

PBL 教学模式下力学与热学实验课程数字化建设研究 ——以桥梁振动实验为例

于婷婷 倪 晨 刘 斐 关 佳 魏振博 何雨华

(同济大学物理科学与工程学院, 上海 200092)

摘 要 为贯彻落实《教育强国建设规划纲要(2024—2035 年)》中关于“拔尖创新人才培养”的战略要求,针对大学一年级力学与热学实验课程中验证性实验占比高、学生创新能力不足的痛点,本文以桥梁振动实验为例,系统探讨了基于 PBL(Problem Based Learning)教学模式的数字化实验建设与实践成效。研究并构建“问题导入—分组讨论—实验验证—展示汇报—评价反思—拓展探索”六环节闭环教学流程。学生在实验改进、创新设计等拓展研究中的主动性与解决复杂问题的能力显著增强。研究证明,PBL 模式能够有效促进力学与热学实验由“验证”向“探究”转型,为高校物理实验课程培养拔尖创新人才提供了可复制、可推广的范例。

关键词 PBL 教学模式;创新能力;实验研究;拔尖人才培养

DOI: 10.27024/j.wlygc.2025.08.25.09

DIGITAL TRANSFORMATION OF INTRODUCTORY MECHANICS AND THERMAL PHYSICS LABORATORY VIA PROBLEM-BASED LEARNING: A CASE STUDY ON BRIDGE VIBRATION EXPERIMENT

YU Tingting NI Chen LIU Fei GUAN Jia WEI Zhenbo HE Yuhua

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

Abstract In response to the “Education Powerhouse 2035” strategic imperative of cultivating top-tier innovative talent, this study addresses the prevailing over-reliance on confirmatory experiments and the concomitant deficit of student innovation in first-year mechanics and thermal physics laboratory courses. Using the bridge vibration experiment as a paradigmatic case, we systematically examine the design, implementation, and impact of a digitally enhanced laboratory curriculum grounded in Problem-Based Learning (PBL). A six-stage closed-loop pedagogical framework “problem elicitation, group deliberation, experimental verification, presentation and reporting, reflective evaluation, and extended exploration” was established and iteratively refined. Empirical evidence indicates a marked increase in student agency and in

收稿日期: 2025-08-25; 修回日期: 2025-10-21; 出版日期: 2026-03-30

基金项目: 教育部物理学类专业教学指导委员会 2024 年力学课程研究会课题(JZW-24-LX-02); 上海市重点课程建设项目(沪教委高[2024]38 号); 同济大学第十九期教学改革项目(同济本[2026]4 号)。

通信作者: 于婷婷, yutingting@tongji.edu.cn。

引文格式: 于婷婷, 倪晨, 刘斐, 等. PBL 教学模式下力学与热学实验课程数字化建设研究: 以桥梁振动实验为例[J]. 物理与工程, 2026, 36(2): 21-27.

Cite this article: YU T T, NI C, LIU F, et al. Digital transformation of introductory mechanics and thermal physics laboratory via Problem-Based Learning: A case study on bridge vibration experiment[J]. Physics and Engineering, 2026, 36(2): 21-27. (in Chinese)

their capacity to resolve complex, open-ended problems, particularly in tasks such as experimental refinement and innovative design. The findings demonstrate that PBL effectively catalyzes the transition of introductory laboratory instruction from verification-oriented to inquiry-driven paradigms, thereby furnishing a replicable and scalable model for cultivating outstanding innovators within physics laboratory education.

