

列车网络控制系统输入输出模块失效分析与系统优化

王刚² 夏好广^{1,2} 陈锦熠² 余健² 杨毅²

(1 中国铁道科学研究院集团有限公司机车车辆研究所 北京 100081; 2 北京纵横机电科技有限公司 北京 100094)

摘要: 针对列车网络控制系统输入输出模块在运行过程中失效的问题, 本文通过车辆实车测试、地面试验室故障复现等手段定位了失效原因, 制定了以下方案: 优化电源电路和提高 IO 通道防护能力, 从而提高模块电磁兼容抗干扰能力; 提高电流保护阈值及优化时间滤波设置, 以避免误报故障。通过实验室测试及实车运用对上述方案进行了验证, 证实其有效提高了模块的可靠性, 减少了对列车运行的影响。

关键词: 输入输出模块; 24V 供电短路故障; MVB 通讯故障; 电磁兼容

0 引言

由于列车网络控制系统输入输出模块与车辆电磁环境匹配性不足, 发生了多起失效故障, 主要表现为模块 MVB (Multifunction Vehicle Bus, 多功能车辆总线) 通讯故障和 24V 电源短路故障。当发生 MVB 通讯故障时, HMI (Human Machine Interface, 人机界面) 报出模块 MVB 通讯故障, 模块指示灯熄灭或报红; 当发生 24V 电源短路故障时, HMI 报出模块 24V 电源短路故障。发生以上两类故障时, 会引起列车制动、牵引、空调等子系统供电空开、开关反馈检测异常等问题, 从而可能发生列车限速运行的情况。本文针对列车输入输出模块失效问题进行分析, 指出了当前方案存在的不足, 并提出了相应的优化方案。

1 输入输出模块介绍

列车网络控制系统主要由列车显示屏、中央控制单元、中继器和输入输出模块组成, 其是集计算、通信、逻辑控制为一体的复杂系统, 相当于动车组的“大脑和神经”, 承担着整个列车的控制、监视、诊断与保护任务^[1]。列车网络控制系统管理列车的牵引系统、制动系统、高压系统、辅助供电、空调、行车安全设备、车门、照明等几乎所有子系统, 动车组所有数据的通信、处理和显示都通过该系统实现, 在列车运行、维护中起着极其重要的作用。

如图 1 所示, 输入输出模块是列车网络控制系统的重要部件, 其与不具有车辆总线接口的输入输出信号进行连接, 主要用于监测车辆中各个开关、按

钮的状态和驱动继电器, 模块自身输出 24V 电压为各个监测回路供电。模块具有供电分组管理功能, 通道具有限流和过流保护能力, 模块输入输出接口功能如下:

- (1) 提供 2 路 DC24V 电源输出;
- (2) 提供 2 组各 16 路通用输入通道, 主要用于如主断路器、空调控制开关的信号采集;
- (3) 提供 2 组各 10 路高速输入通道, 主要用于司机控制器手柄指令、车辆编码信号的采集;
- (4) 提供 1 组 8 路输出通道, 主要用于车门、车钩连挂控制。



图 1 输入输出模块

2 输入输出模块故障分析

对输入输出模块发生的故障进行总结, 故障呈现以下特点:

- (1) 车组初送电、运行途中, 报 MVB 通讯故障;
 - (2) 车组高压供电后, 报模块 24V 电源短路故障;
 - (3) 车组运行途中, 报负载、空开检测失效故障。
- 输入输出模块故障类型如图 2 和图 3 所示。

