

基于MVB和TRDP的列车主控双网冗余设计与实现

周浩尚^{1,2}, 张立斌^{1,2}, 高照玲³

- (1. 中车大连电力牵引研发中心有限公司, 辽宁 大连 116052;
2. 动车组和机车牵引与控制国家重点实验室, 辽宁 大连 116052;
3. 大连东软信息学院 电子工程系, 辽宁 大连 116023)

摘 要: 针对目前列车通信网中, 一般以WTB、MVB作为主要通信方式的现状, 以某动力集中型动车组的研发设计作为依托, 研究基于MVB和以太网的主控单元列车总线控制方式, 在机车应用中增加控制单元双总线冗余切换功能, 增强了列车网络通信可靠性。运用考核表明, 采用该方案的通信网络运行状态良好, 具备较高的可靠性和实时性, 完全满足列车数据传输的要求。

关键词: 动力集中动车组; MVB; TRDP; CCU; 双网冗余

中图分类号: U266.2; TP393

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2018.04.101

Main Control Unit Dual Network Redundancy Design and Implementation Based on MVB and TRDP

ZHOU Haoshang^{1,2}, ZHANG Libin^{1,2}, GAO Zhaoling³

(1. CRRC Dalian R&D Co., Ltd., Dalian, Liaoning 116052, China;

2. State Key Laboratory for Traction and Control System of EMU and Locomotive, Dalian, Liaoning 116052, China;

3. Department of Electronic Engineering, Dalian Neusoft University of Information, Dalian, Liaoning 116023, China)

Abstract: In the train communication network, WTB and MVB were the main communication modes. Based on the research and development of a power centralized EMUs, the train bus control mode based on MVB and Ethernet was studied. The redundant switching function of the dual line of control unit was added to the locomotive application, which enhanced the reliability of train network. The application test showed that the communication network with this scheme has a good running state with high reliability and real time, and fully meets the requirements of the train data transmission.

Keywords: power concentrated EMUs; MVB; TRDP; CCU; dual network redundancy

0 引言

目前铁路用于客运运输的动车组产品结构相对单一, 仅适用于客运专线, 不适应于既有线路, 运营成本较高, 制约了铁路客运量的增长。而动力集中动车组将能弥补以上缺陷, 减少成本、增加运力、提高经营效益。

在研项目某型号动力集中动车组包括2种编组结

构: 短编组为1节动力车+7节拖车+1节控制车; 长编组为1节动力车+9~16节拖车+1节动力车。其中动力车以200 km/h客运电力机车技术平台为基础, 拖车以成熟的25T型客车技术平台为基础。动车组网络控制系统是动车组的神经系统和指挥、控制枢纽, 用其实现各个终端设备及子系统的信息数据传输、共享, 协调中央控制系统与各个终端设备及子系统的控制、监视与诊断任务, 汇总各个终端设备、子系统工作状态和故障诊断信息, 提供人机交互接口和各种信息、数据的显示, 完成整车级的控制、状态监视、故障诊断等工作。

收稿日期: 2017-06-23; 修回日期: 2018-04-09

基金项目: 中国铁路总公司科技研究开发计划重大课题(2016J002-C)

动力集中动车组列车网络控制系统的设计遵循以下原则: ①采用WTB、MVB控车, 同时在动力车和控制车内铺设以太网, 也可以根据需要采取以太网控车; ②实现列车控制和管理系统(Train Control and Management System, TCMS)互联互通, 不同厂商的动力车和控制车之间、动力车与动力车之间实现匹配(头车任意互换编组、互控), 相同或不同厂商的2列短编组列车实现任意方向的重联运营。

1 通信协议

多功能车辆总线(Multifunction Vehicle Bus, MVB)是列车通信网TCN的一部分, 也是一种串行数据通信总线, 主要用于(但不限于)互操作性和互换性要求的互连设备之间数据通信, 其数据传输速度是1.5 Mbit/s, 在IEC 61375-1—2014“铁路电子设备-列车通信网络(TCN)”的第3-1部分“多功能车辆总线(MVB)”中有详细介绍。其在实时性上可以保证控制通信, 但无法满足海量数据的通信, 当需要传输大量数据时, 将会导致总线阻塞和控制时间的延迟等问题^[1]。

