

# 城市轨道交通信号系统智能运维体系 构建与应用研究\*

于 萌<sup>1</sup> 鲁怀科<sup>2</sup> 梁 喆<sup>2</sup> 范仔超<sup>2</sup> 高 宁<sup>2</sup>

(1. 北京市地铁运营有限公司通信信号分公司, 100082, 北京; 2. 广西交控智维科技发展有限公司, 530025, 南宁)

**摘 要** [目的] 针对城市轨道交通运维发展中面临的四大问题, 以南宁轨道交通 4 号线为实践载体, 旨在构建一套基于数据驱动与智能决策的信号系统智能运维体系, 突破传统运维模式的技术与管理瓶颈, 实现高效、精准、可持续的运维管理。[方法] 通过整合多源异构数据并构建多层架构, 实现了设备状态实时监测与劣化趋势分析, 显著提升数据利用率与故障识别能力; 融合复杂网络理论与设备失效机理分析, 开发覆盖关键设备的故障预测模型, 支持故障自动定位与提前预警。在管理体系上, 通过数字化流程重构、轻资产物资配置及跨专业综合班组建设, 打破传统数据孤岛与专业壁垒, 形成“人机料法协同”的运维生态。[结果及结论] 在南宁轨道交通 4 号线工程化应用中, 智能运维体系推动运维模式实现三大转型: 从被动响应转向主动预防, 从经验驱动转向数据驱动, 从分散管理转向协同优化。实践表明, 智能运维体系通过智能化技术赋能与流程再造, 显著提升了运维效率与设备可靠性, 为行业提供了可复制的解决方案。未来研究将进一步探索人工智能和机器自学习等前沿技术在智能运维系统上的应用, 推动轨道交通运维体系向更智能、更可持续发展的方向发展。

**关键词** 城市轨道交通; 信号系统; 智能运维; 多源数据融合

**中图分类号** U231.7

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.20253060

## Construction and Application of Intelligent O&M System for Urban Rail Transit Signaling Systems

YU Meng<sup>1</sup>, LU Huaikē<sup>2</sup>, LIANG Zhē<sup>2</sup>, FAN Zichao<sup>2</sup>, GAO Ning<sup>2</sup>

(1. Communication and Signal Branch of Beijing Subway Operation Co., Ltd., 100082, Beijing, China; 2. Guangxi Zhiwei Technology Development Co., Ltd., 530025, Nanning, China)

**Abstract** [Objective] In response to four major challenges faced in the development of urban rail transit O&M (operation

and maintenance), Nanning Rail Transit Line 4 is taken as the practice platform to construct an intelligent O&M system for signaling system driven by data and intelligent decision-making. The goal is to break through the technical and managerial bottlenecks of traditional O&M models and achieve efficient, precise, and sustainable O&M system. [Method] By integrating multi-source heterogeneous data and building a multi-layer architecture, the system enables real-time equipment status monitoring and degradation trend analysis, significantly improving data utilization and fault identification capabilities. By leveraging complex network theory and equipment failure mechanism analysis, a fault prediction model covering key equipment is developed to support automatic fault localization and early warning. In terms of management, through refactoring digital workflows, allocating light-asset material, and establishing cross-disciplinary integrated teams, the O&M system eliminates traditional data silos and professional barriers, forming an ecosystem encompassing 'personnel-equipment-material method synergy'. [Result & Conclusion] In the engineering application of Nanning Rail Transit Line 4, this intelligent system promotes three major transformations in the O&M model: from passive response to proactive prevention, from experience-driven to data-driven, and from fragmented management to coordinated optimization. Practice has demonstrated that the intelligent O&M system, empowered by intelligent technologies and process re-engineering, significantly enhances O&M efficiency and equipment reliability, offering a replicable solution for the industry. Research in the future will further explore the application of cutting-edge technologies such as artificial intelligence and machine self-learning in intelligent O&M systems, promoting the evolution of rail transit O&M system towards greater intelligence and sustainability.

**Key words** urban rail transit; signaling system; intelligent O&M; multi-source data fusion

\* 广西科技计划项目(桂科 AB22035008, 桂科 AB23075209)

本文以南宁轨道交通4号线为实践载体,针对当前缺失智能运维体系支撑、行业规模快速扩张背景下逐渐暴露出的四大核心问题进行研究:一是线网扩张与客流增长压缩检修窗口,人力依赖型检修易受主观因素影响,且各专业分立建设,形成数据孤岛;资源利用率低,设备数据处理效率滞后;运维时效性与精准度不足。二是故障诊断过度依赖人工经验,新员工技术短板易引发误判,存在运营安全隐患。三是缺乏设备健康度统一评估标准,维护策略滞后于设备状态变化,存在过度修或维修不及时风险。四是跨专业设备管理机制缺失,独立作业易引发连锁影响,无法统筹运维管理体系。研究关键技术点包括:多维多源数据融合与精准计划修优化;基于FMECA(故障模式、影响及危害性分析)与态势研判的故障定位与预测模型;精准运维管理模式创新。通过理论与实践的深度融合,旨在突破传统运维模式的技术与管理瓶颈,为城市轨道交通运维智能化转型提供可复制的解决方案。

