

新时代物理实验课程建设探索

何振辉

(中山大学物理与天文学院, 广东 珠海 519082)

摘要 物理实验是理工科学学校培养学生自主学习能力和实践创新能力的基础核心课程, 面向科学前沿和国家需求的人才培养在新时代也有了新的要求。本文围绕新学院物理实验教学课程建设所面对的问题, 基于“提高学生发现、分析和解决实际问题的能力, 以及通过实验探索新知识的能力”的实验教学理念, 并结合目前提倡的“基础—深入—提升—拓展”四层次实验教学模式, 重新梳理知识点, 使高年级的综合实验在知识、技术和规范 3 个维度分解的相关要素穿插在低年级的实验项目中。在实验教学改革中将装置模块化、可视化, 仪器数字化、通用化, 使之更适合于问题导向和自主学习的教学方式, 并取得初步成效。

关键词 实验教学; 课程体系; 知识拼图; 多层次; 教学模式

EXPLORATION OF THE CONSTRUCTION OF PHYSICS EXPERIMENT COURSES IN THE NEW ERA

HE Zhenhui

(School of Physics and Astronomy, Sun Yat-Sen University, Zhuhai, Guangdong 519082)

Abstract Physics experiment is a fundamental core course for cultivating students' independent learning and practical innovation abilities in science and engineering schools. In the new era, there are also new requirements for talent cultivation towards the forefront of science and state-requirements. To meet the requirements, the construction of physics experiment teaching courses were constructed for a new school. Based on the teaching concept of “improving students' abilities to discover, analyze, and solve practical problems, as well as their ability to explore new knowledge through experiments” and the multilevel experimental teaching model of “fundamental, deepening, improvement, and expansion levels”, the knowledge points are reorganized, and the relevant elements of the comprehensive experiments for the senior are interspersed in the experimental projects of the lower grade experimental projects in terms of knowledge, technology, and standards. In the reform of experimental teaching, the devices are modularized and visualized, and the instruments are digitized and universalized, making them more suitable for problem-oriented and independent learning teaching methods, and initial effects have been achieved.

Key words experimental teaching; curriculum system; knowledge puzzle; multi-level; teaching model

收稿日期: 2024-01-26

基金项目: 教育部高等学校大学物理教学指导委员会教学研究项目(高物课教指字[2022]02号); 热学实验课程体系与教学方法改革研究(DWJZW202238zn)。

作者简介: 何振辉, 中山大学物理与天文学院教授, stshzh@mail.sysu.edu.cn。

引文格式: 何振辉. 新时代物理实验课程建设探索[J]. 物理与工程, 2024, 34(5): 74-81.

Cite this article: HE Z H. Exploration of the construction of physics experiment courses in the new era[J]. Physics and Engineering, 2024, 34(5): 74-81. (in Chinese)

1 新建学院物理实验课程建设问题及机遇

随着数字技术的高速发展以及新时代国家与科学前沿对科研人才素质的需求不断提高,包括教学内容、教学方法和教学模式在内的原课程体系支持能力不足,物理实验课程遇到一些普遍性问题:

(1) 实验教学的内容与方法,往往受限于所采购的实验仪器,且不少仪器是集成一体的结构,与教学理念相违背;看重验证理论知识,物理建模与具体实验装置、实验条件的联系不足;

(2) 教学模式较为单一,不利于满足学生兴趣和差异化发展的需求;

(3) 不少刚刚入学的学生对实验课的目的和意义认识与教师期待的不相符,他们习惯以学习理论知识的方式和要求对待实验;如以“用最少的时间做出标准结果”为衡量好实验的标志,习惯套用公式解释实验数据,而忽略公式背后的物理图像。

上述问题不少是国内实验教学中的共性问题,许多院校做了不少探索和改革。如北京大学以科研引领实验教学的改革以适应新技术和新理论发展^[1],中国科学技术大学的英才物理实验教学试点以适应学生个性化、差异化发展的需求^[2],同济大学引入混合式教学模式实现“学生主体、教师主导”的实验教学^[3],中山大学国家级物理实验示范中心引入数值仿真打通理论物理、实验物理和计算物理研究思维、并使实验可视化^[4,5],东北大学在“基础—进阶—高阶”实验模式下引入信息化教学手段,提升学生实验设计能力和解决问题能力^[6]。

