

地铁列车布局布线EMC技术分析

曾重阳

通号城市轨道交通技术有限公司 北京 100070

摘要：电磁兼容技术不仅关系到地铁列车本身的安全稳定运行，还对车内通信、控制系统等关键设备的正常功能发挥有至关重要的作用。在地铁列车布局和布线过程中，电磁兼容问题的有效解决，直接影响到列车运行的可靠性、效率以及安全性。本文首先对EMC的技术内涵和EMC防护技术要求进行了分析，其次提出了地铁列车布局布线EMC技术的应用路径，以供相关技术部门参考。

关键词：地铁；列车布局；布线EMC技术

地铁列车作为现代城市轨道交通的重要组成部分，其电气设备的复杂性和多样性对电磁兼容性提出了严格要求。电磁兼容性不仅是保证列车系统正常运行的关键因素，也是保障其他电子设备不受电磁干扰的基础条件。随着地铁列车的电气化程度不断提高，列车上的电磁环境愈发复杂，如何通过合理的布局布线设计，有效降低电磁干扰的影响，成为了地铁列车系统设计中的重要课题。基于此，对地铁列车布局布线EMC技术分析具有重要意义。

1 地铁列车布局布线 EMC 技术分析

1.1 EMC的技术内涵

电磁兼容（EMC）是指在电磁环境中，确保电子设备和系统能够稳定、无障碍地运行，同时不会对周围设备产生超出其承受范围的电磁干扰的技术。电磁干扰（EMI）是一种常见现象，可能导致设备、信号传输通道或系统性能下降，甚至出现功能中断。在严重情况下，可能导致不可修复的失效。根据干扰程度，电磁干扰可分为以下四个等级：一、功能干扰。对设备性能产生一定影响，但整体仍在正常工作范围内；二、性能下降。设备运行性能明显下降，但仍在可接受的范围内；三、临时故障^[1]。设备因外部干扰无法正常工作，但干扰消除后可恢复正常状态；四、永久损坏。设备受到不可逆的损坏，必须通过维修才能恢复使用。在设备使用过程中，所有电气设备都可能受到电磁干扰的影响。

1.2 EMC防护技术要求

在城市轨道交通复杂的电磁环境中，信号传输电缆种类繁多，工作频段和电压幅值各不相同，且具有独特的电磁特性。因此，相关部门对这些电缆进行有效的电磁干扰调控至关重要^[2]。车载电缆通常穿越复杂的电磁干扰区域，既可能受到外界干扰，也可能自身产生干扰。因此，合理的电缆布置是保障列车电磁兼容性的基础。

布线时，首先要采取有效的隔离措施，确保高干扰电缆和敏感电缆之间保持足够的距离。尤其是模拟信号线、通信线和控制线，应与动力电缆、刹车电缆、电动机转动电缆等高干扰线缆分开布置。为有效抑制电磁干扰，可以采取以下措施：一、精心规划线路布置，尽量减少电磁干扰；二、采用物理隔离，将电缆放置在线槽或防护套管中，减少信号间的相互干扰；三、对于重要线缆，如电源线和信号线，应优先使用具有有效屏蔽层的电缆，并确保屏蔽层合理接地，以防止电磁干扰扩散；四、严格遵守布线规程，保持电缆之间的适当间距，进一步降低电磁耦合效应。

2 地铁列车布局布线 EMC 技术的应用路径

2.1 地铁布局布线设计

合理布局 and 有效规划是优化城市轨道交通电磁环境、保障设备电磁兼容性的重要手段，对提升系统综合性能具有关键作用。技术人员应基于多年的电磁兼容规划与布线经验，并结合行业规范，对地铁设备进行精细分级管理。通过对不同类型的干扰源进行合理的空间规划，将干扰源集中布置，并保持足够的空间隔离，可以有效降低设备间的电磁干扰。通信线缆和电源线缆在不同电压等级和频率下表现出不同的电磁干扰特性，因此需要对不同类型的线缆进行个性化布线，并详细分析它们的特殊情况，以减少电磁干扰传播的风险。为进一步提升系统的EMC性能，还应采用先进的屏蔽和过滤技术，对设备和线缆实施全方位保护。

2.1.1 高危分区划分

针对城市轨道交通系统结构复杂、设备多样的现状，特别是牵引换流器、弓网等强电磁辐射源与以太网、CAN总线、温度传感器等高灵敏度设备共存的情况，技术部门应进行有效分区与管理。根据设备的电磁性能及其对周边环境的影响程度，可以将系统分为五个区域：强干扰区、

主干扰区、中性区、主敏感区和高敏感区。随着设备之间的距离缩短,电磁干扰的程度会加剧。由于设备的接近程度与电磁兼容风险呈正相关关系,特别是在强干扰、高灵敏度区域,因此技术人员需要更加严密的电磁防护措施,以确保系统的安全稳定运行。

