

整平机器人在小户型住宅项目中的应用 效果评价研究*

张座雄,赵乐群,夏 涛,肖诗凯,冯梦阳,殷云楼,李明武,余家伟,
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] 为推广建筑机器人落地应用和定量评价其应用效果,以整平机器人为研究对象,分析其在住宅项目中的实际应用效果。采用 AHP 层次分析法建立评价模型,以深圳市坪山区某小户型住宅项目为试验对象,开展整平机器人实际作业试验,定量研究整平机器人在不同作业场景下的应用效果,并对其综合效能进行评价,最后针对应用过程中存在的问题提出相应优化措施。

[关键词] 智能建造;整平机器人;住宅;应用效果;评价指标

[中图分类号] TU17

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)02-0126-05

Evaluation Research on Application Effect of Leveling Robots in Small Residential Projects

ZHANG Zuoxiong, ZHAO Lequn, XIA Tao, XIAO Shikai, FENG Mengyang, YIN Yunlou,
LI Mingwu, SHE Jiawei, LIU Mingtao, ZHU Qingcheng

(China Construction Fourth Engineering Division Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510665, China)

Abstract: In order to promote the application of construction robots on the ground and quantitatively evaluate its application effect, the leveling robot is taken as the research object to analyze its actual application effect in residential projects. AHP hierarchical analysis is adopted to establish an evaluation model, and a small residential project in Pingshan, Shenzhen is taken as the test object, the actual operation test of the leveling robot is carried out, the application effect of the leveling robot in different operation scenarios is quantitatively studied, and its comprehensive performance is evaluated, and finally the corresponding optimization measures for the problems existing in the application process are put forward.

Keywords: intelligent construction; leveling robots; residential; application effect; evaluation index

0 引言

建筑业是我国实体经济的重要组成部分。在“十三五”期间,我国建筑业增加值年均增长 5.1%,占国内生产总值比重保持在 6.9% 以上,是影响国计民生的支柱产业。然而,我国建筑行业正面临建筑工人老龄化、生产方式粗犷、管理信息化滞后等挑战,传统建筑业向智能化、信息化、数字化的转型升级已迫在眉睫^[1]。为摆脱现状,我国自 2016 年

起,便在建筑行业大力推广智能建造技术^[2]。

建筑机器人是智能建造的重要组成部分。2022 年 1 月,住房和城乡建设部印发了《“十四五”建筑业发展规划》,规划中提出主要任务是加快智能建造与新型建筑工业化协同发展,特别强调加快建筑机器人的研发与应用。近年来,随着 AI、云计算、BIM 等技术的成熟^[3],建筑机器人实际应用成为可能,越来越多的建筑机器人从实验室走向施工现场。建筑机器人种类繁多,大致可分为 4 大类,分别为混凝土类、装饰装修类、地坪施工类、辅助类。

建筑机器人的应用研究正逐渐获得学界关注。

* 中建股份科技研发课题:建筑机器人精准建造体系在工程项目研究与应用(CSEEC-2023-Z-9)

[作者简介] 张座雄,工程师,E-mail:1781795556@qq.com

[收稿日期] 2024-03-20

如陈琮等^[4]对建筑机器人进行了全面综述;段瀚等^[1]以某项目为案例对建筑机器人的集成应用情况进行了初步研究;李洋^[5]设计了一款找平机器人并对其找平效果进行了研究;肖维思等^[6]以抹灰机器人为研究对象,介绍其施工技术和施工效果。综上所述,当前大多是对机器人应用效果的定性研究,且对混凝土类机器人的研究相对较少。这主要是因为混凝土浇筑技术较复杂,同时,浇筑过程中施工环境时刻变化,导致混凝土浇筑标准化程度较低、智能化难度大,因此应用较少^[7]。而定量评估建筑机器人应用效果,对于建筑机器人后续大规模应用具有重要指导价值。因此,亟需建立一套能全面评价建筑机器人应用效果的评价模型。

