

地铁列车逻辑控制单元典型故障及优化方案研究

何虹丽¹ 黄 行¹ 范溢峻¹ 师满琴¹ 付孙兵² 颜健乐¹

(1. 宁波市轨道交通集团有限公司运营分公司, 315202, 宁波; 2. 深圳通业科技股份有限公司, 518110, 深圳)

摘 要 [目的]作为继电器的替代设备,LCU(逻辑控制单元)在我国城市轨道交通列车中已广泛运用,与列车网络、硬线信号共同参与车辆控制。收集 LCU 运用过程中出现的典型故障进行分析并探求可靠的解决方案和措施,对地铁列车的安全性和可靠性起到至关重要的作用。[方法]针对宁波轨道交通 3、4 号线列车自开通以来的 LCU 典型故障,收集关键数据,通过监测并分析故障板卡关键点位输出波形,对故障机理进行深入分析,确定故障原因为输入输出板卡元器件失效且冗余切换机制未启动,提出优化故障检测及冗余切换机制的方案,并调整驱动芯片输出电路参数。最后结合仿真试验及装车测试,验证了优化方案的有效性。[结果及结论]LCU 的双机热备冗余及故障工况主动切换机制是其优于传统继电器的重要体现,该功能的有效启用对列车的稳定运行发挥着重要作用。因此,在正常及稳压管故障工况下对该优化方案进行测试验证,优化后的 LCU 均能满足使用要求,证实该优化方案切实可行,提升了 LCU 的可用性。

关键词 地铁列车; 逻辑控制单元; 典型故障; 冗余切换机制; 优化措施

中图分类号 U231.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2025.03.059

Research on Typical Faults and Optimization Solutions for Metro Train Logic Control Units

HE Hongli¹, HUANG Xing¹, FAN Yijun¹, SHI Manqin¹, FU Sunbing², YAN Jianle¹

(1. Operation Branch of Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., 315202, Ningbo, China; 2. Shenzhen Tongye Technology Co., Ltd., 518110, Shenzhen, China)

Abstract [Objective] As a replacement for relays, LCUs (logic control unit) are widely used in urban rail transit trains in China, participating in vehicle control alongside train networks and hardwired signals. Analyzing typical faults encountered during LCU operation and exploring reliable solutions are crucial for ensuring the safety and reliability of metro trains. [Method] Focusing on typical LCU faults observed since the opening of Ningbo Rail Transit Line 3 and Line 4, and based on the collected key data, the output waveforms at critical points of the faulty boards are monitored and analyzed to investigate fault mechanisms. The identified causes include component failures

on input/output boards and failures in activating the redundancy switching mechanism. Optimization proposals are formulated to enhance fault detection and redundancy switching mechanisms, and output circuit parameters of the driver chips are adjusted. Finally the effectiveness of the optimization proposal is validated through simulation experiments and onboard testing. [Result & Conclusion] The dual machine hot-standby redundancy and fault condition active switching mechanisms of LCUs are key advantages over conventional relays and play a critical role in ensuring stable train operation. Testing under normal and voltage regulator fault conditions confirms that the optimization proposal can effectively improve the availability of LCUs.

Key words metro train; LCU; typical faults; redundancy switching mechanism; optimization measure

LCU(逻辑控制单元)是地铁列车上重要的控制部分^[1],采用光耦和场效应管等无触点电路设计,实现开关的无触点控制,并通过软硬件结合的方式实现各种逻辑计算、故障诊断及延时控制等功能^[2],利用高可靠性电路和器件,实现了双系统热备冗余。本文通过对宁波轨道交通 3、4 号线列车 LCU 典型故障重要案例进行详细分析,并提出优化方案,经验证该优化方案可切实有效地降低列车运行故障和风险,提高运营可靠性。

1 LCU 典型故障概述

4 号线故障案例:某列车在正线运营过程中关门后未反馈车门关闭且锁紧信号,但司机室 HMI(人机界面)屏未显示车辆故障,车门亦处于关闭状态,尝试重新开关门后恢复正常;之后,在后续站台再次发生相同故障,OCC(运营控制中心)组织列车清客并退出服务。更换 IO(输入输出)板卡后,功能恢复正常。对故障板卡进行检测发现其输出电压低至无法驱动对应继电器动作。