Key words Problem-Based Learning (PBL); innovation competence; laboratory research; top-talent cultivation

2025年1月19日,中共中央国务院印发的《教育强国建设规划纲要(2024—2035年)》中明确指出:“要完善拔尖创新人才发现和培养机制,着力加强创新能力培养,探索国家拔尖创新人才培养新模式^[1]。”作为培养拔尖创新人才的主阵地,高等学校的教育教学也在不断地改革与创新。

力学与热学系列实验是我校物理专业一年级本科生的第一门专业实践类课程,是其从事科学实验工作的入门向导,具有非常关键的承上启下的作用。课程的教学目标为:学生能够掌握物理实验基本技能、方法,加深物理规律的理解,培养学生的实践创新能力。面对人工智能技术的快速发展和学生个性化需求的不断增强,传统的实验教学内容具有强烈的转型需求,这种转型不仅局限于对实验内容、实验仪器的数字化更新,也更多地体现在教学模式、教学评价等方面。

本文以桥梁振动实验为例,基于PBL教学模式设计教学流程,优化实验仪器、拓展实验内容、构建合理教学管理与评价体系,激发学生的学习兴趣,唤醒内驱力,强化自主学习与创新思维。

1 PBL 教学方法简介

基于问题的学习(Problem-Based Learning)概念是由加拿大麦克马斯特大学霍华德·巴罗斯

(Howard S. Barrows)提出的,最早应用于医学教育领域^[2]。其教学指导思想是以学生为中心,以解决实际问题为抓手,鼓励学生分组开展讨论、通过实验的验证与探索,加深理论知识的理解与掌握。有学者认为这一教学方法强化了学习过程,可以有效激发学生的主观能动性,增强团队协作能力^[3]。所以近年来,PBL教学法在高等学校的物理实验教育教学中备受瞩目与推崇^[4-6],是一种培养拔尖创新型人才的有效途径。

2 基于 PBL 教学方法的实验建设与实践过程

传统的力学与热学实验课程实验项目多为经典的理论验证性实验,教学过程以教师为教学的主体,学生通过教师的讲解,按图索骥进行实验操作,得出实验结果。此类实验的结果均为预设,创新空间有限。教学目标的核心是学会操作仪器和验证理论知识,侧重于动手能力、数据处理能力和观察能力等低阶能力的培养。其与现实生活、实际应用、科研前沿等方面联系不够紧密。学生在此模式下实验完成度高、误差小、对基础公式与仪器操作的短期记忆深刻,学习成绩的提高也主要集中在报告书写和数据处理等方面的准确性与规范性上,如图1所示。传统教学模式对学生的分析、评价和创新等高阶能力培养不足,主要是缺乏理论与实践的有机融合,学生创新性思维锻炼不

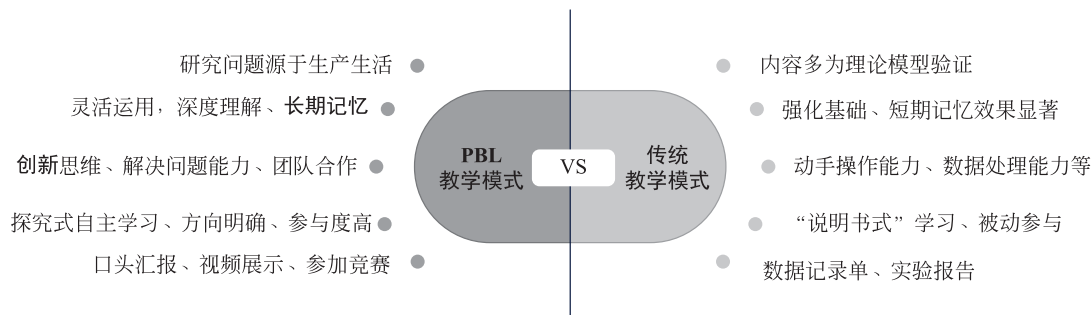


图1 传统教学模式与PBL教学模式的多维度对比分析图

充分,运用知识的解决问题能力未有显著提升。

基于此,引入依托于问题导向的教学模式可以有有效的解决这些问题。基于 PBLworks 认可的七条黄金准则^[7],经过有机融合后,可将课程的教学过程拓展为以下 6 个环节,如图 2 所示。