当前,建筑机器人在大开间大跨度项目中应用效果较理想,而在小户型房建项目中的应用较少,实际应用效果尚不明确。因此,本文基于 AHP 层次分析法建立混凝土类机器人评价模型,以深圳市坪山区某小户型住宅项目为实例,验证该模型准确性,然后针对不同作业场景,将建筑机器人与传统人工作业效果进行综合对比评价,并结合评价结果与实际应用过程中发现的问题,提出相应优化措施,以期助力我国智能建造技术的发展。

1 整平机器人综合效能评价

通过广泛文献调研^[8-9],并与专家学者、资深建筑从业者和相关管理部门进行访谈调查,筛选出影响建筑机器人综合效能的 4 大关键指标,即作业安全、工效、质量、成本。因涉及多项评价指标,可采用 AHP 层次分析法,建立建筑机器人综合评价模型,对其综合效能进行定量评价。

1.1 整平机器人综合效能影响因素

1) 整平机器人设计水平。建筑机器人自身设计水平对其作业工效和质量均有较大影响。例如,整平机器人振动功率、自重等均会影响混凝土最终成型质量。机器人自身尺寸、爬坡能力同样也会影响其在板面的通过性和覆盖率,进而影响其工效。未来需结合更多项目应用结果反馈,提升设计水平,更好地满足施工现场需求。

2) 施工管理水平。建筑机器人作为新技术、新工艺,施工单位和劳务工人对其使用仍处于初步探索阶段。因此,施工单位对机器人的管理水平及其与传统劳务的协作程度也是重要的影响因素。

3) 施工技术水平。建筑机器人目前智能化水平尚不能完全满足现场施工需求,仍需结合项目自身特点,因地制宜地利用建筑机器人进行施工,挖掘其应用潜力。

1.2 综合评价模型建立

为比较整平机器人与传统人工的综合效能,将模型分为 3 个层次,如图 1 所示,上层为目标层(综合效能);中间为指标层,因混凝土整平过程不涉及重大安全隐患,假设机器人作业与人工作业安全性相等,则指标层主要由作业工效、成本、质量组成;下层则为方案层(整平机器人、传统人工)。

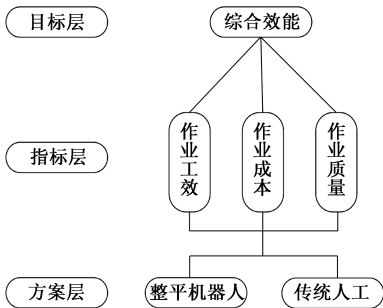


图 1 综合评价模型层次结构
Fig. 1 Hierarchical structure of comprehensive evaluation model

1.3 构建判断矩阵

比较所有指标,并进行打分,打分标度为 1~9。判断标准为:1 表示 2 个指标同等重要,随后重要程度逐渐加深;9 表示 2 个指标相比,前者绝对重要。所得结果采用比较矩阵表示,如式(1)所示。

$$A = (a_{ij})_{n \times n}, a_{ij} > 0, a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}} \quad (1)$$

利用打分标度构造比较矩阵。通过收集到的 50 份有效调查问卷,确定各指标权重。根据打分结果占比,构建相应比较矩阵,结果如式(2)所示。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 1/3 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

为判断该矩阵是否存在逻辑问题,须对其进行一致性检验^[10],即满足式(3),(4)。

$$CR = CI/RI \quad (3)$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

$\lambda_{\max}$ 为判断矩阵最大特征根,为 3.039,代入式(4)可得 $CI = 0.019\ 5$; RI 为一致性指标,通过查表^[11]可得,当矩阵阶数 $n = 3$ 时, $RI = 0.525$ 。最终,求得一致性比率 $CR = 0.037 < 0.1$,通过了一致性检验。