3 号线故障案例:某列车主控钥匙占有后功能异常,占有功能对应继电器未吸合,司机室 HMI 无故障条目显示,尝试复位无效,将 LCU 故障旁路后

占有功能恢复正常。更换 IO 板卡并进行检测,发现与 4 号线故障原因一致,为典型重复故障,遂将两起跨线路故障进行合并分析处理。

2 故障分析

2.1 LCU 拓扑结构及功能描述

LCU 采集司机控制器、按键开关组、隔离开关、接触器辅助触点等信号,经逻辑计算后,输出驱动车辆各类负载信号,完成指定的时序控制功能。采用分布式结构,在每辆车各安装 1 套 LCU 设备,它们之间通过 CAN(控制器局域网)实现数据共享^[3],TC 车(带司机室的拖车)的 LCU 通过 MVB(多功能车辆总线)与 TCMS(列车控制管理系统)建立数据连接。整车 LCU 拓扑结构图见图 1 所示。

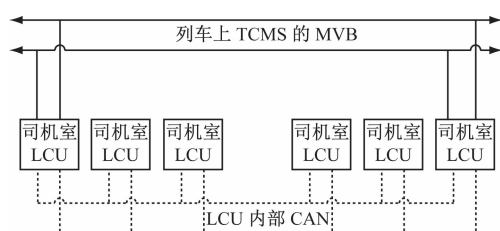
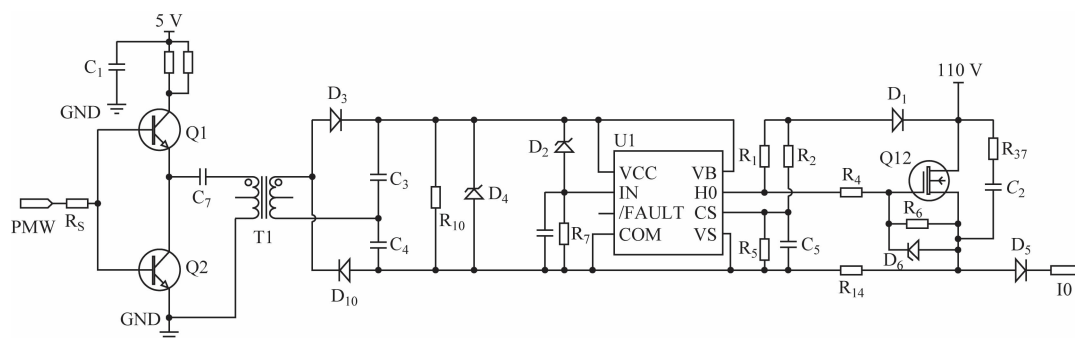


图 1 LCU 拓扑结构

Fig. 1 Topological structure of LCU

LCU 采用完全独立的热备双冗余设计,根据 A、B 两组 LCU 的信息反馈进行判断,具有故障自动切换功能。同时也配置手动转换开关,便于人工切换^[4]。冗余切换逻辑如表 1 所示。



注: PWM 为脉宽调制; R_5 、 R_1 、 R_2 、 R_4 、 R_5 、 R_6 、 R_7 、 R_{10} 、 R_{14} 、 R_{37} 为电阻; C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 、 C_7 为电容; GND 为接地; Q_1 、 Q_2 为三极管; T_1 为变压器; D_1 、 D_3 、 D_5 、 D_{10} 为二极管; D_2 、 D_4 、 D_6 为稳压管; VCC 为输入工作电源; IN 为输入电压; /FAULT 为置位信号; COM 为公共端; VS 为高侧浮动电源回流; CS 为电流检测; VB 为高侧浮动电源输入。

图2 LCU 输出驱动电路图

Fig. 2 Schematic diagram of LCU output driver circuit

通过检测,判断为 D6(稳压管)失效引起漏电流过大,导致 U1 的 HO 管脚驱动电流加大而前级电源回路带负载能力不足,进而出现 VCC(输入工

Tab. 1 Redundant switching mechanism				
输出指令	A 组反馈指令	B 组反馈指令	故障定位	切换动作
1	1	1	无故障	无
1	1	0	B 组反馈通道故障	B 组备
1	0	1	A 组反馈通道故障	A 组备
1	0	0	主用板卡输出通道故障	主用降备
0	1	1	主用板卡输出通道故障	主用降备
0	1	0	A 组反馈通道故障	A 组备
0	0	1	B 组反馈通道故障	B 组备
0	0	0	无故障	无

