

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.11.017

某地铁牵引变流器的电磁兼容性试验方案设计

孙佳伟¹, 尹国龙¹, 高占威², 赵云松²

(1. 中车大连电力牵引研发中心有限公司, 辽宁 大连 116052; 2. 北京经纬恒润科技有限公司, 北京 100191)

摘要:针对目前轨道交通行业内设备级的磁兼容性试验方案不规范所带来的试验结果准确度、可重复性低的问题,以某型号牵引变流器为例,对变流器内部潜在的干扰源、敏感信号以及干扰信号耦合路径等电磁兼容性要素进行了分析和归纳,并以此为基础,对基于 EN 50121 轨道标准的各项电磁兼容性试验方案进行了描述,设计了一种用于模拟牵引变流器实车电磁边界环境的电磁兼容性试验台架。研究结果表明:通过分析某型牵引变流器的电磁兼容性要素,明确各项电磁兼容性试验的实施对象以及操作细节,可以保证产品电磁兼容性试验的有效性和可重复性。

关键词:轨道交通;牵引变流器;电磁兼容;电磁兼容要素;试验台架

中图分类号:TM46

文献标志码:B

文章编号:1001-4551(2018)11-1232-05

Electromagnetic compatibility test plan of a subway traction converter

SUN Jia-wei¹, YIN Guo-long¹, GAO Zhan-wei², ZHAO Yun-song²

(1. CRRC. Dalian R&D. Co., Ltd., Dalian 116052, China; 2. Beijing Jingwei Hirian Technology Co., Ltd., Beijing 100191, China)

Abstract: Aiming at the problems of the low accuracy and low repeatability of the test results caused by the non-standard testplan in the present rolling stock apparatus' electromagnetic compatibility (EMC) test, a certain type of traction converter was taken, the EMC elements such as potential interference sources, sensitive signals and interference coupling paths of the traction converter were analyzed and summarized. Based on this, the test plan of all the necessary EMC test items based on EN50121 rail standards were described. A kind of EMC test bench was designed to simulate the electromagnetic boundary environment of a traction converter. The results indicate that by analyzing the EMC elements of a certain type traction converter and clarifying the implementation object and operation details of each EMC test item, the effectiveness and repeatability of EMC test are guaranteed.

Key words: rail; traction converter; electromagnetic compatibility(EMC); EMC elements; test bench

0 引言

近年来,随着我国高铁、城轨车辆出口到欧美市场,带来了车辆的电磁兼容标准必须与国际对接的问题,也对电磁试验的规范性提出了更高的要求。由于多数轨道车辆的设备级电磁兼容性(EMC)试验验证缺乏规范性的试验方案,导致试验结果的有效性以及可重复性低。

有鉴于此,本文以某地铁牵引变流器为研究对象,

提出一种规范试验方案的设计开发流程,以及电磁兼容试验的系统性方案,以此来提高轨道交通设备电磁兼容性试验的准确性和可重复性。

1 牵引变流器介绍

牵引变流器作为轨道车辆动力总成系统中的关键设备,其核心功能是将电源母线上的直流电转变为频率可调、电压可调(VVVF)的三相交流电,并以此实现对三相异步电机的驱动。因此,通过调节牵引变流器

