

轨道车辆电磁兼容试验标准及其应用研究

戴 立

江苏省建筑工程质量检测中心有限公司 江苏省南京市 210046

摘 要: 为确保轨道车辆电子设备稳定运行并防止电磁干扰影响安全, 研究电磁兼容试验标准及其应用至关重要。分析国内外标准并结合案例, 探讨了如何依据这些标准进行电磁发射和抗扰度测试。研究指出, 将试验标准严格应用于车辆全生命周期, 能有效解决电磁干扰问题, 提高车辆稳定性和可靠性, 对轨道交通行业高质量发展具有重大意义。

关键词: 轨道车辆; 电磁兼容; 试验标准; 应用

城市化和轨道交通建设的快速发展导致轨道车辆运行环境中的电磁信号变得复杂。车辆内部众多电子设备, 如信号系统、动力控制、通信设施和供电模块, 容易相互干扰, 影响安全和稳定。因此, 遵守电磁兼容试验标准至关重要, 它能保证车辆系统正常工作, 减少对环境和其它设备的干扰, 确保轨道交通的安全和效率。

1. 轨道车辆电磁兼容试验标准概述

轨道车辆在现代化交通体系中扮演着举足轻重的角色, 从穿梭于城市地下的地铁, 到驰骋于广袤大地的高铁, 其运行的安全性与可靠性至关重要, 而电磁兼容作为保障车辆电子设备稳定工作的关键要素, 离不开一套科学、严谨的试验标准。这些标准犹如轨道车辆的“电磁护身符”, 为其在复杂电磁环境中平稳运行保驾护航。

目前, 轨道车辆电磁兼容试验标准呈现出多元化且体系化的特征, 欧洲标准 EN 50155 是轨道交通电子设备的核心标准, 规定了设备在振动、冲击、电磁干扰等环境下的性能要求, 新增了供电系统分类和 EMC 端口等效要求。其配套标准 EN 50121 系列则在轨道交通领域深耕细作, 不仅对轨道车辆自身的电磁发射和抗扰度做出了严格规定, 还充分考虑了车辆与轨道系统、周边环境之间的电磁兼容性, 细致入微地规范了从供电系统到通信设备等各个环节的测试要求。国际电工委员会 (IEC) 的 IEC 62236 系列标准与 EN 50121 兼容, 明确了机车车辆设备的 EMC 测试方法, 如传导发射测试频率范围为 150kHz ~30MHz, 辐射发射测试覆盖 30MHz ~6GHz。

我国也结合国内轨道交通发展实际, 制定了 GB/T 24338 系列标准 (等同采用 IEC 62236)。该标准既借鉴了

国际先进经验, 又紧密贴合我国国情, 在兼容国际标准的同时, 对轨道车辆的电磁兼容性能提出了具有针对性的要求。无论是高速动车组的精密控制系统, 还是城市轨道交通的信号传输装置, 都能在这套标准中找到对应的测试依据^[1]。

2. 轨道车辆电磁兼容的实验标准应用细则

轨道车辆作为高度集成化的移动系统, 内部电子设备与外部电磁环境的交互复杂, 电磁兼容试验标准的落地实施, 需要一套严谨且具操作性的应用细则作为指引。从研发设计到生产调试, 每一个环节都需要将标准细化为具体的执行步骤, 才能真正保障车辆的电磁兼容性能。

在研发阶段, 工程师需依据 EN 50121 系列、GB/T 24338 系列等标准, 对车辆电气系统架构进行电磁兼容性预评估。例如, 在设计电子制动控制单元 (装置)、信号控制系统等关键部件时, 需同步规划屏蔽结构与接地方案, 模拟高频电磁干扰场景, 预判设备间潜在的电磁耦合问题。此阶段的仿真测试尤为重要, 通过计算机建模对电磁发射与抗扰度进行虚拟验证, 提前优化设计缺陷, 避免后期返工造成的成本浪费。

进入生产制造环节, 标准应用细则进一步细化为工序控制要求, 在设备组装过程中, 线缆敷设需严格遵循屏蔽层连续性原则, 不同类型线缆需保持安全间距, 防止信号串扰; 接地系统的安装必须精确到螺栓扭矩与搭接面积, 确保接地电阻符合标准限值。每完成一个子系统装配, 都需进行阶段性电磁兼容测试, 如对车载通信设备进行射频电磁场辐射抗扰度测试, 验证其在强电磁环境下的信号传输稳定性。

