2023年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会
论文集

研讨会主办单位：
教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会
教育部高等学校物理学类专业教学指导委员会
中国物理学会物理教学委员会

论文集编辑单位：
物理与工程编辑部

会议组织机构

大会主席:王　青

共同主席:刘玉鑫

执行主席:徐　平　魏　斌　宋　峰

组织委员会

主　席:郭　亮(喀什大学)

副主席:王继新(喀什大学)　　刘　伟(北京理工大学)　　戴剑锋(兰州理工大学)

秘书长:彭　慧(喀什大学)

成员(排名不分先后):

刘建强(山东大学)　　钱飒飒(物理与工程编辑部)

王少霞(喀什大学)　　李　强(喀什大学)

王书童(喀什大学)　　孔维静(喀什大学)

吕　健(喀什大学)　　毛著鹏(喀什大学)

王　平(喀什大学)　　赵平江(喀什大学)

孙泽龙(喀什大学)　　玛依拉(喀什大学)

李幸娟(喀什大学)

论文评审委员会

主席:王　青

成员(排名不分先后):

戴海涛(天津大学)　　樊代和(西南交通大学)

方爱平(西安交通大学)　　林　方(四川大学)

刘　伟(北京理工大学)　　刘　洋(物理与工程编辑部)

穆良柱(北京大学)　　石礼伟(中国矿业大学)

钱飒飒(物理与工程编辑部)　　苏卫锋(复旦大学)

宿非凡(中国科学院物理研究所)　　王雯宇(北京工业大学)

魏　斌(清华大学)　　徐　平(北京航空航天大学)

张伶莉(哈尔滨工业大学)　　张师平(北京科技大学)

朱广天(华东师范大学)

目　次

清华大学大学物理课程数字化考试 …… 李列明(1)
基于五位一体(PRISS)一中心的大学物理教学方法研究 …… 崔慧娟　陈　曦(5)
基于 HPS 教育的高中物理教学实践策略
——以人教版“磁场对通电导线的作用力”教学为例 …… 任虎虎(9)
流体介质阻力作用下的物体运动 …… 黄绍书　方彦栋(15)
大学物理融通式教学模式的探索和实践 …… 吴　喆　高雅纯　刘义东　李　华　杨宏春(19)
大学物理课程思政教学创新实践
——以光的偏振为例 …… 吴海娜　于永芹　张玉凤　杨广武(23)
基于拔尖人才培养的大学物理实验教学改革与实践 …… 翟立朋　常凯歌　张俊武　王小力(29)
线上线下混合教学在原子物理学教学中的应用和探索 …… 林月霞　王红艳(35)
基于 MOOC 的大学物理线上线下混合式大班教学模式 …… 郭　玮　黄　平　张雍家　武　媛　刘瑞萍　崔彩娥(39)
大学物理课程思政教学探究与实践
——以电容器及其能量为例
…… 孟德忠　申　坤　李庚伟　高　禄　邢　杰　吴秀文　郝会颖　赵长春　郑志远　张自力(47)
新高考背景下的大中物理衔接课程建设的探索与实践 …… 申　坤　孟德忠　高　禄　郝会颖(51)
在大学物理教学中突显科学思维方法的探索和实践 …… 陈　静　肖　萌　何南燐　刘凤凤(55)
基于 Simdroid 的大学物理实验仿真教学模块设计 …… 蒋涵文　花　蕾　方　恺(60)
一中心、两融合、三维度,打造有温度有诗意的共情课堂
——“物理学与现代科技”课程创新与实践 …… 陈小凤　刘　双　雷　丹　张晓琴(67)
助力理科创新人才培养的大学物理教学探索与实践 …… 许静平　谢双媛　柯三黄　李云云(70)
信息化赋能 多要素融合 大学物理与实验教学模式创新实践 …… 蒋逢春　冯学超　吴　杰　杨广武　王　翠(75)
大学物理的“立体式”教学情境创设 …… 高雅纯　吴　喆　张修明　刘义东　杨宏春(81)
大学物理教学中课程思政素材的融入
——以“位移电流 全电流定律”为案例 …… 周可雅　任延宇　张　田　张　宇(85)
多措并举,“近代物理实验”一流课程建设和申报
…… 庄　娟　李建东　贾　莉　刘永新　海　然　刘升光　秦　颖　王晓娜(90)
智能型大学物理试卷分析系统的研发 …… 邱　红　张　睿(94)
提升留学生工科物理实验课程教学质量
——以居家实验教学为例 …… 谢子昂　吴　平　张师平　陈　森　裴艺丽　李　莉(104)
基于 OBE 理念的大学物理线上线下混合教学模式的探索与研究
——以“光源与照明”专业为例 …… 张雍家　黄　平　刘瑞萍　武　媛　郭　玮(111)
基于物理学科核心素养的大学物理教学设计与评价
…… 崔文倩　张　睿　赵　晖　时　钟　张建卫　贾　飞　刘冰洁　关　佳(118)
基于 PBL 核心设计的大学物理线上线下混合式一流课程的建设 …… 胡　南　刘改琴　周　密　陈　琳(123)
新工科背景下优化风电专业教学效果的虚实互动风机模型开发
…… 张国煜　陆明玉　崔晓军　李晓雪　李　飞　黄金昭(130)
基于学习者视角下的大学物理实验同伴辅导教学模式及评价 …… 张　愉　周振华　郑永刚(136)
专业课程思政教育问题研究与应对措施
——以东北大学《固体物理学》为例 …… 张莲莲　公卫江　张缤元(142)
基于 Geant4 的 X 射线康普顿散射探测仿真 …… 王　新　王风丽　方　恺　徐　捷　穆宝忠(149)
波动水面附近的声学现象探讨 …… 朱　杰　罗琦敏　朱嘉蓉　郭先红　倪　晨　方　恺(156)
大学物理教学中的课程思政探索
——以机械能守恒定律为例 …… 林晓贺　范奕泽　姚宏林　任武荣　李　瑞(161)

“大学物理实验”课程的自选实验模块教学设计 …… 方 恺 张志华 倪 晨 王风丽(165)
基于相对光谱功率分布的复色光牛顿环研究 …… 郝乐琰 毛胜春 常凯歌 翟立朋 蔡书阳 张俊武(172)
复合受迫振动的研究 …… 陈学文 张家伟 涂静雯(178)
项目式学习在大学物理课程中的实践探索 …… 王 锋 姜海丽 刘晓瑜 王晓峰 张晓峻(186)
新工科背景下课程思政与大学物理分层次教学的统筹设计研究
——以波动光学教学为例 …… 刘晓瑜 张晓峻 王 锋 姜海丽(193)
融入前沿科技的大学物理光学篇教学设计 …… 冯向华 杨 华 张 晖(202)
基于激光散斑高精度测量凸透镜/凹透镜焦距实验设计
…… 冯雪红 张 沛 王红理 高 博 童慧敏 常凯歌 石晓华 曹子君(207)
通过对比实验强化学生对切变模量的理解 …… 徐婷婷 王晓峰 王才林 邓冬梅 张 欢(211)
民族预科班物理课程“层次化”教学模式的探索实践 …… 于 杰 李雪春 常葆荣 李淑凤 柴 硕(216)
迈克耳孙干涉环纹自动计数系统的设计 …… 李川飞 毛爱华 李丽荣(220)
大学物理课程改革在创新拔尖人才培养体系下的实践研究 …… 赵文娟 汪加洁 崔志伟 武福平(225)
大中物理教育衔接之简谐振动教学研究 …… 郑 丹 周丙敏(230)
学生中心,思政引领,技术赋能
——“大学物理”一流课程建设实践 …… 吉驭嫔 樊群超 李会东 付 佳(234)
利用电子秤测量电梯运行参数的教学实验设计 …… 石晶晶 张汐缦 王晓峰 张 欢 徐婷婷(239)
21 世纪新诺奖实验融入大学物理实验教学的探索 …… 王晓峰 徐婷婷 王才林 邓冬梅(243)
“课程思政”在大学物理实验教学中的设计案例
——以不良导体导热系数测定实验为例 …… 郭永利 常凯歌 童 童 王亚平 赵铭姝(247)
基于 OBE 理念的大学物理线上线下混合式教学模式构建与实践
——以应用型地方本科院校为例 …… 邓海明 朱怡佳 孔 超 陈亚琦 李 璋 蒋纯志(251)
关于工科院校大学物理课堂教学的研究和探索 …… 赵丽霞 张 孟(256)
非物理类新理工科量子物理教材建设探索 …… 吕智国(260)
线上线下融合的大学物理实验课程教学探索实践 …… 黄 丽 刘伟龙 娄秀涛(264)

《物理与工程》学术研讨论文选登

查理定律与盖·吕萨克定律的历史探究 …… 孙雨菲 毛婧一 秦思学 张学锋(269)
水波干涉衍射的演示与仿真实验设计研究 …… 袁晨翔 翟立朋 常凯歌 李俊豪 叶颖东 张俊武(275)
大学物理课程思政教学评价初探 …… 邹 斌 渠 朕 崔 彬 杨玉平 张谷令(280)
对巧克力相变迟滞现象的理论解释
——朗道-德冯谢亚理论以及铁电相变理论
…… 李昕玥 王梓烨 秦亦沙 李家驹 方爱平 田蓬勃 冯 俊 蒋臣威 张修兴 王小力(288)
基于 OBE 教学理念的大学物理实验线上线下混合式教学实践
…… 刘 婷 蒲贤洁 徐玮婧 郑雪丽 杨东侠 杨骏骏 张选梅(294)
测量误差、不确定度与真理的相对性
——实验教学的一个难点及课程思政 …… 张映辉(301)
基于 Hirota 方法探求非零边界条件下 MNLS/DNLS 方程的孤子解 …… 周国全 雒润嘉 齐 鎏(307)
基于反溯教学法的物理实验课程思政建设的探索 …… 李 莉 张师平 裴艺丽 谢子昂 陈 森 吴 平(313)
近十年国内大学物理演示实验相关研究的趋势与展望 …… 王嘉宝 王晓杰(323)
大学物理实验课反溯教学方法研究
…… 谢子昂 张师平 陈 森 裴艺丽 李 莉 邱红梅 赵雪丹 王云良 吴 平(335)
“沉浸式”大学物理课程思政教学模式探索与实践 …… 王 真 侯兆阳 柯三民 王凤龙 徐春龙(349)
面向工程师人才培养的基础实验类课程建设探索与实践
——以“物理实验(光学)”课程为例 …… 王 峥 安 炜 王文文 徐 平(357)
平均速度近似为瞬时速度造成系统误差的多方法研究
——以倾斜气垫导轨法测量重力加速度实验设计为例 …… 宋艳敏 王吉昌 王一凡 于永江 马晓光(361)

CONTENTS

An introduction to the digital examination of college physics in Tsinghua University …… LI Lieming(1)
Research on the teaching method of college physics based on the "Five-in-one and one center"
…… CUI Huijuan CHEN Xi(5)
The Strategy on physics teaching practice in senior high school based on HPS education
—To take the lesson of "the force of the magnetic field on the conducting wire" as an example …… REN Huhu(9)
Motion of objects under the action of fluid medium resistance …… HUANG Shaoshu FANG Yandong(15)
Exploration and practice of accommodative teaching in college physics
…… WU Zhe GAO Yachun LIU Yidong YANG Hongchun(19)
Innovative practice of ideological and political teaching in college physics
—Taking polariztion of light as an example … WU Haina YU Yongqin ZHANG Yufeng YANG Guangwu(23)
Reform and practice of university physics experiment teaching based on cultivating top talents
…… ZHAI Lipeng CHANG Kaige ZHANG Junwu WANG Xiaoli(29)
Application and exploration of online and offline blended teaching in atomic physics course
…… LIN Yuexia WANG Hongyan(35)
Online and offline mixed teaching mode of college physics course suitable for large-class learning based on MOOC
…… GUO Wei HUANG ping ZHANG Yongjia WU Yuan LIU Ruiping CUI Caie(39)
Exploration and practice of ideological and political teaching in college physics
—Taking "capacitor and its energy"as an example …… MENG Dezhong SHEN Kun LI Gengwei GAO Lu XING Jie WU Xiuwen HAO Huiying ZHAO Changchun ZHENG zhiyuan ZHANG Zili(47)
Exploration and practice of the construction of university-high school physics bridging courses under the background of the new college entrance examination …… SHEN Kun MENG Dezhong GAO Lu HAO Huiying(51)
The exploration and practice of highlighting scientific thinking method in university physics teaching
…… CHEN Jing XIAO Meng HE Nanlin LIU Fengfeng(55)
Design of simulation teaching module for university physics experiment on simdroid
…… JIANG Hanwen HUA Lei FANG Kai(60)
One center, two fusions, three-dimensions, creating a warm and poetic empathy classroom—Innovation and practice of the course "Physics and modern technology" …… CHEN Xiaofeng LIU Shuang LEI Dan ZHANG Xiaoqin(67)
Exploration and practice of college physics teaching to assist in the cultivation of innovative talents in science
…… XU Jingping XIE Shuangyuan KE Sanhuang LI Yunyun (70)
Innovative practice of integrating multiple elements of informationization empowerment in college physics and experimental teaching mode …… JIANG Fengchun FENG Xuechao WU Jie YANG Guangwu WANG Hui(75)
Construction of "Three-dimensional" teaching situation in college physics
…… GAO Yachun WU Zhe ZHANG Xiuming LIU Yidong YANG Hongchun(81)
The integration of the ideological and political elements into college physics teaching: take "displacement current and the total current law" as a case …… ZHOU Keya REN Yanyu ZHANG Tian ZHANG Yu(85)
Taking multiple measures simultaneously, constructing and applying for the first-class course of "Modern physics experiment" …… ZHUANG Juan LI Jiandong JIA Li LIU yongxin HAI Ran LIU Shengguang QIN Ying WANG Xiaona(90)
Development of an intelligent college physics exam analysis system …… QIU Hong ZHANG Rui(94)
Improving the teaching quality of college physics experiment for international students
—Taking home-based experimental project as an example
…… XIE Ziang WU Ping ZHANG Shiping CHEN Sen PEI Yili LI Li (104)
Study on mixing teaching mode of online and classroom for college physics based on OBE concept
—Taking "Light source and lighting" major as an example
…… ZHANG Yongjia HUANG Ping LIU Ruiping WU Yuan GUO Wei(111)

Design and evaluation of college physics teaching based on core literacy of physics subject …… CUI Wenqian ZHANG Rui ZHAO Hui SHI Zhong ZHANG Jianwei JIA Fei LIU Bingjie GUAN Jia(118)
Based on PBL core design The construction on online and offline hybrid first-class course for college physics …… HU Nan LIU Gaiqing ZHOU Mi CHEN lin(123)
Development of a virtual-reality interactive wind turbine model for optimizing the teaching effectiveness of wind power engineering in the context of emerging engineering education …… ZHANG Guoyu LU Mingyu CUI Xiaojun LI Xiaoxue LI Fei HUANG Jinzhao(130)
Based on learner's perspective of peer tutoring teaching model and application of college physics experiment …… ZHANG Yu ZHOU Zhenhua ZHENG Yonggang(136)
Study on the issues of ideological and political education in professional course and countermeasures —A case study of "Solid state physics"at Northeastern University …… ZHANG Lianlian GONG Weijiang ZHANG Binyuan(142)
Simulation of X-ray Compton scattering detection with Geant4 …… WANG Xin WANG Fengli FANG Kai XU Jie MU Baozhong(149)
Discussion on acoustic phenomena near fluctuating water surfaces …… ZHU Jie LUO Qimin ZHU Jiarong GUO Xianhong NI Chen FANG Kai(156)
The discussion of college physics course with ideological-political education —Taking the law of conservation of mechanical energy as an example …… LIN Xiaohe Fan Yize YAO Honglin REN Wurong LI Rui(161)
Instructional design of self-selected experimental modules for university physics experimental courses …… FANG Kai ZHANG Zhihua NI Chen WANG Fengli(165)
Study on the fringes of Newton's rings in complex colors based on relative spectral power distribution …… XI Leyan MAO Shengchun CHANG Kaige ZHAI Lipeng CAI Shuyang ZHANG Junwu(172)
Research on composite forced vibration …… CHEN Xuewen ZHANG Jiawei TU Jingwen(178)
Practical exploration of project-based learning in university physics …… WANG Feng JIANG Haili LIU Xiaoyu WANG Xiaofeng ZHANG Xiaojun(186)
Study on overall design of curriculum ideology and hierarchical teaching of university physics under the background of emerging engineering education: Taking wave optics as an example …… LIU Xiaoyu ZHANG Xiaojun WANG Feng JIANG Haili(193)
Teaching design of the Optics section in college physics integrating cutting-edge scientific and technology …… FENG Xianghua YANG Hua ZHANG Hui(202)
Experimental design of high-precision measurement of focal length of convex-concave lens based on laser speckle …… FENG Xuehong ZHANG Pei WANG Hongli GAO Bo TONG Huimin CHANG Kaige SHI Xiaohua CAO Zijun ZHANG Qian(207)
Reinforce the undertanding of shear modulus using controlled experiments …… XU Tingting WANG Xiaofeng WANG Cailin DENG Dongmei ZHANG Huan(211)
Exploration and practice of the"Hierarchical" teaching mode of physics course in preparatory class for ethnic minorities …… YU Jie LI Xuechun CHANG Baorong LI Shufeng CHAI Shuo(216)
Automatic counting system of Michelson interference fringes …… LI Chuanfei Mao Aihua Li Lirong(220)
Practice and research on college physics course reform under the innovative top-notch talent training system …… ZHAO Wenjuan WANG Jiajie CUI Zhiwei WU Fuping(225)
Teaching research on simple harmonic vibration for consistency between university physics and high school physics …… ZHENG Dan ZHOU Bingmin(230)
Student center, ideological and political guidance, technology enabling —exploration and practice on the construction of first-class course of the college physics …… JI Yupin FAN Qunchao LI huidong FU Jia(234)

An experiment design on the measurement of operation parameter of vertical elevator using an electronic balance
…… SHI Jingjing ZHANG Ximan WANG Xiaofeng ZHANG Huan XU Tingting(239)
The exploration of integrating the Nobel prize experiments in the 21st century into the teaching of college physics experiments …… WANG Xiaofeng XU Tingting WANG Cailin DENG Dongmei(243)
Design of "Curriculum ideology and politics" in college physics experiment teaching
—A case study of measurement of thermal conductivity of poor heat conductor
…… GUO Yongli CHANG Kaige TONG Tong WANG Yaping ZHAO Mingshu(247)
Construction and practice of online and offline hybrid teaching mode of college physics based on OBE concept
—Take the local regular universities for example
…… DENG Haiming ZHU Yijia KONG Chao CHEN Yaqi LI Zhang JIANG Chunzhi(251)
Research and exploration on classroom teaching of college physics in engineering colleges
…… ZHAO Lixia ZHANG Meng(256)
Exploration on the construction of quantum physics textbooks for nonphysical new science and engineering disciplines
…… LV Zhiguo(260)
Exploratory practice of integrating online and offline teaching in college physics experiments
…… HUANG Li LIU Weilong LOU Xiutao(264)
The historic re-thinking of the Charles's Law and Gay-Lussac's Law
…… SUN Yufei MAO Jingyi QIN Sixue ZHANG Xuefeng(269)
Demonstration and simulation experimental design of water wave interference and diffraction
…… YUAN Chenxiang ZHAI Lipeng CHANG Kaige LI Junhao YE Yingdong ZHANG Junwu(275)
Research on teaching evaluation of curriculum ideological and political education in college physics
…… ZOU Bin QU Zhen CUI Bin YANG Yuping ZHANG Guling(280)
Theoretical explanation for the hysteresis phenomenon of chocolate phase transition—Landau de Vonseia theory and ferroelectric phase transition theory …… LI Xinyue WANG Ziye QIN Yisha Li Jiaju FANG Aiping TIAN Pengbo FENG Jun JIANG Chenwei ZHANG Xiuxing WANG Xiao-li(288)
The online-offline combined teaching exploration on the OBE oriented course of college physics experiment
…… LIU Ting PU Xianjie XU Weijing ZHENG Xueli YANG Dongxia YANG Junjun ZHANG Xuanmei(294)
Error of measurement, uncertainty, and the relativity of truth
—A difficult point of experimental teaching and curriculum ideology …… ZHANG Yinghui(301)
Soliton solution of MNLS/DNLS equation with nonvanishing boundary condition based on Hirota method
…… ZHOU Guoquan LUO Runjia QI Ying(307)
Exploration of ideological and political construction of college physics experiment course based on retroactive teaching method …… LI Li ZHANG Shiping PEI Yili Xie Ziang CHEN Sen WU Ping(313)
Trends and prospects of related research on physics demonstration experiments in domestic universities in the last decade
…… WANG Jiabao WANG Xiaojie(323)
Research on retroactive teaching method for college physics experiment course …… XIE Ziang ZHANG Shiping Chen Sen PEI Yili LI Li QIU Hongmei ZHAO Xuedan WANG Yunliang WU Ping(335)
Exploration and practice of "Immersive" ideological and political teaching mode in college physics course
…… WANG Zhen HOU Zhaoyang KE Sanmin WANG Fenglong XU Chunlong(349)
Exploration and practice of basic experimental courses construction for the training of engineers
—Case study on course of physics experiment (optics)
…… WANG Zheng AN Wei WANG Wenwen XU Ping(357)
Multi-method research on system error caused by average speed approximate to instantaneous speed
—Taking the experimental design of measuring gravity acceleration by inclined air cushion guide rail method as an example …… SONG Yanmin WANG Jichang WANG Yifan YU Yongjiang MA Xiaoguang(361)

清华大学大学物理课程数字化考试

李列明

（清华大学物理系，北京　100084）

摘　要　2011年秋起，清华大学《大学物理》课个别教学班开始试行数字化考试，随后规模逐渐增加，至今已逾11年。11年来，各种措施，如防作弊措施、组卷方式等逐步完善。本文简单介绍其实施过程、各种措施及其沿革并对其利弊作一些讨论。我们的经验表明：这种考试模式在我校大学物理课上是完全可行的；这种考试方式不但可以节省大量的阅卷工作量，而且可以提供大量对教学很有参考价值的考试数据。作为一个例子，本文以笔者主讲的教学班的一些考试数据为例，结合一些教学记录进行了分析讨论。

关键词　大学物理；试题库；数字化考试

1　概述

在这个报告里，“大学物理数字化考试”特指使用选择题和数字填空题组成的考卷进行的大学物理考试。多年后的今天，实际上已经大大简化，只用选择题了。从形式上看，与人们熟知的标准化考试已无多大差别。不过，使用的许多选择题是从一般的填空题和计算题等按特定的格式进行数字化改编后得到的，用于代替原有的计算题或填空题[1]。所以我们沿用“数字化考试”[2,3]的措辞以示区别。

实际使用的题目全部来自《工科大学物理试题库（第4版）》（后文简称“题库”）。该题库力学、相对论和电磁学部分已完成前述的数字化改编[1]，其余部分由我们临时改编。

这种全选择题形式的考试特别容易作弊，因此，我们发展了一套到目前为止行之有效的防作弊措施。

大学物理涉及的知识点太多，一次常规的2小时书面考试完全不能覆盖。经过多年实验后我们开始找到了比较可行的做法：以给定范围题库随机抽题组试卷为基础，再进行适度的人工干预。

从2011年秋起，清华大学大学物理课个别教学班开始试行数字化考试，随后规模逐渐增加，至今已逾11年，方式方法经不断完善后也大致定型。2017年起，我校大学物理课一个教学组一直使用这种考试模式，包括自愿加入的其他班级，期中、期末考试合计已经22次以上，每次考生大约在600～800人左右。

我们的经验表明，在当前的客观条件下，对大学物理课（不同的课程情况不同），这种考试模式利明显大于弊。不但能节省大量的阅卷、统计的工作量，其提供的大量考试数据对于改进教学和教学研究更是宝贵的资源。这些数据虽然不算十分完美，但已经足以对教学的基本情况，以可以接受的满意程度，提供评估。

2　数字化选择题及试卷组成

将计算题或填空题的变量赋予相应的数值，最终的答案也就成了数值。将这样数值化的答案和其他几个数值一起作为选项就构成了我们这里定义的数字化选择题。例如，一道10分的计算题改编后成为：

xz101500769000005（题号）

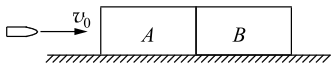
收稿日期：2023-05-28

作者简介：李列明，男，副教授，长期从事物理教学及研究，lmli@tsinghua.edu.cn。

引文格式：李列明. 清华大学大学物理课程数字化考试[C]. 2023年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会，2023.

Cite this article：LI Lieming. An introduction to the digital examination of college physics in Tsinghua University[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education, 2023. (in Chinese)

(本题5分)如图所示,有两个长方形的物体 A 和 B 紧靠着静止放在光滑的水平桌面上,已知 $m_A=2.00\text{kg}$,$m_B=3.00\text{kg}$。现有一质量 $m=100\text{g}$ 的子弹以速率 v_0 水平射入长方体 A,经 $t=0.01\text{s}$,又射入长方体 B,最后停留在长方体 B 内未射出。设子弹射入 A 时所受的摩擦力为 $F=3.00\times10^3\text{N}$,则当子弹留在 B 中时,B 的速度大小 $v_B=$[　　]。



(A) 5.8m/s;@$v_0=300\text{m/s}$
(B) 9.0m/s;@$v_0=400\text{m/s}$
(C) 12m/s;@$v_0=500\text{m/s}$
(D) 19m/s;@$v_0=700\text{m/s}$
(E) 22m/s。@$v_0=800\text{m/s}$
参数:$v_0=500\text{m/s}$
C(答案)

注:上面各选项中,字符@及其后的字符在试卷中不出现。

这种改编似乎简单,但考虑到一些物理因素和技术性因素,包括后文提到的防作弊措施,问题并没有看上去那么简单[1]。

题库中力学、相对论和电磁学部分已完成基本改编,可直接使用,振动与波、热学、光学和现代物理部分则需要临时改编。

所有这种题的题号都以 xz1 开头,按我们的经验,其正确率一般比原题明显要高,一般出现在期中考卷中。在期末考卷中,为了保证一定难度,我们一般将其中的E选项改为:"在两位有效数字精度内,以上选项都不对。"。这样,难度明显增加,按我们粗略印象,难度起码和原题相当。

早期的试卷中数字填空题占相当大的比重。但数字填空题的正确率比原来的计算题、填空题低太多而且技术上也麻烦,从2017年起,取消了数字填空题,试卷全部由题号以 xz0 开头的传统的选择题和 xz1 型数字选择题组成,最后统一为28题,每题3分或5分。这是我们多年摸索试验的结果。以2022年春季学期为例,期中(力学和狭义相对论)xz0 型11道和 xz1 型17道;期末(波动和热学)xz0 型18道和 xz1 型10道。

3 防作弊措施

试卷采用了文献[3]中介绍的防作弊措施。全部试卷分为试题相同但试题排列次序不同的A、B、C、D四种考卷。每份试卷都有的唯一的试卷编号,试卷和答题卡夹在一本草稿纸中,答题卡、草稿纸和试卷上都标有相同的试卷编号。试卷编号与卷种的对应关系是随机的,储存在电脑的读卡机软件中。考生只知道自己的试卷编号,但不知道对应的试卷类型,不能肯定是否和欲抄袭对象是同一卷种而无法简单抄袭。这样可以较好地防止抄答案的作弊行为。相反地,一般使用的将试卷分为A、B卷但在卷上标明卷种(否则阅卷时有困难)的做法,抄袭的学生可以简单破解——抄相同卷种的就行。

收卷后,原则上监考人员应检查每个草稿本。如果考生将题目抄在撕下的草稿纸上带走的话,会马上被发现,按印在草稿本上的试卷编号(和交上来的答题卡和试卷上的完全相同)可以迅速锁定犯规的学生。目前还没发现试题被学生抄走的事例。事实上,试卷中经常会出现一些一两个学期前用过的试题,但其正确率甚至不比当初的高。虽然有些学生总是在努力收集我们用过的考题,但试题看来没有在学生中大规模泄露。

早期,我们按计算机随机生成的卷种-试卷编号对照表,用人工将试卷编号逐份写在印好的A、B、C、D卷的封面上,工作量比较大。现在我们采用自编软件自动生成试卷的电子版,然后用合适的复印机印出,非常快捷。

4 组卷方法

早期,我们采用题库的专家组卷模式,人工组卷。组卷的效果看起来比较好,但是后来我们发现这样做有很大的问题。关键是大学物理的知识点太多,一份常规的100分2小时的试卷根本无法完全覆盖。比如内容为力学和相对论的大学物理B1期中考,即使有28道题,粗略估计也就覆盖60%~70%的知识点,甚至更少。理论上,似乎只能采用随机抽样考查的方法。文献[3]也提到随机抽样组卷的必要性。但是,完全的人工组卷难免有明显的个人风格,很难做到这点。

后来,我们采用题库的智能组卷模式,也就是指定难度、考试范围等参数,由题库自动随机抽样组卷。但是,我们发现,题库的智能化程度达不到我们的要求,这样组的卷往往有问题。另外,出题

的经常是某位任课教师，这也有公正性方面的潜在问题。所以我们现在采用的是由题库智能组卷然后人工筛选的做法。典型做法大致如下：

1. 被指定出题的任课教师在一位监督人旁观下进入题库的智能组卷模式，指定难度、考试范围等参数，由题库组一份考卷，题目数要多于 28 道，比如 33 道甚至更多；

2. 然后从题库输出记录题库题号的 excel 文件，一份交监督人留底，另一份交出题人；

3. 出题人审查原稿，从中删除若干题目后留下 28 道题，非特殊情况只删题不加题，尽量减少个人风格的干扰以保公正。删题的时候必须有充分的理由，例如和某题知识点相同而且难度相近等等。原则上，如遇质询（实际上从未发生过），出题人可公开答辩，展示原稿并给出删题理由；

4. 调整题分，使总分为 100；

5. 组卷后，视情况需要，负责人可能会指定一两位教师仔细校核全卷。

如果出题人的班不参加考试，程序可以简化，原则上还是智能组卷模式后人工修改，但增删题目方面自由度大得多，而且也没有监督人。

使用这种方法组卷时，经常出现知识点过度集中在某些部分的情况。以电磁学考试为例，某次静电学部分特别多，某次静磁学部分特别多，诸如此类。但是，以某次静电学部分特别多的为例，其实里面静电学部分每个重要的知识点通常一难一易两道题都做不到，有合理理由删掉的题目也不多。只能说，知识点太多，28 道题实在覆盖不了。这种情况下，我们会适当删除一些题目来微调（只能微调）试卷的知识点结构。

5 考试数据举例

读卡机读卡后，得到大量考试数据：每一个考生对每一道题所选的选项以及得分。和计算题比，由于没有记录推理、计算的中间过程，这种标准化试题会丢掉一些信息。但我们多年的经验表明，由于题目数量比较多，结果可以互相印证、综合分析，数据提供的信息其实还是令人满意的。如果结合其他方法得到的数据，更是如此。

大量的考试数据，是量化教学研究的宝贵资源。

笔者每次考试后都对所教班级的考试数据进行初步但定量的分析，检讨教学的成败，受益颇多。下面是一个有趣的例子：2018 年春期中的一道考题及相关数据。

考题：（本题 3 分）宇宙飞船相对于地面以速度 v 作匀速直线飞行，某一时刻飞船头部的宇航员向飞船尾部发出一个光讯号，经过 Δt（飞船上的钟）时间后，被尾部的接收器收到，则由此可知飞船的固有长度为（c 为真空中光速）[　]

（A）$c \cdot \Delta t$；

（B）$v \cdot \Delta t$；

（C）$\dfrac{c \cdot \Delta t}{\sqrt{1-(v/c)^2}}$；

（D）$c \cdot \Delta t \cdot \sqrt{1-(v/c)^2}$。

这学期，我班相对论部分共 4 次课。班上学生分为三组：上了 4 次课的为高签到组；3～2 次的为中签到组；1～0 次的为低签到组。各组的数据为：

	高签到组	中签到组	低签到组
选 A 选项的比例	71.4%	65.0%	50.0%
选 B 选项的比例	0.6%	5.0%	0.0%
选 C 选项的比例	23.4%	15.0%	46.2%
选 D 选项的比例	4.5%	15.0%	3.8%

从选择正确答案 A 的比例，明显看出这个知识点的教学效果。此外还有几点对教学颇具启发。

1. 首先，学生的错误选择高度集中在 C 选项，这是典型错误，学生觉得对高速运动，一定要有点“相对论的味道”；

2. 高签到组仍有近 1/4 学生选择 C 选项。尽管课上讲得很清楚了，但这部分学生始终不能相信这是一个经典运动学的问题。在同一份试卷里，一些能用课上例题“举一反三”解决的问题，高签到组有很高的正确率。说明这部分学生上课还是认真的。这种情况在我班历次试卷分析中很典型，只要问题不是直接明了的例题、中学知识的距离较远的，高签到组的正确率一般都止步在 70% 左右，笔者形容为“70%”势垒；

3. 中签到组的选择比较分散，C、D 选项都有。会不会是一种心理现象：有些学生学到半生不熟的程度，概念的跃迁还没完成，犹豫不定？

除了对所教班级考试数据进行分析外，笔者

也帮助一些兄弟院校进行过大学物理的数字化考试，并分析其数据。从分析中往往能看出很多教学方面的特点和问题。笔者的经验一再证明，虽然这种考试数据理论上有不够完善之处，但在当前严重缺乏量化教学研究的环境下，已足以对改进教学和教学研究产生足够的助力。

多年来我校大学物理分层教学组一直使用这种数字化考试进行期中、期末考试，累计过万人次。从考试结果，各教学班的风格、长短，乃至疫情的影响，都清晰可辨。我们认为，作为普通常规的教学评估，这种考试模式是可以接受的。积累的大量详细的考试数据，更是为将来留下了珍贵的研究素材。相反，包含大量计算题的考卷，其详细的统计和记录都很困难。此外，我们的模式能节省大量的阅卷工作量，在不出故障的情况下，上千人的试卷，从读卡到成绩分发，一两个工作人员在一两个小时内就可以全部完成。即使加上复查、核对等，一个下午的工作时间足够。

致谢：本文介绍的工作，是在清华大学物理系大学物理课的平台上实现的。多年来得到系里教学负责人、大学物理课程负责人和很多同事的参与与支持，特此致谢。

参 考 文 献

[1] 李列明，陈信义，沈小明，等.《工科大学物理考试题库》数字化一期改编概况—题目相关部分[J]. 物理与工程，2016，26(Z1)：1-9.

[2] 李列明. 清华大学大学物理课数字化考试概况[C]. 大学物理数字化教育教学研讨会，常州 2017-05-13.

[3] 谢建生，沈小明. 常州大学首次大学物理数字化考试[J]. 物理与工程，2019，29(1)：74-81.

■

AN INTRODUCTION TO THE DIGITAL EXAMINATION OF COLLEGE PHYSICS IN TSINGHUA UNIVERSITY

LI Lieming

(Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract Since the fall of 2011, individual teaching classes of "College Physics" in Tsinghua University began to pilot digital examinations, and then the scale has gradually increased, and it has been more than 11 years. In the past 11 years, various measures, such as anti-cheating measures and the method of organizing papers, have been gradually improved. This article briefly introduces its implementation process, various measures and their evolution, and discusses their pros and cons. Our experience shows that this examination model is completely feasible in our university physics class; This examination method can not only save a lot of examination work, but also provide a large number of examination data that is of great reference value for teaching. As an example, this paper takes some examination data of the teaching class taught by the author as an example, and analyzes some teaching records.

Key words college physics; question bank; digital examination

基于五位一体(PRISS)一中心的大学物理教学方法研究

崔慧娟[1*]　陈　曦[2]

([1]北京建筑大学理学院,北京　100044;[2]中国科学院物理研究所,北京　100190)

摘　要　“五位一体一中心”的教学设计模式,是基于以学生为中心的出发点,将案例、知识、拓展、反馈四个环节引入教学设计,形成教学闭环,同时结合“课程实践”、“课程资源”、“课程思政”、“科研促教”和“虚拟仿真”这五个部分,形成一体化的新型教学方法。基于这样的整体设计思想,将大学物理课程与现有的教学手段更为有机地结合在一起,达到夯实专业基础知识、激发学生学习兴趣、提升物理课程专业支撑性的目的。并通过教学效果的综合分析,提出了几点思考意见。进一步发挥大学物理在学科支撑、人才培养方面的作用。

关键词　教学改革;学生为中心;大学物理

1　研究背景

在教育部印发的《非物理类理工学科大学物理课程教学基本要求》[1]中指出,通过课程的教学,培养学生分析问题、解决问题的能力,同时努力实现学生知识、能力、素质的协调发展。这要求大学物理课程不能仅仅地停留在知识的灌输,更应该体现以学生为中心,为国育人、育才的思想。基于这样的教学定位,有非常多的教师提出了多种的教学改革和措施[2-6]。在对本校的学生进行多年的教学分析以后,我们提出了适合本校学生的“五位一体一中心”的教学设计模式。

本文紧紧围绕着“五位一体一中心”的教学模式,分析教学过程中遇到的问题,结合大学物理的教学改革,通过学情分析和专业需求分析,提出了物理教学过程中的问题。针对这样的问题,我们提出了以“课程实践”、“课程资源”、“课程思政”、“科研促教”和“虚拟仿真”这五部分相结合的创新教学方法。教学改革基于以学生为中心的出发点,将案例、知识、拓展、反馈四个环节引入教学设计,形成教学闭环。针对目前的教学设计的举措,进行了教学效果的综合分析,同时提出了几点思考意见,旨在进一步发挥大学物理在学科教育、人才培养方面的支撑作用。

2　研究内容

2.1　教学问题分析

通过多年的教学分析,我们发现物理教学存在较多的实际问题,主要包括以下几点:首先,物理课程作为基础课程,普遍存在为了教学而教学的情况,缺少对于学生具体分析,不够贴合学生需求,不能很好的符合以学生为中心的总体指导思想。其次,物理课程作为公共基础课程涉及知识面较广,概念较多,学生掌握难度大。最后,课程涉及的基本概念多,物理图像不直观,晦涩难懂,课堂教学效果不好。总体而言物理知识面多、知识复

收稿日期:2023-02-01

基金项目:北京建筑大学教研项目(重点)资助(Y2114);北京建筑大学“双塔计划”优秀主讲教师支持计划资助(YXZJ20220809);北京建筑大学“2022—2023学年第二学期混合式课程”项目资助(YY220229);北京市教育工会支持;北京建筑大学分类发展项目-教务处质量工程建设与宣传专项经费(2023)。

通讯作者:崔慧娟,女,讲师,主要从事物理教学科研工作,研究方向为凝聚态物理,cuihuijuan@bucea.edu.cn;陈曦,男,助理研究员,主要从事理论物理研究工作,chenxi@iphy.ac.cn。

引文格式:崔慧娟,陈曦. 基于五位一体(PRISS)一中心的大学物理教学方法研究[C]. 2023年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会,2023.

Cite this article: CUI H J, CHEN X. Research on the teaching method of college physics based on the “Five-in-one and one center”[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education, 2023. (in Chinese)

杂，存在大而空的现象，学生较难在短时间内较深层的掌握知识，大多浮于表面。基于这样的现状，为了更好的整合课程资源，提升课堂学习效率，在教学过程中采用了**“五位一体一中心”**的教学设计模式。

2.2 “五位一体一中心”的教学设计

“五位一体一中心”的教学设计模式，其中“五位(PRISS)”是“课程实践”、“课程资源”、“课程思政”、“科研促教”和“虚拟仿真”；“一体”是“四环一体”，将案例、知识、拓展、反馈作为四个环节引入教学设计，形成教学闭环；“一中心”是以学生需求为中心，这是整个教学设计的中心。



图1 “五位一体一中心”的设计模式

(1) 以学生为中心。

在教学设计和执行的过程中秉承着以学生为中心的指导思想，以学生的需求和欠缺作为教学设计的基本出发点。课前通过雨课堂投票的方式分析学生的知识点掌握情况，制定本节课的教学进度。同时通过学生反馈和作业分析，对学生的知识点掌握进行实时的掌握和了解，及时调节教学进度。同时通过结合专业、生源地、学生年龄特点等学情分析，设计相应的教学案例，真正做到想学生所想，给学生所需。

(2) 闭环一体教学：案例、知识、拓展、反馈作为四个环节引入教学设计，形成教学闭环。

在教学过程设计中，整体的设计方案使以教学案例作为引入点，有机地与所授知识相结合，并且对该知识点设计的实际内容进行教学拓展和分析，最后在课后通过线上问卷的形式对本部分知识点进行反馈调查，进一步调整教学计划。这样的教学闭环可以最大程度的提升教学效果和学生学习兴趣。

(3) 课程教学过程中加入二维码，学生可以更加方便的进行知识拓展和加强练习，同时实现了课程思政与课程内容有机融合。

为了体现以学生为中心的主体思想，我们在课件和教案中加入了二维码[5]，学生可以通过扫描二维码对本章节内容进行拓展练习。同时与本节内容将相关科学家简介、物理知识发展和完善的过程也做成二维码作为拓展资料，学生可以随时随地的对该知识点的发展背景做了解，这些是非常好的课程思政案例。同时也可以通过该环节知识的拓展练习增加知识的掌握程度。



(a) (b)

图2 相关科学家(a)和自测题和能力提高题(b)

(4) 基础知识与虚拟仿真相结合，让知识更加形象化。

将课堂中的基础知识通过 MATLAB 进行仿真模拟，将只能用 ppt 展示的静态图谱动态化，通过仿真转出 gif 动态图画展现物理参数变化时，物理现象的动态变化。例如我们在《波动光学》章节通过 MATLAB 仿真了光栅衍射的动态图谱，同时动态展示了衍射图样随光栅透光部分宽度变化的规律；在圆孔衍射部分我们通过改变两个光斑的距离，动态展示了光学仪器分辨本领的知识点(图3)等等。通过这样的教学探索，我们将更为先进的仿真技术应用到实际的课堂教学，将物理知识和概念以更加直观形象的方式展现出来，让学生更加直观的感受物理图像，这也体现了该教学改革的高阶性。

(5) 课程资源更加丰富，实验、实践有机结合。

教学过程中所设计的课程是通过线上线下混合建设的方式，教学手段和资源包括雨课堂、中国大学 Mooc 等多种方式，学生可以通过这些平台将课前预习、课中记录、课后复习更加完整有机地结合在一起。教师也通过学生任务节点完成的情况掌握学生的学习动态。另外通过开放性题目讨论和仿真实验涉及，让学生把实践和实验结果通过平台分享，教师可以更好组织实践教学，同时也给学生提供了一个可以互相学习讨论的平台。

(6) 更加细致有针对性的教学评价体系和教

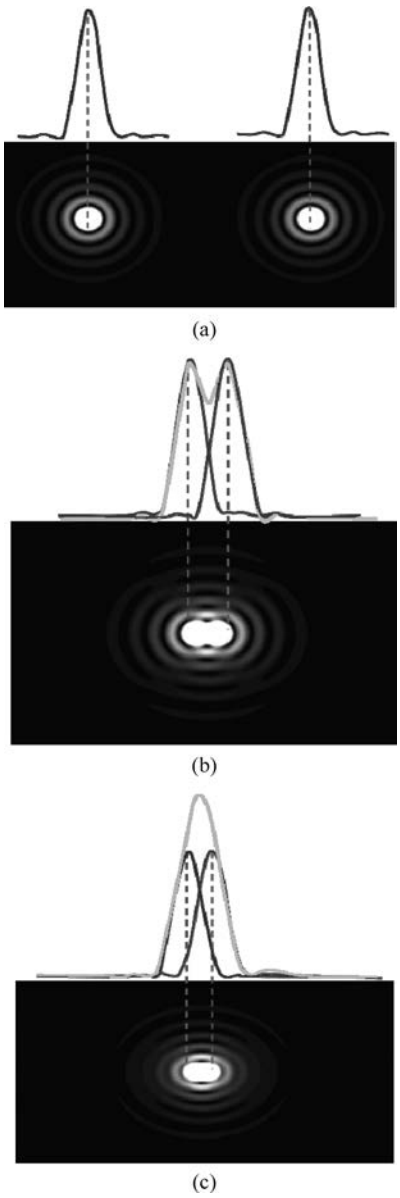


图 3　圆孔夫琅和费衍射仿真图

(a) 两个物点能分辨；(b) 两个物点恰能分辨；(c) 两个物点不能分辨

学反馈。

在教学环节中加入了教学反馈环节，教师针对本节内容需要掌握知识的重点和难点进行调查，学生通过雨课堂投票的方式完成本节课的知识点掌握情况。这样的教学反馈体系可以通过实时的教学反馈来调整课堂的内容、进度和侧重点，实时掌握学生的动态，反哺教学。另外该课程独创了四年教学反馈体系，在学生完成四年学习后在对本课程重点和难点进行下反馈。通过这一样两种反馈体制，致力于把教学组织做成一个螺旋形的上升体系，也具有很高的独创性和新颖性。

(7) 科研促教，教学过程中引入更有科技感和专业针对性的教学案例。

每一个课程引入都是从来自于最前沿的科学研究和尖端的科技。通过这些案例的引入提升学生的学习积极性，同时展示我们的大国科技。比如与光学知识相关“中国天眼”的案例，再比如与载人航天相关的狭义相对论。知识点案例会随着新科技和新技术的不短发展而不断的更新，使得我们的案例库具有新颖性。

同时，我们在课程的设计当中，不仅仅以知识点为指导，更从其中选取对专业的教学有帮助的案例，以更加有针对性的对不同专业进行支撑。后续的教学将更加注重案例的分类，分专业，以最先进的并且结合专业特色的案例为主。这在教学设计上具有高阶性。

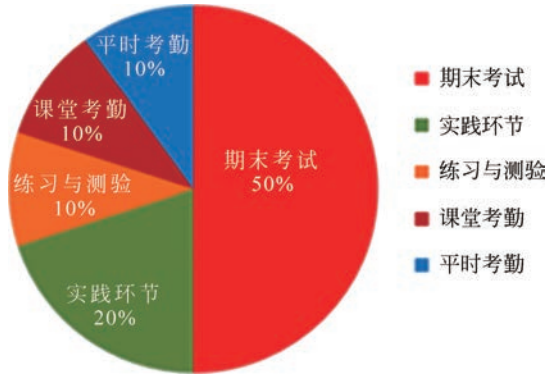


图 4　考核内容以及所占比重

3　多样化考核体系

为了更好的评测“**五位一体一中心**”教学方法的教学效果，我们在教学考核中融入多元化的考核方式。本课程为必修课，考核方式包括期末考试和综合评定两部分，其中期末考试成绩占总成绩 50%，综合平时成绩占总成绩 50%，平时成绩由考勤、作业、随堂测试、期中考试、课外实践等教学环节综合评定。其中实践环节包括演示实验、开放性题目讨论、课后大作业占 20%，期中测验和随堂测验占 10%，考勤和课堂互动占 10%，平时作业占 10%。通过这种多元的综合的考核方式，避免一考定成绩，督促学生在多方面认真学习知

识,参与课堂学习,锻炼动手实践和科学思维能力、实现在知识、能力等方面的全面考核。

4 结语

“五位一体一中心”的教学设计模式,是基于以学生为中心的出发点,将案例、知识、拓展、反馈四个环节引入教学设计,形成教学闭环,同时结合“课程实践”、“课程资源”、“课程思政”、“科研促教”和“虚拟仿真”这五个部分,形成一体化的新型教学方法。同时结合多样化的教学效果分析,全方位的分析学生掌握情况。通过本次教学探索,以学生为中心,多种教学方法有机融入课堂,让学生在学习知识的同时,激发了学生的学习兴趣,同时提升教学效果,是非常好的教学探索。

参 考 文 献

[1] 曹春梅,张晓宏,李松涛.《非物理类理工学科大学物理课程教学基本要求》的实施方案[J]. 中国电力教育,2008(11).

[2] 邹艳. 基于创新性应用型人才培养的大学物理教学内容的构建[J]. 物理与工程,2013(12):48-50.

[3] 张玉强. 新工科视域下大学物理课程教学改革思考[J]. 高师理科学刊,2019,39(2):95-98.

[4] 张静,黄捷. 基于应用型人才培养的大学物理课程改革与研[J]. 科技创新导报,2016(5):156-160.

[5] 张景中,杨九民,梁林梅. 教学系统设计理论与实践[M]. 北京大学出版社,2014:78-98.

[6] 王俊平,苏欣纺,崔慧娟,等. 普通物理教程[M]. 3版. 北京:清华大学出版社,2021.

■

RESEARCH ON THE TEACHING METHOD OF COLLEGE PHYSICS BASED ON THE “FIVE-IN-ONE AND ONE CENTER”

CUI Huijuan[1] **CHEN Xi**[2]

([1] College of Science, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044;

[2] Institute of Physics Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract The teaching design model of “five-in-one and one center” is based on the student-centered starting point. Four segments, known as case, knowledge, expansion and feedback was introduced into the teaching design to form a closed loop of teaching. Then combine it with “curriculum practice”, “curriculum resources”, “curriculum ideology and politics”, “scientific research to promote teaching” and “virtual simulation” and form an integrated new teaching method. Based on this overall design idea, the university physics course is more organically bounded with the existing teaching methods to achieve the purpose of consolidating the basic knowledge of the major, stimulating students' interest in learning, and improving the professional support of the physics course. Through the comprehensive analysis of teaching effects, several thoughts are put forward. Further give play to the role of university physics in discipline support and talent training.

Key words reform in education; student-centered; university physics

基于 HPS 教育的高中物理教学实践策略
——以人教版“磁场对通电导线的作用力”教学为例

任虎虎[1,2]
([1] 华东师范大学 上海 200062；[2]江苏省太仓高级中学，江苏 太仓 215411)

摘 要 HPS 教育将科学史、科学哲学和科学社会学有机融为一体，是培养批判性思维等高阶思维能力的有效路径，也是落实新课改提出的 STSE(科学、技术、社会和环境)理念的重要途径。创设问题情境、提出学科问题；引导质疑反思、理解科学本质；回溯物理学史、发展学科观念；解决实际问题、促进工程实践是基于 HPS 教育的高中物理教学有效策略。

关键词 HPS 教育；高中物理；教学策略；深度学习

2023 年 5 月 26 日颁布的《教育部等十八部门关于加强新时代中小学科学教育工作的意见》指出：“推进基于探究实践的科学教育，激发中小学生好奇心、想象力和探求欲，培养学生科学兴趣，引导学生广泛参与探究实践，做到学思结合、寓教于乐，自觉获取科学知识、培养科学精神、提升科学素质。”对科学教育的路径与方法提出了明确的要求。HPS 教育是习得科学知识、渗透科学方法、培养科学精神和提升科学素养的重要路径，HPS 教育是“科学史 (History of Science)、科学哲学(Philosophy of Science) 和科学社会学(Sociology of Science)”的简称。

1 HPS 教育的价值分析

通过 HPS 教育能把科学史、科学哲学、科学社会学的相关内容有机渗透到科学教学中[1]，以期促进科学教育高质量发展，全面提升科学素养。

首先，物理学史就是一部批判性思维发展史，很多知识的发生与发展过程都充分体现了物理学家们的批判性思维技能和求真求实的批判性思维倾向。对物理学史的深入挖掘能很好地发展学生的批判性思维。例如，开普勒对火星的运动数据进行分析，用圆轨道这一几千年来的传统观念研究时，发现与第谷的观测数据有 8 角分(1°的 7.5 分之 1)的误差，开普勒写到：“我们应该仔细倾听第谷的意见。他花了 35 年的时间全心全意地进行观察，我完全信赖他，只有他才能向我解释行星轨道的排列顺序。”1602 年，开普勒经过批判性分析后开始摒弃行星运动是圆形轨道的认识，又花了 3 年时间，经过大量分析才确定实际轨道应该为椭圆。在提出这一想法后立刻遭到了当时很多人的批评和抨击，但他并没有屈服，而是继续深入研究，最终赢得“天空立法者”的美名[2]。

其次，科学社会学指向科学知识产生的时空背景和应用场域，任何知识的产生与发展都离不开当时社会文化和生产技术的支持，同时科学知识及其思想又深刻地影响和推动着社会的发展[3]，需要引导学生批判性的分析它们之间的耦合关系。例如“能量守恒定律”的发现是 19 世纪 40 年代迈尔、焦耳和赫姆霍兹等一大批科学家努力的结果，这与当时蒸汽机广泛应用在炼铁业、纺

收稿日期：2023-05-06
基金项目：本文系江苏省教育科学“十四五”重点规划课题“指向深度学习的高中物理单元逆向设计与实施的研究 ”(立项编号：C-b/2021/02/80)阶段研究成果。
作者简介：任虎虎，男，华东师范大学博士研究生在读，中学一级教师，主要从事高中物理教学工作，研究方向基于深度学习和 HPS 的中学物理教学，858718818@qq.com。
引文格式：任虎虎. 基于 HPS 教育的高中物理教学实践策略——以人教版“磁场对通电导线的作用力”教学为例[C]. 2023 年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会，2023.
Cite this article：REN H H. The strategy on physics teaching practice in senior high school based on HPS education—To take the lesson of “the force of the magnetic field on the conducting wire” as an example[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education, 2023. (in Chinese)

织业中，工程师们急于提高热机效率的社会背景是分不开的。后来对“能量守恒定律”的深入理解与应用又促进尼古拉奥托在1878年设计制造成功了第一台使用汽油发动机，这说明科学发展与社会生产力紧密关联。

最后，科学哲学是对科学本质理解的结果[4]，科学哲学的发展就是对科学本身批判性反思的结果。夏皮尔的科学实在论、波普尔的科学否证论、库恩的科学范式论和拉卡托斯的科学纲领论都是科学哲学家们批判性的自我反思和抽象概括的结晶[5]。例如在“楞次定律”的教学中，通过对原磁场方向、原磁场引起的磁通量的变化、感应电流方向、以及“中介”——感应电流的磁场方向的分析综合得到楞次定律。通过对楞次定律内涵的分析发现，其与化学领域的勒夏特列原理类似，本质上都属于惯性定理，体现了统一的哲学思想[6]。

2　基于HPS教育的高中物理教学策略

创设问题情境、提出学科问题；引导质疑反思、理解科学本质；回溯物理学史、发展学科观念；解决实际问题、促进工程实践是基于HPS教育的高中物理教学有效策略。下面以人教版新教材“磁场对通电导线的作用力”教学为例进行阐述，本节课内容是力、电、磁的有机整合，并与社会生产与生活实际联系紧密，通过本节课的学习能很好地提升学生的物质观、运动与相互作用观、能量观等物理观念和模型建构、批判质疑、综合归纳等科学思维能力。

2.1　创设问题情境　提出学科问题

基于HPS的教学需要植根于生产、生活实际，从体育、军事和科技等角度出发创设情境，基于真实问题情境进行观察、实验、调研、操作、设计、策划、制作和交流等物理学科特质的实践活动，在具体现象的认识、分析中构建物理模型，并提出高质量的学科问题。

教学中首先播放有关电磁炮的测试视频，它能穿透10多层、10cm厚的钢板，如图1，说明它的初动能很大，其能从静止被加速到很高的速度一定受到了某种力的作用。引导学生继续思考：电磁炮发射装置内部有怎样的结构？使电磁炮加速的力是什么力？这个力是如何产生的？

电磁炮内部的基本结构如图2所示，铜棒类似刚才的炮弹，上、下分别是两块磁性较强的磁铁，N极和S极正对。给每个小组提供一套实验装置，引导学生进行合作体验，体验时注意：将铜杆放在两个磁极正中间，4节干电池串联提供电源，通电时间要短一点，观察到铜棒运动后立刻断开电路。



图1　电磁炮测试画面



图2　安培力演示器

为了纪念安培对电磁学的巨大贡献，把磁场对通电导线的作用力通常也称为安培力。接下来引导学生提出问题：对于安培力大家有没有一些想研究的问题？学生提出安培力的方向如何判断？（因为刚才体验时有的小组铜棒向左运动、有的向右运动）安培力的大小如何计算？安培力有哪些具体的应用？这些都是本节课研究的核心问题。

2.2　引导质疑反思　理解科学本质

基于HPS的教学需要不断挑战学生的思维，尤其要发展批判性等高阶思维能力，引导学生不断地对自己的所见、所为和所思进行质疑反思，不断的收集行为表现、语言表达等方面证据，基于证据的深度整合作出科学、合理的推论，避免片面推断和不严谨性，理解科学的本质。[7]

引导学生猜想：安培力的方向可能与哪些因素有关？学生提出可能与电流方向和磁场方向有关。既然与多个因素有关，采用控制变量法进行研究，可以对问题做一点简化，正视图2装置，磁

场在竖直方向上，可以向上，也可以向下，电流在垂直纸面方向上，可以向外也可以向里，这样就可以构建四组不同模型，如图 3 所示，接下来引导学生对这四个特殊情况进行小组合作探究。

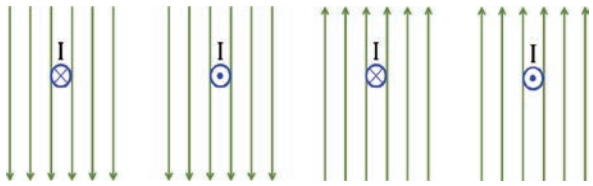


图 3

探究任务：每个小组合作实验，完成上述 4 种情况，并根据观察到的现象完成三个物理量方向的记录，如下表：

序号	磁场方向	电流方向	安培力方向
1	向下	垂直纸面向里	向左
2	向下	垂直纸面向外	向右
3	向上	垂直纸面向里	向右
4	向上	垂直纸面向外	向左

学生发现从表格中很难总结出规律，因为三个方向不在同一个平面内，是立体关系，因此需要从空间角度进一步分析探究：可以用绿色吸管表示磁场方向、黄色吸管表示电流方向、红色吸管表示安培力方向，插在橡皮泥上构建三者方向的空间模型。

请大家仔细观察一下自己构建的四个模型，讨论一下它们四个有区别吗？学生发现四个经过旋转后竟然是一样的，如图 4 所示，这样就从变化中找到了不变的东西！可以总结形成规律。

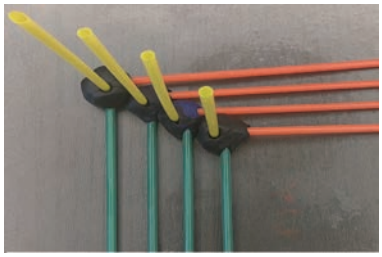


图 4　安培力方向空间模型

引导学生仔细观察一下这个模型，安培力的方向与电流和磁场方向分别是什么关系？发现都是垂直的。引导学生回顾：这个垂直关系怎么来的？是基于铜棒的运动这个证据推理出来的，引导学生反思自己的推理过程，有没有不严谨或不科学的地方？学生反思交流后发现：如果安培力方向斜向上或斜向下，也可以使导体棒水平向右运动，也就是铜棒运动的方向不一定是它所受安培力的方向，如何解决这个疑问？

笔者发现用银丝纤维自制实验装置，可以很好的突破这个难点。为了增强体验，每个小组都给一根银丝纤维，让学生看一看、摸一摸，发现它很轻、很柔软，但可以导电，可以做出静电屏蔽的防护服。将一根银丝纤维的两端固定在“[”形的木板上下，并处于松弛状态，在给它通电后，用一个 U 形磁铁水平靠近它，如图 5，提出问题：你观察到什么？说明什么？还可以将 U 形磁铁在水平面内旋转，继续观察现象，总结规律。

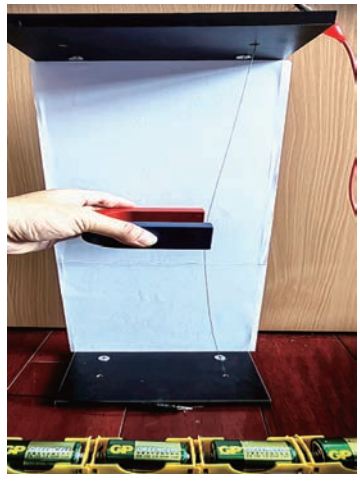


图 5　银丝纤维的偏移

整合分析以上证据合理推断得出结论：安培力方向确实既与磁场方向垂直，又与电流方向垂直，根据数学立体几何知识可知：安培力的方向垂直于磁场和电流方向构成的平面。

2.3　回溯物理学史　发展学科观念

HPS 特别重视科学史的教育价值挖掘，科学革命的发生与范式的建立是一代又一代科学家努力的结果，科学发展史就是一部人类证伪史、精神史。通过回溯物理学史一方面能更好地帮助学生认识科学知识产生的社会背景与发展过程，另一方面能帮助学生理解知识背后的学科思想与方法，发展学科观念。

在“磁场对通电导线的作用力”教学中，首先介绍奥斯特的发现，电流的磁效应在当时引起了巨大的轰动效应，1820 年 9 月 11 日，法国科学院

举行会议，由物理学家阿拉果报告奥斯特的新发现，法国科学家普遍认为电和磁是没有联系的，但这一观念在事实面前被击得粉碎，这其中就包括安培。安培被奥斯特的发现深深地迷住了，开始了一段载入史册的研究历程，包括著名的“马车当黑板故事”就是在这一段时期。在实验室，他把导线折成方框后通电流、把导线对折后通电流、把导线做成螺旋形或圆形通电流，并用不同的电源反复实验。

在大量实验研究的基础上，安培在不到一个月的时间里，发表了三篇论文，宣布了他的重大发现：不仅电流对磁针有作用，而且两个电流之间也有相互作用；在两根平行的通电导体中，如果电流的方向相同，它们就互相吸引；电流的方向相反，它们就互相排斥。

安培并没有因为暂时的成功而沾沾自喜，1822年，他又发现了电流之间相互作用的规律：安培定律。同时，确定了判断电流磁场方向的安培定则（右手螺旋定则）和判断磁场对电流作用力方向的左手定则。

在这些回顾之后，让学生说一说：安培为什么被称为“电学中的牛顿”？为什么安培能在短时间内取得如此多的重大成果？什么样的哲学观点和物理思想指引着安培的研究？

当时很多科学家都被奥斯特的发现所震撼，但安培更善于接受新鲜事物、抓住机遇。他受到康德哲学联系论（各种自然现象是相互联系和相互转化的）和奥斯特发现的启发，深刻的建立了“电”和“磁”相互联系与作用的观念。这些也为后来法拉第发现电磁感应现象和麦克斯韦建立电磁学统一理论做了很好的铺垫。

2.4 解决实际问题 促进工程实践

基于HPS教育的教学需要引导学生解决社会生产、生活中实际的问题，在问题解决的过程中对多个不同知识点进行整合。另外不仅仅局限于在理论推演中提出可行和有效的解决方案，而要从工程学、经济学和美学的角度，综合设计并制作出实实在在的产品，这样的学科教学才更有价值。

引导学生小组讨论：安培力在社会生产及生活中有哪些具体的应用？学生列举出电吹风、电动汽车等例子，它们的核心部件都是电动机，自制一个简单的直流电动机，如图6所示，用一节5号干电池，下面吸住一个圆柱形磁铁，磁铁可以导电，将一个“心型”环形线圈放上去进行观察。

大家观察到什么现象？这个过程实现了什么能向什么能的转化？请同学们自主构建模型，分析这个小电动机转起来的原因是什么？圆柱形磁铁的上方是什么级？这两个问题有助于评估学生对物理模型的建构能力和对左手定则应用能力，磁场和电流方向不垂直，解决过程中需要对磁场进行分解。

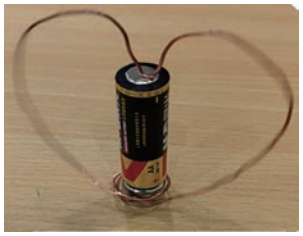


图6 自制电动机

还可以引导学生思考：如何让它转的更快一些？这个问题有助于评估学生对安培力大小的理解程度和应用能力。

电流表和电压表接入电路后，指针会偏转，类比一下刚才的小电动机，猜想其内部有怎样的结构？我们可以画出它的空间模型图，如图7所示，左边和右边的边受力方向分别向哪里？为了研究方便，一般可以将空间问题转化为平面问题处理，即降维的思想，做出它的正视图，如图8所示，大家想一想：当它顺时针转过θ角时的安培力向哪里？使线圈转动的作用力恒定吗？如何让转动的力恒定？可以让安培力与线速度始终同向，磁场方向应该向哪里？工程技术上通常用极靴和圆柱形软铁来有效的改变磁场的分布，如图9所示。

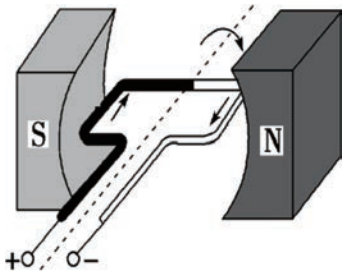


图7

如图9所示，当线框片面转过90°，即左边的边转到右边的磁场区域时安培力的方向向哪里？为了让电动机顺时针持续的转动下午，如果你是工程师，需要如何进行设计与制作？这个问题可

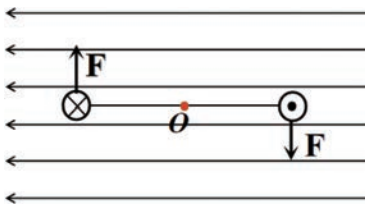


图 8

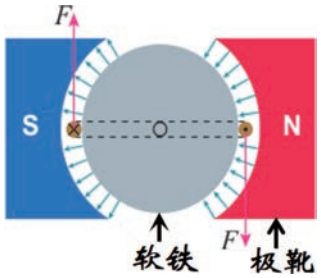


图 9

以让学生课后小组合作完成，要求能利用身边的器材制作出相应的产品。

电表接入电路中，工程技术上如何让指针静止下来确定电流大小？通过展示电表的内部结构，发现里面有一个涡卷弹簧，可以自制演示实验装置，如图 10 所示，涡卷弹簧的外端固定在一个螺丝上，内端（中间）固定在一个水平轴上，轴的前端竖直固定一个红色吸管（代表指针），当线圈带动轴一起转动时，指针也一起偏转，涡卷弹簧受力大小与转过的角度成正比，转到一个角度后稳定下来说明：$BIL=C\theta$，即 I 与 θ 成正比，所以电流表和电压表的表盘刻度都均匀。当放手后（即不受力，电流变为 0），涡卷弹簧恢复原状，吸管回到初始状态。



图 10　自制演示装置

磁电式电流表就是电学中用到的表头，其优点是灵敏度高，缺点是导线很细，能测量的最大电流（量程）很小，需要通过改装来扩大量程，与已有知识整合起来。

基于 HPS 教育的高中物理教学能促进学生与历史的真实对话、与生活的融合共生、与社会的和谐共促、与科学的互动共进[8]。HPS 教育也是促进学科深度学习和培育学科核心素养的重要路径，在教学实践中需要持续地探索与反思。

参　考　文　献

[1] 迈克尔·马修斯. 科学教学——科学史和科学哲学的贡献[M]. 外语教学与研究出版社，2022(4).

[2] 托马斯·库恩. 科学革命的结构(第四版)[M]. 北京大学出版社，2012(10).

[3] 袁维新. HPS 教育：一种新的科学教育范式[J]. 教育科学研究，2010(7)：48-54.

[4] 袁维新. 科学的本质与科学本质教育[J]. 课程·教材·教法，2004(7)：68-73.

[5] 钟启泉. 批判性思维：概念界定与教学方略[J]. 全球教育展望，2020(1)：3-16.

[6] 任虎虎. 基于 HPS 促进高中物理深度学习的教学探索——以人教版新教材“电磁感应现象及其应用”教学为例[J]. 物理教师，2022，43(11)：21-24+28.

[7] 任虎虎. 基于学科大概念的中学物理教学研究[M]. 中国科学技术大学出版社，2022(6).

[8] 任虎虎. 基于 HPS 的高中物理单元整合教学研究——以“动量守恒定律”单元为例[J]. 物理教师，2023，44(5)：20-23.

THE STRATEGY ON PHYSICS TEACHING PRACTICE IN SENIOR HIGH SCHOOL BASED ON HPS EDUCATION
—TO TAKE THE LESSON OF "THE FORCE OF THE MAGNETIC FIELD ON THE CONDUCTING WIRE" AS AN EXAMPLE

REN Huhu[1,2]

([1] East China Normal University, Shanghai 200062; [2] Taicang Senior high school in Jiangsu province, Taicang, Jiangsu 215411)

Abstract HPS education integrates the history of science, the philosophy of science and sociology of science. It is an effective way to develop the advanced capacity like critical thinking. Meanwhile, it functions as an important way to put into practice the theory of STSE (science, technology, society and environment) which is raised by the new curriculum reform. The effective senior high school physics teaching strategies based HPS education are as follows: creating question scenarios and raising questions about the subject; leading students to critical thinking and understanding the essence of science; reviewing the history of physics and developing the subject concept; solving the practical problems and promoting the engineering practice.

Key words HPS education;senior high school physics; teaching strategy; deep learning

流体介质阻力作用下的物体运动

黄绍书[1,2*]　方彦栋[1]

([1] 六盘水市第23中学,贵州 六盘水　553004;[2] 安顺学院数理学院,贵州 安顺　561000)

摘　要　介绍流体介质阻力一般表达式,一般尺度的物体和微粒在空气中运动时受到空气的阻力分别是压差阻力和黏性阻力。对微粒和一般落体在空气中的运动进行较为深入的研究,根据动力学原理即牛顿第二定律的微分形式,导出相应的速度变化规律即运动学方程。

关键词　介质阻力;压差阻力;黏性阻力;运动学方程;收尾速度

1　介质阻力的表现

流体介质对在其中运动的物体的阻力 F 大小与速度 v 有关[1],一般表达式为

$$F=\gamma v+\kappa v^2 \tag{1}$$

其中,γ 和 κ 均为须用实验测定的阻力系数。第一项为黏性阻力(也称粘滞阻力),第二项为压差阻力。当速度较小时,黏性阻力大于压差阻力;当速度超过某一临界速度 v_c 时,压差阻力大于黏性阻力,如图1所示。

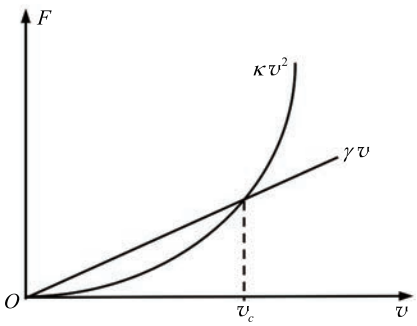


图1　介质阻力随速度的变化

对于半径为 r 的球形物体,阻力系数 γ 和 κ 为

$$\gamma=c_1 r \tag{2}$$

$$\kappa=c_2 r^2 \tag{3}$$

因此,当黏性阻力与压差阻力大小相等时,物体的速度即为临界速度 v_c,满足

$$c_1 r v_c=c_2 r^2 v_c^2 \tag{4}$$

即是

$$v_c=\frac{c_1}{c_2 r} \tag{5}$$

其中,c_1 和 c_2 与流体介质的黏性、密度等有关,是由实验测定的常数。对于空气[2],有

$$c_1=3.1\times10^{-4}\,\mathrm{kg/(m\cdot s)} \tag{6}$$

$$c_2=0.87\,\mathrm{kg/m^3} \tag{7}$$

所以,对于在空气中运动的小球,有

$$v_c=\frac{3.6\times10^{-4}}{r}\,\mathrm{m/s} \tag{8}$$

由此可见,临界速度 v_c 通常是很小的。比如,$r=0.01$m 的小球,$v_c=3.6\times10^{-2}$m/s,对于 r 较大的小球,v_c 更小。只有对于 r 很小的微粒,v_c 才会较大或很大。比如 $r=1\mu$m 的微粒,v_c 可达360m/s,这显然是很大的速度。

因此,可以认为,一般物体(cm尺度)在空气中运动,空气阻力主要是压差阻力,即近似为

$$F=-\kappa v^2 \tag{9}$$

对于很小的微粒,空气阻力主要是黏性阻力,即近似为

$$F=-\gamma v \tag{10}$$

收稿日期:2023-05-11

作者简介:方彦栋,高级教师,主要从事中学物理教育教学及研究,1297988946@qq.com。

通讯作者:黄绍书,正高级教师,主要从事中学物理教育教学暨大中学物理教育教学衔接问题研究,597015954@qq.com。

引文格式:黄绍书,方彦栋. 流体介质阻力作用下的物体运动[C]. 2023年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会,2023.

Cite this article: HUANG S S, FANG Y D. Motion of objects under the action of fluid medium resistance[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education, 2023. (in Chinese)

2 流体介质中的物体运动

2.1 仅在介质阻力作用下的微粒运动

设微粒的初速度为 v_0，若除受黏性阻力 $F=-\gamma v$ 外不受其它力的作用，那么它的动力学方程为

$$m\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=-\gamma v \tag{11}$$

即

$$\frac{\mathrm{d}v}{v}=-\frac{\gamma}{m}\mathrm{d}t \tag{12}$$

将上式两边积分，并注意到 $t=0$ 时 $v=v_0$，可得速度随时间的变化规律为

$$v=v_0\mathrm{e}^{-\frac{\gamma}{m}t}=v_0\mathrm{e}^{-2\beta t} \tag{13}$$

其中，$\beta=\dfrac{\gamma}{2m}$称为阻力因数。显然，在黏性阻力作用下，具有一定初速度的微粒运动速度随时间呈负指数减小，如图 2 所示。当 $t\to\infty$时，$v\to 0$。速度随时间减小的快慢由阻力因数 β 决定，也就是由阻力系数 γ 跟质量 m 的比值决定。

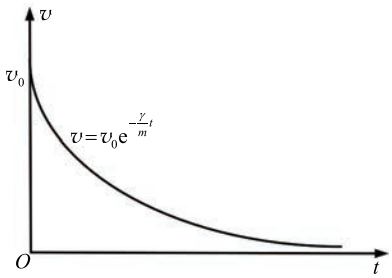


图 2 速度随时间呈指数减小

由于阻力总与速度方向相反，因此微粒作直线运动。假定微粒沿 Os 轴运动，那么根据式(13)对时间积分，并设 $t=0$ 时 $s=0$，则可得微粒的运动方程为

$$s=\int_0^t v_0\mathrm{e}^{-2\beta t}\mathrm{d}t=\frac{v_0}{2\beta}(1-\mathrm{e}^{-2\beta t}) \tag{14}$$

这一表达式表明，微粒的位移随时间呈负指数增加。当 $t\to\infty$时，位移趋于一个最大值，即 $s\to\dfrac{v_0}{2\beta}$(常数)，如图 3 所示。

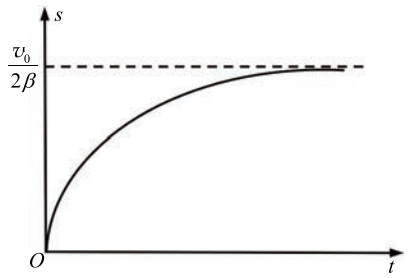


图 3 位移随时间的变化

2.2 恒力场中的微粒运动

对于很小的微粒，黏性阻力和压差阻力相等时的临界速度 v_c 达 $10^2\,\mathrm{m/s}$ 数量级。这意味着在流体介质中受恒力 F_0 作用的微粒运动，在很宽的低速范围内，受到的介质阻力近似为黏性阻力，因此

$$m\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=F_0-\gamma v \tag{15}$$

加速度为

$$a=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{m}(F_0-\gamma v) \tag{16}$$

显然，加速度随微粒速度的增大而单调减小。根据式(15)或式(16)分离变量后积分，即

$$\int_{v_0}^{v}\frac{\mathrm{d}v}{\frac{F_0}{\gamma}-v}=\frac{\gamma}{m}\int_0^t\mathrm{d}t \tag{17}$$

因此，速度随时间的变化规律为

$$v=\frac{F_0}{\gamma}(1-\mathrm{e}^{-\frac{\gamma}{m}t})+v_0\mathrm{e}^{-\frac{\gamma}{m}t} \tag{18}$$

若初速度 $v_0=0$，则

$$v=\frac{F_0}{\gamma}(1-\mathrm{e}^{-\frac{\gamma}{m}t}) \tag{19}$$

显然，微粒的速度移随时间呈负指数增加。当 $t\to\infty$时，速度趋于一个定值，即 $v\to\dfrac{F_0}{\gamma}$(常数)，如图 4 所示。这个速度最大值是微粒在恒力 F_0 和阻尼介质黏性阻力共同作用下最后可达到的极限速度，称为收尾速度，通常用 v_f 表示，即

$$v_\mathrm{f}=\frac{F_0}{\gamma}=\frac{F_0}{c_1 r}\quad(\text{常数}) \tag{20}$$

其中，r 是将微粒视为球形时微粒的半径。

收尾速度也可根据式(16)，令 $a=0$ 时 $v=v_\mathrm{f}$ 直接得出。即

$$\frac{1}{m}(F_0-\gamma v_\mathrm{f})=0 \tag{21}$$

因此，收尾速度表式为

$$v_\mathrm{f}=\frac{F_0}{\gamma}=\frac{F_0}{c_1 r}\quad(\text{常数}) \tag{22}$$

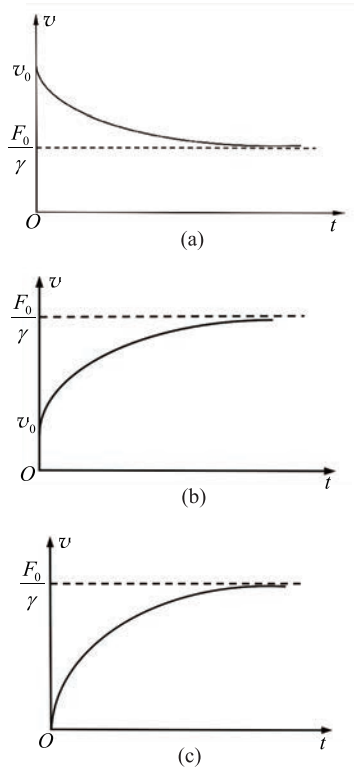


图 4　速度随时间趋于定值

(a) $v_0\neq0$ 且 $v_0>\frac{F_0}{\gamma}$；(b) $v_0\neq0$ 且 $v_0<\frac{F_0}{\gamma}$；(c) $v_0=0$

根据式(18)对时间积分，并设 $t=0$ 时 $s=0$，则可得微粒的运动方程为

$$s=\int_0^t\frac{F_0}{\gamma}(1-\mathrm{e}^{-\frac{\gamma}{m}t})+\int_0^t v_0\mathrm{e}^{-\frac{\gamma}{m}t}\mathrm{d}t$$
$$=\frac{F_0}{\gamma}t+\frac{m\gamma v_0-mF_0}{\gamma^2}(1-\mathrm{e}^{-\frac{\gamma}{m}t}) \qquad (23)$$

这一关系可用如图 5 所示的 s-t 图像表示。

2.3　一般落体运动

对于通常的物体，在重力场中下落要受到空气阻力。由于临界速度 v_c 较小，经很短时间后压差阻力便占主导地位，故空气阻力可由式(9)近似，因此

$$m\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=mg-\kappa v^2 \qquad (24)$$

物体下落的加速度为

$$a=g-\frac{\kappa}{m}v^2 \qquad (25)$$

根据式(24)，可得物体运动的微分方程为

$$\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=\frac{\kappa}{m}\left(\frac{mg}{\kappa}-v^2\right) \qquad (26)$$

将上式分离变量后积分，即

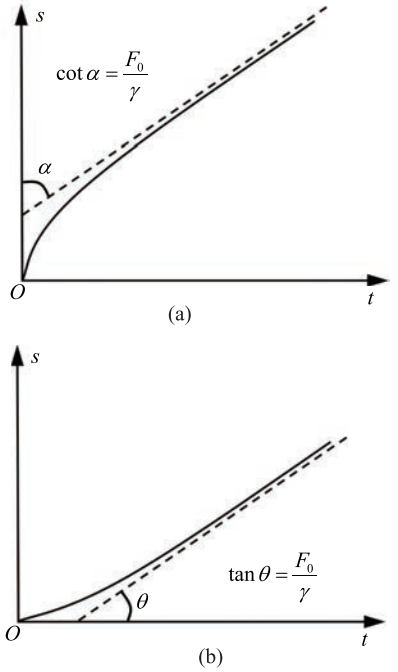


图 5　位移随时间的变化

(a) $m\gamma v_0>mF_0$ 即 $v_0>\frac{F_0}{\gamma}$；(b) $m\gamma v_0<mF_0$ 即 $v_0<\frac{F_0}{\gamma}$

$$\int_0^v\frac{\mathrm{d}v}{\frac{mg}{\kappa}-v^2}=\frac{\kappa g}{m}\int_0^t\mathrm{d}t \qquad (27)$$

得

$$\frac{\kappa}{2mg}\ln\left(\frac{\sqrt{\frac{mg}{\kappa}}+v}{\sqrt{\frac{mg}{\kappa}}-v}\right)=\frac{\kappa g}{m}t \qquad (28)$$

所以，物体运动速度 v 随时间 t 变化的函数关系为

$$v=\sqrt{\frac{mg}{\kappa}}\,\frac{1-\mathrm{e}^{-2gt/\sqrt{mg/\kappa}}}{1+\mathrm{e}^{-2gt/\sqrt{mg/\kappa}}} \qquad (29)$$

这一关系可用如图 6 所示的图像表示。其中，当 $t\to\infty$ 时

$$v=v_\mathrm{f}=\sqrt{\frac{mg}{\kappa}} \qquad (30)$$

为收尾速度。

从式(29)可以看出，一般落体速度趋近其收尾速度是渐近过程。前面的式(18)或式(19)所反映的微粒速度趋近其收尾速度也是渐近过程。

若将式(29)对时间积分，并以开始下落的位置为原点，竖直向下的方向为位移坐标的正方向，那么物体的运动学方程为

$$s=\sqrt{\frac{mg}{\kappa}}\left[t-\frac{\sqrt{\frac{mg}{\kappa}}}{g}\ln\left(\frac{2}{1+\mathrm{e}^{-2gt/\sqrt{mg/\kappa}}}\right)\right] \tag{31}$$

从式(31)可以看出,当时间 t 增大一些时,$\mathrm{e}^{-2gt/\sqrt{mg/\kappa}}\to 0$,因此位移 s 随时间 t 的变化很快就趋于线性关系。在如图7所示是某实际阻尼落体与理想无阻尼自由落体的 s-t 变化关系,其中,实线表示阻尼落体的变化关系,而虚线为无阻尼的自由落体的变化关系。

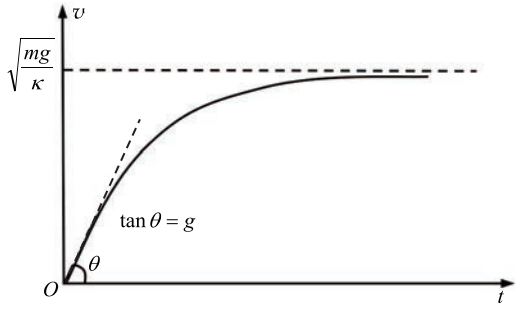


图6 速度随时间的变化

下面举一例来说明一般落体的速度和位移随时间的变化关系。

一半径 $r=0.01\mathrm{m}$ 的球形卵石,其密度 $\rho=2500\ \mathrm{kg/m^3}$,质量 $m=\frac{4}{3}\pi\rho r^3\approx 0.01\mathrm{kg}$,$\kappa=c_2r^2\approx 8.7\times10^{-5}$,根据(30)可得其收尾速度为

$$v_\mathrm{f}=\sqrt{\frac{mg}{\kappa}}\approx 34\mathrm{m/s} \tag{32}$$

根据式(29),可计算出任意时刻的速度。取 $t=10\mathrm{s}$,则

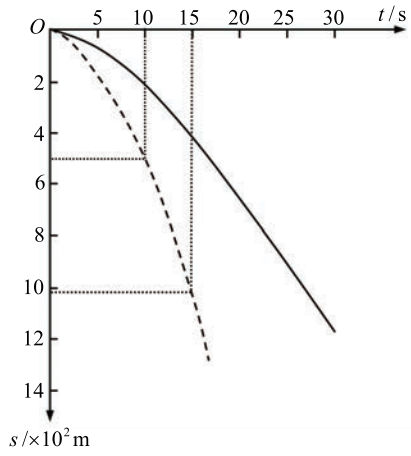


图7 位移随时间的变化

$$v=v_\mathrm{f}\frac{1-\mathrm{e}^{-\frac{200}{34}}}{1+\mathrm{e}^{-\frac{200}{34}}}=0.994v_\mathrm{f}=33.8\mathrm{m/s} \tag{33}$$

根据式(31),可计算 $t=10\mathrm{s}$ 内下落的高度为

$$s=34\cdot\left(10-\frac{34}{9.8}\ln\frac{2}{1.003}\right)\mathrm{m}=260\mathrm{m} \tag{34}$$

由此可见,卵石下落 10s 时,下落的高度为260m,此时速度已达收尾速度的 99.4%。因此,在以后的时间里,可认为卵石以收尾速度 $v_\mathrm{f}=34\mathrm{m/s}$ 做匀速下落。

参 考 文 献

[1] 漆安慎,杜婵英.普通物理学教程力学[M].北京:高等教育出版社,2012,12(3):397-400.

[2] 缪钟英,罗启蕙.力学问题讨论[M].安徽:中国科学技术大学出版社,2018.8(1),109.

■

MOTION OF OBJECTS UNDER THE ACTION OF FLUID MEDIUM RESISTANCE

HUANG Shaoshu[1,2] **FANG Yandong**[1]

([1] No. 23 Middle School of Liupanshui City, Guizhou, Liupanshui, 553004;

[2] School of Mathematics and Science, Anshun University, Anshun, Guizhou, 561000)

Abstract The general expression of fluid medium resistance is introduced. The resistance of general-scale objects and particles moving in air is pressure difference resistance and viscous resistance, respectively. The movement of particles and general falling objects in the air is studied in depth. According to the dynamic principle, that is, the differential form of Newton's second law, the corresponding velocity variation law, that is, the kinematic equation is derived.

Key words medium resistance; differential pressure resistance; viscous resistance; kinematics equation; closing velocity

大学物理融通式教学模式的探索和实践

吴　喆[1,2*]　高雅纯[1]　刘义东[1,2]　李　华[1]　杨宏春[1]
（电子科技大学[1]物理学院；[2]物理格拉斯哥学院，四川 成都　611731）

摘　要　面向创新型人才培养的根本任务，我校开展了一系列融通了物理基础理论和物理实验技能的实践性教学改革。通过解决竞赛的开放性物理问题，并开展大学生创新创业活动来调动学生们的兴趣。开设的“开放性物理项目训练”示范课程，介绍资料检索、文献阅读技巧，研究力、热、声、光、电类物理问题的思路和科学工具，理论分析，数值计算，实验方案探索，实验室规范和实验技巧，数据处理和误差分析等，对学生开展系统性的科研训练。培养学生的合作精神和交流表达能力，使学生的知识、能力和素质全面协调发展。探索了一套适合从新生到高年级本科生的物理类课程的科教融合新模式。

关键词　融通式教学；开放性物理问题；项目式课程

1　绪论

培养出能基于物理概念和物理原理开展原始创新的拔尖人才是双一流A类高校的重要任务之一。[1-3]近年来，我校的应用物理学专业获批教育部“强基计划”，应用物理和电子信息科学与技术两个理科专业均获批为国家一流本科专业建设点；在我校的新工科建设“成电方案”的背景下，也确定了引领工程的复合型创新人才培养的专业目标定位。聚焦需求培养国家急需人才，既是高校人才培养的使命，也是一流应用理科专业建设的有效途径。开展新材料等国家战略需求领域的原创性科技人才培养，首先需要学生们具备根植物理的深厚数理基础，同时还须具备能支撑一个或多个国家战略需求领域发展的电子信息等共性工科的专业基础知识、专业特长和专业素养。

我校的大学物理教学中心自2015年起就组织骨干教师团队，开展了一系列融通物理类课程的物理基础理论和物理实验技能的实践性教学改革。通过解决竞赛的开放性物理问题和大学生创新创业活动来调动学生的兴趣[4-7]，用科研项目化方法驱动解决问题，开设特色物理课程夯实学科基础，探索了一套适合从新生到高年级本科生的物理类课程的科教融合新模式。

2　课程实施方案

我校开设了“开放性物理项目训练”以开展物理类课程的融通式教学实践，由应用物理专业骨干教师、演示实验骨干教师和竞赛课程骨干教师联合授课。该课程共16学时，每周2学时，计8周；其中理论课程10学时，实验课程6学时。通过研究每年全国大学生学术物理竞赛（CUPT）和大学生物理实验（创新）竞赛（CUPEC）公布的开放性物理问题，提高学生综合运用所学知识分析解决实际物理问题的能力，培养学生的开放性思维能力。对学生开展系统性的科研训练，介绍资料检索、文献阅读技巧，研究力、热、声、光、电类物理问题的思路和科学工具，理论分析，数值计算，

收稿日期：2023-05-14
基金项目：2023年高等学校教学研究项目（DJZW202335xn）；四川省2021—2023年高等教育人才培养质量和教学改革项目（JG2021-848）；第三批高校省级课程思政示范课程；电子科技大学教研项目（2020HHKC0041，2022KCSZ0223）。
通讯作者：吴喆，女，教授，主要从事物理教学科研工作，研究方向是无线电物理，zhewu@uestc.edu.cn。
引文格式：吴喆，高雅纯，刘义东，等. 大学物理融通式教学模式的探索和实践[C]. 2023年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会，2023.
Cite this article：WU Z，GAO Y C，LIU Y D，et al. Exploration and practice of accommodative teaching in college physics[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education，2023.（in Chinese）

实验方案探索，实验室规范和实验技巧，数据处理和误差分析等，锻炼学生的科研素质。同时介绍报告撰写和PPT制作，以及汇报、辩论技巧等，培养学生的合作精神和交流表达能力，使学生的知识、能力和素质全面协调发展。并组织学生们参加各级竞赛，申报大学生创新创业项目并开展后续研究，撰写论文和申请发明专利。

2.1 课程内容安排

(1) 绪论

精选力、热、声、光、电磁等各方面的成果，展现理论和实验成果。通过介绍力、热、光、电磁等各方面的成果，要求学生了解开放性物理问题的一般解题过程和成果形式，并尝试发现已有成果的不足，自行提出问题。通过视频、音频、慕课、实物等多重形式的往届成果介绍，引导学生体会解决开放性物理问题的乐趣；组织小组讨论，发现已有成果的不足；培养学生的批判性思维能力。

(2) 文献检索及阅读

介绍开放性物理问题分析的一般思路，介绍文献检索和阅读的方法。要求学生熟练掌握文献检索方法，基于充分的文献阅读确定选题；初步了解科技论文的写作规范，严格遵守学术道德和学术规范。采用课堂演示的方式，介绍文献检索工具的使用；采用讲授、引导和讨论的方式介绍科研工作的基本选题方式，引导学生思考从开放性物理问题中进行科研选题；以1～2篇发表的期刊论文为例，介绍科技论文写作规范；采用课堂讲解、分组讨论和雨课堂测试的方式，加深学生对学术道德和学术规范的理解，杜绝学术不端行为。

(3) 开放性物理问题案例介绍

介绍力学、光学和实验设计类的开放性物理问题案例。要求学生了解力学、光学和实验设计等开放性物理方法的一般研究思路；了解问题的研究进展，讨论和完善问题的研究方案、实验验证和理论验证；确定选题，明确研究方向和成果形式。具体介绍竞赛中典型物理问题的一般研究方案，拓展应用到课程中提供学生可选的物理问题中；通过小组讨论，其他组提问的形式，引导学生形成完善、可行的研究方案；介绍相对完善的往届成果(如已发表的SCI论文、发明专利等)，引导学生在小组内自行确定选题，明确研究方向和成果形式(撰写论文，或者申报发明专利)；并依托学校的大学生创新创业项目申报平台，通过申报大创项目完成科研项目选题的初次实践。教师指导学生撰写论文初稿和发明专利申请书底稿。

除线下的课程进行案例讲解外，我校开设的“物理学术竞赛挑战性课程”慕课(https://www.icourse163.org/course/UESTC-1003515005)中提供了大量较完善的物理问题的报告、视频和对抗资料；学生可利用碎片化时间自行学习。

(4) 物理建模及数值仿真

要求学生掌握至少一种数据处理软件，并能实现数据的可视化(如Matlab，Visual C++)；了解数值仿真(ANSYS/Maxwell/Comsol Multiphysics)的基本方法(建模、网格、边界、初始条件、求解和分析)。以典型试题为例，介绍各仿真软件的应用：如ANSYS(力学、热学分析)，Maxwell(电磁分析)，Comsol Multiphysics(电磁分析、流体问题等)。

2.2 课程考核方式

本课程的成绩分三部分：平时成绩30%，汇报成绩30%，期末成绩40%

- 平时成绩：出勤40%，课堂互动讨论60%；
- 汇报成绩：各学习小组汇报进行成果展示(准备PPT，以及视频音频记录)；
  采用飞书会议的方式进行在线汇报。
- 期末考试：小论文。

3 课程教学案例

3.1 开放性物理问题的研究

教学中我们特别注意引起同学们对物理自主学习的兴趣，以较多的图片、视频、音频，实验记录等，多方面呈现出开放性物理试题的研究成果。如图1，我们在课堂上开展了演示实验(“彩虹糖摩天轮”)，培养学生认真观察，深入分析的能力。再基于该演示实验的问题和关键词，开展文献检索、开放性物理问题研究方法的教学。

3.2 设计类物理问题的案例

如图2，以一道设计性实验的CUPT竞赛的开放性物理问题(“无损检测鸡蛋成熟程度的实验研究”)[8]为例，完整的展示开放性物理问题分析，文献检索与阅读，试验方案选择和设计，结果的分析与讨论等。展现竞赛报告制作和论文的撰写。指导学生搭建符合物理规律且具有可行性的开放性物理实验装置；强调定量化设计，以及低成本的

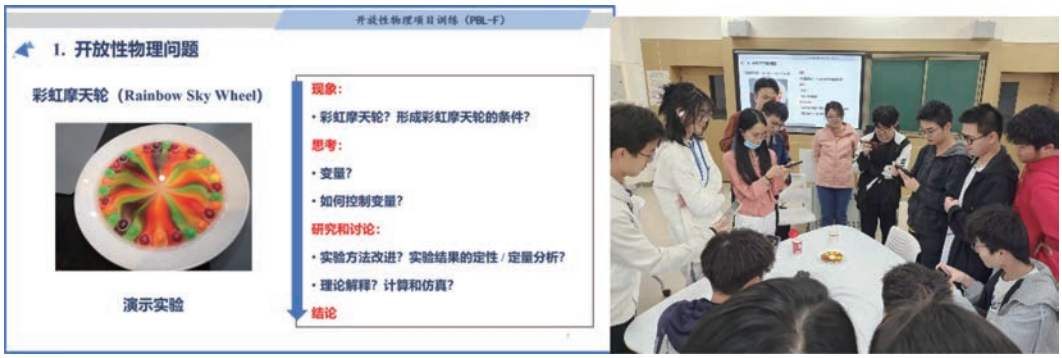


图 1　开放性物理问题“彩虹糖摩天轮”；教室里的演示实验

开放性开发设计理念。

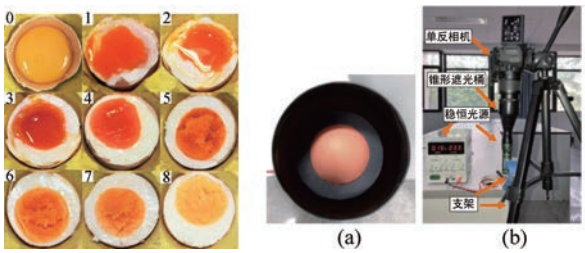


图 2　设计类案例“无损检测鸡蛋成熟程度的实验研究”
（a）锥形遮光桶与鸡蛋；（b）鸡蛋无损检测装置
（康孟哲，吴喆，刘义东等. 实验科学与技术，2019，17(06)：143-146）

4　教学效果

“开放性物理项目训练”课程被评为电子科技大学标杆课程“新生项目课”示范课。图 3 为教室内的学生小组汇报和讨论，通过教师、学生提问和小组讨论引导学生形成完善可行的研究方案。图 4 为创新实验室内的实验课程教学照片。学生可对大学物理实验室、演示物理实验室和创新物理实验室提供的实验设备进行拆解重构，再结合一些生活中的材料自行搭建开放性物理实验装置，获取定量数据并开展后续分析和讨论。



图 3　教室里的小组汇报



图 4　创新实验室内的实验课程教学

图 5 为同学们进行期末课程汇报的飞书会议的截图。各组同学准备了汇报 PPT，其中包含实验照片、视频、数据和分析讨论，教师提问并为学生打分。采用线上会议的方式，便于同学提前熟悉线上竞赛的方式，也利于教师听课和教学活动的观摩。

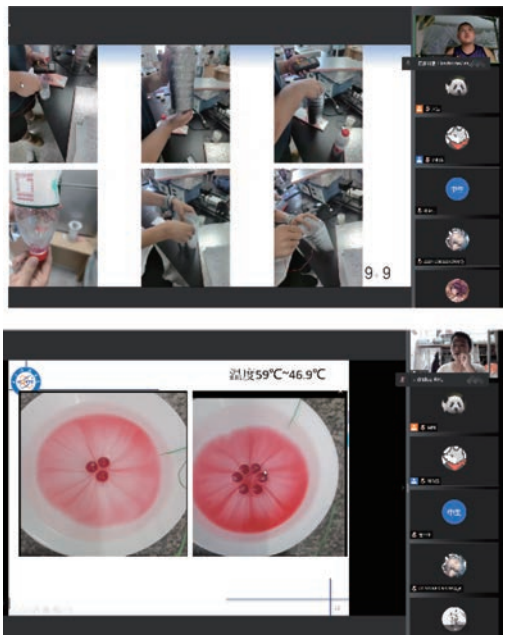


图 5　学生的课程线上汇报

图6为学生们后续参与的大学生创新创业项目的研究成果。该项目源自一个校企合作项目，开发一款航空燃油的电导率测试仪；该仪器是进口垄断的，也是解决卡脖子技术和测量设备的项目之一。学生们通过电路设计、机械加工、工装设计等，完成了原理样机到工程样机的开发研制，样机的测试指标优于对标的进口仪器，且已经进入产品销售阶段。



图6 大学生创新创业项目“燃油电导率仪的开发”

5 结语

面向培养创新型人才的根本任务，我校开展了一系列融通物理类课程的物理基础理论和物理实验技能的实践性教学改革。依托研究开放性物理问题的研究和大学生创新创业活动调动学生的学习兴趣，开设特色课程夯实学科基础，用科研项目化的方式驱动解决问题，形成一套完整的物理类课程的融通式教学方案，构建起综合素养、专业知识与技能，全面与个性化相结合的课程体系。

参 考 文 献

[1] 霍剑青. 大学物理实验课程教学基本要求的指导思想和内容解读[J]. 物理与工程，2007(1)：5-9.

[2] 高兰香，许丹华. 以学生为中心的大学物理教学探索与实践[J]. 大学物理，2022，41(1)：43-49＋60.

[3] 李姣姣，周雨青，董科等. 大学物理教学研究的发展演进探析——基于知网的可视化分析[J]. 大学物理，2022，41(3)：41-50＋77.

[4] 彭勇，罗昔贤，付姚等. 大学物理课程的教学改革与实践[J]. 教育教学论坛，2019，No. 434(40)：79-80.

[5] 翁雨燕，董裕力，杨俊义等. “三位一体”下大学物理实践类课程探索——以“现代物理学在创新创业中的应用”课程为例[J/OL]. 物理与工程：1-8 [2023-05-06].

[6] 高岩，陈秀艳，何燕等. 如何发挥大学生物理实验竞赛在创新型人才培养中的作用[J]. 大学物理实验，2023，36(1)：128-130.

[7] 史新伟，李杏瑞，祝柏林等. 实践育人，践行思政——基于大学物理实验的课程思政教学设计[J]. 物理与工程，2023，33(1)：77-82.

[8] 康孟哲，吴喆，刘义东等. 无损检测鸡蛋成熟程度的实验研究[J]. 实验科学与技术，2019，17(6)：143-146.

EXPLORATION AND PRACTICE OF ACCOMMODATIVE TEACHING IN COLLEGE PHYSICS

WU Zhe[1,2] **GAO Yachun**[1] **LIU Yidong**[1,2] **LI Hua**[1] **YANG Hongchun**[1]

([1] School of Physics; [2] Glasgow College, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu, Sichuan 611731)

Abstract Aim at the fundamental task of cultivating innovative talents, our university has carried out a series of practical teaching reformation that integrate basic physics theories and experimental skills. To mobilize college students' interest, open physics problems from physical competitions and tournaments are applied, innovation and entrepreneurship activities are carried out. “Challenge Course for Undergraduate Physics Tournament” has been built up. It provides systematic scientific research training for college students. It introduces information retrieval, literature reading skills, research methods and scientific tools for physics problems such as heat, sound, light, and electricity, theoretical analysis, numerical calculation, exploration of experimental schemes, laboratory specifications and experimental techniques, data processing and error analysis. Students' spirit of cooperation, communication and expression abilities can be developed and improved in this characteristic project-based physics course. We are exploring a new method for integration of science, technology and education suitable for physics courses from freshmen to senior undergraduate students.

Key words Accommodative teaching; Open physics problems; Project-based course

大学物理课程思政教学创新实践
——以光的偏振为例

吴海娜[1*]　于永芹[1]　张玉凤[1]　杨广武[2]
([1] 深圳技术大学物理教学实验中心,广东 深圳　518118; [2]天津中德应用技术大学,天津　300350)

摘　要　本文以光的偏振一节为例,开展课程思政教学创新实践。瞄准学校人才培养目标,将光的偏振知识与应用紧密关联。从课堂现场演示小魔术出发,由观察现象深入到探究本质,将直观现象与背后的物理原理一一对应。通过小组团队协作实现魔术制作、组间观摩与互助等教学创新设计,使学生树立理实结合、善于观察、勤于思考的科学态度。在光的偏振应用内容拓展过程中渗透精益求精的大国工匠精神及民族自信、科技报国的家国情怀。在整个课堂教学过程中通过学科知识的层层探究及思想情感的互动,引导学生通过课程学习实现价值塑造、知识传授和能力培养三位一体育人目标。

关键词　课程思政;大学物理;教学创新;光的偏振

党的二十大报告指出,“全面贯彻党的教育方针,落实立德树人根本任务,培养德智体美劳全面发展的社会主义建设者和接班人”[1]。2022 年 7 月,教育部等十部门印发了《全面推进“大思政课”建设的工作方案》,教育引导学生坚定“四个自信”,成为堪当民族复兴重任的时代新人[2]。课程思政是推进党的二十大精神入脑、入心、入行的有效渠道,各门课都要守好一段渠、种好责任田,同向同行,形成协同效应。大学物理课程是面对高等教育中理工科专业低年级大学生的重要必修基础课,物理学不仅是自然学科许多领域和工程技术的基础,物理现象的发现、物理学理论的推导及物理学家的成长等过程中蕴含着极为丰富的思政元素,在培养学生的科学素养、成为新时代中国特色社会主义接班人和建设者有着天然的优势[3-9]。

本文以大学物理波动光学的一个教学创新实践—光的偏振为例,瞄准课堂教学目标和思政育人目标,力求将光的偏振物理知识与思政内容“无缝融合”,致力于培养具有科技报国的责任担当和独立从事科学研究与实践应用的能力、具有开放性和创造性思维方式及团队协作精神的高素质设计应用型人才。通过基于学生学习数据的教学反思及学生评价,该教学创新实践能够有效达成课程思政教学目标。

1　教学创新实践

在完整的课程知识框架中,波动光学在理论及应用方面都占有重要地位。光是横波和光具有偏振性的发现,不但丰富了光的波动说内容,而且具有重要的应用价值。偏振光的应用范围非常广,从日常生活中的摄影、灯光设计到地质结构、矿物的探测;从小到原子、分子、病毒微粒的结构分析到大至太阳系、银河系乃至整个宇宙物质结构的探索,无不运用偏振光的知识。学生对本节内容的掌握程度,直接关系到对后续反射和折射时光的偏振、光的双折射的理解及偏振在生活生产中的广泛应用。

1.1　专业教学与思政教育的融合设计

总体设计思路如图 1 所示。首先是课程导

收稿日期:2023-05-17
基金项目:教育部高等学校大学物理课程教指委高等学校教学研究立项项目(DJZW202327zn);广东省本科高校在线开放课程指导委员会 2022 年度研究课题重点课题(2022ZXKC413);教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会大中物理教育衔接工作委员会教学研究课题(WX202237);深圳技术大学 2023 年度校级教学改革研究项目(20231041)。
通讯作者:吴海娜,女,副教授,主要从事有机分子量子自旋输运的理论研究及物理教育,wuhainana@163.com。
引文格式:吴海娜,于永芹,张玉凤,等. 大学物理课程思政教学创新实践——以光的偏振为例[C]. 2023 年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会,2023.
Cite this article: WU H N, YU Y Q, ZHANG Y F, et al. Innovative practice of ideological and political teaching in college physics—Taking polariztion of light as an example[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education, 2023. (in Chinese)

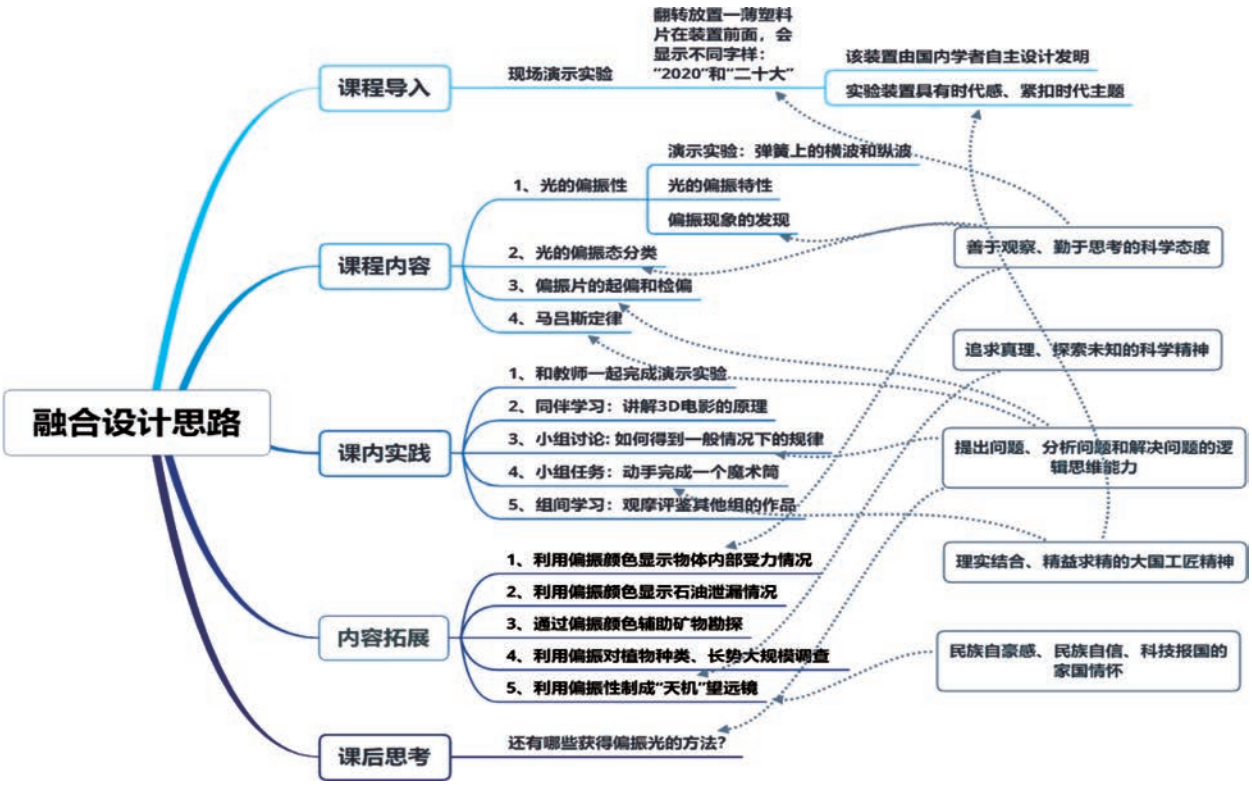


图1 专业教学与思政教育的融合设计示意图

入。物理学理论和实验密不可分，课堂开始先现场演示魔术（该装置由天津中德应用技术大学杨广武团队发明制作并获专利），一个塑料板，上面覆盖一个薄塑料片，会显示"2020"四个数字；仅翻转该薄塑料片，再次覆盖在塑料板上，原来的"2020"消失，呈现"二十大"三个汉字。这个小魔术现象背后的物理原理正是此堂课所要讲述的内容，光的偏振。此处导入体现理实结合、精益求精的大国工匠精神，培养学生善于观察、勤于思考的科学态度。

课堂上采用实物演示实验的方法解释光的偏振特性，以在弹簧上的横波和纵波为例，分别放置水平方向的狭缝和竖直方向的狭缝，边演示边讲解，使学生明白横波和纵波的区别及光的偏振特性，使得直观现象和其背后的物理抽象一一对应，易于学生掌握知识的同时，潜移默化地受到科学思维方法的熏陶。期间穿插偏振现象的发现历程和人造偏振片的发明小故事，伟大的发明家兰德在17岁就读于哈佛大学物理系一年级时，还没有大面积廉价的偏振光起偏器件，于是他打定主意要发明这种实用的大面积偏光片，泡图书馆查阅大量的文献，去实验室重复文献中的实验并进行改进，在19岁时成功做出了最先问世的J型偏光片。通过上述科学家的故事鼓励学生多留心生活中的物理现象，以解决实际问题为引导，在青年时代勇于开拓创新。

课中开展具体实践，学中做，做中学，课堂上通过小组团队协作实现"乒乓球穿墙而过"魔术制作，在亲手制作小魔术道具的过程中，体验课上所讲的光的偏振特性及马吕斯定律。组间观摩与互助等同伴学习模式强化学生理实结合、精益求精的大国工匠精神。

课堂结束前安排内容拓展及课后思考，尤其是介绍"天极"望远镜的情况，再次强化提出问题、解决问题和分析问题的逻辑思维能力及树立民族自豪感、民族自信和科技报国的家国情怀。

1.2 具体教学实施

具体教学实践流程图如图2所示。课堂上以学生的学为中心，教师起引导作用。从课上以请学生协助展示光学小魔术为起点，引导学生观察现象并激发学习兴趣。通过雨课堂现场发布一道测验题限时检测学生的已有知识储备及知识盲点，一方面检查学生的课前预习效果，答对的同学能够建立自信，对自学能力的肯定并正向激励以

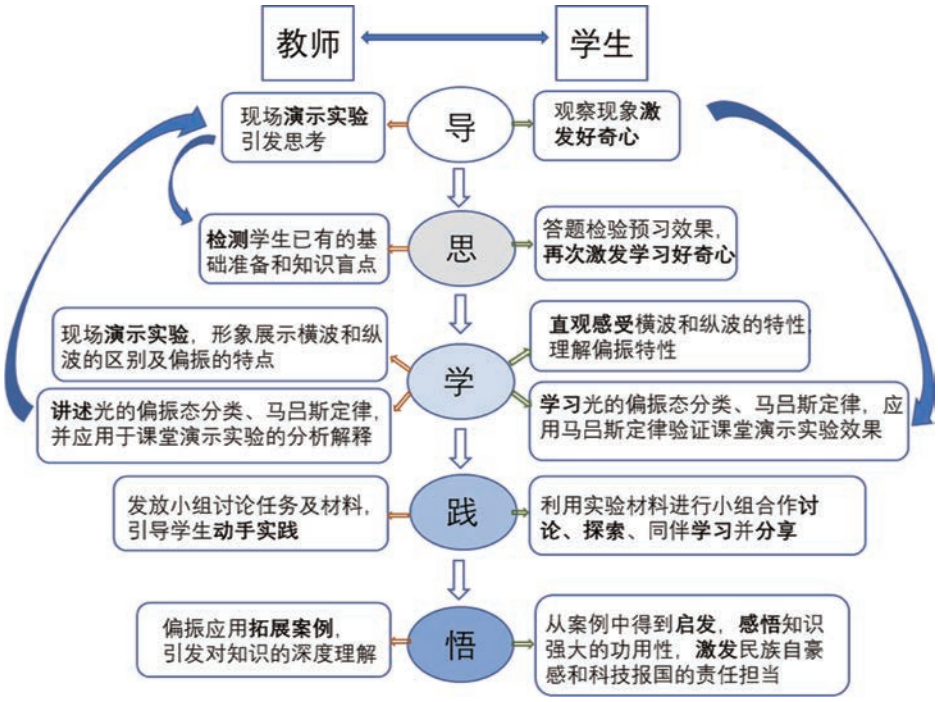


图 2　课程思政教学实施流程示意图

后要多自主学习；答错的同学有警醒感，对接下来课上要讲的内容有期待。

课上教师重点讲解主要内容，学生认真观看、思考和推演，将知识点内容从观察现象上升到认识本质，然后再回到实际应用。教师应用马吕斯定律来验证课堂刚开始时的光学小魔术的设计原理，躬身示范如何分析问题和解决问题，使学生意识到，原来看似复杂的现象和问题以及创新背后，实际上是简洁的物理原理，萌生“原来也不难、我也能创新”的不怕困难、敢想勇创的想法。

学以致用，现场组织学生以团队合作形式，对乒乓球“穿墙而过”的小魔术进行制作（如图 3 所示）。制作过程中有的小组非常顺利地做出了跟实物效果一样的模型，但有的小组却没有做出来。通过组织小组交叉观摩交流，学生和学生之间相互探讨和总结，发现只有当两个偏振片的偏振化方向是垂直时（由马吕斯定律可知，透射光强为零，叠加呈现暗黑色），小魔术才能完全成功。在动手实验过程中，有学生还意外发现，当把从偏振片表面撕下的透明塑料薄膜放在两个偏振片之间，竟然会出现彩色条纹，这更激发了学生的学习兴趣和探究欲望，也为之后介绍光的偏振应用埋下伏笔。

在光的偏振应用中介绍“天宫二号”上的尖端“相机”——宽波段成像光谱仪，这台太空高性能



（a）



（b）

图 3　教学活动

（a）学生组内合作制作小魔术；（b）学生组间观摩交流

光谱与偏振复合型数码相机是由中国科学院上海技术物理研究所的科学家团队贡献八年的智慧和心血造就，他们从可行性分析到设计、制造，再到地面实验验证可靠性的每一个环节中，不断地进行优化完善、自我加压和自我超越，先后为我国的

风云系列气象卫星、神舟系列载人飞船任务、海洋和环境卫星、探月工程研发了各种高性能太空“千里眼”。这样在一台仪器上开启可见光近红外高光谱成像与短波红外、热红外多光谱成像，同时兼具偏振探测功能的智慧锐眼，国际上尚属首次。学生从深度和广度领悟物理学基本原理的强大，中国科技已走在世界前列，民族自豪感和自信心油然而生，激发学生科技报国的责任担当。

2 教学反思

2.1 教学目标达成情况

当学生在课上开始思考，教学才真正发生。当学生具有学习成效，才能说明教学目标已达成。通过上述教学实践过程，反观学生的学习效果。对应课程教学设计的教学目标，知识方面，前测中多选题的学习数据显示客观题正确率为31.58%，其中5%的同学选择了错误的答案，剩余同学只选对了部分答案。经过课上讲解和学习，后测时几乎80%的同学已完全掌握内容，说明学生的学习效果基本达到教学预期目标。能力方面，学生能够利用所讲述的偏振片透光光强为最大和为零来结合解释3D电影的眼镜原理。小组合作讨论时积极参与、探索、分析和分享实验失败和成功背后的物理原理，实现了课程能力目标。价值方面，学生上课从开始时反映平淡，到之后不知不觉融入课堂，听课愈发认真、课堂发言积极踊跃、小组动手实践环节认真探索、实事求是、敢于创新，体现出学生科学精神的培养。从观看天极望远镜视频时学生流露的表情能感受到民族自豪感和科技报国的责任感已由心生。

2.2 学生评价反馈

课后跟学生主动交流，学生反馈本次课堂教学生动形象，以一个小“魔术”来切入课程，吸引兴趣，课堂上频繁的互动拉进了与老师和课程的心理距离，让学生不知不觉中沉浸到了课程之中。课堂上，老师的教学方式独特，风格活泼有趣，对光的偏振讲解很全面和具体，能把晦涩的知识点以游戏的方式展现，使学生学习这些知识时不会感到无趣，在快乐中学到很多新东西，极大地引导学生去思考和探索，也对这个世界有了更深的理解。小组讨论的形式让学生在思维的碰撞中收获知识，通过具体实验和探讨结合模式引导学生的思考一步一步朝真理靠近。学生反馈在课上不但了解了光的偏振原理，在小组合作中还磨合了同学之间的情谊（部分学生评价截图如图4所示）。

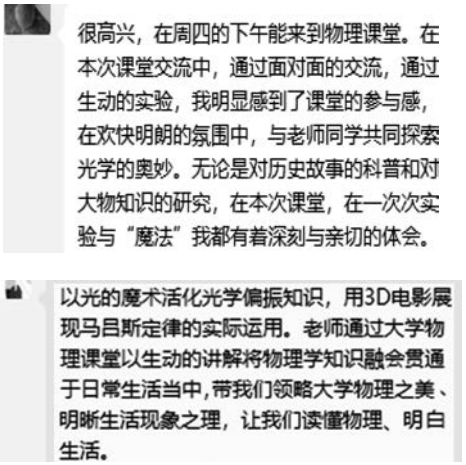


图4 部分学生评价截图

2.3 存在问题及改进措施

课上的课堂演示横纵波实验中狭缝的装置有些简陋，需要重新设计，以便更加清晰演示。预留给学生动手探索创新的时间稍少，实际发现学生对实践的兴趣还是很浓厚的。由于学生听课时自带的文具种类不多，手边材料不丰富，用偏振片自行探究时导致没有发现太多有趣的现象。一部分学生对偏振可以探测植物大规模长势这个应用案例展现兴趣不大。

下一次教学可改进演示道具，使课堂演示的道具更稳固和直观，方便学生观察现象。精简讲课内容，将“偏振现象的发现”这部分内容移到课前学生自学，这部分课上时间可以分配给学生动手实践环节，使学生能对问题有广泛的探究，有更多的发现。替换学生不太感兴趣的应用案例，更新为跟学生实际密切相关的应用案例，更能激发学生的学习积极性。

3 总结

本文以光的偏振为例介绍课程思政教学创新具体实践。将现场演示光学小魔术、学生动手复盘魔术道具与理论解释有机结合，采用问题导入、互动研讨、实践探究及思育智育结合等先进教学方法，理论联系实际，精心设计与理论知识相辅相

成的演示实验及案例，物理贴近生活，组织学生开展合作学习，去主动“观察、思考、质疑、讨论、构建模型、理论计算、实验探究、明理悟道”，让学生切实感受到学习物理“有趣、有谱、有用”。此堂课程思政教学创新的实践对实现“在场景中运用，在联系中理解，在迁移中创造”的应用型人才培养有积极的借鉴意义。

参 考 文 献

[1] 习近平. 高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗——在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告[EB/OL]. 新华网 2022-10-25. http://www.news.cn/politics/cpc20/2022-10/25/c_1129079429.htm.

[2] 教育部等十部门. 教育部等十部门关于印发《全面推进“大思政课”建设的工作方案》的通知[EB/OL]. 教社科〔2022〕3号，2022-08-10 http://www.moe.gov.cn/srcsite/A13/moe_772/202208/t20220818_653672.html.

[3] 吴喆，吴昊，刘义东，等. 大学物理“课程思政”的探索与实践[J]. 物理与工程. 2021，31(5)：61-63.
Wu Zhe，Wu Hao，Liu Yidong，et al. Exploration and practice of ideological and political theories teaching in college physics[J]. Physics and Engineering，2021，31(5)：61-63.（in Chinese）

[4] 王小云，邓巧，黄勇刚，等. 大学物理课程思政的探索[J]. 物理通报，2022，7：87-91.
Wang Xiaoyun，Deng Qiao，Huang Yonggang，et al. Research on Curriculum Ideological and Political Education in UniVersity Physics Course[J]. Physics Bulletin，2022，7：87-91.（in Chinese）

[5] 杨连武，程杰，岳现房，等. 大学物理课程思政内容的设计和实施策略[J]. 物理与工程. 2022，32(2)：182-187.
Yang Lianwu，Cheng Jie，Yue Xianfang，et al. Contents designning and strategy implementation of ideological and political education in college physics course[J]. Physics and Engineering，2022，32(2)：182-187.（in Chinese）

[6] 支鹏伟，胡轶，方向明，等. 基于OBE理念的大学物理课程思政元素探索与研究[J]. 青海示范大学学报(自然科学版). 2021，4：92-96.
Zhi Pengwei，Hu Yi，Fang Xiangming，et al. The exploration and research of ideological and political elements in the course of university physics based on the OBE concept[J]. Journal of Qinghai Normal University（Natural Science）. 2021，4：92-96.（in Chinese）

[7] 高礼静，王敏，唐娜斯. 应用型人才培养模式下“大学物理”课程思政教学探索[J]. 教育教学论坛，2022，18：117-120.
Gao Lijing，Wang Min，Tang Nasi. Exploration on Ideological and Political Teaching of “College Physics” Course under the Training Mode of Applied Talents[J]. Education Teaching Forum，2022，18：117-120.（in Chinese）

[8] 吴玉杰. 求真，至善，唯美——对大学物理课程思政的思考和实践[J]. 物理与工程，2021，31(6)：119-123.
Wu Yujie. Seeking truth，perfection and beauty-Thinking and practice on the ideological and political education of college physics[J]. Physics and Engineering，2021，(31) 6：119-123.（in Chinese）

[9] 张永梅. 工科大学物理课程思政建设尝试[J]. 物理通报，2022，3：80-82.
Zhang Yongmei. An Attempt at Ideological and Political Construction of Physics Courses in Engineering Universities[J]. Physics Bulletin，2022，3：80-82.（in Chinese）

■

INNOVATIVE PRACTICE OF IDEOLOGICAL AND POLITICAL TEACHING IN COLLEGE PHYSICS
—TAKING POLARIZTION OF LIGHT AS AN EXAMPLE

WU Haina[1] YU Yongqin[1] ZHANG Yufeng[1] YANG Guangwu[2]

([1] College Physics Teaching and Experiment Center，Shenzhen Technology University，Shenzhen，Guangdong 518118；
[2] Tianjin Sino-German University of Applied Sciences，Tianjin 300350)

Abstract This article takes the polarization of light as an example to carry out innovative practice in ideological and political education courses. Aiming at the school's talent cultivation goals，closely linking the knowledge of polarization of light with its application. Starting from the on-site demonstration of small magic tricks in the classroom，we correspond the intuitive phenomena with the underlying physical principles，so as to elevate the observation of phenomena to the exploration of their essence. Through innovative teaching designs for group collaboration，such as magic making，inter group observation and mutual assistance，and peer

learning are implemented to strengthen students' scientific attitude of combining theory with practice, being good at observation, and diligent in thinking. In the process of expanding the application content of polarization of light, the spirit of striving for excellence as a great craftsman, as well as the national confidence and patriotism of technology for the country, are permeated. Through the interaction of subject knowledge and ideological level throughout the entire classroom teaching process, guide students to achieve the educational goals of value shaping, knowledge imparting, and ability cultivation.

Key words ideological and political education; college physics; teaching innovation

基于拔尖人才培养的大学物理实验教学改革与实践

翟立朋[1,2*]　常凯歌[1,2]　张俊武[1,2]　王小力[1]

（西安交通大学 [1]物理学院；[2]大学物理国家级实验教学示范中心，陕西 西安　710049）

摘　要　拔尖人才培养计划对大学物理实验的设计和开展提出了新的要求。本文详细介绍了在拔尖计划2.0的背景下对西安交通大学钱学森班大学物理实验课的课程体系、教学模式、课程内容、课后反馈和教学成果等方面的设计与调整，以具体的实验项目举例介绍了课程的开展情况，在完成拔尖人才培养的同时丰富和完善了课程资源建设。

关键词　钱学森班；拔尖人才；大学物理实验；物理演示实验

为回应“钱学森之问”，西安交通大学于2007年开始探索并创建钱学森班（工科拔尖班），旨在培养全面型、创新型、复合型人才[1,2]。2009年教育部联合中组部、财政部在全国20所高校开展“基础学科拔尖学生培养试验计划”，拔尖计划正式启动。经过近10年的探索与实践，2018年教育部发布了“关于实施基础学科拔尖学生培养计划2.0的意见”，在原有基础上进一步提高学生的培养质量、增加受益学生数量，拔尖计划全面推进[1,2]。

大学物理实验课程是全校理工科专业的一门核心基础课[3,4]，是培养学生实践动手能力、科学态度以及科学素养的重要阵地。在拔尖计划2.0的要求下，大学物理实验课程如何培养学生的创新意识、创新思维和创新能力是一个重要的命题。近年来，随着物理实验实践的改善，对拔尖人才培养的探索逐渐从物理学类专业课程[5,6]延伸到了大学物理和大学物理实验课程[3,4]，涉及的学生专业也逐渐延伸到理工交叉[7]、医工交叉[8,9]、新工科[10,11,12]、新农科[13]等等。目前关于拔尖类物理实验课程的改革方案主要是将课程与CUPT、大学生物理实验竞赛、科研训练等进行有机的融合[3,14,15]，确实取得了良好的效果。但西安交通大学的拔尖班（钱学森班）规模大、专业多[1,2]，既往方案实践有困难。物理实验教学示范中心积极探索、主动出击，本文接下来将从课时设置、实验内容设计、考核评价方法等方面对西安交通大学钱学森班物理实验课程的改革与实践情况进行详细的介绍。

1　课程体系调整

根据2010年公布的《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》[16]（简称“基本要求”）结合学校实际，钱学森班原有大学物理实验课程设置2学期总计64学时，分别在大一春季学期和大二秋季学期开展，每学期32学时，其中绪论和误差原理2学时，操作实验包含虚拟仿真实验每个2学时，春季学期完成15个实验，秋季学期完成16个实验。课程主要以课堂操作和课程报告相结合的方式进行考核评价。

在“基本要求”的基础之上，结合学校拔尖人才培养的特色，钱学森班大学物理实验课程的学时增加到80。如图1所示，春季学期32学时，包含了4学时的绪论和误差理论，主要介绍课程的重要性、课程要求与误差理论，并且在该部分增加“随机误差统计规律的验证实验”[17]。春秋学期

收稿日期：2023-05-17

基金项目：2022年西安交通大学本科实验实践与创新创业教育教学改革研究专项（编号：22SJZX01，编号：22SJZX02）；2022年西安交通大学本科教学改革研究项目（拔尖专项）（编号：22BJ03Y）；教育部高等教育司2021年第二批产学合作协同育人项目（编号：202102153105）。

作者简介：翟立朋，男，工程师，主要从事物理实验教学与研究，zhailp2018@xjtu.edu.cn。

引文格式：翟立朋，常凯歌，张俊武，等. 基于拔尖人才培养的大学物理实验教学改革与实践[C]. 2023年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会，2023.

Cite this article：ZHAI L P，CHANG K G，ZHANG J W，et al. Reform and practice of university physics experiment teaching based on cultivating top talents[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education，2023.（in Chinese）

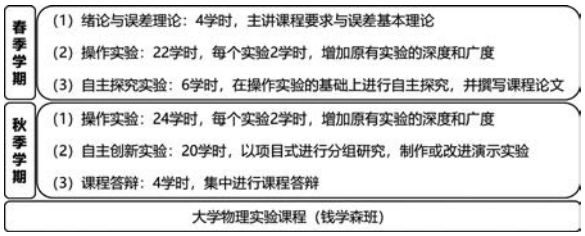


图1 课程体系设置

的操作实验与普通理工科实验项目保持一致，完成“基本要求”中对学生实验能力的培养和训练。春季学期增加6学时的自主探究实验，要求学生以团队形式使用操作实验的设备和仪器对实验内容进行拓展，形成课程论文，占考核成绩的30%。秋季学期在操作实验的基础上增加20学时的自主创新实验，该环节提供20个以上的实验选题，要求学生分组以项目制的形式进行实验选题研究，结题以后对研究项目进行4学时的集中课程答辩，学生对研究成果进行展示，教师对项目的开展情况进行评价考核，占秋季学期的30%。

通过在课程中增加自主探究实验、自主创新实验项目和课程答辩，既完成了“基本要求”对学生基本实验素质的训练，还提高了课程的高阶性、创新性和挑战度，同时改进了课程考核评价方式，能够更好地体现学生的综合素质。

2 自主探究实验项目的探索与实践

传统的操作实验如分光计、杨氏模量、等厚干涉、弦振动等都能够很好的锻炼学生的动手能力和物理建模能力，实验设备、实验内容和实验操作方法已非常成熟，实验项目在各类高校开设也非常广泛。随着第四次工业革命的深入推进，高等学校专业类别也在经历变革与调整，特别是近年来如人工智能、储能技术[18]等新专业的出现，对物理实验课程提出了新的挑战。物理实验课程的设置因为仪器设备成本高等原因，不能快速的更新。所以在进行拔尖人才培养的实践过程中，我们提出了利用现有实验的设备和仪器进行项目内容的拓展和创新，这样既不增加实验的成本又能提高实验项目的创新性和综合性。

在分光计实验中，一般要求学生能够调整分光计并在此基础上进行棱镜折射率或光栅衍射现象的测量[19,20]。分光计最早是作为光谱仪被设计和使用，现代光谱仪也是基于分光计进行设计和开发，所以在自主探究实验项目中我们引导学生使用分光计作为光谱仪测量太阳光谱[21]。图2所示为学生在课程中设计的太阳光谱测量原理、实验装置和测量结果。该项目的实施，让学生切实感受了分光计的发展历史和应用前景，同时提高了实验项目的自主性和课程学习的积极性。

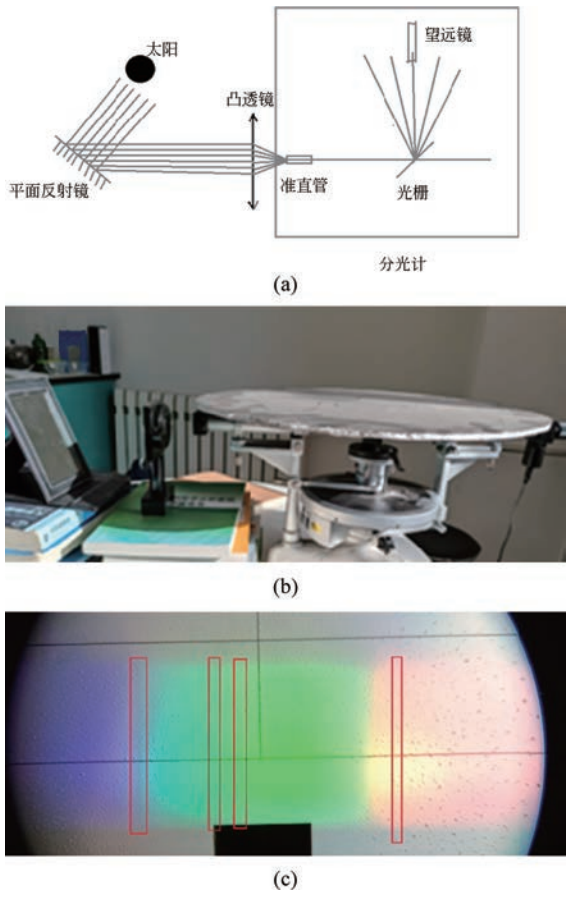


图2 使用分光计测量太阳光谱的原理图(a)、实验装置图(b)和测量结果(c)

在示波器实验中，一般要求学生能够使用示波器测量简单信号的振幅和周期参数、基于李萨茹图形测量信号的频率和相位差等[19,20]。受限于课程时长等因素，物理实验课程中一般对电路原理和信息处理讲解较少。在自主探究实验项目中，学生基于数字示波器中XY模式实现了对数字图像进行重建和复原，使用数字示波器实现了图片的编码、解码和播放功能。如图3所示展示了实验的实物图以及西安交通大学校徽的示波器复原结果。该项目可以加深学生对李萨茹图形的理解，同时还涵盖了数字图像处理方面的综合应

用，极大的提高了实验项目的综合性。

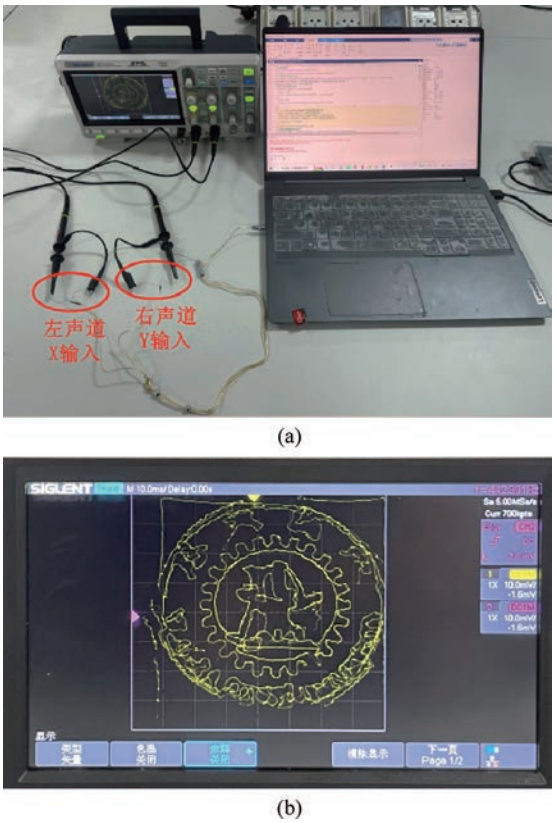


图 3　数字示波器进行图像重建实验装置(a)和结果图(b)

在静电场模拟实验中[19,20]，一般要求学生能够测量同轴电极的电势并与电势理论值进行比对，进而验证电流场模拟静电场的合理性，或者测量任意形状电极的等势线，根据电场线与等势线相互垂直等特点，画出电场线。在自主探究实验中，学生将数值差分算法引入到静电场模拟实验中[22]，该方法不仅能够计算得到任意电极任意位置处的电势和电场分布，还可更进一步得到任意位置处的电荷分布，如图 4 所示。极大的提高了物理实验项目的挑战度，让学生对计算物理和计算机编程技术有初步的了解和应用，且易于推广。

在金属电子逸出功实验中，一般要求学生使用理查森直线法测量金属钨的逸出功[19]，且能够使用磁控法测量电子的荷质比，其中关于磁控临界点一般认为阳极电流为最大值的 25%。学生在学习过程中对磁控临界点为什么是最大值的 25% 产生了极大的兴趣，随即对电子在电场和磁场中的综合运动进行了 Matlab 动力学仿真，详细研究了磁控临界点的动力学模型，并开发了虚拟仿真实验，图 5 所示为虚拟仿真实验界面。仿真实验

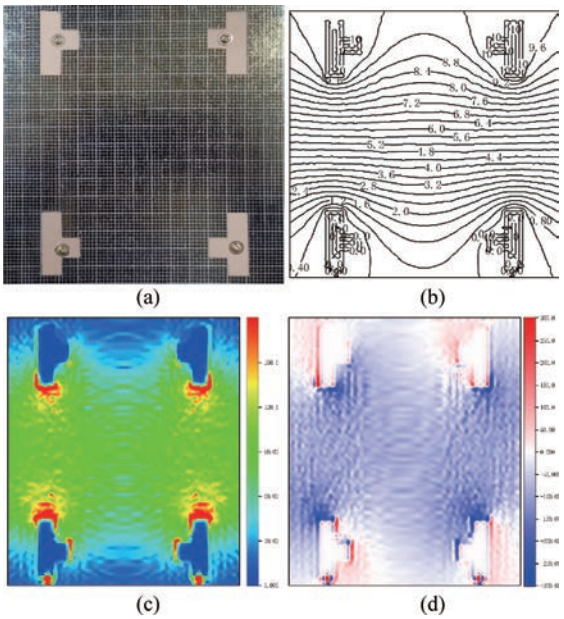


图 4　静电场测量实验的电极模型(a)、电势分布(b)、电场分布(c)和电荷分布(d)图

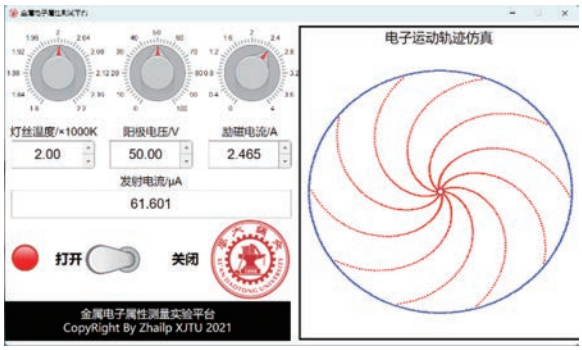


图 5　电子逸出功仿真实验平台

可以将电子运动的轨迹可视化，让实验原理更容易理解。

以上举例可以看出，自主探究实验的开展没有给实验室建设带来任何附加的成本，而是通过物理实验与生活中的现象以及现代信息技术相结合，拓展了实验项目的深度。项目以论文形式进行结题，还可以锻炼学生学术论文的写作素养和写作规范，能够很好的与拔尖人才培养的要求相匹配。

3　自主创新实验项目的探索与实践

该课程相较于普通理工科专业增加了 16 个学时，主要期望能够在夯实基础的前提下提高学生创新能力的培养。自主创新实验的开展过程包

括学生分组、自主选题、方案设计、项目实施、结题验收和课题答辩等环节，通过集中答辩对课题研究进行展示，学生和老师对课题中的问题和疑问进行提问，让选题能够得到充分的展示和交流，对选题的开展进行综合评价。

课程结合竞赛（物理实验竞赛、CUPT竞赛等）和科研训练在物理学类专业的拔尖人才培养方面已经有不少的探索[23,24]，并且取得了良好的效果，但在工科拔尖班进行实施有一定的困难，一方面此类选题专业性强不完全能适应工科专业的需求，二是竞赛类项目需要较大的经费投入，此类项目不太适合在人数较多的工科拔尖班实施，所以我们以演示实验项目为切入点开展自主创新实验。演示实验一般用于辅助大学物理课程教学，但演示实验的开发和设计需要扎实的实验技能作为支撑。自主创新实验环节要求学生对演示实验仪器进行系统的研究、开发、设计、改进等，完成创新人才培养的同时也可以有效的反哺演示实验的创新与发展。

图6所示展示了学生在自主创新实验部分开发和设计的部分作品。图6(a)为学生独立开发设计的一种环形电磁加速器，通过该作品学生在课程答辩中详细介绍了加速器的工作原理，并且研究了加速器的最高速度与电压之间的定量关系；图6(b)为学生开发设计的一种电磁炮，该作品能够通过电磁力实现动力发射，且在此基础上学生通过算法实现了目标自动对准功能；图6(c)为学生改进的一种新型静电感应电动机，相较于传统的静电感应电动机，该装置设计更简单、成本更低，能够更容易的展现电动机的现象；图6(d)为学生开发设计的一种太阳能磁悬浮电动机，通过磁悬浮的方式降低电机转动过程中带来的摩擦，更容易展示太阳能发电的效果，并且研究了光照强度与电机转速之间的关系。

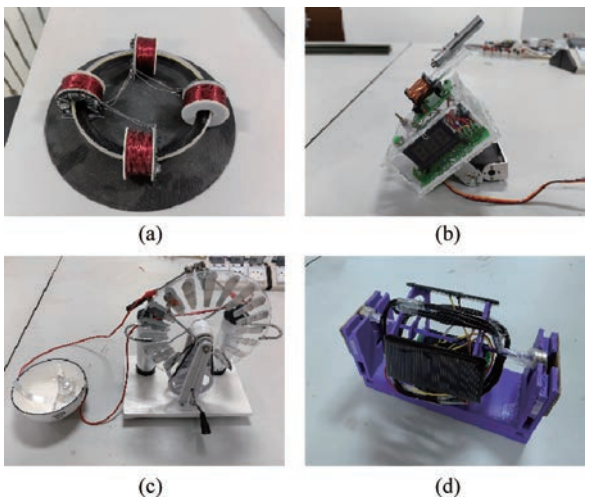


图6 自主创新实验部分项目成果展示

经过一系列项目式的创新实验的开展，学生基本能够以团队协作的形式开展科研项目研究。学生开展实验项目的研究不局限于特定的时间和既定的目标，积极性和主动性更强。

4 教学成果与课程反馈

经过2年的积极探索和实践，适用于我校拔尖人才培养的大学物理实验课程体系已经建立，并取得了良好的教学成果。通过该课程的实施，以本科生或授课教师为第一作者在相关教学期刊已经发表论文5篇[22,25-28]，学生的课程成果参加各类竞赛获奖8项，如图7所示，课程成果得到了相关评审专家的认可。



图7 钱学森班学生相关竞赛获奖

课程也得到了学生的认可，如图8所示为收回的259份课程调研结果。调研结果显示学生认为课程设置基本合理，学生对自主探究实验和自主创新实验更感兴趣，也认为在自主创新实验和自主探究实验环节中学生的个人能力得到了更好的锻炼，学生认为通过课程的实施，个人的实验设计能力、计算机编程能力、团队写作能力、数据处理能力、论文写作能力和表达能力得到了锻炼和提高，该课程也是很多学生科研活动的起点。

5 总结与展望

拔尖班大学物理实验课程的探索和实践是在

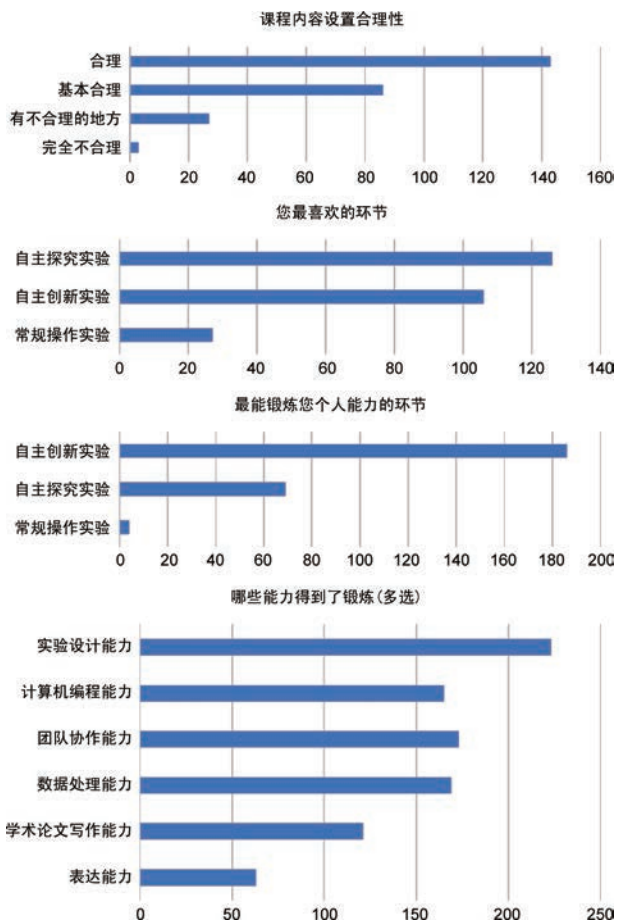


图 8 课程调研结果

新冠肺炎疫情严防严控时期进行的,这不仅对实验课程的设置是一种挑战更是对师生意志力的一种考验。课程中自主探究实验项目的开展极大地提高了学生参与课程的积极性,并涌现出了一批适合居家的物理实验,为普通理工科大学物理实验课程提供了良好的居家实验素材库,课程的探索与实践不仅仅服务了创新人才培养也丰富和完善了课程资源库的建设。未来,拔尖班大学物理实验课将继续在基础操作实验的整合和延展、自主探究实验项目和自主创新实验项目的规范化开展、课程成果的转化等方面进行持续的探索和实践。

参 考 文 献

[1] 王娟,杨森,赵婧方. “拔尖计划”2.0 背景下提升创新人才培养质量的思考与实践[J]. 中国大学教学,2019(3):19-24.

[2] 杨森,王娟,冯国娟,等. 基于“荣誉教育”的拔尖创新人才培养模式探索——以西安交通大学钱学森学院为例,2020.09(3):50-56.

[3] 赵伟,王中平,韦先涛,等. 拔尖人才培养背景下开展英才物理实验教学试点的总结和展望[J]. 物理实验,创新人才教育,2021.09,41(3):23-28.

[4] 张凤琴,林晓珑,王逍. 创新人才培养下的大学物理实验教学改革研究[J]. 大学物理,2017.03,36(3):36-39.

[5] 朱邦芬. 拔尖创新人才的成长之道——恭祝周光召先生 80 寿辰和从事物理工作 55 年[J]. 物理与工程,2010.02,20(1):09-10.

[6] 朱邦芬. 对培养一流拔尖创新人才的思考[J]. 2010.08,20(4):01-06.

[7] 张海明,吴以治. 理工结合、协同发展的障碍及对策研究[J]. 物理与工程. 2015.06,25(3):71-74.

[8] 苏卫锋,冀敏. 浅谈医学物理实验教学内容设计——以“A型超声原理及应用实验”为例[J]. 物理与工程,2022.08,32(4):.

[9] 董仕练,唐涵. 以拉曼光谱技术为引:浅谈大学物理实验中的医学和物理学科交融[J]. 物理与工程,2022.08,32(4):.

[10] 王立英,秦珠,廖怡,等. 新工科下多学科交叉创新性物理实验课程改革[J]. 大学物理,2019.09,38(9):43-48.

[11] 戴玉蓉,董科,周雨青. 新工科项目引领下大学物理及实验课程体系的改革与探索[J]. 物理与工程,2022.02,32(1):76-80.

[12] 张映辉. 适应新工科建设的大学物理实验课程体系与教学方法探索[J],物理与工程,2021.12,31(6):.

[13] 李春燕,贾贵儒,何志巍. 新农科背景下大学物理实验教学探索[J]. 物理与工程,2019,29(Z1):30-33.

[14] 高博,张倩,张俊武,等. 基于“强基计划”的基础物理实验改革探索[J]. 物理实验,2022.10,42(10):20-24.

[15] 李幼真,徐富新,何彪,等. 面向拔尖人才培养的大学物理实验教学改革实践[J]. 大学物理实验,2023.02,36(1):149-152.

[16] 教育部高学校物理学与天文学教学指导委员会. 理工科类大学物理课程教学基本要求 理工科类大学物理实验课程教学基本要求[M],2010 年版,北京:高等教育出版社,2011.02.

[17] 徐强,罗丽峰. 基于手机的随机误差统计规律实验数据处理方法[J]. 物理与工程,2021.08,31(4):100-104.

[18] 中华人民共和国教育部. 教育部关于公布 2022 年度普通高等学校本科专业备案和审批结果的通知[EB/OL]. [2023-04-06]. http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/moe_1034/s4930/202304/t20230419_1056224.html

[19] 王红理,俞晓红,肖国宏. 大学物理实验(第 2 版)[M],西安:西安交通大学,2018.08

[20] 何佳清,霍剑青. 大学物理基础与综合性实验[M]. 北京:高等教育出版社,2018.04.

[21] 王献恒,王菁. 使用分光计观测太阳光谱[J]. 物理实验,2019.02,39(2):49-53.

[22] 翟立朋,常凯歌,程琳,等. 数值差分算法在静电场模拟实验中的设计与应用[J],大学物理实验,2021.12,34(6):49-54.

[23] 张师平,吴平,赵雪丹,等. 以本科生科技创新和物理实验竞赛促进创新型人才培养的探索[J],物理与工程,2016,26(Z1):213-215.
[24] 蒲贤洁,吴小志,韩忠,等. 培养拔尖本科生的CUPT教学模式的探索与实践[J]. 物理实验,2022.10,42(10):14-19.
[25] 周思颖,毛胜春,高博,等. 眼镜度数简便测量及镜片面型判别[J]. 物理与工程,2021.06,31(3):113-119.
[26] 张亦斌,方爱平,齐泽坤,等. 激光散斑形成及漂移现象探究[J]. 物理与工程,2021.12,31(6):129-132.
[27] 杨子源,翟立朋,毛胜春,等. 基于智能手机的地球半径测量居家实验[J]. 物理与工程,2022.04,32(2):133-139.
[28] 薛瀚宸,童童,张俊武,等. 基于Matlab图像处理的光学干涉实验测量研究[J]. 2022.10,32(5):133-137.

■

REFORM AND PRACTICE OF UNIVERSITY PHYSICS EXPERIMENT TEACHING BASED ON CULTIVATING TOP TALENTS

ZHAI Lipeng[1,2] **CHANG Kaige**[1,2] **ZHANG Junwu**[1,2] **WANG Xiaoli**[1]

([1] School of Physics; [2] National College Physics Experimental Teaching Demonstration Center, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract The cultivation plan for top-notch talents has put forward new requirements for the design and implementation of university physics experiments. This article provides a detailed introduction to the course system, teaching mode, course content, post-course feedback, and teaching achievements of the University Physics Experiment course in the top-notch class of Xi'an Jiaotong University under the background of the Top-notch Talent Cultivation Plan 2.0. Using specific experimental projects as examples, the article describes the implementation of the course, enriching and improving the course resource construction while completing the cultivation of top-notch talents.

Key words Qian Xuesen Class; top-notch talent; university physics experiment; physics demonstration experiment

线上线下混合教学在原子物理学教学中的应用和探索

林月霞　王红艳*

（西南交通大学物理科学与技术学院，四川 成都　610031）

摘　要　随着“互联网”技术的快速发展，基于网络教学平台的线上线下混合教学模式，为大学专业基础课的教学改革提供了新方向。本文以西南交通大学应用物理专业原子物理学的教学为例，探索基于智慧树平台建设翻转课堂的混合教学模式，通过比较线上线下混合教学与传统教学的成效，阐明了线上线下混合教学模式的课程设计思路。实践表明，线上线下混合教学模式提升了学生的自主学习能力，提高了师生互动，教学效果有所改善，但是网络提供的学情数据不能完全真实反映学生学习情况。

关键词　线上线下混合式教学模式；原子物理学；翻转课堂；教学改革；教学设计

线上线下混合式教学是一种学生借助网络教学平台开展线上自主学习与教师线下课堂教学相结合，从而将传统的课堂教学与网上在线学习深度融合的教学模式[1-3]。该教学模式克服了传统课堂教学模式所存在的教学程序化、单一化，教学时间、空间有局限性，信息化资源和技术应用不充分，忽视学生主体地位等弊端，同时也弥补了慕课教学模式所具有的缺乏师生面对面互动，学生参与度不足，缺乏浸润式学习体验，学习管理难等缺陷[4]。

《原子物理学》是继力学、电磁学和光学后的普通物理课程，也是量子力学、固体物理学、原子核物理学、近代物理实验等课程的基础。该课程主要讲述原子结构、运动规律及其相互作用与宏观性质，是联系经典物理和近代量子物理的重要桥梁，对于培养学生掌握物理学科知识体系、运用学科知识解释物理现象的能力起着重要作用，同时也是对学生进行正确世界观、人生观、价值观教育以及培养卓越科学精神和坚毅意志品质的极佳载体。

但是《原子物理》课程的知识点多，难度大，课时少。应用线上线下混合式教学模式能够将师生面对面的传统课堂教学与现代化数据网络教学相结合，引导和启发学生的积极性和兴趣点[4]。基于网络教学平台建设翻转课堂，利用线上线下混合教学模式便于实现分层次教学，弥补现有课时不足，既可以提高拔尖班教学难度，也可以拓展普通班学生知识面，培养学生自主学习能力，满足物理学拔尖人才培养的需求；同时利用有限学时实现“知识传授、能力培养、价值塑造”三位一体的教学目标，培养学生的科学态度和科学精神、创新意识和实践能力、爱国情怀和社会责任。推动了高等教育的巨大变革。

1　课程建设及应用情况

以移动通讯设备、新型智慧教学工具与课堂讨论相结合方式为基础的线上线下混合式教学模式，为原子物理课程教学改革提供了全新的道路和方向[5]。自 2020 年疫情开始后，我们利用智慧树平台，开始建设《原子物理》课程线上教学资源，并在 2019 级教学班试点开展了线上线下的混合教学模式。2020 级教学班恢复传统教学模式，然后在总结前两届的教学情况基础上，在 2021 级三个教学班（196 人）全面开展了线上线下的混合教学，线上教学成分占比约为 40%。

收稿日期：2023-05-18

通讯作者：王红艳，女，教授，主要从事原子物理教学和二维催化材料研究工作，hongyanw@swjtu.edu.cn。

引文格式：林月霞，王红艳. 线上线下混合教学在原子物理学教学中的应用和探索[C]. 2023 年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会，2023.

Cite this article：LIN Y X，WANG H Y. Application and exploration of online and offline blended teaching in atomic physics course[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education，2023.（in Chinese）

我们选用智慧树平台的共享课程-《原子物理》教学视频作为线上教学资源，该线上课程由南开大学胡金牛副教授主讲，已开设了6学期，被9所学校选用，教学视频对公众开放。我们没有加入跨校共享的“学分课”，只是要求学生在课前预习时观看教学视频，自主学习相关知识点，主讲老师在课堂只教授难点和重点，简单的知识点课堂上不再讲授。在线考勤，网上提交作业，期中期末考试线下进行。

2 课程教学设计

根据原子物理课程特点，我们将教学内容模块化和层次化，分为科学发展史，理论知识，重大实验和创新能力培养等模块，根据不同的模块，采用不同的教学模式。对于科学发展史主要为线上资源推送，采用启发自学方式；理论知识以线下课堂教师讲授为主；对于重大实验，采用观看线上视频和线下课堂讲解相结合的教学方式；对于拓展性内容，采用线上“资源型”教学方式，重点培养学生创新能力。通过线上线下多种教学方式融合，最终目的是提高学生学习的积极性和主动性，加强了学生在教学中的真正参与度，有效地完成原子物理课程的教学目标。

我们选取《原子物理》的课程教学内容中的“原子结构”这一章节作为样例，说明在一流课程建设过程中的混合式教学设计思路，其中包括“课程思政”融入形式，以及与以往课程教学设计不同的课程教学方法，突出课程建设的创新点、特色。

“原子结构”这一章节的教学目的是学习原子的结构和卢瑟福散射公式，了解原子核的模型建立过程，在讲述原子结构确定的实验时，我们融入了思政元素，通过介绍中国散裂中子源(CSNS)大科学装置，激发学生爱国热情，培养他们的创新意识。该章节的课程教学设计如图1所示。

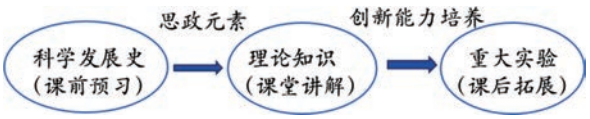


图1 课程设计路线

通过智慧树平台提前发布课前预习内容：学习智慧树平台中“原子的基本性质”和“电子发现”等视频，完成线上测试题。经过课前预习，学生已经自行了解了原子质量、大小和原子模型发展，这些简单内容课堂不再讲授。α粒子散射和卢瑟福散射公式是本章教学难点和重点，老师在课堂上详细讲解，并且通过1～2个例题进行课堂练习，使学生熟悉卢瑟福散射公式及其应用。由于学生进行了课前预习，在课堂上可以组织学生进行讨论，让学生自己讲述三种主要原子模型的发展过程和电子发现过程，在讨论过程中老师进行点评，加深理解，培养学生科学探索的精神。课后对于学有余力的同学，推荐安装运行科罗拉多大学模拟仿真软件，观察α粒子散射，加深对α粒子散射和卢瑟福散射公式理解，也拓展了同学们的视野，培养创新精神。

3 教学成效

2019级3个教学班中拔尖班和教学一班采用线上线下混合教学模式，教学二班采用传统教学模式。我们通过分析比较2019级三个教学班的期末总评成绩说明教学成效。表1数据表明拔尖班成绩明显好于教学一、二班，采用了混合教学方式的班级成绩好于传统教学方式的班级，而且混合教学模式下的高分段高于传统教学，不及格率有所降低。

对采用混合教学的班级成绩前10的学生和成绩后10名的学生的学情进行分析比较，学生的学习成绩与出勤和作业完成情况高度关联。通常成绩差的同学利用线上资源次数明显少于成绩好

表1 混合教学和传统教学的成效(2019级)

	教学模式	平均分	及格率%	100～90 (优秀%)	90～80 (良好%)	80～70 (中等%)	70～60 (及格%)	＜60 (不及格%)
拔尖班	混合	79.06	100.00	21.88	34.38	15.62	28.12	0.00
一班	混合	71.05	80.49	8.54	24.39	21.95	25.61	19.51
二班	传统	68.54	74.07	5.56	22.22	37.04	9.26	25.93

的同学，善于利用线上资源，认真完成作业的同学成绩较好。但是这部分学情数据不能绝对反应同学们的线上学习情况。

4 线上线下混合教学模式存在的问题

通过三届的教学总结，我们认为《原子物理》课程可以采用线上线下混合教学模式，但是线上教学比例不宜过高，建议不超过30%。对于一些重点理论知识，必须采用课堂讲解。尽管线上教学可以弥补课程课时不足和拓展知识，凸显学生主体地位，提升教学效果。但是线上学情数据不能真实准确反映学生自主学习情况，因此对于学习自觉性差的同学应该采取更加严格的督促措施。

线上线下混合教学模式具有学习方式多元化，学习环境丰富多彩，教学时间、空间灵活，可以帮助学生做好课前准备，实现优质教学资源共享，便于学生课后自学[6,7]。但是在实践过程中，缺乏线上线下一体化的教学内容设计，教学平台的限制，无法确切跟踪评价学生的线上学习效果，教师线上教学能力和方式也有待提升。因此，如何有效地突出学生的主体地位，增强学生的积极探索精神和创造能力，如何利用现代信息技术设计更加适合原子物理这类专业基础课程特点的线上线下混合教学模式是我们进行课程教学改革亟待解决的问题。

总之，原子物理课程采用“线上＋线下”混合式教学模式将传统的面授教学与在线网络化学习相结合，通过线上赋能线下、线下支持线上的方式，实现了教学资源的共享和优化，提高教学效果和学生的学习体验。这种教学模式不是简单地将线上和线下两种教学方式相加，而是要实现有机融合，发挥1＋1＞2的效应。它要求我们充分发挥线上和线下两种形式教学的优势，利用信息化资源和技术改造我们的传统教学，改变我们在课堂教学过程中过分使用讲授而导致学生学习主动性不高、认知参与度不足、不同学生的学习结果差异过大等问题。线上线下混合教学这一新型的教学模式将成为未来教育的“新常态”。在原子物理课程中，开展“线上＋线下”混合式教学模式可以有效地提高教学效果，培养学生的创新能力。

参 考 文 献

[1] 郭慧君. 高等数学课程线上线下“混合式”教学模式的研究[J]. 科技视界，2019(11)：127-128.

[2] 宋骆林，林振衡，李响. 翻转课堂在电气专业相关课程教学中的应用[J]. 中国现代教育装备，2019(5)：63-65.

[3] 张建杰，樊永红，田生伟，等. 基于“互联网＋教育”背景下，线上线下混合式教学模式改革的探讨[J]. 国际公关，2020(9)：78-79.

[4] 苏冬云，张佳兴，顾峰. 液压传动与气动技术课程SPOC混合教学模式研究[J]. 科技资讯，2020，18(5)：174，176.

[5] 张蕾，丁琦，王臣臣. 线上线下混合式教学模式在大学物理课堂中的 应用创新教育研究，2021，9(2)，451-455

[6] 舒守娟. 高校理科专业课程线上线下混合式教育模式实践[J]. 高教学刊，2021，7(16)：79-82，87.

[7] 董怡华，杨杰，高丹，等. 基于翻转课堂的环境监测课程线上线下混合教学模式探索[J]，高教学刊，2023，9(3)：102-105.

■

APPLICATION AND EXPLORATION OF ONLINE AND OFFLINE BLENDED TEACHING IN ATOMIC PHYSICS COURSE

LIN Yuexia　WANG Hongyan

(School of Physical Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031)

Abstract With the rapid development of internet technology, the online and offline blended teaching mode based on the network teaching platform provides a new direction for the teaching reform of the basic courses of college majors. Taking the atomic physics course in Southwest Jiaotong University as an example, we explore the blended teaching model by constructing the flipped classroom based on the “intelligent tree” platform. Comparing the effect of online and offline blended teaching with the traditional teaching, this paper illustrates the course design of online and offline blended teaching. Our teaching results shows that the on-

line and offline blended teaching can improve students' autonomous learning ability, strengthen the teacher-student interaction, and promote the teaching effect. However, the data of learning situation provided by the network cannot fully reflect students' learning situation.

Key words online and offline blended teaching; atomic physics; flipped classroom; teaching reform; teaching design

基于 MOOC 的大学物理线上线下混合式大班教学模式

郭 玮 黄 平* 张雍家 武 媛 刘瑞萍 崔彩娥
（太原理工大学物理学院，山西 太原 030024）

摘 要 介绍了太原理工大学针对大容量大学物理课堂开展基于 MOOC 线上线下混合式教学改革与实践。围绕以学为中心的教学理念，借助在智慧树网（https://www.zhihuishu.com）上自建的大学物理山西省高等学校精品资源共享课（线上一流课程），精心设计了适合大班教学的线上线下教学方案。线上教学通过 MOOC 网络平台实施，主要包含课前预习、重点回顾、复习练习、课外知识拓展及以宿舍为单元的小组讨论，侧重自主学习能力培养；线下教学通过课堂教学进行，以知识讲解、讨论互动和案例分析为主，侧重基本知识、基本技能掌握。实践表明，较传统课堂，该教学模式有助于培养学生自主学习、科学探索、团队协作、交流表达及归纳总结等多方面能力。

关键词 大学物理；混合式教学；大班教学；MOOC

新工科建设是我国工程教育改革方向，其内涵是以立德树人为引领，以继承与创新、交叉与融合、协调与共享为主要途径，培养理学基础厚、工程创新能力强、引领未来技术和产业发展的卓越工程人才。以物理学基础为主要内容的大学物理，是理工科专业基础必修课，其课程内容几乎渗透在自然科学各个领域。大学物理课程内容、研究和解决问题的思维方法，在培养学生树立科学世界观，提高学生分析问题、解决问题能力，激发学生探索精神和创新意识等方面具有其他课程不可替代的作用。在新工科建设背景下，高校更加注重高水平人才培养，对大学物理课程建设提出了更高要求，带来了新的机遇与挑战。

当前大学物理主要教学模式有：传统课堂教学模式、MOOC 在线教学模式、SPOC 翻转课堂混合教学模式。传统课堂模式特点是教师课堂上进行信息传递，学生课后完成作业，并对内容进行内化吸收。该模式教师授课进度统一，但师生之间缺乏交流，无法做到个性化学习。MOOC 模式特点是学生课程学习、作业提交、答疑交流以及教师对作业的批改，全部在网上课程平台上进行。该模式使学生能够进行个性化自主学习，但课程整体性和系统性稍嫌不足。SPOC 翻转课堂混合型模式吸收了传统课堂和在线教学模式的优点，并加入了翻转课堂教学法的要素，既能考虑不同学习者的需求，又能促进其自主式学习和加强师生间交流，通过课前、课中、课后三位一体教学活动，实现了知识内化，提升了教学质量[1,2]。但其教学效果与班级规模有关，学生人数较多的班级会影响课堂讨论和答疑效果，从而降低翻转课堂的教学效果[3,4]。因此采用大班授课一些公共课，如大学物理等，不宜以 SPOC 翻转课堂教学形式开设。

大班教学人数众多，师生交流困难，学生在课堂上缺乏表现机会和实际参与。为解决此问题，一些高校尝试使用大班教学、小班研讨的教学模式，取得了一定效果[5-7]。由于一个教学大班一般有 120 多个学生，而一个小班有 25 个左右学生，在实践中，造成老师负担太重，需增加许多助教，

收稿日期：2023-05-19
基金项目：本文为第二批国家级一流本科课程（线上线下混合式）成果，获 2023 年山西省高等学校教学改革创新项目“新工科背景下基于 MOOC 的大学物理线上线下混合式大班教学改革与实践”及山西省高等学校教学改革创新项目（J2021137）支持。
作者简介：郭玮，男，讲师，主要从事大学物理教研工作，guowei1982cry@163.com。
通讯作者：黄平，男，教授，主要从事凝聚态物理研究及大学物理教研工作，huangpinghuangka@163.com。
引文格式：郭玮，黄平，张雍家，等. 基于 MOOC 的大学物理线上线下混合式大班教学模式[C]. 2023 年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会，2023.
Cite this article：GUO W, HUANG P, ZHANG Y J, et al. Online and offline mixed teaching mode of college physics course suitable for large-class learning based on MOOC[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education, 2023. (in Chinese)

导致改模式无法普遍推广。

近年来，有些高校开始尝试基于MOOC的大学物理线上线下混合式大班教学，并取得了一定效果[8-10]。自2019年秋学期开始，太原理工大学大学物理教学团队借助大学物理山西省线上一流课程，围绕“金课”建设的“两性一度”标准，基于信息化技术，从教学设计、教学内容、教学模式、教学评价等多维度构建并实践了“以学生为中心”的大学物理线上线下混合式大班教学改革。实践表明，较传统课堂，该教学模式有助于培养学生自主学习、科学探索、团队协作、交流表达以及归纳总结等多方面能力。

本文简单介绍了我校基于MOOC的大学物理线上线下混合式大班教学教学模式设计、课程内容重构、课程资源建设和课程成绩评定方式，并以刚体定轴转动的角动量守恒定律为例，展示如何基于MOOC开展线上线下混合式大班教学活动。

1 基于MOOC的大学物理线上线下混合式大班教学模式

目前，大学物理一般采用多媒体课件与板书相结合的传统教学模式，教学中存在的两个痛点问题：(1)经典内容多、前沿领域少，课程“两性一度”不足；(2)采用大班教学，学生被动学习，因材施教难，个性教学缺失。教学改革要解决两个重点问题：(1)如何提高课程“两性一度”；(2)如何在大班教学中有效利用信息化及数字化教学工具开展教学活动，调动学生学习主动性，实现以学生为中心的教学转变。

若采用线上线下混合式大班教学，其阻力是小组讨论难以在教室进行。若把小组讨论环节提前到课前，教师发布讨论题目，学生以宿舍为单元进行小组讨论，课中学生展示讨论结果并进行生生互评，可在一定程度上克服此阻力。基于此想法，针对要解决的重点问题，教学团队借助在智慧树网(https://www.zhihuishu.com)大学物理山西省精品资源共享课(线上一流课程)，拓展学时维度，开展了线上线下混合式大班教学，设计了MOOC背景下线上预习、复习、测试、互动，以宿舍为单元小组讨论，与线下课堂教学有机结合的线上线下混合式大班教学，将学生吸引到课堂上来，使教学以学生为中心实施。

1.1 教学模式设计

教学团队按照混合式大班教学模式更新了教学设计，包括教学基本情况和教学过程。教学基本情况涵盖学情分析、教学目标、教学重点和难点、教学手段和方法。教学过程包括：(1)课前(线上学习、以宿舍为单元小组主题讨论)；(2)课中(重难点讲解、互动交流(师生、生生)、课堂练习等)；(3)课后(作业，生生、师生互动答疑)。

1.2 课程内容重构

(1) 教师依据线上学习、互动及课前测情况设计重难点讲解内容，依据学生展示的课前讨论结果及生生互评中理解和认识误区进行点评和总结，使学生参与决定教学内容，提高了教师授课挑战度。

(2) 增加了教指委教学大纲中部分扩展内容教学；引入与大学物理有关的前沿理论和成果，开展实例教学。通过这些措施，增加课程难度，提高了学生学习的挑战度。

(3) 介绍了物理学研究方法、物理学发展历史，激发了学生求知热情、探索精神、创新欲望、以及敢于向旧观念挑战精神；介绍了中国古代蕴含物理学原理的技术发明、近现代中国科学家的典型事迹，宣扬了科学精神、工匠精神和社会主义核心价值观，使学生树立了文化自信。

通过课程内容的重构，让学生了解物理如何推动人类文明进步，让学生理解物理、喜欢物理，培养了学生解决复杂工程问题中物理问题的能力和高阶思维能力，从而将知识传授、能力培养、价值塑造有机融合。

1.3 课程资源建设

(1) MOOC资源建设：完成了具有我校特色的MOOC资源建设。目前MOOC大学物理(上)累计选课4.37万人，累计学校257所；大学物理(下)累计选课3.98万人，累计学校264所。

(2) 教材建设：编写了《大学物理》(上、下)、《大学物理简明教程》、《大学物理学习指导与习题解答》、《大学物理演示实验》等教材。《大学物理》(上、下)先后被评为“十一五”、“十二五”普通高等教育国家级规划教材。

(3) 电子教案和电子课件建设：制作了适用混合式大班教学的电子教案和电子课件，用于大班教学，活跃了课堂气氛，实现了以学生为中心的教学转变。

1.4 课程成绩评定方式

建立了全过程、多维度评价体系，确保两性一度达成。通过MOOC＋平时成绩对学生学习进

行过程性评价，线下期末考试对学生学习效果进行有效测评。具体成绩评定方式如下：

（1）课程总成绩 100%＝线上 MOOC 成绩 20%（指占比，下同）＋线下平时成绩 10%＋线下期末考试成绩 70%；

（2）线上 MOOC 成绩＝学习进度成绩 15%＋学习习惯成绩 25%＋学习互动成绩 10%＋章测试成绩 10%＋线上期末考试成绩 40%；

（3）线下平时成绩＝出勤 10%＋课堂讨论 30%＋作业 60%。

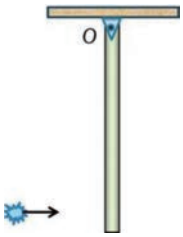
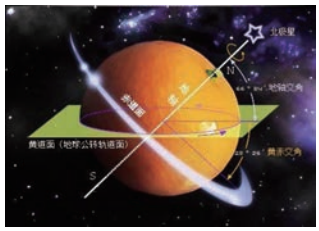
2 基于 MOOC 的线上线下混合式大班教学教学模式的具体实现

根据基于 MOOC 的线上线下混合式大班教学教学模式，针对大学物理“刚体定轴转动的角动量守恒定律”章节进行教学设计，包括教学基本情况（表 1）和教学过程（表 2）。

表 1 教学基本情况

课程名称	大学物理 A（一）	授课题目	刚体定轴转动的角动量守恒定律		
使用教材	《大学物理》上册，王纪龙，杨毅彪主编，第六版，科学出版社				
参考教材	1. 大学物理学，张三慧编著，第二版，清华大学出版社 2. 普通物理学，程守洙等，第五版，高等教育出版社				
课程性质	公共基础课	授课专业	非物理类理工科专业	本节课时	60 分钟
学情分析	**在知识基础方面**，已经学习了角动量概念和定轴转动定律，但由于刚体定轴转动在中学没有涉及，角动量概念比较抽象，因此学生对于角动量守恒定律学习有一定难度。教学中需通过探究日常生活中的实例，帮助学生掌握这一物理规律。 **在学习能力方面**，学生自学能力欠佳，主动性不强，对于抽象物理规律理解以及接受能力不强。因此需要教师在课前、课中以及课后充分调动学生学习兴趣，引导学生学好这一内容。				
教学目标	**一、知识目标** 1. 掌握刚体定轴转动角动量定理； 2. 掌握定轴转动系统角动量守恒定律，明确角动量守恒条件。 **二、能力目标** 1. 能应用角动量守恒定律求解刚体、刚体和质点组成的系统定轴转动问题；2. 能运用角动量守恒定律解释相关问题。 **三、素质目标** 1. 培养学生团队合作精神、实践探究能力； 2. 通过课程思政培养学生不怕困难、坚韧不拔、勇于挑战的科学探索精神。				
教学重点和难点	**一、教学重点：** 1. 刚体角动量定理；2. 角动量守恒定律及其应用。 **二、教学难点：** 角动量守恒定律的应用				
教学手段和方法	**一、授课方式** 借助慕课资源，开展线上线下混合大班教学。课前教师发布教学视频、讨论题目，学生完成课程内容学习，并以宿舍为单元完成讨论题目。课中教师依据学生反馈进行重难点讲解，并引导学生展示讨论结果，由此展开生生互评，教师点评总结。课后通过相应的科学拓展问题进一步巩固学习内容。 **二、教学手段和方法** 启发式和引导式教学方法相结合，灵活应用任务驱动、分组讨论和课堂演示、体验、探究等教学方法。板书和多媒体相结合，重要知识点通过板书体现，相应的图片、动画等信息借助 FLASH 动画、幻灯片演示。				

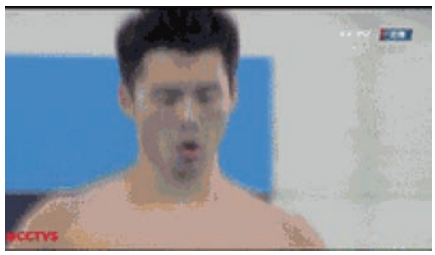
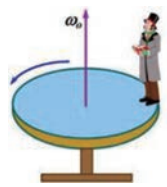
表 2 教学过程

教学环节	时间	教学内容	教学手段与方法
课前	灵活	在班级 qq 群和在线教学平台发布学习任务： 1. 定轴转动角动量定理、角动量守恒定律、定轴转动角动量守恒定律的应用； 2. 完成发布的讨论题目。	在线视频学习 生生互动
课中	5 分钟	**课前测**：一匀质细杆可绕通过上端与杆垂直的水平光滑固定轴旋转，杆初始时静止。现有一小团粘土自左方垂直撞击细杆，并粘在杆上。以粘土和细杆为系统，忽略空气阻力，在碰撞中守恒的量是[ ] (A)动量 (B)绕转轴的角动量 (C)动量和绕转轴的角动量 (D)机械能 	课前测
课中	5 分钟	**刚体定轴转动的角动量定理** $$M = J\beta = J\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}(J\omega)}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}t}$$ 微分形式 $M\mathrm{d}t = \mathrm{d}L$ 积分形式 $\int_{t_1}^{t_2} M\mathrm{d}t = \int_{L_1}^{L_2} \mathrm{d}L = L_2 - L_1$	教师主讲 板书＋PPT
课中	10 分钟	**刚体定轴转动的角动量守恒定律** **1. 内容**：若刚体合外力矩等于零，$L = Jw$ ＝恒量，即转动过程中刚体的角动量保持不变。 **2. 守恒条件**：刚体受合外力矩为零。 **3. 角动量守恒定律应用**： (1) 对于刚体，合外力矩为零，J 和 ω 都不变； (2) 对于一般质点系，对轴合外力矩为零，则 J 和 ω 同时变，但 $L = J\mathrm{w}$ 不变； (3) 多个物体(刚体或质点)组成共轴系统，对轴合外力矩为零，则 $\sum_{i=1}^{n} J_i\omega_i$ ＝常数。	教师主讲 板书＋PPT 启发引导
课中	30 分钟	**应用实例讨论** **讨论一：地球自转周期不变且地轴的方向保持不变，为什么？**  邀请学生展示小组讨论结果，并引导学生生生互评，然后教师总结。 拓展分析：高速竖直旋转的陀螺不容易倒下(播放动图)。 	学生讨论图片 展示动图演示 课堂演示

续表

教学环节	时间	教学内容	教学手段与方法
课中	30 分钟	**讨论二：花样滑冰运动员在比赛中常会做一些旋转的动作，转速会变化。为什么？**  （播放动图） 邀请学生展示小组讨论结果，教师评价并总结。 演示：邀请学生参与站在旋转转台上角速度变化的体验，并提问角速度发生变化的原因，找同学回答解释。 **讨论三：哆啦 A 梦的神奇宝贝——竹蜻蜓，遵循科学规律吗？**  （播放动图） 演示：邀请学生参与站在旋转转台上拨动转轮，人和转台沿与转轮相反方向转动的体验，并提问发生这种现象的原因，找同学回答解释原因，教师评价，并总结解释。  （教学活动图片：学生课堂演示实验） 通过演示实验，教师启发和引导学生分析哆啦 A 梦的竹蜻蜓，不符合科学规律。 拓展应用：避免直升飞机机身反转的方法。  （播放动图）	学生讨论图片展示动图演示课堂演示

续表

教学环节	时间	教学内容	教学手段与方法
课中	5分钟	播放跳水世界冠军完成高难度跳水动作的视频，解释高难度跳水动作理论上遵循角动量守恒定律，但实际圆满完成需要运动员平时艰苦卓绝的训练。通过介绍中国跳水队辉煌成绩，号召学生学习他们不怕挫折、坚韧不拔、锲而不舍、勇于拼搏的精神。  （播放动图）	课程思政教育
课中	5分钟	**运用所学知识解决问题** **例** 匀质圆盘(M,R)与人(m，视为质点)一起以角速度 ω_0 绕通过盘心的竖直光滑固定轴转动。当此人从盘的边缘走到盘心时，圆盘的角速度是多少？ 	师生互动
课后		1. 查找资料解释回转仪的定向原理； 2. 完成教材课后习题 3～9，3～10	

3 基于MOOC的大学物理线上线下混合式大班教学需要进一步解决的问题

虽然大学物理被认定为第二批国家级一流本科课程(线上线下混合式)，但我们认为这只是对混合式大班教学中“如何有效利用信息化及数字化教学工具开展教学活动，调动学生学习主动性，实现以学生为中心的教学转变”这一探索的肯定。在课程建设过程中，尚需解决如下问题：

1) 立体化教学资源库的完善

进一步完善大学物理MOOC平台建设，提高视频质量，丰富平台资源；设计递进式、引导式、探究式的线上教学讨论区问题，进一步培养学生解决复杂问题的综合能力。

2) 改革大学物理教育，强化物理教育工程应用，把物理教育与后续的专业课程联系在一起

(a) 与各学科专业沟通、协同合作，结合学科需求量体裁衣，制定差别化的教学大纲执行细则，为后续专业课程学习做好必要的理论铺垫；

(b) 依据协同制定的教学大纲执行细则，优化教学内容，多层次灵活组织教学；

(c) 结合学生专业特点，深入挖掘大学物理课程思政教育资源，推进课程思政建设，顺其自然地将科学精神、人文价值、家国情怀融入课程，做到“润物无声”。

3) 线上线下混合式大班教学模式对整体教学效果提升效应

(a) 进一步提升学生线上、线下互动的参与度，培养学生敢于质疑、勇于创新的精神，鼓励学生开展研究性学习和个性化学习，提升学生解决复杂问题的综合能力和高阶思维能力；

(b) 强化教学过程管理，优化线上成绩的评价依据，持续创新教学全周期综合考评体系。

参 考 文 献

[1] 张睿，王祖源，徐小凤. SPOC模式大学物理混合型教学的学习效果研究[J]，大学物理，2016，35(8)：52-54+65.
ZHANG Rui，W ANG Zuyuan，XU Xiaofeng. Research on effectiveness of blended learning with SPOC model in university physics[J]，College Physics，2016，35(8)：52-54+65.（in Chinese）

[2] 于淑云，刘建强. 基于SPOC的翻转课堂教学模式在大学

物理教学中的应用[J]. 物理与工程，2016，26(S1)：143-146.
Yu Shuyun，Liu Jianqiang. Application of Flipped Classroom of Spoc-Based on College Physics Course[J]. Physics and Engineering，2016，26(S1)：143-146. (in Chinese)

[3] 张弛，张斌贤. 美国大学与学院的生师比和班级规模[J]，教育发展研究，2002(1)：66-69.
Zhang chi，Zhang binxian，Student/Faculty Ratio and the Class Size in the American Colleges and Universitie，Exploring Education Development，2002(1)：66-69. (in Chinese)

[4] 武松，李静，杨洁，等. 基于微信平台的医学统计学翻转课堂实践与效果评价[J]，沈阳医学院学报，2019，21(6)：572-575.
WU Song，LI Jing，YANG Jie，*et al*. Practice and effect evaluation of medical statistics flipped classroom based on WeChat platform[J]，Journal of Shenyang Medical College，2019，21(6)：572-575. (in Chinese)

[5] 王鑫，陈曙光，肖艳萍. 线上线下混合教学模式的探索与实践——递进式问题驱动下的大学物理大班课堂[J]. 大学物理，2022，41(9)：37-42
WANG Xin，CHEN Shu-guang，XIAO Yan-ping. The exploration and practicing on hybrid teaching in college physics based on problem[J]. College Physics，2022，41(9)：37-42. (in Chinese)

[6] 李帅东，裴晓英. 基于“MOOC＋课堂讨论”混合式教学的探索与实践——以新疆政法学院大学物理课程教学为例[J]. 物理通报，2022，41(12)：2-5
Li Shuaidong，Pei Xiaoying. Exploration and Practice on Mixed Teaching Based on MOOC＋Classroom Discussion—Taking the Teaching of University Physics in Xinjiang University of Political Science and Lawas an Example[J]. Physics Bulletin，2022，41(12)：2-5. (in Chinese)

[7] 覃方丽，大学物理“小班讨论课”模式探索与实践——以中国石油大学(北京)为例[J]，教育教学论坛，2017(51)：143-145
QIN Fang-li，Exploration and Practice on Teaching Mode of Small-Class Discussion in University Physics Course——Take the China University of Petroleum(Beijing) as an Example[J]. Education Teaching Forum，2017(51)：143-145. (in Chinese)

[8] 孙燕云，何钰，吴平，等. 大学物理线上线下混合式大班教学模式初探[J]. 物理与工程，2019，29(5)：85-89
SUN Yanyun，HE Yu，WU Ping，*et al*. A Preliminary Study On The Blended Learning Mode For Colleage Physics:Design For Large-Class[J]. Physics And Engineering，2019，29(5)：85-89. (in Chinese)

[9] 常葆荣，李淑凤，于杰，等. 混合教学模式在大学物理大班教学中的研究与实践[J]. 物理与工程，2021，31(S1)：28-34
CHANG Baorong，LI Shufeng，YU Jie，*et al*. RESEARCH AND PRACTICE ON THE APPLICATION OF MIXED TEACHING MODE IN COLLEGE PHYSICS TEACHING Physics and Engineering [J]. Physics And Engineering，2021，31(S1)：28-34. (in Chinese)

[10] 马堃，焦铮. 大班选课制下大学物理课程教学改革[J]. 物理与工程，2017，27(S1)：113-116.
Ma Kun，Jiao Zheng. Teaching Reform of College Physics Under the System of Large Class Selection[J]. Physics and Engineering，2017，27(S1)：113-116. (in Chinese)

■

ONLINE AND OFFLINE MIXED TEACHING MODE OF COLLEGE PHYSICS COURSE SUITABLE FOR LARGE-CLASS LEARNING BASED ON MOOC

GUO Wei　HUANG ping　ZHANG Yongjia　WU Yuan　LIU Ruiping　CUI Caie

(School of Physics，Taiyuan University of Technology，Taiyuan，Shanxi 030024)

Abstract　The design and practice of the blending teaching method for the large-class college physics based on MOOC in Taiyuan University of Technology are described. Centering on the learning-centered teaching concept，the online and offline teaching programs suitable for large-class learning are carefully designed with the help of Shanxi Province preeminent resources sharing class (online first-class courses) “college physics” self-made on Zhihuishu platform (https://www.zhihuishu.com). Online-based teaching is implemented through MOOC network platform，mainly including preview lessons，review lessons，examination testing，extracurricular knowledge expansion and group discussion in dormitory unit，which cultivates undergraduates to improve independent learning capability and scientific research thinking；Off-

line-based teaching is conducted through classroom, focusing on lecture course, class discussion and case analysis, which cultivates undergraduates to master the basic knowledge and skills. The practical results show that this teaching design can obviously enhance the students' enthusiasm for putting knowledge into practice compared with the traditional class, and is helpful to cultivate their abilities of autonomous learning, scientific exploration, teamwork, communication, expression and summarizing.

