



时间敏感网络技术在工业互联网 领域应用必要性分析

朱瑾瑜¹, 段世惠¹, 张恒升¹, 于学涛²

(1. 中国信息通信研究院, 北京 100191;

2. 北京汉普达电气技术有限公司, 北京 102206)

摘要: 随着工业互联网时代的到来, 工业场景中的数据流流量呈指数级增长, 时间敏感网络成为工业网络的重要演进方向。通过分析新型工业网络在此背景下面临的挑战及发展趋势, 推导时间敏感网络作为其演进方向的必要性。对时间敏感网络核心特性及机制进行说明, 明确其技术优势; 梳理归纳了时间敏感网络关键能力, 进一步证明了时间敏感网络技术成为工业互联网新型工业网络核心关键技术的可行性。

关键词: 工业互联网; 时间敏感网络; 时间同步; 流量调度

中图分类号: TN919

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2020148

Analysis on the application necessity of time-sensitive network technology in the field of industrial interconnection

ZHU Jinyu¹, DUAN Shihui¹, ZHANG Hengsheng¹, YU Xuetao²

1. China Academy of Information and Communication Technology, Beijing 100191, China

2. Beijing HELPGO Electric Technology Co., Ltd., Beijing 102206, China

Abstract: With the coming of the era of industrial internet, the data flow in the industrial scene is increasing exponentially. Time-sensitive network has become one of the important evolution directions of industrial network. By analyzing the challenges and development trend of new industrial networks, the necessity of time-sensitive network as its evolution direction was deduced. The core characteristics and mechanism of time-sensitive network were described, and the technical advantages of time-sensitive network were clarified, through the summary of the key capabilities of time-sensitive network were summarized, and the feasibility of time-sensitive network technology becoming the core key technology of new industrial network of industrial internet was further proved.

Key words: industrial internet, time-sensitive network, time-synchronization, traffic schedule

收稿日期: 2020-02-24; 修回日期: 2020-04-24

基金项目: 国家重点研发计划“宽带通信和新型网络”重点专项资助项目 (No.2018YFB1802400)

Foundation Item: The National Key Research and Development Plan “Broadband Communication and New Network” Key Special Funding Project (No.2018YFB1802400)



1 引言

伴随着第四次工业革命——智能化时代的到来，工业领域延续自动化、信息化、数字化到智能化的路径持续实现产业升级，新型工业场景被重新定义，新的工业应用层出不穷。工业互联网是实现工业智能化的必由之路，将工业控制技术和信息通信技术融合创新，充分发挥数据采集、先进网络、大数据、云计算、人工智能的作用，为工业企业节约成本，提升生产效率。然而传统意义上的工业网络体系架构无法满足工业互联网新技术的要求，构建大带宽、高确定性且具有良好互操作性的工业网络势在必行。

虽然传统的工业以太网协议（如 Profinet、EtherCAT、Ethernet/IP、CC-Link、ModBus-TCP 等）也提出了各自的确定性时间传输解决方案，但上述协议在互操作性、传输质量、应用范围、兼容性和设备成本上都存在一些不足，特别是目前大数据和云计算等信息技术引入工业信息和控制领域，不仅要保证大带宽传输，而且要保证传输的实时性和确定性，这时现有的工业以太网协议就显得力不从心。为此，众多工业领域供应商、信息通信设备厂商和芯片提供商，加入 IEEE 802 标准委员会 TSN 工作组及相关联盟组织，共同更新标准以太网协议，并为工业

互联网的时间敏感型数据制定了低时延、低抖动的确定性数据传输标准，即时间敏感网络（time-sensitive network, TSN）。其核心技术包括精准的网络时钟同步、高精度的流量调度和智能化的网络管控，保证了工业网络确定性、高可靠的承载需求等。

TSN 技术标准主要由 IEEE 802 TSN 工作组负责相关基础协议的制定和应用推进。如图 1 所示，随着时间敏感网络技术在音/视频传输、工业、移动承载、车载网络等各个应用场景受到更为广泛和高度的关注，IEEE 也针对该项技术在垂直行业的应用开展了研究和标准的研制。尤其是在工业领域专门与 IEC 成立 60802 联合工作组，共同推进 TSN 技术在工业领域需求和研究工作。

时间敏感网络符合标准的以太网架构，并在时钟同步、流量调度及互操作等关键特性上实现了增强升级，兼具技术及成本优势，可以同时解决标准以太网的不确定性和工业以太网的复杂性，代表了标准化和高质量的工业通信演进方向。本文旨在通过梳理工业网络发展历程，分析时间敏感网络作为新一代工业网络关键技术选择的必要性；并归纳总结时间敏感网络关键特性，将其核心能力与网络需求进行匹配；进一步识别时间敏感网络技术在工业互联网领域落地应用的典型场景，分析该项技术的执行路线。

