

DOI: 10.7672/sgjs2026130042

室内喷涂机器人在小户型住宅项目中的应用效果研究*

赵乐群,张座雄,夏 涛,余家伟,李明武,邹 勇,肖诗凯,殷云楼,徐清艳,
李俊锋,刘明涛,朱青诚

(中国建筑第四工程局有限公司,广东 广州 510665)

[摘要] 建筑机器人是建筑业智能化升级的关键举措,而室内喷涂机器人在小户型住宅项目中应用案例较少,相关施工经验较为缺乏。以深圳市坪山沙湖保障性租赁住房项目为例,对不同户型条件下室内喷涂机器人应用效果进行研究。结果表明:在小户型住宅项目 A1,B1,C1 3 种户型中,室内喷涂机器人可作业区域为方形的 B1 户型,作业效率、作业质量最好,且该户型内材料节约效果最优;机器人可作业区的大面占比越高,机器人作业工效越高,但室内喷涂机器人在 ALC(蒸压轻质混凝土)免抹灰墙面施工质量较差;当前室内喷涂机器人作业质量易受基层条件影响,且其灵活性较差,为保证最终成品质量,建议室内涂饰施工过程中,第 1 遍腻子、面漆工序宜由人工施工,第 2 遍腻子、底漆工序大面由机器人施工。

[关键词] 智能建造;机器人;住宅;装修;喷涂;应用效果

[中图分类号] TU689

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)13-0042-05

Research on the Efficacy of Indoor Spray-painting Robots in Small-unit Residential Projects

ZHAO Lequn, ZHANG Zuoxiong, XIA Tao, SHE Jiawei, LI Mingwu, ZOU Yong,
XIAO Shikai, YIN Yunlou, XU Qingyan, LI Junfeng, LIU Mingtao, ZHU Qingcheng
(China Construction Fourth Engineering Bureau Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510665, China)

Abstract: Construction robotics represents a pivotal driver for the intelligent transformation of the building industry. However, indoor spray-painting robots have rarely been deployed in small-unit residential projects, and the corresponding construction know-how is scarce, severely limiting their broader adoption. Taking the Shahu Affordable Rental Housing Project in Pingshan, Shenzhen as a case study, this paper evaluates the performance of an indoor spray-painting robot under various apartment layouts. The findings are as follows. Among the three layouts—A1, B1 and C1—in the small-unit project, the robot achieved the highest working efficiency and quality in the B1, whose robot-accessible workspace is rectangular, and material savings were also greatest in this layout. The larger the proportion of continuous wall surfaces within the robot-accessible zone, the higher the robot’s productivity. Nevertheless, the robot delivered relatively poor finish quality on ALC (autoclaved lightweight concrete) walls that required no plastering. Given that the robot’s finish quality is highly sensitive to substrate conditions and its maneuverability is limited, it is recommended that, to guarantee final quality, the first coat of putty and the top-coat application be executed manually, while the second putty coat and the primer on large wall surfaces be performed by the robot.

Keywords: intelligent construction; robot; residential; decoration; spraying; application effect

0 引言

建筑业作为我国国民经济的核心支撑产业,对

我国经济发展有着不可替代的作用,为国民经济的稳健增长提供了坚实保障^[1]。然而,随着国内人口老龄化加剧、叠加职业前景发展受限等,导致近年来建筑行业出现劳动力不足,频繁出现用工荒的问题^[2-3]。为应对上述问题,建筑业急需进行智能化

* 中建股份科技项目(CSCEC-2023-Z-9)
[作者简介] 赵乐群,工程师,E-mail:1103427655@qq.com
[收稿日期] 2026-01-20

转型升级。为此,2020 年 7 月,住房和城乡建设部等 13 部门共同发布了《关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》,强调我国建筑行业需要向着智能建造方向发展。

