



面向新工科的自动化专业半实物仿真控制 实验设计

丁 洁, 周映江, 杨 敏

(南京邮电大学 自动化学院、人工智能学院, 南京 210023)

摘要: 为全面开展新工科背景下的自动化专业建设, 相关控制课程的实验教学亟待升级换代。面向新工科建设要求搭建了半实物仿真飞控教学平台。相比于仿真类控制实验和传统炉温或电机控制实验, 半实物仿真平台利用主控平台来控制无人飞行器, 选定控制变量为俯仰角、偏航角和翻滚角, 实现对真实飞行器的姿态控制; 开发了自动控制原理课程核心知识的实验项目, 包括控制系统时域和频域特性分析、PID 控制器设计以及扩展实验等。基于半实物仿真飞控实验设计使飞行器的本体控制问题充分“落地”, 做到虚实互补, 促进学生理论与实践知识的融合, 深入理解控制系统相关理论对新质生产力发展的重要意义。

关键词: 新工科; 自动化; 半实物仿真; 实验设计

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20240245

Experimental Design for Hard-in-Loop Simulation of Control in Automation Major Under New Engineering

DING Jie, ZHOU Yingjiang, YANG Min

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

Abstract: In order to comprehensively carry out the construction of the automation major under the background of new engineering, the experimental teaching of related control courses urgently needs to be upgraded. For this purpose, a hard-in-loop (HIL) flying control teaching platform is constructed in response to the requirements of new engineering construction. Compared to the simulation control experiments and traditional oven temperature control/motor control experiments, the HIL can control unmanned flying vehicles by setting variables as pitch, yaw and roll angles, and controlling the attitude of a true flying vehicle. Experimental projects for the core knowledge of the course of Principles of Automatic Control are developed, including time-domain and frequency-domain characteristics of control systems, PID controller design and extended experiments, etc. The experimental design for HIL simulation makes the flying control located on the flying vehicle itself, combines the simulation with actual plant, and control theory with piratical knowledge, so as to understand the meaning of control theory on improving new quality productive forces.

Key words: new engineering; automation; hard-in-loop simulation; experimental design

以新技术、新形式、新模式、新产业为代表的新经济蓬勃发展, 迫切要求高校人才培养不断改革, 为经济发展培育具备较强创新意识和解决复杂工程实践问题的能力的工科人才。自动化专业作为老牌工科专业, 面临着专业转型建设等问题, 尤其在理论和实践课程重构、需求方向融合等方面的问题, 迫切需要围绕专业实践和创新教学构建多层次、多方位的特色实践教学体系,

用以支撑自动化人才实践能力多样化、新质化培养需求^[1]。

自动化专业实验教学需要从传统的仿真项目向实际控制对象转变, 从传统工业系统向智能化复杂系统转变。近几年, 智能机器人和无人机等实验对象逐渐代替原有的炉温控制系统和小车倒立摆控制, 成为很多自动化类专业的热门实验对象^[2-3]。然而智能机器人和无人机投入成本高, 且单次实

收稿日期: 2024-04-22

基金项目: 江苏省高等教育教改研究课题(2023JSJG445); 中国电子教育学会教育教学改革研究项目(DJY23008); 南京邮电大学校级重点教改项目(JG00523JX12)。

作者简介: 丁洁, 博士, 副教授, 主要从事自动化专业课程教学与研究。E-mail: dingjie@njupt.edu.cn

验能覆盖的学生数量少。尤其是无人机,在控制过程中极易发生信号中断、碰撞、坠机等意外情况,导致机架、桨、电机、摄像头等部件严重损坏。从无人机的结构稳定性与功能性考虑,即使是轻微损伤的部件也必须更换。在实际飞行场景下,不可避免地需要反复调参甚至多次失败,对于理工类院校自动化专业每年几百名学生的大量实验次数而言,成本消耗过高。除此以外,还面临着实验安全问题。

与全实物控制实验不同,虚拟仿真实验结合信息技术,通过虚拟的控制器和虚拟被控对象,实现复杂控制目标,对实验环境要求低,能同时支持几百名学生远程操作实验^[4]。然而虚拟仿真实验系统的可信度建立在虚拟建模的准确度之上,对项目开发人员的多学科技术等要求高,开发前期需要投入大量测试和建模工作以及研发资金。此外,虚拟仿真实验对很多系统原理都进行了封装,无法让学生直观地面对控制对象进行控制方案等设计。

