

大飞机智能精准锤铆虚拟仿真实验课程设计

王 华, 董婉娇, 吴立辉, 郑 刚

上海应用技术大学智能技术学部机械工程学院, 上海

收稿日期: 2024年9月9日; 录用日期: 2024年10月7日; 发布日期: 2024年10月22日

摘 要

虚拟仿真实验作为物理实验的有效补充, 在专业教育过程中起着非常重要的作用。气动锤铆是飞机装配的主要连接工艺之一, 开展气动锤铆物理实验具有场地需求大、实验材料价格高、技能水平要求高、干涉量测量复杂等问题。采用信息化手段开展虚拟仿真实验, 通过三维虚拟仿真的形式, 将大型飞机铝合金构件的锤铆连接过程真实展现在学生面前, 使学生在大型飞机虚拟装配环境中进行锤铆工艺系统软硬件搭建、锤铆工艺参数选择、锤铆工艺装备选择和铆接头质量检测等仿真实验操作和理论学习, 帮助学生架构面向高端复杂产品智能制造的机械设计制造及其自动化专业知识体系架构。

关键词

虚拟仿真实验, 精准锤铆, 工艺装备, 刚度

Course Design of Virtual Simulation Experiment for Intelligent Precision Percussive Riveting of Large Aircraft

Hua Wang, Wanjiao Dong, Lihui Wu, Gang Zheng

School of Mechanical Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai

Received: Sep. 9th, 2024; accepted: Oct. 7th, 2024; published: Oct. 22nd, 2024

Abstract

Virtual simulation experiment, as an effective supplement to physical experiments, plays a very important role in professional education. Pneumatic percussive riveting is one of the main connection processes in aircraft assembly. Conducting physical experiments on pneumatic percussive riveting has issues such as high site requirements, high material prices, high skill requirements, and complex interference measurement. Using information technology to conduct virtual simulation experiments,

the percussive riveting process of large aircraft aluminum alloy components is realistically presented to students in the form of 3D virtual simulation. This enables students to conduct simulation experiments and theoretical learning in the virtual assembly environment of large aircraft, such as software and hardware construction of percussive riveting systems, selection of riveting parameters, selection of riveting equipment, and quality inspection of riveted joints. It helps students construct a professional knowledge system architecture for mechanical design, manufacturing, and automation for intelligent manufacturing of complex products.

Keywords

Virtual Simulation Experiment, Precision Percussive Riveting, Process Equipment, Rigidity

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

气动锤铆工艺是现代飞机制造三大连接技术(机械连接(铆接、螺接)、胶接、焊接)之一,具有铆接设备成本低、铆接方式灵活多变、铆接操作需求空间小、操作过程快捷、能够适应不同材料之间的连接等优点,在飞机装配中得到了广泛使用。铆接接头的质量直接影响飞机整机的飞行安全和服役寿命,精准锤铆连接工艺是保证飞机装配质量、整机安全性和服役寿命的重要基础和保证之一。

随着我国航空工业的飞速发展和新材料的不断应用,飞机制造企业需要大量高素质应用创新型专门人才,尤其是铆接方面的专门技术人才。但由于飞机制造装配系统的复杂性、航空铝合金板材的高价格、航空铆钉的高价格和气动锤铆高技能专门人才的稀缺性等原因,本科生在大学学习期间往往没有机会接触到飞机铆接装配方面的专门实验或实训课程。