收稿日期:2017-12-26

作者简介:孙佳伟(1984-),男,辽宁阜新人,硕士研究生,主要从事城轨、高铁车辆、机车牵引系统方向的研究。E-mail:jwsun0415@sina.com

的输出频率和电压就可以改变牵引电机的转速,从而实现车辆运行速度的调节以及起停控制。

本文以大连电力牵引研发中心研制的某型号牵引变流器为分析对象,其结构外形如图 1 所示。

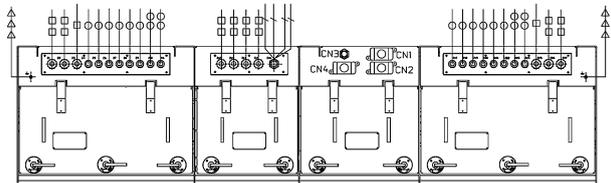


图 1 某型牵引变流器结构图

该型变流器采用了模块化设计,结构上自左至右依次分为 A、B、C 和 D 这 4 个舱室。A 舱和 D 舱用于输出主电路三相电用于驱动电机运转;B 舱内装有接触器、传感器等用于控制以及监测的装置;C 舱为中控舱,用于控制板以及通讯板的安置;D 舱用于输入重载信号。操作人员可通过中控端对变流器输入适当的信号,实现变流器在不同条件下的运行状态,同时也可以通过传感器的反馈信号实现对变流器运行状态的实时监控。

对牵引变流器展开分析主要有 3 个方面:

(1)从信号层面完成对变流器的干扰源、敏感信号和干扰耦合路径等电磁兼容性要素的分析;

表 1 某型牵引变流器电磁兼容要素分类统计表

舱室	端口	端口定义	输入/输出	信号特性(量级/频率/占空比)	要素分类
A	U1/V1/W1	三相输出电	输出	额定电流 220 A,频率-幅度可调	干扰源-高风险,关键
B	电抗器 1 +	接电抗器 1 前端	输出	主电路	干扰源
C	CN1 重载端	控制/反馈端口	输入/输出	数字信号	敏感信号-低风险
	CN2 重载端	传感器信号端口	输入	PWM 信号 0 V/12 V,20 kHz	敏感信号-高风险,关键
	CN3 重载端	总线通讯端口	输入/输出	/	敏感信号-高风险,关键
	CN4 重载端	控制电源	输入	110 VDC 供电/地	敏感信号-高风险,关键
D	U2/V2/W2	三相输出电	输出	额定电流 220 A,频率-幅度可调	干扰源-高风险,关键

其中,本研究对各端口信号所属的电磁兼容性要素范围、风险评估以及关键程度进行了逐一界定。该划分具有通用性。后续在进行电磁兼容性试验方案的设计中,表 1 中标注有高风险的要素分类端口将会被着重考虑。

3 试验方案的设计

目前,国际上轨道交通类电磁兼容性试验主要以 EN 50121 系列标准为参考,国内与之相对应的是 GB/T 24338 系列标准。GB/T 24338 源自 EN 50121 系列标准,其中结合我国轨道行业进行了修正^[1]。为了使试验方案更具通用性,EN 50121 系列标准将被作为制定方案的参考标准。

EN 50121 标准共包含 6 个部分,分别为^[2-7]:

第 1 部分,通则;第 2 部分,铁路系统对环境的辐

(2)基于变流器的功能特点以及应用场景设计较为详细的电磁兼容性试验方案;

(3)设计可有效模拟变流器实车环境电磁边界的电磁兼容性试验台架。

2 电磁兼容要素分解

首先,对其内部所包含的“电磁兼容三要素”,即干扰源、敏感信号以及潜在干扰的耦合路径进行划分;同时,对变流器的典型运行状况以及电气特性进行综合考虑。

将变流器的信号端口做为试验对象。考虑到变流器在运行状态时,需要满足其本身与环境之间以及自身内部各元器件之间两个方面的电磁兼容性要求,从两个方面进行电磁兼容要素分解:

(1)以变流器各个舱室接变流器外部附属设备的端口为分析对象;

(2)以变流器各舱舱体内部信号走线以及舱体间的互联信号为分析对象。

本研究选择其典型额定工况为变流器工作模式,并完成对其电磁兼容性要素的统计分类表。变流器各舱室的端口信号、端口功能、信号类型以及关键参数等如表 1 所示。

射发射;第 3-1 部分,轨道车辆-列车及配套车辆;第 3-2 部分,轨道车辆-车辆设备;第 4 部分,通讯设备的发射与抗扰度;第 5 部分,地面供电设备的发射和抗扰度标准涵盖了铁路系统和轨道车辆对环境的辐射发射要求,以及轨道车辆设备、通讯设备和变电站供电设施的电磁兼容性要求。标准对轨道交通系统以及车辆(设备)在进行电磁兼容性试验时的运行状况、试验场地、适用条件以及试验等级等信息进行了详细描述。在表 1 统计内容的基础上,本研究结合 EN 50121 系列标准要求来设计变流器的电磁兼容性试验方案。

