

时间敏感网络 (TSN) 产业白皮书

V1.0 版



工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

工业互联网产业联盟 (AII)

2020 年 8 月

声 明

本报告所载的材料和信息，包括但不限于文本、图片、数据、观点、建议，不构成法律建议，也不应替代律师意见。本报告所有材料或内容的知识产权归工业互联网产业联盟所有（注明是引自其他方的内容除外），并受法律保护。如需转载，需联系本联盟并获得授权许可。未经授权许可，任何人不得将报告的全部或部分内容以发布、转载、汇编、转让、出售等方式使用，不得将报告的全部或部分内容通过网络方式传播，不得在任何公开场合使用报告内相关描述及相关数据图表。违反上述声明者，本联盟将追究其相关法律责任。

工业互联网产业联盟

联系电话：010-62305887

邮箱：aii@caict.ac.cn

编写说明

2017年11月，国务院在《关于深化“互联网+先进制造业”发展工业互联网的指导意见》中，将“夯实网络基础”作为主要任务之一，提出大力推动工业企业内外网建设。

目前在工业互联网架构下，网络作为基础支撑技术，需要具备更为强大的互联互通、高质量传输和智能运维能力，时间敏感网络技术作为下一代工业网络演进方向，在工业领域内已形成广泛共识。为了更好地助力产业界对时间敏感网络技术的了解，澄清技术理解差异，形成推动时间敏感网络技术落地产业的合力。工业互联网产业联盟（以下简称AII）启动了工业互联网时间敏感网络技术的研究，在总结梳理国内外时间敏感网络研究进展及发展趋势的基础上，撰写了工业互联网时间敏感网络技术研究白皮书。

本白皮书旨在促进业界对工业互联网场景下的时间敏感网络技术的网络架构、技术趋势达成广泛共识，为工业互联网网络时间敏感网络的技术创新、试验验证、应用实践等提供参考和引导，共同推动工业互联网时间敏感网络技术在垂直行业的实际应用。

本白皮书编写过程中，得到了联盟成员及国内外众多企业的大力支持，为白皮书的观点形成与编写提供了有力支撑。后续我们将根据业界的实践情况和各界的反馈意见，在持续深入研究的基础上适时修订和发布的新版本。

组织单位：工业互联网产业联盟

编写单位（排名不分先后）：中国信息通信研究院、华为技术有限公司、新华三技术有限公司、中国联合网络通信集团有限公司、摩莎科技（上海）有限公司、重庆大学

编写组成员（排名不分先后）：

中国信息通信研究院：朱瑾瑜、陈洁、曹蓟光、张恒升、段世惠

华为技术有限公司：陈李昊、王童童

摩莎科技（上海）有限公司：张杰、郑力仁

新华三技术有限公司：孙芳、刘赞、郭晓军、李志国、涂蝉永

中国联合网络通信集团有限公司：路玮、齐飞

重庆大学：蔡岳平、姚宗辰

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

目 录

一、	背景介绍	1
(一)	工业网络演进概述	1
(二)	时间敏感网络发展现状	4
1.	技术现状	4
2.	产业现状	6
(三)	时间敏感网络技术优势	11
1.	互联互通	11
2.	全业务高质量承载	12
3.	智慧运维	12
(四)	时间敏感网络产业驱动力	13
二、	技术体系	15
(一)	标准体系	15
(二)	网络架构	19
1.	在工业互联网网络中的位置	19
2.	时间敏感网络部署架构	20
(三)	时间敏感网络关键特性	22
1.	时间同步	22
2.	流量调度	22
3.	网络管理	23
三、	与其他新技术的融合创新	26
(一)	TSN+OPC UA	26
(二)	TSN+边缘计算	29
(三)	TSN+5G	31
四、	应用场景	35

(一) TSN 在制造业工业网络中的应用	35
(二) TSN 在车载以太网中的应用	37
五、 发展趋势展望	38
(一) 供给侧产业发展趋势	38
(二) 需求侧产业发展趋势	39
(三) 商业模式分析	40



工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

一、背景介绍

(一) 工业网络演进概述

工业网络基于工业控制系统发展而来，20世纪90年代兴起现场总线技术，通过标准化的通信接口解决了工业控制系统内部执行器、传感器以及变送器等设备的互联问题，实现了各类工业数据信号的共总线传输。

然而随着工业应用对于承载需求的进一步提升，现场总线低速率，兼容性差、系统彼此间互联互通互操作性差的问题逐渐凸显，具有更高传输效率、更大带宽、更好兼容性的基于以太网的工业控制网络应运而生，为进一步实现系统间的互通提供了基础。工业以太网技术遵从TCP/IP框架，具有接口简单、协议开放、可靠性高、传输速率快、互通便捷等突出优势，进入21世纪以来逐步成为工业网络的主流技术，并基于以太网架构建立完整的通信技术服务模型，构建工业应用层协议。

