

# 复杂电磁环境下轨道交通通信设备的电磁兼容结构设计

胡若磊

北京铁路信号有限公司 北京 102613

**摘要:** 通过深入探讨复杂电磁环境下轨道交通通信设备的电磁兼容结构设计。针对轨道交通系统面临的复杂电磁挑战,提出一系列创新设计策略,包括加强屏蔽设计、优化接地系统、改进滤波技术以及精细布局布线等。综合运用仿真与优化工具,对设计方案进行精确模拟与评估,确保设备在复杂电磁环境中具备卓越的电磁兼容性能。本文的研究不仅为轨道交通通信设备的电磁兼容设计提供理论依据和实践指导,也为提升轨道交通系统的整体运行稳定性和安全性作出积极贡献。

**关键词:** 复杂电磁环境; 轨道交通; 通信设备; 电磁兼容结构设计

## 1 复杂电磁环境下轨道交通通信设备的作用

在复杂电磁环境下,轨道交通通信设备扮演着至关重要的角色,它们不仅是确保列车安全、高效运行的关键基础设施,也是应对外部电磁干扰、保障信息传输稳定性和可靠性的重要防线。(1) 保障列车运行安全;在复杂电磁环境中,包括但不限于城市无线通信基站、高压电力线路、雷电活动以及工业设备等产生的电磁辐射,可能对轨道交通信号系统造成干扰。轨道交通通信设备通过采用先进的抗干扰技术和加密算法,确保列车控制信号(如ATP/ATO系统信号)的准确无误传输,有效防止因信号误判或中断导致的列车追尾、超速等安全事故,从而保障乘客和列车的安全。(2) 提高运营效率;复杂电磁环境下的轨道交通通信设备能够支持高密度的数据交换,包括列车位置信息、速度数据、调度指令等,实现列车与地面控制中心之间的实时通信。这不仅能够优化列车运行图,减少等待时间,提高列车运行的准时率和效率,还能通过智能调度系统动态调整列车间隔,以应对高峰时段的客流压力,提升整体运营效率。(3) 增强应急响应能力;在遭遇自然灾害(如雷击、洪水)或人为事故时,轨道交通通信设备能迅速建立应急通信链路,确保关键信息的及时传递。通过车载通信系统与地面应急指挥中心的直接联系,可以快速启动应急预案,指挥救援行动,保障乘客安全疏散,并将损失降到最低。(4) 支持综合监控系统;轨道交通通信设备还广泛应用于综合监控系统中,实现对轨道线路、车站设备、电力供应等系统的全面监控。在复杂电磁环境下,这些设备能够稳定地传输监控数据,帮助运营人员及时发现并处理潜在问题,如设备故障、供电异常等,确保轨道交通系统的整体稳定性和可靠性<sup>[1]</sup>。(5) 促进智能化发展;随着物联网、大数据、人工智能等技

术的不断发展,轨道交通通信设备在复杂电磁环境下扮演着推动智能化转型的重要角色。它们支持列车自动驾驶、智能调度、乘客服务优化等高级应用,通过高效、稳定的数据传输,为轨道交通系统的智能化、自动化发展提供坚实基础。

## 2 复杂电磁环境的特征及影响分析

### 2.1 复杂电磁环境的概念解析

复杂电磁环境指的是在一定的空域、时域和频域上,由于电磁辐射源种类多、辐射强度差别大、信号分布密集且形式多样,从而对电子设备和系统正常运行产生严重威胁和影响的电磁环境。这种环境常见于现代都市区域,特别是轨道交通系统周边,其中包括但不限于无线电台、移动通信基站、高压输电线、工业设备以及轨道交通系统内部的各种电子设备。复杂电磁环境的存在,使得电磁波的相互干扰成为常态,对依赖电磁波进行通信和控制的轨道交通系统构成了严峻挑战。

### 2.2 不同电磁源对轨道交通通信设备的影响

内部电磁源,列车在运行过程中,其牵引系统会产生大量电磁辐射,这些辐射可能干扰到通信设备的正常工作,导致信号传输不稳定或中断。轨道交通的信号和通信系统内部设备间的电磁干扰同样不容忽视,尤其是当多个设备在同一频段内工作时,可能会引发频率冲突,影响信号质量。外部电磁源:随着移动通信技术的普及,基站数量不断增加,其发射的电磁波可能对轨道交通通信设备造成干扰,尤其是在基站与通信设备频段相近的情况下。高压输电线在传输电能时会产生强烈的电磁场,这些电磁场通过空气传播,可能影响到轨道交通通信设备的工作状态。如电焊机、雷电等,它们产生的电磁辐射具有突发性和不可预测性,对轨道交通通信设备的干扰更为复杂和难以防范。