## 1 基于多维多源数据融合感知的精准计划修

### 1.1 研究思路与过程

本项目对南宁轨道交通4号线的日常检修等全业务流程进行分析,以可靠性理论为基础,实现了深度和广度的多维多源数据采集、提取、融合和感知分析,并利用决策优化模型,形成了基于多维多源数据融合感知的精准计划修。

1) 全业务流程解构与重构。对信号系统的故障和精准维修全过程、全业务进行多维度拆解分析,将40类设备的8种修程及5 092项检修工作分解为业务识别、数据采集、资源人力分析、验证优化四个阶段。通过建立标准化业务流程模型,识别出传统信号系统监测在数据采集广度和深度的结构性缺陷。

2) 数据融合方法论创新。针对传统信号系统维护中存在的“数据孤岛”与实时性不足的问题,构建了“感知-传输-融合-应用”四层递进架构,首次实现多源异构数据的有机整合:在感知层新增7 700个采集点位,基于Netty数据集群技术搭建分布式流处理框架,通过异步拉取机制实现电源、道岔、计轴和轨道电路设备数据之间的协同感知。

在融合层,创新性提出时变特征多源数据融合算法,通过数据特征的聚合归类,形成针对信号系统设备的各类状态和多种业务类型的结构化数据,

并通过数据特征的标签匹配所有的业务数据。

例如,在南宁轨道交通4号线智能运维系统中,通过该算法对转辙机电流数据、计轴设备电压数据、车地无线通信时延等时变特征进行实时聚类,结合设备历史健康记录生成包含机械磨损、电气老化、通信异常等12类状态标签的结构化数据集,并基于标签与业务工单的自动匹配机制,使设备故障的特征提取时间从分钟级压缩至秒级,实现时变特征数据处理效率提升87%以上。

在决策支撑层,将融合后的数据流与设备全生命周期成本模型深度耦合,运用改进型Pareto多目标优化算法,实现维修决策的动态平衡。智能运维系统以信号设备的维修周期、备件库存阈值作为决策变量,构建包含设备故障率、单次维修成本、维修风险系数的三维目标空间。在决策过程中,自适应权重分配模块通过实时监控设备剩余寿命、环境湿度等参数,动态调整目标函数权重配比,实现决策逻辑的场景自适应。如在广西冬春季节交替、环境湿度超过临界值时,智能运维系统可以给出信号车载设备维修周期压缩天数和备件库存增加件数的具体建议,辅助管理层制定应对特殊天气的专项维保策略。

3) 决策验证体系。建立“实验室仿真—现场试点—模型迭代”的三级验证机制,在实验室模拟不同故障场景327次,在试点现场收集12万多条实时数据,通过A/B测试验证模型验证。该决策验证体系较传统经验决策降低故障误判率42%,减少无效检修工时70%。

### 1.2 与传统监测系统的主要差异

智能运维系统与传统监测系统差异如表1所示。

### 1.3 应用场景

该技术体系在南宁轨道交通4号线智能运维系统工程化应用表明:通过智能运维系统对车载、电源、ATS(列车自动监控)、道岔、信号机、计轴等设备的电压、电流及电气参数进行监测,实现了对设备状态趋势判断,减少了维护人员的工作量(如必须去各个站进行巡视以及需要定期查看各运维终端界面是否异常等工作),替代了巡检;通过监测终端实现了远程监控,设备参数指标等信息能实时在监测终端上显示(如蓄电池的电压/温度等参数);传统方式需要人员现场逐个测量设备的参数,现在通过智能运维系统可直接导出数据结果,替代了现

表 1 智能运维系统与传统监测系统差异

Tab. 1 Differences between intelligent O&amp;M system and traditional monitoring system

维度	传统监测系统	智能运维系统	效果对比
数据维度	单系统 580 维参数	多子系统融合 410 维时变特征	故障识别率提升 16%
决策依据	人工经验 + 事后维修	基于失效概率的预测性维修	无效检修工时减少 70%
系统架构	分散式监测 (LTE (长期演进) 网管、轨旁监测等各自独立)	三层集中架构 (线网-线路-车站)	数据利用率提升 65%
应用场景	故障报警 + 事后分析	状态修/预测修/主动维护	设备寿命延长 15% ~ 20%