工业总线和工业控制网络技术不断推进各领域工业企业信息化建设进程，但值得注意的是由于各领域仅关注解决自身生产问题（如过程控制、运动控制、车载网络等），各类工业总线和工业以太网往往诞生于不同领域，并往往按照特定领域的适应性来制定相关标准，因此就形成了以IEC 61158为代表的工业总线系列标准和以IEC 61784-2为代表的工业以太网系列标准。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。如表1所示：

表 1 目前主流以太协议

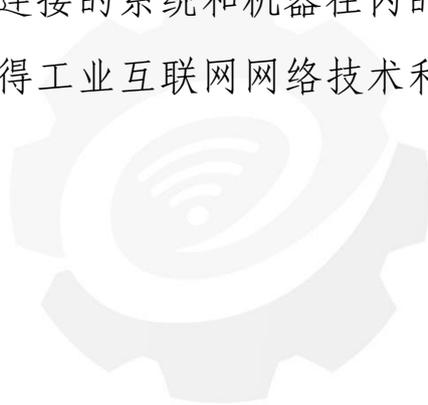
协议名称	运作组织	代表厂家
EtherNet/IP	ODVA	罗克韦尔自动化公司（美国）
PROFINET	PROFIBUS 国际组织 (PROFIBUS International, PI)	西门子
Modbus-TCP	Modbus-IDA	施耐德
Ethernet POWERLINK	Ethernet POWERLINK 标准组织 (Ethernet POWERLINK Standardization Group, 简称 EPSG)	ABB
EtherCAT	EtherCAT 协会	德国倍福 (Beckhoff) 公司
CC-LINK	CC-Link 协会	日本三菱

随着工业企业数字化、信息化、智能化进程不断升级，工业网络逐步发展为由工业控制网络和工业信息网络两个层次组成，前者主要负责工业控制系统内部以及系统之间的互联互通，承载工业控制信号及系统相关的监控、诊断、管理、操作等相关业务；后者主要支撑原始数据转换为信息应用于业务系统或实现控制反馈的数据互通。工业互联网的诞生是为了满足产业界通过智能化、精细化管理提升生产效率、降低运营成本的诉求，作为一个完整的通信信息系统，对于承载相关业务网络的互操作性、兼容性以及传输质量有更高要求。

工业互联网网络需要具备在全生产系统，乃至全产业链范围实现人、机、物全要素的网络互联，以及设计、研发、生产、管理、销售、办公全环节的数据互通的能力。随着工业企业数字化及信息化的进一步深化升级，工业领域相关控制及信息系统的业务类型不断增加、复杂性不断提升，工业控制网络与工

业信息网络也呈现融合趋势，具备支持多业务、多协议、多厂商设备和数据的互联互通、共网承载以及高质量传输能力已经成为工业互联网网络技术必然的演进方向。

时间敏感网络技术用以太网物理接口承接工业内有线连接，基于通用标准构建工业以太网数据链路层传输；作为底层的通用架构，为实现传统 OT 与 IT 网络的融合提供了技术基础，不仅并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，提高了工业设备的连接性和通用性，并且为包括大数据分析以及智能的、连接的系统 and 机器在内的新的业务提供了更快的发展路径，使得工业互联网网络技术和产业生态变得更为开放和富有活力。



工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

（二）时间敏感网络发展现状

1. 技术现状

时间敏感网络（TSN）技术相应基础共性标准主要由 IEEE802.1 TSN 工作组研究制定。



图 1 时间敏感网络标准关键路标

2006 年，IEEE802.1 工作组成立 AVB（Audio Video Bridging）音频视频桥接任务组，并在随后的几年里成功解决了音频视频网络中数据实时同步传输的问题。有效地解决了数据在以太网传输中的时序性、低延时和流量整形问题。来自工业部门的一些参与者立刻看到了其保证带宽和有界延迟的潜在能力。

2012 年，AVB 任务组在其章程中扩大了时间确定性以太网的应用需求和适用范围，覆盖音频视频以外的更多领域：工业、汽车、制造、运输和过程控制，以及航空航天、移动通信网络等，并成立了工业互联网的实时性工作组，称为 IEEE802.1 TSN。2015 年，Interworking TG 与 TSN TG 合并成为新的 TSN 任务组。IEEE802.1 TSN 任务组关注具体技术及其算法。

近年来，随着时间敏感网络技术在各个应用领域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，并有多个工作组同步开展工作，包括已经完成的 802.1CM 项目定义了 TSN 应用于移动前传网络的标准；2017 年由 IEC 和 IEEE 联合立项了 P60802 工作组，目标是定义 TSN 应用于工业自动化网络的方案类标准；2019 年新立项的 IEEE 802.1DF 工作组，目标是定义 TSN 应用于服务提供网络的方案类标准；2019 年新立项的 IEEE 802.1DG 工作组，目标是定义 TSN 应用于车载网络的方案类标准等。

2017 年起，IEC 开始投入时间敏感网络（TSN）技术在工业领域的应用研究，IEC SC65C / MT9 与 IEEE802 成立 60802 工作组，开始制定《用于工业自动化的时间敏感网络（TSN IA）行规》国际标准。2019 年开始，IEC EE（IEC System of Conformity Assessment Schemes for Electrotechnical Equipment and Components）工作组致力于进行时间敏感网络一致性测试服务（TSN Conformance Test Service），目前主要包括进行一致性测试过程的定义（包括：与其他组织的连接和协作），测试实验室认定结果的定义（例如：确认测试在不同的测试实验室使用不同的硬件/软件生成相同并且可重复的结果）以及测试计划的创建等工作。