整车测试环节是检验标准执行效果的关键, 试验场地通常选择具备屏蔽条件的半电波暗室或开阔试验场, 按照标

准规定的测试流程,依次开展电磁辐射发射试验与抗扰度试验。例如,在电磁辐射发射试验中,需使用EMI测量接收机测试车辆运行时的宽带与窄带电磁辐射信号,对比标准限值判定是否达标;抗扰度试验则需要通过静电放电、射频电磁场辐射抗扰度、电快速瞬变脉冲群、浪涌(冲击)抗扰度、射频场感应的传导骚扰抗扰度、工频磁场抗扰度、电压暂降、短时中断和电压变化抗扰度等试验,观察车辆控制系统、安全装置的运行状态。对于测试中发现的超标项,需建立整改对策,从屏蔽结构加固、接地、滤波参数优化等方面逐项解决,并进行复测验证,直至完全符合标准要求^[2]。

3. 轨道车辆电磁兼容试验项目与方法

3.1 电磁发射试验

电磁发射试验旨在测量轨道车辆或车载电子设备运行时向外界辐射的电磁能量,判断其是否会对周边电子设备或通信系统造成干扰。依据EN 50121-3-2等标准,试验主要涵盖传导发射与辐射发射两大项目。

传导发射试验中,需对车辆中的电子装置和设备的电源线、信号线等进行测量。以某型地铁车辆为例,在电子制动控制装置的电源线传导发射测试时,采用人工电源网络测量0.15MHz~30MHz频段内的干扰电压。按照标准要求,在0.5MHz~30MHz频率点,传导发射限值为93dB μ V,实测值需控制在限值范围内,若超过限值,则需排查滤波电路设计缺陷或线缆屏蔽完整性问题。

辐射发射试验通常在半电波暗室中进行,使用天线接收车辆中的电子装置和设备辐射的电磁信号。试验频率范围一般为30MHz~1000MHz,对不同类型轨道车辆设备的辐射发射限值有所差异,最高需测到6GHz。如电子制动控制装置,在30MHz~230MHz频率,电场辐射发射限值为40dB μ V/m(测量距离为10m),在230MHz~1000MHz频率,电场辐射发射限值为47dB μ V/m(测量距离为10m)。测试时,将天线分别置于水平和垂直方向,转台360°旋转多角度采集数据,确保覆盖装置辐射的各个方向。

3.2 电磁抗扰度试验

电磁抗扰度试验用于检验轨道车辆电子设备在外部电磁干扰环境下的正常工作能力,主要包括静电放电抗扰度、射频电磁场辐射抗扰度、电快速瞬变脉冲群抗扰度等项目。

静电放电抗扰度试验依据IEC 61000-4-2标准开展,通过静电放电发生器模拟人体或物体接触车辆时产生的静电

放电现象。试验分为接触放电与空气放电,接触放电电压最高可达8kV,空气放电电压最高15kV。在对某型列车控制系统进行测试时,当接触放电电压升至6kV,设备出现短暂死机现象,经检查发现是控制单元接口处屏蔽层存在缝隙,优化屏蔽结构后,设备在8kV接触放电条件下仍能稳定运行。

射频电磁场辐射抗扰度试验在电波暗室中进行,使用天线发射不同频率与强度的电磁场,模拟车辆运行时受到的射频干扰。标准规定,在80MHz~1000MHz频段,场强需达到20V/m。对车载通信设备测试时,当场强达到20V/m,设备出现信号中断情况,分析发现是滤波器对该频段抑制能力不足,更换高性能滤波器后,设备在20V/m场强下通信正常^[3]。

4. 轨道车辆电磁兼容试验问题分析

4.1 实验标准前的电磁兼容性问题

在轨道车辆电磁兼容试验标准尚未完善之前,行业面临着诸多严峻的电磁兼容性问题。早期,由于缺乏统一规范,不同制造商对车辆电磁兼容性能的理解与把控存在显著差异,导致轨道车辆在实际运行中故障频发。据统计,某城市地铁线路开通初期,因电磁干扰导致信号系统误动作的故障每月高达15-20次,严重影响运营效率与安全性。

彼时,车辆电子设备的设计未充分考虑电磁兼容因素。例如,牵引变流器与通信系统的线缆敷设未遵循屏蔽与隔离原则,大量干扰信号通过传导与辐射方式侵入通信线路,造成数据传输错误。实测显示,未采取有效屏蔽措施的通信线缆,在牵引变流器运行时,接收到的电磁干扰强度最高可达50dB μ V/m,远超正常工作允许的干扰水平。此外,由于缺乏明确的辐射发射限值标准,车辆在运行过程中对外界的电磁辐射失控。某高速动车组试运行期间,其辐射的电磁信号致使沿线3公里范围内的无线通信基站出现信号紊乱,经检测,动车组在400MHz频段的电场辐射强度高达60dB μ V/m,而后续标准对此频段的限值仅为40dB μ V/m。

4.2 应用环节的核心问题

即便在电磁兼容试验标准日趋完善的当下,轨道车辆在试验标准应用环节仍面临诸多核心问题。首先,试验设备与标准要求的匹配度不足,部分实验室的电磁干扰发生器、频谱分析仪等设备精度与稳定性欠佳,导致测试数据偏差较大。例如,某第三方检测机构使用的静电放电发生器,其输出电压误差达 $\pm 15%$,在进行8kV接触放电测试时,实际

