



# 现代控制理论线上实验教学研究探索

吴冬梅, 丁洁

(南京邮电大学 自动化学院、人工智能学院, 南京 2100123)

**摘要:** 为保证实验不受时间和空间的限制, 使线上实验教学取得与线下实质等效的教学效果, 该文以现代控制理论课程的线上实验教学为试点, 构建了“课前—课中—课后”三段式在线实验教学模式, 从实验设计、实验流程、实验实施与步骤、成绩考核等多方面进行了阐述。经过两轮的教学实践结果表明, 线上实验教学模式能够促进学生理论知识的理解, 提高学生的学习能动性, 有效提升学生的工程实践能力和创新能力。

**关键词:** 线上实验教学; 现代控制理论; 工程实践能力; 仿真

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230212

## Research and Exploration on Online Experimental Teaching of Modern Control Theory

WU Dongmei, DING Jie

(College of Automation & College of Artificial Intelligence, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** To achieve the teaching effect that the online experimental teaching is essentially equivalent to the offline teaching regardless of time and space limitations, a three stage online experimental teaching mode of “before class, during class and after class” is constructed by taking the online experimental teaching of the modern control theory course as a pilot. This paper expounds the design, flow, implementation and steps, and assessment of online experiment. Through two rounds of teaching practice, the results show that online experimental teaching can help students better understand theoretical knowledge, stimulate the enthusiasm of students in learning, and ensure that students' engineering practice ability and innovation ability are effectively improved.

**Key words:** online experimental teaching; modern control theory; engineering practice ability; simulation

2008 年加拿大学者提出了慕课教育这一概念, 2013 年起国内部分高校开始慕课教育的研究与探索<sup>[1]</sup>, 在近 10 年的时间中持续推进在线开放课程建设, 使在线教育与学习在高校得到了长足发展。在三年疫情期间, 在线教学出现了井喷式发展, 保证了高校教学活动的顺利实施<sup>[2-4]</sup>。随着信息技术与教育理论的深度融合, 线上与线下相辅相成的教学模式已成为高校教学的新常态。实现线上与线下教学的实质等效一直是我们的目标与难点<sup>[5]</sup>。

依据南京邮电大学自动化专业的本科培养方

案, 自动化类专业的培养目标之一是培养能够在自动化及相关领域从事系统分析、设计、研究、开发、经营、管理等工作的高素质专门技术人才。实验教学在人才培养过程中占有重要的地位, 在自动控制原理、现代控制理论、运动控制系统、过程控制、计算机控制系统等专业核心课程中均设有实验环节。通过实验教学, 能够加深学生对理论知识的理解, 提高动手操作能力和培养创新意识, 这是理论教学不可比拟的。

大信息背景下, 计算机、互联网与教育的交叉融合加快了线上实验教学的进程<sup>[6-8]</sup>, 尤其是无

收稿日期: 2023-04-17; 修回日期: 2024-03-06

基金项目: 教育部产学合作协同育人项目(220900457153226, 220904985163004); 南京邮电大学教学改革研究项目(JG00522JX67)。

作者简介: 吴冬梅(1983-), 女, 博士, 副教授, 主要从事最优控制理论及应用方面的研究。E-mail: wudm@njupt.edu.cn

需借助实验设备的虚拟仿真实验平台建设如火如荼。发达国家的虚拟实验研究起步早,且已十分普及。2004年西班牙和英国着手研究虚拟仿真,并将其用于本科教学。同年约翰霍普金斯大学构建了基于Java技术的虚拟物理实验项目。麻省理工学院建立了在线实验室WebLab,把硬件设备通过网络连接起来,能够同时供数千学生进行线上实验<sup>[9]</sup>。我国虚拟仿真实验研究虽起步较晚,但发展迅猛,仅2017—2020年,教育部就遴选出了千余项国家虚拟仿真实验教学项目,服务高校人才培养<sup>[10]</sup>,如浙江大学的网络实验室可以实现远程实验和设备共享<sup>[11]</sup>,北京航空航天大学(FPGA)在线实验平台能够实现计算机相关的实验设计和结果评估<sup>[12]</sup>。线上实验不受场地、时间和次数的限制,为解决由突发公共卫生事件造成的停课提供了一种有效替代方案,同时也为实验教学的多样化、多元化、自主化提供了借鉴。