成立于2015年的中山大学物理与天文学院位于珠海校区,2016年开始招生并服务珠海校区物理教学。建设资金与实验场地相对充裕,为统筹改进上述问题提供了机遇和后发优势,但也面临新教师经验不足等问题。参考兄弟院校的经验,对照《大学物理实验课程教学基本要求(2010版)》^[7](后简称《基本要求》),我们探索适合于自己特点的物理实验课程建设。

2 物理实验教学课程建设探索

2.1 问题分析

实验教学的目的是不是系统地讲授知识,而是

培养学生的物理(实验)思维,培养运用知识解决实际问题的手脑协调能力;培养学生通过自主实验学习知识、巩固知识和发现新知识的能力。试问在互联网优质网络课程资源日益丰富的环境下,尤其是在人工智能高速发展的今天,学生非到学校才能获得的教学资源是什么?最容易想到的是实验室,以及与一流教师和优秀同学形式多样的现场互动的教学方式。让学生明白实验教学在人才培养中的重要性很有必要。

一项实验内容对理论课来说是一个知识点,但对一个深入的实验就是一个知识点群:除实验原理的知识点外,还包括支持实验的相关技术、保证实验安全和少走弯路的操作规范、真实的实验装置与理想假设的差异,以及不可隔离的环境因素作用等。尽管能力的训练不依赖于具体实验内容,但仍可根据认知规律和知识的内在逻辑,选择有利于加强知识体系建立、与其他科目和技术关联的知识点,包括对未能在理论课充分讲授的知识点,以实验教学的方式进行补充或加强。这些知识点的选择和组织遵从的原则是:在技术和规范层面扎实,在方法、方案和思考层面上放开。考虑到学生实验能力的差异大和实验教学自主性强的特点,在无分级的课程体系下,有必要设置具有弹性和可塑性的实验内容和要求,以适应不同的学生个性需求。

此外,实验是培养实事求是科学精神有力方式,是“实践是检验真理的唯一标准”的唯物观的最好体现;区分事实和观点及其表述方式——客观描述现象和实验原始记录,与分析、推测的不同,是春雨润物般的思政元素和课程思政的体现。

随着学院的发展和定位的不断明确,逐渐调整课程建设内容,糅入学院特色——加强与量子、精密测量物理、天文观测与空间科学实验等内容的关联,引入相关的、已有长足发展的当代实验技术,包括现代传感器技术、数字化测量技术与仪器、计算技术、仿真技术以及互联网技术,遥测与遥控技术。现在学生已普遍自备笔记本电脑,习惯网上搜索与阅读,计算机编程已得到普遍重视并成为本科标配课程,这都为实验教学改革提供了丰富的技术支撑和可行性。

2.2 对策措施

2.2.1 提高认识

针对新生对实验课的目的和意义认识不足的

问题,首先在教师集体备课时多讲实验教学理念,统一认识;在实验课绪论、与学生讨论问题时对学生(重复)讲解实验教学的方式和要求与理论课的差异,更新观念。讲解什么是实验以及测量的本质。自始至终要求学生按规范客观如实记录实验现象和数据,尤其鼓励记录那些与预想不一致的异常现象,要求对自己所记录信息负责(签字);对于用平板记录的数据,为防止修改,要求在签退前上传已签名的实验记录,在培养学生客观记录的好习惯的同时,培养实事求是的科学精神。

2.2.2 逐步推进能力培养

(1) 基于模型的预测与基于实验的验证:加强实验中的物理建模,通过模型建立实验原理与实验装置之间的关系;重视物理过程讨论,运用所学知识解决实际问题。

(2) 有意安排部分实验内容超前于理论课,设置从观察现象、寻找规律到猜想机理的过程体验,更贴近真实科研场景;结合问题导向的研究性实验,培养想象力和通过实验学习知识和发现新知识的能力。

