

“新工科”大学物理实验线上线下混合教学的探索与实践

侯仰龙¹ 沈 韩^{2,3} 陈文多¹ 钱果裕¹ 崔 清¹ 赵福利^{2,3}

(¹ 中山大学材料学院, 广东 广州 510275; ² 中山大学物理学院, 广东 广州 510275;

³ 物理学国家级实验教学示范中心(中山大学), 广东 广州 510275)

摘 要 数字化教育背景下,“新工科”建设要求大学物理实验教学目标从传统知识传授转向科学素养、实践创新能力及工程思维的培养,然而当前教学通常放在一年级,侧重通识教育,新工科特色不足,学生面临理论准备不充分、学习效率不高以及自主学习能力欠缺等问题,难以满足“新工科”人才培养的需求。为此,研究探索并实践了一种“新工科”大学物理实验课程线上线下混合教学模式。该模式依托线上平台,通过教师录课视频、实验操作视频、交互式虚拟仿真实验和针对性预习测试,引导学生在课前完成知识储备;线下实验环节则聚焦规范操作、现象观察、数据采集与分析探究,显著提高了学生的实践操作能力和实验效率;通过共性实验和特色实验相结合的方式,有效拓展学生视野和学科交叉能力。实践结果表明,该模式成效显著,学生的预习效果、实验效率与数据分析能力均得到有效提升,其设计方案和实施流程为“新工科”背景下深化大学物理实验教学改革提供了可借鉴的路径。

关键词 大学物理实验;线上线下混合教学;虚拟仿真;教学改革;新工科

EXPLORATION AND PRACTICE OF ONLINE-MERGE-OFFLINE TEACHING IN COLLEGE PHYSICS EXPERIMENTS OF EMERGING ENGINEERING EDUCATION

HOU Yanglong¹ SHEN Han^{2,3} CHEN Wenduo¹ QIAN Guoyu¹ CUI Qing¹ ZHAO Fuli^{2,3}

(¹ School of Materials, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510275;

² School of Physics, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510275;

³ National Demonstration Center for Experimental Physics Education (Sun Yat-sen University), Guangzhou, Guangdong 510275)

Abstract Against the backdrop of digital education, the “Emerging Engineering” initiative calls on university physics-lab courses to shift their objectives from traditional knowledge transmission to the cultivation of scientific literacy, hands-on innovation, and engineering thinking. Yet current instruction is typically delivered in the first year with a strong general-education focus, lacking the distinctive features demanded by “Emerging Engineering.” Students therefore arrive with insufficient theoretical preparation, low learning efficiency, and weak self-directed learning skills, making it hard to meet the talent-development goals of the

收稿日期: 2025-07-06

基金项目: 2024 年度 广东省本科高校教学质量与教学改革工程建设项目。

通信作者: 赵福利, stszfl@mail.sysu.edu.cn。

引文格式: 侯仰龙, 沈韩, 陈文多, 等. “新工科”大学物理实验线上线下混合教学的探索与实践[J]. 物理与工程, 2025, 35(6): 200-207.

Cite this article: HOU Y L, SHEN H, CHEN W D, et al. Exploration and practice of online-merge-offline teaching in college physics experiments of emerging engineering education[J]. Physics and Engineering, 2025, 35(6): 200-207. (in Chinese)

initiative. To address this, we have designed and implemented a blended online-offline instructional model for the “Emerging Engineering” university physics laboratory. Leveraging an online platform, the model provides teacher-recorded lectures, experimental-operation videos, interactive virtual simulations, and targeted pre-lab quizzes that guide students to build the necessary knowledge before class. During the face-to-face sessions, emphasis is placed on standard operating procedures, observation of phenomena, data collection, and analytical inquiry, markedly improving practical skills and experimental efficiency. By combining common core experiments with distinctive, discipline-crossing ones, the model broadens students’ horizons and strengthens their interdisciplinary competence. Practical results show that the model is highly effective: students’ pre-lab preparation, experimental efficiency, and data-analysis abilities all improve significantly. The design and implementation process offer a replicable pathway for deepening the reform of university physics-lab teaching under the “Emerging Engineering” paradigm.

