

基于机械臂3D陶土打印技术 及其数字孪生工厂构建

高天¹, 崔凯丽¹, 乔文涛^{1,2†}, 杨思楠¹, 王萌博¹

(1. 石家庄铁道大学土木工程学院, 河北 石家庄 050043;

2. 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室(石家庄铁道大学), 河北 石家庄 050043)

摘要:3D打印技术已经成为最具颠覆性的技术之一,为解决现有3D打印建造模式中依旧存在无法持续供料的问题,提出了一种新型的机器人3D打印加工系统。借助硬件装配和软件设计实现了系统的自动化、稳定和协同工作。同时,通过对机器人3D打印加工系统的控制对陶土实体进行了打印。结果表明,陶土实体打印误差控制在2%以内,验证了其在实际工程中的应用价值。最后设计和搭建了基于数字孪生技术的3D打印数字工厂,引入了数字孪生技术实现了实时监控和控制功能,完善了设计和建造一体化。

关键词:智能建造;机器人系统;3D打印;数字孪生

中图分类号:TU689

文献标识码:A

Research on the 3D Clay Printing Technology Based on Robotic Arm and Construction of Digital Twin Factory

GAO Tian¹, CUI Kaili¹, QIAO Wentao^{1,2†}, YANG Sinan¹, WANG Mengbo¹

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China;

2. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control (Shijiazhuang Tiedao University),
Ministry of Education, Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

Abstract: 3D printing technology has become one of the most disruptive technologies. To address the persistent issue of unsustainable feeding in current 3D printing construction methods, a novel robotic 3D printing processing system has been proposed. Through hardware assembly and software design, the system's automation, stability, and collaborative work have been achieved. Simultaneously, control over the robotic 3D printing processing system was applied to print ceramic entities. The results indicate that the printing error of ceramic entities is controlled within 2%, validating its practical engineering application. Finally, a 3D printing digital factory based on digital twin technology was designed and established, introducing real-time monitoring and control function through digital twin technology, thereby enhancing integration between design and construction.

Key words: intelligent construction; robot system; 3D printing; digital twin

随着现代科技的蓬勃发展,建筑行业所面临的生产效率低、设备落后、劳动力短缺、重硬件轻软件等问题亟待解决^[1]。建筑行业迫切需要通过实现高质量发展,不仅需要从粗放式、碎片化的建造模式转

向信息化、智能化的高质量建造^[2],提供更高品质的工程,还需要转变建造动力,从依靠资源与劳动力等要素投入转为创新性建造实现绿色化、工业化、智能化建造^[3]。如今,智能建造和信息技术的

快速发展以及在建筑业的应用,也使建造过程中开展对“人、机、料、法、环”的管理成为现实^[4],逐步实现对传统建筑产业的技术升级和资源优化^[5]。参数化设计的出现改变现有的建模方式和思维,在未来的建筑设计研究方面有很大的发展前景^[6]。其中 3D 打印技术完美地呈现了一种新的想法,从原先的减材建造思维中创造出的新型增材建造思维^[7]。3D 打印技术经过持续多年的发展,开发了许多种成型技术,并由此衍生了许多种加工过程稳定、成型精度高的 3D 打印装置。将 3D 打印技术与机械臂相结合,机械臂作为多自由度的运动装置,具备高度灵活性和精确性,为实现建筑设计与建造的一体化、智能化提供了有力支持。同时,数字孪生技术的出现,实现了对建造过程的实时监控、掌控和终止等,进一步完善了设计与建造的协同性。

基于机械臂的 3D 陶土打印技术及其数字孪生工厂构建,通过硬件装配和软件设计的优化,搭建完整的机械臂 3D 陶土打印加工系统,通过实体打印实验验证机械臂 3D 陶土打印加工系统的可行性。同时,设计构建数字孪生技术应用的 3D 打印数字工厂,运用数字孪生技术实现实时监控和控制,实现对整个生产过程的智能化管理和优化。

1 机器人 3D 打印加工系统

机器人 3D 打印加工系统由 3D 打印系统和机器人系统组成。3D 打印系统包括供料系统和传送挤出系统。供料系统通过刚性连接固定在传送系统上方,传送系统则通过螺栓紧固于高铝型材框架上,以确保可靠和连续地输送打印材料。传送挤出系统通过连接件与机器人系统的六轴机械手臂连接,打印平台在低铝型材框架上通过螺栓牢固固定,以实现机械手臂的操作半径全覆盖打印。整体系统结构如图 1 所示。

