

司控器应急运行装置在轨道交通的技术研究与运用

卿立勇

中交（天津）轨道交通运营管理有限公司 天津 300000

摘要：针对轨道交通司控器软硬件故障易引发列车动力中断、制动失效及线路停运等安全问题，本文开展司控器应急运行装置关键技术研究。文章阐述装置核心结构与性能指标，聚焦故障智能诊断、主备无缝切换、牵引制动精准控制及抗干扰核心技术，完成工程适配部署与多场景试验验证。实践表明，该装置可大幅提升列车运行安全性，缩短故障处置时长、降低运维成本，对轨道交通安全稳定运营具有重要应用价值。

关键词：司控器；应急运行装置；轨道交通技术；运用

引言：司控器作为轨道交通列车牵引、制动及方向控制的核心设备，其运行稳定性直接决定列车运营安全与效率。当前司控器易受硬件磨损、软件异常、电磁干扰等因素影响，频发信号故障，易诱发列车溜逸、追尾及线路拥堵停运等隐患。为解决司控器故障引发的运行风险，弥补现有应急保障体系短板，本文研发高性能应急运行装置，深入研究其核心技术与工程应用效果，为列车故障应急处置、提升线路运营可靠性提供技术支撑。

1 轨道交通司控器及应急运行装置核心理论与结构

1.1 轨道交通司控器系统概述

（1）司控器由手柄、凸轮机构、电位器或编码器、触点组及控制板卡构成。司机操纵手柄输出级位指令，经非接触式霍尔传感器或 CAN 总线转换为数字信号，传至列车控制与监控系统，实现人机交互。（2）牵引控制通过脉冲宽度调制占空比调节牵引逆变器输出电压与频率；制动控制联合电制动与空气制动，按减速度曲线分配制动力；方向控制通过逻辑互锁确保前进/后退指令互斥，防止指令冲突^[1]。（3）司控器是列车牵引与制动指令的核心输入设备，其输出直接影响牵引控制单元和制动控制单元的执行策略。司控器信号异常将触发紧急制动或限速运行，因此被视为列车运行安全的关键源头设备。

1.2 司控器常见故障类型及失效机理

（1）硬件故障包括触点氧化导致接触电阻增大、电位器磨损引起级位跳变、接插件松动造成信号瞬断，以及电解电容老化引起电源纹波超标，严重时导致控制板掉电重启。（2）软件故障表现为通信帧校验错误、看门狗超时复位、级位解析逻辑异常导致输出跳变，以及电磁干扰引发存储器位翻转，造成控制参数错误或状态机

死锁。（3）故障一旦发生，可能引发牵引指令丢失导致列车动力中断，或制动指令误判造成制动力不足，带来列车追尾、溜逸等严重安全风险，甚至导致线路停运。

1.3 应急运行装置核心结构与工作机制

（1）应急装置由冗余控制单元、双路隔离电源单元和信号采集与驱动单元组成。控制单元基于双微控制器热备架构，电源单元支持输入宽压防反接和过流保护，信号单元完成级位采集、触点状态监测和输出驱动。（2）故障检测采用“心跳+问答”组合策略，检测周期不大于 50ms。当主控单元失效时，备用单元在 100ms 内完成切换，同时保持输出平滑，避免冲击。（3）应急模式下，装置根据手柄级位输出固定百分比牵引力，同时自动施加限速，最高运行速度不超过 25km/h；方向切换需在零速条件下执行，确保列车以安全方式驶离故障区间。

1.4 应急装置技术性能指标

（1）故障响应时间 $\leq 50\text{ms}$ ，主备切换时间 $\leq 100\text{ms}$ ，级位输出精度不低于 0.5%FS，确保切换过程无跳变、无中断。（2）应急运行期间，装置应保持 MTBF $\geq 10^5\text{h}$ ，具备过压、过流、短路及防反接保护，绝缘耐压 $\geq 1500\text{V}$ ，确保故障工况下不引发二次危害。（3）装置适应 DC24V ~ 110V 宽压输入，工作温度范围为 $-25^\circ\text{C} \sim +70^\circ\text{C}$ ，相对湿度 $\leq 95\%$ ，振动冲击满足 EN50155 标准要求，可适配多种车型安装接口。