Key words blended learning; large-class learning; college physics; MOOC

大学物理课程思政教学探究与实践
——以电容器及其能量为例

孟德忠* 申 坤 李庚伟 高 禄 邢 杰 吴秀文 郝会颖 赵长春 郑志远 张自力
（中国地质大学（北京）数理学院，北京 100083）

摘 要 课程思政元素融入大学物理课程具有天然的优势。本文以电容器及其能量为例，将课程内容紧密结合典型思政元素，在知识传授的基础上，突出了理论联系实际、自然辩证法认识事物的本质、国家使命感、习近平总书记关于能源革命的重要论述等思政内容。该案例的开展让学生在收获基础物理知识的同时，培养了学生的科学素养、爱国主义情感、科学创新精神，进一步增强了学生的民族自豪感和民族自信心，实现了知识传授、能力培养、价值塑造的教学任务。

关键词 大学物理；课程思政；教学；电容器

引言

思政课程被认为是我国落实立德树人根本任务的关键课程。2022年5月，习近平总书记指出："推动思想政治理论课改革创新，不断增强思政课的思想性、理论性和亲和力、针对性"，"改革创新是时代精神，青少年是最活跃的群体，思政课建设要向改革创新要活力"。2022年8月，教育部等十部门印发《全面推进"大思政课"建设的工作方案》，该方案通过对指导思想、工作原则、目标任务方面的介绍，阐述了党的创新理论研究和教育教学的自主知识体系，最终目标是建设全国高校思政课教研系统。在当前社会全面开展"大思政课"背景下，积极推动课程思政的协同育人作用，不仅能够促进思政教育在课堂上向纵深方向开展，而且也能够发挥思政教育的传统优势，形成全方位的合力，并在不断改革和创新思政教育新模式下推动思政教育向纵深方向开展。

大学物理课程是高等院校理工类专业的学科基础课，具有授课覆盖面广、受众学生多的特点[1]。由于大学物理课程属于自然学科的基础课程，在高中物理的基础上，进一步扩展了力学、热学、光学、电磁学、量子物理和相对论部分的知识体系[2]。课程内容中涉及到了诸多的科学发展史、科学家故事、技术发展前沿、科学与技术转化、爱国思想等思政元素。因此，大学物理与思政元素相结合具有天然的优势。

关于大学物理课程思政领域的研究得到了学者的广泛关注。穆良柱认为物理课程思政的核心是物理认知能力的培养，即认知模型的构建、物理方法的训练以及物理精神的养成三方面[3]。杨玮枫总结了大学物理的三类主要思政元素包括：唯物主义世界观、政治认同和家国情怀以及勇于探索精神[4]。王小力针对大学物理课程研究与实践提出了一系列的建设新途径和建议，促进大学物理课程成为立德树人的重要阵地[5]。同时针对具体内容下课程思政的教学实践案例也层出不穷。王素元以电磁感应课程内容为例，深入挖掘了课程中蕴含的思政元素，实现了对学生的专业能力提升与价值引领的有机统一[6]。马晓波以多普勒效应为例，从情境构建、思政元素挖掘、教学设计

收稿日期：2023-05-21
基金项目：教育部产学合作协同育人项目（202102251006）；中国地质大学（北京）本科教育质量提升计划建设项目（JG202143，XNFZ202106）；高等学校大学物理课程教指委大中物理教育衔接工作委员会教学研究课题（W202111）；中国地质大学（北京）2022年学科发展研究基金项目（2022XK210）。
通讯作者：孟德忠，男，副教授，主要从事大学物理教学法研究，meng@cugb.edu.cn。
引文格式：孟德忠，申坤，李庚伟，等. 大学物理课程思政教学探究与实践——以电容器及其能量为例[C]. 2023年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会，2023.
Cite this article：MENG D Z，SHEN K，LI G W，et al. Exploration and practice of ideological and political teaching in college physics—Taking "Capacitor and its energy"as an example[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education，2023.（in Chinese）

等方面开展了课前、课中、课后等思政融入探索[7]。分析前人的教学研究发现，目前针对大学物理电容器内容的课程思政还未见报道。作者根据自己多年在大学物理的教学经验，以问题为导向，开展了课程思政教学内容的设计及实践，希望该研究成果能够为同仁及广大学生对于电容器部分的学习、理解带来新的感悟。

1　课程思政理念下的大学物理课堂教学模式

1.1　课程目标

基于大学物理电容器及其能量的教学内容，融入课程思政等元素，在课程目标上主要突出以下三个层面。在知识层面上，通过对电容器的结构、电容以及储能原理及应用的讲解，让学生构建电容器知识的核心结构体系，理解场储能思想的应用意义，建立健全的物理方法与科学思维，最终实现知识传授的目的。在能力层面上，通过问题导向式的教学方式，使学生理解基础物理知识与科学创新间的重要关系，培养学生发现问题、分析问题、解决问题的能力，发掘学生的创新能力、思辨能力、国家使命感。在价值层面上：通过物理课程自然融入思政内容，渗透基础科技驱动力、国家使命感和自然辩证法内容，培养学生科学创新精神、爱国主义精神和严谨的科学观。基于以上目标提出了本课程的设计思路，如图1所示。

1.2　典型思政元素内容

恰当的引入典型思政元素是做好课程思政的重要组成部分。通过深入理解电容器部分课程的授课内容，扩展典型思政元素，可以分为如下几个要点。

① 通过电容器知识在日常电子产品中的应用案例，培养学生勤于思考、理论知识结合生活实际的科学思维方式，增强学生的创新精神。

② 结合电容器的电容原理计算，指出电容的决定因素，渗透自然辩证法中认识事物的本质思想，培养学生发挥主观能动性，通过科学知识探索事物的本质精神。通过球形和柱形电容器的电容计算，渗透类比思想在科学研究、生活中的重要作用。

③ 超级电容器是重要的储能器件，通过超级电容器前沿科学中的卡脖子难题，渗透关注基础创新的重要意义，培养学生强烈的爱国主义感和国家使命感。超级电容器涉及到国家能源问题，结合学校理工科专业背景，拓展学习习近平总书记的“加快建设能源强国”和“确保能源安全”重要讲话精神。

2　课程思政案例

2.1　课程引入

针对电容器的课程内容，通过同学们日常接触的电子产品中电容式触摸屏和电容开关引出电容器的概念。如对学生进行如下提问：同学们现在使用触摸屏手机或者平板电脑，请问大家是否

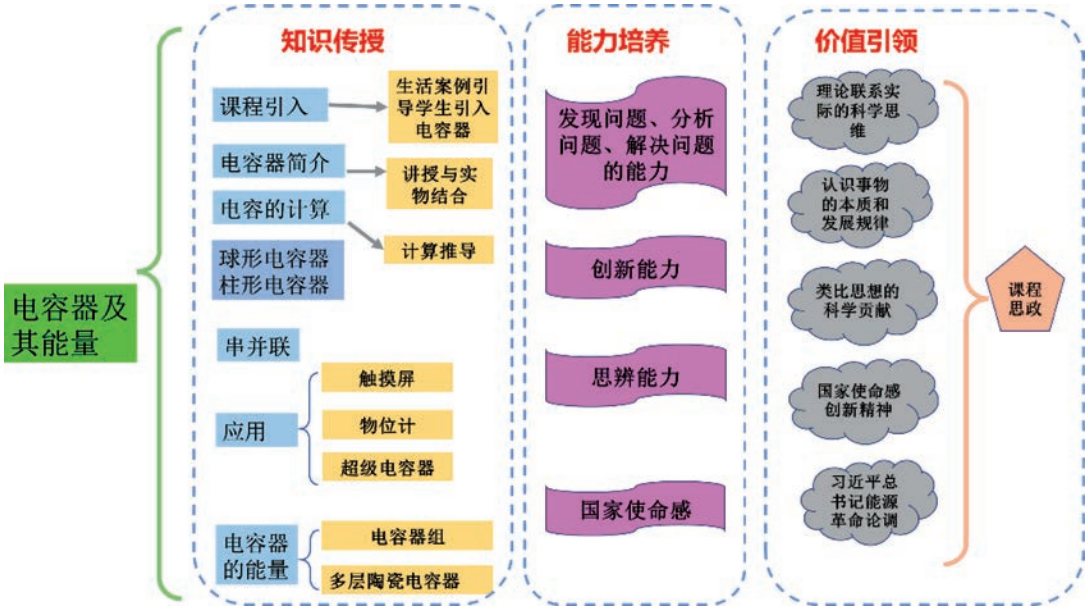


图1　课程设计思路

知道手指是如何控制触摸屏的呢？指纹识别器和电脑键盘的工作原理又是什么？任课教师通过回答这些常见电子产品与电容器间的关系引出本节课内容，展示相关多媒体信息如图 2 所示。上述的电器产品中都应用了电学中一种十分重要的元件，也是今天我们要学习的内容——电容器。与此同时在授课过程中融入课程思政元素，结合日常生活的常见电子产品，启发学生思考科技进步给人类带来的巨大飞跃，鼓励学生勤于思考，将理论知识与生活实际相结合的科学思维方式，增强学生的创新精神。通过大学公共基础课程培养理工类大学生的科学素养和创新精神。

2.2 课程内容与课程思政

典型思政内容一：课程内容从电容器的基本知识开始介绍，通过实物和动画的形式介绍电容器最基本的形式——平行板电容器。进一步，基于平行板电容器的构造，利用电位移的高斯定理详细推导平行板电容器的电容计算公式，得出 $C=\frac{\varepsilon_0\varepsilon_r S}{d}$。

此处需要重点强调，电容反映的是电容器储存电荷本领大小的物理量，电容只与电容器形状、大小和电介质种类有关，而与电量无关。通过这部分知识的讲解，引导学生思考科学问题的正确方式，能够认识事物的本质，培养学生发挥主观能动性，把感性的材料进行科学的思考，通过自身的科学知识，找到事物的本质和发展规律。

典型思政内容二：电容器的应用同样是本节课的重点和难点知识。首先，介绍触摸屏电容器的原理，与课程开始提出的问题进行呼应。手机、平板电脑等屏幕均采用的是电容式触摸屏，当手指滑动屏幕时手指与屏幕间形成耦合电容，因为人体是弱导体，当手指接触屏幕时，微弱的电流通过人体流走，引起电流的变化。进一步通过控制器计算变化的电流到屏幕四个端点的位置，从而精确计算触摸点位置，示意图如图 3 所示。

典型思政内容三：电容器的另外一个重要的应用则是超级电容器。超级电容器具有容量高、功率密度高、充放电效率高、寿命长、放置时间长、温度范围宽、环境友善等诸多的优点[8]。目前已经广泛应用到消费电子产品、电动汽车、内燃机车、电力系统和军事等领域[9]。通过超级电容器的最新研究进展引入科研与教学的结合点。超级电容使用的电极材料多为多孔碳材料，不同的碳材料在理化性能和微观结构等方面存在差异，使得电化学储能性质有所差异，导致超级电容器的性能差异巨大。进一步指出，电容活性炭材料是超级电容的关键材料，目前我国长期依赖进口来满足市场应用。因此，需要关注破解超级电容器储能的“卡脖子”难题。引导学生领悟，只有掌握了核心关键技术，才能够在科技进步和社会发展中掌握主动性，不受制于别国的影响。进一步寄希望于同学们能够积极投身到国家“卡脖子”的难题中，通过自身的努力，为国家的科技进步做出贡献。在此处通过重点培养学生关注基础创新，引导学生强烈的爱国主义感和建设强国的远大志向。

超级电容器不仅存在关键技术难题，同样涉及到国家的能源储备问题。结合学校地球科学背景，介绍习近平总书记的“深入推进能源革命加快



图 2 日常生活常见的电子产品

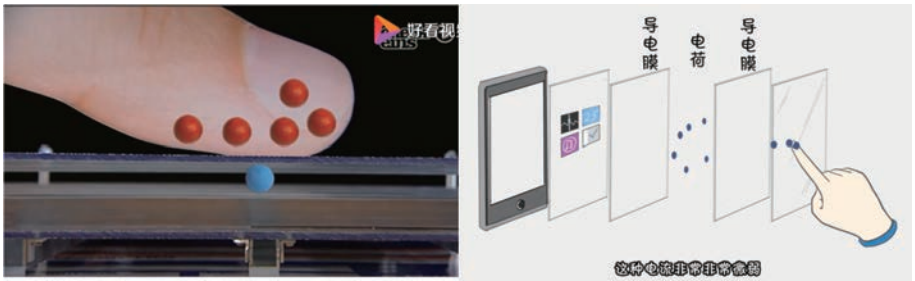


图 3 电容器触摸屏原理介绍

建设能源强国，确保能源安全”和“能源的饭碗必须端在自己手里”重要论调。能源是工业的粮食、国民经济的命脉。能源安全是关系国家经济社会发展的全局性、战略性问题，对国家繁荣发展、人民生活改善、社会长治久安至关重要。同时能源安全问题也关系到国家稳定，能源安全和地区战争、冲突一直以来都具有息息相关的联系。国际上关于能源问题引发的冲突时常发生，如近年来的东海争端，其背后就是对我国东海蕴藏的丰富石油和天然气等资源的争夺。因此，本部分通过引出与能源相关的问题，使学生理性分析和评价国家利益与能源安全的密切关系，进而培养学生的国家意识和全球视野，增强学生民族、社会责任感，培养学生热爱祖国的精神。

2.3 教学扩展

教学扩展是提升学生综合能力的重要环节，针对课程的授课情况，开展一系列的课后实践活动。其一是建议同学们在后续的日常生活中认识电容器元件的广泛应用领域，做到理论联系实际，认识到科技创新对于社会发展的重大驱动力。其二是引导学生在基础学科的学习中学会思考知识体系背后的科学问题，重点培养具有科学质疑精神、独立思考精神的思维方式。

3 结语

本案例在知识传授的同时，融入课程思政元素。课程内容一方面，引导学生构建电容器的电容及其能量方面的知识体系，课程内容与日常生活紧密结合，激发学生的学习兴趣，培养了学生提出问题、分析问题、解决问题的能力。另一方面，重点突出课程思政内容，实现学生对于知识体系和思政教育的全方位结合，提升了学生的家国情怀、责任使命感和马克思唯物主义精神的价值塑造，实现了思政教育的润物无声效果。

参 考 文 献

[1] 王青，忻蓓. 物理专业课程思政建设的认识与思考[J]. 中国大学教学，2021，3：42-54.

[2] 孟德忠. 大学物理与课程思政结合的思考[J]. 时代教育. 2020，27：188-190.

[3] 穆良柱. 物理课程思政教育的核心是科学认知能力培养[J]. 物理与工程，2021，31(2)：9-15.

[4] 杨玮枫，池凌飞，张宏丹，等. 大学物理类课程思政融合的探索与实践[J]. 物理与工程，2021，31(5)：52-55.

[5] 王小力. 大学物理课程思政研究与实践中国大学教学[J]. 2020，10：54-57.

[6] 王素元，张斌. 大学物理课程思政教学研究——以电磁感应教学为例[J]. 物理与工程，2021，31(6)：124-128.

[7] 马晓波，林妹平，曹志杰.“课程思政”理念下大学物理课堂教学探究与实——以多普勒效应为例[J]. 物理通报，2022，10：70-74.

[8] 陈英放，李媛媛，邓梅根. 超级电容器的原理及应用[J]. 电子元件与材料，2008，27(4)：6-9.

[9] 黄晓斌，张熊，韦统振，等. 超级电容器的发展及应用现状[J]. 电工电能新技术，2017，36(11)：63-70.

■

EXPLORATION AND PRACTICE OF IDEOLOGICAL AND POLITICAL TEACHING IN COLLEGE PHYSICS —TAKING “CAPACITOR AND ITS ENERGY”AS AN EXAMPLE

MENG Dezhong SHEN Kun LI Gengwei GAO Lu XING Jie WU Xiuwen HAO Huiying ZHAO Changchun ZHENG zhiyuan ZHANG Zili

(School of Science, China University of Geosciences (Beijing), Beijing, 100083)

Abstract It is a natural advantage for the integration of ideological and political elements into college physics curriculum. The implementation of this case enables students to acquire basic physical knowledge, cultivate their scientific literacy, patriotism and scientific innovation spirit. Furthermore, it enhances the national pride and self-confidence of the students. This teaching method realizes the teaching tasks of knowledge teaching, ability training and value shaping.

Key words college physics; curriculum ideology and politics; teaching; capacitor

新高考背景下的大中物理衔接课程建设的探索与实践

申　坤*　孟德忠　高　禄　郝会颖

（中国地质大学（北京），数理学院，北京　100083）

摘　要　本文在2021年度高等学校大学物理课程教指委大中物理教育衔接教学研究课题的支持下，记述了大中物理衔接在中国地质大学（北京）历时近两年左右的教学改革实践过程。从现状分析，大中物理衔接课程方案设计，全流程培养环节设计以及实施效果等多个维度，阐述了在常规大学物理教学过程中由于学生中学基础不同而产生的问题，讨论了大中物理衔接课程在本科低年级学生培养过程中的实施方案和效果，探究了开展大中物理衔接在本科生培养方面的重要意义，为未来的公共基础课程教学提供参考。

关键词　大中衔接，大学物理，教学评价，素质培养

大学物理作为广大工科专业学生必修的公共基础课，是工科各专业后续课程的重要基础，因此在工科专业学生的培养过程中起着非常重要的作用。近年来在高考模式改革的大背景下，与其他学科相比物理难度较大，不易得高分，导致高中生选考物理的人数逐年减少[1]。而由于现行的高中物理采取模块化教学，不选考物理的学生，仅需在高一完成“力学”、“电磁学”的学习，这就意味着很大部分学生在高中阶段并未就“热学”、“光学”等重要内容进行系统性学习[2]。

而与此形成鲜明对比的是，物理作为工科各专业的基础，是本科阶段重要的公共基础课。因此高中物理与大学物理内容上的断层，常常使得学生因基础过于薄弱而无法跟上课程进度。此外，由于学生来自不同的省份，高考方案和教学大纲等情况各异，基础参差不齐，也为老师的课堂教学带来了许多挑战[3]。因此开设因此开设大中衔接的物理预修课程势在必行。在此背景下，预修课程的课程内容设计，考核模式等成为了亟待解决的问题[4]。

1　现状分析

2022年春季针对大学物理教学效果，我们对我校一年级学生进行了问卷调查，调查人数1500余人，来自全国十余个省市，覆盖了我校所有工科专业。部分调查结果（图1～图3）显示，在热学、振动波动、光学模块，分别有23.82%，33.13%，27.83%的学生在高中阶段从未学习过，在相对论和量子物理部分，比例则高达48.65%和62.66%。说明在这些模块中，大中物理的教学内容确实存在较大的断层。此外，调研数据显示近30%的学生认为自身高中物理基础较为薄弱，且高中物理基础已成为制约大学物理学习效果的主要因素，占比达到40%。

对于大中物理衔接课程，超过80%的学生表达了对课程的欢迎态度。开设大中物理衔接课程，不仅有助于提升大学物理课程的教学效果，而且对于夯实物理基础以保证其他工科专业课程的顺利开展起到积极作用[5]。

收稿日期：2023-05-25

基金项目：高等学校大学物理课程教指委大中物理教育衔接工作委员会教学研究课题：W202111　“新高考背景下的大中物理衔接课程建设的探索与实践”；教育部产学合作协同育人项目，材料类专业《大学物理》课程教学改革，编号202102251006；中国地质大学（北京）校级教改项目，材料类专业大学物理教学内容改革及产学研体系构建，JG202143。

通讯作者：申坤，女，博士，副教授，主要从事物理教学科研工作，研究方向为锂离子电池电极材料的相变行为，k.shen@cugb.edu.cn。

引文格式：申坤，孟德忠，高禄，等. 新高考背景下的大中物理衔接课程建设的探索与实践[C]. 2023年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会，2023.

Cite this article：SHEN K，MENG D Z，GAO L，et al. Exploration and practice of the construction of university-high school physics bridging courses under the background of the new college entrance examination[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education，2023.（in Chinese）

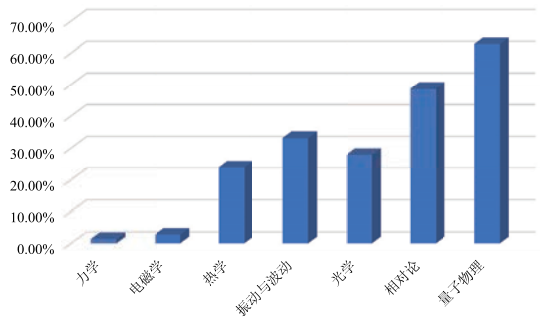


图1 我校2021级本科生在高中阶段未学过的物理内容

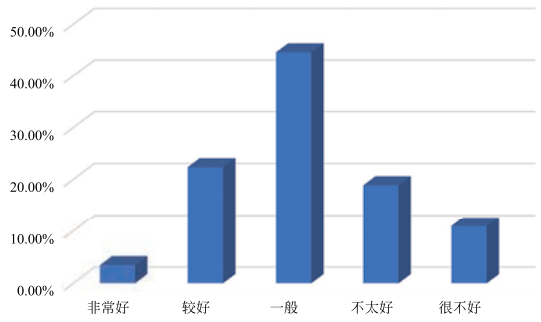


图2 2021级本科生自我评价的高中物理基础水平

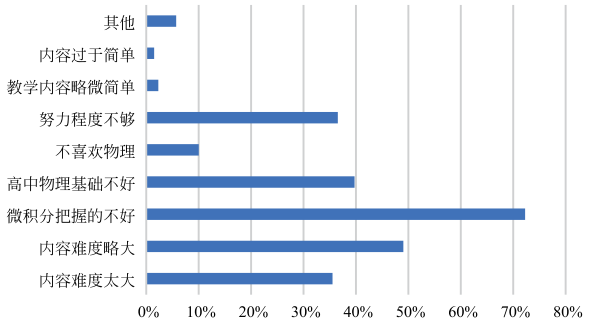


图3 2021级本科生目前学习大学物理的主要问题

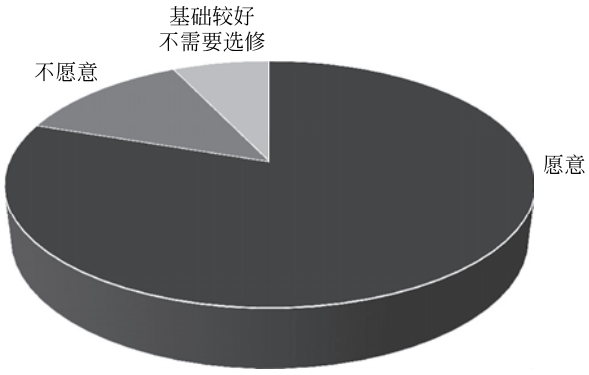


图4 学生选修大中物理衔接课的意愿

综上所述，如何基于我校各工科专业学生的基础特点，专业的实际需求，有的放矢地对《大学物理预修》课程进行课程内容设计和模式设计，是目前亟待解决的问题。

2 课堂内的大中衔接课程实施方案(《大学物理预修》课程内容设计)

1) 增加高等数学(微积分等)在大学物理课程中的应用的专题教学。

在以往的教学过程中，我们发现一年级学生对于矢量运算，微积分等方法在力学电磁学中的应用，总是教学过程中的难点。而在与高等数学的任课教师讨论以及对学生进行问卷调查后，我们发现学生在高数课上的重点学习内容和大学物理解题时常用的微积分和线性代数计算方法，并不完全一致。因此针对大学物理解题中常用的微积分和线性代数计算方法，结合力学电磁学中的典型例题，进行重点讲解，对于数学基础薄弱的大一学生，是很有必要的。此专题已在本校开设的《大学物理预修》选修课上进行讲授，课堂反馈良好。

2) 针对我校工科各专业学生的物理基础背景，进行《大学物理预修》的课程内容设计

通过对大一新生进行物理摸底考试，确定参加预修课程的学生名单。在第一学年秋季学期即开设32学时的《大学物理预修》选修课。根据前期的调研结果，许多学生在光学，热学，近代物理方面基础尤其薄弱。因此在课程内容方面，也将在这方面尽可能倾斜。具体设置如下：力学4学时，电磁学4学时，热学7学时，振动波动7学时，光学6学时，近代物理4学时。

3) 充分利用线上资源，翻转课堂等方式，尽可能满足不同水平的学生的学习需要

由于课时和课堂容量限制，且学生的基础水平参差不齐，预修课程拟采用线上线下混合模式开展教学，以满足不同基础水平的学生需求。前期的调研结果显示，力学、电磁学部分绝大多数学生在高中阶段有一定基础，可结合已有的线上课程资源，开展线上线下混合式教学。而针对光学、热学、近代物理等调研结果显示的学生基础薄弱的部分，则以线下传统课堂教学为主，巩固加强学生在这部分的知识基础[6-9]。

3 课堂外的大中物理衔接的培养环节设计

由于高中与大学阶段在人才培养模式和目标

上，存在较大的区别。高中阶段擅长做题的“好学生”，在大学工科教育注重实际应用和创新的背景下，经常显得“水土不服”。在实际的教学过程中，我们将此部分学生在学习过程中的问题也纳入到大中物理衔接的培养环节中来。针对此问题，对于中学物理基础好的学生，结合“中国大学物理学术竞赛”，“大学生创新创业计划”等课外创新实践活动，进一步培养和提升他们的创新能力和科学素养。结合课外物理竞赛和创新实践活动，建立多元化、立体化的人才培养模式。

4 具体实施步骤和方法

1）通过对新生进行物理水平摸底考试，建议基础较弱的学生参加《大学物理预修》课程。

2）通过线上线下混合式教学和翻转课堂等模式，在有限的课时范围内满足不同背景学生的需要。根据前期调研结果，针对大学物理解题中常用的微积分和线性代数基础内容开展专题教学，针对力学和电磁学内容开展线上预修课程资源建设，针对热学、光学等章节进一步完善课堂教学内容。

3）针对高中基础较好的学生，结合课外竞赛和创新实践活动，全方面立体化的提升学生的科学素养。

5 实施效果

已建设完成适合本校学生物理基础的大中物理衔接课程，并已运行一个学年。在过去一学年，共 38 人次选修了《大学物理预修》课程。我们跟踪了所有参与选修课程的学生的大学物理期末成绩（如下图 3 所示），发现绝大多数学生在参与了预修课成后，大学物理期末成绩有了显著提升，进一步说明了开设大中物理衔接课程的重要意义。

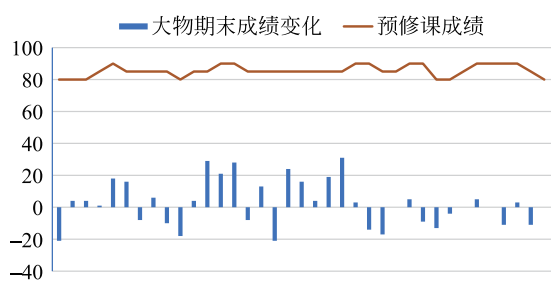


图 5 预修课程对期末成绩的影响

结语

本文详细回顾了本校开展大中物理衔接教学改革项目的过程设计，具体实践，以及效果评估的全过程。历时一年多的大众物理衔接教育教学改革在中国地质大学（北京）产生了积极效果，通过线上线下混合式教学，使学生的获益范围扩大到全校。本文对大中物理衔接教改项目的设计与思考，拟对本校未来的大学物理教学和其他兄弟院校的教学工作提供启示。

参 考 文 献

[1] 周鸣宇，王坤，李慧. 基于新高考背景下大中物理教学衔接研究[J]. 科教导刊（下旬），2019，33：157-159.
Zhou M Y，WANG K，LI H. Based on the research on the connection between college and middle school physics teaching under the background of the new college entrance examination[J]. The Guide of Science & Education，2019，33：157-159.（in Chinese）

[2] 叶伟国. 基于新高考模式下“大学物理”教学方法的探索与实践[J]. 物理与工程，2018，28（S1），54-58+62.
YE W G，Exploration and Practice of “University Physics” Teaching Method Based on New College Entrance Examination Mode[J]. Physics and Engineering，2018，28(S1)，54-58+62

[3] 熊伦. 大学物理与高中物理衔接教育的探讨[J]. 物理与工程，2012，22（1），59-60.
XIONG L，Discussion on bridging education between university physics and high school physics[J]. Physics and Engineering，2012，22(1)，59-60

[4] 孙光辉，龙云泽. 关于大学物理与中学物理衔接问题的教学研究探讨[J]. 物理与工程，2018，28（S1），59-62.
SUN G H，LONG Y Z. Teaching and Research on the Linkage between University Physics and Middle School Physics[J]. Physics and Engineering，2018，28(S1)，59-62

[5] 陈进. 新时代下中学物理与大学物理教学衔接的思考[J]. 教育观察，2021，10（31），49-51+63.
CHEN J. Thoughts on the Connection between Middle School Physics and University Physics Teaching in the New Era[J]. Educational observation 2021，10(31)，49-51+63

[6] 何蕾蕾，彭朝阳. 从高考题探析中学物理与大学物理衔接——以高观点下的霍尔效应为例[J]. 物理通报，2021，No. S2，52-56.
HE L L，PENG Z Y. Exploring the Connection between Middle School Physics and University Physics from College Entrance Examination Questions：A Case Study of Hall Effect from High Viewpoint[J]. Physics Bulletin，2021，S2，

52-56

[7] 李玉强,鹿桂花. 大学物理和中学物理教学内容衔接的探讨——以静电场为例[J]. 物理与工程,2016, 26 (1), 76-79.
LI Y Q, LU G H. Discussion on the Connection between University Physics and Middle School Physics Teaching Content——Taking Electrostatic Field as an Example [J], Physics and Engineering, 2016, 26(1), 76-79

[8] 朱云龙,任永志,李玉祥. 大学物理与高中物理光学部分的教学衔接研究——以夫琅禾费单缝衍射的讲解方法为例[J]. 物理与工程,2023, 33 (2), 31-35+44.
ZHU Y L, REN Y Z, LI Y X. Research on the Teaching Connection between College Physics and High School Physics Optics Section——A Case Study of Interpretation Method of Single-slit Diffraction in Fulanghefei[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(2), 31-35+44

[9] 刘小贤,卫蓉蓉,唐春红. 大中物理衔接教学中加强形成性评价的思考——以"热力学第一定律"为例[J]. 南京工程学院学报(社会科学版),2022, 22 (4), 89-92.
LIU X X, WEI R R, TANG C H. Thinking on Strengthening Formative Evaluation in the Bridging Teaching of Physics in College and Middle School——Taking the "First Law of Thermodynamics" as an Example[J]. Journal of Nanjing Institute of Technology. 2022, 22(4), 89-92

■

EXPLORATION AND PRACTICE OF THE CONSTRUCTION OF UNIVERSITY-HIGH SCHOOL PHYSICS BRIDGING COURSES UNDER THE BACKGROUND OF THE NEW COLLEGE ENTRANCE EXAMINATION

SHEN Kun MENG Dezhong GAO Lu HAO Huiying

(School of Science, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083)

Abstract With the support of the 2021 College Physics Course Teaching and Research Project, this paper describes the teaching reform practice of the university-high school physics bridging courses in China University of Geosciences (Beijing). From the analysis of the current situation, the design of the university-high school physics bridging course, the design of the student training and the implementation effect, the problems arising from the different foundations of students in the regular university physics teaching were expounded. The implementation effect of the university-high school physics bridging course in the development of undergraduate students were discussed, and the significance of the university-high school physics bridging course in the undergraduate training was explored, so as to provide reference for the future teaching of university basic courses.

Key words university-high school physics bridging courses; college physics; teaching evaluation; quality training

在大学物理教学中突显科学思维方法的探索和实践

陈　静*　肖　萌　何南燐　刘凤凤

（中国人民武装警察部队警官学院，四川 成都　610213）

摘　要　科学思维方法是大学物理课程思政的一个重要方面，在教学中采用大学物理军事案例教学模式，即军事应用案例—物理问题—实验探究—理论分析—解决问题—迁移拓展，结合认知过程显性化科学思维方法的训练。如《圆孔衍射 光学仪器的分辨本领》中，从互动实验发现和提出问题，建立圆孔理想模型，采用控制变量法探究圆孔孔径和光波波长对圆孔衍射图样的影响；在理论分析环节摒弃传统直接给出艾里斑半角公式的做法，采用类比猜测，演绎推导、归纳总结的方法得到艾里斑半角公式；应用最小分辨角求解恰能分辨时，两物点在视网膜上成像之间的距离，发现与视神经元尺寸相当，从物理的角度感受生命的进化，倡导学科融合。

关键词　科学思维方法；课程思政；大学物理教学；圆孔衍射

引言

2020年教育部印发的《高等学校课程思政建设指导纲要》[1]的通知特别指出“理学类专业课程，要注重科学思维方法的训练和科学伦理的教育，培养学生探索未知、追求真理、勇攀科学高峰的责任感和使命感”。从物理学知识能力结构模型[2]（如图1）来看，物理学的基础内容是由实验（事实）、物理思想（逻辑、方法论等）、数学（表述形式或计量公式）三方面构成，其中科学思维方法能传送物理现象与物理知识，是物理认知活动的中间场所，起到承上启下的作用。大学物理教指委主任王青、副主任王小力、南京航空航天大学副校长施大宁和北京大学穆良柱等专家在对《纲要》进行解读时也纷纷指出：科学思维方法是大学物理课程思政的一个重要方面[3-7]。对于如何将科学思维方法融入课程教学，穆良柱结合认知过程开展物理方法的训练[8]，吕斌等借助课程思政的途径挖掘马克思主义辩证方法论，使学生从哲学层面上理解和把握物理知识[9]，我们在教学中也聚焦科学思维方法，传递物理思想，以多普勒效应一节内容为例，探索“相对运动”与“频率变化”之间的联系和统一[10]。但目前的大学物理教学仍缺少系统的科学思维方法梳理归纳和显性化。

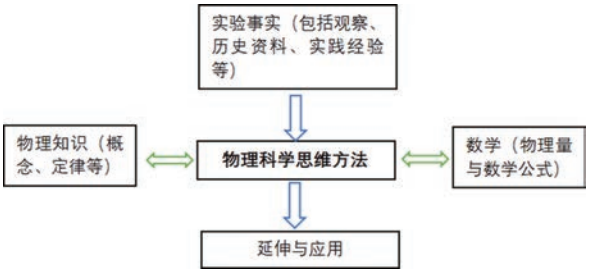


图1　物理学知识能力结构模型

1　在教学过程中显性化科学思维方法

大学物理富含丰富的科学思维方法，如理想模型法建立质点、刚体、理想气体、点电荷、电流元等模型；思想实验法如伽利略的萨尔维迪客号大船实验、牛顿大炮设想、爱因斯坦的追光实验等；反证法证明电场线不相交，反证法证明空腔内没有电荷时，空腔导体的净电荷分布在外表面，反证法证明楞次定律符合能量守恒定律等。在教学中

收稿日期：2023-05-26

基金项目：2022年高等学校“大学物理”和“大学物理实验”课程思政案例立项（DWJZW2022KCSZ-22）；军队院校物理联席协会教育教学研究课题（2023JWL013）；武警警官学院教学成果培育课题资助。

通讯作者：陈静，女，讲师，硕士，主要从事大学物理教学工作，892352470@qq.com。

引文格式：陈静，肖萌，何南燐，等. 在大学物理教学中突显科学思维方法的探索和实践[C]. 2023年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会，2023.

Cite this article: CHEN J, XIAO M, HE N L, et al. The exploration and practice of highlighting scientific thinking method in university physics teaching[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education, 2023. (in Chinese)

显性化科学思维方法，是为了传递守恒、对称、统一等物理思想，促进物质观、时空观、相互作用观等物理观念的形成。如牛顿在猜想平方反比的基础上，根据开普勒三定律推理出万有引力定律，库伦通过类比万有引力定律猜想并实验验证真空中两个点电荷之间的库伦力，安培类比前两种模型猜想推理并实验验证两个电流元之间的安培力，麦克斯韦则根据法拉第电磁感应提出位移电流假说。这其中显性化的科学思维方法就是猜想、类比、推理等方法，蕴藏了统一、对称的思想，有利于物质观和相互作用观的形成。

我们十分赞同穆良柱的观点：物理思维方法的训练一定要结合认知过程来开展[7-8]，因此在课堂教学设计上，我们采用大学物理军事案例应用教学模式，如图2，在教学过程中突出科学思维方法，形成大学物理课程思政教学案例。首先，从军事应用实例中发现和提出问题，采用简化、转换、控制变量等方法进行实验探究寻找规律。之后，通过建立模型并运用猜想、类比、逻辑推理、归纳总结等方法对问题进行理论分析，建立公理认知。应用理论分析的结果解释实验现象，达到理论与实验自洽。进一步应用获得的物理知识解决从军事应用实例中发现和提出的问题。最后，举一反三，将知识迁移类比，拓展延伸至其他军事案例。

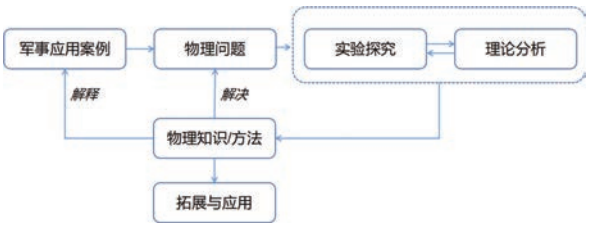


图2　大学物理军事案例教学模式

2　教学实践案例——圆孔衍射 光学仪器的分辨本领

本文以《圆孔衍射 光学仪器的分辨本领》一节为例，采用大学物理军事案例教学模式在教学过程中突显科学思维方法。教学设计如图3，通过

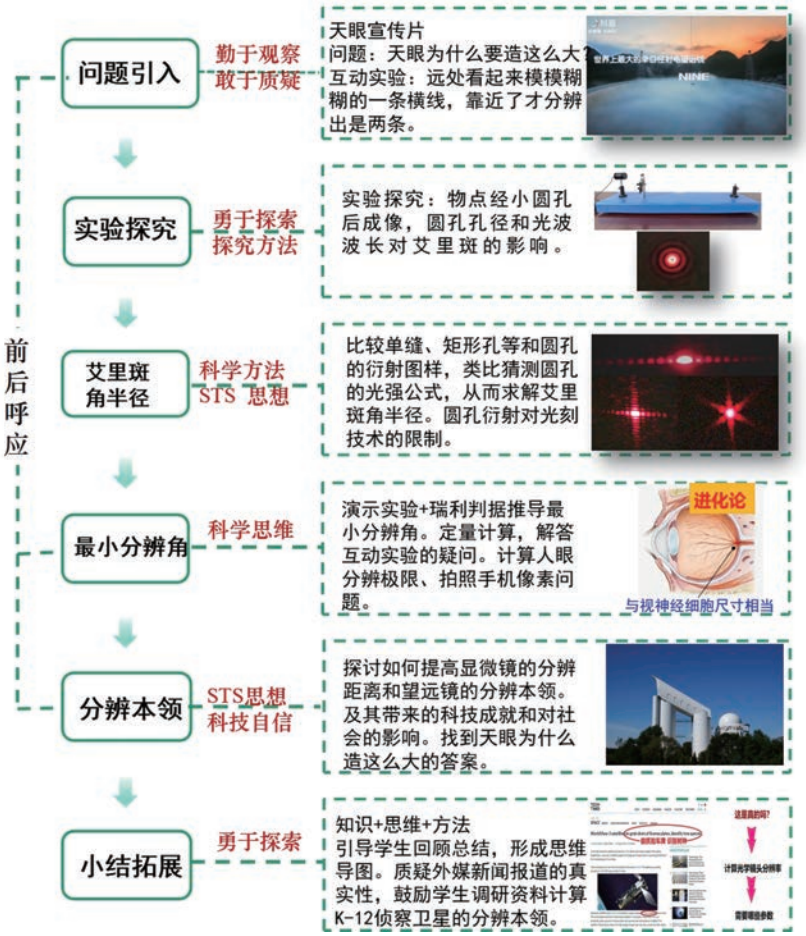


图3　教学设计

实验探究圆孔衍射现象以及圆孔孔径、光波波长对艾里斑大小的影响，理论推导艾里斑半角公式，结合瑞利判据求得最小分辨角，以此解决人眼以及光学仪器的分辨本领问题，体验科学探究的过程，润物细无声地融入思政元素。具体融入方法为：①通过互动实验以及实验探究圆孔夫琅禾费衍射现象，掌握实验探究的方法，培养敢于质疑、勇于探索的科学精神。②通过比较单缝、矩形孔、三角孔的衍射图样，从单缝的光强公式类比猜测矩形孔、三角孔的光强公式，再合理外推至圆孔的光强公式，从而求得艾里斑半角公式。掌握逻辑推理、演绎推导、类比、归纳总结等科学方法。③应用最小分辨角求解恰能分辨时，两物点在视网膜上成像之间的距离，发现与视神经元尺寸相当，从物理的角度感受生命的进化，倡导学科融合。④应用艾里斑角半径探讨光刻技术的发展、应用最小分辨角求解人眼的分辨极限和拍照手机像素问题、应用分辨本领解析电子显微镜，望远镜（Lamost、CSST、FAST），融入 STS 思想，提升科技自信，树立科技报国的决心。

实验探究圆孔衍射：发现并提出问题—猜想假设—设计实验—实施实验—得出结论—总结交流。从互动实验中发现并提出问题：物点经小圆孔后成像是什么？动手实验，观察现象，发现点经小圆孔后成像并不是点，而是以几何投影点为中心的像斑（明暗相间的同心圆环）。提出问题：为什么点经大圆孔后成像是点，经小圆孔后成像是斑？——衍射。那么哪些因素会影响圆孔衍射的光斑？猜想：圆孔尺寸和光波波长，且孔径越小衍射现象越明显，波长越长衍射现象越明显。该如何设计实验验证猜想？——控制变量。通过实验探究过程，显性化实验探究的科学方法，培养勇于探索的科学精神。

理论推导艾里斑的半角公式。在大学物理教材中对艾里斑半角公式是直接给出的，并没有推导，不利于学习。专业的光学书中对该公式的推导都是用惠更斯—菲涅尔原理积分求解，数学运算量大，也不利于学习。于是，我们弱化数学运算，强化物理方法，采用演绎推导、类比、归纳总结的方法求得艾里斑的半角公式。思路：从障碍物形状上考虑，要从单缝变为圆孔，可以先将单缝收缩，变成矩形孔，单缝只有一个方向有衍射，矩形孔两条边方向有衍射，三角孔，三个方向有衍射，五边形……正 n 边形，n 趋于无穷大，就得到了圆孔。采用逻辑演绎推理的方式，通过比较单缝、矩形孔、三角孔的衍射图样（实验获得的），从单缝夫琅禾费衍射的光强公式类比猜测矩形孔、三角孔的光强公式，再合理外推圆孔夫琅禾费衍射的光强公式。利用一阶贝塞尔函数的性质画出圆孔夫琅禾费衍射光强分布曲线，找到第一级暗环的衍射角，从而求得艾里斑半角公式。

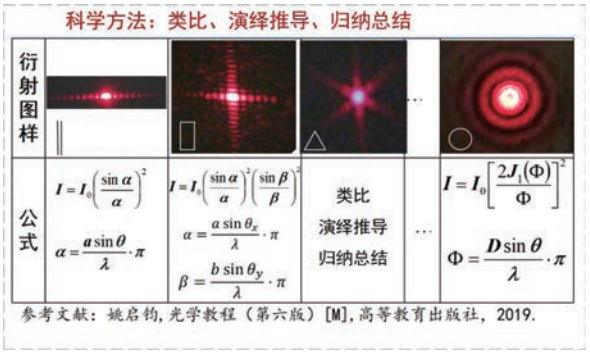


图 4　理论分析推导光强公式

解决问题：定量计算互动实验中距离白板多远的同学恰能分辨两条横线，以及恰能分辨时视网膜上两艾里斑之间的距离。理论联系实际，物理贴近生活，应用最小分辨角计算眼睛的分辨极限，发现恰能分辨时两物点在视网膜上形成的艾里斑中心间距刚好与视神经细胞尺寸相当。若视神经细胞尺寸远大于艾里斑半径，那么一个视神经细胞上将有多个艾里斑，而每个艾里斑代表不同的信息，这将导致视神经细胞会丢失信息。若视神经细胞远小于艾里斑半径，那么一个艾里斑将成像在多个视神经细胞上，多个视神经细胞接收和传递相同的信息，这是视神经细胞资源的浪费。可见，尺寸相当是最优化的结构。而这并不是巧合，是长期的自然选择和自适应过程，从物理的角度感受生命的进化，倡导学科融合。

在课堂教学过程中通过实验探究、理论推导和拓展应用等环节显性化科学思维方法，结合认知过程开展物理方法的训练。课后，学生进行小组探讨，应用课堂掌握的知识、科学思维方法对拓展题目：侦察卫星的分辨本领进行研究性学习，判断媒体新闻报道的真实性，培养质疑的科学态度和勇于探索的科学精神。小组成员于“5 分钟物理”活动中展示，汇报交流研究性学习的成果。需要说明的是，经长期实践后，部分同学通过拓展题

目的探究性学习和“5分钟物理”活动，对应用科学思维方法解决开放性题目产生了浓厚兴趣，于中国大学生物理学术竞赛和物理实验竞赛中取得优异成绩。

3 结语

从《纲要》和专家解读中我们发现，科学思维方法是大学物理课程思政的一个重要方面。对于军校非物理专业学员，物理知识随着时间的推移会慢慢地被遗忘，而最后剩下的科学思维方法才是用于解决生活、军事训练和武器装备问题的关键。于是我们在教学中结合认知过程培养科学思维方法，采用大学物理军事案例教学模式，即军事应用案例—物理问题—实验探究—理论分析—解决问题—迁移拓展，在实验探究、理论分析和拓展应用环节显性化科学思维方法的训练。如在《圆孔衍射 光学仪器的分辨本领》一节中，在实验探究环节采用理想模型法建立圆孔模型、采用控制变量法探究圆孔孔径和光波波长对圆孔衍射图样的影响；在理论分析环节通过比较单缝、矩形孔、三角孔的衍射图样，从单缝的光强公式类比猜测矩形孔、三角孔的光强公式，再合理外推至圆孔的光强公式，演绎推导艾里斑半角公式；在拓展应用环节，应用最小分辨角求解恰能分辨时，两物点在视网膜上成像之间的距离，发现与视神经元尺寸相当，从物理的角度感受生命的进化，倡导学科融合，突显关联、类比、推理的科学思维方法。

参 考 文 献

[1] 高宁，王喜忠. 全面把握《高等学校课程思政建设指导纲要》的理论性、整体性和系统性[J]. 中国大学教学，2020(9)：17-22.
Gao Ning, Wang Xizhong. Comprehensively grasp the theory, integrity and systematization of the Guiding Outline for Ideological and Political Construction of Curriculum in Colleges and Universities [J] Chinese University Teaching, 2020(9): 17-22.

[2] 李正福，李春密，邢红军. 物理教学中的科学方法显性教育[J]. 教育科学研究，2011(1)：54.
LI Zhengfu, Li Chunmi, Xing Hongjun. Explicit education of scientific method in Physics Teaching[J]. Research in Educational Sciences，2011(1)：54.

[3] 王青，析蓓. 物理专业课程思政的思政建设的认识和思考[J]. 中国大学教学，2021(3)：52-54.
Wang Qing, Xie Bei. Understanding and thinking on Ideological and political Construction of Physics Major Curriculum [J]. Chinese University Teaching and Learning, 2021(3): 52-54.

[4] 王小力. 大学物理课程思政研究与实践[J]. 中国大学教学，2020(10)：54-57.
WANG Xiaoli. Ideological and Political Research and Practice of College Physics Course[J]. China University Teaching and Learning, 2020(10)：54-57.

[5] 王青. 课程思政背景下面向未来的课程思政建设[J]. 物理与工程，2021，31：3-6.
Wang Qing. Future-oriented Curriculum Ideological and Political Construction under the Background of Curriculum Ideological and Political[J]. Physics and Engineering，2021，31：3-6.

[6] 江爱华，施大宁，马静等. “金课”建设的时代背景、核心任务及制度保障[J]. 中国高等教育，2019(24)：53-54.
Jiang Aihua, Shi Daning, Ma Jing et al. The historical background, Core tasks and system Guarantee of “Golden Course” construction [J]. China Higher Education, 2019(24): 53-54.

[7] 穆良柱. 物理课程思政教育的核心是科学认知能力培养[J]. 物理与工程，2021，31(2)：9-15.
Mu Liangzhu. The core of ideological and political education in physics curriculum is the cultivation of scientific cognitive ability[J]. Physics and Engineering, 2019，31(2)：9-15.

[8] 穆良柱. 什么是物理方法[J]. 大学物理，2018，37(2)：18-21.
Mu Liangzhu. What is Physical method [J]. University Physics，2018，37(2)：18-21.

[9] 吕斌，陈乃波，高凡等. 大学物理方法论教学的思政探索[J]. 物理与工程，2021，31.
Lv Bin, Chen Naibo, Gao Fan et al. Ideological and political Exploration of University Physics Methodology Teaching [J]. Physics and Engineering，2021，31.

[10] 陈静，郑春华等. 基于相对性原理的多普勒效应公式推导[J]. 大学物理，2023，42(1)：11-13.
Chen Jing, Zheng Chunhua et al. Derivation of Doppler effect formula based on relativity principle[J]. University Physics，2023，42(1)：11-13.

■

THE EXPLORATION AND PRACTICE OF HIGHLIGHTING SCIENTIFIC THINKING METHOD IN UNIVERSITY PHYSICS TEACHING

CHEN Jing XIAO Meng HE Nanlin LIU Fengfeng

(Officers college of PAP, Chendu, Sichuan 610213)

Abstract Scientific thinking method is an important aspect of ideological and political thinking in college physics course. The military case teaching mode of college physics is adopted in teaching, that is, military application case—physical problem—experimental inquiry—theoretical analysis—problem solving—transfer and expansion, combined with the training of cognitive process explicit scientific thinking method. For example, in the Resolution Power of Optical Instruments with Circular Hole Diffraction, problems are found and raised through interactive experiments, and the ideal model of circular hole is established. The influence of circular hole aperture and optical wave wavelength on circular hole diffraction pattern is explored by using control variable method. In the process of theoretical analysis, we abandon the traditional method of directly giving the half Angle formula of Airy spot, and get the half Angle formula of Airy spot by analogy, deduction, deduction and summary. When the minimum resolution Angle is used to solve the exact resolution, the distance between the two object points on the retina imaging is found to be the same size as the optic neuron. It can feel the evolution of life from the physical point of view, and advocate the integration of disciplines.

Key words Scientific thinking method; Curriculum ideological and political; College physics teaching; Circular aperture diffraction

基于 Simdroid 的大学物理实验仿真教学模块设计

蒋涵文　花　蕾*　方　恺

（同济大学物理科学与工程学院，上海　200092）

摘　要　数值仿真是科学研究方法之一，为物理实验教学改革的内容和方向。大学物理实验仿真教学模块依托国产自主开发的有限元软件 Simdroid，由教师指导教学和学生自主开发两个部分组成，旨在让学生了解软件仿真原理，掌握基本分析方法，充分发挥学生的创新性和自主性，让学生独立分析和解决实际问题。在“新工科”背景下，仿真教学模块有助于培养学生的工程思维、批判性思维、自主学习能力、民族自信心和自豪感，鼓励学生自主学习和探索创新。

关键词　大学物理实验；数值仿真；Simdroid

“新工科”背景下，数值仿真作为科学研究方法之一，成为物理实验课程的组成部分，也是教学改革的重要方向[1]。“新工科”建设要求在教学中要把握新工科人才的核心素养，注重培养学生设计思维、工程思维、批判性思维、数字化思维、自主学习能力、团队协作能力和跨学科交叉融合能力，以国家重大战略为重点，引领行业发展[2]。为响应“新工科”建设要求，高校要围绕“坚持学生为本、注重工程训练、强化实践能力、培养自主创新”的育人理念，精准把握国家战略和行业发展方向，培养助力经济转型升级的创新型工程人才[3,4]。

《大学物理实验》课程是高等学校理工科大学进行科学实验训练的基础课程，也是学生学习实验方法、锻炼实验技能、培养研究思维不可缺少的学习环节，对推进新工科建设、培养创新型卓越工程人才具有重要意义。同济大学的《大学物理实验》作为本科生必修课程，每年面向近三千名学生，有着庞大的学生基础。

仿真教学模块作为《大学物理实验》课程的一部分，把信息技术融入课程教学，探索在线教学模式是开展物理实验系列课程建设的重要工作。数值仿真实验教学是高等教育信息化建设和实验教学示范中心建设的重要内容，是当前实验教学改革的新趋势。为了深入贯彻《国务院办公厅关于深化产教融合的若干意见》（国办发[2017]95 号）精神，落实《教育部工业和信息化部中国工程院关于加快建设发展新工科 实施卓越工程师教育培养计划 2.0 意见》（教高[2018]3 号）要求，《大学物理实验》中的本教学模块，结合同济大学物理科学与工程学院的学科优势，大学生物理学科竞赛的创新需求，以及北京云道智造公司的 Simdroid 仿真开发平台，推动本科人才培养、促进物理实验的新一轮数字化革新。

Simdroid 作为完全国产的仿真软件，把该平台融入教学，可以增强学生的民族自信心和自豪感，将思政教育融入大学物理实验教学中，可让实验中所蕴含的思政元素被学生自然吸收，更加有利于培养学生的科学素养，真正达到教书育人的目的，体现立德树人的精髓[5]。在教学模块设计中，基于前沿的 CAE 技术，对教学进行数字化升级；以仿真 APP 作为提交作业的载体，使课程评价多式多样化；以工业仿真进学校课堂，促进新技

收稿日期：2023-05-27

基金项目：教育部产学合作协同育人项目（项目号：220906517230055）；同济大学实验教学改革项目（项目号：1370104326）；同济大学 2023 年精品公共基础课程建设项目（项目号：1370104330/002）。

作者简介：蒋涵文，女，助教，主要研究方向为物理实验教学和量子光学，22666509@tongji.edu.cn。

通讯作者：花蕾，女，助教，主要研究方向为物理实验教学和计算机科学，hualei@tongji.edu.cn。

引文格式：蒋涵文，花蕾，方恺. 基于 Simdroid 的大学物理实验仿真教学模块设计[C]. 2023 年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会，2023.

Cite this article: JIANG H W, HUA L, FANG K. Design of simulation teaching module for university physics experiment on Simdroid [C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education, 2023. (in Chinese)

术形式下的人才培养模式改革。

1 目的和意义

物理仿真研究方法指的是从物理原理中抽象出物理模型，利用计算机仿真技术将其转换为适合在计算机上运行的仿真模型，然后对仿真输出结果进行分析的一种科学研究方法。

模型设计是仿真计算的基础，用物理的或抽象的系统来描述系统的某些行为特征[6]。通过提取主要变量和关键因素，将研究对象简化，建立模型。通过计算机仿真技术来研究连续物理系统，一般是基于微分（或偏微分）方程，利用有限元分析的方法进行数值计算，使物理系统能够更直观地呈现在我们的面前，便于更准确地把握物理图像和解释物理绘景。仿真技术对图形、数据的处理依照真实事件所遵循的客观规律进行，过程中的每一步都遵循相关的数学物理方程，得到的实验数据、图像等结果具有真实性[7]。

计算机仿真的实现分为三个大的步骤：模型的建立、模型的转换和模型的仿真实验，即将研究对象的实质抽象成数学模型，通过计算机处理数学模型，输出这些模型的相关数据，从展现研究对象的某些特质[8]。

本教学模块作为《大学物理实验》课程的一部分，主要面向低年级本科生，旨在让学生开始了解物理仿真基本流程，初步掌握结构分析方法，开展自主研究和开发工作。学生在低年级接触仿真软件，有助于他们在后续的学习过程中，借用仿真软件，结合具体项目，更直观更深入地探究各种物理问题。

2 软件简介

Simdroid 是由北京云道智造科技有限公司开发的基于“仿真开发环境＋仿真 APP”模式的通用计算机辅助工程（CAE）平台。CAE 指利用计算机辅助求解复杂工程问题和优化设计研究对象力学性能、结构性能的一种数值分析方法。该平台具备自主可控的结构、电磁、流体和热四大物理场求解器和多物理场仿真内核，在统一友好的环境中为仿真工作者提供了前处理、求解分析和后处理工具，同时其内置的 APP 开发器支持用户以无代码化开发的方式便捷封装全参数化仿真模型及仿真流程，将仿真知识、专家经验转化为可复用的仿真 APP，实现知识变现。Simdroid 已经在电力、家电、医疗、电子信息、航空航天等行业领域得到了广泛的工程化应用。

仿真开发环境为用户进行仿真和仿真 APP 开发工作的平台，支持 CAD 建模、网格剖分、边界与载荷施加、物理场求解、结果数据可视化和仿真 APP 开发等。用于在此环境下，能够非常方便地将一个工程仿真流程开发形成仿真 APP。

3 仿真教学模块的教学设计

仿真教学模块采用理论课＋实验课的方式进行，理论课向学生讲授 Simdroid 软件仿真基本流程、有限元分析方法，并以结构物理场为例，讲授力学分析的研究对象、三大变量和三大方程，如图 1 所示。

实验课分为教师指导操作和学生自主开发两个部分，旨在培养学生能够基于 Simdroid 软件掌握结构设计、有限元分析和物理场仿真等方法，能够对所研究的物理问题进行建模、分析、计算和 APP 开发。

3.1 教师指导进行仿真软件应用的教学

本部分实验以铁钉模型的线性静力分析为例，向学生系统性讲解 Simdroid 软件仿真流程，如图 2 所示。仿真流程共分为前处理、求解、后处

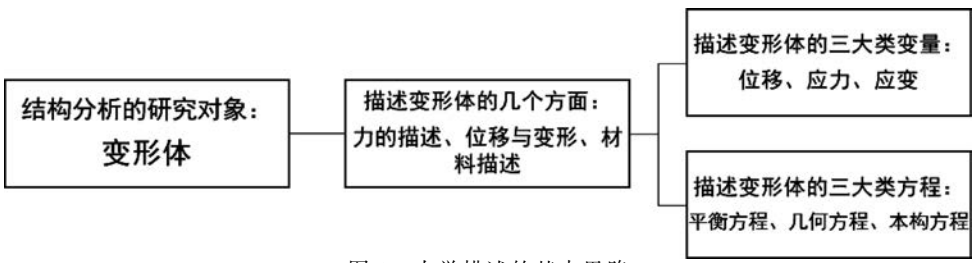


图 1 力学描述的基本思路

理和APP封装四个步骤。



图2 Simdroid软件仿真流程

前处理包含参数定义、三维建模、材料属性和网格剖分四个操作步骤。前处理的主要目的是确定模型参数、建立物理模型、赋予模型材料和应用有限元方法。以铁钉模型为例，主要参数如表1所示。根据所确定的模型参数，建立实体三维模型，为铁钉赋予密度、杨氏弹性模量等材料属性后，进行网格剖分，把三维模型离散化，用以进行有限元分析。三维模型和网格剖分结果分别如图3(a)和(b)所示。

表1 铁钉模型参数

名称	值	描述
r1	15mm	铁钉顶面半径
a	3mm	铁钉顶面厚度
r2	2mm	铁钉杆半径
b	75mm	铁钉杆长
c	15mm	铁钉尖长
ρ	7870kg/m3	铁钉密度
Y	1.9X1011N/m2	铁钉杨氏弹性模量

求解包含分析类型、连接关系和边界条件。结构分析是计算结构的力学特性，可用于分析各种物理模型的静力学和动力学特性，仿真开发环境的结构物理场分析具有以下分析类型：通用静力分析、准静力分析、非线性屈曲分析、线性静力分析、线性屈曲分析、频率分析、谐响应分析、反应谱分析、线性动力分析和随机响应分析等。分析类型即为选择其中一个合适的分析类型，相当于给计算机一个指令，让计算机使用对应的数学求解方法对模型进行计算，这里选择的是线性静力分析。连接关系为三维模型单元拼装成模型整体的过程中，各单元之间的连接关系（固定、耦合或接触）。边界条件则通过对平动、转动等自由度的约束，使计算机的数值积分运算能够得到唯一特解，这里我们对铁钉模型的顶面进行全自由度约束。

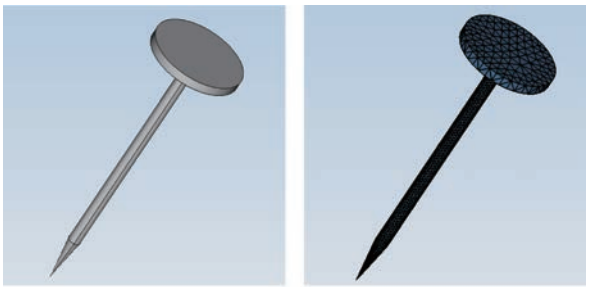


图3 铁钉模型前处理过程

(a) 铁钉几何模型图；(b) 铁钉网格剖分图

后处理即为计算结果和分析，对铁钉顶面施加一个竖直向下的压力，可以得到位移、应力等不同物理场的分布云图，如图4(a)和(b)所示。通过云图，可以很直观地得到不同位置产生的位移和收到的应力。

最后，进行APP封装，包括绑定参数和APP开发。通过设置参数上下限、集合各结果表单（几何模型、网格剖分、位移云图和应力云图）、添加功能按钮等，将前处理、求解和后处理的过程封装成APP，以实现调节参数，得到不同的几何模型对应的不同结果云图。图5为铁钉的静力分析APP中，铁钉顶面半径20mm，铁钉顶面厚度3mm，铁钉杆长80mm，铁钉尖长20mm，施加在铁钉顶面的压力为10N时，铁钉的应力分布云图。

3.2 学生自主进行模型设计和仿真开发

本部分实验为设计性实验，在了解了Simdroid软件仿真原理，掌握了基本分析方法后，学生自主选择研究对象、建立三维模型、设置求解条件、计算仿真结果、封装仿真APP，充分发挥学生

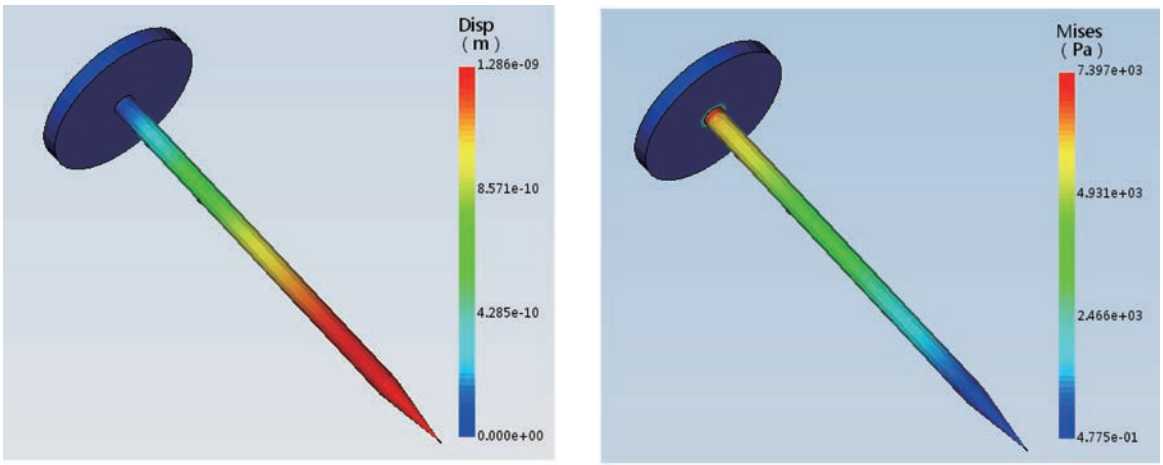


图 4　铁钉模型后处理过程

(a) 铁钉的位移云图；(b) 铁钉的应力云图

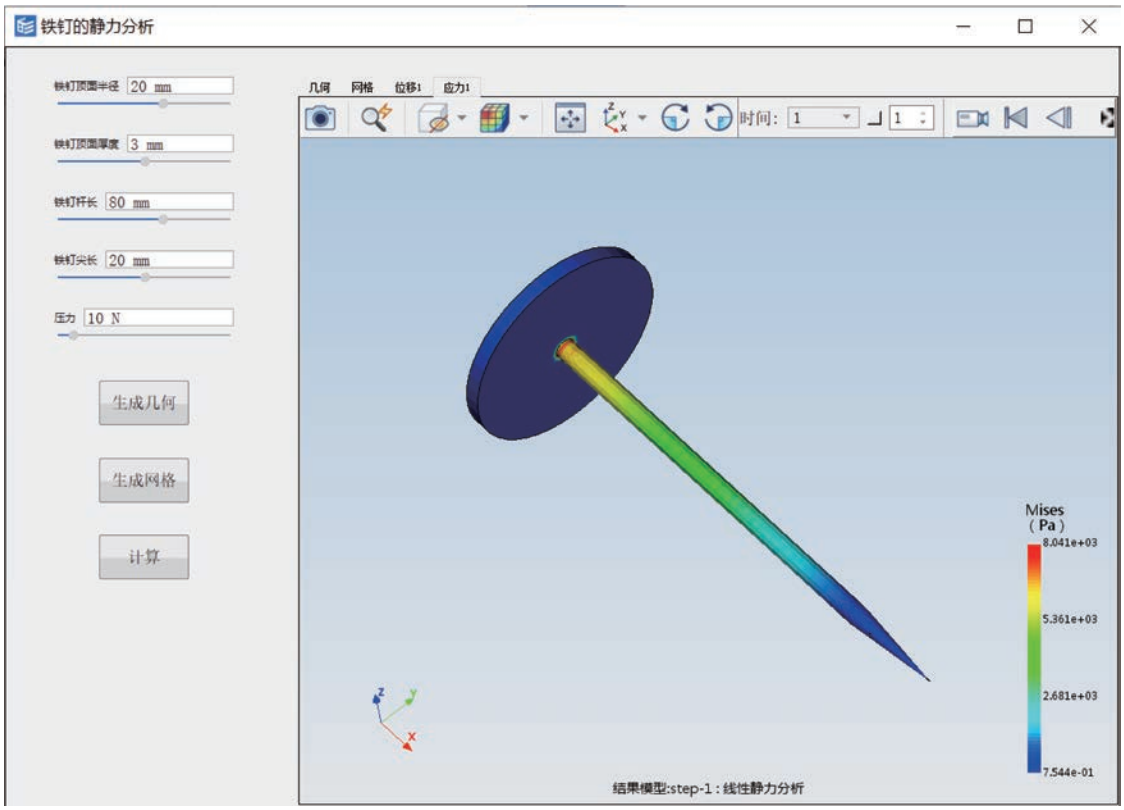
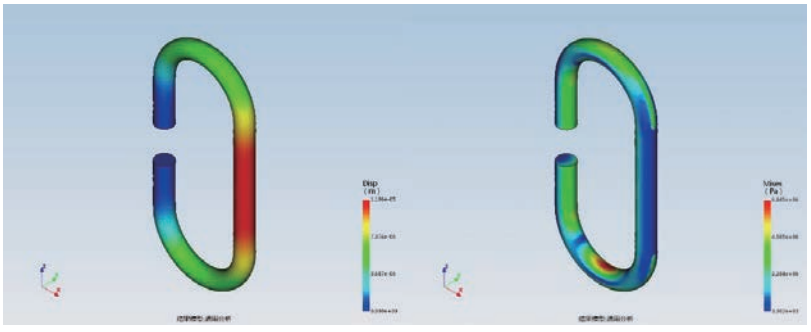


图 5　铁钉的静力分析 APP

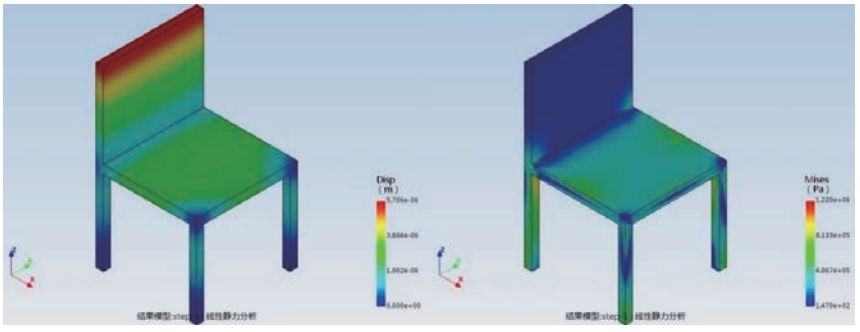
的创新性和自主性，让学生独立分析和解决实际问题，在培养学生实践能力的基础上，鼓励学生自主学习和探索创新。

设计性物理实验是一种介于基础教学实验与科学实验之间的教学实验。《非物理类理工学科大学物理实验课程教学基本要求》中指出，设计性或研究性实验的目的是使学生了解科学实验的全过程、逐步掌握科学思想和科学方法，培养学生独立实验的能力和运用所学知识解决给定问题的能力[9]。因此，在仿真教学模块中设置设计性实验，不仅使学生掌握仿真软件的操作方法，还提升了学生的创新型思维和独立解决问题的能力。

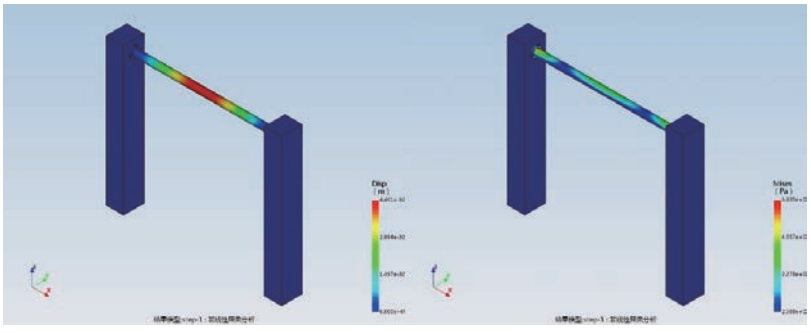
学生多数选择生活中常见的物理模型进行分析，如桌椅、铁链铁环、单杠、晾衣架等，直观地了解这些常见的物理模型在受到静力作用下，产生的位移和应力的分布，从而认识物理的本质，建立正确的物理概念和规律。图6为学生自主开发的仿真APP部分内容。通过自主进行模型设计和



(a) 铁链铁环的位移(左)和应力(右)云图



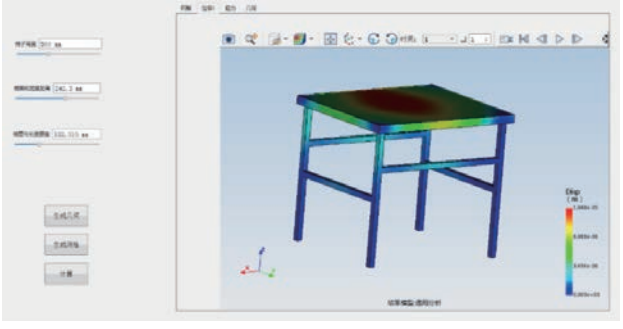
(b) 椅子的位移(左)和应力(右)云图



(c) 单杠的位移(左)和应力(右)云图



(d) 晾衣架的位移云图



(e) 椅子的静力分析仿真APP中位移云图

图6 (a)罐头封头的线性静力分析仿真结果(张宇轩)(b)椅子的线性静力分析仿真结果(宁子文)(c)单杠的线性静力分析仿真结果(张宇轩)(d)晾衣架的线性静力分析仿真结果(胡文沣)(e)椅子的静力分析仿真APP(颜涛)

(a) 铁链铁环的位移(左)和应力(右)云图；(b) 椅子的位移(左)和应力(右)云图；(c) 单杠的位移(左)和应力(右)云图；(d) 晾衣架的位移云图；(e) 椅子的静力分析仿真APP中位移云图

仿真开发，使学生尝试了仿真实验从设计、实施、得到结果到撰写实验报告进行分析与讨论的全过程，培养了学生基本的科研素养和科研习惯，锻炼了学生的创新思维，增加了学生的成就感。

在实验过程中，充分发挥学生的主体作用，不断地挖掘学生的潜力和培养学生的综合素质。相较于传统实验，设计性和研究性实验的教学目标重在培养学生综合运用所学知识分析解决实际物理问题的能力、开放性思维和创新意识[10-11]。

4 结语

本文介绍了基于 Simdroid 的大学物理实验仿真教学模块设计。本学期，相关仿真教学模块作为大学物理实验的自选实验项目之一，向大一本科生开放，广受学生欢迎，申请学习本实验的学生人数一百余人。教学中，实验课分为教师指导操作和学生自主开发两个部分，让学生了解 Simdroid 软件仿真原理，掌握基本分析方法，充分发挥学生的创新性和自主性，让学生独立分析和解决实际问题，在“新工科”背景下，培养学生的工程思维、批判性思维、自主终身学习能力、团队协作能力、跨学科交叉融合能力，鼓励学生自主学习和探索创新。在进一步的教学研究和实践中，将拓展基于 Simdroid 的大学物理实验仿真项目数量，并与工程实践相结合，拓展教学内容，提高教学水平。

参 考 文 献

[1] 沈韩，赵福利，方奕忠，等. 结合定量仿真的虚实结合物理实验教学模式[J]. 物理与工程，2020，30(5)：102-106.
SHEN H，ZHAO F L，FANG Y Z，et al. Virtual-reality combined physics experimental teaching mode based on quantitative simulation[J]. Physics and Engineering，2020，30(5)：102-106. (in Chinese)

[2] 国务院关于印发《中国制造 2025》的通知[J]. 中华人民共和国国务院公报，2015(16)：10-26.

[3] 张映辉. 适应新工科建设的大学物理实验课程体系与教学方法探索[J]. 物理与工程，2021，31(6)：159-162.
ZHANG Y H. An exploration of establishing college physics experiments teaching systems and methods adapted to the new engineering[J]. Physics and Engineering，2021，31(6)：159-162. (in Chinese)

[4] 赵晓丽，李铁磊，吴迪，等. 新工科背景下基于 OBE 理念的创新实践课程教学设计优化路径[J]. 南方农机，2023，54(11)：161-166.
ZHAO X L，LI T Lei，WU D，XIAO G，et al. Optimization of teaching design of innovative practical courses based on obe concept under the background of new engineering engineering[J]. Agricultural Mechanization Synthetic Study，2023，54(11)：161-166. (in Chinese)

[5] 史新伟，李杏瑞，祝柏林，等. 实践育人，践行思政——基于大学物理实验的课程思政教学设计[J]. 物理与工程，2023，33(1)：77-82.
SHI X W，LI X R，ZHU B L，et al. Practical education and political practice—Ideological and political teaching design based on College Physics Experiment[J]. Physics and Engineering，2023，33(1)：77-82. (in Chinese)

[6] 邓明森. 基于计算机仿真技术的氢原子电子云图模型. 贵州教育学院学报(自然科学)[J]. 2005，16(2)：35-37.
DENG M S. Hydrogen electronic cloud model based on computer simulation[J]. Journal of Guizhou Educational College (Natural Sciences)，2005，16(2)：35-37. (in Chinese)

[7] 胡敏. 计算机仿真技术在物理教学中的应用浅探[J]. 计算机工程与科学，2001(23)：58-67.
HU M. Elementary research on the application of computer simulation in physics teaching[J]. Computer Engineering & Science，2001(23)：58-67. (in Chinese)

[8] 周佩娟.《模拟电路》课程的计算机仿真教学[J]. 管理观察，2009(36)：109-110.

[9] 教育部高等学校物理基础课程教学指导分委员会. 理工科类大学物理课程教学基本要求[M]. 北京：高等教育出版社，2008.

[10] 杨东侠，刘安平，韩忠，等. 核物理虚拟仿真实验教学平台搭建——基于开放式实验教学[J]. 物理与工程，2018，28(5)：106-109，113.
YANG D X，LIU A P，HAN Z，et al. Application of reconfigurable nuclear physics experiment teaching platform in open experimental teaching reform[J]. Physics and Engineering，2018，28(5)：106-109，113. (in Chinese)

[11] 唐艳妮，杨卫军，周战荣，等. 大学物理设计性、研究性实验在线教学实践[J]. 物理与工程，2022，32(5)：57-63，70.
TANG Y N，LI X Q，HE C H，et al. On-line teaching practice of designing and researching experiments for college physics course[J]. Physics and Engineering，2022，32(5)：57-63，70. (in Chinese)

■

DESIGN OF SIMULATION TEACHING MODULE FOR UNIVERSITY PHYSICS EXPERIMENT ON SIMDROID

JIANG Hanwen HUA Lei FANG Kai

(School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract Numerical simulation, as one of the scientific research methods, is an important direction for the reform of physics experimental teaching. The simulation teaching module for University physics experiments relies on the domestically developed finite element software Simdroid, consisting of two parts: teacher guided operation and student independent development. The aim is to enable students to understand the principles of virtual simulation, master basic analysis methods, fully leverage their innovation and autonomy, and enable them to independently analyze and solve practical problems. Under the background of "new engineering", the simulation teaching module helps to cultivate students' engineering thinking, critical thinking, autonomous learning ability, national self-confidence and pride, and encourage students to learn independently and explore and innovate.

Key words university physics experiment; numerical simulation; Simdroid

一中心、两融合、三维度，打造有温度有诗意的共情课堂
——“物理学与现代科技”课程创新与实践

陈小凤* 刘 双 雷 丹 张晓琴
（成都理工大学数理学院，四川 成都 610059）

摘 要 “物理学与现代科技”是成都理工大学面对全校文理科学生开设的自然科学通识课程，内容包含对科学技术起着引领作用、并对人类文明产生重大影响的物理概念和理论，及其在现代科学技术领域中的应用。经过多年的教学实践探索，形成了以学生发展为中心，科学素养教育与思政教育相融合，自主学习＋翻转课堂＋课后实践的三维一体的创新性教学模式，打造有温度有诗意的共情课堂。本文梳理了教学过程中出现的痛点问题，以及相应采取的教学创新举措。

关键词 通识课程；教学实践；创新举措

物理学是自然科学与工程技术的基础，是推动人类物质文明进步的最重要学科。作为将来的社会精英、国家栋梁的当代大学生，无论其就读于理、工、农、医等理工科，还是学习人文社科，都应对物理学的基本内容、发展历史以及对人类文明的影响等知识有所了解[1]。为全面贯彻高校通专结合的人才培养要求，提高大学生的自然科学和人文素养，自 2013 年起，成都理工大学开设了面向全校学生的自然通识课程“物理学与现代科技”。

在 10 余年的教学实践过程中，课程组不断进行改革和创新，经历了教学方式从传统教学到线上线下混合，再到翻转课堂的转化；考核方式由单一向多元化的调整；授课对象从文科学生扩大到文理科学生等，逐渐形成了以学生发展为中心，科学素养教育与思政教育相融合，自主学习＋翻转课堂＋课后实践的三维一体的创新性教学模式，构建“生-师”学习共同体，将传统文化与现代科技交相辉映，营造出有温度有诗意的共情课堂。

1 教学痛点问题

课程早期主要采用传统线下教学，面向文科类本科生开设，学生数理基础薄弱，随着学校新一轮培养方案的调整，课程教学对象范围增大，囊括了部分理工科专业学生，学生数理基础参差不齐，且对通识课程重视度低，学习积极性不高，表现出重考试成绩，轻学习过程等突出问题。具体体现在以下几个方面：

（1）传统线下教学模式不能适应信息时代“网络化、智能化”的需求，不能满足学生的个性化教学需求，无法很好的体现“以学生发展为中心”的理念。

（2）课程内容包含对人类文明产生重大影响的物理概念和理论以及物理学在现代科学技术中的应用，教师团队如何有效地实现教学内容的广度和深度的凝练具有较大难度。

（3）课程面向文科和部分理工科专业本科生，认知方式差异显著，调动不同专业学生学习积极性具有很大挑战。

（4）课程涉及内容广泛，包含丰富的思政元素，原有课程教学挖掘课程思政元素不够，无法以润物无声的方式潜移默化地提高学生的思想政治素养。

（5）传统考核方式单一，仅在强调学生对基

收稿日期：2023-05-28

通讯作者：陈小凤，女，副教授，主要从事大学物理基础教学及计算物理方向研究，66434956@qq.com。

引文格式：陈小凤，刘双，雷丹，等. 一中心、两融合、三维度，打造有温度有诗意的共情课堂——“物理学与现代科技”课程创新与实践[C]. 2023 年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会，2023.

Cite this article：CHEN X F，LIU S，LEI D，et al. One center，two fusions，three-dimensions，creating a warm and poetic empathy classroom—Innovation and practice of the course “physics and modern technology”[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education，2023.（in Chinese）

础知识的掌握，学生重考试成绩，轻学习过程的问题严重，无法很好地实现对学生创新能力和科学素养的培养。

2 教学创新举措

针对课程出现的上述教学痛点问题，课程组从教学内容、教学模式、考核方式等各方面采取了积极的创新实践探索。

2.1 重构教学内容，“主题式”多元化创新

课程内容涉及知识面广，信息量大，课程组精选教学内容，采用“主题式”教学，将教学内容分成10个主题，重点介绍对科学技术起着引领作用、对人类文明产生重大影响的物理概念和理论，以及现代科学技术的常识、发展和远景，将物理知识和前沿应用融为一体。各主题的内容分别是：改变世界的物理学、力学与航天技术、无处不在的波、绚丽多彩的光、冷热之自然法则、走进微观世界、时空观的革命、探索宇宙的奥秘、日新月异的材料、能源与信息技术。

根据课程内容，改单一教师授课为团队授课。改变以往由一位教师从头上到尾的授课方式，采取多位教师组团授课，对课程进行统一设计、规划、安排，每位教师根据自身的学术特点和擅长领域担任专长部分的教学任务，有利于充分发挥团队中每位教师的专长，有利于提高本课程的教学质量和教学效果。

2.2 建设在线课程，促学生自主学习

为适应新时代教学形式和手段的多样化、学生学习的个性化发展的需求，课程组于2017年开始在线课程建设，先后在超星泛雅平台和中国大学慕课网建立课程门户。2020年在中国大学慕课网开设了校内SPOOC课程，2021年开设了完全对外开放的MOOC课程。目前已运行了6个学期，选课人数超2万人。

课程线上教学资源丰富，共设置10个主题内容，每个内容细分三个知识点模块，每一模块包含教学视频、教学课件、讨论题目、拓展资料和拓展视频等资源。结合线上慕课资源，对校内学生开展线上线下混合式教学，线下通过慕课堂、QQ群等开展课堂教学互动。学生在课前有充足的自主学习资源，线下课堂更多的是针对知识点的深入讨论和拓展学习。

2.3 翻转课堂教学，构建“生-师”学习共同体

2020年，我校进行了新一轮的培养方案调整，理工科专业的同学也可选修本课程，授课学生专业面扩大。针对学生来自不同的专业，自身基础以及感兴趣的内容相差很大的问题，课程组在线上线下混合教学的基础上，增加了翻转课堂教学。

线下课程开展前要求学生首先在MOOC网完成线上教学视频的学习，拓展内容的学习以及讨论题目的思考，针对不同专业给学生提供10～15个主题内容相关的专题内容，学生分组选择题目，课前预留7～15天查找资料和制作汇报PPT，课堂开展汇报，汇报完针对学生具体汇报内容展开提问和讨论，深化学生对知识的理解。

开展翻转课堂以来，线下课堂学习氛围活跃，绝大多数同学积极参与课堂讨论，还有很多同学课下主动要求加入到团队教师指导的相关项目和指导的学生物理学术和物理实验竞赛中来。通过翻转课堂教学，构建“生-师”学习共同体，共同品味物理，打造“有温度、有热情”的课堂。

2.4 课程思政融入课堂，促进“科学素养教育”与“思政教育”相融合

课程思政实质上是一门课程观，不是增开一门课，也不是增设一项活动，而是将高校思想政治教育融入课程教学和课程改革的各环节、各方面，实现立德树人、润物无声[2]。课程组对课程内容进行精心挖掘，梳理经典思政元素，凝练思政案例。在课堂教学中实现课程思政与物理科技知识的融合，通过介绍中国传统文化，结合我国的科技发展和前沿研究成果，将传统文化与现代科技交相辉映，打造“有诗意”的课堂；寓道于教，将基本的物理定律与生活中的道理、道德等相结合，打造“共情”课堂；在课程考核中也有机融入思政元素，设置生动有趣、灵活多样的课外作业，考试试卷中结合最新的科技时政的材料题，处处潜移默化地提高学生的思想政治素养。

2.5 强化过程性考核，设计多元化考评体系

结合课程本身特点，灵活设置了多元化开放式学习评价方法，注重体现对学生知识结构的优化以及能力素质的培养和提高。

总成绩＝过程性考核成绩×40％＋期末考试成绩×60％

(1) 期末考试为开卷考试，考试内容结合时

事（例如大国重器，神舟飞船等）分析，进一步体现科学素养和思政教育的相融合。

（2）过程性考核包括：线上学习＋线下学习。

线上学习占50%：包括单元测验（占30%）、单元作业（占10%）、线上讨论、在线测试（占10%）。

线下学习占50%：包括课堂表现（占30%）和小组汇报（占20%）。其中课堂表现包括线下课堂的表现和课堂讨论情况；小组汇报主要包括小组主题汇报、交流和总结等。

另外，课程组还积极鼓励学生在课外利用课上所学进行应用或进一步学习。学生以视频，报告、论文等形式提交，在过程性考评中予以加分鼓励，学生积极性非常高。

3 结语

本课程采用“一中心，两融合，三维度”的创新性教学模式，打造有温度有诗意的共情课堂，提升了学生的参与度，增强了课程学习兴趣，学生学习积极性显著提高，同行也给予了高度评价。2021年本课程被评为校级优质课程，2022年获批四川省一流线上课程。

课程教学改革的最终目标是促进学生的发展：一切以学生为中心，一切以学生的学为中心，一切以更好的服务学生的发展为中心，为学生一生着想，为国家培养人才，为社会造就人才，为未来构筑阶梯。

参 考 文 献

[1] 何晓燕，陈小凤，李侠，大学文科学生物理通识教育问题探析[J]. 成都理工大学学报（社会科学版），2006(12)，Vol. 14 No. 4：95-97.

[2] 高德毅，宗爱东. 课程思政：有效发挥课堂育人主渠道的必然选择[J]. 思想理论教育导刊，2017(1)：31-34.

■

ONE CENTER, TWO FUSIONS, THREE-DIMENSIONS, CREATING A WARM AND POETIC EMPATHY CLASSROOM —INNOVATION AND PRACTICE OF THE COURSE “PHYSICS AND MODERN TECHNOLOGY”

CHEN Xiaofeng LIU Shuang LEI Dan ZHANG Xiaoqin

(College of Mathematics and Physics, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059)

Abstract “Physics and Modern Technology” is a natural science general course offered by Chengdu University of Technology to all students majoring in humanities and sciences. The content includes physical concepts and theories that play a leading role in science and technology and have a significant impact on human civilization, as well as their applications in the field of modern science and technology. After years of teaching practice and exploration, an innovative three-dimensional teaching model has been formed, which focuses on student development, integrates scientific literacy education with ideological and political education, and integrates independent learning＋flipped classroom＋after-school practice, to create a warm and poetic empathy classroom. This article outlines the pain points and issues that arise during the teaching process, as well as the corresponding innovative teaching measures taken.

Key words general education course; Teaching practice; Innovative measures

助力理科创新人才培养的大学物理教学探索与实践

许静平　谢双媛　柯三黄　李云云
（同济大学物理科学与工程学院，上海　200092）

摘　要　强大的基础科学研究是建设世界科技强国的基石，而目前理科大学生的培养是强化基础学科研究的重要一环。因此，针对理科大学生的大学物理课程就必须与新工科的培养目标区别开，笔者以激发学生从事基础学科的兴趣和信心为目的，以创新意识和创新能力培养为核心，从教学内容、教学方式和考核评价三个方面探索服务基础学科，助力拔尖创新人才培养的“大学物理”课程体系。

关键词　理科创新人才培养；教学探索；大学物理

1　针对理科大学生的“大学物理”教学目的

基于国家战略发展新需求和国际竞争新形势，2018年国务院印发的《关于全面加强基础科学研究的若干意见》中指出“强大的基础科学研究是建设世界科技强国的基石。强化基础研究系统部署。坚持从教育抓起，潜心加强基础科学研究，对数学、物理等重点基础学科给予更多倾斜。”2020年教育部发文《关于在部分高校开展基础学科招生改革试点工作的意见》，要求服务国家重大战略需求，加强拔尖创新人才选拔培养（以下简称“强基计划”），选拔一批心怀使命、志趣高远、天资出众的青年学生，强化基础学科、强化创新素养，为国家重大战略领域输送后备人才。2023年2月21日，习近平在中共中央政治局第三次集体学习时强调“切实加强基础研究，夯实科技自立自强根基。要优化基础学科建设布局，支持重点学科、新兴学科、冷门学科和薄弱学科发展，推动学科交叉融合和跨学科研究，构筑全面均衡发展的高质量学科体系。”

与很多兄弟高校一样，同济大学进行了大类招生，在大一对学生进行大类培养，而在大一末要进行专业分流。在实行大类招生和专业分流以来，整体的教学情况良好，然而如果以全局视角，从理学相关的几个专业的整体情况来看，到了大一末专业分流时，成绩较好的同学有不少要转到热门学科中去，使得基础学科涉及的专业感受到比较大的压力。通过对一些同学进行调研，笔者发现大一的理科学生在学习中主要存在三方面问题：1.面对高中到大学的转变，夸大了基础学科学习的难度，有畏难情绪；2.对课程不排斥，但主要关注拿高绩点转专业，对基础研究失去兴趣；3.既没兴趣又感觉卷不动，学习主动性和积极性不足。这三个问题影响了强基和拔尖计划的效果，造成了学科发展不均衡，也让一些学生产生了困惑。这里主要的原因一方面是对学生的专业引导亟需加强，另一方面也反映教学设计和内容中吸引力不足，没有把物理学的科学思想理清讲透，使学生对科学精神的正确认识不足、缺乏对于基础研究发展前景的全面了解、踌躇于对基础研究重要性的正确认识以及在家国情怀与现实待遇之间如何进行取舍。

从国家的战略需求、学校的育人目标、学生的

收稿日期：2023-05-28
基金项目：教育部高等学校大学物理教学指导委员会2023年教学研究立项项目（DJZW202322hd）；2021—2022年度课程思政教改课题“格物求道 真理育人——大学物理系列课程思政建设”（同济本〔2021〕67号，项目编号KCSZ-B-20210211）；同济大学虚拟教研室建设试点“普通物理虚拟教研室”；同济大学2022年课程思政示范课程建设项目“电动力学”（同济本〔2022〕46号）。
作者简介：许静平，男，教授，从事量子光学方面的研究，目前主要的工作：拓扑光学结构中的量子光学问题、全光非线性器件，xx_jj_pp@tongji.edu.cn。
引文格式：许静平，谢双媛，柯三黄，等. 助力理科创新人才培养的大学物理教学探索与实践[C]. 2023年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会，2023.
Cite this article：XU J P，XIE S Y，KE S H，et al. Exploration and practice of college physics teaching to assist in the cultivation of innovative talents in science[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education，2023.（in Chinese）

自我实现三个层次，都要求笔者针对理科学生进行目标明确的普通物理课程教育教学改革，提高课程教育教学质量，激发学生从事基础学科学习和研究的兴趣和信心，提升对一流本科人才和加强基础科学研究的支撑。从2021年9月开始，笔者从教学内容、教学方式和考核评价三个方面进行了有针对性的改革。下面交流一下笔者这两年针对理科学生“大学物理”教学中的探索和实践。

2 教学内容的凝练

以提高课程高阶性、创新性和挑战度为原则，梳理课程教学内容，笔者将知识点分成四类：(1)体现唯物辩证法等科学思维和科学方法的知识点；(2)体现物理本质的知识点；(3)与课程思政相关的知识点；(4)有重大现实应用的知识点。这四类知识点将采用不同的教学方法设计不同的教学单元。

比如体现唯物辩证法等科学思维和科学方法的知识点，要强化物理学史的介绍，以幽默风趣的语言将来龙去脉和科学家轶事讲清楚，提高学生的兴趣；体现物理本质的知识点是上课的重中之重，要辅以清晰详实的动画、视频，对其进行详细讲解，还要设计探究式提问环节提升学生的兴趣，帮助其理解；与课程思政相关的知识点，讲究润物细无声，从科学家人物、家国情怀、个人价值与国家利益统一方面着手，收集详实的影像资料，做到真实可靠可信；有重大现实应用的知识点，则鼓励学生们进行课后查阅，举一反三，作为教学评价的一部分。

将信息技术与教育教学深度融合，大学物理的理论课与大学物理的实验课深度融合。合作开展新的创新性实验项目设计，充分发挥虚拟仿真实验优势，构建混合式教学体系，提高教学质量。

3 教学方式的改进

“有教无类，因材施教”，根据不同知识点的特点，采用不同的教学方法，包括信息技术融合、思维教学与问题驱动教学、研讨式、探究式教学，避免课堂教学沉闷无趣，提高学生的抬头率和参与感，与实验教学改革并进，鼓励学生参加学科竞赛和创新项目，让学生在学习中感受到基础研究的乐趣，增强进行基础研究的兴趣和信心。笔者将以“牛顿三定律”和“静电屏蔽”为例，说明在教学中多种教学方式的灵活运用。

1.《牛顿三定律》是学生高中就学过的内容，在大学教学中只是添加了微积分的技巧，这让一些学生直接就陷入了数学的泥潭中，失去了学习的兴趣。然而《牛顿三定律》体现了科学研究的方法论，怎么讲好它对于激发学生从事基础研究的兴趣是非常重要的。有关牛顿三定律的来龙去脉和历史背景有很多文献赘述，事无巨细的给学生灌输会显得鼓噪无味，如何抓住主线，提炼精华就显得尤为重要。对此笔者进行了如下的教学设计。

1.1 介绍亚里士多德的工作。亚里士多德关于“力是维持物体运动的原因”无疑是错误的，整个经典物理其实就是在讲述亚里士多德是如何错的，正确的观点应该是什么。但是，弄明白亚里士多德的逻辑而不是简单的对其批判，有助于学生在日后在学习和生活中去伪存真。亚里士多德拒绝用数字对自然进行描述，而专注于用文字对自然现象进行描述，并通过思辨而不是实验来解释自然现象。这使得他的观点简单一想很有道理，但却经不起推敲。他说的“力是维持运动的原因”其实特指的是强迫运动。而自然运动中他引出了“水火土木”四元素。他也提出了“天贵地贱”的观点。这些观点如果不仔细推敲甚至做实验，一般人是信服的。这一部分用到了思维教学与问题驱动。

1.2 介绍伽利略的贡献。一般教科书都提到伽利略开创了实验科学将实验和逻辑推理结合到了一起，以及那个斜面实验证明“维持物体运动状态无需力，而改变运动状态才需要力”。然而伽利略的贡献不仅仅于此。笔者会强调，伽利略在1623《试金者》一书中提出了“数学实在论”，他将对自然现象的描述分为第一性的量和第二性的质，指出唯有可测量的量才是科学上可认识的，也就是科学只研究那些能被数字描述的部分。而只能用文字描述的部分不是科学研究的内容。从而对学生强调数学的重要性。随后笔者又强调伽利略的实验哲学：“数学原理的真理性必须建立在测量、观察和实验的基础上。”最关键的，伽利略指出了科学探索的目的：不是寻找最终原因而是寻求自然现象的数学描述，即追求 How 而不是 why。这将避免学生在后期的学习中问一些傻问题，比如为什么会有万有引力，为什么带电粒子间会有

库仑力,等。在提到伽利略那个著名比萨斜塔实验时,笔者会问学生:“将两个不同重量的小球从斜塔上放下,这两个小球真的是同时落地吗?”最后笔者会指出由于阻力的存在,两个小球并不会同时落到地面上,但是在真空的环境下,人们已经做实验验证了,一个铁球和一根羽毛会同时落地,并播放相关的视频资料。这用到了信息技术融合。

1.3 牛顿三定律的内在逻辑。第一定律说明了如果物体不受力会怎么样?第二定律说明了物体如果受力了会怎么样?第三定律则指出力是怎么来的,是相互作用力。第一定律其实非常重要,它给出惯性的定义,以及惯性的度量-质量。在这里笔者可以引申出惯性在生活中和科研中的体现,比如惯性约束核聚变和惯性制导,以及我国目前的发展现状。这里引入了课程思政。

1.4 介绍《自然哲学的数学原理》这本书。指出牛顿三定律来源于这本书,并向学生提问:“牛顿三定律是《数学原理》这本书的全部吗?《数学原理》这本书到底讲了什么?”随后告诉学生们《数学原理》这本书只讲了一个问题:万有引力与距离的平方成反比,也就是伽利略提到的科研研究的目的是找出自然现象的数学描述。牛顿为了论证万有引力与距离的平方成反比,用了一千多页,三卷来论述。第一卷是纯理论的部分,介绍了物理相关的定义以及牛顿三定律,然后通过数学计算给出了一个质点受到与距离平方成反比的有心力,两个质点、三个质点乃至多个质点两两之间存在与距离平方成反比的吸引力会怎么运动,这初步呈现出太阳系的运行图像。第二卷介绍了笛卡尔的太阳系涡旋理论,因为这是当时受大家普遍接受的理论,他给出了涡旋理论的数学形式,指出根据涡旋理论,行星运行周期与轨道半径的平方成正比,而观测数据显示运动周期与轨道半径的3/2次方成正比,从而证明涡旋理论不对,并指出如果用与距离平方成反比的万有引力计算,结果与观测数据相同。第三卷则是将当时能观测到的天文数据与自己的万有引力理论的计算结果做对比,并用万有引力理论解释了太阳对地-月系统的摄动效应、潮汐现象、岁差现象、彗星。最后牛顿才得出结论,不论是天上的还是地面上的任何有质量的物体之间都存在吸引力,吸引力与质量的乘积成正比与距离的平方成反比。从而驳斥了亚里士多德的“天贵地贱”观点,最重要的是用一种令人信服的理论体系详尽阐述了一种新的科学学方法,即实验数学法。这部分的讲述则属于研讨式探究式教学。

通过这样一个教学设计,使理科学生体验到科学的方法论、科学探索的成就感、并结合国家的重大工程提升投身科研的决心。

2.《静电屏蔽》。静电屏蔽是导体和电介质中的静电学中的一个重要知识点。而难点就是接地后的处理。很多同学认为接地就是金属外壳的电荷跑到地里去了,但实际上接地的本质是带电体通过电荷的重新分布使得带电体与大地等电势。为了说清楚静电屏蔽的物理,笔者首先展示一个接地的金属笼子里面有只小鸟,即使有高压电击金属笼子也不会伤害笼子中的生物。

2.1 笔者向学生提问:“接地是必要条件吗?高压电击不接地的金属笼,笼内的小鸟是否安全?”学生一般答是或否。继续提问:“飞行中的飞机是不是不接地的金属笼?”学生纷纷表示飞机的确不接地。继续提问:“那么飞机被雷电击中后还能继续飞吗,里面的人会不会受到电击?”于是放一段视频,一架飞机在飞行中被雷电击中,但是继续飞行。从而得出结论,高压电击不接地的金属笼不会影响笼内的生物。

2.2 提问:“不接地总归有影响,有什么影响呢?”学生一般答不出来。笔者告诉答案,不接地,高压电击金属笼,金属笼以及里面的生物都具有很高的电压,但是由于是等电势不产生电流,从而没事。但是生物要是从笼里出来,接触到地面,电压就会迅速降到0,产生大电流,从而被电死。继续拿飞机说事,被雷电击中的飞机继续飞没事,但是要是马上降落,触地就会产生大量火花,对飞机产生破坏,但里面的人不会被电击,因为飞机已经接地了。

2.3 提问:“那么雷雨天在汽车里安不安全?”学生纷纷表示,汽车是个不接地的金属笼,待在里面没事。但是怎么下车呢?学生表示不能下车,会被电死。笔者展示新闻,一辆面包车被雷电击中,等记者赶到时,司机正在忙着换轮胎。你看,人下车也没事,怎么回事呢?问题的关键在哪?学生纷纷回答各种可能。笔者公布答案,那是因为轮胎爆了,接地了。学生恍然大悟。

2.4 提问:“轮胎爆了是偶然事件还是必然事件?”学生茫然。笔者告诉他们轮胎爆了是必然事件,空气能击穿空气,必然就会击穿轮胎,因为橡

胶的击穿电压要小于空气的击穿电压。并展示视频，一架停在机场的飞机，被雷电击中，瞬间轮胎起火爆裂。

通过这一个例子，充分展示了信息技术融合、思维教学与问题驱动教学、研讨式、探究式教学的相互融合。通过这种阶跃式的提问能极大的调动学生的积极性，并深刻掌握静电屏蔽与击穿的概念。

以上仅仅是两个例子，在其他的知识点讲解时，笔者都采用了类似的方式。比如讲共振时，可以提到上海中心的减阻尼装置；讲库仑定理时提到最初测量装置扭秤是为了提高指南针的精度，从而指出在宋朝时，沈括的《梦溪笔谈》就指出可以用悬浮的司南来做指南针，精度也非常高；圆孔衍射时的概念分辨本领，介绍我国最新的光学望远镜和微波段望远镜；讲解马赫锥时，介绍我国战机的飞行速度；在介绍夜视仪时提到志愿军的夜战战术，从而推进了美军对夜视仪的重视。由楞次定律介绍超导磁悬浮，进而介绍我国在磁悬浮列车上的发展进展等等。

4 考核评价优化

教学方式的改进主要考验老师对教学内容和教学目标的理解和贯彻程度，而教学评价则可以激发学生的创新意识和创新能力。

对此笔者在课程评价中鼓励学生进行创新性探索性原创性尝试。

在总评中笔者设立 10％的比重，鼓励学生在研讨式、翻转式教学模式中积极表现。设立 5％的比重鼓励学生拍摄原创科普视频，展现一些灵巧的物理实验，说明物理现象，并从中挑选作为下一年度上课时的课件，目前学生累计拍摄的原创科普视频达 100 余个。

以赛促学，以赛促教。鼓励学生在课程教学的基础上，参加相关学科竞赛和创新项目，激发学生科研实践潜能，在实践中培养和提高大学生的创新能力、实践能力和团队协作意识。由于疫情的影响，2021 年至今只举办过一次校内的大学生物理竞赛，2021 级本科生分流之前学习《大学物理》的理学学生总数为 340 人，主动报名参加物理竞赛的为 110 人，参与率＞33％。

5 结语

鉴于大类招生和大类培养对理学专业的挑战，笔者针对理科学生的《大学物理》教学在教学内容、教学方法和考核评价三个方面进行了改革，通过教学内容凝练，保证课程具有科学知识、科学思维、科学应用和创新精神的内涵；通过教学方法探索促成创新精神培养、理论与实践综合、科学前沿拓展和家国情怀塑造；通过鼓励学生参与学科竞赛和创新项目，提高学生的实践能力和创新能力，通过评价体系优化，强化学生的知识掌握、能力提升、探索精神，最终使理科学生在全过程学习中增强进行基础研究的兴趣和信心。在理学相关学院所有老师和课程的努力下，去年 6 月，2021 级本科生专业分流以后留在理学相关学院的学生数相比 2020 级出现了大幅上升，我们的《大学物理》教学虽然不是决定性因素，但也与之有正相关关系。由于只进行了两年的改革，数据还不全面，后续笔者会继续跟踪学生的发展轨迹，建立一套完整和严谨的评价体系，检验针对理科学生的《大学物理》教学成效，并根据改革中出现的新问题新情况及时反馈和修正，最终建立一套针对理学学生，以增强他们从事基础学科研究的兴趣和信心为目的的《大学物理》教学体系。

■

EXPLORATION AND PRACTICE OF COLLEGE PHYSICS TEACHING TO ASSIST IN THE CULTIVATION OF INNOVATIVE TALENTS IN SCIENCE

XU Jingping　XIE Shuangyuan　KE Sanhuang　LI Yunyun

(School of Physical Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract　Basic scientific research is the cornerstone of building a world science and technolo-

gy powerhouse, and currently, the cultivation of science students is an important part of strengthening basic discipline research. Therefore, the "College Physics" course for science college students must be distinguished from the training objectives of the new engineering discipline. Our goal is to stimulate students' interest and confidence in engaging in basic disciplines, with the cultivation of innovation awareness and ability as the core, and to explore the "College Physics" course system that serves basic disciplines from three aspects: teaching content, teaching methods, and evaluation system, to help cultivate top-notch innovative talents.

Key words the cultivation of innovative talents in science; exploration of teaching; college physics

信息化赋能 多要素融合 大学物理与实验教学模式创新实践

蒋逢春[1*] 冯学超[1] 吴 杰[1] 杨广武[2] 王 翠[3]
([1]郑州轻工业大学电子信息学院,河南 郑州 450002;
[2]天津中德应用技术大学基础实验实训中心,天津 300350;
[3]河南科技大学物理工程学院,河南 洛阳 471000)

摘 要 针对大学物理理论与实验课程脱节等问题,通过多年来教育教学研究实践,依托两门国家级一流课程,利用慕课平台和虚拟教研室,实现资源共享。以智慧教学为切入点,发挥虚拟仿真实验、便携式演示实验、奇趣物理实验等特色优势,创建了“理实相融、虚实结合、基专协同、悟理思政”的“四维融合”教学模式,架起了理论和实验课程融合的桥梁,构建了“知识传授、能力培养、素质提升、价值塑造”融为一体的育人导向;形成了“知识点考试、学习过程评估、实践能力考核和科学素养考察”的“多维综合”评价体系。

关键词 虚拟仿真实验;便携式演示实验;奇趣物理实验;教学模式

1 引言

2019 年 10 月,教育部发布了《关于一流本科课程建设的实施意见》指出“课程这一要素是人才培养的核心要素,课程的质量直接决定了人才培养的质量”。课程是知识的载体,课程建设主要是为教学服务的。要想打造一流课程就要有一流的教育目标,制定一流的教学内容,以恰当的教学方式将课程内容传输给学生[1]。大学物理和物理实验课程是理工科的基础课程,直接关系到人才培养的质量。大学物理理论和实验课程面临许多实际问题,主要有:

(1) 知识传授与能力培养不同步

传统课堂教学以老师单向的知识传递、学生被动接受为主,忽视学生主体地位和个性化发展,不能有效激发学生学习动机和主观能动性的问题。本成果实现了注重知识传授的“以教为中心”向知识传授和能力培养并重的“以学为中心”的转变。

(2) 理论教学与实验操作相脱节

传统大学物理以讲授理论知识为主,物理实验则强调实验能力培养,理论教学与实验操作脱节,不利于培养学生科学思维与创新能力的问题,本成果通过“四维融合”教学模式实践,实现了理论与实验的有机融合,有效激发了学生创新能力。

(3) 培智育人与立德树人未融合

授课过程过多关注知识传授,忽视对学生价值塑造和社会责任感培养,本成果通过创建“格物致理,悟理思政”育人品牌,实现了教书育人,发挥了高等教育“培根铸魂、启智润心”的作用。

面对这些问题,我们进行了全方位的创新实践,取得显著成效。

收稿日期:2023-05-28

基金项目:河南省教育厅教学成果奖,申报 2022 年国家级教学成果奖 “信息化赋能 多要素融合 大学物理与实验课程教学模式创新与实践”(编号 1058);郑州轻工业大学第十三批招标立项课题 “大学物理实验及仿真跨校认证学分的研究与探索”(郑轻大教[2021]1 号-16 号);教育部大学物理教学指导委员会高等学校教学研究项目(DWJZW202131zn);大学物理教指委大中物理教育衔接教学研究项目(WX202220)。

通讯作者:蒋逢春,教授,主要从事大学物理及实验教学与研究,首批国家级线上一流课程《大学物理实验及仿真》主持人,第二批国家级线上线下混合一流课程《大学物理 C》主持人,大学物理实验及仿真河南省虚拟教研室负责人,fengchunj@zzuli.edu.cn。

引文格式:蒋逢春,冯学超,吴杰,等. 信息化赋能 多要素融合 大学物理与实验教学模式创新实践[C]. 2023 年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会,2023.

Cite this article: JIANG F C, FENG X C, WU J, et al. Innovative practice of integrating multiple elements of informationization empowerment in college physics and experimental teaching mode[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education, 2023. (in Chinese)

2 信息化赋能，智慧教学

根据教育部《教育信息化十年发展规划（2011—2020年）》[2]精神要求，2013年8月，河南省教育厅提出全面利用网络学习空间开展网上教学和科研工作，郑州轻工业大学教学团队按照上级部署安排，率先行动，建设了《大学物理》、《物理实验》和《大学物理仿真实验》三门网络课程，开展混合式教学。实践结果表明混合式教学模式对学生掌握知识与技能的作用在一定程度上优于传统教学模式[3]，在全省起到了引领示范作用。

2.1 建设精品资源在线课程，开展智慧教学

随着学为中心的思想深入人心、智慧教学的不断推广，翻转课堂、研讨式、任务式、案例式等新的教学模式层出不穷[4]。2017年，郑州轻工业大学《大学物理实验及仿真》和《大学物理》课程分别在中国大学MOOC和超星平台上线运行。基于丰富的线上课程资源，开展“以问题为核心、以任务为驱动”的翻转课堂教学[5]。线上精心设计预习测验题、讨论题，实施分组任务，使学生在课前能够深入学习，课堂上能够主动思考、深入讨论。理论课老师担任物理实验课，使理论和实验有机融合。实验课采用大循环上课，培养了一批理论功底扎实，实验能力强的教师团队，保障了物理类基础课程教学质量的稳步提升。

2.2 加强虚拟教研室建设，构建课程知识图谱

2021年，教育部高等教育司关于开展虚拟教研室试点建设工作的通知中指出：虚拟教研室成员在充分研究交流的基础上，协同共建人才培养方案、教学大纲、知识图谱、教学视频、电子课件、习题试题、教学案例、实验项目、实训项目、数据集等教学资源，形成优质共享的教学资源库[6]。教学团队积极响应，依托大学物理实验及仿真省级虚拟教研室，在超星课程平台上建设大学物理和实验知识图谱，将分立的数字化资源串联起来，通过揭示知识点之间的内部逻辑，重构个性化的知识体系，培养学生的高阶思维能力[7]。

以单摆为例，在理论课中讲简谐振动时，分析单摆的运动是不是简谐运动？使学生学会运用所学知识分析问题，理解建立物理理想模型的思想方法[8]。在此基础上深化，如何利用单摆测量重力加速度？使所学理论知识能够应用到实际中，提高学生解决问题的能力。同时为后续物理实验奠定基础。在慕课资源中理论和实验相关联，再可以通过虚拟仿真实验平台完成实验。利用蛇摆视频资源，激发学生的好奇心，进一步探究蛇摆的成因，从而达到课程高阶性要求。通过知识图谱跨课知识点的关联，实现精准的个性化教学，提高教学效率。

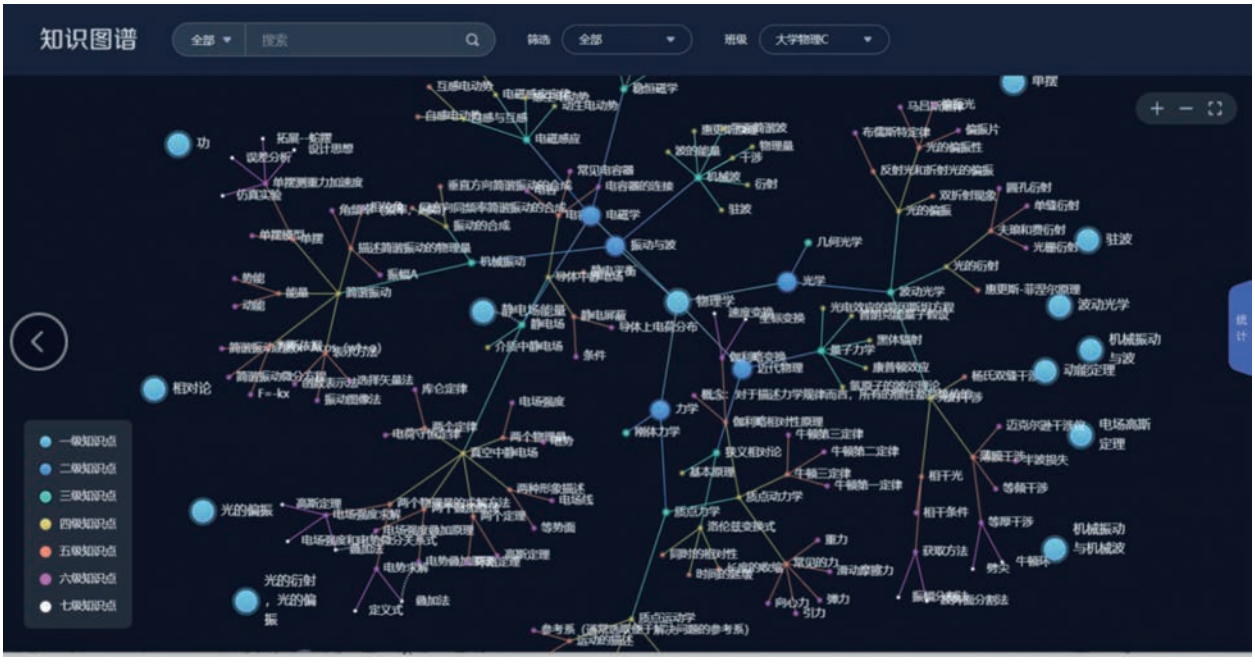


图1 大学物理和实验知识图谱建设

2.3 格物致理，悟理思政

好的物理课程应能启迪学生的心灵，点燃学生的思想火花，激发学生的情感、兴趣和意志[9]。团队秉承“课程承载思政”和“思政寓于课程”的理念，优化课程设置，围绕落实立德树人这一根本任务，把教书和育人结合起来。依托虚拟教研室平台，定期举办课程思政研讨会，强化教师自我修为。以学生感兴趣的科技成就、科技人物、学科前沿和物理学故事等为主题，共享教学思政案例，上传到课程体系的相关知识点处，通过润物细无声的方式融入课程，引导学生践行社会主义核心价值观。

2.4 大数据统计功能，形成多维综合考核模式

利用慕课平台大数据统计功能，改变了传统课程考核重结果轻过程、重理论轻能力的考核模式，两门课程均实施“知识点考试、学习过程评估、实践能力考核和科学素养考察”并举的多维综合评价模式，将课前签到，预习测验、主题讨论、课堂互动、章节测验、分组任务、期中期末考试等环节按照一定权重纳入考核（图 2 是本学期智能物联 22-1，2，3，4 班的成绩统计）。智慧平台强大的数据统计功能，一方面节省了教师大量的统计时间，同时能通过数据分析，精准施教，及时调整教学设计和方法。另方面，评价更客观公正，真正实现过程性考核。学生可以动态了解自己学习进度和知识掌握情况，查漏补缺，提高学生学习内动力。

3 多要素融合，协同育人

3.1 利用生活物品制作演示实验教具

生活物品作为课堂演示实验教具，成本低廉，趣味十足，深受学生喜爱。近几年，录制了系列“奇趣物理实验”视频，以生动的实验现象吸引学生观察、分析、质疑、讨论，引导学生参与实践和探究的全过程。

3.2 开发便携式课堂演示装置

使用便携式科普仪器能够加深教师与学生之间的交流，转变传统的授课模式，从而激发学生的



图 2 多维综合评价成绩统计

学习兴趣[10]。团队开发研制了50余种便携式课堂演示仪器，手提箱包装，充电电池供电，这些仪器可以手持或吸在黑板上，解决了大班上课演示实验难以进课堂的问题，在全国高校推广应用[11]。

还和东南大学等七所高校联合，制作演示实验视频50个，展示实验过程和现象，拓宽学生的认知。

3.3 开放物理实验虚拟仿真平台

校企合作，开放虚拟仿真实验平台，满足物理实验课前学生预习的需求，同时把仿真实验项目纳入大学物理课程教学体系之中，明确教学目标，学以致用。在疫情中发挥了重要作用[12]。

3.4 出版精品教材

教材是教学的基本载体和工具，优秀的教材是保证高水平教学的重要因素。根据新的教学理念和信息化技术，出版了全新《大学物理实验教程》(第二版)和《大学物理学》教材，借助二维码链接将纸质版教材和数字化课程资源融合，方便学生利用碎片化时间自学，满足个性化学习需要。《大学物理实验教程》(第二版)强调实验的物理思想，突出实验教学与理论教学、教学内容与工程实践的相结合。《大学物理学》强调物理理论的数学表达，强化数学在分析和研究物理问题中的应用，注重科学思维的训练，调整了课程难度和深度。

4 四维融合教学模式案例分析

新时代背景下，加强学生创造力的培养和潜能的开发，将传统与现代的内容有机结合，合理运用先进技术、科学方法和新理念培养学生的创新素质显得尤为重要[13]。大学物理是一门理论与实验有机结合的课程，而物理实验又需要理论指导。我们多校联合，校企合作，以信息化平台为载体，资源共建共享，开展“理实相融、虚实结合、基专协同，悟理思政”的“四维融合”混合式教学实践。以迈克尔逊干涉仪为例。

4.1 理实相融

地方院校师资不足，多数是大班授课，利用生活物品和便携式演示仪，理论讲解和课堂演示相结合，使抽象理论生动有趣，有效提高了课堂效率，保证了教学效果。

大学物理理论课在讲解干涉时，迈克尔逊干涉仪是一个典型的干涉装置，如果仅仅局限于理论讲解，学生很难理解它的设计思想，以及实际应用，因此，我们把理论讲解和实物装置及应用放在一起学习，做到“理实相融”。迈克尔逊干涉仪是利用薄膜干涉的原理设计，但却优于薄膜干涉，利用两个平面反射镜，通过动镜位置改变，改变膜的厚度，可以实现零厚度，从而大大增强了它的应用价值。

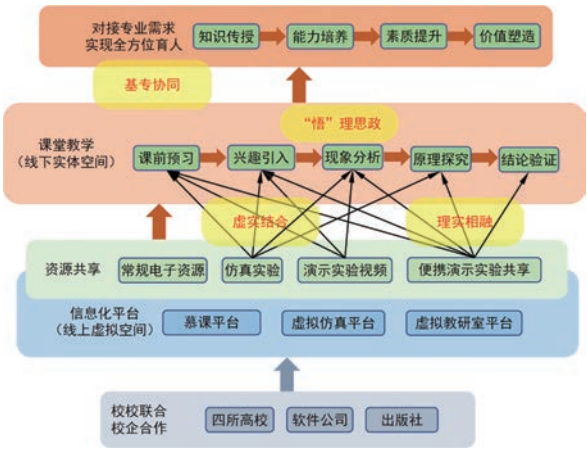


图3 “四维融合”教学模式

4.2 虚实结合

把虚拟仿真实验和物理实验结合，解决了不进实验室不能预习的问题，在疫情中发挥了重要作用。把虚拟仿真实验融入大学物理对应知识体系中。

在讲完迈克尔逊干涉仪的结构，工作原理和应用之后，我们安排学生自主完成仿真实验，实现了“虚实结合”。在后续物理实验课中学生就能深刻理解迈克尔逊干涉仪的设计思想和工作原理，更好完成实验。有效解决了理论与实验脱节的问题。

4.3 基专协同

基础课教师和专业教师对接，跟踪学生后续学习情况，掌握基础课程对专业课程的支撑作用，根据学情反馈，优化教学设计，持续改进。基础课和专业课教师协同育人，提升了学生的成就感、获得感，给学生学习注入驱动力。

迈克尔逊干涉仪在专业课实验中继续使用，有了物理实验打下的基础，在专业实验中能够更好的使用它，完成高阶应用。从而实现“基专协同”。

4.4 悟理思政

课程思政是一种综合教育理念，强调各种课程和思想政治理论课程同向同行，协同育人，从而培养出德才兼备，全面发展的社会主义事业建设

者和接班人[14]。物理学的思想方法,物理学家的故事都是很好的课程思政素材,将其有机融入课堂之中,悟理思政,润人无声。

迈克尔逊严谨的科学精神,迈克尔逊干涉仪的设计思想及实际应用,具有划时代的意义,是很好的课程思政素材,通过学习,达到"悟理思政"的目的。

5 结语

我们秉承"教师主导、学生主体、育人为本、创新为先"的教学理念,树立"锻炼学生思维方式、培养学生科学素养、激发学生创新能力"的课程目标,结合地方高校实际,对大学物理和物理实验两门基础课程的课程体系、教学理念、教学模式和评价体系进行综合改革,构建了"知识传授、能力培养、素质提升、价值塑造"一体的育人模式,创建了"理实相融、虚实结合、基专协同、悟理思政"的"四维融合"教学模式,形成了"知识点考试、学习过程评估、实践能力考核和科学素养考察"的"多维综合"评价体系;坚持教育信息化,以智慧教学为切入点,发挥虚拟仿真实验、便携式演示实验、奇趣物理实验等特色优势,实现大学物理理论和实验的有机融合。

通过申报国家级教学成果奖,使我们认识到差距,明确前进方向。继续依托国家级一流课程和虚拟教研室平台,加强大学物理和实验课程知识图谱建设,真正实现二者的有机融合,保障基础课教学质量。通过教研活动,培育名师,带动西部高校协同发展。

参 考 文 献

[1] 王玉婧,刘甜.一流课程与一流专业关系及建设思路分析——以应用型大学国际经济与贸易专业为例[J].高教学刊,2021,(3):25-29.

[2] 中华人民共和国教育部.教育信息化十年发展规划(2011—2020年)[EB/OL].(2012-03-13)[2023-05-27].http://old.moe.gov.cn/publicfiles/business/htmlfiles/moe/s3342/201203/133322.html.

[3] 蒋逢春,卢雪艳,吴杰,等.混合式教学在大学物理实验中的应用分析[J].物理通报,2018,(1):2-6.

[4] 徐敬青 崔平 陈静,等.智慧教学的研究与思考[J].中国现代化装备,2022,(21):16-18.

[5] 蒋逢春,吴杰,王海燕,等.大学物理实验及仿真翻转课堂的实践[J].物理通报,2019,(3):80-82.

[6] 中华人民共和国教育部.教育部高等教育司关于开展虚拟教研室试点建设工作的通知[EB/OL].(2021-07-12)[2023-05-27].http://www.moe.gov.cn/s78/A08/tongzhi/202107/t20210720_545684.html?eqid=9960064f000c737c00000004643165c7s3342/201203/133322.html.

[7] 戴玉蓉,恽如伟,熊宏齐.大学物理实验智慧教学模式的构建[J].物理实验,2021,(7):42-45.

[8] 蒋逢春,吴杰,陈靖,等.单摆测重力加速度实验教学设计[J].物理通报,2021,(8):94-98.

[9] 巩晓阳,琚伟伟,王翠,等.浅谈物理教学的艺术性[J].中国大学教学,2015,(9):59-61.

[10] 朱飞,张守超,杨广武.科普教学领域中便携式科普仪器的应用价值研究[J].现代信息科技,2019(20):174-175.

[11] 吴海娜,杨广武,公卫江,等.一流课程背景下大学物理课堂演示实验的实践及效果分析[J].大学物理实验,2021,(6):102-104.

[12] 蒋逢春,吴杰,张艳萍,等."停课不停学"背景下大学物理实验及仿真在线开放课程的实践与拓展[J].物理实验,2020,(4):42-46

[13] 孙艳蕊,宋叔尼.高等数学一流课程的建设与实践[J].大学教育,2022,(8):120-122.

[14] 吴杰,蒋逢春,冯学超.大学物理融入课程思政的探索——以恒定磁场为例[J].物理通报,2021,(6):36-39.

INNOVATIVE PRACTICE OF INTEGRATING MULTIPLE ELEMENTS OF INFORMATIONIZATION EMPOWERMENT IN COLLEGE PHYSICS AND EXPERIMENTAL TEACHING MODE

JIANG Fengchun[1] FENG Xuechao[1] WU Jie[1] YANG Guangwu[2] WANG Hui[3]

([1] School of Electronics and Information, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou, Henan 450002;

[2] Tianjin Sino German University of Applied Technology, Basic Experimental Training Center, Tianjin 300350;

[3] Henan University of Science and Technology, School of Physical Engineering, Luoyang, Henan 471000)

Abstract In response to the issue of the disconnection between theoretical and experimental

courses in university physics, through years of educational research and practice, relying on two national first-class courses, utilizing the MOOC platform and virtual teaching and research rooms, resource sharing has been achieved. Taking smart teaching as the starting point, utilizing the unique advantages of virtual simulation experiments, portable demonstration experiments, and interesting physics experiments, we have created a "four dimensional integration" teaching mode that integrates theory and reality, combines virtual and real, collaborates with basic and specialized fields, and understands theory and politics. We have built a bridge for the integration of theoretical and experimental courses, and constructed an educational orientation that integrates "knowledge transmission, ability cultivation, quality improvement, and value shaping"; It has formed a "multi-dimensional comprehensive" evaluation system of "knowledge point examination, learning process assessment, practical ability assessment and scientific literacy inspection".

Key words virtual simulation experiment; portable demonstration experiment; Qiqu physics experiment; teaching model

大学物理的“立体式”教学情境创设

高雅纯[1*]　吴　喆[1,2]　张修明[1]　刘义东[1,2]　杨宏春[1]

([1]电子科技大学物理学院,四川 成都　611731;[2]电子科技大学物理格拉斯哥学院,四川 成都　611731)

摘　要　在新工科教育背景下,面向全校理工科专业的大学物理课程团队凝练了“夯实物理基础、解决工程问题、开拓学术视野”的课程任务,开展了“立体式”物理教学情境创设改革。建设了包含中英文“大学物理”、物理演示实验、物理项目式课程在内的MOOC和SPOC学习资源,采用飞书、雨课堂等信息化教学手段,进行了“线上-线下”相结合的混合式教学探索。利用我校大学物理演示实验室的110多实验项目内容,对大学物理知识全覆盖,通过课堂演示、线上数字实验建设、开放实验等多手段,激发学生兴趣,引导学生将理论知识应用到工程实践中。基于物理学科的丰富内涵,我校围绕大学物理课程开设了“物理学与人类文明”新生研讨课,“大学物理实验和演示实验”等实验课程、创新实践项目式课程,全面创设了“立体式”物理教学情境,为引领工程的复合创新人才培养提供了基础。

关键词　立体式教学情境;线上-线下混合式教学;演示实验融合

1　绪论

在全球科技、产业变革加速的背景下,我国以新工科教育建设重构高等教育体系。电子科技大学实施了“唤起好奇、激发潜能”为核心的新工科教育“成电方案”[1,2]。以物理学基础为内容的大学物理及其实验课程,是高等学校理工科各专业学生一门重要的通识性必修基础课,在新工科人才培养中具有重要的地位[3,4]。

我校大学物理和大学物理实验教学中心组织一系列教研活动,将《大学物理》的新工科人才培养理念聚焦为“夯实物理基础、解决工程问题、开拓学术视野”。为此,课程团队提出了“融通式”创新教学理念,打造“线上与线下”、“理论与实践”相结合的立体式教学情境,取得了一系列教学成果。课程被评为国家级线下一流本科课程、四川省线上及线上线下混合式一流本科课程、四川省课程思政示范课程。

2　“立体式”教学情境构建方案

大学物理内容丰富但学时有限,仅仅依靠课堂讲授无法帮助学生吸收并内化物理学科知识,因此需要将学习过程从理论课堂延伸到实验实践、延伸到课外,为学生提供立体化教学支持[5]。教学团队实施了“立体式”教学情境创设教研教改(见图1),建设了丰富的课程资源,实现包括课上研讨与课外自学、理论课堂与实验演示、线上和线下等多种形式的教学情境。

2.1　“线上-线下”教学情境

针对物理学学科理论建立与科学研究特点,团队经长期实践,提出了“主线—节点”探究式教学范式,如图2所示。首先,以课程“研究目标→研究方案→理论体系构建步骤→理论成果应用→理论成果认识论价值”的问题导引课堂教学范式为主线,其次,以承载于知识体系之上的认知方法教学为关键课程教学环节节点,通过理论体系建

收稿日期:2023-05-28

基金项目:四川省2021—2023年高等教育人才培养质量和教学改革项目(JG2021-848);第三批高校省级课程思政示范课程;电子科技大学教研项目(2022KCSZ0223,2020HHKC0041);2023高等学校教学研究项目(DJZW202335xn)。

通讯作者:高雅纯,女,博士,电子科技大学高级实验师,主要从事物理教学科研工作,研究方向是统计物理,gaoyachun@uestc.edu.cn。

引文格式:高雅纯,吴喆,张修明,等. 大学物理的“立体式”教学情境创设[C]. 2023年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会,2023.

Cite this article: GAO Y C, WU Z, ZHANG X M, et al. Construction of “Three-dimensional” teaching situation in college physics[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education, 2023. (in Chinese)



图1 大学物理立体式教学情境构建方案

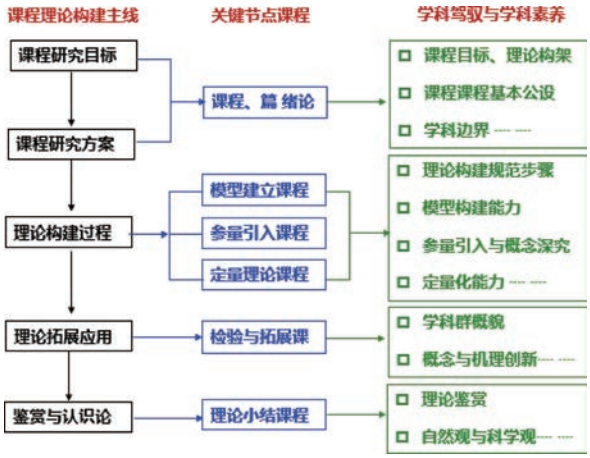


图2 “主线-节点”探究式教学范式

立各环节、各方面问题提出和解决的案例分析，承载了包括学科概貌与构架、自然与科学观、学科边界与成果鉴赏、概念深究与原始创新、问题质疑与批判精神等一系列科学素养，为学生全面科学素养熏陶、培养、塑造提供了可借鉴探究式课堂教学范式。

为了增加师生互动，采用雨课堂进行授课，接收学生弹幕和投稿，实时接受学生反馈。通过雨课堂测验了解知识掌握情况。

建立课程飞书群，上课时同步进行飞书直播，并在课后开放回放，便于课后复习，实现“线上-线下”混合式教学。图3为课程飞书群的一次授课记录和课后的回放视频。

另一方面，研讨式教学需要在课堂教学中，以学生为中心研讨课程难点、关键点问题，对学生能够通过自主学习的内容，应放手让学生自主学习。因此，便于学生自主学习的高水平的MOOC课程资源平台，成为有效实施研讨式教学提供资源平台基础。为此，教学团队建设了《大学物理学》课程以及英文版《Physics》课程的MOOC资源，同



图3 利用飞书群进行“线上-线下”混合式教学实践

时分别建设了相关实践和实验课程《物理学术竞赛挑战性课程》、《大学物理演示实验》的MOOC和SPOC资源平台课程，实现关键教学内容的“翻转课堂”教学。

2.2 “理论-实验”融合教学

在物理学习中，学生往往将课本知识和日常生活相脱节，一方面，对理论知识的学习往往生搬硬套记公式，而不去思考公式背后的物理内涵；另一方面，对很多生活和生产实践中的物理现象视而不见，无法跟所学过的知识联系起来。造成对知识的理解僵化，且实践创新能力不够。利用演示实验，可以调动学生的学习积极性，并能够与高精尖科技相联系，开拓视野。电子科技大学物理演示实验室依托于大学物理教学而设立，是《大学物理》课程内容的实验补充，是物理教学的重要组成部分。实验室配备了110多个演示实验仪器，包括力学、振动和波动、光学、热学、静电学、电磁学和近代物理等内容。大学物理演示实验与大学物理同步开展，着重拓展演示实验教学功能，开设形式多样的演示实验教学授课方法，采取开放与随堂演示相结合，注重物理现象与物理原理间的联系，强调学生的参与，引导学生观察思考。一方面，一些关键实验进入大学物理课堂进行演示，帮助学生更好理解知识，每学期都有固定的实验室开放时间，学生可以动手操作。另外，为了更好地与大物课堂相融合，我们还建立了线上资源，老师和学生在课上就可以扫码观看一些实验现象。同时上线了《大学物理演示实验》SPOC课程，方便学生课后配合理论复习。

2.3 大学物理课程群建设

课程团队建设了一支能够胜任课程群多门课程教学，能够融合开展学生知识与能力、事业与素养、责任与情怀培养的优质师资队伍。如图5所示，以大学物理课程为核心，同步开设以学科导论、学术竞赛、新生研讨、实验等课程或拓展课程，



图 4　大学物理演示实验展示

力求通过课程群融合教学，在教学过程中尽可能融通课程内部与课程之间的理论内在关系，潜移默化形成学生综合应用所学解决问题的科研素养与习惯。拓展课程中，《物理学与人类文明》为大一新生研讨课程，主要从物理学学科概貌、物理学的自然观与科学观、物理学前沿热点等方面展示物理学各主要研究领域取得的科学成就，激发学生对物理学的兴趣。《基于竞赛项目的新生研讨课》和《开放性物理项目训练》为项目式训练课程，课程项目均来源于中国大学生物理学术竞赛(CUPT)和全国大学生物理实验竞赛(创新)，分别针对大一下、大二上本科生，与《大学物理》课程同步开设，是对大学物理知识的直接应用，是对新工科人才建设的积极探索。《基于竞赛项目的新生研讨课》被评为校级挑战性课程，《开放性物理项目训练》与《物理学与人类文明》被评为校级示范性课程。

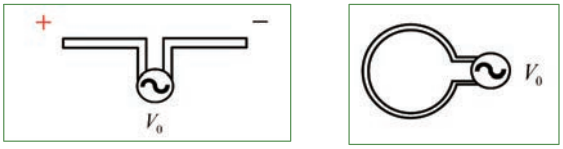


图 5　围绕《大学物理》课程的“理论-实践”课程融合建设

3　“理论-实验”融合教学案例

电磁波是大学物理中一个重难点内容，一方面是电子信息、通信等专业的基础理论，另一方面，理论知识只能从电磁波的波动方程给出电磁波的一些基本性质，但学生没有直观的感受。因此，演示实验室安排了电磁波的产生和发射，说明电磁波的产生条件，以及电磁波的接收过程。先介绍电磁波产生的三个条件：源(中功率电子管)、天线(磁偶极子天线)、频率(200MHz)、接收天线(电偶极子和磁偶极子)，再进行演示。

在课堂演示时，结合原理图(如图 6 所示)，介绍两种偶极子天线的实物，让学生直观地感受电偶极子和磁偶极子天线的不同结构，以及辐射原理。图 7 为课堂演示照片，实验时将不同的偶极子天线放置在不同的位置，比较两种天线的接收效率，从而结合理论说明偶极子天线的方向图。



(a)　(b)

图 6　电磁波接收装置

(a) 电偶极子和(b)磁偶极子的原理图

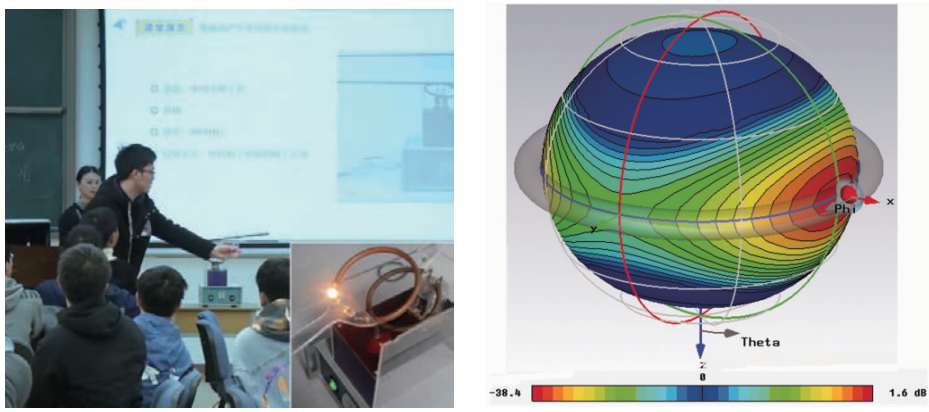
另外，我们还设计了不同尺寸的偶极子天线，在改变天线尺寸时，观察灯泡亮度的变化，这是典型的驻波现象在电磁波中的反映，并可推测电磁波的波长随天线尺寸的变化关系。通过演示，学生深刻理解天线辐射的能量要求，同时引导学生推导电磁波的波长与天线尺寸的关系。

在做完一系列演示实验后，再结合各种生活中的天线装置，比如路由器、手机天线等进行讨论，学生对电磁波的产生和发射有了更深入更全面的认识。

通过课堂演示和研讨，学生对电磁波产生和发射装置产生了浓厚的兴趣，在老师指导下，对偶极子天线的辐射进行了仿真计算，并发表了教研论文[6]。

4　小结

新工科背景下，大学物理课程的任务为“夯实物理基础、解决工程问题、开拓学术视野”，教学团队提出了“融通式”创新教学理念，探索了“线上-线下”相结合、“理论-实验”相融合的教学情境构建，并围绕大学物理开设了“物理学与人类文明”新生研讨课，“大学物理实验和演示实验”等实验课程、“物理学术竞赛挑战性课程”、“开放性物理项目训练”等创新实践课程，全面创设了“立体式”物理教学情境，为引领工程的复合创新人才培养提供了基础。



(a) (b)

图 7

(a) 电磁波产生和发射实验装置和课堂演示；(b) 偶极子天线的辐射仿真[6]

参 考 文 献

[1] 曾勇,黄艳,向桂君,等. 从新生项目课开始:新工科建设"成电方案"的设计与实践[J]. 高等工程教育研究, 2020(1):14-19.

[2] 曾勇, 黄艳, 黄廷祝, 等. 面向未来的新工科教育与"成电方案"2.0的迭代创新[J]. 高等工程教育研究, 2021(3):16-20.

[3] 秦平力,余雪里,马良. 新工科牵引下大学物理实验课程改革与实践[J]. 物理与工程,2023,(2):73-80.

[4] 翁雨燕, 董裕力, 杨俊义, 等. "三位一体"下大学物理实践类课程探索——以"现代物理学在创新创业中的应用"课程为例 [J]. 物理与工程, 2023, 33(2): 93-100.

[5] 卢树华, 田方, 王丽辉. 大学物理教学信息化探讨与实践[J]. 大学物理,2019, 38(1):47-52.

[6] WU M H, TENG B H, SHEN C T, et al. Application of Stokes' Theorem to electrically small loop antenna radiation [J]. International Journal of Electrical Engineering Education, 54(3): 262-272.

CONSTRUCTION OF "THREE-DIMENSIONAL" TEACHING SITUATION IN COLLEGE PHYSICS

GAO Yachun[1] **WU Zhe**[1,2] **ZHANG Xiuming**[1] **LIU Yidong**[1,2] **YANG Hongchun**[1]

([1] School of Physics, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 611731;

[2] Glasgow College, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 611731)

Abstract Under the background of new engineering education, the teaching team aims at "strengthening the foundation of physics, solving engineering problems, and broadening academic horizons", and has carried out the reform of "three-dimensional" physics teaching situation creation. By constructing MOOC and SPOC learning resources including "University Physics" in Chinese and English, physics demonstration experiments, and physics project-based courses, and using information-based teaching methods such as Feishu and Rain Classroom, we have carried out "online-offline" combination Blended teaching exploration. Using more than 110 experimental projects in our university physics demonstration laboratory to cover all university physics knowledge, through classroom demonstrations, online digital experiment construction, open experiments and other means to stimulate students' interest and guide students to apply theoretical knowledge to engineering Practice. Based on the rich connotation of physics, our school has set up a freshman seminar on "Physics and Human Civilization", experimental courses, and practice courses, creating a "three-dimensional" physics teaching situation in an all-round way, providing compound innovative talents.

Key words Three-dimensional teaching situation; online-offline hybrid teaching; demonstration experiment fusion

大学物理教学中课程思政素材的融入
——以“位移电流 全电流定律”为案例

周可雅* 任延宇 张 田 张 宇
（哈尔滨工业大学物理学院，黑龙江 哈尔滨 150001）

摘 要 为了将课程思政素材融入到大学物理教学中，提升课程品质，实现育人和育才的相互统一，本研究以《大学物理》中“位移电流 全电流定律”为案例进行了教学实践。本案例的主导理念是以学生发展为中心、充分发挥并实现大学物理课程的协同育人作用。通过引入传统文化，激发学生的文化自信；引入科学家思想、名言警句，熏陶和提升学生的科学素养；位移电流假说的多角度价值升华，鼓励学生树立正确的科学观、价值观，激发学生的创新意识，培育学生为国奋斗的情怀。

关键词 课程思政；大学物理；位移电流；全电流定律

引言

古语曰：“师者，所以传道授业解惑也”。2020年5月8日，为深入贯彻落实习近平总书记关于教育的重要论述和全国教育大会精神，教育部印发了《高等学校课程思政建设指导纲要》。在该纲要里指出“全面推进课程思政建设，教师是关键”，要提升教师课程思政建设的意识和能力[1]。课程思政是新时代高等教育下的新举措和新方向，在教学过程中要充分发挥课程思政促学促教促改的作用[2]。课程思政要求教师在教学活动应该基于人才培养和课程建设目标，有针对性的引导学生的学业志向和学习诉求；通过课程教学，引领和培养学生的科学态度、科学思维、科学精神和科学素养；结合“四个”教育，培养学生读懂和发展中国道路、中国经验和中国方案；教育学生辩证的看待中国所面临的机遇和挑战，从中华民族复兴大局中定位自身，锤炼自己。

大学物理以经典物理、近代物理和物理学在科学技术中的应用为主要内容，它所传授的物理学基本概念、基本理论和基本方法是构成学生科学素养的重要组成部分，是多学科交叉、转移和渗透的支撑点，在促进科技创新和技术进步等方面发挥着先导作用，是高等学校理工科各专业学生所需要学习的一门重要公共基础课[3]。因此作为本课程的任课老师，应响应时代的号召，深化课程思政建设，持续提升物理教学质量。本课程的实际授课中，以“厚基础，强能力，重创新，见成效”为教学理念，以“情怀引领”为牵引，以“知识传授”为手段，以“能力提升”为首要目标，坚定学生对我国社会主义核心价值观的认同，塑造学生勤奋、朴素、创新、思辨、独立、理性、客观、善良的价值观。

本文以工科大学物理中“位移电流 全电流定

收稿日期：2023-05-28
基金项目：创新创业教育与物理专业课程融合研究（项目来源：黑龙江省教育厅，SJGY20210339）；物理类本科生科学研究能力培养的研究与实践（项目来源：黑龙江省教育厅，SJGY20200208）。
通讯作者：周可雅，男，副教授，主要从事物理教学科研工作，研究方向为微纳光学和非线性光学，zhoukeya@hit.edu.cn；任延宇，男，教授，主要从事物理教学科研工作，研究方向为高能重离子碰撞，ryy@hit.edu.cn；张田，女，硕士研究生，研究方向为微纳光学与信息光学，770139360@qq.com；张宇，男，教授，主要从事物理教学科研工作，研究方向为激光探测的理论与实验研究、光折变非线性光学的理论研究等，zhangyunn@hit.edu.cn。
引文格式：周可雅，任延宇，张田，等. 大学物理教学中课程思政素材的融入——以“位移电流 全电流定律”为案例 [C]. 2023年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会，2023.
Cite this article: ZHOU K Y, REN Y Y, ZHANG T, et al. The integration of the ideological and political elements into college physics teaching: Take “Displacement current and the total current law” as a case[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education, 2023. (in Chinese)

律”为案例，坚持以学生发展为中心，坚持启发式教学的教学指导思想，将课程内容与中国传统文化相融，与科学思维、科学发展规律和科技应用相结合，对课程思政在大学物理中的实施进行了探索。

1 教学目标

1.1 知识目标

能够明确位移电流、位移电流密度的定义；能够掌握并区分位移电流与传导电流的异同；能够从恒定电流的安培环路定理推广到全电流的安培环路定理。

1.2 能力目标

能够感悟并掌握位移电流“科学假说”引入的物理背景和必要性；掌握解决物理问题的简化法、模型法、类比法、对比分析、归纳与推演等科学方法。

1.3 价值引领

深入理解电、磁及其相互作用物理规律的内涵，体会电磁规律的“对称之美”；体会物理学基础理论对于科学发展和科技创新的源头推动作用；通过相关知识拓展，增强学生科学报国、创新强国的理想信念，坚定民族自信心和自豪感。

本节课程的教学重点是“位移电流”假说提出物理背景的介绍，以及引导学生完成从“安培环路定理”到“全电流定律”的过渡。

教学难点是如何引导学生避免“位移电流是由其他规律推导出来”的逻辑谬误；引导学生掌握和理解“位移电流”与“传导电流”的异同。

2 学情分析

“位移电流 全电流定律”是工科大学物理学习中完成经典电磁理论中麦克斯韦方程组的最后一个知识点。通过之前大学物理的学习，学生已经掌握了静电场和稳恒磁场的基本规律；通过学习法拉第的电磁感应定律，知道了变化的磁场能够激发涡旋电场；但是学生对于变化的电场能否激发涡旋电场还尚不明确。本节课引入的位移电流，阐明了变化的电场能够激发涡旋磁场，深刻揭示了变化电场和变化磁场的内在联系和相互依存关系，反映了自然界的对称性。将所有的电场和磁场规律综合起来，就可以建立完整的经典电磁理论体系，归纳出电磁场的基本方程——麦克斯韦方程组。麦克斯韦方程组全面而完整的描述了电磁场的运动规律，麦克斯韦利用他敏锐的洞察力预言了电磁波的存在，并论证了光的电磁波性质[4]。因此本节课的授课内容在学生的电磁理论学习中起到了承上启下的作用，是掌握麦克斯韦方程组及其物理内涵的关键环节。

3 教学组织与实施

3.1 课程导入 激发兴趣

首先借由蝴蝶的对称之美，启发同学们思考电磁现象之间是否存在着对称性？引导学生回顾“静电场”和“稳恒磁场”的典型物理规律，让学生思考其数学形式上的对称性，从而让体会电和磁之间静态规律的对称性。

静电场：有源、无旋 $\oiint_S \boldsymbol{D}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S}=\sum_{S内} q_{0i}$；$\oint_L \boldsymbol{E}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}=0$。

恒定磁场：无源、有旋 $\oiint_S \boldsymbol{B}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S}=0$；$\oint_L \boldsymbol{H}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}=\sum_{L包围} I_{0i}$

而通过电磁感应的学习，学生对于麦克斯韦“涡旋电场”假说是熟悉的，变化的磁场能够产生电场这个规律更容易引起他们的共鸣。

$$\oint_L \boldsymbol{E}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}=-\iint_S \frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S}$$

通过这样的思想共鸣后，提出本节课程的核心问题：“变化的电场能否诱发磁场，当电场和磁场变化时物理规律是否仍然成立？”此处可引用庄子的哲学思想“判天地之美，析万物之理”，将物理学对称之美与中国传统文化相融，同时也把将相对抽象甚至枯燥的物理学知识与美学相结合，激发学生对课程内容的兴趣[5]。

3.2 建立模型 验证推演

展示稳态电路与电容器充电暂态过程的物理模型，要求学生对二者分别进行分析。对图1中左侧的物理过程进行分析：电路处于导通状态，环路所对应的两个曲面中，穿过红色和黑色曲面的电流强度是相同的；对图1中右侧电容器充电的暂态过程进行分析：开关闭合瞬间，电流随时间变化，电容器两个极板电荷逐渐增加。

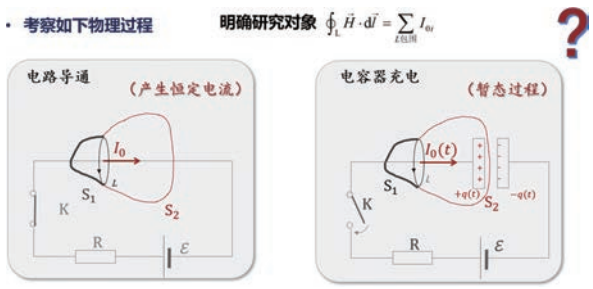


图 1 考察物理过程：稳态电路与电容器充电的暂态过程

采用启发式教学，引导学生将电容器充电的暂态过程与稳态电路中的电磁场分布规律进行对比，要求同学们思考：在稳态电路中与暂态过程中，闭合回路 L 所对应的 S_1 和 S_2 两个曲面，电流强度的通量是否相同，安培环路定理对闭合回路 L 是否始终成立？学生结合所学知识，通过分析思考发现在恒定电流的情况下，电流是连续的，安培环路定理对任意曲面 S_1 或 S_2 始终成立；而在非恒定电流情况下，电流不连续了，安培环路定理左侧的积分在曲面 S_1 和 S_2 发生了不一致的现象。通过上述分析，凝练并提出科学问题：安培环路对变化电流所产生的磁场并不是始终成立的，应该怎么办？通过充分的教师指引和师生互动，在课堂教学中融入麦克斯韦的科学家事迹，引导学生体会麦克斯韦的科学思想，感悟科学假说提出的思想历程，学会从物理学发展的角度思考科学问题[6]。

1856 年 2 月麦克斯韦在剑桥哲学学报上发表了一篇名为《论法拉第力线》的论文，在这篇论文里他写道“电科学的现状看来特别不便于思索”，他认为“有效的科学研究的第一步必须把已有的研究成果简化和归纳成一种思维易于领会的形式”。随后在 1862 年，麦克斯韦发表《论物理力线》这篇重要论文，在其中构建了一个精巧的“分子涡旋”模型，从移动电粒子这一物理图像中产生了一个新的电磁学概念，即“位移电流”。1873 年，麦克斯韦在《电学和磁学通论》这部经典著作中，叙述了引入位移电流概念的思想过程：“只有很少的实验，证明介质中位移电流的改变与电流的电磁作用相联系，但是协调电磁定律与不闭合电流存在的极大困难使我们必须接受瞬变电流的存在是由位移变化产生的，这是许多理由中的一个理由”[7]。

接着跟随老师对提出的“物理假说”进行验证性推演[8]，如下：

第一步：对 S_1+S_2 应用电荷守恒定律：$I_0(t)=\dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}q(t)$

第二步：对 S_1+S_2 应用高斯定理：$\oiint_{S_1+S_2}\boldsymbol{D}(t)\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{S}=q(t)$

第三步：对方程左侧进行拆分：$\iint_{S_1}\boldsymbol{D}(t)\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{S}+\iint_{S_2}\boldsymbol{D}(t)\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{S}=q(t)$

第四步：删除第一项，并求导，可验证位移电流密度在电容器两个极板间的积分与导线内的电流强度在数值上的一致性。由此成功将安培定理过渡到全电流定律，也可称作“全电流安培环路定理”：

$$\oint_L \boldsymbol{H}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{l}=\sum_{L包围} I_{0i}+\iint_S \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{S}$$

针对位移电流和传导电流的异同组织学生之间进行讨论和课堂互动，回答三个核心问题：为什么要引入位移电流，位移电流的实质是什么，位移电流和传导电流有何不同之处？而这又有何相同之处？这样通过抽丝剥茧的知识展开，促进学生对“位移电流”的物理内涵更加深入的认识。

本节段的最后，引导学生重新审视电场和磁场的环路定理及高斯定理，感受电和磁在表达形式上的对称之美和相互转换的对称之美；感受“涡旋电场”和“位移电流”两个科学假说在理解自然界对称之美上的关键作用。此时援引爱因斯坦名言“大自然最不可被理解的就是它竟然是可以被理解的”，使学生更深入的体会物理学对自然界解读的美妙之处[9]。

本教学环节能够有效地帮助学生理解从静电场、恒定磁场的规律过渡到变化的电场与磁场之间相互转化的规律，与此同时在课程讲授过程中穿插麦克斯韦、爱因斯坦等人的科学思想、名言警句，引发学生在科学家精神、敬畏大自然、尊重科学发展规律、认清物理基础理论重要性这四个方面产生共鸣。

3.3 归纳总结 价值升华

从物理思想、物理理论、物理学发展和科技应用四个层面向同学们介绍“位移电流”假说的价值

和意义：

物理思想层面：反映了“科学假说”的物理思想在科学发展和创新研究中的重要性；物理理论层面：完成了电磁相互作用的最后一块拼图，揭示了“电”“磁”的基本物理规律和自然界的对称之美；物理学发展层面：它所揭示的电磁耦合规律成功预言了“电磁波”的存在，推动了从经典物理到近代物理的发展；科技应用层面：它实现和进一步发展雷达、激光、5G技术、中国天眼（FAST）等高新科技的理论基础。引导学生感受四个层面的价值意义，从而产生思想上的共鸣；勉励学生重视基础理论知识学习，树立“科学报国、创新强国”的理想信念。

最后分别针对电磁耦合所揭示的物理本质和与机械波相关知识的联系进行以下分析。思考题一：如何看待两个环路定理方程右侧的符号不对称性？如果两个同为“正”或者同为“负”会怎样？思考题二：由麦克斯韦方程组揭示电磁波速度是相对于谁的速度呢？要求针对两个问题学生查阅资料，完成研究性作业，意在体现本节课程的高阶性、创新性和挑战度；引导学生建立不同知识点互通的物理学图像。

4 教学效果分析及教学反思

本案例获哈工大第二届课程思政教学竞赛“优秀教学设计案例奖”，收录于《哈尔滨工业大学优秀课程思政教学设计样例》，2021年7月本人受邀在大学物理“第四届名校公开课”讲授了本节段的教学内容。在2021—2022年度大学物理和大学物理实验课程思政案例遴选，该案例被评为A级，获教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会课程思政工作委员会立项（图2）。



图2 该教学案例的获奖及立项情况一览

《大学物理》教学中有机融入课程思政元素，有效提升了学生的学习兴趣，帮助学生筑牢其物理学基础，增长学生见识，激发其学习热忱。本教学案例从电磁对称性的角度展示物理学之美，学生在学习这段内容后给予了很高的评价。本学期该课程的授课对象为计算机和电信大类的学生，他们上完本节段后典型评语摘录如下：“虽然一心想要进计算机，但是学习大学物理知识还是可以为自己培养一个好的物理思维”，“我未来很大概率会从事和电子通信相关的行业，电磁的学习让我对这个专业产生了更大的兴趣，也让我了解了许多专业知识”，“即便是计算机专业，未来如果选择偏向底层的专业的话，涉及到基本原理时可能也会用到必要的物理知识，所以电磁也更应该学好才行”。

5 结语

本研究以大学物理课程中“位移电流 全电流定律”一节为例，具体讲述了将课程思政元素融入物理教学的实施办法。本案例不仅充分挖掘了课程内容固有的思政元素，同时也引入了多元的思政元素，切实贯彻了盐溶于水的思想，既体现了润物无声，又做到了掷地有声[10,11]。“判天地之美，析万物之理”正是物理这门自然科学的真实写照，描述电磁规律的麦克斯韦方程组也被认为是物理学最美丽的公式之一；“位移电流假说”是本节课程的灵魂，同时也是麦克斯韦的关键科学思想之一；“大自然最不可被理解的就是它竟然是可以被理解的”这句爱因斯坦的名言，恰如其分的反映了麦克斯韦方程组对自然界电磁规律的定量描述，也正对应了物理之美；基于涡旋电场和位移电流两个科学假说，磁场和电场相互转化的物理图像揭示了电和磁的这种相互耦合的关系，这正是现在5G、激光、微波物理、中国天眼等科技成果的底层物理基础，能够激发学生科技报国的家国情怀。

参 考 文 献

[1] 教育部. 高等学校课程思政建设指导纲要. [EB/OL]. (2020-06-01).

[2] 黄丽，刘伟龙，赵海发，等.“同向同行”的大学物理实验课程思政教学设计与探索[J]. 物理与工程. 2019，(S1)：37-

39.

[3] 王晓鸥，张伶莉，袁承勋，等.新工科背景下的大学物理课程建设与实践[J].大学物理.2021，(4):45-49.

[4] 赵远，王晓鸥，张宇，等.大学物理学[M].北京:高等教育出版社,2012.

[5] 杨朋聚.判天地之美 析万物之理——赏析新教材“万有引力与宇宙航行”中物理学科核心素养的渗透[J].物理通报.2021，(5):145-147.

[6] 张晓磊，张乐，张钰伊，等.“物理学史和物理学方法论”课程思政教学探索[J].大学物理.2021，(4):40-44.

[7] 向义和. 麦克斯韦电磁场理论的建立[J]. 物理,1991(1):43-48.

[8] NAMIAS V. Comment on “Displacement current—A direct derivation,” by T. Biswas (Am. J. Phys.; 56, 373-374 (1988)). American Journal of Physics 57.6 (1989): 557-558.

[9] 吴王杰.求真，至善，唯美——对大学物理课程思政的思考和实践[J].物理与工程,2021,31(6):119-123.

[10] 王向贤.光学教学中的“课程思政”研究与实践[J].物理与工程.2019，(2):45-48.

[11] 李鹏，李志坚，马杰.课程思政的关键在于“潜移默化”和“润物无声”——大学物理课程开展课程思政的实践与思考[J].物理与工程.2022，(1):184-189.

■

THE INTEGRATION OF THE IDEOLOGICAL AND POLITICAL ELEMENTS INTO COLLEGE PHYSICS TEACHING: TAKE “DISPLACEMENT CURRENT AND THE TOTAL CURRENT LAW” AS A CASE

ZHOU Keya REN Yanyu ZHANG Tian ZHANG Yu

(School of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001)

Abstract The purpose of this article is to demonstrate how to integrate the ideological and political elements into the teaching of college physics. Such an integration can highly improve the quality of the course and the mutual unity of education and talent cultivation. We will take “displacement current and the full current law” as a case for teaching practice. The main concept of the case is to leverage and realize the collaborative educational role of the college physics in the development of students. Traditional culture is introduced to stimulate students' cultural confidence. The thoughts of scientists and famous aphorisms are introduced to edify and improve students' scientific literacy. It is shown that our practice can help students to establish a correct and scientific outlook and values, stimulates their innovative consciousness, and encourage them to strive for the country.

Key words curriculum ideology and politics; college physics; displacement current; the full current law

多措并举,“近代物理实验”一流课程建设和申报

庄　娟　李建东　贾　莉　刘永新　海　然　刘升光　秦　颖　王晓娜
(基础物理国家级实验教学示范中心(大连理工大学),辽宁 大连　116024)

摘　要　“近代物理实验”一流课程的建设与实践是教学团队多年来在精编教材、整合线上线下优质教学资源、完善教学方法等方面研究与实践的成果总结。课程内容更具现代化和系列化,课程思政与课程内容更为融合。提高了实验课的教学效果,达到了对学生培养素质、提高能力的目标。最终获批省一流课程。

关键词　近代物理实验;一流课程建设;教学改革

通过“近代物理实验”课程的学习,可以使学生了解近代物理学发展史及近代物理领域中的基本思想和实验方法,更好地掌握近代物理的基本原理,熟悉现代高新技术领域及相关仪器设备的使用。培养学生严谨的科学作风和进行科学研究的能力,以及学生对物理概念和现象的理解和分析能力。培养基础扎实、适应性强,具有创新能力和竞争能力的高素质人才。针对上述目标,我们开展了系统研究,“近代物理实验”获批了辽宁省一流课。

1　优化实验项目,构建近代物理新教学体系

精选有代表性的基础实验:主要选取物理学发展史具有里程碑式的经典实验,设置专题研究型实验,作为基本实验的拓展和补充;设置综合创新型实验,结合教师的科研项目,学生在教师的指导下,自行设计、组织和开展实验;开发系列化实验,拓展学生思维广度。

系列化实验的设置:实验内容具有相关性和递进性,有利于提高学生的实验兴趣和思维拓展。如薄膜系列实验,从镀膜、测膜厚、到薄膜形貌分析,连续三个实验实现了从薄膜制备到多方位表征的系列化研究[1]。

转化科研成果开发特色实验项目:为了解决学生对实验内容跟目前科研需求之间关系不清晰问题,利用教师的科研成果,开发具有实用背景的特色实验。这种教学科研为一体的综合实验平台,使学生理解了近代物理实验与国家重大需求之间的紧密联系。对学生的学习兴趣和创新能力的培养有很好的推动作用。

2　适应信息化发展,优化教材内容,提升教材水平

随着科技进步不断引进新的实验内容融入《近代物理实验》教材中,增加研究性、设计性实验的比例,加强综合应用实验的开发。如“液晶光学双稳态和混沌”和“空间光调制器的振幅调制”等实验内容。在2019年第二版《近代物理实验》教材中,依托现代网络信息技术的发展,把相关实验的重点、难点内容和实验操作中出现的物理现象制作成多媒体视频,方便学生预习实验内容和关键知识信息。学生通过手机扫描教材中的二维码,实现了教材与多媒体视频交互的学习方式,预习效果事半功倍。

3　“思政元素”融入教学过程,激发学生爱国情怀

为了培养学生的爱国热情,达到为党育人为

收稿日期:2023-05-28
基金项目:大连理工大学研究生教改基金项目(No. JG_2021022)。
作者简介:庄娟,女,副教授,主要从事近代物理实验教学及实验教学方法改革研究工作,zhjuan@dlut.edu.cn。
引文格式:庄娟,李建东,贾莉,等. 多措并举,“近代物理实验”一流课程建设和申报[C]. 2023年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会,2023.
Cite this article: ZHUANG J, LI J D, JIA L, et al. Taking multiple measures simultaneously, constructing and applying for the first-class course of “Modern physics experiment”[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education, 2023. (in Chinese)

国育才的目的，在教学过程中融入了“思政元素”，激发学生爱国情怀。近代物理实验课程具有和思政教育相融合的先天优势，针对不同实验内容和特点，深入挖掘每个实验背后的思政元素，润物无声地融入实验教学中，让学生能够自然而然地吸收。强化学生的社会责任感，激发其爱国热情。

引入为我国物理事业做出突出贡献的物理学家的爱国故事以及我国目前发展处于世界前沿的科技成果如图 1，以此来激发学生的爱国情怀和民族自豪感。

4　以老带新，提升教学团队整体水平

注重教师团队建设，以老带新，强化教学研究，鼓励教师积极参与教学研究、带毕业论文和创新实验，指导大学生学术竞赛，提升教师的授课水平。组织集体备课、教学研讨提升教学团队的整体教师水平。近五年课程团队获教学类成果奖 14 项，承担国家级、省部级、校级教研及实验室建设项目 14 项，发表教学研究论文 15 篇，出版中文教材 1 部，英文讲义 1 部，指导学生竞赛获省级以上奖励 22 项。2021 年获第七届全国大学生物理实验竞赛优秀组织奖。组建英文教学队伍，推动实验课教学国际化。针对“中国-白俄罗斯”本科生的全英文实验课，组建了一支实验技能和英文水平均过硬的全英文教学队伍，高质量完成了学校国际化办学的实验教学任务。

5　加强实验室信息化水平，不断提高教学效果

搭建了实验中心信息化硬件平台和软件系统，把信息化资源统一部署到云服务器上，提高了近代物理实验室的信息化水平和运行效率。开发优质网络教学资源，包括虚拟仿真实验、实验教学视频和电子教案等。已经完成“真空技术”等 12 个虚拟仿真实验[2]。其中“辉光放电等离子体物理虚拟仿真综合实验”和“射频等离子体探针诊断及尘埃晶格观测虚拟仿真实验”已经入选国家虚拟仿真实验共享平台。把实验教学有效地延伸到课外，助力学生自主学习。并保证了疫情环境下的教学任务圆满完成。

6　认真总结教学经验，成功申报辽宁省一流课程

我校“近代物理实验”课程自 1982 年起开设，在实验教学中，教育学生认真对待每一个实验现象，如实记录每一个实验数据，培养学生严谨的科学态度和知难而上的优秀品质。“近代物理实验”课程 2007 年获得学校精品课程，经过不断建设，优化了教学体系，出版了教材，建设了老中青结合的教师队伍。在此基础之上，2022 年申报成功辽宁省一流课程。

申报线下一流课程准备工作包括填写申报书、录制 10 分钟的说课视频、教学设计样例说明和最近一学期的测验、考试及答案，并在学校教务处网站上下载最近一学期的教学日历、最近两学期的学生成绩分布统计。其中重要的是申报书的填写和说课视频的制作。申报书主要包括课程目标、课程建设及应用情况、课程特色与创新、课程建设计划。按照课程的内容和特点认真填写。10 分钟说课视频采用手机录制，说课视频内容包括



图 1　思政教育融入实验教学内容

课程负责人在大屏幕电视上讲解申报PPT材料，实验课教学视频资料如图2，实验室整体环境和学生实验操作的图文说明资料等，用绘声绘影软件完成后期的制作。

如图3，在教学设计样例说明材料中选取“真空的获得及低气压等离子体辉光放电”实验为例介绍实验流程，采用了课前预习、课堂讲解（物理知识＋课程思政）、实验操作、数据记录和课后延伸相结合的教学方式。

通过“近代物理实验”一流课程的建设和申报，对实验室的整体教学环境进行优化，实验内容不断完善，教材更具信息化特点，教师能力不断提高。对“近代物理实验”课程的各方面进行系列化改革，收到了良好的教学效果。

参 考 文 献

[1] 庄娟，杨华，李雪春，等. 自制真空系统渐进式系列实验教学[J]. 物理与工程，2017，27(Z1)：293-295.
ZHUANG J，YANG H，LI X C，HAI R. Progressive series experimental teaching of home-made vacuum system[J]. Physics and Engineering，2017，27(Z1)：293-295.(in Chinese)

[2] 庄娟，杨华，李建东，等. 真空技术虚拟仿真实验在教学中的应用[J]. 物理与工程，2018，28(Z1)：99-104.
ZHUANG J，YANG H，LI J D，et al. Application of vacuum technology virtual simulation experimental in teaching[J]. Physics and Engineering，2018，28(Z1)：99-104.(in Chinese)

■

TAKING MULTIPLE MEASURES SIMULTANEOUSLY, CONSTRUCTING AND APPLYING FOR THE FIRST-CLASS COURSE OF “MODERN PHYSICS EXPERIMENT”

ZHUANG Juan　LI Jiandong　JIA Li　LIU yongxin　HAI Ran　LIU Shengguang　QIN Ying　WANG Xiaona

(National Demonstration Center for Experimental Physics Education (Dalian University of Technology))

Abstract　The construction and practice of the first-class course “Modern Physics Experiment”



图2　说课视频的制作

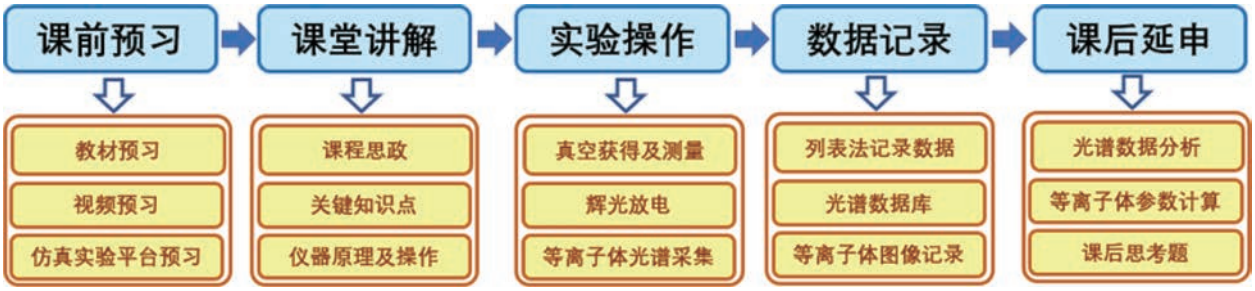


图3　教学设计样例中实验流程的设计

is a summary of the research and practice results of the teaching team over the years in the areas of refining textbooks, integrating high-quality teaching resources online and offline, and improving teaching methods. The course content is modern and serialized, and the ideological and political aspects of the course are integrated with the course content. The teaching effect of the experimental course has been improved, achieving the goal of cultivating students' quality and improving their abilities. It has been approved as a provincial first-class course.

Key words modern physics experiments; construction of first-class courses; reform in education

智能型大学物理试卷分析系统的研发

邱 红 张 睿*

（同济大学物理科学与工程学院，上海 200092）

摘 要 大学物理作为理工科专业学生的必修课程之一，不同专业和能力的学生对知识点的掌握情况会有所差异，教学计划需要进行个性化调整。比较分析发现，多维项目反应理论（MIRT）模型具有更高的拟合度，可以用于试卷分析并对被试进行多维能力认知诊断。调用该模型，推断出学生的一个能力参数即知识掌握程度，并探究该参数与优秀率和不及格率之间的关系。同时，设计并开发智能型试卷分析系统，该系统可以集成MIRT模型，较准确地评估学生的知识掌握程度，自动化生成知识图谱，为知识点的学习和教学提供了有益的支持和参考。因此，本研究可以帮助学生和教师更好地理解和应用大学物理学科的知识，并提供具有针对性的教学改进建议。

关键词 多维项目反应理论；试卷分析；知识掌握；教学评价

1 研究背景

2023年地平线报告强调了基于人工智能技术实现预测性和个性化学习的重要性。报告指出，通过应用人工智能技术，可以减轻教学中耗时的因素，并为学生提供更加精准和个性化的形成性评价反馈。中国教育部与其他相关部门共同发布了《关于推进教育新型基础设施建设构建高质量教育支撑体系的指导意见》。该指导意见强调了利用大数据、人工智能等新一代信息技术创新评价工具的重要性，特别是在评价手段和内容方面的呈现提出了明确的指示[1]。其中包括开发能够记录学生学习表现并支持学生形成性评价的工具[2]。随着数据的丰富性、数据量的增加以及数据结构的复杂性，对于评价技术提出了更高的要求。为了满足这些要求，教育评价工具需要依赖信息技术，实现数字化和智能化的功能。通过数字化和智能化的手段，评价工具能够更好地处理庞大且复杂的数据，提供准确、实时的评估结果，并以可视化的方式呈现，使教育评价更加高效、客观和有针对性[3]。

人工智能技术的应用推动了基于数据的循证教学评价的发展[4]。这种评价方法注重评价的真实性和准确性，对教学效果的反馈具有直接的影响[5]。通过利用人工智能的知识图谱、数据处理与挖掘、区块链等技术，教学中涉及的情感数据、行为数据和过程数据等可以被智能地感知和动态地存储。这些技术为教学评价提供了循证依据，使评价过程更加精确和科学。通过分析学生的考试数据，评价过程变得更加客观和科学。不再仅依赖于师生的主观感知和印象，而是通过教学数据来提供证据和依据[6]。这种评价方式能够更全面地了解教师在教学中的付出和成效，并帮助教师识别自己在课堂教学中存在的不足之处。同时，通过与同类群体特征的教师进行比较，教师可以发现自己与其他教师之间的差距，并进行深入思考和改进[7]。

考试是被广泛采用的一种方式，用来评估学生对学科知识的掌握情况，并衡量他们是否达到学习的要求。通过对学生试卷进行详细的分析，可以直接观察和了解学生在学科知识上的掌握水

收稿日期：2023-05-28

通讯作者：张睿，男，副教授，主要研究方向为教育技术学，98733@tongji.edu.cn。

引文格式：邱红，张睿. 智能型大学物理试卷分析系统的研发[C]. 2023年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会，2023.