(3) 培养基于实验结果的独立思考素养,用实验结果回答问题。

(4) 实验中环境因素往往存在不确定性,分析这类实验现象非常适合训练领军人才所需的、在信息不充分、不确定时作判断、作决定的气质和能力。

2.2.3 改善装置

针对原实验装置中存在的“黑箱”式实验装置问题,一方面,逐步改造、开发新实验项目和新仪器,例如将货架“一体化”仪器、设备拆解,更换为带标准通讯接口的通用测量仪器,通过在不同实验中的反复使用,使学生熟识和掌握通用仪器的

使用及实验数据采集方法;另一方面,为便于展现实验原理和培养学生脑手协调能力,实验装置尽量做到可视化和可及性模块化(可搭拆),为设计性实验和研究性实验的开展提供更好的条件。此外,带标准通信接口的常用测量仪器还为进一步拓展自动测量和远程实验打下基础,以满足《基本要求》^[7]中“逐步引进在当代科学研究与工程技术中广泛应用的现代物理技术”的要求。

梳理当代物理实验技术主线,得到通用测量装置的流程如图1所示,以此为参考改进对包括传感器、数据采集仪器、数字化电源等实验装置架构,并通过PC机管理实验、控制实验条件与实施远程、自动测量。

1) 传感器

除开出传感器专项实验外,推进传感器在各实验中的应用(详见图2)。实验中除适当保留少量需要人为判读的测量仪表(如毫安计、真空表)、以便于展示传感器的发展历程外,大部分实验项目(尤其是新增实验和改进实验)采用不同代级的分立式传感器(如热敏电阻、热电偶、力传感器、AMR传感器、热电堆辐射传感器、光功率计),模拟电信号输出范围对应量程的变送器(如温度变送器,压力传感器、流量计),具备通讯地址的数字式传感器(如DS温度传感器,数字真空计),以及无线通讯功能的数字式传感器(如三维霍尔传感器),对材料物性类的要求掌握其物理原理,其他类型的只要求了解。

2) 通用仪器

数字化数据采集仪器包括数字示波器、数字多用表、NI myDAQ、CompactDAQ、PXI 数据采集模块、数字锁相放大器(图2),它们的共同特点是具备对输入模拟信号放大、模数转换、数字或图

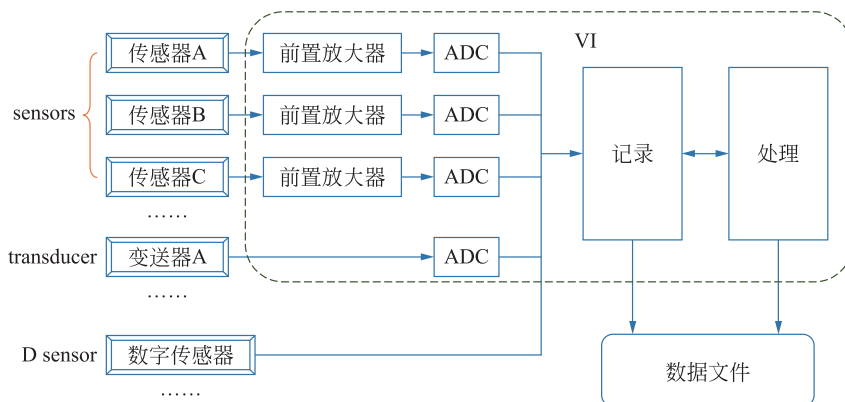


图1 通用多参数自动采集平台

- 实验项目(传感器-数据采集仪器)
- 温度传感器实验(PT-ELVIS、Hs)
 - 冰熔化热测量(TC-MS6514)
 - 不良导体热导率测量(TC-CompactDAQ)
 - 热电效应与TEC控温(PT+transducer-myDAQ)
 - 低温热辐射(PT-DM3058E-PID-DP831; TP-DM3058E)
 - 电阻热噪声测量(TC-MS6514; QE1022)
 - 高温超导电磁性质研究(PT-DM3058E, Hs; OE1022、PXI)
- PT: 热敏电阻
TC: 热电偶
TP: 热辐射传感器
Hs: 霍尔传感器