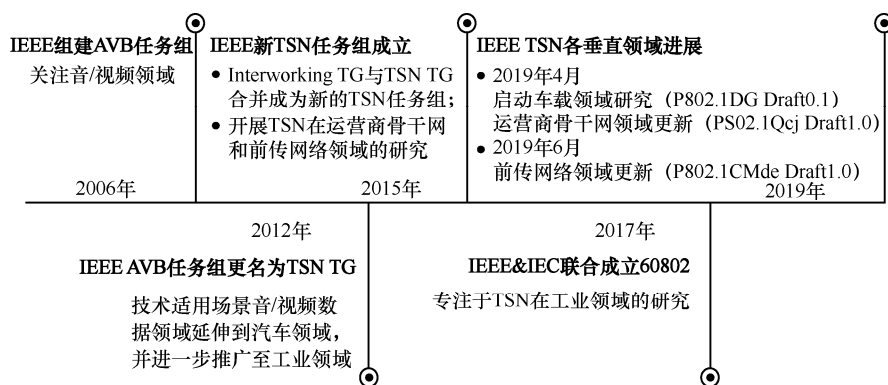


图 1 IEEE TSN 工作组关键路标示意图

2 工业网络发展趋势及挑战

在工业互联网概念出现之前,工业控制网络、工业信息网络以及工业物联网技术按照各自的轨迹发展,自成体系(不同应用场景、不同技术体系),工业网络的发展脉络如图 2 所示。新一代工业网络的概念外延到现在已经发展为同时包含工业控制网络、工业物联网以及工业信息网络在内的工厂内部网络。

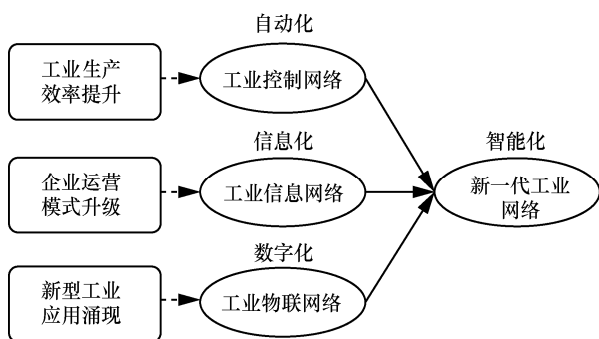


图 2 工业网络的发展脉络示意图

“通过实现人、机、物等的全面互联,构建全要素、全产业链、全价值链、全面连接的新型工业生产制造和服务体系”是业内对于工业互联网概念的权威解读。网络是工业互联网的基础,负责整个工业互联网设备的连接以及各类业务数据的传送,支撑高级分析、实时监控、预测性维护、数字孪生、工业 AI 等新型工业应用的部署。工业互联网作为新一代工业网络也必将兼具工业控制网络、工业信息网络以及工业物联网的功能。值得说明的是,未来工业网络对于工业控制网络、工业信息网络以及工业物联网的融合不会是简单的线性组合,而是多维度的深度融合和网络架构的彻底变革。这是由于目前工业网络存在的问题,并不是可以通过局部改造升级就可以解决的,需要有新的网络技术来适应这种变化。时间敏感网络正是被业界认为代表了工业网络技术演进方向,可以有效应对工业互联网时代应用对网络带来的挑战。

(1) 挑战一

当前主流的工业控制网络中,各类工业总线和工业以太网诞生于不同领域,并按照特定领域的适应性来制定相关标准,每一个工业以太协议背后基本都有一个工业集成商巨头在主导着该协议的生态圈构建,网络设备与协议绑定,各公司基于各自协议对工业控制网络进行持续优化升级,但彼此之间相对封闭,互不兼容。这要求工业控制网络需要通过实现互联互通解决复杂性问题。时间敏感网络技术基于标准以太网协议承接工业内有线连接并构建工业以太网数据链路体系,不仅为打破以封闭协议为维度、由某一厂商主导的产业模式提供可能,更有效提高了工业设备的连接性和通用性。

(2) 挑战二

工业控制网络和工业物联网承载的业务对于网络都有比较严格的实时性要求,尤其对于工业控制网络中的运动控制任务而言,要求其传输网络必须具备微秒级别的时延与抖动;而工业信息网络则对实时性的要求较为宽松,但是未来企业信息系统间,信息系统与生产设备之间的数据交互量相比将呈指数级增长,尤其是部署了云平台和边缘计算节点的情况下,工业信息网络还将承担算力网络的流量冲击,对网络负载有较高要求。这要求新一代工业网络要实现大负载和确定性的高质量传送。时间敏感网络技术在现有的以太网 QoS 功能基础上增加了包括时间片调度、抢占、流监控及过滤等一系列流量调度特性,根据业务流量的特点配合使用相关特性,可以确保流量的高质量确定性传输。

