



基于智能虚拟生产车间的机械制造课程群 教学实践

姜 晨, 叶 卉, 杜宝江, 吴 薇, 高大威

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

摘要: 在机械制造类课程中, 由于大型装备制造环境危险且工艺复杂, 导致学生难以利用实体设备或实际生产制造车间开展实物实验, 极大限制了学生工程实践能力的提升。基于此, 该文建立了面向机械制造课程群的智能虚拟生产车间和虚拟仿真实验教学方法, 通过 WebGL 技术标准建立可交互操作的涡轮发动机叶轮全自动加工虚拟车间, 并在此基础上开发与实体数控机床、机械手、AGV 运输小车等实验设备对应的虚实融合接口以及机械制造与控制实验功能, 形成虚拟仿真实验教学软件, 供机械类相关课程理论与实践教学使用。相关成果已应用于多门机械制造类课程教学中, 学生专业知识和工程应用能力提升显著, 教学效果良好, 证明了该实践教学方法的合理性与实用性。

关键词: 机械制造; 虚拟车间; 实践教学; 虚实融合实验

中图分类号: G642

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230565

Teaching Practice of Mechanical Manufacturing Course Group Based on Intelligent Virtual Production Workshop

JIANG Chen, YE Hui, DU Baojiang, WU Wei, GAO Dawei

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In the teaching of undergraduate mechanical-manufacturing-technology-related courses, considering the danger environment and the process complexity of the large equipment manufacturing, it is quite difficult for students to carry out physical experiments in the physical laboratory or physical intelligent manufacturing workshop, which greatly limits the improvement of students' engineering practice ability. On this basis, a virtual production workshop as well as the virtual simulation experiment teaching method for the courses group of mechanical manufacturing is proposed. Through the WebGL technology standard, the interactive operation of the turbine engine impeller automatic processing virtual workshop is established, and furthermore the virtual-actual combined interface corresponding to experimental equipment such as the physical computer numerical control (CNC) machine tool, manipulator, and automated guided vehicle (AGV) transportation cart as well as the virtual simulation experiment teaching software are developed for practical teaching. The relevant results have been applied to the teaching of mechanical manufacturing courses, and the results show that the students' professional knowledge level and engineering application ability have been significantly improved, and the satisfied teaching effect proves the rationality and practicability of the practical teaching measure.

Key words: mechanical manufacturing; virtual workshop; practical teaching; virtual reality integration experiments

随着我国“制造强国”战略的实施和高端装备制造制造业的快速发展, 对高端装备核心零部件的加工质量和生产效率要求不断提升, 也对高性能制造的实现提出了新的技术挑战。因此, 在国家全面推进工业化、加快建设制造强国的战略背景

下, 为国家培养、输送具有较强工程应用与实践能力的机械专业人才显得尤为重要^[1-2]。机械制造类课程作为机械专业的重要专业课, 包括机械制造技术、数控技术、先进制造技术、精密加工技术等课程, 这些课程以培养学生在制造领域的知

收稿日期: 2023-11-29; 修回日期: 2024-02-26

基金项目: 2022 年教育部产学合作协同育人项目 (220506071125324, 220606071203633, 220506071113615); 2022 年度上海高等学校一流本科课程“数控机床伺服驱动虚拟仿真实验”; 2023 年度上海理工大学教师教学发展研究项目 (CFTD2023ZD06); 2023 年度上海理工大学本科教学研究与改革项目。

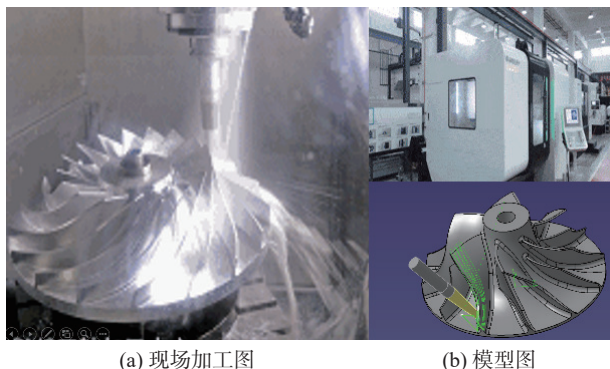
作者简介: 姜晨(1978-), 男, 博士, 教授, 主要从事智能制造与精密加工技术方面的研究。E-mail: jc_bati@163.com