Key words college physics experiments; online-merge-offline teaching; virtual simulation; educational reform; emerging engineering

在“新工科”建设背景下,信息技术与教育领域的深度融合正加速推动工程教育范式转型^[1,2]。大学物理实验作为大部分工科学生接触的第一门实验课程,是工科人才培养中实践能力与科学思维培养的核心载体,亟须突破传统教学模式的时空限制与效能瓶颈^[3,4]。当前实验教学普遍面临预习环节形式化、理论认知碎片化、安全风险管控等痛点^[5],而线上线下混合式教学(Online-Merge-Offline,OMO)模式通过重构“课前-课中-课后”教学闭环,为破解上述难题提供了创新路径。

为响应教育部“新工科”建设战略,中山大学材料学院与物理学院于2021年启动跨学科协同育人项目,率先在《大学物理实验》课程中构建OMO教学生态系统^[6,7]。该模式通过线上预习与仿真实验的深度融合,既保留传统实验的动手实操优势,又借助大数据分析实现教学过程的动态优化。项目组开发的模块化数字资源库覆盖材料科学、电子信息等多学科交叉实验场景,配合问题驱动的混合式教学设计,有效提升了学生对工程问题的解决能力与跨学科创新意识。这种新型教学范式,不仅突破了传统实验教学的资源约束,更通过持续迭代的数字化评价体系,为新工科人才的实践创新能力培养提供了可复制的实施范本。

本研究聚焦OMO模式在物理实验教学中的系统性设计,重点探讨数字化教学平台如何通过

知识图谱构建、虚拟仿真实验等技术手段,实现学生课前理论储备与安全认知的精准提升,进而优化线下实验环节的探究深度与创新空间,最终形成可量化的教学效能评估体系,为新工科背景下工程实践能力培养提供方法论支撑。

1 线上线下混合教学设计方案

“新工科”大学物理实验线上线下混合教学的设计方案如图1所示。本方案围绕线上预习和虚拟仿真实验赋能线下实验深度探究,并进行多维度考核和实时反馈,达到虚拟仿真破解时空瓶颈,任务驱动提升预习质量,数据赋能优化评价精度的教学目标。

在“新工科”背景下,以新工科发展战略为核心,构建了覆盖力、热、光、电磁、原子物理学等前沿领域的多层次实验教学体系,通过基础型、进阶型、特色型实验的有机融合,着力培养学生的工程实践能力和创新思维。例如,在力学实验中,将重力加速度测量等经典实验与航空航天工程实践相结合,使学生体验从理论到工程应用的完整创新链条;在热学实验中,结合温度传感技术,让学生观察分析不同材料的温度特性,研究材料在高温或绝热环境下的导热性能;在电磁学领域,课程内容不仅涵盖惠斯登电桥测电阻、示波器使用等基础实验,更通过设计性实验如智能医疗设备开发,让学生运用电磁感应原理理解临床实际问题;在



图 1 “新工科”大学物理实验线上线下混合教学设计方案

光学实验中,则将迈克耳孙干涉仪调节、全息照相
等经典项目与信息科学前沿结合,通过搭建光路
系统、分析干涉图样等进阶训练,培养学生的精
密仪器操作能力和科研创新能力。这种实验教
学体系,不仅强化了学生对传统物理实验现象
的直观认知,更通过跨学科项目(如新材料设
计、海洋医学工程、柔性电子器件)驱动实现
了从单一学科实验到复杂工程系统的思维跃迁。

在新工科物理实验课程建设中,线上线下混
合教学衔接机制需构建“预习-实践-反馈”闭
环体系。线上平台通过虚拟仿真实验、微课
视频和预习测试实现知识前置,例如利用中
山大学“爱物理”网站(<http://lovephysics.sysu.edu.cn/doku.php>)线上资源发布实验原理解释、仪器操作演示及安全规范,利用虚拟仿真平台完成线下实验的预演,形成操作认知。线下课堂则聚焦深度实践,教师根据线上数据精准定位学生薄弱环节,设计分层任务:基础组通过实体实验巩固操作技能,进