以太网技术已经被广泛地应用于列车通信网络和车载终端设备, 主要是用于大数据量传输的系统, 如车载广播系统、视频系统、下载固件程序等, 可以减少系统更新时间, 提高工作效率。但由于以太网本身的链路层、协议栈的复杂性, 其可靠性、网络失效影响及Robust等都还在验证中, 故列车的主要控制系统还没有大批量采用以太网作为控制系统的主要通信方式。

国际标准化组织(IEC)推出了基于以太网的列车通信网络标准, 包括列车骨干以太网(Ethernet Train Backbone, ETB)(由IEC 61375-2-5定义)和编组以太网(Ethernet Consist Network, ECN, 由IEC 61375-3-4定义)。ETB界定了不同列车编组之间的互连接和互操作规范, 而ECN界定了在每个编组内各个终端设备构成的以太网的通信规范。2015年7月出台机车车辆使用的工业以太网标准IEC 61375-2-3(Edition1.0)^[2], 其定义ECN与ETB的4~7层都将使用专为铁路用途开发的自主协议列车实时数据协议(Train Real-time Data Protocol, TRDP), 并通过行业团体TCNOpen以开源的形式公开。

TRDP协议栈在以太网中所处位置如图1所示^[2]。

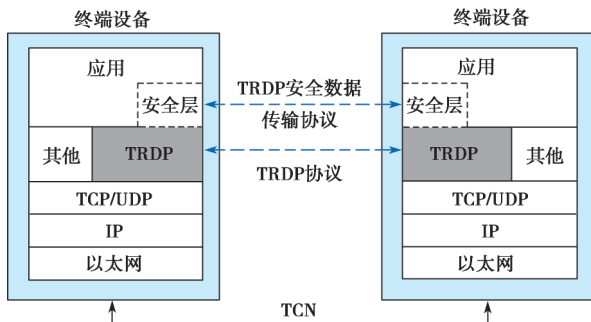


图1 TRDP在OSI网络结构中的位置

TRDP协议栈在应用系统中位置如图2所示。

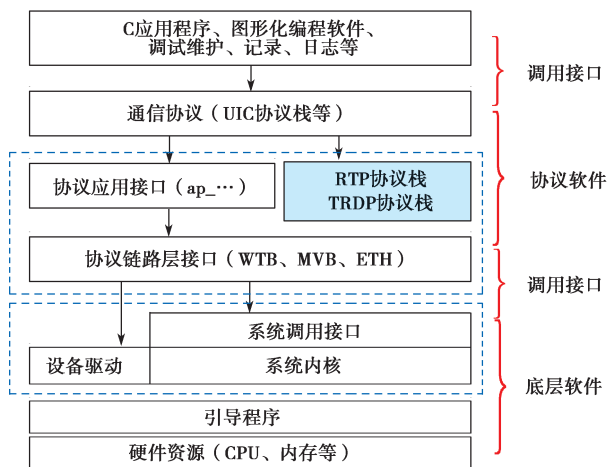


图2 TRDP协议栈在应用系统中位置

列车中央控制单元(Central Control Unit, CCU)是列车网络控制系统的一个核心部件, 负责整个车辆的网络管理和车辆运行控制功能。

系统硬件部分采用低功耗嵌入式PC/104结构的工业计算机104-1645CLDN-(24B)板卡, 集成了AMD LX800CPU、256 MB DDR、1个PC/104扩展接口、1个10/100 Mbps自适应网口、1个IDE接口、2个串口、USB 2.0接口等^[3]。

