

Innovation and Practice of Interference Suppression Technology for Rail Transit Communication Signals

Yakun Wang

Beijing Railway Signal Co., Ltd., Beijing, 100070, China

Abstract

As the core support for rail operation control, dispatching command and passenger service, the stability of the communication and signal system directly determines the operational efficiency and safety of the line. This paper takes the communication signal interference problem of on-board equipment in rail transit as the core. Starting from the generation mechanism and evolution characteristics of interference, it classifies and analyzes three types of interference sources: electromagnetic radiation, equipment coupling, and transmission links, and reveals the dynamic evolution law of interference with the operation stage and the hierarchical penetration influence mechanism. Furthermore, the direction of technological innovation is explored from four dimensions: anti-interference design of vehicle-mounted hardware, optimization of production processes, product testing and verification, and type tests. Propose practical paths for full life cycle management, implementation of key scenarios, coordinated promotion of standards, and talent cultivation, and look forward to the development trends of intelligence, integration, and greenness, providing theoretical support and practical references for enhancing the anti-interference capabilities of train control on-board equipment such as CTCS3-300T and CTCS3-400T.

Keywords

Rail Transit; Communication Signaling; Interference Suppression; Shielding Protection; Multi-system Coordination

轨道交通通信信号干扰抑制技术的创新与实践

王亚坤

北京铁路信号有限公司, 中国·北京 100070

摘要

通信信号系统作为轨道行车控制、调度指挥与旅客服务的核心支撑,其稳定性直接决定线路运行效率与安全。本文以轨道交通车载设备通信信号干扰问题为核心,从干扰生成机理与演化特征入手,分类剖析电磁辐射、设备耦合、传输链路三类干扰来源,揭示干扰随运营阶段动态演化的规律及层级化渗透影响机制。进而从车载硬件抗干扰设计、生产工艺优化、产品测试验证、型式试验四个维度探讨技术创新方向。提出全生命周期管理、关键场景落地、标准协同推进、人才培养的实践路径,并展望智能化、集成化、绿色化发展趋势,为CTCS3-300T、CTCS3-400T等列控车载设备抗干扰能力提升提供理论支撑与实践参考。

关键词

轨道交通; 通信信号; 干扰抑制; 屏蔽防护; 多系统协同

1 引言

伴随中国轨道交通朝着网络化、智能化、高速化迈进,列控车载设备已从单一信号接收与执行单元,升级为集行车控制、数据记录、故障诊断、人机交互于一体的综合控制平台。无论是CTCS3-300T的高速运行控制,还是CTCS3-400T的高密度发车协同,均依赖通信信号的稳定传输。然而,车载设备在运行中易受干扰,不仅引起误码率上升、传输延迟增加,更可能导致控制指令丢失、行车模式切换异常等安全隐患。传统的单一干扰抑制手段已难以应对复杂电磁

环境下的多源干扰问题,从硬件设计、生产工艺、测试验证全流程提升抗干扰能力,成为保障轨道交通安全高效运行的关键。

2 轨道交通通信信号干扰的生成机理与演化特征

2.1 干扰的核心来源分类

轨道交通通信信号干扰来源具备多种样式,可依据生成主体与作用方式分成三类。其一为电磁辐射干扰,主要是由牵引供电系统与大功率电气设备所致。列车启动及制动时的牵引变流器,电流迅速变动引发宽频段电磁辐射,频率跨度从几十kHz到几百MHz,与车载无线通信模块(2.4GHz CBTC、4G/5G)工作频段重叠,导致信号解调产生失真后

【作者简介】王亚坤(1987-),男,中国河南许昌人,本科,工程师,从事轨道交通通信信号研究。

果。车辆高压部件及外部环境释放的电磁能量，也会对车载天线、接收机等设备造成干扰。

其二为设备耦合造成的干扰。因车载设备安装空间紧凑，干扰凭借传导与电场耦合得以传播。供电电缆与信号电缆平行敷设时，高频电流借助分布电容与互感在信号电缆中感应出干扰信号；机箱内部金属结构件之间的电场耦合也会影响敏感电路^[1]。

