

基于时间敏感网络的列车通信时间同步研究*

张军贤¹ 梁汝军¹ 黄涛¹ 张稳亿^{2,3} 徐龙^{2,3}
熊伟^{2,3} 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] 列车通信网络中 NTP(网络时间协议)的毫秒级精度,已日渐无法满足大流量和确定性传输的要求,同时现有研究局限于将 PTP(精确时钟同步协议)应用于列车通信场景,而缺乏列车通信网络中的时间敏感网络时间同步研究,因此有必要进行相关分析。[方法] 首先,结合列车通信网络中时间同步的研究现状,根据时间敏感网络同步协议分析了列车通信网络中的偏差和时延;其次,提出了时钟服务源故障和跳变情况下的冗余机制;最后,通过模拟时间同步过程,验证了冗余机制的效果。[结果及结论] 时间敏感网络能较好地适用于列车通信网络中时钟服务源的时间同步,且其冗余机制能较好地避免时钟服务源的故障和跳变带来的同步误差。

关键词 列车通信网络; 时间敏感网络; 时间同步

中图分类号 U231.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.05.011

Research on Time Synchronization of Train Communication Based on Time-sensitive Networking

ZHANG Junxian¹, LIANG Rujun¹, HUANG Tao¹, ZHANG Wenyi^{2,3}, XU Long^{2,3}, XIONG Wei^{2,3}, ZHU Hailong^{4,5}, PENG Kailai⁵

(1. CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., 210031, Nanjing, China; 2. 3onedata Co., Ltd., 518055, Shenzhen, China; 3. 3onedata Qitong Co., Ltd., 201601, Shanghai, China; 4. Beijing University of Posts and Telecommunications, 100876, Beijing, China; 5. Purple Mountain Laboratories, 211111, Nanjing, China)

Abstract [Objective] The millisecond-level precision of NTP (network time protocol) in train communication networks has increasingly failed to meet the requirements of high traffic and deterministic transmission. Meanwhile, existing research is limited to applying the PTP (precision time protocol) to train

communication scenarios, lacking research on time synchronization in time-sensitive networks within train communication networks. Therefore, it is necessary to conduct relevant analysis. [Method] Firstly, based on the current research status of time synchronization in train communication networks, the deviation and delay in train communication networks are analyzed according to time-sensitive network synchronization protocols. Secondly, redundancy mechanism for clock service source failures and jumps are proposed. Finally, the effectiveness of the redundancy mechanism is verified through simulation of the time synchronization process. [Result & Conclusion] Time-sensitive networks are well suited for time synchronization of clock service sources in train communication networks, and their redundancy mechanisms effectively mitigate synchronization errors caused by clock service source failures and jumps.

Key words train communication network; time-sensitive networking; time synchronization

TCN(列车通信网络)是轨道交通行业中列车分布式网络控制系统,其负责列车控制、信息传输、检测和诊断^[1]。根据 IEC 61375-2 和 IEC 61375-3 标准,TCN 由列车级网络和车辆级网络组成,列车级网络即骨干网,其包括 WTB(绞线式列车总线)、ETB(以太网列车骨干网);车辆级网络即编组网,其包括 MVB(多功能车辆总线)、ECN(以太网编组网)等。根据 TCN 中网络技术类型的不同,可分为总线型网络和交换型网络^[2]。总线型网络由 WTB 和 MVB 组成,其采用 RTP(实时传输协议),拓扑结构简单,连接着列车的控制系统,但带宽较低且故障诊断较为困难^[3];交换型网络由 ETB 和 ECN 组成,其采用 TRDP(列车实时数据协议),弥补了带宽和传输速率方面的不足,提高了网络数据传输的可

* 国家自然科学基金项目(62003086);上海浦江项目(21PJ1422000)