系统软件部分主要包括底层系统软件和应用层软件, 前者是后者的操作系统平台, 在本设计中采用基于x86硬件平台VxWorks操作系统, 进行软件IO映射管理、内存管理、任务调度, 通过运行相关任务的方式完成和上位机的通信、MVB数据的收发、PLC控制任务、在线监视、运行数据记录、故障记录、列车级速度控制、牵引制动控制等。

列车运行环境复杂多变, 在气压变化及温差变化较大加上风暴扬尘等情况下都要保证列车稳定运行, 因此除了对CCU加装更高等级防护外, 一般还进行冗余设计, 即每列车装备2台互为冗余的CCU, 其中一台处于热备状态, 实时检测主CCU状态, 确保在主CCU发生故障时, 从CCU能够全面接管主CCU的所有功能, 以保障列车的正常运行, 同时增加了系统的安全性和可靠性^[4-5]。

2 CCU和热备CCU之间的冗余切换方案

CCU冗余切换方案可由司机室显示单元(Driver Display Unit, DDU)选择切换策略, 方便车辆在试运行、测试单个设备等情况下使用。

当切换策略为0时, 采取仅MVB通信时CCU冗余切换方案。

当切换策略为1时, 采取仅以太网TRDP通信时CCU冗余切换方案, 目前仅在测试时使用。

当切换策略为2时, 即采取MVB和以太网双网通信, 其中以太网通信数据优先采用。

2.1 只采用 MVB 通信时 CCU 冗余切换方案

目前在轨列车多数采用以 MVB 作为列车内部通信的方案。

分别设置 2 台 CCU 面板上的拨码为 5 (CCU1) 和 9 (CCU2)，初始上电时 2 台 CCU 都定义为从设备，分别读取其对应的从配置文件，面板上“MVB 主”指示灯熄灭，CCU2 启动时间延长 5 s，待 CCU1 启动完成后再次启动，防止出现 2 台设备同时上电启动造成“抢主”的情况发生。CCU1 启动后接收 CCU2 的状态信号，如果此时 CCU2 还未启动，CCU1 接收不到 CCU2 的状态信号，那么 CCU1 由从设备升级作为应用主设备，点亮面板上“MVB 主”指示灯。CCU2 启动后接收 CCU1 的状态信号，发现 CCU1 已经为应用主，CCU2 继续为从设备，处于热备冗余状态。CCU1 和 CCU2 之间的通信采用独立的端口进行配置，在相应的配置文件中加以区分。

启动过程如图 3 所示。

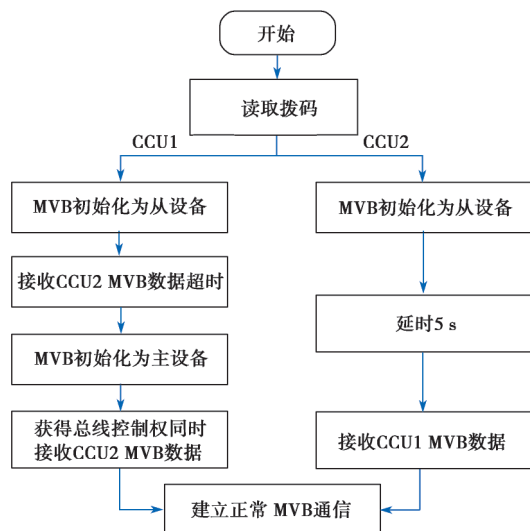


图 3 单 MVB 通信时 CCU 启动过程

当 CCU1 发生故障时（包括 MVB 线缆断开、松动等），CCU2 接收 CCU1 状态信号超时，认为 CCU1 发生故障，CCU2 重新载入其主配置文件，点亮面板上的“MVB 主”指示灯，之后接替 CCU1 的控制功能，CCU2 成为新的主设备，同时向 CCU1 发送自己为主设备的信号。该过程如图 4 所示。

