

面向时间敏感网络的控制管理机制研究综述

汪硕^{1,2}, 尹淑文^{1,2}, 卢华³, 张继栋³

(1. 北京邮电大学网络与交换国家重点实验室, 北京 100876;

2. 网络通信与安全紫金山实验室, 江苏 南京 211111;

3. 广东省新一代通信与网络创新研究院, 广东 广州 510663)

摘要: 时间敏感网络可以为应用提供有界低时延的确定性传输服务, 为异构的实时以太网提供更加统一通用的架构与标准, 然而 IEEE802.1 Qcc 标准下的时间敏感网络在各种应用场景中的实现部署存在各种挑战。对时间敏感网络中的控制管理机制研究进行了总结叙述, 从传输性能、可扩展性、技术融合 3 方面分析归纳了所面临的问题, 并介绍控制管理机制在相关方面的最新研究进展, 指出了尚待解决的问题和未来的研究方向。

关键词: 时间敏感网络; 控制平面; 资源管理

中图分类号: TN911.22

文献标识码: A

DOI: 10.11959/j.issn.2096-109x.2021105

Survey of control and management mechanisms for time-sensitive network

WANG Shuo^{1,2}, YIN Shuwen^{1,2}, LU Hua³, ZHANG Jidong³

1. State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Communications, Beijing 100876, China

2. Purple Mountain Laboratories, Nanjing 211111, China

3. Guangdong Communication & Network Institute, Guangzhou 510663, China

Abstract: Time-sensitive network can provide deterministic transmission services with bounded low latency for applications. Besides, it brings a unified architecture and standards to heterogeneous real-time Ethernet in the industry. However, the implementation and deployment of time-sensitive network based on IEEE Std 802.1Qcc face many challenges in various application scenarios. The research on the control and management mechanisms in

收稿日期: 2020-11-18; 修回日期: 2021-03-12

通信作者: 卢华, luhua@gdcni.cn

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1800500); 国家自然科学基金(61902033); 北京市自然科学基金(4204105); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2021RC02)

Foundation Items: The National Key R&D Program of China (2018YFB1800500), The National Natural Science Foundation of China(61902033), The Natural Science Foundation of Beijing (4204105), The Fundamental Research Funds of the Central Universities (2021RC02)

论文引用格式: 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.

time-sensitive network was summarized. Then the problems to be solved were analyzed and summarized from transmission performance, scalability and technology fusion. The latest research progress of control and management mechanisms was shown. The open issues and future research directions were discussed.

Keywords: time-sensitive network, control plane, resource management

1 引言

随着互联网的广泛使用和信息化技术的快速发展,网络应用对流量传输的质量要求越来越高,如工业控制、远程医疗手术、自动驾驶等应用需要将端到端时延控制在 10 ms 以下,将抖动控制在微秒级。工业 4.0 时代,人们期望智能化能够取代的工作越来越精密,这就迫切需要将数据传输中的各种“不确定性”变为“确定性”。

而如今以统计复用和存储转发为基础的“尽力而为”网络仍然存在丢包与时延不确定的问题,当前可以满足传输时延确定性要求的实时工业以太网 PROFINET、TTEthernet、EthernetCAT 等无法互相兼容,难以实现互操作性^[1]。

时间敏感网络(TSN, time-sensitive network)的出现为满足确定性低时延的传输以及互操作性提供了一种解决方案。它是一种基于以太网协议的数据链路层技术,在提供低时延、低抖动的端到端传输和保证带宽能力的同时,给出了一个标准的、开放的二层,不仅改进了互操作性,还能够实现实时数据与普通数据的共同传输。

近年来,IEEE 802.1 工作组致力于时间敏感网络的标准化,发布了一系列的技术标准。TSN 已经成为实现局域确定性网络较成熟的技术。TSN 旨在利用时分复用的思想,对不同需求的流量进行优先级划分,并为较高优先级流量提供确定的传输时隙与路径,避免带宽重叠和突发流量造成的重传和分组丢失的影响,这种方法的实现需要对整个网络的行为和资源进行高效的控制管理。

2 时间敏感网络控制管理标准

2.1 控制模型

时间敏感网络发布的标准^[2]为时间敏感网络提供了 3 种控制配置模型,分别是完全分布式模型、集中式网络/分布式用户模型和完全集中式模型。

(1) 完全分布式模型

在完全分布式模型中,没有一个集中式的网络配置实体,用户需求由终端设备通过 TSN 用户协议直接与相连的交换机进行交流传达,交换机再通过协议在拓扑中沿着路径传播 TSN 用户/网络配置信息,交换机在传播用户需求的同时进行资源管理,其结构如图 1 所示。

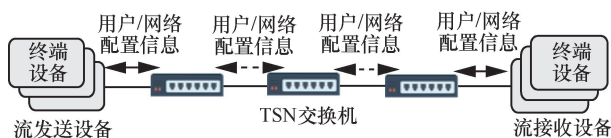


图 1 完全分布式模型结构
Figure 1 The structure of the fully distributed model

这种分布式模型能够有效地保留高优先级流量的带宽,被广泛地应用在具有单向、单目标、点对点连接属性的音视频流的传播。但是这种局部管理受到交换机当前所知道的信息量限制,并且当消息突然增多时易导致网络崩溃,从而导致时间敏感流量无法忍受的时延。

