



专题：确定性网络

Auto-learning TSN：时间敏感网络（TSN）的可用性优化

王童童，张嘉怡，陈李昊，耿雪松
(华为技术有限公司，北京 100083)

摘要：许多网络应用（如工业控制）都要求网络提供确定性的传输服务，传统的统计复用网络无法满足这一类应用需求。IEEE 802.1 时间敏感网络（TSN）相关标准和研究能够在以太网上提供确定性的网络服务。简述 TSN 的基本原理，利用网络演算对 TSN 中的关键排队机制进行了定量分析，并提出自学习 TSN 机制，通过网络智能化自适应支持非 TSN 端侧设备组网，结合时延保证算法形成端到端 TSN 方案，为 TSN 技术的进一步推广和应用打下了基础。

关键词：TSN；有界时延；网络演算；确定性网络

中图分类号：TP393

文献标志码：A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2023245

Auto-learning TSN: improvements on TSN usability

WANG Tongtong, ZHANG Jiayi, CHEN Lihao, GENG Xuesong
Huawei Technologies Co., Ltd., Beijing 100083, China

Abstract: Many network applications (e.g., industrial control) require networks to provide deterministic transmission services, and traditional statistical multiplexing networks can not meet the needs of this type of applications. IEEE 802.1 TSN standard and related research can provide deterministic networking services over Ethernet. The basic principles of TSN were described briefly, the key queuing mechanisms of TSN by using network calculus were analyzed quantitatively, and an auto-learning TSN mechanism was proposed to adaptively support non-TSN device connections by network intelligence. Together with delay guarantee algorithms, a E2E TSN solution can be formed and used for the further promotion and application of TSN technology.

Key words: TSN, bounded latency, network calculus, deterministic networking

0 引言

确定性网络可以提供可预期的网络服务质量，如时延上界、抖动、丢包率、带宽、可靠性，以满足各类垂直行业的高质量通信需求。

时间敏感网络（time sensitive networking，

TSN）是实现确定性网络的重要技术方法。TSN 由 IEEE 802.1 TSN 任务组进行标准定义，其前身是 IEEE 802.1 于 2005 年成立的音视频桥接(audio video bridging, AVB)任务组，旨在为专业音视频场景提供端到端时延有保障的网络服务。AVB 技术的成功发展和商用，吸引了其他垂直行业的

关注。IEEE 802.1 决定将 AVB 更名为 TSN，以体现其行业中立性，后续定义的 TSN 系列标准也被应用于更广泛的场景。

传统 IP/以太网虽然具有开放性、互通性、成本等方面的优势，但其网络服务基于统计复用，无法提供行业所需的确定性网络服务，如有界时延。基于场景设计的工业以太网通过特定的方法实现了时延有界，但其互通性、可扩展性受限，且使用专用的软/硬件，成本更高。TSN 兼具两者的优势：一方面，它依托于 IP/以太网生态，能为用户提供低成本、大带宽、支持统计复用的网络基础设施，同时解决各种总线、工业以太网协议互通难的问题；另一方面，TSN 又具备提供有界时延的能力、结合自动化网络配置、高可靠性等性能优势，逐渐在各种垂直行业得到应用和部署。

TSN 技术已有 18 年发展历史，目前已有 20 余项 TSN 子技术，主要分为 4 个方面。

- 时延保证：TSN 通过流量整形、优先级调度等技术，为关键业务流量提供有界时延服务。
- 资源管理：TSN 通过流量控制、流量预留等技术，确保关键业务流量在网络中获得足够的资源。
- 时间同步：TSN 通过时钟同步协议，为网络中的设备提供精确的同步时间。
- 可靠性：TSN 通过流量识别、冗余传输等技术，提高网络的可靠性。

当前在标准组织中 TSN 子技术的集合已趋于完善，目前 IEEE 802.1 TSN 工作组的热点主要集中于定义 TSN 在工业自动化网络、车载网络、承载网、机载网络等领域的方案组合标准，即 TSN 可以通过上述技术的组合形成面向不同垂直行业的解决方案。其中，TSN 用于专业音/视频网络、移动前传网络的方案组合标准已经完成定义并实现商用。本文简述 TSN 的基本的原理，利用网络演算对 TSN 中关键的时延保证算法进行定量分

