

地铁信号系统智能化改造方案研究

马 超 吕佳俊 李 怡
西安市轨道交通集团有限公司 陕西 西安 710000

摘 要：本文针对地铁信号系统传统架构的局限性，提出分层化、模块化的智能化改造方案。通过融合智能感知、数据分析、通信优化与安全防护技术，构建自适应调整、实时决策与全生命周期管理的智能化体系。改造方案分阶段实施，实现与既有系统的无缝对接，提升线路运力、运维效率与乘客体验，为城市轨道交通发展提供技术支撑。

关键词：地铁信号系统；智能化改造；智能调度；故障预测；乘客服务

引言：地铁信号系统作为轨道交通运行的核心保障，其传统架构在兼容性、扩展性、故障诊断与人工干预依赖度等方面存在局限。随着客流增长与技术发展，智能化改造成为提升运营效率与安全性的必然选择。本文围绕系统现状分析、改造方案设计、功能实现路径展开研究，为地铁信号系统智能化升级提供理论框架与实践指导。

1 地铁信号系统现状分析

1.1 传统信号系统架构

地铁信号系统作为轨道交通运行的核心保障，其传统架构历经多年发展，已形成相对成熟的技术体系。闭塞方式是信号系统的基础，直接决定了列车运行的安全间隔与效率。固定闭塞通过轨道电路划分固定区段，以区段占用状态控制列车运行，技术简单但间隔较大，难以满足高密度运营需求；准移动闭塞在固定闭塞基础上引入车地通信，利用列车定位信息动态调整安全间隔，提升了线路利用率；移动闭塞则通过连续式通信实现车地实时交互，进一步缩短列车追踪间隔，成为现代地铁信号系统的主流方案。核心设备层面，联锁系统负责道岔、信号机等基础设备的逻辑控制，确保列车按既定路径安全行驶；ATP（列车自动防护）系统通过速度监控与超速防护，保障列车运行安全边界；ATO（列车自动驾驶）系统在ATP基础上实现牵引、制动等自动控制，提升运行效率；ATS（列车自动监控）系统则承担全线运行图管理、调度指令下达等任务。这些设备共同构成信号系统的功能闭环，但各子系统间存在技术壁垒，数据共享与协同能力有限。

1.2 现存问题

传统信号系统在长期运行中暴露出诸多问题。系统兼容性差是首要挑战，不同线路、不同时期建设的信号系统采用不同技术标准，导致设备互联互通困难，跨线运营与资源共享受阻。扩展性不足则限制了系统升级能

力，随着客流增长与线路延伸，既有系统难以通过简单扩容满足新需求，需大规模改造甚至重建。故障诊断与预警能力薄弱是另一大痛点。传统系统依赖人工巡检与经验判断，故障发现滞后且定位精度低，导致维修响应时间长、处置效率低。部分系统虽具备简单自检功能，但缺乏对设备劣化趋势的预测能力，难以实现预防性维护。人工干预依赖度高是系统效率提升的关键瓶颈。在调度指挥、故障处理等环节，过度依赖人工决策导致响应速度慢、操作规范性差，且易受人为因素影响。尤其在突发大客流或设备故障时，人工调度难以快速优化运行图，易引发连锁延误。

1.3 智能化改造需求

面对传统系统的局限性，智能化改造成为必然选择。自适应调整能力是改造的核心目标之一，需通过实时感知列车位置、客流分布、设备状态等信息，动态调整运行间隔与调度策略，实现线路运力的弹性配置^[1]。例如，在高峰时段自动缩短列车追踪间隔，在低谷时段降低能耗，提升运营效率与资源利用率。实时数据分析与决策支持是智能化改造的技术支撑。通过构建大数据平台，融合多源异构数据（如列车运行数据、设备监测数据、环境数据等），利用AI算法进行深度挖掘与趋势预测，为调度人员提供精准决策依据。例如，基于历史数据与实时监测，预测设备故障概率并提前制定维护计划，或根据客流预测动态调整列车停站时间。全生命周期管理优化是改造的长期价值体现。需建立覆盖设计、建设、运营、维护全流程的数字化管理体系，通过数字孪生技术实现设备状态虚拟仿真，通过物联网技术实现设备全生命周期数据追溯，从而降低运维成本、延长设备寿命。

