

基于时间敏感网络的列车通信网络研究及应用^{*}齐玉玲¹ 黄 涛¹ 张军贤¹ 贾焱鑫^{2,3} 徐 龙^{2,3} 熊 伟²
朱海龙^{4,5} 彭开来⁵(1. 中车南京浦镇车辆有限公司, 210031, 南京; 2. 深圳市三旺通信股份有限公司, 518055, 深圳;
3. 上海三旺奇通信息科技有限公司, 201601, 上海; 4. 北京邮电大学信息与通信工程学院, 100876, 北京;
5. 网络通信与安全紫金山实验室, 211111, 南京)

摘 要 [目的] TCN(列车通信网络)拓扑结构复杂而且对传输实时性要求较高,目前列车数据传输主要采用 TRDP(列车实时数据协议)进行承载,但会存在网络时延不确定的问题,故研究采用 TSN(时间敏感网络)保证数据传输的有界时延,来解决 TCN 面临的以上问题。[方法] 提出了 TTAM(一种 TRDP 与 TSN 自适应的方法),以实现 TRDP 与 TSN 的协议转换,保证列车数据在网络中传输的时间确定性。[结果及结论] 通过搭建 TSN 测试台,对 TSN 网络功能及性能(IEEE 802.1 AS 与 IEEE 802.1 Qbv 协议)进行测试,验证了 TTAM 在 TSN 技术应用中的有效性。

关键词 列车通信网络; 时间敏感网络; 列车实时数据协议

中图分类号 U285.5

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.05.038

Research and Application of Train Communication Network Based on Time-sensitive Networking

QI Yuling¹, HUANG Tao¹, ZHANG Junxian¹, JIA Yanxin^{2,3}, XU Long^{2,3}, XIONG Wei², ZHU Hailong^{4,5}, PENG Kailai⁵

(1. CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., 210031, Nanjing, China; 2. Shenzhen Sanwang Communication Co., Ltd., 518055, Shenzhen, China; 3. Shanghai Sanwang Qitong Information Technology Co., Ltd., 201601, Shanghai, China; 4. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, 100876, Beijing, China; 5. Network Communication and Security Zijinshan Laboratory, 211111, Nanjing, China)

Abstract [Objective] TCN (train communication networks) has complex topologies and requires high real-time transmission capabilities. Currently, train data transmission mainly relies on TRDP (train real-time data protocol) for car-

riage, while there are issues of network latency uncertainty. TSN is thus adopted to ensure bounded latency for data transmission, addressing the aforementioned issues faced by TCN.

[Method] A method called TTAM (TRDP and TSN adaptive method) is proposed to achieve protocol conversion between TRDP and TSN, ensuring data transmission in the network.

[Result & Conclusion] Through the establishment of a TSN testbed, the functionality and performance of TSN networks (IEEE 802.1 AS and IEEE 802.1 Qbv) are tested, validating the effectiveness of TTAM in TSN technology application.

Key words train communication network; time-sensitive networking; train real-time data protocol

TCN(列车通信网络)是用于连接车载设备,实现信息共享、控制功能和监测诊断的数据通信系统^[1-2]。随着轨道交通行业的快速发展,列车通信网络逐步向基于车载以太网综合承载网络方向过渡,综合承载包括列车控制、乘客信息、火灾和辅助监测等系统的数据传输,其网络拓扑越来越复杂,传输的数据类型和数据量显著增多;同时各系统对列车网络的传输带宽的要求也越来越高。由于要优先保证列车控制网络等对高实时性系统的数据传输的要求,列车通信网络能够承载的数据量有限,带宽利用率低。

目前,列车控制网络主要采用 TRDP(列车实时数据协议)^[3]进行数据传输。该协议基于以太网实现列车数据的实时传输,由于其利用软实时的方法来提升网络的实时性和确定性,其冲突检测和故障重传等机制带来的延时和不确定性依旧没有解决^[4]。因此,目前迫切需要一种能够同时满足高实时性和大带宽需求的网络技术。