成立于 1986 年的 Internet 工程任务组（IETF Internet Engineering Task Force），是推动 Internet 标准规范制定的最主要的国际标准化协会组织。2015 年 IETF 成立了确定性网络（Detnet）工作组，与负责第 2 层操作的 IEEE802.1 时间敏感网络（TSN）工作组合作，为第 2 层和第 3 层定义通用架构，致

力于在第 2 层桥接段和第 3 层路由段上建立确定性数据路径。这些路径可以提供延迟、丢包和数据包延迟变化（抖动）以及高可靠性的界限。可以认为 DetNet 是广义的时间敏感网络技术。目前 IETF DetNet 工作组已经完成整体架构、数据平面说明、数据流信息模型以及 YANG 模型等交付成果。

2. 产业现状

近年来，时间敏感网络（TSN）技术作为新一代以太网技术，因其符合标准的以太网架构，具有精准的流量调度能力，可以保证多种业务流量的共网高质量传输，兼具技术及成本优势，得以在音视频传输、工业、移动承载、车载网络等多个领域成为网络承载技术的重要演进方向之一，从而得到产业界的广泛关注。

时间敏感网络技术基于 IEEE802.1 协议实现，推动供应商开发遵从时间敏感网络标准的产品，可按需为需求侧提供更为灵活、可靠的时间敏感网络解决方案。这意味着产业界各类企业或机构有机会参与到相关技术研究中，基于统一标准的进行技术实施，并提供更为广泛的产品来支持时间敏感网络，从而建立起时间敏感网络产业生态。

目前，时间敏感网络技术已经成为包括芯片厂商、通信设备厂商、自动化厂商、相关行业组织以及各类研究机构在内的产业链各个组成环节关注的热点。如图 2 所示：



图 2 时间敏感网络产业现状示意

行业组织方面：除了工业以太网相关协会组织（如 EtherCAT、CC-Link、Profinet 等），都开始致力于开展描述现有工业网络与时间敏感网络融合部署的模型的研究工作；产业内众多独立第三方组织也开始积极组织参与时间敏感网络标准的测试床建设、产品测试认证以及方案孵化推广等各项工作。

- a) AVNU 组织为 TSN 网元提供时间精确性和低延迟特性提供认证服务，以保证其合规性和互操作性要求。该项工作目前已经完成了运营理念的论证，并已经在 2017 年开始了设备的相关认证工作；
- b) 工业互联网联盟（IIC）整合了相关组织和技术资源，为组织成员提供测试平台并致力推进 TSN 标准在各垂直行业的应用；
- c) LNI4.0 也以每季度一次的频度定期组织进行 TSN 网络设备的对接实验；
- d) 为了推进 OPC-UA 与 TSN 的发展，由 B&R 和 TTTech 公司于 2016 年组织以多家公司自发联合形成了“塑造者”阵营（Shaper Group）。2018 年，Rockwell 自动化加入该集团，

带来了其在北美市场的影响力。Shapers 积极推动形成以 OPC UA 和 TSN 为基础，开发“传感器，执行器，控制器和云之间的开放，统一，基于标准的 IIoT 通信解决方案，满足工业自动化的所有要求”。

自动化厂商方面：2016-2017 年，TSN 应用于工业互联网领域的核心功能逐步完善。随后，多家自动化厂商宣布了对 OPC-UA 与 TSN 的支持，并加入相关国际组织，包括 ABB、贝加莱、Bosch Rexroth、GE、NI 等。自 2017 年下半年起，截止到 2019 年连续三届的德国纽伦堡工业自动化展览会（SPSIPCDrive）和汉诺威工业博览会上，相关厂商开始就其产品在 TSN 技术上的进展发表声明，或直接演示测试床并发布 TSN 相关产品和解决方案。

- a) 2017 年以德国倍福为代表的 EtherCAT 组织发表了关于 TSN 技术的白皮书，2017 年 11 月 Beckhoff 发布了其首款 TSN 桥接通讯模块 EK1000；
- b) 2017 年 5 月 NI 发布了多款集成 TSN 技术的控制器，如：CompactDAQ、CompactRIO 等；
- c) 2017 年以西门子为代表的 PI 组织宣布将会在新的 ProfiNet 协议中使用 TSN 技术，2018 年 12 月，**西门子正式宣布支持 OPC-UA 和 TSN 这对组合**，TSN 与西门子的工业以太网协议 Profinet 在数据链路层进行集成，并发布了第一批 TSN 技术相关产品，包括具有 TSN 功能的网络组件、通信处理器、软件和网络管理系统。并计划在 2019 年中发布该协议或相关产品。
- d) SERCOS 则在 SPSIPCDrive 上展示了由 TSN 交换机桥接组成的 Rexroth 运动控制系统；

