

# 铁路信号设备的自动化控制技术分析

段小刚

中铁武汉电气化局集团有限公司西安分公司 陕西 西安 710000

**摘要:** 铁路信号设备自动化控制技术是保障铁路运输安全高效的核心支撑。本文深入剖析自动化控制的核心构成, 涵盖组件、架构与运行逻辑, 阐述列车运行、道岔信号机控制等关键技术, 解析指令生成传输、状态感知调控等运行机制, 并展望技术迭代、融合应用及设备控制优化等发展方向。该技术通过多源数据融合、智能算法应用及分层架构设计, 实现设备精准控制与协同运行, 为铁路运输提供可靠保障, 推动行业向智能化、高效化迈进。

**关键词:** 铁路信号设备; 自动化控制技术; 分层架构; 协同控制; 技术融合

引言: 铁路信号设备自动化控制是保障列车运行安全、提升运输效率的核心环节。随着铁路网络规模扩大与运营复杂度增加, 传统控制方式已难以满足实时性、可靠性及智能化需求。自动化控制技术通过集成传感器、逻辑控制、通信网络及智能算法, 构建起覆盖设备状态感知、指令生成、执行反馈的全链条闭环系统。该技术不仅实现了列车运行精准调控、道岔信号机自动控制及设备健康监测, 还通过多设备协同机制确保全线运行安全。其分层架构设计与冗余容错机制, 为系统扩展性与可靠性提供了双重保障, 成为现代铁路信号系统的技术基石。

## 1 铁路信号设备自动化控制技术的核心构成

### 1.1 自动化控制核心组件

铁路信号设备自动化控制体系由多种关键组件协同构成, 共同支撑起系统的稳定运行。继电器作为基础控制元件, 通过电磁感应原理实现电路通断的精准切换, 其高可靠性设计确保在复杂电磁环境下仍能稳定工作, 为信号逻辑控制提供基础保障<sup>[1]</sup>。继电器的动作时间通常在10-50ms之间, 能够满足铁路信号快速切换的需求。逻辑控制单元采用可编程控制器或专用控制芯片, 具备强大的数据处理能力, 能够实时解析输入信号并生成控制指令, 是系统智能决策的核心载体。传感器网络分布于轨道、信号机、道岔等关键位置, 持续采集设备状态数据, 为系统提供实时运行信息, 其精度与响应速度直接影响控制效果。执行机构包含电动转辙机、信号灯驱动模块等, 负责将控制指令转化为物理动作, 完成道岔转换、信号显示等关键操作, 其动作准确性与响应时间决定系统运行效率。通信模块承担数据传输任务, 通过有线或无线方式实现车地间、设备间的信息交互, 构建起覆盖全线的通信网络, 确保控制指令与状态数据的实时传递。

### 1.2 自动化控制的技术架构

铁路信号自动化控制采用分层递进式技术架构, 各层级功能明确且相互协作。数据采集层通过传感器网络实现设备状态信息的全面感知, 为上层提供原始数据支撑。数据处理层运用边缘计算技术对采集数据进行预处理, 过滤无效信息并提取关键特征, 减轻核心处理器负担。逻辑控制层基于预设规则与算法模型, 对处理后的数据进行深度分析, 生成控制策略与执行指令, 是系统智能化的关键环节。执行反馈层将控制指令转化为具体设备动作, 并通过状态反馈机制验证执行效果, 形成闭环控制回路。各层级间通过标准化接口实现数据交互, 既保证系统模块化设计的灵活性, 又确保整体运行的协同性。这种分层架构设计使系统具备高扩展性, 能够通过升级特定层级模块实现功能迭代, 而无需对整个系统进行重构。

### 1.3 自动化控制的运行逻辑

铁路信号自动化控制遵循严格的逻辑时序与安全准则。系统启动后首先进行自检程序, 验证各组件工作状态与通信链路可靠性, 确保所有模块处于正常待命状态。当列车进入控制区域时, 轨道电路或应答器等定位设备立即感知列车位置, 并将信息上传至控制中心。控制中心结合列车运行计划与线路状态数据, 通过联锁算法验证进路安全性, 确认无冲突后开放信号并驱动道岔转换至指定位置。在列车运行过程中, 系统持续监测列车速度、位置及设备状态, 动态调整信号显示与限速指令, 确保列车始终处于安全运行区间。当检测到设备异常或潜在风险时, 系统立即触发安全防护机制, 通过降级运行模式或紧急制动指令保障行车安全。整个控制过程严格遵循故障导向安全原则, 任何单一组件故障均不会导致危险侧输出, 通过冗余设计与容错机制确保系统可靠性。

