

城市轨道交通信号智慧化运维系统框架研究

程 辉

徐州地铁信息科技有限公司 江苏 徐州 221000

摘要：城市轨道交通信号系统是保障列车安全高效运行的关键基础设施，其运维面临高复杂、高安全、高成本挑战。本文研究城市轨道交通信号智慧化运维系统框架，分析信号系统特点与运维需求，设计总体架构与关键技术模块，阐述核心功能模块实现路径，提出系统性能保障机制，为提升城市轨道交通信号系统运维智能化水平提供理论支撑。

关键词：城市轨道交通；信号系统；智慧化运维；系统框架；性能保障

引言：城市轨道交通作为城市公共交通的骨干，其信号系统对保障列车安全、高效运行至关重要。传统运维模式在应对复杂系统、高安全性要求和成本压力时逐渐力不从心。随着信息技术发展，智慧化运维成为必然趋势。通过实时监测、智能诊断、资源优化等手段，可提升运维效率、降低成本、增强安全性。研究城市轨道交通信号智慧化运维系统框架，对推动轨道交通智能化发展具有重要意义。

1 城市轨道交通信号系统特点与运维需求分析

1.1 信号系统核心组成

城市轨道交通信号系统是保障列车安全、高效运行的关键基础设施，其核心组成涵盖多个重要子系统。联锁系统作为信号系统的核心控制部分，负责确保轨道区段、道岔、信号机等设备之间的安全逻辑关系，防止列车冲突与追尾等事故发生，为列车运行构建起第一道安全防线。列车自动控制系统（ATC）则进一步细分为列车自动监控（ATS）、列车自动防护（ATP）和列车自动运行（ATO）三个子系统^[1]。ATS实现对列车运行的集中监视与调度指挥，优化列车运行计划，可同时监控多达50列及以上列车的运行状态；ATP实时监测列车运行速度与位置，在列车超速或接近危险区域时自动实施制动，保障列车运行安全；ATO根据ATS的指令，自动控制列车启动、加速、巡航、惰行和制动，实现列车的自动驾驶，提高运行效率与舒适性。数据通信系统（DCS）为信号系统各子系统之间以及列车与地面设备之间提供高速、可靠的数据传输通道，确保信息实时、准确交互，支撑整个信号系统的协同工作。

1.2 运维关键挑战

城市轨道交通信号系统运维面临着诸多关键挑战。高复杂性体现在多系统协同工作与实时性要求上，各子系统相互关联、相互影响，任何一个环节出现故障都可

能影响整个系统的正常运行，且对故障响应的实时性要求极高，故障响应时间需控制在3分钟以内。高安全性方面，信号系统故障可能导致严重安全事故，因此对故障零容忍，需具备完善的容错机制，确保在部分设备故障时系统仍能安全运行，系统整体安全等级需达到SIL4级。高成本则源于人力与资源投入压力，信号系统设备分布广泛、技术复杂，需要大量专业技术人员进行日常巡检、维护与故障处理，每条线路平均需配备30-50名专业运维人员，同时设备更新换代、技术升级也需要大量资金投入。

1.3 智慧化运维需求

随着城市轨道交通的快速发展，传统运维模式已难以满足需求，智慧化运维成为必然趋势。实时监测与故障预测能够通过传感器等设备实时采集信号系统运行数据，运用大数据分析技术提前发现潜在故障隐患，实现预防性维护，可提前1-2周发现潜在故障隐患。自动化诊断与决策支持借助人工智能算法，对故障进行快速、准确诊断，并提供科学合理的处理建议，提高故障处理效率。资源动态调度与优化则根据信号系统运行状态与运维任务需求，动态调配人力、物力资源，实现资源的高效利用，降低运维成本。

2 智慧化运维系统框架设计

2.1 总体架构

城市轨道交通信号智慧化运维系统采用分层与模块化相结合的架构设计。分层结构自下而上包括感知层、数据层、平台层和应用层。感知层部署各类传感器，负责采集信号系统设备的运行状态信息^[2]。数据层承担数据存储与管理职能，对采集数据进行清洗与整合，构建统一数据仓库。平台层集成多种智能算法，实现故障诊断、预测维护等核心功能。应用层提供可视化操作界面，辅助运维决策。系统模块划分涵盖数据采集、状态