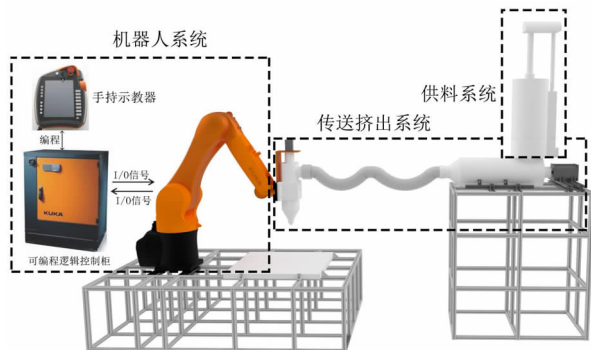


图 1 机器人 3D 打印加工系统

1.1 系统各硬件构成

传统的 3D 打印系统通过直接向挤出装置添加打印材料进行实体打印。本文所提出的机器人 3D 打印加工系统中,采用了独立的供料系统,通过向供料系统注入打印材料来实现 3D 打印的持续性。该供料系统由供料桶、升降结构、挤压结构和调节结构组成。具体结构如图 2 所示。

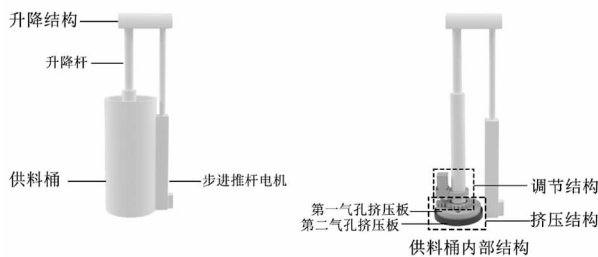


图 2 供料系统结构图

挤压结构和调节结构是供料系统的核心。挤压结构通过气孔挤压板的分布控制储料桶的气压。调节结构通过齿轮和步进旋转电机调节挤压板的角速度,通过大小齿轮的转动控制气孔位置,实现对供料桶气压的控制。

当需要向传送装置输送打印材料时,通过步进转动电机转动小齿轮带动大齿轮和上侧挤压板顺时针旋转 90°实现气孔错位分布,形成挤压空间,向下挤压材料。材料输送完毕后,逆时针旋转 90°实现气孔交叠分布,保持气压一致,避免材料反流。为确保 3D 打印材料的稳定输送,采用步进转动电机驱动机制,通过升降结构将挤压结构移出储料桶,加入新材料,循环操作实现连续打印。同时也确保了 3D 打印过程的稳定性和质量。挤压结构的不同状态如图 3 所示。

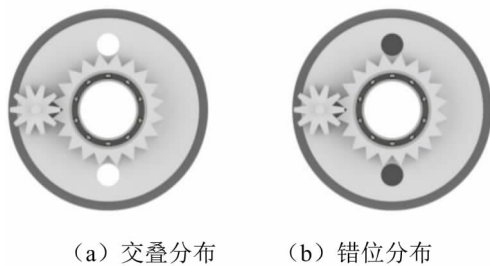


图 3 挤压结构不同状态

传送挤出系统由 57 步进转动电机驱动的螺杆、竖形桶、机械连接件和柔性管道组成。系统采用螺杆驱动类方式实现连续传送和挤出打印材料,利用 57 步进旋转电机提供持续转动动力。螺杆通过 Arduino 微控制器控制转动速度,并与机器人系统进行

信号协同交互,实现对打印速度和质量的控制。

机器人系统由机械手臂、逻辑控制柜、手持示教器和连接线缆组成。采用工业库卡(KUKA)机器人 KR10R1100six。机器人作为 3D 打印加工系统的运动装置,通过执行 SRC 文件指令控制加工过程,借助手持示教器进行指令转译和驱动机械手臂运动。

1.2 机器人 3D 打印加工系统协同控制

机器人 3D 打印加工系统在实际打印过程中,其核心部分为控制系统,其中各个系统的自动化控制,涉及机器人系统和外部 3D 打印系统的相互协调。具体机器人 3D 打印加工系统协同控制如图 4 所示。

