

大学物理设计性、研究性实验在线教学实践

唐艳妮 杨卫军 周战荣 李雪琴 何楚洹 刘 芯

(火箭军工程大学基础部, 陕西 西安 710025)

摘 要 近年由于新冠疫情的影响,很多课程都尝试开展了线上教学,文章从实验课角度对开展大学物理设计性研究性实验在线教学做了具体分析,为大学物理设计性、研究性实验开展及实验课程线上教学提供参考。文章主要从大学物理设计性、研究性实验线上教学实施条件、实施过程、教学效果进行了探索实践和分析。通过对学生调查问卷和感受反馈,分析了大学物理设计性研究性实验在线教学中学生各方面能力培养的问题,同时针对能力培养提出了一些设计性、研究性实验开展的建议。

关键词 物理实验;设计性;研究性;在线教学;开放

ON-LINE TEACHING PRACTICE OF DESIGNING AND RESEARCHING EXPERIMENTS FOR COLLEGE PHYSICS COURSE

TANG Yanni YANG Weijun ZHOU Zhanrong LI Xueqin HE Chuhuan LIU Xin

(Department of Basic Courses, Rocket Force University Of Engineering, Xi'an, Shaanxi 710025)

Abstract Due to the influence of COVID-19, many courses have tried to carry out online teaching recently. From the perspective of experimental class, this paper makes a concrete analysis of the online teaching of designing and researching experiments in college physics, providing reference for conducting such experiments and online teaching. This paper mainly explores and analyzes the implementation conditions, implementation process and teaching effect of on-line teaching practice of designing and researching experiments. Based on the questionnaire and feedback of students, this paper analyzes how to cultivate well-rounded students in the online teaching practice and puts forward some suggestions for it.

Key words physics experiment; design; research oriented; online teaching; opening-up

设计性和研究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,它的主体是学生,由学生自己动手,在实验过程中,认识到这些物理实验反映的物理本质,从而形成正确的物理概念,建立正确的物理规律^[1-2]。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。因为设计性实验所设计的方案、仪器、设备需要通过实验进行研究、改进、调试和验证。而研究性实验则更需要对原理、思路、方案、手段进行认真的设计,因此两者没有严格界限^[3],以下把两者作为同一实验类型讨论。为保证疫情防控期间教学进度和教学质量,我校物理实验中心制定了学生开放性选题、自制

收稿日期: 2021-11-29; 修回日期: 2022-03-29

基金项目: 火箭军工程大学教学研究项目(HJJKTB2021029)。

作者简介: 唐艳妮,女,实验师,主要从事大学物理实验教学研究,研究方向为凝聚态物理,tyn0622@sina.com。

引文格式: 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.

Cite this article: 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)

仪器、撰写论文,教师网络指导的大学物理设计性、研究性实验在线教学模式,获得了较好的教学效果。

1 设计性、研究性实验在线教学实施条件

1.1 教学大纲要求

我校新版《院校教学大纲》提出“在大学物理实验课程中设计性或研究性实验最低学时比例不低于10%”,要求学生要理解实验的设计思想,掌握常用的实验方法;能够完成简单设计性实验方案的设计、实验方法以及仪器选择、测量条件确定等,会做设计性、研究性或具有设计研究性内容的实验;能够按照课题要求,查阅资料、拟定研究方案、完成课题的实验任务。

1.2 基础知识储备

大学物理实验课程一般分两个学期完成,第一学期一般为实验数据处理相关理论、基础性和综合性实验,通过一学期的学习,学生已经掌握了基本的实验方法、实验设计思路、实验结果分析等基本技能,同时大学物理、高等数学等通识课程均已开设,学生有一定的理论基础和数学功底。

1.3 测量条件保障

实验课与理论课在线教学相比,最大的困难在于测量条件保障,目前的智能手机中配置有大量的传感器,如:加速度、压力、磁力计、光强、GPS、陀螺仪等传感器,利用这些传感器可以实现力、热、电、光等实验数据的测量,如phyphox、音频频谱分析仪、声音发生器等手机应用,还有手机的视频拍摄功能、计时功能,这些都为居家开展设计性、研究性物理实验提供了保障。

2 设计性、研究性实验在线教学实施过程

在“非物理类理工学科大学物理实验课程教学基本要求”里指出,“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”,并要求“各校应根据实际情况设置该类型的实验内容”^[4]。所以设计性、研究性实验没有固定的内容限制,基

