



基于虚拟仿真实验的实验力学 混合式一流课程建设

杨未柱^{1,2}, 何新党^{1,2}, 李 磊^{1,2}, 李 朗^{1,2}, 敖良波^{1,2}, 岳珠峰^{1,2}

(1. 西北工业大学 力学与土木建筑学院, 西安 710129; 2. 西北工业大学 力学国家级实验教学示范中心, 西安 710129)

摘要: 为适应新时代创新型、复合型、应用型人才培养需要, 针对实验力学课程进行了教学改革。以大量真实实验和数据为基础, 借助信息技术建设了系列省级和校级虚拟仿真实验教学课程资源, 同时融合与教学内容相关的课程思政元素、工程应用案例以及前沿学术成果等, 开展了实验力学线上线下混合式一流课程建设实践, 提升了课程教学质量和效果, 有力支撑了力学高素质拔尖创新人才培养。

关键词: 虚拟仿真实验; 混合式教学; 课程思政; 一流课程; 实验力学

中图分类号: O348

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230139

Development of the Hybrid First-class Course of Experimental Mechanics Based on the Virtual Simulation Experiment

YANG Weizhu^{1,2}, HE Xindang^{1,2}, LI Lei^{1,2}, LI Lang^{1,2}, AO Liangbo^{1,2}, YUE Zhufeng^{1,2}

(1. School of Mechanics, Civil Engineering and Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China;

2. National Demonstration Center for Experimental Mechanics Education, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: In order to meet the need of training innovative, compound and application-oriented talents in the new era, the teaching reform of the course of experimental mechanics has been carried out. On the basis of a large number of real test data, a series of provincial and university-level first-class courses of virtual simulation experiments have been developed with the help of the information technology. At the same time, ideological and political elements, engineering application cases and cutting-edge research achievements related to the teaching contents have been integrated into the construction practice of the hybrid online and offline first-class course of experimental mechanics, which has improved the teaching quality and effect. The teaching reform can support the cultivation of high-quality innovative mechanics talents more effectively.

Key words: virtual simulation experiment; hybrid teaching mode; curriculum ideology and politics; first-class course; experimental mechanics

课程质量直接决定人才培养质量, 为贯彻落实习近平总书记关于教育的重要论述和全国教育大会精神, 2019 年教育部发布《关于一流本科课程建设的实施意见》(简称《意见》), 明确把立德树人成效作为检验高校一切工作的根本标准, 而一流本科课程建设既是高校落实立德树人根本任务的关键途径, 也是适应新时代人才培养要求的重要举措^[1-2]。同时, 新工科建设也给卓越工程人才培养提出了更高要求, 迫切需要打破传统教

学模式, 推动课程教学改革, 加强学生发现问题、解决问题的综合创新实践能力^[3-4]。

《意见》还提出“强化现代信息技术与教育教学深度融合”“形成专业布局合理、教学效果优良、开放共享有效的高等教育信息化实验教学体系”。在此背景下, 各高校根据自身学科特点建设了一批高水平虚拟仿真实验教学项目^[5-7], 这些虚拟仿真实验教学项目有效地结合科研成果, 将无法进行传统现场教学的高危或极端环境、高

收稿日期: 2023-03-28; 修回日期: 2023-10-27

基金项目: 教育部产学合作协同育人项目(220804669195840); 西北工业大学教育教学改革研究项目(2024JGZ12)。

作者简介: 杨未柱(1990-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事结构力学行为及强度测试方面的研究。E-mail:

wzhyang@nwpu.edu.cn

成本、高消耗、不可逆操作、大型综合训练等实验项目引入课堂教学,拓宽了学生的知识面,提高了学生解决复杂工程问题的综合创新能力,同时,为高校实验相关课程教学提供了新途径^[8]。

西北工业大学高度重视人才培养工作,出台并推进《西北工业大学一流本科人才培养行动计划》各项任务落地落实,努力培养具有家国情怀、追求卓越、引领未来的领军人才,一流课程建设是该行动计划中的关键任务。实验力学是力学相关专业的核心课程,为强化对力学高素质拔尖创新人才培养的支撑作用,基于高水平虚拟仿真实验开展了线上线下混合式课程建设探索,通过融合课程思政元素、结合虚拟仿真实验、引入工程应用背景和前沿测试技术等途径,进行了混合式教学改革探索,有效拓展了课程的深度和广度,提升了课程“两性一度”,取得了较好的教学效果。

