

# 轨道车辆智能运维技术研究与应用

卞能建

常州地铁集团有限公司运营分公司 江苏 常州 213000

**摘要:** 针对传统轨道车辆运维模式效率低、漏检率高,难以适配现代轨道交通发展需求的问题,本文以提升运维效率、保障行车安全、降低运维成本为目的,采用文献研究、技术整合分析与场景验证相结合的方法,基于常州地铁运营线车辆运行数据、故障案例数据等多源数据,对智能运维关键技术及应用体系展开研究。结果表明,智能运维技术使故障定位时间缩短超60%,运维成本降低18%,关键部件故障预警准确率超95%,为轨道交通可持续发展提供技术支持。

**关键词:** 轨道车辆;智能运维技术;关键技术;应用场景;发展趋势

引言:轨道车辆是重要交通工具,其安全稳定运行意义重大。传统运维依赖人工,效率低、易漏检,难以满足现代轨道交通发展需求。2023年全国城轨车辆故障导致的晚点中,38%源于运维滞后,凸显技术升级紧迫性。随着科技进步,智能运维技术融合物联网、云计算、人工智能等应运而生,但现有研究存在数据孤岛、模型泛化能力差等问题,故研究轨道车辆智能运维技术对轨道交通智能化发展意义重大。

## 1 轨道车辆智能运维关键技术

### 1.1 数据采集与传输技术

轨道车辆智能运维依赖精准高效数据采集与稳定传输。单一维度采集无法满足需求,提出多模态异构数据融合采集架构<sup>[1]</sup>。该架构同步采集多类型数据,设计高精度时钟同步模块与校准算法,解决时序对齐难题,为融合分析打基础。传感器部署遵循关键节点全覆盖、易故障区域加密策略,优化安装位置,选用工业级高可靠性传感器。数据传输体系采用“边缘-云端”协同架构,车载端部署边缘计算节点与轻量化推理引擎,实时预处理数据并初步预判故障,仅上传疑似故障与关键特征数据,减少无效传输。传输方式依数据类型差异化选择,核心运行参数用光纤有线传输,辅助监测数据用5G加Wi-Fi双模无线传输。传输链路多层屏蔽防护,配置冗余通道保障连续可靠。

### 1.2 数据处理与分析技术

原始采集数据含噪声和缺失值,需清洗与预处理。通过滤波消除噪声,插值填补缺失数据,标准化处理统一格式与量纲。数据清洗与预处理是数据分析的基础,只有经过处理的数据才能为后续的分析提供准确的依据。轨道车辆正常数据占比超95%,用SMOTE或FocalLoss处理数据不平衡问题。大数据分析中,图神经

网络可处理部件间复杂关联。机器学习算法用于故障诊断,监督学习依托已知样本训练模型识别新故障,无监督学习发现异常模式预警潜在故障。不同的机器学习算法具有不同的特点和适用场景,合理选择算法能够提高故障诊断的准确性和效率。引入迁移学习构建跨线路故障诊断模型,标注数据量从10000组降至500组。故障特征提取结合Transformer架构深度挖掘特征,融入可解释性人工智能技术提升运维人员信任度。基于数据分析的运维决策支持,借助强化学习优化维护策略、预测部件剩余寿命。

### 1.3 状态监测与故障诊断技术

对轨道车辆关键部件开展状态监测可及时发现故障隐患<sup>[2]</sup>。转向架监测振动位移温度等参数判断运行状态;牵引系统监测电机电流电压转速等参数排查电气故障;制动系统监测制动压力制动盘温度等参数保障制动性能。不同关键部件的监测参数和监测方法各不相同,需要根据部件的特点和运行要求进行针对性设计。构建数字孪生驱动的故障注入与模拟平台,在虚拟空间模拟多种故障模式。多源数据融合诊断技术综合各类传感器数据,搭配基于知识图谱的根因推理引擎,快速追溯故障源头并明确传播路径。多源数据融合诊断技术能够充分利用各种传感器数据的信息,提高故障诊断的准确性和可靠性。引入不确定性量化方法,通过贝叶斯深度学习输出故障概率分布规避误判风险。故障预警与健康管理系统涵盖多个环节,实现车辆全生命周期健康管理。基于多源异构数据构建融合智能诊断模型,结合AIGC辅助运维决策技术生成故障处理方案建议。