(3) 挑战三

新型的工业应用需要工业控制网络与工业物联网配合实现。但当前二者在进行业务流量传输时却采用不同的质量要求和机制。工业控制网络中多数控制任务是周期性的,因此多采用轮询机制,由主站对从站分配时间片的模式,而工业物



联网通常采用包转发的方式实现大容量多类型的数据（如文件、JPEG 图片、音/视频等）传输。承接二者功能的新一代工业网络对于信号的传输需要兼顾周期信号与非周期信号，即全业务共网承载。时间敏感网络基于 SDN 架构实现网络资源的集中管理和按需调度，配合精确时间同步、流量调度等核心特性，可为不同类型的业务流量提供智能化、差异化承载服务。

3 时间敏感网络核心特性

3.1 概述

时间敏感网络基础共性标准的制定和发布由 IEEE 802 TSN 工作组推动完成，截至 2019 年 12 月，已经发布的标准见表 1。可以看出，时间敏感网络主要在时间同步、流量调度和网络管控 3 个方面对以太网技术协议进行了优化升级，包括利用 gPTP 技术提升时间同步机制的性能，利用时间切片、抢占、流过滤等技术扩展流量调度手段以及利用路径控制、冗余备份以及 YANG 模型等技术增强网络的网络管理功能。

目前，时间敏感网络针对时间同步、流量调度、互操作等基础共性特性标准已经基本成熟，

业界正在开展针对垂直领域进行应用推进，从最初的车载音/视频领域，到目前与 IEC 合作成立的 60802 工作组聚焦工业控制领域，再到 2019 年 IEEE 重启时间敏感网络在移动前传、运营商骨干网以及车载以太网领域的应用研究工作。此外，IETF 在 2019 年也发布多个针对 TSN 技术应用于 IP 网络和 MPLS 网络的研究报告和标准草案，以应对运营商骨干网络的确定性传输需求。3GPP R16 中 5G 系统架构的也明确对时间敏感网络技术应用于 5G 承载网络进行了描述。

产业方面，包括英特尔、博通、德州仪器（TI）在内的主流芯片提供商的 TSN 芯片都已经上市销售；以华为、新华三、思科、摩莎为代表的通信设备厂商也已有相关样机面世，相关产品也计划于 2020 年正式上市销售；工业厂商方面，CC-Link 支持 TSN 的系列产品已经于 2019 年上市发售，Profinet、EtherCAT、Ethernet/IP 等工业以太网也积极寻求与 TSN 兼容的技术方案。在 2018 年、2019 年的纽伦堡和汉诺威工业博览会上，时间敏感网络技术已经连续两年成为产业界关注的焦点。

由此可见，时间敏感网络技术已经从理论研

表 1 已发布标准（截至 2019 年 12 月）

特性	标准编号	标准名称	状态
时间同步	IEEE Std 802.1AS-2011	时间敏感应用的时间同步	2017 年 6 月发布
流量调度	IEEE Std 802.1Qbu-2016	帧抢占	2016 年 8 月发布
	IEEE Std 802.1Qbv-2015	调度流量的增强功能	2016 年 3 月发布
	IEEE Std 802.1Qch-2017	周期队列及转发	2017 年 6 月发布
	IEEE Std 802.1Qci-2017	流量过滤及监管	2017 年 9 月发布
网络管控	IEEE Std 802.1Qcc-2018	带宽预留	2017 年 10 月发布
	IEEE Std 802.1Qca-2015	路径控制和预留	2016 年 3 月发布
	IEEE Std 802.1Qcp-2018	数据模型	2018 年 9 月发布
	IEEE Std 802.1CB-2017	无缝冗余	2017 年 9 月发布
	IEEE Std 802.1AB-2016:	路径发现	2016 年 1 月发布
	IEEE Std 802.1AX-2014	链路聚合	2014 年 12 月发布

究阶段全面转入垂直行业的试点落地阶段，业界将聚焦根据垂直行业典型需求完善技术细节，并进一步形成可指导时间敏感网络设备生产和方案规划部署的技术规范。

3.2 时间同步

时间同步特性是时间敏感网络的基础特性，不仅因为其是众多工业应用的自然需求，还因为时间敏感网络相关的流量调度特性需要依赖贯穿整个以太网的时间同步来保证性能；时间同步的误差可能带来流量调度效果劣化甚至失效。

