

## 基于工业以太网的动车组列车通信网络设计

任祥臣, 石磊

### Design of train communication network for EMU based on industrial Ethernet

REN Xiangchen and SHI Lei

引用本文:

任祥臣, 石磊. 基于工业以太网的动车组列车通信网络设计[J]. 铁路计算机应用, 2023, 32(8): 43-51.

REN Xiangchen, SHI Lei. Design of train communication network for EMU based on industrial Ethernet[J]. [Railway Computer Application](http://tljsjyy.xml-journal.net/2023/18/43), 2023, 32(8): 43-51.

在线阅读 View online: <http://tljsjyy.xml-journal.net/2023/18/43>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 地铁列车的实时通信网络研究

Real-time communication network of metro train

铁路计算机应用. 2019, 28(3): 65-69

#### 基于5G技术的动车组车载数据传输及监控系统研究

EMU on-board data transmission and monitoring system based on 5G technology

铁路计算机应用. 2021, 30(5): 23-25, 36

#### 基于无证书公钥密码的铁路通信网访问控制方案研究

Access control scheme of railway communication network based on certificateless public key cryptography

铁路计算机应用. 2020, 29(8): 48-51

#### 基于数据融合的动车组健康状态评估

EMU health status assessment based on data fusion

铁路计算机应用. 2017, 26(7): 15-20

#### 基于SVM智能预测的车地多网融合无线通信系统方案的研究与设计

Train-wayside multi-network integration wireless communication based on SVM intelligent prediction

铁路计算机应用. 2018, 27(8): 62-66

#### 动车组多源故障管理平台设计

Design of multi-source fault management platform for EMU

铁路计算机应用. 2021, 30(4): 36-39



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



# 基于工业以太网的动车组列车通信网络设计

任祥臣, 石磊

(中车长春轨道客车股份有限公司, 长春 130062)

**摘要:** 动车组列车通信网络 (TCN, Train Communication Network) 为动车组列车运行控制、多车重联控制、车辆维护及旅客服务等提供公用通信服务, 实现列车信息传输和共享。我国现有的动车组 TCN 采用基于 IEC 61375 标准的绞线式列车总线 (WTB, Wire Train Bus) + 多功能车辆总线 (MVB, Multifunction Vehicle Bus) 技术, 数据传输带宽有限, 且部分通信线路无冗余, 难以满足动车组技术升级过程中不断增长的列车数据传输需求。面向动车组 TCN 的各类数据传输要求, 研究将工业以太网技术应用于动车组列车通信网络, 利用工业以太网的特性和优势, 实现对既有动车组 TCN 技术的替代升级。测试结果表明, 采用该动车组列车通信网络, 动车组所有子系统设备的通信状态和通信质量测试结果均满足评定标准, 满足列车控制与管理要求, 系统运行稳定, 符合设计要求。该动车组列车通信网络已在复兴号系列动车组和上海、贵阳等城市的城际、城铁车辆上广泛应用, 传输速率高, 稳定性强, 设备维护便捷, 有助于快速提升轨道交通列车维修及旅客服务水平。

**关键词:** 动车组; 列车通信网络; 工业以太网; 替代升级; 全冗余设计; 数据传输隔离

**中图分类号:** U285 : TP39 **文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1005-8451.2023.08.08

## Design of train communication network for EMU based on industrial Ethernet

REN Xiangchen, SHI Lei

(CRRC Changchun Railway Vehicles Co. Ltd., Changchun 130062, China)

**Abstract:** Train Communication Network (TCN) provides public communications for EMU train operation control, multi-train coupling control, vehicle maintenance and passenger service, and realizes train information transmission and sharing. China's existing EMU TCN adopts the technology of WTB (Wire Train Bus) + MVB (Multifunction Vehicle Bus) based on IEC 61375 standard. It is difficult to meet the increasing demand for train data transmission in the process of technology upgrading due to limited data transmission bandwidth and lack of redundancy in part of communication lines. To deal with various data transmission requirements of EMU TCN, industrial Ethernet is applied to EMU's train communication network to replace and upgrade the existing EMU's TCN technology. The test results show that using the EMU Ethernet designed in this paper as the train communication network, the communication status and communication quality test results of all subsystems of the EMU can meet the evaluation standards, meet the train control and management requirements, and the system runs stably and meets the design requirements. The EMU Ethernet designed in this paper has been widely used in Fuxing series EMU and intercity and urban rail vehicles in Shanghai, Guiyang and other cities, with high data transmission rate, strong stability and convenient equipment maintenance, which is conducive to rapidly improving the levels of vehicle maintenance and passenger service of rail trains.