本文以“现代控制理论”的实验教学实施情况为例,探索线上实验教学模式,改革实验流程、考核方式等各方面内容,取得了与线下实验教学实质等效的教学效果。

## 1 课程概述

“现代控制理论”是自动化专业课程体系中的专业基础核心课<sup>[13]</sup>,旨在培养学生利用状态空间分析法对系统进行建模、可控性与可观性分析、状态反馈控制律设计等,以分析改善复杂控制系统的动态和稳态性能。

课程共计40学时,其中包含4学时的实验,实验教学安排如表1所示。实验教学的目的在于通过验证性实验和综合性设计实验,使学生进一步理解现代控制理论的内容,掌握自动控制系统状态空间法建模、动态和稳态性能分析、状态反馈控制和最优控制设计,提高针对复杂工程系统的分析和设计能力。验证性实验是给定被控对象的数学模型与最优性能指标,根据系统类型及要求设计线性二次型最优控制律。根据实验结果,验证理论结果并深入理解性能指标的含义。综合性实验是给定被控对象模拟电路图,首先根据系统闭环极点配置要求,设计一状态反馈阵,使其闭环系统极点配置在给定值处;然后根据状态观测器设计的要求,设计全维状态观测器,并使观测器的极点配置在给定值处;最后根据实验结果,分析各种极点配置方法对系统的影响。

表1 实验环节教学安排

序号	实验名称	实验类别	学时
实验一	状态反馈与状态观测器	综合	2
实验二	线性系统二次型最优控制律	验证	2

## 2 线上实验教学方法及实施

2022年春季“现代控制理论”的实验教学采取了线上线下相结合的教学模式,这是该课程从未有过的教学体验。考虑到“现代控制理论”的课内实验学时占比较少,且不需线下实验设备,由MATLAB仿真即可完成,因此实验内容按照原实验大纲要求不变。在校学生参加线下实验,而针对未返校学生,建立临时的线上课堂,利用腾讯会议、QQ等平台直播教学,如图1所示。为了保证线上实验教学的质量,教师需在课前、课中及课后3个阶段做好教学准备,设计线上实验的教学环节,具体实施方案如图2所示。

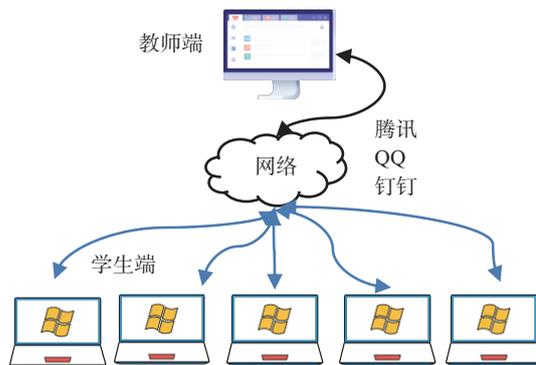


图1 线上实验教学信息交互示意图

### 2.1 硬件保障

远程教学或实验离不开硬件设备及互联网技术的支撑。教师与学生按照实验教学大纲要求,提前调试好硬件设备,如电脑、摄像头、话筒等,确保网络运行顺畅,无延迟,无断网。同时要求学生检查自己的学习环境及硬件,并提前测试,保障线上实验能够顺利进行。

### 2.2 软件保障

随着教育信息化的发展,出现了雨课堂、腾讯会议、QQ课堂、钉钉等多种远程授课软件工具。为了保证教师与学生之间的远程快速高效沟通,线上实验教学过程中教师可以充分利用上述软件教学平台进行直播授课,也可以通过在线签到、测验等辅助功能掌握学生的基本学情。另外课前教师建立微信课程群或QQ课程群,发布线上实验的时间,分享实验教学资料,也便于课后学生与教师互动交流。

