

自动化列车通信网络分析仪设计

赵建博¹, 孙晓东¹, 胡国强², 王新政¹, 胡雪峰¹

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111;

2. 北京润科通用技术有限公司, 北京 海淀 100191)

摘要: 为了解决现阶段轨道车辆网络故障排查定位中的困难, 研发了自动化列车通信网络分析仪; 研究了自动化列车网络测试诊断的难点及应对手段, 设计了硬件各模块, 包括接口电路, 数据处理中心及电源模块等; 设计了软件各模块, 定义了软件层级及拓扑关系; 将自动化分析仪应用于高铁及地铁列车中, 检测网络的通信情况, 定位多功能车辆总线中的故障点; 分析绞线式列车总线的网络质量; 很好的弥补了多功能车辆总线的分布式网络结构及源寻址广播机制, 绞线式列车总线的长线路传输衰减等问题; 满足了列车网络定位的准确性, 时效性需求, 为整车功能调试奠定了坚实基础。

关键词: 自动化; MVB; WTB; 分析仪

Automatic Train Communication Network Analyzer Design

Zhao Jianbo¹, Sun Xiaodong¹, Hu Guoqiang², Wang Xinzhen¹, Hu Xuefeng¹

(1. Crrc Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111, China;

2. Beijing Runke Tongyong Technologies Co., Ltd., Beijing 100191, China)

Abstract: Aiming at solving the difficulties in train debugging, an automatic train communication network analyzer is researched. In the research, the difficulties and corresponding measures in automatic test and diagnosis are studied; hardware modules including interface, data processing center and power, etc are designed; software layers and topology are defined. The analyzer can monitor the status of communication, position the faulty points of Multifunction Vehicle Bus, and analyze the waveform quality of Wire Train Bus in high speed train and metro system. The analyzer compensates drawbacks of the distributed network structure and source addressing broadcast mechanism in Multifunction Vehicle Bus and the attenuation caused by long transmission path in Wire Train Bus. The analyzer fulfills the accuracy and timeliness requirements and lays a solid foundation for function test of the complete train.

Keywords: automatic; MVB; WTB; analyzer

0 引言

现阶段轨道车辆中, 列车通信网络普遍采用 TCN (Train Communication Network 列车通信网络) 网络通信^[1-2], 列车级网络采用 WTB (Wire Train Bus 绞线式列车总线) 通信^[3], 车辆级的通信则大都采用 MVB (Multi-function Vehicle Bus 多功能车辆总线)^[4]。在列车调试过程中, 需要首先要保证 WTB/MVB 通信正常, 才能进行整车功能的调试。

由于 MVB 的分布式网络结构^[5], 各组网设备分布于车辆内的不同设备、不同电气柜内, 甚至是不同车辆上, 并且不同系统的组网设备往往来自于不同的设备供应商, 这些都给网络调试及故障定位带来一定的难度。MVB 采用了源寻址广播的机制^[6], 组网的各网络设备一般不能获取总线上的全部数据, 而且无法获取物理层数据^[7], 这也制约了网络调试过程中故障的排查定位。

WTB 通信应用于车辆间的通信, 传输线路长, 中间连接点多, 总线物理波形衰减大, 编组后的 WTB 波形受连接

点及衰减影响大, 检测困难^[8]。

目前调试现场手段单一匮乏, 效率较低, 此外对现场人员的专业技术水平及调试经验要求较高。另一方面列车调试现场情况随机性大, 调试工序重要且时间紧迫^[9], 因此迫切需要一款自动化列车通信网络 (TCN) 分析仪。用来分析 MVB 网络的通信情况, 定位网络中可能存在的问题, 定位故障点; 分析 WTB 网络的通信情况、网络波形是否满足列车要求。

自动化 TCN 分析仪通过采集 MVB/WTB 总线波形及报文信息, 分析网络质量状态, 结合列车网络拓扑信息, 定位故障可能位置或范围。为列车检修人员定位故障提供参考信息, 提高了列车检修效率。

1 功能定义与应用场景分析

1.1 功能定义

根据列车网络的调试需求, 自动化 TCN 分析仪需要满足如下功能:

