

长沙磁浮列车 MVB 通信故障机理研究

李拥军¹, 闫光临², 尚敬², 支永健², 石煜², 许义景²

(1. 湖南磁浮交通发展股份有限公司, 湖南 长沙 410115;
2. 中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 分析了长沙磁浮列车在调试过程中出现的一起 MVB 网络通信故障, 指出 MVB 信号尾帧异常振荡是导致故障的直接原因。根据传输线理论, 结合对振荡现象的分析, 排查出列车 MVB 网络外接设备存在接触不良是导致故障的根本原因。通过理论公式与仿真建模研究了可能导致故障发生的主要因素, 全面地解释了故障现象, 为提高列车网络通信系统电磁兼容性和可靠性提供了重要参考。

关键词: 长沙磁浮列车; MVB; 振荡; 反射; 电磁兼容性

中图分类号: U237; U292.91⁺7

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2017.03.021

Research on Mechanism of Changsha Maglev Train MVB Communication Fault

LI Yongjun¹, YAN Guanglin², SHANG Jing², ZHI Yongjian², SHI Yu², XU Yijing²

(1. Hunan Maglev Transportation Development Incorporated Company, Changsha, Hunan 410115, China;
2. CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: A MVB network communication fault that occurred during the test run of Changsha maglev train was discussed, abnormal oscillation of the last MVB signal frame was found to be the direct reason. According to the theory of transmission lines, and combining with the analysis of oscillation phenomenon, this paper points out that the poor contact in the equipment of MVB network was the root cause. Through the theoretical formula and simulation modeling, the major factors that might cause a similar fault were researched, and the fault phenomenon was explained comprehensively. It also provides important reference value for the improvement of the EMC and reliability of train network communication system.

Keywords: Changsha maglev train; MVB; oscillation; reflection; EMC

0 引言

2016年5月6日, 目前世界上最长的中低速磁浮运营线, 同时也是中国首条具有完全自主知识产权的中低速磁浮商业运营示范线——长沙磁浮快线开通试运营^[1]。列车网络通信系统的可靠性与稳定性直接影响行车及人员安全, 而信号收发设备、传输线路状态正常与否直接影响列车网络通信系统的运行。列车在调试和运行过程中出现的任何网络通信故障都要得到及时的闭环处理, 并且需要对其故障机理进行深入分析, 避免同类故障再次发生。基于此, 介绍了长沙

磁浮在调试过程中出现的一起 MVB (Multifunction Vehicle Bus, 多功能车辆总线)^[2-3] 通信故障排查分析及整改过程, 并通过计算仿真验证了故障机理。

1 故障分析与排查

长沙磁浮列车在调试过程中偶尔出现通信故障, 导致司机上车整备时无法闭合主断, 起浮、降落、合主断指令异常, 严重影响列车的正常运行。

1.1 故障分析

根据故障现象, 初步推断故障原因是 MVB 信号传输异常。长沙磁浮列车的 MVB 线缆长约 100 m, 其传输的差分信号为方波。现场技术人员使用协议分析仪

和示波器对 MVB 信号进行监视, 发现故障车 MVB 线缆传输的差分信号尾帧存在异常振荡, 振荡幅值约为 800 mV, 超过了 IEC 61375 标准要求的 200 mV^[4-5], 如图 1 所示。这个振荡被设备物理层识别后会干扰正常帧的解码和转发, 导致故障发生。从振荡波形上可以看出, 振荡发生在尾帧之后, 其延时均在最大传输时间 667 ns 以内 (假设传输速度为光速, 最大传输距离为一个来回, 共即 200 m)。根据传输线理论, 如果信号传输路径中存在阻抗不连续, 则会引起反射, 由此推测尾帧振荡可能是由线路反射引起。由以上分析可知, 故障车 MVB 线路中可能存在阻抗严重失配点, 现场技术人员据此对 MVB 所连设备、MVB 线缆及连接器进行了排查。