本文以 EN 50121-3-2 作为参考标准,并结合变流器干扰源、敏感信号以及干扰耦合路径等相关特点,选取针对性的测试项来构建测试方案。针对该型变流器所制定的电磁兼容性试验方案如表 2 所示。

表 2 牵引变流器设备级电磁兼容试验预案

试验项目	试验要求	测试对象	性能要求
辐射发射	9 kHz ~ 150 kHz, 10 m 法, 峰值检波 150 kHz ~ 1 GHz, 10 m 法, 峰值检波	设备外壳	需满足 EN 50121 - 3 - 1 车辆慢速运行 B 限值,
传导发射	150 kHz ~ 500 kHz, 准峰值检波 500 kHz ~ 30 MHz, 准峰值检波	控制 110 V 电源端	限值 99 dB μ V 限值 93 dB μ V
射频共模传导抗扰	150 k - 80 MHz, 10 V/m(rms), 80%, AM - 1 kHz	控制 110 V 电源端 控制与反馈信号	性能等级 A
快速瞬变传导抗扰	± 2 kV, 5/50 ns, 5 kHz	控制 110 V 电源端 制与反馈信号	性能等级 A
浪涌抗扰	± 2 kV, 1.2/50 μ s, 42 Ω , 0.5 μ F, 线 - 线 ± 1 kV, 1.2/50 μ s, 42 Ω , 0.5 μ F, 线 - 地	控制 110 V 电源端	性能等级 B
射频辐射抗扰	80 - 800 MHz, 20 V/m (rms), 80% AM - 1kHz	设备外壳	性能等级 A
静电放电	接触放电, ± 6 kV 和 ± 8 kV 空气放电, ± 6 kV 和 ± 8 kV	控制面板	性能等级 B

电磁兼容性试验方案中各试验项需要明确设备的运行情况,并且工况的制定必须参考设备的实车运行状况。在试验方案中,对变流器规定几种不同工况下的典型工作模式,以便全面掌握变流器不同工况下的电磁兼容性特性。

试验方案中,根据标准要求明确变流器在各项试验中的空间位置、摆放姿态、线缆长度、所用测试设备以及方法等信息。

3.1 辐射发射

根据标准 EN 50121 - 3 - 2 的要求,该项试验参考 EN 55011 进行,试验在 10 米法或者 3 米法半波暗室内进行。由于地面反射的原因,推荐选 10 米法暗室作为测试场地。辐射发射试验布置如图 2 所示。

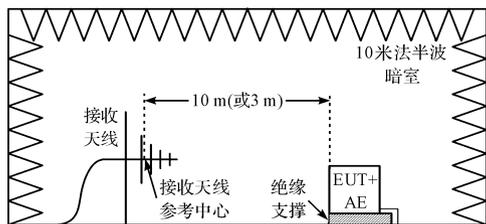


图 2 辐射发射试验布置

本研究将变流器及其辅助设备(如驱动电机)放置与绝缘支撑板上(厚度 15 cm)。接收天线参考中心与变流器被侧面距离 10 m。对变流器某一侧面进行测试即可,可以选取靠近骚扰源的侧面作为测试面,测试中天线需在 1 m ~ 4 m 的高度范围对其进行扫描,测量并选取最大值。

为了保证测试的准确性,测试前需对测试场地的底噪声进行测量记录,保证环境底噪需比发射限值低 6 dB 以上。

3.2 传导发射

传导发射试验所针对的对象是变流器低压控制器的 110VDC 供电端口。根据 EN 50121 - 3 - 2 的要求,

传导发射试验方法需参考 EN 55016 - 2 - 1,其中涉及到 3 种测试设备:人工电源网络(AMN)、电压探头(VP)、电流探头(CP)。

利用人工电源网络可以得到较为准确的结果,并且在固定工作模式下,该测试方法也能较好地保证测试结果的一致性。只有在使用 AMN 受试设备无法正常工作时,才会考虑使用电压探头或者电流探头作为测试接收设备。针对牵引变流器,本研究选择 AMN 法进行测试。