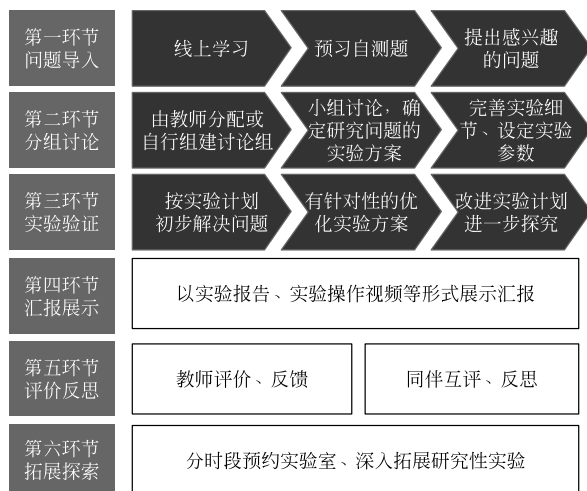


图 2 基于 PBL 教学模式的力学与热学实验教学环节流程图

改进后的教学模式中教师的角色转变为教学辅助,其功能主要为教学引导,而学生才是教学主体,实验的进程由学生掌控。在问题导入环节中,问题通常来源于现实生活,学生能够直观地感受物理知识的实用价值。此环节强化了知识的情境性和应用性,可以有效激发学生的主观能动性,增强个人的学习兴趣;在分组讨论和实验环节中,学生需要面对复杂问题进行拆解、自行查找资料进行信息整合,小组讨论后形成有效可行的实验方案,再不断尝试迭代优化。此环节是 PBL 教学模式中最关键的环节,可以充分锻炼协同能力、自主学习能力、批判性思维和解决问题等高阶能力;在汇报展示环节,学生通过报告或演讲等形式展示其创新成果。该环节不设标准答案,旨在为学生提供充分发挥的空间。只要逻辑自洽、论证充分,任何多样化的解决方案、非常规的实验方法或创新的设计思路均会得到鼓励。此举不仅检验了学生的学习成果,更旨在最大限度地培养其语言组织能力与科学写作能力。通过评价反思环节,能够养成总结反思的科学习惯;最后的拓展探索环节,充分调动学生的积极性,将理论知识融会贯通、举一反三,提高综合素质和创新能力。PBL 教学模式突破“说明书式”的传统实验模式,鼓励学生通过试错来寻求某一实际问题的最优解。学

生的学习动机从“完成任务”转变为“解决问题”,学习的过程可极大地激发学生的内驱力。

以此教学模式开展教学后,力学与热学实验课程的内容可分为综合性实验和研究性实验两种。综合性实验主要采用第一到第五环节进行教学,研究性实验则安排第六环节进行拓展。从实验的仪器角度出发,数字化、信息化、灵活度高的实验仪器更有利于 PBL 教学模式的开展。桥梁振动实验可以提供给学生自由组装搭建的杆件,每杆的两端都有螺丝孔,用于组装各式转角或绳索配件。在实验过程中,学生可以按照自己的实验需求,合理设计构建桥梁结构,解决实际问题。下面以此实验为例,介绍 PBL 教学模式的开展流程。

2.1 问题导入

在 PBL 教学模式中,合理且有效的问题导入是激发学生学习兴趣的关键环节。桥梁作为现代交通基础设施的重要组成部分,合理的设计与可靠的施工质量都直接关系到公共安全与经济。无论公路桥梁还是铁路桥梁,其在设计建造过程中都会面对很多的技术难题,如地震动引起的桥梁结构振动、影响结构稳定性的固有频率求解、荷载的合理有效横向分布、箱梁的扭转畸变问题等。例如,世界上最长的跨海大桥——港珠澳大桥采用了创新的大型钢箱梁制造技术^[8-9],在保证工程质量和安全性的同时有效解决大跨径问题。

