

DOI: 10.7672/sjgs2025130006

多款建筑智能机器人全过程协同作业技术*

黄和明,夏涛,肖诗凯,徐清艳,佘家伟,赵乐群

(中国建筑第四工程局有限公司,广东深圳 518000)

[摘要] 对工程从主体施工阶段到装修阶段全过程高效应用建筑智能机器人展开研究,旨在形成一套建筑机器人高效施工体系和高效协同的智能建造模式,提高建筑机器人作业覆盖率,推进自动化、标准化生产,保证施工质量、降低人工成本、提高作业效率。研究项目主要对地下室底板施工,主体标准层施工以及室内外装修部分工序施工中建筑智能机器人的应用进行总结。其中,地下室底板施工采用了整平、抹光两款机器人协同作业;主体标准层施工基于造楼机平台集成开合模机器人、巡检机器人、钢筋抓取机器人、钢筋转运机器人、自动巡点布料机、混凝土振捣机器人6款机器人组成一体化协同作业平台协同作业;室内装修阶段应用了腻子喷涂作业、腻子打磨作业、天花打磨机器人3款机器人协同作业;而室外装修阶段应用了外墙乳胶漆喷涂机器人进行高危环境作业。共同构成了一个立体多款建筑智能机器人全过程协同作业模式。

[关键词] 智能建造;机器人;协同作业;造楼机;自动化

[中图分类号] TU758

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)13-0006-06

The Whole Process Collaborative Operation Technology of Multiple Building Intelligent Robots

HUANG Heming, XIA Tao, XIAO Shikai, XU Qingyan, SHE Jiawei, ZHAO Lequn

(China Construction Fourth Engineering Bureau Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000, China)

Abstract: This paper studies the efficient application of intelligent building robots in the whole process, from the main construction stage to the decoration stage, aiming at forming a set of efficient construction systems and an efficient collaborative intelligent construction mode of building robots, improving the coverage rate of building robots, promoting automation and standardized production, ensuring construction quality, reducing labor cost, and improving operation efficiency. The research project mainly summarizes the application of intelligent building robots in the construction of the basement floor, the construction of the main standard layer, and the construction of indoor and outdoor decoration. Among them, the basement floor construction adopts two types of robots, namely, leveling robots and polishing robots, to work together. The main standard layer construction is based on the building machine platform, which integrates six types of robots, i. e., the mold opening and closing robot, inspection robot, steel bar grabbing robot, steel bar transfer robot, automatic inspection point distributor, and concrete vibrating robot. These six types of robots form an integrated collaborative work platform to work together. In the indoor decoration stage, the putty spraying operation robot, putty grinding operation robot, and ceiling grinding robot are applied to work together. In the outdoor decoration stage, the external wall latex paint spraying robot is applied instead of high-risk environment operation. All these robots together constitute a three-dimensional, multiple, whole-process collaborative operation mode of building intelligent robots.

Keywords: intelligent construction; robot; collaborative work; building machine; automation

* 中建股份科技研发课题:建筑机器人精益建造体系在工程项目研究与应用(CSECEC-2023-Z-9);广东省住房和城乡建设厅研究开发项目:建筑机器人精益建造体系在工程项目研究与应用(2024-K65-100579);中建四局科技研发课题:建筑机器人精益建造体系在工程项目研究与应用(CSECEC4B-2023-KTA-15)

[作者简介] 黄和明,工程师,E-mail:hmgxs@163.com

[收稿日期] 2025-03-25

0 引言

目前工程建设领域智能机器人信息化、数字化、智能化技术尚处于初级阶段,存在机器人在复杂作业场景下的施工适应性与传统施工作业工序

的交叉管理问题,造成机器人作业效能未达预期,且作业覆盖率较低,尚无相适应的施工、设计和验收等标准规范。仅靠1款机器人的应用无法实现效能的显著提升,也无法从危险繁重的施工作业中解放劳动力,研究多款建筑智能机器人全过程协同作业,即“云端工厂建造”,是解决上述问题的办法之一。为此,基于公司自研的智能顶升模架造楼机平台研发新一代高层建筑智能机器人协同作业平台及施工工艺。

1 工程概况

对关联性较强的2个建筑智能机器人应用项目实践经验进行了总结。

1)项目1:位于广州市天河区车陂新涌口西路,框架核心筒结构,标准层立面较为规则,适合造楼机顶升爬行。地下3层,地上36层,建筑高度超过170m,核心筒平面尺寸为39.4m×54.7m,建筑面积约10.44万m²。