图2 传感器与通用数字仪器在热学相关实验中的穿插应用

形化显示、数据缓存、在通信协议下授受上位机指令和向上位机输出数据。另一类输出数据的常用仪器包括数字函数发生器(弱电)、程控直流电源(强电)。

3) 计算机控制与远程实验

用PC机作为上位机,用LabVIEW开发常用仪器的实验控制和数据自动采集功能。通过远程桌面控制,实现远程实验。试点实验包括示波器、函数发生器、数字万用表使用,玻尔振动实验,磁滞回线测量,电阻热噪声和玻尔兹曼常数测量,缪子宇宙线测量等。

2.2.4 实验内容与教学方法

1) 内容编排——知识点

针对实验学时有限,实验内容分散,一方面注重各实验项目间知识点之间的联系,以及与理论知识点对应的均衡,梳理关联实验知识点如图3所示;另一方面,将如图4所示实验基本流程各环节拆解,作为教学侧重点安排在不同的实验课程

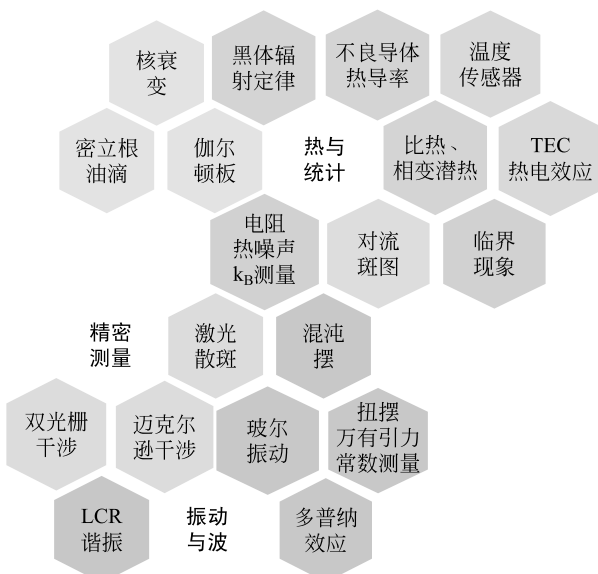


图3 关联实验知识点拼图(除对流斑图实验外,均已开出)

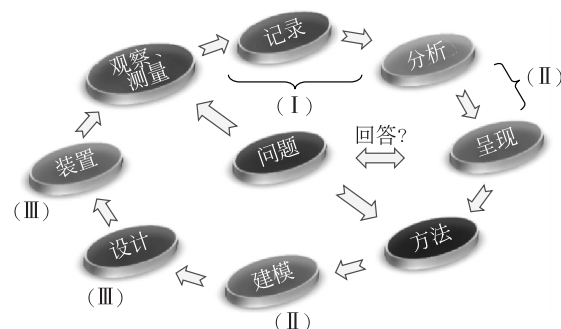


图4 实验基本流程

和不同类型的实验项目中;同时注重实验各维度的链接,将相关知识、技术穿插编排到各年级的教学内容中(如表1所示),把一些高年级复杂实验所需要的知识、技术分解到低年级的实验中,适当地重复常用技术和通用仪器的使用、可强化操作,使学生由浅入深,更有利于知识的系统性学习和灵活应用。

2) 梳理实验类型和要求

按《基本要求》^[7],基础性实验、综合性实验、设计性或研究性实验这3类实验教学层次的建议比例分别为:60%、30%、10%。在《基本要求》解读的基础上以及数十年来的技术发展,针对新教师经验不足、学生能力提升和物理专业要求更高等的问题,细化实验类型,以便于教师设计教学方案。

基础性实验:内容包括基本物理量的测量、基本实验仪器的使用、基本实验技能和基本测量方法的运用、不确定度分析及数据处理理论与方法的掌握、区分客观描述与主观分析判断的表述规范,以及安全意识的培养。基础性实验侧重学习知识,培养独立实验的能力:一方面,它通常给出实验方案和仪器用具,通过实验验证对应的理论知识(通常在理论课有讲述),实验结果在误差范围内唯一;另一方面,它提供通用仪器使用、电路连接、光路搭建及调试等操作规范的训练。例如,示波器与数字万用表的使用,锁相放大器使用,LabVIEW初步,分光计使用;工具使用以往贯穿于其他实验之中,仅对常用但复杂的工具单独设置实验项目,侧重于实验操作规范的基本训练,以及对常见实验系统故障进行分析、判断和排除能力的训练,同时学习仪器原理相关的物理知识。