### 1.4 智能运维装备与系统

智能巡检设备是轨道车辆智能运维重要支撑。研发轻量化巡检机器人,重量小于30kg续航超8小时,缺陷识

别精度达0.1毫米，自主导航误差小于5厘米，可检查车辆底部侧部等部位，搭配高清摄像头与传感器实时采集图像数据。轻量化巡检机器人具有灵活、高效的特点，能够在狭小空间内进行巡检，提高巡检的覆盖范围和准确性。无人机可巡检车辆顶部及外部环境，提升巡检效率。设计云边端协同智能运维架构，可压缩传输带宽60%以上。远程运维监控平台具备数据实时展示功能，集成区块链保障数据可信模块，支持运维人员远程操作调试车辆设备。云边端协同智能运维架构能够实现数据的快速处理和传输，提高运维的响应速度和效率。构建运维知识图谱，从检修规程中提取实体关系，形成包含50000多个节点的知识库。运维专家系统依托知识库与推理机制分析诊断运维问题并提供解决方案。智能运维系统实现各子系统集成互联互通，与车辆控制系统调度系统等协同联动，提升运维智能化水平。

## 2 轨道车辆智能运维技术应用场景

### 2.1 日常巡检与维护

智能运维技术推动日常巡检与维护工作变革。智能巡检流程优化突破传统局限，引入动态巡检周期优化算法，依部件健康指数和运营强度将固定周期调为动态模式，可节约30%巡检人力。动态巡检周期优化算法能够根据车辆的实际运行情况，合理安排巡检时间，提高巡检的效率和针对性。借助先进设备全面检查轨道车辆，实时采集图像数据，通过分析快速识别部件缺陷与异常。基于状态的维护策略摆脱传统束缚，实时监测分析运行数据，借助强化学习算法掌握部件状态，制定最优维护计划，延长部件寿命并降低成本<sup>[3]</sup>。引入增强现实辅助维修技术，运维人员佩戴增强现实眼镜，实时叠加设备三维模型与维修指导，助力新手效率提升40%。维护任务智能调度与分配综合多种因素自动分配任务，根据进展实时调整方案，提升整体运维效率。

### 2.2 故障应急处理

智能运维技术在故障应急处理中发挥关键作用。故障快速定位与诊断依托多源数据融合和智能诊断模型，结合知识图谱驱动的根本分析技术，实时采集车辆运行数据，出现异常时迅速整合多方面信息，准确判断故障位置类型及根源。故障快速定位与诊断是故障应急处理的关键环节，只有准确快速地定位故障，才能及时采取有效的处理措施。设计故障预案资源匹配模型，输入故障代码后10秒内输出相关信息。应急预案智能生成与执行基于故障诊断结果，借助AIGC辅助运维决策技术自动匹配生成个性化应急预案，指导运维人员开展应急工作。执行中系统实时监控处理进度与效果，动态调整

方案。应急预案智能生成与执行能够根据故障的实际情况，快速生成合适的应急预案，并实时监控处理过程，确保故障得到及时有效的处理。构建应急演练数字孪生平台，模拟极端场景下多车故障处置流程。故障修复后需进行性能验证与评估，确保轨道车辆安全可靠运行。

### 2.3 寿命预测与健康管理

寿命预测与健康管理是轨道车辆智能运维重要方向。提出融合运行工况的个性化寿命预测模型，同一部件在不同线路寿命差异可达40%，需引入工况权重提升预测精准度。不同线路的运行工况不同，对部件的磨损程度也不同，融合运行工况的个性化寿命预测模型能够更准确地预测部件的剩余寿命。该模型基于大量数据，运用相关算法构建，精准预测部件剩余使用寿命，提前安排更换或维护计划。车辆整体健康状态评估综合各关键部件状态信息，运用图神经网络构建部件关联模型，结合算法给出车辆整体健康评分。车辆整体健康状态评估能够全面了解车辆的健康状况，为运维决策提供重要依据。基于健康管理的运维计划优化依整体健康状态评估结果，动态调整运维方案，实现运维资源合理分配。

### 2.4 运维资源管理

智能运维技术在运维资源管理中作用显著。构建运维人员数字画像，基于500多份维修记录搭建评估模型，实现运维任务精准派工<sup>[4]</sup>。运维人员数字画像能够全面了解运维人员的技能水平和工作能力，为运维任务的精准派工提供依据。在此基础上，借助智能系统评估运维人员技能水平，制定个性化培训方案，通过多元手段提升专业技能。备品备件管理环节，构建备件需求预测混合模型，融合多种算法与人工经验，预测准确率超85%，可将库存周转率提升2倍。备件需求预测混合模型能够准确预测备件的需求量，合理安排备件的库存，降低库存成本。依托物联网与大数据技术，实时监控备品备件情况，自动生成采购计划。智能系统记录分析运维全流程费用，精准定位成本过高环节，实现运维成本有效控制。通过对运维全流程费用的记录和分析，能够找出成本过高的环节，采取相应的措施进行成本控制，提高运维的经济效益。