Cite this article: QIU H, ZHANG R. Development of an intelligent college physics exam analysis system[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education, 2023. (in Chinese)

平。目前学科教师在对学生考后试卷进行分析时,通常更关注某次考试的全班分数分布情况。然而,这种分析对学生和教师来说意义不大。真正有效的试卷分析应该包括了解该班同学对试题所涉及的知识点的掌握情况,并绘制可视化图表,以便学生和教师能够更有效地进行学习。因此,设计并开发一个综合处理数据、集成模型、数据分析和可视化图谱的试卷分析系统至关重要。智能型试卷分析系统是一种基于信息技术的教育评价工具,旨在对学生的考试试卷进行深入分析和评估。该系统利用大数据和人工智能等技术,通过对试卷的内容和学生答题情况进行综合分析,提供全面的评价和反馈[8]。

2 试卷分析系统的需求分析

2.1 试卷分析系统的功能

智能型试卷分析系统可以评估学生对相关知识的掌握情况,提供详细的评估结果和反馈。兰晓红等学者[9]通过对学科课程标准进行分析,建立一个包含所有知识点的课程标准知识点库,使用图像采集设备将学生的答卷输入系统,并利用OCR图文识别算法对试卷进行识别,形成个性化报告。李雪[10]利用粗糙集和决策树的优势相结合,以及改进的ID3算法,构建了一个试卷分析系统。该系统分为三个主要部分,包括学生成绩分析、教学成果分析和试卷质量分析。系统的核心是使用改进的ID3算法进行数据挖掘,并通过决策树算法对挖掘得到的数据进行深入分析,从而实现对成绩的全面评估和分析。曾令思等人[11]进行了改进的关联规则Apriori算法,并设计了集成传统成绩分析和数据挖掘功能的试卷分析系统。

本研究设计的试卷分析系统由以下几个重要功能组成:(1)数据预处理:预处理模块的存在是为了处理数据中的噪声和缺失值等问题。它可以清除数据中的不必要的干扰和误差,填补缺失的数据,并进行数据的归一化、标准化或规范化等操作,以确保数据的一致性和可比性。通过预处理,可以获得更完整的数据集,为后续的数据挖掘过程提供可靠的基础[11];(2)调用MIRT模型:将预处理过的数据通过Rserve客户端与R语言模型的服务端建立连接,远程调用R语言中的mirt模型。将数据文件的地址传送到模型系统,以便模型读取数据文件;(3)模型统计分析:系统具备对MIRT输出的试题区分度、难度和学生能力参数进行分析的能力。结合试卷中的知识点标注,系统能够评估学生对不同知识点的掌握情况。这样的分析提供了试卷整体表现和班级相对表现的信息。通过统计分析,可以了解班级在各个知识点上的掌握情况,以及不同班级在相同教师教授下在知识点掌握方面的差异。这有助于评估试卷的难度水平和学生的学习程度,并能够识别出不同班级中的优势和薄弱环节。根据这些分析结果,能够提供有针对性的教学建议和改进措施,以帮助教师更好地进行教学和提高学生的学习成效。(4)数据可视化:系统还提供了试卷分析结果的可视化展示功能,通过知识图谱的形式呈现,使用户能够更加直观地理解和分析试卷的知识点特征以及学生的掌握情况。这种可视化展示方式可以帮助学生和教师更轻松地从数据中获取信息,并做出准确的判断和决策;(5)班级的个性化评估:系统可以为每个班级生成相应的知识图谱,以评估班级的知识点掌握情况,同时,系统还提供了查看其他班级和全校知识点掌握情况的功能。教师可以根据班级的知识图谱和比较不同班级的情况,进行有针对性的教学策略调整,以确保每个班级的学生都能够获得最佳的学习效果。

2.2 试卷分析系统的操作流程

为了进行学生成绩数据的分析和知识掌握程度的评估,可以按照以下流程进行操作:

(1) 在前端页面上,用户上传Excel格式的成绩数据。

(2) 后端使用EasyExcel工具对上传的数据进行分析和预处理,将其转换成模型集成系统所需的数据格式。

(3) 预处理完毕后,将处理好的数据文件存储到本地服务器或指定的位置。

(4) 通过Rserve客户端与R语言模型的服务端建立连接,远程调用R语言中的mirt模型。

(5) 将数据文件的地址传送到模型系统,以便模型读取数据文件。

(6) 模型系统使用数据文件地址读取数据,并进行相应的数据分析。

(7) 分析完成后,将数据分析结果写入数据库,以便后续使用和查询。

(8) 基于数据库中的数据结果,进行知识掌握程度的分析和评估。

(9) 最终,生成知识图谱,将其以可视化的方式渲染到前端页面上,供用户查看和交互。

通过上述流程如图1所示,将成绩数据经过预处理、模型分析和数据库存储,得到学生的知识掌握程度,并通过知识图谱的可视化展示,帮助教师和学生更好地理解和评估学生的学习情况。

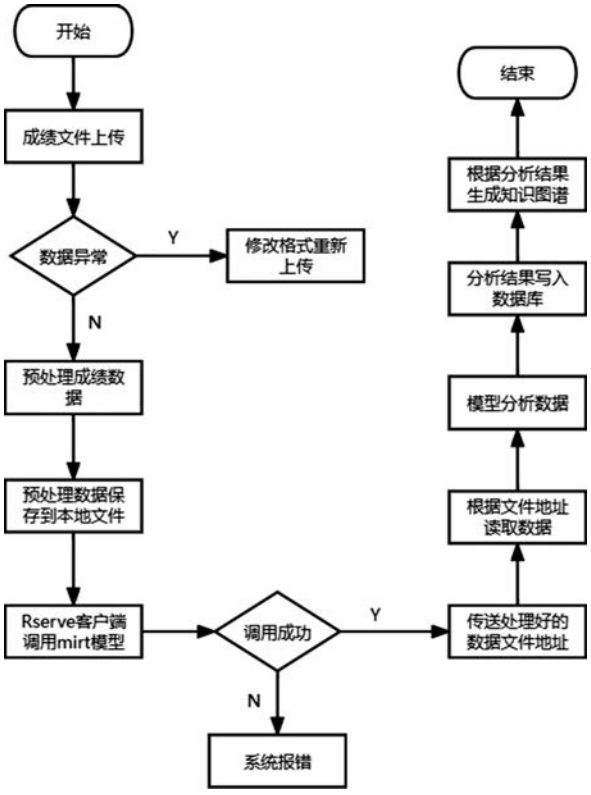


图1 试卷分析系统的操作流程

3 试题难度和区分度的计算方法

3.1 MIRT模型介绍

在教育测量领域,存在一种称为多维项目反应理论(Multidimensional Item Response Theory,MIRT)的理论框架。这个理论框架适用于那些试题本身考察的能力并不唯一的情况,也就是说一个题目可能涉及到学生多个能力点的考察。本文采用了Reckase提出的多维Logistic模型[12]作为其基础模型。在这个模型中,可以计算第i个被试在正确回答第j个题目上的概率。计算公式如(1):

$$P(x_{ij}=1\mid\theta_i,a_j,\gamma_j)=\gamma_j+\frac{(1-\gamma_j)}{1+\exp\left[-D(a_j^T\theta_i+d_j)\right]} \quad (1)$$

其中:$\theta_i=(\theta_{i,1},\theta_{i,2},\cdots,\theta_{i,m})$代表第i个被试的能力向量;$a_i=(a_{i,1},a_{i,2},\cdots,a_{i,m})$代表第j个题目的区分度向量;$d_i$为与题目难度参数;$\gamma_j$为题目的下渐近参数;D为模型调整常数[13]。为了提供多维度的评价信息,在经典测量理论(CTT)和单维项目反应理论(UIRT)中,常常采用项目间多维模型设计试题。这种设计方法将整个测验分为多个子量表,每个子量表专门用于测量学生在某个特定能力维度上的表现。每个子量表的得分与相应的能力维度得分相对应[14]。

当试题数量减少以减少要考查的能力维度时,这会对测试的预期目标产生影响。传统的命题设计往往采用项目内多维模型,即一道试题同时考查多种能力维度,如何从被试的表现信息中分离出各个能力维度的得分成为学生能力测量的一个难点。多维项目反应理论(MIRT)的快速发展为解决这一问题提供了新的路径。MIRT建立在IRT和因子分析的基础上,结合了它们的优点,并在项目功能差异、多维认知诊断等方面得到广泛应用[14]。MIRT克服了IRT只能提供单一能力值的限制,它能够从被试在多个维度上的表现信息中提取出各个维度的得分,这与能力参数的多维性是一致的。因此,MIRT的发展为在项目内多维模型设计下从被试的表现信息中分离出各个维度的得分提供了一条新的路径。它充分利用了多维项目反应理论的优势,使得能力测量可以在多个维度上提供被试的表现信息,进一步增强了评价的准确性和维度覆盖度。

在多维项目反应理论(MIRT)中,选择适当的拟合方法对于获得准确的参数估计和提高模型拟合程度至关重要。Kim[15]学者设计了多维项目反应理论的概念框架,相比于单个维度的测量,MIRT估计的数值更接近真实值且误差最小。Xu[16]设计了多维项目反应理论下的多阶段自适应测验的自动测验组装和路由规则,估计准确度高于MCAT。Liu[17]探究了MIRT的MHRM和MCEM的估计方法,验证了MHRM估计方法拟合度更高。Min[18]学者探究双因子MIRT模型可以作为属性为连续变量的测评,模型拟合度更高。Marveled[19]举例说明了多维项目反应理论

(MIRT)模型在纵向教育调查中的应用,在该调查中反复测量了学生。提出了一种边际最大似然(MML)方法来估计多维度量部分信用模型的重复测量,可以使用拉格朗日乘数检验来评估模型拟合。本研究使用了最大似然估计方法,即"MHRM"估计方法,以获得更准确和全面的能力测量结果。这种方法有助于更深入地理解学生在各种能力维度上的表现情况。

3.2 MIRT 模型拟合

本研究数据来源于某高校大学物理 1581 份期末考试试卷,该套试卷共包含 36 道题,其中,20 道是选择题,剩余的 16 道题是由 8 个填空题拆分得来的,所有题目采用 0/1 计分。

利用拟合的 MIRT 模型,对数据进行拟合优度检验、模型参数的稳健性检验等。在 R 语言 MIRT 软件包中对于多维项目反应模型的拟合评价指标主要给了以下几个:似然比 G2、AIC(Akaike's Information Criterion)、BIC(Bayesian Information Criterion)、AICC(Corrected Akaike Information Criterion)、DIC(Deviance Information Criterion、HQIC(Hannan-Quinn Information Criterion),且数值越小模型越佳[20],估计方法是"MHRM",该方法适用于多维结构的模型[21]。将不同维度的 MIRT 模型进行拟合检验,如表 1 所示,在 4 个模型中,相较于其他模型而言,三维模型的各项拟合指标都是最低的,说明三维模型与数据之间的拟合程度最好。

通过计算均方根误差(RMSE)来评估试题与数据的拟合程度,可以更准确地衡量试题与实际数据之间的差异。较小的 RMSE 值表示试题与实际数据的拟合程度较好,而较大的 RMSE 值则表示拟合程度较差[22]。计算公式如(2):

$$\mathrm{RMSE}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{l=1}^{n}(\hat{\xi}_l-\xi)^2} \qquad (2)$$

在表 2 中,列出了 4 个模型的 RMSE 值,用于评估这些模型的拟合程度。其中:三维三参数模型的 RMSE 的值是最小的,因此 3-3PLM 与每道试题都具有较高的拟合度。由图 2 可以看出,不同班级的 RMSE 值有所波动,但是三维三参数的 RMSE 值基本是最低的,综上,选用 3-3PLM 模型作为本测试的测量模型进行数据分析是合适的。

表 2 不同模型的 RMSE 值

模型	RMSE
1-2PLM	0.3812
2-3PLM	0.3681
3-2PLM	0.4246
3-3PLM	0.3601

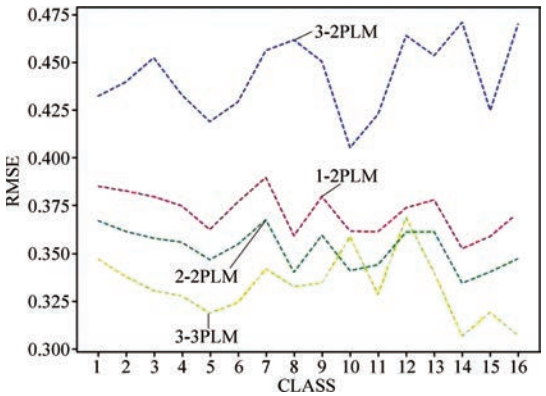


图 2 不同班级的 RMSE 对比图

3.3 知识点掌握参数的确认

本研究使用聚类分析中的手肘法来选择最佳的聚类数 K,将 MIRT 输出的学生能力参数与期末成绩进行聚类分析。通过生成的 k-SSE 关系图,观察到 k 值集中在 2、3 和 4,具体结果如图 3 和图 4 所示。在此基础上,利用 K-means 均值聚类分析功能,将 2、3 和 4 作为聚类数进行检验。结果显示,大部分情况下,3 聚类的方差分析所得到的 F 值高于 2 聚类和 4 聚类的情况。基于上述分析结果,本研究最终决定采用 3 聚类对数据进行分类。

为了验证输出的能力参数代表的能力属性,

表 1 MIRT 不同维度拟合指标

维度	G^2	AIC	AICC	BIC	DIC	HGIC
二维	102133.0	137314.7	134917.5	139894.5	135893.4	138045.6
三维	100789.6	135567.5	134686.3	137656.8	134850.6	136094.7
四维	102769.4	136209.6	137453.2	144496.6	135808.5	137439.1
五维	203455.5	247561.5	261139.5	279450.8	269384.4	273942.5

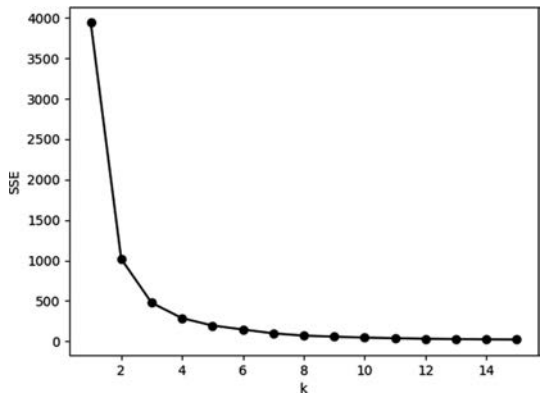


图3 三维能力参数k-SSE关系图

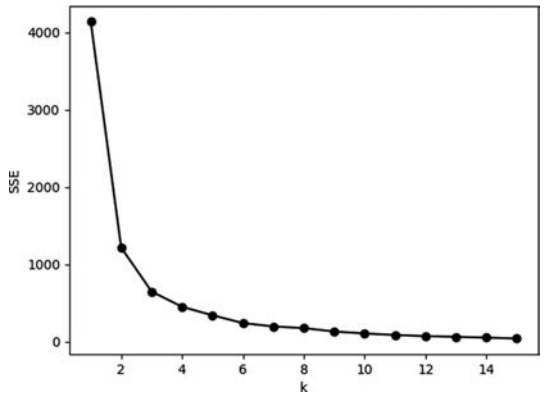


图4 期末成绩k-SSE关系图

研究者选取了全校和两个班级的能力参数值和期末考试分数，并通过以上研究确定最佳的聚类数为3。在表3中，可以观察到全校能力参数值的情况，根据聚类结果，聚类2的聚类中心为－2.2852，优秀率为0，不及格率为74.37%；而聚类3的聚类中心为2.1701，优秀率为55.40%，不及格率为5.7%。初步判断，该维度表现为聚类中心越高，优秀率越高，不及格率越低。因此，可以得出结论：该维度符合知识点的掌握能力特征。为了进一步验证这一结论，研究者列出了表4和表5的数据。观察数据后发现，聚类中心最高的类别具有最高的优秀率和最低的不及格率。这进一步支持了该维度代表知识点掌握能力的判断，这一发现对于进一步了解学生能力的特点，并针对性地进行教学和辅导具有重要意义。

为了进一步验证知识掌握程度与优秀率和不及格率之间的关系，并说明结果的科学性，本研究在SPSS 20中进行了针对三个班级和全校的知识掌握维度参数值与对应的优秀率和不及格率的Spearman秩相关分析。如表6所示，结果显示知识掌握程度与优秀率呈显著正相关（$p=0.757$，$p<0.05$），与不及格率呈极其显著负相关（$p=-0.837$，$p<0.001$）。这进一步证明了该维度代表了知识掌握程度，由于学生的知识掌握程度越好，其优秀率越高，不及格率越低。与统计结果的显著关系一致，体现了分析结果的科学性和可靠性。

表3 全校知识掌握维度

知识掌握	聚类中心	优秀率	及格率	不及格率
1	－0.0586	13.57%	75.52%	24.48%
2	－2.2852	0%	25.63%	74.37%
3	2.1701	55.40%	94.30%	5.70%

表4 12班知识掌握维度

知识掌握	聚类中心	优秀率	及格率	不及格率
1	－0.788	36.59%	90.24%	9.76%
2	0.6447	79.49%	100%	0%
3	－0.8214	6.90%	51.72%	48.28%

表5 2班知识掌握维度

知识掌握	聚类中心	优秀率	及格率	不及格率
1	1.03	47.83%	100%	0%
2	－1.13	3.33%	46.67%	53.33%
3	0.13	21.95%	70.73%	29.27%

表6 知识掌握与优秀、及格率的相关性

	知识掌握	优秀率	不及格率
知识掌握	1		
优秀率	0.757*	1	
不及格率	－0.837**	0.02	1

4 基于试卷分析结果的教学质量的评估

根据试卷题目的知识点和属性分类，可以进行如下颜色标记：红色代表该类题目难度较小，大部分的同学都答对了，这说明学生对这些知识点的掌握情况较好，值得表扬；蓝色代表该类题目区分度较大，学得好的同学答对，但是学得不好的同学答错，这可能意味着授课教师在讲授这些知识点时存在偏难的情况，导致学得不好的同学没有掌握；黄色代表该类题目区分度较小，难度较高，这说明该班级整体对这些知识点的掌握情况较差；黑色代表该套试卷未涉及到的知识点。通过

这种标记方式，可以更清晰地了解学生在不同知识点上的掌握情况，并对教学进行针对性的调整和改进，以提高学生的整体学习效果[23]。

根据图 5 和图 6 思维导图的对比，可以发现两个班级在机械能守恒、动能守恒、牛顿定律、质速关系、旋转矢量法、特征速率、转动动能、冲量以

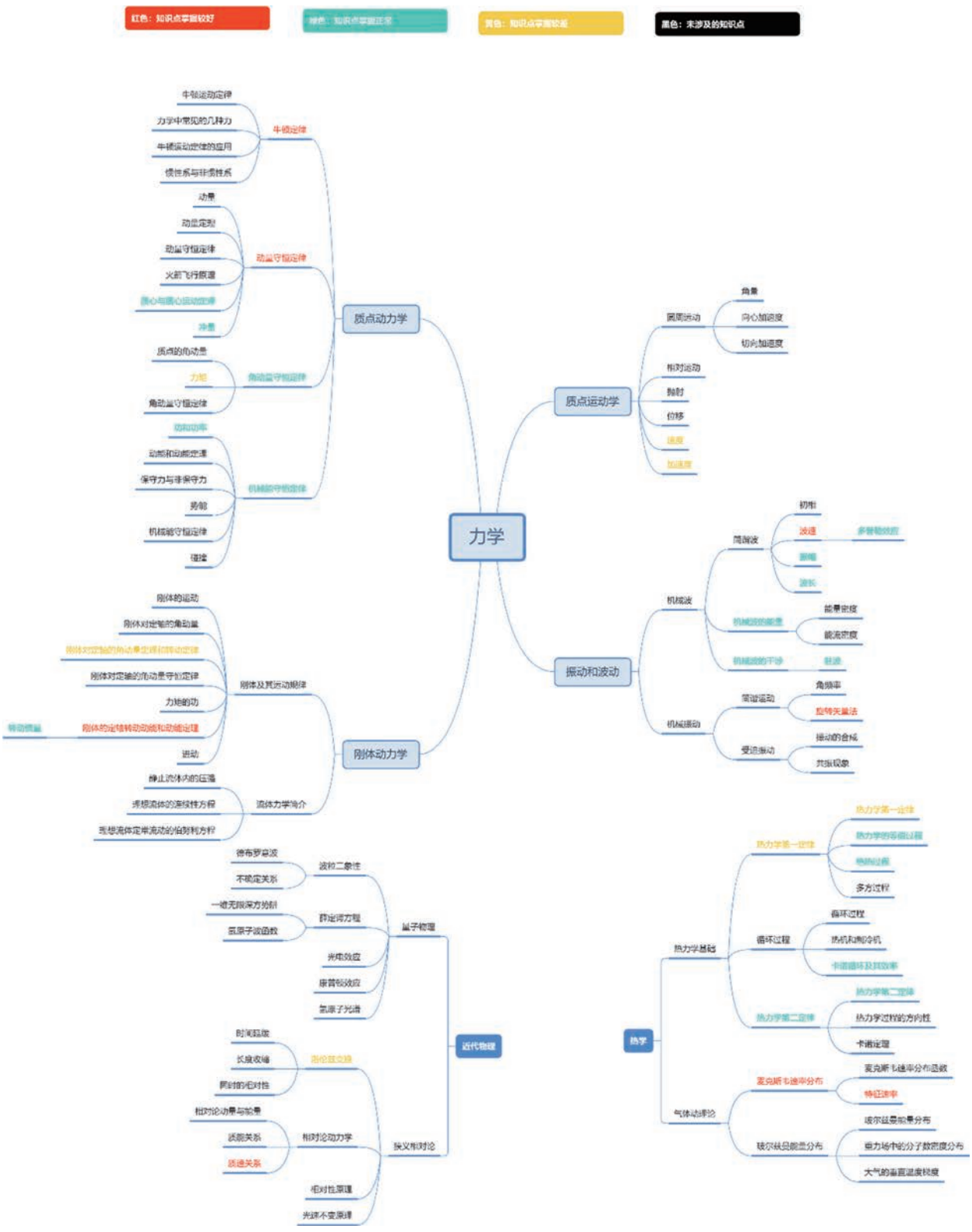


图 5　1 班知识点掌握可视化图谱

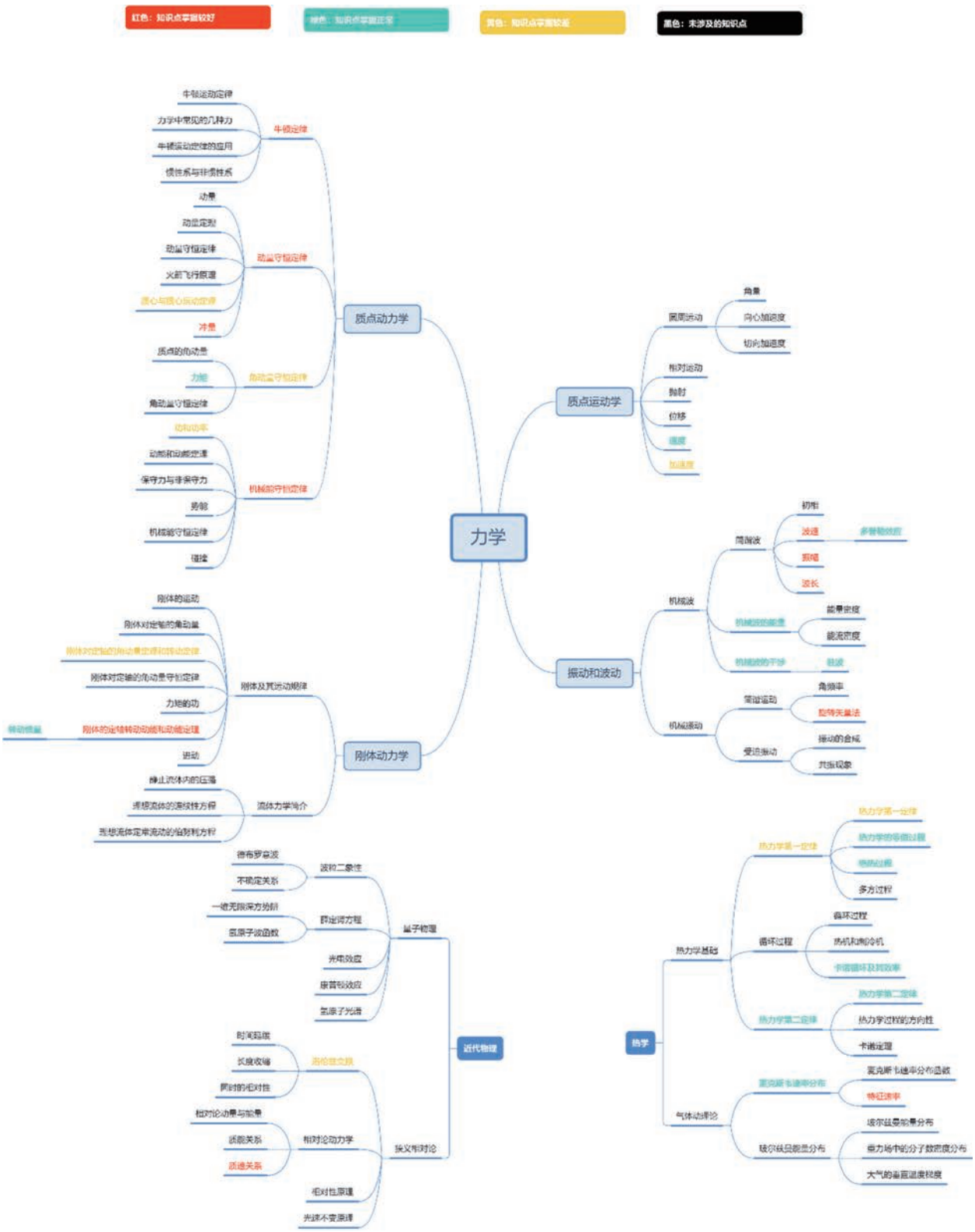


图 6　2 班知识点掌握可视化图谱

及波速等知识点上的掌握较好。然而，在加速度、转动定律、洛伦兹变换、热力学第一定律等知识点上，两个班级的掌握程度相对较差。具体而言，1 班在速度和力矩方面的掌握较差，而 2 班对这两个知识点的掌握程度正常。然而，2 班在质心、角动量守恒以及功的知识点上的掌握相对较差，而 1

班对这几个知识点的掌握程度正常。综上所述，同一个任课教师教授不同班级时，学生对知识点的掌握情况会有所不同，这可能与学生的能力水平相关。因此，教师在教学过程中需要根据学生的能力差异采取灵活的教学策略，以确保每个班级的学生都能够达到良好的学习效果。

经过对比两个班级的思维导图与图 7 全校的思维导图，可以发现以下情况：全校学生在卡诺循



图 7　全校知识点掌握可视化图谱

环、旋转矢量法以及转动惯量等知识点上的掌握情况较差，而这些知识点在1班和2班的学生中掌握情况是正常甚至较好的水平。这表明该教师在上述三个知识点的讲授水平是优秀的，可以为其他教师和后续的教学模式提供参考。与此同时，注意到1班在转动定律、热力学第一定律以及角动量守恒等知识点的掌握情况较差，而全校的学生对这几个知识点的掌握情况是正常的。这说明该教师在这几个知识点的讲授存在问题，需要参考其他教师的教学模式，并根据学生的反馈及时调整自身的教学方法，提高教学水平。

5 结语

本研究提出了一个基于试卷分析的评估框架，对于后续实现面向学生能力素养的评估具有重要的借鉴意义。具体来说，本研究的主要贡献有以下两个方面：一方面，根据MIRT模型输出的学生能力参数和试卷题目参数，可以推断能力参数维度代表学生的知识掌握程度以及探究了知识掌握程度与优秀率和及格率之间的关系。同时，通过对试卷知识点的标注，可以判断学生对各个知识点的掌握情况。更重要的是，通过对比不同教师的知识图谱，可以揭示不同教师在知识点讲授方面的差异，从而促进教师之间的相互借鉴和学习，为后续教学提供有益的参考。另一方面，本研究设计了一个综合处理数据、集成模型、数据分析和可视化图谱的试卷分析系统。这个系统解决了两个关键问题：首先，能够自动调用R语言的MIRT模型生成数据；其次，能够根据试卷知识点的标注以及MIRT模型输出的数据，自动生成可视化的知识图谱，为学生和教师提供参考和指导。

教师可以利用生成的知识图谱来评估学生的知识掌握情况和学习进展。通过分析知识图谱中不同知识点的学习情况，教师可以发现学生常犯的错误和难点，从而调整教学策略和教学重点，提供更有效的教学指导。同时，知识图谱可以促进教师和学生之间的知识共享和协作。教师可以根据知识图谱的结构和内容，设计教学资源和活动，促进学生之间的合作学习和知识交流。因此，在物理教学中运用智能型试卷分析系统，并优化系统的自动生成知识图谱的智能属性，使系统更加智能化是非常必要的。在后续的研究中，将持续对该部分进行改进，以提高可视化图谱的质量和准确性。

参 考 文 献

[1] 吴斓，余胜泉，骈扬等. 面向学生过程表现的协作问题解决能力评估研究[J]. 中国电化教育，2022，No. 426(7)：87-96.

[2] 教育部等六部门. 关于推进教育新型基础设施建设构建高质量教育支撑体系的指导意见[EB/OL]. http://www.moe.gov.cn/srcsite/A16/s3342/202107/t20210720_545783.html，2021-07-01.

[3] TEIG N，SCHERER R，KJÆRNSLI M. Identifying patterns of students' performance on simulated inquiry tasks using PISA 2015 log-file data [J]. Journal of Research in Science Teaching，2020，57(9)：1400-1429.

[4] 陶磊，汪萍平. 人工智能赋能高校思想政治理论课混合式教学之思[J]. 黑龙江高教研究，2022，40(12)：119-126. DOI：10.19903/j.cnki.cn23-1074/g.2022.12.023.

[5] 吴立宝，曹雅楠，曹一鸣. 人工智能赋能课堂教学评价改革与技术实现的框架构建[J]. 中国电化教育，2021，No. 412(5)：94-101.

[6] 牟智佳，刘珊珊，陈明选. 循证教学评价：数智化时代下高校教师教学评价的新取向[J]. 中国电化教育，2021，No. 416(9)：104-111.

[7] 孙文静，陈桂. 基于学生评教的高校思政课教师课堂教学能力评估与诊断[J]. 学校党建与思想教育，2020，No. 626(11)：73-76. DOI：10.19865/j.cnki.xxdj.2020.11.019.

[8] 宫维明. 人工智能环境下高校思想政治理论课教学的"形变"与"神不变"[J]. 思想政治课研究，2021，No. 251(5)：124-133.

[9] 兰晓红，潘菊，陈富烊. 基于课程标准的个性化学情诊断方法[J]. 中国考试，2022，No. 359(3)：32-36. DOI：10.19360/j.cnki.11-3303/g4.2022.03.005.

[10] 李雪. 基于决策树算法的成绩分析系统[D]. 长春理工大学，2010.

[11] 曾令思，任辉. 面向学生成绩分析的数据挖掘系统设计与实现[J]. 信息技术，2022，No. 369(8)：120-125. DOI：10.13274/j.cnki.hdzj.2022.08.022.

[12] RECKASE M D. Multidimensional item response theory [M]. New York：Springer-Verlag，2009.

[13] 林子植，胡典顺. 多维项目反应理论在数学素养测验中的应用[J]. 中国考试，2021(5)：72-80. DOI：10.19360/j.cnki.11-3303/g4.2021.05.010.

[14] 康春花，辛涛. 测验理论的新发展：多维项目反应理论[J]. 心理科学进展，2010，18(3)：530-536.

[15] KIM S Y，LEE W C，KOLEN M J. Simple-Structure Multidimensional Item Response Theory Equating for Multidimensional Tests. Educational and Psychological Measurement，2020，80(1)：91-125. https://doi.org/10.1177/0013164419854208

[16] XU L，WANG S，CAI Y，et al. The Automated Test As-

sembly and Routing Rule for Multistage Adaptive Testing with Multidimensional Item Response Theory. Journal of Educational Measurement, 2021, 58: 538-563. https://doi.org/10.1111/jedm.12305

[17] LIU T C, WANG C, XU G J. Estimating three- and four-parameter MIRT models with importance-weighted sampling enhanced variational auto-encoder, Frontiers in Psychology, 2022, 13: 1664-1078, https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2022.935419

[18] MIN S C, CAI H W, HE, L Z. Application of Bi-factor MIRT and Higher-order CDM Models to an In-house EFL Listening Test for Diagnostic Purposes, Language Assessment Quarterly, 2022, 19: 2, 189-213, DOI: 10.1080/15434303.2021.1980571

[19] Marveled JMT. Application of multidimensional item response theory models to longitudinal data[J]. Educational and Psychological Measurement,2006,66(1):5-34.

[20] CHALMERS R P. Mirt: a multidimensional item response theory package for the R environment[J]. Journal of Statistical Software, 2012, 48(6): 1-29.

[21] CHALMERS R P. mirt:A multidimensional item response theory package for the R environment [J]. Journal of statistical Software,2012,48(1):1-29.

[22] CAI L, HANSEN M. Limited-information goodness-of-fit testing of hierarchical item factor models[J]. British Journal of Mathematical and Statistical Psychology, 2013, 66(2): 245-276.

[23] 王琛琛,张睿,吴天刚.大学物理知识图谱的构建及其在个性化教学中的应用[J].物理与工程,2020,30(5):76-81.

DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT COLLEGE PHYSICS EXAM ANALYSIS SYSTEM

QIU Hong ZHANG Rui

(School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract College physics is one of the compulsory courses for students in STEM majors. Students from different disciplines and with varying abilities may have differences in their grasp of the subject matter. Therefore, the teaching plan needs to be adjusted on a personalized basis. Comparative analysis has shown that the multidimensional item response theory (MIRT) model exhibits a higher level of fit and can be used for test analysis and multidimensional cognitive diagnosis of examinees' abilities. By employing this model, it is possible to infer a student's ability parameter, which indicates their level of knowledge mastery, and explore the relationship between this parameter and the rates of excellence and failure. Additionally, a smart test analysis system is designed and developed, which integrates the MIRT model and can accurately assess students' knowledge mastery, automate the generation of knowledge maps, and provide valuable support and references for the learning and teaching of specific knowledge areas. Therefore, this research can help students and teachers better understand and apply the knowledge in the field of university physics, while providing targeted teaching improvement suggestions.

Key words multidimensional item response theory; test paper analysis; knowledge mastery; instructional evaluation

提升留学生工科物理实验课程教学质量
——以居家实验教学为例

谢子昂[1] 吴 平[1*] 张师平[1] 陈 森[2] 裴艺丽[2] 李 莉[2]

([1] 北京科技大学数理学院,北京 100083;[2]北京科技大学自然科学基础实验中心,北京 100083)

摘 要 本研究通过使用 PhyPhox 软件等辅助教学手段,开展留学生居家实验的工科物理实验课程教学尝试。PhyPhox 是一款功能强大的手机应用程序,能够实现物理数据的实时采集、分析与可视化,并以之帮助学生自主开展居家物理实验,探索物理现象。学生通过使用 PhyPhox 软件,可利用手机自带的传感器进行实时数据采集,并对数据作可视化分析,以更加直观地理解物理现象。我们以磁学、声学两个教学模块为例,探究了通过居家物理实验教学,帮助学生进行自主实验探究,观察和记录实验数据,并与理论知识进行比较和分析的新时期教学方法。这一辅助教学手段不仅可以提升学生的实验技能,还培养了他们的科学思维能力。通过应用这一全新的教学方法,能够增强学生的学习积极性,进行有益的居家实验探索,并取得了良好的留学生工科物理实验课程教学效果。

关键词 留学生教学;工科物理实验课程;PhyPhox 软件;居家实验;辅助教学手段

0 引言

实验是人类认识世界、了解自然的重要途径,是培养学生创新意识、动手能力和分析问题能力的重要环节,也是工科学生掌握相关专业知识的必要手段。工科物理实验课程作为留学生课程体系的重要一环,也需要针对这些特点开展合理的教学编排和实验指导[1-2]。近年来,居家实验教学正日益成为一种全新的教学方式。通过组织开展居家实验,可促进留学生学习主动性和学习兴趣,弥补传统线下实验课程的诸多不足,进一步加强他们的实验技能和科学思维能力。在居家实验中,学生可以利用家庭环境中的简单器材和实验材料,进行基本物理实验现象的探索和实践。通过这样的实践,留学生不仅可以加深对基本物理原理的理解,还可以提高实验设计和数据处理能力,可谓一举多得。

参加工科物理实验课程的大学二年级留学生与一般同年龄段的中国学生相比,可能存在一些文化和心理上的特点。由于留学生来自不同的国家和文化背景,具有不同的价值观、信仰和社会习惯[3-5]。这使得他们在处理问题和表达观点时可能会有不同的方式和角度。留学生在面对新的学习环境和文化背景时可能面临巨大挑战,需要适应不同的教学风格、学术要求和社交规范。此外,留学生通常会面临语言上的挑战,尤其是在课程中需要与同学、教师进行较为复杂的口头表达和交流时。这些特点可能对他们的学习产生重大影响[6-7]。留学生需要额外的努力来提高语言能力和沟通技巧以适应中国的教学模式,而开展居家实验课程编排可针对上述特点实现“扬长避短”。

收稿日期:2023-06-29

基金项目:北京科技大学 2021 年度本科教育教学改革重点项目(JG2021Z05)和北京科技大学青年教师国际交流成长计划项目(QNXM20220050)资助。

作者简介:谢子昂,男,讲师,主要研究方向为半导体光电器件、柔性功能材料、微纳结构制造与电磁仿真等,xieziang@ustb.edu.cn。

通讯作者:吴平,女,教授,主要研究方向为大学物理与实验课程体系与内容的研究,低维储能材料的制备,结构与性能表征以及颗粒物质的物理问题研究,pingwu@sas.ustb.edu.cn。

引文格式:谢子昂,吴平,张师平,等. 提升留学生工科物理实验课程教学质量——以居家实验教学为例[C]. 2023 年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会,2023.

Cite this article: XIE Z A, WU P, ZHANG S P, et al. Improving the teaching quality of college physics experiment for international students—Taking home-based experimental project as an example[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education, 2023. (in Chinese)

教学中,我们尝试通过使用 PhyPhox 软件等辅助教学手段,进行了一系列的留学生工科物理课程居家教学尝试,并取得了良好的教学效果。本研究旨在探索基于手机软件的居家实验教学方法,并分析其优势和存在的问题,进而提出相应的改进建议。

1 居家实验教学实施方案

1.1 PhyPhox 软件概况

PhyPhox 是一款由德国物理学家 Sebastian Staacks 开发的物理实验数据采集软件。该软件支持智能手机或平板电脑上进行物理实验,并能够采集各种物理量数据,如加速度、速度、磁场、压力、光强等。该软件具有简单易用、实时可视化、高精度数据采集、支持多种数据格式导出等诸多优势,可以同时满足多种实验需求。软件可进行多种物理实验,如自由落体运动、质量测量、声音波形测量等,且用户可以将数据上传到云端进行数据共享和协作分析。PhyPhox 软件利用手机中的多个传感器进行数据测量,支持多种实验的设计和数据采集。这些传感器可以精确测量环境中的多种基本物理量,如速度、加速度、方向、位置、磁场、光强、压力、声音等。PhyPhox 软件界面如图 1 所示,可使用英文或中文进行操作,方便了留学生使用。



图 1 PhyPhox 手机软件操作界面

(a) 英文界面;(b) 中文界面

PhyPhox 软件界面清晰、操作简单,留学生可以方便地在宿舍或其他生活场所进行实验。软件涵盖多种类物理实验模块,涉及多个物理学科教学领域,能够满足留学生不同层次和方向的实验需求。PhyPhox 软件具有跨平台性,可同时在 Android 和 iOS 系统上使用。PhyPhox 软件界面和说明均可切换为多种语言,有利于留学生直接使用。通过使用多语种协助教学,留学生不仅能够学到更多物理知识,同时也能够增强自身的跨文化交流能力和综合素质。



图 2 使用 PhyPhox 手机软件操作界面记录环境磁场分布实验结果

1.2 PhyPhox 软件磁学模块教学案例

PhyPhox 软件可通过内置的磁学传感器来记录环境磁场分布,从而方便地测量周围磁场的情况,包括大地磁场以及其他可能的磁场源。它通过手机内置的磁学传感器来捕捉磁场的变化,并将数据实时显示在操作界面上,这为留学生提供了一种简单而便捷的方式来研究磁场的空间分布情况。

教学中,教师首先介绍地磁场和生活环境磁场的概念,让学生了解磁场的来源和影响因素。教师同时引导学生思考和分析在日常生活中可能产生磁场的设备,如电视、手机、电脑等,并解释这些设备如何影响周围的磁场分布。讲解这些设备之所以能产生磁场,是因为它们内部包含了磁性材料,或电流通过导线产生了磁场。例如,手机中的磁性探测器是通过内置的磁敏传感器来检测磁场的变化。当手机中的磁性探测器与磁力线发生

相互作用时，传感器会感知到磁场的变化，并将其转换为电信号进行处理。这样，我们就可以通过手机的磁性探测器来检测和测量周围的磁场分布。当手机的磁性探测器与磁力线平行时，传感器会感应到一个较大的电信号。而当手机的磁性探测器与磁力线垂直时，传感器则感应到一个较小的电信号。因此，通过手机的磁性探测器，我们可以间接地了解磁力线的分布情况。

完成讲解后，教师使用 PhyPhox 软件的磁学传感器模块进行实际测量。学生打开软件，选择磁学传感器模块，并将手机保持在不同的位置和角度。软件实时显示 x、y、z 轴方向上的的磁场数值，并自动记录数据。通过以上操作，学生可以方便地观察和分析磁场数值的变化，了解不同位置和设备对磁场的影响。教师以此进一步引导学生讨论和解释数据结果，帮助他们深入理解磁场的物理概念和实际应用。通过这样的教学过程，学生不仅能够学习到磁场的基本知识，还能够运用 PhyPhox 软件进行实际测量和数据分析，培养他们的实验技能和科学思维能力，将所学知识与日常生活联系起来。

1.3 PhyPhox 软件声学模块教学案例

在课堂实验教学中，受实验条件限制，力、热、光、电等模块的实验相对较多，而声学相关的实验相对较少。为补充这一模块的实验，我们利用 PhyPhox 软件中的声音记录模块，设计了名为“Sound Mysteries”（“声音奥秘”）的居家实验。PhyPhox 软件声音记录模块中，手机中的声学传感器可以完整记录声音，并将其实时转化为频谱-时间二维图形。教学模块的思维导图如图 3 所示。

教学中，教师首先要求学生记录英语国际音标中/ɑː/等长元音、/ʌ/等短元音、/eɪ/等双元音的发音，其结果如图 4 所示。通过对/ɑː/等长元音、/ʌ/等短元音、/eɪ/等双元音的发音对比，学生记录和认识到元音发音的基本频谱规律。可见在频谱图上，元音的发音特征通常会受到喉部和声带的影响。/ɑː/等长元音通常表现为一个低频的清晰峰值。声音产生在喉部，舌位靠后，嘴唇略微舒展。相比之下，/ʌ/等短元音通常表现出相对较高的频率。声音产生在口腔中部，舌位处于舒展状态，嘴唇略微张开。

此外，/eɪ/等双元音在频谱图上通常表现为两个频率的峰值，分别对应于双元音的两个元音。在发音过程中，这些峰值会随着舌位和嘴唇的移动而变化，因此这种双元音通常较难准确地捕捉和表示。不同的元音在频谱图上有着不同的特征，这些特征能够帮助我们更好地理解和描述语音信号。

教师在以上基础上，引导学生以汉语和英语分别读出一段文字内容，实验结果如图 5 所示。

通过汉语发音与英语音域频谱图对比，我们帮助学生理解了不同语言的发音频率差异。汉语的音域相对较窄，大多数音位集中在较低频率的区域，而英语的音域相对较广，包含了更多高频音位。汉语的音位相对于英语来说更加平均，没有太多明显的高频或低频音位。英语则包含了一些明显的高频或低频音位，如元音 /i/ 和 /u/ 的高频、元音 /æ/ 和 /ɑ/ 的低频等。汉语和英语中一些相同的音位在频谱图上表现出来的形状略有不同，这是由于两种语言的发音方式和音调系统的不同造成的。在汉语和英语中，相同的音位在不同的词语中也可能会有不同的频率和强度表现，这取决于语言的语音特征和发音习惯。从语音学

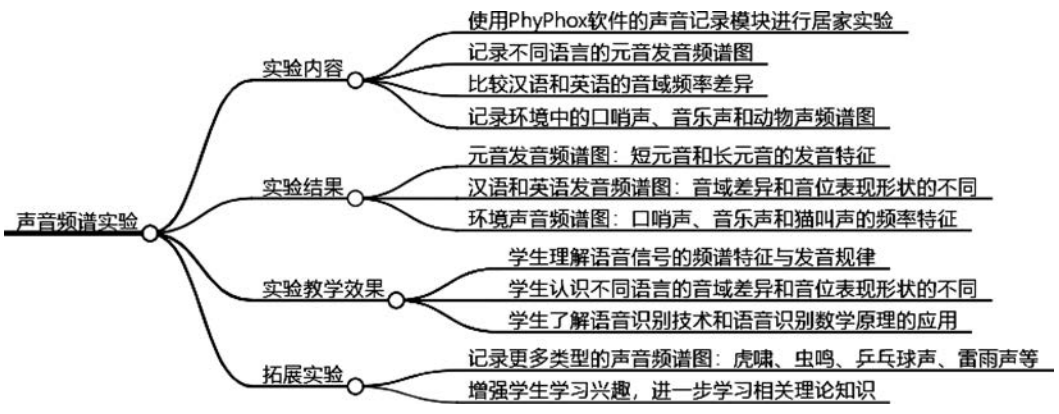


图 3 PhyPhox 软件声学模块教学思维导图

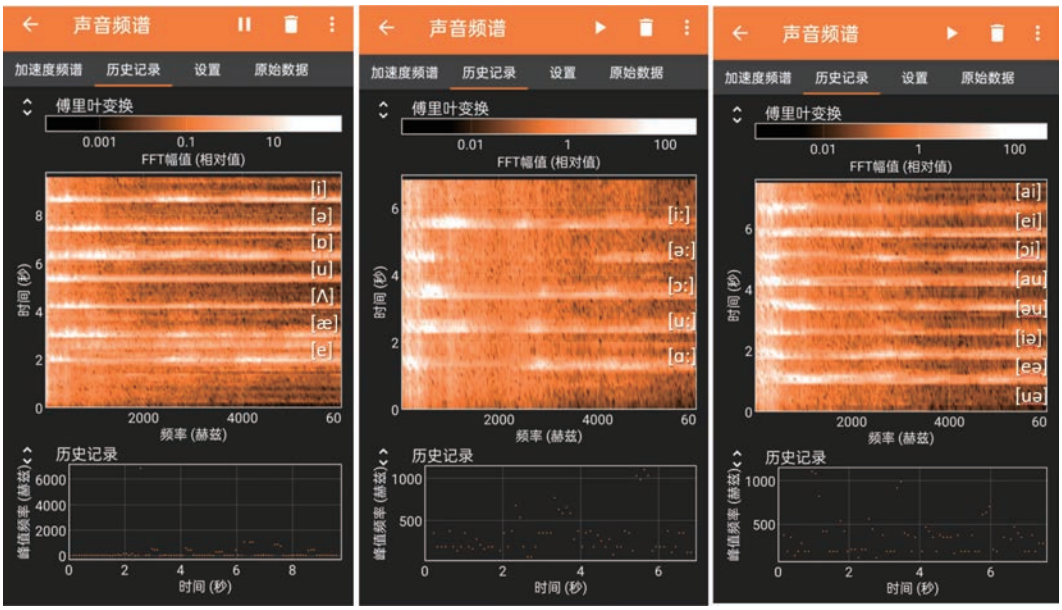


图 4　使用 PhyPhox 手机软件操作界面记录英语国际音标元音发音实验结果

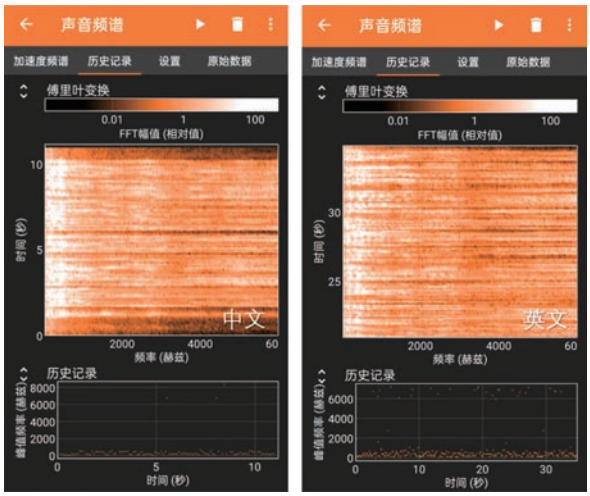


图 5　汉语发音与英语音域频谱图对比实验结果

频率等实验结果出发,我们进一步引导学生了解语音识别系统等较为复杂的语音识别数学原理,让学生了解到语言学音频识别技术在现代社会中的广泛应用和重要性。取得了很好的教学效果。

进一步地,教师要求学生记录环境中的口哨声、音乐声、猫叫等动物声的频谱图,结果如图 6 所示。可见口哨声的频率较高,且可随着口哨音调的变化而发生变化。交响音乐声则为多种频率叠加,反映出多种频率的混合。有趣的是,无论是人模仿的猫叫声,还是实际的猫叫声,都在频谱时间图上呈现带状分布。猫的叫声通常比人的更加尖锐。这是因为猫的喉部和喉头比人类更加灵活,能够产生更高频率的声音。猫的叫声通常在 1～2kHz 的频率范围内,而人的嗓音则通常在低于 1kHz 的范围内。此外,猫的叫声也比人更具穿透力,这与它们作为猎食动物的本性有关。

在以上实验结果基础上,教师进一步引导学生利用在线资源,对诸如虎啸、虫鸣、乒乓球声、雷雨声等多种类型的自然或非自然声响做记录。这些新实验极大增强了学生的学习兴趣,为他们进一步学习研究相关理论知识打下了基础。

2　教学效果评估

本轮教学中,居家实验共有来自 23 个国家的留学生参与。授课前,教师进行了详细的教学准备工作,包括软件、网络、硬件设备等。课程中,教师和留学生使用微信群、腾讯会议等平台做了深入交流,以确保课程质量和教学效果。课程结束后,教师对留学生进行了调查反馈,统计调查结果并进行分析。调查显示,留学生对课程总体满意度为 100%,认为教师认真、负责、耐心和细致。约 90%的学生对教师在线授课效果表示满意,10%的学生认为网络连接方面有待改善。学生对本课程总体评价较高,但部分学生也提出了一些建议

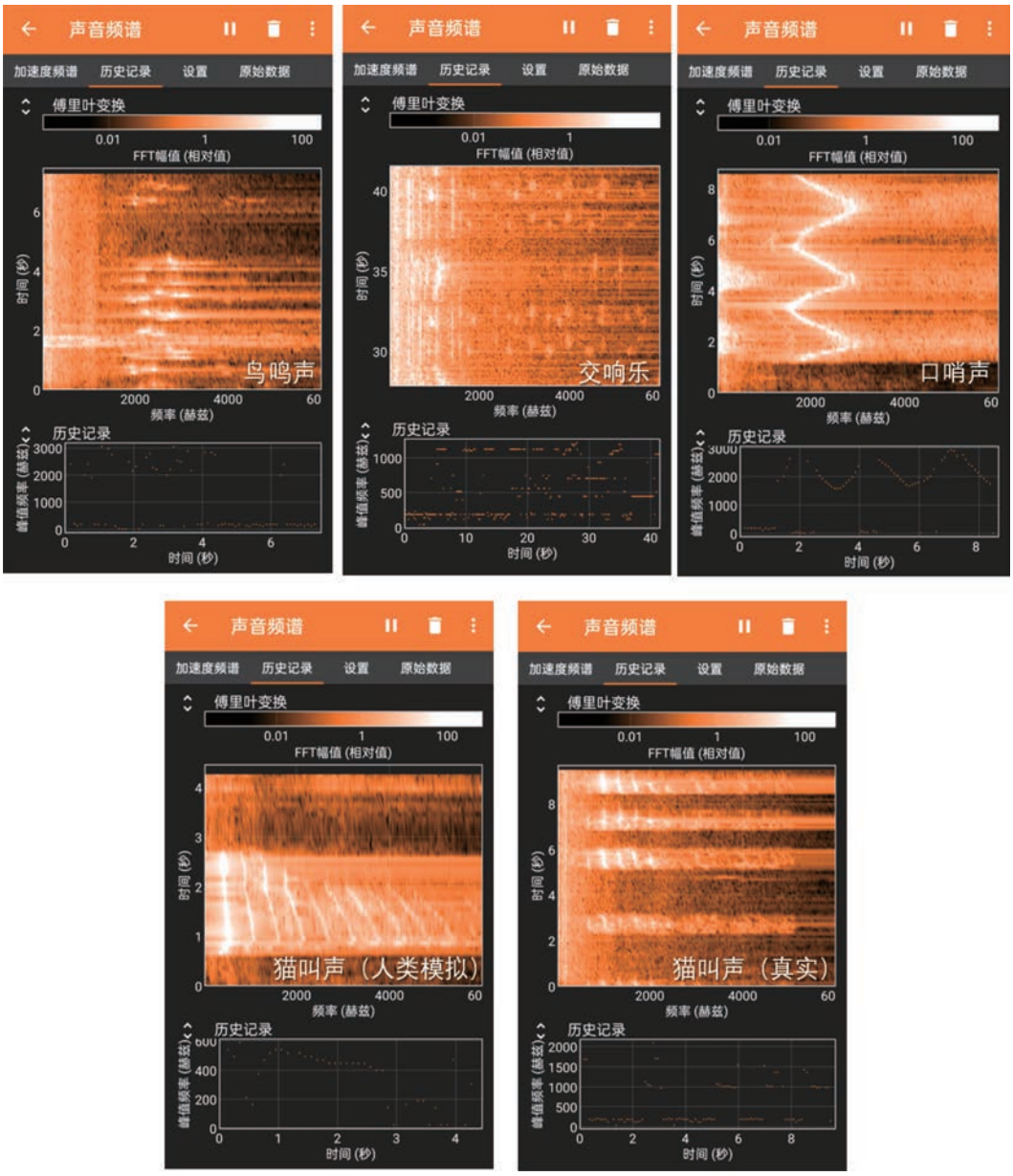


图 6　各类声响音域频谱图对比实验结果

和改进措施。

调查结果表明，通过居家实验教学，学生能够更好地理解和掌握相关物理知识。学生在居家实验教学中表现出了较高的参与度和学习兴趣，表现出较强的自学能力和实践能力，并且能够在线完成实验报告。大多数学生都对居家实验教学方式表现出了浓厚的兴趣，能够积极地投入到居家实验教学中去。

通过问卷调查，我们发现学生在居家实验教学中表现出了较强的学习兴趣。约80%的学生认为居家实验教学能够帮助他们更好地理解物理知识，并增强了他们的自学能力。有60%的学生表示希望能获得更多关于物理知识的信息，这表明他们希望通过线上实验教学获得更多的信息，并且希望通过观看在线视频等方式进一步巩固自己所学到的物理知识。在对实验数据进行分析后，我们发现学生对于线上实验教学和线下课堂教学中获得的物理知识具有同等的关注度。

尽管居家实验教学在一定程度上弥补了传统实验课程的不足，但其实施过程中仍面临挑战。学生可能面临设备和场地不足的问题，以及使用手机中遇到各种困难。同时，一些较为复杂的实

验仍无法在居家环境下由学生自主独立完成,而网络不稳定也可能影响学习效果。为解决上述问题,需要教师在课前提供更多的相关指导和学习资料,并组织学生间的互动以激发他们的思考和探究热情。

留学生来自不同国家,在居家实验教学中,他们亦面临英语水平差异的问题。为此,教师在课前提供了一定的文献资料和指导,帮助学生做预习,增加课堂参与度,并通过提问激发学生思考和探索。以上改进措施能够帮助留学生更好地适应居家实验教学,并提升学习效果。

3 总结与展望

通过本研究,我们认为居家实验教学可在一定程度上弥补传统实验课程的不足。居家实验教学通过使用 PhyPhox 软件等辅助教学手段,使学生能够在家中进行实验探究,从而激发了他们对物理学习的兴趣,提高了学习效果。然而,居家实验教学在实施过程中仍面临一些挑战。其中包括设备和材料的限制、学生在语言表达和沟通方面的困难,以及学生在数据分析和实验操作方面可能遇到的难题。

为应对这些挑战,我们提出了一些改进和优化的建议。教师在课前应充分准备相关指导材料和文献资料,为学生提供必要的支持和指导。教师在课堂中应积极组织互动和活动,提高学生的参与度和学习效果。我们还建议加强教师对学生的辅导和支持,帮助学生克服语言障碍,并提供更详细的实验指导材料,以帮助学生顺利进行实验操作和数据分析。

综上所述,居家实验教学在留学生工科物理课程中具有重要的应用价值。通过结合 PhyPhox 软件和其他辅助教学手段,居家实验教学能够激发学生的学习兴趣,提高实验技能和科学思维能力。然而,在实施过程中仍需要克服一些挑战。通过改进和优化教学方法和支持措施,我们可以进一步提高居家实验教学的效果,为留学生提供更优质的教育资源和学习环境。同时,我们还呼吁进一步研究不同国家和地区学生的实际需求,探索更适合他们的居家实验教学模式,为留学生创造更多学习机会和学习资源。

参 考 文 献

[1] 王丽,苏雪琼,刘凤艳.工科留学生“大学物理”课程教学模式改革探索[J].教育教学论坛,2023,(6):94-97.

[2] 吴平,邱宏,孙旭贵,等.将科学研究的思维方式引进普通物理实验教学[J].实验技术与管理,2003,(1):73-75.

[3] 潘仁胜,秦磊,宋显斌.“新工科”背景下留学生“桥梁工程”课程全英文教学探索[J].科技风,2022,(1):103-105.

[4] 任珂.工科类(英文授课)留学生汉语教学的反思与策略[J].汉字文化,2021,(S1):85-87.

[5] 张师平,吴平,赵雪丹,等.以本科生科技创新和物理实验竞赛促进创新型人才培养的探索[J].物理与工程,2016,(S1):213-215.

[6] 马莹,邓聪颖,刘岳岩.“一带一路”沿线国家来华留学生工科课堂教学策略探讨[J].教育现代化,2019,(96):116-117.

[7] 胡忠华.“双一流”建设背景下工科专业留学生培养的机遇、挑战及对策[J].大学教育,2018,(11):201-203.

IMPROVING THE TEACHING QUALITY OF COLLEGE PHYSICS EXPERIMENT FOR INTERNATIONAL STUDENTS —TAKING HOME-BASED EXPERIMENTAL PROJECT AS AN EXAMPLE

XIE Ziang[1] WU Ping[1] ZHANG Shiping[1] CHEN Sen[2] PEI Yili[2] LI Li[2]

([1] School of Mathematics and Physics, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083;

[2] Basic Experimental Center for Natural Science, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

Abstract This study leverages the PhyPhox software and the corresponding auxiliary teaching techniques to facilitate home-based experimental instruction in College Physics Experiment course for international students. PhyPhox is a versatile mobile application capable of real-time collection, analysis, and visualization of physical data, thereby fostering independent physics experimentation and exploration of physical phenomena for the international students.

Utilizing PhyPhox software, students employ mobile phone sensors for real-time data acquisition, and proceed with a visual data analysis, enabling a more intuitive comprehension of physical phenomena. This paper specifically focuses on magnetism and acoustics as instances, elucidating the application of innovative teaching strategies that encourage students to independently execute experimental exploration, observe and document the experimental data, and integrate it with theoretical knowledge via home-based physical experiments. The implementation of these auxiliary teaching methods not only enhances the students' experimental proficiency but also nurtures their scientific investigation ability. By adopting this innovative pedagogical approach, we aim to boost the students' learning enthusiasm, promote productive home-based experimental exploration. Favorable teaching outcomes in College Physics Experiment courses have been accomplished for the international students.

Key words international students teaching; college physics experiment course; PhyPhox software; home-based experiment project; auxiliary teaching method

基于 OBE 理念的大学物理线上线下混合教学模式的探索与研究
——以“光源与照明”专业为例

张雍家* 黄 平 刘瑞萍 武 媛 郭 玮
（太原理工大学物理学院，山西 太原 030024）

摘 要 目前大学物理课程存在与专业课程联系不紧密、较注重理论知识和计算技能传授、教学方法单一、教学过程缺乏对教育“需求侧”的重视等问题。为改变课程教学现状，本文结合太原理工大学光源与照明专业本科生的培养要求，贯彻以学生为中心，以“成果产出”为导向，以服务非物理类专业课学习为目的，探索基于成果导向教育（OBE）理念的大学物理线上线下混合教学模式。阐述了课程教学大纲协同制定、教学内容优化、课程评价体系完善、第二课堂拓展的机制，旨在提供大学物理课程教学发展新思路。

关键词 大学物理；OBE 理念；线上线下混合教学模式；教学大纲；第二课堂

1 前言

党的二十大报告指出“加强基础研究”、“集聚力量进行原创性引领性科技攻关”、“提高科技成果转化和产业化水平”，强调了基础研究对于增强自主创新能力、打赢关键核心技术攻坚战、促进产业变革发展的关键作用。而大学物理课程作为全国高等院校各理工科专业学生必修的一门基础课，在高校人才培养过程中发挥着非常重要的作用。大学物理课程的教学内容、研究和解决问题的思维方法，对培养学生树立科学的世界观，提高学生分析问题、解决问题的能力，激发学生的探索精神和创新意识等方面具有其他课程不可替代的作用。近年来，为应对新一轮科技革命与产业变革，支撑服务“中国制造 2025”等国家战略，教育部先后发布了《关于开展新工科研究与实践的通知》、《关于高等学校加快“双一流”建设的指导意见》和《淘汰“水课”打造“金课”教育部要求提升本科教育教学质量》等通知。“新工科”“双一流”与“金课”的建设给高校人才培养提出了更为具体、更高标准的要求，这为大学物理教学带来了新的机遇与挑战[1-2]。

2018 年，习近平总书记在北京大学师生座谈会上指出“随着信息化的不断发展，知识获取方式和传授方式、教和学关系都发生了革命性变化”。2019 年，教育部在发布的《关于一流本科课程建设的实施意见》中明确指出线上线下混合式教学是“双万计划”国家级一流本科课程建设的重要形式之一。2023 年，世界数字教育大会在北京召开，以“数字变革与教育未来”为主题，围绕数字化转型、数字学习资源开发与应用、师生数字素养提升、教育数字治理等进行深入交流讨论，并发布了中国智慧教育蓝皮书和智慧教育发展指数、发布了智慧教育平台标准规范、发起成立了世界数字教育联盟倡议和发布了世界数字教育发展合作倡议等。期间，习近平总书记指出：“我们将通过教育信息化，逐步缩小区域、城乡数字差距，大力促进教育公平，让亿万孩子同在蓝天下共享优质教育、通过知识改变命运。”

收稿日期：2023-05-28
基金项目：山西省高等学校教学改革创新项目（J2021137）。
通讯作者：张雍家，男，副教授，主要从事物理教学科研工作，研究方向为低维半导体磁性及气敏性，zhangyongjia@tyut.edu.cn。
引文格式：张雍家，黄平，刘瑞萍，等. 基于 OBE 理念的大学物理线上线下混合教学模式的探索与研究——以“光源与照明”专业为例[C]. 2023 年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会，2023.
Cite this article: ZHANG Y J, HUANG P, LIU R P, et al. Study on mixing teaching mode of online and classroom for college physics based on OBE Concept—Taking “Light source and lighting” major as an example[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education, 2023. (in Chinese)

“互联网＋教育”模式打破了传统课堂教学中以教师为主、学生为辅的教学局面，片段化、模块化、定制化的教学方式突破了时空界限，使学生学习更加自由主动，满足了学生个性化、多样化的学习需求[3]。因此，大学物理课程也必须紧跟时代步伐，在教学模式、教学方法中融入现代信息技术，提升教学质量，充分发挥物理学科对人才创新能力培养的“基础性、先导性、创新性和全局性”作用，促进理工融合、提质增效，为就业出口宽、市场需求量大、适应未来产业发展方向、助力国家重大战略需求的新工科专业群提供更好的支撑。线上线下混合式教学，是一种综合线上教学和线下教学的优势，将二者有机联系起来，即“线上”＋“线下”的教学模式，其充分利用大数据资源，将教学资源共享化，不断提升教学质量[4]。该教学模式是在翻转课堂的基础上发展起来的，鼓励学生在线上先行学习，建立初步知识概念，思考教师布置问题。线下课堂，教师根据学生对知识点的掌握情况引导学生进入学习完善环节，发挥学生的主导地位，以学生为中心，突出学生的个性化发展。相比慕课（MOOC）和翻转课堂教学，混合式教学除采用了翻转课堂的教学模式外，还采用了多媒体教学方法、任务式教学方法、案例式教学方法等。线上线下混合式教学将信息化网络技术有效融入到教学中，通过网络资源扩充教学知识范围，并将知识横向纵向延伸，提高实时共享，从而激发学生自主学习的积极性，实现了以学生为中心的教学改革创新，进而弥补传统教学方式的不足，推动教学效果的优化。

1981年，Spady等人首次提出了成果导向教育（Outcome Based Education，简称OBE，也称为能力导向教育、目标导向教育、结果导向教育或需求导向教育）[5]。OBE是一种以学生“学习成果”为导向的教育理念，代表了目前国际工程教育领域的主流思想[6-8]。OBE理念注重递进式教学，教学设计和教学目标是根据教育“需求侧”拟取得的成果反向设计的，有利于优化教学环节，提高教学质量。OBE教育模式要求教育“供给侧”预先规划学生应达到的能力和水平，然后以预期目标为导向设计教育活动。学生通过可锻炼其思考、质疑、研究、决定和呈现能力的任务来培养创造性思维、分析和综合信息等实践能力。大学物理课程是学生学习工程技术知识的基础，其按内容可分为力学、热学、光学、电磁学、近代物理等。教学内容与学生后续专业课程的学习息息相关，是非物理类各专业专业课程的学前课程。课程中涉及到的物理思想，定律、定理，问题处理的方法等对学生实践能力的培养具有重要的作用。大学物理的教学目标与OBE教育理念相通。因此，以OBE理念为基础来寻求并设计大学物理课程教学改革方案是一种有效的途径。

2 大学物理教学现状分析

大学物理是我校各理工科专业的基础必修课，开设于大学一年级下学期及二年级上学期，光源与照明专业等部分工科专业开设学时为120学时，教学内容包括力学、热学、电磁学、波动光学、狭义相对论和量子物理基础六大知识模块，知识量大，涉及面广。随着信息化的快速发展，传统课堂教学的不足日趋明显，主要体现如下：大学物理任课教师往往独立开展教学工作，很少顾及与专业课程之间的协同；教学大纲较注重基于理论知识的传授和解题运算能力的训练；教学方法主要采用“教师主教、学生主学”的灌输式；教学过程的组织与实施主要围绕课堂、教师、书本“三中心”进行，师生关系处于课堂见面、知识的单向传输状态；课程考核主要是考试和考查两种，成绩评价模式较单一；学生学习只注重分数，不注重能力培养，习惯被动接受课堂知识，不具备主动挑战知识和未知世界的观念。此外，受时代发展等多重因素影响，我校部分工科专业的大学物理课程教学学时逐渐减少，呈现出教学内容与教学学时之间的矛盾。学时减少后，通过减少课程内容来适应新的学时限制，如整章、整节删除；降低讲授深度，以保持内容相对完整性；模块化，由选课学院自由组合，以满足专业后续课程的需求。以上做法均存在弊端，如简单删除章节，会导致课程缺乏系统性与完整性；减低讲课深度，会导致重要知识点不够深入，不利于学生的长远发展；把课程模块化，会导致知识点的分散、缺乏系统联系，无法体现物理学的统一性。

针对这些问题，同时也为适应社会需要，国内外对大学物理课程的改革实践层出不穷。例如东南大学的大学物理网络工作室，成功将优质教学资源和现代教学技术相结合，实现了大学物理课

程教学的改革和创新。与此类似，中国科技大学基于网络，为学生创造了多元化的教学环境，节约教学资源的同时，也为人才的创新思维和实践能力提供了个性化的教学模式。近年来，慕课（MOOC）在我国的兴起又进一步推动了网络视频教学的发展，包括线上讨论、混合式教学、翻转课堂等。笔者所在大学物理教研团队通过多次课程教学实践，反思现有教学方案，发现其仍存在以下问题有待改善。例如单纯使用 MOOC 容易导致知识点碎片化。大学物理是一门逻辑性、系统性强的学科，因此授课过程应保持物理课程内容的内在逻辑性，系统性，教师对课堂的把控和引导显得尤为重要。此外，受师生比例限制，多数高校对大学物理课程授课采用人数较多的大班教学，在分组讨论中，课堂容易陷入混乱，部分学生并没有真正参与自主思考和讨论，起不到个性化教学的作用。2020 年初新冠肺炎疫情期间 MOOC 的大规模使用，使人们意识到慕课不可能替代当下的课堂教学。这是由于大学生开展网络学习除了需要有学习动机、学习兴趣、求知欲外，还需要具有开展自主性、能动性学习的能力。因此，如何在“教学模式创新、育人质量提升”的教学改革背景下，在大学物理课程教学中更好地完成扎实基础、突出创新的高素质人才培养，是一个需要长期研究和探索的问题。

3 基于 OBE 理念的大学物理线上线下混合式教学实践

OBE 理念强调的是以学生“学习成果”为导向，反向设计课程。这为我们线上线下混合式教学的教学设计提供了指导。教学过程中，各教学要素均会产生一定的作用，但教学效果的最优体现并不是各教学要素简单叠加，而是各要素之间相互作用产生“合力”。要追寻最大“合力”就要求各教学要素不断变化调整，这就需要教学“供给侧”需从动态的、综合的角度考量。基于此，笔者以我校光源与照明专业为例，对大学物理课程线上线下混合教学模式进行了实践与探索。

3.1 协同制定教学大纲

OBE 教学理念在大学物理课程的具体应用，首先要解决的是课程教学大纲的设定。因此，结合我校光源与照明专业的具体情况，对大学物理课程的培养目标进行定位，构建一个全新的满足专业需求和学生个性培养的大学物理教学体系。众所周知，各理工科专业的专业知识中都要涉及到物理学的相关内容，且不同专业所需物理知识的侧重点各不相同，如果学生没有良好的物理基础，则会在专业课程的学习中遇到困难。传统大学物理教学缺乏与专业课程之间的协同，而 OBE 理念强调教学的协同性。为了让学生能够达到最终的培养目标，这需要大学物理任课教师和专业课老师进行沟通、协同合作，来设计和实施课程教学及评价，并对各专业制定差别化的授课实施计划和教学大纲，为后续专业课程的学习做好必要的理论铺垫。

为了协同工作的顺利进行，建立针对光源与照明专业的虚拟教研室，教研室团队成员涵盖大学物理课程任课教师、各专业课任课教师及部分用人单位企事业工程师。基于 OBE 教育理念沟通探讨该专业学生的最终学习目标，该目标的确定要充分考虑社会、学校、用人单位、学生、和教师等相关者的要求与期望。本着为最终学习目标服务的原则，调整大学物理教学内容，完成教学大纲的制定，增强大学物理课程与专业课程的联系。具体协同机制如图 1 所示。

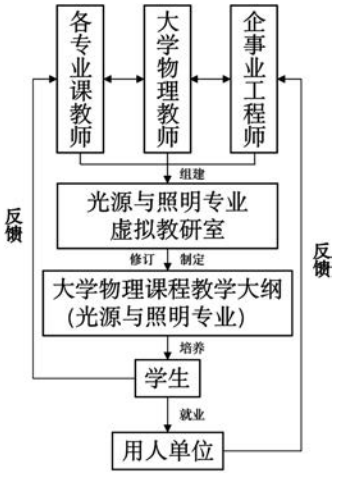


图 1 协同制定教学大纲机制图

虚拟教研室团队成员基于 OBE 理念探讨大学物理与各专业课程之间的知识衔接，经多次讨论，筛选出与大学物理课程有效对接的课程包括半导体物理、光电传感器应用技术、工程光学、电磁场与电磁波、光源原理与器件、激光原理、电路分析基础 7 门课程。各专业课与大学物理课程知识点对接如表 1 所示。

表1 光源与照明专业各专业课与大学物理课程知识点对接表

专业课名称	专业课知识点	大学物理知识点
半导体物理	载流子的迁移率和散射	平均自由程、平均碰撞次数
	PN结电容、半导体表面、MIS结构	电容、电容器
	半导体导电性	电流密度
	半导体中电子态	量子物理基础
光电传感器应用技术	第一、三、四、五章	三大辐射定律、光电效应
工程光学	光学系统中的显微镜和望远系统	光学分辨率
	光的干涉、光的衍射	波动光学
电磁场与电磁波	电磁场的基本规律	真空中静电场、真空中稳恒磁场、位移电流
	时变磁场	感生电场
光源原理与器件	光源特性参数	光源
激光原理	激光基本原理	光源及相干光
电路分析基础	电子元件	电容、电感
	谐振电路	LC振荡电路

3.2 优化教学内容

传统教学中，由于需要花费大量的时间在基础理论的推导、证明和计算题目的演练，理论发展的背景、与专业结合的案例无法在课堂上传授，学生学习盲目、缺乏目标，没有实际应用的机会，不能发挥其主观能动性，教学对学生创新能力的培养贡献小。而基于OBE理念的大学物理教学模式，则以培养学生创新能力为目的。依据与各专业课程协同制定的教学大纲，优化教学内容。

具体实施方法为：1、加强近代物理基础，例如：量子物理、激光、相对论、超导等原理。2、对经典物理内容现代化，即以现代化的观点重组经典物理内容体系，联系物理学的最新进展和高新科技，结合光源与照明专业特点，把所学知识与现代科技发展有机结合。3、对物理学的前沿内容“科普化”，以专题讲座形式介绍物理学前沿发展动态，使学生深切感到物理学内容奥妙无穷，有待于人们不断发现和创新。4、将自然辩证法内容渗透于物理课程教学中，用辩证唯物主义的自然观、方法论、发展观来指导物理课程教学，在整个物理课程教学过程中，注重培养学生的科学思维。将优化后的教学内容按照专业特点梳理分类为通识知识类、科学素质知识类及融合应用案例类三种。教学大纲构成如图2所示。

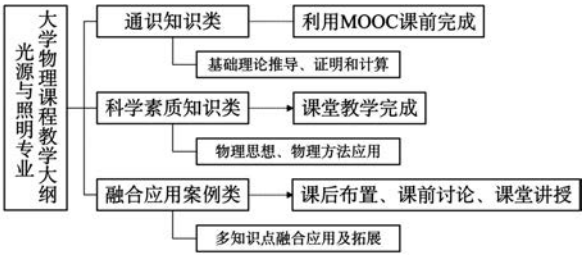


图2 教学大纲构成图

根据上述知识点衔接及OBE教学理念，对光源与照明专业大学物理课程教学大纲进行修订，其中“科学素质知识”模块强化电磁学模块、波动光学模块及量子物理基础模块，具体表现为：1、在第十章静电场中的导体和电介质中加入半导体知识点。2、拓展第十一章电流密度的概念。3、强化电容及电容串并联应用。4、详述三大辐射定律和光电效应。5、加强光学仪器分辨率的问题导入。6、加强波动光学光源及相干光知识导入，详述光源发光机制。

3.3 合理规划线上线下混合教学模式

传统教学的教学设计理念在于“先教后学”，即教师讲课、指导，学生听课、做笔记，学生处于被动学习的状态，教学方法单调。而进入信息时代的今天，任课教师可以合理利用互联网信息技术，将部分教学内容制作成MOOC，放置在网络平台，引导学生不受时间、空间限制自由学习。而教师在课堂上的主要教学任务是提高学生的知识理解能力，引领学生达到新的学习高度，教学方案的设计理念偏向于“先学后教”。教师依据各理工科专业所涉及到的物理学知识，合理规划线上、线下

教学内容，将通识知识和部分专业非重点科学素质知识设计成线上教学，线下教学则偏重于专业重点科学素质知识的讲解及融合应用案例的拓展。

基于 OBE 教学理念的“通识知识＋科学素养＋融合应用”的教学体系，课程内容丰富多样，传统的授课模式显然不再适合新的教学体系。同时，随着互联网技术的快速发展，借用电子终端，利用线上课程软件，在教学过程中开展“线上”＋“线下”互为补充的混合式教学成为一种行而有效的措施。笔者基于光源与照明专业学生的学习基础，依托所在教学团队自制的已上线的 MOOC 资源，将通识知识和部分专业非重点科学素质知识设计成线上教学，教师引导学生自由学习。而对于专业重点科学素质知识和融合应用案例的拓展则由教师以课堂教学的方式进行。这种教学方案既缓解了教学内容与教学学时之间的矛盾，又体现了专业特色、增强针对性，实现大学物理教学与专业课程教学的衔接，使大学物理更好地为学生专业学习服务，体现大学物理公共基础课的地位和作用。线上线下混合教学模式如图 3 所示。

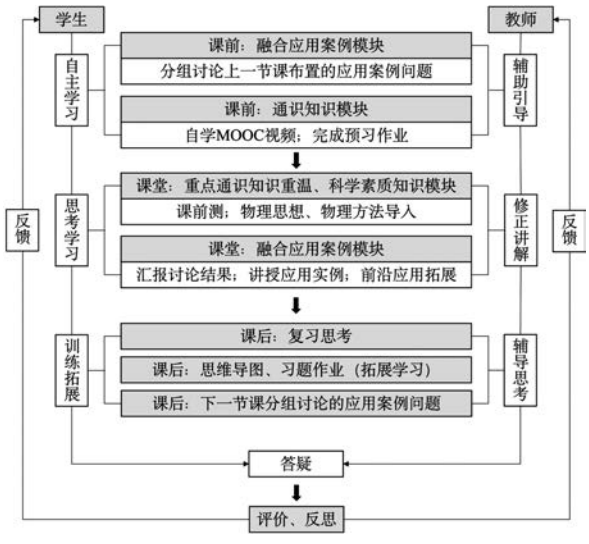


图 3　线上线下混合教学模式

3.4　完善课程评价体系

持续改进的教学评价是 OBE 理念的核心之一，改变学生课程评价体系是基于 OBE 理念混合教学模式改革的关键。改变过去以期末考试成绩作为唯一评价标准的考核方式，建立“评价—反馈—改进”循环评价体系，持续改进教学活动，进而实现以持续改进地提高教学质量为目标的螺旋上升式良性循环。课程考核方式构建以统一考试为主，MOOC 测试、平时作业、研讨报告、专题总结为辅的课程评价方式。统一考试重在评价学生通识知识模块和科学素质知识模块所学知识分析、解决实际问题能力；平时作业实时监测学生对通识模块和科学素质知识模块的接受、理解程度；研讨报告综合反映学生对科学素质知识模块和融合应用案例模块的融合、综合运用能力；专题总结注重学生分层培养、个性发展，反映学生自主学习、探究、创新能力。

这种综合课程评价方式兼顾通识性、专业性，有效打破传统评价模式中考试课“考记忆”的尴尬局面。反馈体系的研究分直接反馈和间接反馈两部分，直接反馈通过调查问卷的形式直接了解学生对物理课程的需求、意见、建议、理解和接受程度；间接反馈通过教师对学生的试卷、作业、研讨报告和专题总结的学习成果达成度综合分析总结。图 4 给出了光源与照明专业 2018 级（改革前）和 2019 级（改革后）秋季学期大学物理 A（二）成绩分布直方图。

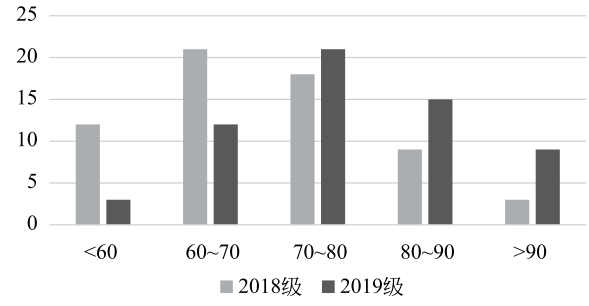


图 4　光源与照明专业 2018 级、2019 级大学物理 A（二）成绩分布

2018 级采用传统的课程评价模式，期末总成绩由 10％的平时成绩与 90％的期末卷面成绩组成，其中 10％的平时成绩由考勤成绩和作业成绩构成。一般来说，考勤成绩是任课教师根据平时学生上课情况确定，作业成绩根据学生作业质量确定。作业往往是教材的每章课后习题，以计算题为主，考察内容较单一，只能大体了解学生的学习情况，对学生的评价缺乏客观性、准确性和合理性，区分度不高。2019 级采用基于 OBE 理念的混合教学课程评价模式，期末总成绩由 10％的平时成绩、20％的线上 MOOC 成绩与 70％的期末卷面成绩组成，其中在 20％的线上 MOOC 成绩

中，章节视频学习占比30%，章节测试占比20%，互动分值占比5%，习惯分值占比5%，线上期末考试占比40%。可以明显看到因疫情被迫导致的线上线下混合式教学的成绩相对于传统课堂教学成绩有显著提高。这是由于采用智慧树学习平台后，线上MOOC成绩的采集分为多个大项，合理设置权重，可以真实全面反映学生的平时学习情况，从而实现对学生的全面持续评价，便于任课教师随时掌握学生的学习动态，调整线下授课计划，实现以学生为中心的教学目标。

3.5 拓展大学物理第二课堂

基于OBE教学理念的第二课堂，其以锻炼学生综合能力为主。第二课堂充分结合课程、生活及生产实践中所遇到的问题，根据对问题的分析，组织指导教师进行深入的讨论。这种基于项目及解决当前实际问题的学习是一种研究性学习教学模式，在较大程度上有利于培养学生的学习自主性与工作责任心，增强学生创新精神与实践能力，提高学生的综合素质。基于OBE理念的第二课堂既能充分调动学生参与实践教学活动及课程内容的设计与实施的积极性，同时也不会限制学生的思维扩展，以赛促学，从而达到培养学生从构思、设计、实施、运行的全生命周期。

基于线上线下混合教学的第二课堂借用现代网络信息技术，引入部分大学物理演示实验，将实践科学与理论知识有机融合，拓展了大学物理第二课堂的知识广度与深度，演示性实验在线上线下混合教学中起到辅助知识点内化为学生能力的作用。同时，鼓励学生进实验室开展自主研究，拓展知识的同时达到培养学生双创能力的目的，引导部分优秀学生参加全国大学生物理竞赛与大学生创新项目。依托太原理工大学大学物理实验中心，引入虚拟仿真演示实验，以全国大学生物理竞赛为导向，拓展大学物理第二课堂。利用物理学院已有科研条件，联系科研导师带领学生进实验室开展自主研究，进一步培养学生的实践创新能力。改革后的第二课堂以学生个人或3～5人小组为单位，实行教师引导、专业学长“传帮带”。每个小组或个人均可以灵活选择实践教学活动主题，设计方案由组内学生独立提出，并尽可能至少提出2～3个设计方案，适时开展课题小组会议，组内论证后提请指导教师审批。指导教师在成本可控的基础上，与组内成员从技术、成本、能耗、环境等多方面分析、探讨及对比后，确定最终实施方案并从学校申请专项竞赛经费。同时，指导教师可择优选取部分学生申报大学生创新项目。经过两年的实践，基于OBE理念的大学物理第二课堂逐步完善，光源与照明专业的学生参加大学生竞赛的积极性明显增加，从2018年前的5人次/年增加到现在的20人次/年。

4 结束语

本文以太原理工大学光源与照明专业为例，阐述了新工科背景下基于OBE理念的大学物理线上线下混合教学模式的改革思路。从教学大纲的协同制定，教学内容的优化，混合式教学模式的创新，课程评价体系的完善及大学物理第二课堂的拓展方面进行了初步探索和实践。结果表明，基于OBE教育理念的线上线下混合式教学在大学物理教学中具有很强的可操作性，可以以此为借鉴开展更多工科专业的实践，充分发挥学生的学习主动性，实现以学生为中心的教学。本教学模式以学生学习成果为导向，倡导教师主导学生合作学习，以培养学生能力为目标，强调学生应学什么，能做什么，鼓励学生批判性思考、推理和评论，从根本上培养学生的双创能力，为国家一流学科建设，特色专业打造提供有利条件。

参 考 文 献

[1] 彭艳华，李明枫，廖斌，等. “双一流”建设与“新工科”背景下工程创新型人才培养研究 [J]. 创新创业理论研究与实践，2020，3(12)：86-87.

[2] 其木格. 大学物理线上线下混合式教学探索与实践 [J]. 大学物理，2022，41(10)：51-54.

[3] 孟庆龙，尚静，黄人帅，等. 大学物理线上线下混合式教学模式研究 [J]. 内江科技，2020，41(11)：151-152.

[4] 孙燕云，何钰，吴平，等. 大学物理线上线下混合式大班教学模式初探 [J]. 物理与工程，2019，29(5)：85-89.

[5] SPADY W G. Choosing outcomes of significance [J]. Educational Leadership, 1994, 51(6): 18-22.

[6] 王金旭，朱正伟，李茂国. 成果导向：从认证理念到教学模式 [J]. 中国大学教学，2017，6(6)：77-82.

[7] 杨志宏. 浅谈成果导向教育(OBE)理念的起源、发展及理论基础 [J]. 高校论坛，2019，413(29)：5-6.

[8] 刘永平. “OBE”教学模式在大学物理课堂教学中的实践探索 [J]. 大学：教学与教育，2021，8(31)：91-93.

STUDY ON MIXING TEACHING MODE OF ONLINE AND CLASSROOM FOR COLLEGE PHYSICS BASED ON OBE CONCEPT —TAKING “LIGHT SOURCE AND LIGHTING” MAJOR AS AN EXAMPLE

ZHANG Yongjia HUANG Ping LIU Ruiping WU Yuan GUO Wei

(College of Physics, Taiyuan University of Technology, Shanxi, Taiyuan 030024)

Abstract There are some problems in college physics course, such as lack of close connection with professional courses, emphasis on imparting theoretical knowledge and calculation skills, single teaching method, and lack of emphasis on the “demand side” of education in the teaching process. To improve the present situation, combining with our cultivation goals for the undergraduate students of light source and lighting major at Taiyuan University of Technology, carrying out student-centered, “result output” oriented, and purpose of serving non physics major course learning, we explored the mixing teaching mode of online and classroom for college physics based on the Outcome-Based Education (OBE) concept. This work expounds the mechanism of course outline collaborative design, teaching content optimization, course evaluation system improvement, and second classroom expansion, aiming to provide new ideas for the development of college physics course teaching.

Key words college physics; OBE concept; online and classroom blended learning mode; course outline; second classroom

基于物理学科核心素养的大学物理教学设计与评价

崔文倩* 张 睿 赵 晖 时 钟 张建卫 贾 飞 刘冰洁 关 佳
（同济大学物理科学与工程学院，上海 200092）

摘 要 基于物理学科核心素养进行大学物理教学设计，采取课堂教学-课堂讨论-课后实践相结合的形式，采用线上线下混合式教学模式将课程教学，科研能力培养有机的整合起来。教学中项目化学习主要方法和手段涉及理论建模，实验研究和计算模拟三个层面，通过项目化学习的形成性评价能够测评学生的学术潜能和学术志趣为拔尖创新人才的选择与个性化培养提供数据支持。

关键词 核心素养；混合式教学；项目化学习；教学评价

1 研究背景

21 世纪人类面临的最大的挑战是如何应对知识需求与知识供给之间不断拓宽的鸿沟。在此背景下，世界各国都在致力于深层的教育改革，调整教育目标、内容和方式，将知识创新与问题解决能力作为学生的核心素养来培养[1]。这些改革试图将高水平思维、问题探究和协作创造活动整合到课程内容与教学中，并不断创新技术和学习环境，支持学习和教学方式变革。自 21 世纪初，我国启动了新一轮课程与教学改革，将创新人才培养作为重要目标，推进协作式、探究式教学和研究性学习。到目前为止，协作、探究式学习已经逐步在中小学课堂中开展。然而，探究活动的实施多以教师规划的探究任务为主，往往“有形少实”。如何在教学中实现更真实、动态的探究，支持学生主体性和创造性的发挥，是教育研究者需要解决的重要问题。2019 年，教育部启动“六卓越一拔尖” 2.0 计划[2]，通过拓围、增量、提质、创新，扩大了各个计划的实施范围，增强了各项改革举措的力度，提升了改革发展的质量内涵。

对于一流高校的学生培养模式，推动多种教学模式的改革，引导学生自我管理主动学习。在评价模式上，严格过程考核，加大过程考核成绩在课程总成绩中的比重。健全能力与知识考核并重的多元化学业考核评价体系，完善学生学习过程监测、评估与反馈机制。这为高等教育教育教学的多维度评价改革提供了政策基础。2022 年初，教育部在全国教育工作会议和年度工作要点中正式提出“实施教育数字化战略行动”[3]。可以看出，数字化转型已成为国家教育改革发展的战略部署，将为教育高质量发展注入新动力，是 2022 年教育领域的“关键词”。

习近平总书记在党的二十大报告中指出[4]，要“加快建设教育强国、科技强国、人才强国，坚持为党育人、为国育才，全面提高人才自主培养质量，着力造就拔尖创新人才”。这是首次将教育、科技、人才进行“三位一体”统筹安排，拔尖创新人才培育被提升至更加重要的位置。卓越拔尖人才培养特别是物理等基础学科拔尖人才培养关系到国家从 0 到 1 基础创新工作的根基。习近平总书记在中央人才工作会议上强调[5]，要走好人才自主培养之路，高校特别是“双一流”大学要发挥培

收稿日期：2023-05-28
基金项目：基础学科拔尖学生培养计划 2.0 重点研究项目；同济大学研究生教育研究与改革教育管理项目的支持；同济大学本科生教育研究与改革教育管理项目的支持。
作者简介：张睿，副教授，主要从事教育技术与物理教育与研究工作，98733@tongji.edu.cn。
通讯作者：崔文倩，实验员，主要从事教学管理与评价工作，shiny@tongji.edu.cn。
引文格式：崔文倩，张睿，赵晖，等. 基于物理学科核心素养的大学物理教学设计与评价[C]. 2023 年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会，2023.
Cite this article: CUI W Q, ZHANG R, ZHAO H, et al. Design and evaluation of college physics teaching based on core literacy of physics subject[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education, 2023. (in Chinese)

养基础研究人才主力军作用，全方位谋划基础学科人才培养，建设一批基础学科拔尖人才培养要地。那么基础物理教育如何服务于拔尖创新人才的培养呢？

2 基于物理学科核心素养的大学物理教学设计

2.1 核心素养

物理教学的目标是培养学生的核心素养。物理学科核心素养是指学生在接受物理教育过程中逐渐形成的适应个人终身发展和社会发展需要的素养和能力，是学生通过物理学习内化的带有物理学科特性的品质[6]。主要体现在物理观念，科学思维，科学探究以及科学态度与责任四个维度，对知识与技能、过程与方法、情感态度价值观三维目标进行整合与再聚焦，充分体现物理学科对提高学生核心素养的独特作用[7]。当前，有关物理学科核心素养的理论问题研究已相对完善，但如何落实，怎样转化为学生的必备品格和关键能力还是一项复杂而艰巨的任务[8]. 特别是基础物理的教学，往往采取以课堂教学为主，以教师为中心的教学模式，教师对物理学科核心素养的把握往往停留在物理观念层面，对科学思维，科学探究以及科学态度与责任的培养都有所欠缺。因此面向物理核心素养的教学必须要在教学模式的培养上有所突破。

2.2 物理核心思想

物理思想是物理学科素养的重要组成部分，对学生科学素养的养成、学习能力的提升有着重要的价值[9]。物理思想是物理学的精髓，是知识转化为能力的桥梁。物理研究的思想方法有很多，比如观察法、类比法、控制变量法、等效替代法、转换法、图像法、数理建模等[10]。但核心是基于物理现象的理论建构，这取决于对物理现象的敏锐观察与对数学工具的熟练掌握，在模型构建过程中需要考虑的因素主要包括不变性与对称性，对物理规律的应用主要考虑的因素包括泛在性与还原性(见图 1)。开展基于项目化学习的探究性研究是培养物理核心素养的重要途径也是基于工程实践活动培养工科学生工程素养的重要抓手。

2.3 混合教学的总体框架

大学物理学课程教授内容所涵盖的自然界物质运动基本规律，包含力学、热学、电磁学、光学、相对论和量子力学等，所涉及的内容是自然科学的基础和现代工程技术的重大支柱。课程对于培养学生物理核心素养发挥十分重要的作用。

立足国家人才培养目标，贯彻“学生中心、产出导向、持续改进”的理念，提升课程的高阶性，突出课程的创新性，增加课程的挑战度，建构“课堂教学-课堂讨论-课后探究”的线上线下混合式教学模式[11](见图 2)。借助在线学习平台，利用学习分析技术，借助在线学习平台，开展探究性教学，前沿研究成果融入基础课程，消弭基础知识与前沿研究之间的鸿沟，在提升知识创新能力的同时，加深对基础知识的理解和内化。融入物理学史，明晰物理学对科学与社会发展的贡献，拓展物理学向交叉学科的延伸，点燃学术理想，激发潜能，提升学生的“软实力”。开展项目式课题，组织项目研究与成果展示训练，培养学生发现、分析、解决问题的能力。将知识传授、能力培养、价值引导与物理问题的综合探索和实践紧密结合，建构了满足学生个性化科学兴趣和学术需求的学习环境，有力支撑了科技创新人才的培养。

2.4 基于物理学科核心素养教学设计的基本原则

混合教学包括课堂教学，课堂讨论与课后探



图 1 物理核心思想架构

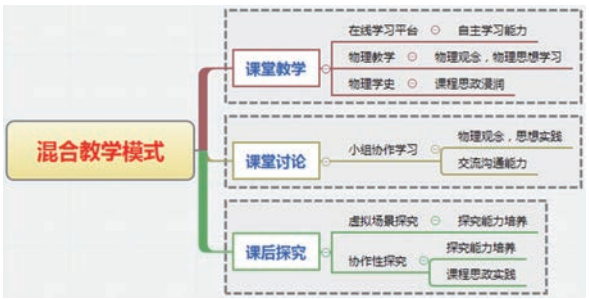


图 2 混合式教学模式下的教学设计总体框架

究三个部分，在课堂教学部分的教学设计中，教师应重视启发式教学对核心素养的培养，培养学生的科研意识。例如在讲授全反射时，可询问学生为何在海边容易出现海市蜃楼，为何海面附近会出现折射率变化的梯度。事实上，在物理教学中涉及许多经典的物理实验，如杨氏双缝，迈克尔逊-莫雷实验，康普顿效应等等，开展基于这些经典实验的讨论，既能够培养学生的科研意识，也可以培养学生学习科学家勤于思考的良好品质，起到课程思政的作用。

在课堂讨论部分的教学设计中，教师应重视高阶教学目标的教学活动，通过不同视角，不同方法，不同思路的比较，培养学生对布鲁姆学习目标分类中分析，比较，评估等科研基本技能。如在讨论谐振子时，比较动力学视角与能量视角。在讨论光栅衍射时，比较多光束干涉模型与光栅衍射模型，提升学生的批判性思维能力。

对于课后实践，结合项目化学习的特点，设计研讨式翻转式教学单元，通过案例分析、模型构建、课后查询、课堂展示的环节，将学生分组进行现场展示宣讲，注重物理基本原理、规律与科学前沿相结合，锻炼学生的主观能动性，培养学生独立获取知识、富有创新精神，强化科学应用和科学前沿拓展。

3 基于物理学科核心素养的教学评价

3.1 基于形成性评价和终结性评价的物理概念测评

物理观念是从物理学视角形成的关于物质、运动和相互作用、能量等内容的总体认识，是物理概念和规律等在头脑中的提炼与升华是从物理学视角解释自然现象和解决实际问题的基础，主要包括物质观念、运动和相互作用观念、能量观念等要素[12]。

学生的学习过程是多种多样的，不同的学生会采取不同的学习方式，从而导致不同的学习结果。吴维宁[13]认为，现有的评价方法与评价工具，更多地侧重于对表层式学习方式所产生的学习结果的评价与测量，缺乏对深层式学习方式所导致的学习结果的关注，其结果是学生仅采用表层式或者成就式学习方式进行学习。而形成性评价却恰恰关注学生学习过程中的学习方式[14]，通过分析混合式教学模式应用过程中学生的学习行为数据，确立科学的形成性评价指标，将学生的学习方式引导到深层式的方向上来，以助力教师调整教学内容和教学策略，进而提升教学效果。

课程教学过程中借助课堂应答系统，设置前测和后测题目来检验课堂学习效果，借助期末考试进行课程考核，通过项目反应理论和人工智能数据挖掘手段，对题目和试卷进行分析，测评出学生知识点掌握程度，挖掘教学中重点难点[15]（见图 3）。因此，对物理概念的测评应注重形成性评价和终结性评价，大概念的学习与理解不能简单地以“结论”的形式传授，需要学生充分经历学习的过程[16]。通过试卷分析、题目重难点来落实学生知识点掌握的程度和教师课堂教学效果，在“学”中“思”，在“学”中“悟”，使混合式教学的形成性评价更加科学有效，为线上线下混合式金课的建设提供一定的依据。

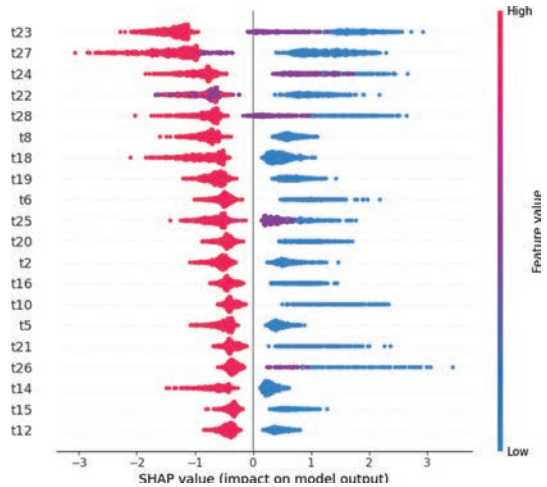


图 3 基于人工智能对试题难点与重点的挖掘

3.2 基于项目化协作学习的创新能力与课程思政成效的测评

就大学生的创新能力而言，至少包括以下几

个方面:探究能力(发现问题的能力,分析问题解决问题能力,归纳总结能力),团队工作能力(合作能力,交流沟通能力),自主学习能力(学术兴趣,时间管理能力)。学术能力的培养离不开特定的学习场景,在传统的教学模式中,教学场景以课堂教学为主,学习过程以教师讲授为主,学生在学习过程中使用的认知技能多为记忆,理解与简单应用,缺乏对高阶技能与学术能力的培养,对学生的考核也主要依赖于纸笔测验,对于学生学术能力的提高和发展不能起到应有的促进作用。在线学习和混合学习要求学生有较强的自主学习能力,能够合理地规划时间;项目化学习和研究性学习要求学生能够发现存在的问题,通过分析解决问题,并对解决结果进行归纳总结;协作学习要求团队成员积极合作,有效交流沟通,合理规划时间与任务。在教学过程中融入各种学习场景有助于学生学术能力的培养[17]。

项目化学习的评价主要来源于学习成果与学习日志。通过学习成果评价学生研究小组的研究能力,而学习日志主要用于评价学生研究小组的协作能力。从我们的数据上来看,大一学生项目化学习成效主要取决于团队成员之间的协作情况与小组组长的领导能力。

项目化学习也是课程思政的重要观测点,思想道德建设重在实践,通过对不同研究小组项目的实施情况上看,可以评判学生专研精神。例如在项目化学习中,有的学生倾向于自主推导,有的学生倾向于通过网络寻找现成解答;有的学生倾向对比不同的实验方案,有的学生倾向只用一套现有的方案。这都体现了学生钻研精神与创新精神的不同。

4 总结

本研究以大学物理教学作为典型个案,将传统课堂教学与混合教学,协作学习,探究学习等多种学习方式通过教学设计实现有机融合,通过人工智能与学习分析技术,形成大学生学术能力画像,对多维度综合测评,主要维度涉及学生知识掌握程度,学习主动性,解决问题能力,归纳总结能力与协作能力等方面,比较全面的测量和记录学生成长历程,为学生个性化发展提供较为精准的测量方法。通过以评促学,以评促教能够对提升大学生的学术能力和核心素养能起到积极的作用,对于拔尖创新人才的选拔也能起到借鉴的作用。

参 考 文 献

[1] 王祖源.增强教师教学能力提升学生核心素养[J].物理教学探讨,2021,39(10):1-4.
WANG Z Y. Enhancing teachers' teaching ability and enhancing students' core literacy[J]. Physics Teaching Discussion, 2021, 39(10): 1-4.

[2] http://www.moe.gov.cn/jyb_xwfb/xw_zt/moe_357/jyzt_2019n/2019_zt4/tjx/mtjj/201906/t20190619_386519.html

[3] http://www.moe.gov.cn/jyb_sjzl/moe_164/202202/t20220208_597666.html

[4] WATERMAN A, et al. The RISC-V instruction set manual, (i), 2011. 116.

[5] http://www.cppcc.gov.cn/zxww/2021/09/29/ARTI1632875623905103.shtml

[6] 中华人民共和国教育部制定普通高中物理课程标准(2017年版2020年修订)[M].北京:人民教育出版社,2020.
Developed by the Ministry of Education of the People's Republic of China. Physics curriculum standards for ordinary high schools (Revised in 2017 and 2020) [M]. Beijing: People's Education Press, 2020.

[7] 张健,王华,李春密.核心素养视角下的高考试题评析以2018年北京高考理综物理试题为例[J].物理教师,2019,40(10):89-93.
ZHANG J, WANG H, LI C M. Evaluation and analysis of college entrance examination questions from the perspective of core literacy. taking the 2018 Beijing college entrance examination physics test as an example[J]. Physics Teacher, 2019,40(10): 89-93.

[8] 关亚琴,赵亮.物理学科核心素养落实过程中存在的问题及对策——基于古德莱德"课程转化层级理论"的视角[J].中学理,2023,41(07):32-35.
GUAN Y Q, ZHAO L. Problems and countermeasures in the implementation of core literacy in physics—Based on Goodlaide's "hierarchy theory of curriculum transformation" [J]. Middle School Science, 2023,41(7): 32-35.

[9] 郑刃生. 核心素养视域下高中物理学科教学手段优化研究[J].课堂内外(高中教研), 2022(6):91-93.
ZHENG J S. Research on the optimization of teaching methods in high school physics from the perspective of core literacy[J]. In and out of Classroom (High School Teaching and Research), 2022(6): 91-93.

[10] 顾仁权.借助物理思想方法提升学生核心素养[J].中学教学参考,2019(17):55-56.
GU R Q. Enhancing Students' core literacy through physical thinking and methods[J]. Reference for Middle School Teaching, 2019 (17): 55-56.

[11] 陈华洲.探究线上线下融合教学培养学生物理核心素养[J].教育界,2023,No.516(04):44-46.
CHEN H Z. Exploring the integration of online and offline teaching to cultivate students' core physical literacy[J]. Education Press, 2023, 516(4): 44-46.

[12] 李庆国,帅厚梅.充分挖掘物理思想提升学生核心素养[J].物理教师,2021,42(12):20-23.
LI Q G, SHUAI H M. Fully exploiting physics thought to enhance students' core literacy[J]. Physics Teacher, 2021, 42(12): 20-23.

[13] 吴维宁.过程性评价的理念与方法[J].课程·教材·教法,2006(6):18-22. DOI:10.19877/j.cnki.kcjcjf.2006.06.005.
WU W N. Concepts and methods of process evaluation[J]. Curriculum·Textbooks·Teaching·Methods, 2006(6): 18-22. DOI:10.19877/j.cnki.kcjcjf.2006.06.005.

[14] 翟苗,张睿,刘恒彪.高校混合式教学形成性评价指标研究[J].现代教育技术,2020,30(9):35-41.
ZHAI M, ZHANG R, LIU H B. Research on formative evaluation indicators of blended teaching in universities[J]. Modern Education Technology, 2020,30(9): 35-41.

[15] 崔文倩,张睿,张建卫等.大学物理混合式教学资源评价研究[J].物理与工程,2021,31(S1):76-80.
CUI W Q, Zhang R, Zhang Jianwei, et al. Research on the evaluation of hybrid teaching resources in college physics[J]. Physics and Engineering, 2021,31 (S1): 76-80.

[16] 素养导向:大概念与大概念教学[J].刘徽;蔡蒨;李燕;朱德江.上海教育科研,2022(01).
LIU H, CAI X, LI Y, et al. Literacy orientation: Big concepts and big concept teaching[J]. Shanghai Education Research, 2022 (01).

[17] 马志强,王文秋.面向协作知识建构会话的智能观点分类研究——基于深度神经网络与会话分析的融合方法[J].现代教育技术,2022,32(6):5-14.
MA Z Q, WANG W Q. Research on the classification of intelligent views oriented to collaborative knowledge building conversation—A fusion method based on deep neural network and conversation analysis[J]. Modern Education Technology, 2022, 32 (6): 5-14.

■

DESIGN AND EVALUATION OF COLLEGE PHYSICS TEACHING BASED ON CORE LITERACY OF PHYSICS SUBJECT

CUI Wenqian ZHANG Rui ZHAO Hui SHI Zhong ZHANG Jianwei JIA Fei LIU Bingjie GUAN Jia

(School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract Based on the core competencies of the physics discipline, the design of university physics teaching adopts a combination of classroom teaching, classroom discussion, and post class practice. It adopts an online and offline hybrid teaching mode to organically integrate course teaching and research ability cultivation. The main methods and means of project-based learning in teaching involve three levels: theoretical modeling, experimental research, and computational simulation. The formative evaluation of project-based learning can evaluate students' academic potential and interests, providing data support for the personalized cultivation of top-notch innovative talents.

Key words Core literacy; Blended teaching; Project based learning; Teaching evaluation

基于 PBL 核心设计的大学物理线上线下混合式一流课程的建设

胡　南[1]　刘改琴[2]　周　密[3]　陈　琳[4]
([1,2,3,4] 重庆理工大学理学院，重庆　400054)

摘　要　高等教育内涵式发展离不开人才培养，人才培养离不开课程建设。以重庆理工大学“大学物理学”第二批国家级线上线下混合式一流课程的建设为例，从学生学情出发，创新开展了基于问题导向学习（Problem-Based Learning，PBL）核心设计的混合式教学。以学生发展为中心，立德树人为根本任务，革新课程理念、强化课程目标，开展了基于问题导向学习的课程内容、教学模式、课程思政建设、课程评价等方面的创新改革，并取得一定的成效。

关键词　大学物理学；线上线下混合式教学；一流课程；PBL

人才培养离不开专业建设，课程建设是专业的重要组成部分。2019 年教育部印发《关于一流本科课程建设的实施意见》，至此全面开展一流本科课程建设[1]。大学物理学是理工科专业的重要的公共必修基础课程，重庆理工大学近 10 多年的课程建设经历了“分层分类教学改革”“应用型人才培养目标改革”“互联网＋教学改革”及“线上线下混合式教学改革”，2019 年开始实践线上线下混合式教学。团队重视课程学情分析，直面课程教学痛点；对标一流课程建设目标，基于公共基础课树品德、打基础、习方法、培能力的课程定位；结合后续新工科跨学科、重融合、数字化的人才培养目标；革新形成了“德育在前、学生为本、问题导向、夯基础促拔尖”的教学理念，创新构建了“基于 PBL（Problem-based Learning）核心设计的混合教学模式”。2021 年课程认定为市级一流课程，2022 年课程认定为市级课程思政示范课，同期评为市级一流本科课程示范案例；2023 年获认定为第二批国家级混合式教学一流课程。

1　课程目标和课程“痛点”问题

大学物理课程是面向新生的公共基础课程，新高考背景下，生源各地区不一是课程的基本学情；传统单一课堂教学模式不利于知识、能力、素质三方面课程目标的实现是课程迫在眉睫的痛点问题。秉承以生为本、立德树人，突出一流课程两性一度的建设方向，结合重庆理工大学“应用研究型大学”办学定位，课程团队再次明确和细化了三位一体的课程目标；针对课程目标，详细调研分析了本校学生的学情，诊断出阻碍课程目标实现的课程内容、教学过程、教学活动中的具体痛点问题（图 1），并从痛点问题出发开展课程改革和实践。

2　创新解决“痛点”问题，实现课程目标

为了解决痛点问题，实现课程目标，团队创新构建了“基于 PBL 核心设计的大学物理混合式教学模式”。PBL，即问题导向学习（Problem-based Learning）是以学生为中心，教师引导学生主动学习并解决问题的教学方法。研究表明 PBL 有利于促进学生的批判思维能力、解决问题能力以及沟通能力的发展，也有助于学生养成终身学习的行为习惯[2]。通过线上线下混合式教学模式，拓展课程学习的时空域，实现个性化教学，提升课程

收稿日期：2023-05-29
基金项目：重庆市一流本科课程建设项目、重庆市课程思政示范课建设项目、重庆理工大学重点教改课题（2121ZD13）、重庆理工大学重大教学成果培育项目（ZDJG12）、西南地区物理学术竞赛类教育教学改革研究项目（SWPTJG2205）。
作者简介：胡南，女，副教授，主要从事大学物理教学研究，chenhu2002@cqut.edu.cn。
引文格式：胡南，刘改琴，周密，等. 基于 PBL 核心设计的大学物理线上线下混合式一流课程的建设[C]. 2023 年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会，2023.
Cite this article：HU N，LIU G Q，ZHOU M，et al. Based on PBL core design The construction on online and offline hybrid First-class course for college physics[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education，2023.（in Chinese）



图1 课程目标和课程痛点问题

的高阶性和挑战度，从而实现创新能力的培养。

PBL核心设计的理念是(1)教学内容的知识点要融入到创新设计的各种大小问题中，后文阐述；(2)教师课堂授课以“问题链”开展师生互动，推进课程教学；(3)以PBL大课题完成阶段性知识的应用和实践研究，实现综合能力培养；(4)问题以任务的形式，教学过程中形成“课前思考＋线上练习＋课后作业＋随堂测试＋PBL项目”5轮教学任务驱动。

基于PBL核心设计，课程团队从教学内容重组、教学模式构建、课程思政设计、教学活动打造以及教学评价多元化等方面开展了混合式教学的建设和实践。

2.1 打破传统框架，课程内容创新重构

内容是教学创新的载体，为了与线上线下混合式教学匹配，基于认知理论，将课程内容重构为：物理概念、定理定律、典型例题、线上练习、实践应用、综合分析等模块。根据布鲁姆教学目标分类，每个模块设定了重点教学目标，细化模块的能力培养核心点，强化能力培养。(图2)

目前储备课堂问题导向案例22个，PBL项目20个。教学案例常讲常新，让课堂贴近生活紧跟时代。课程数字化分析物理问题辅助软件8个，提升学生数字素养。以问题解决为中心，培养学生学习力、思想力和创造力。(图3)

2.2 改革传统课堂，深度混合教学过程

2.2.1 拓展课程教学时间和空间，开展线上线下混合式教学

从学生学习能力特点和课程目标新定位出发，采用轮转式混合教学方式[3]，即学生按照排定的课表开展线上线下教学活动交替轮转，自主学习与协同探究式学习结合，既实现能力培养又有助于完成大中物理思维的转型。线上线下学时比例为4∶6，结合内容模块，把概念、定理定律、典型例题和部分习题练习安排在线上，案例应用、分析推理综合问题解决放在线下协同学习，课后PBL项目提升综合能力和素养，竞赛促进拔尖学生的培养和选拔。

模块	物理概念	定理定律	典型例题	习题练习	实践应用	综合课题
重点目标（布鲁姆教学目标分类）	记忆 理解 应用	记忆 理解 应用	理解 应用 分析	理解 应用 分析	理解 应用 分析 评价	分析 评价 创造
能力培养核心点	术语描述 物理含义 概念背景 相似概念	内容描述 物理意义 适用对象 适用条件	典型性 分析思路 数学化 结果预判	知识敏锐度 多样性 熟练度 归纳能力	模型化思考 逆向思维 置疑判断 演绎能力	提取有效信息 多维思考 创新独特
案例：刚体定轴转动	刚体、角加速度、定轴转动、力矩转动惯量	转动定律	转动运动学例题（微积分）；转动动力学	概念+基础+综合应用	**如何打出高速旋转的乒乓球？（问题链教学）**	**PBL项目——网球塔**(高阶复杂问题分析)
教学安排	**线上引导性自学**			**线下课堂教学**		**课后小组研讨**

图2 课程内容分模块重构

课程内容		线下课堂问题设计部分案例 (横线为课程思政设计点)	辅助教学软件	思政人文(案例)	小组PBL 项目部分案例
力学	质点平动	**1.宇宙速度与相对运动**：嫦娥奔月、天问一号、中国空间站 **2.受力与状态**：赵州桥、大足石刻、悬空寺、罗马斗兽场、万神庙等的建筑力学（受力与状态） **3.受力与运动**：各类体育运动项目	1.智能手机; 2.轨迹追踪器 **Tracker_** 运动学 3.光路分析**Z-max** 4.物理传感器 **Phyphox;** 5.物理实验室 APP_电磁、天体物理 6.数据分析画图 **Orange** 7.电磁场探测APP 8.计算编程**Matlab**	1.航空航天精神; 2.中国古代智慧（赵州桥、悬空寺）、美育 3.体育精神 4.南仁东科学家精神 5.疫情共克时艰（教师自制电容笔线上批阅） 6.“5.12”地震精神 7.北斗精神 8.刘慈欣的创作精神 9.美育：毕加索立体画派与相对论 10.辩证唯物观：特殊到一般、辩证统一等	**1.校运动会体育项目动力学问题分析：（自选体育项目+视频拍摄+原理分析+软件数字化分析+论证说明）** **2.弹簧串并联探索实验（自备器材或用手机Phyphox+串并联实验+视频录制+Tracker 追迹+周期特征分析+结论说明）** **3.不同光圈拍摄分辨率研究或偏光镜头作用的探究（相机+室内外目标拍摄+对比分析+Matlab光强分辨分析+结论说明）** **4.旋转磁铁（大学生物理学术竞赛题目，仿做实验，分析物理原理，软件捕获数据并分析）**
	定理定律及守恒	**1.动量及定理**：2011年7·23甬温线铁路交通事故；2021年台铁太鲁阁事故（数据分析，高铁速度争议） **2. 冲量及应用**：高速水流切割宝石、高压水枪清洁、蹦极跳			
	刚体定轴转动	**1.定轴转动**：机械切割机，齿轮连带系统；乒乓球运动、跳水、滑雪大跳台、球类旋转问题 **2.角动量守恒**：陀螺仪、中子星的旋转速度；花滑运动，跳水运动等			
	机械振动和波	**1.振动**：2021年5月，深圳赛格大厦的振动危机；心脏搏动、心率及运动手表的探测；弹簧在机械减震、生活中的应用 **2.波动**：水波、声波探测及特征分析，电磁波、引力波的推广，专业延伸：波动信号的分析处理，电流、电压、光强等			
波动光学	光的干涉	**1.波动光学基础**：2022年11月天象血月—衍射波动性的**体现，观看直播** **2.干涉**：电影片段——干涉破案；全息成像，最热门三维成像			
	光的衍射	**1.圆孔衍射**：FAST中国天眼的孔径优势；照相机光圈的成像区别；光学仪器的分辨本领，2022，9中国重庆在建“中国第二只眼睛中国复眼” **2.光栅衍射**：光谱分析仪及其专业应用			
	光的偏振	**1.偏振**：2022年《阿凡达2》3D电影的秘密； 2.反**射光的偏振**：相机偏光镜头、驾驶偏光眼镜			
电磁学	电学	**1.电磁基础**：手机软件探测生活空间的电磁场，无处不在 **2.电容**：电容式触屏笔，自制电容触屏笔；专业：超级电容 **3.接地问题**：雷雨天避险，总结归纳三孔插座的用电器并解释			
	磁学	**1.磁学**：类比学习，数学知识散度旋度知识融合 **2.磁力**：科研重器——粒子加速器、碰撞实验			
	电磁相互作用	**1.电磁作用**：电磁炉、微波炉工作原理及探索实验 **2.电磁波的传播**：地震预警原理			
相对论		**1.时空修正**：GPS时空修正系统，中国的北斗系统 **2.科幻电影**：细节师生讨论《三体》《流浪地球》《独行月球》《星际迷航》《星际穿越》《奇异博士》等 **3.美育**：毕加索的立体画派的相对论时空思想			

图 3 大学物理课程 PBL 教学问题案例设计

2.2.2 创设多平台分层分类递进式线上线下混合式教学环境，让学生想学能学会学

课程形成了 74 个“校本微课”为主，276 个“校本录频课”为辅，校外优质资源为拓展的课程视频梯度学习体系；教师自主建设的 B 站（bilibili 平台，**up：渝语兰**），自录课程辅助学习视频 44，科普视频 43 个，物理人文视频 38 个，常讲常新；自建课程微信公众号（**思物理品生活**），发表物理科普文章，课程教学资料，课程建设动态 30 余篇。重点打造了基于超星学习通平台为主，B 站、公众号为辅的课程线上线下学习环境（图 4），让学生有兴趣学、方便学、学得会、学得好。

2.2.3 采用 BOPPPS 教学过程设计，以学生为中心，变被动学习为主动学习

BOPPPS 教学过程最早是由加拿大教学培训工作坊提出，强调以学生为中心，将教学过程设置为 6 个模块[4]，目前被众多教育工作者应用到教学设计中。重庆理工大学课程团队以 BOPPPS 为基本框架，将线上线下混合式教学过程分为导入，学习目标，前测，参与式互动教学，后测及总结。学生通过“线上视频学习、教材阅读、问题思考、课程笔记”完成概念、定理定律、例题的学习。课堂教学以具体的应用问题为主线，重点采用“问题导向式”学习，通过创新教学活动，融入课程思政元素，实现混合教学的两性一度（图 5）。比如在讲授刚体的定轴转动的力矩和转动定律中，在线上基本概念的学习基础上，线下以“如何打出你希望转动方向的高速旋转的乒乓球？”为主线，12 个问题链推进展开，从而实现知识的高阶性，过程中融入课程思政（图 6）。课前思考＋线上练习＋课后作业＋随堂测试＋PBL 项目”5 轮课程教学任务驱动，循序渐进，使学生的学习更有积极性，参与感和获得感。

2.3 德育在前，创新开展课程思政

以物理学研究方法和科学事件为主要依托，提炼“辩证唯物观、科学方法和精神、育人综合元

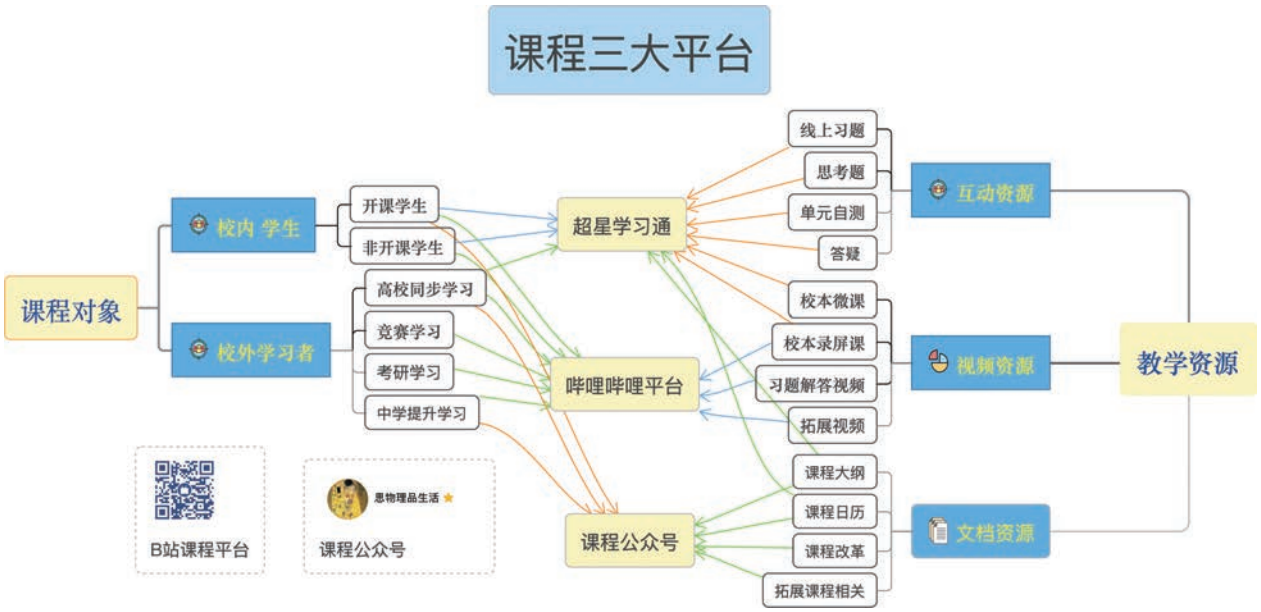


图 4　大学物理课程线上线下混合式教学学习环境



图 5　BOPPPS 课程教学过程设计

素”的三条思政主线，以“泛在、重点、升化、课题融合”等方式，图片、视频、讨论、日常推文等载体，线上线下、课堂内外潜移默化开展课程思政（图 7），激发学习动力，树立远大目标。

A:“乒乓球受力就会旋转吗？”——力矩
B:“转轴与乒乓球受力有什么特点？”——叉乘的平面垂直关系
C:“球拍与乒乓球的接触点怎么影响球的旋转？”——转动平面的确立
D:“提拉上旋是如何给乒乓球力的？”——冲击力与摩擦力的合力
E：“为什么合力中只有摩擦力有力矩？：”——力矩的相对性
F：“自由刚体的旋转轴如何确定？”——高阶性、挑战度，推荐高阶学习
G：“如何打出更旋转的球？”——复习运动学知识导入转动定律
H：“影响乒乓球角速度的因素有哪些呢？”——多因素问题，导入转动惯量
I：“球壳相对过球心的轴其转动惯量如何呢？”——高阶性，三维数值分析
J：“乒乓球的转动惯量是多少呢？”——具体案例
K：“2000 年，国际乒联为什么把 38mm 的小球换成了 40mm 的大球？”-课程思政
L：“比较了 38mm 和 40mm 球的参数后，你发现了什么结果吗？”——数据说话，思政

图 6　课堂教学以问题链展开——刚体定轴转动

注重辩证唯物元素的多次泛在融入，去表面化，比如：力学中牛顿定律、做功、守恒等学习中体现的“个别到一般”；质点、刚体模型中的“抓主要矛盾”；光本质研究的“一分二”“辩证统一”；相对论中的“时空观”等，让学生有真感悟；强调由物理问题引出思政内容，去“硬融入”，比如：计算乒乓球的转动特性，感悟徐寅生小球改大球的大局观和发展观；用所学分辨本领的知识半定量分析 FAST 望远镜的分辨本领，感怀南仁东的民族精神和奉献精神；计算大跳台的运动员轨迹，感受苏翊鸣青年运动员的拼搏精神；相对论时空收缩启发同时期毕加索的立体画派产生的创新精神；平转动受力综合分析谈恒山悬空寺中国古人的智慧等等，让学生学会用数据说话，在数据分析中对事物人物有真触动。组长负责制的 PBL 项目，使学生的沟通、协作、表达、协调等团队合作能力提升，让学生有真收获。

2.4　多元创新教学活动，打造学习共同体

基于“最近发展区理论”[5]。初期教师依托课程 QQ 群互动，缩短师生、生生交互影响距离；课堂基于问题链，开展小组讨论、抢答、演示、翻转课堂等教学活动营造自主、合作、探究式学习氛围；课后 PBL 项目，教师将任务的分工、管理、督促、合作、赋分权力下放，让部分同学参与到教学实施中，并带动小组成员积极完成任务，循序渐进打造师生学习共同体（图 8）。PBL 项目以问题为导向，小组协同完成器材准备、实验探索、模型分析、



图 7　课程思政三条主线及其实施

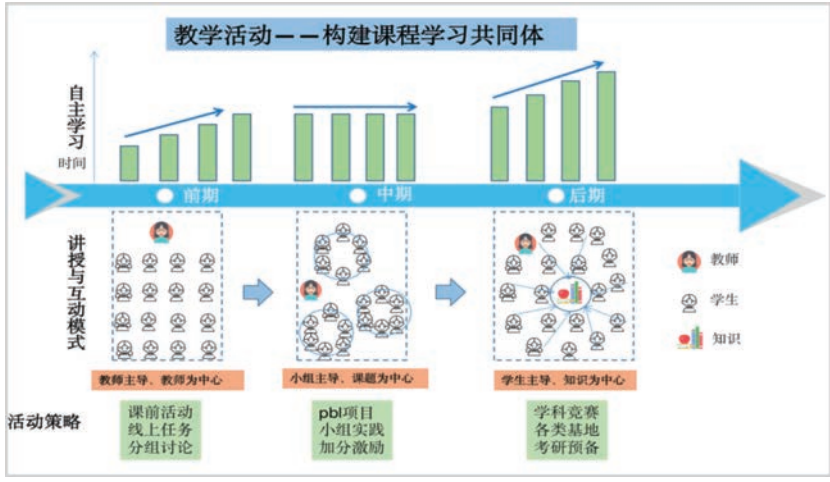


图 8　依托教学活动打造学习共同体

计算机计算与模拟、论证与结论及课题视频制作各环节。每学期2个项目，选题由易到难，培养学生团队协作、问题分析、建模、软件分析等综合能力，该项活动得到大部分学生的好评，并一直认可收获颇丰。

2.5 综合课程动态评价

注重过程性课程评价，形成课程综合评价体系。教师在教学过程中，不定期公布平时分，督促学生及时调整学习态度和改变学习方法，同时开展教师教学反思，实现动态测评和教学督导。课程真实度系数保障平时学习与期末考试情况基本一致。（图9）

3 大学物理课程建设成效

通过课程团队10多年的改革创新，课程已被认定为第二批国家线上线下混合式一流课程。依托大学物理一流课程建设，团队成员主持基于课程思政、课程评价、问题导向式学习等省部级课题多项，完成相关论文数篇。教师团队成员在全国混合教学创新大赛、省部级教师教学创新大赛、教学指导委员会举办的教师教课比赛中取得优异的成绩。

经过教学创新，学生学习积极性和主动性大大增强，课程不及格率明显下降。近2年学生完成PBl课题研究百余项，很好地培养了学生的问题探究能力，运用数字化工具分析物理问题的能力以及团队合作交流、群策群力克服困难、努力奋斗等精神品质的养成，得到大量学生的认可和好评。学生竞赛成绩提升，近2年，在“全国大学生物理实验竞赛”“西南地区大学生物理学术竞赛”两大赛事中实现获奖零的突破，并在2022年的学术竞赛中争获西南片区一等奖，10名参赛队员中4名队员突破性获个人奖。

重庆理工大学的教师的授课视频、科普视频在全网拥有3万粉丝，点击率近300万，全国400多所高校的学生在同步学习大学物理学，有效助力在校大学生完成课程学习、研究生专业课考试、辅助高中生参与物理竞赛，教学效果得到大量的留言肯定。

教育高质量发展离不开课程建设，数字时代背景下的课程改革面临新的挑战。本文切合国家级一流课程建设，分享了重庆理工大学大学物理课程在教学内容重组、教学模式构建、课程思政设计、教学活动打造以及教学评价多元化的措施和方法，并创新构建了“基于PBL核心设计的混合教学模式”的经验和成效，以期与同类课程交流学习，提升课程质量。

参 考 文 献

[1] 教育部.关于一流本科课程建设的实施意见(教高[2019]8号)[Z]. 2019.

[2] 朱晓艳、罗国平.近十年问题导向学习研究热点与发展前沿————基于CiteSpace和VOSviewer的知识图谱分析[J].高教论坛，2022(7)：114-120.

[3] http://www.blendedlearning.org/models/@Clayton Christensen.

[4] 曹丹平，印兴耀.加拿大BOPPPS教学模式及其对高等教育改革的启示[J].实验室研究与探索，2016，(2)：196-201.

[5] VYGOTSKY L S. Mind in Society. Cambridge：Harvard University Press，1978：86.

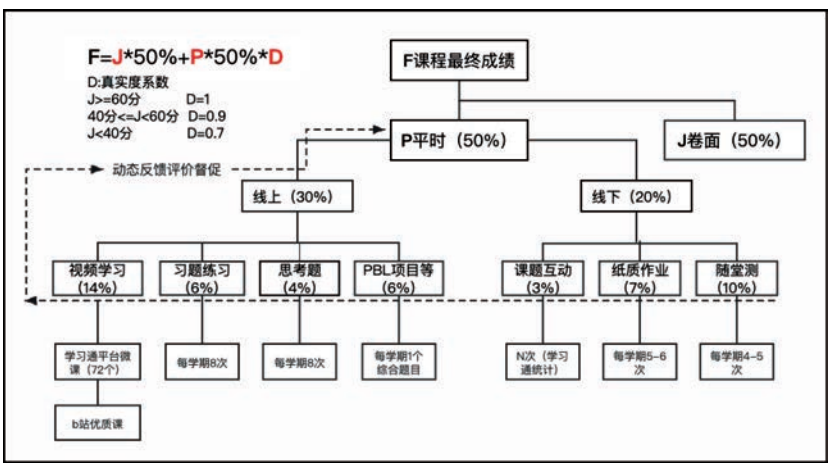


图9 课程动态综合评价体系

BASED ON PBL CORE DESIGN THE CONSTRUCTION ON ONLINE AND OFFLINE HYBRID FIRST-CLASS COURSE FOR COLLEGE PHYSICS

HU Nan[1] **LIU Gaiqing**[2] **ZHOU Mi**[3] **CHEN lin**[4]

([1,2,3,4] College of science, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054)

Abstract The connotative development of higher education relies on personnel training, which cannot be separated from curriculum construction. Taking the construction of the second batch of national blended online and offline first-class courses of College Physics in Chongqing University of Technology as an example, based on the core design of PBL (Problem-Based Learning) is innovatively carried out from the students learning situations. Centered on student development and rooted in moral education, innovative reforms have been carried out in curriculum concepts, course objectives, problem-based learning curriculum content, teaching models, ideological and political education in curriculum construction, and course evaluation, etc., and some positive results have been achieved.

Key words college physics; online and offline hybrid teaching; first-class course; problem-based learning

新工科背景下优化风电专业教学效果的虚实互动风机模型开发

张国煜　陆明玉　崔晓军　李晓雪　李　飞　黄金昭
（济南大学物理科学与技术学院，山东 济南　250022）

摘　要　数字孪生虚拟风场对于提升传统风电专业教学质量，培养具备多学科交叉综合能力的新能源专业学生有着十分重要的价值。为更好地实现教学用数字孪生系统，本文介绍了一种适合风电教学和实验需求的实体风机模型，它通过机械结构和控制系统的创新设计，能够精准还原风力发电机在水平轴上的运动，实现步进电机的闭环精确控制和与虚拟风电场数字模型的双向实时交互功能。这种模型不仅可以提高风力发电类专业相关理论课程的教学效果，实现虚实同步运行，提高教学演示效果和课堂吸引力，还可以在风力发电综合实验中替代过去老旧的实验仪器完成实验。该系统还能与更大的虚拟数字孪生风电场景无缝连接，完善虚实互动功能。对于推动虚拟仿真、物联网等新技术在风力发电专业教学培养中的创新应用，具有重要的实践价值。

关键词　虚拟仿真；数字孪生；风力发电；物理原理

1　研究背景与意义

风力发电在我国可再生能源开发与利用战略中始终占据着优势地位，并且占比逐年提升，截至2022年，我国风电、光伏发电量突破1万亿千瓦时，达到1.19万亿千瓦时，已接近全国城乡居民生活用电量[1]。庞大的市场体量为风电相关领域的人才培养提出了更高的需求[2]。

风力发电系统是一种典型的复杂系统，具有鲜明的跨学科属性，而传统的教学与实践环节普遍存在一些痛点问题亟待解决。首先，风力发电系统涉及电机原理、控制理论、流体力学等多个领域的知识，这类专业基础课在大学里往往是分散在多个学期且独立讲授的，学生仅通过理论学习难以形成整体且系统的知识体系。其次，由于风力发电设备体积大、成本高，学校很难提供真实设备供学生进行实际参观和操作，而专业认知实习也仅是去风电场走马观花，教学效果难以得到保证。

数字孪生技术[3]，近年在能源和工业领域被广泛采用，其通过创建物理设备的虚拟模型并利用实时数据更新模型参数，结合人工智能算法来进行设备预测、优化和决策支持[4]。国内外已有若干机构对数字孪生技术与风电专业教育的结合进行了一些探索：德国的Fraunhofer研究所开展了一项名为“Virtual Wind Farm”的研究项目[5]。该项目通过建立风电场的数字孪生模型，让学生可以在虚拟环境中进行风电场的运行和维护实践，从而提升他们的实践技能和解决实际问题的能力。在我国，企业与高校均对数字孪生技术在教育中的应用表现出越来越浓厚的兴趣，郭瑞等人的一项研究[6]开发了一个基于数字孪生的风力发电机虚拟实验室，学生可以在其中对风力发电机的运行进行仿真和实验，进一步理解风力发电机的工作原理和运行状态，提升实践操作能力。

本文描述了一个由新能源科学专业一线教师自主搭建的多用途风电场数字孪生风力发电机的演示模型。它隶属于一个更大规模的教学用风力发电场的数字孪生场景，这个系统力求在风电专业教育和培养环节中的多个阶段和科目中辅助专业课教学，通过数字孪生和人工智能技术解决传

收稿日期：2023-05-29
基金项目：济南大学教学研究重点项目（JZ2106，J2207，JZC2205）。
作者简介：张国煜，男，讲师，主要从事新能源科学与工程教学科研工作，研究方向为可再生能源转换与利用，sps_zhanggy@ujn.edu.cn。
引文格式：张国煜，陆明玉，崔晓军，等. 新工科背景下优化风电专业教学效果的虚实互动风机模型开发[C]. 2023年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会，2023.
Cite this article：ZHANG G Y，LU M Y，CUI X J，et al. Development of a virtual-reality interactive wind turbine model for optimizing the teaching effectiveness of wind power engineering in the context of emerging engineering education[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education，2023.（in Chinese）

统风电教育中的痛点问题。

本文的基本结构如下：第二部分，简要阐述自主开发的教学用风电场数字孪生场景架构以及核心功能；第三、四两部分，分别描述风机功能模型的结构设计和控制器软硬件设计；最后，是系统成品展示以及结论。

2 项目简介与实体风机模型

该系统主要针对风电方向的专业基础课程与实践环节需求开发，目的是建立一个统一的虚拟数字平台，融合先进图形技术、虚拟现实技术（VR）、计算机视觉技术（CV）和机器学习技术（ML），通过设计新的功能来辅助各教学环节开展，优化教学体验。系统整体结构如图 1 所示。



图 1 三维虚拟风电场数字孪生系统整体架构

该项目中位于核心地位的是采用虚幻 4 引擎打造的风力发电场数字孪生虚拟场景，借助业界领先的图形技术可呈现照片级拟真度的三维场景[7]，支持实时光线追踪和高动态范围等先进图形技术，在主流个人电脑上流畅运行，为实现其他功能拓展提供基础。为满足不同教学培养环节的不同需求，项目围绕风电专业若干理论和实践课程构建了丰富的功能模块。比如虚拟现实模块面向专业认知实习环节[6]，突破时空限制，通过 VR 设备接入高拟真度的虚拟风场，进行实地参观学习，通过精心设计的游览路线和互动环节，身临其境的完成认知环节。动力学模型和仿真软件接口则面向理论课程，如风力发电原理以及自动控制理论基础等，将传统由 MATLAB/Simulink 为主的系统仿真模型，与高拟真度的虚拟风机进行融合，让系统仿真更加的直观、真实，激发学习兴趣并提升学校效果。另外，随着人工智能技术渗透率的提高，未来风电场的设计、运维等环节均离不开 AI 技术和自主机器人技术，因此本项目场景积极引入和对接主流 AI 技术，借助先进算法实现了基于虚拟场景的合成数据生成器，能全自动的生成近乎无限量的带标签数据样本，辅助 AI 视觉算法的开发与训练，也为学生未来的学科交叉融合奠定了软硬件基础。

在本项目中承担“虚实融合，实时同步”任务的就是本文主角：风力发电机实体模型，它主要面向风力发电原理及新能源综合实验等课程需求。这类课程需要对风电机的不同功能进行分离、演示和操作。在传统的教学环节中，由于缺乏高质量的风机功能模型，讲解或演示效果往往不尽人意，要么只能进行理论讲解缺乏直观演示，要么只能通过视频等无互动的单一方式进行单向展示；实验环节中，学生只能面对极度简化的功能模型去做实验，无法与真实风机上对应的部件和功能建立连接，效果也就无从保证。因此本项目建立了高拟真度的实体风机模型，用以模拟风力发电机若干重要功能，并且能与虚拟场景中的风机实时同步运转，配合完成不同的教学需求。接下来将从该实体模型的硬件和软件两个方面分别进行介绍。

3 硬件设计

3.1 设计原则与方法

本项目中的虚拟风场定位于多用途风电场数字孪生，同时也需要在教学中更加直观的展示风力发电机相关的运动状态和功能，我们细化并拆解了设计目标，并逆向确定了如下设计原则：

- 实体模型需能够模拟真实风机的若干基本功能，如风轮转速调节、机舱偏航控制以及桨距角调节等功能，且能够与虚拟场景进行同步运行，因此需要设计复杂的内部机械结构并开发满足通讯和控制需求的控制系统；
- 由于需求功能较多，既要外形拟真度又要求模拟功能，因此是市场上没有此类产品或满足要求的零部件出售，因此采用了自行设计，3D 打印并组装的方式来实现该实体模型；
- 考虑到 3D 打印的精度有限，对于精密的

传动系统和强调配合的接插部分零件，我们选择了一致性高、通用性强的乐高积木零件。

本文中实体模型使用 SolidWorks2022 软件进行设计、装配和功能前期验证。3D 打印采取外包的方式，收到零部件后自行组装和调试；本系统所用的控制电路与控制算法均为自主开发，控制电路硬件 PCB 使用立创 EDA 工具进行设计并自行焊接。

3.2 结构解析

风机实体模型的整体结构如图 2 所示。整机高度约为 110cm，由左机舱、右机舱、机舱顶盖、轮毂、轮毂端、扇叶、塔架、驱控一体式步进电机等组成。

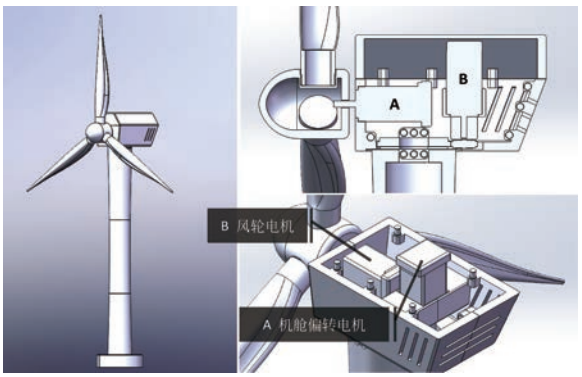


图 2 水平轴风力发电机实体功能模型整体结构图

塔筒部分高度约为 75cm，由于 3D 打印设备的可打印物品体积存在限制，因此塔筒部分我们做了分段处理，将塔筒分为三部分，并设计了牢固的接插结构。这也与真实的水平轴风力发电机结构保持一致，学生可以借此了解真实风力发电机结构特点。塔筒采用空心设计用以将机舱内部复杂的电源和控制线缆引出到底座电源。

机舱部分安装在塔筒之上，并能够以塔筒为轴心做旋转运动，因此需要设计特殊的旋转结构来实现。我们采用了类似坦克炮塔的旋转支承结构来实现此功能。其中控制机舱旋转的驱动电机 A 垂直安装，通过小齿轮与固定在塔筒上的大齿轮啮合，当电机旋转时，带动小齿轮转动，从而与大齿轮产生相对转动，实现机舱的旋转。配合电机控制器的闭环反馈和转角细分功能，可以实现机舱转角、转速的精细控制。

风轮旋转部分的结构由电机 B 驱动，电机轴连接与风轮中心的圆锥形几何体——轮毂相连。轮毂采用轻量化设计，并通过三个相隔 120°的凹槽连接风力机扇叶。扇叶采用复杂曲面建模技术，实现对真实风机叶片的高度仿真建模，叶片内部采取薄壁中空设计，降低风轮驱动电机负荷的同时，也能保证有足够的机械强度。以上四个部分构成一个水平轴风力发电机的典型风轮结构，与机舱类似，高性能闭环驱动电机能够实现精细且宽范围的转速调节效果，实现风机叶片旋转功能的完美模拟。

本模型中最复杂的部分为桨距角调节机构（图 3）。首先，要在非常有限的轮毂内部空间实现三个桨叶的角度调整，必须设计一种十分紧凑的调节机构。其次，风轮整体是时刻处在旋转状态的，因此须在旋转的同时实现垂直于旋转平面的调节。

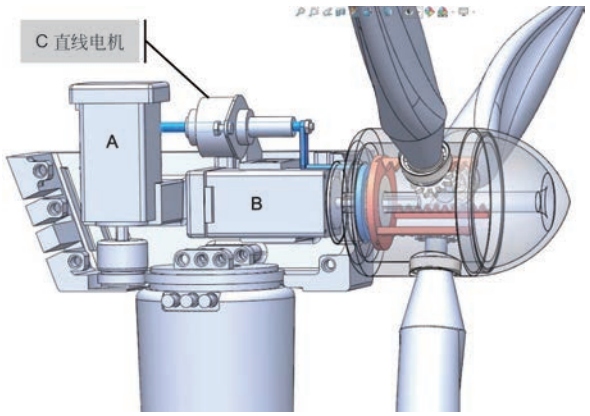


图 3 实体模型桨距调节机构示意图

我们借助一种类似旋转支承的装置实现了这种结构，区别是轴向可以双向运动，图 3 中橙色部分有三个齿条与扇叶根部的齿轮啮合，形成“齿条＋齿轮”的传动结构，用来将齿条的平动转换为齿轮转动，从而带动扇叶完成桨距角调节。橙色和蓝色为超薄轴承，可在旋转的同时实现径向运动。轴承蓝色一侧通过一个异形推杆完成径向移动，动力由直线电机 C 提供。

3.3 控制单元硬件设计

为实现实体风机模型的动作控制以及与虚拟场景之间的双向实时通信，需要设计相应的控制系统。具体包括对风机功能进行模拟所需的三个电机控制器，即图 2 中的机舱偏转电机 A、风轮电机 B 以及图 3 中用于桨距角调节的直线电机 C。上述三个电机均为步进电机，两相四线式配置，具体参数如表 1 所示。

表 1 项目所用电机规格参数

用途	保持转矩/Nm	额定电流/A	相电阻/Ω	相电感/mH	步距角/(°)	重量/kg	机身尺寸/mm
机舱偏转	0.07	1	2.4	5.0	1.8	0.1	28×28×30
风轮旋转	0.07	1	2.4	7.5	1.8	0.1	28×28×30
桨距调节	N/A	0.4	53	N/A	15	0.08	10×10×25

对于机舱偏转和风轮旋转这类运动控制，需要专门设计步进电机驱动电路，通过对电机两相电流的精细控制，实现规定的偏转动作。目前市场上已有成熟的驱动电路板产品，但是由于本项目面向的是虚拟数字孪生场景，虚实模型之间的实时互动对通信系统要求很高，而且需要做定制化的功能开发和对接，这类产品往往不开放二次开发权限，因此只能自行开发，做到软硬件自主研发垂直整合。

根据功能需求，我们选择了目前主流的STM32F103系列单片机作为主控芯片，实现步进电机的驱动和双向实时通信功能。该芯片基于ARM Cortex M0核心，主频72MHz，且具有丰富的外设接口，如多路PWM，I^2C，SPI，UART总线等，加之有多种封装尺寸可选，能够在极为有限的空间实现功能完整的驱控一体化紧凑型驱动板。为了增强控制的准确性和可靠性，选择了更复杂但更先进的一体化闭环控制结构，控制板直接安装在电机背部，使用磁性元件感知电机转动角度实现位置反馈环，电机加控制器整体结构小巧紧凑，非常适合在模型风机的机舱内部署。控制系统的功能如图4所示。

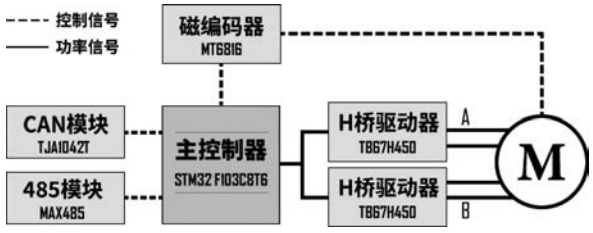


图4 步进电机闭环驱动板核心器件拓扑结构

驱动系统中使用两个集成的H桥芯片H450分别对步进电机的A、B两相进行控制(图5)，每一颗芯片内部集成了四颗功率N-MOS芯片及其驱动电路，从而组成单路H桥，可实现步进电机单相线圈的正反转驱动。

为实现电机的闭环控制，需要配合磁性编码器来感知电机轴的转动角度。磁性编码器采用

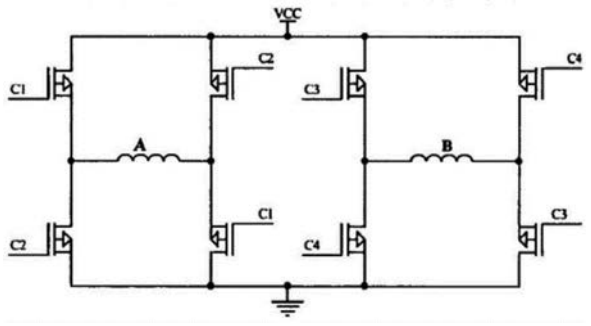


图5 两相步进电机的双H桥驱动电路，图中A和B线圈表示电机某一相的电感线圈两端

MT6816芯片，它可以精确感知径向磁化的磁场的旋转，并精确反馈出旋转的角度。芯片能够支持多种角度编码输出，如A/B/Z正交编码、PWM脉冲信号反馈以及SPI总线方式输出。为增强系统鲁棒性，我们选择了SPI总线通信的方式来将角度测量值反馈到主控芯片，由于是纯数字传输还有信息校验环节，最大限度地保证了传输过程的抗干扰性。

虚实之间实时互动功能需要具备完善的外部通信接口，因为虚拟风电场中的风机数量不确定，对应的实体模型必须考虑能够适用于多风机共存和共同工作场景。比如由十几台实体风机模型组成的一个沙盘模型演示系统，要求所有风机和虚拟场景的风机一一对应且同步运行。因此我们选择了具备多点通信能力的现场网络构建通讯系统。适合本项目使用的现场总线包括RS485和CAN总线两种，前者是半双工通信，成本较低但是通信效率和规模都受限，后者作为汽车领域的标准总线，具备高速、稳定和全双工的优点，但是成本相对较高。经过综合比较，项目并不需要多个风机控制器之间进行通讯，而只需要一个主控制器挂载在运行虚拟场景的主机上即可，因此作为第一版控制器我们采用了成本更低的RS485方案，并自行制定通讯协议。

电机驱动板的电源部分我们选择了效率高、发热低的降压开关电源(BUCK电路)方案，在极

为有限的空间里实现了高效的24V→3.3V的降压结构，进一步降低了驱动板的整体发热量。由于功能需求多、功率大且尺寸限制严格（28mm×28mm），因而采用4层板的PCB设计。PCB的设计和布局工作全部使用我国自主知识产权的PCB设计软件“立创EDA”完成，并加工。最终的PCB结构和电路板实物如图6所示。

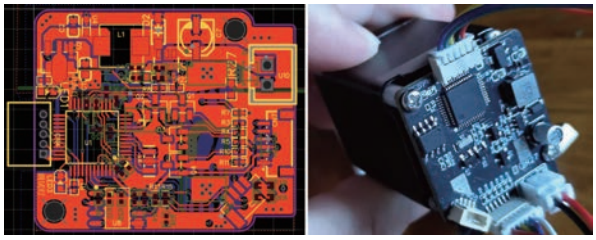


图6　电机控制板PCB设计图（左）和实物安装图（右）

4　软件设计与成品效果

本项目软件分为两部分，一是实现闭环步进电机的控制，另一部分则是用以实现电机与虚拟场景实时通信。闭环电机的嵌入式控制系统，使用Keil作为开发IDE，实现电机的闭环控制策略。由于对程序运行效率要求较高，故选择不使用实时操作系统，直接裸机运行。闭环PID控制周期为20kHz，能够实现快速响应和精确控制。

而通讯部分，基于485总线自行拟定了通信协议，通讯结构如图7所示。一帧信息分为帧头、传输方向代码、目标站号、属性域、帧尾和校验位几个部分。帧头和帧尾用来定义一个通信帧的开始和结尾，传输方向表示信息在实体风机和虚拟场景两端之间的传递方向，属性则表示与风机相关的各项属性值，必须考虑冗余，即为未来要纳入传输任务的若干属性数据预留位置，目前系统仅使用风轮转速、机舱转角和桨距角三项属性，另外预留了10个属性全部填入0xFF占位符。

本系统成品组装效果如图8所示。图中展示了实体模型与背后大屏幕中的虚拟场景同步运行的状态。

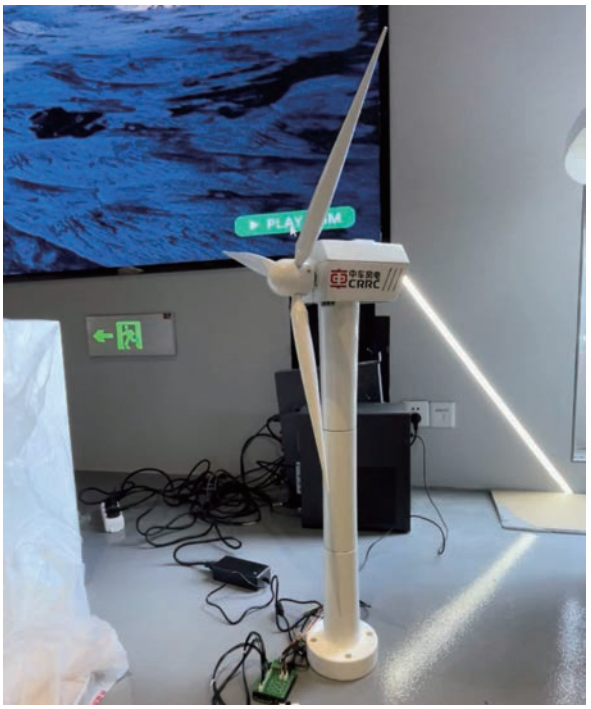


图8　实体风机模型成品展示

5　结论

本文设计并实现了一种全新的适合风电专业教学和实验需求的实体风机模型。通过创新的机械结构设计精准还原水平轴风力发电机多个自由度的运动；自主设计并制作了控制与电气系统，实现了步进电机的闭环精确控制和与虚拟风电场中的数字风机模型双向实时交互功能。此系统将在如下两个方面发挥重要的作用：

在专业的相关理论课程教学上，虚拟场景配合实体模型能够完成虚实同步运行，可以将原本枯燥抽象的控制系统和控制过程，以极高质量的虚拟模型和看得见摸得着的实体模型同步呈现出来，极大得提高了教学演示效果，增强课堂吸引力。

在风力发电综合实验，此模型也能增强了实验模型的真实性和互动性，由于本模型控制器具备总线通信功能，而且开放通信接口，方便与控制策略对接，从而替代过去老旧的实验仪器完成



图7　虚拟场景与电机控制器通信帧结构

实验。

综上，本系统立足风电类专业教学场景和需求，实现了一个仿真和教学需求的新平台，能够显著提升教学互动的效果，增加学习兴趣，与更大的虚拟数字孪生风电场景无缝对接，完善了虚实联结互动功能，该系统为推动风电教育数字化，进一步与新技术整合做出了基础性的贡献。

参 考 文 献

[1] 2022年我国可再生能源发展情况-国家发展和改革委员会[EB/OL].[2023-05-28]. https://www.ndrc.gov.cn/fggz/hjyzy/jnhnx/202302/t20230215_1348799.html.

[2] 李建林，梁忠豪，王力. 储能学科体系建设与思考[J]. 储能科学与技术，2022，11(5)：1667.

[3] 陶飞，刘蔚然，刘检华，等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统，2018，24(1)：18.

[4] FEI T，HE Z，LIU A，et al. Digital twin in industry：State-of-the-art[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics，2019，15(4)：2405-2415.

[5] NOEVER-CASTELOS P，ARDIZZONE L，BALZANI C. Model updating of wind turbine blade cross sections with invertible neural networks[J]. Wind Energy，2022，25(3)：573-599.

[6] 郭瑞，吕嘉文，周昊天. 智慧风电数字孪生系统的实现及应用[J]. 数字化用户，2022，28(15)：58-60.

[7] 王梦茹. 基于Unreal Engine4的虚拟建模研究[J]. 信息技术与信息化，2021，000(004)：64-66.

DEVELOPMENT OF A VIRTUAL-REALITY INTERACTIVE WIND TURBINE MODEL FOR OPTIMIZING THE TEACHING EFFECTIVENESS OF WIND POWER ENGINEERING IN THE CONTEXT OF EMERGING ENGINEERING EDUCATION

ZHANG Guoyu　LU Mingyu　CUI Xiaojun　LI Xiaoxue　LI Fei　HUANG Jinzhao

(School of Physical Science and Technology，University of Jinan，Jinan Shandong 250022)

Abstract　Digital twin virtual wind farms have significant value in improving the quality of traditional wind power education and cultivating new energy professionals with interdisciplinary and comprehensive abilities. In order to better implement teaching with digital twin systems，this paper introduces a physical wind turbine model suitable for wind power education and experimental needs. Through innovative design of mechanical structure and control system，it can accurately reproduce the motion of a wind turbine on a horizontal axis，achieve closed-loop precise control of stepper motors，and enable bidirectional real-time interaction with virtual wind farm digital models. This model not only enhances the teaching effectiveness of wind power-related theoretical courses，synchronized virtual and physical operation，improves teaching demonstration effects and classroom appeal，but also replaces outdated experimental instruments in comprehensive wind power experiments. The system can seamlessly connect with larger virtual digital twin wind farm scenarios，improving the interaction between virtual and physical components. It has important practical value in promoting the innovative application of new technologies such as virtual simulation and the Internet of Things in wind power professional education and training.

Key words　virtual simulation；digital twin；wind power generation；physical principles

基于学习者视角下的大学物理实验同伴辅导教学模式及评价

张　愉　周振华*　郑永刚

（云南师范大学物理与电子信息学院，云南 昆明　650500）

摘　要　针对大学物理实验教学中长期存在的“痛点”问题，本文尝试在大学物理实验课堂教学中融合“同伴辅导教学法”“自主学习法”，积极构建一种以学习者为视角的伴有责任的大学物理实验教学模式，旨在提升大学生物理实验自主学习能力，并为大学物理实验教学改革提供一些借鉴思路。

关键词　大学物理实验；同伴辅导；学习者视角；教学模式

大学物理实验是一门独立面向理工类学生开设的公共基础课，为培养学生模型建构、批判性思维等科学高阶思维能力和科学责任与态度提供坚实的后盾，同时大学物理实验是孵化基础物理理论知识的辅助基地，是促进学生对物理学科的感性认知往科学知识的重要枢纽，为后续专业课的理论学习提供扎实的基础。但目前大学物理实验教学存在着亟待解决的痛点问题。通过文献查阅，可以发现大学物理实验教与学中存在的问题：对于教师而言，费尽全力不过上演了一出独角戏，主要是“原理讲授＋实验演示＋报告批改”；对于学生而言，主要是“听原理＋仿操作＋记数据＋写报告”等教师讲、学生听，教师演、学生做，只授课、不育人，无交流、不评价，无技术、缺创新等机械传统的、无自主性的教学模式，这里描述的情形不代表所有学校，但当前有大量的研究表明高校在大学物理实验中学生在自主学习方面的表现有待改善。且笔者当下所在学校大学物理实验课堂教学中反馈出来的情况依旧是：学生无主体、无自主性的教学模式，致使大多数学生对大学物理实验课不感兴趣、对教师讲授后的实验原理模糊不清；操作物理实验能力不足、实验数据处理态度不认真，以及学生实验创新性不够等一系列现象的日益暴露，大学物理实验课程正陷入“教师难教、教不痛快，学生厌学、学不清爽”的局限境地。

针对大学物理实验教学中长期存在的“痛点”和应着力的“重点”问题，笔者拟尝试秉持“立德树人”为根本任务，实现学生真主体，师生共对话，同伴互助学；做到理论实践相融合，促进线上线下深度学习进阶式的教育理念，基于“同伴辅导教学互助法”，渗透“自主式”“混合式”“对话式”思想，尝试在大学物理实验课堂教学中得以实现，为大学物理实验课程教学改革提供一些借鉴思路。

1　基于学习者视角下大学物理实验同伴辅导的教育模式构建

当前高校教师面临的主要课堂教学挑战是如何帮助大学生进行有目的的、自发的和有效的学习，而实现这过程的主要途径在于自主学习（或自调式学习）的使用[2]。学生的自主学习不仅与学生自身的自我调适有关，同时也需要外界创设一种良好的自主学习氛围和提供相应的支持策略和条件保障[3]。在学生的自主学习过程中，教师扮演着至关重要的角色，在课堂里引入不同类型有关自主学习的元素和干预措施以及教师的信念、课程思政等能够促进学生的自主学习。

众所周知，大学物理实验作为理工科学生必

收稿日期：2023-05-29

作者简介：张愉，女，讲师，主要从事大学物理实验、中学物理教育，云南师范大学物理与电子信息学院，495867839@qq.com。

通讯作者：周振华，男，副教授，主要从事理论物理研究，381501463@qq.com。

引文格式：张愉，周振华，郑永刚. 基于学习者视角下的大学物理实验同伴辅导教学模式及评价[C]. 2023年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会，2023.

Cite this article：ZHANG Y, ZHOU Z H, ZHENG Y G. Based on learner's perspective of peer tutoring teaching model and application of college physics experiment[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education, 2023. (in Chinese)

修的基础课程，是进入大学后接受系统实验方法和技能训练的开端，在人才培养中是学生必修的基础课程，是进入大学后接受系统实验方法和技能训练的开端，在人才培养中具有不可替代的重要作用。课程是人才培养的核心要素，教学改革改到深处是课程。因此，要解决大学物理实验教学的困境，唯有改变课程教学模式。

大学物理实验教学中，实验原理的明晰是实验教学的重点，实验操作素养的培养是实验教学的难点。在教学中，要以学生学习为中心，构建以学为本的课堂结构。因此，在具体教学内容教学中，实施“同伴教学互助法”“自主学习法”，充分利用“师生对话式”“生生对话式”教学，弥补实验教学中教师“满堂灌”“满堂演”的“痛点”，因此有计划开展教学，有助于学生知识进阶的形成，力求实现“要我学——我要学——能学会——我来讲——能讲通——能学好”的转变。基于此，建构学习者视角下大学物理实验同伴辅导的教育模式如下。

详细操作步骤为：课前环节，事先要求实操组同学提前通过“线上资源自学”“线下教师面授”等模式实现对实验操作的自主理解与掌握，在教师的指导下完成“我能当好小老师”的蜕变，因此教师会在课前对实操组的同学们进行课前教学、实验操作指导；课中环节，正式课堂中由实践小组的同学代表当“小老师”对整个实验操作进行自主实验操作讲解、注意事项提醒，再分别由实践小组的同学对应到各组同学中间去辅导、指导实验顺利进行，教师在侧加以鼓励、辅助实验教学的顺利开展。课后环节，由反思组同学要引导所有同学都要做到“思”，是着力引导学生做到从“技术熟练者”向“反思性实践家”，倡导学生作为复杂情境中能动的、主动的、自主的探究者——“在行动中自

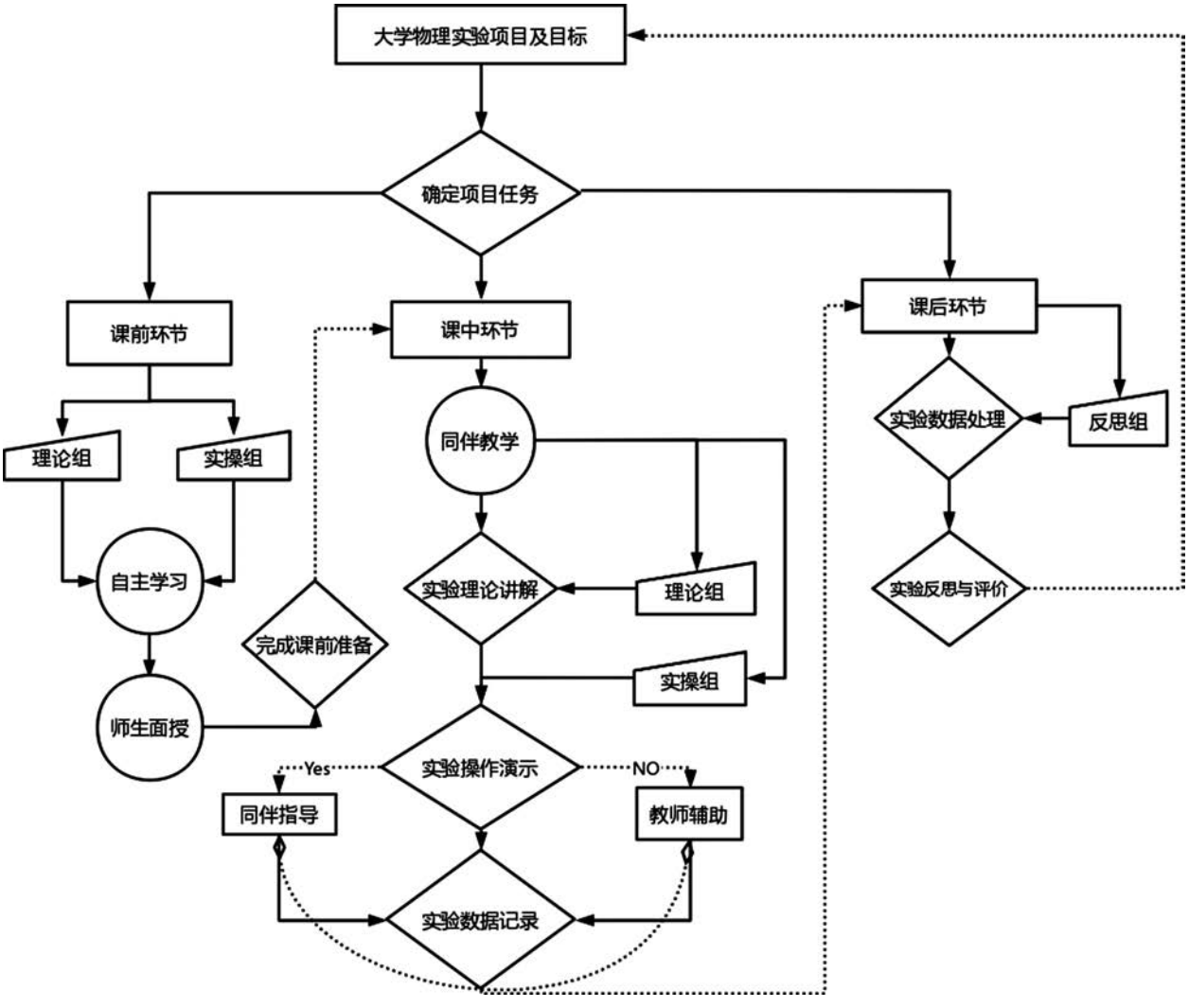


图 1　大学物理实验“同伴辅导-自主学习法”教学实施模型

主反思”“在反思中自主行动”。如下所示。

2 基于学习者视角下大学物理实验同伴辅导的教育模式评价研究

物理学是一门基础自然科学，是众多新技术的基础，其本质上是一门实验科学，大学物理实验通过观察现象、动手实践来培养学习兴趣，是学好物理学、培养创新实践能力的有效途径，是学生验证物理规律、深入理解物理理论的有效途径，也是学生进行系统实验、实训的开端，更是培养其独立思考、分析、解决问题能力的重要平台。学校不会变，只有教师在学生与教材、与课堂、与实验、与教师、与同学之间架起一座座自主学习的桥梁，从学生入手，以生为本，基于客观事实，紧密联系生活，引领学生展开——同客观世界对话、同他者对话、同自己对话。在大学物理实验教学全过程中，充分融入以学习者为视角，尝试从目标设定、问题凝练、内容重塑、方法创新、评价优化等角度，对教学内容实施“一少、二精、三活、四思”原则，在学生与教材、与课堂、与实验、与教师、与同学之间架起一座座桥梁。

2.1 构建明晰可定位的课程思政目标体系

因此，建构基于时代主旋律的本土化大学物理实验课程体系、多元化教学模式是时代的要求。同时，还需思考在大学物理实验教学中如何把思政元素特色鲜明地融入，对回答“为谁培养人，培养什么人，怎样培养人”提出了较高的时代要求，挖掘“取之于生活用之于生活”的本土元素素材去融合物理实验，挖掘出物理学史中古代物理学史、经典物理学史等物理学家思想精髓，挖掘出信息技术、科学技术等手段去辅助实验教学的精准便捷，把学生活跃的思路链接起来，充分融入物理实验教学中，与学生产生共鸣，同频共振、同向同行，全程融入思政元素，把学生与生活、与社会、与国家紧密联系起来，建构起一幅鲜明的物理实验教与学的图景。

总体目标：落实立德树人的根本任务，学生具有扎实物理实验基础知识、深厚物理实验素养、创新性科学思维能力，学生具备专业理论课程学习、个人成长和发展的关键品质。

知识目标：学生能用自己的话说出或描述出物理实验原理、梳理或推导出物理概念间的关系。

能力目标：学生能将复杂的物理理论、实际问题转化为通过亲自动手等实验实践来验证、探究，通过表现性评价手段评价出学生具备一定的物理模型建构、科学探究、分析、推理等科学思维的能力。

价值目标：学生敢于探索、勇于追求、敢于实践、勇攀科学高峰的科学责任感与使命感，从而建立物理实验素养和科学精神，实现立德树人。

2.2 建立课程多元的、全过程的表现性评价体系

评价即教学。教师进行“支架式”(scaffolding)引导和启发性教学，或帮助学生进行自我评价都有助于提高学生的自主学习能力[5]。本研究基于周文叶教授建构的“指向学生学习的表现性评价质量评估框架”[6](如图2)搭建起大学物理实验“自主学习”课堂教学的评价体系，如图3。

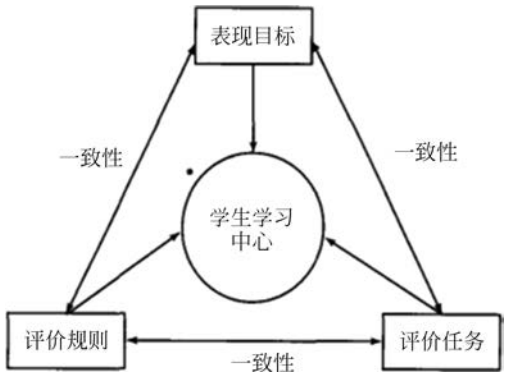


图2 指向学生学习的表现性评价质量评估框架

周文叶教授还指出，表现性评价评的是居于课程核心的、需要持久理解的目标，这些目标需要真实情境中的任务来落实并进行检测。基于此，想要搭建的大学物理实验自主学习课堂教学评价模型(见图3)，也是需要学生在亲身经历真实实验环境中去解决问题，深度理解实验原理，构建出实验所需要的实验原理图，厘清实验方法、操作步骤与注意事项，制定具体实验方案，从而呈现出学生在自主性学习中进行自我主导的学习，对概念的理解、原理的掌握、思维的进阶进化以及各阶段任务解决的可追踪的学习历程与可评价的关键能力。

(1) 确定表现目标：表现型评价目标与课程标准保持一致。引述有关资料，用自己的话为同学说出或用图画描述出(描绘出)物理实验原理；能够向同学清楚转述物理原理或机制，培养学生

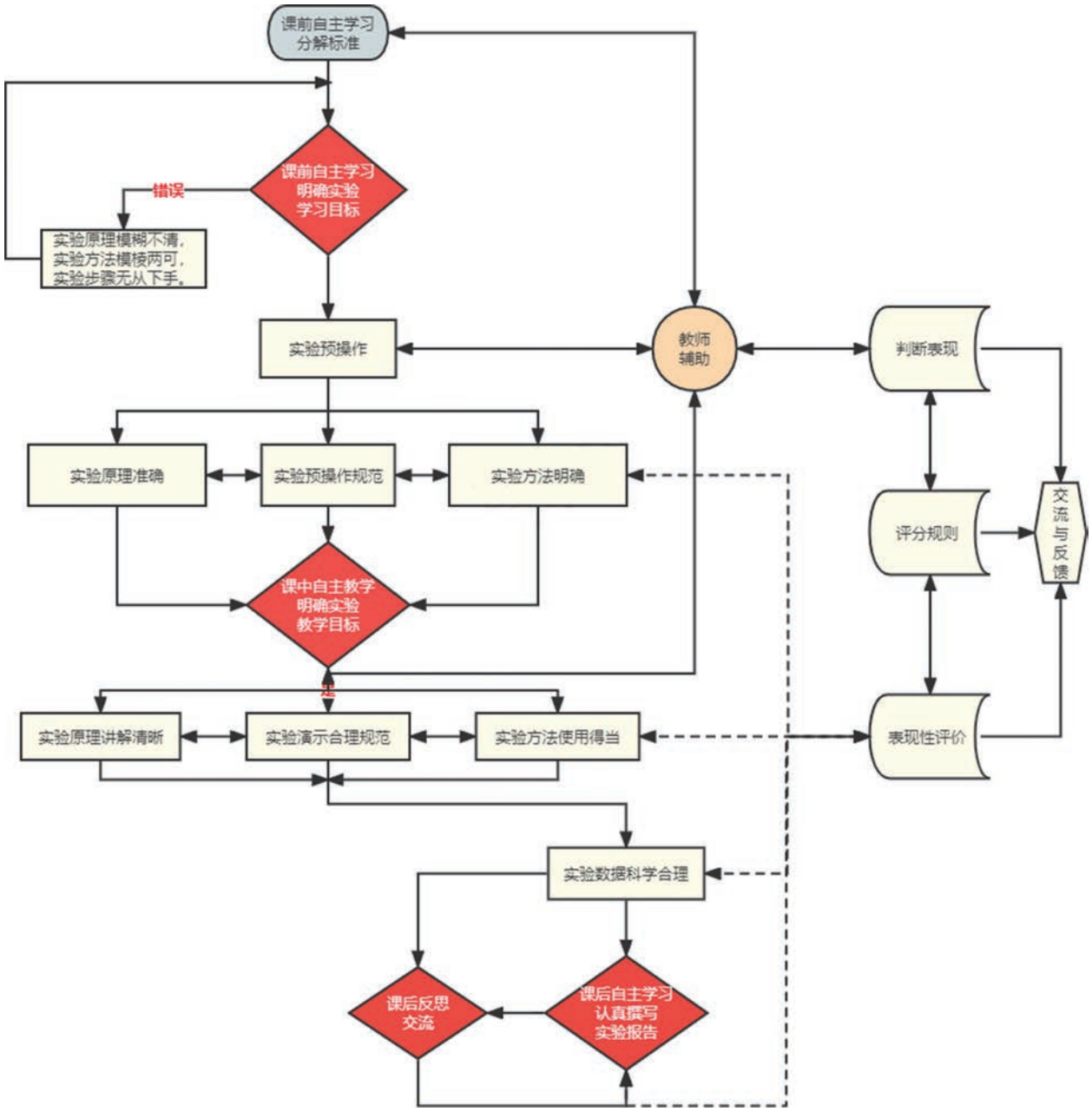


图 3　指向学生自主学习的大学物理实验课堂表现性评价实践模型

敢于探索、勇于追求、敢于实践、勇攀科学高峰的科学责任感与使命感；熟悉介绍实验各元件的功能；能操作、应用并知道测量方法，将复杂的物理理论、实际问题转化为亲自动手能力，从而建立物理实验素养和科学精神，实现立德树人，提升物理模型建构、科学探究、分析、推理等科学思维的能力。

（2）细化评价任务：明确实验内容、目标与原理，提前根据课程内容设置好包括学生（轮值）预习组、实操组、反思组的工作分组，做好课前预习与师生交流环节、课中实验授课与实验操作环节、课后实验报告与反思形成环节等学习、教学任务。

（3）制定评分规则：体现师生“教育性”。采用课前准备、课堂表现、报告呈现等方式结合进行，对如实验预习是否到位，实验原理、实验操作是否表达清晰、专业、正确、规范，操作流程是否合理，实验教学是否多角度互动；实验数据记录、结果分析是否精确，对实验结论是否有依据等按能力等级制定大学生物理实验自主学习能力评分规则。再则参照郭文娟对自主学习能力课堂观察框架模型，实现教师对大学物理实验课堂教学中学生

表1 大学生物理实验自主学习能力课堂观察框架(教师)

基本信息	班级编号： 教室氛围： 观察实验科目： 授课小组： 观察时间： 持续时间： 被特别观察的学生：											
学习情境自主学习维度	认知策略				元认知策略		资源管理策略		动机			
	复述	联系	组织	批判性思维	元认知知识	元认知监控与调节	自我资源管理	外界资源管理	内部动机	外部动机	自我效能感	焦虑
上课听讲												
师生互动												
完成协作实验教学任务												
完成实验困难操作任务												
实验数据记录时												
备注												

自主学习能力的课堂观察框架。

同时设计出作为大学物理实验自主学习能力课堂观察框架,提供对特别学生的关注。

3 小结

在以学习者为中心的具体大学物理实验教学场域中,教师要做到“帮”“扶”“放”[7]。“帮”是把学习方法“交给”学生,鼓励引导学生通过自主体验式、同伴教学式等教学模式激发自主;“扶”是教师根据教学目标帮助学生确定自己的学习目标、制定学习计划,选择学习策略,完成自主学习;“放”是把学习权、主动权、体验权、话语权、评价权“还给”学生。同时,学习者作为课程评价的主体,他们关注哪些评价指标、如何理解课程评价指标之间的关系、对于不同类型课程的评价存在怎样的差异等问题,都是进行课程质量评价时需要关注的重要课题[8]。因此,有必要立足于学习者视角开展研究,以期明确大学物理实验课程质量评价过程的核心内容,同时发现已有研究未曾提及的新的评价指标,为大学物理实验教改提供参考。

综上所述,本文旨在为学生建立起清晰的物理实验课程体系,把大学物理学实验建成以学习者为中心的“同伴辅导-自主式学习”的教学模式,引导大学生在大学物理实验教学中实现“要我学——我要学——能学会——我来讲——能讲通——能学好”的真正“自主学习”观念转变,提高学生自主实验、同伴互助等学习能力、动手能力和创新精神,最终形成稳定的大学物理实验学习自主性等自主学习能力和评价体系,为其终身成长奠基。

参 考 文 献

[1] 杨洁.中学生自主学习的意愿和实施策略[J].教育理论与实践,2022,42(2):58-60.

[2] Panadero, Ernesto, Alonso-Tapia, et al. How do students self-regulate? review of Zimmerman's cyclical model of self-regulated learning[J]. Anales De Psicologaa, 2014, 30(2): 450-462.

[3] 李子建,邱德峰.学生自主学习:教学条件与策略[J].全球教育展望,2017,356(1):47-57.

[4] 赵国俭,徐丽红,王佳乐,等.大学物理实验“基础 进阶 高阶”教学模式的探索[J].物理与工程,2022,32(6):148-152.

[5] 郭文娟,刘洁玲.核心素养框架建构:自主学习能力的视角[J].全球教育展望.2017,356(3):16-19.

[6] 周文叶,董泽华.表现性评价质量框架的建构与应用[J].课程·教材·教法.2021(41):121.

[7] 刘畅.学生自主学习探析[J].教育研究.2014,414(7):131-151.

[8] 张文丽,董一诺,孙莉,曹红荃.基于学习者视角的外语在线课程质量评价指标研究[J].外语与外语教学,2022,325(4):111.

■

BASED ON LEARNER'S PERSPECTIVE OF PEER TUTORING TEACHING MODEL AND APPLICATION OF COLLEGE PHYSICS EXPERIMENT

ZHANG Yu ZHOU Zhenhua ZHENG Yonggang

(School of Physics and Electronic Information, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500)

Abstract Aiming at the long-term "pain point" problem in college physics experiment teaching, this paper attempts to integrate "peer tutoring method" and "independent learning method" in the classroom teaching of Hall Effect in college physics experiment, and actively build a college physics experiment teaching model with responsibilities from the perspective of learners, aiming at improving college students' independent learning ability in physics experiment. It also provides some reference ideas for college physics experiment teaching reform.

Key words university physics experiment; peer tutoring; learner's perspective; teaching mode; Hall effect

专业课程思政教育问题研究与应对措施
——以东北大学《固体物理学》为例

张莲莲* 公卫江 张缤元
（东北大学理学院，辽宁 沈阳 110819）

摘 要 本文探究专业课程思政教育存在的具体问题，以东北大学的固体物理学课程思政为例，采用PBL教学模式与专业课程思政教育相结合，区别于传统的课程思政教学模式。通过对PBL教学模式在课前、课中和课后三个环节的充分利用，引导学生深入理解课程知识和思政教育，展现PBL教学模式在专业课程思政教育改革中的实用性和有效性，提升专业课程思政教育的质量和效果。本文旨在为专业课程思政改革提供可行的教学措施和方法，以期为培养担当民族复兴大任的时代新人做出应有贡献。

关键词 专业课程思政；固体物理学；PBL教学模式

1 固体物理学课程的背景和现状

固体物理学是物理学中内容极为丰富、应用极为广泛的分支学科，主要研究固体的物理性质、微观结构、粒子运动形态和规律，以及它们之间相互关系。它的研究对象是固态物质，包括金属、半导体、绝缘体等。在20世纪20年代，量子力学的诞生为固体物理学的研究提供了新的理论基础。随着科学技术的不断发展，人们逐渐掌握了原子力显微镜、扫描隧道显微镜等先进的实验技术，能够更加深入地研究固体的物理性质和微观结构。20世纪50年代至60年代，半导体材料的发现和应用推动了固体物理学的发展。70年代至80年代，凝聚态物理与材料科学相结合，形成了现代固体物理学的基础。90年代以来，随着计算机技术的快速发展，人们开始运用计算方法研究固体的电子结构和物理性质。固体物理学是一门重要的学科，它的发展历程一直贯穿着基础研究、应用研究、创新研究等三个方向，涉及到力学、热学、声学、电学、磁学和光学等多个方面。它的研究成果广泛应用于电子、能源、材料等领域，为我们更好地认识和掌握物质的本质，促进科技进步做出了重要贡献。固体物理课程是物理学及相关专业学生的必修课程，通过深入系统地学习固体物理，学生能够从更理论的角度剖析原有知识点，澄清物理机制的同时，进一步掌握讨论固体性质的理论方法，为培养自身的科学创新和科研探索能力奠定坚实的基础。

由于固体物理是一门理论性较强且相对抽象难懂的课程，学生很容易在学习过程中产生畏难情绪，从而失去对课程的学习兴趣。正因如此，充分利用好固体物理课程思政教育，有利于学生增强对本课程的学习积极性，将爱国主义、集体主义、社会责任感等思想政治素质培养融入到专业教学中去，引导学生树立创新精神，鼓励学生勇于

收稿日期：2023-05-29
基金项目：2022年度辽宁省研究生教育教学改革研究项目；东北大学2023年研究生教育质量保障工程项目；2023年东北大学理学院教育教学改革项目。
通讯作者：张莲莲，女，副教授，主要从事大学物理、固体物理学及应用物理学专业实习的教学与课程建设工作，研究方向低维量子体系的电子输运及相关性质，zhanglianlian@mail.neu.edu.cn；公卫江，男，教授，主要从事本科生固体物理学、力学及研究生固体理论课程的教学与应用物理学专业建设工作，研究方向为量子体系的能态和输运特性、拓扑量子体系，gwjneu@163.com；张缤元，女，讲师，主要从事固体物理学课程的教学工作，研究方向为低维材料电子结构及相关性质，zhangby@mail.neu.edu.cn。
引文格式：张莲莲，公卫江，张缤元. 专业课程思政教育问题研究与应对措施——以东北大学《固体物理学》为例[C]. 2023年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会，2023.
Cite this article：ZHANG L L，GONG W J，ZHANG B Y. Study on the issues of ideological and political education in professional course and countermeasures—A case study of "Solid state physics"at Northeastern University[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education，2023.（in Chinese）

探索和尝试，培养实践能力和创新思维，从而促进学生的全面发展和人格塑造。引导学生了解中华优秀传统文化和现代文明成果，增强文化素养和人文精神；引导学生树立正确的世界观、人生观和价值观。以努力学习提升自身综合素质为实际行动，为实现中华民族伟大复兴而奋斗。

2 专业课程思政教学改革的重要性及存在的问题

课程思政是实现大学生的能力素质与思想道德素质双提升的系统性工程，推动课程思政提质增效，是为党育人、为国育才的应然之策[1]。课程思政的根本任务是将实现以人为本的教学理念和立德树人的教学思想相结合。作为一项系统工程，课程思政需要在科学理念的指导下，统筹规划与设计，积极实践并不断推进。2020 年 6 月 8 日，教育部召开部署《高等学校课程思政建设指导纲要》贯彻落实工作会议。会议强调，要深刻认识全面推进高校课程思政建设的战略意义，充分发挥好专业课教师“主力军”、专业课教学“主战场”、专业课课堂“主渠道”的作用，推动课程思政建设不断取得新进展新成效，使专业课与思政课同向同行，构建立德树人长效机制，实现全员全程全方位育人[2]。2023 年 5 月，教育部党组启动实施“时代新人”铸魂工程，推动党的创新理论进教材、进课堂、进头脑，开好讲好“习近平新时代中国特色社会主义思想概论”课，加快大中小学思想政治教育一体化建设，加强“大思政课”建设，强化思政课数字赋能，打造“大先生”育人队伍，为实施科教兴国战略，强化现代化建设人才支撑作出应有贡献[3]。

专业课程思政是最为关键和亟需有效推进的领域之一。该领域涉及的核心内容主要包括：专业课程思政教师的思想政治素养和教育能力，专业课程思政的教学设计、教学手段方法以及专业课程思政教学评价等方面。专业课程思政从理论层面解释相对容易，但落实到课程实践层面其实是有一定难度的。专业教育与思政教育是高等教育的两个重要方面，二者之间存在着目标不同、内容不同、教学方式不同及评价标准不同等多方面的差异。目前专业课程思政存在的问题主要体现在以下三方面：

1. 思政教育内容不够充实。与专业思政教育相关联的思政元素较为单一，思政元素涵盖的范围较窄，缺乏对学生思想政治素质的全面提升。

2. 思政教育形式不够多样化。思政教育形式较为单一，主要以教师讲授为主，师生之间缺乏有效互动，更缺乏实践、应用等多元化的形式。

3. 思政教育与专业教学融合不够紧密。思政教育与专业教学融合不够紧密，缺乏有效的衔接和协同，形成“两张皮”的效果。

因此，如何处理思政教育与专业教育之间的关系，既要兼顾兼容性与平衡性，又要更好地发挥两者的作用，成为有效推进专业课程思政建设的关键所在[4]。针对以上专业课程思政存在的具体问题，本文以东北大学的固体物理学课程思政为例，采用目前较为有效的 PBL 教学模式，探讨如何将 PBL 教学模式与固体物理课程思政教育相结合，使学生能够深入地理解课程知识并获得更好的思政教育，从而深化专业思政课程教学改革与实践，为培养担当民族复兴大任的时代新人做出应有的贡献。

3 基于 PBL 的专业课程思政教学设计

PBL（问题-驱动-学习）教学模式是一种以问题为导向的学习方法，强调团队协作和多学科相容与交叉，学生主动参与和自行管理，教师起到引导和协助作用，对培养学生的自主学习和解决问题的能力具有良好的效果。通过引入 PBL 问题，帮助和引导学生激发学生的专业兴趣，构建专业基础[5,6]。这种教学模式在培养学生科学思维方式与科学素养、工程能力与工程素养方面起到引领性作用。将 PBL 教学模式应用于固体物理课程思政教学中，可以强化学生的问题意识，通过提出具体的问题，引导学生关注社会现实和科学发展中的热点问题，培养学生的社会责任感和良好的道德观念。可以提高学生的实践能力，PBL 教学模式要求学生自主探究、发现问题并解决问题，培养学生的实际操作能力和解决实际问题的能力。可以促进思政教育，在 PBL 教学过程中，教师可适时融入思政教育内容，引导学生树立正确的价值观和世界观。

3.1 导向性问题设计

导向性问题设计主要目的是通过提出具有引导性和探究性的问题，引导学生积极参与课堂讨论，激发学生的思考和学习兴趣，并促进学生自主

学习和有效学习。因此,在固体物理学课程思政教育中,严格筛选并充分利用与固体物理知识点相匹配的思政元素进行导向性问题设计,是开展PBL教学模式的第一步也是关键的一步。对于固体物理学中蕴含的课程思政元素,主要包括三部分的内容。一是关于科学研究上的思政元素,包括科学思想、科学精神、科学方法等。二是关于马克思主义哲学原理所涉及到的思政元素,包括真理的相对性和绝对性、量变和质变的辩证关系、世界的统一性和多样性等。三是关于社会主义核心价值观和爱国主义情操的思政元素。

在设计导向性问题时,既要激起学生的好奇心、充分发挥学生的想象力,引导学生思考和探究课程中的重点和难点问题,使学生更加主动积极地参与到课堂讨论和学习中来。同时还要确保在学生知识水平之内,完成教学目标达成的特定方面,而避免造成过于简单或者特别复杂的极端情况。

因此,精心设计思政元素与知识点的理解及应用相关联的问题,把握好导向问题的度是PBL教学法得以顺利实施的关键。根据研究对象以及关联的思政元素,进行情境化分析,最后完整表述出一个实际的问题。通过完成上述步骤,可以引导学生从全新的角度和更高的层面上,探索真实情境和学科知识之间的结合点,在思考和解决问题的过程中,充分调动自身的分析和创新能力,提升自身的社会责任感和道德观念[7],深入了解课程所涵盖的社会问题和现实场景,培养他们的社会责任感和道德观念。

3.2 教学环节设计

PBL教学模式以问题为导向,通过组内成员的配合以及学习小组之间的协作,让学生开展专题调研、分析讨论、设计方案、汇报总结等过程,从而掌握新知识并获取新技能。重点突出了学生在教学中的主体地位,鼓励更高效的教学互动行为,包括生生互动,师生互动,共同探讨解决课程学习相关的理论或实践问题。

PBL教学的三个环节包括课前、课中和课后。上课前,教师应该提前发布预习资料,以激发学生的主动学习兴趣。学生可以通过预习来独立思考和查阅、整理相关资料,以解决相关问题。课中,学生可以展示他们的问题解决方案,教师则可以引导提问。学生可以通过组内讨论和组间讨论评选出最优解决方案,从而深入掌握课程的内容,将理论应用到实际中。下课后,教师应该推送课后复习题,以帮助学生解决课上遗留问题。学生需要完成并上交复习题和思考题的最终解决方案,教师则会对学生的作业和方案进行点评,并分析总结学生的学习数据,从而为教学调整提供有效依据。

4 PBL模式在专业课程思政中的实施过程

PBL教学模式在固体物理学课程思政的具体实施过程中主要通过线上线下混合式学习为载体,引导学生在自主学习过程中不断探究,提高学习兴趣和学习能力,使学生在课程思政教学活动中从原本被动地接收变成主动地思考、探索,真正做到对思政教育内涵的理解和掌握。

4.1 课前

除了常规教学内容的线上预习指导外,将本节教学内容涉及到的思政元素设计成导向性问题作为线上预习的任务之一。通过雨课堂发布学习公告,使学生对课程内容有清晰的学习脉络,并在预习及自主学习过程中了解自己掌握的程度。以固体物理学得绪论为例,教师为学生提供了引导式的课程思政学习帮助:

① 如何利用固体物理知识为国家经济发展提供支持?

