

城市轨道交通车辆应答器传输模块电磁干扰原因 及其应对措施

王 博 杨其林 孔宴伟 邸 峰 朱真宗

(中车青岛四方车辆研究所有限公司, 266031, 青岛//第一作者, 高级工程师)

摘 要 目的: 实际运营中经常出现车载变流系统对车载 BTM(应答器传输模块)天线产生电磁干扰、导致 BTM 天线无法正常工作, 需找出电磁干扰的原因, 并制定干扰抑制措施。方法: 先对干扰源进行定位, 确定其干扰源是车载变流系统; 阐述了变流系统产生电磁干扰的机理和传输路径, 初步分析了变流系统产生的共模干扰分量与差模干扰分量对 BTM 天线正常工作产生的影响。建立了简化电路模型和理论计算公式, 给出了所增设器件的参数范围。提出了抑制变流系统产生差模干扰和共模干扰的三个方案, 对三个方案下变流系统对外端口产生的干扰幅值进行测试。结果及结论: 增加共模干扰和差模干扰信号的流电路径后, 实现了干扰信号在变流系统内的循环流通, 减少了对变流系统外设备的传导干扰。方案三可以有效解决 BTM 天线受扰问题。

关键词 城市轨道交通车辆; 应答器传输模块; 电磁干扰; 车载变流系统

中图分类号 U285.28

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2023.11.018

Electromagnetic Interference of Urban Rail Vehicle Balise Transmission Module and Coping Strategies

WANG Bo, YANG Qilin, KONG Yanwei, DI Feng, ZHU Zhenzong

Abstract **Objective:** In rail vehicle operation, there is often electromagnetic interference from the vehicle mounted converter system with the BTM (Balise Transmission Module) antenna, resulting in its malfunction. It is necessary to identify the causes of the electromagnetic interference to develop interference suppressing measures. **Method:** By locating the interference source, the vehicle mounted converter system is identified as the root cause. The mechanism and transmission path of electromagnetic interference generated by the converter system is explained, and the impact of common-mode interference and differential-mode interference generated by the converter system on the operation of the BTM antenna is preliminarily analyzed.

Then, a simplified circuit model and theoretical calculation formula are established, and the parameter range of adding components is provided. Three schemes for suppressing common-mode interference and differential-mode interference from the converter system are proposed, the external port amplitudes of these three schemes are tested. **Result & Conclusion:** By increasing the flow paths of common-mode interference and differential-mode interference signals, the internal circulation of interference signals within the converter system is achieved, reducing conducted interference to external devices of the converter system. The third scheme can effectively solve the interference problem with the BTM antenna.

Key words urban rail transit vehicle; BTM; electromagnetic interference; vehicle mounted converter system

Author's address CRRC Qingdao Sifang Rolling Stock Research Institute Co., Ltd., 266031, Qingdao, China

随着技术更新迭代,城市轨道交通车辆装备了越来越多的电子、电气设备或系统产品,这些产品的 EMC(电磁兼容)测试是车辆必须检验检测的项点。城市轨道交通大功率变流系统的 EMC 测试应按照 GB/T 24338.4—2018《轨道交通 电磁兼容 第 3-2 部分:机车车辆 设备》进行,产品出厂前须按照该标准的规定进行厂内的 EMC 测试。但由于厂内测试受地面试验条件的限制,地面 EMC 试验结果仅能证明其部分功能正常。此外,GB/T 24338.4—2018 中明确规定超过 50 kVA 的变流器设备不能单独进行发射试验,传导发射项点中也仅对变流系统中的辅助变流器输出端有限值进行了约束,这些因素都可能导致车辆其他子系统或设备运行过程中车载变流系统输入端口的电磁干扰存在未知的安全风险。