本宗旨就是以动手操作、解决问题、掌握实验方法和实验思想为主。

2.1 实验选题库拟定

考虑疫情期间,学生居家,没有统一的实验仪器,且是初次接触设计性、研究性实验,大部分学生在选题时会比较茫然,鉴于此,选题方案采取选题资源库和自由选题相结合的方式。实验中心组织教师编写设计性、研究性实验项目选题库,每个实验项目只提供大的研究方向,每个研究方向下按照基础、提升、进阶和选做,逐步提高难度,分阶段设置研究问题,引导学生研究。通过设置分层次实验项目资源库,既能保证学生对研究方向的需求,又让学生有自主研究空间。既能保证基础薄弱的学生可以完成基本的实验任务,又能让有能力的学生有挑战发挥空间。自由选题,指学生可以根据自己的兴趣或擅长的知识领域进行题目设计,如通过变通测量物理量、测量方法、测量仪器等方式设计新的研究内容,或从生活实际出发,研究生活现象。建议参加CUPT竞赛及物理实验竞赛的学生把竞赛题目作为设计性、研究性实验选题,深入研究。

特殊时期,教师在编写实验项目及学生自由选题时主要考虑了两点:第一,实验的可行性。因为疫情期间居家环境,没有专业的实验设备,需要考虑能否用居家材料制作及代替。第二,实验的深度。虽然没有专业仪器,实验精度可以放宽要求,但是设计性、研究性实验的层次是大学物理实验的最高层次,因此,研究的深度要求不能降低,不能只是实验现象观察,重在定量测量和分析,能够写出一篇科技论文。

2.2 实验教学组织

由于实验选题的开放性,每个学生的研究内容不尽相同,因此在教学组织方面,先通过直播,给学生整体介绍设计性、研究性实验的一般研究方法、如何查找文献资料、可能用到的测量工具、常用数据处理软件以及科技论文的撰写要求等,通过总体介绍使学生对设计性、研究性实验的研究过程有基本的感性认识。再通过分组,给学生分配对应的指导老师,负责学生的实验指导全过程。包括初期学生设计的实验方案审核,中期的实验过程把关,最后的实验论文评阅。

由于设计性、研究性实验的目的是培养学生

基本的科研素养和科研习惯,因此教学指导思想是在学生遇到问题时只给学生提供意见建议供学生参考,培养学生自主学习能力,对居家实验中涉及比较多的软件,如手机传感器 phyphox、视频追踪分析软件 tracker、数据处理软件 origin 等,教师通过辅导群推送学习资源如软件安装包,使用说明资料等。

学生根据选择的实验项目,利用日常生活中的常见材料和手机传感器软件,自主设计搭建实验装置,图 1 为学生居家设计研究的部分实验内容。通过亲自设计实验,使学生从单纯的操作者变成设计者,这一角色的转变,使学生尝试了实验从设计、实施、取得结果到撰写论文的全过程。通过课题研究模式培养学生基本的科研素养和科研习惯。既让学生解脱电脑屏幕的束缚,又锻炼了学生的创新思维;既有挑战,又有成就感。

2.3 调查问卷设计和结果分析

由于设计性、研究性实验线上教学是首次尝试,和以往的课堂教学在选题设置、实施指导方面都有所不同,且由于空间隔离,师生无法面对面交流,为了更好地了解学生在此次设计性、研究性实验教学模式的接受程度和实际效果,及时调整教学方案,教学组设计了问卷调查。主要从设计性、研究性实验选题,教学方式、实验周期以及学习中存在的困难等方面进行了问卷设计。

本次调查问卷采用问卷星发出电子问卷 667

份,实际收回有效份数 615 份,回收率为 92.2%。调查对象为正在教学实施的二年级学生,覆盖全部专业,调查的范围足够广泛,结果能全面反映实际情况。整个问卷调查表由 8 道题组成,1~3 题为单选,4~7 题为多选,第 8 题为开放性题。调查结果见表 1。

从问卷调查结果可以看出,在选题来源“1. 你的设计性、研究性实验课题来源是什么?”中,有 53.67%,一半多的学生倾向于自拟课题,另有 39.8% 的学生倾向于从教师给的实验项目资源库中选择课题,说明大部分学生对自主研究的兴趣更高。

