



面向复杂工程问题的探空火箭实验课程设计与实践

刘磊, 李滚, 韩尧, 李翔, 任玉琢

(电子科技大学 航空航天学院, 成都 611731)

摘要: 电子科技大学积极响应新工科教育改革, 持续优化本科培养方案, 建设了多门项目式课程, 实现了贯穿 4 年本科教育和逐级挑战的教学目标。“探空火箭设计与制作”课程是一门为本科三年级开设的挑战性综合实验课程, 课程以培养复杂工程问题解决能力为核心目标, 面向本科教学实际, 深入分析了探空火箭系统复杂性特征, 基于此创设了围绕复杂工程的实验教学情境, 营造了“沉浸式”的项目学习体验。通过改进实验课程教学组织形式, 构建了全新的“学习共同体”, 有效促进了以学生为中心的主动学习模式达成。

关键词: 新工科; 工程教育; 复杂工程问题; 探空火箭; 实验课程建设

中图分类号: G642

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230521

Design and Practice of Challenging Experimental Courses in Complex Engineering Problems for the New Engineering Disciplines

LIU Lei, LI Gun, HAN Yao, LI Xiang, REN Yuzhuo

(School of Aeronautics and Astronautics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: The University of Electronic Science and Technology of China responds to the new engineering disciplines reform actively, continues to optimize undergraduate training programs, and establishes various project-based courses, achieving the goals of integrated undergraduate education over four years with progressively challenging objectives. The course “Design and Production of Sounding Rockets” is a challenging, comprehensive and innovative experimental course offered to third-year undergraduates. The core objective of this course is to cultivate the ability to solve complex engineering problems. Tailored to the realities of undergraduate education, the course deeply analyzes the complexity of sounding rocket systems. Based on this analysis, it creates improved experimental teaching scenarios centered around complex engineering challenges, fostering an immersive project-based learning experience. By employing improved course organization methods, a new “learning community” is established, which effectively promotes a student-centered and active learning model.

Key words: new engineering disciplines; engineering education; complex engineering problem; sounding rocket; experimental course construction

2016 年中国成为《华盛顿协议》正式成员国, 中国的工程教育认证体系也被国际广泛认可, 中国的工程学位得到了国际的认可和尊重^[1]。与此同时, 经过“复旦共识”“天大行动”和“北京指南”的演进, 新工科建设在我国高等教育教育界达成了共识并迅速展开^[2]。

电子科技大学系统构建并全面实施了以“唤

起好奇、激发潜能”为核心的新工科教育“成电方案”: 始于新生、贯通四年、基于项目、逐级挑战。随着成电方案 2.0 的迭代更新, 在挑战性研究型新工科课程体系和通识教育体系基础上, 突破常规单一专业核心课程体系, 以全流程设计为核心、跨学科项目为中心, 构建各自逐级递升, 又密切联系, 螺旋上升的“三链条”课程体系,

收稿日期: 2023-11-08; 修回日期: 2024-03-22

基金项目: 电子科技大学精品项目式课程建设计划“探空火箭设计与制作实验”(2023JPXM014)。

作者简介: 刘磊(1984-), 男, 硕士, 实验师, 主要从事卫星导航与信号接收技术方面的研究以及实验教学与实验室建设工作。E-mail: liu.vs.lei@foxmail.com

着力提升学生的“科技”硬实力、“技术”创新力、“领军”软实力^[3]。

“探空火箭设计与制作实验”是电子科技大学航空航天学院的一门核心实验课。本课程组结合航空航天学科发展特色,借鉴美国麻省理工学院(MIT)和欧林工学院人才培养模式,旨在建设一门以探空火箭设计与制作为主题的复杂系统工程挑战性实验课。课程聚焦新工科改革要求,加强工科学生在系统设计能力、工程计算与分析能力、跨学科知识综合运用和复杂问题解决能力等方面的训练和培养,以满足工程界对未来创新引领型人才的要求^[4]。

