

# 智能建筑地坪研磨施工机器人开发与产业化应用

胡佳祥

(广东博智林机器人有限公司, 广东 佛山 528311)

**摘要:** 建筑机器人作为一种新质生产力工具,将助力建筑行业新业态发展和产业化升级。针对传统建筑地坪研磨设备必须人工跟随操控、施工效率低等问题,开发了一款智能全自动化地坪研磨施工机器人,分析阐述该机器人的总体技术方案框架和关键性技术原理。然后,通过工程应用案例,描述地坪研磨机器人的施工作业流程,并对对比分析机器人与传统设备的综合施工效益情况。结果表明,地坪研磨机器人综合施工降本率约为19.4%,具备较高的施工成本优势。最后,对推广应用地坪研磨机器人的社会效益进行了阐述。

**关键词:** 地坪研磨机器人; 地坪施工; 建筑机器人; 产业化应用; 智能建造

**中图分类号:** TP242.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)14-0040-08

建筑地坪装饰施工作为地坪施工工程的最后一道作业工序,通常也是建筑物交付验收前的收尾工序,常常伴随着工期短、任务重等特点。从类型上看,适用于室内外停车场、工厂车间、仓库以及运动场所等场景的地坪主要有密封固化剂类地坪和地坪漆类地坪两大类,此两类地坪施工量约占所有地坪装饰施工量的90%以上。然而,无论是密封固化剂地坪还是地坪漆地坪的施工,都离不开地坪研磨施工机械。传统的地坪研磨机主要由人工手推、座驾或遥控等操控方式,施工效率低,完成面质量一致性差,施工过程扬尘大危害工人健康,综合施工成本高等问题<sup>[1-2]</sup>,不符合绿色环保施工的施工理念。

住房和城乡建设部《关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》《“十四五”建筑业发展规划》等纲要文件的相继印发,为建筑业智能建造体系的全产业链融合,构建建筑业高质量、高水平发展的新业态带来了机遇<sup>[3-4]</sup>。同时“新质生产力”理论的提出,不仅延续了“高质量发展”的核心要求,而且为建筑业构建高质量发展新业态提供了新思路<sup>[5]</sup>。当前,建筑机器人的相关研究逐渐受到市场的大力关注,以博智林公司为代表的多家企业已经相继研制了几十款建筑机器人并投入项目实际应用当中。实践表明,建筑机器人是实实在在的新质生产力工具,即在一定前置条件下,在满足施工质量前提下,多款建筑机器人已经能在“人机大

战”中取得不同程度代人的经济效益<sup>[6]</sup>。引入智能建筑地坪研磨施工机器人等新质生产力工具,代替人工执行“危繁脏重”的地坪装饰施工,助力解决行业劳动力老龄化,降低工人劳动强度和罹患职业病的风险,将成为地坪施工行业的新业态和必然趋势。然而,有关建筑地坪研磨施工机器人的具体研究较少。本文结合该款机器人的研发与应用实践经历,系统地阐述其整体设计框架与关键技术要点,并通过工程应用案例及施工数据,探讨“机器人”施工的巨大优势。

## 1 地坪研磨机器人的整体设计

面向多样化的施工应用场景和工艺对象的地坪装饰施工作业,针对传统地坪研磨施工设备的缺点,开发了一款无人化智能建筑地坪施工机器人平台(以下简称“地坪研磨机器人”),其整体技术方案框架如图1所示。作为一款具备激光自主导航行走、智能路径规划能力,且集成设计了大功率吸尘集尘装置和供电电缆收纳装置的智能化地坪研磨施工设备,可完全取代传统设备,实现对混凝土地面进行全自动化研磨抛光作业,同时具备抑制扬尘、吸尘集尘和供电电缆自动收放等功能,达到提高施工效率,降低人工投入,改善施工环境的目的。

