

轨道交通通信设备电磁兼容仿真分析对结构的优化设计研究

胡若磊

北京铁路信号有限公司 北京 102613

摘要: 通过探讨轨道交通通信设备电磁兼容性的基础理论,包括电磁兼容的概念、电磁干扰的产生与传播途径以及电磁兼容标准与规范。详细介绍了电磁兼容仿真分析方法,包括仿真软件的选择、仿真模型的建立、仿真分析流程与参数设置以及仿真结果的评估与验证。进一步分析了电磁干扰对轨道交通通信设备结构的具体影响,包括对设备外壳结构、电路板结构和线缆结构的干扰。因此,提出了基于电磁兼容仿真分析的轨道交通通信设备结构优化设计策略,以提升设备的电磁兼容性和整体性能。

关键词: 轨道交通; 通信设备; 电磁兼容; 仿真分析; 结构优化设计

1 轨道交通通信设备电磁兼容基础理论

1.1 电磁兼容的概念

电磁兼容 (Electromagnetic Compatibility, 简称 EMC), 是指设备或系统在其电磁环境中能正常工作, 同时又不对该环境中其他设备和系统产生无法忍受的电磁干扰的能力。在轨道交通通信系统里, 众多通信设备密集运行, 如列车上的车载通信设备、沿线的基站设备等。这些设备既要保证自身在复杂电磁环境下稳定传输信号、执行通信功能, 又不能因自身电磁发射干扰到周边其他设备的正常运作。例如, 车载信号控制系统需精准接收和处理轨道旁信号设备发送的指令, 同时不能让自身产生的电磁噪声干扰到车内乘客的通信设备以及周边的通信网络。电磁兼容涵盖了电磁干扰 (EMI) 和电磁抗扰度 (EMS) 两个关键方面, 只有二者协同达成要求, 才能确保轨道交通通信设备实现理想的电磁兼容状态。

1.2 电磁干扰的产生与传播途径

在轨道交通通信设备中, 电磁干扰源种类繁多。内部干扰源主要源于设备自身的电路运行, 像数字电路中高速开关元件的频繁通断, 会产生高频的开关噪声; 电源模块在进行电压转换和功率传输时, 因电路特性会出现纹波干扰, 影响设备内其他电路的稳定工作。外部干扰源同样不容忽视, 列车运行时, 其电气系统、牵引电机等会向外辐射强烈的电磁信号, 干扰沿线通信设备的信号接收; 周边通信基站、广播电视发射塔等产生的电磁信号, 也可能窜入轨道交通通信频段, 对通信设备造成干扰。

电磁干扰主要通过传导和辐射两种途径传播。传导干扰借助电源线、信号线等导体, 将干扰信号引入通信

设备内部电路, 影响设备正常运行, 比如电源线上叠加的干扰电压会直接影响设备供电稳定性, 进而干扰设备工作。辐射干扰则是干扰源以电磁波的形式在空间传播, 当通信设备处于干扰源的辐射范围内时, 设备的外壳、电路板走线等会感应出干扰电流, 导致设备出现信号失真、误码等问题^[1]。

1.3 电磁兼容标准与规范

为了确保电子、电气设备的电磁兼容性, 各国和地区都制定了相应的电磁兼容标准和规范。这些标准和规范规定了电磁兼容性的测试方法、限值以及设计要求等, 旨在保障设备在预期的电磁环境中能够正常、可靠地运行。在轨道交通领域, 电磁兼容标准和规范对于通信设备的设计、制造、安装和调试等环节都具有重要的指导作用。通过遵循这些标准和规范, 可以有效地减少电磁干扰, 提高通信设备的电磁兼容性, 从而确保轨道交通系统的整体运行安全和效率。

2 轨道交通通信设备电磁兼容仿真分析方法

2.1 仿真软件介绍与选择

在轨道交通通信设备电磁兼容仿真领域, 存在多款功能强大的软件。ANSYSElectronicsDesktop是一款综合性的电磁仿真软件, 其中的HFSS (HighFrequencyStructure Simulator) 模块擅长处理高频电磁问题, 能够精确模拟通信设备中复杂的天线辐射、微波传输等现象; Maxwell模块则专注于低频电磁场分析, 对于电源模块、电机等产生的低频电磁干扰模拟效果出色。CSTStudioSuite同样应用广泛, 它具备高效的求解算法, 在处理大规模模型时优势明显, 可快速准确地模拟通信设备在复杂电磁环境下的响应。选择仿真软件时, 需综合考虑轨道交通通

信设备的特点。若设备涉及大量高频信号传输,如5G通信模块在轨道交通中的应用, HFSS模块在模拟信号完整性、电磁辐射等方面表现更为突出;若关注设备的电源系统电磁兼容性, Maxwell模块可精准分析电源纹波、传导干扰等问题。同时,模型的规模、复杂度以及对计算效率的要求也是重要考量因素, CSTStudioSuite在应对大规模复杂模型时能显著缩短计算时间。