在教学方式方面,“2. 你希望怎么进行设计性、研究性实验教学?”大部分学生喜欢完全开放的形式,喜欢自己钻研摸索,在有问题时再向教师寻求指导,少部分学生喜欢半开放的形式,希望教师能针对课题设置具体的研究问题,自己按照问题导向查资料研究。因此在设计性研究性实验中,实验的主动权要交到学生手中,让学生有足够的动手空间和思考空间,老师主要起到点拨、引导、把关和鼓励的作用。

设计性、研究性实验的时间周期相对于基础性实验要更长一些,在本次实验周期设置上,最初计划 14 天完成 1 个设计性、研究性实验,但通过“3. 你需要的实验周期是多久?(单选)”问卷结果可以看出,大部分学生觉得时间不够,这和疫情期

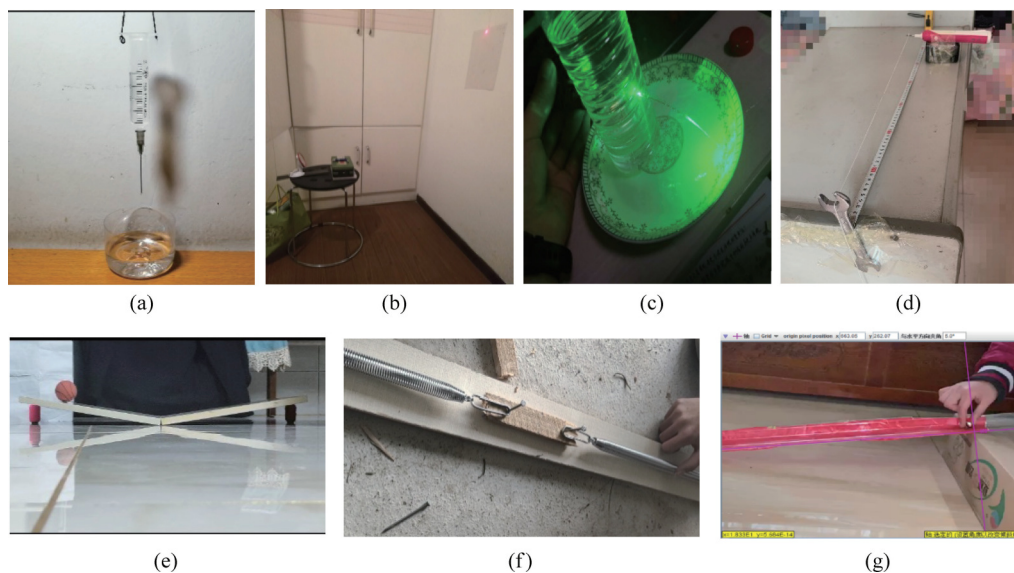


图 1 学生居家设计研究的部分实验内容

(a) 滴重法测液体表面张力;(b) 金属丝杨氏弹性模量测量;(c) 导光水柱研究;(d) 用驻波法测振动频率;(e) 视频追踪法分析小球的平板运动;(f) 简谐振动研究;(g) 用 Tracker 分析运动物体加速度

表 1 问卷调查的内容及统计结果

题目	选项	人数	比例
1. 你的设计性、研究性实验课题来源是什么? (单选)	A. 自拟课题	331	53.82%
	B. 从教师设置的实验项目中选择	244	39.67%
	C. 历年 CUPT 或物理实验竞赛题目	23	3.74%
	D. 其他	17	2.76%
2. 你希望怎么进行设计性、研究性实验教学? (单选)	A. 自己选题,有问题主动找教师沟通	390	63.41%
	B. 教师设置问题,个人查资料按照问题导向研究	225	36.59%
3. 你需要的实验周期是多久? (单选)	A. 10 天	48	7.8%
	B. 14 天	80	13.01%
	C. 20 天	487	79.19%
4. 关于设计性、研究性物理实验,你希望得到哪方面的指导? (多选)	A. 理论分析	278	45.2%
	B. 实验选题	354	57.56%
	C. 数据处理软件	401	65.2%
	D. 论文书写	286	46.5%
	E. 其他	52	8.46%
5. 当你不知如何开展设计性、研究性实验时,你会怎么做? (多选)	A. 查阅文献	510	82.93%
	B. 与教师沟通寻求帮助	93	15.12%
	C. 与同学交流寻求帮助	410	66.67%
	D. 其他	71	11.54%
6. 设计性、研究性实验与实验室常规实验相比有什么差异? (多选)	A. 更有难度	493	80.16%
	B. 更加容易	6	0.98%
	C. 更有趣味性	232	37.72%
	D. 更有挑战性	298	48.46%
7. 你的设计性、研究性实验没有按时完成的原因是什么? (多选)	A. 不感兴趣,不想做	23	3.74%
	B. 太难了,不会做	237	38.54%
	C. 没有时间做	98	15.93%
	D. 没有研究方向	313	50.89%
	E. 没有电脑处理数据	65	10.57%
	F. 实验进展不顺利	323	52.52%
	G. 其他	76	12.36%