靠性,但数据传输时间不精准且不确定^[4]。

此外,列车控制系统中服务类、安全类、数据类和控制类的信息,分布在诸如 TCMS(列车控制与管理系统)、PIS(乘客信息系统)、TCU(牵引控制单元)、BCU(制动控制单元)等不同的子系统单元中。由于以太网数据传输的不确定性,PIS 等大带宽的多媒体流数据可能会对 TCMS 等列车控制数据产生影响。目前的列车多网融合通信系统多采用百兆以太网和千兆以太网网络并行的方式进行,或者采用多台交换机从物理层上将子系统隔离开,故会增加系统的复杂度^[5]。

TSN(时间敏感网络)标准是一簇针对以太网链路层的 IEEE 802.1 标准,其不仅可以进行确定性传输,还能避免大带宽流数据对重要数据传输的影响。其中,IEEE 802.1AS 标准能满足列车通信网络中数据传输时间同步的要求,IEEE 802.1Qbv 标准的流量调度和 IEEE 802.1Qch 标准的周期队列转发支持列车通信网络中确定性时延传输,IEEE 802.1Qbr 标准中的帧抢占保障重要信息流的实时传输,IEEE 802.1Qcc 标准中的带宽预留可进行时间敏感网络的集中管理配置^[6-7]。

针对列车 TSN 包括基于同步、流量整形、流量调度等的基础技术研究^[8-10],以及网络通信拓扑、终端设计、城市轨道交通环境应用等方面的技术研究,本文提出了列车通信网络中的时间同步方案:首先,介绍了 TCN 和 TSN 之间的联系;其次,阐述了列车通信网络时间同步的研究现状和不足,并介绍了列车中所使用的时间同步协议;再次,分析了列车中时间同步的过程,以及时钟服务源故障和跳变情况下的冗余机制;最后,通过试验验证并得出总结。

1 列车时间同步技术研究现状

时间同步为列车的运行和控制提供统一的时间,关于列车的时间同步研究众多:①时间同步协议,包括 NTP(网络时间协议)、PTP(图片传输协议)等;②授时技术,包括 GPS(全球定位系统)、北斗、长波、短波授时;③由地面时间同步网和移动列车时间同步网组成的铁路通信同步网;④控制系统,包括 ATS(列车自动监控系统)、TCMS 系统等时间同步机制分析;⑤列车与列车之间的通信;⑥重组列车时间同步。此外,时间同步技术还被应用到列车的时空定位、无线传感网络、列车换乘等

场景。

2 时间同步协议

2.1 NTP 工作原理

NTP 以主从模式进行精确对时,如图 1 a)中所示: t_1 为客户端发送时间同步请求报文的时间, t_2 为服务器接收到请求报文的时间, t_3 为服务端向客户端发送响应报文的时间, t_4 为客户端接收到响应报文的时间, θ 为客户端和服务端的时间偏差, δ_1 为对时过程中客户端到服务端的网络路径时延, δ_2 为服务端到客户端的网络路径时延。对时过程满足:

$$t_1 + \theta + \delta_1 = t_2 \quad (1)$$

$$t_3 - \theta + \delta_2 = t_4 \quad (2)$$

即:

$$t_2 - t_1 = \delta_1 + \theta \quad (3)$$

$$t_4 - t_3 = \delta_2 - \theta \quad (4)$$

假设 δ_1 与 δ_2 相等,两式分别相加相减,可得:

$$\theta = \frac{(t_2 - t_1) - (t_4 - t_3)}{2} \quad (5)$$

$$\delta_1 = \delta_2 = \frac{(t_2 - t_1) + (t_4 - t_3)}{2} \quad (6)$$

通过验证可知:NTP 应用方便,不需要硬件支持,是目前列车通信中广泛应用的时间同步协议,但由于 NTP 中网络时延的随机性,同步精度只达到毫秒级。

2.2 PTP 工作原理

PTP 是 IEEE 1588 标准中定义的高精度时间同步协议,它与 NTP 的最大不同在于,PTP 采用硬件处理时间戳,PTP 各时间节点有独立的本地时钟,网络带宽小且速度快,同步精度可以达到亚微秒级。