场检修,缩短了检修总时长及工作量。因此实现了计划性维修的优化,可替代传统检修工作中的项点为 1 120 项,可延长检修周期的项点为 1 460 项。

## 2 基于 FMECA 和设备态势研判的故障定位和预测

### 2.1 研究思路与过程

信号系统设备的故障容易导致列车晚点或者中断运行,对运营的影响很大,信号系统故障修的效率直接影响列车准点率和连续运行能力。信号系统设备日常运行在多种不同的工况下,工作强度、环境、接口都比较复杂,另外信号系统设备包含机械、电子、网络、计算机等多种不同类型,导致了信号系统设备的故障耦合因素多、故障隐蔽、具有很强的不确定性。信号系统作为一个大型的复杂网络,设备间互相影响、关联耦合,导致信号系统设备故障影响大且排查耗时长。因此,本项目通过多因素耦合的工况演变模型开展设备态势研判,同时构建复杂运营条件下的故障传播模型和关键路径模型完成信号系统复杂网络故障传播机理研究,最后根据层次分析法形成了基于 FMECA 的故障定位与预测技术。

1) 设备态势研判研究。本项目通过分析设备失效的技术、物理、材料和使用等原因,建立了设备失效与部件磨损等因素间的耦合关系模型,利用集成聚类和在线模型拟合技术,预测设备性能变量的状态概率分布,并外推至失效阈值以实现趋势分析。据此,构建了针对转辙机 78 项、计轴 45 项、信号机 40 项和电源系统 54 项的态势研判模型。

例如,在南宁轨道交通 4 号线智能运维转辙机故障预警中,首先通过部署传感器采集转辙机动作电流时序数据,对电流曲线进行分段处理。接着采用层次聚类融合算法,对历史数据集进行聚类分析。通过计算特征向量间的加权欧氏距离(电气特征权重占比 60%,机械参数占 40%),将设备状态划分为“正常”“接点氧化”“卡阻”等几类簇。然后将聚类结果作为标签输入 XGBoost 与 LightGBM 模型进行训练,建立状态特征曲线聚类模型。最后,智能运维系统通过聚类边界迁移检测到电机齿轮磨损的渐进劣化趋势:当设备从“正常”簇向“临界劣化”簇迁移时(聚类中心偏移距离超过阈值),自动生成预防性维修工单。

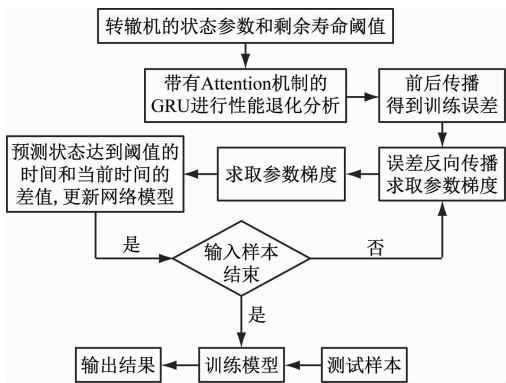
2) 故障传播机理研究。本项目基于 217 个信号系统态势研判模型,利用复杂网络理论和故障数据,结合 CBTC(基于通信的列车控制)系统架构,构建了列车运行控制系统的网络拓扑、信息流传导及故障传播模型。通过对子系统耦合关系的深入研究,精准分析了模型统计特性并识别出关键失效事件。基于此,本项目创新性地将相继故障负荷-容量模型与故障传播路径搜索算法相结合,不仅能动态搜索故障传播网络,更能准确锁定不同运行条件下故障扩散的最优路径,为系统风险评估提供了可靠的技术支撑。此外,建立了信号系统网络模型,采用 PRAC(计划、资源、安排、控制)方法评估运营效率变化,适用于联动响应和故障影响评估。同时,分析了组件独立和多点故障的传播路径及概率,基于负荷-容量模型实现了故障传播路径的定量分析。

3) 基于 FMECA 模型的故障定位和预测技术研究。本项目运用 FMECA 算法实现对设备的智能诊断分析。系统通过实时采集报警数据与故障现象,精准定位故障根源,并基于专家库智能输出排查方案及维护指导。针对状态受多种因素影响的设备,根据影响设备状态的各种因素的类型,结合监测数据,根据设备状态特征参数、工作负载、环境因素、历史故障和维修记录数据等类型数据建立分层评价体系,建立基于层次分析的故障预测方法以及基于 FMECA 的故障定位和预测技术,充分利用数据背后隐藏的信息实现设备的故障判断和预测,如图 1 所示。