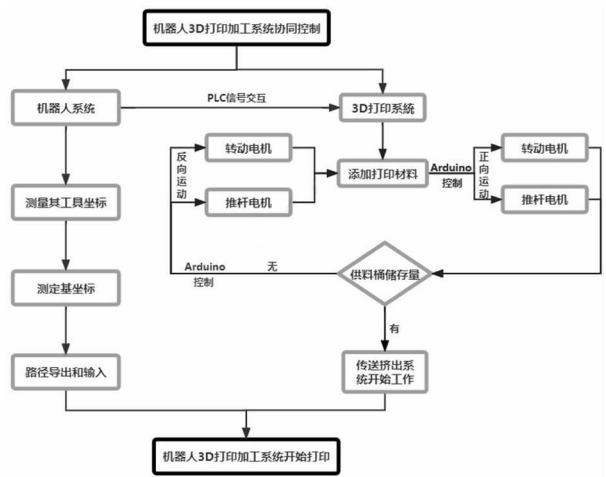


图 4 机器人 3D 打印加工系统协同控制

机器人系统采用封闭型结构,通过机器人离线编程和路径规划实现打印对象的参数化建模和模拟。除机器人系统以外的系统设备需通过 PLC 自动化技术来实现与机器人系统进行信号协同交互,从而实现机器人 3D 打印加工系统的自动化控制。

3D 打印系统的自动化控制以 Arduino 微控制器为中心,控制各个电子元件的工作状态。通过设计完整的硬件线路连接并形成有效的信号交互控制,借助 Arduino 技术和机械臂控制系统协同控制。确保机械臂与外设硬件之间稳定协同运行。

2 3D 陶土实例打印建造

2.1 参数化模型及路径模拟

结合 Grasshopper 软件和 Rhino 软件采用参数化建模方法构建模型,通过操控节点、尺寸和形状参数来实现最佳建构方案。虽然 Grasshopper 软件可用于路径设计,但在转译机器人可识别程序时存在一些问题。通过使用 KUKA|prc 插件,可

以解决这个问题,并实现对库卡机器人的全方位工程实践模拟,同时能够以图形形式映射机器人所有轴的运动,并通过参数化设计方法对路径进行调整和优化,以找到完成加工任务的最佳路径方案。通过对机器人进行仿真模拟,可以预处理碰撞和轴限位等问题,从而提高实际建造过程的效率。

基于参数化模型建构,将打印模型的第一层作为参数化的第一项,当初始层面确立后,将打印层数、中间层凹陷程度和中间层位置作为下一步参数化指数,得到最终模型的中间层面和最终层面。

因为在实际打印过程中需要频繁地改变方向,容易导致角部出现折角问题,极易造成打印路径折断,影响美观。因此,通过采用“回”字形打印路径法优化打印效果,避免折角和路径中断等问题的出现。

同时,通过对实际打印过程中层与层之间转换位置可能引起的打印材料堆积问题进行分析,利用 Grasshopper 软件进行路径优化,如图 5 所示。以获取最佳的打印路径,进而生成最终打印路径。

2.2 机器人 3D 打印加工系统的组装与调试

机器人 3D 打印加工系统通过将 3D 打印系统、机器人系统和高低铝型材框架固定装置组合搭建完成原型机的组建。系统之间通过机械、线缆和螺栓连接相互关联,并进行位置调整以满足实际打印需求。在程序参数设置与调试阶段,通过 Arduino IDE 编写清晰的程序代码,实现多运行流程的协同控制。Grasshopper 软件中的 KUKA|prc 生成于控制工业机器人运动的 SRC 文件。根据实际需求进行参数化设计和调整打印路径,调整电机转速以控制挤出量。通过稳定的信号传输和协同交互实现系统间的协调工作。调试过程中,插入数字信号和等待时间确保打印材料传送到位。最终,程序按预设步骤运行,完成 3D 打印任务,机器人 3D 打印加工系统组装调试完成后如图 6 所示。

2.3 陶土材料及打印参数选用

3D 陶土打印加工过程中,陶土材料需要通过分析其材料特性和力学性能后进行选择。建水白陶具有高硬度、适中黏稠度和多样化的塑形特性,适用于 3D 陶土打印应用。同时,对陶土打印过程中的挤出质量进行评估,包括挤出均匀性、层间间距和实际轮廓。通过调整陶土材料的含水率、步进转动电机的转动速度和挤出装置的向上偏移路径距离来优化打印参数。