虚拟仿真实验是提升实验教学质量、提升新工科人才培养质量、扩大课程影响的重要方式之一[1]。岳利可[2]开发了面向社会开放的发动机拆装及工作过程虚拟仿真实验平台,拓展了拆装实验教学的广度和深度,探索了新的发动机拆装实验教学方法和模式。尹肖云[3]基于 BOPPPS 教学模式,提出了五阶段教学设计,通过仿真实验教学提高工程实践素养。雷姗[4]开发设计了脉冲激光沉积(PLD)过程虚拟仿真实验项目,完整模拟了 PLD 薄膜制备的工艺流程及关键控制条件。赵熹[5]建设了飞机机翼数字化装配虚拟仿真实验课程来提高飞机装配领域的人才培养质量,使学生快速掌握现代飞行器的装配技术和装配技能。窦东阳[6]针对过程装备与控制工程专业过程装备控制技术和化学工程与工艺专业化工过程测控技术等课程,开发了基于组态软件和 Simulink 的虚拟仿真实验教学系统。秦春[7]通过分析“材料物理性能实验”课程中的教学现状,结合虚拟仿真实验教学项目的实施,论述了开展虚拟仿真实验的优势。陈光荣[8]以“机器人技术基础”课程为例,从微观层面介绍了以项目为导向的虚拟仿真实验教学改革的具体实践与探索。张嘉鹭[9]进行了“动车组检修”课程虚拟仿真实验构建与学习指标评价体系研究。孙斌[10]开发了飞机起落架系统交互式虚拟仿真实验,实现了交互式虚拟实验界面及操作流程设计。姚敬[11]建立了“热处理设备”课程虚拟仿真实验教学系统,帮助学生掌握热处理设备的基本理论和技能、获得良好的思辨能力和岗位胜任力,并培养学生的工学人文精神和家国情怀。张继研[12]研究了新工科背景下过程控制虚拟仿真实验教学课程建设的相关问题,构建了虚拟实验平台以模拟仿真设备操作培训、单回路控制系统设计、串级控制系统的投运和整定、前馈控制系统的投运和整定及其他先进控制等。邱胜海[13]研究了虚拟仿真实验课程项目化体系构建及综合评价方法,构建了基于模糊数学、加权评价等方法的课程建

设综合指标评价体系。常海超[14]建立了船舶与海洋工程专业虚拟仿真实验平台,并探究了课程教学策略。卢艳丽[15]研究了航空航天用材料虚拟仿真实验教学一流课程在人才培养中的应用,探索了材料科学与工程实验教学中的课程思政内容建设等问题。

大飞机智能精准锤铆虚拟仿真实验课程围绕教育部“新工科”建设、深挖“高端应用型专门人才”的培养特色,凝练智能精准锤铆工艺过程中的核心要素,抓住智能制造背景下“应用技术”新的增长点,采用信息化手段开展虚拟仿真实验,通过三维虚拟仿真的形式,将大型飞机铝合金构件的锤铆连接过程真实展现在学生面前。使学生在大型飞机虚拟装配环境中进行锤铆工艺系统软硬件搭建、锤铆工艺参数选择、锤铆工艺装备选择和铆接接头质量检测等仿真实验操作和理论学习。

2. 气动锤铆物理实验存在的问题

在高校实验室开展气动锤铆物理实验存在以下问题和困难:

(1) 飞机机身、部段和型架等制造成本高、专用性强。同时市场上大型飞机机身、部段等数量非常少,高校基本很难购置。即使能够购买到一些机身、部段等,在学校实验室布置飞机装配型架,需要较大的实验场地,这对于非航空类院校,存在很大的困难。

(2) 飞机机身所用的轻质高强材料,如铝锂合金材料的加工工艺复杂、成本高、价格贵。开展锤铆物理实验需要大量的铆钉和铆接板,且铆钉和铆接板都无法重复利用,造成实验成本高。

(3) 飞机锤铆物理实验教学中,必须要保证锤铆实验的重复性、一致性。气动锤铆需要操作者具有一定的铆接技能才能完成锤铆操作,这对在校大学生是一个非常大的挑战。学生在课程有限的学时之内,很难通过锤铆实操得到合格的锤铆接头,也就无法观察到正确的实验现象,也无法获得有效的实验数据,并基于实验数据分析得出正确的结论。

(4) 从实验安全的角度考虑,铆接板制孔和锤铆环节存在一定的风险,需要专职的实验老师(具有上岗证)才能开展实训操作。专职锤铆实验教师的缺乏导致无法开展锤铆物理实验教学。