1.4 求取指标权重

利用和法将判断矩阵 A 进行归一化处理,得到每个指标权重 $W = [0.637\ 0.258\ 0.105]^T$ 。

2 整平机器人现场试验

2.1 整平机器人简介

评价模型建立完成后,需获取真实数据训练模型,以验证模型可行性及准确性。以深圳坪山某小户型住宅项目采用的整平机器人为试验对象。该整平机器人具备独特的双自由度自适应系统、高精度激光识别测量系统和实时控制系统,能动态调整并精准控制执行机构末端,使之始终保持在毫米级精度;能自动设定整平规划路径,实现混凝土地面全自动整平施工;可根据施工现场情况,选用全自动或遥控模式完成施工作业。因小户型施工场地狭小,情况较复杂,故采用遥控模式进行施工作业。

如图 2 所示,整平机器人由四轮底盘 1、机身组件 2、整平机构 3 及电控系统 4 组成。其中,整平机构是机器人控制标高的执行机构。整平机构能实现地面砂浆的刮平和振捣,最终使地面达到目标高度。整平机器人参数如表 1 所示。

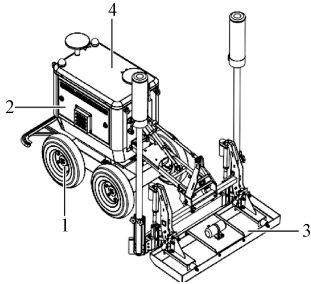


图 2 整平机器人结构
Fig.2 Structure of leveling robot

表 1 整平机器人参数

Table 1 Parameters of the leveling robot			
参数	数值	参数	数值
质量/kg	150	转弯半径/m	≤1.3
外形尺寸/mm	1 650×1 000×2 000	爬坡能力/(°)	≤10
行驶速度/ (mm·s ⁻¹)	0~500	工作续航/h	6

2.2 整平机器人施工作业流程

- 1)前置条件排查。为保证机器人通过性和覆盖率,此阶段需确定机器人进场路线,评估浇筑面积情况,准备塔式起重机,复核钢筋绑扎情况,检查铝合金模板楼面,研究竖向预制构件准备情况等。
- 2)人员配备。浇筑班组人员配置由班组自行确定。除了负责正常扶管、振捣、摊平等工序的工人外,还需额外安排 1 人操作机器人,并配备 1 名工人协助机器人进行混凝土刮平和补充工作。
- 3)机器人点检。作业前,需在仓库内对机器人进行点检,确定设备是否齐全、机器人运行是否正常、电量是否充足。

4)机器人进场。如设备与施工板面距离较远,需提前准备车辆进行运输,并注意规划设备进场路线。如施工需使用塔式起重机,应提前与管理人员沟通协调。通常情况下,设备应在板面浇筑前 1~2h 进场。

5)激光发射器架设。根据相关操作手册安装发射器,并调节激光发射器高度,调整机器人和手持接收器标高。在激光架设过程中,需注意施工人员是否会遮挡机器发出的激光信号。

6)机器作业。混凝土浇筑和振捣完成后,由人工根据激光标高指示控制初摊平高度。当班组浇筑的初摊面积达一定大小时,再使用机器人进行整平作业,以避免机器与班组人员交叉作业,减少相互影响。通常情况下,机器与班组人员应保持约 2m 距离。例如,在浇筑楼面混凝土时,应在房间内初摊平结束后,再使用整平机器人进行整平。机器整平完成后,墙边和柱脚区域需人工进行收面和修补工作。

7)机器退场。由于机器人在作业中会黏附大量混凝土,因此需及时清洗,以防混凝土凝固后影响机器性能。机器人施工完成后,清洗干净,返回仓库或充电房进行充电和存放。

2.3 试验方案

如图 3 所示,为研究整平机器人在不同作业场景下的应用效果,以深圳市坪山区某小户型住宅项目某栋塔楼为试验场地,分别在地下室顶板和标准层 2 个应用场景内进行试验,并设置人工对照组。试验过程中记录机器人作业时长、质量及过程中发现的问题等,并进行汇总分析。

