

城市轨道交通列车车载应答器传输模块 天线电磁干扰研究

张 东 乙永强 郭宁波 赵 腾

(青岛地铁运营有限公司, 266300, 青岛)

摘 要 [目的]城市轨道交通列车的电磁环境相对复杂,车载 BTM(应答器传输模块)天线极易受到电磁干扰,容易引发行车安全隐患,需对列车车载 BTM 天线电磁干扰进行研究。[方法]以青岛地铁 8 号线发生的车载 BTM 天线电磁干扰为例,从敏感设备、干扰源及干扰路径等基本要素出发,排查造成电磁干扰的主要原因;结合现场实际,根据排查结果制定优化方案,并进行动态测试。[结果及结论]通过排查推断干扰源来自辅助逆变器三相逆变单元,干扰路径来自回流线缆中的高频电流。制定在辅助逆变器输入负线增加 0.5 μF 电容的优化方案,该方案能够有效降低列车的电磁干扰对 BTM 天线的影响,保证列车正常运行。

关键词 城市轨道交通;列车;车载应答器传输模块天线;电磁干扰

中图分类号 U285.28

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.01.026

Electromagnetic Interference with the On-board Balise Transmission Module Antennas of Urban Rail Transit Train

ZHANG Dong, YI Yongqiang, GUO Ningbo, ZHAO Teng

(Qingdao Metro Operation Co., Ltd., 266300, Qingdao, China)

Abstract [Objective] The electromagnetic environment of urban rail transit train is relatively complex. The on-board BTM (balise transmission module) antenna is highly susceptible to electromagnetic interference, which may easily lead to potential safety hazards during train operation. Therefore, it is necessary to conduct research on the electromagnetic interference with the on-board BTM antenna. [Method] The electromagnetic interference with the on-board BTM antenna that occurred on Qingdao Metro Line 8 is taken as an example, the main causes of the electromagnetic interference are investigated from the basic elements such as sensitive equipment, interference sources and interference paths. An optimization plan is formulated according to the actual situation on site and the investigation results, corresponding dynamic tests are carried

out. [Result & Conclusion] Through investigation, it is concluded that the interference source originates from the three-phase inverter unit of the auxiliary inverter, and the interference path comes from the high-frequency current in the return cable. An optimization plan of adding a 0.5 μF capacitor to the negative input line of the auxiliary inverter is formulated, which can effectively reduce the impact of the train electromagnetic interference on the BTM antennas and ensure the train normal operation.

Key words urban rail transit; train; BTM antenna; electromagnetic interference

列车车载 BTM(应答器传输模块)是城市轨道交通列车信号设备的关键组件之一,它利用电磁感应原理,激活地面应答器并接收报文,为车载信号主机提供线路和位置等相关信息。近年来,城市轨道交通列车为适应不同的需求而不断吸收、引进和创新各种不同的技术,导致电磁兼容统筹设计不完善,车载 BTM 容易发生电磁干扰相关问题,直接影响行车效率。

1 BTM 天线电磁干扰问题描述

青岛地铁 8 号线(以下简称“8 号线”)信号系统在进行 BTM 天线静态干扰测试过程中发现,BTM 天线受到频率为 4 MHz 附近的信号干扰,该同频干扰将导致列车行车期间丢失应答器信号,进而致使列车运行过程中产生非预期紧急制动,通过现场普查发现同批列车普遍存在受干扰现象。BTM 天线静态干扰测试结果截图如图 1 所示。由图 1 可见:当频率为 4.08 MHz 时,BTM 天线干扰信号强度最大值达 -45.94 dBm,不满足 BTM 天线对周围电磁环境的要求(频率在 2.5 ~ 6.0 MHz 范围内时,BTM 天线周围的干扰信号强度峰值应小于 -60 dBm)。



图1 BTM天线静态干扰测试结果截图

Fig.1 Screenshot of BTM antenna static interference test results

2 BTM天线电磁干扰问题分析

通常产生电磁干扰需具备以下3个基本要素:干扰源、干扰路径和敏感设备。车载BTM使用弱电信号,在列车上属于敏感设备,列车牵引、辅助、空调系统等大功率设备都有很强的电磁噪声,是BTM的潜在干扰源;而一旦设备整体设计不合理,接地系统设计不完善或接地不良,都极易使BTM受到电磁干扰。

2.1 干扰源分析

2.1.1 底噪测试

在列车静止状态下进行底噪测试。BTM天线在频率为4.03 MHz时接收到的信号强度为-77.87 dBm。由此可见,列车静止状态下不会对BTM天线产生电磁干扰。

2.1.2 启动不同负载测试

在不同负载工况下对BTM天线产生的干扰强度进行测试。

1) 列车仅启动蓄电池,切除车上所有负载设备,BTM天线在频率为4.03 MHz时接收到的信号强度为-75.03 dBm,与底噪基本一致,可判断蓄电池工作不会对BTM天线产生干扰。