如图1所示,地坪研磨机器人的硬件系统由双轮差速底盘机构、激光雷达、研磨执行机构、灰尘收集装置、供电与电缆收纳装置、中央控制器、

收稿日期: 2025-03-05

作者简介: 胡佳祥(1988—),男,湖北黄冈人,硕士,工程师,研发方向为智能机电一体化装备、智能机器人等。

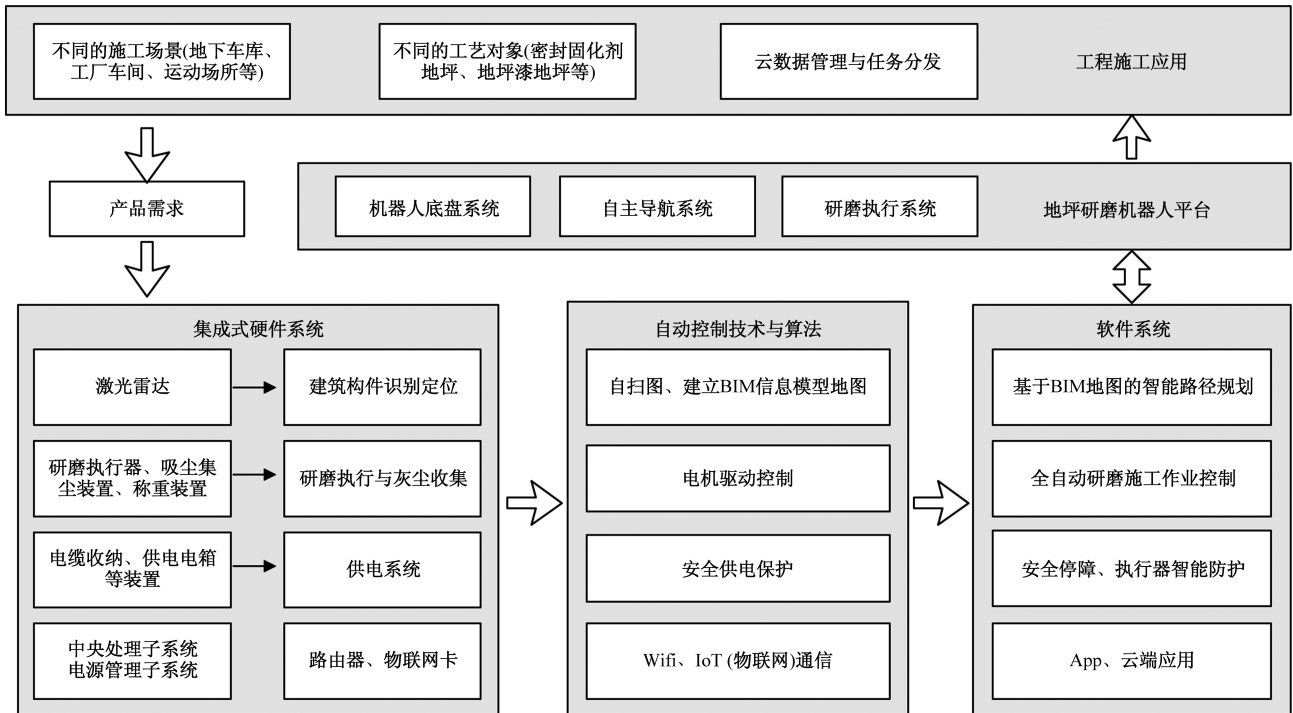


图1 地坪研磨机器人总体技术方案框架

工业路由器等组成,其中激光雷达作为环境感知传感器,用于施工现场环境感知、构建建筑信息模型(building information model, BIM)地图、实现自主定位与导航行走。软件系统主要包括底盘运控系统、自主定位与导航算法、路径规划算法、安全避障算法、人机交互 App 和云端数据管理系统等构成。操作人员通过人机交互 App 制定施工工艺参数并发送作业指令,该机器人即可实现全自动化、高质量、高覆盖率施工作业,作业过程无须人工跟随。

地坪研磨机器人的典型结构如图 2 所示。

## 2 地坪研磨机器人关键技术

### 2.1 大型复杂建筑场景下的自主导航定位技术

地坪研磨机器人施工过程中,需要实时扫描识别出周边墙体、立柱等建筑物特征信息,进行自动定位与导航行走,并控制底盘按照路径规划算法给出的施工路径及模式进行全自动化作业。由于地坪施工场景往往面积大,结构单一,参照物较少,在这样的大场景下,需要特殊的定位导航算法。

激光雷达作为一种常用的主动型环境探测传感器,具有分辨率高,受环境因素干扰小的特点,常被用于定位、导航、障碍物判断等诸多领域<sup>[7]</sup>。地坪研磨机器人搭载激光雷达,通过开发大型复杂建筑场景下的专用自主导航算法,实现了机器人的自主定位与