桥梁振动实验中所研究的内容可以作为初步解决工程实际问题的基础手段,帮助学生从宏观角度判断桥梁结构整体刚度和运营性能。在实验课程前,为充分合理利用有限的课时,教师可以将基础知识、前沿问题、仪器操作等内容通过线上资源的形式发布给学生,如通过 canvas 平台发布实验理论 PPT,仪器操作讲解 PPT 和数字人课程视频;通过数字教材的形式发布实验讲义等,如图 3 所示。鼓励学生在课前对实验理论、桥梁工程实践问题等有初步的了解,便于研究问题的提出。还可以通过线上课程教学平台发布预习自测题,用来检验学生的预习情况,此部分会计入成绩总分。经过对理论知识的了解后,学生可能会对某一个或几个问题产生兴趣,但需要经过小组讨论和教师指导后才能付诸实践。

2.2 分组讨论

考虑到桥梁搭建的难易程度和课时的限制,在讨论环节,采用两人一组的团队合作形式,可以

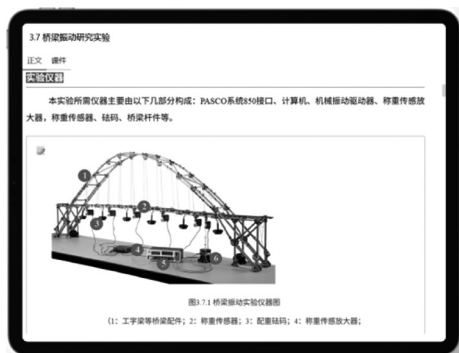
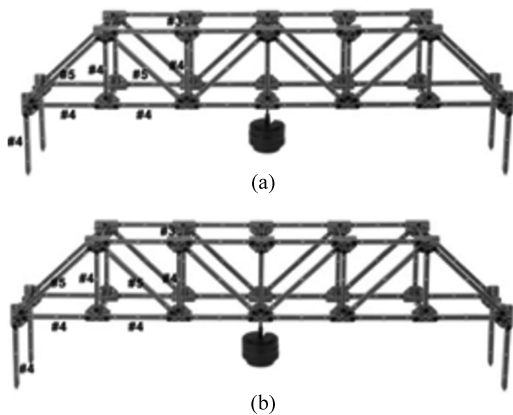


图3 课程线上资源(数字教材、数字人视频)

由教师分配或自由组合。此环节是鼓励学生发散思维、实现创新设计的主要环节。学生刚刚开始接触 PBL 教学模式,可能会存在上手难,没思路或者实验设计方案不合理的情况。作为“辅助指引者”的教师需要适时地提供方向引导,帮助学生更快地适应科研实践的学习过程。

比如教师可以通过列举国内外典型桥梁结构的创新点,如桥塔结构模型设计,主梁的气动外形等,启发学生思考结构到底如何影响桥梁杆件的受力与振动,如图 4 所示。同为三角形分段桥梁的沃伦桁架桥与普拉特桁架桥,不易直接通过理论方法准确地分析出每根杆件的静态受力情况,这两种桁架桥的斜梁可视为是拉索构件,是桥梁的主要承力部分。研究其静态受力和外界环境激励下各种形式的振动都对解决桥梁工程实际问题有所帮助。

图4 沃伦桁架桥和普拉特桁架桥
(a) 沃伦桁架桥; (b) 普拉特桁架桥

再比如学生经过讨论,设计研究拱桥荷载的增加是否会对振动频率产生影响问题时,设置的实验参数为依次在桥梁上悬挂 2 千克、4 千克和

6 千克砝码,如图 5 所示。但这种实验参数有可能会造成测量过程中杆件受力超过力传感器的量程,造成测量不准确或仪器损坏的现象,教师可及时提醒,并强调实验设计的安全性及可靠性。

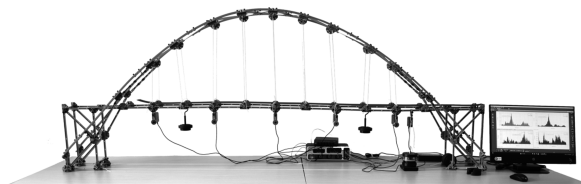


图5 实验中所用拱桥实物图

教师在此教学环节中需要时刻关注学生的讨论进度,推动实验设计进程,还应注意观察组内成员的参与度,对其实验过程做形成性评价,并鼓励主动性不强、积极性不高的学生更多地参与讨论活动。