② 在当前科技发展趋势下,固体物理领域存在哪些亟待解决的科学问题?

③ 如何将固体物理的研究成果应用于现实生活,提高人们的生活品质?

④ 为什么科学研究对社会有如此重要的影响?我们如何在固体物理的科学研究中遵循职业道德标准?

⑤ 关于物质基本特性的深入研究是否会对人的思维形成产生积极的影响?如何将这些发现用于解决现实世界问题?

通过提出这些问题,教师作为一名引导者,引导学生关注国家发展、科技创新和社会需求,潜移默化中培养学生的社会责任感和创新精神;引导学生更深入地探讨固体物理学的实践应用、科学研究的社会影响,以及科学家如何遵循专业道德进行研究的重要性等思想议题。

4.2 课中

结合实际案例，着眼于中国固体物理学领域的发展历史，要求学生讲述科学家们在固体物理领域的奋斗历程，彰显科学家们的崇高品质和家国情怀。例如，我们开展的“我为大家讲故事——介绍我国著名固体物理学家的感人事迹”系列课程思政教学活动，学生通过调研文献，查阅资料，准备展示的过程，逐步深入的感受到科学家们的崇高职责和使命感，对我国固体物理领域的发展历史和未来的发展趋势都有了更深刻的认识，同时也意识到作为新一代青年所肩负的中华民族伟大复兴的历史使命。以下给出了“我为大家讲故事”系列课程思政教学活动的具体案例。

“求真求实，科技报国——中国固体物理学领域五位资深科学家简介”

说起中国固体物理学领域的发展，不得不提到五位杰出的院士：赵忠尧、葛庭燧、程开甲、黄昆和谢希德[8]。他们的杰出贡献，为中国的固体物理学的发展和进步注入了新的活力。从科学救国到科技兴国，他们以勇于创新的科学精神、严谨求实的治学风范和淡泊名利的人生态度，表达着对党和国家最深沉的爱。

赵忠尧先生是中国的反物质（正电子）领域的第一人，他的实验启发了安德森先生的研究，安德森也凭借着这一发现获得了诺贝尔奖。虽然赵先生没有获奖，但他的功绩受到了广泛的认可。

葛庭燧先生致力于金属物理学的研究和发展，他的研究团队取得了众多原创性成果，尤其在晶界弛豫、位错阻尼和非线性滞弹性内耗研究方面，他们的研究成果为固体物理学领域的发展提供了宝贵的研究积淀。

程开甲和黄昆两位先生是中国固体物理学领域的伟人，他们的成就卓著，双双荣获了国家最高科学技术奖。他们在固体物理学方面的研究成果在全世界范围内都具有重大的意义，为我们国家的科学事业的发展做出了巨大的贡献。

谢希德先生的贡献不仅仅是在半导体物理和固体物理方面，还体现在她培养的大批科研人才上。她成功的培养了大批中科院院士，成为了她贡献的非常重要的一部分，她为半导体物理和固体物理领域的人才培养和科技进步做出了突出的贡献。1958 年，她与黄昆先生合编的《半导体物理》问世，这是我国半导体领域最早的一本专著；1962 年，她与黄昆先生联名建议在我国开展固体能谱研究；1992 年，她与黄昆先生组成筹备班子，把半导体物理领域最具权威性的国际会议“请”到中国，这个历来由欧美唱主角的国际会议首次在亚洲发展中国家召开。

这五位杰出院士的成就，不仅仅是为固体物理学领域的发展和进步打下了坚实的基础，更是为我们国家的科学事业做出了独特的贡献，为我们打开了探索和发现的新世界。

我要重点介绍其中一位杰出的学者——黄昆先生。黄昆先生被誉为中国固体物理和半导体物理学的奠基人和开拓者之一，声子物理学的第一人。他和玻恩（Niels Bohr）一起合著了《晶格动力学理论》这本经典著作，深入研究了固体物理学的知识点、内容前后的逻辑关系，并长期在北京大学讲授相关课程。在建国之初，黄昆先生放弃了西方优越的科研条件，选择毅然回国，满怀一腔爱国热情。在科研条件十分困难的情况下，他选择专攻教育事业 27 年之久。期间，他为我国培养了一批批固体物理、半导体物理领域的杰出人才，他的爱国精神和敬业精神令我们动容，更是值得我们好好学习的。黄昆先生后来还担任了中科院半导体所所长，潜心科研，追求卓越，取得了举世瞩目的科研成果。在他的领导下，我国的半导体事业也得到了长足的发展。在我们刚刚学到的晶格动力学中，黄昆方程告诉我们在晶格振动与电磁波耦合的情况下，晶格振动会发生一些特殊变化。他以唯象的方式准确描述并预测了 polariton 的存在。所有这些都是黄昆先生杰出成就的重要组成部分，也是他留给我们的珍贵遗产。

4.3 课后

完成以上的学习活动后，教师从目前固体物理学领域的最新发现入手，提出具有挑战性同时也是同学们感兴趣且能够解决的问题，让学生以小组的形式围绕与课程相关的问题进行思考和研究讨论。在此过程中，学生会遇到尚未学习过的新概念，需要查阅、整合资料，阅读综述类文献从去理解问题，分析问题，最后解决问题。此时，教师在教学中所处的主导身份将转变协助者，教师更多的是指导学生如何查阅目标文献，如何从大量文献中进行筛选，同时，指明研究方向，提供思路，鼓励他们用全新的视角去探究问题的本质，真正意义上将创新思维能力培养落到实处。这也是固体

物理学课程思政教育非常重要的一环具体见图 1。

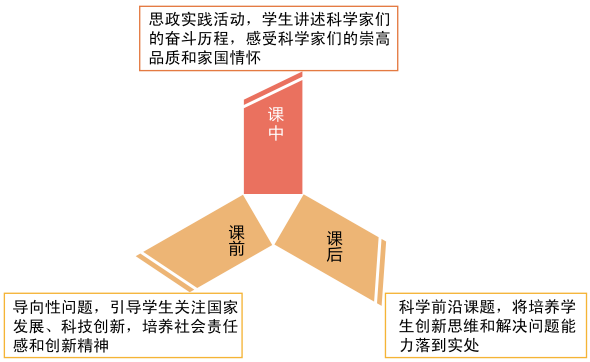


图 1 PBL 模式在专业课程思政教学中的实施过程

5 PBL 模式在专业课程思政中的应用效果

通过 PBL 教学模式的不断应用和课程改革实践，充分利用信息技术，采用线上线下混合式教学手段，使学生对固体物理学课程思政的教育意义以及课程思政所引发的深入思考等有明晰、正确的理解，熟悉并掌握固体物理学的辩证思维模式，对固体物理学思政元素与教学内容之间的关联性和相容性有比较全面和系统的认识，达到对学生科学发现意识、科学思维方法和科学钻研素养的培养，增强学生自主学习、深入学习和终生学习的能力，培养学生的思想政治素质，如爱国主义、集体主义、社会责任感，引导学生树立正确的世界观、人生观和价值观。

通过问卷调查，以及与学生线上、线下的交流，学生们对 PBL 教学模式在课程思政教学中的作用和效果给出了积极正向的反馈。有学生认为，以前觉得课程思政和知识点是完全脱离的，思政内容是无法融入固体物理学课堂教学中的，但是通过预习时思考老师留的导向性问题，让我对学习固体物理学有了新的感受，深刻理解固体物理学科的重要性，认识到科学技术对国家发展的重要支撑作用……还有同学说，思考和研究的过程对自己的帮助很大，特别是参加了“我给大家讲故事”的课程思政教学活动，被科学家们的爱国主义精神，还有无私奉献、严谨求实、淡泊名利的人生态度所深深打动……

我们根据丹麦奥尔堡大学实施 PBL 的教学评价标准，设计了专项调查问卷，表 1 列出了东北大学 90 名应用物理学专业学生的调查问卷数据，图 2 给出了调查数据关联的重要程度折线图。

表 1 PBL 模式对课程思政教学的促进和提升的重要程度

知识/能力	非常重要	重要	一般	不重要
1 知识点与思政元素的融合度	44	32	14	0
2 知识点与思政元素的协调关系	50	28	12	0
3 团队协作、有效沟通、提升领导力	40	33	13	2
4 提升爱国主义信念、社会责任感	54	28	8	0
5 查阅整理资料，分析解释获得的数据	42	29	15	4
6 树立正确的人生观、价值观	40	32	17	0
7 提升勇于探索、克服困难的能力	30	32	26	2
8 报告展示能力	48	33	7	2
9 系统、理性地思考问题	54	29	8	0
10 创新性的解决问题能力	56	22	11	0

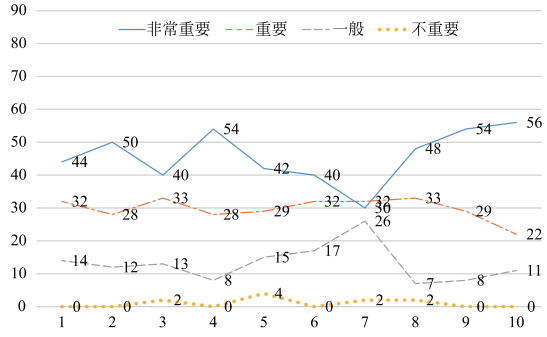


图 2 PBL 模式对课程思政教学的促进和提升的重要程度折线图

在固体物理学课程中创新思政教育形式，采用的 PBL 教学模式充分调动了学生在课程思政中的积极性和主动性，学生深入思考学习的目的和意义，在课堂上积极参与讨论，开展科学前沿研究实践活动、认真展示团队协作成果。课前、课中、课后，师生交互、生生交互，效果显著。学生能够在解决“问题”中对所学知识进行实际应用，培

养了独立思考和创新思维，自主学习能力大幅度提高。PBL 教学模式重点强化了思政教育与专业教学的融合，有效破解专业教育和思政教育的“两张皮”现状。将思政教育贯穿于专业教学的全过程，通过专业知识的教学来引导学生深刻理解固体物理学科的重要性和作用，认识到科学技术对国家发展的重要支撑作用，培养学生的科技创新精神和实践能力。通过固体物理课程的教学实践，引导学生树立正确的世界观、人生观和价值观，培养爱国主义、集体主义、社会责任感等思想品质，提高学生的综合素质和思想觉悟。

6 结语

作为高校的一线教育工作者，在推进专业课程思政建设时，紧扣专业课程育人目标，找准融入的“侧重点”。始终注重“深入研究”，不断寻求思政元素与专业课知识有机融合“新突破”。特别是要根据不同学科专业的特色和优势，深入研究不同专业的育人目标，深度挖掘提炼专业知识体系中与党的二十大精神契合的价值性、文化性、伦理性等育人元素，从学科专业发展的历史维度、典型人物的主体维度、建设成就的实践维度找准与党的二十大精神相结合的融入点[1]。课程思政元素与专业课程内容从最初的渗透、叠加到现在的有机融合，已经从简单的“加法”，跃升至非线性相干叠加。让学生在潜移默化中接受教育，实现专业课程与思想政治理论课同向同行。从本质上形成将思政元素和专业内容融为一体的新课程，达到使课程思政引领教师业务水平和业务价值的效果，实现师生教学相长。只有这样，才能使学生的思想道德素质和科学文化素质同步提升，才能更好地服务社会、服务人民。

参 考 文 献

[1] 蒲清平，黄媛媛. 党的二十大精神融入课程思政的价值意蕴与实践路径[J]. 重庆大学学报(社会科学版)，2022，28(6)：286-298.
PU Q P，HUANG Y Y. Integrating the spirit of the 20th CPC national congress into curriculum-based ideological and political education：Its value implications and practice path[J]. Journal of Chongqing University(Social Science Edition)，2022，28(6)：286-298.(in Chinese)

[2] 抓准抓实 全面推进高校课程思政建设取得实效 http://www.moe.gov.cn/jyb_zzjg/huodong/202006/t20200609_464012.html.

[3] 中共教育部党组：高标准高质量开展主题教育 奋力建设教育强国-中华人民共和国教育部政府门户网站（moe.gov.cn).

[4] 楚国清，王勇. “课程思政”到“专业思政”的四重逻辑[J]. 北京联合大学学报(人文社会科学版)，2022，20(1)：18-23.
CHU G Q，WANG Y. Quadruple logic evolving from“ ideological and political education through all curricula”to“ ideological and political education through all majors”[J]. Journal of Beijing Union University (Humanities and Social Sciences)，2022，20(1)：18-23.(in Chinese)

[5] 胡珏，潘柏松. 基于 PBL 的工科课程教学方法改革——以“工程创新设计方法学”课程教学为例[J]. 高教论坛，2017，4(4)：63-68.
HU Y，PAN B S. PBL-based reform of engineering course teaching methods：A case study of “engineering innovative design methodology” course teaching[J]. Higher Education Forum，2017，4(4)：63-68.(in Chinese)

[6] 茅锐，彭琼琼. 认知建构模式下 PBL 教学在化学学科中的应用[J]. 高等理科教育，2021，2：64-70.
MAO R，PENG Q Q. The application of PBL in chemistry teaching under the mode of cognitive construction[J]. Higher Education of Sciences，2021，2：64-70.(in Chinese)

[7] 史新伟，李杏瑞，祝柏林，等. 实践育人，践行思政——基于大学物理实验的课程思政教学设计[J]. 物理与工程，2023，33(1)：77-82.
SHI X W，LI X R，ZHU B L，et al. Practical educational and political practice—Ideological and political teaching design based on college physics experiment[J]. Physics and Engineering，2023，33(1)：77-82.(in Chinese)

[8] 石锋，韩秀君，张灵翠，等. 固体物理学发展简史[J]. 物理学进展，2021，4：170-187.
SHI F，HAN X J，ZHANG L C，et al. A brief history of solid state physics[J]. Progress In Physics，2021，4：170-187.(in Chinese)

■

STUDY ON THE ISSUES OF IDEOLOGICAL AND POLITICAL EDUCATION IN PROFESSIONAL COURSE AND COUNTERMEASURES

—A CASE STUDY OF "SOLID STATE PHYSICS" AT NORTHEASTERN UNIVERSITY

ZHANG Lianlian GONG Weijiang ZHANG Binyuan

(College of Science, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819)

Abstract This paragraph discusses the specific issues related to ideological and political education in professional courses, taking the solid state physics course at Northeastern University as an example. It combines the PBL teaching mode with ideological and political education in professional courses, which is different from the traditional teaching mode of ideological and political education in professional courses. Through the full use of the PBL teaching mode in the three stages of before, during, and after class, students are guided to deepen their understanding of course knowledge and ideological and political education, demonstrating the practicality and effectiveness of the PBL teaching mode in the reform of ideological and political education in professional courses, and improving the quality and effectiveness of ideological and political education in professional courses. This article aims to provide feasible teaching measures and methods for the reform of ideological and political education in professional courses, in order to make the necessary contributions to the cultivation of new generations who will undertake the great task of national rejuvenation.

Key words ideological and political education in professional courses; solid state physics; PBL teaching mode

基于 Geant4 的 X 射线康普顿散射探测仿真

王　新　王风丽　方　恺　徐　捷　穆宝忠*
（同济大学物理科学与工程学院，上海　200092）

摘　要　闪烁体探测器是 X 射线康普顿散射成像系统的核心部件，探测效率决定了系统检测的灵敏度和图像对比度。利用 Geant4 程序构建了康普顿散射及探测的仿真模型，研究了 X 射线散射信号在闪烁体探测器中的能量沉积，研究了探测器材料、尺寸及 X 射线能量对探测信号强度的影响。仿真结果表明高原子序数物质构成的硅酸镥（LSO）的探测效率明显优于低原子序数聚苯乙烯，沉积粒子数随着探测器厚度的增大而增加。仿真为高灵敏度 X 射线探测提供了一种有效的设计方法，对于小型化背散射系统的研制及科研、教学用新型 X 射线探测器的开发具有重要的意义。

关键词　闪烁体；康普顿散射；能量沉积；安检；实验教学

近年来，随着违禁品贩运数量的增大及手段的多样化，一些新型的安检技术和装备已逐步发展起来，例如 X 射线背散射成像技术[1]。该技术区别于 X 射线透视成像，其基于探测康普顿背散射信号实现对物质的检测。多数违禁品，例如毒品和爆炸物等低原子序数、低密度物质的散射信号明显强于金属类物质。因此，X 射线背散射技术特别适合于探测毒品、爆炸物等违禁品，已成为传统 X 射线透视安检技术的有力补充，在一些重要的安检场所（海关、边境安检站等）与透视装置配合使用，明显提高了违禁品查缉的能力。

目前，已实用化的 X 射线背散射装置主要包括：龙门架式安检装置、车载式安检车，主要用于海关或边境安检站对车辆的安全检查[2,3]。该类装置通过对车辆整体的扫描来实现对车辆的检查，适合于检测大体量的非金属违禁品，例如几千克的毒品和塑胶炸药。但是，该类装置也具有明显的缺点，主要体现为：(1)射线源和探测器距离车辆藏匿的待测物品较远（约为 2～3m），对于少量违禁品（几十克甚至几克的毒品或炸药），探测到的信号极其微弱，图像信噪比差，甚至无法探测；(2)车辆复杂的零部件对违禁品的遮挡和图像的重叠会增加检测的难度；(3)辐射严重且无法有效屏蔽射线对人体的危害；4)设备极其庞大且多为固定式。所以，传统的 X 射线背散射装置在检测车辆夹层中藏匿的违禁品，特别是小体量违禁品方面存在很大的困难，也是一直以来无法解决的难题。

针对大型背散射安检装置的不足，国际上逐渐开展了小型智能化背散射安检技术和装置的研究。通过大幅减小设备的体积和重量，可借助诸如机械臂等先进的智能技术将背散射装置伸入车辆内部或其它狭小的空间对某些部位进行有目的精确检测。小型背散射装置的射线能量低、功率小，辐射危害大幅降低，同时，近距离的检测可以明显改善图像的分辨率。但是，设备的小型化将会带来一系列的研制困难，主要体现为较低的射线能量和功率会进一步降低所能采集到的射线的强度，导致探测灵敏度和信噪比变差。对于龙门式、车载式背散射安检装置，因设备的整体尺寸不受限制，为了更好的采集物体散射的 X 射线信号，通常采用大型地塑料闪烁体探测器来收集背散射 X 射线信号[4,5]。但是，塑料闪烁体探测器的主要

收稿日期：2023-05-29
基金项目：同济大学 18 期实验教学改革项目（1370104331）；同济大学教学改革项目。
作者简介：王新，男，高级工程师，主要从事物理教学科研工作，研究方向为 X 射线光学及系统，wangx@tongji.edu.cn。
通讯作者：穆宝忠，男，教授，研究方向为 X 射线光学，mubz@tongji.edu.cn。
引文格式：王新，王风丽，方恺，等. 基于 Geant4 的 X 射线康普顿散射探测仿真[C]. 2023 年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会，2023.
Cite this article：WANG X, WANG F L, FANG K, et al. Simulation of X-ray Compton scattering detection with Geant4[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education, 2023. (in Chinese)

材料为有机塑料，密度仅1.03g/cm^3，对高能X射线的沉积效率极低，严重影响了探测效率。因此，塑料闪烁体探测器已不适合小型化背散射装置的X射线探测。

为了解决小型化背散射装置的高效率X射线探测问题，无机闪烁体逐渐代替塑料闪烁体成为高效率X射线探测的首选。无机闪烁体具有较大的原子序数和密度，能够沉积更多的X射线，尤其在高能X射线波段（几十千电子伏特到几百千电子伏特）具有明显的优势[6]。但是，几乎所有的无机闪烁体都很难做到大尺寸，一般仅几十毫米直径，较小的尺寸势必会影响采集到的光子数。因此，对于小型化X射线背散射装置，在允许的体积限制内实现高效率的X射线探测是研制高性能背散射装置的关键。

本文针对小型化背散射安检装置的研制，开展了高效率X射线背散射探测的仿真研究。利用Geant4程序构建了X射线背散射探测的仿真模型，研究了X射线散射信号在闪烁体探测器中的沉积。利用模型研究了探测器材料、尺寸及X射线能量对探测信号强度的影响。本文能够为高灵敏度X射线探测研究提供一种仿真方法，对于小型化背散射系统的研制及科研、教学用的新型X射线探测器的开发具有重要的意义。

1 X射线背散射及探测

X射线康普顿背散射技术是一种新型的安检技术，主要通过探测物质在X射线照射下产生的康普顿散射信号实现检测。X射线康普顿散射设备利用射线与物质之间相互作用发生的非相干散射效应，入射光子与被检测物的自由电子发生碰撞，使光子的部分能量传递给自由电子从而变成反冲电子，光子自身损失一定的能量且改变了运动方向成为散射光子，再由专用的散射探测器接收被检测物散射的X射线光子，然后通过数据处理重构X射线散射图像。低原子序数、低密度物质（主要成分为C、H、O、N的毒品、炸药等）的康普顿散射截面较大，散射信号较强，而金属类物质的散射截面小，散射信号弱。所以，X射线康普顿散射技术利用物质散射信号的差异可以有效区分毒品、炸药等有机物和金属无机物，并突显出有机物的背散射信号，与传统的透视技术实现互补。

图1为飞点扫描式X射线背散射装置及探测机构的原理图。飞点扫描式背散射是目前主流的背散射技术，龙门式与车载式背散射装置均是基于飞点扫描结构。利用旋转的斩波轮产生上下扫描的细光束，细光束辐照被测样品，样品背向散射的X射线被闪烁体探测器接收并转化为可见光，再由光电倍增管PMT收集可见光并生成电流信号，最后通过后端的电路将电流信号转化为电压信号，并经过放大、滤波、整形后由数字采集卡采集，形成所需的二维图像。所谓的X射线探测单元即计数型闪烁体探测器，由闪烁体、光电倍增管及相应的电路构成，其中闪烁体是核心部件。

在选择闪烁体材料时，需要考虑闪烁体的发

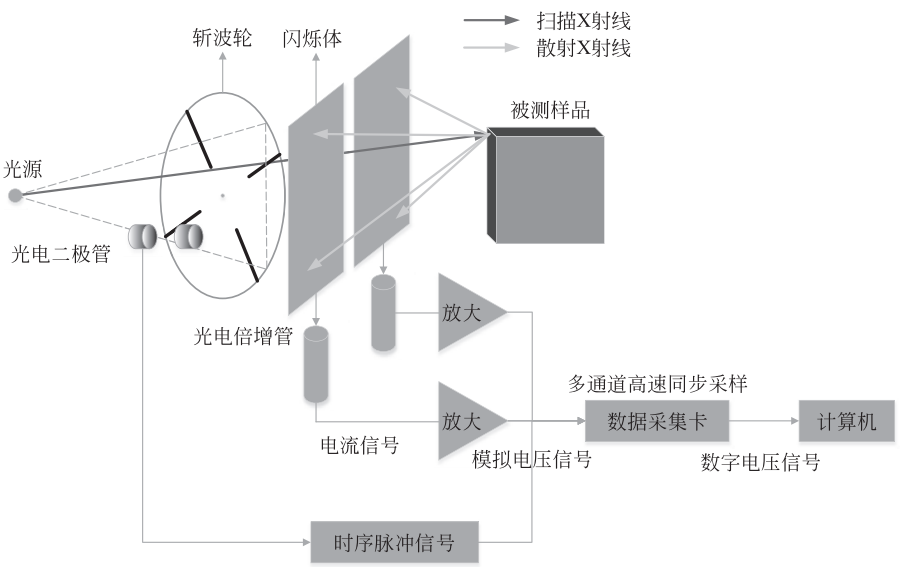


图1 飞点式背散射及信号采集系统原理

光峰值波长、衰减时间、相对发光强度、潮解程度等。闪烁体的衰减时间基本都在纳秒量级，能够满足飞点扫描对时间响应的要求。目前常用的闪烁体材料的相关特性如表 1 所示，其中假设 NaI(TI)的相对发光强度为 100[7,8]。

在不易潮解的闪烁体材料中，以塑料闪烁体(基质为聚苯乙烯，$(C_8H_8)_n$)和硅酸镥(Lu_2SiO_5，简称 LSO)最为常见。塑料闪烁体的密度较小、原子序数较低，X 射线在闪烁体中衰减较弱，但是塑料闪烁体可以制成较大尺寸，尺寸可达 1m 甚至更大。反之，LSO 闪烁体的密度较大、原子序数也较高，且 X 射线在其中的衰减较强，但是，大面积的 LSO 闪烁体难以制作，常见的 LSO 闪烁体尺寸仅几厘米到约 10cm。对于小型化背散射装置，探测器的设计主要是考虑探测器对于入射高能 X 射线的沉积效率及探测器尺寸的平衡，即在最小化体积的同时实现最高效率的探测。因此，本文利用 Geant4 蒙特卡洛程序[9,10]，构建了 X 射线背散射及散射信号在闪烁体中能量沉积的模型。通过该模型对有机违禁品的背散射及其信号在闪烁体中的沉积进行了仿真研究，该研究可以对背散射探测器的设计提供一种方法和必要的数据支撑。

2 仿真模型

构建的 X 射线背散射及闪烁体探测器仿真模型如图 2 所示。该仿真分两个步骤来研究：其一为入射的单能 X 射线直接辐照闪烁体表面，其二是入射的单能 X 射线先辐照样品(例如毒品、爆炸物等违禁品)，闪烁体接收被样品背向散射的 X 射线光子。当入射的 X 射线光子与样品和闪烁体相互作用时，主要会发生相干散射、非相干散射(康普顿散射)、光电效应及电子对效应等物理过程。如图 2(a)所示，入射的光子与闪烁体材料发生上述物理过程，部分光子被吸收和散射，剩余部分则透过闪烁体，被吸收的光子部分转化为可见光。图 2(b)则给出了基于背散射检测违禁品的模型，即入射到待测样品的光子首先在样品表面和内部发生相互作用，被样品散射的光子再次与闪烁体相互作用并在闪烁体上沉积能量，从而转化为可见光子。

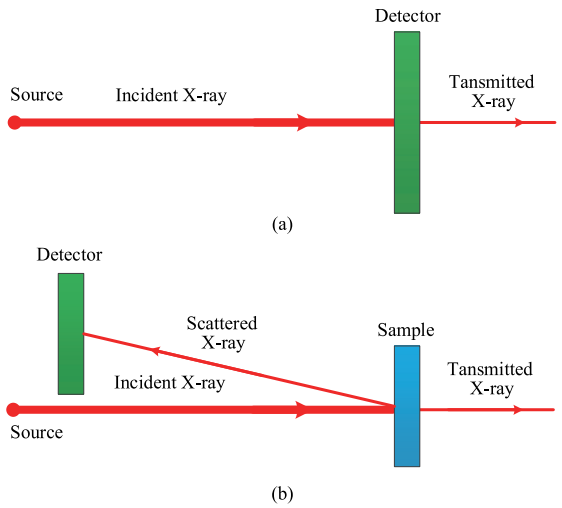


图 2 仿真模型示意图

(a) 入射的单能 X 射线直接辐照闪烁体表面；(b) 入射的单能 X 射线先辐照样品

利用 Geant4 蒙特卡洛程序构建了如图 2 所示的仿真模型。该模型的定义主要包括对粒子源、闪

表 1 常用闪烁体材料的特性

闪烁体	密度(g/cm^3)	折射率	发光峰值波长(nm)	衰减时间(ns)	相对发光强度	潮解程度
NaI(TI)	3.67	1.85	410	230	100	易潮解
BGO	7.13	2.15	480	300	15	不潮解
CsI(TI)	4.51	1.80	530	1000	45-50	轻微潮解
Pure CsI	4.51	1.80	310	10	＜10	轻微潮解
BaF_2	4.88	1.58	220/325	0.9/630	20	轻微潮解
GSO:Ce	6.71	1.85	310/430	30	20	不潮解
Plastic	1.03	1.58	400	2.0	25	不潮解
LSO	7.35	1.82	420	40	70	不潮解
PWO	8.28	2.16	470	15	0.7	不潮解
YAP	5.55	1.97	380	30	40	不潮解

烁体探测器、待测样品的构建。图3为Geant4输出的仿真模型结构，其中图3(a)和图3(b)分别与图2(a)、图2(b)相互对应，图中绿色光线代表Gamma射线。

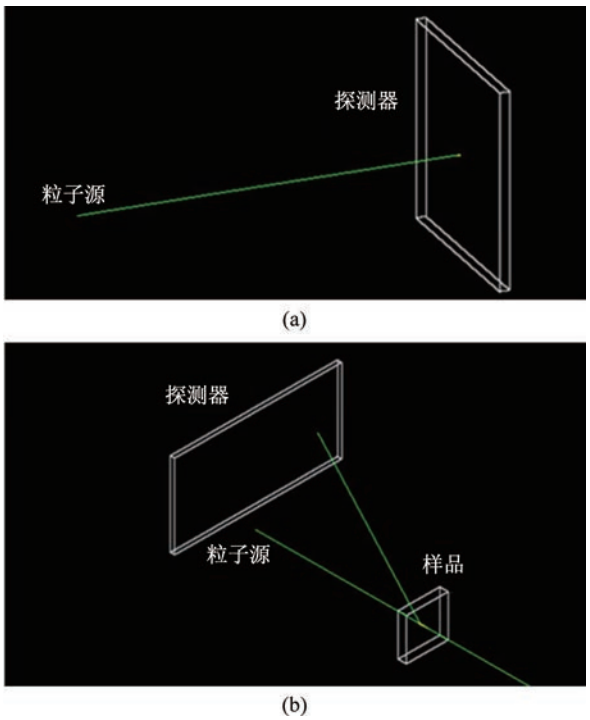


图3 Geant4程序的仿真模型

(1) 粒子源

入射粒子类型定义为Gamma粒子；粒子能量确定在0～200 keV范围内，在研究闪烁体探测器对X射线能量响应的部分以此为根据设置粒子能量参数；同时将粒子源坐标设为原点坐标。

(2) 闪烁体探测器

定义两种闪烁体：硅酸镥闪烁体(Lu_2SiO_5，简称LSO)和塑料闪烁体(基质为$(C8H8)_n$，聚苯乙烯)；将闪烁体探测器定义为尺寸为10cm×10cm×T的平板，其中T为该平板的厚度。在研究厚度对粒子沉积的影响时，闪烁体的厚度T取不同值。对于图2(a)的模型，闪烁体探测器的坐标设为(0，0，20cm)，表示探测器与粒子源之间距离为20cm。而对于图2(b)的模型，探测器中心坐标为(0，10cm，0)，即探测器置于粒子源正上方10cm处。

(3) 待测样品

选择两种毒品作为待测样品开展研究，分别为海洛因(Heroin，$C_{21}H_{23}NO_5$，1.4g/cm^3)和可卡因(Cocaine，$C_{17}H_{21}NO_4$，1.2g/cm^3)[11]，样品尺寸定义为5×5×1cm^3，坐标为(0，0，20cm)，即相对粒子源的距离为20cm。

3 仿真结果及讨论

3.1 直接探测

所谓直接探测即闪烁体直接接收入射的Gamma光子，对应图2(a)所示的模型。从粒子源发射出Gamma粒子束入射到闪烁体探测器，每次模拟过程入射的粒子数为5×10^4，粒子能量为40～120keV。图4(a)和(b)分别为在不同的入射粒子能量、不同的探测器厚度时塑料闪烁体及LSO闪烁体对Gamma粒子的沉积效率(沉积粒子数与入射粒子数的比值)。

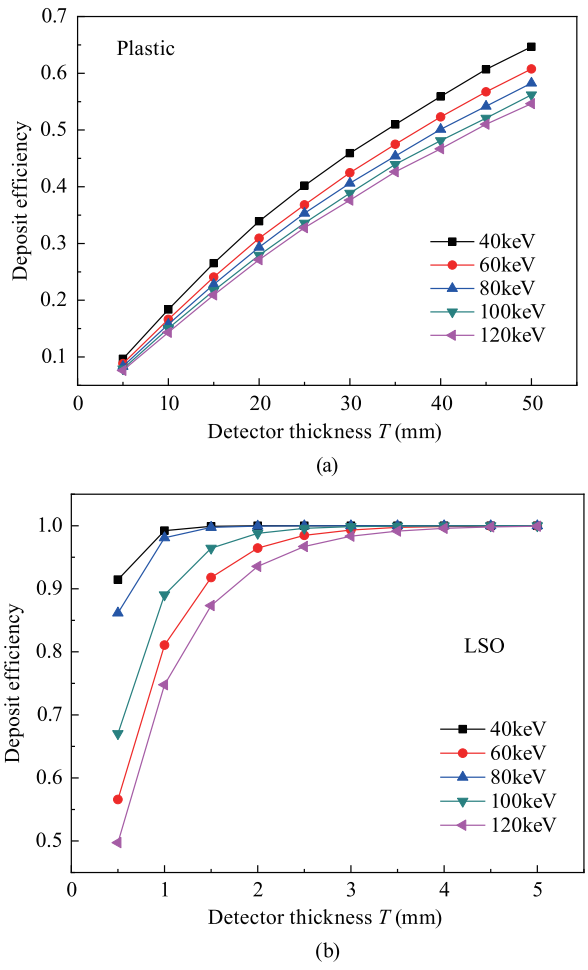


图4 塑料闪烁体、LSO闪烁体的沉积效率

根据图4的仿真结果可以看出，对于两种闪烁体材料，随着厚度的增加闪烁体探测器的沉积效率(沉积粒子数与入射粒子数的比值)也逐渐增

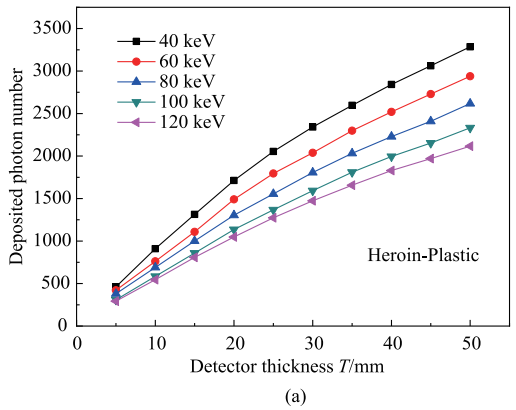
大。由于 LSO 闪烁体具有较大的原子序数和较高的密度，仅需 3～4mm 厚就基本可以吸收全部的入射光子；而对于低原子序数、低密度的塑料闪烁体而言，即使厚度达到 5cm 沉积效率依然仅约 0.6，远低于 LSO 探测器的沉积效率。所以，用于安检领域的 X 射线背散射探测，所采用的塑料闪烁体的厚度要达到约 10cm，这对于实现小型化是很不利的。另外，两种闪烁体的沉积效率均随着入射 Gamma 光子能量的增大而相应的降低，这是由于材料对高能光子的衰减系数更低造成的。但是，如图 4(b)所示，对于 LSO 闪烁体，当入射 Gamma 光子能量为 60keV 时，沉积效率反而相对于 Gamma 光子能量为 80、100keV 时更低，这似乎“有悖于”上述结论(沉积效率随着入射光子能量的增大而降低)。这是因为 LSO 材料在 63keV 能量附近存在吸收边，其质量衰减系数在 63keV 附近发生突变，物质的质量衰减系数参见 NIST (National Institute of Standards and Technology data)[12]。

3.2 背散射探测

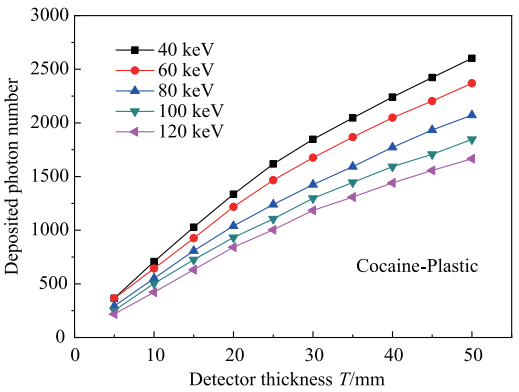
所谓背散射探测指的是入射的 Gamma 光子首先与样品相互作用，发生散射、光电效应等物理过程，然后背向散射的光子部分被闪烁体探测器吸收而产生可见光，如图 2(b)所示。因为散射信号较弱，所以每次模拟过程入射的粒子数为 5×10^5，粒子能量为 40～120keV。图 5(a)和(b)分别为在不同的入射粒子能量、不同的探测器厚度时塑料闪烁体沉积的 Gamma 粒子数，这些 Gamma 粒子是待测样品(海洛因、可卡因)背向散射的光子。

根据图 5 的仿真结果可以看出，对于塑料闪烁体，随着厚度的增加闪烁体探测器沉积的光子数也逐渐增大。另外，闪烁体的沉积光子数随着入射 Gamma 光子能量的增大而相应地降低，造成这一现象的主要因素是：高能量光子的康普顿散射截面小，导致背散射光子数少；同种材料探测器对高能光子的衰减系数更低。比较图 5(a)和(b)可以看出，探测器接收到的海洛因散射光子多于可卡因，这是因为海洛因具有较高的密度。图 5 同时表明，当探测器厚度达到 5cm 时，接收到的光子数仍未达到饱和，这说明需要更厚的闪烁体才能充分地吸收散射的 Gamma 光子。

图 6 为待测样品的散射光子在不同厚度 LSO

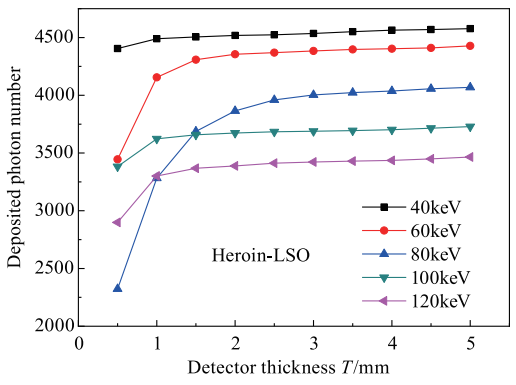


(a)

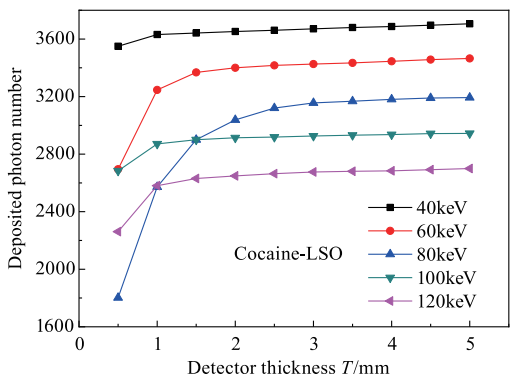


(b)

图 5 样品背散射在塑料闪烁体中沉积的光子数



(a)



(b)

图 6 样品背散射在 LSO 闪烁体中沉积的光子数

闪烁体探测器中的沉积结果。根据仿真结果可以看出，当LSO闪烁体的厚度达到约1mm时，探测器对散射光子的沉积基本达到饱和，低于直接探测所需的3mm饱和厚度，这是因为康普顿背散射的光子能量低于入射光子的能量，所以对于较低能量的光子，更薄的探测器就可以实现饱和探测。所以，对于研制小型化的背散射安检装置，约1mm厚的LSO闪烁体就可以实现饱和探测。另外，比较图5和图6可以看出，对于这两种探测器，厚度为5cm的塑料闪烁体探测器的沉积效率仅约为1mm厚LSO探测器的60%～70%。所以，对于小型化、轻量化的X射线背散射系统，选用高原子序数、高密度的LSO闪烁体作为探测器效果更好。

4 结语

本文围绕小型化、轻量化的背散射安检装置的研制需求，开展了X射线背散射及探测器的仿真研究。基于X射线与物质相互作用原理，构建了Geant4仿真模型，研究了X射线散射信号在闪烁体探测器中的沉积。利用该模型研究了探测器材料、尺寸及X射线能量对探测信号强度的影响。仿真结果表明，高原子序数物质构成的LSO的探测效率明显优于低原子序数聚苯乙烯；沉积粒子数随着探测器厚度的增大而增加。高原子序数、高密度的无机LSO闪烁体更适合作为小型化、轻量化背散射系统的X射线探测器。

参 考 文 献

[1] ZHU P, DUVAUCHELLE P, PEIX G, et al. X-ray Compton backscattering techniques for process tomography: imaging and characterization of materials[J]. Measurement Science & Technology, 1996, 7(3):281-286.

[2] CHALMERS A. Applications of backscatter x-ray imaging sensors for homeland defense[J]. Proc. SPIE, 2003, 5071: 388-396.

[3] CHALMERS A. Rapid inspection of cargos at portals using drive-through transmission and backscatter x-ray imaging [J]. Proc. SPIE, 2004, 5403:644-648.

[4] 李波均，朱学彬，王立宗，等. ST401塑料闪烁体中子探测效率研究[J]. 核电子学与探测技术，2014，34(12)：1520-1523.
LI B J, ZHU X B, WANG L Z, et al. Research on the Neutron efficiency of plastic scintillator ST401[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2014, 34(12): 1520-1523. (in Chinese)

[5] 韩梦涛. 塑料闪烁体探测器空间辐射粒子响应建模与仿真研究[D]. 南京：南京航空航天大学，2016.
HAN M T. Research on modeling and simulation of plastic scintillator detector response induced by space radiation particles[D]. NANJING: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)

[6] 冯龄. X射线探测器系统的设计与实现[D]. 成都：电子科技大学，2014.
FENG L. Design and implementation of the X-ray detector system[D]. CHENGDU: University of Electronic Science and Technology of China, 2014. (in Chinese)

[7] NIKL M. Scintillation detectors for x-rays[J]. Measurement Science & Technology, 2006, 17(4): R37.

[8] 张永兴. 闪烁体厚度对X射线成像探测器成像质量影响的研究[D]. 北京：中国科学院大学，2014.
ZHANG Y X. Study of influence of scintillator thickness on the imaging quality of X-ray imaging detectors[D]. BEIJING: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)

[9] APOSTOLAKIS J, GIANI S, MAIRE M, et al. Geant4 low energy electromagnetic models for electrons and photons, CERN-OPEN-99-034[R], Switzerland: European Organization for Nuclear Research, 1999.

[10] Geant4 Collaboration. Physics reference manual[EB/OL]. [2020-04-02] http://geant4.cern.ch/support/index.shtml.

[11] Chemspider search and share chemistry[EB/OL]. [2020-04-02]. http://www.chemspider.com/.

[12] National Institute of standards and technology, physical measurement laboratory[EB/OL]. [2020-04-02]. https://physics.nist.gov/PhysRefData/FFast/html/form.html.

■

SIMULATION OF X-RAY COMPTON SCATTERING DETECTION WITH GEANT4

WANG Xin WANG Fengli FANG Kai XU Jie MU Baozhong

(School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract The scintillator detector is a key component of X-ray Compton scattering imaging system. Detection efficiency determines sensitivity and image contrast of system. A simula-

tion model of Compton scattering and detection was constructed based on Geant4 program. The deposition of scattered X-ray in scintillator and the influences of material, size and X-ray energy on the signal intensity were studied. The results show that the detection efficiency of LSO composed of high atomic number materials is obviously better than that of low atomic number polystyrene, and the number of deposited particles increase with thickening of detector. The simulation provides an effective design method for high sensitivity X-ray detection, which is of great significance for the development of miniaturized backscatter system and novel X-ray detectors in scientific research and teaching.

Key words scintillator; Compton scattering; energy deposition; security inspection; experimental teaching

波动水面附近的声学现象探讨

朱　杰　罗琦敏　朱嘉蓉　郭先红　倪　晨　方　恺*

（同济大学物理科学与工程学院，上海　200092）

摘　要　在水面和空气交界处，声波会在界面发生反射和散射等现象。通过将实际情况具体分解为镜面和波动界面，应用高斯型概率密度反射系数对声波在水下和空气中的传播进行了模拟和推导。结果表明：对于实际的具有不断振荡的波动水面而言，声波从水下向空气中传播会发生全反射以及散射，声音几乎无法穿透水面进入空气；而从空气向水下传播过程中由于并不能全部反射而导致有部分声波会在一定的距离范围内以一定的角度入射水中，这和实际观察到的现象吻合。

关键词　声波；声阻抗；界面；反射系数；衰减

众所周知，声波是一种纵波，在不同介质中传播时速率不同，空气中的声速在海平面附近大约为340米/秒，而在水中的声速则接近了1500米/秒，是空气声速的近5倍。在不同介质内的速率和介质密度差异会直接影响声波在界面处的反射和透射程度。根据声阻抗的公式 $Z=\rho u$，计算得到空气的声阻抗约为400Pa·s/m，水的声阻抗为 1.5×10^6 Pa·s/m。由于水的密度更大，水的声阻抗约是空气的3600倍。这种巨大的声阻抗差异导致更多的声音就会在边界被反射，因此传统观点认为声音既不能从水下传播到空气中，也几乎无法从空气中传播到水下。那么实际情况是否如此呢？在日常生活中我们的确很难在水-空气中的一种介质内听到另外介质中声源发出的声音，可是有些场景下似乎和理论有些不一样。如水边钓鱼的人常常希望周边岸上的人不要大声喧哗，以免惊惊扰吓跑水中的鱼儿；在游泳池中，潜入水下的游泳者却可以在水下听到水面附近甚至岸上人员所发出的声音，这与理论上似乎有所出入，针对这个现象，本文进行了简单的理论推导，分析了游泳池情况下水面与空气界面的具体特点，利用高斯型概率密度函数来近似描述波动水面对声波的反射系数，探讨了实际泳池或自然界条件下的空气水界面的声波透射反射情况。

1　声波基本原理介绍

声波是人类生活中接触最多的机械波之一，我们通过声波进行相互语言交流，情感沟通以及彼此信息的获取。通过对空气的纵向压缩将能量从声源传递到我们耳中，再通过鼓膜的振动带动听小骨震动，放大的能量带动淋巴液和耳蜗内基底膜进行振动，最后通过毛细胞使机械能转换为电信号使大脑中形成听觉声音。

声波在不同介质中传播速度不同，在固态物质中其传播速度与介质的弹性模量 E 以及密度 ρ 有关 $u=\sqrt{\dfrac{E}{\rho}}$。在气体介质中，通常将声波的传播过程当作绝热过程处理[1]。声速与气体的热力学温度 T、摩尔质量 M 以及摩尔气体常量 R 有关。在流体中传播时，由于介质的各个质元之间会发生相互挤压和拉伸从而产生压强之差，也就是声压。在弹性介质中任意垂直于声波传播方向的平面两侧的声压可以通过应用牛顿第二定律

收稿日期：2023-05-29

基金项目：同济大学2023年精品公共基础课程建设项目（项目号：1370104330/002）。

作者简介：朱杰，男，副教授，主要研究方向为X射线光学，晶体精密加工，jzhu008@tongji.edu.cn。

通讯作者：方恺，女，教授级高级工程师，主要研究方向为物理实验教学，教育技术学和凝聚态物理学，fangkaitj@tongji.edu.cn。

引文格式：朱杰，罗琦敏，朱嘉蓉，等. 波动水面附近的声学现象探讨[C]. 2023年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会，2023..

Cite this article: ZHU J, LUO QIMIN, ZHU J R, et al. Discussion on acoustic phenomena near fluctuating water surfaces[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education, 2023. (in Chinese)

给出：

$$(p+p_0)S-(p+dp+p_0)S=\rho S dx \cdot a \tag{1}$$

其中，p 和 p_0 分别为有声压和无声压时的压强，a 为介质平面质元的加速度。

设声波的波动表达式为：$y=A\cos\left(\omega\left(t-\frac{x}{u}\right)\right)$

质元的振动和加速度分别为：

$$\begin{cases} \upsilon=\dfrac{\partial y}{\partial t}=-\omega A\sin\omega\left(t-\dfrac{x}{u}\right) \\ a=\dfrac{\partial^2 y}{\partial t^2}=-A\omega^2\cos\omega\left(t-\dfrac{x}{u}\right) \end{cases}$$

代入式(1)后，可得声压的表达式：

$$p=-\rho A\omega u\sin\omega\left(t-\frac{x}{u}\right)=\rho u\upsilon \tag{2}$$

式(2)中的介质密度与声速 u 的乘积就是声阻抗 $Z=\rho u$。

声波在两种不同介质分界面上的反射和折射时能量的分配就由两种媒质的声阻抗决定的(如图 1 所示)。

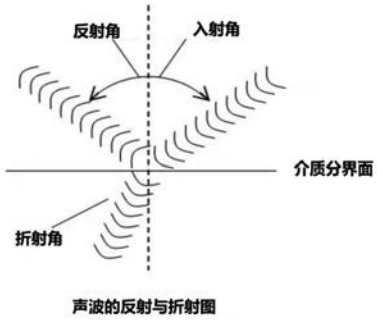


图 1　声波在介质分界面的反射和折射示意图

2　水-空界面的声波反射和透射

当声音从空气中传播到水的表面时，在界面处的声阻抗会发生突变，要遵从边界条件。假设在常规情况下，室温为 20 摄氏度情况下，如果有一束声波以 θ 角度传导到空气和水的界面，根据声波传播特性，假设入射波的声强为 I_i，反射波的声强为 I_r，透射波的声强为 I_t，入射波和透射波的声强之比。空气的声阻抗约为 $Z_{空}=415\mathrm{Kg/m^2\cdot s}$，水的声阻抗为 $Z_{水}=1.5\times10^6\mathrm{Kg/m^2\cdot s}$。二者的声阻抗相差了大约 3500 倍，那么在空气-水的界面声波将发生全反射，全反射角由空气和水的声速所确定 $\theta_R=\arcsin\frac{u_0}{u_1}$，空气中声速为 340m/s，水中声速为 1497m/s，可知全反射角约为 13.1°左右。也就是在正上方大约 26°的范围内才有可能有透射波，大于这个范围就全部被反射了。那么在这个有限的反射区域范围内反射波和入射波的关系可以由反射系数公式(3)确定：

$$R=\frac{Z_{水}-Z_{空}}{Z_{水}+Z_{空}}=\frac{1.5\times10^6-415}{1.5\times10^6+415}\approx0.9994 \tag{3}$$

也就是说几乎所有的声波都被反射掉了，因此透射声波能量极小，可以忽略。由于公式的对称性，不管是声波从水内向空气中传播还是空气向水中传递都是一样的结果。因此理论上的推导说明，在空气-水的界面两侧无法听到对面的声音。

3　实际粗糙表面的声波反射和透射模型

以上是理想情况下空气与水的界面处发生反射和透射的声强推导情况，所建立的是以水面为平整镜面的模型。水面是声波的理想反射面，反射损失接近于零。而实际环境中，不论是风和日丽的河边，湖光山色的湖泊还是室内游泳池的情况下，水面都会存在一定的起伏，波面起伏随着外界风力的大小而有所不同。此时的水面不再是一个理想的声波反射体，在表面波动的作用下成为一个不可忽略的声波散射体[2,3]。这种高低起伏的水面对声波的反射特性取决于表面起伏的概率分布情况[4]，此时的声压计算需要用到不平整表面的概率密度函数，反射损失不再为零[5]。

$$p_r=p_i\int_{-\infty}^{\infty}\exp(-2i\gamma Z)W(Z)\mathrm{d}Z \tag{4}$$

其中 p_r 和 p_i 分别是反射波和入射波的声压幅值，$\gamma=k\sin\theta$，$k=\frac{2\pi}{\lambda}$，θ 为掠入射角，λ 为入射声波波长。$W(Z)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma^2}\right)$ 为随机表面的概率密度，将其展开后可得

$$W(Z)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\mathrm{e}^{\left(-\frac{z^2}{2\sigma^2}\right)}\cdot\left(1+\frac{1}{3}m_3H_3+\frac{1}{12}m_4H_4+\frac{1}{18}m_3^2H_6\right) \tag{5}$$

其中，$m_3=\frac{C_s}{2}$，$m_4=\frac{(C_E-3)}{2}$分别为偏倚系数和峰凸系数相对应参数，C_s 和 C_E 值分别是随着水面波浪幅度变化的参数。H_n 为厄密多项式，Z 为与水面高度，起伏坐标等参数相关的函数，σ 为均方根高度[6]。带入前式可以得到反射波与入射波的声压幅值比公式为[7]：

$$p_r/p_i=e^{-2\gamma^2\sigma^2}\left(1+\frac{8}{3}m_4\gamma^4\sigma^4+\frac{16}{9}m_4^2\gamma^8\sigma^8-\frac{256}{27}m_1m_3^2\gamma^{10}\sigma^{10}+\frac{1024}{81}m_3^4\gamma^{12}\sigma^{12}\right) \quad (6)$$

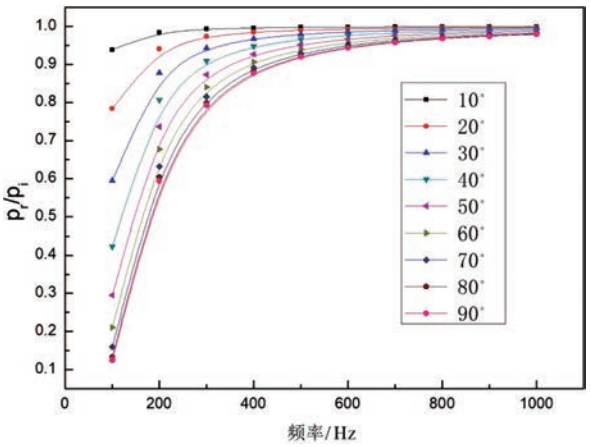


图2 不同掠入射角下不同频率反射声波与入射声波声压幅值之比（σ取0.3cm）

4 不同水面情况下的模拟计算

因为公式中变量较多，在固定相关参数后，可以模拟不同频率的声波在不同掠入射角下其反射波和入射波声强之比。虽然人耳能听到的频率范围较大，但人声的频率范围并不是很大，基本上从100Hz到1200Hz范围就已经全部覆盖了，因此计算的频率取值范围从100Hz到1000Hz，模拟计算不同频率的声音以不同掠入射角入射到水面时其反射波和入射波的声压幅值比如图2所示。

若考虑小波浪的水面情况，均方根高度σ等于0.3cm，水面波浪大概在一厘米多范围，属于一种常见的波动起伏状态。掠入射角从10°到90°。从图2中可以看出在低频部分，入射角对声波的反射影响较大。随着角度增加，入射波靠近法线方向时反射波强度会急剧下降，根据能量守恒的原则，透射波和散射波将会增加。由于声波的全反射角大概在13°附近，这一点也和前面所计算的声波只能在法线附近26°范围有透射相吻合。而且角度越大反射越弱，透射越强。当频率高于600Hz以上时，不论入射角度如何增加基本都被反射掉，很难有透射的情况存在。这与其他研究结果一致：角度和频率对反射波的影响很大[8]，也就是说如果在水面以下能听到水面上的声音，声音主要集中在低频部分，在水下情况也是类似[9]。

理想的物理模型是采用镜面表面（如图3(a)所示），而实际上水面总是在外界风的作用、自身流动以及岸边反射的情况下存在大小不一的波动震荡（如图3(b)(c)所示）。本文根据波动幅值大小，对应公式中参数均方根σ的变化进行了模拟计算，研究波动起伏对声波反射的影响效果。水面的波动起伏可以用高斯型概率密度函数描述，C_s 和 C_E 值分别是随着水面波浪幅度变化的参数，此时可以针对不同水面起伏高度σ来计算相应的反射波和入射波的幅值比。若固定声波的入射角度为45°斜入射，分别模拟计算了不同浪高表面时在不同σ情况下，不同频率的声波其反射波

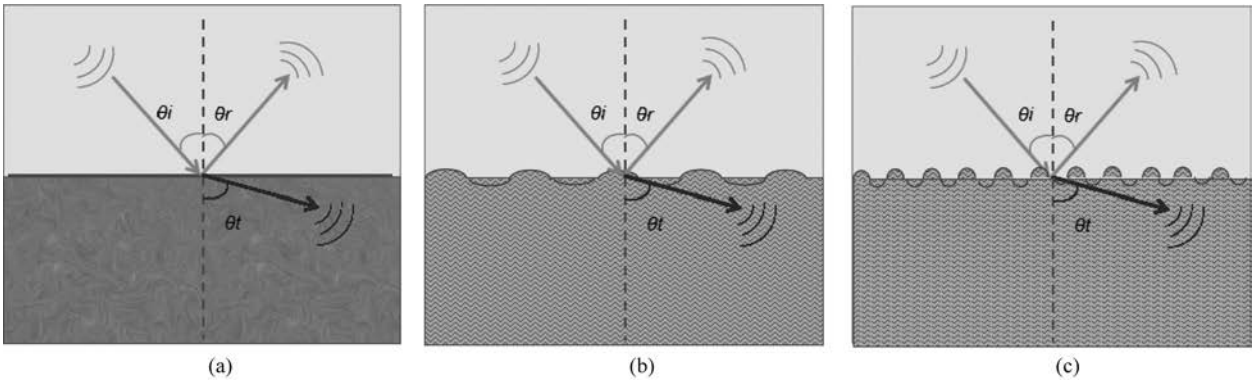


图3 不同水面情况示意图（镜面到波浪表面）

和入射波的幅值比曲线图，如图 4 所示。

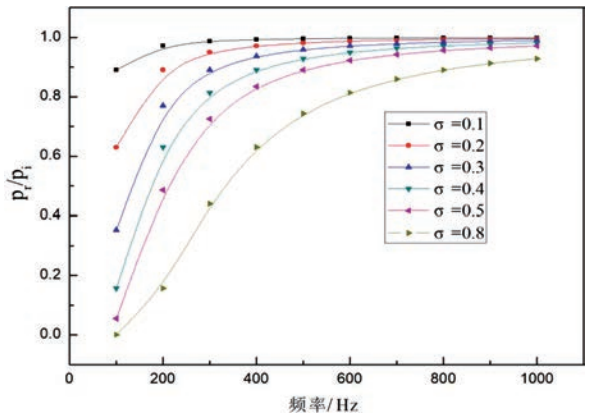


图 4　45 度角入射条件下不同浪高对应不同频率反射声波与入射声波声压幅值之比

由图 4 可以看出，水面波动的浪高对声波的反射影响较大，浪高越高，波形越复杂，反射波的强度下降越明显。当然随着浪高的增加，其反射过程也变得更加复杂，包括不同水面小波浪对声波的反射以及反射波之间的迭加相干也会大量出现。与之前结果相一致，随着频率增加，这种影响会变弱。

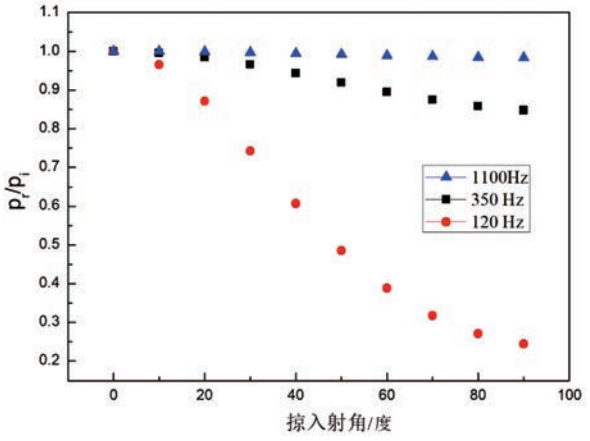


图 5　三种典型人声的随入射角变化反射声波与入射声波声压幅值之比(120Hz，350Hz，1100Hz)

此外，我们还选择了三种最典型的声音频率，分别进行模拟计算，如图 4 所示，在小于 10°的低掠入射角范围内，基本都被反射掉了，但随着掠入射角增加，被反射掉的部分在下降，特别是低频部分下降很多，1100Hz 的高频部分情况则不同。因此，低频声音反而容易透射，高频声波更容易被反射。

5　实际情况的探究

那么在水面下方，我们能听到的主要是人声中的哪一部分？人声频率范围是男低音 82Hz～392Hz，女低音 82Hz～392Hz。男基准音区 64Hz～523Hz，男中音 123Hz～493Hz，男高音 164Hz～698Hz，基准音区 160Hz～1200Hz，女低音 123Hz～493Hz，女高音 220Hz～1.2KHz。对此我们采用了一般情况下男低音的下限 120Hz，以及最上限 1100Hz 部分，实际计算表明 120Hz 声音更容易透射进入水面以下。究其原因，这和声波的波长有关，当频率在 100Hz 时，声波的波长大约为 3.4 米，更容易发生衍射而进入界面的另外一部分。由于人讲话的声音频率主要集中在 200Hz～500Hz 这一频段，因此从计算结果可以看出，在水面以上讲话的时候，水面以下是可以听到声音的。当然由于反射率较高，透射率比较小，能听到的声音会很弱，考虑到水对声音还有吸收作用，导致声波强度在水中会有所衰减，因此在水下较深的位置将会很难听到水面以上的声音，这点和在游泳池内实际发生的情况相吻合。

6　小结

本文基于日常实际发生的物理现象，对空气-水界面两侧的声音传播进行了分析。细化了物理模型，给出了真实情况下水面的不同波动状态，设定了不同浪高以及浪高起伏的均方根差值。通过粗糙水面的声学模型进行了反射声波和入射声波的声强比值计算，对比了理想状态下镜面空气-水界面和实际波浪起伏状态下空-水界面的反射情况。结果表明由于实际水面存在波浪起伏，频率在 500Hz 以下的人声由于波长较长，低频部分的反射率相比高频部分较低，更容易通过衍射进入界面另一侧的水中，在水面下较浅的位置是可以听到水面以上空气部分传来的声音，真实情况也的确如此。因此，理想模型和实际情况存在的细小差异在实际问题的物理处理过程中不能忽略。

参　考　文　献

[1]　毛俊健，顾牡. 大学物理学(第三版)[M]. 北京：高等教育出版社，2020.

[2] 陈小泉，马忠成. 小斜率近似方法分析粗糙界面声散射问题[J]. 声学技术，2009，28(6)：725-728.
CHEN X Q，MA Z C. Study of acoustic scattering from rough surface by the small-slope approximation theory[J]. Technical Acoustics，2009，28(6)：725-728.（in Chinese）

[3] 陈小泉，张波. 粗糙面声散射方法概述[J]. 中国科技信息，2009(2)：35-36+38-39.
CHEN X Q，ZHANG B. Overview of rough surface acoustic scattering methods[J]. China Science and Technology Information，2009(2)：35-36+38-39.（in Chinese）

[4] 戚诒让，陆德明，徐烈忠，等. 不平整水面的镜向声反射[J]. 海洋与湖泊，1986(2)：111-116.
QI Y R，LU D M，XU L Z，et al. The sound reflection in specular direction on a rough surface[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica，1986(2)：111-116.（in Chinese）

[5] 张红星. 目标与干扰声学特性的水池动态模拟技术[D]. 哈尔滨工程大学，2005：18-20.

[6] 刘明. 粗糙海面声散射特性研究[D]. 哈尔滨工程大学，2011：04-05.

[7] 尤立克. 洪申 译. 水声原理(第三版)[M]. 哈尔滨船舶工程学院出版社，1990：101-102.

[8] 汤渭霖. 用物理声学方法计算界面附近目标的回波[J]. 声学学报，1999，24(1)：32-36.
TANG W L. Calculation of acoustic scattering from object near an interface using physical acoustic method[J]. Acta Acustica，1999，24(1)：32-36.（in Chinese）

[9] 朱韬. 水下目标低频声散射特性研究[D]. 上海交通大学，2008：54-55.

DISCUSSION ON ACOUSTIC PHENOMENA NEAR FLUCTUATING WATER SURFACES

ZHU Jie　LUO Qimin　ZHU Jiarong　GUO Xianhong　NI Chen　FANG Kai

(School of Physics Science and Engineering，Tongji University，Shanghai 200092)

Abstract　At the interface between water and air，sound waves will reflect and scatter at the interface. By decomposing the actual situation into mirror and wave interfaces，the Gaussian probability density reflection coefficient was applied to simulate and derive the propagation of sound waves in water and air. The results indicate that for actual water surfaces with continuous oscillations，sound waves propagating from underwater to air will undergo total reflection and scattering，and sound can hardly penetrate the water surface and enter the air；During the process of propagation from air to underwater，some sound waves may not be fully reflected，resulting in a certain distance range and angle of incidence into the water，which is consistent with the observed phenomenon in practice.

Key words　sound wave；acoustic impedance；interface；reflection coefficient；attenuation

大学物理教学中的课程思政探索
——以机械能守恒定律为例

林晓贺[1*]　范奕泽[1]　姚宏林[1]　任武荣[1]　李　瑞[2]
([1]航天工程大学基础部,北京　101400;[2]齐齐哈尔大学,黑龙江 齐齐哈尔　161006)

摘　要　大学物理课程是生长军官高等教育各专业的必修基础课,在课程中融入课程思政,对引导学员树立爱国爱军情怀,培养精益求精的大国工匠精神,塑造正确世界观、人生观、价值观具有重要意义。本文以机械能守恒定律为例,通过其在航天事业中的应用,点燃学员求知、探索和创新的热情,向学员传递航天传统精神和新时代北斗精神,引导学员感悟科技强国的重要性。通过播放视频和讲述中国射箭队运动员张娟娟的事迹,激发学员民族自豪感,培养学员努力学习、刻苦训练、不畏艰辛、不惧失败的优秀品格。

关键词　大学物理;课程思政;机械能守恒定律

0　引言

在习近平强军思想、习近平新时代军事教育方针指导下,在“立德树人、为战育人”的教育新格局下,立足“培养什么人、怎样培养人、为谁培养人”根本问题,为实现全方位育人目标,课程思想政治建设已成为各学科课程建设的必备关键环节。大学物理课程作为生长军官高等教育各专业的必修基础课,在高校人才培养体系中占有至关重要的地位。在大学物理课堂中全面融入课程思元素已成为大学物理教学改革中的重中之重。

在大学物理课程中实施课程思政[1]具有以下四个方面的优势:一,物理学是从哲学中剥离出来的第一门自然科学,对传播马克思主义思想,实施哲学思政具有得天独厚的优势;二,物理学是一门定量的实验科学,现象是物理学的根源,物理学中绝大部分定律定理均来自大量的实验现象。这些真实自然得天独厚的实例可以更好地传播实事求是、理论联系实际、实践是检验真理唯一标准的科学思想,培养学员知行统一和勇于探索的创新精神;三,物理学是科学方法和科学思想的宝库。英国哲学家培根曾说过“跛足而不迷路,能赶上虽然健步如飞,但误入歧途人”。学习也是如此,只有看清路,才能少走或不走弯路。处理科学问题时,物理学采用的科学方法往往比其他自然科学采用的要简明清晰。在教学中更容易培养学员研究问题、分析问题和解决问题的能力,对塑造学员的科学思维方法尤为重要;四,物理学中具备着大量形象丰富的思政素材,其中包含着庞大的军事应用素材,依托这些素材,可以更好地让学员树立强国兴军的远大志向,培养学员的爱国爱军情怀。

本文以高等教育出版社出版,东南大学等七所工科院校编,马文蔚等人改编的《物理学》第七版中第三章动量守恒定律 能量守恒定律中的机械能守恒定律为例,讨论大学物理教学过程中的课程思政问题。学员在中学时期对机械能守恒定律就有一定的理解,所以比较容易掌握该知识点,

收稿日期:2023-05-29
基金项目:国家自然科学基金(12203106)。
作者简介:林晓贺,女,讲师,主要从事大学物理教学和科研工作,研究方向为原子分子物理,xiaohelin1989@163.com。
引文格式:林晓贺,范奕泽,姚宏林,等. 大学物理教学中的课程思政探索——以机械能守恒定律为例[C]. 2023年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会,2023.
Cite this article: LIN X H, FAN Y Z, YAO H L, et al. The discussion of college physics course with ideological-political education—Taking the law of conservation of mechanical energy as an example[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education, 2023. (in Chinese)

这就给我们提供了比较丰富的空间来融入课程思政内容。

1 课程讲解及课程思政

1.1 理论知识讲解

根据质点系的动能定理：作用于系统内所有质点上的力所作的功等于系统动能的增量即

$$W = E_k - E_{k0}$$

而作用于系统内所有质点上的力可以分为外力和内力，其中内力还可以分为保守内力和非保守内力，所以上左侧可以写为如下形式：

$$W = W_{外力} + W_{内力} = W_{外力} + W_{保守内力} + W_{非保守内力}$$

式中

$$W_{保守内力} = -(E_P - E_{P0})$$

所以

$$W_{外力} + W_{非保守外力} = (E_k + E_p) - (E_{k0} + E_{p0})$$

定义系统的机械能 E 等于系统动能 E_k 与势能 E_P 之和，即

$$E = E_k + E_p$$

则

$$W_{外力} + W_{非保守外力} = E - E_0$$

该式的物理意义为质点系机械能的增量等于外力和非保守内力对系统作功之和，此为质点系的功能原理。

当 $W_{外力} = 0$、$W_{非保守外力} = 0$ 时，$E = E_0$。

此为机械能守恒定律，即当作用于质点系的外力和非保守内力都不作功，或者做功之和均为零时，质点系的机械能是守恒的[2]。

1.2 应用及课程思政

在孤立的保守力场中，系统的机械能守恒，在利用守恒定律处理实际问题时，可以不用考虑系统内的细节，只考虑系统的始末状态。在大学物理中，分析和解决问题，往往要用到守恒定律。

(1) 利用质点系的机械能守恒定律可以推导三种宇宙速度，分别为第一宇宙速度—航天器成为人造卫星所需的最小发射初速度；第二宇宙速度—航天器摆脱地球引力束缚，成为人造行星所需的最小发射速度；第三宇宙速度—航天器摆脱太阳引力束缚，飞出太阳系所需的最小发射速度。

随着航天事业的发展，大量的人造卫星被应用于通讯、导航、侦查、预警、定位和捕捉其他卫星。这些卫星由于其使命不同而在分布不同的轨道上运动。比如地球同步轨道卫星[3]，绕地球转动的周期与地球自转的周期相同，即它绕地轴转动的角速度与地球自转的角速度相同。地球同步轨道上的卫星覆盖区占地球表面积的42.4%。因此只需在地球同步轨道上分开放置三颗卫星就可以实现除两极以外的全球通信。目前，中国自主独立研制的北斗卫星系统[4,5]已全面服务于社会各领域，包括交通运输、导航通讯、公共安全、减灾救灾、电力金融、农林牧渔等行业和设施，深刻改变着人们的生产生活方式。在国防建设方面[4,5]，北斗卫星导航系统也被广泛应用到各种军事演练任务、救援任务和维和任务中。当士兵执行任务遇到恶劣环境时，可以利用卫星导航系统的监控功能对所处环境进行一个全面深入的了解，从而优化执行军事任务的实施过程，有效降低士兵的伤亡率。北斗卫星系统为社会的和谐、稳定、发展和国家的繁荣富强作出了巨大贡献。

引入课程思政：习近平总书记指出“探索浩瀚宇宙，发展航天事业，建设航天强国，是我们不懈追求的航天梦”。从古至今，人们探索宇宙的脚步从未停歇过。从古老的神话故事嫦娥奔月、夸父追日、敦煌飞天、万户逐梦，到两弹一星、神州出世、天宫遨游、嫦娥玉兔、北斗问天。中国的航天事业创造了辉煌成就，在这个过程中无数的优秀科学家和爱国的前辈们为中国航天的崛起“做惊天动地事，当隐姓埋名人”，积淀起了深厚而博大的航天精神与文化，比如航天传统精神、“两弹一星”精神、载人航天精神、探月精神、新时代北斗精神等。当代大学生应该具备时代赋予大家的使命感和责任感，明白科技强国、科技强军的重要性，着力培养热爱科学、积极探索、开拓创新的科学精神，为社会的和谐稳定、国家的繁荣富强和人类的不断进步积极努力。

(2) 机械能守恒定律成立的条件：作用于质点系的外力和非保守内力都不作功，即只有保守力做功时，系统的机械能守恒。在机械能守恒的系统中，系统的动能和势能是可以相互转化的。在中国古代，弓箭是最简单最常用的弹射武器，主要由弹性强韧性佳的弓壁、弓弦和箭矢组成。在拉弦张弓的过程中，人对弓做的功转化为了弓的弹性势能。在释放弓弦的一瞬间，弓的弹性势能转化为了箭的动能。

引入课程思政：2008年在北京举办的第29届

奥运会上，我国共获得51枚金牌，位列金牌榜首，这其中有中国射箭女队的张娟娟一人单挑韩国3大名将，获得的首枚中国射箭队奥运金牌。播放此次比赛张娟娟射箭过程的视频，解析在射箭过程中张娟娟的动作变化。拉弓的过程中，人对弓做的功转化为弓的弹性势能，松开弓的瞬间，忽略空气阻力等作用，只有弹性力做功，弹性势能转化为箭的动能射向目标。向学生说明，张娟娟的成功离不开赛前的刻苦训练与赛时过硬的心理素质。成功并非一蹴而就的，张娟娟的运动员生涯也不是一帆风顺的。在2004年雅典举办的奥运会上，张娟娟首次出战，就在女子个人项目比赛上失利，止步于1/8决赛。但她没有就此自暴自弃，而是化失败为动力，苦练专业技能，强化心理素质。在2021年的体育人物专访上，她曾说过，为了提高心理素质和对环境时差的适应能力，运动员要在凌晨两点左右起床，进行山地越野行军，此时山里环境恐怖，道路难行，趴在树丛里的教练还会突然出来吓他们。正是在如此严格的训练下，张娟娟不畏惧训练时的枯燥与痛苦，射箭技术才得以达到世界顶尖水平。与此同时，值得提出的是，在2008年奥运赛场上，比赛的过程也是波澜起伏，环境上，小雨天气，可视度低。比赛上，她首箭十环，在射出第二箭的时候，右前方闪光灯一闪，导致她只拿到了7环的成绩。但是基于良好的心理素质，她迅速调整状态，最终以110∶109的优势逆袭夺冠，成功打破了韩国射箭队自1984年奥运会以来女子个人项目24年的冠军垄断神话，为中国赢得无数喝彩。

总结张娟娟的职业经历，既可以激发学员的民族自豪感和自信感，又可以令学员们可以感受到，成功的背后是满怀勇气、不畏艰辛和奋力拼搏。我们的学员更应该坚定理想信念，筑牢信仰之基，强化责任担当，矢志奋斗强军。平时努力学习，刻苦训练，不畏惧艰难险阻，树立家国情怀，从成功中总结经验，从失败中汲取教训，努力向前，成为祖国的栋梁。

2 结论

习近平总书记曾多次强调：思想政治教育不仅仅是思政课教师和高校辅导员的职责，更是全体教师的神圣职责[6]。其他各门课都要守好一段渠、种好责任田，使各类课程与思想政治理论课同向同行，形成协同效应[7]。大学物理课程作为生长军官高等教育各专业的必修基础课，在高校人才培养体系中至关重要。将课程思政元素全面贯穿到大学物理课程中，立德树人，为战育人，对引导学员树立家国情怀，培养学员科学素养与创新精神，塑造正确的世界观、人生观、价值观和不畏困难、坚忍不拔、持之以恒的科学品格至关重要。本文以机械能守恒定律为例。首先对该理论知识进行讲解，然后列举机械能守恒定律的两个应用，对其进行课程思政。其一是在航天事业中的应用-地球同步轨道卫星、北斗卫星导航系统，向学员传达新时代航天精神和文化，来点燃学员求知、探索和创新的热情，同时让学员感悟科技的力量，为人类科技的进步和国家的繁荣富强而努力。其二是通过中国射箭女队运动员张娟娟的事迹，激发学员民族自豪感，培养学员勤奋刻苦、勇往直前、不畏艰辛、不惧失败的优秀品格。本案例结合当前科技成果、人物事迹和视频播放等方式，将大学物理课程与课程思政相结合，发挥课堂教学“主渠道”作用，全面落实教师教书和育人根本任务。

参 考 文 献

[1] 陈真英，谢冰，谢文彬，等. 立德树人格局下大学物理课程实施课程思政的特色优势研究[J]. 高教学刊，2019，(21)：61-63.

[2] 东南大学等七所工科院校编，马文蔚，周雨青，解希顺 改编. 《物理学》(7版)[M]. 北京：高等教育出版社，2020.

[3] 韩仙华，武文远，王晓等. 大学物理学教学设计(2版)[M]. 北京：国防工业出版社，2014.

[4] 夏禹. 北斗卫星导航系统发展与应用[J]. 电子技术与软件工程，2021，(9)：25-26.

[5] 郝志涛. 北斗卫星导航系统发展与应用[J]. 电子技术与软件工程，2017，(7)：34.

[6] 刘仁臣，陆静. 力学基本量测量实验中育人和育才双效结合教育的探索[J]. 高教学刊，2019，(25)：51-54.

[7] 倪涌舟，郭中富. 大学物理课程思政的课堂实践探索[J]. 教育教学论坛，2020，(16)：51-52.

■

THE DISCUSSION OF COLLEGE PHYSICS COURSE WITH IDEOLOGICAL-POLITICAL EDUCATION
—TAKING THE LAW OF CONSERVATION OF MECHANICAL ENERGY AS AN EXAMPLE

LIN Xiaohe[1] Fan Yize[1] YAO Honglin[1] REN Wurong[1] LI Rui[2]

([1] Faculty of foundation, Space Engineering University, Beijing 101416;

[2]Department of Physics, College of Science, Qiqihar University, Qiqihar, Heilongjiang 161006)

Abstract College physics course is the public basic compulsory course for various majors in higher education for growth officer. Integrating ideological and political education into the course is of great significance in guiding students to establish patriotism and love for the military, cultivate the spirit of striving for excellence as a great craftsman, and shape correct worldviews and values. In the present work, we will take the application of the law of conservation of mechanical energy in the aerospace industry as an example to motivate students' enthusiasm for seeking knowledge, exploration, and innovation, convey the traditional spirit of aerospace and the spirit of the new era Beidou, and guides students to understand the importance of technological power. By playing videos and telling the story of Zhang Juanjuan, coming from Chinese archery team, we aim to inspire students' sense of national pride and cultivate their excellent character of hard work, hard training, fearlessness of hardships, and fearlessness of failure.

Key words college physics; curriculum ideology and politics; law of conservation of mechanical energy

“大学物理实验”课程的自选实验模块教学设计

方　恺*　张志华　倪　晨　王风丽
（同济大学物理科学与工程学院，上海　200092）

摘　要　“大学物理实验”是高等学校理工科专业本科生进入大学后首先学习的科学实验训练公共基础课程，为将来学习专业实验课程夯实基础，对于人才培养有重要作用。本文探讨了通过对“大学物理实验”课程的自选实验模块教学设计，拓展教学实验项目，丰富教学内容，让学生接触到前沿科学技术，培养学生的研究能力和创新精神，提高教学质量。为帮助大学一年级的本科生理解自选实验模块中与科技前沿结合的高阶实验内容，本课程采用线上线下相结合混合式的教学方法，并通过实验教学资源开放共享，提高仪器设备的使用率，充分发挥仪器设备在教学和人才培养等工作中的作用。

关键词　大学物理实验；自选实验；教学设计

高质量人才培养工作和双一流建设，对公共基础课程的教学提出了更新更高的要求，因而从课程思政、分层次教学和混合式教学等多个方面，全面重构面向新工科研究型人才培养的大学物理实验公共基础课程。传统的大学物理实验课程，教学项目和教学内容较为固定，如何在公共基础课程中让学生接触到前沿科学技术，培养学生的研究能力和创新精神，优化教学过程，改善教学环境，提高教学质量，是大学物理实验课程教学改革工作中持续关注的问题[1-3]。因此，对“大学物理实验”课程的自选实验模块进行教学设计，可以拓展原来有限的教学实验项目，让学生接触到前沿科学技术，培养研究能力和创新精神，提高实验课程的教学质量。

以信息技术支持个性化和协作式学习的实证研究结果表明，其有益于提高学生的学业成就[4]。基于教学信息化管理系统构建在线大学物理实验教学方案，包括虚拟实验和自主设计实验等，学习者可以自主选择学习时间和空间，可以取得良好教学效果[5]。因此，在大学物理实验课程的教学设计中，基于多个实验信息化教学平台，采用线上线下相结合混合式的教学方法，支持实验开放教学和个性化学习。

1　大学物理实验课程设计

“大学物理实验”课程建设工作中，紧密围绕卓越工程师教育培养、新工科建设、拔尖人才计划和强基计划，深入开展对基础公共物理教学需求的研究，以实验教学质量建设和课程思政改革为核心，以面向专业人才培养的物理实验课程个性化能力建设为特色，实现实验课程多模块的分层次教学设计。

“大学物理实验”两学期的课程教学内容结合大学物理课程，涵盖力学、热学、光学、电磁学和近代物理等领域的验证性、综合性、设计性和研究性的物理实验项目。课程教学设计包括“学＋思＋践＋悟”四个环节，如图1所示，涵盖知识学习、实验实践、能力培养、团队协作、安全教育和创新能力培养等内容。教学模块包括：实做实验、虚拟实验、自选实验和校级的课内竞赛等，采用线上线下相结合的教学模式，将课程的教学目标和教育理

收稿日期：2023-05-29
基金项目：同济大学17期实验教学改革项目，同济大学16期精品实验项目（项目号：2023-15），同济大学课程建设项目。
通讯作者：方恺，女，教授级高级工程师，主要研究方向为物理实验教学、教育技术学和凝聚态物理学，fangkaitj@tongji.edu.cn。
引文格式：方恺，张志华，倪晨，等. 大学物理实验课程的自选实验模块教学设计[C]. 2023年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会，2023.
Cite this article：FANG K，ZHANG Z H，NI C，et al. Instructional design of self-selected experimental modules for university physics experimental courses[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education，2023.（in Chinese）



图1 课程教学设计

念落到实处。在开展课内实验项目教学的同时，本课程通过加强开放实验室建设，优化实验条件，鼓励学生在课程教学的基础上，参加相关学科竞赛和创新项目，激发学生科研实践潜能，在实践中培养和提高大学生的创新能力、实践能力和团队协作意识。

在第一学期“大学物理实验”课程的教学内容为基础实验，教学内容主要包括：基本物理量和常用物理量的测量方法，基本物理实验设计思想，基本实验仪器的使用方法，实验数据记录和分析方法等。

在此基础上，第二学期的《大学物理实验》课程主要为高阶实验，以模块化实验开展教学，包括获诺贝尔奖实验，与现代测量技术相结合的综合性、创新性实验，包含自选实验模块等。其中，自选实验模块包括十余项实验，同学可以通过实验教学网站和同济物理实验中心公众号移动学习平台自主选择，在聆听实验在线讲座，并通过线上资源进行实验预习后做实验。

2 自选实验模块设计

为启发学生对物理学和对科学实验的兴趣，在教学中鼓励学生自主选择部分实验项目，进一步拓宽实验教学的范围和深度，让学生在综合运用知识、自主设计实验、分析实验现象和数据，以及研究实际工程技术问题等各方面得到更大的锻炼，并对学生的学习态度产生积极影响[6]。

相比于其他教学模块，自选实验模块的教学内容具有紧跟科学技术前沿，衔接应用技术，支持个性化学习和教学内容易于拓展的特点。在2022—2023学年，同济大学的《大学物理实验》课程的自选实验模块包括的实验项目如表1所示，每个自选实验的课时约为6课时。自选实验项目的实验内容包含量子计算、系列核物理实验、半导体光刻、晶体物理和建模仿真等，一半以上的实验项目为首次开设，体现出实验教学内容的不断开拓和勇于创新。学生在公共基础课程的学习中，也可以接触到最前沿的科学技术，大大激发了学生的学习兴趣，也有益于培养学生的科学素养和创新精神。

以金刚石NV色心量子计算自选实验为例（如图2所示），本课程在实验教学过程中，将知识传授、能力培养和思政教育充分融合，实现“知识、能力、素养”全面提高的培养目标。本实验项目将前沿的金刚石量子计算实验和金刚石NV色心的物理原理引入大学物理实验教学，并介绍2022年诺贝尔物理学奖授予了“纠缠光子实验、验证违反贝尔不等式和开创量子信息科学”方面研究的贡献，学生很感兴趣，选择这个实验项目的学生人数也较多。但是，对于大学一年级的本科生来说，物理理论基础还不足以让他们容易理解固体物理和量子计算的实验原理，因此，在实验的教学内容和教学设计，以及教学资源建设等方面需要教学团队进行综合考虑。

在教学内容方面，主要包括：(1)介绍量子技术的发展历程，及其在科技进步和社会发展中的作用，并了解中国科学研究者在量子技术领域的贡献和成果，包括：量子科学实验卫星“墨子号”、款超导量子计算云平台和超导量子计算原型机

表 1 自选实验项目及其主要知识点和实验内容

自选实验项目	主要知识点和实验内容
1 量子计算实验	• 量子计算 • 金刚石 NV 色心
2 虚拟放射源核物理实验	• 卢瑟福散射 • 中子活化元素半衰期测量
3 核磁共振成像实验	• 核磁共振原理和核磁共振成像原理 • 磁体的中心频率和拉莫尔频率 • 梯度回波序列成像 • 弛豫时间
4 半导体光刻微结构制备与检测实验	• 半导体光刻工艺流程和工艺参数 • 制作相位光栅
5 数字全息实验	• 全息照相原理 • 计算机模拟光波衍射，再现光波的复振幅分布。
6 液体表面张力测量实验	铂金板法、最大气泡压力法、悬滴法等
7 Simdroid 物理仿真软件设计	电磁学、力学、流体力学等多种物理场的仿真计算
8 晶体材料光学实验	• 人工晶体结构、生长、特性和应用 • 物理研磨法进行晶体样品抛光
9 钠原子光栅光谱实验	• 钠原子光谱 • 光栅光谱仪结构
10 法拉第磁光效应实验	• 磁光效应 • 费尔德常数测量方法
11 硅光电池特性的研究	硅光电池结构，及光伏效应，照度特性，伏安特性和温度特性等。
12 Zemax 光学仿真实验	光学镜头设计和光学系统分析
13 验证快速电子的动量与动能的相对论关系实验	• β 放射源和 γ 放射源的能谱 • 快速电子的动量与动能的相对论关系 • 磁分离技术 • 辐射安全知识

等，融入课程思政教育内容，激发学生爱国精神和科技报国的使命感。(2)学习量子计算相关的基本理论和实验原理。(3)通过连续波实验和拉比振荡实验学习仪器的工作原理。(4)学习用 NV 色心体系来实现 D-J 算法，并通过与传统算法比较，分析量子算法的优势所在。(5)进一步深入理解量子比特演示、量子逻辑门操作、量子叠加态演化等量子计算实验技术，以及量子计算研究的基本方法。

在教学设计方面，基于线上线下相结合的混合式教学模式，分为四个主要环节：(1)自主选择实验项目：基于实验教学网站和微信公众号，向学生发布实验简介和教学安排信息，有助于学生了解实验的基本内容，从而根据自己的专业兴趣和学科方向等，自主选择相应的实验项目，并在系统中提交选项。在此环节，任课教师和课程管理员可以通过教学管理平台，实时了解学生的选课情况，根据学生的学习意愿和需求酌情对课程安排进行优化调整。(2)实验预习：教师通过在线讲座课向学生介绍实验内容和教学要求等。学生可以通过课程教学网站和微信公众号移动学习平台，阅读实验资料，观看微课程视频，撰写预习报告，开展课前调研。(3)实验学习：充分发挥学生为主体，教师为主导的作用，教师采用启发式教学模



图2 金刚石NV色心量子计算实验

(a) 讲座课件;(b) 微课程;(c) 实验仪器;(d) 教学场景

式,将抽象的理论与具体的实验相结合,以直观的方式展现了量子计算相关的原理和知识,学生以两人为一组合作开展实验学习,自主探究和分析讨论。(4)撰写报告:学会自主设计科学实验的报告,对实验结果进行记录分析,并鼓励学生开展自主调研,激发学生对量子计算研究的兴趣,培养精益求精和勇于创新的科学精神。

在教学资源建设方面,需要考虑的主要问题包括:(1)教学资源类型多样化,主要实验讲义、讲座课件和微课程视频等。(2)多平台共享教学资源:通过学校Canvas教学管理平台、物理实验教学网站和公众号等,满足学生移动学习和个性化学习的需求。(3)拓展教学资源来源:鼓励任课教师和学生共同进行教学资源的建设。在本实验教学资源的制作中,微课程视频来源于学生制作并参加全国大学生物理实验竞赛(创新赛)获得讲课比赛一等奖的视频[7]。该视频经学生同意后向《大学物理实验》课程的同学分享,在课程教学中长期发挥作用。学生设计和制作教学视频等资源时,能从自己学习过程的经验和体会出发,并融入新的技术手段,让学习者感兴趣。(4)创新资源呈现方式:通过融入多媒体视频、虚拟教师和虚拟仿真等多种现代教育技术,丰富知识的呈现方式,有益于让学生理解实验原理或仪器装置结构功能等,培养学生的科学思维,提高学生学习兴趣,提升实验教学质量。

3 信息技术与实验教学深度融合

《教育部关于加快建设高水平本科教育全面提高人才培养能力的意见》《教育信息化中长期发展规划(2021—2035年)》《教育信息化"十四五"规划》和《关于推进"互联网+教育"发展的指导意见》指出,以学生发展为中心,以信息化为重点,以提升质量为目标,构建线上线下相结合的混合式教学模式,形成高质量教育支撑体系。

信息化技术融入基础实验课程教学,要求课程提供丰富的教学资源,友好的在线学习环境,保证在线教学的高质量。因此,《大学物理实验》课程构建了开放共享课程建设体系,引入"互联网+"和"智能+"理念,紧跟人才培养需求和学科发展,设计和优化在线教学平台的功能,加强在线教学资源建设工作,建设混合式在线教学课程,从而提升实验课程的教学和管理水平。物理实验中心教学管理综合平台方案,突破传统实验教学资源时空,综合管理实验教学资源,以满足拓展性、开放性、可量化等需求,其结构和功能如图3所示。通过教学管理综合平台支持线上线下相结合的优质混



图 3　物理实验中心教学管理综合平台

合式实验课程，可以实现共享在线教学资源和课程，学生可以自主在线预习和自主选择实验时间，平台可以管理实验学习资源，记录学生学习情况，给予评价和反馈，并进行教学分析。

4　实验教学设备资源分层次开放与共享

在“大学物理实验”课程的自选实验模块设计和教学工作中，为丰富实验教学内容，充分利用包括实验设备和实验室空间等在内的教学资源，在不同层次的物理实验课程之间可以实现共享。与此同时，对于教学实验的仪器设备等资产的管理，要坚持资产管理与财务管理、实物管理与价值管理相结合的原则，坚持安全规范与注重实效相结合的原则，符合实验课程和实验室管理可持续发展的要求。因此，建立合理高效的实验教学设备和资源分层次开放模式，势在必行。实验教学设备资源分层次开放，主要包含三个层次：

（1）课程内开放：实验教学采用线上线下混合式教学，教学平台支持学生自选实验项目，预约实验时间，记录学生的实验学习情况等信息，并将学习过程中的形成性评价作为实验课程教学情况分析的依据。

（2）课程之间开放：通过共享系列物理实验课程的教学资源，学生可以根据自己的专业方向或者专业兴趣，自主选择学习内容。教学实验项目开放共享和开放实验室等，可以通过实验课程的内容衔接和突破课程壁垒加以实现。再以金刚石 NV 色心量子计算实验为例，实验项目作为“大学物理实验”课程的自选实验，也是物理专业本科生的“近代物理实验”课程的教学项目。通过物理实验教学团队共同完成相关实验项目的教学和研究工作。对于不同课程和专业基础的学生，实验内容和实验要求可以有所差异，实现分层次教学。

（3）创新平台开放：通过搭建学生创新研究平台实现实验教学资源开放共享，支持学生在课程以外自主选择学习内容，鼓励学生参加学科竞赛，助力创新课题研究，并提供实验条件和教师指导。鼓励学生参加相关学科竞赛和创新项目，积极开展物理实践，有益于提高学生对物理课程的学习兴趣，激发学生科研实践潜能，在实践中培养



图 4　实验教学设备和资源分层次开放模式

和提高大学生的创新能力、实践能力和团队协作意识。同时,也可以丰富教学内容,促进物理实验教学改革工作的不断发展,提高物理实验教学的质量与水平,为培养高素质人才奠定基础。

5 小结

本文探讨的"大学物理实验"课程的自选实验模块教学设计,紧密围绕创新人才培养对基础公共物理教学的需求深入开展研究,在公共基础课程中引入科学技术前沿内容,丰富实验教学项目,实现公共基础物理实验课程与专业物理实验课程的教学资源的共建共享,统筹规划课程教学和实验室管理工作。在课程教学实践中,采用线上线下相结合的混合式教学模式,实现了个性化学习,激发学生的学习兴趣,提高实验课程的教学水平。"大学物理实验"课程的自选实验模块的教学设计可以作为物理实验课程教学改革和研究工作的借鉴参考。

参 考 文 献

[1] 理工科类大学物理课程教学基本要求理工科类大学物理实验 课程教学基本要求(2010年版)[M]. 教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会物理基础课程教学指导分委员会,北京: 高等教育出版社, 2011:1-8.

[2] 徐平, 唐芳. 基础物理实验绪论课的改革与思考[J]. 物理与工程,2022,32(3): 36-40.
XU P, TANG F. Reconstruction and reflection the introduction lecture of fundamental physics experiment course [J]. Physics and Engineering, 2022,32(3): 36-40.

[3] 赵国俭, 徐丽红, 王佳乐 等. 大学物理实验"基础-进阶-高阶"教学模式的探索[J]. 物理与工程,2022,32(6): 148-152+158.
ZHAO G J, XU L H, WANG J L, et al. Exploration of the teaching mode of "Basic-intermediate-advanced" in college physics experiment [J]. Physics and Engineering, 2022, 32(6): 148-152+158.

[4] 董玉琦, 高子男, 张慧伦 等. 技术支持的个性化协作式学习实证研究——以高校物理专业"光的双缝干涉"教学单元为例[J]. 现代远距离教育, 2023(1): 10-18.
DONG Y Q, GAO Z N, ZHANG H L, et al. An empirical study on personalized collaborative learning with technology support: Taking the teaching unit of "double slit interference of light" in the college physics major as an example[J]. Modern Distance Education, 2023(1): 10-18.

[5] 冯卓宏, 王丽丽, 郑卫峰. 大学物理实验全媒体多元化自主性教学模式实践[J]. 实验室科学,2022,25(6): 106-109+113.
FENG Z H, WANG L L, ZHENG W F. Practice of omnimedia and diversified teaching mode for college physics experiment[J]. Laboratory Science, 2022,25(6): 106-109+113.

[6] 查建峰, 邵晓婷, 方恺,等. 学生自主选择实验项目的教学方式对其学习态度的影响[J]. 物理与工程,2019,29(S1): 73-75.
ZHA J F, SHAO X T, FANG K, et al. The influence of self-selected experimental items on students' learning attitude. Physics and Engineering. 2019.29 (S1): 73-75.

[7] 翟立朋, 赵述敏, 邱淑伟 等. 第8届全国大学生物理实验竞赛(创新)的实践与思考[J]. 物理实验, 2023,43(5): 25-32.
ZHAI L P, ZHAO S M, QIU S W, et al. Exploration and consideration of the 8th Chinese undergraduate physics experiment competition(innovation)[J]. Physics experimentation, 2023,43(5): 25-32.

■

INSTRUCTIONAL DESIGN OF SELF-SELECTED EXPERIMENTAL MODULES FOR UNIVERSITY PHYSICS EXPERIMENTAL COURSES

FANG Kai ZHANG Zhihua NI Chen WANG Fengli

(School of physics science and engineering, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract University physics experiments is a basic course for undergraduate students majoring in science and engineering in higher education institutions to first learn scientific experimental training after entering the university. It lays a foundation for future professional experimental courses and plays an important role in talent cultivation. This article explores the design of self-selected experimental modules for university physics experimental courses, expanding teaching experimental projects, enriching teaching content, allowing students to be

exposed to cutting-edge science and technology, cultivating their research ability and innovative spirit, and improving teaching quality. To help the first-year undergraduate students understand the advanced experimental content in the self-selected experimental module that combines with the forefront of technology, this course adopts a hybrid teaching method of combining online and offline. With the open sharing of experimental teaching resources, the utilization rate of instruments and equipment is improved, and the role of instruments and equipment in teaching and talent cultivation is fully utilized.

Key words University physics experiment; self-selected experiments; instructional design

基于相对光谱功率分布的复色光牛顿环研究

郁乐琰[1]　毛胜春[2,3]　常凯歌[2,3*]　翟立朋[2,3]　蔡书阳[1]　张俊武[2,3]

（西安交通大学[1]电子与信息学部；[2]物理学院；[3]大学物理国家级实验教学示范中心，陕西 西安　710049）

摘　要　在大学物理实验教学中通常用钠光来产生牛顿环验证光的干涉，而生活中很多是复色光的干涉。本文使用一系列复色光光源结合遮光装置产生了高对比度的牛顿环，随后利用光栅光谱仪测量不同光源的光强分布曲线，根据等厚干涉光强分布公式得到牛顿环半径上各点处各个波长光的强度信息，再结合色度学原理及RGB色匹配函数，利用Python仿真复现出复色光的牛顿环，仿真结果与实验结果一致，吻合良好，可适用于多种光源。同时实验仿真结果也验证了光的可叠加性。

关键词　等厚干涉；光谱仪；色匹配函数；计算机仿真；牛顿环

光的干涉现象有力地支撑了光的波动性。牛顿环是干涉中较为常见且应用广泛地一种。当前大学物理实验中牛顿环实验光源为单色光。但现实中的光源大多为复色光，且，复色光牛顿环在生活中也有体现，如水中油膜在阳光下五彩斑斓。在大学物理实验中涉及复色光牛顿环是很有必要的。

但是，复色光牛顿环现象并不明显，开展教学实验效果不佳。因此，不受实验环境实验条件影响的计算机仿真便成了认识、研究复色光牛顿环，进行实验教学与展示的重要工具。

本文首先借助暗室环境和遮光设备做出了对比度较高的复色光牛顿环，随后根据，色匹配函数，色度学原理，光谱仪，等厚干涉光强公式，使用计算机仿真出了光源对应的牛顿环。

1　高对比度复色光牛顿环的生成

1.1　牛顿环

牛顿环是由一块曲率半径为R的平凸透镜和一块平面玻璃的组合形成，其间存在空气隙。当光线通过透镜后会分成两束，如图1中的1和2，从而产生光程差，产生干涉现象。空气隙相同的点位于以O为中心的圆上，所以干涉图像呈中心对称。由于距离中心不同半径处的空气隙厚度不同，所以干涉图像在径向上明暗相间。

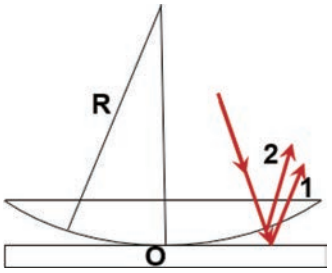


图1　牛顿环成像原理[1]

1.2　复色光牛顿环对比度较低原因

图2为在暗室中让光源直接照射半透半反镜，产生的牛顿环：



图2　低对比度牛顿环

收稿日期：2023-05-29

基金项目：2022年西安交通大学本科实验实践与创新创业教育教学改革研究专项（编号：22SJZX01，编号：22SJZX02）；2022年西安交通大学本科教学改革研究项目（拔尖专项）（编号：22BJ03Y）；教育部高等教育司2021年第二批产学合作协同育人项目（编号：202102153105）。

作者简介：郁乐琰，男，西安交通大学2021级本科生。

通讯作者：常凯歌，女，西安交通大学物理学院工程师，主要从事物理实验教学与研究，changkg@xjtu.edu.cn。

引文格式：郁乐琰，毛胜春，常凯歌，等. 基于相对光谱功率分布的复色光牛顿环研究[C]. 2023年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会，2023.

Cite this article：XI L Y，MAO S C，CHANG K G，et al. Study on the fringes of Newton's rings in complex colors based on relative spectral power distribution[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education，2023.（in Chinese）

可以看出，在无额外环境光干扰的情况下，其对比度仍较低，色彩不鲜艳，不利于观察。其原因是，光源发出的光线，一部分通过了进入了凸透镜和平面玻璃组成的成像系统中，另一部分直接入射镜筒之中，光路图如下：

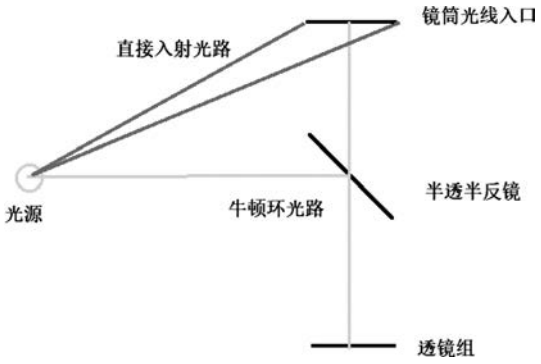


图 3　低对比度原因

这种情况在光源尺寸增大之后尤为明显，为提升对比度，可通过算法增强对比度或通过物理装置去除干扰光线。图 4 为通过算法处理后的效果。

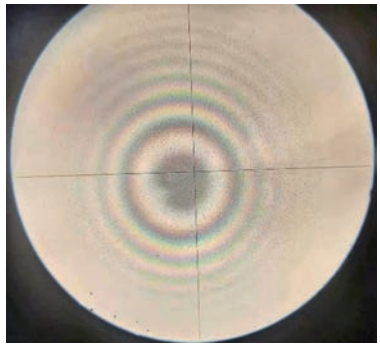


图 4　算法处理后效果

图 4 可看出算法可以在一定程度上提高对比度，但其缺点是增加了不少噪点。因此采用物理方法提高对比度。

1.3　使用遮光装置提高牛顿环对比度

本文使用遮光屏与通光管限制光源发出的光线，以下是装置原理简图：

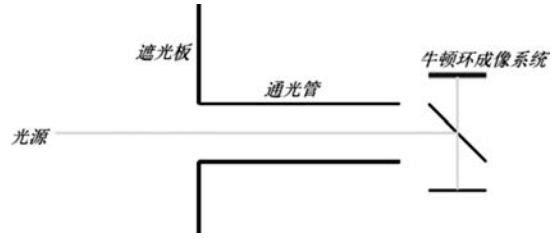


图 5　遮光装置原理图

图 6 是物理增强后的图像效果：

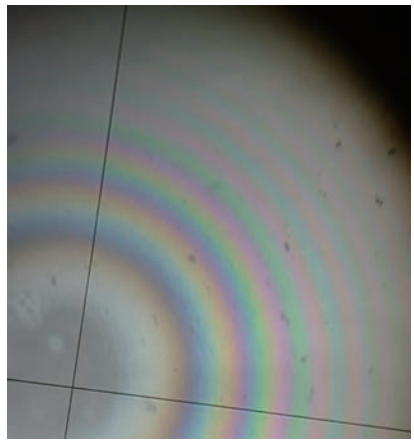


图 6　物理提升对比度后的效果

从图 6 可以看出，牛顿环的对比度明显增强，色彩更为鲜艳。

2　复色光牛顿环成像的仿真

复色光牛顿环的成像模拟，主要由两个步骤组成首先是测量基础信息，即测定成像透镜的曲率半径，测各种光源的光强分布曲线，通过 CIE 色匹配函数 XYZ 数据(1931)[2]计算出 RGB 的色匹配函数。其次是计算机仿真。首先根据相干光的干涉公式得到牛顿环的光强分布公式；其次，结合光源的光强分布函数和牛顿环光强分布公式借助 Python 求出不同波长的光在距圆心不同距离处的光强值。最后，结合 RGB 色匹配函数，以及色度学基本原理，将波长-光强矩阵转换为 RGB 矩阵，生成图像。

3.1　基础数据获取

3.1.1　透镜曲率半径数据的测定

假设平凸透镜凸面的曲率半径为 R，产生的第 j 级牛顿环的半径为 R_j，对应的空气膜厚度 h，示意图如图 7

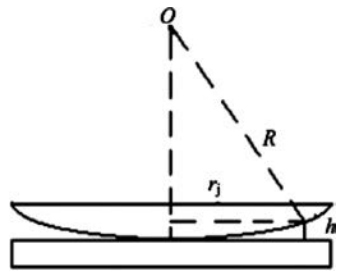


图 7　牛顿环成像示意图

于是有：

$$h=\frac{r_j^2}{2R} \tag{1}$$

由等厚干涉可得，暗环半径平方为：

$$r_j^2=k\lambda R,\quad j=0,1,2\cdots\cdots \tag{2}$$

由上式推导可得：

$$R=\frac{r_j^2}{k\lambda} \tag{3}$$

因此可由单色光牛顿环的第 k 级的半径信息测得平凸透镜的凸面的曲率半径。但考虑到设备原因同时为尽可能地准确，这里按照大学物理实验[3]中牛顿环实验的操作步骤进行操作。

测量牛顿环各个光斑的位置数据，有下表：

表 1　牛顿环标定数据

级数 k	光斑左侧位置/mm	光斑右侧位置/mm
15	31.782	25.820
14	31.681	25.922
13	31.578	26.020
12	31.477	26.125
11	31.359	26.241
10	31.240	26.365
9	31.116	26.480
8	30.979	26.621
7	30.842	26.752
6	30.698	26.901

借助曲率半径求解公式，可以求得所使用的透镜曲率半径：

$$R=1.0263\text{m}$$

3.1.2　光谱仪测光源光强分布

通过北京杏林睿光科技有限公司的 RLE-SA02 光纤光谱仪测得实验所用复色光源在可见光波段 $\lambda\in(400,760)$ nm 的光强波长数据。此处以公牛白光灯为例，根据其数据做出光强分布曲线，横轴表示波长，纵轴表示相对强度，如图 8 所示：

3.1.3　RGB 色匹配函数及其获取方式

根据色度学原理[4]，每一个波长的光线都可以由红绿蓝三基色按照不同强度混合产生。每一个波长的光都有与之对应的三个强度数据。这里波长与强度数据之间的对应关系即为 RGB 色匹配函数。

为将波长-光强数据矩阵转换为可视化的

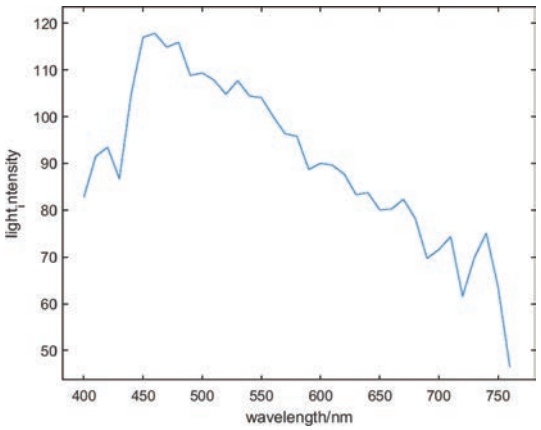


图 8　公牛白光灯的光强分布曲线

RGB 值矩阵，我们只需利用 RGB 色匹配函数，找出每个点处的光所对应的三个强度值，即得到了 RGB 矩阵，从而能在计算机上实现可视化输出。

RGB 色匹配函数可通过国际照明委员会(CIE)于 1931 年发布 XYZ 色匹配函数转换得到。XYZ 色匹配函数与 RGB 色匹配函数之间存在如下关系：

$$\begin{aligned}\boldsymbol{X}(\lambda)&=(X(\lambda),Y(\lambda),Z(\lambda))\\&=\frac{1}{0.17}\begin{pmatrix}0.49&0.31&0.20\\0.17&0.81&0.01\\0.00&0.01&0.99\end{pmatrix}\boldsymbol{R}(\lambda)\end{aligned} \tag{4}$$

因此可以通过此关系式反解出 $\boldsymbol{R}(\lambda)$：

$$\begin{aligned}\boldsymbol{R}(\lambda)&=\begin{pmatrix}R(\lambda)\\G(\lambda)\\B(\lambda)\end{pmatrix}\\&=0.17\begin{pmatrix}0.49&0.31&0.20\\0.17&0.81&0.01\\0.00&0.01&0.99\end{pmatrix}^{-1}\boldsymbol{X}(\lambda)\\&=0.17\begin{pmatrix}0.49&0.31&0.20\\0.17&0.81&0.01\\0.00&0.01&0.99\end{pmatrix}^{-1}\begin{pmatrix}X(\lambda)\\Y(\lambda)\\Z(\lambda)\end{pmatrix}\end{aligned} \tag{5}$$

我们从国际照明委员会(CIE)官网下载了其于 1931 年发布的色匹配函数数据，也即(4)式中 $\boldsymbol{X}(\lambda)$，随后通过 Matlab 将不同波长的 XYZ 值通过上述公式转换为 RGB 值，从而得到 RGB 色匹配函数。图 9 是计算得出的 RGB 色匹配函数图像。

3.2　计算机仿真复色光牛顿环

本部分主要分为两个步骤：首先根据光栅光

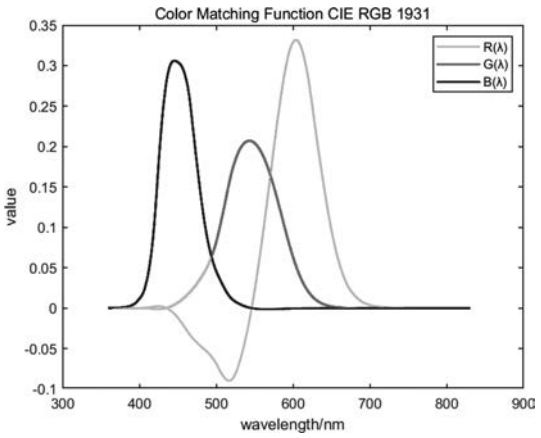


图 9 RGB 色匹配函数

谱仪测得光源的光强分布和牛顿环光强公式计算出牛顿环半径上各点处各个波长光的强度信息；其次根据 RGB 色匹配函数将波长-强度信息转换为可视化的 RGB 数值。

3.2.1 牛顿环光强分布公式

复色光牛顿环实质上是不同单色光牛顿环叠加而成。因此，首先研究单色光牛顿环的光强分布公式，复色光只需将其简单叠加即可。结合光的干涉基本原理[5]，两光强相同的相干光叠加后其光强为：

$$\begin{aligned} I &= I_0 + I_0 + 2I_0\cos(\Delta\varphi) \\ &= 2I_0 \cdot 2\cos^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \\ &= 4I_0\cos^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \end{aligned} \tag{6}$$

结合图 1，将牛顿环中半径为 r 处相干光的相位差带入公式：

$$\begin{aligned} I &= 4I_0\cos^2\left(2\pi \cdot \frac{2d+\frac{\lambda}{2}}{2\lambda}\right) \\ &= 4I_0\cos^2\left(2\pi \cdot \frac{2(R-\sqrt{R^2-r^2})+\frac{\lambda}{2}}{2\lambda}\right) \end{aligned} \tag{7}$$

考虑到 R 远远大于 r，r 远远大于 d，因此可使用以下近似关系：

$$d \approx \frac{r^2}{2R} \tag{8}$$

从而有：

$$I = 4I_0\cos^2\left(\frac{\pi\left(\frac{r^2}{R}+\frac{\lambda}{2}\right)}{\lambda}\right) \tag{9}$$

将上式化简可得：

$$I = 4I_0\sin^2\left|\frac{\pi r^2}{R\lambda}\right| \tag{10}$$

公式(10)即为牛顿环光强分布公式。

3.2.2 各波长光线光强对半径的分布函数

通过光栅光谱仪测得待测光源光强 I 与波长的关系，取可见光 $\lambda \in (400,760)$ nm 波段，为降低计算量，以 10nm 为步长取值，得到 37 组对应不同光强的 I，整理为光源光强矩阵：

$$i_{37\times37} = \begin{bmatrix} I_{400\text{nm}} & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & \cdots & I_{760\text{nm}} \end{bmatrix} \tag{11}$$

而牛顿环上某一点的某一波长的光强可用以下公式表示：

$$I(\lambda,r) = 4 \cdot I_\lambda\left(\sin\left(\frac{\pi r^2}{R \cdot \lambda}\right)\right)^2 \tag{12}$$

从而构造矩阵：

$$\begin{aligned} &A_{37\times n} \\ &= \begin{bmatrix} \left(\sin\left(\frac{\pi \cdot r_1^2}{R \cdot \lambda_{400\text{nm}}}\right)\right)^2 & \cdots & \left(\sin\left(\frac{\pi \cdot r_n^2}{R \cdot \lambda_{400\text{nm}}}\right)\right)^2 \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \left(\sin\left(\frac{\pi \cdot r_1^2}{R \cdot \lambda_{760\text{nm}}}\right)\right)^2 & \cdots & \left(\sin\left(\frac{\pi \cdot r_n^2}{R \cdot \lambda_{760\text{nm}}}\right)\right)^2 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{13}$$

得到最终光强与距离 r 以及波长的关系：

$$I_{37\times n} = 4iA \tag{14}$$

3.2.3 波长光强图的可视化处理

根据得到的 RGB 色匹配函数，其步长为 1nm。为减小计算量，在可见光波长范围内，以 10nm 为步长取点，可以得到了 37 个波长处 RGB 色匹配函数的具体数值，并写成了以下三个向量的形式：

$$\begin{aligned} r_{37\times1} &= \begin{bmatrix} r_{400\text{nm}} \\ \vdots \\ r_{760\text{nm}} \end{bmatrix} \\ g_{37\times1} &= \begin{bmatrix} g_{400\text{nm}} \\ \vdots \\ g_{760\text{nm}} \end{bmatrix} \\ b_{37\times1} &= \begin{bmatrix} b_{400\text{nm}} \\ \vdots \\ b_{760\text{nm}} \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{15}$$

根据 RGB 的定义式[6]：

$$R=\int_0^{\infty} I(\lambda)\bar{r}(\lambda)\,\mathrm{d}\lambda$$
$$G=\int_0^{\infty} I(\lambda)\bar{g}(\lambda)\,\mathrm{d}\lambda \tag{16}$$
$$B=\int_0^{\infty} I(\lambda)\bar{b}(\lambda)\,\mathrm{d}\lambda$$

将相应的数值带入即可，由于仅仅对37个数据进行求和，上式可以写成离散求和公式：

$$R=\Delta\lambda\sum_{i=1}^{37} r(\lambda)I(\lambda)$$
$$G=\Delta\lambda\sum_{i=1}^{37} g(\lambda)I(\lambda) \tag{17}$$
$$B=\Delta\lambda\sum_{i=1}^{37} b(\lambda)I(\lambda)$$

其中$\Delta\lambda=10\mathrm{nm}$，由此可以求得距离为圆心r处的每一点的RGB值。

3.4 多种光源的光强分布函数的测定结果以及模拟结果与实际图像的比对

利用上文所述算法计算得出不同图像的RGB矩阵，可作出如下仿真图像。图10和图11分别是小米台灯发出的白色光产生的牛顿环与仿真环的对比：

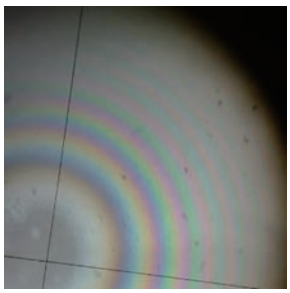


图10 小米白色光源下的牛顿环局部

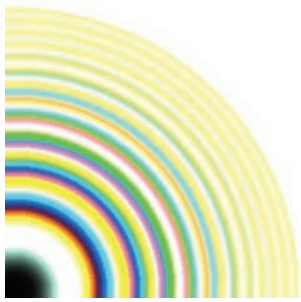


图11 小米白色光模拟牛顿环

图12和图13是公牛白光灯产生的牛顿环与仿真环的对比：

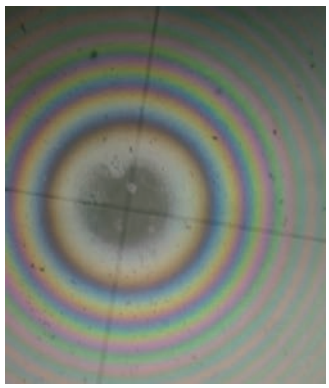


图12 公牛白光灯光源下的牛顿环

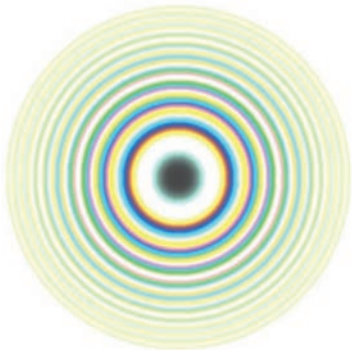


图13 公牛白光灯模拟出牛顿环

图14与图15是小米灯发出的黄光产生的牛顿环与仿真环的对比。

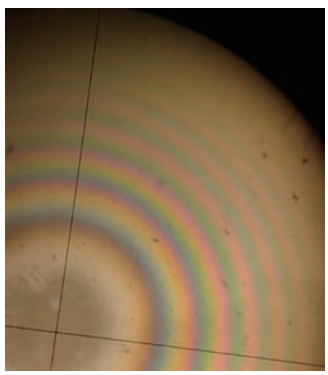


图14 小米灯黄光

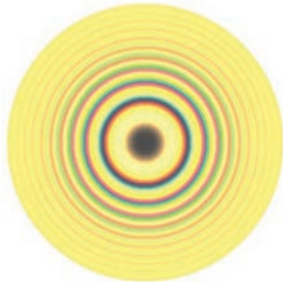


图15 小米灯黄光模拟

从以上仿真与原图的对比中可以看出，仿真牛顿环的颜色变化次序与原图相同，深色条带的宽度与其他条带宽度的比例与原图基本一致。因此，可以认为本算法对复色光牛顿环的仿真是十分成功的。

4 实验结论

本实验分析了复色光牛顿环现象不明显的原因，并设计遮光装置对其进行了改进，从而得到高对比度，色彩鲜亮的复色光牛顿环。随后从光的叠加原理出发，结合 RGB 色匹配函数，光栅光谱仪，色度学原理，相干光光强公式的复色光牛顿环进行了计算机模拟仿真。对比模拟和实验结果，图像色带排列相同，色带宽度比例相同，很好地吻合了实验结果。

在仿真算法上，实验对多种光源产生的牛顿环都进行了仿真，出色的仿真结果验证了程序算法的稳健性。同时也验证了光的叠加原理的正确性。在精度方面，仿真所设置的采样步长为 10nm，但算法的架构可以很方便地将采样步长减小至 1nm，从而大幅提升精度。

在实际应用上，本算法易于操作，仅需要输入光源的光强分布，即可输出其复色光牛顿环图像，不受设备场地环境制约，方便教学展示以及开展研究。

参 考 文 献

[1] 王蕴杰. 基于 Matlab 的牛顿环白光干涉实验仿真[J]. 大学物理实验，2014，27(4)：97-99.

[2] CIE 1931 COLOUR-MATCHING FUNCTIONS，2 DEGREE OBSERVER[EB/OL]. https://cie.co.at/datatable/cie-1931-colour-matching-functions-2-degree-observer

[3] 王红理，俞晓红，肖国宏. 大学物理实验[M]. (第 2 版). 西安：西安交通大学. 2018.08.

[4] 王书颖，李洪秀. 色度学简介(上)[J]. 大学物理，1991(7)：29-32.

[5] 吴百诗. 大学物理学(下册)[M]. 北京：高等教育出版社，2012.12.

[6] 普渡大学数字图像处理[EB/OL]. https://engineering.purdue.edu/～bouman/ece637/notes/pdf/Tristimulus.pdf

■

STUDY ON THE FRINGES OF NEWTON'S RINGS IN COMPLEX COLORS BASED ON RELATIVE SPECTRAL POWER DISTRIBUTION

XI Leyan[1] **MAO Shengchun**[2,3] **CHANG Kaige**[2,3] **ZHAI Lipeng**[2,3] **CAI Shuyang**[1] **ZHANG Junwu**[2,3]

([1] Faculty of electronic and information engineering; [2] School of Physics;

[3] National College Physics Experimental Teaching Demonstration Center, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049)

Abstract In this paper, a series of multicolor light sources are used combined with shading devices to produce brightly colored Newton rings. Then combined with the light intensity distribution curves of different light sources, the isometric interference light intensity distribution formula, the principle of chromaticity, and the RGB color matching function, the Newton ring generated by the experiment is reproduced via computer. The simulation effect is realistic and the accuracy is high, which can be applied to any light source. At the same time, experimental simulation also verifies the principle of superposition of light.

Key words iso thick interference; grating spectrometer; color matching function; computer simulation; Newton ring

复合受迫振动的研究

陈学文* 张家伟 涂静雯

（重庆科技学院数理与大数据学院，重庆 401331）

摘 要 受迫振动是大学物理课程中的重点教学内容，深入理解受迫振动对于学生学习后续专业课程能够起到十分重要的作用。本文针对2022年高教社杯全国大学生数学建模竞赛A题（简称A题），结合大学物理课程中的受迫振动知识对其进行了分析研究。针对A题中涉及到浮子和振子的垂荡运动和纵摇运动，首先从物理上分析了各种模型假设下的受迫振动微分方程组，进而运用对微分方程组做了解析计算或数值计算，并通过绘图直观展示了“振子”位移和速度随时间的变化曲线。最后针对结果做了简要讨论。

关键词 复合受迫振动；微分方程组；数值计算

机械振动是理工科《大学物理》课程中的一个重要板块，其中受迫振动作为机械振动中一个十分重要的知识点。受迫振动相比于简谐振动而言更具有一般性，是研究很多实际问题的重要模型。然而由于受迫振动对于非物理专业大一学生而言难度较大（涉及非齐次二阶常微分方程的求解），所以在一般教学中往往不作为重点内容讲解，仅仅告诉学生物理现象，对受迫振动所涉及到的微分方程的求解问题不做具体讲解。然而，受迫振动对于学生后续专业课程（如《振动力学》、《结构动力学》、《机械振动学》等）的学习十分重要。文献[1-3]针对音叉受迫振动与共振现象做了研究；文献[4]讨论了弹簧振子稳态受迫振动中的功能关系；文献[5]讨论了受迫振动的非线性特性。若能结合实际问题讨论受迫振动，则对学生理解受迫振动以及解决实际受迫振动问题大有裨益。

本文以2022年高教社杯全国大学生数学建模竞赛A题（简称A题）为例[6]，从物理角度分析研究了问题中涉及到的复合受迫振动问题。本文针对A题中的问题1和问题3做相关研究。基于对问题的分析，列出相应的受迫振动微分方程组，利用Mathematica软件做了相应的解析计算或者数值计算，并基于数值解的结果绘制了浮子和振子垂荡和纵摇时的位移和速度随时间的变化曲线。最后针对结果做了简要讨论了《大学物理》知识对后续专业课程的重要作用。

1 问题1的分析计算

1.1 问题1的描述

图1为一种波浪能装置示意图，由浮子、振子、中轴以及能量输出系统（PTO，包括弹簧和阻尼器）构成，其中振子、中轴及PTO被密封在浮子内部；浮子由质量均匀分布的圆柱壳体和圆锥壳体组成；两壳体连接部分有一个隔层，作为安装中轴的支撑面；振子是穿在中轴上的圆柱体，通过PTO系统与中轴底座连接。在波浪的作用下，浮子运动并带动振子运动，通过两者的相对运动驱动阻尼器做功，并将所做的功作为能量输出。考虑海水是无粘及无旋的，浮子在线性周期微幅波作用下会受到波浪激励力（矩）、附加惯性力（矩）、兴波阻尼力（矩）和静水恢复力（矩）。在分析下面

收稿日期：2023-05-29

基金项目：国家自然科学基金（12275036）；重庆市科委基金（cstc2021jcyj msxmX0678，cstc2021jcyj-msxm4061）；重庆市教委科学技术研究项目（KJQN202001541，KJQN202201527）；重庆科技学院教育教学改革研究项目（202072）。

通讯作者：陈学文，男，副教授，主要从事物理教学与科研工作，研究方向为理论物理，chenxuewen@cqust.edu.cn。

引文格式：陈学文，张家伟，涂静雯. 复合受迫振动的研究[C]. 2023年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会，2023.

Cite this article: CHEN X W, ZHANG J W, TU J W. Research on composite forced vibration[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education, 2023. (in Chinese)

问题时，忽略中轴、底座、隔层及 PTO 的质量和各种摩擦。

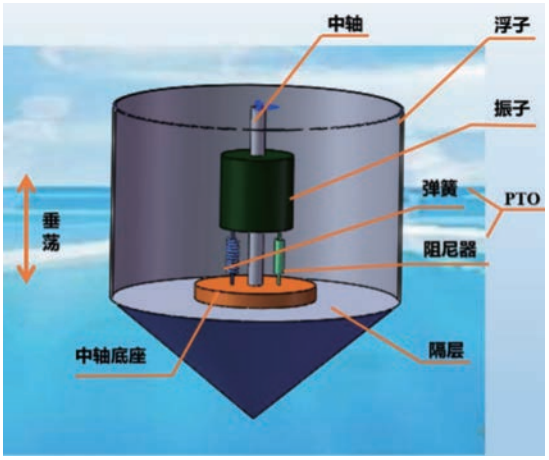


图 1　波浪能装置示意图

如图 1 所示，中轴底座固定于隔层的中心位置，弹簧和直线阻尼器一端固定在振子上，一端固定在中轴底座上，振子沿中轴做往复运动。直线阻尼器的阻尼力与浮子和振子的相对速度成正比，比例系数为直线阻尼器的阻尼系数。考虑浮子在波浪中只做垂荡运动（即沿竖直方向做受迫振动），建立浮子与振子的运动模型。初始时刻浮子和振子平衡于静水中，利用附件提供的参数值，分别对以下两种情况计算浮子和振子在波浪激励力作用下的垂荡位移和速度：(1)直线阻尼器的阻尼系数为 10000N·s/m；(2)直线阻尼器的阻尼系数与浮子和振子的相对速度的绝对值的幂成正比，其中比例系数取 10000，幂指数取 0.5。

1.2　问题 1 的分析与计算

浮子做垂荡运动（竖直方向上振动）时，会受到波浪激励力（驱动力）、附加惯性力（阻力）、兴波阻尼力、静水恢复力和内部 PTO 系统和浮子之间相互作用力的作用。振子受到浮子对它的反作用力。由牛顿第二定律可得浮子和振子的运动微分方程（组）[7]：

$$\begin{cases} m_b\ddot{z}_b = F_\omega + F_b + F_i + F_r - F_{PTO} \\ m_v\ddot{z}_v = F_{PTO} \end{cases} \tag{1}$$

其中，m_b 为浮子质量，m_v 为振子质量，$F_\omega = f\cos\omega t$ 为波浪激励力，$F_b = -\rho_w g S_b z$ 为静水恢复力，$F_i = -m_a\ddot{z}_b$ 为附加惯性力，$F_r = -R\dot{z}_b$ 为兴波阻力，$F_{PTO} = -C\dot{z}_r - kz_r$ 是内部 PTO 系统和浮子之间的相互作用力。

整理可得

$$\begin{cases} (m_b + m_a)\ddot{z}_b + R\dot{z}_b + \rho g S_b z_b + \\ C(\dot{z}_b - \dot{z}_v) + k(z_b - z_v) = f\cos\omega t \\ m_v\ddot{z}_v + C(\dot{z}_v - \dot{z}_b) + k(z_v - z_b) = 0 \end{cases} \tag{2}$$

式中 $S_b = \pi$ 为浮子转筒水平截面积，m_a 为附加惯性质量。根据题意，初始时刻浮子和振子平衡于静水中。上述微分方程组的初始条件为：$z_b(0) = 0, z_v(0) = 0, \dot{z}_b(0) = 0, \dot{z}_v(0) = 0$。

基于题目中给的数据[6]和附表提供的数据（见表 1），可将微分方程组(2)写成

$$\begin{cases} 6201.535\ddot{z}_b + 10656.3616\dot{z}_b + 111561z_b - \\ \quad 10000\dot{z}_v - 80000z_v = 6250\cos(1.4005t) \\ 2433\ddot{z}_v + 10000(\dot{z}_v - \dot{z}_b) + 80000(z_v - z_b) = 0 \\ z_b(0) = 0, z_v(0) = 0, \dot{z}_b(0) = 0, \dot{z}_v(0) = 0 \end{cases} \tag{3}$$

表 1　相关参数的具体数据

问题	问题 1	问题 3
入射波浪频率/s^{-1}	1.4005	1.7152
垂荡附加质量/kg	1335.535	1028.876
纵摇附加转动惯量/(kg·m^2)	6779.315	7001.914
垂荡兴波阻尼系数/(N·s/m)	656.3616	683.4558
纵摇兴波阻尼系数/(N·m·s)	151.4388	654.3383
垂荡激励力振幅/N	6250	3640
纵摇激励力矩振幅/(N·m)	1230	2140

对于上述微分方程组，其求解过程十分复杂，本文借助 Mathematica 做解析计算并绘图。在 Mathematica 中输入

```
eqns =
  {6201.535 x''[t] + 10656.3616 x'[t] + 111561 x[t] -
     10000 y'[t] - 80000 y[t] == 6250 Cos[1.4005 t],
                                  余弦
   2433 y''[t] + 10000 y'[t] + 80000 (y[t] - x[t]) -
     10000 x'[t] == 0, x[0] == y[0] == 0,
   x'[0] == y'[0] == 0};
sol = DSolve[eqns, {x, y}, t]
```

便可得到相应的解析结果。对解析结果作相应的化简处理，可得

$$\begin{aligned} & z_b(t) \\ &= (-0.428\mathrm{Cos}1.88t - 0.028\mathrm{Sin}1.88)\cdot e^{-0.043t} - \\ & \quad (0.006\mathrm{Cos}6.25t + 0.004\mathrm{Sin}6.25t)e^{-2.871t} + \\ & \quad 0.434\mathrm{Cos}1.4005t + 0.029\mathrm{Sin}1.4005t \end{aligned} \tag{4}$$

$$z_v(t)=(-0.476\mathrm{Cos}1.88t-0.042\mathrm{Sin}1.88t)e^{-0.043t}+(0.016\mathrm{Cos}6.25t+0.008\mathrm{Sin}6.25t)e^{-2.871t}+0.460\mathrm{Cos}1.4005t+0.036\mathrm{Sin}1.4005t \quad (5)$$

对(4)式和(5)式求导，便可得到浮子和振子的速度随时间的变化关系。图2和图3分别给出了阻尼系数为常量时浮子、振子位移与速度随时间的关系。

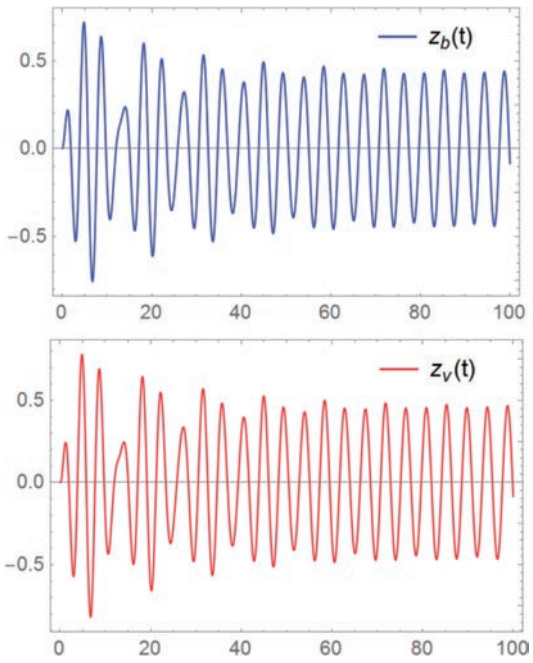


图2　阻尼系数为常量时浮子、振子位移随时间的变化

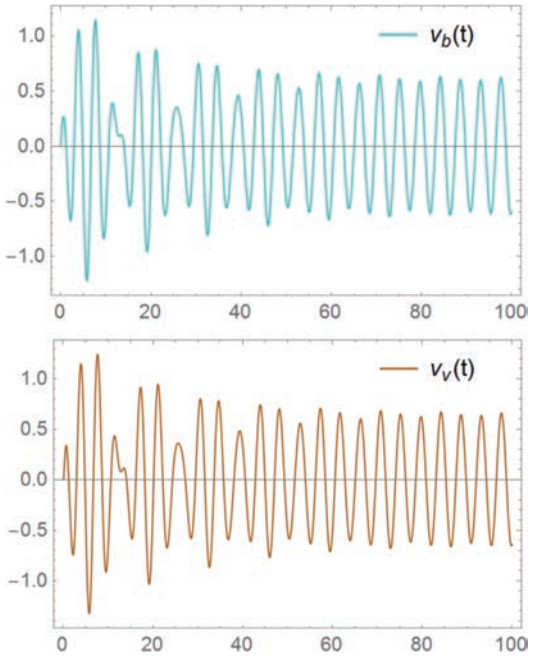


图3　阻尼系数为常量时浮子、振子速度随时间的变化

若直线阻尼器的阻尼系数与浮子和振子的相对速度的绝对值的幂成正比，其中幂指数取0.5。在此情况下，浮子和振子的运动方程为

$$\begin{cases}(m_b+m_a)\ddot{z}_b+R_a\dot{z}_b+\rho gS_bz_b+C\sqrt{|\dot{z}_b-\dot{z}_v|}(\dot{z}_b-\dot{z}_v)+k(z_b-z_v)=f\cos\omega t\\ m_v\ddot{z}_v+C\sqrt{|\dot{z}_b-\dot{z}_v|}(\dot{z}_v-\dot{z}_b)+k(z_v-z_b)=0\end{cases} \quad (6)$$

对于直线阻尼器的阻尼系数与浮子和振子的相对速度的绝对值的幂成正比的情况，结合附1提供的数据，可将方程(6)写成

$$\begin{cases}6201.535\ddot{z}_b+656.3616\dot{z}_b+31561x+10000\sqrt{|\dot{z}_b-\dot{z}_v|}(\dot{z}_b-\dot{z}_v)+80000(z_b-z_v)=6250\cos(1.4005t)\\ 2433\ddot{z}_v+10000\sqrt{|\dot{z}_v-\dot{z}_b|}(\dot{z}_v-\dot{z}_b)+80000(z_v-z_b)=0\\ z_b(0)=0,z_v(0)=0,\dot{z}_b(0)=0,\dot{z}_v(0)=0\end{cases} \quad (7)$$

上述微分方程组存在非线性项，很难得到其解析解。本文利用Mathematica对上述微分方程组做数值计算，得到了浮子和振子垂荡位移和速度随时间的关系。在Mathematica中输入

```
v =
 NDSolve[
 数值求解微分方程组
  {6210.535 x''[t] + 656.3616 x'[t] + 31561 x[t] -
     10000 √Abs[x'[t] - y'[t]] (x'[t] - y'[t]) + 80000 (x[t] - y[t]) ==
    6250 Cos[1.4005 t],
      余弦
   2433 y''[t] + 10000 √Abs[x'[t] - y'[t]] (y'[t] - x'[t]) + 80000 (y[t] - x[t]) == 0,
   x[0] == y[0] == 0, x'[0] == y'[0] == 0}, {x, y}, {t, 320}];
yplot = Plot[Evaluate[{y[t]}] /. v, {t, 0, 100}, PlotStyle → {Thickness[0.003], Red},
        绘图  计算                    绘图样式          粗细          红色
  PlotLegends → Placed[{"z_v(t)", FontFamily → "Times New Roman"}, {0.8, 0.9}],
  绘图的图例      放置              字体系列
  Background → White, Frame → True]
  背景色          白色   边框    真
dydtplot = Plot[Evaluate[{y'[t]}] /. v, {t, 0, 100},
           绘图  计算
  PlotStyle → {Thickness[0.003], Darker[Orange]},
  绘图样式          粗细              暗黑化  橙色
  PlotLegends → Placed[{"v_v(t)"}, {0.8, 0.9}], Background → White, Frame → True]
  绘图的图例      放置                  背景色          白色   边框    真
xplot = Plot[Evaluate[{x[t]}] /. v, {t, 0, 100}, PlotStyle → {Thickness[0.003], Blue},
        绘图  计算                    绘图样式          粗细          蓝色
  PlotLegends → Placed[{"z_b(t)"}, {0.8, 0.9}], Background → White, Frame → True]
  绘图的图例      放置                  背景色          白色   边框    真
dxdtplot = Plot[Evaluate[{x'[t]}] /. v, {t, 0, 100},
           绘图  计算
  PlotStyle → {Thickness[0.003], Darker[Cyan]},
  绘图样式          粗细              暗黑化  蓝绿色
  PlotLegends → Placed[{"v_b(t)"}, {0.8, 0.9}], Background → White, Frame → True]
```

便可得到浮子、振子位移与速度随时间的关系。

图4给出了直线阻尼器的阻尼系数与浮子和振子的相对速度的绝对值的幂成正比时浮子、振子位移随时间的关系。

从图2和图4可以看出，在周期性外力的驱

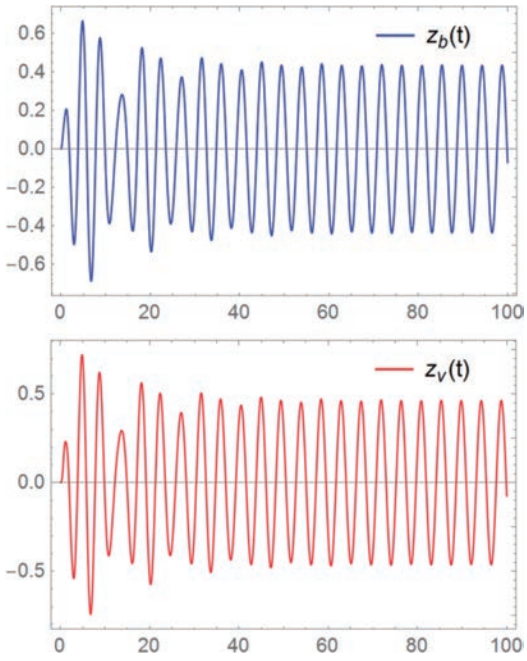


图 4　直线阻尼器的阻尼系数与浮子和振子的相对速度的绝对值的幂成正比时时浮子、振子位移随时间的关系

动下，浮子和振子经过一段时间后，做频率与周期性外力频率相同的振动，这与一般受迫振动结果是一致的。

2　问题 3 的分析计算

2.1　问题 3 的描述

如图 5 所示，中轴底座固定于隔层的中心位置，中轴架通过转轴铰接于中轴底座中心，中轴绕转轴转动，PTO 系统连接振子和转轴架，并处于中轴与转轴所在的平面。除了直线阻尼器，在转轴上还安装了旋转阻尼器和扭转弹簧，直线阻尼器和旋转阻尼器共同做功输出能量。在波浪的作用下，浮子进行摇荡运动，并通过转轴及扭转弹簧和旋转阻尼器带动中轴转动。振子随中轴转动，同时沿中轴进行滑动。扭转弹簧的扭矩与浮子和振子的相对角位移成正比，比例系数为扭转弹簧的刚度。旋转阻尼器的扭矩与浮子和振子的相对角速度成正比，比例系数为旋转阻尼器的旋转阻尼系数。考虑浮子只做垂荡和纵摇运动（参见附录 2），建立浮子与振子的运动模型。初始时刻浮子和振子平衡于静水中，利用表 1 和表 2 提供的参数值（波浪频率取 $1.7152\mathrm{s}^{-1}$），假定直线阻尼器和旋转阻尼器的阻尼系数均为常量，分别为 10000N·s/m 和 1000N·m·s，计算浮子与振子在波浪激励力和波浪激励力矩 $f\cos\omega t$，$L\cos\omega t$（f 为波浪激励力振幅，L 为波浪激励力矩振幅，ω 为波浪频率）作用下垂荡位移与速度和纵摇角位移与角速度。

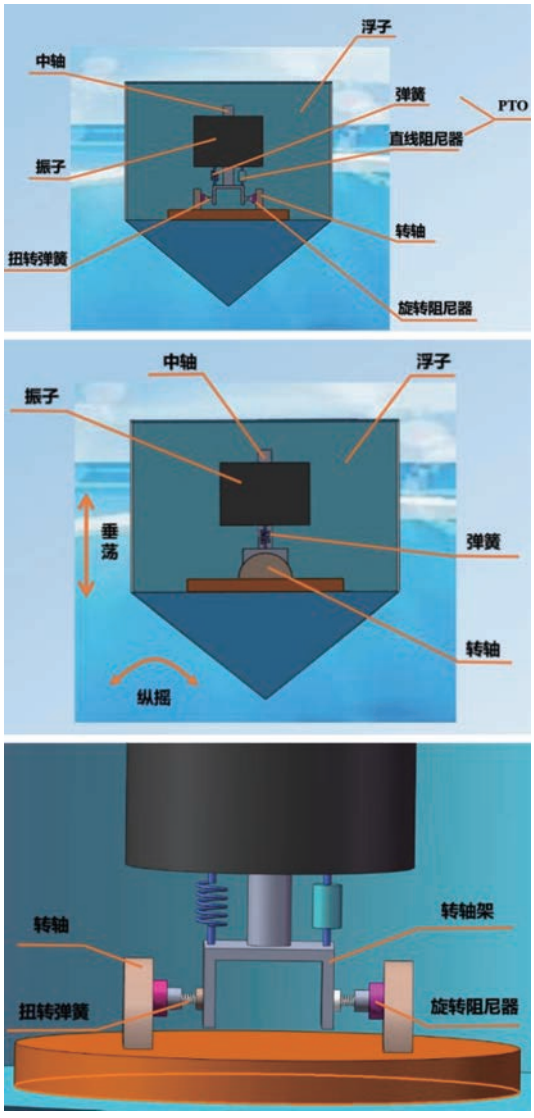


图 5　波浪能装置不同侧面的示意图

2.2　问题 3 的分析与计算

该问不仅需要考虑浮子的垂荡运动还要结合纵摇运动（参见附录），建立浮子在双重影响下的运动状态中的受力分析，并根据能量守恒定律测算各方向力的大小，最后需要将求解得出的浮子与振子垂荡位移与速度和纵摇角位移与角速度。

浮子和振子同时做垂荡和纵摇运动，令 $u(\theta, t)$ 为浮子位移函数，将垂荡和纵摇看成两个独立的运动分别用 $\theta(t)$ 和 $z(t)$ 来表示。对于浮子的垂

荡，类似于问题1处理，可将其振动方程写成

$$\begin{cases} m_b\ddot{z}_b = F_\omega + F_b + F_i + F_r - F_{\mathrm{PTO}} \\ m_v\ddot{z}_v = F_{\mathrm{PTO}} \end{cases} \tag{8}$$

代入相应数据后（见表2），可得

$$\begin{cases} 5894.876\ddot{z}_b + 683.4558\dot{z}_b + 31561z_b + 10000(\dot{z}_b - \dot{z}_v) + 80000(z_b - z_v) = 3640\cos(1.7152t) \\ 2433\ddot{z}_v + 10000(\dot{z}_v - \dot{z}_b) + 80000(z_v - z_b) = 0 \\ z_b(0) = 0, z_v(0) = 0, \dot{z}_b(0) = 0, \dot{z}_v(0) = 0 \end{cases} \tag{9}$$

表2 相关参数

参数	取值
浮子质量/kg	4866
浮子底半径/m	1
浮子圆柱部分高度/m	3
浮子圆锥部分高度/m	0.8
振子质量/kg	2433
振子半径/m	0.5
振子高度/m	0.5
海水的密度/(kg/m^3)	1025
重力加速度/(m/s^2)	9.8
弹簧刚度/(N/m)	80000
弹簧原长/m	0.5
扭转弹簧刚度/(N·m)	250000
静水恢复力矩系数/(N·m)	8890.7

图6给出了浮子和振子垂荡位移与速度随时间的关系。

对于纵摇运动，浮子和振子受到各种合外力矩，在合外力矩作用下作往复摆动。

$$\begin{cases} I_b\ddot{\theta}_b = M_\omega + M_b + M_i + M_r - M_{\mathrm{PTO}} \\ I_v\ddot{\theta}_v = M_{\mathrm{PTO}} \end{cases} \tag{10}$$

其中，I_b 为浮子纵摇时绕旋转点的转动惯量，I_v 为浮子纵摇时绕旋转点的转动惯量，$M_\omega = L\cos\omega t$ 为波浪激励力矩，M_b 为静水恢复力矩，M_i 为附加惯性力矩，M_r 为兴波阻力矩，M_{PTO} 是内部PTO系统和浮子之间的相互作用力矩。

若要获得上述方程的解，需要首先求解出振子和浮子相对于转轴的转动惯量。在纵摇过程中，浮子和振子均沿着转轴转动。浮子质量均匀分布，根据其几何尺寸和总质量（表2），可得圆柱

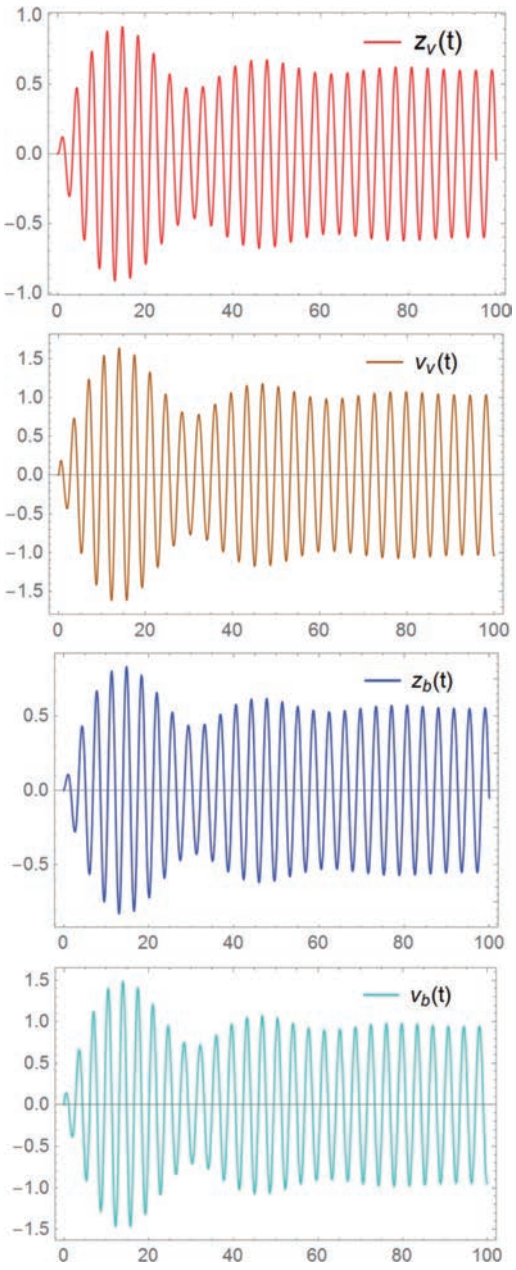


图6 浮子和振子垂荡位移与速度随时间的关系

壳体和圆锥壳体的质量分别为4010kg和856kg。圆柱壳体可看成是无数个均匀细棒元构成。根据平行轴定理 $I = I_C + md^2$，可得每个均匀细棒元相对于转轴的转动惯量为

$$\mathrm{d}I = \left(\frac{1}{12}l^2 + d^2\right)\mathrm{d}m \tag{11}$$

对所有均匀细棒元求和（积分），可得

$$I_{\text{圆筒}} = \left[\frac{1}{12}3^2 + (1^2 + 1.5^2)\right]4010 = 16040\,\mathrm{kg\cdot m^2} \tag{12}$$

同理可得圆锥筒绕转轴的转动惯量为 $I_{\text{圆锥}} =$

451.34kg·m^2。浮子绕定点的转动惯量为

$$I_b=16491.34\text{kg}\cdot\text{m}^2 \tag{13}$$

同样，根据平行轴定理可得振子相对于转轴的转动惯量为

$$I_v=\frac{1}{12}ml^2+md^2=547.76\text{kg}\cdot\text{m}^2 \tag{14}$$

需要说明的是，在计算时统一取静止时弹簧相对于转轴的转动惯量（此时弹簧的压缩量为 $\Delta z=m_v g/k=0.298\text{m}$），没有考虑弹簧形变时带来的转动惯量的微小改变。

结合表 1 中的数据，可得

$$\begin{cases}23663.833\ddot{\theta}_b+654.3383\dot{\theta}_b+8890.7\theta_b+\\1000(\dot{\theta}_b-\dot{\theta}_v)+250000(\theta_b-\theta_v)\\=1690\cos(1.7152t)\\547.76\ddot{\theta}_v+1000(\dot{\theta}_v-\dot{\theta}_b)+250000(\theta_v-\theta_b)=0\\\theta_b(0)=0,\theta_v(0)=0,\dot{\theta}_b(0)=0,\dot{\theta}_v(0)=0\end{cases} \tag{15}$$

利用 Mathematica 对上述微分方程组做解析计算，化简后的结果为

$$\begin{aligned}&\theta_b(t)\\&=(7.84\text{Cos}0.34t-0.50\text{Sin}0.34t)\times10^{-3}e^{-0.0098t}-\\&(0.57\text{Cos}22.9t-1.15\text{Sin}22.9t)\times10^{-4}e^{-9.125t}-\\&0.00778\text{Cos}1.7152t+0.00138\text{Sin}1.7152t\end{aligned} \tag{16}$$

$$\begin{aligned}&\theta_v(t)\\&=(7.84\text{Cos}0.34t-0.50\text{Sin}0.34t)\times10^{-3}e^{-0.0098t}+\\&(\text{Cos}22.91t-0.52\text{Sin}22.91t)\times10^{-4}e^{-9.125t}-\\&0.00794\text{Cos}1.7152t+0.00137\text{Sin}1.7152t\end{aligned} \tag{17}$$

可计算出浮子和振子垂荡位移和速度随时间的关系。图 7 分别给出了浮子的角位移与角速度随时间的关系。从图 7 可以看出，做纵摇运动时，浮子和振子的受迫振动图像和一般的受迫振动有所不同，振动频率最终与波浪驱动力的频率相同，但振幅存在某种“周期性变化”。

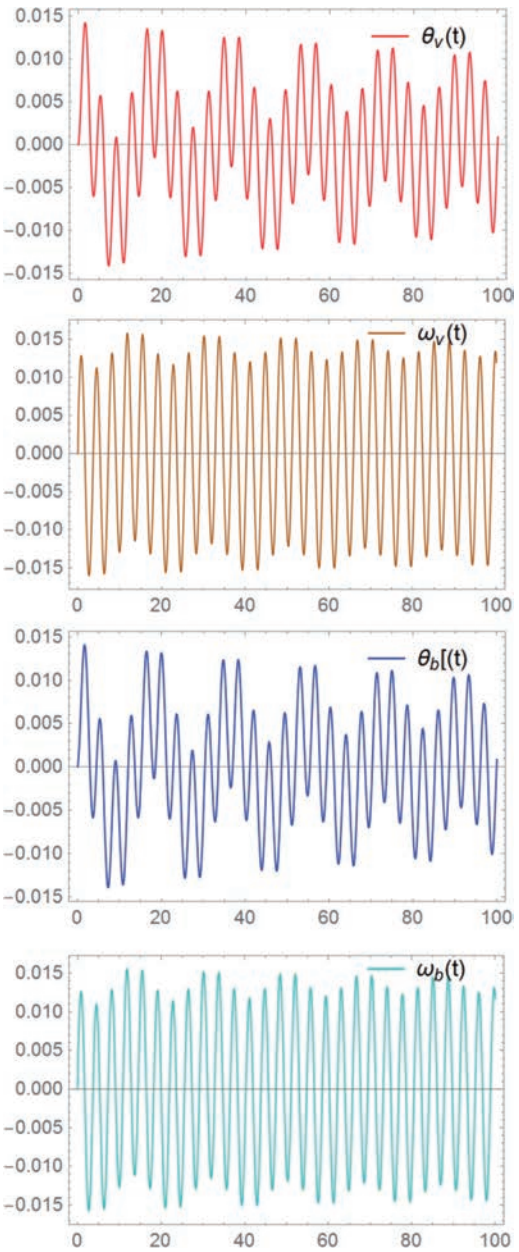


图 7　浮子和振子纵摇角位移与角速度随时间的关系

3　总结

本文以 2022 年高教社杯全国大学生数学建模竞赛 A 题为例讨论了受迫振动在波浪能发电中的应用。利用绘图软件可以清晰地展示受迫振动中浮子和振子的位移随时间的变化曲线。受迫振动是一种很复杂的运动，涉及到弹簧振子在固有频率、驱动力以及阻力三者之间的相互协调。但不论参数如何变化，最后的运动都会趋于一个较为稳定的周期性振动。

受迫振动是一个重难点，在一般大学物理课堂上讲解受迫振动时，往往是给出结论，并例举几个关于受迫振动和共振的例子。由于受迫振动微分方程是二阶线性非齐次微分方程，其求解过程较为繁琐，加之学生相应的数学基础较弱，对受迫振动微分方程的求解过程不讲，由此导致学生对该知识点的掌握程度很浅，只知道一些现象，完全不懂现象背后的物理规律。

若能在课程中对受迫振动做深入研究，利用

Mathematica等相关软件对此做解析解，结合振动图像做物理分析；进而例举实际例子讨论受迫振动的应用，比如本文中的波浪能发电。一方面可以让学生体会到所学知识的是实际应用，另一方面还可以以此来进行课程思政：在国家“双碳目标”的推进下，清洁能源越来越成为能源未来发展的主流方向，国务院印发的《2030年前碳达峰行动方案》明确能源是经济社会发展的重要物质基础，也是碳排放的最主要来源。要坚持安全降碳，在保障能源安全的前提下，大力实施可再生能源替代，加快构建清洁低碳安全高效的能源体系，其中就包括要高效可用海洋能源，推进波浪能发电应用[8]。

此外，在新工科建设背景下，在大学物理课堂上，基于实际情况（如结合学生专业、学生数学基础等），适当讲一些稍稍超出课程要求的知识内容（例如本文中涉及到的复合受迫振动，利用矢量分析＋毕奥萨伐尔定律推导真空中载流圆线圈、螺线管空间任一点的磁感应强度[9,10]等），并充分利用计算机软件进行辅助计算、绘图，反而会激发学生兴趣，提高教学效果。

附录

波浪能装置（浮子、振子）同时做垂荡和纵摇运动示意图。



垂荡纵摇运动示意图

参 考 文 献

[1] 张慧，康秀英. 音叉受迫振动与共振现象的研究[J]. 大学物理. 2017，36(10)：65-67.
ZHANG H，KANG X Y. Research on tuning Fork's forced vibration and resonance phenomenon[J]. College Physics，2017，36(10)：65-67.（in Chinese）

[2] 郭悦韶. 音叉受迫振动的实验研究[J]. 实验室科学. 2020，23(5)：40-43.
GUO Y S. Experimental research on tuning fork's forced vibration[J]. Laboratory Science，2020，23(5)：40-43.（in Chinese）

[3] 李朝刚，羿世凡，彭雪城等. 不同条件下阻尼片对音叉受迫振动的影响[J]. 大学物理. 2020，39(6)：27-32.
LI C G，YI S F，PENG X C，*et al*. Influence of damping sheets on the forced vibration of tuning fork under different conditions[J]. College Physics，2020，39(6)：27-32.（in Chinese）

[4] 丁红胜，王佳曦，张师平等. 受迫振动非线性特性的教学拓展[J]. 大学物理，2021，40(2)：12-17.
DING H S，WANG J X，ZHANG S P，*et al*. Teaching development of the nonlinear characteristics of forced vibration[J]. College Physics，2021，40(2)：12-17.（in Chinese）

[5] 黄时中，谢丽莎. 弹簧振子稳态受迫振动中的功能关系[J]. 大学物理，2014，33(9)：15-19.
HUANG S Z，XIE L S. Relation between the work and energy in stable forced vibration of a spring[J]. College Physics，2014，33(9)：15-19.（in Chinese）

[6] http://www.mcm.edu.cn/.

[7] 张万超，周亚辉，周效国. 振荡浮子式波能转换装置动力输出系统特性研究[J]. 振动与冲击，2020，39(11)：38-44.
ZHANG W C，ZHOU Y H，ZHOU X G. Power take-off mechanism analysis of oscillating-buoy wave energy converter[J]. Journal of vibration and shock，2020，39(11)：38-44.（in Chinese）

[8] http://news.sohu.com/a/560538750_121395128.

[9] 陈学文，吴莲，张家伟等. 载流线圈和有限长直螺线管磁场的理论分析与讨论[J]. 大学物理，2019，38(10)：23-27.
CHEN Xuewen，WU Lian，ZHANG Jiawei，*et al*. Theoretical analysis and discussion on magnetic field of current-carrying coil and finite-length straight solenoid[J]. College Physics，2019，38(10)：23-27.（in Chinese）

[10] 陈学文，谢腾辉，张家伟等. 亥姆霍兹线圈磁场的理论计算与实验讨论[J]. 西南师范大学学报（自然科学版）. 2020，45(3)：40-45.
CHEN Xuewen，XIE Tenghui，ZHANG Jiawei，*et al*. On Theoretical Calculation and Experimental Discussion of Magnetic Field Due to Hemholtz Coil[J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science). 2020，45(3)：40-45.（in Chinese）

■

RESEARCH ON COMPOSITE FORCED VIBRATION

CHEN Xuewen ZHANG Jiawei TU Jingwen

(Department of Math&Phys and Big data, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing 401331)

Abstract Forced vibration is a key teaching content in university physics courses. Deep understanding of forced vibration can play a crucial role in students' subsequent professional courses. In this paper, we combine with the forced vibration in university physics courses, to analyze Question A of the 2022th National College Student Mathematical Modeling Competition of the Higher Education Society Cup (abbreviated as Question A). For the heave and pitch motion of the buoy and oscillator involved in question A, we give the differential equations of forced vibration firstly, then we give the analytical or numerical results by Mathematica. The relationship of the displacement and velocity with respect to the "oscillator" with time are visually displayed through figures. Finally, a brief discussion is conducted on the results.

Key words composite forced vibration; differential equation system; numerical calculation

项目式学习在大学物理课程中的实践探索

王　锋　姜海丽　刘晓瑜　王晓峰　张晓峻*
（哈尔滨工程大学物理与光电工程学院，黑龙江 哈尔滨　150001）

摘　要　从培养“新工科”人才的教育目标出发，探索了在大学物理教学过程中融入项目式学习方法的教学设计方案及实施途径。总体教学设计由理论教学及项目实践两部分构成。在理论教学环节中，采用线上线下混合式教学，对课前、课堂、课后教学过程进行了重构，旨在更好地实现理论引导；在项目实践环节中，参考科研项目研究流程，让学生围绕具体问题进行项目方案的设计、论证、实施及总结，旨在以项目为驱动，全面提升学生跨学科知识融合能力，培养锻炼其系统思维和创新思维。以大学物理中“磁学”部分的教学内容为依托，设计并开展了基于项目式学习的教学实践，并取得了良好的教学效果。

关键词　新工科；大学物理及实验；项目式学习

2017年教育部提出“新工科”建设的新理念、新标准、新模式、新方法、新技术、新文化，实现从学科导向转向产业需求导向、从专业分割转向跨界交叉融合、从适应服务转向支撑引领[1,2]。我国高等教育教育需要面向工业界、面向世界、面向未来培养符合经济社会发展需要的合格工程师后备人才。高校作为国家的人才培养基地和研发的骨干力量，探索在核心技术研发过程中培养具备科学精神、工程思维、实践能力的高级工程创新人才的教学新模式十分必要[3,4]。

项目式学习（PBL：Project-based Learning）是当前 STEM（集 Science、Technology、Engineering、Mathematics 的综合教育）教育中关注度较高的一种教学模式[5]。教学过程中，由传统教学中以老师讲授为主导，转向以学生为中心、以问题为导向的教学模式。在完成项目的过程中，学生必须整合各个相关学科的知识，和团队成员密切配合来解决各种问题。在项目推进过程中，学生自发进行的探究、沟通、创新和协作等行为，最终形成多种形式的学习成果并相互交流分享，有利于促进学生知识体系的构建，发展学生的高阶思维模式，这是传统教学模式无法触及的。通过项目从易到难、由浅及深的合理规划，不仅可以夯实学生对基础知识的理解、锻炼学生对知识的应用能力，更能激发学生自主学习的兴趣，同时培养学生团队协作的意识，可以全方位地、持续地提升学生的综合素质[6]。

大学物理是高等院校理工类各专业大学生的一门重要的公共基础必修课，是各理工科专业课的重要前续课程，大学物理教学过程中传递给学生的物理基础知识，尤其是对学生学习模式、思维方式的引导，将对后续专业课程的学习产生重要的影响[7]。结合“新工科”背景下的人才培养需求以及物理课程理论和实验并重的课程特点，在大

收稿日期：2023-05-29
基金项目：黑龙江省教学改革项目（SJGY20210169，SJGY20210178），教育部产学合作协同育人项目（220506071234345，220506528264452），哈尔滨工程大学教学改革项目（JG2022B2506）。
作者简介：王锋，男，讲师，主要从事大学物理及大学物理实验教学工作，研究方向为嵌入式系统，wangfeng@hrbeu.edu.cn。
通讯作者：张晓峻，男，副教授，主要从事大学物理实验教学工作研究方向为光电传感技术应用，zhangxiaojun@hrbeu.edu.cn。
引文格式：王锋，姜海丽，刘晓瑜，等. 项目式学习在大学物理课程中的实践探索[C]. 2023年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会，2023.
Cite this article：WANG F，JIANG H L，LIU X Y，et al. Practical exploration of project-based learning in university physics[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education，2023.（in Chinese）

学物理教学过程中开展项目式学习可以更好地发挥课程基础性、前瞻性和衔接性作用，更有针对性地满足各理工科专业需求，在更广维度上提升学生素质，在更高程度上助力新工科人才的培养[8,9]。

因此，在新工科背景下，在面向新工科人才培养需求，聚焦战略需求，深化高等教育改革发展的新形势下，在大学物理教学过程中展开项目式学习人才培养模式的探究与实践，融合工科物理的理论与实验部分，培养学生的物理思维能力、科学实验能力、交叉融合能力及实践创新能力，全方位提高学生的各方面综合素质，以适应新工科背景下人才培养的新需求。

1 项目式学习教学设计介绍

我校基础物理教学中心将理论教学和实验教学有机融合、二度创新，由传统单一的讲授教学模式，转变为理论融合实践的新型项目式学习，教学设计如图 1 所示。通过教学内容更新及教学方法改进等一系列手段打造智慧教学课程平台，力求课程教学深入浅出，培养学生物理思维能力。教师团队通过通识物理实验及基础物理实验打造思维探索实训平台，培养学生科学实验能力。通过类科研流程的项目实践过程，让学生围绕具体问题进行项目方案的设计及实施，培养学生的交叉融合能力及实践创新能力。教学设计中的具体实施途径由理论教学及项目实践两部分构成。

1.1 理论教学

理论教学以学生发展为中心，采用线上线下混合式教学，对课前、课堂、课后教学过程进行重构。

课前通过线上雨课堂平台向学生推送课前导学课件，突出问题导向，激发学生学习内驱力，学会自主获取、自主学习，最后通过自我检查，个性化标记重难点，数据同步反馈给教师，为精准化课堂教学做好铺垫。

线下课堂由兴趣导入，根据预习反馈数据做重难点剖析，融入工程案例，将教学内容作拓展应用，扩展学生物理视野及思维。

课后充分利用国家级精品视频公开课与省精品在线开放课程等慕课资源及智慧课件，引导学生先慕课学习，巩固提升，然后自我检测、查漏补缺，之后扩展阅读、感知科技前沿，最后大胆创新、挑战自我。

在理论教学中引入研讨式课堂，以翻转课堂的形式进行。由教师提供生活、工程、科研前沿等研讨类问题，通过建立开放的课堂文化，让学生敢于提问，敢于发表观点；通过头脑风暴的形式激活学生的思路，丰富学生完成项目的素材。让学生分组进行讨论交流，碰撞出思想的火花。

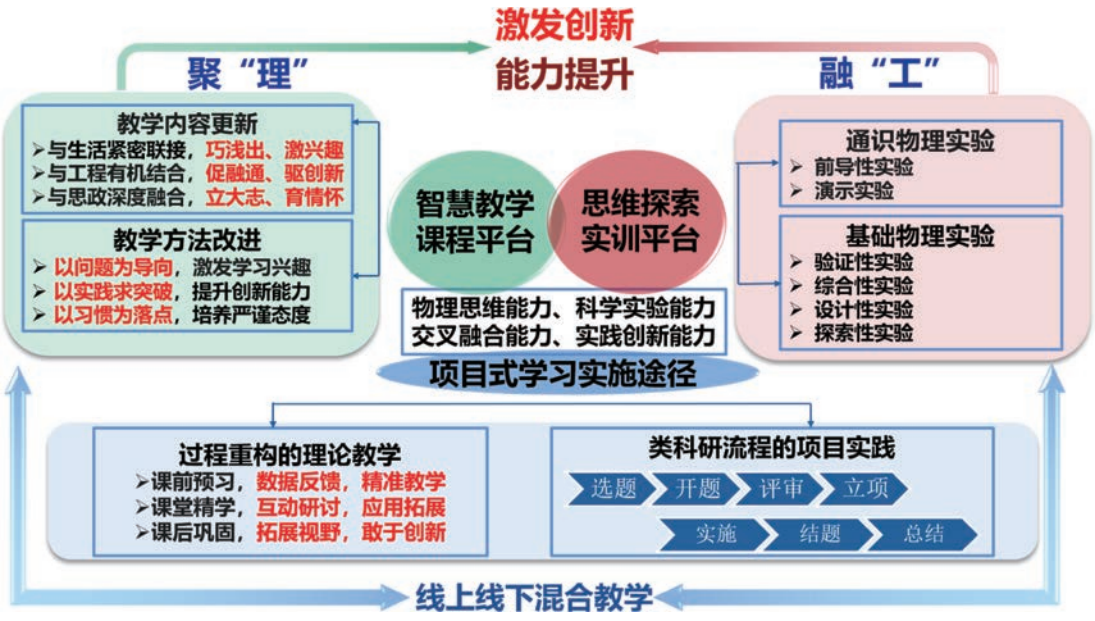


图 1 项目式学习教学设计

1.2 项目实践

项目式学习的实践部分依托于我校国家级物理实验教学示范中心，在大学物理实验课程中除原有通识物理实验、基础物理实验外，增加开设了项目式学习的实践环节。显然，参与到项目式学习的实践部分，对于学生的自主学习能力要求较高，所以并不适合向全体学生开放，因此项目实践环节设置为选修环节，对于参与到项目实践环节的同学给予实验成绩加分，以吸引更多学生参与到项目实践的教学环节中来。

项目实践环节参考科研项目研究流程，这样可以让学生们提前了解如何进行科学研究。由教师根据本学期教学内容提供选题；由学生组成团队，通过研讨、咨询教师、查阅文献资料等手段，对项目提出合理的方案，要求方案中要至少包含项目方案的实验原理、技术路线、执行计划、人员分工、所需仪器设备及所需费用等，进行开题答辩；再由教师进行点评及指导，遴选出设计合理，可操作性强的优秀项目方案给予场地、设备及经费的支持；在项目的实施阶段，教师将指出设计方案的问题所在，在技术上对学生加以适当指导；项目实施完成后，教师组织学生团队对项目作品进行展示，学生们可以交流分享实施过程中的点点滴滴，互相学习，反哺教学；最终鼓励学生将项目实施成果加以总结，积极参加相关的大学生科创竞赛，或以发表科研文章、申请专利、制作设备仪器等方式对项目成果加以推广。

在项目实践环节中，学生通过“计划、探究、表达”的活动环节进行协作学习，教师仅以项目管理者的身份介入。

1.3 课程思政

党的十八大以来，我国更加注重原创导向，充分发挥着基础研究对科技创新的源头供给和引领作用，基础研究投入持续大幅提升，物理学科属于基础学科，是国家关注的学科之一。

项目式学习过程中，学生应用所学，学以致用，通过自主查找大量相关资料并学习相应内容，丰富已掌握基础知识，真正做到对基础理论活学活用。物理思维与创新精神不是老师在课堂中能够教授好的，而是学生有意识地、并不断坚持锻炼出来的，这正是工匠精神，锲而不舍。在项目式学习的实践过程中，学生们解决了实际问题，建立起工程思维；对项目内容进行自主探索学习，并不断完善优化项目内容，扩充已有的知识框架；通过分析关键难点，最终总结而形成物理思维。

学生在挑战项目的过程中，运用基础知识和自学内容，解决团队项目难题。一方面，在自主学习过程中，通过不断挑战自我，提升自我学习能力。另一方面，在团队工程规范要求下，每个个体都参与到集体项目中，通过团队协作实现共同目标。

2 项目式学习实施

考虑到参与项目实践需要一定的工程经验，对于来到本科第三学期即大学二年级的学生应已经有了一定的理论基础知识，部分同学已经开始参与到大学生电学、物理、机械等相关竞赛，积累了一定的工程基础知识，具备了参与项目式学习的基本能力。所以，大学物理课程中的项目式学习选在了第三学期开展。

我校本科学生第三学期中的大学物理是整体大学物理课程的下半部分，由“磁学”、“热学”、“近代物理”三部分构成，共计72学时，其中“磁学”部分由18学时的稳恒磁场及16学时电磁感应两部分构成，共计34学时。磁场的相关技术在国防、军事及生活中有着广泛的应用，项目式学习的内容选在了恒定磁场部分。

在2022年秋季学期中实施了“磁学”内容的项目式学习，对相应的教学内容及进度进行了调整。在理论教学部分，进一步增加磁场相关技术的工程应用案例的内容，并开展反转课堂，组织学生们对工程案例的进行积极研讨，让学生们深入了解如何把一个个的概念、定理、定律、公式等转换为国防、军事及生活中的相关应用，扩展学生视野。在物理实验教学环节中，对于已有电磁学基础实验，在实验原理中进一步增加相关实验的仪器设计思路、仪器内部构成、仪器成本及生产等工程应用方面的内容，让学生们对仪器的设计、制造、组装、生产等有进一步的了解，为项目实践环节打下一定基础。具体项目式学习实施计划如图2所示。

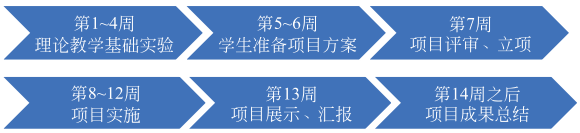


图2 项目式学习实施计划

在完成前4周的恒定磁场部分理论教学后，给学生们提供了两个可选的项目内容："磁场的测量"及"磁力的测量"。让学生们3～5人组成团队，学生团队在第5～6周中，可以通过成员研讨、咨询教师、查阅参考文献等等渠道来设计所选题目的项目方案，要求学生团队的项目方案中至少要包含项目方案的实验原理、技术路线、执行计划、人员分工、所需仪器设备及所需费用等等项目实施细节。最终在我校共有15组学生团队参与到了选做的项目实践环节。

在第7周，基础物理教学中心组织理论教学及实验教学的部分老师对学生团队的项目方案进行了立项评审，要求学生将项目方案制作成PPT并进行口头汇报，教师团队听取了学生团队介绍的项目方案后，对设计方案提出自己的看法，指出设计方案中的优势与不足，提出设计方案的修改意见。最终遴选出5个设计合理，可操作性强的优秀项目方案，中心给予场地、设备及经费的支持，帮助学生们实现自己的设计方案。

在第8～12周中，学生团队将理论付诸实践，按照设计方案进行计算、仿真、设计图纸、准备实验器材、搭建实验环境、设计实验方案、进行实验操作及数据分析等等步骤，并根据具体情况调整、优化整体设计方案。教师为学生在器材选型及筹备、实验环境创设等方面提供适当的帮助，并在技术上对学生加以指导。通常，学生在获取初步实验结果后，会进一步发现设计方案中存在的一些问题，这对提升学生分析问题、解决问题、运用技术的能力具有促进作用，也能对学生的创造能力予以培养。

在第13周，要求由学生团队展示项目作品。设计原理、实验结论、仪器的应用、方案实施的困难、方案下一步的计划、学生心得等等均可作为展示的内容。在作品展示过程中，学生能够进一步掌握相关理论知识及其应用技巧，同时，学生的组织能力、语言表达能力能够得到锻炼。然后，基础物理教学中心再次组织理论教学及实验教学的部分老师对学生团队的项目作品进行了结题评审，教师团队在深入了解学生团队的项目实施过程、实验结论、作品实物后，指出项目作品中的优势与不足，并给出项目作品下一步发展的建议。

在项目结题评审之后，教师团队进一步持续关注学生团队项目方案的成果总结及后续发展，鼓励学生们通过多种形式将项目成果加以推广：利用团队项目方案实施成果积极参加相关的大学生科创竞赛；将计算结果、仿真结果、测量数据等等加以总结，撰写科研论文；将项目方案所设计的测量方案加以总结，申请发明专利；将项目方案中所制作设备仪器进一步完善，用于课堂教学或实验教学的演示，甚至加以推广销售。

3 项目案例分享：载流螺绕环的磁场测量装置

在磁学部分的理论教学中，磁场的安培环路定理的应用，有两个较为经典的例题：载流直螺线管的磁场分布及载流螺绕环内的磁场分布，其中，载流螺绕环内的磁场分布更为复杂。一个由5名同学构成的学生团队针对"磁场的测量"题目提出了"载流螺绕环的磁场测量装置"的项目方案，方案中包含从理论分析、仿真计算、仪器制作并进行实验测量等多方面出发，多层次、深入地对螺线环内部磁场分布进行分析及测量。

3.1 理论分析

将 N 匝细导线密绕在内径为 R_1，外径为 R_2 的圆环上，通过线圈的电流强度为 I，称为载流螺绕环，如图3所示。



图3 螺绕环示意图

根据圆的对称性可知，在与环共轴的圆周上磁感应强度的大小相等，方向沿圆周的切线。取与螺绕环共轴的圆形有向安培环路，利用安培环路定理可计算出螺绕环磁场分布。

$$\oint_l \boldsymbol{B}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{l}=2\pi rB=\mu_0 NI \tag{1}$$

$$B=\mu_0\frac{N}{2\pi r}I \quad (\text{环内}:R_1<r<R_2) \tag{2}$$

$$B=0 \quad (\text{环外}:r<R_1, r>R_2) \tag{3}$$

3.2 实验方案

选择使用截面积为 $1\mathrm{mm}^2$ 的漆包线绕制内径为0.20m、外径为0.32m、高度为0.10m、匝数分别为100匝和200匝的两个螺线环。

选择霍尔元件作为磁场测量的传感单元，在

教师的指导下选择了线性砷化镓霍尔器件 MG610，此器件灵敏度高且采用超薄型 SSOT-4 封装，厚度仅为 0.6±0.05mm。可以设计带有刻度线的印刷电路板，将 MG610 焊接在电路板上并插入螺线环内进行磁场测量。

设计并加工用于磁场测量装置的印刷电路板，搭建实验环境，设计载流螺绕环内部磁场分布的相关测量实验，设计合理的数据处理方案并进行误差分析。

3.3　仿真计算

学生团队根据设计方案中的螺绕环的结构参数，使用 SolidWorks 建立三维螺绕环几何模型，再导入到多物理场仿真分析软件 COMSOL Multiphysics 中，建立有限元仿真模型，配置仿真数据、相关求解器数据及编译求解方程，模拟仿真出载有恒定电流的螺绕环内部磁场分布，如图 4 所示，并将理论计算结果与仿真结果相比较。

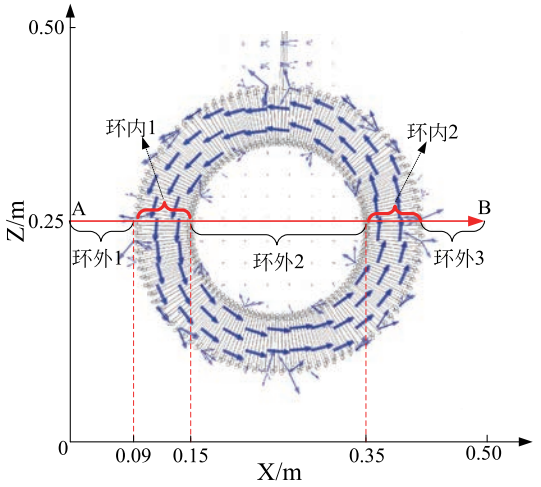


图 4　载流螺线环磁感应强度分布截面图

3.4　仪器制作

为了便于固定及移动焊有霍尔器件的印刷电路板，在教师的建议下，学生团队尝试利用 3D 打印技术制作了一个较为简单的导轨，如图 5 所示。



图 5　3D 打印导轨

根据霍尔效应测量磁场的方案，学生团队设计了霍尔电压的信号放大电路及两个恒流源电路：螺线环的励磁电流与霍尔器件的工作电流。由于本学生团队中暂无单片机编程开发的能力，故在教师的指导下采用了可以将模拟量转换数字量并通过数码管显示的 ICL7107 芯片，电路图如图 6 所示。

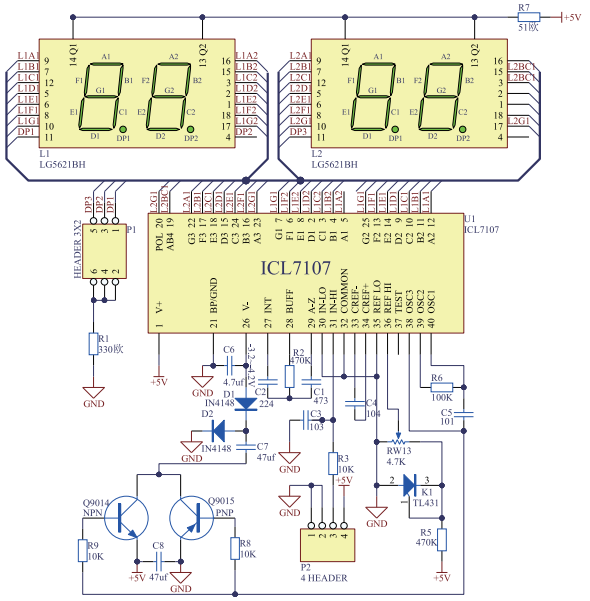


图 6　模拟量测量显示电路

3.5　实验测量

学生团队利用制作并组装完成的测量仪器分别完成了设计方案中的两个实验：螺绕环内部磁感应强度与励磁电流的关系；螺绕环内部磁感应强度与环路半径的关系。并在教师的建议下增加螺绕环内磁介质（空气）磁导率的测量实验。

学生团队针对实验原理及实验的测量数据设计了合理的数据处理方案，包括曲线改直，最小二乘法等，如图 7 所示。

测量仪器整体装置如图 8 所示：

3.6　项目成果

将学生团队的项目成果带进课堂进行演示，让其他同学也可以更加直观的了解螺绕环内部测量分布；同时，让团队成员分享项目实施的心得，增加其他学生参与到科学研究中的兴趣。

学生团队以项目成果参加了 2022 年第八届全国大学生物理实验竞赛，并荣获二等奖。

由整体项目的实施过程可以看出，虽然学生项目方案中所涉及的物理问题比较简单，但学生团队在实施过程中进行了理论分析、COMSOL 仿

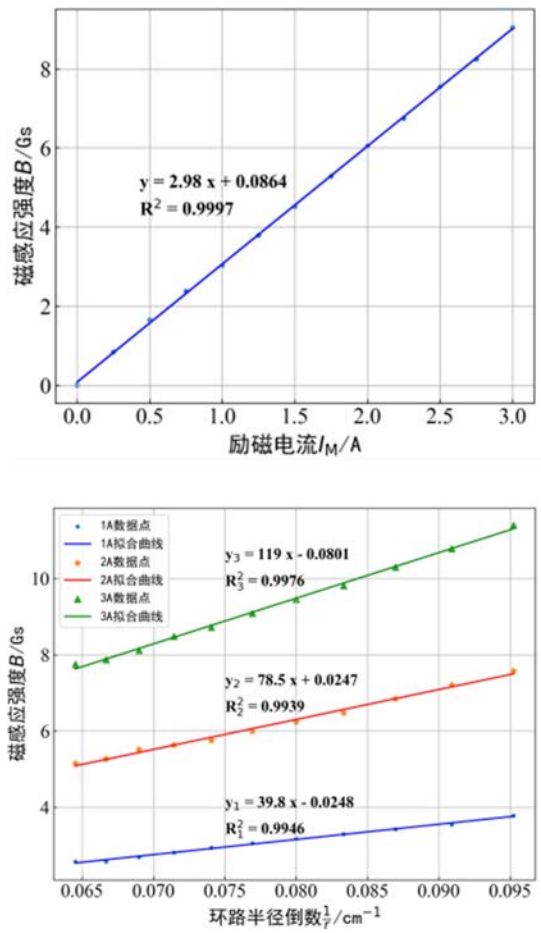


图 7　实验数据处理



1—移动导轨；2—霍尔元件尺；3—霍尔元件；4—螺线环；5—螺线环磁场测试仪

图 8　测量仪器整体装置

真计算、螺绕环制作、3D 打印、器件选型、电路设计、电路加工、电路调试、实验设计、数据处理、PPT 制作、演讲汇报等等内容。在项目执行过后，学生团队成员均表示，除了深入了解了设计方案的物理原理外，对于积极参与到项目中各个实施环节的同学都有了极大的收获。

4　结论

在大学物理教学中使用项目式学习，彻底改变了传统教学模式存在的不足，解决了传统教育中学生始终处于被动接受知识这一问题，让学生自行解决问题，使学生能够在轻松的氛围中进行学习，充分发挥学生的学习积极性，鼓励学生积极思考，提高学生的自学能力、思考能力、创新能力，满足了“因材施教”的教学理念，可以有效地改善大学物理教学现状，实现了教学模式的更新，能够培养出更多创新型的物理专业人才。以项目式大学物理教学改革为依托，团队教师在第三届全国高校教师教学创新大赛（黑龙江赛区）中荣获二等奖。

参　考　文　献

[1] “新工科”建设复旦共识[J]. 高等工程教育研究，2017(1)：10-11.