实际的工程项目中,经常出现厂验 EMC 试验结果合格但实际使用时车载变流系统(以下简称“变流系统”)对车载 BTM(应答器传输模块)天线

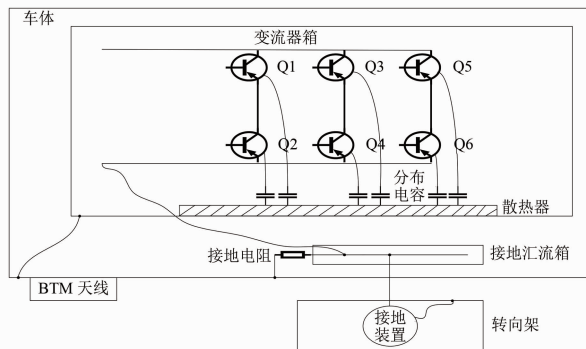
产生电磁干扰的情况,即变流系统启动后,BTM天线的信号接收功能受到了较强的干扰,导致其无法正常工作。本文对该情况的产生原因进行分析,并对电磁干扰的抑制措施进行研究,以期对地面 EMC 测试内容及后续的产品设计提供技术参考。

1 BTM 天线受扰原因分析

为找到安装在车头端部的 BTM 天线受干扰的具体原因,应先对干扰源进行定位。通过试验发现:与 BTM 天线同车的变流系统启动前,BTM 天线接收的信号一切正常;变流系统启动后,BTM 天线就会接收到 4 MHz 附近频率较强的干扰信号,由此可认为本车的变流系统是干扰源。再对变流系统进行空载和带载试验,该干扰现象未发生明显变化,由此可认为该干扰现象与变流系统的负载功率间无强相关关系。

进一步对变流系统的拓扑原理和接地方式进行分析。图 1 为变流系统主拓扑及接地方式示意图,变流系统采用两电平的三相全桥逆变拓扑,采用 IGBT(绝缘栅双极型晶体管)作为开关器件。变流系统采用 DC(直流电) 1 500 V 供电制式,变流器箱的负线首先接到车体底部接地汇流箱内的接地汇流排,汇流排再直接与接地装置连接。通过接地碳刷实现了变流系统负线与轮轨的连接,进而实现变流器的负线回流。变流系统吊装在车底并与车体直接连接,变流系统设备设置了单独的接地点,与车体相连。车体经过接地电阻连接到汇流排,以实现保护性接地。车体经过接地电阻能够适当地提高车体电位,减小流经车体的谐波电流。但是,考虑到车体电位不能高于安全电压的防护要求,接地电阻的电阻值不能太大,一般要求小于 $50\text{ m}\Omega$ ^[1]。

如图 1 所示,当变流系统工作时,其内部的 IGBT 处于快速通断模式,逆变输出电压为一系列宽度呈周期性变化的、近似方波的脉冲电压,这类脉冲电压含有丰富的谐波分量,是变流系统产生电磁干扰的主要原因。PWM(脉冲宽度调制)驱动的逆变系统产生干扰,可分为共模干扰和差模干扰两种。IGBT 本身存在的寄生电感在 di/dt (单位时间内电流变化率)高速变化情况下产生了高频电压干扰信号,IGBT 与散热器之间的等效分布电容为共模干扰信号提供了传播路径。IGBT 快速开关动作



注: Q1—U 相上桥臂的 IGBT; Q2—U 相下桥臂的 IGBT; Q3—V 相上桥臂的 IGBT; Q4—V 相下桥臂的 IGBT; Q5—W 相上桥臂的 IGBT; Q6—W 相下桥臂的 IGBT。

图 1 变流系统主拓扑及接地方式示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the main topology and grounding method of the converter system

产生的 du/dt (单位时间内电压变化率)使得这些分布电容开始充放电并产生共模噪声,且共模干扰信号的传输路径不同将导致共模信号与差模信号的相互转化,差模信号可在输入电缆或输出电缆之间进行传播^[2]。变流系统电磁干扰的流通过程如图 2 所示。

