

DOI: 10.7672/sgjs2026030054

人机协同式建筑打磨机器人研发*

季元吉,金艳萍,郑昊,应晔,纪凯乐,高润东

(上海市建筑科学研究院有限公司上海市工程结构安全重点实验室,上海 200032)

[摘要] 针对建筑加固与改造中混凝土表面打磨工序长期依赖人工作业导致的效率低下、劳动强度大、粉尘和噪声污染严重、质量一致性难以保证等问题,研发了适用于实际工程应用的人机协同式建筑打磨机器人,围绕机器人整体结构设计、打磨执行机构优化、粉尘控制及电控操作协同等方面开展系统性研究。该机器人以6自由度机械臂为主体,工作半径达1.798m,可覆盖典型楼层构件。通过对比测试,选用综合性能优异的刚性打磨片与一体式三相电机驱动方案,并设计防尘罩联动工业吸尘器的闭环除尘系统,实现无尘化作业。引入拖动示教与图形化示教器界面,使施工人员无须编程即可便捷规划路径,降低使用门槛。该机器人有效整合机械灵活性、工具可靠性、环境友好性与操作直观性,为建筑打磨工序智能化升级提供解决方案。

[关键词] 既有建筑;加固;打磨;机器人;机械臂;人机协同

[中图分类号] TU741

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)03-0054-05

Research and Development of a Human-machine Collaborative Building Grinding Robot

JI Yuanji, JIN Yanping, ZHENG Hao, YING Ye, JI Kaile, GAO Rundong

(Shanghai Key Laboratory of Engineering Structure Safety, Shanghai Research Institute of Building Sciences Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: Aiming at the problems of low efficiency, high labor intensity, severe dust and noise pollution, and poor quality consistency caused by the long-term reliance on manual operation in the concrete surface grinding process for building reinforcement and renovation, this study developed a human-machine collaborative building grinding robot applicable to practical engineering, and carried out systematic research on the overall structural design of the robot, optimization of the grinding actuator, dust control, and coordinated electronic control operation. With a six degree of freedom robotic arm as the main body, the robot has a working radius of 1.798m, covering typical floor components. Through comparative tests, a driving scheme with rigid grinding discs of excellent comprehensive performance and an integrated three-phase motor was adopted, and a closed-loop dust removal system combining a dust cover with an industrial vacuum cleaner was designed to achieve dust-free operation. By introducing drag teaching and a graphical teaching pendant interface, construction workers can conveniently plan grinding paths without programming, lowering the operation threshold. The robot effectively integrates mechanical flexibility, tool reliability, environmental friendliness and operational intuitiveness, providing a solution for the intelligent upgrading of building grinding processes.

Keywords: existing buildings; reinforcement; grinding; robot; robotic arm; human-machine collaborative

0 引言

随着制造业向高端化、智能化与绿色化加速转

型,建筑业升级革新显得尤为迫切。在当前建筑业从规模扩张转向存量优化的发展阶段,以建筑加固与改造为主导的城市更新类项目已成为主流。在此过程中,混凝土表面打磨作为基础且重要的工序,其质量直接影响后续加固材料黏结效果与长期耐久性。然而,该工序长期依赖人工作业,普遍面

*上海市住房和城乡建设管理委员会2024年度科研项目(沪建科2024-002-007)

[作者简介] 季元吉,工程师,E-mail: jiyuanji@sribs.com

[收稿日期] 2025-09-25

临粉尘污染重、噪声大、劳动强度高、施工效率低等问题,不仅严重威胁操作者的健康,引发尘肺病、听力损伤等职业疾病,在高处、狭窄空间作业时还存在安全风险。此外,打磨质量高度依赖工人经验,工艺一致性难以保证,已难以适应现代建筑工业化对施工质量、效率与安全性的标准要求。

因此,发展智能化、自动化打磨技术,以机器人替代人工作业,成为行业突破瓶颈的必然方向。近年来,机器人技术在感知、控制与协同作业方面取得显著进展,为建筑打磨智能化提供了坚实的技术基础。当前用于建筑混凝土表面打磨的机器人相关研究相对较少,大部分打磨仅适用于腻子表面,且在实际应用时仍存在亟需解决的问题,如打磨效率及效果难以满足实际工程需求;在打磨过程中往往会产生大量粉尘,严重影响施工作业环境;大部分机器设备操作较复杂,普通施工人员难以快速上手操作。因此本研究聚焦上述问题,研发适用于实际工程的人机协同式建筑打磨机器人。