该协议规定了:Sync(同步)、Follow_Up(跟随)、Delay_Req(延时请求)、Delay_Resp(延时应答)4 种报文,通过主从时钟传输报文的时间戳计算时间偏差和时延。如图 1 b)所示: t_1 为 Master(时钟主设备)向 Slave(时钟从设备)发送 Sync 报文的时间, t_2 为 Slave 接收到 Sync 报文的时间,其中 t_1 由 Follow_Up 报文传输给 Slave, t_3 为 Slave 向 Master 发送 Delay_Req 报文的时间, t_4 为 Master 接收到 Delay_Req 报文的时间,其中 t_4 由 Delay_Resp 报文传输给 Slave。往返时延 D_{el} 和时间偏差 O_{ff} 的计算如下:

$$D_{el1} = t_2 - t_1 - O_{ff} \quad (7)$$

$$D_{el2} = t_4 - t_3 + O_{ff} \quad (8)$$

假设传输路径对称,即 D_{el1} 与 D_{el2} 相等,两式分

别相加相减,可得:

$$O_{ff} = \frac{(t_4 - t_3) - (t_2 - t_1)}{2} \quad (9)$$

$$D_{el1} = D_{el2} = \frac{(t_2 - t_1) + (t_4 - t_3)}{2} \quad (10)$$

2.3 gPTP 工作原理

gPTP(广义精准时间协议)是 IEEE 802.1AS 标准中的协议,其由 PTP 发展而来。PTP 支持 P2P (Peer-to-Peer) 和 E2E(End-to-End) 2 种时延测量方式,P2P 中报文在链路中桥接设备的驻留时间可被测量,且会和传输时延一同发送给下一个节点,精度高且可控,而 E2E 中普通交换机的驻留时间随机且不可被测量,精度不可控且波动范围大。gPTP 仅支持 P2P 的时延测量方式,且只运用于数据链路层,相较于 PTP 而言精度更高,可达到纳秒级。

如图 1 c) 的左侧所示, t_1 为 Master 向 Slave 发送 Sync 报文的时间, t_2 为 Slave 接收到 Sync 报文的时间(其中, t_1 由 Follow_Up 报文传输给 Slave), t_3 为 Slave 向 Master 发送 Pdelay_Req 报文的时间, t_4

为 Master 接收到 Pdelay_Req 报文的时间(其中 t_4 由 Pdelay_Resp 报文传输给 Slave), t_5 为 Master 向 Slave 发送 Pdelay_Resp 报文的时间(t_5 由 Pdelay_Resp_Follow_Up 报文传输给 Slave), t_6 为 Slave 接收到 Pdelay_Resp 报文的时间。

假设传输路径对称,同理可得:

$$O_{ff} = \frac{(t_4 - t_3) - (t_2 - t_1)}{2} \quad (11)$$

$$D_{el1} = D_{el2} = \frac{(t_4 - t_1) - (t_3 - t_2)}{2} \quad (12)$$

同时,由于存在主从时钟端口振荡频率不一致的情况,需计算主从时钟端口振荡频率比:

$$R_{ate} = \frac{t_9 - t_5}{t_{10} - t_6} \quad (13)$$

其中, t_7 、 t_8 、 t_9 、 t_{10} 为下一个周期的 Pdelay_Req、Pdelay_Resp、Pdelay_Resp_Follow_Up 报文的时间戳,如图 1 c) 的右侧所示,则时延为:

$$D_{el1} = D_{el2} = \frac{[(t_4 - t_1) - (t_3 - t_2)R_{ate}]}{2} \quad (14)$$

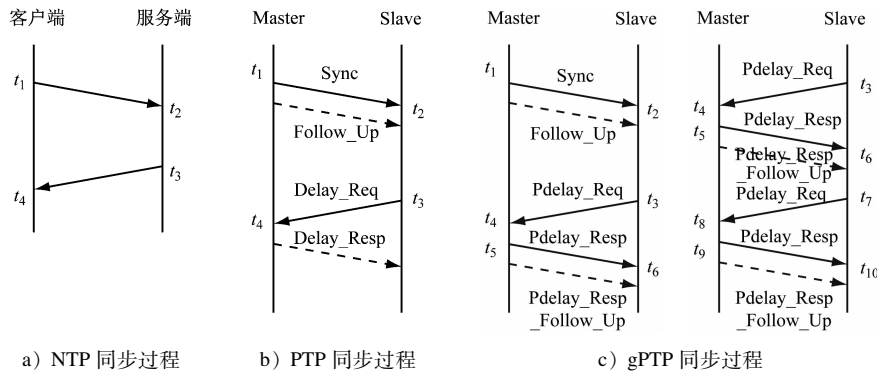


图 1 NTP、PTP、gPTP 的同步过程

Fig. 1 Time synchronization process of NTP, PTP, gPTP

3 TCN 时间同步过程和冗余机制

3.1 三层时钟服务源的时间同步

在 TCN 中,时钟服务器为第一层时钟服务源,通过网络连接,前置机利用 GPS 获取外部时钟源作为标准时间信号。应用服务器为第二层时钟服务源,从通信接口获取时间信息,保持本地时钟与时钟服务器前置机的时钟一致。网关服务器为第三层时钟服务源,从应用服务器获取时间信息,进而为分布在车辆级网络的 TCMS、PIS,以及 TCU、BCU 等控制单元的叶子节点提供对时服务。列车的三层时钟服务源架构如图 2 所示。

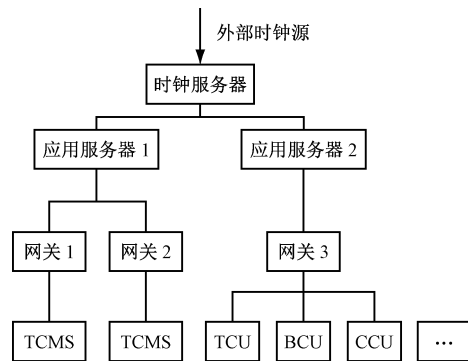


图 2 三层时钟服务源架构

Fig. 2 Architecture of three-layer clock service source

设 $t_{1,1}$ 为第一层时钟服务源节点(以下简称“节

点”)开始时间同步的时刻, $t_{2,1}$ 为第二层节点接收到同步报文的时刻, $t_{2,2}$ 为第二层节点发送给下一层节点的时刻,如图3所示。所有节点均支持gPTP协议,第二层节点根据本地时间和gPTP协议的周期性报文携带的时间戳信息计算得到第一层节点到第二层节点的时延 d_1 ,余类推;第二层节点和第一层节点的时间偏差为 o_1 ,余类推;报文在第二层节点的驻留时间为 r_2 ,余类推;则第二层节点的修正时间 $t_{2,1,R}$ 和第二层节点与第一层节点的校正域 c_2 为:

$$t_{2,1,R} = t_{1,1} + d_1 + o_1 \quad (15)$$

$$c_2 = d_1 + r_2 \quad (16)$$

同理可得,第三层节点的修正时间 $t_{3,1,R}$,及第三层节点与第一层节点的校正域 c_3 为:

$$t_{3,1,R} = t_{1,1} + d_2 + o_2 + c_2 \quad (17)$$

$$c_3 = c_2 + d_2 + r_3 \quad (18)$$

叶子节点的修正时间 $t_{4,1,R}$ 为:

$$t_{4,1,R} = t_{1,1} + d_3 + o_3 + c_3 \quad (19)$$

TCN中车辆级网络系统和控制单元根据叶子节点的修正时间来进行时间同步修正。

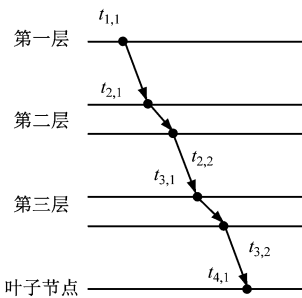


图3 三层时钟服务源时间同步示意图

Fig. 3 Time synchronization diagram of three-layer clock service source

3.2 针对时钟服务源的故障和跳变的冗余机制

时钟服务源的时间同步使得TCN的时间保持在同一时间基准,可以保证整个系统的稳定运行。然而,由于外部环境的干扰或者时钟源内部软硬件的状态,会影响时钟源的正常运行,从而导致系统的时间偏差,进而影响TCN中各系统和控制单元的同步和稳定。