间各个课程线上教学追赶进度,排课过满有关。为了保证教学效果,教学实施中适当延长了实验周期至 20 天。

从“4. 关于设计性、研究性物理实验,你希望得到哪方面的指导? (多选)”调查结果可以看出,学生在数据处理软件使用方面能力薄弱,指导需求比例最大,其次是实验选题、论文书写和理论分析。选题困惑主要是学生虽然有自拟课题的欲望,但是在寻找课题方向时又比较茫然,不知从何

下手,这和学生从小到大长期以来被动接受的学习模式有关。论文书写方面的问题属于共性问题,可以以参考论文为例给学生介绍科技论文书写的一般要素、详略重点、图表比例等。由于学生研究的课题方向不同,对应的理论分析差异较大,属于个性问题,需要教师个别辅导,但考虑学生人数较多,在有问题时更鼓励学生相互讨论,如建立了 origin 软件学习群、CUPT 题目讨论群等,有相同问题的学生可以共同讨论,不仅可以相互解决

问题,消除一个人单打独斗的无助感,也能让老师指导更有重点,效率更高。

从“5. 当你不知如何开展设计性、研究性实验时,你会怎么做?(多选)”问卷结果可以看出,学生在实验遇到瓶颈的时候,他们主要是通过查找文献和与同学交流来解决,比例分别为 82.93% 和 66.67%,最后才是向教师寻求帮助或想其他方法,说明学生有自己解决问题的能力,和教师相比,与同学探讨交流可能更加轻松自在。同时也提示老师,做到亦师亦友,可以更好地和学生交流。对于基础较差,性格内向的学生,老师更要多关注以便及时发现问题给予指导,多鼓励增强学生的自信心。

从“6. 设计性、研究性实验与实验室常规实验相比有什么差异?(多选)”和“7. 你的设计性、研究性实验没有按时完成的原因是什么?(多选)”结果可以看出,和传统的基础性、综合性实验相比,学生觉得设计性、研究性实验的难度更大,但认为这种开放式的教学形式更有趣味性,也更有挑战性。而导致学生没有按时间节点完成的原因占比较大的三个方面分别是:“研究方向不明确”、“实验进展不顺利”和“太难了不会做”,针对学生反应的问题,教学组经过讨论拟定了以下解决方案。

(1) “研究方向不明确”:在课程开始,实验中心组织教师编写了设计性、研究性实验项目选题库,但基于锻炼学生的实验设计能力,每个实验项目只提供了大的研究方向,所以对于长期处于被动接受学习的学生而言,感觉会无从下手。针对此问题,鼓励学生把自己的专业特长拓展到物理研究中,如有的学生熟悉作图软件或编程,可以发挥优势制作实验仿真软件或物理理论演示动画;有的学生理论基础扎实,建议他们利用所学知识解释一些有趣的物理现象;还可以介绍物理学科的前沿发现、应用或仪器设备。

(2) “实验进展不顺利”:此问题表明该部分学生已经有了明确的研究方向,且已开展研究,只是在实验过程遇到了瓶颈,此类情况老师要了解学生卡住的问题所在,是时间紧张还是技术问题,再各个击破。

(3) “太难了不会做”:初次接触设计性研究性实验,且要居家完成,部分学生的畏难情绪较重,鉴于此,教学组建议这部分学生基于学过的物

理理论和基础性实验自制仪器完成实验测量。比如基于光的衍射理论自制仪器研究单缝衍射、单丝衍射、圆孔衍射、光栅衍射等;基于基础性实验三线摆测转动惯量,让学生利用居家材料制作仪器研究三线摆中各因素对转动惯量测量的影响等,通过重新设计基础性实验可以培养学生在原有知识基础上获得新知识的能力,让学生动手设计一些基础性实验研究,不仅可以缓解学生的畏难情绪,也让学生不被书本传统的知识所束缚,大胆创新。同时为活跃学习氛围,激发学生兴趣,鼓励学生在微信群分享趣味演示实验,如图 2 所示,用各种材料制作蛇摆、“永不沉没”挑战、“搓锅”接力等,在理解物理原理的同时,也提高了学生的实验参与度。

