



面向教研一体化的数字化制造实验教学平台 搭建与探索

刘银华, 张振东, 段振霞*

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

摘要:为了更好地将高校人才培养目标与社会需求保持一致, 培养出国家急需的数字化智能制造类专业人才, 该文结合车辆工程专业整车数字化制造人才需求, 搭建一套数字化制造软硬件实验教学平台, 并进一步针对该平台的实验教学与科研一体化功能进行分析探索。该平台主要由机器人系统、装配工艺仿真软件系统等组成, 通过软件系统对物理世界的多维度、多领域、多视图的装配工艺数字仿真模拟, 并结合机器人装配路径规划、多机协同等工艺轨迹仿真, 把物理世界的信息综合在数字世界中, 构造一个虚实结合的数字孪生教学系统。该装配工艺数字化实验教学平台的搭建, 对整车等复杂工业产品制造产业升级背景下的人才培养具有较大价值, 也为国家数字化智能制造行业人才培养中的教学方法创新提供参考。

关键词: 数字化制造; 数字孪生; 虚实结合; 教学平台

中图分类号: TP3

文献标志码: A

DOI: [10.12179/1672-4550.20220001](https://doi.org/10.12179/1672-4550.20220001)

Construction and Exploration of Digital Manufacturing Software and Hardware Experimental Teaching Platform for Teaching and Research Integration

LIU Yinhua, ZHANG Zhendong, DUAN Zhenxia*

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

Abstract: In order to better keep the goal of talent training in colleges and universities consistent with social needs, to cultivate the country's urgent need for digital intelligent manufacturing professionals, this article combines the talent needs of vehicle engineering professionals for digital manufacturing of complete vehicles, build a set of digital manufacturing software and hardware experimental teaching platform, and further analyze and explore the integration function of experimental teaching and scientific research of the platform. The platform is mainly composed of robot system and assembly process simulation software system, through the software system, the assembly process is simulated in multi-dimensional, multi-domain, multi-view of the physical world, combined with robot assembly path planning, multi-machine collaboration and process trajectory simulation, synthesize information from the physical world into the digital world, a digital twin teaching system combining virtual and real is constructed. The construction of digital experimental teaching platform for assembly process, has great value for talent training under the background of industrial upgrading of complex industrial products such as complete vehicles, it also provides reference for the innovation of teaching methods in the talent training of national digital intelligent manufacturing industry.

Key words: digital manufacturing; digital twin; combination of virtuality and reality; teaching platform

近年来, 人工智能、云计算、物联网等技术快速发展, 推动主要工业国家提出面向智能制造的战略规划, 包括德国的“工业 4.0”、美国的

“工业互联网”、中国的“中国制造 2025”等, 助推传统制造业向数字化制造转型升级^[1]。在制造业中作业方式单一、重复等简单工序中, 传统的

收稿日期: 2021-12-28; 修回日期: 2022-04-23

基金项目: 机械系统与振动国家重点实验室开放基金(MSV202010); 2021 年上海理工大学一流专业建设项目基金(10-21-304-006); 2020 年上海市重点教改项目(10273040202-2020-0129)。