1) MVB 网络通信质量测试评估, 自动分析总线上某个设备/端口的通信状态, 自动分析 MVB 网络通信状态, 包括负载率、误码率等。

2) 自动获取总线上的设备/端口配置, 并与配置文件对比, 统计对应通信状态; 同时具备一定自学习能力, 对

收稿日期: 2019-02-10; 修回日期: 2019-03-18。

作者简介: 赵建博(1986-), 男, 山东金乡人, 高级工程师, 主要从事轨道交通电气调试技术方向的研究。

功能正常的动车组能够自动搜集配置文件主要信息、生成配置文件模板。

3) 通过主动寻址方式, 自动查找定位总线上可能存在的故障点, 针对 MVB 链路层、物理层数据进行分析, 详细定位通信异常位置。

4) 针对 MVB 网络进行故障类型、端口、设备的统计, 并形成报告。

5) WTB 网络具备一定的自动分析能力, 能够自动分析 WTB 网络通信状态, 包括负载率、误码率等; 自动获取总线上的节点配置。

6) 自动采集 WTB 网络各节点的物理波形; 自动分析各节点物理波形质量, 并与标准对比, 自动生成通信质量报告。

1.2 应用场景分析

自动化 TCN 分析仪 (以下简称自动分析仪) 的典型应用场景如下。

场景一: 列车调试环境下, 列车检修人员将自动分析仪接入 MVB 网络, 操作上位机扫描 MVB 总线设备及端口, 并实时显示总线设备及端口状态 (在线 or 离线), 一段时间后自动停止扫描, 生成设备及端口表, 表格数据可导出。

场景二: 列车调试环境下, 列车检修人员将自动分析仪接入 WTB 网络, 操作上位机扫描 WTB 总线节点, 并实时显示节点信息表, 一段时间后自动停止扫描, 生成总线节点列表, 表格数据可导出。

场景三: 列车调试环境下, 将列车拓扑信息表导入自动分析仪。列车检修人员将设备接入 MVB 网络, 操作上位机软件进入 MVB 监听统计模式, 启动分析, 一段时间后软件自动停止分析, 并输出 MVB 网络质量评估报告。

场景四: 列车调试环境下, 列车检修人员将自动分析仪接入 WTB 网络, 操作上位机软件进入 WTB 监听统计模式, 启动分析, 一段时间后软件自动停止分析, 并输出 WTB 网络质量评估报告。

场景五: 列车调试环境下, 将列车拓扑信息表导入自动分析仪。列车检修人员判断 MVB 网络存在通信异常, 将设备接入 MVB 网络, 操作上位机软件进入 MVB 检索分析模式, 软件提示操作人员断开 MVB 主设备, 启动分析, 一段时间后软件自动停止分析。软件结合拓扑信息表判断故障位置, 输出 MVB 各设备的通信质量报告。

2 设备接口及参数

2.1 接口电路

接口电路模块用于总线信号的采集/发送, 主要实现 MVB/WTB 网络的接入、物理信号的调理及匹配、信号隔离等功能, 接口电路包括如下。

1) WTB 接口: DB9 接口, 支持 AB 两路信号同时采集;

2) MVB 接口: DB9 接口, 支持 AB 两路信号同时采集及发送;

3) 接口电路: 符合 IEC61375 中 EMD 以及 WTB 介质接口要求;

4) 信号调理电路: 为匹配 AD 及 DA 芯片的电压范围, 对信号进行调理, 实现电平匹配;

5) 信号采集: 采用高速 AD 可同时采样 A、B 两路信号, 并将采样的信号传给 FPGA 进行数据分析和处理;

6) 信号收发: 完成 MVB 网络物理信号和数字信号之间转化。

2.2 电源参数

下位机具备三种供电方式: DC 110 V、AC 220 V 及锂电池供电, 当存在外部供电时, 优先选用外部供电方式。

表 1 直流电源单元技术参数

	参数	备注
输入电压/(DC · V)	70~120	
输出电压/(DC · V)	12	
额定功率/(W)	≥60	
绝缘电阻/(MΩ)	≥20	输入—输出
	≥20	输入—机壳
	≥20	输出—机壳
绝缘强度/(AC V)	1500	输入—输出, 1 分钟, 无异常
	1500	输入—机壳, 1 分钟, 无异常
	1500	输出—机壳, 1 分钟, 无异常
保护功能		过压、短路、过流