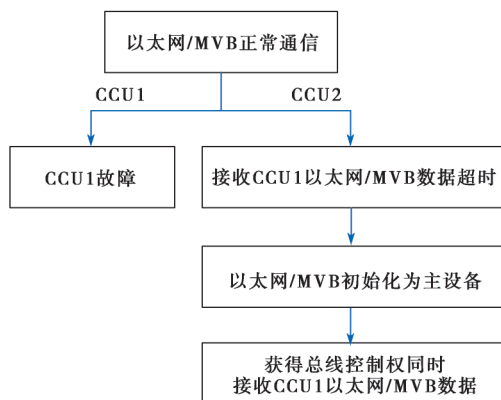


图 4 单网通信 CCU1 故障时的逻辑

当 CCU1 故障排除而恢复正常时（包括断电重启和复位），载入从配置文件，重新启动为从设备，接收 CCU2 的状态信号，发现 CCU2 此时为主设备，则 CCU1 主从状态不变化，一直为从设备，CCU2 一直为主设备。

当 CCU1 为主设备，CCU2 发生故障时，CCU1 主从状态不变，不发生冗余切换。当 CCU1 为主设备，CCU2 故障排除而恢复正常时，CCU2 的启动过程与其初始上电的启动过程一样，CCU1 主从状态仍然不变。

当由于 MVB 线缆松动或接触不良造成 CCU1 和 CCU2 同时为主，而某一时刻线缆恢复时，CCU1 本身为主设备，又接收到 CCU2 状态也为主设备，CCU2 也是同样的情况，会造成网络中有 2 个主设备，此时发生二者“抢主”的行为。解决策略：该种情况下 CCU1 自动降为从设备，交出总线控制权，熄灭面板上“MVB 主”指示灯，CCU2 主从状态不变。“抢主”过程如图 5 所示。

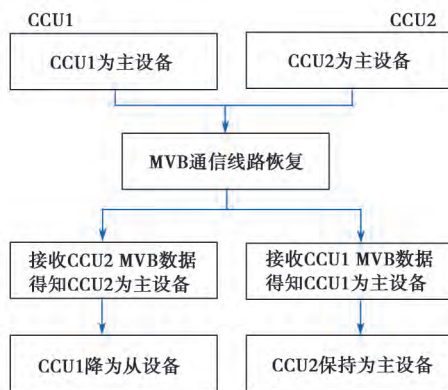


图 5 “抢主”逻辑

在 CCU1 和 CCU2 的冗余切换过程中，以太网和 MVB 总线的数据保持不变，在切换完成之前不再进行数据更新。来自总线数据的 DDU 数据保持不变，冗余切换后更新 DDU 数据，能够保证其数据和真实数据保持一致。

2.2 只采用以太网 TRDP 通信时 CCU 冗余切换方案

目前列车还未采用单以太网模式作为内部通信的情况，在此仅作为前期预研，在某型号动力集中动车组项目中测试其他子设备的以太网功能时应用。

该方案设计和只采用 MVB 通信时 CCU 冗余切换一致，只是 CCU1 和 CCU2 读取的配置文件为同一个，作为主设备时点亮对应的“ETH 主”灯，方便查看本 CCU 对总线的控制情况。

2.3 双网通信时 CCU 冗余切换方案

切换方案为：初始上电启动时，MVB 按照既有策略启动，等待 CCU1 的 MVB 通信建立完成后 CCU2 还未建立 MVB 通信，CCU1 继续启动以太网 TRDP 通信接收 CCU2 的状态信息，接收超时后判断 MVB 通信是否正常。此时 CCU2 还在 5 s 的延时中，未启动 MVB，则 CCU1 不能收到 CCU2 为主设备的信息，

认为总线中没有 MVB 主设备, 即 MVB 通信异常。CCU1 升级为 MVB 主设备, 点亮面板“MVB 主”指示灯。同理, 以太网也为主设备, 点亮面板“ETH 主”指示灯。此后 CCU1 通过 MVB 和以太网同时向 CCU2 发送自己为“主设备”状态。5 s 过后, CCU2 的 MVB 通信启动完成, 再启动以太网通信, 可以接收到 CCU1 的“主设备”逻辑状态, 认为 MVB 总线和以太网总线都有主设备, 通信正常, 不再升级为主设备。CCU 初始上电启动完毕。启动过程如图 6。