1 复杂工程问题特征分析

1.1 复杂工程问题

复杂工程问题是现代工程领域中的主要挑战之一,涵盖各种领域,包括但不限于航空航天、能源、环境保护和信息技术。这些问题通常不仅仅是工程性质的,还涉及了社会、经济和环境等多个方面。例如,设计一次太空探测任务既需要工程技术,还需要考虑科学研究目标、预算、风险管理等各种问题^[5]。

如何定义复杂工程问题,中国工程教育认证协会发布的工程教育认证标准中给出了详细的说明,包含以下7个特征:

- 1) 必须运用深入的工程原理,经过分析才可能得到解决;
- 2) 涉及多方面的技术、工程和其他因素,并可能相互有一定冲突;
- 3) 需要通过建立合适的抽象模型才能解决,在建模过程中需要体现出创造性;
- 4) 不是仅靠常用方法就可以完全解决的;
- 5) 问题中涉及的因素可能没有完全包含在专业工程实践的标准和规范中;
- 6) 问题相关各方利益不完全一致;
- 7) 具有较高的综合性,包含多个相互关联的子问题。

结合工科实验教学实践,其中第1条是必备的,指出了复杂工程问题的本质,第2~7条部分或全部具备^[6-7]。

1.2 探空火箭系统工程复杂性特征分析

探空火箭是一种用于科学研究和大气探测的火箭系统。其主要目的是将科学仪器和测量设备

送入高层大气或甚至太空中,以获取有关大气成分、温度、气压、辐射等数据^[8]。探空火箭项目本身也是一个复杂的工程任务,需要不同学科、不同专业部门的合作和协调,才能确保任务的成功执行。从工程实现角度来分析探空火箭项目的复杂性特征,可以归纳如下。

1) 多系统集成

探空火箭包括多个子系统,如动力系统、航电系统、有效载荷、控制系统等。这些子系统必须紧密协同工作,以确保火箭的整体性能。子系统之间的集成和协同工作是复杂性的一个方面,需要综合考虑各个部分的需求和相互关系。

2) 工程高精度要求

火箭设计与制造过程涉及多种工具的使用,同时工程精度要求较高,包括零部件的制造和组装,即使微小的误差也可能导致火箭性能下降或失败。

3) 不确定因素

探空火箭的飞行环境和条件可能受到不确定因素的影响,如大气层的变化、天气条件、飞行轨迹等。

4) 安全性

探空火箭项目涉及高风险的活动,如火箭发射和回收。

5) 过程控制和项目管理

包括资源分配、时间表制定、风险管理等方面的任务,这些任务本身也具有复杂性。

通过上述复杂工程问题特征分析,可加深对探空火箭设计和制造中所涉及的各种复杂问题的理解,进而为设计课程复杂度和挑战度提供依据。

2 复杂工程挑战性实验课程建设要点

2.1 工程复杂性与课程挑战性关联分析

工程复杂性与课程挑战性之间存在密切的关联,复杂工程问题的本质要求工程教育在培养学生时需要考虑这一点。复杂工程问题不仅要求工程师具备深度的专业知识,还需要他们涉及多个领域,解决问题的过程通常伴随着不断的冲突和相互依赖。因此,为了培养学生成为合格的工程师,需要将各种学科领域的知识融入教学过程中,使学生能够在面对复杂工程问题时,展现出解决问题的思考深度和工程创造性。课程的挑战性主要体现在以下3个方面。

1) 多学科知识的综合运用

工程复杂性通常涉及多个学科领域的知识和技能,需要工程师具备深入的专业知识,并能够将不同领域的知识整合到一个综合性解决方案中。课程的挑战性在于要求学生理解和应用来自多学科的知识,如气动力学、电子工程、材料科学、自动控制等,以解决探空火箭项目中的各种问题。

2) 系统思维与团队协作意识

工程复杂性涉及多个相互关联的子问题,解决这些问题需要系统思维和整体观念。课程的挑战性在于要求学生将各个子系统的设计和制造整合到统一的系统中,确保各部分协调一致,以实现项目的整体目标。这其中涉及多工具的综合使用,要求学生具备多方面的专业能力和团队协作意识。

