

时间敏感网络标准与研究综述

蔡岳平^{1,2)} 姚宗辰²⁾ 李天驰²⁾

¹⁾(重庆大学信息物理社会可信服务计算教育部重点实验室 重庆 400030)

²⁾(重庆大学微电子与通信工程学院 重庆 400030)

摘 要 基于标准以太网的时间敏感网络通过增强时间同步、确定性流调度以及高可靠无缝冗余能力实现多业务流高质量共网传输。它能提供高可靠与确定有界低时延流传送服务,是未来工业自动化系统、车载通信、智能电网等垂直行业应用的核心网络技术之一。本文首先从时间同步、低时延流控、可靠性、网络管控以及应用场景五个方向对时间敏感网络相关标准及其最新进展进行了介绍和分析,重点阐述其解决的问题与关键技术。其次对时间敏感网络的研究现状进行了综述分析,重点分析比较现有方案的优缺点。最后讨论了时间敏感网络的发展趋势与研究挑战。

关键词 时间敏感网络;标准;时间同步;流控;可靠性

中图法分类号 TP393 DOI号 10.11897/SP.J.1016.2021.01378

A Survey on Time-Sensitive Networking: Standards and State-of-the-Art

CAI Yue-Ping^{1,2)} YAO Zong-Chen²⁾ LI Tian-Chi²⁾

¹⁾(Key Laboratory of Dependable Service Computing in Cyber Physical Society of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing, 400030)

²⁾(School of Microelectronics and Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030)

Abstract During the digital transformation process of the society, emerging industry applications with critical data streams present great challenges to current networks. Traditional Ethernet provides best-effort frame delivery service without any performance guarantee such as latency and frame loss. Industrial Ethernet provides real-time and reliable communication services for industrial automation systems. However, the standards of industrial Ethernet are not compatible with each other, and the networking of different industrial systems becomes a great challenge. Time-Sensitive Networking (TSN) based on Ethernet provides high-quality multi-service flow transmissions on the same network through enhanced functions of time synchronization, deterministic flow scheduling and seamless reliability. It enables high-reliable and bounded low-latency flow transmission services. It is one of the key networking technologies for vertical applications such as industrial automation systems, in-vehicle networking, smart grid, and so on. Firstly, this survey introduces the standardization status of TSN from the following five aspects: time synchronization, low-latency flow control, reliability, network control and management, and use cases. The problems and key technologies of these standards are analyzed. For example, Time synchronization protocols such as NTP (Network Time Protocol), PTP (Precise Time Protocol),

and gPTP (generalized PTP) are introduced and compared with a focus on the synchronization algorithms. Different flow scheduling mechanisms covered in the standards are described, analyzed, and compared qualitatively, based on their characteristics and performances. Network redundancy scheme based on the frame replication and elimination for reliability (FRER) is introduced in detail. Three models of TSN control and management are presented. They are centralized model, distributed model, and hybrid model. Vertical applications of TSN are briefly outlined including: professional audio and video, industrial automation, mobile fronthaul, service provider network, in-vehicle networking, and smart grid. Secondly, we survey the research state-of-the-art of TSN with a focus on the advantages and disadvantages of current solutions. Three research areas covered in this survey are time synchronization, flow control, and reliability. The main challenges to time synchronizations are algorithms enabling fast and efficient synchronization process, and clock precision. Current research works on the low-latency flow control mainly focus on traffic shaping, traffic scheduling, and traffic preemption. Traffic shaping problems include delay analysis, shaping mechanism and shaping overhead. Research topics of traffic scheduling include optimization algorithms, joint scheduling of routing and slot allocation, and software defined TSN. Flow preemption research works try to solve the problems of jitter and the adversary effect to the preempted traffic flow. Research works on TSN reliability include redundancy mechanisms, fault detection and restoration, and reliability of time synchronizations. Finally, research challenges and potential research directions are discussed. Future research works include TSN networking, Wireless TSN, and vertical applications of TSN. How to integrate TSN with other network layers remains to be a research problem. Due to the inherent characteristics of wireless channels, design of wireless networks with deterministic properties similar to TSN is a great challenge. Vertical applications of TSN such as 5G fronthaul, industrial automation systems, and in-vehicle networking are envisioned. In a word, TSN is a promising network technology in the fourth industrial revolution of the society.

Keywords time-sensitive networking; standards; time synchronization; flow control; reliability

1 引言

互联网的快速发展和各种新兴应用的产生,极大改变了人们的生活和工作方式.未来很多行业应用需要毫秒级甚至更低的确定低时延网络连接.例如,工业自动化系统端到端时延需求在几微秒到几毫秒之间^[1],触觉互联网(Tactile Internet)^[2]的时延需求大约为 1 ms 等.表 1 列举了未来工业、医疗、汽车、银行、信息娱乐、航空电子等应用场景中的服务质量(Quality of Service, QoS)需求,包括时延、时延抖动和丢包率等性能指标^[3-4].传统以太网难以满足上述应用的 QoS 需求.

为满足确定有界低时延传输需求,工业界做出了很多尝试和努力.如保证时间触发流量的统

一以太网解决方案 TTEthernet^[5],基于事件触发(Event-triggered)和时间触发(Time-triggered)的汽车工业总线技术 FlexRay^[6].这些技术虽从不同程度上满足了确定时延和超低时延需求,但都限于特定场景下使用,不具备互操作性和互连接性^[7].

时间敏感网络^[8](Time-Sensitive Networking, TSN)是 IEEE 802.1 工作组中的一个子任务组,成立于 2012 年. TSN 前身为 2005 年成立的 AVB(Audio Video Bridging,音视频桥接)^[8]工作组,主要解决音视频的实时传输问题.

本文接下来将对时间敏感网络相关标准及其最新进展进行介绍和分析,并阐述其解决的问题和关键技术.然后对时间敏感网络研究现状进行分析总结.最后讨论时间敏感网络发展趋势及研究挑战.

表 1 典型行业应用的流量特征和 QoS 需求

行业	应用	时延	抖动	丢包率
工业	工业自动化	$0.2 \mu\text{s} \sim 0.5 \text{ms}$	微秒级	0.0000001%
	控制系统	$25 \mu\text{s} \sim 2 \text{ms}$	微秒级	0.0000001%
	智能电网	约 8 ms	几微秒	低
医疗	远程手术、触觉反馈	3~10 ms	<2 ms	低
汽车	驾驶辅助系统	100~250 μs	几微秒	0.00001%
	动力传动、底盘控制	<10 μs	几微秒	0.0001%
	交通安全	<5 ms	几微秒	低
银行	高频交易	<1 ms	几微秒	低
信息娱乐	增强现实	7~20 ms	几微秒	—
	音频/视频	2~50 ms	<100 μs	低
航空电子设备	AFDX 协议系统	1~128 ms	几微秒	0.0000001%

2 时间敏感网络标准现状

2.1 时间同步标准

时间同步的主要功能是通过对本地图钟的操作,实现整个系统的统一时间标准.如图 1 所示,时间敏感网络的时间同步标准主要包括 IEEE 1588 和 IEEE 802.1AS 两个标准.

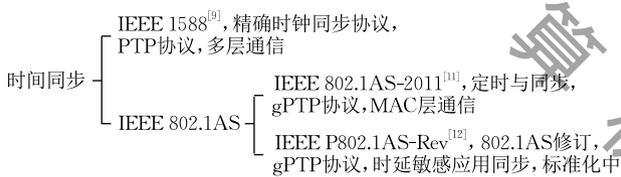


图 1 时间敏感网络时间同步标准导图

2.1.1 IEEE 1588, PTP 协议

IEEE 1588 标准解决了以太网的时间同步问题.传统网络时间协议(Network Time Protocol, NTP)采用的软件同步方式不能满足现代测量和控制系统的精确度要求.因此 IEEE 1588 标准提出了精确时间协议(Precision Time Protocol, PTP),以软件和硬件相结合的方式,大幅度提高了网络的时间同步能力^[9].

PTP 协议的同步过程主要包括两个部分:(1)建立同步体系:用最佳主时钟算法(Best Master Clock Algorithm, BMCA)^[10]选择 GM(grandmaster)时钟,建立主从时钟拓扑结构,并向所有从时钟节点发送通告消息;(2)同步本地时钟:使用本地时钟同步算法(Local Clock Synchronization Algorithm, LCSA)计算时钟偏差,并调整本地时钟.

2.1.2 IEEE 802.1AS, TSN 时间同步

IEEE 802.1AS-2011 标准解决了 TSN 的时间同步问题.该标准对 PTP 协议进行了修改,制定了基于二层网络的 gPTP(generalized PTP)协议^[11],对 TSN 流的时间同步方法和过程进行了定义和解释.

gPTP 协议同步过程与 PTP 协议类似,其核心

是时间戳机制. GM 时钟将同步信息发送到不同的 gPTP 域时,设备的本地时钟进行时钟采样并产生一个转发时间(即驻留时间),然后与主时钟的时间信息进行比较计算得出传输时延,实现对本地时钟的调整.另外,驻留时间和传输时延决定着时间同步的精度, gPTP 协议使用时间频率比(不同 gPTP 域的本地时钟频率比)纠正传输时延,实现精确的时钟调整和频率补偿.

目前 IEEE 802.1 工作组正在制定 802.1AS 的修订版本 IEEE P802.1AS-Rev,以确保时延敏感应用在域间的时间同步需求.同时 IEEE P802.1AS-Rev 标准还规定了用于网络组件移除、GM 时钟故障及网络重新配置等情况下的时间同步操作,如路径追踪(Path Trace)等^[12].

2.2 低时延流控标准

流控机制是 TSN 实现流确定低时延传输的关键技术之一. TSN 流控过程主要包括流分类、流整形、流调度和流抢占,如图 2 所示:(1)交换机在入端口根据标识符等信息对帧进行识别和分类;(2)分类后的帧进入各自的优先级队列进行排队;(3)流整形模块在流排队完成后对超过限制速率的 AVB 流进行限制和控制,其余如 TT(Time Triggered)流和 BE(Best Effort)流则无需进行整形,直接进行流的调度与抢占操作;(4)流调度模块根据不同的流调度策略或算法决定帧的转发顺序,并根据流特殊需求执行抢占操作;(5)选择不冲突的交换机出端口对流进行转发.

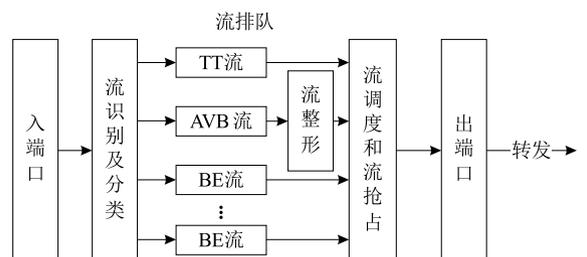


图 2 时间敏感网络流控过程示意图

流分类区分了不同应用程序或服务的 QoS 需求,是整个流控机制的前提.流分类主要功能是通过识别流的属性信息或统计信息,以确定它们对应的流量类型和优先级信息.TSN 中的流识别及分类机制常用于交换机入端口处,其性能评价指标主要为分类准确度.

流整形可减轻网络拥塞和降低分组丢包率,是流调度的部分功能之一.流整形主要功能是限制突发流的最大速率并对超过该速率的流进行缓存,然后控制流以较均匀的速率发送,达到稳定传送突发流量的目的.TSN 中的突发流量多产生于音视频流量,故流整形机制常用于 AVB 流的整形.在性能评价指标方面,流整形增加了流端到端时延,因此整形时延是一个重要指标.此外它还强调流整形给网络带来的开销(如带宽消耗等)大小.

流调度可保证各种流转发时的有序性并降低网络拥塞,是整个流控机制的核心部分.流调度主要功能是通过一定规则(调度算法或机制)将排队和整形后的流调度至输出端口,以确定流在交换机内对应的转发顺序,从而保证各种流传送时的 QoS 需求并在一定程度上降低网络拥塞.TSN 中的流调度既包括单条流内的帧调度,也包括多条流(如时间敏感流与 AVB 流等)间的调度.在性能评价指标方面,流调度机制主要评价指标包括时延及抖动.

