

时间敏感网络中确定性服务保障技术研究综述

张莉涓¹, 喻春妮¹, 徐风友²

(1. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 江苏 南京 211106; 2. 中国电子科技集团第二十八研究所, 江苏 南京 210007)

摘 要: 信息技术的发展日新月异, 物联网和工业互联网中的远程外科手术、高精度机器人控制等新型业务对端到端的时延提出了新的要求, 传统以太网技术由于其传输的不确定性, 已难以满足各类应用的需求, 因此确定性网络应运而生。时间敏感网络是确定性服务保障技术。它兼容传统以太网, 通过高精度时间同步确保网络之间的时钟一致性, 通过低时延流量整形和数据调度策略, 有效控制数据传输的时延和抖动, 并结合主动故障预防和网络配置机制, 实现了时间敏感业务的确定性传输。重点对时间敏感网络中的确定性服务保障技术展开了研究。介绍时间敏感网络的产生背景、发展目标和优势, 以及现有标准的分类等方面的内容。从时间同步、资源管理、流量控制和可靠性4个方面对现阶段时间敏感网络的相关标准进行介绍, 总结目前的国内外研究现状, 并分析比较不同标准的优劣势和适用场景。阐述时间敏感网络在汽车、工业、航空航天等领域的应用价值, 分析各领域的研究趋势。总结时间敏感网络发展面临的挑战, 并讨论其未来的研究方向。

关键词: 确定性网络; 时间敏感网络; 时间同步; 资源管理; 流量控制; 可靠性

中图分类号: TP391.4

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.2096-109x.2024049

Survey of deterministic service assurance technology in time sensitive networking

ZHANG Lijuan¹, YU Chunni¹, XU Fengyou²

1. College of Electronic Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China

2. The 28th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210007, China

Abstract: With the rapid development of information technology, new types of services such as remote surgery and high-precision robot control in the Internet of things and industrial Internet have necessitated new requirements for

收稿日期: 2023-09-01; 修回日期: 2024-07-28

通信作者: 张莉涓, lijuanzhang6@gmail.com

基金项目: 国家自然科学基金(61902182, 62371232); 江苏省自然科学基金(BK20190409); 中国博士后科学基金(2019TQ0153); 航空科学基金(2016ZC52029)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61902182, 62371232), The Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20190409), China Postdoctoral Science Foundation (2019TQ0153), The Aeronautical Science Foundation of China (2016ZC52029)

引用格式: 张莉涓, 喻春妮, 徐风友. 时间敏感网络中确定性服务保障技术研究综述[J]. 网络与信息安全学报, 2024, 10(4): 1-16.

Citation Format: ZHANG L J, YU C N, XU F Y. Survey of deterministic service assurance technology in time sensitive networking[J]. Chinese Journal of Network and Information Security, 2024, 10(4): 1-16.

end-to-end latency. Traditional Ethernet technology has been found difficult to meet the requirements of various applications due to its transmission uncertainty property. Hence, deterministic networks have emerged as a solution, with time-sensitive networking (TSN) standing as a promising deterministic service assurance technology. TSN was designed to be compatible with traditional Ethernet, ensuring clock consistency between networks through high-precision time synchronization. By employing low-latency traffic shaping and data scheduling strategies, TSN effectively controlled data transmission delays and jitter. Furthermore, the combination of proactive fault prevention and network configuration mechanisms enabled the deterministic transmission of time-sensitive services. The deterministic service assurance technology was focused on within TSN. The background, development goals, advantages, and classification of TSN standards were introduced. An overview of current TSN standards was provided from four aspects: time synchronization, resource management, traffic control, and reliability. The current research status, both domestically and internationally, was reported. The strengths, weaknesses and applicable scenarios of different standards were analyzed and compared. The application value of TSN in fields such as automotive, industrial, and aerospace was elaborated upon, with research trends in each area being analyzed. The challenges facing the development of time-sensitive networks were summarized, and future research directions were discussed.

Keywords: deterministic networking, time sensitive networking, time synchronization, resource management, flow control, reliability

0 引言

随着物联网, 第五代移动通信, 云计算等新兴通信技术的发展^[1], 网络中数据流对带宽、时延等服务质量方面的要求日益严苛。传统以太网技术由于其传输的不确定性, 已难以满足各类应用的需求^[2]。在智能驾驶、远程医疗、VR/AR 技术、数字孪生等应用场景下, 对于端到端的时延需求甚至达到毫秒级^[3]。例如在自动驾驶系统中, 数据传输全链路的时延需求已经缩短到 100 ms 以内^[4]。在智慧医疗方面, 远程手术和远程操作, (如远程外科机器人手术), 时延要求通常在毫秒级^[5]。此外, 对于高精度控制和机器人操作, (如一些高精度机械臂) 时延抖动要求只有微秒级^[1]。这就提出了严格的低时延、低抖动和高可靠的承载要求^[6]。面对网络中流量突发造成的数据拥塞, 传统以太网虽然在不同层级上设计了优先级队列、超时重传、拥塞避免等机制保证数据包的 QoS (quality of service)。但该网络仅能面向逐包提供基于差分服务的 QoS 保障, 很难提供逐流的基于综合服务的 QoS 保障。当面向日益复杂且激增的时延敏感业务时, 传统方法将不再适用。

面对时延敏感性业务的紧迫需求, 传统以太网面临着从“尽力而为”到“确保准时、准确”

实现端到端确定性传输的挑战。为应对这一挑战, 无论是工业界还是学术界, 相关标准化组织和协会都做出了积极的探索, 并提出新型服务确定性网络^[7]。如图 1 所示, 服务确定性网络主要包含 4 种, 即工业实时以太网、时间触发网络 (time-trigger ethernet, TTE)^[8]、时间敏感网络 (time-sensitive networking, TSN)^[9] 以及确定网络 (deterministic networking, DetNet)^[10]。

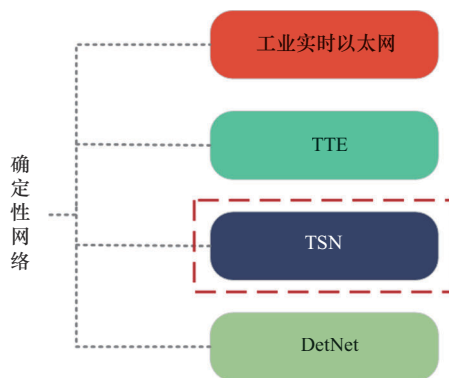


图 1 确定性网络

Figure 1 Deterministic networking

服务确定性网络首先在工业自动化领域得到应用和发展。为达到工业网络的实时性指标, 西门子、倍福、贝加莱等公司和组织相继提出了多种实时以太网标准, 如 Profinet^[11]、EtherCAT^[12]、Powerlink^[13]、Ethernet/IP、Sercos III、

CC-Link IE^[14]等。采用这些架构的工业网络已经可以达到较高的实时性指标, 而且在实际应用中也展示了较好的稳定性, 并得到了大范围部署。但这些解决方案要么不让网络满载导致带宽资源浪费, 要么使网络独立导致网络结构复杂化。此外, 提供实时性传输的方法不同导致的网络异构性使这些工业实时以太网与标准的以太网不兼容, 从而在工业互联网所追求的IT (Information technology) 与OT (operational technology) 的融合^[15]过程中会遇到互联和互操作的问题, 以此造成周期性数据和非周期性数据必须通过不同的网络传输, 并导致标准以太网和各种自动化系统的实时以太网也不能直接相连。

考虑未来工业网络需要继承多种类型的设备, 各设备间要在异构网络环境中进行复杂的实时性交互。而在“同一”网络环境中进行数据传输, 正是TSN的核心诉求^[16]。TSN通过单一网络解决了总线的复杂性问题, 使周期性数据与非周期数据可以共同传输, 同时平衡了IT和OT网络的实时性与数据负载的差异。因此无论是从经济性还是技术发展的必要性角度考虑, TSN都是具有发展前景的通信技术之一。

TSN是由IEEE 802.1任务组开发的一套数据链路层协议规范。由于传统以太网基于尽力而为的传输方式不能够满足广泛的实时性需求, 因此TSN致力于在以太网中构建更加可靠、时延更低的网络。TSN工作于数据链路层, 该协议族中对于提供确定性服务保障的时间敏感网络技术主要包括时间同步、资源管理、流量控制和可靠性4个方面的标准。由于在TSN中周期数据与非周期数据并存, 实时与非实时性数据并存, 数据帧在进入TSN后首先在入端口通过标识符等信息对数据流进行分类^[17], 然后进入网络中的交换机形成队列, 最后通过整形器 (shaper) ^[18]实现流量整形并通过相应的调度算法来决策队列中的数据传输。

