

CRH2 型动车组控制系统冗余安全设计

刘群欣¹, 霍 芳²

- (1. 中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001;
2. 湖南铁路科技职业技术学院, 湖南 株洲 412006)

摘 要: 针对 CRH2 型动车组要求整车控制系统高安全可靠性的特点, 重点研究了网络控制系统通信架构、软硬件控制平台及车辆电气控制系统, 详细论述了控制系统在冗余通信、安全导向、联锁保护的设计策略及优点。长期运用表明系统性能表现优异。

关键词: CRH2 型动车组; 故障导向安全; 安全可靠; 网络控制系统

中图分类号: U266.2; TP393

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2019.03.012

Design of CRH2 EMUs Control System Redundant Safety

LIU Qunxin¹, HUO Fang²

(1. CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China;

2. Hunan Vocational College of Railway Technology, Zhuzhou, Hunan 412006, China)

Abstract: Aiming at the characteristics of high safety and reliability of the CRH2 EMUs vehicle control system, the communication architecture of network control system, software and hardware control platform and vehicle electrical control system was studied. The design strategy and advantages of the control system in redundant communication, safety guidance and interlocking protection were discussed in detail. Long-term application shows that the system has excellent performance.

Keywords: CRH2 EMUs; fault-oriented security; safety and reliability; network control system

0 引言

高速动车组控制系统的安全可靠运行是动车组正常运营的基本保证^[1]。从整车来看, 动车组控制系统涵盖网络控制系统、电气联锁控制系统以及电气信号线系统等。控制系统作为车辆的控制中枢, 关系到整车的安全和可靠运营。

CRH2 型动车组控制系统在设计过程中充分考虑基于故障导向的安全, 冗余通信保障和联锁保护等措施, 以提升整车控制系统的安全可靠性。整车控制系统围绕控制指令这一核心要素, 在指令传送环节采用了指令安全采集和冗余传送设计, 在指令控制方面采用安全联锁设计以及其他方面的安全可靠性设计。本文

从网络系统架构、硬件控制平台和车辆电气控制系统 3 个方面进行研究与设计。

1 网络传输系统设计

1.1 网络总线架构

CRH2 型动车组的网络传输拓扑采用列车级与车辆级两层架构。列车级通信网络连接各动态编组车辆, 而车辆通信网络连接车辆内固定设备。列车总线采用光纤技术, 连接各中央装置和终端装置, 采用双重环网结构。车辆总线网络用于各车厢车载设备的数据通信, 主要采用光纤与电流环等形式。在两层架构外, 网络控制系统还有备用的自我诊断传输线, 采用双绞线方式连接中央装置和终端装置^[2]。

CRH2 型动车组网络控制系统核心为中央装置 (CCU) 与终端装置 (LCU)。其中 CCU 主要包括

收稿日期: 2019-02-18

基金项目: 湖南省教育厅科学研究项目 (14C0762)

