地铁车载无线通信系统常见故障分析及运维对策

李　扬

徐州轨道交通运营有限公司　江苏　徐州　221000

摘　要：地铁车载无线通信系统是保障列车安全、稳定运行的核心支撑，直接影响地铁运营效率与行车安全。本文先阐述系统的组成、工作原理及主流技术制式，重点剖析信号传输、硬件设备、软件数据及运维管理四类常见故障的表现与核心成因。结合 LTE-M 与 WLAN 技术应用特性，从硬件运维、信号优化、软件管控、体系完善四个维度，提出针对性运维优化对策，旨在解决系统频发故障，提升车地通信稳定性，为地铁通信运维工作提供实操参考。

关键词：地铁车载无线通信系统；常见故障；运维对策

引言：随着城市轨道交通高速发展，地铁运营对车地无线通信的实时性、稳定性要求持续提升。车载无线通信系统作为 CBTC 运行控制、乘客信息传输、行车调度指挥的核心载体，运行状态直接关系行车安全与运营效率。现阶段系统受隧道环境、电磁干扰、设备损耗及运维不规范等影响，故障频发并影响运营秩序。为此本文系统分析各类故障机理，制定科学运维优化方案，助力通信系统安全稳定运行。

1 地铁车载无线通信系统概述

1.1 系统组成与工作原理

（1）车载无线通信系统核心硬件组成。车载侧主要包括车载台控主机、控制盒、通话手柄及车顶天线，头尾司机室各设一台车载台，通过漏泄同轴电缆或空间自由波与轨旁设备通信。轨旁侧由无线接入点、接入交换机及骨干网交换机构成，骨干网采用环形冗余拓扑，支持 50ms 内故障自愈。（2）系统网络架构与数据传输原理。现代地铁车地通信普遍采用 A/B 双网完全独立并行的冗余架构，A 网承载综合业务，B 网独立备份，整体可靠性超过 99.99%。数据经车载终端上行至轨旁基站，再通过接入交换机汇聚至骨干环网，最终传至控制中心。（3）车地无线通信交互运行机制。CBTC 系统依赖车地间双向连续通信：地面向列车下发进路、限速等防护信息，列车向地面回传位置、速度及车辆状态。列车跨越基站覆盖边界时触发越区切换，要求切换时延不超过 100ms[1]。

1.2 系统核心功能与运营要求

（1）列车信号传输与语音调度核心功能。车地通信首要承载 CBTC 列控数据，保障列车自动防护与自动驾驶指令的毫秒级传输；同时通过数字集群调度实现行车调度员、司机与车站值班员间的语音联络及紧急呼叫联动。（2）视频监控与乘客信息传输辅助功能。车载 CCTV 将车厢监控画面实时回传控制中心，PIS 系统向乘客推送动态导乘信息与应急广播，二者共享车地带宽资源，对丢包率要求相对宽松但需保证视频流畅无卡顿。（3）地铁运营对通信稳定性与实时性的指标要求。CBTC 业务要求单向传输时延≤ 150ms、丢包率≤ 1%，越区切换通信延时≤ 100ms；冗余热备设备切换时间不大于 2s，系统平均无故障时间应大于 10000h。

1.3 主流技术制式及应用特点

（1）LTE-M 地铁专用通信技术应用特点。采用 1.8G 专用频段，抗公共频段干扰，支持 200km/h 平滑切换；单套系统综合承载 CBTC、集群调度、PIS、CCTV 等业务，支持 9 级 QoS 调度，优先保障列控质量[2]。（2）WLAN 无线通信技术应用优势与短板。优势为产业链成熟、成本低；短板是 2.4GHz 开放 ISM 频段易受同频/邻频干扰，致车地通信中断甚至紧急制动，且覆盖短、切换频繁，多业务并发无法按优先级调度，难以适应综合承载需求。（3）不同技术制式下故障高发特性差异。WLAN 故障主因是外部干扰，民用 WLAN 设备致 CBTC 车地通信频发中断，随机不可控；LTE-M 故障多为设备老化与切换边界性能退化，但凭专用频段和双网冗余，隔离与自恢复能力更强，波及面显著收窄。

2 地铁车载无线通信系统常见故障及成因分析

2.1 信号传输类故障

（1）信号弱覆盖、信号干扰故障表现特征：列车在部分区段出现通信质量下降，车载台频繁掉线重连，CBTC 报文丢失，调度语音断续并伴杂音，误码率升高、接收电平低于门限，严重时触发紧急制动并影响后续通

信恢复。（2）隧道环境、电磁干扰导致的信号衰减问题：隧道弯曲狭长产生多径衰落与屏蔽损耗，漏缆接头氧化、牵引回流及站台民用 WiFi 造成同频或邻频干扰，使信噪比恶化，接收灵敏度下降，传输距离明显缩短。（3）信号切换异常、越区切换失败故障成因：相邻基站重叠覆盖不足，切换门限、迟滞及时间参数设置不当，列车高速通过时切换流程未完成，导致链路中断、数据重传甚至会话掉线，直接影响列车运行安全。

