

跨文化视域下的大学物理实验教学

李巧梅¹ 卢五一² 张选梅¹ 何光宏¹ 王爱峰¹ 韩忠¹

(¹ 重庆大学物理学院物理国家级实验教学示范中心, 重庆 401331; ² 重庆大学资源与安全学院, 重庆 401331)

摘要 为了加强和提升发展中国家的物理教育水平与适应“3+2”本硕连读联合教育项目的培养要求, 对新加坡国立大学(NUS)和重庆大学的大学物理实验课程在课程体系、教学模式、评价反馈机制以及实验室管理等方面进行了深入比较分析。研究发现 NUS 在师资力量和实验内容设计方面表现出色, 强调学生的自主性和创新思维的培养; 重庆大学则提供了更为广泛的实验内容, 注重学生全面掌握物理学的基础知识和技能, 但是课程负担较重, 实验室管理较为传统。基于此, 提出一系列优化国内物理实验教学的策略, 以促进学生的全面发展和创新能力的提升。

关键词 跨文化比较; 物理实验课程教学; 优化策略

UNIVERSITY PHYSICS LABORATORY TEACHING THROUGH A CROSS-CULTURAL PERSPECTIVE

LI Qiaomei¹ LU Wuyi² ZHANG Xuanmei¹ HE Guanghong¹ WANG Aifeng¹ HAN Zhong¹

(¹ College of Physics, Chongqing University, National Demonstration Center for Experimental Physics Education, Chongqing 401331;

² School of Resources and Safety Engineering, Chongqing University, Chongqing 401331)

Abstract To strengthen and enhance the level of physics education in developing countries and meet the training requirements of the “3+2” joint undergraduate-graduate program, an in-depth comparative analysis was conducted on the university physics experiment courses offered by the National University of Singapore (NUS) and Chongqing University, focusing on aspects such as the curriculum system, teaching mode, evaluation and feedback mechanisms, and laboratory management. The study found that NUS excels in faculty strength and experimental content design, emphasizing the cultivation of students’ autonomy and innovative thinking. Chongqing University, on the other hand, provides a broader range of experimental content, focusing on students’ comprehensive mastery of basic knowledge and skills in physics. However, the course burden is heavier, and laboratory management is more traditional. Based on this, a series of strategies for optimizing domestic physics experiment teaching are proposed to promote students’ comprehensive development and enhance their innovative abilities.

Key words cross-cultural comparison; physics experimental course teaching; optimization strategies

收稿日期: 2025-01-14

基金项目: 2024 年全国高等学校大学物理改革研究一般项目(2024PR035); 2025 年第一届国家级(市级)大学生创新训练项目(国市创)(202510611281); 2024 年教育部产学合作协同育人项目(231102455072923)。

通信作者: 李巧梅, qmli@cqu.edu.cn。

引文格式: 李巧梅, 卢五一, 张选梅, 等. 跨文化视域下的大学物理实验教学[J]. 物理与工程, 2025, 35(5): 112-119, 125.

Cite this article: LI Q M, LU W Y, ZHANG X M, et al. University physics laboratory teaching through a cross-cultural perspective[J]. Physics and Engineering, 2025, 35(5): 112-119, 125. (in Chinese)

在全球化和科技迅猛发展的今天,面对以科技创新为核心的国际竞争,培养具有国际视野和综合素质的人才已成为高等教育的重要使命。为了适应这一趋势,国内众多高校如西安交通大学、中国科学技术大学、厦门大学以及重庆大学等,正积极推进本科生教育的国际化进程。这些高校与国际知名大学建立了合作关系,共同开展了“3+2”本硕连读联合培养项目^[1,4],旨在通过国际合作提升教育质量,培养具有国际竞争力的顶尖人才,如图1所示。在该项目中,学生在国内高校完成三年本科课程学习,随后前往国外合作高校参与为期两年的硕士课程学习,并加入国外的研究课题组进行项目研究。毕业后,学生将同时获得国内高校的学士学位和国外高校的硕士学位。相较于传统的本科教育,“3+2”项目更加注重培养学生的国际视野、跨文化交流能力、英语沟通能力、学术研究能力和跨学科综合能力,从而为学生的全面发展和国际竞争力的提升奠定坚实基础。