处理器板 CPU3、光通信板 MDM8、控制指令发送卡 TXC 等单板; LCU 主要包括处理器板 CPU3、光通信

板 MDM8 和 MDM9、控制指令接收卡 RXC 等单板^[3]。CRH₂ 型动车组网络系统典型拓扑图如图 1 所示。

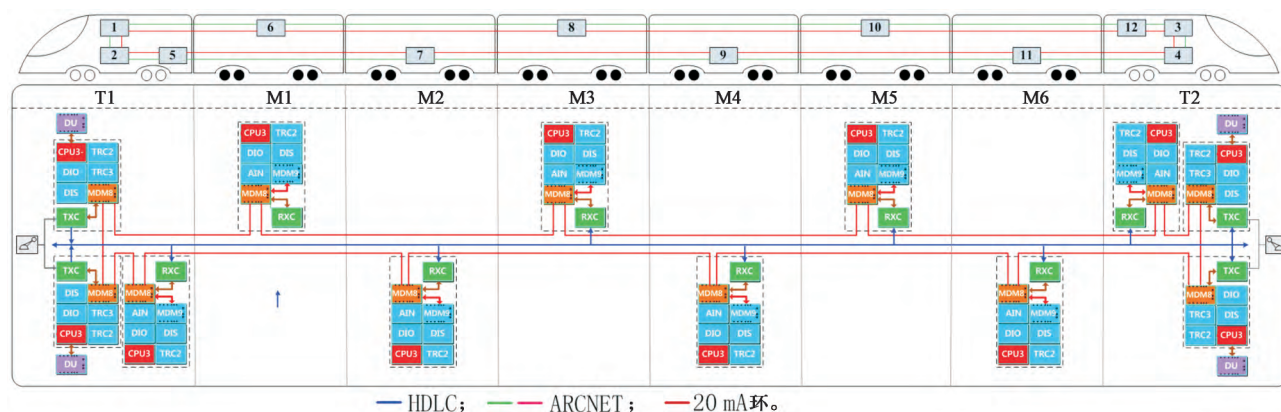


图1 CRH₂ 型动车组网络系统典型拓扑图

1.2 网络传输总线冗余设计

网络传输系统 MON 为双重环网系统, 以确保系统的冗余性。中央装置 CCU 和终端装置 LCU 采用双重环形结构的控制监视器传输连接线, 采用了抗故障能力极强的双向环形网络方式, 具有左转和右转 2 个路径, 是一种分散性的系统。当网络传输系统出现 1 处故障时, 节点可以选择相反方向的链路继续正常地传输数据, 即使同时发生 2 处以上的链路故障, 环形网络断开时, 其他正常连接链路上的节点通信不受影响, 还能继续保持传输功能。考虑环形网络全部中断, 网络系统还配备有自诊断传输线, 用于牵引 / 制动控制指令的传输, 维持列车运行不中断。CRH₂ 型动车组网络传输通道见图 2 所示。

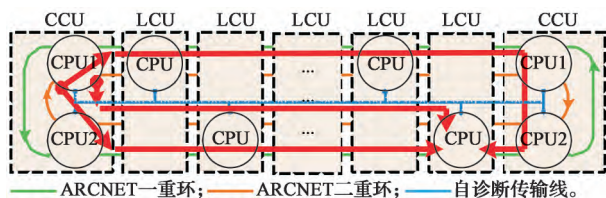


图2 CRH₂ 型动车组网络传输通道

CRH₂ 型动车组网络结构本身就可实现一重冗余, 另外连接全车的自诊断传输线可实现第二重冗余 (由于自诊断传输线只能传输控制指令, 对其他的状态数据和数据块传输则不能通过自诊断传输线实现传输冗余)。

在该系统中, 节点检查接收到的数据, 如果数据正常, 就按照目的地址传送该数据; 如果该数据异常, 则该数据将被丢弃。传送系统上的负载通过信息包分配 / 优先级处理进行控制, 以便控制数据可靠地被传送到每个设备。优先级定义如下:

①第一优先级: 控制指令数据;

②第二优先级: 状态数据 (用于显示于司机室监控屏幕上的数据);

③第三优先级: 数据块 (已记录的数据, 比如故障数据)。

1.3 控制指令备份

牵引制动指令是网络传输的核心控制指令, 也是

控制车辆运行的关键。为了提高系统可靠性, 控制指令传输不经过 CPU3, 而是直接通过 TXC, MDM8, MDM9, RXC 等链路完成。另外, 中央装置内的 TXC 插件和终端装置内的 RXC 插件是单独供电的, 即使 CPU 一侧的电源故障, TXC 与 RXC 的工作也不会受影响。

控制指令由司控器产生, 通过网络系统传输给牵引控制系统 CI 和控制系统 BCU。当环网结构故障无法实现控制指令传输时, 自诊断传输线的存在保证了 TXC 与 RXC 的通信不中断, 同时能有效保证控制指令的传输, 提高系统可靠性。控制指令传输共有 3 个优先级备份, 下面按优先级由高到低依次进行描述。

1) TXC → 中央装置 MDM8 → 末端装置 MDM8 → 末端装置 MDM9

传输过程: TXC 采集司机台上的 DI 信号后, 通过 20 mA 电流环传给中央装置的 MDM8, 中央装置的 MDM8 通过 ARCNET 环网传给末端装置的 MDM8, 末端装置的 MDM8 通过 ARCNET 环网传给末端装置的 MDM9, 末端装置的 MDM9 再通过 HDLC (物理介质为光纤) 传给 CI 和 BCU。