- e) 以三菱为代表的 CC-Link IE 在 2019 年汉诺威展上演示了 CC-Link IE over TSN 的方案，其中使用了支持 TSN 功能的 CC-Link IE 的 Controller 和 IO。
- f) 罗克韦尔最新加入其中，计划将工业以太网协议 EtherNet/IP 与 TSN 在网络架构的第二层进行集成。

通信设备厂商方面：2017 年起包括华为、思科、MOXA、新华三在内的多家通信设备厂商已经研发出或正在研发时间敏感网络相关网络设备，包括交换机、网关以及通讯模块，相关进展包括：

- a) 华为在 2018、2019 年汉诺威展上展示了 OPC-UA TSN 测试床，并在其中提供了 TSN 交换机。
- b) 思科在 2018、2019 年汉诺威展上展示了 TSN 测试床以及支持 TSN 的 IE 4000 系列交换机。
- c) Moxa 在 2018 年的德国 SPS 中展示了 TSN 测试床，同年的 IIC 联合测试床中展示 Moxa TSN 交换机。
- d) 新华三在 2019 年 4 月“领航者峰会”发布了 TSN 交换机产品，计划在 2020 年完成 TSN 交换机产品专业机构评测并实现规模化量产。

芯片厂商方面：作为产业上游的芯片厂商对于时间敏感网络芯片的研发进展也不容小觑，支持时间敏感网络的通信芯片不断面世：

- a) BROADCOM 已发布 BCM53570、BCM53112、BCM53162 等不同规格的用于交换机的 TSN 芯片，以及用于工业现场设备的 BCM53154 TSN 芯片。
- b) MARVELL 已发布 88E6390X、88Q5050 用于交换机的 TSN 芯片，其

中后者主要对标车载网络场景。

- c) NXP 已发布 SJA1105、SJA1105TEL TSN 芯片，主要用于车载网关、车载 ECU。恩智浦的 LS1021A 时间敏感网络 TSN 平台、
- d) ADI 正在研发的千兆 TSN 芯片也将于近期发布，目标定位海量的 TSN 网桥转换模块市场。fido5000 实时以太网多协议芯片、
- e) 德州仪器（TI）推出的多协议千兆位时间敏感网络处理器系列产品
- f) 此外，SoCe、Xilinx 等公司也已公开宣称可以提供 TSN 相关的芯片 IP core。



工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

（三）时间敏感网络技术优势

1. 互联互通

标准的以太网具有开放性好、互操作性好的技术优势，但尽力而为的调度方式导致网络性能往往不能满足工业业务的承载要求，存在确定性方面的问题；而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，但协议之间通常彼此封闭，且往往需要专用硬件的支持，造成了不同协议无法互通、只能专网专用、可扩展性差、成本高等问题，增加了网络部署的复杂性。如图 3 所示：

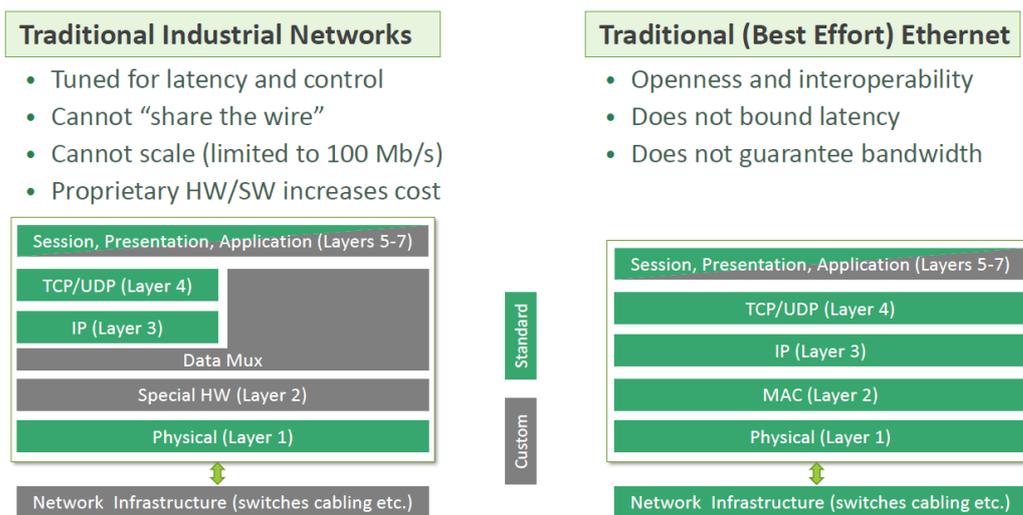


图 3 传统工业网络和以太网的比较

时间敏感网络（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，提升了互操作性，同时降低了成本。可以整合相互隔离的工业控制网络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了技术支撑。

2. 全业务高质量承载

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。需要网络支持不同类型的业务流在工业网络上实现混合承载。

时间敏感网络（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承载服务，进而使能各类工业业务数据在工业设备到工业云之间的传输和流转的能力。