阶组结合开放性课题开展创新探究,特色组呼
应新工科交叉融合趋势,结合智能技术(如 AI
辅组分析数据),强化工程实践能力。

大学物理实验线上线下混合教学的线下考
核指标需体现实践能力、创新思维与职业素养
的多维培养目标。结合线上教学与线下实践,
考核指标体系可归纳为实验操作技能与规范
性、数据处理与分析能力、创新思维与问题解
决能力、学习态度与安全意识四个核心维度。
通过以上多维度指标,可系统化定量评估学生
在混合式教学中的能力提升情况,为新工科人
才培养提供科学依据。

2 实施流程

2.1 线上预习阶段,进行理论基础与操作预演

线上预习指学生在实体实验课 1 周前,通
过学校在线课程平台(如中山大学爱物理网
站)获取实验相关资源并进行学习,包括:实
验原理动画和

视频讲解、电子版实验指导书(含目的、步骤、仪器图、注意事项)、仪器操作演示视频、虚拟仿真实验(如 SeeLight 光学仿真实验)、实验安全及注意事项讲解、预习自测题等。

线上线下混合教学模式在大学物理实验课程可以明显提升课堂效率,学生通过电子讲义、实验原理动画和视频讲解提前掌握实验要点,深化理论理解;一些复杂概念(如光学干涉条件、表面张力、光电效应等)可通过线上资源反复学习、动态演示,降低线下理解门槛,促进理论联系实际。通过仪器操作演示视频与虚拟仿真实验操作,可以提前进行实验预操作,模拟各种复杂情况,减少课堂讲解时间,将精力集中于动手操作、现象观察与问题解决。

线上线下有机结合可以高效培养自主学习能力,学生自主安排学习节奏,查阅资料,完成预习任务,锻炼信息获取、独立思考与解决问题能力。此外,在预习中强调安全规范和仪器操作要点,减少误操作导致的设备损坏或人身伤害风险,降低实验风险。OMO 模式为线下互动(提问、讨论、高阶探究)奠定坚实基础,使课堂交流更具深度和针对性。

2.2 线下实验阶段,进行实践操作与深度探究

在线下实验阶段,进行实践操作与深度探究是实验课程的核心所在,它能帮助学生将理论知识转化为实际技能,培养学生的科学思维和创新能力。在实验正式开始前约 10 分钟,进行预习检查与准备工作。教师会快速核查学生的预习情况,一方面查看线上测试的完成度,以此了解学生对基础知识的掌握程度;另一方面通过关键问题提问,进一步检验学生对实验原理和流程的理解。与此同时,学生以小组(2 个人)为单位,对实验所需的仪器进行检查和熟悉,确保仪器的正常运行和安全使用。教师则会着重强调安全要点与操作核心注意事项,但不会重复讲解基本步骤,这要求学生预习阶段就对基本流程有清晰的认识。

进入实验操作与数据采集的核心环节,学生们需按照预习时掌握的流程,进行分工协作,规范操作仪器。在操作过程中,学生要全神贯注地观察实验现象,实时、准确、规范地记录原始数据,包括数据的单位和误差估计。这不仅有助于培养学生严谨的科学态度,还为后续的数据分析奠定基

础。当遇到问题时,学生应优先在组内进行讨论,充分发挥团队的智慧和力量;必要时,再寻求教师的针对性指导。

在实验尾声,也就是实验结果初步分析与讨论环节,学生们先在组内初步整理数据,验证实验现象是否符合预期,仔细识别异常或误差线索。随后,教师会引导全班聚焦共性问题或关键发现进行简短讨论,让学生在交流中深化对实验的理解,拓展思维的深度和广度。通过这样的方式,学生能够在实践操作中不断探索和发现,提升自己的科学素养和综合能力。

2.3 课后考核阶段,采用多维度考核方式

线上和线下教学效果反馈的主要内容涵盖实验操作技能与规范性、数据处理与分析能力、创新思维与问题解决能力、实验态度与安全意识四个维度:

在实验操作技能与规范性方面,主要考查学生对实验仪器的正确使用、线路连接、安全操作流程等的掌握程度以及仪器操作的规范性;评估学生是否按标准流程完成实验,包括预处理、数据采集、异常情况处理等环节,保证实验步骤完整性;通过观察学生在仪器故障、数据异常等场景的处理方式,考核学生对突发问题的应对能力与问题排查能力。