2) 列车接入DC 1 500 V高压,启动蓄电池,切除辅助逆变器,开启照明、PIDS(旅客信息显示系统)、烟火等负载。BTM天线在频率为4.03 MHz时接收到的信号强度为-73.93 dBm,与底噪基本一致。由此可判断,照明、PIDS、烟火等负载不会对BTM天线产生干扰。

3) 列车接入DC 1 500 V高压,启动辅助逆变器,切除所有交流负载,BTM天线在频率为4.04 MHz时接收到的信号强度为-43.70 dBm,BTM天

线受干扰较为严重。由此可判断,BTM天线受干扰与辅助逆变器有关。

4) 列车接入DC 1 500 V高压,启动辅助逆变器,分别启动空调、电热玻璃及空压机,BTM天线在频率为4.05 MHz时接收到的信号强度分别为-43.69 dBm、-44.58 dBm、-44.59 dBm,这与仅投入辅助逆变器相比差异不大。由此表明,BTM天线干扰与空调、电热玻璃、空压机等负载均无关。

通过启动不同负载与底噪进行对比测试发现,本次BTM天线受干扰与辅助逆变器相关。

2.1.3 辅助逆变器内部测试

辅助逆变器包括三相逆变单元和充电机单元,其中:三相逆变单元主要把直流网线电压DC 1 500 V转换为三相AC 380 V/AC 220 V/50 Hz电压,为车上相关交流负载供电;充电机单元主要把直流网线电压DC 1 500 V转换为DC 110 V,为车上相关直流负载供电。

对辅助逆变器内部单元进行测试:首先,关闭辅助逆变器内三相逆变单元,只启动充电机单元时,BTM天线在频率为5.14 MHz时接收到的信号强度为-63.96 dBm;然后,关闭辅助逆变器内充电机单元,只启动三相逆变单元时,BTM天线在频率为4.05 MHz时接收到的信号强度为-42.73 dBm。由此可判断,BTM天线受干扰与辅助逆变器中三相逆变单元有关。

2.2 干扰路径分析

本文采用自制的环形天线对BTM天线附近的电磁场进行测试。当环形天线紧贴转向架接地装置和转向架构架连接线缆,测得频率为4.06 MHz时的干扰信号强度峰值为-20.49 dBm,如图2所示;当环形天线位于BTM天线下方区域,测得频率为4.06 MHz时的干扰信号强度峰值为-35.57 dBm,如图3所示;当环形天线紧贴回流线缆,测得频率为4.06 MHz时的干扰信号强度峰值为-14.02 dBm,如图4所示。通过对BTM天线附近电磁场进行测试发现,回流线缆处干扰信号强度最大,基本确定干扰路径为该回流线缆。

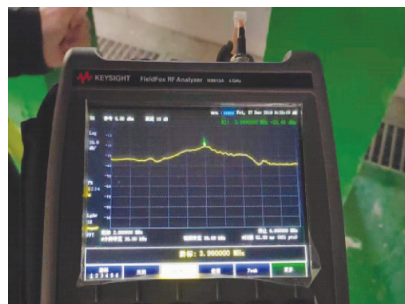
通过以上测试,推断干扰源来自辅助逆变器三相逆变单元,干扰路径来自回流线缆中的高频电流。

3 优化分析

针对形成电磁干扰的三要素,采取适当措施对



a) 转向架构架连接线缆处放置环形干扰天线



b) 干扰测试结果

图2 转向架接地装置和转向架构架连接线缆处电磁干扰
Fig.2 Electromagnetic interference at the connection cables between the bogie grounding device and the bogie frame



a) BTM 下方区域放置环形干扰天线

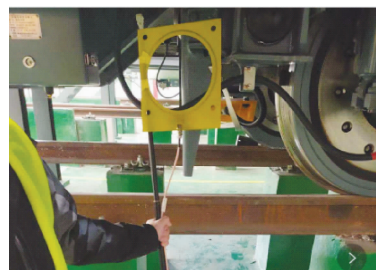


b) 干扰测试结果

图3 BTM 天线下方区域电磁干扰

Fig.3 Electromagnetic interference in the area below BTM antenna

其进行抑制。首先,应抑制干扰源,直接消除产生干扰的原因;其次,消除干扰源与敏感设备之间的耦合及辐射,切断干扰路径;最后,提高敏感设备的抗干扰能力,降低其对噪声的敏感度。根据本文干



a) 回流线缆附近放置环形干扰天线



b) 干扰测试结果

图4 回流线缆附近电磁干扰

Fig.4 Electromagnetic interference near the return cables

扰源及其传播途径排查结果,制定以下措施进行优化。

3.1 抑制干扰源

从抑制干扰源入手,通过在辅助逆变器内部增加磁环以及不同规格电容进行验证,如图5所示。不同优化方案下信号强度测试结果,见表1。根据表1测试结果,在辅助逆变器输入负线增加0.5 uF电容后,干扰抑制效果明显。