作者简介: 刘银华(1983-), 女, 博士, 副教授, 主要从事数字化工艺设计与智能制造方面的研究。

*通信作者: 段振霞(1985-), 女, 硕士, 实验师, 主要从事测试与控制方面的实验教学与研究工作, E-mail: dzx0621@163.com

工业机器人已得到广泛应用。但是这类机器人的不足之处就是缺乏智能性,主要用于周围环境状态已知、变化小的结构化工作场景中^[2]。而在汽车零部件、3C电子、机械行业等,还存在大量目标攻坚与环境都高度非结构化的作业场景。所以我国制造业向数字化、智能化制造转型升级的需求不断增长^[3]。数字孪生技术异常火热,很多企业利用数字孪生技术进行了创新,数字孪生是一个普遍适用的理论技术体系,可以在众多领域应用,一般由“软件+硬件”构成的系统为主^[4]。目前在产品设计、产品制造、医学分析、工程建设等领域应用较多,在国内关注度最高、研究最热的是数字化智能制造领域^[5]。然而中国高校配备数字化制造相关实验教学平台的实践不足,特别是工科专业的虚拟制造实验条件仍存在设备较陈旧、教学方式交互性不足等问题,无法紧跟社会需求培养出国家急需的数字化智能制造类专业人才。针对这一问题,本文结合专业教学的实际需求和软硬件条件,提出了一套针对整车装配工艺的数字化制造实验教学思路与平台。该平台主要由软件系统和硬件系统组成,教学中学生可以通过软件系统进行仿真分析、优化算法开发等学习,当仿真结果达到预期要求,通过硬件平台验证仿真分析的正确性和算法的可靠性。通过搭建一个虚实结合的数字孪生系统,可以为学生创造学习数字化智能制造技术的平台,为国家数字化智能制造行业培养优秀人才储备^[6]。

1 数字化制造仿真软件系统搭建

在整车装配过程中,机器人技术是实现产品数字化、自动化生产的关键技术。针对机器人装配工艺仿真应用,主要的虚拟软件系统包括MATLAB、ROS、Tecnomatix的PDPS (process design & process simulation) 和 InteRobot等。其中PDPS软件系统是汽车整车制造业广泛使用的系统之一,全产品生命周期内“数字化双胞胎”能够完整真实再现制造过程,从而在实际投入生产前即能在虚拟环境下优化、仿真和测试,在生产过程中也能同步优化整个企业流程,最终打造高效的柔性生产^[7]。

西门子公司的Tecnomatix工业系统软件,可以提供工艺规划、机器人运动仿真、人因工程等

多个功能模块,能够满足我们拟搭建实验教学平台的功能需求。Tecnomatix内嵌多种算法优化工具,可对生产工艺参数进行自动优化,目前也是行业内支持与PLC、机器人等硬件设备互联互通的仿真与虚拟调试软件^[8]。本文将在PDPS软件系统框架基础上开展智能制造软硬件教学平台下的软件系统。

此系统的装配工艺和装配仿真一体化模块可以让学生在计算机虚拟系统中对机械零件进行虚拟装配,替代传统装配工艺中的预装配,可以大大缩短试装的周期,同时可以尽早地发现问题解决问题,从而减少大量的工程变更。为了保证装配过程中不发生干涉,可以通过计算机虚拟环境进行装配路径规划^[9]。

软件系统中的机器人仿真和离线编程模块,在实践教学过程中学生将通过机器人装配、检测工位的工艺规划与布局设计,满足空间约束和几何限制。进一步,学生可通过机器人运动路径的优化设计,通过编程示教机器人以验证其可达性和无干涉性。针对多机协同工作场景,学生可以通过对区域分割、停等策略等协同规划方法开展预研与学习,并通过实操编程实现多机器人协同装配等工艺规划与控制。上述教学内容可以充分地与社会需求相结合,通过在数字化制造教学平台的学习,可提高学生的专业实践能力与就业竞争力。

在数字化生产制造中越来越重视人为的因素影响,所以近年来人因工程研究异常火热。在教学平台中,学生可以模拟人的不同姿态进行工作,来分析人的可达性和可视性,评估人工作时的舒适程度等。在软件系统中提供了大量的人体姿态列表,更为柔性的自动接近和手型适应功能,可以进行视线空间分析和人机交互动作模拟。研究人因工程可以优化人工作业空间、环境及过程,并可对操作人员进行可视化操作培训,减少现场问题数量,减少甚至消除物理样机试装过程。从人机工效的角度,解决产品设计的合理性、工艺可行性等问题,提高生产效率,减少疲劳强度,保护工人的人身安全和健康。