墙面涂料施工是装饰装修工程中的关键施工环节,其高重复性、高标准化特点为机器人技术应用提供了较为理想的场景。因此,室内喷涂类机器人的研究获得了学界和产业界的广泛关注。日本建筑行业在 20 世纪 80 年代最先将机器人技术引入建筑领域,成功研制出世界第 1 台喷涂机器人^[4]。这类机器人可以替代人类在高处墙面以及天花的喷涂作业,有效减轻施工人员的体力劳动强度,减少攀爬和弯腰数次等。尤其对于室内建筑环境,移动式喷涂机器人凭借其较高的灵活度,能够适应施工现场各种复杂作业环境,具有极高的应用价值,因此受到青睐^[5]。刘国虬^[6]探讨了喷涂距离、速度、压力等参数对机器人喷涂质量的影响。杨明等^[7]研究梳理了室内喷涂机器人的技术原理、施工工艺流程、并对其经济效益进行了分析。许卫军等^[8]从人机协同、涂料配合比等方面对喷涂机器人施工技术进行了优化。综上所述,我国室内喷涂机器人已逐步进入现场试用阶段,在效率提升与人工成本控制方面成效显著。但受限于机器人尺寸,为保证室内喷涂机器人施工效率,当前多应用在大开间项目,而在保障性住房等小户型住宅项目中的应用实例较少,缺乏相应的施工技术经验,严重制约室内喷涂机器人的大规模应用。

因此,本文依托深圳坪山沙湖保障性租赁住房项目,通过应用室内喷涂机器人进行腻子、油漆作业,分析室内喷涂机器人在小户型住宅项目不同户型中的应用效果,并深入讨论了不同户型应用效果差异的原因,以期助力我国建筑机器人应用水平的提升。

1 工程概况

坪山沙湖保障性租赁住房项目位于深圳市坪山区碧岭街道。本项目用地面积 20 159.0m²,容积率 4.19,总建筑面积 153 222.6m²,结构形式为框架剪力墙结构。本项目共有 5 栋住宅楼及商业、文化活动室等 1 层配套建筑,其中 1 栋和 2 栋为超高层建筑,建筑高度为 143.45m;3 栋、4A 栋、4B 栋为高层建筑,建筑高度为 98.75m,地上层数为 33/48 层,地下室均为 3 层。本项目结构剪力墙长度较短、且分布分散,标准层内隔墙采用轻质隔墙板分隔,共有 A1、B1、C1 3 种户型,如图 1 所示(图中紫色区域为机器人可作业区)。室内墙面做法为 ALC(蒸压

轻质混凝土)免抹灰墙面和外墙内保温抹灰墙面。该项目计划投入 2 台室内喷涂机器人,在 2 种墙面、3 种户型内分别进行腻子涂敷和面漆喷涂施工。

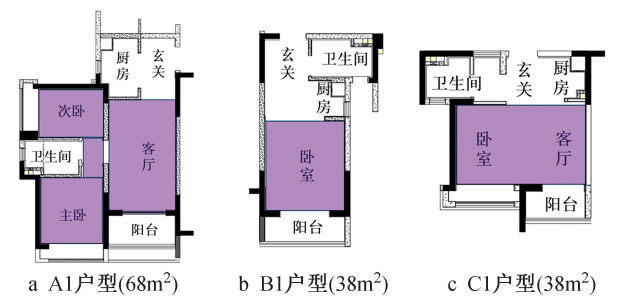


图 1 项目户型
Fig. 1 Project house type

2 室内喷涂机器人现场试验

2.1 室内喷涂机器人简介

室内喷涂机器人具备腻子、底漆、面漆自动喷涂,自动路径规划、参数控制、APP 远程监控等功能(见图 2),其详细参数如表 1 所示,并具有以下施工优势。



图 2 室内喷涂机器人
Fig. 2 Indoor spray-painting robot

表 1 室内喷涂机器人参数

Table 1 Parameters of the indoor spray-painting robot		
序号	指标名称	指标值
1	质量/kg	350
2	外形尺寸/mm	1 050×690×1 780
3	行驶速度/(mm·s ⁻¹)	0~3 200
4	作业高度/m	≤3.2
5	爬坡能力/(°)	≤10
6	工作续航/h	6
7	涂料容量/L	60
8	喷涂压力/MPa	10~22