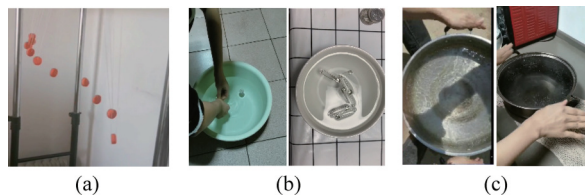


图 2 趣味演示实验

(a) 蛇摆; (b) “永不沉没”挑战; (c) “搓锅”接力

3 教学效果和启示

疫情期间的的设计性、研究性实验,在教学内容、课堂主体和方法手段方面和以往的教学模式有所不同,是一次探索尝试。为了给后期“以学生为中心”的大学物理实验教学改革积累经验,要求学生上交实验论文的同时写下自己做实验的感受,通过学生上交的自制仪器视频资料、论文完成度和感受反馈发现,此次设计性、研究性实验线上教学对提高学生综合能力有很大帮助。图 3 为部分学生的论文结语感受。

3.1 实验设计和创新能力

在以往的设计性、研究性实验中,教师会根据设置的实验项目提供一些实验仪器,学生根据自己设计的实验方案选择仪器搭建实验平台完成数据测量,这个过程虽然也能锻炼学生的实验设计能力,但由于实验选题不够丰富,大部分学生的实验设计方案大同小异,缺少创新设计。

在此次设计性、研究性实验教学中,由于没有固定的实验仪器,实验选题相对比较开放,给了学

4 结语

这次的实验并没有做成功,关键在于配置折射率梯度的溶液失败了。对于自己来说还是有一些失落,尝试了三次配置溶液,因为溶液需静置六小时,所以总共花的时间还是挺长的,害怕错过了时间也曾半夜起来用激光笔试一试,溶液有没有到达要求。每一次看见激光经过溶液都是“直直”的过去,再换不同的角度高度入射特别期待能看见它变“弯”。在网上搜的视频看见别人做的感觉挺简单,实际操作起来才明白,折射率梯度的溶液真的不那么容易配置。经过此次实验后,深深的为科学家们那种被失败折磨千次仍继续的毅力所打动。

与其要千篇一律的成功,不如经历不可复制的失败。这次实验虽然失败了,但是还是挺有收获的。学会了怎么通过网络查找自己需要的资料,对于外文的文献可以通过很好的翻译软件进行学习;知道了例如 Tracker 等软件来对实验结果进行处理,为后续的学习储备了一些经验。

5. 结语

因为疫情不得不在家中自制试验器材,自己动手做实验,更加深刻地感受到了实验的乐趣。通过这次单摆测重力加速度的实验,了解了重力加速度的含义及并掌握了利用单摆测量重力加速度的测量方法,利用家中现有的材料就可以测量出当地重力加速度,并有了更加直观了解,收获满满。

7. 结语

本实验在家利用简单的器材测量了重力加速度,相较于以往在实验室用单摆测重力加速度,利用 phyphox 手机软件,在数据处理方面更加简便,但是存在的误差较多,较大,这也导致了第一次实验的失败。而在第二次实验中,存在的误差仍然较大,不过勉强可以接受。最后进行了大角度单摆周期公式的猜测,有理有据,令人遗憾的是家中条件有限,实验精度确实不高,没能对公式进行检验。总之,此次实验在家中,我做得十分艰难,但同时也体会到了在家做实验的乐趣。

4. 结语

实验中学生自己在家中寻找实验器材,自行构思实验步骤完成了对一个基础而又重要的测量小球加速度实验。本实验不仅可以利用现代技术精确测量实验结果,还可以帮助学生提升对现代化科技产品的使用技巧,实验内容自由度高,趣味度高。手机录取实验视频,再用电脑的 tracker 软件进行分析,不仅仅考验了学生的物理实验素养,更提高了学生将现代化科技灵活运用科技素养,不仅促进了对于生活中见怪不怪的物理现象的思考,也提高了学生的动手实践能力。