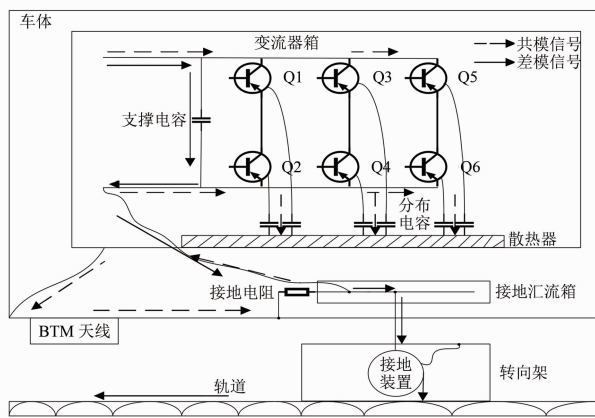


图 2 变流系统电磁干扰流通过程

Fig. 2 Electromagnetic interference flow path of the converter system

电磁干扰可分为电场干扰与磁场干扰两种,两者属性不同,但两者间的能量能互相影响,即:随时间变化的电场会产生磁场,随时间变化的磁场也会产生电场。这些连续不断同相振荡的电场和磁场共同形成了电磁干扰/电磁波。

从图 2 中 BTM 天线安装的位置及干扰信号的流通过程看,共模信号和差模信号都会对 BTM 天线正常接收信号产生一定的干扰。

2 电磁干扰的抑制措施

为降低变流系统产生的差模干扰和共模干扰对 BTM 天线的影响,本文考虑采用在变流器箱内部增加干扰信号回流路径、缩短干扰信号在变流器箱外部回流路径的方式,使得干扰信号尽可能地在变流器箱内循环,从而解决该电磁干扰问题。在查阅了相关资料及文献^[3]后,综合考虑方案的可行性及可靠性,决定通过增加电源对箱体的接地电容、在电源正负线间增加高频滤波电容这两种方式进行干扰抑制,变流系统增加接地电容、高频滤波电容后的电磁干扰流通过程如图 3 所示。

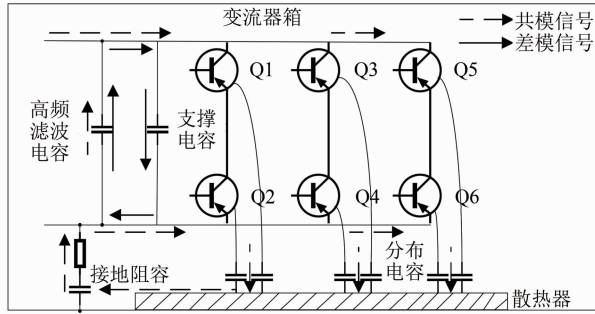


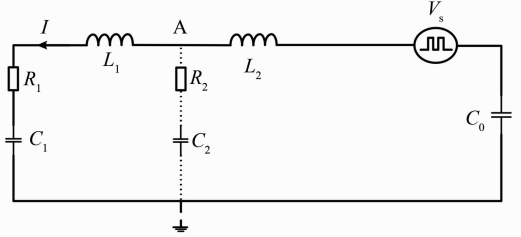
图 3 变流系统增加接地电容、高频滤波电容后的电磁干扰流通过程

Fig. 3 Electromagnetic interference flow path after adding grounding capacitance and high-frequency filtering capacitance to the converter system

如图 3 所示,增加了接地电容后,变流器箱 IGBT 产生的共模信号可通过此阻容器件回到电源侧;增加高频滤波电容后,差模信号可在支撑电容与

高频滤波电容间流通,且部分共模干扰信号也可通过此高频滤波电容回流至电源正线。采用这两个抑制措施后,降低了差模信号、共模信号传输至车体的强度,进而降低了对安装在车体底部的 BTM 天线的干扰。

为确定增设的接地电容和高频滤波电容的具体参数值,对增加接地电容后的共模干扰回路进行简化分析^[4],其简化电路如图 4 所示。



注: I —共模电流; A —直流输入侧负线端口; V_s —等效共模干扰; L_1 —线缆电感; L_2 —母排电感; C_0 —IGBT与散热器之间的寄生电容; C_1 —供电电源的等效电容; R_1 —供电电源的等效电阻; R_2 —拟增加的接地滤波电阻; C_2 —拟增加的接地滤波电容。