在数据处理与分析能力方面,要保证原始数据记录的准确性,考核学生检查数据记录的完整性、清晰度及单位标注规范性,评估学生对系统误差、随机误差的识别能力,以及是否如实记录异常数据并分析原因,考核图表绘制规范性(如误差线标注)、数据拟合方法合理性及结论的科学性。

在创新思维与问题解决能力方面,鼓励学生提出实验方案优化设计,改进实验方法,并评估方案的可行性。在进阶型实验中,鼓励学生开放性实验探索,考核学生创新能力;在特色实验中,考核学生自主选题、方案设计及跨学科知识应用能力。通过物理实验竞赛等竞赛表现与成果产出,评价学生的创新成果。

在实验态度与安全意识方面,通过角色分工与协作效率、实验报告撰写协作度、课堂讨论参与度,考核学生的团队协作与沟通能力。通过检查学生是否遵守安全操作规程,考核实验室安全规范;采用查重系统与过程性记录,防止抄袭并且确

保数据真实,考核实验报告学术诚信;评估学生是否按时完成实验、保持实验台整洁及遵守实验室纪律,考核学习态度与时间管理。

通过以上多维度指标,可系统化评估学生在混合式教学中的线下实践能力,同时为新工科人才培养提供科学依据。具体实施时需结合课程特点调整权重,例如设计性实验可侧重创新维度,而基础性实验则强化操作规范性考核。

2.4 线上与线下的关键结合点

OMO 模式的有效性依赖于线上线下的紧密耦合,表 1 列出若干种类型实验的关键结合点,具体内容包括:

(1) 知识传授(线上)和实践操作(线下)结合:线上学习提供理论支撑与认知思维导图,线下

实践实现知识具身化与技能内化。

(2) 数据采集(线下)和分析与验证(线上/线下)结合:线下获得一手数据;线上提供多种工具(Excel,Origin,Python,Matlab)进行深度处理、绘图、误差分析、虚拟对比^[8,9];线下课堂进行初步讨论和教师即时反馈。

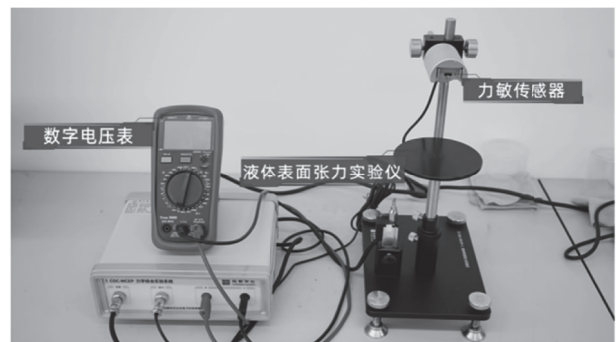
(3) 问题发现(线下)和反馈指导(线上/线下)结合:线下操作中产生的问题,可通过线上平台(讨论区、答疑室、邮件)随时提问获得异步解答,或在线下课堂获得教师同步指导。

