

铁路信号设备的自动化控制技术分析

李鹏飞

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 017000

摘要：为提升铁路行车安全与运输效率，本文围绕铁路信号设备自动化控制技术展开系统性研究。首先阐述信号设备与自动化控制的基础理论及核心支撑技术，重点剖析计算机联锁、ATC、故障容错及智能自适应控制技术的应用原理与流程。同时梳理技术应用中存在的设备代际差异、环境适配不足、运维体系不完善等问题，针对性提出技术、设备、体系优化策略，并预判智能化、一体化、高容错化的行业发展趋势。

关键词：铁路信号设备；自动化；控制技术

引言：随着我国铁路路网规模持续扩大、运营密度不断提升，传统人工管控模式已难以适配现代化铁路安全、高效、稳定的运行需求。铁路信号设备作为行车指挥的核心设施，其自动化控制水平直接决定铁路运输的安全性及通行效率。为厘清各类自动化控制技术的应用价值与现存短板，本文结合铁路信号设备运行原理，深入探究核心自动化控制技术的应用场景，剖析实际应用中的各类问题并制定优化方案，为智慧铁路信号系统升级提供参考。

1 铁路信号设备与自动化控制技术基础

1.1 铁路核心信号设备概述

(1) 基础信号设备组成：主要包括信号机、轨道电路、道岔、联锁及闭塞设备。信号机以灯光颜色传递指令（红、黄、绿分别代表禁止、警示、通行）；轨道电路利用钢轨检测列车轮对分路状态，判断区段占用；道岔由转辙机驱动尖轨位移，实现进路变更；联锁设备确保道岔、信号机与轨道区间间的安全制约关系；闭塞设备划分区间，保持追踪列车安全间隔^[1]。(2) 设备运行核心要求：须遵循安全性、实时性、稳定性与故障容错性四大标准。安全性要求“故障导向安全”，异常时设备自动转至最安全状态（如信号转红）；实时性要求位置与速度信息在毫秒级内完成采集处理与传输；稳定性确保在强电磁干扰、宽温域等恶劣环境下长期可靠运行；故障容错性通过冗余设计（如双机热备）与自诊断功能，保障单点失效不危及行车安全。

1.2 自动化控制技术核心原理

(1) 自动控制基本逻辑：铁路信号自动控制系统以闭环控制为核心，通过传感器实时采集列车速度、位置及设备状态数据，经逻辑运算后生成控制指令（如

调速、制动），并持续监测执行结果以形成反馈修正。系统内置智能响应机制，能根据预设算法自动调节控制参数；同时具备故障自锁功能，当检测到超出安全阈值的偏差时，立即锁定危险侧输出，强制设备导向安全状态。(2) 铁路场景适配原理：系统需依据列车实时运行状态（速度、牵引/制动特性、编组长度）与线路环境（坡道、曲线半径、道岔限速、临时限速区段），动态调整控制策略。例如，在长大下坡道区段，自动控制会提前介入，结合轨道电路与应答器信息，生成连续式速度监督曲线，实现减速度的平滑控制，确保列车在任何线路条件下均能安全、高效运行。

1.3 铁路信号自动化控制关键支撑技术

(1) 计算机联锁技术：采用分布式或二乘二取二架构，以高性能工业计算机为核心，将进路、道岔与信号逻辑关系数字化。相比继电器联锁，运算快、可编程强，可灵活实现复杂车站进路自动排列与冲突检测，并支持与 CTC 系统无缝对接，提升作业效率与安全性。(2) 传感器实时采集技术：综合运用计轴器、轨道电路、应答器、雷达及激光雷达等，获取轮轴计数、区段占用、位置校准、相对速度及障碍物距离等信息。多源数据通过时间同步与冗余校核，确保高置信度环境感知。(3) 网络通信与数据传输技术：依托铁路专用协议（RS-485、MVB、工业以太网及 GSM-R/5G-R），构建冗余环网或双网拓扑，实现低时延、高可靠传输。采用国密 SM 系列加密算法，对无线报文进行完整性保护与身份认证，防止篡改和非法接入，保障信号控制信息安全交互。

