

doi:10.11835/j.issn.1005-2909.2024.06.018

欢迎按以下格式引用:何春,陈珂,骆汉宾,等.建筑3D打印线上线下混合教学模式创新与实践[J].高等建筑教育,2024,33(6):136-143.

建筑3D打印线上线下混合教学模式创新与实践

何春¹,陈珂^{1,2},骆汉宾^{1,2},贾倩²,周诚^{1,2}

(华中科技大学1.土木与水利工程学院;2.国家数字建造技术创新中心,湖北武汉430074)

摘要:为加快推进建筑业工业化、数字化、智能化转型升级,许多高校正积极建设智能建造专业,并推出了一系列新的专业课程。其中,建筑3D打印是智能建造专业的一项特色课程,其教学内容涵盖机械、材料、信息等领域。传统课堂教学和大范围实验存在学生学习兴趣不高、知识理解效率低,以及大范围实验受制于3D打印的高成本、长制作周期和低成品率的限制;因此,有必要探索线上线下混合式教学模式,以激发学生的学习兴趣和培养学生的实践精神和创新能力,从而有效提升教学效果。本研究以华中科技大学智能建造专业建筑3D打印课程教学为例,讨论了建筑3D打印线上线下混合式教学的内容设计与实践运行。该课程搭建了建筑3D打印虚拟仿真系统,提供三维模型格式转换、模型自动检测、模型修复等工具,使学生能够进行虚拟打印操作,以最低成本和最短时间对打印模型参数进行调整。此外,使用基于工业级六轴机械臂的建筑3D打印设备进行线下打印实践,建立了标准化的打印工艺流程,以确保打印构件的高精度成型。通过“月壶尊”壳体结构混凝土3D打印案例,介绍了该线上线下混合教学模式下的完整学习过程。该教学模式符合智能建造专业掌握一种软件语言、驱动一台硬件设备、解决一个工程问题的“三个一”人才培养理念,为其他高校开展建筑3D打印教学提供了有益参考。

关键词:建筑3D打印;线上线下;教学模式创新;智能建造

中图分类号:G642.0

文献标志码:A

文章编号:1005-2909(2024)06-0136-08

我国正处于从“建造大国”向“建造强国”迈进的关键时期。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》提出,以智能建造助力“中国建造”。为了推动我国智能建造的发展,首要任务是培养具备跨学科知识和创造性思维能力的复合型人才。为响应国家的战略需求,全国已有超过百所高校开设了智能建造专业。这些高校根据自身特色,提供了多样化的专业课程。其中,建筑3D打印作为许多高校智能建造专业的特色课程,涵盖了机械、材料和信息等

修回日期:2023-11-15

基金项目:湖北省高等教育学会共同体建设项目重点课题(2022XD83)

作者简介:何春(1980—),女,华中科技大学土木与水利工程学院党委副书记,博士,主要从事大学生思想政治教育研究,(E-mail)64513056@qq.com;(通信作者)陈珂(1991—),男,华中科技大学土木与水利工程学院副教授,博士,主要从事新型建筑工业化教学与科学研究,(E-mail)chenkeem@hust.edu.cn。

领域的跨学科融合。然而,建筑3D打印教学实践面临着双重挑战。一方面,由于3D打印设备和材料成本高、制作周期长、成品率低,建筑3D打印教学通常依赖于教师主导的课堂讲授或演示实验等方式^[1];另一方面,仅仅通过传统课堂教学无法让学生全方位直观感受建筑3D打印全过程,从而导致学生出现学习兴趣不高、知识理解低效等问题。在智能建造学科发展的早期阶段,有必要探索创新建筑3D打印教学模式,以提高教学质量^[2]。

教育部等十一部门印发的《关于促进在线教育健康发展的指导意见》,明确要求加快科技与教育的深度融合,推动线上教育与线下教育的良性互动。在这一文件的指导下,线上线下混合式教学的理论及方法得到了多个学科领域的高度重视。在相关研究方面,叶兴琳等^[3]利用虚拟仿真实验和智慧教学平台,构建了基于线上线下的有机化学实验教学新模式。卢嫣等^[4]采用线上线下的方式改进了高分子基础实验教学。徐敬海等^[5]设计了线上线下混合的地理信息系统原理课程教学改革框架与方法。周小龙等^[6]介绍了工程案例与虚拟实验在建筑结构抗震课程教学中的应用,引导学生从可视化的地震情境中提出问题、分析问题、解决问题,深化学生对抗震基本概念和原理的理解。戴北冰等^[7]通过虚拟现实技术建设仿真实验平台,有效克服了传统土力学课程中存在的知识点繁多、内容体系复杂,以及实验教学受时间、空间和资源限制等问题,提升了土力学课程的教学质量。