**Keywords:** Electric Multiple Unit(EMU); train communication network; industrial Ethernet; substitution and upgrade; fully redundant design; data transmission isolation

动车组列车通信网络 (TCN, Train Communication Network) 作为动车组关键技术之一<sup>[1-2]</sup>, 为动车组列

车运行控制、多车重联控制、远程数据传输、车辆设备工作状态监测与故障诊断、地面检修维护作业、司乘人员业务以及旅客服务等提供公用通信服务, 实现列车信息传输和共享。我国现有的动车组 TCN 采用基于 IEC 61375 标准的绞线式列车总线 (WTB,

收稿日期: 2023-05-20

基金项目: 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题 (P2019J007)

作者简介: 任祥臣, 高级工程师。

Wire Train Bus)+多功能车辆总线(MVB, Multifunction Vehicle Bus)技术<sup>[3-4]</sup>,主要是针对列车控制和管理系统(TCMS, Train Control and Management System)应用专项开发的,具有较高可靠性和实时性<sup>[5]</sup>,在过去较长一段时间内一直作为我国动车组TCN的主流技术。随着轨道交通列车技术的不断升级,对TCN传输数据量的需求不断提高,但MVB数据传输的最高比特率(带宽)仅为1.5 Mbps,无法满足列车设备远程维护、车载设备状态信息实时采集、故障诊断以及旅客信息服务等新应用的数据传输需求。

目前,工业以太网技术在工业自动化和过程控制领域发展迅速,以往制约工业以太网化应用受限的不足之处,如环境适用性、安全性、可靠性及实时性等,正在不断被攻克。工业以太网具有带宽高(最高比特率可达100 Mbps)、兼容性强、安装成本低等优点。

本文面向动车组TCN的传输要求,研究将工业以太网技术应用于动车组列车通信网络<sup>[6]</sup>,以期利用工业以太网的特性和优势,实现对既有动车组TCN

技术的替代升级,以满足不断增长的动车组列车通信需求。

## 1 既有动车组TCN存在问题分析

### 1.1 动车组TCN简介

既有的动车组TCN具有两级分层架构,由列车总线(采用WTB)和车辆总线(采用MVB)构成。动车组TCN主要为列车控制和管理系统(TCMS, Train Control and Management System)提供通信支持,实现动车组主要车载设备的管理、运行信息采集、运行状态的监视和故障诊断,保障列车安全、可靠运行,并为司机和机械师提供故障处理指南,为列车维护提供数据支持。此外,动车组TCN也为旅客信息系统(PIS, Passenger Information System)提供数据通信服务。

### 1.2 TCN网络拓扑

动车组一般为8辆编组,由2个牵引单元构成,动车组TCN按照牵引单元划分为2个网段;为提高可靠性,重要部件采用冗余设计。既有的动车组TCN的网络拓扑结构如图1所示。