析，提出配合时延保证算法使用的自学习 TSN (auto-learning TSN) 机制，并对其在工业场景中的应用提出展望。

1 TSN 时延保证机制

TSN 的核心目标是提供有界时延，即报文在网络中的传输时间不会超过一个确定的值。这个值就是时延的上界。TSN 通过一系列调度算法提供时延保证，即设备基于一定的规则决定队列中报文调度的顺序，保证报文在队列中的时延上限可预期。在 TSN 时延保障机制中，最有代表性的是时间门控机制，但其实 TSN 也定义了其他调度和整形方法。TSN 标准主要定义了以下 6 种调度整形方法。

(1) 绝对优先级

绝对优先级 (strict priority, SP) 是 TSN 的基础调度机制，也是默认使用的调度机制。在 SP 的调度方法中，报文的调度顺序由报文的优先级决定。对于优先级为 X 的队列，只有当所有优先级大于 X 的队列均没有可调度报文时，才允许调度优先级为 X 的队列。

(2) 基于信用的整形

基于信用的整形 (credit-based shaping, CBS) 是 AVB 时代定义的经典调度方法。它类似于单速令牌桶机制，但又有所不同。CBS 的运作机制如下。

- 基于 CBS 的队列，需要先从令牌桶中取出相当于报文长度的信用量 (credit)。
- 当信用量非负时，报文可以通过 CBS 整形器。
- 当信用量为负且队列中报文积压时，信用量以恒定速率 IdleSlope 增长。
- 当队列为空时，信用量清零。

CBS 的效果如下。

- 为特定队列提供等同于信用量增长速率 IdleSlope 的带宽。
- 尽可能地“打散”报文，使得低优先级的队列也能获得一定的传输机会。



(3) 异步流量整形

异步流量整形 (asynchronous traffic shaping, ATS)^[1]是 TSN 中定义的一种新的调度方法, 与单速令牌桶机制相似。ATS 调度器的关键配置参数是承诺信息速率 (committed information rate, CIR) 和承诺突发量 (committed burst size, CBS)。

ATS 的运作机制如下。

- 当报文入队时, ATS 调度器会根据 CIR 和 CBS 计算出报文的允许调度时间。
- 在传输选择机制进行判断的时候, 只需要检查报文的允许调度时间是否已到, 不需要重新执行令牌桶的计算。

ATS 的优点是能够提高调度效率, 可支持灵活的整形, 逐流或逐汇聚流整形; 而 ATS 的缺点是对硬件要求较高。ATS 通过逐跳整形, 可以有效地抑制突发流量, 使得时延可预期。

(4) 时间感知整形

时间感知整形 (time-aware shaping, TAS)^[2]是一种基于时间开关门的机制, 用于控制报文的传输。对于一个队列, 当它的门 (gate) 状态为开 (open) 时, 可以传输报文; 门状态为关 (close) 时, 不可以传输报文。通过门控列表 (gate control list, GCL) 对各队列门的开关状态进行配置。

基于 TAS 的能力, 可以构筑各种时延保证方案。其中一种常见方案是, 上下游的网络设备基于时间同步, 控制门控开关在上下游之间进行良好的配合, 为关键流量提供专属时隙通道。基于这种门控机制, 也可以提供其他整形方案。

(5) 周期排队转发

周期排队转发 (cyclic queuing and forwarding, CQF)^[3]是一种基于 TAS 构筑的方案, 用于为关键流量提供快速传输通道。在现实场景中, 关键流量的数目很大, 为所有流量安排专属时隙进行转发的复杂度很高, 可实现性弱。CQF 通过在网络设备的出端口上划分周期解决这一问题。通过上下游之间的周期映射, CQF 方案能够降低门控