根据陶土材料的含水率计算公式选择并结合陶土原土材料的情况依次划分含水率分别为 5%、

10%、15%、20%如图 7 所示。

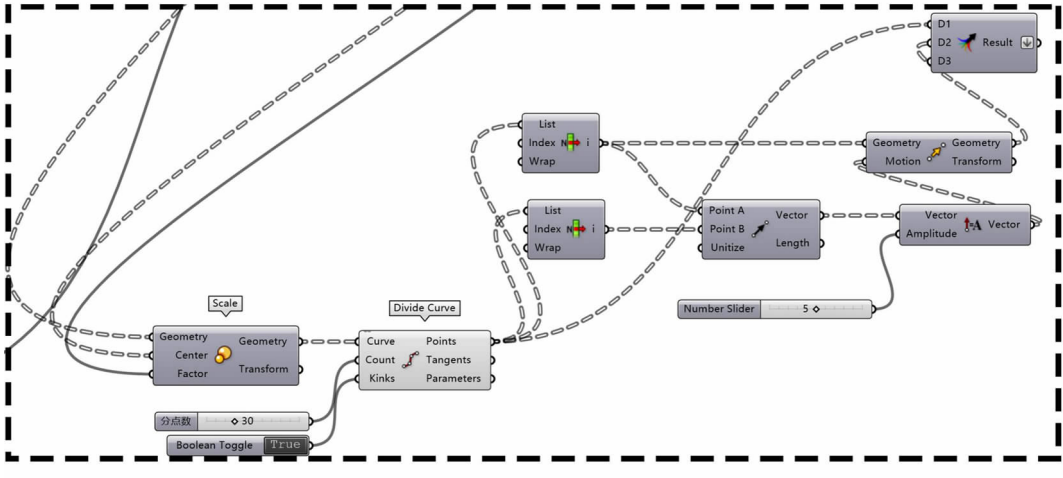


图 5 打印路径优化程序

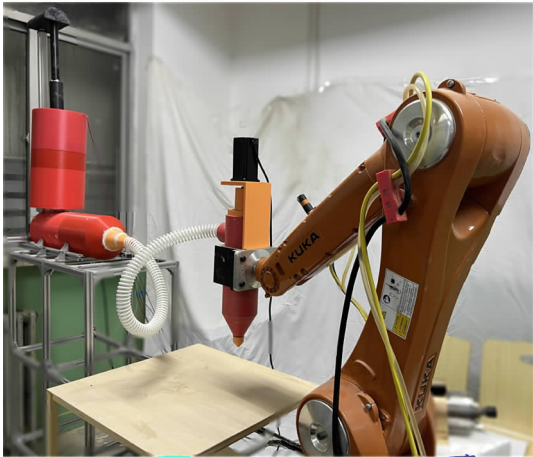


图 6 3D 打印系统的组装与调试



图 8 陶土材料挤出结果对比

细分控制为 4,后选择三种向上偏移距离进行模拟实验。陶土材料挤出结果对比如图 9 所示。



图 9 陶土材料挤出结果对比

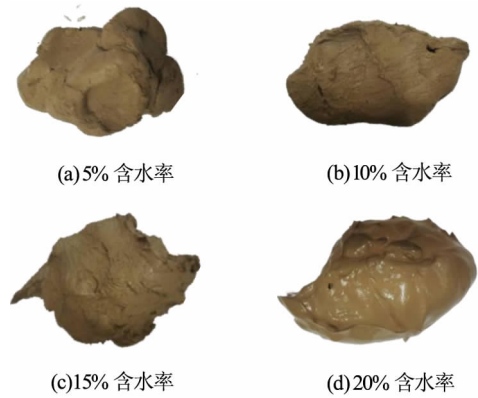


图 7 不同含水率陶土材料

通过分析,选择含水率为 15%的陶土材料,打印口径为 5 mm,喷头距路径偏移为 8 mm,步进转动电机驱动器选择 1、2/A、4、16 细分。进行第一组模拟试验。陶土材料挤出结果对比如图 8 所示。

通过打印实验可知,陶土含水率为 15%、细分控制为 4 和挤出装置向上偏移路径距离为 7 mm 机器人 3D 打印加工系统最佳的打印参数,打印时系统运行状态最佳。