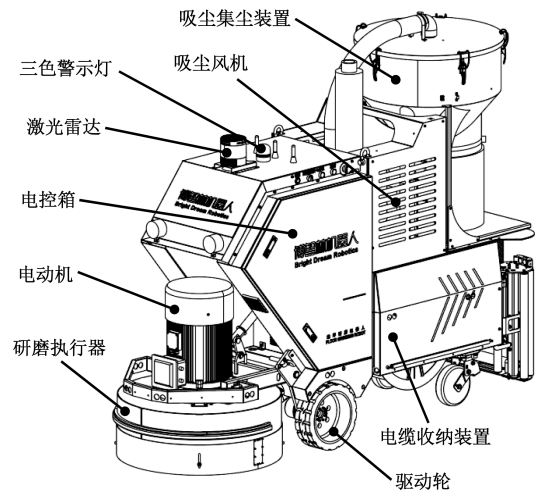


图2 地坪研磨机器人典型结构

导航功能,其导航定位精度可达 $\pm 50 \text{ mm}$ <sup>[8]</sup>。地坪研磨机器人在不同建筑场景中的无人自动化施工如图 3 所示。

### 2.2 智能路径规划技术

地坪研磨施工时需要目标施工区域进行全覆盖,为实现无人自动化施工,必须对地坪研磨机器人进行路径规划研究。不同于 A\* 算法、D\* 算法、RRT 算法、神经网络、蚁群算法等常见的路径规划算法<sup>[9-10]</sup>,为提高机器人全自动研磨施工时的作业覆盖率,提出一种适用于地坪研磨机器人自动化施工的路径规划策略和方法。即在已获取施



(a) 在地下车库场景中的施工应用

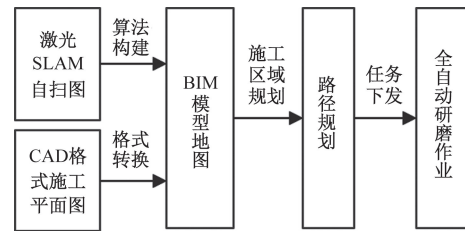


(b) 在钢结构厂房场景中的施工应用

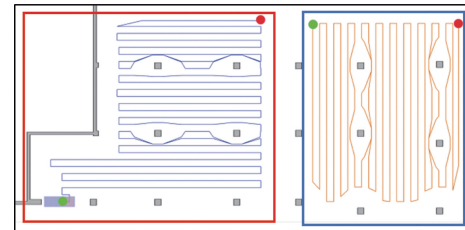
图 3 地坪研磨机器人在不同建筑场景中的无人自动化施工

工现场 BIM 模型地图的基础上,按照给定的路径规则和策略,自动生成施工作业路径。因此,同步开发了一套基于 BIM 技术的面向建筑物内部复杂环境的机器人施工作业路径智能规划算法程序。在该路径规划策略和算法程序的支撑下,机器人即可采用激光同步定位与建图(simultaneous localization and mapping, SLAM)技术扫描获取施工现场 BIM 模型地图,或者导入由 CAD 格式施工平面图转换生成的 BIM 地图,自动生成可供手动编辑的机器人施工路径,打通 SLAM+BIM+建筑机器人数据自动化交互的核心问题<sup>[11-12]</sup>,流程如图 4(a)所示。

在大面积场景施工方面,采用基于 BIM 地图合理划分施工区域的方法,分区域进行机器人施工路径规划,确保施工路径能够完全覆盖施工区域,并且路径无交叉重叠或遗漏,满足机器人自动作业面积覆盖率和施工效率最大化。分区路径规划方法如图 4(b)所示,在某块大面积施工区域,可规划出分别由红色边界框和蓝色边界框定义的两条独立的施工路径。其中,路径起点由绿色圆点表示,终点由红色圆点表示。



(a) 路径规划流程原理



(b) 分区路径规划方法

图 4 地坪研磨机器人路径规划流程与分区路径规划方法

### 2.3 全自动研磨施工控制技术

地坪研磨机器人最核心也是最基础的功能是能够实现无人化或少人化的智能全自动化研磨施工。如图 5 所示,研究了依托激光雷达导航技术、激光 SALM 技术、智能路径规划技术、自动控制技术与算法的全自动研磨技术,从提高作业覆盖率和降低人工参与程度的角度出发,实现机器人自主全自动研磨作业的核心功能,大幅提升研磨质量。