1 建筑打磨机器人整体设计

为满足打磨机器人实际工程应用需求,其设计的关键是在满足打磨施工效率的同时,保证打磨效果符合后续加固需求。因此,研发时采用高自由度、可灵活作业的机械臂作为设计基础。由于目前需加固的既有建筑以住宅和办公楼居多,其标准层层高一般 $\leq 3.3\text{m}$,而需要在加固前打磨的部位往往分布于板底、梁身及柱身周边(即打磨作业分布于整个层高范围内),为确保打磨效率,机械臂有效作业半径应 $\geq 1.65\text{m}$ 。基于上述要求,研发如图1所示机械臂。该机械臂具有6个自由度(6轴),理论工作半径可达 1.798m ,重复定位精度可达 $\pm 0.05\text{mm}$,力控精度可达 0.5N (力)和 $0.1\text{N}\cdot\text{m}$ (力矩)。

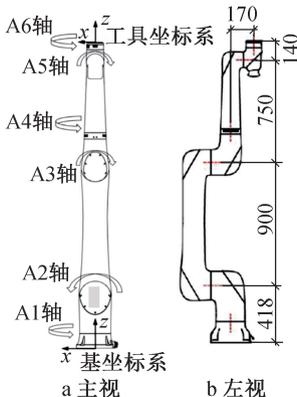


图1 机械臂设计

Fig. 1 Design of the robotic arm

机械臂设计完成后,需对其打磨执行机构进行进一步设计。为准确定位打磨工具,需使用预留的 $\phi 8$ 销孔准确定位,机械臂在设计时其末端法兰有6个M8螺纹孔,可用于将打磨工具连接到机械臂法兰上。机械臂末端法兰尺寸如图2所示。

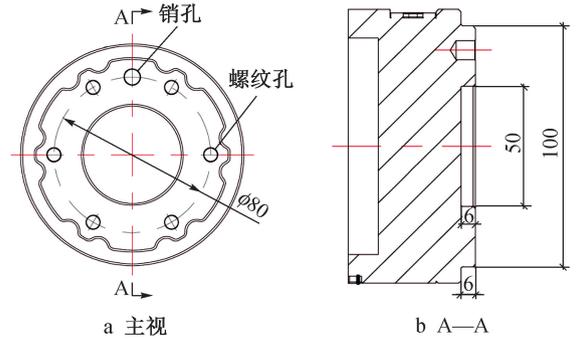


图2 机械臂末端法兰构造

Fig. 2 Structure of flange at the end of robotic arm

2 建筑打磨机器人打磨执行机构设计

2.1 打磨片设计选型

打磨工具采用直径 100mm 的打磨片,为检测其实际打磨效果,进行了打磨性能测试(见图3,4),分别采用6种不同类型的打磨片(见图5)进行试验,通过对标准C30混凝土试块进行打磨测试,从打磨平整度、打磨振动及噪声、打磨效率方面进行评价。