(2) 集中式网络/分布式用户模型

集中式网络/分布式用户模型是完全分布式和集中式的中间状态,其结构如图 2 所示。在传达用户需求上采用分布式的方法,即终端设备直接通过用户网络接口向相连的交换机传达其需求,TSN 用户/网络的配置信息则由与终端设备相连的交换机与集中式网络配置(CNC, centralized network configuration)节点之间进行通信传播,不再传播到拓扑内部,TSN 流的所有交换机配置也都是由 CNC 使用远程网络管理协议来完成的。

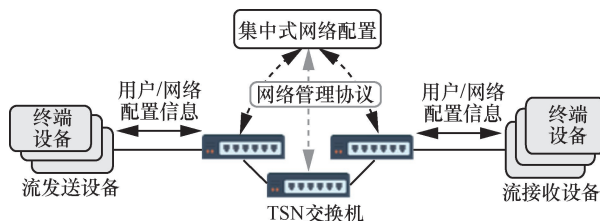


图 2 集中式网络/分布式用户模型结构
Figure 2 The structure of the centralized network/distributed user model

这种模型将计算集中在单个设备上并且为计算提供网络的全局视图，相比于分布式模型，其更适用于最优配置的实现和计算复杂的应用，更有利于系统的运行。

(3) 完全集中式模型

完全集中式模型则通过一个集中用户配置(CUC, centralized user configuration)节点与 CNC 之间交换用户需求,用户网络接口在 CUC 与 CNC 之间,其结构如图 3 所示。CUC 与终端设备之间通过协议实现终端设备的发现、配置以及功能和需求的检索。CNC 使用远程管理来发现物理拓扑,检索交换机功能,并配置每个交换机的 TSN 功能。CUC 从终端设备获取需求,并将其传达给 CNC, CNC 通过其了解到整个网络中各个流的需求以及网络资源和拓扑结构,来计算出满足整体传输要求的配置信息并下发给各个交换机。

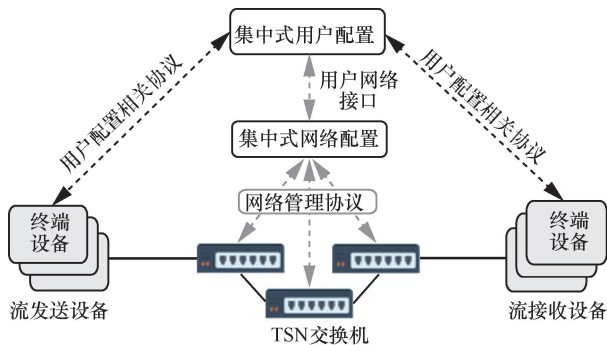


图3 完全集中式模型结构
Figure 3 The structure of the fully centralized model

完全集中式模型提供了一组管理和控制全局网络的工具,被看作最终实现实时通信和确定性的框架,当前 IEEE 802.1 标准只给出了一个集中式框架的概念,不过学术界与产业界已经开始提出这种架构模型具体实现部署的方案。

2.2 资源管理

为了有效地实现时延的严格限制和零拥塞损失,需要对网络中端到端的资源进行管理来确保流计划传输的服务质量,并为流量提供有效的许可控制策略和安全的资源注册机制。

IEEE 802.1Qat 标准^[3]定义了流预留协议(SRP, stream reservation protocol),在数据链路层定义了流的概念,用来解决网络中音视频实时流量与普通以太网流量之间的竞争问题。通过协

商机制,在音视频流从源设备到不同交换机再到目的终端设备的整个路径上预留出所需的带宽资源,以提供端到端的服务质量和时延保障,实现接纳控制。

SRP 是运行在分布式架构的网络中的。流发送终端设备发出流预留申请声明,该声明沿着选择出的路径逐跳在沿途交换机中进行注册、更新声明信息,并通过配置队列和过滤库来实现带宽资源的预留。如果路径中的所有交换机都有足够的带宽资源可以实现预留的情况,那么流接收设备则会接收到携带信息为预留成功的声明,反之则会收到信息变为预留失败的声明,之后流接收终端设备发出预留结果声明,并逐跳传输至发送设备。

IEEE 802.1 Qcc 标准对 SRP 进行了性能改进,减小了预留消息的大小和频率,使更新仅由链接状态或预留更改触发,并且支持更多类型与优先级的流量采用不同的调度整形机制在网络中进行转发传输,以扩展 TSN 的应用范围。时间感知整形(TAS, time-aware shaper)和循环排队转发(CQF, cyclic queuing and forwarding)这两种调度整形机制都是借助 Qcc 定义的完全集中式模型,根据控制管理层面所下发的门控列表来进行时隙资源分配从而实现数据无冲突地转发。流量传输的质量很大程度上取决于控制管理层面对于资源的管理分配方案。