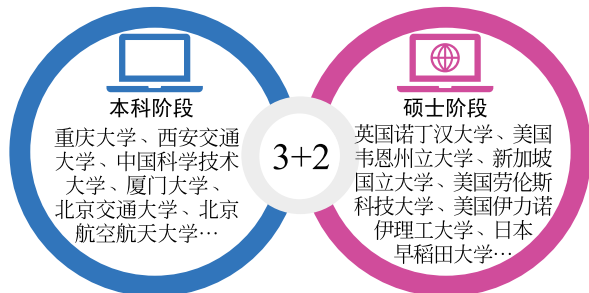


图1 近年来开展“3+2”本硕连读联合教育的部分国内与国外高校

物理实验课程作为理工科专业的核心基础课程,对于锤炼学生的实验技能、科学思维、创新能力和应用能力发挥着至关重要的作用^[5]。它不仅帮助学生在实践中提升“3+2”项目所要求的核心素质,而且为学生未来的学术研究和职业生涯打下了坚实的基础。此外,物理实验课程通常采用国际通用的专业英语词汇,这不仅增强了学生的专业英语能力,也拓宽了他们的国际视野,并提升了跨文化交流技能。鉴于国内外物理实验课程教学存在的差异,进行深入的比较研究显得尤为必要^[6,9]。

在当今全球化背景下,高等教育面临着来自不同文化背景的挑战与机遇。文化背景不仅影响教育理念的形成,还深刻影响教学内容的选择、教

学方法的运用以及实验室管理的模式。新加坡国立大学(NUS)和重庆大学作为两所具有国际影响力^[10]的高校,分别处于不同的文化环境中,这种文化差异对它们的物理实验教学产生了显著的影响。新加坡作为一个多元文化融合的国家,其教育理念深受西方教育模式的影响,强调学生的自主性、创新能力和跨文化沟通能力的培养,这在NUS的教学理念、教学内容和实验室管理中体现得尤为明显。而中国传统文化强调集体主义和对权威的尊重,重庆大学的教学模式更注重基础知识的系统传授和学生的全面发展。对比分析两所高校的物理实验课程,旨在揭示不同地区、文化背景下的物理实验教学特点,NUS的成功经验对中国高校在物理实验教育中融入国际化元素,构建符合全球教育趋势的教学模式具有重要的启示作用,为国内物理实验教学的改革提供参考,并推动教学方法的创新和教育质量的提升,切实做到以学生为中心^[11,12],同时为学生的“3+2”本硕连读之路打好基础,实现国内物理实验教育与国际纯粹与应用物理学会(IUPAP)的目标^[13]即加强和提升发展中国家的物理教育水平接轨。

1 物理实验课程对比分析

1.1 物理实验课程体系

为了适应“3+2”本硕连读联合教育项目的要求,培养具有国际竞争力的人才,物理实验课程体系的构建显得尤为关键。重庆大学和NUS的物理实验课程体系各具特色(见图2)。

重庆大学的物理实验课程体系核心课程是广泛覆盖的全校性公共基础必修实验课——《大学物理实验》,物理专业、应用物理以及电子信息科学与技术专业的实验课程进行拓展和补充,同时融合课外研究创新实验项目以提升学生的综合实验能力。

与重庆大学所强调的基础性、综合性和设计性的分层教学稍有不同的是,NUS的物理实验课程体系以物理专业学生的必修课与其他理工科专业选修的物理实验课程 Experimental Physics and Data Analysis-PC2193 为核心,配合通识实验课程-HSI1000、物理实验II-PC3193和物理实验基本技术-PC5214等选修课程,形成了基础性(HSI1000、PC2193)、先进性(PC3193)和创新性

(PC5214)的实验课程体系。具体而言,基础性实验课程的设置考虑到了对物理专业知识不太深入的学生,为他们打下坚实的基础;先进性确保高年级物理专业学生接触到最前沿的测量仪器;而创新性则鼓励学生在学习一定的物理实验课程后,根据自身兴趣选择探究性项目与计算机、光电等专业结合进行多学科交叉深入研究。

根据 NUS 课程网站 (<https://nusmods.com/courses/>)上的信息和重庆大学物理实验课程问卷调查的结果来看,两所高校在五个关键维度呈现显著差异:在课程满意度指标上,NUS 以 92%的满意度显著高于重庆大学的 85%;在实验项目完成率上 NUS 由于实验项目较少以 94%的完成率远高于重庆大学的 76%;实验设备配置方面,NUS(95%)与重庆大学(78%)存在 17 个百分点的显著性差异;进一步分析显示,教师指导有效性维度中,重庆大学以 89%的有效性评价略微领先 NUS;在创新能力培养这一战略指标上,NUS 保持 13%的显著优势,两校在教育资源配置效率和教学创新实施效果维度均存在差异。值得注意的是,实验设备投入强度与创新能力培养成效呈现强正相关关系。

