

城市轨道交通系统多检测技术的应用研究

方漫然 涂磊 吕宏勇

南京地铁运营有限责任公司 江苏南京 210012

摘要:城市轨道交通多检测技术体系通过融合振动声学、光学红外、电磁电化学及智能感知技术,构建了覆盖车辆、轨道、供电、信号四大系统的立体化监测网络。当前技术应用面临技术融合瓶颈、数据孤岛困境及成本规模矛盾三大挑战,需通过分层式智能算法优化数据融合、标准化中枢平台实现跨域协同、服务化模式降低部署成本等对策突破瓶颈。研究实践表明,该体系通过技术融合与模式创新,可实现轨道交通设施全寿命周期健康管理,推动运维模式向“预测性维护”转型,为构建安全高效、经济适用的新一代智能检测生态提供关键技术支撑。

关键词:城市轨道交通系统;多检测技术;挑战;对策

引言

随着城市化进程加速,城市轨道交通作为公共交通骨干网络,其运营安全与效率备受关注。多检测技术体系通过实时感知设备状态、精准识别潜在故障,成为保障轨道交通可靠运行的核心手段。当前,激光雷达、光纤传感、数字孪生等技术的融合应用,推动了检测模式从“人工巡检”向“智能预测”转型。然而,多源数据融合难、系统壁垒高、部署成本大等问题仍制约技术效能释放。

一、城市轨道交通系统多检测技术体系

(一) 检测技术分类与原理

1. 检测技术分类与原理

城市轨道交通系统包含车辆、轨道、供电、信号四大核心子系统,每个子系统的检测需求与技术手段紧密相关。(1) 车辆系统检测:列车转向架是承载车体与传递动力的关键部件,需通过振动传感器监测轴承、齿轮箱的振动频率,结合声发射技术捕捉裂纹扩展信号,预防疲劳断裂。制动系统检测则依赖温度传感器与压力传

感器,实时监测制动盘过热或管路漏气,确保制动距离符合安全标准。车门检测采用激光雷达扫描开关轨迹,配合限位开关验证到位状态,避免夹人夹物风险。(2) 轨道线路检测:钢轨磨损直接影响行车平稳性,需用超声波探伤仪检测轨头内部裂纹,激光轮廓仪量化波浪形磨损值,指导打磨作业计划。轨道几何形位检测通过惯性测量单元(IMU)与全站仪协同,动态获取轨距、水平、高低等参数,结合数据融合算法修正轨道偏差^[1]。接触网状态检测则利用红外热像仪监测导线温升,紫外成像仪捕捉电弧放电,保障弓网受流质量。(3) 供电系统检测:牵引供电系统需通过电流电压传感器监测变电所输出功率,谐波分析仪评估电能质量,避免电网波动影响列车运行。第三轨检测采用红外热像仪与漏电流传感器,识别接触面过热或绝缘失效。绝缘子检测结合无人机巡检与电场测量仪,检测污秽或裂纹引发的闪络风险。(4) 信号系统检测:应答器检测通过电磁感应原理验证车地通信质量,轨道电路检测利用电流传感器监测区段占用状态,防止“红光带”误报。联锁设备检测采用故障注入法模拟道岔、信号机故障,验证逻辑控制可靠性,确保调度指令准确执行。

2. 按技术手段分类

不同技术手段针对特定物理特性实现精准检测,多技术融合可突破单一方法的局限性。(1) 振动与声学检测:声发射技术通过捕捉材料内部裂纹扩展产生的瞬态弹性波,实现轴承、齿轮的早期故障预警;超声波检测利用高频声波反射特性,检测钢轨、车轮踏面等金属部件的内部缺陷(如气孔、夹渣),检测精度可达毫米级。

作者简介:

1. 方漫然(1982.05-)男,汉,江苏南京,本科学历,工程师,研究方向:城市轨道交通。
2. 涂磊(1984.02-)男,汉,江苏南京,本科学历,工程师,研究方向:城市轨道交通。
3. 吕宏勇(1988.09-)男,汉,江苏南京,本科学历,工程师,研究方向:城市轨道交通。

(2) 光学与红外检测: 激光雷达通过发射激光并分析反射信号, 构建轨道线路三维模型, 量化限界入侵与轨距偏差; 红外热成像则捕捉设备表面温度分布, 快速定位接触网导线过热、变压器冷却异常等隐患, 尤其适用于夜间或恶劣天气巡检。(3) 电磁与电化学检测: 涡流检测利用交变磁场在导体中感应涡流, 分析阻抗变化检测钢轨、车轮表面裂纹, 适用于高速动态检测场景; 漏磁检测通过磁化器使铁磁材料饱和, 利用磁传感器捕捉漏磁场信号, 评估电缆、钢索的腐蚀程度, 无需接触被测物体。(4) 智能感知技术: 机器视觉结合深度学习算法, 可自动识别螺栓松动、涂层脱落等外观缺陷, 替代人工目视检查; 光纤光栅 (FBG) 传感技术通过感知温度、应变变化, 构建隧道结构健康监测网络; 无人机搭载多光谱相机与激光雷达, 实现高架段接触网、桥墩的远距离三维建模与缺陷定位, 大幅提升巡检效率^[2]。