近几年,半实物仿真实验逐渐成为主流实验方式,利用虚拟控制平台来控制真实被控对象,做到虚实互补,促进学生的知识融合^[5-6]。文献^[7]设计了导弹制导控制的半实物仿真系统,实现制导控制物理设备连接、数据检测、信号传输、仿真过程控制、制导模型仿真验证等功能,极大降低了制导控制的危险系数。西北工业大学实验室面向科研研制了无人机飞行控制半实物仿真系统^[8],极大地缩短了无人机开发流程。

自动控制原理这门国家一流课程的教学团队立足自动化专业本科人才培养方案,尊重控制课程特点及发展规律,利用真实的飞行器特性,使飞行器的本体控制问题充分“落地”。结合国家虚拟仿真中心设备,搭建飞行器教学主控台,设计控制教学目标,选定控制变量为俯仰角、偏航角和翻滚角,实现对真实飞行器的姿态控制。开发的实验项目不仅应用于自动控制原理课程,相关实验环节还可应用于后续控制类课程的实验教学,实现教学内容的共享化以及学科与专业的协同发展。

1 半实物仿真飞控教学平台

半实物仿真飞控平台选定若干轴距适中的飞行器,搭载飞行控制处理器,读取各传感器数

据,获取电脑控制指令、输出生成电机驱动信号,并连接无线通信设备,实现与教学主控台的通信。

半实物仿真飞控教学平台如图 1 所示,可分为飞行器和电脑操作平台。出于教学安全考虑,飞行器固定于气缸上,能进行俯仰角、偏航角和翻滚角的控制,无升降控制。核心模块主要包括:飞控处理器模块、传感器模块(提供姿态的测量传感器)、电源模块(提供飞行器所需的不同电压)、执行机构(提供无人机升力)。电脑操作系统与飞行器通过无线通信模块实现信息交互。

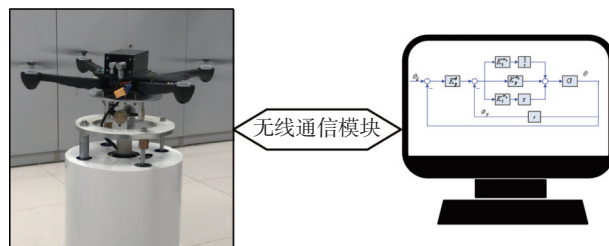


图 1 半实物仿真飞控教学平台示意图

2 无人飞行器认知和建模

四旋翼飞行器是一种六自由度的垂直升降机,相邻机臂之间的角度为 90° ,电机安装在机臂外端,电子调速器接收控制信号后,直接驱动电机,旋翼固定在电机的上方,给四旋翼无人机提供升力。半实物仿真飞控教学平台以无人机时域控制场景为背景,选取 3 个基本运动,即俯仰运动、偏航运动和翻滚运动,围绕“控的什么、用什么控、控得怎样”,了解真实工程控制的环节和对象。通过调节 4 个电机转速来改变旋翼转速,实现升力的变化,从而控制飞行器的姿态和位置。

为达到实验教学目的,在改变单个姿态角通道的控制输入信号,并保持其它通道不变的情况下,多次改变控制信号,收集并记录飞行数据,结合系统辨识工具箱,获取无人飞行器多个通道下的数学控制模型,以此构建电脑操作系统中的仿真数学模型。从而可以通过教学主控台系统中的模型进行控制,达到对无人飞行器的控制。具体建模方法可参考文献^[9]。

3 无人飞行器控制实验设计

3.1 实验教学目标

飞行器控制实验教学以“立德树人”为根本

任务,紧密围绕国家战略需求和控制发展的前沿技术,将实际复杂工程控制问题和半实物仿真技术相结合,实现价值塑造、知识传授和能力培养多元统一,培养和提升学生解决控制领域复杂工程实际问题的能力。实验教学具体目标包括以下4点:

1) 培养学生的社会责任感,激发学生奉献社会的情怀和使命感,培养学生严谨的研究态度和科学的工作方法;

2) 掌握飞行器控制系统的工作原理和建模方法,具备综合运用自动控制原理等课程知识点,分析和理解复杂工程控制对象、控制要求以及系统建模的能力;

3) 掌握飞行器控制系统的性能测试与分析计算的方法,具备完成控制系统的搭建、算法设计和验证的能力;

