

[逻辑控制单元]

地铁列车高安全等级LCU设计及主控板丢失问题分析与优化

文/叶 锋 阳俊杰 汪 婷
中车株洲电力机车有限公司产品研发中心

随着地铁列车无人驾驶的普及，对取代传统继电器电路控制逻辑的逻辑控制单元(LCU)的安全性和可靠性要求越来越高。介绍了一种安全完整性等级为4级(SIL4)的LCU设计原理，针对其在深圳某项目实际应用中出现的主控板丢失故障问题进行了分析并提出了优化措施，大大提升了LCU的可靠性和安全性，减少列车发生类似故障的可能性。

随着地铁越来越普及，在地铁技术高速发展的同时，传统地铁列车使用的继电器逻辑控制电路的可靠性迎来了巨大挑战。继电器广泛存在于地铁列车的控制系统中，每辆列车最多可达400个，在轨道交通中发挥着重要作用。继电器的电气特性及特殊的使用环境等因素导致其故障频发。据统计，地铁车辆控制故障60%以上是由继电器失效所致，给地铁运行和维护带来了很大的安全隐患。为解决继电器存在的诸多不足，逻辑控制单元(Logic Control Unit, LCU)应运而生。近几年，随着地铁全自动无人驾驶的推广，对LCU的安全性和可靠性提出了更高的挑战和要求。本文介绍了一种可应用于全自动无人驾驶地铁列车的符合安全完整性等级为4级(SIL4)的LCU设计方案，分析了主要的安全设计原理，以及在实际应用中出现的问题和优化措施。

设计原理

1. 设计方案

LCU是专为在轨道交通环境下应用而设计的数字逻辑控制装置。它采集司机控制器、按键开关组、隔离开关及接触器辅助触头等车辆操作开关信

号及状态，经逻辑处理后，输出驱动车辆各类执行部件，完成指定的时序逻辑控制功能。

图1为深圳某无人驾驶线路地铁列车整车LCU拓扑结构图。根据控制需求，6节编组列车每节车均配备SIL4等级LCU，其中A1车和A2车配备1个6U和1个3U的LCU，客室B1车、C1车、C2车及B2车各配备1个3U的LCU，各LCU之间通过CAN网络实现数据共享。各LCU通过双冗余以太网与TCMS建立数据连接，上报LCU故障数据和状态数据。

该LCU内部通过二乘二取二的方式实现SIL4的功能，二乘二取二LCU集成无缝切换的双机热备冗余和二取二的双机冗余表决两种方案，最大程度利用冗余技术实现高可靠性、高安全性的组合。在可靠性上采用两系热备且完全一致可互换的冗余结构，在主用系出现任意功能模块单点故障，即触发主备切换控制；备用系出现单点故障，则锁定、隔离故障单元不允许进行主备切换。在安全性上，采用单板二取二的任务级同步的容错、安全管理，并将双功能模块的关键过程数据进行周期性表决。表决成功则允许输出，表决失败则导向双系主备切换，控制原理如图2所示。

