

# 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

王欣立 于泽人 周 钧 张立斌

(中车大连电力牵引研发中心有限公司, 116052, 大连//第一作者, 工程师)

**摘 要** 目前城市轨道交通列车多网融合通信系统无法保证关键性数据传输的确定性。分析了该系统对 TSN(时间敏感网络)技术的需求,构建了流量整形网络试验平台,开展了基于 TSN 技术的时间同步与流量整形的相关测试。试验结果表明:在没有其他外界条件干扰的情况下,可以实现预期的列车通信网络时间同步功能;流量整形技术在网络带宽达到上限的极端情况下,仍可以保证关键性数据传输的确定性。

**关键词** 城市轨道交通;列车多网融合通信系统;时间敏感网络;时间同步;流量整形;传输确定性

**中图分类号** U231.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.03.010

## Time Synchronization and Traffic Shaping Technique of Train Communication Network Based on Time Sensitive Network

WANG Xinli, YU Zeren, ZHOU Jun, ZHANG Libin

**Abstract** At present, transmission determinacy of critical data in urban rail transit train multi-network integrated communication system cannot be guaranteed. Through analyzing the technical requirements of TSN (time sensitive network) for the system, a traffic shaping network test platform is constructed and associated tests of time synchronization and traffic shaping based on TSN technology are carried out. Test results show that the expected time synchronization function of train communication network can be achieved without the interference of other external conditions, the traffic shaping technique can guarantee the deterministic transmission of critical data even in the extreme case that the network bandwidth reaches the upper limit.

**Key words** urban rail transit; train multi-network integrated communication system; time sensitive network; time synchronization; traffic shaping; transmission determinacy

**Author's address** CRRC Dalian Electric Traction R & D Co., Ltd., 116052, Dalian, China

MVB(多功能车辆总线)被广泛应用于城市轨道交通的列车网络系统中,其实时性、可靠性能够满足目前列车应用的基本需求。但是,由于 MVB 的带宽较低,无法满足乘客对信息化服务(如高清视频、实时传输等)的需求<sup>[1]</sup>。轨道交通列车的 CAN open(架构在 CAN(控制局域网)上的高层通信协议)主要应用于有轨电车上,与 MVB 相比,其主要优势为工程成本较低,对子系统的可选择性较强,但在传输速率、可靠性等方面都处于劣势<sup>[2]</sup>。相较于其他网络总线形式,以太网无论在带宽还是传输速率上的性能均表现良好,但以太网是以非同步方式工作的,其数据传输时间既不精准也不确定。

TSN(时间敏感网络)技术在以太网技术的基础上作出优化,可实现列车网络系统中关键性设备的时间同步,并对流量进行规划整形,以保证数据流量的确定性,实现真正意义上的网络融合。TSN 技术有效地提高了数据带宽,降低了延时,并保证关键性数据流的传输确定性,能够确保未来各种智能配套业务(如列车高清视频、虚拟编组等)的实施。

本文在分析列车多网融合通信形式的基础上,提出了基于 TSN 的列车多网融合通信系统技术需求,并设计了试验平台,开展了基于 TSN 技术的时间同步与流量整形的相关测试。

## 1 TSN 技术概述

TSN 技术主要用于解决目前工业以太网存在的非同步传输问题。如表 1<sup>[3]</sup>所示,相比传统的以太网,TSN 的优势主要表现为低延时、低抖动、高可靠、高带宽、互操作性强及低成本。

TSN 的研发重点是对网络数据链路层进行特性增强,为关键性的业务数据流提供确定的延时,进而保证流量的确定性。在国际电气与电子工程师协会发布的 IEEE 802.1Q 协议中,针对 TSN 制定

了相关标准,如表 2<sup>[4]</sup>所示。

表 1 TSN 的技术特点	
Tab. 1 Technical characteristics of TSN	
项目	主要技术优势
时间延时与抖动	时间同步精度小于 1 μs;交换机单点时延小于 50 μs;数据传输抖动误差小于 5 μs
带宽量	标准以太网速率;全双工网络;可平滑过渡到 1 Gbit/s 和 10 Gbit/s 网络
可靠性	时间同步冗余;数据帧复制与消除;路径冗余
互操作性	标准化以太网组件;集中式管理
成本	采用商业成熟芯片;多网合一