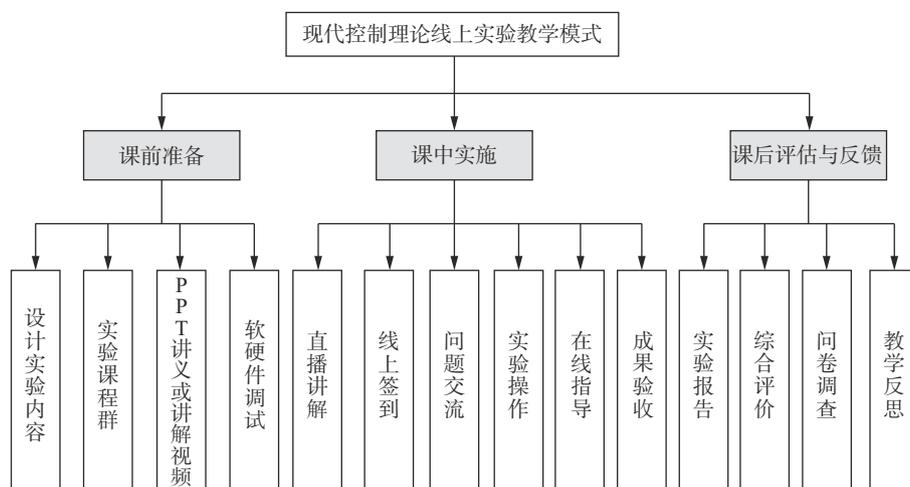


图2 教师层面的线上实验“课前-课中-课后”分段式教学模式

### 2.3 课前准备

教师认真核对实验指导书, 针对线下线上教学模式的转变, 调整教学流程、实验内容及要求。然后将实验目的、实验原理、实验内容、实验设备、实验步骤、注意事项等要点进行细化、切分, 制作讲解 PPT 或演示短视频。至少提前 1 周将实验指导书等电子资料发布到课程群, 引导学生提前对实验目的、实验内容、实验步骤等进行预习, 以便在正式上课时跟上教师的进度。

与传统实验教学相比, 线上实验教学可以不受时间和地点限制。按照实验教学的进度, 学生灵活安排时间学习相应的线上实验教学资源。自学过程中遇到任何问题, 通过课程群或其他线上教学工具反馈给教师, 教师根据情况予以答复或进行一对一指导。

### 2.4 直播讲解

在授课过程中, 教师采用腾讯会议等教学工具, 以屏幕分享、直播等形式对实验原理与实验步骤进行详细解说, 就实验中常见错误问题及注意事项做重点强调。实验课全程要求学生打开摄像头, 以便教师监控学生学习状态, 教师不定时使用腾讯会议签到功能监督学生听课状态, 学生在实验中出现问题及时与教师沟通, 教师引导学生分析与解决问题。

### 2.5 过程管理

利用腾讯会议的签到功能查看学生课堂在线的情况, 另外腾讯会议的录制功能可以保存教师的授课视频, 方便学生回看教师的上课课件及讲解, 以更好地把握重点难点和注意事项。学生做完实验后, 可在腾讯会议举手示意“已完成实验, 请老师验收”, 并通过屏幕共享演示仿真过程及结果。

任课老师通过学生的反馈可以清楚地了解实验的实施情况和学生掌握的程度。从 2022 年春季的效果反馈可以看出, 线上实验的教学效果令人满意。

### 2.6 考核与评价

线下实验的考核方式多以实验完成情况和实验报告作为学生的评分依据, 而这类结果性评价指标无法清楚地了解实验具体实施情况和学生实际掌握程度。因此线上实验考核摒弃单一的评价标准, 采用多元化考核方式对学生进行综合评价, 适当调整考核比例。课前实验内容预习占 10%; 实验实施过程中, 操作步骤及互动交流占 20%, 课堂签到占 10%; 实验结束后, 实验完成及验收情况占 20%, 实验报告撰写规范性及完整性占 40%。多元化的考核指标结合线上线下的教学特点, 能够有效提高评分的公正性与合理性<sup>[14]</sup>。

## 3 实验教学效果评价和实验成绩考核评定

### 3.1 实验教学效果反馈

特殊时期, 通过建立与实验教学大纲相匹配的线上实验教学资源, 借助线上教学平台圆满达成了实验教学目标。课程结束后我们对 2022 年春季和 2023 年春季的教学情况满意度进行了问卷调查, 共 273 名学生参与, 其中 65 人采用线上实验教学, 208 人采用线下实验教学, 结果如表 2 所示。其中, 第 1~5 项指标面向全体学生进行问卷调查, 而第 6 项指标仅针对线上实验的同学进行调研。由表 2 可见, 学生对实验教学内容和教学方式是满意的, 达到了实验教学大纲规定的教学目标及要求。部分学生对现有实验教学内容及安排提出了一些建议和意见, 我们应适当予以考虑。

