

地铁信号系统车载故障的影响探究

卢 帅 姜 珂 白 圆

西安市轨道交通集团有限公司运营分公司 陕西 西安 710000

摘 要：地铁信号系统车载设备是保障列车安全高效运行的核心，其故障可能引发运营效率下降、安全风险攀升及服务质量受损等连锁反应。该研究分析通信故障、硬件故障、软件故障等类型及设备老化、电磁干扰、维护不足等成因，探究故障对运营效率、安全及乘客体验的具体影响，提出强化预防性维护、完善应急流程、推进智能化升级等应对策略，为提升系统可靠性、保障列车平稳运行提供参考。

关键词：地铁信号系统；车载故障；影响

引言

地铁信号系统车载设备作为列车运行控制的关键，其稳定运行直接关乎运营秩序与乘客安全。随着运营年限增长及客流压力增大，车载设备故障频发，对列车准点率、行车安全及服务水平构成挑战。本文从车载设备概述入手，剖析故障类型与成因，深入探究故障影响，结合实际运营需求，提出针对性应对策略，旨在为优化设备运维、提升系统稳定性提供实践指导，助力实现更安全高效的地铁运营。

1 地铁信号系统车载设备概述

地铁信号系统车载设备是列车运行控制的核心执行单元，其通过多维度信息交互构建起列车与地面系统的实时联动机制，精准解析轨道电路、应答器等外部信号源传递的位置与速度指令，结合车载测速测距装置生成的动态数据，形成闭环控制逻辑以保障列车安全运行。该系统集成了车载安全计算机、人机交互界面、无线通信模块等关键组件，其中安全计算机作为决策中枢，采用冗余架构设计实现运算过程的双重校验，确保在复杂工况下仍能输出可靠的驾驶模式指令，人机交互界面则以图形化方式向驾驶人员展示列车当前状态、目标速度及预警信息，为人工干预提供直观参考。车载设备的稳定运行依赖于多层次的自检与维护机制，通过内置诊断程序对硬件状态、通信链路及软件逻辑进行实时监测，一旦发现异常便触发分级报警机制，同时将故障信息编码后通过车地无线通道上传至地面维护系统，便于技术人员快速定位问题根源。针对不同运行场景，系统可自动切换自动驾驶、ATP防护下的人工驾驶等模式，在高峰时段通过优化牵引与制动曲线提升运行效率，在故障降级模式下则依托备用信号源保障列车维持最低安全标准继续运行。随着智能化运维技术的应用，车载设备正逐步具备预测性维护能力，通过对历史运行数据的建模

分析，提前识别潜在故障风险并生成维护建议，将传统被动抢修转化为主动预防，有效降低设备故障率。在信号系统升级过程中，车载设备需与地面系统进行深度适配调试，通过多轮联合测试验证新增功能的兼容性与可靠性，确保系统迭代后仍能保持原有控制精度与响应速度，为乘客提供更加平稳高效的出行服务。

2 地铁信号系统车载故障类型与成因分析

2.1 故障类型

2.1.1 通信故障

通信故障多表现为车地无线传输链路中断或数据丢包，当无线通信模块与地面基站的信号切换出现延迟时，会导致列车位置报告与地面指令传输不同步，进而引发自动驾驶模式下的紧急制动。应答器信息接收异常也属于典型通信故障，金属粉尘附着或电磁环境突变可能干扰射频信号解码，使车载设备无法获取精确的定位基准数据，造成列车定位漂移。此类故障常伴随动态授权丢失现象，需依赖备用通信通道重建数据链路以恢复正常控制逻辑。

2.1.2 硬件故障

硬件故障集中体现为车载安全计算机冗余单元同步失效、测速传感器脉冲信号异常等情况，安全计算机的核心处理器若出现运算偏差，会导致双重校验结果不一致，触发系统强制降级。测速轮径磨损或打滑会使速度采集数据失真，造成实际运行速度与ATP监控速度产生偏差，严重时引发超速防护误动作。电源模块输出电压波动也可能导致各硬件组件供电不稳定，表现为接口模块频繁重启或数据总线通信中断^[1]。

2.1.3 软件故障

软件故障主要源于控制逻辑冲突或数据处理异常，在模式切换过程中，若自动驾驶程序与人工干预指令的优先级判定出现逻辑漏洞，可能导致列车牵引制动指令

执行紊乱。数据缓存溢出会使应答器报文解析延迟,造成后续定位点计算错误,表现为列车在区间运行时突然显示位置跳变。软件补丁兼容性问题也可能引发隐性故障,新增功能模块与既有系统的接口适配不当,会在特定工况下触发程序异常退出,需通过离线仿真测试提前发现潜在风险。