2 智能化改造方案设计

2.1 总体架构设计

智能化改造需构建分层化、模块化的系统架构，以

实现功能解耦与灵活扩展。分层架构分为感知层、网络层、平台层及应用层,各层之间通过标准化接口实现数据交互与功能协同。感知层作为数据采集前端,集成多源传感器与定位设备,负责实时获取轨道状态、列车运行参数及环境信息。网络层基于5G/LTE-M等通信技术,构建高可靠、低延迟的数据传输通道,支持海量终端接入与实时通信。平台层作为数据处理中枢,部署大数据分析平台与AI算法引擎,实现数据清洗、融合、挖掘及决策支持。应用层则面向用户需求,提供智能调度、故障预警、乘客服务等多样化功能模块。模块化设计原则贯穿架构始终,通过标准化接口定义与功能抽象,实现各模块的独立开发与灵活组合。接口标准化确保不同厂商设备可无缝对接,功能可扩展则支持系统根据业务需求动态升级。

2.2 关键技术模块

2.2.1 智能感知与数据采集

智能感知是智能化改造的基础,需融合多源传感器与高精度定位技术,构建全方位、立体化的数据采集网络。多源传感器包括轨道几何状态传感器、列车轴温监测仪、环境温湿度传感器等,覆盖轨道、车辆、环境三大维度。轨道状态传感器可实时监测钢轨形变、扣件松动等异常,列车运行传感器则采集速度、加速度、轴重等参数,环境传感器监测隧道温度、湿度及空气质量。通过传感器数据融合算法,消除单一传感器局限性,提升数据准确性与可靠性。高精度定位技术采用北斗/5G融合定位方案,结合惯性导航与地图匹配算法,实现列车厘米级定位精度。北斗卫星定位提供全局坐标基准,5G基站辅助定位补充隧道等卫星信号盲区,惯性导航在通信中断时维持短时定位能力。融合定位技术可显著提升列车追踪精度,为智能调度与安全防护提供支撑。

2.2.2 数据分析与决策

数据分析与决策模块是智能化改造的核心,需构建大数据分析平台与AI算法引擎,实现数据价值挖掘与智能决策。大数据分析平台基于分布式存储与流式计算框架,支持海量实时数据的高效处理。通过数据清洗、特征提取、关联分析等技术,从原始数据中提炼出设备健康度、客流分布、能耗水平等关键指标。异常检测算法可自动识别设备故障、运行异常等事件,并触发预警机制。AI算法应用聚焦调度优化与故障预测。深度学习模型通过历史数据训练,学习列车运行规律与客流波动特征,生成动态运行图调整建议^[2]。强化学习算法则模拟调度员决策过程,在仿真环境中优化调度策略,提升线路运力与运行效率。故障预测模型基于设备状态数据与故

障案例库,预测设备剩余寿命与故障概率,指导预防性维护。

2.2.3 通信与网络优化

通信与网络优化是智能化改造的保障,需采用5G/LTE-M通信技术与网络切片、边缘计算等架构,实现高可靠、低延迟的通信服务。5G/LTE-M通信技术提供大带宽、低时延、高并发的无线接入能力,满足列车实时控制、高清视频传输等需求。网络切片技术将物理网络划分为多个虚拟子网,为不同业务分配专属资源,确保关键业务(如列车控制)的优先级与可靠性。边缘计算架构将部分计算任务下沉至网络边缘,减少数据传输延迟,提升实时响应能力。

2.2.4 安全防护机制

安全防护机制需从网络安全与功能安全两个维度构建,确保系统安全稳定运行。网络安全防护包括数据加密传输、入侵检测与响应、访问控制等措施。数据加密采用国密算法,对传输数据进行端到端加密,防止数据泄露。入侵检测系统实时监测网络流量,识别异常行为并自动阻断攻击。访问控制机制基于角色权限模型,限制用户操作范围,防止越权访问。功能安全遵循SIL4级安全标准,采用冗余设计、故障安全原则与安全认证技术。冗余设计包括硬件冗余(双机热备)、软件冗余(多版本并行)与数据冗余(多副本存储),确保单点故障不影响系统运行。故障安全原则要求系统在故障发生时自动进入安全状态,避免危险输出。安全认证技术则对关键设备与软件进行安全评估与认证,确保符合行业安全规范。

2.3 系统集成与兼容性

2.3.1 与既有信号系统的接口设计

智能化改造需与既有信号系统实现无缝对接,确保改造过程对运营影响最小化。接口设计遵循标准化、模块化原则,定义统一的数据格式与通信协议。通过网关设备实现既有系统与新系统的数据交互,支持既有设备状态读取与控制指令下发。同时开发兼容性适配层,对既有系统功能进行抽象封装,为上层应用提供统一服务接口。