表 2 2022 年和 2023 年线上、线下实验教学满意度调查

序号	评价指标	2022 春电气工程及其自动化专业						2023 春自动化专业						2023 春电气工程及其自动化专业(独立学院)										
		线下(87人)		线上(18人)		线下(49人)		线上(20人)		线下(72人)		线上(27人)		线下(72人)		线上(27人)								
		基本 同意 (%)	不同意 (%)	基本 同意 (%)	不同意 (%)	基本 同意 (%)	不同意 (%)	基本 同意 (%)	不同意 (%)	基本 同意 (%)	不同意 (%)	基本 同意 (%)	不同意 (%)	基本 同意 (%)	不同意 (%)	基本 同意 (%)	不同意 (%)							
1	教师对在线教学工具使用熟练,态度认真,能够提前做好教学准备	97.70	2.30	—	—	100.00	—	—	98.00	2.00	—	—	95.00	5.00	—	—	97.22	2.78	—	—	100.00	—	—	
2	实验指导书内容完整,覆盖了现控的关键知识点	96.55	2.30	1.15	—	94.44	5.56	—	93.90	6.10	—	—	95.00	5.00	—	—	95.83	2.78	1.39	—	96.30	3.70	0.00	0.00
3	实验条件可满足实验要求	100.00	—	—	—	100.00	—	—	100.00	—	—	—	100.00	—	—	—	100.00	—	—	—	100.00	—	—	—
4	教师能够有序组织与管理课程秩序,及时关注学生学习状态	95.40	2.30	2.30	—	83.33	16.67	—	96.00	2.00	2.00	—	85.00	15.00	—	—	95.40	2.30	2.30	—	81.48	11.11	7.41	7.41
5	实验教学达到了原定的教学目标和要求	98.85	1.15	—	—	88.89	11.11	—	96.00	4.00	—	—	90.00	10.00	—	—	98.85	1.15	0.00	—	88.89	11.11	—	—
6	线上实验的教学效果及体验总体满意	—	—	—	—	83.33	11.11	5.56	—	—	—	—	85.00	10.00	5.00	—	—	—	—	—	83.33	11.11	5.56	5.56

对实验教学的意见或建议  
 1)希望线上实验时间能更加灵活,实验完毕可以提前下课;  
 2)实验被控系统能更贴近实际工程应用实例

与2022年相比,2023年自动化专业学生的教学满意度有所提高,而独立学院学生由于同时参加线上实验人数较多,教师对学生问题反馈不及时,故第4项指标有所下降。课程结束后,我们总结了以下4点线上实验教学实施过程中存在的问题。

#### 1) 网络质量影响学生知识接收效果

由于线上教学的声音、影像和文字均是通过互联网进行传输,网络流畅度影响学生信息接收效果。如偏远山区的网络信号不稳定,甚至由于网络通信基础设施覆盖不全而存在信号盲区和死角,影响学生的听课质量和学习效果。

#### 2) 实验预习监控不到位

教师提前上传实验相关电子材料到课程群,但是仅通过文件的下载次数无法判断学生是否进行了有效的课前预习,也无法探知学生的预习效果。

#### 3) 师生互动性缺失

线下实验教学中,教师可以清楚地观察到学生的表情、肢体动作等,以此研判学生知识接收效果,及时调整授课方式和讲授重点。但线上实验教学中,由于教师和学生隔着屏幕,即使要求学生全部打开摄像头,由于硬件设备及软件显示的限制,教师往往不能及时把握学生的听课状态,对学生的问题反馈也存在延迟,需同学私信或主动举手,造成时间浪费且互动效果不佳。

#### 4) 实验内容设置单一

实验项目仅包含验证性实验和综合设计性实

验,缺少创新研究性、开放性实验和多学科交叉性实验,不利于学生创新意识的培养和综合能力的提升<sup>[15-17]</sup>。部分同学仅用少量学时即可完成全部实验,无法满足不同层次学生的差异化需求。