编排的难度, 其代价是产生了额外的时延。

(6) 帧抢占

帧抢占 (frame preemption)^[4]是一种降低时延的技术。在低速率链路上, 一个低优先级的长报文可能会阻挡高优先级报文几百微秒。帧抢占允许高优先级报文打断正在传输的低优先级报文, 从而大大降低高优先级报文的时延上界。帧抢占还可以配合 TAS 机制, 降低保护带 (guard band) 对带宽的消耗。

上述机制在应用时可基于场景特征进行选取, 也可以组合使用。

2 TSN 典型调度机制的定量比较

总体来说, TSN 单点报文调度方法, 可以分成同步类方案 (如 TAS、CQF) 以及异步类方案 (如 CBS、ATS、SP) 两种技术路线。同步类方案依赖时钟同步和全网关键数据流的编排控制协同转发, 可以获得超低时延和超低抖动控制, 是小规模网络的最佳选择, 其实施代价是对时钟同步的管理和全网门控编排算法的复杂度。异步类方法不依赖全网时钟同步, 但是在时延抖动性能上有所牺牲。

本节选取 CBS、ATS、TAS、CQF 这 4 种单点调度和整形方法, 对常用有界时延保证的方法进行定量分析和比较。TSN 调度方法定量分析拓扑如图 1 所示, 交换机出端口带宽为 1 Gbit/s, TSN 调度方法定量分析使用的流量参数见表 1, 其中 T 表示周期, L 表示最大报文长度, N 表示周期内最大报文数, Flow1 和 Flow2 分别对应两条工控周期流, 具备不同流量特征参数和时延需求, 分别占用 100 Mbit/s 和 300 Mbit/s 平均带宽, 同时在网络中注入 700 Mbit/s 背景流, 造成网络整体的高负载。

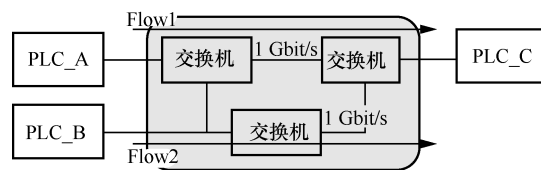


图 1 TSN 调度方法定量分析拓扑

表 1 TSN 调度方法定量分析使用的流量参数

对比项	类型	路径	参数	突发报文个数/个	网络负载	时延需求/ms
Flow1	周期突发	PLC_A—PLC_C	$T=2\text{ ms}$ 、 $L=64\text{ byte}$ 、 $N=4$	100	10.2%	1.5
Flow2	周期突发	PLC_B—PLC_C	$T=10\text{ ms}$ 、 $L=512\text{ byte}$ 、 $N=1$	700	28.7%	7.5
BE3	平稳流	—	$L=1\ 500\text{ byte}$	—	70%	—

结合网络演算流量^[5]建模和网络服务建模方法,可以推导出各类调度方案的端到端时延,TSN 调度方法端到端时延比较见表 2,其中 I_A、I_B 分别为 CBS 对 ClassA、ClassB 信用量的上升斜率,据此可得到相应类的预留带宽。根据计算结果,可得到调度技术特性和适用场景。

(1)TAS 方法在端网协同统一配置的前提下,可以做到时延和抖动最低。

(2)SP 在业务少、负载轻的情况下,时延低,也容易部署,但是随着业务量增加,时延上界迅速提高。

(3)CQF、CBS、ATS 等整形器方案均逐跳进行流量整形,可以达到逐跳控制微突发和保障时延有界的效果。其中 CQF 的优势在于抖动控制,端到端抖动并不随着跳数增长,且固定在 $2T$ 周期内;CBS 是 Class 级别的逐跳整形,而 ATS 可以细化为流级别逐跳整形,控制粒度更细,配置更复杂。

(4)TSN 的同步、异步两类调度技术都可以提供时延确定性。同步类调度需要配合门控编排算法使用,异步类调度方案的具体参数配置也需要配合控制面的网络演算规划算法部署,才能获得端到端时延保障。网络资源规划可以是预先的静态编排规划;也可以配合业务动态上线,进行资源规划的增量计算,以支持关键业务的实时布放。