2.2 设备硬件类故障

（1）车载天线、射频模块老化与损坏故障：天线安装松动、馈线弯折、接头进水氧化，射频模块长期高温工作导致增益下降、功放烧毁，发射功率不足，接收灵敏度降低，通信距离缩短，需及时更换。（2）车载通信终端、交换机硬件故障问题：车载台主板、电源板或轨旁交换机端口损坏、芯片过热死机，引发单点通信中断；双网冗余未及时切换，可能扩大为局部车地通信瘫痪，严重影响行车组织[3]。（3）线路接触不良、供电异常引发的设备故障：车辆振动使接插件松动，供电电压波动或瞬断造成设备反复重启，板卡供电不足时工作不稳定，数据收发异常，严重时设备离线并导致通信中断。

2.3 软件与数据传输类故障

（1）系统程序卡顿、软件兼容故障：车载软件与轨旁设备版本不匹配、内存泄漏或进程死锁，导致操作响应迟缓、通信任务调度异常；升级后新旧协议兼容性差，也会引发连接失败或功能异常。（2）数据丢包、延迟、传输中断故障：网络拥塞、队列溢出、路由收敛慢或无线链路误码，造成 CBTC 数据丢包率超限、时延抖动增大，严重时传输中断，影响列车自动防护与自动驾驶功能。（3）参数配置错误、系统升级异常引发故障：IP 地址、VLAN、QoS 优先级或切换参数配置错误，会造成业务不通；升级中断电、版本回退失败，可能导致设备无法正常启动，需现场恢复处理。

2.4 运维管理类隐性故障

（1）日常巡检不到位导致的隐患积累问题：未定期检查天线馈线、接头防水和设备温度，灰尘堆积、螺丝松动等小隐患逐步累积，最终在运营高峰时段集中爆发，扩大故障影响范围。（2）故障排查流程不规范引发的重复故障：缺乏标准化诊断步骤，排障时仅重启设备而未定位根因，导致同一故障反复出现，甚至因误操作引入新问题，增加后续维护难度和运营风险。（3）运维人员技术能力不足导致的处置不当问题：对 LTE-M 与 WLAN 故障特征辨识不清，不能快速区分干扰、硬件与配置问题，延误处置时机，扩大故障影响范围，降低运营恢复效率。

3 地铁车载无线通信系统运维优化对策

3.1 硬件设备运维优化策略

（1）建立设备分级巡检与老化更替机制。按重要度、故障影响及历史故障率，将车载台、天线、射频模块、交换机、漏缆等分为 A、B、C 三级。A 级每日远程巡检、每周现场检查，B 级每月检查，C 级每季度检查。建立全生命周期台账，记录投运时间、维修次数、更换部件及性能衰减曲线，设定关键指标预警线。对达到年限、性能下降超阈值或故障频发设备提前更换，推行“状态修 + 计划修”，避免突发故障导致行车中断。（2）优化车载天线、射频设备安装与防护方案。改进天线安装位置与角度，增加减震支架和防松脱措施，减少振动影响。馈线接头做防水、防尘、防氧化处理，采用密封胶和热缩管双重防护，做好接地与防雷。射频模块选用宽温器件并优化散热，定期测试驻波比、发射功率和接收灵敏度。隧道漏缆定期检查接头、吊夹和防火措施，防止外力破坏导致信号中断[4]。（3）完善硬件故障快速检测与更换流程。配置便携式频谱仪、驻波比测试仪、光功率计和标准化备件，制定硬件故障定位流程：先判断 A/B 网是否同时故障，再查供电、射频链路和终端设备。推广模块化热插拔更换，缩短平均修复时间。建立更换记录与质量追溯机制，更换后性能复测，防止备件质量问题引发二次故障。定期组织应急演练，提高处置效率。

3.2 信号与传输环境优化措施

（1）优化隧道信号覆盖，消除盲区。依据链路预算与仿真，调整基站/AP 间距、漏缆开槽及天线方向角；对弯曲隧道、站台端部、岔区等弱覆盖区增设补盲设备或调整倾角。定期路测，采集信号强度、误码率、切换成功率等数据，利用测试软件生成覆盖热力图，动态优化方案。新建线路应设计阶段预留冗余，确保全线信号连续均匀，满足 CBTC 业务对传输质量要求。（2）落实电磁干扰防护与隔离。优先采用 LTE-M 专用频段，从根源上规避公共频段干扰。定期频谱扫描，排查外部干扰源，建立台账。加装滤波器、屏蔽层，完善接地，并与民用 WiFi 在信道、功率和空间上隔离。站台、车辆段等干扰高发区，可采用定向天线、降低发射功率或调整信道规划；必要时协调无线电管理部门清理非法频段，保障车地通信在复杂电磁环境中稳定运行。（3）优化越区切换参数，降低切换故障。合理设置切换门限、迟滞和