其三为传输链路干扰。车载设备与地面系统之间的无线链路易受隧道多径效应、外部信号入侵影响；车载内部线束若屏蔽不良或接地不合理，会引入串扰与反射。此外，高速数据传输接口（如以太网、MVB总线）在信号完整性不佳时，也会成为干扰传播的通道。

2.2 干扰的演化规律与影响机制

轨道交通通信信号干扰并非以静态形式存在，而是依据运营阶段、列车状态、设备老化动态演进，设备处于效能最优状态。干扰主要源自牵引供电系统等固定源头，电磁辐射强度波动不超过5%，影响范围集中于牵引变电所周边500米的区域。3至5年后，车载线缆屏蔽层磨损、接插件氧化、电路板元器件性能漂移等问题出现，令系统抗干扰能力弱化。原本微弱的设备耦合干扰渐渐增大，影响范围延伸到整个车站及隧道区间。列车发车间隔小于2分钟的高峰时段，牵引供电系统负荷增长，令电磁辐射强度提升20%~30%。列车高密度运行，无线信道信号流量有所增长，干扰信号跟有用信号碰撞概率上涨三到五倍，干扰的突发性与随机性明显增强。

3 轨道交通通信信号干扰抑制技术的创新方向

3.1 屏蔽防护技术的升级与突破

车载硬件抗干扰设计是抑制干扰的基础途径，必须从电路、结构、元器件选型三方面进行优化。就电路设计而言，采用分层接地与光电隔离技术，将信号地、电源地、屏蔽地分开布局；敏感信号链路使用差分传输与EMI滤波器；电源模块采用宽压输入与低纹波设计，增强对电压波动和高频干扰的抑制能力。就结构设计而言，机柜采用2mm镀锌钢板并喷涂电磁屏蔽涂料，关键接口使用IP67带屏蔽的连接器；内部线缆采用双层屏蔽线与金属波纹管防护，减少外部辐射与内部串扰^[2]。就元器件选型而言，选用符合EN 50155、IEC 61373标准的车规级元器件，确保在宽温、振动、冲击环境下的稳定性；高频电路器件需满足低寄生参数要求，降低辐射发射。

3.2 信号传输链路的抗干扰优化

生产工艺优化是保障硬件抗干扰性能的关键环节。电路板制造方面，采用高密度PCB设计，优化走线布局以减少回路面积；对高速信号线实施阻抗控制与差分对等长设计；焊盘与过孔处理满足车规可靠性标准。线缆线束生产方面，制定标准化线束加工流程，确保屏蔽层360°连续接地；对线束分支处进行额外屏蔽处理，避免干扰泄露；采用自动

化压接与导通测试，提升一致性与可靠性。机柜装配方面，机柜内部金属件通过多点低阻抗接地实现等电位连接；安装导电衬垫确保机箱接缝处的电磁密封；关键模块间加装隔离板，抑制内部干扰耦合。

3.3 多系统协同管控技术的创新应用

产品测试验证是确保抗干扰性能的重要手段。ICT测试可对电路板进行在线检测，发现开路、短路、元件错装等制造缺陷，确保硬件基础质量。功能测试通过搭建车载设备功能测试平台，模拟不同速度、不同信号强度下的设备运行状态，验证通信、控制、诊断功能的稳定性。EMC测试按照EN 50155、EN 50121-3-2标准进行，包括辐射发射（RE）、射频辐射抗扰度（RS）、静电放电（ESD）、电快速瞬变脉冲群（EFT）等项目^[3]。环境测试进行高低温、湿热、振动、冲击、盐雾等环境适应性测试，验证设备在恶劣条件下的抗干扰与可靠性。