[2] “新工科”建设行动路线(“天大行动”)[J]. 高等工程教育研究，2017(2)：24-25.

[3] 新工科建设指南(“北京指南”)[J]. 高等工程教育研究，2017(4)：20-21.

[4] 顾佩华. 新工科与新范式：实践探索和思考[J]. 高等工程教育研究，2020(4)：1-19.

[5] 苑素霞，周厚兵，陈叶青，等. STEM 教育理念下的大学物理实验教学探析——融入项目式学习[J]. 广西物理，2019，40(3-4)：54-58.

[6] 赵永生，刘毳，赵春梅. 高阶思维能力与项目式教学[J]. 高等工程教育研究，2019(6)：145-148，179.

[7] 刘艳玲，古金霞，梁春恬，等. 新工科背景下建筑类高校大学物理教学改革探究[J]. 大学物理，2022，41(1)：56-60.

[8] 戴玉蓉，董科，周雨青. 新工科项目引领下大学物理及实验课程体系的改革与探索[J]. 物理与工程，2022，32(1)：76-80.

[9] 封志明，郑亮，费凌，等. 新工科背景下地方高校智能制造人才培养改革探索[J]. 实验技术与管理，2021，38(7)：23-29，35.

■

PRACTICAL EXPLORATION OF PROJECT-BASED LEARNING IN UNIVERSITY PHYSICS

WANG Feng JIANG Haili LIU Xiaoyu WANG Xiaofeng ZHANG Xiaojun

(College of Physics and Optoelectronic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001)

Abstract Based on the goal of cultivating "new engineering" talents, this paper explores the teaching design scheme and implementation approach of integrating project-based learning method into university physics teaching. The overall instructional design consists of two parts: theoretical teaching and project practice. In the theoretical teaching, the combination of online and offline teaching is adopted to reconstruct the teaching process of pre-class, in-class and after-class, so as to realize the theoretical guidance better. In the project practice, students are asked to design, demonstrate, implement and summarize the project by referring to the research process of the scientific research project, so as to comprehensively improve students' ability of integrating interdisciplinary knowledge and train their systematic thinking and innovative thinking. Based on the contents of "magnetism" in university physics, the author designs and carries out the teaching practice based on project-based learning, and achieves good teaching effect.

Key words new engineering; university physics and experiments; project-based learning

新工科背景下课程思政与大学物理分层次教学的统筹设计研究
——以波动光学教学为例

刘晓瑜　张晓峻　王　锋　姜海丽*
（哈尔滨工程大学物理与光电工程学院，黑龙江 哈尔滨　150001）

摘　要　推动“新工科”建设是我国主动应对新一轮科技革命和产业变革的迫切需要。此背景下，大学物理教学亟需改变传统教学理念及教学策略，着力培养学生的跨学科思维、系统思维、工程思维和创新思维。在众多教学改革尝试中，分层次教学可以更好地实现精准教学，进而提高教学效果。在复杂的分层次教学体系中，探索如何能让大学物理课程思政工作也做到因材施教具有重要的意义。本文以波动光学部分教学内容为例，分析并探讨了不同层次大学物理课程思政的设计要点与实施途径，旨在让课程教学立足学情，充分发挥育人功能，更好地实现知识传授、能力培养和思政引领等多重价值，助力新工科人才培养。

关键词　新工科；大学物理；课程思政；分层次教学

1　新工科背景下的大学物理课程思政

1.1　目标与意义

2016年，习近平总书记在全国高校思想政治工作会议上强调，要用好课堂教学这个主渠道，各类课程都要与思想政治理论课同向同行，形成协同效应，引导学生树立“四个正确认识”：正确认识世界和中国发展大势；正确认识中国特色和国际比较；正确认识时代责任和历史使命；正确认识远大抱负和脚踏实地[1]。

2017年以来，为从根本上解决我国工程人才结构性过剩与短缺并存的问题，推动我国科技与产业的高质量发展，教育部积极推进新工科建设，倡导各高校全力探索并形成高等工程教育的中国模式，培养创新型的卓越工程人才，以优质高等教育助力强国建设[2]。

2021年9月，习近平总书记在中央人才工作会议上进一步强调，要努力建设一支爱党报国、敬业奉献、具有突出技术创新能力、善于解决复杂工程问题的工程师队伍[3]。

大学物理作为高等院校非物理专业理工类本科生必修的公共基础课程，所教授的物理基本概念、基本理论，尤其是分析物理问题的基本方法，对培养学生的逻辑推理能力、抽象思维能力、实验动手能力等均具有极其重要的作用；课程内容涵盖的力、热、光、电磁以及近代物理等多知识模块，对培养学生跨学科知识融合能力及综合应用能力，具有天然的优势；物理学的发展历程及物理学家们的奇思妙想、严谨执着、爱国情操等又为课程育人提供了极为丰富的思政素材。

因此，在新工科建设背景下，高校大学物理教

收稿日期：2023-05-29
基金项目：黑龙江省教学改革项目(SJGY20210169，SJGY20210178)，哈尔滨工程大学教学改革项目(JG2022B2506)。
作者简介：刘晓瑜，女，讲师，主要从事大学物理及大学物理实验教学工作，研究方向为光电检测，liuxiaoyu@hrbeu.edu.cn。
通讯作者：姜海丽，女，教授，主要从事大学物理教学工作及课程教学团队建设、课程改革，研究方向为高等教育教学研究、光纤传感，jianghaili@hrbeu.edu.cn。
引文格式：刘晓瑜，张晓峻，王锋，等. 新工科背景下课程思政与大学物理分层次教学的统筹设计研究——以波动光学教学为例[C]. 2023年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会，2023.
Cite this article：LIU X Y，ZHANG X J，WANG F，et al. Study on overall design of curriculum ideology and hierarchical teaching of university physics under the background of emerging engineering education：taking wave optics as an example[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education，2023.（in Chinese）

学更应积极拓展与课程相应的思政教学资源、不断探索思政与课程教学的最佳融合方式、践行课程思政与思政课程的同向同行、实现“全员全程全方位育人”，使学生的知识、能力、素质得以系统性和综合性提升，为党和国家培养出能力强、素质优、忠诚可靠的科技、工程人才。

1.2 实施路径

课程思政工作的主要实施途径为不断从课程内容中挖掘蕴含的思想政治教育素材，然后将其与课程教学从内容到过程深度融合[4]。

在新工科建设背景下，作为工科“基石”的物理课程教学，亟需顺应人才需求的变化，更新教育理念、改进教学方法，在深挖知识内涵的同时积极扩展知识的外延，让大学物理课程从理论教学向工程应用拓展，从基础课程向后续专业课程延伸，为学生切实搭建起理工融通的桥梁，助力新工科人才的培养。而相应的课程思政工作也需遵循科学合理的实施路径：

(1) 课程思政素材库建设：按照课程涉及的不同知识模块(力、热、光、电磁及近代等)，逐一从物理思维培养、家国情怀、科学精神、使命担当等不同维度出发，采用科学家事迹跟踪法、知识应用联系法、人文内涵拓展法、哲学内涵提炼法等不同方法挖掘相应的思政素材，依据教学大纲分类整理形成课程思政素材库；

(2) 课程思政案例库建设：立足教学内容，将思政素材与物理相关工程、科研案例，时事新闻等有机融合，以视频、图片、文字等多种形式，形成鲜活生动、形式多样的课程思政案例库；

(3) 课程思政的教学实施：结合学生实际学情、教师教学方法和特点，以及不同思政案例的特点，将课程思政以线上或线下或两者相结合的形式，合理融会贯通于课前、课中、课后，实现课程教学中的思政引领；

(4) 课程思政的持续更新：没有一劳永逸的课程建设，要想引导学生成为乐于探索、勇于创新、敢于挑战的人，作为“引导者”的教师首先应成为“示范者”。所以教师在课程思政建设工作中也应持续学习，时常汲取新的思政素材、扩充思政案例库、不断提高思政育人能力。

2 新工科背景下的大学物理分层次教学

2.1 内涵与意义

“分层次教学模式”通常指教师根据学生现有的知识、能力水平和潜力倾向，把学生分成几组各自水平相近的群体并区别对待。分层次教学已在全国各级各类学校开展了多年的研究及实践，并取得了一定的教学改革成果。由于我国各高校实际教情、学情差异性较大，分层次教学也因而演化出了多种不同的具体形式，如：定向培养目标分层模式、能力目标分层监测模式、“个别化”学习模式、同一课堂“分层互动”模式、班内分层目标教学模式、分层走班模式等[5,6]。教学实践及研究表明，科学的分层教学策略可以更好地因材施教，实现精准教学，提高教学效果。

2.2 分层次教学体系

以作者所在哈尔滨工程大学为例，按照学校相关人才培养目标的不同，通识类物理课程主要分为以下3个主要层次：

第1层次：面向大中衔接的前导类课程；

第2层次：面向理工大类人才的公共基础课程；

第3层次：面向特殊人才的通识教育课程。

不同层次人才培养体系简图如图1所示、相应物理课程教学基本情况见表1。

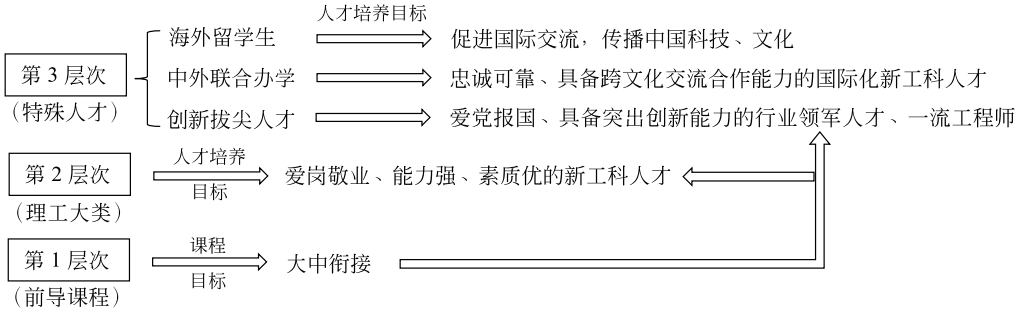


图1 哈尔滨工程大学分层次人才培养体系简图

表 1 哈尔滨工程大学通识类物理课程分层次教学设计

学生层次	课程名称	课程性质	授课对象	授课学期	学时	教学模式（除线上课程外，其余均为线上线下混合）
第 1 层次（前导课程）	《大学物理思维导引》	选修	全校理工科	大一全年	88	线上课程
	《大学物理预修教程》	选修	全校理工科	大一全年	29	线上课程
	《基础物理》	必修	民族预科生	大学入学前一年度	96	大班授课
第 2 层次（理工大类）	《大学物理》	必修	全校理工科	大一（下）、大二（上）	144	大班授课
第 3 层次（特殊人才）	《大学物理》（英文）	必修	海外留学生	大一（下）、大二（上）	144	小班授课
	《大学物理》（英文）		中外联合办学	大一（下）、大二（上）	96	大班授课＋小班研讨
	《海洋物理学》		创新拔尖人才	大一、大二全年	182	小班授课（研讨式＋项目式）

3 新工科背景下课程思政与大学物理分层次教学的统筹设计与实践

为了高效达成习近平总书记提出的青年思政培养目标，在大学物理课程思政设计过程中，应始终以引导学生建立及达成“四个正确认识”为基本目标，将课程教学与思政引领深度融合，做好基础课程与后续专业课程的衔接工作，锻炼学生跨学科知识交叉融通能力及理论知识联系工程实际的能力，助力我国新工科建设及人才培养。在分层次教学体系下，课程教学与思政育人的融合设计需特别关注：

（1）不同层级的思政目标及达成路径应有“共通”也有“不同”：“四个正确认识”是不同层级大学物理教学“共通”的基本思政目标，“线上线下混合”和“课前课中课后”是不同层级大学物理教学“共通”的教学模式和教学过程。在此基础上，需注意到不同层级的课程教学目标不同，相应人才目标也不同，因此课程思政目标及达成途径也不能简单的“一刀切”，而是需要结合不同层次的人才培养目标、教情学情、课程内容等精心设计更具针对性的思政目标，使课程教学与思政育人真正做到双向协同，效果最大化；

（2）部分层次之间学生有重叠，要避免相应课程思政的简单重复：比如参加第 1 层次前导类课程的同学，后续会参加第 2 层次或第 3 层次的物理课程。因此除了物理教学内容需精心设计，做好相关层级之间的内容衔接、难度递进之外，课程思政设计也需统筹规划、科学设计，避免同一思政元素在不同层次的物理教学中只是简单的重复，既浪费教学资源又难以达成预期教学效果，甚至可能会适得其反。

基于上述考量，我校不同层次的物理教学思政目标设计如表 2。

为实现表 2 中的思政育人目标，针对各层次的物理课程思政设计要点如下分析。表 3 以波动光学的教学为例，列举了新工科背景下，我校各层次物理教学与课程思政融合设计的部分案例。

3.1 前导类物理教学的课程思政设计要点

新高考背景下不同省份的高中物理授课重点内容不同导致同一所大学的新生物理基础参差不齐。同时我们国家是多民族国家，由于历史发展、语言文化、地理结构等多种原因，导致部分少数民族聚居地区初、中等教育与汉族地区初、中等教育有很大不同。故针对上述情况，我校开设了《大学物理预修教程》、《大学物理思维导引》两门线上课程供理工科大类学生在大学物理课程之前选择性修习；开设了《基础物理》线下课程用以系统性夯实少数民族预科班同学的物理基础。这两部分课程的共性特点是他们都是大学物理和中学物理的衔接类课程[7]，此类课程除了要在教学内容上做

表2 新工科背景下不同层次的物理教学基本思政目标与强化思政目标

基本思政目标	不同层次的课程思政强化目标	
	层级划分	强化目标
四个正确认识	第1层次（前导课程）	**面向全校理工科**：强化大中衔接阶段物理学习的方法引领、辩证思维的养成。 **面向民族预科生**：帮助学生快速适应生活、学习环境变化；引导民族间的相互尊重包容、团结共赢。
	第2层次（理工大类）	**面向理工大类学生**：培育新工科背景下的跨学科思维及系统性科学思维；培育创新思维及工程思维；培养理想信念、塑造家国情怀。
	第3层次（特殊人才）	**面向海外留学生**：强化中国科技及文化传播。 **面向中外联合办学**：强化大中、中外教育模式的衔接；正确拓展国际视野、不断增强文化自信；增强民族自豪感和国家荣誉感。 **面向创新拔尖人才**：深化学科交叉、理工融通的新工科思维养成；强化创新思维及工程思维；培育沟通协作、团结共进的团队意识；增强民族责任感与使命感。

表3 新工科背景下课程思政与大学物理分层次教学的统筹设计与实施途径

内容	课程思政教学设计及实施途径举例（以波动光学部分教学内容为例）	
光学发展简史	第1层次（前导课程）	**课堂教学**： ①教师简介世界光学发展史和我国光学发展史； （通过人类对光本质的认识历程向学生传递科学的发展观及辩证思维） （从我国《墨经》中对光直线传播规律的记载到新中国成立后我国在光学领域的长足发展，向学生传递文化自信、家国情怀及历史责任感和使命感） ②对于民族预科班同学，鼓励学生结合自身民族特点、地域特点等分享生活中的光学应用案例、光学领域的科学家故事等。 （通过生生、师生交流分享，锻炼沟通交流能力、增进民族了解及团结，为后续课程教学中的研讨式教学奠定基础，做好大中学习方法的衔接）
	第2层次（理工大类）	**课前任务**： ①查阅相关资料，撰写世界及我国光学发展史综述性论文； （通过自行查阅资料、撰写论文，锻炼文献资料的调研梳理能力及论文撰写能力，同时感悟科学的发展观及辩证思维） ②面向光学工程专业同学的专项任务：调研本校光学相关专业的主要研究方向及重大研究成果，制作5分钟左右的PPT。 （通过专项任务的完成，使各院系的同学对自己院系的专业研究方向、最新研究进展等产生更深入的了解） **课堂教学**： ①教师点评光学发展史相关论文完成情况； （通过论文点评给予学生课前任务完成情况的反馈，向学生传递论文撰写的基本规范、组织框架等，助力学生综合能力提升，同时通过总结光学发展史引导学生树立“四个正确认识”） ②在专项任务中随机抽查并请同学结合自己的PPT介绍本校光学相关专业。 （通过来自不同院系的同学的相互交流分享，增加同学对学校各专业的了解，为后续课程学习中的跨专业学科融合、跨专业合作奠定基础）

续表

内容		课程思政教学设计及实施途径举例(以波动光学部分教学内容为例)
光学发展简史	第3层次(特殊人才)	**课前任务:** • **面向海外留学生**:调研自己所在国家的光学领域主要研究或工程应用以及我国在相关领域的研究或应用进展。 (通过课前任务使学生了解光学知识的实际应用,同时了解我国的应用光学发展,为我国的文化输出、科技输出"埋种子") • **面向中外联合办学**:以小组形式(3~5人),通过文献调研总结中外光学发展史、国内外光学领域的最新研究方向及进展等,制作5分钟左右的PPT。 (通过课前任务锻炼学生文献调研能力,同时扩展国际视野,正确比较国内外科研进展) • **面向创新拔尖人才**:以小组形式(3~5人)调研团队感兴趣的光学相关研究、应用方向,或与自己所在专业方向有交叉融合的光学相关研究、应用方向。制作5~10分钟的PPT,阐述其研究内容、国内外研究进展,涉及到的光学原理等。 (通过课前任务锻炼学生文献调研能力,同时结合自身兴趣和专业方向深挖光学应用,激发光学学习兴趣,拓展学术视野,提升跨学科知识融合能力) (通过开放性的课前任务,鼓励创新拔尖类学生在学习过程中不断拓展自己的能力边界,不满足于伸手"够一够"就能获取的知识,而是不断试探"跳一跳"自己能做到什么程度,勇于挑战,才能激发创新) **课堂教学**:小班研讨课中以个人或小组形式交流分享课前任务的完成情况,教师在点评过程中强化相应思政引领。 (通过课堂教学,进一步推动学生深入达成课前任务中隐含的思政育人目标)
杨氏双缝干涉	第1层次(前导课程)	**课堂教学**:简介托马斯·杨的富有传奇色彩的一生,吸引学生学习兴趣并引导学生分享类似的科学家故事。对于民族预科班同学,鼓励学生分享本民族类似的科学家故事或者自己身边人的故事。 (隐性锻炼学生思维能力:什么是托马斯·杨生平故事的核心特征?怎样的故事才是类似的故事?)
	第2层次(理工大类)	**课前任务**:阅读托马斯·杨生平资料。 (通过课前阅读环节学生的初步思考,吸引学生学习兴趣,同时为课堂教学中的思政引导奠定基础)
	第3层次(特殊人才)	**课堂教学**:请参加过第1层次课程学习的同学或由老师简单介绍托马斯·杨生平,之后随机请3~5位同学每人用1~2句话简要分享托马斯·杨生平经历读后感。 (教师总结并借此向同学传达:跨学科知识融通的内涵及其重要性;要具有开阔的学术及生活视野;即使是天才也一样离不开勤奋加持)
薄膜干涉	第1层次(前导课程)	**课堂教学**:演示肥皂膜干涉现象,由直观的实验现象引入相应原理分析,为同学建立相应物理概念,做好内容以及思维方式上的大中衔接。
	第2层次(理工大类)	**课堂教学**:介绍薄膜干涉的常见工程应用案例:光学镜头的增透、增反膜,劈尖干涉检查工件平面的平整度、测量薄片厚度,牛顿环干涉测量透镜曲率半径、单色光波长,迈克尔逊干涉仪测薄片厚度、单色光波长等。 (通过上述应用案例引导学生达成:理论学习与工程应用的融会贯通;体会从以手、足测长,到直尺、游标卡尺、螺旋测微计,再到光学干涉测量,人类不断突破测量极限、提高测量精度,精益求精的工匠精神)
	第3层次(特殊人才)	**课堂教学**:同第2层次。 **课后任务**:以小组(3~5人)为单位自行设计方案测定氦氖激光器波长,及某给定透明介质薄片的厚度,经小班研讨论证各组实验方案后,完成相关测量并撰写实验报告。 (通过设计性实验项目的完成,强化学生理论知识联系工程实际的意识和能力,同时将鼓励创新落在实处,让学生在实践中巩固理论、激发创新灵感)

续表

内容		课程思政教学设计及实施途径举例(以波动光学部分教学内容为例)
光学仪器分辨本领	第1层次 (前导课程)	**课堂教学**:在黑板上画点,并请后排同学、中排同学及前排同学分别回答老师画的是几个点,由直观的生活现象引入相应光学仪器分辨本领的概念。 (通过通俗易懂的引入方式,做好教学内容以及学习思维方式上的大中衔接)
	第2层次 (理工大类)	**课堂教学**:介绍提高光学仪器分辨本领的两大主要途径,引入望远镜(哈勃太空望远镜、韦伯太空望远镜、我国的射电望远镜"天眼"、以及预计于2024年发射的中国"巡天"太空望远镜)和电子显微镜(介绍疫情期间我国科研工作者利用电子显微镜对新冠病毒的研究为世界范围内的新冠病毒防治做出的重要贡献)。 (通过工程案例的引入,强化理论知识和工程应用的联系、拓展学术视野,增强我国学生文化自信、向海外留学生传播我国相关科技成就)
	第3层次 (中外联合) (海外留学生)	**课后任务**:深入阅读我国"天眼"工程相关资料,撰写心得体会。 (通过进一步了解"天眼"工程的突出成就,增强文化自信;感受"天眼"工程两代总工程师"南仁东"和"姜鹏"的杰出贡献和家国情怀,引导学生强化自身责任感和使命感)
	第3层次 (创新拔尖)	**课堂教学**: ①在上述工程应用案例基础上,进一步引入"卡脖子"核心设备之一的"光刻机",简述光刻机工作原理,并从瑞利判据的角度引导学生思考影响光刻机性能的因素,以及我国在芯片领域的另一赛道"光芯片"方面的探索思路; (通过"光刻机"及"光芯片"简介,使学生感受到基础课程与科技前沿之间的紧密关系,激发学生对基础学科的探索欲) ②结合学校特色学科,介绍水下光学成像系统工作原理及我国自主设计的"蛟龙号"深海载人潜水器在海底作业、深海勘探等方面的突出成绩。 (通过"蛟龙号"简介,激发学生探索海洋、开发海洋的兴趣,同时通过介绍我校在"蛟龙号"载人潜水器的水下导航定位中所做突出贡献,激发学生的学校荣誉感及自身使命感) **课后任务**: ①以小组(3～5人)为单位,查阅相关资料,完成"光刻机"及"光芯片"原理阐述及发展现状调查报告; (通过进一步调研芯片行业发展现状,感受"技术封锁"下我国科技发展面临的实际问题,同时认识到我国科技工作者不屈的努力,激发科技报国志向) ②继续研读"蛟龙号"相关资料,并以小组(3～5人)为单位,设计并实现水下物体的形貌检测。 (通过设计性实验项目的完成,强化学生理论知识联系工程实际的意识和能力,同时鉴于学校在船舶工业、海军装备和海洋开发方面的研究积淀与优势,引导创新拔尖类学生在物理基础课程学习过程中感受海洋科技魅力、拓展思路、提升能力)

好大中衔接,不做简单的高中内容的重复,消耗学生兴趣,也要避免过度开展大学物理教学内容,造成学生学习方法及内容难度上的不适应,而该类课程在课程思政方面的设计要点则应为:

(1)从思想引导上做好大中衔接:大学阶段是很多同学独立生活的起点,也是"世界观""人生观""价值观"形成的重要时期,因此,前导类课程思政设计要特别关注同学们的思想引领,从思维方式到学习方法再到情感价值,全面帮助同学快速实现从中学到大学的转变;

(2)在思政工作中促进民族团结:立足课程内容,挖掘能够弘扬民族团结的思政元素,并将其深度融合于课程教学中,促进民族团结。例如在讲解杨氏双缝干涉实验中,由托马斯·杨突出的跨学科成就,引入中国工程院院士维吾尔族多语种信息处理专家吾守尔·斯拉木,学物理出身,在40岁前都没摸过电脑的情况下,在国家需要时毅然扛起了少数民族信息化事业的"拓荒"大旗。既引导学生要有不畏困难的坚毅精神,科技报国的远大理想,也让少数民族同学感受到民族认同感及自豪感,促进民族团结。

3.2 理工大类人才物理教学的课程思政设计要点

新的国际环境加速了我国产业升级的需求，也催生了对于具有学科融通能力、工程实践能力及创新意识的新工科人才的急迫需求。新工科背景下的人才需求对高校的专业教育提出了新的要求，而新的专业教育势必又对基础课程教学提出从教学理念到教学内容再到教学方法的全方位新需求。理工科大类学生是今后我国新工科人才的中坚力量，因此，面向理工科大类人才的物理教学，在教学内容上应注意跨学科知识融通以及理工融通能力的提升，相应在课程思政方面的设计需注意：

（1）国家新型工程人才需求的传导：作为教学活动的主体，学生在学习大学物理课程时，总体上属于大学低年级阶段，因此大多数同学对于我国的产业升级需求以及由此带来的人才需求变革没有具体概念，或者有一定概念但不清楚自己要如何做才能顺应国家需求，故而会在惯性驱使下仍然采用传统的“刷题式”学习模式。因此作为教学活动的引导者，教师有责任在教学过程中向学生传导国家的人才需求，以及引导学生应该加强哪方面的能力才能契合国家需求，进而转变学生的学习思路和方法，提高育人成效。在新工科人才需求背景下，教学过程中还应更多地引入与教学内容相关的工程案例、科研案例，并将理论知识和相关实验巧妙结合，扩展学生眼界与思路，培养学生的知识交叉融合能力和理工融通能力；

（2）理想信念、家国情怀的培养：作为未来我国工程领域的中坚力量，在技术能力之外，必须要有远大的理想、坚定的信念，以及根植于心的家国情怀，因此大学物理课程思政设计需立足课程内容，积极引导学生树立理想、坚定信念、厚植家国情怀，例如在讲解光学仪器分辨本领时，可以通过对我国“天眼”工程的课堂简要介绍，让同学了解我国科技成就，再通过课后观看视频、阅读文章，撰写心得体会等引导同学感受南仁东、姜鹏，两代“天眼”总工程师，不一样的时代背景、一样的奉献精神。

3.3 特殊人才物理教学的课程思政设计要点

（1）面向海外留学生：海外留学生是向外输出我国科技、文化的重要窗口，也是扩大我国国际影响力的重要途径，因此在物理课程教学过程中，十分有必要通过合理的教学设计，向其传播与物理学相关的我国历史成就、科技发展等，例如在光学讲解过程中，向学生介绍我国约在2400多年前已经有了光的直线传播、小孔成像等光学现象相关的文字记载，干涉测量目前在我国工程领域的广泛应用、“天眼”工程、疫情期间我国科技工作者借助“冷冻电子显微镜”首次对新冠病毒形貌予以确定，为全球新冠病毒的识别及防治提供科学依据，等等。以详实的案例辅助学生理解物理知识的实际应用，同时推广我国相关历史成就及当前科技发展；

（2）面向中外联合办学：中外联合办学是我国高等教育“国际化”的试验田，也是我国高等教育办学方式“多样化”的具体呈现。在教学内容及教学方式与国际接轨的同时，如何有效落实思想政治教育的“四个正确认识”、如何保障培养出的学生具有国际视野、具备跨文化交流合作能力，同时具有坚定的文化自信和国家荣誉感，是中外联合办学人才培养面临的重要课题。为此作者在波动光学教学过程中以课前任务的形式请同学们自行查阅相关文献并制作PPT，总结中外光学发展史及光学领域国内外的最新研究方向及进展。旨在通过课前任务的完成及课堂上的生生、师生交流分享，隐性落实“四个正确认识”的培养，同时有效提升学生综合能力；

（3）面向创新拔尖人才：2018年，教育部印发《关于实施基础学科拔尖学生培养计划2.0的意见》，进一步推动创新拔尖人才培养。创新拔尖人才是未来我国各科技、工程领域的头部人才，各大高校广泛探讨其培养模式[8]。我校创新拔尖人才培养对标船舶工业、海军装备及海洋开发领域未来的行业领军人才、一流工程师，因此在相应物理教学中尤其注重物理内容在海洋领域的应用，特别开设了《海洋物理学》课程。在课程思政设计中注意引导学生拓展思维，心怀海洋，强化新工科思维，强化创新意识。能力越高、责任越大，对创新拔尖人才的培养，除了要充分激发学生的潜在能力，还需同时积极引导、不断增强学生的民族责任感与使命感。例如，在讲解光学仪器分辨本领时，除太空望远镜、电子显微镜等通用案例外，可借近年来愈演愈烈的技术封锁问题，简介“光刻机”原理，引导学生从光学仪器分辨本领的角度出发，理解光刻机的“极限”在哪里。还可引导学生思考光学成像系统在水下有哪些应用场景、需要注意哪

些问题，借势引入我校参与研发、我国自主设计的“蛟龙号”深海载人潜水器，并通过课后小组合作完成水下物体形貌检测的课程项目，深度建立物理知识与海洋间的联系，增强向海图强的责任感与使命感。

4 结语

新一轮科技革命和产业变革正在孕育兴起，培养具备跨学科知识的交叉融合能力、理论知识与工程实际的融会贯通能力、同时富有创新意识与创新能力的新型工程技术人才日渐重要。

在高校众多改革举措中，分层次教学可以更好地实现精准教学，提升教学效果，但随之而来的是更加复杂的教学体系。

在百年未遇之大变局的时代，在复杂的分层次教学体系下，教师应立足课程内容、结合实际教情学情，统筹设计与规划不同层次的课程思政强化目标及实施途径，积极充分地利用课程教学资源，科学高效地发挥课程育人功能，让分层次教学在能力培养和思政引领双维度上均能实现因材施教。

参 考 文 献

[1] 习近平在全国高校思想政治工作会议上强调：把思想政治工作贯穿教育教学全过程 开创我国高等教育事业发展新局面[N]. 人民日报，2016-12-09(1)

[2] 吴爱华，杨秋波，郝杰. 以“新工科”建设引领高等教育创新变革[J]. 高等工程教育研究，2019(1)：1-7+61.
WU A H, YANG Q B, HAO J. THE innovation and reform of higher education under the leadership of emerging engineering education[J]. Research in Higher Education of Engineering, 2019(1): 1-7+61 (in Chinese)

[3] 习近平：深入实施新时代人才强国战略 加快建设世界重要人才中心和创新高地[DB/OL]. 光明网. https://m.gmw.cn/baijia/2021-12/15/35383281.html, 2021-12-15

[4] 朱鋐雄，王向晖，尹亚玲. 课程思政的“根、本、魂”和相应教育“三观”的理性探讨—从思政视角探讨大学物理课程思政[J]. 物理与工程，2023，33(1)：54-60.
ZHU H X, WANG X H, YIN Y L. The “Root, basis, soul” of the curriculum ideology and rational discussion of respectively educational “Three viewpoints”[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(1): 54-60 (in Chinese)

[5] 张荣香，丁文革，代秀红，等. 大学物理分层次在线教学的研究与探索[J]. 物理与工程，2021，31(4)：45-53.
ZHANG R X, DING W G, DAI X H, et al. Research and exploration on hierarchical online teaching of college physics [J]. Physics and Engineering, 2021, 31(4): 45-53 (in Chinese)

[6] 朱 纯，陈国庆，聂延光，等. 雨课堂：“多维度分层次”教学的实践与思考[J]. 大学物理，2020，39(6)：52-58.
ZHU C, CHEN G Q, NIE Y G, et al. Rain classroom: Practice and reflection on the teaching of “multi-dimensional and different levels”[J]. College Physics, 2020, 39(6): 52-58 (in Chinese)

[7] 施建青，徐志君，李珍. 新高考背景下大学物理预修课程开设及其教学资源建设[J]. 物理与工程，2019，29(5)：39-42.
SHI J Q, XU Z J, LI Z. The establishment of advanced courses of college physics and the construction of teaching resources under the background of the new college entrance examination[J]. Physics and Engineering, 2019, 29(5): 39-42 (in Chinese)

[8] 王娟，杨森，赵婧方. “拔尖计划”2.0背景下提升创新人才培养质量的思考与实践[J]. 中国大学教育，2019(3)：19-24.

■

STUDY ON OVERALL DESIGN OF CURRICULUM IDEOLOGY AND HIERARCHICAL TEACHING OF UNIVERSITY PHYSICS UNDER THE BACKGROUND OF EMERGING ENGINEERING EDUCATION: TAKING WAVE OPTICS AS AN EXAMPLE

LIU Xiaoyu ZHANG Xiaojun WANG Feng JIANG Haili

(College of Physics and Optoelectronic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, 150001)

Abstract To promote the construction of “emerging engineering education” is the urgent need for our country to take the initiative in the new round of scientific and technological revolution

and industrial transformation. Under this background, university physics teaching needs to change the traditional teaching ideas and teaching strategies, and focus on cultivating students' interdisciplinary thinking, systematic thinking, engineering thinking and innovative thinking. In many teaching reform attempts, hierarchical teaching can better realize precision teaching and improve teaching effect. In the complex hierarchical teaching system, it has great significance to explore how to realize the individualized teaching in curriculum ideology and politics. Taking wave optics as an example, this paper analyzes and discusses the design points and implementation approaches of ideological and political education in different levels of university physics courses, aiming to better realize the multiple values of curriculum education, such as imparting knowledge, cultivating ability and guiding ideology, and then help the training of new engineering talents.

Key words emerging engineering education; university physics; curriculum ideology and politics; hierarchical teaching

融入前沿科技的大学物理光学篇教学设计

冯向华　杨　华　张　晖

（信息工程大学基础部，河南 郑州　450001）

摘　要　光学篇是大学物理课程的重要组成部分，光学的实验结果曾经推动了近代相对论和量子论的发展，其知识体系和研究方法在生产实践、科学前沿和国防领域有重要应用。我校大学物理教学团队着眼“为战育人”培养目标，基于军队院校学情现状，引导学生透过抽象的物理概念和数学符号掌握物理内涵和科学思想。在光学教学中融入前沿科技热点，让学生了解科技的前沿动态与实验，体会大学物理与实际应用的紧密结合；通过基础知识与前沿科技和思政元素的结合教学，有效调动了学生的学习热情和积极性。

关键词　大学物理；前沿科技；光学教学设计

1　引言

光学是物理学的一部分，是物理学的一个分支，也是当前科学研究中最活跃的学科之一，光学的发展是人类认识客观世界进程中一个重要的部分，光学的实验结果曾经推动了近代相对论和量子论的发展。光学为多个学科提供了重要工具，如望远镜对于天文学与大地测量学；显微镜对于生物医学与金相学；光谱仪对于化学和材料科学。光学的发展还为生产技术提供了许多重要的观察和测量工具。激光的问世对光学及相关科学和技术影响很大，已应用于多个科研领域并产生了一些新产业。在科技快速发展的今天，光学也在飞速发展，现代科技的发展使图像信息日益重要，光信息的获取、传输、存储、处理、接收、显示等技术都有非常大的进步。激光还为同位素的分离、受控核聚变以及军事上的应用，展示了光辉的前景。这些前沿科技也开始逐步走进大众视野。与此同时，我校密码工程、人工智能、测绘、通信、网络空间安全、计算机科学与技术等专业学生在光学教学过程中有增加光学前沿科技内容的需求。而作为教学工作者，则需要不断思考与探索如何将前沿科技融入教学当中，提升教学效果，真正做到教书育人。

对工科专业而言，大学物理是一门非常重要的专业基础课，在培养专业型人才方面拥有独特的作用。目前我校大学物理教学内容主要包括：力学、热学、电磁学、波动光学、相对论和量子力学，其中光学的学时为 16 学时（8 次课）。在有限的光学篇教学学时中，探索将一些光学前沿科技内容引入大学物理课程教学中。一方面有利于学生丰富科学知识，了解光学前沿进展，激发学习热情；另一方面，理论联系实际，让学生看到学有所用，增强实践应用能力。

2　融入前沿科技和思政元素的光学篇教学安排

光学是大学物理课程中的重要一部分内容，教学内容主要包括：光源、光程、相干光，双缝干涉，薄膜的等倾干涉、等厚干涉，迈克尔逊干涉；光的衍射现象、惠更斯—菲涅尔原理，单缝衍射，圆

收稿日期：2023-05-29

基金项目：2023 年度军队院校物理教学联席会教育教学立项课题（2023JWL025 ）。

作者简介：冯向华，女，教授，主要从事物理教学科研工作，研究方向为集成光学，1465770025@qq.com；杨华，男，教授，主要从事物理教学科研工作，研究方向为理论物理，yanghua313@126.com；张晖，女，副教授，主要从事物理教学科研工作，研究方向为非线性光学，466432667@qq.com。

引文格式：冯向华，杨华，张晖. 融入前沿科技的大学物理光学篇教学设计[C]. 2023 年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会，2023.

Cite this article：FENG X H，YANG H，ZHANG H. Teaching design of the Optics section in college physics integrating cutting-edge scientific and technology[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education，2023.（in Chinese）

孔衍射，光栅衍射；偏振光和自然光，起偏和检偏、马吕斯定律，反射和折射时的偏振等。选学的内容有 X 射线衍射、双折射、偏振光的干涉等，由于课时有限选学内容基本不实施课堂讲授。在实际教学过程中，主要面向我校大二上学期的学生，学生感觉比电磁学容易，是因为计算时很少使用微积分，使用有限的光学公式就可以把题目做出来，但对于光学中涉及的相位、光程等概念理解不充分，不能把大学物理的光学知识迁移到未来专业的学习中，不能很好理解现代光学的发展与所学内容的关系。针对这些问题，我们在光学学教学过程中加入介绍光学的前沿内容，让学生看到光学的丰富内涵，在感受科技飞速进步的同时，激发他们的学习热情，拓展他们的知识面，提升大学物理中光学部分的教学效果。

2.1 光的干涉的教学设计

光的干涉所用学时为 8 学时。光学的学习在电磁学和振动波动之后，学生对于电磁学和波的理解有一定的深度。在第一节光源、光程、相干光教学中用光互连对比电互联的优势引入内容。由于电互联在带宽、互联密度、时钟扭歪、能耗、抗干扰性等方面的限制，即所谓“电子瓶颈”，面临着难以解决的矛盾。光互连是以光子取代电子作为信息载体来实现功能单元之间的信息交换，20 世纪 80 年代初被提出用来解决计算机通信中的这一“瓶颈”。光是什么？光波是电磁波中的一个波段，光互连以光波作为信息的载体，可以在非导电的介质（自由空间、光学材料）中用电场和磁场的相互交换来传播。从物理本性上看，光子不具有静质量、传输信息的速度高，光频与微波段相比高 10^4 倍，达 500THz 左右，频带很宽，传输过程中能量损耗小。即可以在真空中传播，也可以在介质中传播，很容易通过真空和介质的界面，并行传输、多维多重复用性（如波长、偏振、相位和频率）交叉传输无串扰的独特优势。对比电波，把光波的属性、特点和优势凸显出来。光在介质中传播速度与介质折射率有关引出光程概念。

光具有波动的独立性、叠加性和相干性。学习光的相干性后引入我国激光非相干合成技术的成就。通过对 N 路激光的倾斜和离焦等进行控制，使各路激光在目标处实现强度叠加，能够将目标处的功率密度提高 N 倍（如图 1）。相干合成技术通过对 N 路激光的相位、倾斜、离焦、偏振、模式和光程等进行控制，使各路激光在目标处实现振幅叠加，能够实现阵列光束的亮度提升，将目标位置的峰值功率密度提升 N^2 倍。国防科技大学在 2020 年实现了 107 路光纤激光相干合成，目前，研究人员利用空域/时域合成、相干光谱合成技术实现了对超快激光的相干合成，获得了万瓦级高平均功率激光输出。相干合成后的激光系统具备着更好的光束质量、更高的功率甚至更复杂有趣的光场模式，已逐渐应用于非线性频率变换、雷达与导星（军用）、光场调控、激光通信及大科学装置等领域。

在学习杨氏双缝后、通过杨氏双缝各种情况光程差的讨论，得到不同干涉情况，引入波前的全息记录的介绍。全息术是一种可以记录光波前（包括其幅度和相位）并重建的技术，并举例全息军事沙盘作为一种采用全息技术的现代战争模拟与训练工具，以其高度逼真、交互性强以及高效率的特点逐渐成为军事训练的重要组成部分。全息投影技术是全息军事沙盘的核心技术之一，通过激光与干涉成像原理，将三维场景以逼真的形式呈现出来，让训练者置身于真实的战场环境中（如

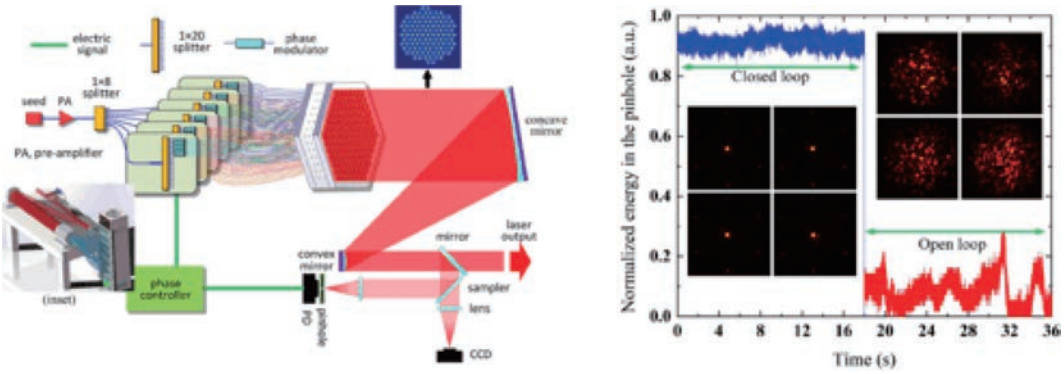


图 1 国防科技大学课题组研制的 107 路光纤激光相干合成实验系统和实验效果

图2)。

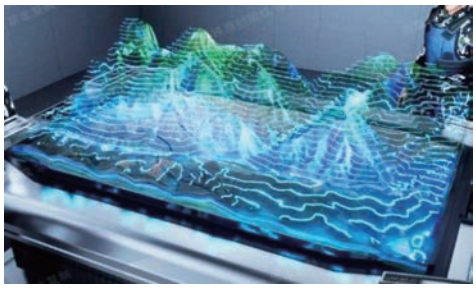


图2 全息军事沙盘

学习薄膜干涉时引入昆虫翅膀(如图3)和孔雀羽毛上的色彩原因的介绍,结构色则是由鳞片的特殊结构而形成的光学现象,是由于翅膀上鳞片结构不同、所具有的物理属性也不同而产生的不同颜色。在显微镜下,人们可以看到这些鳞片有许多脊纹。某些种类的脊纹由许多半透明的薄层组成,有一定角度且充满空气,这些结构能使光线产生折射、反射或干扰,从而形成各种各样的光泽。

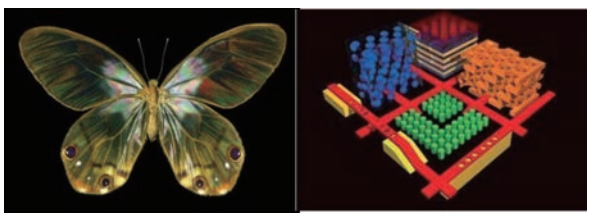


图3 自然界的结构色和人造光子晶体

由自然界的结构色到人造光子晶体(如图3),这种具有周期结构光子晶体让隐身斗篷的不再遥远,对社会的进步和人们的生活产生重要影响。用于军事上的光子晶体柔性复合隐身材料,通过抑制目标热辐射,达到让目标实现红外隐身的效果。目前我军研制出能同时防御可见光、红外、激光等多个波段侦察和制导的新型隐身材料,为装备战场生存能力跃升提供了有效支撑。

通过等倾、等厚干涉的学习还让学生了解光学镀膜、光学精密检测等内容。如在牛顿环学习中设计如何利用牛顿环检测光学元件的表面质量的例题,在劈尖干涉中设计测量长度的微小改变的方法的例题,让学生体会光学的精密检测的优势,并介绍配置CCD摄像装置和计算机干涉条纹解析装置,可进行的高精度条纹分析。在设计例题中介绍增透膜与高反射膜,例如氦氖激光器谐振腔中的全反射镜镀15～19层的硫化锌-氟化镁膜系,广泛用于彩色电视机中的彩色分光膜等。

学习迈克尔逊干涉仪时,通过设计例题让学生了解干涉仪可以作为工厂里检验棱镜和透镜质量以及测量折射率和角度的精密仪器。迈克尔逊干涉仪的原理还被发展和改进为其他许多形式的干涉仪器。如激光陀螺—Sagnac干涉仪。激光陀螺又叫环形激光器,它在加速度计的配合下可以感知物体在任意时刻的空间位置,被誉为武器平台定位导航系统的“心脏”。环形激光器腔内运行的顺、逆时针激光能够以不同的频率独立振荡。由于激光谐振条件的要求,Sagnac效应产生的光程差转换成了顺、逆时针运行激光的频率差,使激光陀螺有很高的灵敏度和精度衍射。介绍国防科大院士高伯龙引领团队从白手起家、艰辛探索,到如今勇立潮头、抢占前沿,创造了辉煌的业绩,为强军兴军作出了突出贡献。以此增强学生爱国情和报国志。

2.2 光的衍射和偏振的教学设计

光的衍射和偏振所用学时为8学时,以下简略介绍引入的相关内容:

(1) 光的衍射现象:引入的有矩孔和圆孔的衍射图样、光互连的衍射极限、超分辨率显微技术等。

(2) 夫郎禾费单缝衍射、圆孔衍射:引入的有助视仪器的分辨本领、哈勃望远镜、中国天眼、电子显微镜等。

(3) 平面衍射光栅:引入的有光栅光谱仪、闪耀光栅、DVD光碟衍射等

(4) 偏振光和自然光:3D电影、液晶偏振方向、旋光现象、量子密钥分发中偏振光表示的量子态、量子计算原型机“九章”等

(5) 反射和折射时的偏振:偏振成像技术在军事中的应用等。

近代物理学基础篇中还将选择引入光频梳、光钟、光镊、光声断面成像、原子力显微镜、光盘存储技术、卫星定位、超薄纳米光学器件等。

3 着眼目标的多样化教学方法和模式

多媒体课件由于具有良好的表现力、交互性和共享性而成为一种重要的教学手段。优秀的教学课件可以在一定程度上提高教学质量和教学效

果。因此本物理教研室教师们相互共享教学课件，各自精心打磨，并在教学实践中对之进行不断完善，逐步形成了文字和色彩搭配合理，设计内容布局合理，直观、清晰的图片和视频插入合理，动画设计合理等一套有个人风格的教学课件。例如针对不同专业的学生兴趣引入相关的与时俱进的科技热点、每年诺贝尔物理奖的获奖介绍、结合教研室的研究方向的专业介绍等；还有人机互动环节比如在讲授衍射光栅，通过不同缝数的光栅即时动画显示衍射图样，帮助学生深刻体会光栅衍射条纹的特点；合理使用新型教学手段，比如通过雨课堂平台发布练习题，精准把握学生对相关知识的掌握程度，方便教师有针对性地引导学习，提高教学的反馈速度和效果；依托相关的俱乐部（如物理学术和物理创新俱乐部）和选修课，鼓励优秀学生参加学科竞赛等。比如今年 CUPT 的题目彩色线（当只选用白炽灯光中入射角较大的光照射光盘或 DVD 时，会出现一条明显的绿色线。光盘的角度稍有改变，颜色就会发生变化，解释并研究此现象。）就引发了众多学生积极参与此题目的研究。

本大学物理教研室教学团队面向国防和军队建设需求，着眼“为战育人”培养目标，不断就教学内容、教学模式、教学手段、考核方式等方面进行调整和改革。通过融入军事应用案例、前沿科学进展和思想政治元素等，增强了课堂内容的人文性、生动性和先进性；通过教与学的双边互动，着力完成“知识传授、能力培养和价值观塑造”的教学目标。

4 结语

大学物理课程有学生受众广、内容涵盖广、育人资源广等优势。在“新工科”建设背景下，为实现培养高素质国防科技人才和联合作战保障人才总目标，对大学物理课程改革进行积极探索，是培养国家战略工程需求人才的重要一环。我们物理教研室教师共同参与了大学物理课程建设，对于科技进步史、物理学家史、物理与高新技术等内容已收集了大量素材，拥有资源丰富的实验室和演示实验室，拥有几个俱乐部和选修课，更有不少在各类讲课比赛中获奖的优秀教师，这些都为大学物理的建设提供了保障。我们将一些前沿科技融入教学过程中，受到学生一致好评，有效提升了教学效果。通过基础知识与前沿科技的结合教学，一方面有效增强了学生的学习兴趣，看到大学物理与实际应用的紧密结合；另一方面提升了学生的知识与能力，了解科技的前沿动态与实验。

教学改革是一项长期而艰巨的任务，要求教师跟紧科技潮流、契合国家需求、对接学生岗位持续推进。通过融合基础与前沿、理论与思政，努力打造精讲多练、特色鲜明、全员参与、全面提升的高品质课程，使学生都能因需而学，学有所获。唯有如此，课程才能真正实现“育人”、“育才”的教学目的。

参 考 文 献

[1] 吴王杰. 大学物理学[M]. 北京：高等教育出版社，2018.

[2] 姚启钧. 光学教程[M]. 北京：高等教育出版社，2020.

[3] 赵凯华，罗蔚茵. 新概念物理教程[M]. 北京：高等教育出版社，2019.

[4] 张以谟. 光互连网络技术[M]. 北京：电子工业出版社，2006.

[5] 周朴，粟荣涛，马阎星等. 激光相干合成的研究进展：2011—2020[J]. 中国激光，2021，48(04)，31-58.

[6] 朱志宏. 光子晶体应用理论研究[M]. 长沙：国防科技大学出版社，2011.

[7] 纪鉉腾，毛元昊，陈丁博等. 激光陀螺原理、现状及展望[J]. 导航与控，2022，21(5)：221-240.

[8] 郭光灿. 量子信息技术研究现状与未来[J]. 中国科学：信息科学，2020，50(9)：1395-1406.

[9] 周强国，黄志明，周炜. 偏振成像技术的研究进展及应用[J]. 红外技术，2021，43(9)：817-828.

■

TEACHING DESIGN OF THE OPTICS SECTION IN COLLEGE PHYSICS INTEGRATING CUTTING-EDGE SCIENTIFIC AND TECHNOLOGY

FENG Xianghua　YANG Hua　ZHANG Hui

(Foundation Department, Information Engineering University, Zhengzhou, Henan 450001)

Abstract　Optics is an important component of College Physics. The experimental results of

Optics have promoted the development of modern Relativity and Quantum theory, and the knowledge system and research methods have important applications in production practice, scientific frontiers, and national defense. With the goal of "educating people for war" and based on the current situation of military academies, the College Physics teaching team in our university has guided students to grasp the connotation of physics and scientific ideas through abstract physical concepts and mathematical symbols. Integrate cutting-edge science and technology hot-spots into optical teaching, so that students can understand the cutting-edge dynamics and experiments of science and technology, and understand the close integration of university physics and practical applications. Through the combination of basic knowledge with cutting-edge science and technology and ideological and political elements, the students' enthusiasm for learning has been aroused greatly.

Key words College Physics; cutting-edge technology; Optics teaching design

基于激光散斑高精度测量凸透镜/凹透镜焦距实验设计

冯雪红* 张 沛 王红理 高 博 童慧敏 常凯歌 石晓华 曹子君
（西安交通大学物理学院，陕西 西安 710049）

摘 要 基于激光散斑理论设计高精度测量的凸透镜/凹透镜焦距的实验方法和装置。毛玻璃和像屏通过刚性材料连接体设计为一体结构。激光通过已知短焦距凸透镜的汇聚点作为待测凸透镜（凹透镜）的物（虚物），在汇聚点右侧（左侧）放置待测凸透镜（凹透镜），改变待测透镜与汇聚点的距离，使汇聚点通过待测透镜称缩小的实像。垂直激光传播方向放置毛玻璃与像屏的连接体，毛玻璃表面在待测透镜“物”（包括“虚物”）和“像”附近从左向右缓慢移动，像屏散斑最大时毛玻璃表面对应的位置是待测透镜的“物”（包括“虚物”）和“像”的位置。该实验设计能够高精度测量待测透镜物距与像距。毛玻璃和像屏之间距离为30cm，测量焦距－100mm的凹透镜焦距的－99.6mm，测量焦距为90mm的凸透镜焦距为89.4mm，毛玻璃与像屏之间的距离越长，测量精度越高。该装置测量透镜焦距范围广、精度高、方法简单。

关键词 激光散斑；实验装置；实验方法；高精度；凸透镜焦距；凹透镜焦距

透镜的焦距对于现代精密光学仪器的设计、光学成像、光学滤波、激光探测等方面有着重要的应用。高精度测量透镜的焦距具有重要意义。目前传统的透镜焦距的测量方法有自准直法、物距像距法、共轭法、透镜组合法。无论用那一种方法，由于不同的色差和球差的限制，像的位置一般很难准确确定，测量精度一般不高。尤其是凹透镜，无法形成实像，以至于测量凹透镜焦距的方法比较复杂，和凸透镜相比，传统的方法测量凹透镜的焦距误差更大。激光散斑测量技术是利用激光散斑特性而发展起来的一种现代测量技术，它具有测量精度高、非接触、全场、实时性、以及灵活等优点[1]。在过去半个世纪的发展历程中，激光散斑计量技术不断的走向成熟，也有文献提出激光散斑测量凸透镜的装置与方法，但测量精度不高[2,3]。本文提供一种基于激光散斑技术精确测量凸透镜和凹透镜焦距的实验装置和方法。

1 激光散斑高精度测量凸透镜/凹透镜焦距的理论

本文基于激光散斑大小的公式[4-5]来设计实验装置和实验方法的。激光散斑大小的公式如下

$$\delta_r = 1.22\frac{\lambda l}{D} \tag{1}$$

δ_r 为激光散斑的大小，λ 为激光波长，l 为毛玻璃漫射屏与观察屏的距离。在这个公式中，当 λ，l 一定时，散斑颗粒的大小只与毛玻璃漫射屏表面光照的圆形区域直径 D 成反比。由于实验时激光波长确定，只要 l 一定，散斑颗粒的大小只与毛玻璃漫射屏表面光照的圆形区域直径 D 成反比，D 越小，像屏上散斑越大。实验设计使待测透镜的“物”和“像”处光斑都是“物”附近和“像”附近光斑最小的位置，像屏散斑最大时毛玻璃粗糙表面对应的位置是待测透镜的“物”和“像”的位置。本文基于激光散斑技术精确测量待测凸透镜和凹

收稿日期：2023-05-30
基金项目：激光技术和激光应用技术实践基地实验室建设项目（220904090031548）。
作者简介：冯雪红，女，高级工程师，主要研究方向是光学，fengxh@xjtu.edu.cn。
引文格式：冯雪红，张沛，王红理，等. 基于激光散斑高精度测量凸透镜/凹透镜焦距实验设计[C]. 2023年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会，2023.
Cite this article：FENG X H, ZHANG P, WANG H L, et al. Experimental design of high-precision measurement of focal length of convex-concave lens based on laser speckle[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education, 2023. (in Chinese)

透镜的“物”和“像”的位置上，从而精确测量凸透镜和凹透镜的焦距。

2 激光散斑测量凸透镜和凹透镜的实验方法与装置

激光散斑测量凸透镜、凹透镜焦距实验装置示意图分别如图1和图2：

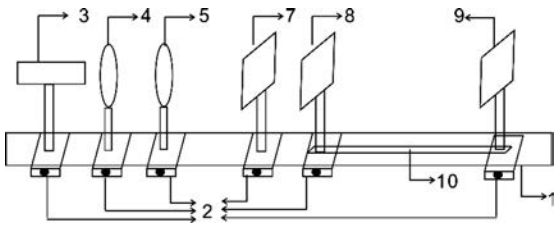


图1 激光散斑测量凸透镜焦距实验装置图

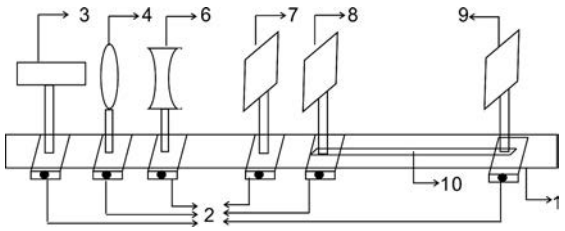


图2 激光散斑测量凹透镜焦距实验装置图

上图中实物标注如下：1 一维精密光学导轨(有标尺)，2 固定架，3 激光光源，4 短焦距凸透镜，5 待测凸焦距的透镜，6 待测凹焦距的透镜，7 白屏，8 毛玻璃，9 像屏，10 刚性连接体。

激光散斑在测量中，毛玻璃面和像屏不论哪一个发生微小的横向、纵向移动或微小的旋转，对测量结果造成一定的误差。本实验装置最关键的设计部分就是设计毛玻璃8、像屏9和连接体10为一体结构，毛玻璃8与像屏9之间是固定的长距离(30cm)，且连接体为刚性材料(不会发生形变)。保证毛玻璃面移动时，毛玻璃面和像屏不会因为材料形变发生微小的横向、纵向移动或微小的旋转，即两者距离不变，保证精确的测量待测凸透镜和凹透镜的“物”和“像”的位置。因为光学测量中，毛玻璃面和像屏发生微小的横向、纵向移动或微小的旋转，都会给测量结果带来一定的误差。

为了更加清晰说明实验方法，配有各个调试环节的说明图。

图1中，设计短焦距透镜4的汇聚点作为待测凸透镜的“物”，光学导轨上靠近短焦距凸透镜4

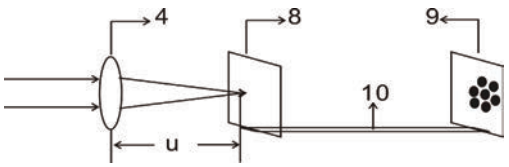


图3 激光散斑测量光束通过短焦距透镜汇聚点位置的光路图

放置毛玻璃与像屏的连接体，毛玻璃粗糙表面在待测凸透镜“物”附近从左向右缓慢移动，由于毛玻璃、像屏和刚性连接体是一个整体，毛玻璃和像屏沿着光学导轨向右缓慢联动(移动中，毛玻璃面和像屏不会因材料形变发生微小的横向、纵向移动或微小的旋转，即两者距离不变)，待测凸透镜的“物”处光斑是“物”附近光斑最小的。像屏散斑最大时毛玻璃粗糙表面对应的位置是待测凸透镜的“物”的位置。记下待测凸透镜的“物”的位置对应的标尺刻度。从光学导轨上取下毛玻璃面和像屏一体结构，在光学导轨上短焦距凸透镜汇聚点(待测凸透镜的“物”)右侧放置待测凸透镜，改变待测凸透镜与待测凸透镜的“物”的距离，使待测凸透镜的“物”通过待测透镜成缩小实像。记下待测透镜位置对应的标尺刻度。调节共轴，光学导轨上靠近待测凸透镜放置毛玻璃面和像屏一体结构，毛玻璃在待测凸透镜“像”附近从左向右缓慢移动，毛玻璃和像屏沿着光学导轨向右缓慢联动(移动中，毛玻璃面和像屏不会因材料形变发生微小的横向、纵向移动或微小的旋转，即两者距离不变)，待测凸透镜的“像”处光斑是“像”附近光斑最小的。像屏散斑最大时毛玻璃粗糙表面对应的位置是待测透镜的“像”的位置。分别记下待测透镜中心对应的标尺刻度和待测透镜的像的位置对应的标尺刻度。图4是通过激光散斑测量光束通过待测凸透镜像位置的光路图。

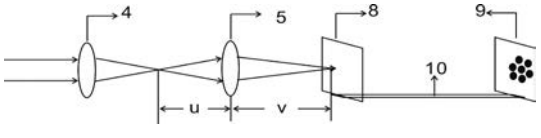


图4 激光散斑测量光束通过待测凸透镜像位置的光路图

图2中，设计短焦距透镜4的聚焦点作为待测凹透镜的“虚物”，光学导轨上靠近短焦距凸透镜4放置毛玻璃与像屏的连接体，毛玻璃粗糙表面在待测凹透镜“虚物”附近从左向右缓慢移动，由于毛玻璃、像屏和刚性连接体是一个整体，毛玻

璃和像屏沿着光学导轨向右缓慢联动(移动中,毛玻璃面和像屏不会因材料形变发生微小的横向、纵向移动或微小的旋转,即两者距离不变),待测透镜的"虚物"处光斑是虚物附近光斑最小的。像屏散斑最大时毛玻璃粗糙表面对应的位置是待测凹透镜的"虚物"的位置。记下待测透镜的"虚物"的位置对应的标尺刻度。从光学导轨上取下毛玻璃面和像屏一体结构,在光学导轨上短焦距凸透镜汇聚点(待测凸透镜的"虚物")左侧放置待测凹透镜。改变待测透镜与待测透镜的"虚物"的距离,使待测透镜的"虚物"通过待测凹透镜成缩小实像。记下待测透镜位置对应的标尺刻度。调节共轴,光学导轨上靠近待测透镜放置毛玻璃面和像屏一体结构,毛玻璃在待测凸透镜"像"附近从左向右缓慢移动,毛玻璃和像屏沿着光学导轨向右缓慢联动(移动中,毛玻璃面和像屏不会因材料形变发生微小的横向、纵向移动或微小的旋转,即两者距离不变),待测透镜的"像"处光斑是"像"附近光斑最小的。像屏散斑最大时毛玻璃粗糙表面对应的位置是待测透镜的"像"的位置。记下待测透镜的像的位置对应的标尺刻度。图 5 是通过激光散斑测量光束通过待测凹透镜像位置的光路图。

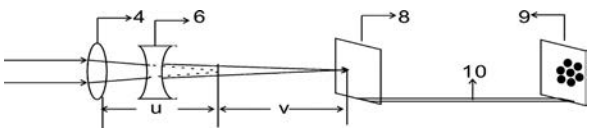


图 5 激光散斑测量光束通过待测凹透镜像位置的光路图

3 实验结果

为了验证该方法的有效性,利用本发明实施例提供的测量方法及装置(毛玻璃与像屏之间距离是 30cm)测量了一个凸透镜的焦距和一个凹透镜的焦距。

待测透镜物的位置对应标尺刻度 X_1,待测透镜位置对应标尺刻度 X_2,待测透镜像位置对应标尺刻度 X_3,详见表 1。

表 1 待测凸透镜、凹透镜测量数据及数据处理结果

透镜种类	X_1/mm	X_3/mm	X_3/mm	物距/mm	像距/mm	焦距/mm	理论焦距/mm
凸透镜	58.5	211.5	426.5	153	215	89.4	90
凹透镜	202	146	274	−56	128	99.6	100

凹透镜焦距的测量误差分别为 0.4%,凸透镜焦距的测量误差分别为 0.6%.为了进一步提高精度,可以增加毛玻璃与像屏刚性连接体距离。

4 结论

本文设计基于激光散斑设计测量凸透镜/凹透镜焦距实验装置和实验方法,测量透镜焦距范围宽范,测量精度高.而且毛玻璃与像屏距离越大,测量精度越高。

参 考 文 献

[1] 李东晖. 数字激光散斑位移测量和跟踪技术研究[D]. 安徽:中国科学技术大学,2006.

[2] 仲伟纲,岳公云,孙国文,等. 激光散斑测量透镜焦距[J]. 光学技术,1992,(4):47,39.

[3] 黄水平,张飞雁. 激光散斑在大学物理实验教学中的应用[J]. 物理与工程,2011,21(1):37-39,45.

[4] LI Q B, CHANG F P. Three-dimensional dimension of laserspeckle[J]. Applies Optics, 1992, 31(29): 6287-6291.

[5] 王仕璠. 信息光学理论与应用[M]. 北京:北京邮电大学出版社,2009:270-287.

■

EXPERIMENTAL DESIGN OF HIGH-PRECISION MEASUREMENT OF FOCAL LENGTH OF CONVEX-CONCAVE LENS BASED ON LASER SPECKLE

FENG Xuehong ZHANG Pei WANG Hongli GAO Bo TONG Huimin CHANG Kaige SHI Xiaohua CAO Zijun ZHANG Qian

(School of Physics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049)

Abstract The experimental method and device for high-precision measurement of focal length

of convex-concave lens are designed based on the laser speckle theory. The ground glass and image screen are designed as an integrated structure through a rigid material connector. with the laser passing through the convex lens with short focal length, the laser can make a convergence point which is regard as the object of the convex lens or virtual object of the concave lens. the convex lens(concave lens) to be measured are Placed on the right (left) side of the convergence point, and change the distance between the lens to be measured and the convergence point, so that the convergence point forms the real image reduced by the lens to be measured. the connector between the ground glass and the image screen is Placed in the vertical laser propagation direction, and the ground glass surface moves slowly from left to right near the "object" (including "virtual object") and "image" of the lens to be measured. and the corresponding position of the ground glass surface when the image screen speckle is maximum is the position of the "object" (including "virtual object") and "image" of the lens to be measured, and the distance between the object and the image distance of the lens to be measured is measured with high precision. the distance between the ground glass and the image screen is 30cm, the focal length of the concave lens with a focal length of −100mm is measured as −99.6mm and focal length of the convex lens with a focal length of 90mm is measured as 89.4mm by the experimental method and device. and the longer the distance between the ground glass and the image screen is, the higher the measurement accuracy is. The device has a wide range, high precision and simple method for measuring lens focal length.

Key words laser speckle; experimental device; experimental method; high-precision measurement; convex lens; concave lens

通过对比实验强化学生对切变模量的理解

徐婷婷　王晓峰　王才林　邓冬梅　张　欢*
（南方科技大学物理系，广东 深圳　518055）

摘　要　为了加深学生对切变模量强度量属性的理解，启发学生对材料微观结构的思考，本文在扭摆法测量切变模量实验的基础上增加了多组对比实验。新增的实验内容通过比较细丝材料、直径和长度对切变模量以及扭转系数的影响，引导学生探索切变模量的性质。教学实践表明，该对比实验取得了良好的教学效果，有利于消除学生认知上的误区，帮助他们巩固对强度量和广延量的理解。

关键词　切变模量；扭转系数；强度量；广延量；扭摆

切变模量是材料的重要力学参数，广泛应用于工程技术领域[1]。在大学物理实验课程中，普遍开设扭摆实验用以测量细丝切变模量[2]，其原理在于扭摆简谐转动周期和切变模量存在关联。目前，该实验的教学内容多侧重于实验方法的训练，而较少引导学生对切变模量的性质进行探索。往往有不少学生即便能准确地测定切变模量，也仍然错误地认为切变模量依赖于细丝的直径和长度。同时，围绕该实验的教学研究多致力于提高测量精度和扩充仪器功能[3-5]。因此，有必要针对切变模量的强度量属性，研究如何拓展传统的实验内容，消除学生认识上的误区。本文拟设置三种变量，即细丝材料、直径和长度，首先通过探索切变模量和各变量之间的关系验证切变模量的强度量属性；然后通过对比扭转系数与各变量之间的关系展现强度量和广延量的区别。教学实践表明，该对比实验取得了良好的教学效果，深化了学生对材料微观结构的思考。

1　实验装置

扭摆装置主要包括铁架台、细丝、悬架、铁环和计时器，如图1(a)所示。铁架台横杆和悬架上均装有钻头夹，用来锁紧细丝。细丝选取了钢丝、康铜丝和铝丝三种材料。细丝直径约介于0.3mm～0.6mm，长度约介于30cm～60cm。悬架在绕细丝旋转时会接近计时器感应探头触发计时。两个钻夹头之间所夹细丝的直径和长度分别记为 D 和 L。悬架的转动惯量记为 I_x。由于悬架的形状不规则，I_x 需要在实验中间接测定。铁环可安装于悬架上，其质量为416.1±0.1g，内外径分别为79.92±0.04mm和110.00±0.02mm，经计算转动惯量为 $I_0=961.71\pm0.47\,\mathrm{kg\cdot mm^2}$。

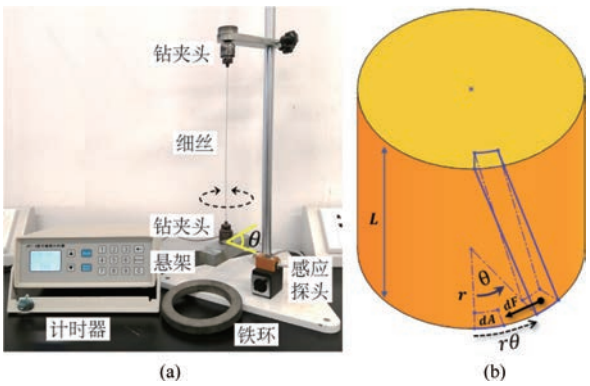


图1　实验装置图
(a) 实物图；(b) 细丝扭转示意图

收稿日期：2023-06-01
基金项目：南方科技大学教学改革项目(XJZLGC202224；XJZLGC202223；XJZLGC202225)，广东省教学改革项目(SJZLGC202207)资助。
通讯作者：张欢，南方科技大学物理系实验师，博士，从事大学物理实验教学和低维材料电子输运理论研究，zhangh@sustech.edu.cn
引文格式：徐婷婷，王晓峰，王才林，等. 通过对比实验强化学生对切变模量的理解[C]. 2023年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会，2023.
Cite this article：XU T T, WANG X F, WANG C L, et al. Reinforce the undertanding of shear modulus using controlled experiments[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education, 2023. (in Chinese)

2 实验原理

考虑如图1(a)所示扭摆装置，细丝上截面固定，下截面随悬架发生扭转，转角为 θ。在此过程中，细丝内部与轴心相距为 r 的微小长方体发生切变，下底面移动了 $r\theta$，如图1(b)所示。由于弹性，长方体下底面上产生恢复力 $\mathrm{d}F$，其与下底面面积 $\mathrm{d}A$ 以及移动量 $r\theta$ 之间的关系为[1]

$$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}A}=G\frac{r\theta}{L}. \tag{1}$$

上式等号左右侧分式分别表示切应力和切应变(记为 γ)。比例系数 G 是切变模量，它取决于材料的内禀性质，属于强度量。

根据恢复力可计算下截面上的总恢复力矩

$$M=\iint r\,\mathrm{d}F, \tag{2}$$

上述积分遍及整个下截面。结合式(1)，可得

$$M=\kappa\theta, \tag{3}$$

其中，κ 表示细丝的扭转系数，它属于广延量，依赖于细丝的切变模量 G、直径 D 和长度 L，函数关系为[2]

$$\kappa=\frac{\pi GD^4}{32L}. \tag{4}$$

当阻尼作用可忽略不计时，悬架仅受细丝恢复力矩作用，其转动方程为

$$I_x\ddot{\theta}=-M, \tag{5}$$

其中，I_x 和 $\ddot{\theta}$ 分别表示悬架的转动惯量和角加速度。求解以上方程可知悬架作简谐转动，周期为

$$T=2\pi\sqrt{I_x/\kappa}, \tag{6}$$

同理，在悬架上安装铁环后，新的转动周期为

$$T'=2\pi\sqrt{(I_x+I_0)/\kappa}, \tag{7}$$

其中，I_0 表示铁环的转动惯量，其值已在“实验装置”部分给出。联立式(6)和(7)，可得悬架转动惯量

$$I_x=I_0T^2/(T'^2-T^2). \tag{8}$$

上式表明，可以通过测量铁环安装前后的转动周期来测定 I_x。再结合式(6)测定扭转系数

$$\kappa=4\pi^2I_x/T^2, \tag{9}$$

然后结合式(4)测定切变模量

$$G=32\kappa L/(\pi D^4). \tag{10}$$

最后，在不确定度计算方面，可以根据不确定度传递理论[2]和式(9)得到 κ 的不确定度表达式

$$U_\kappa=\kappa\sqrt{\left(\frac{U_I}{I_x}\right)^2+\left(2\frac{U_T}{T}\right)^2} \tag{11}$$

其中，U_I 是 I_x 的不确定度，U_T 是周期的不确定度。同理，结合式(10)可以得到 G 的不确定度

$$U_G=G\sqrt{\left(\frac{U_\kappa}{\kappa}\right)^2+\left(\frac{U_L}{L}\right)^2+\left(4\frac{U_D}{D}\right)^2} \tag{12}$$

其中，U_κ、U_L 和 U_D 分别表示 κ、L 和 D 的不确定度。由于测量 L 和 D 时，分别使用了卷尺和千分尺，所以 $U_L\approx1\mathrm{mm}$ 和 $U_D\approx0.001\mathrm{mm}$。

3 实验操作

为了测量 I_x，本实验将直径约为0.396mm的钢丝接入扭摆，并通过调整上端钻头夹紧固位置使 $L=40.00\mathrm{cm}$。接着将计时模式设置为6次周期平均，并将感应探头对准悬架平衡位置[6]，然后先后测量铁环安装前后的转动周期。经测量，安装铁环前的转动周期为 $T=11.437\pm0.012\mathrm{s}$，安装铁环后的转动周期为 $T'=19.655\pm0.011\mathrm{s}$。将上述数据以及 I_0 的值带入式(8)，计算得到 $I_x=492.2\pm2.7\mathrm{kg\cdot mm^2}$。

在完成上阶段测量后，本实验再按3种材料、4种直径和4种长度截取48根细丝，并依次接入扭摆测量转动周期(未安装铁环)。然后将周期数据和 I_x 的值带入式(9)计算 κ，最后根据式(10)计算 G。

4 实验结果和讨论

经测量，本实验得到了48种不同参数条件下的扭转周期、细丝扭转系数、切变模量和相应的不确定度，结果见表1。从表中数据可以看出，同种材料切变模量的测量值大致相同，而不同材料切变模量的测量值相差较大，其中钢丝的最大，铝丝的最小；扭转系数的测量值不仅取决于材料种类，还随细丝长度增加而减小，以及随细丝直径增加而增加，此特征与式(4)相符。另外，表中切变模量的测量值与公认值相符[7]。

为了更好地展现数据特征，图2描绘了切变模量与细丝长度、直径间的关系。图中的点表示实验数据，线表示平均值所在位置。图2(a)中细丝的直径均约为0.4mm，图2(b)中细丝的长度均

表 1　细丝切变模量测量数据

材料	D/mm	L/cm	T/s	κ/mJ	G/GPa
钢丝	0.308	30.00	9.962±0.006	0.1958±0.0013	66.5±1.5
钢丝	0.308	40.00	11.437±0.012	0.1486±0.0011	67.3±1.6
钢丝	0.308	50.00	12.800±0.012	0.1186±0.0009	67.1±1.5
钢丝	0.308	60.00	13.978±0.007	0.0995±0.0007	67.5±1.4
钢丝	0.396	30.00	5.992±0.002	0.5412±0.0034	67.2±1.3
钢丝	0.396	40.00	6.935±0.002	0.4040±0.0024	66.9±1.2
钢丝	0.396	50.00	7.735±0.003	0.3248±0.0020	67.3±1.2
钢丝	0.396	60.00	8.444±0.003	0.2726±0.0017	67.7±1.2
钢丝	0.497	30.00	3.868±0.003	1.2990±0.0092	65.2±1.2
钢丝	0.497	40.00	4.448±0.006	0.9822±0.0081	65.7±1.2
钢丝	0.497	50.00	4.976±0.006	0.7848±0.0061	65.6±1.2
钢丝	0.497	60.00	5.451±0.002	0.6540±0.0041	65.6±1.0
钢丝	0.594	30.00	2.654±0.003	2.7580±0.0211	67.8±1.2
钢丝	0.594	40.00	3.068±0.001	2.0642±0.0129	67.6±1.0
钢丝	0.594	50.00	3.415±0.002	1.6662±0.0111	68.2±1.1
钢丝	0.594	60.00	3.730±0.002	1.3966±0.0091	68.6±1.0
康铜丝	0.301	30.00	11.236±0.027	0.1539±0.0016	57.4±1.5
康铜丝	0.301	40.00	12.877±0.021	0.1172±0.0010	58.3±1.4
康铜丝	0.301	50.00	14.363±0.022	0.0942±0.0008	58.6±1.4
康铜丝	0.301	60.00	15.781±0.009	0.0780±0.0005	58.2±1.2
康铜丝	0.405	30.00	6.208±0.005	0.5043±0.0035	57.4±1.2
康铜丝	0.405	40.00	7.128±0.007	0.3825±0.0029	58.0±1.2
康铜丝	0.405	50.00	7.984±0.004	0.3048±0.0020	57.8±1.1
康铜丝	0.405	60.00	8.746±0.005	0.2540±0.0017	57.8±1.1
康铜丝	0.501	30.00	4.031±0.007	1.1957±0.0109	58.0±1.2
康铜丝	0.501	40.00	4.641±0.006	0.9020±0.0073	58.3±1.1
康铜丝	0.501	50.00	5.187±0.004	0.7222±0.0051	58.4±1.0
康铜丝	0.501	60.00	5.675±0.005	0.6035±0.0044	58.5±1.0
康铜丝	0.605	30.00	2.741±0.004	2.5873±0.0213	58.9±1.1
康铜丝	0.605	40.00	3.166±0.003	1.9388±0.0147	58.9±1.0
康铜丝	0.605	50.00	3.530±0.003	1.5594±0.0112	59.2±0.9
康铜丝	0.605	60.00	3.868±0.003	1.2990±0.0094	59.2±0.9
铝丝	0.299	30.00	17.298±0.017	0.0649±0.0005	24.8±0.6
铝丝	0.299	40.00	19.881±0.022	0.0492±0.0004	25.1±0.6
铝丝	0.299	50.00	22.256±0.023	0.0392±0.0003	25.0±0.6
铝丝	0.299	60.00	24.281±0.045	0.0330±0.0003	25.2±0.6
铝丝	0.403	30.00	9.841±0.028	0.2007±0.0022	23.3±0.6
铝丝	0.403	40.00	11.297±0.049	0.1523±0.0022	23.6±0.6
铝丝	0.403	50.00	12.559±0.050	0.1232±0.0017	23.9±0.6
铝丝	0.403	60.00	13.768±0.044	0.1025±0.0012	23.8±0.6
铝丝	0.502	30.00	6.210±0.030	0.5039±0.0077	24.3±0.6
铝丝	0.502	40.00	7.125±0.022	0.3828±0.0044	24.6±0.5
铝丝	0.502	50.00	7.906±0.032	0.3109±0.0042	25.0±0.6
铝丝	0.502	60.00	8.698±0.045	0.2568±0.0041	24.8±0.6
铝丝	0.608	30.00	4.366±0.039	1.0192±0.0237	22.8±0.8
铝丝	0.608	40.00	4.967±0.028	0.7876±0.0131	23.5±0.6
铝丝	0.608	50.00	5.532±0.030	0.6350±0.0104	23.7±0.6
铝丝	0.608	60.00	6.066±0.024	0.5281±0.0071	23.6±0.5

约为40cm。从图中可以看出，切变模量测量值未随细丝长度或直径发生明显变化，而是分布在平均值附近；不同材料的切变模量存在明显差异。上述结果证实了切变模量的强度量属性。

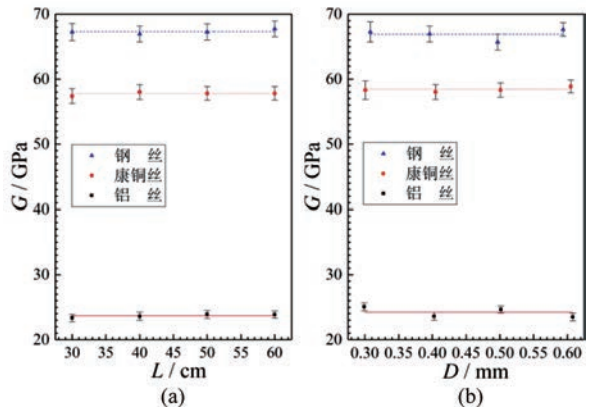


图2　切变模量与细丝长度、直径的关系图

(a) $D\approx0.4$mm；(b) $L\approx40$cm

切变模量的强度量属性反映了材料的微观性质。为了简化分析，可以近似认为细丝由大量原子按立方结构堆叠而成，如图3所示。在细丝发生切变后，原子层整体发生平移，键角变化量等于细丝的切应变 γ[8]。由于偏离平衡位置，原子受到恢复力作用，其小大为 $\eta\gamma$，系数 η 表征原子间作用强度。因此，切面上的总恢复力为 $F=An\eta\gamma$，其中的 A 和 n 分别表示切面面积和单位面积上的原子数量。结合式(1)中关于切变模量的定义，可知 $G=n\eta$[9]。基于上述简化模型可推测，铝丝切变模量较小的原因可能是原子间作用相对较弱和原子排布相对疏松。

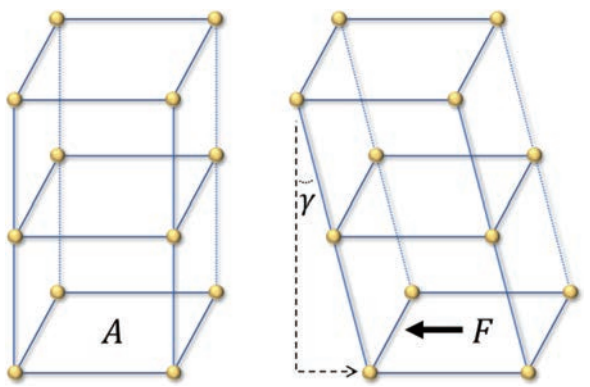


图3　切变微观简化示意图

作为对比，图4描绘了扭转系数与细丝长度、直径间的关系。图中的点表示实验数据，线表示拟合直线，目标函数为式(4)。图4(a)中细丝的直径均约为0.4mm，图4(b)中细丝的长度均约为40cm。从图中可以看出，扭转系数随细丝长度和直径的改变发生显著变化，它们之间的关系分别为 $\kappa\propto L^{-1}$ 和 $\kappa\propto D^4$，均与式(4)中的理论预期相符良好。上述结果证实了扭转系数的广延量属性。

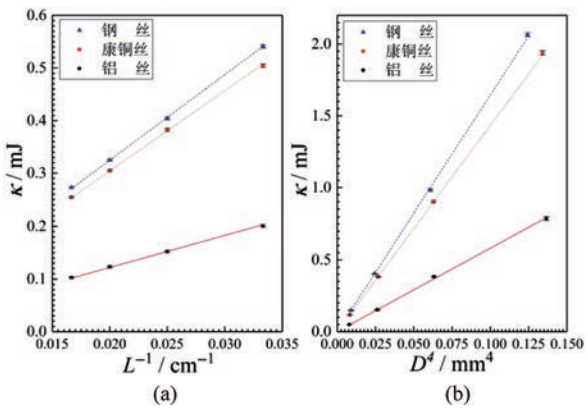


图4　扭转系数与细丝长度、直径的关系图

(a) $D\approx0.4$mm；(b) $L\approx40$cm

5　结语

本文通过新增对比实验内容验证了切变模量的强度量属性以及扭转系数的广延量属性。教学实践表明，该对比实验取得了良好的教学效果，有助于帮助学生消除认识上的误区和启发他们对材料微观结构的思考。教学实施方面的建议是，该对比实验既可以作为独立的探究课题，也可以通过“一台扭摆一种细丝”的安排融入到平常教学过程中。

参　考　文　献

[1] PELLEG J. Mechanical properties of materials[M]. Dordrecht:Springer,2013:23-24.

[2] 吴泳华，霍剑青，浦其荣. 大学物理实验[M]. 北京：高等教育出版社，2005：125-126.

[3] 张平. 切变模量和转动惯量实验的改进[J]. 大学物理，2006，25(5)：28-31.

[4] 陈莹梅，刘平安. 基于垂直轴定理的新型扭摆实验仪的实验研究[J]. 实验室研究与探索，2006，25(11)：1363-1365.

[5] WANG Y T, et al. An asymmetrical double torsion pendulum for studying coupled harmonic motion[J]. American Journal of Physics, 2020,88(9):760-768.

[6] 邹红玉，郑红平. 扭摆法测量转动惯量实验中光电门摆放位

置的探究[J]. 物理实验,2009,29(6):29-31.
[7] WARLIMONT H, MARTIENSSEN W. Handbook of materials data[M]. Dordrecht:Springer,2018:61-120.
[8] YADAV S K, et al. First-principles study of shear behavior of Al, TiN, and coherent Al/TiN interface[J]. American Journal of Physics, 2020,88(9):760-768. Journal of Applied Physics, 2012,111(8):083505,1-5.
[9] Crystal structures and elastic properties of superhard IrN_2 and IrN_3 from first principles[J]. Physical Review B, 2007, 76(5): 054115,1-15.

REINFORCE THE UNDERTANDING OF SHEAR MODULUS USING CONTROLLED EXPERIMENTS

XU Tingting WANG Xiaofeng WANG Cailin DENG Dongmei ZHANG Huan
(Department of Physics, Southern University of Science and Technology, Shenzhen, Guangdong 518055)

Abstract In this paper, an extended study is conducted on the experiment of shear modulus measurement to demonstrate the shear modulus as an intensive quantity and inspire students to explore the microscopic structure of materials. The new experiment content guides students to investigate the property of shear modulus by evaluating the influences of wire diameter, wire length and wire material on shear modulus and torsion constant. The teaching practice shows that the proposed content is effective to help students clarify the potential misunderstanding and consolidate their understanding toward intensive quantity and extensive quantity.

Key words shear modulus; torsion constant; intensive quantity; extensive quantity; torsion pendulum

民族预科班物理课程“层次化”教学模式的探索实践

于 杰* 李雪春 常葆荣 李淑凤 柴 硕
（大连理工大学物理学院，基础物理国家级实验教学示范中心，辽宁 大连 116024）

摘 要 本文作者结合十余年的预科物理教学实践，进行了预科物理课程“层次化”教学模式的探索实践。通过设置多元化、循序渐进、层次化的教学内容，将教学内容理论联系实际，调动学生的学习兴趣和主观能动性；处理好预与补、巩固与提高、讲授与训练、学习知识与提高能力的关系；兼顾各层次水平学生，促进学生知识、能力、素质协调发展。

关键词 民族预科班；层次化；教学模式

发展少数民族预科教育是党中央民族政策的一项重要举措，是适应改革开放和西部大开发战略实施的需要，对促进民族地区稳定和可持续发展，增强民族团结具有重要意义。少数民族地区教育比较落后，教育资源不足，这是制约民族地区发展的最大瓶颈。民族地区在面临着改造经济环境、加快工业化进程压力下，要实现跨越式发展，必须要有能驾驭全局、能宏观决策的战略性人才及德才兼备的各类专门人才，这需要依靠民族教育，尤其是民族高等教育的强有力支撑。少数民族预科教育是高等教育的重要组成部分，是高等教育的特殊层次，更是我国民族政策的集中体现，为民族地区人才的培养、民族高等教育的发展做出了巨大的贡献[1]。

新中国成立后，党和国家大力倡导发展民族预科教育。从 1980 年开始，在清华大学、北京大学、大连理工大学、东北师范大学等十所院校先后创办了民族班。预科教育是少数民族高等教育的重要组成部分，具有过渡性、层次性、特殊性与衔接性等特点[2]。预科教育经过多年的发展，现已达到相当规模。在培养提高少数民族地区人口素质方面，大连理工大学承办的民族班和民族预科班发挥了重要的作用。

预科班物理教学是一种比较特殊的“中学物理内容加深及其与大学物理衔接”的过渡式教学模式。按照预科生基础知识薄弱和生活习惯特殊等特点，要求教师在授课过程中有机地将大学物理和中学物理知识揉合在一起，提高学生科学素质和能力、做好预科班物理与大学物理之间的衔接、为在本科阶段达到正常高考入学大学生的水平做好铺垫[3]。在教学原则、培养特色、教学方法与教学考核等方面切实适应民族预科教育的发展要求，达到为民族地区培养优秀建设人才的目的。

从 2005 年至今，本人已经连续担任 18 届少数民族预科班的预科物理主讲。通过对这些年的民族预科班物理教学实践的总结，我认为民族预科班物理教学中主要面临以下几方面问题：(1)生源来自不同地区、不同民族，入学前教育状况差别较大。我校民族预科班的学生按地区分主要来自新疆、西藏、广西、甘肃、贵州、宁夏、内蒙古等地区，其中新疆学生占一半左右；按民族分有维吾尔、哈萨克、藏、回、满、蒙古、壮、锡伯族等十几个民族。通过对高考成绩和各学科教育程度调查比较发现，不同地区、不同民族的学生所接受的中等

收稿日期：2023-06-04

基金项目：民族预科班物理课程“层次化”教学模式的探索与实践（2021 年度教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会大中物理教育衔接工作委员会教学研究课题，项目编号：WX202110）；《大学物理》课程思政建设与实践（大连理工大学教学改革基金重点项目，项目编号：ZD2020032）。

通讯作者：于杰，女，大连理工大学物理学院副教授，博士研究生，主要从事大学物理基础课教学工作以及分子与激光场相互作用的理论研究，yujie@dlut.edu.cn。

引文格式：于杰，李雪春，常葆荣，等. 民族预科班物理课程“层次化”教学模式的探索实践[C]. 2023 年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会，2023.

Cite this article：YU J，LI X C，CHANG B R，et al. Exploration and practice of the“Hierarchical” teaching mode of physics course in preparatory class for ethnic minorities[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education，2023.（in Chinese）

教育程度具有很大差异。(2)部分学生汉语水平较低,物理基础薄弱。民族学生长期生活在民族聚居区和散居区,有各自的语言习惯和文化。很长时间以来,在新疆、西藏、内蒙古等地区,一些高中采用维语、藏语、蒙语等授课,这些学生汉语水平普遍较低。此外,由于高考录取对单科成绩不做要求,所以一些民族地区高中会建议学生做“战略性放弃”,集中突击考生的强项学科,导致部分学生高中物理基础很差,甚至基本不学习物理,使得大多数民族预科学生物理基础薄弱。近两年来,随着各地高考政策改革的不断推进,这种现状有所缓解,但是与正常高考上来的同学们相比,这种差异还是比较明显。(3)缺少针对民族生的物理教材。目前,全国各高校的预科班物理教学没有统编的教材,各校按照自己的标准实施教学。本人在多年的教学实践中发现,预科班物理教材存在两个方面的问题:滞后性和不适应性。一方面没有考虑预科班学生的特点,在中学阶段和大学阶段教学内容的渗透和衔接方面考虑不够;另一方面教学内容没有更新,知识明显滞后于当今科技的发展。

针对民族预科班物理教学中存在的主要问题及预科学生的特点,结合我校的师资情况,我们在预科物理教学过程中采用“层次化”的差异化教学模式,兼顾各层次水平学生,以期做好预科与本科的衔接和过渡,全面提高预科班学生素质。通过设置多元化、循序渐进、层次化的教学内容,将教学内容理论联系实际,充分调动学生的学习兴趣和主观能动性;处理好预与补、巩固与提高、讲授与训练、学习知识与提高能力的关系;促进学生知识、能力、素质协调发展,共同提高。

(1) 在授课过程中,将授课内容以及习题布置分为三个层次:预科基础达标、本科基本程度、拓展提高。

每年的开学初,我们都要先开展调查,通过学生的反馈,分析新入学的不同地区、不同民族预科生的语言基础、文化基础、物理基础。据此设置本学年预科物理的课程内容、难度层级等。在此之后的授课环节中,我们会将各章内容分成“预科基础达标、本科基本程度、拓展提高”三个层次进行讲授,在课后作业布置的环节也同样分成三个层次。我校的民族预科生在预科阶段的学习成绩不计入本科学业成绩,但是预科阶段的成绩会影响到能否顺利从预科升入本科、能否选到心仪的本科专业、能否顺利本科毕业等等,所以我们在设置内容的难易层级的时候,就要首先考虑这一部分的要求。“预科基础达标”的内容就要兼顾全体预科生,使得他们通过自己的努力,认真完成预定的这部分内容,就可以通过预科阶段结业考试;预科物理是为本科大学物理的学习奠定基础的,如果预科阶段能够夯实物理基础,那么进入本科之后,预科生与普通入学的本科生之间的差距就会缩小很多,能够帮助他们顺利完成本科阶段大学物理的学习,因此我们的预科物理设置了“本科基本程度”这一层级的内容,讲授占据大学物理大约60%~70%的教学内容中的基础知识,比较难的和复杂的就不进行讲授,旨在强调奠定基础,但是又不能让学生感觉已经学过了一次大学物理而松懈,造成两层皮现象;最后,考虑到还有一部分学生物理基础很好、或者对学习物理的兴趣很强,我们还设置了一些“拓展提高”的内容,拓宽学生的视野,引领他们分析、解决问题。习题的设置也本着这样的原则进行。比如关于力做功问题的讲解过程中,恒力在直线运动中做功的内容讲解和习题布置部分,就是中学知识的复习讲解,属于基础达标部分,所有学生都必须熟练掌握;而恒力在曲线运动中做功问题和变力在直线运动中做功问题,就属于本科基础,讲授过程中重点强调思想和思维方法,重点在于引领学生学会将“化整为零、归零为整”的微积分思想运用于研究力做功问题,进而会举一反三。所布置的练习题也只需简单的微积分运算,巩固这种处理问题的方法的运用。之后延伸至变力在曲线运动中做功问题的处理,让学有余力的学生可以在此基础上拓展提高,对于基础相对薄弱的同学们可以选学。布置的题目也是选作的星标题目,星标题目不计入平时作业成绩,但是教师会认真批改,根据完成度在期末时候适当提高完成星标作业学生的平时成绩。

各个章节的内容讲授和习题布置,基本采用上述类似的方法分层次进行,做好高中与预科、预科与本科的衔接,又能兼顾各个层次的学生,处理好预与补、巩固与提高、讲授与训练、学习知识与提高能力的关系。

(2) 通过撰写学科小论文,提高学生物理知识应用能力,对学生进行价值观的引领。

在讲课过程中,有意识地通过定理、规律的推

导、现代物理知识的新应用和新发展、物理学家的感人事迹、物理规律发现过程的物理学史以及演示实验的参观、演示和参与，教会学生一些科研的方法、培养其理论和实践相结合的能力，将“思政元素”融入教学，帮助学生树立科学的世界观、正确的人生观和价值观，激发学生的爱国主义情怀、民族自信心和自豪感，树立科技报国的理想信念，通过展现物理学家在研究思考物理问题时的批判性思维和科学研究素养，将科学探究精神通过课堂教学内化于心。然后，鼓励学生充分利用演示实验室、图书馆以及网络等一系列平台获取资料，撰写学科小论文。按论文的质量在平时成绩上予以一定程度的加分奖励，提高学生物理理论与实践结合的能力，对学生进行正确的价值观的塑造和引领。

(3) 成立学习兴趣小组，在学生间结成帮扶对子，协力提高学生整体水平。

利用同学之间生活习惯和信仰相近，更易于沟通、易于交流内心真实感受的特点，主讲教师预先在班级里培养几名物理程度比较高的学生，让他们充分理解老师所讲的内容，然后利用课后时间给基础差的学生当小老师，协力提高学生整体水平。

(4) 充分发挥助教的作用和课程资源的优势，做到课内教学与课外辅导相结合，线上资源与线下授课相结合。

主讲教师课下辅导、督促助教认真做好每一道作业题，把学生作业批改中存在的问题列举出来，在每章结束后，利用自习课到班级给学生讲解，巩固课堂教学效果。此外，我们大学物理教学中心在超星学习通平台和中国大学慕课平台上有着丰富的教学资源，主讲教师授课的过程中，根据内容进度和学生学习情况反馈，及时指导学生利用线上资源进行课前预习、课后巩固，通过线上资源与线下授课相结合，来处理预与补、巩固与提高，从而达到兼顾各个层次学生的目的，整体提高预科学生的水平。

此外，我们还着手制定了适合本校预科班特点的教学大纲，编写了适合预科阶段少数民族学生学习规律特点的物理学教材《基础物理学》和习题集，目前《基础物理学》已经正式出版，并在2022级预科班中开始使用。习题集也已经在几届预科生中使用，根据使用效果继续丰富完善，然后再考虑出版问题。

通过十多年的探索实践，我们发现在民族预科班中采用“层次化”的教学模式进行预科物理教学，能够兼顾各层次水平学生，为学生进入本科后的物理及相关学科学习奠定基础，有助于全面提高预科学生素质，其优势是显而易见的。每年八十多人的预科生基本都能顺利完成预科物理学习，除个别的1～2人因个人原因或家庭原因，没有顺利通过，需要进入本科后再回头重修预科物理。并且，通过调研发现，采用该教学模式之后，大部分少数民族预科生升入本科之后都能跟上大学物理的授课进度，对大部分预科生来说大学物理学习也不再是老大难问题。

参 考 文 献

[1] 韦鹏飞. 造就少数民族高级人才的金色桥梁[J]. 中国民族教育，2009，10，17-19.

[2] 吉克跃林，马锦卫，邓小林等. 少数民族预科教育模式研究[J]. 民族学刊，2011，6，73-103.

[3] 毕磊. 黑龙江民族预科物理教学改革的回顾[J]. 大学教育，2012，1(2)，45-46.

■

EXPLORATION AND PRACTICE OF THE“HIERARCHICAL” TEACHING MODE OF PHYSICS COURSE IN PREPARATORY CLASS FOR ETHNIC MINORITIES

YU Jie LI Xuechun CHANG Baorong LI Shufeng CHAI Shuo

(School of Physics, National Demonstration Center for Experimental Physics Education, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024)

Abstract In this paper, the author combined with more than ten years of preparatory physics teaching practice, carried out the exploration and practice of the “Hierarchical” teaching mode

of preparatory physics courses. By setting up diversified, step-by-step and hierarchical teaching content, linking the teaching content theory with practice, the students' interest and initiative in learning are aroused; The relationships between preparation and reinforcement, consolidation and improvement, teaching and training, learning knowledge and improving ability were well handled. The teaching mode can considerate the students at all levels and promote the coordinated development of students' knowledge, ability and quality.

Key words preparatory class for ethnic minorities; hierarchical; teaching mode

迈克耳孙干涉环纹自动计数系统的设计

李川飞　毛爱华　李丽荣
（内蒙古科技大学 理学院，内蒙古 包头　014010）

摘　要　针对在“用迈克耳孙干涉仪测激光波长”物理实验中，学生手工测量干涉环纹级数变化导致的实验误差大的问题，本文采用基于 Python 的 GUI（graphical user interface）开发框架软件 Kivy，通过设计智能计数算法、应用图像识别技术编写干涉环纹级数的自动计数程序，打包成 APK（android application package）文件安装于智能手机，用于测量环纹级数变化，以达到降低辅助计数系统的硬件成本、提高环纹级数测量灵敏度及减小实验误差的目的。经实验验证，用自动干涉环纹计数系统测量明显比手动操作测量误差小。

关键词　迈克耳孙干涉仪；图像识别；计数算法

迈克耳孙干涉仪是 1881 年由迈克耳孙设计制成的用分振幅法产生双相干光束干涉的仪器，用它可以观察光的干涉现象，也可以研究许多物理因素对光的传播影响，同时还可以测定单色光的波长、光源和滤光片的相干长度以及透明介质的折射率等[1]。“用迈克耳孙干涉仪测激光波长”是本科阶段经典的大学物理实验之一，能很好地提升学生实验技能和实验素质[2]。在实验操作中，存在以下一些问题使得难以准确读出干涉环纹级数变化，以致测量结果的误差偏大。一是实验使用的激光刺激学生的眼睛，长时间观察环纹，眼睛疲劳易产生误读错读；二是学生在人工测量时难免会使实验仪器轻微晃动，出现环纹中心级数发生跳变；三是学生无法用肉眼长时间连续测量，使得所测量的环纹变化数量有限，也会导致实验结果精度低。

近年来，高校实验教研人员已设计了不少装置辅助测量环纹级数变化量。主要用光电二极管、光敏电阻或 CCD（charge coupled device）作为感光元件，接收干涉环纹中心斑点光强，进而判断级数变化个数[3-6]。也有用单片机控制步进电机转动来代替手动转动微调鼓轮，以减小读数时产生的系统误差[7-8]。这些装置会带来一定的实验精度收益，但缺点非常明显，一是硬件成本高，安装和使用不方便；二是测量灵敏度低，当干涉环纹亮度低下或环纹级数快速变化时，装置将无法进行精确测量。

为了降低额外设计辅助计数系统的成本，提高测量灵敏度，减小实验误差，本文基于学生人人都有的智能手机，运用计算机图像识别技术，编写 APP（Application）界面及程序，智能测量了干涉环纹中心级数变化量。

1　迈克耳孙干涉实验原理

迈克耳孙干涉仪光路清晰简单，能够直观地展示两束相干光的干涉现象，基本光路图如图 1 所示。光源 S 一般选用 He-Ne 激光器，为实验待测波长光源。分光板 G_1 底部镀有半反射半透射膜，将入射光束分为折射光束和反射光束两部分。补偿板 G_2 用于补偿这两束光线的光程差，以及白光干涉时的色散[9]。平面反射镜 M_1 和 M_2 分别垂直放置于反射光束和折射光束的正前方。

实验原理可以简述为，光源 S 发出的光经过

收稿日期：2023-06-05
基金项目：内蒙古科技大学 2022 年度教育教学改革研究项目（JY2022037）。
作者简介：李川飞，男，讲师，主要从事物理实验教学工作，研究方向为电磁传播，li_chuanfei@163.com。
引文格式：李川飞，毛爱华，李丽荣. 迈克耳孙干涉环纹自动计数系统的设计[C]. 2023 年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会，2023.
Cite this article：LI C F, MAO A H, LI L R. Automatic counting system of Michelson interference fringes[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education, 2023. (in Chinese)

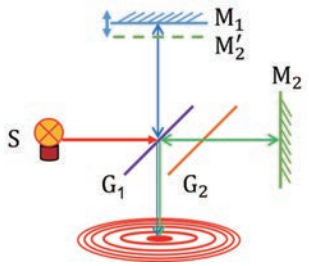


图 1　迈克耳孙干涉仪基本光路图

分光板 G_1 分成折射光束和反射光束两部分相干光，反射光束向上传播遇到反射镜 M_1 后反射回来，再经过 G_1 折射后到达视野区域。折射光束向左传播经过补偿板 G_2 后，遇到反射镜 M_2 反射回来，再经过 G_1 反射后也达到视野区域。调整 M_1 或 M_2 的镜面倾斜度，使得两者镜面严格垂直，则折射光束和反射光束汇聚在视野中形成明暗相间的圆环状干涉图样。若沿分光板 G_1 做反射镜 M_2 的像 M_2'，改变反射镜 M_1 到 M_2' 的距离 d，由光程差公式可得出环纹中心级数变化数 N 与 M_1 移动量 Δd、激光波长 λ 之间满足关系：

$$\Delta d = \frac{1}{2}N\lambda \tag{1}$$

通过改变 M_1 的移动量 Δd，测量此过程中干涉圆环中心级数变化数 N，根据上述关系式即可求出激光光源的波长 λ。

2　软件设计

程序设计流程主要包括干涉环纹图像的采集和处理、级数计数算法设计、APP 界面设计和结果显示三部分。

程序设计的核心为对圆环状干涉图像的处理，具体为将手机摄像头采集的每一帧干涉图像，识别出环纹中心后，进行灰度图转化、滤波和二值化处理，再将区域中亮的像素点数依次存入列表中，然后根据移动 M_1 过程中环纹中心周期性地“吞”或“吐”的规律，判断干涉环纹级数是否增加或减小。为了消除实验环境晃动带来的影响，在识别环纹中心为亮斑和暗斑时均作标记，只有环纹中心斑点满足“亮-暗-亮”或“暗-亮-暗”变化时才进行计数。

2.1　获取干涉图样

实验时，调整好干涉仪后，将智能手机固定在支架上，手机摄像头对准毛玻璃屏上的干涉图样。通过手机摄像头获取到实时的每一帧干涉环纹图像，首先将其转为灰度图，并识别出环纹中心区域，然后画出灰度直方图，整个过程如图 2。图中选取了 6 帧连续的干涉图像，识别出干涉环纹中心，从直方图中可以明显看出，干涉图像中心斑点最亮时，峰值集中在灰度值为 200 的附近，而中心斑点较暗时，峰值集中于灰度值为 150 的附近。

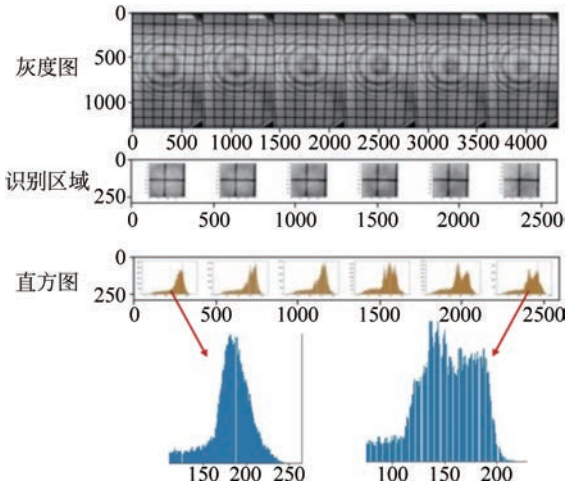


图 2　干涉图像的灰度图、识别区域和灰度直方图

2.3　图像预处理和二值化

干涉环纹中心识别区域在预处理之后进行二值化。预处理的主要作用是去噪，基本原理为设计一 $m \times m$ 的卷积核，然后和输入图像进行卷积。如均值滤波的卷积核为 $m \times m$ 的全 1 矩阵，其作用为对输入像素及周围若干点的灰度级做平均，以达到减小噪声的目的。

高斯滤波是将输入图像与呈高斯分布的卷积核进行卷积，二维空间的高斯分布为

$$G(u,v) = \frac{1}{2\pi\sigma^2}e^{-(u^2+v^2)/2\sigma^2} \tag{2}$$

高斯卷积核以输入像素点为圆心，其他像素点分别处于不同的同心圆上，圆心处具有最大的权重，其他像素点依据所处圆的半径大小具有对应的权重，半径越大，其权重越小。设权重 $\sigma=1.5$，滤波半径为 1 的高斯卷积核约为

$$\begin{pmatrix} 0.045 & 0.057 & 0.045 \\ 0.057 & 0.071 & 0.057 \\ 0.045 & 0.057 & 0.045 \end{pmatrix}$$

双边滤波是在基于空间分布的高斯滤波基础上，为了保留更多的边缘信息而设计的算法。双边

滤波结合了空间分布和灰度分布，加入了对灰度值的权重，即在邻域内，越接近中心灰度值的像素点权重越大，灰度值相差越大的像素点权重越小，最后将空间权重与灰度权重相乘，得到双边滤波的卷积核[10]。对识别区域的双边滤波效果如图3。

干涉图像的二值化是通过选取合适的阈值将所有像素点的灰度值设置为0或255，即整个干涉图像呈现出黑白效果。阈值选取是二值化的关键，有较多的算法可以实现阈值的自动选取。通过分析前面干涉环纹识别区域的灰度直方图，可以发现图像灰度值呈集中分布，中心为亮斑时灰度值集中分布在150至250之间，峰值在200附近；中心为暗斑时集中分布在100至200之间，峰值在150附近。因此本文自定义分割阈值为175，二值化后效果如图3所示。

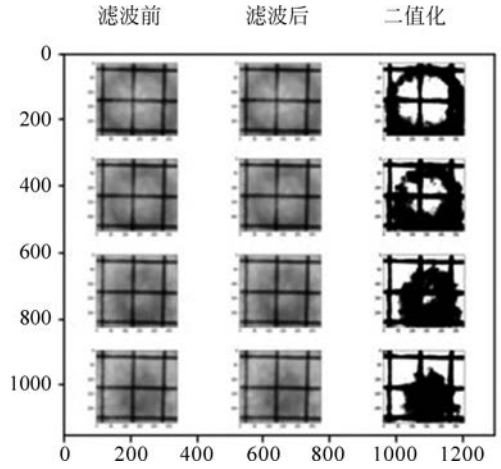


图3 干涉环纹中心二值化

2.4 计数算法

通过二值化后的每一帧黑白干涉图像，较为容易地检测出圆心是亮斑还是暗斑。不论环纹中心是在“吞”还是“吐”，连续帧的图像总是呈现出由亮到暗，再由暗到亮的周期性规律。统计每一帧图像中亮值的像素点个数，存在列表中。列表中的值周期性的由大到小，再由小到大，选取值连续变大时环纹中心级数增加1，即可计量出环纹级数变化。为了消除实验环境晃动影响，避免出现环纹级数跳变时增加测量值，在像素点亮度值连续增加和连续减小时均进行标记，只有在判断标记值满足由亮到暗和由暗到亮的循环时才增加环纹级数变化。自动测量环纹级数变化量的核心代码如下。

```
class MyCamera(Camera):
    value = NumericProperty(0)
    list1 = ObjectProperty([])
    flag = '1'
    def on_tex(self, *l):
        super(MyCamera, self).on_tex(*l)
        w, h = self.texture.size
        frame=np.frombuffer(self.texture.
        pixels, 'uint8').reshape(h, w, 4)
        gray=cv2.cvtColor(frame, cv2.
        COLOR_RGBA2GRAY)
        gray = gray[440:640, 890:1110]
        _, img = cv2.threshold(gray,
        175, 255, 0)
        num = np.sum(img > 0)
        self.list1.append(num)
        length = len(self.list1)
        if length > 4:
            if (self.list1[length - 4] >
            self.list1[length - 3] >
            self.list1[length - 2] >
            self.list1[length - 1]) and
            (self.flag == '1'):
                self.value=self.value + 1
                self.flag = '0'
            if self.list1[length - 4] <
            self.list1[length - 3] <
            self.list1[length - 2] <
            self.list1[length - 1]:
                self.flag = '1'
```

目前智能手机大多支持设置录像帧率为60FPS，为了更稳定可靠地实现环纹级数变化量计数，算法中最多使用连续8帧图像来判断环纹级数是否增加1。即本论文能够在环纹级数变化速率高达8环/秒的条件下进行精确测量，而通过人眼识别来手工计量环纹级数约为1环/秒。可见相比手工测量，使用手机APP自动测量能够提升实验测量的灵敏度。

2.5 界面设计

APP界面采用Kivy开发，Kivy是一个开源的、跨平台的Python框架，用于开发创新的、多点触控的用户界面应用程序。APP界面设计主要包

括的元素有摄像头组件、控制组件、显示标签等，各组件之间需要进行控制值和数据的传递。另外，APP 中还实现实验预习和操作指导，以及实验数据记录和自动处理功能。

3 实验验证

在实验中相比于学生人工测量，用智能手机辅助测量的干涉环纹中心级数变化量要大地多，有助于提高实验精度。测量所得数据如表 1。

表 1 M_1 镜移动中环纹级数变化数据记录表

级数	动镜位置/mm	级数	动镜位置/mm	Δd_i/mm
0	0.01223	300	0.10902	0.09679
50	0.02861	350	0.12517	0.09656
100	0.04481	400	0.14124	0.09643
150	0.06086	450	0.15739	0.09653
200	0.07695	500	0.17367	0.09672
250	0.09294	550	0.18984	0.09690

用逐差法处理数据，环纹中心变化数 $N=300$，M_1 镜移动距离的平均值为 $\overline{\Delta d}=0.09666\text{mm}$，通过下式求出 λ 不确定度 Δ_λ 及相对不确定度 U_r。

$$\Delta_{\Delta dA}=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n=6}(\Delta d_i-\overline{\Delta d})^2} \tag{3}$$

$$\Delta_{\Delta dB}=\Delta/\sqrt{3} \tag{4}$$

$$\Delta_{\Delta d}=\sqrt{\Delta_{\Delta dA}{}^2+\Delta_{\Delta dAB}{}^2} \tag{5}$$

$$\Delta_\lambda=\frac{2\Delta_{\Delta d}}{N} \tag{6}$$

$$\bar{\lambda}=\frac{2\overline{\Delta d}}{N} \tag{7}$$

$$U_r=\frac{\Delta_\lambda}{\bar{\lambda}}\times 100\% \tag{8}$$

计算得实验结果为

$$\begin{cases}\lambda=\bar{\lambda}\pm\Delta_\lambda=(644\pm1)\,\text{nm}\\ U_r=0.2\%\end{cases}$$

相对于学生手工测量时相对不确定度一般在 5%左右，采用高灵敏度高准确度的 APP 图像处理程序自动智能计数，能达到较高的实验精度。

4 结论

论文分析了“用迈克耳孙干涉仪测激光波长”实验中干涉环纹级数变化计量的困难，总结了现有装置的不足之处，给出了一种新颖的解决措施。基于学生人人都有的智能手机，运用图像识别技术，编写 APP 程序自动测量环纹级数变化量。从实验结果来看，手机 APP 自动计数具有较高的精度。同时，本文基于手机 APP 程序辅助物理实验测量的优点是使用方便，极易推广。

参 考 文 献

[1] 毛爱华，左建华，大学物理实验[M]. 北京：高等教育出版社，2020.3.

[2] 徐建强，韩广兵. 大学物理实验[M].（第三版）.北京：科技出版社，2020.7.

[3] 吴文娟，李致金. 迈克耳孙干涉环纹自动计数系统设计[J]. 大学物理实验，2020，8：24-28.

[4] 吴金泉，陈心浩，樊燚. 迈克耳孙干涉仪的改进[J]. 物理实验，2017，2：13-16.

[5] 吴庆州，陈陶，王涛. 干涉条纹自动计数系统的设计与研制[J]. 大学物理实验，2017，10：82-86.

[6] 穆万军，朱俊，于白茹. 迈克耳孙干涉条纹移动计数器的设计及仿真[J]. 物理实验，2017，2：20-23.

[7] 石明吉，刘斌. 新型迈克耳孙干涉条纹测控装置研制[J]. 自动化仪表，2018，9：14-17.

[8] 陈玉林，马龙，顾斌. 基于线阵 CCD 的迈克耳孙干涉仪条纹计数器[J]. 物理实验，2012，2：21-24.

[9] 张朝晖. 迈克耳孙干涉仪与光学自相关测量[J]. 物理实验，2023，43(1)：49-63.

[10] 张娜娜，张媛媛，丁维奇. 经典图像去噪方法研究综述[J]. 化工自动化及仪表，2021，48(5)：409-412.

AUTOMATIC COUNTING SYSTEM OF MICHELSON INTERFERENCE FRINGES

LI Chuanfei Mao Aihua Li Lirong

(Inner Mongolia University of science and technology, Baotou 014010, China)

Abstract In response to reducing the errors in the Michelson experimental data caused by students when changing the interference fringes, this article designs an automatic counting

system. By adopting the software Kivy based on the Python GUI development framework, it intends to design an intelligent counting algorithm and apply image recognition technology to write an automatic counting program for the number of interference fringes. The purpose is to decrease the hardware cost of the auxiliary counting system, improve the sensitivity of ring pattern progression measurement, and reduce experimental errors. After experimental verification, the measurement error using an automatic interference ring counting system is significantly smaller than that using manual operation.

Key words Michelson interferometer; mobile phone; counting algorithm

大学物理课程改革在创新拔尖人才培养体系下的实践研究

赵文娟　汪加洁　崔志伟　武福平

（西安电子科技大学物理学院，陕西 西安　710071）

摘　要　在创新拔尖人才培养要求下，以“创新学习方式、促进科教融合、形成一流学术氛围”为教学理念，对拔尖班的大学物理课程开展了教学改革。通过优化课程整体结构，实现了由基础理论、前沿拓展和专业应用为主体的模块化设计。依据专业发展方向对课程内容开展了差异化设计，对不同教学内容采用了针对性的教学模式，并将理论课程与学生的实验实践能力训练进行了深入结合。在此基础上，通过设立多元化考核方案对学习效果进行综合评价，引导学生注重过程学习和实际能力培养。实践结果表明以上措施有效地激发了学生的学习兴趣、探究意识和动手能力，为培养拔尖创新人才奠定了坚实的物理基础。

关键词　大学物理；课程改革；拔尖人才培养；多元化考核

2018年教育部等六部门启动实施拔尖计划2.0，提出高等教育要着力培养本领过硬的高素质专门人才和拔尖创新人才，为把我国建设成为世界主要科学中心奠定人才基础[1]。为响应拔尖计划人才培养要求，西安电子科技大学近年来陆续开设了计算机、数学信息英才和钱学森班等拔尖班，采取单独编班、个性化培养、本硕博贯通的培养方式，其中计算机拔尖班获批2021年教育部基础学科拔尖学生培养计划2.0基地。

人才的培养落实于课程，影响学生发展最直接的因素就是课程质量的好坏，而课程质量的好坏又直接决定了人才培养的效果。在理工科各专业的众多通识基础课程中，大学物理既是自然科学和工程技术的基础，又是工程创新的源泉。课程中蕴涵的观察问题、分析问题和解决问题的科学思想对人才科学素养的培养具有非常重要的作用。如何摆脱传统教学中的问题，提高学生学习积极性、推进创新教育理念的贯彻和实施，是拔尖班大学物理教学创新改革的动力目标。在此背景下，我国多个高校在培养学生创新能力、促进优秀学生脱颖而出方面进行了探索，针对当下物理理论与实验教学中出现的问题推进了相应的课程教学改革，并取得了初步成效[2-3]。西安电子科技大学大学物理课程组针对拔尖班确立了“创新学习方式、促进科教融合、形成一流学术氛围”的教学理念，制定并实施了系列课程改革创新方案。

通过面向全校各专业学生随机发放的442份调查问卷显示，常规“教师主导课程”、“课堂讲授为主”的教学模式下，学生给出“知识点繁杂”、“概念抽象难以理解”、“学习难度高”、“期待多种形式教学活动的开展”等反馈[4]。综合了教学过程中积累的问题及学生的反馈意见，我们率先在计算机和数学信息英才等拔尖班的大学物理教学中开展了课程改革，以期修正以往的一些问题，同时实践创新拔尖人才培养体系下物理课程的改革。整体设计思路为构建“夯实基础-综合提高-拓展应用”的多层次教学体系，培养学生高水平基础创新能力。强化夯实基础使学生掌握扎实的物理学概念和原理，结合专业优势与特色，注重科学思维、逻辑推理和实验实践等能力的训练提升，培养

收稿日期：2023-06-05

基金项目：西安电子科技大学2022年度高等教育教学改革研究项目及2023年度研究生教育改革项目。

作者简介：赵文娟，女，副教授，主要从事物理教学科研工作，研究方向为电磁波和光波在介质中的传播和散射，zhaowenjuan@xidian.edu.cn。

引文格式：赵文娟，汪加洁，崔志伟，等. 大学物理课程改革在创新拔尖人才培养体系下的实践研究[C]. 2023年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会，2023.

Cite this article: ZHAO W J, WANG J J, CUI Z W, et al. Practice and research on college physics course reform under the innovative top-notch talent training system[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education, 2023. (in Chinese)

独立获取知识与分析和解决问题的能力，充分发挥物理学在培养学生建立辩证唯物主义世界观的作用，为拔尖创新人才的全面素质培育提供支撑。本文以近年来拔尖班的大学物理教学过程为例，探索拔尖创新教育下课程改革的实施及作用。

1 优化课程结构体系，夯实物理基础

课程内容是人才培养的载体，是改革和教学效果评价的核心，因此如何设定针对性的教学目标及进一步开展相应的课程体系建设就成为课程育人有效性的关键因素[3]。我校各专业拔尖班人才培养目标为“拓围、增量、提质、创新”，因此大学物理的教学目标、教学内容、教学安排及考核评价等都需要围绕该需求进行针对性的梳理。

首先，按照专业培养要求修订课程教学目标。将课程与教学培养目标充分融合，分别在理工融合、夯实理论基础、提高深度广度、工程应用实践等方面给予侧重，构建分类分层的物理课程教学体系。以计算机和数学信息英才两个拔尖班为例，表1中简要列出了课程培养目标及建设的侧重点。其次，围绕教学内容进行梳理优化，将各部分课程主体模块细分为基础理论、前沿拓展和专业应用三个子模块。其中，基础理论模块为课程的主体，是物理知识和思想的来源，通过该部分的学习强化夯实物理基础；前沿拓展模块是基础理论的提升，是拔尖培养“拓围、增量”要求的具体实现，注重培养学生独立获取知识和分析、解决问题的能力；专业应用部分主要结合专业优势与特色，注重学生科学思维、逻辑推理和实验实践能力的训练与提升。例如电磁学部分教学中，电荷和电磁场相互制约的关系，场分布的物理理解为基础模块中的重点掌握内容，引导学生围绕电磁场与电磁波的前沿应用进行学习拓展，结合学校电子信息特色及专业特点引入如量子计算、场论等领域的基本概念，为物理知识与专业发展的结合留出“接口”。

2 拓宽视野衔接专业，综合提高科学素养

2.1 教学内容安排具有专业差异化

教学内容的设计中，物理概念的体系化和物理思维的训练是关键，在教学中强调物理方法和规律的同时，还应注重物理学与专业学科间的衔接，以物理学的知识点为基础，针对不同拔尖专业增设前沿拓展和应用模块，结合专业知识加强学科间的相互渗透[5]。

在总学时相同的前提下，表2列出了大学物理(Ⅰ)大类班与拔尖班教学内容及对应的学时安排。拔尖班学生普遍具有数理基础较好、基础知识掌握牢固的特点，对质点运动及动力学的基本物理原理较为熟悉，因此做了学时的缩减，现有学时除了知识点的巩固外，重点落在时空概念的理解、惯性系和非惯性系等高阶理论的提高学习上。同时，增加了刚体力学、机械振动和机械波以及波动光学的学时比重，相应的拓展内容又根据专业不同有所区别。数学信息英才班更注重引导数学工具在物理模型中的应用[6]，计算机拔尖班更关

表1 拔尖班大学物理课程培养目标与建设侧重点

班级名称	拔尖班所在专业	课程培养目标	课程体系建设侧重点
计算机拔尖班	计算机科学与技术	1.基础理论扎实、知识面宽、实践能力强、富有创新精神 2.具备扎实的自然科学和人文社科基础知识 3.数理基础扎实，熟悉电子线路、计算机、信号处理、通信等相关电子系统的基本知识 4.强化数理基础，注重能力提升，突出实践创新，打造交叉复合型人才	1.通过物理模型的抽象思维了解建模的思想 2.物理实验的虚拟仿真实践
数学信息英才班	数学与应用数学		1.基于数学手段掌握物理思维的建立 2.物理实验的虚拟仿真实践

注计算机建模思维的训练[7]。如单缝衍射中，要求数学英才班不仅掌握半波带法同时也应该会使用菲涅尔衍射公式和矢量图解法进行分析；机械振动和机械波中，要求计算机拔尖班同学可以编程模拟阻尼振动、受迫振动、李萨如图等。通过不同的内容设置既可以夯实物理基础，又能加深与专业需求的结合。

2.2 教学模式安排适配内容个性化

在拔尖班教学中更多地采取启发式、问题式、互动式为主的教学模式。目的在于引导学生积极思考参与整个教学过程，落实“以学生为中心”的教学理念。仍以大学物理（Ⅰ）为例，如表2所示，大类班教学计划为课堂54学时加线上学习4学时；拔尖班为40＋18，即课堂讲授40学时，教师可以按照课程内容的侧重选取合适的形式开展18学时教学。

表2 大学物理（Ⅰ）大类班与拔尖班学时安排

教学内容	大类班（学时）	拔尖班（学时）
质点力学	14	8
刚体力学	8	10
机械振动和机械波	12	14
波动光学	12	14
热学	12	12
课程形式	54（课堂）＋4（线上）	40（课堂）＋18（多种形式）

例如光学现象观察往往需要较专业的仪器，因此多采用启发探究的形式开展学习。如通过Mooc视频或演示实验了解迈克尔逊干涉仪、双折射的光学现象和原理，课堂总结讨论，结合单元测试和课程报告启发物理现象的深入探究。振动和波动与生活相关度较高，可采用讨论引导式，遵循“提出问题-学生准备-教师组织讨论-总结答疑”的模式进行。通过引导学生讨论多普勒、水波等生活中常见的物理现象或者物理问题开展讨论和交流，激发学习热情，引导正确的思维方法、培养良好的科学习惯。还可以采用自学-辅导模式，进一步提高学生的自学能力和综合素质，培养良好的学习习惯，同时提高学生的理解交流运用能力。如热学部分玻尔兹曼分布和熵的学习，学生自学完成课前布置的题目，教师通过课堂测试情况了解掌握情况查漏补缺，从问题出发、经过小组讨论，再到给出总结性结果，使课堂教学成为开启学生探索的主渠道。

2.3 理论与实验实践教学深度结合

物理教学不再囿于单纯的理论为主的讲授，教学过程与演示实验室、实验中心、课堂示教进行了充分的融合，体现课程特点的同时，也对学生的实验实践能力开展了训练。

建设完成全系列的“沉浸式”物理演示实验教学示范中心，开设课堂演示实验110余项。通过带实验进课堂，利用演示教具实现物理概念教学形象化、实体化。与实验教学中心开展协同教学，打通理论课与实验课的安排，实现内容同步化。完成了专门服务课堂教学的演示实验室建设，课题组在传统验证性实验课程基础上，增设“开放性”和“创造性”实验，建设了基础类创新实验26项，设计性实验18项，综合类实验8项，充分引导学生发挥自己的潜力和开发创造能力。与大学生课外学术创新基地签约，满足拔尖人才的科研训练需求。通过以上保障，拔尖班大学物理课程已经构建了演示性实验、验证性实验、综合设计实验、创新性实验及课外科研项目的逐级提升创新实践能力培养体系，逐步实现课内与课外、理论与实践、教学与科研有机结合的创新拔尖人才培养结构链。

3 探索考核多元化，改进学业评价

课程采取标准化考核与非标准化考核相结合的形式开展评价。标准化考核以期中、期末考试和阶段性测试为主，重点在于考察学生对物理课程基础理论模块的学习效果，通过多次测试增大过程性考核比重。非标准化考核以文献阅读、翻转课堂、小组互动和网络课堂等多种形式相结合的课程环节为依托，内容兼顾教学大纲的同时更侧重前沿拓展模块和专业应用模块，重点在综合考核学生各项能力。通常设定具有开放性答案的内容，不再要求学生死记硬背课程的知识点，而是更加强调课程的综合训练，考核学生如何以所学的知识发现问题、分析问题并解决问题，将考核过程变成反思、纠错和加深理解的学习过程，与标准化考核的区别是在成绩评定上既要有灵活性又要把握给分标准，最终实现培养学生创新思维的目的。

仍以2023年春拔尖班大学物理（Ⅰ）为例，标准化考核含阶段性测试（预习测试、章节测试、知识点测试）20％，期中考试20％和期末考试40％。

非标准化考核占比20%由学生在线学习完成度、课堂活动与讨论、小组活动、课程报告等部分组成。与传统标准化考核决定课程成绩相比，学生在线学习完成度和课程参与度得到了有效提高。

4 结语

通过近3年在拔尖班物理教学中的不断改革，学生的物理基础、探究兴趣、探究意识和创新能力都有了很大的提升，也为后续专业领域的发展奠定了扎实的物理基础。从调查问卷数据、信息化平台学习数据统计、平行班成绩对比、考试对应题目完成比等方面都有所体现，如2023春季学期的期中考试中，我校各专业平均及格率为59%，数学信息英才班68%，计算机拔尖班83%；针对考卷中一道考查刚体转动惯量的难度较高的题目，大类班的正确率为48%，数学信息英才班和计算机拔尖班分别为61%和78%。2023春季学期的期末考试中，拔尖班的考试试卷与同专业大类班差异为25%，差异部分题目难度有明显增加，下图为拔尖班与同专业大类某班成绩对比。

通过考试成绩分布及重难点题目完成度对比分析，我们有理由相信，目前的教学改革方案相较于传统课堂教学教学效果更加明显，可以更加有效的提升学生对课程的兴趣，针对性的课程改革方案也必然会在拔尖人才培养中起到更深远的作用。

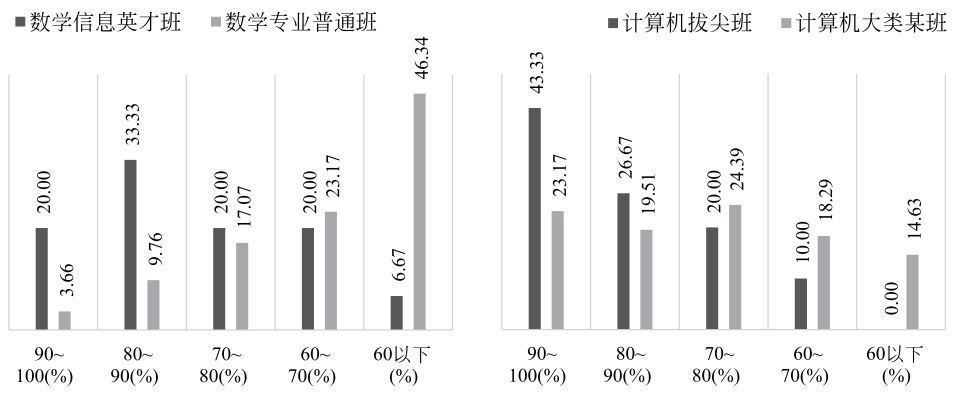


图1 拔尖班与同专业普通班2023春期末成绩对比

(a) 数学专业；(b) 计算机专业

参 考 文 献

[1] 教育部等六部门关于实施基础学科拔尖学生培养计划2.0的意见(教高(2018)8号)[EB/OL].[2018-10-08] http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7056/201810/t20181017_351895.html.

[2] 郝会颖，赵长春，张自力，等. 谈创新教育视角下拔尖人才培养的载体、途径和学业评价——以大学物理课程改革为例[J]. 物理与工程，2017，27(6)：90-94.

[3] 李幼真，徐富新，何彪，赵华芬. 面向拔尖人才培养的大学物理实验教学改革实践[J]. 大学物理实验. 2023，36(1)：149-152.

[4] 赵文娟. 张艳艳. 汪加洁，等. 基于学习行为特征的大学物理教学方法研究(摘要)[J]. 物理与工程(2021年增刊1)，2021，7(31)：145.

[5] 赵跃英，王祖源. 注重基础物理课程与专业学科间的衔接——大学物理教学设计之五[J]. 物理与工程，2010，20(4)：7-8.

[6] COLLEEN M R，许桂清. 物理建模数学模式简介[J]. 物理教师，2011，32(8)：1-3.

[7] 盖双旗. 以物理建模为导向的大学物理应用型课外作业设计[J]. 物理与工程，2022，32(2)：84-87，98.

PRACTICE AND RESEARCH ON COLLEGE PHYSICS COURSE REFORM UNDER THE INNOVATIVE TOP-NOTCH TALENT TRAINING SYSTEM

ZHAO Wenjuan WANG Jiajie CUI Zhiwei WU Fuping

(School of Physics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071)

Abstract Under the requirements for cultivating top-notch innovative talents, a teaching re-

form was carried out on the college physics in the top-notch class based on the educational philosophy of "innovative learning methods, promoting integration of science and education, and forming a first-class academic atmosphere". By optimizing the overall structure of the course, a modular design has been achieved, with a focus on basic theories, cutting-edge expansion, and professional applications. Differentiated design of course content has been carried out based on professional development directions, and targeted teaching modes have been adopted for different teaching content, deepening the combination of theoretical courses and students' practical skills training. Furthermore, a diversified assessment plan has been established to comprehensively evaluate learning effects, guiding students to focus on process learning and practical ability training. The practical results demonstrated that these measures effectively stimulate students' interest in learning, exploration consciousness, and hands-on ability, ultimately laying a solid foundation for cultivating top-notch innovative talents in physics.

Key words college physics; curriculum reform; cultivation of top-notch talents; diversified assessment

大中物理教育衔接之简谐振动教学研究

郑　丹[1]　周丙敏[2]

([1] 河南农业大学理学院,河南 郑州　450002;[2] 郑州市第四十七高中,河南 郑州　450000)

摘　要　高中教育和大学教育都是学生学习生涯中的重要阶段,是为国家培养合格建设者的必经之路,人才培养需大中衔接协同育人。教学的有效衔接是帮助学生系统构建知识体系的关键环节,也是提高教学效率和学生培养质量的重要条件.一直以来,高中与大学两个学习阶段的不连贯性,使两者的物理课程难以统一规划、有效衔接,造成了学生在物理学习中的知识"碎片化"现象.本文从大中物理教育衔接的角度出发,结合简谐振动这一节课,比较了高中物理和大学物理在讲授上的不同,总结了几种讲法,期待和同行探讨交流。

关键词　大中衔接;物理教学;简谐振动

自改革开放四十年以来,尤其是近二十年来中国经济的腾飞,与我国学校教育培养了一大批科学素质相对较高的毕业生密切相关,所谓的"人口红利",本质是"教育红利"。当然中国当前也存在着许多问题,特别是人才创新力不足的问题,这与国民整体缺乏科学素养的培养有关。人才的培养不是一蹴而就,而是需要长期、连贯的投入,需要基础教育阶段和高等教育阶段的紧密配合,才能取得较好的成效[1]。大学和中学作为人才培养的两个重要阶段,相互之间要多交流、多沟通、多碰撞,只有这样才有利于人才的培养,才真正有利于学生的成长。然而目前现状是基础教育和高等教育之间的衔接不够紧密连贯,这既不利于国家的未来战略的实施,也不利于学生的终身学习和发展,因此加强大中物理衔接协同是一项具有连续性和系统性的工程,应该受到重视起来。

1　大中物理教育衔接之现状

先来分析全球视野下,要有效实施国际上通行的STEM公共课程进行大中衔接,以期达到引导青年学子学习认识自然界的客观规律,并能在了解自然规律的基础上改造世界、实现人与自然的和谐共处、解决社会发展过程中遇到难题之目的。STEM是科学(Science),技术(Technology),工程(Engineering),数学(Mathematics)四门学科英文首字母的缩写。STEM公共课重点是加强对青年四个方面的培养:一是科学素养,即运用自然科学知识理解自然界运行规律并参与影响自然界的过程;二是技术素养,也就是使用、管理、理解和评价技术的能力;三是工程素养,即对技术工程设计与开发过程的理解;四是数学素养,也就是学会分析计算多种情境下的数学建模问题的能力。在科学技术是第一生产力的当下国际社会,STEM公共课程进行好大中衔接体现了一个国家的教育竞争力[2]。

再来分析大学物理课程相较于高中物理课程,专业理论更系统,数学工具难度加大,理论推导更抽象,课堂教学的信息量增大,并且随着专业课程大纲的调整,大学物理的总课时一再减少,相应的辅导和做题训练也随之一并减少,这使得学生在高中物理知识的基础上学习大学物理有了较大的难度。

收稿日期:2023-06-06

基金项目:河南农业大学教学改革研究与实践项目(2021XJGLX073)。

作者简介:郑丹,男,副教授,主要从事大学物理教育与教学、农业工程方面研究,zhengdaniel@henau.edu.cn。

引文格式:郑丹,周丙敏.大中物理教育衔接之简谐振动教学研究[C].2023年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会,2023.

Cite this article: ZHENG D, ZHOU B M. Teaching research on simple harmonic vibration for consistency between university physics and high school physics[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education, 2023. (in Chinese)

2 简谐振动案例教学探讨

在物理学课程教学中，简谐振动是一个很重要的知识点。根据定义，凡是加速度和偏离平衡位置的位移之间有大小成正比、方向成相反关系的运动，就被称作为简谐振动（simple harmonic oscillation）。简谐振动是最简单最基本的振动，典型例子之一是弹簧振子。

什么是弹簧振子呢？一个质量忽略不计的弹簧连接一个有质量的小球或物块，然后把它沿着弹簧的方向压缩或者拉伸一定的距离后松手，那么物块就会只在弹簧弹力的作用下，周期性地往复振动。弹簧振子是一个理想力学模型，振子速度最大的位置处回复力为零，此处称之为平衡位置；振子速度为零的位置处恢复力最大，此处称之为振幅。

现行高中物理人教版教材采用的是探究性教学方法。如图 1 所示在桌面上放一个弹簧振子，下附一支描线笔，下面放上一条长长的宽纸带，然后在弹簧振子振动的同时在一侧把纸带匀速卷起来，这样就得到一条和余弦函数曲线类似的图像，教材引导学生猜想图像的函数并验证。然后根据振幅和周期写出余弦函数表达式，再从实验得到的图像中选择几个点，得到不同时间所对应的位置值，把这个位置值和表达式中对应时间的函数值做个比较，如果符合得很好，说明振动方程就是对应余弦函数。人教版高中教材的这个方法简单直观，规避了严谨的数学推理。其中把时间作为一个数轴，位移作为另一个数轴，从一维振动中拉一个二维图像的方法是一个很妙的思路。

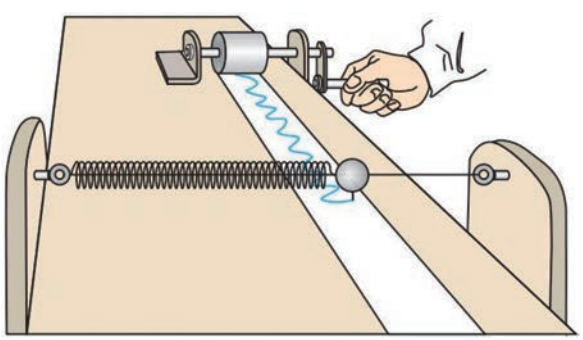


图 1 弹簧振子

人教版高中物理教材采用如上方式的探究性教学方法是符合国家大力开展新课程改革要求的，在物理教学中更重视学生的物理探究过程，巧妙设置场景体验一下发现问题、提出猜想、设计实验、得出结论、讨论验证等的科学研究过程[3]。

而笔者通览大学物理相应教材，比如（排名不分先后）：马文蔚版《物理学》、《费曼物理学讲义》、程守洙和江之永版《普通物理学》等，在这些大学物理教材里振动方程均来自于直接写出微分方程的通解[4]。因为作者觉得读者都是大学生了，自己可以推导出来，所以一般在教学中只是把它当成基本结论一提而过。实际上，跳过证明的讲解方式如浮光掠影，无法给学生留下深刻印象，结果很多学生一无所得。

在学习大学物理课程时，学生普遍好奇为什么数学对物理学的作用如此之大？甚至会让人产生一种观念，所有物理现象都需要依托数学法则而存在。通常老师解释说数学是物理学的语言，大部分情况下，在物理学理论被发现之前，数学家们早就准备好了该理论所需的数学知识，黎曼空间对于爱因斯坦广义相对论的作用就是最好的例子。而大中衔接时学生高等数学知识普遍薄弱，笔者在教学中时常遇到有学生没搞明白这个余弦函数的通解是怎么来的。笔者认为非常有必要在这个知识点上展开教学创新，因为推导简谐振子的运动方程解法其实有很多，只需要学生掌握一些非常基础的数学知识，有助于消除学生对解方程的畏难情绪。尤其是给不擅长数学的非物理类专业的学生教授大学物理时，就能明白这种感觉。对老师来说已经显而易见的问题，在不擅长数学的学生看来却很难理解，因此你会苦于不知如何解释。想要理解物理公式，只能一步一步遵循证明求解过程。求解过程不是单纯的论证，还具有思维实验的意味。所谓理解证明，就是要自己尝试重现思维实验的过程，理解才可以说是自身的体验。

下面笔者将探讨简谐振动运动学方程的讲解方法，力求简洁有趣。

（1）二阶常微分方程标准解法

先带领学生观察微分方程的形式，并简单解释方程中有自变量的微商，所以是微分方程，因为微商的阶数最高是二阶，所以叫二阶微分方程：

$$\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}+\omega^2x=0 \tag{1}$$

二阶导数还等于自身的函数首先想到的是以自然

常数e为底的指数函数，即令 $x(t)=Be^{\lambda t}$ 代入(1)式中可得：

$$Be^{\lambda t}(\lambda^2+\omega^2)=0 \tag{2}$$

从而求出待定系数

$$\lambda=\pm i\omega \tag{3}$$

则方程(1)式的通解可写为

$$x(t)=B_1e^{i\omega t}+B_2e^{-i\omega t} \tag{4}$$

我们知道位移只有取实数才有实际意义，于是限定 $x(t)$ 在任意时刻都是实数，那么 $x(t)$ 的复共轭与其自身相等，即 $x^*(t)=x(t)$ ：

$$B_1{}^*e^{-i\omega t}+B_2{}^*e^{i\omega t}=B_1e^{i\omega t}+B_2e^{-i\omega t} \tag{5}$$

两边比较可以得出：$B_2=B_1{}^*$，于是不妨令：$B_1=Ce^{i\varphi}\quad B_2=Ce^{-i\varphi}$

于是(4)式可以写作：

$$x(t)=C\left[e^{i(\omega t+\varphi)}+e^{-i(\omega t+\varphi)}\right] \tag{6}$$

由欧拉公式 $e^{i\theta}=\cos\theta+i\sin\theta$ 可得：

$$e^{i\theta}+e^{-i\theta}=2\cos\theta \tag{7}$$

结合(6)式和(7)式，并令 A=2C，最终可得：

$$x(t)=A\cos(\omega t+\varphi) \tag{8}$$

此通解即简谐振动的位移随时间变化的函数关系，亦即其运动方程。

(2) 费曼推理法

1986年挑战者号失事，费曼只用一杯冰水和一只橡皮环，就在国会向公众揭示了挑战者失事的根本原因——低温下橡胶失去弹性，这体现了费曼擅长简化问题的能力，亦即面对问题，先从简单的情况入手，抓住事物规律的核心，再去考虑其他情况。而在简谐振动弹簧振子的问题上，费曼也是从二阶常微分方程入手，也是先猜想通解的形式。

让我们跟随费曼的思路，再一次观察方程(1)式。用语言描述就是关于时间的函数经过两次求导后又变回到原来的函数形式，只不过多了一个负号。到底何种函数具有如此性质呢？略加思索，我们会发现正弦函数或余弦函数都行。于是从量纲上考虑，不妨设通解形式为 $x(t)=\cos\omega t$。我们知道时间的单位是秒，余弦 cos 的括号里是角度量，因此括号里面不能单单只有时间 t，还应该乘上一个量 ω，ωt 就是角度。将之代入方程(1)式，很显然方程成立，假设正确。这是不是就是最终的通解形式呢？非也！由方程(1)式可以看出 $\omega^2=m/k$，亦即 $\omega=\sqrt{m/k}$ 跟弹簧的固有属性有关，而通解要包涵待定系数，因此还要再分析添加。

通过位移与时间的分析，我们发现 $x(t)=\cos\omega t$ 仅仅表达了振子从最大位移处开始运动的情况，此时弹簧振子的速度为0。当然振子不必非要从最大位移处开始运动，其运动初速度可以不为0。更进一步思考，你正在用秒表去记录振子的运动，当振子在最大位移处，你按动秒表计时开始，其振动方程正好是余弦函数 $x(t)=\cos\omega t$。当发现振子运动到最大位移的一半处时，小王同学才按动秒表作为计时开始，而此刻你的秒表已经走过了 Δt 的时间。对小王而言，他在零时刻看到的振子的状态，肯定跟你经过了 Δt 时间看到的状态是一样的，因此该状态对应的振动方程应该写作：$x(t)=\cos\omega(t+\Delta t)$。

由于 Δt 是一个任意的常数，因此可以令 $\varphi=\omega\Delta t$，它也是一个任意的常数，如此方程可以进一步改写成 $x(t)=\cos(\omega t+\varphi)$。在这个振动方程表达式中，余弦函数的取值范围只能是(−1,1)，但是振子的位移可以在一个区间内变化，亦即可以让振子以任意的振幅运动，所以还得把振幅A添加到方程里面去，最终振子的运动学方程就改写成：

$$x(t)=A\cos(\omega t+\varphi) \tag{8}$$

此通解即简谐振动的位移随时间变化的函数关系，亦即其运动方程。

3 大中物理教育衔接之反思

高中物理课程是要求对于物理学主要领域的知识和概念侧重于定性和半定量的正确理解，对于物理方法，尤其要抓住主要因素的近似方法、实验检验理论的实证方法、运用数学计算和逻辑推理的思考方法等认知。相较于高中物理课程，大学物理课程数学工具难度大，理论推导更多元抽象，课堂教学的信息量大。做好大中物理衔接，一方面是帮助学生更好补充完善所需的基础科学知识，另一方面是为了从哲学层次培养学生的思辨能力，使得学生从K12阶段过渡到大学阶段能适应学习方式的改变，掌握批判性思维方法，培养学生独立思考与解决问题的能力[5]。

我们一线的大学物理教师应该加大对大中物理课程衔接的关注，把提升中国国民的科学素质当作自己的职责，大中物理教育衔接好坏将直接影响到学生在大学阶段能否有所获、毕业时能否

有所成、踏入职场能否有所用。对此，笔者简要介绍了以简谐振动为例的课堂上积极运用协同教学法，把科学史和哲学思辨融入大学物理课的课堂教学之中，大力营造一个在学中思，在思中悟，再有所得的课堂氛围，既有科学的思想美，也有人文的情感美，进而提升学生的综合素质，以期达到人才培养之最终目的。

参 考 文 献

[1] 习近平在全国高校思想政治工作会议上的讲话. 新华网 http://news. xinhuanet. com/politics/2016-12/08/c_1120082577. htm.

[2] 张萍，MAZUR E. Peer-Instruction-哈佛大学物理课程教学新方法[J]. 中国大学教学，2010(8)：69-71.

[3] 孙志华. 高中物理教育与大学物理教育的衔接研究[D]. 南京：南京师范大学，2010.

[4] 潘建斌，郑丹.《大学物理教程》[M]. 北京：中国农业出版社，2014.

[5] 郑丹. 浅谈物理教育改革中的情感应用[J]. 河南教育学院学报(自然科学版)，2006(4)：50-52.

TEACHING RESEARCH ON SIMPLE HARMONIC VIBRATION FOR CONSISTENCY BETWEEN UNIVERSITY PHYSICS AND HIGH SCHOOL PHYSICS

ZHENG Dan[1] **ZHOU Bingmin**[2]

([1] College of Science, Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan 450002;

[2] Zhengzhou No. 47 high school, Zhengzhou, Henan 450000)

Abstract High school education and university education are both important stages in students' learning life, and it is the only way to train qualified builders for the country. Abstract Effective teaching consistency is the key of helping students construct knowledge system, and the important condition to improve teaching efficiency and students' training quality. The inconsistency of high school and college causes the difficulty of physics teaching planning, and connecting in these two learning phases, and the "fragmentation" phenomenon during physics knowledge learning. From the perspective of consistency between university physics and high school physics, combined with the lesson of simple harmonic vibration, this paper compares the differences in the teaching of high school physics and college physics, summarizes several teaching methods, and looks forward to discussing and communicating with peers.

Key words bridging university physics and high school physics; education of physics; simple harmonic vibration

学生中心，思政引领，技术赋能
——“大学物理”一流课程建设实践

吉驭嫔　樊群超　李会东　付　佳
（西华大学理学院物理系，四川 成都　610039）

摘　要　根据地方型理工科院校的特色，西华大学“大学物理教学团队”经过实践，逐渐形成一套符合一流课程“两性一度”要求的教学模式。我们秉承以学生发展为中心的教学理念，重点解决学生被动学习，成就感低，积极性低，教学资源不足的问题，构建“一体两翼四位”的教学模式。教学中有机融入思政元素和工程实例，立德树人的同时训练学生解决复杂问题的能力。通过线上平台和信息技术，实现优质资源共享，采用多元化的评价方式，加强教学过程管理。课程教学为培养学生创新实践能力、价值观的塑造夯实了基础。

关键词　学生中心；思政引领；工程实例；技术赋能

2023年，教育部实施系列“101计划”，全面推进基础学科和“四新”关键领域核心课程建设，提高高校服务社会经济能力。新工科[1]建设目标明确指出，树立人才培养新理念，加强工程实践教育，培养创新实践能力强、综合素质高，能胜任行业发展需求的创新型人才。西华大学是四川省属重点综合性大学，是教育部首批新工科研究项目获批高校。在地方型理工科背景的高校中，大学物理教学改革的重点是树立学以致用的教学理念，构建理论紧密联系工程实际的教学体系，训练学生实践创新能力，为新工科建设起到支撑作用[2]。

1　课程简介和解决的问题

以物理学基础为内容的大学物理课程，是高等学校理工科各专业学生一门重要的通识性必修基础课，开设在大学一年级，学生学习专业课之前。该课程在理论和实验方面所教授的基本概念、基本理论和基本方法是构成学生科学素养的重要组成部分，是一个科学工作者和工程技术人员所必备的。

大学物理课程由经典物理和近代物理组成，涉及大量的公式和计算，知识点多而且抽象，学生理解困难，对培养理工科学生实践创新能力无法起到支撑的作用，因此，我们要解决的问题有：

（1）重塑新的教与学关系：传统课堂以教师为主体，学生长期被动学习，积极性低，学生持续竞争力培养不到位，需要打通教与学之间的互动渠道；

（2）丰富大学物理教学资源：大学物理现有的教学资源前沿性，深度与广度不够，无法适应新时代金课创新性，高阶性和挑战度，以及课程思政的需求；

（3）学生人数多，无法精确关注每一位学生的学习成效，如何高效管理教学过程和分层教学，构建自适应学习，学情智能诊断等数字教育应用场景。

收稿日期：2023-06-06
基金项目：应用物理学国家级一流专业建设点基金项目；四川省高等教育教学改革项目（JG2021-925），四川省本科一流线上课程（YLKC01779）/线上线下混合课程（YLKC01758）建设项目，四川省高校课程思政示范课建设项目，四川省课程思政示范教学团队（RC210001462）。
作者简介：吉驭嫔，女，副教授，主要从事信息光学和课程建设工作，jiyupin@163.com。
引文格式：吉驭嫔，樊群超，李会东，等. 学生中心，思政引领，技术赋能——“大学物理”一流课程建设实践[C]. 2023年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会，2023.
Cite this article：JI Y P，FAN Q C，LI H D，et al. Student center，ideological and political guidance，technology enabling—Exploration and practice on the construction of first-class course of the college physics[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education，2023.（in Chinese）

2　大学物理一流课程建设的教学设计方案。

西华大学“大学物理”教学团队以应用物理学国家一流本科专业建设点和四川省教学示范中心作为平台，在2018年录制上线《大学物理B》慕课后，就开始着手摸索一套适合本校学生学情，满足一流课程“创新性、高阶性、挑战度”[3]建设要求的“一体两翼四位”大学物理教学模式（见图1）。以学生发展为中心设计教学内容，坚持“课堂教学和课外创新”两翼化训练，贯彻“思政引领，科学思维，工程实例，创新设计”四位一体的教学模式，实现知识传授，价值引领，能力提升三位一体的教学目标。

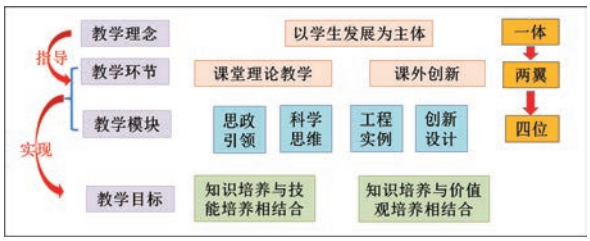


图1　一体两翼四位的教学模式

2.1　修订课程教学大纲，制定新的教学目标，明确人才培养的内涵

2019年，按照新时代对高等教育的要求，西华大学进行了培养方案和教学大纲的修订。新版大学物理教学大纲从课程目标出发，以科学知识形成为基础，以具有学科特点的思维能力为目标，从科学逻辑到学科逻辑抽取各种元素，寻找课程与创新和思政的结合点。在原有知识目标的基础上，突出由工程实例训练和创新设计领衔的技能目标，以及课程思政领衔的价值目标，在课程中充分体现两性一度，为人才培养的内涵做出明确的规定。在课程教学目标基础上，把思政元素“润物细无声”地融于到教学中，培养学生追求真理，探索科学精神，习得认识问题、分析问题、解决问题的方法，形成唯物主义的世界观。

2.2　以“解决一个工程实例”为线索，使用BOPPPS有效教学模式进行线上线下混合教学

我们选择自主打造的省级一流线上课程和国家精品课《大学物理》作为线上资源，在超星平台建立了《大学物理B》的SPOC课程进行线上教学，线下教学以“解决一个工程实例”为线索，引入与所学知识联系紧密的工程实例[4]，所选的内容从工程实际出发，避开不必要的技术细节，把实际问题抽象成物理模型，给出具体的场景，让学生自主探究。

课程教学设计按照BOPPPS[5]来进行：课前在学习通上发布学习任务单，告知教学目标，并推送慕课指导学生自学，题库组题检测学生自学掌握情况。课堂教学中引入蕴含学科前沿和思政元素的工程实例，将其化为闯关任务，同时使用大学物理3D虚拟仿真实验平台[6]将抽象模型具象化。在任务驱动中，引导学生进行主动探究。因此教学一般分为四步，案例导入分析、分组实践、教师指导和考评总结。最终，学生分组探究给出解决工程实例的方案，激发学生主动学习的欲望和成就感；培养学生解决复杂问题的能力。课后由平台形成过程性评价指导对学生进行个性化培养。

比如讲授角动量守恒时（见图2），课前将角动量和角动量定理的慕课推送给学生学习，课堂上以嫦娥五号“打水漂”返回地球作为案例导入，案例中既体现了科技前沿又蕴含中国骄傲的思政元素，同时抛出工程实例问题：假如你是航天工程师，如何精准控制航天器的方向？问题导向，学生带着问题学习更有目的性。然后使用前测了解学生慕课学习成效，适时调整教学进度。在讲解完知识后，学生分组讨论并在3D虚拟仿真实验平台进行实践，找到解决方案，然后小组汇报考评。在这个过程中，不仅能够保障知识目标的达成度，还能培养学生实践创新、小组协作和语言表达等技能，同时陶冶学生情操，促进价值观目标的达成。

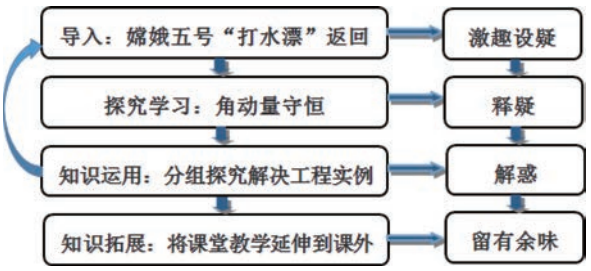


图2　教学设计流程

2.3　努力挖掘物理类课程中的科学思维和思政元素，多环节课程思政，同频共振

课程教学的实施以立德树人为目标，做到物理知识传授的显性教育和思政教育的隐性教育相统一[7,8]。我们以思政引领、科学思维以及前沿性作为选择工程实例的标准，力求案例解决的过程契合“两性一度”的建设标准，如角动量守恒使用

嫦娥五号，杨氏双缝干涉使用九章计算机作为案例等。在教学中，注意挖掘物理学史典型案例的人文内核，进行人生观和价值观教育；强化物理知识的逻辑性和研究方法，培养科学方法和辩证思维方法；弘扬“中国智造”，增强自信心和民族自豪感，激发家国情怀；以科学家事迹为载体，培养学生实事求是及刻苦钻研的科学态度与工匠精神。

2.4 延展教学空间，将教学延伸到课外，构建“多维度线上线下混合智慧教学系统”（见图3）

依托MOOC＋互动APP＋SOTS智慧作业系统进行线上线下混合式教学，教学中强调多维度多空间互动，延展教学空间。首先构建课前课中课后三空间联动，课前依托MOOC推送学生自学基础知识；课堂中老师使用互动APP，引导学生自主探究，分组讨论。课后使用SOTS题库组卷对学生进行测评。同时依托省级实验教学示范中心和创新实验室，将教学活动延续到课堂外，鼓励学生进行创新设计，开辟“第二课堂”，多环节育人。其次构建师生，生生，课生三维度互动，课堂上加强师生互动，小组探究和创新设计加强生生互动，引入在线教学资源加强课程和学生的互动。在“飞书”社区建立智能答疑系统，利用人工智能助教提供全天候的知识服务。打造数据驱动的智慧教学系统，让学习空间多元化，学生学得更容易，教师教学管理更简单有效。



图3 多维度线上线下混合智慧教学系统

2.5 丰富教学资源，建设“一课一平两库”教学资源库

推进慕课、3D虚拟仿真实验平台、工程实例库、思政案例库等“一课一平两库”教学资源库的建设。通过线上课程平台，引进和自建结合，打造大学物理教学资源（如图4），资源可以满足课程“两性一度”的需求，并实现优质资源共享。

目前团队负责的省级一流线上课程《大学物理B》选课总人数为1.1万人，共有天津科技大学、湖北第二师范学院、武汉工商学院、武汉设计工程学院、中国民航大学、潍坊科技学院等100所学校学生使用，其中15所学校利用该资源建立了SPOC课程，进行线上线下混合教学，学生利用MOOC资源实现自我学习及自身可持续性发展。

	教学资源	数量	建设方式	应用方式
知识型	慕课视频	100	国家精品课引进（67%）	线上自主学习
		50	自建慕课（33%）	针对校本学情，补充资源
	配套课件	20	自建	
	章节测试题	300	引进	随堂测试+慕课测
		480	自建	Solt智慧作业系统，课后测试
	期末测试题	200	自建	线上期末测试
情感价值观型	思政案例库	26	自建+引进+改造	思政融入，同频共振
技能型	工程实例库	18	自建+引进+改造	课堂训练项目
	虚拟仿真实验	15	引进+改造	课内外训练项目
	创新设计任务	10	自建	课外创新实践

图4 课程教学资源库

2.6 改革课程考核制度，打造全方位的教学过程管理体系

我们充分利用现代信息技术管理学习成绩，让考核贯穿整个教学活动中，构建“N＋1”的多元成绩评价体系（如图5）。成绩由1项期末考试成绩和N项平时成绩组成，其中平时成绩分为两大类，一类体现“基本盘”如线上学时，作业测验，出勤，一类体现“挑战度”如创新设计、课堂研讨等，均由智慧教学系统即时记录评分依据。学习数据由团队开发的基于大数据和机器学习的多维度平时成绩考核系统[9]进行分析，成绩评价更加科学有效。

评价模块	评价项目	评价内容	评价类型
线上（20%）	慕课观看（8%）	考查学生自主学习成效，为线下课程安排提供参考	过程性评价
	自主测试(4%)		
	线上讨论(3%)		
	线上考试（5%）	考察学生基础知识和能力	总结性评价
线下（80%）	考勤+课堂互动（10%）	考察学生课堂基本表现	过程性评价
	小组研讨（8%）	考察学生的高阶能力，如小组协作，实践，解决问题的持续竞争力	
	课后作业（8%）	巩固学生学习的知识，并进行应用	
	创新设计（4%）	考察实践创新能力	
	期末考试(50%)	全部考查学生课程学习成效	终结性评价

图5 “N＋1”多元成绩评价体系

3 课程建设成效和反思

多年来，西华大学大学物理教学团队秉承着以学生发展为中心的教学理念，从重塑教学理念、

丰富教学资源、重构教学环境、创新教学方式、改革评价方式等多个维度进行改革，将学习的过程交还给了学生，调动学生积极性，为学校新工科建设提供支撑作用。为此团队取得了一系列的成果，2022 年获得四川省高等教育教学成果奖两项，四川省高等教育教学改革项目 3 项，《大学物理 B》于 2019 年和 2021 年分别获批四川省课程思政示范课和一流混合课程，《大学物理 B》慕课于 2022 年获批四川省线上一流课程，“大学物理”教学团队于 2021 年入选四川省课程思政示范教学团队。学生对课程满意度在多次迭代后开始逐渐升高，目前教学满意度比改革前高，教学模式逐渐完善。学生能力提升，在全国大学生物理实验竞赛等比赛中，获得一等奖等各级奖项 78 人次，获批国家级和省级“三创项目”11 项。

经过多年实践，我们发现还存在一些问题需要解决。过去的教学改革都是凭借团队老师的教学经验来摸索进行的，缺乏教学学术理论指导持续反思，未来需要我们基于教学理念、围绕教学目标进一步整合，从学术研究者的角度看待教学，使教学改革具有可持续发展性；另外，教学技能目标和情感目标达成度目前多以调查问卷的方式来进行，评估和评价机制还不够科学有效。特别是课程思政成效更多体现在情感、态度、价值观层面，不易评测。目前很多大学都在对思政评价展开研究[9]，如武汉大学已推出第一版“课程思政评价指南”[10]，为后续在评估＋评价体系上的改革指引了方向。总之，教学一直在路上，我们还需要持续努力。

参 考 文 献

[1] 吴岩. 持续深化“四新”建设，走好人才自主培养之路[J]. 教育家，2022，No. 326(22)：1.

[2] 董宏伟. 新工科背景下高校物理教学改革策略研究[J]. 科教导刊，2023，No. 509(05)：34-36. DOI：10. 16400/j. cnki. kjdk. 2023. 5. 011.

[3] 教育部. 关于一流课程建设的实施意见(教高[2019]8 号)[Z]. 2019.

[4] 吉驭嫔，王时建. 在大学物理教学中培养学生解决工程问题的实践能力——基于卓越工程师教育培养计划工科物理的教学改革探索[J]. 教育教学论坛，2018，No. 373(31)：105-106.

[5] 李会东，吉驭嫔，王时建. BOPPPS 模型引入大学物理教学课堂的实践——以《机械波》为例[J]. 教育现代化，2020，7(3)：127-129. DOI：10. 16541/j. cnki. 2095-8420. 2020. 03. 049.

[6] 朱海飞，周战荣，沈晓芳. 计算机仿真模拟在大学物理教学中的辅助理解作用[J]. 科技风，2023，No. 527(15)：118-120. DOI：10. 19392/j. cnki. 1671-7341. 202315040.

[7] 教育部. 高等学校课程思政建设指导纲要(教高[2020]3 号)[Z]. 2020.

[8] 朱鋐雄，王向晖，尹亚玲. 课程思政的“根、本、魂”和相应教育“三观”的理性探讨——从思政视角探讨大学物理课程思政[J]. 物理与工程，2023，33(1)：54-60.

[9] 付佳，范志祥，樊群超等. 基于平时行为多维度数据分析的个性化人才培养[J]. 高教学刊，2023，9(11)：169-171＋175. DOI：10. 19980/j. CN23-1593/G4. 2023. 11. 041.

[10] 武汉大学本科生院，武汉大学课程思政教学评价指南(第一辑)(武大本函[2022]171 号)[Z]. 2022.

■

STUDENT CENTER, IDEOLOGICAL AND POLITICAL GUIDANCE, TECHNOLOGY ENABLING —EXPLORATION AND PRACTICE ON THE CONSTRUCTION OF FIRST-CLASS COURSE OF THE COLLEGE PHYSICS

JI Yupin FAN Qunchao LI huidong FU Jia

(Department of Physics, School of Science, Xihua University, Chengdu, Sichuan 610039)

Abstract According to the characteristics of local science and engineering colleges, “ the college physics teaching team” of Xinhua University has gradually formed a teaching model that conforms to the requirements of the first-class course “ Innovative、high-order and challenges ” through practice. We persist in the development of students as the center, and focuses on solving the problems of passive learning, low sense of achievement and low enthusiasm of students,. Insufficient teaching resources The teaching content mode of “one body, two wings

and four digits" is constructed, and ideological and political elements and engineering examples are organically integrated into the teaching, so as to train students' ability to solve complex problems while cultivating morality and talents. Through online platform and information technology, we can realize the sharing of high-quality resources, adopt diversified evaluation methods, and strengthen the management of teaching process. The course teaching lays a solid foundation for cultivating students' innovative practical ability and shaping their values.

Key words student center; ideological and political guidance; technology enabling; engineering examples

利用电子秤测量电梯运行参数的教学实验设计

石晶晶[1]　张汐缦[2]　王晓峰[1]　张　欢[1]　徐婷婷[1*]
（南方科技大学[1]物理系；[2]机械系，广东 深圳　518055）

摘　要　电梯在运行过程中存在超重和失重现象。本研究巧妙利用电子秤在电梯升降过程中的示数变化，获得电梯运行的加速度、速度和位移信息，从而实现楼层高度的测量。实验过程中使用智能手机采集数据，并用视频软件提取数据。该方法的可行性经过实验检验，其高度测量相对误差小于0.5%。该方法具有实际应用价值，并可以作为研究物体运动规律的实验推广到大学基础物理实验教学中。

关键词　电子秤；超重和失重；加速度；楼高

超重和失重是日常生活中常见的物理现象，在航天航空领域更是普遍存在[1]。我国载人航天事业飞速发展，2023年5月30日神舟十六号载人飞船发射取得圆满成功，神舟十六号乘组首次包含了航天驾驶员、航天飞行工程师、载荷专家3个航天员类型，是天宫一号进入应用与发展阶段迎来的首个乘组。研究超重失重现象可以培养大学生对航天航空中力学问题的兴趣，加深对太空失重原理的理解，具有重要的教学意义。

电梯的运行过程包括三个阶段：起步加速，匀速运行和减速停止。起步加速阶段：上升过程中电梯内物体所受的支持力比物体自身重力大，所以物体处于超重状态；下降过程中支持力小于重力，物体处于失重状态。减速停止阶段：上升过程中电梯内物体所受的支持力比物体自身重力小，所以物体处于失重状态；下降过程中支持力大于重力，物体处于超重状态。有关电梯运行参数的测量，产业界主要使用加速度测量仪器，有多种成熟产品型号可选[2]。另外鉴于手机的普及使用，也可以选择使用手机内部的MEMS加速度计（又称作重力传感器）对电梯的运动加速度进行测量[3,4]。但这些方法，都是直接获得加速度数据，对于加速度数据本身和超重失重等物理本质的探讨，并不深入。本文介绍一种利用实验室中的电子秤获得电梯运行加速度数据的方法，可以更直观地探究电梯运行过程中的超重和失重现象，有利于学生理解加速度数据计算的物理本质[5]，并利用加速度数据测量楼层高度，具有实际应用价值。

1　实验原理

1.1　电子秤结构

电子秤的结构和工作原理[6]，如图1所示。

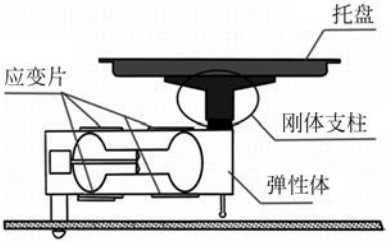


图1　电子秤的内部结构

电子秤是利用应变式传感器（应变片）将重力产生的应变转变成应变片电阻的变化，再经电桥测量电路和放大电路转换成电压信号输出显示[7]。由于电子秤的设计问题和使用要求，电子

收稿日期：2023-06-06
基金项目：南方科技大学教改项目（XJZLGC202224；XJZLGC202223；XJZLGC202225），广东省教改项目（SJZLGC202207）资助
通讯作者：徐婷婷，实验师，从事大学物理实验教学，xutt@sustech.edu.cn。
引文格式：石晶晶，张汐缦，王晓峰，等. 利用电子秤测量电梯运行参数的教学实验设计[C]. 2023年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会，2023.
Cite this article：SHI J j，ZHANG X m，WANG X f，et al. An experiment design on the measurement of operation parameter of vertical elevator using an electronic balance[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education，2023.（in Chinese）

秤内部部分结构(刚体支柱)和电子秤外部托盘的质量也会在超重和失重的过程中影响电子秤示数的变化,所以在后续的测量过程中需要排除这些附加质量对实验结果的影响。学生在实验中往往忽略了电子秤内部结构的影响,从而导致测量误差偏大,在教学过程中需要特别强调。

1.2 电子秤测量电梯运行参数的原理

电梯运行时,重物及电子秤超重以及失重时的受力分析如图2所示。

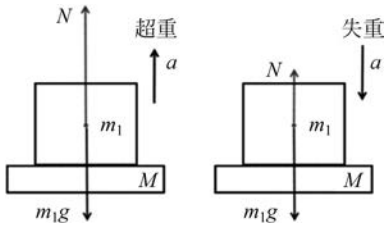


图2 重物在秤上超重以及失重时的受力分析

假设秤的示数为M,重物的质量为m_1,秤的托盘和刚体支柱的质量为m_2,根据牛顿第三定律,物体对电子秤的压力等于电子秤对物体的支持力,所以电子秤对物体的支持力N可以表示为:

$$N = Mg \tag{1}$$

电梯静止或匀速运动时,物体对电子秤的压力来源于物体的重力,故:

$$N = m_1 g \tag{2}$$

由公式(1)和(2)可知,静止或匀速运动时电子秤示数等于重物质量,即:

$$M = m_1 \tag{3}$$

根据牛顿第二定律,物体受到的合外力会使物体产生加速度。在电梯运行的过程中,电子秤对物体的支持力与物体本身的重力所产生的合外力导致物体存在加速度,且由于物体与电梯是相对静止的,物体的加速度与电梯的加速度同步。加速过程中,称的示数M会发生变化,考虑到附加质量m_2,物体运行中的加速度表示如下:

$$N - m_1 g = (m_1 + m_2)a \tag{4}$$

将(1)代入(4)后可得:

$$a = \frac{M - m_1}{m_1 + m_2} g \tag{5}$$

对加速度积分,可得到速度:

$$v = \int_0^{t_0} a\,\mathrm{d}t \tag{6}$$

再对速度积分,即得到位移:

$$z = \int_0^{t_0} v\,\mathrm{d}t \tag{7}$$

由此,可以通过记录电子秤在电梯运行过程中示数的变化,从而得到电梯的加速度,速度和位移信息。

2 实验装置

实验装置包括电子秤、铁环重物、手机支架、手机和一部电梯。实验中需要将电子秤稳固放置于电梯地板中央,并调整电子秤水平,将铁环重物放在电子秤托盘上。使用手机支架固定手机,并利用手机拍摄功能记录电子秤的示数变化。测量装置如图3所示。



图3 实验装置实物图

3 实验测量和数据处理

实验在某栋5层高的教学楼进行,电梯运行过程是从1层至5层,共经过4层楼高。实验过程如下:

(1) 测量楼层高度。用50m标准卷尺测量从一楼地板至五楼地板的高度,得到四层楼的楼层高度数据为H=16.83m,并作为标准值,对实验进行误差分析。

(2) 测量重物质量,电子秤中的托盘质量以及电子秤内部刚体支柱的质量。重物质量m_1=1665.28g。取下托盘称重,如图4所示,托盘质量



图4 电子秤的托盘质量

为 82.35g。刚体支柱内置于电子秤内部，无法取出，但可巧妙利用电子秤的测量原理，另辟蹊径：将取下托盘的电子秤正面倒置后清零，然后将电子秤反转回来。由于刚体支柱对应变片的作用力由拉伸转变为压缩，所以此时电子秤显示的示数即为两倍刚体支柱的质量，如图 5 所示。可得刚体支柱质量 74.90g。由此可知 $m_2=157.25g$。



图 5　电子秤中 2 倍刚体支柱的质量

学生在实验初期由于对电子秤内部结构不了解，往往认为电子秤对读数的影响仅由托盘产生，于是得出 m_2 等于托盘质量 82.35g，从而忽略了电子秤内部结构刚体支柱在加速减速过程中对示数的影响。在教学过程中，可通过学生对此步骤的分析，判断学生对于电子秤内部结构及其工作原理的认识是否准确。

（3）将实验装置放入电梯，并调整水平，在电梯运行时，利用手机录制电子秤示数变化。将数据导入 Tracker，间隔 15 帧读数，将数据导入 Origin 得到加速度数据：图 6(a)～图 6(b)。对加速度积分，得到速度数据：图 6(c)～图 6(d)。对速度积分得到位移数据：图 6(e)～图 6(f)。此处重力加速度为 $9.7887m/s^2$。

通过实验数据处理，可得电梯上行位移：$h_1=17.08m$；电梯下行位移：$h_2=16.68m$；取平均值可得：$h=16.88m$；与标准值 $H=16.83m$ 比较，实验相对误差 0.3%。另外，电梯平稳运行速度为 1.0m/s，与电梯设备标示速度一致。

实验中存在的误差包括电梯自身运行不够稳定，电梯在启动或静止时存在轻微的横向晃动，影响示数稳定显示。数据读取间隔导致的与实际情况的微小差异等。但是多次改进实验条件，特别是消除电子秤内部质量影响后，学生基本可以使实验的相对误差控制在 0.5%以内。

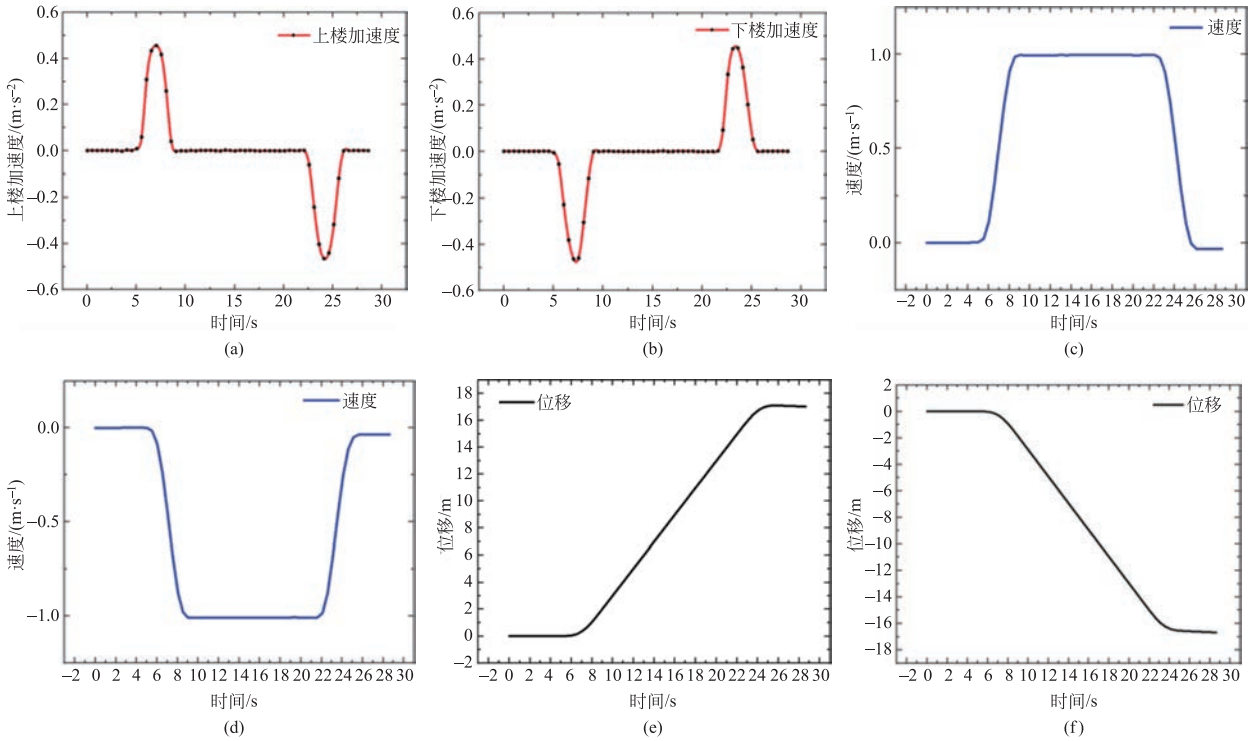


图 6　实验测量得到的电梯运行参数

(a) 上楼加速度与时间图像；(b) 下楼加速度与时间图像；(c) 上楼速度与时间图像；(d) 下楼速度与时间图像；(e) 上楼位移与时间图像；(f) 下楼位移与时间图像

4 实验总结和讨论

本文通过对电子秤在电梯运行过程中示数变化的探究，模拟了航天器在发射运行过程中的超重失重现象，实现了对楼层高度的测量，并加深了学生对物体运动力学规律的理解。

该实验方法装置简单，测量精度高，可用于摩天大楼等高层建筑物的高度测量，具有实际应用价值。作为大学物理实验中关于物体运动规律实验研究项目的补充[8,9]，有利于培养学生理论联系实际的能力。

在实际教学过程中，不仅要求学生掌握加速度计(重力传感器)的原理，同时引导学生对电子秤的工作原理、内部结构进行深入探究，不断优化实验结果，培养学生精益求精、追本溯源的实验精神。在数据获得和处理方面，实验中灵活使用手机，并应用 tracker、origin 等科学软件，培养学生分析和处理实验数据的技能。

在多年教学实践中，该实验作为独立的探究课题，在低年级本科生中取得了良好的教学效果，非常适合大学基础物理实验教学项目的拓展需求。

参 考 文 献

[1] 姜启时.“神七”问天相关物理知识探究[J].物理教学，2009，000(002)：43-45.

