

智能传感器在地铁监控设备检修中的应用研究

韦安达

(南宁轨道交通运营有限公司, 广西 南宁 530022)

摘要 地铁BAS系统传感器通信故障处置长期面临流程冗长、信息割裂与现场不可达等挑战。本文提出基于智能传感器的边缘自监测与事件驱动总线技术,构建集状态监测、故障定位、可视化交互与人机协同于一体的检修辅助平台。实际应用表明,该方法将传感器通信故障平均排查时间由28 min压缩至7 min,远程处置占比提升至62%,显著提高了检修效率与协同质量。方案具备良好的可复制性,旨在为地铁设备智能化运维提供参考。

关键词 地铁BAS; 智能传感器; RS485; 边缘计算; 人机协同

中图分类号: U231.9+2; TP212

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.19.010

0 引言

地铁BAS系统涉及大量RS485总线传感器,其通信链路中断等故障处置依赖人工逐点排查,效率低、响应慢,且受限于风道、夹层等高风险区域的可达性^[1]。现有维保模式呈现被动响应、数据分散、系统割裂等特点,难以适应精细化运维需求^[2]。随着智能传感与边缘计算技术发展,传感器端侧自监测与平台侧事件驱动机制的融合,为实现主动预警、精准定位与远程处置提供了可能^[3]。本文围绕智能传感器在地铁监控设备检修中的应用展开研究,探索提升检修效率与协同能力的技术路径。

1 地铁监控设备检修现状与智能传感器应用需求分析

1.1 传统地铁监控设备检修的痛点与挑战

在地铁BAS系统维保中,传感器通信故障处置流程冗长、信息割裂。以RS485总线挂接的风道温湿度与压差传感器为例,链路中断时,检修需依次完成报警确认、点表核对、区段隔离及节点复位替换,一条支路超20个节点时人工逐点排查超28 min,且需现场电话核对监控画面。风道与电缆夹层在运营时段存在高噪声、强风流风险,人员无法进入,应急响应被迫延后至夜间天窗期,故障扩散与能耗异常难以压制^[4]。由此衍生出被动响应、人找数据与系统独立三类根源性约束:告警触发后方处置,历史日志分散,且BAS与FAS、屏蔽门系统缺乏联动,源头定位与影响评估持续滞后。

1.2 智能传感器在地铁检修中的应用需求分析

鉴于BAS维保中链路中断滞后与现场不可达等约束,智能传感器的应用需求应从三个方面重新界定^[5]。

首先,从被动响应转向主动诊断,传感器需集成边缘计算与自监测能力,对负载、心跳、链路衰减及供电波动进行本地解析,生成健康度与预警,将故障定位至支路与节点级。其次,从人找数据转向数据找人,应建立统一时间基准与资产标识,通过事件驱动总线将异常信息、历史波形及工况推送至班组终端与调度工作站,并自动标注BAS、FAS与屏蔽门系统间的因果联动。最后,从系统独立转向人机协同,传感器需支持远程升级、参数下发与安全接入,平台侧提供可视化与工单编排,将诊断建议、风险分级与应急预案内嵌至流程,同时兼顾高噪声与强风流环境下的低功耗冗余采集。

2 智能传感器在地铁监控设备检修中的关键应用与技术实现

2.1 智能传感器状态监测与故障定位技术实现

因地铁BAS传感器多以RS485总线接入且站点分散,本研究以组态王平台为监测内核研发通信监视软件,构建BAS设备监控辅助平台。软件在项目初始化阶段预置通信参数与设备点表,按支路生成模板化驱动实例,通过带隔离与浪涌抑制的RS485转接器接入风机房与区间风道端子,以串口转以太方式远程读取,在强干扰与长距离场景下稳定轮询与心跳采集。平台将超时比例、重试计数、响应抖动与母线电压摆幅作为链路健康度核心指标,记录供电纹波与终端负载变化。诊断引擎无需逐帧解析底层报文,通过地址段连续丢失等模式自动将故障定位到支路与节点级,标注疑似物理断点与接地回路异常,联动点表完成设备级告警合并。运行时,辅助平台与BAS工作站共享时间

作者简介: 韦安达(1989-),男,本科,助理工程师,研究方向:轨道交通工业自动化控制。

基准与资产标识,通过事件驱动总线推送异常关联等信息到班组终端,将远程参数下发与驱动模板更新纳入权限控制。结合智能传感器边缘自监测能力,节点侧上报负载与链路衰减估计值,平台跨支路对比与刻画趋势,使巡检由人工逐点查询变为数据主动抵达,提高故障锚定与恢复效率。