3.4 设备与系统的抗干扰设计创新

设备及系统具备的抗干扰能力乃是抑制干扰的关键保障，需要从硬件、软件、架构这三方面实现创新。硬件设计贯彻电磁兼容（EMC）标准，电路借助分层接地手段，对信号地、电源地、屏蔽地予以分开设置，关键电路借助光耦、隔离变压器阻断干扰传导。电源模块采用宽范围稳压及低通滤波设计，应对电压波动及高频干扰。设备机箱采用2mm厚镀锌钢板制作而成，表面进行电磁屏蔽涂料喷涂作业，电缆接口采用带屏蔽且防水的IP67连接器，能适应雨雪潮湿环境。软件算法优化加大信号处理能力，信号接收环节借助自适应滤波算法，实时形成反向抵消信号，干扰抑制比≥30分贝。主备控制单元数据处理阶段采用Turbo码、LDPC码等差错控制算法，依靠10%-20%冗余内容，错误率≤15%时可实现数据恢复率≥98%。系统架构搭建冗余容错架构，采取双机热备架构的模式，主备设备借助高速链路实现数据实时同步，主设备故障时，毫秒级即可切换上线；关键传输链路实施双链路备份举措，2.4GHz无线链路及光纤链路实现冗余，切换时间少于100ms。系统依据模块化实施拆分，数据采集、信号处理等模块独立开展运行并进行光耦隔离，杜绝局部故障扩散。

型式试验与质量管控是产品投入运营的最后保障。型式试验按照铁路产品特定技术要求，完成全套型式试验，包括功能安全测试、EMC测试、环境测试、可靠性测试，确保产品满足上线运营条件。质量管控方面，建立生产过程质量追溯系统，对元器件批次、生产工序、测试数据进行全流程记录；实施SPC（统计过程控制）监控关键工艺参数，及时发现异常趋势。同时，将电磁兼容设计要求纳入产品技术规范，从源头把控抗干扰性能。

4 轨道交通通信信号干扰抑制技术的实践路径

4.1 全生命周期的干扰抑制管理体系构建

轨道交通通信信号干扰抑制贯穿产品设计、生产、测试、

交付、运维的全生命周期阶段,形成“预防—控制—优化”闭环管理格局。预防前期阶段,在方案设计与详细设计阶段进行 EMC 仿真分析(如 CST、FEKO),提前优化电路布局与屏蔽结构,同时引入故障模式与影响分析(FMEA)方法,针对车载设备关键模块可能存在的干扰风险点进行预判,制定针对性设计预案,从源头降低干扰隐患^[4]。

事中控制环节,严格依照工艺文件及检验标准予以执行,凭借 ICT、功能测试、EMC 预测试及时发现隐患;在生产进程里施行首件检验、巡检、末检三级质量管控,实现产品一致性,又建立起关键工序的工艺参数数据库,实时对比研究参数波动与干扰测试结果的关联性,依照抗干扰需求动态调整工艺参数值。

优化后续阶段,构建设备健康状态监测体系,凭借车载记录数据与地面分析平台的结合,掌握设备抗干扰性能的变化动态,事先预警潜在风险;按时开展干扰数据分析及工艺优化,始终提升产品抗干扰能力,每季度对运营反馈的干扰案例进行收集,安排技术团队梳理全生命周期各环节管控死角,更新管理流程以及技术标准。

4.2 关键场景的干扰抑制技术落地

轨道交通各场景的干扰特征差别明显,应拟定差异化技术落地办法,高速运行情形重点改进无线通信链路抗衰落能力,凭借优化天线布局、采用波束赋形技术以提升信号质量,同时往车载设备无线模块中添加自适应功率调节单元,按照列车运行速度与信号强度动态调整发射功率大小,防止高速移动时信号频繁中断或失真。

高密度发车态势强化车载设备数据处理效能,维持多车交汇时通信稳定状态;借助信道聚合技术把多个空闲信道整合成宽信道,加大抗干扰力度,再者搭建高密度发车模拟测试环境,模拟不同发车间隔情形下的信号交互场景,检测车载设备于高并发信号传输当中的抗干扰冗余水平,针对数据缓存与冲突解决算法实施优化。