### 2.2 与传统监测系统对比

智能运维系统与传统监测系统功能对比如表 2 所示。





注:GRU—控制与表示单元。

图 1 故障判断和预测流程

Fig. 1 Fault judgement and prediction process

表 2 智能运维系统与传统监测系统功能对比  
Tab. 2 Comparison of functionalities between intelligent O&M system and traditional monitoring system

对比维度	传统监测系统	智能运维系统
监测范围	单一参数/设备状态监测	多因素耦合工况演变模型(覆盖转辙机、计轴、信号机等)
实时性	静态阈值报警,被动响应	在线模型拟合+递归迭代更新,实现设备状态趋势主动预测
故障诊断能力	简单因果关系判断	基于复杂网络理论的故障传播模型(含 217 个子系统耦合分析),支持多故障路径定量分析
数据处理方式	离散式数据采集,缺乏深度特征挖掘	集成聚类算法+深度学习(XGBOOST/LightGBM,建模软件)进行无监督训练,建立状态特征曲线聚类模型
预测能力	仅故障后告警	基于 FMECA 的故障定位预测(结合设备负载、环境、历史记录等多源数据)
维护策略	经验驱动定期检修	智能诊断(专家库联动)+关键路径失效预判,实现预防性维护
耦合分析	忽略设备间关联效应	构建 CBTC 系统架构网络拓扑,识别关键失效事件并分析故障传播路径(PRAC 方法评估运营效率变化)
自适应性	依赖人工经验调整阈值/规则	模型持续在线训练(新数据产生时自动更新),适应复杂工况演变

2.3 应用场景

该技术体系在南宁轨道交通 4 号线智能运维系统的工程化应用表明:实现了精准故障诊断,故障场景覆盖率达 95%,故障率下降了 61%。具体表现如下:

1) 实现了故障的智能诊断。能够直接定位故

障根因,同时通过可视化界面将复杂的设备电路图、设备状态、拓扑关系及故障信息以图形化方式直观展示,替代了传统人工排查图纸、记录参数等繁琐流程,大幅缩短故障排查时间。

以道岔室内继电器故障为例。传统方式需维护人员到达现场后联系车控室重复操动道岔,然后人工观察道岔动作过程中的继电器时序、测量线圈电压和分线柜接线电压等,平均道岔问题的处置时间为 40 ~ 60 min。智能运维系统实时监控道岔状态,可直接提示维护人员室内故障的继电器名称和位置,维护人员直接携带备件进行更换即可,平均耗时仅 5 min,效率提升 8 倍以上。

2) 智能运维系统的引入显著提升了故障预防能力。通过设备预警功能,系统可实现对各类电气特性指标实时监测,当指标超限或接近阈值时,系统可在设备故障实际发生前给出预警信息。如:计轴磁头感应电压 > 9.95 V 时,系统会判定磁头轨旁断线或虚接;计轴磁头电压小于 5.04 V 时,系统判定磁头松动或感应高度性能异常。根据此类预警,维护人员可以提前干预处置,消除故障隐患。故障隐患的消除,一方面可以降低运维故障率指标,另一方面可减少维护人员的故障处置时间,从而减轻运维工作量。

3) 智能运维系统通过多维度健康度分析与预警机制,显著降低了设备劣化引发的故障风险。针对道岔、计轴、电源等有电气特性特征的系统,智能运维系统根据三级指标的评价模型,从设备全局监控的角度对其运行状态和健康状态进行评估,当设备健康度异常时会触发预警,维护人员可以提前干预处置,消除故障隐患。对于联锁、车载等集成板卡类设备,系统通过 FMECA 模型基于设备的历史故障频次来分析当前健康状态。通过引入健康度评价模型与设备预警机制,智能运维系统实现了从被动故障响应到主动预防的转变,并可为设备检修周期的动态调整、设备预测修/状态修提供数据支撑,进一步延长设备寿命,显著减少因设备劣化导致的故障发生。

3 基于精准运维管理体系构建

3.1 研究思路与过程

为解决运维管理中有效提高检维修工作质量时出现的人力物力资源的浪费问题,本项目结合信号精准运维成套装备,提出了一种基于“人机料法”

耦合的精准运维管理体系,以智能分析算法为核心,实现对信号系统的全生命周期保障及服务,从根本上实现运维管理模式的提升。该策略从智能化故障判断、态势感知模型构建、人员操作服务以及数字化流程管理等方面进行了探讨,旨在提高运维效率,降低故障处理时间,保障轨道交通的稳定运行。

1) 精准运维管理流程。为适应精准运维系统对运维管理模式的变革,本项目开展了基于数字化运维管理模式,实现从采集感知、车站分析感知、工区统筹指挥,建立以数据驱动为基础的运维管理模式。实现了对班组职能和安排、巡视维修的修程修制以及应急响应的流程数字化管理,提高了线路和站点运营维护的可靠性和安全性。研究模式分为常规故障应急管理、重大故障应急指挥管理和计划维修管理三类,配合这三类管理模式开发对应的管理系统,调整检修工艺卡、作业指导书、故障处理指南、设备操作指南管理办法等规章制度 19 类,实现相应的运维管理。