除了TSN, 确定性网络的实现机制还包括TTE和DetNet。TTE的核心思想是将时间触发传输机制的实时性和确定性与传统以太网的灵活性相结合。与TSN相比, 两者在时间同步、数据转发和可靠性交付等方面都对传统以太网进行

了确定性增强。但数据转发机制作为保障确定性交换的核心, TTE在设计上并没有使用作为网络分组交换的基础排队机制对各种不同的网络流量进行复杂的分配汇聚。TSN则是在IEEE 802.1Q^[19]的基础上进行了协议增强, 所以在实现上, TSN可以兼容传统以太网的传输机制。在以太网中交换设备逻辑不变的基础上, 通过增加时间同步和出端口的整形机制即可实现TSN传输机制。因此, TTE虽然在TSN提出之前就得到了发展, 但在未来, TSN将会逐步取代TTE, 成为主流的确定性网络交换方案。

DetNet在TSN的基础上, 对以太网的确性增强由L2层的桥接网络扩展到L3层的路由段, 重点对网络的整体架构、数据规范、流量模型等进行研究。而TSN重点关注L2层具体的技术和算法实现^[20]。在现阶段, TSN工作组也与DetNet工作组合作, 共同推进确定性网络的发展。在L2层桥接网络实现确定性传输, 则是双方共同关注的重点, 这也是TSN的主要工作^[21]。

1 时间敏感网络概述

随着物联网的蓬勃发展, 在万物互联的背景下, 各领域对于共网传输的要求越来越高。IEEE 802.1工作组成立了音视频桥接, AVB (audio video bridge) 子任务组, 旨在通过IEEE 802协议框架在标准以太网的基础上, 为音视频A/V (audio/video) 业务提供有界的时延保障^[22-24]。这其中包括时钟同步、资源管理以及速率控制等方面的机制, 这些机制最早在车载网络中取得了良好的性能, 并获得了广泛的关注。因此, 在2012年IEEE正式将AVB子任务组升级为IEEE 802.1 TSN时间敏感网络工作组, 用于适用更复杂的应用场景^[25]。

随后, TSN工作组在AVB制定的协议集基础上进行了增强和拓展, 在网络体系结构的第二层数据链路层, 针对网络时钟、资源分配、传输时延以及冗余性和可靠性等方面制定了一系列的协议规范。TSN基于传统的以太网开发, 通过实现数据链路层的开放转发, 可以向下兼容传统以太网, 且不需要对当前以太网设备进行额外物理设备的接口添加。这既保证了不同网域应用之间的互操作性, 又能够降低设备的复杂度, 使不同类型的数据流可以使用共享的物理链路, 从而统

一网络传输。同时, TSN 以提供微秒级时延的确定性服务保障、降低承载网络的设备复杂度、实现各种流量的共网传输为目标, 因此被认作下一代以太网技术^[26-27]。

目前 IEEE 802.1Q 制定的 TSN 标准族可以分为 4 大类: 时间同步标准、资源管理标准、流量控制标准以及可靠性标准, 如图 2 所示。TSN 标准族中已经出台的标准可以在特定的场景下为网络中的数据传输提供低时延、低抖动、低丢包率和高冗余性的确定性服务保障。

(1) 时间同步标准

TSN 需要精确的时间同步机制, 以保证网络上的时间敏感流量能够在规定的时间内准确到达目的地, 从而满足实时性和可靠性的要求。为此, IEEE 标准化组织制定了一系列时间同步标准, 其中最为重要的是 IEEE 802.1AS 和 IEEE 1588。

(2) 资源管理标准

TSN 在资源管理方面的一项主要工作是在网

桥的控制层面, 通过相关机制为时间敏感业务预留独立的传输带宽以实现零拥塞损失。因此 TSN 首先在 IEEE 802.1Qat 中定义了一种可以为传入流保存带宽资源的流预留机制, 并先后出台了 IEEE 802.1Qcc、IEEE 802.1Qdd 等, 对网络中的带宽资源管理和分配制定了一系列的协议增强和补充机制。

(3) 流量控制标准

流量控制作为实现端到端确定性时延中最为关键的技术, 是目前在 TSN 研究领域中最关注的重点。实现确定性时延的一个基本要求是限制传输过程中流量的突发, 对此 TSN 工作组在数据转发平面定义了一系列的整形机制来对流量速率进行限制, 从而实现数据流稳定传输的目的。TSN 网络是桥接网络, 在数据进入到交换机后, 会首先形成队列, 然后进行传输。传输过程由交换机中的整形器决定。如图 3 所示, TSN 制定了一系列关于整形器的标准, 分别从主动拓扑



图2 标准族分类

Figure 2 Standard family classification

管理、队列入口端数据流过滤、队列管理、出口端数据流输出选择、发送控制等方面制定了不同应用场景的数据调度机制。

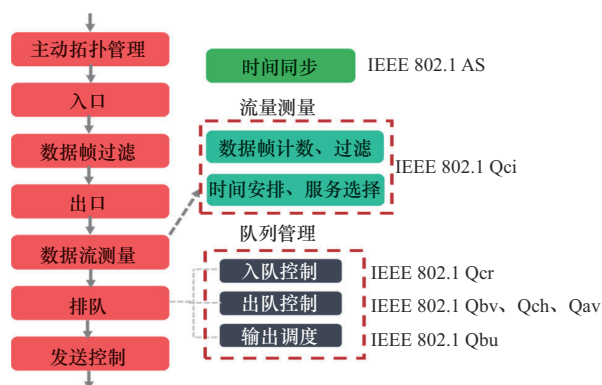


图3 数据帧交换过程及TSN扩展

Figure 3 Data frame exchange process and TSN extension

(4) 可靠性标准

可靠与容错是时间敏感网络重要的组成部分，容错的一般实现方式主要是在网络中引入冗余性，TSN工具集通过在数据帧和传输路径中添加冗余性，保障可靠传输。TSN针对可靠性制定了一系列标准，例如IEEE 802.1CB通过数据帧的复制和消除防止由于网络拥塞而造成的丢包现象，提高传输的可靠性。

目前，在异构链路场景下，时间敏感网络面临以下挑战。

(1) 同步性问题

由于周期与非周期流量共存、实时与非实时业务共享传输链路，网络状态变得尤为复杂。且由于链路的异构性，网络将无法获取网域内所有的网络设备状态，因此难以在全网范围内实现时钟同步^[28]。

(2) 资源分配问题

在异构网络中，由于不同类型的网络之间的资源占用情况和调度机制不同，所以在复杂的流量场景下如何管理设备内队列资源的分配、保证时间敏感流量的实时性和可靠性是一个挑战。

(3) 安全性问题

在异构网络中，不同类型的网络设备可能存在安全漏洞，如何保证时间敏感流量的安全性也极具挑战。此外，在异构网络中，不同网络之间的数据流量可能需要进行转发和中转，如何处理流量的微突发问题、降低节点内时延，从而实现

端到端的确定性传输也不容忽视。

2 TSN时间同步标准分析

时间同步的主要目的是通过对本地时钟的调整来确保整个系统的时间保持一致，即各个设备的本地时钟根据某种协议或算法进行同步。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。

2.1 IEEE 1588, PTP协议

传统的网络时间协议（network time protocol, NTP）采用的软件同步方式已经不能满足现代测量和控制系统对精确度的要求，这是由于其存在一定的时延和抖动。为了解决以太网时间同步问题，IEEE 1588提出了新的精确时间协议（precision time protocol, PTP）。PTP允许网络中的设备彼此同步，使不同的设备之间具有相同的时间参考，大幅度提高了网络的时间同步能力。

PTP采用主从架构，主时钟为网络中的所有设备提供时间参考，从时钟接收主时钟的时间信号并做出相应的调整。该协议的同步过程主要包括两个部分。①建立同步体系：用最佳主时钟算法选择GM（grand master）时钟^[29]，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^[30]。②同步调整本地时钟：通过本地时钟的同步算法统计时钟偏移，从而调整本地时钟。

IEEE 1588支持两种模式：单播和多播。单播模式下，主时钟向每个从时钟发送单独的时间戳。多播模式下，主时钟向特定的多播组发送时间戳，而所有从时钟都监听该组地址。多播模式可以减少网络流量，更适合大型网络。

2.2 IEEE 802.1AS, TSN时间同步协议

TSN中的时间同步问题的解决得益于IEEE 802.1AS-2011标准。该标准修改了PTP，制定了基于二层网络的gPTP（generalized precision time protocol）^[31]，并对TSN流的时间同步方法和过程进行了定义和解释。

在gPTP中，TSN流的时间同步主要通过同步消息和时延请求-响应机制实现^[32]。网络中的GM设备会向其他设备发送同步消息提供时间信号，其他设备通过接收消息，并根据消息中包含的时间戳同步自己的时钟。为进一步提高同步精

