

城市轨道交通车辆智能运维技术体系构建与应用研究

陈金龙

重庆轨道交通运营有限公司, 重庆 401120

[摘要]我国轨道交通车辆保有量巨大,截至2024年底已达到10300余列,运营里程突破11710.3km,且年均增幅超6%,运维压力持续攀升。在此背景下,如何满足车辆运行安全可靠、维修工作经济高效及维修资源优化配置是当前重要研究课题。车辆运营过程中,受限于车辆自重和载重力以及运行中的冲击和振动等载荷作用,极易使得关键零部件出现不同程度的磨损或疲劳损伤,导致车辆动力学性能下降,进而引发突发性故障甚至运行中断。因此,对车辆进行科学有效的运维,不仅关乎行车安全与乘客体验,更直接决定线路运营效率与全寿命周期成本。故文章以当前传统运维技术的局限性为切入点,并简要阐述轨道车辆智能运维技术要求,以此构建覆盖状态感知、故障诊断以及平台支撑的全链式智能运维技术体系及其应用,期为行业发展提供可落地的实践路径。

[关键词]城市轨道交通;车辆运维;智能运维技术;体系构建与应用

DOI: 10.33142/sca.v9i5.19760

中图分类号: U279.2

文献标识码: A

Research on the Construction and Application of Intelligent Operation and Maintenance Technology System for Urban Rail Transit Vehicles

CHEN Jinlong

Chongqing Rail Transit Operation Co., Ltd., Chongqing, 401120, China

Abstract: The number of rail transit vehicles in China is huge, reaching more than 10,300 by the end of 2024, with an operating mileage exceeding 11,710.3km and an average annual growth rate of over 6%. The pressure of operation and maintenance continues to rise. In this context, how to meet the requirements of safe and reliable vehicle operation, economical and efficient maintenance work, and optimized allocation of maintenance resources is currently an important research topic. During the operation of vehicles, due to the influence of the vehicle's own weight and load capacity, as well as the impact and vibration during operation, it is easy for key components to experience varying degrees of wear or fatigue damage, leading to a decrease in the vehicle's dynamic performance and causing sudden failures or even operational interruptions. Therefore, conducting scientific and effective operation and maintenance of vehicles is not only related to driving safety and passenger experience, but also directly determines the efficiency of line operation and the total life cycle cost. Therefore, the article takes the limitations of traditional operation and maintenance technology as the starting point, and briefly elaborates on the requirements of intelligent operation and maintenance technology for rail vehicles, in order to construct a full chain intelligent operation and maintenance technology system and its application that covers state perception, fault diagnosis, and platform support, in order to provide a practical path for the development of the industry.

Keywords: urban rail transit; vehicle operation and maintenance; intelligent operation and maintenance technology; system construction and application

随着城市化进程的加速,城市轨道交通作为缓解交通拥堵的重要手段,其线网规模和客流量均呈现出快速增长的趋势。数据显示,我国部分城市轨道交通日均客流量已突破1000万人次,列车数量也随之激增,虽可有效提升运能,但车辆高密度、高强度运行亦加剧了设备劣化速率,为车辆运维带来一定难度。就实际情况而言,传统运维模

式主要依赖计划性维修和预防性维修,可在一定程度上保障设备设施的安全性和可靠性,但其高昂的运维成本以及对人力资源的高度依赖已成为制约行业发展的瓶颈,若不及时进行转型升级,势必会加剧资源错配与响应滞后,难以适配突发故障的精准预测与快速处置需求。此外由于运营时段延长等因素,传统模式在适应性和灵活性方面存在

明显不足，容易导致资源浪费或故障漏检等问题，急需构建一套全面覆盖、高效协同的智能运维技术体系，使其成为支撑车辆全寿命周期健康管理的核心引擎。

1 当前传统运维技术的局限性

当前现有的城市轨道交通车辆运维技术体系虽可满足基本运行安全需求，但在应对复杂工况、多源异构数据融合及动态风险评估方面能力薄弱，难以支撑精细化、差异化运维决策^[1]。总结车辆运维现状发现主要在检修人员、修程修制、技术条件等方面存在问题，如图1所示。



图1 传统运维技术的局限性

1.1 人员缺乏专业技能与实时处理能力

相关人员作为车辆运维的主要执行者，其专业技能水平与实时处置能力直接影响运维质量，若缺乏必要的系统化培训与实战演练，轻则导致故障处置效率低下，重则引发次生安全风险，进而影响整条线路的运营秩序与乘客信任度。但就实际情况而言，传统运维模式高度依赖现场技术人员的个人经验与临场判断，形成典型的经验主导型决策路径，难以实现知识沉淀与标准化复用。其中技术人员普遍对于车辆出现的 TCMS 网络故障或软件逻辑异常等问题，缺乏系统的诊断方法论与工具，致使故障定位耗时长、误判率高。且新入职员工虽具备一定的理论知识，但将理论转化为解决实际问题的能力周期漫长，存在显著的空白期。