2 司控器应急运行装置在轨道交通的关键技术研究

2.1 故障智能识别与诊断技术

（1）司控器运行状态实时采集技术：在司控器手柄级位输出端、触点通断回路及通信总线节点部署

多路高精度采样通道,同步采集电压、电流、频率及 CAN/RS485 总线数据,采样率不低于 1kHz,利用 FPGA 进行前端数据预处理与时间戳标记,确保原始状态数据的完整性与实时性。(2)多维度故障特征分析与精准判定算法:提取时域(均值、方差、峰值)、频域(谐波分量、频谱能量)及时序(变化率、累计偏差)三维特征向量,构建基于改进支持向量机与决策树融合的故障分类模型,训练样本覆盖接触不良、信号漂移、通信超时等典型故障模式,故障识别准确率不低于 99.2%^[2]。(3)故障分级预警与快速定位技术:将故障划分为轻微、一般、严重三个预警等级,轻微故障触发维护提示,一般故障启动备用通道并限速运行,严重故障立即实施紧急制动。采用基于故障树的最小割集定位方法,结合历史故障库进行比对匹配,可在 200ms 内定位故障单元并输出报警代码。

2.2 主备系统无缝切换控制技术

(1)无扰动切换逻辑设计与优化:设计“先备后主”切换时序,即备用单元提前完成输出跟踪与相位锁定,切换时刻仅变更输出使能信号,避免传统“先断后通”方案产生的输出中断。引入输出变化率限制器,切换前后级位变化率限制在 5%/s 以内,确保列车无冲击过渡。(2)切换过程信号同步与容错处理技术:主备单元间通过高速 SPI 总线实时交换输出级位、工作状态及时间基准,实现微秒级同步。采用三模冗余比较机制,当主备输出偏差超过阈值时,采用中值优选策略;单路信号异常时自动屏蔽故障源,确保切换瞬间控制指令连续、无跳变。(3)手动、自动双模式切换控制技术:自动模式下由在线故障检测逻辑自主触发切换,切换阈值依据故障等级动态调整;手动模式下通过驾驶台专用切换开关实现人工干预,切换过程受逻辑闭锁保护,防止误操作引发指令冲突,两种模式相互独立且互为备份。

2.3 应急牵引制动精准控制技术

(1)应急模式下牵引动力平稳调控技术:应急运行时采用斜率限制算法对牵引级位变化率进行约束,上升斜率不大于 5%/100ms,下降斜率不大于 8%/100ms;引入加速度闭环反馈,实时修正输出级位,抑制牵引力突变产生的纵向冲动,使列车冲动率控制在 0.75m/s³ 以内^[3]。(2)分级制动精准控制与防冲击技术:制动指令按减速度需求分为初级制动(0.6m/s²)、中级制动(1.0m/s²)和紧急制动(1.4m/s²)三个等级,各级别间采用 S 型过渡曲线平滑衔接。同时根据车速动态调整电制动与空气制动配比,优先使用电制动再生能量,减少闸瓦冲击磨损。(3)紧急工况下安全制动防护技术:

当检测到超速、信号丢失或设备严重故障时,装置立即触发安全制动逻辑,采用“紧急制动+撒砂辅助”组合策略缩短制动距离。在制动过程中实时监控轮轨黏着状态,若检测到滑行则自动降低制动力并重投,确保列车在极限工况下仍能安全停车。

2.4 高可靠硬件与抗干扰技术

(1)应急装置核心元器件选型与优化设计:控制芯片选用通过 SIL4 安全认证的工业级双核 MCU,功率器件选用内阻低于 5mΩ 的 MOSFET,关键电容采用固态聚合物钽电容。所有元器件工作温度范围覆盖-40℃~+85℃,并通过 1000 小时高温老化筛选,确保长期运行参数稳定。(2)复杂电磁环境下信号抗干扰技术:模拟信号传输采用差分方式并增加共模扼流圈,数字信号经光耦隔离后再进入控制核心;PCB 设计采取四层板结构,完整地平面分区布置,关键信号线两侧布设接地屏蔽线;机箱壳体采用导电密封条实现整体屏蔽,整机通过 IEC61000-4-2/3/4/5/6 五项电磁兼容试验,满足轨道交通严苛电磁环境要求^[4]。(3)设备冗余设计与故障自愈技术:电源模块采用双路隔离输入、单路热备输出架构,任一电源失效时自动无缝切换;关键输出通道设置硬件看门狗与软件陷阱双重保护,当程序跑飞或死锁时,硬件看门狗在 1.6s 内强制复位;对瞬时故障(如通信误码、电源尖峰),装置内置自恢复逻辑,通过重试机制和滤波器自动清除扰动,无需人工干预即恢复正常运行。

3 应急运行装置工程运用与效果分析

3.1 工程应用方案设计

(1)应用线路与列车车型适配分析:选取某城市地铁既有线路作为示范应用线,该线路日均客流量大、行车间隔短,对设备可靠性要求高。装置适配 B 型及 A 型两类列车,重点分析司机台安装空间、供电接口(DC110V/24V)及通信协议(MVB 与 CAN 兼容),针对不同车型差异设计转接支架与线束适配器,确保装置可快速加装于既有列车。(2)应急装置安装布局与接线方案:控制主机安装于司机室设备柜内,采用导轨式固定;信号采集盒就近安装于司控器下方,缩短模拟信号传输路径。接线采用屏蔽双绞线并单端接地,电源线独立走线避免串扰。所有外接接口采用航空插头快接方式,平均单台安装时间控制在 40 分钟以内。(3)系统调试与上线部署流程:制定“离线自检—单车静调—联挂调—载客试运行”四阶段部署流程。离线自检覆盖电源极性、通信握手及级位采集精度验证;单车静调完成逻辑功能逐项测试;联挂调进行低速试跑与信号互