两校物理实验课程体系并无绝对优劣,而是基于不同定位的差异化设计,NUS 的课程体系显得更具灵活性,为学生提供更多的选择,在培养学生专业技能和知识的同时,尽可能为相关服务学科提供支持。实现了“3+2”项目培养学生综合实验能力与学生个性化发展的双重目标,这也更符合 2022 年国际纯粹与应用物理学会(IUPAP)对物理实验教育的要求。^[13]

1.2 核心物理实验课程

核心物理实验课程(见表 1)作为物理实验课

程体系中的关键环节,其设计与实施直接关系到“3+2”项目人才培养的质量。

重庆大学的大学物理实验课程是 1.5 个学分,面向非物理专业的理工科学生。授课方式是课前教师们借助雨课堂、课堂派、SPOC 平台为学生发布预习理论视频、操作视频、预习测试,对学生进行学情分析,课中教师讲解 30~40min 的理论与演示操作,其余的时间进行辅导,课后通过批改实验报告了解学生的学习情况。学生要在 16 周内 1~2 人一组完成一次理论课与 15 个实验项目,手写提交 16 份实验报告,实验报告涵盖的内容量较大,强调数据记录与处理。大学物理实验开设的目标是培养学生的科学实验能力与思维方式,激发学生的创新意识,对于有学习兴趣的学生鼓励参加全国大学生物理实验竞赛。自 2016 年起,为了更好地满足不同大类专业学生个性化的需求,重庆大学的大学物理实验建立了包括基础性实验 10 个、综合性和设计性实验 5 个,以及研究性实验 2 个,总计 17 个实验项目(见表 2)的物理实验分类分层教学体系。

PC2193 物理实验课程是 4 个学分,学生每 2 人一组一个学期内从 15 个实验项目(见表 2)挑选完成 A、B、C、D、E、F 六个实验项目,实验 A 从 15 个实验项目里任意选择,B、C、D、E、F 必须是光学 Optics、半导体 Semiconductors、光谱 Spectroscopy、原子 Particles、力学 Mechanics 五个不同分类里的实验项目。授课模式是教师在 Canvas 平台上发布课堂预约时间、文字形式的实验项目指导书、根据学生的反馈增添内容。与学生约定时间进行一小时左右的讲授(Lecture),主要讲解数据处理问题与实验室安全,其余的时间进行辅导。每个学生需完成 3 个电子版的实验报告,对实验报告