流抢占改变了低优先级流的调度顺序,保证了高优先级流的及时转发,是流调度的一种特殊形式和 TSN 关键技术之一.流抢占主要功能是通过帧间切片打断低优先级帧传输的方式避免流优先级反转现象,以保证高优先级帧实时性或超低时延性能需求.TSN 中的流抢占常用于多条优先级不同的流在某些特殊需求(如流截止时间、流周期性等)下的调度.在性能评价指标方面,流抢占机制更为关注抢占带来的抖动和开销.

TSN 低时延流控标准如图 3 所示.

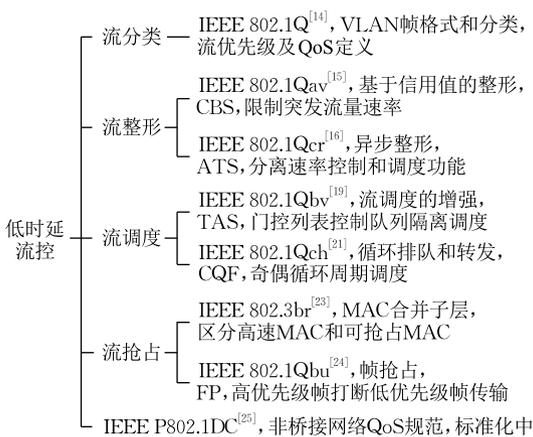


图 3 时间敏感网络低时延流控标准导图

2.2.1 流分类

IEEE 802.1Q 标准规定了 VLAN 帧的封装格式和流的类别.在标准 IEEE 802.1Q 中,TSN 中的流(数据链路流)被赋予 QoS 属性(如带宽、时延),利用这种特征,流由以太网报文头中的 PCP(Priority Code Point field)字段和 VID(VLAN ID)共同定义^[13].IEEE 802.1Q 标准根据流的不同类型指定了不同的优先级,从最低 0 到最高 7 共 8 个流量类别,如表 2.

表 2 IEEE 802.1Q 流分类

优先级	流量类型
0	BE 流(Best effort)
1	背景流(Background)
2	EE 流(Excellent effort)
3	关键应用流(Critical Applications)
4	视频流(Video, <100 ms, 时延和抖动)
5	音频流(Voice, <10 ms, 时延和抖动)
6	互联控制流(Internetwork control)
7	控制数据流(Control-Data Traffic, CDT)

IEEE 802.1AVB 标准^[8]允许交换机识别、分类不同的流量类型,并赋予它们不同的 QoS 属性.IEEE 802.1AVB 定义了两个指标:(1)最大帧大小:流源在一个周期内产生的数据量;(2)最小帧间隔:数据发送的最小频率.根据这些流量规范指标,IEEE 802.1AVB 定义了 A 类和 B 类 AVB 流以及 BE 流.其中 A 类优先级最高,用来传输音频流量;B 类优先级次之,用来传输视频流;BE 类定义为传统的以太网流量.在此基础上,IEEE 802.1TSN 引入了新的 CDT(Control-Data Traffic)流量类型,为工业自动化等领域中的时延敏感应用提供低时延流传送服务.

2.2.2 流整形

(1) IEEE 802.1Qav, 时延敏感流的转发和排队

IEEE 802.1Qav 标准主要用来减少网络中的突发流量和拥塞.过多的突发多媒体流量汇聚在下游交换机,会导致大量的数据缓存和网络拥塞,进而出现数据包丢弃和体验质量(Quality of Experience, QoE)降低的情况.针对这一问题,IEEE 802.1Qav 指定了时延敏感流的转发和排队(Forwarding and Queuing of Time Sensitive Streams, FQTSS)操作,包括为时延敏感(具有时延和抖动约束)的实时音频/视频(Audio/Video, AV)数据流传输提供流量整形、优先级划分和队列管理等功能,现已合并到桥接网络基础标准 802.1Q 中^[14].

IEEE 802.1Qav 标准的具体技术主要有基于信用值的整形算法(Credit-Based Shaper, CBS)及严

格的优先级算法. CBS 是一种常用的网络流量整形和速率限制的算法. 如图 4 所示, CBS 整形的一般过程为: 赋予每个流队列一个信用值(一般对最大信用值都有限制, 即限制了一次可以发送的最大数据量), 当 AV 帧等待(即 AV 帧被其他帧阻塞)时, 信用值以空闲率(idle slope)为斜率线性增长; 而在流传输时, 为保持流在可控的时间内进行传输, 信用值将以发送率(send slope)为斜率线性下降直到其小于 0 时停止传输.

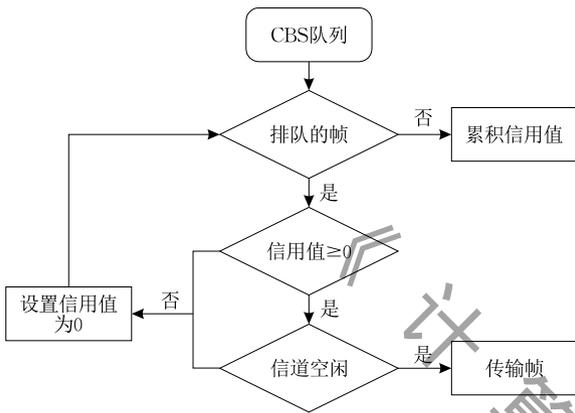


图 4 IEEE 802.1Qav 标准中的 CBS 算法流程图

CBS 算法可以通过修改信用值的上下界对突发流量进行更细致的控制. 这种整形算法操作简单, 可减少一定的突发流量并实现整形功能. 但 CBS 算法在侧重于提高带宽利用率的同时却增加了分组的平均时延.

(2) IEEE 802.1Qcr, 异步整形

IEEE 802.1Qcr 标准提高了分组传输的带宽利用率和降低了对时间同步的依赖性. 虽然时间感知整形器(Time-Aware Shaper, TAS)和蠕动整形器(Peristaltic Shaper, PS)(详细分析见 2.2.3 节)为时延敏感的 CDT 流提供了超低时延传送服务, 但它们依赖于精确的时间同步. 针对这些问题, IEEE 802.1Qcr 标准指定了异步流量整形器(Asynchronous Traffic Shaper, ATS)^[15]. ATS 是基于事件紧急性的调度器(Urgency-Based Scheduler, UBS)^[16], 它重塑了 CDT 流的排队和传输方式.

IEEE 802.1Qcr 主要引入 ATS 来对 ST(Scheduled Traffic)帧和 BE(Best Effort)帧进行调度传输. 在进入队列之前, 所有接收到的帧都需要通过 ATS 整形模块. 如图 5 所示, ATS 整形的一般过程为: 对于 ST 帧, ATS 整形器记录帧到达交换机的时间戳并计算逗留时间. 然后 ATS 将逗留时间与设定的阈值进行比较, 若前者小于后者, ST 帧进入队列排队; 若

前者大于后者, 则将 ST 帧引导到紧急队列中. 而 BE 帧在到达后将直接进行排队. 在进入紧急队列后, UBS 将 ST 帧分为静态优先级和最早截止时间^[17]两类, 利用速率控制器对其进行并行调度, 然后采取不同的速率控制策略, 如静态优先级、先到先服务或最早截止时间等. 同时在交换机出端口对常规 ST 和 BE 队列进行多路复用, 从而公平共享信道, 防止 BE 流出现“饿死”现象.

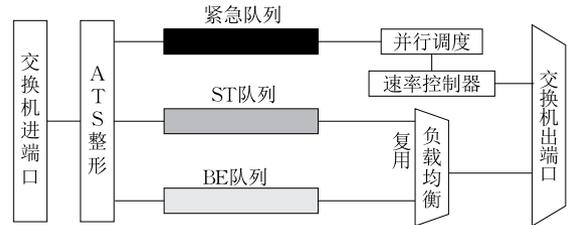


图 5 IEEE 802.1Qcr 标准中的 ATS 示意图

通过对速率控制器和调度器的分离, ATS 实现了带宽和有界时延两者的解耦. 同时它省去了实时同步的复杂操作, 因此可以有效地利用带宽, 即使在具有混合流量(周期性和非周期性流量)负载的网络环境下也适用. 但 ST 流和 BE 流因为共享信道传输出现的竞争行为会导致 ST 流时延性能下降.

2.2.3 流调度

(1) IEEE 802.1Qbv, 流调度的增强

IEEE 802.1Qbv 标准解决了帧调度时延的确定性问题. 在 TSN 中, 流量对于性能的需求不仅仅局限于时延和抖动, 它们更需要所有节点的传输时延和抖动是可预测和确定的. CBS 提供了 AVB 流的控制机制, 并支持一定程度上的突发, 但它并不能很好满足帧的时间可预测性送达需求. 因为即使是最高优先级的帧, 也必须等待低优先级的帧传送完后才能进行传输, 故时延抖动较大. 针对这些问题, IEEE 802.1Qbv 增强了流调度机制, 与 IEEE 802.1Qbu 帧抢占(frame preemption)技术(帧抢占标准在 2.2.4 节进行详细介绍)共同为 TSN 提供细粒度的 QoS.

IEEE 802.1Qbv 标准的具体技术主要有时间感知整形器(TAS)和门控列表(Gate Control Entries, GCEs)^[18]. 其中, TAS 在时间触发(时间感知)的窗口中调度 CDT 流, 因此它的基本思想是基于时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)技术^[19]的, 即给每个传输窗口分配不同的传输时隙, 使 CDT 流和非 CDT 流之间形成隔离, 减小相互间的干扰和帧间的重叠影响. 在通过时间感知的窗口

后, IEEE 802.1Qbv 标准通过门结构来控制帧的出队列操作. 如图 6 所示, TAS 的一般过程为: 门控列表控制门结构的开关状态, 1 和 0 分别表示每个队列的打开和关闭状态. 在时间同步后, 门通过门控列表周期性地打开, 确定流的调度时刻. 同时帧的传输还需要结合传输选择决策, 不同的流队列对应着不同的传输选择决策. 例如时隙 1 打开了 AVB 流的门结构, 只允许优先级为 1 的 AVB 流传输, 此时按照 CBS 算法对流进行调度; 时隙 2 打开了 TT 流 (CDT 流的一种) 队列的门结构, 只允许优先级为 0 的 TT 流传输, 此时按照严格的优先级顺序进行调度.

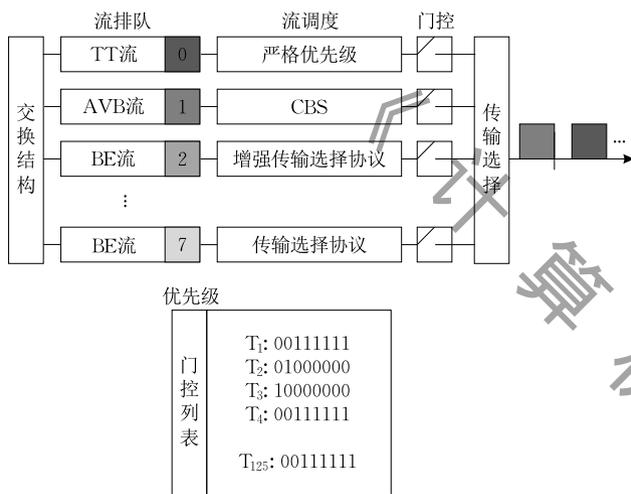


图 6 IEEE 802.1Qbv 标准中 8 种流的增强调度示意图

TAS 保证了 CDT 流的时延敏感特性, 同时隔离了非 CDT 流的干扰. 但流进入时间触发窗口前的等待操作会产生一些额外的时延, 且时延会随着交换机上不断到来的数据而累积. 同时, 在进行 TAS 门调度时, TSN 交换机的同步操作、帧传输选择策略在大规模网络中是不适用的, 并且需要额外的网络管理操作. 此外, TAS 隔离调度的方式降低了带宽利用率, 这也是一个值得思考的问题. 总体而言, TAS 调度的配置有较高复杂性, 扩展到大型网络是具有挑战性的.

(2) IEEE 802.1Qch, 循环排队和转发

IEEE 802.1Qch 标准解决了帧传输时的有界时延问题. 现有的 FQTSS 机制适用于软实时约束的网络传输, 缺点之一就是网络的最坏时延和网络的拓扑结构密切相关, 而不仅仅依赖网络跳数, 故很难获得有界时延. 为了解决这些问题, IEEE 802.1Qch 中引入了循环排队和转发 (Cyclic Queuing and Forwarding, CQF) 机制, 也被称为蠕动整形器

(PS)^[20], 实现网络零拥塞和有界时延.