TSN(时间敏感网络)是由 IEEE 802.1 TSN 工

^{*} 上海市浦江人才计划项目(21PJ1422000)

工作组开发的一组数据链路层协议簇^[5-6],以以太网为基础的新一代网络标准,其具有时间同步、延时保证等确保实时性的功能,还可解决 TCN 面临的问题,因此被引入下一代 TCN 中,是未来 TCN 的发展趋势^[7]。

本文提出 TTAM(一种 TRDP 与 TSN 自适应的方法),以实现上层 TRDP 数据与数据链路层 TSN 数据的交互,且利用 TSN 技术保证列车控制网络数据传输的实时性和确定性,进而提高列车通信网络的带宽利用率。搭建了轨道交通场景下的 TSN 测试台,将 TTAM 集成在 TSN-GW(TSN 网关)设备上,对 TSN 网络功能和性能(IEEE 802.1 AS 与 IEEE 802.1 Qbv 协议)进行测试验证,证明 TTAM 的有效性。

1 TSN 介绍

TSN 是由 IEEE 802.1 协议 TSN 工作组开发的一组数据链路层协议簇^[5],其采用时钟同步、流量调度等机制,保证数据传输的有界时延、低时延与低丢包率^[7]。

1.1 数据帧结构

为了保持与标准以太网的兼容,TSN 基于 IEEE 802.1 Q 协议的 VLAN(虚拟局域网)构建。在标准以太网帧中插入 4B 的 VLAN Tag(虚拟局域网标签)来定义其特征。TSN 数据帧结构截图如图 1 所示。

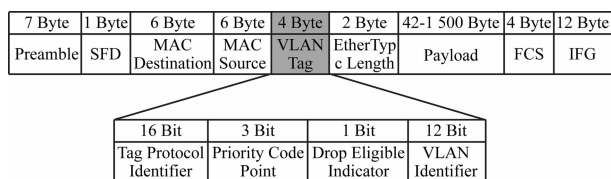


图 1 TSN 数据帧结构截图

Fig. 1 TSN data frame structure

TSN 数据帧包含:① 协议识别标签为 0X810,是加了 802.1 Q 协议标签的帧;② 优先级定义了 8 个类别,以优先级从高到低的方式进行数据传输,是实现业务低时延传输的重要参数;③ 丢弃标识为识别该帧是否可被丢弃;④ VLAN ID(虚拟局域网标识)为 VLAN 网络的识别号。

1.2 IEEE 802.1 AS 协议

IEEE 802.1 AS 协议时钟同步功能是 TSN 正常运行的基础^[7],其使用 GPTP(通用精确时间协议)来实现链路延迟计算与误差补偿,是由 IEEE

1588 标准改进而来。时钟同步是基于 PTP(精确时钟同步协议)进行划分,其中一个域中可以包含多个 PTP 节点。

时钟同步时,首先采用人工配置或 BMCA(最佳主时钟算法)动态选择 PTP 域的主时钟,然后主时钟通过向 PTP 节点周期性发送报文的方式计算链路延迟、时钟误差等,对从时钟时间进行修正,最后完成时钟同步^[8]。

1.3 IEEE 802.1 Qbv 协议

IEEE 802.1 Qbv 协议定义了 TAS(时间感知整形器)是用于实现数据的确定性传输^[9]。其采用类似时分多址的 GCL(技术门控制列表),给每个传输窗口分配不同的传输时隙,并在时间触发的窗口中调度高优先级流,与低优先级的流形成隔离^[10]。一般地,在设备出端口最多可以设置 8 个不同优先级的队列,每个队列设置不同的传输选择算法,通过 GCL 控制队列的开关。GCL 可以在时间维度上隔离其他类型流量对高优先级流的干扰,保障高优先级流(时间敏感流)的传输时效性。