度, GM 发送时延请求消息, 其他设备接收后会立即将自己的时间戳返回给 GM, GM 根据接收的时间戳可以计算出时延, 并将其加入同步消息中, 从而实现更准确的同步。gPTP 定义了一个媒体独立层, 这使即使在混合网络中, 采用不同的媒体接入技术和网络技术, 也可以使用相同的时间域进行同步。不同的子网可以采用不同的包格式和管理机制来交换时间敏感的信息。相比之下, IEEE 1588 中的 PTP 的适用范围具有一定的局限性, 只能用于特定的网络。

Baniabdelghany 等^[33]提出了基于 IEEE 802.1AS 的扩展同步协议, 用于改善动态和不对称 TSN 混合网络中的时钟同步精度。该扩展同步协议通过增加相邻速率比和累积缩放速率偏移的准确时延值等机制改善时钟的同步精度。在不对称的 TSN 中具有更高的同步精度和更好的稳定性。在时钟精度方面, Gutierrez 等^[34]关注网络中同步时钟的质量, 对 gPTP 在大规模网络环境中的同步及定时误差进行了评估和测量, 通过对同步抖动、处理时延、驻留误差等因素的控制, 设计了时间感知系统。Mahmood 等^[35]则对影响 gPTP 中时钟精度的时钟漂移等环境因素进行了论述, 并引入漂移因子实现了精度的校正。Shrestha 等^[36]结合时钟漂移因子对时钟精度的影响, 研究了自动化控制应用中无线传感器节点间定时同步的问题, 并提出了一种增强型精确时钟同步协议。

Buscem 等^[37]研究了 gPTP 流量和时钟在受到攻击时的行为, 提出了一种新的基于监督机器学习的系统, 用于检测高风险的攻击。Shuyi 等^[38]讨论了主从时间偏移的容错机制, 提出基于卡尔曼的冗余系统, 优化了时间偏移, 保证了主从时钟同步过程的容错性。目前, IEEE 802.1 工作组正在进行修订 IEEE 802.1AS-Rev 版本的工作, 旨在满足不同域之间时延敏感应用的时间同步需求。这意味着该修订版本将对现有的 IEEE 802.1AS 进行改进和完善, 以提高其在域间的时间同步精度和可靠性, 从而满足不同应用场景中的需求。同时 IEEE 802.1AS-Rev 还提供了一些其他的功能, 如计算网络时延和在网络中检测和处理时钟异常情况。

3 TSN 资源管理标准分析

资源管理的主要功能是对不同的流量按照优先级进行划分, 并为不同优先级的流量划分不同的传输时隙, 一定程度上保障高优先级的流量优先传输, 并避免网络堵塞以及流量之间的相互干扰。时间敏感网络的资源管理标准主要包括 IEEE 802.1Qat、IEEE 802.1Qcp、IEEE 802.1Qcc、IEEE 802.1Qdd 等。

3.1 IEEE 802.1Qat, 流预留协议

IEEE 802.1Qat 定义了一个准入控制框架, 可以基于流量的时延需求和网络设备的资源状态对网络中流量的传输请求进行管理和控制。该框架制定了一个用于实现处理服务请求、为请求保留带宽资源、向网络中发布流量的控制程序, 确保有流量传输时网络中有足够的资源。

该框架最初是 AVB 工作组制定的一项分布式网络协议, 主要通过多重注册协议 (multiple registration protocol, MRP) 实现。该协议可以通过对流量中 48 bit 长的扩展唯一标识符 EUI-48 (extended unique identified-48) 进行识别, 并通过 3 种协议, 即多重 MAC 注册协议 (multiple MAC registration protocol, MMRP)、多重流注册协议 (multiple stream registration protocol, MSRP) 和多重 VLAN 注册协议 (multiple VLAN registration protocol, MVRP), 对不同优先级的流量进行预留^[39]。当传输请求到达时, 首先由 MMRP 和 MVRP 在终端处完成传输的分组信息和 VLAN 信息的注册, 然后使用 MSRP 实现端到端传输中每一跳的预留工作。MSRP 在每一跳维护一个 MRP 应用, 并根据 MRP 的属性声明 (mad attribute declaration, MAD) 实现本地预留资源的注册, 网桥之间的前向传输则通过 MRP 属性传播 (mrp attribute propagation, MAP) 流程来完成。

3.2 IEEE 802.1Qcp, YANG 数据模型

IEEE 802.1Qcp 定义了 VLAN 配置数据的格式和传输方式, 并支持了查询和通知消息的功能, 在 TSN 网络中发挥了重要作用。这些功能使 IEEE 802.1Qcp 可以用于管理和配置 TSN 网络中的 VLAN。IEEE 802.1Qcp 提供了即插即用的 YANG 数据模型标准, 使网桥组件可以根据 NETCONF 格式配置数据^[40], 解决数据配置和管

理模型的建立问题。YANG数据模型是一种通用的建模语言，用于描述和表示配置数据、状态数据、网络管理协议通知数据等。它需要使用网络配置协议（如NETCONF）进行配置和操作^[41]。

目前，IEEE 802.1工作组正在制定一系列YANG模型的修订和扩展标准，以满足不断发展的网络管理需求。这些标准的制定旨在提供更加完善和灵活的YANG模型，以便支持各种网络管理应用场景^[42-43]。为更好地实现在桥接系统中的连接故障管理（connectivity fault management, CFM）与控制配置功能，IEEE 802.1Qcx正在拟定用于此类功能的YANG模型，并明确CFM YANG数据模型与其他管理功能模型之间的关系^[44-45]。此外，IEEE 802.1Qcw还对现有规范进行了扩充，增加了调度和抢占等功能的配置^[46]。IEEE 802.1AB中的YANG模型能够完成配置链路层发现协议（link layer discovery protocol, LLDP）的功能^[47]。除此以外，IEEE 802.1CB也对YANG模型进行了拓展，旨在能实现FRER（frame replication and elimination for reliability）和MIB（management information base）的配置^[48]。

3.3 IEEE 802.1Qcc, 资源集中管控协议

在IEEE 802.1Qat中，频繁的注册和预留过程给流量传输带来较大的时延开销。因此IEEE 802.1Qcc提供了3种不同的网络配置模型来实现所有节点设备的端到端管理。

第一种模型是完全分布式模型，在IEEE 802.1Qat的配置结构基础上，向终端与网桥之间提供了一个用户/网络接口（users/network interface, UNI），使发送终端向网络中请求传输时，可以仅通过UNI按照预定义的路径传输相应的配置信息即可便捷地完成预留操作。如图4所示，当网络中有传输需求时，终端首先向网络中发送流注册信息，网桥将根据此信息在本地执行相应的资源管理配置。

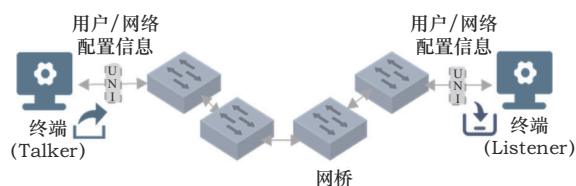


图4 IEEE 802.1Qcc完全分布式模型

Figure 4 IEEE 802.1Qcc complete distributed model

第二种模型是集中式网络/分布式用户模型，该模型提供了一个集中式网络配置（centralized network configuration, CNC）实体。如图5所示，该模型使配置信息直接通过CNC下发到端到端之间的每一跳节点中，配置下发通过IEEE 802.1Qcp提供的NETCONF远程管理协议实现，是一种集中式的配置方式。

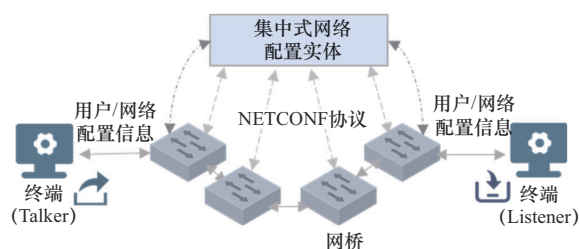


图5 IEEE 802.1Qcc集中式网络/分布式用户模型

Figure 5 IEEE 802.1Qcc centralized network/distributed user model

第3种模型是完全集中式模型，该模型在集中式网络/分布式用户模型的基础上将用户的配置信息通过一个集中式用户配置（centralized user configuration, CUC）实体进行分发^[49]。如图6所示，CUC的需求通过UNI发送给CNC，然后再通过NETCONF发送给每跳网桥，实现用户和网络的集中式统一规划。