图 3 部分学生论文结语感受

生更多自由发挥的空间。有的学生自制了蛇摆并研究了蛇摆的运动规律,有的学生用手机屏作为光栅测量手机屏的分辨率,有的学生研究了水泵工作原理,还自制了小型水泵装置。相对开放的教学环境,使学生的潜能得到了开发,个性得以张扬、创新意识得到了提升、创造能力得到了培养。但要使开放性的实验选题在后期实施中有操作性,必须要有对应的教学组织和学习环境。可以尝试课堂讲授和网络指导结合的教学组织形式。构建稳定、高效和可持续发展的实验室开放模式,给学生提供开放的探索实践时空环境。

3.2 工具和软件的操作技能

实验数据和图像处理是物理实验的一个重要组成部分,提高数据处理能力也是提高实验能力的一部分^[5]。在以往的大学物理实验数据处理中,教师经常讲的方法有列表法、逐差法、作图法和最小二乘法。学生在数据处理时最常用的是列表法、逐差法和作图法,在用作图法作图时通常选择坐标纸手工作图,不仅耗时,而且误差大;最小二乘法,因为计算量大,学生很少使用。随着计算机应用技术的发展以及设计性、研究性实验的开展,利用计算机软件处理实验数据越来越受到重视。目前在大学物理实验的数据处理中,如误差分析、曲线拟合、画图等,都大量采用了计算机工具^[6-8]。

本次居家设计性、研究性实验的选题大部分都是基于手机传感器如 phyphox 和视频追踪软件 tracker 等工具完成的,且要求学生以学术论文形式上交实验报告,还给学生推荐了 excel、origin、

matlab 三种物理实验中常用数据处理软件^[9-11]。利用计算机软件处理实验数据的可行性高、效率高、时代性强^[12-13],从学生日常数据处理、学生竞赛到毕业论文乃至以后的工作中都会用到。所以,后期可以尝试在物理实验的第一学期让学生掌握基本的数据处理方法,养成严谨求实的习惯,在第二学期要求学生用软件处理实验数据,可以使学生较快、较早的接触一些新思想、新技术,能够跟上时代前进的步伐。教师可以通过实验绪论课介绍相关软件,利用选修课、实验中心网站发布视频课和学习资源等给学生讲解数据软件使用方法。

3.3 自主学习能力

要完成一个设计性、研究性实验,从实验选题到查找资料再到实验设计最后撰写论文,整个过程中,学生需要学习文献检索、文献中有效信息的提取,测量工具、数据处理软件的使用以及学习科技论文的撰写方法和技巧。通过亲自设计实验,使学生从单纯的操作者变成设计者,这一角色的转变,使学生从被动接收转变为主动获取,过程中虽然有教师指导,但是大部分工作需要学生去摸索和总结经验,这个过程正是学生自主学习能力的培养过程。

在当今世界科技迅猛发展的背景下,各种新知识和新技术不断涌入到社会的各个领域。知识经济时代的到来使人类迈入了学习型社会,传统意义上的学习已无法使个体应对科学技术与社会迅猛发展带来的挑战,“学会学习”“终身学习”将成为一个人毕生面临的发展任务^[14-16]。学生在学

校的时间是非常有限的,有教师陪伴的学习只是人生的一个阶段,在人生更长的阶段,都需要自主学习。因此在后期的大学物理设计性、研究性实验教学中,要从实验内容设置、教学方法手段、实时监督、评价和激励等方面给学生营造有利于自主学习的环境。

3.4 抗挫折能力

常规的实验室做实验,都是教师提前把实验仪器调试好,且现代仪器的集成度高,稳定性好,学生在实验时只需要按步骤操作基本都能顺利完成实验。但此次居家实验中,由于没有现成的实验仪器,学生需要根据自己的实验方案选择材料替代仪器或自制实验仪器,给学生带来了很大的挑战,也使学生感受到了实验室不曾体验过的失败。实验失败了,学生需要找到失败的原因,不断改进,经过反复磨炼,最终取得的成功才更有成就感。即使最终没有达到预期的结果,也从中学习了经验,磨炼了坚毅的品格。