3. 智慧运维

时间敏感网络（TSN）技术的互操作架构遵循 SDN 体系架构，可以基于 SDN 架构实现设备及网络的灵活配置、监控、管理及按需调优，以达到网络智慧运维的目标。TSN 系列标准中已经定义或正在新定义或改进的控制面相关的协议，将会大大增强二层网络的配置、动态配置与管理的能力，为整个工业网络的灵活性配置提供了支撑。

（四）时间敏感网络产业驱动力

在工业领域，产业角色主要可以分为三大类：工业厂商（operator）、设备制造商（vendor）、集成商（integrator）。工业厂商为了制造某个产品，需要建工厂、运营工厂，这个过程中需要从设备制造商那里采购各种工业设备，再在集成商的帮助下完成生产线及经营管理系统的搭建。这三类产业角色都有推动 TSN 进入工业网络进行应用的诉求。

工业厂商作为需求侧期望通过对工厂的网络化升级改造，提升工业企业的生产效率，并兼顾成本因素。因此其对于网络的主要诉求主要三点：

第一是要满足工业互联网时代智能生产、智能管理及智能运营等各类业务流量的高质量共网传输需求，保证产线之间、产线与管理系统、管理系统与运营系统之间的数据的可靠流转，为工业企业从数字化到信息化迈向智能化提供网络保证。时间敏感网络（TSN）技术的主要优势就是通过时间同步和精准调度在满足各类业务流量各自网络 KPI（带宽、时延、抖动、丢包）要求前提下，实现共网共路传输。

第二是要满足开放兼容的技术特点，之前的工业以太网协议相对封闭，而工业企业在若干年的生产经营过程中，难免会出现不同时期采购的工业设备之间的通信协议无法兼容的问题，无法满足存量设备之间，新设备与存量设备之间的信息互通及功能协同的需求，而时间敏感网络技术（TSN）依托标准以太网体系架构，具备兼容和开放的技术属性。

第三是降低工业企业网络部署成本，随着工业企业数字化、信息化、智能化的不断升级，海量设备联网成为基本要求，之前各家工业以太网生态圈相对封闭，导致部署成本昂贵。而时间敏感网络（TSN）技术的出现将从技术上打破这种封闭，进而引导市场在开放的技术架构上进行竞争，逐步降低工业网络的部署及运维成本。

设备制造商作为工业网络相关设备的供应侧，重点关注通过新的网络技术在工业领域应用的需求场景中的落地，保持技术的先进性和产品的竞争力。时间敏感网络技术（TSN）是一种新的技术架构，无论是在转发层面还是在管理层面的技术都融合了最新的网络技术思想，具有可演进、可拓展的体系架构。

工业集成商作为工业网络解决方案提供方，重点关注产业技术生态的构建以及基于解决方案对于先进方案的融合应用。时间敏感网络（TSN）技术特点决定了其与 OPC UA、边缘计算以及 5G 等先进技术相互融合，彼此支撑将形成更为强大的方案体系，助力形成网络对于工业互联网的强力支撑作用。

二、技术体系

（一）标准体系

时间敏感网络主要在时间同步、流量调度以及互操作三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，利用时间分片、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互操作功能。目前标准的制定主要集中在基于标准以太网的基础共性标准以及结合应用场景的技术细化和升级两个方面：

基础共性标准：时间敏感网络（TSN）技术为以太网协议的 MAC 层提供了一套通用的时间敏感机制，在确保以太网数据通讯的时间确定性的同时，为不同协议网络之间的互操作提供了可能。IEEE 802.1 TSN 工作组目前已经完成基础共性协议的制定和发布，主要特性集中在时间同步、流量调度、网络管理以及安全可靠三大类，

表 2 IEEE 802.1 AVB/TSN Task Group 部分已发布标准列表

特性	标准编号	标题	状态
时间同步	IEEEStd 802.1AS-2011	Timing and Synchronization 时间敏感应用的时间同步	2017 年 6 月 12 日发布
流量调度	IEEEStd 802.1Qbu-2016	Frame Preemption. 帧抢占	2016 年 8 月 30 日发布
	IEEEStd 802.1Qbv-2015	Enhancements for Scheduled Traffic. 调度流量的增强功能	2016 年 3 月 18 日发布
	IEEEStd 802.1Qca-2015	Path Control and Reservation	2016 年 3 月 11

		路径控制和预留	日发布
	IEEEStd 802.1Qch-2017	Cyclic Queuing and Forwarding 周期队列及转发	2017年6月28 日发布
	IEEEStd 802.1Qci-2017	Per-Stream Filtering and Policing. 流量过滤及监管	2017年9月28 日发布
互操作及安全可靠	IEEEStd 802.1Qcc-2018	Stream Reservation Protocol (SRP) Enhancements and Performance Improvements 带宽预留	2017年10月31 日发布
	IEEEStd 802.1Qcp-2018	YANG Data Model. 数据模型	2018年9月14 日发布
	IEEEStd 802.1CB-2017	Seamless Redundancy 无缝冗余	2017年9月28 日发布
	IEEEStd 802.1AB-2016:	Station and Media Access Control Connectivity Discovery (specifies the Link Layer Discovery Protocol (LLDP)) 路径发现	2016年3月11 日发布
	IEEEStd 802.1AX- 2014:	Link Aggregation 链路聚合	2014年12月 24日发布