1 实验力学课程概况

实验力学是开展力学试验测试的基础,航母、大飞机、运载火箭、核潜艇、大型桥梁建筑等战略装备和基础设施的研制和建设都离不开以实验力学为基础的力学实验测试技术和验证体系;同时,日常生活中用到的各种力学传感器(如汽车的加速度传感器、超市的电子秤等)也是运用实验力学的知识进行设计。此外,从宏观到微观再到纳米尺度的各种力学试验以及力-化学-生物等耦合环境下的试验也为新材料、新理论和新机制等基础科学研究提供重要支撑。

实验力学课程是西北工业大学力学、航空航天类等专业的专业核心课程,课程教学内容主要是力学实验和测试的基本理论、原理和实践,包含理论授课学时和实验课学时,其特点是理论与应用实践的紧密结合,这不同于以理论为主的材料力学和以实验为主的工程力学实验。因此,该课程是培养学生创新精神和实践能力的良好平台,是高素质拔尖创新人才培养的重要环节。

1.1 课程教学目标

围绕“立德树人”这一根本任务,基于“知识传授、能力培养、价值塑造”三位一体的教学理念,针对实验力学课程,通过课堂教学和实验操作,拟达到以下3个教学目标。

1) 知识目标

使学生了解实验力学的任务、作用以及最新

测试技术,较系统地掌握电测法、光测法等测试技术的基本理论和实验方法,同时能够正确地进行实验操作和实验结果分析。

2) 能力目标

锻炼学生独立开展力学实验设计、分析和实践的能力,着力提升学生的科研创新能力和综合实践能力,为未来开展航空航天、桥梁建筑及大型工业装备的力学试验测试储备必要的能力和技术。

3) 价值目标

厚植航空报国、献身国防的家国情怀,强化学生严谨务实、创新求是的科学精神,提高学生从事力学实验相关研究的科学素养。

1.2 教学改革的重点问题

以西北工业大学实验力学为例,课程教学改革要解决的重点问题包括如下3点。

1) 思政教育与课程知识体系有机融合的问题。立德树人是高校教育的根本任务,一流课程建设须深入挖掘课程和教学方式中蕴含的思政元素,同时开展课程思政教学设计,与专业教学互相促进、同向同行^[9-10]。

2) 大型、长周期、综合型实验难以引入现场教学,学生综合实践能力训练不足的问题。传统课程教学中设置的实验课时主要是电测和光测相关的简单实验,不能满足综合创新实践能力的培养需求,但大型综合的力学实验如大型结构强度试验等一般具有规模大、实施周期长、耗费高的特点,难以开展现场教学。因此,为提升学生的综合创新实践能力,需依托信息技术建设相关的虚拟仿真实验,并引入课程教学设计。

3) 课堂教学与前沿测试技术结合不够紧密,学生创新思维培养仍需进一步增强。传统课程教学主要讲授应变电测法和光测法等基本测试技术,然而随着技术的进步以及测试要求的提高,实验力学相关的测试方法和手段也在不断进步。为培养学生的创新思维,拓展学生视野以适应未来发展需求,需将课程内容与前沿测试技术如柔性传感器、极端环境测试技术等充分结合,不断更新教学内容,提升课程的高阶性和创新性。

2 线上线下混合式一流课程建设途径

针对1.2节中3个重点问题,围绕“两性一度”金课建设要求,提出了有机融合课程思政、重塑课件内容设计、建设虚拟仿真实验、引入工

程案例和科研成果等多元课程建设途径,强化能力培养和价值塑造目标上的教学创新。

2.1 有机融合课程各元素

从实验力学发展史、大国工程、西工大故事、科学家故事、传统文化等多角度出发建立课程案例库,结合工程案例和教学内容巧妙融合各

元素,同时以身作则、言传身教,将育人理念贯穿教学全过程,在厚植家国情怀、强化使命担当、培养科学精神的同时,活跃课堂氛围,增强学习兴趣,使学生在快乐中学习。各章节的课程内容如表 1 所示,以模型试验、应变电测技术基础两个教学内容为例。