CQF 机制允许交换机以循环方式实现帧的同步传输, 只要循环周期设置合理, 便可通过单跳时延确定总的网络时延, 即传输时延只与跳数和循环周期值有关, 而与网络拓扑无关^[21]. 如图 7 所示, CQF 的一般过程为: 假设有两个传输队列和一个循环周期, 在偶数循环周期间隔中, 队列 1 积累来自交换机接收端口的接收帧 (不传输), 这时队列 2 传输任何来自前奇数循环周期接收的帧 (不接收); 在奇数循环中, 队列 2 积累来自交换机接收端口的接收帧 (不传输), 队列 1 传输来自前偶数循环周期的接收帧 (不接收). 通过 CQF 机制, 任何时延敏感流都能在循环周期间隔内完成调度传输.

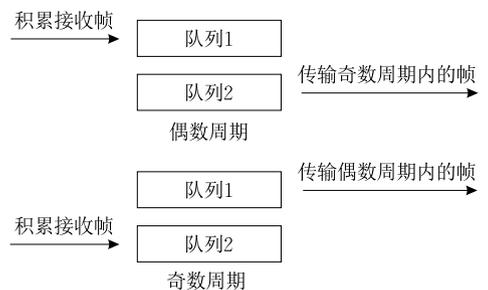


图 7 IEEE 802.1Qch 标准中的 CQF 示意图

CQF 循环周期的合理设置是其高效工作的重要保证, 同时它可以与 IEEE 802.1Qbu 标准中的帧抢占操作结合, 将周期时间减少到最小的帧片段时隙. 若在保证帧在分配周期内确定传输, 循环周期时间与队列周期时间的对齐操作将是一个重要前提和难点.

2.2.4 流抢占

IEEE 802.3br 标准和 IEEE 802.1Qbu 标准主要解决了超低时延和流优先级反转的问题. 流优先级反转指高优先级的帧必须等待正在调度传输的低优先级帧操作完成后才能进行调度. 这种现象阻碍了高优先级帧的及时调度, 使其时延特性随之变差. 为了解决这些问题, IEEE 802.3br 和 IEEE 802.1Qbu 两个标准通过帧抢占操作, 保证了时延敏感的高优先级流的超低时延.

IEEE 802.3br^[22] 标准定义了两个 MAC 合并子层, 即高速 MAC (express MAC, eMAC) 和可抢占 MAC (preemptable MAC, pMAC), 并定义了帧抢占的核心功能, 如帧的切片操作和还原等具体流程. 在流队列进行传输选择决策后, 帧抢占状态表将所有帧映射到 eMAC 和 pMAC, 其中 eMAC 帧和 pMAC 帧间的传输方式有两种: (1) eMAC 帧可以

抢占(中断)正在传输的 pMAC 帧;(2) eMAC 帧可以阻止 pMAC 帧的启动和传输. 进一步, IEEE 802.1Qbu^[23]为抢占操作提供了抢占接口和模块级别的定义,并具体阐述了帧抢占结合 CBS 机制的帧传输过程. 如图 8 所示, 抢占的一般过程为: 高优先级的帧通过切片动作对低优先级帧的传输进行打断, 然后在一个帧间间隔后进行传输. 而已传输的低优先级帧在等待高优先级帧传完后补全为完整的帧(在分片切断位置补上合适的前导码和校验码组装成原帧)后继续进行传输, 实现确定传输时间内不同类型流的共同传输.

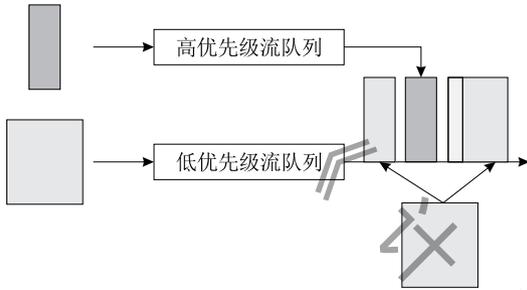


图 8 IEEE 802.1Qbu 标准中的帧抢占示意图

相比于严格的优先级调度算法, 帧抢占调度算法可以保证高优先级流的超低时延. 但是, 抢占操作会带来不可避免的开销, 增加了低优先级流的额外时延. 同时不同位置的切片操作产生的时延效果也是不一样的, 因此网络中低优先级流的时延将变得不确定, 即帧抢占调度算法无法保障低优先级流的抖动性能.

2.2.5 IEEE P802.1DC, 非桥接网络 QoS 规范

IEEE P802.1DC 标准拟解决非桥接网络的 QoS 规范问题. 上文所述的一系列流控机制都只适用于 IEEE 802.1Q 标准中定义的桥接网络系统, 因此 802.1 工作组正在制定 IEEE P802.1DC, 将其作为解决非桥接网络 QoS 规范问题的独立标准^[24].

IEEE P802.1DC 标准对桥接网络的 QoS 架构进行了修改, 移除了流分类和检测功能(中继系统功能), 同时在原有的 QoS 规范基础上增加了 ISS (Internal Sublayer Service) 等参数描述, 以适应非桥接网络系统.

目前, IEEE P802.1DC 标准化工作仍在进行中, 包括 YANG 模型以及管理信息库(Management Information Base, MIB)模块的修改等.

2.2.6 低时延流控标准小结

流控机制实现不同类型流量高效低时延转发和共享传输. 本文主要将 TSN 中的流量整形分为两类, 即时间触发的整形器(TAS)和事件触发的整形器(ATS), 两者各有优缺点. 流控中的调度算法按照上述分析可分为时间同步和时间异步的调度算法. 其中时间同步的调度算法主要有时间感知整形(TAS)和循环队列转发(CQF)等. 时间异步的调度算法主要有基于信用值的整形算法(CBS)、严格优先级(SP)调度、帧抢占(FP)以及异步流量整形(ATS)等. 表 3 为 TSN 低时延流控机制核心标准和算法对比分析.

表 3 TSN 流控标准对比分析

名称	核心算法	标准	时间	描述	时延	抖动	优缺点	应用
时延敏感流的转发与排队	CBS	IEEE 802.1Qav	异步	通过信用值的阈值大小控制 AV 突发流的大小	大	较小	支持突发流量传输, 但平均时延较大	突发流量有限、支持一定时延容忍的小规模网络
严格优先级	SP	IEEE 802.1Q	异步	按优先级顺序进行调度转发	高优先级流的时延较大	高优先级流的抖动较大	保证不同优先级流的服务质量, 但优先级反转会大幅增加时延	优先级固定、无优先级反转的简单网络
流调度增强: 时间感知整形	TAS	IEEE 802.1Qbv	同步	优先级队列后增加门结构控制帧的出队列操作	较小	小	隔离高低优先级流的传输, 但需要严格时间同步	支持复杂配置和管理的大型网络
帧抢占	FP	IEEE 802.3br、IEEE 802.1Qbu	异步	高优先级帧抢占低优先级帧的传输	高优先级流时延小	高优先级流抖动小	明显优化高优先级流的时延, 但切片位置选择存在一定抖动	存在优先级反转现象或流具有截止期限特性的网络
循环排队与转发	CQF	IEEE 802.1Qch	同步	以循环方式同步帧的传输	较小	小	可获得确定的网络时延, 但需考虑周期时间对齐的问题	对拥塞性能要求和实时性要求较高的网络
异步整形	UBS ATS	IEEE 802.1Qcr	异步	按优先级和截止时间对速率控制的帧进行并行调度	较小	较小	高效利用带宽, 竞争导致 ST 流时延性能下降	无需时间同步、混合流量负载的网络

2.3 可靠性标准

TSN 的可靠性主要指网络对故障的预防以及恢复能力. 如图 9 所示, 时间敏感网络的可靠性标准主要包括 IEEE 802.1CB 和 IEEE 802.1Qci 两个标准.

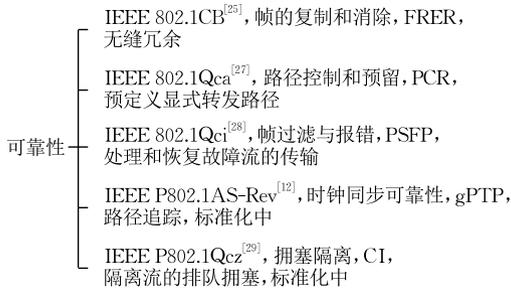


图 9 时间敏感网络可靠性标准导图

2.3.1 IEEE 802.1CB, 帧的复制和消除

IEEE 802.1CB 标准解决了帧的可靠通信问题. 控制类帧传输时的重要目标之一是高可靠性, 因此对丢包率指标有着严格的要求. 为了解决该问题, IEEE 802.1CB 标准制定了帧的复制和消除 (Frame Replication and Elimination for Reliability, FRER) 机制^[25], 将拥塞和故障影响降到最低.

IEEE 802.1CB 标准中的 FRER 机制允许网络为时延敏感类的控制帧传输提供冗余路径, 以保证其在网络故障时仍能可靠传输. 如图 10 所示, FRER 的一般过程为: FRER 对即将进行传输的帧进行复制并产生冗余帧, 然后在不相交的网络路径上对两者同时进行多径转发. 若两个帧都到达目的地后, 便删除重复的帧. 冗余帧的复制条件是流量类型和 TSN 流路径信息 (标识号)^[25], 这也是帧确定丢弃或传输的判断条件.

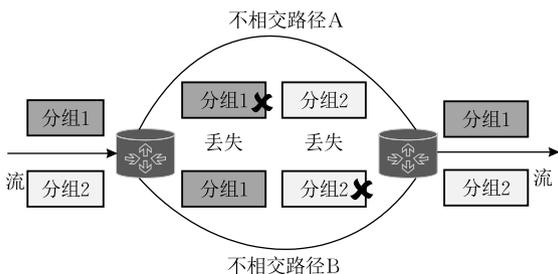


图 10 IEEE 802.1CB 标准中 FRER 示意图

为了降低网络拥塞, FRER 只能用于丢包敏感类业务, 而 BE (尽最大努力) 和其他容错业务则正常传输. 这种方式有效地提供了无缝的主动冗余, 而代价是消耗额外的网络资源, 同时分组的复制、路由和消除操作也需要较为复杂的集中管理.

2.3.2 IEEE 802.1Qca, 路径控制和预留

IEEE 802.1Qca 标准解决了帧的路由路径问

题. 逐跳转发通过路由表条目中的地址前缀匹配方式进行转发, 不能满足多种帧的传输服务差异性要求. 为了解决该问题, IEEE 802.1Qca 中引入路径控制和预留 (Path Control and Reservation, PCR) 机制, 对传统的链路状态协议 (Link State Protocol, LSP)、中间系统到中间系统 (Intermediate System-to-Intermediate System, IS-IS) 协议进行了扩展, 即更新了最短路径桥接 (Shortest Path Bridging, SPB) 协议中的路由方式^[26].

PCR 机制允许为流集中配置多条显式路径 (Explicit Paths, EPs), 即预先为每个流预先定义受保护的路径设置、带宽预留、数据流冗余 (包括保护和恢复)、流同步及流控制等信息^[27]. 另外, PCR 可以与 SDN 相结合, 在数据平面用 IS-IS 协议执行拓扑发现和路径计算等基础功能, 而在控制平面管理显式路径, 实现与数据平面 IS-IS 协议的交互.

与逐跳转发方式相比, 显式路径转发方式允许网络按照业务的 QoS 需求以及用户需求对资源进行灵活的分配, 并提供定制的流传输服务. 同时 SDN 集中式的控制可以管理冗余的显式转发路径, 将其作为保护路径.

2.3.3 IEEE 802.1Qci, 帧过滤与报错

IEEE 802.1Qci 标准解决了网络故障情况下的流处理问题. 网络中的设备出现故障或受到攻击将导致流量过载或者错误交付. IEEE 802.1Qci 标准通过对帧的过滤与报错 (Per-Stream Filtering and Policing, PSFP) 机制, 提高网络的健壮性^[28].

IEEE 802.1Qci 标准中的 PSFP 机制主要分为 3 个部分, 包括: (1) 过滤 (filtering). 根据流 ID 和优先级、过滤规范和策略等信息对流进行逐一过滤; (2) 门控 (gate control). 对过滤后的流进行有序的组织 and 传输; (3) 计量 (metering). 对通过门控后的流执行预先配置的带宽分配策略.