俄国著名物理学家列别捷夫说:“平静的湖面练不出精悍的水手,安逸的环境造不出时代的伟人”。这些失败的体验可以让学生成长,在以后的工作和生活中才能有更强的抗挫折能力,但在学生实验受到失败打击一蹶不振时,教师要及时鼓励,要让学生树立勇于面对挫折和战胜挫折的信念,成为一个坚强的人,这也是大学物理实验课程思政的教学目标。

4 结语

在此次特殊背景下实施了以开放性选题、自制仪器、网络指导、论文撰写为基本内容的大学物理设计性、研究性实验在线教学,通过调查问卷及时了解学生在实验中的困难和建议,进行针对性指导;通过学生上交的自制仪器资料、实验论文和感受反馈了解了此次线上教学效果。学生在实验设计创新能力、工具和使用技能、自主学习能力、抗挫折能力方面都得到了锻炼,综合素质也有一定的提高。虽然此次在线教学效果良好,但也有些不尽如人意的地方,如学生居家独立完成实验,单打独斗,缺少团队协作能力的培养;居家实验器材有限,实验项目主要以力学、声学、光学类为主,热学和电磁类实验项目偏少,实验选题多样性受限。但通过实践探索,为后期的设计性、

研究性实验教学改革积累了宝贵经验。

参 考 文 献

- [1] 乔宪武. 设计性物理实验的教学研究[J]. 教育教学论坛, 2013(27):229-230.
QIAO X W. Teaching research of design physics experiment [J] Education and teaching forum, 2013(27): 229-230. (in Chinese)
- [2] 任红, 吴本科, 何于江. 加强物理实验中设计性内容的尝试[J]. 实验室研究与探索, 1996, 04:11-12.
REN H, WU B B, HE Y J. An attempt to strengthen design content in physical experiments[J]. Laboratory Research and Exploration, 1996, 04: 11-12. (in Chinese)
- [3] 张映辉. 设计性、研究性实验题目设置和教学方法初探[J]. 大学物理实验, 2015, 28(1):107-109.
ZHANG Y H. A preliminary study on design and research experiment topic setting and teaching methods[J]. University Physics Experiment, 2015, 28(1): 107-109. (in Chinese)
- [4] 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.
- [5] 杨骏. 物理实验数据的线性化图像处理浅析[J]. 物理通报, 2016, 35(6):65-67.
YANG J. Analysis of linearized image processing of physical experiment data[J]. Bulletin of Physics, 2016, 35(6): 65-67. (in Chinese)
- [6] 樊洋, 姚陆峰. 计算机辅助数据处理在大学物理实验中的应用[J]. 实验室科学, 2013, 16(6):48-49.
FAN Y, YAO L F. Application of computer aided data processing in university physics experiments[J]. Laboratory Science, 2013, 16(6): 48-49. (in Chinese)
- [7] 于新伟, 朱王平, 李雪梅. 不同计算机软件在实验数据处理中对误差影响的比较[J]. 大学物理实验, 2016, 29(4):98-100.
YU X W, ZHU W P, LI X M. Comparison of the influence of different computer software on errors in experimental data processing[J]. University Physics Experiment, 2016, 29(4): 98-100. (in Chinese)
- [8] 曲冰, 汪静, 迟建卫. 大学物理实验数据的计算机软件处理[J]. 装备制造技术, 2016(1):199-200, 207.
QU B, WANG J, CHI J W. Computer software processing of university physics experiment data[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2016(1): 199-200, 207. (in Chinese)
- [9] 王达, 熊彩云, 涂清, 等. 3种常用物理实验数据处理软件的比较研究—以霍尔效应实验数据处理为例[J]. 物理通报, 2017(S2):123-125.
WANG D, XIONG C Y, TU Q, et al. A comparative study of three common physical experimental data processing software—Taking Hall effect experimental data processing as an example[J]. Bulletin of Physics, 2017(S2): 123-125. (in Chinese)

(下转第70页)

