 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v3i9.11784

Research on Intelligent Fault Repair Technology for Key Components in Urban Rail Transit Vehicles

Boxun Liu

CRRC Dalian Electric Traction Research and Development Center Co., Ltd., Dalian, Liaoning, 116000, China

Abstract

Urban rail transit vehicles operate under prolonged conditions of frequent start-stop cycles, full-load operation, and complex route environments. The condition of their critical components directly impacts train operational safety, transportation efficiency, and passenger experience. Traditional maintenance approaches primarily rely on scheduled repairs, manual inspections, and post-failure interventions, which meet basic maintenance requirements but exhibit delays in fault early warning, hazard identification, and resource allocation. With advancements in sensor monitoring, data analysis, artificial intelligence, and digital maintenance platforms, vehicle fault diagnosis and repair have evolved from empirical methods to state-aware monitoring, intelligent diagnostics, and precision maintenance. Based on the failure characteristics of key components, this paper analyzes the value of intelligent maintenance technologies and explores pathways for data acquisition, fault diagnosis, maintenance decision-making, and management optimization, thereby providing insights for enhancing vehicle operation and maintenance quality.

Keywords

urban rail transit; key vehicle components; fault diagnosis and repair; intelligent technologies; condition-based maintenance

城市轨道交通车辆关键部件故障检修智能化技术研究

刘博逊

中车大连电力牵引研发中心有限公司，中国 · 辽宁 大连 116000

摘　要

城市轨道交通车辆长时间处于高频次启停、满载运行、复杂线路环境之中，其关键部件的状态对于列车运行安全、运输效率、乘客体验有着直接的关联。传统的检修方式主要是依靠计划修、人工巡检、事后处理，虽然能够满足基本的维护要求，然而在故障预警、隐患识别、资源配置等方面存在着滞后性。伴随传感监测、数据分析、人工智能、数字化检修平台的发展，车辆故障检修逐渐从经验判断朝着状态感知、智能诊断、精准维护转变。本文依据关键部件的故障特点，来分析智能化检修技术的价值，探讨数据采集、故障诊断、检修决策、管理优化的路径，从而为提高车辆运维质量提供参考。

关键词

城市轨道交通；车辆关键部件；故障检修；智能化技术；状态维护

1 引言

城市轨道交通身为大中城市公共交通模式里相当重要的一部分，有着客流密集、运行间隔时间短、安全方面要求高等特性。要是车辆设备出现了故障，便会致使列车晚点、进行清客、实施救援、运营秩序受到干扰，还有可能引发比较严重的安全风险。转向架、牵引系统、制动系统、车门系统、受流装置、车载控制设备，这些是车辆运行过程中的关键部件，同时也是故障检修管理的重点关注对象。面对车辆规模不断扩大、检修任务逐渐加重的情况，仅仅依靠人工经验已经没办法适应精细化运维的需求了。对关键部件故障检修智能化技术展开研究，能够提高隐患发现的能力，优化检修资源的配置，促使城市轨道交通车辆维护模式得以升级。

【作者简介】刘博逊（1989–），男，中国吉林公主岭人，硕士，高级工程师。

2 城市轨道交通车辆关键部件故障特征

2.1 关键部件运行负荷高

城市轨道交通车辆每日需承担大量的载客任务，其在运行的时候经常会加速、制动、开关门、受流，关键部件长期处于重复载荷、振动冲击的状态中。转向架要承受车体重量、线路不平顺状况、曲线通过力，轮对、轴箱、弹簧、减振器容易出现磨耗、松动、裂纹、性能衰减等情况。牵引电机、齿轮箱、逆变装置在启停过程中要承受电热应力与机械冲击，要是散热、润滑或者绝缘状态出现异常，故障便会逐渐积累。制动系统频繁参与速度控制，闸片磨耗、空气管路泄漏、电子控制异常都有可能影响制动稳定性。关键部件运行负荷很高，这就决定了检修工作不能仅仅停留在到期更换还有外观检查方面，而是要关注部件性能的变化趋势。

2.2 故障表现具有隐蔽性

车辆关键部件出现故障时，通常会经历一个从轻到重、从局部向系统扩散的过程。不少隐患在早期并不会直接致使列车停运，而是体现为温度稍微升高、振动幅值有变化、噪声出现异常、动作时间变长或者报警频次增多。车门系统故障在初期或许仅仅是开关门阻力变大、门控信号偶尔丢失，要是没有及时处理，有可能演变为夹人保护出现异常或者无法关闭。牵引系统里存在绝缘老化、接插件松动、传感器漂移等问题，短期内可能会被复位操作遮盖。制动系统的微泄漏、阀件卡滞、压力建立延迟，也不容易凭借常规巡检准确判断。故障的隐蔽性要求检修技术拥有连续监测、异常识别的能力，不能等故障变得明显后才进行被动处置。