设计性实验:针对目标 and 需求,在实验室提供的实验条件基础上,提出实验原理、方法和实验方

表 1 实验教学内容编排穿插于各门实验课程

课程	知识	工具、技术	操作与规范	能力与素养
基础 I	误差分析	常用量具		定量思维
	力学	常用仪器		统计性思维
基础 II	热学	虚拟仪器		批判性思维
	电磁学	PID 控制	安全	观察能力
	光学	传感器	电路、光路…	查错能力
基础 III	原子物理	分光计、干涉仪……	实验方案	逻辑分析能力
	核物理	数据自动采集	实验记录	表达能力
近代 I	相对论	锁相技术	作图列表	综合与归纳能力
	量子物理	真空技术	误差分析	沟通与协调
		低温技术	文献检索与引用	判断力
近代 II	电路原理	光电倍增管		领导力
	数字电路	放大技术		
电子技术	模拟电路	电源技术		工科思维
		测量技术		动手能力

案,这些方法和方案通常并非唯一;对高要求的设计性实验,要求学生分析和验证实验方案;实验评价不仅看实验设计,还要看最后目标能否或多程度上实现。设计性实验侧重实际问题能力的训练,学生学习分解目标 and 需求,然后逐一解决。通用仪器的使用为设计性实验提供必要的支持。

研究性实验:针对某一现象或问题提出假设,通过研究现象的内在规律、得到规律背后的物理机理,检验假设是否符合预期。假设、研究方案可多样,机理和答案也不必唯一;研究性实验侧重探索新知识的能力训练;通过实验学习理论课未讲过或未讲到的知识,甚至是全新的知识,训练学生的洞察力和判断力,培养大胆假设、小心求证的作风。同时也学习科研规范流程,要求以科研论文形式提交实验结论。

综合性实验:通常指涉及多个知识点,或多项实验技术才能完成的实验。

实验教学要求基本技能和操作扎实、符合规范;对设计性和研究性实验,要求在讲义和实验前提供相关知识介绍和实验指引,开展问题导向方式的实验教学。

为适应个性化教学的需求和发展趋势,我们响应全国高等学校实验教学示范中心联席会对实验项目推行四个层次分级的倡议(已列入 2023 年版的《基本要求》^[8]),选出数个实验项目开展教学试点,按认知规律和知识的内在逻辑,摸索各层次

的内涵和要求,将“基础、深入、提升、拓展”四个层次对应知识学习的“播种、生根、发芽、成长”四个阶段(如表 2);在教学安排上,便于学生基于自己的基础、能力或兴趣选择至某一层次的实验内容。

针对因耗时长、实验结果偏差大、学生体验不佳导致热学实验开出偏少这一全国性问题,以热学及热学相关的实验为教学改革切入点,探索在照顾知识点均衡的同时,提高教学质量的教学方法。

3 建设成效

原“冰熔化热测量”实验用时长、测量准确度低,分析原因主要是漏热补偿偏差,该偏差是因原模型中的环境温度的定义不明确、测量该温度的热电偶位置不明确而造成的;这是典型的物理建模与实验装置不匹配的例子。用绝热性能好的家用真空杯改进了“混合法测量冰的熔化热实验”,简化实验和模型的同时,厘清了模型与装置之间的关系,培养学生利用模型分析实验结果的能力,并锻炼了学生在不确定范围内通过分析未知量做出合理决定的能力,知识点覆盖热力学第一定律^[8]。

开设“热电热机与热力学第二定律”实验,在有限时间热力学框架下探究热力学第二定律,同时作为设计性实验,提供不同层次实验内容,使学生加深认识热电效应,初步接触耦合多变量系统