3 试验数据分析

3.1 作业工效分析

如表 2 所示,在地下室施工区域,由于场地较开阔,阻碍较少,人工和机器人作业效率均相对较高。机器人工效为 1.21m²/(人·min),为传统人工的 1.53 倍,同时减少了 1 名劳动力,表现出较好的应用效果。在标准层作业时,由于保障性住房开间较小,降板区域较多,人员和机器活动空间受限,人工和机器人作业效率均大幅度降低。随着作业面积减小,传统人工作业工效下降约 26.6%,而机器人作业工效平均下降约 33.5%,因此作业面积的减小对机器人作业效率影响更大。

3.2 作业质量分析

待楼面混凝土终凝后,利用 2m 靠尺,对传统人工作业区和机器人作业区分别进行实测实量,通过板面平整度,对比分析整平机器人作业质量,如表 3

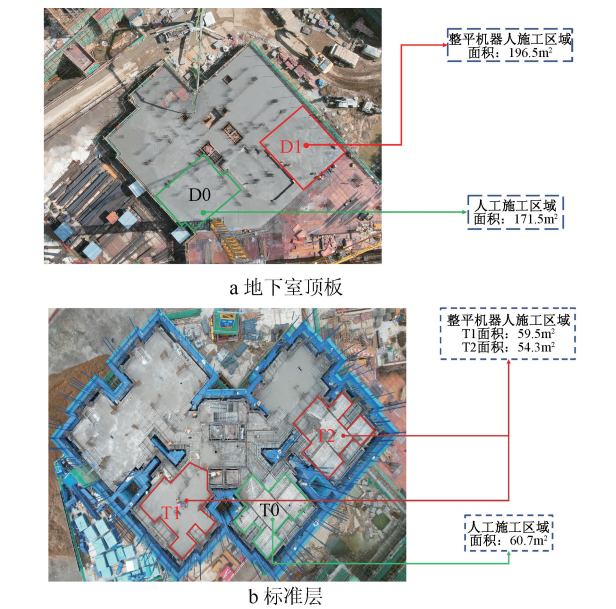


图 3 试验区域

Fig. 3 Test area

表 2 机器人与传统人工作业工效对比					
Table 2 Comparison of robot and traditional manual work efficiency					
区域	编号	作业时长/min	面积/m²	人工/人	工效/[m²·(人·min)⁻¹]
地下室	D0	72	171.5	3	0.79
	D1	81	196.5	2	1.21
标准层	T0	35	60.7	3	0.58
	T1	38	59.5	2	0.90
	T2	33	54.3	2	0.71

所示。其中,板面平整度在 15mm 以内则为合格点,反之则为爆点。由表 3 可知,在地下室施工阶段,整平机器人作业合格率为 92.3%,而人工作业合格率为 93.3%,整平机器人作业质量略低于传统人工作业。随着作业区域面积减小,传统人工和整平机器人作业质量均呈下降趋势,但整平机器人作业质量下降速率更快,二者质量差距更大。

表 3 整平机器人作业质量对比				
Table 3 Comparison of operating quality of leveling robots				
区域	编号	总测点/个	爆点/个	合格率/%
地下室	D0	60	4	93.3
	D1	52	4	92.3
标准层	T0	24	2	91.7
	T1	27	4	85.2
	T2	25	4	84.0

3.3 工效、质量与作业面积的关系

机器人作业工效、质量与面积间关系如图 4 所示。如图 4a 所示,随着作业面积减小,机器人作业工效呈幂函数式的下降趋势,且这种关系相关性较

好。当作业面积减小到某一范围时,整平机器人作业工效小于传统人工,应用效果不佳。如图 4b 所示,随着作业面积减小,机器人施工质量也呈幂函数式的下降趋势。在保障性住房标准层作业时,整平机器人与传统人工作业相比,综合优势不突出。为提高建筑机器人施工工效,未来需进一步对机器人与施工环境的适应性进行研究。