2)项目2:深圳首个大规模成体系使用建筑机器人的项目——坪山沙湖应急隔离场所及保障性租赁住房项目,位于深圳市坪山区。地下2层,建筑高度有100m和150m,剪力墙结构,标准层立面较为规则,适合造楼机顶升爬行。二次结构及室内采用装配式,总体容积率4.4,隔离用房不低于3000套。

2 机器人协同作业原理

2.1 工艺原理

1)主体施工阶段

造楼机结构布置前需要根据施工工艺进行设计,如机器人的安装位置、预留洞口、轨道预埋等。通过多款机器人分工作业实现主体施工与室内外作业(见图1)。开合模机器人负责模板安装和后续拆除,包括对拉螺栓安拆;钢筋抓取机器人将塔式起重机吊运至造楼机顶部材料堆场的钢筋每次按一定数量抓取并放至转运机器人运载装置上;钢筋转运机器人在轨道行走实现水平转运,再将钢筋转动成竖直状态垂直运输至钢筋绑扎作业面;钢筋绑扎完成后,自动巡点布料机将泵送混凝土通过串筒将混凝土从造楼机平台面传送至浇筑面,混凝土振捣机器人通过行走轨道移动到浇筑面上方,下放振捣棒将混凝土振捣密实;巡检机器人通过预设轨道行走在造楼机贝雷架下方实时记录和监控主体施工情况。

此外,建筑机器人实施前须做好模板、钢筋、混凝土等筹备计划以及施工作业面的管理等工作。

2)室内外装修阶段

首先采用BIM制定作业地图并经过算法规划

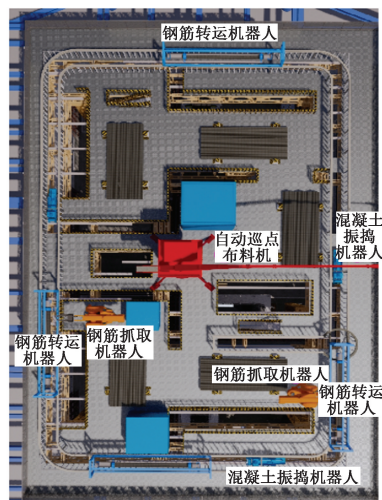


图1 造楼机平台机器人布置

Fig. 1 Robot layout of building machine platform

出作业路径,腻子喷涂机器人对墙体进行找平层喷涂,完成后再由腻子打磨机器人沿同样的规划路径进行腻子研磨。

2.2 技术原理

2.2.1 主体施工阶段

依托造楼机预留轨道,基于感知、认知与运动控制、人机交互、安全控制技术,实现机器人避免互相干扰的前提下安全高效施工。

1)安全施工:通过数字建造管控平台远程监控进行故障诊断、自主决策等。在速度、力度、位置等参数上都有严格限制,以确保在遇到异常状态时,机器人能够及时采取紧急处理措施,保障工作人员安全。

2)动态感知:机器人多方向搭载传感器,通过这些传感器,机器人可以动态获取周围物体位置、形状、大小、速度等信息,对感知到的物体进行识别、分类和定位,实时将信息反馈给机器人并对环境中的物体进行理解,从而构建1个准确的环境模型,辅助机器人快速完成对环境全方位的感知和认知。基于这些感知和认知,机器人能够进行高精度的运动控制,包括对机器人的机械臂、速度、加速度等参数的控制,以及外部扰动的抑制和补偿。

3)环境建模与理解:机器人可以对感知到的物体进行识别、分类和定位。对周围感知环境信息进行建模与分析,通过图像处理、智能学习,机器人通过传感技术动态感知环境变化并自主规避障碍物或洞口等从而实现自主导航的目的。

4)规划与决策:机器人在理解环境后,需要基于任务的要求和环境模型来进行规划与决策,确定

最佳的行动路径、动作序列和执行策略,以完成任务。这一步骤可以通过路径规划算法、学习算法等技术来实现。

5) 运动控制:协作机器人在规划与决策后,需要将决策的结果转化为具体的运动控制指令。机器人可以根据控制算法分析发出指令,通过控制系统如操纵机械臂、移动底盘等实现物体的抓取、移动、放置等动作。