2.2 仿真模型的建立

建立精确的仿真模型是电磁兼容仿真的基础,利用三维建模软件,如SolidWorks、CATIA等,构建轨道交通通信设备的几何模型。对于设备外壳,需精确还原其形状、尺寸以及材质,因为外壳的结构和材质对电磁屏蔽性能影响重大。例如,金属外壳的厚度、是否存在缝隙等都会改变其对电磁干扰的屏蔽效果。电路板建模时,要详细绘制每一条走线、过孔以及元件的位置,因为走线的长度、间距和拓扑结构会影响信号传输过程中的电磁耦合和干扰^[2]。线缆建模同样关键,需明确线缆的类型、屏蔽层结构、线芯材质以及线缆的走向,不同类型的线缆在抗干扰能力和辐射发射特性上差异显著。完成几何模型构建后,依据实际材料属性,在仿真软件中准确设置各部件的参数,如金属的电导率、介质材料的介电常数等,以确保模型能真实反映设备在电磁环境中的行为。

2.3 仿真分析流程与参数设置

仿真分析流程包含多个关键步骤,首先将建好的模型导入仿真软件,随后进行网格划分,这一步骤至关重要。合理的网格划分能在保证计算精度的同时提高计算效率。对于复杂结构和场强变化剧烈的区域,需采用更细密的网格;而在相对简单、场强变化平缓的部位,可适当增大网格尺寸。求解设置环节,要根据仿真目的选择合适的求解器,如针对高频问题可选用有限元求解器,低频问题则可采用积分方程求解器等。同时,设置好电磁干扰源的激励参数,包括干扰信号的频率范围、幅度大小、波形特征等,以及定义仿真模型的边界条件,如辐射边界用于模拟无限空间的电磁传播,端口边界用于设置信号的输入输出。在参数设置方面,网格尺寸、求解精度、迭代次数等参数相互关联且对仿真结果影响较大。例如,过小的网格尺寸虽能提高精度,但会大幅增加计算量和计算时间;求解精度设置过高可能导致计算不收敛,需通过多次试验调整参数,找到最佳组合。

2.4 仿真结果评估与验证

评估仿真结果需确立一系列科学的指标,电场强度、磁场强度直观反映了设备周围电磁环境的强弱,过

高的场强可能导致设备故障或干扰其他设备。电磁辐射发射强度用于衡量设备自身向外辐射的电磁能量,需与相关标准规定的限值进行对比。电磁抗扰度裕度则体现了设备抵抗外界干扰的能力,裕度越大,设备在复杂电磁环境下的可靠性越高。为验证仿真结果的准确性,需借助实验测试。利用电磁兼容测试设备,如频谱分析仪可精确测量设备的电磁辐射发射频谱,电波暗室能模拟理想的电磁环境,对设备进行抗扰度测试。将实验测试数据与仿真结果进行对比分析,若二者偏差在合理范围内,说明仿真模型可靠;若存在较大差异,则需重新审视模型建立、参数设置以及仿真分析流程,查找问题并进行修正,确保仿真结果能真实反映轨道交通通信设备的电磁兼容性能。

3 电磁干扰对轨道交通通信设备结构的影响分析

3.1 对设备外壳结构的影响

外壳材料对电磁屏蔽效能起决定性作用,普通塑料材质几乎无屏蔽能力,金属外壳虽有一定屏蔽性,但厚度与结构形式同样关键。在高频环境下,如5G通信频段,过薄的金属外壳难以阻挡信号穿透。外壳上的缝隙与孔洞若设计不合理,会成为电磁干扰“通道”,导致电磁泄漏,干扰内部电路。列车运行时,外部强电磁辐射通过外壳缝隙进入,可能使通信设备出现信号中断、误码等问题。长期发热还会加速外壳材料老化,降低机械强度与屏蔽性能,影响设备稳定性与使用寿命。

3.2 对电路板结构的影响

当附近存在强电磁干扰源时,信号线间的电容性和电感性耦合加剧,使信号波形畸变,增加误码率,影响通信质量。电路板布线方式也至关重要,走线过长、间距过小会增大串扰风险,尤其是在高速信号传输线路中,不合理的布线拓扑结构会导致信号反射严重,削弱信号强度。过孔的寄生电容和电感同样会阻碍信号传输,高频时影响更明显。电磁干扰增加电路板上电子元件的损坏风险,芯片、电容、电感等元件可能出现击穿、性能退化等问题,影响设备正常运行^[3]。

3.3 对线缆结构的影响

线缆在轨道交通通信设备中负责信号与能量传输,电磁干扰对其结构影响不容忽视。电容性耦合是常见问题,当线缆靠近强电磁干扰源,干扰信号会通过电容耦合进入线缆,干扰正常信号传输。例如,列车电气设备附近,电力线缆与通信线缆距离过近,电力线缆的电磁干扰可能窜入通信线缆。电感性耦合也是隐患,线缆在变化磁场中会感应出电动势,产生干扰电流。线缆的屏蔽层、线芯材质以及线缆长度与走向都影响耦合干扰,