2) 常规故障应急管理流程。当设备发生故障时,智能运维系统推送设备报警,报警中包含故障案例库信息(故障分析、处置建议、所需工器具及备品、触发工单流程编号等),中心调度人员在智能运维工作站进行报警确认,生成下发对应故障维护工单。调度平台可根据位置信息,将工单派发至距离故障点最近的维护人员,如图 2 所示。

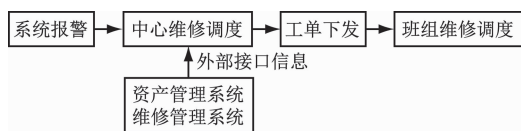


图 2 常规故障应急管理流程

Fig. 2 Emergency management procedure for routine malfunctions

3) 重大故障应急管理流程。当发生重大故障或事件时,系统启动应急指挥流程,由调度人员确认或发起应急指挥流程,下发至各智能运维工作站和手持终端设备,同时推送应急预案指引。应急预案执行过程中,相关人员根据预设节点反馈一线情况,中心可实时监控应急预案执行进度,并掌控线路/线网范围内人员、物资情况,完成资源统一调配和应急指挥,如图 3 所示。

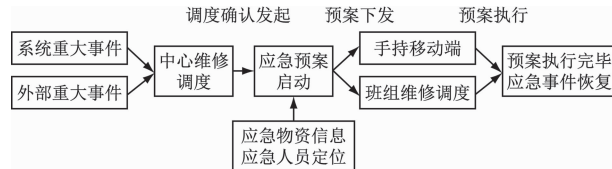


图 3 重大故障应急管理流程

Fig. 3 Emergency management procedure for major malfunctions

4) 计划维修管理流程。维护人员在智能运维工作站制定维修计划,智能运维系统根据预设时间触发计划工单。工单生成后,下发至手持移动终端设备与工班维护工作站,维护人员根据工单指引,完成故障或计划检修处理,并反馈作业结果,完成工单闭环,如图 4 所示。

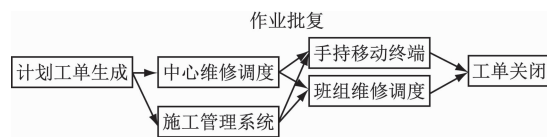


图 4 计划维修管理流程

Fig. 4 Planned maintenance management procedure

5) 轻资产物资管理模式。基于轻资产的物资管理模式通过精准维修体系和平台,优化物资采购、储备和使用过程,提高物资周转速度,降低库存成本。本项目主要通过以下手段完成轻资产的物资管理:简化供应链,制定精细化的物资计划,强化信息化管理,采用灵活的物资储备策略。实现物资的高效利用、降低成本、提高竞争力的同时,关注物资回收和再利用,促进可持续发展。

6) 综合化人员管理。随着智能运维系统投入应用,一线维护人员的工作量显著减少,为优化人员配置和管理模式提供了契机。通过重组岗位职责架构,打破传统按设备类型分组的单一模式(如传统信号运维模式下相对独立的 ATS 班组、正线班组、车辆段班组、车载班组等),组建跨专业综合班组,要求成员掌握信号系统全链路知识,并通过智能平台实时共享故障案例与处置方案,提供系统自动诊断结果,强化应急处置能力。通过技术赋能与团队协作创新,显著提升人员的故障处理效率和应急响应能力,同时降低了人力冗余与培训成本。

### 3.2 与传统运维管理体系对比

精准运维管理体系与传统运维管理体系功能对比如表 3 所示。

表 3 精准运维管理体系与传统运维管理体系功能对比

Tab.3 Comparison of functionalities between precise O&M and traditional O&M management systems

对比维度	传统运维管理体系	精准运维管理体系
管理理念	依赖人工经验与纸质流程,以故障修复为导向,缺乏系统性规划	基于智能算法与数据驱动,融合“人机料法”一体化,实现主动预防与精准管控
流程管理	故障处理依赖人工派单与纸质记录,应急响应滞后;计划维修周期固定,缺乏灵活性	数字化流程全贯通(常规/重大故障分级响应、计划维修工单自动化),通过智能调度缩短响应时间,支持动态调整检修周期
物资管理	物资定额粗放,采购与库存依赖人工统计,存在冗余浪费	基于平台分析物资消耗规律,动态优化定额与库存,实现物资周转率提升与成本降低
人员管理	职责分散,班组专业化分工单一,培训以理论为主,应急处置依赖个人经验	调整班组结构,开展综合化培训,通过数字化平台提升应急处置能力,培养复合型人才
技术工具	无智能分析平台,依赖人工巡检与经验判断	应用智能分析算法(如故障定位、健康度评估)、物联网监测设备、数字化工单系统,实现全流程数据驱动
效率与成本	故障处理时间长(如道岔故障平均 40 ~ 60 min),维修成本高,人力物力浪费严重	故障处置效率提升 38.9%,维修成本下降 12.4%,资源利用率显著优化
数据应用	数据分散,缺乏设备健康度分析与历史故障关联挖掘	基于三级指标模型与 FMECA 算法,实现设备状态实时监测、故障预测与健康度评估、数据驱动决策