AMN 法传导发射试验所用的 AMN 需满足高压要求的。测试中,变流器以及辅助设备置于绝缘支撑板上(厚度 15 cm),外部 110 VDC 电源通过人工电源网络给变流器控制器供电。测量接收机通过 AMN 上的测量端口对被测线上的干扰进行测量。

3.3 射频共模传导抗扰

根据 EN 50121 - 3 - 2 要求,试验方法参考 EN 61000 - 4 - 6。射频共模传导干扰的注入方式一般有 3 种:耦合去耦网络注入法(CDN 法)、电磁/电流卡钳注入法、直接注入法。

根据 EN 61000 - 4 - 6,控制电源端选择 CDN 注入法,而对于控制信号线和反馈信号线,则选择电磁卡钳或者电流卡钳作为干扰注入设备。考虑到变流器的内部空间有限以及线束数量较多的情况,可以选用电流卡钳作为注入设备。

CDN 法试验布置图如图 3 所示。

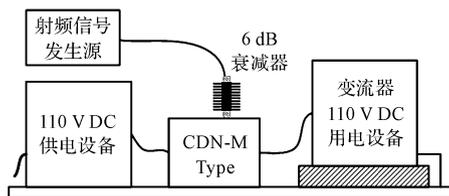


图 3 CDN 法传导抗扰试验布置

电流卡钳法的试验布置图如图 4 所示。

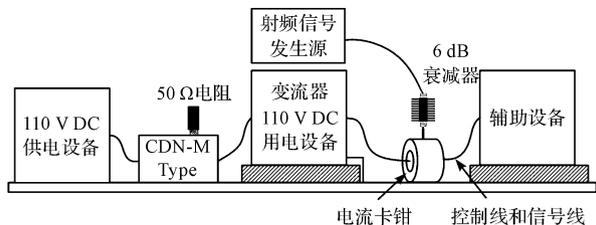


图 4 电流卡钳法传到抗扰试验布置

在试验中,变流器以及其辅助设备均需放置于高度 15 cm 的绝缘支撑上,且设备各个线缆距离地面高度应不小于 30 cm。

3.4 快速瞬变传导抗扰

该项试验参考标准 EN 61000 - 4 - 4, 针对 110 VDC 电源端口以及控制线和信号线两种测试对象, 本研究选 CDN 法和容性耦合夹法来进行试验。

对于 110 VDC 电源端口的瞬变脉冲群测试, 试验布置与针对其的射频共模传导抗扰试验相似。对于控制线和信号线的容性耦合夹法的瞬变脉冲群测试, 试验布置图如图 5 所示。

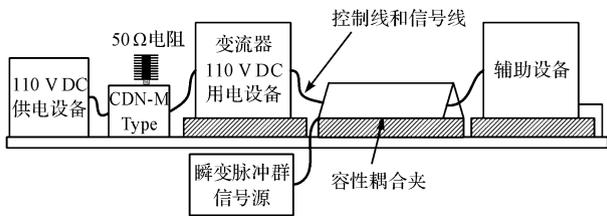


图 5 控制线和信号线瞬变脉冲群试验布置

试验中,受试变流器以及其辅助设备需放置在厚度不超过 15 cm 的绝缘支撑上。

3.5 浪涌抗扰

浪涌抗扰度试验参考标准 EN 61000 - 4 - 5 进行,按照标准中描述的耦合/去耦网络的选择方法,测试对象为变流器的 110 VDC 供电端口,试验分为线-线耦合和线-地耦合两类,测试布置示意图如图 (6,7) 所示。