表 2 实验项目四个层次的划分和要求

层次	名称	内涵和要求	标志	类型	阶段
1	基础	明白原理、掌握基本的知识和技术,建立物理图像、掌握操作规范和区分观点与事实的表述规范。	实验记录(签字); 统计误差分析; 数据处理; 实验结果呈现。	基础性	播种
2	深入	在物理原理与实验装置之间建立定量关系,弄清实验装置与实验对象间相互作用的物理过程。	物理建模; 物理过程分析; 实验方案; 结论阐述。	基础性、设计性	生根
3	提升	优化方案和模型、可视化,提高测量精度、拓宽测量范围、新仪器的应用等;并解决围绕上述目标提出的新问题。	数值建模、模型相关系统误差分析; 迭代优化、新方案; 新技术(材料、器件、仪器或算法)的应用。	设计性、研究性、 综合性	发芽
4	拓展	将所用技术、原理应用到解决本实验以外的其他问题,或其他学科知识点有机融合、贯通。	学科交叉; 多变量复杂系统; 组合创新; 研制实验装置、仪器。	综合性、开放性、 第二课堂	成长

实验设计和数据处理,提高自主学习能力。结合对应热力学第零定律的“温度传感器实验”,知识点已覆盖除第三定律外的热力学定律。

结合空间科学技术需求和疫情期间非接触测温技术的广泛应用,开设“低温热辐射测量”设计性实验,作为高温热辐射实验的补充;通过面辐射提高传感器接收的照度,并通过热电堆提高传感器的灵敏度,用自主设计低温热辐射测量实验仪器,分析展现能量从辐射面到传感器的全物理过程^[10]。知识点覆盖热能传递的三个基本方式之一和热电效应应用,结合黑体辐射谱测量,展现从经典物理到量子物理过渡的重要实验。

作为热辐射实验的拓展,在比宇宙微波背景辐射更低的频率端,展现出电阻热电压噪声^[11]。通过测量该噪声,不但可以认识热噪声的统计特性,还可以通过噪声功率谱密度计算玻尔兹曼常数^[12],它可以作为少有的统计物理教学实验补充,同时作为锁相放大器应用于弱信号测量的实验。通过改进实验装置的电磁屏蔽性能^[13],取得了较好的教学效果。需要指出的是,该实验还可以进一步拓展,用于摄氏温标和热力学温标这两个独立定义的温标之间的关系研究,为热学理论课提供实验补充。

探索通过实验学习新知识的实验教学,自主

设计“高温超导电磁性质研究”实验项目,通过测量高温超导材料的电阻和交流磁化率,研究外加磁场对超导转变影响的规律,同时学习低温技术、强磁场技术和弱信号测量技术,在巩固学过知识的同时,让学生能力有综合性的提高^[14]。在该实验中,通过改进实验装置,缩小温度差和缩短实验时间,为研究多种外部因素对超导性能的影响提供了技术保障。该综合实验亦是体现知识点之间的关联的一个很好的例子。图 5 展示了如何将该实验在知识、技术和规范 3 个维度分解出相关要素,特别是那些在低年级实验中已用过的技术和规范。

将上述热学实验改革模式进一步推广至其他实验项目,把实验向装置模块化、可视化,仪器数字化、通用化,以及内容要求多层次的适应性改造。例如将磁滞回线实验装置模块化,可方便更换磁性材料,采用 myDAQ 采集数据,通过数字积分不仅还原磁滞回线,获得铁磁材料的磁性参数,还进一步拓展到磁滞损耗测量、磁隙漏磁损耗测量,加深对广义力、广义位移、和广义功的认识^[15]。

2023 年中山大学承办的第九届全国大学生物理实验竞赛(教学),物理与天文学院负责珠海赛区命题,其赛题内容和要求也能反映出我们的物理实验教学理念和教学模式。(2 道基础题和 2