2.3 实验验证

验证过程中,采用 PASCO 850 数据采集接口搭配 Capstone 数字化软件进行实时测量。可以实现数字型万用表,双通道示波器,函数发生器等功能,软件还可以进行图表编辑、数据拟合、快速傅里叶变换等数据处理功能,如果学生在研究所搭建桥梁结构振动频率时,可以通过此软件实时观测到频率数值的变化情况。图 6 为学生研究荷载分布对振动频率影响的实施方案示意图。学生将五个传感器沿桥梁跨度等间隔放置。以跨中为轴线,依次在左右两边对称的三个位置悬挂 2 千克砝码,用手或其他工具模拟桥面瞬间受到的冲击来激励桥梁振动,根据振动节点所在的位置,每个传感器的振动振幅和频率存在差异,通过快速傅里叶变换为频域信号后,测出每个传感器对应杆件位置的共振频率记录在表 1 中。

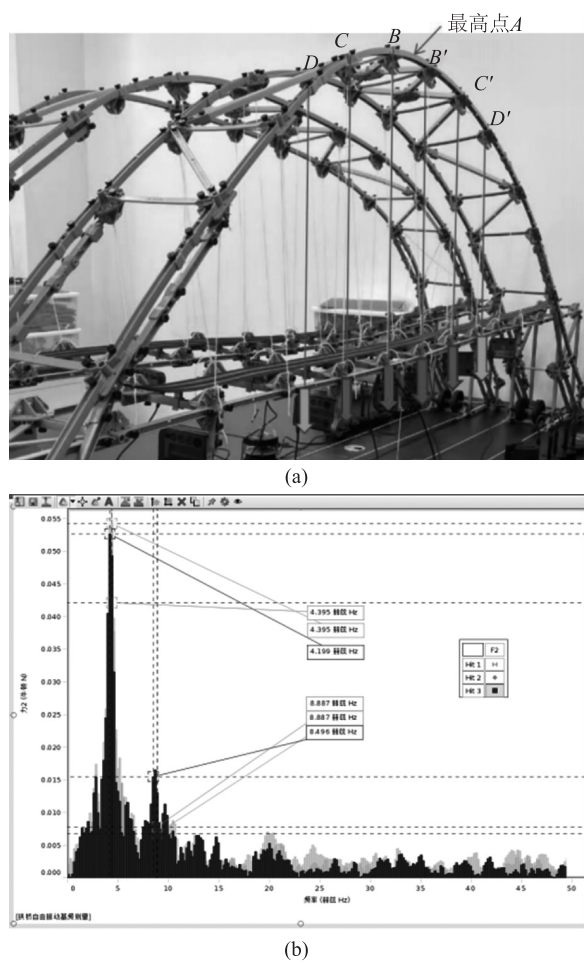


图 6 实验设计中悬挂荷载位置示意图与软件数据图
(a) 桥梁悬挂荷载位置示意图；(b) 利用传感器测量频率数据图

表 1 实验中所采集到的实时数据图表

悬挂位置	F_1/Hz	F_2/Hz	F_3/Hz	F_4/Hz	F_5/Hz
B、B'	4.607	4.655	4.687	4.604	4.660
C、C'	4.441	4.413	4.395	4.420	4.415
D、D'	4.181	4.191	4.181	4.181	4.183

从实验数据中可看出,相同的荷载下,其横向

分布越靠近桥塔,整个桥梁系统的振动频率越低。

这样的采集方式可以使得学生在进行实验的过程中得到及时反馈,增强实验结果的直观性,也可以使教师实时了解实验进程,促进教学的互动。考虑到学生实验经验不足,初期可能会存在一系列因实验仪器或数据软件问题而引入的实验误差,所以教师在此环节需要更多的辅助与指导。组员之间也应加强沟通,提高团队协作的有效性。