[2] Ryser H. Acceleration measurement on an elevator device [P]. WO，WO2009135629 A1.

[3] 孙玉国，勾灿.安卓手机在电梯加速度测量中的应用[J]. 上海计量测试，2016，(255)：5-6，11.

[4] Kinser，Jason M. Relating time-dependent acceleration and height using an elevator[J]. The Physics Teacher，2015，53(4)：220-221.

[5] 周治良，张传军，王书义，等.电磁力平衡式加速度计原理及检测方法研究[J].电测与仪表，2010，47(A08)：7-9.

[6] 李燕.电子秤的结构和工作原理[J].物理通报，2006，(6)：55-56.

[7] 李岢.电阻应变式传感器测量性能分析[J].电子元器件与信息技术，2020，004(002)：153-155.

[8] 吴泳华，霍剑青，浦其荣.大学物理实验[M].北京：高等教育出版社，2005.

[9] 何佳清，霍剑青.大学物理基础与综合性实验[M].北京：高等教育出版社，2018.

■

AN EXPERIMENT DESIGN ON THE MEASUREMENT OF OPERATION PARAMETER OF VERTICAL ELEVATOR USING AN ELECTRONIC BALANCE

SHI Jingjing[1] ZHANG Ximan[2] WANG Xiaofeng[1] ZHANG Huan[1] XU Tingting[1]

([1] Department of Physics; [2] Department of Mechanical, Southern University of Science and Technology, Shenzhen, Guangdong 518055)

Abstract The phenomenon of overweight and weightlessness exists in the process of elevator running. In this study, the information about acceleration, speed, and displacement of the elevator during elevator running is obtained by analyzing the varying indications of the electronic balance so as to measure the height of the building. The experiment data is recorded by a mobile phone and extracted by a video software. The feasibility of this method is verified by experiments, and the relative error of height measurement can be less than 0.5%. This method has practical application value, and it serves as an accessible example for college students to study the laws of both kinetics and dynamics in the course of fundamental physics experiments.

Key words electronic balance; overweight and weightlessness; acceleration; the height of the building

21世纪新诺奖实验融入大学物理实验教学的探索

王晓峰　徐婷婷　王才林　邓冬梅*

（南方科技大学物理系，广东 深圳　518055）

摘　要　目前，高校的大学物理教学实验中所涉及的诺贝尔物理学奖实验多为20世纪的经典物理实验，推动着物理学的进步与发展。具有重要的教育价值和实践意义。然而，随着时代的飞速发展、科技的不断进步，大学生仅注重于百年前诺奖经典实验已无法适应时代发展的需求。因此，将21世纪新诺奖实验融入大学物理实验教学，深挖新诺奖的教育价值，不仅可以使学生了解科学发展前沿且具重大意义的研究成果，了解现代化技术支持下的物理实验手段、实验方法，更有助于提升学生的核心素养，提高创新实践能力。本文以南方科技大学实验教学为例，探索将21世纪新诺奖实验融入大学物理实验教学的实施路径。

关键词　诺贝尔奖；物理实验；教学改革

1　研究背景

建立于20世纪初的诺贝尔奖，是根据瑞典化学家阿尔弗雷德·诺贝尔的遗嘱所设立的奖项。在其百年历史中，奖励了许多在科学发展方面做出原始性和突破性贡献的科学家。其成果加速了人类社会前进的步伐，成为人类文明进步的推动力量。将诺奖实验融入大学物理实验教学，有利于培养学生探索性的思维方式、求是的实验态度以及坚忍不拔的科研品质。

目前大学物理实验教学所包含的诺贝尔物理学奖的实验项目多数（如表1所示）已经距今约百年之久。大学物理实验教学不仅需要经典的、传统的、基础的物理实验技能与手段培养，更应培养符合时代发展需求的、紧跟科研前沿的、具有原始创新能力的新时代大学生。因此，将21世纪新诺奖实验引入大学物理实验教学，让学生了解现代化技术支持下的物理实验手段、实验方法，是时代发展的需要，也是物理实验教学与时俱进的必然趋势。

表1　大学物理实验所涉及的诺贝尔物理学奖

实验名称	获诺奖年份	获奖人
塞曼效应	1902年	亨德里克·安东·洛伦兹 彼得·塞曼
迈克尔逊干涉仪	1907年	阿尔伯特·迈克尔逊
高温超导材料的制备及导电性能和转变温度的测量	1913年	海克·卡末林·昂内斯
光电效应法测普朗克常量	1921年	阿尔伯特·爱因斯坦
氢氘光谱	1922年	尼尔斯·玻尔
用密立根油滴实验测电子电荷	1923年	罗伯特·安德鲁·密立根
弗兰克-赫兹实验	1925年	詹姆斯·弗兰克 古斯塔夫·路德维希·赫兹

收稿日期：2023-06-06

基金项目：广东省本科高校教学质量与教学改革工程建设项目（SJZLGC202207）。

通讯作者：邓冬梅，女，博士，主要从事大学物理实验教学工作，研究方向为半导体材料与器件，dengdm@sustech.edu.cn。

引文格式：王晓峰，徐婷婷，王才林，等. 21世纪新诺奖实验融入大学物理实验教学的探索[C]. 2023年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会，2023.

Cite this article：WANG X F，XU T T，WANG C L，et al. The exploration of integrating the Nobel prize experiments in the 21st century into the teaching of college physics experiments[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education，2023.（in Chinese）

2 新诺奖实验引入实验教学的挑战

百年经典诺贝尔物理学奖成果的教育价值已经得到实践的认可。21世纪新诺奖实验应用于教学中的具体方式和方法还有待进一步探索。主要需解决的关键问题有:1、哪些新诺奖实验适合引入到大学物理实验教学中?2、如何将尖端诺奖实验"转型"成适合本科生教学型实验?需要向学生展现哪些核心物理概念?3、如何体现新诺奖实验的育人价值?

3 从高端的诺奖成果到"接地气"的物理实验

表2为21世纪诺奖相关成果列表。其中包括宇宙学、拓扑理论、量子信息、核物理以及凝聚态等多个领域。考虑到教学实验需要学生亲身参与实验的设计与探测,而凝聚态领域的诺奖实验更容易在实验进行演示、相关的实验仪器和设备易于购置,因此,我校将以下凝聚态领域的3个诺奖实验引入实验课程。包括2007年诺奖巨磁电阻效应相关的《巨磁阻效应》实验;2009年诺奖光纤领域相关的《光纤耦合与数值孔径测量》实验;2010年诺奖二维材料相关的《二维材料的制备与光谱测量》实验;2014年诺奖蓝光LED相关的《发光二极管的发光机理与特性研究》实验。

20世纪的诺奖实验中注重于重要实验现象的发现,从而使我们对分子原子世界有了更深的了解,例如氢氘光谱实验,通过原子光谱让我们了解到同位素效应。因此,实验上可以通过重复诺奖实验向学生介绍实验原理、方法与内在物理机理。然而21世纪的凝聚态诺奖实验更加偏重于实验对人类科技进步的重要作用。例如巨磁电阻效应的发现促进了当代磁存储技术的发展,而蓝光LED的发明彻底改变了人类的照明方式。每个诺奖的背后都包含很多需要解决的物理科学与工程技术方面的难题。以2014年诺奖蓝光LED为例[1],它被授予了日本三位科学家赤崎勇、天野浩和中村修二。以奖励三位获奖者在发现新型高效、节能、环境友好的蓝光LED方面做出巨大贡献。然而在整个蓝光LED的发展历程中,遇到了许多问题和挑战,科学家也不断地突破和创新(如图1所示)[2]。例如生长蓝光LED的材料选取问题。哪种材料适合做蓝光LED?如何在大失配衬底上生长高质量氮化镓材料?如何获得高质量p型GaN?如何处理材料生长过程副反应太多,影响材料质量的问题?以及如何提高LED的发光效率?这些看似工程领域的技术问题,后面隐藏的是关键的物理机理。因此,着眼于蓝光LED发展过程中的重要物理现象和物理问题,是我们将21世纪新诺奖实验引入大学物理教学实验的基本原则。

实验上为了让学生深刻了解蓝光LED的原理,开展LED的生长与特性测量的实验是最合适

表2 21世纪诺奖相关成果列表

年份	相关成果	年份	相关成果	年份	相关成果
2000	半导体异质结	2008	亚原子物理学中对称性破缺	2016	拓扑相变和拓扑相
2001	碱金属原子稀薄气体的玻色-爱因斯坦凝聚	2009	光纤和电荷耦合器件	2017	引力波探测
2002	探测宇宙中微子	2010	石墨烯二维材料	2018	激光物理领域的突破发明
2003	超导体和超流体领域	2011	发现宇宙加速膨胀	2019	宇宙相关研究和发现太阳系外行星
2004	量子场中夸克渐进自由	2012	量子世界的粒子控制	2020	宇宙黑洞
2005	光学相干的量子理论、激光精密光谱学	2013	希格斯玻色子	2021	对地球气候的物理建模、量化变化和可靠地预测全球变暖
2006	宇宙微波背景辐射	2014	发明蓝光LED	2022	纠缠光子实验、验证违反贝尔不等式和开创量子信息科学
2007	巨磁电阻效应	2015	发现中微子振荡		



图 1　蓝光 LED 发展的时间线

的，然而生长 LED 的设备（MOCVD）价值千万，无法在本科教学中开展。因此，我们的实验设计将针对 LED 发展过程中遇到的一些关键问题进行探讨。我们设计的《发光二极管的发光机理与特性研究》实验，除了向学生介绍蓝光 LED 的内部结构和发光机理，还探讨了 LED 中的量子限制斯塔克效应和极化效应，其在 LED 发光上的表现为发生红移和发光效率变低的现象。这是 LED 发展过程中遇到过的重要科学问题。也是中村修二获诺奖后仍在继续研究的课题之一。我们将诺奖实验中基本的物理问题以及相关的重要物理概念相融合形成了面向本科生的大学物理实验。这样不仅有助于了解科研的时代脉搏，而且也能理解制约其发展的重要科学问题。此外，学生还需要自组实验小组，基于所讲解的原理进行创新型应用实验，如：利用 LED 制作显示面板、白光光源等，深入发掘 LED 的应用价值。让高端的诺奖发明为“我”所用。

从 21 世纪的新诺奖实验可以看到，有很多实验都是需要大科研装置的支撑，例如引力波的探测[3]、探测宇宙中微子[4]。然而，其中也有“接地气”的诺奖实验，即石墨烯二维材料。二维材料，即厚度在一个或几个原子的材料，理论上被认为是不稳定的、自然界中不存在的。然而，2010 年的诺贝尔奖得主安德烈·海姆在被废弃的粘有石墨碎片的胶带上发现了完美单层石墨-石墨烯，它是一种几近完美导热材料和电导体。自从 2010 年发现石墨烯以来[5]，科学家们陆续发现了成千上万种像石墨烯一样具有二维结构特性的材料，包括单层极限下的二维半导体材料二硫化钼、二维铁磁材料三碘化铬、二维铁电材料铜铟磷硫以及二维多铁材料二碘化镍。这些新材料也是目前二维材料研究领域重点关注的材料，有望发展出新型的电子自旋功能器件。因此我们结合最前沿的科学研究，设计了《二维材料的制备与光谱测量实验》。学生可以仅凭图 2 所示的胶带、硅片等十分简单的实验元件来制备二维材料。通过显微镜下对其颜色的观察来初步判断其厚度，并结合拉曼、荧光光谱来分析其独特的光学特性。这个实验让学生深刻的体会，低成本、朴实无华的实验手段，也可以产生震惊世界的实验成果。

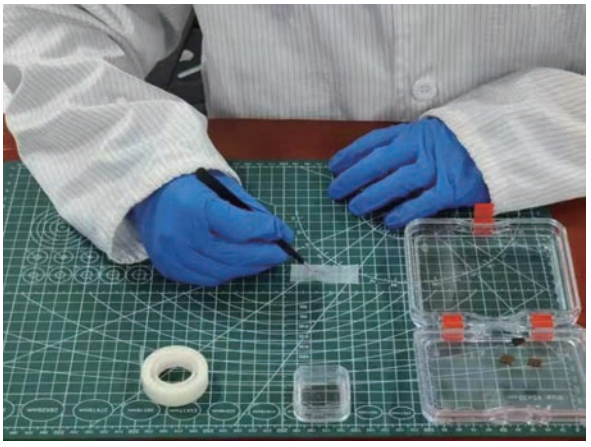


图 2　二维材料的制备

科学的严谨需要科技工作者在长期科学实践中不断的尝试和探索。将新诺奖实验引入实验教学，最根本的目的是希望学生从当代科学家身上学习科学研究必备的品格和能力。诺贝尔奖的历史上有很多“灵光一现”的实验，例如安德烈·海姆在被废弃的粘有石墨碎片的胶带上发现了完美石墨烯。推翻了人们对二维材料在单层极限下不存在的认知。这些看似偶然的实验背后是科学家对信念的坚持以及对新科学方法的不断尝试的必

然结果。将新诺奖实验引入教学中，希望学生了解诺奖的科学意义和价值的同时也要深刻体会科研前辈所付出的努力。这样才能成为敢担当且具备核心素养的新时代大学生。

4 结论

将21世纪新诺奖成果引入大学物理实验教学，解决了实验内容无法与时俱进的痛点，避免了实验教学与前沿研究脱轨的尴尬。同时，引入新的诺奖成果，目的在于育人。培养学生科学研究所必备的核心素养，使学生站在巨人的肩膀，远眺科学发展的未来。

参 考 文 献

[1] 李海. 2014年诺贝尔物理学奖——蓝光LED的发明[J]. 自然辩证法研究，2015(4)：83-87.

[2] 葛惟昆：. 2014年诺贝尔物理学奖的启示[J]. 物理与工程，2014，06：3-8.

[3] 张宏浩：. 解读2017年诺贝尔物理学奖：引力波的直接探测[J]. 物理与工程，2018，02：3-12.

[4] 高崇寿. 2002年诺贝尔物理奖介绍：中微子振荡实验[J]. 物理与工程，2004，01：7-10.

[5] 宋峰 于音. 什么是石墨烯——2010年诺贝尔物理学奖介绍[J]. 大学物理，2011，30(1)：7-7.

THE EXPLORATION OF INTEGRATING THE NOBEL PRIZE EXPERIMENTS IN THE 21ST CENTURY INTO THE TEACHING OF COLLEGE PHYSICS EXPERIMENTS

WANG Xiaofeng XU Tingting WANG Cailin DENG Dongmei

(Department of Physics, Southern University of Science and Technology, Shenzhen, Guangdong 518055)

Abstract At present, most of the Nobel Prize-winning experiments involved in college physics teaching experiments are classic physical experiments in the 20th century, which promote the progress and development of physics. It has important educational value and practical significance. However, with the rapid development of science and technology and the progress of society, college students only focus on the classic Nobel Prize experiments a hundred years ago, which cannot meets the needs for the developing of modern society. Therefore, integrating the 21st century New Nobel Prize experiments into college physics experiment teaching, and exploring its educational value will not only enable students to understand the cutting-edge and significant research results of scientific development, but also understand the physical experimental methods supported by modern technology. Moreover, it is more helpful to improve the ability of innovation and practice. This paper takes the experimental teaching of Southern University of Science and Technology as an example to explore how to integrate the 21st century New Nobel Prize experiments into the college physics experiment teaching.

Key words Nobel Prize; physics experiment; teaching reform

“课程思政”在大学物理实验教学中的设计案例
——以不良导体导热系数测定实验为例

郭永利　常凯歌　童　童*　王亚平　赵铭姝
（西安交通大学物理学院国家级大学物理国家级实验教学示范中心，陕西 西安　710049）

摘　要　课程思政就是将立德树人与传授专业知识有机统一的教育理念。以不良导体导热系数测量为例，探讨如何培养学生严谨的科学态度、创新思维能力以及增强学生自信心。同时将马克思主义基本原理融入课程教学中，与知识传授起到协同作用。给学生“植入”家国情怀，提高学生的民族自豪感，增强学生自信心和社会责任感，实现教书与育人的有机统一。

关键词　课程思政；导热系数；大学物理实验；实验教学

0　引言

《高等学校课程思政建设指导纲要》中明确要求：公共基础课的重点就是建设一批能提高在校学生的思想道德修养、人文科学素质、宪法法治意识、安全意识和自我认知能力的课程，注重在润物细无声中坚定学生远大的理想信念、熏陶爱国主义情怀、加强思想品德修养、增长科学知识、发扬奋斗精神，提升学生综合素质[1]。本文首先阐述了课程思政建设的基本内涵，然后介绍如何在大学物理实验课中的进行课程思政建设，并以不良导体导热系数测试实验为例，具体阐述如何在大学物理实验中挖掘课程思政元素。

1　课程思政

“课程思政”是指高等学校中所有设置的课程均有思想政治教育的功能，发掘各门课程所蕴含的思政元素和所发挥的思想政治教育功能，有机融入课堂教学的各环节，实现思想政治教育与科学知识教育的有机统一[2,3]。

“课程思政”的根本任务就是立德树人，其教学实践主体为专业课程，其主要目标是以习近平新时代中国特色社会主义思想为指引，将立德树人、思政教育融入人才培养全过程，推动马克思主义基本原理、社会主义核心价值观等内容与专业知识讲授的有机结合[4]。那么“课程思政”的具体建设内容就是在讲授专业课程中，将课程中蕴含的“思政元素”挖掘出来，探索专业知识中所潜藏的与马克思主义辩证哲学原理相结合的知识点，培养学生的家国情怀、勇攀科学高峰的精神，树立正确的理想信念，达到“教书”和“育人”的有机结合，促进学生专业成才，立德树人[5-7]。

2　大学物理实验课程

大学物理实验课是一门实践性很强的课程，与理论课程相辅相成，具有同等重要的教育功能[8]。在培养既懂理论又会动手，能解决实际问

收稿日期：2023-06-06
基金项目：2022年西安交通大学本科教学改革研究青年项目(2022Q-19)。
作者简介：郭永利，女，高级工程师，主要从事物理实验教学，g.y.l.89307@mail.xjtu.edu.cn。
通讯作者：童童，女，工程师，主要从事物理实验教学，tongtong.phy@mail.xjtu.edu.cn。
引文格式：郭永利，常凯歌，童童，王亚平，赵铭姝. “课程思政”在大学物理实验教学中的设计案例——以不良导体导热系数测定实验为例[C]. 2023年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会，2023.
Cite this article: GUO Y L, CHANG K G, TONG T, et al. Design of “Curriculum ideology and politics” in college physics experiment teaching—A case study of measurement of thermal conductivity of poor heat conductor[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education, 2023. (in Chinese)

题的高级工程技术人才的过程中，大学物理实验课具有独特的重要作用[9]。大学物理实验内容的思想性、方法性和实践性非常强，蕴含着丰富的哲学思想和政治元素 。经典物理实验项目包含着物理学数百年来一脉相承的精髓——科学的研究态度和思想方法，实验项目中涉及的科学研究人物、伟大成就等能够让学生感受到深厚的家国情怀和使命担当，这些都是课程思政的典型素材[10,11]。

3 在不良导体导热系数测量实验中挖掘思政元素

3.1 通过物理实验背景的了解，培养学生严谨的科学态度

大学物理实验项目背后的探索历史，蕴含着相关物理学知识的发展规律。比如，导热系数，又称热导率，是表征材料导热能力的物理量[9]。那么热是如何定义的呢？从17世纪末到19世纪中叶，热学经历了早期发展。18世纪初，英国化学家布莱克提出“热素说”，认为热是一种没有质量，没有体积的流体物质，“热素”可以进入一切物体内部，物体含有“热素”越多，温度就越高，反之则越低。这显然是一种错误的解释，因为它不能解释摩擦生热的现象。1736年，法国科学院把热问题的求解作为悬赏课题，当时提出的问题是：“对于火的本质与传导的研究。”法国著名数学家与物理学家傅立叶(1768—1830)从事热传导的研究可能与此悬奖课题有关。然而他对热学的研究并没有涉及热的本质，而是选择了热传导的数学理论研究，这是有深刻科学意义的[12]。

这段历史背景告诉人们，在科学的道路上，人们对事物的认知并不是都是客观的，而是在实践过程中不断的修正不合乎客观实际的理论，然后反复经过实践检验，最后得到科学规律。在这个循序渐进的过程中，需要人们不断的付出艰辛努力，渐渐地对热的认知更加客观准确。同时，培养学生对任何理论和论点，大胆质疑，鼓励学生要用怀疑的态度去认识现有理论。

3.2 在实验教学过程中，给学生“植入”家国情怀

不良导热材料的应用范围也很广泛，日常生活中，我们穿的棉袄、被子等，建筑物外面的保温材料，以及航天员身上穿的航天服、返回地球的返回舱等都是保温材料。返回舱舱体主要的热传导方式为辐射。返回舱在太空中受到太阳照射，外层温度达到一百多摄氏度，如果被其他舱体挡住，外面的温度又降到零下一百多摄氏度，所以保温技术的应用是非常关键的。同时对学生进行爱国主义教学，鼓励学生热爱祖国、崇尚科学，把自己投身到建设我们祖国的任务当中去。激发学生的学习兴趣和民族建设的使命感，厚植民族情怀和自豪感，引导学生刻苦努力，用科学知识武装自己的头脑，等走上社会，成为建设祖国的栋梁之材[13]。

3.3 在实验教学过程中，培养学生创新思维能力

在该实验中，为了让实验结果更加精确，加热盘A、样品B、散热盘C三个盘要做到无缝接触，如图1所示，不能中间夹杂由空气，因为空气的导热性能很差，会直接影响不良导体导热系数的测量，带来较大的误差。所以三个盘对接整齐压紧后，用螺栓固定好，以使A盘有一定的向下压力，确保三个盘之间没有空气间隙。同时铜盘C是由三个柱子支撑的，为了避免这三个柱子对铜盘C的散热有影响，所以这三个柱子特地选用不良导热材料制作而成，以减小对实验结果的影响。

在这个系统中有诸多因素影响着实验结果的准确测量，因为事物之间以及事物内部诸要素之间的相互影响、相互制约和相互作用。承认因果联系的普遍性和客观性，是人们正确认识事物，进行科学研究的前提；正确把握事物的因果联系，才能提高人们实践活动的自觉性和预见性[14]。在实验中，找到所有影响散热传热过程中的影响因素，并逐一消除掉，才能更加精确地测量出不良导体导热材料的导热系数。培养学生在科学研究中，逻辑上追求环环相扣的关系，细节上要求一丝不苟，态度上严谨治学。

在实验过程中，当系统的加热功率与散热功率相等时，系统的温度分布将处于一个相对稳定的状态，然后利用稳态法测量样品的导热系数。这个实验过程是量变到质变的典型教学案例，量变就是热量不断地从高温端向低温端传导，样品中某一点的温度随着时间的变化而变化。质变就是所有质点的温度不再随时间而发生变化，传热速率和散热速率达到了平衡。系统从不平衡到平衡，质点的温度从变化到不变，这就是量变到质变的客观规律。

3.4 培养学生创新思维，增强学生自信心

在公式中，材料的传热速率是难以直接测量

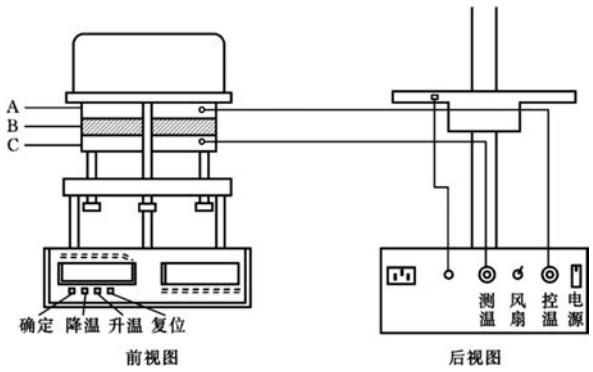


图 1 导热系数测定仪示意图

的物理量，怎么解决该问题呢？既然不能直接测量，那么用间接测量的方法，用其他可以直接测量的物理量来间接测量传热速率。经研究发现，当加热盘和散热盘达到稳态时，材料内部的传热速率和散热盘的散热速率相等，而散热速率可直接测量。用润物细无声的方式给学生渗透一个理念，做任何事情不能犯“一根筋”的错误，要学会灵活变通。在错误的道路上及时停止就是止损。将创新精神、创新思维方法、创新技法综合应用，促进发展思维策略，帮助学生进行思路创新、方法创新、知识创新，从而创新性的开展学习与工作，更好地塑造自己、发展自己[15]。

用这套设备可测量良导体导热系数，但是必须对样品进行改装，加长样品长度，以便在样品内部形成稳定的温度场；在样品侧面加保温材料，以保证热流方向。培养学生积极思考，用已有知识解决实际问题，达到格物以致用的效果。学习科学原理的目的就是灵活运用，不是一把钥匙开一把锁。教师还可以充分激发学生的主观能动性，使其潜移默化地体会和感悟科学精神。通过动手操作培养实验技能，学生实验技能的累积会增强其能力和自信心，能够让学生以积极的心态投入到后续的课程学习中。

4 结束语

“课程思政”是一种以“树德为先、育人为本”为中心的教育理念，培养学生德智体美全面发展。而大学物理实验课程是理工科专业的必修基础课，每个实验项目都蕴含着生动的“课程思政”元素，所以该课程开展“课程思政”教育具有重要的意义。本文以不良导体导热系数测量实验为例，在讲授专业知识过程中融入了马克思主义辩证哲学原理，渗透式培养学生严谨的科学态度和创新思维能力，给学生“植入”家国情怀，增强学生自信心。将知识传授、能力培养与价值引领有机统一起来。

参 考 文 献

[1] 教育部.教育部关于印发《高等学校课程思政建设指导纲要》的通知[B/OL](2020-05-28)[02-06-01]. http://www.moc.gov.cn/scsitc/A08/s7056/202006/t20200603_462437.html

[2] 高德毅,宗爱东. 从思政课程到课程思政:从战略高度构建高校思想政治教育课程体系[J]. 中国高等教育,2017(1):43-46.

[3] 沈光,洪一明. 高校实验教学课程思政亲和力的价值和提升路径[J].实验室研究与探索,2019(38):237-240.

[4] 王淑梅,李明珠,马鸿洋.落实立德树人根本任务推进物理实验课程的思政建设[J].大学,2021(44):80-82

[5] 王光彦.充分发挥高校各门课程思想政治教育功能[J]. 中国大学教学,2017(10):4-7.

[6] 张映辉,陈宝玖,殷 燕.结合物理实验讲授唯物辩证法的3个典型案例[J].物理实验,2020(40):27-30.

[7] 樊代和,魏云,刘其军等. 基于“课程思政”的大学物理实验课程教学案例探讨——以迈克耳孙干涉实验为例[J].物理与工程,2022(32):175-178.

[8] 李林,吕秀品,池凌飞等. 大学物理实验实例的思政挖掘[J].物理与工程,2022(32):190-192.

[9] 王红理,俞晓红,肖国宏.大学物理实验[M].2018:1-2.

[10] 陈真英,谢冰,谢文彬等.立德树人格局下大学物理课程实施课程思政的特色优势研究[J].高教学刊,2019(21):61-63.

[11] 王秀敏.大学物理实验课程教学中课程思政的实践与探索[J].教育现代化,2019(48):203-204.

[12] 贾随军,贾小勇.傅立叶与热传导理论的数学化[J].自然辩证法通讯,2009(5):65-70.

[13] 叶超.以小见大:大学物理实验课程思政教育的放大法[J].物理实验,2021(41):46-49.

[14] 刘建军,郝立新,寇清杰等.马克思基本原理概论[M].北京:高等教育出版社,2018:30-32.

[15] 物理实验课程中“课程思政”融合式教学模式建设与探索[J].大学物理实验,2021(34):106-110.

■

DESIGN OF "CURRICULUM IDEOLOGY AND POLITICS" IN COLLEGE PHYSICS EXPERIMENT TEACHING
—A CASE STUDY OF MEASUREMENT OF THERMAL CONDUCTIVITY OF POOR HEAT CONDUCTOR

GUO Yongli CHANG Kaige TONG Tong WANG Yaping ZHAO Mingshu

(National Demonstration Center for Experimental College Physics Education, School of Physics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049)

Abstract Curriculum ideology and politics is an educational concept which organically unifies moral cultivation and imparting professional knowledge. Taking the measurement of thermal conductivity of poor heat conductor as an example, this paper discusses how to cultivate students' rigorous scientific attitude, innovative thinking ability, and enhance their self-confidence. At the same time, the principle of Marx's dialectical philosophy is integrated into the course teaching, which plays a synergistic role with imparting scientific knowledge. Implanting the feelings of family and country into students to improve their national pride, enhance their self-confidence and sense of social responsibility, and realize the organic unity of teaching and education.

Key words curriculum ideology and politics; coefficient of thermal conductivity; college physics experiment; experiment teaching

基于OBE理念的大学物理线上线下混合式教学模式构建与实践
——以应用型地方本科院校为例

邓海明[1]　朱怡佳[1]　孔　超[1]　陈亚琦[1]　李　璋[2]　蒋纯志[1*]
([1]湘南学院物理与电子电气工程学院,湖南 郴州　423000;[2]郴州市第二中学,湖南 郴州　423000)

摘　要　基于OBE理念,结合超星泛雅慕课平台和雨课堂,打造线上线下实时互动学习社区,搭建学习效果双向反馈通道;融合讨论式、探究式和启发式教学方法,既发挥了教师主导作用,又保障了学生主体地位;提出多元化课程考核方案,加强对线上线下学习过程的全面考核,以此激发学生学习的主动性;通过浸润式课程思政教育,培养学生高尚的思想情怀和爱国主义热情。

关键词　OBE理念;大学物理学;线上线下混合式教学

0　引言

2018年6月,教育部新时代全国高等学校本科教育工作会议的召开,提出了"以本为本"、"四个回归"等高等学校本科教育基本思想。"振兴本科教育",推行本科课堂教学改革,全面提升教学质量,势在必行!秉承先进的教学理念,是教学改革成功的先决条件。随着国际上教育教学理念的不断更迭,新的教学理念层出不穷,其中OBE理念以其独特的、创新的思维获得了国际、国内教育界的广泛认可。在互联网+蓬勃发展的时代,人们教学改革思路更开阔,方法更多样。线上教学和线下教学相结合是基于互联网+发展起来的一种新型教学模式。后疫情时代更是促进了它的迅速发展。那么如何基于OBE理念设计一套线上线下混合式教学模式,确保该混合式教学模式提高教学效率、提升教学质量是目前教学改革一个研究的热点。

物理学是一门非常重要的基础学科。毫不夸张的说,它是推动全球科技发展以及我国工业化进程的重要力量。以物理学知识为基础的《大学物理》课程是理、工、医专业本科生必开的专业基础课程。笔者所在单位为一所地方本科院校,着力于培养地方经济社会发展需要的高素质应用型人才,建成具有鲜明特色的应用型大学。《大学物理》课程面向我校十几个专业本科生开设。该课程着力于培养学生对物理学基本概念、基本理论、基本方法的全面认识和正确的理解,使其具备物理建模能力、定性分析、估算与定量计算的能力,并初步掌握物理学研究问题的思路和方法。笔者以《大学物理》课程为例,以OBE理念为指导思想,开展线上线下混合式教学模式探讨,以打造优质高效的线上线下混合式教学。线上教学与线下教学各有其独特的优势,在混合式教学中如何将两者有机结合起来,保障既优质又高效的教学效果,是本次教学改革的重点。

1　课程构建理念及思路

课程构建以OBE理念为指导思想。所谓OBE理念,即以成果为导向,以学生为本,采用逆

收稿日期:2023-06-06
基金项目:2020年湖南省一流本科课程[湘教通2021-28]-698。
作者简介:邓海明,女,副教授,主要从事物理教育教学科研工作,研究方向为量子物理,woshidenghaiming@126.com。
通讯作者:蒋纯志,女,教授,主要从事物理教育教学科研工作,研究方向为力学,775376022@qq.com。
引文格式:邓海明,朱怡佳,孔超,等. 基于OBE理念的大学物理线上线下混合式教学模式构建与实践——以应用型地方本科院校为例[C]. 2023年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会,2023.
Cite this article: DENG H M, ZHU Y J, KONG C, et al. Construction and practice of online and offline hybrid teaching mode of college physics based on OBE concept—Take the local regular universities for example[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education, 2023. (in Chinese)

向思维的方式进行课程体系建设的理念。该理念颠覆了传统教育认知，认为一切教学活动应该首先明确可衡量的具体教学目标。在这些明确的教学目标引导下，教师会自发积极思考如何遴选教学内容，选取恰当的教学方法，采用多样化教学手段以及考核方式，努力确保目标的达成。课程结束后，应该有一套分析指标体系来定量计算教学目标是否达成；且教师须重视学生课程考核成绩反馈的问题，保持课程的持续改进。

课程构建总体思路是依托信息化教学平台，融合讨论式、探究式、启发式教学方法，开展线上网络学习和线下课堂学习有机结合的混合式教学，通过线上线下双向反馈机制实时了解学生学习动态，并依照学习情况调整教学手段，通过多元化考核方案激发学生学习的热情，架构效率高、质量佳的互助式集体学习社区，基于课程达成度分析指标体系，监控课程完成质量，并保持不断改进。

线上线下混合式教学模式含有线上活动和线下活动两个部分。其中线上活动主要包括超星泛雅慕课平台课前自主学习、线上预习作业、在线讨论以及雨课堂线上作业；线下活动主要包括教师授课，课堂讨论以及课后作业。构建思想具体阐述如下：

(1) 线上教学与线下教学各司其职，合力完成教学任务

线上教学的优势在于解决教学效率问题，线下教学则更有利于保障教学效果，因此它们各自所承担的教学任务不同。结合其特点，将教学任务做如下分配：线上教学完成课程基础性知识的讲解，线下则由各课程组教师进行知识的深化和相关专业类应用教学。

(2) 线上活动与线下活动深度融合，实时反馈，打造混合学习社区

线上活动与线下活动虽分工明确，却又是相互促进、深度融合的有机结合体。超星泛雅慕课平台中的预习作业完成情况以及线上讨论情况，能充分反馈学生课前学习中所遇到的困难，这些反馈有利于教师针对性的设计课堂教学。雨课堂线上作业则是线下课堂教学过程中所穿插的线上教学活动。与传统课堂练习相比，雨课堂线上作业有全员参与的优势。学生答题结束后，它能极速统计学生做每道题所花时间以及正确率，实时反馈学生课堂学习效果。统计结果所暴露的学生掌握欠佳的知识点，能提示教师及时调整教学方法和手段。由此可知，线上教学活动的效果反馈能有效指导线下教学。反之，教师的课堂教学活动、课堂讨论及课后作业同样能体现学生的知识基础及思维短板，这为教师设计和调整线上教学活动内容提供参考意见。

(3) 融合多种教学方法，确保教师为主导作用和学生的主体地位

在教学方法上，课题组注重学生学习主导性的发挥。讨论式教学贯穿整个教学过程。线上，学生可实时在平台发起讨论；线下的课堂上，教师则通过提出问题引发学生思考，并延伸至课后的分组讨论。这种教学模式，不仅能帮助学生更有效地掌握基础知识、解决应用拓展的问题，还能让他们学会团队分工与协作。探究式教学方法则是学生专业实践拓展项目中用得最多的教学方法，通过引导探索未知问题答案，培养学生严谨的思维、科学的精神和创新的能力。启发式教学则是课前教学视频和线下课堂中用于引导和启迪学生思维的方法。以讨论式教学为主，探究式、启发式为辅的教学方法，既发挥了教师主导作用，又保障了学生主体地位。

(4) 建立多元化考核机制，激发学生积极性

为激发学生学习的积极性，保障教学效果，特提出一套基于学习过程的多元化课程考核方案。该方案以加强对学习过程的管理与考核，综合反映学生整体学习状况和最终课程水平为指导思想，涵盖了线上考核与线下考核两部分。线上考核依据线上自主学习情况、线上测评、在线讨论表现等给出评价；线下考核则由课堂表现、分组讨论表现、拓展论文以及期末考核等共同给出。

(5) 建设课程目标达成度分析指标，保持持续改进

为确保课程的有效实施，一个学期课程结束后，教师必须进行课程达成度分析。比如，针对数学专业本科生开设的《大学物理》课程，课程组根据数学专业特点，设置了三个课程目标的评价依据，并进一步给出各项评价依据对课程目标支撑的权重。比如，课程目标三为使学生“具备物理建模能力，定性分析、估算与定量计算的能力，以及实验设计能力，掌握物理学研究问题的思路和方法，形成探索问题的科学方法和良好的思维习惯”。支撑该目标的评价依据有单元测试成绩、作

业成绩、期末考试成绩，以及小组讨论和小论文成绩。几个依据分别按照成绩对课程目标的支撑程度，分别赋予 10%、10%、40%、20%、20%的权重，由此可量化计算每个课程目标的达成度。最后，根据每个课程目对课程的支撑权重，可计算出课程目标总的达成度。课程组认为，一般情况下大学物理课程的达成度应不低于 75%。在课程教学过程中以及课程达成度计算过程中，用心的教师总能发现课程教学中新的问题。保持空杯的心态，不断探索，持续改进，才能保证课程源源不断的生命力。这亦是 OBE 理念至关重要的一个环节。

2 课程构建实例——带电粒子在磁场中的运动

基于以上课程构建思想，课程组织实施方式为：课前教师对线上资源的整合、梳理、优化，并提供给学生；学生根据自身情况在超星泛雅慕课平台开展网络自主学习，完成基础知识的掌握和初步内化，并可通过平台的讨论功能进行提问和讨论；教师再根据学生的自学情况有针对性设计课堂教学。课中，教师通过启发式授课完成基础知识的深化，通过雨课堂习题推送考查学生对知识的掌握程度，并根据反馈数据及时调节教学环节，通过讨论式授课完成知识的拓展；课后，根据课堂教学情况推送课后习题，并结合专业特点对知识进行专业性拓展探究。

我们以《大学物理》课程中的一个授课内容——带电粒子在磁场中的运动为例，结合多年的教学经验，构建了一堂线上线下混合式教学设计，如下表所示。

3 课程建设及应用情况

目前《大学物理》在线课程依托超星泛雅教学平台建立了良好的学习架构、授课视频、学习教案，课堂检测和作业均可通过网络进行发布，学生可随时随地进行学习，极大发挥了在线课堂移动教学的优势，学生也可以通过发布讨论参与互动，教师可在线解决学生学习过程中存在的疑问。课程网络平台建设正在不断建设完善当中。

该在线网络课程学习权限已经在超星泛雅慕课教学平台上开放，全校师生均能够通过搜索参与课程学习，目前已经在全校十八个专业中开展，受益学生人数达两千余人。大学物理教学团队是一支经过多年教学改革与实践锤炼，具有优良传统和创新精神的团队，形成了以教授为骨干，中青

课前	1.超星泛雅课前自主学习	学生通过在超星泛雅慕课平台观看预习视频，自主完成“电子在磁场中的三种运动”知识的学习；同时学生需自行通过思维导图的方式整理自行整理好知识点，以确保知识性内容的全面掌握。
	2.超星泛雅课前预习作业	通过课前预习作业，完成基础知识的初步内化。预习作业题如下：(1)洛伦兹力可以做功吗？(2)可以改变带电粒子的运动大小和方向吗？(2)带电粒子在磁场中的螺旋轨迹是如何产生的？
	3.超星泛雅课前问题反馈	极光如此绚丽，为什么只能在极地观测到？
课中	1.课堂引入	播放一段绚丽的极光视频。
	2.知识深化	通过带电粒子在非均匀磁场中的运动，解释极光的原理，并建立磁镜的概念。
	4.讨论式学习	回旋加速器的工作原理
	5.雨课堂课堂练习推送	计算回旋加速器中振荡器的振荡频率
	6.实时反馈	针对性问题讲解与剖析
	7.讨论式学习	质谱仪分析：(1)速度选择器原理，(2)应用
	8.课程思政	中科院自主设计世界首台全超导托卡马克聚变实验装置，这是我们中国人的骄傲。
课后	1.知识点拓展探究	核聚变的基础是上亿度的高温等离子体，任何实物靠近它都会灰飞烟灭，拿什么容器来装它们呢？
	2.课后作业	根据课本中课后作业具体情况布置

年教师为主体，教育理念先进、结构合理、教学与科研能力强的教学队伍。

4 课程评价及改革成效

为评估大学物理教学改革效果，我们选取了由我院同一名任课老师所教授的两个同专业同层次的班级进行试点。其中一个班级采用线上线下混合式教学，另一个班级采用传统教学方法。一个学期后，教学团队进行问卷调查。调查结果显示，我们的教学模式、教学防范以及教学效果在学生中的认可度较高。

考试结束后，我们将学生成绩按照低于70分、70～80分、80～90分、90分以上四个阶段进行了统计，统计结果如下：传统教学班成绩低于70分的学生人数占比为21%，70分至80分之间的学生人数占比为33%，80～90分之间的学生人数占比为38%，90分以上学生人数占比为8%。线上线下混合式教学试点班成绩低于70分的学生人数占比为15%，70分至80分之间的学生人数占比为30%，80～90分之间的学生人数占比为42%，90分以上学生人数占比为13%。两组之间的成绩对比显示，混合式教学在教学效果好优于传统教学。

除此之外，我们根据教学大纲中所设定的课程目标评价依据，分别计算了三个课程目标的达成度，再整合三个课程目标分别对总课程目标的支撑权重，得到了课程目标总的达成度。结果表明，传统教学班课程目标总的达成度为74.2%，教学改革试点班课程目标总的达成度为76.8%。该组数据亦支持“混合式教学有利于课程目标达成”的结论。

根据以上三种评估方式，我们认为线上线下混合式教学具有一定的优势。二本院校大学生普遍缺乏积极的学习态度，混合式教学的最大优势恰好是激发学生自主学习的潜能，将学生变成学习的主体，因而在教学效果上正好出现了正面的反馈。

大学物理课程结合湘南学院应用型地方本科院校的办学定位，构建了地方本科院校大学物理课堂教学新方法，打造了一支精良的“双师型”大学物理教学团队，极大地提高了学生学习的兴趣和创新的热情，学生应用能力得到显著提升。该课程经过教学团队持之以恒的探索和建设，已经成为一门教学资源丰富、教学模式先进、教学方法科学、教学效果良好的线上线下混合式精品课程。

5 总结和展望

今后五年，该课程将持续进行课程设计及教学资源建设。课程设计方面，教学团队将尝试翻转课堂、分组讨论式、案例式、项目式等多种教学方法与线上线下混合式教学模式的结合，探索与各个专题教学内容最切合的课程教学设计方案；将持续关注各授课专业发展步伐，进一步加深课程内容与专业前沿应用的结合，打造独具应用性地方高校特色的大学物理课程体系。资源建设方面，教学团队将继续制作优质授课视频、教学设计、试题库等教学资源，将大学物理线上课程打造成内容齐全、品质优良的优质线上课程。

虽然课程教学改革取得了些许成效，但随着时代的发展也存在新的问题。因新高考推进以及我校生源特点，同专业同班级学生物理基础悬殊，如何让高考未选考物理或者职业高中的学生也能跟上大学物理课程的正常节奏，是需要解决的问题之一；作为大学物理授课教师，如何掌握理工医各个不同专业的最新动态和热点，保持大学物理课程的持续生命力，是需要解决的另一个问题。

未来教学改革的方向将是着力于解决以上问题。为解决学生专业基础不同的问题，拟充分利用在线教学平台，开展分基础大学物理课程教学。针对物理基础薄弱的学生，开设高中物理与大学物理衔接内容，这批学生需在大学物理课程开课前先完成相关内容的学习。为掌握理工医各个不同专业的最新动态和热点，大学物理教学团队教师到一线企业调研走访，紧盯所负责专业的最新动向；同时，团队定期组织召开交叉学科的教学研讨会，与对应专业教师广泛交流，以掌握各专业前沿发展，保持课程生命力。

参 考 文 献

[1] 王晶，余花娃，尹纪欣. 新工科背景下大学物理课程教学设计与实践[J]. 科教导刊，2021，1：107-109.

[2] 苏剑峰，牛强. OBE教育理念下大学物理线上线下混合式教学改革研究[J]. 西部素质教育，2021，7(22)：127-128.

[3] 王传杰. 大学物理线上线下混合式教学模式探究[J]. 科技资讯，2022，11：6.153-156.

[4] 李存,范春风,吴瑞田. 混合式教学模式下大学物理智慧五步教学法实践[J]. 高师理科学刊,2021,41(10):94-95.
[5] 梁敏,王鹏,王璟璟,刘启鑫,彭延东. 基于超星平台的大学物理线上线下混合式教学改革与实践[J]. 科教园地,2022.7:143-144.
[6] 宋冬灵,张胜海,候德亭,郭东琴,黄森淼. 基于多平台的大学物理线上教学实践探索[J]. 教育教学论坛,2021,20:97-100.
[7] 谢东,樊代,王辉. 基于混合式教学模式的"大学物理"教学设计[J]. 物理与工程,2022,32(5):187-191.
[8] 刘洋. 因材施教在大学物理线上线下混合教学中的应用[J]. 科技视界,2022.15(18),63-65.

CONSTRUCTION AND PRACTICE OF ONLINE AND OFFLINE HYBRID TEACHING MODE OF COLLEGE PHYSICS BASED ON OBE CONCEPT
—TAKE THE LOCAL REGULAR UNIVERSITIES FOR EXAMPLE

DENG Haiming [1] **ZHU Yijia** [1] **KONG Chao** [1] **CHEN Yaqi**[1] **LI Zhang** [2] **JIANG Chunzhi**[1]
([1] School of Physics and Electronic Electrical Engineering, Xiangnan University, Chenzhou, Hunan 423000;
[2] Chenzhou No. 2 High School, Chenzhou, Hunan 423000)

Abstract Based on OBE concept, the online and offline real-time interactive learning community and a two-way feedback channel for learning effects is built by combining Chaoxing Mocc and Yuketang. The teacher's leading role and student's main position were ensured by flusing the discussing, exploratory and elicitation method. The pluralistic course assessment scheme was proposed to strengthen the overall assessment of the learning process and stimulate students' learning initiative. The students' noble feelings and patriotism were cultivated by immersion Ideological and Political Education in class.

Key words OBE concept; college physics; online and offline hybrid teaching

关于工科院校大学物理课堂教学的研究和探索

赵丽霞　张　孟

（华东理工大学物理学院，上海　200237）

摘　要　本文以大学物理课堂教学为研究对象，以热力学循环的课程案例为导向，创新性地提出了沉浸式的教学方式，设计了四段教学模式：导航模式；科学研究模式；科学家精神的激励模式；复盘模式。通过四种模式的教学设计，让学生沉浸在物理课堂的学习中，激发学生对物理学的学习兴趣，提高学生的学习能力和科研能力。

关键词　大学物理；热力学循环；沉浸式教学；学习能力和科研能力

物理学是研究物质世界最基本形态的科学，它的理论渗透到自然科学的各个领域，因此，物理学是工科大学生必修的一门基础课程[1]。大学物理中的物理思想、物理方法、物理理论在培养学生树立正确的世界观和方法论，增强学生爱国主义精神与人文情怀，培养学生的科学素养和科学精神方面，具有十分重要的地位和作用[2]。然而，作为传统公共基础课程的大学物理[3]，因为教授内容的相对不变性，和教学模式的单一性[4]，已无法满足当代大学生的学习需求[5,6]。为了培养出“知识、能力、素质”三位一体的人才[7,8]，我们通过重新设计课堂教学，创新地提出了沉浸式教学的设计，让学生变为教学中的主体，以问题为导向，寻找不同的解决方案，研究每一个方案，找到最优的解决办法，让学生从不断的解决问题中，体会到学习和研究的乐趣，从而激发学生们学习大学物理的兴趣和培养他们的科研精神。

1　沉浸式教学设计

沉浸式教学是一种将学生要学习的知识润物细无声的融入学生生活中的教学模式。这种教学模式的目的是让学生沉浸在知识的学习中，而不自知。这不仅能提高学生的学习效率，也同时实现快乐学习的目的[9]。这种沉浸式教学于1965年起源于加拿大，被称为“依托课程内容的语言教学模式”[10]。大学物理教学中沉浸式教学的沉浸化是教学内容通过“对象化”与“具体化”的知识统一而实现的泛在化，是作为教学内容在物理层面的沉浸化存在。

德国物理学家M.普朗克在1900年提出量子的概念[11]，即一个物理量如果存在最小的不可分割的基本单位，则这个物理量是量子化的，并把最小单位称为量子。在这种思想的启发下，我们把物理学的知识也分割成无数个量子片段，重塑大学物理的知识架构。我们针对每一个量子化知识片段，重新设计教学模式，帮助学生沉浸在学习和研究过程中，体会自行决定学习知识内涵的掌控感与参与感。

1.1　导航模式

在引入新课时，我们用设问的方式制造悬念，激起学生求知的欲望；采用可以找到的一切资源，例如视频、图片、实验演示等，向学生展示目前碰到的困难，急需要解决的问题，让学生带着问题去寻找解决的办法，实现以学生为主体，以问题为导向的教学理念，最大程度地调动学生学习的积极

收稿日期：2023-06-06

基金项目：2022年中央教改专项-教改（教育部基金JGV00221001）；2022年中央教改专项-教育实践（教育部基金JGV00223001）；2022年教育部高等学校教学研究项目（DWJZW202225hd）；2022年教育部高等教育科学研究规划课题（22LK0304、22LK0403）；2023年华东理工大学教学改革项目（重点）。

作者简介：赵丽霞，女，副教授，主要从事大学物理和大学物理实验的教学工作，凝聚态物理量子材料的研究工作，zlx@ecust.edu.cn。

引文格式：赵丽霞，张孟. 关于工科院校大学物理课堂教学的研究和探索[C]. 2023年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会，2023.

Cite this article：ZHAO L X，ZHANG M. Research and exploration on classroom teaching of college physics in engineering colleges[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education，2023.（in Chinese）

性和主动性，大大提高了学生的学习兴趣，达到了较好的教学效果[12]。

以“热力学循环”为教学案例（图1），我们首先介绍航天的新闻和相关的物理知识，引入发动机的动力问题，同时让学生思考，日常生活中有没有这样的实际案例，引导学生发现电冰箱与火箭拥有一样的基础理论知识，是一件很奇妙的事情，激起学生学习热力学循环过程的强烈兴趣。

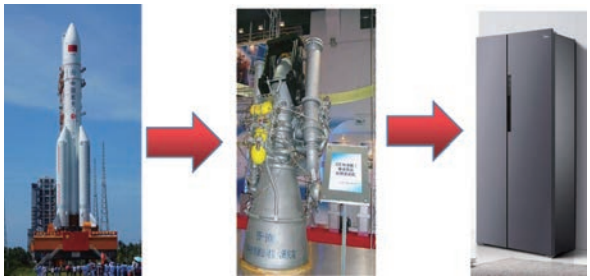


图1

发动机是将燃烧可燃混合气的化学能转化为机械能的机器，其中活塞起到至关重要的作用，那么活塞是怎么做功的呢？我们找到了图2，向学生展示最基本的活塞做功原理：气缸内的气体吸收热量膨胀，推动活塞对外做功；随着气体膨胀，压强逐渐减小，当减至与外界压强相等时，就不能再对外作功。然而，在实际应用过程中，我们需要活塞持续做功，这怎么实现呢？学生们带着问题，即将开始探索之旅。

1.2 科学研究模式

在传统的课堂教学中，都是以教师的讲述为主，学生被动式的接受，老师很难了解学生对该知识的掌握程度。科学式研究问题就是激发学生探索问题的能力和兴趣，通过教师引导，学生不断的提出问题，通过提出问题展开逻辑思维互动，使学生始终处于课堂的主体地位，将教学过程转变为科学研究的活动。通过这样的课堂教学，可以培养学生的逻辑思维能力、创新能力和科学素养。

在循环过程中，我们研究活塞的做功问题（图2）。学生们提出两种解决办法，一种是建造大型的活塞装置，一种是废气再利用。老师和学生一起探讨了两种办法，发现后一种办法更可行。在这样的研讨活动中，引入循环过程，顺理成章，学生很容易学会。在学习中研究，在研究中学习，把科学研究渗透到学生方方面面的学习中去，对培养学生的科研能力具有重要的意义。

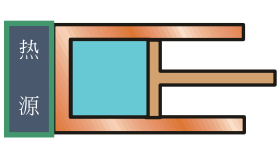


图2

1.3 科学家精神的激励模式

蕴含爱国、创新、求实、奉献、协作、育人的高尚品格汇聚成的科学家精神，是一代代科学家崇高精神的凝结，是激励引领广大人才锐意进取、开拓创新的重要力量源泉。科学家精神能激发学生的积极性、主动性和创造性，引导青少年理解新时代的科学家精神，可以鼓励他们敢于创新、爱国奉献，为祖国的科技发展努力学习、拼搏奋进。

在循环过程的课堂教学中，我们设计了与现代科技联系的板块。其中，中国科学院精密测量科学与技术创新研究院研究员冯芒团队与多家机构合作，设计并实现了国际上首个非厄米量子热机实验。该研究的成果和所展现的技术具有一定的普适性，有望应用于能源、生物、医药和工程等领域，并用于开发分子马达、纳米机器人和微型智能装置等。众所周知，科研难，“难于上青天”。但是冯芒团队经历了艰苦的研究过程，克服了各种困难，最终打破了课题壁垒，完成了这项科学研究，值得我们学习和借鉴。这样的设计，可以让学生近距离接触当代科学家以及科学家们艰苦奋斗的故事，从而激发起学生们的科研兴趣，努力学习，在祖国的科技发展中成就自我、实现价值。

1.4 复盘结课模式

复盘，围棋术语，也称“复局”，指对局完毕后，复演该盘棋的记录，以检查对局中招法的优劣与得失关键。我们创新性的把复盘引入到物理课堂教学中来，可以帮助学生理清学习的内容，回答学习过程中产生的问题和困惑，加深对物理学知识的印象，也可以更加融会贯通，提高自己的逻辑思维能力和创新能力，为接下来的学习打下坚实的基础。

以循环过程为例，在课堂学习过程中，我们提出问题：(1)如何实现活塞的持续做功？(2)热机效率能否达到100%？(3)热机效率的最大值是多少？通过复盘前面的研究内容，我们可以逐个解答这些问题：(1)用循环过程实现活塞的持续做功；(2)热机的效率不可能达到100%！而且我们

还进行了延伸，第二类永动机（从单一热源吸取热量完全用来对外做功的热机）不能实现！（3）为了研究热机效率的极值问题，我们引入卡诺循环。卡诺告诉我们，热机必须工作在两个热源之间，热机的效率仅仅决定于两个热源的温度差，而与工作物质无关，在两个固定热源之间工作的所有热机，以可逆机效率最高。这样，学生通过解决这些问题，又重新梳理了所学知识，加深了印象。在课后的应用过程中，更加得心应手，也坚定了学生学好物理学的信心。

2 沉浸式教学效果

我们通过对大学物理课堂教学的长期研究和实践，对课堂教学进行沉浸式教学模式的设计。这种设计可以帮助学生增加知识点的理解，激发学生的学习能力、科研能力和反思能力。

2.1 学习能力

学习能力是学生成功地完成学习目的所必需的个性心理特征[13]。这种能力需要长期练习和培养。我们在学校的学习平台上提供了大学物理的教学视频，学生可根据自己的时间，独立进行学习，完成老师导航式的问题，老师上课前可根据大数据，了解学生的学习情况，及时调整上课内容和难度。有了这些学习的基础，进入课堂学习后，学生可以顺利地跟上老师的讲授进度。在老师导航式模式的引领下，学生能够让自己不断的加深认知、提升对物理知识的了解，进而会在思考中提升自己的主动学习的认知，提升自己的学习能力。通过学生提出的问题数量和期末的成绩对比，我们发现，学生提出问题的数量增加了一倍，期末总评优秀率和合格率都有了很大改善。

2.2 科研能力

科研能力是指一个人在其所从事的专业中，以科学的思维和适当的方法，对未知领域进行科学探索的能力。在我们的科学研究模式和科学家精神激励模式下，很多学生开始自主的提出问题，确立自己的研究课题，并能和同学、老师展开积极的讨论，不断改善自己的研究方向，最后形成小论文，尽管还很稚嫩，但极大地提高了学生的科研能力。

2.3 反思能力

课堂教学结束时，我们通过复盘所学内容，解决学生学习过程中的困惑和问题，为接下来的学习和研究，排除障碍，打下坚实的理论基础，并且引导学生对所学知识进行反思和换位思考。让学生扮演老师的角色。作为老师，如何去考察学生的学习情况？在教师的引导下，每5位学生自由组成一组，设组长一名。在组长的带领下，5位学生作为考察委员会的成员，设计一套试卷，复盘所学知识，用来考察全班同学的学习情况。我们还设置了自评、组内评、他组评和老师评的四维评价体系，真实的反应了学生的反思能力。

重塑大学物理的知识框架，设计新的教学模式，引领学生参与创新课堂的学习和研究，将知识学习融入课题研究中去，完成课堂的四段式教学过程。“以问题为导向、以学生为主体”的沉浸式教学法，在教学过程中充分发挥学生的主体作用，引导学生独立思考，培养学生的自主学习能力和科研能力，把“为党育人、为国育才”真正做到实处。

参 考 文 献

[1] 郭俊雄，杨维. 应用型本科高校的大学物理教学改革策略[J]. 科技风，2023年5月，133-135.

[2] 朱鋐雄，王向晖，尹亚玲. 课程思政的“根、本、魂”和相应教育“三观”的理性探讨——从思政视角探讨大学物理课程思政[J]. 物理与工程，2023，33(1)，55-60.

[3] 胡祥青，夏灏，立德树人，润物无声——大学物理课程思政初探[J]. 物理与工程，2022，32(6)，189-194.

[4] 张萍，DING L，张静. 传统大学物理教学的困境及成因分析[J]. 物理与工程，2019，29(01)：25-30+34.

[5] 秦丹，邢娟，李光仲，等. 大学物理“对分课堂”教学模式实践探索[J]. 大学物理，2021，40(4)：32-36.

[6] 李祖斌，鄢小卿，宋峰. 欧洲大学非物理专业的大学物理教学[J]. 大学物理，2021，40(11)：32-35.

[7] 于淑云，葛美华，王洪超，等. 信息技术促进大学物理大容量混合式教学[J]. 大学物理，2020，39(6)：47-51.

[8] 高兰香，许丹华. 以学生为中心的大学物理教学探索与实践[J]. 大学物理，2022，41(1)：43-49.

[9] 安传迎，5G+VR促进大学教学从片面沉浸化到全面沉浸化[J]. 重庆高教研究，，2021，9(4)：59-68.

[10] 俞理明，韩建侠. 渥太华依托式课程教学及其启示[J]. 外语教学与研究，2003(6)：465-468.

[11] 马克斯·普朗克(Max Planck).《论正常光谱的能量分布定律的理论》[J]. 1900年12月14日，物理学会议发表论文.

[12] 徐守芳，陆宏志. 以问题为导向以学生为主体的仪器分析教学改革[J]. 实验室科学，第2015，18(5)，112-118.

[13] 林崇德，俞国良，李辉. 中国独生子女教育百科，浙江人民出版社，1999-01.

RESEARCH AND EXPLORATION ON CLASSROOM TEACHING OF COLLEGE PHYSICS IN ENGINEERING COLLEGES

ZHAO Lixia ZHANG Meng

(East China University of Science and Technology, College of Physics, Shanghai 200237)

Abstract This article takes the college physics classroom teaching as the research object, takes the Thermodynamic cycle course case as the guide, innovatively proposes the immersion teaching method, and designs four teaching modes: navigation mode; scientific research models; the incentive mode of scientist spirit; repeat mode. By designing four teaching modes, students can immerse themselves in the study of physics in the classroom, stimulate their interest in physics learning, and improve their learning abilities and research abilities.

Key words college physics, thermodynamic cycle, immersion program, learning abilities and research abilities

非物理类新理工科量子物理教材建设探索

吕智国

（上海交通大学物理与天文学院，上海　200240）

摘　要　流行的大学物理教材中主要介绍基础量子物理概念和简单应用，没有量子理论的整体框架。非物理类的新理工科量子物理教学不同于传统的大学物理教学，也不同于专业物理类的量子力学教学，其教学方式和内容更新是现阶段探究的核心任务。在上海交通大学的《大学物理》课程实践中通过优化量子力学的教学内容，开展了全校范围非物理类专业的量子物理教学，总结教学内容并出版了《量子物理》教材。教材建设作为课程建设的重要环节为进一步教学实践和教学内容优化提供了基础。

关键词　教材建设；大学物理；量子物理；教学内容优化

1　教学意义

《非物理类理工学科大学物理课程教学基本要求》（简称《基本要求》）中对量子物理基础要求是重点介绍量子物理的基本原理，建立物质的波粒二象性，通过几个重要实验和模型，逐步揭示量子力学建立和意义，学时要求不少于20学时。具体内容只包括部分量子力学的基本原理，在大学物理总学时限制下，教学不能充分展开量子力学的基本原理，也不涉及量子物理应用，而这无法适应当前新理工科量子物理教学的要求[1]。从实际教学上来看，传统大学物理中量子物理教学都是在临近学期结束的最后几周内进行授课，这形成了匆忙教学，学生不重视的局面，学生无法真正领悟量子物理的规律。面对人数众多的理工科大学生，量子物理教学是一个十分重要的课题[2-6]。

量子物理学是现代科学文明发展的最重要的理论基础。自二十世纪初量子论诞生以来，量子物理学直接促成了半导体和微电子学、激光和激光器、超导体和器件等相关的科学和技术的迅速且广泛的发展。这为信息科学和技术建立了硬件基础，其渗透影响涉及到理科和工科的许多研究前沿。但在我们现行的非物理类专业大学物理学教材中，对于量子物理学的讲授相对局限于一些比较简化的概念和方法，不能很好地反映出量子物理学的新发展及其与新理科新工科建设发展的深刻联系。逐步在大面的大学物理教学实践中解决这个问题是当前非物理类基础物理教学的重要任务。在“逆全球化”下产业链“脱钩”愈演愈烈，当前我国的科技基础能力难以支撑实现高水平科技自立自强的国家战略，培养人才增强科技创新能力是最优路径，优先改变的是新理工科人才的基础物理课程。量子物理是微电子科学、材料、化学等学科专业基础课程的基础，在人才知识体系建立过程中有着十分重要作用，为此上海交通大学从2022年开始开设了《大学物理三》-量子物理课程（大学物理一：力学和热学，大学物理二：电磁和光学）。

2　教学实践

《大学物理三》在《基本要求》指导下对量子理论的基本概念、基本理论和基本方法进行较为全

收稿日期：2023-06-06

基金项目：上海交通大学教学发展基金（CTLD22J 0076），国家自然科学基金（11774226）。

作者简介：吕智国，男，副教授，主要从事大学物理教学工作，研究方向是量子物理，zglv@sjtu.edu.cn。

引文格式：吕智国. 非物理类新理工科量子物理教材建设探索[C]. 2023年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会，2023.

Cite this article：LV Z G. Exploration on the construction of quantum physics textbooks for nonphysical new science and engineering disciplines[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education, 2023. (in Chinese)

面的介绍，同时展开重要的量子应用。内容安排上充分考虑了学生已有的数学和物理基础，只要学过大学物理的光学、高等数学、线性代数就可以顺利进行课程学习。《大学物理三》课为 32 学时的公共基础课。

2.1 优化教学内容

《大学物理三》与物理专业的量子物理课有着不同的学习目标和学时要求，如何安排公共基础课中量子物理的内容是课程的首要问题。应仔细选择教学内容，目前盛行的大学物理教材对早期量子论的陈述篇幅较长，如黑体辐射、光电效应、康普顿散射针对实验与经典理论的矛盾，玻尔原子理论有着详细的介绍，形成早期量子论很成功的印象，与后期量子理论建立关系陈述较少。学生对这些内容在中学物理中或多或少有所了解，但对于波动力学知之甚少。

对量子物理教学内容进行了仔细的梳理。为了保持量子力学完整性、系统性、前瞻性，课程介绍量子力学的波粒二象性（物质波、不确定度关系等）、薛定谔方程、波函数、定态薛定谔方程、概率守恒、量子态叠加原理、力学量算符表示、表象变换理论、狄拉克符号、自旋、定态问题、氨分子为代表的双态系统、激光，自选内容包括固体物理基础和量子信息。

同时，为了激发学生学习兴趣和活跃课堂学习的气氛，插入量子物理前沿和进展，包括我国科学家在量子力学探索中的卓越贡献，如墨子号通讯卫星、祖冲之号量子计算原型机等。

2.2 教学模式

《大学物理三》任课老师主要来自于教学研究中心长期主讲《大学物理》且有着丰富教学经验的老师，任课老师通过认真研究教学大纲和教学进度，在提供参考课件基础上，融汇个人经验并加入丰富的各种案例实施课堂教学，并进行教学课程研究讨论，达成最终共识。课程形成了以大纲为主线，百花齐放的教学模式。

量子力学诞生和发展中科学家的故事自然形成了量子物理课的思政素材，任课教师在课中穿插小故事会（我国科学家如吴有训在康普顿散射实验全面验证贡献、黄昆方程在固体物理中贡献等）引导学生树立正确科学世界观，激发学生探究热情、求知欲望、创新精神，培养分析问题解决问题能力，尤其是建模过程，抓主要矛盾，用物理数学语言描述问题。

3 优化方案

对于早期量子理论部分内容采用大作业等方式，让学生自主探究一下。如黑体辐射理论推导，国内学者在物理期刊上发表众多论文供学生参考。对于本科生来说，通过查找资料深入了解一下早量子论的发展背景有助于启发学习兴趣。

简明扼要介绍早期量子论后，主要是系统地对描述微观世界的量子规律进行讲解。对于量子物理教学的重点和难点，做到深入核心，比如算符理论，系统地学习算符一般性质，厄密算符的运算规律、算符本征值和本征函数，力学量的本征值和本征函数普遍特性，角动量算符的性质、测量意义。下面借助知识图进行展示大学物理三授课内容和教材建设内容，如图 1 所示。

4 教材建设

大学物理三课程教材在教学实践基础上迈出了第一步，于 2023 年初正式出版了《量子物理》[7]。该教材包括了量子力学主要的基本原理、规律、有意义的应用。量子物理基础章节通过对黑体辐射、光电效应、康普顿散射的讲解使读者了解到经典物理学的困难，同时讨论了波函数、态叠加原理、算符、表象变换等量子力学的基本物理概念和数学工具。量子物理无论在原理还是技术层面都有广泛的应用，并扩展到众多领域，如化学、生命科学、材料科学和信息科学等，极大地促进了各学科的发展。双态系统是非常典型的例子，从量子共振，拉比振荡、微波激射到核磁共振处处体现了该物理模型的精髓。激光是现代光学的基石，在各领域都有丰富的应用，如在医疗、工业等领域。固体物理基础章节介绍半导体基本原理，PN 结，晶体管、场效应管等，这些构成了当今各类电子元器件的基本单元，有助于学生将其应用到各自的专业领域中。量子信息是量子物理和信息科学结合产生的新学科，已经成为国家发展的重要战略高地，在基础物理教学中介绍量子信息的基础知识有利于提升学生的科学素养。

应新时代变革之力需要在高校建立一种开放、交叉融合的教育新生态，充分利用量子物理中

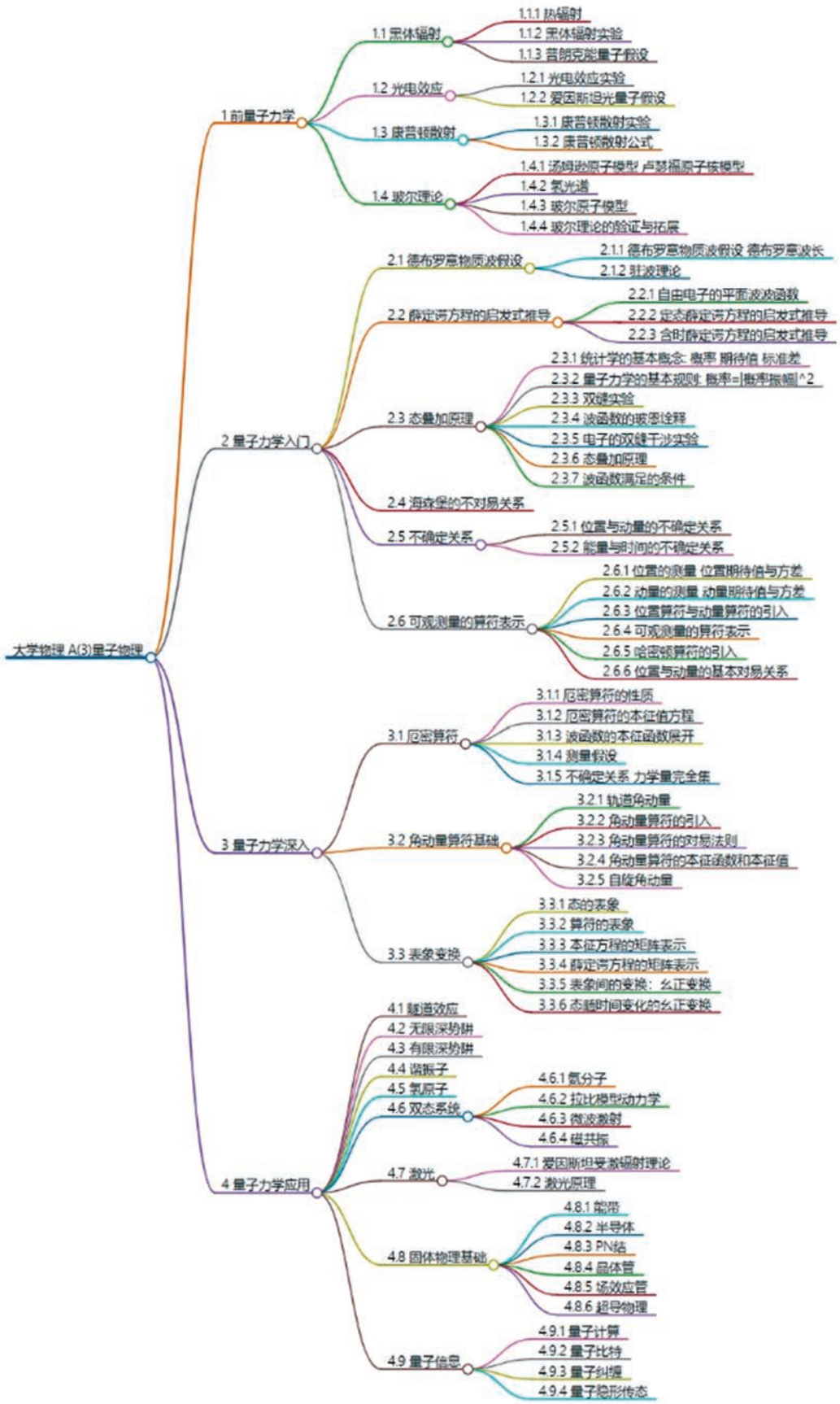


图 1　大学物理三-量子物理课程教学内容

方法论、科学家精神、基础到应用的案例来建设课程内容和课程体系，必将推动新工科和新理科人才的跨学科交融，促进学生的全面发展和创新素养形成。

5 结语

在新理工科人才培养的重要基础课-大学物理三课程建设中，上海交通大学任课教师优化教学内容，从课程实践中总结给出了32学时量子物理课程的模式，并且出版了《量子物理》教材，为后期兄弟院校同类量子物理课程提供了有意义的参考。

参 考 文 献

[1] 新工科背景下教学改革与创新——以量子力学教学为例[J]. 张千帆，段林彤. 河北师范大学学报(教育科学版)，2021(2)：135-140.
ZHANG Q F, DUAN L T. Teaching reform and innovation in the context of new engineering—taking quantum mechanics teaching as an example[J]. Journal of Hebei Normal University (Educational Science Edition), 2021, 23 (2): 135-140. (in Chinese)

[2] 基于"问题链"模式的量子力学教学改革与实践[J]. 李娇阳，杨玉平，刘蓓，张谷令，等. 高师理科学刊. 2021，41(2)：94-98.
LI J Y, YANG Y P, LIU B, et al. Teaching reform and practice of quantum mechanics based on problem chain model[J]. Journal of Science of Teachers' College and University, 2021, 41(2): 94-98. (in Chinese)

[3] 钟登华. 新工科建设的内涵与行动[J]. 高等工程教育研究. 2017，(03)：1-6.
ZHONG D H. Connotations and actions for establishing the emerging engineering education[J]. Research in Higher Education of Engineering, 2017, 164(3): 1-6. (in Chinese)

[4] 盛嘉茂. 关于工科量子物理教学内容的讨论[J]. 大学物理. 2013，32(10)：27-29.
SHENG J M. Discussion on contents of quantum physics of engineering course[J]. College Physics, 2013, 32(10): 27-29. (in Chinese)

[5] 魏环，莫文玲，王红梅，等. 工科量子物理教学初探[J]. 大学物理. 2009，28(8)：51-53.
WEI H, MO W L, WANG H M, et al. Exploring teaching quantum physics of engineering course[J]. College Physics, 2009, 28(8): 51-53. (in Chinese)

[6] 邓丽城，陈德媛，郭艳艳. 新工科背景下量子力学教学内容优化研究[J]. 物理与工程，2023，33(2)：88-92.
DENG L C, CHEN D Y, GUO Y Y. Research on optimization of teaching of quantum mechanics in the context of new engineering[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(2): 88-92. (in Chinese)

[7] 吕智国. 量子物理[M]. 上海：上海交通大学出版社，2023.

■

EXPLORATION ON THE CONSTRUCTION OF QUANTUM PHYSICS TEXTBOOKS FOR NONPHYSICAL NEW SCIENCE AND ENGINEERING DISCIPLINES

LV Zhiguo

(School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract Popular college physics textbooks mainly introduce basic quantum physics concepts and simple applications, without a comprehensive framework of quantum theory. The teaching of quantum physics in nonphysical new science and engineering majors is different from those of traditional university physics and professional physics quantum mechanics. Its teaching methods and content updates are the core tasks of current exploration. In the practice of the "College Physics" course at Shanghai Jiao Tong University, we optimized the teaching content of quantum mechanics and conducted quantum physics teaching for nonphysical majors of the university. We summarized the teaching content and published the "Quantum Physics" textbook. The construction of textbooks, as an important part of curriculum construction, provides a foundation for further teaching practice and optimization of teaching content.

Key words teaching material construction; college physics; quantum physics; optimization of teaching content

线上线下融合的大学物理实验课程教学探索实践

黄　丽*　刘伟龙　娄秀涛

（哈尔滨工业大学物理学院，黑龙江 哈尔滨　150001）

摘　要　在课程学时被削减的情况下，为了更好地发挥“大学物理实验”课程在培养拔尖创新人才过程中的重要作用，本文对原有的“大学物理实验”课程教学内容进行了重新地梳理和升级、改造，建设了融入隐性课程思政元素的“大学物理实验”在线课程教学资源，并以此为基础开展了“以线下实验教学为主，线上教学资源为辅”的探索性“大学物理实验”课程教学实践，取得了一定的积极成效。实践证明，线上课程教学资源可以很好地补充助益线下的实验课堂教学，有助于实现“大学物理实验”课程教学从“以教为主”“以知识传授为主”向“以学为主”“以能力培养为主”的转变。

关键词　线上线下融合教学；大学物理实验；教学探索实践

“大学物理实验”是理工科学生在大学阶段第一门系统的公共基础实验课程。在培养学生实践能力、创新能力和科学素养的过程中，“大学物理实验”课程具有不可或缺的基础性作用。作者所在的哈尔滨工业大学物理实验教研中心，秉承“重基础，强能力，求创新”的实验物理教学理念，将“大学物理实验”课程定位在为培养非物理类拔尖创新型人才打好物理实验基础；培养目标是使学生全面掌握物理实验的基本知识、基本方法，培养学生科学实验基本能力和实践能力，培养学生的科学思维、创新意识和创新能力，培养学生“知行合一”的科学实验能力和科学实验素养。

近年来，随着“拔尖计划 2.0”、新工科建设工作和供给侧教学改革工作的持续推进，如何在课堂学时削减的压力下，更好地发挥公共基础实践类课程在培养未来科学技术发明创造人才过程中的重要作用，是受益学生数量大、教学内容覆盖面广的“大学物理实验”课程教学改革工作面临的一个时代命题。为此，我们在深入拓展实验教学内容的广度和深度，提升实验教学课程挑战度的同时，积极探索并实践更加灵活的实验教学模式，以更好地在知识、能力和素养三个方面实现对学生的协同培养。

在上述背景下，本文工作以“大学物理实验”课程的特点和实际教学需要为出发点，设计并建设了“大学物理实验”课程在线教学资源，将线上、线下混合式教学模式适当地、合理地融入到了“大学物理实验”课程的教学当中。两个学期的“以线下实验教学为主，线上教学资源为辅”的探索性“大学物理实验”课程教学实践证明，线上课程教学资源可以很好地补充助益线下的实验课堂教学。一方面，本文工作可以促使学生从习惯性的“被动地从书本中学习”向“主动地从实践中探索”转变；另一方面，本文工作可以引发实验教师对实验教学内容和实验教学过程的深入思考，促进实验教师在“重视知识传授”的基础上，更加“重视能力培养和精神塑造”。在“教”与“学”两方面同时实现“相向而行”的转变，可以形成“教学相长”的良性教学状态，从而切实实现“大学物理实验”课程教学从“以教为主”“以知识传授为主”向“以学为主”“以能力培养为主”的转变。本文工作建设的在线课程资源已经被国内部分高校应用于“大

收稿日期：2023-06-05

基金项目：黑龙江省高等教育教学改革研究项目（SJGY20200210）。

通讯作者：黄丽，博士，从事实验物理教学和研究工作，研究方向为超材料电磁仿真和实验研究，lihuang2002@hit.edu.cn。

引文格式：黄丽，刘伟龙，娄秀涛. 线上线下融合的大学物理实验课程教学探索实践[C]. 2023 年全国高等学校物理基础课程教育学术研讨会，2023.

Cite this article：HUANG L，LIU W L，LOU X T. Exploratory practice of integrating online and offline teaching in college physics experiments[C]. 2023 National Symposium on Basic Physics Courses in Higher Education，2023.（in Chinese）

学物理实验”课程，让更多的学生可以随时、随地开展实验学习，起到了扩大“大学物理实验”课程学生受益面的作用。

1 工作背景分析

随着信息技术的飞速发展，基于互联网技术的教学方法，比如 MOOC，SPOC，微课，混合式教学等[1]，引发了近年来国内高校教学改革和研究工作的一个热潮。对于学生来说，在线课程教学有效拓展了学习的时间和空间。学生可以随时随地、方便地利用在线教学平台进行学习，也可以通过在线教学平台与教师、与同学们进行隔空互动和交流。具体到高校物理类课程的教学工作，相比于发展迅速、量大面广的理论课在线课程，大学物理实验在线课程仍然是为数不多。2020 年春季学期，一批高校的“大学物理实验”MOOC 火速上线，很好地满足了在疫情防控期间、教师和学生居家情况下的实验教学工作需要。目前，大多数“大学物理实验”MOOC 基本上都是将线下实验课堂教学中对实验原理、实验装置、实验操作和数据处理等内容的讲解制作成教学视频，上传至不同的在线教学平台，学生通过观看教学视频就可以完成课堂实验操作等实验学习环节。

近年来，作者所在的哈工大物理实验教研中心自制和开发了一系列 DIY（Do It Yourself）实验教学项目，主要包括：“乐音研究”“准稳态法不良导体导热系数和比热测量实验”“用霍尔效应原理测量电机转速实验”“非平衡电桥法测量材料电阻温度系数实验”“自组显微镜与望远镜实验”“电磁混合磁悬浮实验”“磁耦合共振式无线电力传输实验”等物理实验教学项目。在这些 DIY 实验教学项目的课堂教学实践中，我们在实验物理教学实践中总结提出了“自主探究性物理实验教学新模式”。这种教学模式能够让学生“自主设计、自主搭建、自主调试、自主探索”地进行自主探究性的物理实验学习。通过这样的实验学习过程，学生“手脑并用”的科学实验能力、解决问题的实践能力、主动学习能力、创新思维和能力得到了有效地培养和提高。

2020 年春季学期，为了在“新冠疫情”期间实现“停课不停教、停课不停学”，作者所在哈工大物理实验教研中心的老师们在满足大学物理实验课程教学要求的基础上，精心设计了 22 项居家 DIY 大学物理实验在线教学项目。在细致的在线实验教学研讨、充分的居家集体备课之后，我们居家开展了“居家大学物理实验”课程教学工作，在线指导学生利用生活中触手可及的日常用品和基于智能手机传感器应用的 phyphox 软件，居家开展“大学物理实验”课程的学习。这样的大学物理实验教学实践虽然是初次尝试，但是因为在线教学的准备工作做得细致充分，教学内容难度适当，在学生实验过程中教师的引导和指导工作及时、有效，因此受到了同学们的欢迎，取得了较好的实验教学效果。让学生在居家的情况下，利用身边

基于近年来的 DIY 实验课堂教学实践和 2020 年春季学期的居家物理实验在线教学工作，我们深刻意识到，在线实验教学可以与实验室课堂教学相辅相成，学生“手脑并用”地深度参与到实验教学的全过程，能够有效地提升大学物理实验课程的教学成效。因此，我们在开展“大学物理实验”在线课程教学资源建设工作的同时，积极开展了线上线下融合的大学物理实验教学设计和探索。

2 在线教学资源建设

如前所述，在“大学物理实验”课程学时被压缩的压力下，我们建设“大学物理实验”课程在线教学资源的目的，是要和线下的实验教学相辅相成，有效地拓展实验课堂教学的时间和空间，有效地提升“大学物理实验”课程的教学成效。因此，我们对原有的“大学物理实验”课程教学内容进行了重新地梳理和升级、改造。

首先，我们尽可能地将让传统的大学物理实验教学内容以学生喜闻乐见的形式出现在实验教学中，使实验内容更贴近生活、更贴近实际应用、更贴近科技发展的前沿。也就是说，在增强大学物理实验的趣味性和应用性的同时，尽可能地将科学研究和科学技术发展的新成果适当融入到大学物理实验教学当中。比如，在“电磁混合磁悬浮实验”“磁耦合共振式无线电力传输实验”等实验教学项目中，通过列举同学们在生活中常见的磁悬浮列车、磁悬浮玩具、手机的无线充电和电动牙刷的无线充电，激发同学们的实验学习兴趣；通过讲述磁悬浮技术、磁悬浮列车技术和无线充电技

术的发展历程及其发展过程中所遇到的“瓶颈”问题，激发同学们的实验探索兴趣。通过对在线实验教学资源的学习，学生在线下实验室开展实验学习和探索之前有了充分的思考时间，进而可以在实验室进一步实验探索的空间。

其次，我们除了将实验原理、相关实验的发展过程和作用、实验仪器的使用、实验方法和实验技术及其实际应用等具体内容制作成在线实验教学资源以外，还将相关科学家的故事、实验相关理论和技术的发展情况和实际应用、实验中常见的难点和重点问题等做成实验教学视频。比如，在同学们普遍反映“实验难度很大”的“分光计的调节和用衍射光栅测定光的波长”实验中，我们的在线教学视频从“1814年，德国物理学家夫琅和费发明的世界上的第一台分光计”讲起，逐一讲解科学家们利用分光计所先后进行的科学研究工作，分光计在科学研究中的实际应用。在此基础上，我们将构成分光计的两个主要组件——平行光管和望远镜“解剖”，具体讲解平行光管和望远镜的光路、调节原理和方法及相应的实验现象。同学们在了解了分光计的“前世今生”，“从里到外”地学习和理解了分光计的“精巧的结构”和“精密的测量原理”以后，就能够和我们的实验教师一起“享受”“分光计的调节和用衍射光栅测定光的波长”实验的“美妙”了。

同时，我们深入、广泛地挖掘“大学物理实验”教学内容中的隐性思政元素，并且把这些隐性课程思政元素“无痕”地融入到在线课程教学资源中去。几乎在“大学物理实验”课程的每一个实验教学项目中，都蕴含着科学家们对知识和技术的创新思想和创新实践，都有着相关物理学家勇敢、不懈地追求真理的感人事例[2]。此外，通过把实验物理知识和技术的发展与生活实际、社会发展和科技进步相联系，尤其把学生关注的科学、技术发展的新领域、新应用和社会发展热点问题，比如“大国重器”“中国制造”等相关内容，引入物理实验课程的在线教学资源，能够极大地提高学生的大局意识和国情意识，激发学生的时代责任感，培养学生的家国情怀。比如，在“大学物理实验”课程中3学时的绪论课中，我们在讲授学生必须要熟练掌握的测量误差理论和数据处理方法的基础上，引入了“十大最美丽的物理实验”。通过讲解“十大最美丽的物理实验”，一方面，可以让学生了解实验物理发展的大致脉络，深入认识和思考“什么是物理实验”“为什么做物理实验”“怎么做物理实验”；另一方面，可以让学生认识到物理学家眼中“最美丽”的科学之魂，塑造学生的科学精神。比如，通过讲解伽利略的自由落体实验和加速度实验，让学生领悟伽利略“尊重科学，不畏权威”的科学精神，以及伽利略将理性思维和实验过程相结合的“思辨”精神。伽利略的“思辨”精神是他成为近代科学实验奠基人的一个重要原因。在“大学物理实验”课程的教学过程中，我们也应该着重培养学生的“思辨”精神。实际上，在线下实验教学中，通过学生不断“发现问题、提出问题、解决问题”的自主探究性实验学习过程，可以很好地培养学生理论联系实际、克服困难、勇攀高峰的科学精神，引导学生正确地思考问题和看待世界，注重培养学生正确的价值观、世界观和人生观。

此外，我们希望“大学物理实验”课程在线教学资源可以让更多高校的学生们受益，可以促进我们与国内高校同行的教学交流和研讨。考虑到不同高校的大学物理实验课程教学的各个方面，诸如课程的定位、课程目标、学时、具体的实验教学项目安排、配套的实验教学仪器和实验教学师资队伍等，也都存在一定的差异。而且，具体的实验操作应该是学生自行阅读实验仪器相关资料就可以完成的内容，并不是我们在“大学物理实验”课程教学中的重点授课内容，因此，我们的“大学物理实验”课程在线教学视频基本上不涉及具体实验仪器和具体的实验操作过程。

3 线上线下融合的物理实验教学探索实践

我们建设的“大学物理实验MOOC”已于2022年秋季学期在“智慧树”平台上线，面对公众开放。在2022年秋季学期和2023年春季学期，我们小范围地在哈工大“大学物理实验”课程的本科生中开展了线上线下融合的探索性实验教学实践。

哈工大的“大学物理实验”课程在每年的秋季学期开课。我们在秋季学期的“绪论课”上，把我们的“大学物理实验”在线课程资源公布给学生。学生在进入实验室开展自主实验学习之前，可以利用在线课程教学资源复习绪论课所学的内容，也可以对感兴趣的、预约到实验室自主学习的实

验项目进行在线预习。每个实验项目的在线教学视频包括“实验背景”“实验目的”“实验原理和方法”和“实验注意事项”四个主要部分，每部分视频的讲解时长都不超过15分钟。在“实验原理和方法”教学视频中，我们在一定的时间节点先后设置了2至3道弹窗测试题，用以检验学生对这部分内容的预习掌握情况。这种在线进行实验预习的方式，比起原有的“誊抄”实验课教材进行实验预习的方式，对于学生来说是更为便捷、更为有效的。

学生在线“动脑”学习实验理论知识后，通常会带着对实验教学项目的不解和疑问进入实验室，开展线下“动手”自主实验学习和探索。实验课堂上，教师和学生一起走出“老师演示”“学生照做”的“舒适区”，通过线上线下相结合的师生互动、生生互动，实验教师为学生营造轻松的、自主探索式实验学习的环境和氛围，让同学们深度参与到实验教学过程中来。实验教师自然而然地把自己的科研经历和科研能力融入到指导学生实验学习探索的过程中，丰富同学们的实验学习体验。教师引领学生学习和探索一个个实验教学项目的过程，就是引领学生实验研究一个个“小课题”的过程。因此，线上线下融合的物理实验课堂教学，学生和老师都不再简单地关注实验数据和实验结果，而是一起“共同享受自主实验学习和探索的过程”。在实验过程中，学生随时可以把遇到的问题、观察到的实验现象上传分享，并和老师、同学们互动、交流、讨论；在实验结束前，老师会要求同学们上传实验现象的照片、小视频和相应的实验数据。在不断克服困难、解决问题之后，成功提交了实验“成果”后，同学们的自信心和成就感得到有效提升，从而切实提升了“大学物理实验”课程的教学成效。

在实验结束后，同学们离开了实验室，但仍然可以随时随地查看自己的实验现象、实验数据和实验过程中的交流、讨论，仍然可以随时随地利用在线课程资源进行课后拓展学习和复习，也可以随时随地在线反馈、讨论课堂实验学习过程中的遗留问题。

从2022年秋季学期到2023年春季学期，我们的“大学物理实验”在线共享课的选课人数为6281人，选课学校数量为66所，互动次数为1483次。

4 结语和展望

在“大学物理实验”课程学时被压缩的现实压力下，为了提升课程的教学成效，本文工作建设了在线“大学物理实验”教学资源，开展了线上线下融合的“大学物理实验”课程探索性教学实践，取得了一定的积极成效。需要指出的是，在采用开放式教学的实验课堂上，不同的学生有着各自不同的专业背景，有着各自不同的知识储备，有着各自不同的理解能力和“动手”能力，这要求实验教师必须具备较强的实验技能和实验教学能力，必须根据每堂课、每个学生的具体情况，在实验教学中“因材施教”，灵活运用多种教学方法，比如讲述法、研讨法等，增强与学生的有效互动，做到“个性化”教学，以保证“大学物理实验”课程教学目标的达成。为此，我们将对标“2023版大学物理与实验课程基本要求”，针对每一个大学物理实验教学项目的教学内容，在基础性实验内容和设计性实验内容之外，适当增加进阶性实验内容和高阶性实验内容，以适应不同专业背景、不同知识储备、不同实验探索能力学生的物理实验学习需要。

参 考 文 献

[1] 冯晓英，王瑞雪. “互联网＋”时代核心目标导向的混合式学习设计模式[J]. 中国远程教育，2019，(7)：19-26.

[2] 弗·卡约里 著，戴念祖 译，范岱年 校. 物理学史. 桂林：广西师范大学出版社，2002：281-294.

■

EXPLORATORY PRACTICE OF INTEGRATING ONLINE AND OFFLINE TEACHING IN COLLEGE PHYSICS EXPERIMENTS

HUANG Li　LIU Weilong　LOU Xiutao

(School of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001)

Abstract　In order to better leverage the important role of College Physics Experiments in cul-

tivating top-notch innovative talents, despite the reduction of course hours, this article has reorganized, upgraded, and transformed the original teaching content of College Physics Experiments, and constructed an online College Physics Experiments teaching resource that incorporates implicit ideological and political elements, And based on this, an exploratory teaching practice of College Physics Experiments, which focuses on offline experimental teaching and supplemented by online teaching resources, has been carried out, achieving certain positive results. Practice has proven that online course teaching resources can effectively supplement and assist offline experimental classroom teaching, and help achieve the transformation of College Physics Experiments teaching from "Teaching Oriented" and "Knowledge Imparting Oriented" to "Learning Oriented" and "Ability Cultivation Oriented".

Key words Online and offline integrated teaching; College Physics Experiments; Exploratory teaching practice

学术研讨论文选登

查理定律与盖·吕萨克定律的历史探究

孙雨菲　毛婧一　秦思学　张学锋
（重庆大学物理学院物理学系，重庆　401331）

摘　要　查理(Jacques Alexandre César Charles)是法国著名的发明家、科学家和热气球驾驶员，是热气球发展史上的传奇人物。盖·吕萨克(Joseph Louis Gay-Lussac)是法国著名的化学家和物理学家，与查理一样，是热气球和气体定律发展的先驱。两人都为气体定律的发展作出了极大的贡献，然而以两位科学家的名字命名的这两条定律却总是被混淆。本文通过介绍查理定律与盖·吕萨克定律的发展由来、命名原因以及实验过程来理清历史脉络，去伪存真。

关键词　查理定律；盖·吕萨克定律；物理学史

THE HISTORIC RE-THINKING OF THE CHARLES'S LAW AND GAY-LUSSAC'S LAW

SUN Yufei　MAO Jingyi　QIN Sixue　ZHANG Xuefeng
(College of Physics, Chonqing University, Chongqing 401331)

Abstract　Charles is a distinguished French inventor, scientist and balloon pilot, a legend in the history of balloon development. The famous French chemist and physicist Gay-Lussac, similarly as Charles, is a pioneer in the development of hot air balloons and gas laws. Both of them contributed significantly to the creation and development of gas laws. However, the Charles's law and Gay-Lussac's law are always confused in the elementary education stage. This article mainly introduces the origin, development and naming of Charles's law and Gay-Lussac's law, and explains why they are confused.

Key words　Charles's law; Gay-Lussac's law; history of physics

气体状态与压强、温度和体积的关系通常作为热力学的开篇讨论。在人教版普通高中物理选修课本第三册第二章《气体、固体和液体》第三节气体的等压变化和等容变化中，对于查理定律表述如下：一定质量的某种气体，在体积不变的情况下，压强 p 与热力学温度成正比。对于盖·吕萨克定律表述为：一定质量的某种气体，在压强不变的情况下，其体积 V 与热力学温度 T 成正比[1]。

而在 P. E. Tippens 法文版普通物理教材《Física》中[2]，关于查理定律有以下描述："首位通过实验证明体积与温度之间直接比例关系的是雅克·查理。其表述如下：当气体样品的质量和压强保持恒定时，其开尔文温度与体积成正比。"盖·吕萨克定律则表述为："当气体样品的体积保

收稿日期：2023-06-03
基金项目：国家自然科学基金(12147102)，教育部高等学校教指委高等学校热学课程教学研究项目(JZW-21-RX-03)；重庆市教育委员会高等教育教学改革研究项目(223020)；研究生教改项目(yjg213002，yjg213008)。
通讯作者：张学锋，男，教授，研究方向为普通物理专业教学改革研究和量子多体理论研究，zhangxf@cqu.edu.cn。
引文格式：孙雨菲，毛婧一，秦思学，等. 查理定律与盖·吕萨克定律的历史探究[J]. 物理与工程，2023，33(4)：41-46.
Cite this article：SUN Y F, MAO J Y, QIN S X, et al. The historic re-thinking of the Charles's Law and Gay-Lussac's Law[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(4): 41-46. (in Chinese)

持恒定时，该气体的压强与开尔文温度成正比。”查理定律和盖·吕萨克定律对热力学定律的引入至关重要[3,4]，并且有助于直观阐释分子运动、建立微观与宏观的联系。事实上，基于这些定律所凝练出的理想气体模型不仅是热力学的里程碑，也是整个物理学发展的一座丰碑。

对于这两条重要的定律，国内高校教材却往往一笔带过、张冠李戴、甚至波及至中学课本——在1988年《关于盖吕萨克和查理定律的提法种种》一文中有过简单的梳理[5]，并未受到关注。本文旨在通过梳理历史过程，追溯其命名缘由，从而一方面帮助教师和同学理清物理概念，另一方面希望激发读者对于科学精神的思考。

1 两个定律的产生背景

气体定律的诞生可追溯至1643年意大利物理学家托里切利（E. Torricelli）发明水银气压计[6]。1783年6月4日蒙特哥菲尔（Montgolfier）兄弟发明第一个高空热气球，引发社会各界对热气球的关注，因而17世纪到18世纪也成为气体定律飞速发展的阶段，科学家通过实验逐渐建立起气体宏观物理量之间的关系。到18世纪末19世纪初，作家 Horace Walpole 甚至创造了“Balloonomania”这个词，用于描述当时风靡全国的热气球狂潮[7,8]，预示着一场科学的革命。

2 查理定律的诞生与命名

查理（1746—1823年）是法国当时著名的发明家兼热气球爱好者。早在1662年，爱尔兰科学家玻意耳（Robert Boyle）就提出了**玻意耳定律**：在定量定温的封闭系统中，理想气体的体积与气体的压强成反比。1766年，英国科学家卡文迪许（Henry Cavendish）发现当某些酸与某些金属反应后会产生氢气。随后在1781年，意大利科学家卡瓦洛（Tiberius Cavallo）在论文《Treatise on the Nature and Properties of Air》中对氢气的性质展开了一系列的实验研究[8]。

在学习了卡文迪许和卡瓦洛等人的工作后，查理于1783年8月23日，在如今埃菲尔铁塔所在地发射了世界上第一个以氢气作为提升剂的热气球。考虑到氢气的制备过程缓慢且危险，而热空气虽然安全易收集，却存在着升力小于氢气，且容易变冷的问题。科学家们迫切需要探索更持久的热空气，还需要考虑气体的温度随高度的变化、体积随温度和压强的变化等。查理随后开始潜心研究气体定律。根据盖·吕萨克在1802年《化学年鉴》中发表的文章《气体与水蒸气膨胀速率的研究》[3,4]中记载：“查理使用气压计作为实验仪器，将实验气体封闭在气压计的储液器中。在0℃，汞柱的高度为28英寸。将整个气压计浸没在沸水中后，汞柱上升”[3,4]。可惜查理并未发表此研究成果。

同时期的盖·吕萨克也对气体定律产生了浓厚的兴趣。当他以优异的理论成绩和卓越的实验能力从大学毕业后，被推荐为法国化学家兼气球调研协会成员贝托莱（Claude Louis Berthollet）的科研助理。1801—1802年间，在导师的鼓励下，盖·吕萨克开始独立科研。早在18世纪初，温度计的发明者阿蒙顿（Guillaume Amontons）就发现了空气受热膨胀的现象。1789年，L. B. G. Morveau 和 C. A. P. Duvernois 出版了《论空气与其他气体的受热膨胀》，以梳理记录这些结论。盖·吕萨克敏锐地察觉到文章中实验数据不精准。他曾评论道：“多年来，物理学家一直忙于研究气体的膨胀问题。然而研究结果却总是差异巨大”[3,4]。

盖·吕萨克发现之前的实验者缺乏考虑水对实验结果的影响。其实验装置并不完全干燥，使得温度升高时装置内的水蒸气增加测量体积。且部分气体溶于水，从而减小测量体积，产生误差。他吸取前人教训，着手一系列改进实验，以检验《论空气与其他气体的受热膨胀》一文中的结论。与此同时，英国的著名科学家道尔顿（John Dalton）也开始着手重新开展验证实验。此项研究在英国和法国同时进行，并最终几乎在同一时期得出结论，相较于道尔顿，盖·吕萨克的实验数据更加精确，关于实验过程的记录也更加专业。

为了得到干燥的烧瓶和试管，盖·吕萨克设计了以下三个步骤：“如果烧瓶明显是湿的，我会先用滤纸擦干；再通过加热蒸发可能仍存在的一些水分；之后我借助连接着玻璃导管的风箱，将气流吹进烧瓶中排出蒸汽。重复多次上述操作，烧瓶和试管会变得非常干燥”[3,4]。盖·吕萨克的实验极具有开创新与严谨性，简单介绍如下[3,4]：

如图1所示，装置Ⅰ收集气体。将实验气体

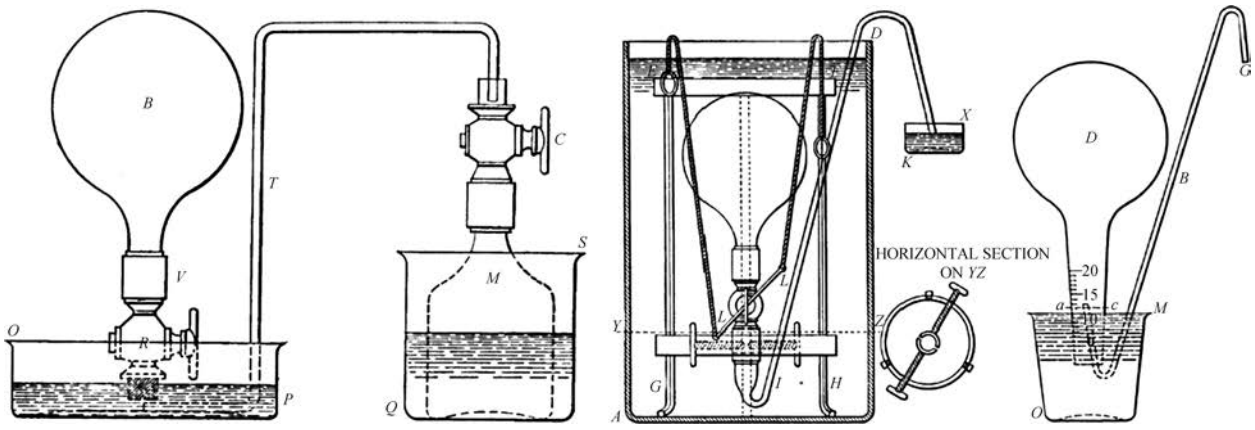


图 1　记录于盖·吕萨克《气体与水蒸气膨胀速率的研究》中的实验仪器Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ(左,中,右)[3]

充入钟形玻璃罩 M,并浸泡在水浴池 QS 中,旋塞 C、R 控制开闭。打开旋塞后气体充入真空的圆底烧瓶 B 中,为确保仪器的密闭性,B 开口浸泡在汞浴池 OP 中。当收集满实验气体后,关闭旋塞,将仪器 B 和 V 接入到实验仪器Ⅱ中,其中 V 是铁制的旋塞,可以与弯管 ID 连接。

实验装置Ⅱ气瓶固定在圆柱形的铁笼 EF-GH 上,将其浸泡在铜制的水浴池 AD 中。为隔绝外界空气,将弯管 ID 的末端浸泡在汞浴池 KX 中。LL 杠杆的设计非常精妙,它与两端的绳索连接,通过控制绳索实现旋塞的开闭。之后盖·吕萨克将装置水浴加热至 10℃,并迅速打开和关闭旋塞。气体在受热膨胀下会迅速从烧瓶 B 中流出并将弯管 ID 中的大气排出。当温度上升至 40℃时,弯管中就不再有大气。在进行充分加热后(大约 15～20 分钟),该装置中所有的仪器和内部气体都可以达到相同的温度。此时打开旋塞并将弯管 ID 的末端移出汞浴池 KX,待实验气体与大气的压强达到平衡后关闭旋塞,这时将装有实验气体的圆底烧瓶取出并放入冰水混合物中降温。经过足够长的时间后,气体与冰水混合物达到相同温度,再将圆底烧瓶放入水中并打开旋塞。由于圆底烧瓶中的气体减少,水会进入到烧瓶中,当达到平衡时烧瓶中的水的体积与受热被排出的气体体积相同。擦干圆底烧瓶表面的水后,通过比较充满水的圆底烧瓶重量和实验后的重量计算水的体积,以及被排出烧瓶的气体体积。

此外,盖·吕萨克还描述了另一种简单的实验方法(实验装置Ⅲ)。

排除所有的误差来源后,盖·吕萨克设定处于冰水混合物温度下的大气体积为 100,加热至沸水温度后,记录最后的体积。经过 6 次实验他得到的结果:137.40、137.61、137.44、137.55、137.48 和 137.57。平均值接近于 137.50。若将从冰水混合物的温度到沸水温度分为 100 等份,可以发现温度每升高 1 度,体积的变化是初始体积的$\frac{137.50-100}{100\times100}$倍,这个膨胀系数被盖·吕萨克写为$\frac{1}{266.66}$。他的这一发现也可以记作:$V=V_0\left(1+\frac{t}{266.66}\right)$,其中 V 为加热后的体积,V_0 为初始体积,t 为温度变化。

在研究了大气的受热膨胀后,盖·吕萨克转向更多类型的气体,见图 2。

Between the temperature of melting ice and that of boiling water, 100 parts of	Suffer an increase of	Differences
Atmospheric air	37.50 parts	
Hydrogen gas	37.52	+0.02
Oxygen gas	37.48	−0.02
Nitrogen gas	37.49	−0.01

图 2　记录于盖·吕萨克《气体与水蒸气膨胀速率的研究》中的实验数据Ⅰ[3]。

根据图 2 中的实验数据,盖·吕萨克在文章中写道:“大气、氧气、氢气和氮气从融冰的温度到沸水的温度之间膨胀到相同的程度”[3,4]。为了验证大气与其他可溶于水的气体的膨胀系数相同,盖·吕萨克进行了验证实验(见图 3),左边试管充碳酸、盐酸、亚硫酸、一氧化二氮或氨气等气体,右边试管中充大气,并将它们同时放于含水银的盆 AC 中。同时对两个试管中的气体加热,观察气体

的膨胀，从而验证两者的气体膨胀率是否相同。盖·吕萨克在他的文章中记录道："无论我多么仔细地观察，我从未发现任何不同，两个试管中气体总是同时膨胀至同一个刻度"[3,4]。

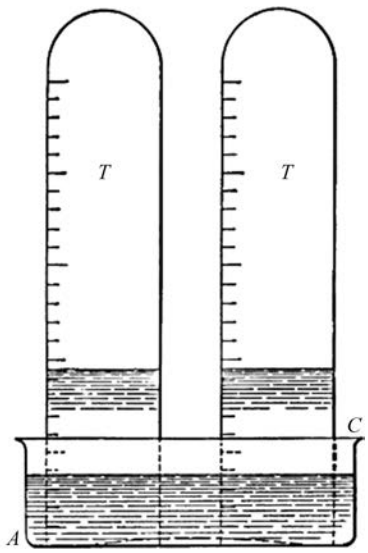


图3 记录于盖·吕萨克《气体与水蒸气膨胀速率的研究》中的实验仪器Ⅳ[3]

盖·吕萨克还对乙醚蒸汽进行实验，与大气进行比照，发现乙醚蒸汽与大气的膨胀率也相同。总结以上实验，盖·吕萨克得出了两条结论："1. 所有气体以及所有蒸汽，无论密度或者水溶性的差异，在加热至相同温度下的膨胀程度相同；2. 对于永久性气体，如果将冰水混合物温度到沸水温度区间划分为100等份，体积变化是初始体积的$\frac{100}{266.66}$"[3,4]。盖·吕萨克测得的气体膨胀系数$\frac{1}{266.66}$非常接近标准值$\frac{1}{273.15}$。通过将公式$V=V_0\left(1+\frac{t}{273.15}\right)$进行变形，就能得到关系式：$\frac{V}{V_0}=\frac{T}{T_0}$。需要强调的是，同时期道尔顿的结果与盖·吕萨克大相径庭。杜隆(Dulong)和佩蒂特(Petit)曾指出："盖·吕萨克先生的实验证明，对于温度的等量增加，气体膨胀体积是恒定的。相反，道尔顿先生认为，对于温度的每次等量增加，气体膨胀体积与前一个温度区间的膨胀体积保持恒定比例"[9]。

1802年盖·吕萨克发表了自己的研究结果[3]，他在论文中承认参考查理的工作。他写道："尽管我发现了氧气、氮气、氢气、二氧化碳、大气等多种气体从0～80℃的膨胀程度相同。然而早在15年前，查理就注意到了气体存在这种性质，只是并未发表，而我很碰巧地知道这些成果"[3,4]。

盖·吕萨克非常敬佩他的同胞查理，认为查理不应该因实验结果未发表而被历史遗忘。所以最终盖·吕萨克将此定律命名为查理定律。有时，该定律也被叫做查理-盖·吕萨克定律，而国内的一些资料会直接简称为盖·吕萨克定律。

事实上，在查理和盖·吕萨克之前，早在1708年，英国科学家豪克斯比(Francis Hauksbee)也独立的发现了这个规律[10]。豪克斯比的实验结果发现在压强不变的情况下，温度与体积成正比的这一事实。但是由于英法两国在那个年代的学术交流不深，盖·吕萨克并没有注意到豪克斯比的成果(见图4)。

3 盖·吕萨克定律的诞生与命名

1805年，盖·吕萨克开始着重观测压力、温度和湿度的关系。在向法国大学写的信里，洪堡评价道："借此这个机会请阁下注意这位朋友[盖·吕萨克]，他在精确测量方面具有杰出的功绩，兼具谦虚、纯粹的习惯和勇气，这些特质都激发和维持着他的研究"[9]。

盖·吕萨克与洪堡在研究氢气与氧气燃烧反

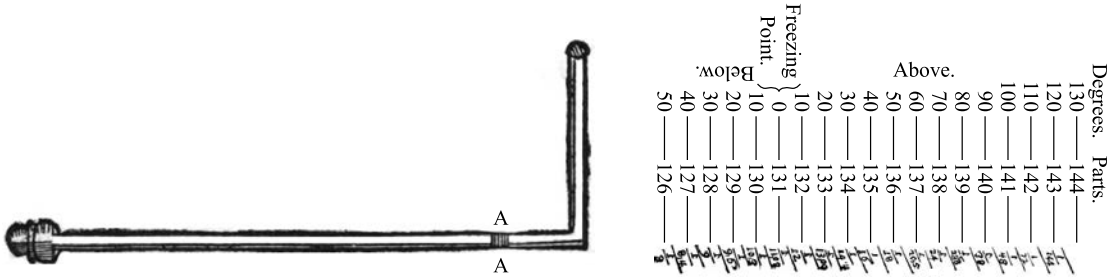


图4 记录于豪克斯比论文中的实验仪器(左)和实验数据(右)[10]

应时注意到,当氧气与氢气以超过 10∶1 的比例混合时,两种气体不能完全结合在一起。当选择与氧气化学性质相差巨大的氮气替代过量氧气时,对氧气与氢气的结合同样具有抑制效果。盖·吕萨克将这一现象归因于掺入气体会吸收热量,使得容器中的温度降低到燃烧所需温度以下,且不同气体的吸热效果相同。于是他提出了猜想:"人们都自然地倾向于概括,我们(至少特别是我)保留了这样一种观点,即所有的气体都具有相同的热容。在探究气体比热的过程中,盖·吕萨克发现了盖·吕萨克定律"[11,12]。

在盖·吕萨克以往研究中已经得出所有气体在受热会均等膨胀,而已知气体所占的体积与压缩它们的重量成反比,所以盖·吕萨克与道尔顿一致认为若将气体置于相同的条件下,然后将施加在它们上的压力降低相同的量,从温度的变化可以看出它们是否有相同热容量。为了验证这一猜想,盖·吕萨克准备了两个 12 升、含两个开口的烧瓶。一个开口装旋塞,另一个开口装精确度为百分之一度的酒精温度计。为避免水分影响,每个烧瓶中放入干燥的氯化钙。在确保仪器的密闭性后,将两个烧瓶抽真空,其中一个烧瓶中充入实验气体。大约 12 小时后,用一根铅管连接两个烧瓶,打开旋塞使实验气体流入空瓶中达到平衡。在平衡过程中,盖·吕萨克详细记录了温度计的变化。为作区分,盖·吕萨克将装有实验气体的烧瓶记作 1 号烧瓶,将另一空烧瓶记作 2 号烧瓶。当打开旋塞后,1 号烧瓶的气体压强变为原来的 1/2。若再把 2 号烧瓶抽真空后再进行相同操作将 1 号烧瓶与 2 号烧瓶连接,那么 1 号烧瓶中的气体压强变为原来的 1/4。盖·吕萨克在常压、1/2 大气压和 1/4 大气压下对空气进行实验后得到了如下的实验数据(见图 5)。

DENSITÉ DE L'AIR exprimée par le baromètre.	FROID PRODUIT dans le ballon n°. 1.	Chaleur produite dans le ballon n°. 2.
o^m, 76...	o°, 61...	o°, 58...
o^m, 38...	o°, 34...	o°, 34...
o^m, 19...	o°, 20...	o°, 20...

图 5 盖·吕萨克气体膨胀的实验数据。图中第一列为通过气压计测量的气体密度;第二列为 1 号烧瓶中气体降低的温度;第三列为 2 号烧瓶中气体升高的温度[11]。

通过比较两个烧瓶中的温度变化盖·吕萨克发现,除了第一组实验中 1 号烧瓶降低的温度与 2 号烧瓶升高的温度不尽相同,第二组和第三组都是相同的。关于这一现象,盖·吕萨克认为:"第一组实验误差足够小到可以忽略的情况下,我们发现两个烧瓶的温度变化完全相等"[11,12]。

在这个实验中,盖·吕萨克第一次得出结论:"将两个特定的容器连在一起,一个是空的,另一个充满气体,那么每个容器中气体的温度变化彼此相等"[11]。这一结论对于后来的能量守恒定律发展具有非常重要的历史意义,由于盖·吕萨克的著作没有被翻译成英文让更多科学家读到,直到 1845 年焦耳(Joule)才又重新独立地发现了这一事实[9]。

除此之外,盖·吕萨克还发现:"当空气凝结或膨胀时,其温度变化很可能与其密度变化成正比"[11]。在盖·吕萨克的实验中,气体的密度是由气压计测量,这个结果也被解释为在恒定体积下,气体温度的变化与其施加到真空的压强成正比。虽然盖·吕萨克研究的重点不在于此,但他确实在实验中发现过这条定律,被命名为盖·吕萨克定律。

类似于查理定律,法国科学家纪尧姆·阿蒙顿(Guillaume Amontons)早在 1699 年就发现关于在恒定体积下,气体压强与温度的关系这一问题。[13-15]。同年阿蒙顿还研究了摩擦定律,发表了利用热空气膨胀制造新型热机等论文,因此这些成果在当时的法国更被人熟知,以至于他的关于气体压强与温度关系的研究总是被人忽视。即便如此,盖·吕萨克定律偶尔也会被叫做阿蒙顿定律。

4 结语

百年前,人们普遍对乘坐热气球产生恐惧,它将人类的身体与地球分离。但是查理和盖·吕萨克为了探索自然,勇敢无畏地登上热气球。查理曾在报告中写道:"落日为我独自升起,用它的光芒为气球镀上一层金光,我看见大自然其余的部分都陷入了阴影。我沉迷于高空中的难以言喻的喜悦和沉思的狂喜"[8]。对于科学家最大的尊重莫过于尊重历史。关于查理定律和盖·吕萨克定律混淆的问题不仅出现在高等教育课本中,连带

着中学课本也出现相同的错误[1],更不必说网络内容。借以此文,希望可以将这一混淆改过。

参 考 文 献

[1] 物理选择性必修第三册[M].北京:人民教育出版社,2019:26-28.

[2] TIPPENS P E. Physics 7th edition[M]. McGraw-Hill Education 2005: 383:388.

[3] GAY-LUSSAC J L. Recherches sur la dilatation des gaz et des vapeurs[J]. Proceedings of the Annales de chimie, 1802(43): 137.

[4] RANDALL W W. The expansion of gases by heat: Memoirs by Dalton, Gay-Lussac, Regnault and Chappuis [M]. New York: Ameeican Book Company, 1902.

[5] 张学龙.关于盖吕萨克和查理定律的提法种种[J].玉溪师范学院学报,1988 (4): 62

[6] Gillispie, C C, (1960). The edge of objectivity: An essay in the history of scientific ideas [M]. Princeton University Press. 1960: 100-100;doi: 10.2307/j.ctvc779t6

[7] DAVIS T. Lighter Than Air[M]. The Johns Hopkins University Press. 2009.

[8] 理查德·霍姆斯.好奇年代:英国科学浪漫史[M]三联书店,2020.

[9] CROSLAND M. Gay-Lussac: Scientist and Bourgeois[M]. Cambridge University Press, 1978.

[10] HAUKSBEE F. An account of an experiment touching the different densities of the air, from the greatest natural heat, to the greatest natural cold in this climate[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1708.

[11] GAY-LUSSAC J L. Premier essai pour déterminer les variations de température qu'éprouvent les gaz en changeant de densité, et considérations sur leur capacité pour le calorique[J]. Mémoires de physique et de chimie de la Société d'Arcueil, 1807.

[12] MAGIE W F. A source book in physics[M]. Harvard University Press, 1935.

[13] ASIMOV I. Motion, sound and heat[M]. New American Library, 1969.

[14] AMONTONS. Moyen de substituer commodement l'action du feu, a la force des hommes et des cheveaux pour mouvoir les machines[J]. Histoire de l'Académie royale des sciences, 1699.

[15] JOHN MARTYN E C. The philosophical history and memoirs of the Royal Academy of Sciences at Paris[M]. London: Knapton, 1742.

■

水波干涉衍射的演示与仿真实验设计研究

袁晨翔[1]　翟立朋[2,3]　常凯歌[2,3]　李俊豪[1]　叶颖东[4]　张俊武[2,3]

（西安交通大学[1]电子与信息学部；[2]物理学院；[3]大学物理国家级实验教学示范中心；

[4]能源与动力工程学院，陕西 西安　710049）

摘　要　本文自主设计了一种水波干涉衍射的演示实验仪器，通过光影法进行增强，展示了水波干涉衍射的效果。本文还研究了振动频率、衍射缝宽等不同条件下的干涉衍射现象，并对该现象的原理进行了深入探讨。同时本文基于 Matlab 开发了一种可视化的水波干涉衍射虚拟仿真实验，具备图形化、直观性等优点。经过与演示实验现象的对比验证了仿真实验的合理性。仿真实验可以更好地应用于大学物理课堂演示。本研究成果可以促进物理学相关领域的研究和应用，对推动相关领域的发展具有重要的意义。

关键词　水波；干涉衍射；演示实验；仿真实验；Matlab 可视化

DEMONSTRATION AND SIMULATION EXPERIMENTAL DESIGN OF WATER WAVE INTERFERENCE AND DIFFRACTION

YUAN Chenxiang[1]　ZHAI Lipeng[2,3]　CHANG Kaige[2,3]　LI Junhao[1]　YE Yingdong[4]　ZHANG Junwu[2,3]

([1] Faculty of electronic and information engineering; [2] School of Physics;

[3] National College Physics Experimental Teaching Demonstration Center;

[4] School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049)

Abstract　This article independently designed a demonstration experimental instrument for water wave interference diffraction, which was enhanced by the light shadow method to demonstrate the effect of water wave interference diffraction. And the interference diffraction phenomenon under different conditions such as vibration frequency and diffraction slit width was studied, and the principle of this phenomenon was deeply explored. At the same time, this article developed a visual virtual simulation experiment of water wave interference diffraction based on Matlab, which has the advantages of graphical and intuitive. The rationality of the simulation experiment was verified through comparison with the demonstration experiment phenomenon. Simulation experiments can be better applied to demonstrate in university physics classrooms. The research results can promote the research and application of physics related fields, and are of great significance for promoting the development of related fields.

Key words　water waves; interference and diffraction; demonstration experiments; simulation experiments; visualization in Matlab

---

收稿日期：2023-05-29

基金项目：2022 年西安交通大学本科实验实践与创新创业教育教学改革研究专项（编号：22SJZX01，编号：22SJZX02）；2022 年西安交通大学本科教学改革研究项目（拔尖专项）（编号：22BJ03Y）；教育部高等教育司 2021 年第二批产学合作协同育人项目（编号：202102153105）。

通讯作者：翟立朋，男，工程师，主要从事物理实验教学与研究，zhailp2018@xjtu.edu.cn。

引文格式：袁晨翔，翟立朋，常凯歌，等. 水波干涉衍射的演示与仿真实验设计研究[J]. 物理与工程，2023，33(4)：47-51.

Cite this article：YUAN C X, ZHAI L P, CHANG K G, et al. Demonstration and simulation experimental design of water wave interference and diffraction[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(4): 47-51. (in Chinese)

波的干涉衍射是大学物理课程中的重要内容[1,2]，干涉衍射现象广泛存在于机械波、声波、光波、电磁波等各种类型的波。对于声波、光波和电磁波的干涉衍射，只能观察到干涉衍射结果而无法看到干涉衍射过程。水波作为一种机械波，能够非常直观地观察到干涉衍射的过程，所以水波经常被用来设计作为干涉衍射演示实验的理想载体[3-5]。

演示实验是大学物理课程中重要的一环[6,7]。伴随着近年来高校的扩招，大学物理课堂的学生容量越来越大，水波演示实验因为需要近距离观察，导致实际教学应用越来越少。所以本文自主设计了一种水波干涉衍射的演示实验装置，增强了干涉衍射图样对比度，极大地方便了干涉衍射过程的展示，并基于 Matlab 开发了一款虚拟仿真实验软件，通过与实验对比验证了仿真实验的可行性。仿真实验替代演示实验能够很好的匹配大班教学的现实场景。

1 演示实验设计

1.1 理论模型

当频率相同、振动方向平行、相位差恒定的两列波叠加时，某些区域振动始终增大，而使另一些区域振动始终减小的现象，称为波的干涉现象。只有两列波频率一样，振动方向平行，相位差恒定时才能产生干涉现象。

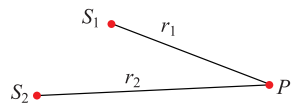


图 1 双波源干涉的理论模型

如图 1 所示为两个频率相同的波源 S_1 和 S_2，波源传播到任意一点 P 的振幅分别可表示为：

$$y_1 = A_{10}\cos\left(\omega t + \varphi_{10} + \frac{2\pi}{\lambda}\cdot r_1\right) \quad (1)$$

$$y_2 = A_{20}\cos\left(\omega t + \varphi_{20} + \frac{2\pi}{\lambda}\cdot r_2\right) \quad (2)$$

其中 A_{10}、A_{20} 分别表示两个波源的振幅，ω 为波源振动的角频率，φ_{10}、φ_{20} 分别振动的初相位，r_1、r_2 为分别 P 点到两个波源的距离。则 P 点的振幅可以表示为：

$$y = y_1 + y_2 \quad (3)$$

建立坐标系后，即可得到双波源干涉的理论图样，如图 2 所示。可以看出，频率相同的两列波叠加时，某些区域振动加强，某些区域振动减弱，这些区域相互间隔，形成了稳定的干涉图样。

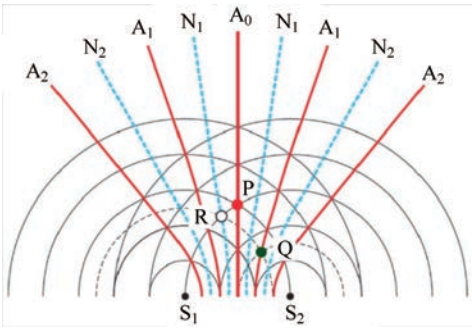


图 2 双波源干涉的理论图样

波绕过障碍物传播的这种现象叫做波的衍射[1,2]。当缝、孔的宽度尺寸与波长接近，或者比波长小时，能观察到明显的衍射现象，波长与狭缝大小相等时，衍射现象最明显。水波的衍射可以通过惠更斯原理来解释，即在水面上每一点都可以看作一个次级波源，它们发出的波峰和波谷在水中相互干涉，产生新的波前，从而形成了衍射波，如图 3 所示。当水面上存在一道狭缝时，狭缝两侧的水波传播方向发生偏转，同时在狭缝两侧分别形成半圆形的波前，这些波前相互重叠，形成交错的干涉花样。其间发生的相消干涉和相长干涉的效应使得不同位置的水波的相位和振幅存在差异，形成衍射波并沿各个方向传播。

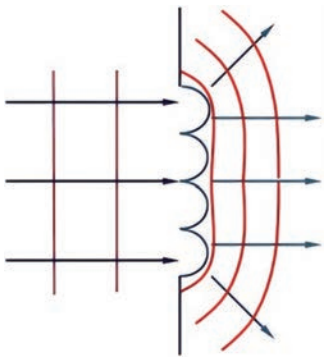


图 3 水波衍射的原理图

1.2 演示实验设计

水波是一种机械波，具有不可压缩性，水波中波峰与波谷的形成都来源于水从波峰向波谷的流动，水波中的每一个质点既做横向运动又做纵向

运动，也就是说既有横波的部分也有纵波的部分。所以水波的干涉衍射需选择在浅水波中进行，如图 4 所示。图中 x 为水波的传播方向，d 为水深，L 为水波波长。

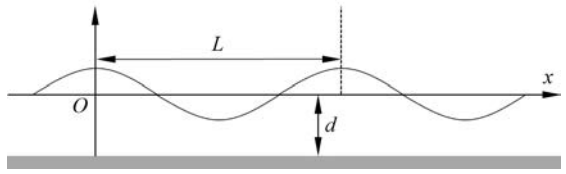


图 4　浅水波坐标示意图

本文设计将水槽、振源和驱动电机等装置按照如图 5(a)所示的示意图进行，为了能够提高干涉衍射图样的对比度，我们在水槽上方加上光源，通过光源对衍射水波在装置底部的投影来观察衍射波形，以方便更清楚地观察到干涉衍射现象，如图 5(b)所示。

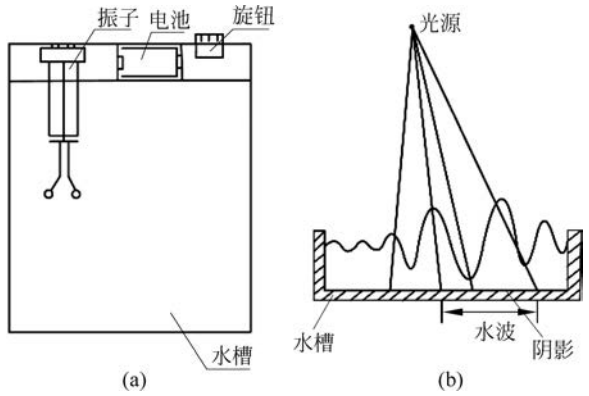


图 5　干涉衍射装置示意图和光影法原理图

基于以上关于干涉衍射的理论和实验模型，搭建了如图 6 所示的实验装置。图中数字 1～6 分别表示为发波振子、电池、频率调节旋钮、导线、挡板和备用挡板。振子在水中可以按照一定的频率振动产生水波，并通过其上的旋钮调节振子的振动频率，从而调控波源的振动频率，通过调节纸板的位置可以设置狭缝的宽度，进而提高实验现象的对比度。

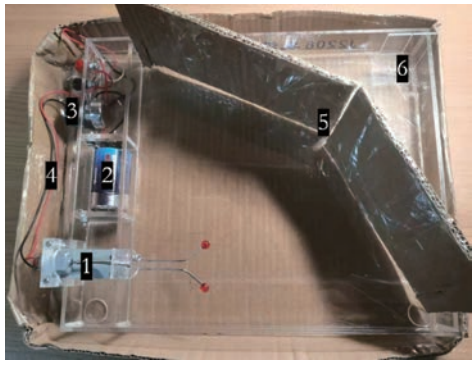


图 6　水波干涉衍射装置图

2　实验方法

将实验仪器水平放置在实验平台上，向水槽内倒入 10mm 的清水，将振子浸水湿润后固定在振动源上，并调节振子的高度，使其浸入水面 1～2mm，接通电源后调节频率旋钮，改变振动频率观察不同频率下(5Hz、10Hz、15Hz 和 20Hz)的干涉图样，如图 7 所示。可以看出随着振动频率的升高，在相同的视场下干涉条纹密度越高。

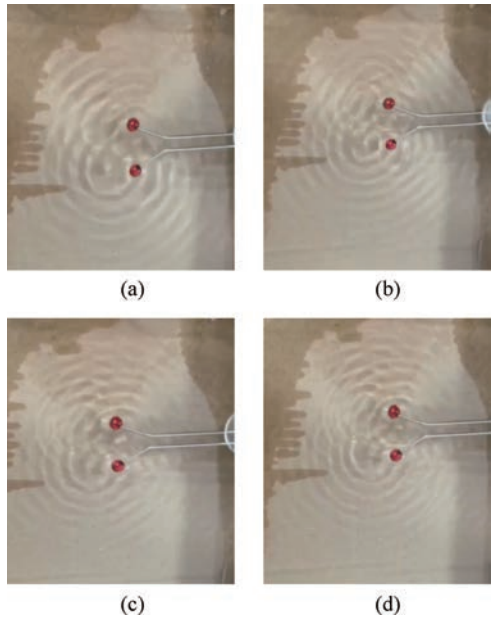


图 7　不同振动频率下的干涉图样

(a) 5Hz；(b)10Hz；(c) 15Hz；(d) 20Hz

将双振子换成单振子并固定好，调节振子的频率为 5Hz，使用纸板和胶带自制衍射挡板。在挡板上分别裁剪出缝宽不同的狭缝，缝宽分别 2mm、3mm、4mm、5mm，将挡板放到距离波源 5cm 处，可以得到其衍射图样，如图 8 所示。可以看出水波在缝宽与其波长大小相等时衍射现象最为明显，在狭缝过窄与过宽时衍射现象减弱。是因为当狭缝过窄时，虽然满足衍射波长条件，但水波能够通过狭缝的振动能量减小，衍射现象减弱；当缝宽大于水波波长时，不太容易产生衍射现象，所以衍射现象减弱。该装置能够比较好地完成演

示实验的要求。

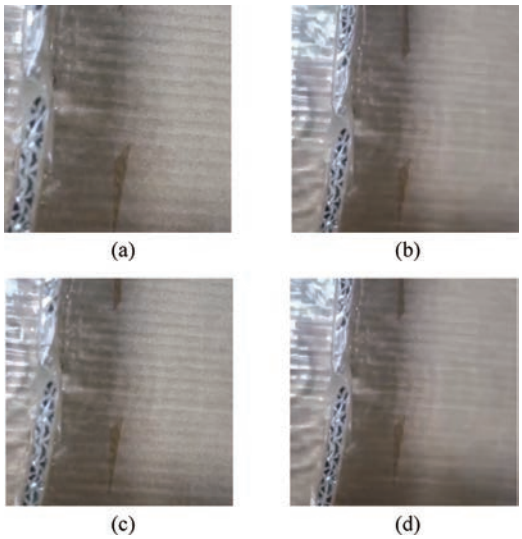


图8 不同衍射缝宽条件下的衍射图样

(a) 2mm；(b) 3mm；(c) 4mm；(d) 5mm

3 仿真实验的开发设计

但不管是本文所设计的水波装置还是传统水波演示装置，都不太能够满足大班授课的要求，所以本文基于 Matlab 设计了参数可以调节的仿真APP，如图9所示。该APP可以计算并给出不同

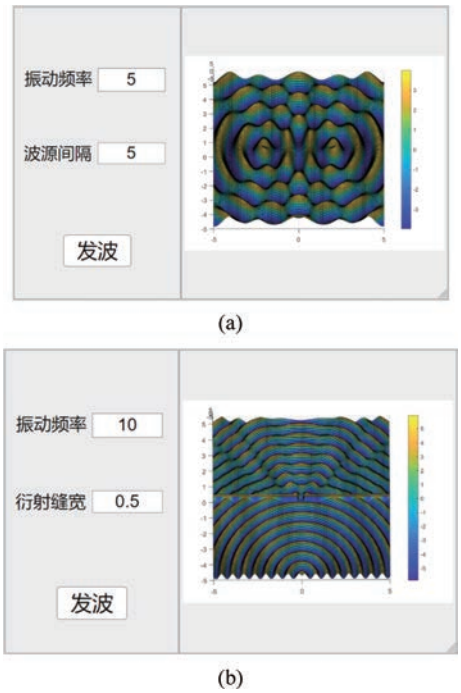


图9 虚拟仿真实验APP界面

(a) 干涉仿真演示界面；(b) 衍射仿真演示界面

频率、不同间隔和不同缝宽等条件下的水波干涉与衍射图案。

为了更直观地在大班授课中应用仿真演示APP，本文还设计了不同参数之间的对比试验。图10为不同振动频率的干涉图样对比，与此同时对比参数可以很方便地进行改变。

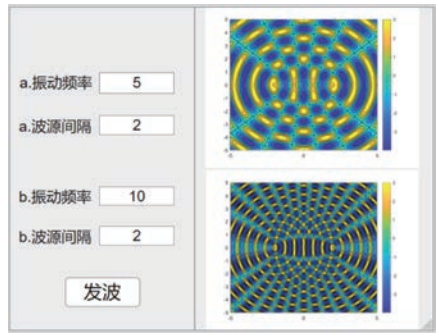


图10 不同振动频率之间的干涉图样对比

图11为在不同频率下改变衍射缝宽所得到的衍射图样，从图中可以看出，缝宽的改变对衍射图样的影响较大，在缝宽小于或与水波波长相近，衍射现象更为明显。

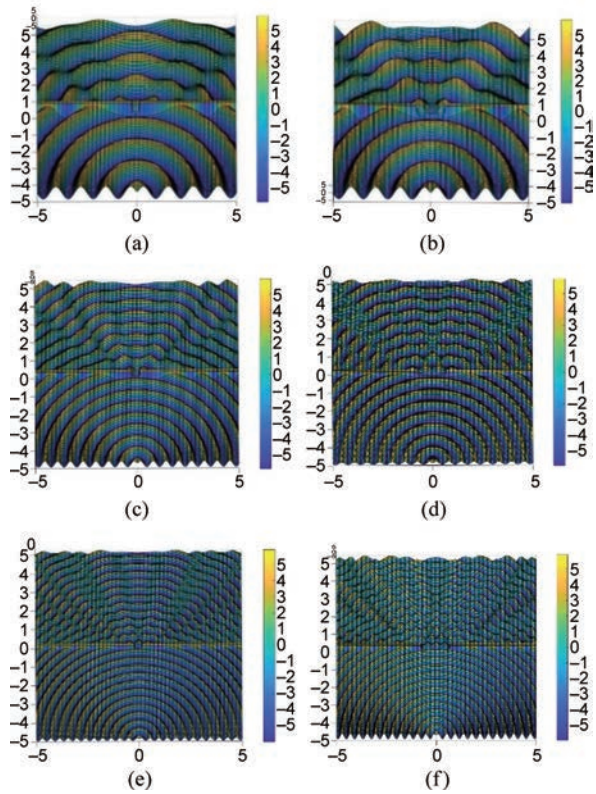


图11 不同衍射条件下的衍射图样对比

(a) 5Hz，2mm；(b) 5Hz，4mm；(c) 10Hz，2mm；(d) 10Hz，4mm；(e) 15Hz，2mm；(f) 15Hz，4mm

4 总结

本文运用浅水波模型分析了水波在不同频率下干涉和衍射的波形图，推导出水波的干涉与衍射原理公式，以发波水槽和双振子为基本实验仪器，通过实验进行演示，观测到了水波的干涉与衍射，并使用 Matlab 进行仿真模拟，增强了水波在干涉和衍射过程中的可视化。同时，设计了通过光照投影的方法来增强水波干涉实验的可观察性，并设计了一款用于课堂教学实践的 APP。理论与实验研究证明：对于水波干涉，在波源间距一定的情况下，频率越大的波其干涉条纹越密，干涉条纹的间距越小。对于水波衍射，其发生对缝宽的要求较为苛刻，只有对于缝宽小于水波波长或与水波波长相近的情况下才能发生。

参 考 文 献

[1] 吴百诗. 大学物理学(下册)[M]. 北京：高等教育出版社，2012.12.

[2] 程守洙，江之永. 普通物理学(第六版)下册[M]. 北京：高等教育出版社，2006.12.

[3] 魏薇. 电磁谐振水波干涉演示仪的设计研究[J]. 物理与工程，2012(3)：23-25.
WEI W. Design of water wave interferometer of electromagnetic resonance[J]. Physics and Engineering，2012(3)：23-25.（in Chinese）

[4] 杨万琴，汪成瑞，张轶炳. 基于声振动的机械波干涉与衍射实验[J]. 物理实验，2018(4)：59-60.
YANG W Q，WANG C R，ZHANG Y B. Demonstrating device of exploring sound propagation conditions based on magnetic suspension[J]. Physics Experimentation，2018(4)：59-60.（in Chinese）

[5] 卢桂林，钟浩源，谭铝平，等. 液体表面驻波的演示和驻波波长的测量[J]. 物理实验，2019(5)：29-33.
LU G L，ZHONG H Y，TAN L P，et al. Observing and measuring standing waves on liquid surface[J]. Physics Experimentation，2019(5)：29-33.（in Chinese）

[6] 秦哲，杨广武，胡雪兰，等. 基于便携式课堂演示实验的大学物理教学探索与实践[J]. 大学物理，2021(11)：26-30.
QIN Z，YANG G W，HU X L，et al. Exploration and practice of college physics teaching based on portable demonstration experiment[J]. College Physics，2021(11)：26-30.（in Chinese）

[7] 孙宝印，李成金，刘军. 基于创新能力培养的物理演示实验教学模式[J]. 物理实验，2017(S1)：25-28.
SUN B Y，LI C J，LIU J. Demonstration experiment teaching based on the cultivation of innovative ability[J]. Physics Experimentation，2017(S1)：25-28.（in Chinese）

■

大学物理课程思政教学评价初探

邹 斌 渠 朕 崔 彬 杨玉平 张谷令
（中央民族大学理学院，北京 100081）

摘 要 大学物理课程思政是一种隐性的思想政治教育，对其进行教学效果评价研究是目前教学工作中需要解决的问题。本文采用调查问卷进行课程思政教学评价研究，科学界定大学物理课程思政教学评价，并将其划分为家国情怀、科学精神、科学家精神和中华优秀传统文化四个一级指标，编制的调查问卷初步检测信度和效度良好。通过对比研究部分学生在大学物理学习前和结课后的情况，本文分析了目前大学物理课程思政教学中需要关注的问题。希望本研究的相关问卷工具和调研结果为各高校开展大学物理课程思政教学提供有益借鉴。

关键词 科学精神；科学家精神；大学物理；教学评价

RESEARCH ON TEACHING EVALUATION OF CURRICULUM IDEOLOGICAL AND POLITICAL EDUCATION IN COLLEGE PHYSICS

ZOU Bin QU Zhen CUI Bin YANG Yuping ZHANG Guling
(School of Science, Minzu University of China, Beijing 100081)

Abstract The ideological and political education of college physics curriculum is a recessive form of education. It has become a subject to be solved in the current teaching work to evaluate the teaching effect of students in this field. We used the form of questionnaire to carry out the preliminary study of this teaching evaluation. We have scientifically defined the teaching evaluation of ideological and political education in college physics courses. We divided the items of the questionnaire into four first-level indicators, namely, patriotism, scientific spirit, scientist spirit and the excellent traditional Chinese culture. The preliminary test reliability of the questionnaire we prepared is good, and the validity of the questionnaire is also acceptable. We made a comparative study of more than 100 college students from the Minzu University of China before and after college physics study. We analyzed the problems that need to be paid attention to in the ideological and political teaching of college physics. We hope that the questionnaire tools and survey results of this study can provide useful help for Chinese universities to carry out ideological and political teaching of college physics courses.

Key words scientific spirit; scientist spirit; college physics; teaching evaluation

收稿日期：2023-02-11
基金项目：2020年教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会华北区工作委员会教学研究项目“大学物理课程思政教学实效性研究”（项目编号：2020004）；中央民族大学2022年度研究生课程思政示范课培育项目（项目编号：GESKCSZ004）；中央民族大学2022年度一流本科课程建设项目（项目编号：KC2227）和本科教学改革创新项目（项目编号：CX2211）。
通讯作者：邹斌，男，副教授，研究方向为大学与中学物理教学衔接研究和凝聚态物理理论研究，zoubin@muc.edu.cn。
引文格式：邹斌，渠朕，崔彬，等. 大学物理课程思政教学评价初探[J]. 物理与工程，2023，33(4)：52-59.
Cite this article: ZOU B, QU Z, CUI B, et al. Research on teaching evaluation of curriculum ideological and political education in college physics[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(4): 52-59.

1 大学物理课程思政教学研究现状概述

大学物理课程是通识性基础必修课程，是理工农医类本科生很重要的公共基础课程，又是典型的理论和实验相配合的实践类课程。大学物理课程在培养学生科学精神和创新意识等课程思政建设方面，具有得天独厚的优势。很多高校在大学物理理论和实验课程中将价值观引导有机融入到大学物理知识传授与能力培养中，在全员、全程、全方位育人的大格局中不断实现“润物细无声”的育人效果，落实了立德树人根本任务。

为全面准确了解国内高校开展大学物理课程思政建设的情况，2023 年 1 月 8 日我们在中国知网(CNKI)全文数据库中以“大学物理”和“课程思政”两个精确主题词为限定条件进行高级检索，从中扣除掉“物理化学”等内容的教学研究文章，共检索到大学物理课程思政相关有效文献 246 篇。利用 Citespace(版本号：6.1.R6 基础版)可视化文献分析软件对这些论文进行关键词的时间线可视化分析，得到如图 1 所示的结果。

可以看出，明确将大学物理与课程思政建设联系在一起的文献可以追溯到 2018 年。广西大学的陈真英等人在大学物理课程思政建设早期阶段对课程思政资源进行挖掘，并针对如何利用思政元素做了有益探讨[1]。本领域标志性的文献是 2020 年 10 月西安交通大学王小力教授所发表的《大学物理课程思政研究与实践》一文，该论文首次明确提出课程思政与大学物理教学相互融合需要做到“五个始终坚持”，为推进大学物理课程思政建设提出了有针对性的指导建议[2]。

由图 1 可以发现，文献中的聚类标签(年份)主要有“大学物理实验(2021 年)”“大学物理(2021 年)”“立德树人(2021 年)”“课程教学(2021 年)”“教学团队(2022 年)”“思政元素(2021 年)”等。如在 2020 年聚类标签主要是“智慧教学”，这与 2020 年转向线上教学现实背景相契合，在当时疫情防控的严峻形势下，很多高校都意识到构建线上线下混合的大学物理智慧教学体系是十分必要的[3]。2021 年探讨大学物理“教学内容”的课程思政建设的文献比较多[4]，后期教学内容更加聚焦，如“力学”[5]“电磁学”[6]“光学”[7]等都有涉及和体现。这些研究尝试选用某一具体的内容将大学物理课程思政的构建和有效融入讲深弄透，具有良好的示范价值。需要关注的是，2022 年“教学团队”这一聚类标签的出现，反映出大学物理课程思政建设更加关注团队建设，在经验交流、教学观摩及教学培训等交流平台的支持和激励下，全

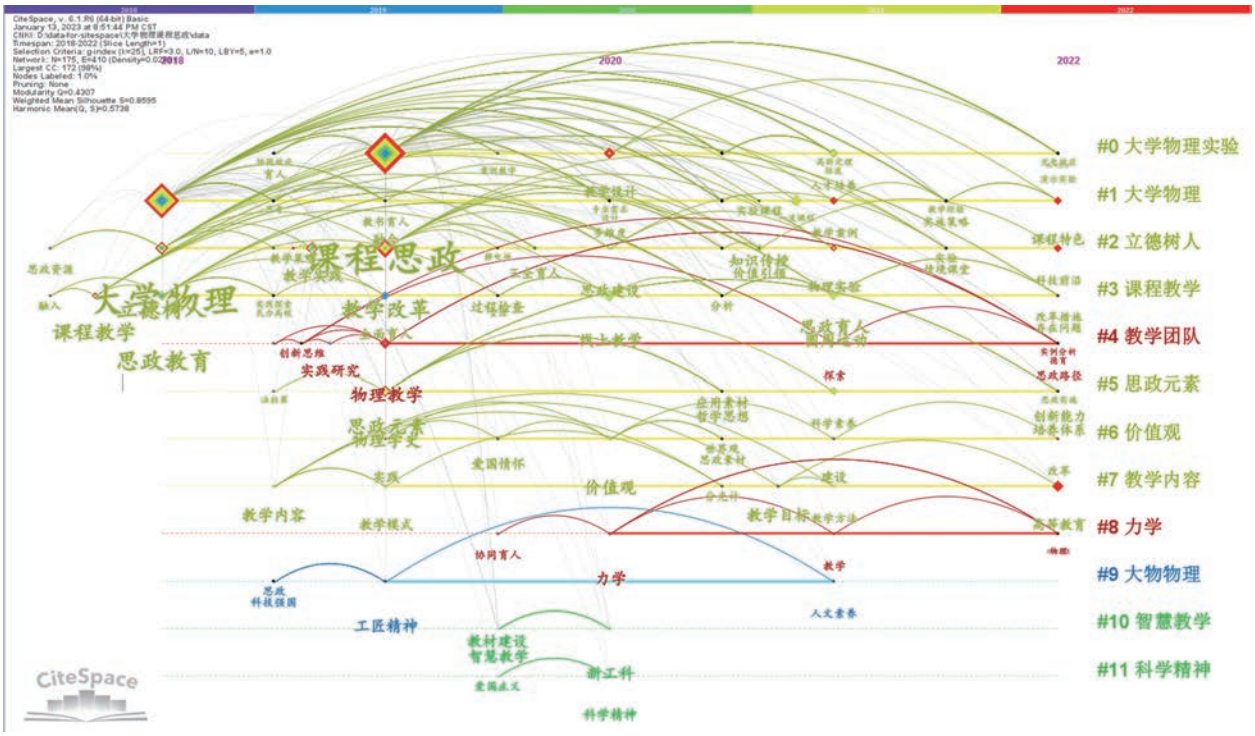


图 1 关键词的时间线可视化结果(节点大小正比于载文量)

员育人的局面正在形成。

关于大学物理课程思政建设的评价也有很多作者在讨论。如山西大学李鹏等人调查发现，大学物理开展课程思政具有良好的学生基础，开展课程思政十分必要[8]；卢宏等人提出过程性评价可以考查学生践行科学精神和科学家精神等的达成情况[9]。

然而，纵览自2018年至2022年的246篇文献，如何将课程思政这一“隐性教育”的效果进行显性评价，怎样区分学生得到的思政教育是在大学物理中获得的，而不是在高等数学或其他专业课中获取的，这些深层次的教学评价问题极少涉及。

2020年教育部印发的《高等学校课程思政建设指导纲要》（以下简称《纲要》）中明确提出，课程思政建设要建立多维度的课程思政建设成效考评体系并不断落细落实，其中如何设计调查问卷对授课学生进行课程思政教学效果的显性评价，是目前大学物理教学中亟须解决的现实问题之一。

2 调查问卷的设计

我们依据大学物理教学的实际情况，结合自身的教学实践，将大学物理课程思政教学评价界定为有效收集和分析大学物理课程教学中隐性渗透价值引领的相关信息，从而做出一定的价值判断、初步改进教育决策的过程。

2.1 指标点的初步确立

科学合理地设置评价指标体系是大学物理课程思政教学评价的重要环节。《纲要》中有关于课程思政建设的内容指出，需要紧密围绕理想信念，以“五爱”为主线，在政治认同、家国情怀、文化、法制和道德修养等方面进行内容完善。不过这些要求是对全员、全程和全方位整体育人格局的总要求。仅仅两个学期的大学物理理论课和实验课无法实现全部内容的落实，因此这样的总要求并不适合全套照搬拿来作为我们的考查指标。

在构建大学物理课程思政教学评价指标过程中，我们充分考虑《纲要》所规定的课程思政内容要点，结合大学物理理论课和实验课的基本情况和自身特点，初步构建了大学物理课程思政教学评价的四个一级指标：家国情怀、科学精神、科学家精神和优秀传统文化。一级指标点所对应的二级指标点在表1中列出。

科学精神比较抽象，在确定其二级指标点时，仁者见仁，智者见智，存在很多不同的观点[12,13]。本研究采用文献[10]所论证的观点作为“科学精神”的二级指标点。“科学家精神是科技工作者在长期科学实践中积累的宝贵精神财富”[14]，科学家精神在文献[11]中有十分明确权威的表述。这里需要说明的是，科学家精神显性涵盖有大胆质疑、探索创新等科学精神，但是新时代科学家精神同时也蕴含着“人”的精神，比如胸怀祖国、奉献人民的爱国精神，淡泊名利、潜心研究的奉献精神和甘为人梯、奖掖后学的育人精神等，这些也是科学家作为一个“人”的精神与科学精神的重要区别[15]。因此在评价指标中我们将科学精神和科学家精神分别列出。

2.2 调查问卷的基本设计

按照大学物理所包含的力学、振动和波、热学、电磁学、光学、狭义相对论力学基础、量子物理基础和物理实验等八个板块，分别设计这八个板块所隐含的大学物理课程思政教学评价所使用的调查问卷。各项指标一般采用李科特五级量表方式进行勾选。

考虑到课程思政是典型的隐性教育，应避免

表1 调查问卷一级指标和二级指标

一级指标	二级指标
家国情怀	与国家民族休戚与共的家国同构、以天下为己任的使命担当
科学精神[10]	大胆质疑、探索创新、自由竞争、协作包容、造福人类
科学家精神[11]	胸怀祖国、服务人民的爱国精神；勇攀高峰、敢为人先的创新精神；追求真理、严谨治学的求实精神；淡泊名利、潜心研究的奉献精神；集智攻关、团结协作的协同精神；甘为人梯、奖掖后学的育人精神。
优秀传统文化[16]	古典诗词、古代科技发明、传统民俗游戏

出现“贴标签”或“两张皮”的情况发生，所以“家国情怀”等指标点通过设计间接问题进行考查。

问卷调查可以在开学之初（前测）或大学物理结课之后（后测）进行。为保证所调查课程思政教学效果主要是来源于大学物理的教学效果，我们设置了多组大学物理八个板块与科学精神、科学家精神及优秀传统文化的交叉矩阵类题目。如果学生没有学过个别板块，也允许学生不进行相关作答。

本调查问卷可以在大学物理开课之前进行前测，客观上也考查了中学物理教学中“立德树人”的落实情况，只需将“大学物理”等表述修改为“中学物理”即可。

调查问卷通过问卷星网络发放，相关链接网址为 https://www.wjx.cn/vm/rlyb95R.aspx，供读者参考使用。

2.3 指标体系的信度和效度简单分析

2021 年 5 月本调查问卷在小范围内进行了预测试。选取中央民族大学已经学完大学物理的三年级（2019 级）学生进行预测试，回收有效问卷 37 份。利用问卷星在线 SPSSAU 平台对本调查问卷一级指标整体进行了初步的信效度分析[17]，结果在表 2 中给出。

表 2 调查问卷信度、效度初步分析

一级指标	信度分析 α 系数	效度分析 KMO 值
家国情怀	0.937	0.847
科学精神	0.891	0.810
科学家精神	0.916	0.646
中华优秀传统文化	0.760	0.626

初步分析，四个一级指标的 Cronbachα 系数均在 0.7 以上，说明信度较好；使用 KMO 和 Bartlett 检验进行效度验证发现，四个一级指标的 KMO 值都在 0.6 以上，说明所得到的调查数据比较适合提取信息，从侧面反映出效度尚可。

3 调查结果

3.1 调查对象

对中央民族大学 2021 级光电信息科学与工程专业、电子信息专业的 215 名同学发放前测和后测调查问卷，时间点分别为 2021 年 9 月（学生刚入学）和 2022 年 6 月（学习大学物理课程满一年）。这两个专业的学生是我校学习大学物理课时数最多的两个专业，理论课学时为 126 学时，实验课学时为 54 学时。调查问卷由问卷星平台发布并进行统计。其中前测回收得到有效试卷 101 份，后测为 111 份。

需要说明的是，前测中分别有 64 人和 62 人学习过狭义相对论和量子物理的高中教材内容，分别占总调查人数的 63.4%和 61.4%。

3.2 “家国情怀”一级指标调查结果

表 3 给出针对“家国情怀”的问卷调查结果，表中数字表示勾选该选项的学生人数，括号内是对应的人数百分比。通过设计间接问题调查后的整体结果来看，不管是刚升入大学还是经过一年的学习，学生在家国情怀、情感认同方面结果令人满意。中国科技不断发展，大国重器不断涌现，也激励着学生们今后投身报效国家建设。

表 3 “家国情怀”调查结果

题目选项	时间	非常赞同	比较认同	同意	比较反对	非常不赞同
中国科技发展日新月异，这些成就离不开国家的大力支持和持续投入	前测	99(98.02%)	2(1.98%)	—	—	—
	后测	98(88.29%)	9(8.11%)	4(3.6%)	—	—
大国重器的不断涌现，是国家制度优越性的集中体现	前测	90(89.11%)	5(4.95%)	5(4.95%)	1(0.99%)	—
	后测	94(84.68%)	13(11.71%)	4(3.6%)	—	—
学好学科知识、培养专业能力，是为了毕业后建设家乡，报效国家	前测	87(86.14%)	8(7.92%)	6(5.94%)	—	—
	后测	90(81.08%)	16(14.41%)	4(3.6%)	—	1(0.9%)
中学/大学物理学习提高了我的科学文化修养	前测	68(67.33%)	19(18.81%)	10(9.9%)	3(2.97%)	1(0.99%)
	后测	86(77.48%)	17(15.32%)	8(7.21%)	—	—
中国优秀传统文化中孕育着很多可以用中学/大学物理知识解释的问题	前测	78(77.23%)	13(12.87%)	10(9.9%)	—	—
	后测	89(80.18%)	15(13.51%)	6(5.94%)	—	—

在本调查中还发现，有86.14%的大一新生学生对“中学的物理学习内容能提高其科学文化修养”有比较正面的认同，而这批学生经过一年的大学物理课程学习后，有92.8%的学生有较为积极的认同度，整体提升了6.66%。究其原因，可能是高中物理知识只用到初等数学工具，学生主要精力用于做题、备考和升学，没有更多时间体会和领悟物理学中简单清晰之美、严谨完备之美、和谐统一之美。而到了大学物理学习阶段，更多数学工具的运用，牛顿力学三大守恒定律的完整阐述，相对性原理的不断拓展，量子概念引发的现代物质观的确立，使得物理学理论体系自洽完备而又简洁精确。一年的大学物理课程学习，让更多的学生感受到物理学之美，体会到大学物理知识体系中所蕴含的思想价值与精神内涵。

同样的情况也发生在对“中国优秀传统文化中孕育着可以用物理知识解释的问题”的这一调查中。后测相对于前测来说，新增了3.59%的学生对此持比较认同或非常赞同的态度。大学物理理论课和实验课相较于中学物理的内容具有更大的广度和深度，从而使学生对优秀传统文化中一些现象的理解也更加透彻。

3.3 “科学精神”一级指标调查结果

调研了大学物理的各个板块学习过程中，学生感受到的科学精神的情况。在每个学习板块中学生可以选择最多三种印象深刻的科学精神。图2是学生刚入学时的前测结果，图3是经过两个学期的大学物理学习后的后测结果。

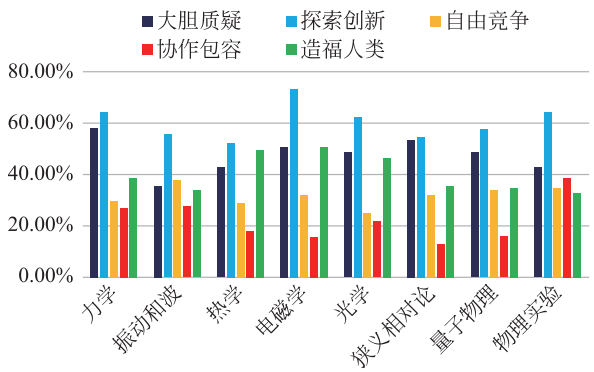


图2 “科学精神”调查结果(前测)

在前测中，无论是哪块物理内容，刚完成高中物理学习的学生认为感受最深的都是“探索创新”科学精神。其中在“力学”“电磁学”“光学”和“物理实验”中，选择“探索创新”的人数都超过了学生

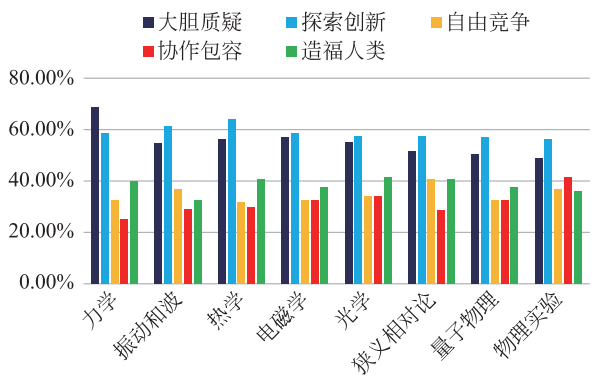


图3 “科学精神”调查结果(后测)

人数的60%。这种情况在后测中也有体现，“探索创新”是大部分大学物理教学板块中学生选择最多的一个选项。求真、求实这样的理性精神是科学精神的最根本要素，探索创新也是科学活动的出发点和落脚点[10]。无论是高中物理教学还是大学物理授课，教师在组织教学活动中都有意无意地将探索创新融入其中，如正负电荷、原子等概念的提出和实验验证等，都能体现出不畏艰难、探索创新的科学精神。

不管是前测还是后测，在除了“物理实验”板块之外的其他板块，“协作包容”这一科学精神选项都是学生选择最少的。前测中“狭义相对论”板块仅有12.87%的学生选择“协作包容”；后测中“振动和波”和“狭义相对论”板块也只有28.83%的学生选择“协作包容”选项。究其原因，经典物理学和近代物理学教学内容看似都是一位位天才般的科学家做出的，学生较难领会到“协作包容”的科学精神。其实在诸如高能物理、凝聚态物理等现代物理学发展过程中以及国家重大科技基础设施建设过程中，“协作包容”精神在推动科学发展和人类文明进步方面发挥着重大作用。无论是大学老师还是中学教师，在理论课的教学中都需要关注“协作包容”科学精神的内容挖掘和隐性表达。不过，在“物理实验”板块中，学生们往往需要通过小组成员的配合完成实验，从而感受到了协作的力量，因此在该板块中，学生对“协作包容”科学精神的体会相较于其他板块更加深刻一些。

3.4 “科学家精神”一级指标调查结果

关于“科学家精神”的问卷调查也是按照前测

和后测分别进行的，学生从六种精神中选取自己在物理各板块学习中印象较深的三个。其中图 4 为前测结果，图 5 是后测统计。

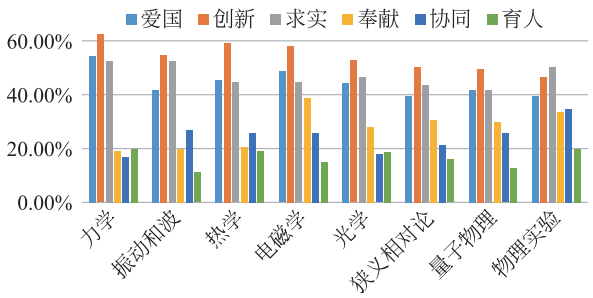


图 4 “科学家精神”调查结果(前测)

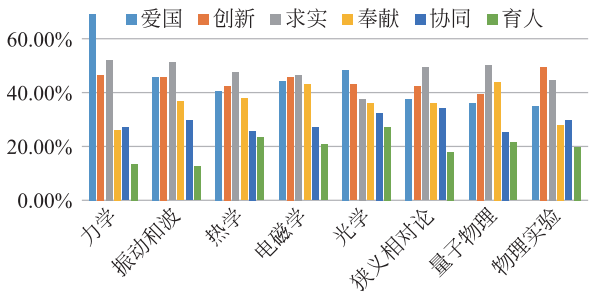


图 5 “科学家精神”调查结果(后测)

通过两个学期的大学物理学习，“科学家精神”调查前测和后测结果有很多不同。刚入学时，学生对中学物理教学中渗透的“勇攀高峰、敢为人先的创新精神”印象深刻，选择该选项的学生人数基本上都超过了 50%(除了“物理实验”板块以外)。而经过一年的大学物理学习和课程思政教育的不断渗透，“胸怀祖国、服务人民的爱国精神”和“追求真理、严谨治学的求实精神”选项在各个板块中分别占据首位，如图 5 所示。这与大学物理教师结合更深入的教学内容更多讲解物理学家的勤奋严谨的求学历程、科学报国的优秀品质的教学设计密不可分。在各个教学环节有机穿插物理学家们所处的时代背景和所运用的思想方法，不仅能让学生近距离感受科学家们的风采，更能帮助学生理解所学的物理知识[18]。

“科学家精神”指标调查中的“物理实验”这一板块中，前测和后测结果也有差异。调查显示，刚刚从中学升入大学来的学生对物理实验中体现的科学家们的“追求真理、严谨治学的求实精神”印象深刻；而完成大学物理实验后，他们对物理学家们“勇攀高峰、敢为人先的创新精神”有了更深刻的认识。中学物理实验更多的是基础实验，如探究弹簧弹力与形变量关系、用打点计数器研究速度和加速度、平抛运动实验、测量电源电动势和内阻、验证动量守恒等等。这里学生感受到的求实精神，更多的应该是实验本身所要求的物理图像需准确描述、实验数据准确可靠、实验误差正确表达等。大学物理实验内容比中学实验更加丰富，研究方法更为多样，仪器设备使用更加多样。大学物理实验项目，如碰撞实验[19]、霍尔效应实验[20]、迈克耳孙干涉实验[21,22]、弗兰克-赫兹实验[23]、密立根油滴实验[24]等，都蕴含丰富的科学家精神素材，可以较好地做到于无声处渗透物理学家们敢于探寻新方法、开辟新方向的创新精神。

3.5 关于中华优秀传统文化的调查情况

中国古代很多诗词、古代科技发明和传统民俗游戏中蕴含着丰富的物理观念和科学原理。我们调查了物理教学中加强中国优秀传统文化教育的情况。询问学生在中学物理(前测)和大学物理(后测)授课中，是否能体会到这些传统文化中蕴含的物理思想，为单选题。前测和后测结果在图 6 和图 7 中进行了展示。

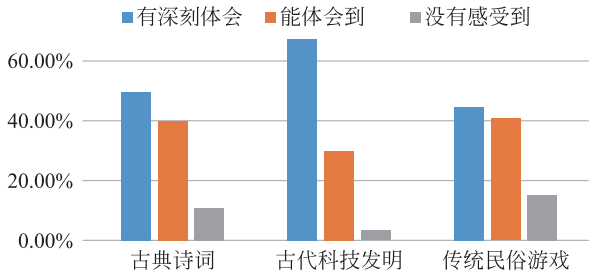


图 6 中华优秀传统文化教育的情况调查(前测)

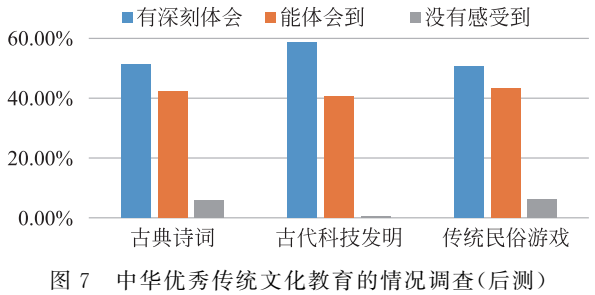


图 7 中华优秀传统文化教育的情况调查(后测)

通过前后测的对比发现，经过一年的大学物理课程学习，学生对古典诗词、古代科技发明和传统民俗游戏中所包含的物理现象的体会变化不大。这从侧面反映出我校光电信息科学与工程专业和电子信息专业的大学物理课堂上，应该有意

识地加强关于中华优秀传统文化的赏析。比如古典诗词歌赋中确实有不少有趣的物理现象，教师可以采取多种方式引导学生去观察、思考、提问并探究作品中自然现象的物理知识和科学原理，从而打开一条通往物理世界的新途径。[25]

4 总结

如何对大学物理课程思政教学效果进行问卷调查和客观评价，是大学物理教学过程中急需要解决的现实问题之一。本团队在教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会华北区工作委员会教改项目的支持下，尝试开展课程思政教学评价相关研究。

本文将《纲要》中有关于课程思政建设内容分解为家国情怀、科学精神、科学家精神和优秀传统文化四个一级考查指标点，并论述了二级指标点选取的依据。紧密结合《理工科类大学物理/大学物理实验课程教学基本要求(2010年版)》所给出的力学、振动和波、热学、电磁学、光学、狭义相对论力学基础、量子物理基础和物理实验等八个板块，编制大学物理课程思政教学评价的学生调查问卷。这种紧密结合大学物理各个板块的情况调查，能够初步考查大学物理教学对学生思政教育的贡献情况。

通过对我校2021级光电信息科学与工程专业、电子信息专业部分学生调查显示，学生在一年的大学物理学习后能更加体会到物理科学体系的价值内涵。“探索创新”的科学精神是学生在学习物理课程后感受最深的；通过物理实验教学，学生能较好地体会到“协作包容”的精神内涵。对比前测和后测结果，在中学物理和大学物理教学阶段无声渗透“科学家精神”的结果有较多差异，爱国精神和求实精神在大学物理教学阶段体现地更为明显。大学物理教师相较于中学物理教师，在物理课程内容深度和广度方面有更大的优势，开展课程思政建设的方式方法也相应会更加方便。此外，调查还显示，我校在大学物理教学中体现中华优秀传统文化的价值引领方面，有待加强。

参 考 文 献

[1] 陈真英，孙立萍，杨昌亿，等. 立德树人视域下大学物理课程中的思政资源探析[J]. 西部素质教育，2018，4(22)：1-2，5.
CHEN Z Y，YANG L P，YANG C Y，et al. Exploring the Civic Resources in University Physics Courses under the Perspective of Establishing Virtue and Raising People[J]. Western China Quality Education，2018，4(22)：1-2，5.（in Chinese）

[2] 王小力. 大学物理课程思政研究与实践[J]. 中国大学教学，2020，362(10)：54-57.
WANG X L. Research and Practice of Civic Government in University Physics Course[J]. China University Teaching，2020，362(10)：54-57.（in Chinese）

[3] 孙云娟. 新工科教育背景下大学物理课程改革方向与路径探析[J]. 中国教育技术装备，2020，496(22)：99-101.
SUN Y J. An Analysis of Direction and Path of College Physics Reform under Background of New Engineering Education[J]. China Educational Technology & Equipment，2020，496(22)：99-101.（in Chinese）

[4] 胡琛，滕冰，钟德高，等. 课程思政在物理类科技英语中的教学探索与实践[J]. 物理与工程，2021，31(Z1)：118-120.
HU C，TENG B，ZHONG D G，et al. Teaching Exploration and Practice of Ideological and Political Course Education in English for Science and Technology of Physics[J]. Physics and Engineering，2021，31(Z1)：118-120.（in Chinese）

[5] 蒋最敏，魏心源. 在大学物理力学中的课程思政实践[J]. 物理与工程，2021，31(3)：92-96.
JIANG Z M，WEI X Y. Improvements in both values education and quality of teaching：A teaching practice in university physics mechanics[J]. Physics and Engineering，2021，31(3)：92-96.（in Chinese）

[6] 王素元，张斌. 大学物理课程思政教学研究——以电磁感应教学为例[J]. 物理与工程，2021，31(6)：124-128.
WANG S Y，ZHANG B. Research on curriculum ideology of college physics—Take electromagnetic induction teaching as an example[J]. Physics and Engineering，2021，31(6)：124-128.（in Chinese）

[7] 梁敏，刘静，李照鑫，等. 大学物理创新教学中课程思政的有效融入——以“光学仪器的分辨本领”为例[J]. 物理通报，2022(1)：64-67.
LIANG M，LIU J，LI Z X，et al. The Effective Integration of Curriculum Ideological and Political Education in the Innovative Teaching of University Physics—Taking Resolving Power of Optical Instruments as an Example[J]. Physics Bulletin，2022(1)：64-67.（in Chinese）

[8] 李鹏，李志坚，马杰. 课程思政的关键在于“潜移默化”和“润物无声”——大学物理课程开展课程思政的实践与思考[J]. 物理与工程，2022，32(1)：184-189.
LI P，LI Z J，MA J. The key of curriculum ideology and politics lies in “imperceptible influence” and “moistening things silently”—The practice and thinking of carrying out curriculum thought and politics in college physics course[J]. Physics and Engineering，2022，32(1)：184-189.（in Chinese）

[9] 卢宏，杨友昌，高慧昀，等. 大学物理课程的多维度教学探索

与实践[J]. 贵州工程应用技术学院学报,2022,40(3):119-123.
LU H, YANG Y C, GAO H Y, et al. Exploration and Practice of Multi-dimensional Teaching of College Physics [J]. Journal of Guizhou University of Engineering, 2022, 40(3): 119-123. (in Chinese)

[10] 蒋道平. 关于科学精神内涵的多维解析——基于文化差异和历史线索视角[J]. 科普研究, 2017, 12(3): 8-18,104.
JIANG D P. On the Connotation of Scientific Spirit from a Multi-dimensional Perspective: Based on Cultural Differences and Historical Line[J]. Studies on Science Popularization, 2017, 12(3): 8-18, 104. (in Chinese)

[11] 中共中央办公厅 国务院办公厅印发《关于进一步弘扬科学家精神加强作风和学风建设的意见》[Z]. 中华人民共和国国务院公报, 2019, (18): 20-24.

[12] 刘永谋,伍铭伟. 自然辩证法课程要着重培养学生的科学精神[J]. 中国大学教学, 2022, 385(9): 28-32,55.
LIU Y M, WU M W. The course of dialectics of nature should focus on cultivating students' scientific spirit[J]. China University Teaching, 2022, 385(9): 28-32,55. (in Chinese)

[13] 郑美红,任思睿,任磊,等. 公民科学素质中的科学精神及其测量[J]. 科普研究, 2021, 16(2): 24-31, 108.
ZHENG M H, REN S R, REN L, et al. The Spirit of Civic Scientific Literacy and Its Measurement[J]. Studies on Science Popularization, 2021, 16(2): 24-31, 108. (in Chinese)

[14] 杜祥琬. "两弹一星"精神与科学家精神[J]. 科普研究, 2022, 17(6): 5-7.
DU X W. Two Bombs and One Satellite Spirit and the Spirit of Scientists[J]. Studies on Science Popularization, 2022, 17(6): 5-7. (in Chinese)

[15] 潜伟. 科学文化、科学精神与科学家精神[J]. 科学学研究, 2019, 37(1): 1-2.
QIAN W. Scientific Culture, Scientific Spirit and Scientist Spirit[J]. Studies in Science of Science, 2019, 37(1):1-2. (in Chinese)

[16] 熊万杰. 将中华传统文化思想融入大学物理教学之初探[J]. 物理与工程, 2009(2): 35-37, 43.
XIONG W J. A preliminary study on the integration of traditional Chinese cultural ideas into university physics teaching[J]. Physics and Engineering, 2009(2): 35-37, 43. (in Chinese)

[17] 周俊. 问卷数据分析-破解 SPSS 的六类分析思路[M]. 电子工业出版社,2017.

[18] 许瑞,何春娟,程志海,等. 面向人文社科类学生的物理类课程思政探索与实践[J]. 物理与工程, 2022, 32(5): 172-178.
XV R, HE C J, CHENG Z H, et al. Exploration and practice of physical curriculum ideology and politics for students majoring in humanities and social sciences[J]. Physics and Engineering, 2022, 32(5): 172-178. (in Chinese)

[19] 张春玲,刘玉斌,文小青,等. O-AMAS助力大学物理实验课程思政——以碰撞实验为例[J]. 物理实验, 2021, 41(3): 21-25, 31.
ZHANG C L, LIU Y B, WEN X Q, et al. Ideological and political education of college physics experiment assisted by O-AMAS effective teaching method—Taking collision experiment as an example[J]. Physics Experimentation, 2021, 41(3): 21-25, 31. (in Chinese)

[20] 何艳,邓磊,罗志娟,等. 挖掘霍尔效应中的科学精神与科学方法[J]. 物理与工程, 2021, 31(5): 64-67.
HE Y, DENG L, LOU Z J, et al. Exploring the scientific spirit and method in mining Hall effect[J]. Physics and Engineering, 2021, 31(5): 64-67. (in Chinese)

[21] 陈佳敏,熊永红. 融入思政元素的迈克尔孙干涉实验教学设计[J]. 物理通报, 2022(8): 77-80, 85.
CHEN J M, XIONG Y H. Teaching Design on Michelson Interference Experiment Integrating Ideological and Political Elements[J]. Physics Bulletin, 2022(8): 77-80, 85. (in Chinese)

[22] 樊代和,魏云,刘其军,等. 基于"课程思政"的大学物理实验课程教学案例探讨——以迈克耳孙干涉实验为例[J]. 物理与工程, 2022, 32(1): 175-178, 183.
FAN D H, WEI Y, LIU Q J, et al. Discussion on "Ideological and political Education in Curriculum" in College Physics Experiment Course—Taking Michelson interferometer experiment as an example[J]. Physics and Engineering, 2022, 32(1): 175-178,183. (in Chinese)

[23] 张映辉,陈宝玖,殷燕. 结合物理实验讲授唯物辩证法的3个典型案例[J]. 物理实验, 2020, 40(3): 27-30.
ZHANG Y H, CHEN B J, YIN Y. Three typical cases of teaching materialistic dialectics in combination with physics experiments[J]. Physics Experimentation, 2020, 40(3): 27-30. (in Chinese)

[24] 汪亚平,赵懂叶,宁长春. 密立根油滴实验中引入物理学史的教学实践[J]. 物理通报, 2021(8): 145-150.
WANG Y P, ZHAO D Y, NING C C. Teaching practice of introducing the history of physics in the Milligan oil drop experiment[J]. Physics Bulletin, 2021(8): 145-150. (in Chinese)

[25] 陈征. 诗词中也有物理 意境里蕴藏思维[J]. 中国科技教育, 2022(10): 24-27.
CHEN Z. There are also physical artistic conception in poetry that contains thinking[J]. China Science & Technology Education, 2022(10): 24-27. (in Chinese)

对巧克力相变迟滞现象的理论解释
——朗道-德冯谢亚理论以及铁电相变理论

李昕玥[1] 王梓烨[1] 秦亦沙[1] 李家驹[1] 方爱平[1] 田蓬勃[1] 冯 俊[1] 蒋臣威[1] 张修兴[2] 王小力[1]
([1] 西安交通大学物理学院，陕西 西安 710049；[2]渭南师范学院物理与电气工程学院，陕西 渭南 714099)

摘 要 巧克力作为生活中常见的事物，其储存方法一直是食品科学界研究的重要课题，而由相变产生的巧克力凝固和融化等现象对巧克力的储存产生了决定性的影响；但由于巧克力的成分复杂且晶体结构多变，目前只在生活中实现了控制巧克力保持良好性状的储存，而鲜少有研究分析其背后存在的相变机理。研究中首先基于朗道-德冯谢亚理论，使用序参量描述了影响相变的相关因素，初步解释了巧克力相变当中存在的迟滞现象；而后进行了相关实验，提出了一种对朗道理论的修正来解释实验现象；最后，通过研究巧克力的主要成分可可脂晶体的铁电相变，对德冯谢亚理论中未作出解释的势垒产生做出了阐述。

关键词 巧克力相变；朗道二级相变理论；铁电物理

THEORETICAL EXPLANATION FOR THE HYSTERESIS PHENOMENON OF CHOCOLATE PHASE TRANSITION
—LANDAU DE VONSEIA THEORY AND FERROELECTRIC PHASE TRANSITION THEORY

LI Xinyue[1] WANG Ziye[1] QIN Yisha[1] Li Jiaju[1] FANG Aiping[1] TIAN Pengbo[1] FENG Jun[1]
JIANG Chenwei[1] ZHANG Xiuxing[2] WANG Xiao-li[1]
([1] School of Physics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049;
[2]School of Physics and Electrical Engineering, Weinan Normal University, Weinan, Shaanxi 714099)

Abstract As a common thing in life, the storage method of chocolate has always been an important subject of research in food science. The phenomenon of chocolate solidification and melting caused by phase change has a decisive impact on the storage of chocolate; However, due to the complex composition and variable crystal structure of chocolate, it is currently only achieved in daily life to control the storage of chocolate to maintain good properties, and there is little research to analyze the phase transition mechanism behind it. Firstly, based on the Landau de Vonseia theory, the relevant factors affecting phase transition were described using order parameters, and the hysteresis phenomenon in chocolate phase transition was preliminarily explained; Subsequently, relevant experiments were conducted and a modification to Landau's theory was proposed to explain the experimental phenomenon; Finally, by studying

收稿日期：2023-05-25
基金项目：2021年度高等学校热学课程教学研究项目(JZW-21-RX-06)；渭南师范学院教育科学研究项目(2020JYKX021)。
通讯作者：方爱平，女，教授，主要从事物理教学科研工作，研究方向为量子光学、电磁模拟计算，apfang@xjtu.edu.cn。
引文格式：李昕玥，王梓烨，秦亦沙，等. 对巧克力相变迟滞现象的理论解释——朗道-德冯谢亚理论以及铁电相变理论[J]. 物理与工程，2023，33(4)：60-65.
Cite this article：LI X Y, WANG Z Y, QIN Y S, et al. Theoretical explanation for the hysteresis phenomenon of chocolate phase transition—Landau de Vonseia theory and ferroelectric phase transition theory[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(4): 60-65. (in Chinese)

the ferroelectric phase transition of cocoa butter crystal, the main component of chocolate, the generation of potential barrier that has not been explained in De Vonseyer's theory is expounded.