本虚拟仿真实验课程依托沪上领先的虚拟交互教育创新中心、高效混合技术开发实验室,将科研成果转化为实验课程教学,在虚拟仿真环境里先行先试、保证实验安全,解决真实环境下的实训操作、安全、成本和专职实验教师缺乏造成的“理解难、实施难、考核难”等问题。课程将信息技术与数字化制造技术的结合,采用国际先进的 Unity3D 引擎在国际主流大型客机(波音 B737、空客 A320、中国商飞 C919)总装制造过程的基础上,根据课程教学的需要进行了综合整理,定制开发了具有沉浸感的大型客机装配场景。同时在三维虚拟仿真环境中将飞机装配现场场景、锤铆局部成形过程、材料性能的测试过程真实展现在学生面前,使学生在虚拟装配环境中进行机械制造工艺与装备的仿真实验操作和理论学习。

3. 虚拟实验平台设计

本虚拟仿真实验系统采用 B/S 架构(图 1),模型和脚本运行在服务器上,客户端通过浏览器访问指定网址便可开展实验。

仿真实验软件系统整体框架如图 2,总体层次结构分为应用层、服务层、软件层和数据层。

仿真实验软件系统由统一管理平台、虚拟仿真实验和平台数据库组成,包括软件资源、实验框架和逻辑管理三大部分。软件资源包括实验场景资源、场景相关设备、实验界面资源、流程逻辑资源。实验框架包括实验简介、认知模块、锤铆实验、数据分析和实验报告内容。逻辑管理包括交互模型参数管理、人机协同交互管理、实验流程操作逻辑管理、铆接数据逻辑管理。虚拟仿真实验系统的底层数据库由 MySQL、Redis、Navicat、Mybatis 等数据库组成,虚拟仿真实验相关数据内容通过数据接口与我校教务系统和国家虚拟仿真实验教学项目共享平台等外部系统进行对接。

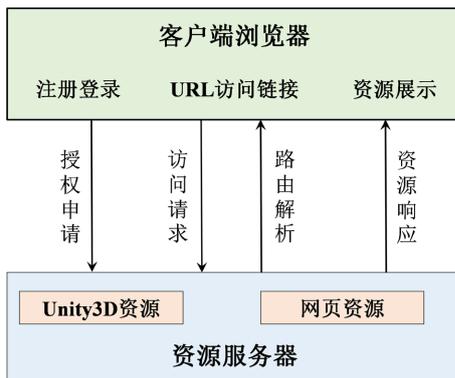


Figure 1. Architecture of virtual simulation experiment system

图 1. 虚拟仿真实验系统架构



Figure 2. Overall architecture of virtual simulation experiment system

图 2. 虚拟仿真实验系统总体架构

4. 实验操作步骤

飞机锤铆虚拟仿真实验的操作环节围绕锤铆装备选择、工艺参数设置、接头成形和质量检测，基于产出导向教育理念，以大型飞机装配、锤铆工艺为载体让学生综合应用互换性与技术测量、机械加工工艺、机械制造工艺装备和工程材料等多学科知识，完成虚拟仿真实验。

本虚拟仿真实验系统的组成和步骤流程如图 3 所示，主要包括：

(1) 基础模块(图 4)。主要包括：飞机结构认知与装配、气动铆枪结构认知与装配、顶铁与铆钉认识、锤铆气动控制系统连接、锤铆协作机器人结构认知与装配、盒式工装认知与装配、测量设备认知等。

(2) 人工锤铆操作模块。主要包括：飞机部件在盒式工装上安装、人工锤铆系统布局与通讯布线、PLC(可编程逻辑控制器)的 I/O 口分配、锤铆任务编程设计、人工锤铆实验操作、锤铆接头形貌和干涉量测量等。