PSFP 机制提供了网络故障时对流的处理过程和方法, 是提高 TSN 可靠性的一个有效措施.

2.3.4 IEEE P802.1Qcz, 拥塞隔离

IEEE P802.1Qcz 标准拟解决队头阻塞 (Head-Of-Line blocking, HOL) 问题. 先入先出的排队机制使低优先级帧即使在缓存出口空闲时也必须等待高优先级帧进行处理, 这导致了资源的浪费和网络的拥塞. IEEE P802.1Qcz 标准引入了拥塞隔离 (Congestion Isolation, CI) 操作, 实现混合流量环境下的高端到端拥塞控制及可靠传输^[29].

IEEE P802.1Qcz 标准将 CI 定义为一种通过

隔离阻塞流避免 HOL 的方法. CI 的一般过程为:

(1) 使用如 AQM(Active Queue Management)之类的算法识别阻塞流;(2) 在阻塞流表中创建阻塞隔离信息(Congestion Isolation Message, CIM)实体;(3) 通过预先设定的阈值隔离阻塞流;(4) 识别无阻塞流存在;(5) 阻塞流表中删除 CIM 实体并进行转发.

CI 通过隔离多种流间的排队阻塞,减少了 SP 机制的使用频率,进一步解决了 HOL 问题. 目前 IEEE P802.1Qcz 正在标准化中.

2.4 网络管控标准

网络管控的主要功能包括对网络资源进行管理和配置及对性能数据进行监测和分析等. 其标准导图如图 11 所示.

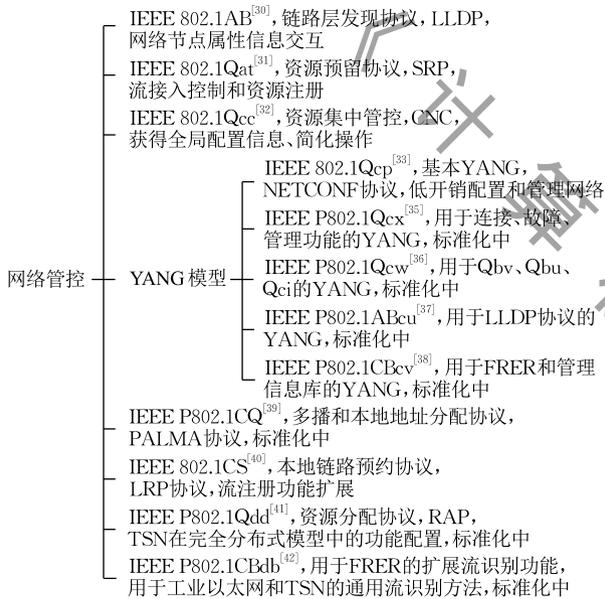


图 11 时间敏感网络网络管控标准导图

2.4.1 IEEE 802.1AB, 链路层发现协议

IEEE 802.1AB 标准解决了数据链路层网络拓扑的发现问题. 传统的基于交换机地址转发表的拓扑发现技术的算法难度较大, 且对数据完整性有着严格要求. IEEE 802.1AB 标准制定了链路层发现协议(Link Layer Discovery Protocol, LLDP), 实现特定设备向其它设备公布保存临近设备的发现信息功能^[30].

2.4.2 IEEE 802.1Qat, 流预留协议

IEEE 802.1Qat 标准解决了流的注册与预留问题. 传输路径上具有可用的资源是流在进行整形、调度和传输等过程的前提条件. IEEE 802.1Qat 标准制定了 SRP 协议, 并定义了基于流需求和网络可用资源的接入控制框架^[31].

2.4.3 IEEE 802.1Qcc, 网络集中管控

IEEE 802.1Qcc 标准解决了 TSN 网络的集中管控问题. SRP 协议中的流注册过程是分散且无区分的, 这将导致关键业务的时延增加. IEEE 802.1Qcc 标准提出了管理和控制 TSN 网络的三种模型^[32], 包括分布式模型、集中网络/分布用户模型以及集中式模型, 如图 12 所示.

分布式模型

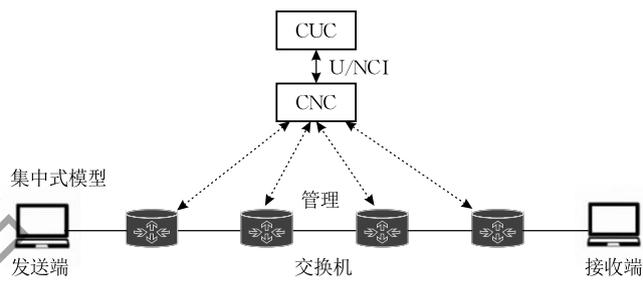
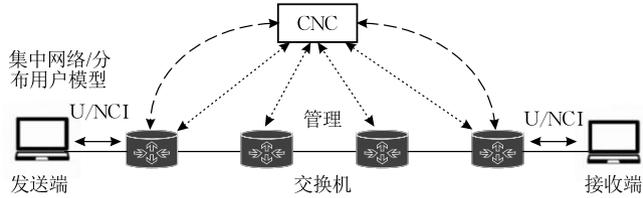


图 12 时间敏感网络三种配置模式示意图

在分布式模型中, 用户/网络配置信息(User/Network Configuration Information, U/NCI)通过用户网络接口(User Network Interface, UNI)从发送端逐跳传输到接收端, 这种方式的配置信息局限于本地交换机, 不能获得全局的配置信息; 在集中网络/分布用户模型中, 所有的用户需求都需要在 U/NCI 和集中网络配置(Centralized Network Configuration, CNC)实体(管理客户端)进行交互; 在集中式的模型中, 用户的需求不再通过每个 UNI 进行传输, 其 U/NCI 只在集中用户配置(Centralized User Configuration, CUC)和 CNC 之间进行通信, 用于发现终端用户、检索用户的需求以配置 TSN 的功能. 针对分布式网络、集中式网络以及混合式网络等应用场景, 标准中的三种配置模式实现了 TSN 基础设施和交换终端节点的灵活功能配置.

2.4.4 IEEE 802.1Qcp, YANG 数据模型

IEEE 802.1Qcp 标准解决了数据配置和管理模型的建立问题. YANG 数据模型是一种用于配置数据、状态数据、网络管理协议通知数据等的通用建模语言(UML), 它需要网络配置协议(如 NETCONF)

对其进行配置或者操作. IEEE 802.1Qcp 标准定义了 YANG 配置和操作状态模型并更新了 YANG 模型的层次框架^[33-34].

目前 802.1 工作组正在制定一系列 YANG 模型的修订和扩展标准. 其中 IEEE P802.1Qcx 标准拟制定用于桥接网络中的连接、故障和管理(Connectivity Fault Management, CFM)配置功能的 YANG 模型,同时阐述了 CFM YANG 数据模型与其他管理功能模型之间的关系^[35]; IEEE P802.1Qcw 标准拟制定支持 CNC 模型以及调度、抢占等配置功能的 YANG 模型^[36]; IEEE P802.1ABcu 标准拟制定用于 LLDP 协议(拓扑发现)配置功能的 YANG 模型^[37]; IEEE P802.1CBcv 标准拟制定用于 FRER 和 MIB 配置功能的 YANG 模型^[38].

2.4.5 IEEE 802.1CQ, 多播和本地地址分配协议

IEEE 802.1CQ 标准拟解决网络设备地址分配问题. 全球地址空间随着虚拟机和物联网设备的大量使用而逐渐耗尽,迫切需要可用的全局地址替代方案. IEEE 802.1CQ 标准提出多播和本地地址分配协议(Protocol for Assignment of Local and Multicast Addresses, PALMA),实现地址局部分配^[39]. PALMA 协议是解决 IEEE 802 网络设备地址空间有限问题的有效方法. 目前 IEEE 802.1CQ 正在标准化中.

2.4.6 IEEE 802.1CS, 本地链路预约协议

IEEE 802.1CS 标准改善了流的预约和快速注册过程. SRP 协议虽然提供了流注册方法,但保存流状态信息的数据库空间是有限的. 随着网络业务的增加和规模的扩大,流注册过程将减缓,导致 SRP 域内的状态信息交换加快. IEEE 802.1CS 标准提出本地链路预约协议(Link-Local Reservation Protocol, LRP),制定了一系列修改 SRP 数据库的操作,完善了流的注册过程^[40].

目前 802.1 工作组正在制定 802.1CS 的子标准——IEEE P802.1Qdd,并在 LRP 协议和 MSPR 协议的基础上制定了资源分配协议(Resource Allocation Protocol, RAP),补充和扩展了完全分布式网络模型中的 TSN 功能配置^[41].

2.4.7 IEEE 802.1CBdb, 扩展的流识别功能

IEEE 802.1CBdb 标准拟解决流的通用识别问题. 由于工业自动化网络需要工业以太网和 TSN 的融合,故 TSN 节点和非 TSN 节点间的流识别功能显得尤为重要. 目前的流识别方法局限于 TSN 标

准(如 IEEE 802.1CB),而工业以太网的流识别需要非 IP 的上层协议参数. IEEE P802.1CBdb 标准扩展了流识别功能,区分 2 层网络和上层网络流识别参数,以适应工业以太网和 TSN 融合的网络^[42]. 该标准目前正在考虑根据不同的实时应用或协议,实现灵活的流识别功能.

2.5 应用场景标准

TSN 在许多场景中有着重要应用,如图 13 所示,包括专业音视频、工业互联网、移动前传、运营商网络、车辆内网络及智能电网等应用.

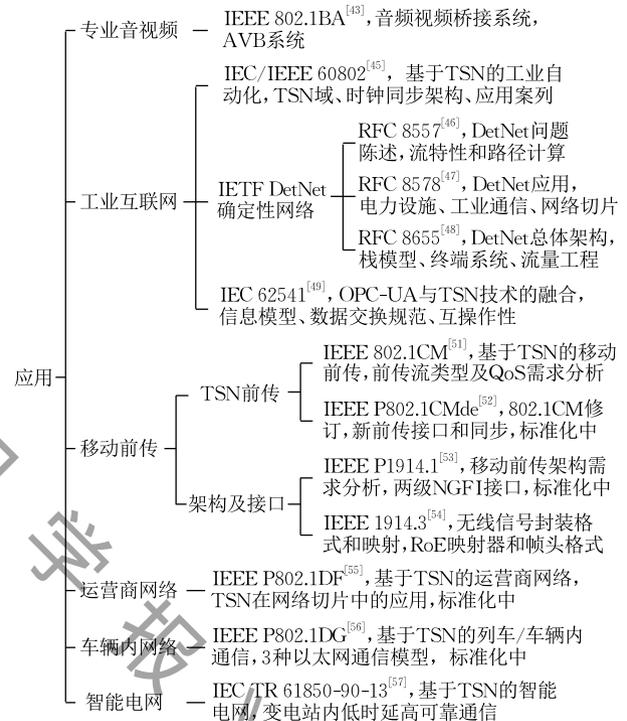


图 13 时间敏感网络应用场景标准导图

2.5.1 IEEE 802.1BA, 音频视频桥接系统

IEEE 802.1BA 解决了音频视频桥接(Audio Video Bridging, AVB)系统的文件配置问题,成为 AVB 广泛应用于不同场景的基础文件之一^[43].

2.5.2 工业互联网

(1) IEC/IEEE 60802, 基于 TSN 的工业自动化

IEC/IEEE 60802 标准解决了 TSN 在工业自动化领域的应用问题,为 TSN 在工业自动化领域中的应用提供了技术规范^[44-45].

(2) IETF DetNet 确定性网络

DetNet 主要解决三层的确定性路由转发问题,目前已完成 RFC 8557、RFC 8578 和 RFC 8655 三个标准. 其中 RFC 8557 对 DetNet 进行了问题陈述^[46]; RFC 8578 对 DetNet 的应用场景进行了描述和分析^[47]; RFC 8655 定义了 DetNet 的总体架构^[48].