3 自学习 TSN

3.1 自学习 TSN 需求场景

自学习 TSN 方案的动机是在端侧未必支持 TSN 完整功能的情况下,通过交换机自动感知并获取流量特征参数,从而可配合第 2 节所述的单点调度技术,进一步配合沿路径资源编排和预留,提供端到端的时延确定性。

一个完整的、提供时延保障的 TSN 方案,不论使用第 2 节所述的哪种 TSN 时延保障机制,都要依赖 TSN 资源管理技术完成对网络的配置。TSN 资源管理的基本逻辑如下。

步骤 1 用户(talker& listener)或集中式用户配置(centralized user configuration, CUC)将业务流信息和需求通过用户-网络接口(user-network interface, UNI)发送给网络或集中式网络配置(centralized network configuration, CNC)。

步骤 2 网络通过资源预留协议或 CNC 运行特定算法,生成可以满足用户需求的 TSN 配置方案。

步骤 3 通过资源预留协议或 CNC 的网络管理接口,将配置下发(到交换机、路由器等)并使能。

步骤 4 用户发送数据,相应的业务流量在网络中获得服务保障。

表 2 TSN 调度方法端到端时延比较

对比项	SP	TAS	CQF	CBS	ATS
关键参数	—	—	30 $\mu\text{s}/\text{hop}$	I_A=200 Mbit/s I_B=550 Mbit/s	同 group 两个 scheduler
工控业务 1	0.240 ms	0.019 7 ms	3.15 ms	1.07 ms	1.78 ms
工控业务 2	3.46 ms	0.025 8 ms	—	5.26 ms	4.44 ms



其中,在步骤1中,由于端侧设备差异化大,工业现场存在大量传统设备并未支持端侧 TSN 协议,对于传统设备如何在组网中支持 TSN 资源管理的过程,存在端侧适配难的问题;而步骤2,尤其在网络规模较大、流量众多时,则会遇到编排算法复杂的问题。

通过对网络演算性能理论的深入分析,可以发现确定性网络技术的三大要素分别是确定性流量模型、时延保障的单点报文调度器和端到端的确定路径。IEEE 802.1 TSN 标准限定 TSN 端侧模组需要按照流量规范(traffic specification, TSpec)周期性地发送流量,集中式 TSN 架构中的 CNC 控制器按照所有关键业务 TSpec 和时延指标编排计算全网资源配置表,进而配置网络并提供确定性质量保障。

自学习 TSN 方案可以降低 TSN 对端侧设备的依赖,自学习 TSN 方案示意图如图2所示。该方案使用 TSN 交换机进行业务感知和流量特性拟合,配合 CNC 控制器完成网络端到端的路径和资源配置,包括逐跳的 TSN 时间门控列表或者队列调度配置(如优先级、带宽、缓存等),极大降低了 TSN 的使用难度和消除端侧依赖,可以快速在工控、数采、监控等行业网络中部署。

3.2 自学习 TSN 关键技术

自动流量建模技术需要从真实报文序列中提取出数学模型特征(速率、突发性、周期性等),并结合网络服务模型进行网络性能分析。具体计算处理上主要分为两大类:工控数据采集类的周期性流量建模和视频监控类的突发性流量建模。其中周期性流量建模相对简单,可使用滑窗迭代计数等方法寻找周期等参数;相比之下,突发性流量建模复杂度更高,希望寻找到可满足缓存限制和时延确定性要求的有效带宽系数。

一种有效的突发性流量建模方法,通过输入流量的[timestamp, burst](其中,timestamp 表示时间戳,burst 表示突发性)抓包序列和网络缓存、时延、丢包率等服务等级协定(service level agreement, SLA)约束,统计得出可编排部署的 TSN 有效带宽。考虑流量在一段时间的累计数据量 $A(t)$ 用到达曲线 (b, r) 表示,如式(1)所示。

$$P(\exists(s, t) \in [T, T + \delta], A(s, t) > r(t - s) + b) \leq \varepsilon(b) \quad (1)$$