2 TRDP 介绍

2.1 TRDP 报文结构

GB/T 28029.4—2020 标准定义的 TRDP 过程数据报文结构截图如图 2 所示。

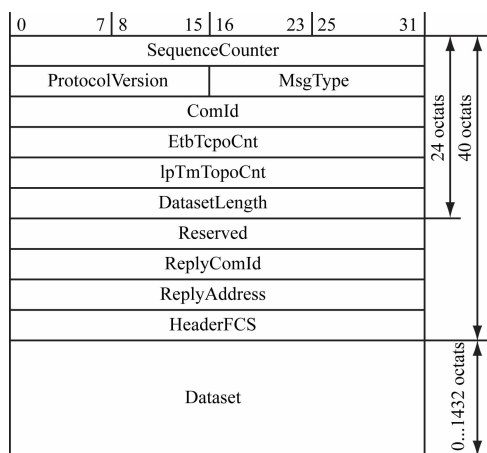


图 2 TRDP 报文结构截图

Fig. 2 TRDP packet structure

由图 2 可知:TRDP 报文从上往下包含:① 序号计数器,消息序号计数器,每发送 1 个报文,该值加 1;② 协议版本,报文的协议版本;③ 消息类型,包含 Pr、Pp、Pd 和 Pe 等 4 种类型;④ 通信端口号,通过 ComId 标识和设备的 IP 地址标识过程数据;⑤

列车静态拓扑序列,标识静态网络拓扑;⑥ 列车运行拓扑序列,设置运行状态的网络拓扑;⑦ 应用数据长度;⑧ 保留字段,用于后续扩展;⑨ 应答数据通信端口,负责已请求的 ComId;⑩ 应答数据通信 IP 地址,负责应答 IP 地址;⑪ 首部校验和(Header-FCS):过程数据报文首部校验和;⑫ 应用数据必须是 4 B 的整数倍^[3]。

2.2 TRDP 服务

为了保证列车网络数据的实时性与可靠性,基于标准以太网协议栈,在传输层与应用层之间添加了 TRDP 协议。

网络体系结构中各层会为它的上一层提供服务,服务提供者与服务用户间交互的信息称为服务原语。TRDP 层通过服务原语实现与应用层的交互,提供过程数据和消息数据通信服务。应用层只需要将要发送的数据和相关的发送参数传递给 TRDP 层。TRDP 层会负责将数据打包成特定的数据包格式,并通过网络发送给目标设备。

2.3 TRDP 与 TSN 融合的协议栈

在 OSI(开放式通信系统互联参考)模型中,各层相互独立,拥有独立的功能,层间通过接口提供服务。所以只需在 TRDP 协议栈^[11]的数据链路层添加 TSN 协议即可^[4],如图 3 所示。在该协议栈中,数据链路层使用 TSN 数据帧,而不是传统 TRDP 所使用的标准以太网。而 TSN 数据帧是基于标准以太网增加 4 B 标签的数据帧,无法被直接识别。所以,本文提出一种 TRDP 与 TSN 自适应的方法 TTAM,以实现 TRDP 协议与 TSN 协议的转换,进而利用 TSN 技术保证列车网络数据的实时可靠传输。

应用层	TRDP用户(应用程序)	
表示层	TRDP协议	TRDP
会话层		
传输层	TCP/IP协议	TCP/UDP
网络层		IP
数据链路层	TSN协议	IEEE 802.1 AS、IEEE 802.1 Qbv等功能
物理层	IEEE802.3物理层	

注:TCP/IP 协议—传输控制协议/网际协议;UDP—用户数据报协议。

图 3 TRDP 与 TSN 融合的协议栈

Fig. 3 Protocol stack of TRDP and TSN fusion

3 TTAM 介绍

在 TRDP 与 TSN 融合的协议栈中,列车控制消息发送时,需要将消息交给 TRDP 层,封装一个 TRDP 头,然后封装后的列车控制消息依次经过其余各层,递交给 TSN 网卡的驱动,直至物理层。在 TSN 网卡处理中,TTAM 会实现 TRDP 与 TSN 的数据转换,其转换过程包含数据帧单元和转发单元。TTAM 框架如图 4 所示。