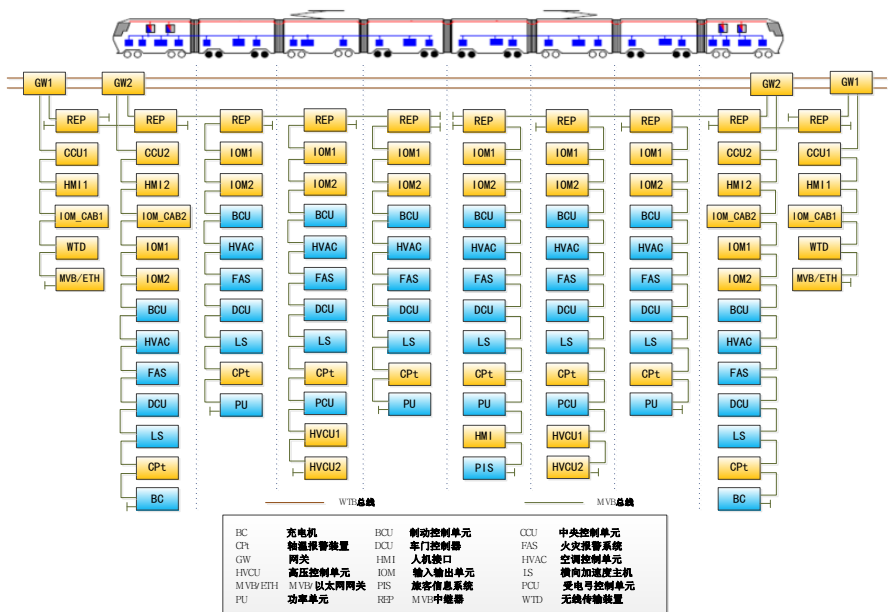


图1 既有动车组TCN网络拓扑结构示意图

(1) 每一牵引单元上设置2个互为冗余的中央控制单元(CCU, Central Control Unit),它们共同负责对本单元车辆的控制、监视和诊断。

(2) 每一牵引单元有冗余的WTB/MVB网关(集成在CCU中),负责2个牵引单元之间及重联时列车之间的数据交换。

(3) 每个司机台分别安装有2个显示屏,机械师室装有1个显示屏,用于显示列车状态、故障诊断信息。

(4) 2个头车上安装有无无线传输装置,用于记录状态和故障诊断数据,并完成数据远程传输。

(5) 每节车厢上安装有中继器(REP, Repeater)模块,具有信号再生和整形的功能,可将车辆总线分为若干网段,当某个网段故障时不会影响车辆总线其余部分的工作。

(6) 列车上的牵引控制单元、制动控制单元、门控单元、空调控制单元、受电弓控制单元等,通过MVB连接到列车网络。

### 1.3 传输带宽

WTB的传输介质采用2根互为冗余的双绞线,传输速率为1 Mbit/s,2个牵引单元之间通过WTB与冗余的网关连接,通过网关与本单元的MVB进行数据交换。

MVB的物理层采用2对冗余的双绞线总线结构,其传输速率为1.5 Mbit/s,通过总线连接器和输入输出模块,实现各子系统与CCU之间的数据通信。

### 1.4 存在的主要问题

在动车组运用过程中,现有的采用WTB+MVB的动车组TCN存在以下不足之处:

(1) 数据传输带宽有限:WTB传输速率为1 Mbit/s,MVB传输速率为1.5 Mbit/s;为了保证列车通信的稳定性和可靠性,目前只能利用动车组TCN传输涉及列车控制的信号和列车主要运行状态信号和运行信息,无法传输远程设备维护和故障诊断所需的大量设备状态数据。

(2) 部分通信线路无冗余:现有的动车组TCN仅对重要部件采取冗余设计,MVB通信线路未能实现冗余;列车各子系统与CCU之间通过MVB总线进行串连,并共用该线路进行数据传输。当遭遇网络风暴、网络异常攻击或MVB通信线路出现故障时,会造成列车车辆间通信中断,无法满足整列车通信的完整性需求;同时,当某个子系统设备出现故障时,会导致该设备及其连接的所有设备均与CCU失去通信,严重影响列车功能。

(3) 车载设备维护不便利:整列动车组不具备公用维护网络接口,在利用现有的动车组TCN进行车载各子系统设备维护或软件升级时,维护人员需要单独连接到各个子系统设备进行相关操作,导致动车组列车检修维护操作复杂繁琐、耗时长,维护成本高。

(4) 旅客服务功能不全面:由于MVB网络带宽有限,且信息传输实时性也较低,导致列车旅客服务系统功能实现受限,仅能提供基本运行信息显示及少量重要数据传输,无法根据实际需求实现多媒体播放、视频监控、故障联动等功能的集成,难以满足日益丰富的旅客服务信息传输需求。

## 2 基于工业以太网的动车组TCN设计

### 2.1 设计目标

(1) 在实现既有列车通信网络功能的前提下提高网络带宽:采用工业以太网替代现有的基于WTB+MVB的动车组TCN网络,满足目前TCMS和PIS全部通信要求;以工业以太网传输速率高达100 Mbps,能从根本上解决现有动车组TCN网络带宽受限的问题,充分满足列车大流量数据传输、故障传输、软件版本同步、能量信息传递、旅服信息传输等多种应用的信息传输需求。