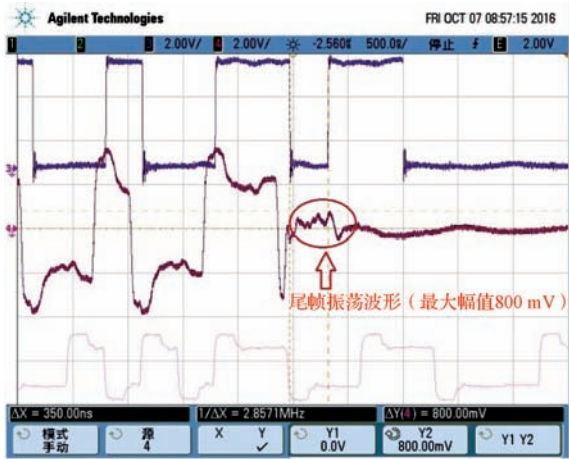


图1 故障车 MVB 信号尾帧异常振荡波形

1.2 故障排查与整改

首先对故障车的 MVB 线缆及连接器情况进行检查后, 对一些可能存在影响的部位进行了优化, 例如增大了线缆在转弯处的弯曲半径以减小反射, 对一些关键部位的连接器进行了重新压接等。在优化故障车 MVB 线缆及连接器后, 监视 MVB 信号, 发现尾帧振荡幅值没有显著变化, 仍然会导致故障的发生。

技术人员又对故障车 MVB 线路所连设备进行了排查。排查中发现, 将故障车 BCU 从网络系统中甩开后, 尾帧振荡幅度下降至标准规定值以下, 由此可将问题定位在 BCU 处。将 BCU 的 MVB 板卡拆下, 发现板卡内部采用了长度超过 10 cm 的排线 (从阻抗匹配和抗干扰的角度考虑排线不应超过 10 cm), 同时, 设备内部 MVB 的连接器也存在松动情况。用万用表对 BCU 的 MVB 板卡插座上 1、2 点之间电阻进行测量, 结果显示为 30~260 Ω (理论值为 0), 相当于在 MVB 信号线路中串联了一个 30~260 Ω 的随机可变电阻 (列车的振动可能会导致阻值的改变, 其变化是随机的)。故障车 BCU 更换新的 MVB 板卡 (内部采用排线长度小于 10 cm) 后, 故障彻底消除。由此可以确定, 故障车 MVB 信号尾帧出现严重振荡是由 BCU 内部 MVB 排线末端连接器接触不良造成的。

2 故障机理

根据传输线理论, 当传输线终端不匹配或传输线路中有阻抗突变时, 信号会被反射, 造成信号失真, 严重时会造成信号过冲、振荡或器件损坏^[2]。传输线反射原理如图 2 所示, 信号反射程度通常用该点的反射系数 $\Gamma(z)$ 来表征, 下面的公式反映了影响传输线上某点电压的所有因素。

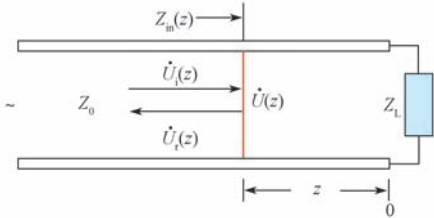


图2 传输线反射原理示意图

$$\dot{U}(z) = \dot{U}_i(z)[1 + \Gamma(z)],$$

$$\Gamma(z) = \frac{\dot{U}_r(z)}{\dot{U}_i(z)} = \frac{Z_{in}(z) - Z_0}{Z_{in}(z) + Z_0},$$

$$Z_{in}(z) = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan \beta z}{Z_0 + jZ_L \tan \beta z}, \quad \beta = \frac{2\pi}{\lambda}$$

式中: β 为相移常数, 其值只与信号的波长 λ 有关; $Z_{in}(z)$ 为从该点向负载端看过去的输入阻抗; Z_0 为传输线的特性阻抗, 其值只与传输线本身因素有关; $\dot{U}_r(z)$ 为该点反射波电压; $\dot{U}_i(z)$ 为该点入射波电压; $\dot{U}(z)$ 为该点总电压^[4]。