2.4 展示汇报

最终的实验结果以实验报告或实验视频的形式上传至线上课程教学平台的指定位置,其内容不仅要包括实验设计方案、实验操作过程和数据处理,还要对实验进程中遇到的问题进行深入的研究与分析。最后,回答超星学习通中预设的课后思考题,在回溯与反思中进一步升华对物理概念的理解,以此来巩固所学知识,实现知识的内化与迁移。表 2 为学生提交的实验报告示例。

2.5 评价反思

在线上课程教学平台中,教师和学生都可以对上传的作品进行评价。在评价环节,针对实验报告的部分做了完备的评分细则,其中实验操作与实验报告各占比 50%。实验操作的部分属于形成性评价,教师在辅助教学的过程中通过观察学生行为、动手操作能力、协作沟通情况、数据记录单等多种方式方法评价,当堂给出分数。其评分细则如表 3 所示。针对于实验报告部分的评价,其中完整性与规范性占比为 40%,科学性、先进性与创新性占比为 60%。教师更多地关注于实验模型构建是否合理,实验内容是否安全可行;实验方法与手段是否凸显现代特色,实验成果的应用与推广度等。教师和学生评价每个作品时能够做到有章可循,有方可用。

表 2 学生报告中的实验分析与讨论示例

误差分析		进一步思考	
1	初次接触桥梁振动仪器,没有安装经验,实验操作不熟练,可能会影响实验的操作精度	1	考虑从多个角度检查桥梁结构,并在桥梁的关键位置(如支座、梁端、节点等)标记参考点,避免因视觉误差导致的误判
2	实验操作是用手拍打桥梁,每次拍打的方向和力度可能存在偏差,无法做到完全控制变量,引入了较大的不确定性	2	考虑引入参考传感器,放在实验室中远离实验桥梁的位置,用于监测外部振动情况,从而更好地分离出外部振动的影响
3	由于长期使用,梁的弹性模量、密度等属性可能存在不均匀性,导致理论与实际的差异	3	考虑改变桥的搭建方式、材料等特性,研究不同材料和连接方式对桥梁受力分布的影响

表 3 物理实验 1 课程中操作评分细则

评分类别	评分标准	得分
出勤	按时上课;不允许迟到早退	5 分
实验操作	操作规范:是否正确开机、预热、校准、调平;有无违规操作,如超出量程、报警等 实验过程及问题解决:是否能按设计方案准确调出实验现象;能够在规定时间内完成全部实验内容;在调试或测量遇到困难时,是否能积极独立思考、分析原因并尝试解决,或主动寻求教师指导等 责任意识:是否爱护仪器;实验结束后是否整理仪器、恢复实验台整洁等	30 分
数据记录	数据记录是否及时、准确;读数方法是否正确;数据记录是否完整;有效数字及单位是否正确;是否有不确定度计算结果等	15 分
学术道德	考查是否存在抄袭、数据篡改或伪造等行为。如有,此处扣除以上所有项成绩的总和,总分为 0 分。例如:以上各项总和为 90 分,此处填入-90。如无,此次填入 0	0 分

在有限的课时中,学生无法对自己感兴趣的所有问题进行探究,而同伴互评的形式给了学生相互学习的机会。教师预先在系统中设置每位学生会随机分配到两份作品,对彼此学习成果进行评改。通过同伴互评,学习者可以得到不同角度的评价反馈,也可对自己未做的实验内容有一定的了解,起到以评促学的作用。