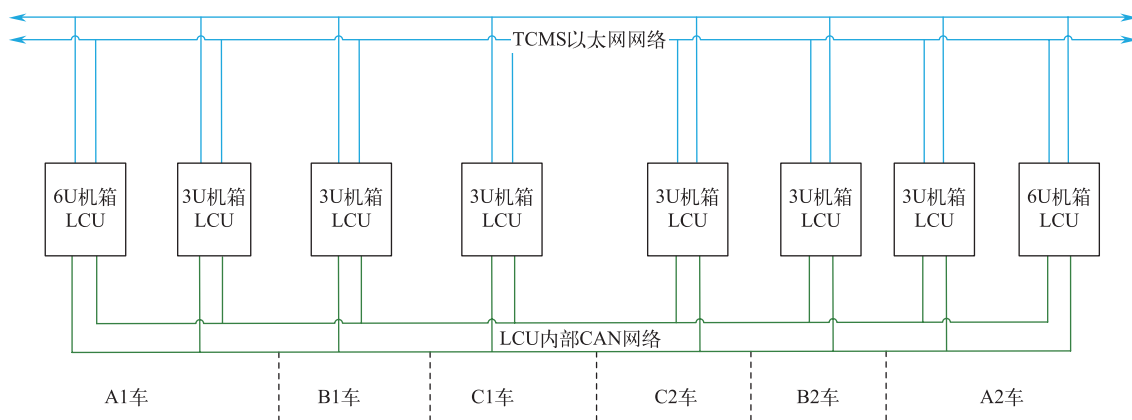


图1 整车LCU拓扑结构图

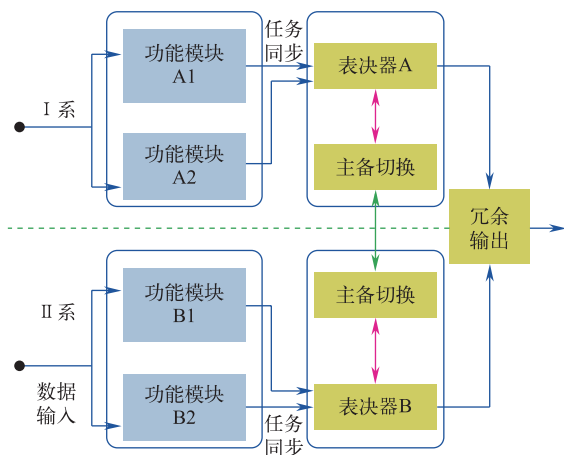


图2 二乘二取二原理示意图

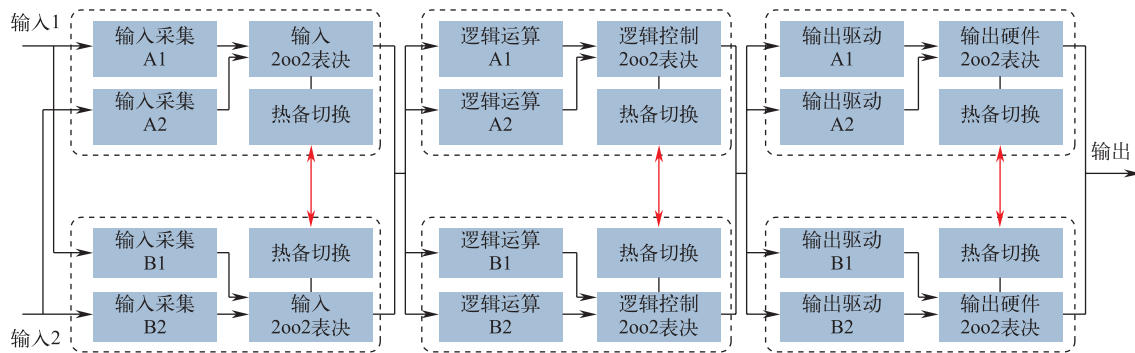


图3 二乘二取二LCU功能单元组成示意图

LCU系统上电时，根据系统时间进行单双日判断，单日默认分配A组为主，B组为备；双日分配B组为主，A组为备；当A、B组两块主控板中日期时间不一致时，默认以A组主控板日期为参考进行主备分配。系统正常运行过程中，若日期跨越天数，不再重新进行主备分配；若单组先上电，上电时默认主备状态不受日期限制。

LCU的核心功能单元组成包括车辆逻辑IO输入信号采集、列车逻辑控制运算和车辆逻辑IO输出驱动三部分。每单元的硬件CPU和软件功能独立，各单元的双路冗余的2-out-of-2（2oo2）表决、双系热备切换功能在本单元CPU内单独配置，如图3所示。

2. 主、备用主控板热备切换原理

逻辑计算电路采用四个独立CPU，每两个CPU作为二乘二取二冗余机制的“二取二”部分，同时每一系的两个CPU也同时进行双冗余的单组二取二比较计算，当计算一致时双冗余逻辑输出，当计算不一致时切换到二乘二取二另外一个系进行逻辑计算。

现场故障情况及分析

1. 1618车备用主控板丢失

2022年8月14日，该项目1618车在调试线试验时，司机显示屏报4车LCU-3U机箱A组主控丢失，如图4所示。根据故障判定逻辑：LCU主用主控板与备用主控板之间通过CAN模块通信，主用主控板在规定时间内未收到备用主控板发送的数据，

则判定备用主控板丢失并上报故障至司机显示屏（HMI）。该日为双日，LCU自动选择B组主控板为主用，因此判定该故障位备用主控板丢失。

1618 现存故障 星期日 2022-08-14 13:49:21				
No	等级	故障代码	故障内容	发生时间
1	故障	R24E	4车 LCU5 主控板 A 丢失	2022-08-14 13:47:24
2	提示	0209	任意停放制动未缓解	2022-08-14 13:39:08
3	提示	0208	3个及以上牵引系统不可用	2022-08-14 13:39:08