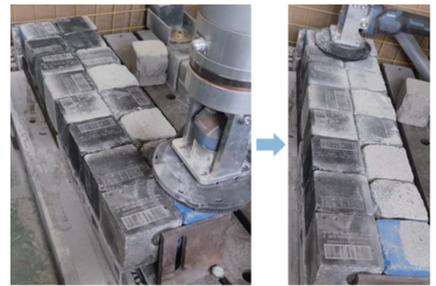


图3 打磨片打磨效果测试试验1

Fig. 3 Test 1 of grinding effect of grinding discs

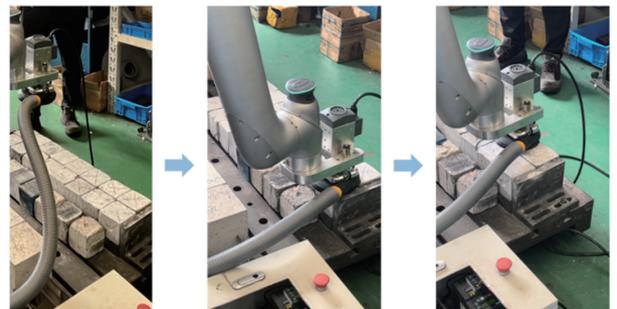


图4 打磨片打磨效果测试试验2

Fig. 4 Test 2 of grinding effect of grinding discs

测试时通过对设备打磨力进行控制与调整(出

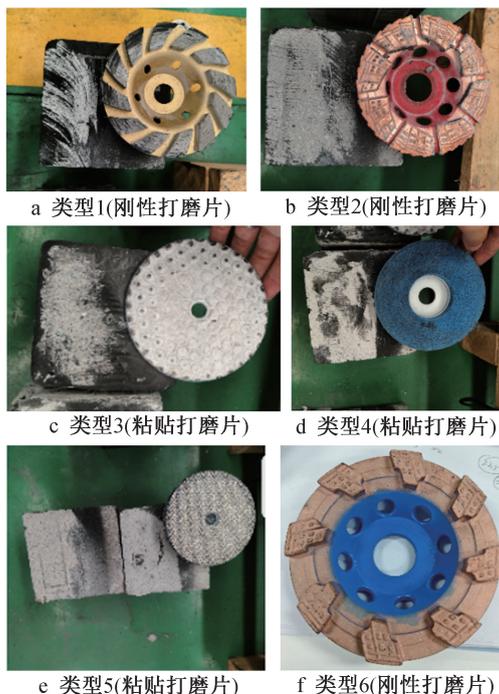


图 5 打磨片类型

Fig. 5 Types of grinding discs

力控制为 20~100N),使打磨深度可达 2mm,以满足实际工程需求,打磨测试结果如表 1 所示。由表 1 可知,打磨片 5,6 整体效果较好。在此基础上对打磨片 5,6 进行耐久性测试,通过对混凝土表面进行 10h 打磨后,观察其磨损情况,如图 6,7 所示。由图 6,7 可知,打磨片 5 磨损情况较严重,已难以继续使用,需要更换;打磨片 6 磨损情况相对良好,可继续使用。这表明选择打磨片 6 更合理。

表 1 打磨测试结果

Table 1 Results of grinding tests

打磨片类型	测试结果
1	打磨效果(平整度)一般,振动一般,打磨噪声分贝 < 70dB,打磨效率可达 $0.15m^2 \cdot min^{-1}$
2	打磨效果(平整度)较好,振动较大,打磨效率可达 $0.15m^2 \cdot min^{-1}$
3	打磨效果(平整度)差,振动一般,打磨噪声分贝 < 70dB,需较大外加力,打磨效率可达 $0.15m^2 \cdot min^{-1}$
4	打磨效果(平整度)一般,振动一般,打磨噪声分贝 < 70dB,打磨效率可达 $0.15m^2 \cdot min^{-1}$
5	打磨效果(平整度)较好,振动一般,打磨噪声分贝 < 70dB,打磨效率可达 $0.15m^2 \cdot min^{-1}$
6	打磨效果(平整度)较好,振动一般,打磨噪声分贝 < 70dB,打磨效率可达 $0.15m^2 \cdot min^{-1}$

2.2 打磨电机设计

打磨片类型确定后需对打磨电机进行设计,本研究设计 2 套电机方案,以应对可能需要的工程场景。方案 1 基于锂电池角磨机改装而成,采用大容

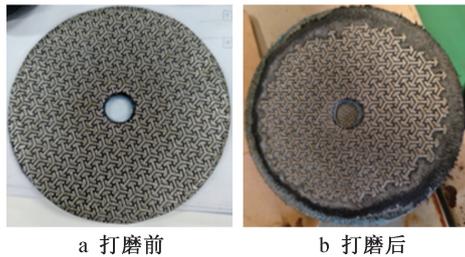


图 6 打磨片 5 耐久性试验结果

Fig. 6 Durability test results of grinding disc 5

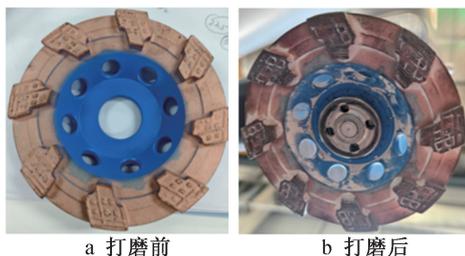


图 7 打磨片 6 耐久性试验结果

Fig. 7 Durability test results of grinding disc 6

量锂电池角磨机,在机械臂末端轴顶部进行拼接设计,通过磨头支架与磨头浮动架将机械臂与角磨机机头连接(见图 8,9),其额定功率为 1 000W,转速可达 9 000r/min,额定电压为 21V,打磨盘直径为 100mm。打磨机构内部设有弹簧作为浮动机构,可有效降低振动,防止打磨时损伤机器人关节并提升打磨质量。根据机械臂设置的下压力,选择一定的安全系数,设计中假定弹簧压缩量和压并高度,计算弹簧刚度,实现弹簧选型。