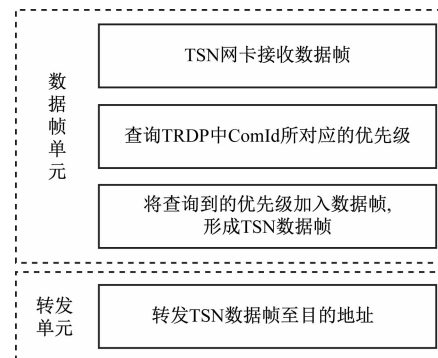


图 4 TTAM 框架

Fig. 4 TTAM framework

数据帧单元:TSN 网卡接收 TRDP 数据帧,首先提取 TRDP 头中的 ComId,然后从预先设置的 ComId 优先级配置文件中查询消息所对应的优先级,将查询到的优先级加入数据帧,最后形成 TSN 数据帧。优先级可根据现实情况进行优先转发,假设当列车终端发送通风控制消息与制动控制消息时,可根据实际情况设定对应的优先级,使制动的 ComId 优先级高于空调通风 ComId 的优先级,从而实现符合实际情况的数据转发,而不是传统的排队等待。

转发单元:通过转发设备根据 TSN 数据帧中的优先级和目的地址,实现 TSN 数据帧的转发。由于网络中存在多个终端设备以及交换机,TSN 交换机会根据数据帧中的优先级对需转发数据进行排序,然后将不同优先级的数据转发到不同队列,最后根据数据帧中的目的地址发往下一个目标 TSN 交换机。

传统的 TRDP 使用工业以太网,各通信终端基于自身板卡 CPU 的时钟源,替换为 TSN 后,TRDP 则从 TSN 获取时钟源;基于 TSN 的所有节点设备具有统一的时钟源,TRDP 的传输时延将变得精确。使用 IEEE 802.1 AS 协议可避免各终端使用自身板

卡 CPU 时钟源带来的通信周期错位,其通过计算网络的链路延迟与误差以实现整车的时钟同步。使用 IEEE 802.1 Qbv 协议可在时间维度上隔离其他类型流量对时间敏感流的干扰,以保障时间敏感流的传输时效性。

4 试验验证

本文在 TSN-GW 中实现 TTAM 方法的可行

性,并采用如图 5 所示的网络拓扑结构搭建轨道交通场景的 TSN 测试台。通过对测试台的网络性能以及 TSN 功能(IEEE 802.1 AS 与 IEEE 802.1 Qbv 协议)的验证来证明列车网络数据的实时传输,进而表明 TTAM 的有效性。

4.1 网络拓扑

网络拓扑结构中,ETBN(列车骨干网络节点)为 ETB(列车骨干网络)交换机,ECN(以太网编组

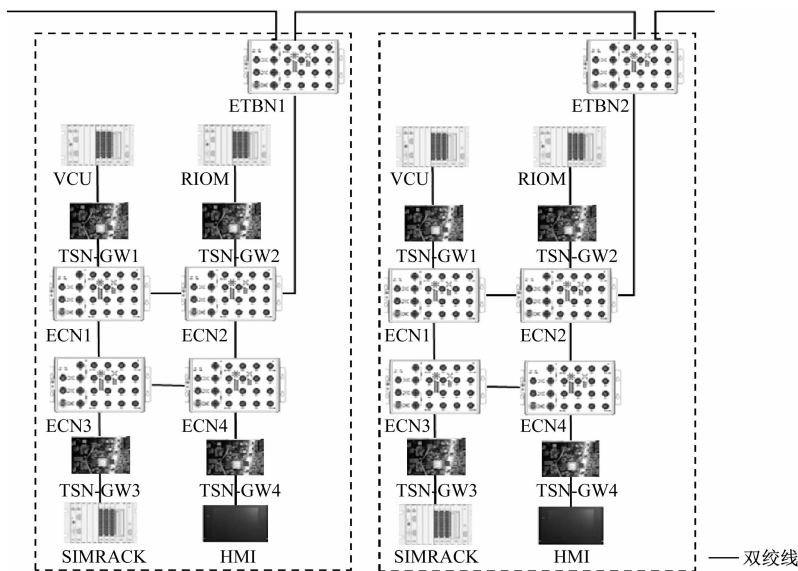


图 5 网络拓扑结构截图

Fig. 5 Screenshot of network topology structure

网)为 TSN 交换机,VCU(整车控制器)、RIOM(远端输入输出模块)为列车网络系统同类产品,SIMRACK 为仿真子系统。连接 ETBN1 与 ETBN2 的为 ETB 总线线缆,其余线缆为 ECN 内部线缆。TSN-GW 采用模块式架构,其可内置于 VCU、RIOM 等设备内。在测试时,TSN 网络测试仪可接入任意位置进行测试。