识、技术和能力为目标^[3],是实现机械专业人才培养的重要保障。但目前,机械制造类课程教学通常以理论教学为主,学生缺乏充足的实践锻炼机会,严重阻碍了学生工程应用能力的提升^[4-5]。以现代化智能制造生产系统为载体开展实践教学有助于培养和提升机械专业本科生的工程实践能力,也能强化学生对专业理论知识的理解。然而实际工厂的智能制造生产线因自身承担生产任务重以及自动化程度高等因素,无法让大批量的学生在生产现场进行可重复性的设计、测试、探究等教学实践活动,同时现场也面临着学生操作的危险性问题。因此,通过将实体智能生产车间进行虚拟化,并以此为基础融合教学功能,形成虚拟仿真网络实验教学课程供学生学习应用^[6-7],是较为理想的解决方案,同时符合国家推进教育数字化转型的发展定位和导向^[8]。本文以涡轮发动机叶轮全自动加工为例,通过开发与实体数控机床、机械手、运输小车等实验设备相呼应的智能虚拟车间,形成“目标导向—控制设计—模拟检验—优化设计”的闭环实验模式,实现机械制造课程群实验教学设计与实践。

1 机械制造虚拟仿真实验教学建设

1.1 机械制造虚拟实验总体框架

叶轮作为涡轮发动机的核心部件,其曲面造型复杂,设计加工难度大,是最具有代表性的复杂零件^[9-10]。实际叶轮生产过程中需要依托数控车床、立式加工中心或五轴加工中心等数控设备,通过设定程序自动控制刀具在叶轮表面进行不同的加工操作,如车削、铣削、钻孔、攻牙、切割等,以完成叶轮的最终全自动加工与成型,如图1所示。



(a) 现场加工图

(b) 模型图

图1 叶轮实际加工现场与模型图

虚拟仿真实验的重点是模拟现实生产环境、建设可重复设置操作的虚拟环境,并实现交互操作的体验式教学^[11-13]。为此,设计虚拟仿真实验总体框架,包含涡轮发动机虚拟生产车间、实验室实体实验设备、制造技术实验功能、校园网虚拟课程服务器和实验管理功能等,如图2所示。

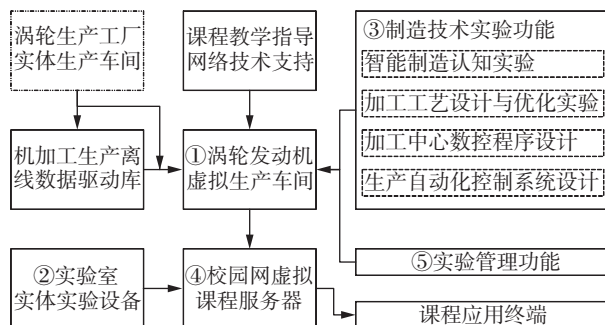


图2 机械制造虚拟仿真实验总体框架图

1) 虚拟生产车间

采用 WebGL 网络方式,开发一套以叶轮生产加工车间为场景,以智能制造认知、加工工艺设计与优化、加工中心数控程序设计和生产自动化控制系统设计为实验教学内容的模拟软件,形成三维涡轮发动机生产虚拟仿真车间,为学生实验提供高度仿真实体生产系统的实验环境。

2) 实体实验设备的融合

基于实验室中现有的实体设备,如数控机床、机械手、AGV 运输小车、可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)装置等,将其作为生产线上的设备节点,通过开发虚实联动接口,与虚拟车间中的虚拟生产线融为一体,使得虚拟生产线与实体生产线相呼应。学生能够在虚拟仿真加工环境中完成工艺参数优化和数控程序设计、安装接线等操作,并进行运动控制分析。虚拟生产线平台如图3所示。