2 数字化制造检测、装配硬件台架搭建

结合西门子软件系统,在虚拟空间完成仿真,并将其结果映射于对应的实体装备中,通过

虚拟调试实现单工位、多工位智能制造背景下的不同专业的教学与科研多样化要求。

数字化制造检测、装配硬件台架如图 1 所示,其中两个型号为 UR-5 的机器人组成双臂协作系统,作为整个硬件平台的执行机构,用于验证在仿真软件中实现的碰撞检测、路径规划等算法是否稳定可靠。台架作为整个硬件系统的承载平台,用于放置两个 UR-5 机器人,保证两个机器人可以在无干涉的情况下安全运行,UR-5 机器人末端安装有一个 GOCATOR 扫描仪以获取工件的点云数据。GOM-Scan1 工业相机与 GOCATOR 扫描仪功能类似,在需要的情况下 UR-5 机器人末端也可以安装 GOM-Scan1 工业相机,代替 GOCATOR 扫描仪的一些功能。GOM-Scan1 是一款光学三维条纹投影扫描仪,它通过投射蓝色条纹,快速捕捉零件的完整表面,提供细节精确的三维网格,简单高效地得到三维模型数据,可用于 3D 打印、逆向工程或者零件表面缺陷检测等领域。对精度要求较高的场合,可以在 UR-5 机器人末端与 GOCATOR 扫描仪之间安装一个 HPS-FT060E 力传感器用于保证运行过程中的安全性,防止受力过大使机器人受到损坏。HPS-FT060E 传感器可以实时测量 XYZ 三个方向所受到的力和力矩,优化设计的应变测量结构,24 bit 高速 ADC 采样,高

信噪比全数字式输出,高静态抗过载保护,可应用于工业机器人、协作机器人、医疗机器人、自动化测量和风动测试等领域。图中没有安装 HPS-FT060E 力传感器,标注了放置的位置。

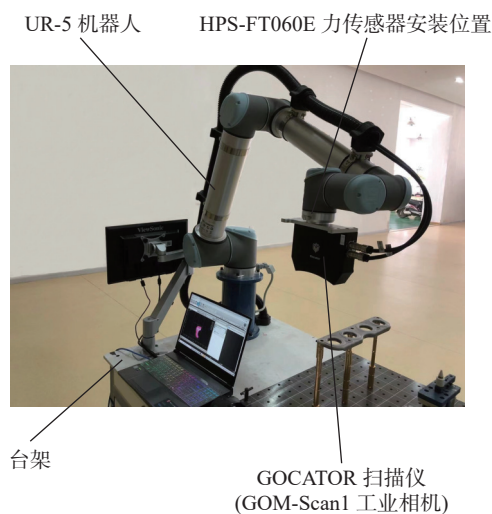


图 1 数字化制造检测、装配硬件台架

3 实验平台对专业内涵和科研的支撑

开发的数字化制造软硬件系统在教学上可以涵盖机械制造及其自动化专业、车辆工程专业、机器人工程专业、电气工程及其自动化专业、智能制造专业等,如图 2 所示。



图 2 软硬件系统功能模块对专业教学内涵的支撑

- 1) 三维生产线设计仿真模块可以针对机械设计及其自动化专业和车辆专业的学生开展教学和研究;
- 2) 工艺规划仿真模块可以针对车辆工程专业和机器人工程专业的学生开展教学和研究;
- 3) 产能提升和物流优化仿真模块可以针对机械设计专业、机器人工程专业和车辆工程专业的

学生开展教学和研究;

- 4) 自动化工艺仿真模块可以针对电气工程专业的学生开展教学和研究,学生可以通过软件进行虚拟调试;
- 5) 人因工程仿真模块可以针对机械设计专业、车辆工程专业和智能制造专业的学生开展教

学和研究;