2.2 故障点定位

两起故障发生时刻 LCU 均未启动冗余切换功能,且 HMI 无故障条目报出。测量 LCU 相关点位电压均约为 40 V,远低于后端继电器的动作电压,可确定为 LCU 输出故障,并且输出回采电路未检测到异常,因此未能进行冗余切换,故存在功能缺陷。

2.3 故障原因分析

LCU 输出驱动电路如图 2 所示,由驱动信号控制 U1(驱动芯片)的 HO(门极驱动输出)管脚输出电压开通或者关断 Q12(金属氧化物半导体场效应晶体管,以下简称 MOS 管),为后端负载输出电源,同时进行输出回采,通过比较判断电路是否出现故障,是否触发冗余切换机制。

作电源)电压在 8.8~9.8 V 之间来回跳动现象(驱动芯片 U1 低于 9 V 将封锁输出),继而引起 U1 的 HO 管脚脉冲式的输出,无法正常触发 Q12 开通。

由于脉冲式输出的脉冲周期短,加之光耦的延迟关断特性,最终导致输出回采电路未能检测出异常,故无法进行冗余。

3 优化方案

根据上述分析,可从以下两方面进行优化:

- 1) 冗余切换及故障检测机制优化;
- 2) 驱动芯片 HO 输出电路优化。

3.1 故障检测及冗余切换机制优化

LCU 输出通道故障诊断机制是通过对比输出指令和输出反馈来判断通道是否故障。故障时刻 LCU 存在输出指令,输出反馈采集周期为 2 ms,采集 4 次数据,其中高电平次数大于 3 次时认为信号为高电平。故障波形截图如图 3 所示。

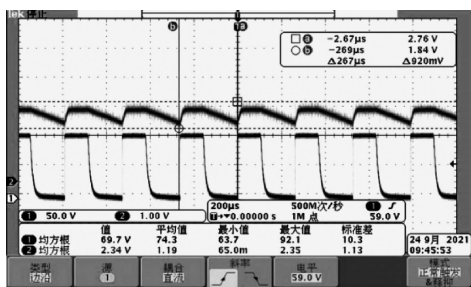


图3 输出通道与输出反馈电压波形截图

Fig. 3 Screenshot of output channel and output-feedback voltage waveform

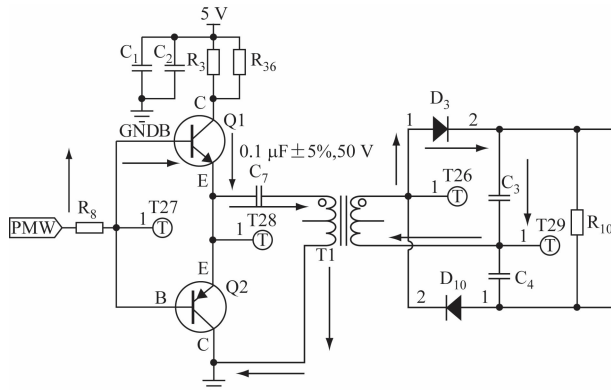
故障 IO 板卡输出的是周期为 200 μs 的 PWM 波,而输出反馈回路光耦开通时间短,关断时间长,导致更大概率会采集到高电平信号,因此软件判定既有输出指令也有输出反馈,输出通道无故障。

由于故障点位为总 MOS 管和支路 MOS 管上的 GS(栅极与源极)两端稳压管漏电流异常,故可考虑改变元器件的参数或软件的参数以规避驱动芯片脉冲式输出的情况。

当 PWM 波处于高电平时,如图 4 所示,三极管 Q1 控制端有电流流入,Q1 导通,变压器 T1 电流从上往下通过,同时二极管 D_3 也处于通态,向电容 C_3 供电。

当 PWM 波处于低电平时,如图 5 所示,三极管 Q2 控制端有电流流入,Q2 导通,T1 电流从下往上通过,同时二极管 D_{10} 也处于通态,向电容 C_4 供电。由于支路电容 C_3 、 C_4 为驱动芯片供电,其容值原为 1 μF ,由于故障出现时驱动芯片没有正常输入电源,可将其加大至目前总电路中应用的 2.2 μF ,以提高