图3 虚拟生产线平台

3) 制造技术实验功能

该功能包含了智能制造认知、生产与物流设备操作、生产工艺流程设计、自动化控制设计、装夹具设计、数控加工程序设计、生产检测、模拟生产校验、生产安全等实验功能模块。

4) 网络课程服务功能

三维虚拟交互实验课程通过 WebGL 技术, 实现免插件的虚拟实验内容的 Https 页面集成, 形成基于校园网专用虚拟实验服务器的校内外客户端访问模式, 学生可以使用电脑或手机等移动终端上网操作, 有效地增强了客户端浏览器软件的方便性和客户端设备的适应性。通过多服务器集群和访问链路自动切换方法, 提升了访问并发数。

5) 实验管理功能

该功能设有基于生产经验和机械工程知识数据库的设计合理性与操作正确性判别与计分、知识推送与引导、实验操作帮助等辅助功能模块。

1.2 虚拟生产车间构建

1) 作为实验对象的智能制造车间构成

智能制造加工车间以涡轮发动机关键零件为加工对象, 设有涡轮发动机叶轮一体成型、发动机主轴和发动机箱体 3 条自动化加工生产线, 各生产线包含数控机床、数控加工中心、定装及横梁倒挂式上下料机器人、AGV 运输小车、自动料仓、滚筒输送带等加工和物流设备等, 如图 4 所示。



①—涡轮发动机叶轮一体成型生产线; ②—发动机主轴生产线; ③—发动机箱体生产线。

图 4 涡轮发动机自动加工虚拟生产车间界面

2) 工艺流程设计

生产车间按照工件加工工艺流程进行工段划分, 生产线按照加工工序进行节拍、路线、物流站点等组织, 生产线与设备节点按照工序动作进行自动控制运行。

1.3 虚拟仿真实验功能设计

1) 智能制造认知实验

智能制造车间整体认知界面如图 5 所示。通

过实体生产数据驱动运行的虚拟生产线, 学生可认识加工对象、工艺流程、生产系统组成、设备布局、信息通信、自动化控制、质量控制与检验、安全生产等要素, 了解装备制造的专业知识、新技术与绿色制造概念。通过可调参数驱动的数控加工中心、刀具、装夹具、数控程序、控制系统、机器人、AGV 运输小车、输送带、料仓等设备的交互操作, 学生能够熟悉生产节拍、工艺流程和设备结构性能。



图 5 智能制造车间整体认知界面

2) 加工工艺设计与优化实验

以专用机床和数控加工中心为载体, 以叶轮一体成型加工为对象进行加工工艺设计, 包括加工流程、节拍、生产力平衡分析、工序、机床参数、刀具参数、装夹方式、物流衔接、控制时序等。通过设计参数驱动的生产线模拟运行, 校验设计参数的合理性, 并进行以粗加工生产率和精加工质量为目的的工艺参数优化调整, 如图 6 所示。

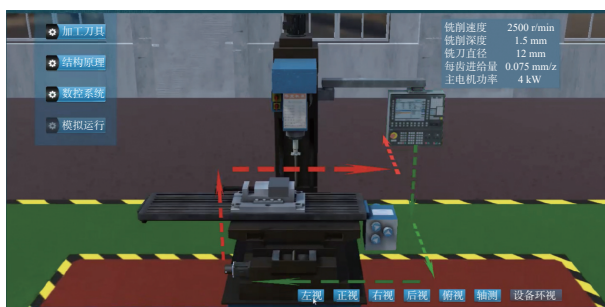


图 6 加工过程设计与校验界面

3) 加工中心数控程序设计

分别以叶轮车削粗加工、叶轮成型铣削精加工、主轴粗加工和精加工这 4 个工艺段的典型工序为对象, 设计相应机床的数控加工程序, 并通过数控程序驱动的机床模拟运行进行设计合理性校验。涡轮发动机叶轮在五轴加工中心上进行叶片成型铣削加工的部分程序代码如图 7 所示。



图 7 叶轮成型铣削加工程序代码界面

4) 生产自动化控制系统设计

以包含数控机床、上下料机器人、AGV 运输小车、堆垛式料仓等设备的叶轮加工生产线为控制对象, 设计以 PLC 为控制硬件的加工控制系

统, 进行工艺分析、节拍计算、时序图绘制、PLC 接线图和 T 型图设计。通过 PLC 程序控制的虚拟生产线模拟运行, 找出设计的不合理处, 进行修改和优化控制参数, 如图 8 所示。