1)质量可控:机器人喷涂压力、喷涂距离、移动速度等工艺参数精准控制,质量实时监测闭环反馈,使涂敷厚度更均匀,表面光滑、无污染、无色差。

2)工效优异:理论施工效率为 100~150m²/h,净工效约为人工的 4 倍,且能长时间连续作业。

3)绿色节材:可控制腻子均匀出料,可节约材

料 20% 左右;施工操作人员远离有害油漆,工作环境更加绿色环保。

2.2 室内喷涂机器人作业流程

室内喷涂机器人整体作业流程如图 3 所示,重点作业流程具体操作如下。

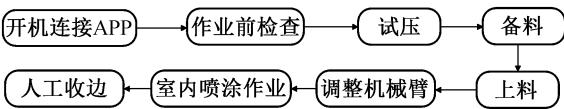


图 3 施工流程
Fig. 3 Construction process

1) 试压

在非施工场地内用清水测试机器人是否正常,并打开液压开关上压工作。上压过程中如发现无水喷出,液压管路可能出现堵塞,需检查回路,排除故障。

2) 上料

打开排料阀门排出多余清水,倒入搅拌好的腻子或油漆,将喷嘴对准废料桶,打开喷嘴开关,直至涂料均匀喷出,关闭喷嘴开关,上料完成。

3) 调整机械臂

操作面漆喷涂机器人移动至施工作业面,按照面漆喷涂机器人自带的激光定位功能,调整好腻子涂敷机器人与工作面间距,使得机械臂能自由舒展工作。

4) 室内喷涂作业

为应对不同工作场景,室内喷涂机器人具备两种不同的工作模式,大面涂敷作业时采用自动模式,可实现机器人自动涂敷、行走;机器人户间转移时,采用转运模式。工作前于机器人 APP 内设置好作业起始高度、结束高度、运行速度等参数后,点击开始工作,机器人便开始自动工作。户内作业顺序一般为先墙面、再天花。天花喷涂时需重新调整机械臂高度。为保证施工质量,每道接茬需大于 20cm。

5) 人工收边

室内喷涂机器人单户施工作业完成后,采用转运模式移动到下一户,一般用时为 5min。本户型剩余墙脚、阴阳角、玄关、门窗边等特殊部位,由人工进行收边。

2.3 试验方案

为研究室内喷涂机器人在不同户型下的应用效果,以坪山沙湖项目 3 个户型为试验场地,分别在 ALC 免抹灰墙面和抹灰墙面两种基层内进行试验,并同时设置人工对照组。试验过程中记录机器人

作业时长、作业质量、过程中发现的问题等,并进行汇总分析。

3 室内喷涂机器人应用效果分析

3.1 室内喷涂机器人作业效率分析

室内喷涂机器人在不同户型条件下其作业效率呈现出一定规律。如图 4 所示,室内喷涂机器人的作业效率整体为 B1>C1>A1,而覆盖率依次为 C1>B1>A1,最大覆盖率为 80%。在腻子涂敷作业中,由于第 1 遍腻子厚度要求较高,降低了机器人喷嘴移动速度,因此其工效约为第 2 遍腻子施工的 50%。同理,底漆相较面漆作业效率更低。人工腻子涂敷效率约为 0.3m²/min,且第 1 遍和第 2 遍腻子作业效率相近。室内喷涂机器人作业效率约为人工的 3 倍,具有一定的效率优势。但受小户型条件限制,机器人覆盖率在 67%~80%,剩余部位仍需人工进行协作。