(3) IEC62541, OPC-UA 与 TSN 的融合

IEC62541 标准解决了应用层语义解析的问题,通过一系列的标准机制和规范,实现不同数据和控制命令间的通信,为工业互联网数据互联互通提供了可能性^[49-50]。

2.5.3 移动前传标准

(1) IEEE 802.1CM, 基于 TSN 的移动前传

IEEE 802.1CM 标准解决了移动前传严格时延和高容量连接问题,根据 CPRI 和 eCPRI 规范分别定义了不同的流量模式以支持不同移动前传架构^[51]。目前 802.1 工作组正在制定 IEEE 802.1CMde 标准,对流规范进行增强修订,以支持新的前传接口和同步等标准^[52]。

(2) IEEE 1914, 移动前传架构及接口

IEEE 1914 工作组制定了 IEEE P1914.1 和 IEEE 1914.3 两个子标准,前者为了满足 5G 前传架构演变以及 BBU 功能分割的需求,定义了两级 NGFI (Next Generation Fronthaul Interface) 接口^[53];后者为了实现移动前传中 CPRI (Common Public Radio Interface) 数据在以太网中的传输,定义了两种将 CPRI 帧和 RoE 帧映射成为以太网帧的映射器,同时对帧头封装格式进行了解释,重点描述了 RoE 头部和载荷字段^[54]。

2.5.4 IEEE P802.1DF, 基于 TSN 的运营商网络

IEEE P802.1DF 标准拟解决 TSN 在运营商网络中的应用问题,对 TSN 在运行商网络中的应用可行性以及场景进行了分析,包括对应用 TSN 技术消除网络切片间的干扰问题做出了详细分析^[55]。

2.5.5 IEEE P802.1DG, 基于 TSN 的车辆内网络

IEEE P802.1DG 标准拟解决基于 TSN 的列车/车辆内网络的模型建立以及应用问题,对现有的 E/E 架构发展进行了分析和改进,同时对 TSN 在车辆内以太网通信模型中的应用做出了详细分析^[56]。

2.5.6 IEC TR 61850-90-13, 基于 TSN 的智能电网

IEC TR 61850-90-13 标准解决了 TSN 在智能电网中的应用问题,对 TSN 技术在智能电网中应用可行性进行了分析,重点介绍和分析了变电站内部信号处理流程以及总线通信方式,规范了变电站内部通信要求^[57]。

3 时间敏感网络研究现状

本节将对时间敏感网络的研究现状进行综述分析。对应于标准部分的内容和顺序,本节重点对时间

同步、低时延流控、可靠性三个方面的研究现状进行分析。网络管控及应用研究因文献相对较少和篇幅所限未在本文进行综述分析。

3.1 时间同步研究现状

时间敏感网络时间同步问题研究如图 14 所示,主要分为同步机制和时钟精度两个方面。

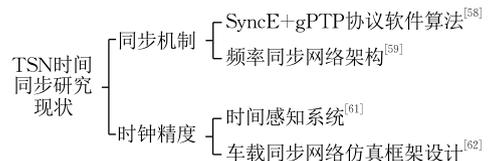


图 14 时间敏感网络时间同步研究现状

3.1.1 同步机制

同步机制是影响时间同步性能的重要因素,其目标是提供全局统一时钟信息以及节点的参考时钟信息,进而实现本地时钟的调整和整个网络的时间同步。文献^[58]结合同步以太网(Synchronous Ethernet, SyncE)及 gPTP 协议两者优势,物理层使用 SyncE 技术提供公共计时频率标准,并通过数字锁相环的方式对时钟频率进行了合理分配和调整;控制层使用 gPTP 协议计算时间同步误差,实现相位同步。最后在基于 FPGA 的 TSN 原型上实现了纳秒级的高精度同步,包括单跳网络相位误差控制在 2 ns 以内,以及六跳网络相位误差在 10 ns 以内。由于物理层采用 SyncE 技术调整频率具有一定的操作复杂性,网络开销会随之加大。为此 Li 等人^[59]提出一种支持交换和路由的时间同步架构,同时在该架构中添加流的低时延处理模块,实现了同步信息的低时延和低抖动传输。这种频率同步方法和硬件实现过程对网络开销进行了控制,同时具有良好的可扩展性。

3.1.2 时钟精度

高时钟精度要求是大多数分布式系统成功运行的先决条件。它由广泛的网络属性决定,包括时钟漂移和环境影响等。Mahmood 等人^[60]详细描述了影响时钟精度的主要因素及相应的改进措施。

时钟漂移是影响时钟精度的重要因素,但参与节点同步的时钟漂移过程是不可控的。为此 Shrestha 等人^[61]对现有 PTP 协议进行了扩展,通过引入时钟漂移因子以估计时钟的漂移量,实现本地时钟的校正和调整。最后仿真实验结果显示,该增强的 PTP 协议在不同的 WLAN 信道模式下皆可达到纳秒级的时钟精度,比商用的 PTP 协议(约 50 ns)有较大提升。同时文中对不同时钟漂移因子下的同步

时延性能进行分析,得到同步时延与时钟漂移因子呈负相关关系.针对关键控制和自动化应用中的工业无线传感器网络,该协议实现了节点之间的高精确时间同步功能.但产生时钟漂移的因素是复杂且多元的,漂移因子的定义和选取是决定整个网络时钟精度的重要环节.为此 Gutierrez 等人^[62]在综合考虑影响时钟精度因素的基础上设计了一套时间感知系统,在传输同步消息的同时检测抖动和驻留时间等信息,以调整本地时钟并达到提高时钟精度的目的.最后在 OMNeT++ 平台上的仿真实验表明,每个节点的抖动和时钟粒度等因素影响着整个网络的时间同步精度,时钟同步精度在 100 跳的网络下增加到了 2 ms.

3.2 低时延流控研究现状

TSN 低时延流控机制研究现状如图 15 所示.目前低时延流控问题研究主要分为流整形、流调度和流抢占三个方面.

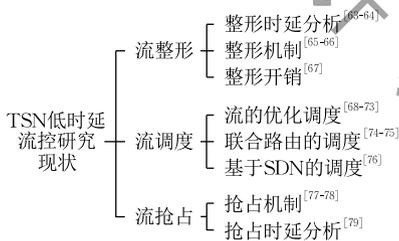


图 15 时间敏感网络低时延流控研究现状

3.2.1 流整形研究

(1) 整形时延分析

在一些具有流实时传送要求的应用场景中,整形机制的时延分析显得尤为重要.文献^[63]对车载时间敏感网络中突发限制整形器(Burst Limiting Shaper, BLS)、时间感知整形器(TAS)和蠕动整形器(PS)的时延和抖动性能进行了对比分析.在基于事件触发的汽车网络模型中模拟和评估得到以下结论:TAS 具有最佳的低时延和低抖动性能,却具有最高的配置复杂性;CBS 的时延性能最差,但却保证了流的 QoS;ATS 的时延性能介于两者之间,配置复杂性最低.为对整形器的时延性能进行确定性分析,Zhou 等人^[64]对 IEEE 802.1Qcr 标准中 ATS 机制的最坏时延进行了数学分析,并在建立的网络模型上提出了两种异步整形算法:UBS/LRQ (Length-Rate Quotient)和 UBS/TBE(Token Bucket Emulation).最后通过仿真实验得到,LRQ 算法和 TBE 算法的丢包率均为 1.27% (预留带宽为 5.69 Mbps);LRQ 算法的平均单跳时延为 8 ms, TBE 算法的平均单跳时延为 6.8 ms.文中虽然指出

了不同算法的应用场景,但它们只针对单跳网络情景,未对多跳或更复杂的网络场景进行分析.

(2) 整形机制

网络性能(特别是时延性能)最坏边界分析是网络 QoS 问题研究的重要方面,而当前的随机过程和排队分析模型无法对网络性能进行确定性分析.网络演算(Network Calculus)理论是一种新兴的分析网络节点和系统性能的数学工具,可实现端到端流量 QoS 的精确分析.在 AFDX(Avionics Full Duplex Switched Ethernet)网络中,Finzi 等人^[65-66]提出了一种基于网络演算的计算硬实时约束流量(Safety-Critical Traffic, SCT)和速率受限(Rate Constrained, RC)流量端到端时延界限的方法.文中提出用 NPSP(Non-Preemptive Strict Priority, Scheduler)调度器对不同类型流的优先级进行管理,同时将 BLS 集成到 NPSP,共同对 SCT 流进行整形.最后通过实验仿真得到:RC 流的平均时延为 5 ms,且时延上限提高了 74%;SCT 流平均时延为 2 ms,且带宽利用率提高了 50%.

(3) 整形开销

流整形时不可避免会带来额外的网络配置开销.例如 TAS 需要对每个 TSN 节点的流信息进行配置和管理,这将影响整个网络的配置开销.针对该问题的研究,Farzaneh 等人^[67]提出了一种基于本体论(Ontology)的方法,扩展了 TSN 在车载网络中即插即用和自动网络配置方面的功能.TSN 节点在自动配置前需要获取可用节点和相应节点的信息属性,包括设备信息、交换机信息、QoS 需求信息和 TSN 一般特征信息^[67].基于这些信息属性,本体论可建模成元模型,每当网络中发生即插即用事件的时候,TSN 节点的自动配置便会运行,从而管理和配置节点的开销.这种方式有效降低了流整形操作所带来的网络配置开销.

3.2.2 流调度研究

(1) 流的优化调度

为了实现 TAS 队列帧的低时延抖动传输,非 TAS 队列的门会在 TAS 队列的门打开前关闭一段时间,这段时间称为“保护带(guard bands)”.时延敏感的控制数据流(如 TT 流)在调度时需额外增加保护带,实现与其它流的隔离传输.因此减少保护带数量成为降低控制流调度时延的关键问题.为此,Durr 等人^[68]提出将 TT 流的调度问题转换为无等待的数据包调度问题(No-Wait Packet Scheduling Problem, NW-PSP),进一步将其抽象化为无等待作

业的车间调度模型,并在此基础上采用禁忌(Tabu)搜索算法减少了 TT 流调度时产生的保护带数量.最后通过仿真实验得到 50 条流的调度执行时间保持在 10s 以内,且平均减少了 24% 的保护带数量.

“保护带”的存在使链路在一段时间内处于空闲状态,从而导致带宽的浪费.目前这个问题的研究大多数聚焦在对 IEEE 802.1Qbv 中的门控调度方式的改进和扩展工作方面. Heilmann 等人^[69]在不减少和缩小保护带的前提下对门控调度方式进行了修改.文中提出的 SBQ(Size-Based Queuing)机制通过引入额外的队列对非 TAS 队列中的帧进行分离传输.根据帧的优先级以及大小信息,SBQ 机制能够为每个队列提供足够的输出带宽,对应缩小了“保护带”和提高了带宽利用率.但文中并未对加入队列的阈值参数进行定量分析,无法准确地量化 SBQ 提升的带宽利用率等性能指标.不同 TAS 配置下的网络开销不尽相同且最优调度问题的求解是 NP 难的.目前部分研究将这个组合问题转换为可满足性(Satisfiability, SAT)问题,利用可满足性求解器进行求解. Craciunas^[70-73]小组分析了影响实时流量的有界时延抖动和确定性端到端时延的因素,并将它们转换成约束条件和一阶阵列理论(first-order theory of arrays)模型,利用可满足性模块理论(Satisfiability Modulo Theories, SMT)和优化模块理论(Optimization Modulo Theories, OMT)求解出了 TAS 不同配置下的调度方案.最后通过实验仿真得到,简单拓扑结构(1 个交换机,3 个终端系统)下的流平均运行时间约为 1s.

(2) 联合路由的调度

门控机制决定着交换机输出端口上队列的转发顺序.适当控制门结构的开关状态可实现流的精确调度.这种传输调度计算方式首先需要对流进行路由,然后计算沿各自路径路由后的调度结果. Nayak 等人^[74]在整数线性规划(Integer Linear Programming, ILP)公式基础上提出了 MSTL(Maximum Scheduled Traffic Load)算法,对 TT 流的路由过程进行了优化.文中同时考虑了跳数对 TT 流路由的影响,并在最后的实验评估证明了 MSTL 比最短路径路由算法的可调度性提高了 60%,比等价多路径路由算法(ECMP)的可调度性提高了 30%.但这种算法提高了运算复杂度,增加了运行时间.相似的方法在文献^[75]中也有提到,但该方法只针对时隙重叠约束条件进行优化求解,不适用于约束条件较多的大型网络.