IEEE 802.1 Qdd 标准通过在链路本地注册协议的基础上,定义新的点对点资源分配协议来更新分布式配置模型,为精确的时延计算和传送提供支持。SPR 受到底层多注册协议(MRP, multiple registration protocol)能力的限制,不能有效地支持大型预留数据库,在进行分布式的流预留时,也不能支持需要通过 IEEE 802.1 CB 中复制冗余技术而获得高可用性的流的预留。这些问题将在 Qdd 标准中得到解决,Qdd 标准将完全摆脱 MRP 的框架限制,并设计出一个全新的流预留协议。

3 时间敏感网络控制管理机制的挑战

3.1 混合流量的管理

当前 TSN 所实现传输可控的网络配置都是基于全网时钟同步和高优先级流量的周期性的,

然而在实际应用中, 不仅存在需要准时、准确传输的时间触发流, 还存在关键性的事件触发流量, 而这种流量是非周期的, 具有突发性, 很可能导致网络崩溃。在同时存在非周期时间敏感流的情况下, 如何控制流量传输和资源的分配, 使得既能满足非周期流的传输质量又能避免周期流传输受到影响, 还没有一个合适的解决方案。数据层面上的异步流量整形 (ATS, asynchronous traffic shaper) 不需要同步机制, 通过每一跳对流进行重新整形允许非周期流的传输, 但面对高负荷的周期流量时性能较差^[4], 还需要更多的研究和实践。

TSN 可以实现多种时延要求的流量的共同传输, 集中化的架构提供了一个允许网络配置自动化的平台, 可以通过不同的调度方法实现流量传输控制。但是目前的方案大多数只考虑最高优先级流量, 而忽视优先级的较低实时流量和普通以太网流量。研究表明^[5-6]: 一些高优先级流的配置可能会导致较低优先级时间敏感流, 如音视频流, 无法调度, 会对普通以太网流的服务质量产生显著影响。TSN 标准把流量分为 7 个优先级, 如何通过合适高效的控制来保证更多流的可调度性需要进一步探讨。

3.2 规模扩大与兼容

集中式控制管理模型一般采用调度算法生成门控列表以控制流量的传输, 这本质上是一个 NP 完全问题, 所以可控制网络规模受到算法复杂性和运行时间的限制, 并且时间同步只能在一定范围内保证全网的时钟同步。TSN 在大型网络和大量流的现实场景的部署应用仍然存在问题。

此外, 随着自动化水平的提升, 工业网络需要突破局限在单个生产线或工厂的分隔现状, 实现多个工业网络的连接, 以满足不同业务无缝过渡、相互配合等需求^[7]。这就对应用于工业控制的 TSN 提出了新的挑战: 在控制平面实现多个 TSN 域的连接并在多个域内进行实时通信。

由于在 TSN 被提出之前, 实时工业以太网没有统一的标准, 所以如今工业控制总线技术中存在很多标准互异的实时工业以太网, 基础设备由运行着不同协议的网络设备组成。TSN 的出现则是为了提供一个实时开放互联的通信网络, 因此

TSN 有必要支持遗留的工业以太网, 同时为其扩展提供空间^[8]。在 TSN 实现遗留异构工业以太网的互联互通、实现互操作性需要进一步研究 TSN 对异构网络的管理。

3.3 网络的协同融合

面对需求千差万别的网络应用, TSN 对资源的分配应当按需进行, 从而实现差异性服务, 使网络资源得到充分有效利用。在网络的链路层以下已经出现融合切片技术的灵活以太网技术, 实现了链路层与物理层的解耦, 提供了更加灵活的物理通道速率。将这种底层的资源切片技术与 TSN 进行协同, 来实现细粒度、差异化的资源分配是确定性网络研究的重要一步。如何在 TSN 中实现对底层资源的准确细化控制也是其中需要考虑的一个问题。

此外, 工业中大多数的通信技术采用有线的方式, 然而随着物联网和 3GPP 5G 技术的发展, 无线技术为网络通信带来了新的可能性和优势。无线通信赋予了终端设备灵活性并以一种经济有效的方式进行连接, 满足了移动机器人、自动驾驶车辆、无人机等移动设备对可靠性连接的期望。但与以太网相比, 无线链路引入了一些特性, 如不可靠性、不对称链路时延和信道、信道干扰和来自环境的信号失真^[9]。这些因素使得适用于无线网络的 TSN 标准的研究和实现成为一项挑战。就管理控制方面而言, TSN 与 3GPP 5G 的端到端集成面临的问题在于两者工作过程的不同: TSN 在流建立之前需要得到包括链路速度和时延在内的底层基础设施的准确信息, 而 3GPP 5G 系统只有在网络内建立连接后才能提供这些信息^[10]。这个问题的克服还需要一个有效的方案。

4 时间敏感网络控制管理机制的研究

4.1 控制平面设计

TSN 的控制管理基础是 IEEE 802.1Qcc 定义的配置模型, CUC 可应用于用户设备, 管理和转发服务请求, CNC 可应用于网络设备, 计算和下发相关配置。然而 802.1Qcc 标准只提供了相应的配置建议, 并没有提供实际技术的具体规范。由于 TSN 完全集中的配置模型与软件定义网络 (SDN, software defined network) 架构相契合,