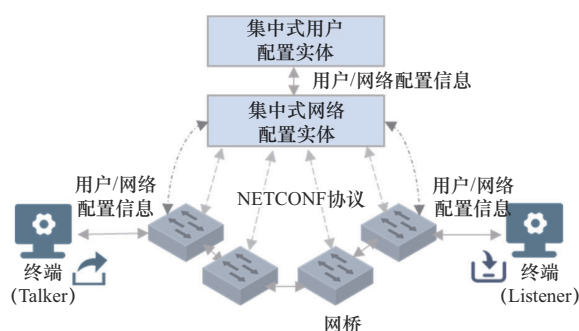


图6 IEEE 802.1Qcc集中式网络/分布式用户模型

Figure 6 IEEE 802.1Qcc complete concentrated model

3.4 IEEE 802.1Qdd, 资源分配协议

IEEE 802.1Qat最初只是针对AVB系统提供服务而设计的，而在AVB系统中通常会特定为音视频A/V类流量提供QoS服务。为了实现对TSN网域内所有的时间敏感类流量提供预留的带宽，IEEE 802.1Qdd在IEEE 802.1Qat的基础上进行了扩展，并使用链路本地预留协议（local res-

ervation protocol, LRP) 对 IEEE 802.1Qcc 这 3 种不同的模型制定预留方式。LRP 预留注册过程与 MRP 方式类似, 但与 MRP 不同的是, LRP 不需要为每个节点维护 MRP 应用程序, 而是通过在每跳节点间对 MAD 中的属性信息进行复制, 并在每跳传输后记录并修改发生变化的状态信息值, 同时对违反某些约束和超过生命周期无响应的数据进行删除, 以此提高节点间配置信息传递的效率。该过程几乎可以忽视由于配置信息传递带来的额外的时延开销, 这对于预留机制在面向异构链路的网络场景下的应用提供了有效的工具。表 1 给出了上述 4 种标准的优劣势分析以及应用分析。

基于上述 4 种标准的改进, 近年来时间敏感网络的资源管理标准有了新的研究进展。Nsiah 等^[50]对 IEEE 802.1Qcc 中的完全集中式模型进行重点研究, 以实现无线工业网络中 TSN 机制的配置。在该研究中, 无线终端站通过 CUC 实体来完成配置, 并根据完全集中式模型中 CUC 和 CNC 之间的 UNI 接口进行通信。此外, IEEE 802.1Qat 提出的流预留机制也得到了进一步改善。对于预留算法的性能优化, 一些工作侧重于对数据流可调度性的研究。Zuo 等^[51]针对预留过程中网络吞吐量和服务请求数量两个方面存在的调度问题进行了优化, 并提出了基于多项式时间复杂度的启发式带宽预留算法。Balasubramanian 等^[52]开发了一种可以联合调度转发、路由管理和准入控制的控制策略框架。其优化目标是在确保稳定性的前提下缓解网络拥塞, 最大化网络中流量的可调度性。因此, 对于资源管理技术中预

留机制的研究, 可以从提高网络中数据流可调度性的角度对现有预留机制进行改进。Oechsle 等^[53]开发了一个模块框架, 该框架由模块管理和基于 YANG 模型的数据存储组成, 提供了用于实现中央用户控制器功能的网络配置模块和监控模块, 进一步为 TSN 在工业自动化的应用提供了便利。

4 TSN 流量控制标准分析

由于网络中终端应用程序对于信息的传输需求不同, 网络状态也各不相同, 因此网络设备很难对所有的情况采取有效的措施。而流量控制可以通过对流量进行整形和按序转发, 对流量进行不同程度的限制, 以防止相互之间的干扰或流量积压, 从而提供确定性的时延上界, 实现确定性传输的目的。流量控制是 TSN 协议族中的核心机制, 作为提供确定性时延边界和转发规则的流量整形和调度机制, 是流量控制中需要重点关注的技术。通过使用不同的整形器, 以及在转发端口不同的转发规则, TSN 制定了不同的流量整形和调度机制。

总的来说, 流量整形和调度机制根据是否需要时间同步可以分为同步整形调度和异步整形调度机制。其中同步整形调度机制标准主要包括 IEEE 802.1Qbv 和 IEEE 802.1Qch, 异步整形调度机制标准主要包括 IEEE 802.1Qav 和 IEEE 802.1Qcr^[54]。

4.1 IEEE 802.1Qbv, 时间感知整形器

IEEE 802.1Qbv 定义了时间感知整形器 (time awareness shaper, TAS)^[55], TAS 基于预先设定的周期性门控列表, 通过对不同数据队列在时隙上进行划分, 将不同类型的数据流量限制

表 1 标准的优劣势分析以及应用分析

Table 1 Analysis of standard strengths, weaknesses, and application

名称	优点	缺点	应用场景
IEEE 802.1Qat	能够根据实际网络资源进行动态资源管理和准入控制	注册请求的变更有可能使网络负荷过重, 从而导致关键流量的时延	通常用于解决网络中音视频实时流量与普通异步数据流量之间的竞争问题
IEEE 802.1Qcp	支持多种不同类型和优先级的流量传输, 管理和配置成本低	覆盖的配置项有限, 不同软件版本之间的 YANG 模型存在差异	通常用于管理和配置 TSN 网络中的 VLAN
IEEE 802.1Qcc	减小预留消息的大小和频率, 节约带宽资源, 仅需通过链路状态和预留变更触发更新	可能会出现单点故障, 将增加网络的复杂性, 导致成本增加	可以用于静态和动态网络的配置
IEEE 802.1Qdd	摆脱底层多注册协议 MRP 的束缚, 节点间配置信息的传递效率高	可能会导致大量的控制平面开销	可以用于管理大量的预留数据, 适用于复杂网络环境

在不同时隙内，并动态控制队列出口端的开闭，仅在特定时隙内打开对应的门控进行该队列数据的传输。这样就可以在时间上将不同类别和优先级的数据以及周期性数据和非周期性数据分开，从而确保 TSN 网络中每个交换机的传输时延是确定的，以此实现确定性传输。

TAS 的工作原理如图 7 所示。在网络同步时钟提供的时间同步服务下，门控列表中的每个时间间隔内由各队列的选通状态构成，其中 1 代表选通，0 代表关闭，每个状态控制着该时间间隔内的每个队列是否会被传输。一般采用 TAS 的 TSN 进行配置时，会将队列分为优先级队列、流预留类队列和尽力交付类队列，它们分别对应不同类别的流量。优先级队列中包括时间敏感型数据，这些数据会按照优先级依次进行传输；流预留队列主要是为紧急数据预留的一条通道，如果数据需要紧急调度，则该队列可以优先获得传输服务，这种类型的数据一般是非周期性的；尽力交付队列则主要针对时延要求较低的流量类型。通过设计不同的队列以及相对应的门控选通机制，TAS 整形调度确保了实时数据的传输，以及非实时数据的交换。TAS 的调度机制需要严格的时间同步，如果在窗口开启时数据帧还未到达或无法完成传输，这将导致严重的传输错位，给端到端时延带来极大的抖动，因此 TAS 对于全网时间同步的要求很高，而且还会由于保护带宽造成资源的浪费。

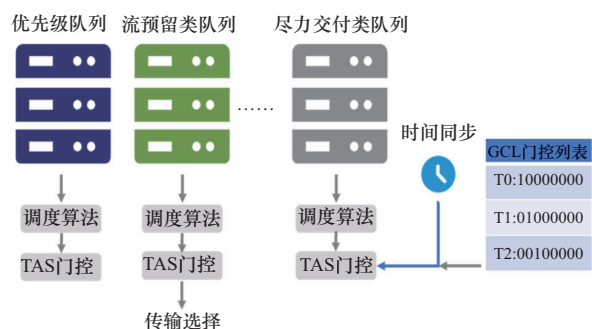


图7 TAS工作原理

Figure 7 TAS working principle

4.2 IEEE 802.1Qch, 循环队列转发调度

IEEE 802.1Qch 循环队列转发 (cyclic queuing and forwarding, CQF) [56] 的思想是在所有网桥同步的基础上，在完成一条流进入缓存队列的

同时，实现另一队列数据流的出队。CQF 机制使用两个队列进行数据缓冲，其核心机制是每个周期内数据包仅在每个桥接节点前进一步。如图 8 所示，类似 TAS 机制，CQF 通过一个入队门控列表和一个出队门控列表对两个缓冲队列进行选通，通过同步时钟实现周期性的开和闭。在同一跳桥接节点上，若队列 1 写入数据，则队列 2 就发送数据。在此期间队列 1 的入队门控打开，出队门控关闭，而队列 2 则是入队门控关闭，出队门控打开。在下一个周期，队列 2 接收数据，队列 1 发送数据，通过周期性的交替开闭两个队列的入队和出队门控，就形成了 CQF 周期性排队转发。