(3) 基于 SDN 的流调度

软件定义网络(Software-Defined Networking, SDN)具备逻辑集中控制和管理流的特性,因此基于 SDN 的流调度研究也是当前研究热点之一. Nayak 等人^[76]提出了在时间敏感软件定义网络(Time-sensitive Software Defined Networking, TSSDN)架构上,利用 ILP 建模调度问题,验证了不同静态和动态调度算法下 ILP 求解质量的好坏.最后的实验数据表明,静态调度算法运行时间明显低于动态调度算法,但可调度性和时延的表现很差;快速和轻量级的在线动态调度算法实现了 TT 流子秒内的增量调度,但算法的平均运行时间同时增加到 10s 左右.

3.2.3 流抢占研究

(1) 抢占机制

在进行帧抢占的过程中,保护带具有不干扰控制流传输的作用.由于 AVB 流不能在保护带内传输,因此减少保护带是提高带宽利用率的一个关键技术. Lee 等人^[77]介绍了一种新的减少保护带的机制,他们利用 TSN 节点的同步特性准确地计算了可抢占帧的大小.考虑到同步误差, Lee 等人^[77]将保护带大小设为 20 字节.与 IEEE 802.1Qbu 标准进行对比,结果验证了该机制在降低 AVB 流平均时延方面的优越性.但这种机制却带来了较大的开销,并会因重新缓存抢占帧而产生额外的排队时延. Jia 等人^[78]也通过设置合适的帧间隔,将抢占机制的带宽利用率最大化,同时与基于优先级的非抢占机制进行了对比分析.

(2) 抢占时延分析

不同于传统以太网,时间敏感网络中的 CDT 流对非 CDT 流的抢占机制虽然保证或改善了前者的时延性能,但同时也给后者的传输带来了影响,影响的大小主要表现为抢占不同优先级流产生的端到端时延差异. Thiele 等人^[79]对以太网进行了时序分析,得到了 CDT 流抢占情况下的最坏时延界限.同时他们设置了一个真实的汽车以太网环境来分析标准以太网和 TSN 在抢占时的最坏情况的时延性能,最终证明具有抢占性的以太网与 TSN 在 CDT 流和非 CDT 流的时延性能方面的表现相当,而且标准以太网更容易管理和部署,例如不需要转发调度及时间同步等操作.

3.3 可靠性研究现状

TSN 的可靠性主要包括对故障的预防以及恢复能力.如图 16 所示,TSN 可靠性问题研究主要分为帧的复制与消除、故障检测与恢复、容错拓扑与路



图 16 时间敏感网络可靠性研究现状

径选择以及时间同步可靠性。

3.3.1 冗余机制

帧的复制与消除(FRER)主要通过给时延敏感流提供冗余帧和路径,以保证其可靠传输。Pahlevan 等人^[80]构建了一个基于 Riverbed 的仿真模型,在高度冗余的列车网络结构上设置了不同故障情形,实现 TSN 中的时间特性和冗余管理评估。实验结果表明,FRER 机制使 TSN 不受暂态故障(如电磁干扰)的影响,并在永久故障(如链路故障、节点崩溃)情况下提供有界端到端时延和零丢包。

TSN 中的冗余机制包括空间冗余和时间冗余两种。空间冗余一般用来解决永久故障,而时间冗余一般用来解决网络中的暂态故障。文献^[81]通过帧的自动复制和重传,对时间冗余方式进行了探讨研究。文中重点阐述了帧复制的两种方案:(1)基于发射端的方法:发射端负责复制和发送所有帧,交换机转发接收到的每个副本,这种方法带宽利用率不高;(2)基于链路的方法:只要一个帧的复制副本到达,便在每条链路上发送多个副本,这种方法导致部分节点进行多次可靠性操作。同时提出了几种确定传输副本数量的方法,以及有效复制帧和识别复制所需的不同步骤等内容。该文虽然对 FRER 机制进行了深入的理论分析,但并未对不同场景下的时间冗余方式进行定量分析。

3.3.2 故障检测与恢复

针对部分对时延要求不高的场景,故障检测与恢复也是一个提供可靠通信的重要措施。Nakayama 等人^[82]设计了一种新的链路故障检测和恢复方案。提出了在时分双工网络架构上,对无线信号到达时间进行预测,从而估计链路故障的位置,然后将受影响的流快速切换到备份路径上。该方案本质属于多径转发的类型,同样具有高带宽消耗的缺点。

3.3.3 时间同步可靠性

Balakrishna 等人^[83]提出了一种基于 IEEE 802.1As-Rev 标准的仿真框架,用于评估基于 TSN 的系统中全局时钟的可靠性。文中利用仿真框架中对不同的 TSN 同步模块进行了评估,如最佳主时钟算法(BMCA)、同步和对等时延测量等。最后文中重

点研究了时间同步在节点故障或链路故障情况下的可靠行为,并在构建的 7 跳列车网络示例场景中进行了模拟实验,得出该框架下的时间同步精度保持在 1ms 以内,验证了 TSN 时间同步在现代网络系统中的适用性和可靠性。

3.4 国内研究现状

国内的学术界、企业界,在 TSN 方面也进行了相关研究。清华大学 Zhao 等人^[84-86]研究了时间触发以太网调度的关键技术(包括快速实时调度、自适应调度、容错调度等)及其在列车通信网络中的应用。国防科技大学 Bu 等人^[87]研发了支持 TSN 关键技术验证的开源项目 OpenTSN,包括同步网络 SyncNet 以及 TSN 网络监测器等工作。中国科学院沈阳自动化研究所 Liu 等人^[88]研究了 TSN 在工业自动化系统中的应用。北京邮电大学 Huang 等人^[89]以 OSI 网络层次结构模型为基础,从物理层、数据链路层以及网络层对确定性网络进行了综述分析,对关键技术 FlexE、TSN 以及 DetNet 进行了讨论比较,并展望了确定性网络的研究挑战。

华为公司在 2019 年汉诺威博览会期间,展示了面向智慧工厂 Smart Factory 的边缘计算 OPC UA over TSN 测试床^[90]。该测试床基于 OPC UA over TSN,可以提供一个实时、高确定性与开放互联的通信网络,可满足工业生产安全、实时和可靠的需求。华为 TSN 解决方案通过 SDN 实现统一网络管控,基于专有调度算法,优化 TSN 网络利用率。

4 时间敏感网络研究方向与挑战

目前,时间敏感网络 TSN 处于标准化前期,其研究仍处于一个起步阶段。TSN 及其应用的研究方向和挑战主要包括以下几个方面。

4.1 时间敏感网络组网技术研究

为保证整个 TSN 网络的端到端性能,需从网络各层次对 TSN 组网技术进行研究。

在数据链路层,TSN 通过流控机制、帧抢占机制及帧的复制消除机制,保证了业务流的确定低时延可靠传送。从应用范围来看,TSN 属于局域桥接网络技术,多应用于园区系统(如工厂内网)内。TSN 交换机是主要设备形态,但是 TSN 控制平面技术和网络管理技术仍需进一步研究。

在网络层,确定性网络 DetNet 通过资源分配、服务保护与显式路由等关键技术实现流的确定低时延传输。DetNet 可互联多个 TSN 域提供广域的确

定低时延流传输服务. 目前 IETF 正在对 DetNet 进行标准化, 包括网络体系结构等. TSN 是 DetNet 底层关键技术之一. 如何实现 DetNet 数据平面技术 TSN、IP 及 MPLS 的相互封装映射仍是挑战之一. 同时, DetNet 的控制平面、OAM 等技术仍待研究.

在传输层, 面向 TSN 的低时延 TCP 和多径 TCP 机制是未来研究课题. 传统 TCP 协议通过拥塞控制机制提供可靠的流服务, 不能满足工业等应用中低时延、确定性等服务需求. 因此, 如何设计低时延 TCP 以及智能的拥塞控制机制是实现 TSN 端到端服务的研究挑战之一. 另外, TSN 利用分组复制和多径转发实现流可靠传送, 因此如何应用多径 TCP 至 TSN 仍待研究.

在应用层, OPC-UA 与 TSN 融合, 实现工业互联网从现场层、控制层、管理层直到云端的统一数据通信. OPC-UA 标准解决了工业互联网中水平集成与垂直信息集成两个维度的“语义互操作”问题, 是实现 OT 与 IT 融合的基础. OPC-UA 基于 TCP/IP 客户-服务器通信或基于发布-订阅模型通信, 实现工业互联网各层通信功能. 如何建立映射到 TSN 的统一通信特征集(如设备类型配置文件、IP 地址、标识符、设备标识等)是实现不同供应商互操作性的关键问题之一.

4.2 无线时间敏感网络技术研究

无线技术也是工业互联网的连接技术之一. 无线技术由于其本身的物理限制, 在复杂的工业环境中应用, 与有线 TSN 网络技术相比面临更大挑战. 具备 TSN 特性的无线网络技术是未来工业互联网的重要组成部分之一. 具体研究方向和挑战如下:

无线 TSN 面向工业互联网应用, 需要提供确定低时延流调度能力, 如有线 TSN 的 802.1Qbv. 如何在无线网络环境中实现类似于 802.1Qbv 的流调度能力成为研究挑战之一.

无线 TSN 与有线 TSN 网络实现同步是面向工业应用场景的关键能力需求之一. 有线 TSN 采用 gPTP 协议实现同步, 研究如何实现无线 gPTP 机制并与有线 TSN 实现联合部署与协调同步是关键技术难题之一.

超高可靠低时延通信是 5G 的三大应用场景之一. 工业互联网是 5G 的典型应用. 高通公司研究组^[91]提出面向工业互联网的利用 5G 实现 TSN 交换机功能思想和原型系统, 实现与有线 TSN 网络的互联互通. 英特尔公司研究组^[92]阐述了将 TSN 技术能力应用至无线网络面临的技术挑战, 以及如

何扩展现有无线网络包括 802.11 与 5G 的可靠性与低时延能力的相关技术, 并讨论了无线 TSN 与有线 TSN 网络融合面临的挑战. 因此, 如何将无线 5G 技术与有线 TSN 技术实现无缝融合是工业互联网重要且关键的技术难题之一.

4.3 基于时间敏感网络技术的应用研究

4.3.1 基于时间敏感网络的移动前传技术研究

移动前传架构是 5G 及未来移动通信网络的关键组成部分之一. 如何基于 TSN 构建灵活、高效、可靠的移动前传网络成为研究挑战之一.

在基于 TSN 帧的无线信号高效封装方法研究方面, 文献^[93-94]研究了使用以太网帧封装 CPRI 信号的时延与抖动问题, 实验与仿真结果显示通过流调度其性能满足前传需求, 验证了以太网前传方案的可行性. TSN 网络本身具备同步、低时延、高可靠等特性, 但是如何根据无线采样信号的需求包括: 时延、带宽、同步、抖动等, 基于 TSN 帧高效封装无线信号是仍待解决的关键技术问题之一.

移动前传网络中的 IQ(In-phase and Quadrature modulation)数据流具有时延敏感的特性, 基于 TSN 的移动前传流调度机制可保证其严格的时延需求^[95]. 但目前将 TSN 应用于前传网络时存在一些问题, 如前传网络背景流具有生成时间不确定和速率非恒定特性, 影响关键流传输的时延与抖动等性能, 因此需要修改 TSN 流调度机制或扩展 TSN 流调度标准, 以解决前传网络本身存在的问题. 基于 TSN 的移动前传网络的流调度机制是 5G 及未来移动通信网络的研究难点之一.

移动前传网络流量具有高可靠性要求^[96]. TSN 网络采用了流量分组复制与消除的技术实现流的可靠传输, 本质上是一种 1+1 的备份机制. 但是移动前传流量类型众多且需求各异, 因此 IEEE 802.1Q 中的流量优先级划分规则需要修改扩展以解决前传流量的优先级映射问题. 在此基础上如何根据流量类型和需求实现差分流保护与恢复是亟待解决的技术难题之一.

4.3.2 基于时间敏感网络的工业互联网技术研究

(1) 确定低时延工业通信

工业通信和自动化系统对实时通信有着严格要求^[97]. 从 TSN 流量模型来看, 工业通信中的实时数据与 IEEE 802.1Q 中的流量模型并不匹配, 应用 TSN 低时延流控机制传输工业实时数据受到限制. 如何扩展 TSN 流量模型成为工业实时通信待解决的技术难题之一.

