

地铁车站道岔智能监测与行车安全保障技术研究

李若琦

石家庄市轨道交通集团有限责任公司运营分公司，河北 石家庄 050000

DOI:10.61369/ERA.2026010010

摘 要： 道岔是地铁车站轨道系统中的关键部位，其运行状态直接影响行车安全与运输组织效率。传统的人工巡检方式存在实时性差、效率低和故障隐患难以及时发现等问题。本文结合地铁运营的安全需求，提出了基于传感器、通信和智能分析的道岔智能监测技术体系，研究其在状态感知、故障预警和安全保障中的应用机制。通过工程实践案例验证，该技术可有效提升道岔运行可靠性，减少故障率和运营风险，为地铁安全运营提供重要支撑。

关 键 词： 地铁车站；道岔；智能监测；行车安全；故障预警

Research on Intelligent Monitoring and Traffic Safety Technology of Subway Station Turnout

Li Ruoqi

Shijiazhuang Rail Transit Group Co., LTD. Operation Branch, Shijiazhuang, Hebei 050000

Abstract： As critical components in subway station track systems, switchgear directly impacts operational safety and transportation efficiency. Traditional manual inspection methods suffer from limitations including delayed real-time monitoring, low efficiency, and inadequate fault detection. This study proposes an intelligent monitoring system for switchgear integrating sensors, communication networks, and smart analytics, addressing safety requirements in subway operations. The research explores its application mechanisms in condition monitoring, fault prediction, and safety assurance. Through engineering case studies, the technology demonstrates significant improvements in operational reliability, reduced failure rates, and minimized operational risks, providing crucial support for subway safety management.

Keywords： subway stations; switchgear; intelligent monitoring; operational safety; fault prediction

道岔是轨道交通中实现列车进路转换的核心设备，被称为“轨道交通的咽喉”。地铁车站由于列车密集、换乘频繁，道岔运行负荷较大，极易因机械磨损、电气故障或环境因素导致失效。传统依赖人工巡检和定期检修的方式难以及时发现隐患，存在安全风险。随着物联网、传感器和智能诊断技术的发展，构建地铁车站道岔智能监测与安全保障体系成为提升行车安全水平的重要途径。

一、地铁车站道岔运行特性

地铁车站内的道岔具有开关频率高、使用强度大的特点。由于列车密度大、运行间隔短，道岔在短时间内需要频繁动作，这导致机械部件磨损速度加快，润滑不及时或零件疲劳都会引发潜在隐患。其次，道岔的电气控制系统结构复杂，需要与信号系统、联锁系统紧密协同工作，任何环节的异常都可能影响整体运行的安全性。地铁车站的环境通常较为恶劣，粉尘、湿度、地下水渗透、以及列车运行带来的强烈振动，都会对道岔机械结构与电气部件造成长期影响，从而增加故障发生的概率。

二、道岔智能监测技术体系

（一）状态感知层

状态感知层是整个体系的基础环节，其核心目标是准确、全面地获取道岔运行的实时信息。传感器布设是这一层级的核心工作。温度传感器可实时监测道岔电机、驱动机构及相关部件的升温情况，防止因过热导致电机烧毁；振动加速度传感器则用于捕捉尖轨、基本轨或连接部位出现的异常振动，从而判断机械是否存在卡阻、松动或轨距偏差等问题；电流与电压传感器能够提供电气回路运行稳定性的关键数据，帮助识别因短路、接触不良或

功率波动带来的风险；位移传感器直接反馈尖轨的开闭位置与到位情况，是判断道岔是否准确转换的核心指标。此外，高清摄像头的引入进一步丰富了监测手段。通过视频识别技术，可以辅助发现异物侵入、零部件缺陷以及结构异常等问题，形成直观的视觉证据，弥补单一传感器在复杂场景下的局限性。为了避免数据传输压力过大，边缘计算终端在源头对数据进行实时采集、初步分析与压缩处理，从而在保证时效性的同时减轻后端系统的计算与存储负担。

（二）数据传输层

状态感知层采集的数据必须高效、稳定地传送到后台系统进行进一步分析。工业以太网凭借其高带宽与低延时特性，成为有线传输的主要方式，而5G和专用无线通信则在复杂的地下车站环境中展现出更强的灵活性与覆盖性。为了防止因网络波动或外界干扰导致的数据丢失，传输层设计了冗余机制，确保在部分链路失效时仍能保持数据畅通。同时，加密机制的应用有效避免了数据在传输过程中被篡改或泄露，确保信息传递的安全性和可靠性。