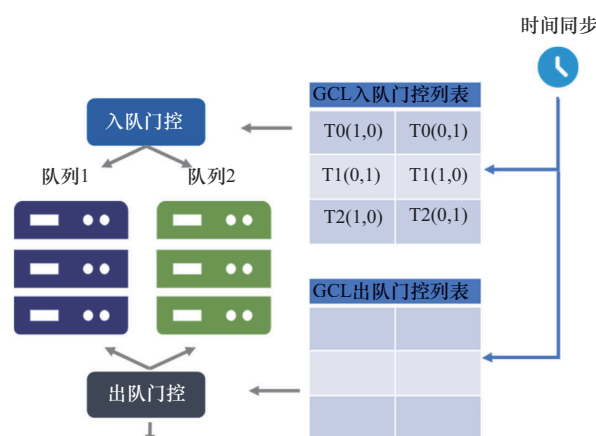


图8 CQF工作原理

Figure 8 CQF working principle

通过在同一周期内对每个节点实现数据包的进队与出队过程，CQF 整形器能够把一跳的时限定在一个接受延时加一个传输延时的范围内。在文献[56]中，CQF 将时间划分为等长的时隙，即 $i, i+1, \dots, i+N$ 。在时隙 i 期间，节点通过网桥发送的帧被下游网桥接收，并在时隙 $i+1$ 期间将其再转发给下一跳网桥，以此类推。由此可知，节点在时隙 i 传输的帧将被其下游网桥在时隙 $i+1$ 期间进行转发。因此，一个帧所经历的最大可能时延为从时隙 i 开始到时隙 $i+1$ 结束的两个时隙长度；而最短时延则为从时隙 i 的结束到时隙 $i+1$ 的开始的时间，即为 0。一般来说，在 CQF 中一个帧经历的最长时延为 $(h+1)d$ ，最短时延为 $(h-1)d$ ，其中 h 为跳数， d 为时隙长度。由此可知，CQF 整形器能够使数据流经过交换机的时间更具确定性。

4.3 IEEE 802.1Qav, 基于信用的整形器

上述两种同步机制都需要严格的全网同步,所以在异构链路的场景下,这两种机制都没有办法得到很好的部署。异步整形调度机制则不需要依赖全网时钟对本地设备内缓存的流量进行处理,可以借助信令的方式依靠本地时钟在恰当的时间内进行相应的转发。

IEEE 802.1Qav 基于信用的整形 (credit based shaper, CBS) 算法通过维护信用值 credit 的增长和衰减,来决定是否可以传输当前数据帧^[57-58]。CBS 整形器首先将网络中的队列分为两类:一类为尽力而为 (best-effort, BE) 流量;另一类为带宽预留 (stream-reservation, SR) 流量。对于 SR 类流量设立较高的优先级,如图 9 所示分别用队列 A 和队列 B 表示不同类型和优先级的 SR 类流量。队列 A 的优先级要高于队列 B,同时 CBS 整形器根据队列 A、B 的信用值 credit 进行传输控制^[59]。

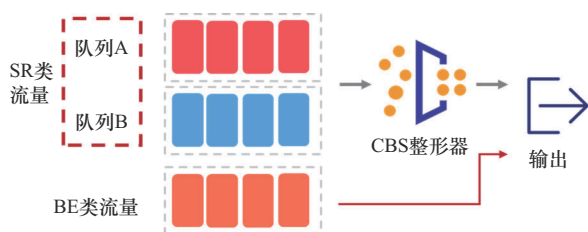


图9 CBS工作原理

Figure 9 CBS working principle

队列 A 和 B 的 credit 是动态变化的:当队列中没有数据需要传输时, credit 被置为 0;如果队列处于等待传输的状态,那么该队列的 credit 会按照实际带宽速率 idleSlope 逐渐增加,而处于传输状态的队列 credit 则会以端口传输速率 sendSlope 进行减少;若队列 credit 的值为负,则不能进行传输,但对于在 credit 为负之前就开始传输的队列,则可以继续完成本次传输^[60]。然而 CBS 会存在突发级联的情况,导致每跳时延会随着跳数的增加而累加。这对于一些工业应用,可能会超出其时延限制,且对于配置的预留带宽,由于每跳时延变化,如何确定该配置信息也需要进一步研究。

4.4 IEEE 802.1Qcr, 异步流量整形器

IEEE 802.1Qcr 异步流量整形 (asynchronous

traffic shaper, ATS)^[61]不同于 CBS, ATS 可以实现每跳流量的重新整形,并通过逐流粒度按流状态进行队列分类,从而消除流量级联实现流量的平滑传输。ATS 基于 UBS 提出,采用基于流状态的按类交错整形器,将具有相同状态特征的流量汇聚在同一缓冲队列中。该机制既可以根据数据流的状态特征为每条流分配相应的合格时间,从而指示其何时可以释放并传输到下一级队列,又无须实现每条数据流与整形队列的严格一一映射,实现相对较低的复杂度,并大大提高 ATS 整形的可扩展性。ATS 可以通过交错整形为每一帧计算合格时间 (eligibility time),并以合格时间作为传输信令按序传输,从而消除时间同步的依赖。同时采用速率控制服务规程 (rate control service disciplines, RCSD) 将整形用的限速器与转发用的调度器分离,从而实现预留带宽与时延边界的解耦,以实现低带宽和低时延的流量传输。所以 ATS 可以在复杂的流量场景和高负载的网络环境下,合理有效地利用带宽,并获得确定性的时延边界,更适用于部署在异构链路的网络环境中,ATS 工作原理如图 10 所示。

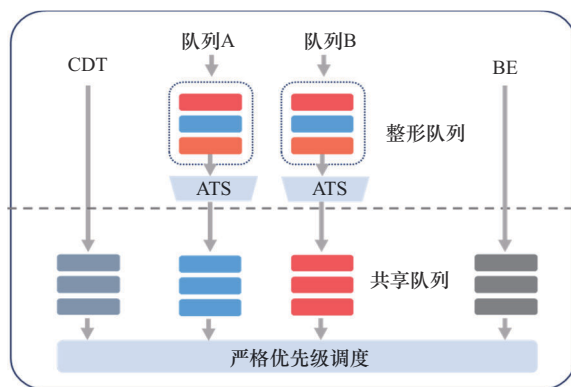


图10 ATS工作原理

Figure 10 ATS working principle

在 IEEE 802.1Qcr 提出之后,一些学者在此基础上进行了一系列的研究。Zhou 等^[62]对异步流量整形算法进行了深入的研究,讨论了异步流量整形机制使用不同的速率约束算法和转发调度机制的情况下性能的变化,给出每种算法形式化的建模方法,并在文献^[63]中对异步流量整形的实现方式及应用场景进行了详细的分析。Nasrallah 等^[64]对不同的拓扑及流量场景下时间感知整

形算法和异步流量整形算法的时延波动进行了对比,结果显示异步流量整形算法在零星流量传输的场景下拥有更好的性能,且消除了对于时间同步的依赖。此外,He等^[65]提出了基于深度强化学习的快速、可扩展的流感知TSN调度方法。该方法可以从数据流之间的复杂依赖关系中自动学习有效的调度策略,具有快速和可扩展性,显著提高了可调度性。Gong等^[66]针对TSN链流,提出了TSN链式流调度,用于在多级拓扑中对链流进行全局调度,同时提出基于禁忌搜索的启发式重调度算法。该算法可以有效地避免局部最优解,增强动态调度能力,提高调度算法的可靠性。Wei等^[67]提出基于TSN的贪婪时隙分配调度算法,实现工业无线网络与TSN融合的网络调度。根据传输数据流的特点,该算法能够传输不同优先级数据流的每个数据帧,从而对每个数据流进行优化。

上述整形调度算法都是基于不同的应用场景和需求提出的,且作用于数据帧交换的不同阶段。TAS和CQF都是对队列的输出调度进行管控。ATS是在数据流入队之前对流量进行重塑实现速率控制;CBS是在队列管理阶段引入信用值实现流量整形。表2给出了这些调度算法性能对比。在实际应用中,对于各种数据调度算法的使用往往需要根据各种需求做出合理的规划,比如同步机制、时延等多方面的因素。

5 TSN可靠性标准分析

TSN的可靠性主要指实现传输确定性需求中的低抖动、低丢包率的指标以及网络对故障的预防以及恢复能力。目前相关的标准有IEEE

802.1CB和IEEE 802.1Qci。

5.1 IEEE 802.1CB, 帧的复制和消除

IEEE 802.1CB的目的是在以太网中实现帧的复制和消除,从而提高网络的可靠性和可用性。该协议规定了基于帧的复制和消除可靠性(frame replication and elimination for reliability, FRER)技术,将拥塞和故障影响降到最低^[68]。

FRER是IEEE 802.1CB中的一项功能,其作用是提供冗余路径,确保时延敏感类的控制帧传输能够在网络发生故障时仍能可靠地进行。FRER的工作原理为:首先源设备向网络中发送数据帧,在FRER所在的交换机上,该数据帧被复制多份并分别发送到不同的接收设备,复制的数量可以根据网络拓扑和需求进行配置;其次接收设备将接收到的多个数据帧进行比较,如果发现重复的帧,则只保留其中的一份,这样可以避免数据冲突和混乱,如果有任何一个接收设备无法接收到数据帧,则交换机会自动将数据帧重复发送到其他可用的接收设备,从而保证数据的可靠传输,当数据帧到达目的地后,目的设备可以通过比较多个副本来检查数据的完整性和准确性,以此实现数据流在网络中传输时的无缝冗余及发生故障后传输的快速恢复。