2.3.2 渐进式改造路径

渐进式改造路径分阶段实施,逐步推进智能化升级。第一阶段聚焦感知层与网络层建设,部署多源传感器与5G/LTE-M通信网络,实现数据全面采集与实时传输。此阶段对既有系统影响较小,可快速验证新技术可行性。第二阶段推进平台层与应用层开发,构建大数据分析平台与AI算法引擎,开发智能调度、故障预警等

核心功能^[3]。此阶段需与既有系统深度集成,通过接口适配与功能迁移,逐步替代传统功能模块。第三阶段实现全系统智能化运行,优化调度策略、提升运维效率、改善乘客体验。此阶段需持续优化算法模型、扩展功能模块,并根据运营反馈迭代升级系统。通过分层架构设计、关键技术突破与渐进式改造路径,地铁信号系统智能化改造可实现安全、高效、智能的升级目标,为城市轨道交通发展注入新动能。

3 智能化功能实现

3.1 智能调度与运行优化

智能调度与运行优化是智能化改造的核心目标之一,通过动态路径规划与列车群协同控制,实现线路运力与客流需求的精准匹配。动态路径规划依托实时数据与AI算法,根据列车位置、运行状态、客流分布等信息,动态调整列车运行路径。例如,当某区间发生故障或大客流时,系统可快速计算备选路径,并通过协同控制算法协调多列车的速度与停站时间,避免连锁延误。列车群协同控制通过车车通信与车地协同,实现列车间的安全距离自动调整与速度同步,缩短追踪间隔,提升线路通过能力。基于客流预测的运力调整是智能调度的另一关键功能。系统通过整合历史客流数据、实时票务信息及外部数据(如天气、活动信息),利用深度学习模型预测未来时段客流分布。根据预测结果,系统自动生成动态运行图,调整列车开行对数、停站时间及交路方案。

3.2 故障预测与健康管理

故障预测与健康管理(PHM)通过设备状态监测与寿命预测,实现从被动维修到主动维护的转变,提升系统可靠性与运维效率。设备状态监测利用多源传感器与边缘计算技术,实时采集轨道、车辆、供电等关键设备的运行参数,通过特征提取与异常检测算法,识别设备劣化趋势。例如,轨道几何状态传感器可监测钢轨磨损与道床沉降,车辆振动传感器可预警轴承故障,供电系统监测设备可预警绝缘老化。寿命预测基于设备历史数据与故障案例库,结合机器学习算法(如随机森林、LSTM神经网络),建立设备剩余寿命预测模型。模型综合考虑设备运行工况、环境因素及维护记录,输出设备健康度评分与剩余寿命预测值。根据预测结果,系统自动生成维护计划,指导预防性维护与备件管理^[4]。故

障自愈与应急响应机制是PHM的延伸功能。当设备发生轻微故障时,系统可自动触发自愈程序,通过调整控制参数或切换冗余设备恢复功能。例如,当某列车车门故障时,系统可远程关闭故障车门并调整开关门逻辑,确保列车继续运行。对于严重故障,系统启动应急响应流程,自动隔离故障设备、调整运行图并通知调度人员,减少故障影响范围。

3.3 乘客服务与体验提升

乘客服务与体验提升是智能化改造的直观体现,通过实时信息推送与个性化服务,改善乘客出行体验。实时信息推送依托多渠道通信技术,向乘客提供列车位置、拥挤度、换乘指引等实时信息。乘客可通过手机APP、站台显示屏或车载终端获取信息,合理规划出行路线。例如,当某列车因故障延误时,系统自动向受影响乘客推送延误通知与替代方案,减少乘客等待焦虑。个性化服务聚焦特殊群体需求,提供无障碍通行与多语言支持功能。无障碍通行服务通过车站与列车内的无障碍设施联动,为轮椅乘客、视障乘客等提供语音导航、自动门控制等辅助功能。多语言支持则覆盖站内广播、标识系统及APP界面,支持中英文、方言及少数民族语言切换,消除语言障碍。系统还可根据乘客历史出行数据,提供个性化推荐服务。

结束语

地铁信号系统智能化改造是城市轨道交通发展的必然趋势。本文提出的改造方案涵盖架构设计、关键技术、系统集成及功能实现等方面,为地铁信号系统智能化升级提供了全面思路。未来,需进一步优化算法模型、提升系统性能,并加强与其他交通系统的协同,以实现更高效、智能的城市轨道交通运营。

参考文献

- [1]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(08):172-176.
- [2]陈佳民.地铁信号系统智能化改造方案研究[J].人民公交,2024(12):55-57.
- [3]廖龙.铁路信号系统智能化发展与应用[J].铁路计算机应用,2021,20(3):34-38.
- [4]夏洪彬.铁路信号系统智能化发展与应用研究[J].铁道通信信号,2022,58(3):56-60.