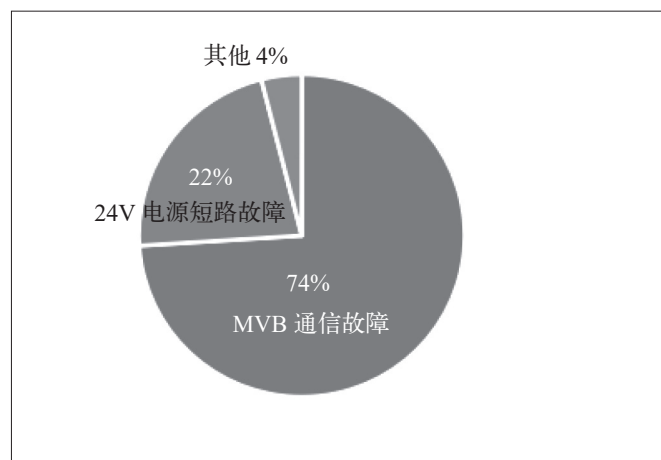


图2 输入输出模块故障类型统计

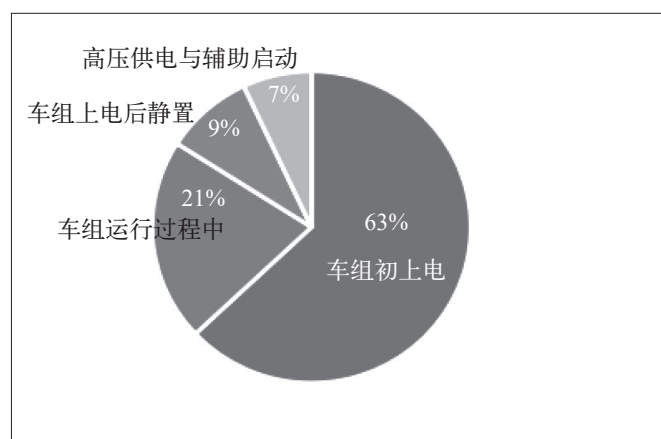


图3 输入输出模块故障类型统计

2.1 车辆环境中信号测试

在列车运行过程中,对 110V 供电电源线正负间电压、正负线对地电压进行测试。

(1) 列车蓄电池初上电时,电源线有明显浪涌和跌落,特别是正线对地电压跌落比较明显,如图 4 所示。

(2) 过分相区间的干扰:稳定电压 112.6V,过分相时正负间电压会瞬时增大,电压最大为 138.75V,如图 5 和图 6 所示^[2];低速过分相(或手动断开主断路器过分相)时,由于没有中压保持功能,充电机停止工作,因此紧急通风逆变器会启动,此时电源干扰比较严重,如图 7 所示。