3) 工程实践不确定性与风险管理

工程复杂性常伴随着不确定因素,如仪器故障、系统组装偏差等。在具体教学中,课程的挑战性在于引导学生如何管理工程实践的不确定性和应对风险。学生需要学会制定应对计划,采取适当的措施来降低风险,以确保项目的成功,这培养了学生的问题解决和风险管理能力。

2.2 课程建设要点分析

根据以上课程挑战性问题分析,课程建设的总体思路是:通过定义与复杂工程问题相关的系列问题,模拟真实工程情境,激发学生去学习、思考、分析、设计与实践,从而掌握复杂工程问题的内在联系和本质特征;在解决复杂工程问题的过程中培养学生的创新意识、批判性思维以及解决问题需要的各种能力和素质。

综合考虑工程复杂性与课程挑战性的关联分析,笔者提出以下复杂工程挑战性课程建设的7个要点:

- 1) 定义复杂工程问题;
- 2) 模拟真实工程情境;
- 3) 跨学科知识整合^[9];
- 4) 团队合作;
- 5) 复杂工程综合解决方案制定;
- 6) 复杂工程实践和系统集成测试;
- 7) 问题解决和工程迭代。

以上要点将在教学创新方法与举措中有所体现,但并非一一对应。

3 教学创新方法与举措

3.1 以课程目标为引领,重构教学内容

3.1.1 以“复杂工程问题解决”为核心的课程目标

在成果导向教育(outcome based education, OBE)理念中,教学目标(学生预期学习产出)先于教学内容存在并居于主导地位,课程资源开发、教学环节设置、教学组织实施等活动都需围绕预期目标展开^[10]。工程专业本科毕业生在解决复杂工程问题方面需要具备8种能力和素质:多学科知识应用能力(WA1)、复杂工程问题分析能力(WA2)、复杂工程系统设计与开发能力(WA3)、文献研究与实验分析能力(WA4)、现代工具使用能力(WA5)、工程师的社会责任意识(WA6)、环境与可持续发展意识(WA7)、沟通交流能力(WA10)。其中WA1~WA5属于专业能力要求,WA6~WA7属于综合素质,WA10属于社会能力^[11-12]。

结合本文关于探空火箭复杂工程问题的特征分析以及“华盛顿协议”对工科类专业毕业生的素质要求,拟定了以“复杂工程问题解决”为核心的课程目标,即知识目标、能力目标和素质目标^[13],其核心要素如图1所示。

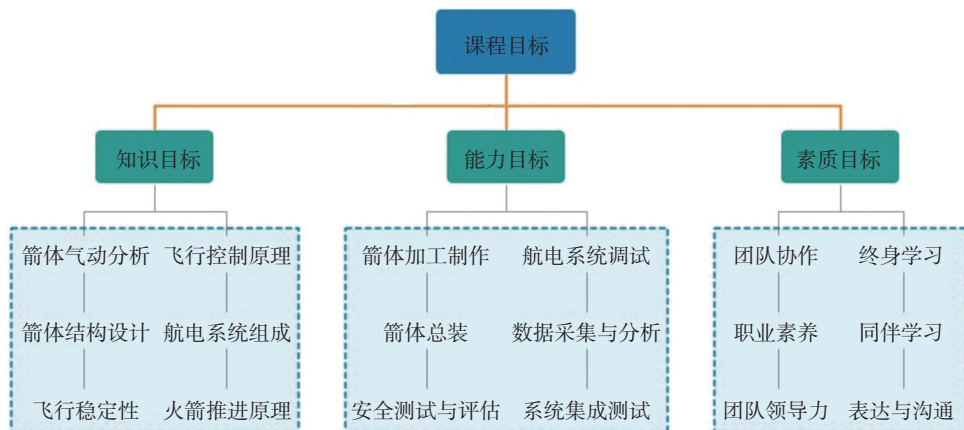


图1 课程目标要素图

三类目标相互促进, 知识为能力提供支持, 素质目标则是在知识和能力基础上综合体现学生的全面发展。这种有机结合使学生全面达到工程教育培养目标中各项能力要求, 为未来的职业生涯和终身学习打下坚实基础。