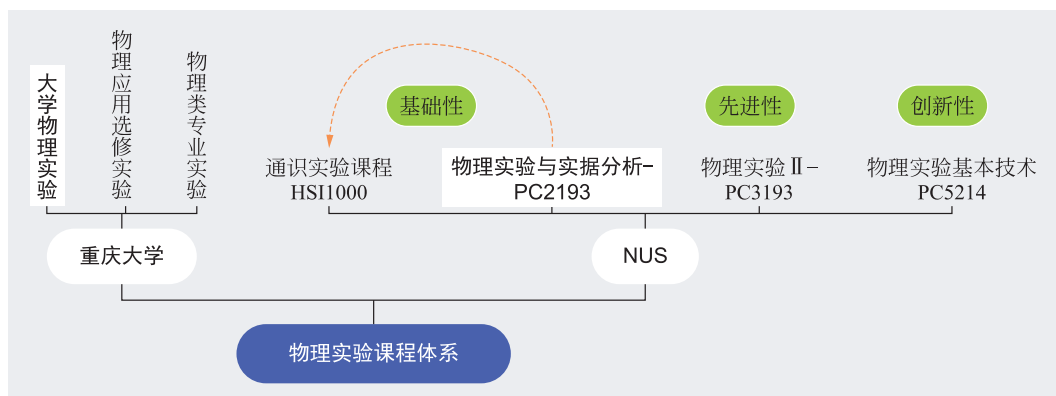


图 2 国内外高校物理实验课程体系

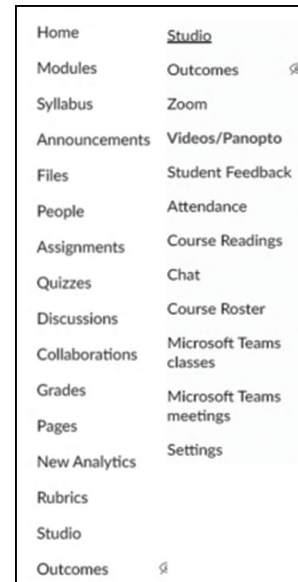
表 1 重庆大学与 NUS 的核心实验课程

	重庆大学	NUS
核心课程	大学物理实验(1.5 学分)	PC2193(4 学分)
授课对象	面向大一、大二非物理专业的理工科学生,48 学时,1200 名左右学生	面向大一、大二、大三已经修过《Frontiers in Physics》的理工科学生,每周可以在实验室做 8 小时,每两周完成一个实验项目,30 名左右学生
授课模式	教师进行 30~40min 的讲解,其余时间辅导,1~2 人/组实验,一个学期需完成 1 次理论与 15 个实验项目	教师约定时间讲解 1 小时,其余时间进行辅导,2 人/组实验,一个学期需完成 6 个从不同分类里选择的实验项目
实验报告	题目、实验原理、实验仪器、实验步骤、数据记录与处理、讨论	题目、摘要、引言(Background and Objectives)、材料和方法、结果、讨论、参考文献、补充材料
教学目标	培养学生的科学实验能力、思维方式,激发创新意识	培养大学生跨学科能力

网络学习平台



雨课堂



Canvas

表 2 重庆大学、NUS 核心物理实验课程的实验项目

	重庆大学	NUS
1	固体杨氏弹性模量的测量	Brewster's Angle
2	霍尔效应及螺线管内磁场分布的测量	Optics Diffraction of Circular Aperture
3	电子示波器的使用	Propagation of Laser Light
4	铁磁材料磁化曲线和磁滞回线的测绘	Basic Diode Electronics
5	基础性实验 用直流电桥测量电阻温度系数	Semiconductors Band Gap of Germanium
6	分光计的调整与玻璃三棱镜折射率测量	Hall Effect in P and N Type Semiconductors
7	等厚干涉-劈尖和牛顿环	Spectroscopy Electron Spin Resonance
8	弗兰克-赫兹实验	Franck Hertz experiment

续表

重庆大学		NUS	
9	光电效应法测普朗克常量	Spectroscopy	UV-vis Absorption Spectroscopy
10	迈克尔孙干涉仪		Absorption of Gamma and Beta Rays
11	综合性和 设计性实验	Particles	Rutherford Scattering
12			X-Ray Diffraction of Crystals
13	密立根油滴法测定基本电荷		Magnetic Moment in the Magnetic Field
14	声光衍射与液体中声速的测定	Mechanics	Pohl's Pendulum
15	显微镜、望远镜的设计与组装		Gyroscope
16	研究性实验		利用单缝衍射法测量钢丝的杨氏弹性模量
17	设计制作数字温度计		

的要求更强调完整性。基于这六个实验项目的差异性要求,教师通过实验报告、口试(Viva)以及答辩(Presentation)来深入了解学生的学习情况。对于通过系统实验课程学习的学生则鼓励他们参加 Undergraduate Research Attachment Programme in Science(UROPS)项目^[14,15]。

对比重庆大学的物理实验课程跟 NUS 的 PC2193 课程,从实验项目总数上来说,重庆大学的要求是在一个学期内完成 15 个实验(见表 2)+1 次理论,学生的工作量更大一些,NUS 的任务量较少。学分上,国内高校的物理实验课程的学分都略低于其他课程,而 NUS 的物理实验课跟其他课程的学分是一致的,能够引起学生的同等重视与认真对待;授课模式上,国内高校更多的是给予视频讲解,授课教师在实验课上处于主导状态,这可能跟国内高校的实验任务量太大有关,想更节约学生的学习时间,但同时又存在学生对实验过程理解表面化的风险。而 NUS 更多的是提供文字性指导书,让学生研读学习,授课教师是辅导状态,更多的空间和自由给到学生,这与国内高校相比,就更能够促进学生的深入思考和自主探索,这与“3+2”项目培养学生独立研究能力的目标相契合;从实验报告的数量与内容上看,两高校有明显的不同,虽然 NUS 学生完成的数量较重庆大学少,但与重庆大学要求的对一个实验的了解过程不同,NUS 的实验报告则完全按照 SCI 论文的格式,更为国际化,引导学生提早与国际接轨,更有助于学生的继续深造。

重庆大学和 NUS 的核心课程均围绕提升学生的实验技能和科研能力展开,但各有侧重,重庆

大学的实验内容分类不清晰,学科之间的交叉体现较少,更注重分层次教学,NUS 的实验内容明确分类,更注重光学、半导体等学科的学习深度。在授课过程中体现了各自独特的教学理念和实践特色。