施加到车辆设备上的电压仅为 6.8kV，无法真实模拟严酷的静电干扰环境，可能漏检设备的抗扰度缺陷。

其次，试验流程执行不规范现象普遍存在，在辐射发射试验中，部分操作人员未严格按照标准要求布置天线位置与高度，导致采集的数据不完整。某次对城轨车辆的辐射发射测试中，因天线高度未按标准设置在 1.5 米处，而是错误设置为 1 米，使得车辆顶部辐射较强区域的电磁信号未能有效采集，最终测试结果显示辐射发射达标，但在实际运行中，车辆却对周边广播电视信号造成干扰，复测发现车顶某频段辐射强度超标 $10\text{dB } \mu\text{V/m}$ 。

5. 轨道车辆电磁兼容试验标准的应用

5.1 在轨道车辆设计阶段的应用

在轨道车辆设计初期，电磁兼容试验标准就如同精准的导航图，为设计方案的敲定提供重要指引。工程师们参考 EN 50121、GB/T 24338 等行业规范，对车辆电气系统的电磁兼容性进行全面预判。比如在规划牵引变流器、信号控制系统等核心部件的布局时，会反复琢磨标准中关于电磁屏蔽、接地系统及线缆隔离的细节要求，就像精心规划城市交通线路一样，确保不同系统间“各行其道”，避免相互干扰。

不仅如此，借助计算机仿真技术，工程师们还会模拟静电放电、射频电磁场辐射等复杂场景，对设计方案进行“虚拟彩排”。通过这种方式，提前发现潜在问题并及时调整，让各子系统在实际运行时，能够从容应对各种电磁环境，稳定发挥功能。将标准要求融入设计源头，就像为轨道车辆打下坚实的地基，能有效减少后期设计变更，降低研发成本，大大提升设计效率和质量。

5.2 在轨道车辆生产制造过程中的应用

在轨道车辆的生产制造环节，电磁兼容试验标准就像一把严格的质量标尺，贯穿从零部件组装到整车集成的每一道工序。工人师傅们在敷设线缆时，会严格按照标准要求操作，仔细检查屏蔽层是否连续，精准把控不同类型线缆之间的距离；安装接地系统时，也会反复测量接地电阻，确保符合限值要求。

每完成一个子系统的装配，技术人员都会依照标准进行阶段性的电磁兼容测试。比如，对车载通信设备进行射频

电磁场辐射抗扰度测试，就像模拟设备在“电磁风暴”中的表现；对供电系统进行传导发射测量，则是检查系统是否会产生过多的“电磁噪音”。

5.3 在轨道车辆维护与检修中的应用

在轨道车辆的日常维护和检修工作中，电磁兼容试验标准是检修人员排查故障、恢复车辆性能的得力助手。检修人员会定期按照标准要求，对车辆的电磁兼容性进行全面检测，通过测量电磁发射水平、评估设备抗扰能力，及时发现潜在的电磁干扰隐患。

当车辆出现信号传输不畅、控制系统误动作等可能与电磁兼容相关的问题时，检修人员会严格遵循标准规定的测试方法，对相关设备和系统展开“地毯式”排查，快速锁定故障点。此外，在更换或升级车辆电子设备时，也会依据标准对新设备与原有系统的兼容性进行仔细验证，就像为车辆安装新“器官”前，先确保它能与身体其他部分和谐共处。

结语

轨道车辆电磁兼容试验标准是保障车辆稳定运行的基石，在实际应用中，严格依据标准开展试验，不仅能及时发现车辆电子系统潜在的电磁干扰隐患，通过优化屏蔽、接地、滤波等设计，还能有效提升车辆抗干扰能力。从城市地铁到高速列车，遵循标准完成的电磁兼容试验已成为车辆研发、生产及验收的关键环节。未来，随着车辆智能化程度不断提升，电磁兼容试验标准也需与时俱进，持续为轨道交通安全运行、提升乘坐体验保驾护航。

参考文献：

- [1] 窦慧. 轨道车辆电磁兼容标准现状分析及技术展望[J]. 环境技术, 2024,42(11):250-257.
- [2] 杨志浩, 毕京斌, 常青, 等. 轨道车辆大功率高频辅助变流器设计研究[J]. 电力电子技术, 2022,56(03):38-42.
- [3] 郝宏海, 杨智勇, 马振元, 等. 城市轨道交通车辆辐射电磁骚扰试验不确定度研究[J]. 运输经理世界, 2021,(33):4-6.
- [4] 卢明书, 赵康杰, 徐铭, 等. 轨道车辆变频空调电磁兼容性设计及应用[J]. 铁道车辆, 2021,59(02):69-72.
- [5] 王哲. 轨道车辆电磁兼容试验标准及其应用研究[J]. 科技创新导报, 2020,17(19):83-85.