

新型智能通信传感技术在轨道交通机电设备中的应用与发展

刘恩南

(中铁建电气化局集团南方工程有限公司)

【摘要】新型智能通信传感技术通过集成多模态传感器、边缘计算能力与无线通信协议，实现了对轨道交通系统中动力照明系统、通风环控系统、电扶梯系统等关键机电设备的实时状态感知与智能分析。技术发展呈现出传感器微型化、通信协议标准化、数据处理智能化的显著特征，在设备故障预测准确率等方面展现出巨大应用价值；智能传感节点通过5G-R专网等新型通信技术实现数据高速传输，结合机器学习算法构建设备健康评估模型，为轨道交通智能化运维提供了技术支撑。

【关键词】智能传感技术；轨道交通；机电设备；状态监测；无线通信

中图分类号：U239.5

DOI：10.13655/j.cnki.ibci.2025.S2.120

Application and Development of New Intelligent Communication Sensing Technology in Rail Transit Electromechanical Equipment

LIU En-nan

(China Railway Construction Electrification Bureau Group Southern Engineering Co., Ltd.)

【Abstract】The new-type intelligent communication and sensing technology, by integrating multi-modal sensors, edge computing capabilities and wireless communication protocols, enables real-time status perception and intelligent analysis of key electromechanical equipment in rail transit systems, such as power supply and lighting systems, ventilation and environmental control systems, as well as escalator and elevator systems. The technological development exhibits distinct characteristics of sensor miniaturization, communication protocol standardization and data processing intelligence, and demonstrates great application value in aspects like equipment fault prediction accuracy. Intelligent sensing nodes achieve high-speed data transmission through new communication technologies such as 5G-R private networks, and combine machine learning algorithms to construct equipment health assessment models, providing technical support for the intelligent operation and maintenance of rail transit.

【Keywords】intelligent sensing technology; rail transit; electromechanical equipment; condition monitoring; wireless communication

1 引言

传统的轨道交通机电设备维护模式主要依靠人工巡检与定期保养,存在故障发现滞后及资源配置不合理等问题。智能通信传感技术融合了先进传感器技术与无线通信协议,能实现对机电设备运行参数的实时采集、传输处理及分析,为管理人员的维护与操作提供支持,推动轨道交通智能化发展。

2 智能通信传感技术架构与核心组件

2.1 多模态传感器集成技术

多模态传感器集成技术通过整合振动与电流等多类型传感器,实现机电设备运行状态的全面感知,MEMS 振动传感器可检测微小振动、预警机械故障,数字化温度传感器监测热参数以防过热事故,霍尔效应电流传感器实时分析电流波形,精准定位设备

异常^[1]。图1为智能传感器节点架构图。

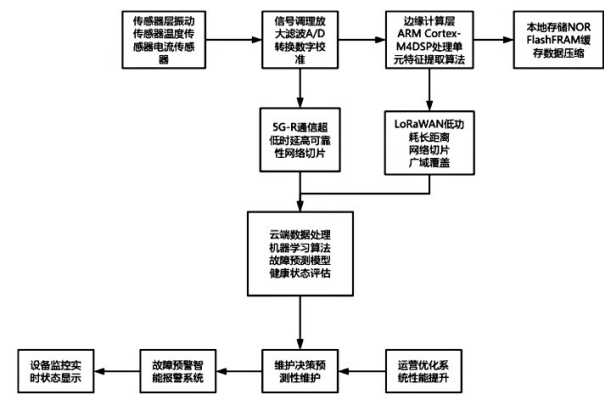


图1 智能传感器节点架构图

2.2 边缘计算与数据处理能力

智能传感节点内置ARM Cortex-M4处理器,具备32位运算能力与浮点运算单元,能够在设备端完

成数据预处理与特征提取等计算任务,减轻中央管理系统的计算负担^[2]。边缘计算架构减少了数据传输量,使管理人员能够更快速地获取设备状态信息^[3]。处理器集成的DSP功能单元专门用于信号滤波与频谱分析等数字信号处理任务,本地存储模块采用NOR Flash与FRAM混合架构,有效减少存储空间占用与网络传输开销。