2.3 故障后果具有联动影响

城市轨道交通车辆作为一种复杂装备，是由机械系统、电气系统、空气制动系统、网络控制系统、信息通信系统等共同构成的。当中关键部件一旦出现故障，往往就会对其他系统带来连锁影响。转向架要是出现异常振动情况，那么就可能会对车体平稳性产生影响，进而还会加速轮轨磨耗，牵引系统要是出现故障，就可能造成动力不足的状况，甚至会使得列车降级运行，严重时还可能出现清客退出服务的情况，制动系统状态要是出现异常，会直接关联到列车停车精度、安全防护方面，车门系统要是出现故障，那么就容易对站停时间、运营秩序产生影响。有部分故障虽说只是发生在单车单部件上，然而在高密度运营的条件下，会迅速传导演变成线路运行间隔拉大、列车晚点、客流拥堵等问题。所以，对于关键部件的检修，要从单个故障点处理的方式转变成系统性风险控制，并且要重视故障之间的关联关系、运营影响评估。

3 关键部件故障检修智能化技术基础

3.1 多源状态数据采集技术

智能化检修得以进行的前提在于能够准确获取车辆运行状态数据。就城市轨道交通车辆而言，可以借助温度传感器、振动传感器、电流电压采集装置、压力传感器、位移传感器、声学检测装置、车载网络系统，针对关键部件运行状态实施实时或者周期性的采集工作。转向架方面能够着重采集轴箱温度、轮对振动、构架应力、齿轮箱温度，牵引系统可以采集电机电流、逆变器温度、绝缘状态、故障代码，制动系统能够采集制动缸压力、管路压力、动作响应时间、闸片磨耗量，车门系统能够采集开闭时间、电机电流、门位置反馈、防夹动作信号。多源数据能够从不同角度展现部件状态，为故障识别、健康评估奠定基础。

3.2 智能诊断与异常识别技术

故障诊断在智能化检修里占据着核心地位。传统的诊断方式主要依靠故障代码、检修人员的经验，当面对间歇性故障、复合故障还有早期隐患时，很容易出现判断上的偏差。智能诊断技术能够借助机器学习、知识图谱、专家规则、模式识别、数据融合等方法，对历史故障、运行参数、检修记录展开综合分析。要是转向架出现振动异常的情况，那么就可以利用频谱分析去识别轮对不圆、轴承损伤、齿轮啮合异常，要是碰到牵引系统问题，能够结合电流波形、温升曲线、报警记录来判断模块老化或者散热不良，要是车门系统出现状况，可以依据开关门时间、驱动电流、故障复位次数来识别机构卡滞、控制异常。智能诊断的价值就在于能够发现那些人工很难及时捕捉到的弱信号，进而提高故障定位的准确性。

3.3 检修决策与数字化平台技术

智能化检修需要发现故障，并且要形成能够执行的维修策略。数字化检修平台能够把车辆履历、运行里程、故障记录、检测数据、备件更换、作业工单、人员安排都集中进行管理，达成检修流程的可视化与闭环化。平台依据故障严重程度、部件寿命、列车运用计划、备件库存，自动生成检修建议，辅助管理人员确定临修、均衡修、专项修或者计划修的安排。针对同类故障高发的部件，系统会进行趋势统计，提示设计缺陷、批次质量亦或是检修工艺方面的问题。数字化平台还能够支持移动终端作业，检修人员在现场就可以查看标准工艺、上传图片、填写数据、反馈结果，减少纸质记录滞后、信息断层的情况。

4 关键部件智能化检修应用路径

4.1 转向架与走行部智能检修

转向架、走行部乃是车辆能够安全运行的根基所在，其检修的重点涵盖了轮对、轴承、齿轮箱、构架、空气弹簧、减振器、牵引拉杆等一系列部件。智能化检修借助轨旁检测系统、车载振动监测装置、库内自动化检测设备，能够对轮径的变化情况、踏面是否出现擦伤、轴承的温度上升状况、齿轮箱有无异常振动、构架是否存在裂纹风险展开识别工作。针对轮对踏面出现的缺陷问题，可以综合运用图像识别、激光测量技术来判定剥离、擦伤、多边形磨耗的程度，针对轴承故障而言，能够依据温度变化趋势、振动特征提前发出预警信号，以此避免发展成为热轴或者卡滞事故。在检修进程当中，应当把检测结果与人工复核相结合，针对异常部件建立起跟踪档案，确定好复测周期、处置方式，从而让走行部的维护工作从定期拆检逐渐转变为状态评估。

4.2 牵引制动系统智能检修

牵引系统跟制动系统对于列车的动力性能、安全制动能力起着直接的决定作用。牵引系统智能检修的时候需要关注牵引电机、逆变器、接触器、冷却系统、高压电缆的状态，借助电流波形、温升数据、绝缘检测、故障代码关联分析，来判断部件的老化趋势。制动系统检修时重点要分析制动压力建立时间、缓解时间、闸片磨耗、空气泄漏、制动控制单元的状态。智能化技术能够对制动响应曲线进行比对，从而