技术升级：在基础共性标准逐步成熟的情况下，相关标准组织都积极也开始积极推进时间敏感网络在相关垂直领域的研究，并贴合实际应用场景进行技术细化及升级。

目前 IEEE802.1 一方面聚焦时间敏感网络应用场景的研究项目在工业控制、车载以太网、移动前传网络、运营商骨干网络等领域成立时间敏感网络研究小组，如下表所示

表 3 IEEE 802.1 TSN Task Group 部分垂直行业标准列表

编号	名称
IEEE Std 802.1BA-2011:	音视频桥接系统 Audio Video Bridging (AVB) Systems
IEEEStd 802.1CM-2018	时间敏感网络应用于移动前传网络 Time-Sensitive Networking for Fronthaul
IEC/IEEE 60802	工业自动化领域时间敏感网络概述 Automation TSN Profile for Industrial

P802.1DF	服务提供网络领域时间敏感网络架构 TSN Profile for Service Provider Networks
P802.1DG	车载时间敏感网络架构 TSN Profile for Automotive In-Vehicle Ethernet Communications

另一方面针对时间敏感网络的基础共性特性进行细化升级，并标准进行增补或者修订，目前在研的项目包括：

表 4 IEEE 802.1 正在进行的研究项目

P802.1AS-Rev	Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications	修订 (Revision)
P802.1AX-Rev	Link Aggregation Revision	修订 (Revision)
P802.1Qcj	Automatic Attachment to Provider Backbone Bridging (PBB) services	完善 (amendment IEEE802.1Q)
P802.1Qcr	Bridges and Bridged Networks Amendment: Asynchronous Traffic Shaping	完善 (amendment IEEE802.1Q)
P802.1Qcw	YANG Data Models for Scheduled Traffic, Frame Preemption, and Per-Stream Filtering and Policing	完善 (amendment IEEE802.1Q)
P802.1Qcx	YANG Data Model for Connectivity Fault Management	完善 (amendment IEEE802.1Q)
P802.1Qcz	Congestion Isolation	完善 (amendment IEEE802.1Q)
P802.1Qdd	Resource Allocation Protocol	完善 (amendment IEEE802.1Q)
P802.1Qdj	Configuration Enhancements for TSN	完善 (amendment IEEE802.1Q)
P802.1ABcu	LLDP YANG Data Model	完善 (amendment IEEE802.1AB)
P802.1Abdh	Support for Multiframe Protocol Data Units	完善 (amendment IEEE802.1AB)
P802.1CS	Link-local Registration Protocol	新增
P802.1CQ	Multicast and Local Address Assignment	新增
P802.1DC	Quality of Service Provision by Network Systems	新增

同时，IETF 的 Detnet 工作组与 IEEE802.1 时间敏感网络 (TSN) 任务组开展合作，将时间敏感网络特性向网络层扩展，为第 2 层和第 3 层定义通用的时间敏感网络架构。相比 IEEE802.1

TSN 任务组关注具体技术及其算法，IETF 更关注 DetNet 的整体架构、数据平面规范、数据流量信息模型、YANG 模型。Detnet 工作组已经发布和在研的标准项目如下表：

表 5 IETF 已经发布的 DetNet 相关标准

标准编号	标题	状态
RFC 8557	Deterministic Networking Problem Statement	2019 年 5 月发布
RFC 8578	Deterministic Networking Use Cases	2019 年 5 月发布
RFC 8655	Deterministic Networking Architecture	2019 年 10 月发布
draft-ietf-detnet-bounded-latency-01	DetNet Bounded Latency	草案
draft-ietf-detnet-data-plane-framework-03	DetNet Flow Information Model	草案
draft-ietf-detnet-ip-04	DetNet Data Plane: IP	草案
draft-ietf-detnet-mpls-04	DetNet Data Plane: MPLS	草案
draft-ietf-detnet-ip-over-mpls-04	DetNet Data Plane: IP over MPLS	草案
draft-ietf-detnet-mpls-over-udp-ip-04	DetNet Data Plane: MPLS over UDP/IP	草案
draft-ietf-detnet-ip-over-tsn-01	DetNet Data Plane: IP over IEEE 802.1 Time Sensitive Networking (TSN)	草案
draft-ietf-detnet-mpls-over-tsn-01	DetNet Data Plane: MPLS over IEEE 802.1 Time Sensitive Networking (TSN)	草案
draft-ietf-detnet-tsn-vpn-over-mpls-01	DetNet Data Plane: IEEE 802.1 Time Sensitive Networking over MPLS	草案
draft-ietf-detnet-security-06	Deterministic Networking (DetNet) Security Considerations	草案
draft-ietf-detnet-yang-04	Deterministic Networking (DetNet) Configuration YANG Model	草案