2.2 检修信息可视化界面优化设计

鉴于 BAS 维保现场存在站内标识与屏显信息不一致、路径指引不清、告警层级割裂等问题,设计界面优化为围绕位置识别、链路拓扑与事件语义的三层可视化体系,将诊断结果以面向任务的方式推送到检修终端。站级总览中,将出入口罗马编号调整为按站厅现勘的 A、B、C、D 标识,配合站台方向箭头及列车头尾方位提示,叠加风机房与区间风道的楼层关系和可通行路径,减少应急奔赴中的逆向行进与重复搜索。因传感器故障常表现为支路级退化与单点间歇缺失,拓扑视图按物理走向绘制 RS485 支路,节点按健康度分级着色,嵌入链路心跳与母线电压摆幅迷你趋势图,地址段连续丢失时自动高亮可疑区段并弹出推荐隔离断点与复位顺序。为实现数据主动抵达,界面引入统一时间轴,串联 BAS、FAS 与屏蔽门的告警,点击事件可调出历史波形等记录,将风险分级与应急预案以卡片形式挂载到设备侧栏,便于值守人员完成远程参数下发与工单编排。由此推出移动端与大屏的一致交互范式,移动端任务清单与导航联动,大屏提供分区放大与跨支路对比,二者共享资产标识与权限模型,降低跨班组协同沟通成本。

2.3 人机协同检修体系构建

鉴于地铁 BAS 维保现场不可达与信息割裂,人机协同检修体系将感知、判断、处置及复盘串成闭环,把三类转型目标嵌入组织流程。体系以智能传感器边缘自监测为前置触发,节点周期上报心跳、链路衰减与供电纹波,平台通过事件驱动总线合并跨支路异常,自动生成带风险分级的处置工单与 SOP 步骤库,值守员在移动终端接收任务卡片并远程初勘。在指令执行场景中,中心侧将参数下发、支路隔离及驱动模板更新编排为可回滚的原子操作流,设双人复核与时窗约束,遇屏蔽门、FAS 联动风险触发跨系统干预清单并评估影响域。站内可视化界面合并呈现拓扑、行进路径及应急预案,驻站检修员在抵达受限区域前完成模拟操作核对,现场仅进行必要插拔与复位,缩短暴露时间。平台将诊断链路、参数变更等记录写入资产级知识库,经版本化管理后在相邻车站复用,班组长通过复盘报

告评估 SOP 适配性并迭代权限模型,确保主动诊断、数据找人与人机协同在日常维保中稳定运行。同时,将设备接入与指令审计纳入统一基线,依靠零信任模型配合细粒度授权,明确远程操作边界并留存可追溯证据。

3 智能传感器应用效果评估与推广价值分析

3.1 应用效果量化分析

围绕 BAS 维保任务链,本研究将故障处置效率、组织投入与协同质量三类指标纳入量化框架,选取 RS485 风道支路与站台风机房典型场景,统计两个运营季度工单与链路日志,构建改造前后对比序列。指标涵盖平均排查时间、远程处置占比等,工序拆分为告警合并、定位与处置三段以降低样本异质性,关键对比见表 1,对照口径为工单级起止时间与统一时钟标定。为避免单一时长指标失真,用下式计算效率提升率衡量端到端处置效率:

$$E = \frac{T_0 - T_1}{T_0} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中, E 表示效率提升率, T_0 为改造前平均排查时间, T_1 为改造后平均排查时间,单位均为 min。改造样本中,传感器通信故障平均排查时间从 28 min 缩至 7 min,效率提升率 75%;结合 230 条任务序列作业时长,统计期累计节约检修工时 326 h,按一线维保人员小时人工成本 70 元计,直接人工成本降低约 23 000 元。

在流程侧指标方面,远程处置占比从 15% 升至 62%,夜间介入次数显著下降,跨系统因果标注覆盖率升至 85%,告警到派发时延从 35 min 缩至 8 min,提高了组织协同可预期性与资源调度弹性。