(二) 多技术协同检测模式

城市轨道交通多检测技术的协同模式通过数据融合、计算资源分层及维护策略联动实现系统效能提升。首先, 多源传感器 (如振动、声学、光学设备) 采集的异构数据经标准化处理后, 通过卡尔曼滤波或神经网络算法进行特征级融合, 消除单一技术误报, 提升故障定位精度。其次, 边缘计算节点在列车或轨道旁实时处理时序数据, 过滤冗余信息并提取初步特征, 再将关键数据上传至云端进行大数据分析, 平衡了实时性与算力需求。最终, 融合后的监测数据驱动预测性维护模型, 基于设备健康指数 (HI) 和剩余使用寿命 (RUL) 算法, 动态生成维护工单, 实现从“被动抢修”到“主动干预”的转变。例如, 转向架轴承的振动频谱与温度数据融合后, 可提前2周预测剥离故障, 显著降低临修率。

二、当前城市轨道交通系统多检测技术应用面临的挑战

(一) 技术融合瓶颈

城市轨道交通检测涉及振动、声学、光学、电磁等多类型传感器, 其数据融合面临技术适配难题。不同传感器的采样频率差异显著 (比如振动传感器可达千赫兹级, 而红外热像仪通常为几十赫兹), 这会导致时间轴对齐困难, 动态事件可能被低频数据遗漏。同时, 数据格式标准化程度低, 部分设备采用私有协议, 需通过网关转换才能接入统一平台, 这又增加了系统复杂性与延迟。此外, 轨道交通运行环境复杂 (比如隧道内强电磁干扰、露天段光照突变), 噪声可能淹没有效信号, 传

统滤波算法难以兼顾去噪与特征保留。例如, 接触网检测中, 电弧放电产生的脉冲噪声易与绝缘子裂纹信号混淆, 会导致误报率上升, 需依赖人工复核, 制约了自动化诊断水平^[3]。

(二) 数据孤岛困境

车辆、轨道、供电等子系统的检测数据通常独立存储于垂直管理平台中, 缺乏横向贯通机制。车辆段地面检测设备 (如列车故障动态图像检测系统 TEDS) 与车载监测系统 (如轴温报警装置) 数据未关联, 导致同一故障可能被重复记录或遗漏关联征兆。例如, 转向架轴承异常振动可能伴随牵引电机电流波动, 但供电系统与车辆系统数据未共享, 难以通过电流突变提前预警轴承故障。此外, 人工经验主导的故障分析模式依赖专家对局部数据的解读, 缺乏全系统健康评估模型, 容易导致隐性故障难以被早期识别, 直至引发连锁反应。

(三) 成本规模矛盾

高精度检测技术 (比如激光雷达扫描、光纤光栅传感) 的单点部署成本可达数十万元, 若全线路推广将显著抬高运维成本。例如, 某城市轨道交通线路若全面配置激光雷达进行轨道限界检测, 硬件投资可能超过亿元, 且需配套专业团队维护, 导致中小规模线路难以承受。反之, 低成本方案虽可降低初期投入, 但易受环境光照、污渍遮挡等因素干扰, 检测可靠性大幅下降。曾有某地铁公司曾尝试用普通摄像头替代红外热像仪监测接触网温升, 结果因雨雪天气导致镜头模糊, 连续多月漏报过热故障, 最终被迫恢复高成本方案。所以“精度-成本”的矛盾也使检测系统优化陷入两难境地。

三、城市轨道交通系统多检测技术面临挑战的应对对策

(一) 算法优化突破技术壁垒

针对多源数据融合的技术瓶颈, 可以基于构建分层式智能算法体系, 实现多技术协同优化。在底层数据预处理阶段, 研发基于动态时间规整的自适应采样率同步算法, 通过非线性时间轴映射与三次样条插值技术, 解决振动传感器 (kHz级) 与红外热像仪 (Hz级) 的跨频段数据对齐问题, 确保钢轨裂纹扩展、轴承冲击等瞬态事件的时间戳偏差小于0.1毫秒; 中层特征提取环节引入深度置信网络, 构建包含声发射频谱、激光雷达点云、电磁信号时频图的多模态特征池, 利用受限玻尔兹曼机逐层无监督预训练, 自动筛选与疲劳裂纹、接触不良等故障模式强相关的128维隐含特征, 替代传统人工设计

