

铁路信号系统新技术应用研究

张海龙

国家能源集团新朔铁路有限责任公司大准铁路分公司 内蒙古 鄂尔多斯 010300

摘要:为适配铁路多场景高质量发展需求,提升信号系统安全与运行效能,本文系统梳理铁路信号智能列控、5G-R 通信、智能运维及网络安全四大核心新技术原理。结合高铁、普速、重载铁路场景开展应用实践分析,验证了新技术在提升运能、降低故障、节约成本方面的显著成效。同时剖析技术落地的兼容、成本、人才短板问题,并从技术、管理层面提出优化对策,预判行业智能化、一体化、绿色化发展趋势,为技术规模化推广提供参考。

关键词:铁路信号系统;新技术;应用

引言:铁路信号系统是保障铁路行车安全、提升运输效率的核心基础设施。随着我国铁路路网规模化拓展、运营场景日趋复杂,传统信号系统已难以适配高密度、高安全、智能化的运营需求。各类新型通信、智能控制与运维技术逐步落地,为铁路信号系统升级革新提供支撑。基于此,本文聚焦铁路信号系统新技术,深入探究其技术原理、多场景应用成效,梳理现存问题并制定优化方案,助力铁路信号技术迭代与智慧铁路建设发展。

1 铁路信号系统核心新技术概述及应用原理

1.1 智能列控新技术及应用原理

(1) 移动闭塞技术核心原理与应用优势:基于车地连续双向通信,将传统固定闭塞分区取消,以列车自身为动态追踪单元,通过实时计算前后列车安全间隔距离实现闭塞控制。其优势为显著缩短行车间隔、提高线路通过能力,同时提升行车安全性与线路利用效率。(2) 智能 CTC 调度集中技术运行机制:以大数据与人工智能算法为核心,实现列车运行计划的自动编制与动态调整,并综合实时车流、站场状态、运营约束等多元信息,通过智能化冲突检测与自主决策机制,完成调度指令的自动下达与执行,提升路网调度精准性^[1]。(3) 列车自动驾驶(ATO)信号协同控制原理:基于车地一体化信号闭环控制架构,ATO 系统与列控防护系统深度耦合,结合精确测速定位与多目标优化算法,实现列车速度曲线自主规划、精确对标停车及节能运行控制,并具备与联锁、CTC 协同联动功能。

1.2 新一代通信传输新技术

(1) 5G-R 铁路专用通信技术适配原理:基于 5G 大带宽、低时延、高可靠特性进行频段定制与协议适配,实现列车控制、调度指挥及运维数据等多业务承载,并

通过网络切片保障信号业务服务质量与安全隔离。(2) GSM-R 升级优化技术传输特性:对既有 GSM-R 系统进行 IP 化改造、双模终端协同及频率复用优化,强化数据链路冗余与抗干扰能力,有效支撑列控业务向宽带平滑演进。(3) 光纤传感信号传输技术应用机理:利用光纤分布式传感实现沿线温度、振动、应变等多参量实时感知,通过光时域反射与散射信号解调,完成信号传输链路与环境状态一体化监测。

1.3 智能化运维新技术

(1) 大数据故障预警技术工作原理:对信号设备多源历史与实时数据进行关联挖掘,构建设备健康基线,通过偏离度识别潜在故障特征,实现故障早期预警与剩余寿命预测。(2) AI 智能故障诊断技术核心逻辑:基于深度神经网络与知识图谱,建立信号设备故障映射模型,实现故障特征自动提取、根因定位与维修策略智能推荐。(3) 设备状态实时监测技术实现路径:部署边缘传感与物联网节点,采集电压、电流、温度、振动等多维参数,经协议转换与数据上云,实现关键设备状态全景可视与实时告警。

1.4 网络安全新技术

(1) 铁路信号系统加密防护技术原理:采用国密算法对车地通信与控制指令端到端加密,结合密钥动态更新与设备身份认证,保障数据传输机密性与完整性。(2) 网络入侵检测与主动防御技术机制:基于流量行为分析与规则引擎,实时识别异常攻击与越权操作,联动防火墙策略进行自动阻断与动态诱捕,形成主动防御闭环。(3) 信号数据安全备份与容错技术:采用异地多活数据备份与强一致性同步机制,结合设备冗余热备与故障自动切换,实现数据零丢失及系统快速自愈。