2.2 成因分析

2.2.1 设备老化

设备老化呈现渐进性性能衰减特征,安全计算机的电容元件长期承受温度循环冲击,会导致容值偏离设计阈值,造成电源滤波效果下降,影响运算电路稳定性。车载无线天线经过长期振动后,射频连接器可能出现接触氧化,使信号接收灵敏度逐步降低,在隧道遮挡区域更易出现通信中断。制动控制单元的继电器触点在频繁吸合动作后会产生磨损,导致触点接触电阻增大,表现为制动指令响应时间逐渐延长,影响停车精度。

2.2.2 电磁干扰

电磁干扰主要来自列车内部动力系统与外部环境的叠加影响,牵引变流器在开关过程中产生的高频谐波会通过供电线路耦合至信号系统,干扰数据总线的差分信号传输,造成报文校验错误。隧道内接触网电弧放电产生的电磁脉冲可能穿透车载设备屏蔽层,干扰应答器阅读器的射频前端电路,导致报文解码错误率上升。相邻列车的无线通信信号若出现频率偏移,可能在交汇时段对当前列车的车地通信产生同频干扰,引发数据传输瞬时中断。

2.2.3 维护不足

维护不足会导致潜在故障逐步累积,应答器天线的定期清洁不到位,会使表面附着的油污与粉尘形成绝缘层,降低信号耦合效率,长期运行可能引发定位信息丢失。安全计算机的风扇滤网若未按周期更换,会导致散热通道堵塞,使处理器工作温度超出额定范围,加速元件老化进程。软件版本管理疏漏可能造成不同列车的控制程序存在差异,在联调过程中因参数不匹配引发协同故障,增加批量故障排查难度^[2]。

3 地铁信号系统车载故障的影响分析

3.1 运营效率下降

通信链路中断引发的自动驾驶模式紧急制动会直接导致区间运行间隔异常拉长,原本紧密衔接的列车运行图出现连锁性延误,高峰时段的断面客流承载能力随之下降,而恢复运行所需的模式切换与人工确认流程进一步加剧了晚点累积效应。应答器信息接收异常造成的定位漂移会迫使列车以限制性速度缓慢行驶,这种被动降

速不仅降低单列车的旅行速度,还会在后续车站形成列车扎堆现象,干扰站台客流组织的节奏。硬件故障导致的系统强制降级使列车无法参与自动驾驶协同调度,人工驾驶模式下的牵引制动曲线优化功能失效,区间运行时间较计划值出现不可控延长,同时故障列车占用区间的时间增加,会压缩后续列车的可用行车间隔,最终形成全网性的运行效率衰减。软件逻辑冲突引发的牵引制动指令紊乱可能导致列车在进站阶段出现不必要的减速或停车,破坏车站接发车的计划性,而故障排查过程中临时采取的越站通过措施,又会打乱沿线各站的客流疏散计划,形成恶性循环。

3.2 安全隐患增加

安全计算机冗余单元同步失效会使双重校验机制形同虚设,此时单一处理器的运算偏差可能直接转化为错误的速度监控指令,若实际运行速度已接近防护曲线上限,这种偏差极易突破安全阈值,使超速防护功能丧失应有的预警作用。测速传感器脉冲信号异常导致的速度数据失真,会让车载设备对列车实际位置的判断出现偏差,在道岔区段可能因定位不准而错误进入非安全进路,而电磁干扰引发的应答器报文解码错误,会使列车误判当前所处的信号分区,增加与相邻列车发生冲突的风险。电源模块电压波动造成的接口模块频繁重启,可能导致关键控制指令在传输过程中出现断点,制动系统在收到不完整指令时,其响应力度可能与实际需求产生偏差,在紧急情况下无法达到预期的减速效果。软件补丁兼容性问题引发的程序异常退出,会使自动驾驶模式突然中断,此时若人工干预不及时,列车可能在无防护状态下持续运行,暴露于轨道电路异常、信号机误显示等潜在风险中,放大安全管控的薄弱环节。

3.3 乘客服务体验受损

区间紧急制动引发的列车骤停会使乘客产生强烈的不适感,而故障排除期间的长时间滞留会加剧车厢内的拥挤感,高温或低温环境下的空调系统运行不稳定,进一步降低乘坐舒适度。定位漂移导致的列车过站不停车或站内停留时间延长,会打乱乘客的出行计划,特别是换乘节点的衔接延误,可能使乘客错过预定的换乘列车,被迫重新规划行程。通信故障造成的动态信息更新延迟,会使站台显示屏与列车广播的到站信息不一致,引发乘客对当前位置的困惑,而故障降级模式下的限速运行,会让全程旅行时间超出预期,影响通勤族的时间安排。硬件故障导致的车门开关异常,可能使乘客上下车过程受阻,夹伤风险增加的同时,也会因车门反复开关延长站台停留时间,引发后续乘客的焦躁情绪。软件