时钟服务器通过GPS等技术获取外部时钟源,将时间同步相关信息通过应用服务器传输给网关和叶子节点,在此过程中,网络连接的不稳定、信号传输中断或延迟等故障会导致时钟服务源获取时钟失败,只能通过采用存在偏差和时延的本地时

钟。此外,由于长时间运行和芯片、电池等问题,时钟服务源的本地时间可能会存在跳变,尽管会在下一个周期修正回来,但仍会对三层时钟服务源的时间同步,尤其影响连接的下一层的同步设备。

针对这些问题,对三层时钟服务源增加了冗余机制,如图4所示。由图4可知:第三层时钟服务源的网关服务器还可以从冗余的时钟服务器和网关获取时间同步的时间戳信息;当原时钟服务器故障时,根据冗余时钟服务器进行时间同步;当原时钟服务器跳变时,可以利用冗余时钟服务器的同步时间发现跳变情况并做出告警和修正;同时,让冗余的时钟服务器从外部时钟源而非原时钟服务器获取基准时间,可以避免它们之间存在的偏差和时延而导致的主备时钟源切换时的时间不一致问题。

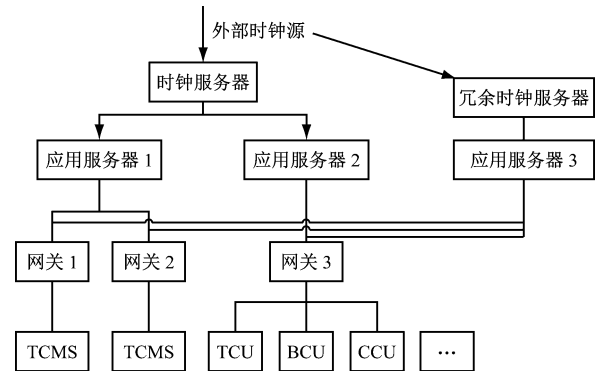


图4 三层时钟服务源的冗余机制

Fig. 4 Redundancy mechanism of three-layer clock service source

4 时间同步试验与分析

采用Matlab软件进行数值模拟的方式验证冗余机制的效果。节点O为外部时钟源,节点A1为第一层时钟服务源时钟服务器,节点B1、B2为第二层时钟服务源应用服务器,节点C1至C3为第三层时钟服务源网关服务器,节点D1至D5为叶子节点列车控制系统单元,节点A2为冗余的时钟服务器,节点B3为冗余的应用服务器,如图5所示。由于各层时钟服务源及叶子节点的振荡频率不一致,假定第二层节点为第一层节点的0.9倍,第三层节点为0.8倍,叶子节点为0.7倍,即以第一层节点的时间为基准,第一层节点每间隔1ms,第二层节点间隔0.9ms。假定三层时钟服务源中各个节点之间的偏差和时延恒定,且均已被测量并保存在节点内,设定偏差均取值为 10^{-6} s,时延均取值为 100^{-6}