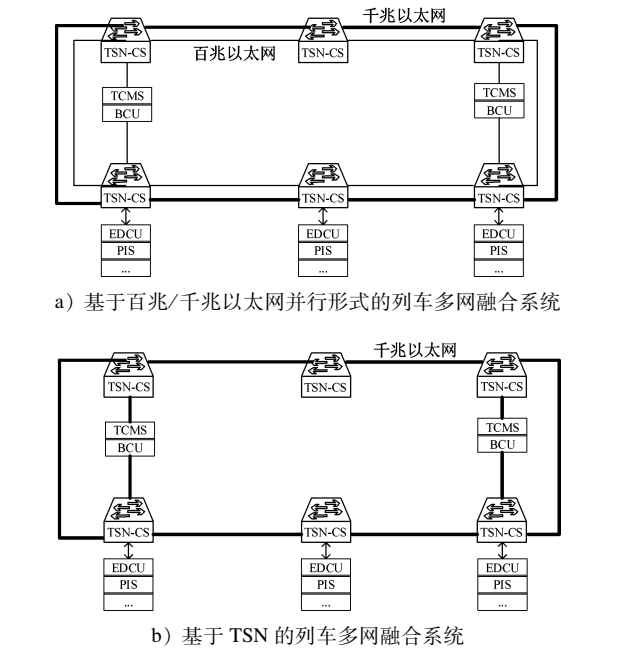
表 2 TSN 标准集		
Tab. 2 TSN standard sets		
标准名称	主要内容	阶段
IEEE 802.1Qbu	帧抢占	已发布
IEEE 802.1Qbv	调度流量的增强功能	已发布
IEEE 802.1Qca	路径控制和预留	已发布
IEEE 802.1CB	无缝冗余	已发布
IEEE 802.1Qcc	带宽预留与增强	已发布
IEEE 802.1Qch	周期队列及转发	已发布
IEEE 802.1AS	时间敏感应用的时间同步	已发布
IEEE 802.1Qci	流量过滤及监管	已发布
IEEE 802.1Qcp	YANG 数据模型	已发布
IEEE 802.1Qcr	网桥和网桥网络修改;异步流量整形	已发布
IEEE 802.1AS-REV	时间敏感应用的定时和同步	已发布

## 2 列车网络系统对 TSN 技术的需求分析

列车多网融合是未来主流的列车通信形式,指采用单一的网络来连接列车上所有的设备,包括 TCMS(列车控制与管理系统)、PIS(乘客信息系统)、TCU(牵引控制单元)和 BCU(制动控制单元)等。但是由于以太网数据传输的不确定性,无法保证传输 PIS 等大带宽的多媒体流数据时对 TCMS 等列车控制(以下简称“控车”)数据的零影响。目前的列车多网融合通信系统并没有做到实质性的融合,只是采用百兆以太网和千兆以太网网络并行的方式进行融合,TCMS 和 PIS 数据并不在一条总线上传输<sup>[5]</sup>,或者采用 2 台交换机从物理上将 PIS 和 TCMS 系统隔离开。这两种方式虽然采用了单一的以太网网络,但是从布线成本和复杂度上分析,列车网络架构并没有简化。

将 TSN 技术应用到列车多网融合网络系统中,可保证 TCMS 等控车数据传输的确定性,消除多媒体流数据在网络拥堵时对 TCMS 等控车数据传输造成的影响,进而实现列车网络真正的融合。图 1

为列车多网融合网络系统的拓扑示意图。



注:EDCU——电子门控单元;TSN-CS——TSN 交换机。

图 1 列车多网融合网络系统拓扑示意图  
Fig. 1 Diagram of train multi-network integration system topology