(3) 牵引回流突变:由于牵引回流流过车体,电源呈现共模干扰特征,且在个别时刻出现突然的浪涌波形,呈振铃状,如图 8 和图 9 所示。

接触网硬点、过道岔、冬季接触网覆冰后造成弓网离线,钢轨覆冰导致轮轨接触不良,会车、过分相引发车体牵引回流变化,从而导致车体电势突变。

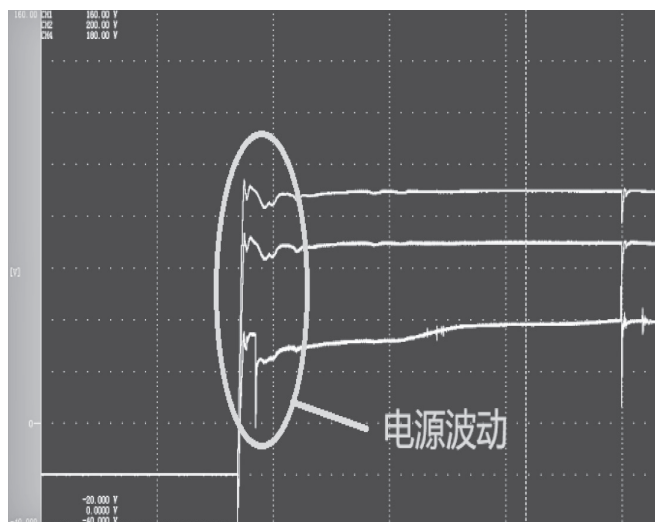


图4 列车蓄电池上电时 110V 供电波形

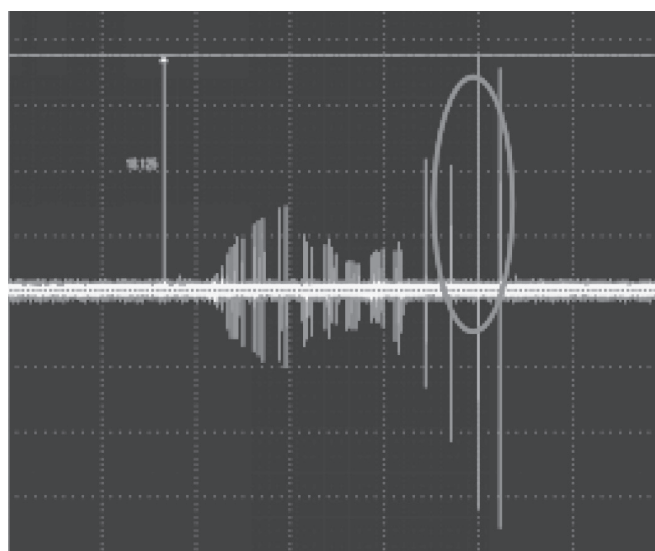


图5 过分相最高电压值 138.75V

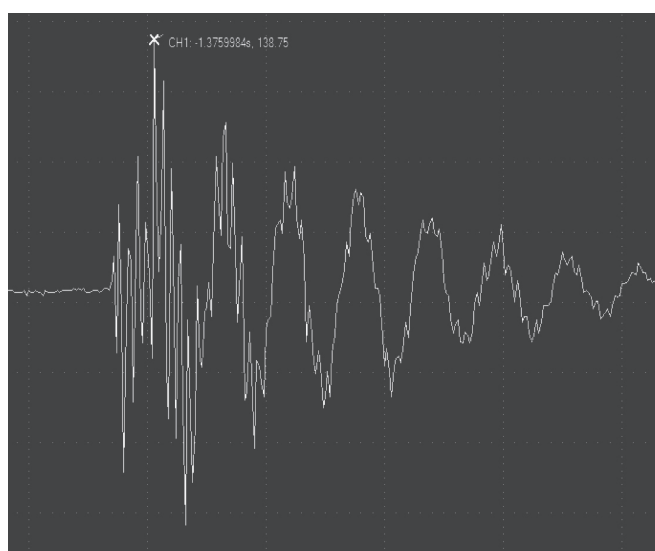


图6 红圈区域波形展开图

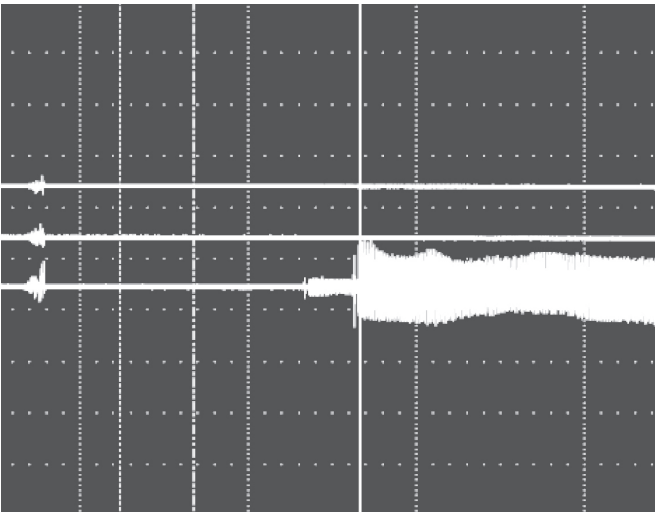


图 7 低速过分相干扰信号

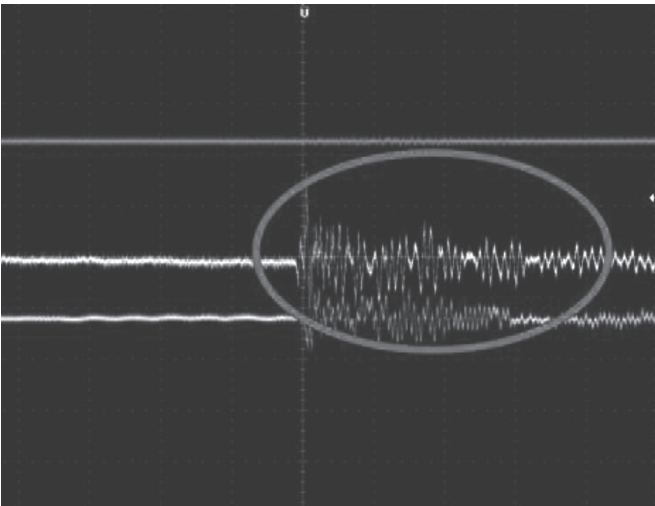


图 8 电源浪涌波形

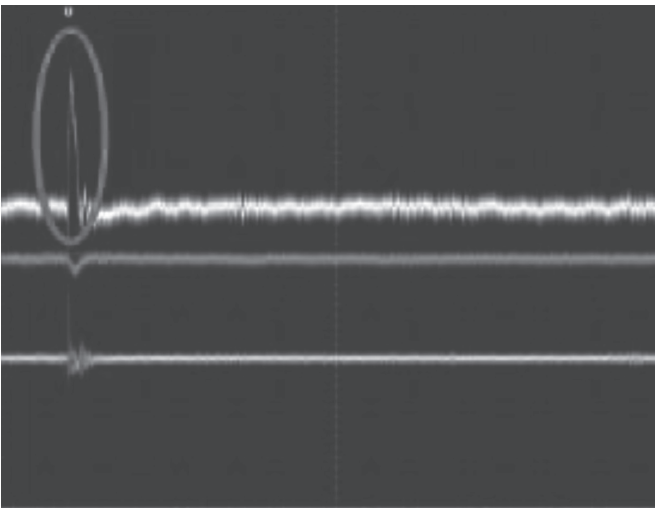


图 9 干扰波形电压最高达 143.2V

车体作为所有系统（高压 AC25kV、中压 AC380V、低压 DC110V 和信号 DC5V）的共用接地系统，包括

高压电缆的屏蔽层接地、车载供电系统的接地、车载用电设备的接地、电子控制装置的电源接地、电子控制板卡的信号接地、通信线路和传感器的信号线屏蔽层接地等^[3,4]，车体电势对电子设备工作可靠性有着直接影响，这种干扰超过车内敏感设备的承受能力时，会导致电子设备失效^[5]。

2.2 实验室故障复现