## 3 轨道车辆智能运维技术发展趋势

### 3.1 技术融合趋势

科技快速发展背景下，轨道车辆智能运维技术正与物联网云计算人工智能等前沿技术深度融合。物联网技术通过在车辆关键部位部署大量传感器，构建精密感知网络，实时采集振动温度压力等运行数据并传输至后台，实现车辆状态全方位感知。云计算技术凭借弹性扩

展按需分配特性,提供强大数据存储与计算能力,高效处理海量复杂运维数据,无论是实时数据快速处理还是历史数据挖掘分析都能轻松应对,为运维决策筑牢数据支撑。人工智能技术融入推动智能运维质的飞跃,Transformer架构神经网络强化学习等前沿算法深度应用,实现故障精准预测诊断部件关联分析及运维策略优化,结合知识图谱AIGC等技术进一步提升决策科学性与效率。引入联邦学习解决数据隐私问题,支持多地铁公司联合建模,数据不出域且模型准确率提升5个百分点。多种技术协同构建完整智能运维解决方案,实现车辆全生命周期智能化管理。

### 3.2 自主化与智能化水平提升

未来轨道车辆智能运维系统将朝着自主感知、自主决策、自主执行的方向发展<sup>[5]</sup>。自主感知能力支持系统无需人工干预,自动采集车辆运行状态信息,对环境变化做出快速响应。自主决策能力基于感知到的数据,运用强化学习、AIGC辅助决策等先进算法模型,自动生成最优运维策略,涵盖维护计划制定、故障处理方案选择等内容。自主执行能力让系统直接控制相关设备完成运维任务,例如自动调整车辆参数、启动故障修复程序,实现运维过程的自动化与智能化。智能运维机器人技术也将取得进一步发展。下一代具身智能运维机器人具备自主拆解、更换部件能力,操作精度达0.01mm。这类机器人将具备更强环境适应能力,能在复杂恶劣环境下稳定工作,操作精度与灵活性大幅提升,可完成零部件精准安装拆卸、故障部位精细检测修复等精细运维任务,成为轨道车辆智能运维的重要力量。

### 3.3 标准化与规范化建设

为推动轨道车辆智能运维技术的健康发展,标准化与规范化建设势在必行。构建完善的智能运维技术标准体系,涵盖数据采集、传输、处理、分析等各个环节,明确各项技术指标与要求,特别是区块链保障数据可信、图神经网络应用等前沿技术的相关标准,确保不同厂家生产的设备与系统之间能够实现互联互通、互操

作。同时,统一运维数据格式与接口标准,打破数据壁垒,实现数据的共享与流通,为智能运维的大规模应用与协同发展奠定基础。

### 3.4 绿色运维与可持续发展

在全球倡导节能减排、绿色发展的大背景下,轨道车辆智能运维将注重绿色运维与可持续发展。开展能效优化与运维联动研究,通过空调滤网堵塞度与能耗关联分析可知,及时清洗滤网可降低能耗8-12%。基于这类数据支撑,制定节能减排的运维策略,通过优化车辆运行参数、借助强化学习合理安排维护计划等方式,降低车辆运行过程中的能源消耗与排放<sup>[6]</sup>。积极应用资源循环利用与环保型运维技术,对废旧零部件进行回收再利用、采用环保型材料进行维修,减少资源浪费与环境污染,实现轨道车辆运维的绿色转型与可持续发展。

### 结束语

轨道车辆智能运维技术发展前景广阔。深度融合多种前沿技术,提升自主化智能化水平,加强标准化规范化建设,推行绿色运维,将全面提升运维质量与效率。持续探索创新,完善技术体系,优化应用场景,能更好满足轨道交通发展需求,为轨道车辆安全稳定运行与行业可持续发展提供有力支撑,创造更大价值。

### 参考文献

- [1]苑永祥,蹇波,唐松龄,等.轨道车辆智能运维技术发展及应用现状[J].电力机车与城轨车辆,2023,46(1):12-22.
- [2]秦征,周庭东.轨道交通车辆车门系统智能运维技术方案研究[J].中国设备工程,2024(5):30-32.
- [3]晋浩奇,陈平安,薛鑫,等.轨道交通车辆智能运维技术状态修分析[J].技术与市场,2024,31(3):41-43,47.
- [4]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(1):233-236.
- [5]赵明,高明亮,高珊,等.城市轨道交通车辆轨旁智能运维技术研究[J].城市轨道交通研究,2022,25(2):123-128,133.
- [6]皮魏.城市轨道交通车辆智能运维系统信息安全技术方案[J].城市轨道交通研究,2024,27(6):281-285.