交流电源技术参数如表 2 所示。

表 2 交流电源单元技术参数

	参数	备注
输入电压/(AC V)	220	1±15%
输出电压/(DC V)	12	
额定功率/(W)	≥60	
绝缘电阻/(MΩ)	≥20	输入—输出
	≥20	输入—机壳
	≥20	输出—机壳
绝缘强度/(AC V)	1500	输入—输出, 1 分钟, 无异常
	1500	输入—机壳, 1 分钟, 无异常
	1500	输出—机壳, 1 分钟, 无异常
保护功能		过压、短路、过流

交流电源设置单独输入接口, 电源进线从市电取得; 直流电源设置单独输入接口, 电源进线从被测车辆取得; 设置保险丝和电源开关来保护电源模块。电源模块面板设置直流电源指示灯来显示电源状态。

锂电池容量支持 2 小时连续工作续航, 满足乘坐飞机携带需求。拥有电量检测及温度测量功能, 实时监测电池包内剩余电量及温度。

2.3 通信接口

通讯接口满足使用需求的无线路由器, 用于连接上位机。通讯模块包括 M12 工业以太网接口和 WIFI 无线接口。WIFI 无线接口支持串口透明传输, 符合 FCC 认证, 支持 IEEE 802.11b/g/n 协议, 支持 WEP64/128、WPA/WPA2 PSK 数据安全标准。通过 WIFI 无线接口与网络交互, 线路

上的数据延迟小于 100 ms。

2.4 其它参数

根据列车环境规范，硬件满足工作温度：-25~50℃，工作湿度：10%~95% RH，无凝露。设置 LED 指示灯，指示设备工作状态、总线通信状态等信息；内部存储的容量不少于 100 GB 固态硬盘；有一对标准 DB9 接口，用于连接 MVB 网络；一对标准 DB9 接口，用于连接 WTB 网络。

3 硬件设计

硬件电路的原理框图如图 1 所示。

3.1 FPGA

FPGA 用于完成总线数据的高速分析，包括：

- 1) 外围接口进行配置，控制接口状态；
- 2) 采集物理波形进行解码，得到总线传输数据报文；
- 3) 总线报文物理层、链路层及帧帧间隔异常进行判决；
- 4) 对发送报文进行编码，控制发送电路发送报文。

3.2 ARM 处理器

ARM 处理器搭载嵌入式处理系统，根据总线解码结果判断总线通信情况，完成上下位机通信，设备工作模式控制等功能。

3.3 DDR 内存模块

主控器具备两个 DDR3 内存，分别位于 PL 端和 PS 端。其中，PL 端 DDR3 用于缓冲 AD 采集的报文数据和波形数据，逻辑触发模块根据表达式内容读取并判断报文是否符合要求。PS 端 DDR3 用于嵌入式系统的程序运行，包括裸核和 Linux 系统的运行。

3.4 数据存储模块

数据存储需要考虑硬件同时兼容 SSD 存储方案和 eMMC 存储方案。

报文及波形数据存储在 SSD 中，SSD 建议采用 256GB 的存储容量。SSD 存储满时，可按照用户预先设置的两种模式：循环存储、停止存储之一进行后续数据的处理。循环存储，即最新数据覆盖最老数据；停止存储，即丢弃新的数据。

系统应用程序以及系统版本、配置数据存放在 EMMC 介质中。

3.5 网络通信

PS 端的网口用于与上位机通信，设备内部提供 RJ45 接口，连接至交换机，设备对外输出 RJ45 接口。

无线模块提供 4G、WIFI 功能，WIFI 同时支持 AP+STA 模式。

4 软件设计

软件包括上位机软件和分析仪嵌入式软件。

4.1 上位机软件

上位机软件使用 JAVA 编程语言实现，软件的层次结构见图 2，主要分为界面层、业务层、报文服务层和通信层。

界面层在 3 种分析模式显示的内容上有差异，但均由配置显示，过程显示，结果显示及设备状态显示构成。配置显示配置功能的用户接口，过程显示负责分析过程的内容和进度展示，结果显示主要负责分析结果和报告内容的展示，设备状态显示负责设备状态信息的用户接口。