3 轨道交通机电设备监测应用

3.1 动力照明系统智能监测技术

动力照明系统通过智能传感器实时监测电压等关键参数,为设备管理提供精准依据,非接触式红外温度传感器监测LED灯具散热情况,配电箱环境监测集成多种传感器,异常时自动预警以提高管理主动性,保障乘客安全与运营质量。关键监测参数与阈值为故障预警提供量化标准,全面提升系统管理效能^[4]。照明系统关键监测参数与阈值设置见表1。

表1 照明系统关键监测参数与阈值设置

监测参数	正常范围	预警 阈值	报警 阈值	传感器类型
配电箱温度/℃	20~50	55	65	温湿度 传感器
LED灯具温度/℃	25~60	70	85	红外温度 传感器
回路电流/A	10~80	90	100	霍尔电流 传感器
电压偏差/%	±5	±8	±10	电压传感器
功率因数	0.85~0.95	0.80	0.75	功率分析仪

3.2 通风环控系统状态监测技术

通风环控系统负责维持地铁站内空气质量与温度的稳定调节,智能监测技术通过部署风速传感器、三轴加速度传感器等设备,实现对通风机运行状态、空调机组参数等关键指标的实时监测。其中,通风机振动监测采用三轴加速度传感器,其测量范围为±16g,分辨率达0.001g,可准确反映风机轴承磨损状态与叶轮平衡偏差情况^[5]。空调机组制冷剂压力监测通过实时采集高低压侧压力变化,辅助计算制冷系统效率,公式如下:

$$P_{eff} = \frac{Q_c}{W_{comp}} \times \frac{P_{high} - P_{low}}{P_{high}} \quad (1)$$

式(1)中: P_{eff} 为制冷系统效率, Q_c 为空调机组制冷量(kW), W_{comp} 为压缩机功耗(kW), P_{high} 为高压侧压力(MPa), P_{low} 为低压侧压力(MPa)。管理人员可

通过实时压差数据判断风道堵塞情况与过滤器更换需求。

3.3 电扶梯系统智能监测技术

智能通信传感技术通过部署振动等高精度传感器实时监测电扶梯系统关键运行参数,如驱动电机状态及链条张力等,结合数据分析与阈值设定快速定位故障并提供预警,确保设备安全可靠运行,有效保障乘客安全与运营效率。电扶梯系统关键监测参数与阈值设置见表2。

表2 电扶梯系统关键监测参数与阈值设置

监测参数	正常范围	预警阈值	报警阈值	传感器类型
电机振动加速度/(m/s ²)	0~2.5	3.5	5.0	加速度 传感器
驱动电机温度/℃	30~65	75	85	温度传感器
链条张力偏差/%	±5	±8	±12	应变传感器
运行电流/A	15~45	55	65	电流传感器
制动器间隙/mm	1.0~2.0	2.5	3.0	位移传感器

4 监测数据基于的无线通信网络与数据传输技术

4.1 5G-R 专网通信技术

5G-R 专用网络专门为轨道交通行业设计,具备超低时延与高可靠性的技术特点,网络架构采用核心网下沉及边缘计算部署的方式,实现了机电设备数据的就近处理与快速响应,提升管理人员对设备状态的实时掌控能力。5G-R支持网络切片技术,能够为不同业务场景提供定制化的网络服务,机电设备监测业务采用uRLLC切片,保障数据传输的实时性与可靠性,小基站部署覆盖200m~500m,低至5ms时延,且99.999%传输可靠性,确保机电设备高效监测与通信保障。

4.2 LoRaWAN 低功耗广域网络

LoRaWAN为低功耗与长距离传感器数据传输提供支持,采用星型拓扑,单网关覆盖10km且部署灵活高效。表3所示的不同通信技术性能对比。

表3 不同通信技术性能对比

技术类型	传输距离	功耗 水平	数据速率	时延	连接数
5G-R	0.5km~2km	高	1Gbps	<5ms	>1000
LoRaWAN	5km~15km	极低	0.3kbps~50kbps	1s~10s	>10000
NB-IoT	1km~10km	低	200kbps	1.6s~10s	>50000