(2) 实现通信线路全冗余设计:为提高列车整车通信可靠性,重要部件均采用冗余设计,冗余包括部件冗余和通信线路冗余<sup>[7]</sup>;各车载子系统的控制设备通过通信接口与车辆总线的连接,均采用冗余线路设计,当某个子系统的一个网络通道或网段中一个通道故障时,均不会影响该子系统及本车其它子系统的正常通信。

(3) 方便车载设备维护:设置车载设备公用维护网络接口,地面维护人员可使用专用软件直接与连接在动车组列车通信网络上的车载子系统进行通信,完成包括故障下载、软件升级、调试试验等车载设备维护任务,为动车组维护提供便利的技术条件。

(4) 完善旅客服务功能:通过旅客服务系统内部网络和列车通信网络的有效融合,将旅客服务所需的媒体资源、监控视频和故障联动信息等内容及



时、可靠地传输到动车组列车各服务终端、显示终端和记录单元，满足旅客对列车服务的多种信息需求。

2.2 网络拓扑

基于工业以太网的动车组 TCN（简称：动车组

以太网）采用两级网络架构<sup>[8]</sup>，分别为列车级以太网（ETB，Ethernet Train Backbone）和车辆级以太网（ECN，Ethernet Consist Network），其拓扑结构如图 2 所示。

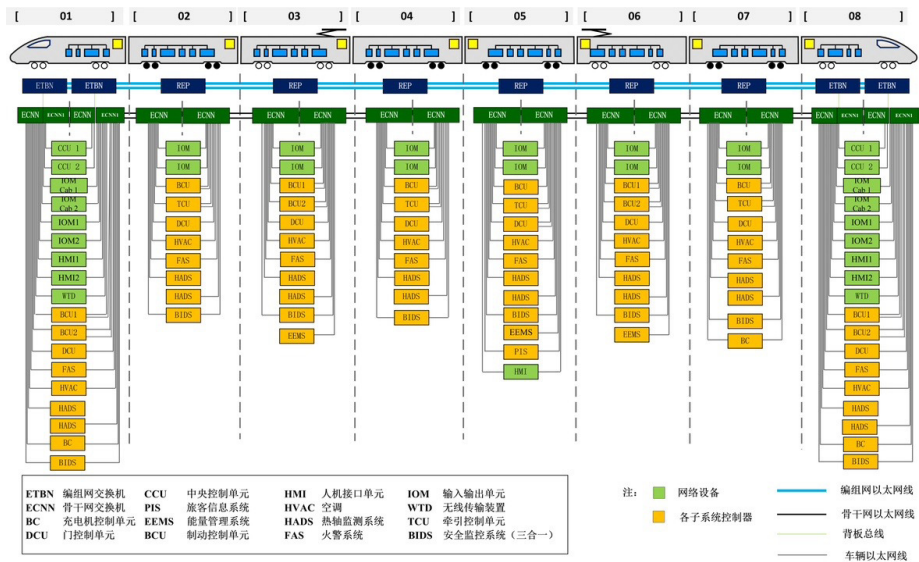


图2 基于工业以太网的动车组 TCN 拓扑结构示意图

（1）动车组头车安装有列车级以太网节点设备（ETBN，Ethernet Train Backbone Node），完成列车级网络初始化功能，包括建立列车通信链接、确认列车节点数量、完成列车网络配置等；满足列车运行控制的列车级数据传输要求，具备监视功能，并为列车重联提供数据传输通信接口。

（2）每节车厢安装有以太网交换机，用于车辆级以太网总线之间的连接，可以传输故障诊断、事件记录、设备状态和参数显示等数据；基于 IEEE 802.3（100BASE-TX）标准的全双工模式，传输速率为 100 Mbit/s。

（3）各类车载设备，包括中央控制单元（CCU，Central Control Unit）、输入输出模块（IOM，Input and Output Management）、人机接口显示屏（HMI，Human Machine Interface display screen）、无线传输装置（WTD，Wireless Transmission Device）均通过以太网总线连接至各车辆以太网交换机；其它具有以太网接口的子系统控制单元可通过以太网总线连接至各车辆以太网交换机，连接器符合 IEC 61076-2-101 标准。