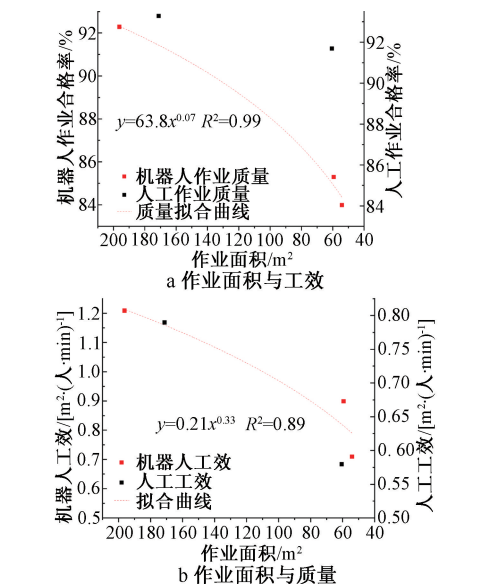


图 4 整平机器人作业工效、质量与面积间关系

Fig. 4 Relationship among work efficiency, quality and area of leveling robot work

4 模型评价结果

基于试验结果,开展问卷调查,从作业工效、成本、质量方面对整平机器人和传统人工作业效率进行打分。整平机器人作业效率较高,平均得 3 分,而人工作业成本较低,得 5 分,人工作业质量相对较高,得 3 分。得分矩阵如式(5)所示。

$$B = \begin{bmatrix} 3 & 1/5 & 1/3 \\ 1/3 & 5 & 3 \end{bmatrix} \tag{5}$$

最终评价值为:

$$K = BW \tag{6}$$

式中: B 方案得分矩阵; W 为指标权重矩阵; K 为最终评价值。

将评价值进行归一化处理得:

$$K = [0.547 \ 0.453]^T \tag{7}$$

即整平机器人最终评价值为 0.547,传统人工为 0.453,整平机器人综合效能整体略高于传统人工,与现场实际基本符合,证明了该评价模型的合理性。模型评价结果表明,在小户型住宅项目中,整平机器人综合效能不突出,仍存在较大的优化改进空间。

5 整平机器人应用优化措施

当前,国内建筑机器人应用尚处于初级阶段^[12],机器人在复杂环境中的感知、定位和操作能力有限,无法完全替代人工完成复杂的施工作业。为进一步提升整平机器人实际应用效果,针对试验过程中发现的问题,提出相应的优化改进措施。

5.1 设计优化

1)轻量化设计。在试验过程中,若混凝土塌落度较低,机器人自重容易导致在板面上碾压出较深车辙印,这对混凝土最终观感和质量产生较大影响。此外,由于机器人体型限制,其在狭小空间内的作业能力受到限制。因此,未来可将小型化和轻量化作为机器人设计和研发的一个方向。

2)振捣分级调控设计。受机器人振捣功率的限制,当板厚>150mm 时,振捣不充分,需补充人工振捣。若振捣功率过大,可能造成混凝土返砂风险,因此,为满足不同板厚要求,可设计分级振捣调控功能。

3)自主越障设计。整平机器人越障能力相对较弱,在小户型住宅项目中,由于降板区域较多,需频繁进行吊运,这严重影响了机器人整体应用效果。因此,需提升机器人自主越障能力。

5.2 施工管理优化

在墙边、柱脚等边缘部位 10cm 范围内,整平机器人难以触及,因此需人工进行收面工作。同时,由于人机协作不畅,导致机器人多次停机等待。为解决这些问题,施工前应对班组进行充分的交底培训,以提升人机协作水平。此外,还可通过自建机器人劳务队等方式创新管理模式,进一步提高人机协作效率。