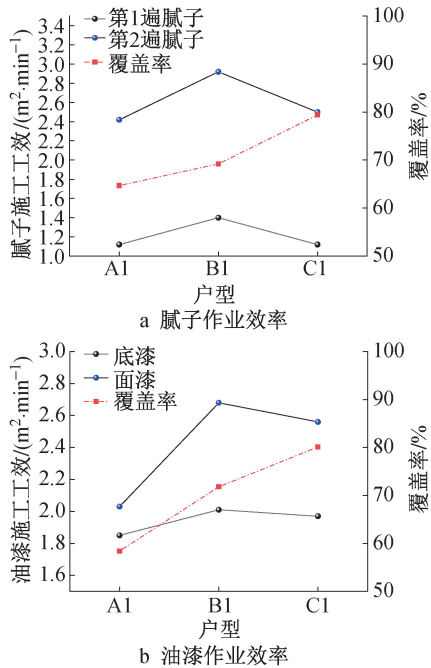


图 4 不同户型室内喷涂机器人作业效率
Fig. 4 Working efficiency of the indoor spray-painting robot in different apartment layouts

3.2 室内喷涂机器人作业质量分析

室内喷涂机器人作业完成后及时对完成面进行实测实量,收集平整度与垂直度数据,并与传统人工数据进行对比,如图 5 所示。由图 5 可知,机器人施工质量与传统人工相比较差,且油漆施工质量差距更大。3 种户型中 B1 户型的施工质量最佳,而 C1 户型最差。

3.3 室内喷涂机器人节材效果分析

油漆施工过程中,传统人工为手持喷枪喷涂,

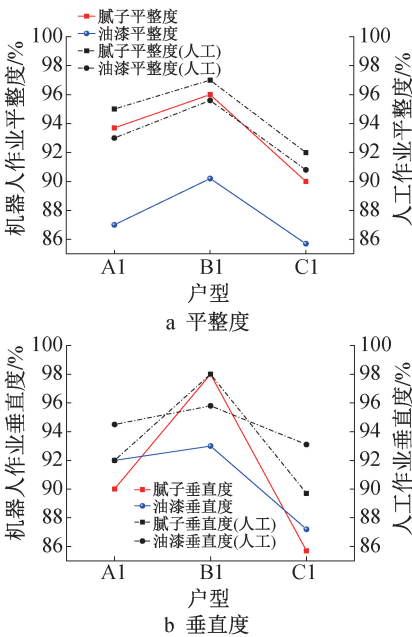


图 5 不同户型室内喷涂机器人作业质量

Fig. 5 Work quality of the indoor spray-painting robot in different apartment layouts

与喷涂机器人施工原理相似,油漆的涂覆率较为接近,节材效果并不突出,因此本节重点分析腻子涂覆率,如图 6 所示。由图 6 可知,室内喷涂机器人在腻子施工过程中,涂覆率显著低于人工作业,平均节约腻子约 17%,且 B1 户型涂覆率最低,腻子消耗量最少。因此,在 B1 户型的材料节约效果最佳。

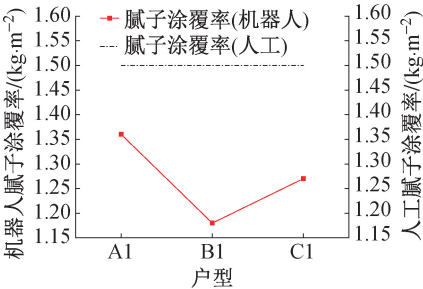


图 6 不同户型腻子涂覆率

Fig. 6 Putty application rate in different apartment layouts

4 讨论

由第 3 节分析可知,室内喷涂机器人在 B1 户型作业工效最高、作业质量最佳、节材效果最好,通过对机器人施工过程分析得出以下原因。

1) B1 户型机器人可作业范围接近方形,转运用时最少,导致其整体效率较高,而 A1 户型为 3 个房间,机器人需频繁移动, C1 户型虽也为单房,但长度较长。

2) 若将长度超过 3m 定义为大面,则 B1 户型机

器人可作业区的大面占比最高达 93.4%,而机器人在大面施工效率更优。比较大面对机器人工效的影响,如图 7 所示。由图 7 可以看出,机器人作业效率与大面占比呈正比,文献[9]也得到类似结论。