在单一总线的列车多网融合网络环境中,设备之间采用以太网进行数据交互。当网络中的流量趋于饱和时,数据传输会出现问题甚至发生传输中断,进而导致列车网络故障。可采用表 2 所列的 TSN 标准集技术处理流量问题,以可靠的方式确保在密集网络流量下关键数据传输不受影响。

列车控制系统中的牵引、制动等数据是关键控车数据。通过 TSN 技术将安全等级高的数据和安全等级低的数据予以区分,分别完成不同数据的确定性传输,可实现 TSN 技术对安全完整性等级 4 (SIL4)数据传输的支持。

精确同步的时钟是 TSN 的基本元素,可采用基于 IEEE 802.1AS 或 IEEE 1588v2(网络测量和控制系统的精密时钟同步协议标准的简称)实现全网时间同步,并在此基础上进行数据流量调度。

在 TCN(列车通信网络)中,确保流量中的帧在确定的、可预测的时间内送达是一个非常重要的技术指标要求。基于 IEEE 802.1Qbv 或 IEEE 802.1Qch 标准的门控调度机制对特定标识的数据帧加以控制,结合 IEEE 802.1Qci 标准对入口数据进行筛选和过滤,是实现数据安全确定性传输底层的技术基础。

传统软件所定义的网络不是专门为实时网络设计的,它只支持网络的可达性,较少涉及到端系统。但是,实时性是一个系统性的属性,列车网络环境中需将端系统纳入统筹考虑范畴。IEEE 802.1 Qcc 标准的全集中式管理技术可为该需求提供技术支持。

IEEE 802.1CB 标准涉及无缝冗余,即列车设备发生故障时,路径冗余将不再有切换时间。

图2为列车多网融合网络系统对TSN的技术需求。

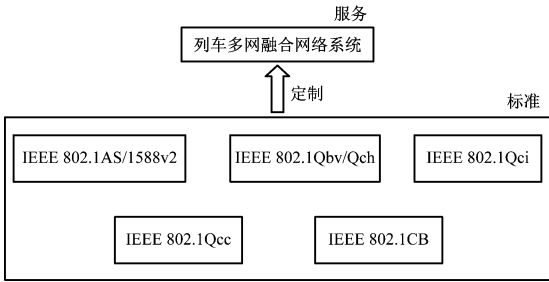


图2 列车多网融合网络系统对TSN的技术需求  
Fig. 2 Train multi-network integration system technical requirements for TSN

### 3 时间同步与流量整形的技术标准

#### 3.1 IEEE 1588v2 标准

采用基于数据链路层附上时间戳的方式,可实现IEEE 1588v2标准,使得时钟同步信息更加精确。其时钟同步原理如图3所示,主时钟端口周期性地向从时钟端口发送时间同步报文,中间节点交换机作为从时钟的同时也用于透明时钟的传递。

主从时间差的计算式如下:

$$q = \frac{(t_2 - t_1 + t_3 - t_4)}{2} \quad (1)$$

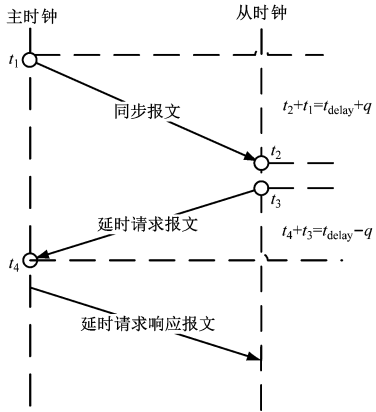
式中:

- $t_1$ ——主时钟同步报文的发送时间戳;
- $t_2$ ——从时钟同步报文的接收时间戳;
- $t_3$ ——从时钟延迟请求报文的发送时间戳;
- $t_4$ ——主时钟延迟请求响应报文的接收时间戳;
- $q$ ——主时钟和从时钟时间差。