时间参数，保证相邻基站重叠覆盖，优化邻区关系，减少乒乓切换。高速区段开展专项测试，验证切换成功率与时延，确保车地通信连续稳定。根据列车速度、线路曲率和信号变化动态调整切换策略；切换频繁区段可增加基站密度或采用先进切换算法，避免切换失败导致紧急制动或通信中断[5]。

3.3 软件系统与数据运维优化

（1）规范系统软件升级、参数配置管理流程。建立版本管理制度，升级前进行评审、备份和实验室验证，采用灰度发布与回退机制。参数配置实行模板化、权限管控和双人复核，变更尽量安排在非运营时段，降低升级风险，确保软件版本与轨旁设备兼容。升级过程中安排专人监控关键指标，一旦发现异常立即回退。同时，建立配置基线库，定期比对实际配置与基线，防止未经授权的修改。（2）搭建数据传输实时监测与预警系统。对时延、丢包率、误码率、流量和信号强度等关键指标进行实时采集，设置多级阈值告警，并通过可视化平台展示趋势。与网管系统联动，提前发现拥塞、干扰和性能退化隐患，实现从被动抢修向主动预防转变。利用大数据分析技术，对历史数据进行挖掘，识别故障前兆特征，建立预测模型，为运维决策提供支持。同时，监测系统应具备日志记录和回放功能，便于故障复盘。（3）建立软件故障备份与快速修复机制。定期备份配置文件和系统镜像，关键设备采用双机热备。制定软件故障应急预案，支持一键恢复和远程重启，建立软件故障库，积累处置经验，缩短故障修复时间，最大限度减少对运营的干扰。对于频繁出现的软件问题，组织厂家和运维人员联合攻关，从根本上解决兼容性、内存泄漏等问题。同时，定期更新病毒库和安全补丁，防止网络攻击导致系统异常。

3.4 运维管理体系完善方案

（1）构建常态化、标准化运维管理制度。明确岗位职责、巡检标准、故障响应等级和闭环流程，落实交接班、工单管理和绩效考核。通过 PDCA 循环持续改进运维质量，使各项工作有章可循、有据可查，形成规范化、制度化的运维体系。建立运维质量评价指标体系，包括故障率、平均修复时间、巡检完成率等，定期考核并公布结果，激励运维人员提升工作质量。（2）强化运维人员专业技能培训与考核。分层次开展 LTE-M、WLAN、传输、射频等专项培训，增加故障模拟和实操演练，推行持证上岗和定期考核，提升人员对复杂故障的辨识与处置能力，打造一支技术过硬的运维队伍。同时，鼓励运维人员参与厂家技术交流和行业研讨，了解新技术、新设备的发展趋势。建立培训档案，将培训成绩与绩效挂钩，形成学习型团队。（3）建立故障台账与大数据分析复盘机制。完整记录故障时间、现象、原因、处置过程和影响范围，定期复盘分析，统计高频故障与薄弱环节，挖掘根因并优化维护策略，形成知识库，实现经验共享与持续改进，不断提升系统运维水平。利用大数据技术对故障数据进行关联分析，找出设备、环境、操作等因素之间的内在联系，为预防性维护提供依据。同时，将典型故障案例编写成教材，用于人员培训，提高整体应急处置能力。

结束语

地铁车载无线通信系统故障类型多样、诱因复杂，软硬件缺陷与运维漏洞均会造成通信异常，甚至引发行车安全隐患。本文全面归纳系统常见故障，剖析各类故障产生的关键原因，针对性提出硬件运维、信号优化、软件管控及制度建设等优化策略。通过落实精细化、标准化、常态化运维模式，可有效降低故障发生率，提升系统自愈与抗干扰能力，保障地铁安全高效有序运营。

参考文献

[1] 陈勇, 周志翔. 地铁车载无线通信系统典型故障分析与运维优化 [J]. 城市轨道交通研究,2024,27(08):189-193.

[2] 王霁晨, 李海粟, 刘嘉宇. 城市轨道交通车地无线通信系统故障成因及运维策略 [J]. 铁道通信信号,2024,60(05):67-72.

[3] 林木森, 张航. 轨道交通车地无线通信智能运维关键技术及故障治理 [J]. 铁路计算机应用,2025,34(03):45-50.

[4] 彭章硕, 谢列文, 廖庭. 地铁车地无线通信漏缆故障整治与运维优化研究 [J]. 铁道工程学报,2023,40(11):78-83.

[5] 吴磊. 地铁车载无线通信系统电磁干扰故障分析与抗干扰运维措施 [J]. 信息技术,2023,47(09):112-116.