业务层为上位机核心功能层，负责报文信息统计及端口节点发现、波形质量分析。业务层根据统计分析结果，结合网络拓扑信息，分析出网络总线通信质量以及各设备/节点通信质量，并以报告形式展示。

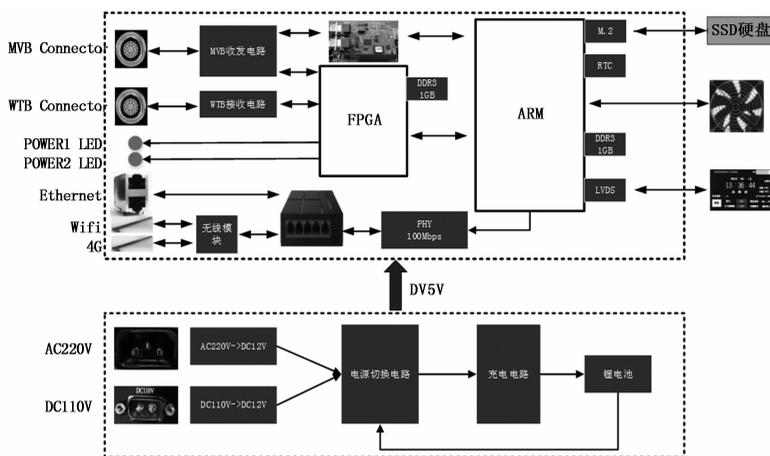


图 1 自动化 TCN 分析仪硬件原理框图

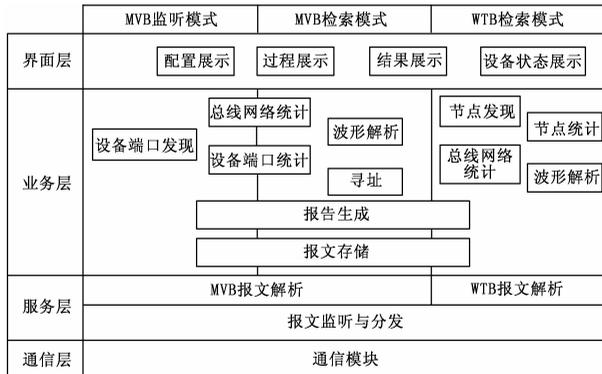


图 2 上位机软件结构

数据服务层接收数据、解析数据并将数据分发给业务层。

通信层和下位机建立链接，给下位机发送执行，接收报文数据和波形数据。

4.2 分析仪嵌入式软件

嵌入式软件设计包括 PL 端软件设计和 PS 端软件设计。PL 端软件实现总线波形采集，波形解码、报文链路异常判断、波形存储等工作。PS 端采用 OpenAMP 架构，其中 CPU0 运行 PetaLinux 操作系统，CPU1 运行单任务操作系统（即裸核操作系统），如图 3 所示。

CPU0 运行的 PetaLinux 操作系统分为内核空间及用户空间。内核空间包含了设备运行需要的基本驱动，用户空间实现设备业务逻辑控制。

用户空间的线程设计包括：

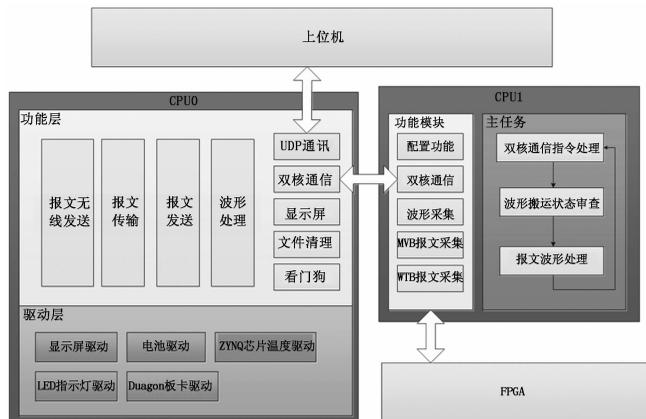


图 3 嵌入式软件结构

MVB 网络拓扑信息, 定位出故障所在位置信息以及可能故障原因。其中导入的 MVB 网络拓扑采用四级结构, 标注端口、设备、中继器、车厢之间的物理连接关系, 设备依据该物理关系定位故障位置信息。