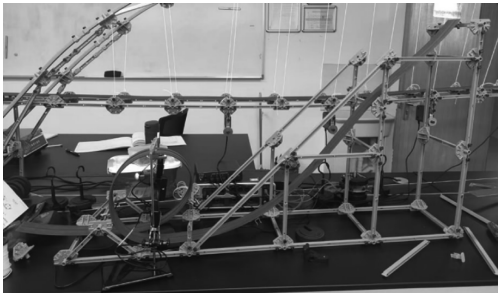
2.6 拓展探索

在研究性实验中,鼓励学生以开放视野聚焦力学或热学任一知识点,自主提出科学问题并构建研究路径。同时,实验室较多采用计算机实时测量工具,凭借其模块化硬件与多类型传感器的高度可扩展性,为多样化实验方案的快速迭代与精准测量提供了技术保障。得益于此,开课迄今,已有大量学生衍生出具有原创性的研究课题,充分验证了该教学模式在激发创新思维与提升科研素养方面的显著效能。比如,有学生从桥梁建造适用环境角度出发,探索研究更换不同的建筑材料是否会对桥梁抗震起到改善的作用;也有学生利用了基础实验内容中学会的杆件受力情况测试方法,从增强结构韧性和节省材料的角度对塔状模型结构进行优化。学生通过“大胆假设、小心求证”的研究方法拓展研究,能够充分锻炼其发现问题、分析问题和解决问题的能力。图 7 所示为学生做拓展实验示例。

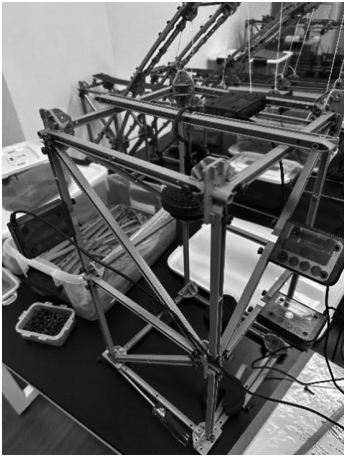
3 教学模式实施效果

3.1 学生学习积极性与主动性的提高

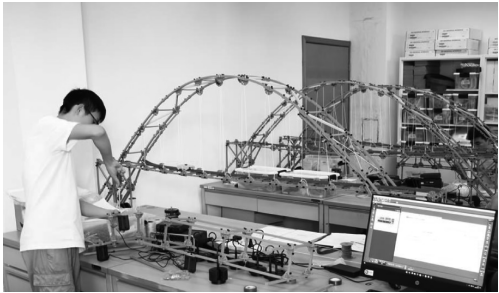
力学与热学实验课程采用开放共享的线上资



(a)



(b)



(c)

图 7 学生进行实验拓展研究

(a) 学生利用杆件搭建的过山车模型;(b) 学生研究桥墩塔状结构受力情况的模型;(c) 学生进行拓展实验,搭建某一结构示意图

源平台,可实时跟踪学生的学习情况。经过该教学模式在课程中的实际应用,学生学习的积极性和主动性有所提升。比如在课堂上,学生被动接受知识的学习方式有所改变,从教-学的单向传递逐渐转变为问题驱动的多方协同模式。课堂活跃度高,学生主动提问、即时研讨的频率与深度均明显增强。课后也会借助线上渠道与教师保持高频互动。学生愿意花更多的时间在实验探索上,开放实验室的预约人次呈显著上升趋势。除此之外,学生提交实验报告的及时率也在提高,如2023—2024 学年第一学期,实验报告准时提交率为97.8%,2024—2025 学年第一学期,实验报告准时提交率为98.4%,同比增长0.6%。PBL 教学模式的引入显著提升了学生的学习内驱力。

3.2 培养学生团队协作能力、激发创新思维

PBL 教学模式中的分组讨论和汇报展示环节对培养学生团队合作意识起到了至关重要的作用。在分组讨论教学环节中,小组成员充分发挥自身所长共同完成学习任务,既能满足个性化的学习需求,又能体会合作精神的重要性。而汇报展示环节能够有效的提高学生的集体荣誉感,促进团队协作意识的形成与发展。