3.1.2 基于决策树的探空火箭设计问题分析

通过学习火箭基础知识, 对火箭总体设计中的关键要素进行整理和分析, 得到如图2所示的火箭设计关键要素决策树分析图。将决策树中关键要素按照层级和权重顺序进行排序, 得到问题解决路线, 如图3所示。问题解决路径为: 满足火箭发射高度要求的前提下, 优先减轻整体质量; 其次通过调整火箭发动机推力大小来满足推力要求, 再考虑降低箭体阻力的气动外形设计; 最后结合火箭质心、压心位置进行飞行稳定性校验。

3.1.3 深挖课程思政元素, 融入教学过程

“两弹一星”元勋王希季先生是中国第一枚探空火箭技术负责人、中国第一枚卫星运载火箭总体方案设计者、中国第一颗返回式卫星首任总设计师, 为中国航天事业发展做出了卓越贡献。开设探空火箭主题实验课程是对先生的致敬, 通过分析实际的火箭制作与发射案例, 体会老一辈科学家艰苦奋斗的精神。让学生参与火箭设计或制作的项目, 培养他们的实践能力和团队合作精神。利用视频、图片等多媒体资源, 展示火箭技术的发展历程和应用, 增强学生的直观感受。

3.2 模拟复杂工程环境, 营造“沉浸式”学习体验

3.2.1 基于项目式管理的教学模式设计

在教学模式上, 充分融入CDIO(conceive, design, implement, operate)工程教育模式教学理

念^[4], 仿照实际航天工程研发流程, 强调培养学生面向解决复杂工程问题的实践能力, 学生完整参与项目需求分析、设计、制作、实施全过程, 如图4所示。其中设计了子系统迭代和系统优化与工程迭代, 以培养学生解决复杂工程问题的能力。