3.3 应用场景

该管理体系依托南宁轨道交通 4 号线智能运维系统,通过数字化、智能化技术的全场景渗透,实现了从理论到实际运维模式的完整落地,具体体现在以下方面:

1) 物资管理模式优化。智能运维系统通过数字化手段实现了信号系统设备全生命周期管理,覆盖信号全部子系统,以及道岔、蓄电池等关键设备,可以随时查看设备履历、备件信息(如型号、批次、存放位置等),并自动关联故障处置记录,形成完整的设备状态追溯链条。以计轴磁头为例,运维人员可在磁头到货后录入其基础信息(物资编码、厂商、寿命等),故障更换时系统自动记录安装位置、更换时间、剩余寿命及操作人员信息,实现备件全流程可追溯。同时,系统实时监控备件库存量,当剩余数量低于预设安全阈值时自动触发采购预警,帮助

运维人员提前补充物资,将缺货风险降低 30%。此外,系统通过分析历史消耗与库存数据,为科学制定备品备件采购计划提供依据。

2) 生产及故障处置流程优化。通过智能运维系统可实现线上交接班管理,未完成任务自动带人,规避漏交接、漏关键信息的风险,同时未完成任务纳入接收人当天任务列表中,便于任务的管理及追踪。

维护人员在智能运维工作站制定维修计划,智能运维系统根据预设时间触发计划工单。工单生成后,下发至手持移动终端设备与工班维护工作站,维护人员根据工单指引,完成故障或计划检修处理,并反馈作业结果,完成工单闭环。

智能运维系统通过故障工单自动生成与推送、实时设备状态监测与故障自动诊断、移动端协同指挥及工单闭环管理等功能,将传统电话通知与人工派单的串行流程进行压缩;在故障处置阶段,可根据智能运维系统上报的报警信息关联诊断结果、检修建议等信息触发故障工单,经调度人员确认后下发至具体维护人员,替代原有在即时通信软件群发通知和纸质工单的流转模式,实现抢修资源调度的快速响应和全流程可追溯。

3) 人员管理模式优化。在实践中,通过组建跨专业综合运维班组,将原有的 ATS、正线、车辆段、车载等独立班组人员纳入综合班组管理。综合班组的组建有效打破了传统专业壁垒,要求成员全面掌握信号系统全链路知识,并熟练运用智能运维平台的各项功能。这种模式下,运维团队能够快速响应跨系统故障(如车载信号与正线联锁协同问题),减少跨班组协调耗时;同时,通过统一培训体系和标准化操作流程,新员工可在实践中快速成长为复合型人才,班组整体技术适配性与应急响应效率显著提升,为轨道交通复杂场景下的高效运维提供了可持续的人才保障。

4 结语

本研究针对传统运维模式在效率、成本、可靠性等方面的痛点,围绕南宁轨道交通 4 号线实践场景,构建了“数据驱动 + 智能决策 + 全生命周期管理”的智能运维体系,形成了一整套的理论框架与技术实现方案,研究核心成果如下:

1) 多维多源数据融合与精准计划修。通过构建“感知-传输-融合-应用”四层架构,首次实现多源



异构数据的有机整合,开发时变特征融合算法与改进型 Pareto 多目标优化模型,故障识别率提升 16%,无效检修工时减少 70%,设备寿命延长 15%~20%。

2) 基于 FMECA 与态势研判的故障定位与预测。融合设备失效机理分析与复杂网络传播模型,开发了覆盖 78 项转辙机、45 项计轴等设备的态势研判系统,实现故障自动定位与提前预警,并通过三级健康度评估模型为预测性维修提供数据支撑。

3) 精准运维管理模式创新。提出精准运维管理模式,通过数字化流程重构、轻资产物资管理与跨专业综合班组建设,显著降低人力冗余与资源浪费。

在南宁轨道交通 4 号线工程化应用中,智能运维体系实现了三个转变:从被动响应到主动预防——通过设备健康度实时监测与故障预测,将运维重心从“事后抢修”转向“事前干预”;从经验驱动到数据驱动——依托智能诊断平台与标准化流程,提升故障处理效率,降低人工依赖度;从分散管理到协同优化——打破了专业壁垒与数据孤岛,提升了跨班组协作效率和资源利用率。