(4) 报告撰写与评估(线上为主,线下为辅)结合:学生利用线上模板和工具撰写、提交报告;教师在线批改、反馈;线下可针对报告共性问题进行点评或深化讨论。

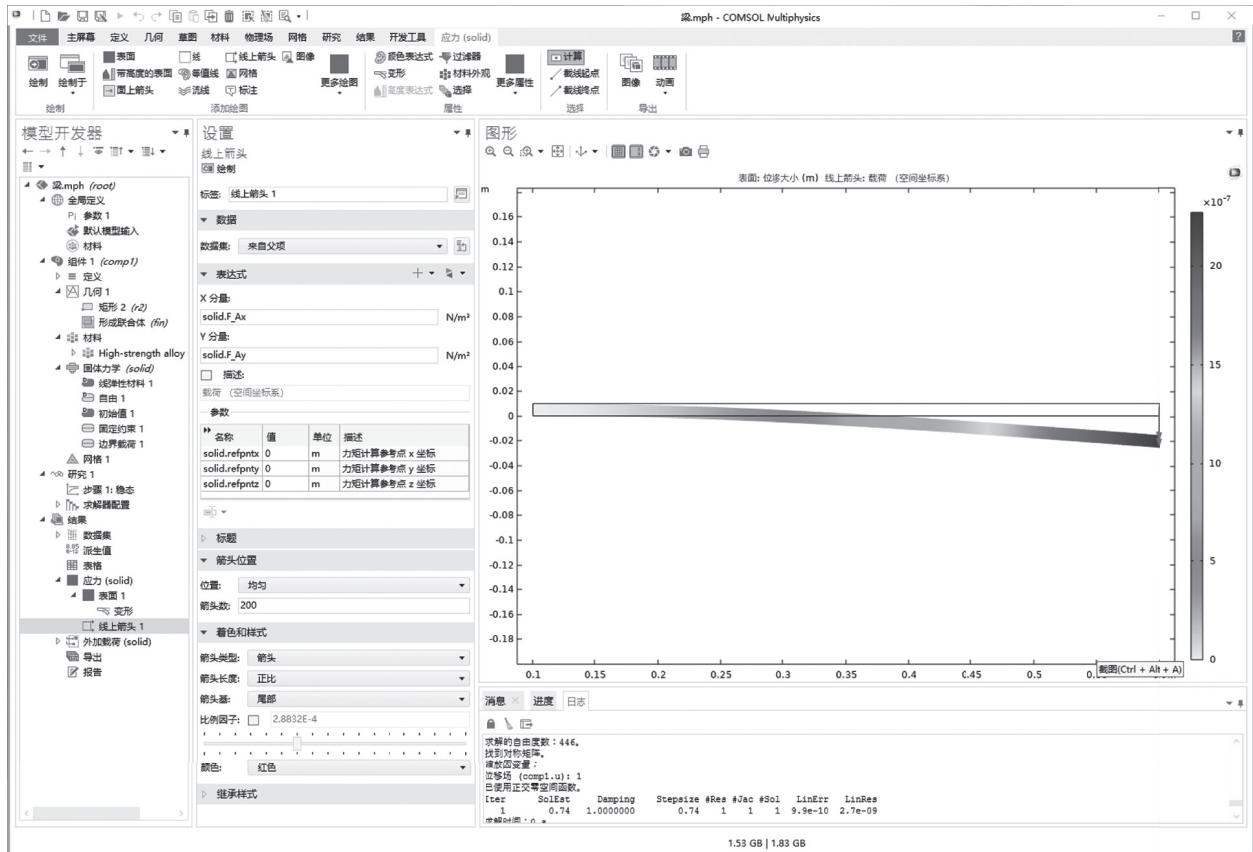
表 1 线上与线下的关键结合点举例

实验类型	实验名称	线上内容	线下内容	关键结合点
基础型实验	液体表面张力系数测量实验	1. 虚拟仿真平台模拟拉脱法测量表面张力系数; 2. 表面张力理论动画演示(温度、液体性质影响)	1. 实验室使用 Wilhelmy 铂片法操作; 2. 力传感器和位移传感器的使用	1. 虚拟仿真预习了解线下操作参数设置; 2. 线上数据处理模板为线下数据处理提供模版
	示波器使用和波形观测实验	1. 示波器虚拟面板操作训练(触发模式/时基设置); 2. 典型波形生成原理动画	1. 实际仪器参数调节与信号捕捉; 2. 复杂波形叠加分析	1. 线上虚拟操作指导线下实操校准; 2. 线上波形库对比线下观测结果
进阶型实验	迈克耳孙干涉实验 ^[8]	1. 干涉条纹动态调节模拟(平面镜倾斜补偿); 2. 光程差计算公式推导视频	1. 实际光路调试与等倾/等厚干涉观察; 2. 波长测量精度优化	1. 虚拟光路预调指导线下微调训练; 2. 线上误差分析模型指导线下调试
	霍尔效应与磁敏电阻特性实验	1. 霍尔电压三维磁场分布模拟; 2. 磁敏电阻特性曲线拟合工具	1. 磁场强度与霍尔电压关系测量; 2. 温度对磁敏电阻影响测试	1. 线上磁场模拟指导线下传感器标定; 2. 线上拟合工具辅助线下数据分析
特色型实验	牛顿环干涉与偏振实验 ^[10]	1. 膜干涉动态厚度变化模拟; 2. 偏振片叠加效果交互演示	1. 牛顿环直径测量与透镜曲率半径计算; 2. 马吕斯定律验证实验	1. 虚拟厚度调节指导线下测量参数设定; 2. 线上偏振动画辅助线下现象解释
	光电效应实验	1. 光电管伏安特性曲线模拟(截止电压计算); 2. 普朗克常数测定方法对比	1. 不同频率光照射下的饱和电流测量; 2. 截止电压与频率关系实验	1. 线上曲线拟合指导线下数据采集; 2. 线上方法对比指导线下方案选择