拓展探索环节中,通过可重构系统配件,鼓励学生自主思考与创新,动手组装不同力学结构,探索高阶性实验内容。此环节有效地激发学生的学习兴趣 and 勇于探索的科学精神,磨炼意志,培养动手操作能力、创新能力和分析问题、解决问题的能力,激发科研活力,获得成就感的情绪价值。经过此模式教学后学生参与校级、省部级和国家级竞赛的比例由以往的30%~40%增加至如今的70%~80%,学生参与研究的兴趣正在稳步提升。

4 结语

实践表明,PBL 教学模式以真实问题为驱动、以学生为中心的理念,与力学与热学实验课程的教学目标高度契合。通过桥梁振动实验的示范应用,构建了“问题导入—分组讨论—实验验证—展示汇报—评价反思—拓展探索”的闭环教学流程,显著提升了学生学习的主动性、团队协作能力与创新思维,验证了该模式在基础物理实验教学中的可行性与有效性。目前课程实验项目的数字化比例为40%。未来,我们将进一步丰富数字化实

验案例,如声速测量、弦线振动等,提高课程的数字化比例;并依托Canvas、超星学习通和国家虚拟仿真实验教学项目共享服务平台(实验空间)等线上资源平台,完善数字教材、虚拟仿真实验与课程知识图谱,为教学提供有力支撑,持续改进教学模式,优化教学管理与多元评价机制,为拔尖创新人才的培养提供更加广阔的舞台。

参 考 文 献

- [1] 《教育强国建设规划纲要(2024—2035 年)》https://www.gov.cn/zhengce/202501/content_6999913.html.
- [2] 王海科. PBL 教学模式在大学物理实验教学中的设计与实践:以“分光计的调整和使用”为例[J]. 大学物理实验, 2024, 37(3):124-127.
WANG H K. The design and practice of PBL teaching mode in college physics experiment teaching-taking “adjustment and use of spectrometer” as an example[J]. Physical experiment of college, 2024, 37(3):124-127. (in Chinese)
- [3] KILROY D A. Problem based learning emergency[J]. Medicine Journal, 2004(21): 411-413.
- [4] 周琴,张九红,陈沈. PBL 教学法在建筑物理实验教学中的应用[J]. 物理实验, 2022, 42(1):29-34.
ZHOU Q, ZHANG J H, CHEN S. Application of PBL teaching method in experiment teaching of architectural physics[J]. Physics Experimentation, 2022, 42(1):29-34. (in Chinese)
- [5] 樊代和,谢东,朱浩,等. 基于 PBL 的大学物理实验与理论课融合教学模式探索[J]. 物理与工程, 2025, 35(4):48-53.
FAN D H, XIE D, ZHU H, et al. Exploration of the integration teaching mode of college physics experiment and theory based on PBL[J]. Physics and Engineering, 2025, 35(4): 48-53. (in Chinese)
- [6] 赵国俭,王旗. 翻转课堂结合 PBL 在物理实验教学中的实践[J]. 教育教学论坛, 2020(47):226-228.
ZHAO G J, WANG Q. Application of flipped classroom combined with PBL in physics experiment teaching[J]. Education Teaching Forum, 2020(47): 226-228. (in Chinese)
- [7] “What is Project Based Learning?”, PBLWorks, <https://www.pblworks.org/what-is-pbl>.
- [8] 曾有艺,易壮鹏,韩艳,等. 桥梁工程课程设计中的创新元素[J]. 科教文汇, 2024(11):77-80.
ZENG Y Y, YI Z P, HAN Y, et al. Innovative elements in the design of bridge engineering courses[J]. Journal of Science and Education, 2024(11): 77-80. (in Chinese)
- [9] 高婧,雷家艳,张尧,等. 桥梁工程专业课程思政建设路径探讨与实践[J]. 高教学刊, 2022, 8(14):193-196.
GAO J, LEI J Y, ZHANG Y, et al. Exploration and practice of integrating ideological and political education into professional courses in bridge engineering[J]. Journal of Higher Education, 2022, 8(14): 193-196. (in Chinese)