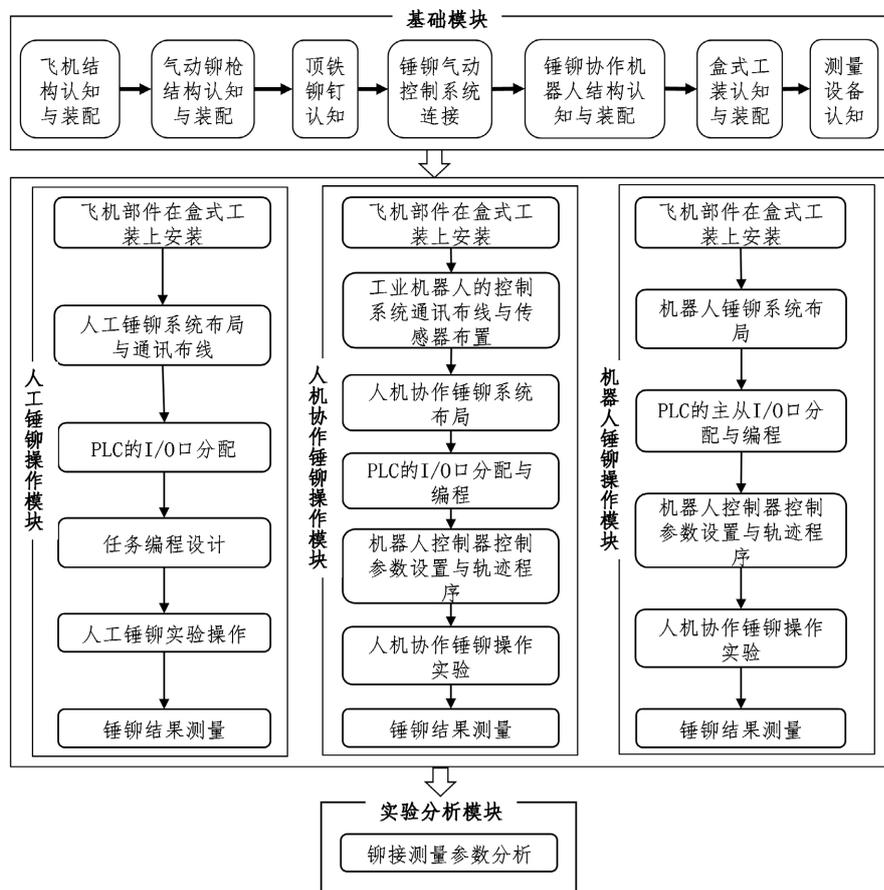


Figure 3. Virtual simulation experiment steps
图 3. 虚拟仿真实验步骤

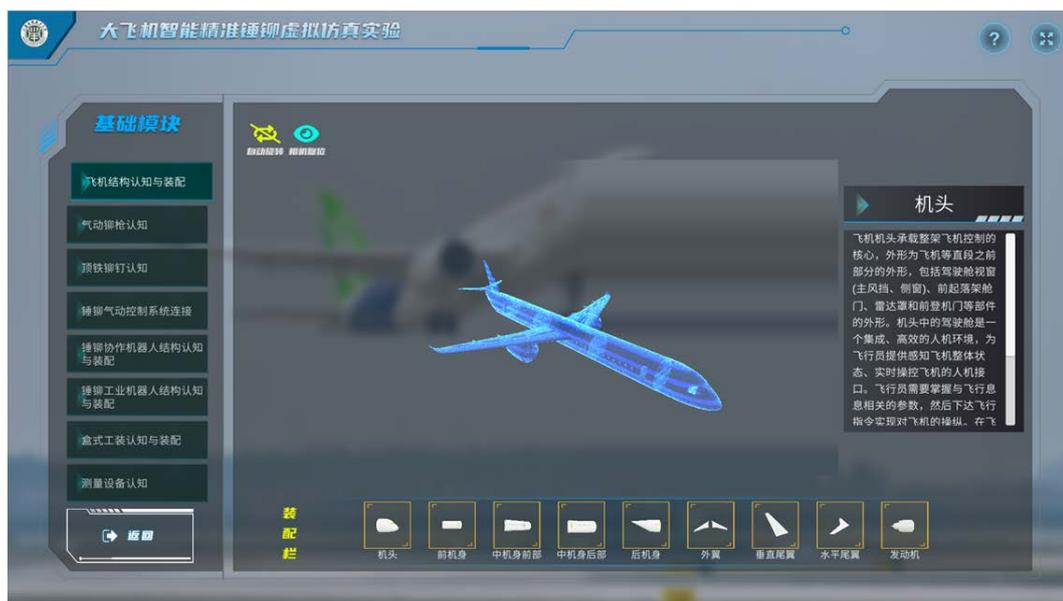


Figure 4. Basic module interface of virtual simulation experiment
图 4. 基础模块界面

(3) 人机协作锤铆操作模块(图 5)。主要包括：飞机部件在盒式工装上安装、工业机器人的控制系统通讯布线与传感器布置、人机协作锤铆系统布局、PLC 的 I/O 口分配与编程、机器人控制器控制参数设置与轨迹程序、人机协作锤铆操作实验、锤铆接头形貌和干涉量测量等。



Figure 5. Interface of human-machine collaborative percussive riveting module
图 5. 人机协作锤铆操作模块界面

(4) 机器人锤铆操作模块。主要包括：飞机部件在盒式工装上安装、机器人锤铆系统布局、PLC 的主从 I/O 口分配与编程、机器人控制器控制参数设置与轨迹程序、人机协作锤铆操作实验、锤铆接头形貌和干涉量测量等。

(5) 实验结果分析模块。主要包括：锤铆接头形貌和干涉量测量数据分析、锤铆接头质量的影响因素分析等。

本课程期望通过学生的虚拟仿真实验操作来达成以下技能目标：(1) 根据质量检测要求选择正确的测量工具；(2) 根据测量工具的精度保留正确的有效数字；(3) 针对发现多因素影响规律的需要进行试验设计；(4) 对实验数据进行分析 and 处理、得出正确的结论。

5. 虚拟仿真实验的结果分析

解决复杂工程问题需要综合应用多学科知识，并将知识点构建为知识体系，建立知识点之间的支撑、逻辑关系，然后才能解决问题。飞机锤铆工艺实验涉及机械(装配连接工艺、压力成形)、材料(航空铝合金板材成分、组织和力学性能)、自动化(控制系统硬件、软件程序)、气动(气动比例阀、电磁阀的时序控制)和人机工程(人机协作)等多学科知识，以及前期实践类课程的学习成果。