时间敏感网络推荐采用 IEEE 802.1as 定义的精确时钟同步协议（generalized precision time protocol, gPTP）作为时间同步机制，gPTP 基于 IEEE 1588-2008 定义的精确时钟同步协议，即 PTP 标准，并对 PTP 协议中基于数据链路层的传输机制进行了增强，删减了二层无关的时间同步功能。时间敏感网络 gPTP 时间同步网络架构如图 3 所示。

gPTP 的时间同步流程可以分为最佳主时钟选择、频率同步、时延测量以及时间同步 4 个步骤，即时间敏感网络各网元通过 Announce 报文宣告各自时钟能力，并通过 BMCA 算法选举最优时

钟作为全网时钟源并确定各网元主从关系；通过同步报文（Sync）和跟随报文（Follow-up）交互实现节点间时钟频率的同步；进一步通过 PDelay_Req、PDelay_Resp 和 PDelay_Resp_Follow-up 3 种 gPTP 协议报文的交互，计算网络中相邻节点的路径时延；最后根据路径时延和频率差异结果进行时间敏感网络时间校准，达到全网时间同步。

与 IEEE 1588v2 定义的 PTP 协议相比，gPTP 具有更快速的启动能力，可以在几秒内实现频率锁定并进行精准时间同步；同时由于实现了同步机制的简化和优化，可以利用含有低成本晶振的网卡实现。更适合用于实现工业网络的时间同步。

3.3 流量调度

时间敏感网络的流量调度特性其实是在标准以太网 QoS 架构下的功能优化和升级，IEEE TSN 工作组主要制定了 IEEE 802.1Qch、IEEE 802.1Qci、IEEE 802.1Qbv 和 IEEE 802.1Qbu 来实现这部分功能。

(1) 门控

IEEE 802.1Qbv 定义了时间调度机制——TAS（time awareness shaper），将以太网的传输

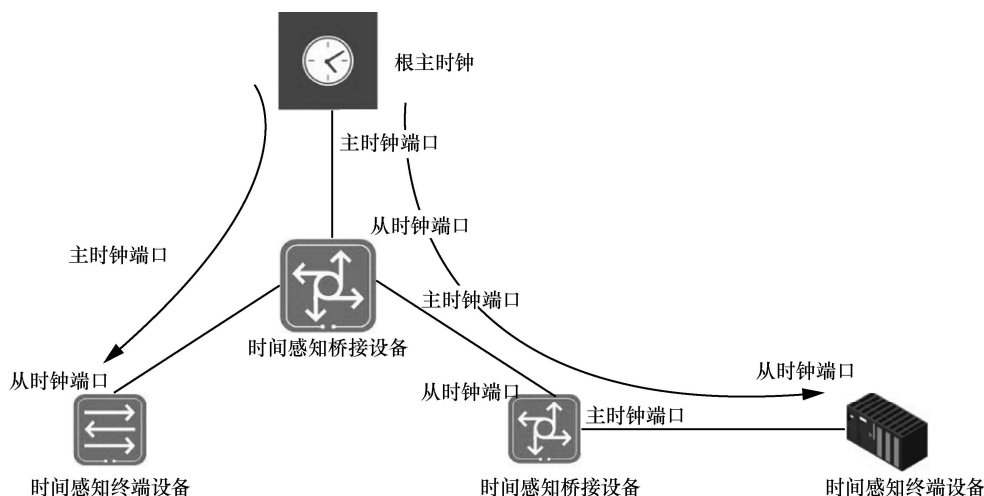


图 3 gPTP 时间同步网络架构



分成固定长度的时间片即调度周期，每个周期内部可以根据流量模型分成更细颗粒的时间片即门控周期，每个传输队列可以占用一个或几个门控周期。在设定门控调度表时，需要针对流量特征进行设定，如对于常见的工业应用中常见的实时周期定长数据，则可以将调度周期设定为发送周期，将其定长数据传输所需时间设定为门控时隙，在实时周期定长数据传输的时隙内，可以将其他非实时数据流队列的门控关闭，以避免其对实时流量的冲击，从而保证实时数据的专用虚拟管道，实现低时延、低抖动的传输。门控机制保证实时周期信号传输示意图如图 4 所示。

(2) 抢占

对于流量模型中需要实时传输的数据类型仅有周期定长数据时，IEEE 802.1Qbv 定义的门控机制可以较好解决，但对于实时周期性非定长数据，门控时隙的长度将难以确定，即尽力而为的非周期数据何时开始传输才不影响实时数据无法确定。而基于 IEEE 802.1bu 和 IEEE 802.3br 的抢占式机制则可以解决上述问题，其原理的核心思想是：将数据流按照实时性要求标记为快速流量和可抢占流量，实时流量可以打断正在传输的非实时流量，而非实时流量则分片，待实时流量传输完成后进行