图 4 共模干扰回路简化模型

Fig. 4 Simplified model of common-mode interference

设 f 为需要改善的超标频率, U_A 为端口共模电压。设未添加接地电容的端口共模电压为 U_{A0} , 其计算式为:

$$U_{A0} = \frac{R_1 + \frac{1}{j2\pi f C_1} + j2\pi f L_1}{R_1 + \frac{1}{j2\pi f C_1} + j2\pi f L_1 + \frac{1}{j2\pi f C_0}} V_s \quad (1)$$

设添加接地电容后的端口共模电压为 U_{A1} , 其计算式为:

$$U_{A1} = \frac{\left(R_1 + \frac{1}{j2\pi f C_1} + j2\pi f L_1\right) \left(R_2 + \frac{1}{j2\pi f C_2}\right)}{\left(R_1 + \frac{1}{j2\pi f C_1} + j2\pi f L_1\right) \left(R_2 + \frac{1}{j2\pi f C_2}\right) + j2\pi f L_2 + \frac{1}{j2\pi f C_0}} V_s \quad (2)$$

联立式(1)及式(2),可得到功率插入损耗 A_{dB} 的计算式为:

$$A_{dB} = \frac{U_{A0}}{U_{A1}} = \frac{\frac{R_1 + \frac{1}{j2\pi f C_1} + j2\pi f L_1}{R_1 + \frac{1}{j2\pi f C_1} + j2\pi f L_1 + \frac{1}{j2\pi f C_0}}}{\frac{\left(R_1 + \frac{1}{j2\pi f C_1} + j2\pi f L_1\right) \left(R_2 + \frac{1}{j2\pi f C_2}\right)}{\left(R_1 + \frac{1}{j2\pi f C_1} + j2\pi f L_1\right) \left(R_2 + \frac{1}{j2\pi f C_2}\right) + j2\pi f L_2 + \frac{1}{j2\pi f C_0}}}$$

A_{dB} 为预期需要改善的功率插入损耗,可根据式(3)在不同目标频点组成方程组,求得需要增加

的阻容参数的理论值。

由于实际装车工况中杂散电流参数共模回路

的拓扑结构复杂,根据图 4 的简化模型和式(1)一式(3),结合电容值增大后漏电流增大可能导致变流系统与车体的电磁场环境变差的实践经验,接地电容建议采用单电容配合线路等效阻抗的方案。该方案下接地电容和 高频滤波电容的范围均为 0.47~2.00 μF ,选用的电容均应采用杂散电感小的专用接地电容。

3 试验验证

变流系统的基本电气参数如下:输入电压 U_{DC} 为 DC 1 500 V;支撑电容 $C=4\text{ mF}$;开关频率 $f_1=1\text{ 350 Hz}$;输出频率 $f_2=50\text{ Hz}$;输入电感 $L=3.5\text{ mH}$ 。

首先对变流系统未增设回流路径时的干扰频谱进行测试,得到的测试结果如图 5 所示。由于 BTM 天线的敏感信号频段为 2~6 MHz,本文仅对此频段的频谱进行观测。由图 5 可知:干扰的峰值功率点出现在 4.13 MHz 附近,幅值峰值为 -51.94 dBm。

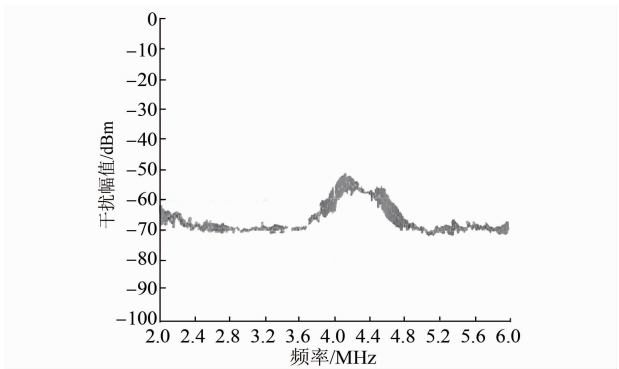


图 5 变流系统未增设回流路径时的干扰频谱截图
Fig. 5 Interference spectrum without adding reflux path to the converter system