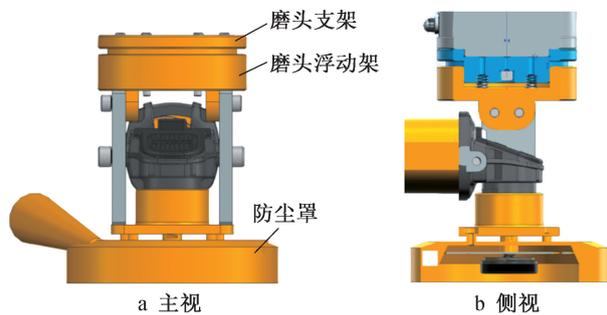


图 8 方案 1 设计

Fig. 8 Design of scheme 1

方案 2 采用一体式三相电机,通过 220V 交流电直接供电,并搭载变频器调速,保持转速稳定,减少噪声(见图 10,11)。其额定功率为 1 100W,转速可达 12 000r/min,额定电压为 220V,频率为 200Hz。电机两侧安装阻尼器,采用直线轴承与导向轴配合进行导向,实现上下浮动。在导向轴末端安装鱼眼轴承,实现电机左右摆动。



图9 方案1实物

Fig. 9 Physical object of scheme 1

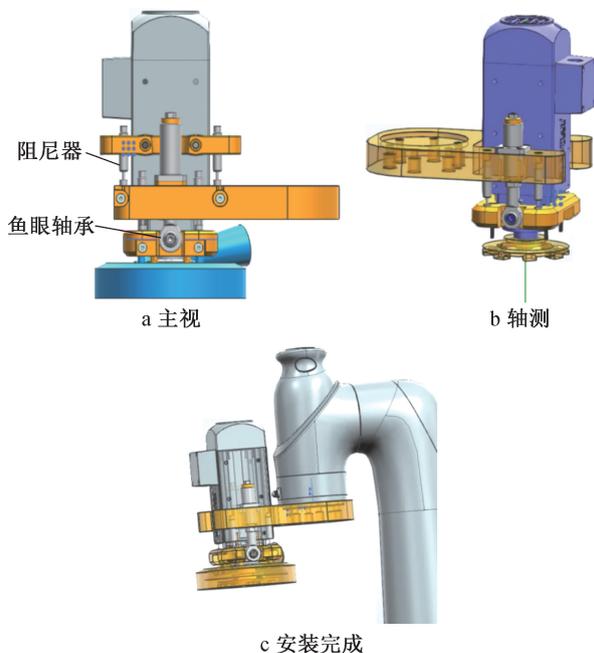


图10 方案2设计

Fig. 10 Design of scheme 2



图11 方案2实物

Fig. 11 Physical object of scheme 2

经对比试验发现,方案1(锂电池方案)与方案2(三相电机方案)相比设计虽更简便,但其在打磨效率、质量及稳定性方面具有明显劣势,尤其是当机器人进行长时间打磨,机头温度过高或设备过载时,由于锂电池保护机制将导致电机停转。因此方案1仅适用于施工作业现场无法提供稳定电源的情况(此类情况并不多见),否则应优先选用方案2。

2.3 吸尘装置设计

由于打磨混凝土时会不可避免地产生大量粉尘,如不加干预,不仅会严重影响现场施工环境,干扰现场施工作业,长期暴露于此类环境下,还会导致机器人传感器灵敏度下降甚至失灵,危害现场施工人员身体健康。因此,有必要设计可靠的吸尘装置。基于本文涉及的打磨机器人特点,有针对性地在磨头端设计适配的防尘罩进行连接(见图12),该防尘罩可有效防止打磨时的灰尘乱飞,减少粉尘污染,实现无尘打磨。防尘罩出尘口通过管道连接至工业吸尘器,实现在打磨过程中的吸尘功能。吸尘器具备30L大容量(可满足数百h吸尘需求),额定电压为220V,额定功率为1800W,吸力为26000Pa,工作噪声分贝为70dB,具备4层过滤系统,可进行多重过滤,防止粉尘二次污染。经实测,在打磨作业过程中无明显粉尘,可满足实际应用需求。



