

轨道交通车站智能清洁机器人系统设计

任 涛, 王殿龙, 薛俊宋

宁波中车智维科技有限公司, 浙江 宁波

收稿日期: 2026年6月5日; 录用日期: 2026年7月8日; 发布日期: 2026年7月17日

摘 要

针对轨道交通车站客流密集、场景复杂、保洁要求高的现状, 本文设计一款专用智能清洁机器人。结合场站工况分析传统人工清洁模式的不足, 明确设备设计需求与基本原则, 完成系统架构、机械结构、硬件、动力及清洁机构整体设计。采用Cartographer SLAM算法实现环境建图, 融合A*、TEB + DWA算法完成路径规划与动态避障, 配套开发分级作业逻辑。通过消融实验、量化测试与现场实测试验验证设备性能, 结果表明该机器人运行稳定、避障灵敏、清洁效率突出, 可满足车站全自动保洁需求, 能够降低人力运维成本, 为轨道交通智能清洁装备研发与应用提供实践参考。

关键词

轨道交通车站, 智能清洁机器人, 系统设计, 路径规划, 环境适配

Design of Intelligent Cleaning Robot System for Rail Transit Stations

Tao Ren, Dianlong Wang, Junsong Xue

Ningbo CRRC Zhiwei Technology Co., Ltd., Ningbo Zhejiang

Received: June 5, 2026; accepted: July 8, 2026; published: July 17, 2026

Abstract

In response to the current situation of dense passenger flow, complex scenes, and high cleaning requirements in rail transit stations, this article designs a dedicated intelligent cleaning robot. Analyze the shortcomings of traditional manual cleaning mode based on station operating conditions, clarify equipment design requirements and basic principles, and complete the overall design of system architecture, mechanical structure, hardware, power, and cleaning mechanism. Using the Cartographer SLAM algorithm to achieve environmental mapping, integrating A*, TEB + DWA algorithms to complete path planning and dynamic obstacle avoidance, and supporting the

development of hierarchical job logic. Through ablation experiments, quantitative testing, and on-site measurements, the performance of the equipment has been verified. The results show that the robot operates stably, avoids obstacles sensitively, and has outstanding cleaning efficiency. It can meet the requirements of fully automatic cleaning at stations, reduce human operation and maintenance costs, and provide practical reference for the research and application of intelligent cleaning equipment for rail transit.

Keywords

Rail Transit Station, Intelligent Cleaning Robot, System Design, Path Planning, Environmental Adaptation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

城市轨道交通网络不断扩张，车站保洁作业范围扩大、作业环境愈发复杂，传统人工清洁效率低、成本高，难以适配智慧场站发展需求。通用型清洁机器人在人流密集场景下适配性不足，为此本文结合车站实际工况开展智能清洁机器人系统设计，完成硬件布局与控制算法开发，依托多组实验检验设备综合性能，打造贴合轨道交通场景的自动化清洁设备，助力车站运维工作智能化升级。

2. 车站工况与整体设计要求

2.1. 现场工况与传统模式短板

轨道交通车站划分候车区、换乘通道、大厅等功能区域，地面以防滑地砖、水磨石为主，区域衔接处存在小幅坡度与接缝。站内客流早晚高峰密集、平峰时段分散，立柱、闸机等固定障碍物较多，换乘通道空间狭窄，作业环境兼具规律性与动态不确定性。日常主要污染物为固体碎屑、浮尘与水渍，对清洁设备综合能力要求较高。传统人工清洁存在明显短板，不仅清洁盲区多、作业效率有限，还受运营时段限制难以保障作业标准统一。同时人力投入成本偏高，应急处置能力弱，作业过程缺少数字化记录，无法满足现代化智慧运维的管理要求[1]。

2.2. 功能需求与设计基本原则

结合车站保洁工作内容，机器人需集成清扫、吸尘、拖地一体化功能，支持分区作业、定时启停、手动遥控等运行模式，搭载状态监测模块实现电量、故障、作业进度实时反馈，同时具备作业日志存储功能。设备外形、行走机构需适配狭窄空间与多样地面，运行噪音、防护等级符合公共区域使用标准。本次设计遵循多项原则，以实用性为核心，围绕现场需求确定功能与结构；选用成熟工业硬件保障设备长期运行稳定性；优化机身结构实现轻量化，简化日常检修流程；搭建软硬件双重防护体系，保障人员与设备安全；预留功能接口，满足后期功能拓展的使用需求。