线上线下混合式教学为化解建筑3D打印教学的实践困境、提升课程教学质量提供了新的思路。理论上,线上线下混合式教学既保留了传统教学方式的互动性和社交性,又提供了丰富的数字化学习工具,帮助教师在引导、启发和监控教学过程中发挥更大作用,从而有效激发学生在学习过程中的主动性、积极性和创造性^[8]。这一特征对于培养学生在建筑3D打印学习中的动手能力和创新思维具有显著作用,同时也能有效规避大范围开展建筑3D打印实验所面临的各种弊端。值得注意的是,目前关于建筑3D打印教学实践中线上线下混合教学模式的研究还不够充分,缺乏针对线上线下内容安排和协同方式的实践经验。

本文以华中科技大学智能建造专业的建筑3D打印课程为研究对象,旨在深入阐释智能建造专业“三个一”的人才培养理念,探索虚实结合的线上线下教学实践,构建理论与实践、学习与使用一体化的实验实训教学模式。这种教学实践不仅有助于满足本专业人才培养的需求,而且还将推进智能建造核心课程教学改革,提高智能建造专业教育的整体质量。

一、课程内容与线上线下混合式教学

华中科技大学智能建造专业自2020年开始招生,旨在培养具备智能建造研究应用能力、工程实践能力、团队协作能力、创新意识和国际视野,既能在智能建造领域从事智能设计、智能施工、智能运维等技术性工作,又能在人工智能领域从事科技开发与组织管理工作的高素质复合型人才。

智能建造专业在教学过程中充分融入了新一代人工智能技术,如大数据智能、群体智能、人机混合智能、无人自主智能等,将其与先进工程建造相结合,实现了教学内容的融合创新。同时,在夯实传统土木工程基础课程知识的基础上,还坚持“三个一”人才培养理念,即通过教学与实践培养学生至少掌握一种软件语言(计算机),驱动一台设备(机械),解决一个工程问题(土木)。建筑3D打印作为智能建造专业的特色课程,为学生提供了学习和实践的重要平台,使其能够熟练应用建筑3D打印技术,并掌握开发3D打印应用系统的关键技能。

建筑3D打印技术是一种快速成形的先进建造技术^[9]。该技术以数字模型为基础,通过计算机智能控制实现建筑构件的免模板施工工艺,尤其在异形结构建造方面具有显著优势^[10]。在设计建筑3D打印课程时,需要充分考虑该技术的综合性和学生学习的认知规律,将课程内容划分为理论

和实践两个部分。理论部分主要围绕建筑3D打印设备的执行机构、驱动装置、材料性质,以及控制系统,旨在使学生掌握该技术的基本原理。建筑3D打印线上线下混合式教学主要侧重于课程的实践部分,如图1所示。鉴于建筑3D打印涉及多个界面的软硬件操作,学生在进行实践操作前,必须在理论学习阶段全面掌握相关软硬件的操作要点及注意事项。

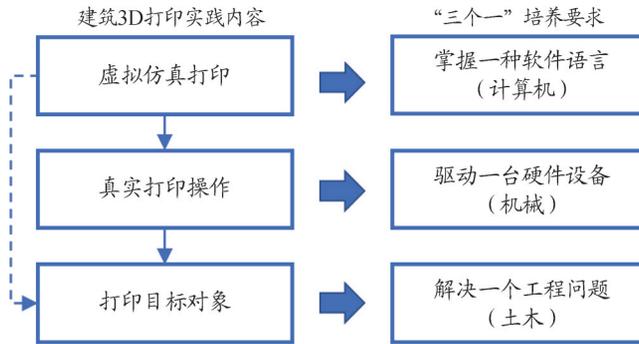


图1 实践内容与专业培养要求

为实现虚拟仿真打印,需要搭建建筑3D打印虚拟仿真系统。该系统提供常用的3D打印建模工具,如3D模型格式转换、模型自动检测、模型修复等。在教学过程中,学生在教师的指导下利用该系统进行多种结构的混凝土构件建模。通过机器人操作系统(Robot Operating System, ROS)规划虚拟打印路径,并通过离线编程将规划路径转化为机械臂运动的指令集,以完成虚拟打印仿真。这种虚拟仿真打印方式有助于学生在实际打印操作之前,灵活配置不同的打印参数并对比分析相应的打印效果。面对效果不够理想的情况,学生能够以最低成本和最短时间对初始模型参数进行修改或调整,从而提高实际打印操作效率和成果质量。