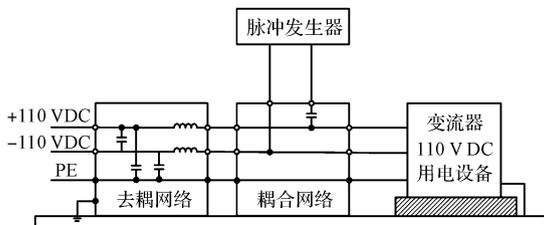


图 6 线-线浪涌试验布置

根据标准要求,耦合网络与变流器之间的线束长

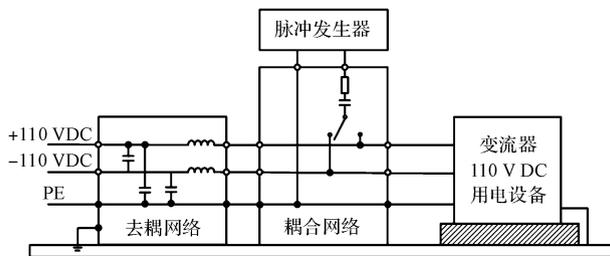


图 7 线-地浪涌试验布置

度应最长不超过 2 m。线-线浪涌试验中的耦合网络阻抗要求为 18 μF,线-地浪涌试验中的耦合网络阻抗要求为(9 μF + 10 Ω)。去耦网络中 L 最大不超过 1.5 mH,选取电容 X 和 Y 时,需满足在不接入 DUT 时注入浪涌的情况下,去耦网络输入端所测得的脉冲峰值不超过所施加脉冲峰值 15% 的要求。

3.6 射频辐射抗扰

根据标准 EN 50121 - 3 - 2 的要求,射频辐射抗扰试验参考标准 EN 61000 - 4 - 3 所描述的方法进行,试验布置示意图如图 8 所示。

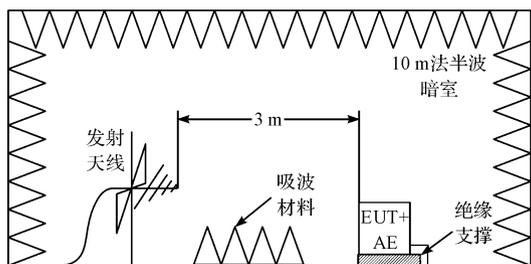


图 8 辐射抗扰试验布置

与辐射发射试验不同,为了保证测试场强的均匀度要求,通常需在发射天线与受试设备之间加铺一定面积的吸波材料(铁氧体板和尖劈)降低地面反射。对于变流器设备需放置于过 15 cm 厚的绝缘支撑上。

辐射抗扰试验要求使用 3 m 法进行,并且须在天线水平极化以及垂直极化两种条件下进行,天线高度设置为 1.5 m。

3.7 静电放电

参考标准 EN 61000 - 4 - 2 的要求,静电放电试验需在温度 15 °C ~ 35 °C 和相对湿度 30% ~ 60% 的环境下进行,本研究选用 150 pF,330 Ω 放电网络,放电类型分接触放电以及空气放电两种。

根据 EN 50121 - 3 - 2 的要求,轨道交通设备的静电放电试验只适用于非维护状态下,有可能被列车乘客或者设备操作人员碰触或者接近的情况。针对牵引变流器,静电释放位置选择变流器的控制面板、操作开关等有可能出现被人为接触的位置。

4 试验台架的改进

根据标准要求,针对受试设备实际使用情况的不同,试验中设备通常采取两类支撑放置方式,一种情况为将设备放置在 80 cm 高的绝缘实验台上^[8-9],该种方式通常适用于台式设备;另一种情况则直接将设备至于地面上,通过一个厚度不超过 15 cm 的木板来支撑,这种方式一般只针对大型的机箱机柜。

对于牵引变流器来讲,传统的试验布置与其实车安装布置相去甚远,这使得其在试验条件下的电磁边界条件与实车安装时的电磁边界存在较大差异,这种差异会在一定程度上加大变流器电磁兼容性测试与整车测试结果的不一致性,尤其对于发射类试验(如辐射发射、传导发射等)的影响较为明显。