6) 人机交互:每款机器人研发初期均为充分协同作业的场景,尚未实现无人自动化建造,故需要经过专业实操培训的工人实时介入,在复杂或突发工况下工人实时交互输入指令进行纠偏,从而确保工作效率和安全性。

2.2.2 室外作业机器人

机器人根据施工工艺装备动态感知周围环境。激光雷达可实时扫描周围空间,构建三维地图,用于检测障碍物、识别建筑结构和作业区域。摄像头能获取视觉图像,通过图像识别技术识别建筑构件、施工标志等。

3 造楼机结构安全性分析

采用 MIDAS/Gen 钢结构有限元分析软件进行建模分析,考虑施工堆载取值 $5\text{kN}/\text{m}^2$,机器人设备自重及作业过程中的荷载根据说明书及厂家确认,为保守起见,基本风压取 50 年重现期的基本风压,即 $0.5\text{kN}/\text{m}^2$,其他荷载如结构自重、温度作用等根据广东省标准 DBJ/T 15—101—2022《建筑结构荷载规范》取值。

经对比分析,造楼机顶部布料机底座区域竖向位移最大,为 32mm ,其中该跨度为 14.1m ,贝雷架竖向位移在控制范围 $L/250$ (56mm) 以内,水平方向最大位移 5mm ;最大应力为 178MPa ,低于钢结构许用应力 305MPa ,满足钢结构相关规范要求。

采用 YJKS6.0 对造楼机钢结构平台进行整体建模分析,整体模型如图 2 所示。造楼机钢结构整体指标如表 1 所示。

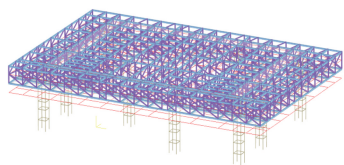


图 2 造楼机平台整体模型

Fig. 2 The overall model of building machine platform

由表 1 可以看出,造楼机钢结构整体指标满足规范限值要求,该结构布置可确保施工作业安全。

表 1 造楼机钢结构整体指标

Table 1 Overall index of steel structure of building machine

指标项目	指标	规范限值要求
第 1 扭转周期/第 1 平动周期	0.83	≤ 0.9
x 向最大层间位移角	1/311	$\leq 1/200$
y 向最大层间位移角	1/209	$\leq 1/200$
x 向层间位移比值	1.03	≤ 1.2
y 向层间位移比值	1.02	≤ 1.2

4 施工阶段智能机器人穿插施工部署

建筑智能机器人采用市面上主流机器人,部署前需要根据施工工艺及现场工作面情况进行立体部署设计,避免机器人之间、机器人与其他传统施工工艺之间作业面冲突,实现有序高效流水施工。

4.1 地下室施工

地下室底板混凝土的整平、抹光工作可选择对应功能的两款机器人。其运用 GNSS 全自动导航系统,集成智能运动控制算法和实时控制技术,可完成自动纠偏、自动抗干扰、自动路径规划工作。利用抹刀、抹盘与混凝土地面小倾角的相互作用力驱动机器人平移与旋转运动,依次完成混凝土的整平、压实、提浆、抹光、收光等工序。作业场景如图 3 所示。



a 地坪研磨机器人路径模拟



b 整平机器人作业



c 地面抹光机器人作业

图 3 机器人作业场景

Fig. 3 Robot working scene

4.1.1 作业特点

1) 采用电池续航,静音降噪,大幅降低对混凝土硬化过程的扰动;确保完成面表面密实度、耐磨度、光洁度满足施工要求,施工质量稳定可靠。

2) 通过工人换班操作可实现长时间不间断作业,提高施工效率,保障工期。

3) 自主避让障碍,智能施工,作业灵活,可以手动/自动切换,工人作业强度低。

4.1.2 施工工效对比(见表2)

表2 整平机器人与人工工效对比

Table 2 Comparison of leveling robot and manual work efficiency

类别	有效时长/ min	工作面积/ m ²	覆盖面	数量	工效/ [m ² · (人·min) ⁻¹]
机器人	38	56.9	1)适用于大面,墙柱边10cm以内无法触达; 2)降板区域无法通行	2	0.81
人工	35	84.7	100%	2	0.80

通过表2可知,混凝土整平机器人不足之处是作业面覆盖率低于人工。主体标准层作业受限于户型设计及斜撑撑脚、预留洞口等环境因素影响,覆盖率低于传统人工作业,但施工质量略高于传统人工作业。