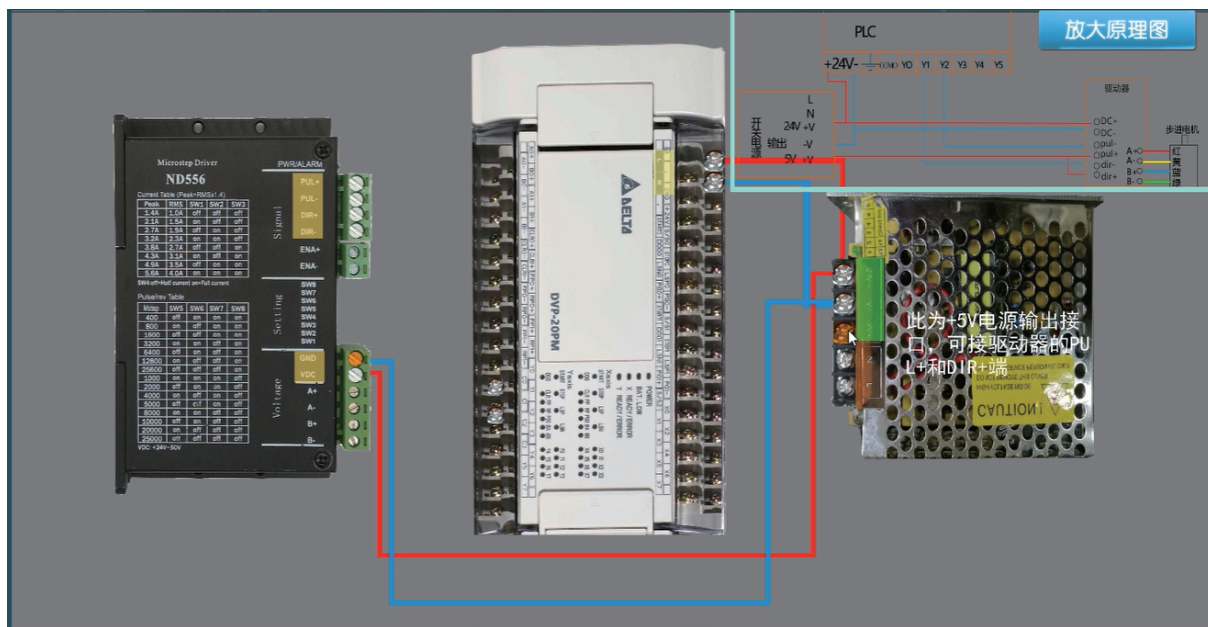


图 8 PLC 程序控制虚拟生产线模拟图

通过实验教学各环节的逐层实施, 学生不仅能够看到电机控制下的机床机械运动过程, 更能系统、直观地学习和理解整个叶轮加工过程中数控机床和设备运动过程的所有软、硬件执行环节, 以及机、电、光各部分内在协同配合的原理, 培养学生综合性及拓展性能力。

2 机械制造虚拟仿真实验教学实施

虚拟仿真实验是对传统实物实验的有效补充或部分取代, 通过实体设备融合虚拟车间的实验方式, 可实现“能实不虚、虚实融合”的机械制造技术知识传授和学生能力训练。

2.1 虚拟仿真实验的发布与应用

与实体实验设备(数控机床、机器人等)实时信号通信连接的服务器端软件部署在校园网服务器上,在虚拟仿真实验教学项目共享平台的统一管理调度下,学生可以通过选课授权在校内外的计算机或移动终端访问服务器,完成虚拟仿真实验内容,也可以在实验室以虚实联动方式进行虚实融合实验,提升了学生对智能制造全工艺流程的知识掌握和对关键设备的操作能力。

2.2 实验融入教学课程体系

针对机械大类本科专业,将实验内容按照不同专业和不同课程的需求进行选项式模块化处理,并对相关专业的教学计划进行适当调整,按专业特性将实验内容以不同的内容和学时比例融入课程中,部分课程的实验融入情况如表 1 所示。