2) TXC → 中央装置 MDM8 → 末端装置 MDM8 → 末端装置 RXC

传输过程: TXC 采集司机台上的 DI 信号后, 通过 20 mA 电流环传给中央装置的 MDM8, 中央装置的 MDM8 通过 ARCNET 环网传给末端装置的 MDM8, 末端装置的 MDM8 通过 20 mA 电流环传给末端装置的 RXC, 末端装置的 RXC 再通过 DO 输出给 CI 和 BCU。由于 DO 通道的限制, 只输出牵引 A 挡和 B 挡, 制动 A 挡和 B 挡。如果 MDM8 发生故障, 控制指令将通过 RXC 传给对应的 CI 和 BCU, 但通过 RXC 传送的控制指令中牵引级位只有 A 与 B 两级, 这种情况下网络上其他数据的传输将不受影响。

3) TXC → RXC

传输过程: TXC 采集司机台上的 DI 信号后, 通过自诊断传输线 (帧协议为 HDLC, 介质为双绞线) 传

给末端装置的 RXC, 末端装置的 RXC 再通过 DO 输出给 CI 和 BCU。当采用 RXC 传输牵引/制动挡位信息时, 由于 DO 通道的限制, 只输出牵引 A 挡和 B 挡, 制动 A 挡和 B 挡。这时终端装置内的 RXC 将信任来自自诊断传输线的数据, 并将数据送给 CI 和 BCU。

2 软硬件控制平台设计

2.1 系统单板级冗余

CRH₂ 型动车组的网络系统对控制指令的采集和传输优先级是最高的, 所以其冗余也主要针对控制指令。对于控制指令的采集与控制指示灯的显示主要在中央装置内完成, 其冗余方式是采用插件级冗余。中央装置的 1 系和 2 系是 2 个相对独立的系统, 各自采用单独的电源进行供电, 1 系故障时 2 系自动接管 1 系的网络控制权。中央装置 1 系和 2 系内部各自插接有 1 块 TXC 插件, TXC 负责司控指令的采集及司控指示灯、单元指示灯等信号的输出。

对于同一司控指令, 1 系和 2 系 TXC 插件将同时进行采样。1 系正常时, 指令通过 TXC 处理后传送给 MDM8 插件, 再由 MDM8 插件通过环网发送到网络, 此时 2 系只监视环网上 1 系发出的数据; 当 1 系故障时 (2 系 50 ms 内检测不到 1 系发送的数据) 则 2 系接管网络, 2 系 TXC 采样的司控指令将被传送到环网上, 从而实现司控采样与网络传输路由的冗余。

另外, 对于关键的司控室状态指示灯, 也是通过 TXC 驱动的, 1 系和 2 系的 TXC 输出通道同时驱动同一个指示灯, 即使一组 TXC 发生故障指示灯状态也正常工作。

2.2 安全计算机技术

CRH₂ 型动车组网络系统在硬件设备设计上, 引入了故障导向安全技术。故障导向安全和冗余是 2 种不同的设计理念, 对于网络传输, 冗余是在系统发生故障时通过备份设备保证通信不受影响从而确保系统可靠性, 而故障导向安全则是在系统发生故障时主动中断通信, 从而保证数据传输的安全性。

MON 系统故障导向与安全方面的设计主要体现在 TXC 和 RXC 插件上。TXC 和 RXC 采用双 CPU 系统, 插件内部 CPU 分为 2 组, 其中一组作为工作组 (#1 组), 另外一组作为监视组 (#2 组), 所有数据发送的功能只能通过 #1 组执行, 而对于接收的数据 #1 组和 #2 组都将接收。

工作组和监视组都将独自采集司控指令, 并将采集的指令数据通过 2 个组之间的通信接口发送给对方, 2 组处理器内部不停地比较自身的数据和对方的数据, 并反馈计算结果和状态。只有 2 组数据完全一致, 且 #1 组处理器本身工作正常时才会将控制数据发送给 MDM8 和自诊断传输线, 以保证数据的安全。反之内部的安全电路 (Fail-safe circuit) 将不能正常工作,