由以上公式可以看出, 在信号源和传输线选定的情况下, 传输线上某点的电压与该点的反射系数有关, 而该点的反射系数与该点的特性阻抗 Z_0 和负载 Z_L 有关。故障车 MVB 信号传输线缆采用屏蔽双绞线, 长度约 100 m, 线缆两端装有终端匹配电阻 Z_L , 如图 3 所示。由于设计的传输线与负载阻抗匹配, 所以正常工作时 ($R=0$), MVB 所连设备发出的信号几乎不会反射; 但是, 当传输线路中某个连接器因接触不良等原因存在较大接触阻抗时 ($R \neq 0$), 从该点向负载看过去的输入阻抗发生改变, 导致该处反射系数增大, 从而引起 MVB 信号反射。由于 MVB 信号采用的是 $\pm 5\text{ V}$ 交变的脉冲方波, 尾帧之前的信号只会在反射的影响下失真, 收发设备仍然可以正常识别。但是, 由于尾帧之前的信号存在反射延时, 在尾帧之后信号本应当为 0 电平的时刻, 却收到了前面信号的反射信号, 这个反射信号足以被设备物理层识别, 对设备正常运行产生干扰。

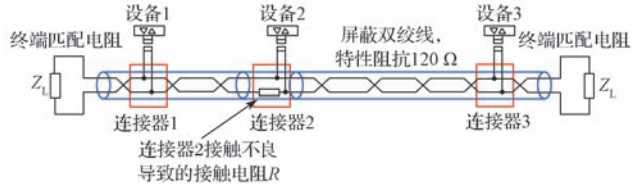


图3 MVB 信号线路示意图

3 故障仿真分析

为了对 MVB 信号异常振荡的影响因素进一步研究,在 CST CABLE STUDIO 仿真软件^[8-9]中对故障线路进行仿真分析。根据实际故障情况,需要研究的影响因素有以下 3 个方面:

①故障由连接器接触不良引起,其接触电阻 R 可变,所以需要研究 R 取不同的值对信号振荡特性的影响;

②某一时刻 MVB 线路中的每个设备都可能是信号源或接收设备,所以需要研究信号源、接收设备、接触不良点三者之间相对位置对信号振荡特性的影响;

③不同设备的信号源发出的方波信号上升沿 / 下降沿时间可能不同,所以需要模拟不同信号源波形对信号振荡特性的影响。

故障车 MVB 线路接有数十个设备,不均匀地分布在长约 100 m 的线路上,其物理层特性也不尽相同。实际列车的 MVB 线路模型非常复杂,所以这里对实际线路模型做适当简化。根据实际情况,选取长为 100 m 的双绞线作为仿真线缆,用 6 个点将此线缆平均分为 5 段,具体如图 4 所示。故障点位于距离一端约 20 m 处,选定在图中的 N5 点。对仿真线路模型提取参数后,在 N5 点对应的引脚处串入接触电阻 R ,如图 5 所示。

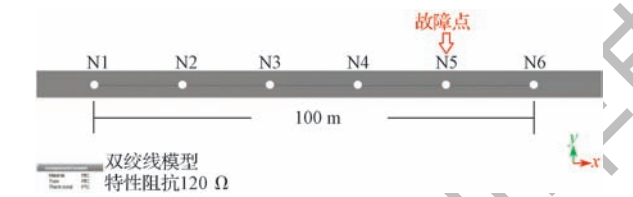


图 4 仿真线缆模型

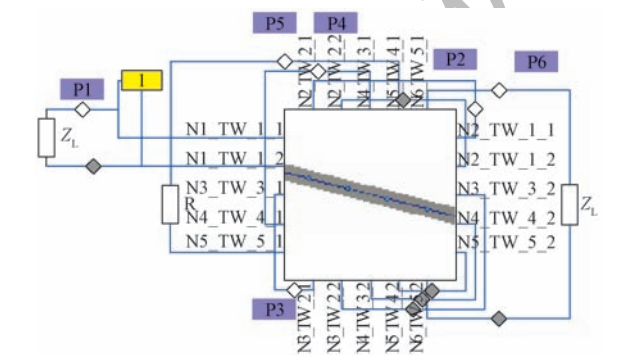


图 5 提取线缆分布参数后的仿真电路模型

3.1 接触电阻 R 的影响

为了研究不同接触电阻 R 对信号振荡特性的影响,选定 N1 为信号源, N2 为接收设备。信号源选择幅值为 5 V, 上升 / 下降沿时间 20 ns, 持续时间 200 ns, 周期为 540 ns 的方波信号。当 R 分别取 0 Ω 、30 Ω 、50 Ω 、100 Ω 时, N2 处接收设备接收到的信号波形如图 6 所示, 最大振荡幅值 $V_{\max}$ 如表 1 所示。