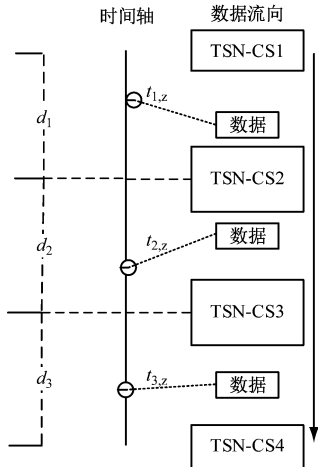
#### 3.2 IEEE 802.1Qch 标准

应用IEEE 802.1Qch标准,基于CQF(循环排队和转发)模型对关键流量进行整形。如图4所示,TSN-CS1、TSN-CS2、TSN-CS3、TSN-CS4均为

TSN交换机的编号,CQF模型将全网时间轴划分为连续相等的 $n$ 个时间槽 $d$ (即将时间轴划分为 $d_1, d_2, \dots, d_n$ )。设 $t_{1,z}$ 为TSN-CS2在 $d_1$ 时间槽接收数据的时刻, $t_{2,z}$ 为TSN-CS2在 $d_2$ 时间槽发送数据的时刻, $t_{3,z}$ 为TSN-CS3发送数据的时刻, $t_{1,z}$ 和 $t_{2,z}$ 可在时间槽 $d_1$ 和 $d_2$ 中任意分布。若TSN-CS2交换机在 $d_1$ 的 $t_{1,z}$ 时刻从链路上接收到数据帧,则必须在下一个时间槽 $d_2$ 的 $t_{2,z}$ 将数据帧输出到链路上,因此数据在TSN-CS1和TSN-CS2的延时( $t_{2,z}$ 与 $t_{1,z}$ 的时间差)最大值为 $2d$ ,最小值为0。同理,TSN-CS3交换机在时间槽 $d_3$ 中的某个时刻 $t_{3,z}$ 发送数据帧,则数据经TSN-CS2和TSN-CS3传输后的延时( $t_{3,z}$ 与 $t_{1,z}$ 的时间差)最大值为 $3d$ ,最小值为 $d$ 。由此可认为,当数据经过的路径上交换机跳数为 $n$ 时,则数据传输的最大延时为 $(n+1)d$ ,最小延时为 $(n-1)d$ 。



注: $t_{\text{delay}}$ ——链路延时。  
图3 时钟同步原理  
Fig. 3 Clock synchronization principle



注:箭头表示数据传输的方向。  
图4 数据传输延时保证原理图  
Fig. 4 Diagram of data transmission delay guarantee principle

网络通信中的时间确定性,其原理是每一个周期内数据只走一步。如图 5 所示,A 和 B 分别为 2 个 TSN 数据队列。在交换机节点  $P_0$  中,A 队列的门为输入状态,B 队列的门为输出状态。在进入下一个交换机节点  $P_1$  时,A 队列的门变为输出状态,B 队列的门变为输入状态。由此,数据传输过程形成了不断开关门的周期性、确定性传输<sup>[7]</sup>。

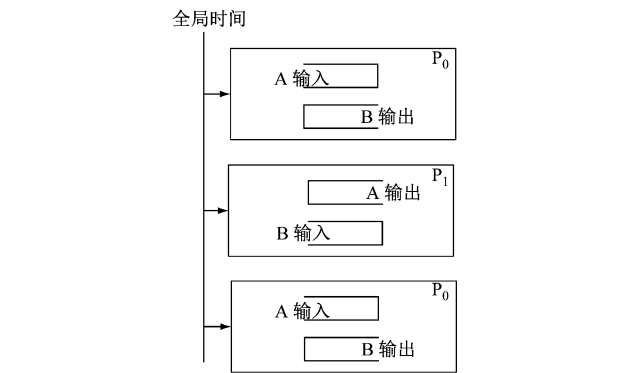


图 5 网络通信数据周期性不间断转发的原理示意图  
Fig. 5 Diagram of periodic uninterrupted forwarding principle of network communication data