表 1 部分课程的实验融入情况表

理论/实践课程	本虚拟实验内容
工程学导论 (理论课, 16学时)	智能制造系统(2学时)
数控机床 (理论课, 48学时)	机构、伺服驱动、检测、CNC编程(虚实联动)(4学时)
PLC技术 (理论课, 32/48学时)	料仓电机、生产线工段、输送带控制(4学时)
机械制造技术 (理论课, 64学时)	全部实验内容(12学时)
机械虚拟设计与制造 (实践课, 64学时)	全部实验内容(16学时)
虚拟制造技术 (理论课, 32学时)	除控制功能的其他实验内容(4学时)
自动化控制 (理论课, 32学时)	PLC、机床/机器人/AGV运输小车/生产线控制(6学时)
机械工程综合实验 (实践课, 96学时)	自动化加工生产线、物流(16学时)

2.3 仿真实验资源的共享应用

1) 学生预习应用

在理论课、实验课及工厂实习等教学环节之前,教师先布置预习内容,学生在课前通过虚拟仿真车间完成预习或自学,提升课堂教学效果和知识掌握的扎实性。

2) 课堂应用

在课堂上,相关课程的老师直接通过校园网调用智能制造虚拟车间软件,演示智能制造系统的组成、原理、结构,讲解工艺流程、生产物流设备以及生产自动化控制的关键技术,示范设计与操作要点,并通过可逆性操作演示生产安全知识与生产质量控制等生产系统重要内容。学生在

课堂学习的同时,可以直接使用移动终端联网,重复练习老师的示范操作或自主探究相关问题,师生可在虚拟生产线上进行互动操作和交流讨论,实现智能制造生产的沉浸式教学,有效地提升了学生学习效果和实践能力。

3) 课后延伸与应用

学生在课后可以随时随地地进行虚拟仿真实验操作,依据相关课程知识点设计的实验内容,学生在校内外网络条件下按照在线指导,逐步交互操作完成车间认知、机床结构原理、工艺设计、设备操作、装夹具选型、机加工操作、数控编程、自动化控制系统设计、加工精度测量、生产安全校验、生产管理分析计算、设计合理性模拟运行校验等实验操作,巩固对课程知识点的掌握。

4) 实验室虚实融合应用

对于有实验室硬件装置的实验内容,如数控机床编程加工、数控机床伺服驱动、机械手编程控制、工艺流程规划设计、AGV运行控制、工件装夹与刀库操作等,可以通过实体装备与虚拟生产线联动运行来校验设计结果的正确性,有效地拓展实体设备的实验功能、提升工艺设计的系统性能力^[14]。

5) 师生交流应用

课程和实验负责教师可以通过与学生在线协同操作虚拟生产线来讨论相关的问题、实现模拟现场的在线指导与交流。

6) 校间共享应用

通过教育系统虚拟仿真实验教学共享平台,实现面向不同高校相近学科和专业学生的共享应用。

3 教学方法与效果

3.1 虚实融合实验教学方法与效果

采用以融合实验室实体设备节点的虚拟生产线为载体的虚拟仿真实验软件,既保障了远程网络化虚拟仿真实验资源的共享性和使用便利性,又确保了在虚拟操作训练的同时,不丢失实体设备操作的实践训练功能,教学效果得到了显著的提升。通过 2022—2023 学年和 2023—2024 学年近万名学生的应用数据统计显示,无论相关理论课程的学时数是否缩减,在学生实验学时数与以往相同的情况下,学生所完成的实验内容数量是

原来的2~4倍,实验内容的复杂性,所用技术的先进性,知识点的融合程度,学生设计与操作的系统性、正确性和安全性等指标约有15%~50%的提升。通过观察学生在2023—2024学年机械工程综合实验课程中的表现,发现随着虚拟仿真实验的增加,学生动手实践能力有所提高,体现了该实验教学手段的有效性。