1.3 教学评价与反馈机制

教学评价与反馈机制不仅是衡量学生学习成效的工具,更是激励学生积极进取、持续进步的动力源泉。重庆大学和 NUS 在物理实验课程的成绩构成与分布上虽有共性,但在评价要求和等级划分上仍存在差异。

关于成绩构成与成绩分布如表 3 所示。重庆大学大学物理实验课程的总成绩=预习 10%+平时 40%+操作 10%+考试 40%。具体来说,预习=线上资料学习与课前测试+课堂讨论(提问、在线答题等);平时=实验报告(16 次)+挑战性答辩(教改班);操作=选取 1~2 个实验项目进行中间节点验收打分。成绩等级采用五级制度,即优秀、良好、中、及格和不及格,基本上是正态分布,其中优秀(闭卷考试成绩必须超过优秀线)成绩的学生不超过 20%,多数学生获得良好、中和及格成绩,大约 5%的学生会出现不及格(闭卷考试不超过及格线)情况。

与重庆大学的课堂内外多个部分综合考核有所不同,在 NUS-PC2193 课程中,更加注重对每一个实验项目的具体能力考核,且不同实验类型对成绩的要求各不相同,同时随着对实验的熟练程度提高,实验项目在总成绩中的权重逐渐增加。具体而言,实验 A 要求完成 3 页数据处理 PPT 和小测试,实验 B 要求提交实验报告并进行口试,实

表 3 国内高校大学物理实验与 NUS-PC2193 的成绩构成与分布

重庆大学		NUS	
成绩构成	预习 10%+平时 40%+操作 10%+考试 40%	Experiment # A: 5% (3 slides data analysis + consultation); Experiment # B: 15% (Report + viva); Experiment # C: 15% (Midterm Presentation); Experiment # D: 20% (Report + viva); Experiment # E: 20% (Report + viva); Experiment # F: 25% (Final Presentation).	
成绩分布	优 20% 良+中+及格 75% 不及格 5%	A+ / A A- / B+ / B / B- / C+ / C / D+ / D- F	20% 80% 0%

验 C 包括中期答辩(PPT+演讲(10min)+答辩 Q&A(5min)), 而实验 D、E 要求提交实验报告并进行口试, 最终实验 F 要求进行期末答辩(PPT+演讲+答辩 Q&A)。成绩按照 A+、A、A-、B+、B、B-、C+、C、D+、D-、F 11 个等级划分, 优秀的比例也是 20%, 学生挂科率较低。

两所高校的总成绩都采用了综合评价的方式, 这种多元化的评价体系有助于全面评估学生的学业表现。此外, NUS 的实验评价体系, 强调通过不同实验类型的多样化评价, 特别地如: 口试、演讲以及答辩的方式, 更全面地反映了学生的学习成果, 这为“3+2”项目中学生的个性化评价提供了借鉴。

2 实验室管理与运行机制

实验室作为物理实验教学的实施场所, 其管理与运行机制的优化对于提升教学质量和满足“3+2”本硕连读项目的要求至关重要。实验室管理与运行机制涵盖了实验室管理与授课教师的安排^[16, 17]。

重庆大学的实验课程由国家级物理实验教学

示范中心开设, 包括 15 个大学物理实验室和 6 个专业实验室。每间实验室一个实验项目有 20~30 套仪器, 有一位实验技术人员进行管理, 根据学生的专业班进行分班, 实验中心分配教师, 按照轮换制度每周学习不同的实验项目。实验室的开放时间根据课程表进行安排, 授课教师需要精通多个实验项目。在实验室内, 学生在 3 个学时内完成一个实验项目, 学生操作实验仪器后需手动记录数据, 如图 3(a) 所示。

NUS 物理系的实验课设有 3 个教学实验室, 每个实验室设置多个实验项目, 每个实验项目有 3 套仪器, 有 4 位授课教师、3 名实验技术人员、5~6 位 PhD 助教。学生可根据自己的时间提前预约进入实验室, 每两周完成一个实验项目。实验室开放时间为周一至周五的上午 9:00 至下午 6:00。每位授课老师负责 4~5 个不同的实验项目。此外, 如图 3(b) 所示实验桌上设有实验仪器、计算机和打印机, 计算机上的测试软件自动记录实验数据。NUS 实验室最显著的特点是自主预约模式, 使学生能够根据自己的研究进度和兴趣安排实验时间, 这种自主性让学生更积极地参与实验设计