重组。这样既保证了高优先队列的实时性传输，也兼顾了低优先队列数据的有效传输。抢占机制保证高优先级流量低时延传输示意图如图 5 所示。

(3) 流监控和周期队列转发

在这个机制中先由 PSFP 机制（即 IEEE 802.1Qci）对数据进行预先的判断，依据预设的滤波和监控标准对入口队列进行处理，然后排队转发构成 CQF 机制（即 IEEE 802.1Qch）。其本质是借助流水线思想，将接收到的数据按照队列进行重新编排，如图 6 所示，控制每个队列数据在每个节点的转发时延为一个固定值，当整个时间敏感网络各节点保持时间同步并且遵循同一个门控调度表，则可以实现数据的端到端确定性时延和最小抖动传输。

需要特别指出的是，上述时间敏感网络的流量调度方法是可以根据流量模型组合应用，以达到各类数据的差异化服务质量，并兼顾带宽利用率。同一个流量模型时间敏感网络中的各个节点应该配置相同门控调度表，并且要保证全网时间精度高于最小可分配的门控周期，否则将由于门控的失配导致严重的分组丢失率。此外，在工业互联网的应用中，流量模型会更加复杂，如何根据流量模型设定合适的门控调度表，在时间敏感

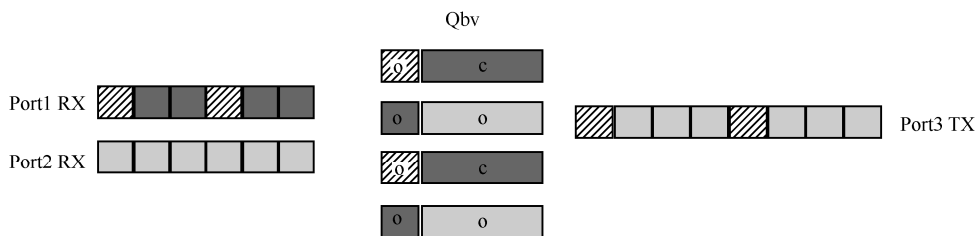


图 4 门控机制保证实时周期信号传输示意图

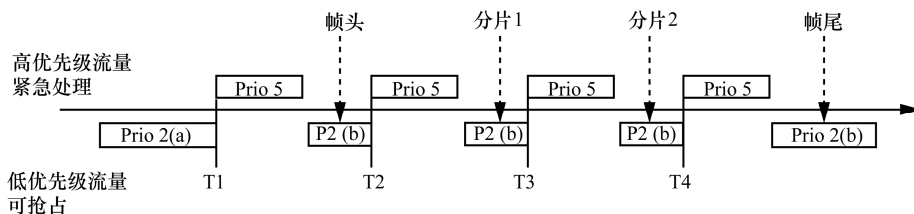


图 5 抢占机制保证高优先级流量低时延传输示意图

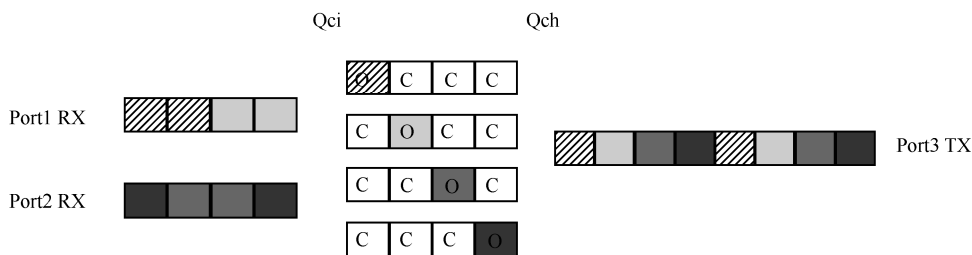


图6 利用周期队列实现确定转发延迟示意图

网络中部署是需要进一步明确的问题。

3.4 网络管控

时间敏感网络相对于之前的工业网络技术在网络管理控制能力上做了多维度的增强,可以支撑更大规模更复杂流量模型下网络的自动化配置,降低人为配置和运维的复杂度。时间敏感网络的网络管理是以 IEEE 802.1Qcc 为基础的,配合 IEEE 802.1Qcp (YANG 模型) 形成管理控制机制,将工业应用抽象成业务模型,并映射出该项业务在网络上的流量模型,并以此为依据进行时间敏感网络的路径、带宽、调度模型等配置信息的生成,形成配置下发网络。时间敏感网络的管控模型及对应协议示意图如图 7 所示。

IEEE 802.1Qcc 中定义的时间敏感网络的配置模型分为全集中式配置模型、混合式配置模型

以及全分布式配置模型 3 种,考虑在工业互联网网络场景下的部署架构需要融合 SDN 体系结构,建议选择采用 CNC 集中控制模型。进一步通过路径发现 (IEEE 802.1AB)、路径控制 (IEEE 802.1Qca)、无缝冗余 (IEEE 802.1CB) 等特性实现时间敏感网络的可靠性、自动调优等功能,为工业网络架构重构提供了全新思路。