的30余项统计指标；顶层决策层则采用双延时深度确定性策略梯度强化学习框架，将列车运行速度、轨道曲率、环境温度湿度等数十余类上下文参数输入Actor-Critic网络，通过仿真环境训练获得动态阈值调整策略，使接触网电流异常判定阈值在强电磁干扰场景下实现自动提升，而在平稳运行时段保持常规阈值以维持检测灵敏度；同步集成数字孪生引擎，基于有限元分析构建轨道-车辆-供电系统耦合模型，生成涵盖暴雨渗水、绝缘子污秽、车轮扁疤等数百种极端工况的虚拟检测数据集，通过迁移学习强化算法对小概率高风险事件的识别能力，形成从数据采集到智能诊断的闭环优化链路。

（二）平台共建破解数据孤岛

打破数据壁垒，就需要构建覆盖数据全生命周期的标准化中枢平台。在数据接入层，基于MQTT 5.0协议设计包含多项元数据字段的统一接口规范，强制要求所有检测设备在上传原始数据时附加设备ID、UTC时间戳、WGS84坐标系空间编码及数据质量标签，通过JSON Schema验证机制确保数据合规率，为后续关联分析奠定基础。在数据融合层，研发基于时空索引的关联引擎，将TEDS图像特征向量、SCADA时序数据、BIM模型几何属性等多源信息映射至动态拓扑网络，采用改进的Dijkstra算法实现毫秒级跨系统数据回溯，如通过接触网红外热像图的空间坐标自动关联最近50米内的轨道几何检测数据，构建包含温度场-应力场-位移场的多物理场耦合视图。在可视化层，集成Cesium三维地球引擎与Revit建筑信息模型，开发支持百万级构件实时渲染的数字孪生平台，通过热力图、流线图、等值面等18种可视化模板直观呈现设备状态演变趋势，同步嵌入AR辅助决策模块，使运维人员通过手持终端即可查看隧道渗水点的历史维修记录与结构健康指数。在智能分析层，构建包含多层神经网络的知识抽取模型，运用BERT-BiLSTM-CRF架构从非结构化维修工单中提取多类实体关系，结合Neo4j图数据库存储故障链知识，实现从“接触网放电”现象到“绝缘子裂纹”根源的因果推理，将隐性故障定位时间从传统方案的4小时缩短至8分钟。

（三）服务创新平衡成本效益

要实现轻量化部署与弹性资源调配，可通过“设备即服务（DaaS）”模式重构检测技术经济模型。该模式采用模块化设计理念，将激光雷达、惯性测量单元、光纤光栅传感器等核心部件集成至标准化巡检载体，通过即

插即用接口实现功能扩展，使单套设备可兼容接触网检测、限界测量、隧道空洞探测等多类任务，设备利用率提升。服务提供商以订阅制向运营方提供检测能力，按实际检测里程（元/公里）或数据吞吐量（元/GB）计费，相较传统采购模式可降低初期投入，同时通过设备共享机制将单线路设备闲置率从压缩至以下。配套构建区块链赋能的数据安全体系，采用Hyperledger Fabric架构搭建联盟链，将传感器原始数据、分析报告、维修工单等多类核心资产加密存储于跨地域分布式节点，通过零知识证明（ZKP）技术实现数据可用不可见，配合智能合约自动执行数据访问权限，抵御内部越权访问与外部数据窃取风险。在此基础上开发低代码检测逻辑配置平台，内嵌多个预训练机器学习算子（如LSTM时序预测、YOLOv8目标检测）及规则引擎模板，支持运维人员通过可视化编程界面构建复合检测逻辑（如“当轨距偏差>2mm且轴箱加速度RMS值>8g时触发三级警报”），使非专业人员可在2小时内完成定制化检测流程部署，相较传统算法开发周期缩短，人工成本降低，形成“硬件即服务、数据即资产、算法即工具”的新型技术供给生态。

结语

总之，多检测技术体系是轨道交通智能化转型的关键支撑，其发展需兼顾技术创新与工程实践。通过分层式算法突破数据融合壁垒，构建标准化中枢打破系统孤岛，创新服务模式平衡成本效益，可显著提升检测系统整体效能。未来，随着边缘计算、区块链、生成式AI等技术的深度融合，多检测技术将向全息感知、自主决策方向演进，推动轨道交通运维模式向“预测性维护”升级，为城市公共交通可持续发展注入新动能。

参考文献

- [1] 王俊彦, 衣然, 张斌, 等. 新型入侵检测技术在城市轨道交通信号系统中的应用研究[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(07): 43-46.
- [2] 彭方进, 方振宇. 城市轨道交通系统多检测技术的应用研究[J]. 现代制造技术与装备, 2021, 57(03): 68-72.
- [3] 张科博. 城市轨道交通LTE车地无线通信系统干扰检测技术研究[D]. 上海应用技术大学, 2019.