### 2.4 远程供电与双源供电技术

由于地坪研磨机器人在自动化研磨作业状态时,必须由外部 AC380V 市电供电以满足不间断作业。另外,机器人还内置安装了 DC48V 锂电池,可供机器人在无外部市电供电的情况下能够执行自动行走、远距离转场、地图扫描或功能调试点检等用途。因此,如何实现在非关机条件下实现外部交流供电与内置低压直流供电之间的双源自由切换供电,以及外部远程交流供电安全性,是本项目研究的关键性技术。该技术方案简要逻辑原理如图 6 所示。

首先,通过特别的电源供电电路切换设计,当接通外部交流市电供电时,机器人整机由市电提供电能,并对内置锂电池进行充电;当任何时刻断开外部市电时,机器人整机转为由内置锂电池提供电能,但此时机器人不能执行研磨作业。电源切换过程中,机器人无须关机,也不会出现瞬时断电的情况,保障机器人的执行机构不因频繁掉电或者非主观意愿的突然掉电而出现机械损伤和电气件毁坏,或者引起人员伤亡事故,提高机器人的智能化程度和安全性。

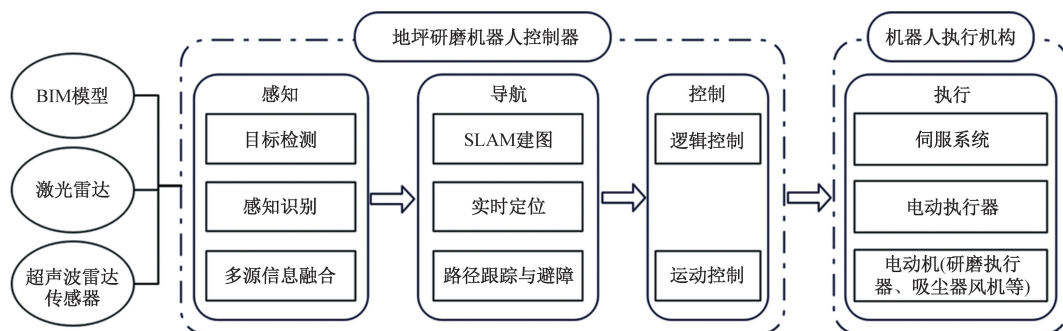


图5 全自动研磨施工控制技术原理示意图

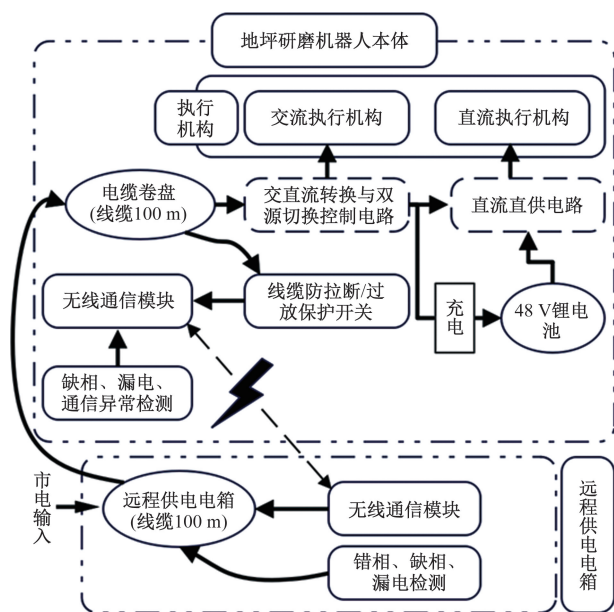


图6 远程供电与双源供电技术逻辑原理简图

其次,远程安全供电技术方案主要依托短距离即时无线通信技术,当远程供电电箱检测到自身电路缺相、错相、漏电流或与机器人本体无线通信异常时,无法对外供电,以保护机器人本体不受电源端问题的影响。当机器人本体端检测到输入的电源缺相、漏电流等异常情况时,通过无线通信模块指令远程电箱断电,防止人员触电或损伤机器人本体的电气电路器件。

## 2.5 自动吸尘集尘与尘满保护技术

地坪研磨施工作业时,通常会有大量灰尘溢出研磨执行结构防护壳,扬起的灰尘也将逐渐充溢在整个施工毗连区域内,不仅影响本施工区域内的作业视野,给毗连区域内施工作业人员造成困扰,对工人的身体健康造成严重危害。对于机器人而言,则会影响激光雷达导航性能的可靠性,出现导航定位偏差大、定位失败等问题。因此,采取必要的扬尘抑制手段极为重要。