## 2 铁路信号设备自动化控制的关键技术

### 2.1 列车运行控制相关自动化技术

列车运行控制自动化技术通过多维度信息融合实现精准速度调控。基于轨道电路的连续式信息传输系统,持续向车载设备发送线路限速、前方列车位置等数据,为列车提供实时运行参考<sup>[2]</sup>。车载控制器结合列车动力学模型与线路坡度信息,计算当前允许速度并生成牵引制动指令,确保列车按目标曲线运行。移动闭塞技术突破传统固定闭塞限制,通过车地双向通信实现列车位置动态追踪,将安全间隔缩小至最小可行值,显著提升线路通过能力。速度防护模块采用分级控制策略,当列车接近限速值时提前发出预警,超速时自动触发常用制动,危急情况下实施紧急制动,构建多层次安全防护体系。

### 2.2 道岔与信号机控制自动化技术

道岔控制自动化依托高精度转辙设备与智能驱动系统实现。电动转辙机内置位置传感器与力矩监测模块,实时反馈道岔转换状态与动作阻力,当检测到卡阻或转换不到位时立即停止动作并报警。智能驱动系统根据道岔型号与线路条件自动调整转换参数,确保不同环境下均能可靠动作。信号机控制采用动态显示技术,通过LED矩阵实现多色灯位组合显示,支持多种信号制式自动切换。显示逻辑控制单元结合列车运行方向与进路状态,动态生成信号显示指令,确保信号开放时机与列车运行需求精准匹配。

### 2.3 信号监测与反馈自动化技术

信号监测自动化构建起覆盖全设备的状态感知网络。振动传感器部署于关键机械部件,通过频谱分析识别早期故障特征;温度传感器监测电气元件工作状态,预防过热引发的设备损坏;电流电压传感器实时采集供电参数,保障系统能源供给稳定。反馈控制机制采用闭环调节模式,将监测数据与标准阈值比对,当偏差超过允许范围时自动触发补偿动作。智能诊断系统运用机器学习算法对历史故障数据建模,实现故障类型自动识别与处理建议生成,缩短故障处置时间。

### 2.4 数据传输与联动控制技术

数据传输网络采用分层架构设计,骨干层通过光纤环网实现高速数据转发,接入层运用无线通信技术覆盖移动设备,确保车地间低延迟通信。时间同步技术为全系统提供统一时间基准,各设备时钟偏差控制在微秒级,保障多源数据时空一致性。联动控制技术通过标准化接口实现设备间协同,当检测到列车进站信号开放时,自动触发站台门联动开启指令;道岔转换过程中同步调整相关信号机显示,防止误操作引发冲突。跨系统

数据交互平台打破信息孤岛,将调度指挥、运维管理、旅客服务等系统数据融合,为全链路优化提供数据支撑。

## 3 铁路信号设备自动化控制技术的运行机制

### 3.1 控制指令的生成与传输机制

控制指令生成过程融合多源数据与智能算法。列车运行计划、线路状态参数及设备实时状态数据经数据融合模块处理后,形成完整运行场景描述<sup>[3]</sup>。逻辑控制单元依据预设规则库与动态优化算法,对场景数据进行深度解析,生成包含信号显示、道岔转换、限速调整等要素的控制指令集。指令生成过程中采用冗余校验机制,通过哈希算法验证指令完整性,防止传输过程数据畸变。传输网络采用分层架构设计,骨干层通过光纤环网实现高速转发,接入层运用无线通信技术覆盖移动设备,确保指令在微秒级时延内送达目标设备。传输协议采用时间敏感网络技术,为关键指令分配专用时隙,避免普通数据流对控制指令的干扰,保障指令传输的实时性与确定性。

### 3.2 设备状态的实时感知与调控机制

设备状态感知体系构建于多维传感器网络基础之上。振动传感器部署于道岔转辙机、信号机驱动机构等关键机械部位,通过频谱分析技术识别齿轮磨损、轴承缺油等早期故障特征。电流传感器监测设备供电质量,实时捕捉电压波动、谐波干扰等异常现象。温度传感器覆盖电气控制柜、LED信号模块等发热部件,预防过热引发的设备性能衰减。感知数据经边缘计算节点预处理后,通过时间同步技术标注精确时间戳,确保多源数据时空一致性。调控机制采用闭环反馈控制模式,当设备状态偏离标准阈值时,系统自动生成补偿指令驱动执行机构调整。电动转辙机配置力矩反馈模块,实时监测转换阻力并动态调整驱动电流,确保道岔在恶劣环境下仍能可靠动作。信号机亮度调节系统根据环境光照强度自动调整显示亮度,既保障显示效果又延长设备使用寿命。