监测、故障诊断、预测维护和决策支持等功能。各模块协同工作，形成完整的运维管理闭环。

2.2 关键技术模块

多源数据融合技术是系统实现全面、准确分析的基础。该技术将传感器数据、日志数据、历史维护数据等不同来源、不同格式的数据进行整合，消除数据冗余与冲突，形成统一、完整的数据集，为后续智能分析提供可靠数据基础。智能分析技术涵盖基于机器学习的故障模式识别与深度学习驱动的剩余寿命预测。机器学习算法通过对大量故障样本的学习，构建故障模式识别模型，能够快速、准确地识别设备故障类型。深度学习技术则利用其强大的特征提取与学习能力，对设备运行数据进行深度挖掘，实现剩余寿命的精准预测。数字孪生技术通过构建虚拟信号系统模型，对实际信号系统进行仿真验证，提前发现潜在问题，优化系统设计与运维策略。边缘计算与云计算协同工作，边缘计算负责实时处理现场数据，实现快速响应与局部决策；云计算则进行全局资源调度与大数据分析，为系统提供强大的计算与存储能力。

2.3 系统交互机制

系统内部模块间通过精心设计的数据流与控制流实现高效交互。数据流保障各模块间数据传输的准确性与及时性，控制流则协调各模块的工作顺序与逻辑关系。针对外部系统交互需求，系统制定了与调度系统、应急管理系统等的接口规范，明确数据传输格式、通信协议及交互流程，从而实现与外部系统的无缝对接与协同工作，进一步提升城市轨道交通整体运营效率与安全性。

3 核心功能模块实现路径

3.1 智能监测与预警模块

智能监测与预警模块是城市轨道交通信号智慧化运维系统的基础支撑部分。在实时状态参数采集环节，信号系统关键设备上合理布局高精度传感器，持续获取设备运行时的温度、振动、电流、电压等关键参数，通过可靠的数据传输通道实时传送至后端数据处理单元。为实现异常阈值的动态调整，系统收集设备长期运行的历史数据，并结合环境温度、湿度等实时变化因素^[1]。运用数据分析算法对历史数据和环境因素进行综合剖析，动态设定异常阈值。例如当环境温度升高时，系统会自动提高设备温度的异常阈值，防止因环境因素出现误报。基于知识图谱的故障关联分析是该模块提升故障处理效率的关键手段。知识图谱以结构化形式存储设备信息、故障现象及其关联关系。当系统检测到设备异常状态时，能迅速在知识图谱中搜索匹配，找出相关故障信

息。通过分析挖掘，不仅可以快速定位故障根源，还能清晰呈现故障传播路径和可能引发的连锁反应，为运维人员制定处理方案提供有力支持。

3.2 自动化诊断与修复模块

自动化诊断与修复模块是提升城市轨道交通信号系统运维效率的核心环节。在故障根因定位方面，采用贝叶斯网络、因果推理等先进算法。贝叶斯网络构建设备故障与各种可能因素间的概率关系模型，利用已知故障现象和设备状态信息，计算各可能故障原因的概率分布，找出最可能的故障根源。因果推理算法基于设备运行的因果逻辑关系，通过深度分析设备运行数据，推断故障产生的因果链条，精准定位故障根本原因。修复方案推荐与执行反馈闭环机制是该模块的重要特色。系统依据故障根因定位结果，在预先构建的修复方案知识库中进行智能匹配推荐，为运维人员提供多种可行修复方案。系统记录修复方案执行过程和结果，将反馈信息用于修复方案知识库的更新优化。通过对大量修复案例的学习分析，不断提升修复方案准确性和有效性，形成自我完善、持续优化的闭环系统，提高故障修复效率和质量。

3.3 预测性维护模块

预测性维护模块旨在通过评估和预测设备健康状态，提前制定合理维护计划，降低设备故障发生率，延长设备使用寿命。设备健康度评估模型采用故障预测与健康管理体系，该框架综合考虑设备运行历史数据、实时状态数据、环境因素等多方面信息，运用数据挖掘、机器学习等技术，构建设备健康度评估指标体系。通过对这些指标综合分析，量化设备健康状态，为设备维护决策提供科学依据。维护计划动态优化算法是该模块的核心算法之一。它根据设备健康度评估结果、设备重要程度、维护资源可用性等因素，运用优化算法动态调整维护计划。例如，当设备健康度下降较快时，系统自动提前安排维护任务；当维护资源紧张时，系统根据设备重要程度和健康状态，优先安排关键设备维护工作，确保维护资源高效利用，实现设备维护精准化和智能化。

3.4 运维知识库与决策支持模块

运维知识库与决策支持模块是城市轨道交通信号系统运维的智慧大脑。专家经验数字化沉淀与更新机制是构建运维知识库的关键。组织行业专家对信号系统运维过程中的各类经验进行总结提炼，将这些宝贵经验以结构化方式存储在知识库中。随着技术发展和运维实践积累，定期更新完善知识库内容，确保知识库时效性和准确性。多目标优化决策模型是该模块为运维决策提供科学支持的重要工具。在城市轨道交通信号系统运维中，