s。模拟各节点 1 s 内的本地时间变化和时间同步过程。

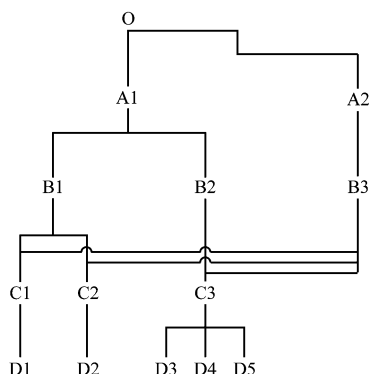


图5 时钟服务源的节点示意图

Fig. 5 Diagram of clock service source nodes

在 100 ~ 200 ms 处模拟时钟服务器故障情况,即令节点 B1 无法接收到节点 A1 的时间信息,此时 B1 节点采用本地时间作为同步信息传输给下一层的节点 C1,由于节点 B1 的本地时间与基准时间不同,时间累积之后会产生误差。如图 6 所示,实线为节点 C1 的本地时间,虚线为节点 C1 根据基准时间调整后的同步时间(以下简称“调整同步时间”),二者在 1 s 中内累计了一定的误差。在 100 ~ 200 ms 处,由于节点 C1 使用了节点 B1 的本地时间来进行时间同步,节点的实际同步时间稍慢于时钟服务器正常情况下的同步时间,如图中双划线部分。而在冗余机制中,当时钟服务器出现故障节点 B1 无法接收到节点 A1 的时间信息时,节点 C1 也不使用节点 B1 的本地时间,而是从节点 B3 获取时间同步信息。如图 7 所示,在 100 ~ 200 ms 处,节点的实际同步时间与时钟服务器正常情况下的同步时间保持一致。

在 300 ~ 400 ms 模拟时钟服务器的跳变情况,即令节点 A1 在获取节点 O 外部时钟源的基准时间信息后,产生小范围的时间波动,节点 C1 的同步时间也随之变化。由于波动范围较小,在图 6 中并不明显,可见图 8 中的同步误差,虚线为时钟服务器故障和跳变情况下的同步误差,在 100 ~ 200 ms 处存在随机波动。而在冗余机制中,节点 C1 在时钟服务器的跳变情况下,会根据节点 B1 和节点 B3 的同步信息分别计算同步时间,并以它们的均值作为实际同步时间,如图 8 中双划线部分,同步误差减小。

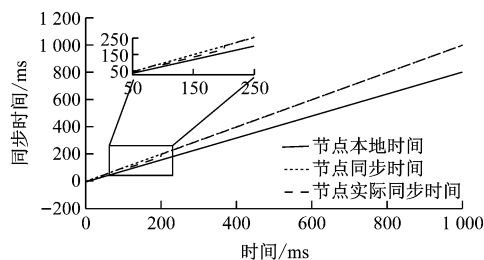


图6 节点 C1 的同步时间

Fig. 6 Synchronized time of node C1

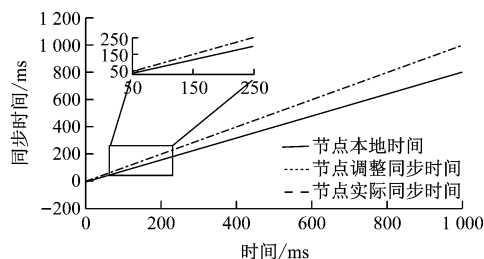


图7 增加冗余机制后节点 C1 的同步时间

Fig. 7 Synchronized time of node C1 after adding redundancy mechanism

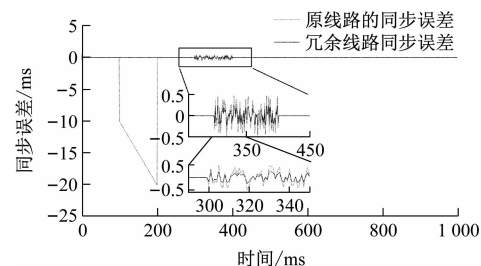


图8 节点 C1 的时间同步误差

Fig. 8 Time synchronization error of node C1

综上所述,根据模拟的时间同步过程,以节点 C1 的同步时间为例,冗余机制能较好地避免时钟服务源的故障和跳变带来的同步误差。

5 结语

时间同步是列车通信网络 TSN 协议确定性传输的前提,本文总结了 TCN 和 TSN 协议的联系,详细介绍了列车时间同步的研究现状,并根据 gPTP 计算列车时间同步中 3 层时钟服务源的偏差和时延。同时,通过增加冗余节点,避免列车时钟源存在的断联和跳变问题而造成误差,并验证了冗余机制的效果。后续工作将进一步研究在多种类型流量混合下的时间同步及调度,以确保 TCN 的可靠性传输。

