

室内顶面鼓包墙皮自主修复装置的设计与实现

梁佳建 任宇波 韦俊瑞 王伦 龙清泉

绍兴文理学院智能工程学院, 浙江绍兴, 312000;

摘要: 针对传统室内顶面鼓包墙皮修复存在作业风险大、效率低及污染严重等问题, 本文设计并实现了一种针对室内顶面鼓包墙皮的自主修复装置。该装置首创“识别-定位-打磨-涂刷”全流程自动化作业。装置采用模块化设计, 集成定位、打磨、粉刷及粉尘收集机构。测试结果表明, 每平方米平均单次修复作业时间为 15 分钟, 该设备能够有效满足应用需求。

关键词: 鼓包墙皮修复; 自动化; 模块化设计

DOI: 10.69979/3029-2727.26.01.040

引言

随着城市化进程推进, 大量建筑进入维护改造期, 室内顶面墙皮鼓包、开裂乃至脱落已成为普遍性问题。研究表明, 全国超过 60% 的居住房屋存在渗漏问题, 其中约 34% 直接表现为墙皮鼓包^[1]。该问题不仅影响美观, 若不及时处理, 将加剧损坏程度并显著提高修复成本。

目前, 顶面墙皮鼓包修复主要依赖人工方式, 存在以下突出问题: 一是安全风险高, 高空作业中坠落事故频发, 狭窄空间维护困难; 二是效率低、成本高, 单次修复耗时长达数小时至数天, 人工成本持续攀升; 三是质量不稳定, 受操作人员技术水平和疲劳程度影响显著; 四是环境污染严重, 施工过程中产生的粉尘及有害挥发物违背绿色施工理念。

针对上述问题, 本文旨在实现一种室内顶面鼓包墙皮自主修复装置, 其创新价值主要体现在两方面: 技术上, 通过融合视觉激光定位与精密机械传动系统, 实现了顶面环境的“识别-定位-打磨-涂刷”全流程自动化作业, 突破了现有设备功能单一的局限; 应用上, 以机械化作业替代人工高空操作, 单次修复时间可控制在 15 分钟以内, 在显著提升效率的同时, 通过粉尘控制模块实现绿色施工, 为建筑维护提供了一种安全高效的解决方案。

1 研究现状

国内建筑机器人研究发展迅速, 但与顶面修复直接相关的技术方案同样存在功能割裂的问题。通过专利与文献检索发现, 相关技术多集中于单一功能的实现。李云成等公开了一种竖直墙面裂缝自动修复设备, 但其无法处理顶面鼓包, 且仍需人工介入操作^[2]。李营超等展

示了一种墙面清灰打磨装置, 具备粉尘收集功能, 但同样仅完成了修复流程中的局部环节, 不具备全流程自动化与顶面作业能力^[3]。这些现有方案普遍缺乏针对顶面修复场景的、高度集成的机械系统设计与多机构协同控制策略。

发达国家在建筑机器人领域起步较早, 已涌现出诸如墙面喷涂机器人、砌砖机器人、地面平整机器人等产品。日本、澳大利亚等国在建筑自动化方面投入大量研究, 有学者研究了基于缆绳并联机构的顶面作业机器人^[4], 亦有团队开发了用于建筑表面评估的多传感器融合技术^[5]。然而, 这些研究多集中于新建建筑的大型施工场景, 或针对地面、垂直墙面等易于接触的表面。专门针对室内顶面这种特殊空间、小尺度、精细化修复任务的自主装备, 公开的文献与成熟产品仍较为罕见。现有技术路径复杂、成本高昂, 难以在民用建筑维护市场中普及。

2 装置设计

为实现对传统人工修复模式的替代, 本装置满足以下核心功能与性能需求: 首先, 具备全流程自动化作业能力, 能够自主完成从鼓包识别与定位、到均匀的打磨、直至最终涂刷恢复墙面的完整闭环。其次, 针对顶面作业的特殊性, 装置拥有高的精度与稳定性, 其空间定位精度须达 $\pm 3.0\text{mm}$, 以确保修复动作精确无误, 同时升降机构必须运行平稳并具备可靠的自锁功能, 保障高空作业安全。再次, 装置需内秉安全与环保属性, 从设计上消除高空人工作业风险, 并集成有效的粉尘控制机制, 从源头抑制污染。最后, 装置应体现良好的人机交互与适应性, 支持远程无线控制与状态监控以降低操作门槛, 能适应常见室内环境约束, 并采用模块化设计便于关键

