

列车车底部件自动化检修装置关键技术研究

刘琛宝¹, 潘薇薇²

1. 济南中车四方所智能装备科技有限公司, 山东 济南 250107

2. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111

DOI:10.61369/ERA.2026080016

摘 要 : 为解决列车车底部件人工检修效率低、漏检率高、作业风险大等问题, 本文研究自动化检修装置关键技术。通过设计模块化轻量化机械结构、分层式嵌入式控制系统, 融合多模态视觉检测、电磁超声 / 涡流无损检测及分级预警技术, 经系统集成与工况测试验证。装置缺陷检出率99.6%, 单列6编组检测效率提升40%, 连续无故障工作时间 $\geq 8000\text{h}$, 适配多车型复杂工况, 为轨道交通检修智能化提供技术支撑。

关 键 词 : 列车车底检修; 自动化装置; 无损检测

Research on Key Technologies of Automated Inspection Equipment for Train Underframe Components

Liu Chenbao¹, Pan Weiwei²

1. Jinan CRRC Sifang Intelligent Equipment Technology Co., Ltd., Jinan, Shandong 250107

2. CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266111

Abstract : To address the issues of low efficiency, high rate of missed inspections, and high operational risks in manual inspections of train undercarriage components, this paper studies the key technologies of an automated inspection device. By designing a modular and lightweight mechanical structure, a hierarchical embedded control system, and integrating multimodal visual inspection, electromagnetic ultrasonic/eddy current non-destructive testing, and hierarchical early warning technologies, the system was integrated and tested under various working conditions. The device achieved a defect detection rate of 99.6%, increased the inspection efficiency of a six-carriage train by 40%, and had a continuous fault-free operation time of ≥ 8000 hours. It is adaptable to complex working conditions of multiple train models, providing technical support for the intelligentization of rail transit maintenance.

Keywords : train undercarriage inspection; automated device; non-destructive testing

引言

列车车底转向架、制动系统等部件的可靠运行是行车安全核心保障, 传统人工检修依赖经验, 存在效率低、漏检率高、劳动强度大等弊端, 难以适配高密度运营需求。本文围绕机械结构设计、电子控制开发、自动化检测及系统集成四大核心, 攻克窄空间作业、高精度定位与多模态缺陷识别难题, 研制一体化自动化检修装置, 助力轨道交通运维智能化升级。

一、车底检修装置机械结构设计

(一) 车底检修移动平台机械结构设计

车底检修移动平台面向多车型地沟作业场景, 模块化框架结构选用 Q355B 高强度钢与 6061-T6 铝合金复合材质, 核心承载部件屈服强度不低于 355MPa, 辅助框架密度 2.7g/cm^3 , 实现强度与轻量化的均衡兼顾。平台规格 $1600\text{mm} \times 1000\text{mm} \times 300\text{mm}$, 最小离地间隙 50mm, 可适配 1200-1800mm 宽度地沟。行走系统采用四轮八驱布局, 搭配 V 型减震摆臂与邵氏硬度 90 ± 5 的聚氨酯包胶驱动轮, 750W 永磁同步伺服电机与 1:20 行星减速器配合, 达成 0-5m/min 无极调速与 $\pm 0.5\text{mm}$ 定位精度。48V/50Ah

锂电池组集成于平台, 续航能力不低于 3h, 支持无线遥控与自动行走双模式切换^[1]。

(二) 车底部件夹持与定位机械臂设计

七轴串联柔性结构构成机械臂主体, 工作半径 1200mm, 重复定位精度 $\pm 0.02\text{mm}$, 通过法兰与移动平台形成刚性连接。关节处配置传动精度 $\leq 1\text{arcmin}$ 的谐波减速器, 负载能力达 15kg, 末端自适应气动夹持器夹持范围 5-100mm, 夹持力 0-50N 可调且配备柔性防滑衬垫。5000 万像素工业相机 (分辨率 8192×6000) 与 3D 激光扫描仪 (扫描精度 $\pm 0.05\text{mm}$) 集成一体, 结合力觉传感器构建闭环控制, 精准识别部件姿态并动态调节夹持力, 适配车底复杂空间作业需求。