2.4 实际建造流程

在基于模型、硬件和软件的基础上,使用 FDM 层积成型方法进行 3D 打印。通过调整参数和协同运行,机器人 3D 打印加工系统能够根据实体模型进行精准的 3D 打印。具体步骤如下:

- 1)调整挤出装置并测量工具坐标。
- 2)测定基坐标。
- 3)路径和 Arduino 程序的导出和输入。

- 4)控制柜 PLC 与 Arduino 微控制器的信号交互。
- 5)自动化打印工作
- 模型的 3D 打印过程如图 10 所示。

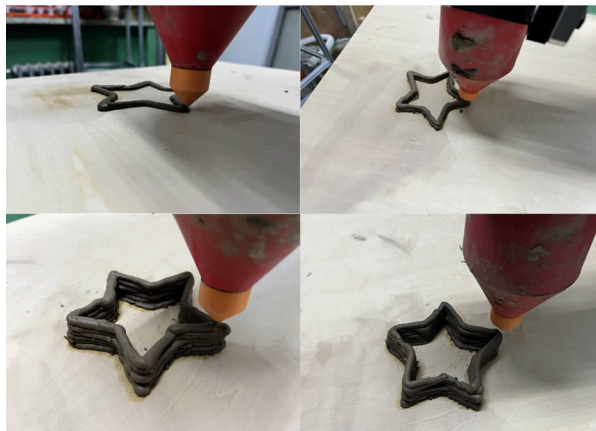


图 10 模型的 3D 打印过程

3 基于数据可视化 3D 打印数字工厂

3.1 3D 打印数字工厂的整体布置

为了满足建筑行业向信息化和数字化转型的需求,数字孪生技术应运而生,信息物理系统利用信息化技术和自动化控制技术,将信息世界和物理世界的对应数据和要素进行有效融合,实现物理世界向信息世界的映射,并通过这些数据和要素建立一个实时交互、协同合作的系统。在此基础上提出一种基于 3D 打印技术和数字孪生技术相结合的 3D 打印数字工厂设计。

该工厂包含多条生产线,以满足现代工厂对多样化和多功能化的需求,如图 11 所示。其中,陶土工艺品生产线、陶土模板混凝土加工生产线构成了该工厂的核心部分。陶土工艺品生产线和陶土模板生产线通过 3D 打印技术实现自动化生产和智能化生产。