参考文献

- [1] 于泽人,王欣立. 列车以太网通信与时间敏感网络技术标准

- 化探索[J]. 中国标准化, 2021(13): 147.
- YU Zeren, WANG Xinli. Research on standardization of train ethernet communication and time sensitive network technology [J]. China Standardization, 2021(13): 147.
- [2] 李林锋. 基于交换式以太网的列车综合承载网络通信方案[J]. 城市轨道交通研究, 2022(增刊1): 27.
- LI Linfeng. A comprehensive train carrying network communication scheme based on switched ethernet [J]. Urban Mass Transit, 2022 (S1): 27.
- [3] 蔡志伟. 机车实时以太网 ETB 与 ECN 交换技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- CAI Zhiwei. Research on the exchange technology of locomotive real-time Ethernet ETB and ECN [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [4] 王欣立, 于泽人, 周钧, 等. 基于时间敏感网络的列车通信网络时间同步与流量整形技术研究[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(3): 51.
- WANG Xinli, YU Zeren, ZHOU Jun, et al. Time synchronization and traffic shaping technique of train communication network based on time sensitive network [J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(3): 51.
- [5] CHEN Y, HUANG X Y, ZHAO W Z, et al. Research on real-time Ethernet technology for metro vehicle multi-network integration [J]. Modern Urban Rail Transit, 2019(7): 40.
- [6] 黄韬, 鲁京京, 朱海龙, 等. 车载时间敏感网: 现状与展望[J]. 北京邮电大学学报, 2023, 46(6): 46.
- HUANG Tao, LU Jingjing, ZHU Hailong, et al. Automotive in-vehicle time-sensitive network; the state of the art and prospect [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2023, 46(6): 46.
- [7] 工业互联网联盟. 时间敏感网络 (TSN) 产业白皮书 [EB/OL]. (2020-08-01) [2021-01-25]. http://www.ai-alliance.org/up-load/202009/0901_165010_961.pdf.
- Industrial Internet Alliance. Time sensitive network (TSN) industry white paper [EB/OL]. (2020-08-01) [2021-01-25]. http://www.ai-alliance.org/up-load/202009/0901_165010_961.pdf.
- [8] 程顺岭, 赵科. 基于 IEEE 1588 标准的列车时间同步技术的研究[J]. 工业控制计算机, 2022, 35(2): 28.
- CHENG Shunling, ZHAO Ke. Research on train time synchronization technology based on IEEE 1588 standard [J]. Industrial Control Computer, 2022, 35(2): 28.
- [9] 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.
- [10] 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.
- 收稿日期: 2024-02-02 修回日期: 2024-03-05 出版日期: 2024-05-10
Received: 2024-02-02 Revised: 2024-03-05 Published: 2024-05-10
• 第一作者: 张军贤, 正高级工程师, zjx0422@163.com
通信作者: 朱海龙, 讲师, zhuhl@bupt.edu.cn
• ©《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 50 页)

- MENG Fei, YANG Bing, YANG Guangwu, et al. Influence of the underframe side beam and the upper beam structure stiffness on car-body structure modal [J]. Railway Locomotive & Car, 2018, 38(6): 28.
- [11] 李定南. 上弦梁结构刚度对车体结构模态的影响[J]. 机车电传动, 2017(3): 59.
- LI Dingnan. Influence of the upper beam structure stiffness on car-body structure modal [J]. Electric Drive for Locomotives, 2017(3): 59.
- [12] 王俊. 铁路客车车体结构振动模态提升研究[J]. 机车车辆工艺, 2021(4): 1.
- WANG Jun. Research of the enhancement of structural vibration mode for railway passenger car body [J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2021(4): 1.
- [13] 潘婷. 动车组车体灵敏度分析及优化设计[D]. 大连: 大连交通大学, 2013.
- PAN Ting. Sensitivity analysis and optimization design of EMU body [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2013.
- 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: 杜彦品, 正高级工程师, dyp711522@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