- DAI Y R, DONG K, ZHOU Y Q. Reform and exploration of the curriculum system of university physics and physics experiment courses under the guidance of "new engineering and technical disciplines" projects[J]. Physics and Engineering, 2021, 31(4): 15-19. (in Chinese)
- [12] 何丽娟, 陈春天, 杨文龙, 等. 物理教学中开展研究性教学模式的探索[J]. 物理与工程, 2018, 28(S1): 192.
HE L J, CHEN C T, YANG W L, et al. Exploration of research teaching model in physics teaching[J]. Physics and Engineering, 2018, 28(S1): 192. (in Chinese)
- [13] 杨兵初, 徐富新, 周聪华. 课堂教学方法改革是创新教育的关键[J]. 物理与工程, 2020, 30(04): 42-47.
YANG B C, XU F X, ZHOU C H. Reforming the classroom instruction method is the key of the innovation education[J]. Physics and Engineering, 2020, 30(4): 42-47. (in Chinese)
- [14] 王海鹏. 液态金属结构与性质[M]. 北京: 高等教育出版社, 2021.
- [15] 王磊. 静电悬浮条件下液态锆与钛基合金的快速凝固过程研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2020.
- [16] WANG H P, LUO B C, WEI B. Molecular dynamics calculation of thermophysical properties for a highly reactive liquid[J]. Physical Review E, 2008, 78(4):
- [17] YUAN Z F, MUKAI K, HUANG W L. Surface tension and its temperature coefficient of molten silicon at different oxygen potentials[J]. Langmuir, 2002, 18(6): 2054-2062.
- [18] ZHOU Z, MUKHERJEE S, RHIM W-K. Measurement of thermophysical properties of molten silicon using an up-graded electrostatic levitator[J]. Journal of Crystal Growth, 2003, 257(3): 350-358.
- [19] RHIM W-K, OHSAKA K. Thermophysical properties measurement of molten silicon by high-temperature electrostatic levitator; Density, volume expansion, specific heat capacity, emissivity, surface tension and viscosity[J]. Journal of Crystal Growth, 2000, 208(1): 313-321.
- [20] PRZYBOROWSKI M, HIBIYA T, EGUCHI M, et al. Surface tension measurement of molten silicon by the oscillating drop method using electromagnetic levitation[J]. Journal of Crystal Growth, 1995, 151(1): 60-65.
- [21] FUJII H, MATSUMOTO T, NOGI K, et al. Surface tension of molten silicon measured by the electromagnetic levitation method under microgravity[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2000, 31(6): 1585-1589.
- (上接第 63 页)
- [10] 王畅, 蒋礼林, 王乐新, 等. 计算机辅助大学物理实验的实践与探索[J]. 贺州学院学报, 2011(3): 146-148.
WANG C, JIANG L L, WANG L X, et al. Practice and exploration of computer aided university physics experiments[J]. Journal of He Zhou University, 2011(3): 146-148. (in Chinese)
- [11] 何学敏, 李斌, 陈伟, 等. 浅论软件作图在物理实验数据处理中的必要性[J]. 科教文汇(上旬刊), 2020, No. 490(4): 76-77.
HE X M, LI B, CHEN W, et al. On the necessity of software mapping in data processing of physical experiments[J]. Science, education and culture (Early Issue), 2020, No. 490(4): 76-77. (in Chinese)
- [12] 张弘强. 大学物理实验数据处理方法改革的探索与实践[J]. 赤峰学院学报: 自然科学版, 2015(8): 255-257.
ZHANG H Q. Exploration and practice of the reform of data processing methods for university physics experiments[J]. Journal of Chifeng University: Natural Science Edition, 2015(8): 255-257. (in Chinese)
- [13] 董朝贤. 大数据时代下计算机软件技术的应用分析[J]. 信息与电脑, 2019, 421(3): 82-83.
DONG C X. Application analysis of computer software technology in the era of big data[J]. Information and Computer, 2019, 421(3): 82-83. (in Chinese)
- [14] 于晓科, 孙伟峰, 程明, 等. 课堂教学中学生自主学习能力的培养策略研究[J]. 神州, 2019(10): 186-186.
YU X K, SUN W F, CHENG M, et al. Research on the cultivation strategies of students' autonomous learning ability in classroom teaching[J]. Shenzhou, 2019(10): 186-186. (in Chinese)
- [15] 翟焕香, 王泽云, 马立振. 学生自主学习能力培养研究[C]. 教师教学能力发展研究科研成果集(第八卷). 2017.
- [16] 徐冬梅. 浅谈学生自主学习历史能力的培养[J]. 新教育时代电子杂志(教师版), 2017, 000(27): 153.
XU D M. Talking about the cultivation of students' autonomous learning history ability[J]. New Education Times Electronic Journal (Teacher Edition), 2017, 000(27): 153. (in Chinese)