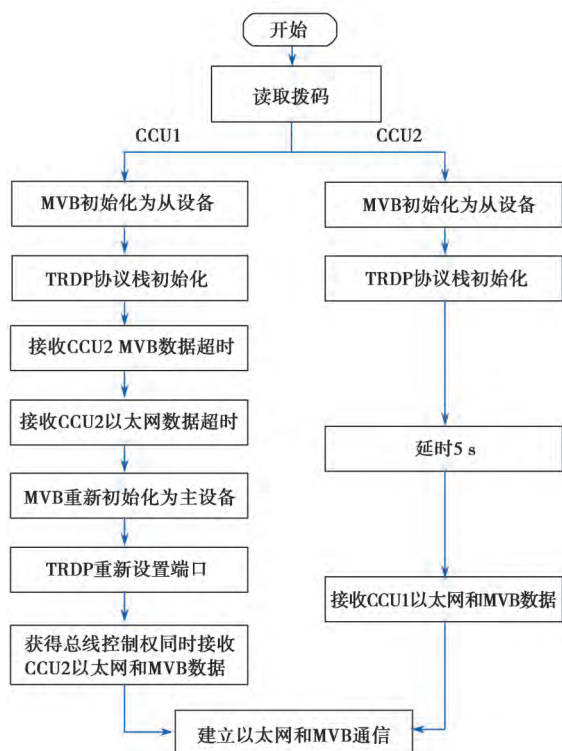


图6 双网通信时 CCU 启动过程

在正常运行过程中, 遇到 MVB 或以太网线断线或线缆松动时, CCU 判断是 MVB 通信异常还是以太网通信异常。若为二者之一, 则系统主从状态不变; 若二者皆通信异常, 则 CCU1 仍然保持不变, CCU2 升级为主设备; 若在某种情况下线缆恢复或 CCU1 重启时, CCU1 接收 CCU2 为主的设备状态后, CCU1 降为从状态 (线缆恢复) 或保持从状态 (CCU1 重启), 不升级为主设备, 逻辑如图 7。

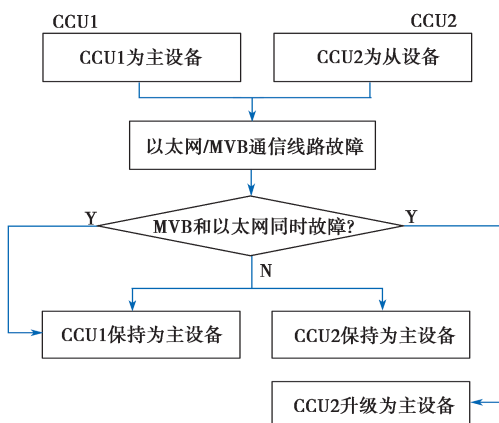


图7 双网通信 CCU1 故障时的逻辑

3 CCU 和终端设备之间的冗余切换方案

根据某型号动力集中动车组 TCMS 拓扑关系, 除了 LLJ、FSJ、PSU、LDP 只有以太网通信外, 其他设备都具有 MVB 和以太网双网通信能力。

固定编组以太网 (Ethernet Consist Network, ECN) 采用环形网络, CS 交换机连接在同一个环网内, 所有的终端设备与 CS 连接, 每个网络接口速率为 100 Mbps(100BASE-TX), 并且为全双工通信模式。终端设备需要使用以太网进行通信, 符合 IEC 61375-2-3 规范的 TRDP 协议, 采用端口 17224 和 17225, 其他应用层协议禁止使用这些端口。

该方案要求 CCU 和终端设备在 MVB 和以太网总线上同时发送相同的过程数据。接收设备 (不含 CCU) 从两种总线上接收数据后, 优先信任其中总线上所接收的数据 (类似于 MVB 线路中的 A、B 路), 这条总线成为信任总线, 另外一条总线称为监视总线。