其中, s, t 是任意非递减的时间点, T 是流量积压区间, δ 是一个小量, $P(\cdot)$ 表示事件概率, $\varepsilon(b)$ 是与突发有关的小量。

搜索所有数据突发的小区 δ , 在可行带宽 r 和

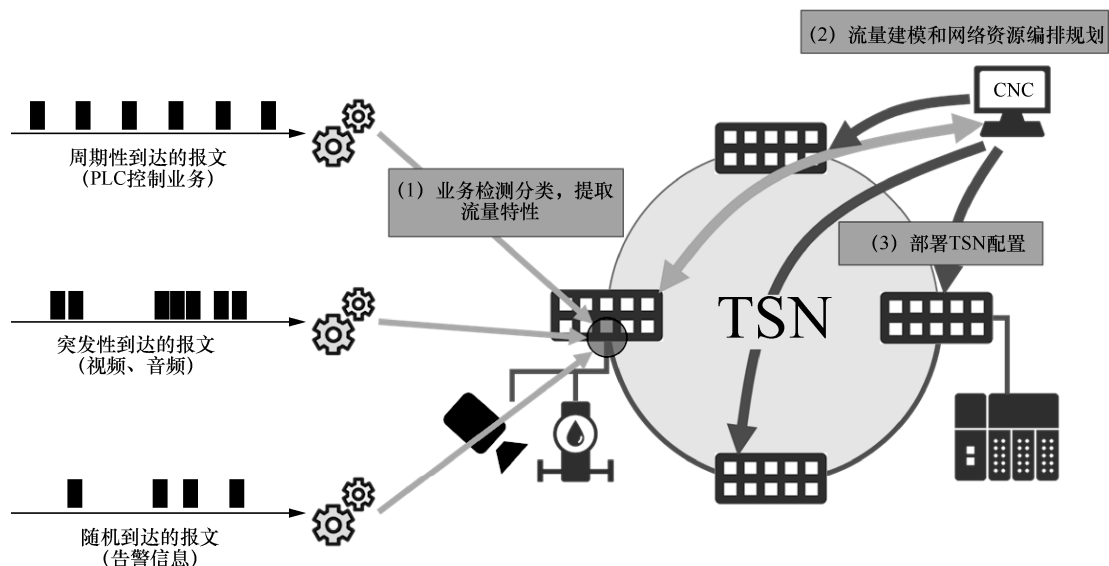


图2 自学习 TSN 方案示意图

缓存 b 中, 获得满足 SLA 需求的最佳服务速率 r_{opt} 。

以网络摄像机抓取的一段流量为例, 其分辨率是 1080p, 帧率为 25 Hz, H.264 格式。给定边缘节点时延上界为 40 ms, 在可用缓存 350 KB 的约束下, 运行上述流量拟合算法, 得到的带宽是 $r_{\text{opt}}=45.96$ Mbit/s, 可用单节点仿真验证拟合带宽的有效性。设置首节点的整形速率等于上述带宽, 回放抓包流量注入节点。仿真结果见表 3。

表 3 仿真结果

时延约束/ms	最大时延/ms	缓存约束/KB	最大缓存/KB
40	39.74	350	228

仿真结果表明, 配置相应的带宽在边缘节点, 可以使仿真时延最大值不超过约束值, 最大缓存小于约束值。证明了所得带宽可满足预设的 SLA。在多流、多跳场景, 考虑最差情况 (worst-case) 的资源约束和时延上界, 获得相应的优化带宽, 据此配置端到端资源预留, 可以在网络级保证业务端到端时延上界, 并最大化确定性容量。

为了验证上述带宽是否能够描述流量的长期稳定特征, 在流量采样中截取不同子序列长度作为训练样本, 计算有效带宽统计量, 不同训练样本数所得有效带宽如图 3 所示。结果表明, 训练样本的采样数在 5 万以上时, 带宽统计量保持稳定。在工业机器视觉业务应用场景 (包括扫码、定位、检测、识别), 摄像机拍摄的内容具有重复、规律的特点, 在此前提下, 训练数据学习所得参数, 可用于描述未来运行态的流量特征。