真实打印操作则使用基于工业级六轴机械臂的建筑3D打印设备。在真实打印的准备、打印和收尾环节,均配备专门的实验员,指导学生进行具体操作。在整个实践教学过程中,将建筑3D打印的关键步骤及常见实践问题整理成电子版指导手册,以供学生持续学习建筑3D打印相关知识。

基于上述课程内容设计与混合式教学思路,华中科技大学相关团队将科技部重点研发计划项目“轻量化可重构月面建造方法研究”“面向建筑行业典型应用的机器人关键技术与系统”等研究成果融入智能建造专业的建筑3D打印教学环节。以下将以“月壶尊”壳体结构3D打印为例,介绍建筑3D打印线上线下混合教学的实践运行情况。

二、线上虚拟仿真

建筑3D打印线上虚拟仿真的主要目标是使学生系统地学习3D打印结构建模、3D打印切片、格式转化、虚拟打印路径规划等内容(见图2),掌握Rhino、Simplify3D、RobotStudio等软件的具体功能与操作。

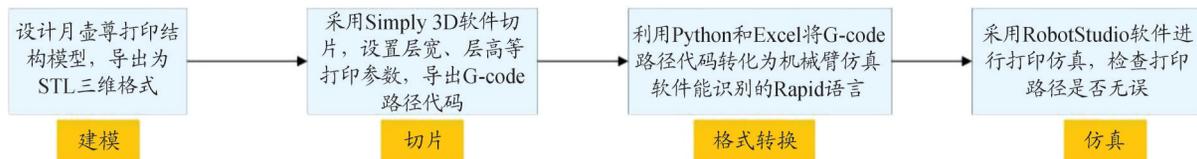


图2 线上虚拟仿真流程

(一) 基于Rhino的3D打印结构建模

按照常规的建筑3D打印实践流程,线上虚拟仿真教学的第一部分内容是指导学生利用Rhino参数化设计软件完成3D打印结构的建模。在此过程中,学生需注意实际打印过程中可能存在的人为误差,以及机械臂的运动范围、喷头精度等因素带来的打印局限性。比如,模型在垂直方向超过 35° 倾斜角度时,容易导致打印构件塌陷。完成3D虚拟模型后,教师将引导学生关注后续注意事项,包括对模型的尺寸、倾斜角度等主要指标进行检查和确认。在确保检查结果符合要求后,教师将指导学生导出STL格式文件,以便进行下一步3D打印切片。本部分内容共计4课时。

(二) 基于Simplify3D的3D打印结构分析

线上虚拟仿真教学的第二部分内容是指导学生利用Simplify3D软件对已建立的3D打印结构进行分析。Simplify3D为学生提供了易于使用的交互界面,便于导入3D模型文件并分析潜在的几何形状网格错误,如孔、薄壁或自相交等(如图3)。学生还可以利用Simplify3D的快速编辑工具,自定义支撑位置和形状。根据打印要求,学生在编辑打印过程的设置中可以调整具体的打印参数,如喷嘴直径、挤出宽度、层高、封顶和封底层数、外壳周长和打印方向等。

在本案例的“月壶尊”切片设置中,模型尺寸直径为200 mm,喷嘴直径为10 mm,层高为3 mm。考虑泵机挤出速率及二级喷头挤出速率的影响,将挤出线宽设置为5 mm。这样的参数设置使得“月壶尊”能够保持整体形状,层与层之间的连接度较好,并且内部带肋部分能够与内圈有效连接,从而避免了断料、断点等问题,符合打印要求。本部分内容共计4课时。



图3 “月壶尊”3D打印切片

(三) 基于RobotStudio的虚拟打印路径规划

线上虚拟仿真教学的最后一部分内容是指导学生利用RobotStudio软件进行虚拟打印路径规划,这也是线上虚拟仿真的重点内容。此部分主要利用与机械臂配套的RobotStudio软件,搭建虚拟仿真系统,进而模拟整个打印过程,分析可能存在的问题并有针对性地进行调整。教师指导学生在仿真系统中添加3D打印现场环境模型,导入3D打印机械臂及末端喷嘴模型,输入机械臂姿态、打印工具姿态、外部轴位等驱动信息,随后利用模拟示教器对虚拟机械臂进行示教。