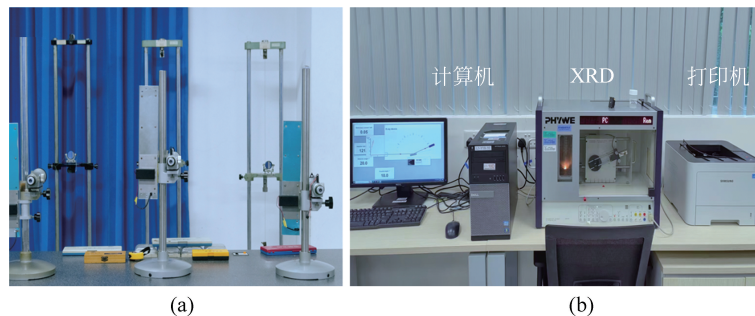


图 3 实验室实景

(a) 重庆大学实验室的固体杨氏弹性模量的测量实验项目; (b) NUS 实验室的晶体 X 射线衍射实验项目

和实施。例如,学生可以根据自己的研究课题灵活选择实验设备和时间,无须等待统一安排,从而提高了学习和研究的积极性。自主预约模式要求学生实验前进行充分的准备和规划,包括查阅资料、设计实验方案等,促使学生独立思考 and 解决问题,增强他们的自主创新能力。由于实验室资源开放,不同学科背景的学生可以共享实验室,这为跨学科合作提供了便利。例如,计算机科学和生物医学的学生可以共同使用实验室进行跨学科研究,拓宽了学生的视野。

通过对比来看,重庆大学的实验室管理模式以分班制和轮换制度为特点,这种模式有利于学生的分类培养,但学生的参与度有待提高。同时实验课程规模较大,实验室管理较为复杂,实验仪器的先进性略有欠缺,授课老师的工作量较大,在一定程度上可能会影响授课质量以及实验项目进行的精确性。NUS 则以其完善的师资配备和灵活的学习时间安排,为学生提供了高度自主的学习环境,这种模式鼓励学生根据自己的研究兴趣和时间安排进行实验。

3 针对性的优化策略

与 NUS 的物理实验教育相比,可以发现我国的物理实验教育在满足“3+2”项目学生的素养需求方面还有很多进步的空间。针对国内实验教育的短板给出以下建议:

(1) 加强教师培训与支持体系。针对授课教师需要掌握多个实验项目的情况,可提供更多的培训资源,使教师能够更好地掌握实验知识和操作技能。对于教师工作量过大的问题,可以考虑增加教师的配备或者引入 PhD 进入课堂。增加实验课程的教师培训力度,提高教师对国际先进物理实验技术和方法的了解,更好地引导学生进行实验研究。

(2) 分类分层实验建设,提高课程体系中的创新性。借鉴国外经验并结合教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2023 年版)的文件精神和国内大学物理实验教学的数字化发展趋势建立分类分层实验项目,研究性内容是项目式实验,只给出实验任务和具体要求,实现方法和结论具有一定的开放性,给与学生一定的自主选择权,在学

生能够逐步深入形成系统的实验技能的同时感受到物理实验之美。建议适度提高实验课程的学分,以确保学生充分重视并平等对待实验科目。优化我国物理实验课程内容,鼓励物理实验与其他学科进行交叉,开展创新项目,培养学生的跨学科思维 and 实践能力。

(3) 减少讲授式教学,增加课程挑战度。推动实验课程的教学模式创新,增加实验设计、数据采集和分析、结果解释和学术写作等环节,丰富在线学习的内容,把实验课堂交还给学生,提高学生学习的自主性和多样性。

(4) 在评价体系上,引入更多元化的评价方式。设计科学合理的评价机制,包括实验报告、口试、演讲、答辩等多方面的评价方式,以全面了解学生在实验中的表现。可以考虑将实验项目的难度和权重逐渐增加,促使学生在实验中持续提升能力。适当减少实验报告的撰写,减少学生重复性的任务,有足够的时间进行深入学习,教师也更能为学生提供及时有效的反馈。

(5) 实验室管理与设备更新。借鉴 NUS 的做法,推行自主学习和网络化教学,为学生提供灵活预约实验室时间的机制。针对实验室规模较大、管理较为复杂的情况,建议优化实验室管理体制。增加实验技术人员的配备,在提高实验室的开放效率的同时提升实验室管理水平,加强实验仪器的更新与维护,确保学生接触到最先进的实验设备,提高实验质量。

(6) 增加合作机制与资源整合。建立更广泛的国际化合作机制,与更多国际知名大学展开合作,通过网络平台或线上图书馆,共享物理实验教学资源,包括教学视频、实验指导书、研究论文等,共同提高物理实验水平。