从而将输出通信线切断以保证网络传输的安全。另外, TXC 内部的 IO 量都采用反逻辑, 以确保故障时的安全性。

3 电气联锁控制电路设计

3.1 运行安全联锁设计

动车组运行过程中, 必须保证在各种异常情况下不影响人身安全和设备的安全, 保证故障发生时能将损失限定在一定的范围之内。进行整车电气电路设计时, 充分考虑了运行安全联锁, 主要包括:

①列车分离时启动紧急制动和快速制动。列车分离时, 紧急制动电磁阀失效, 紧急制动和快速制动同时启动。

②总风管管压降低时启动紧急制动和快速制动。总风管气压低于设定值 (590 ± 10) kPa 时, 紧急电磁阀和快速制动电磁阀失磁, 在紧急制动发挥作用的同时, 快速制动得到制动指令。

③检测到制动力不足时启动紧急制动和快速制动。在检测到制动力不足时, 紧急电磁阀和快速电磁阀失效, 在紧急制动发挥作用的同时, 快速制动得到制动指令。

④自动过分相感应信号故障处理。发生过分相严重故障时, 网络故障报警, 提示驾驶员手动通过过分相; 预告信号故障时, 网络通过强迫信号启动自动过分相; 没有收到过分相进入信号时, 人工操作手动进入过分相; 没有收到过分相通过信号时, 人工操作恢复过分相之前状态。

⑤门控电路的安全控制。在关门状态下, 速度到达 30 km/h 以上时, 压紧电磁阀被励磁, 按压气缸把门压紧, 保持气密; 在开门状态下, 只有速度低于 5 km/h 时, 对应的开门安全继电器动作, 完成开门操作。

3.2 主电路保护联锁

车辆主电路设有变压器 1 次绕组保护、变压器保护、变压器 2 次绕组保护和变压器 3 次绕组保护, 通过保护功能与主电路的开关联锁, 保证故障时车辆主电路的安全。

主电路保护联锁的功能为: 在牵引变压器 1 次绕组、2 次绕组和 3 次绕组过流以及 2 次绕组和 3 次绕组接地时, 断开主断路器 VCB, 切断高压电网; 在牵引变压器 1 次绕组、2 次绕组和 3 次绕组过流时, 断开 VCB, 同时断开变流器的输入接触器和封锁变流器触发脉冲; VCB 变压油泵运行停止或油温上升时, 断开变流器的输入接触器, 同时封锁变流器触发脉冲。

3.3 牵引控制联锁

司机控制器负责牵引/制动指令的生成, 具体由车辆电气控制系统实现。司机控制器在每端司机室内各有 1 套。司机控制器由方向控制器、牵引控制器和司机制动控制器组成, 完成动车组主控选择、牵引方向、

牵引/制动控制指令设定^[4]。

主控制继电器 MCR 决定驾驶员的操作是否有效。通过车辆电气控制联锁电路, 驾驶员在头车驾驶时, 另一端的主控继电器 (MCR) 不能吸合, 该车所有操作均无效, 保证了动车组只能在一端的司机室驾驶。

通过电气控制电路, 确保在安全条件满足的前提下才能产生牵引指令。牵引指令输出的安全条件有:

①是在操作端 MCR; ②方向开关向前或向后; ③没有快速制动和紧急制动; ④侧拉门在关闭状态或关门联锁开关为 ON。另外, 牵引指令的生效还取决于制动指令, 一旦有来自制动手柄或 ATP 的制动指令, 都将使牵引指令无法生成。因此, 车辆制动系统比牵引系统有较高的优先级, 从而保证行车的安全^[5]。

4 试验验证规范

试验验证是保证系统安全可靠的重要手段。CRH₂ 型动车组控制系统试验分为 3 类: 软硬件试验、系统例行试验、系统功能试验。通过 3 类完整的试验, 系统功能的正确性、安全性、可靠性可得到充分验证。

软硬件试验主要包括特性试验、电源电压变动试验、高低温试验、干扰试验、振动试验、耐压试验、瞬时停电试验、连续通电试验等。

系统例行试验包括显示功能、控制功能、诊断功能试验等 3 类试验。控制功能试验主要有牵引/制动指令传输、救援连接时制动指令传输、运行控制指令备份传输的功能试验。诊断功能主要包括光传输诊断、设备传输诊断、DI/DO 诊断等功能试验。