为检测输入输出模块的电磁兼容性能，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》标准进行试验，如图 10 所示。结果表明，模块的浪涌和电快速脉冲群抗扰度性能仅满足三级标准要求，结果如表 1 和表 2 所示，在严酷工况下测试时出现了故障^[6]。

2.3 模块失效原因分析

输入输出模块故障主要分为两种情况，一种是

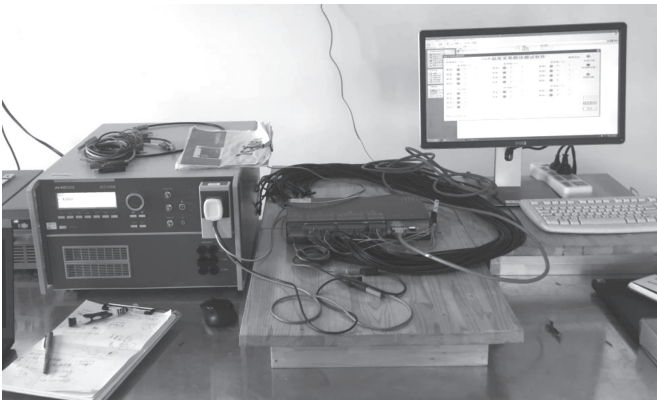


图 10 电磁兼容试验

表 1 输入输出模块浪涌测试结果

项目	电压等级	试验结果
110V 电源端口	线对线 $\pm 1000V$ 线对地 $\pm 2000V$	工作状态正常
110V 电源端口	线对线 $\pm 1500V$ 线对地 $\pm 3000V$	在线对地测试中，存在模块通讯故障现象，脉冲过后功能恢复正常
110V 电源端口	线对线 $\pm 2000V$ 线对地 $\pm 4000V$	测试 L-N 时，模块功能失效，电源指示灯熄灭；重新断电后上电，模块无法启动

表 2 输入输出模块电快速脉冲群测试结果

项目	电压等级	试验结果
110V 电源端口	2kV, 5/50ns, 5kHz	工作状态正常
110V 电源端口	4kV, 5/50ns, 5kHz	工作状态正常
信号线	2kV, 5/50ns, 5kHz	工作状态正常
信号线	4kV, 5/50ns, 5kHz	模块指示灯报红，MVB 通讯异常，试验结束后恢复正常

MVB 通讯故障，另一种是 24V 电源短路故障，结合车辆实车及实验室测试分析，这两种故障都可能是模块受到强电磁干扰后引起的。当电源电压产生干扰信号时，供电电源形成短时间的脉冲干扰，干扰达到一定强度后，使得 24V 输出回路上产生电流尖峰，从而导致 24V 电源短路故障。