1.2 运维程序与设备状态变化脱节

传统修程修制以时间周期或运行里程为唯一触发条件，其刚性约束易导致过修或欠修现象频发，无法动态响应设备真实健康状态，这种现象在设备状态劣化速率差异显著的现实下尤为突出。轨道交通车辆的实际运行状态受线路条件及操作习惯等多重动态因素影响，其部件损耗具

有个体差异性与不确定性，单一固定周期难以精准匹配各部件实际退化曲线，致使关键部件可能在未达检修期前突发失效，而低负荷部件却被迫提前拆检，造成人力、物料与停机资源的双重浪费。另外传统技术模式下运维策略难以精准进行资源调配，备件库存基于历史消耗的粗略估计设定，此时可能导致关键备件短缺影响抢修，或非关键件大量积压占用资金，既不符合精益管理理念，也加剧了仓储成本与资金占用压力^[2]。

1.3 技术条件落后于设备更新迭代速度

当前支撑运维的底层技术条件主要集中在架构、感知与决策三个层面，可完成基本的数据采集与简单告警，并进行有限的规则式分析。但面对日益复杂的车辆电子系统与海量异构数据，现有架构扩展性差且难以支撑多源数据的实时融合与深度挖掘，使得形成数据孤岛与分析浅层化困境，无法从整车系统层面进行故障影响链分析和综合健康状态评估^[3]。同时传统监测依赖于车辆自身 TCMS 有限的传感器，其设计初衷是控制与基本保护，而非精细化状态预测。对于走行部或关键部件的微弱退化特征，缺乏高精度、多维度的状态感知能力，难以捕捉早期故障征兆，更无法形成可量化分析的数字化记录，使得故障预测与健康管理体系难以落地，状态评估仍停留在经验判断与事后处置的粗放阶段。

2 轨道车辆智能运维技术要求

2.1 确保全面感知与实时监测

全面感知与实时监测是智能运维体系的基础支撑，其技术要求主要分为构架部署、参数标准处理以及数据融合三方面，①构架部署需采用“固定监测+移动监测+车载嵌入式监测”的混合架构，实现对关键部件全生命周期状态的无盲区覆盖。主要利用部署于车辆段、停车场及关键线路区间的固定监测设备实时捕捉相关车辆运行过程中的异常情况，随后结合巡检机器人与手持终端灵活开展点检与复核。最后集成应用 TCMS 与各子系统控制器实时采集核心参数，并通过边缘计算模块完成本地化预处理与异常初筛^[4]。②参数标准处理必须建立在统一、可追溯、高时效的数据标准体系之上，除常规电压、电流、压力、开关量外，必须涵盖一系列健康状态指示参数。③数据融合则需打破多源异构壁垒，依托时间同步、空间配准与语义对齐技术，实现轨旁监测、车载传感、维修工单及历史故障库的深度关联。车辆智能感知与监测技术体系（如上表1所示）。

2.2 实现智能基础设施建设

轨道交通系统装备及其基础设施体系庞大且技术复

杂，对于智能基础设施建设的研究可从行车系统、车站系统和基础设施等三个方面考虑。其中，行车系统主要有供电系统、信号系统、通信系统等，为列车运行提供动力、控制与信息交互支撑。车站系统聚焦售检票系统、综合监

控系统、环境控制及电梯与扶梯、安全防护设施、隧道通风系统、给排水及消防系统等^[5]。基础设施则以桥梁与隧道、车站建筑、车辆设备维护基地和装备以及轨道线路等为核心载体，轨道交通智能基础设施框架如图 2 所示。