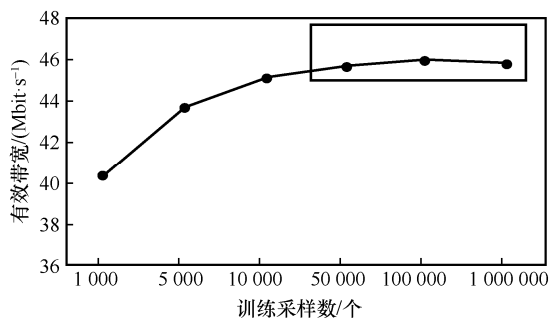


图 3 不同训练样本数所得有效带宽

通过上述方案, 使用内嵌自学习 TSN 算法的 TSN 交换机, 可支持在线识别时间敏感业务流特性, CNC 控制器自动配置 TSN, 以及配合各种 TSN 时延保证算法, 进而解决了网络自动获得 TSpec 的难题, 减少对 TSN 端侧功能的依赖。因此, 该方案不仅可以应用于工控场景, 支持存量非 TSN 端侧设备即插即用, 也可以扩展应用于工业视觉场景中视频业务的特性学习和确定性网络资源部署。

4 结束语

工业园区网络在规划设计生产 IT 网络和生产 OT 网络时, 提出了强确定性 (<1 ms) 和弱确定性 (100 ms 级别) 的差异化分级需求目标, 逐步使能 PLC 拉远和池化场景, 以及更多的视频+遥控操作应用, 推动工业现场的无人化、少人化; 产业界也提出过融合承载 (converged transportation) 的主张, 建议在一张混合承载 IT/OT 融合的工厂网络中, 分层部署不同层级的确定性和安全技术。上述多种 TSN 技术可以在分层多域的工业网络中组合部署, 推荐使用端网协同的同步 TSN 技术在工业现场提供微秒级实时性, 异步确定性技术在汇聚层提供毫秒级时延质量保障。本文所述的 TSN 研究与标准进展都为 TSN 在工业界的部署与应用提供了有效支撑, 也为后续大规模推广和相关工作的开展打下了坚实的基础。

参考文献:

- [1] IEEE. IEEE draft standard for local and metropolitan area networks-media access control (MAC) bridges and virtual bridged local area networks amendment: asynchronous traffic shaping: IEEE 802.1Qcr-2017[S]. 2017.
- [2] IEEE. IEEE standard for local and metropolitan area networks -- bridges and bridged networks - amendment 25: enhancements for scheduled traffic: IEEE 802.1Qbv-2015[S]. 2015.
- [3] IEEE. IEEE standard for local and metropolitan area networks--bridges and bridged networks--amendment 29: cyclic queuing and forwarding: IEEE 802.1Qch-2017[S]. 2017.
- [4] IEEE. IEEE standard for local and metropolitan area networks - bridges and bridged networks - amendment 26: frame preemption: IEEE 802.1Qbu-2016[S]. 2016.
- [5] LE B J Y, THIRAN P. Network calculus: a theory of deterministic queuing systems for the Internet[M]. Berlin: Springer, 2001.



[作者简介]



王童童（1978- ），女，华为技术有限公司确定性网络专家，主要研究方向为有线网络性能分析、确定性网络技术以及 TSN 标准技术。



陈李昊（1992- ），男，华为技术有限公司高级工程师，主要从事 TSN 算法及解决方案研究、确定性网络技术研究工作。



张嘉怡（1989- ），女，博士，华为技术有限公司高级工程师，主要研究方向为 TSN、网络演算理论算法、确定性网络技术。



耿雪松（1991- ），女，华为技术有限公司高级工程师、确定性网络标准代表，主要从事确定性网络相关技术研究及标准推动工作。