仿真系统提取路径规划点的三维坐标信息,形成可视化的预打印路径和设备运动指令,从而使虚拟机械臂执行虚拟打印作业。然而,仅仅观看机械臂的运动无法检查打印路径是否存在错误,也无法优化相关参数;因此,利用RobotStudio软件自带的TCP跟踪功能,实时显示机械臂和末端喷嘴的位置与姿态信息,并通过“单步前进”和“单步后退”功能,将路径上一个点作为当前节点,让学生仔细观察虚拟打印的过程(见图4)。此功能有助于检查规划路径的合理性和打印过程的流畅性,还能对路径规划的细节进行微调,从而提高真实打印的成功率。本部分内容共计4课时。

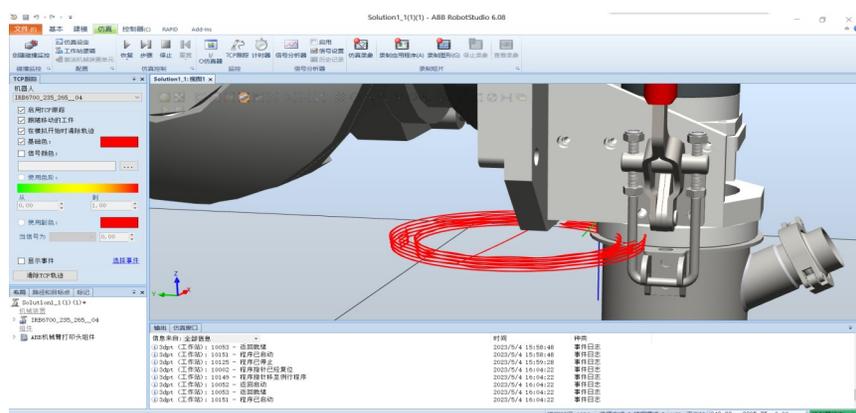


图4 虚拟打印TCP轨迹跟踪

三、线下真实打印

通过课前学习和线上虚拟仿真,学生对3D打印实验内容、步骤和相关设备形成了初步了解。在进行线下真实打印前,教师将学生分成4~6人一组,提前安排操作任务,每组学生轮流完成线下3D打印实验准备、打印和收尾三个环节的相关工作。考虑打印成功率受打印机械设备、打印模型构造、混凝土材料性能、搅拌时间和运输工艺等因素的影响,线下真实打印操作需要固定打印工艺流程,使打印过程标准化。这样既可以减轻设备不足的压力,又有助于促进学生之间的合作。

在准备环节,学生在教师指导下分析混凝土材料的性能,包括材料搅拌、表观形态观察、挤压测试、凝结时间和稠度测试等,判断混凝土材料是否适合3D打印(见图5)。在教学过程中,教师引导学生从虚拟3D建模的理想环境出发,思考线下实验中的注意事项,例如如何减少各种干扰对打印成果的影响。待准备完毕后,学生将真实体验线下3D打印过程。

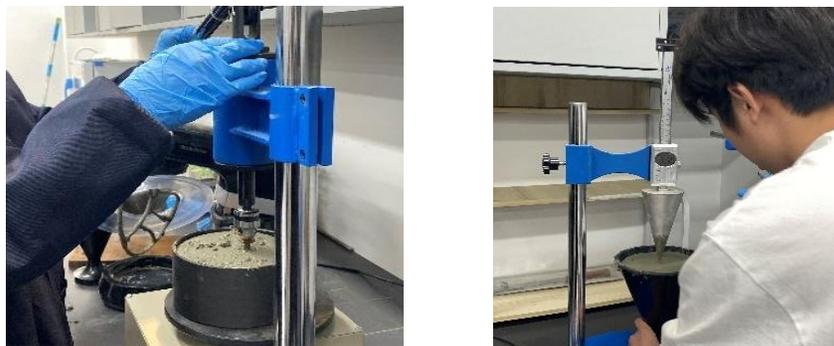


图5 混凝土材料实验

首先,将水泥、砂等干料与快硬剂、增稠剂等添加剂加入砂浆搅拌机中充分混合。待干搅完成后,加入适量水及含有减水剂的水溶液,再充分搅拌,以确保混凝土不凝固。搅拌完成后,将混凝土从搅拌机移至泵机中,开始运输至喷头处。本实验的喷头增加了一个螺旋装置,以实现打印过程中的混凝土搅拌,避免了混凝土在喷头处停留过久而硬化,防止喷头堵塞或断料现象的发生。本部分内容共计3课时。