3.2 机械制造知识的掌握效果

涡轮加工过程是一个综合性强、复杂程度高的工艺流程,需要依托车间数条自动化加工生产线来实现。在以往的教学,学生往往仅以书本知识为基础来设计工艺,既无法感受实际生产线,更难以进行试切加工检验,设计过程实际为纸上谈兵。现在以虚实融合生产线为载体,相同学时下学生设计内容增加数倍,并可以模拟加工校验,设计正确性大幅提升,同时提高了学生自主评价和纠错的能力。如生产线物流控制实验,原来在实验室中仅能完成PLC驱动电机实验,现在学生可以根据加工设备生产工艺节拍,在虚拟生产线上设计机器人、AGV运输小车、输送带、料仓等的控制方案及PLC组态与控制程序等,并对设计结果进行模拟校验,使其设计更符合实际生产的要求。因此,采用虚拟生产系统作为实验载体,并集成专业知识、交互与可逆性操作和模拟校验功能,能够有效提升学生对制造专业知识的掌握。

3.3 示范辐射作用

相关实验先后通过教育部示范中心联合会虚拟仿真实验机械学科组“高等学校机械工程学科虚拟仿真实验教学共享平台”、上海理工大学虚拟仿真实验教学项目共享平台、国家级装备制造虚拟仿真实验教学中心网站、上海市虚拟制造技术公共服务平台等5个网络平台对外服务。同时,实验课程部分内容服务于大中小学一体化育人,还先后支撑完成了“沪疆青少年科技文化交流活动”等青少年科普、科创教育活动^[15],获得了学生的一致好评。

4 结束语

以虚拟生产线为实验载体的机械制造技术虚拟仿真实验软件的建设与应用,为机械制造课程

群提供了理论教学辅助资源和实践教学手段。通过多学期的共享应用,学生掌握机械制造知识的效果和工程实践能力均有了显著提升,证明了本文所述的教学建设和教学方法的实用性和有效性。

参考文献

- [1] 耿俊浩,齐乐华,蒋建军,等.面向领军人才、融入大类培养的传统机械类专业转型探索与实践[J].高等工程教育研究,2024(1):23-29.
- [2] 李峰,秦晓峰,李秀红,等.新工科机械类创新人才培养模式下实践教学体系构建[J].机械设计,2023,40(11):135-140.
- [3] 叶卉,姜晨.面向思政育人的机械工程专业课程教学设计与实践:以机械制造类课程为例[J].科教导刊,2023(21):59-62.
- [4] 南玉龙,卢倩,曾勇.机械工程测试技术课程中融入人工智能教育的探索[J].物联网技术,2023,13(10):152-154.
- [5] 赵磊岩.本科教学创新助推本硕博一体化人才培养研究[J].黑龙江教育(高教研究与评估),2024(3):49-51.
- [6] 蒙艳玫,唐治宏,董振,等.机械工程虚拟仿真实验教学体系的研究与实践[J].实验技术与管理,2016,33(5):109-112.
- [7] 杜宝江.机械制造虚拟实验移动互联网教学建设与应用[J].教育现代化,2018,5(19):173-175.
- [8] 潘旭东,黄文涛,闫纪红,等.高端装备制造虚拟仿真实验教学中心建设[J].实验室研究与探索,2016,35(12):147-150.
- [9] 李强,黄勇,刘海初,等.整体叶轮加工工艺与数控仿真加工及优化研究[J].机械设计,2022,39(8):79-84.
- [10] 叶玉全,陈波,王志标,等.叶轮轴加工工艺设计与仿真加工[J].机械工程与自动化,2023(5):144-146.
- [11] 尚伟燕,刘淑珍,王学锋,等.机械工程专业设计类课程体验式课堂教学改革研究[J].教育现代化,2017,4(1):51-52.
- [12] 张春明,杨天鸿.虚拟仿真教学实验中心教与学互动设计与实现[J].实验科学与技术,2021,19(4):68-74.
- [13] 陈海,朱瀚昆,戴宏杰,等.后疫情时代下基于虚拟仿真技术提升食品科学与工程专业教学质量的探讨[J].食品与发酵工业,2022,48(13):359-364.
- [14] 程嘉豪,杜宝江.虚拟机电机械手PLC控制技术[J].农业装备与车辆工程,2021,59(11):108-111.
- [15] 上海杨浦.新疆青少年走进上理,体验神奇的机械手臂[N/OL].上观新闻,[2023-08-15].<https://sghexport.shobserver.com/html/baijiahao/2023/08/15/1098048.html>.

编辑 葛晋