4.2 地上标准层施工

应用八大业务板块建造1个数字指挥中心平台,将现场管理进行集成并形成可视化的多类终端看板即数字建造管控平台界面,实时感知和智能管控施工情况。平台操作界面如图4所示。



图4 平台管控界面

Fig. 4 Control interface of platform

钢筋抓取机器人、钢筋转运机器人、混凝土振捣机器人、自动巡点布料机在造楼机平台上部署如图5所示。

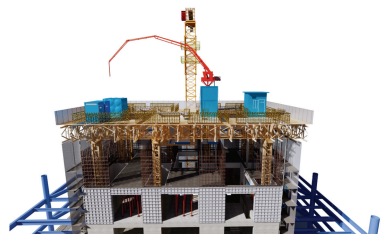


图5 造楼机剖面

Fig. 5 Profile of building machine platform

裙楼以上标准层结构主体施工采用造楼机平台,各款机器人主要协同作业施工流程如图6所示。开合模机器人、巡检机器人设置在造楼机贝雷

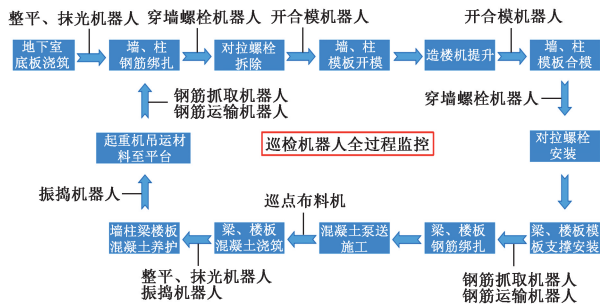


图6 造楼机平台协同作业施工流程

Fig. 6 Collaborative operation construction process of building machine platform

架下方,机器人可通过预设轨道到达指定位置作业。

钢筋转运机器人和混凝土振捣机器人共用同一轨道作业。轨道宽度900mm,安装在预留洞口两边。自动巡点布料机通过预设点位,可快速将软管放置在混凝土串筒上方并浇筑。开合模机器人、钢筋抓取与转运机器人如图7所示。



图7 机器人协同作业

Fig. 7 Collaborative operation of robot

智能振捣机器人预设振捣时长、间距、点位等参数后先通过轨道移动到振捣点上方,下放振捣棒,自动进行振捣作业,提升振捣棒水平移动至下一个振捣点继续振捣,显著减轻工人的工作强度。

混凝土通过自动巡点布料机和串筒将混凝土传送到指定楼板区域后,人工控制启动、停止作业指令。

自动巡点布料机通过预设串筒点位,可快速将软管口伸到串筒上方,实现高效布料的目标。自动巡检机器人通过轨道可全方位无死角监控施工过程并记录,为后续施工检查提供依据。

造楼机平台上智能机器人功率较大,需要配备交流电源,需要从造楼机的配电房接电。钢筋抓取

机器人需要使用 380V 动力电源,钢筋转运机器人使用 220V 电源。

轨道式巡检机器人行走轨道设在梁板施工作业面上一层空间内,可以观察混凝土浇筑过程、楼板硬化后的 $N+1$ 层剪力墙钢筋绑扎过程和造楼机升降过程。通过视频画面和 AI 图像识别技术,进行施工进度及安全作业巡视。

5 装修阶段智能机器人部署

5.1 室内机器人流水施工

应用项目 2 室内装修采用了腻子喷涂、腻子打磨 2 款智能机器人,均由蓄电池作为动力来源。施工前运用 BIM 模型地图提前规划作业路径和喷涂站点,并深化外墙分格,机器人自主移动作业。路线规划如图 8 所示。

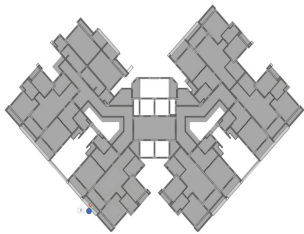


图 8 墙面喷涂、打磨机器人路径规划

Fig. 8 Path planning of wall spraying and grinding robot

研磨机器人需配备大功率吸尘集尘系统,施工过程基本无扬尘,达到绿色施工标准;涂敷均匀,不得有肉眼可见的色差;涂敷厚度需控制在允许范围;边角等部位不能覆盖的区域需要人工进行涂敷。