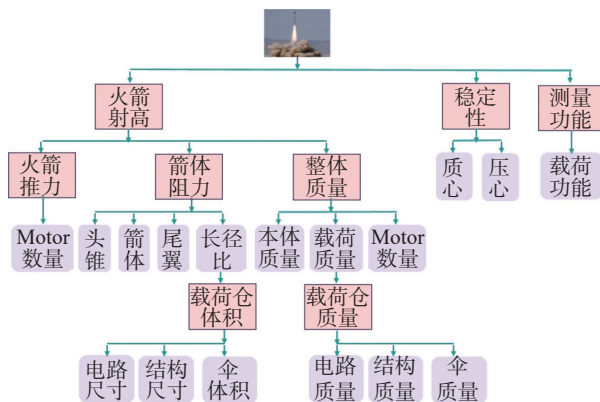


图2 火箭设计关键要素决策树分析图

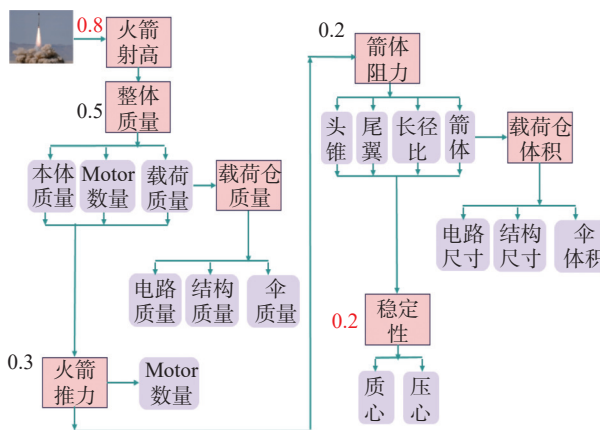


图3 基于决策树的问题解决路线图

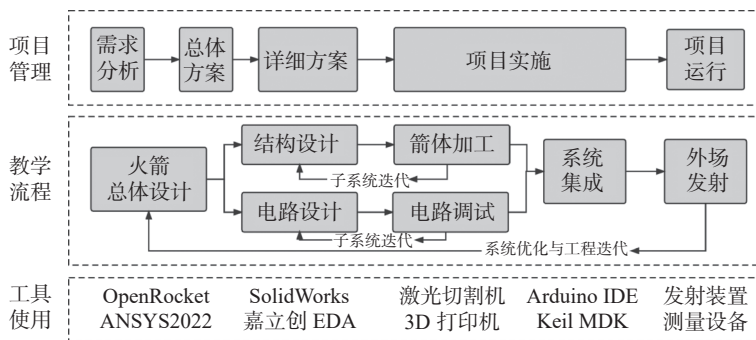


图4 项目式课程教学模式

3.2.2 建设“项目式工坊”实验环境

校院两级共同投入建设了“探空火箭实验

室”, 打造了120 m²的箭体加工坊、电子制作工坊和火箭总装工坊, 购置了激光切割机、微型桌

面加工车床、3D 打印机等必要设备，如图 5 所示。通过“项目式工坊”实验环境的建设，为学生营造了“沉浸式”的课堂体验，有力地支撑了课程实施，助力了教学效果提升。

3.3 创新课堂学习组织形式和课程考核方式

3.3.1 创新课堂组织形式，构建“学习共同体”

课堂的组织形式需要与课程教学内容、教学模式紧密结合，提出构建“课程学习共同体”，即：任务小组+专业小组+指导教师的组织形式，如图 6 所示。

1) 任务小组

以火箭设计与制作为核心任务，学生 3~4 人为一组，每个人既要承担特定任务，又需要密切合作，扮演好自己的“角色”。火箭总师主要负责火箭的总体规划与实施，以及各关键分系统的协调任务；“分系统工程师”分别负责航电、结构、动力等各个关键分系统的设计与制作。

2) 专业小组+指导教师

相同“角色”的工程师将会按照专业建立专业小组，同时配备指导老师，以确保在教学中能够为学生提供充分的支持和指导。鼓励同学间的同伴学习，以及充分利用互联网在线资源(中国 MOOC 等)进行主动学习。