### 3.2 实验成绩考核方法

线上实验的考核与评价贯穿整个实验教学过程,多元化、全方位实行教学过程的监督与控制,保证教学评价的客观性和合理性。从考勤、学习态度、实验操作、互动交流到实验报告多角度评价学生的学习情况,考察学生知识点掌握、仪器设备使用、实验操作、数据处理、实验结果分析等各方面能力。借助实验教学信息化管理平台,给予实验各项环节一定的权重,然后将各项成绩加权获得实验的最终成绩,如图3所示。

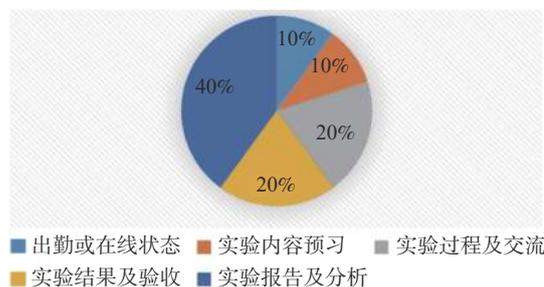


图3 实验成绩考核方法

我们对2022年春季和2023年春季共计273位同学的线下与线上实验成绩进行统计分析,其中线下实验的考核成绩由出勤、实验完成情况及实验报告3部分组成。统计结果如表3所示,表明线上实验成绩优于线下实验成绩。

表3 2022年和2023年线上、线下实验成绩统计

分数	2022春电气工程及其自动化专业		2023春自动化专业		2023春电气工程及其自动化专业(独立学院)	
	线下分段 人数占比(%)	线上分段 人数占比(%)	线下分段 人数占比(%)	线上分段 人数占比(%)	线下分段 人数占比(%)	线上分段 人数占比(%)
<60	—	—	—	—	5	4
60~70	33	6	12	5	32	15
70~80	32	47	10	15	40	55
80~90	28	29	39	45	17	15
≥90	7	18	39	35	6	11

### 3.3 实验优化策略

“现代控制理论”的线上实验正式开始前由教师提前准备电子资料,上传至课程群,要求学生提前预习。相比文字形式,视频方式更能引起学生的注意力,因此教师可以尝试从实验教学的线上开展方式着手,如提前用手机或摄像机拍摄视频,录制整个实验操作过程,然后对

录制的视频进行剪辑,添加文字注解等,转化为网络在线通用的流媒体格式。最后连同实验指导书、实验讲解PPT教案等文字资料上传课程群,供学生下载,引导学生进行线下自主学习。另外本课程有对应的省级精品在线课程——《Modern Control Theory》<sup>[18]</sup>,然而现有的线上视频资源未包含实验方面的内容,后续拟补充实验讲解

或操作视频，这样能够避免教师每年的重复录制或解说工作。如果线上实验的学生人数较多，可以借助我校“国家级网络通信与控制虚拟仿真实验教学中心”的教学平台，进行实验教学资源共享，帮助学生预习实验与复习实验<sup>[19]</sup>，实现以学生为主体的网络化教学与个性化学习效果。

除此之外，在学生人数少且网络通畅的条件下，教师可采用线上直播方式完成同样的教学任

务。如需借助线下实验设备的实验项目，教师在实验室边操作边讲解，学生在线观看学习实验内容和操作过程，记录相关数据结果，最后对实验结果进行处理分析<sup>[20]</sup>。在整个实验过程中教师和学生可以实时互动交流，调动学生学习积极性，提升课堂参与度，进而提升线上实验教学质量。总之，教师需针对不同情况设计实验教学实施方案，才能达到较好的教学效果。线上实验教学方案设计如图 4 所示。