虚拟仿真实验结果分析环节从气动锤铆工艺装备的刚度特性入手，以飞机装配过程中“环境-装备-工艺”的交互作用机制为驱动，引导学生探究和发现影响锤铆接头质量的主要因素、提炼轻质高强材料对锤铆连接工艺的挑战和需求、理解机械制造工艺参数在具体实施过程中的环境适应性，为达成相关课程的课程目标和毕业要求提供支撑。

5.1. 锤铆工艺参数对接头质量的影响规律

本虚拟仿真实验课程的数据分析主要流程如图 6 所示，包括以下内容。



Figure 6. Data analysis steps for virtual simulation experiments

图 6. 虚拟仿真实验数据分析步骤

(1) 输入参数。学生根据实验目的，自行选择采用单因素法或正交法来设计实验。输入参数包括：铆接形式、铆枪型号、输入气压、击打时间、顶紧力、铆接孔位等。

(2) 数据测量。学生需要选择正确的测量仪器对关键尺寸进行测量并记录数据，在数据记录中，学生需要根据选择仪器的精度，保留正确的有效数字。

(3) 数据分析。学生需要通过对测量数据进行分析，获得表征铆接性能的参数，如干涉量等，并判断是否合格。

(4) 分析与结论。学生通过对实验数据分析，得出工艺参数及铆接设备对铆接质量的影响规律。

5.2. 锤铆工艺装备刚度对接头质量的影响规律

在不同实验场景中放置不同的锤铆工艺装备，采用相同的工艺参数进行实验，得到不同的锤铆接头性能，从而分析不同工艺工况对铆接性能的影响。虚拟锤铆仿真实验后的数据源自实际锤铆试片的测试数据，学生完成实验后对相关数据进行正确的分析后，能够得出相应的正确结论，从而对“环境-装备-工艺”的交互作用机制在具体产品结构、工艺过程中的实际体现有直观体验和深入理解。虚拟锤铆仿真实验装备包括：人工锤铆、人机协作锤铆和工业机器人锤铆(图 7)。