## 参考文献

- [1] 周志林. 轨道交通智能运维与创新平台建设[J]. 运输经理世界, 2021(20): 102.  
ZHOU Zhilin. Construction of intelligent operation and maintenance and innovation platform for rail transit[J]. Transport Business China, 2021(20): 102.
- [2] 施聪. 城市轨道交通通信信号专业的智能运维系统[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(8): 172.  
SHI Cong. Communication and signal intelligent operation and maintenance system in urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(8): 172.
- [3] 李祥东, 刘宇博, 马博. 城市轨道交通车辆智能运维系统研究[J]. 自动化技术与计算机技术期刊, 2020, 7(8): 5.  
LI Xiangdong, LIU Yubo, MA bo. Research on intelligent operation and maintenance system of urban rail transit vehicles[J]. Automation technology and computer technology. 2020, 7(8): 5.
- [4] 李沁蔚. 我国城市轨道交通发展现状与对策建议[J]. 黑龙江科技信息, 2016(29): 245.  
LI Qinwei. Development status and corresponding suggestions of urban rail transit in China[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2016(29): 245.
- [5] 谭文举, 郜洁. 基于健康评价模型的城市轨道交通信号设备智能化监测平台研究[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(2): 33.  
TAN Wenju, GAO Jie. Research on intelligent monitoring platform of urban rail signaling equipment based on health assessment model[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(2): 33.
- [6] 张冲, 黄蒙涛, 艾新. 城市轨道交通信号系统大数据智能运维平台设计方案[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(10): 326.  
ZHANG Chong, HUANG Mengtao, AI Xin. Design scheme of big data intelligent maintenance platform for urban rail transit signaling systems [J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(10): 326.
- [7] 李中浩, ZHANG Liman. 我国城市轨道交通信号系统发展方向探讨[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(2): 彩 12.  
LI Zhonghao, ZHANG Liman. Discussion on the development direction of urban rail transit signaling systems in China[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(2): C12.
- [8] 白广争, 郑泽熙, 冯浩楠, 等. 城市轨道交通 CBTC 系统实时故障定位方法[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(2): 112.  
BAI Guangzheng, ZHENG Zexi, FENG Haonan, et al. Real-time fault locating method for urban rail transit CBTC system[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(2): 112.
- [9] 胡寿建, 吴荣斌, 王亚坤, 等. 城市轨道交通信号智能运维系统设计与研究[J]. 军民两用技术与产品, 2023(1): 48.  
HU Shoujian, WU Rongbin, WANG Yakun, et al. Design and research of intelligent operation and maintenance system for urban rail transit signals[J]. Dual Use Technologies & Products, 2023(1): 48.
- [10] 李传建. 城市轨道交通信号智能运维系统的设计与应用[J]. 设备管理与维修, 2023(8): 10.  
LI Chuanjian. Design and application of intelligent operation and maintenance of urban rail transit signal system[J]. Plant Maintenance Engineering, 2023(8): 10.
- [11] 张志政. 基于在线监测设备健康状态的城轨信号系统智能运维研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.  
ZHANG Zhizheng. Research on intelligent operation and maintenance of urban rail signaling system based on on-line monitoring equipment health status[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023.
- [12] 祖萌蒙. 城市轨道交通信号智能运维系统设计与研究[J]. 信息与电脑(理论版), 2023, 35(9): 146.  
ZU Mengmeng. Design and research of intelligent operation and maintenance system of urban rail transit signal[J]. Information & Computer, 2023, 35(9): 146.
- [13] 朱发林. 基于云边协同计算的城市轨道交通信号智能运维系统研究[J]. 铁道通信信号, 2023, 59(9): 12.  
ZHU Falin. Research on signal intelligent operation and maintenance system based on cloud edge collaborative computing for urban rail transit[J]. Railway Signalling & Communication, 2023, 59(9): 12.
- [14] 宁鑫. 轨道交通信号智能运维系统研究[J]. 铁道通信信号, 2023, 59(10): 8.