分析仪提取的物理波形特征参数信息如表 3 所示, 分析仪软件支持指标健康参考值设置。

表 3 MVB 物理波形特征参数

指标	参数	参考值
过零点斜率	上升沿	[15, ∞]
	下降沿	[- 15, - ∞]
脉冲过冲电平	上升沿	[1.0V, 5.5V]
	下降沿	[- 5.5V, - 1.0V]
脉冲稳态电平	正电平	[0.5V, 5.0V]
	负电平	[- 5.0V, - 0.5V]
时钟抖动	—	[0%, 2%]
帧电平	高电平	[0.5V, 5.0V]
	中电平	[- 0.2V, 0.2V]
	低电平	[- 5.0V, - 0.5V]
帧尾电平	帧尾	[- 0.2V, 0.2V]
	帧尾 300ns	[- 0.1V, 0.1V]
帧能量值	—	—

故障定位处理流程如图 4 所示, 分析仪统计各设备及端口的误码率信息以及波形参数信息, 根据设置的健康标准判断设备故障状态; 网络中各设备故障状态分析完成以后, 根据设备故障数据, 结合导入网络拓扑信息, 判断网络中是否存在线缆故障。

当满足以下条件之一, 则认为该设备连接线缆存在故障:

- 1) 设备与分析仪挂载在一路中继器中, 设备位于分析仪与中继器之间, 从该设备开始至中继器间的所有设备, 均出现某路总线无从帧响应;
- 2) 设备与分析仪挂载在一路中继器中, 设备位于分析仪与终端电阻之间, 从该设备开始至终端电阻间的所有设备, 均出现某路总线无从帧响应;
- 3) 设备与分析仪挂载在不同中继器间, 从该设备开始至终端电阻间的所有设备, 均出现某路总线无从帧响应。

6 实车测试结果分析

自动分析仪的典型应用为高铁/地铁列车 MVB 网络通信质量评估, MVB 网络通信故障位置定位; 高铁/地铁列车 WTB 网络通信质量评估。

自动分析仪在某十六节车厢编组 WTB+MVB 组合网络控制的高铁实车测试中, 分别完成了正常通信车辆的 MVB/WTB 网络质量评估以及通信故障车辆的 MVB 故障定位测试。正常通信车辆的 MVB 网络监听测试结果如图 5、图 6 所示。图 5 给出了监听测试时总线分析结果, 图 6 给出了监听测试时网络异常设备信息。

在故障车辆测试中, 自动分析设备有效地分析了 MVB

1) 以太网通信线程:

- a) 同时支持 MVB/WTB 参数配置;
- b) 支持通过接收命令启动/停止 ADC 采集;
- c) 支持 MVB 报文发送控制;
- d) 设备状态查询返回接口;
- e) MVB/WTB 总线选择命令;
- f) 支持 MVB/WTB 综合分析仪上位机软件读取报文波形信息。

2) 波形存储:

- a) MVB/WTB 波形分别进行存储;
 - b) 支持 MVB/WTB 波形独立上报;
- ### 3) 报文接收传输线程:
- a) MVB/WTB 报文接收;
 - b) MVB/WTB 报文组包上报。
- ### 4) 状态显示:
- a) 显示当前采集环境 (MVB 或 WTB);
 - b) 电池或者芯片温度过高时, 设备自动关机;
 - c) 显示自动化 TCN 分析仪设备状态。

5) 双核通信:

- a) 设备配置参数传输;
 - b) 采集报文及波形传输;
 - c) 波形采集控制命令传输;
- ### 6) 程序主线程:

a) 主线程初始化时, 配置默认参数, 默认进入标准数据采集模式;

b) 配置参数中, 触发条件个数设置为 0, 设备仅使用强制触发功能;

c) 通信线程接收到上位机指令, 通知进入 TCN 网络分析模式;