3. 机器人硬件系统设计

3.1. 系统架构与机械结构设计

机器人采用四层分层架构，分别为感知层、决策控制层、执行作业层与后台交互层。感知层集成多

类传感器实时采集环境轮廓、障碍物距离等数据[2]，为设备运行提供原始信息支撑；决策控制层作为核心中枢，完成数据解析、逻辑运算并向下发动作指令；执行作业层接收指令，完成行走移动与清洁作业等物理动作；后台交互层依托通信模块实现远程管控、任务下发与数据存储。机身采用紧凑型一体化设计，整体轮廓做圆弧过渡处理，降低碰撞带来的安全隐患。机身按照功能完成分区布局，前部集中布置各类感知器件，中部安放主控单元与供电模块，下半区域布设全套清洁组件，尾部设置可拆卸集尘箱。机身选用轻质铝合金框架搭配密封防护外壳，在控制整体自重、提升移动灵活性的同时，有效阻隔灰尘与水汽侵入内部精密器件，可长期适配车站全天候连续作业环境(图 1)。

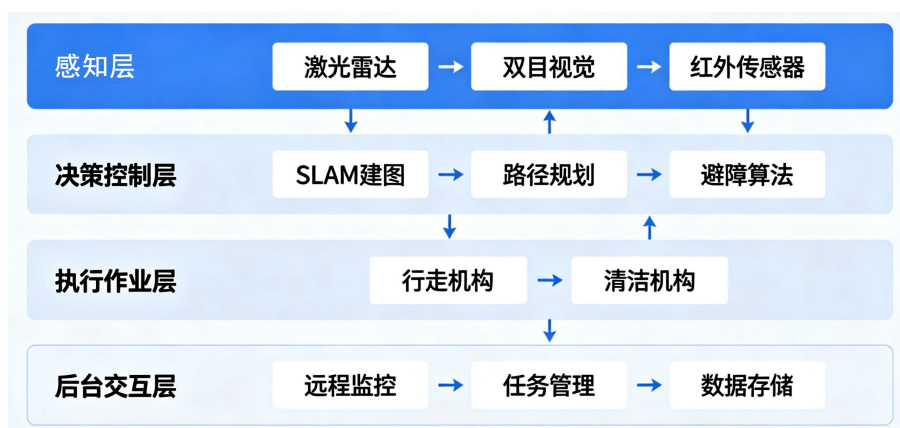


Figure 1. Four layer robot system architecture diagram

图 1. 四层机器人系统架构图

3.2. 硬件选型与行走供电系统

核心硬件均选用工业级成熟器件，主控单元搭载 STM32H743 嵌入式主板，搭配 RPLIDAR A1 激光雷达，强大的运算能力可同时满足算法运行与多设备协同控制需求。环境感知系统整合激光雷达、双目视觉、红外传感器与机械式防撞触点，构建全方位、多维度的环境感知体系[3]。清洁驱动模块配备专用调速芯片，可灵活调节清扫部件运转速度，整套硬件统一采用 24 V 工作电压与标准通信协议，保障各模块信号传输稳定、协同运行有序。行走机构采用差分轮组驱动方案，配合独立驱动电机实现灵活转向与平稳调速，电机低噪音设计符合公共区域使用标准。供电系统选用 24 V/20 Ah 磷酸铁锂电池组，续航能力可覆盖车站单日保洁工作，配套智能电量管理单元，具备低压告警、低电量自主返航功能，同时增设多级稳压电路，有效抑制电压波动，全方位保护硬件设备安全[4]。

3.3. 清洁执行机构布局设计

清洁执行机构采用前置扫刷、中部吸尘、后置拖拭的一体化布局，三道清洁工序可同步开展，作业效率大幅提升。整机外形尺寸为 780 mm × 520 mm × 650 mm，内部吸尘风道风机风压达 1200 Pa。机身前端配备浮动式边刷，可根据地面高度自主微调，高效聚拢固体碎屑、杂物等大颗粒垃圾；中部负压吸尘结构能够深入吸附地砖缝隙、地面表层的细微浮尘，强化深度清洁效果；后端柔性胶棉拖布专门用于擦拭地面水渍与浅层污渍，完成精细化保洁作业。整套清洁组件支持 0~30 mm 小幅升降调节，可适配地面轻微起伏，保证作业部件与地面紧密贴合。机身末端设置 18 L 大容量封闭式集尘箱，采用卡扣式拆装结构，工作人员可快速完成箱体拆卸与杂物清理。该一体化结构设计简洁、故障率低，能够持续稳定运行，充分满足车站常态化、高频次的保洁作业要求。