数据接收端按照默认策略选择信任总线, 当满足以下条件时接收设备将交换信任总线和监视总线:

- ① MVB 为信任总线时, 当终端设备连续 8 个特征周期没有收到主控单元 CCU 的数据帧 (生命信号不变化), 切换到以太网作为信任线;
- ② 当以太网总线为信任总线时, 当终端设备连续 8 个特征周期没有收到主控单元 CCU 的数据帧 (生命信号不变化), 切换到 MVB 为信任总线;
- ③ 当默认优先信任线重新恢复正常时, 切换到优先信任总线。

CCU 接收线路选择判断: CCU 通过 DDU 设置默认信任总线并存储在 CCU 的配置文件中, 计算每一个设备状态线, $(00)_2$ 为 2 个通道都故障, $(01)_2$ 为以太网故障, $(10)_2$ 为 MVB 故障, $(11)_2$ 为 2 个通道都正常。

在 CCU 内部软件中计算每一个设备信任线, $(0)_{10}$ 为以太网, $(1)_{10}$ 为 MVB。

对应 CCU 中某个子设备, MVB 总线为设备信任线, 并且 CCU 连续 8 个周期没有收到该终端设备的数据帧时, 转换设备状态线和信任线。当以太网为设备信任线, 并且终端设备连续 8 个周期没有收到该终端设备的数据帧时, 转换设备状态线和信任线。

4 结语

该方案经过实验室调试、实际车上测试、上线试运行、在铁科院东郊环形轨道上测试及在成都铁路局所辖区域内试验, 并经过铁科院车辆所验证核实, 目前正在兰渝线、兰新线进行 20 万 km 运用考核, 该方案运行状态良好, 具备较高的可靠性和实时性, 完全满足列车数据传输的要求, 可作为向下一代电力机车全面采用以太网实时通信方案的过渡。

参考文献:

- [1] 刘悦宇. 基于 IEC 61375-2-5 的列车网络仿真及冗余切换软件设计与实现 [D]. 成都: 西南交通大学, 2014. (下转第 82 页)

从表 3 可以看到,中间电压异常案例个数所占比重较大,电机负载异常案例个数次之,控制异常案例个数最少。整体故障数据分布不均匀,存在故障点样本数据只有个位数的情况。将这 660 个逆变过流故障文件分别用基于数据驱动的方法及基于专家经验结合数据挖掘的方法进行诊断应用,结果如表 4 及表 5 所示。

从表 4 中可以看出,基于数据驱动故障诊断方法虽故障诊断准确率较高,但只能对前 4 类样本数据分布较多的故障点进行诊断,故障点覆盖率较低。

从表 5 中诊断结果可知,基于专家经验结合数据挖掘故障诊断方法能对前 10 类故障进行诊断,并保证了故障诊断准确率,且在样本量较少的情况下能取得良好的诊断效果。

通过表 4 与表 5 的比较,突出基于专家经验结合数据挖掘故障诊断方法既保证覆盖大部分逆变过流故障点,又保持较高的故障诊断准确率的优势。

表 4 数据驱动方法诊断结果

专家判断	数据驱动模型预测原因					诊断准确率
	模块故障	电容故障	速度信号异常	TCU 插件异常		
模块故障	● 74	○ 00	○ 01	○ 00		98.70%
电容故障	○ 04	● 12	○ 02	○ 00		66.70%
速度信号异常	○ 00	○ 00	● 65	○ 05		92.90%
TCU 插件异常	○ 00	○ 00	○ 02	● 12		86.70%
正负母排放电	-	-	-	-		-
电机大线断开	-	-	-	-		-
电机大线接反	-	-	-	-		-
电机本体故障	-	-	-	-		-
电机电流信号异常	-	-	-	-		-
中间电压信号异常	-	-	-	-		-
总计	故障点覆盖率 36.4%					诊断准确率 92.00%