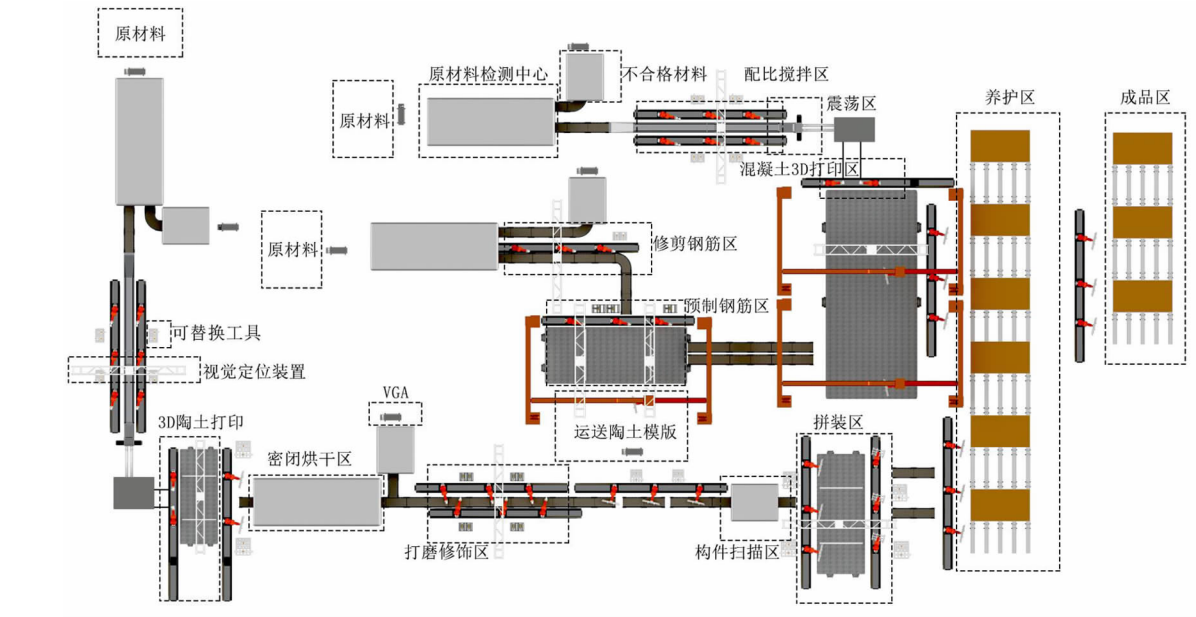


图 11 3D 打印数字工厂设计

3.1.1 陶土工艺品生产线区域布置

现代陶土工艺品生产面临效率低下、质量不稳定和成本增加的挑战。为了应对这些问题,提出了陶土智能生产线。该生产线涵盖了陶土工艺品加工生产的全过程,包括多个加工工艺和功能分区。

在打印材料制备区,通过抽样检测和配比搅拌工艺,准备符合要求的陶土打印材料。陶土工艺品打印及后处理区负责实际的打印和后续处理,通过机器人 3D 打印加工系统实现精确打印,然后进行烘烤成型、质量检测和最终的打磨修饰。通过构件扫描区进行单体成品扫描,然后进行拼装和最终装

配。陶土智能生产线利用配套机械臂的协同作业,实现了自动化和高效化的生产过程。

3.1.2 陶土模板及混凝土加工生产线区域布置

该生产线由陶土模板及钢筋加工生产线和混凝土打印生产线组成,为解决传统模板成本高、回收利用率低的问题而设计。陶土模板及钢筋加工生产线负责制作构件模板和钢筋排布,而混凝土打印生产线则负责混凝土打印和养护工作。通过协同工作,这条生产线实现了高效、低成本的混凝土构件制造,并充分利用原料,实现可持续发展。

3.2 基于 MES 系统的 3D 打印数字工厂虚实交互设计

3.2.1 3D 打印数字工厂数据映射

基于 3D 打印数字工厂的产线布置和装置设计,采用了模块化和层次化的方法,开发 MES(制

造执行系统)平台页面,旨在实现智能化管理。

该平台集成了数据采集、可视化展示和设备管理功能,并建立了主要功能页面模块。人员登录 MES 系统平台后,能够对 3D 打印数字工厂进行全面管理,如图 12 所示。

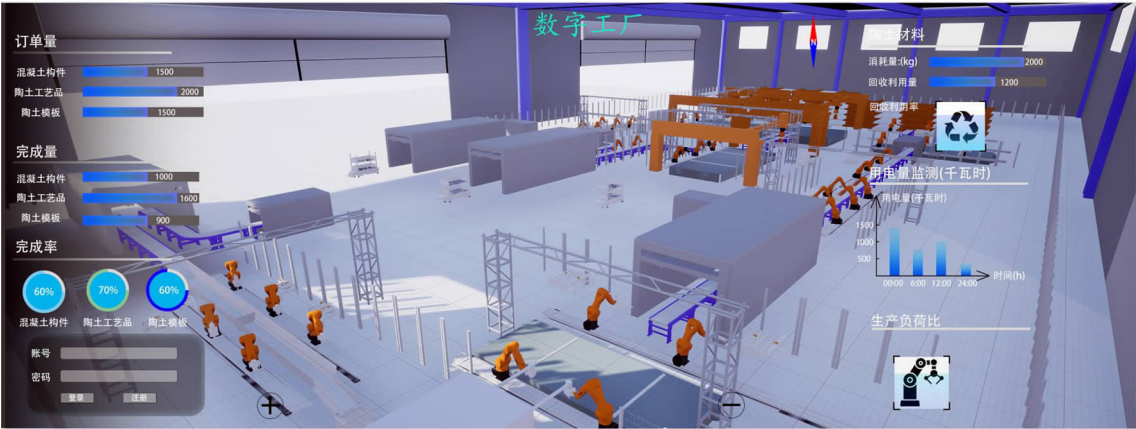


图 12 MES 系统平台首页面

通过对 3D 打印数字工厂 MES 系统平台的布局 and 规划,结合与数据库的数据交互,能够实时提取和分析数据,并在平台上进行展示,实现了对 3D 打印数字工厂的数据映射。