执行部件（如磨头、刷头）的快速更换与维护，从而拓展应用场景。

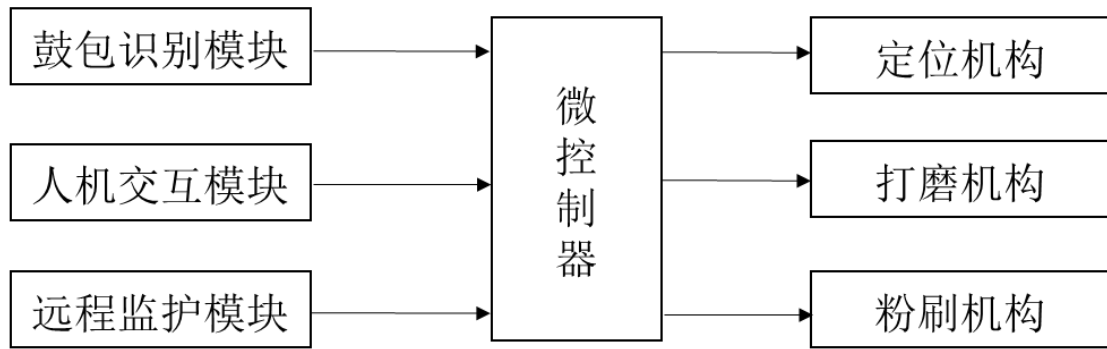


图1 系统总框图

如图1所示，本装置采用三层系统架构，实现从信息感知到作业执行的完整闭环。信息输入层由鼓包识别、人机交互与远程监护三大模块构成，分别承担环境感知、指令输入与状态监测功能，为系统提供全面的作业需求与环境数据。核心决策层以微控制器为中枢，通过多源信息融合与逻辑判断，生成精准控制指令。动作执行层包含定位、打磨与粉刷机构，在微控制器的协同调度下

依次完成“定位-打磨-粉刷”全流程作业，实现了顶面墙皮修复的自动化与智能化。

3 装置实现

该装置是一个按预定程序运行的自动化系统，其完整的工作流程是一个有序的闭环过程，可分为三个阶段，其工作流程图如图2所示。

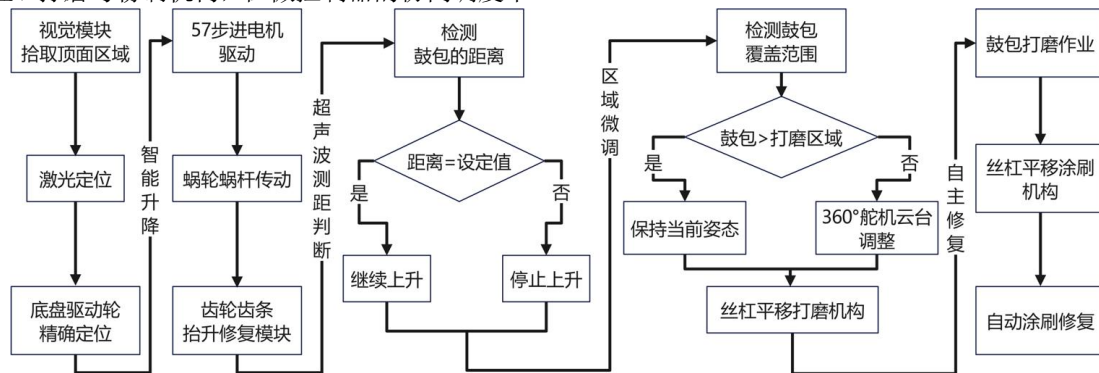


图2 装置工作流程图

第一阶段：自主定位与高度调节

系统启动后，通过基于树莓派与YOLOv8算法的视觉模块对顶面进行扫描。当识别到鼓包目标（置信度 ≥ 0.8 ）时，即刻解算其位置与尺寸参数并发送至主控单元。STM32主控融合超声波测距数据，驱动“同步带-蜗轮蜗杆-齿轮齿条”复合升降机构将作业平台升至预设高度，同时协同控制360°云台与滚珠丝杠滑台，完成修复工具与鼓包区域的精准对位。