从 TSN 数据交换方式来看, TSN 交换机的存储-转发方式并不能达到理论上的最小时延性能. 工业以太网中的直通式转发技术根据数据包目的地址进行转发, 具有时延低和吞吐量高的优点, 但同时存在错误或冗余数据包增加的缺点. 如何将直通转发技术与 TSN 结合是一个技术难题.

从 TSN 流控机制来看, TSN 中的门控调度方式在时延性能表现方面较优, 但门控列表的确定过程却比较复杂, 特别是在复杂的工业生产线上, 实时调度问题的求解是 NP 难的. 虽然目前已有部分研究通过启发式算法或通用工具与理论(如 ILP、SMT 等)对工业调度问题作了初步探索, 但距离真正的实时调度和通信还有一定的差距. 如何扩展门控调度方式和优化调度求解器成为技术难题之一.

(2) 时间敏感网络与 OPC-UA 的融合

TSN 的确定低时延可靠传输与 OPC-UA 的增强型发布-订阅功能的融合, 为工业互联网提供统一的标准模块构建, 实现 IT 信息技术与 OT 操作技术的无缝融合, 为工业物联网与工业 4.0 奠定基础^[98]. TSN 与 OPC-UA 的融合存在如下技术挑战.

从网络层次架构来看, TSN 侧重数据链路层, OPC-UA 注重应用层、表示层与会话层等, 而面向工业互联网的网络层和传输层相关协议与技术仍需研究. 信息中心网络^[99]以信息内容为中心, 解耦数据发送与接收, 由接收端驱动实现通信, 采用发布订阅架构, 与 OPC-UA 的发布订阅通信模式一致, 可满足工业互联网通信的需求. 因此如何具体构建完整的网络层次架构实现 TSN 与 OPC-UA 高效融合的工业互联网是关键挑战之一.

从网络的管控来看, 网络的控制平面(包括集中网络配置和集中用户配置)与数据平面无缝集成使得 TSN 与 OPC-UA 融合网络的管控更方便. 然而, 如何具体部署控制平面功能成为研究问题之一. 基于云计算的集中式部署或基于边缘计算的分布式部署或云边协同的混合部署是控制平面功能部署候选技术方案.

4.3.3 基于时间敏感网络的车辆内网络技术研究

车载时间敏感网络是面向未来智能自动驾驶的车辆内网络关键技术之一. 车辆内网络中传统域和分区模型中的中央网关电控单元(Electric Control Unit, ECU)与域控制器采用的是非以太网(如 CAN 总线)连接方式, 且 ECU 之间采用点到点通信方式^[100]. IEEE P802.1DG 标准结合 TSN 对域模型进行了修改. 在域内, 考虑到 ECU 之间和与控制器之

间的低时延通信要求, 模型采用以太网连接方式用于传输带宽需求较高的流量, 且使用 TSN 技术以保证其通信 QoS 需求. 在域间, 模型根据所需链路带宽将所有的域控制器连接起来, 以抽象出底层的物理网络连接, 实现不同域间的应用程序通信, 且 TSN 分布式的处理方式降低了网络冗余和域控制器的开销. 但是汽车内流量类型的适配、TSN 网络拓扑结构与可靠性机制、网络管控技术等仍待进一步研究, 以满足车辆内通信的实时安全可靠需求.

5 总 结

流的高可靠和确定有界低时延传送成为未来产业互联网众多应用的重要需求. 时间敏感网络基于以太网制定了一系列扩展标准, 并提出多种相应的时间同步、低时延流控、可靠性和网络管控机制以满足各种应用场景需求. 本文在对时间敏感网络标准和研究进行综述分析的基础上, 讨论了其研究挑战与发展趋势, 为后续该领域的研究奠定基础. 时间敏感网络实现流的可靠和确定有界低时延传输, 为未来工业自动化、移动前传网络、车辆内网络、智能电网、工业互联网等应用提供网络通信方案.

参 考 文 献

- [1] Wollschlaeger M, Sauter T, Jasperneite J. The future of industrial communication: Automation networks in the era of the Internet of Things and Industry 4.0. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2017, 11(1): 17-27
- [2] Simsek M, Aijaz A, Dohler M, et al. 5G-enabled tactile Internet. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016, 34(3): 460-473
- [3] Kim K S, Kim D K, Kim J, et al. Ultrareliable and low-latency communication techniques for tactile Internet services. *Proceedings of the IEEE*, 2019, 107(2): 376-393
- [4] Nasrallah A, Thyagaturu A, Alharbi Z, et al. Ultra-low latency (ULL) networks: The IEEE TSN and IETF DetNet standards and related 5G ULL research. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, 21(1): 88-145
- [5] Kopetz H, Ademaj A, Grillinger P, et al. The time-triggered Ethernet (TTE) design//*Proceedings of the International Symposium on Object-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)*. Magdeburg, Germany, 2005: 22-33
- [6] Makowitz R, Temple C. Flexray—A communication network for automotive control systems//*Proceedings of the Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)*. Torino, Italy, 2006: 207-212

- [7] Gardiner E. The Avnu alliance theory of operation for TSN-enabled industrial systems. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2018, 2(1): 5-5
- [8] Messenger J L. Time-sensitive networking: An introduction. *IEEE Communications Standards Magazine*, 2018, 2(2): 29-33
- [9] Eidson J, Lee K. IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems. *IEEE Std. IEEE 1588-2002*, 2008; 1-300
- [10] WG802. 3. IEEE Standard for Ethernet. *IEEE Std. IEEE*, 2018; 1-5600
- [11] WG802. 1. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications in Bridged Local Area Networks. *IEEE Std. IEEE 802. 1 AS*, 2011; 1-292
- [12] WG802. 1. IEEE Draft Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications in Bridged Local Area Networks. *IEEE Std. IEEE P802. 1AS/D7. 7*, 2010; 1-296
- [13] WG802. 1. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Bridges and Bridged Networks. *IEEE Std. IEEE 802. 1Q-2014*, 2014; 1-1832
- [14] WG802. 1. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Virtual Bridged Local Area Networks Amendment 12 Forwarding and Queuing Enhancements for Time-Sensitive Streams. *IEEE Std. IEEE 802. 1Qav-2009*, 2009; 1-72
- [15] WG802. 1. Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Media Access Control (MAC) Bridges and Virtual Bridged Local Area Networks Amendment: Asynchronous Traffic Shaping. *IEEE Std IEEE P802. 1Qcr/D0. 2*, 2017
- [16] Specht J, Samii S. Synthesis of queue and priority assignment for asynchronous traffic shaping in switched Ethernet//*Proceedings of the Real-Time Systems Symposium (RTSS)*. Paris, France, 2017; 178-187
- [17] Zhang H, Ferrari D. Rate-controlled static-priority queueing //*Proceedings of the INFOCOM*. San Francisco, USA, 1993; 227-236
- [18] WG802. 1. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks—Bridges and Bridged Networks—Amendment 25: Enhancements for Scheduled Traffic. *IEEE Std. IEEE 802. 1Qbv-2015*, 2016; 1-57
- [19] Pedreiras P, Gai P, Almeida L, et al. FTT-Ethernet: A flexible real-time communication protocol that supports dynamic QoS management on Ethernet-based systems. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2005, 1(3): 162-172
- [20] WG802. 1. IEEE Standard for Local and metropolitan Area Networks—Bridges and Bridged Networks—Amendment 29: Cyclic Queuing and Forwarding. *IEEE std. IEEE 802. 1Qch-2017*, 2017; 1-30
- [21] Yan J, Quan W, Jiang X, et al. Injection time planning: Making CQF practical in time-sensitive networking//*Proceedings of the IEEE INFOCOM 2020*. Toronto, Canada, 2020; 616-625
- [22] WG802. 1. IEEE Standard for Ethernet Amendment 5: Specification and Management Parameters for Interspersing Express Traffic. *IEEE Std. IEEE 802. 3br-2016*, 2016; 1-58
- [23] WG802. 1. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Bridges and Bridged Networks—Amendment 26: Frame Preemption. *IEEE Std. IEEE 802. 1Qbu-2016*, 2016; 1-52
- [24] Huawei Technologies Co. Ltd. Introduction to Draft 0. 1 of IEEE P802. 1DC Quality of Service Provision by Network Systems. Shenzhen, Technical Report, 2018
- [25] WG802. 1. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Frame Replication and Elimination for Reliability. *IEEE Std. IEEE 802. 1CB-2017*, 2017; 1-102
- [26] Oran D. OSI IS-IS Intra-domain Routing Protocol. *RFC Editor*, 1990
- [27] WG802. 1. IEEE Standard for Local and metropolitan Area Networks—Bridges and Bridged Networks—Amendment 24: Path Control and Reservation. *IEEE Std. IEEE 802. 1Qca-2015*, 2016; 1-120
- [28] WG802. 1. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Bridges and Bridged Networks—Amendment 28: Per-Stream Filtering and Policing. *IEEE Std. IEEE 802. 1Qci-2017*, 2017; 1-65
- [29] WG802. 1. Draft Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Bridges and Bridged Networks—Amendment: Congestion Isolation. *IEEE std. IEEE P802. 1Qcz*, 2019
- [30] WG802. 1. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Station and Media Access Control Connectivity Discovery Corrigendum 2: Technical and Editorial Corrections. *IEEE Std. IEEE 802. 1AB*, 2015; 1-68
- [31] WG802. 1. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Virtual Bridged Local Area Networks Amendment 14: Stream Reservation Protocol (SRP). *IEEE Std. IEEE 802. 1Qat-2010*, 2010; 1-119
- [32] WG802. 1. IEEE Draft Standard for Local and metropolitan area networks—Media Access Control (MAC) Bridges and Virtual Bridged Local Area Networks Amendment: Stream Reservation Protocol (SRP) Enhancements and Performance Improvements. *IEEE std. IEEE P802. 1Qcc/D2. 0*, 2017; 1-207
- [33] WG802. 1. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Bridges and Bridged Networks—Amendment 30: YANG Data Model. *IEEE Std. IEEE 802. 1Qcp-2018*, 2018; 1-93
- [34] WG802. 3. IEEE Draft Standard for Ethernet YANG Data Model Definitions. *IEEE std. IEEE P802. 3. 2/D3. 0*, 2018; 1-150
- [35] WG802. 1. IEEE Draft Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Bridges and Bridged Networks—Amendment: YANG Data Model for Connectivity Fault Management. *IEEE std. IEEE P802. 1Qcx/D2. 0*, 2019; 1-80