2 铁路信号设备自动化控制核心技术及应用分析

2.1 计算机联锁自动化控制技术

(1) 技术架构: 系统硬件采用冗余配置的工业控制计算机、安全型输入输出接口板、专用驱采电路及双路独立电源模块, 构建二乘二取二或三取二安全计算平台; 软件控制系统基于实时多任务操作系统, 内嵌联锁逻辑运算、进路自动搜索、操作显示及自诊断等核心功能模块; 数据交互模块通过标准通信网关, 采用 RS-485、CAN 总线或工业以太网等铁路专用协议, 实现与室外设备 (转辙机、信号机、轨道电路) 及上层系统 (调度集中、微机监测) 的双向实时数据交换。(2) 应用流程: 自动化控制以进路办理为主线。首先进入进路锁闭阶段, 系统接收操作或自动排路指令后, 依据站场拓扑数据检查敌对进路、道岔位置及轨道区段空闲状态, 全部条件满足后下达道岔锁闭命令。其次为道岔转换阶段, 系统驱动转辙机动作, 通过采集表示杆位移和密贴检查信息确认转换到位并锁闭。最后是信号开放阶段, 确认进路安全无误后, 控制信号机由禁止转为允许信号, 列车越过信号机后系统自动关闭信号并解锁进路^[2]。(3) 应用优势: 计算机联锁以软件逻辑取代继电器硬线组合, 改扩建仅需更新数据配置而无需重新布线, 工程成本显著降低; 进路搜索处理速度由秒级提升至毫秒级, 有效提高咽喉区通过能力; 同时支持远程集中控制、操作记录追溯与板卡级故障自诊断, 大幅减少故障延时与人为失误。

2.2 列车运行自动控制 (ATC) 技术

(1) 技术分类: ATC 由三大子系统协同构成。ATO 负责站间自动驾驶与车站精准停车; ATP 为安全核心, 持续比对实时速度与允许速度, 超速即触发紧急制动; ATS 实现全线运行图管理、列车追踪与自动调整发到时刻, 三者配合实现 “驾驶—防护—调度” 一体化控制。(2) 控制逻辑: 系统采用目标距离速度控制模式, 根据前方目标点距离、线路限速及列车制动性能实时生成速度-距离防护曲线。车载控制器以毫秒级周期采样实际速度, 计算与目标速度偏差后通过 PID 或模型预测控制输出牵引/制动指令, 同时依据轨道电路或无线通信获取移动授权, 动态调整追踪间距。(3) 场景应用: 高铁采用 CTCS-3 级, 依托 GSM-R 无线通信实现移动闭塞追踪; 城际铁路采用 CTCS-2+ATO, 增加自动折返与站台精确停车功能; 普速铁路沿用 CTCS-0/1 级, 以地面信号为主, ATP 仅执行固定限速防护, 形成差异化分级应用格局。

2.3 信号设备故障自动诊断与容错控制技术

(1) 故障实时监测技术: 系统通过部署于各设备的智能传感器 (如电流/电压互感器、温度振动传感器、道

岔缺口监测器) 持续抓取运行参数, 利用边缘计算单元提取特征值, 并与预设健康基准比对。当检测到参数异常漂移 (如转辙机动作电流超限、轨道电路分路不良) 时, 立即触发预警, 通过时域/频域分析识别早期劣化趋势, 实现故障前兆的主动告警。(2) 自动容错控制技术: 故障发生后, 系统启动分级容错策略。首先, 安全型设备自动导向危险侧封锁 (如信号恢复红灯); 其次, 冗余切换机制在毫秒级内将控制权转移至备用模块 (如双机热备切换); 同时, 应急调控逻辑依据预设故障场景库, 自动调整相邻区段的闭塞方式或降级运行模式, 在保证安全前提下尽可能维持线路通行能力, 避免全线瘫痪^[3]。(3) 运维自动化应用: 系统将监测数据与故障记录上传至运维管理中心, 利用故障树分析和历史案例库实现精准故障定位, 精度可达板卡级或接点级; 通过大数据趋势分析预测设备剩余寿命, 生成维修建议工单; 结合电子履历与健康管理 (PHM) 技术, 实现状态修替代定期修, 显著减少非计划停机, 提升运维智能化水平。

2.4 智能化自适应控制技术

(1) 动态自适应控制原理: 系统实时采集车流密度、区间运行时分、天气条件 (雨雪风速) 及设备损耗参数, 通过在线学习算法动态调整控制策略。例如, 在高峰时段自动缩短追踪间隔并优化进路排布, 在大风天气自动降速并延长制动距离, 在道岔磨耗加剧时微调转换力矩, 确保控制输出始终匹配当前环境与设备状态的最优边界^[4]。(2) 智能算法的应用: 大数据技术用于挖掘海量历史运行数据中的关联规则, 建立信号设备退化模型和列车能耗优化模型; 机器学习 (如强化学习、神经网络) 被应用于进路冲突预测、超速风险预判及节能驾驶曲线生成, 通过离线训练与在线推理相结合, 持续优化控制参数。目前部分线路已试验基于深度学习的道岔动作时间预测和基于强化学习的列车节能运行方案, 显著降低牵引能耗并提高正点率, 为未来全自动无人驾驶奠定算法基础。

3 铁路信号设备的自动化控制技术应用现存问题与优化发展策略

3.1 自动化控制技术应用现存问题

(1) 技术层面: 老旧线路继电器联锁与交流计数轨道电路, 同新建计算机联锁、ZPW-2000 设备存在接口协议与通信速率代际差异, 需多级协议转换, 易增延迟与误码。现有机器学习模型多基于典型线路训练, 山区大坡道、小半径曲线、复杂进路等极端场景下, 控制参数难匹配实际动力学, 致速度超调或制动偏差。雨雪冰