CPU1 运行裸核操作系统, 配合 PL 端完成外围设备进行配置, 完成波形、报文采集及传输。

5 故障定位设计

列车 MVB 网络设备故障定位功能包括线路异常引起的故障定位以及单个设备故障定位。自动分析仪基于设备各端口的误码率统计结果以及波形分析结果, 结合导入的

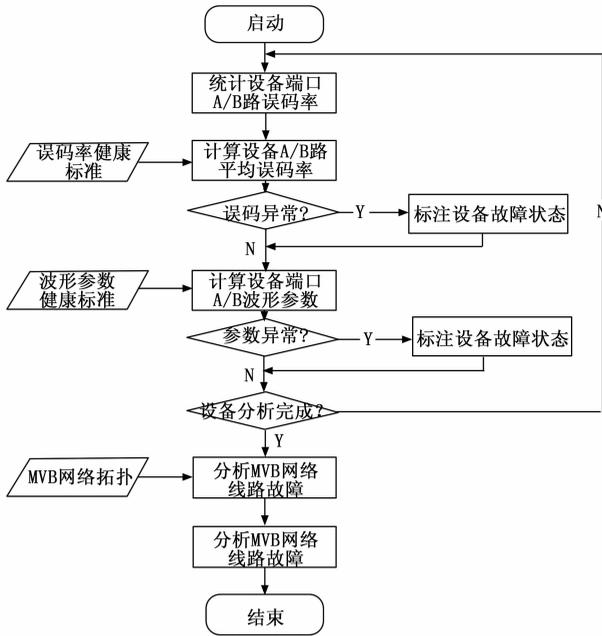


图 4 故障定位处理流程图

网络测试报告			
时间:	2019 02 21 15:10:32	测试时长:	81s
测试单元:		测试人员:	
MVB 总线测试			
	A 通道	B 通道	参考
平均负载率	32.0%	32.0%	50.0%
平均误码率	0.77%	0.77%	5.0%
响应设备个数	82 个	82 个	82 个
响应端口个数	438 个	438 个	267 个
MVB 设备端口测试			
导入设备及端口			
根据配置文件的内容, MVB 网络中应有设备 82 个, 应有端口 267 个。			
实测结果中, 响应设备 82 个, 响应端口 262 个。			

图 5 MVB 网络总线测试结果

问题汇总					
MVB 网络中有 9 个问题端口, 具体请见下表。					
序号	车厢	设备	端口	问题原因	
1	车厢 17	WNSD_17[00 19]	端口 472[01 D8]	A 通道: 帧电平均: -0.21(<0.2)	
2	车厢 15	HVAC_15[00 43]	端口 584[02 48]	A 通道: 误码率: 0.19(<0.05) B 通道: 误码率: 0.19(<0.05)	
3	车厢 15	HVAC_15[00 43]	端口 585[02 49]	A 通道: 误码率: 0.19(<0.05) B 通道: 误码率: 0.19(<0.05)	
4	-	-	端口 [04 B8]	A 通道: 误码率: 1.0(<0.05)	
5	-	-	端口 [0A E8]	B 通道: 误码率: 1.0(<0.05)	
6	-	-	端口 [0D 50]	A 通道: 帧电平均: -0.23(<0.2) B 通道: 误码率: 1.0(<0.05)	
7	-	-	端口 [0D 51]	A 通道: 误码率: 1.0(<0.05) B 通道: 误码率: 1.0(<0.05)	
8	-	-	端口 [0D 52]	A 通道: 误码率: 1.0(<0.05) B 通道: 误码率: 1.0(<0.05)	
9	-	-	端口 [0D 53]	A 通道: 误码率: 1.0(<0.05) B 通道: 误码率: 1.0(<0.05)	

图 6 MVB 监听测试问题汇总

网络的通信质量, 给出了故障位置信息, 并以图表的形式展示, 帮助列车调试人员快速定位网络故障, 提高了列车调试效率。实车调试检测出的列车设备状态如图 7 所示, 绿色为正常设备, 黄色为分析指标不合格设备, 红色为不响应设备。图 8 为故障信息的详细列表, 从表中可以看出, 设备准确定位出了故障的详细位置及故障原因。