将自动研磨、大功率吸尘集尘、尘满保护等功能结构集成设计,让机器人在研磨施工的同时进行真空自动吸尘,并将灰尘经滤芯过滤后集中装袋处理,可有效抑制扬尘,改善施工环境,减少后续清扫灰尘的工作量,体现了绿色环保施工理念。实践表明,采用大功率工业吸尘技术方案的地坪研磨机器人在全自动作业时可有效保障激光雷达的导航与定位稳定性和可靠性。此外,尘满保护功能即体现在灰尘称重功能设计上,如果灰尘重量达到设定阈值,会提示更换灰尘袋,防止灰尘溢出或造成滤芯堵塞,严重影响吸尘效果。

## 2.6 研磨执行器智能防护与安全停障技术

由于地坪浇筑阶段作业对钢筋网片处理不当、防渗漏膨胀螺钉植入等前置原因,地坪研磨施工时,不可避免地会出现钢筋头或膨胀螺钉裸露或浅藏于地坪表面的情况。当研磨执行器打磨到钢筋头或膨胀螺钉等坚硬异物时,由于物理惯性等原因,研磨执行器会剧烈跳动而难以操控。传统地坪研磨机施工时,只能依靠人工控制紧急停机,机身的不稳定和人工处理速度都将影响紧急停机的反应时长,过程中极易出现研磨执行器结构零部件损坏,大大影响研磨执行器的使用寿命,维修成本和维修频次高。

采用三维振动传感器,通过实时采集研磨执行器的三轴动态加速度数据的主动检测保护设计,实时检测和分析研磨执行器的振动情况,判断是否打磨到钢筋头等坚硬异物。当研磨执行器打磨到钢筋头等坚硬异物时能够立即停止运转,并将整机置为急停状态,同时通过人机界面、声光告警等方式提醒机器人操作人员,从而保护研磨执行器不被损坏,其技术原理如图7所示。在人机界面,机器人操作人员还可根据地面实际情况,通过调整和设置合适的三维振动传感器的各轴灵敏度值,防止机器人出现频繁误告警的情况。工程应用实践证明,该技

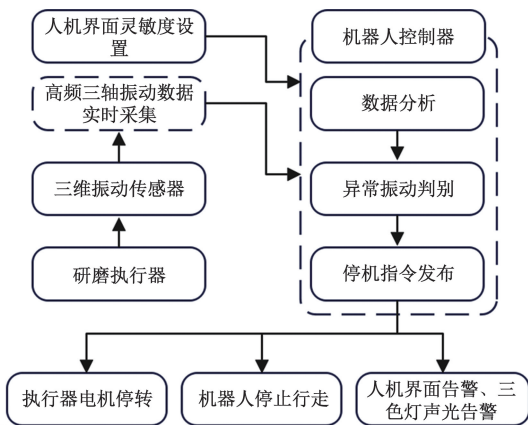


图 7 研磨执行器智能防护技术原理

术方案能够有效提升研磨执行器的使用寿命,降低维修维护频次和成本。

进一步地,在机器人研磨执行器前方和机器人四周均布置有超声波雷达传感器,用于安全障碍检测。当有物体侵入到一定距离范围时,机器人将停止移动,暂停当前任务;物体离开后,机器人继续执行当前任务,实现“人近即停,人走即行”的安全障碍功能。

## 2.7 OTA 与云端管理功能

项目同步应用了基于物联网 (internet of things, IoT) 技术的空中下载技术 (over-the air technology, OTA) 在线升级和机器人云端协同管理功能,解决地坪研磨机器人远程施工数据监控、施工进度管理与机器人调度管理、远程系统升级等“互联网+”方面的服务需求。

## 3 地坪研磨机器人的产业化应用

随着地坪研磨机器人系统平台的研发落地,产品开发团队大力实施推进该型机器人的工程施工应用测试。在工程应用测试的基础上,逐步迭代完善了机器人的产品功能和性能的稳定性,实现了规模化的产业化应用。截至发稿,博智林公司的地坪研磨机器人产品已在国内实现量产应用,应用项目遍布全国 30 个省份,并逐步推向中国香港、新加坡、马来西亚等国家和地区。