### 2.3 电磁干扰机制分析

电磁干扰主要通过辐射干扰和传导干扰两种机制影响轨道交通通信设备。辐射干扰通过空间传播,其影响范围广泛,可能波及较远距离的设备。在复杂电磁环境中,多种电磁辐射源同时作用,使得电磁波在空间中的分布变得极为复杂。轨道交通通信设备在接收和发送信号时,容易受到这些电磁波的干扰,导致信号失真、衰减或中断。传导干扰则通过导体(如电线、电缆)传播,其影响通常局限于与干扰源直接或间接连接的设备。在轨道交通系统中,信号线和电源线往往密布于各种设备之间,若未采取有效的屏蔽和隔离措施,则易受到传导干扰的影响。这种干扰可能导致设备内部电路发生异常,进而影响整个系统的稳定性和可靠性。

## 3 轨道交通通信设备的电磁兼容结构设计原理

### 3.1 电磁兼容设计原则

轨道交通通信设备的电磁兼容(EMC)设计原则旨在确保设备在复杂电磁环境中能够正常工作,同时不对其他设备产生不可接受的电磁干扰。这些原则包括:

(1) 源头控制,在设计初期即考虑减少设备本身的电磁辐射和电磁敏感性。通过优化电路设计、选择合适的元器件和合理的布局布线,从源头上降低电磁干扰的产生。(2) 屏蔽设计,采用金属壳体或导电材料对设备或关键部件进行屏蔽,以阻挡外部电磁波的侵入和内部电磁波的泄漏<sup>[2]</sup>。(3) 接地设计,良好的接地系统能够确保设备内部各部分的电位均衡,减少因电位差引起的电磁干扰,合理的接地方式还能对电磁波的泄放提供低阻抗路径。(4) 滤波设计,在信号线和电源线上安装滤波器,以滤除不必要的电磁噪声和干扰信号,保证信号传输的纯净性。(5) 布局与布线,合理的电路布局和布线能够减少电磁耦合和串扰。避免高频信号线与低频信号线、数字信号线与模拟信号线的交叉干扰,保持信号线的完整性和连续性。

### 3.2 电磁隔离技术在结构设计中的应用

电磁隔离技术是一种有效的电磁兼容设计手段,它通过物理隔离的方式将可能产生或受到电磁干扰的部件分离开来,以减少它们之间的相互影响。在轨道交通通信设备的结构设计中,电磁隔离技术的应用包括:(1) 屏蔽舱设计,为关键通信模块或电路板设计独立的屏蔽舱,使用导电材料制成舱体并良好接地,以隔离外部电磁干扰。(2) 多层板设计,采用多层印制电路板(PCB),通过内部电源层和地层的设计,实现信号层之间的电磁隔离,减少层间耦合和串扰。(3) 隔离变压器,在电源输入端使用隔离变压器,将设备与电网的电

气连接隔离开来,防止电网中的电磁噪声通过电源线进入设备内部。(4) 光纤通信,在需要长距离传输信号时,采用光纤作为传输介质,因为光纤通信具有天然的电磁隔离性能,能够有效避免电磁干扰。

### 3.3 抑制电磁干扰的技术手段

除了上述的电磁兼容设计原则和电磁隔离技术外,还有一些具体的技术手段可以用于抑制电磁干扰;在信号线和电源线上安装滤波器和去耦电容,以滤除高频噪声和干扰信号。滤波器应根据干扰信号的频率特性进行选型和设计。在数字信号处理中,通过软件算法对采集到的信号进行滤波处理,进一步去除噪声和干扰成分,提高信号质量。在电路设计中加入瞬态抑制器件(如TVS管、压敏电阻等),以吸收和抑制电路中的瞬态过电压和过电流,保护设备免受浪涌冲击。在设计完成后,对设备进行全面的电磁兼容性测试,包括辐射发射测试、传导发射测试、辐射敏感度测试和传导敏感度测试等,以验证设备的电磁兼容性能是否符合相关标准和规范。

## 4 复杂电磁环境下轨道交通通信设备的电磁兼容结构设计实践

### 4.1 设备需求分析

在复杂电磁环境下,轨道交通通信设备的电磁兼容结构设计实践首先需从设备需求分析入手<sup>[3]</sup>。这一步骤旨在明确设备在特定电磁环境中的工作需求,包括但不限于设备需承受的最大电磁辐射强度、需满足的电磁敏感度标准、以及设备间的电磁隔离要求等。通过深入分析轨道交通系统的运行特点、电磁环境特征以及通信设备的具体功能,可以制定出全面而精确的设备需求清单,为后续的结构设计提供有力支撑。

### 4.2 结构设计方案制定

基于设备需求分析的结果,接下来是制定轨道交通通信设备的电磁兼容结构设计方案。设计方案应综合考虑电磁屏蔽、接地、滤波、布局与布线等多种电磁兼容设计原则和技术手段,以确保设备在复杂电磁环境中能够稳定可靠地工作。具体而言,设计方案可能包括采用多层屏蔽结构来增强设备的电磁防护能力,设计合理的接地系统以确保设备内部电位的均衡,以及通过优化电路布局和布线来减少电磁耦合和串扰等,还需根据实际需求选择合适的电磁隔离技术和抑制电磁干扰的技术手段,如使用隔离变压器、安装滤波器等。