其中控制平面可以由 CNC 与 CUC 提供, 因此, 许多研究人员都希望通过 TSN 与 SDN 结合来具体实现 TSN 的集中式模型构想, 提供一个动态的、集中的配置解决方案, 以满足对 TSN 管理控制的各种预期以及一些应用对 SDN 实时性、确定性的要求。基于 SDN 的 TSN 架构如图 4 所示。

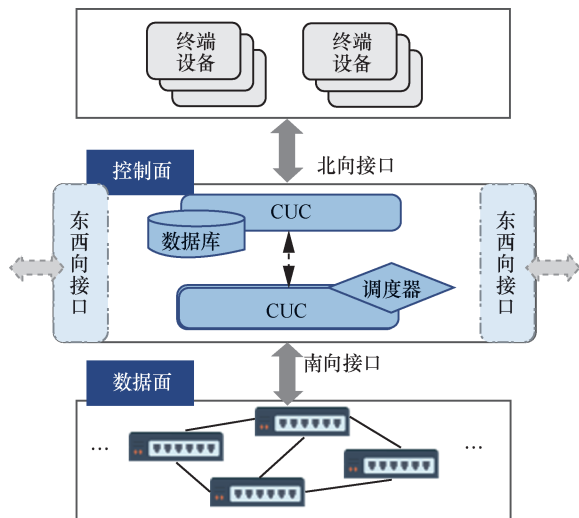


图4 基于SDN的TSN架构
Figure 4 The architecture of TSN based on SDN

在 TSN 中, 一个影响网络性能的重要因素就是时钟的同步, 而在对启动时间有着严格要求的网络中, 如应用于汽车的 TSN, 网络运行时一般不支持 IEEE 802.1AS 中的最佳主时钟算法和时钟生成树等动态算法, 此环境下需要在每个设备上配置更多的参数, 时钟同步的实现就成为一个复杂的问题。但是使用 SDN 方法能够使得该场景下时间同步的部署变得更加简便, Said 等^[11]通过 NEON 软件实例化 Qcc 模型, 在 SDN 控制器中指定 GrandMaster 标识, 获取到拓扑信息之后计算时钟生成树从而决定所有设备中每个端口的角色, 进行相应的配置, 此外还通过一个试验台展示了该方案如何配置时间同步特性。

对于 TSN 具体选用什么方法来实现集中的控制管理的问题, Gerhard 等^[12]认为 OpenFlow 是解决在 TSN 中部署生成的路由和调度这个问题的有效方案, 并且可以为终端设备到控制中心的流预留通知提供高度的灵活性。所以文献[12]结合 SDN 提出了一种软件定义流保留的体系架构,

使用已有的 SDN 控制器软件和南向接口协议, 并根据 802.1Qcc 定义了一个功能完整的 TSN 配置基础设施。Böhm 等^[13]从灵活性的方面考虑, 提出了在 TSN 环境下集成 OpenFlow 的体系架构来解决动态流预留的问题, 使用 OpenFlow 作为 TSN 的网络管理协议, 并利用现有的开源 SDN 控制器进行了实现。Hackel 等^[14]证明了 TSN 与 SDN 的结合能够保障时间敏感流的传输质量, 在汽车网络中具有巨大的潜力。

Gerhard 和 Böhm 都详细总结了 TSN 控制器需要满足的要求以及 OpenFlow 满足要求的情况。除了特定于 802.1CB 的报头外, OpenFlow 支持在 802.1Qcc 数据帧规范中可以选择的所有可能的协议字段, 因此 OpenFlow 不需要在流接收和发送设备上流转换, 并且根据匹配标准将数据帧匹配到流规则中、出入口的计量以及出队列与出端口的选择是 OpenFlow 里的常见操作。但是 OpenFlow 不支持时钟同步, 无法为 IEEE 802.1Qbv 标准中的时间感知整形提供队列管理功能。为了满足 TSN 的这些需求, 需要对原本的 SDN 进行扩充。例如, 整形器的配置可以附加一个南向协议, 如 NETCONF, 通过同时使用两种不同的南向协议来实现部署^[12], 时钟同步则必须使用另外的协议(如精度时间协议)来实现^[13], 在这方面 Mizrahi 已经进行了一些研究^[15-16]。

TSN 与 5G 结合成为工业互联网的发展方向。Farkas 等^[17]认为 5G 的超低时延能力可以和 TSN 特征很好地匹配, 这两个关键技术的集成能够提供确定性的端到端连接, 并且认为控制平面集成的第一步是基于软件定义网络的方法实现 TSN 的完全集中模型。在集中控制的架构下, 从 TSN 桥接网络隐藏 5G 系统 (5GS, 5G system) 内部过程, 把 5GS 看作一组 TSN 网桥, 能够接收并转换执行 TSN 在用户和控制平面的发出信息, 从而使 5GS 能够于 TSN 域中协同运行。

5G PPP 将 SDN 定义为 5G 核心网络的一种技术, 同时 IEEE 802.1 TSN 任务组也已经发布了 TSN 在前传网络方面的草案, 但是这两个网络现在需要分别进行配置, 这阻碍了两种技术的协同和 5G 的进一步发展^[18]。Böhm 等^[19]提出使用 TSSDN 作为 TSN 和 SDN 的统一控制平面, 在不