第二阶段：修复作业有序执行

首先执行打磨作业：滑台驱动曲柄滑块打磨机构覆盖鼓包区域，进行往复式打磨，联动式集尘机构同步展开以收集粉尘。随后进行涂刷作业：滑台切换至粉刷机构，曲柄摇杆机构驱动刷头完成蘸料与涂覆，利用其急回特性提升效率，并通过云台与滑台的微动确保涂层均匀。

第三阶段：系统复位与待机

作业完成后，主控单元依序将粉刷机构、滑台、升降机构及移动平台复位至初始状态，系统进入低功耗待机模式，等待下一次作业指令，完成全自动化闭环。

装置整体设计图如图3所示

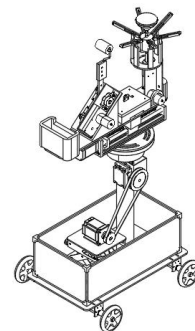


图3 装置整体设计图

如表 1 所示，装置顺利完成全部 20 个循环的耐久性测试。在整个测试过程中，未发生任何机械故障或控制系统宕机。定位精度抽检数据显示，其误差范围始终保持 在 $\pm 1.5 \text{ mm}$ 以内，未见明显的精度衰退。升降机

构中的蜗轮蜗杆自锁系统在整个测试期间表现可靠，未发生任何下滑现象。此测试充分证明了本装置机械结构的坚固性、传动系统的可靠性以及控制系统的鲁棒性，具备满足实际工程应用需求的稳定性。

表 1 装置稳定性测试数据统计表

测试阶段	定位精度均值 (mm)	定位精度最大值 (mm)	电机最高温度 (°C)	蜗轮蜗杆自锁状态	故障发生情况
1 次循环后	0.11	0.16	-	可靠无下滑	无故障
10 次循环后	0.13	0.18	28.9	可靠无下滑	无故障
20 次循环后	0.14	0.19	32.6	可靠无下滑	无故障
总值/平均值	0.13	0.18	32.6	-	无故障

4 总结

本文介绍了一种室内顶面鼓包墙皮自主修复装置，完成了从总体设计、关键技术实现到稳定性验证的全过程。本文针对传统顶面墙皮修复作业中存在的安全风险高、效率低下及环境污染严重等核心痛点，设计并实现了一种集视觉激光定位、精密机械传动与智能控制于一体的全自动化解决方案。

装置的核心创新在于首创了“识别-定位-打磨-涂刷”的全流程自动化作业体系，改变了依赖人工的传统作业模式。在机械结构上，通过同步带-蜗轮蜗杆-齿轮齿条复合传动系统实现了升降的平稳性与自锁安全，并基于运动学理论优化了曲柄滑块打磨机构与曲柄摇杆粉刷机构，确保了修复作业的高效与精准。稳定性测试表明，装置的定位精度、修复效率及整机稳定性均达到设计指标，有效验证了设计方案的可行性。

[1] 中国产业调研网. 中国建筑渗漏维修行业研究与发展趋势报告 (2025-2031 年) .

[2] 李云成. 一种垂直墙面裂缝自动修复的维修设备:CN112854810A[P]. 2021-05-28

[3] 李营超. 一种工程装饰修用墙面清灰打磨处理装置:CN214264959U[P]. 2021-09-24

[4] Li, W., et al. Design and Control of a Cable-Driven Parallel Robot for Ceiling Maintenance [J]. Mechanism and Machine Theory, 2023.

[5] Roberts, D., et al. Multi-sensor Fusion for Robotic Surface Defect Assessment in Civil Infrastructure [J]. NDT & E International, 2024.

作者简介：梁佳建(2005.08-)，男，壮族，广西柳州人，本科，研究方向：机械设计与机器人控制。

基金项目：国家级大学生科技创新项目 (No. 202510349068) 。

参考文献