（4）提供维护用专用网络接口，方便设备维护人员对连接在车载以太网上的车载子系统进行远程维护。

2.3 设计要求

（1）网络安全要求：动车组以太网优先保证满足列车实时控制的通信要求，划分为车辆内网与外部系统网络 2 部分，如图 3 所示；其中，车辆内网主要负责动车组车辆内部各设备之间的通信，连接在车辆内网上的所有设备无需具备复杂的加密、鉴权、访问记录、访问控制功能，简化动车组车辆内部各子系统间通信过程，确保列车控制功能的实时性；外部系统网络设备包括 WTD 和旅客信息系统（PIS，Passenger Information System）设备，实现与外部系统的物理隔离，并为外部系统提供接入列车以太网的通用通信接口。

（2）列车控制数据传输要求：列车控制数据按照 IEC 61375 标准中规定的以太网过程数据（PD，Process Data）进行传输，并采用 IEC 61375-2-3 标准中定义的 TRDP 协议数据报文格式，如表 1 所示。

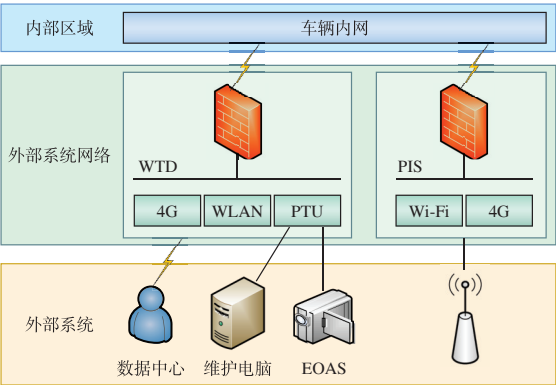


图3 车辆内网、外部系统网络及外部系统连接示意

表1 TRDP 协议数据报文格式

0 7	8 19	16 23	24 31
序号			
协议版本		消息类型	
通信数据标识号comid			
列车级网络拓扑计数			
列车级控制网络拓扑计数			
TRDP数据长度			
保留位			
回复通信数据标识号			
回复IP地址			
头部校验序列			
TRDP数据			

中央控制单元、车辆以太网交换机和各子系统设备均分配了专有的通信数据标识号 COMID。在发送数据时，各子系统设备需按照协议数据报文格式组织以太网过程数据，并通过通信板卡上的 2 个通信接口按照各通信接口的 IP 地址，将 TRDP 控制数

据包发送到以太网总线上；在接收数据时，各子系统设备通过通信板卡上的 2 个通信接口按照各通信接口的 IP 地址接收控制数据包，再由各设备 CPU 从 2 个数据包中选择使用的数据。为保证列车控制数据的有效性，车辆以太网交换机会监测各子系统设备的生命信号，当生命信号停止更新（2 s）或设备通信超时（即 5 倍特征周期内从 2 个通信接口都接收不到任何数据时）后，车辆以太网交换机判定此设备通信故障并上报给 CCU，CCU 不再采信此设备数据进行相关控制。为保证列车控制数据的准确性，各子系统设备的以太网过程数据中会在报文中规定本设备特有的头部校验序列，通过对数据包中的头部校验序列进行校验，确定接收到的数据是否为所需数据，防止调用错误数据。

（3）数据通道隔离要求：通过车辆以太网交换机接入的各子系统设备（即连接至以太网总线的各种车载设备，包括牵引、制动、车门等）需设置至少 2 个以太网通信接口，其中 1 个以太网通信接口只具备列车控制功能，另 1 个以太网通信接口具备列车控制和维护功能，如图 4 所示。当动车组以太网用于列车控制时，CCU 优先使用只具备控制功能的以太网通信接口来接收数据，由此实现列车控制与其它应用（车辆维护、旅客服务等）的数据传输隔离，从而提高列车控制网络的安全性、实时性和稳定性。

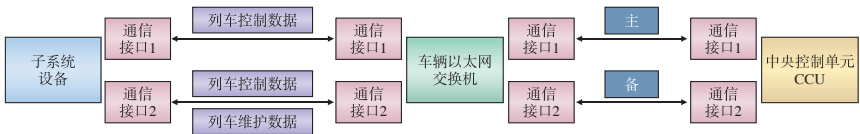


图4 车载子系统设备的以太网通信接口数据传输示意

（4）通信质量要求：动车组控制数据采用以太网组播通信的方式进行传输，各子系统应具备组播稳定通信能力；各子系统设备的以太网通信接口符合 IGMP v2 标准要求，响应通用组播查询报文，并回复组播加入报文；加入组播范围符合通信协议规定，禁止加入非协议定义组播；各子系统设备的以太网通信接口按协议规定的特征周期发送数据，最