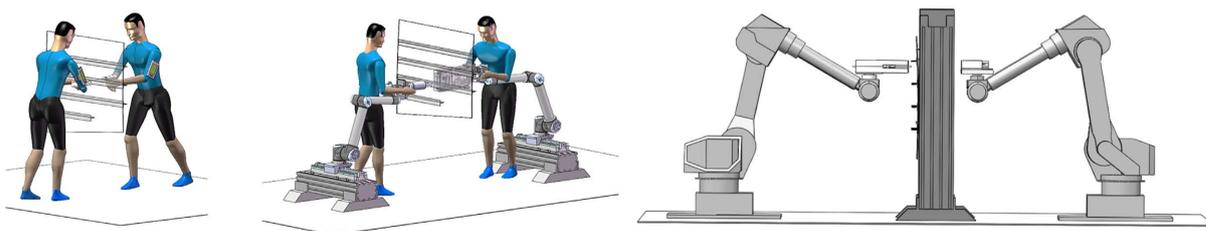


Figure 7. Three different percussive riveting equipment

图 7. 三种不同的锤铆工艺装备

在进行锤铆虚拟仿真实验时，学生将在三种不同工况下采用同一组实验参数进行实验，实验后需要多次测量铆钉的镢头高度、镢头直径、钉头侧干涉量、中部干涉量、镢头侧干涉量。学生计算实验数据后，建立不同工况下与镢头直径、镢头高度和干涉量的曲线分析图，并得到结论：

(1) 在相同工艺参数下，采用机器人锤铆方式，镢头高度最低、镢头直径最大、干涉量最大。采用人工锤铆方式，镢头高度最高、镢头直径最小、干涉量最小。

(2) 工艺装备的刚度系数将影响锤铆接头质量。

(3) 相同的输入气压、击打时间的条件下：锤铆工艺装备刚度越大，铆接方式的刚度越强，镢头高度越低、镢头直径越大、干涉量越大。

6. 虚拟仿真实验的评分

本虚拟仿真实验课程的成绩评定主要包括以下内容。

(1) 实验方案：评价学生根据虚拟仿真实验的特点、实验目的和要求设计仿真实验方案、选择实验参数范围并搭建虚拟仿真实验系统的能力。

(2) 实验成绩：虚拟仿真实验软件设置了相关知识点内容、开放问答及随机操作，依据学生在各个步骤中的实验操作和答题情况，采用步骤赋分模型完成对学生实验过程的打分。

(3) 实验答辩：采用实验总结汇报的方式交流实验方案设计、数据分析方法、实验结论与学习成果，开展学生互评与教师评分，评价学生的表达沟通能力、知识点组合与应用能力等。

(4) 实验报告：评定虚拟仿真实验报告成绩，内容主要包括实验目的、实验原理、实验数据分析、实验结果与结论、实验心得等。

7. 结语

本虚拟仿真实验课程以大型飞机智能装配、精准锤铆为载体，帮助学生建立知识点之间的支撑关系、架构面向高端复杂产品智能制造的机制专业知识体系，从而解决工程实践中的复杂问题，这些知识的综合应用对本科生具有很好的实用性和一定的高阶性与挑战度。

本虚拟仿真课程的实验操作过程沉浸感强、实验所设置的扩展和思考环节有助于培养学生的自主学习和创新思维；教学过程注重过程考核和课程目标的达成，成绩考核评价科学合理。学生对本虚拟仿真实验课程有较高的学习兴趣、整体评价较好。