复杂电磁环境下强化机箱屏蔽及线束防护,降低外部干扰形成的耦合;给关键模块实施光电隔离与电源滤波操作,提高系统整体抗干扰水平,于隧道出入口、牵引变电所周边等强电磁干扰地带,为车载设备添装专用电磁屏蔽罩,与地面基站的信号增强装置相配合,搭建“车地协同”干扰防护网阵,进一步降低复杂环境对设备的干扰程度^[5]。

4.3 技术创新与标准体系的协同推进

搭建多方协同的标准研发体系,与高校、科研机构、设备厂商及运营企业组建抗干扰标准工作组,每年举行 2 至 3 次研讨活动。围绕车载硬件抗干扰设计,规定接地、屏蔽、滤波等设计规范;面向生产工艺,制定 PCB 设计、线束加工、机柜装配等工艺标准;针对测试验证,统一 EMC 测试方法、环境测试条件与判定准则,为技术升级留出空间。

4.4 人才培养与技术交流机制建设

在人才培养方面,构建高校、企业与科研机构协同架构。高校为轨道交通信号与控制、通信工程专业开办“电磁兼容与抗干扰技术”课程,涉及干扰机理、抑制技术以及标准规范,纳入 MATLAB 干扰仿真及虚拟 EMC 测试实验。企业内部开展车载硬件设计、生产工艺、测试验证专项培训,提升工程师实战能力。在技术交流方面,构建常态化平台,每年开展一届抗干扰技术论坛,邀请诸多专家交流车载设备抗干扰设计经验、生产工艺优化案例、测试验证方法等实用技术,推动行业整体水平提升。

5 未来发展趋势与展望

未来轨道交通通信信号干扰抑制技术会朝着智能化、集成化方向深度拓展。智能化方面,AI 技术会全面渗透至干扰抑制各环节,依托深度学习的干扰识别算法可达成干扰源米级的定位,主动生成最优的抑制方案。依据历史数据,AI 驱动的预测性维护可提前判断设备老化引发的抗干扰能力下降,预先实施改造,减少突发故障的发生频次。

集成化方面,列控车载设备内置的干扰监测及抑制模块中,干扰抑制技术将跟通信信号系统、行车控制系统深度结合,CTCS3-300T/400T 等列控车载设备将内置干扰监测及抑制模块,可独立达成“干扰识别—算法优化—参数调整”全流程,无需外部干涉,响应用时 < 50ms。干扰抑制功能会与列车自动驾驶系统携手联动,以干扰强度为依据动态调整行车速度与间距,维护运行安全状态。

6 结语

轨道交通通信信号干扰抑制技术的创新及实践,是顺应数字时代轨道交通发展需求、保障线路安全高效运行的核心难题。列控车载设备迈向智能化升级关键阶段,通信信号系统的复杂程度以及重要性不断加大,干扰抑制技术面临着新的机遇及挑战。未来需始终加强技术研发及标准建设,引领技术向智能化、集成化、绿色化实现转型,筑牢中国轨道交通网络安全稳定运行的坚实根基。

参考文献

- [1] 陈艳.轨道交通无线通信网络传输信号干扰智能抑制方法研究[J].长江信息通信,2025,38(05):217-219.
- [2] 刘希高,杨世武.基于多导体传输线的高速铁路站内机车信号邻线干扰研究[J].铁道学报,2024,46(10):76-85.
- [3] 李守杰,曹义斌,董海萍.多种干扰下轨道通信信号高精度自动化监测系统[J].微型电脑应用,2024,40(08):159-163.
- [4] 杜晓鑫.轨道信号干扰分析仪的特点及应用[J].铁路通信信号工程技术,2023,20(S1):117-121.
- [5] 刘安波.ZPW-2000型轨道电路频率干扰典型案例的分析与处理[J].铁路通信信号工程技术,2020,17(S1):16-20.