4) 掌握根据工程实际需求对飞行器进行设计与调试的方法,具备探究性思维方式,提高分析和解决实际问题的能力以及自主创新实践能力。

3.2 实验教学内容和方法

实验教学内容以“原理认知—系统测试—控制器设计”为主线,通过环环相扣的3个实验环节,实现无人机的姿态控制。主要分为无人机认知与系统建模、系统性能测试与分析、PID控制、实验评估与讨论4个部分。通过控制无人飞行器,让学生切实感受动力学系统模型特性、控制器设计及参数调节、系统性能指标等重点与难点知识。实验内容涉及的课程知识点包括以下6点:

- 1) 无人飞行器位置动力学特性认识;
- 2) 无人飞行器系统的组成与建模;
- 3) 二阶系统的时域特性分析;
- 4) 二阶系统的频域特性分析;
- 5) PID控制和参数整定;
- 6) 综合实验和扩展实验。

实验过程中,根据实验内容主要采用模型法、比较法、推演法、控制变量法等实验方法,旨在帮助学生科学有效地完成相关的实验环节。具体有以下4个方法。

1) 模型法

通过模型来揭示原型的形态、特征和本质。在无人机认知环节,通过控制单一通道参数,实

现无人机的俯仰运动、偏航运动和翻滚运动,理解控制对象的运动特性。

2) 比较法

主要在系统性能测试与分析环节,通过对比不同控制参数设置下系统的控制效果,选择合适的控制参数;对比不同参数控制下系统的输出响应曲线,理解上升时间、峰值时间、调节时间、超调量、稳态误差等性能指标的物理意义。

3) 推演法

在实验基础上经过概括、抽象、推理得出规律。在时域特性分析模块,通过不同控制参数的选择和调整,推演控制器参数对系统性能指标的影响;在PID控制模块,选取不同的PID参数,推演比例系数、积分系数、微分系数的作用和PID控制规律。

4) 控制变量法

控制变量法是一种探索问题和分析解决问题的科学实验方法^[10]。该实验方法赋予学生灵活设置控制变量,探究控制规律和方法。在PID控制实验中共有3个参数需要学生进行设计,分别是比例系数 K_p 、积分系数 K_i 、微分系数 K_d ;在扩展实验中,设计模糊PID控制,找出PID的3个参数与误差和误差变化率之间的模糊关系,根据确定的模糊控制规则对3个参数进行动态调整^[11]。在实验过程中,学生利用控制变量法进行控制参数的调节,观察参数调整后的系统输出及其性能指标的变化,深入理解PID控制和模糊控制器中的相关参数在系统性能中的作用,达到优化控制器设计的目的。

基于半实物仿真飞控教学平台的搭建,结合步步引导、层层递进的实验内容设计,引导学生学习相关背景知识,梳理专业基础理论,积极思考问题,设计和讨论展开方案,并在各实验环节的测评结果指引下,一步步完善设计方案和算法,最终达到预期的实验效果。实验模块、环节、交互步骤以及知识点之间的对应关系如图2所示。

在实验教学过程中,坚持以学生为中心的教学理念,综合采用任务驱动式和容错探究式教学方法,引导学生将所学专业知识与具体工程任务相联系,通过半实物仿真飞控平台,层层推进,完成无人机控制实验。其次,以任务驱动开展自