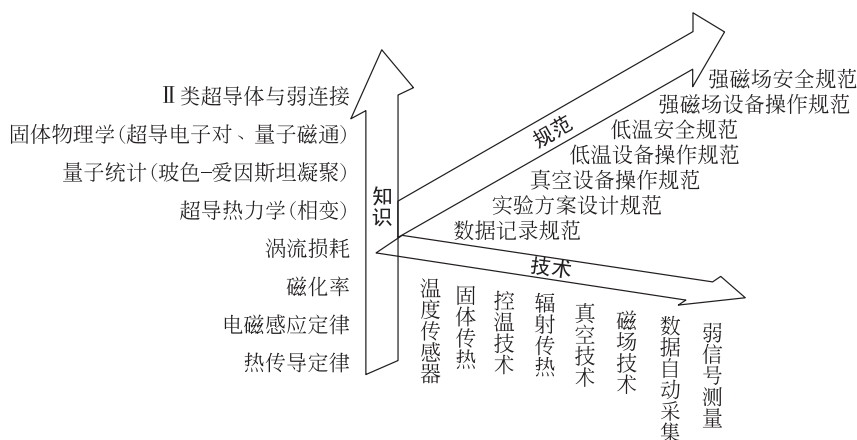


图5 “高温超导电磁性质研究”实验项目中3个维度的实验属性知识谱图

道综合题的解读已分别发表在《物理实验》杂志2024年第2期和第3期。)

4 结语

实验课程建设和一系列有利于深入探究和能力培养的教学改革得到学生肯定,但同时普遍反映实验课程占据时间长,实验报告负担重。这可能是新教学方式要求付出的时间代价。对此,一方面,需要教师加强引导,界定基本要求的必做内容与深入提升的选做内容;另一方面,鼓励好学生挑战选做内容,反过来需要压缩实验项目数量,腾出更多的时间聚焦于提高实验教学质量。尺度如何把控,是我们在下一步需要探索的内容。

总的来说,所建物理实验教学课程体系为中山大学珠海校区新建学院和相关专业的物理实验教学提供了基本保障,同时还选取某些实验项目为试点开展教学改革,取得了一些成效,然而离科学前沿、国家和社会需求人才的培养而言,仍有明显的差距。实验教学改革的路仍很漫长,未来的工作重点将从课程建设转移到内涵式发展上来,提升教师队伍水平、挖掘每个实验项目潜力并提高教学质量。好的教学理念和教改措施,需要优秀的教师才能贯彻到位。

参 考 文 献

[1] 李智,张朝晖.以“科研引领实验教学”理念,推动物理实验教学的改革和团队建设[J].物理实验,2018,38(3):24-27.
LI Z, ZHANG Z H. Improvement of the physical experiment teaching guided by the idea of “leading experiment teaching by scientific research”[J]. Physics Experimenta-

tion, 2018, 38(3):24-27. (in Chinese)

- [2] 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,2021,41(9):23-28.
ZHAO W, WANG Z P, WEI X T, et al. Pilot teaching of elite physics experiment under the background of top-notch talent training[J]. Physics Experimentation, 2021, 41(9): 23-28. (in Chinese)
- [3] 王琦,邱红,谢铁文,等.基于大学物理实验混合式教育模式与评价体系研究[J].物理与工程,2021,31(Z1):19-27.
WANG Q, QIU H, XIE T W, et al. Research on blended education mode and evaluation system based on university physics experiment[J]. Physics and Engineering, 2021, 31(Z1):19-27. (in Chinese)
- [4] 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 base on quantitative simulation[J]. Physics and Engineering, 2020, 30(5):102-106. (in Chinese)
- [5] 廖德驹,沈韩,崔新图,等.基于通用设备和Multisim的虚实结合电学实验教学模式[J].物理与工程,2021,31(1):96-103.
LIAO D J, SHEN H, CUI X T, et al. Virtual-reality combined teaching mode for electric experiments of college physics laboratory based on commonly used instruments and Multisim[J]. Physics and Engineering, 2021, 31(1):96-103. (in Chinese)
- [6] 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):148-158.
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):148-158. (in Chinese)
- [7] 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[M]. 北京:高等教育出版社,2010.
- [8] 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[M]. 北京:高等教育出版社,2023.
- [9] 薛玉琪,何振辉. 用真空杯改进混合法测量冰的熔化热实验[J]. 物理实验, 2021, 41(11):9-13.
XUE Y Q, HE Z H. Measuring the melting heat of ice with a vacuum cup based on the mixing method[J]. Physics Experimentation, 2021, 41(11):9-13. (in Chinese)
- [10] 鹿博,薛玉琪,何振辉. 低温热辐射实验设计及教学方法[J]. 物理实验, 2021,41(4):11-16.
LU B, XUE Y Q, HE Z H. Design and teaching method of an infrared radiation experiment[J]. Physics Experimentation, 2021,41(4):11-16. (in Chinese)
- [11] 何振辉. 锁相放大器噪声测量原理与教学实验设计[J]. 大学物理, 2022, 41(11):22-27.
HE Z H. Principle of noise measurement with lock-in amplifiers and teaching design for laboratory courses[J]. College Physics, 2022, 41(11): 22-27. (in Chinese)
- [12] 李佳明,申玉宽等. 通过电阻热噪声测量玻尔兹曼常数的教学探索[J]. 物理实验, 2023,43(8):29-35.
- LI J M, SHEN Y K, ZHANG H Y, et al. Teaching practice of Johnson noise measurement on Boltzmann constant determination[J]. Physics Experimentation, 2023,43(8): 29-35. (in Chinese)
- [13] 申玉宽,何振辉. 不同温度下电阻热噪声测量方案与电磁屏蔽的改进[J]. 大学物理实验, 2023,36(2):54-58.
SHEN Y K, HE Z H. Improvement of resistance thermal noise measurement and electromagnetic shielding at different temperatures [J]. Physical experiment of college, 2023,36(2):54-58. (in Chinese)
- [14] 何振辉,刘艳芬,赵芳. 从高温超导交流抗磁性实验中学习超导电性的教学探索[J]. 物理实验, 2022, 42(5):35-40.
HE Z H, LIU Y F, ZHAO F. AC diamagnetism experiment of a high temperature superconductor[J]. Physics Experimentation, 2022, 42(5):35-40. (in Chinese)
- [15] 穆翠玲,马波,等. 基于 NI myDAQ 的积木式磁滞回线实验设计与教学实践[J]. 物理实验, 2024,44(4):12-18.
MU C L, MA B, et al. Design and teaching practice of hysteresis loop experiment with building block setup and NI myDAQ[J]. Physics Experimentation, 2024, 44(4): 12-18. (in Chinese)

