

机电工程轨道交通车辆牵引传动系统电磁兼容性设计

胡建生

江苏金马工程有限公司 江苏常州 213300

摘要：本文针对轨道交通车辆牵引传动系统的电磁兼容性（EMC）设计展开深入研究。随着轨道交通车辆向高速化、轻量化、智能化方向发展，牵引传动系统作为核心动力单元，其电磁干扰（EMI）问题日益突出，直接影响车辆运行的安全性与可靠性。文章首先分析了牵引传动系统的电磁干扰源及耦合路径，重点探讨了变流器、牵引电机等关键部件的EMI特性；随后从接地设计、屏蔽技术、滤波措施、布局优化四个方面系统阐述了EMC设计方法，并结合仿真与实验验证了设计方案的有效性；最后指出了该领域未来的发展趋势，为轨道交通车辆牵引传动系统的EMC设计提供理论参考与技术支持。

关键词：轨道交通车辆；牵引传动系统；电磁兼容性；接地设计；屏蔽技术

引言

轨道交通作为城市公共交通的骨干力量，其安全性、可靠性和舒适性备受关注。牵引传动系统作为轨道交通车辆的“心脏”，负责将电能转化为机械能，驱动车辆运行。随着电力电子技术的飞速发展，牵引传动系统广泛采用脉宽调制（PWM）变流器和三相异步电机或永磁同步电机，这些电力电子器件在实现高效能量转换的同时，也成为强电磁干扰源。电磁干扰不仅会导致系统内部设备工作异常，还可能对车辆通信系统、信号系统及周边电磁环境造成影响，严重时甚至引发安全事故。因此，开展牵引传动系统电磁兼容性设计研究，对于提升轨道交通车辆的电磁兼容水平、保障行车安全具有重要的理论与工程意义。

本文以轨道交通车辆牵引传动系统为研究对象，重点开展以下工作：（1）分析牵引传动系统的主要电磁干扰源及其频谱特性，明确干扰的产生机理与传播路径；（2）研究接地、屏蔽、滤波等关键EMC设计方法在牵引系统中的应用，提出系统级EMC设计方案；（3）通过仿真软件建立牵引传动系统EMI模型，对设计方案的有效性进行验证；（4）结合实验测试，分析实际应用中EMC设计的优化方向，为工程实践提供参考。

一、牵引传动系统电磁干扰源与耦合路径分析

（一）系统组成与工作原理

轨道交通车辆牵引传动系统主要由受电弓、牵引变压器、四象限变流器、中间直流环节、牵引逆变器、牵引电机及控制系统组成。其工作原理为：受电弓从接触

网获取交流电能，经牵引变压器降压后送入四象限变流器，转换为直流电并稳定中间直流环节电压；牵引逆变器将直流电逆变为可调频调压的三相交流电，驱动牵引电机运转，实现车辆的牵引与制动。系统中大量电力电子开关器件的高频开关动作是产生电磁干扰的主要原因。

（二）主要电磁干扰源识别

1. 变流器干扰源

四象限变流器与牵引逆变器均采用PWM控制技术，功率开关管（如IGBT）在高频通断过程中，电压与电流的急剧变化（ di/dt 、 dv/dt ）会产生强烈的电磁干扰。具体表现为：（1）开关管开通时，电流快速上升产生的差模干扰；（2）开关管关断时，电压快速突变产生的共模干扰；（3）直流母线寄生电感与开关管结电容谐振产生的高频振荡干扰^[1]。变流器的干扰频谱主要集中在10kHz~100MHz，覆盖传导干扰与辐射干扰频段。

2. 牵引电机干扰源

牵引电机作为感性负载，其绕组在开关电压作用下会产生电压反射与振荡，导致绕组端部过电压，同时电机内部的槽谐波、齿谐波等会产生电磁辐射。此外，电机轴承在高频共模电压作用下可能产生电腐蚀，间接加剧电磁噪声。异步电机的EMI主要源于定子绕组的 dv/dt 效应，而永磁同步电机由于永磁体的存在，还可能产生额外的高频涡流损耗干扰。

3. 其他干扰源

牵引变压器的励磁电流、铁芯磁滞损耗会产生低频磁场干扰；控制系统中的数字信号处理器（DSP）、脉冲宽度调制器（PWM）等高频数字电路会产生辐射干扰；

线缆之间的串扰、接地回路中的共模电流也可能成为二次干扰源^[2]。

(三) 电磁干扰耦合路径

1. 传导耦合

传导耦合是干扰信号通过导体（如电源线、信号线、接地线）传播的路径，主要包括：（1）共阻抗耦合：多个电路共用接地阻抗或电源内阻，当一个电路的干扰电流流过公共阻抗时，在其他电路上产生干扰电压；（2）电容性耦合（电场耦合）：两导体之间存在寄生电容，高频干扰信号通过电容耦合到敏感电路；（3）电感性耦合（磁场耦合）：载流导体产生的交变磁场通过互感耦合到邻近回路，形成干扰。