4. 智能控制算法与作业逻辑

4.1. 环境建图与路径规划算法

本文采用 Cartographer 图优化 SLAM 算法搭建车站二维栅格地图[5], 算法融合激光雷达、惯性测量单元与轮式里程计采集的多源数据[6], 依托局部子图结合全局优化的架构[7], 有效过滤站内行人走动产生的动态干扰信号[8], 最终建图定位误差可控制在 2 cm 以内。完成地图绘制后可本地存储并支持后期局部修正, 设备再次上岗作业时直接调用已有地图, 无需重复遍历场地, 减少前期准备时长。全局路径规划选用 A*算法[9], 基于已成型的站内地图划分独立保洁区域, 按照由远及近、分区遍历的逻辑生成最优行走路线, 从根源上避免路线重复、作业区域漏扫等问题。系统预设逐行清扫、环绕清扫、定点清扫三种运行模式, 可根据候车大厅、狭长通道、设备边角等不同场景灵活切换。整套算法运算效率高、路径规划合理性强, 为机器人实现全域自主保洁作业筑牢技术基础。

4.2. 动态避障控制策略

针对轨道交通车站客流实时变化、障碍物类型复杂的工况特点, 本文采用 TEB + DWA 双层局部规划算法构建动态避障体系[10]。其中 TEB 时间弹性带算法主要负责狭长通道、转弯路段的轨迹优化, 合理约束机器人运行速度与加速度, 保障设备穿行、转向过程平稳; DWA 动态窗口算法可实时采样速度空间, 对突然出现的行人、临时障碍物做出快速响应, 两类算法优势互补, 适配车站复杂通行环境。设备依靠多传感器分层识别周边障碍, 检测到 10 米范围内物体时提前降速, 预留充足反应缓冲空间; 3 米近距离识别通行行人时, 立即暂停清洁动作原地等待; 遇到固定小型障碍物则自动微调行进路线平稳绕行。整套避障策略响应时延短、安全冗余充足, 在不干扰乘客正常通行秩序的前提下, 最大限度保障清洁作业的连续性, 可平稳适配车站早晚高峰、客流平峰等多种人流工况。

4.3. 分级智能作业逻辑设计

结合轨道交通分时运营的行业特征, 本文针对性设计三类分级作业模式, 匹配不同时段保洁需求。基础保洁模式适用于客流平峰阶段, 机器人以常规速度匀速行驶, 清洁组件保持标准功率运转, 完成全站常态化基础保洁工作。深度保洁模式主要应用于夜间停运、凌晨客流低谷等窗口期, 设备主动降低行走速度, 同步提升清洁组件运行功率, 重点对通道边角、设备间隙等清洁难点区域进行强化清理。应急定点模式依托视觉识别功能, 检测到局部泼洒污渍、大面积污染时, 自动定点停留并往复多次清理, 直至达到保洁标准。系统支持多组定时任务编辑与自动启停, 可完全依照车站运营时刻表自主启停设备, 实现无人值守全自动化作业。分级作业逻辑让设备运行与场站运营节奏深度融合, 在保障保洁质量的同时兼顾车站运营秩序, 显著提升自动化作业的适配性与实用价值[11]。

5. 系统测试与性能分析

5.1. 整机调试与消融实验

设备组装完成后, 先在室内模拟场地开展空载调试, 逐一检测硬件通信、传感器精度、行走动作与清洁机构运行状态, 排查线路故障、机械卡滞、程序异常等问题, 并完成基础参数校准。为验证系统核心架构的必要性, 本文设置两组消融实验。关闭双目视觉模组后, 设备对低矮障碍物识别能力下降, 动态避障成功率明显降低; 剔除 TEB 算法仅保留 DWA 算法时, 机器人在狭长通道内行驶轨迹偏移增大, 运行平稳性变差。实验结果证实, 多传感器融合方案与 TEB + DWA 双层避障算法, 是设备适应复杂车站环境的关键。经过调试与验证, 机器人各模块动作流畅、信号传输稳定, 无卡顿、异响、断联等问题, 各项基础性能达标, 可进入真实车站开展实地测试。

5.2. 多场景量化性能测试

本次选取换乘通道、候车大厅、多立柱区域三类典型车站场景开展量化测试，每组实验多次重复并取平均值，保障数据客观性。建图测试表明，设备整体建图效率较高，定位误差控制在合理范围，流动人流对地图精度干扰微弱[12]。按照低、中、高三级客流密度开展避障测试，设备整体避障成功率表现优异，响应时延符合设计标准，仅在高人流场景出现短暂停顿，全程未出现安全隐患。选取同等面积区域开展人机对比实验，相较于人工保洁，机器人作业耗时更短，清洁覆盖率更高。从长期运维角度来看，该设备能够有效削减人力开支，综合使用成本优势显著。各项量化数据证明，机器人在作业效率、清洁质量、运行经济性上均满足轨道交通车站保洁使用要求(表 1)。

Table 1. Quantitative comparison data table of robot obstacle avoidance and human-machine cleaning under multiple passenger flow densities