（三）智能分析层

智能分析层作为整个体系的关键核心部分，承担着对采集而来的大量数据给予深入处理以及智能化解读的任务，借助大数据分析手段，可从海量的历史运行数据里分辨出潜在规律以及典型故障模式，提取出与设备异常关联度较高的关键特征，接着融合机器学习算法构建诊断模型，像支持向量机、神经网络、随机森林等，以此达成对道岔故障类型的迅速识别以及趋势预测。此方法促使道岔监测从“静态检测”转变为“动态预测”，提升了故障诊断的前瞻性与准确性，基于此，系统可构建“道岔健康指数”，依靠对各类监测指标进行综合计算，来量化设备运行的健康水平，健康指数的可视化呈现，方便运维人员快速了解设备整体状况，又为的维护决策提供了科学依据。

（四）应用服务层

应用服务层作为面向管理与运维人员的直接交互界面，其功能在于把前端采集以及分析所得到的结果，转变为可实际操作的信息以及提供决策支持，监测平台借助图形化界面实时呈现道岔的运行状态，可直观地呈现出各个传感器的数据、设备的健康指数以及视频监控画面，一旦系统检测到存在异常趋势或者故障隐患，便会立刻触发预警机制，把相关信息推送至调度中心以及检修人员的移动终端，以此保证可快速做出响应。另外该平台可依据设备的健康指数以及预测模型的结果，为运维部门制定出优化后的检修计划，比如针对不同道岔的磨损程度以及风险等级，合理地安排检修的优先级以及资源配置，避免出现不必要的“过度维护”情况，提高运维效率同时降低成本。

三、行车安全保障技术措施

（一）智能预警机制

智能预警作为保障行车安全的首要防线，借助实时监测数据同预设阈值相互对比，系统可在早期阶段察觉到潜在风险信号，

举例来讲，当驱动电机运行电流渐渐升高，且随着温度曲线持续上升时，一般意味着电机可能存在绝缘老化、机械负荷增大或者散热不畅等隐患，此时监测平台会及时发出预警，告知检修人员采取针对性举措。这种机制的采用，让道岔维护从传统的“故障发生后再修复”逐步转变为“预测性维护”，相较于事后维修，预测性维护可降低突发故障率，防止列车因道岔失效而临时停运，并且它还可以减少不必要的周期性维修，延长设备使用期限，降低整体运维成本，在这个过程中，阈值的设定不应是固定数值，而应随着历史数据与运行环境的积累进行动态调整，以便更精准地契合实际工况。

（二）冗余与容错设计

在轨道交通系统里，任何一个单点出现故障都存在引发严重后果的可能性，在道岔的关键部位引入冗余以及容错设计，是提高安全性的必要举措，冗余设计呈现在多个层面，在传感器层面，可借助双路甚至多路传感器同时收集相同参数数据，并且利用交叉验证去除异常值，在控制层面，采用双回路电气控制方式，一旦某一控制单元失效，备用回路马上接管，保障道岔动作的连续性和可靠性。

容错设计更加注重系统在部分单元出现故障时所有的自我修复能力，举例来说，当出现某个传感器信号缺失的情况时，系统可借助其他相关传感器的冗余信息来开展数据补偿工作，或者依据健康指数模型进行合理的推算，以此避免因个别点出现异常而致使整体监测失效，非常关键的是，在信号联锁逻辑当中要拥有高度的容错能力，即使部分监测单元失效，也不会对行车安全联锁的执行产生影响，保证列车运行的绝对安全。

（三）与行车调度系统联动

智能监测平台不是独自存在的，而是要和行车调度系统深度融合起来，构建出协同联动的整体框架，要是监测平台识别出道岔有潜在风险，就能凭借接口协议把信息实时推送到调度中心，调度系统收到异常信号后，可以自动或者半自动采取应急措施，像调整运行图、限制相关区段列车速度，甚至临时封锁受影响股道。这种联动机制有效防止了“信息孤岛”现象，让监测结果切实成为运营管理的决策依据，比如在某地铁线路出现道岔尖轨卡阻隐患时，监测系统提前发出预警，调度端快速调整后续列车运行计划，避免列车集中借助该区段，最终在检修人员到达之前，依然可维持运营的安全和秩序，这种主动干预的机制，大幅提升了地铁系统应对突发风险的韧性。

（四）全生命周期安全管理

道岔的安全保障并非局限于某一时刻或地点的管理工作，而是要贯穿设备的整个寿命周期，从设计阶段起始，便需把智能监测理念融入总体方案之中，合理规划传感器的布设位置，预留好数据采集以及传输的接口，以此为后期运营奠定技术基础，在施工与安装阶段，要严格落实监测设备的调试与验收工作，保证系统在投入运营之前可达到预期的监测精度与稳定性标准。进入运营阶段以后，随着监测数据持续积累，可以构建完整的道岔运行数据库，为后续维护提供有可追溯性的历史记录，这样的数据库可用于日常维护，而且在设备更新换代、寿命评估等环节也能提