表 1 车辆智能感知与监测技术体系

维度	技术分类	关键参数	性能要求
构架部署	固定式监测	受电弓滑板磨耗、接触网导高与拉出值、轮轨垂直/横向力	高清线阵相机分辨率 ≥ 2048 像素；力传感器精度优于 $\pm 3\%$
	移动式监测	车底/车顶关键部件外观、内部空间状态	机器人缺陷自动识别率 $\geq 95\%$ ；手持终端数据实时同步
	车载嵌入式监测	车辆控制指令、系统状态、关键部件振动温度	振动传感器频率范围 0.5Hz-20kHz；温度传感器精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$
参数标准化处理	牵引系统	电流不平衡度 $< 5\%$ 、振动包络值、特征频率幅值	高频采样率 $\geq 25.6\text{kHz}$ （振动）；实时结温估算误差 $< 5\%$
	车门系统	动作时间偏差 $< 0.1\text{s}$ 、电流曲线匹配度、障碍物触发频率	实时曲线与标准模板比对；异常动作秒级报警
	转向架等	振动有效值/峰值、温度梯度、横向/垂向位移	振温同步采集；三轴振动传感器动态范围 $\geq 100\text{g}$
数据融合与协同	多源数据整合	轨旁图像、车载传感数据、维修记录、历史故障代码	打破数据孤岛，实现同一事件在多源数据中的关联追溯
	边缘-云协同计算	特征数据压缩 30%-50%、本地异常检测延时 $< 1\text{s}$ 、剩余使用寿命（RUL）预测误差 $< 15\%$	大幅减少上传数据量，降低带宽压力，实现毫秒级初判，优化全生命周期管理

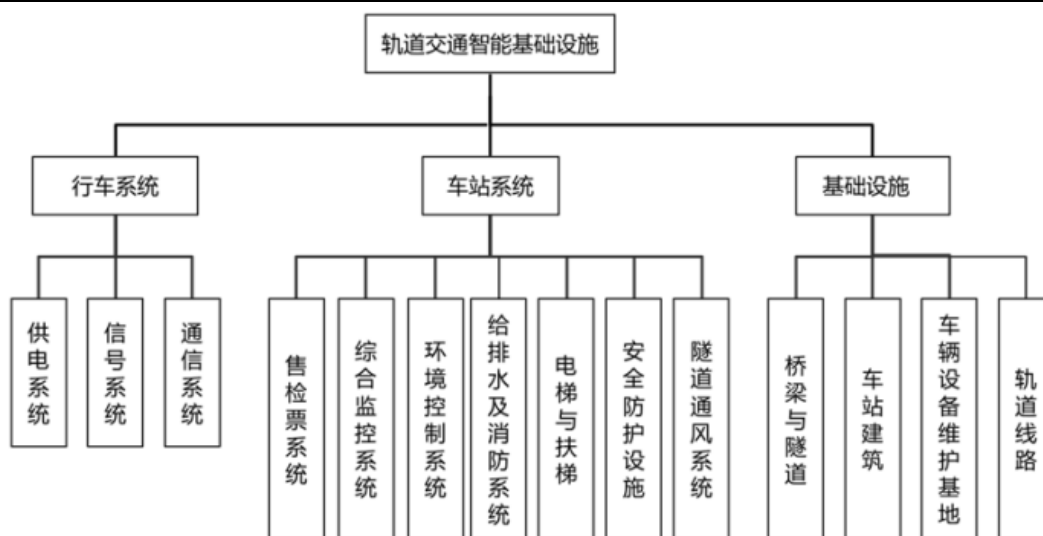


图 2 轨道交通智能基础设施框架图

3 城市轨道交通车辆智能运维技术体系构建与应用

城市轨道交通车辆智能运维技术体系的构建是一个系统性工程，其核心在于通过数据驱动实现运维业务由被动向智能主动转变，以全息感知、智能诊断、平台支持为支撑，深度融合 AI 算法、数字孪生与边缘智能，共同构成从数据采集、价值挖掘到服务支撑的完整技术闭环，实现车辆全生命周期智能化、精细化管理，车辆智能运维技术体系（见图 3）。



图 3 车辆智能运维技术体系图

3.1 状态感知层构建与应用

状态感知层是智能运维体系的基础，其核心任务是实

现对车辆及其关键部件运行状态的全方位、实时、高精度数据采集,构建覆盖车-地-段的立体化感知网络,该层建设的完备性与数据质量直接决定上层智能分析的可行性与准确性,避免数据失真、采样盲区与特征缺失等问题。为此,体系构建需在车辆本体关键机械部件部署专用物理传感器,包括在转向架轴箱轴承、齿轮箱处安装宽频振动加速度传感器和非接触式红外温度传感器,以监测机械磨损与热故障。或在受电弓滑板部署激光测距传感器,监测磨损量。至于传感器的选型与安装位置需基于 FMEA 及动力学仿真确定,以最大化获取故障特征信息。对于处理后的数据需通过车地无线通信网络实时传输至地面数据中心,可采用 5G-U 或 LTE-M 专网保障低时延且高可靠传输,满足关键状态数据端到端传输的要求^[6]。具体应用已覆盖车辆日常巡检、故障预警与健康评估三大场景,通过多源异构数据融合分析,实现轴承早期微裂纹识别、受电弓异常磨损预警、轮对踏面擦伤识别,健康评估模型基本覆盖典型部件退化模式。