在打印环节,学生在操作台打开切片模型,按照线上虚拟仿真结果设置打印参数。在打印过程中,教师需要提醒学生观察管道和喷头的运动情况。由于混凝土材料的性质,需实时控制打印过程

中机械臂的移动速率和泵机的混凝土输送速率(见图6),以免混凝土中出现空气导致断料现象的发生。图7展示了“月壶尊”壳体结构3D打印的部分过程。



图6 控制机械臂和泵机



图7 “月壶尊”打印过程

此外,为了实时监控打印过程,支持后续对打印成果进行三维重构和打印过程优化,在打印区域的四周布设了四个球型摄像头,构成360°监控系统(见图8)。在“月壶尊”壳体结构混凝土3D打印过程中,启动摄像头并开启录屏装置,可以实现全方位的视觉检测。学生在教师的引导下,分析3D打印过程中的影像,并与3D打印的虚拟仿真结果进行对比,分析导致虚拟和实体打印差异的原因与对策,例如材料配比、工艺流程和人员操作等。本部分内容共计6课时。



图8 360°监控系统

在收尾环节,学生在教师指导下对设备进行清洗、归位。学生需要掌握如下操作流程:将喷头移开打印区域,清除管道和喷头中剩余的混凝土,并在泵机排空混凝土后加水,防止泵机空转损坏;在各机械设备清洗干净后,使用高压水枪清洗地面,将各个工具摆放至规定位置。教师在收尾工作完成后进一步引导学生分析虚拟仿真打印对实际3D打印的支持作用。本部分内容共计3课时,至此整个建筑3D打印课程结束。

四、学生反馈与教学创新点

针对传统教学方式在开展建筑3D打印等智能建造技术教学中存在的不足,线上线下混合教学模式对教学方式及内容进行了优化,获得了学生的积极反馈。超过80%的学生认为,虚拟打印仿真环节为其提供了充足的学习和探索空间,而线下真实打印环节在标准化流程和电子版指导手册的引导下,使其能够全面掌握科学的操作流程。此外,学生在学习过程中还接触了机器人控制、视觉检测等相关知识,激发了其创新精神。根据学生的反馈,为了更好地总结实践过程中的操作技巧,可在收尾环节结束后引入课堂讨论,让不同小组分享彼此的操作经验,还可考虑将实验过程制作成

视频材料,供学生课后复习,以强化认知,进一步提高其对建筑3D打印的理解和应用能力。本线上线下混合教学模式的创新点总结如下。

(一) 多学科交叉创新实验

建筑3D打印实验涉及多种软硬件的操作,是智能建造专业与计算机科学与技术、电子信息及机械设计制造等多学科的交叉拓展。采用虚实结合的实验教学模式能够有效激发学生的学习兴趣,有助于引导学生带着问题开展实验,通过实际操作、观察和总结,深入探索答案,从而奠定扎实的知识基础,并培养其科学探索精神。

(二) 科研成果快速反哺教学

目前,建筑3D打印技术尚处于初级阶段,需在打印设备、材料及工艺等方面进一步改进^[1]。本教学模式充分利用建筑3D打印虚拟仿真系统在实验教学和科研方面的一致性及其基本相似的构成要素,通过建立虚拟仿真系统迅速整理建筑3D打印构件库,将科研项目的阶段性成果及时转化为教学资源,从而推动研学转化。

(三) 多功能开放式教学平台

建筑3D打印线上线下混合教学模式秉承以学生为中心的教育理念,普及建筑3D打印、虚拟仿真等智能建造技术的重要知识,鼓励技术学习与分享交流。相关软硬件设施设备既支持验证性实验,又可以进行更为复杂的综合性实验,汇聚学生的创新智慧,引导其在材料优化、工艺改良、硬软件性能提升等多方面探索高成形质量的3D打印成果。

五、总结

为满足智能建造专业人才的知识需求,众多高校相继开设了建筑3D打印等课程,对学生在理论与实践方面的学习提出了新的要求,因此有必要采用创新的教学模式。本研究详细介绍了华中科技大学智能建造专业中建筑3D打印课程所采用的线上线下混合教学模式。该模式设计旨在满足专业人才培养的“三个一”要求,使学生能够借助建筑3D打印虚拟仿真系统分析理论打印效果,优化参数配置,并在此基础上进行实际的3D打印实验。通过线上线下协同和虚实结合的方式,帮助学生深刻理解打印模型构造、混凝土材料配比、打印机械设备、混凝土搅拌和运输工艺、打印方法等关键知识。