### 3.1 工程应用案例

广东省佛山市顺德凤桐花园项目是 2021 年 2 月住建部发布的《关于同意开展智能建造试点的函》确定的首批 7 个智能建造试点项目之一。同年,凤桐花园项目的相关经验做法及案例分别入选住建部《智能建造与新型建筑工业化协同发展可复制经验做法清单(第一批)》和《智能建造新技术新产品创新服务典型案例(第一批)》。凤桐花园项目开

工建设之际,正是博智林地坪研磨机器人开发逐渐进入技术成熟期的关键时间节点,产品开发团队借此机会,实施关键性的工程施工应用测试,助力试点项目建设。

案例概述如下。

(1)施工地点:凤桐花园项目 3 号楼-1 层地下室,施工平面图(局部)如图 8 所示。

(2)施工工艺:密封固化剂地坪+环氧地坪漆地坪前置打磨。

(3)施工作业流程:地坪研磨机器人主要用于取代传统地坪研磨设备,在施工作业流程中,其主要功能与传统设备一致,即用于地坪表面的浮浆打磨与亮化抛光。以混凝土密封固化剂地坪为例,常规的工艺流程为:根据设计要求编制施工工艺方案和进度计划→地坪基面清理→地坪表面浮浆粗打磨处理→喷洒密封固化剂→研磨与抛光亮化处理<sup>[13]</sup>。其中,地坪表面浮浆打磨处理、研磨与抛光亮化处理两部分共需合计打磨抛光 7~9 遍,均由地坪研磨设备进行施工。地坪研磨机器人的施工作业简要流程如图 9 所示。

(4)施工作业面积及机器人综合工效如表 1 所示。表 1 中同时列举除了凤桐花园项目,在该机器人不同研发阶段的部分施工应用数据,用以评估机器人在不同地坪地面初始前置条件下的平均综合工效值。数据均以混凝土密封固化剂地坪施工为例。

### 3.2 机器人与传统人工的施工对比

如前文所述,地坪研磨机器人与传统设备在核心功能上是一致的,但在施工效率、人机班组配置等方面的差异,其单位面积的综合施工成本对比如表 2 所示。

如表 2 可知,地坪研磨机器人施工相较于传统设备,单位面积的综合施工成本降低约 19.4%。以 2 万 m<sup>2</sup> 施工面积计算,可实现地坪施工工期缩短约 20%,具有较高的综合施工成本优势,可为施工企业提供更大的利润空间。

### 3.3 机器人产业化应用的社会效益

除了综合施工成本和工期优势,地坪研磨机器人的产业化应用也将带来质量、安全、环保等方面的巨大社会效益<sup>[14-15]</sup>。

在施工质量方面,机器人可开展智能全自动化作业,无须人工跟随操控,其施工作业路径均匀连续,无多磨漏磨现象,施工完成面均匀性、观感一致性和平整度等较传统人机配合模式更好,合格率更高,可减少因人工因素导致的质量问题。



表2 机器人与传统人工的施工对比

工序:有找平层的密封固化剂地坪 (研磨与抛光工艺遍数:9遍)			工程单价(人机成本):6元/m <sup>2</sup>	
施工设备	机器人	传统人工	机器人与传统人工施工对比	
标准班组人机配比	1机1人	1机2人	机器人施工降本率/%	19.4
日均成品面面积/m <sup>2</sup>	150	120		
年均成品面面积/m <sup>2</sup>	30 000	24 000		
年均产出额/元	180 000	144 000		
年均折旧+维保成本/元	51 450	11 000		
年均人工成本/元	80 000	120 000		
每年项目间运输成本/元	2 000	1 500		
年施工成本小计/元	133 450	132 500		
人机协同成本/(元·m <sup>-2</sup> )	4.45	5.52		
年利润额/元	46 500	11 500	机器人施工年利润额增值/元	35 000

注:因施工配套用耗材与辅材对于采用何种施工设备无差异,故表中工程单价仅体现人工和设备成本;考虑进场施工项目因实际进度导致作业面交付延迟、施工设备闲置等常规情形,年实际净施工天数按200 d计,设备使用寿命按5年计。



(a) 地坪研磨机器人施工



(b) 传统人工研磨设备施工

图10 地坪研磨机器人与传统人工研磨设备施工环境对比

肺病新增病例8 051例<sup>[17]</sup>,尘肺病占我国法定职业病总数的66.7%以上,虽然近年来中国职业性尘肺病新病例数量逐年递减,但仍然是危害职工健康安全最主要的职业病。通过“机器人”,解决地坪施