逻辑冲突引发的车内显示屏故障,会使乘客无法获取准确的站点信息和运行状态提示,在陌生线路上易出现坐过站等问题,整体服务感知度随之下降^[3]。

4 地铁信号系统车载故障的应对策略

4.1 强化预防性维护

(1) 构建基于数字孪生的设备健康模型,通过实时采集车载安全计算机、测速传感器等核心部件的温度、振动及运算参数,在虚拟空间映射设备运行状态,结合机器学习算法识别早期性能衰减特征,例如预判电容元件容值变化趋势或继电器触点磨损速率,提前制定针对性更换计划,避免因突发性老化引发功能失效。(2) 开发应答器信息接收系统的自适应清洁机制,集成微型气流吹扫装置与粉尘浓度感应模块,当检测到金属粉尘附着量接近阈值时,自动启动定向清理程序,同时通过电磁屏蔽层材质优化与接地电阻动态调节,削弱牵引变流器高频谐波对射频信号的干扰,维持稳定的解码环境。

(3) 建立软件版本全生命周期管理平台,对控制程序的每次迭代进行基因级兼容性校验,模拟不同工况下新增模块与既有逻辑的交互过程,生成潜在冲突风险热力图,在部署前通过数字沙盘完成多场景压力测试,确保补丁更新不会触发隐性故障,同时留存完整的版本回溯路径。

4.2 完善应急处理流程

(1) 设计车地通信双通道智能切换架构,在主链路中断时,备用通道通过跳频技术快速重建数据链路,同步激活车载临时授权生成机制,基于最后已知位置与轨道电路边界信息,临时生成短距离移动许可,避免自动驾驶模式下的紧急制动,同时通过人机交互界面向驾驶人员推送简化版操作指引,缩短人工介入响应时间。

(2) 开发故障分级处置决策系统,根据故障类型自动匹配预定义处置方案,例如安全计算机冗余单元同步失效时,立即启动单单元运算模式并激活独立校验通道,通过动态调整双重校验阈值维持基本控制功能,而测速传感器异常时则自动融合多源定位数据,采用加权算法修正速度偏差,保障列车在降级模式下的平稳运行。

(3) 构建车载与地面维护系统的协同诊断网络,当检测到硬件故障时,实时将故障代码、环境参数及运行轨迹打包上传,地面系统通过三维可视化技术还原故障发生场景,远程指导驾驶人员执行关键参数核查与部件复位

操作,同时调度就近技术支持单元携带适配备件赶赴现场,压缩故障修复周期。

4.3 推进智能化升级

(1) 引入边缘计算节点优化车载数据处理能力,在列车运行过程中实时分析无线通信信号强度波动规律,结合轨道沿线基站分布特征,提前预判信号切换盲区并主动调整传输功率,同时通过应答器报文的分布式缓存与并行解码技术,提升复杂电磁环境下的信息解析效率,减少定位漂移现象。(2) 开发自动驾驶模式的动态曲线自优化系统,基于实时客流载荷与轨道状态数据,自动调整牵引与制动参数,在保障安全的前提下,通过平滑加减速算法降低设备机械损耗,同时集成故障自愈模块,当检测到软件逻辑冲突时,自动调用备用控制子程序并隔离异常模块,维持基本驾驶功能不受影响。

(3) 搭建基于知识图谱的故障预测平台,整合历史故障案例、设备参数变化及环境影响因素,构建多维度关联模型,通过识别故障前兆特征,例如无线模块丢包率与温度变化的隐性关联,提前生成维护工单并指定最优维修时段,将传统周期性维护转变为基于设备实际健康状态的精准干预,提升系统整体可靠性^[4]。

结语

综上所述,地铁信号系统车载故障的影响贯穿运营全链条,从运营效率衰减到安全隐患凸显,再到乘客体验受损,需系统性应对。通过构建数字孪生健康模型、完善双通道应急架构、引入边缘计算等智能化手段,可实现从被动抢修到主动预防的转变。未来,应持续深化车地协同与数据驱动的运维模式,推动车载设备向预测性维护、自愈式控制升级,以适应高密度运营需求,为乘客提供更可靠的出行保障。

参考文献

- [1]洪兰兰.地铁信号系统车载故障的影响分析[J].建筑工程技术与设计,2020(26):3730.
- [2]徐杨元.地铁车载信号系统功能及常见故障分析探讨[J].越野世界,2021,16(7):168.
- [3]马俊.地铁车载信号系统功能及常见故障分析探讨[J].建筑工程技术与设计,2021(6):2469.
- [4]蒋斌.地铁车载信号设备的故障诊断系统探究[J].数码设计(下),2020,9(10):20-21.