5.3 施工技术优化

1)整平机器人前置条件优化。尽管建筑机器人在净工作效率上相较于人工具有一定优势,但其对前序工艺准备、进场条件及现场机具的要求也相对更严格。例如,为提升整平机器人在标准层的通过性,将凸出板面的预埋件优化为暗藏式预埋件,如图 5 所示,提高了机器人作业覆盖率。未来需进一步优化机器人作业前置条件,形成统一的前置条件标准,实现作业效率、质量、安全、成本的均衡。

2)人机协作工艺优化。由于机器人无法覆盖所有区域,需人工进行收面,因此必须提前规划好机器人施工顺序和人工介入时机,以实现高效的人机协同作业。同时,为确保机器人作业的连续性,还需进行机器人资源的冗余配置,并落实相应保障措施。

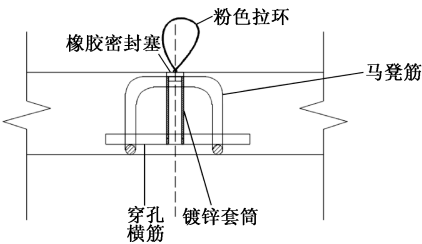


图 5 暗藏式铝合金模板预埋件
Fig. 5 Concealed aluminum alloy formwork embedded parts

6 结语

本文以深圳市坪山区某小户型住宅项目为例,采用 AHP 层次分析法建立评价模型,对整平机器人在不同作业场景下的综合效能进行定量评价,最后针对试验中发现问题提出相应优化措施,得到结论如下。

1)在不同作业区域内,整平机器人作业工效均优于传统人工,在地下室区域应用效果较好,为传统人工的 1.53 倍。

2)整平机器人作业工效、质量与面积呈正相关关系,随着作业面积减小,作业工效和质量呈下降趋势。

3)通过 AHP 模型分析得出,整平机器人最终评价值为 0.547,传统人工为 0.453,机器人综合效能略高于人工,与现场实际情况较符合。

4)为提升整平机器人应用效果,可从机器人设计、施工管理、施工技术方面进行优化改进。

参考文献:

[1] 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. Practice and development of intelligent construction driven by construction robots[J]. Construction economy, 2022, 43(11): 5-12.
[2] 杜明芳. 中国智能建造新技术新业态发展研究[J]. 施工技术(中英文), 2021, 50(13): 54-59.
DU M F. Research on the development of new technology and business form of China intelligent construction[J]. Construction technology, 2021, 50(13): 54-59.
[3] 刘占省,刘诗楠,赵玉红,等. 智能建造技术发展现状与未来趋势[J]. 建筑技术, 2019, 50(7): 772-779.
LIU Z S, LIU S N, ZHAO Y H, et al. Development status and future trends of intelligent construction technology [J]. Architecture technology, 2019, 50(7): 772-779.
[4] 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.

ZHOU Y, ZHANG L X, LIU T, et al. Structural system identification based on computer vision [J]. China civil engineering journal, 2018, 51(11): 17-23.

[18] FANG W L, MA L, LOVE P E D, et al. Knowledge graph for identifying hazards on construction sites: Integrating computer vision with ontology[J]. Automation in construction, 2020,119: 103310.

[19] 池昌政,庞博,任江涛,等. 基于视觉识别的高大模板支撑结构安全监控方法[J]. 工业建筑, 2024, 54(2): 65-72.

CHI C Z, PANG B, REN J T, et al. A safety monitoring method for high-formwork support structures based on computer vision recognition[J]. Industrial construction,2024, 54(2): 65-72.

[20] 李航宇,龚杰,陶玉菲,等. 基于轻量化多目标视觉感知的高大模板系统位移监控[J]. 建筑结构学报, 2024, 45(7): 69-79.

LI H Y, GONG J, TAO Y F, et al. Research on displacement monitoring of high formwork system based on lightweight multi-target visual perception[J]. Journal of building structures, 2024, 45(7): 69-79.