冻、强风沙条件下,传感器信号受干扰,测速测距精度下降,闭环误差累积可能触发非必要安全制动。(2)设备层面:长期运行致电子元件性能漂移,如道岔转辙机动作电流随温度波动、轨道电路补偿电容容值衰减,动作一致性下降,故障率随服役年限上升。冗余设计多限于主机双套热备,通信链路、供电回路及采集通道仍存单节点瓶颈,多点并发故障时缺乏有效降级手段。(3)运维层面:智能运维处初级阶段,各子系统监测数据分散存储,缺统一数据中台关联挖掘,告警误报、漏报较多。一线维护人员擅长传统继电器检修,对嵌入式、网络及软件调试技能不足,人才断层。故障处置依赖人工经验,缺标准化应急预案与远程支援通道,从告警到恢复耗时偏长,影响运输秩序。

3.2 自动化控制技术优化改进策略

(1)技术优化:升级智能控制算法,引入自适应PID与模型预测控制(MPC)替代固定参数策略,根据列车实时牵引/制动性能在线整定控制系数;完善多场景自适应控制模型,针对不同线路条件、车型编组及气象等级建立场景标签库与控制策略映射表,实现“一线一策”“一车一策”的动态匹配;强化数据传输稳定性,部署冗余通信链路及断点续传机制,关键列控指令采用时间戳与校验码双重保护,降低无线传输丢包对行车安全的影响。(2)设备升级:分批次推进老旧车站信号设备智能化改造,以安全型电子执行单元替代故障率高发的继电器组合,统一接口协议标准并预留扩展端口。优化冗余架构设计,关键环节实现电源、通信、采集三重冗余,消除单节点瓶颈;在采集前端增加硬件滤波与自适应阈值调整功能,提升设备在强电磁干扰环境下的抗干扰能力,从根源上降低偶发故障概率,使系统平均无故障时间提升至10万小时级以上^[5]。(3)体系完善:构建统一的智能化运维管理体系,整合各子系统监测数据形成企业级数据中台,利用专家规则库与机器学习结合的混合诊断引擎,将故障误报率降低30%以上。搭建设备全生命周期管控平台,从出厂履历、安装调试、定期检修到报废更换实现全流程数字化追踪,结合剩余寿命预测模型指导精准维修计划编排,实现运维资源的最优配置。

3.3 铁路信号自动化控制技术发展趋势

(1)智能化深度升级:人工智能与物联网技术深度融合,信号设备嵌入边缘计算单元,在端侧即可完成数据预处理与异常判别,减少云端依赖。深度学习应用于联锁逻辑自验证和进路冲突预判,系统逐步具备自主感知、自主决策与自主执行能力,向全场景无人干预的自主控制方向演进。(2)一体化集成发展:打破信号、调度、运维的传统功能边界,构建统一智能管控平台,实现运行图调整、进路控制与设备维护的协同闭环。信息流在调度指挥中心、车站与列车之间贯通共享,形成“车一地—云”协同的智慧铁路生态,整体运输效能可提升15%~20%。(3)安全冗余常态化:全方位故障预警与自愈控制技术从辅助手段上升为标准配置。系统具备实时自检与主动容错能力,在故障萌芽阶段即启动隔离或修复措施,通过软件定义冗余替代部分硬件备份,确保任一单一故障均不影响行车安全,将“故障安全”理念升级为“故障免疫”目标。

结束语

本文系统分析了铁路信号设备自动化控制的核心技术、应用现状、现存问题及优化路径。当前铁路信号自动化技术已实现规模化应用,但仍存在设备适配、算法优化、智能运维等方面的短板。未来需依托人工智能、大数据、物联网技术,持续推进设备智能化升级、系统一体化集成与运维体系完善,推动铁路信号控制从自动化向智慧化、自主化进阶,全面筑牢铁路行车安全运行根基。

参考文献

- [1] 夏涛. 铁路信号设备的自动化控制技术分析[J]. 中国高新科技, 2025, 23(18): 126-128.
- [2] 郁文斌, 邱兆阳. 基于扩展有限状态机的铁路信号设备自动化控制与测试技术[J]. 铁道学报, 2025, 47(02): 83-91.
- [3] 杨培刚. 基于DWT-PNN的重载铁路信号设备智能自动化控制与故障检测技术[J]. 信息技术, 2025, 49(11): 186-192.
- [4] 段国平. 铁路信号设备自动化控制系统设计与技术优化[J]. 现代工业经济和信息化, 2022, 12(05): 235-239.
- [5] 王筱骅. 铁路电务信号设备自动化控制技术及工程应用[J]. 设备管理与维修, 2024, 10(06): 78-80.