图4 HMI上报的LCU主控板丢失故障

发生故障后，维护人员上车查看LCU机箱状态，机箱状态正常，复位重启后故障消失。

现场出现报主控板丢失为备用主控板丢失，且在车上强制AB组，或者拔掉主用主控板，LCU均可以切换到备用主控板。

故障时刻LCU机箱为B组主用，现场人员将主用主控板拔出，备用主控板升主，说明主控板A实际工作正常，并非故障状态。

故障板卡返厂后，装入整机进行功能测试，上电后板卡正常运行，无报红等异常，常温下板卡测试无异常，将板卡放入高温箱中老化4 h，板卡在高温下持续运行，无报红等异常。读取板卡数据，CAN通信正常。

LCU主备用状态优先取通信状态来判断主备状态，软件通信判断周期为5个周期，每周期为30 ms，5个周期内主用MCU（主控单元）未收到备用MCU生命信号，则置位故障位报板卡丢失。

由于试验室测试未能复现现场故障，此次仅对软件进行了优化，修改MCU板软件，将生命信号通信故障判定周期由5个周期延长至10个周期并装车验证。

2. 1609车备用主控板丢失

2022年9月25日，1609车库内时报1车LCU-3U机箱主控板B丢失故障。

维护人员上车查看LCU机箱实际运行正常，强制切换到备用B组正常，拔出主用A组可正常切换到备用B组。查看下载的日志记录数据，导致主控板B丢失的原因为CAN通信超时，并且超时周期超过了判断周期，所以判断备用主控板丢失故障，如图5所示。

45404	34	2022-09-24 21:46:52	8292	9004	12	F6 03 00 00 02 02 20 03 00 00 00 00 00 00 00 00 ...	B
45405	37	2022-09-24 22:25:04	8291	9004	12	F5 03 00 00 02 02 20 03 00 00 00 00 00 00 00 00 ...	B
45406	38	2022-09-25 00:21:10	8303	9004	12	F8 03 00 00 02 01 20 03 00 00 00 00 00 00 00 00 ...	B
45408	36	2022-09-25 07:28:04	8304	9004	12	F9 03 00 00 02 01 20 03 00 00 00 00 00 00 00 00 ...	B
45446	45	2022-09-25 18:38:31	29257...	9004	12	02 01 38 06 06 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 ...	B
45563	35	2022-09-25 19:18:10	8304	9004	12	F8 03 00 00 02 01 20 03 00 00 00 00 00 00 00 00 ...	B
45572	37	2022-09-25 19:54:14	8299	9004	12	F3 03 00 00 02 01 20 03 00 00 00 00 00 00 00 00 ...	B
<div>3D 6C BA 01 02 01 38 06 06 00 </div>							

图5 LCU故障日志

数据记录中，02 01表示故障板为主控板，38表示发生了CAN通信超时故障，06 06表示通信超时的原因是没有收到数据，而不是收到的数据不符合校验结果。由此可见，软件优化未能解决备用主控板丢失故障。

在故障发生期间，若LCU内部CAN通信恢复正常，则主控板丢失故障消失，但现场情况为主控板丢失故障一直存在，证明CAN通信没有恢复，所以初步推断可能是硬件CAN模块故障导致的主控板丢失功能异常，属于硬件电路设备的随机性失效，非软件功能性失效。

CAN通信模块筛选

1. 筛选方法

为了杜绝类似故障，将现场CAN通信模块批量周转返厂进行检测。模块返厂后先使用高倍显微镜对CAN模块引脚焊接质量进行检查，确保器件焊接无异常；再使用万用表测量CAN模块CAN_H与CAN_GND之间的阻抗；随后使用高低温交变冲击箱对整列LCU进行24 h高低温交变测试。以上测试过程中如有异常，则更换CAN模块。

2. 筛选结果

经过焊接质量检查和24 h高温老化测试，筛选出部分CAN收发器异常的CAN通信模块，降低了将隐患带到现场的可能性，减少了现场故障发生概率。目前相关CAN通信模块已经在业主现场运营超过半年以上，未再出现由于CAN收发器故障导致的主控板丢失故障。

结束语

该项目为我司首次应用SIL4级二乘二取二LCU的项目。LCU板卡在现场的运用过程中，多次报出板卡CAN1或CAN2故障，进而引起备用主控板丢失故障。通过长时间对LCU硬件详细测试，确定为板卡中的CAN收发器随机性失效引起。经过返厂长时间高温老化及详细性能测试后，筛选出故障板卡，大大提高了整个项目LCU的可靠性，为后续项目提供了非常宝贵的参考价值。EA

(收稿日期：2023-06-02)