为了模拟变流器实车条件下的安装环境,需尽可能在不违反标准其他要求的前提下,对变流器的试验支撑台架进行了设计改进,借助设备级试验方案尽可能地评估设备在系统级试验的中的电磁兼容性特性。

本文设计电磁兼容试验台架如图 9 所示。

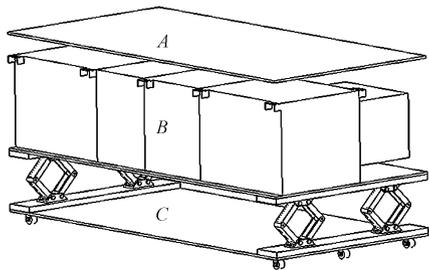


图 9 牵引变流器电磁兼容性试验台架

台架 A—面积金属材质盖板,用于模拟轨道车辆底部;
B—变流器;C—可移动且高度可调的支撑,材质多为低介电常数非导电材质

整个试验台架可有效承载总重 2 000 kg 以内的受试设备以及附属装置。

利用改进后的试验台架进行电磁兼容性试验,可以根据变流器在实车中的空间位置,合理调整测试台架的支撑高度和位置,从而可以实现模拟变流器在实车环境下所处的电磁边界的功能。

5 结束语

本研究以大连电牵公司某型牵引变流器为研究对

象,针对其电气特性,在完成对变流器电磁兼容性试验方案设计的同时,还概述了轨道交通中设备级电磁兼容试验方案的一般设计流程和方法,该流程以及方法可以有效提升试验方案设计的科学性与规范性。

本研究第 4 部分针对牵引变流器的结构特点以及实车安装位置,设计了一种较为通用的试验台架,通过拟合其在实车中的环境边界条件以及设备的接地方式,来改善变流器设备级 EMC 测试结果与整车 EMC 测试结果的一致性。该设计目前正用于某型号牵引变流器的 EMC 试验验证,后续有待取得进一步的验证成果。

参考文献 (References):

- [1] 崔勇,王颖,王俊飞,等. 国内外轨道交通电磁兼容标准对比分析[J]. 北京交通大学学报:自然科学版,2015,39(6):54-61.
- [2] BS EN 50121.1—2015. Railway applications-electromagnetic compatibility, Part 1: general[S]. London:BSI, 2015.
- [3] BS EN 50121.2—2015. Railway applications-electromagnetic compatibility, Part 2: emissions of the whole railway system to the outside world[S]. London:BSI, 2015.
- [4] BS EN 50121.3.1—2015. Railway applications-electromagnetic compatibility, Part 3-1: rolling stock-train and complete vehicle[S]. London:BSI, 2015.
- [5] BS EN 50121.3.2—2015. Railway applications-electromagnetic compatibility, Part 3-2: rolling stock-apparatus[S]. London:BSI, 2015.
- [6] BS EN 50121.4—2015. Railway applications-electromagnetic compatibility, Part 4: emission and immunity of the signaling and telecommunications apparatus[S]. London:BSI, 2015.
- [7] BS EN 50121.5—2015. Railway applications-electromagnetic compatibility, Part 5: emission and immunity of fixed power supply installations and apparatus[S]. London:BSI, 2015.
- [8] BS EN 55016.1.4—2010 + A1—2012. Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods, Part 1-4: radio disturbance and immunity measuring apparatus-antennas and test sites for radiated disturbance measurements[S]. London:BSI, 2012.
- [9] BS EN 61000.4.3—2006 + A2—2010. Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods, Part 4-3: testing and measurement techniques-radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test[S]. London:BSI, 2010.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

孙佳伟,尹国龙,高占威,等. 某地铁牵引变流器的电磁兼容性试验方案设计[J]. 机电工程,2018,35(11):1232-1236.

SUN Jia-wei, YIN Guo-long, GAO Zhan-wei, et al. Electromagnetic compatibility test plan of a subway traction converter[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2018,35(11):1232-1236.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>