## 4 测试与分析

### 4.1 搭建试验平台架构

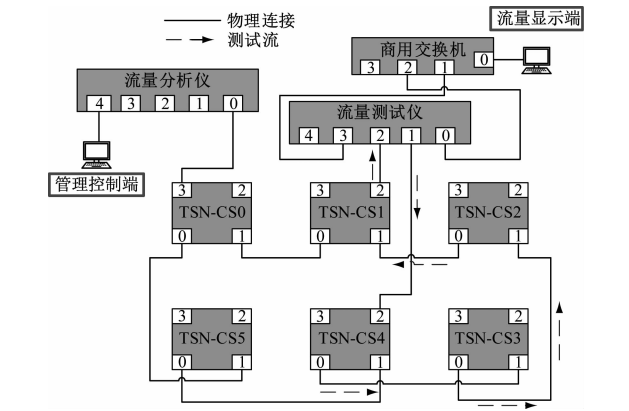
为了验证列车通信网络技术的实际效果,本文构建了流量整形网络试验平台。如图 6 所示,试验平台由 6 个 TSN 交换机(TSN-CS1—TSN-CS6),以及流量测试仪、流量分析仪等组成。6 个 TSN 交换机节点形成了符合列车编组网的环形拓扑,每个交换机节点均支持 TSN 数据交换。

流量分析仪用以实现网络数据流配置信息 的下发和时间同步信息的获取,并将获取的时钟信息传到流量显示端,以实现数据的可视化。

流量测试仪模拟 CCU(中央控制单元)、BCU 等模块及 PIS 等系统发送数据,通过流量显示端上位机界面的数据流配置信息,按照配置发送速率模拟发送 TSN 流、非关键过程数据流和高带宽尽力而为转发数据流(大多为音视频数据)。根据该配置信息,模拟数据从 TSN-CS4 的 2 号端口流入,按照图 6 中虚线路径及方向流向 TSN-CS1。数据从 TSN-CS1 的 2 号端口流出后,在流量显示端实现数据的可视化。

### 4.2 时间同步测试

交换机节点可以通过配置的物理地址,计算非



注:数字 0、1、2、3、4 均为 TSN 交换机节点的端口。  
图 6 流量整形网络试验平台架构示意图  
Fig. 6 Diagram of traffic shaping network test platform architecture

本设备 PTP(精确时间协议)报文的透明时钟并对报文进行传递。首先通过管理控制端下发配置信息(包括网络中设备的物理地址、转发方向等),静态配置 TSN-CS0 为主时钟节点,TSN-CS0 按照逆时针方向通过找寻物理地址方式依次向其余 TSN 交换机节点发送时间同步报文,与其他 5 个 TSN 交换机进行时钟同步。

时间同步功能启动后,各交换机节点会周期性地向管理控制端上报其所携带的时钟同步信息报文。管理控制端通过分析收到报文的精准时间戳,可计算得出时间精度信息(见图 7)与时间抖动信息(见图 8),并将数据进行可视化展示。

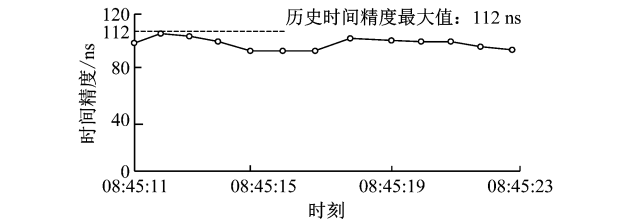


图 7 时间精度信息  
Fig. 7 Time precision information

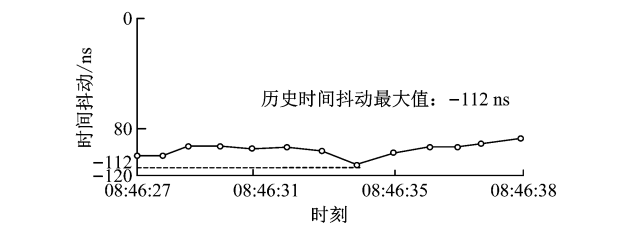


图 8 时间抖动信息  
Fig. 8 Time jitter information

如图 7 和图 8 所示,与主时钟节点 TSN-CS0 相

比,其余各交换机节点历史时间精度的最大值为 112 ns,历史时间抖动的最大值为 -112 ns。由此可得出结论:该测试平台在没有其他外界条件干扰的情况下,可以实现预期的时间同步功能。