改变数据平面的情况下, 形成一个由 TSN 网桥和 SDN 交换机组成的联合网络, 以此实现基于 TSN 的前传网络和 5G PPP 中基于 SDN 的核心网络的统一配置, 并且通过测试平台证明了这个概念的可行性。

此外, 5G 所采用的网络切片技术如何在 TSN 中启用是两者融合需要满足的需求, 目前还没有相关的技术或标准来实现。Bhattacharjee 等^[20]提出了一种把 5G 中网络切片控制管理系统与 TSN 控制面互联的方法机制, 在一种新的网络架构中通过 5G 应用功能与 TSN 的 CNC 之间的交互, 使 TSN 传输网络能够支持网络切片的生命周期管理, 从而能够进一步释放端到端确定性通信的潜力。

4.2 资源管理策略

TSN 采用的流量整形与转发大多是以 IEEE 802.1Qbv 为基础的整形机制, 需要在集中式的控制器中对门控列表进行配置, 从而达到端到端确定性传输的效果。对于具有一定规模的网络来说, 手动控制太过复杂, 这就需要一些算法策略来解决自动生成门控列表这个 NP 完全问题, 实现网络资源的有效管理。资源管理策略发展如表 1 所示。

表 1 资源管理策略发展
Table 1 The development of resource management strategy

研究内容	解决的问题
推导时间敏感流调度的约束条件	为时间敏感网络流量调度方案的自动化配置方案生成奠定基础
联合路由对流量进行调度	同时进行空间和时间上的隔离传输, 避免瓶颈链路造成时间敏感流量可调度性降低
引入对多播传输调度的预处理和后处理	增强时间敏感网络的多播能力, 避免出现多播下调度算法运行时间大幅度与可调度性降低的问题
在线调度方案	解决网络运行期间设备或流量的动态增删改变问题
考虑低优先级流量的调度方案	避免高优先级流的调度严重影响到低优先级流的可调度性
调度方案求解与机器学习结合	推动 TSN 的全自动化配置和设备的即插即用的实现
调度方案信息的保护	避免出现因为调度方案泄露而受到攻击影响系统稳定性的问题

Craciunas 等^[21]分析了影响 802.1Qbv 实时通

信的确定性行为的关键功能参数, 并基于这些参数的广义配置, 推导出了计算离线调度所需的约束条件; 在交换多速率时间触发网络中, 使用一阶逻辑约束来阐述任务调度问题, 并提出使用可满足性模理论 (SMT, satisfiability modulo theories) 和混合整数规划 (MIP, mixed integer programming) 求解器寻找解决方案^[22]。Santos 等^[23]使用 SMT 求解器为 TSN 交换机输出调度方案, 完成了自动生成 TSN 调度方案的工具 TSNCHED。同时进行空间隔离和时间隔离的联合路由调度也出现了相关的研究^[24], 可以通过为流选取剩余带宽大的链路来均衡链路利用率以提高流量的可调度性。Huang 等^[25]考虑到周期性流带宽利用率的分散性会导致传输瓶颈判断标准缺乏准确性, 通过分析不同周期流的组合的带宽利用情况, 引入了一种新的度量调度瓶颈的方法并提出了一种时间触发流感知路由算法, 进一步提高了流的可调度性。

大部分提出来的调度方案适用于多播, 但会对流量的可调度性和执行时间造成很大的影响, 所以 Yu 等^[26]对多播 TSN 中动态应用的调度问题进行了相关的研究, 通过引入预处理和后处理阶段, 在不影响求解空间的情况下对网络链路进行修剪和合并, 减少了链路的数量, 从而大大减少了路由和调度变量的约束数, 加速了动态应用程序的调度合成, 并且维持了可调度性和解决方案空间。

现代网络的场景常常存在各种动态变化, 如网络节点、网络拓扑或流量模式的变化。在这种情况下, 假设预先知道所有流信息的离线调度算法就不再适用。所以一些联合路由的在线增量调度的方法被提出^[27-28], 以解决网络运行过程中设备或者流的增加。同时, Nasrallah 等^[29]对动态流资源分配和许可控制策略进行了相关的研究, 并为存在动态变化的 TSN 设计了一个 CNC 接口, 允许在运行时对网络重新配置策略。与大多数控制管理研究不同的是, 他们考虑了集中式控制模型单点故障、增加复杂度的缺点, 对模型进行了修改, 将控制面和数据面进行结合, 使重配置策略能够在完全分布式和分布式用户/集中式网络模型上运行。