表 5 专家经验结合数据挖掘方法诊断结果

专家判断	专家规则预测原因										诊断准确率
	模块故障	电容故障	速度信号异常	TCU 插件异常	正负母排放电	电机大线断开	电机大线接反	电机本体故障	电流信号异常	电压信号异常	
模块故障	● 291	○ 17	○ 15	○ 00	○ 15	○ 00	○ 00	○ 00	○ 00	○ 00	86.10%
电容故障	○ 03	● 15	○ 00	○ 00	○ 00	○ 00	○ 00	○ 00	○ 00	○ 00	83.30%
速度信号异常	○ 00	○ 00	● 159	○ 00	○ 00	○ 13	○ 15	○ 00	○ 00	○ 00	85.00%
TCU 插件异常	○ 04	○ 00	○ 09	● 63	○ 00	○ 00	○ 00	○ 00	○ 00	○ 00	82.90%
正负母排放电	○ 01	○ 00	○ 00	○ 00	● 12	○ 00	○ 00	○ 00	○ 00	○ 00	92.30%
电机大线断开	○ 00	○ 00	○ 00	○ 00	○ 00	● 02	○ 00	○ 00	○ 00	○ 00	100%
电机大线接反	○ 00	○ 00	○ 00	○ 00	○ 00	○ 00	● 03	○ 00	○ 00	○ 00	100%
电机本体故障	○ 00	○ 00	○ 00	○ 00	○ 00	○ 01	○ 02	● 13	○ 00	○ 00	81.30%
电机电流信号异常	○ 00	○ 00	○ 00	○ 00	○ 00	○ 00	○ 00	○ 00	● 04	○ 00	100%
中间电压信号异常	○ 00	○ 00	○ 00	○ 00	○ 00	○ 00	○ 00	○ 00	○ 00	● 04	100%
总计	故障点覆盖率 90.9%										诊断准确率 86.30%

4 结语

本文对神华十二轴货运干线电力机车逆变过流故障进行了诊断方法研究,运用了基于专家经验结合数据挖掘的方法,将研究内容与基于数据驱动的方法进行了现场故障数据比对验证,结果显示本文研究方法的故障诊断覆盖面广且诊断准确率较高,应用价值高。

参考文献:

[1] 戴鹏,蔡云,符晓.等.基于小波包变换和神经网络的逆变器故障诊断[J].电源技术应用,2011(8): 17-22.
[2] 樊京路,易韵岚.基于小波分析的光伏并网逆变器故障诊断[J].大功率变流技术,2014(5): 12-16.

[3] 崔博文,任章.基于傅里叶变换和神经网络的逆变器故障检测与诊断[J].电工技术学报,2006(7): 37-43.
[4] 罗铁军,徐培刚,丁培义,等.HXD1C 型电力机车逆变过流故障分析[J].机车电传动,2014(6): 104-110.
[5] 刘松柏,蒋新华,陈特放.电力机车主变流器故障智能诊断系统[J].机车电传动,2005(2): 57-62.
[6] 陈纯北,杨斌.HXD1C 型机车运用中主变流器故障成因分析[J].铁道机车车辆,2014,34(3): 103-107.
[7] 罗铁军,彭军华,彭江山.HXD1C 型电力机车速度信号故障分析[J].机车电传动,2014(4): 57-60.

作者简介: 罗建涛 (1972-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为牵引供电及信息化。

(上接第 77 页)

[2] Electronic railway equipment-Train communication network(TCN)-Part 2-3:TCN communication profile:IEC 61375-2-3 [S]. 2015.
[3] 任宝兵.城轨车辆中央控制单元设计[D].大连:大连理工大学,2014.
[4] 赵跃华,朱媛媛.基于故障树分析的软件安全性测试研究[J].计算机应用研究,2013,30(6): 1760-1763.

[5] 李伯成.嵌入式系统可靠性设计[M].北京:电子工业出版社,2006: 153-186.

作者简介: 周浩尚 (1984-), 男, 硕士, 主要从事嵌入式系统平台研发与应用。