5.2 IEEE 802.1Qci帧的过滤和报错

IEEE 802.1Qci的主要目的是提供一种检测和诊断网络的机制,用于解决网络故障情况下的流处理问题,提高网络的可靠性和可用性。IEEE 802.1Qci规定了一种连接故障管理(connectivity fault management, CFM)技术,它可以用于检测和诊断网络中的故障^[69]。CFM技术可以在以太网中快速发现和诊断连接故障,包括链

表2 调度算法性能对比

Table 2 Comparison of scheduling algorithm performance

调度算法	优点	缺点	应用场景
CBS	在保证紧急数据优先传输的前提下使低优先级流量获得传输服务	时延存在不确定性,无法实现确定性传输	适用于网络资源有限的情况,可以和TAS结合使用,提高传输效率
TAS	可以实现低时延抖动的传输	容易造成带宽资源浪费	适用于对传输时延、传输抖动要求比较严苛的信号
CQF	实现了与网络拓扑无关的零拥塞和有界时延,消除了带宽浪费的现象	时间同步要求严格	适用于周期性的、有最大时延要求的信号
ATS	以异步形式运行,消除了对同步时钟的依赖	实现复杂,时延抖动大,可扩展性较差	适用于工作负载和环境条件比较复杂的情况

路故障、节点故障和端口故障等，还可以监测网络中的性能和质量，并提供相应的报告和警告。

IEEE 802.1Qci 提出了优先级和服务参数化框架（prioritization and service parameterization framework, PSPF）^[70]。该框架包括 3 个主要步骤：首先是过滤，根据数据流的 ID、优先级、过滤规则和策略等信息，逐一对数据流进行过滤；其次是门控，即对经过过滤的数据流实施有序的分配和处理，以确保数据流能够按照指定的优先级得到处理；最后是计量，即对进入门控制器的数据流实施预先选择的带宽分配政策，以确保网络的带宽得到合理的分配和利用。PSPF 框架给出了网络故障后对流处理的主要过程与途径，是改善 TSN 稳定性的一种有效方法。表 3 对以上两种可靠性标准进行分析。

此外，可靠与容错是时间敏感网络重要的组成部分，添加网络的冗余性能够保障可靠传输。随后，各领域科研人员针对 TSN 的冗余性展开研究。Kehrer 等^[71]对比了 TSN 冗余技术在去耦合和协调方式下网络的连通性及拓扑的稳定性。而 Álvarez 等^[72]研究了基于冗余性分组传输的可靠性方法，分别提出了基于发射端的冗余方法和基于链路的冗余方法，并在文献^[73]中提出了时间与空间冗余的混合概念，对不同冗余方法进行了性能评估。Pahlevan^[74]等则将重点放在对不同场景下冗余机制的仿真上，提出了 Riverbed 仿真模型，对 TSN 中的冗余机制进行了评估。Sudhakaran 等利用 TSN 的冗余能力，如 IEEE 802.1CB，来消除漫游和干扰等事件导致的网络中断或时延现象^[75]。Yan 等^[76]提出了一种冗余路径路由方法，通过定义交叉度和碰撞度两个参数来描述路径之间的相关程度，有效降低目标流的端到端丢包率，提高了时间敏感网络的可靠性。

6 TSN 面临的挑战与机遇

时间敏感网络旨在提供确定性和鲁棒性的传输服务，以满足各种应用场景的需求，如汽车、工业以及航空航天等关键领域。然而，在实际部署和应用过程中，时间敏感网络面临着诸多难题。下面将结合应用场景和发展挑战对 TSN 的研究趋势展开讨论。

6.1 应用场景

（1）汽车领域

智能交通、自动驾驶等先进技术不断涌现，汽车行业逐渐进入智能化时代。传统的车载网络架构很难满足日益增加的高带宽、低时延的业务需求。一方面，随着新兴车载需求的不断增长，尤其是自动驾驶技术的发展，车载数据传输量呈指数级增长。传统的网络技术难以满足数据传输需求。另一方面，随着时效性要求的提高，时间同步需求急剧上升。自动驾驶系统已经从简单的数据传输升级到实时高效数据处理，这对车载网络架构提出了新的要求。此外，为了保证数据处理的准确性，自动驾驶对数据间的时间同步也提出了更高的要求。TSN 在时间敏感性可以为车载网络提供有效的时延保障，引入车载 TSN 是当前主流趋势。

（2）工业领域

在工业领域，TSN 作为一种高度可靠的通信解决方案，已经得到了广泛的应用。在实时监控应用中，工业环境对通信的确定性要求极高，而传统的以太网本质上是一种非确定性网络，无法满足通信需求。TSN 通过引入中心控制、网络设备时间同步以及更低的时延等，确保数据包能够实时、可靠地到达目的地，从而满足了工业领域对高度可靠性和实时性的通信需求。TSN 在工业领域的应用为提升性能和安全性提供了有力支持，使工业互联网能够更好地适应高度复杂和要

表 3 可靠性标准分析
Table 3 Analysis of reliability standards

标准名称	优点	缺点	应用场景
IEEE 802.1CB	提供保护机制以防止拥塞丢失，减少设备故障导致的数据包丢失风险	对网络要求较高，要求网络拓扑必须有环路	适用于对数据传输有高可靠性传输需求的应用
IEEE 802.1Qci	通过过滤和监控策略，以防止软件错误、恶意设备和攻击	没有定义过滤规则在网络规模上出现或动态更新的方式	适用于对未知和可疑流量的阻断和限流

求严格的工业环境。

(3) 航空航天领域

随着我国航天事业的发展,无人战车、飞机以及各类航天器等智能装备的广泛应用给数据交换带来了越来越高的要求,如高带宽、确定性以及低成本。传统以太网虽然具有一定的高带宽、低成本特点,但在航空航天领域,却难以满足“零丢失”和“延时确定”等确定性服务需求。在这一背景下,通过测试带宽控制能力,TSN能够确保实时交换数据的传输具有低时延、低抖动和确定性的特点。此外,通过测试CB冗余交换能力,TSN能够保障航空电子设备网络传输的可靠性,提高整个系统的抗干扰性和可靠性。因此,TSN的应用能够实现设备之间的高效通信。

6.2 发展挑战

(1) 大规模网络中流量调度实现困难

随着越来越多的设备和系统连接到网络中,数据流量和网络规模逐渐扩大,确定性需求也随之增加。但是现有的TSN流量调度技术一般只用于中小规模的网络场景。如何有效管理大规模网络,优化流量调度技术以及如何根据不同指标要求设计适合各种业务场景和规模的调度规划方案具有较大的挑战。

(2) 数据的完整性与机密性缺乏保障

近年来,恶意攻击、数据泄露和网络中断等事件逐渐增加。TSN提供的802.1Qci,虽然在一定程度上能够过滤突发帧,但是仍然无法有效保证数据的完整性和机密性。因此,如何有效利用安全技术,提高TSN网络数据的完整性和机密性是一个值得研究的问题。

(3) 分布式调度和集中式调度难以均衡

TSN目前拥有的调度方案主要有分布式调度和集中式调度。其中,分布式调度只能按照预留的带宽进行流量调度,在多跳的拓扑结构下,这将造成比较高的时延,调度效率较低。而集中式路由调度可以在对流量进行调度的同时对路径上所有节点进行调度,虽然提高了调度效率,但是中心节点的合理选取对调度性能的影响较大。

(4) 确定性与传输效率无法兼顾

关键流量的传输鲁棒性和确定性通常以传输效率为代价。为了确保时间敏感网络传输的质量

和实时性,时间敏感网络会进行带宽预留和流量整形。这意味着即使在网络拥塞的情况下,关键流量也能得到足够的带宽,从而得到确定性传输,但同时也会增大数据传输的开销并导致效率降低。因此,如何解决确定性与传输效率之间的平衡问题至关重要。

6.3 研究展望

随着网络规模的不断扩大和应用场景的不断增加,TSN需要提供更高的性能和更强的服务保障能力。针对上述应用和挑战,未来时间敏感网络中确定性服务保障技术的研究方向主要包括以下几个方面。

(1) 流量调度优化

针对大规模网络中流量调度的困难,可以结合机器学习技术对网络流量进行分类和预测,根据实时流量需求,动态调整调度策略。此外由于静态调度无法应对突发流量,且时间同步误差大。因此可以结合全局静态调度和局部动态调度的分层调度框架,降低调度的复杂度和时延,提高可扩展性。