Key words the phase transition of chocalate; Landau second order phase transition theory; ferroelectricity physics

自然界中的物质存在不同的状态,在特定条件下,物质的这种状态会发生改变。物理学中,相变理论可以对该现象做一定研究。目前物理学界普遍认为,相是指"没有外力作用下,物理、化学性质完全相同且成分完全相同的均匀物质的聚集态",而相变被定义为"外界条件变化时,从一个相转变为另一个相的过程"。[1] 对于较为简单的气液、固液、固气相变,可以利用物态方程与实验测量结果,得到此物质的 p-V 图和 p-T 图进行研究。它们都属于一级相变,相变前后有摩尔体积与摩尔熵的突变,伴随着潜热的吸收和释放。如果相变前后物质化学势的一阶偏导数相等,二阶偏导数不等,则这种相变称为二级相变,此时摩尔体积与摩尔熵不会改变,但压缩系数、热膨胀系数和热容会发生突变,例如液体与液晶的转变、物质铁磁性的转变。巧克力是生活中很常见的食品,一定温度下固态的巧克力会熔化成液体,而当温度再次降低至凝固点时,巧克力会继续保持液态。这种迟滞现象与铁磁相变中的迟滞行为类似,可以利用朗道-德冯谢亚理论(Landau-Devonshire theory)尝试对此展开研究。

1 对象与方法

1.1 基本模型

1.1.1 巧克力成分分析

巧克力的成分为可可脂(即从巧克力中分离出来的纯油脂),可可粉,糖,乳化剂;而可可脂的主要组成是甘三酯。对天然的可可脂,其结晶状态有从Ⅰ~Ⅵ六种晶型[2],熔点依次为 17.3℃、23.3℃、25.5℃、27.5℃、33.8℃、36.3℃,可可脂中的各种甘油三酯具有相似的碳链长度,但在饱和度上存在较大差异。因此,可可脂表现出复杂的结晶行为,可以形成结构不同的晶体网络。但是通过相变晶体动力学这一角度来分析有些过于繁琐,因此我们选取朗道二级相变理论来解释迟滞行为。

1.1.2 朗道二级相变理论

根据朗道二级相变理论[3],热力学函数的对称性即为晶体结构的对称性。用序参量 η 来表征物体的有序度:高温相系统无序,拥有高对称性,$\eta=0$;低温相有序,发生对称性破缺,$\eta=1$。将自由能密度函数通过 η 展开,并保留偶次项,可以得到自由能密度函数和序参量与温度的关系[4],见图 1。

$$g(\eta,T)=g_0+A\eta^2+D\eta^4+F\eta^6 \tag{1}$$

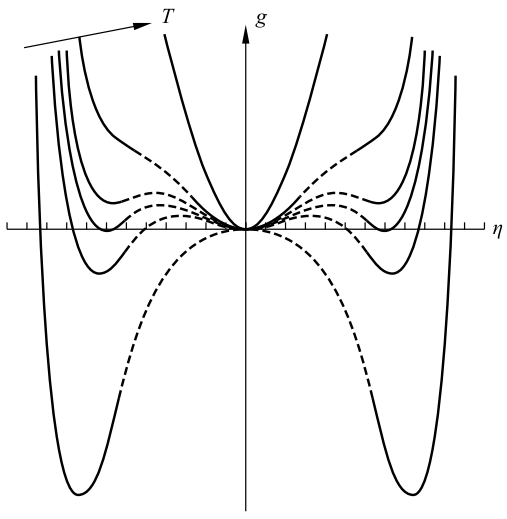


图 1 自由能与序参量的函数图[4]

考虑在温度 T 大于相变温度 T_c 时,自由能密度函数在 $\eta=0$ 处取得最小值,故有 $A=B(T-T_c)$。将其代入上式并加入共轭项,有[5]

$$g(\eta,T)=g_0+B(T-T_c)\eta^2+D\eta^4+F\eta^6-H\eta \tag{2}$$

根据稳态平衡条件 $(\partial g/\partial\eta)_{P,T}=0$,得

$$0=2B(T-T_c)\eta+4D\eta^3+6F\eta^5-H \tag{3}$$

变换上边方程的形式,可以得到稳态温度的表达式:

$$T=\frac{H}{2B}\frac{1}{\eta}-\frac{2D}{B}\eta^2-\frac{3F}{B}\eta^4+T_c \tag{4}$$

他们的关系如图 2 所示。

观察自由能函数曲线可以发现,当两个极小值之间存在势垒时,迟滞现象存在。因此若 T 的范围在两个点之间,两个点的位置分别满足

$$\left(\frac{\partial g}{\partial\eta}\right)_{P,T}=0,\quad \left(\frac{\partial^2 g}{\partial\eta^2}\right)_{P,T}<0 \tag{5}$$

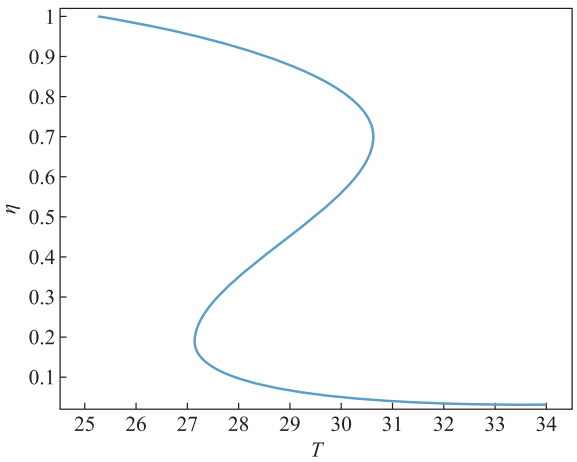


图2 T-η曲线

则巧克力可以固液共存。

1.1.3 序参量的选取

序参量与可可脂晶体的分布有关。当晶体呈现长程有序时，原子会因排列的规律性强化晶体的稳定性，形变所受到的阻力大；而当巧克力熔化，晶体处于短程有序时，形变的阻力小。序参量与巧克力的形变大小成负相关。因此我们考虑一种简单模型，将巧克力序参量视为与所受应力形变程度的二次方成反比。考虑将一颗小球放置在巧克力表面，当巧克力处于熔化状态时，小球受重力下落，小球下落的深度和底部凹陷的面积可以反应巧克力的形变程度，有[4]：

$$\eta=\frac{k}{R^2} \tag{6}$$

将该式代入式(4)可以通过实验数据计算出方程的系数，确定巧克力固液共存的范围。

2 结果

2.1 实验探究

2.1.1 研究回顾

我们对Landau-Devonshire理论做了简单的介绍，即系统的自由能可以表示为温度和序参量的函数：

$$g(\eta,T)=g_0+B(T-T_c)\eta^2+D\eta^4+F\eta^6-H\eta$$

通过实验我们观察到了巧克力相变的不同状态，得到了定性的实验数据：凝固过程的熔点较融化过程低了5℃左右，巧克力的迟滞现象明显。

2.1.2 实验进展

之前的实验使用牙签搅拌来判断巧克力的凝固情况并不准确不能够定量描述巧克力的相变情况，并不能给出有关序参量的定量数据。

所以我们这次将一块德芙巧克力熔化在烧杯中，使其平铺在烧杯底，在冰箱内冷藏至完全凝固(见图3和图4)。将小烧杯放在水浴锅中，将水浴锅初始温度设置在20℃。以1℃为步长，直至巧克力完全融化(40℃)。使用小球轻放于巧克力的表面，记录其在不同温度下的最大下沉直径。将完全融化的巧克力从40℃开始，以−1℃为步长，同理记录巧克力的凝固情况。



图3 实验选用玻璃珠

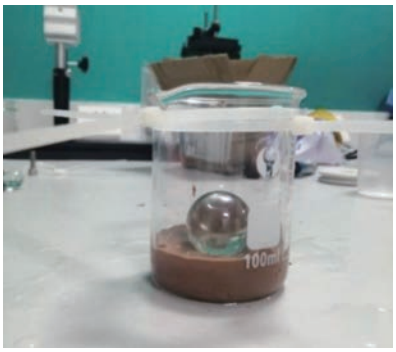


图4 实验装置

实验器材：巧克力、温度计、水浴锅，烧杯，测温枪，不同材料体积小球等。

序参量的确定离不开小球的合理选取，选用不同质量材质体积的小球放置在不同融化情况下的巧克力上对比实验现象，选取最优小球。最终选取如图3所示的小球。最终得到实验数据如图5和图6所示。

2.2 模型修正

朗道二级相变理论：

$$g(\eta,T)=g_0+B(T-T_c)\eta^2+D\eta^4 \tag{7}$$

在上文所述的整个热力学相变的系统当中，

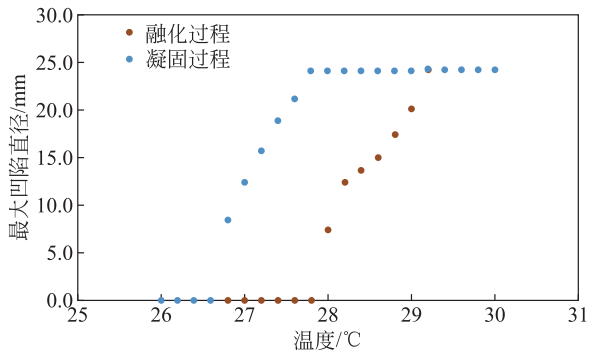


图 5　玻璃珠最大凹陷直径与温度的关系

应当加入弹性相关的参考因素，此时序参量会与弹性应变产生耦合。因此，在自由能展开式中要加入两项，分别代表弹性应变部分以及二者耦合部分。即有：

$$g(\eta,T)=g_0+B(T-T_c)\eta^2+D\eta^4+C\eta^2\varepsilon+K\frac{\varepsilon^2}{2} \tag{8}$$

其中，C 是相应的耦合系数，K 则是适当的弹性系数，K 在 T_c 附近随 T 的变化在此忽略不计。

为了确定所使用的序参量和耦合、弹性系数之间的关系，考虑此耦合系统不受外力的条件是：

$$\frac{\partial g(T,\eta,\varepsilon)}{\partial\varepsilon}=0 \tag{9}$$

即有：

$$\varepsilon=-\frac{C\eta^2}{K} \tag{10}$$

其中，C'是相应的耦合系数，K 则是适当的弹性系数。代回刚才的式子得到：

$$g(\eta,T)=g_0+B(T-T_c)\eta^2+D'\eta^4 \tag{11}$$

其中，

$$D'=D-\frac{C}{2K} \tag{12}$$

只要 $D'>0$，$B>0$（朗道理论要求如此），$K>0$（弹性常数自然为正），以及 $n>4$，上式即能说明在应变与序参量相耦合后出现相变的缘由和现象。由：

$$\left(\frac{\partial g}{\partial\eta}\right)_{P,T}=0,\left(\frac{\partial^2 g}{\partial\eta^2}\right)_{P,T}>0 \tag{13}$$

得到：

$$B(T-T_C)m\eta^{m-1}+Dn\eta^{n-1}-\frac{2C^2}{K}\eta^3=0 \tag{14}$$

当 $T=T_c$ 即有：

$$g(\eta,T)=g_0+D\eta^6+\frac{C^2}{2K}\eta^4 \tag{15}$$

MATLAB 绘图得到：

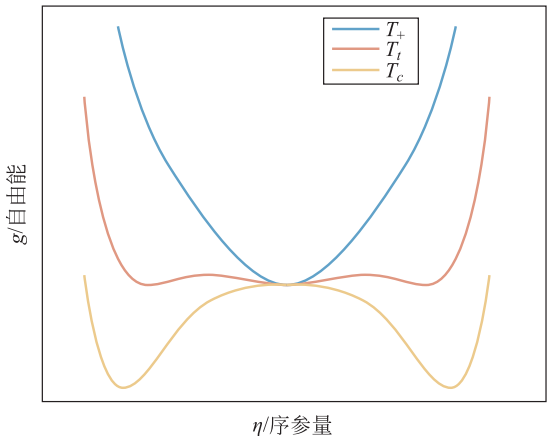


图 6　不同温度下自由能与序参量关系

使用德冯谢亚理论分析表明：$T>T_+$，无序项位于高温项，为稳定项；$T<T_c$，有序项位于低温项，为稳定项。而在 $T_+\sim T_t$ 之间，无序项为稳定项，有序项为亚稳定项。当 $T=T_t$ 时，在 $\eta=0$ 和 $\eta=C^2/\sqrt{6DK}$ 时，$g(T,\eta)$有两个同水平极小值。T 略小于 T_t 时，发生 $\eta=0$ 到 $\eta=C^2/\sqrt{6DK}$ 的相变，此时需要越过一个势垒，即证明了在此条件下朗道理论依然成立。

2.3　铁电相变

对称性改变是相变的一个十分显著的特征。在很多情况下，相所处的温度即代表了其所具有的稳定性。一些对称元素在高温相稳定存在，在低温相则会消失，这称为对称破缺。一个很具有代表性的例子是，钛酸钡晶体在温度高于 120℃时为立方晶系，包含 48 个对称元素，在 120～5℃之间为四方晶系，此时只存在 8 个对称元素。顺电铁电相交使钛酸钡晶体减少了 40 个对称元素。[5]

原子位置的改变会导致晶体的有序性和对称性发生改变。对称破缺就是晶体相对于对称性好，稳定性强的相发生了位置的变化，同时变得更加有序。钛酸钡晶体在 120℃以上时，正氧八面体中心是钛原子。发生铁电相变时，晶体中的原子沿晶胞轴的发生位置的改变，氧八面体趋向于扁平，且原子偏离中心，晶体对称性变差。此外，不同原子之间也会出现相对位移，这会导致晶胞中

电荷分布不均匀，从而产生极化。以上这些表明，相变导致的对称性变化实际上是由原子的相对运动导致的，这同时也解释了序参量的出现。

经典的德冯谢亚理论可以很好地对上文铁电相变的相关现象做出解释，并将弹性应变及其与序参量的耦合纳入到自由能方程当中。不过，作为平衡态热力学理论，德冯谢亚理论依然有很多不足。本文所探讨的迟滞现象是不可逆过程；虽然 德冯谢亚理论能够给出迟滞温度变化的最大范围，但却不能解释迟滞现象产生的具体原因。因此，本文下面尝试从不可逆过程的角度进行讨论，并得出更具有说服力的结果。

德冯谢亚理论在解释铁电相变的迟滞现象时，提出了居里温度 T_c 附近分布着很多接近平衡态的非平衡态，二者之间存在势垒从而导致了迟滞现象。下面本文将尝试分析平衡态和非平衡态之间势垒的产生原因。

巧克力的主要成分是可可脂或粉，糖和乳化剂；而可可脂的主要成分是三甘油酯。影响巧克力相变相关性质的主要成分是可可脂[7]。

经过对比一堆各式各样的巧克力配料表，从基本都共有且含量显著的成分里，我们分离出以下几种，作为我们巧克力的近似组成，分别为：代可可脂（Cocoa Butter）、可可块（Cocoa Mass）、卵磷脂（Lecithin）。接着，通过单独研究每一种成分，发现这里代可可脂对巧克力的融化起了决定性作用。即是说，代可可脂含量低的巧克力，比如黑巧克力，化得慢[8]。

图 7 和图 8 为巧克力（代可可脂）的相图和晶型[9]（纵轴是温度，横轴是固化时间），可以看到，随着温度的降低，巧克力由于其中所含的主要成分三甘油酯的种类并不唯一且物理性质也不尽相同，展现出了多种不一样的晶型。最初的 γ 晶型存在的时间很短。当可可脂全部变为为透明液态，再将其冷却到 20℃左右，就会出现另一种熔点约在 21～24℃的 α 晶型，呈针状且稳定性很差，会快速变成熔点约在 27～29℃的 β′ 晶型，稳定性得到提高。如果可可脂温度恒定在 20℃，那么其会慢慢转化成熔点在 34～35℃的 β 晶型，拥有最强的稳定性。

上文所提到的不可逆过程始终接近平衡态，由此以热力学第一定律作为前提。在系统处于机械自由的情况下，有：

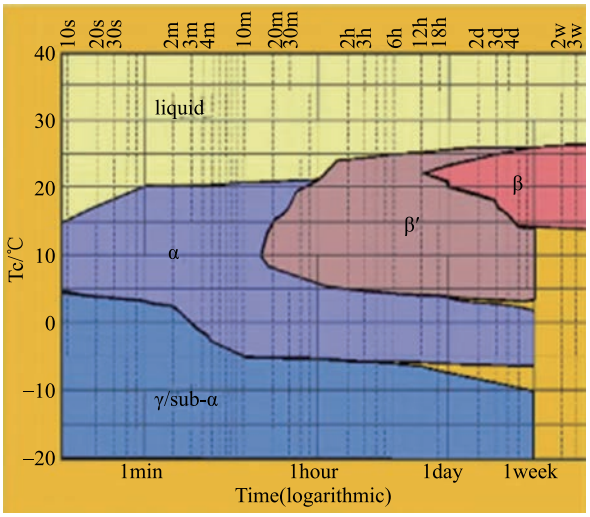


图 7 可可脂的相图[8]

可可脂晶型	熔点范围/℃
γ	17~19
α	21~24
β′	27~29
β	34~35

图 8 可可脂的晶型[8]

$$Tds = du - E \cdot dD - \mu dn \tag{16}$$

两边对时间 t 求偏导，有

$$T\frac{\partial s}{\partial t} = \frac{\partial u}{\partial t} - E \cdot \frac{\partial D}{\partial t} - \mu \frac{\partial n}{\partial t} \tag{17}$$

定义 J_u，J_P，J_n 分别为内能、电极化强度和流体流量对时间的导数。可以写作：

$$\frac{\partial s}{\partial t} = \frac{1}{T}\left[\frac{\partial u}{\partial t} - E \cdot \frac{\partial D}{\partial t} - \mu \frac{\partial n}{\partial t}\right] = -\frac{1}{T}\nabla \cdot J_u - \frac{E}{T} \cdot J_P + \frac{\mu}{T}\nabla \cdot J_n \tag{18}$$

由于有：

$$E = -\nabla\varphi \tag{19}$$

可得到：

$$\frac{\partial s}{\partial t} = \frac{1}{T}[\nabla \cdot J_p + \nabla \cdot (\varphi J_p) + \nabla \cdot (\mu J_n)] - \frac{E}{T} \cdot J_P + \frac{\mu}{T}\nabla \cdot J_n \tag{20}$$

化简得到：

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \nabla \cdot J_s = \sigma_s \tag{21}$$

即为局域熵平衡方程。

由于铁电相变不会改变原子数密度，整个系

统可以很好地维持晶体结构，故物质流密度应恒等于0。则有：

$$\sigma_s = -\frac{1}{T^2} J_P \cdot \nabla T + J_P \cdot \left(-\frac{\varphi}{T^2}\nabla T + \frac{1}{T}\nabla\varphi\right) \tag{22}$$

考虑最简单的球对称体系，假设系统被放置在均匀介质里，系统的温度分布 $T(r)$ 便仅仅与 r 有关，因此有

$$\nabla T = \nabla T(r) = \frac{\partial T}{\partial r} e_r \tag{23}$$

取吸收热量时 ∇T 背离球心，J_P 指向球心，此时 $\sigma_s > 0$ 符合理论(见图9)。

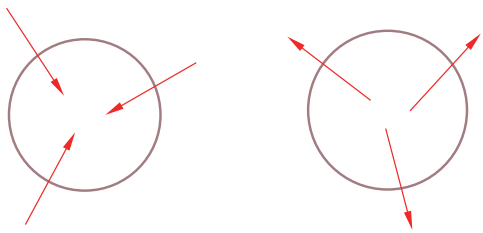


图9 温度变化时密度矢量的方向示意图

考虑简单的情况，电势为一常量，则有：

$$E = -\nabla\varphi = 0$$

$$\sigma_s = -\frac{1}{T^2} J_P \cdot \nabla T + J_P \cdot -\frac{\varphi}{T^2}\nabla T \tag{24}$$

为了满足 $\sigma_s > 0$，$J_p \cdot -\frac{\varphi}{T^2}\nabla T$ 恒大于零，根据最小熵原理取最小值。由于

$$J_P = \frac{\partial D}{\partial t} \tag{25}$$

体系中各点 ∇T 方向是变化的，因此 J_P 方向也不同。

由于温度在整个系统当中并非均匀分布，且温度的改变最先体现在系统的表面，所以相变现象也会在表面最先开始出现。$J_P = \partial D/\partial t$ 在 Tc 处趋于无穷，可得 $\nabla T \to 0$。

由于表面温度不可能向相反方向变化，在 $\nabla T \to 0$ 时，内部温度变化速率十分快，此时系统需要与外界进行快速的热量交换，这体现为系统表面的温度要显著地高于或者低于居里温度，这样才可以使相变在整个系统当中发生。

3 讨论

本文在理论方面，从晶体理论解释巧克力的相变过程，根据朗道-德冯谢亚理论推导了巧克力的自由能和序参量的关系，解释巧克力迟滞现象的机理；推导出巧克力迟滞理论上的温度范围的表达式；扩充了朗道理论的适用范围，提出了耦合应变的理论修正；讨论了铁电相变中德冯谢亚理论“势垒”的产生原因。

在实验方面，初步测量巧克力的熔化凝固特性，得到巧克力状态和温度的变化关系，验证了迟滞现象；用玻璃球在小球表面的凹陷直径来定量的测量巧克力凝固程度，得到序参量的大小，进一步验证理论。

本文依然具有可以提高的部分：对于耦合应变之后的朗道理论并没有进行实际验证，应该进行多组实验并将结果与理论进行对比，验证其适用范围；若能提纯巧克力，对其主要成分进行结构研究，可以从铁电相变的角度定量的描述迟滞现象的产生，而不仅仅是定性解释。

参 考 文 献

[1] 白玲. 基于范德瓦尔斯理论的气液相变的 SPH 数值模拟研究[D]. 天津大学，2014.

[2] 华聘聘. 可可脂的同质多晶型体的转变[J]. 江南大学学报，1988(3)：116-125.
Hua Pinpin. Transformation of homogeneous polymorph of cocoa butter[J]. Journal of Jiangnan University，1988(3)：116-125. (in Chinese)

[3] 朗道. 统计物理学[M]. 北京：高等教育出版社，2008.

[4] 宫秀敏. 相变理论基础及应用[M]. 武汉：武汉理工大学出版社，2004.

[5] RUILONG R，QUNFENG L，SIHUA L，et al. Hysteresis in the phase transition of chocolate[J]. European Journal of Physics，2016(37)：014003.

[6] 张晓云. $BaTiO_3$ 基陶瓷的异价离子掺杂及其介电性能研究[D]. 西华大学，2019，4(1)：45-49.

[7] 唐海珊. 低热量巧克力制品的研究进展[J]. 中国油脂，2017，42(10)：149-153，156.
TANG H S，LI Z Z，XIAO X S. Research progress on low calorie chocolate products[J]. Chinese Journal of Fats and Fats，2017，42(10)：149-153+156. (in Chinese)

[8] ROWAT A C，HOLLAR K A，STONE H A，et al. The science of chocolate：interactive activities on phase transitions，emulsification，and nucleation[J]. Journal of Chemical Education，2010，88(1)：29-33.

[9] LOISEL C，et al. Dynamic crystallization of dark chocolate as affected by temperature and lipid additives[J]. Journal of Food Science，1998，63(1)：73-79.

基于OBE教学理念的大学物理实验线上线下混合式教学实践

刘　婷[1,2]　蒲贤洁[1,2]　徐玮婧[1,2]　郑雪丽[1,2]　杨东侠[1,2]　杨骏骏[1,2]　张选梅[1,2]
（重庆大学[1]物理学院；[2]物理实验国家级实验教学示范中心，重庆　401331）

摘　要　近年来，线上线下混合式教学模式逐步兴起，但该模式未用数据充分分析学生的学情，为改善这一不足，教改组基于OBE教学理念，结合课堂派在线课堂管理平台，挑选线上部分及线下建设教育资源，获得学生学情，反向设计线下教学环节，建设基于OBE教学理念，从学情出发的大学物理实验线上线下混合式教学模式，满足学生核心需求的同时调动学生兴趣，提升教学质量。通过教学实践及学生期末笔试成绩表明，该教学模式能精准服务教学目标，有利于学生深入理解实验原理，灵活运用所学知识，有助于逐步提升学生实践、创新能力，提高教学质量。

关键词　OBE教学理念；大学物理实验；学情；创新能力

THE ONLINE-OFFLINE COMBINED TEACHING EXPLORATION ON THE OBE ORIENTED COURSE OF COLLEGE PHYSICS EXPERIMENT

LIU Ting[1,2]　PU Xianjie[1,2]　XU Weijing[1,2]　ZHENG Xueli[1,2]　YANG Dongxia[1,2]
YANG Junjun[1,2]　ZHANG Xuanmei[1,2]
([1] School of Physics; [2] National Experimental Teaching Demonstration Center of College Physicsl Labs, Chongqing University, Chongqing 401331)

Abstract　The online and offline hybrid teaching mode has gradually emerged in recent years but without fully analyze the knowledge structure of students using the data. To improve this shortage, the teaching reform group selects online and offline education resources to obtain students' knowledge structure based on the OBE concept and in combination with the KETANGPAI online classroom management platform and reversely help teachers design the offline teaching scenarios. By teaching through this OBE oriented online and offline combined teaching mode, the crucial needs of students can be fulfilled while the learning interest mobilized and the teaching quality is improved. All the advantage mentioned above has be validated by the educational practice and the scores of students' final examination.

Key words　OBE concept; college physics experiment; knowledge structure; innovation ability

OBE(Outcome Based Education)教学理念起源于美国等国家的基础教学改革，是一种以结果为目标导向的教育，其结果是指学生完成课程学习后所获得的所有成果[1-3]，根据新课程所提倡的

收稿日期：2023-05-25
基金项目：重庆市高等教育教学改革研究项目(No. 213020、No. 223022)；重庆大学教学改革研究项目(No. 2020Y49)。
作者简介：刘婷，女，重庆大学物理学院实验师，主要从事大学物理实验教学工作，研究方向为物理实验教学，tingliu@cqu.edu.cn。
引文格式：刘婷，蒲贤洁，徐玮婧，等. 基于OBE教学理念的大学物理实验线上线下混合式教学实践[J]. 物理与工程，2023，33(4)：66-72.
Cite this article: LIU T, PU X J, XU W J, et al. The online-offline combined teaching exploration on the OBE oriented course of college physics experiment[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(4): 66-72. (in Chinese)

课程教学目标，其成果不仅包括课程所涉及的知识与技能，还包括获得知识与技能的过程与方法，以及情感、态度、价值观等[4]。OBE 教学理念的以结果为导向即以课程教学目标为导向，利用反向思维推导学生习得知识与技能的课程设计[5]，获得学习知识的方法所对应的教学活动，使结果与实际教学中的教学环节形成一一对应或一对多的关系，最终保证教学目标的达成。通过多年的教学实践，教改组将大学物理实验的教学目标定为：知识目标、能力目标、思政目标。知识目标即要求学生掌握理论误差及各实验项目的基本概念、实验原理、数据处理方法等基本知识；能力目标指培养学生分析实验数据、评估实验误差、解决实际问题的能力，以及探索、创新实验等高阶能力。思政目标指使学生养成科学思维习惯，润物无声地提升学生的社会责任感、历史使命感等。根据 OBE 教学理念，大学物理实验一线教师应该以教学目标为导向，设计教学环节，进行课堂教学实践。目前，已有研究者基于 OBE 教学理念进行大学物理实验的教学改革[6-10]，但还未形成较广泛的辐射示范作用。

1 线上线下混合式教学存在的问题

近年来，大学物理实验的一线教师在线上线下混合式教学模式方面已有不少的探索[11-14]，相应的线上教育资源也颇为丰富。线上线下混合式教学模式对教师的综合能力提出了更高的要求，也需要教师投入更多的精力，所以在进行线上线下混合式教学时存在部分教师将线上、线下教学简单组合、生搬硬套，机械运用线上平台及资源的现象，不考虑引用的线上资源是否与其学生的知识结构对应、各学校学生的学情是否相同，如部分教师利用线上资源，但不充分考虑其学校学生的学情，线下也不因学生的学情动态调整教学方案，简单地将其他学校的线上教育与自身学校传统的线下教学相结合；部分教师机械地将线上部分资源、传统课堂中的预习问题、操作视频等放置线上平台，不做统计分析，线下授课时，依然根据经验去判断学生的知识结构。这不仅徒劳地增加了教师和学生的任务量，教师对学生真实的知识结构及所学的掌握情况还是没有具体的认识，不便于因材施教，不能有效地提升课堂的教学质量。

2 基于 OBE 教学理念，从学情出发的线上线下混合式教学模式的实践

2.1 重构实验项目教学内容

设计大学物理实验不仅需要理论支撑，还需要与实际相联系，所涉及的内容多且可能复杂，教材所展示的内容不可能面面俱到，包含所有的知识点，所以学生要在短时间内较深入掌握实验内容有一定的困难。大学物理实验是面对全校理工科大一、大二学生开放，此时的学生所掌握的大学物理知识还不足以支撑学生较深入地学习大学物理实验，同时考虑到不同专业，不同层次学生的知识结构不同，此次教改补充了部分教材未展示的、对学生理解实验项目原理有帮助的内容，增添了部分实验项目测量内容，并对增改后的实验项目内容进行分层次划分，为设计可动态调整的教学方案提供内容支撑。实验项目内容主要划分为基础、中级、高级三个层次。

（1）基础。基础层次对应实验项目的最简单知识、测量内容，对学生的知识结构要求不高，物理知识薄弱的学生也能掌握该部分实验内容。这部分内容主要包括实验项目的基本概念、简单的实验原理及实验操作，是学生进入下一层次的基础，同时能增强学生深入实验的信心。

（2）中级。中级层次对应实验项目的中等难度知识、测量内容，是学生在学习或完成了基础层次实验内容后的进阶内容。学生需要运用基础层次的知识内容，对要解决的实际问题进行思考，并找出合适的解决方案才能完成这部分内容，能锻炼学生解决实际问题的能力，并在一定程度上提高学生的探索、创新能力。大部分学生认真思考后能完成这部分内容，小部分学生需要在教师的帮助下完成。

（3）高级。高级层次对应的实验项目内容的难度比中级层次的稍大，可以是实验项目中重要公式的理论推导，也可以是其他的，与中级层次实验内容相联系的更进一步的实验测量。这部分内容进一步提高了实验的挑战度，对学生的能力要求较高，仅为少部分优秀学生提供进步需求渠道，可进一步提高学生解决实际问题的能力以及创新能力。

2.2 构建线上教学资源

为了不过大增加教师的任务量，可以集中教师的精力搞教学，目前大学物理实验中心精心建设了数字化教材（见图1(a)）、课前测试题库（见图1(b)）、课后测试题库（见图1(c)）、微视频（见图1(d)）等教学资源供所有实验教师使用。数字化教材中大学物理实验的实验项目题目旁边配置了二维码，扫二维码即可观看实验操作视频，方便学生预习时熟悉实验仪器；课前测试题库是学生适用且能体现学生已有知识结构的习题测试库，其中的知识结构包括学生预习实验所重构的知识结构；课后测试题库主要涉及所有实验项目的60%左右的基础知识点、重难点内容；微视频是实验中心教师合力建设的十六次课程对应的讲解基础知识的理论视频及介绍实验仪器的操作视频。这些教学资源是根据近几年教师的经验、学生的反馈，有针对性建设的，相比传统提问，教师通过现有测试可更快更准确掌握学生的学情；相比其他传统方式预习（看教材，查文献、资料预习），学生通过这些教学资源预习针对性更强，可提升学生的预习效率。



图1 构建线上教学资源

(a) 数字化教材；(b) 课前测试题库；(c) 课后测试题库；(d) 微视频

2.3 线上教学培训平台

2012年重庆大学成立了教师教学发展中心，该中心定位于学术性服务型组织，围绕国家教育发展传略与学校教育发展需求，以“促进学校的教学卓越与创新”作为根本使命，是重庆大学教师开展线上线下混合式教学模式的强大后盾，为教师们提供了各类在线培训课程，便于教师提升在线教学能力，弄清混合式教学模式的内涵，避免出现生搬硬套线上平台等问题，见图2。另外重庆大学大学物理实验中心在教研活动中分享课堂派教学实践经验，进一步为教师们熟悉课堂派，开展混合式教学提供支持。



图2 混合式教学培训课程

2.4 学情分析

课堂派是集直播、课堂管理、师生互动、资源管理等一体的，以互联网移动终端为载体的在线管理平台，主要包括课程教学（包括互动课件、测试、资料、话题、互动答题等功能）、学情分析等功能。通过课堂派建立班级，课前发布针对性的测试、微视频、补充的关键知识、线上挑选的部分资源等，利用自动改题、统计等辅助工具，可在一定程度上基于数据获得学生知识结构、学习能力分析，摸清学生学情。

2.4.1 学生知识结构分析

大学物理实验实验项目涵盖力、热、光、电内容，相互独立的性质强于相互联系的性质，各个实验项目所涉及的原理、知识点不同，所以每次实验项目均需分析学生已有的相关内容的知识结构。下课当天在课堂派对应班级里发布下节课的实验项目课前测试、微视频、补充的关键知识、针对性的线上资源等，要求学生在规定时间内完成相关内容的学习，并在课前前一天完成课前测试。教师根据学生学习微视频、课前测试的得分率等来分析学生本身已存在的知识结构，并基于此数据获取学生关键性比较薄弱的环节、欠缺的地方。

2.4.2 学生学习能力分析

教师将在线下教学实践环节中获取学生学习能力分析，课前教师首先通过课堂派编辑好可在线测评的实时互动测试题（实时互动测试题为教师分析学生已有知识结构后，以教学目标为导向所设计的，或为实验项目的重难点知识），在线下教学实践环节中适时利用课堂派的实时互动测试题在线测试学生学习知识的实际情况，通过实时

互动测试的测试数据掌握线下教学环节教学效果，掌握学生理解相关原理、重难点的程度以及实验操作情况，在较大范围内把握学生学习实验项目相关内容的学习能力。该方法与课堂中的提问、互动相比，好处在于有数据支撑，能更全面地掌握学生的实际情况。

2.5 构建基于 OBE 教学理念，从学情出发的线上线下混合式教学模式

本次教学模式的总体方案如图 3 所示。

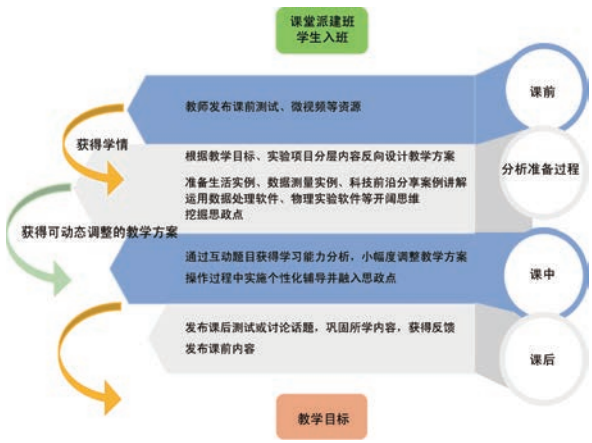


图 3 教学模式总体方案

2.5.1 基于 OBE 教学理念、学生知识结构设计教学方案

课前教师通过学生知识结构分析获取学生薄弱的环节、欠缺的地方后，教师首先补充学生薄弱、对理解实验项目重难点起关键性作用且学生欠缺的知识内容，再根据教学目标中的知识目标、能力目标、思政目标及学生知识结构分析数据，结合实验项目内容的不同层次反向设计可动态调整的教学方案。通常情况下，所有学生均需完成实验项目的基础、中级层次实验内容，基础层次实验内容对应培养学生的知识目标或初步的能力目标，中级层次实验内容对应培养学生的能力目标，高级层次实验内容是继续培养学生能力目标的加强内容，是为学有余力的同学准备的。为完成教学目标，教师根据学生薄弱、欠缺的地方及学生知识结构分析数据继续大致判断学生在掌握基础、中级、高级层次实验内容哪些内容会容易出问题、在完成教学目标的哪些地方会比较困难，在设计教学方案时着重强调这些内容，并准备多种手段或方案解决此类问题，比如结合生活实例、数据测量实例、科技前沿分享等进行讲解，运用数据处理软件、物理实验软件如 phyphox 等开阔思维，准备、设计有余量、可小幅度动态调整的教学方案，为线下教学实践临场小幅度调节教学方案提供素材。再根据实验项目的不同挖掘一些思政点，巧妙融入设计的教学环节，为思政目标服务。

2.5.2 基于学生学习能力调整教学方案

教师先选定课前设计的某种教学方案，课中按照此教学方案先逐步进行线下教学，选择在一些实验项目重难点处或学生容易出错的地方运用课堂派中的实时互动获取学生实际的学习情况，学生的学习能力情况，方便让学生熟悉、把握重难点的同时，可根据学生所掌握的知识情况及学习能力快速判断当前选择的教学素材是否能支撑学生达成教学目标中的知识目标以及能力目标，如果学生反馈的情况不能达到教学目标，教师应增加补充素材再次进行讲解，如果课前学生的知识结构分析环节做得不错，补充或强调的素材应该在课前设计的教学方案当中，从而在线下教学环节中可以基于学生的学习能力小幅度动态调整教学方案，以保证培养学生达到教学目标中的知识目标以及能力目标。

在线下操作环节，多观察学生的操作情况，并在学生需要时进行个性化辅导，提高学生解决问题的能力，激发学生的探索欲、创新能力；适时融入与课程特色相关的思政点，培养学生良好的科学思维，激发学生社会责任感、历史使命感，为达成教学目标中的能力目标及思政目标服务。再根据实际情况鼓励学有余力的学生完成高级层次的实验内容，进一步强化、锻炼自身的解决问题的能力以及创新等能力。最终形成基于 OBE 教学理念，从学情出发的大学物理实验线上线下混合式教学模式。

2.5.3 巩固所学内容，获得反馈

课后再次通过课堂派发布针对实验项目的测试，在测试发布时选择试题打乱顺序选项，防止学生相互抄袭选择题答案，并要求学生在规定时间内完成测试；或发布、鼓励学生发布相应实验项目的讨论话题，激励学生积极参与到讨论当中去，巩固学生所学内容的同时教师由测试结果数据、讨论实际情况进一步获得学生学习能力分析，为下一轮教学实践持续性改进提供数据支撑。

2.6 教学展示——以理论误差和电子示波器的使用为例

在整个教学实践中，大部分学生在课前预习、

课前测试环节中都按质按量完成，并积极踊跃参与课中实时互动、课后测试或话题讨论环节，令教学实践活动生动有趣。

以第一次理论误差课为例，在理论误差课结束后，教师在课堂派平台建立班级，将班级加课码发送到学生群，学生入班后，为后续熟悉课堂派并检验理论误差课学习效果，教师鼓励学生参与到课堂派平台中的话题讨论当中去，大部分同学都与课堂中发言相反，积极主动地参与到了学生自己发布的话题讨论中去。一位同学关于测量与误差提出为什么精密度是评价随机误差的，准确度是反映系统误差的？有几位同学给出了解释和自己的看法，但多数同学对精密度和准确度的定义及解释还不到位，且对温度和气压是造成系统误差还是随机误差也有疑惑，见图4。而教师在课堂中是详细解释过精密度和准确度的概念及如何区分这两者，也讲解过在不同的条件下，温度可能主要给实验带来系统误差，也可能主要给实验带来随机误差。还有一位同学关于有效数字提出疑问，121＊1.0＋21应该等于多少？有几位同学都评论指出这位同学的答案错误，还有两位同学直接给出了自己的答案，见图4。教师从这两个话题

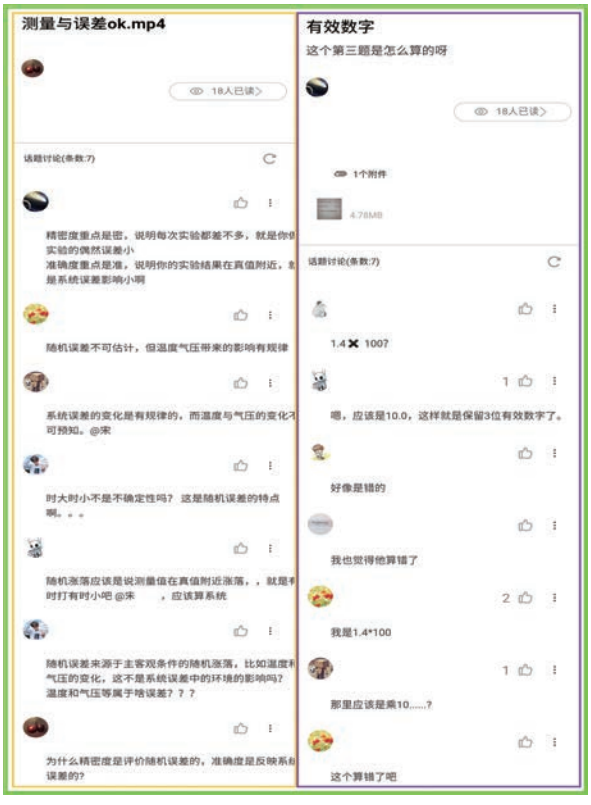


图4 话题讨论展示

中可以得出整体上学生在有效数字的运算上掌握得比较好，但在理解系统误差和随机误差上还存在困难，教师分析可能是因为第一节理论误差课程内容较多，也可能是因为学生初步接触系统、随机误差，在之后的课堂教学实践中教师可结合实验项目实例进行讲解，加深学生印象，逐步提高学生在系统误差及随机误差方面的理解能力，为学生打好大学物理实验的理论基础。

以电子示波器的使用为例，这个实验项目的知识目标为掌握电子示波器的测量功能、电子示波器的主要组成部分、示波管的结构；能力目标为熟练掌握示波器扫描与整步装置、放大与衰减装置的原理、利用示波器测量电压、频率、位相差的使用方法；价值目标为培养学生在实验过程中的坚韧、追求真理的科学精神。实验项目内容的基础层次为掌握本次实验项目的基本知识并利用示波器测量待测电压的电压值、待测频率的频率大小；中级层次为在熟练掌握使用示波器测量电压、频率的基础上，利用示波器、移相器测量移相器两端的电压与流过的电流的位相差；高级层次为让学生利用示波器去测量弗兰克赫兹实验或鼓励学有余力的学生结合大学物理实验探索新实验。课前教师在课堂派平台发布课前测试、微视频等资源，并设置学生完成课前测试及课前预习的时间，然后利用课前测试结果数据(见图5(a))及每题的得分率(由于篇幅问题只放了一个例子，见图5(b))，掌握学生课前知识结构和预习情况，有三分



图5 课前测试及小题得分率展示

之一的学生获得满分，其他同学主要失分于示波器的放大与衰减装置的理解上。说明所有学生学习该实验不存在知识结构缺失，通过预习大部分学生已经达成教学目标中的知识目标，只是部分学生对实验本身的内容预习还不到位，或对应知识的理解能力不够，未达到教学目标中的能力目标。为让所有的学生能完成教学目标，在备课设计教学方案时，把示波器扫描与整步装置、放大与衰减装置的讲解作为重点，并制作动画辅助解释示波器的扫描与整步装置的原理，准备待测电压、频率被放大与衰减装置放大或缩小的实例解释放大与衰减装置的原理，同时准备多余实例辅助学生举一反三。根据学生学情再次判断学生在掌握能力目标中的位相差时会有缺陷，备课时把位相差作为重点，并结合物理中信号波形以周期的方式变化，波形循环一周对应的相位为 360°的实例、定标实例辅助学生理解。线下教学实践过程中在位相差处运用了课堂派的实时互动进行检测，见图 6，数据结果显示这部分内容学生掌握得不够扎实，教师可根据充分的备课内容小幅度动态调整教学方案，以保证学生达成能力目标。



图 6　课中实时互动展示

示波器的调节面板按键较多，在进行实验操作时，教师可根据实际情况从原理上对问题学生进行个性化辅导，不少同学容易在相位差的测定环节出现问题，原因是不了解示波器输入端的外壳是接地的，教师借此情况让学生体会出错、理解、做对的过程，逐步培养学生实践、创新能力的同时培养其坚韧、追求真理的科学精神，逐步达到教学的能力及思政目标。再根据学生的完成情况鼓励学有余力的学生完成高级层次内容，进一步锻炼学生解决问题及创新的能力。

2.7　期末考试成绩及实践情况分析

为了从客观角度考评基于 OBE 教学理念，从学情出发的大学物理实验线上线下混合式教学在提升教学质量方面的成效，此类教改班和普通班在期末统一参加考试，期末考试题型依次为选择题、判断题、设计题、计算题。表 1 为 2 个教改班和全校普通班每种题型的平均得分率和总得分率的情况（1、2 班为教改班，3 班为普通班），其中选择题、判断题、计算题主要考查学生对实验项目原理的理解、对基础知识的掌握、对知识运用的能力，而在选择题、判断题、计算题上 2 个教改班相对普通班平均得分率分别高出 0.04、0.02、0.07，说明此类教改在完成教学目标中的知识目标有一定的积极作用；设计题主要考查学生解决实际问题的能力和创新能力，而教改班的得分率较普通班高出 0.04，说明该教改对提高学生解决实际问题及创新能力有一定的积极作用，能较好地完成教学目标中的能力目标；2 个教改班的总得分率为 0.54、0.55，而全校普通班的总得分率为 0.05，且最高分出自这两个教改班，说明本次教改能在一定程度上提高教学质量。

表 1　教改班和全校普通班考试得分率

班级	选择	判断	设计	计算	总分
1	0.50	0.58	0.47	0.68	0.54
2	0.47	0.60	0.47	0.78	0.55
3	0.45	0.57	0.43	0.66	0.50

在教学实践过程中设计了前测、互动、后测或讨论环节，通过这些环节发现学生逐步深入理解了实验原理，在实验操作过程中引入了与专业特色相关的思政元素，这些思政元素在教学实践中润物无声地影响了学生，从学生线下的实验操作能力逐步提高的情况来看在一定程度上培养了学生刻苦钻研等科学精神，服务了本课程教学目标中的思政目标，后续教学实践中还将加强思政方面的探索。

3　结语

教学资源丰富的今天，线上线下混合式教学仍存在生搬硬套、机械运用的现象。本文借助课堂派在线课堂管理平台精准获取学生学情，基于 OBE 教学理念，根据教学目标反向设计教学环节，建设基于 OBE 教学理念，从学情出发的大学物理实验线上线下混合式教学模式。实践及期末

考试表明，此教学模式有利于学生深度理解实验原理、灵活运用所学知识，并逐步提高实践、创新能力，精准服务教学目标，提高教学质量，为进一步的探索大学物理实验教学改革提供参考。

参 考 文 献

[1] 苗永平，代坤，孙二平，等. 基于OBE教学理念的大学物理实验初探[J]. 大学物理实验，2020，33(2)：133-136.
MIAO Y P，DAI K，SUN E P，et al. The primary exploration of physical experiment teaching under out-coming based education[J]. Physical Experiment of College，2020，33(2)：133-136.(in Chinese)

[2] 李妙娟. 基于OBE教学理念下的教学质量保障体系构建研究[J]. 佳木斯职业学院学报，2021，37(6)：137-138.
LI M J. Research on the construction of teaching quality assurance system based on out-coming based education concept[J]. Journal of Jiamusi Vocational Institute，2021，37(6)：137-138.(in Chinese)

[3] 朱思宁. OBE教学理念下双语教学效果提升策略研究[J]. 传播力研究，2020，4(18)：172-172.
ZHU S N. Research on strategies for improving bilingual teaching effectiveness under out-coming based education concept[J]. Research on Transmission Competence，2020，4(18)：172-172.(in Chinese)

[4] 王道福. 新课程教学目标实效性研究[J]. 教学与管理：理论版，2011(6)：19-20.
WANG D F. Research on the effectiveness of teaching objectives in the new curriculum[J]. Journal of Teaching and Management：Theoretical version，2011(6)：19-20.(in Chinese)

[5] 杨淼，李静，高利，等. 基于OBE教学理念的药学分析化学教学改革与实践[J]. 中国高等医学教育，2022(5)：47-48，51.
YANG M，LI J，GAO L，et al. Teaching reform and practice of pharmaceutical analytical chemistry under out-coming based education concept[J]. China Higher Medical Education，2022(5)：47-48，51.(in Chinese)

[6] 武立华，刘志海，张杨，等. 基于OBE理念的大学物理实验教学体系探索[J]. 实验技术与管理，2018，35(10)：188-189，196.
WU L H，LIU Z H，ZHANG Y，et al. Exploration of university physics experimental teaching system based on OBE idea[J]. Experimental Technology and Management，2018，35(10)：188-189，196.(in Chinese)

[7] 刘利清，陈鹏，李永涛. 基于OBE理念下的大学物理实验教学改革的探究[J]. 大学物理实验，2018，31(6)：122-124.
LIU L Q，CHEN P，LI Y T. The exploration of educational reform of university physics experiment based on OBE concept[J]. Physical Experiment of College，2018，31(6)：122-124.(in Chinese)

[8] 刘利清，王利霞，鞠维，等. 基于OBE理念下的大学物理实验教学改革和试行方案[J]. 大学物理实验，2020，33(1)：126-128.
LIU L Q，WANG L X，JU W，et al. Educational reform and pilot program of university physics experiment based on OBE concept[J]. Physical Experiment of College，2020，33(1)：126-128.(in Chinese)

[9] 周红仙，王毅. 新工科背景下基于OBE的大学物理实验教学方法研究[J]. 大学物理实验，2020，33(5)：141-145.
ZHOU H X，WANG Y. Research on college physics experiment teaching based on OBE model for new engineering education construction[J]. Physical Experiment of College，2020，33(5)：141-145.(in Chinese)

[10] 李春红，王崇杰，孙中皋，等. 基于OBE理念的以学生发展为中心的实验教师教育改革[J]. 大学物理实验，2020，33(6)：131-134.
LI C H，WANG C J，SUN Z G，et al. Experimental teacher education reform centered on student development based on OBE concept[J]. Physical Experiment of College，2020，33(6)：131-134.(in Chinese)

[11] 欧阳建明，彭刚，何焰兰，等. 线上线下混合式大学物理实验教学设计——以示波器使用实验为例[J]. 物理实验，2020，40(4)：38-41.
OU Y J M，PENG G，HE Y L，et al. Experiment teaching with online and offline hybrid model—Taking the experiment of oscilloscope use as an example[J]. Physics Experimentation，2020，40(4)：38-41.(in Chinese)

[12] 唐艳妮，李雪琴，赵云芳，等. 疫情中的大学物理实验线上教学探索[J]. 物理实验，2020，40(5)：31-35.
TANG Y N，LI X Q，ZHAO Y F，et al. Exploration on online teaching of physics experiment in epidemic situation[J]. Physics Experimentation，2020，40(5)：31-35.(in Chinese)

[13] 其木格. 大学物理线上线下混合式教学探索与实践[J]. 大学物理，2022，41(10)：51-54.
QI M G. Exploration and practice of online and offline blended teaching of college physics[J]. College Physics，2022，41(10)：51-54.(in Chinese)

[14] 王军，王帆，沙金巧，等. 线上线下相结合的大学物理实验教学改革研究[J]. 物理与工程，2020，30(5)：26-31，36.
WANG J，WANG F，SHA J Q，et al. Research on the reform of college physics experiment teaching based on the combination of online and offline[J]. Physics and Engineering，2020，30(5)：26-31，36.(in Chinese)

■

测量误差、不确定度与真理的相对性
——实验教学的一个难点及课程思政

张映辉
（大连海事大学理学院，辽宁 大连 116026）

摘 要 课程思政离不开具体的教学内容，思政观点必须与课程内容有较强的相关性；大学阶段的课程思政既要有较强的政治性，又要有较高的层次性。本文将真理的相对性（及相关原理、观点）融入误差与不确定度教学，在帮助学生深入学习理解不确定度概念及应用的同时，进一步熟悉和理解唯物辩证法相关原理和观点，引导他们坚定政治信仰，强化投身科学事业探索未知的信心和决心，并试图以此作为理工学科课程思政建设视角、思路和方法的一次实践探索，供同行诸贤参考。

关键词 测量误差；不确定度；真值；近真值；真理的相对性；课程思政

ERROR OF MEASUREMENT, UNCERTAINTY, AND THE RELATIVITY OF TRUTH
—A DIFFICULT POINT OF EXPERIMENTAL TEACHING AND CURRICULUM IDEOLOGY

ZHANG Yinghui
(College of Science, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026)

Abstract Curriculum ideology should not be separated from the specific teaching content, and ideological viewpoints must have a strong correlation with the content of the course. The curriculum ideology in the university stage should not only have a strong political nature, but also have a higher level. In this paper, the relativity of truth (and related principles and views) is integrated into the teaching of error and uncertainty, While helping students to deeply understand the concept and application of uncertainty, they are further familiar with the relevant principles and views of materialist dialectics, guide them to strengthen their political belief, and strengthen their confidence and determination to devote themselves to scientific career to explore the unknown. This paper attempts to take it as a practical exploration of the perspective, thought and methods of the curriculum ideological construction of the science and technology for the reference of the peers.

Key words error of measurement; uncertainty; true value; near true value; the relativity of truth; curriculum ideology

---

收稿日期：2023-05-06
基金项目：2021教育部高等学校教学研究项目“贯彻‘三位一体’要求，提高实验教学育人效果研究（DWJZW202101db）”；2021年度辽宁省普通高等教育本科教学改革研究项目“结合物理教学传授辩证唯物主义世界观和方法论研究”（项目指南编号1-9）；大连海事大学2022年教师发展项目“打造符合‘三位一体’要求的优秀教学团队（JF2021Y15）”
作者简介：张映辉，女，教授，主要从事大学物理和大学物理实验教育教学工作，研究方向为凝聚态物理，yhzhang@dlmu.edu.cn。
引文格式：张映辉. 测量误差、不确定度与真理的相对性——实验教学的一个难点及课程思政[J]. 物理与工程，2023，33(4)：73-78.
Cite this article: ZHANG Y H. Error of measurement, uncertainty, and the relativity of truth—A difficult point of experimental teaching and curriculum ideology[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(4): 73-78. (in Chinese)

1 课程思政的目标、要求和努力方向

教育部《高等学校课程思政建设指导纲要》指出，要“深入挖掘各类课程和教学方式中蕴含的思想政治教育资源，让学生通过学习，掌握事物发展规律，通晓天下道理，丰富学识，增长见识，塑造品格，努力成为德智体美劳全面发展的社会主义建设者和接班人”[1]。理学、工学类课程“要在课程教学中把马克思主义立场观点方法的教育与科学精神的培养结合起来，提高学生正确认识问题、分析问题和解决问题的能力”“要注重科学思维方法的训练和科学伦理的教育，培养学生探索未知、追求真理、勇攀科学高峰的责任感和使命感”[1]。

如果通过“课程思政”，既能够强化“马克思主义立场观点方法的教育”与“科学精神的培养”，又能帮助学生对所授科学知识（包括理论、概念、观点、方法，下同）的理解，更好地实现知识体系建构，并从而“让学生通过学习，掌握事物发展规律，通晓天下道理”，岂不是更好？

是的，所谓的“将价值塑造、知识传授和能力培养三者融为一体”“寓价值观引导于知识传授和能力培养之中”，就是要通过对“课程”与“思政”的深入研究，找到教学内容与思政观点的相关性、融通点，通过巧妙设计和适时、精准、简洁、到位的讲解，实现“教书”与“育人”的相辅相成、相互促进、相得益彰。

也就是说，课程思政与一般教学目标的实现能否相互促进？答案是肯定的。只要我们找到“结合点”（相关性、融通点）和正确的“融入”方法。优质的、高水平的课程思政应该能够实现知识体系建构与政治觉悟提升的统一、“科学精神的培养”与正确“三观”确立的统一。

2 测量不确定度的评定和表示[2]是实验（误差理论）教学的一个难点

2.1 关于误差与不确定度

不确定度表示利用可获得的信息，表征赋予被测量量值分散性的非负参数[3]。

当报告物理量的测量结果时，应对测量结果的质量给出定量的说明，以便使用者能评价其可靠程度。从前，人们用“测量误差”来评定测量结果的准确程度。由于测量误差是一个理想化的概念，实际上难以准确定量。考虑测量误差在实际评定中存在难以克服的缺陷，1993年，国际标准化组织（ISO）、国际计量局（BIPM）等7个组织联合发布了《测量不确定度表示指南》。我国1999年制定《测量不确定度评定与表示》作为统一准则，作出了用不确定度对测量结果进行评定、表示和比较的规定。2017年，国家质量监督检验检疫总局、国家标准化管理委员会重新颁布了《测量不确定度评定和表示》（中华人民共和国国家标准：GB/T 27418—2017）[3]，对相关概念进行了重新定义，用“被测量的值”（或“量值”）替换原来（99版，下同）的“真值”，用“估计值”替换原来的“近真值（最佳值）”。

由于新“国标”尚未正式写入教学基本要求，“被测量的值”（或“量值”）、“估计值”等概念还没有进入日常教学。为便于叙述和理解，下面仍沿用原有的真值、近真值（最佳值）概念。

2.2 引入不确定度后，实验结论（测量结果）的表述

因篇幅所限，略去繁琐的理论推演和教学解析等内容，仅以大学物理实验教学中间接测量量测量结果的评定和表示为例简要说明。

间接测量量 N 的测量结果评定和表示的主要步骤[4]：

A. 按照直接测量量 x_i 测量结果评定和表示的步骤求出各直接测量量的测量结果 $\bar{x}_i \pm U_i$。

B. 求间接测量量的最佳值 $\overline{N}=f(\bar{x}_1,\bar{x}_2,\cdots,\bar{x}_n)$。

C. 用不确定度合成公式求出 N 的不确定度 $U=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\cdot U_i\right)^2}$ 或相对合成不确定度 $U_r=\frac{U}{\overline{N}}=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial \ln f}{\partial x_i}\cdot U_i\right)^2}$。

对于加减运算为主的函数，先求不确定度 U，再用 $U_r=\frac{U}{\overline{N}}$ 求 U_r 比较简便；而对以乘除运算为主的函数，先求出其相对不确定度 $U_r(N)$，再用 $U=\overline{N}U_r$ 求不确定度比较简便。

D. 最后写出测量结果

$$\begin{cases} N=(\overline{N}\pm U)(\text{单位}) \\ U_r=\frac{U}{\overline{N}}\times 100\% \end{cases}。$$

例1 已知测量金属丝电阻率的原理公式为：

$\rho=\pi D^2R/4L$。其中金属丝长度的测量结果为：$L\pm U_L=3.000\pm0.005$m，直径的测量结果为：$D\pm U_D=0.136\pm0.004$mm，用电桥测电阻的测量结果为：$R\pm U_R=105.5\pm0.1\Omega$。求：(1)电阻率$\rho$=？(2)推导出电阻率的相对合成不确定度公式$U_r(\rho)$，并计算出结果；(3)求电阻率的测量结果$\rho\pm U$=？[5]

解：(1) 电阻率测量最佳值为

$$\rho=\pi D^2R/4L$$
$$=3.142\times0.136^2\times10^{-6}\times105.5/(4\times3.000)$$
$$=5.11\times10^{-7}\Omega\text{m}$$

(2) 电阻率的相对不确定度为

$$U_r(\rho)=U/\rho$$
$$=\sqrt{\left(\frac{\partial\ln\rho}{\partial D}\right)^2U_D^2+\left(\frac{\partial\ln\rho}{\partial R}\right)^2U_R^2+\left(\frac{\partial\ln\rho}{\partial L}\right)^2U_L^2}$$
$$=\sqrt{4\left(\frac{U_D}{D}\right)^2+\left(\frac{U_R}{R}\right)^2+\left(\frac{U_L}{L}\right)^2}$$
$$=\sqrt{4\left(\frac{0.004}{0.136}\right)^2+\left(\frac{0.1}{105.5}\right)^2+\left(\frac{0.005}{3.000}\right)^2}$$
$$=5.9\times10^{-2}=6\%$$

(3) 不确定度为$U=\rho U_r(\rho)=5.11\times10^{-7}\times6\times10^{-2}=3\times10^{-8}\Omega m$

电阻率的测量结果为

$$\rho\pm U=(5.1\pm0.3)\times10^{-7}\Omega m$$

即，科学实验(测量)的结论(结果)应包含最佳值和不确定度两部分(在选定计量标准，即单位情况下)。

2.3 教学的难点在于不确定度概念的建立

对于大多数理工科学生来说，学习的难点不在于公式和计算有多么复杂，而在于概念的理解和建构。

从小学到高中，学生所受的教育和训练都是精准的、是非(对错)分明的。他们对“误差”的认识(即便在学习了误差理论之后)大多仍停留在直观层面(如仪器精度不够高、测量不够精细等)。在他们的思想体系中，理科的问题都是有确定标准答案的，“不确定”是不正常、另类和错误的。思维惯性使他们在心理上不重视对“不确定度”这一重要概念和意义的学习理解和应用。

另一方面，由于不确定度概念及其所展现的科学思想和方法与一般的误差理论相比，不仅非常新颖，而且更为深刻和精妙，教师讲起来也感到比较困难，在客观上也造成了学生学习和理解上的不深入、不到位。许多同学头脑中不确定度的概念比较模糊，满足于套用公式算出某个值，完成实验报告了事。这种情况若不能改变，将对后续的学习特别是科研(实验)工作产生非常不好的影响。

爱因斯坦说，解决一个问题的答案，往往并不在问题的同一维度，而是在更高的维度上[6]。从更高的层面挖掘真值、近真值、不确定度等概念的意义，帮助学生深入理解不确定度所展现的科学思想、科学方法，将使他们对科学实验在理论、方法，尤其是实验数据的分析、实验结果的评定与利用上有更为清楚、深刻的认识，同时也能坚定用实验(测量、数据采集、计算、分析等)方法探索未知世界的信心和决心。

3 唯物辩证法关于真理的相对性原理

3.1 相关概念、原理

1) 真理，是标志主观与客观相符合的哲学范畴，是对客观事物及其规律的正确反映[7]。

2) 真理的绝对性和相对性[8]。

真理的绝对性有两层含义：一是真理是客观存在的，是不依赖于人的意识的客观内容，真理与谬误有原则的界限，这是无条件的、绝对的。二是人类能够正确认识无限发展着的物质世界，认识每前进一步，都是对无限发展着的物质世界的接近，这也是绝对的、无条件的。在这个意义上，承认世界的可知性，也就是承认了绝对真理。

真理的相对性，是指人们在一定条件下对客观事物及其本质和发展规律的正确认识总是有限度的、不完善的。它也有两层含义：一是范围有限，从客观世界的整体来看，任何真理都只是对客观世界的某一阶段、某一部分的正确认识，有待扩展；二是深度有限，就特定事物而言，任何真理都只是对客观对象一定方面、一定层次和一定程度的正确认识，认识反映事物的深度是有限度的，或是近似性的。因而，认识有待深化，也就是说，任何真理都只能是主观对客观事物近似正确即相对正确的反映。

3) 真理发展规律

真理永远处在由相对向绝对的转化和发展中，亦即人们的认识能够随实践探索愈来愈接近客观实际(主客观统一)。

3.2 真理、真理的相对性与真值、近真值、不确定度的相关性

研究发现，真理、真理的相对性与真值、近真

值、不确定度具有很好的正相关性。其对应关系及相关观点如图1所示。

结合相关原理，应该明确：

A. 真理是客观存在的，肯定有一个真值；

B. 实验不能得到真值，只能得到（一定条件下的）近真值（最佳值）；

C. 为体现实验结果的科学性，用“近真值＋不确定度”表述测量（实验）结果；

D. 既要承认真值（真理）存在，又用“近真值＋不确定度”表述测量结果，表明实验（测量）结果是相对正确（近真）的，这体现（等于承认）了真理的相对性；

E. 不确定度正是这种相对性（近真程度）的表述。

近真值、不确定度等概念及其相互关系十分完美地展现了唯物辩证法关于真理的相对性原理，二者互为概括和例证，一并进行讲解，不仅有利于近真值、不确定度等概念的理解，而且能够帮助学生加深对唯物辩证法及其相关原理的学习和理解，有利于坚定政治信仰，强化科学的世界观和方法论。

4　教学设计

4.1　主要思政元素、教学（融入）方法与目标

A. 主要思政元素及其与课程内容的对应关系：

真理，真理的绝对性———真值

真理的相对性———近真值＋不确定度

真理发展规律———科研探索不断深入，越来越接近真值（真理）

B. 思政内容（融入）方法：将唯物辩证法关于真理的相对性原理（含相关概念、真理发展规律）融入教学。

C. 教学（思政）目标：

目标1：强化教学目标。引导学生从更高（哲学）层面理解不确定度概念，进而加深对整个教学内容（包括真值、近真值、不确定度及其相互关系和意义等）的理解和体系建构。同时，对学业、事业也将有所启迪（也可看作思政目标之一）。

目标2：帮助学生深入学习和理解真理的相对性原理和真理发展的规律，打牢辩证唯物主义思想基础，坚定马克思主义信仰，树立正确的科学观、实践观。

4.2　教学内容与学业目标、学业启迪

本课教学内容与学业目标、学业启迪如图2所示。

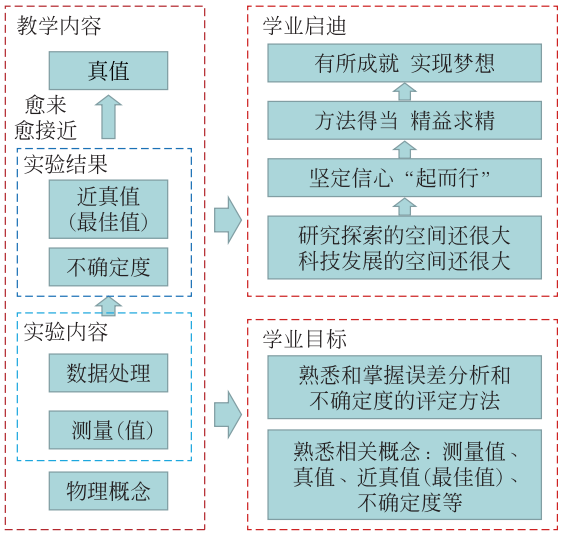


图2　教学内容与学业目标、学业启迪简图

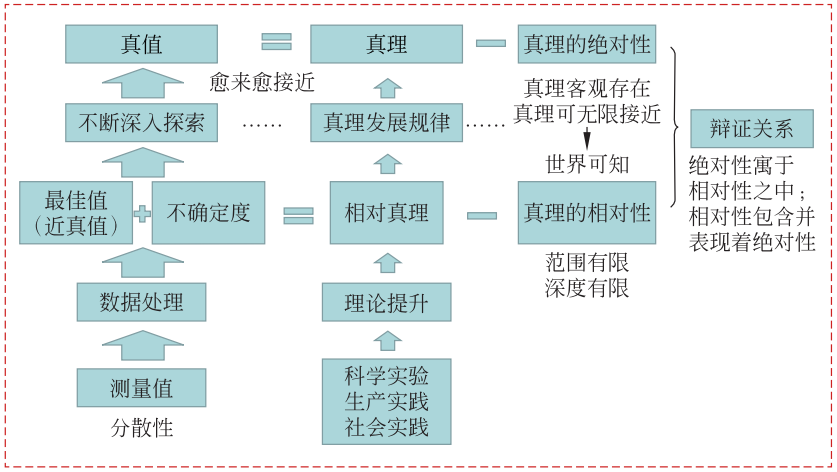


图1　真值（真理）与不确定度辩证关系图

传授知识，完成基本教学内容，并在学业上给学生以正确的引领和启迪，是教师的基本任务和职责。

应该承认，许多教师把“学业启迪”当作课程思政，也在情理之中。

4.3 教学内容、课程思政与育人（思政）目标

教学内容与课程思政逻辑关系如图 3 所示（教师掌握）。

教学中应该启发学生：

所谓的用“不确定度”表示“对被测量值不能确定的程度”，从本质上讲就是承认测量所得（直接或间接所得的值，下同）只是现有条件下“相对正确（准确）”的结果，即现有条件下的最佳值、近真值。

“近真值＋不确定度”即为现有条件下所能达到的“真理”，这个“真理”是相对的、可向前推进（发展）的——这就是真理的相对性。

随着科技进步（条件改善）和人类的不断探索（方法改进），测量所得一定会愈来愈接近真值（真理）——此即真理发展规律。

我们既要相信真理（真值）的存在，又要承认真理不是一成不变的，真理永远处在发展中。这正是我们进行科学研究，不断探索前行的意义和价值所在。

4.4 课程思政的主要内容（思政元素）与教学融入

教学中融入真理的相对性原理，引导学生树立正确“三观”的逻辑关系和教学内容（流程）如图 4 所示。

结合上图，启发学生（重复的观点可以略去）：

A. 关于真理的绝对性，应该有以下几点认识：

真理是客观存在的（测不准也是一种客观存在），否则，一切研究探索毫无意义。

真理是客观存在的（——世界观），因此，要坚定用科学研究探索未知的信心和决心（——价值观）。

世界是可知的（——世界观），人类的认知正不断向微观和深空拓展。

假如世界不可认知（——不可知论），那么，一切研究探索将毫无意义。不可知论显然已被人类文明成果所否定。

B. 真理的相对性告诉我们：

真理（在范围上）是有限的[8]，如牛顿力学只适用于低速宏观运动。

真理（在深度上）是有限的，实验只能得到近真值（现实条件下的最佳值），认识无终结，探索无止境。

不承认真理的有限性，将堕入绝对主义、教条主义、终结论。

真理是有限的，不确定度正是这种有限性的表述。因此，用“近真值＋不确定度”表述我们对客观世界（被测量值）的认识，是科学的现实选择。

真理是有限的，即真理永远处在发展中（——世界观），人类通过不断地探索前行可以越来越接

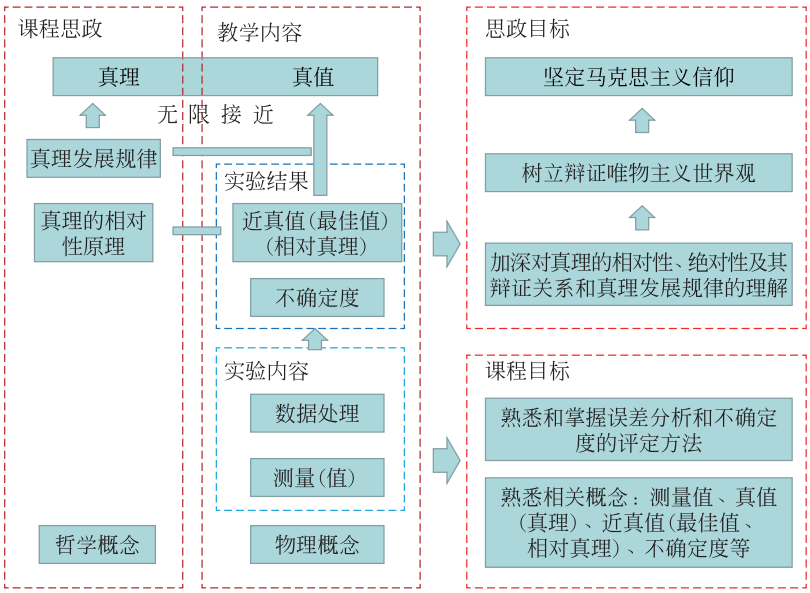


图 3 教学内容与课程思政逻辑关系图

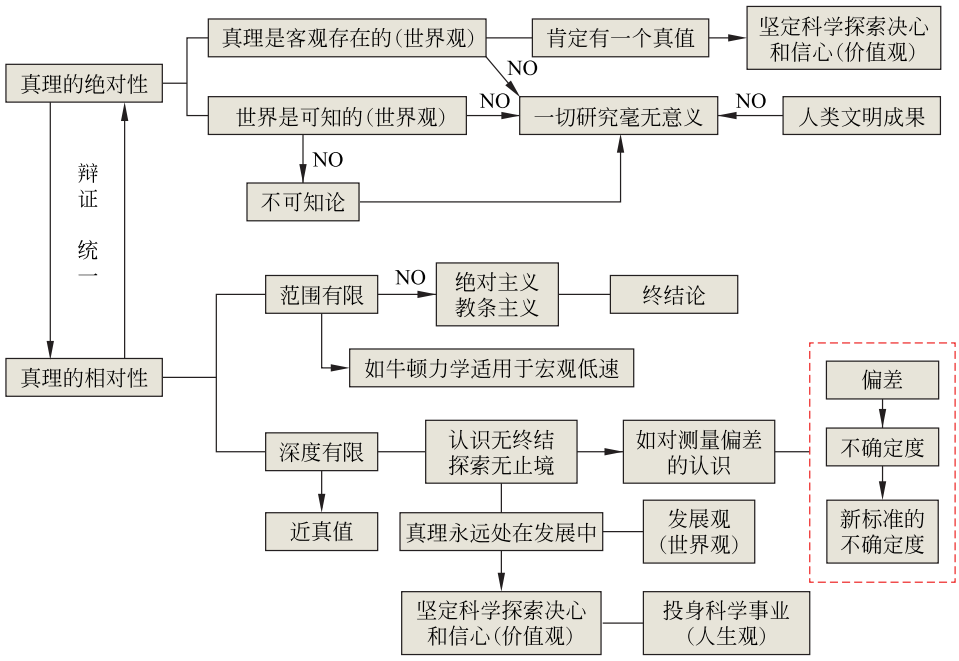


图4 不确定度、真理的相对性原理与“三观”教育流程

近客观真实(真值、真理)——真理发展规律。为此,更应坚定科学研究探索未知的信心和决心(——价值观)——同学们可以把科学实验探索未知作为职业选择和人生目标(——人生观)。

5 结语

总之,课程思政不是“课程”与“思政”的简单相加,而是要在教学中融入“马克思主义立场观点方法的教育”与“科学精神的培养”,“让学生通过学习,掌握事物发展规律,通晓天下道理”。

不确定度体现了辩证唯物主义关于真理的相对性原理。教学中融入这一原理,一方面,能够帮助学生从更高维度(哲学层面)学习理解真值、近真值、不确定度等概念,促进教学效果提升。另一方面,结合不确定度及相关概念、知识的学习和应用,能够帮助学生加深对关于“真理是客观存在的”、“世界是可知的”、同时“真理又是相对的、有限的(测量只能得到近真值)”、“真理永远处在发展中”等观点的认识,从而坚定政治信仰,有利于他们坚定投身科学事业的信心和决心,在学习和工作中踔厉前行,奋发有为。

参 考 文 献

[1] 教育部.高等学校课程思政建设指导纲要[EB/OL].http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-06/06/content_5517606.htm(2020-06-06)[2023-05-26].

[2] 教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会物理基础课程教学指导分委会.理工科类大学物理课程教学基本要求 理工科类大学物理实验课程教学基本要求(2010年版)[M].北京:高等教育出版社,2011:16.

[3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.中华人民共和国国家标准 测量不确定度评定和表示:GB/T 27418—2017[S].2017.

[4] 张映辉.大学物理实验学习指导书[M].2版.北京:高等教育出版社,2021:14.

[5] 张映辉.大学物理实验[M].2版.北京:机械工业出版社,2017:19-20.

[6] 李善友.第一性原理[M].人民邮电出版社,2021:扉页.

[7] 《马克思主义基本原理(2023年版)》编写组.马克思主义基本原理(2023年版)[M].北京:高等教育出版社,2023:91.

[8] 李秀林,王于,李淮春.辩证唯物主义和历史唯物主义原理[M].5版.北京:中国人民大学出版社,2021:296-298.

基于 Hirota 方法探求非零边界条件下 MNLS/DNLS 方程的孤子解

周国全　雒润嘉　齐　鎣
（武汉大学物理科学与技术学院，湖北 武汉　430072）

摘　要　Hirota 双线性导数变换处理非线性偏微分方程，是一种比反散射变换更为方便的直接方法。本文展示了 Hirota 双线性导数变换法应用于求解非线性可积方程的一般手续，以非零驻波边界条件下修正的非线性薛定谔（MNLS）方程为例，探求其孤子解；再通过简单的参数归零法直接得到导数非线性薛定谔（DNLS）方程在非零常数边界条件下的相应孤子解，亮/暗孤子解随时间和空间变量的演化也通过图像加以演示，所得孤子解与反散射方法得到的结果一致相符。

关键词　孤子；非线性方程；修正的非线性薛定谔方程；导数非线性薛定谔方程；Hirota 方法；Hirota 双

SOLITON SOLUTION OF MNLS/DNLS EQUATION WITH NONVANISHING BOUNDARY CONDITION BASED ON HIROTA METHOD

ZHOU Guoquan　LUO Runjia　QI Ying
（Department of Physics, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072）

Abstract　Hirota's bilinear derivative transformation is a direct method which is more convenient than the inverse scattering transform to deal with a nonlinear partial deferential equation. Based on Hirota's method, the soliton solutions of the modified nonlinear Schrödinger (MNLS) equation under standing wave boundary condition, are obtained; and by simple method of parameter vanishing, the corresponding soliton solutions of the derivative nonlinear Schrödinger (DNLS) equation under constant nonvanishing boundary condition, are gotten, which allows the existence of both bright and dark solitons. The evolution of bright/ dark-soliton solutions in time and space is demonstrated in figures. The results are consistent with what were obtained by the inverse scattering transform.

Key words　soliton; nonlinear equation; modified nonlinear Schrödinger equation; derivative nonlinear Schrödinger equation; Hirota method; Hirota's bilinear derivative transformation

自然界存在两类稳定的波动状态，一类稳定波动存在于线性且无色散的均匀媒质中，因为非线性效应和色散效应都会破坏波的稳定性。但是，当传波媒质的非线性效应与色散效应达到一种精致而稳定的平衡并相互抵消的时候，媒质中又会产生一种孤立、稳定的局域波动，称为孤立波

收稿日期：2023-05-28
作者简介：周国全，男，副教授，研究方向为非线性可积方程及孤子理论，电磁场理论，zgq@whu.edu.cn。
引文格式：周国全，雒润嘉，齐鎣. 基于 Hirota 方法探求非零边界条件下 MNLS/DNLS 方程的孤子解[J]. 物理与工程，2023，33(4)：79-84.
Cite this article：ZHOU G Q, LUO R J, QI Y. Soliton solution of MNLS/DNLS equation with nonvanishing boundary condition based on Hirota method[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(4): 79-84. (in Chinese)

(solitary wave),即第二类稳定传播的波动现象[1]。描述这类孤立、稳定且局域的波动现象在时空中的演化过程的偏微分方程,称为可积非线性微分方程。可积非线性方程既有非线性项,又有色散项,可以改写成一对关于时空变量的线性演化方程(所谓 Lax pair)的可积条件[1],也称为相容性条件(compatibility condition),或者零曲率条件(zero-curvature condition)。一些稳定的孤立波之所以被称为孤子(soliton),是因为它们的传播呈现一种经典的准粒子运动状态,其相互间的碰撞过程类似于弹性粒子之间的碰撞。孤子种类很多,诸如亮/暗孤子、呼吸子、高阶孤子、流氓波(rogue wave),并且各具不同的物理背景,比如光纤中传播的光孤子,等离子体中传播的阿尔芬孤波,QCD 的规范量子场微分方程的真空瞬子(instanton),等等。本文专注于讨论非线性光纤光学中的光孤子理论。

光孤子理论应用于光纤通信领域,十分重要,广受关注[1]。将在单模光纤中传播的皮秒或飞秒级超短脉冲激光波包函数记为 $u(x,t)$(正比于激光脉冲的电场分量),在考虑了自相位调制和自陡变效应以后,$u(x,t)$ 满足修正的非线性薛定谔(MNLS)方程[2]

$$i\partial_t u+\partial_x^2 u+i\partial_x(|u|^2u)+2\gamma|u|^2u=0 \tag{1}$$

其中含参数 γ 的项量化体现了电场引起的非线性克尔效应,注意实际上 x 是时间变量,而 t 是空间变量,(这是为了与其他领域的某些非线性模型拥有统一的微分方程,从而发展出统一的解决方案[1-3])。若将参数 γ 归零或进行类规范变换[3,4],MNLS 方程(1)可演变为导数非线性薛定谔(DNLS)方程

$$i\partial_t v+\partial_x^2 v+i\partial_x(|v|^2v)=0 \tag{2}$$

上述 DNLS 方程(2)中的 $v(x,t)$ 可用于描述等离子体中的阿尔芬孤波和一些铁磁/反铁磁介质中传播的弱非线性电磁波[5-8]。

探求非线性可积方程的各类孤子解的常见方法有反散射(inverse scattering)变换,Daboux 变换,Bäcklund 变换等间接方法,和 Hirota 双线性导数变换等直接方法。对于非零边界条件下 DNLS 方程的求解,使用 Bäcklund 变换法将会得到矩阵形式解,它并不适合直观地演示孤子的相互作用[9];而反散射变换法将会遇到黎曼面上的多值问题和发散的围道积分,迂回曲折,繁难费时。Hirota 方法更为直观简便,它结合摄动微扰技术,对方程的非零边界条件的预设更少,能够求解各类不同的孤子解。本文即采用 Hirota 双线性导数变换法求解 MNLS/DNLS 在非零特殊边界条件下的亮/暗孤子解。

在 MNLS 方程提出后不久,它在零边界条件下的孤子解已被学者们用反散射变换法求得[1,2]。文献[6]使用 Hirota 方法求得了 MNLS 方程在平面波背景下的特殊流氓波解。至于 DNLS 方程,文献[11-13,4,14-16]分别用不同方法求出了该方程在零/非零边界条件下的亮/暗单孤子或 N 孤子解,纯孤子/呼吸子或混合孤子解;文献[17]运用 Hirota 方法求得 DNLS 方程的特殊流氓波解和空间周期解。迄今未见有人尝试用 Hirota 方法探求非零边界条件下的 MNLS/DNLS 方程的亮/暗孤子解或呼吸子解。本文以 MNLS 方程为例,介绍了 Hirota 双线性导数变换的定义与性质,及其应用于非线性可积方程的一般手续与技巧;尝试并成功地求解了 MNLS 方程在驻波边界条件下的孤子解,并在其微扰参数 γ 趋近于零时,使该解退化为 DNLS 方程在常数边界条件下的亮/暗孤子解。最后我们还讨论了微扰强弱——参数 γ 的大小、背景波振幅对亮/暗孤子行为的影响。

1 Hirota 双线性导数变换

Hirota 最先引入双线性导数变换——即一个双 D 算符,用来处理一些偏微分方程[18,19],其定义为

$$\mathrm{D}_t^m\mathrm{D}_x^n f(x,t)\cdot g(x,t)=(\partial/\partial t-\partial/\partial t')^m\cdot(\partial/\partial x-\partial/\partial x')^n f(x,t)g(x',t')\big|_{t'=t,x'=x} \tag{3}$$

其中符号 $\cdot$ 代表 f、g 之间的有序乘积,当 m 或 n 为 1 时可省去上标,例如

$$D_x f\cdot g=f_x g-fg_x=-D_x g\cdot f \tag{4}$$

$$D_x^2 f\cdot g=f_{xx}g-2f_x g_x+fg_{xx}=D_x^2 g\cdot f \tag{5}$$

$$D_x^3 f\cdot g=f_{xxx}g-3f_{xx}g_x+3f_x g_{xx}-fg_{xxx}=-D_x^3 g\cdot f \tag{6}$$

易证 Hirota 双线性导数变换具有若干重要性质:

性质 1:

$$D_t^m D_x^n f \cdot g = (-1)^{m+n} D_t^m D_x^n g \cdot f \tag{7}$$

特别地，当 $m+n$ 为奇数时，

$$D_t^m D_x^n f \cdot f = -D_t^m D_x^n f \cdot f = 0 \tag{8}$$

性质 2：若 C 为常数，有

$$D_x^n C \cdot f = -\partial_x^n f \tag{9}$$

性质 3：设 $\eta_j = \omega_j t + k_j x + \eta_j^0$，其中 $j=1,2$，ω_j 和 k_j 均为复常数，则有

$$D_t^m D_x^n e^{\eta_1} \cdot e^{\eta_2} = (\omega_1 - \omega_2)^m (k_1 - k_2)^n e^{\eta_1+\eta_2} \tag{10}$$

推论，具有相同系数的线性指数函数的双线性导数为零，即当 $\omega_1 = \omega_2$ 或 $k_1 = k_2$ 时

$$D_t^m D_x^n e^{\eta_1} \cdot e^{\eta_2} = 0 \tag{11}$$

为应用上述 D 算符的便利的性质，**将方程转化为仅含双线性 D 算符而不含其他普通偏导算符的形式，即双线性形式，分离变量后将其拆解为双线性方程组。**

2 MNLS/DNLS 方程的双线性导数形式及其孤子解

参考 MNLS/DNLS 方程的孤子解所具有的典型形式[4,6-8,12,14,16]

$$u = g\bar{f}/f^2 \tag{12}$$

本文将上式作为 MNLS 方程未知解函数的变换形式。据定义(3)，可以给出如下两个常用的双线性导数变换公式

$$(f/g)_x = (D_x f \cdot g)/g^2 \tag{13}$$

$$(f/g)_{xx} = (D_x^2 f \cdot g)/g^2 - f(D_x^2 g \cdot g)/g^3 \tag{14}$$

运用以上公式，可得

$$u_t = \frac{D_t g \cdot f}{f^2}\frac{f}{} + \frac{g}{f}\frac{D_t \bar{f} \cdot f}{f^2} \tag{15}$$

$$u_{xx} = \left(\frac{D_x^2 g \cdot f}{f^2} - \frac{g}{f}\frac{D_x^2 f \cdot f}{f^2}\right)\frac{f}{} + 2\frac{D_x g \cdot f}{f^2}\frac{D_x \bar{f} \cdot f}{f^2} + \frac{g}{f}\left(\frac{D_x^2 \bar{f} \cdot f}{f^2} - \frac{f}{}\frac{D_x^2 f \cdot f}{f^2}\right) \tag{16}$$

$$\partial_x(|u|^2 u) = 2\frac{g}{f}\frac{D_x g \cdot f}{f^2} + \frac{g^2}{f^2}\frac{D_x \bar{g} \cdot f}{f^2} \tag{17}$$

将上述各式代入 MNLS 方程，可得

$$i\frac{f\bar{f}}{f^4} D_t g \cdot f + i\frac{fg}{f^4} D_t \bar{f} \cdot f + \frac{\bar{f}f}{f^4} D_x^2 g \cdot f - \frac{2g\bar{f}}{f^4} D_x^2 f \cdot f + \frac{2}{f^4}(D_x g \cdot f)(D_x \bar{f} \cdot f) + \frac{gf}{f^4} D_x^2 \bar{f} \cdot f + i2\frac{g\bar{g}}{f^4} D_x g \cdot f + i\frac{g^2}{f^4} D_x \bar{g} \cdot f + 2\gamma\frac{g^2\bar{g}}{f^3} = 0 \tag{18}$$

将上式两边分别乘以 f^4，合并化简得仅含 D 算符的双线性导数形式

$$f\bar{f}(iD_t + D_x^2) g \cdot f + 2\gamma g^2 \bar{g} f - fg(iD_t + D_x^2) f \cdot \bar{f} + f^{-2}\{D_x f^3 \cdot [g(2D_x f \cdot \bar{f} - ig\bar{g})]\} = 0 \tag{19}$$

不同于零边界条件的处理方法[15]，为得到非零边界条件下的解，引入参数 λ，将上式(19)拆分为如下双线性方程组：

$$(iD_t + D_x^2 - \lambda) g \cdot f = 0 \tag{20}$$

$$(iD_t + D_x^2 - \lambda) f \cdot \bar{f} = 2\gamma g\bar{g} \tag{21}$$

$$D_x f \cdot \bar{f} = (i/2) g\bar{g} \tag{22}$$

其中 λ 的取值取决于函数 f、g 的函数形式、γ 的取值及其正负，以及 $u(x,t)$ 在无穷远处的边界条件。先将函数 f、g 展开为摄动微扰参数 ε 的无穷级数

$$f = \sum_{i=0}^{\infty} \varepsilon^i f^{(i)}, \quad g = \sum_{i=0}^{\infty} \varepsilon^i g^{(i)} \tag{23}$$

代入式(20)～式(22)后，再将变换后的方程展开为摄动微扰参数 ε 的无穷级数，合并整理，比较方程两边参数 ε^n 的同幂项，得到

$$(iD_t + D_x^2 - \lambda)\left(\sum_{j=0}^{n} g^{(j)} \cdot f^{(n-j)}\right) = 0 \tag{24}$$

$$(iD_t + D_x^2 - \lambda + 4i\gamma D_x)\left(\sum_{j=0}^{n} f^{(j)} \cdot \overline{f^{(n-j)}}\right) = 0 \tag{25}$$

$$D_x\left(\sum_{j=0}^{n} f^{(j)} \cdot \overline{f^{(n-j)}}\right) = (i/2)\left(\sum_{j=0}^{n} g^{(j)} \cdot \overline{g^{(n-j)}}\right) \tag{26}$$

其中式(25)由式(21)，式(22)导出。n 可取 0，1，2，…，∞，即有无穷组这样的方程。

现在设定 $f^{(i)} = 0, i \geqslant 2$，$g^{(i)} = 0, i \geqslant 2$。这是使得式(23)中仅剩对应于单孤子解的相关级数项，同时满足双线性方程，即单孤子截断的充分不

必要条件。换言之，Hirota方法选择了单孤子解[14]。涉及到式(24)～式(26)中$\varepsilon=0,1,2$三组共9个方程：

$$(iD_t+D_x^2-\lambda+4i\gamma D_x)f^{(0)}\cdot\overline{f^{(0)}}=0 \tag{27}$$

$$(iD_t+D_x^2-\lambda+4i\gamma D_x)\cdot(f^{(0)}\cdot\overline{f^{(1)}}+f^{(1)}\cdot\overline{f^{(0)}})=0 \tag{28}$$

$$(iD_t+D_x^2-\lambda+4i\gamma D_x)f^{(1)}\cdot\overline{f^{(1)}}=0 \tag{29}$$

$$(iD_t+D_x^2-\lambda)g^{(0)}\cdot f^{(0)}=0 \tag{30}$$

$$(iD_t+D_x^2-\lambda)(g^{(0)}\cdot f^{(1)}+g^{(1)}\cdot f^{(0)})=0 \tag{31}$$

$$(iD_t+D_x^2-\lambda)g^{(1)}\cdot f^{(1)}=0 \tag{32}$$

$$(i/2)g^{(0)}\overline{g^{(0)}}=D_x f^{(0)}\cdot\overline{f^{(0)}} \tag{33}$$

$$(i/2)(g^{(0)}\overline{g^{(1)}}+g^{(1)}\overline{g^{(0)}})=D_x(f^{(0)}\cdot\overline{f^{(1)}}+f^{(1)}\cdot\overline{f^{(0)}}) \tag{34}$$

$$(i/2)g^{(1)}\overline{g^{(1)}}=D_x f^{(1)}\cdot\overline{f^{(1)}} \tag{35}$$

考虑到Hirota双线性导数变化法探求非线性可积方程的孤子解的关键手段是将未知函数f,g展开为线性指数函数的级数，不失一般性，将f,g的各阶微扰项写作线性指数函数。对于形如$h(x,t)=e^{i\phi_1}e^{\phi_2}$，$\phi_j=\omega_j t+k_j x+\phi_j^{(0)}$ $(j=1,2)$的指数函数，从双线性导数方程

$$\sum_{m,n}D_t^m D_x^n h\cdot\bar{h}=\sum_{m,n}(2i\omega_1)^m(2ik_1)^n=0 \tag{36}$$

仅能得到函数$h(x,t)$的辐角的变量前的参数ω_1、k_1的相关方程。式(27)正是这种形式，即无法从中得到$f^{(0)}$的辐角中的常数项和模的信息，不妨将它们吸收纳入$g^{(0)}$的表达式中。鉴于式(12)的u表达式中含有f，g之商，此举不失一般性，即假设$f^{(0)}=e^{i\xi_0}$，$\xi_0=\omega_0 t+k_0 x$。$f^{(0)}$，$f^{(1)}$分别满足的式(27)、式(29)完全一致，且形如式(36)，即$f^{(0)}$与$f^{(1)}$的辐角满足同一微分方程，可以假设$f^{(0)}$，$f^{(1)}$的辐角仅相差一常数：

$$f^{(1)}=e^{\omega_0 t+k_0 x+\xi_1^{(0)}}e^{\eta}=f^{(0)}e^{i\xi_1^{(0)}}e^{\eta},\quad \eta(x,t)=\tau t+\kappa x+\eta^{(0)} \tag{37}$$

其中所有常参数$\omega_0,k_0,\xi_1^{(0)},\tau,\kappa,\eta^{(0)}$均为实数。

将$g^{(0)}$写作$g^{(0)}=\rho e^{i\alpha_0}$，$\alpha_0=a_0 t+b_0 x$，其中$a_0$，$b_0$为实数，$\rho$可以取复数值。将$f^{(0)}$，$f^{(1)}$代入式(33)、式(35)，得到$|g^{(1)}|^2=|\rho|^2e^{2\eta}$，不妨将$g^{(1)}$写作

$$g^{(1)}=\rho e^{i\alpha_1}e^{\eta},\quad \alpha_1=a_1 t+b_1 x+\alpha_1^{(0)} \tag{38}$$

其中$a_1,b_1,\alpha_1^{(0)}$为实数。再将$f^{(0)}$，$f^{(1)}$，$g^{(0)}$，$g^{(1)}$代入式(32)，可得

$$(iD_t+D_x^2-\lambda)\rho e^{i(a_1 t+b_1 x)}\cdot f^{(0)}=0 \tag{39}$$

代入式(30)，可得

$$(iD_t+D_x^2-\lambda)\rho e^{i(a_0 t+b_0 x)}\cdot f^{(0)}=0 \tag{40}$$

不妨假设$a_0=a_1$，$b_0=b_1$，得到f、g的表达式

$$f=f^{(0)}+f^{(1)}=e^{i\xi_0}(1+e^{i\xi_1^{(0)}}e^{\eta}) \tag{41}$$

$$g=g^{(0)}+g^{(1)}=\rho e^{i\alpha_0}(1+e^{i\alpha_1^{(0)}}e^{\eta}) \tag{42}$$

其中

$$\xi_0=\omega_0 t+k_0 x;\ \alpha_0=a_0 t+b_0 x;\ \eta=\tau t+\kappa x+\eta^{(0)} \tag{43}$$

当我们需要$e^{\eta}\to+\infty$，在$x\to\pm\infty$或$t\to\pm\infty$时(取决于时间空间变量前的系数正负性，例如在$\tau>0,\kappa>0$时，$x\to+\infty$或$t\to+\infty$)，我们有

$$u=\rho e^{i(\alpha_0-3\xi_0)}e^{i(\alpha_1^{(0)}-3\xi_1^{(0)})} \tag{44}$$

而当边界条件使得$e^{\eta}\to0$时，u的边界极限取值与上式(44)仅差一常数相因子。由以上分析可见，若α_0与ξ_0简单地取x,t的线性函数，通过Hirota双线性导数变换法可以求解的非零边界条件的类型有常数边界、平面波边界、驻波或正/余弦边界。要使波函数在无穷远处趋近于驻波边界条件，即只含时间变量x，即让$\alpha_0-3\xi_0$仅随时间参量x改变，可以假定α_0，ξ_0中t的参数均为零，即$\omega_0=a_0=0$。值得注意的是，分析发现，使用Hirota方法无法得到MNLS在常数边界条件的解，因为它会导致式(27)与式(30)两式矛盾。

将解中$f^{(0)}$和$g^{(0)}$代入式(27)，式(30)，式(33)，同时考虑边界条件上述约束，得到

$$k_0=(1/4)|\rho|^2,\quad b_0=(1/4)|\rho|^2\pm\sqrt{(1/4)|\rho|^4+2\gamma|\rho|^2},\quad \lambda=-(1/4)|\rho|^2-2\gamma|\rho|^2 \tag{45}$$

将其中各参数表达为ρ与γ的函数，以便根据给定的具体边界条件与微扰项γ值来拟合理论解中的参数。

将获得的$f^{(0)}$，$f^{(1)}$，$g^{(0)}$，$g^{(1)}$表达式代入式(28)，式(31)，式(34)，得到含$e^{i\xi_1^{(0)}}$、$e^{i\alpha_1^{(0)}}$、τ、κ四个未知数的三个方程，不妨将其余三者用$\xi_1^{(0)}$表示：

$$\alpha_j^{(0)}=\xi_j^{(0)}+\arccos(\cos^2\xi_j^{(0)}+(\Delta-1)\sin^2\xi_j^{(0)}),\quad \Delta=2(|\rho|^2\mp\sqrt{|\rho|^4+8\gamma|\rho|^2}+4\gamma)/|\rho|^2 \tag{46}$$

$$\kappa=(1/2)\,|\rho|^2(\cos\alpha_1^{(0)}-\cos\xi_1^{(0)})/\sin\xi_1^{(0)},$$

$$\tau=-4(\gamma+k_0)\kappa+\cot\xi_1^{(0)}\kappa^2 \tag{47}$$

而式(29),式(32),式(35)中包含的信息在寻找孤子解的过程中已经运用。至此我们得到 MNLS 方程在驻波边界条件下的单孤子解

$$u=\rho e^{i(b_0-3k_0)x}(1+e^{i\alpha_1^{(0)}}e^{\eta})(1+e^{-i\xi_1^{(0)}}e^{\eta})/(1+e^{i\xi_1^{(0)}}e^{\eta})^2 \tag{48}$$

其中 $\eta=\tau t+\kappa x+\eta^{(0)}$,各常数参数取值见式(45)～式(47)。将 ρ、γ、$e^{i\xi_1^{(0)}}$ 视作可调节参数。取特殊参数值作图,如图 1 所示,它对应着在波导中传播的超短脉冲的电场的绝对值的时空演化。其中(a)单孤子振幅绝对值大于背景波,为亮孤子;(b)中单孤子振幅绝对值小于背景波,为暗孤子。以图 1(a)为例,取 $t=t_0$ ($-\infty<t_0<+\infty$)做截面,得到光脉冲电场随时间的演化,即一个突然出现又消失的孤立波峰;而不同 t_0 对应的截面的波形类似,也就是波形随空间演化平移不变。

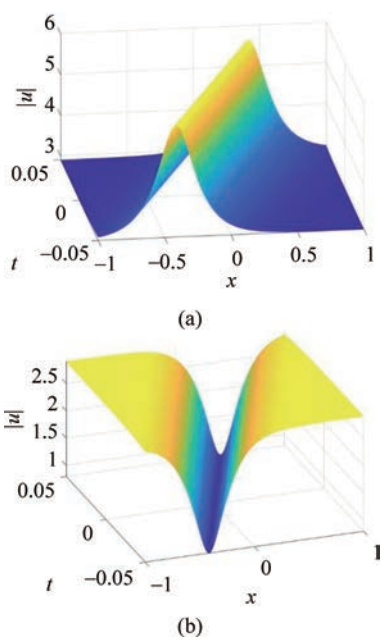


图 1　MNLS 方程的暗、亮孤子解

其中(a) $\rho=2.9,\xi_1^{(0)}=\pi/3,\gamma=-1$;(b) $\rho=2.9,\xi_1^{(0)}=4\pi/3,\gamma=-1$

当 MNLS 方程的参数 γ 取零时,前述孤子解退化为 DNLS 方程的孤子解

$$u=\rho(1+e^{i3\xi_1^{(0)}}e^{\eta})(1+e^{-i\xi_1^{(0)}}e^{\eta})/(1+e^{i\xi_1^{(0)}}e^{\eta})^2 \tag{49}$$

其中

$$\eta=-|\rho|^2\sin2\xi_1^{(0)}(x-|\rho|^2(1+2\cos^2\xi_1^{(0)})t+\eta_1^{(0)}) \tag{50}$$

$$k_0=(1/4)\,|\rho|^2,\quad b_0=(3/4)\,|\rho|^2 \tag{51}$$

$$\alpha_1^{(0)}=3\xi_1^{(0)},\quad \kappa=-|\rho|^2\sin2\xi_1^{(0)},$$

$$\tau=|\rho|^4\sin2\xi_1^{(0)}(1+2\cos^2\xi_1^{(0)}) \tag{52}$$

$\gamma=0$ 时,上面的解满足边界条件 $u=\rho$,当 $e^{\eta}\to+\infty$,即 $x\to\pm\infty$ 或 $t\to\pm\infty$ 时(取决于时间空间变量前的系数正负性,例如在 $\tau>0,\kappa>0$ 时,$x\to+\infty$ 或 $t\to+\infty$),即 MNLS 的驻波/简谐波边界条件,在 γ 趋近于零时对应于 DNLS 的非零常数边界条件。这与文献[8,14]利用改进的反散射法得到的常数边界条件下 DNLS 方程的纯孤子解一致。两种方法对比可知,本文 Hirota 方法得到的 DNLS 方程的孤子解中的复常参数 $\rho e^{i\xi_1^{(0)}}$ 对应于反散射法[14]中围道积分的极点。如图 2 所示,当复常参数取不同的特殊值(相差 π 的相位)时,可分别得到亮/暗孤子解。

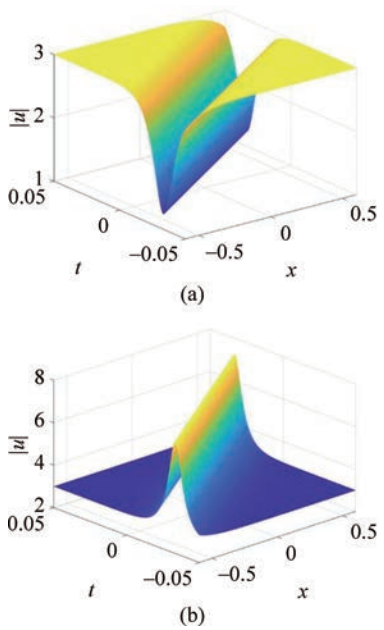


图 2　DNLS 方程的暗/亮孤子解

其中(a) $\rho=3,\xi_1^{(0)}=\pi/4$;(b) $\rho=3$, $\xi_1^{(0)}=5\pi/4$

当参数 γ 趋近于 0(但不等于 0)时,MNLS 方程的孤子解趋近于 DNLS 方程的孤子解。为探究 γ 不为零带来的新特点,固定 ρ,将解减去背景波的影响,分析发现随着 γ 趋近于零,孤子变高变窄,反之则变矮变宽,即微扰项让 DNLS 方程的孤子解弥散。另一方面,如图 3 所示,随着背景波振幅 ρ 的增加,孤子变高变窄,即更剧烈的背景振荡

将更突显孤子的存在。注意到 γ 作为 MNLS 方程在 DNLS 方程基础上的微扰强度的度量，对 MNLS 方程单孤子解的影响远不及背景波振幅的影响。

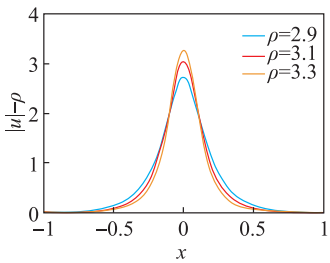


图 3 孤子波模与背景波模高差随背景波振幅 ρ 的变化

3 结语

本文展示了运用 Hirota 双线性导数变换法求解非线性可积方程的全部手续与过程；以 MNLS 方程为例求出其在驻波边界条件下的亮/暗单孤子解。通过参数归零法使 MNLS 方程退化为 DNLS 方程时，该解自然地变为 DNLS 方程在常数边界条件下的亮/暗孤子解，并与运用修改的反散射法求得的孤子解完全一致。通过对比，找到了两种方法等价结果的对应参数关系。同时研究表明，微扰项导致孤子解的弥散，更剧烈的背景振荡将更突显孤子的存在。

参 考 文 献

[1] ABHINAV K, GUHA P, MUKHERJEE I. Study of quasi-integrable and non-holonomic deformation of equations in the NLS and DNLS hierarchy[J/OL]. Journal of Mathematical Physics, 2018, 59(10). DOI:10.1063/1.5019268.

[2] SONG Y, SHI X, WU C, et al. Recent progress of study on optical solitons in fiber lasers[J/OL]. Applied Physics Reviews, 2019, 6(2). DOI:10.1063/1.5091811.

[3] CHEN Z Y, HUANG N N. Explicit N-soliton solution of the modified nonlinear Schrodinger equation[R]//PHYSICAL REVIEW A: 卷 41. 1990.

[4] LASHKIN V M. N-soliton solutions and perturbation theory for the derivative nonlinear Schrödinger equation with nonvanishing boundary conditions[J/OL]. Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical, 2007, 40(23): 6119-6132. DOI:10.1088/1751-8113/40/23/008.

[5] KHALIQUE C M, PLAATJIE K, ADEYEMO O D. First integrals, solutions and conservation laws of the derivative nonlinear Schrödinger equation[J/OL]. Partial Differential Equations in Applied Mathematics, 2022, 5. DOI:10.1016/j.padiff.2022.100382.

[6] 唐宇轩，周国全. 用 Hirota 双线性导数变换法求 MNLS 方程的 Rogue 波解[J]. 数学物理学报，2023，43(A(1)): 132-142.
TANG Y X, ZHOU G Q. The Rogue wave solution of MNLS/DNLS equation based on Hirota's bi-linear derivative transformation[J]. Acta Mathematica Scientia, 2023, 43, A(1): 132-142. (in Chinese)

[7] CAI H. Research about MNLS Equation and DNLS Equation[D]. Wuhan: Wuhan University, 2005.

[8] CHEN X J, YANG J, LAM W K. N-soliton solution for the derivative nonlinear Schrödinger equation with nonvanishing boundary conditions[J/OL]. Journal of Physics A: Mathematical and General, 2006, 39(13): 3263. https://dx.doi.org/10.1088/0305-4470/39/13/006. DOI:10.1088/0305-4470/39/13/006.

[9] MJØLHUS E, HADA T. Nonlinear waves and chaos in space plasmas[M]. Tokyo, 1997.

[10] CHEN X J, YANG J, LAM W K. N-soliton solution for the derivative nonlinear Schrödinger equation with nonvanishing boundary conditions[J/OL]. Journal of Physics A: Mathematical and General, 2006, 39(13): 3263-3274. DOI:10.1088/0305-4470/39/13/006.

[11] KAUP D J, NEWELL A C. An exact solution for a derivative nonlinear Schrödinger equation[J/OL]. Journal of Mathematical Physics, 1977, 19(4): 798-801. DOI:10.1063/1.523737.

[12] ZHOU G Q, HUANG N N. An N-soliton solution to the DNLS equation based on a revised inverse scattering transform[J]. Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical, 2007, 40.

[13] NIAN-NING HUANG, ZONG-YUN CHEN. Alfven solitons[J/OL]. Journal of Physics A: Mathematical and General, 1990, 23(4): 439. https://dx.doi.org/10.1088/0305-4470/23/4/014. DOI:10.1088/0305-4470/23/4/014.

[14] ZHOU G Q. Explicit breather-type and pure N-soliton solution of DNLS+ equation with nonvanishing boundary condition[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2013, 18: 147-155.

[15] ZHOU G Q, BI X T. Soliton solution of the DNLS equation based on Hirota's bilinear derivative transform[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2009, 14: 505-510.

[16] LI X J, ZHOU G Q. Mixed breather-type and pure soliton solution of DNLS equation[J/OL]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2017, 22(3): 223-232. https://doi.org/10.1007/s11859-017-1239-0. DOI:10.1007/s11859-017-1239-0.

[17] ZHOU G Q, LI X J. Space periodic solutions and rogue wave solution of the derivative nonlinear Schrödinger equation[J/OL]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2017, 22: 373-379. DOI:10.1007/s11859-017-1261-2.

[18] HIETARINTA J, NIMMO J. Foreword[M]//BOLLOBAS B, FULTON W, KATOK A, et al. The Direct Method in Soliton Theory. New York: Cambridge University Press, 2004: vii-viii.

[19] HIROTA R. The direct method in soliton theory[M]. New York: Cambridge University Press, 2004.

基于反溯教学法的物理实验课程思政建设的探索

李　莉[1]　张师平[2]　裴艺丽[1]　谢子昂[2]　陈　森[1]　吴　平[2]
（北京科技大学[1]自然科学基础实验中心；[2]数理学院，北京　100083）

摘　要　物理实验具有天生的“思政”教育属性，可以帮助学生树立爱国情怀，为培养学生客观进取、实事求是的世界观和人生观奠定基础。为实现高质量人才培养的目标，我们提出了物理实验的反溯效教学法，将现代科学技术新发展引入物理实验课程内容，激发学生探索欲和创造欲的同时，深挖物理实验中的思政元素，以此打通前沿科技发展、基本物理原理与现象、课程价值引领之间的联系，探索了物理实验的知识传授、能力提高与价值塑造三位一体的育人模式。本文以霍尔效应实验为例，探索了基于反溯效教学法的思政元素融入物理实验课程的方法。

关键词　物理实验；课程建设；课程思政；反溯教学法

EXPLORATION OF IDEOLOGICAL AND POLITICAL CONSTRUCTION OF COLLEGE PHYSICS EXPERIMENT COURSE BASED ON RETROACTIVE TEACHING METHOD

LI Li[1]　ZHANG Shiping[2]　PEI Yili[1]　Xie Ziang[2]　CHEN Sen[1]　WU Ping[2]
([1] Basic Experimental Center for Natural Science;
[2] School of Mathematics and Physics, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

Abstract　Physics experiments have natural advantages on ideological and political education, which can help students bring up the patriotic feeling and lay foundation for their objective, enterprising, and pragmatic word-view and life-view. In order to cultivate high-quality innovative talents, we proposed the retroactive teaching method for the college physics experiment course. The new development of modern science and technology is introduced into the content of physics experiment course to stimulate students' desire to explore and create, and to dig deep into the ideological and political elements in physics experiment, so as to open up the relationship between the development of cutting-edge science and technology, basic physics principles and phenomena, and curriculum value guidance, and explore the trinity education mode of knowledge imparting, ability improvement and value shaping of physics experiment. Taking the 'Hall effect' experiment as an example, this paper explores the method of integrating ideological and political elements into the physics experiment course based on the backtracking effect teaching method.

收稿日期：2023-05-29
基金项目：北京科技大学，2022年课程思政特色示范课程项目《理科物理实验Ⅰ&Ⅱ》(KC2022SZ18)；北京科技大学，2021年度本科教育教学改革重点项目《对标一流本科课程，重构优化《大学物理实验》课程内容体系，建设物理实验金课》(JG2021Z05)。
作者简介：李莉，女，工程师，北京科技大学自然科学基础实验中心。主要从事物理实验教学与研究工作，科研方向为颗粒物质运动与多相流，lili19@ustb.edu.cn。
通讯作者：吴平，女，教授，北京科技大学数理学院。主要从事物理实验教学与研究工作，科研方向为功能材料制备、颗粒物质物理问题、磁致流动行为等，pingwu@sas.ustb.edu.cn。
引文格式：李莉，张师平，裴艺丽，等. 基于反溯教学法的物理实验课程思政建设的探索[J]. 物理与工程，2023，33(4)：85-94.
Cite this article: LI L, ZHANG S P, PEI Y L, et al. Exploration of ideological and political construction of college physics experiment course based on retroactive teaching method[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(4): 85-94. (in Chinese)

Key words physical experiments; curriculum construction; ideological and political education; retroactive teaching method

2017年2月,中共中央、国务院《关于加强和改进新形势下高校思想政治工作的意见》[1]提出,坚持全员全过程全方位育人。2020年5月,教育部颁发了《高等学校课程思政建设指导纲要》,以提高人才培养质量这一核心要务为主线,部署高校结合学科专业特点全面推进课程思政建设。因此,如何将思想政治教育贯穿教育教学全过程,立德树人的同时提高人才培养能力,实现全程育人、全方位育人,是当前国内各个高校普遍关注、热烈讨论并积极开展教学实践的一个重大课题[2]。

物理实验课程是高等学校理工科类专业对学生进行科学实验基本训练的必修基础课程[3]。物理实验内容具有很强的逻辑性、思想性和方法性,蕴含着朴素但深刻的辩证唯物主义思想,物理实验过程很多是人类物理知识获得过程的浓缩再现过程,在引导学生掌握理论学习和实验科学结合的意识和方法,培养学生科学素养、创新能力等方面具有明显优势[4]。物理实验教学与思政教育目标一致,通过实验教学培养学生思想道德品质十分必要性并且切实可行[5]。因此,物理实验课程在全面推进课程思政建设中应积极作为、主动作为、创新作为。

本文以北京科技大学吴平教学团队提出反溯教学法为基础,将现代科学技术新发展引入物理实验课程内容,同时深挖物理实验中的思政元素,打通前沿科技发展、基本物理原理与现象、课程价值引领之间的联系,探索了物理实验的知识传授、能力提高与价值塑造三位一体的育人模式。

1 物理实验课程思政的先天优势

物理实验在融入课程思政教育方面具有独特的先天优势。充分发挥物理实验课程的优势,深入挖掘这些资源,自然融入教学过程,既有利于高质高效完成物理实验课程内容,又有利于对学生的思想价值引领,实现大学物理实验课程的课程思政。

1.1 物理实验课程开设于学生思想价值引领的关键时期

物理实验课程是高等学校理工科类专业对学生进行科学实验基本训练的必修基础课程,是本科生接受系统实验方法和实验技能训练的开端[3],面向各高校理工科大学低年级学生开设。而这些年级的学生正处于树立思想、形成人生观和世界观的关键年龄与黄金时期。为抓住这段关键时期,实现全过程全方位育人,急需物理实验课程积极主动地充分发挥它的思想价值引领作用。

1.2 物理实验课程内容充分体现了“格物致理”的过程

物理实验课程内容涵盖力、热、光、电和近代物理等诸多分支学科,知识覆盖面宽,学生受益面广,兼具理论与实践相结合、创新与应用相结合的特征和优点。不仅仅教给学生物理实验知识、培养动手能力,也能带给学生实事求是的科学思维。通过对实验现象的观察和分析、对物理量的测量与计算,培养学生的科学素养,训练学生的科学思维。在每一个物理实验中都涉及一些物理方法与思想,了解这些方法与思想,有利于培养学生认知问题、提出问题与解决问题的能力,为学生适应科技进步和社会发展变化奠定了必要的基础。

1.3 物理实验课程天然具有丰富的思政内涵

物理实验中许多成就本身即是人类实现价值理想的成果,体现了人类追求真理、不断超越的精神品质内涵。例如,科学家们为科学发展而拼搏的奉献精神,不贪图功名利禄的精神和爱国情怀以及民族自豪感;在研究中勇于创新、不畏权威、锲而不舍的探索精神;物理实验中严谨求实、诚实守信、团结协作的专业操守[6]。此外,物理实验通过实验研究物质运动及其规律,其研究内容和对象,与辩证唯物主义哲学的物质观及其运动观有着密不可分的联系。物理实验自然蕴含着的马克思主义哲学思想,有助于培养学生的哲学思维,树立科学的世界观和方法论。

同时,物理实验课程还可以培养学生的思想道德素质和爱国主义情感。改革开放以来,我国物理学家们牺牲个人利益,纷纷投身祖国的科研事业。“两弹一星”、载人航天、月球探测、深海载人潜水、建造空间站与太空实验室等显著成绩,增强学生的民族自信心和自豪感,激发学生的爱国情怀,培养学生为中国崛起努力学习的热情[7]。

2 反溯教学法

为切实提高教学质量，我们提出了物理实验的反溯教学法，即以学生实践能力与创新意识培养为目标，注重学生未来发展的实际需求，将现代科学技术新发展引入物理实验课程内容。反溯教学法的基本思想，是从前沿科技发展及应用反溯其基本物理学概念、原理和现象，激发学生的探索欲和创造欲，全面提升学生的学习兴趣与学习能力，充分挖掘课程潜力，让学生从“要我学”变为“我要学”。同时，在尊重物理实验课程自身建设规律的前提下，坚持“课程承载思政”和“思政寓于课程”的理念，分析物理实验涉及的社会背景、深刻影响与前沿科技应用，寻找激发学生爱国情怀，增强法治意识、社会责任与人文精神的事例，将思想政治教育元素自然融入物理实验的反溯教学过程中，加强课程的价值引领作用。

由此，基于反溯教学法充分发挥物理实验课程思政的先天优势，打通在物理实验教学过程中高新技术新发展、基本物理原理与现象、课程价值引领之间的联系，在知识、方法、思想与精神协调统一的基础上，激起学生的好奇心和兴趣，也让学生切实体会到基本物理原理和现象是新技术发展的重要源泉，有助于切实有效地达成教书育人的教学目标。

3 基于反溯教学法的霍尔效应思政实例

基于反溯教学法的思想，我们对物理实验课程体系与内容进行了全面的建设和深化，构建了一整套大学物理实验课程教学范式，在课程体系建设、学生能力与创新意识培养等诸多方面均发挥了重要作用。在本文中，将以霍尔效应为例，介绍基于反溯效教学法的思政元素融入物理实验课程的探索与实践。

3.1 案例设计思路

物理实验融入思政元素的设计思路如图 1 所示。为实现霍尔效应实验教学过程中知识传授、能力提高与价值塑造协调统一，首先，需要充分挖掘霍尔效应的思政元素。如通过讲述霍尔效应实验产生的历史背景与发展沿革历程，使学生知晓

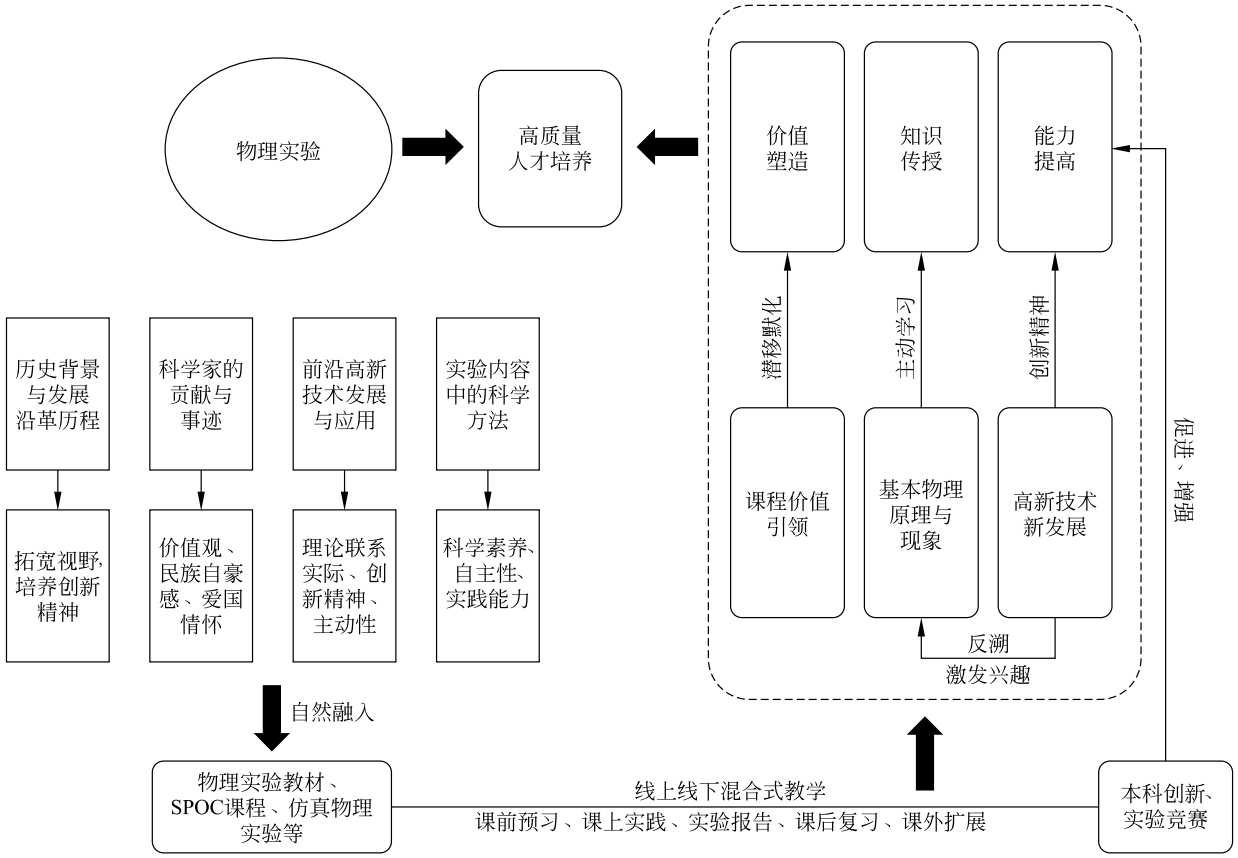


图 1 在物理实验中融入思政元素的设计方案

本实验的必要性和历史价值，让学生了解更加丰富的物理知识和背景，从而拓宽视野，培养创新精神；通过了解霍尔效应领域中科学家的贡献与事迹，增强学生的民族自豪感和爱国情怀；通过介绍霍尔效应的前沿高新技术与实际应用，使学生认识到所学内容的实用性，提高理论联系实际的能力，调动学习兴趣与创新精神；通过体会并实践霍尔效应实验内容中的科学方法，培养学生的崇尚实践、认真严谨、实事求是等科学素养。

其次，以霍尔效应为主线，充分挖掘每一教学环节中可利用节点，以将思政元素融入教学全过程。以线上SPOC课程与线下实验课程相结合的教学模式，在课前预习、课上讲解与实践、课后撰写实验报告、课后复习与课后拓展各个环节中，引导学生反溯回其中蕴含的基本物理学概念、原理和物理现象，潜移默化融入相关的思政内容，实现立德树人润物无声。

最后，采取适当的成绩评定方法，鼓励学生的创新活动。如鼓励学生参加本科生科技创新、物理实验竞赛等，训练运用所学知识发现问题、分析问题、解决问题的能力，以期培养能学以致用、用以促学、学用相长、知行合一的高质量创新型人才。

3.2 霍尔效应中典型的思政元素

3.2.1 霍尔效应发现与发展沿革中的科学精神

霍尔效应的原理如图2所示。当霍尔电流 I_S 垂直于外加磁场 B 通过半导体时，载流子发生偏转，垂直于电流和磁场的方向会产生附加电场，使半导体的两端产生电势差，即霍尔电压 V_H。

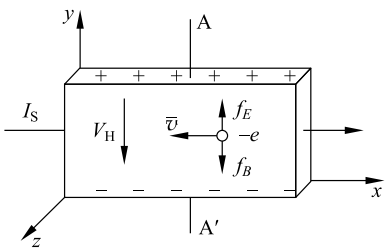


图2 霍尔效应原理示意图

注：载流子为电子，外加磁场 B 沿 z 轴方向

自19世纪末发现霍尔效应后，科学家们又发现了反常霍尔效应、量子霍尔效应、自旋霍尔效应等，该领域一共产生了三个诺贝尔物理学奖。随着时代的发展，越来越多的霍尔效应被发现，从而推动了物理学的发展和科学技术的进步。教师在讲这部分内容时，不仅可以讲霍尔效应的内容，也可以适当地拓展介绍霍尔效应实验产生的历史背景与发展沿革历程[8-11]，让学生了解更加丰富的物理知识和背景，从而拓宽他们的视野，培养创新精神。

经典霍尔效应。1879年，24岁的霍尔是霍普斯金大学罗兰教授的研究生。当时还没有发现电子，也没有人知道金属中导电的机理，科学家们对很多问题持有不同的看法。经典电磁理论的创始人麦克斯韦认为“在磁场中的通电导体受到的机械力不是作用于电流上，而是作用在导体上的”。然而，瑞典物理学家爱德朗则认为磁场作用在固定导体中的电流上，与作用在自由移动的导体上是完全相同的。发现两位学术权威的观点不一致，霍尔萌生了疑问，在与罗兰教授讨论后，决定通过实验研究通电导体在磁场中的受力情况。经历了前期反复的失败，认真分析、调整实验思路后，他大胆想象把导体中的电流类比为管道中的水流，并通过较高精确的实验测量，成功证实了自己的想法。最终，有了霍尔效应这一伟大的发现。

经典霍尔效的发现过程可以说明，没有质疑精神就没有科学的发展。面对麦克斯韦这样伟大的物理学家，霍尔没有盲从、敢于质疑、独立思考，以实践作为检验真理的唯一标准。他紧跟科学发展前沿，虚心请教，不畏挫折，始终朝着既定目标坚持不懈。在当时洛伦兹的经典电子论还未建立之时，霍尔敢于大胆想象，当实验失败后勇于创新，善于运用类比的方法，以其超强的实验能力获得了实验的成功[11, 12]。在教学过程中，融入霍尔效应的发现过程以及科学家霍尔的科学精神，可以让学生体会与领悟到学习不但要敢于质疑，更需要追求真理、严谨求实、不怕失败、坚持到底的精神，同时创新的思维和正确的方法也是成功的关键[12]。

霍尔效应的发展沿革。霍尔效应的发现激发了人们在这一领域的研究兴趣，霍尔效应的三个副效应，即埃廷斯豪森效应、能斯特效应和里吉-勒迪克效应，相继被发现。此后，磁现象研究取得了许多突破性的进展[8]：

① 量子霍尔效应：因在极低温度、强磁场中的半导体中发现了量子霍尔效应，德国物理学家

克利青荣获 1985 年度诺贝尔物理学奖；2018 年，复旦大学修发贤课题组首次在三维空间中发现量子霍尔效应，并在国际权威期刊《自然》发表了研究成果《砷化镉中基于外尔轨道的量子霍尔效应》；2019 年，中国科学技术大学乔振华课题组与南方科技大学张立源课题组首次验证了三维量子霍尔效应，并在《自然》期刊上发表了研究成果。

② 分数量子霍尔效应：继发现量子霍尔效应之后，因在更低温度、更强磁场下发现了分数量子霍尔效应，使得人们对量子现象的认识更进了一步，美籍华裔物理学家崔琦、美籍德裔物理学家施特默、和美国物理学家劳克林荣获 1998 年度诺贝尔物理学奖。这也是继杨振宁、李政道等之后又一位获得诺贝尔物理学奖的华裔科学家。

③ 量子反常霍尔效应：1988 年，美国物理学家霍尔丹提出可能存在不需要外磁场的量子霍尔效应，即量子反常霍尔效应；2010 年，我国理论物理学家方忠、戴希等与复旦校友、美国斯坦福教授张首晟教授合作，提出磁性掺杂的三维拓扑绝缘体有可能是实现量子化反常霍尔效应的最佳体系。德国、美国、日本等有多个世界一流研究组受到启发，在实验上寻找量子反常霍尔效应，但均未取得突破。2013 年，由清华大学薛其坤院士领衔、清华大学物理系和中科院物理研究所组成的实验团队成功在实验上首次观测到了量子反常霍尔效应，薛其坤院士获得了 2020 年度菲列兹·伦敦奖。

④ 半整数量子霍尔效应：因在石墨烯中发现了半整数量子霍尔效应，两位英国科学家而荣获了 2010 年诺贝尔物理学奖。

⑤ 自旋霍尔效应：2004 年美国加利福尼亚大学圣巴巴拉分校 Awscha-lom 团队发现了自旋霍尔效应。

⑥ 量子自旋霍尔效应：2006 年，复旦校友、美国斯坦福教授张首晟成功地预言了二维拓扑绝缘体中的量子自旋霍尔效应，并于 2007 年与母校合作开展了“量子自旋霍尔效应”的研究。“量子自旋霍尔效应”是美国《科学》杂志评出的 2007 年十大科学进展之一。

发展才是硬道理，现代技术的进步高度依赖于科学的发展，而创新更是科学发展的源泉，科学需要创新精神。正是由于科学家们坚持不懈地探索与创新才会有霍尔效应领域中这些新成就的取得[12]。通过讲述霍尔效应的发展沿革过程，可以启发学生理解事物辩证发展的观点，引导学生热爱科学、积极探索、勇于创新，激励其刻苦奋斗、努力学习，为科技发展与人类进步做出贡献。

3.2.2 霍尔效应发展过程中科学家的贡献与情怀

物理学家认识自然和世界的历程中充满内涵丰富的科学实践，其中不仅包含丰富的科学知识，也包含了大量的科学精神和人文思想[6]。在讲解霍尔效应发现及发展沿革过程中，着重讲述我国科学家的贡献与事迹，可以增强学生的民族自豪感和爱国情怀。

华裔科学家崔琦因发现分数量子霍尔效应获得了 1998 年诺贝尔物理学奖，而在该领域甚至整个物理学界都没有中国籍物理学家获得过诺贝尔物理学奖。为此，我国物理学家们正在不断地探索；

三维量子霍尔效应对测量条件、材料体系的要求异常苛刻，一直是科学家们未能突破难题。2018 年，复旦大学修发贤课题组首次在三维空间中发现量子霍尔效应，中国科学技术大学乔振华课题组与南方科技大学张立源课题组在有磁场的情况下对五碲化锆晶体进行实验，首次验证了“三维量子霍尔效应”，并发现了全新的物态和机制[11]；

量子反常霍尔效应不同于量子霍尔效应，自 1988 年起不断有理论物理学家提出各种方案，然而在实验上却没有取得任何进展。清华大学薛其坤团队一直致力于反常量子霍尔效应的研究，经过坚持不懈的努力，在 2013 年首次实验观测到反常量子霍尔效应。这一发现有望突破摩尔定律的瓶颈，可能推进信息技术巨大的突破，也让中国科学界站在了下一次信息革命的战略制高点[12]。之后，薛其坤团队将观测温度从 30mK 提高到 2K 左右，进一步提高了量子反常霍尔效应的观测温度。这是许多拓扑量子效应走向应用的关键因素[13]。因为在实验上发现量子反常霍尔效应，薛其坤获得 2020 年度菲列兹·伦敦奖。

从分数量子霍尔效应的发现到反常量子霍尔效应的验证，华裔科学家与中国本土科学家们凭借坚持不懈、精益求精、追求极致的科研精神取得了巨大的成功，也使我国在相关领域中取得了高新技术上的突破。在霍尔效应实验中，教师可以

向学生讲述崔琦、修发贤、张立源、张首晟、薛其坤等华人物理学家在这一领域的研究成果，以中国的科技进步，弘扬了爱国精神，提升民族自豪感。

3.2.3　霍尔效应的科学前沿应用，提升社会责任感

霍尔效应的应用十分广泛。它为半导体材料的参数、磁场、无损检测等提供了一种精确测量的途径。霍尔传感器是其典型应用，可以将位移、角度、转速、压力、液位等非电学量转换成电学量进行测量，广泛应用于自动控制装置、电测量和高新信息技术等方面[9]。教师可以介绍有关霍尔效应的前沿研究动态以及在科技上的应用，既能调动学生的学习兴趣与创新精神，又能引导学生理论联系实际，使学生明白该领域还有很多值得探索的东西，进而培养他们远大的志向。

测量磁场。利用霍尔效应可以制造测量磁感应强度的精密仪器——高斯计（又称毫特斯拉计）。高斯计的探头是一个霍尔元件，在它的里面是一个半导体薄片。探头在磁场中因霍尔效应而产生霍尔电压，测出霍尔电压后根据霍尔电压公式和已知的霍尔系数可确定磁感应强度的大小。高斯计主要用于测量磁性材料的均匀磁场、表面磁场、永磁电机磁场、电磁铁磁场以及交变磁场的检测。例如，图3所示的测量磁性纳米粒子（MNP）的场分布，用于研究磁性纳米粒子（MNP）在医学领域的靶向控制；调控磁场强度的大小与方向，对

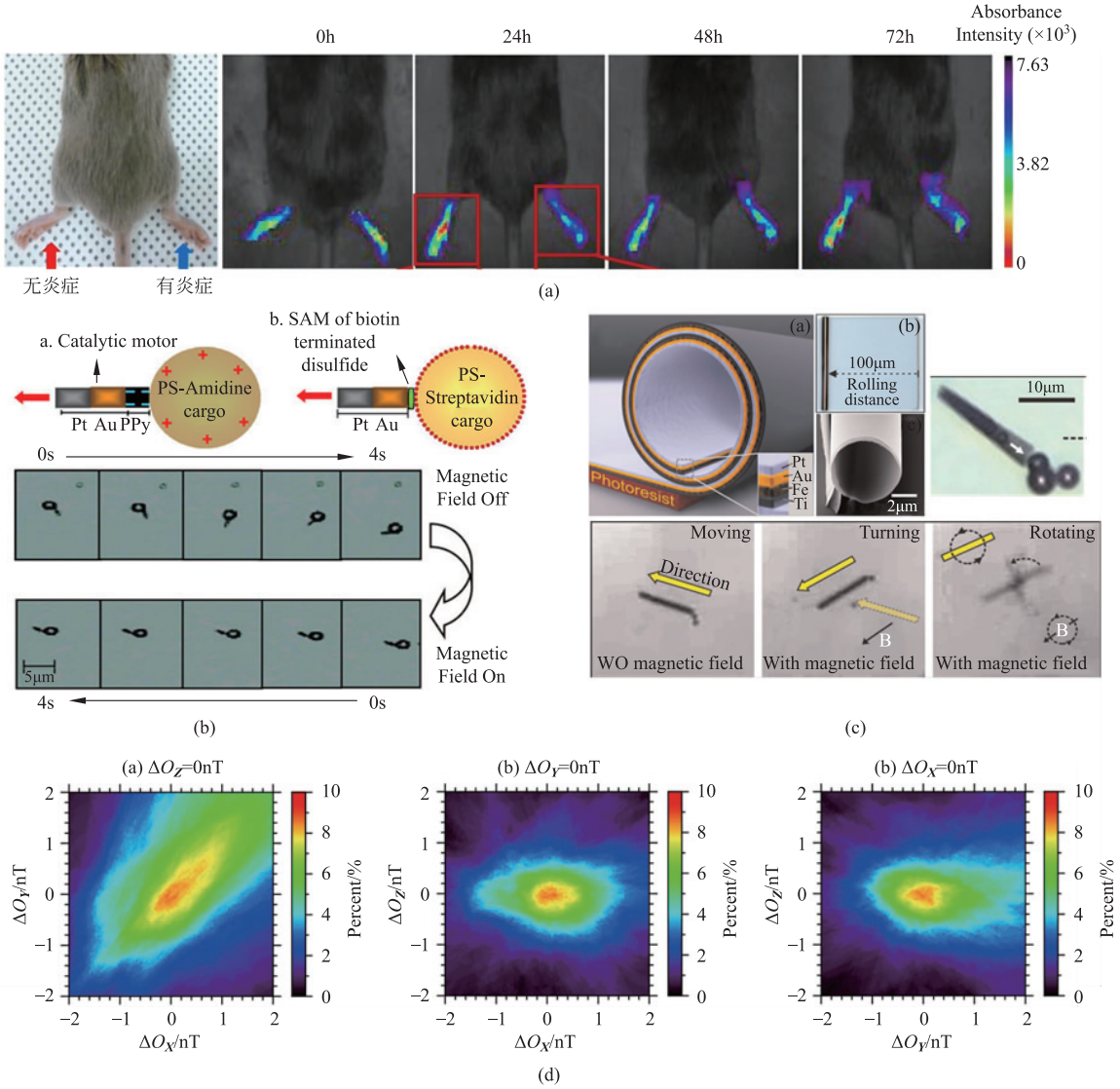


图3　霍尔元测量磁场的应用

（a）小鼠风湿性关节炎爪子和非炎症爪子的药物负载磁性纳米粒子（MNP）分布[14]；（b）一种磁导向自电泳驱动式微纳米机器人[15]；（c）一种磁导向气泡推动式管状微纳米机器[16]；（d）星际磁场的阿尔芬特性[17]

磁性纳米机器人做定向导航等。在人造卫星系统中，对星际磁场及卫星外层空间磁场进行检测，有利于火箭发射及卫星控制。

霍尔传感器。以霍尔效应原理构成的霍尔元件、霍尔集成电路、霍尔组件通称为霍尔效应磁敏传感器，简称霍尔传感器，可以精确测量力、位移、压差、角度、振动、转速、加速度等各种非电学量。例如，电动跑步机上安装霍尔速度传感器，用于人因意外跌倒后机器的紧急停止；如图 4 所示，汽车上的汽车霍尔传感器，用于电池检测、动力控制、车身稳定性控制、牵引力控制、安全气囊系统及防抱死制动系统等；姿态传感器安装在宇航员、飞船、卫星与空间站上用于调整姿态，图 5 展示了天宫空间站组合体调整姿态倾斜超 70°的景象。

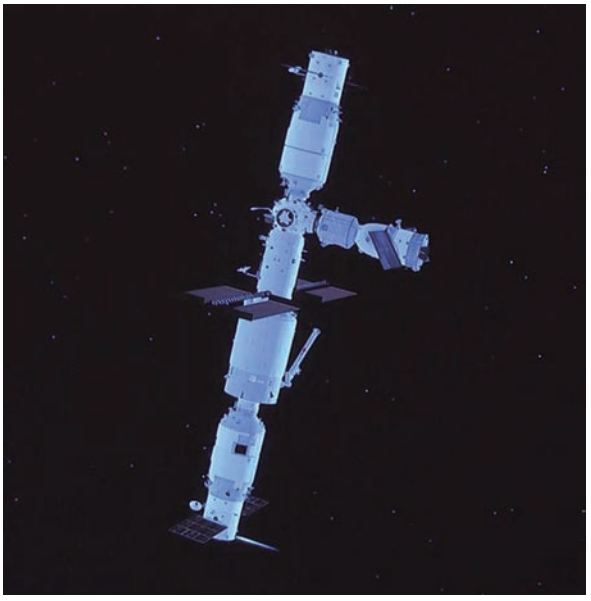


图 5　天宫空间站组合体姿态倾斜超 70 度

霍尔电推进器。霍尔电推进器的应用领域已由 GEO 卫星、低轨卫星扩展至深空探测器、大型载人航天器等方面。霍尔电推进器的原理与外观如图 6 所示。我国首台霍尔推力器、首台多模式霍尔推力器和首套霍尔电推进系统，达到世界领先水平，可以替代传统的化学燃料为我国的天宫空间站持续提供推力。实现了我国霍尔电推进的首次空间飞行，成为第四个掌握霍尔电推进技术的国家。2020 年我国霍尔电推进已取得喜人的成绩，实现了推力从毫牛级向牛级的跨越。目前，我国已经研制出多种型号和规格的霍尔电推力器，从牛级到千牛级再到吨级，从低轨到高轨再到深空，从卫星到空间站，对我国的太空技术发展起到了极大的作用。

高速电子器件中的应用。量子霍尔效应中电子运动无能量耗散，在一些高速电子器件中有重要应用[10]。例如，量子霍尔效应可以解决和电子器件能量耗散和电脑发热的问题，但因需要强磁

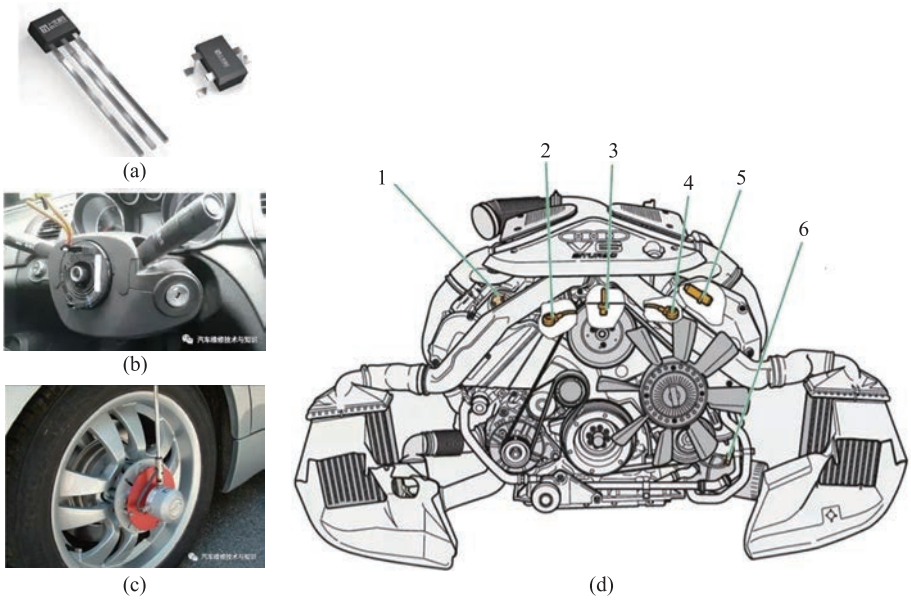


图 4　霍尔传感器

(a) 常见的霍尔元件；(b) 转向盘转角传感器；(c) 车轮速度传感器转；(d) 奥迪 V6 发动机传感器执行器安装位置（前视图）[19]
1—霍尔传感器(凸轮轴位置传感器)；2—爆燃传感器(左侧气缸)；3—进气温度传感；4—爆燃传感器(右侧气)；5—凸轮轴调节阀(右侧气缸)；6—机油压力开关

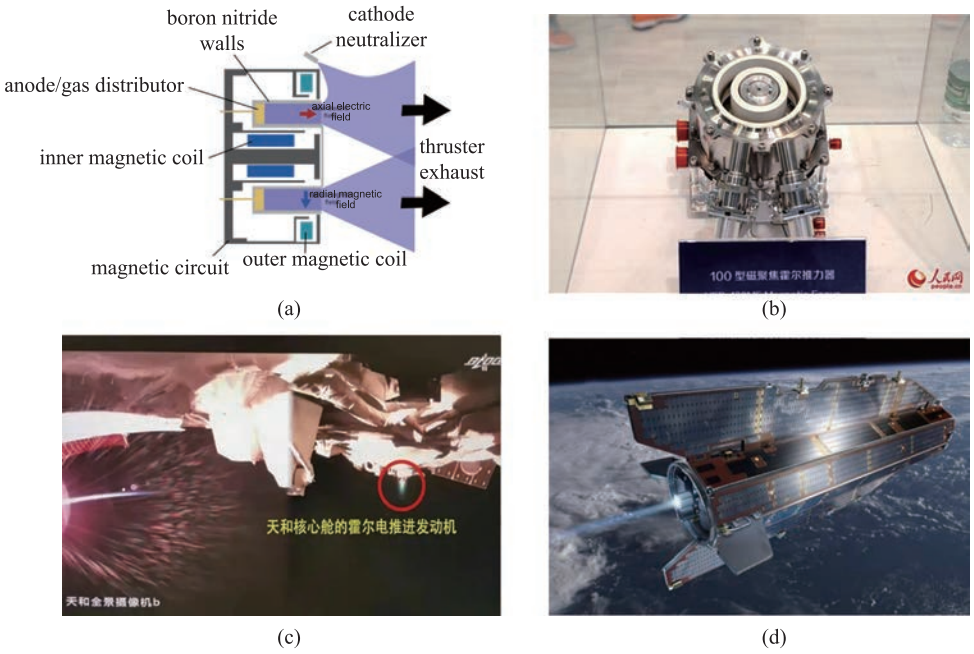


图6 霍尔电推进器

(a) 霍尔推进器原理示意图[20, 21]；(b) 我国“黎明号”使用的离子推进器；(c) 我国天和核心舱的霍尔电推进发动机；(d) 欧洲重力场和海洋环流探测卫星(GOCE)[22]

场、制造成本很高，难以实际应用[13]。张首晟团队验证了“量子自旋霍尔效应”之后，研究发现利用电子自转方向与电流方向之间的规律，可以降低电子器件的能量耗散[18]，进而研发量子自旋电子设备集成信息处理和存储单元，执行低功耗的可逆量子计算。

只有科技才能强国，而科技的发展离不开创新精神。在实验教学中，通过介绍霍尔效应在现代化技术中应用，特别是前沿科技中的应用，使学生了解我国在霍尔效应研究领域中的最新进展，了解科技发展对人们的生活方式以及对社会未来发展的引领作用，以此鼓励学生展望未来，激发勇于探索与敢于创新的精神。同时，将高新科技发展反溯至霍尔效应的基本物理学概念、原理和现象，引导学生理论联系实际，切实体会到基本物理原理和现象是高新技术发展的重要源泉，进而全面提升学生的学习兴趣和学习动力。

3.2.4 霍尔效应中的科学方法

霍尔效应实验内容要求学生研究霍尔电压与励磁电流和外加磁场的关系，测量磁感应强度与半导体相关参数。不同的参数测量涉及不同的实验思想方法，而领悟与体会实验测量的思想方法是培养学生科学素质的重要方面[12]。在霍尔效应实验中，主要用到了“转换测量法”“控制变量法”“转化法”“对称测量法”等方法。

转换测量法。利用霍尔效应进行磁学量与电学量的转换测量，是霍尔效应推广应用的基础。在霍尔效应实验中，使用高斯计测量外加磁场的磁感应强度 B。其他实验条件不变，通过改变励磁电流 I_M，研究磁感应强度 B 与励磁电流 I_M 的关系，拟合二者的关系曲线并计算出线圈常数 α（曲线斜率），进而以励磁电流 I_M 为基准去测量未知的磁感应强度 B。

转换测量法是根据物理量之间的各种效应和函数关系，利用变换原理进行测量的方法。由于物理量之间存在多种效应所以有各种不同的换测法，这正是物理实验最富有启发性和开创性的面。启发学生体会事物的普遍联系性，随着科学技术的发展，物理实验方法渗透到各学科领域，实验物理学也不断向高精度、宽量程、快速测量、遥感测量和自动化测量发展，这一切都与转换测量紧密相关。

控制变量法。控制变量法是一种把多因素的问题变成多个单因素的问题的方法。在研究和解决问题时，对影响变化规律的因素加以人为控制，每一次只改变其中一个变量的大小，而控制其他变量不变，从而分别研究每个因素的影响规律。

在霍尔效应实验中，霍尔电压 $V_H=K_H I_S B$，其中，V_H 是霍尔电压，V；K_H 是霍尔灵敏度，m^2/C；I_S 是霍尔电流，A；B 是外加磁场的磁感应强度，A/m。当保持磁感应强度 B 不变（即保持励磁电流 I_M 不变），通过改变霍尔电流 I_S，研究霍尔电压 V_H 与霍尔电流 I_S 的关系；当保持霍尔电流 I_S 不变，通过改变磁感应强度 B（即改变励磁电流 I_M），研究霍尔电压 V_H 与磁感应强度 B 之间的关系。

控制变量法是科学探究中的重要思想方法。它可以将含有多个自变量与因变量的复杂物理规律简单化，使学生对物理规律产生一定的认识，在此基础上逐渐加深理解。通过由浅到深逐步建立对物理规律的认知，有助于提升学生自身解决实际物理问题的能力，培养学生的科学思维与科学精神。

作图法与最小二乘法拟合。作图法是将实验数据之间的关系或其变化情况绘制成图，更形象直观地显示物理量之间的变化规律的方法。作图法在数据处理中是一种很便利的方法，但往往会引入附加误差。为克服这一点，在数理统计中研究直线拟合问题，常用以最小二乘法为基础的实验数据处理方法。在霍尔效应实验中，根据测量获得的实验数据，绘制霍尔电压 V_H 与霍尔电流 I_S 的关系曲线；绘制霍尔电压 V_H 与磁感应强度 B 的关系曲线，用最小二乘法计算出相应的霍尔灵敏度 K_H；根据 V_H-I_S 与 V_H-B 曲线，计算霍尔系数 R_H，并进一步计算载流子浓度 n。作图法与最小二乘法拟合可以训练学生对基本实验数据的处理能力，以及分析问题的能力。

对称测量法。在霍尔效应实验中，在产生霍尔效应的过程中会伴随有各种副效应产生的附加电压叠加在霍尔电压上。由于制造工艺技术的影响，测量霍尔电压的电极很难做到在一个理想的等势面上，两极间会产生不等位电势差 V_O；由于载流子速度分布不均，霍尔样品两侧聚集了不同速度的载流子导致温度不同，从而产生了温差电动势 V_E，即埃廷斯豪森效应；由于霍尔样品的电流两端电极与基底接触电阻不同，产生不同的焦耳热并形成两电极间的温度梯度，沿该温度梯度扩散的载流子受到磁场的作用而偏转，产生电位差 V_N，即能斯特效应；能斯特效应中沿温度梯度扩散的载流子在磁场中发生偏转且速度不同，会再次产生埃廷斯豪森效应，形成温差电动势 V_R，即里吉-勒迪克效应。不等位电势差 V_O 的方向与霍尔电流 I_S 方向有关；温差电动势 V_E 的方向与霍尔电流 I_S 和磁场 B 两者有关。电位差 V_N 与温差电动势 V_R 的方向仅与磁场 B 方向有关[23, 24]。因此，在保持霍尔电流 I_S 和强感应强度 B 的大小不变时，通过依次改变它们的方向就可以基本上消除这些副效应的影响。这就是对称测量法。

通过讲解霍尔效应消除副效应的测量方法，训练科学的思维方法，体现辩证唯物主义的思想。虽然有时副效应影响较小，但要追求严谨的科学精神。例如，汽车驾驶安全问题，对霍尔传感器精度要求很高，一些微小测量误差很可能造成严重的后果。

4 结语

反溯教学法以学生实践能力与创新意识培养为目标，注重学生未来发展的实际需求，将前沿科技发展及应用发引入物理实验课程内容。为充分发挥物理实验在课程思政上的先天优势，我们在教学过程中，融入了物理实验的历史背景与发展沿革历程、科学家的贡献与事迹、前沿科技发展及应用以及实验内容涉及的科学方法中的思政元素。基于反溯教学思想，打通了在物理实验教学过程中高新技术新发展、基本物理原理与现象、课程价值引领之间的联系，探索了物理实验的知识传授、能力提高与价值塑造三位一体的育人模式，促进育人成效与教学质量共同提升。

参 考 文 献

[1] 教育部. 中共中央国务院印发《关于加强和改进新形势下高校思想政治工作的意见》[J]. 社会主义论坛，2017(3)：4-5.
The Ministry of Education, the Central Committee of the Communist Party of China and the State Council issued 'Opinions on Strengthening and Improving Ideological and Political Work in Colleges and Universities under the New Situation'[J]. Socialist Forum, 2017(3): 4-5. (in Chinese)

[2] 黄丽，刘伟龙，赵海发，等. "同向同行"的大学物理实验课程思政教学设计与探索[J]. 物理与工程，2019，29(S1)：37-39.
HUANG L, LIU W L, ZHAO H F, et al. Design and experimention of ideological teaching in college physics experiment course[J]. Physics and Engineering, 2019, 29(S1): 37-39. (in Chinese)

[3] 教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会，物理基础课程教学指导分委员会. 理工科类大学物理实验课程教

学基本要求[M]. 北京：高等教育出版社，2010.

[4] 王秀敏. 大学物理实验课程教学中课程思政的实践与探索[J]. 教育现代化，2019(48)：263-264.
WANG X M. Practice and exploration of ideological and political education in college physics experiment teaching[J]. Education Modernization，2019(48)：263-264.（in Chinese）

[5] 吕红英，戴占海，李凌燕，等. 基于微课和翻转课堂的大学物理实验教学改革[J]. 大学物理实验，2018，31(3)：126-130.
LV H Y，DAI Z H，LI L Y，et al. The educational reform of physical experiment teaching in university on the basis of the microlearning and flipped classroom[J]. Physical Experiment of College，2018，31(3)：126-130.（in Chinese）

[6] 奉勇辉，李延标，白忠，等. “大学物理实验”思政教育的内容探索[J]. 大学物理实验，2022，35(4)：131-135.
FENG Y H，LI Y B，BAI Z，et al. Exploring the content of ideological and political education in university physics experiment[J]. Physical Experiment of College，2022，35(4)：131-135.（in Chinese）

[7] 张春玲，刘玉斌，文小青，等. O-AMAS助力大学物理实验课程思政——以碰撞实验为例[J]. 物理实验，2021，41(3)：6.
ZHANG C L，LIU Y B，WEN X Q，et al. Ideological and political education of college physics experimentassisted by O-AMAS effective teaching method—Taking Collsion Experiment as an Example[J]. Physic Experimention，2021，41(3)：6.（in Chinese）

[8] 涂宏庆. 霍尔效应理论研究发展历程[J]. 科技信息(学术研究)，2008(29)：363+367.
TU H Q. The development of Hall effect theory[J]. Science and technology information（academic research），2008(29)：363+367.（in Chinese）

[9] 张勇，孟建新，杨红英，等. 霍尔效应的发展及应用[J]. 安徽电子信息职业技术学院学报，2010，9(2)：31-34.
ZHANG Y，MENG J X，YANG H Y，et al. Development and application of Hall effect[J]. Journal of Anhuivocational College of Electronic & Information Technology，2010，9(2)：31-34.（in Chinese）

[10] 郑进，曹海霞. 抓好二次开发落实课程思政 ——浅谈霍尔效应中的育人功能[J]. 中学教学参考，2021，12(35)：39-41.
ZHENG J，CAO H X. Focus on secondary development to implement curriculum ideological and political education—Discussing the educational function of Hall effect[J]. Middle school teaching reference，2021，12(35)：39-41.（in Chinese）

[11] 倪忠楚. 霍尔效应的发现及其意义[J]. 科技创新导报，2017，14(2)：85-87.
NI Z C. The discovery of the Hall effect and its significance[J]. Science and Technology Innovation Herald[J]. 2017，14(2)：85-87.（in Chinese）

[12] 何艳，邓磊，罗志娟，等. 挖掘霍尔效应中的科学精神与科学方法[J]. 物理与工程，2021，31(5)：64-67.
HE Y，DENG L，LUO Z J，et al. Exploring the scientific spirit and method in mining Hall effect[J]. Physics and Engineering，2021，31(5)：64-67.（in Chinese）

[13] 李海. 量子霍尔效应及量子反常霍尔效应的探索历程[J]. 大学物理，2014，33(12)：4.
LI H. Investigation process of quantum Hall effect and quantum anomalous Hall effect[J]. College Physics，2014，33(12)：4.（in Chinese）

[14] HA Y J，LEE S M，MUN C H，et al. Methotrexate-loaded multifunctional nanoparticles with near-infrared irradiation for the treatment of rheumatoid arthritis[J]. Arthritis Research & Therapy，2020，22(1)：146-113.

[15] PAXTON W F，BAKER P T，KLINE T R，et al. Catalytically induced electrokinetics for motors and micropumps[J]. Journal of the American Chemical Society，2006，128(46)：14881-14888.

[16] SOLOVEV A A，MEI Y，URENA E B，et al. Catalytic microtubular jet engines self-propelled by accumulated gas bubbles[J]. Small，2009，5(14)：1288-1692.

[17] 孟立飞，王国强. 基于行星际磁场阿尔芬特性的星载磁通门磁强计在轨标定新方法[J]. 地球物理学报，2023，66(5)：1847-1855.
MENG F，WANG G Q. A new method for in-flight calibration of spaceborne fluxgate magnetometers based on Alfvénic nature of the interplanetary magnetic field[J]. Chinese Journal of Geophysics，2023，66(5)：1847-1855.（in Chinese）

[18] 张琳，米斌周. 量子霍尔效应的研究及进展[J]. 华北科技学院学报，2014，11(3)：61-65.
ZHANG L，MI B Z. The research and progress of the quantum Hall effect[J]. Journal of North China Institute of Science and Technology，2014，11(3)：61-65.（in Chinese）

[19] 汽车发动机传感器有哪些，发动机传感器位置在哪[图解][EB/OL]. https://www.qcwxjs.com/qcgztj/13623.html?ivk_sa=1024320u.

[20] 吴汉基，周顺林，蒋远大. 走向国际化的静态等离子体推力器[J]. 中国航天，1998(4)：29-31.
WU H J，ZHOU S L，JIANG Y D. Internationalized static plasma thrusters[J]. Aerospace China，1998(4)：29-31.（in Chinese）

[21] 吴汉基，蒋远大，张志远. 电推进技术的应用与发展趋势[J]. 推进技术，2003(5)：385-392.
WU H J，JIANG Y D，ZHANG Z Y. Application and development trend of electric propulsion technology[J]. Journal of Propulsion Technology，2003(5)：385-392.（in Chinese）

[22] 曾奎. 基于形状曲线逼近法的小推力航天器轨迹设计[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2017.

[23] 吴平. 大学物理实验教程[M]. 2版. 北京：机械工业出版社，2015.

[24] 吴平. 理科物理实验教程：力学、热学、电磁学、光学实验分册[M]. 2版. 北京：清华大学出版社，2022.

近十年国内大学物理演示实验相关研究的趋势与展望

王嘉宝[1]　王晓杰[1,2]

([1] 南开大学物理科学学院；[2]基础物理国家级实验教学示范中心(南开大学)，天津　300071)

摘　要　物理演示实验通过具象的实验帮助学生理解理论知识，在物理教学中有着重要的作用。本论文利用 Citespace 软件对中国知网近十年来(2013—2022 年)与国内大学物理演示实验相关的 208 篇文献进行量化分析，包括期刊类型和发文量、作者和机构、研究主题、研究热点等维度。根据量化分析得到的主要研究领域和研究热点，对物理演示实验的价值、类别和成效进行质性分析。最后对近几年大学物理演示实验教学的不足进行总结分析，并对未来大学物理演示实验的发展提出了五点建议。

关键词　物理演示实验；Citespace；实验教学；发展趋势

TRENDS AND PROSPECTS OF RELATED RESEARCH ON PHYSICS DEMONSTRATION EXPERIMENTS IN DOMESTIC UNIVERSITIES IN THE LAST DECADE

WANG Jiabao　WANG Xiaojie

([1] School of Physics, Nankai University;

[2] National Demonstration Center for Experimental Physics Education (Nankai University), Tianjin 300071)

Abstract　Physics demonstration experiments play an important role in physics teaching by helping students understand theoretical knowledge through concrete experiments. This paper uses Citespace software to quantitatively analyze the 208 papers related to domestic university physics demonstration experiments in CNKI in the last decade (2013—2022), including journal types and publication volume, authors and institutions, research topics, and research hotspots. According to the main research fields and research hotspots obtained by quantitative analysis, qualitative analysis is carried out on the value, category and effectiveness of physical demonstration experiments. Finally, this paper summarizes and analyzes the deficiencies in the teaching of university physics demonstration experiments in recent years, and puts forward five suggestions for the development of university physics demonstration experiments in the future.

Key words　physical demonstration experiments; Citespace; experimental teaching; development trend

---

收稿日期：2023-05-29

基金项目：教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会大中物理教育衔接工作委员会教学研究课题(WX202206)，教育部产学合作协同育人项目(220905259141912)，南开大学本科教改项目(NKJG2023048，NKJG2023107，NKJG2022096，22NKSYKF05)。

通讯作者：王晓杰，男，助理研究员，主要从事物理教学科研工作，研究方向为非线性光学，wxj@nankai.edu.cn。

引文格式：王嘉宝，王晓杰. 近十年国内大学物理演示实验相关研究的趋势与展望[J]. 物理与工程，2023，33(4)：95-106.