3.2 技术方案可复制性评估

本研究围绕地铁 BAS 维保组织现实,将可复制性定义为不改造既有控制器和传感器,依靠通用软硬件组合实现跨站点、跨系统快速落地。因站内传感器多采用 RS485 接入、协议以 Modbus RTU 为主,方案选用现有运维笔记本与组态王等通用 SCADA 软件为监测内核,配合带隔离的 RS485 转以太转接器与标准 NTP 时钟,实现零新增专用主站设备部署。针对系统侧异构性,驱动层用点表模板、地址段策略与事件驱动总线解耦,可对接 BAS 风道类负载,延伸至 FAS 消防探测回路与屏蔽门 PSD 联动告警标注,复用统一资产标识与权限模型降低跨系统维护复杂度。复制条件受站级点表准确度、OT 网段与中心侧安全隔离策略、跨厂商 PLC 串口参数与报文变体差异三项基线制约,前两项通过统一命名规范与零信任接入边界加固解决,后者通过模

表 1 智能传感器辅助检修效果对比表

指标	改造前	改造后	变化幅度	统计口径
传感器通信故障平均排查时间 /min	28	7	-75%	RS485 支路超过 20 节点，端到端
告警到派发时延 /min	35	8	-77%	工单系统时间戳
远程处置占比 /%	15	62	+47%	站级远程参数下发与隔离
夜间天窗介入次数 / 次	64	19	-70%	两个运营季度汇总
跨系统因果标注覆盖率 /%	0	85	+85%	BAS 与 FAS 与屏蔽门
累计节约检修工时 /h	0	326	+326	230 条任务序列汇总
直接人工成本节约 / 元	0	23,000	+23,000	按 70 元 /h 估算
首次定位成功率 /%	68	92	+24%	支路级与节点级

板化驱动与远程升级能力化解。由此得出适用于多数存量车站的迁移路径：首先在风机房与区间风道按支路上线心跳与母线电压监视，其次将跨系统因果标注与工单编排纳入统一事件总线，最后把远程参数下发与原子操作流引入班组日常，形成低成本、短周期、可滚动复制的推广模式，见表 2。

表 2 智能传感器方案推广效益预测表

指标	10 站（BAS-RS485 支路）	30 站（BAS+FAS 接入）	60 站（BAS+FAS+PSD 联动）
端侧改造成本 / 元 / 站	1 000	2 000	3 000
预计排查时长压缩率 /%	65%	68%	70%
预计远程处置占比 /%	55%	60%	64%
夜间介入下降率 /%	50%	58%	62%
单季人工成本节约 / 元 / 站	3 000	4 200	5 500
预计投入回收期 / 月	8	7	6

3.3 未来应用拓展方向

鉴于存量线路站点多、负载类型杂的运维现实，未来拓展应从故障后处理转向健康预测与风险量化。多传感器融合是将温湿度、压差等多源数据在统一时钟和资产模型下对齐，在边缘侧完成特征提取与异常刻画，给出退化趋势和剩余寿命估计。适配样本稀缺场景，可在节点侧用轻量自监督学习，以无标签序列学习正常模式，辅以小样本增量学习和知识蒸馏，将跨站可迁移的阈值和特征发布到事件总线。跨站协同引入联邦学习，兼顾数据合规与模型迭代。

4 结束语

本文围绕地铁 BAS 系统传感器通信故障处置痛点，构建了融合边缘自监测、事件驱动总线、可视化交互与人机协同的智能传感器辅助检修平台。实际应用验证了其在提升排查效率、压缩夜间介入次数、降低人工成本等方面的显著成效。方案基于通用软硬件实现，具备良好的可复制性与推广价值。未来将进一步融合

多源感知与健康预测模型，拓展至牵引供电、轨旁设备等领域，推动地铁运维由故障响应向健康管理转型。

参考文献:

[1] 卞能建,吕圣杰,舒康华,等.多视觉传感器融合的地铁列车关键设备故障 360° 视觉检测[J/OL].测控技术,1-8[2026-04-03].https://doi.org/10.19708/j.ckjs.2026.03.301.
[2] 王文刚,尉雪玲,马学涛,等.面向数字化铁路货车检修车间智能监控系统设计研究[J].粘接,2025,52(07):136-139.
[3] 张姗姗,李家平,张明.基于微服务的地铁隧道多源异构传感器自动化监控系统建设与实践[J].城市勘测,2024(03):59-63.
[4] 杨镒成,李孝普,孙康萌,等.地铁车站自动扶梯智能监控系统的设计及应用[J].中国电梯,2021,32(13):12-14.
[5] 高璐瑶,杜淑蓓,刘振翔,等.一种基于 RS485 和 LoRa 技术的混合网络环境监控系统设计[J].通信与信息技术,2021(02):62-65.