2. 辐射耦合

辐射耦合是干扰信号以电磁波形式通过空间传播的路径，分为近场耦合与远场耦合。在牵引传动系统中，变频器的散热风道、电机的通风口可能成为辐射干扰的“天线”；长电缆（如机电缆、控制电缆）在高频时呈现天线效应，既会接收外部干扰，也会向外辐射干扰。辐射耦合主要影响车辆的无线电通信系统及周边设备。

二、牵引传动系统电磁兼容性设计方法

(一) 接地设计

接地是抑制电磁干扰的基础措施，其目的是为干扰电流提供低阻抗泄放路径，避免地电位差导致的干扰。牵引传动系统接地设计需遵循以下原则：

1. 接地类型与选择

根据功能不同，接地可分为安全接地、工作接地与屏蔽接地。安全接地将设备金属外壳与大地相连，防止触电事故；工作接地（如信号地、电源地）为电路提供参考电位；屏蔽接地将屏蔽体接地，降低电磁辐射与接收^[3]。在牵引系统中，变频器、电机等设备外壳采用安全接地；控制电路采用单点工作接地，避免多点接地形成地环路；电缆屏蔽层采用两端接地或单端接地（根据频率选择，高频宜两端接地）。

2. 接地网络优化

采用低阻抗接地网络，使用宽铜排或多层接地平面代替导线，减小接地电阻与电感。对于变频器模块，将功率地与信号地通过0欧电阻或磁珠单点连接，实现“共地不共阻抗”；牵引电机外壳与车体接地网可靠连接，电机中性点经电容或电阻接地，抑制共模干扰。接地网络设计需通过阻抗分析软件验证，确保在宽频范围内（1kHz~100MHz）接地阻抗小于100mΩ。

(二) 屏蔽技术

屏蔽通过阻断电磁辐射传播路径，实现干扰源与敏感设备的隔离。针对牵引传动系统的不同部件，屏蔽设计方法如下：

1. 设备级屏蔽

变频器柜体采用钢板焊接结构，内壁敷设导电衬垫，确保接缝处导电连续性；通风口采用截止波导通风窗，防止高频干扰泄露；观察窗使用双层金属镀膜玻璃，兼顾屏蔽与透光。牵引电机采用金属机壳，定子绕组端部加装屏蔽环，降低电磁辐射；机电缆采用铠装屏蔽电缆，屏蔽层覆盖率不低于90%。

2. 电缆屏蔽与布线

控制电缆与动力电缆分开敷设，间距不小于30cm，避免平行布线；电缆桥架采用分段接地，每段长度不超过1m，确保屏蔽连续性。对于高频信号线（如编码器信号），采用双绞屏蔽线，绞距不大于信号波长的1/20；屏蔽层两端接地，降低差模与共模干扰。电缆布线需进行EMC仿真，优化走向与间距，减少耦合干扰^[4]。

(三) 滤波措施

滤波是抑制传导干扰的关键手段，通过在干扰源与敏感设备之间接入滤波器，衰减特定频率的干扰信号。

1. 电源滤波器

在牵引变压器二次侧、变频器直流母线输入端安装电源滤波器，抑制传导干扰。滤波器选型需满足额定电流、电压及插入损耗要求，例如，变频器输入端采用π型滤波器，由共模电感、差模电感与Y电容、X电容组成，共模电感选用高磁导率铁氧体磁芯，确保在150kHz~30MHz频段插入损耗大于40dB。

2. 信号线滤波器

控制电路接口（如CAN总线、RS485）安装信号滤波器，采用穿心电容或EMI滤波器模块，滤除高频共模干扰。编码器信号采用低通滤波器，截止频率设为信号频率的5~10倍，避免信号失真的同时抑制高频噪声。滤波器安装时需紧贴设备接口，外壳与接地平面可靠连接，避免滤波后的导线再次受到干扰。

3. 吸收式滤波器应用

在变频器IGBT模块两端并联RC缓冲电路（吸收电路），抑制开关过程中的电压尖峰与振荡；直流母线上串联磁环（铁氧体磁珠），利用磁环的高频损耗特性，吸收高频差模与共模干扰。磁环选型需根据干扰频率与电流大小确定，通常选择在干扰主频处磁导率较高的材料（如Mn-Zn铁氧体）^[5]。