3.2 智能诊断层构建与应用

智能诊断层的核心在于将状态感知层采集的多维时序数据转化为可解释、可决策的故障诊断结论,并支撑维修策略动态优化,属于知识驱动与数据驱动深度融合的智能决策中枢。该层主要依托混合模型或多模态算法架构,将物理机理模型与深度学习特征提取能力有机结合,构建具备故障可解释性与泛化鲁棒性的诊断引擎^[7]。例如在牵引系统绝缘劣化识别中,融合电机温度场仿真模型与 LSTM 时序异常检测模块,精准捕捉绝缘电阻衰减趋势与局部放电脉冲特征耦合关系,实现劣化阶段识别。在制动系统气压异常诊断中,引入图神经网络建模管路拓扑结构,结合气压传感器时序数据与阀门动作逻辑图谱,精准定位微泄漏点与堵塞节点,定位精度达管路段级。同时联动健康评估层退化趋势预测结果,动态生成监测-限速-停运三级干预策略,当轮对踏面擦伤深度达到预测值时自动触发限速指令,并同步推送至车载 HMI 与调度中心。当预测深度突破阈值,系统立即报警,提示后台技术人员及时处理。

3.3 平台支持层构建

平台支撑层是体系的循环系统与骨架,负责所有数据、应用与流程的协同,承担模型训练、服务编排、资源调度与安全管控等核心职能,为有效完成平台支撑层的构建,可结合实际情况与现有基础设施,部署“云-边-端”协同的工业互联网平台架构,以此实现模型轻量化部署与低时延推理。端与边缘作为实时响应的第一道防线,负责现场数据的实时采集、缓存与轻量级边缘计算,并将关键特征

实时上传至边缘节点,供边缘节点进行局部模型推理与初步诊断。数据中台作为数据治理与服务的核心枢纽,主要对全域数据进行接入、清洗、治理、建模与管理,形成统一的数据资产中心,一方面为上层应用提供标准化、可复用的数据服务接口,另一方面通过数据追踪与质量监控机制,保障健康评估与智能诊断所依赖的时序数据完整性与时效性^[8]。应用层则基于数据中台的能力,快速开发并部署各类智能应用,如状态监控大屏、预测性维护工单系统、备件需求预测系统、决策支持仪表盘等,服务于不同角色的用户。

4 结语

综上所述,随着城市化进程加速与轨道交通网络日益复杂,传统以计划维修和人工经验为主的运维模式,在效率、成本及安全性方面已难以为继。智能运维作为以数据驱动、人工智能为核心的新型运维范式,成为行业转型升级的必然方向。未来车辆智能运维系统应深度融合信息技术与车辆运行数据、边缘计算及数字孪生技术,实现状态实时感知、故障精准预测、决策智能优化与作业自动闭环,使城市交通车辆得到更为安全且可靠的运行保障,在更宏观的层面上实现车-线-网-环境的协同优化,最终为乘客提供更安全、准点、舒适的出行服务。

[参考文献]

- [1]李明超.城市轨道交通车辆智能运维技术体系构建与应用研究[J].装备维修技术,2025(06):52-54.
- [2]林兆鑫.基于自动化技术的城市轨道交通智能运维实践[J].数字技术与应用,2025,43(11):238-240.
- [3]王久山,吴玉松,梁超.基于数据机理模型的轨道车辆智能运维系统研究与设计[J].轨道交通装备与技术,2025,33(06):1-6.
- [4]陈龙.常州地铁全自动线路车辆智能运维体系探索[J].科技创新与应用,2025,15(22):79-82.
- [5]王先磊.城市轨道交通通信智能运维系统体系构建关键技术研究[J].城市轨道交通研究,2025,28(07):217-221.
- [6]张建华.光热成像技术在城市轨道交通车辆智能运维中的应用研究[J].城市轨道交通研究,2025,28(01):233-236.
- [7]刘勇.轨道交通车辆智能运维技术研究[J].模具制造,2024,24(08):32-34.
- [8]王磊,贺俊,位凯乐,等.大数据智能运维管理在轨道交通行业的应用[J].电视技术,2023,47(07):221-228.

作者简介:陈金龙,男,(1985.3-),西南交通大学;电气工程及其自动化,重庆轨道交通运营有限公司,车间副主任,高级工程师。