表 1 实验力学课程多元化教学内容

章节	教学内容	课程思政元素	工程应用案例	前沿研究成果	教学组织形式
第一章 绪论	实验力学的任务、基本方法、发展趋势	实验力学发展史、大国工程相关测试	飞机、航空发动机、生物医学工程、桥梁建筑等邻域的力学实验案例	极端尺度(时间和空间)、极端环境下的测试技术	线下授课、研讨、视频资源
第二章 误差分析和数据处理	测量误差的概念、数据处理和分析方法	工程应用实例、严谨求实的科学态度	3 σ 准则、肖维纳准则等在工程实际中的应用	不确定性表征方法、贝叶斯理论的发展	线下授课、研讨
第三章 相似理论	模型试验的概念、相似定理	传统文化、大国工程实例(东方明珠等)	紫禁城角楼的抗震性能、东方明珠抗震试验、缩比模型飞行试验	先进抗震设计方法	线下授课、研讨、视频资源
第四章 应变电测法	应变电测技术基础、电阻应变计、测量电路原理与设备、静态应变测量、传感器	科学家故事、西工大故事、大国工程实例	ARJ21全机最大载荷静力试验、海上钻井平台健康监测、桥梁振动测量、冰雹冲击叶片动应力测量等	数字孪生强度试验、柔性电子、电子皮肤等新型传感器	线下授课、虚拟仿真实验线上学习、线下研讨
第五章 光测法	光弹性实验的基本原理和方法、等差线和等倾线、三维光弹性、近代光测技术	大国工程实例、科大多少年曹原的魔角石墨烯研究	三峡大坝截面应力分布测量、舰船模型光弹性试验等	魔角石墨烯研究与云纹纹路、现代激光散斑测量	线下授课、讨论
第六章 数字图像相关法	数字图像相关法(DIC)的工作原理、基于 DIC 的测试典型案例	技术发展史(问题驱动创新)、工程应用实例	航空航天结构非接触测量、复合材料变形测量、生物医学工程、土木工程等	高温非接触测量、数字体图像相关法、基于人工智能的图像处理	线下授课、研讨、视频资源
实验课时	未知载荷测定、DIC 应变测量、动态应变测量、虚拟仿真实验	工程安全案例、社会责任感	飞机、发动机等大型装备力学实验走进课堂	基于小试样 DIC 的激光熔覆成型力学性能研究	线下分组实验、线上虚拟仿真实验

1) 模型试验

通过榫卯结构建造的紫禁城角楼的优异抗震性能,传播中国建筑智慧,提升学生的文化自信和自豪感。通过抛出问题:“如何证明其优异抗震性能?”用模型试验,自然过渡到本节教学内容。

2) 应变电测技术基础

以西北工业大学校园里的 ARJ21 飞机(前身为试验机)引入通过全机结构静力试验从失败到攻关成功的感人故事,传播敢于直面困难、不屈不挠奋斗的航空报国精神,培养学生的家国情怀。通过全机结构静力试验中用到的应变测试技术自然过渡到本节教学内容。

2.2 高水平虚拟仿真实验建设

近 3 年来,以国家科技进步奖相关成果、国家重大专项课题为牵引,依托学院国家级力学实验教学示范中心、飞行器结构完整性技术工信部重点实验室、陕西省航空发动机结构强度与可靠

性重点实验室等国家或省部级平台,基于大量实测数据,结合实验教学需求,有规划地建设了飞行器全机结构强度、飞行器加筋壁板结构屈曲稳定性、大冰雹撞击航空发动机风扇增压级、先进航空结构材料基本力学性能、材料高周疲劳力学性能测试及微观力学分析 5 门虚拟仿真实验教学课程(10 学时),包括材料级、组件级、部件级和全机试验,内容涉及静强度、屈曲、疲劳、动态冲击等测试技术,其中 2 门已获省级虚拟仿真实验一流课程认定、2 门获校级一流课程认定,初步形成了力学虚拟仿真实验课程资源群,如图 1 所示。将建设的虚拟仿真实验引入课堂和课外教学,构建“虚实结合”课程教学体系,通过信息技术和教学实施的深度融合,让学生线上直观感受大型结构力学实验过程,参与综合实验设计,结合线下研讨,拓展学生视野,提升其解决复杂问题的综合能力。