发现压力波动、阀件动作迟滞、管路密封异常。针对牵引制动系统的偶发报警，不适合简单地复位放行，而应该借助数据追溯来判断是不是存在重复出现的隐患。通过牵引与制动数据联合分析，能够更精确地评估列车运行性能，降低临时故障发生的概率。

4.3 车门与车载控制系统智能检修

在城市轨道交通运营里，车门系统出现故障是比较常见的状况，这会对站停效率、乘客安全造成直接影响。智能化检修能够采集门机电流、开关门时间、门位反馈、防夹动作还有故障复位记录，以此来判断门机构是否磨损、导轨是否被污染、限位是否出现异常、控制模块是否有故障。要是车门的动作时间慢慢变长，那就需要及时安排对其进行清洁润滑、部件调整或者电机检查，以此防止小缺陷变成运营故障。车载控制系统的检修要留意列车网络通信、控制单元、传感器、软件的状态。借助日志分析、故障代码关联，能够找出通信丢包、节点异常、控制逻辑冲突等问题。车门和控制系统的检修要注重软件数据与机械状态的同步分析，防止只是单纯地更换模块却忽略了实际的机械原因。

5 智能化检修管理优化措施

5.1 构建状态修与计划修融合机制

城市轨道交通车辆检修既不能完全摒弃计划修制度，也不能长期依靠固定周期维护。比较合理的做法是把状态修和计划修结合起来，依据部件重要程度、故障发生频次、运行里程、健康状况来动态调整检修策略。对于安全等级高且失效后果严重的部件，要进行必要的周期性检查，并且在此基础上增添状态监测，对于故障规律明显且监测数据充足的部件，可以逐步优化检修周期，减少过度拆装。检修管理部门需建立关键部件健康评价模型，把报警次数、趋势变化、维修记录、运营影响都纳入综合评分。根据评分结果来确定检修优先级，有助于提高资源利用效率，减少“该修未修”、“无效维修”同时存在的问题。

5.2 完善数据质量与标准化管理

智能化检修对数据有所依赖，然而数据质量欠佳会直接对诊断准确性产生影响。企业需要统一车辆设备编码、故障分类、检测项目、测点位置、记录格式、检修工单标准，以此来保证不同线路、不同车辆、不同检修班组之间的数据能够进行比对。针对传感器采集的数据，应当定期进行校准、有效性核查工作，避免因传感器漂移、通信中断或者数据缺失而导致误判。人工填写的检修记录要防止出现笼统表述的情况，比如“已处理”“正常”等，而应当明确故障现象、处理措施、更换部件、复测结果。数据标准化并非仅仅是简单的信息录入要求，其更是智能诊断、维修决策的基础工程。只有数据具备真实、完整、连续的特性，智能化技术才能够发挥出稳定的作用。

5.3 提升人员能力与协同水平

智能化技术的应用并非意味着检修人员的作用会降低，相反，它对人员的能力提出了更高的要求。检修人员要明白传感器数据、故障模型、平台提示所蕴含的意义，并且能够把系统诊断结果与现场的实际状况进行核对。企业应当强化机械、电气、网络控制、数据分析等复合型人才的培养，防止智能系统的使用仅仅停留在查看报警、生成报表的方面。车辆检修部门、运营调度部门、设备厂家、信息化团队之间需要建立协同机制，针对重复性故障、疑难故障、批量隐患展开联合分析。要是出现智能诊断结果与现场判断不一致的情形，就要及时对模型规则和数据来源进行复盘，持续修正诊断逻辑。只有技术、人员、管理协同起来，才能够促使智能化检修真正得以落地。

6 结语

城市轨道交通车辆关键部件故障检修的智能化，属于提高车辆运维质量、运营安全水平的关键方向。借助多源状态感知、智能诊断分析、数字化检修平台、闭环管理机制，能够提前察觉到转向架、牵引制动、车门、车载控制系统里的潜在隐患，进而降低突发故障对运营秩序造成的影响。在实际运用的时候，应当防止片面注重技术堆叠，而是要依据关键部件故障机理、现场检修需求来挑选合适的技术。未来，伴随数据积累、算法优化、检修标准完善，城市轨道交通车辆维护会朝着预测性、精准化与协同化方向进一步发展，为安全、高效、稳定运营给予更为可靠的技术支撑。

参考文献

[1] 邢湘利.城市轨道交通车辆制动系统故障检修[J].中外企业家,2018,(33):140.

[2] 余晴,邹艳.城市轨道交通车辆制动系统故障检修探析[J].数字通信世界,2018,(8):272-273.

[3] 柴晴泰.城市轨道交通车辆轮对组装与故障检修[J].甘肃科技,2018,34(16):41-43+40.

[4] 单晓涛.城市轨道交通车辆车门故障分析及检修策略优化[J].中国现代教育装备,2019,(19):97-100+103.

[5] 丁华.城市轨道交通车辆检修智能化水平评价和检修策略改进研究[D].重庆交通大学,2023.