本课程已被认定为上海高校市级一流本科课程，依托我校的虚拟仿真实验教学平台，推进与相关高校的合作交流，将其应用于企业员工培训、航空爱好者科普等领域，并向全国飞机制造、飞机维修等行业和企业的相关专业从业人员提供课程服务，提升专业人员的能力和水平，不断扩大本实验项目在企业人员培训中的共享和应用。

本虚拟仿真实验课程项目将进行持续建设，不断优化实验交互、操作步骤。总结、整理实验教学过程中的资料和学生需求，编写实验课程教材。在此基础上，拟建设物理锤铆实验平台，包括人工锤铆、协作机器人锤铆、工业机器人锤铆等模拟实验工位，开展锤铆物理实验。同时，拟开展半物理实验，以物理锤铆实验过程驱动虚拟仿真实验。

基金项目

上海应用技术大学校级课程建设项目(大飞机智能精准锤铆虚拟仿真实验)；上海应用技术大学课程思政示范课程群建设项目(机械设计课程群)；上海应用技术大学课程思政示范课程建设项目(互换性与技术测量)。

参考文献

- [1] 杨艳华, 普园媛, 常俊, 等. 新工科背景下综合性虚拟仿真实验的开发[J]. 电气电子教学学报, 2022, 44(6): 142-147.
- [2] 岳利可, 梁兴雨, 高文志, 等. 发动机拆装虚拟仿真实验建设与应用[J]. 实验室科学, 2022, 25(6): 114-117, 121.
- [3] 尹肖云, 邹强, 白晓瑞, 等. BOPPPS 模式下飞行原理课程虚拟仿真实验教学设计[J]. 实验室研究与探索, 2023, 42(2): 253-257.
- [4] 雷姗, 孙立志, 王鑫铭, 等. 脉冲激光沉积过程虚拟仿真实验设计及教学模式探索[J]. 实验室研究和探索, 2023, 42(5): 243-246.
- [5] 赵熹, 李雨轩, 关世玺, 等. 飞机机翼数字化装配虚拟仿真实验课程设计[J]. 科教导刊, 2023(6): 111-113.

-
- [6] 窦东阳, 王艳飞, 王启立. 过程控制技术课程虚拟仿真实验教学系统建设与翻转课堂实践[J]. 创新创业理论研究与实践, 2023(13): 30-33.
- [7] 秦春, 蒋亮, 李涌泉. 虚拟仿真技术在“材料物理性能实验”课程中的应用探究[J]. 教育教学论坛, 2023(37): 88-91.
- [8] 陈光荣, 陈亚. “机器人技术基础”课程虚拟仿真实验教学研究[J]. 实验室研究与探索, 2023, 42(10): 159-164.
- [9] 张嘉鹭, 李晓鹏, 张林. “动车组检修”课程虚拟仿真实验构建与学习指标评价体系研究[J]. 科技风, 2023(28): 50-52.
- [10] 孙斌, 张铁纯, 杨柏. 飞机起落架系统交互式虚拟仿真实验开发与应用研究[J]. 教育教学论坛, 2023(42): 13-16.
- [11] 姚敬, 肖璇, 舒小勇. “热处理设备”课程虚拟仿真实验教学系统建设及应用[J]. 教育教学论坛, 2023(43): 125-128.
- [12] 张继研, 王宏伟, 解永平, 等. 新工科背景下过程控制虚拟仿真实验教学课程建设[J]. 实验室科学, 2023, 26(5): 217-222.
- [13] 邱胜海, 王萍萍, 唐利芹, 等. 虚拟仿真实验课程项目化体系构建及综合评价[J]. 科教文汇, 2023(14): 102-105.
- [14] 常海超, 冯佰威, 詹成胜. 船舶与海洋工程专业虚拟仿真实验平台建设及教学策略探究[J]. 高教学刊, 2023, 9(16): 114-117.
- [15] 卢艳丽, 马良, 高峰, 等. 虚拟仿真实验教学一流课程建设研究与实践[J]. 高教学刊, 2023, 9(25): 34-37.