为降低变流系统对车载 BTM 天线的干扰,采取降低干扰源强度的解决措施,在变流器箱内增加电源对箱体的接地电容,在电源正负线间增加高频滤波电容,并进行了试验验证。增设的接地电容和 高频滤波电容的参数如表 1 所示。

表 1 增设的接地电容和 高频滤波电容的基本参数
Tab. 1 Basic parameters of added grounding capacitance and high-frequency filtering capacitance

项目	额定电压/ V	电容值/ μF	等效串联 阻抗/ $\text{m}\Omega$	自感/ nH
接地电容	2 000	0.5	68.2	≤ 20
高频滤波电容	3 000	1.0	1.3	≤ 30

注:除额定电压外,其余参数均为高频下的等效值。

3.1 方案一(仅增加 0.5 μF 共模电容)

方案一下,测得的干扰频谱如图 6 所示。由图 6 可知:增加了 0.5 μF 共模电容后,4.00 MHz 频率点附近的干扰幅值为 -56.27 dBm(较图 5 降低了 4.33 dBm),这说明增加此电容后干扰信号中的共模分量受到了一定程度的抑制;但是,2.44 MHz 附近的峰值点的幅值为 -49.29 dBm(较图 5 增加了 2.65 dBm),这导致变流系统的整体干扰幅值有所提高,究其原因主要为增加的共模接地电容与回路中的等效电感在此频率下发生了谐振,导致该频率点的信号幅值增加。因此,方案一不能解决变流系统对 BTM 天线的干扰问题。

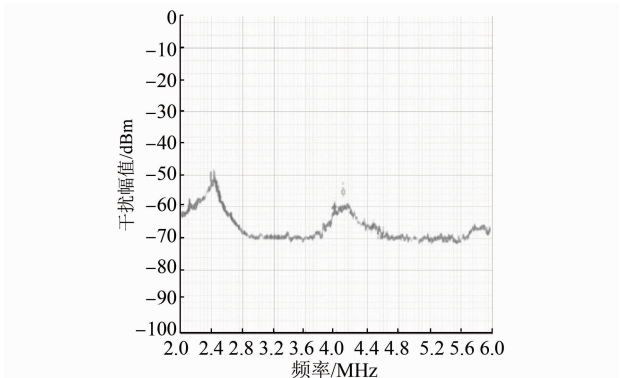


图 6 方案一的干扰频谱截图
Fig. 6 Interference spectrum diagram of Scheme 1

3.2 方案二(仅增加 1.0 μF 差模电容)

方案二下,测得的干扰频谱如图 7 所示。由图 7 可知:增加了 1.0 μF 差模电容后,4.00 MHz 频率点附近的干扰幅值为 -55.59 dBm(较图 5 降低了 3.65 dBm),这说明干扰信号中的差模分量可通过增加的电容进行流通,干扰信号中的差模分量受到了一定程度的抑制。

但由于仅增加差模电容对干扰信号幅值的降低作用并不明显,且与满足工程应用的 -60 dBm 标准幅值的差距较大,因此,方案二不能解决变流系统对 BTM 天线的干扰问题。

3.3 方案三(增加 0.5 μF 共模电容和 1.0 μF 差模 高频滤波电容)

方案三下,测得的干扰频谱如图 8 所示。由图 8 可知:峰值频率点出现在 2.88 MHz 附近,峰值点的干扰幅值约为 -58.93 dBm。与图 5 相比,变流系统的整体干扰幅值降低了约 7.00 dBm。方案三能够基本满足本工程项目 BTM 天线的抗干扰要求。