7 结束语

针对现阶段轨道车辆中 MVB 和 WTB 通信网络测试和诊断困难, 及检测手段单一低效的现状, 研发了自动化

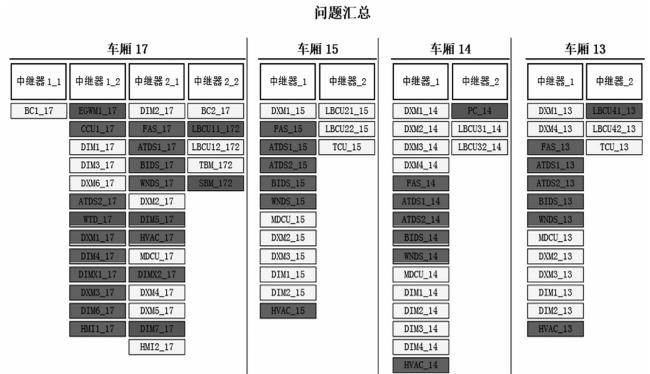


图 7 MVB 网络设备状态图

序号	车厢	设备	端口	问题原因
1	车厢 17	DXM1_17[00 0D]	-	A 通道: 断针
2	车厢 17	BCU_17[00 01]	端口 408[01 98]	A 通道: 误码率: 1.0(<0.05)
3	车厢 17	CCU_17[00 07]	-	A 通道: 没有响应 B 通道: 没有响应
4	车厢 17	DIM1_17[00 08]	端口 1828[07 24]	A 通道: 误码率: 0.0645(<0.05)
5	车厢 17	DIM1_17[00 08]	端口 1829[07 25]	A 通道: 没有响应
6	车厢 17	DIM3_17[00 09]	端口 1841[07 31]	A 通道: 误码率: 0.9224(<0.05)
7	车厢 17	DXM6_17[00 0A]	端口 1929[07 89]	A 通道: 没有响应 B 通道: 没有响应
8	车厢 17	DXM6_17[00 0A]	端口 1924[07 84]	A 通道: 误码率: 0.1382(<0.05)
9	车厢 17	DXM6_17[00 0A]	端口 1925[07 85]	A 通道: 没有响应 B 通道: 没有响应
10	车厢 17	ATDS2_17[00 0B]	-	A 通道: 没有响应 B 通道: 没有响应
11	车厢 17	DXM1_17[00 0D]	端口 1897[07 69]	B 通道: 没有响应
12	车厢 17	DXM3_17[00 10]	端口 1913[07 79]	B 通道: 没有响应
13	车厢 17	DIM2_17[00 15]	端口 2082[08 22]	A 通道: 没有响应 B 通道: 误码率: 0.1429(<0.05)

图 8 MVB 设备故障信息列表

TCN 分析仪。分析了自动化测试及诊断的难点及应对手段, 设计了硬件接口及各模块, 定义了硬件参数; 设计了软件并给出了交互界面。将分析仪应用到实车检测中, 分析了测试数据, 得出使用结论。未来将进一步将自动化 TCN 分析仪推广到更多轨道交通中去, 通过实际使用效果完善自动化 MVB 和 WTB 通信测试和诊断技术。

参考文献:

- [1] 王 威, 李长新. TCN 系统在地铁列车故障诊断中的应用 [J]. 电子世界, 2016, 63 (18): 87-88.
- [2] 白 龙. 列车通信网络 TCN 网的网关技术与实现 [D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [3] 孙梅玉, 于庆斌. 动车组网络控制系统及技术分析 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 28 (10): 105-107.
- [4] 李雪刚, 王 跃. MVB 在轨道车辆上的应用 [J]. 山东工业技术, 2019, 52 (1): 54.
- [5] 李 蔚, 陈特放. 基于通信网络机车分布式系统实时控制的分析与研究 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 67 (10): 2444-2447.
- [6] 杨子亮. 列车控制网络的实时性与可靠性研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [7] 康亚庆. 提高 MVB 网络信号传输可靠性的研究 [J]. 通信电源技术, 2018, 18 (4): 50-52.
- [8] 王树宾. 动车组列车通信网络及其可靠性设计 [J]. 铁道车辆, 2007 (10): 20-22.
- [9] 刘 波. 基于多功能车辆总线的列车网络关键技术的研究与应用 [D]. 长沙: 中南大学, 2005.
- [10] 米 磊. 单通道光纤旋转连接器的研究 [D]. 西安: 中国科学院研究生院 (西安光学精密机械研究所), 2010.