表 1. 多客流密度下机器人避障与人机清洁量化对比数据表

实验组别	测试条件	避障成功率	单位面积清洁耗时 (min/100 m ²)	清洁覆盖率	单位单日运维成本 (元)
机器人 - 低客流	候车大厅，行人稀少	99.7%	7.2	98.6%	28.5
机器人 - 中客流	换乘通道，行人间歇通行	98.2%	8.5	97.9%	28.5
机器人 - 高客流	早高峰大厅，人流密集	94.5%	11.3	96.4%	28.5
人工保洁	同标准车站区域	-	22.6	83.1%	165

5.3. 现场试运行与优化

将调试完成的机器人投入实际轨道交通车站开展现场试运行，全程记录设备运行状态与作业表现。试运行阶段，机器人可自主完成地图调用、路线行进、动态避障、分时作业等全流程任务，连续工作时长达到设计指标，能够适配车站全天候保洁作业模式。结合现场工况暴露的细微问题，技术人员针对性优化算法阈值、行走速度以及清洁组件高度，进一步提升设备环境适配性。经过长期实地打磨，机器人运行状态稳定，各项技术参数与清洁效果均达到预设标准。本次现场测试充分验证了设备的可靠性与实用性，该智能清洁机器人可正式应用于车站常态化保洁工作，同时也具备在同类型轨道交通场站规模化落地推广的条件。

6. 核心创新点

相较于通用型清洁机器人，本文设计设备形成三项核心创新。一是采用多传感器融合感知搭配 TEB + DWA 双层避障算法，针对性解决车站人流密集、通道狭窄的痛点，兼顾通行平稳性与突发障碍快速响应能力。二是设计一体化浮动清洁机构，可自适应地面起伏，同步处理多种类型污染物，贴合车站复杂清洁需求。三是开发分级分时作业逻辑，结合轨道交通运营规则设置不同作业模式，实现设备运行与场站运营深度协同。三项创新均围绕轨道交通车站专属工况设计，有效弥补传统设备与人工保洁的短板，大幅提升智能清洁系统的场景专用性与综合应用价值。

7. 结束语

本文完成轨道交通车站智能清洁机器人整体设计，确定软硬件方案与核心控制算法，通过多项测试验证设备性能。该机器人建图精准、避障灵敏、清洁效率高，能够有效替代人工开展保洁工作，降低运维成本，提升车站智能化服务水平。本系统在多机协同、极端人流适配等方面仍有优化空间，后续可结

合数字孪生、智能识别等技术进一步升级。该设计可为同类场站智能清洁设备研发提供参考，助力轨道交通运维行业持续向智能化方向发展。

参考文献

- [1] 张晓宇, 徐卓异, 黄健, 等. 光伏组件常驻型轨道直驱清洁机器人系统设计[J]. 智能制造研究与应用, 2026, 2(3): 4-6.
- [2] 赵张桢. 移动机器人基于视觉惯性紧耦合的同时定位与建图算法研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆理工大学, 2023.
- [3] 范新明, 朱锦新, 邵俊. 激光传感器感知环境信息和视觉融合的机器人定位研究[J]. 激光杂志, 2026, 47(2): 216-221.
- [4] 栾东雪, 景少雷, 姚志广. 一种智能清扫机器人系统的设计与实现[J]. 电子产品世界, 2025, 32(9): 64-70.
- [5] 苗红霞, 郭章旺, 齐本胜, 等. 基于改进 Cartographer 算法的激光 SLAM 研究[J]. 计算机仿真, 2024, 41(9): 299-303.
- [6] 吴文昊, 谷玉海. 多传感器融合的无人车 SLAM 系统研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2025, 39(1): 229-235.
- [7] 杨铭远, 张亿, 袁宇辰, 等. 基于改进 Cartographer 的二维激光 SLAM 算法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2025, 62(23): 262-274.
- [8] 蔡芸, 曾超, 王磊, 等. 语义先验改进 Cartographer 的机器人重定位方法[J]. 农业机械学报, 2025, 56(6): 585-593+683.
- [9] 刘进. 轨道交通车辆清扫机器人智能路径规划研究[J]. 机械制造与自动化, 2024, 53(4): 245-249.
- [10] 张磊. 多传感融合视域下清洁机器人智能避障系统设计[J]. 信息记录材料, 2025, 26(6): 33-35.
- [11] 王川. 基于 ROS 的户外清扫机器人自主导航与目标检测系统研究[D]: [硕士学位论文]. 淄博: 山东理工大学, 2024.
- [12] 刘宗坤. 清扫机器人远程智能运维系统设计[D]: [硕士学位论文]. 济南: 济南大学, 2023.