检;最后经 168 小时空载连续运行后方转入载客阶段,确保上线零隐患。

3.2 现场试验与性能测试

(1) 静态功能测试与逻辑验证试验:列车停放状态下,对手柄各级位输出进行逐点比对,验证采集误差 $\leq 0.5\%FS$;依次模拟主控失效、通信断线、电源异常等故障注入,检查应急装置故障识别率、切换成功率及报警输出正确性,共执行 156 个测试用例,通过率 100%。(2) 动态行车工况模拟试验:在试车线按真实运行图进行牵引、惰行、制动循环试验,最高速度达 80km/h。试验中每隔 2 分钟随机触发应急模式,测量切换过程中列车减速度波动值、级位跟踪偏差及信号中断时长,验证装置在动态条件下的响应稳定性。(3) 极端故障场景应急处置试验:模拟司控器完全失效、牵引逆变器通信中断及制动指令锁死三类极端工况。应急装置介入后,分别验证限速 25km/h 驶入站台、逐级减速停车及安全制动三项能力,试验共进行 30 次,平均响应时间 46ms,切换冲击加速度 $\leq 0.7m/s^2$,满足设计指标^[5]。

3.3 运用效果与运营价值分析

(1) 故障处置效率与列车准点率提升效果:装置投用后,司控器类故障平均处置时间由原来的 12 分钟压缩至 1.5 分钟(应急装置自动投入,列车无需原地等待救援),故障导致的晚点事件减少约 67%,早高峰全线路准点率由 92.3%提升至 97.1%。(2) 列车运行安全性与稳定性改善分析:应急装置投入后,因司控器异常引发的紧急制动次数由月均 2.8 次降至 0.4 次,列车运行平稳性指标(平均加速度变化率)改善约 22%。安全冗余架构使单一故障点引发运行中断的概率降低一个数量级。(3) 运维成本与救援成本优化效果:按线路 20 列车测算,全年减少救援出勤约 30 次,直接节省救援车辆燃油、人工及设备损耗费用约 45 万元;同时故障定位时间缩短,维修工时减少,年度运维综合成本降低约 18%。

3.4 运用现存问题与优化方案

(1) 现场运用中暴露的技术与适配问题:部分老旧

车型通信协议非标准版本,导致初期数据解析异常;极端低温($-20^{\circ}C$ 以下)环境下,个别电源模块启动时间延长;装置报警阈值的固定设置偶尔触发非必要切换,影响正常运营体验。(2) 针对性的技术优化与方案改进措施:升级通信接口为可配置协议栈,支持用户自定义数据帧解析规则,覆盖主流车型通信差异;电源模块更换为低温特性更优的器件并增加预加热电路;引入自适应阈值算法,根据历史运行数据动态调整故障判定门限,降低误切换率至 0.2% 以下。(3) 长期迭代优化方向:后续版本向智能化方向演进,集成边缘计算能力实现故障预测与寿命预估;完善地面数据分析平台,通过无线传输将应急装置运行日志上传至运维中心,支撑全线路健康管理;同时推动装置轻量化和小型化设计,减少司机室占用空间,提升装车适配性。

结束语

本文系统研究了轨道交通司控器应急运行装置的心理理论、关键技术与工程应用成效,验证了装置在故障识别、无缝切换、安全控车方面的优异性能。装置有效解决了司控器故障导致的各类运营问题,显著提升列车运行安全性与准点率,优化运维成本。同时梳理了现场应用短板并提出优化方案,后续将持续推进装置智能化、轻量化迭代,助力轨道交通应急保障体系的升级完善。

参考文献

- [1] 陶波,魏晓婷.城市轨道交通列车应急备用司控器研究与应用[J].机电工程技术,2024,55(05):168-173.
- [2] 武瑞成.HXD2 型机车司机控制器级位异常故障分析与优化措施[J].铁道机车与动车,2024,16(09):37-39.
- [3] 宋新勇,李猛,张秦盈.动车组司机控制器可靠性优化与应急冗余设计[J].铁道技术监督,2023,51(07):55-58.
- [4] 杨汗平.广州市轨道交通十三号线车辆司控器问题及解决方案[J].设备管理与维修,2025,11(08):76-78.
- [5] 徐开德,何晓亮,尚永宝.司控器工作原理及应急处置技术探讨[J].机车车辆工艺,2024,20(06):52-54.