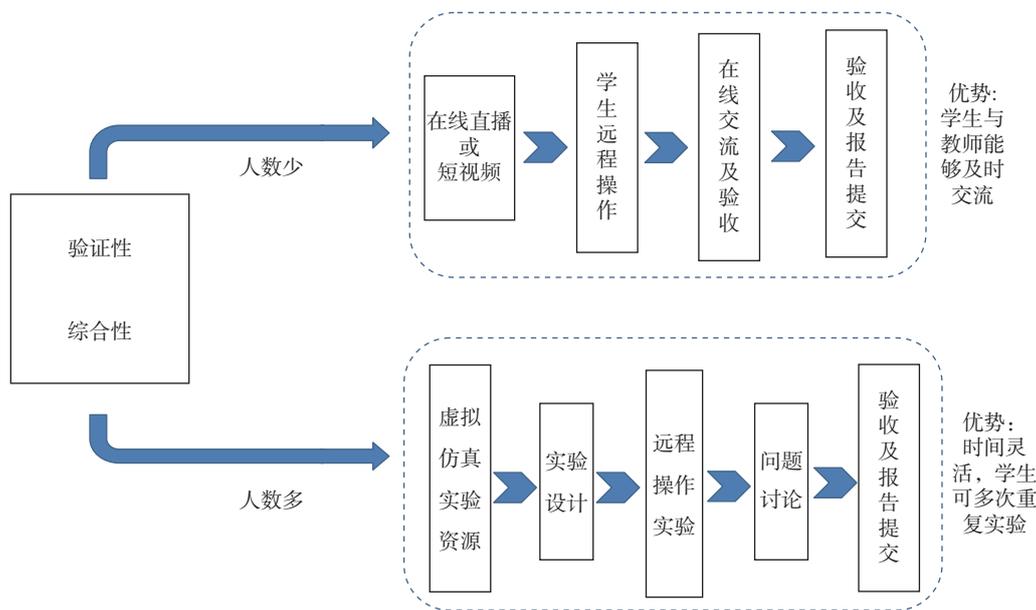


图 4 线上实验教学方案设计图

#### 4 结束语

实验教学是加深理论认识、提高创新实践能力的有效途径，是培养学生解决复杂工程问题能力和激发学生自主学习兴趣的重要教学手段。线上实验教学不能完全取代传统的线下实验教学，但是它能够辅助线下实验教学的目标达成。如何发挥线上教学和线下教学的优势互补，将是未来高校实验教学的重要发展方向。

本文以“现代控制理论”课程的线上实验教学为试点，探索线上实验教学新模式。经过两轮教学实践，学生普遍反馈能够在教师引导下完成实验，顺利通过实验验收，提交高质量的实验报告。从满意度调查结果来看，学生对线上实验教学效果较为满意，达成了实验教学目标，保证了特殊时期线下与线上实验教学实质等效的教学效果。此外多元化的考核方式提高了学生的学习能动性。因此持续推进和优化线上实验教学模式，

助力信息技术与高校教学模式深度融合是一项长期工作，需要进一步探讨与实践。

#### 参考文献

- [1] 汪潇潇, 何乃昕. 我国大规模在线开放课程建设的探索与实践[J]. 终身教育研究, 2023, 34(3): 11-15.
- [2] 李永涛, 王雪杰, 王增旭, 等. 后疫情时代大学物理实验教学模式改革与实践[J]. 大学物理实验, 2021, 34(4): 140-142.
- [3] 孙翠娟, 刘桂丽. 计算机通信与网络实验课程线上实践教学初探[J]. 中国多媒体与网络教学学报(上旬刊), 2021(7): 57-59.
- [4] 孙艳娜, 洪玲, 孙大权, 等. 新冠肺炎疫情下高校线上实验教学模式探讨: 以“道路工程材料”课程沥清虚拟仿真实验为例[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(6): 233-236.
- [5] 郁悦, 张绍文, 张乐天. 后疫情时代高校在线教学与传统教学融合发展的路径探析[J]. 教育探索, 2020(12): 42-46.
- [6] 沈春颖, 邓淇, 何士华, 等. 线上线下混合式实验教学新