动控制的原理学习和控制系统的分析设计，部分关键实验任务按照“一题多解”设计，引导学生

通过容错探究式的实验得到个性化的实验结果，培养学生解决复杂工程问题的综合能力^[12]。

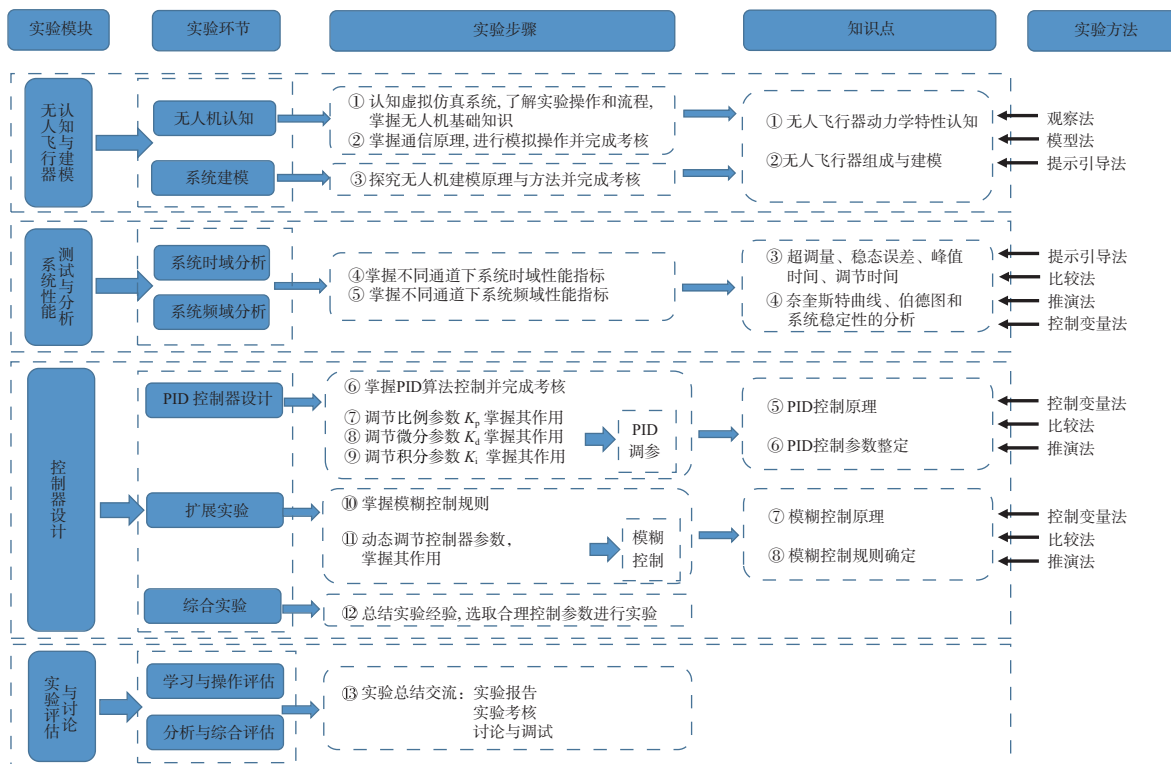


图 2 实验内容、知识点和实验方法的对应关系图

3.3 实验项目案例

姿态控制是无人分飞行器控制系统的核心，是实现其他复杂功能的前提和基础，采用姿态角和姿态角速率反馈形成闭环控制，被称为无人机控制的内回路。姿态控制分为姿态保持和姿态跟踪两种控制，采用两级 PID 控制，分别进行滚

转、俯仰、航向 3 个通道的控制器设计^[13]。

以俯仰通道 PID 控制为例进行说明。通过控制平台锁定飞行器的滚转和偏航通道，在姿态控制模式下，对飞行器内环(角速率环)控制进行调试，作为外环(姿态角环)控制的基础。俯仰角控制结构如图 3 所示，具体有以下 7 个实验步骤。

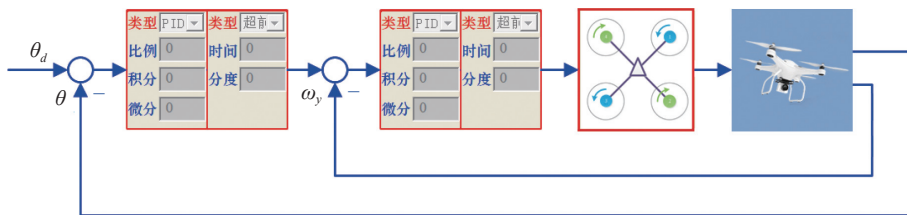


图 3 俯仰角控制结构图

- 1) 检查飞行器的机械结构是否有松动，桨叶是否拧紧，一切检查完毕后，建立飞行器和电脑的无线通信。
- 2) 打开实验界面，将飞行器气缸抬起，使其处于合适的起飞姿态，准备起飞。
- 3) 待所有人员均在安全区域内，飞行器起飞，处于拉平状态。

- 4) 设计内环 PID 控制器，实现对象速率的控制，调试完成后，进行外环控制的调试。
- 5) 设定安全范围内的姿态角的阶跃输入信号，根据给出的参考控制参数，调整实际控制器的控制参数，记录不同参数下的响应曲线，分析控制参数变化对飞行系统性能的影响。
- 6) 比较实际飞行器的姿态控制系统与理论模