室内腻子喷涂机器人综合施工效率可确保在 $130\text{m}^2/\text{h}$,只需配备 1 名工人。腻子打磨机器人打磨离墙边 15cm 范围内磨盘容易被墙角反弹,需人工重点管控。腻子打磨机器人工效如表 3 所示。

表 3 腻子打磨机器人工效

Table 3 Efficiency of putty grinding robot

作业时长/h	上料时长/min	覆盖率/%	辅助工人/个	平均工效/ $(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{-1})$
6	2~3	80	2	1.53

5.2 室外乳胶漆喷涂机器人施工

外墙喷涂作业危险系数较大,故采用外墙乳胶漆喷涂机器人代替人工完成底、中、面漆喷涂作业,该款机器人经多次改进可实现作业区域定位、任意高度停留、作业轨迹预设、喷涂量预设及喷涂质量检测等功能。机器人喷涂时开启红外线热成像仪反馈到控制系统实现精准控制喷涂漆膜厚度的目的,喷涂到复杂造型或窗口部位,搭载的红外智能

感知装置将反馈到控制平台,可人工远程控制暂停喷涂作业,通过指定区域后再打开喷枪继续喷涂,喷涂观感均匀性更好,避免工人作业因手法差异导致的色差和接茬不顺畅等问题,有效确保了外墙喷涂施工质量。

熟练的油漆工外墙涂刷 1d 大约能完成 $20 \sim 30\text{m}^2$,同样工作时长,室外喷涂机器人施工效率提升了 30% 以上。

5.2.1 作业特点

- 1) 喷涂质量可靠,合格率有保障,喷涂效率高。
- 2) 机械喷涂嘴滴漏较少,显著降低材料用量。
- 3) 可长时间不间断作业,加快了工程进度,减少施工缝,很好保障了工期和质量。
- 4) 不需要工人上吊篮高空喷涂,降低施工安全风险,避免了作业工人吸入有毒有害挥发物而造成身体损害,从而减少职业病的发生。

5) 工作条件较人工作业苛刻,需要人工提前将外墙表面浮浆、粉尘等去除干净,将麻面、裂缝等用水泥浆找平。

5.2.2 实施效果

能精确控制涂料用量,减少乳胶漆的浪费,全程作业不需要光线辅助,可实现 24h 连续作业,缩短工期。完工后,满足相关涂饰、装饰装修工程验收规范要求。

6 优势与局限性

6.1 主要优势

- 1) 自动化及智能化施工
技术革新推动设备智能化,融合施工工艺创新实现了部分施工工序智能化作业,只需少量经培训合格后的工人监控,从一定程度上改变了生产方式。
- 2) 工人劳动强度低
一些重复且繁重的工作交由机器人完成,仅需少量工人操控,可轻松完成任务。如室内喷涂机器人可自主导航,自动完成喷涂施工;自动巡点布料机在标准层浇筑混凝土过程中节省大量重复调整浇筑点的操作。

3) 施工效率高

只要保证电力供应,室内喷涂机器人可连续不间断施工。作业时间更长,日完成工作量成倍增加,很好地保障了施工进度要求。

4) 减少事故、远离职业病

工程建设过程中,存在较多危险源,如高空作业、材料吊运,喷涂油漆中毒、土方坍塌、触电等,用建筑智能机器人代替人工作业,可有效减少安全事故发生,降低安全管理成本;另外,可提高管理效