3.2.2 工厂生产与设备物联与大数据交互

数字工厂的产线与设备物联与大数据交互是实际生产中的重要问题。通过实时监控生产线情况、实时交互生产数据和实时分析设备运行状况,可以预防故障和问题的发生,提高生产效率和质量,降低成本。3D 打印数字工厂的功能需求包括生产线展示、生产流程、设备工具等模块。

在生产线展示页面中,通过实时填写产品信息和展示原材料供需情况,实现定制化生产和优化供应链管理。

生产流程页面展示了原材料处理、构件加工和养护存放的实时交互数据,帮助实时调整和优化生产流程。设备工具页面展示设备基本信息、运行状态和能耗监测,实现设备的实时分析和管理。这些功能能够实现数字工厂产线与设备物联与大数据的实时交互,提升生产效率和效益。生产流程中原材料处理平台页面如图 13 所示。

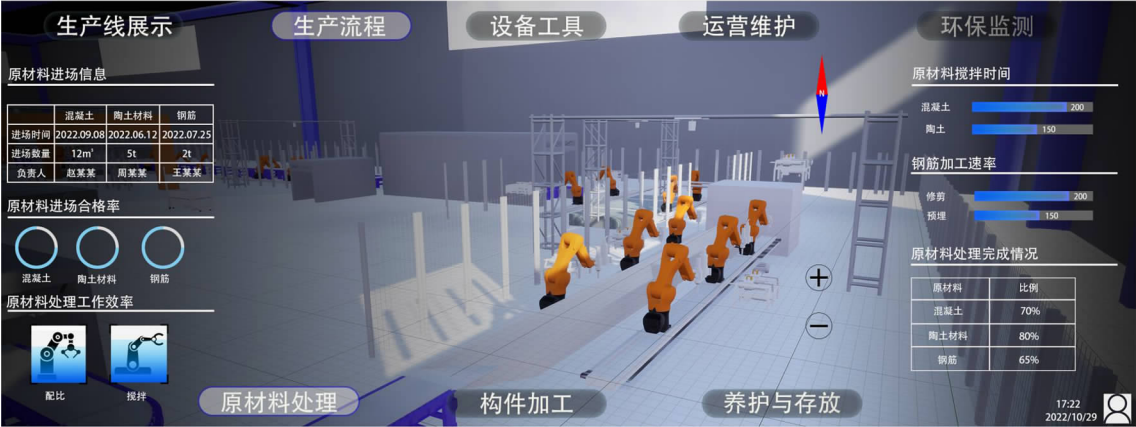


图 13 原材料处理平台页面

3.2.3 工厂运维与环保物联与大数据交互

3D 打印数字工厂的运维和环保是确保其正常运行和可持续发展的关键。为实现有效管理和协调工厂运营活动,对运营维护系统和环保监测系统

进行开发。运营维护系统是综合管理系统,包括人员管理、物料管理、安全管理、消防管理、能耗管理和成本管理等功能模块,旨在科学制定生产计划、优化采购流程、提高财务效率和优化资源配置,如图 14 所示。