需综合考虑成本、效率、安全等多个目标^[4]。多目标优化决策模型运用先进优化算法,对这些目标进行综合权衡分析,在满足安全要求前提下,寻求成本最低、效率最高的运维决策方案。例如,制定设备维护计划时,该模型综合考虑维护成本、设备停机时间对运营效率影响以及设备故障对安全风险等因素,为运维人员提供最优维护决策建议。

4 系统性能保障机制

4.1 可靠性设计

在城市轨道交通信号智慧化运维系统中,可靠性设计是确保系统稳定运行的关键环节。冗余架构与容错机制是提升系统可靠性的重要手段。冗余架构通过设置多个相同或相似功能模块,当某个模块故障时,其他模块可迅速接替工作。例如数据传输链路采用双链路冗余设计,一条链路故障时,数据自动切换到另一条链路传输。容错机制能在系统故障时自动检测并采取措施,使系统在故障状态下继续运行,为运维人员争取处理时间。例如软件系统中设置错误检测和恢复代码,程序出现错误时自动跳过错误部分继续执行后续操作。数据备份与恢复策略是保障系统数据可靠性的重要措施。系统定期备份重要数据,将备份数据存储在安全可靠的位置。备份方式采用全量备份和增量备份相结合,全量备份确保数据完整性,增量备份减少备份时间和存储空间。当系统出现数据丢失时,能迅速从备份数据中恢复,保证系统正常运行。

4.2 安全性设计

安全性设计是城市轨道交通信号智慧化运维系统不可或缺的一部分,端到端数据加密与访问控制是保障系统数据安全的核心措施。端到端数据加密对数据传输和存储过程进行加密处理,确保数据在各个环节都不被窃取或篡改。例如采用先进的加密算法对数据进行加密,只有拥有解密密钥的授权用户才能解密数据。访问控制通过对用户身份进行认证和授权,限制用户对系统资源的访问权限。例如设置不同的用户角色和权限级别,只有具有相应权限的用户才能访问特定的数据和功能模块。攻击检测与防御体系是防范外部攻击的重要手段。系统部署入侵检测系统、防火墙等安全设备,实时监测系统的网络流量和运行状态,及时发现并阻止各种网络攻击行为。例如入侵检测系统可以对网络流量进行深度

分析,检测出异常流量和攻击行为,并及时发出警报。防火墙则可以阻止未经授权的外部访问,保护系统内部网络的安全。

4.3 可扩展性设计

可扩展性设计是为满足系统未来发展和业务增长需求,模块化架构与插件式功能扩展是实现系统可扩展性的重要方式。模块化架构将系统划分为多个独立模块,每个模块具有明确功能和接口,模块之间通过标准化接口进行通信和协作。当系统需要增加新功能时,可方便添加新模块,不会影响其他模块的正常运行^[5]。插件式功能扩展允许用户根据实际需求选择和安装不同插件,实现系统功能的个性化定制。例如在运维管理系统中,用户可根据需要安装不同监控插件,实现对不同设备的监控和管理。标准化接口与开放协议支持是保障系统与其他系统集成和互操作的关键。系统采用标准化接口和开放协议,可方便与其他相关系统进行数据交换和共享,实现系统的互联互通。例如采用通用的数据接口标准和通信协议,使运维系统能与信号系统、车辆系统等其他系统无缝对接,提高系统的整体运行效率。

结束语

城市轨道交通信号智慧化运维系统框架研究,通过构建分层与模块化架构,集成多源数据融合、智能分析等关键技术,实现了智能监测预警、自动化诊断修复等功能。同时,可靠性、安全性和可扩展性设计保障了系统稳定运行与持续发展。该系统框架为城市轨道交通信号系统运维提供了智能化解决方案,有助于提升运维管理水平,推动轨道交通行业向智能化、高效化方向迈进。

参考文献

- [1]王廉正.城市轨道交通信号智慧运维的应用与实践探索[J].人民公交,2024(16):107-109.
- [2]李海涛,魏园园.城市轨道交通通信信号的智慧运维系统设计[J].集成电路应用,2023,40(11):172-173.
- [3]彭韬.轨道交通信号系统智慧运维体系的应用研究[J].越野世界,2023,18(5):250-252.
- [4]杨勇.地铁信号系统智慧运维研究[J].运输经理世界,2022(14):95-97.
- [5]王向阳,柴建华,刘懂懂,等.城市轨道交通多专业数字化运维体系[J].城市轨道交通研究,2023,26(11):212-216.