4 时间敏感网络关键能力

4.1 互联互通

TSN 技术遵循标准的以太网协议体系,天然具有更好的互联互通优势,可以在提供确定性时延、带宽保证等能力的同时,实现标准的、开放的二层转发和流量调度,具有统一的时间同步机制和灵活的网络管控能力,可以整合相互隔离的

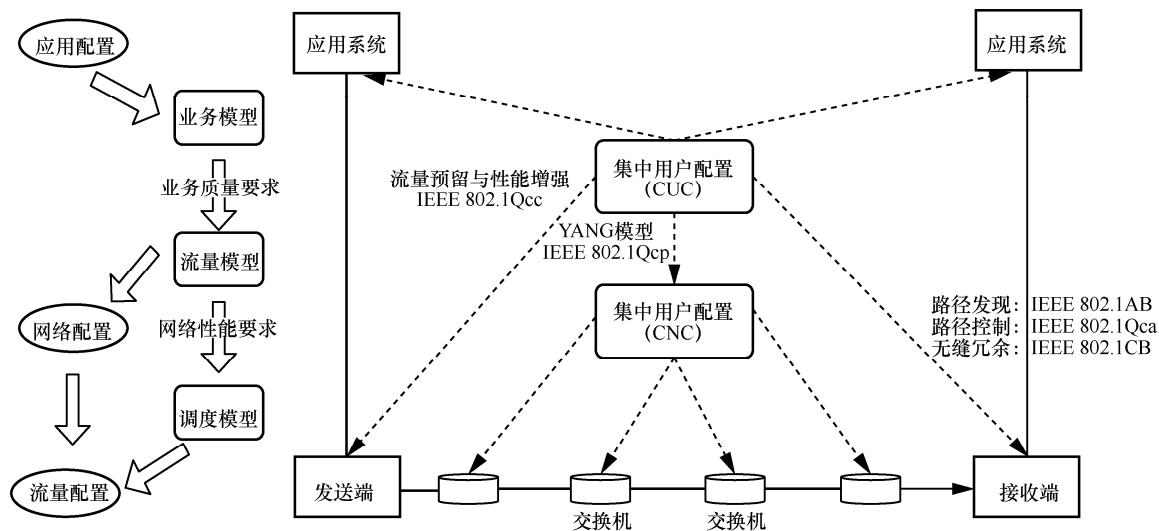


图7 时间敏感网络的管控模型及对应协议示意图



存量工业控制网络，构建新的工业网络架构，为原有的分层的工业信息网络与工业控制网络向融合的扁平化的架构演进提供基础。

目前工业控制网络通常通过对网络协议进行专门定制化开发来解决确定性问题，不同工业以太网协议的传输机制彼此封闭，互不兼容。按照网络协议层次不同大体可以分为3类，如图8所示。

- 类型 A: 以 EtherCAT、Profinet/IRT 为代表；通过专门的以太控制器硬件，从数据链路层开始自定义数据传输协议，以进一步优化性能。其优点是实时性强，缺点是成本较高，需使用专用协议芯片。
- 类型 B: 以 Profinet/RT、PowerLink 为代表；兼容通用以太硬件，但不使用 TCP/IP 协议来传输实时数据。在此类协议中，TCP/IP 协议栈被用来传输非实时数据，但是增加了实时层（timing-layer）来提高实时性能。这种结构的优点是帧结构与以太网兼容，可使用通用意见，并具有较强的实时性。
- 类型 C: 以 ModBus/TCP、Ethernet/IP 为代表；兼容以太网网帧结构和通用硬件，实时业务数据和非实时业务数据都可以通过标准 TCP/IP 协议进行传输，仅在应用层利用软件方式保证实时性。其缺点是网络确定性受限于底层网络结构，性能提升有限。

时间敏感网络可以对进入时间敏感网络的标准以太帧进行严格精准的流量调度，具备天然的互联互通能力，屏蔽工业应用在传输维度的差异，为工业应用打通网络层面的互联提供基础。一方面，时间敏感网络可以通过统一的时间同步机制和基于 IEEE 802.1Q 的流量调度机制建立互联互通的统一的数据链路层工业网络；另一方面，对于 B 类和 C 类的存量工业控制网络，时间敏感网络可以采用 overlay 的方式实现远程控制，多产线协同的互通连接，扩大其作用范围。