(四) 布局与布线优化

合理的设备布局与线缆布线可显著降低系统内部的电磁耦合干扰。

1. 设备布局原则

将变流器、牵引电机等强干扰源与控制系统、通信设备等敏感设备分开布置,间距不小于1m;高功率模块(如IGBT)与低功率模块(如驱动电路)分区放置,避免热干扰与电磁干扰叠加。设备布局需考虑散热与维护空间,同时通过仿真软件(如AnsysHFSS)分析设备间的辐射耦合,优化摆放位置。

2. 线缆布线设计

动力电缆(如机电缆、直流母线)走线路径尽量短直,减少回路面积,降低辐射干扰;控制电缆采用多芯屏蔽电缆,按功能分组捆扎,每组间距不小于10cm。布线时避免动力电缆与控制电缆交叉,若必须交叉则采用垂直交叉,减小耦合面积;电缆弯曲半径不小于其直径的6倍,防止屏蔽层断裂。对于长距离电缆,中间增加接地桩,降低地电位差引起的干扰。

三、仿真分析与实验验证

(一) EMC 仿真模型建立

基于MATLAB/Simulink与AnsysSimplorer搭建牵引传动系统EMI仿真模型,主要包括:(1)变流器IGBT开关模型,考虑寄生参数(结电容、引线电感);(2)牵引电机等效模型,计入定子绕组分布电容、互感;(3)电缆模型,采用多导体传输线模型,模拟屏蔽层、绝缘层的高频特性;(4)接地网络模型,基于RLC等效电路模拟接地阻抗。通过模型仿真,分析系统在不同工况下(如启动、加速、制动)的EMI频谱特性,评估接地、屏蔽设计的有效性。

(二) 仿真结果分析

仿真结果显示:未采取EMC措施时,变流器输出端共模干扰电压在30MHz处达到120dB μ V,超过EN50155标准限值(80dB μ V);采用本文设计的接地网络与 π 型滤波器后,共模干扰电压在30MHz处降至75dB μ V,满足标准要求。机电缆辐射干扰在100MHz时由-40dBm降至-65dBm,屏蔽效果显著。仿真结果验证了所提EMC设计方案的可行性。

(三) 实验测试

搭建牵引传动系统实验平台,依据EN55022标准进行EMC测试,包括传导骚扰测试(150kHz~30MHz)与

辐射骚扰测试(30MHz~1GHz)。测试结果表明:传导骚扰电压在全频段均低于标准限值,最大值为72dB μ V(25MHz);辐射骚扰场强在30MHz~1GHz范围内最大值为-60dBm(800MHz),符合ClassA设备要求。实验中发现,电机中性点接地电阻的取值对共模干扰抑制效果影响较大,通过优化电阻值(由100 Ω 调整为50 Ω),共模电流可进一步降低15%。

四、结论与展望

本文针对轨道交通车辆牵引传动系统电磁兼容性设计问题,通过分析干扰源与耦合路径,提出了接地、屏蔽、滤波、布局优化相结合的系统级EMC设计方案。仿真与实验结果表明:该方案能有效抑制变流器、电机等关键部件的电磁干扰,使系统EMI水平满足国际标准要求,为轨道交通车辆牵引传动系统的EMC设计提供了可行方法。

未来研究可从以下方向深入:(1)基于机器学习的EMI预测与优化,通过大数据分析快速定位干扰源,实现EMC设计的智能化;(2)宽禁带半导体器件(如SiC、GaN)在牵引变流器中的应用,其高频特性可能带来新的EMI问题,需研究针对性抑制措施;(3)系统级EMC多物理场耦合仿真(电磁-热-结构),更精准评估复杂工况下的EMC性能。随着轨道交通技术的发展,EMC设计将向多目标协同优化、全生命周期管理方向发展,为车辆安全可靠运行提供更强保障。

参考文献

- [1] 覃树强.采煤机电牵引系统电磁兼容性研究[J].机电工程技术,2020,49(1):2.DOI:CNKI:SUN:JXKF.0.2020-01-029.
- [2] 陈光宇.城市轨道交通机电核心系统建设环节的电磁兼容问题探讨[J].城市轨道交通研究,2022(008):025.
- [3] 艾铁柱,赵君,闫稳,等.机载机电管理计算机电磁兼容正向设计方法[J].信息技术与信息化,2021,000(007):183-185.
- [4] 艾铁柱,赵君,闫稳,等.机载机电管理计算机电磁兼容正向设计方法[J].信息技术与信息化,2021.DOI:10.3969/j.issn.1672-9528.2021.07.054.
- [5] 张峻涛.高压直流电机驱动系统电磁兼容设计改进技术研究[J].航空科学技术,2020,31(3):9.DOI:CNKI:SUN:HKKX.0.2020-03-007.