2 铁路信号系统新技术具体应用

2.1 高速铁路场景新技术应用

(1) 移动闭塞技术在高铁高密度行车中的应用实践:在京沪、京广等繁忙高铁干线,移动闭塞通过实时追踪列车位置与速度,动态计算并调整追踪间隔,将最小发车间隔由传统固定闭塞的5分钟压缩至3分钟以内,有效支撑高峰时段列车密集追踪运行,极大释放线路运输潜能。(2) 5G-R 通信技术保障高铁信号稳定传输的应用:高铁场景下高速移动带来的多普勒频移与频繁切换问题,5G-R 通过波束赋形、超密集组网及快速切换优化算法,确保列控数据端到端时延小于20ms、可靠性达99.999%,在高时速条件下实现车地信号连续不中断传输^[2]。(3) 智能运维技术在高铁信号设备常态化管控中的应用:依托全线部署的轨旁传感与室内监测单元,对道岔转换力、轨道电路电平、应答器报文等关键参数实施秒级采集与智能分析,实现设备状态“一图全景”可视,并自动生成维护建议,有力支撑夜间天窗期高效精准检修。

2.2 普速铁路与市域铁路场景应用

(1) 智能 CTC 系统在普速铁路调度优化中的应用:普速线路多涉及单线半自动闭塞及多会让矛盾,智能 CTC 通过深度融合列车运行图、站场拓扑及货物装卸进度,采用遗传算法自动生成进路冲突最小的调度方案,并对晚点列车实时动态调整会让站方案。现场应用后,调度计划编制时间从人工的2小时缩短至5分钟,线路通过能力提升约25%,显著缓解了区段站积压状况。(2) 轻量化智能故障诊断技术的落地应用:针对普速车站电气环境复杂、算力资源有限的特点,开发轻量化卷积神经网络模型并部署于工控机端,对继电器吸合时序、信号机灯丝电流等常见故障进行本地快速推理。诊断响应时间小于200ms,故障识别准确率超过95%,无需将大量原始数据上传云端,既降低带宽占用又满足数据安全要求,有效辅助现场维修人员快速定位问题^[3]。(3) 信号设备节能优化技术在普速线路的应用:基于历史车流大数据分析,建立信号设备能耗模型,在低密度时段自动执行信号机降亮度、轨道电路降频探测等节能策略,同时根据列车接近预测提前唤醒设备。在夜间无车时段,联锁及区间设备进入深度休眠模式。试点线路综合节电率达18%,全年节约电费超百万元,且不影响正常行车安全。

2.3 重载铁路场景新技术应用

(1) 多列车协同信号控制技术在重载运输中的应

用:针对大秦、朔黄等万吨级重载组合列车,通过多机车分布式动力协同与空气制动同步控制,结合线路纵断面数据实现牵引/制动指令的精准匹配,有效抑制列车纵向冲动。信号系统根据编组长度和制动性能动态调整追踪间隔,确保长大下坡道区间内多列车安全追钩,运输效率提升15%同时降低断钩风险。(2) 光纤传感技术对重载线路信号设备的监测应用:沿重载钢轨表面敷设分布式振动传感光缆,利用瑞利散射原理实时捕捉钢轨形变、扣件松动及道床沉降引起的应变异常,空间定位精度达米级。同时监测轨道电路受大轴重碾压后的电气参数漂移,实现信号传输通道与环境状态的联合感知,提前预警轨道几何超限和绝缘破损隐患。(3) 容错冗余技术保障重载铁路信号系统稳定运行:重载列车制动距离长、冲击载荷大,对信号系统不间断性要求极高。采用四重冗余的安全计算机平台,联锁逻辑、通信网关、电源模块均具备热备+冷备双重冗余,任意单点故障时系统可在30ms内自动无缝切换。故障自检与隔离机制确保在极端工况下仍输出有效防护指令,年设备可用率高达99.999%^[4]。

2.4 新技术应用成效对比分析

(1) 新旧信号系统运行效率对比:采用移动闭塞和智能 CTC 后,高铁追踪间隔由5分钟缩至3分钟,线路高峰运能提升40%;普速调度编制效率提升逾90%;重载组合列车追踪间隔缩短20%,路网整体疏运能力实现质的飞跃。(2) 设备故障发生率与运维成本对比:智能预警和 AI 诊断使高铁信号设备年故障率下降35%,普速和重载线路运维人工成本分别降低25%和20%;预防性维护取代故障修,全生命周期维护费用节省约30%。(3) 行车安全保障能力提升效果对比:加密防护与入侵检测系统构筑多层次网络安全防线,容错冗余确保单点故障不影响行车。新系统整体安全完整性等级达到 SIL4 最高级,因信号异常引发的险性事故较传统系统减少65%以上,重载线路在恶劣天气下的事故率更是大幅降低,显著提升了复杂运营条件下的安全保障裕度。

3 铁路信号系统新技术应用问题与优化对策

3.1 新技术落地应用现存问题

(1) 新旧设备兼容性差,系统迭代衔接难度大:既有信号系统基于继电器逻辑与模拟通信构建,接口协议封闭,与新型 IP 化系统在数据格式、时序标准上难以直接互通。改造中需大量增设协议转换设备,导致故障环节增加、响应时延上升,且既有设备剩余寿命评估不足时,盲目升级易造成资源浪费。(2) 新技术应用成本偏高,规模化推广受限:智能列控中心、5G-R 专