### 4.3 电磁兼容性能测试和验证

结构设计方案制定完成后,必须进行电磁兼容性能测试和验证,以确保设备满足预期的电磁兼容性能要求。测试内容通常包括辐射发射测试、传导发射测试、

辐射敏感度测试和传导敏感度测试等多个方面,以全面评估设备在复杂电磁环境中的表现。测试过程中,应严格按照相关标准和规范进行操作,确保测试结果的准确性和可靠性。通过测试,可以及时发现并解决设计中存在的问题,对设计方案进行优化和改进。最终,当设备通过所有测试并满足相关标准和规范的要求时,即可认为其电磁兼容结构设计实践是成功的。

## 5 电磁兼容结构设计的优化与改进

### 5.1 结构设计的改进策略

在电磁兼容结构设计的优化与改进过程中,制定明确的改进策略是至关重要的第一步。这要求设计团队不仅要深入理解现有设计的电磁性能瓶颈,还要对复杂电磁环境有全面的认识。通过详细的电磁兼容测试数据分析和故障排查,可以准确识别出设备中电磁干扰的主要来源,如高频信号泄漏、接地不良、布局不合理等。随后,基于这些发现,制定针对性的改进策略。这可能包括加强屏蔽设计的具体措施,如增加屏蔽材料的厚度以提高屏蔽效能,或者采用新型屏蔽材料以更好地适应特定频段的电磁辐射;调整接地布局,优化接地路径,确保设备内部电位均衡,减少由电位差引起的电磁干扰;以及重新规划电路布局和布线,避免信号线间的交叉干扰,提高信号完整性。这些策略的实施将显著提升设备的电磁兼容性能,确保其在复杂电磁环境下稳定可靠地运行。

### 5.2 仿真与优化工具应用

随着计算机技术的飞速发展,仿真与优化工具在电磁兼容结构设计中扮演着越来越重要的角色。这些工具利用先进的算法和模型,能够模拟出复杂电磁环境下设备的实际工作状态,预测电磁干扰的分布和强度,从而为设计者提供有力的决策支持。在设计初期,设计者可以利用仿真工具对不同的设计方案进行快速评估,比较其电磁兼容性能的差异,选择最优方案<sup>[4]</sup>。在设计过程中,仿真工具还可以帮助设计者实时监测电磁场的分布情况,发现潜在的干扰源和敏感点,及时调整设计参数以优化电磁兼容性能,优化工具还能根据设计目标自动搜索最佳设计参数组合,提高设计效率和准确性。

### 5.3 设计方案的可行性分析

在确定了电磁兼容结构设计的改进方案后,进行详细的可行性分析是确保方案顺利实施的关键步骤。可行性分析应从多个维度进行,包括技术可行性、经济性和实施难度等方面。在技术可行性方面,需要评估改进方案是否具备实现预期电磁兼容性能的技术基础,是否符合相关标准和规范的要求。这要求设计团队具备丰富的专业知识和实践经验,能够准确判断方案的技术可行性。在经济性方面,需要综合考虑改进方案所需的成本投入与预期收益之间的平衡。这包括设备材料成本、研发成本、生产成本以及后期维护成本等多个方面。通过成本效益分析,确保改进方案在经济上合理可行。在实施难度方面,需要评估改进方案在实际生产过程中的可操作性、可维护性以及对现有系统的影响。这要求设计团队充分考虑生产条件、工艺流程以及现场环境等因素,确保改进方案能够顺利实施并稳定运行。

## 结束语

复杂电磁环境下轨道交通通信设备的电磁兼容结构设计是一项系统工程,需要综合考虑多方面因素。通过本文的研究与实践,成功设计出了一系列具备优异电磁兼容性能的轨道交通通信设备。这些设备不仅能够在复杂电磁环境中稳定可靠地运行,还具备较高的抗干扰能力和信号传输质量。未来,随着电磁兼容技术的不断进步和轨道交通系统的持续发展,将继续深化研究,不断优化设计方案,为轨道交通事业的繁荣与发展贡献更多力量。

## 参考文献

- [1]李华.微机继电保护装置软硬件技术探讨[J].电力建设,2017,22(15):144-147.
- [2]王庆斌.刘萍.尤利文.等.电磁干扰与电磁兼容技术[J].北京机械工业出版社,2017,28(22):185-190.
- [3]王康周,彭波,江志斌.新一代信息通信技术在装备制造服务化中的作用:基于我国4家企业的案例研究[J].中国机械工程,2018,29(18):2259-2267.DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2018.18.011.
- [4]高通股份有限公司.用于使用用户装备作为代理来向多个机器类型通信设备提供IMS服务的技术:中国,CN201780045950.8[P].2019-03-19.