图1 建设的虚拟仿真实验课程资源群

2.3 引入工程应用案例和前沿研究成果

科研反哺教学是提升教学质量和课程创新性的有效途径^[11]。结合两个省部级重点实验室的科研项目背景以及国内外相关领域的最新研究成果(如Nature及子刊、Science及子刊、Advanced Materials等期刊论文),引入与课程教学内容相关的工程应用案例和前沿测试技术,丰富教学内容,重塑教学课件。引入的工程应用案例包括飞机全机结构强度和疲劳试验、涡轮叶片模拟件测试、冰雹冲击风扇叶片试验、基于DIC的传动装置齿轮疲劳试验、三峡大坝模型光弹性实验、海上钻井平台健康监测、东方明珠塔模型抗震测试等,引入的前沿研究成果包括柔性电子传感器/电子皮肤^[12-13]、生物组织(肌腱)微观力学测试^[14]、单层石墨烯拉伸测试^[15]、多孔纳米结构原位TEM压缩测试^[16]、Nature成果魔角石墨烯^[17]与云纹法、激光熔覆成型材料力学性能^[18]、大型结构数字孪生强度试验等,与教学内容对应性见表1。前沿研究成果与课程内容结合紧密,如在应变电测法的传感器部分,先讲传统传感器设计,在进一步介绍新型的柔性电子技术及其与应变电测的关系,拓展学生的视野;另外,绪论部分通过引入系列前沿研究成果,给学生传播和分析实验力学的研究热点发展趋势,包括非接触全场测试技术,原位TEM实验、超高温力学实验等极端尺度极端环境下的力学测试技术等。同时,结合这些实例设置开放思考题,以增加课程的挑战度和趣味性,启发学生的探究式与个性化学习。此外,鼓励学生参加课程团队组织和指导的大创项目、力学实验

技能竞赛和“周培源大学生力学竞赛”,开展自主实验设计和装置开发,进一步提高学生的创新实践能力。

3 基于虚拟仿真实验的教学实践和成效

3.1 课程教学实践

实验力学课程共32学时,包括理论课24学时和实验课8学时。在教学过程中将理论与实践紧密结合,并利用建设的虚拟仿真实验安排10学时的线上自主学习,结合理论授课、课堂研讨、线下分组实验、虚拟仿真实验线上自主学习、自主实验设计等教学方式开展线上线下混合式教学实践。建设的虚拟仿真实验中涉及应变计粘贴及选用、测量方案设计等相关知识点,基于学生线上自主学习情况优化线下课堂授课,实现线上线下教学的互相促进。同时,在教学过程中注重课程的价值塑造作用,并结合开放思考题、虚拟仿真实验和自主实验设计等进一步加强学生综合创新实践能力的培养,取得了良好的教学效果。

3.2 课程考核方式

在课程成绩评价方面,改革评价机制,提升过程考核比例,总成绩中包括考试成绩50%、平时成绩20%和实验报告30%,其中平时成绩包含课堂表现、作业习题和思考题回答情况,实验报告包括线下实验报告和虚拟仿真实验报告等。通过多样化的考核方式,实现了从重点考察考试分数到学生理论学习、实践操作、创新能力等多方面综合评价的转变。

3.3 教学改革成效

通过近年来的教学改革和实践,丰富了教学内容,优化了教学方法,赢得了学生们的好评,同时取得了较显著的建设成效,实验力学课程于 2022 年 4 月被认定为校级线上线下混合式一流课程,同时被评为“课程思政”示范课程,所建设的 5 门虚拟仿真实验教学课程中有 2 门获省级一流课程认定,线上学习总人数达 39200 余人次,并基于虚拟仿真实验建设及应用获批 2022 年第二批教育部产学研合作协同育人项目。此外,课程团队教师在省级和校级教学竞赛中获奖 5 项,入选第三届全国高等学校力学类专业优秀课程思政案例,参与指导学生在“周培源大学生力学竞赛”个人赛中获一、二等奖共 7 项和“基础力学实验”团体赛一、三等奖各 1 项,团队教师获“周培源大学生力学竞赛”优秀指导教师奖 5 人次。