- 尝试[J]. 科技与创新, 2021(14): 130-132.
- [7] ZHENG L, LIANG H, ZHOU X Y. Empirical study on online experimental teaching design of physics at Harbin university under the background of epidemic prevention and control[C]//Proceedings of the 2020 6th International Conference on Social Science and Higher Education (ICSSHE 2020). Paris: Atlantis Press, 2020: 183-188.
- [8] 张春晓, 彭必雨, 程海明. 工科实验实践课程线上教学改革研究与实践[J]. 皮革科学与工程, 2023, 33(3): 104-108.
- [9] 侯慧, 朱韶华, 张清勇, 等. 国内外高等学校虚拟仿真实验发展综述[J]. 电气电子教学学报, 2022, 44(5): 143-147.
- [10] 柳洪洁, 宋月鹏, 马兰婷, 等. 国内外虚拟仿真教学的发展现状[J]. 教育教学论坛, 2020(17): 124-126.
- [11] 张欢, 朱善安. 基于 MVC 架构的电工电子网络实验室的 B/S 实现[J]. 机电工程, 2013, 30(9): 1159-1163.
- [12] 孙丹, 黄亚玲, 吴星明. 基于虚拟仪器的 FPGA 实验平台设计[J]. 实验技术与管理, 2012, 29(4): 329-330.
- [13] WU M, SHE J H, ZENG G X, et al. Internet-based teaching and experiment system for control engineering course[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2008, 55(6): 2386-2396.
- [14] 付庄, 贡亮, 金惠良. “多元融合”教学法的线上控制理论课程教学实践[J]. 高等工程教育研究, 2021(S1): 3.
- [15] 富月, 周晓杰. 现代控制系统课程创新实验教学实践[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(11): 151-155.
- [16] 田东亮, 钱建刚, 翟锦, 等. 创新能力培养为导向的大学英语实验教学改革创新[J]. 实验室研究与探索, 2022, 41(2): 219-223.
- [17] 王雪, 姜学锋, 刘君瑞, 等. 线上线下混合式教学模式在 C 语言程序设计实验教学中的应用[J]. 计算机教育, 2021(11): 152-156.
- [18] 蒋国平, 丁洁, 吴冬梅. *Modern Control Theory* [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2021.
- [19] 赵鲁杭, 霍朝霞, 邹玲, 等. 基于教学大纲的线上实验教学资源体系建设、教学实践及思考[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(6): 226-229.
- [20] 王志琼, 刘津彤, 刘继明, 等. 线上实验教学模式探索[J]. 科教导刊, 2021(10): 137-139.

编辑 王燕

(上接第 66 页)

- [14] SUN J, TANG C J, ZHAN P, et al. Fabrication of centimeter-sized single-domain two-dimensional colloidal crystals in a wedge-shaped cell under capillary forces[J]. *Langmuir*, 2010, 26(11): 7859-7864.
- [15] YE R, YE Y H, ZHOU Z, et al. Gravity-assisted convective assembly of centimeter-sized uniform two-dimensional colloidal crystals[J]. *Langmuir*, 2013, 29: 1796-1801.
- [16] ZHANG J, LI Y, ZHANG X, et al. Colloidal self-assembly meets nanofabrication: From two-dimensional colloidal crystals to nanostructure arrays[J]. *Advanced Materials*, 2010, 22: 4249-4269.
- [17] MOON G D, LEE, T I, KIM B, et al. Assembled monolayers of hydrophilic particles on water surfaces[J]. *ACS Nano*, 2011, 5(11): 8600-8612.
- [18] MENG X, QIU D. Gas-flow-induced reorientation to centimeter-sized two-dimensional colloidal single crystal of polystyrene particle[J]. *Langmuir*, 2014, 30: 3019-3023.
- [19] WANG X, WANG Y, CHEN Q. Rapid facial fabrication of silica colloidal crystal film at the air/water interface[J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2015, 15(12): 9711-9716.
- [20] HO C C, CHEN P Y, LIN K H, et al. Fabrication of monolayer of polymer/nanospheres hybrid at a water-air interface[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2011(3): 204-208.
- [21] GU P, WAN M, SHEN Q, et al. Experimental observation of sharp cavity plasmon resonances in dielectric-metal core-shell resonators[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(141908):1-5.
- [22] LIANG Y, YU Z, XU T. A self-assembled plasmonic optical fiber nanoprobe for label-free biosensing[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(7379):1-7.
- [23] GU P, CAI X, CHEN S, et al. Rapid fabrication of high-quality bare silica monolayer and multilayers at the water/air interface[J]. *Results in Physics*, 2020, 19(103404): 1-9.
- [24] LEE H L, SHIM T S, HWANG H, et al. Colloidal photonic crystals toward structural color palettes for security materials[J]. *Chemistry of Materials*, 2013, 25: 2684-2690.

编辑 张俊