2.1.2 车下布局

为解决地铁列车系统的电磁兼容问题,技术部门可以将B级新一代地铁牵引换流器、牵引电机、高压箱体、空压机等大功率高压设备布置在列车底部,以避免对敏感设备造成干扰。同时,将车载通信关键部件、驾驶控制系统核心模块及直流、低压交流电源等敏感装置布置在车身顶部或其他无干扰区域^[3]。通过物理隔离的方式,能够有效减少电磁干扰对系统正常运行的影响。

2.1.3 线槽布局

针对城轨线路中线缆种类多、数量大的特点,技术部门应制定针对性的线缆布线方案,以解决线缆之间的相互干扰问题,提升电磁兼容性。沟槽的设计和布置需要精心规划:

(1) 厚度设计关系着屏蔽效果。金属线槽壁的厚度与其电磁屏蔽效果密切相关。对于高频电磁干扰,可以利用趋肤效应在较薄的材料上实现有效屏蔽。试验结果显示,厚度为0.2-0.5mm的槽道能够提供良好的屏蔽效果。为了在确保屏蔽性能的同时提高结构强度和耐用性,地铁线路通常应设计为2.5mm厚的槽道,以保障电缆的屏蔽效果,并延长其使用寿命。

(2) 需要注意接地设计。接地编是增强线槽电磁防护的关键措施。为确保接地的有效性,技术人员需要在槽道两端及导线沿线多个适当位置进行多重接地,以形成稳固的接地网络。车体左右两侧的槽道开口朝向车身,车体本身可以作为天然屏蔽层,若需要加强防护,也可设计专门的遮罩。为最大限度减少线缆之间的干扰,技术人员应将槽道划分为三个独立线槽,将A类(380 V交流电缆)、B类(110 V电缆)和C类(信号线等)分别进行隔离布置。电缆应紧凑有序地布置,尽量靠近电缆沟以减少空间辐射。同时,要确保导线、电缆及分支管线的总横截面积不超过槽道横截面的75%,以保障系统的安全和稳定性。

2.2 线槽仿真及分析

技术部门应根据《布线技术规范》,制定标准线缆的精确布线计划,旨在优化电磁环境。具体规划中,压缩线缆被小心地布置在靠近A槽的一侧,以尽量减少相互干扰;为了进一步减少电磁干扰,可采用B型线缆的三维建模方法,并将信号线缆布置在C型槽中,从而保证最大

程度的安全距离。

2.2.1 仿真结果

技术人员可以通过数值模拟方法对点M1 (-41, -53880)和点M2 (-2.49, -25,3930)进行观测和分析。首先,在未设置沟槽的情况下,A类和B类线缆之间的涡流效应非常明显,这对C型线缆形成了严重的安全风险。尤其在布线密集的情况下,不仅会影响信号传输质量,还可能对连接装置造成损害;其次,尽管铝合金沟槽在一定程度上能减少涡流效应,但由于其本身是弱磁材料,磁屏蔽性能有限。因此,可以利用铝合金的结构刚度和经济性优势,满足基本的电磁屏蔽要求。另外,采用钢线槽可以显著提高布线效率。钢线槽有效地将AC380V电缆产生的强涡流场控制在A槽内,从而保证B槽内110V电缆和C槽内信号电缆的电磁环境洁净和兼容。实验结果表明,钢沟槽具有良好的电磁屏蔽效果。

2.2.2 结果分析

与未使用槽道的结构相比,铝合金槽道能够显著减少电磁干扰,基本满足地铁工程的需求。为了更好地满足电磁屏蔽要求,技术部门可以使用更高性能的材料,如硅钢片等。此外,加强A、B、C三类电缆的隔离措施,可以进一步提高整体电磁兼容性^[4]。尤其是C级信号线缆,其抗电磁干扰能力对于确保列车信号的畅通和列车的安全运行至关重要。

2.3 EMC建模与仿真

2.3.1 建模

技术部门应通过分析内燃动车组底部平面布线图和线路图,确定其下方配置了50 Hz AC380V三相四线制供电电缆和DC15V供电电缆。信号电缆的导体间距为37mm,两个导体的长度为4113mm,高电平大于9V(负载电阻为3k Ω),低电平不超过2V,脉冲持续时间为50 \pm 20%。三维模型中包含了一个装有辅助变流器的箱体。上方电缆为标准EN 3*2.5的AC380V电缆,下方电缆为EN 3*0.5的屏蔽信号电缆。三维模型使用CST STUDIOSUITE 2019进行建模,线路仿真模型由Cable Studio生成。为符合仿真工作条件,各部分按电学原则连接。在模型中,DC15V电源的额外三相AC380V励磁源标记为“port 1”、“port 2”、“port 3”、“port 4”。

在车辆运行过程中,各种设备和IGBT的切换会产生脉冲群、浪涌、谐波以及高频干扰,使车内电气环境变得复杂。因此,电磁干扰仿真中输入的激励信号包含了大量脉冲、冲击、谐波和高频干扰,这使得激励信号不再是“干净”的正弦波,而是具有复杂干扰的信号,从而更接近于真实环境。在CST STUDIOSUITE 2019的仿真