表 1 不同接触电阻 R 时的最大振荡幅值				
接触电阻 / Ω	0	30	50	100
$V_{\max}$ / mV	193	447	652	1 026

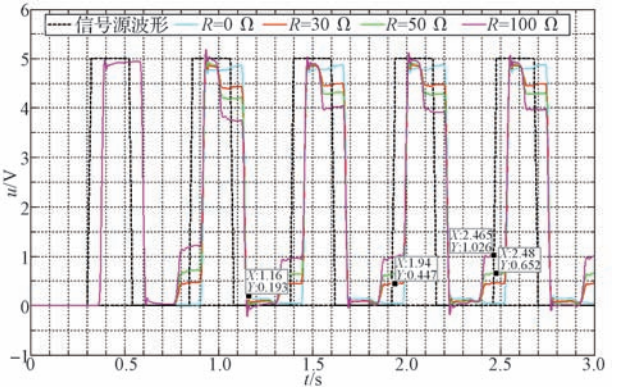


图 6 不同接触电阻 R 时信号波形对比

可以看出信号的振荡幅值随接触电阻 R 的增大而增大, R 取 50 Ω 时, 振荡幅值已经达到了 650 mV, 这个信号已经足以被 N2 点处设备的物理层识别, 从而干扰该设备的正常运行。

3.2 相对位置的影响

为了研究信号源、接收设备、接触不良点三者之间相对位置对信号振荡特性的影响, 选定 N3 为信号源 (信号源特性同上), N5 点接触电阻 R 选定为 50 Ω 。接收设备分别在 N1、N4、N6 点采集到的信号波形如图 7 所示, 最大振荡幅值如表 2 所示。

表 2 不同相对位置时的最大振荡幅值			
接收设备点位	N1	N4	N6
$V_{\max}$ / mV	185	929	591

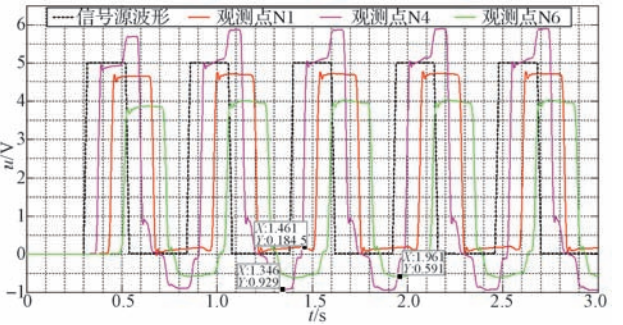


图 7 信号源、接收设备、故障点位不同相对位置信号波形对比

由以上数据可以看出, 当接收设备在信号源与故障点位之间时, 波形振荡幅度最大, 为 929 mV; 当接收设备在故障点位右侧时, 波形振荡幅度为 591 mV; 当接收设备在信号源左侧时, 波形振荡幅度最小, 为 185 mV。

3.3 信号波形上升沿 / 下降沿时间的影响

为了研究信号波形上升沿 / 下降沿时间对信号振荡特性的影响, 选定 N1 为信号源, N2 为接收设备, N5 处的接触电阻 R 选定为 50 Ω 。当激励方波信号上升沿 / 下降沿时间分别取 20 ns、40 ns、100 ns 时, N2 处采集到的信号波形如图 8 所示, 最大振荡幅值如表 3 所示。

表 3 不同上升沿 / 下降沿时间的最大振荡幅值			
上升沿 / 下降沿时间 / ns	20	40	100
$V_{\max}$ / mV	652	672	712

(下转第 109 页)