TSN 测试台包含 2 个机柜,单个机柜实物平台如图 6 所示。机柜中配置 ECN 交换机 4 台,TSN-GW 4 个,ETB 交换机、HMI(人机交互界面)、VCU、RIOM、SIMRACK 各 1 个,其中 1 台机柜连接 TSN 网络测试仪。

4.2 网络配置

VLAN 划分:使用手动配置的方式对网络进行 VLAN 划分,隔离广播域。具体地,将 ECNN、TSN-GW 与所对应的终端划分到 VLAN2 和 VLAN3 两个不同的 VLAN。将背景流划分至 VLAN5 连接至 ECN,可避免因为背景流太大,影响 TSN-GW 和所

对应终端的性能,保证数据传输。

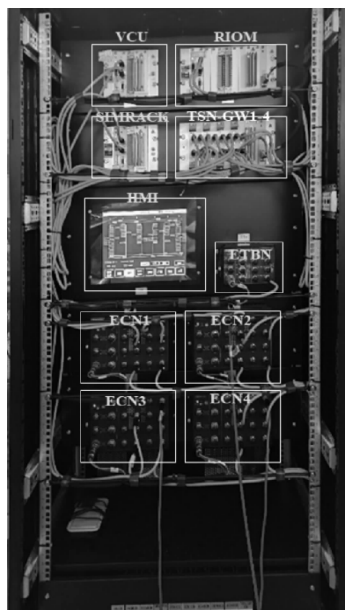


图 6 TSN 测试台的单个机柜实景图

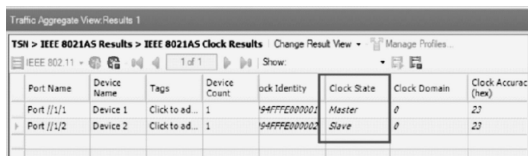
Fig. 6 Photo of TSN testbed single cabinet

PTP 端口配置:使用手动配置或网关软件界配置的方式,对 TSN 交换机的 PTP 端口配置。具体地,配置主从时钟的优先级分别为 1 和 250, sync 报文发送间隔为 -3,其余采用默认参数。

Qbv 端口配置:使用手动配置或网关软件界配置的方式,对 TSN 交换机 Qbv 端口配置。在全局配置模式下,配置 Cycle Time 为 10 ms, Base Time 为 1 s。在端口配置模式下,添加并配置 4 个队列(队列 0、队列 2、队列 3、队列 4)的队列状态和窗口时间,队列优先级起始范围为 0~7,其中每个队列的窗口时间为 2 ms。

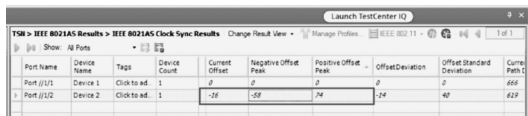
4.3 测试及验证

IEEE 802.1 AS 协议功能测试及验证:TSN 测试仪采用网络配置中 PTP 端口配置参数,然后观察主从时钟偏移量。IEEE 802.1 AS 协议功能验证结果截图如图 7 所示。由图 7 可知:其偏移量为 ns 级,表明该测试台中 AS 功能可正常运行。