Cite this article：WANG J B, WANG X J. Trends and prospects of related research on physics demonstration experiments in domestic universities in the last decade[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(4): 95-106. (in Chinese)

物理学是一门以实验为基础的学科，物理学的研究离不开实验，物理学理论的发展需要实验结果的支持。南开大学物理学科的创始人饶毓泰先生曾说过："物理学教育一定要重视实验教学"。由此可见，演示实验在物理教学中有着重要的地位，是课堂理论教学不可或缺的一项教学辅助手段，可以使抽象的物理知识具象化，帮助学生理解物理概念。大学物理演示实验不同于大学物理实验课，实验课有明确的实验内容和要求，演示实验则重在激发学生的学习兴趣，让学生理解和掌握课堂理论知识。国外的一些高等院校十分重视大学物理演示实验。例如，德国的物理教学大纲规定只有经过大量实验和细致观察才能得到物理规律，其基础物理教材中有大量的演示实验。美国也相当重视物理演示实验，不仅演示实验数量众多，教学方式也非常多样[1]。近年来国内高校对物理演示实验教学越来越重视，建立了专门的演示实验室，在教学方面作出很多新的尝试[2]，采用随堂演示、开放演示、走廊展厅演示等多种教学形式[3]。

近十年间，大学物理演示实验不停地发展与进步，在教学技术[4]、自制仪器[5]、人才培养[6]和实验室建设[7]方面发展迅速，已经逐步形成明确的研究体系，但针对目前的研究趋势还缺乏深入的研究和系统分析。因此，本文采用文献检索法，收集国内近十年大学物理演示实验相关研究的文献资料，然后采用量化研究和质性分析的方法，对文献进行统计分析，归纳出国内大学物理演示实验相关研究的发展趋势以及研究现状。Citespace软件系统是由美国德雷塞尔大学陈超美博士开发的一款主要用于计量和分析文献数据的信息可视化软件，可以绘制文献的科学知识图谱，直观展现某一科学研究领域的研究热点和前沿方向等[8]。目前，Citespace已广泛用于教育教学方面的研究[9-10]。

在中国知网数据库(CNKI)中对"物理演示实验"和"教学"两个关键词进行检索，经筛选后总计论文208篇。研究的时间跨度为2013—2022年，筛选原则为：与大学物理演示实验教学有关的文献并且除去会议通知、会议纪要、报纸、硕士论文。随后从期刊发文量和期刊类型分析、作者、机构，关键词，研究热点等维度对这些文献进行量化分析，揭示国内大学物理演示实验的研究现状、总结研究主题和热点问题。此外，基于现有的文献，对国内大学物理演示实验的教学方式、技术应用、教学创新等内容进行分析讨论，并据此对未来的教学提出建议。

1 近十年国内大学物理演示实验相关研究量化分析

1.1 发文量和期刊类型

历年文献发文量反映了近十年国内大学物理演示实验研究领域的发展速度。近十年在国内期刊论文中发表的与大学物理演示实验相关的论文的发文量统计如图1所示。从图1可以看出，2018年以前发文数量比较平稳，平均值为27篇。2019年和2020年有所下降，但仍保持一定的发文量。2021年后发文量急剧下降。之后一直呈下降趋势。根据近几年高等学校物理演示实验教学研讨会的相关信息来看，2021年举办的第15届高等学校物理演示实验教学研讨会相较于前几届研讨会，参与的高校由100多所变为60多所，参会人数由近300名减少为170名左右，会议收到的论文数量也从三四十篇减少到16篇，参评的演示实验仪器由100多件减少为86件。上述分析表明疫情对演示实验的教学研究冲击较大。

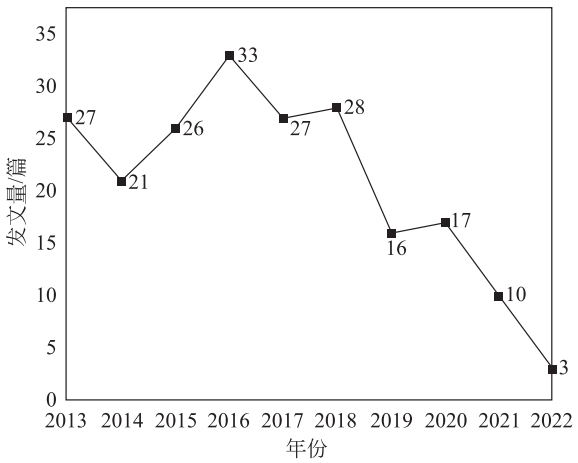


图1 近十年国内大学物理演示实验发文数量趋势

对期刊类型进行分析发现208篇文献共来自88种学术期刊。其中北大核心期刊7种，科技核心5种，JST收录期刊14种，南开大学高质量论文期刊15种。发文量前十的期刊信息见表1。从表1中可以看出排名前十的期刊发文量共有97篇，占比46.6%。其中，《物理与工程》发表的期刊最多，近十年共发表了20篇论文，占比9.6%。其

表 1 近十年大学物理演示实验发文量前十的期刊信息

序号	发文量	期刊名称	期刊类型
1	20	物理与工程	科技核心,JST,南开大学高质量论文期刊
2	17	大学物理实验	JST
3	12	物理实验	JST,南开大学高质量论文期刊
4	12	教育教学论坛	普通期刊
5	9	科技视界	普通期刊
6	7	实验室研究与探索	北大核心,CA,JST,南开大学高质量论文期刊
7	6	物理教师	北大核心,南开大学高质量论文期刊
8	5	大学物理	南开大学高质量论文期刊
9	5	教育现代化	普通期刊
10	4	实验科学与技术	JST,南开大学高质量论文期刊

次是《大学物理实验》和《物理实验》,分别发表了17篇和12篇,占比13.9%。其中,《物理实验》是每届高等学校物理演示实验教学研讨会后收到的近两年来物理演示实验教学改革、创新的成果的推荐期刊。

1.2 作者和机构合作分析

作者合作图是Citespace中的一种重要的图表类型,用于表示不同作者之间的合作关系。通过合作图,可以分析作者发表论文的频次、合作者之间的联系、强度以及研究主题的聚集等信息。可以掌握相关研究的深度和广度。在Citespace软件中分析的节点类型选择为"Author",选择显示的作者姓名为出现频率大于等于2的所有作者,结果如图2所示。从图2中可以看到节点N=238,节点越大标明作者频次出现越多。连线数量E=220,连线代表作者之间的合作联系,连线越粗说明他们在同一篇文献中出现的频率越高[11]。从节点数和连线数可以看出论文作者之间有一定的合作关系,但总体来看研究者之间较为分散,没有形成明显的合作网络。说明不同高校教师之间合作较少。

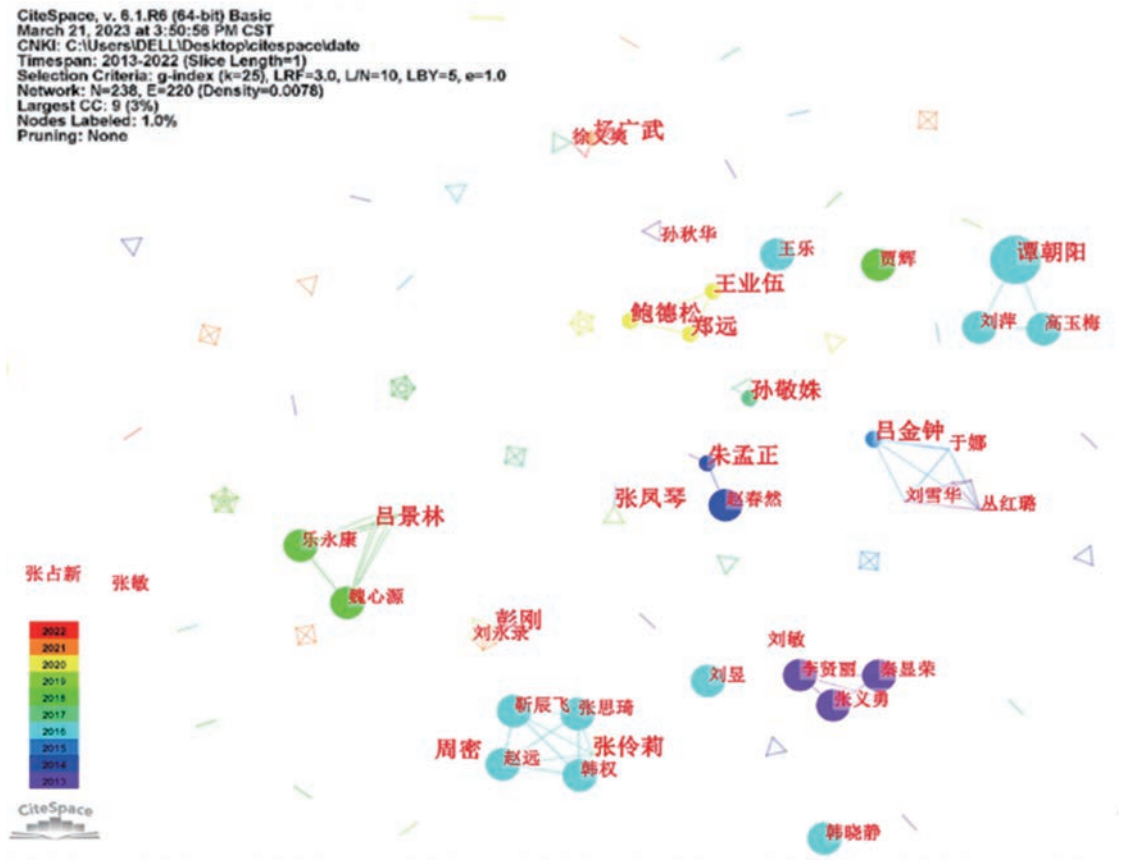


图2 近十年国内大学物理演示实验研究作者合作图

此外，本文对近十年作者发文量进行了统计，结果表明作者发文量较少，发文量大于等于3篇的作者只有十三位。其信息如表2所示。从表中搞科研看出所属单位均为高校。其中浙江大学有3位作者。核心作者群可以集中反映研究的发展趋势，依据普莱斯定律，核心作者发文最低积累量为0.749与发文量最大的作者的发文量的算术平方根的乘积[12]。统计发现发文量最多的作者发文量为3篇，计算得核心作者发文最低积累量为1.297，即发文量大于等于2篇的作者为核心作者，总人数为38人，占所有作者的15.9%，核心作者占比较少，说明高校教师在论文发表方面需要进一步提高。

作者机构统计可以显示哪些研究机构走在特定研究领域的前沿部分[13]。近十年大学物理演示实验研究机构的合作关系如图3所示。图3左上角显示数据“N＝189，E＝19”，N代表节点，即机构出现的位置节点，节点越大标明机构频次出现越多；E代表连线数量，连线代表机构之间的合作联系，连线越粗说明他们在同一篇文献中出现的频率越高。机构合作图中有189个节点，19条连线，说明各机构之间的合作较少。

表2 发文量前13的作者信息

序号	发文量/篇	作者	单位
1	3	彭刚	国防科学技术大学
2	3	周密	重庆理工大学
3	3	孙敬姝	吉林大学
4	3	吕金钟	北京交通大学海滨学院
5	3	吕景林	复旦大学
6	3	张凤琴	吉林大学
7	3	郑远	浙江大学
8	3	王业伍	浙江大学
9	3	朱孟正	淮北师范大学
10	3	张伶莉	哈尔滨工业大学
11	3	鲍德松	浙江大学
12	3	谭朝阳	电子科技大学中山学院
13	3	杨广武	天津中德应用技术大学

1.3 关键词共现

图4显示了出现频次为8的关键词共现图。关键词核心概括了论文的核心内容，共现分析直观地展示了此领域的主要研究内容和研究热点[14]。图4中字号较大的关键词为演示实验、大学物理、物理演示实验、教学模式、教学改革、教学

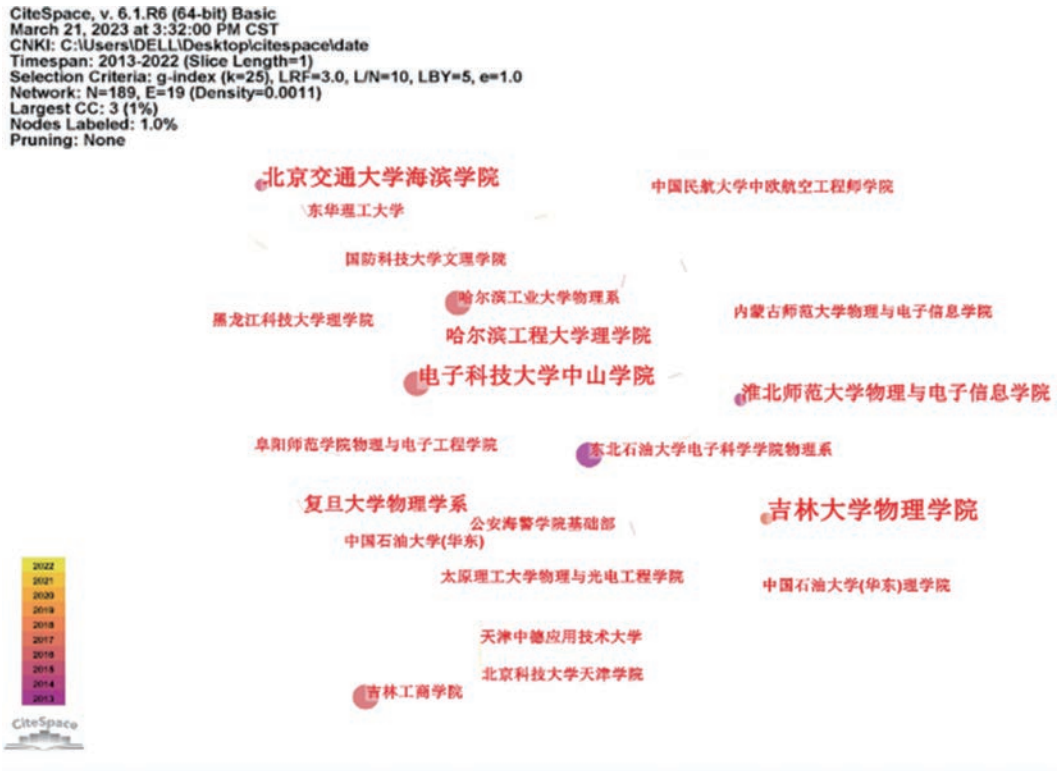


图3 近十年国内大学物理演示实验研究机构合作图

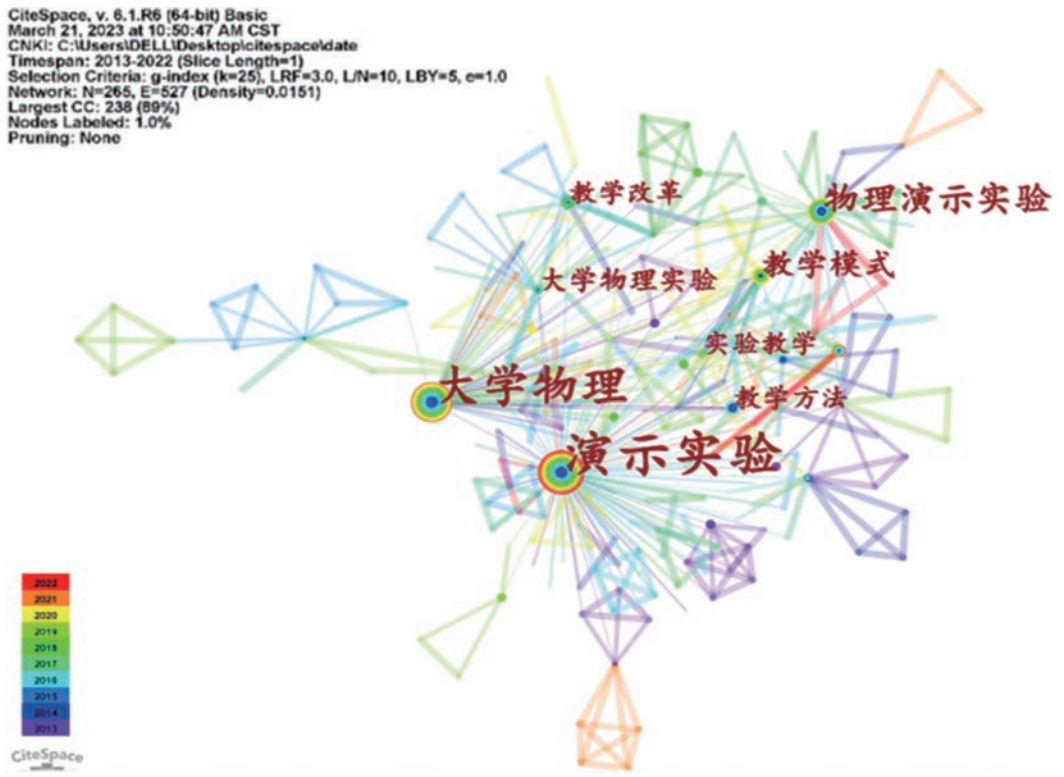


图 4　关键词共现图

方法、实验教学和大学物理实验等，这些关键词在文献中出现频率高，具体频次参见表 3。剔除掉与检索关键词相同的部分，剩下的关键词为大学物理、教学模式、教学改革、教学方法、实验教学和大学物理实验。上述关键词体现了目前关于大学物理演示实验的研究热点。

表 3　关键词在文献中出现的频率

关键词	中心值	频次
演示实验	1.12	104
大学物理	0.35	58
物理演示实验	0.27	22
教学模式	0.07	14
大学物理实验	0.08	10
教学方法	0.01	9
教学改革	0.04	9
实验教学	0.08	9

1.4　关键词聚类

聚类功能可以整合分散的热点关键词进行系统研究，聚类图谱侧重于体现聚类间的结构特征，突出关键节点及重要连接[15]。Citespace 根据网络结构和聚类的清晰度，提供了模块值（Q 值）和平均轮廓值（S 值），S 值越接近 1，网络的同质性越高，Q 大于 0.3 时，聚类的社团结构显著，S 大于 0.7 时，聚类是令人信服的[16]。对关键词进行聚类得到的结果如图 5 所示。$Q=0.6183$，$S=0.9032$，说明聚类结构十分显著且令人信服。此外，从图 5 中可以看出共有八个聚类。关键词聚类图谱可以表明该领域不同研究关注点，每个聚类的标签都是共现网络中的关键词，聚类的数字越小，包含的关键词越多。本文选取了每一聚类的前三个代表性最强的关键词，如表 4 所示，借助这些关键词有助于了解近十年国内大学物理演示实验的核心研究领域。

通过对表 4 中的关键词进行分析，结合图 4 中的关键词信息，可将近十年国内大学物理演示实验的研究分为以下几个领域：

1. 大学物理演示实验教学的理论方面，主要包括教学改革、教学模式和演示实验教学等。

2. 大学物理演示实验的教学技术方面，主要包括微课、翻转课堂和多媒体技术等。

3. 人才培养模式方面，主要包括创新人才培养、科学素质和应用型人才培养模式等。

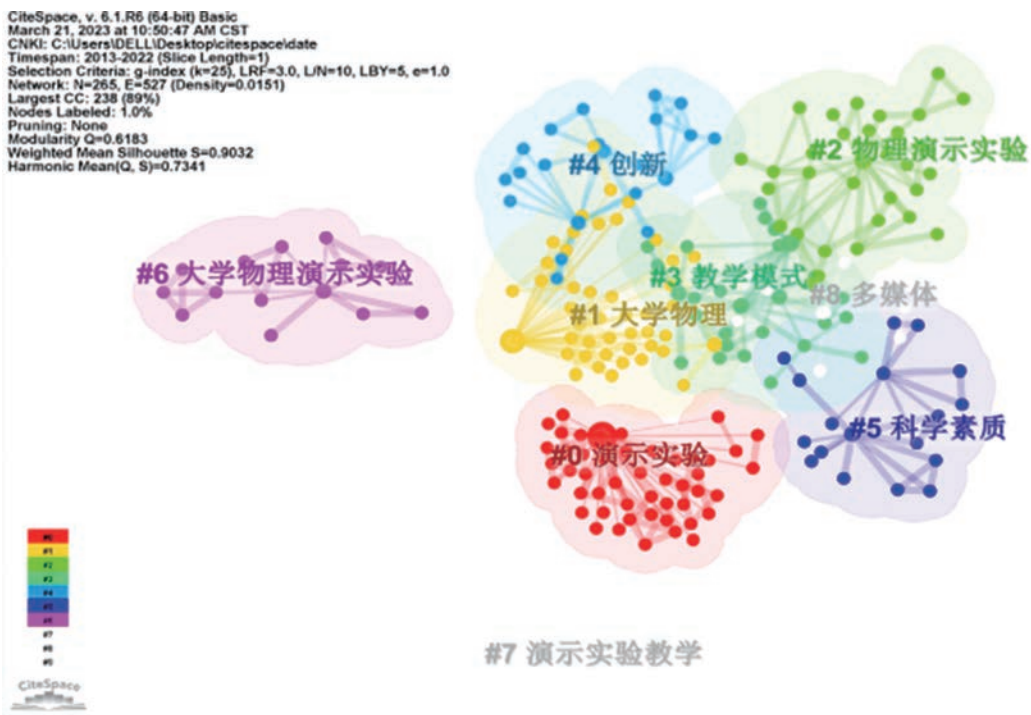


图5 关键词聚类图

表4 聚类汇总

聚类	文献值	S值	聚类内代表关键词
#0演示实验	49	1	应用型本科、数值法、微课
#1大学物理	45	0.714	教学方法改革、翻转课堂、物理演示与探索实验
#2物理演示实验	32	0.946	科学素养、高校、静电实验
#3教学模式	27	0.844	融合、创新能力、自主式
#4创新	21	0.935	教学效果、主题活动、创新人才培养
#5科学素质	18	0.891	拓展研究、多维教学体系、创新研究
#6大学物理演示实验	14	0.988	应用型人才培养模式、创新思维能力、动手操作能力
#7演示实验教学	8	0.993	演示实验、多媒体技术、物理课堂

1.5 研究演进阶段

图6为对每一组聚类的时间演化进行研究的时间线图。其中主要研究了6个聚类，每个聚类的标签是共现网络中的关键词，这些关键词按照它们在对应时间内出现的年份，在所属的聚类中铺展开来，显示出每个聚类里关键词的发展情况。由图6可以发现，早期大学物理演示实验关注的焦点主要集中在“物理演示实验”。随时间发展，逐步转向“教学创新”“实验室建设”“创新人才培养”等方面。近年来，“便携式仪器”“虚拟实验”“新工科”等成为关注领域，演示实验的教学在逐步发展，同时演示方法也随着科技水平的发展不断增多，演示仪器也逐步走向便携和创新。

图7列出了近十年大学物理演示实验的研究过程中短期反复出现的词。这些短期反复出现的词称为突变词，通过分析突变词生成突变词图谱，可以得到关键词引用量激增的年份，并且显示出该词的流行时间段[10]。图7中突增率最高的词为新工科、多媒体、物理演示实验、科学素质、物理实验、演示仪器、教学内容等，说明这些方面的发展势头较猛，是物理演示实验研究过程中在某一时间段内受到关注最多的领域，即研究重点，具有一定的研究价值。从不同时期来看，早期的突变词为科学素质、教学内容和多媒体。随时间发展，突现词转变为创新、大学物理实验和物理演示实验。近年来，

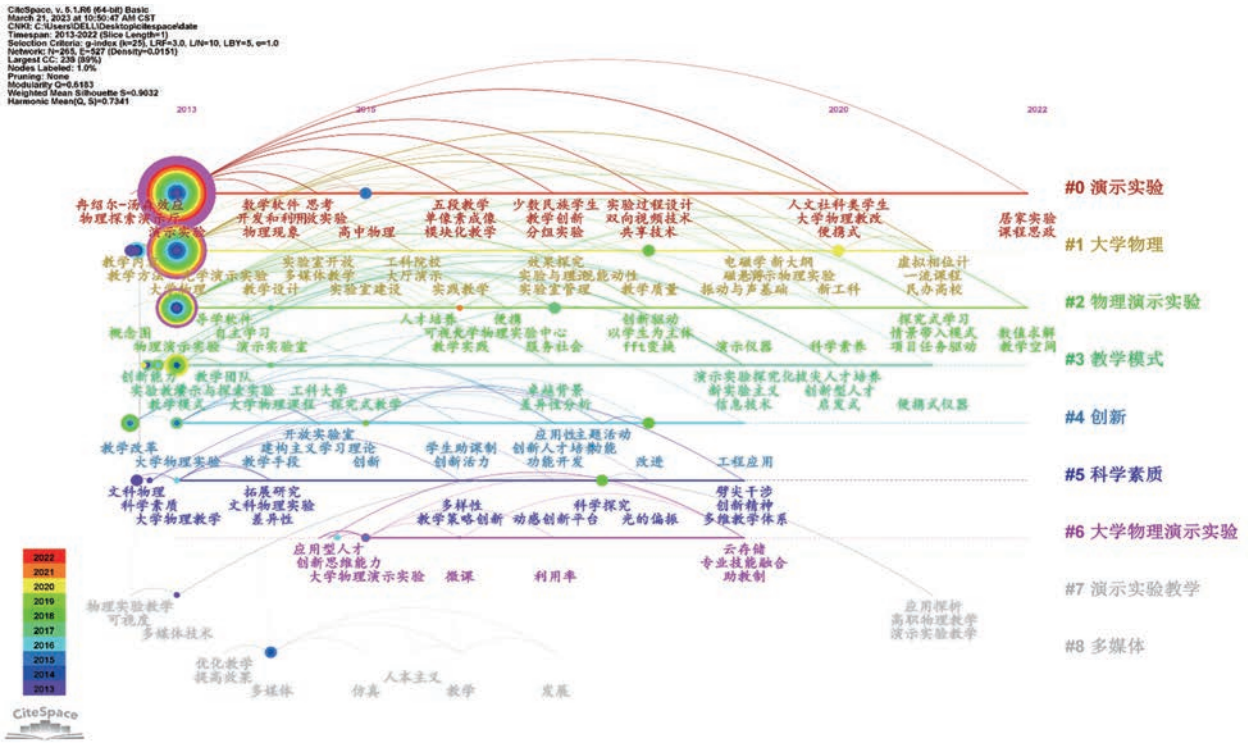


图 6　时间线图

Keywords	Year	Strength	Begin	End	2013—2022
科学素质	2013	1.17	**2013**	2013	
教学内容	2013	1.02	**2013**	2015	
多媒体	2014	1.67	**2014**	2015	
创新思维能力	2015	1.28	**2015**	2016	
创新	2015	0.99	**2015**	2018	
大学物理实验	2013	0.98	**2015**	2017	
物理演示实验	2013	1.56	**2016**	2018	
光的偏振	2018	1	**2018**	2022	
物理实验	2013	1.16	**2019**	2020	
演示仪器	2019	1.02	**2019**	2020	
新工科	2020	2.16	**2020**	2022	

图 7　前十一个突现度最高的关键词信息

光的偏振、演示仪器、新工科成为新的研究热点。

2　近十年国内大学物理演示实验相关研究质性分析

结合近十年国内大学物理演示实验相关研究的量化分析结果，本部分将对国内大学物理演示实验相关研究进行质性的文本分析。具体包括演示实验的作用、物理演示实验的类别、物理演示实验的成效等方面。

2.1　物理演示实验的价值

物理演示实验能够帮助学生理解物理概念，使抽象的物理知识具象化，大多情况下由教师在课堂教学中进行演示，学生在老师的操作下进行观察，从而提升对物理的兴趣，增加探索欲望，达到理解和掌握物理理论知识的目的[17]。大学物理演示实验和普通物理实验以及近代物理实验并不相同，演示实验的主体一般是老师，老师对物理现象进行演示，学生进行观察和理解。随着教育的改革，演示实验的主体更倾向于学生，更加注重学生的参与性和互动性，注重培养学生的动手能力和主动性。通过与老师的互动和小组合作，往往能培养学生在实验中发现问题然后解决问题的能力，培养合作意识，增强学习积极性，也使得对深层知识的掌握和对科学真理的探求素养得到提升。以西藏大学为例，引入物理演示实验的区内生源班有更好的大学物理教学效果[18]。

同时物理演示实验对大学物理实验课程的教学效果也有促进作用，如电子科技大学中山学院通过加强演示实验环节，激发学生发明创造，并且通过教师团队的努力，使大学物理实验仪器进行了改造升级，且对物理实验的内容、教学方法、设备等方面进行了改革，有效地促进了大学物理实

验课程的发展[19]。

随着对物理演示实验教学重视程度的增加，近几年在演示实验教学相关的教改项目立项逐渐增加。例如，在2022年教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会教学研究立项项目中关于物理演示实验教学的项目有清华大学的《大学物理典型课堂演示实验教学研究》和南开大学的《国际化视野下融合思政元素的大学物理演示实验项目库建设与研究》。2022年教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会大中物理教育衔接工作委员会教学研究课题中增加了要增加了依托物理演示实验教学面向学生和社会公众的物理科学素养和科普教学的研究和实践。其中，南开大学的《基于项目式学习的物理科普教育实践探索》、新疆师范大学的《基于大学物理演示实验开展科普教育的实践研究》和苏州科技大学的《高校科普创新工作体系的探索与实践》获得立项。

2.2 大学物理演示实验的类别

目前，国内许多高校都开设了面向全校学生的大学物理演示实验系列课程，包括北京大学、清华大学、南开大学、复旦大学等。例如，复旦大学开设的《物理演示实验拓展》选修课，在学生明白演示实验的教学目标的基础上自主选择课题，学生需要自拟实验方案，考核方式的评定依据也从以实验结果转变为以学生的投入与收获，教师的作用为讨论和解答疑问，做到了以学生为主体，学生的学习模式由被动转变为主动，很好地培养了学生的创新思维和创新能力，于2014年被评为上海市精品课程[20]。南开大学为全校学生开设了《物理演示实验》《趣味物理实验与探究》等课程。其中，《物理演示实验》获得了南开大学校级示范精品课程。这些课程的开设，为学生提供了自由发挥的空间，提高了演示仪器的使用率，培养了学生的核心素养和科学知识水平。依据本文的研究，目前大学物理演示实验类型主要包括随堂演示实验、课外演示实验、面向全体公民的科学普及活动等。

2.2.1 随堂演示实验

传统的课堂物理演示实验通常以教师在课堂上进行演示，学生进行观察的形式进行。随堂演示实验的优点是具有良好的时效性，在讲解理论知识的时候直接演示，有助于提高学生注意力和学习兴趣。但也存在一些问题，课堂演示实验实物演示较少，很多高校采用播放演示实验视频来进行演示，导致教学效果差。复旦大学、北京交通大学在课堂演示方面做得较好，其演示实验室为教师准备了100多种仪器，覆盖了力、热、光、电等学科，还配备了轻便的手推车[20]。

2.2.2 课外演示实验

课外大学物理演示实验教学形式就更加丰富，学生可以利用课外时间，采用预约登记等形式进行开放性演示实验。开放性物理实验有很多形式，如演示实验展厅、走廊演示和演示实验室等。课外演示实验比起课堂演示实验的优势是可以使用课堂上不方便使用的大型演示仪器、学生可以亲自动手进行实验、学生可以更好地分配时间等。以浙江大学为例，其建立了大学物理演示实验教学空间，一共分为三部分，分别为主题展厅、用来小班教学的偏振3D投影多功能教室和视频展示科学长廊，为学生的课外演示实验提供了很好的教学条件[21]。

2.2.3 科学普及活动

许多高校依托物理演示实验开展面向学生和社会公众的教学研究和实践。例如，南开大学物理演示实验室近年来随着“双一流”建设的推进，逐渐发展成“服务本科课程，面向大众开放”的特色实验室，先后成为“弱光非线性光子学教育部重点实验室”科普基地、“天津市信息光子材料与技术重点实验室”科普基地以及天津市科普基地。物理演示实验室先后开展了多项丰富多彩且有良好互动性的物理科普活动，这些科普活动充分发挥了物理演示实验的育人功能，提高了实验仪器的使用效率，被多家媒体报道，受到了社会的关注。北京交通大学物理演示与探索实验室形成了一套科普活动模式，为更多高校实验室投身于科普事业，服务社会做出了榜样。近年来其物理演示实验室工作显著，主要有：实验室为学生全年提供演示实验课程8学时，为学生的大学生创新项目和物理竞赛提供平台，指导学生获得国家级奖项和市级奖项。2015年成为北京市首批中学生课外实践基地，2015年至2017年，为2000多名学生提供参加实验室科普送课活动的机会[7]。苏州科技大学物理科学与技术学院于2022年在B站举办了“物理科普演示实验室开放日”直播科普活动，有2000多人观看。此次科普活动依托江苏省2022年科技活动周暨科普宣传周系列活动，主要面向中小学生和科普爱好者，由物理科学与技术学院的四位老师精心挑选了诸如“静电实验”“辉光球”“无线传输电”等20多件演示仪器进行展示

和讲解，让学生们体会物理的奇妙。苏州科技大学的此次活动为高校开展演示实验实验室科普育人活动提供了新的方案。

2.3 大学物理演示实验的成效

通过近十年来大学物理演示实验相关研究的整理，发现目前物理演示实验取得了一定的成效：

2.3.1 实验教学技术革新

随着国家经济和科学技术的发展，目前的教学采用了很多新的技术。传统的物理演示实验室是一定程度上可以解决课堂演示的不足之处。但在现在的数字化时代，随着网络的大量普及，微课化、碎片化学习更受学生的青睐。例如，黑龙江科技大学基于共享网络空间创建了物理演示实验教学平台，该教学平台基于“360Cloud＋Faisco”，初步实现了物理演示实验数字化视频的共建互享，适应了学生微课化、碎片化的学习趋势[4]。太原理工大学物理与光电工程学院采用了微课方式来完成演示实验的预习环节，并且有效改善了实验教学课堂以及降低了实验仪器的损坏率，同时采用云储存沟通教师和学生的资料共享，有效提高了演示实验的教学效果[22]。

2.3.2 自制仪器倍受肯定

和大学物理实验课的实验仪器相比，演示实验仪器有种类丰富、与理论课知识点密切相关、更加方便等特点[20]。各个高校都在纷纷加入自制演示仪器的队伍，根据高等学校物理演示实验教学研讨会的信息表明，每届会议均能受到 100 件左右的演示仪器参评，这充分表明了自制演示仪器的重要性。学生在老师的指导下自制物理演示实验仪器，可以培养其解决问题能力和创新能力，在制作演示仪器的过程中，很多时候无法单独依靠个人完成项目，故自制仪器还能锻炼学生的动手能力和团队协作能力。学生创新自制的演示仪器具有灵活性、直观性、适用性和经济性[23]。制作好的演示仪器能够为演示实验教学实验室提供更丰富的资源[5]。自制演示仪器彰显了高校教师在实验教学和仪器研发方面的实力和潜力，可以有效推进教学改革、提高学生创新能力。

2.3.3 人才培养效果明显

教育部在《关于一流本科课程建设的实施意见》中指出，要解决好教与学模式创新的问题，通过教学方法创新实现对传统课堂教学的改革，强调以学生为中心，激发课堂生机活力，进一步提升卓越拔尖人才培养能力。目前国家和社会需要更多的创新型人才，创新型人才应该具有两方面的基本素质：一是善于发现问题，善于学习知识并灵活运用知识解决问题；二是创新型人才应该具有良好的心理品质，如敢于挑战，坚忍不拔，愈挫愈勇等。传统的物理演示实验主要是教师在课堂上操作仪器演示，学生进行观察，这种被动的方式很少能让学生有参与感，不利于培养创新型人才，因此要完善人才培养体系。完善人才培养体系，首先要加强教师队伍建设和教学及科研水平，教师良好的知识储备和能力是完成教学任务必不可少的条件，要重视青年教师培养，采用老教师带动青年教师使用演示实验仪器的方法使青年教师逐步熟悉演示实验教学。其次还应该建设相关的创新人才培养的课程体系，建设创新人才培养的教学条件建设，如扩建演示实验室，维修和购买演示实验仪器，采用最新的教学配套设施等。同时还需要构建创新人才培养教学模式，如吉林大学物理学院的开放的大学物理演示实验教学，学生可以通过预约随时利用课余时间进入演示实验室进行学习[24]。以及复旦大学的以学生为主体的物理演示实验教学模式，获得了国家及教学成果奖。其教学模式的革新突破了传统的物理演示实验模式，没有固定内容的实践过程给予了学生充分的自由度，培养了学生发现问题解决问题的能力，让学生独立思考，在失败中获得前进的勇气，形成了人才培养和课程资源建设双赢的模式[6]。

3 相关研究对大学物理演示实验教学的启示

3.1 国内大学物理演示实验教学的不足

依据本论文的相关研究，目前大学物理演示实验教学在以下方面存在不足：

(1)目前高校课堂中的演示实验教学仍以教师演示为主，很少让学生自主进行实验，学生缺乏主动性。

(2) 自制仪器的教具较少，购买的教具多。课堂演示中实物演示较少，多使用多媒体和影像进行演示，缺乏互动性，尚未形成成熟的课堂演示实验体系。

(3) 虚拟平台的演示实验教学开始起步，演示实验资源较少。

3.2 国内大学物理演示实验教学的发展方向

3.2.1 加强课程思政教育

“课程思政”是落实立德树人根本任务的重要

举措，这既是新时代的教育使命，也是崭新的教育理念。物理学有着深厚的历史底蕴、实事求是的科学精神、潜移默化的人文价值，也是物理课程丰富多彩的思政教育元素与资源所在[25]。全国高等学校第十五届物理演示实验教学研讨会新增了“基于课程思政的物理演示实验教学研究”的研究主题，说明课程思政在物理演示实验中逐渐受到重视。目前的信息技术已经十分普及，学生可以自主从网络获取相关知识，未来的教学应该从知识传授转向能力培养，再向价值塑造转变。在传授过程中实现能力培养和价值塑造，做到知识传授与人文精神、科学精神培养的有机融合。

3.2.2 建设数值仿真物理演示实验

物理仿真实验是通过建造虚拟的实验环境对实验进行模拟，可以有效避免因为环境、资金、设备、时间等因素带来的不便，实现传统实验达不到的效果。仿真实验可以应用在课堂现场、物理实验课、科技馆、科普展厅等场合。当前国内建设了很多虚拟仿真实验项目，但多数以定量实验为主，并不适合演示物理实验教学需求。因此，基于物理演示实验的虚拟仿真实验资源建设显得十分必要。

3.2.3 加强实验室环境建设

传统的物理演示实验室仅仅提供了实验的场所，不具备育人的功能。随着教育理念的不断更新，研究发现环境对于学生发展与学习经验建构有着重要价值。因此，现代化的教学实验室它不应是传统意义上的纯粹学科实验室，而是更注重提供一种全方位、多元化的育人环境，致力于激发学生对科学探究的好奇心和兴趣，掌握科学探究的思维过程与能力。这种实验室的设计更注重课程设置、教学方法、实验项目等方面的创新和整合，使学生能够在实验室中获得更全面、更系统、更深入的科学知识和科学精神。同时，它也充分考虑了环境对学习的影响，让学生在一个舒适、充满活力的环境中学习和实验，更容易培养学生的兴趣和潜力。因此，这种实验室在促进学生全面发展、提高学生科学素养和培养学生的创新能力等方面具有创新性。

3.2.4 创新教学模式

传统的教学模式下，学生存在学习兴趣和动力不足、自主学习和深度学习能力欠缺以及创新意识和能力薄弱的问题。随着对人才质量的更高要求，传统的教学方式需要同时进行改进。例如PPBL(Physics problem based learning)模式和BOPPPS(Bridge-In, Objectives, Preassessment, Participatory Learning, Postassessment and Summary)模式等。PPBL模式在问题引领的过程中培养学生的物理思维、让学生掌握基本理论、提升创新能力。PPBL相对于传统教学模式有五个转变：教学理念从以教师为中心转变为以学生为中心，教学目的从传授知识转变为发展能力，教学内容从知识体系转变为问题逻辑，教学方式从教师讲授转变为学生探究，学业评价由知识水平转变为运用能力[26]。

BOPPPS模式起源于加拿大技能培训工作坊，根据人的注意力只能维持大约15分钟的规律，将课堂内容分解为一个一个的小单元[27]。其中B指正式开始教学之前的引言环节，用来吸引学生的注意力，培养学生的学习兴趣和学习动力；O指学习目标和预期效果，是学生明确学习的方向，有利于学生把握重点；第一个P指对学生进行摸底测试，了解学生的基础知识并根据学生的状况调整教学思路；第二个P指师生参与式学习，通过师生互动完成课程核心内容，要求教师随机应变，鼓励学生主动参与教学环节，增强参与式教学的氛围；第三个P指课堂快结束时对学生进行测试，检验学生的学习情况；S指对本次课堂的总结，教师带领学生总结内容，布置课后作业等。BOPPPS教学模式在物理演示实验教学方面有很大的应用前景。

3.2.5 研制个性化教学仪器

由于自制仪器通常根据教学需求和学生能力进行定制，学生可以更深入地参与实验过程，积极探索和发现知识，为学生提供更加丰富和有趣的学习体验，同时培养他们的实践能力、问题解决能力。这种个性化学习体验可以激发学生的学习兴趣和动力，提高他们的学习效果。每两年举办的全国高等学校物理演示实验教学研讨会都会设立物理演示实验教学自制仪器展评环节。通过该环节，教师可以展示使用自制仪器进行实验教学的经验和效果，包括教学效果、学生反馈等。这些评估和反馈可以帮助改进和优化自制仪器的性能和使用方式，提升实验教学的质量和效果。同时，通过与其他教师的交流和互动，可以获取更多的教学灵感和改进意见，不断提升实验教学的创新性和实效性。

4 总结

本文从中国知网搜索近十年关于大学物理演示实验的文献，使用Citespace软件对相关文献在

发文量和期刊类型、作者和机构合作情况、关键词共现、关键词聚类和研究演进阶段这五个方面进行量化分析。从发文量来看，2018 年以前发文数量比较平稳，2013 年至 2018 年文献多在二三十篇左右，近几年研究热度有所减少；从期刊分析得知高质量期刊占全部期刊的总量较少；通过对研究机构的分析可知高校是研究大学物理演示实验教学的主阵地；通过对作者的分析发现研究者之间合作比较分散，难以形成大的合作网络；通过关键词共现和聚类分析可以发现主要研究领域包括物理演示实验教学的理论方面、教学技术方面、人才培养模式方面；研究热点包括“便携式仪器”“虚拟实验”“新工科”等。

根据量化分析得到的主要研究领域和研究热点确定了对演示实验的作用、物理演示实验的类别和物理演示实验的成效进行质性分析。演示实验增加了学习物理的兴趣，有助于培养学生的综合能力。物理演示实验的类别包括随堂演示实验、课外演示实验和科学普及活动。物理演示实验的成效包括实验教学技术革新、自制仪器备受肯定和人才培养效果明显。其中教学技术的革新表现在网络的大量普及，微课化、碎片化学习更受青睐。自制仪器方面，高等学校物理演示实验教学研讨会每届会议均能受到 100 件左右的演示仪器参评，自制演示仪器彰显了高校教师在实验教学，仪器研发方面的实力和潜力，可以有效推进教学改革。人才培养方面，通过建设相关的创新人才培养的课程体系、教学条件建设和构建创新人才培养教学模式等方法培养更多的创新型人才。

对近几年大学物理演示实验教学的成果和不足进行总结分析。不足之处包括学生缺乏主动性，虚拟平台技术的不成熟，自制仪器较少等。根据上述分析，本论文对未来大学物理演示实验教学的发展提出了五点建议：第一，加强课程思政教育的建设；第二，建设数值仿真物理演示实验；第三，加强实验室环境建设；第四，创新教学模式；第五，研制个性化教学仪器。

参 考 文 献

[1] 陈惠敏，石雁祥，张承据. 大学物理演示实验教学模式的探讨[J]. 大学物理实验，2007，20(4)：95-99. lCHEN H M，SHI Y X，ZHANG C J. The research of modes of the demonstrate experiment on the general physics[J]. Physical Experiment of College，2007，20(4)：95-99. (in Chinese)

[2] 韩璐，李延龙. 基于人本主义的大学物理演示实验教学[J]. 吉林省教育学院学报，2016，32(9)：106-109.
HAN L，LI Y L. Demonstration experiment teaching in college physics based on humanism[J]. Journal of Jilin Provincial Institute of Education，2016，32(9)：106-109. (in Chinese)

[3] 展凯云. 大学物理教学中应用演示实验的教学方法思考与实践[J]. 物理与工程，2016，26(S1)：202-205.
ZHAN K Y. Reflection and practice on the teaching method of applying demonstration experiments in college physics teaching [J]. Physics and Engineering，2016，26(S1)：202-205. (in Chinese)

[4] 李海宝. 基于共享网络空间的物理演示实验教学平台[J]. 实验室研究与探索，2015，34(5)：177-181.
LI H B. Physics demonstration experiment teaching platform based on network sharing space[J]. Research and Exploration in Laboratory，2015，34(5)：177-181. (in Chinese)

[5] 解校辉，刘鉴锋，王畅，等. 自制物理演示实验仪器与学生综合能力培养的探索[J]. 黑龙江教育(理论与实践)，2016(Z1)：21-22.
XIE X H，LIU J F，WANG C，et al. Exploration of self-made physics demonstration experimental instruments and the cultivation of students' comprehensive abilities[J]. Heilongjiang Education (Theory & Practice)，2016(Z1)：21-22. (in Chinese)

[6] 吕景林，乐永康，冀敏，等. 创新驱动，开启新形势下以学生为主体的物理演示实验教学新模式[J]. 物理实验，2018，38(S1)：43-46.
LV J L，LE Y K，JI M，et al. Creatively motivated and student-oriented unprecedented model of physics demonstration experiment teaching in a new era[J]. Physics Experimentation，2018，38(S1)：43-46. (in Chinese)

[7] 简阳天. 高校实验室发挥社会服务职能的探索与研究——以北京交通大学物理演示与探索实验室为例[J]. 教育现代化，2018，5(18)：160-161，175.
JIAN Y T. Exploration and research on the social service functions of university laboratories—Taking the physics demonstration and exploration laboratory of Beijing Jiaotong University as an example [J]. Education Modernization，2018，5(18)：160-161，175. (in Chinese)

[8] 侯剑华，胡志刚. CiteSpace 软件应用研究的回顾与展望[J]. 现代情报，2013，33(4)：99-103.
HOU J H，HU Z G. Review on the application of CiteSpace at home and abroad[J]. Journal of Modern Information，2013，33(4)：99-103. (in Chinese)

[9] 杨选瑾，熊宏齐. 国内实验教学信息化研究进展——基于 CitesPace 的可视化分析[J]. 实验室研究与探索，2018，37(6)：218-222，226.
YANG X J，XIONG H Q. Progress of research of domestic experimental teaching informatization—Visual analysis based on CitesPace [J]. Research and Exploration in Laboratory，2018，37(6)：218-222，226. (in Chinese)

[10] 林子舰，冯超超，王廷振，等. 知识图谱技术在物理实验教

学中的应用探讨[J].物理与工程,2020,30(4):88-95.
LIN Z J, FENG C C, WANG T Z, et al. The exploration of the application of knowledge mapping technique on physics experiment teaching [J]. Physics and Engineering, 2020, 30(4): 88-95. (in Chinese)

[11] 袁琳,孙敬姝,盖学敏. 基于Citespace的物理演示实验可视化分析[J].物理实验,2018,38(1):33-38.
YUAN L, SUN J S, GAI X M. Visualization analysis of demonstration experiment based on Citespce[J]. Physics Experimentation, 2018, 38(1): 33-38. (in Chinese)

[12] 毛乐. 我国教育惩戒的研究热点与趋势——基于CiteSpace的可视化分析[J].教育理论与实践,2023,43(11):18-22.
MAO L. Research hotspots and trends of educational punishment in China—Visual analysis based on CiteSpace[J]. Theory and Practice of Education, 2023, 43(11): 18-22. (in Chinese)

[13] 张永山.《情报科学》2009年文献计量学分析[J].情报科学,2010,28(11):1661-1665+1692.
ZHANG Y S. Analysis on bibliometrics of information science in 2009[J]. Information Science, 2010, 28(11): 1661-1665+1692. (in Chinese)

[14] 褚会敏,刁娟娟,潘月丽. 基于Citespace的中医药治疗肾病综合征可视化分析[J].世界科学技术-中医药现代化,2022,24(12):5017-5025.
CHU H M, DIAO J J, PAN Y L. Visualization analysis of nephrotic syndrome treated by traditional Chinese medicine based on Citespace[J]. Modernization of Traditional Chinese Medicine and Materia Medica-World Science and Technology, 2022, 24(12): 5017-5025. (in Chinese)

[15] 耿敬杰,汪军民. 基于CiteSpace的集体建设用地问题研究进展及热点分析[J].国土资源科技管理,2017,34(5):47-61.
GENG J J, WANG J M. The research status and hotspots of collective construction land on Citespace[J]. Scientific and Technological Management of Land and Resources, 2017, 34(5): 47-61. (in Chinese)

[16] 许朦,赵文虎. 我国矿井水处理研究领域的知识图谱分析[J].中国矿业,2023,32(5):8-15.
XU M, ZHAO W H. Knowledge mapping analysis in the research field of mine water treatment in China[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(5): 8-15. (in Chinese)

[17] 洪贤富,杨秀峰,张勇. 大学物理演示实验教学资源建设[J].西部素质教育,2017,3(22):114+118.
HONG X F, YANG X F, ZHANG Y. Construction of teaching resources for university physics demonstration experiments [J]. Western China Quality Education, 2017, 3(22): 114+118. (in Chinese)

[18] 周毅,周艳霞. 将演示性实验引入大学物理课程的教学方法探究——以西藏大学为例[J].实验室研究与探索,2020,39(4):194-196.
ZHOU Y, ZHOU Y X. Practice of the demonstration physics experiment in college physics teaching—A case study of Tibet University[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2020, 39(4): 194-196. (in Chinese)

[19] 谭朝阳. 探索大学物理实验教学新思路有效激发学生创新活力[J].大学物理实验,2016,29(4):117-119.
TAN C Y. Stimulating students' creativity via exploring new ideas in physical experiment[J]. Physical Experiment of College, 2016, 29(4): 117-119. (in Chinese)

[20] 吕景林,魏心源. 复旦大学物理演示实验教学实践回顾[J].实验室研究与探索,2017,36(7):178-181.
LV J L, WEI X Y. Review of teaching practice of physics demonstration experiments in Fudan University[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2017, 36(7): 178-181. (in Chinese)

[21] 郑远,鲍德松,王业伍. 可视化物理演示实验教学的探索与实践[J].物理实验,2022,42(6):26-32.
ZHEN Y, BAO D S, WANG Y W. Exploration and practice of visual demonstration experiment teaching[J]. Physics Experimentation, 2022, 42(6): 26-32. (in Chinese)

[22] 韩燕,薛林. 利用微课和云存储提升大学物理演示实验的探讨[J].大学物理实验,2019,32(2):98-100.
HAN Y, XUE L. Discussion on micro-course and cloud storage for improving the college physics demonstration experiment[J]. Physical Experiment of College, 2019, 32(2): 98-100. (in Chinese)

[23] 李雪琴,赵云芳,唐艳妮,等. 基于目标分类的物理演示实验教学方法探索与实践[J].物理实验,2018,38(1):39-42.
LI X Q, ZHAO Y F, TANG Y N, et al. Exploration and practice of physics demonstration experiment teaching method based on target classification[J]. Physics Experimentation, 2018, 38(1): 39-42. (in Chinese)

[24] 张凤琴,林晓珑,王逍. 创新人才培养下的大学物理实验教学改革研究[J].大学物理,2017,36(3):36-39.
ZHANG F Q, LIN X L, WANG X. Research on the teaching reform of college physics experiment under the cultivation of creative talents[J]. College Physics, 2017, 36(3): 36-39. (in Chinese)

[25] 王小力. 大学物理课程思政研究与实践[J].中国大学教学,2020,362(10):54-57.
WANG X L. Research and practice on ideological and political education in college physics courses [J]. China University Teaching, 2020, 362(10): 54-57. (in Chinese)

[26] 吕东燕,周原. 基于OBE理念的大学物理实验PPBL教学模式的探究[J].科技视界,2021,339(9):31-32.
LV D Y, ZHOU Y. Exploration of PPBL teaching model for college physics experiments based on OBE concept [J]. Science & Technology Vision, 2021, 339(9): 31-32. (in Chinese)

[27] 曹丹平,印兴耀. 加拿大BOPPPS教学模式及其对高等教育改革的启示[J].实验室研究与探索,2016,35(2):196-200+249.
CAO D P, YIN X Y. The BOPPPS teaching mode in Canada and its implications for higher education reform[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2016, 35(2): 196-200+249. (in Chinese)

大学物理实验课反溯教学方法研究

谢子昂[1]　张师平[1]　陈　森[2]　裴艺丽[2]　李　莉[2]　邱红梅[1]　赵雪丹[1]　王云良[1]　吴　平[1]
（北京科技大学[1]数理学院；[2]自然科学基础实验中心，北京　100083）

摘　要　为促进新形势下的“大学物理实验”课程体系改革，推动“高素质、创新型”人才培养朝新方向、高水平前进，北京科技大学“大学物理实验课反溯教学方法研究”课题组提出了物理实验课反溯教学方法，将现代科技的最新发展引入课程，对反溯教学方法进行了探索。课题组从实验现象出发，引导学生反溯基本物理学概念、原理和现象，并相应组织编排物理实验内容，激发学生的探索欲和创造欲，全面提升学生的学习兴趣和学习能力。课题组从实验室建设、新教材建设、新实验编排、本科生科技创新、实验课程与最新科研项目结合等多个角度出发，对“大学物理实验”课程体系进行了全面深化，促进学生变“要我学”为“我要学”，并取得了一系列教学成果。

关键词　大学物理实验；反溯教学方法；课程建设；现代科技

RESEARCH ON RETROACTIVE TEACHING METHOD FOR COLLEGE PHYSICS EXPERIMENT COURSE

XIE Ziang[1]　ZHANG Shiping[1]　Chen Sen[2]　PEI Yili[2]　LI Li[2]　QIU Hongmei[1]　ZHAO Xuedan[1]
WANG Yunliang[1]　WU Ping[1]
([1] School of Mathematics and Physics;
[2] Basic Experimental Center of Natural Science, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

Abstract　In order to promote the reform of the College Physics Experiment curriculum system under the new situation, and to push forward the cultivation of “high-quality and innovative talents” at an advanced level, the research group on “Retroactive Teaching Method for College Physics Experiment” in University of Science and Technology Beijing has proposed the retroactive teaching method for the course. This teaching method introduces the latest developments in modern science and technology into the curriculum and explores retroactive teaching methods. The research team started from experimental phenomena, guided students to trace back basic physical concepts, principles, and phenomena, and organized physics experiment contents accordingly, stimulating students' desire to explore and create, and thus com-

收稿日期：2023-06-05
基金项目：北京科技大学2021年度本科教育教学改革重点项目(JG2021Z05)和教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会2020年教学研究项目(DJZW202006hb)。
作者简介：谢子昂，男，讲师，主要研究方向为半导体光电器件、柔性功能材料、微纳结构制造与电磁仿真等，xieziang@ustb.edu.cn。
通讯作者：吴平，女，教授，主要从事大学物理与实验教学研究及凝聚态物理研究，研究方向为低维能源材料、颗粒物质物理等，pingwu@sas.ustb.edu.cn。
引文格式：谢子昂，张师平，陈森，等. 大学物理实验课反溯教学方法研究[J]. 物理与工程，2023，33(4)：107-120.
Cite this article: XIE Z A, ZHANG S P, CHEN S, et al. Research on retroactive teaching method for college physics experiment course [J]. Physics and Engineering, 2023, 33(4): 107-120. (in Chinese)

prehensively enhancing their learning ability. The research team has conducted a comprehensive deepening of the College Physics Experiment curriculum system from multiple perspectives, including laboratory construction, new textbook and new experiment arrangements, undergraduate scientific and technological innovation projects, and the combination of experimental courses with the latest scientific research frontiers. These practices stimulated our students to change from being told "you must learn" to saying "I wish to learn" on their own initiative. As a result, a series of significant teaching achievements have been accomplished.

Key words college physics experiment; retroactive teaching method; curriculum construction; modern science and technology

目前,我国已成为世界制造大国,制造业规模跃居世界第一,已稳步迈入由"中国制造"转向"中国创造"的崭新阶段。未来20年内,我国人才需求方向将由"技术型"转变为"高素质、创新型"[1-3]。如何从高校教育的角度,将解决问题的技术型人才提升至善于提出问题、分析问题和解决问题的创新型人才,是当今教学面临的重要改革方向[4-5]。

作为高校理工科人才培养过程的必要环节,"大学物理实验"课程是学生进入大学后接受系统的实验技能训练的开端,对切实提高人才培养质量具有重要作用和意义[6-7]。但课程中还存在部分实验项目形式陈旧、教学内容与教学方法传统、与前沿科技结合较弱、不易激发学习热情等情况。学生完成实验操作后缺乏兴趣,更不知道如何对实验结果进行分析和讨论。教师的引导因人而异[8-9]。学生投入了时间精力,却远未能达到应有的学习效果。进行资源统合并改革教学方式,成为课程亟待解决的问题。

北京科技大学"大学物理实验课反溯教学方法研究"课题组以培养学生实践能力与创新意识为目标,注重学生未来发展的实际需求,将现代科技的最新前沿发展引入课程,构建了符合"高素质、创新型"人才培养需求的"大学物理实验"课程反溯教学法。反溯教学法的基本思想,是从最新科技发展反溯其基本物理学概念、原理和现象,激发学生的探索欲和创造欲,全面提升学生的学习兴趣和学习能力。充分挖掘课程潜力,让学生从"要我学"变为"我要学"。三年来的教学实践表明,我们提出的大学物理实验课程反溯教学法成功构建了一整套大学物理实验课程教学范式,在课程体系建设、学生能力与创新意识培养等诸多方面均发挥了重要作用。以实验竞赛、科研论文、专利等为代表的成果见证了反溯教学法的成功实施。反溯教学法所构建的新型课程体系与内容为建设适应新时期、新形势下人才培养需求的"大学物理实验"教学新方法进行了成功探索。

1 反溯教学法指导"大学物理实验"课程新编排

反溯教学法指导"大学物理实验"课程新编排的路线框图如图1所示。围绕这一路线图,我们从创新实验室建设、新教材编排、创新型新实验项目与内容设计编排等角度开展了工作。

1.1 创新实验室建设

创新、竞赛、实验教学相融合必须有教学环境改善的支持。三年来,课题组从实验室硬件建设、实验室师资团队建设和学生开放性管理等方面全面建设创新实验室,同时做好实验室管理工作,以满足学生开展个性化实验与创新型实验的需求。

我们搭建了通用制作实验平台、热学物性测量平台、软物质研究平台、核磁成像技术及应用研究平台、分子动力学模拟仿真实验平台和光伏器件制备与测试平台等多个实验平台(图2(a)~(f)),为学生开展科学实验研究、科技创新项目、仪器制作、学科竞赛、科技竞赛、社会实践等活动提供便利。

创新实验室是提升学生科学素养、建立正确科学观的重要场所。创新实验室每年支撑三十余组同学参加大学生科技创新项目、国家级和省部级实验竞赛等,使实验课堂实现由课内向课外自然延展。

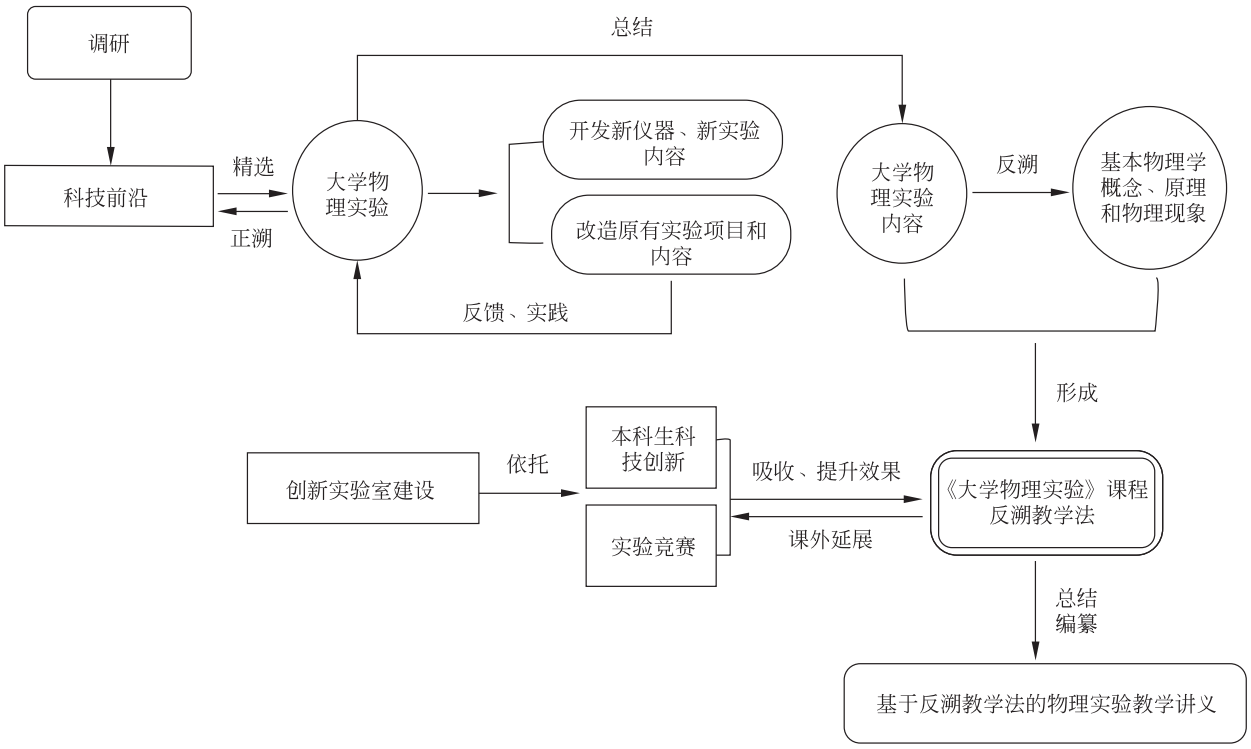


图 1 “大学物理实验”反溯教学法的研究思路

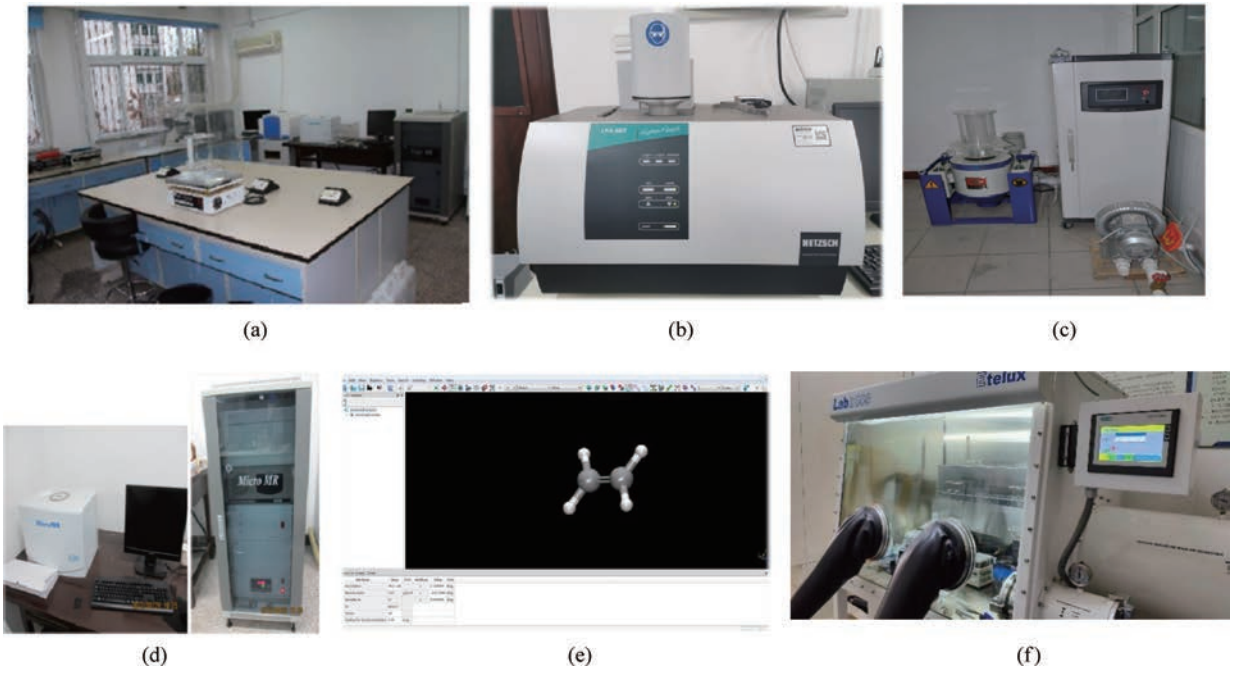


图 2 实验平台建设情况

(a) 通用制作实验平台；(b) 热学物性测量平台；(c) 软物质研究平台；(d) 核磁成像技术及应用研究平台；(e) 分子动力学模拟仿真实验平台；(f) 光伏器件制备与测试平台

1.2 《理科物理实验教程(第 2 版)：力学、热学、电磁学、光学实验分册》教材

为了凝练、固化反溯教学法的研究成果，我们编排了《理科物理实验教程(第 2 版)：力学、热学、电磁学、光学分册》教材[10]。所选入的实验项目既考虑了课程体系的完整性，又兼顾了前沿科技

的最新发展。各实验项目的编排均以反溯教学法为核心指导思想，首先引入背景知识介绍或具体的高新技术应用，再引导学生回归到基础物理现象和知识点。“知之者不如好之者，好之者不如乐之者”，我们通过反溯教学法让实验项目激发了学生的学习兴趣和内在学习动力。教学实践表明，经过以上实验课程内容的学习，学生在知识获取、技能培训和科研兴趣培养等诸多方面都有了大幅提升。

在以上新教材编排的基础上，我们新申请了理科物理实验Ⅰ（2020—2021年）和基础物理实验Ⅰ&Ⅱ（2022—2023年）两个教学示范课项目，以反溯教学方法全面组织实施了新时期实验课程，受到学生的欢迎和支持。

1.3 反溯教学法新实验

1）干涉光刻技术实验

干涉光刻技术是一种无须用到复杂光学系统即可制备精细微纳结构的技术手段。该技术可反溯回光干涉这一基本物理原理。我们设计了使用两束或三束相干激光光束干涉产生周期性纳米织构图形的光学系统，并研究入射角度、光束强度、光束波长等因素对所成图形的影响。所研究的图形种类将包含光栅、孔阵、点阵、柱阵等多样化的结构，以满足不同的后续实验需求。结合图形转录方法，要求学生学习和掌握光刻图形“正模”与“倒模”的转移、转换技术，并探究不同类型光刻胶的性能。拟使用平面等离子体刻蚀等方法将所制微纳图形转移至硅衬底或砷化镓衬底上，使学生在领略光刻技术的同时，对刻蚀的基本原理、实验过程和影响因素有初步了解，也为学生未来进一步学习光刻技术做基础准备。

2）基于Sagnac效应的激光干涉光纤陀螺仪实验

陀螺仪是一种古老而有生命力的仪器，能提供准确的方位、水平、位置、速度和加速度等信号，因而在国防军事、导航测控、汽车制造等领域有重要应用。基于Sagnac效应的激光干涉光纤陀螺仪的原理可反溯回光干涉等基本物理原理。同一光源发出的光分为两束后，在同一环路内沿相反方向绕行一周后会合可产生干涉。当环路所在平面旋转，干涉条纹将会发生移动，也即Sagnac效应。此时，两束光线的光程差与环路所在平面的旋转角速度成正比。基于这一效应制成的激光干涉光纤陀螺仪可测量装置的旋转角速度。通过这一实验，可使学生回溯光干涉基本原理，掌握Sagnac效应的同时了解其应用，理解现代科学技术新发展与基本物理现象和物理原理之间的联系。将激光干涉光纤陀螺仪实验引入到大学物理实验中，可使学生反溯激光干涉的基本原理进行理论和实验探索，激发其学习兴趣，了解Sagnac效应及激光干涉陀螺仪，理解基本物理现象与现代科学技术新发展的关系。

3）LED光谱实验

蓝光发光二极管（LED）是白光LED的基础，是一项里程碑式的发明。这种由于多数载流子注入而引起电子和空穴对复合发光的现象称为注入式电致发光，可回溯至能带理论等基本物理原理。LED具有节能环保、寿命长、体积小、应用广泛、色彩丰富等特点，是继白炽灯、荧光灯之后的第三代照明光源，在生活上、工业上有多种应用。我们尝试将LED光谱实验引入到大学物理实验中，与光栅光谱仪实验相结合，让学生从LED的发光原理与特性出发，引发学习兴趣，体会物理学科在高新技术中的重要作用，再反溯回LED的光谱研究，使学生在完成实验的过程中掌握新型半导体器件的发光原理和光谱特性。本实验已编排为《理科物理实验（第2版）：力学、热学、电磁学、光学分册》课程的光学实验项目。

4）混沌摆实验

摆的发展与研究有着悠久的历史。双摆是一个由两个摆锤组成的简单物理系统，其中一个摆锤连接在另一个摆锤的末端。双摆属于混沌摆之一，具备丰富的动态特性，能够展现出混沌现象。混沌现象是指发生在确定性系统中的看似随机的不规则运动行为，表现为不确定性、不可重复、不可预测，是非线性系统的固有特性。双摆/混沌摆对于初始条件十分敏感，整个运动混沌无序、无法预测。混沌现象的发现和混沌理论的建立，同相对论和量子论一样，是对牛顿确定性经典理论的重大突破。许多科学家认为，20世纪物理学三个辉煌的科学奇迹是相对论、量子论和混沌理论的创立。将混沌现象引入到大学物理实验中，可使学生反溯摆的基本运动规律进行理论和实验探索，激发其学习兴趣，了解混沌现象及混沌理论，体会物理学科在现代生活中的重要作用。本实验已编排为《理科物理实验（第2版）：力学、热学、电磁学、光学分册》课程的力学实验项目。

5）介电常数的频率特性

电容器存储和释放电能的能力产生了许多重要应用，比如摄影师使用的电子闪光装置、中国正在建设的“Z 机器”（Z Pulsed Power Facility）、电磁炮使用的电容器等。这些应用的原理均可反溯至电容器两极板间电介质材料的性质。学生使用高精度阻抗分析仪与相应夹具，可学习测量电介质材料介电常数和损耗与频率的关系。在此基础上教师作点评与讲解，使学生在掌握介电常数和损耗测量方法的同时，理解介电常数和损耗频率特性的产生原因等源头知识，并展望其应用。本实验已编排为《理科物理实验（第 2 版）：力学、热学、电磁学、光学分册》课程的电磁学实验项目。

6）磁耦合谐振实验

磁耦合谐振，即两个相同频率的谐振物体将会产生很强的相互耦合，与远离谐振环境的物体有较弱的交互，可实现无线能量的传输。其相关知识可反溯回耦合、谐振、频率分裂等基本概念。磁耦合谐振是本科生电磁场理论教学中的难点，也是电磁学领域科学研究前沿。它是目前无线供电技术的一种解决方案，也是当前电气工程领域最热门的研究方向之一。基于磁谐振耦合理论的无线电能传输现象，既可从物理理论上通过经典的耦合模理论，也可用电气、电工学科的 LC 共振电路模型来进行分析，创新性地引入大学物理实验课堂教学、填补教学空白。历时多年的课堂试用、课题组改进和优化了多线圈磁耦合谐振实验系统，并将其编排为《理科物理实验（第 2 版）：力学、热学、电磁学、光学分册》课程的电磁学实验项目。

7）声悬浮实验

声悬浮技术对于悬浮物体的性质没有特定要求，对声场内的固体和液体均可以进行悬浮，技术适用度高，近年来逐渐发展应用于分析化学，材料科学，医学等多个领域，是一种新兴、前景极其广阔的悬浮技术。其原理可以反溯至声辐射力对抗重力以实现物体的悬浮。学生利用自搭实验装置，控制悬浮物体移动，可以引起较大的学习兴趣和探索欲望。在实验基础上，教师作讲解，使学生在熟悉控制悬浮物操作的同时，掌握声辐射力以及驻波的原理和应用，理解现代科学技术新发展与基本物理现象和物理原理之间的关系。

8）可变转动惯量装置与测量

转动惯量是大学物理实验教学中常见的实验项目。在工业生产中，经常会使用具有大转动惯量的飞轮进行惯性储能。随着储能工业的发展，学界提出了可变转动惯量的储能方法，也即在较低的转速下可以较低的转动惯量运行，而在较高的转速下其自身的转动惯量可以增大，从而达到高效储能的目的。基于这种可变转动惯量的工作原理可以反溯至转动惯量的测量、物体质量分布的变化与转动惯量之间的关系等基本物理原理。在实验基础上，经教师讲解，学生可探究可变转动惯量装置的转动惯量测量，了解该装置的转动惯量变换原理，以及质量分布和转动惯量之间的关系。

9）材料相变热的测量实验

材料的相变过程在工业生产和日常生活中都有重要作用，而研究相变过程的手段往往需要采用价格高昂的专业仪器设备。为此，我们从相变过程的应用和测量手段入手，提起学生研究的兴趣，从差热分析方法反溯回温度测量与热流之间的关系，通过实验室搭建的实验装置——开放式量热装置，让学生从中探究物质传热的基本原理，理解现代测试技术与基本物理现象和物理原理之间的关系。

2 反溯教学法在本科生 SRTP 科技创新项目中的实践

开展本科生 SRTP 科技创新项目是提升能力的重要手段。为了将最前沿、最新科技成果与本科生实验教学结合起来，我们尝试使用反溯教学法指导本科生科技创新项目，力求做到“立足科技创新，辐射实验教学”，并取得了一系列教育、教学经验。课题组通过以本科生科技创新和物理实验竞赛相结合的方式，走出了一条“以赛促教”的新路。

2.1 《基于 Sagnac 效应的激光陀螺仪》SRTP 项目（在研）

陀螺仪是重要的角运动检测装置。课题组通过已有的氦氖激光管、反射镜、分光镜和陶瓷玻璃等元件设计搭建出简单的激光陀螺仪（图 3(a)）。其原理可反溯至角动量守恒、光干涉等基础知识。通过制作和运行激光陀螺仪，研究高速旋转下的物体性质。制作环形谐振腔，观测并分析其中两束光的干涉，及整个环形光路里形成的驻波现象

(图3(b))。自主设计和搭建了单激光分光的矩形双循环干涉光路(图3(c)),观察并探究陀螺在不同速度的高速运转下,驻波波结、波腹相对反射镜的位置变化,镜子转动距离对干涉条纹变化的影响。

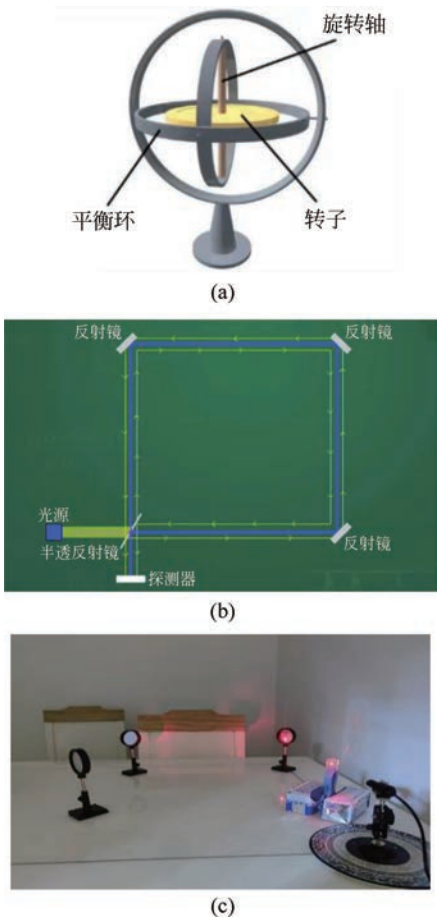


图3 《基于Sagnac效应的激光陀螺仪》SRTP项目成果
(a) 陀螺仪结构;(b) 光路图;(c) 单激光分光的矩形双循环干涉光路照片

2.2 《双摆的制作及其混沌现象的研究》SRTP项目(结题)

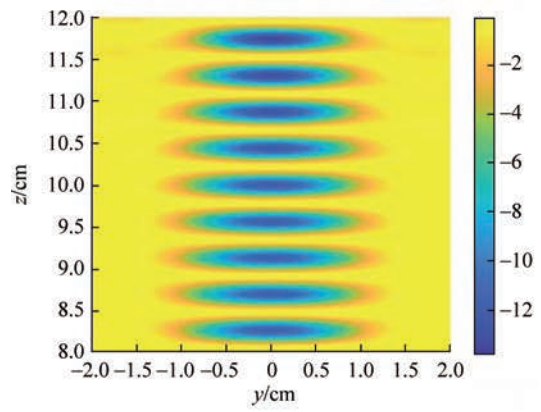
混沌是非线性动力系统的固有特性,是非线性系统普遍存在的现象。牛顿确定性理论能够充分处理的多为线性系统,而线性系统大多是由非线性系统简化而来。项目对双摆中的混沌现象产生原因以及可能存在的规律进行了理论上的探索研究,并基于理论力学中的拉格朗日方程与Runge-Kutta法给出了双摆运动的轨迹模型,并对出现的混沌现象给出了一定的解释与理解。利用Tracker软件对图像进行了数据处理与分析,初步判断出在短周期内双摆的运动是混沌运动。在简易双摆装置的基础上,课题组增加外部驱动装置,进一步实现对双摆施加可调的驱动力。基于混沌理论,即兼具质性思考与量化分析的方法,探讨了双摆动态系统中无法用单一的数据关系,以整体、连续的数据关系解释和预测了摆动行为。

2.3 《模块化的可见光通信设备研制》SRTP项目(在研)

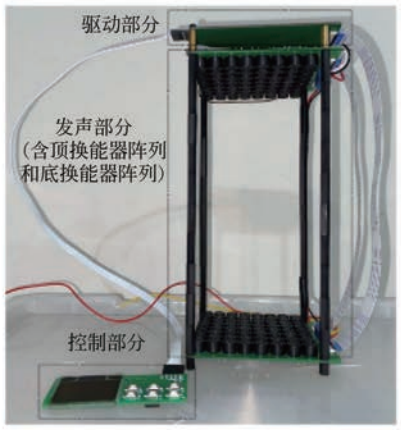
可见光通信技术是指利用可见光波段的光作为信息载体,在空气中直接传输光信号的通信方式。可见光通信的主要优势有绿色低碳,可实现近乎零耗能通信,还可有效避免电磁信号泄露等缺点,为快速构建抗干扰、抗截获的安全信息空间提供支持。其原理可反溯至亥姆霍兹方程、能带理论等基础知识。课题基于基本通信电路,通过改善信号发出端的输入信号以及信号接收端(硅光电池)的输出信号,使最后得到的信息连续且清晰,并且基于这些成果,本项目将推进信息的数字化,将电路中基本的元件转化成数字元件,通过编码与解码,利用信号发出端低延迟等特点,提高信息的传递效率。力求研制出具备模块化特性的光通信小型设备,并设计实验装置,以展示优异的物理性能和广泛的应用推广度。该实验装置可用于教学演示、实验教学以及中小学科普等场景。同时,我们期望通过该实验装置展示的原理和创新,能够在通信技术中如蜂窝网络等以及物联网、智慧城市(家庭)、航空、航海、地铁等领域中带来创新应用和价值体验。

2.4 《模块化的超声波悬浮与三维空间移动装置的研制》SRTP项目(结题)

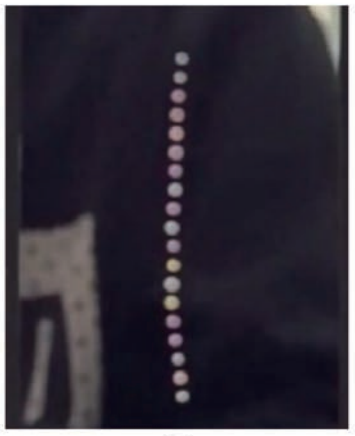
声悬浮是高声强条件下的一种非线性效应。本课题基于目前较为稳定的平面相控阵技术,通过波动学、声学等理论和实验创新,一定程度上解决现存平面相控阵声悬浮装置的不足。势能分布理论结果(图4(a))揭示了空间中的势能位点呈周期性分布,可反溯至势能、驻波等基础知识。课题组自主搭建了声悬浮装置(图4(b)),从悬浮物的悬浮稳定性以及三维移动角度,开展了驻波声悬浮中对悬浮小物件的操纵实验,实现了聚苯乙烯小球悬浮(图4(c))。并改进现有的平面相控制声悬浮装置,一定程度上解决其存在的操控、成本等问题。力求研制模块化的设备,设计出具有优良的物理性能和推广度的实验装置,可用于教学演示、实验教学以及中小学生科普,并为其他势场中的物体移动提供了新思路。



(a)



(b)



(c)

图 4 《模块化的超声波悬浮与三维空间移动装置的研制》SRTP 项目成果

(a) 势能分布理论结果；(b) 声悬浮装置照片；(c) 声悬浮实现效果

以北京科技大学 2018 级本科生牟天钰为第一作者的论文《平面相控阵下微小固体的超声波悬浮与移动》已发表于《物理实验》[11]。以北京科技大学 2019 级本科生张烨为第一作者的论文《用平面声波方式实现颗粒悬浮的理论讨论》已发表于《物理与工程》[12]。

2.5 《柔性 ITO 电极受周期性冲击作用实时电阻表征》SRTP 项目(结题)

柔性薄膜电极目前广泛用于柔性显示技术、可穿戴技术等领域当中，氧化铟锡(ITO)功能材料是其最重要的代表之一。柔性 ITO 薄膜电极广泛应用于光电器件、太阳能电池、平板液晶显示和透明电磁屏蔽等领域，具有很高的科研价值。其缺点是抗弯折能力差，易碎裂，使器件失效。研究柔性 ITO 电极受弯折等应力作用下失效的物理过程和物理机制，并进一步提升柔性电极性能，成为本领域关键考量之一。课堂上，教师首先向学生展示了柔性聚对萘二甲酸乙二醇酯(PEN)衬底上 ITO 薄膜的导电特性，及其易碎裂的物理现象，使学生思考如何进行物理表征。着重引导学生反溯伏安法等基本物理原理，发展出了一套原位实时电阻表征实验系统。

该套实验系统(图 5(a))可使柔性 ITO 电极在不同撞击半径、方式、速率的作用下，产生弯曲、拉伸、针戳、折叠等多种变形，并实时测量其电阻变化(图 5(b))。学生自主设计仪器电路，进行 Labview 虚拟仪器编程，实现了实验参数及测量值的持续记录和实时展示(图 5(c))。装置通过滚珠丝杠将扭矩转换成轴向反复作用力，使柔性 ITO 电极按特定方式弯曲变形，在单片机控制下产生规律的应力变化(图 5(d))。

教学团队引导学生对 ITO 碎裂的过程做深入分析，探究在裂纹产生后电阻不断上升的物理机制。在周期性冲击过程中，导致 ITO 薄膜电阻增加的主要原因是在其表面形成的微观和宏观尺度的裂纹。这些裂纹起源于 ITO 和 PEN 基底之间的杨氏模量差异、内部应力和外部疲劳载荷等因素。由于缺陷、位错、褶皱、空洞和杂质粒子的存在，周期性冲击初期产生的微观裂纹通常较短且较浅，对电阻增加的贡献较小，也即非特征性裂纹。随着周期性冲击的进行，非特征性裂纹的长度逐渐增加。当非特征性裂纹的深度达到 ITO 层厚度，ITO 层在厚度方向上完全破裂形成特征性裂纹，这种裂纹对电阻增加的贡献更大。结合理论课程中学习过的“道尔顿板”原理，辨明了相应的微观机制，并拓展为宏观物理模型，实现了“从理论出发进行实验，再用实验结果拓展理论”的完整知识研习过程。

以北京科技大学应用物理专业黄昆班 2018

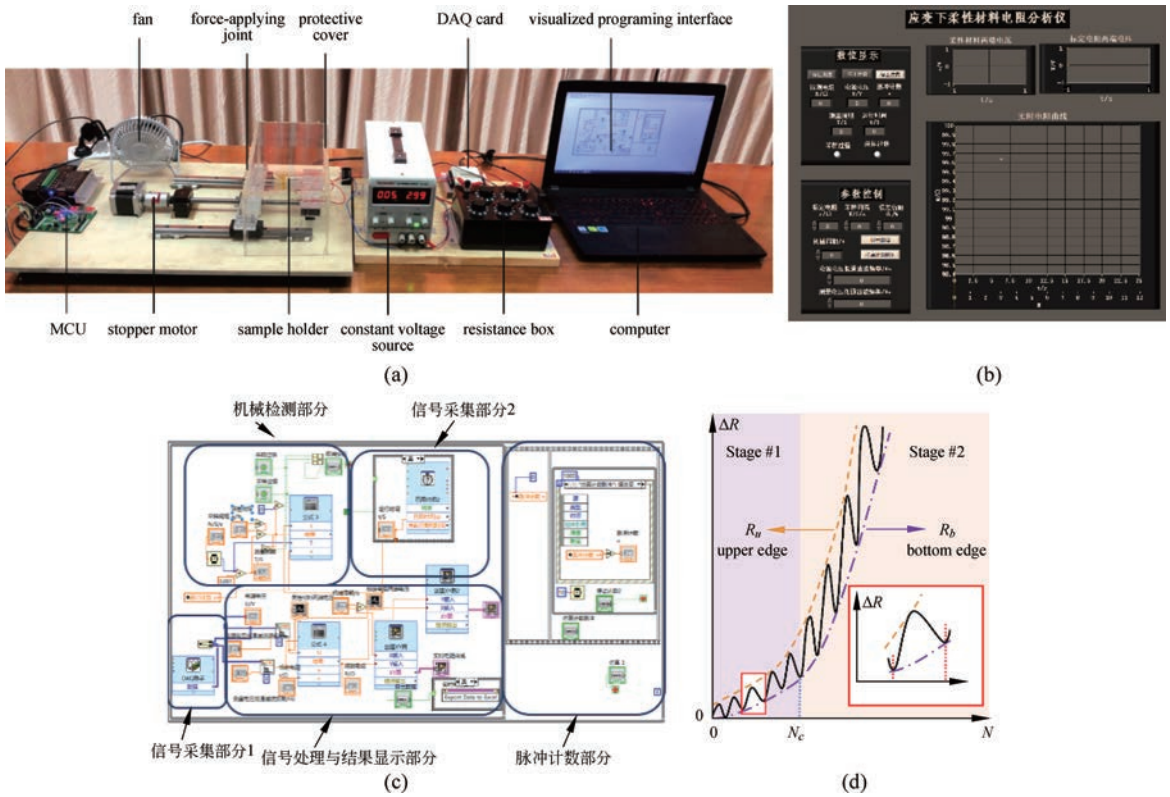


图5 《柔性ITO电极受周期性冲击作用实时电阻表征》SRTP项目成果

(a) 实验系统照片；(b) 系统Labview视窗；(c) 系统程序架构；(d) ITO薄膜电阻增量 ΔR 与撞击次数 N 的一般关系

级本科生于姗姗为第一作者的全英文SCI论文《Real-Time Resistance Characterization of ITO Film Electrode on Flexible Substrate Under Periodic Impact》(《柔性衬底上ITO薄膜电极在周期性冲击作用下的实时电阻表征》)已发表于《Materials Science in Semiconductor Processing》(《半导体加工中的材料科学》)杂志[13]。相关的装置已获得实用新型专利[14]。

2.6 《具有优化纳米织构的单结钙钛矿太阳能电池仿真研究》SRTP项目(结题)

太阳能电池和纳米功能器件是凝聚态物理学在器件方面取得的较为突出的两类成就。在半导体太阳电池表面生长具有周期性的纳米材料阵列结构，可以大大提升太阳能电池的光吸收率。这一现象的物理基础是陷光效应，已在单晶硅、多晶硅、微晶硅、砷化镓等多种传统无机半导体电池中得到应用。然而对于新兴的钙钛矿电池行业，由于其电池结构的复杂性与特殊性，如何在其中引入周期性纳米织构，以及其潜力究竟有多大，成为了亟待探究的问题。

实验课程教学中，教师在讲授《光的等厚干涉》《太阳能电池性能测量》等实验时，通过图片、视频展示等方式讲解半导体材料中陷光效应(light trapping effect)的存在，并介绍钙钛矿光伏材料的最新研究进展。通过电磁仿真动画，介绍陷光效应是指通过在半导体表面或内部引入周期性纳米织构增强光的吸收。这种现象的基本原理是延长光在材料中的传播路径，形成多次反射、散射和衍射，从而增强光吸收，并提高光电转换效率。这一手段在传统无机半导体太阳能电池中已得到广泛应用。对于新兴的钙钛矿太阳能电池，引入周期性纳米结构并研究陷光效应的潜力具有重要意义，因为钙钛矿材料同样具有良好的光吸收能力，而通过优化陷光效应，可以进一步提高电池的光电转换效率。在此基础上，教师进一步引导学生思考：太阳电池效率是否可能存在极限？如何求取这类极限？要求他们反溯在光学、电动力学、半导体物理学等课程中学习过的麦克斯韦方程组、电介质等知识，并介绍时域有限差分(FDTD)方法等仿真方法和基本织构类型(图6(a)～(b))。

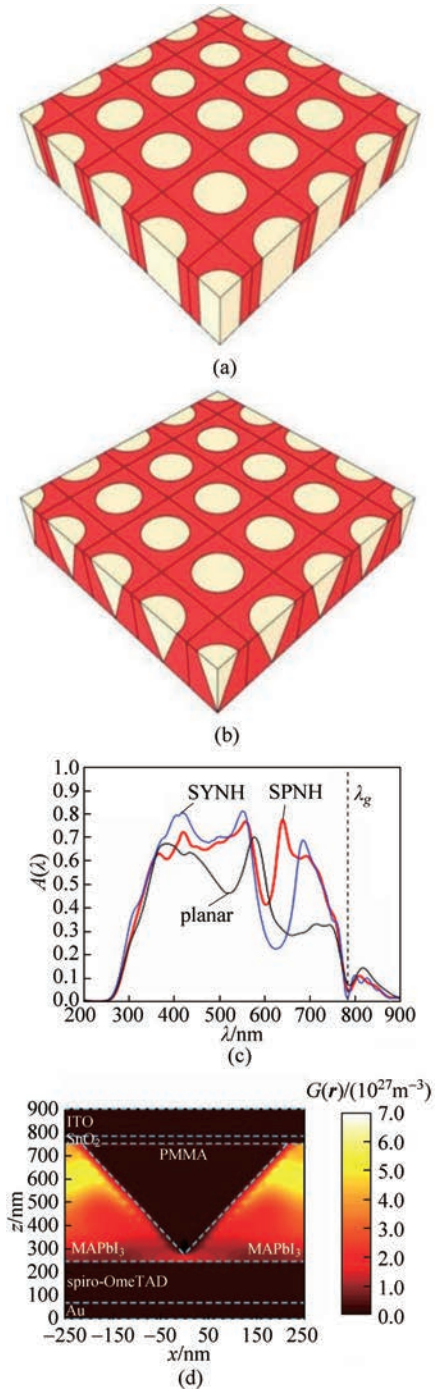


图 6 《具有优化纳米织构的单结钙钛矿太阳能电池仿真研究》SRTP 项目成果

(a)～(b) 空柱型织构与空锥型织构结构；(c) 含织构电池与平面、无织构电池吸收谱作比较；(d) 含空锥型织构电池剖面的载流子浓度分布

设计电池结构后，应用 FDTD 方法研究“*n-i-p*”正型含周期性纳米织构钙钛矿电池的光吸收和极限效率(图 6(c))。该 SRTP 项目中，学生在 Lumerical FDTD 程序界面下通过自主编程，以织构类型、钙钛矿层厚度、织构高度、织构周期、占空比等参数对电池极限效率之影响为研究目标，进行了诸多探索(图 6(d))，并总结出一套可实际实现的含织构电池制备流程，分析了载流子浓度、载流子寿命等诸多物理量与电池效率的关系。

以北京科技大学材料物理专业 2018 级本科生关昊辰为第一作者的全英文 SCI 论文《Simulation Study of Significant Optical Absorption Enhancement for “*n-i-p*” Structured Perovskite Solar Cells with Optimized Periodic Nano Texture》(《具有优化周期纳米织构的“*n-i-p*”型钙钛矿太阳能电池显著增强光吸收的仿真研究》)已发表于《Physica B》(《物理 B》)杂志[15]。

2.7 《硅与钙钛矿叠层电池内制备纳米织构提升电池效率》SRTP 项目(在研)

传统硅电池的效率已近极限。钙钛矿作为廉价光伏材料，可与硅结合形成硅/钙钛矿叠层电池，以较低成本大大提高效率。目前对高性能硅/钙钛矿叠层电池的研究局限于改变异质结硅底电池的硅片工艺、厚度、表面尺寸和复合材料等，从电池结构上做突破性改进的报道还较少。在实验课教学中，我们首先介绍了叠层电池的概念，使学生亲身感受硅电池与钙钛矿电池相结合的“1＋1＞2”之功效。在此基础上，进一步讲解顶电池和底电池之间的电流匹配关系，告诉学生在叠层电池中，顶部的钙钛矿电池和底部的硅电池在电流匹配方面需要进行优化，以确保电流在两个层之间的平衡以最大化光能吸收。从现象入手，引导学生反溯折射率(图 7(a))、物质守恒定律等基本物理原理，自主推导叠层电池内顶电池和底电池的电流匹配关系，并在阅读文献后使用 FDTD 方法论证最顶电池最优禁带宽度范围(图 7(b))。进一步地，引导学生寻找在硅/钙钛矿叠层电池内制备纳米织构提升电池效率的方法，并予以实验验证。

以北京科技大学应用物理专业 2019 级本科生谢盈为第一作者的论文《Significant Enhancement of Ultimate Efficiency for Perovskite/c-Si Tandem Solar Cell with Optimized Periodic Nano Texture》(《优化周期纳米织构显著增强钙钛矿/晶体硅叠层太阳能电池效率研究》)正在做最后整理，将于近期投出。

“授人以鱼”不如“授人以渔”。为使学生能够适应未来社会发展的挑战，其关键在于“学会学习”。科学思维是“学会学习”的重要基础，以“大

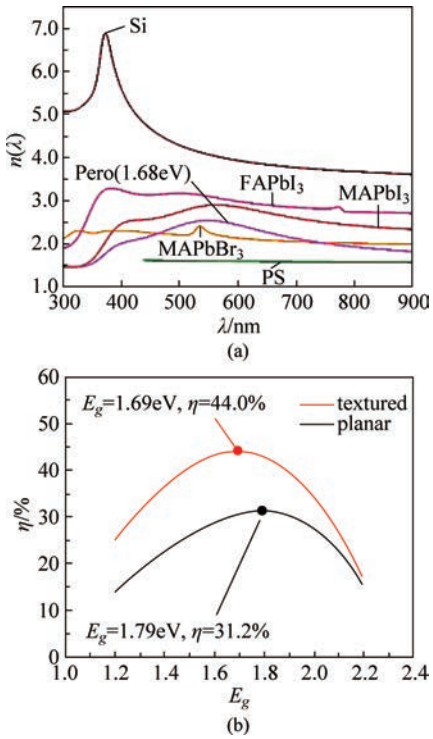


图7 《硅与钙钛矿叠层电池内制备纳米织构提升电池效率》SRTP项目成果

(a) 杂化钙钛矿(禁带宽度为1.68eV)的折射率与其他钙钛矿材料对比；(b) 电池极限效率与顶电池禁带宽度关系理论结果

学物理实验”课程为基础，在SRTP本科生科技创新项目的不断锤炼下，我们通过教师-学生、学生-学生之间的互动探讨与实践探索，强化分析讨论训练，提高分析讨论的深度，逐步培养训练学生提出问题、分析问题并最终解决问题的能力。通过系统的实验方法与技能训练，在培养学生的实践能力与创新意识的同时，训练学生认知问题、提出问题与解决问题的思维能力，最终为学生应对未来工作、科技进步和社会发展做基础性准备。

3 反溯教学法的深度开拓

反溯教学法在本科生物理实验教学中得到了成功运用。为进一步开拓这一教学方法，课题组作了进一步的探索和挖掘，努力向教学输送可转化为本科生实验内容和研究方向的潜在课题项目。所取得的研究成果正源源不断地转化为本科生训练素材，为他们拓宽科学视野，进一步做好工作打下了良好的基础。

3.1 《多线圈磁耦合谐振实验仪》项目

通过对中、外大学物理实验课程内容体系现状进行广泛调研，研究理论课与实验课教学内容、知识体系和教学难点之间的相互关系，聚焦学生以后在生产、科研活动中对物理原理的应用和要求，课题组从开展科学研究的思路和角度出发，紧密结合物理学科专业特点与创新型人才培养需求，重新梳理了我校电磁学相关实验项目。在物理实验课程中引入基于“磁耦合谐振原理”的无线电能传输这一科学研究前沿内容，以完善课程体系，填补我校大学物理实验教学空白。由于市场没有成熟设备，课题组仪器设计团队启动了磁耦合谐振原理实验仪的自研。

磁耦合谐振原理是本科生电磁场理论教学中的难点，也是电磁学领域科学研究前沿。历时多年的课堂试用、改进和优化，团队最终定型了多线圈磁耦合谐振实验仪(图8(a)～(b))。

实验仪由驱动线圈利用接入高频交流信号产生交变磁场，发生近距离的电磁感应耦合使发射线圈产生自谐振。由于发射线圈和接收线圈拥有一样的固有频率，且与产生的交变磁场的频率相同，因此发射线圈和接收线圈之间发生谐振。电磁能量在两线圈之间实现周期性的交换振荡，从而建立起一条能量传输的通路，发射线圈和接收线圈之间进行磁场能量的交换。通过近距离电磁感应耦合转移到设备线圈，进而为设备提供电能，从而实现系统源源不断的无线电能传输，可点亮“USTB”字样LED灯(图8(c)～(d))，或为手机充电。在此基础上，团队通过理论推导、数学建模，探究了强耦合线圈装置内品质因数等物理量与线圈数目、线圈半径的关系(图8(e))，并研究了趋肤效应等现象。

该套实验装置设计巧妙，便于推广。现象明显、趣味性较强。可用于大学物理演示实验、理论课堂教学演示等，开阔学生视野。系统的可拓展性强，学生通过自己动手组装无线供电系统，调节谐振频率，自制无线手机充电装置，现场为自己的手机充电，体验无线充电的生活方式和技前沿的孵化产品，使学生有强烈的成就感，培养学生对科技前沿探索的兴趣。可直观地对互感现象、谐振现象、频率分裂现象、趋肤效应、电磁耦合模理论等进行演示与验证，内容设计上既给学生留下了较大的发挥空间，难度恰当又不至于使学生难于上手，有利于学生的主动参与。相关的装置已获得实用新型专利[16]。

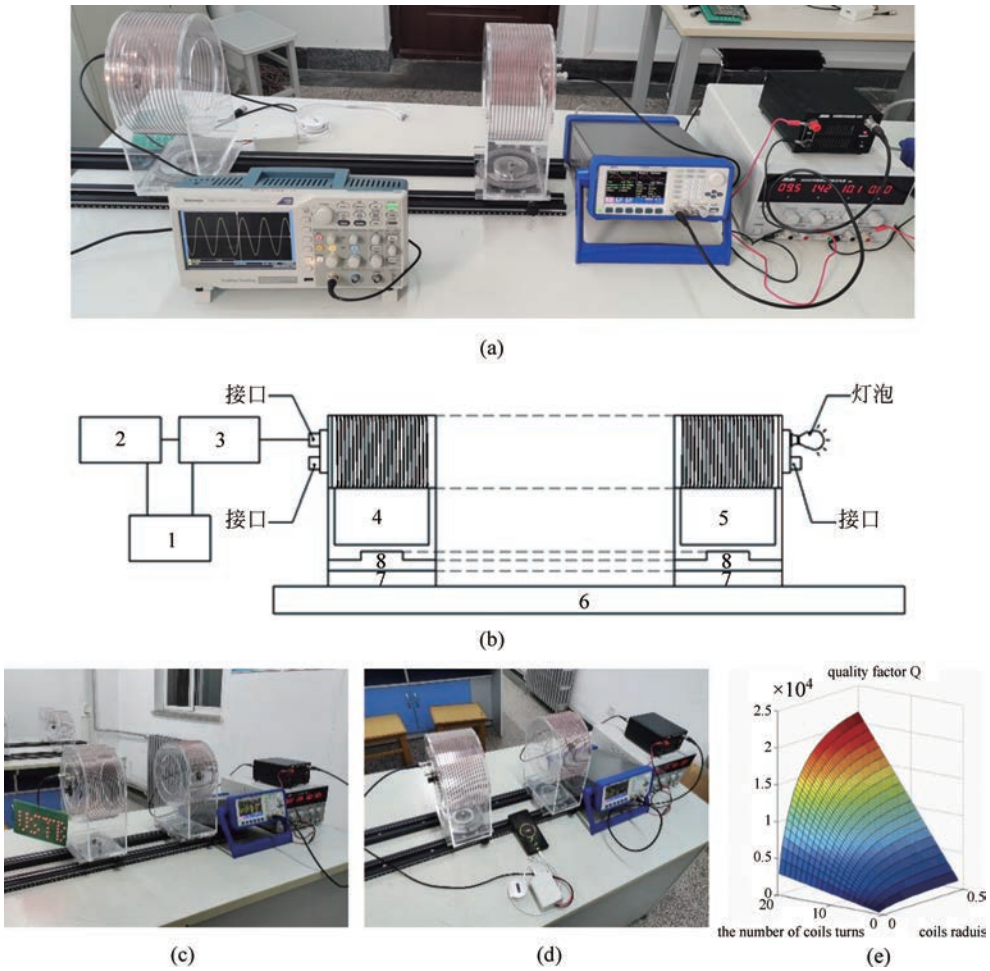


图 8 《多线圈磁耦合谐振实验仪》项目成果

(a) 实验仪照片；(b) 实验仪结构；(c) 实验仪点亮“USTB”字样 LED 灯照片；(d) 实验仪为手机无线充电照片；(e) 品质因数与线圈数目、线圈半径的关系

3.2 《LiTFSI 等离子型化合物改性空穴传输层》项目

聚(3,4-乙烯二氧噻吩):聚(苯乙烯磺酸盐)(PEDOT:PSS)具有可导电、透明度高、涂布能力强等优点,广泛应用于固态电容、抗静电涂层、印刷电子等领域。在“*p-i-n*”反型钙钛矿电池中,PEDOT:PSS 常作为空穴传输层使用。然而 PEDOT:PSS 存在导电性不够理想、具有酸性、易吸湿、在活性层表面浸润性差等缺点,限制了相应反型钙钛矿电池的光电转换效率和稳定性。

近 10 年来,通过掺杂等方法改进 PEDOT:PSS 材料的思路不断涌现。其中,掺杂双三氟甲磺酰亚胺锂(LiTFSI) 等导电性增强掺杂剂以同时增强 PEDOT:PSS 材料导电性和耐弯折能力的研究获得了很大关注。以多种方法表征 PEDOT:PSS:Li 的弯折失效现象(图 9(a)),制备优化后的电池(图 9(b)),并实现了 16.8%的电池效率(图 9(c))。

论文《Enhancing Power Conversion Efficiency and Anti-Bending Ability of Flexible Perovskite Solar Cells with PEDOT: PSS: Li Hole Transport Layer》(《PEDOT:PSS:Li 空穴传输层提高柔性钙钛矿太阳能电池的光电转换效率和抗弯曲能力》)已发表于《Journal of Physics D: Applied Physics》(《物理期刊 D:应用物理》)杂志[17]。对这一课题的研究,可将对 PEDOT:PSS:Li 材料物理性质的测量反溯至伏安法、能带结构、库伦作用力等基础物理知识。课题组为此设计了进一步的实验计划和装置,计划于 2022—2023 年通过本科生 SRTP 项目予以实施。

3.3 《PVP 修饰锡基钙钛矿》项目

聚乙烯吡咯烷酮(PVP)是重要的非离子型高

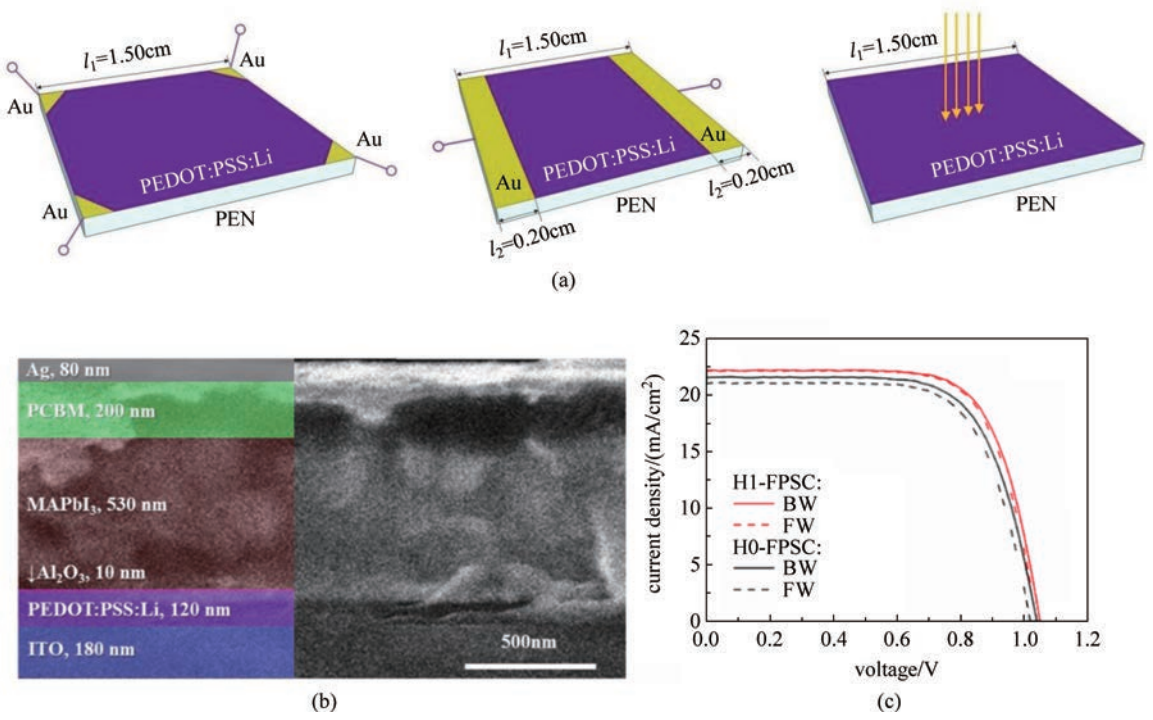


图9 《LiTFSI等离子型化合物改性空穴传输层》项目成果

(a) 使用霍尔法、电阻法和四探针法表征柔性PEDOT:PSS:Li层弯折失效现象原理示意图；(b) 所制电池结构与横截面SEM照片；(c) 改进后的电池正扫与反扫*J-V*曲线结果

分子化合物，是*N*-乙烯基酰胺类聚合物中最具特色，被研究得最深、最广泛的高分子化学物质。纺织印染行业中，PVP因与许多有机染料有良好的亲和力，可与聚丙烯腈、聚氨酯、尼龙、纤维素等多种类疏水性合成纤维相结合，具有较为成熟的加工技术。而这一点，与锡基钙钛矿材料构建柔性可穿戴器件的未来发展方向不谋而合，为其应用打下了良好的基础。我们将PVP掺入甲醚锡碘($FASnI_3$)材料，并对其薄膜结构进行了分析(图10(a))。所制锡基电池(图10(b))实现了7.8%的效率。时间分辨光致发光谱(TRPL)(图10(c))和电池各层吸收率理论计算结果(图10(d))验证了$FASnI_3$:PVP材料的结晶质量和光吸收能力。

论文《Enhancing Performance of Tin-Based Perovskite Solar Cells by Polyvinyl Pyrrolidone Doping Strategy》(《聚乙烯吡咯烷酮掺杂提高锡基钙钛矿太阳能电池性能研究》)已发表于《Optical Materials》(《光学材料》)杂志[18]。课题中，锡基钙钛矿材料的光电性质可反溯至禁带宽度、谐振子、载流子扩散长度等基础物理知识。我们设计了进一步利用高聚物改进锡基钙钛矿的实验装置，并将之应用于钙钛矿光伏器件准备。

3.4 《含锌离子液体$Zn(NTf_2)_2$掺杂PEDOT:PSS》项目

以LiTFSI为代表的离子型添加剂在掺杂PEDOT:PSS领域应用中取得了良好的效果。然而，锂离子在器件中易腐蚀ITO层，降低器件的使用寿命。为此，我们进一步尝试采用了基于锌元素为基础的双三氟甲磺酰基酰亚胺锌($Zn(NTf_2)_2$)作为PEDOT:PSS层的添加剂，形成PEDOT:PSS:$Zn(NTf_2)_2$材料。通过紫外发光光谱(UPS)探究其功函数(图11(a))，并将其作为空穴传输层材料，应用于玻璃衬底与柔性衬底上结构为“ITO/PEDOT:PSS:$Zn(NTf_2)_2$/$MAPbI_3$:PVA/PCBM/Ag”的电池(图11(b))中，取得了18.4%的效率。

论文《PEDOT:PSS:$Zn(NTf_2)_2$ for Rigid and Flexible “*p-i-n*” Structured Perovskite Solar Cells: Strategies and Applications》(《PEDOT:PSS:$Zn(NTf_2)_2$用于刚性和柔性“*p-i-n*”结构钙钛矿太阳能电池：策略和应用》)已发表于《Materials Letters》(《材料快报》)杂志[19]。与$Zn(NTf_2)_2$等多

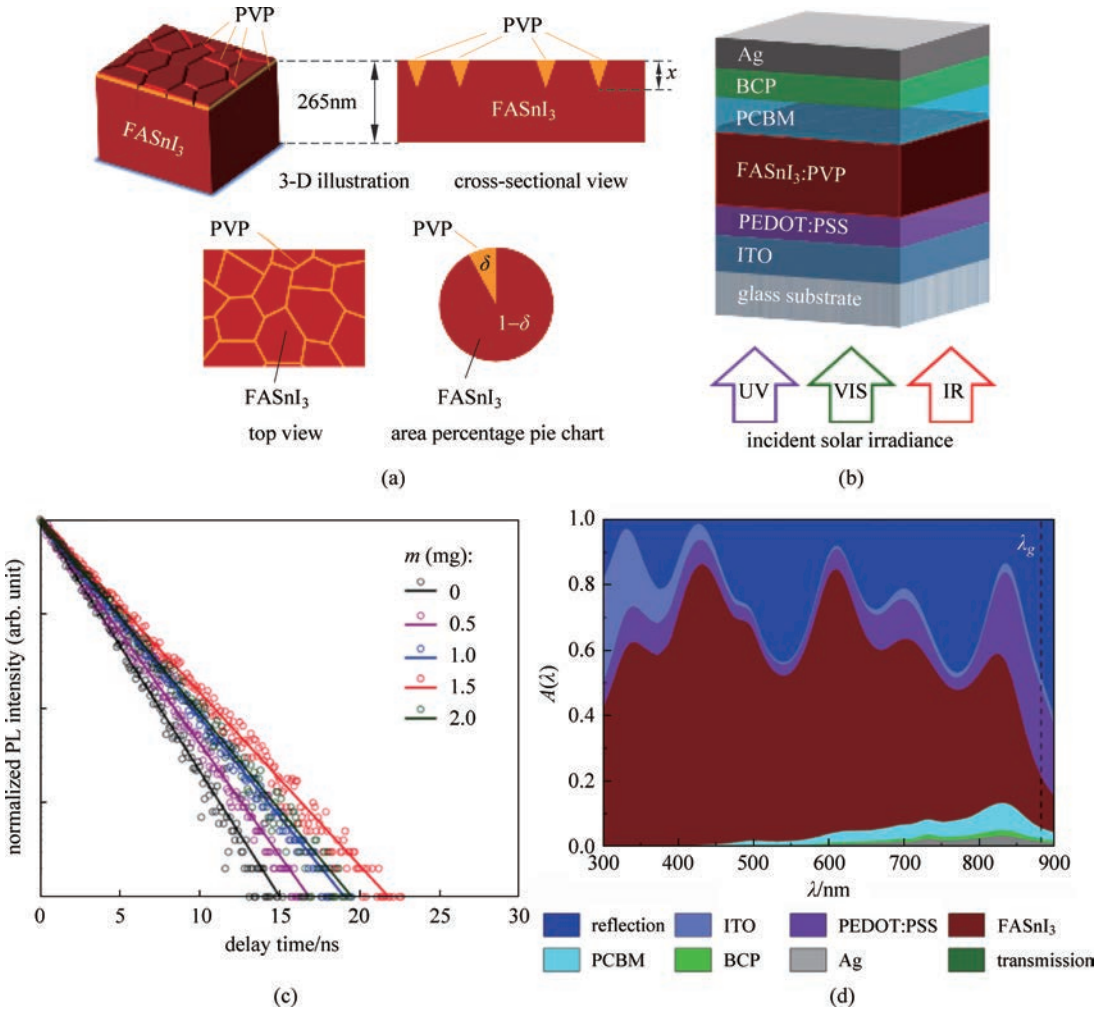


图 10 《PVP 修饰锡基钙钛矿》项目成果

(a) $FASnI_3$:PVP 薄膜结构模型；(b) 所制电池三维结构；(c) 改变 PVP 掺杂量后所形成 $FASnI_3$:PVP 的 TRPL 谱；(d) 电池各层吸收率理论结果

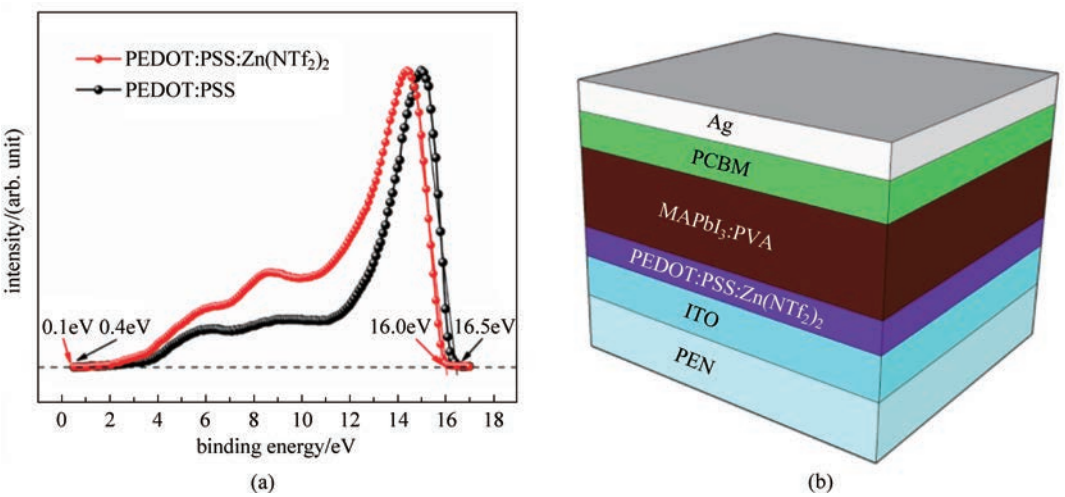


图 11 《含锌离子液体 $Zn(NTf_2)_2$ 掺杂 PEDOT:PSS》项目成果

(a) PEDOT:PSS:$Zn(NTf_2)_2$ 与 PEDOT:PSS 的 UPS 谱测量结果；(b) 所制电池三维结构

价态离子液体相关的材料性能，可反溯至化学键成键、拉曼光谱等基础物理知识，我们将围绕这类新型材料的器件应用，进一步开展教学及科研实验。

4 结语

综上所述，课题组探索使用反溯教学法，从实验室建设、新教材建设、新实验编排、本科生科技创新、实验课程与最新科研项目结合等角度，对“大学物理实验”课程体系进行了全面的研究和建设，取得了显著成效。课题组将继续开展研究，结合新的教学实践，紧扣科技发展前沿，进一步开展课程内容研究与建设工作。

参 考 文 献

[1] 吴平，邱宏，孙旭贵，等. 将科学研究的思维方式引进普通物理实验教学[J]. 实验技术与管理，2003(1)：73-75.
WU P，QIU H，SUN S G，et al. Introducing the scientific research mindset into ordinary physics experimental teaching [J]. Experimental Technology and Management，2003(1)：73-75. (in Chinese)

[2] 张师平，吴平，赵雪丹，等. 以本科生科技创新和物理实验竞赛促进创新型人才培养的探索[J]. 物理与工程，2016(S1)：213-215.
ZHANG S P，WU P，ZHAO X D，et al. The exploration of promoting innovative talents cultivation by student research training program and physics experiment competition[J]. Physics and Engineering，2016(S1)：213-215. (in Chinese)

[3] 李永涛，张红光，陈伟，等. 大学物理实验课程创新教学改革与实践[J]. 大学物理实验，2021(5)：122-124.
LI Y T，ZHANG H G，CHEN W，et al. Innovation teaching reform and practice of college physics experiment course [J]. Physical Experiment of College，2021(5)：122-124. (in Chinese)

[4] 刘悦，周硕，郑君刚. 工科院校物理实验教学改革的现状分析与对策研究[J]. 物理通报，2012(3)：65-67.
LIU Y，ZHOU S，ZHENG J G. Analysis and countermeasures research on the current situation of physics experimental teaching reform in engineering colleges[J]. Physics Bulletin，2012(3)：65-67. (in Chinese)

[5] 樊英杰. “新工科”背景下物理演示与探索实验的自主开发与创新研究[J]. 实验技术与管理，2020(5)：200-202.
FAN Y J. Independent development and innovation of physical demonstration and exploration experiment under background of “New engineering”[J]. Experimental Technology and Management，2020(5)：200-202. (in Chinese)

[6] 李明雪. 基于创新人才培养的大学物理实验五维一体教学改革[J]. 高师理科学刊，2015(3)：87-90.
LI M X. Five-dimensional teaching reform based on innovative talents cultivation of college physics experiment teaching[J]. Journal of Science of Teachers' College and University，2015(3)：87-90. (in Chinese)

[7] 周珺. 以物理实验课程教改促进新工科本科生创新型人才培养的探索[J]. 大学物理实验，2020(5)：150-152.
ZHOU J. Physics experiment curriculum reform promotes the exploration of new engineering undergraduate，innovative talents training[J]. Physical Experiment of College，2020(5)：150-152. (in Chinese)

[8] 邱宏，赵雪丹，于明鹏，等. 把“薄膜光电导效应”引入探究型实验教学[J]. 大学物理，2018(5)：57-61.
QIU H，ZHAO X D，YU M P，et al. The research-based physics experiment：Photoconductivity of the semiconducting film[J]. College Physics，2018(5)：57-61. (in Chinese)

[9] 裴艺丽，张师平，李亚男，等. 用四探针平台测量热电材料塞贝克系数的实验探索[J]. 物理与工程，2017(5)：107-109.
PEI Y L，ZHANG S P，LI Y N，et al. Experimental exploration on testing Seebeck coefficients of thermoelectric materials used by four-probe platform[J]. Physics and Engineering，2017(5)：107-109. (in Chinese)

[10] 吴平，陈森，邱红梅，等. 理科物理实验教程：力学、热学、电磁学、光学实验分册(第2版)[B]. 清华大学出版社，2022年4月.

[11] 牟天钰，裴艺丽，张师平，等. 平面相控阵下微小固体的超声波悬浮与移动[J]. 物理实验，2022(10)：1-6.
MU T Y，PEI Y L，ZHANG S P，et al. Ultrasonic levitation and movement of tiny solids in planar phased array[J]. Physics Experimentation，2022(10)：1-6. (in Chinese)

[12] 张烨，张师平，牟天钰，等. 用平面声波方式实现颗粒悬浮的理论讨论[J]. 物理与工程，2022(2)：114-121.
ZHANG Y，ZHANG S P，MU T Y，et al. Theoretical discussion on particle suspension by plane acoustic wave[J]. Physics and Engineering，2022(2)：114-121. (in Chinese)

[13] YU S S，WANG C Y，WANG J L，et al. Real-time resistance characterization of ITO film electrode on flexible substrate under periodic impact[J]. Materials Science in Semiconductor Processing，2022(140)：106388.

[14] 王晨洋，王金龙，于姗姗，等. 一种用电学特性表征的柔性薄膜电极疲劳性能测试装置[P]. CN216285484U.

[15] GUAN H C，XIE Y，XING Y，et al. Simulation study of significant optical absorption enhancement for “n-i-p” structured perovskite solar cells with optimized periodic nano texture[J]. Physica B：Condensed Matter，2022(643)：414171.

[16] 陈森，何昀，吴平，等. 磁耦合谐振实验仪[P]. CN209312306U.

[17] XIE Z A，et al. Enhancing power conversion efficiency and anti-bending ability of flexible perovskite solar cells with PEDOT：PSS：Li Hole transport layer[J]. Journal of Physics D：Applied Physics，2021(54)：455105.

[18] XIE Z A，WU P，CHEN S，et al. Enhancing performance of tin-based perovskite solar cells by polyvinyl pyrrolidone doping strategy[J]. Optical Materials，2022，129：112511.

[19] CHEN S，XIE Z A，PEI Y L，et al. PEDOT：PSS：$Zn(NTf_2)_2$ for rigid and flexible “p-i-n” structured perovskite solar cells：Strategies and applications[J]. Materials Letters，2023，333：133668.

“沉浸式”大学物理课程思政教学模式探索与实践

王　真　侯兆阳　柯三民　王凤龙　徐春龙
（长安大学理学院，陕西 西安　710064）

摘　要　为了促进和加强“大学物理”课程思政建设，我校大学物理课程教学团队，通过从古代物理、科学史话、前沿科学、工程应用等方面深入挖掘“大学物理”课程中蕴含的思政元素，将物理知识和思政元素有机融合；建立包含各种文字、图片、动画和视频素材的课程思政电子化材料库，让思政效果入眼、入耳、入脑、入心，提升课程思政育人效果；并充分利用现代化信息和互联网技术平台，使学生在课内和课外全方位受思政教育浸润，实现“沉浸式”大学物理课程思政。该教学方法和模式具有一定可推广性，期望能够为大学物理课程思政建设起到一些参考作用。

关键词　大学物理；课程思政；思政元素；思政素材库

EXPLORATION AND PRACTICE OF “IMMERSIVE” IDEOLOGICAL AND POLITICAL TEACHING MODE IN COLLEGE PHYSICS COURSE

WANG Zhen　HOU Zhaoyang　KE Sanmin　WANG Fenglong　XU Chunlong
(School of Science, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064)

Abstract　By deeply digging into the ideological and political elements contained in the course of college physics, physical knowledges and ideological and political elements are organically integrated together. Establish a curriculum ideological and political electronic material library containing various text, pictures, animation and video materials. Let the effect of ideological and political education into the eyes, ears, brain, heart of the students and teachers, improve the ideological and political education effect of the course. Make full use of modern information and internet technology platform, so that students in class and extracurricular all-round ideological and political education infiltration, realize the “immersive” college physics course ideological and political.

Key words　college physics; curriculum ideological and political; Ideological and political elements; ideological and political material library

2016 年 12 月习近平总书记在全国高校思想政治工作会议上提出：“高校思想政治工作关系高校培养什么样的人、如何培养人以及为谁培养人这个根本问题。”[1]。从而把高校思政教育的重要性上升到了一个新的高度。2019 年 8 月，中共中央、国务院印发了《关于深化新时代学校思想政治理论课改革创新的若干意见》[2]，提出要整体推进高校课程思政建设，发挥所有课程的育人功能。2020 年 5 月，教育部颁布《高等学校课程思政建设指导纲要》[3]，明确了课程思政建设的目标要求和内容重点。

收稿日期：2023-06-05
基金项目：教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会教研项目(DWJZW202116xb)；长安大学中外合作办学一流本科课程建设项目(300203214003)。
通讯作者：侯兆阳，男，教授，主要从事物理教学和计算材料方面的研究，zhaoyanghou@163.com。
引文格式：王真，侯兆阳，柯三民，等. “沉浸式”大学物理课程思政教学模式探索与实践[J]. 物理与工程，2023，33(4)：121-128.
Cite this article: WANG Z, HOU Z Y, KE S M, et al. Exploration and practice of “Immersive” ideological and political teaching mode in college physics course[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(4): 121-128. (in Chinese)

“大学物理”课程是工程技术类各专业学生的一门重要的必修基础课，该课程教学内容包括力、热、光、电磁、近代物理等，蕴含着丰富的思政素材和德育资源[4]。在培养学生树立科学的世界观、价值观，增强学生观察和思维能力，传播辩证唯物主义的观点和方法，培养学生的求实精神、创新意识，弘扬家国情怀和爱国主义等方面，具有其他课程不可替代的育人功能与优势[5-8]。

但当前“大学物理”课程在承担思政教育实施方面仍或多或少存在如下一些问题：(1) 思政元素与课程内容融合度不高，学生认同感不强。若是要充分发挥“大学物理”的“课程思政”功能，应当以隐性的方式灌输思政内容[9]。但是，当前由于大部分物理教师的成长过程一直处于理科知识和思维的熏陶中，缺乏人文知识和思政素养。这样就存在物理知识与思政元素的融合深度不够、生搬硬套的实施方式和学生的认同感不高等问题。(2) 思政元素呈现的载体形式单一，对学生的吸引力不强。当前“大学物理”课程思政元素的呈现主要通过授课教师，在课堂通过语言或文字的形式呈现，思政元素呈现的载体和形式都缺乏丰富性和创新性，对学生的吸引力不足，思政效果不明显。(3) 思政元素在课堂展现时间短，学生受思政教育浸润时间不足。当前大部分课程思政元素的展现都是在课堂教学过程中进行，而“大学物理”课程的知识点多，在有限的课堂教学时间中，能分配到思政元素的讲授时间较少，学生受思政教育浸润时间往往不足，难以形成共鸣。

穆良柱认为：物理课程思政教育的内涵核心是物理认知能力培养，包括认知模型的构建、物理方法的训练、物理精神的养成、也就是物理文化的传承[10]。

物理学作为一门自然科学蕴含了非常多的马克思主义哲学原理。马克思主义哲学对物理学研究具有理论指导作用，同时学生通过对物理学知识的深入学习，能够帮其树立正确的世界观、人生观和价值观[11]。因此，只有在考虑到大学物理课程本身特点，将思政课程要求与大学物理知识体系对接，才能将思政元素有机地融入课内课外教学中。为了促进“大学物理”课程思政建设，我校“大学物理”教学研究团队组建了“课程思政”教学研究团队，从思政元素挖掘、课程思政元素电子化材料库建立、课程思政的平台构建等方面进行了探索和实践，利用现代化信息和互联网技术平台，使学生在课内和课外全方位受思政教育浸润，让思政效果入眼、入耳、入脑、入心，实现“沉浸式”大学物理课程思政，逐渐形成具有特色的课程思政教育教学模式。

1 深入挖掘大学物理课程中蕴含的思政元素，并建立更具亲和力的思政元素库

教师在教学中起主导作用，要全面推进课程思政建设，其中的关键在教师。我们充分发挥青年教师讨论课制度优势，深入讨论、梳理、挖掘每章节课程内容所蕴含的思政元素，我们主要从古代物理、科学史话、前沿科技、工程应用等几个方面进行思政元素的挖掘。

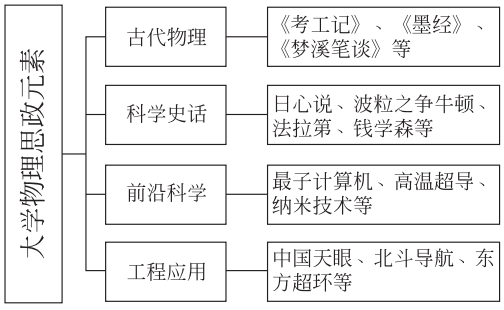


图1 大学物理思政元素分类

1.1 从中国古代物理中挖掘思政元素

我国是一个拥有五千年不间断文明史的古国，科学技术成就曾一度领先于世界，在物理学方面也取得了不少可以令人称赞的成就，体现了我国古人的智慧，形成了诸多优秀的思政元素，将这些思政元素应用于“大学物理”教学中，可以激发学生的学习动力和民族自豪感。

在力学方面，我国现存最早的科技书籍《考工记》中，就记载了不少力学知识，其中对惯性问题的认识更是比同期的欧洲国家深刻得多；墨家著作《墨经》一书，对力学现象进行了初步概括，并进行了一些推理论证，包括时空观、力的平衡问题等，墨家发现的杠杆原理比阿基米德要早两百多年；东汉时期的古籍《尚书纬·考灵曜》中记载地球运动时说：“地恒动不止而人不知，譬如人在大舟中，闭窗而坐，舟行而不觉也。”形象生动地描述了相对性原理，比哥白尼、伽利略的论述早了1400多年。在光学方面，世界上最早的几何光学著作是《墨经》，它比欧几里得要早一百多年，其中记载了世界上最早的小孔成像实验，并对小孔成像进行了正确地分析和解释；《墨经》中还记载了光是

沿直线传播的观点，并讨论了平面镜、凹面镜、凸面镜等的成像情况；沈括的《梦溪笔谈》和赵友钦的《革象新书》对几何光学也有很深的研究[12]。此外，在古籍中还有对热学、电磁学、声学等方面的记载。我国古代物理中相关思政教育素材和教学内容对照情况详见表1。通过提取古代物理学中的思政元素并融入课堂教学，有助于培养学生的人文精神、民族自豪感和爱国主义精神，正确认识中国古代文明发展，体会中国古代学者勇于创新的科学态度和精神。

1.2 从物理学史中寻觅思政元素

物理学理论是人类对客观世界物理运动规律所获取的主观反映，因此它必然包含客观世界的真实内容。合乎物理学规律的种种联系的稳定性和可重现性，正表明物理学理论具有其绝对真理的成分，符合马克思辩证唯物主义的观点[13]。物理学的发展史是人类探索物质运动基本规律的过程，期间物理学家为追求真理而夜以继日地观测、实验，孜孜不倦地思考、探索，既有长期的困顿，也有豁然的开朗，既有成功的喜悦，也有失败的懊恼，既有借鉴、协作和继承，也有质疑、批判和争论。总之，物理学史体现了人类探索和认识世界的历程，是物理学家征服世界、改造自然、创造发明的奋斗史，记述了物理知识的累积过程，以及物

表1 大学物理教学中中国古代物理学课程思政内容对照表

	教学内容	思政切入点	思政元素
中国古代物理学	力学	运动的相对性	战国《吕氏春秋》：“刻舟求剑”的故事；
			《隋书·天文志》：“仰游云以观，日月常动而云不移”。
			《抱朴子·塞难》：“见游云西行，而谓月之东驰”。
			《春秋纬·考灵曜》“地恒动不止，而人不知，比如人在大舟中，闭牖而坐，舟行而人不觉”。
			王充《论衡·效力篇》
		惯性	《考工记·轮人》：“马力既竭，辀(辕)犹能一取也”。
		力的定义	战国《墨经》“力，刑之所以奋也。”
		杠杆原理	战国《墨经》“衡木，加重焉而不挠，极胜重也；右校交绳，无加焉而挠，极不胜重也。”
		功与能	《淮南子·谬称训》：“物之功，动而有益，则损随之。”
	热学	热的平衡、热的传导	王充《论衡》研究了热的平衡、热的传导和物质状态的变化。
			刘安《淮南万毕术》“取沸汤置瓮中，密以新缣，沈中三日成冰。”
	声学	声音的产生	王充在《论衡》中指出：声音是振动产生的，是通过空气传播的，在空气中传播可用水面波来比喻，这些论述在世界上是最早的
		声的共振	沈括第一个在声学史上做了有名的声的共振实验。
		拍的形成	战国时期制造的曾侯已编钟
		回声	北京天坛回音壁
	光学	光的传播	战国《墨经》堪称世界上最早的几何光学著作
		小孔成像	战国《墨经》记载了世界上最早的小孔成像实验，并对小孔成像给予了正确的分析和解释。
		焦距和焦点	汉代《淮南子》一书讨论了阳燧的焦点问题，明确了焦距和焦点。
	电磁学	摩擦起电	东汉王充《论衡》中阐述了“顿牟掇芥”的现象。
		磁性	我国古代四大发明指南针
			战国《吕氏春秋》在“磁石召铁”中记载磁石指南北的性质
			郦道元在《水经注》中，记载了秦始皇磁石建造阿房宫的北阙门防避刺客
		导体和绝缘体	《梦溪笔谈》中，记载了“一家遭雷电，宝刀银器等熔流于地，而草木无一毁者”

理科学的发展演变规律[13]。从日心说、行星运动三大定律到经典力学，再到相对论和量子力学，从亚里士多德到伽利略，牛顿再到法拉第、麦克斯韦、爱因斯坦，从外国科学家到中国科学家。物理学家的奋斗历程精彩绝伦，这其中包含着丰富的思政元素可以挖掘。如牛顿怎样站在巨人的肩膀上，爱因斯坦十年的追光思考，居里夫妇艰辛的提炼镭，卢瑟福长期研究阿尔发射线，以及量子理论早期发展所经历的曲折和磨难等[14]。物理学史具体相关思政教育素材和教学内容对照情况详见表2。以物理学史为载体深入挖掘典型案例的人文内核，用科学家事迹激励学生，发挥榜样的力量，通过学习科学家的精神，让学生认识到科学的道路是不平坦的，帮助学生建立正确的世界观和科学价值观，树立辩证唯物主义的实践观，养成实事求是、精益求精的科学精神。

1.3 从前沿科学技术中提炼思政元素

前沿科学技术代表着全人类最高科学技术研究的发展方向，对国家未来新兴产业的形成和发展具有引领作用，有利于产业技术的更新换代，实现跨越式发展。我国科研人员通过深耕与传承，在量子计算机、量子通信、量子精密测量、高温超导、自旋电子学、可控核聚变等很多前沿领域与国际先进水平的差距从“跟跑”“并跑”到“领跑”，科

表2 大学物理教学中物理学史课程思政内容对照表

	教学内容	思政切入点	思政元素
科学史话	力学	运动学	伽利略的科学思想方法。
		牛顿运动定理	牛顿的传奇一生及主要成就。
		万有引力	哥白尼的日心说和捍卫真理的殉葬者布鲁诺 。
		动量和冲量	齐奥尔科夫斯基提出的多级火箭和惯性导航。
			钱学森回国效力，献身国防，志在强国，成就了“两弹一星”伟大事业，中国载人航天奠基人。
	热学	热力学定律	蒸汽机的发展，第一次工业革命的核心技术。
			永动机不可实现。
		热与功的等效性	焦耳验证能量转化实验。
		卡诺循环	卡诺，第一个把热和动力联系起来的人，是热力学理论基础建立者。
	电磁学	电性	富兰克林的风筝实验。
		库仑定律	库仑发明扭秤、卡文迪什在电学方面的贡献。
		磁现象	奥斯特发现电流磁效应。
		霍尔效应	诺贝尔奖得主崔琦的分数霍尔效应，薛其坤院士反常霍尔效应
		安培定律	“电学中的牛顿”安培。
		电磁感应现象	法拉第发现电磁感应现象，制成第一台发电机。
		电磁场理论	麦克斯韦预言了电磁波的存在，实现了电磁大统一。
		交变电流	特斯拉，交流电之父。
	光学	光的本性的认识	光的发展简史 。
		杨氏双缝干涉	托马斯·杨的双缝干涉实验开启了第二次光的波粒之争。
		迈克耳孙干涉仪	迈克耳孙发明迈克耳孙干涉仪对光速进行了精密测量。
	近代物理	爱因斯坦假设	爱因斯坦及其主要成就、科学精神和人文情怀。
		量子力学	从普朗克的量子假说，到波尔的电子假说，再到海森堡不确定性原理、薛定谔的波函数。
		波粒二象性	持续了300年的波粒之争，由牛顿开始，到爱因斯坦结束。
		实物粒子的波动性	德布罗意提出新理论。
		康普顿散射	吴有训，中国物理学研究的“开山祖师”。

技话语权在加强，创新能力与日俱增。在教学实践中，教师通过列举专业领域与国际先进水平的对比，提高学生对前沿科技的把握和认识，同时为学生建立“立足中国，放眼世界”的国际视野，为学习与成长建立愿景与目标。

1.4 从工程应用中凝聚思政元素

新中国成立以来特别是改革开放 40 年来，我国经济社会快速发展，重大工程建设举世瞩目；进入新时代，我们在习近平新时代中国特色社会主义思想指引下，以重大工程夯实社会主义现代化强国基础，涌现了一大批具有世界先进水平的标志性重大科技工程，如载人航天、深海探测、特高压输电、中国“天眼”、中国环流器二号 M、蛟龙号载人潜水器、C919 大飞机等。众多奇迹的背后，是国家基础研究和原始创新的不断加强，是百万科研技术人员攻坚克难，自立自强的伟大成就。从工程应用中的物理知识为背景提取思政元素，如表 4 所示，以此伟大成就增强学生民族自信和文化自信，厚植爱国主义情怀。

2 建立课程思政电子化材料库，丰富课程思政载体形式

当前“大学物理”课程思政元素的呈现主要通过授课教师，在课堂通过语言或文字的形式呈现，思政元素呈现的载体形式缺乏丰富性和创新性，对学生的吸引力不足，思政效果不明显。通识课在大面积授课中，教师教学水平参差不齐，课程思政不易普遍实施。

我们通过团队建设素材库，利用信息化教学

表 3 大学物理教学中前沿科学技术课程思政内容对照表

	教学内容	思政切入点	思政元素
前沿科技	力学	万有引力	引力透镜/引力弹弓
		冲量与动量	太阳帆，离子推进器等太空推进器
		角动量	多螺旋桨无人机的设计
	热学	热力学循环	脉冲爆震发动机简介
			110MW 发电重型燃气轮机
		绝对零度	诺贝尔奖得主朱棣文的激光冷却技术。
			中国科学技术大学超冷分子化学团队制备超冷三原子分子气。
	光学	迈克尔逊干涉仪	LIGO 聆听来自宇宙深处的引力波。
		多普勒效应	激光多普勒血流计
	电磁学	电容	超级电容器原理和发展
		带电粒子在磁场中的运动	磁约束-用磁场来约束等离子体中带电粒子的运动。
			扫描电子显微镜/透射电子扫描电镜-磁透镜
		安培力	电磁弹射技术的基本原理
		磁场	中国“慧眼”刷新宇宙最强磁场 16 亿 T
		磁悬浮	上海磁悬浮示范线、长沙磁浮快线、北京磁浮 S1 线
		霍尔效应	霍尔推进器
		电磁场	特高压输电，使用 1000 千伏及以上的电压等级输送电能
		电流的磁效应/安培力	电动汽车的电动机简介
		电磁感应	磁悬浮原理及发展状况
		波的应用	我国自主研发的“蛟龙号”的构造
		电磁波谱	中国天眼 FAST
	近代物理	光电效应	光伏产业，光电通信
		核聚变	Lawrence Livermore National Laboratory 首次成功地在核聚变反应中实现了“净能量增益”
		量子力学	量子纠缠/量化波粒二象性

表4 大学物理教学中工程应用课程思政内容对照表

	教学内容	思政切入点	思政元素
工程应用	力学	质点运动学	北斗卫星导航系统的原理与应用
			弹道问题
		万有引力	我国航天事业的辉煌成就/重力勘探
		冲量与动量	缓冲包装设计
			打桩机的基本原理
		惯性	惯性导航系统
		浮力	建筑工程水下桩基础设计
		力矩	汽车的驱动与制动
		共振	港珠澳大桥:中国成为桥梁建设强国,
			虎门大桥风振分析
		势能	三峡工程及其主要功能
	热学	热平衡	建筑中的热平衡
		热力学循环	蒸汽机/内燃机原理
			制冷机/热泵原理
		热传导	温度场对机械的影响
	光学	全反射	光纤的传播模式
		干涉和衍射	全息照相
		光栅衍射	金属材料应变测量
		偏振光	平面光弹性的应力
		马吕斯定律	液晶显示原理
	电磁学	静电感应	避雷针/静电除尘器/静电复印/静电透镜
		电容	电容的应用及作用
		带电粒子在磁场中的运动	东方超环(托卡马克装置)
			扫描电子显微镜/透射电子扫描电镜-磁透镜
		安培力	电磁炮的基本原理
		磁悬浮	上海磁悬浮示范线、长沙磁浮快线、北京磁浮S1线
		霍尔效应	PN结简介/磁场的测量
		电磁场	特高压输电,使用1000千伏及以上的电压等级输送电能
		电流的磁效应/安培力	电动汽车的电动机简介
		电磁感应	发电机基本原理,白鹤滩水电站/微波加热原理/五轮仪原理
		波的应用	我国自主研发的“蛟龙号”的构造
		电磁波谱	中国天眼FAST/相控阵雷达原理
	近代物理	光电效应	光伏产业
		核聚变	中国“两弹一星”精神/于敏构型
		量子力学	墨子号量子卫星实现1200千米地表量子态传输新纪录
			“九章”和“祖冲之”号量子计算机

将思政材料电子化,形成了包括各种文字、图片、动画和视频素材的课程思政电子化材料库,其中包含百余幅图片、40多个视频、完整“大学物理”课程思政PPT。文字材料包含课程思政融入点的教案、课件PPT,以及其他单行文字材料;图片包括已有图片的整合,以及团队成员拍摄的图片;视

频包括剪辑的电影片段、纪录片片段、课堂讲课视频、团队成员精心设计录制的体现思政融入点的微视频、学生录制的视频。运用微课、微视频、微电影、慕课等这些新技术手段，满足学生的求知欲，增强课堂的体验性和互动性，以达到入眼、入耳、入脑、入心的思政效果，使思政课堂真正发挥出它应有的活力。

3 构建全方位实施课程思政的平台和渠道，实现课内课外沉浸式思政浸润

近年来随着教育信息化大力推进，信息技术与教育教学深度融合。声音、图像、视频、动画等的传播越来越方便，人们获取知识和信息的方式已变得更加方便和快捷；同时，网络信息技术的发展为大量优质的数字化教学资源的传播带来便捷，也为教师观念的转变和教学方法的改革提供了重要支撑。本教学团队经过多年的建设，逐渐形成了“一导两课三平台”的教学模式（以学科竞赛为引导，传统课堂和在线课堂两个课堂，在线课程、微信公众号、B站直播教室三个线上平台），如图2所示。为了构建全方位课程思政的实施平台和渠道，我们进一步在“一导两课三平台”的教学模式中融入思政内容。截至目前，我们的微信公众号已发布教学推送350篇，关注超19000人；B站直播辅导平台，关注人数10000余人，开展大型直播辅导50余场，发布教学相关视频200余个，播放量超44.4万，受众广泛，广受欢迎。在课程思政的实施过程中，通过传统课堂与微信公众号和Bilibili站平台形成的课内课外双循环系统，不但在课堂教学中由教师主导对思政元素进行阐释、讲解；还通过在线课程、微信公众号和Bilibili平台，使课程思政教育在课堂外延伸，将电子化的



图2 “一导两课三平台”的教学模式

课程思政素材进行推送，方便学生全天候进行阅读、观看和学习。同时利用平台的数据统计功能可以时刻关注学生的思想动态，分析学生喜好，及时调整思政内容并对学生进行正确深入的引导，确保学生掌握正确的思政内容，达到思政教育的目的。

4 课程思政的实施效果

“沉浸式”是课程思政实施的高阶形式，以丰富的思政元素熏陶人，以高尚的师德感染人，以爱国、爱校促进“双一流”建设激励人，以实现中华民族伟大复兴的家国情怀升华思想。

4.1 教学团队全体教师共享思政元素素材库，各展所长

建设好素材库并不意味着课程思政就能够成功落地，需要教师实际应用起来，并融合到教学内容里面。因此，教学团队成员全员参与，积极将素材库中的思政元素融入到自己的教学过程中，并根据学生的反馈和教学效果不断优化和改进；同时，不断地更新和补充。为了保证素材库的全面性和有效性，以及提升教师课程思政能力，我们建立了相互交流和学习的机制，定期组织举办团队研讨会或学术讲座等活动，开展思政教学研究工作，团队成员定期分享自己的课程思政方法和素材，共同完善素材库的内容和质量，使教学资源得到充实。

4.2 学生积极参与课程思政教学，对课程思政教学评价较高

大学物理课程思政教育的核心是科学认知能力的培养，包括物理认知模型构建、物理方法的训练和物理精神的养成。为了有效地进行思政教育，我们在微信公众号设立“悟理”和“课程思政”专栏。鼓励学生可以通过“悟理”专栏发表在学习“大学物理”课程中的学习心得，以及对学习过程中的创新思路和解题方法，互动交流。通过自己撰写文章，可以提高学生对物理学的认知，同时可以训练学生认识问题，分析问题，解决问题的逻辑思维能力。

鼓励学生参加物理类学科竞赛，培养学生以科学的思维和方法思考分析问题，处理问题，并能够对物理现象进行定性和定量的探究。现在，我们每年组织全校本科生参加“大学生物理学术竞赛”和“大学物理实验竞赛”。在竞赛培训过程中，我们从竞赛的背景知识、竞争意识、团队意识、吃苦耐劳的精神等方面融入思政元素。在参赛过程

中，学生收获的不仅仅是成绩和荣誉，更是全面提升和激发的创新意识、创新能力。另外，通过总结竞赛所取得的经验，汇聚成新的思政元素，反哺到“大学物理”思政课程中去，使更多的同学能够受到激励。



图3 长大物理微信公众号“悟理”和“课程思政”专栏

5 结语

为了促进“大学物理”课程思政建设，针对当前“大学物理”课程在思政教育方面思政元素融合生硬、呈现形式单一、学生受思政浸润时间较短等突出问题，我校“课程思政”教学研究团队，通过深入挖掘“大学物理”课程中蕴含的思政元素，将专业知识和思政元素有机融合；建立包含各种文字、图片、动画和视频素材形式丰富的课程思政电子化材料库；并充分利用现代化信息技术手段，借助于教学团队已经建立并运行的在线课程、微信公众号、B站直播教室平台等多种平台，使课程思政教育在课堂外延伸，从而使学生各感官长时间被吸引，让思政效果入眼、入耳、入脑、入心，从而形成“沉浸式”的课程思政教育效果。从而形成一种可供推广的教学模式，逐步在校内外进行推广应用，期望能够为大学物理课程思政建设起到一些参考作用。

参 考 文 献

[1] 习近平. 把思想政治工作贯穿教育教学全过程 开创我国高等教育事业发展新局面[N]. 人民日报，2016-12-09.

[2] 中共中央办公厅. 关于深化新时代学校思想政治理论课改革创新的若干意见[Z]. [2019-08-14].

[3] 中华人民共和国教育部. 高等学校课程思政建设指导纲要[Z]. 2020-06-01.

[4] 王小力. 大学物理课程思政研究与实践[J]. 中国大学教学，2020，10：54-57.
WANG X L. Research and practice of ideological education in university physics courses [J]. China University Teaching，2020，10：54-57. (in Chinese)

[5] 张景川，楚合营，孔德国，等. 大学物理“课程思政”教学团队建设及实践研究[J]. 教育现代化，2019，6(88)：162-165.
ZHANG J C，CHU H Y，KONG D G，et al. Research on the Construction and practice of the teaching team of college physics “course ideological and political” [J]. Education modernization，2019，6(88)：162-165.

[6] 王青，忻蓓. 物理专业课程思政建设的认识与思考[J]. 中国大学教学，2021(3)：52-54.
WANG Q，XIN B. Understanding and thinking on the ideological and political construction of physics courses[J]. University Teaching in China，2021(3)：52-54. (in Chinese)

[7] 王青. 课程思政背景下面向未来的课程建设[J]. 物理与工程，2021，31(5)：3-6.
WANG Q. Future oriented curriculum construction under the back ground of curriculum ideology and politics [J]. Physics and Engineering，2021，31(5)：3-6. (in Chinese)

[8] 王敏，王晓琴，楼宇丽，等. 思政教育融入大学物理教学的研究与实践[J]. 高教学刊，2022，8(20)：4.
WANG M，WANG X Q，LOU Y L，et al. Research and practice of ideological and political education in college physics teaching [J] Journal of Higher Education 2022，8(20)：4. (in Chinese)

[9] 金鑫宇，汪亚平，毛新云，等. 关于大学物理课程思政的若干思考[J]. 物理与工程，2022，32(4)：74-83.
JIN X Y，WANG Y P，MAO X Y，et al. Some thoughts on ideological and political construction of college physics course [J]. Physics and Engineering，2022，32(4)：74-83. (in Chinese)

[10] 穆良柱. 物理课程思政教育的核心是科学认知能力培养[J]. 物理与工程，2021，31(2)：9-15.
MU L Z. The core of ideological and political education in physics course is the cultivation of scientific cognitive ability [J]. Physics and Engineering，2021，31(2)：9-15. (in Chinese)

[11] 卢常芳. 物理学发展中蕴含的思政元素 ——马克思主义哲学观点在物理学中的体现[J]. 物理通报，2022(4)：2-8.
LU C F. Ideological and political elements in the development of physics-The embodiment of marxist philosophy in physics [J]. Physics Bulletin，2022(4)：2-8. (in Chinese)

[12] 戴念祖. 中国古代物理学[M]. 中国国际广播出版社，2010.

[13] 申先甲. 物理学史简编[M]. 山东教育出版社，1985.

[14] 张丰强，余仲秋. 漫谈物理学中的科学精神[M]. 河南人民出版社，2010.

[15] 张晓磊，张乐，张钰伊，等. “物理学史和物理学方法论”课程思政教学探索[J]. 大学物理，2021，40(4)：40-44+85.
ZHANG X L，ZHANG L，ZHANG Y Y，et al. The exploration of ideological and political teaching in the course of the history and methodology of physics [J]. College Physics，2021，40(4)：40-44，85. (in Chinese)

面向工程师人才培养的基础实验类课程建设探索与实践
——以“物理实验(光学)”课程为例

王　峥[1]　安　炜[1]　王文文[2]　徐　平[1]
(北京航空航天大学[1]中法工程师学院；[2]航空发动机研究院，北京　100191)

摘　要　基础实验类课程在工程师人才培养过程中担负着培养学生实践动手能力、系统思维能力和工程意识的重要作用。本文以“物理实验(光学)”课程为例，从课程目标与定位、内容设计、授课模式、考评方式等方面，详细阐述了改革创新举措。课程的改革创新使理科基础实验课程为工程技术类专业课程的学习提供有效支撑，为卓越工程师人才的创新能力培养提供有力保障。

关键词　物理实验；课程建设；工程师

EXPLORATION AND PRACTICE OF BASIC EXPERIMENTAL COURSES CONSTRUCTION FOR THE TRAINING OF ENGINEERS
—CASE STUDY ON COURSE OF PHYSICS EXPERIMENT (OPTICS)

WANG Zheng[1]　AN Wei[1]　WANG Wenwen[2]　XU Ping[1]
(Beihang University [1] Sino-French Engineer School; [2] Research Institute of Aero-engine, Beijing 100191)

Abstract　Basic experimental courses play an important role in training students' practical ability, systematic thinking and engineering consciousness in the process of training engineers. Taking physics experiment (optics) course as an example, the present paper introduces the exploration and practice of course construction from aspects of course objectives, content design, teaching mode and evaluation method. The reform and innovation of the curriculum not only makes the basic experiment course provide effective support for the study of engineering courses, and also provides a strong guarantee for the cultivation of engineers' innovation ability.

Key words　physics experiment; course construction; engineer

2022年9月27日，教育部、国务院国资委联合举行了卓越工程师培养工作推进会。教育部怀进鹏部长在会上指出，要深刻理解卓越工程师培养的极端重要性，着力破解核心难题，实现工程教育办学方式从学科专业单一性和独立性向学科大类交叉、校企深度融合模式的根本转变，培养目标

收稿日期：2023-06-06
基金项目：教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会2023高等学校教学研究项目(DJZW202307hb)；北京航空航天大学校级一流本科课程建设项目《预科物理实验》。
作者简介：王峥，女，副教授，从事大学物理实验教学工作，研究方向为先进核能材料；安炜，男，副教授，从事大学物理教学工作，研究方向为第一性原理计算；王文文，女，教授，从事大学物理教学工作，研究方向为功能薄膜材料。
通讯作者：徐平，男，教授，主要从事大学物理实验教学工作，研究方向为传感器，xuping@buaa.edu.cn。
引文格式：王峥，安炜，王文文，等. 面向工程师人才培养的基础实验类课程建设探索与实践——以“物理实验(光学)”课程为例[J]. 物理与工程，2023，33(4)：129-132.
Cite this article: WANG Z, AN W, WANG W W, et al. Exploration and practice of basic experimental courses construction for the training of engineers—Case study on course of physics experiment (optics)[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(4): 129-132. (in Chinese)

从重视理论传授向重视工程创新能力的根本转变，评价标准从唯论文唯奖项等向考查实际创新贡献为主的根本转变[1]。卓越工程师培养计划对高校的工程师人才培养工作提出了更高的要求，如何在传授理论的同时培养学生的工程创新能力是摆在高校教师面前的重要课题。

作为工科优势突出的北京航空航天大学，以为国家培养红色工程师为己任，早在二十多年前就开始了工程师人才培养的模式创新，包括与法国中央理工大学集团合作，于2005年创立的北航中法工程师学院[2]，旨在借鉴法国工程师培养理念、模式和成功经验，结合北航高等工程教育的优势，培养具有国际视野和创新意识的卓越工程师人才。在十多年的探索实践过程中，有较为丰富的积累，特别是在基础课程与专业课程的有效衔接、实验课程对工程师专业人才培养的支撑等方面，有值得推广的经验。

基础实验类课程在培养学生的实践动手能力、系统思维能力和工程意识等方面具有非常重要的作用。然而，实验课在一些高校中存在学生重视程度不足、学习兴趣不高，课程内容陈旧，教学模式死板、僵化等问题。本文以北航中法工程师学院开设的本科生必修课“物理实验(光学)”的课程建设为例，探讨如何在基础实验类课程的教学实践中通过有针对性的课程设计，递进式的师生、生生互动授课模式，以及多维度的考评方式来促进学生的工程意识和实践能力培养。

1 课程定位与目标

北航中法工程师学院采用“本科-硕士”与“预科-工程师”融合的培养模式，专业方向为通用工程师。本科阶段强化学生的数理基础，培养学生多学科知识的融合、应用能力并注重培养学生的工程意识。“物理实验(光学)”课程是一门面向通用工程师专业大三学生开设的实验类基础课程，旨在培养学生的知识构建能力、综合运用光学等相关知识和数学工具建模并设计实验的能力、系统思维能力、解决复杂问题能力和工程意识。本课程对于通用工程师专业学生由强化理科基础阶段进入工程教育阶段的顺利进阶具有重要意义。围绕北航培养新时代领军领导人才的办学定位，结合通用工程师培养目标要求，确立了本课程的教学目标：

(1) 掌握常用光学仪器的工作原理和调节方法，具有光学测量系统设计的基本知识和工程意识，具备对实验系统进行建模的能力。

(2) 能提出问题并结合实验系统建立相应的实验模型，利用各类工具(软件)和技术资源，设计实验系统并完成实验操作。

(3) 能对实验数据合理性进行评估，并基于实验数据验证模型的合理性，从而具备知识的构建能力。

(4) 具有团队精神，能以口头和书面方式参与学术讨论并准确表达实验思想和结论。

2 课程改革创新与实践

2.1 课程设计

围绕课程目标和专业定位，优化教学内容，开设出适合实践动手能力和工程意识培养的、层次化递进的实验项目。课程目前共有六个专题12个实验项目(见表1)，涵盖几何光学和波动光学内容。根据实验课程教学特点和“两性一度”要求，以专题形式编排实验内容。每个专题包含多个(知识)由浅入深、(操作)由易到难、(系统性或应用性)由简单到复杂，并且关联度很高的系列实验项目。实验中引导学生通过观察实验现象，获得客观真实的实验数据或特征，再对数据或特征进行分析以解释物理现象，从而帮助学生形成物理世界观。

基础性实验可以帮助学生巩固知识并掌握光学实验基本技能；拓展性实验可以培养学生归纳分析、建模和验证模型以及利用模型进行实验现象预测的能力；设计性实验可以培养学生在限定条件下，基于理论和实验模型设计实验、完成实验并对结果进行有效性和局限性分析的能力；而应用性探究实验则可以培养学生基于需求建立模型、模拟仿真、构建实验，并通过比较仿真结果、实验结果与需求之间差异，修正模型、改进设计以逼近实际需求的能力。实验中学生需要综合运用各种知识和技能，包括数学、计算机、实验和实践等技能。

表 1 “物理实验(光学)”课程实验项目

专题			实验项目
一	薄透镜和球面镜专题	1	薄透镜和球面镜焦距测量及诺莫图法应用
		2	天文望远镜模型搭建及原理研究
二	透镜组专题	3	消色差透镜组及焦距的精确测量
		4	光学显微镜特性的实验研究
三	分光计专题	5	分光计的使用和柯西公式
		6	光栅和棱镜光谱仪的搭建及应用
		7	白光干涉法测量透明薄膜的厚度
四	光的干涉和衍射专题	8	光的干涉和衍射及光盘参数测量
五	光的偏振专题	9	光的偏振及 3D 电影
		10	云母片快慢轴的测定
六	迈克尔逊干涉仪专题	11	迈克尔逊干涉仪的调整及白光干涉观察
		12	傅里叶变换光谱仪和光谱测量

2.2 授课模式

根据实验难度和课程特点,实施小班化教学(每班 12～15 人),保证教师有足够的时间指导和与学生互动。教学过程中不规定严格统一的实验步骤,而是在讲义中以设置问题的形式一步步引导学生设计实验方案、动手操作、记录数据、总结规律、最终给出观点或结论。根据实验项目特点,综合运用采用引导启发式、互动辩论式、共情探索式等教学方法,鼓励学生自主探索。下面分别举例说明:

验证性实验项目主要以学生自主动手实践为主,教师把控整体进程并作适当引导和阶段性总结,学生有充分的试错时间和空间。如“薄透镜和球面镜焦距测量及诺莫图法应用”实验,要求学生从实像到虚像、实物到虚物观察实验现象,从定性到半定量、定量测量薄透镜和球面镜焦距,中间穿插多个讨论环节,最后由教师根据归纳法,以诺莫图法[3]对各类薄透镜和球面镜的成像特点进行归纳总结,并以天文望远镜的研究作为应用拓展。

有些概念比较抽象的实验项目,以教师理论讲解和知识梳理开始,中间穿插实验演示、现象讨论等环节。如“光的偏振特性研究”,实验过程中要由光强的变化反推偏振态的变化,具有很强的抽象性,需要学生有非常扎实的理论基础、清晰的物理模型和正确的实验设计。为保证实验顺利进行并有实际收获,需要教师在课堂中系统梳理相关知识,有序把控实验进程,并组织学生基于实验现象开展有效的讨论和辩论。

对于有些实验项目中结合科学研究、工程技术前沿的讨论题目,需要在师生、生生互动中层层推进,没有确定的答案,通过共情探索拓展,主要目的是培养学生批判性思维和学术交流能力。根据观察到的现象、得到的数据,学生应在批判性地解释这些数据和现象基础上,得到基于实验结果的初步结论;根据实验课堂的组织形式,通过书面和口头形式,陈述结果、推论或自己的观点。

2.3 考评方式

考核方法和标准与课程目标高度契合,引入法国教育部的六项能力评价量表(见表 2),以考核学生知识和资源的综合运用能力、建模能力、解决实际问题能力为主线,对学生分析、计算、仿真、实验、验证、交流沟通等能力进行多维度、全方位考核,客观地评价考生理论与实践的结合能力以及解决复杂工程问题的综合能力。学生成绩由以下三部分构成:

(1) 平时实验操作成绩占 50%:根据实验项目特点,使用六项能力评价量表对学生的课堂表现予以评价。

(2) 期末笔试成绩占 20%:闭卷考试,侧重实验知识以及实验方法的考查。

(3) 期末操作考试成绩占 30%:每名学生独立参加操作考试,时长 1 小时。不同学生所抽到考试题目可能不同,但难度相同。每份试题针对某一个实验项目展开,题目中全面涵盖对六项能力的考查,操作过程中有明确的与教师交流表述环节。

此外,设置开放式实验项目,鼓励学生应用所学知识解决一些实际问题。学生自愿参加,根据完成质量给予最多不超过 10 分的加分。

表2 六项能力评价指标[4]

能力	相关素质要求
理解与适应能力	-实验环境下搜集、提取及组织信息 -陈述实验所研究问题 -确定适当的实验目标
方案实施能力	-实现实验流程 -按照说明指导，正确使用实验设备 -严格遵守实验安全操作规范
分析计算能力	-明确并修改假设 -针对研究问题提出解决思路 -提出相关模型 -解释、论证实验规程或实验设置的原理 -估计实验现象数值及其变化的量级
结果验证能力	-发现观察和测量中可能的错误来源，估计误差 -将实验结果与模型相对照 -判断假设与信息的正误 -批判性地分析实验结果 -对实验流程或模型提出改进方案
学术交流能力	-以书面或口头形式条理清晰、逻辑严密、简明易懂地概括介绍自己的实验过程； -使用合适的科学用语 -善于使用图表描述实验数据 -了解他人的工作，互相对照观点
自主实践能力	-独立研究或团队合作 -适当请求帮助 -主动投入，勇于抉择，预备周全

3 课程建设成效

本课程注重学生自主探究的实验能力培养，给学生“试错”的时间和空间，让学生有更多的探索机会，并在挑战失败中建立自信；突出高阶性的能力素质评价，弱化纯知识记忆型考查内容，注重学生学习过程，并使用能力量表跟踪学生成长，学生的适应、分析、实现、验证、交流和自主探究能力得到显著提升。基于本课程的培养，本科生以第一作者的身份在《大学物理》杂志发表实验研究论文，并有多名学生获得北京市大学生物理实验竞赛一等奖和全国大学生物理实验创新赛三等奖等奖项。学生历年对课程的评价均为优秀。课程也得到了法国教育部巡查督学的肯定，为学院申请法国工程师职衔委员会(CTI)认证提供了有力支撑。

在课程建设运行过程中，课程团队积极开展教学研究，在《大学物理》《物理实验》等期刊上发表多篇以实验研究为背景的教改论文；围绕国家需求、学校的人才培养定位和工程师人才培养目标，对课程教学模式和方法进行了创新发展，在《物理与工程》《高等工程教育研究》等期刊上发表了多篇教学模式改革和教学方法探索的研究论文。课程获批北航精品课程、双百工程(优质课程)。为课程编写的配套教材“物理实验(光学)”为工信部“十四五”规划教材，并被评为2022年北京市优质本科教材。

4 结语

面向工程师人才培养的课程，不仅应当重视理论传授，更要看重工程创新能力的培养。“物理实验(光学)”课程以培养学生解决复杂问题能力和工程意识为导向，强调物理思想，融入工程技术的方法，实现了科学素养和科学实验能力训练与工程意识、工程实践能力培养有机结合。课程的改革创新可以使理科基础实验课程为工程技术类专业课程的学习提供有效支撑，为卓越工程师人才的创新能力培养提供有力保障。

参 考 文 献

[1] 教育部国资委联合召开卓越工程师培养工作推进会[DB/OL] http://www.moe.gov.cn/jyb_xwfb/gzdt_gzdt/moe_1485/202209/t20220927_665483.html

[2] 北航中法工程师学院成立[J].北京航空航天大学学报，2005(7)：734
Establishment of Sino-French Engineer School in Beihang University [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005(7):734(in Chinese)

[3] 刘佳，徐平，陈子瑜，等.诺莫图法在薄透镜和球面镜成像分析中的应用[J].大学物理，2010(6)：5-8.
LIU J, XU P, CHEN Z Y, et al. Application of Nomorgragh in the imaging analysis of the thin lens and spherical mirror [J]. College Physics, 2010(6):5-8. (in Chinese)

[4] Classes préparatoires aux grandes écoles : Filière scientifique MPSI [EB/OL]. https://prepas.org/index.php? document=71

平均速度近似为瞬时速度造成系统误差的多方法研究
——以倾斜气垫导轨法测量重力加速度实验设计为例

宋艳敏　王吉昌　王一凡　于永江　马晓光
（鲁东大学物理与光电工程学院，山东 烟台　264025）

摘　要　匀变速直线运动加速度计算公式应用中，最基本的物理观念是几个物理量之间存在着“一一对应”关系。在倾斜气垫导轨法测量重力加速度实验中，滑块运动的瞬时速度无法准确测量，只能用平均速度代替，造成了公式应用中要求的物理量之间的“一一对应”关系被破坏，产生了无法克服的系统误差。本文设计了匀加速和匀减速直线运动两种实验情境，分别用控制变量法、数学解析法和图像法等多种方法研究了不同实验情境的系统误差，将系统误差分析与物理观念构建建立了联系，分析了挡光片宽度 d、加速情境滑块静止释放时离第一个光电门的距离 L、减速情境滑块静止时离第二个光电门距离 M、两光电门间距 S 和气垫导轨倾角 θ 等参量对该系统误差的影响，研究表明：d、S、L 或 W 参量对该系统误差都有影响；d 值的大小是造成该系统误差的主要因素；θ 参量无影响；应用公式(1)计算重力加速度值更精确。

关键词　物理观念；平均速度；瞬时速度；系统误差

MULTI-METHOD RESEARCH ON SYSTEM ERROR CAUSED BY AVERAGE SPEED APPROXIMATE TO INSTANTANEOUS SPEED
—TAKING THE EXPERIMENTAL DESIGN OF MEASURING GRAVITY ACCELERATION BY INCLINED AIR CUSHION GUIDE RAIL METHOD AS AN EXAMPLE

SONG Yanmin　WANG Jichang　WANG Yifan　YU Yongjiang　MA Xiaoguang
(School of Physics and Optoelectronics, Ludong University, Yantai, Shandong 264025)

Abstract　In the application of the acceleration calculation formula of uniform linear motion, the most basic physical concept is that there is a one-to-one correspondence relationship between several physical quantities. In the experiment of measuring the acceleration of gravity by the inclined air cushion guide rail method, the instantaneous velocity of the slider movement cannot be measured accurately, and can only be replaced by the average velocity, which causes the one-to-one correspondence relationship between the physical quantities required in

收稿日期：2023-06-15
基金项目：鲁东大学教学成果培育项目(2023CG16；2023CG01)。
通讯作者：于永江，男，教授，主要从事物理教学科研工作，y13225457193@163.com。
引文格式：宋艳敏，王吉昌，王一凡，等. 平均速度近似为瞬时速度造成系统误差的多方法研究——以倾斜气垫导轨法测量重力加速度实验设计为例[J]. 物理与工程，2023，33(4)：133-140.
Cite this article：SONG Y M, WANG J C, WANG Y F, et al. Multi-method research on system error caused by average speed approximate to instantaneous speed—Taking the experimental design of measuring gravity acceleration by inclined air cushion guide rail method as an example[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(4): 133-140. (in Chinese)

the application of the formula to be destroyed, resulting in Insurmountable systematic error. In this paper, two experimental scenarios of uniform acceleration and uniform deceleration linear motion are designed, and the systematic errors of different experimental scenarios are studied by various methods such as control variable method, mathematical analysis method and image method. The system error analysis is connected with the construction of the physical concept, and the influence of parameters such as the width d of the light barrier is analyzed, the distance L from the first photogate when the acceleration situation slider is released at rest, the distance M from the second photoelectric gate when the slider is stationary in the deceleration scenario, the distance S between the two photogates and the inclination angle θ of the air cushion guide rail to the system error is analyzed. The research shows that the parameters of d, S, L or W all affect the system error. The research shows that the d, S, L or W parameters all affect the system error: the value of d is the main factor causing the system error; the θ parameter has no effect; the application of formula (1) to calculate the acceleration of gravity is more accurate.

Key words physical concepts; average speed; instantaneous speed; systematic error

物理学研究离不开物理实验，物理实验中都会存在误差，误差分为系统误差和随机误差。系统误差与随机误差不同，往往是有迹可循的，它通常遵循一定的规律，由此可见，只要找到系统误差产生的原因和规律，就可以采取相应的措施减少或者是消除系统误差。分析研究系统误差是实验工作一个重要组成部分，在各种各样的物理实验中，人们为消除系统误差做出了很多努力。[1-3]从实验环节上来讲，可以从以下两个环节来消除系统误差：第一，消除产生系统误差的根源。在测量之前，要求测量者对可能产生系统误差的环节作仔细的分析，从根源上消除。第二，在测量过程中限制和消除系统误差。对于固定不变的系统误差，在测量过程中常常采用抵消法、交换法和对称观测法等加以限制和消除。[4]减小系统误差主要考虑测量方法、测量仪器、测量环节和测量人员等四个因素。[5]文献[6]报道了气垫导轨实验中，由于测量仪器的因素，瞬时速度无法直接测量，不得不利用平均速度替代瞬时速度，必然会造成系统误差，并对该误差进行研究，但受篇幅限制，该文献仅研究了气垫导轨测量重力加速度实验中加速运动的实验情境，该实验中计算加速度的公式有两个，即公式(1)和公式(2)，文献也仅讨论公式(1)的应用。

$$a=\frac{v_2^2-v_1^2}{2S} \tag{1}$$

$$a=\frac{v_2-v_1}{t_{12}} \tag{2}$$

本文将在气垫导轨实验仪器上，设计匀加速直线运动和匀减速直线运动两种情境，并对实验中两个加速度计算公式进行全面讨论，开展解析法、控制变量法和图像法等多方法研究，重点解决运动学物理观念的“一一对应”问题，即运动学公式(1)应用中要注意的某一段时间物体运动的位移起点与初速度、终点与末速度必须是一一对应的关系，或运动学公式(2)应用中某一段时间的起始时刻与初速度、终点时刻与末速度必须是一一对应的关系，这种一一对应关系在理论教学应用中只是泛泛而论，而在本实验情境下，这种一一对应关系被打破，表现为系统误差，对运动学物理观念的构建定能发挥积极作用。

1 实验情境设计

气垫导轨实验装置是由导轨、滑块以及两个光电门组成，实验中导轨喷射出的压缩空气与滑块之间形成气垫，滑块可以无摩擦运动，图1是实验装置图。

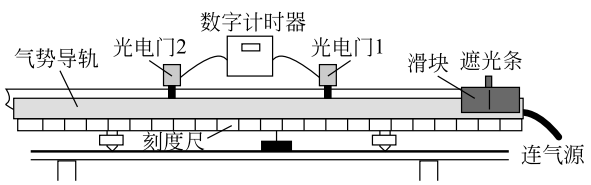


图1 气垫导轨实验装置图

光电门是由聚光灯泡和光电管组成，立在导

轨的一侧。光电门与数字毫秒计相连，通过光路是否遮挡影响光电管电路导通与否，输出信号使数字毫秒计开始或停止计时。固定在滑块上的U形挡光片实现光路遮挡，两个前沿的间距为 d，如图2所示。工作时滑块携带U形挡光片向右运动，挡光片第一前沿通过光电门1挡住光路，数字毫秒计开始计时，第二前沿通过光电门再次挡住光路，计时结束，这样记录了滑块通过光电门1的时间 t_1；同样可以记录U形挡光片通过光电门2的时间 t_2。另外，当U形挡光片第一前沿通过光电门1，数字毫秒计开始计时，再通过光电门2停止计时，这样记录滑块通过两个光电门所用的时间 t_{12}。

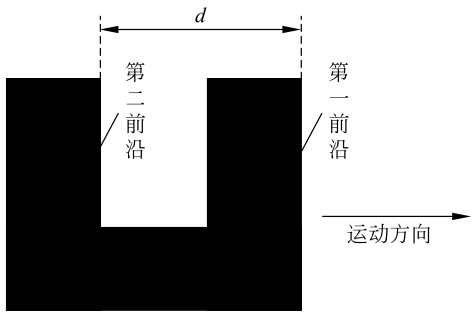


图2　U形挡光片装置示意图

气垫导轨法测量重力加速度实验中，长度为 l 的气垫导轨先调整为水平，再左端垫高 h，构造出一个与水平面夹角为 θ 的斜面，创建一个加速下滑情境，滑块距离第一个光电门为 L 处静止释放，携带着宽度为 d 的挡光片一起做加速直线运动，如图3所示。也可以创建一个减速上升的实验情境如图4，这时是气垫导轨右边垫高 h，让滑块初速度较大，从左向右减速向上滑动，分别经过两个光电门，并且停止时离第二个光电门距离为 M。设 a 表示滑块运动的加速度，实验中惯用的处理方法是测得 t_1、t_2 和 t_{12} 以及两光电门之间的距离 S，用滑块通过两个光电门位置处的平均速度 $\overline{v_1}=\dfrac{d}{t_1}$ 和 $\overline{v_2}=\dfrac{d}{t_2}$ 分别表示瞬时速度 v_1 和 v_2。那么滑块运动的加速度可以用上文公式(1)或公式(2)分别计算。

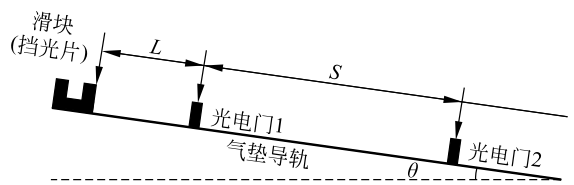


图3　匀加速直线运动实验情境示意图

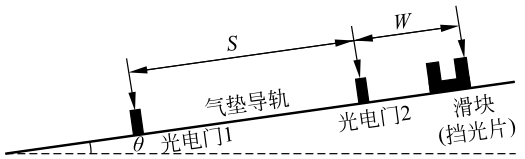


图4　匀减速直线运动实验情境示意图

当地的重力加速度计算用公式(3)表示，h 和 l 由实验测得，在 h 比较小的情况下 $\sin\theta$ 可表示为 h/l。另外，加速运动取正号，减速运动取负号。

$$g=\pm\frac{a}{\sin\theta} \tag{3}$$

根据瞬时速度定义，该实验设计中直接测量滑块通过光电门的瞬时速度是很困难的，不得不用平均速度替代瞬时速度，虽然 d 比较小，对应的 t 也很短，公式(1)(2)用平均速度代替瞬时速度的处理方法也会带来无法克服的系统误差。

2　系统误差分析-解析法

2.1　匀加速直线运动

2.1.1　位移 S 和时间间隔 t_{12} 的系统误差分析

图5(a)表示了滑块在匀加速直线运动过程中几个关键时刻点对应的空间位置、时间和速度演化图像[6]，图5(b)是对应的 v-t 图。为了便于分析，将挡光片两个前沿上各取一个点 O_1 和 O_2。设0时刻，O_1 点静止，其速度 $v=0$，O_1 点离光电门1点的距离为 L；t_0 时刻 O_1 点运动到光电门1点，设运动速度为 v_{10}；t_0+t_1 时刻 O_2 点运动到光电门1点，运动速度为 v_{1t1}；在 $t_0\to t_0+t_1$ 时间内，O_1 点位移为 d，用时 t_1，实验中用 t_1 时间段的平均速度近似的表示 O_1 点通过光电门1的瞬时速度 v_1，根据匀变速直线运动规律，理论上 O_1 点的瞬时速度等于 v_1 的时刻应该在 $t_0+0.5t_1$ 时刻；O_1 点通过光电门1到2的时间间隔为 t_{12}；在 t_0+t_{12} 时刻 O_1 点通过光电门2，$t_0+t_{12}+t_2$ 时刻 O_2 点通过光电门2，滑块通过光电门2用时为 t_2，在 t_2 时间段内 O_1 点通过光电门2的瞬时速度等于平均速度 v_2 应该在 $t_0+t_{12}+0.5t_2$ 时刻，$t_0+0.5t_1\to t_0+t_{12}+0.5t_2$ 这两个时刻 O_1 点的位移用 $S_{理论}$ 表示，可以表示为

$$S_{理论}=\frac{a_{真}(t_0+t_{12}+0.5t_2)^2-a_{真}(t_0+0.5t_1)^2}{2} \tag{4}$$

本讨论中加速度作为一个客观量用 $a_{真}$ 表示，

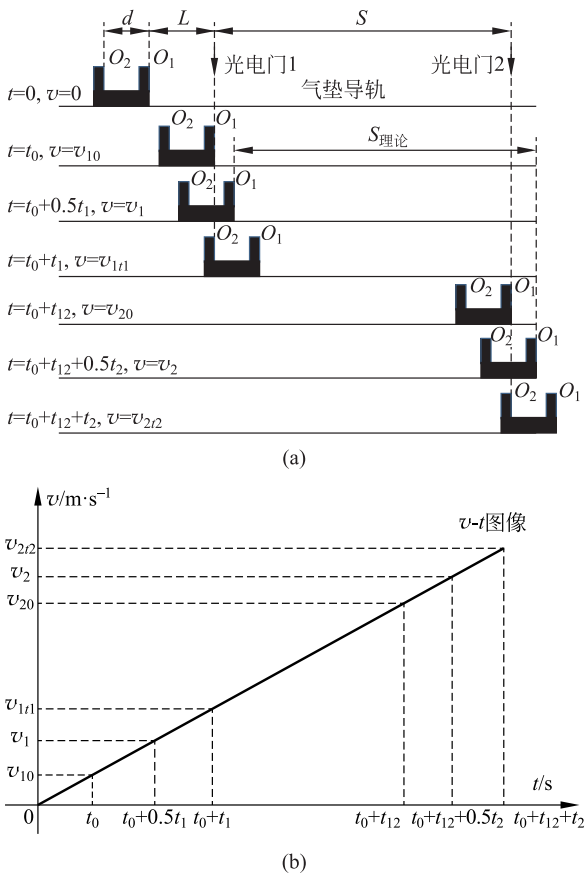


图 5

(a) 滑块运动过程中的空间、时间和速度演化示意图；(b) 滑块运动过程中的 v-t 图

$a_{真}=g_{真}\sin\theta$，其中 $g_{真}$ 为当地重力加速度值。另外，实验测量中 S 的大小是两个光电门之间的距离，图 5 中可以看出

$$S=\frac{a_{真}(t_0+t_{12})^2-a_{真}t_0^2}{2} \tag{5}$$

比较式(4)和式(5)，发现 S 不等于 $S_{理论}$，而且 S 小于 $S_{理论}$，导致应用公式(1)计算的加速度 a_1 值偏大。显然，应用公式(1)计算加速度时不可避免的系统误差主要是由位移 S 不等于 $S_{理论}$ 造成的。在此，运动学公式(1)应用中物体运动位移的起点与初速度、终点与末速度必须是一一对应的物理观念，由于平均速度的近似被打破，表现为系统误差。

严格意义上，应用公式(1)计算 O_1 运动的加速度应该表示为

$$a_{理论}=\frac{v_2^2-v_1^2}{2S_{理论}} \tag{6}$$

在测量中滑块通过两个光电门所用的时间间隔为 t_{12}。理论上滑块瞬时速度由 $v_1\rightarrow v_2$ 对应的两个时刻之间的时间间隔应该是 $t_{12理论}$，表示为

$$\begin{aligned}t_{12理论}&=(t_0+t_{12}+0.5t_2)-(t_0+0.5t_1)\\&=t_{12}+0.5t_2-0.5t_1\end{aligned} \tag{7}$$

显然 t_{12} 不等于 $t_{12理论}$，所以用公式(2)计算的加速度 a_2 会造成不可避免的系统误差。式(7)中可以看出，测量值 t_{12} 大于 $t_{12理论}$，导致加速度间接测量值 a_2 偏小。在此，运动学公式(2)应用中该段时间的起始时刻与初速度、终点时刻与末速度必须是一一对应的关系也是由于平均速度近似被打破，也是表现为系统误差。

理论上，滑块(或 O_1 点)运动的加速度利用公式(2)应该表示为

$$a_{理论}=\frac{v_2-v_1}{t_{12理论}} \tag{8}$$

2.1.2 重力加速度相对误差解析表达式

根据匀加速直线运动规律，可知：

$$v_1=a_{真}(t_0+0.5t_1) \tag{9}$$

$$v_2=a_{真}(t_0+t_{12}+0.5t_2) \tag{10}$$

将公式(9)、公式(10)代入公式(1)整理得

$$a_1=\frac{(g\sin\theta)^2[(t_0+t_{12}+0.5t_2)^2-(t_0+0.5t_1)^2]}{2S} \tag{11}$$

将 $t_0=\sqrt{\frac{2L}{g\sin\theta}}$，$t_1=\sqrt{\frac{2(L+d)}{g\sin\theta}}-\sqrt{\frac{2L}{g\sin\theta}}$，$t_{12}=\sqrt{\frac{2(L+S)}{g\sin\theta}}-\sqrt{\frac{2L}{g\sin\theta}}$，$t_2=\sqrt{\frac{2(L+S+d)}{g\sin\theta}}-t_0-t_{12}=\sqrt{\frac{2(L+S+d)}{g\sin\theta}}-\sqrt{\frac{2(L+S)}{g\sin\theta}}$

分别代入式(6)和式(11)整理得：

$$\begin{aligned}a_{理论}&=\frac{v_2^2-v_1^2}{2S_{理论}}\\&=\frac{g_{真}\sin\theta[(t_0+t_{12}+0.5t_2)^2-(t_0+0.5t_1)^2]}{(t_0+t_{12}+0.5t_2)^2-(t_0+0.5t_1)^2}\\&\equiv g_{真}\sin\theta\end{aligned} \tag{12}$$

$$a_1=g_{真}\sin\theta\cdot\frac{(\sqrt{L+S}+\sqrt{L+S+d})^2-(\sqrt{L}+\sqrt{L+d})^2}{4S} \tag{13}$$

将式(13)代入式(3)得

$$g_1=g_{真}\cdot\frac{(\sqrt{L+S}+\sqrt{L+S+d})^2-(\sqrt{L}+\sqrt{L+d})^2}{4S} \tag{14}$$

实验中测量的重力加速度 g_1 的相对误差可以表示为

$$\delta_1=\frac{g_1-g_{真}}{g_{真}}100\%=\left[\frac{(\sqrt{L+S}+\sqrt{L+S+d})^2-(\sqrt{L}+\sqrt{L+d})^2}{4S}-1\right]100\% \tag{15}$$

将公式(7)(9)(10)代入公式(8)整理得

$$a_{理论}=\frac{v_2-v_1}{t_{12理论}}=\frac{a_{真}(t_0+t_{12}+0.5t_2)-a_{真}(t_0+0.5t_1)}{t_{12}-0.5t_1+0.5t_2}=a_{真}\equiv g_{真}\sin\theta \tag{16}$$

将公式(9)(10)代入公式(2)整理得

$$a_2=\frac{v_2-v_1}{t_{12}}=\frac{g_{真}\sin\theta\left[\sqrt{2(L+S+d)}+\sqrt{2(L+S)}-\sqrt{2(L+d)}-\sqrt{2L}\right]}{2\sqrt{2(L+S)}-2\sqrt{2L}} \tag{17}$$

加速度测量值 a_2 的相对误差也等于重力加速度测量值的相对误差，可以表示为

$$\delta_2=\frac{g_2-g_{真}}{g_{真}}100\%=0.5\times\left\{\frac{\left[\sqrt{(L+S+d)}-\sqrt{(L+d)}\right]}{\sqrt{(L+S)}-\sqrt{L}}-1\right\}100\% \tag{18}$$

从式(15)和式(18)都可以看出，在相对误差表达式中只有 L、S 和 d 三个参量，没有倾角 θ 参量，可见，本实验测量重力加速度的相对系统误差，仅与 L、S 和 d 三个参量大小有关，与导轨的倾角 θ 的大小无关。

2.2　匀减速直线运动

2.2.1　位移 S 和时间间隔 t_{12} 的系统误差分析

图 6(a)表示了滑块在匀减速直线运动过程中几个关键时刻点对应的空间位置、时间和速度演化图像，图 6(b)是对应的 v-t 图。让滑块以较大的初速度向上做匀减速直线运动，设 0 时刻，O_1 点过光电门 1，瞬时速度为 v_{10}；t_1 时刻 O_2 点运动到光电门 1 点，设瞬时速度为 v_{1t1}；在 0→t_1 时间内，O_1 点位移为 d，用时为 t_1，实验中用 t_1 时间段的平均速度近似的表示 O_1 点通过光电门 1 的瞬时速度 v_1；理论上 O_1 点的瞬时速度为 v_1 的时刻应该在 $0.5t_1$ 时刻；O_1 点通过两个光电门所用的时间间隔 t_{12}；在 t_{12} 时刻 O_1 点通过光电门 2，$t_{12}+t_2$ 时刻 O_2 点通过光电门 2，滑块通过光电门 2 用时为 t_2，在 t_2 时间段内 O_1 点通过光电门 2 的瞬时速度等于平均速度 v_2 应该在 $t_{12}+0.5t_2$ 时刻，$0.5t_1$→$t_{12}+0.5t_2$ 这两个时刻 O_1 点的位移大小用 $S_{理论}$ 表示，可以表示为

$$S_{理论}=v_{10}(t_{12}+0.5t_2)-v_{10}(0.5t_1)+\frac{a_{真}(t_{12}+0.5t_2)^2-a_{真}(0.5t_1)^2}{2} \tag{19}$$

假定滑块运动初速度方向为正方向，那么 $a_{真}$ 为负值，表示方向与正方向相反。图 5 中可以看出

$$S=v_{10}t_{12}+\frac{a_{真}(t_{12})^2}{2} \tag{20}$$

比较式(19)和式(20)，发现 S 不等于 $S_{理论}$，导致应用公式(1)计算加速度时不可避免的系统误差也是由位移 S 不等于 $S_{理论}$ 造成的。

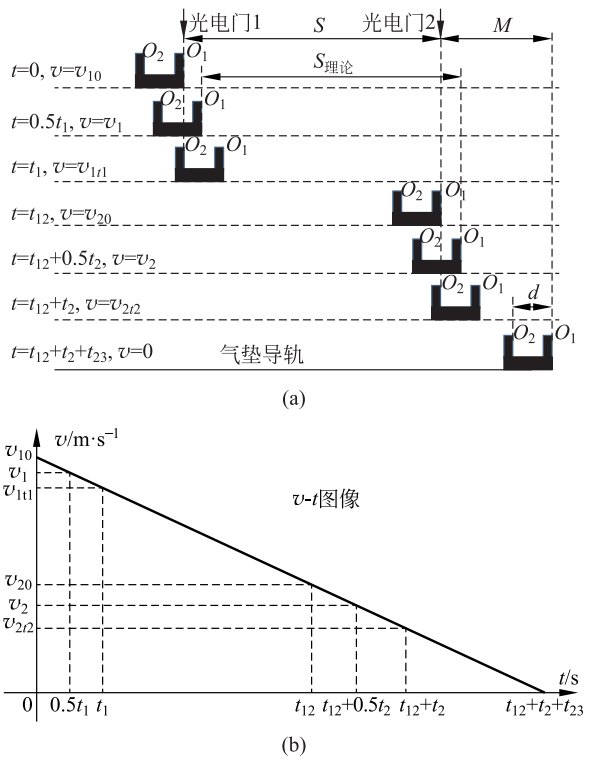


图 6

(a) 滑块运动过程中的空间、时间和速度演化示意图；(b) 滑块运动过程中的 v-t 图

理论上，应用公式(1)和公式(2)计算 O_1 运动的加速度公式也分别与式(6)和式(8)相同。

在测量中滑块通过两个光电门所用的时间间隔为 t_{12}。理论上滑块瞬时速度由 v_1→v_2 对应的两个时刻之间的时间间隔应该是 $t_{12理论}$，公式表达与式(7)相同。由式(7)可以看出，加速运动情境下，测量值 t_{12} 小于 $t_{12理论}$，导致应用公式(2)计算加速度间接测量值 a_2 偏大，与加速情况相反。

2.2.2 重力加速度相对误差解析表达式

根据匀减速直线运动规律，可知：

$$v_1 = v_{10} + a_{真}(0.5t_1) \tag{21}$$

$$v_2 = v_{10} + a_{真}(t_{12} + 0.5t_2) \tag{22}$$

假设 O_2 点过光电门 2 后到滑块静止用时为 t_{23}，可知 $v_{10} = -a_{真}(t_{12}+t_2+t_{23})$

又根据图 6(b)可知

$(M-d) = \frac{1}{2}(-a_{真})t_{23}^2$，得 $t_{23} = \sqrt{\frac{2(M-d)}{-a_{真}}}$，

$M = \frac{1}{2}(-a_{真})(t_2+t_{23})^2$，得 $t_2 = \sqrt{\frac{2M}{-a_{真}}} - \sqrt{\frac{2(M-d)}{-a_{真}}}$，

$M+S = \frac{1}{2}(-a_{真})(t_{12}+t_2+t_{23})^2$，得 $t_{12} = \sqrt{\frac{2(M+S)}{-a_{真}}} - \sqrt{\frac{2M}{-a_{真}}}$，

$M+S-d = \frac{1}{2}(-a_{真})(t_{12}+t_2+t_{23}-t_1)^2$，

得 $t_1 = t_{12} + t_2 + t_{23} - \sqrt{\frac{2(M+S-d)}{-a_{真}}} = \sqrt{\frac{2(M+S)}{-a_{真}}} - \sqrt{\frac{2(M+S-d)}{-a_{真}}}$

将式(21)(22)代入式(1)和式(6)整理得

$$a_1 = \frac{-g_{真}\sin\theta}{4s}\left[\left(\sqrt{(M+S)} + \sqrt{(M+S-d)}\right)^2 - \left(\sqrt{M} + \sqrt{(M-d)}\right)^2\right] \tag{23}$$

$$a_{理论} = a_{真} \equiv -g_{真}\sin\theta \tag{24}$$

式(23)代入式(3)得

$$g_1 = \frac{g_{真}}{4s}\left[\left(\sqrt{(M+S)} + \sqrt{(M+S-d)}\right)^2 - \left(\sqrt{M} + \sqrt{(M-d)}\right)^2\right] \tag{25}$$

实验中测量的重力加速度 g_1 的相对误差可以表示为

$$\delta_1 = \frac{g_1 - g_{真}}{g_{真}}100\% = \left[\frac{\left(\sqrt{(M+S)} + \sqrt{(M+S-d)}\right)^2 - \left(\sqrt{M} + \sqrt{(M-d)}\right)^2}{4S} - 1\right]100\% \tag{26}$$

将公式(21)、公式(22)、公式(7)代入公式(8)整理，结果与式(24)相同。将公式(21)、公式(22)代入公式(2)整理得

$$a_2 = 0.5a_{真}\left(1 + \frac{\sqrt{M+S-d} - \sqrt{M-d}}{\sqrt{M+S} - \sqrt{M}}\right) \tag{27}$$

加速度测量值 a_2 的相对误差也等于重力加速度测量值的相对误差，可以表示为

$$\delta_2 = 0.5\left(\frac{\sqrt{M+S-d} - \sqrt{M-d}}{\sqrt{M+S} - \sqrt{M}} - 1\right)100\% \tag{28}$$

从式(26)和式(28)都可以看出，在相对误差表达式中只有 M、S 和 d 三个参量，没有倾角 θ 参量，表明本实验测量重力加速度的相对系统误差，仅与 M、S 和 d 三个参量大小有关，与导轨的倾角 θ 的大小无关。

3 系统误差分析-控制变量及图像描绘法

3.1 匀加速直线运动

设定滑块静止释放时离第一个光电门的距离 L=20.00cm，两个光电门之间的间距 S=40.00cm，只改变 U 形挡光片的宽度 d 的大小，根据式(12)和式(15)，数值模拟了 d 值变化对重力加速度测量相对误差的影响，变化曲线如图 7(a)所示。结果发现 d 越小，重力加速度测量的相对误差的绝对值越小，反之越大。在理论上分析其主要原因是，d 越小，根据式(4)和式(5)计算出的平均速度越接近瞬时速度标准值，造成的误差影响自然减小，这样可以推断出实验中要尽量选用宽度 d 较小的 U 型挡光片。

两个光电门间距 S=40.00cm，U 形挡光片的宽度 d=1.000cm，改变滑块静止释放时离第一个光电门的间距 L 的大小，图 7(b)描绘了 L 值对重力加速度测量相对误差影响的变化规律。结果发现 L 越大，所计算的重力加速度相对误差绝对值越小，反之越大，图像可以看出当 L 取值大于 20.00cm 后，本参数对系统误差就影响比较小了，这样实验探究时 L 取值一般要大于等于 20.00cm，与实验指导教材要求相符[7]。

设定滑块静止释放时离第一个光电门的距离 L=20.00cm，以及 U 形挡光片的宽度 d=1.000cm，

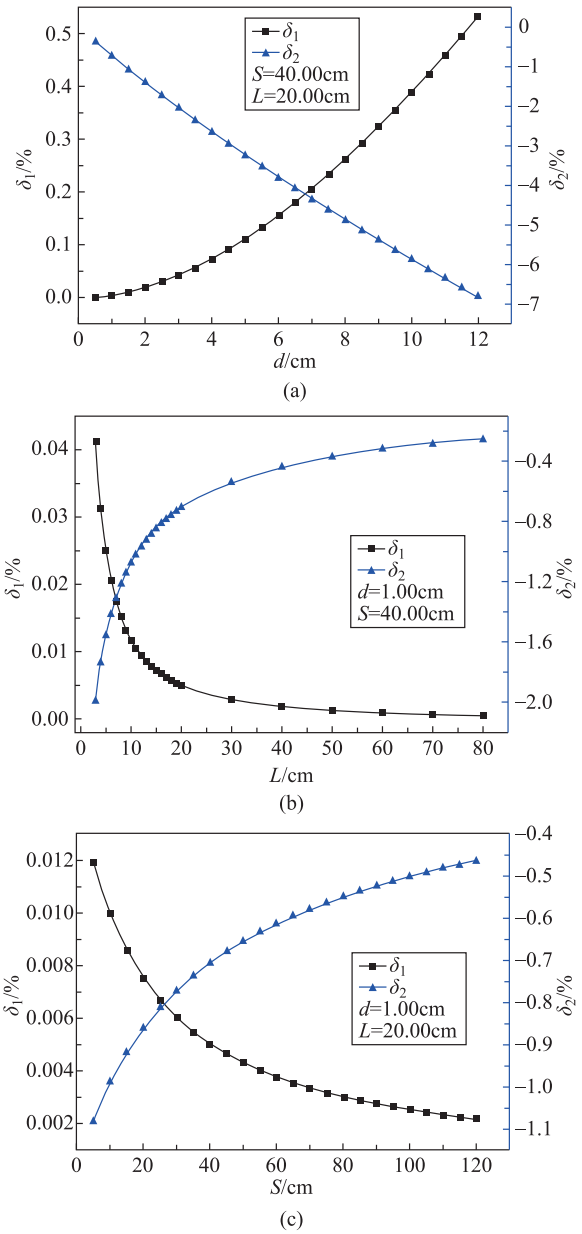


图 7

(a) d 值对重力加速度测量值相对误差的影响；(b) L 值对重力加速度测量值相对误差的影响；(c) S 值对重力加速度测量值相对误差的影响

改变两个光电门间距 S，图 7(c)绘制 S 值对重力加速度测量相对误差影响的规律曲线，我们发现 S 越小，对重力加速度测量的相对误差绝对值越大，反之越小。这样就明显表现出，只要实验条件允许，实验中要尽量增大两个光电门的间距。

通过图 7 还可以发现，同等条件下 δ_1 始终为正值，δ_2 始终为负值，说明同样一组实验数据，使用公式(1)计算的重力加速度比真值偏大，公式(2)计算偏小。图 7 的(a)(b)和(c)纵向比较还发现，实验中影响系统误差的主要因素是挡光片的宽度 d。另外，选择 $S=40\text{cm}$，$L=20.00\text{cm}$ 和 $d=1.000\text{cm}$ 一组数据，代入式(15)和式(18)计算发现重力加速度的相对误差分别等于 0.005%[6] 和 −0.7%，可见，在用气垫导轨法测量加速度时应用公式(1)，结果更精确。

3.2　匀减速直线运动

设定匀减速直线运动滑块静止时离光电门 2 的距离为 $M=20.00\text{cm}$，两个光电门之间的间距 $S=40.00\text{cm}$，只改变 U 形挡光片的宽度 d 的大小，根据式(26)和(28)，数值模拟了 d 值变化对重力加速度测量相对误差的影响，变化曲线如图 8(a)所示。结果发现 d 越小，重力加速度测量的相对误差值越小，反之越大。

两个光电门间距 $S=40.00\text{cm}$，U 形挡光片的宽度 $d=1.000\text{cm}$，改变匀减速直线运动滑块静止时离光电门 2 的距离大小，图 8(b)描绘了 M 值对重力加速度测量相对误差影响的变化规律。我们发现 M 越大，所计算的重力加速度相对误差绝对值越小，反之越大，但 M 取值大于 20.00cm 后，本参数对系统误差就影响比较小了。

设定匀减速直线运动滑块静止时离光电门 2 的距离 $M=20.00\text{cm}$，以及 U 形挡光片的宽度 $d=1.000\text{cm}$，改变两个光电门间距 S，绘制 S 值对重力加速度测量相对误差影响的规律曲线，如图 8(c)所示。我们发现 S 越小，对重力加速度测量的相对误差越大。这样提示我们，只要实验条件允许，实验中要尽量增大两个光电门的间距。

通过图 8 还可以发现，同等条件下 δ_1 和 δ_2 始终为正值，在匀减速直线运动情境中，使用式(1)和式(2)计算的重力加速度比真值都偏大，但使用公式(1)计算的实验结果更精确，且影响系统误差的主要因素仍然是也是挡光片的宽度 d。

4　结论

不考虑空气阻尼的理想情况下，在倾斜气垫导轨法测量重力加速度实验情境中，由于用平均速度近似的替代瞬时速度，造成了匀变速直线运动加速度计算公式应用中要求的物理量之间的“一一对应”关系的物理观念被打破，必然产生了无法克服的系统误差，该系统误差可知、可控。挡

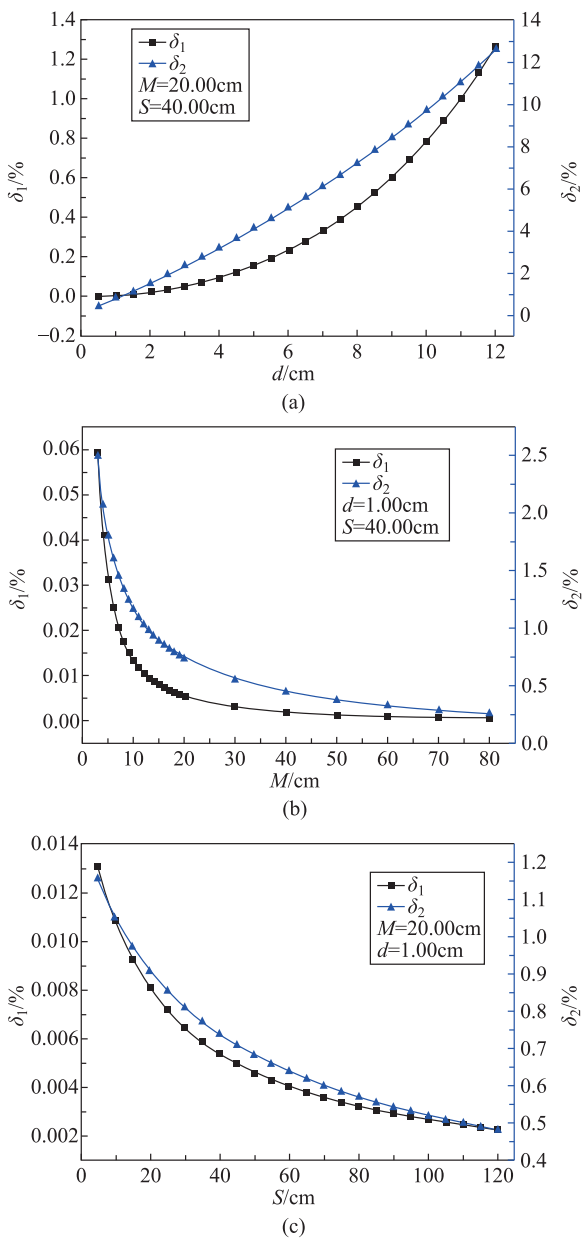


图 8

(a) d 值对重力加速度测量值相对误差的影响；(b) M 值对重力加速度测量值相对误差的影响；(c) S 值对重力加速度测量值相对误差的影响

光片宽度 d、加速情境滑块静止释放时离第一个光电门的距离 L 或减速情境滑块静止时离光电门2的距离 M、两光电门间距 S 等三个参量对该系统误差都有影响，d 值的大小对该系统误差的影响最大，且 d 值越大影响越大，L 和 S 值对该系统误差的影响次之，它们均是数值越大影响越小；导轨倾角 θ 对该系统误差没有影响；在加速运动实验情境中，用公式(1)计算的重力加速度的值比真值偏大，用公式(2)计算的重力加速度的值比真值偏小，应用公式(1)计算重力加速度值更精确。在减速运动实验情境中，用两个公式计算的重力加速度的值比真值都偏大，但用公式(1)计算的重力加速度值更接近真值。

参 考 文 献

[1] HU J G, CHEN X, WANG L Y, et al. Systematic error suppression scheme of the weak equivalence principle test by dual atom interferometers in space based on spectral correlation[J]. Chinese Physics B, 2020, 29(11): 230-235.

[2] 朱栋，徐晗，周寅，等. 基于扩展卡尔曼滤波算法的船载绝对重力测量数据处理[J]. 物理学报，2022，71(13)：159-167.
ZHU D, XU H, ZHOU Y, et al. Data processing of shipborne absolute gravity measurement based on extended Kalman filter algorithm[J]. Acta Phys. Sin. 2022, 71(13): 159-167. (in Chinese)

[3] 朱明宇，陈艺欣，陈敏，等. 密立根油滴实验中温度因素的影响：理论考量与实验校准[J]. 物理与工程. 2023，33(1)：128-133.
ZHU M Y, CHEN Y X. CHEN M, et al. Influence of temperature in the oil-drop experiment: theoretical consideration and experimental corection[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(1): 128-133. (in Chinese)

[4] 杨述武，孙迎春，沈国土. 普通物理实验(1)[M]. 北京：高等教育出版社，2015.

[5] 千承辉，陈长松. 基于平衡法的重力加速度测量装置[J]. 仪表技术与传感器，2014，10：19-21，27.
QIAN C H, CHEN C S. Design of gravitational acceleration measuring device based on balance method[J]. Instrument Technique and Sensor, 2014, 10: 19-21, 27. (in Chinese)

[6] 赵佳乐，张嘉禾，于永江. 气垫导轨测量重力加速度实验系统误差分析[J]. 物理与工程，2022，32(3)：105-109.
ZHAO J L, ZHANG J H, YU Y J. Analysis of the systematic errors on measurement of gravity acceleration by air track [J]. Physics and Engineering, 2021, 32(36): 105-109. (in Chinese)

[7] 吴泳华，霍剑青，浦其荣. 面向21世纪课程教材大学物理实验第1册[M]. 北京：高等教育出版社，2005.



大物教指委
官网



《物理与工程》
投审稿平台



《物理与工程》
微信公众号