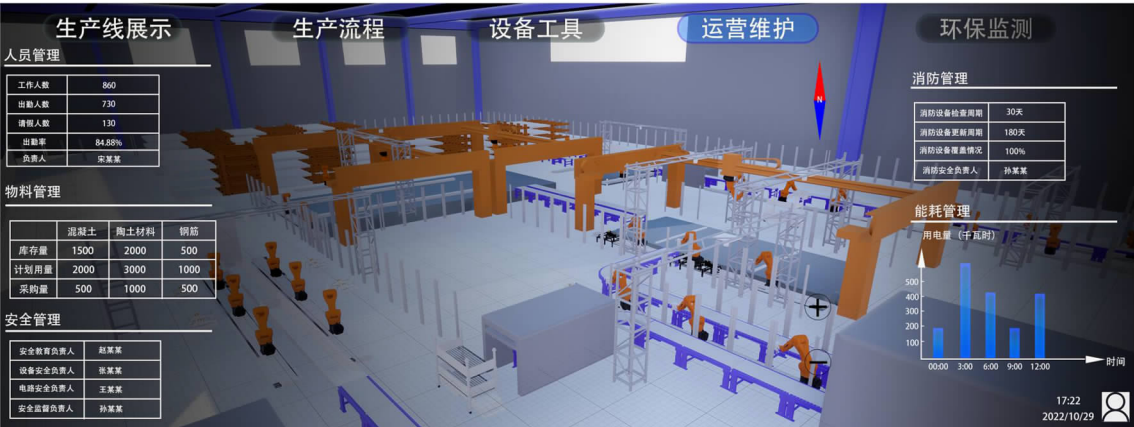


图 14 运营维护系统页面

环保监测系统通过实时监测工厂产线中的废气、废水、废料和噪声等环境污染因素,对生产过程中所产生的超标情况进行实时记录、控制和治理,如图 15 所示。

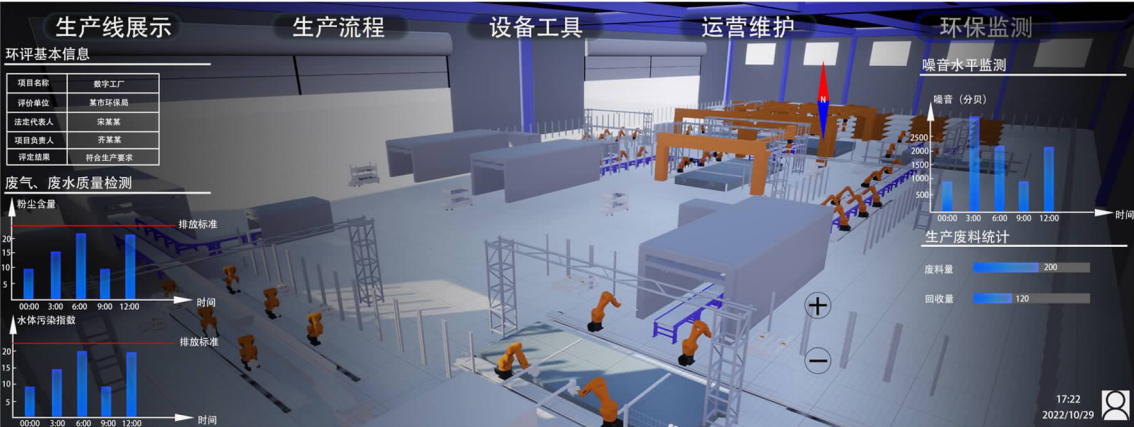


图 15 环保监测系统页面

运营维护和环保检测系统通过合理的页面布局和功能设计,能够有效管理和协调工厂运营活动,确保环境保护措施的执行,实现工厂的高效运行和可持续发展。

4 结 论

提出了一种基于机器人的 3D 打印加工系统,对该系统进行了原型机的建造与实体性能评估,同时引入 3D 打印数字工厂,并对该数字工厂的产线布置、数字孪生和 MES 管理系统页面进行设计和构建,可得出以下结论:

1)基于机器人的 3D 打印加工系统通过软硬件信号交互控制,实现了高度一体化和稳定的协同工作,可以实现其预设功能,其误差控制在 2% 以内,验证了该系统的可行性。

2)通过设计多条协同生产线,对数字工厂布局进行了合理规划。

3)使用 MES 管理系统实时操作、监控和管

控,实现物理工厂向信息管理平台的数据映射,从而提升生产效率和提高产品质量;通过实时数据分析和数据模拟来把握生产进度和安排,从而降低生产成本和生产风险。

参考文献

[1] XU Y Y, ZHOU Y, SEKULA P, et al. Machine learning in construction: from shallow to deep learning[J]. Developments in the Built Environment, 2021, 6: 100045.

[2] 李国建,宫长义,施明哲,等. 智能建造开启建筑行业新机遇[J]. 江苏建筑,2022(6):4-7+21.

[3] 孔文雄. 建筑机器人推动智能建造迈向发展新时代[N]. 中国建材报,2021-11-11(003).

[4] 马涛. 智能建造视角下新型建筑工业化发展水平评价[D]. 合肥:安徽建筑大学,2022.

[5] BAKHSHINEZHAD S, MOHEBBI M. Multi-objective optimal design of semi-active fluid viscous dampers for nonlinear structures using NSGA-II[J]. Structures, 2020:24.

[6] 虞刚. 图解的力量——阅读格雷格·林恩的《形式表达——建筑设计中图解的原一功能潜力》[J]. 建筑师,2004(4):62-65.

[7] SANGHERA B, NAIQUE S, PAPA HARILAOU Y, et al. Preliminary study of rapid prototype Medical models[J]. Rapid Prototyping Journal, 2001,7(5):275-284.