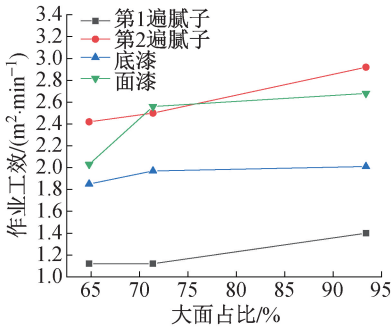


图 7 作业面积与大面占比

Fig. 7 Working area versus large-wall proportion

3) 机器人施工质量主要受墙面基层条件影响。如图 8a 所示,在 ALC 免抹灰墙面受 ALC 墙板拼缝影响,机器人腻子涂敷过程中暂时无法实现多刮少补,拼缝处施工质量较差。而 B1 户型中 ALC 墙板的占比最小,因此该户型整体质量最优,而油漆施工过程中,由于机器人启动和停止过程中出料速度下降,油漆整体均匀性下降,易出现流坠(见图 8b),因此机器人油漆施工质量普遍低于人工。

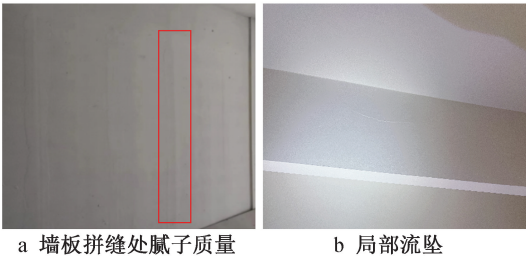


图 8 机器人施工质量

Fig. 8 Construction quality achieved by the robot

4) B1 户型大面占比较高、而 ALC 墙板占比较少,因此,整体上机器人喷嘴移动速率较高,相应墙面的腻子涂覆率也随之降低,节材效果最为显著。

5 结语

建筑机器人施工技术是建筑业智能化升级的关键举措。而室内喷涂机器人在小户型住宅项目中应用案例较少,相关施工经验较为缺乏,严重阻碍了建筑机器人的推广应用。本文以深圳市坪山沙湖保障性租赁住房项目为例,对不同户型条件下室内喷涂机器人应用效果进行研究,得到以下结论。

1) 小户型住宅项目 A1, B1, C1 3 种户型中,机器人可作业区域约为方形的 B1 户型,作业效率、作业质量最好,并且该户型内材料节约效果最优。

2) 机器人作业工效与可作业区域的大面(长度大于3m的墙面)占比成正比,且室内喷涂机器人在ALC免抹灰墙面施工质量较差。

3) 鉴于当前室内喷涂机器作业质量易受基层条件影响,且其灵活性较差,为保证最终成品质量,建议室内涂饰施工过程中,第1遍腻子、面漆工序宜完全由人工施工,第2遍腻子、底漆工序大面由机器人施工。

参考文献:

[1] 赵峰,王要武,金玲,等. 2023 年建筑业发展统计分析[J]. 工程管理学报, 2024, 38(2): 1-6.
ZHAO F, WANG Y W, JIN L, et al. Statistics analysis of China's construction industry development in 2023[J]. Journal of engineering management, 2024, 38(2): 1-6.

[2] 段瀚,张峰,陈高虹,等. 建筑机器人驱动下的智能建造实践与发展[J]. 建筑经济, 2022, 43(11): 5-12.
DUAN H, ZHANG F, CHEN G H, et al. The practice and development of intelligent construction driven by construction robots[J]. Construction economy, 2022, 43(11): 5-12.

[3] 黄和明,夏涛,肖诗凯,等. 多款建筑智能机器人全过程协同作业技术[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(13): 6-11.
HUANG H M, XIA T, XIAO S K, et al. The whole process collaborative operation technology of multiple building intelligent robots[J]. Construction technology, 2025, 54(13): 6-11.