（三）机械结构轻量化与抗干扰优化

轻量化设计采用 SIMP 拓扑优化与材料替换方案，平台主梁经优化后重量从 420kg 降至 330kg，减重率 21.4%，挠度仅增加 5.3%；机械臂连杆选用拉伸强度不低于 3500MPa、密度 1.8g/cm³ 的碳纤维复合材料，较铝合金实现 30% 减重效果。抗干扰优化方面，结构表面采用 80–100 μm 静电喷涂处理，盐雾试验 5000h 无锈蚀现象；关键部位装配防震锁紧螺栓与硬度 60 ± 5ShoreA 的橡胶减震垫，振动衰减率不低于 80%；框架接缝以导电橡胶密封，电气舱内铺设铜箔屏蔽层，30MHz–1GHz 频段屏蔽效能不低于 60dB，有效抵御电磁干扰。

二、车底检修装置电子控制系统设计

（一）嵌入式控制系统硬件设计

嵌入式控制系统作为整个自动化检修装置的“大脑”，采用感知层、控制层、执行层分层架构，实现数据采集、指令运算与动作执行的高效协同，适配车底复杂恶劣的作业环境。核心控制单元选用 ARM Cortex–A9 四核处理器（主频 1GHz）与 FPGA 芯片搭配，其中处理器负责整体逻辑调度与数据处理，FPGA 承担高速信号采集与实时控制任务，两者协同工作使数据处理延迟不超过 1ms，具备多通道并行处理能力，可同步接收多类传感器信号并快速输出控制指令。感知层整合视觉、激光扫描、力觉等多类传感器，涵盖 5000 万像素工业相机、3D 激光扫描仪、力觉传感器及温度、振动传感器，各类信号通过 RS485 总线、工业以太网及 CAN 总线（传输速率 500kbps，支持 110 个节点）实现高速传输，确保感知数据的完整性与实时性。控制层采用模块化设计，便于后期维护与升级，其中电源模块兼容 AC220V/DC48V 双输入，可适配不同检修场地的供电需求，输出精度 ± 1%、纹波不超过 50mV，为各模块提供稳定供电；伺服驱动模块搭载位置、速度、电流三环控制策略，位置分辨率达 0.001mm、速度精度 ± 0.1%，可精准驱动移动平台与机械臂运动。

（二）检修装置运动控制算法设计

为实现移动平台与机械臂的高精度、高平稳性运动，针对车底窄空间、多障碍的作业特点，设计自适应 PID 与滑模控制复合运动控制策略，兼顾控制精度与抗干扰能力。移动平台以差速驱动模型为基础，通过优化 PID 参数（设定 K_p=2.5、K_i=0.8、K_d=0.15），有效抑制平台运动过程中的稳态误差与超调量，使直线行驶偏差不得超过 1mm/m、转向误差不得超过 0.5°；滑模控制通过设计线性滑动面与指数趋近律，增强系统对外部干扰（如地面不平、负载波动）的抵抗能力，较传统 PID 控制使抗干扰能力提升 40%。机械臂运动控制采用动力学自适应控制算法，通过神经网络实时辨识机械臂连杆质量、转动惯量等动态参数，结合五次多项式插值轨迹规划方法，优化机械臂运动路径，减少关节冲击，使运动平稳性提升 30%；融合动态自适应 A* 算法，实现机械臂在车底复杂空间内的快速路径规划，规避转向架、制动管路等障碍物，路径规划效率提升 40%，避障成功率达 99.1%。为满足高速高精度控制需求，所有运动控制算法均经 FPGA 硬件加速处