参考文献:

- [1] 王明振,高霖.“新工科”背景下3D打印技术在“土木工程结构实验”课程教学中的应用[J].教育现代化,2018,5(23):202-206,223.
- [2] 王家庆,王立彬,李强,等.新工科视域下增材智能建造技术创新教学探索[J].教育教学论坛,2022(25):49-52.
- [3] 叶兴琳,崔桃,喻国贞,等.基于线上线下和虚拟仿真实验技术的有机化学实验教学改革[J].广东化工,2021,48(2):174-177.
- [4] 卢嫣,黄剑华,赵青华,等.线上线下和“虚-实”组合教学法在分子基础实验教学中的探索[J].高分子通报,2022(4):79-83.
- [5] 徐敬海,董有福,张云鹏,等.线上线下混合的地理信息系统原理课程教学改革探索与实践[J].测绘通报,2022(S1):88-93.
- [6] 周小龙,刘章军,卢海林,等.工程案例与虚拟实验在建筑结构抗震课程教学中的应用[J].高等建筑教育,2020,29(5):149-155.
- [7] 戴北冰,赵红芬,常丹,等.“虚实结合”在土力学教学中的探索与实践[J].高等建筑教育,2023,32(4):112-119.
- [8] 胡安峰,杨仲轩,朱斌,等.土力学线上线下混合式教学改革探索与实践[J].高等建筑教育,2021,30(6):24-31.

- [9] 周马枝, 彭博远, 李古. 建筑3D打印技术的研究与发展[C]// 全国现代结构工程学术研讨会学术委员会. 第二十三届全国现代结构工程学术研讨会论文集, 2023: 348-353.
- [10] 王培涛, 任奋华, 蔡美峰. 基于虚拟现实和3D打印技术的“虚实结合”教学模式在岩土工程课程中的应用探索[J]. 高等建筑教育, 2020, 29(1): 156-161.
- [11] Khan S M, Sanchez F, Zhou H. 3-D printing of concrete: Beyond horizons [J]. Cement and Concrete Research, 2020, 133.

Innovation and practice of online and offline hybrid teaching mode of construction 3D printing

HE Chun¹, CHEN Ke^{1,2}, LUO Hanbin^{1,2}, JIA Qian², ZHOU Cheng^{1,2}

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, P. R. China; 2. National Center of Technology Innovation for Digital Construction, Wuhan 430074, P. R. China)

Abstract: In order to accelerate the transformation and upgrading of the construction industry in the direction of industrialization, digitization and intelligence, many universities are actively developing intelligent construction majors and offering a series of new courses. Among them, construction 3D printing is one of the featured courses, and its teaching content involves knowledge in the fields of machinery, materials, and information. There are some problems with traditional classroom teaching and large-scale experiments, such as the low interest of students in learning and the low efficiency of knowledge understanding, as well as the large-scale experiments are limited by the high cost, long production cycle, and low finished product rate of 3D printing. Therefore, it is necessary to explore online-offline hybrid teaching mode to stimulate students' learning interest and fully cultivate their practical spirit and innovation ability, so as to effectively enhance the teaching effect. This study discusses the content design and practical operation of online-offline hybrid teaching mode by taking the construction 3D printing course in the intelligent construction program of Huazhong University of Science and Technology as an example. The course builds a virtual simulation system for 3D printing, which provides tools such as 3D model format conversion, automatic model detection, and model repair, allowing students to perform virtual printing operations and make adjustments to the parameters of the printed model at the lowest cost and in the shortest time. In addition, the industrial-grade six-axis robotic arm-based 3D printing equipment is used to carry out offline printing practice, and the establishment of a standardized printing process ensures the accuracy of the printed components. Through the concrete printing instance of the Moon Pot Zun shell structure, the complete learning process under this mode is introduced. This teaching mode meets the three-one talent cultivation concept of mastering a software language, driving a hardware device, and solving an engineering problem, which can provide a useful reference for other universities to carry out the teaching of construction 3D printing.

Key words: construction 3D printing; online and offline; teaching mode innovation; intelligent construction

(责任编辑 梁远华)