上述方法都只是从优先级最高的时间触发流量来考虑调度的问题,但 TSN 需要满足多种流量共存的调度和时延保证。Zhao 等^[30]采用网络演算的方法分析了帧抢占和非抢占模式下最高优先级的时间触发流量对较低优先级的音视频流传输的影响,并给出了音视频流量保持有界时延传输的条件。基于此研究, Gavrilut 等^[5]在帧抢占和非抢占提出了一种在 TSN 中考虑音视频流量的时间触发流量联合路由调度的方法,在保证时间触发流量传输能力的同时,为音视频流量留出更多的传输资源,提高了音视频流量的可调度性。Metaal 等^[31]考虑到不同工业以太网具有不同质量要求的应用,设计了一种允许这些具有不同流量模式和服务质量要求的流量在一个网络共同进行传输的方法,从而加速了 TSN 实现与这些异构网络的集成。Chuang 等^[32]在 TSN 中同时考虑高优先级时间触发流与优先级较低的音视频流两者调度的前提下提出了基于蚁群算法在线路由调度方法,实现灵活地调整或重路由。

随着现在网络设备向着即插即用的方向发展,对实时网络控制管理的研究也更进一步,出现了 TSN 网络的自配置的方案,从而实现网络的自动更新来适应网络中的变化,人工输入参数的步骤可以一并省略。Gutiérrez 等^[33]以引入配置代理的方式向现有的实时网络配置和管理技术中添加了学习功能。配置代理包含网络检测、流信息提取、生成调度和重配置 4 个功能模块,通过不断监测网络并提取相关的信息,实现对网络当前配置的及时修改。此外,Navet^[34]提出了机器学习是否能够作为 TSN 提供一个有效的可调度性分析的问题,并对监督式和无监督式机器学习进行了研究,证明了机器学习算法可以较为准确地对可调度性能进行预测。

TSN 中的网络安全问题不仅包括所传输数据的安全,还包括流量传输的时隙和路由等信息的安全。Mahfouzi 等^[35]在满足流传输时间约束的同时为网络控制面的路由和调度提出了具有安全意识的方法,通过对资源的仔细优化来提高网络控制系统抵御攻击的弹性和能力,保障了工业控制等应用的稳定性。

4.3 管理规模优化

对 TSN 进行资源分配、控制流量传输的门控列表的自动化配置虽然可以通过上述约束求解的调度算法解决,但求解的复杂度很高,SMT 等求解器可以达到指数复杂度,当存在超出一定数量范围的帧和复杂的约束条件时,问题求解就变得复杂。

针对这种管理规模局限性的问题,启发式方法或者启发式方法与基于 SMT 的方法组合得到了很多的关注和研究,如利用贪婪算法^[36]或遗传算法^[37]进行调度可以得到随流规模线性增长的复杂度,还可以在减少解决方案空间与得到方案的性能之间进行权衡,两种基础调度求解方法对比如表 2 所示。TSN 交换机中数量有限的调度表条目限制了可调度的时间敏感流数量,JIN 等^[38]放宽了交换机端口控制的限制,使交换机无须在所有情况下都记录每个数据包的端口控制信息,从而大大减少了流调度时所需要的调度条目表,结合快速启动算法消除调度冲突,扩大了可调度的网络规模。

表 2 调度求解方法对比
Table 2 Comparison of scheduling solution methods

调度求解方法	可调度性	时间复杂度
线性规划求解	求解时间充足的情况下,能够保证所求方案满足约束的最优解	指数复杂度,求解时间随流和网络规模增大而指数增加
启发式方法	不能保证所求的调度方案完全满足约束的最优解	线性复杂度,算法运行时间随流和网络规模的增大而线性增加

Hellmanns 等^[39]针对工业网络中的规模问题提出了更进一步的解决方案,设计了一种利用工厂网络的层次结构对同步流量进行分层次分阶段调度的方法。这种方法把网络分割为层次化的子网,机器层网络通过边缘交换机连接到生产单元网络、生产单元网络再连接到大的环形拓扑中,形成工业骨干网。流量的调度分为两个阶段:子网内的调度利用无等待传输条件下的禁忌搜索启发式;子网间调度则基于模拟追踪的方法进行。文献[39]提出的层次化调度的方法比传统的方法的性能提高了两个数量级,显著地扩大了网络控制管理的范围。

工业 4.0 要求网络实现大规模跨域的通信,但目前的 TSN 网络没有提供彼此之间的连接与协同控制,Böhm 等^[7]提出了 TSN 网络东西向接口协议的概念,TSN 控制器在利用路由协议找到邻近控制器后,通过东西向协议建立多域时间同步的基准、传递关于流连接建立的信令,实现了基于 IEEE 802.1 Qcc 的多个 TSN 控制平面间的通信,以此支持跨多个 TSN 域的通信路径的建立和时间敏感流量的有效传输。

除了在多个 TSN 域间进行通信,TSN 作为统一实时工业以太网的标准技术,实现与其他遗留实时工业以太网的互联互通也是 TSN 需要满足的要求。Chouksey 等^[40]使用多个不同厂商的 TSN 设备建立了一个异构 TSN 测试平台并进行了配置和调试,总结了市场现有的 TSN 设备和工具以及系统控制存在的问题。Schriegel 等^[41]将多 SDN 域控制平面架构应用到 TSN 与异构网络的互联互通之上,并且将遗留的以太网接入 SDN 代理,从而使其数据平面集成到 SDN 控制面中,异构网络与 TSN 之间就可以通过 SDN 的东西向接口来实现网络间的通信。