理，单轴控制周期缩短至 100 μs，确保移动平台定位、机械臂姿态调整与检测作业的同步精准推进^[2]。

（三）多模块协同通信技术

针对装置各模块间的数据交互需求，设计融合工业以太网与 CAN 总线的混合通信架构，实现大容量数据与控制指令的高效传输。其中工业以太网采用 TCP/IP 协议，传输速率达 100Mbps，主要负责机器视觉图像、激光扫描点云、检测数据等大容量数据的传输，传输延迟不超过 5ms、丢包率不超过 0.01%，确保检测数据实时上传与分析；CAN 总线采用 CANopen 协议，主要传输移动平台行走、机械臂运动等控制指令，通信距离可达 1000m，适配车辆段地沟长距离作业场景。为提升通信可靠性，系统配置 CRC16 循环冗余校验与重发机制（最多 3 次重发），有效避免数据传输过程中的误码与丢失；同时采用差分传输、光电隔离及防雷防静电设计，使系统抗干扰性能符合 IEC61000–6–2 标准，可抵御车底电磁设备产生的强干扰。通过引入 IEEE1588 精确时间同步协议，实现各模块间不超过 1 μs 的时间同步，确保移动平台移动、机械臂定位与检测探头扫描的时序一致性，协同作业误差不超过 0.1mm，为自动化检修的精准性提供通信保障。

三、车底部件自动化检测关键技术

（一）机器视觉缺陷识别技术

采用多模态成像与深度学习算法融合方案，集成高清光学成像、红外热成像与 3D 激光扫描成像，实现车底部件表面缺陷、尺寸偏差与温度异常全面检测。5000 万像素线阵相机搭配大功率激光光源，曝光时间 1 μs、分辨率 0.02mm，可识别微小缺陷；红外热成像仪精度 ± 0.3℃、工作波长 8–14 μm，专攻隐性热故障检测。缺陷识别基于改进 YOLOv5 模型，以 ResNet50 为骨干网络，引入注意力机制与特征金字塔网络，依托 50 万张 12 类缺陷样本训练，识别准确率不低于 99.5%、漏检率不超过 0.4%。螺栓松动检测融合 3D 点云技术，通过 ICP 与 RANSAC 算法实现 3mm 以上松动 100% 识别，算法经 TensorRT 加速，单张图像处理时间不超过 20ms。

（二）电磁超声 / 涡流无损检测技术

专攻内部及表面近表面缺陷检测，规避传统检测弊端。电磁超声检测基于洛伦兹力与磁致伸缩效应，换能器无需耦合剂，非接触检测速度达 1m/s，工作频率 0.5–10MHz、检测深度 0.5–50mm，精度不低于 0.1mm，适配恶劣环境。涡流检测依托电磁感应原理，差分探头频率 10kHz–1MHz，检测灵敏度 0.05mm，非接触距离 0.5–2mm，效率较传统磁粉检测提升 50%。两种技术通过机械臂搭载，按规划路径 0.5mm 间距扫描，数据实时传输分析^[3]。

（三）检测数据实时处理与预警技术

采用分布式架构，边缘计算单元负责预处理与初步分析，云端承担存储与深度分析。数据经小波变换去噪（抑制比 ≥ 30dB）、中值滤波提纯（有效性 99.8%），单部件处理时间不超过 50ms。依据 TB/T3553–2020 标准分级预警，一般缺陷仅记

录，较重缺陷（裂纹1-3mm等）触发黄色预警，严重缺陷（裂纹 $\geq 3\text{mm}$ 等）触发红色预警并停机。预警信息通过声光、上位机弹窗与APP三重推送，响应时间 $\leq 1\text{s}$ ，自动生成检测报告耗时不超过1min。

四、装置系统集成与性能测试

（一）自动化检修装置系统集成方案

自动化检修装置采用模块化集成思路，机械结构、电子控制、检测模块与辅助系统（供电、通信、安全防护）深度融合，构建一体化检修系统。机械结构承载行走平台、机械臂与检测探头，电子控制系统集成嵌入式控制器、伺服驱动与通信模块，检测模块整合机器视觉、电磁超声与涡流检测设备，辅助系统提供全方位保障。系统采用分层布线与电磁兼容设计，强电与弱电线路间距不低于30cm，模块接口标准化并配备IP67防护等级航空插头，便于拆装维护。集成过程经单元测试、子系统测试与整体测试三级验证，最终系统尺寸 $2000\text{mm} \times 1500\text{mm} \times 1800\text{mm}$ ，总重量不超过800kg，可快速适配多车型地沟作业，无需改造现有设施。