[4] 詹达夫,郑智珂,施雨恬,等. 建筑机器人技术应用及发展综述[J]. 建筑施工, 2022, 44(10): 2474-2477.
ZHAN D F, ZHENG Z K, SHI Y T, et al. An overview of application and development of construction robots technology

[J]. Building construction, 2022, 44(10): 2474-2477.

[5] 陈翀,李星,邱志强,等. 建筑施工机器人研究进展[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(4): 58-70.
CHEN C, LI X, QIU Z Q, et al. Research progress of construction robots[J]. Journal of architecture and civil engineering, 2022, 39(4): 58-70.

[6] 刘国虬. 室内智能喷涂机器人喷涂技术研究[J]. 建筑机械化, 2023, 44(11): 15-18.
LIU G Q. Research on spraying technology based on indoor intelligent spraying robot[J]. Construction mechanization, 2023, 44(11): 15-18.

[7] 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.

[8] 许卫军,罗继文,林建侠,等. 墙面喷涂机器人施工技术应用研究[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(13): 18-21.
XU W J, LUO J W, LIN J X, et al. Research on application of wall spraying robot construction technology[J]. Construction technology, 2025, 54(13): 18-21.

[9] 张座雄,赵乐群,夏涛,等. 整平机器人在小户型住宅项目中的应用效果评价研究[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(2): 126-130, 143.
ZHANG Z X, ZHAO L Q, XIA T, et al. Evaluation research on application effect of leveling robots in small residential projects[J]. Construction technology, 2025, 54(2): 126-130, 143.

(上接第 29 页)

[8] MENDOZA O, VARGAS B, MENDOZA J. Digital processing of fractographic images for welded joints on microalloy steel API5L-XS2aged[J]. IEEE Latin America transactions, 2013, 11(1): 172-176.

[9] 罗会东,周佳奇,冯志军,等. 地下连续墙刚性排插接头技术研究[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(16): 33-38.
LUO H D, ZHOU J Q, FENG Z J, et al. Research on rigid plug-in joint technology of underground continuous wall[J]. Construction technology, 2024, 53(16): 33-38.

[10] MUHAMMAD J, ALTUN H, ABO-SERIE E. Welding seam profiling techniques based on active vision sensing for intelligent robotic welding[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2017, 88(1): 127-145.

[11] 徐佳琦,姜冬冬,刘健鹏,等. 基于聚类注意力机制的焊接质量智能检测系统研究[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(21): 31-36.
XU J Q, JIANG D D, LIU J P, et al. Welding quality intelligent detection system based on a clustering attention mechanism[J]. Construction technology, 2025, 54(21): 31-36.

[12] 朱海良. 管片钢筋骨架自动焊接技术的设计与应用[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(S1): 413-419.
ZHU H L. Design and application of automatic welding technology of segment reinforcement skeleton[J]. Tunnel construction, 2022, 42(S1): 413-419.

[13] 王百泉,彭涛,尚伟,等. 盾构管片钢筋笼平面网片自动成型模块设计与应用[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(3): 444-451.
WANG B Q, PENG T, SHANG W, et al. Design and application of automatic forming module of shield tunneling steel cage's plane mesh[J]. Tunnel construction, 2020, 40(3): 444-451.

[14] 张立宇. 地铁盾构隧道管片流水线生产智能化技术[J]. 现代城市轨道交通, 2022(11): 47-52.
ZHANG L Y. Intelligent production technology of assembly line for metro shield tunnel segment[J]. Modern urban transit, 2022(11): 47-52.

[15] 贾宝荣,许勇,马良. 超高层建筑高强度钢焊接全过程数字管控技术[J]. 施工技术(中英文), 2026, 55(1): 13-16, 28.
JIA B R, XU Y, MA L. Digital control technology for entire welding process of high-strength steel in super high-rise buildings[J]. Construction technology, 2026, 55(1): 13-16, 28.