2.3.1 24V 电源模块故障

110V 转 24V 电源模块的故障原因主要包括电源电路电磁兼容性能不足、模块自身功能故障和电源模块功率不足，如图 11 所示。

2.3.2 24V 过流 / 短路故障

对输入输出模块的工作原理进行分析，原模块中 24V 电源为 12 路信号提供电源输出，每路均有独立的输出检测及过流保护电路，如图 12 所示。

当 24V 输出电流大于过流保护限值时，保护电路将关断使输出无电压；当电源输出检测电路检测不到 24V 时，会报告 24V 电源短路故障。

(1) 电磁干扰导致产生电流尖峰。在外部电磁

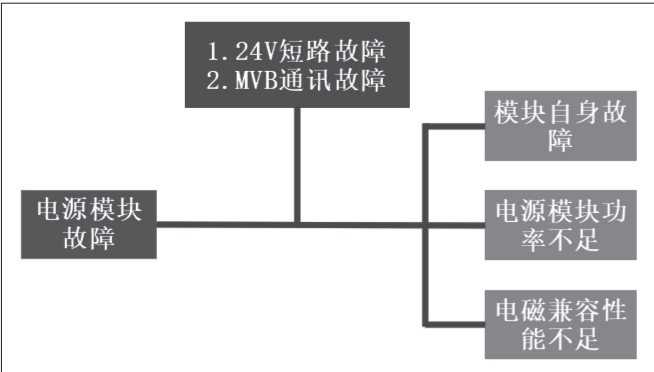


图 11 电源模块故障分解图

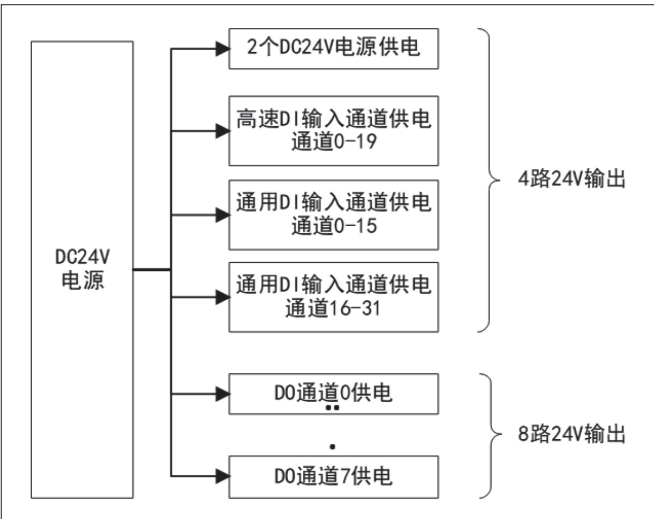


图 12 DC24V 电源模块供电分布图

干扰情况下产生较大的电流尖峰，超出过流保护限值，且持续时间较长，造成 24V 电源短路故障的误报。

(2) 过流保护限值低，容易触发过流保护。单路通用 / 高速数字量输入通道正常工作电流约为 7mA，16 路 DI 通道共用一路 24V 电源，总工作电流约为 112mA，限流保护值为 150mA，余量不足。单路数字量输出通道最大输出电流约为 85mA，考虑实际应用工况，DO 输出驱动能力较小，容易触发过流保护。

2.3.3 MVB 通讯故障

外部电磁干扰导致模块供电电源产生波动，影响 CPU 及 MVB 模块正常工作；车辆运行中，因振动等原因造成地址配置接线松动（图 13），MVB 设备地址发生变化导致 MVB 通讯故障 [7]。

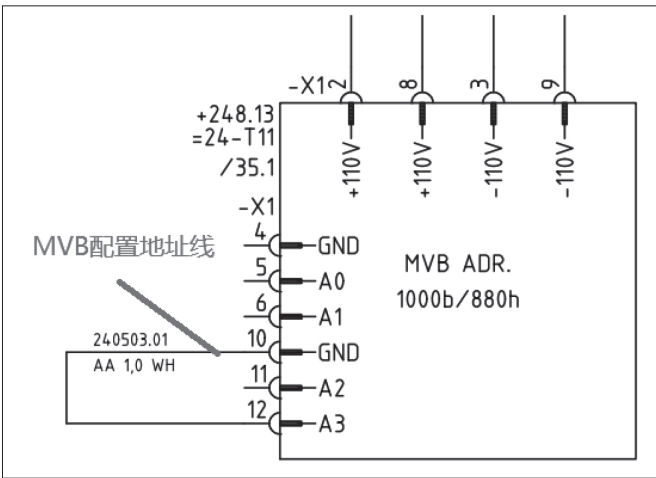


图 13 输入输出模块 MVB 地址编码线

3 输入输出模块系统优化

通过对模块进行抗干扰能力测试及整机工作原理的分析，制定了以下方案：优化电源电路和提高 IO 通道防护能力，从而提高电磁兼容抗扰能力；提高电流保护阈值及优化时间滤波设置，避免误报故障，提高模块对车辆复杂电磁环境的适应性。