大时延抖动符合系统要求（周期抖动小于±10 ms）；各子系统设备的以太网通信接口具备长时间（如 12 h 以上）通信能力。

（5）通信诊断要求：车辆以太网交换机根据实际物理线路接线状态，向 CCU 报告各子系统线路连接状态和信号通断状态，CCU 根据车辆以太网交换机报告的线路连接状态和信号通断状态，生成各子



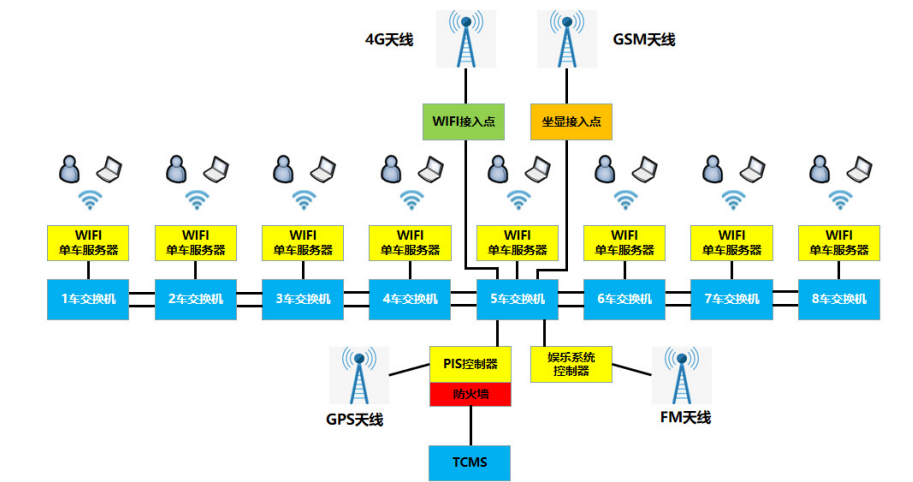


图6 动车组旅客服务网络构成示意

地回复组播加入报文；

（3）在动车组以太网先于子系统设备启动的情况下或子系统先于动车组以太网启动的情况下，验证组播通信能正常建立并进行双向通信（发送/接收）；

（4）反复多次（设置为10次）拔出-恢复子系统与动车组以太网之间的连线，验证线路连接恢复后能正常进行双向通信（发送/接收）；

（5）检验子系统发送的PD数据，数据内序号、协议版本字段和类型字段；

（6）检验相同COMID的PD数据，发送周期和时钟抖动。

3.2 通信质量测试

通信质量测试内容如表2所示。

表2 通信质量测试项目

序号	试验内容	评定标准
1	列车级网关拓扑稳定性	试验过程中，不应发生重新组网，即组网次数不改变。
2	列车级通信周期符合性	试验过程中，列车级协议comid=1001报文的周期负荷设计值，周期抖动小于10 ms，且不发生丢包。
3	网络及子系统车辆通信周期符合性及丢包率	设计周期不大于100 ms的comid，其报文的周期应符合设计值，周期抖动小于±10 ms，且丢包率小于0.2%。
4	车辆级带宽占用率	列车运营开始初次上电后，每个整点观测记录全网负载占用情况。试验记录设备从主CCU对应的ECN交换机端口的镜像端口接入。
5	以太网承载能力测试	CN侧分别注入10 M、30 M、50 M和80 M流量，监控各子系统状态。

3.3 测试结果

使用网络协议分析器（Wirshark）采集整列车以太网过程数据，并通过网络流量监控软件（NetFlow Analyzer），进行数据周期符合性及数据丢包率等以

网络性能分析。

（1）列车级通信周期符合性测试

COMID1001数据包测试结果如图7所示；COMID=1001数据包的实际周期基本符合设计要求的20 ms，平均周期为21.3 ms，方差均小于1.2 ms，其最大误差小于8 ms，没有出现周期抖动超过设计周期10 ms的数据包。

TTDP拓扑发现数据包测试结果如图8所示；TTDP拓扑发现的数据包其实际周期符合设计要求的100 ms，平均周期为99.998 ms，方差为小于0.6 ms，周期抖动均没有超过设计周期30%。