图 5 “项目式工坊”探空火箭实验室环境图

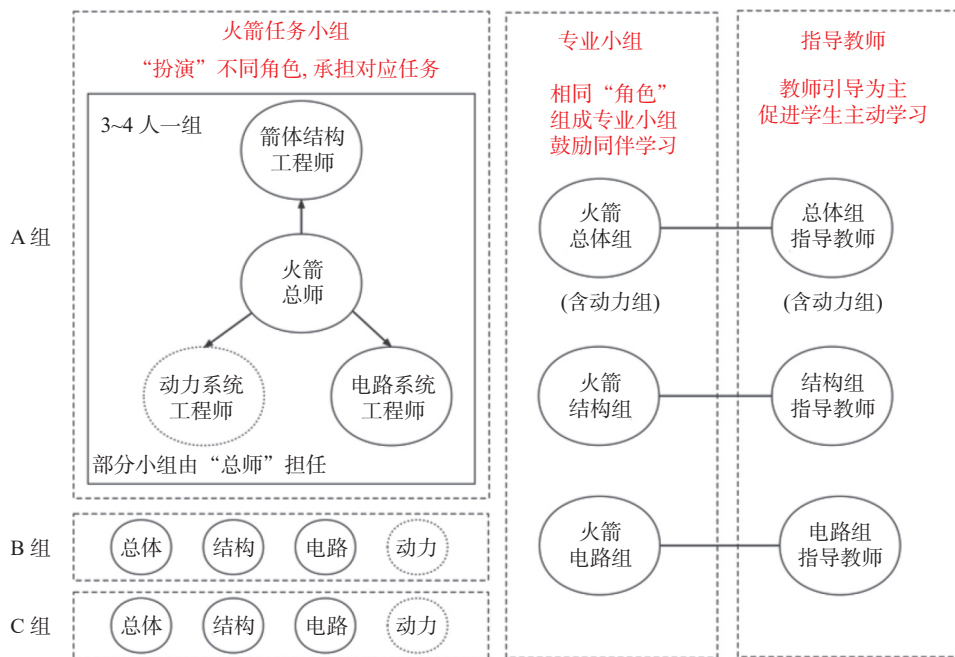


图 6 课堂组织形式架构图

3.3.2 创新课程考核评价方式

课程成绩由平时成绩和期末成绩组成，各占 50%。平时成绩：满分 100 分，课堂研讨(火箭发射汇报)占 30%，课程实践(火箭制作水平评价)占 40%，课堂表现(火箭制作过程规范性与参与度评价)占 30%。

课程的学生成绩评定主要以考核方式为主，既关注火箭发射结果的评估，也重视过程性评价^[15]。结合火箭设计与制作过程，制定了详细的过程性评价表，如表 1 所示。课程从火箭总体设计和制造、团队写作、项目沟通与管理、学术研究与写作、安全规范意识、汇报与表达等多个维

度对学生的综合能力进行评价。

4 教学成效与课程思政育人

4.1 部分学生作品及火箭发射

该课程与传统实验课程相比,呈现出明显不同之处。火箭外场发射成功带来的喜悦和兴奋的情感体验是其他课程学习中无法获得的。

在火箭发射场地的选择上,要选择相对开阔的场地,远离人群和高大建筑物。火箭发射高度控制在80 m以内,可以在学校标准田径场或相当大小空旷地带完成发射。发射前要进行各项安全检查,并提醒周围人员注意安全。部分学生制作的火箭作品如图7所示,外场发射的照片记录如图8所示。

表1 课程过程性评价表

评分项目	子项目	评分要点	分值
总体设计和制造	设计质量	火箭总体设计是否符合技术标准和性能要求	20
	制造质量	火箭制造的工艺和材料选择是否符合质量和安全标准	15
	地面测试	是否进行了必要的地面测试以验证火箭系统的性能	15
团队协作	小组合作	小组内的协作和贡献,确保各个子系统的协调一致	5
	团队协调	整个团队之间的合作和协调,包括解决问题和资源管理	5
项目沟通与管理	技术沟通	是否能清晰表达设计原理和解决方案,以及与他人技术沟通	5
	项目管理	在项目启动、预算、资源分配和时间安排方面的管理能力	5
学术研究及写作	文献研究	是否进行了相关文献研究以支持设计和决策	5
	实验分析	是否有效地分析实验数据并提取有用信息	5
安全规范意识	安全意识	在整个项目过程中是否注重安全标准和风险管理	5
	风险评估	是否能够识别潜在的风险并采取措进行风险管理	5
汇报与表达	技术演示	技术演示和展示能力,包括口头和书面展示	5
	学术报告	学术报告写作和交流能力	5



图7 学生加工制作箭体照片



图8 火箭外场发射照片

授课10班次,合计317人次,学生评教为四星、五星。该课程获电子科技大学本科教学标杆课程、本科新工科教育课程建设二等奖,2022年获四川省一流本科课程认定。本课程被选作典型案例在“第三届中国高等教育峰会”和2021年新工科建设工学院院长峰会上进行展出交流。学生的火箭作品获电子科技大学新工科作品展一等奖,并受邀在学校开放日、中小学科普活动中进行展出交流,极大提升了学生的成就感和个人价值感。

4.3 依托课程思政,育人效果显著提升

课程深挖思政元素,从知识传授、能力培养、价值引领三方面实现全面育人,如图9所示。知识传授注重培养学生对多学科知识的综合运用,综合能力则强调对多项专业工具的使用和系统集成能力。以“责任感、使命感、成就感”为价值引领,将专业知识传授与学生能力培养紧密结合,传承老一辈科学家的航天精神,使思政元素自然地融入教学活动中,贯穿课程始终,润物无声,与课程目标高度一致,极大提升了课堂育人效果。