3.1 电源模块优化

(1) 提高电源模块功率，进而提高 24V 供电电源的最大电流输出能力。

(2) 110V 电源电路采用集成式设计，在 110V 输入级增加自恢复保险丝、大功率 TVS 管，并采用集成式防浪涌模块；输出级增加共模电感、TVS 管等进行隔离及滤波，提高后级电路可靠性，电源电路如图 14 所示 [8]。

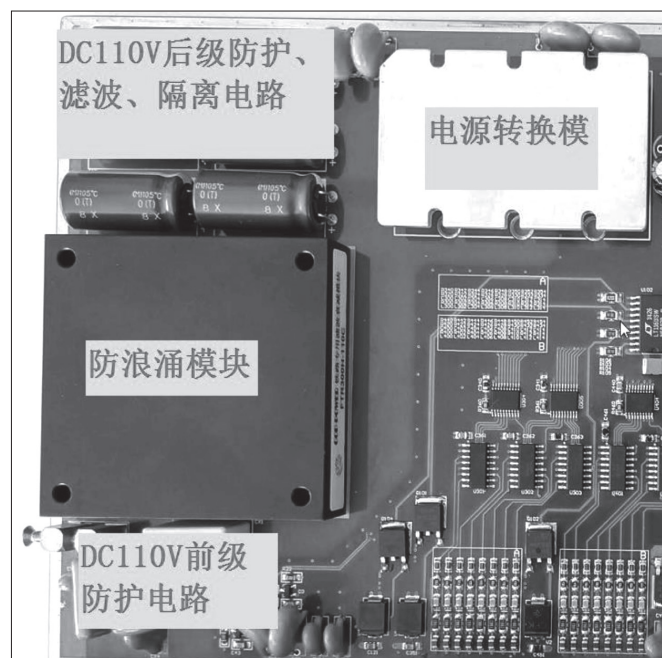


图 14 优化后的电源电路

3.2 过流 / 短路故障优化

(1) 增强输入输出通道电磁兼容防护能力。所有 IO 通道增加 TVS 等元器件进行滤波和防护，PCB 布局时采用物理隔离，避免通道间相互干扰，有效滤除因电磁干扰导致的电流尖峰^[9,10]。

(2) 提高各通道 24V 过流保护限值，增加过流安全余量。

(3) 增加过流保护延时，进一步抑制外部干扰、噪声等原因导致的故障误报。

(4) 优化诊断逻辑，软件检测到连续 3 次 24V 电源短路故障才判断故障真实有效。

3.3 MVB 模块优化

(1) 优化软件设计，MVB 初始化配置自检功能，避免上电时电源扰动造成初始失败。

(2) 优化 MVB 地址编码读取方式，仅在上电后一段时间内读取地址编码、判断编码地址是否有效，避免车辆运行过程中振动等原因造成编码接线松动导致的 MVB 通讯故障^[11]。