6) 尺寸质量工程仿真模块可以针对机械工程专业和车辆工程专业的学生开展教学和研究。

开发的数字化制造软硬件系统在科研上可以涵盖装配工艺、焊接工艺、机器人运动学、单多机器人程序开发、人机共融智能制造等。三维生产线设计仿真模块可以进行装配工艺方向的科学研究;工艺规划仿真模块可以进行焊接工艺方向的科学研究;产能提升和物流优化仿真模块可以进行单、多机器人程序开发类的科学研究;自动化工艺仿真模块可以进行机器人运动学方向的科学研究;人因工程仿真模块可以进行人机共融方向的科学研究。

4 可支撑的潜在科研方向

该教学平台不仅可以应用在教学过程和传统的科研方向中,而且可以挖掘一些潜在的科研方向开展科学研究。针对不同生产环境中,机器人的应用场景具有不确定性的特点,各专业的科研方向可从如下5个方面开展。

1) 数字化装配理论

在工业领域中,装配问题是基本问题。对于不同环境下,零件的装配顺序、装配准确性成了工业生产中重中之重的问题。在不确定制造环境下,机器人如何智能识别装配次序、完成装配任务成了后续工作开展的基础。

2) 数字化检测、焊接工艺设计

焊接,作为一个必不可少的工艺流程,如何快速高效的完成焊接任务,提高焊接质量应是未来研究的重点。

3) 机器人运动学仿真

机器人在智能制造过程中,起着主要作用,无论是装配还是焊接,都由机器人来完成,对于不同的机器人对应着不同的运动学方程。因此,如何根据当前机器人计算其运动学方程成了机器人领域的研究基础。

4) 多机器人智能协同技术

针对大型自由三维曲面,机器人无法独自完成所有任务,此时,增加机器人数量,形成多机器人系统。由于多机器人系统的加入,机器人程序开发时不应只考虑碰撞检测和路径规划问题,对于待完成任务如何分配,保证每个机器人分得的任务数量相似,完成时间相差不大,是多机器

人程序开发的主要研究内容。

5) 人机共融智能制造技术

由于一些工艺因素的限制,对于机器人不能独立完成任务,需要人与机器人的配合共同完成,因此人机协同的相关研究有着广阔的前景。

本团队在搭建教学平台基础上,指导本科、研究生在“IEEE/ASME Transaction on Mechatronics”“Journal of Manufacturing Systems”“Journal of Intelligent Manufacturing”“计算机集成制造系统”等国内外知名期刊发表机器人智能装配工艺规划方面的高水平论文10余篇,获美国机械工程师协会最佳论文奖。完成整车制造企业数字化制造与智能制造产学研课题多项,研究成果应用于多个整车制造企业,实验平台搭建除了教学外,进一步为科研理论、方法的验证提供了实验平台,也为实验室技术创新的实践应用提供重要支持。

5 基于实验平台的教学实践与分析

搭建的数字化制造软硬件实验教学平台主要由软件仿真系统和硬件台架组成。可对整车装配过程开展算法开发、机器人轨迹规划虚拟仿真、机器人实际示教验证等完整的数字化装配工艺实验教学。硬件台架主要由UR-5机器人组成,其中两个机器人组成双臂协作系统,作为整个硬件平台的执行机构,用来验证在仿真软件中实现的碰撞检测、路径规划等算法是否稳定可靠。同时在机器人末端装有工业相机、激光扫描仪、力传感器等感知元器件,获取点云数据并保证机器人的运行安全^[10]。

由于数字化制造实验教学平台选用的都是目前比较前沿的机器人和传感器,针对目前实验平台中台套数有限情况下,教学实践过程中采用分组的形式,目前实践过程中学生9人一组进行实验。本实验教学平台主要从“机器人装配过程路径规划算法预研”“虚拟软件应用与工艺路径规划数字化实现”“装配过程工业机器人示教与轨迹验证”3个方向开展教学活动。在“机器人装配过程路径规划算法预研”实验教学内容中,主要是带领学生学习TSP等路径规划算法,对比目前常用的路径规划算法的优缺点,让学生真正理解路径规划算法的底层逻辑。然后在“虚拟软件应用与工艺路径规划数字化实现”实验教学内容中带领学生通过编写程序完成算法的数字化实