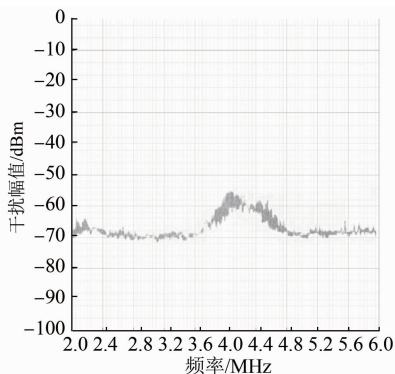


图 7 方案二的干扰频谱截图

Fig. 7 Interference spectrum diagram of Scheme 2

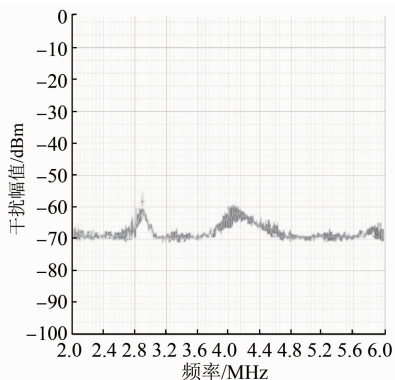


图 8 方案三的干扰频谱截图

Fig. 8 Interference spectrum diagram of Scheme 3

4 结语

本文从遇到的实际工程问题出发,对城市轨道交通车辆车载变流系统产生电磁干扰的原理进行了分析,并对 BTM 天线接收到的干扰频谱进行了测试,得出了电磁干扰的共模干扰分量与差模干扰分量相当的结论。

通过建立开关器件的等效简化模型,结合预期需要改善的噪声水平,得到了为降低共模干扰信号而增设的器件参数的理论值范围。增加了共模干扰和差模干扰信号的流通过程后,实现了干扰信号在变流系统内的循环流通,减少了对变流系统外设备的传导干扰。最后通过试验验证了本文抑制电磁干扰策略的正确性,最终给出了降低 BTM 天线干扰信号的具体方案。

该方案不仅可以满足实际的工程应用要求,还可用于指导后续变流系统产品的设计。在进行地面 EMC 试验时,通过增加变流系统机箱端口对外传导发射的基础摸底测试,可进一步提高变流系统的可靠性与稳定性。

参考文献

- [1] 李恩龙, 于青松. 城市轨道交通车辆接地方案分析[J]. 城市轨道交通研究, 2012, 15(8): 139.
LI Enlong, YU Qingsong. Analysis of urban rail transit vehicle grounding scheme [J]. Urban Mass Transit, 2012, 15(8): 139.
- [2] 姜艳姝, 于晓洋, 艾跃, 等. PWM 多驱动系统中的共模电压及其抑制[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(11): 44.
JIANG Yanshu, YU Xiaoyang, AI Yue, et al. Common-mode voltage and its cancellation in PWM multi-drive system [J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(11): 44.
- [3] ZHANG H, YANG L, WANG S, et al. Common-mode EMI noise modeling and reduction with balance technique for three-level neutral point clamped topology[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(9): 7563.
- [4] BISHNOI H, BAISDEN A C, MATTAVELLI P, et al. Analysis of EMI terminal modeling of switched power converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(9): 3924.

(收稿日期:2021-06-03)

(上接第 98 页)

WANG Dongsheng, CHEN Xiaoyu, ZHANG Rui, et al. Characteristics of pulses in near-fault ground motion based on Hilbert-Huang transform[J]. Acta Seismologica Sinica, 2022, 44(5): 824.

- [6] 陈文略,王子羊. 三次样条插值在工程拟合中的应用[J]. 华

中师范大学学报(自然科学版), 2004, 38(4): 418.

CHEN Wenlue, WANG Ziyang. The application of cubic splines interpolation in the project fitting[J]. Journal of Central China Normal University (Natural Sciences), 2004, 38(4): 418.

(收稿日期:2023-06-27)