续表

技术类型	传输距离	功耗水平	数据速率	时延	连接数
Wi-Fi 6	50m~100m	中	9.6Gbps	<1ms	256

数据传输协议采用 MQTT-SN, 支持 QoS 等级设置, 确保重要数据的可靠传输。

5 智能数据分析与故障预测

5.1 机器学习算法应用

采用多种机器学习算法, 通过历史数据训练与实时数据推理实现设备健康状态评估, 为管理人员提供科学的维护决策支持。其中, 支持向量机 (SVM) 算法用于设备异常检测, 通过构建高维特征空间中的最优分离超平面, 实现正常状态与异常状态的有效区分。设备故障概率预测则基于贝叶斯网络模型, 该模型可量化多个监测参数之间的相关性与因果关系, 公式为:

$$P(\text{故障}|X_1, X_2, \dots, X_n) = \frac{P(X_1, X_2, \dots, X_n|\text{故障}) \times P(\text{故障})}{P(X_1, X_2, \dots, X_n)}$$

(2)

式(2)中: $P(\text{故障}|X_1, X_2, \dots, X_n)$ 为给定监测参数条件下的故障概率, $P(\text{故障})$ 为故障先验概率, $P(X_1, X_2, \dots, X_n|\text{故障})$ 为故障条件下参数联合概率, $P(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 为各监测参数的边缘联合概率。

5.2 数字孪生技术在机电系统管理中的集成应用

采用数字孪生技术构建机电设备虚拟模型, 实现物理设备与数字模型的实时映射与交互, 提供直观的可视化界面, 为机电设备智能化管理提供全面解决方案(见图2)。

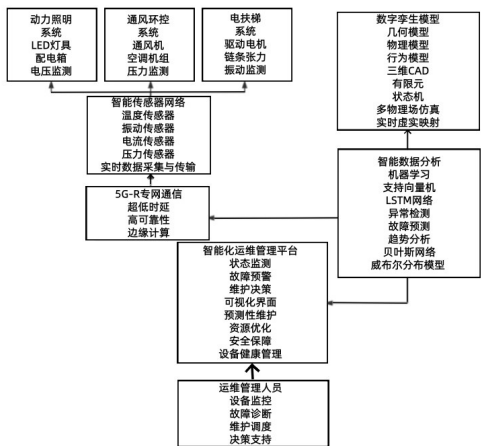


图2 数字孪生系统架构图

行为模型结合状态机与事件驱动机制, 描述设

备的运行逻辑与控制策略, 模型参数通过实时传感器数据动态校准, 以匹配设备实际运行状态。设备性能退化过程采用威布尔分布模型量化描述, 其概率密度函数为:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta} \right]$$

(3)

式(3)中: β 为形状参数, η 为尺度参数, t 为运行时间, 模型参数 β 与 η 通过极大似然估计方法, 结合设备历史退化数据确定。

6 结语

综上, 新型智能通信传感技术在轨道交通机电设备中的应用, 使运维从被动维护向主动预防转变, 从经验驱动向数据驱动转变, 能够显著提升设备故障预警能力, 降低维护成本并优化资源配置, 为轨道交通运营提供了强有力的技术保障。

参考文献

[1] 方玄, 周祝兵, 刘派, 等. 基于光纤传感技术的多参量智能缆索及其应用[J]. 现代交通与冶金材料, 2025, 5 (3): 101-108.

[2] 王义震. 基于智能传感技术的机电设备故障诊断[J]. 上海轻工业, 2025 (3): 121-123.

[3] 李康蕾, 王瑞琳, 刘艺涵, 等. 基于传感技术的智能罐诊系统设计[J]. 软件, 2025, 46 (4): 34-37.

[4] 岳小波. 绿色建筑施工智能传感技术应用分析[J]. 建设科技, 2025 (7): 42-45.

[5] 王博, 陈纲, 张红旺, 等. 基于气体传感技术的矿山智能监测采集及效果验证[J]. 粘接, 2025, 52 (2): 129-132.