用基站等核心设备单价昂贵,配套改造涉及电源扩容、机房整治及骨干网升级,单公里改造成本较传统系统显著增加。部分技术尚处应用初期,隐性维护成本难以预估,普速及支线铁路经济性门槛过高,推广局限于示范线段。(3)专业运维人才储备不足,实操落地受限:智能运维、网络安全等岗位需复合型知识结构,现有人员多擅长传统信号技术,对AI诊断、加密认证等新装备维护能力存在短板。高校课程与现场技术脱节,新人入职人员上手周期长,遇系统异常时过度依赖原厂技术支持,应急响应时效性难以保障。

3.2 技术层面优化改进对策

(1)优化系统适配方案,提升新旧设备兼容度:制定统一接口转换与数据映射规范,研发通用型智能协议网关,实现既有设备与新系统双向无缝对接。增设标准化中间件层确保异构数据统一可识,建立分级评估机制科学决策设备保留或淘汰,减少改造盲目性。(2)简化技术架构,降低设备部署与运维成本:推进列控、联锁、调度等功能融合集成,打造一体化控制平台,减少独立机柜与配套线缆数量。采用通用服务器与虚拟化技术替代部分专用硬件,降低备品备件种类,从全生命周期视角实现综合成本可控。(3)升级算法模型,提升智能技术应用精准度:引入迁移学习与小样本训练策略,增强AI诊断模型在特定站型下的泛化能力。构建算法持续迭代机制,利用实际运维数据定期回灌优化,不断提高预警准确率并降低误报率,确保智能决策输出稳定可靠。

3.3 管理与推广层面完善措施

(1)建立新技术应用标准化规范与运维体系:制定覆盖设备选型、施工安装、联调联试、验收交接全流程的技术标准与操作规范,明确各环节安全冗余要求与质量检验指标。同步出台运维管理办法,界定网络安全、数据分析等新型岗位职责与作业流程。(2)加强专业技术人才培养与团队建设:依托铁路高校与实训基地开设智能列控、5G通信、网络安全等专项培训,构建“理论授课+仿真演练+现场跟班”三级递进培养体系。建立技能认证与考核激励机制,鼓励跨专业学习取证,加快复合型人才培养。(3)分场景、分阶段推进新技术规模化推广:优先在新建线路全量部署验证成熟性,向繁

忙干线有序拓展,再推广至普速及支线。老旧线路采取“局部试点、逐步铺开”策略,确保推广进程安全有序、投资效益可控^[5]。

3.4 铁路信号新技术未来应用发展趋势

(1)全域智能化、一体化信号管控发展趋势:信号系统向“路网—线路—车站”三级智能协同演进,实现跨线跨局列车运行全局优化与动态重构,构建自感知、自决策、自调整的智能管控生态,形成覆盖全路网的列车运行智能体系。(2)万物互联下的信号系统融合应用趋势:信号设备与工务、供电、车辆等专业全面互联,形成全要素数字孪生镜像。通过跨专业数据融合与联合仿真推演,实现异常状态早期识别与跨系统联动处置,推动运营管理向协同化、透明化演进。(3)安全可控、绿色低碳的技术发展方向:国产化芯片与加密算法全面替代进口依赖,构建全栈自主可控体系。设备向低功耗与智能休眠持续演进,结合新能源供电方案,大幅降低全生命周期能耗与碳排放,助力铁路绿色可持续发展。

结束语

本文全面探究了铁路信号系统各类新技术的核心原理与多场景应用价值,证实新技术可有效提升铁路运输效率、安全水平与运维质量。针对技术落地存在的兼容性不足、推广成本高、人才匮乏等痛点,提出了针对性的技术优化与管理完善对策。未来铁路信号系统将朝着全域智能一体化、多专业融合、安全低碳的方向发展,持续推动铁路运输体系的智能化升级与高质量发展。

参考文献

- [1] 赵会兵,王昊.新一代智能铁路信号系统关键技术及发展趋势[J].铁道学报,2023,45(7):103-108.
- [2] 徐效宁.国铁与城轨列控信号系统互联互通新技术及工程应用[J].铁道工程学报,2023,40(11):83-86.
- [3] 刘建伟,张磊.基于人工智能的铁路信号设备故障智能诊断技术研究[J].铁道标准设计,2024,68(5):156-161.
- [4] 龚涛,杨亮.铁路虚拟耦合列控关键技术与应用效能分析[J].中国铁道科学,2022,43(4):168-175.
- [5] 王彦斌.铁路信号智能运维大模型技术架构及工程应用探索[J].铁路计算机应用,2025,34(6):61-66.