工“危繁脏重”的行业现状,实施“智能建造”是降低建筑行业尘肺病发病率的重要途径。

#### 4 结论

(1)系统地阐述了智能地坪研磨施工机器人的整体技术方案框架和关键性技术原理,通过工程应用案例,对比分析了地坪研磨机器人与传统设备的综合施工效益情况。

(2)经应用验证,地坪研磨机器人自动施工过程无须人工跟随操控,具有有效提高施工效率,减少人工投入,降低项目综合施工成本等优势,可创造出巨大的经济和社会效益。

(3)作为一种新质生产力工具,地坪研磨机器人的产业化应用,必将推动建筑地坪施工行业的新业态发展和产业转型升级,助力智能建造和绿色环保施工体系建设。

(4)同时,应该认识到当前建筑地坪研磨机器人产品存在的不足,在后续工作中,需要进一步结合人工智能等前沿技术,深度提高产品的智能化程度,使地坪研磨机器人真正走进用户手中,并得到更加广泛的应用与普及。

#### 参考文献

- [1] 张岗,张俊杰.建筑机器人地坪施工标准研究[J].工程建设标准化,2023(S2):119-123.
- [2] 宋向辉,谭伟,徐尧.地坪施工机器人的自动控制与平整度优化[J].中国高新科技,2023(17):141-143.
- [3] 陈珂,张芸菡,郭丰毅,等.智能建造背景下建筑业新业态研究[J].科技和产业,2023,23(12):131-135.
- [4] 丘康尧,何寿奎.中国建筑业高质量发展空间格局及影响因素[J].科技和产业,2024,24(23):245-254.
- [5] 常俊松,张天宝,李博雨.京津冀地区建筑业新质生产力发展水平测度[J].科技和产业,2024,24(22):177-183.
- [6] 陈刚.行业变革的选择——建筑机器人发展现状与趋势[J].施工企业管理,2024(9):62-65.
- [7] 韩广涛,张明路,高春艳,等.室外广域环境下移动机器人地形障碍检测及分析方法[J].科学技术与工程,2024,24(19):8150-8157.
- [8] 中国工程建设标准化协会.建筑机器人地坪研磨机器人:T/CECS 10297-2023[S].北京:中国标准出版社,2023.
- [9] 郑宏远,卢宁,龚涛.智能卸煤机器人关键技术[J].科学技术与工程,2024,24(7):7131-7139.
- [10] 李忠林,罗邵屏,贾玉婷.移动机器人路径规划算法综述[J].现代信息科技,2024,8(19):184-188.
- [11] 中国工程建设标准化协会.建筑机器人地坪施工标准:T/CECS 1306-2023[S].北京:中国计划出版社,2023.
- [12] 周献华,杨若澜,胡佳祥,等.无人化智能地坪研磨机器人开发及产业化[R].佛山:广东博智林机器人有限

- 公司, 2024.
- [13] 马培, 孙浩, 王东亚. 混凝土密封固化剂在工业厂房地面工程中的应用[J]. 数码-移动生活, 2023(1): 472-474.
- [14] 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.
- [15] 曹建福. 建筑机器人技术现状与产业化思考[J]. 施工企业管理, 2024(9): 55-58.
- [16] 赵燊. 我国建筑机器人行业发展现状、问题及对策研究[J]. 建筑经济, 2024, 45(4): 5-10.
- [17] 2023年我国卫生健康事业发展统计公报[J]. 中国病毒病杂志, 2024, 14(5): 416-424.

## Development and Industrial Application of Intelligent Floor Grinding Construction Robot for Buildings

HU Jiexiang

(Guangdong Bright Dream Robotics Co. Ltd., Foshan 528311, Guangdong, China)

**Abstract:** As a new productivity tool, construction robots will help promote the development of new business forms and industrial upgrading in the construction industry. Aiming at the problems that the traditional building floor grinding equipment must be manually followed and controlled with low construction efficiency, an intelligent and automatic floor grinding construction robot was designed. The overall technical scheme framework and key technical principles of the robot was analyzed and explained. Then, through engineering application cases, the construction process of the floor grinding robot was described, and the comprehensive construction benefits of the robot and traditional equipment were compared and analyzed. The result shows that the comprehensive construction cost reduction rate of the robot is about 19.4%, which has a higher construction cost advantage. Finally, the social benefits of popularizing and applying the robot was elaborated as well.

**Keywords:** floor grinding robot; floor construction; construction robot; commercial application; intelligent construction