图12 防尘罩

Fig. 12 Dust cover

3 建筑打磨机器人电控系统与操作优化

3.1 机械臂 I/O 接口应用

研发的打磨机器人采用机械臂输出信号控制三相电机及吸尘装置。机械臂有4路数字输入、输出通道,集中在端子式连接器上,通过使用带有E0308针式冷压接线端子的连接线连接相应通道,并使用其通用I/O功能,将三相电机与吸尘器接入机械臂的连接器上即可完成连接控制,使其协同工作。整体组装完成后的打磨机器人如图13所示。



图13 整体组装完成后的打磨机器人

Fig. 13 Grinding robot after overall assembly

3.2 操作优化

相比于传统机器人需要通过事先编程的形式完成路径控制与规划,本研究采用的人机协同式建筑打磨机器人可采用拖动示教的形式实现现场对设备的操作与控制,即操作员可直接用手抓住机械臂末端,牵引其走遍需要打磨作业的路径,机器人会自动记录轨迹完成打磨作业任务,无须编写复杂的代码,降低了普通施工人员的使用门槛。此外,机器人配有示教器(见图14),通过示教器图形交互界面与拖动示教结合应用,可轻松完成对机器人的远程实时操控和调整。相比传统建筑机器人需要与人隔离作业,人机协同式机器人可与人类并肩工作,相互配合完成任务,其操作手段更直观、灵活,对于传统施工人员更友好。



图14 示教器

Fig.14 Teaching pendant

4 结语

1) 基于既有建筑层高与打磨范围分布特点,选用6自由度机械臂作为打磨机器人主体,其工作半径达1.798m,重复定位精度高,并具备力控功能,能够满足典型楼层内的梁、板、柱等构件打磨需求,为高效、灵活作业奠定了机械基础。

2) 通过系统性打磨片性能与耐久性测试,筛选出在打磨平整度、振动噪声控制及耐磨性方面综合表现最优的刚性打磨片。针对不同工程场景,设计并对比了锂电池角磨机改装方案与一体式三相电机方案,测试结果表明后者在打磨效率、质量稳定性及长时间作业可靠性上更具优势,是多数工况下的优选。同时,设计了与磨头适配的防尘罩及连接工业吸尘器的闭环除尘系统,实测可有效实现无尘化作业,改善了施工环境。

3) 通过利用机械臂的通用I/O接口,实现了对打磨电机与吸尘装置的一体化协同控制。引入拖动示教功能,结合图形化示教器界面,使施工人员无须专业编程知识即可直观、快捷地引导机器人完成打磨路径规划与记录,大大降低了机器人使用门槛,实现了人机协同作业,提高了施工灵活性与适应性。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 高晓斌. 面向智慧工地的建筑智能化及机器人技术[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(13):27-31.
GAO X B. Intelligent building and robot technology for smart construction sites[J]. Construction technology, 2025, 54(13):27-31.
- [3] 刘凤义,熊学胜,岳承涛. 基于力位混合控制方法的建筑外墙智能打磨机器人系统研究[J]. 机器人技术与应用, 2022(2):26-30.
LIU F Y, XIONG X S, YUE C T. Research on intelligent grinding robot system for building exterior wall based on hybrid control method of force and position [J]. Robot technique and application, 2022(2):26-30.
- [4] 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.
- [5] 郭金迪. 面向建筑环境的自主打磨移动机器人研究[D]. 沈阳:东北大学, 2020.
GUO J D. Research on autonomous polishing mobile robot for building environment [D]. Shenyang: Northeastern University, 2020.
- [6] 金志裕. 室内腻子墙面自主打磨机器人路径规划研究[D]. 南昌:华东交通大学, 2022.
JIN Z Y. Research on path planning of indoor putty wall autonomous polishing robot [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2022.
- [7] 曾峰,张立,罗维成. 实测实量机器人在大规模房建项目中的应用[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(14):31-34.
ZENG F, ZHANG L, LUO W C. Application of real measured robot in large-scale housing construction project[J]. Construction technology, 2024, 53(14):31-34.
- [8] 郭梅静. 墙面抹平机器人设计及仿真[D]. 济南:山东建筑大学, 2007.
GUO M J. Design and simulation of wall plastering robot [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2007.
- [9] 谢哲东. 研抛大型自由曲面的微小机器人开发与加工作业研究[D]. 长春:吉林大学, 2008.
XIE Z D. Developmental and experimental research on small robot for polishing large freeform surface [D]. Changchun: Jilin University, 2008.
- [10] 翁润庭. 面向移动式墙面打磨机器人的定位及检测方法研究[D]. 广州:广州大学, 2023.
WENG R T. Research on positioning and detection method for mobile wall grinding robot [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2023.