（2）子系统车辆级通信周期符合性及丢包率测试

端口通信周期符合性及丢包测试结果如图9所示；在测试中，子系统除个别数据包发生了大于10 ms的抖动，其余数据包抖动均较小，实际周期符合设计要求的30 ms，平均周期为30.0219 ms和29.9995 ms，方差分别为0.315 ms和0.271 ms，个别周期抖动超过设计周期10 ms的数据包，没有丢包发生。

（3）车辆级带宽占用率测试

车辆级带宽占用率测试结果如图10所示，带宽平均占用率为4.0956至4.1071 Mbps，方差为0.035 Mbps；从测试结果可以看出，车辆级带宽占用率稳定。

由列车级通信周期符合性测试、子系统车辆级通信周期符合性及丢包率测试、车辆级带宽占用率



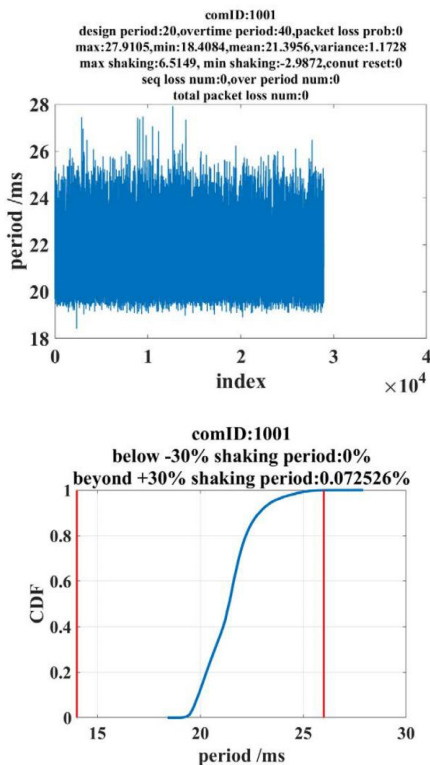


图7 1001 数据包周期复合性测试结果

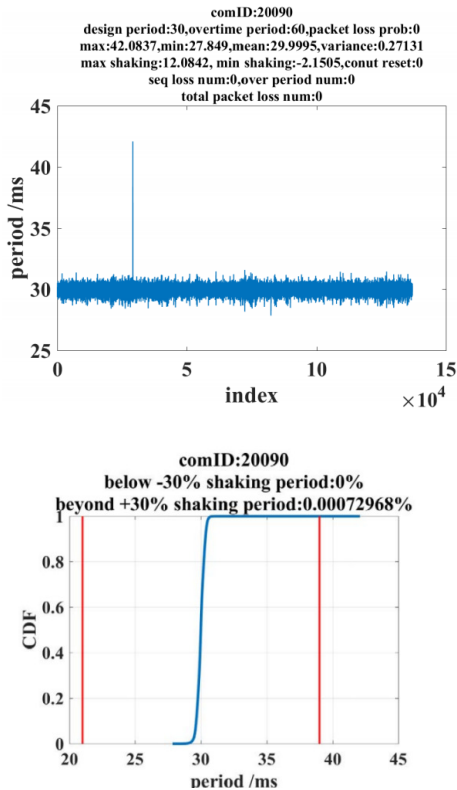


图9 端口通信周期符合性及丢包测试结果

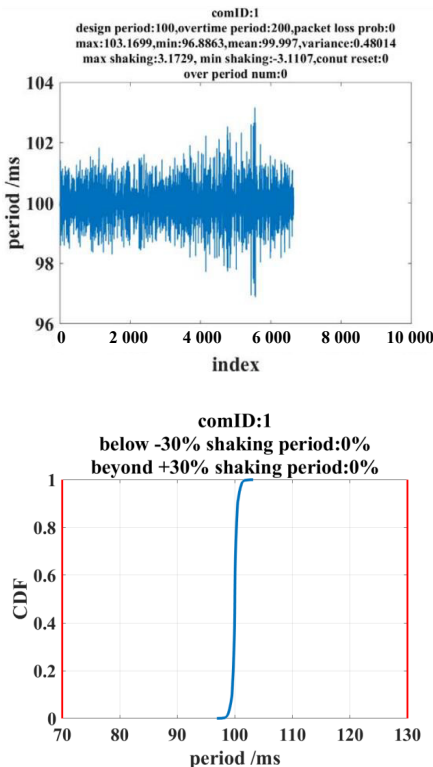


图8 TTDP 数据包周期复合性测试结果

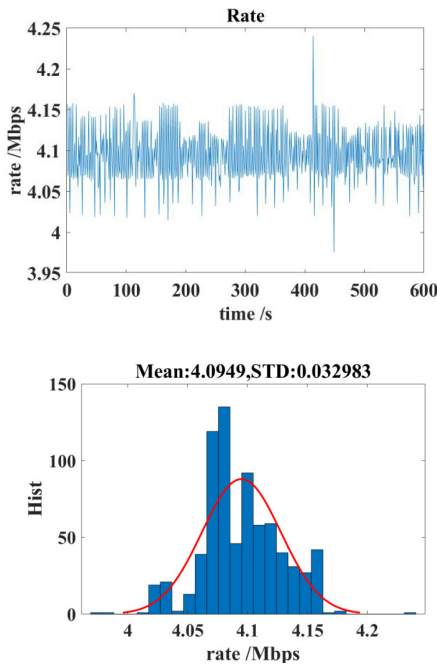


图10 车辆级数据包带宽占用率测试结果

4 结束语

测试结果可知：动车组列车所有子系统设备的通信状态和通信质量测试结果均满足评定标准，满足列车控制与管理要求，系统运行稳定，符合设计要求。

为解决既有基于 WTB+MVB 的动车组列车通信网络因带宽受限、无法满足动车组列车技术升级对

大流量数据传输需求的问题，采用工业以太网技术设计了动车组以太网，优先满足动车组 TCMS 实时通信需求，且线路采用全冗余设计，可避免因单点失效导致的通信线路故障；高带宽的动车组以太网提供了车载设备公用维护网络接口，构建起车地一体化的动车组维护网络系统，使动车维护人员和设备厂家能够方便地完成故障信息下载、车载软件升级、调试试验等车载设备维护任务，也为动车组 PIS 设备更新升级和旅客服务丰富完善提供了有利技术条件。本文设计的动车组以太网实现了对既有 WTB+MVB 列车通信网络的替代升级，经测试验证，采用数据通道冗余和隔离技术，显著提升动车组列车通信网络的可靠性，保证列车控制数据传输安全可靠。