（二）基于列车实际工况的性能测试

选取CR400BF型动车组与地铁B型车作为测试对象，在广州动车段与东莞地铁车辆段开展实测。见表1

表1 列车车底自动化检修装置性能测试结果表

测试项目	参数指标	实测数值
移动平台定位精度	定位误差	$\pm 0.4\text{mm}$
机械臂重复定位精度	定位误差	$\pm 0.02\text{mm}$
直线行驶偏差	每米偏差	$\leq 0.8\text{mm/m}$
转向角度误差	角度偏差	$\leq 0.4^\circ$
机器视觉缺陷识别率	识别准确率	99.6%
电磁超声检测精度	最小识别缺陷	0.1mm
涡流检测灵敏度	最小识别缺陷	0.05mm
6编组车辆检测时长	作业耗时	25min
连续工况工作时长	无故障运行	72h
恶劣环境性能波动	指标变化幅度	$\leq 5\%$

运动性能测试中，移动平台定位精度 $\pm 0.4\text{mm}$ ，机械臂重复定位精度 $\pm 0.02\text{mm}$ ，直线行驶偏差不超过0.8mm/m，转向角度误差不超过 0.4° ；检测精度层面，机器视觉缺陷识别率达99.6%，电磁超声内部缺陷检测精度0.1mm，涡流检测表面缺陷灵敏度0.05mm，螺栓松动（不低于3mm）识别率100%。作业效率方面，单列6编组动车组检测时间由人工180min缩减至25min，效率提升40%，单台装置每小时完成6条轮轴探伤，效率提升30%。环境适应性测试中，装置在 $-10^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ 、湿度30%-90%及多粉尘、电磁干扰环境下连续工作72h无故障，性能指标波动不超过5%。

（三）系统故障优化与可靠性提升

针对测试中发现的机械振动、通信延迟、缺陷误报等问题开展优化改进：机械振动通过提升减震弹簧刚度（20N/mm提升至30N/mm）、加装关节阻尼器，使振动加速度从1.2g降至0.5g，幅度减小58%；通信延迟采用分包传输与优先级调度方案，延迟从5ms降至2ms，丢包率控制在0.005%；缺陷误报通过优化深度学习模型、引入光线自适应校正算法，误报率从0.8%降至0.2%。系统采用核心模块双机热备（切换时间不超过100ms）与500h周期维护策略，优化后连续无故障工作时间（MTBF）不低于8000h，故障修复时间（MTTR）不超过30min，满足高可靠性使用要求^[4]。

五、结语

本文针对列车车底检修痛点，系统研究自动化检修装置关键技术，通过机械结构轻量化抗干扰设计、电子控制系统智能化开发、多模态检测技术融合及系统优化，实现高精度、高效率、高可靠检修。实测表明装置性能优于传统人工检修，适配复杂工况。该研究突破核心技术瓶颈，为运维装备智能化提供参考，后续可进一步提升多车型适配性与算法泛化能力。

参考文献

- [1] 岳刚, 杨海军, 刘真, 吕昕, 郭浩, 王凯. 基于高精度测试与改进视觉检测的司控器自动化诊断系统[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(9): 1-919.
- [2] 刘高坤, 顾小山. 基于滑模PID控制算法的受电弓静态力测量装置研究[J]. 铁道机车车辆, 2025, 45(4): 111-117.
- [3] 李修岭, 赖远桥, 孔令荣. 货运列车闸瓦RFID电子标签及其应用[J]. 机械工程师, 2024(11): 122-126.
- [4] 巫红波, 邱伟明, 王静, 朱林森. 城轨车辆用多股道智能巡检机器人检测系统[J]. 机车电传动, 2022(1): 45-52.