系统功能试验的项点比例行试验要求更详尽全面, 系统功能试验包括显示功能、控制功能、里程计算、行驶状态显示、车辆状态显示、设备动作显示、服务

设备控制功能、设备间接口、数据记录功能、检修功能、诊断功能等 14 类试验。以控制功能为例, 除例行试验大纲中的 3 项试验项点外, 还有设备远程控制切除指令传输、三次电源切换、无电区通过控制等 11 项试验, 共计 14 项试验项点。

5 总结

CRH₂ 型动车组控制系统从网络传输系统、硬件控制平台、车辆电气控制系统 3 部分出发, 充分考虑了故障导向安全的设计宗旨, 为适应不同层面的安全性和可靠性要求, 采用了非常有针对性的冗余性、容错性策略, 使系统整体的安全性和可靠性得到了很大的增强, 其产品所表现出来的整体功能和性能, 在实际运用过程中也得到了客户的积极评价和认可。

参考文献:

- [1] 王奇. 轨道交通安全相关系统安全完整性的探讨 [J]. 机车电传动, 2015(2): 1-3.
- [2] 刘先恺. CRH₂ 型 200 km/h 动车组列车网络控制系统 [J]. 机车电传动, 2008(6): 1-4.
- [3] 霍芳, 刘群欣, 张森. CRH₂ 高速列车网络控制系统的创新研究与实现 [J]. 机车电传动, 2014(4): 21-23.
- [4] 张曙光. CRH₂ 型动车组 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2006.
- [5] 王芮. 基于 RVDSim 的动车组电路系统动态可视化仿真研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2016.

作者简介: 刘群欣 (1977—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事列车网络控制系统研发及科技创新管理工作。

(上接第 55 页)

- [5] 金亮亮. 基于故障树的航天器故障诊断专家系统研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- [6] YAO Q, WANG J, ZHANG G G. A fault diagnosis expert system based on aircraft parameters[C]//IEEE. 2015 12th Web Information System and Application Conference. Jinan: IEEE, 2015: 314-317.
- [7] 高松. 牵引供电系统故障的基于模型诊断方法研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [8] 胡笑翔. 智能变电站故障诊断软件设计 [D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [9] 高松, 刘志刚, 戴晨曦, 等. 牵引供电系统故障的基于模型诊断方法研究 [J]. 铁道学报, 2015, 37(9): 38-44.
- [10] 刘治翔, 谢春雪, 毛君, 等. 空心阴极真空电弧焊接的引弧机理及参数优化 [J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(3): 614-618.
- [11] 毛云龙, 高军伟, 张震, 等. 基于小波包和 AGA-LSSVM 模型的滚动轴承故障诊断 [J]. 测控技术, 2016, 35(12): 49-52.
- [12] 张芳芳, 张世荣, 程琴. 结合位移检测和 LSSVM 的电机故障诊

- 断 [J]. 河南科技大学学报 (自然科学版), 2018, 39(2): 11-16.
- [13] 钟小凤, 贺德强, 苗剑. 基于 PCA-LSSVM 的机车走行部滚动轴承故障诊断研究 [J]. 广西大学学报 (自然科学版), 2014, 39(2): 328-333.
- [14] 仇军, 王景成. 基于 PSO-LSSVM 的城市时用水量预测 [J]. 控制工程, 2014, 21(2): 232-236.
- [15] 刘双印, 徐龙琴, 李振波, 等. 基于 PCA-MCAFA-LSSVM 的养殖水质 pH 值预测模型 [J]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 239-246.
- [16] 仇军. 改进 PSO-LSSVM 方法在城市时用水量预测中的应用 [D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [17] 刘博, 万金泉, 黄明智, 等. 基于 PCA-LSSVM 的厌氧废水处理系统出水 VFA 在线预测模型 [J]. 环境科学学报, 2015, 35(6): 1768-1778.

作者简介: 张 雷 (1978—), 男, 硕士, 计算机科学与技术实验师, 主要研究方向为软件架构设计。