目前，本文设计的动车组以太网已在复兴号系列动车组和上海、贵阳等城市的城际、城铁车辆上广泛应用，数据传输速率高，稳定性强，设备维护便捷，有助于快速提升动车组维修及旅客服务水平。后续将进一步研究把动车组现有 PIS、车门控制系统等内部单独组网的子系统全部改用工业以太网通信方式，将动车组车载网络全部统一升级为工业以太网，以降低车载设备维护复杂度。另一方面，针对动车组以太网需要承载旅客服务系统中媒体资源、

影音娱乐、监控视频等应用的大容量数据传输，考虑采用传输速率更高的 1000 Mbps 工业以太网产品来搭建动车组以太网，充分满足不断增长的旅客服务信息传输需求。

#### 参考文献

- [1] 高枫, 赵红卫, 黄志平, 等. 高速动车组列车网络控制系统自主化研制及应用 [J]. 铁路技术创新, 2015 (2): 77-82.
- [2] 常振臣, 李强. CRH380CL 高速列车网络控制系统 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2017, 40 (3): 1-5.
- [3] 常振臣, 牛得田, 王立德, 等. 列车通信网络研究现状及展望 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2005 (3): 5-7, 60.
- [4] 李洋涛. TCN 列车网络技术现状与发展 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2012, 12 (1): 4-7.
- [5] 韩霜. 列车网络控制系统软件可靠性分析及研究 [J]. 制造业自动化, 2017, 39 (4): 139-142.
- [6] 戚小莎, 王宏志, 王晓宇, 等. 基于以太网子网的列车性能研究 [J]. 长春工业大学学报, 2018, 39 (5): 475-479.
- [7] 潘林杰, 王朝, 黄崇玺. 列车车载以太网冗余技术的分析 [J]. 数字通信世界, 2017 (9): 58-59.
- [8] 赵航, 胡黄水, 戚小莎, 等. 列车以太网拓扑结构 [J]. 长春工业大学学报, 2018, 39 (5): 494-498.
- [9] 王翔, 吴士林, 吴学超. 高速列车以太网通信质量状态评估方法及试验研究 [J]. 铁道机车车辆, 2023, 43 (2): 105-109.

责任编辑 桑苑秋