在线下课堂阶段(约4个学时):教师通过快速线上测试或提问关键步骤(如拉脱法原理、焦利氏秤调节方法)进行预习检查;学生小组完成实验装置调节、金属环浸润与拉脱、重复测量和数据采集。教师进行现场指导,包括检查金属环洁净度、校准拉脱速度、解决传感器漂移或基线不稳定等问题。



(b)



(a) 实验原理讲解视频; (b) 实验操作讲解视频; (c) 用科研软件定量仿真

在线上实验过程中,鼓励大一学生通过工程仿真软件(如 COMSOL)展开仿真模拟(图 2(c)),结合实际操作,初步讨论水膜拉脱时的收缩趋势、拉力突变点的捕捉等实验现象,进行误差分析,讨论金属环直径测量误差,温度波动导致表面张力系数变化,拉脱过程中液膜是否完全脱离等误差源分析。

在数据分析阶段进行线上数据处理,要求学生运用数学工具或编程(如 Matlab, Python)计算表面张力系数,绘制表面张力系数—液体种类关系图,实施线性回归分析,计算相对误差。

在实验报告撰写与提交阶段:学生在线提交结构化实验报告,包括实验装置示意图、原始数据记录表、表面张力系数计算过程、误差分析、对比讨论等。教师进行线上+线下评估与反馈,线上进行实验报告批改,重点关注数据处理规范性、图表制作专业度、讨论深度等方面;线下教学反馈,主要展示典型错误案例(如未校正温度对表面张力系数的影响)、分析共性问题(如接触角测量方法误区)、播放优秀实验视频、发布拓展任务等。

3.2 实践成效

对比实验班(采用 OMO)与对照班(传统教学),实验报告平均成绩提升约 12%,大学物理实验成绩在全体班级中排名分别为第一和第二,其中操作规范性评分显著提高。线上预习完成率大于 95%,预习自测平均通过率大于 85%。根据学生反馈意见(问卷调查)发现,75%学生认为线上预习“显著增强”了实验信心。82%学生认可虚拟仿真对熟悉复杂仪器操作的帮助。78%学生认为线上数据处理工具提升了分析效率和规范性。典型访谈反馈:“反复看视频弄懂了原理,做实验时心里有底了”(物理系学生 A);“虚拟操作让我提前试错,真机上更敢动手”(工科学生 B)。

本科一年级的学生可在教师的指导下,运用诸如 Matlab、SolidWorks、ANSYS、或 COMSOL 等广泛普及的工程仿真软件,针对课程相关的线下物理实验(例如基础电路分析、简单结构力学测试或基础流体实验等),进行简单的数字仿真模拟,进而深入理解实验现象背后的物理原理,验证理论模型的有效性,培养起初步的工程问题解决与定量分析的核心能力,为后续专业课程学习和复杂工程项目奠定坚实的数字化实践基础。

4 混合教学的优势与挑战

4.1 显著优势

OMO 模式通过线上资源的灵活调用(如虚拟仿真、预习视频)与线下实操的深度融合,显著提升了学习自由度和教学效能。学生可突破时空限制进行按需学习和反复训练,不仅夯实了理论基础、明确实验目标,更在个性化学习路径中激发了探究兴趣;同时,线上自动化评估工具与可复用资源优化了教学投入,使教师能将线下课堂聚焦于高阶指导和实践精炼,大幅提升操作熟练度、数据分析能力及单位时间实践效率,形成“预习-实践-反馈”的深度迁移闭环。

4.2 面临挑战

混合教学的高度自主性对学生自律性与时间管理能力提出严峻考验,且技术条件依赖(稳定网络、硬件设备及平台操作熟练度)可能造成学习壁垒。教师需承担前期高质量线上资源开发的巨大投入,并掌握线上线下融合教学设计方法,而线上答疑与学习监控更增加了隐性工作量;此外,如何精准设计衔接环节避免内容脱节或重复、如何弥补线上交互在精细操作指导与即时深度讨论上的不足,尤其是小组协作的临场感缺失,仍是优化体验的关键难点。