4 结束语

一流课程建设是进行一流人才培养的重要保障。西北工业大学实验力学课程打破传统实验教学模式,基于建设的高水平虚拟仿真实验开展线上线下混合式教学,将大量工程应用案例和前沿研究成果引入课堂教学中,丰富了教学方法和教学内容。通过教学改革和实践,拓展了课程教学广度和深度,开阔了学生的视野,加强了学生综合创新实践能力的培养,同时突出了价值塑造,取得了良好的教学效果,可为相关实验课程的建设提供借鉴。

参考文献

- [1] 中华人民共和国教育部. 教育部关于一流本科课程建设的实施意见[EB/OL]. (2019-10-30)[2023-03-28]. http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7056/201910/t20191031_406269.html?eqid=a52a1109000ffaa9000000036461d241&wd=&eqid=acea728e0003492f000000005648b16d7.
- [2] 闫长斌, 时刚, 张素磊, 等. “双一流”和“双万计划”背景下学科、专业、课程协同建设: 动因、策略与路径[J]. 高等教育研究学报, 2019, 42(3): 35-43.
- [3] 教育部高等教育司. 关于开展新工科研究与实践的通知[EB/OL]. (2017-02-20)[2023-03-28]. http://www.moe.gov.cn/s78/A08/tongzhi/201702/t20170223_297158.html.
- [4] 林健. 面向未来的中国新工科建设[J]. 清华大学教育研究, 2017, 38(2): 26-35.
- [5] 蒲丹, 周舟, 任安杰, 等. 多层次综合性虚拟仿真实验教学中心建设经验初探[J]. 实验技术与管理, 2014, 31(3): 5-8.
- [6] 耿志挺, 陈学军. 材料力学虚拟仿真实验系统的设计与开发[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(5): 98-101.
- [7] 阮君, 周权, 张迪, 等. 基于虚拟仿真的混合式动物学实验教学模式[J]. 实验科学与技术, 2023, 21(1): 130-134.
- [8] 付小莉, 操金鑫, 姚丽芳. 疫情影响下的工程流体力学在线教学探索与实践: 以同济大学为例[J]. 大学教育, 2022(9): 26-29.
- [9] 刘建平, 周耀杭, 莫丹华. 深入把握高校课程思政的基本规律[J]. 中国高等教育, 2020(23): 36-38.
- [10] 沈光, 洪一明. 高校实验教学课程思政亲和力的价值和提升路径[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(12): 237-240.
- [11] 唐琳, 施开波, 刘星月, 等. 科研成果转化为创新教学实验项目的探索与实践[J]. 实验室研究与探索, 2022, 41(9): 174-177.
- [12] XU B, AKHTAR A, LIU Y, et al. An epidermal stimulation and sensing platform for sensorimotor prosthetic control, management of lower back exertion, and electrical muscle activation[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(22): 4462-4471.
- [13] XU S, ZHANG Y, JIA L, et al. Soft microfluidic assemblies of sensors, circuits, and radios for the skin[J]. *Science*, 2014, 344(6179): 70-74.
- [14] ROSSETTI L, KUNTZ L A, KUNOLD E, et al. The microstructure and micromechanics of the tendon-bone insertion[J]. *Nature Materials*, 2017, 16(6): 664-670.
- [15] CAO K, FENG S, HAN Y, et al. Elastic straining of free-standing monolayer graphene[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 284.
- [16] MEZA L R, DAS S, GREER J R. Strong, lightweight, and recoverable three-dimensional ceramic nanolattices[J]. *Science*, 2014, 345(6202): 1322-1326.
- [17] CAO Y, FATEMI V, FANG S, et al. Unconventional superconductivity in magic-angle graphene superlattices[J]. *Nature*, 2018, 556(7699): 43-50.
- [18] ZHAO Z, LI L, YANG W, et al. A comprehensive study of the anisotropic tensile properties of laser additive manufactured Ni-based superalloy after heat treatment[J]. *International Journal of Plasticity*, 2022, 148: 103147.

编辑 钟晓