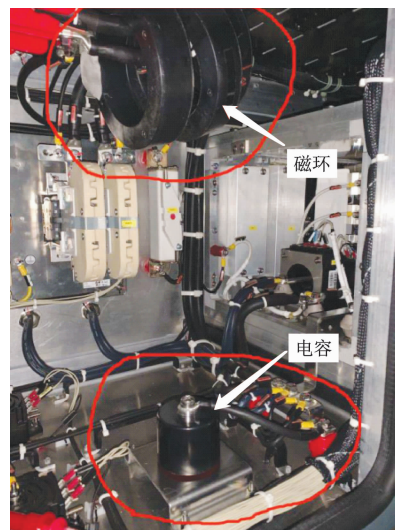


图5 辅助逆变器内部增加磁环和电容

Fig.5 Magnetic rings and capacitors being added inside the auxiliary inverter box

表 1 不同优化方案下信号强度测试结果

Tab. 1 Test results of signal strength under different optimization schemes

项目	不同方案下的信号强度/dBm				
	增加 0.5 μF 电容	增加 2.0 μF 电容	增加 2.0 μF 电容和磁环	增加 3.9 μF 电容	增加 3.9 μF 电容和磁环
方案优化前	-42.61	-42.61	-42.61	-42.61	-42.61
方案优化后	-54.39	-50.71	-51.08	-50.55	-50.66
方案优化前后变化量	11.78	8.10	8.47	7.94	8.05

3.2 切断干扰路径

将接地回流线缆更换为屏蔽线进行测试,如图 6 所示。通过测试,测得在 2.5 ~ 6.0 MHz 范围内信号强度最大值为 -47.34 dBm,此时频率为 4.08 MHz;而相对于未增加屏蔽线时,信号强度最大值为 -47.33 dBm,此时频率为 4.11 MHz。由此可见,两者仅存在 0.01 dBm 的差距,该屏蔽线使用后作用效果不明显。

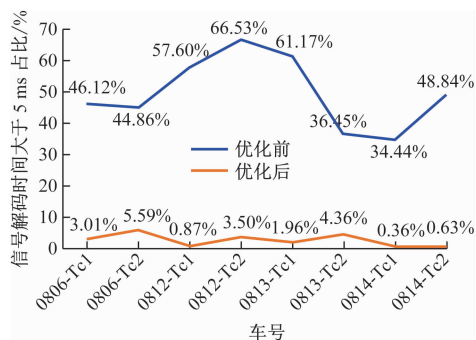


图 6 接地回流线缆更换为屏蔽线

Fig. 6 Grounding return cable being replaced with shielded cable

3.3 动态测试

通过上述试验,最终选定对辅助逆变器输入负线增加 0.5 μF 电容的方案进行优化,并进行动态测试。图 7 和图 8 为方案优化前后信号解码时间及好码率测试效果对比。从图 7 和图 8 中可以看出:方



注: Tc1、Tc2 为带司机室的拖车。

图 7 方案优化前后信号解码时间大于 5 ms 的效果对比

Fig. 7 Effect comparison of signal decoding time over 5 ms before and after the scheme optimization

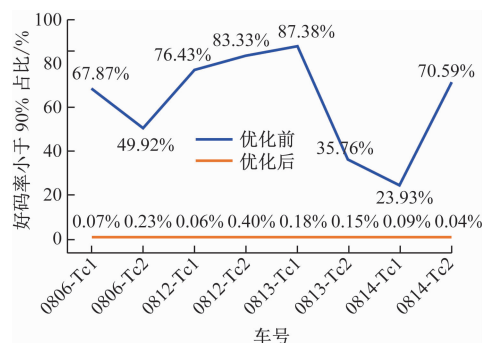


图 8 方案优化前后好码率小于 90% 的效果对比

Fig. 8 Effect comparison of good code rate less than 90% before and after the scheme optimization

案优化后抑制干扰和提高解码质量方面有了较大提升,满足信号传输要求。

4 结语

通过对列车车载 BTM 天线电磁干扰源及传播途径进行排查和整治,BTM 天线干扰问题得到有效控制。本文所提方法和措施在现场运用中切实有效,为后续解决车载 BTM 天线电磁干扰问题提供了思路。

参考文献

- [1] 刘勇. 贵阳地铁 1 号线车辆辅助逆变器与信号 BTM 天线电磁干扰分析及改进措施[J]. 决策探索(中), 2018(7): 55.
LIU Yong. Analysis and improvement measures of electromagnetic interference between vehicle auxiliary inverter and signal BTM antenna on Guiyang Metro Line 1[J]. Policy Research & Exploration, 2018(7): 55.
- [2] 徐宁. 加装屏蔽板后应答器传输模块天线性能的研究[J]. 中国铁道科学, 2017, 38(3): 110.
XU Ning. Study on the performance of balise transmission module antenna after adding shielding plate[J]. China Railway Science, 2017, 38(3): 110.

· 收稿日期:2022-08-23 修回日期:2022-11-18 出版日期:2025-01-10
Received:2022-08-23 Revised:2022-11-18 Published:2025-01-10
· 通信作者:张东,工程师,zhangdong4433@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license