Port Name	Device Name	Tags	Device Count	Lock Identity	Clock State	Clock Domain	Clock Accuracy (new)
Port //1/1	Device 1	Click to add...	1	54FFFFFF0000000000	Master	0	23
Port //1/2	Device 2	Click to add...	1	54FFFFFF0000000000	Slave	0	23

a) 截图 1



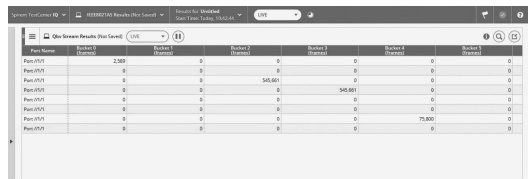
Port Name	Device Name	Tags	Device Count	Current Offset	Negative Offset Peak	Positive Offset Peak	Offset Deviation	Offset Standard Deviation	Curr. Path
Port //1/1	Device 1	Click to add...	1	0	0	0	0	0	650
Port //1/2	Device 2	Click to add...	1	-16	-59	74	74	47	612

b) 截图 2

图 7 IEEE 802.1 AS 协议功能验证结果截图

Fig. 7 Screenshot of IEEE 802.1 AS functionality verification results

IEEE 802.1 Qbv 功能测试及验证:TSN 测试仪采用网络配置中 Qbv 端口配置参数,观察测试仪收到报文情况。IEEE 802.1 Qbv 功能验证结果截图如图 8 所示。由图 8 可知:其只在对应门控中收到报文,这表明该网络 Qbv 功能配置正确。



Port Name	Device Name	Tags	Device Count	Current Offset	Negative Offset Peak	Positive Offset Peak	Offset Deviation	Offset Standard Deviation	Curr. Path
Port //1/1	Device 1	Click to add...	1	0	0	0	0	0	650
Port //1/2	Device 2	Click to add...	1	-16	-59	74	74	47	612

图 8 IEEE 802.1 Qbv 功能验证结果截图

Fig. 8 Screenshot of IEEE 802.1 Qbv functionality verification results

TSN 网络时延确定性测试:采用测试工具进行背景流的模拟,将 TSN 测试台中的 1 个机柜移除 TSN 功能,以 100 Mbit/s 的速率向 2 个机柜发送背景流,可发现,具有 TSN 功能的机柜仍可正常运行,而不具备 TSN 功能的机柜会宕机。这表明,TSN 测试台中的背景流不会影响时间敏感流的传输。

5 结语

本文提出的 TRDP 与 TSN 自适应的方法 TTAM,可实现 TRDP 协议与 TSN 协议的转换。通过搭建 TSN 测试台,对 TSN 的网络性能、功能(IEEE 802.1 AS 与 IEEE 802.1 Qbv 协议)进行测试,验证了 TTAM 方法在 TSN 技术应用中的有效性,并对 TSN 在 TCN 上的应用具有重要促进意义。随着 TSN 技术的逐渐成熟,该技术将是未来 TCN 的发展趋势。

参考文献

- [1] 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.
LI Yangtao. State and development of TCN train network technology[J]. Microcontrollers & Embedded Systems, 2012, 12(1): 4.
- [2] 周怡, 毛中亚. 基于 OPNET 仿真软件的列车通信网络研究[J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17(2): 42.
ZHOU Yi, MAO Zhongya. Train TCN and ARCNET communication networks based on OPNET[J]. Urban Mass Transit, 2014, 17(2): 42.
- [3] 张旭, 马可. 基于时间敏感网络的列车以太网通信技术研究[J]. 铁道机车车辆, 2022, 42(3): 93.
ZHANG Xu, MA Ke. Research on train network technology based on time-sensitive networking[J]. Railway Locomotive & Car, 2022, 42(3): 93.
- [4] 李宗辉, 杨思琪, 喻敬海, 等. 时间敏感网络中确定性传输技术综述[J]. 软件学报, 2022, 33(11): 4334.
LI Zonghui, YANG Siqi, YU Jinghai, et al. State-of-the-art survey on deterministic transmission technologies in time-sensitive networking[J]. Journal of Software, 2022, 33(11): 4334.
- [5] 王家兴, 杨思锦, 庄雷, 等. 时间敏感网络中多目标在线混合流量调度算法[J]. 计算机科学, 2023, 50(7): 286.
WANG Jiaxing, YANG Sijin, ZHUANG Lei, et al. Multi-objective online hybrid traffic scheduling algorithm in time-sensitive networks[J]. Computer Science, 2023, 50(7): 286.
- [6] 黄韬, 鲁京京, 朱海龙, 等. 车载时间敏感网络: 现状与展望[J]. 北京邮电大学学报, 2023, 46(6): 64.
HUANG Tao, LU Jingjing, ZHU Hailong, et al. Vehicle time sensitive networks: current status and prospects[J]. Journal of