值得关注的是，工业自动化和控制系统正逐步向基于标准化技术和可扩展结构演进，并致力于融合信息和互联网技术，“TSN+OPC UA”的组合被认为是这一演进方向的技术保障，可以进一步同时达成网络的互联和数据层面的互通。TSN 技术基于以太网提供了一套数据链路层的协议标准，解决的是网络通信中数据传输及获取的可靠性和确定性问题；OPC UA 则提供一套通用的数据解析机制，应用于业务系统端设备，解决数据交换及系统互操作的复杂性问题。“TSN+OPC UA”协议层对应示意图如图9所示。可以判断，“TSN+OPC UA”组合将提供一个实时、高确定性并真正与设备厂商解耦的互联互通的工业通信网络系统，在整体上使得工业生产的各个环节横向与纵向数据实现透明交互，进而同时有效解决工业网络确定性和复杂性问题。

	类型A	类型B	类型C	标准以太网	时间敏感网络
层5~7	工业应用	工业应用	工业应用	IT应用 HTTP SNMP FTP...	工业应用&IT应用
			软实时		
层4	定制化的实时数据传输协议		TCP/UDP		
层3			IP		
层2	实时层		IEEE 802.1		TSN
	专用以太控制器	IEEE 802.3 std MAC			
层1	IEEE 802.3 std PHY				

图8 以太网协议栈模型对比示意图

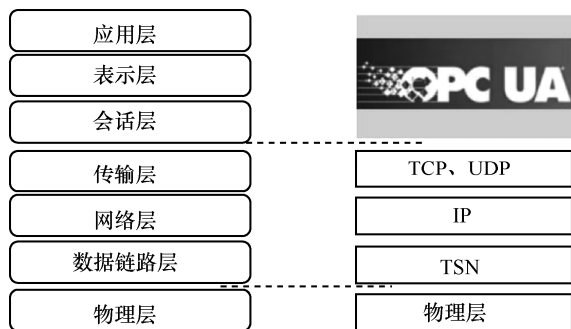


图9 “TSN+OPC UA”协议层对应示意图

4.2 高质量传输

标准以太网的 QoS 调度机制, 虽然可以根据优先级进行流量调度, 使得高优先级流量的转发尽可能得到保证, 但是其调度机制是基于队列和权重的, 无法严格保证高优先级流量的时延、抖动, 在链路拥塞情况下, 甚至还会产生高优先级流量的分组丢失率。时间敏感网络则可以通过 IEEE 802.1Qbu、IEEE 802.1Qbv 等协议针对 IEEE 802.1Q 流量调度特性进行增强, 采用多队列帧抢占, 高优先级流量独占时间片的方式, 如图 10 所示, 即使在高负载的网络中也可以保证其确定性高质量传输。

工业控制网络中的控制信号往往是周期性小带宽的, 并且要求保证确定性、实时性传送, 通过在时间敏感网络中设定合适的时间分片和调度周期, 组合高频的周期控制信号和低频的周期控

制信号, 维持要求高速性的运动控制的信号传送精度, 实现装置性能的提高。

4.3 全业务承载

工业互联网时代, 工业数据作为核心要素的流传范围不再局限于工业控制网络内部, 需要进一步向工业信息网络传递, 此外工业数据的类型也呈现多样化趋势, 逐步从以周期信号为主的控制信号, 演变为包括视频数据、海量运维数据、远程控制信号在内的多种业务类型, 流量模型也从单一的从物理信息系统或者产线内部的控制设备与生产设备之间的简单模型, 转变为控制设备与控制设备协同、信息系统与产线之间、产线与云平台之间的复杂模型。如图 11 所示, 工业网络可能同一时间承载以工业信号为主的实时性或非实时性信号以及以非循环信号为主的信息数据。

TSN 技术体系中提出了包括时间片调度、抢占、流监控及过滤等一系列流量调度特性, 支撑二层网络为数据面不同等级的业务流提供差异化的承载服务。另一方面 TSN 技术的互操作架构遵循 SDN 体系架构, 基于 SDN 架构实现设备及时间敏感网络的灵活配置、监控、管理及按需调优, 具备根据不同场景流量模型, 自动分配带宽、计算最优可用路径和调度策略并对网络进行实时调