(2) 安全性保障

由于TSN提供的802.1Qci无法完全满足数据的安全性要求。可以结合区块链技术在每个数据块加入已出块数据的哈希值,并通过共识机制确保每个区块中数据的不易篡改性。同时,还可以通过设计安全传输协议,例如SSL/TLS等加密数据流,保护传输过程中数据的完整性和机密性。此外,为保障传输时隙和路由等信息的安全,可以通过优化资源分配和设计安全感知的路由和调度策略,提高网络对抗恶意攻击的能力。

(3) 确定性与传输效率的平衡优化

带宽预留和流量整形一定程度上降低了流量传输的效率,可以结合基于动态带宽分配的传输效率优化方法,根据实时网络负载情况动态调整带宽分配,最大程度地减少带宽预留和流量整形带来的开销,实现确定性服务的同时提高传输效率。

7 结束语

本文对时间敏感网络做出了全面介绍,从TSN的发展背景出发,分别介绍了TSN的技术概述以及现阶段该技术面临的挑战,并从时间同

步、资源管理、流量控制和可靠性 4 个方面对 TSN 现有标准族以及基于现有标准做出的研究进行详细分析。随着“工业 4.0”时代的到来,工业自动化领域对网络中端到端的传输提出了确定性的 QoS 需求。从总体上讲,时间敏感网络协议族中已经出台的标准可以在特定场景下为网络中的数据传输提供低时延、低抖动、低丢包率和高冗余性的确定性服务保障,从不同的角度针对不同的应用案例提供了各种措施来满足端到端传输的 QoS 需求。

参考文献:

- [1] 黄韬, 汪硕, 黄玉栋, 等. 确定性网络研究综述[J]. 通信学报, 2019, 40(6): 160-176.
HUANG T, WANG S, HUANG Y D, et al. Survey of the deterministic network[J]. Journal on Communications, 2019, 40(6): 160-176.
- [2] 丁易. 时间敏感网络资源调度机制研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
DING Y. Research on resource scheduling mechanism in time-sensitive network[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.
- [3] 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[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2017, 11(1): 17-27.
- [4] 汤小丹. 计算机操作系统[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2007.
TANG X D. Computer operating system[M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 2007.
- [5] 李光, 王延松, 范成法. M-ICT 时代 SDN 技术实践与创新[J]. 中兴通讯技术, 2016, 22(5): 61-66.
LI G, WANG Y S, FAN C F. Practice and innovation of SDN technology in M-ICT era[J]. ZTE Technology Journal, 2016, 22(5): 61-66.
- [6] FARKAS J, BELLO L L, GUNTHER C. Time-sensitive networking standards[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2018, 2(2): 20-21.
- [7] HUANG T, WANG S, HUANG Y D, et al. A review of deterministic networks[J]. Journal of Communications, 2019, 40(6): 160-176.
- [8] KOPETZ H, ADEMAJ A, GRILLINGER P, et al. The time-triggered Ethernet (TTE) design[C]//Proceedings of the Eighth IEEE International Symposium on Object-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC'05). Piscataway: IEEE Press, 2005: 22-33.
- [9] MESSENGER J L. Time-sensitive networking: an introduction[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2018, 2(2): 29-33.
- [10] YANG X, SCHOLZ D, HELM M. Deterministic networking (DetNet) vs time sensitive networking (TSN)[J]. Network, 2019: 79.
- [11] FELD J. PROFINET - scalable factory communication for all applications[C]//Proceedings of the IEEE International Workshop on Factory Communication Systems, 2004. Proceedings. Piscataway: IEEE Press, 2004: 33-38.
- [12] LANGLOIS K, VAN DER HOEVEN T, RODRIGUEZ CIANCA D, et al. EtherCAT tutorial: an introduction for real-time hardware communication on windows[tutorial[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2018, 25(1): 22-122.
- [13] ERWINSKI K, PAPROCKI M, GRZESIAK L M, et al. Application of Ethernet powerlink for communication in a linux RTAI open CNC system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(2): 628-636.
- [14] TRAN N V P, NGUYEN V Q, TRAN H N, et al. Design of gateway based on CC-LINK IE field and serial communication[C]//Proceedings of the IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Piscataway: IEEE Press, 2017: 3378-3383.
- [15] HONG X H, CAI D. Research on the integration development of OT and IT for Internet plus [J]. China Engineering Science, 2020, 22(4): 18-23.
- [16] GARDINER E. The avnu alliance theory of operation for TSN-enabled industrial systems[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2018, 2(1): 5.
- [17] 蔡岳平, 姚宗辰, 李天驰. 时间敏感网络标准与研究综述[J]. 计算机学报, 2021, 44(7): 1378-1397.
CAI Y P, YAO Z C, LI T C. A survey on time-sensitive networking: standards and state-of-the-art[J]. Chinese Journal of Computers, 2021, 44(7): 1378-1397.
- [18] THIELE D, ERNST R, DIEMER J. Formal worst-case timing analysis of Ethernet TSN's time-aware and peristaltic shapers[C]//Proceedings of the 2015 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC). Piscataway: IEEE Press, 2015: 251-258.
- [19] IEEE. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks-Bridges and Bridged Networks[S]. New York: IEEE, 2014.
- [20] IETF. Official website of the IETF deterministic net-working (detnet) working group[S]. 2019.
- [21] CHEN S, LEGUAY J, MARTIN S, et al. Load balancing for deterministic networks[C]//Proceedings of the 2020 IFIP Networking Conference (Networking). Piscataway: IEEE Press, 2020: 785-790.
- [22] NASRALLAH A, THYAGATURU A S, ALHARBI Z, et al. Ultra-low latency (ull) networks: the ieee tsn and ietf detnet standards and related 5g ull research[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(1): 88-145.
- [23] GAVRILUT V, ZHAO L X, RAAGAARD M L, et al. AVB-aware routing and scheduling of time-triggered traffic for TSN[J]. IEEE Access, 2018, 6: 75229-75243.
- [24] JOHAS TEENER M D, FREDETTE A N, BOIGER C, et al. Heterogeneous networks for audio and video: using IEEE 802.1 audio video bridging[J]. Proceedings of the IEEE, 2013, 101(11): 2339-2354.
- [25] FINN N. Introduction to time-sensitive networking[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2018, 2(2): 22-28.
- [26] BELLO L, STEINER W. A perspective on IEEE time-sensitive networking for industrial communication and automation systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2019, 107(6): 1094-1120.
- [27] PRINZ F, SCHOEFFLER M, LECHLER A, et al. End-to-end redundancy between real-time I4.0 components based on time-sensitive networking[C]//Proceedings of the 2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1083-1086.
- [28] PRADOS-GARZON J, TALEB T. Asynchronous time-sensitive networking for 5G backhauling[J]. IEEE Network, 2021, 35(2): 144-151.
- [29] IEEE WG802.3. IEEE Standard for Ethernet. IEEE Std.[S]. 2018