计算中,为了清晰地比较C级电缆的差异,技术人员应增加激励信号。在图中,AC380V的三相电压下,单相工作电压为220V,频率为50Hz。第一个周期从0.02秒起为理想的正弦波,第二个周期为带有正弦波的脉冲组。脉冲组包含10个单脉冲,上升时间30ns,脉宽200ns,周期时间0.1毫秒,峰值30V。从0.025秒开始,出现两个波前,一个为1.2毫秒,另一个为30毫秒,周期为0.15毫秒。从0.03秒起,出现了谐波和正弦波相互作用的波形,占整个信号的20%。从0.035秒开始,激励信号中包含了高频干扰和正弦波,峰值为14V,频率为5MHz。此外,使用DF16(正方向)速度传感器,该传感器在DC12-30V范围内工作,频率为500Hz,输出方波幅值在高电平时大于9V,低电平时不低于2V。

实际环境的EMC仿真结果显示,真实激励信号受到多种因素的影响,导致仿真结果存在较大差异。特别是当信号电缆的屏蔽层为双端接地时,两种电缆均未使用屏蔽编织网;信号类电缆采用了双端接地的屏蔽网;C类电缆使用了双端接地的屏蔽钢管。这些不同类型的电缆均使用了屏蔽编织网并双端接地。

2.3.2 仿真

(1) 两类线缆均不采用屏蔽编织网。在仿真试验中,两根没有屏蔽编织网的钢索能够在获得理想波形信号后的初始阶段,确保速度传感器的输出信号处于正常运行范围内,传感器能够正常工作。然而,当面对脉冲群、浪涌、谐波和高频等复杂的电磁干扰时,传感器的输出信号会出现明显的扰动。具体表现为,高电平可能异常上升至7.7 V(低于9 V的安全阈值),而低电平可能降至3.5 V(低于2 V的安全阈值)。这些扰动容易导致速度传感器性能退化,严重时可能引起设备失效和损坏。

(2) 信号线缆采用屏蔽编织网并双端接地。使用双端接地的屏蔽编织网对信号电缆进行优化后,仿真结果显示,在最初的理想波形周期中,速度传感器的工作特性基本稳定。虽然脉冲群和电涌等干扰仍然存在,但传感器输出的波形幅值有所降低,最高电压达到8.2 V,最低电压保持在3 V。这表明,采用屏蔽编织网的方案具有较强的抗干扰能力。然而,该方法仍未能完全消除干扰

效应,因此,技术部门仍需对性能进一步优化。

(3) 信号线缆采用屏蔽钢管并双端接地。对信号电缆进行屏蔽处理后,其电磁保护性能明显改善。在整个试验过程中,无论是否存在脉冲群或浪涌等扰动,速度传感器的输出信号都能准确控制在工作范围内^[1]。在最恶劣的环境条件下,高电平仅轻微上升至9.5 V,而低电平则维持在1.4 V以下。因此,技术人员可采用钢管屏蔽方案提升速度传感器的抗干扰能力。

(4) AC380线缆和速度传感器线缆均采用屏蔽编织网并双端接地。仿真试验结果表明,双端绕线屏蔽网的AC380V电缆及速度传感器电缆具有优良的抗干扰性。在理想电压波形下,传感器输出稳定;而在复杂的电磁干扰下,尽管高电平会出现轻微的起伏,但在最大扰动下,高电平输出电压仍不超过9.3 V,低电平峰值仅为1.3 V。这表明,该研究成果对提高转速传感器在恶劣电磁环境下的稳定性具有重要意义。

结束语:综上,地铁列车布局布线中的EMC技术对于确保列车设备的正常运行和系统的电磁环境安全至关重要。通过对干扰源的合理布局、线缆的科学布线设计以及高效的屏蔽与接地措施,可以有效减少电磁干扰的影响,保障设备和信号的稳定性。同时,利用先进的仿真技术对电磁干扰进行分析和验证,不仅能进一步优化布线设计,还能提高系统的电磁兼容性,确保列车运行的安全与可靠性。这些技术手段为地铁列车的稳定运营提供了强有力的保障。

参考文献

- [1]朱波.地铁列车控制系统的冗余信号电源设计[J].铁路通信信号工程技术,2024,21(08):67-73.
- [2]刘尧.地铁某线路列车制动方案改进[J].铁道车辆,2024,62(03):169-174.
- [3]陈娟,潘倍强.地铁列车布局布线EMC技术研究[J].环境技术,2023,41(10):129-135.
- [4]唐飞龙,赖森华,于青松.系列化中国标准地铁列车电气系统[J].机车电传动,2022,(02):1-8.
- [5]刘雄.系列化中国标准地铁列车牵引系统设计[J].机车电传动,2022,(02):55-66.