4.3 流量整形测试

流量整形测试是在时间同步测试的基础上展开的。首先,流量显示端通过软件向流量测试仪发送数据流配置信息,配置 8 种用于测试的以太网数据报文。这 8 种报文的帧头均带有 VLAN(虚拟局域网)标签,其 PCP(优先级)值分别设为 7、6、5、4、3、2、1 及 0,并设置时间槽大小为 131 μs。其中:①PCP 值为 7 和 6 的报文分别为类型一、类型二报文,这两类报文对应的是时间敏感流量。本测试模拟 CCU 和 BCU 发出的数据,TSN 交换机接收到打上时间敏感流标签的数据后,会利用 CQF 模型对其进行整形,以实现数据的确定性传输。②PCP 值为 5、4、3 的报文分别为类型三报文、类型四报文及类型五报文,这三类报文对应预约流数据,用于模拟非

关键性过程数据的转发。③PCP 值为 2、1、0 的报文分别为类型六报文、类型七报文及类型八报文,这三类报文对应转发流数据,用于模拟高带宽的音视频流。

按照上述配置信息完成配置后发送数据流,测试环境的流量带宽为 800 Mibit/s。数据经过 3 个交换机节点后返回流量测试仪,按照 CQF 整形原理计算理论确定得到延时为 262 ~ 524 μs;流量测试仪按照 1 s 的采样频率根据返回的数据包计算各类型数据的丢包率、发送速率及延时。

图 9 是该试验平台的流量监测界面截图。由图 9 可知:当数据带宽超过设计预设范围时,类型六、类型七及类型八的报文出现丢包。根据 TSN 的运行机制,此时会保证类型一报文、类型二报文的时间敏感流无丢包情况。类型一报文、类型二报文的平均延时分别为 334 479 ns 和 335 262 ns,延时在理论允许范围内。

	发送个数:	接收个数:	发送实时速率:	接收实时速率:	延时:	平均延时:	丢包个数:
类型一报文:	187893	187893	1812730 bps	1815847 bps	389737 ns	334479 ns	0
类型二报文:	187893	187893	1812730 bps	1815847 bps	370609 ns	335262 ns	0
类型三报文:	187893	187893	1812730 bps	1812730 bps	16897 ns	16179 ns	0
类型四报文:	187893	187893	1812730 bps	1812730 bps	16649 ns	16234 ns	0
类型五报文:	187893	187893	1812730 bps	1812730 bps	15857 ns	16193 ns	0
类型六报文:	1954094	1946293	18851947 bps	18737928 bps	27881 ns	25061 ns	7801
类型七报文:	1954094	1948466	18852393 bps	18782912 bps	25769 ns	25171 ns	5628
类型八报文:	9671392	9644183	93305272 bps	93113310 bps	26473 ns	25369 ns	27209

图 9 试验平台的流量监测界面截图

Fig. 9 Screenshot of test platform traffic monitoring interface

测试结果表明:根据配置信息可以保证数据按照一定的确定性延时进行传递,即被规定为 TSN 数据流的数据可以实现确定性传输,且在网络带宽达到上限的情况下,能够丢弃被认为是音视频流类型的数据,以满足时间敏感流数据的确定性传输要求。

5 结语

本文描述了目前列车多网融合通信系统的通信形式,分析了基于 TSN 的列车多网融合通信系统的技术需求,并针对时间同步技术、流量整形技术进行了测试,验证了关键性时间敏感流数据的确定性传输能力,CCU、BCU 等安全等级高的数据在网络带宽达到上限的极端情况下不会因为音频视频

流或其他波动数据造成网络堵塞而出现丢包等情况。本文基于 TSN 的列车通信网络时间同步与流量整形技术研究可为列车多网融合通信系统的设计提供参考。

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] 李星宜, 李正, 崔杰, 等. 城市轨道交通车辆总线对比分析[J]. 现代城市轨道交通, 2019(6): 55.