### 3.3 多设备协同自动化控制机制

多设备协同控制建立在标准化接口与统一时序基准之上。车地通信模块通过轨道电路与应答器组合定位技术,实现列车位置动态追踪,为协同控制提供空间坐标参考。当列车接近道岔区段时,系统自动触发进路办理流程,联锁逻辑单元验证道岔位置、信号显示及区间空闲状态后,生成包含道岔转换、信号开放、限速调整的协同指令包。执行过程中各设备通过状态反馈机制保持动作同步,道岔转换完成后立即向信号机发送显示确认指令,信号开放后触发轨道电路占用人检测流程。跨系统协同通过数据交互平台实现,调度指挥系统将列车运

行调整计划推送至信号控制系统,运维管理系统将设备健康状态数据反馈至控制中心,形成覆盖运输组织、设备维护、安全防护的全链条协同体系。协同控制算法采用分布式计算架构,各节点独立运行局部优化模型,通过消息传递机制实现全局目标收敛,既提升系统响应速度又增强容错能力。

#### 4 铁路信号设备自动化控制技术的发展方向

##### 4.1 技术迭代与升级方向

技术迭代聚焦于核心控制单元的智能化演进与硬件架构革新<sup>[4]</sup>。新一代处理器将采用多核并行计算架构,集成专用逻辑推理模块,提升复杂场景下的实时决策能力,使系统在应对突发状况时具备更强的自主应变能力。传感器技术向高精度与高可靠性方向突破,新型材料的应用显著提升环境适应性,即使在极端温度、强电磁干扰等恶劣条件下仍能保持稳定工作,为控制决策提供精准依据。通信协议升级重点强化抗干扰能力与传输稳定性,通过优化编码方式与纠错机制,确保控制指令在复杂电磁环境中准确传达,避免因通信中断引发的安全风险。安全防护体系构建多层次防御机制,硬件层面采用冗余设计,软件层面引入形式化验证方法,从底层保障系统运行的绝对安全。

##### 4.2 技术融合应用方向

技术融合呈现跨领域深度协同特征。人工智能技术深度融入控制流程,通过构建知识图谱与推理引擎,使系统具备场景理解能力,能够根据列车运行状态、线路条件等动态因素自主调整控制策略。数字孪生技术构建虚拟信号系统,在数字空间模拟设备运行逻辑,通过虚实交互实现控制参数的优化验证,提前发现潜在冲突并制定解决方案,缩短新功能部署周期。物联网技术打通设备间信息孤岛,通过标准化接口实现数据互通,构建覆盖全线路的协同控制网络,使信号机、道岔、轨道电路等设备形成有机整体。边缘计算与云计算协同架构形成,本地节点处理实时性要求高的控制任务,云端平台完成全局优化与长期趋势分析,平衡系统响应速度与计算资源利用率。

##### 4.3 设备控制的优化方向

设备控制优化着眼于全场景适应性提升。控制逻辑

设计引入动态调整机制,根据线路使用频率、设备老化程度等参数自动优化控制参数,在繁忙区段采用高效调度模式提升通过能力,在维护期切换至保守模式延长设备寿命。能耗管理成为重要优化维度,通过智能电源管理技术实现设备工作状态与供电功率的动态匹配,信号机采用情景感知调光技术,根据环境光照强度自动调整显示亮度,既保障显示效果又降低能源消耗<sup>[5]</sup>。人机交互界面向自然化方向演进,语音交互与手势识别技术替代传统操作方式,运维人员通过自然语言指令即可完成设备状态查询与参数调整,降低操作复杂度。远程运维能力持续增强,增强现实技术辅助现场维修,专家通过虚拟标注指导复杂故障处理,结合远程控制功能实现部分维护任务的自动化执行,提升运维效率的同时降低人力成本。

#### 结束语

铁路信号设备自动化控制技术通过多组件协同与分层架构设计,实现了从设备状态感知到控制指令执行的完整闭环,为铁路运输安全与效率提供了坚实保障。当前技术发展聚焦于核心控制单元智能化升级、跨领域技术融合及全场景适应性优化,通过引入人工智能、数字孪生等新技术,推动系统向自主决策、动态调整方向演进。设备控制优化则围绕能耗管理、人机交互及远程运维展开,进一步提升系统经济性与可维护性。这些技术突破将持续强化铁路信号系统的核心能力,支撑铁路运输向更高水平发展。

#### 参考文献

- [1]夏涛.铁路信号设备的自动化控制技术分析[J].中国高科技,2025(18):126-128.
- [2]王筱骅.铁路信号设备的自动化控制技术研究[J].中国设备工程,2026(5):197-199.
- [3]段国平.铁路信号设备的自动化控制技术分析[J].现代工业经济和信息化,2022,12(5):235-236,239.
- [4]朱德华.关于铁路信号设备的自动化控制技术的探讨[J].中国新通信,2022,24(3):48-50.
- [5]余立伟.铁路信号设备的自动化控制技术分析[J].百科论坛电子杂志,2022(3):94-96.