（二）网络架构

1. 在工业互联网网络中的位置

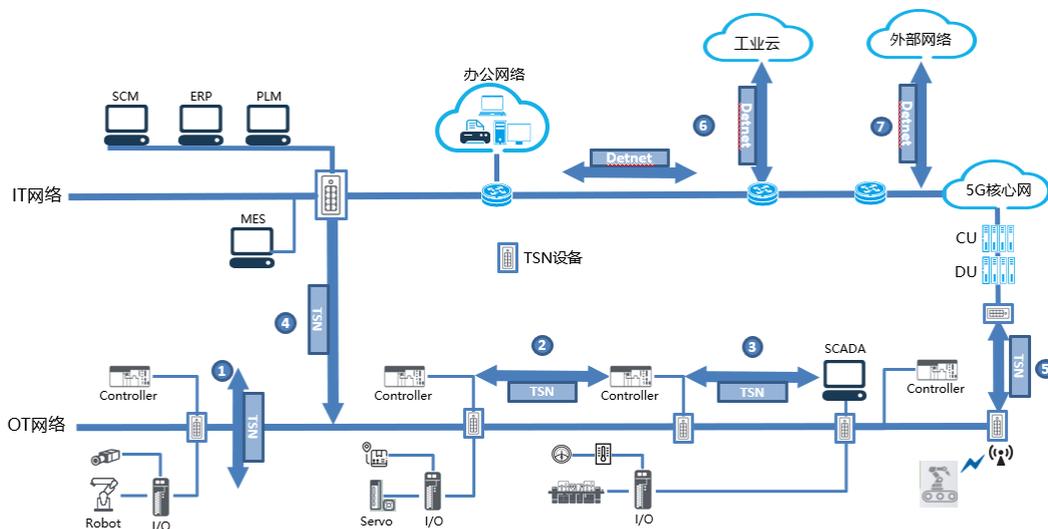


图 4 时间敏感网络在工业互联网网络中位置示意

当前，工业领域的网络架构是分层实现的，对于工业互联网场景下的设备互联和数据互通需求满足度不高。工业互联网网络需要同时具备实现控制网络中各业务单元的互通和打通从现场控制到云端的数据通路的能力。

如果将传统意义上的二层 TSN 网络和三层 Detnet 网络看作是广义的时间敏感网络，那么其在工业网络中的应用范围，主要可以包括图中所示的 7 个位置：

① 将 TSN 网络部署于控制器到现场设备之间，实现控制信号的高质量确定性时延传输；

② 将 TSN 网络部署于控制器之间，实现协同信号的高精度同步传输；

③ 将 TSN 网络部署于控制器与监控设备（SCADA）或者 HMI 之间，实现维护数据的高质量传输；

④将 TSN 网络部署于 IT 网络与 OT 网络之间，助力实现生产数据向信息系统的上传以及控制管理信息向生产设备的下发；

⑤将 TSN 网络部署于移动前传网络，为射频单元（RRU）与基带处理单元（BBU）之间的确定性传输提供网络支撑，

⑥将 Detnet 网络部署于 IT 网络与云平台之间，实现企业内部 IT 网络与私有云平台业务的确定性时延承载；

⑦将 Detnet 网络部署于企业外网中，在企业分支之间，企业与数据中心，工业企业与上下游企业之间建立全业务共网承载的管道，实现按业务要求调配网络资源。

可以看出，将时间敏感网络可以做为工业网络互联互通的核心，连接存量的传统工业以太网产线、接入采集海量工业数据的物联网、支撑高精度、远程控制的信号承载，实现各类型工业业务的共网络承载，并按需保证传输质量。

2. 时间敏感网络部署架构

在工业互联网领域中，业务流量模型相比传统工业控制网络的流量更为复杂，即从单一的产线内部的控制流量，转变为产线内部、产线之间、控制网络与信息网络之间的多种业务流量类型并存，满足向智能化演进的工业网络的功能架构呼之欲出。

时间敏感网络的功能架构应该遵循 SDN 技术思路，并遵照当前的协议要求（IEEEstd802.1Qcc），包含控制管理单元（CNC、CUC），传输单元（网关、交换机），应用单元（工业端设备、基站等）三种功能单元。