支路电容的带负载能力。



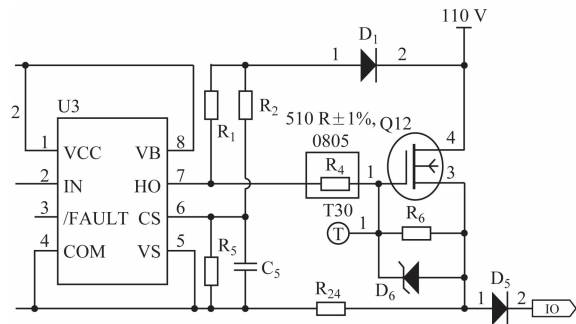


图7 支路电阻参数

Fig.7 Resistance parameters of branch circuit

综合考虑 HO 电路故障影响及响应时间要求, 可将 HO 串联电阻增大至 10 kΩ, 则稳压管漏电流增大或对地短路时, 驱动电流不会明显增大, 驱动芯片的 VCC 和 IN 电压不会被拉低, 并且稳压管电压异常使 MOS 管无法导通, 使输出反馈通道无输出电压, 回采电路能识别到有输出指令但无输出反馈故障, 因而对 LCU 设备进行冗余切换。

4 验证优化效果

综上, 将 C₃ 和 C₄ 增大为 2.2 μF, R₄ 改为 10 kΩ, R₆ 改为 100 kΩ 后, 系统带负载能力提高的同时, MOS 管开通关断响应时间、输入输出响应时间未发生明显变化, 在装入故障稳压管的工况下亦能完成主备切换, 达到了优化目的。

1) MOS 管开通关断响应时间测试: 采集 MOS 管的开通和关断波形, 对比其开通及关断时间, 如表 2 所示。板卡优化前后开通时间和关断时间基本一致, 均满足使用要求。

表2 开通与关断响应时间

Tab.2 Response time of turn-on and turn-off

C ₃ /μF	C ₄ /μF	R ₄ /kΩ	R ₆ /kΩ	开通响应时间/μs	关断响应时间/ms
1.0	1.0	0.5	10.0	9.2	2.0
1.0	1.0	10.0	10.0	40.8	1.9
1.0	1.0	10.0	100.0	78.0	1.7
2.2	2.2	10.0	10.0	24.0	3.8
2.2	2.2	10.0	100.0	22.0	2.0

2) 输入输出响应时间测试: 针对优化后的板卡, 分别对输入采集点和输出通道进行监测, 经过多次测试, 输入输出响应时间约为 11.8 ms, 满足使用要求。

3) 整机冗余功能测试: 将故障稳压管分别装在优化后板卡的总 MOS 电路和支路 MOS 电路中做测试。经多次测试, LCU 可以识别故障并完成主备切换, 主备切换时间约为 44 μs, 满足使用要求。

4) 装车跟踪测试: 将器件参数调整后的故障板卡装车进行多次测试, 冗余功能均正常启动; 将上述优化后的 IO 板卡装车后, 跟踪 6 个月, 同类故障未复现, 经验证该优化措施切实有效。

5 结语

该优化后的 IO 板卡装车应用效果良好, 符合实际使用要求, 可进行批量推广。后续将持续关注 LCU 各类型故障, 以深度剖析故障原因, 提出行之有效的优化措施, 保证列车正线运行可靠性, 降低维护和检修工作量。这对提高地铁车辆利用率具有显著的现实意义。

参考文献

[1] 吕强. 地铁列车 LCU 系统技术发展与应用[J]. 科技创新导报, 2016, 13(28): 1.
LYU Qiang. Development and application of metro train LCU system technology[J]. Science and Technology Innovation Review, 2016, 13(28): 1.
[2] 李小庆, 吴金贤, 李松, 等. 地铁车辆逻辑控制单元优化设计[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(2): 112.
LI Xiaoqing, WU Jinxian, LI Song, et al. Optimization design of subway vehicle logic control unit[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(2): 112.
[3] 崔霆锐, 李熙, 华路捷, 等. 地铁列车逻辑控制电路安全服役技术应用研究[J]. 铁道机车车辆, 2021(2): 114.
CUI Tingrui, LI Xi, HUA Lujie, et al. Application research on safety service technology of logic control circuit for subway vehicle[J]. Railway Locomotive & Car, 2021(2): 114.
[4] 曾华南, 汪萍萍. 地铁列车逻辑控制单元设计与应用研究[J]. 机械工程与自动化, 2023(4): 150.
ZENG Huanan, WANG Pingping. Research on design and application of metro train logic control unit[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2023(4): 150.

· 收稿日期: 2022-11-30 修回日期: 2024-04-15 出版日期: 2025-03-10
Received: 2022-11-30 Revised: 2024-04-15 Published: 2025-03-10
· 通信作者: 何虹丽, 工程师, 409555989@qq.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