4 结语

本研究通过深入比较重庆大学与新加坡国立大学(NUS)的物理实验课程,揭示了各自在课程体系、教学模式、评价与反馈机制以及实验室管理等方面的独特优势。NUS 的 PC2193 课程,以其卓越的师资力量和精心设计的实验内容,为学生提供了高度的自主性,使其能够在实验中深入思考并主导整个过程。面对“3+2”本硕连读项目的挑战与机遇,我国物理实验教学亟须借鉴国际先

进经验,特别是在提升师资力量、深化实验内容设计、鼓励学生主动参与等方面进行优化,早日实现国内物理实验教育与国际标准的接轨,提升学生的国际竞争力。

致谢:衷心感谢 Prof WANG Qinghai and Phd SUN Xingjian of National University of Singapore Department Physics Faculty of Science 的指导与帮助。

参 考 文 献

- [1] 刘春阳. 国际视野下高校本科生联合培养模式研究[J]. 国内高等教育教学研究动态, 2017(15): 10.
LIU C Y. Research on joint training mode of undergraduate students in universities from an international perspective [J]. Dynamics of Higher Education Teaching and Research in China, 2017(15): 10. (in Chinese)
- [2] 郑军, 秦妍. 法国本硕连读拔尖创新人才培养的经验及启示[J]. 河南工业大学学报: 社会科学版, 2020(3): 86-99.
ZHENG J, QIN Y. Experience and enlightenment of elite innovative talents training in France's integrated undergraduate and master's program[J]. Journal of Henan University of Technology: Social Science Edition, 2020(3): 86-99. (in Chinese)
- [3] 刘新颜, 赵闻蕾, 高明. 高校国际化人才培养模式的实践探索[J]. 航海教育研究, 2014(3): 51-53.
LIU X Y, ZHAO W L, GAO M. Exploration of international talent training mode in universities[J]. Navigation Education Research, 2014(3): 51-53. (in Chinese)
- [4] 刘英翠, 吴艳琼, 林赫, 等. 中美本科生多模式国际化联合培养——上海交通大学与美国普渡大学联合培养机械工程人才案例研究[J]. 世界教育信息, 2017(1): 62-67.
LIU Y C, WU Y Q, LIN H, et al. Multi-mode international joint training of undergraduate students in China and the United States—Case study of joint training of mechanical engineering talents between Shanghai Jiao Tong University and Purdue University[J]. World Education Information, 2017(1): 62-67. (in Chinese)
- [5] 王建林, 何苏勤, 孙洪程. 构建实验教学平台, 培养学生创新精神和实践能力[J]. 实验技术与管理, 2005, 22(4): 9-12.
WANG J L, HE S Q, SUN H C. Building experimental teaching platform to cultivate students' innovative spirit and practical ability[J]. Experimental Technology and Management, 2005, 22(4): 9-12. (in Chinese)
- [6] 韩忠, 黄佳木, 何光宏. 哈佛大学物理实验室考察与我国物理实验教学的思考[J]. 实验室研究与探索, 2011(7): 361-364.
HAN Z, HUANG J M, HE G H. Inspection of Harvard University physics laboratory and reflections on physics experimental teaching in China[J]. Laboratory Research and Exploration, 2011(7): 361-364. (in Chinese)
- [7] 李春密, 顾江鸿, 张霄. 国内外物理实验教学的现状分析与展望[J]. 物理实验, 2022(6): 54-61.
LI C M, GU J H, ZHANG X. Current situation analysis and prospect of physics experimental teaching at home and abroad[J]. Physics Experiment, 2022(6): 54-61. (in Chinese)
- [8] 张志颖, 赵玉丹, 余丹. 中美高校实验教学模式比较优化的探索[J]. 中国成人教育, 2013(8): 136-138.
ZHANG Z Y, ZHAO Y D, YU D. Exploration of comparative optimization of experimental teaching modes in Chinese and American universities[J]. Adult Education in China, 2013(8): 136-138. (in Chinese)
- [9] 乐永康. 德国大学物理实验教学情况介绍[J]. 物理实验, 2001(3): 42-46.
LE Y K. Introduction to the teaching of physics experiments in German universities[J]. Physics Experiment, 2001(3): 42-46. (in Chinese)
- [10] 李萌, 郭芮兵, 陆通, 等. 新加坡国立大学实验室安全管理模式的研究及启示[J]. 化学教育(中英文), 2023(14): 119-124.
LI M, GUO R B, LU T, et al. Research and enlightenment of laboratory safety management model in national university of Singapore[J]. Chemical Education (Chinese and English), 2023(14): 119-124. (in Chinese)
- [11] 张礼, 左玉生, 吴弘, 等. 物理实验教学方法的研究与发展[J]. 实验技术与管理, 2015(10): 197-198, 202.
ZHANG L, ZUO Y S, WU H, et al. Research and development of physics experimental teaching methods[J]. Experimental Technology and Management, 2015(10): 197-198, 202. (in Chinese)
- [12] 曾卫东, 张才乔. 深化实验教学改革, 促进创新能力的培养[J]. 实验技术与管理, 2005, 22(4): 84-87.
ZENG W D, ZHANG C Q. Deepening the reform of experimental teaching to promote the cultivation of innovative ability[J]. Experimental Technology and Management, 2005, 22(4): 84-87. (in Chinese)
- [13] Elizabeth J ANGSTMANN, Manjula D SHARMA. Connecting Research in Physics Education with Teacher Education 3[C]. The International Commission on Physics Education in cooperation with University of the Basque Country (UPV/EHU) and Dublin City University: General Editors, 2022: 144-162.
- [14] 徐剑波, 鲁佳铭, 蒋雅静. 新加坡国立大学创新型人才培养模式及其启示[J]. 世界科技研究与发展, 2020(6): 688-697.
XU J B, LU J M, JIANG Y J. Innovative talent training mode of national university of Singapore and its enlightenment[J]. World Science and Technology Research and Development, 2020(6): 688-697. (in Chinese)