(下转第 234 页)

- synergetic control system for regenerative braking energy capacitor energy storage device [J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(9): 187.
- [19] 卢鹏, 崔平. 6 kV 高压柜越级保护故障分析与整改[J]. 有色冶金设计与研究, 2022, 43(3): 34.  
LU Peng, CUI Ping. Failure analysis and rectification of 6 kV high-voltage cabinet over-level protection[J]. Nonferrous Metals Engineering & Research, 2022, 43(3): 34.
- [20] 赵文元, 杨军, 严建海, 等. 直流系统故障支路综合保护与隔离技术研究[J]. 电工技术, 2022(11): 57.  
ZHAO Wenyuan, YANG Jun, YAN Jianhai, et al. Research on comprehensive protection and isolation technology of fault branch circuit in DC system[J]. Electric Engineering, 2022(11): 57.
- [21] 漆昀晨. 浅谈电动控制模块在开关柜中的应用[J]. 甘肃科技, 2022, 38(2): 11.  
QI Yunsheng. Brief introduction to the application of electric control module in switch cabinet[J]. Gansu Science and Technology, 2022, 38(2): 11.
- [22] 冯剑冰, 郑淳淳, 谢金莲, 等. 基于 GOOSE(面向通用对象的变电站事件)通信技术的直流牵引供电系统跨所网络化保护方案[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(8): 205.  
FENG Jianbing, ZHENG Chunchun, XIE Jinlian, et al. Cross-substation networking protection scheme for DC traction power supply system based on GOOSE communication technology[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(8): 205.
- [23] 胡建侠. 基于虚拟现实技术的变电站远程巡检方案及关键技术[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(10): 168.  
HU Jianxia. Remote inspection scheme and key technologies for substations based on virtual reality technology[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(10): 168.
- [24] 肖尧, 李曼. 10 kV 断路器防跳回路分析及改造[J]. 电力安全技术, 2022, 24(1): 47.  
XIAO Yao, LI Man. Analysis and upgrade of 10 kV breaker anti-trip circuit[J]. Electric Safety Technology, 2022, 24(1): 47.
- [25] 侯炜, 董凯达, 宋志伟, 等. 基于高可靠性冗余环网通信的中压母线差动保护研究[J]. 电气技术, 2021, 22(8): 78.  
HOU Wei, DONG Kaida, SONG Zhiwei, et al. Research on medium-voltage busbar differential protection technology based on high-availability seamless redundancy communication [J]. Electrical Engineering, 2021, 22(8): 78.
- [26] 张军, 黄立场, 王瑾然. 一种基于原屏改造的变电站综保改造方式[J]. 湖北电力, 2021, 45(1): 47.  
ZHANG Jun, HUANG Lichang, WANG Jinran. A substation integrated protection transformation method based on original screen transformation[J]. Hubei Electric Power, 2021, 45(1): 47.
- 收稿日期:2024-06-17 修回日期:2025-02-11 出版日期:2025-07-10  
Received:2024-06-17 Revised:2025-02-11 Published:2025-07-10  
· 通信作者:李国玉,高级工程师,948818205@qq.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

## (上接第 228 页)

- NING Xin. Research on signal intelligent operation and maintenance system for rail transit[J]. Railway Signalling & Communication, 2023, 59(10): 8.
- [15] 苏雯. 城市轨道交通信号智能运维系统关键技术及应用研究[J]. 智慧轨道交通, 2024, 61(2): 36.  
SU Wen. Study on key technologies and application of intelligent operation and maintenance system for urban rail transit signals[J]. Intelligent Rail Transit, 2024, 61(2): 36.
- [16] 潘佳鹏, 迟宝全. 城市轨道交通信号系统智能运维平台研究[J]. 现代城市轨道交通, 2024(11): 21.  
PAN Jiapeng, CHI Baoquan. Research on the intelligent operation and maintenance platform for urban rail transit signal system[J]. Modern Urban Transit, 2024(11): 21.
- [17] 张宝利. 新质生产力对城市轨道交通关键设备智能运维影响的思考[J]. 城市轨道交通, 2024(9): 22.  
ZHANG Baoli. Thoughts on the influence of new quality productivity on intelligent operation and maintenance of key equipment in urban rail transit[J]. China Metros, 2024(9): 22.
- [18] 甘超莹. 交通强国背景下的智慧城轨建设思考[J]. 人民公交, 2025(2): 146.  
GAN Chaoying. Thoughts on the construction of smart urban rail under the background of strong transportation country[J]. People's Public Transportation, 2025(2): 146.
- [19] 袁若岑, 计时磊, 黄颖俊, 等. 城轨信号智能运维系统研究[J]. 价值工程, 2025, 44(2): 105.  
YUAN Ruocen, JI Shilei, HUANG Yingjun, et al. Research on intelligent operation and maintenance system of urban rail signal[J]. Value Engineering, 2025, 44(2): 105.
- 收稿日期:2025-02-21 修回日期:2025-03-25 出版日期:2025-07-10  
Received:2025-02-21 Revised:2025-03-25 Published:2025-07-10  
· 第一作者:于萌,工程师,ym3027@sina.com  
通信作者:梁喆,工程师,zhe.liang@gx-tct.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license