率,最终实现工业化生产。

6.2 局限性

建筑智能机器人代替人工作业还处于探索阶段,技术尚不成熟,其作业效率及覆盖范围不如人工。

1) 局部作业面无法到达

室内喷涂及研磨机器人由于设备体积较大,难以到达卫生间、阴角等小空间,需要后续人工补充作业。

2) 振捣机器人施工效率低

振捣机器人从造楼机平台伸臂至混凝土浇筑面属于长臂操作,容易受造楼机振动影响,抬起振捣棒后再移至另一个振捣点再振捣,耗时比人工长。

3) 适应性差

项目施工作业条件复杂多变,目前机器人只能根据预设的路径完成作业任务,对突然出现的障碍物或洞口未能适时做出暂停作业或绕行等调整,需要人工监督保障作业环境通畅。

7 结语

多款建筑智能机器人全过程协同作业是建筑智能建造发展的勇敢尝试,通过一系列实践应用总结,得出以下结论。

1) 造楼机平台可集成多款智能机器人进行协同作业,并且满足结构安全要求。

2) 多款智能机器人协同作业有助于大幅提升施工效率,促进建筑行业转型升级,降低对人工操作的依赖,有效降低安全事故及职业病发生的概率。

3) 机器人可通过数字建造管控平台统一调配、监控,管理效率更高。

4) 在作业环境相对良好的条件下,智能机器人施工作业效率更高,质量更有保证。

5) 混凝土振捣机器人由于造楼机平台离浇筑面较高,收放振捣棒所需时间较长,振捣效率不及人工,适应性差,施工工艺仍有待改进。

6) 室内装修机器人体型较大,卫生间等狭小空间难以到达,作业面覆盖率不及人工,后续可通过机器人小型化设计及作业路线优化提高。

7) 经过大量实践总结,提高机器人施工工效及适应性,逐步实现全周期智能化施工。

参考文献:

[1] 田璐璐,黄欣莹,雷俊,等.多模自动巡检扫描机器人在模块化建筑工业生产场景中的应用[J].施工技术(中英文),2024,53(12):26-29.

TIAN L L, HUANG X Y, LEI J, et al. Application of multi-mode automatic inspection robots in the field of modular construction [J]. Construction technology, 2024, 53(12): 26-29.

[2] 翟浩博,任宝双,陈洪敏,等.房建施工机器人的应用及展望[J].施工技术(中英文),2023,52(23):20-26.

ZHAI H B, REN B S, CHEN H M, et al. Application and prospect of building construction robot [J]. Construction technology, 2023, 52(23): 20-26.

[3] 董善白.移动式造楼工厂——“空中造楼机现场、现浇自动化绿色建造技术”系统概述[J].建筑,2020(5):50-57.

DONG S B. Mobile building factory: system overview of “automatic green construction technology of aerial building machine on site and cast-in-place” [J]. Construction and architecture, 2020(5): 50-57.

[4] 李国建.融合创新视角下的建筑产业数字化[J].城市建筑空间,2023,30(2):24-26.

LI G J. Digitalization of construction industry from perspective of integration and innovation [J]. Urban architecture space, 2023, 30(2): 24-26.

[5] 王开强,李迪,李立飞,等.基于造楼机的混凝土布料机器人研究[J].混凝土,2023(9):184-192.

WANG K Q, LI D, LI L F, et al. Research on concrete distribution robot based on building machine [J]. Concrete, 2023(9): 184-192.

[6] 段瀚,陈琳欣,郭红领.人机合作背景下建筑机器人的施工策略研究[J].施工技术(中英文),2023,52(14):53-59.

DUAN H, CHEN L X, GUO H L. Construction strategy research of construction robot within the context of human-robot cooperation [J]. Construction technology, 2023, 52(14): 53-59.

[7] 贾大伟,赵鹏翔,程志强,等.一种智能型混凝土布料机的研究[J].建筑机械,2023(6):26-27.

JIA D W, ZHAO P X, CHENG Z Q, et al. Research on an intelligent concrete distributor [J]. Construction machinery, 2023(6): 26-27.

[8] 肖维思,庄然,唐务生.抹灰机器人施工研究[J].施工技术(中英文),2023,52(11):22-26.

XIAO W S, ZHUANG R, TANG W S. Construction research of plastering robots [J]. Construction technology, 2023, 52(11): 22-26.

[9] 杨明,曹晟.基于机器人的室内自动喷涂施工技术研究——以凤桐花园一期项目为例[J].福建建筑,2022(12):127-130.

YANG M, CAO S. Research on indoor automatic spraying construction technology based on robot: taking Guangdong Fengtong Garden Phase I project as an example [J]. Fujian architecture & construction, 2022(12): 127-130.

[10] 路景顺,马焯霖,吴万超,等.智能喷涂机器人关键技术及运用研究[J].中国高科技,2023(15):26-28.

LU J S, MA Y L, WU W C, et al. Research on key technology and application of intelligent spraying robot [J]. China high-tech, 2023(15): 26-28.

[11] 王月阳,李佳明.基于机械臂的建造探索[J].建筑技艺,2023,29(8):93-97.

WANG Y Y, LI J M. Exploration of architectural construction based on robotic arms [J]. Architecture technique, 2023, 29(8): 93-97.