- 事应用的探讨[J]. 物理与工程, 2016, 26(3): 59-62.
- BAI H G, LIU J P. Inquire into enhancing actual combat military application of college physics teaching of military school integrated training cadets[J]. Physics and Engineering, 2016, 26(3): 59-62. (in Chinese)
- [4] 孙丽颖. 王大珩科学精神研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2020.
- SUN L Y. Study of wang daheng scientific spirit[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [5] 田静. 微穿孔板和小孔喷注——马大猷教授对声学的特殊贡献[J]. 声学学报, 2015, 40(2): 129-133.
- TIAN J. Microperforation and microjet noise—The special contributions of Prof. Dah-You MAA in acoustics[J]. Acta Acustica, 2015, 40(2): 129-133. (in Chinese)
- [6] 李向富, 郑兴荣, 曹鹏飞, 等. 基于 OBE 理念的大学物理实验教学的改革与实践[J]. 物理与工程, 2024, 34(3): 42-48.
- LI X F, ZHENG X R, CAO P F, et al. Reform and practice of college physics experiment teaching based on OBE concept[J]. Physics and Engineering, 2024, 34(3): 42-48. (in Chinese)
- [7] 李东, 段利兵, 白晓军, 等. 国防特色高校大类培养背景下“课堂+网络+科创”三位一体大学物理教学模式实践[J]. 大学物理, 2024, 43(11): 43-48.
- LI D, DUAN L B, BAI X J, et al. Practice of classroom+network+science and technology innovation trinity teaching model of college physics under the background of large category training in national defense features university[J]. College Physics, 2024, 43(11): 43-48. (in Chinese)
- [8] 刘作业, 丁晶洁, 王集锦, 等. 中国科技前沿元素在大学普通物理教学中的渗透[J]. 物理与工程, 2021, 31(3): 73-77.
- LIU Z Y, DING J J, WANG J J, et al. Application of latest scientific and technological frontier elements of China in the teaching of college general physics[J]. Physics and Engineering, 2021, 31(3): 73-77. (in Chinese)
- (上接第 119 页)
- [15] National University of Singapore. Undergraduate Education[EB/OL]. [2019-07-26]. <http://www.nus.edu.sg/registrar/education-atnus/undergraduateeducation/special-undergraduate-programmes/undergraduate-research-opportunities.html>.
- [16] 刘鸣, 毕玉玲, 赵美蓉, 等. 实行开放教学模式培养学生创新探索精神[J]. 实验技术与管理, 2005, 22(4): 91-94.
- LIU M, BI Y L, ZHAO M R, et al. Implementation of open teaching mode to cultivate students' innovative exploration spirit[J]. Experimental Technology and Management, 2005, 22(4): 91-94. (in Chinese)
- [17] 贾攀, 尹秋艳. 高校实验室队伍现状分析及建设对策[J]. 实验室研究与探索, 2009, 28(2): 159-161.
- JIA Z, YIN Q Y. Analysis of the current situation of university laboratory teams and countermeasures for construction[J]. Laboratory Research and Exploration, 2009, 28(2): 159-161. (in Chinese)