4.2 课程评教优异

本门课程近5年共计开设4轮次,8个学期,

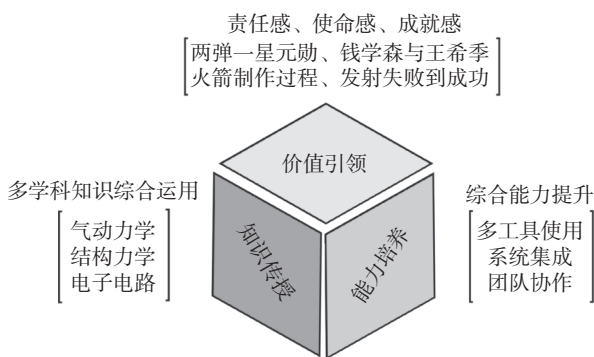


图9 课程思政育人矩阵图

5 结束语

“探空火箭设计与制作实验”课程的设计与实践表明，新工科教育改革在培养具有创新精神和实践能力的工程技术人才方面具有重要作用，为学生提供了探索复杂系统工程问题的机会。通过项目驱动的学习、实验室实践和团队合作，学生在这门课程中得以全面发展，不仅培养了他们的工程实践能力和复杂问题解决能力，还激发了他们勇于挑战的团队精神和合作意识。随着电子科技大学在新工科改革方面的不断深入，培养方案优化和项目式课程建设的持续推进，在未来将会更加注重培养学生面向复杂系统的建构能力和问题解决能力，以更好地满足国家对于高素质工程技术人才的需求。

参考文献

- [1] 吴岩. 新工科: 高等工程教育的未来——对高等教育未来的战略思考[J]. 高等工程教育研究, 2018(6): 1-3.
- [2] 吴爱华, 杨秋波, 郝杰. 以“新工科”建设引领高等教育创新变革[J]. 高等工程教育研究, 2019(1): 1-7.
- [3] 曾勇, 黄艳, 黄廷祝, 等. 面向未来的新工科教育与“成电方案” 2.0 的迭代创新[J]. 高等工程教育研究, 2021(3): 16-20.
- [4] 徐利梅, 谢晓梅, 陈彦, 等. 新工科专业课程体系重构: 从新生项目课程到高峰体验项目课程[J]. 高等工程教育研究, 2019(4): 33-39.
- [5] 李明华. 航天复杂巨系统工程管理体系及实施初探[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2020, 12(2): 155-163.
- [6] 中国工程教育专业认证协会. 工程教育认证标准: T/CEEAA001-2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023: 3.
- [7] 徐振峰, 孙强, 胡学友, 等. 工程教育认证中复杂工程问题解析[J]. 高教学刊, 2023, 9(13): 85-88.
- [8] 王赤, 陈志青, 胡连欢, 等. 我国空间环境天/地基监测平台的发展态势和展望[J]. 航天器环境工程, 2021, 38(3): 225-239.
- [9] 曲云霞, 张建辉, 郭兰申, 等. 基于解决复杂工程问题能力培养的课程体系建设[J]. 教育教学论坛, 2023(28): 14-17.
- [10] 王永泉, 胡改玲, 段玉岗, 等. 产出导向的课程教学: 设计、实施与评价[J]. 高等工程教育研究, 2019(3): 62-68.
- [11] 林健. 如何理解和解决复杂工程问题: 基于《华盛顿协议》的界定和要求[J]. 高等工程教育研究, 2016(5): 17-26.
- [12] 林健. 工程教育认证与工程教育改革和发展[J]. 高等工程教育研究, 2015(2): 10-19.
- [13] 朱露, 唐浩兴, 胡德鑫, 等. 工科本科生解决复杂工程问题能力评价模型[J]. 高等工程教育研究, 2023(4): 86-99.
- [14] 程春雨, 商云晶, 马驰, 等. 基于 CDIO 工程教育模式的理科人才培养研究[J]. 实验科学与技术, 2020, 18(3): 123-127.
- [15] 邱丹萍. 新工科教育体系下的课程过程性评价与多元考核机制研究[J]. 创新创业理论与实践, 2022, 5(23): 173-175.

编辑 王燕