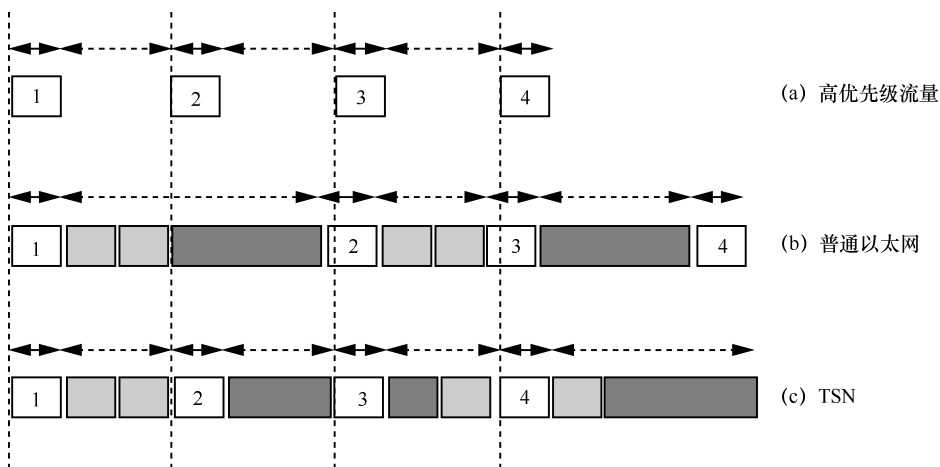


图10 时间网络高质量传输示意图

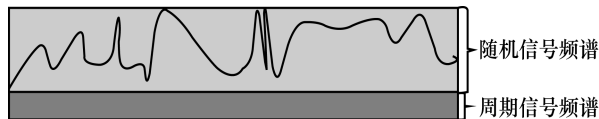


图 11 全业务场景下信号频率示意图

优的能力基础。可见时间敏感可以支持工业互联网中各类业务流量的共网承载。

5 结束语

本文从工业网络发展历程切入,对工业网络发展脉络进行梳理,识别工业互联网时代工业网络面临的 3 个主要问题和挑战。随之对目前工业网络中的焦点技术——时间敏感网络技术进行论述,系统阐述了其标准和技术体系,明确其核心特征,并进一步分析论证了时间敏感网络应对互联互通、高质量传输和全业务承载场景具备的关键能力,可以同时解决工业网络目前面临的主要问题和挑战。

此外,随着时间敏感网络技术的不断完善和产业的逐渐成熟,在工业领域的实际应用全面铺开过程中,时间敏感网络将与 OPC UA、边缘计算等技术融合部署,为工业互联网时代工业网络的创新重构提供强大的技术支撑。

参考文献:

- [1] IEEE. 802.1Qbv-2015-IEEE standard for local and metropolitan area network-bridges and bridged networks-amendment 25: enhancements for scheduled traffic[S]. 2016.
- [2] IEEE. 801.1Qbu-2016-IEEE standard for local and metropolitan area network-bridges and bridged networks-amendment 26: frame preemption[S]. 2016.
- [3] IEEE. 802.3br-2016-IEEE standard for Ethernet-amendment 5: specification and management parameters for interspersing express traffic[S]. 2016.
- [4] IEEE. 802.1Q-2018-IEEE-standard for local and metropolitan area networks-bridges and bridged networks-amendment[S]. 2018.
- [5] IEEE. P802.1AS-Rev-timing and synchronization for time-sensitive applications[S]. 2019.
- [6] 王俊文. 未来工业互联网发展的技术需求[J]. 电信科学, 2019, 35(8): 26-38.
WANG J W. Technical requirement of future industrial inter-

net[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(8): 26-38.

- [7] 丛培壮, 田野. 时间敏感网络的关键协议及应用场景综述[J]. 电信科学, 2019, 35(7): 1-11.
CONG P Z, TIAN Y. A survey of key protocol and application scenario of time-sensitive network[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(7): 1-11.
- [8] 王丽莉, 姚军. 5G 传输网络承载方案分析[J]. 电信科学, 2019, 35(7): 145-151.
WANG L L, YAO J. Scheme analysis of transmission network for 5G mobile communication system[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(7): 145-151.
- [9] MOSTAFA K. 5G industrial networks with CoMP for uRLLC and time sensitive network architecture[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2019, 37(4): 947-958.
- [10] IEC/IEEE. Requirements IEC/IEEE 60802[Z]. 2019.
- [11] AVNU Alliance. Theory of operation for TSN enabled industrial systems[Z]. 2017.
- [12] 朱瑾瑜, 程娜. 时间敏感网络时间同步特性综述[J]. 信息通信技术与政策, 2019(12): 70-73.
ZHU J Y, CHENG N. Overview of time-sensitive network time synchronization characteristics[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2019(12): 70-73.

[作者简介]



朱瑾瑜(1983-),女,中国信息通信研究院技术与标准研究所产业互联网研究部工程师,主要研究方向为工业互联网网络架构、时间敏感网络技术、移动承载网络技术等。



段世惠(1974-),男,博士,中国信息通信研究院技术与标准研究所产业互联网研究部高级工程师,主要研究方向为工业互联网网络、工业云平台等。

张恒升(1981-),男,中国信息通信研究院技术与标准研究所产业互联网研究部副主任,主要研究方向为工业互联网网络。

于学涛(1982-),男,北京汉普达电气技术有限公司总经理、高级工程师,主要研究方向为工业以太网技术及工厂数字化升级改造实施。