型的不同之处,分析产生误差原因,并且思考控制器可以如何改进。

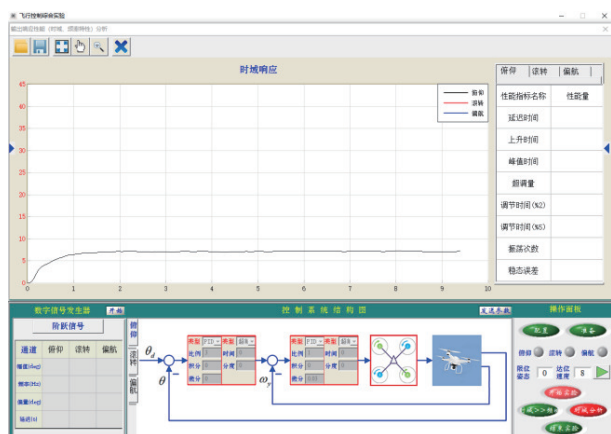
7) 通过理论仿真分析与实际平台验证,总结控制参数变化对系统性能的影响和调试经验。

实验过程中可选定不同控制参数进行对比。

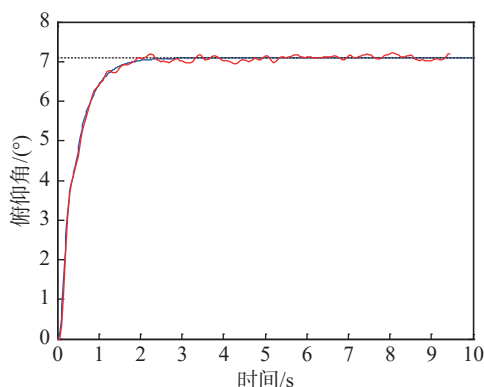
根据PID控制器设计的原理,依次调节比例、积分和微分参数。以俯仰角控制为例,参考输入信号为 5° 俯仰角,设置多组内外环PID控制参数,并将半实物仿真平台实验数据与数字仿真进行对比,如表1和图4所示。

表1 三组PID参数设置下控制系统性能指标

PID参数		超调量	稳态误差/ $^\circ$	调节时间/s
外环PID (3,0,0)	实验值	0	2.14	1.40
内环PID (1,0,0.03)	数字仿真值	0	2.09	1.65
外环PID (3,0,0)	实验值	0	1.29	0.67
内环PID (1,0,0)	数字仿真值	0	1.22	0.64
外环PID (2,0,0)	实验值	30.0	0	7.40
内环PID (1,0.2,0.03)	数字仿真值	25.8	0	7.75



(a) 半实物仿真控制系统响应曲线



(b) 数字仿真控制系统阶跃响应曲线

图4 (3,0,0)和(1,0,0.03)下控制系统响应曲线图

从以上3组参数设置下的性能指标可知,半实物仿真平台控制飞行器姿态角的系统响应曲线与数字仿真结果接近,有利于学生加强对控制系统和理论的理解。此外,当比例作用大时,可以加快调节,减少误差;但比例过大时,会使飞行

器的稳定性下降,甚至造成不稳定。积分调节可以使系统减少稳态误差,同时也会使系统稳定性下降,动态响应变慢。微分环节可以减少超调,但如果微分过强会引起系统的震荡^[14]。

飞行器半实物仿真平台为学生参加电子设计大赛和机器人比赛中的无人机比赛项目提供理论和实践支撑。

4 结束语

团队以相关教学成果和科研为基础,以问题为导向的实验设计方法,遵照“能实不虚、虚实结合”的原则,自主研发了面向自动化专业的半实物仿真飞控教学平台和控制实验内容^[15]。实验项目以半实物仿真形式,突破传统自动控制原理教学的局限和瓶颈,提升学生的学习兴趣,辅助学生贯穿理解控制系统中的各个环节,综合培养学生宏观把控、整体分析、参数调节、数据处理等相关专业技能,有效完成课程的实验教学目标,让学生掌握技能,规范操作流程,提升技能水平,有利于攻克教学重点及教学难点,增强综合实践类课程对学生专业学习与成长的影响力。

参考文献

- [1] 自主可控强实体 新质生产创未来: 2023 中国自动化大会召开[J]. 模式识别与人工智能, 2023, 36(12): 1141-1145.
- [2] 丁大伟, 丁洁, 赵勃, 等. 面向智能折弯的机器人数字孪生平台实验教学探索[J]. 宁波工程学院学报, 2024, 36(1): 92-98.