将 TSN 集成到 OPC 统一架构(UA, unified architecture)中是 TSN 被广泛应用的关键步骤。OPCUA 作为一个自动化技术与机器对机器网络传输协议,允许工业设备之间跨平台的通信,OPCUATSN 则能够使这种通信具有实时和确定性传输的能力,也能使 TSN 设备实现即插即用^[42]。Eymüller 等^[43]对跨多个实时传输组件的运行连续和分布式进程的问题进行建模,并提出了一种将 TSN 上的实时通信与 OPC UA 结合通信的方法,实现了实时同步多个分布式 OPC UA 程序和交换进程数据。

5 结束语

时间敏感网络作为下一代生产型网络的重要组成部分已经得到了充分的重视,其标准的开放性为研究提供了更开阔的空间。本文结合应用场景和标准进展分析归纳了当前时间敏感网络发展部署中其控制管理机制所面临的挑战,并对时间敏感网络控制平面架构、管理方法与策略方面的最新研究进展进行了总结概述。

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] WG 802.1. IEEE standard for local and metropolitan area networks: virtual bridged local area networks amendment 14: stream reservation protocol (SRP)[S]. 2018.
- [3] WG 802.1. IEEE standard for local and metro-politan area networks--virtual bridged local area networks amendment 14: stream reservation protocol (SRP): IEEE Std 802.1Qat-2010[S]. 2010.
- [4] 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.
- [5] GAVRILUȚ 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.
- [6] HOUTAN B, ASHJAEI M, DANESHTALAB M, et al. Work in progress: investigating the effects of high priority traffic on the best effort traffic in TSN networks[C]//Proceedings of 2019 IEEE Real-Time Systems Symposium (RTSS). 2019: 556-559.
- [7] BÖHM M, OHMS J, WERMSE D. Multi-domain time-sensitive networks - an east-westbound protocol for dynamic TSN-stream configuration across domains[C]//Proceedings of 2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). 2019: 1363-1366.
- [8] ANSAH F, OLAYA S S P, KRUMMACKER D, et al. Controller of controllers architecture for management of heterogeneous industrial networks[C]//Proceedings of 2020 16th IEEE International Conference on Factory Communication Systems (WFCS). 2020: 1-8.
- [9] MILDNER A. Time sensitive networking for wire- less networks-a state of the art analysis[J]. Net-work, 2019, 33.
- [10] MANNWEILER C, GAJIC B, ROST P, et al. Reliable and deterministic mobile communications for industry 4.0: key challenges and solutions for the integration of the 3GPP 5G system with IEEE[C]//Proceedings of Mobile Communication-Technologies and Applications. 2019: 1-6.
- [11] SAID S B H, TRUONG Q H, BOC M. SDN-based configuration solution for IEEE 802.1 time sensitive networking (TSN)[J]. ACM SIGBED Review, 2019, 16(1): 27-32.
- [12] GERHARD T, KOBZAN T, BLÖCHER I, et al. Software-defined flow reservation: configuring IEEE 802.1Q time-sensitive networks by the use of software-defined networking[C]//Proceedings of 2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). 2019: 216-223.
- [13] BÖHM M, OHMS J, KUMAR M, et al. Dynamic real-time stream reservation for IEEE 802.1 time-sensitive networks with OpenFlow[C]//Proceedings of 8th International Conference on Applied Innovation in IT. 2020.
- [14] HACKEL T, MEYER P, KORF F, et al. Software-defined networks