- [36] WG802.1. IEEE Draft Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Bridges and Bridged Networks—Amendment; YANG Data Models for Scheduled Traffic, Frame Preemption, and Per-Stream Filtering and Policing. IEEE std. IEEE P802.1Qew/D1.2, 2020
- [37] WG802.1. IEEE Draft Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Station and Media Access Control Connectivity Discovery—Amendment; YANG Data Model. IEEE std. IEEE P802.1ABcu/D1.0, 2020
- [38] WG802.1. Frame Replication and Elimination for Reliability Amendment; Information Model, YANG Data Model and Management Information Base Module. IEEE std. IEEE P802.1CBcv/D0.4, 2020
- [39] WG802.1. Protocol for Assignment of Local and Multicast Addresses. IEEE std. IEEE P802.1CQ/D0.5, 2020
- [40] WG802.1. IEEE Draft Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Link-local Registration Protocol. IEEE std. IEEE P802.1CS/D1.5, 2018; 1-124
- [41] WG802.1. Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Bridges and Bridged Networks—Amendment; Resource Allocation Protocol. IEEE std. IEEE P802.1CS/D0.2, 2020
- [42] WG802.1. 802.1CBdb Generic 2-layer stream identification function. IEEE std. IEEE P802.1CBDB/D0.7, 2020
- [43] WG802.1. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Audio Video Bridging (AVB) Systems. IEEE Std. IEEE 802.1BA-2011, 2011; 1-45
- [44] Bello L, Steiner W. A perspective on IEEE time-sensitive networking for industrial communication and automation systems. *Proceedings of the IEEE*, 2019, 107(6): 1094-1120
- [45] WG802.1. TSN Profile for Industrial Automation. IEEE Std. IEEE IEC/IEEE 60802/D1.2, 2020
- [46] Finn N. Deterministic Networking Problem Statement. IETF Std. RFC 8557, 2019
- [47] Grossman E. Deterministic Networking Use Cases. IETF Std. RFC 8578, 2019
- [48] Finn N. Deterministic Networking Architecture. IETF Std. RFC 8655, 2019
- [49] IEC/SC 65E. OPC unified architecture—Part 1; Overview and concepts. IEC std. IEC TR 62541-1-2016, 2019
- [50] Tian S, Hu Y. The role of OPC UA TSN in IT and OT convergence//*Proceedings of the 2019 Chinese Automation Congress (CAC)*. Hangzhou, China, 2019; 2272-2276
- [51] WG802.1. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Time-Sensitive Networking for Fronthaul. IEEE Std. IEEE 802.1CM-2018, 2018; 1-62
- [52] WG802.1. Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Time-Sensitive Networking for Fronthaul Amendment; Enhancements to Fronthaul Profiles to Support New Fronthaul Interface, Synchronization, and Syntonization Standards. IEEE Std. IEEE 802.1CMde-2020/D2.1, 2020
- [53] WG1914. IEEE Draft Standard for Packet-Based Fronthaul Transport Networks. IEEE Std. IEEE 1914.1/D5.0, 2019; 1-89
- [54] WG1914. IEEE Standard for Radio over Ethernet Encapsulations and Mappings. IEEE Std. IEEE 1914.3-2018, 2018; 1-77
- [55] WG802.1. IEEE Draft Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Time-Sensitive Networking Profile for Service Provider Networks. IEEE Std. IEEE IEC/IEEE 60802/D0.1, 2020
- [56] WG802.1. IEEE Draft Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Time-Sensitive Networking Profile for Automotive In-Vehicle Ethernet Communications. IEEE Std. IEEE P802.1DG/D1.2, 2020
- [57] IEC TC57. Deterministic Networking in Power Automation. IEC std. IEC TR 61850-90-13, 2019
- [58] Ru Xu-Long. Study on Time Synchronization Technology in Time-Sensitive Networking [M.S. dissertation]. Xidian University, Xi'an, 2018(in Chinese)
(茹旭隆. 时间敏感网络中的时间同步技术研究[硕士学位论文]. 西安电子科技大学, 西安, 2018)
- [59] Liß C, Ulbricht M, Zia U F, et al. Architecture of a synchronized low-latency network node targeted to research and education//*Proceedings of the IEEE International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR)*. Campinas, Brazil, 2017; 1-7
- [60] Mahmood A, Exel R, Trsek H, et al. Clock synchronization over IEEE 802.11—A survey of methodologies and protocols. *IEEE Transactions on Industrial Information*, 2017, 13(2): 907-922
- [61] Shrestha D, Pang Z, Dzung D. Precise clock synchronization in high performance wireless communication for time sensitive networking. *IEEE Access*, 2018, 6: 8944-8953
- [62] Gutiérrez M, Steiner W, Dobrin R, et al. Synchronization quality of IEEE 802.1AS in large-scale industrial automation networks//*Proceedings of the Real-Time & Embedded Technology & Applications Symposium (RTAS)*. Pittsburgh, USA, 2017; 273-282
- [63] Concer N, Thangamuthu S, Cuijpers P J L, et al. Analysis of Ethernet-switch traffic shapers for in-vehicle networking applications//*Proceedings of the IEEE Design, Automation Test in Europe (DATE)*. Grenoble, France, 2015; 55-60
- [64] Zhou Z, Yan Y, Berger M S, et al. Analysis and modeling of asynchronous traffic shaping in time sensitive networks//*Proceedings of the 2018 14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)*. Imperia, Italy, 2018; 1-4
- [65] Finzi A, Mifdaoui A, Frances F, et al. Network calculus-based timing analysis of AFDX networks with strict priority and TSN/BLS shapers//*Proceedings of the International Symposium on Industrial Embedded Systems (SIES)*. Graz, Austria, 2018; 1-10
- [66] Finzi A, Mifdaoui A, Frances F, et al. Incorporating TSN/BLS in AFDX for mixed-criticality applications: Model and timing analysis//*Proceedings of the International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)*. Imperia, Italy, 2018; 1-10

- [67] Farzaneh M H, Knoll A. An ontology-based plug-and-play approach for in-vehicle time-sensitive networking (TSN)//Proceedings of the 2016 IEEE 7th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON). Vancouver, Canada, 2016: 1-8
- [68] Durr F, Nayak N G. No-wait packet scheduling for IEEE time-sensitive networks (TSN)//Proceedings of the Real-Time Networks and Systems(RTNS). Brest, France, 2016: 203-212
- [69] Heilmann F, Fohler G. Size-based queuing: An approach to improve bandwidth utilization in TSN networks. SIGBED Review, 2019, 16: 9-14
- [70] Craciunas S S, Oliver R S. SMT-based task and network-level static schedule generation for time-triggered networked systems//Proceedings of the International Conference on Real-time Networks & Systems(RTNS). Versailles, France, 2014: 45-54
- [71] Craciunas S S, Oliver R S, Chmelik M, et al. Scheduling real-time communication in IEEE 802.1Qbv time sensitive Networks//Proceedings of the International Conference on Real-time Networks & Systems (RTNS). Poitiers, France, 2016: 183-192
- [72] Craciunas S S, Oliver R S. Combined task- and network-level scheduling for distributed time-triggered systems. Real-Time Systems, 2016, 52(2): 161-200
- [73] Oliver R S, Craciunas S S, Steiner W. IEEE 802.1Qbv gate control list synthesis using array theory encoding//Proceedings of the IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS). Porto, Portugal, 2018: 13-24
- [74] Nayak N G, Dürr F, Rothermel K. Routing algorithms for IEEE 802.1Qbv networks. SIGBED Review, 2018, 15: 13-18
- [75] Schweissguth E, Danielis P, Timmermann D, et al. ILP-based joint routing and scheduling for time-triggered networks //Proceedings of the Real-time Networks & Systems (RTNS). Grenoble, France, 2017: 8-17
- [76] Nayak N G, Dürr F, Rothermel K. Incremental flow scheduling and routing in time-sensitive software-defined network. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(5): 2066-2075
- [77] Lee H, Lee J, Park C, et al. Time-aware preemption to enhance the performance of audio/video bridging (AVB) in IEEE 802.1 TSN//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Communication and the Internet. Halkidiki, Greece, 2016: 80-84
- [78] Jia W K, Liu G H, Chen Y C. Performance evaluation of IEEE 802.1Qbv: Experimental and simulation results//Proceedings of the IEEE 38th Conference on Local Computer Networks(LCN). Sydney, Australia, 2013: 659-662
- [79] Thiele D, Ernst R. Formal worst-case performance analysis of time-sensitive Ethernet with frame preemption//Proceedings of the IEEE 21st International Conference on Emerging Technology and Factory Automation (ETFA). Berlin, Germany, 2016: 1-9
- [80] Pahlevan M, Obermaisser R. Redundancy Management for Safety-Critical Applications with Time Sensitive Networking //Proceedings of the 28th International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC). Sydney, NSW, 2018: 1-7
- [81] Álvarez I, Proenza J, Barranco M, et al. Towards a time redundancy mechanism for critical frames in time-sensitive networking//Proceedings of the 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Limassol, Cyprus, 2017: 1-4
- [82] Nakayama Y, Hisano D, Kubo T, et al. TDD-based rapid fault detection and recovery for fronthaul bridged network. IEEE Communications Letters, 2018, 22(3): 498-501
- [83] Pahlevan M, Balakrishna B, Obermaisser R. Simulation framework for clock synchronization in time sensitive networking //Proceedings of the IEEE 22nd International Symposium on Real-Time Distributed Computing (ISORC). Valencia, Spain, 2019: 213-220
- [84] Yu Q H, Wang T, Zhao X B, et al. Fast real-time scheduling for Ethernet-based train control networks//Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Parallel & Distributed Processing with Applications(ISPA). Melbourne, Australia, 2018: 533-540
- [85] Wang N, Yu Q H, Wan H, Zhao X B, et al. Adaptive scheduling for multicenter time-triggered train communication networks. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(2): 1120-1130
- [86] Su L, Wan H, Qin Y F, Zhao X B, et al. Synthesizing fault-tolerant schedule for time-triggered network without hot backup. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(2): 1345-1355
- [87] Bu Tianyu, Yang Yi, Yang Xiangrui, et al. TSN-insight: An efficient network monitor for TSN networks//Proceedings of the 2019 Asia Pacific Workshop on Networking (APNET2019). Beijing, China, 2019: 1-7
- [88] Liu Jin-Di, Li Dong, Zeng Peng. The research on future industrial network architecture based on SDN & TSN. Automation Panorama, 2018, 10: 56-59(in Chinese)
(刘金娣, 李栋, 曾鹏. 基于SDN&TSN的未来工业网络架构探究. 自动化博览, 2018, 10: 56-59)
- [89] Huang Tao, Wang Shuo, Hunag Yu-Dong, et al. Survey of the deterministic network. Journal on Communications, 2019, 40(6): 160-176(in Chinese)
(黄韬, 汪硕, 黄玉栋等. 确定性网络研究综述. 通信学报, 2019, 40(6): 160-176)
- [90] Huawei OPC UA over TSN Testbed creates new milestone in edge computing. <http://www.econsortium.org/Lists/show/id/350.html>, 2019(in Chinese)

(华为 OPC UA over TSN 测试床打造边缘计算新里程碑. <http://www.econsortium.org/Lists/show/id/350.html>, 2019)

- [91] Khoshnevisan M, Joseph V, Gupta P, et al. 5G industrial networks with CoMP for URLLC and time sensitive network architecture. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(4): 947-959
- [92] Neumann A, Wisniewski L, Ganesan R S, et al. Towards integration of industrial Ethernet with 5G mobile network// *Proceedings of the 2018 14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)*. Imperia, Italy, 2018: 1-4
- [93] Chitimalla D, Kondepu K, Valcarengi L, et al. 5G fronthaul-latency and jitter studies of CPRI over Ethernet. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2017, 9(2): 172-182
- [94] Valcarengi L, Kondepu K. Time-versus size-based CPRI in Ethernet encapsulation for next generation reconfigurable fronthaul. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2017, 9(9): 64-73
- [95] Chih L I, Yuan Y, Huang J, et al. Rethink fronthaul for soft RAN. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(9): 82-88
- [96] Assimakopoulos P, Al-Hares M K, Hill S, et al. Statistical distribution of packet inter-arrival rates in an Ethernet fronthaul// *Proceedings of the International Conference on Communications Workshops (ICC)*. Cambridge, UK, 2016: 140-144
- [97] Aijaz A, Sooriyabandara M. The tactile Internet for industries: A review. *Proceedings of the IEEE*, 2019, 107(2): 414-435
- [98] Bruckner D, Stanica M P, Blair R, et al. An introduction to OPC UA TSN for industrial communication systems. *Proceedings of the IEEE*, 2019, 107(6): 1121-1131
- [99] Xylomenos G, Ververidis C N, Siris V A, et al. A survey of information-centric networking research. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014, 16(2): 1024-1049
- [100] Wang J, Liu J, Kato N. Networking and communications in autonomous driving: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, 21(2): 1243-1274



CAI Yue-Ping, Ph. D. associate professor. His main research interests include industrial networks, data center networks, and deterministic networking.

YAO Zong-Chen, M. S. candidate. His main research interest is time-sensitive networking.

LI Tian-Chi, M. S. candidate. His main research interest is deterministic networking.

Background

Traditional Ethernet can't meet QoS requirements of ultra reliable and low-latency (uRLLC) applications such as industrial automation system, smart grid, and so on. Time-Sensitive Networking (TSN) based on Ethernet is one of the key networking technologies, providing high-reliable and bounded low-latency flow transmission services. TSN plays an important role in many application areas such as industrial automation systems, mobile fronthaul, in-vehicle networking, smart grid, and so on. This survey introduces the standards of TSN from the following five areas: time synchronization,

flow control, reliability, management and control, and use cases. It surveys the research state-of-the-art of TSN and discusses its research challenges.

This work is supported by the National Key Research and Development Project under Grant No. 2020YFB1710900, the National Natural Science Foundation of China under Grant No. 61301119, the Chongqing Technology Innovation and Application Development Key Project under Grant No. cstc2019jscx-zdztzxX0023, and the Natural Science Foundation of Chongqing under Grant No. cstc2019jcyj-msxmX0375.