5 结语

线上线下混合教学模式是大学物理实验教学改革的重要方向。新工科大学物理实验教学 OMO 模式,在学生能力提升、实验效能优化、教学质量进阶等方面展现出显著成效,有效促进了新工科院系学生理论知识内化、实践技能掌握、自主学习能力发展和科学素养(如数据处理、误差分析)养成,提高了预习质量、课堂操作效率和实验成功率,优化了教学资源配置,推动教学模式从“教师中心”向“学生中心”转变,为特色化教学和精准反馈提供了可能。通过持续优化线上资源建设、深化融合设计、提升师生信息素养并积极应对挑战,该模式将更好地服务于新工科拔尖创新人才培养目标,提升大学物理实验教学的育人实效。

参 考 文 献

- [1] 付春玲,胡振涛,任星. 新工科建设视域下大学物理实验创

- 新性教学改革实践与路径探析[J]. 中国现代教育装备, 2025(7): 52-54.
- FU C L, HU Z T, REN X. Analysis of Innovative Teaching Reform Path and Practice of College Physics Experiment under the Background of Emerging Engineering Education Construction, 2025(7): 52-54. (in Chinese)
- [2] 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, 33(2): 73-80.
- QIN P L, YU X L, MA L. Curriculum reform and practice of university physics experiment under the traction of Emerging Engineering[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(2): 73-80. (in Chinese)
- [3] 陈靖. CUPT 实践教学中的思政内涵探索与实践[J]. 物理实验, 2025, 45(4): 22-28.
- CHEN J. Exploration and integration of ideological and political connotation in CUPT practical teaching[J]. Physics Experimentation, 2025, 45(4): 22-28. (in Chinese)
- [4] 赵伟, 王中平, 胡勇, 等. 面向大中衔接的“生活中的物理实验”教学探索[J]. 物理实验, 2025, 45(5): 35-41.
- ZHAO W, WANG Z P, HU Y, et al. Teaching exploration of physics experiments in daily life for transition from high school to university[J]. Physics Experimentation, 2025, 45(5): 35-41. (in Chinese)
- [5] 柴志方. 基于 SPOC 的普通物理实验混合式教学模式的实践研究[J]. 物理通报, 2023(8): 121-124.
- CHAI Z F. Practical Research on Mixed Teaching Mode of General Physics Experiment Based on SPOC[J]. Physics Bulletin, 2023(8): 121-124. (in Chinese)
- [6] 赵福利, 陈敏, 董建文, 等. 在过程性学习评价基础上开展线上+线下《光学》课程教学[J]. 物理与工程, 2022, 32(1): 86-92.
- ZHAO F L, CHEN M, DONG J W, et al. Online and off-line teaching implementation of optics with process evaluation[J]. Physics and Engineering, 2022, 32(1): 86-92. (in Chinese)
- [7] 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 experiment teaching mode with quantitative simulation[J]. Physics and Engineering, 2020, 30(5): 102-106. (in Chinese)
- [8] 董建文, 范智斌, 陈晓东, 等. 基于 FDTD 的超透镜聚焦光场仿真[J]. 物理与工程, 2022, 32(6): 127-131.
- DONG J W, FAN Z B, CHEN X D, et al. Focusing field simulation of metalens based on FDTD[J]. Physics and Engineering, 2022, 32(6): 127-131. (in Chinese)
- [9] 陈瑞, 袁小瑾, 庞晓宁, 等. 基于 MATLAB 的矢量光束聚焦光场仿真[J]. 物理与工程, 2022, 32(1): 13-17.
- CHEN R, YUAN X J, PANG X N, et al. Focal field simulation of vectorial beam based on matlab[J]. Physics and Engineering, 2022, 32(1): 13-17. (in Chinese)
- [10] 冯饶慧, 沈韩, 高凤彬, 等. 以衍射实验为例谈虚实结合实验教学模式[J]. 物理与工程, 2020, 30(4): 102-107.
- FENG R H, SHEN H, GAO F B, et al. Virtual-actual experimental teaching mode for diffraction experiment[J]. Physics and Engineering, 2020, 30(4): 102-107. (in Chinese)