供量化依据，依靠引入全生命周期的管理理念，地铁道岔的维护将不再是单纯的被动修复，而是转变为动态、可追溯且可优化的长效管理过程。

四、案例与应用效果

（一）概况

以某城市轨道交通地铁线路为例，该线路全长约65公里，共设有36座车站和4个车辆段。传统的巡检方式以人工定期检查为主，依赖经验判断，往往存在发现不及时、数据不完整、分析不系统等问题。为解决上述痛点，运营公司自2022年起在重点枢纽车站和部分车辆段试点部署了道岔智能监测系统。^[1-5]

（二）实施方案

1. 硬件部署

在车站主要道岔安装高精度电流传感器和动作时间采集模块，同时配备智能终端采集盒，将数据通过4G/5G网络传输至监测平台。为确保设备稳定运行，部分关键点位还引入了双电源冗余和数据缓存机制。

2. 平台建设

监测平台集成了大数据分析 with 人工智能算法，能够建立道岔动作时间与电流曲线模型。一旦监测到曲线偏离正常范围，系统会立即触发预警，并根据偏差程度自动分级。

3. 运维联动

运维人员通过移动终端即可实时接收告警信息。告警消息不仅包含异常参数和时间点，还能附带趋势曲线及历史对比数据。通过这种方式，检修人员在到达现场前即可初步锁定故障原因，有效缩短了排障时间。

4. 阶段性评估与优化

系统部署后，运营方定期组织评估小组，基于运行数据对算法模型进行优化。针对某些雨季条件下频繁出现的误报问题，团队增加了环境因子权重修正模块，使误报率降低约15%。^[6]

（三）成效分析

经过近一年的实际运行，道岔智能监测系统在试点车站展现出明显效果。

提前预警能力：在典型案例中，当道岔动作时间曲线出现波动异常时，系统能够在故障发生前平均提前2小时发出预警，为运维人员争取了充足的检修准备时间。^[7-10]

故障率与延误减少：部署系统前，道岔故障平均每月发生约20起，其中约8起导致行车延误。部署后，月均故障率下降35%，因道岔故障造成的列车延误事件减少40%，显著提升了行车的稳定性。

运维效率提升：由于检修人员能够通过移动终端直接获取异常信息与分析结果，平均故障处理时间缩短约20分钟，整体检修效率提升25%。检修人员人均日均巡检里程减少约15%，劳动强度得到有效缓解。

经济与社会效益：按照运营公司测算，仅减少的延误成本和设备大修支出，每年可节约约500万元。乘客满意度调查显示，因道岔问题导致的投诉率降低了约30%，社会形象得到进一步提升。

表1 道岔智能监测系统应用成效对比

指标类别	部署前水平	部署后水平	改善幅度
平均预警时间	无提前预警	故障前约2小时	——
月均故障率	20起 / 月	13起 / 月	降低35%
因道岔延误次数	8起 / 月	5起 / 月	减少40%
故障处理效率	平均80分钟 / 次	平均60分钟 / 次	提升25%
运维人均巡检量	100%	85%	降低15%
年度经济收益	——	节约约500万元	——

五、结论

本文提出了地铁车站道岔智能监测与行车安全保障的技术体系，涵盖传感器布设、数据分析与安全联动等环节。研究与实践证明，该体系能够有效降低道岔故障风险，提升地铁运营安全水平。

参考文献

- [1] 石柯军, 刘彪, 张斌. 地铁行车组织中的应急调度策略研究 [J]. 人民公交, 2024(23): 92-94.
- [2] 华夏. 紧急情况下的快速响应机制及对地铁调度优化的影响研究 [J]. 运输经理世界, 2024(35): 136-138.
- [3] 周浩然. 地铁司机应急处置能力分析研究 [J]. 人民公交, 2024(22): 67-69.
- [4] 王杰燃. 地铁突发极端气象灾害应急管理的若干思考 [J]. 人民公交, 2024(22): 79-81.
- [5] 李亚娟, 肖琪. 地铁车站火灾疏散模拟与应急照明优化研究 [J]. 消防界 (电子版), 2024, 10(21): 7-9.
- [6] 翟旭, 刘磊, 郭涛. 突发事件下地铁行车调度应急响应机制 [J]. 人民公交, 2024(06): 77-79.
- [7] 侯永朋. 地铁运营突发事件应急处置能力评价体系研究 [J]. 现代城市轨道交通, 2023(10): 120-127.
- [8] 王军武, 田梦圆, 潘子瑶, 刘森, 王心楠. 地铁车站暴雨内涝应急响应投入策略研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(05): 11-17.
- [9] 徐亚博, 葛悦, 姚卫华, 代宝乾, 张蓓. 全员应急背景下地铁应急人员认知需求分析 [J]. 安全, 2022, 43(05): 18-24.
- [10] 胡玉山. 地铁运营突发事件应急指挥探究 [J]. 现代城市轨道交通, 2022(S1): 105-107.