屏蔽层质量不佳会降低线缆抗干扰能力。线缆过长或走向不合理,会增加受干扰概率,且传输高频信号时,若结构设计不合理,还会成为电磁辐射源,破坏通信系统的电磁兼容性。

4 基于电磁兼容仿真分析的轨道交通通信设备结构优化设计策略

4.1 设备外壳结构优化

设备外壳在轨道交通通信设备抵御电磁干扰中扮演着极为关键的角色,对其结构开展优化设计是提升设备整体电磁屏蔽性能的核心要点。借助电磁兼容仿真分析,能够精准定位外壳上的电磁泄露点以及高风险区域,为后续的优化工作提供坚实依据。从性能提升层面来看,通过仿真分析不同厚度的外壳对电磁屏蔽效果的影响,发现适当增加外壳厚度可显著提升其对电磁干扰的阻挡能力。以某型号通信设备为例,在初始设计中,其金属外壳厚度较薄,在高频电磁环境下,内部电路受到的干扰较为严重。经电磁兼容仿真模拟,当将外壳厚度从1mm增加至1.5mm时,设备内部关键区域的电磁干扰强度降低约30%,有效保障电路的稳定运行,大幅提升设备的抗干扰性能。

在材料选择方面,仿真分析能够对比多种屏蔽材料的特性。常见的金属材料如铝、铜等,导电性和导磁性存在差异,对不同频段电磁干扰的屏蔽效果也有所不同。通过仿真模拟,对于工作在特定频段的通信设备,若采用高导电性的铜合金作为外壳材料,相较于普通铝合金,其对该频段电磁干扰的屏蔽效能可提升20%-30%。这不仅增强设备的电磁防护能力,还能减少外界干扰对设备内部信号传输的影响,提高通信质量。虽然一些高性能的屏蔽材料能带来出色的电磁屏蔽效果,但成本相对较高。借助电磁兼容仿真分析,可以在满足设备电磁兼容性能要求的前提下,寻找性能与成本的平衡点。例如,在对某通信设备外壳进行优化时,通过仿真分析发现,采用价格相对较低的镀锌钢板,并在表面涂覆一层特殊的导电涂层,其电磁屏蔽性能与直接使用昂贵的铜合金外壳相近,但成本降低约40%。同时,优化外壳缝隙的设计,减少电磁波的渗透路径,引入合理的接地设计,确保外壳的连续性和完整性,进一步提升整体电磁屏蔽性能。

4.2 电路板结构优化

电路板结构的优化设计旨在减少电磁干扰的传播,提高电路板的电磁兼容性和信号完整性。利用电磁兼容仿真分析技术,可以对电路板上的电子元件布局、信号走线、电源分布等进行精细化的优化设计。例如,通过调整元件的摆放位置,减少相互之间的电磁耦合;采用差分信号传输和合理的阻抗匹配,降低信号传输中的反射和衰减;增加去耦电容和滤波电路,以抑制电源噪声和干扰信号。此外,仿真分析还可以帮助识别潜在的电磁干扰源,并指导采取相应的屏蔽或隔离措施,确保电路板上的信号传输稳定可靠^[4]。

4.3 线缆结构优化

线缆作为轨道交通通信设备中信号传输和电力供应的关键部分,其结构的优化设计对于减少电磁干扰和提高系统整体电磁兼容性至关重要。通过电磁兼容仿真分析,可以评估不同线缆材料、屏蔽层厚度、走线方式等因素对电磁干扰的影响。可以采取以下优化策略:选择高屏蔽效能的线缆材料,增强线缆的电磁屏蔽能力;优化线缆的布局和走线,避免长距离平行走线和不必要的弯折,以减少电磁干扰的传输路径;增加线缆屏蔽层的接地连接,确保屏蔽层的有效性和连续性。

结束语

通过深入研究电磁兼容基础理论,利用先进的仿真分析技术,可以精确识别并解决电磁干扰问题。设备外壳、电路板和线缆结构的优化设计对于提升设备的电磁屏蔽性能和信号完整性具有重要意义。未来,随着轨道交通技术的不断发展,电磁兼容性问题将更加复杂多变,因此需要持续探索和创新电磁兼容设计与分析方法,以确保轨道交通通信系统的安全、稳定和高效运行。

参考文献

- [1]冯亚雄.关于确保城市轨道交通传输系统运行稳定性的研究[J].智能城市,2020(05):134-135.
- [2]袁胜军,阳川,李博识,贺伟,廖啟龙.电磁兼容接地分析与设计[J].电子产品可靠性与环境试验,2022,40(013).
- [3]陈希艳,杨兴超,张占营,秦海晶,徐洋涛,陈威立.电磁兼容中的屏蔽方法[J].集成电路应用,2020,37(09):40-41.
- [4]刘尚峰.电磁兼容设计在铁路信号设备中的应用[J].铁路通信信号工程技术,2022,19(03):105-110.