- [3] 葛亚明. 面向自动化专业新生实践教学的轮式机器人设计[J]. *实验科学与技术*, 2020, 18(2): 117-121.
- [4] 张光远, 龚迪, 王坤. 库存管理与自动化仓储虚拟仿真实验教学[J]. *实验技术与管理*, 2020, 37(12): 149-154.
- [5] 孙良, 张欣, 涂玲. 虚实结合的便携式自动化仿真实验平台开发[J]. *实验科学与技术*, 2022, 20(6): 147-151.
- [6] 陈鹏, 王浩然, 甘雨航, 等. 基于半实物仿真的教学系统: 在自动化学科控制实验上的应用[J]. *工业控制计算机*, 2023, 36(2): 79-81.
- [7] 陈俊杰, 吴盘龙, 何山, 等. 基于 RTX 的制导控制半实物仿真系统设计[J]. *指挥控制与仿真*, 2023, 45(6): 141-145.
- [8] 吕永玺, 屈晓波, 史静平. 无人机飞行控制半实物仿真系统设计与实现[J]. *实验技术与管理*, 2021, 38(3): 153-157.
- [9] 丁洁, 周映江, 徐丰羽, 等. 基于飞控平台的现代控制理论综合实验设计[J]. *实验技术与管理*, 2022, 39(10): 163-167.
- [10] 周怀远, 田春阳. 在探究过程中习得“控制变量法”[J]. *湖北教育(教育教学)*, 2024(4): 91-92.
- [11] 姚帅, 曹伟, 林丽, 等. 基于遗传算法的四旋翼姿态模糊 PID 控制研究[J]. *机械设计与研究*, 2024, 40(2): 51-55.
- [12] 朱亚玲, 徐瑾, 王娟, 等. 任务驱动教学法对于培养工科大学学生计算思维的应用研究[J]. *创新创业理论与实践*, 2023, 6(19): 174-176.
- [13] 郭晶晶, 刘允刚, 满永超, 等. 自主多旋翼无人机系统: 感知、规划与控制[J]. *控制理论与应用*, 2024, 41(10): 1707-1725.
- [14] 胡寿松, 姜斌, 张绍杰. 自动控制原理[M]. 8 版. 北京: 科学出版社, 2023.
- [15] 万佑红, 周映江, 杨敏, 等. 自动控制原理实验教程: MATLAB 编程与虚拟仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2023.

编辑 葛晋

(上接第 18 页)

- [5] 赵荣琦, 张陆唯, 王湛. 基于时频域分析的雷达有源干扰识别方法及实现[J]. *舰船电子对抗*, 2024, 46(5): 30-36.
- [6] 高楠, 张璨, 孟召宗, 等. 频域分析的条纹投影技术相位解调方法研究进展[J]. *光学技术*, 2023, 49(4): 436-445.
- [7] 周涛, 胡健, 李艳凤, 等. “金课”建设背景下“信号与系统”研究性教学载体设计[J]. *实验技术与管理*, 2020, 37(11): 196-200.
- [8] 陈娟, 陈雯, 石飞, 等. 基于 Python 的信号与系统实验教学改革与实践[J]. *实验技术与管理*, 2021, 38(5): 166-169.
- [9] 欧静兰, 吴皓威, 印勇, 等. “信号与系统”课程小班互动式教学实践的探索[J]. *实验科学与技术*, 2017, 15(3): 47-50.
- [10] 孙明. 基于 GUI 的周期信号频谱分析演示系统设计[J]. *实验科学与技术*, 2018, 16(1): 18-21.
- [11] 谭北海, 彭秋明, 姚小娇, 等. 高等院校信号与系统课程教学辅助探究与实践[J]. *实验科学与技术*, 2018, 16(2): 70-73.
- [12] 钟登华. 新工科建设的内涵与行动[J]. *高等工程教育研究*, 2017(3): 1-6.
- [13] 曾勇, 黄艳, 向桂君, 等. 从新生项目课开始: 新工科建设“成电方案”的设计与实践[J]. *高等工程教育研究*, 2020, 68(1): 14-19.
- [14] 黄廷祝, 黄艳, 杨建宇. “科研育人”新工程教育: 认识、思考与实践[J]. *中国大学教学*, 2021(7): 42-48.
- [15] 翟显, 李敏, 廖冬梅, 等. 新工科通识实践课程建设[J]. *实验科学与技术*, 2023, 21(5): 65-69.
- [16] 白春光, 艾宇翔, 夏晖, 等. 以 ISO 模型为核心的“成电方案”在高校实验课程建设的探索与实践[J]. *实验科学与技术*, 2023, 21(6): 127-134.

编辑 王燕