(上接第 73 页)

- [7] 李先海,李龙江,黄小芬. 基于实验室开放项目的大学生创新人才培养实践[J]. 大学,2021,39:15-17.
LI X H, LI L J, HUANG X F. Practice of cultivating innovative talents of college students based on open laboratory projects[J]. University, 2021, 39: 15-17. (in Chinese)
- [8] 杨佳,吕卅,高晓红,等. 新工科视域下地方高校创新创业能力培养模式研究与实践[J]. 高教学刊,2021,7(28):46-49, 54.
YANG J, LV S, GAO X H, et al. Research and practice on the cultivation model of innovation and entrepreneurship ability in local universities from new engineering perspective [J]. Journal of Higher Education, 2021, 7(28): 46-49, 54. (in Chinese)
- [9] 张凤琴,刘强,林晓珑. 信息技术与大学物理实验深度融合的教学模式研究与探索[J]. 实验技术与管理,2019,36(6): 204-207.
ZHANG F Q, LIU Q, LIN X L. Research and exploration on teaching mode of deep integration of information technology and college physics experiment[J]. Experimental Technology and Management, 2019, 36(6): 204-207. (in Chinese)
- nese)
- [10] 李伟,刘昭廷,吕靖薇,等. 大学物理实验创新实验室建设的探索与实践[J]. 大学物理实验, 2016,29(3):129-132.
LI W, LIU Z T, LV J W, et al. Exploration and study of innovation laboratory construction for university physics experiments[J]. Physical Experiment of College, 2016, 29(3): 129-132. (in Chinese)
- [11] 冯杰,肖桂娜,赵立竹,等. 大学生创新能力培养及大学物理实验室建设实践研究[J]. 物理通报, 2017, 1: 5-9.
FENG J, XIAO G N, ZHAO L Z, et al. Practice research on the Cultivation of university students' innovation ability and the construction of university physics laboratory[J]. Physics Bulletin, 2017, 1: 5-9. (in Chinese)
- [12] 刘忠民,周琳,官盛果,等. 大学物理实验室信息化建设探索[J]. 中国教育技术装备, 2017, 20: 14-16.
LIU Z M, ZHOU L, GUAN S G, et al. Exploration of information construction for university physics laboratories [J]. Chinese Educational Technology Equipment, 2017, 20: 14-16. (in Chinese)