- Beijing University of Posts and Telecommunications, 2023, 46(6): 64.
- [7] 韩文璇, 朱海龙, 何欣欣, 等. 一种结合入队整形的 TSN 流量调度算法[J]. 物联网学报, 2022, 6(4): 117.
- HAN Wenxuan, ZHU Hailong, HE Xinxin, et al. A TSN traffic scheduling algorithm combined with enqueue shaping[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2022, 6(4): 117.
- [8] 朱海龙, 严园园. TSN 网络中时钟同步可靠性提升方法[J]. 北京邮电大学学报, 2021, 44(2): 20.
- ZHU Hailong, YAN Yuanyuan. Measures of reliability improvement of clock synchronization in time sensitive networking[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021, 44(2): 20.
- [9] 张磊, 王盼盼. 时间敏感网络流量整形技术综述[J]. 微电子学与计算机, 2022, 39(1): 46.
- ZHANG Lei, WANG Panpan. Survey of traffic shaping and scheduling in time-sensitive network[J]. Microelectronics & Computer, 2022, 39(1): 46.
- [10] 张彤, 冯佳琦, 马延滢, 等. 时间敏感网络流量调度综述[J]. 计算机研究与发展, 2022, 59(4): 747.
- ZHANG Tong, FENG Jiaqi, MA Yanying, et al. Survey on traffic scheduling in time-sensitive networking[J]. Journal of Computer Research and Development, 2022, 59(4): 747.
- [11] 赵辰阳, 王立德, 简捷, 等. 基于列车实时数据协议的以太网高速通信技术[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(3): 85.
- ZHAO Chenyang, WANG Lide, JIAN Jie, et al. Research on Ethernet high-speed communication technology based on TRDP[J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(3): 85.
- 收稿日期:2023-11-02 修回日期:2023-12-30 出版日期:2024-05-10
Received:2023-11-02 Revised:2023-12-30 Published:2024-05-10
· 通信作者: 齐玉玲, 高级工程师, qiyuling_crrc@163.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 178 页)

参考文献

- [1] 中国城市轨道交通协会. 中国城市轨道交通智慧城轨发展纲要[J]. 城市轨道交通, 2020(4): 8.
- China Association of Metros. Outline of smart urban rail transit development in China[J]. China Metros, 2020(4): 8.
- [2] 李广斌. 城市轨道交通车辆与信号系统一体化设计研究[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(增刊2): 27.
- LI Guangbin. Research on integrated design of urban rail transit vehicle and signal system[J]. Urban Mass Transit, 2016, 19(S2): 27.
- [3] 邱宝光, 刘波, 赫宏联, 等. 现代有轨电车车辆与信号一体化研究[J]. 中国铁路, 2013(11): 76.
- QIU Baoguang, LIU Bo, HE Honglian, et al. Research on the integration of modern trams and signals[J]. Chinese Railways, 2013(11): 76.
- 收稿日期:2023-11-10 修回日期:2023-12-29 出版日期:2024-05-10
Received:2023-11-10 Revised:2023-12-29 Published:2024-05-10
· 通信作者: 林业, 高级工程师, y_lin2006@126.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

(上接第 183 页)

- HE Liqiang, YE Xinming. Design and implementation of conformance testing environment[J]. Computer Engineering, 2001, 27(8): 27.
- Received:2023-12-05 Revised:2024-01-05 Published:2024-05-10
- 第一作者: 吕红强, 正高级工程师, lhq_125@163.com
通信作者: 雷宇晴, 高级工程师, 279516691@qq.com
· ©《城市轨道交通研究》杂志社, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

欢迎投稿《城市轨道交通研究》

投稿网址: tougao. umt1998. com