- [30] IEEE LAN/MAN. Standards committee. station and media access control connectivity discovery[S]. IEEE, Std, 802.
- [31] LAN/MAN Standards Committee. IEEE standard for local and metropolitan area networks - virtual bridged local area networks[S]. IEEE Std, 2006, 802.
- [32] 杨庆. 基于工业以太网的TSN实时性技术策略[J]. 淮阴师范学院学报(自然科学版), 2022, 21(1): 24-29.
YANG Q. A study on security technical scheme of TSN based on industrial Ethernet[J]. Journal of Huaiyin Teachers College (Natural Science Edition), 2022, 21(1): 24-29.
- [33] BANIABDELGHANY H, OBERMAISSER R, KHALIFEH A. Extended synchronization protocol based on IEEE 802.1AS for improved precision in dynamic and asymmetric TSN hybrid networks[C]// Proceedings of the 2020 9th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), Budva, Montenegro, 2020: 1-8.
- [34] GUTIÉRREZ M, STEINER W, DOBRIN R, et al. Synchronization quality of IEEE 802.1AS in large-scale industrial automation networks[C]//Proceedings of the 2017 IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS). Piscataway: IEEE Press, 2017: 273-282.
- [35] MAHMOOD A, EXEL R, TRSEK H, et al. Clock synchronization over IEEE 802.11—a survey of methodologies and protocols[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(2): 907-922.
- [36] SHRESTHA D, PANG Z B, DZUNG D. Precise clock synchronization in high performance wireless communication for time sensitive networking[J]. IEEE Access, 2018, 6: 8944-8953.
- [37] 乔萱, 李宗辉, 刘强, 等. 无线时间敏感网络技术综述[J]. 软件学报, 2024, 1-19.
QIAO X, LI Z H, LIU Q, et al. Summary of wireless time sensitive network technology [J]. Software Journal, 2024, 1-19.
- [38] 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): 4334-4355.
LI Z H, YANG S Q, YU J H, et al. State-of-the-art survey on deterministic transmission technologies in time-sensitive networking[J]. Journal of Software, 2022, 33(11): 4334-4355.
- [39] 曹志鹏, 刘勤让, 刘冬培, 等. 时间敏感网络研究进展[J]. 计算机应用研究, 2021, 38(3): 647-655.
CAO Z P, LIU Q R, LIU D P, et al. Survey of time-sensitive networking[J]. Application Research of Computers, 2021, 38(3): 647-655.
- [40] IEEE .M. Holness, IEEE draft standard for local and metropolitan area networks - media access control (MAC) bridges and virtual bridged local area networks amendment: YANG data model, IEEE Standard P802.1Qcp/D0.7, Dec[S]. 2016.
- [41] IEEE.WG802.3.IEEE draft standard for ethernet YANG data model definitions. IEEE std. IEEE P802.3.2/D3.0[S]. 2018.
- [42] IEEE .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[S].2018.
- [43] IEEE . WG802.3. IEEE draft standard for ethernet YANG data model definitions. IEEE std. IEEE P802.3.2/D3.0[S]. 2018.
- [44] BOHM M, OHMS J, KUMAR M, et al. Time-sensitive software-defined networking: a unified controlplane for TSN and SDN[C]// Proceedings of Mobile Communication-Technologies and Applications; 24. ITG-Symposium. VDE, Osnabrück, 2019: 1-6.
- [45] SATKA Z, ÁLVAREZ I, ASHJAEI M, et al. Work in progress: a centralized configuration model for tsn-5g networks[C]// Proceedings of the 2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). IEEE, 2022: 1-4..
- [46] IEEE 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 perStream filtering and policing. IEEE std. IEEE P802.1Qcw/D1.2[S]. 2020.
- [47] IEEE 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 [S]. 2020.
- [48] IEEE 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 [S]. 2020.
- [49] 汪硕, 尹淑文, 卢华, 等. 面向时间敏感网络的控制管理机制研究综述[J]. 网络与信息安全学报, 2021, 7(6): 11-20.
WANG S, YIN S W, LU H, et al. Survey of control and management mechanisms for time-sensitive network[J]. Chinese Journal of Network and Information Security, 2021, 7(6): 11-20.
- [50] NSIAH K A, ALKHOURI K, SIKORA A, Configuration of Wireless TSN Networks[C]// Proceedings of the 2020 IEEE 5th International Symposium on Smart and Wireless Systems within the Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS-SWS), Dortmund, Germany, 2020: 1-5.
- [51] ZUO L D, ZHU M M, WU C Q. Bandwidth reservation strategies for scheduling maximization in dedicated networks[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2018, 15(2): 544-554.
- [52] BALASUBRAMANIAN V, ALOQAILY M, REISSLEIN M. An SDN architecture for time sensitive industrial IoT[J]. Computer Networks, 2021, 186: 107739.
- [53] OECHSLE S, FRICK F, LECHLER A, et al. A modular configuration and management framework for distributed real-time applications based on converged networks using TSN[J]. Procedia CIRP, 2023, 118: 38-43.
- [54] 刘晨阳. 准动态平台时间敏感网络调度与测试技术研究及实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
LIU C Y. Research and Implementation of Quasi-dynamic Platform Time Sensitive Network Scheduling and Testing Technology[D]. Xi'an: Xidian University, 2021.
- [55] IEEE Standards Association. 802.1 WG. IEEE 802.1 Oby-2015, Standard for local and metropolitan area networks-bridges and bridged networks-amendment 25; enhancements for scheduled traffic [S]. 2016.
- [56] IEEE Standards Association .802.1 WG IEEE 802.1 Och-2017 standard for local and metropolitan area networks bridges and bridged networks amendment 29:cyclic queuing and forwarding [S]. 2017.
- [57] IEEE, Time-Sensitive Networking Task Group. IEEE Std 802.1Qav-2009Amendment to IEEE Std 802.1Q-2005) IEEE standard for local and metropolitan area networks-virtual bridged local area networks-12: forwarding queuing enhancements amendment and for time-sensitive streams [S]. 2009.
- [58] MOHAMMADPOUR E, STAI E, MOHIUDDIN M, et al. Latency and backlog bounds in time-sensitive networking with credit based shapers and asynchronous traffic shaping[C]//Proceedings of the 2018 30th International Teletraffic Congress (ITC 30). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.

- [59] IEEE. 802.1Qav-2009. IEEE standard for local and metropolitan area networks virtual bridged local area networks amendment 12: forwarding and queuing enhancements for time sensitive streams [S]. 2010.
- [60] ZHAO L, HE F, LI E S, et al. Comparison of time sensitive networking (TSN) and TTEthernet[C]//Proceedings of 2018 IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-7.
- [61] IEEE Computer Society. 802.1 WG-Higher Layer LAN Protocols Working Group. IEEE802.1Ocr-2020 IEEE standard for local and metropolitan area networks bridges and bridged networks amendment 34: asynchronous traffic shaping [S]. 2020.
- [62] ZHOU Z F, YAN Y, BERGER M, et al. Analysis and modeling of asynchronous traffic shaping in time sensitive networks[C]//Proceedings of the 2018 14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-4.
- [63] ZHOU Z F, BERGER M S, RUEPP S R, et al. Insight into the IEEE 802.1 qcr asynchronous traffic shaping in time sensitive network[J]. Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal, 2019, 4(1): 292-301.
- [64] NASRALLAH A, THYAGATURU A S, ALHARBI Z, et al. Performance comparison of IEEE 802.1 TSN time aware shaper (TAS) and asynchronous traffic shaper (ATS)[J]. IEEE Access, 2019, 7: 44165-44181.
- [65] HE X W, ZHUGE X W, DANG F, et al. DeepScheduler: enabling flow-aware scheduling in time-sensitive networking[C]//Proceedings of the IEEE INFOCOM 2023 - IEEE Conference on Computer Communications. Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-10.
- [66] GONG K, YANG D, ZHANG W T, et al. An efficient scheduling approach for multi-level industrial chain flows in time-sensitive networking[J]. Computer Networks, 2023, 221: 109516.
- [67] WEI M, YANG S J. A network scheduling method for convergence of industrial wireless network and TSN[C]//Proceedings of the 2023 17th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (IMCOM). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.
- [68] IEEE WG802.1. IEEE standard for local and metropolitan area networks-frame replication and elimination for reliability. IEEE Std. IEEE 802.1CB-2017[S]. 2017.
- [69] IEEE WG802.1. IEEE standard for local and metropolitan area networks - bridges and bridged networks -amendment28: perstream filtering and policing. IEEE Std. IEEE802.1Qci-2017[S]. 2017.
- [70] PAHLEVAN M, OBERMAISSER R. Evaluation of time-triggered traffic in time-sensitive networks using the OPNET simulation framework[C]//Proceedings of the 2018 26th Euromicro International Conference on Parallel, Distributed and Network-based Processing (PDP). Piscataway: IEEE Press, 2018: 283-287.
- [71] KEHRER S, KLEINEBERG O, HEFFERNAN D. A comparison of fault-tolerance concepts for IEEE 802.1 time sensitive networks (TSN)[C]//Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA). Piscataway: IEEE Press, 2014: 1-8.
- [72] ÁLVAREZ I, PROENZA J, BARRANCO M, et al. Towards a time redundancy mechanism for critical frames in time-sensitive networking[C]//Proceedings of the 2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-4.
- [73] ÁLVAREZ I, PROENZA J, BARRANCO M. Mixing time and spatial redundancy over time sensitive networking[C]//Proceedings of the 2018 48th Annual IEEE/IFIP International Conference on Dependable Systems and Networks Workshops (DSN-W). Piscataway: IEEE Press, 2018: 63-64.
- [74] PAHLEVAN M, OBERMAISSER R. Redundancy management for safety-critical applications with time sensitive networking[C]//Proceedings of the 2018 28th International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-7.
- [75] SUDHAKARAN S, ALI I, EISEN M, et al. Zero-delay roaming for mobile robots enabled by wireless TSN redundancy[C]//Proceedings of the 2023 IEEE 19th International Conference on Factory Communication Systems (WFCS). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-8.
- [76] YAN J J, REN J, YANG D. A routing approach towards frame replication and elimination in time-sensitive networks[C]//Proceedings of the 2023 IEEE 3rd International Conference on Information Technology, Big Data and Artificial Intelligence (ICIBA). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1045-1050.

[作者简介]



张莉涓 (1987-), 女, 四川广安人, 博士, 南京航空航天大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为无线泛在网络、时间敏感网络、集群协同、强化学习、联邦学习等。



喻春妮 (2001-), 女, 江苏南通人, 南京航空航天大学硕士生, 主要研究方向为通信网络、群智感知。



徐风友 (1998-), 男, 山东德州人, 中国电子科技集团第二十八研究所工程师, 主要研究方向为软件开发、网络传输。