[21] XIONG R X, SONG Y B, LI H, et al. Onsite video mining for construction hazards identification with visual relationships[J]. Advanced engineering informatics, 2019,42: 100966.

[22] 杨斌,张卫冬,伍章明,等. 基于 SOA 的设备远程监测与故障诊断系统体系结构研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(3): 85-90,108.

YANG B, ZHANG W D, WU Z M, et al. Architecture of remote monitoring and diagnosis system based on service-oriented architecture(SOA)[J]. Journal of vibration and shock, 2011, 30(3): 85-90, 108.

[23] FANG W L, DING L Y, ZHONG B T, et al. Automated detection of workers and heavy equipment on construction sites; a convolutional neural network approach[J]. Advanced engineering informatics, 2018,37: 139-149.

[24] SUN L M, SUN H B, ZHANG W, et al. Hybrid monitoring methodology: a model-data integrated digital twin framework for structural health monitoring and full-field virtual sensing[J]. Advanced engineering informatics,2024,60: 102386.

[25] 刘卫然,于海丰,黄俊,等. 轮扣式模板支撑架稳定承载力试验研究及有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(1): 219-227.

LIU W R, YU H F, HUANG J, et al. Experimental study and finite element analysis of stable bearing capacity of wheel-buckled formwork supporting frame[J]. Journal of building structures, 2022, 43(1): 219-227.

[26] HUANG M F, ZHANG B Y, LOU W J, et al. A deep learning augmented vision-based method for measuring dynamic displacements of structures in harsh environments[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2021, 217: 104758.

[27] HUANG M F, ZHANG B Y, LOU W J. A computer vision-based vibration measurement method for wind tunnel tests of high-rise buildings [J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2018, 182: 222-234.

[28] 蒋明华,张宗富. 盘扣式支撑架有限元模型的修正方法 [J]. 黑龙江科技大学学报, 2021, 31(6): 753-758.

JIANG M H, ZHANG Z F. Model updating method of finite element model of disk lock steel tubular scaffold. [J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2021, 31(6): 753-758.

(上接第 130 页)

[5] 李洋. 地面找平建筑机器人的设计与实验研究[D]. 北京:北京建筑大学, 2022.

LI Y. Design and experimental research of ground screeding construction robot [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture,2022.

[6] 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.

[7] ZHAO S, WANG Q, FANG X, et al. Application and development of autonomous robots in concrete construction; challenges and opportunities[J]. Drones, 2022, 6(12): 424.

[8] 俞洁,俞选明,刘一帆,等. 混凝土地面施工机器人在施工中的应用分析[J]. 城市建筑,2024,21(10): 229-232.

YU J, YU X M, LIU Y F, et al. Analysis on the application of concrete floor construction robot in construction [J]. Urbansim and architecture, 2024,21(10): 229-232.

[9] 邱远光. 混凝土施工机器人组合应用研究[J]. 铁道建筑技术,2024(5): 196-200.

QIU Y G. Research on the combination application of concrete construction robots [J]. Railway construction technology, 2024(5): 196-200.

[10] 张小刚,杜思成. 钢筋混凝土结构耐久性的多因素 FUZZY-AHP 评估[J]. 混凝土, 2009(5): 39-42.

ZHANG X G, DU S C. Multi-influencing factors FUZZY-AHP assessment for the durability of reinforced concrete[J]. Concrete, 2009(5): 39-42.

[11] 涂胜金,杨华山,刘冬梅. 粉煤灰效应模糊综合评价中权重确定的层次分析法[J]. 混凝土, 2009(2): 45-46.

TU S J, YANG H S, LIU D M. AHP method to the determination of weight in fuzzy comprehensive evaluation of fly ash effect[J]. Concrete,2009(2): 45-46.

[12] LU C, LIU J, LIU Y, et al. Intelligent construction technology of railway engineering in China [J]. Frontiers of engineering management, 2019, 6(2): 503-516.