现和虚拟仿真。最后在“装配过程工业机器人示教与轨迹验证”实验教学内容中将前面编写好的路径规划算法代码放入机器人硬件系统中进行算法验证和运动演示。

由于台套数的限制在实验中学生需要分组配合完成实验内容。将每组学生分成 3 个小组, 每小组 3 人研究学习一种路径规划算法; 然后通过 PPT 汇报的方式让其他小组学生也了解这种算法; 最后, 组内所有学生一起对比分析这 3 种算法的优缺点, 初步确定最优算法。接下来每小组学生通过编程实现本小组研究的路径规划算法和虚拟仿真; 然后再将 3 个小组不同的路径规划算法程序在机器人硬件系统中验证和演示; 最后通过硬件系统的验证和演示进行分析对比, 验证实操结果与仿真结果的一致性。如果不一致, 则需每小组出具一份 PPT 对比分析报告, 组内所有成员一起分析确定验证结果与推测结果不一致的原因。

通过完成本实验教学平台的教学内容, 可以让学生掌握 Tecnomatix 软件系统的使用方法和路径规划算法的研究思路, 理解数字孪生技术的实际应用场景, 了解数字化制造教学平台的强大功能, 为进入社会提供了前沿技术知识支撑^[11]。

6 结束语

根据数字化制造需求和数字孪生技术的特点, 本文搭建了一套数字化制造软硬件实验教学平台, 详细介绍了实验教学平台的软件系统和硬件系统的搭建, 同时说明了教学平台对专业模块和科研方向的支撑, 进一步阐述了可支撑的潜在科研方向。该实验教学平台不但可以开展工科类学生的实验教学任务, 还可以开展数字化装配理论、数字化检测焊接工艺设计、机器人运动学仿真、多机器人智能协同技术、人机共融智能制造技术等领域的科学研究。通过该教研一体化实验

平台搭建, 将教学与科研有机结合, 为数字化制造本科生、研究生培养提供实验、实践平台, 也为其他高校开发此类实验教学平台提供了参考^[12]。

参考文献

- [1] 肖洋. 西方科技霸权与中国标准国际化——工业革命 4.0 的视角[J]. 社会科学, 2017(7): 57–65.
- [2] 孙立宁, 许辉, 王振华. 工业机器人智能化应用关键共性技术综述[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(2): 211–218.
- [3] HU L, MIAO Y, WU G, et al. iRobot-factory: an intelligent robot factory based on cognitive manufacturing and edge computing[J]. *Future Generation Computer Systems*, 2019, 90: 569–577.
- [4] WÄRMEFJORD K, R SÖDERBERG, Schleich B, et al. Digital twin for variation management: a general framework and identification of industrial challenges related to the implementation[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(10): 3342–3357.
- [5] XU W, CUI J, LI L, et al. Digital twin-based industrial cloud robotics: Framework, control approach and implementation[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2020(58): 196–209.
- [6] 谭建荣, 刘达新, 刘振宇, 等. 从数字制造到智能制造的关键技术途径研究[J]. 中国工程科学, 2017, 19(3): 39–44.
- [7] 谭弘颖. 从传统到数字化从愿景到实体验——走进西门子数字化体验中心[J]. *制造技术与机床*, 2017(10): 8–9.
- [8] 高扬. 助企实践数字化共绘工业 4.0 蓝图——2016 西门子工业论坛[J]. *制造技术与机床*, 2016(9): 17–18.
- [9] 谭建荣. 智能制造与机器人应用关键技术与发展趋势[J]. *机器人技术与应用*, 2017(3): 18–19.
- [10] 王震. 面向机器人抓取任务的视-触觉感知融合系统研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020.
- [11] 冯明涛. 基于深度学习的机器人视觉三维感知与识别方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [12] 宫唤春. 新能源汽车技术虚拟实训平台开发与应用[J]. *实验技术与管理*, 2018, 35(7): 137–139.

编辑 张俊