- supporting time-sensitive in-vehicular communication[C]//Proceedings of 2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Spring). 2019: 1-5.
- [15] MIZRAHI T, MOSES Y. Time-based updates in software defined networks[C]//Proceedings of the second ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Software Defined Networking. 2013: 163-164.
- [16] MIZRAHI T, MOSES Y. Software defined networks: It's about time[C]//Proceedings of IEEE INFOCOM 2016 - The 35th Annual IEEE International Conference on Computer Communications. 2016: 1-9.
- [17] FARKAS Á, VARGA B, MIKLÓS G, et al. 5G-TSN integration meets networking requirements for industrial automation[J]. *Ericsson Technology Review*, 2019, 96(7): 45-51.
- [18] LARRAÑAGA A, LUCAS-ESTAN M C, MARTINEZ I, et al. Analysis of 5G-TSN integration to support industry 4.0[C]//Proceedings of 2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). 2020: 1111-1114.
- [19] BÖHM M, OHMS J, KUMAR M, et al. Time-sensitive software-defined networking: a unified control-plane for TSN and SDN[C]//Proceedings of Mobile Communication-Technologies and Applications, 24. ITG-Symposium. 2019: 1-6.
- [20] BHATTACHARJEE S, KATSALIS K, AROUK O, et al. Network slicing for TSN-based transport networks[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 62788-62809.
- [21] CRACIUNAS S S, OLIVER R S, CHMELÍK M, et al. Scheduling real-time communication in IEEE 802.1Qbv time sensitive networks[C]//Proceedings of the 24th International Conference on Real-Time Networks and Systems. 2016: 183-192.
- [22] CRACIUNAS S S, OLIVER R S. Combined task and network-level scheduling for distributed time-triggered systems[J]. *Real-Time Systems*, 2016, 52(2): 161-200.
- [23] SANTOS A C T D, SCHNEIDER B, NIGAM V. TSNSCHED: automated schedule generation for time sensitive networking[C]//Proceedings of 2019 Formal Methods in Computer Aided Design (FMCAD). 2019: 69-77.
- [24] FALK J, DÜRR F, ROTHERMEL K. Exploring practical limitations of joint routing and scheduling for TSN with ILP[C]//Proceedings of 2018 IEEE 24th International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications (RTCSA). 2018: 136-146.
- [25] HUANG K, WU J K, JIANG X W, et al. A period-aware routing method for IEEE 802.1Qbv TSN networks[J]. *Electronics*, 2020, 10(1): 58.
- [26] YU Q H, GU M. Adaptive group routing and scheduling in multi-cast time-sensitive networks[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 37855-37865.
- [27] ALNAJIM A, SALEHI S, SHEN C C. Incremental path-selection and scheduling for time-sensitive networks[C]//Proceedings of 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). 2019: 1-6.
- [28] NAYAK N G, DÜRR F, ROTHERMEL K. Incremental flow scheduling and routing in time-sensitive software-defined networks[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2018, 14(5): 2066-2075.
- [29] NASRALLAH A, BALASUBRAMANIAN V, THYAGATURU A, et al. Reconfiguration algorithms for high precision communications in time sensitive networks[C]//Proceedings of 2019 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). 2019: 1-6.
- [30] ZHAO L X, POP P, ZHENG Z, et al. Timing analysis of AVB traffic in TSN networks using network calculus[C]//Proceedings of 2018 IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS). 2018: 25-36.
- [31] METAAL M A, GUILLAUME R, STEINMETZ R, et al. Integrated industrial Ethernet networks: time-sensitive networking over SDN infrastructure for mixed applications[C]//Proceedings of 2020 IFIP Networking Conference (Networking). 2020: 803-808.
- [32] CHUANG C C, YU T H, LIN C W, et al. Online stream-aware routing for TSN-based industrial control systems[C]//Proceedings of 2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). 2020: 254-261.
- [33] GUTIÉRREZ M, ADEMAJ A, STEINER W, et al. Self-configuration of IEEE 802.1 TSN networks[C]//Proceedings of 2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). 2017: 1-8.
- [34] NAVET N, MAI T L, MIGGE J. Using machine learning to speed up the design space exploration of Ethernet TSN networks[R]. University of Luxembourg, 2019.
- [35] MAHFOUZI R, AMINIFAR A, SAMII S, et al. Security-aware routing and scheduling for control applications on Ethernet TSN networks[J]. *ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems*, 2020, 25(1): 1-26.
- [36] RAAGAARD M L, POP P. Optimization algorithms for the scheduling of IEEE 802.1 Time-Sensitive Networking (TSN)[J]. Tech- Univ Denmark, Lyngby, Denmark, Tech Rep, 2017.
- [37] PAHLEVAN M, OBERMAISSER R. Genetic algorithm for scheduling time-triggered traffic in time-sensitive networks[C]//Proceedings of 2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). 2018: 337-344.
- [38] JIN X, XIA C Q, GUAN N, et al. Real-time scheduling of massive data in time sensitive networks with a limited number of schedule entries[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 6751-6767.
- [39] HELLMANN S D, GLAVACKIJ A, FALK J, et al. Scaling TSN scheduling for factory automation networks[C]//Proceedings of

2020 16th IEEE International Conference on Factory Communication Systems (WFCS). 2020: 1-8.

- [40] CHOUKSEY S, SATHEESH H S, ÅKERBERG J. An experimental study of TSN-NonTSN coexistence[C]//Proceedings of 2021 IEEE 11th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC). 2021: 1577-1584.
- [41] SCHRIEGEL S, KOBZAN T, JASPERNEITE J. Investigation on a distributed SDN control plane architecture for heterogeneous time sensitive networks[C]//Proceedings of 2018 14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS). 2018: 1-10.
- [42] BRUCKNER D, STĂNICĂ M P, BLAIR R, et al. An introduction to OPC UA TSN for industrial communication systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2019, 107(6): 1121-1131.
- [43] EYMÜLLER C, HANKE J L, HOFFMANN A, et al. Real-time capable OPC-UA Programs over TSN for distributed industrial control[C]//Proceedings of 2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). 2020: 278-285.

[作者简介]



汪硕(1991-), 男, 河南灵宝人, 博士, 北京邮电大学讲师, 主要研究方向为确定性网络、软件定义网络、未来网络等。

尹淑文(1998-), 女, 河南商丘人, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为确定性网络、时间敏感网络等。

卢华(1976-), 男, 江苏南京人, 硕士, 广东省新一代通信与网络创新研究院主任, 主要研究方向为核心网、软件定义网络、P4 可编程、虚拟化等。

张继栋(1976-), 男, 陕西西安人, 广东省新一代通信与网络创新研究院研究员, 主要研究方向为软件定义网络、5G 接入网和 5G 核心网等。