4 输入输出模块系统验证

4.1 电磁兼容测试

根据 GB/T 24338.4-2018 标准，对优化

后的模块进行电磁兼容试验，测试结果满足标准四级要求，结果如图 15、图 16 和表 3 所示。

4.2 过流保护限值验证

分别对 24V 电源电路、通用 DI 输入、高速 DI 输入、DO 输出进行过流保护限值测试，测试结果符合要求，如表 4 所示。

4.3 整机例行测试

按照《轨道交通 机车车辆电子装置》标准进行试验，对整机进行了外观检查、绝缘耐压试验和功能试验，优化后的模块符合要求。

4.4 实际应用

优化后的输入输出模块在车辆上进行了运用，效果良好。

5 结语

本文针对列车网络控制系统输入输出模块在运行

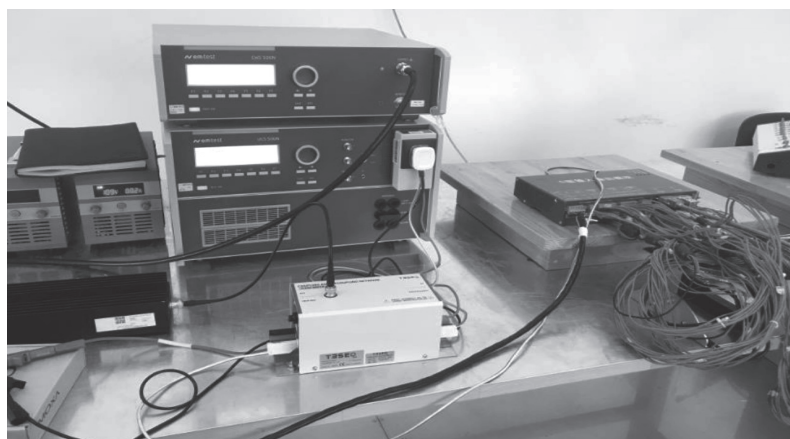


图 15 电磁兼容测试



图 16 电磁兼容测试

表 3 输入输出模块电快速脉冲群测试结果

项目	电压等级	试验结果
110V 电源端口浪涌抗扰度试验	Level 3: 线对线 ±1kV, 线对地 ±2kV	A 级, 工作状态正常, 无重启, 无失效
	Level 4: 线对线 ±2kV, 线对地 ±4kV	
电源和信号端口电快速瞬变脉冲群试验	4kV, 5/50ns, 5kHz	A 级, 工作状态正常, 无重启, 无失效
	2kV, 5/50ns, 5kHz	

表 4 输入输出模块 24V 过流限值测试

项目	过流保护限值 /mA	实测限值 /mA
供电电源 24V 输出	220	315
通用 DI 模块输入	500	492
高速 DI 模块输入	500	472
DO 模块输出	220	213

过程中的失效问题，分析了失效原因并提出了优化方案。并经过实验室测试及实车运用，对方案进行了验证，有效提高了模块的可靠性，减少了对列车运行的影响。通过本次故障的分析与优化，建议在后续设计中，为满足列车复杂的电磁环境要求，电子机箱电磁兼容能力尽量满足四级标准要求，提高列车的抗干扰能力。

基金项目：中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划项目：动车组网络控制系统检修技术优化研究（P2020J010）。

参考文献：

[1] 高枫, 赵红卫, 黄志平, 等. 高速动车组列车网络控制系统自主化研制及应用 [J]. 铁路技术创新, 2015 (2) : 77-82.

[2] 苏立轩, 张晨. 动车组过分相暂态过程对信号设备的电磁影响 [J]. 铁道工程学报, 2016, 33 (7) : 71-77.

[3] 万佳, 马佰全. 动车组列车电磁兼容性研究 [J]. 内燃机与配件, 2020 (3) : 82-83.

[4] 李常贤, 冯庆鹏, 郑祥. 高速列车接地技术研究 [J]. 内燃机车, 2012 (10) : 8-10.

[5] 万玉苏, 刘耀银, 高国强. 接地方式对高速动车组升弓浪涌过电压的影响 [J]. 铁道学报, 2017 (12) : 32-37.

[6] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 轨道交通 电磁兼容 第 3-2 部分: 机车车辆 设备 :GB/T 24338.4-2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.

[7] 全国牵引电气设备与系统标准化技术委员会. 轨道交通 电子设备 列车通信网络 (TCN) 第 3-1 部分: 多功能车辆总线 (MVB) :GB/T 28029.9-2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.

[8] 赵艳飞, 李善庆. 输入浪涌抑制与防反接电路的设计优化 [J]. 通信电源技术, 2016, 33 (3) : 11-13.

[9] 潘宇倩, 白东炜. 电磁干扰的产生及 PCB 设计中的抑制方案 [J]. 航天器工程, 2007, 16 (3) : 125-129.

[10] 任枫轩. PCB 布线中的抗干扰设计 [J]. 科技创新与应用, 2013 (22) : 32-33.

[11] 李申龙, 孔元, 郑雪阳. 高速动车组 MVB 通讯故障诊断软件设计与实现 [J]. 铁道机车车辆, 2021, 41 (3) : 111-115.

作者简介: 王刚 (1983.12-), 男, 汉族, 河北张家口人, 本科, 高级工程师, 研究方向: 铁道机车车辆; 夏好广 (1987.08-), 男, 汉族, 山东德州人, 博士研究生, 副研究员, 研究方向: 铁道机车车辆。