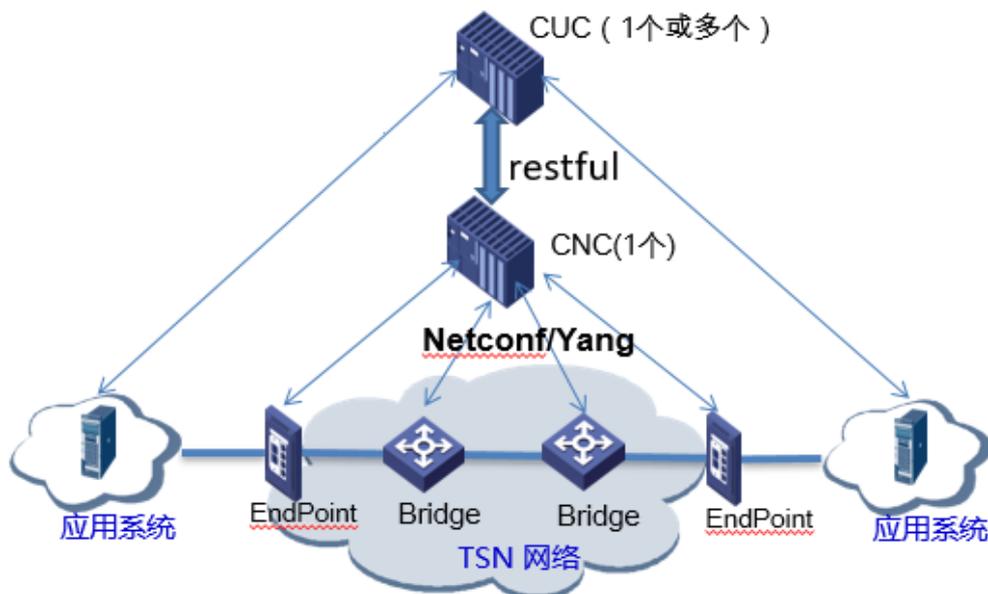


图 5 工业互联网网络整体架构

管理单元中 CUC 负责用户对网络需求的翻译及网络信息和设备配置的域间协同，CNC 在同一个时间敏感网络域内，负责实现设备监控管理、网络拓扑发现、流量监控及调优，业务建模及调度模型下发等功能。

传输单元除了支持时间敏感网络相关转发特性，还支持相关在线测量协议，实时将相关状态上送给管理单元，以便实现实时的全网监控，根据网络需求和状态，动态调整相关配置。

应用单元则需要具备接入时间敏感网络的能力，支持在线测量及运行维护相关协议，以实现全网拓扑发现、状态监测以及网络业务调优。

（三）时间敏感网络关键特性

1. 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 gPTP 机制实现时间敏感网络的时间同步，相比 IEEE 1588v2 定义的 PTP 协议，gPTP 具有更快度的启动能力，可以在几秒钟内锁定并进行精准时间，同时由于实现了同步机制的简化和优化，并可以利用含有低成本晶振的网卡实现。gPTP 系统使用逻辑同步（频率对齐）技术，而非其他 PTP 系统中的物理同步技术，同时结合通道和设备延迟的实时测量技术，实现时间敏感网络中网络节点的时间对齐（同步）。

2. 流量调度

时间敏感网络在做数据转发时，针对不同优先级的业务数据应用队列调度进行承载质量差异化保证，在工业互联网场景下需要对各类工业应用涉及的业务流特性进行定义建模，作为制定调度机制与优先级的依据。目前，工业网络中的流量类型众多，并没有统一的分类方法。图 6 为一种分类方法的示例：

Types	Periodicity	Typical period	Synchronized to network	Data delivery guarantee	Tolerance to interference	Tolerance to loss	Typical application data size	Criticality
Isynchronous	Periodic	< 2ms	Yes	Deadline	0	None	Fixed: 30 - 100 Bytes	High
Cyclic	Periodic	2 - 20ms	No	Latency	<= latency	1 - 4 Frames	Fixed: 50 - 1000 Bytes	High
Events	Sporadic	n.a.	No	Latency	n.a.	Yes	Variable: 100 - 1500 Bytes	High
Network Control	Periodic	50ms - 1s	No	Bandwidth	Yes	Yes	Variable: 50 - 500 Bytes	High
Config & Diagnostics	Sporadic	n.a.	No	Bandwidth	n.a.	Yes	Variable: 500 - 1500 bytes	Medium
Best Effort	Sporadic	n.a.	No	None	n.a.	Yes	Variable: 30 - 1500 Bytes	Low
Video	Periodic	Frame Rate	No	Latency	n.a.	Yes	Variable: 1000 - 1500 Bytes	Low
Audio/Voice	Periodic	Sampling Rate	No	Latency	n.a.	Yes	Variable: 1000 - 1500 Bytes	Low

图 6 工业自动化网络中的典型流量

以同步实时流 (Isochronous real-time traffic) 为例，此类流量常用于运动控制 (Motion control)，对时延的要求最高。其特点包括：周期性发包，一般其周期小于 2ms；每周期内发送的数据长度相对稳定，一般不超过 100Bytes；端到端传输具有 deadline 要求，即数据需要在一个特定的绝对时间之前抵达对端。总体上，时间敏感网络的流量调度可分为两大类方案：一是基于时隙化调度的方案，一是基于 QoS 的调度方案。前者需要全网进行时间同步。TSN 的数据转发技术可以为时间敏感的业务流的传输提供有界时延，亦即时延上界。

3. 网络管理

IEEE802.1Qcc 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三种：

全集中式配置模型使用集中式网络配置控制器 (CNC, Centralized Network Configuration controller) 与集中式用户配置控制器 (CUC, Centralized User Configuration

controller)。

混合式配置模型使用集中式网络配置控制器（CNC，Centralized Network Configuration controller）与分布式用户配置控制器（CUC，Centralized User Configuration controller）。

全分布式配置模型使用分布式网络配置控制器（CNC，Centralized Network Configuration controller）与分布式用户配置控制器（CUC，Centralized User Configuration controller）。

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，如图 7 所示：

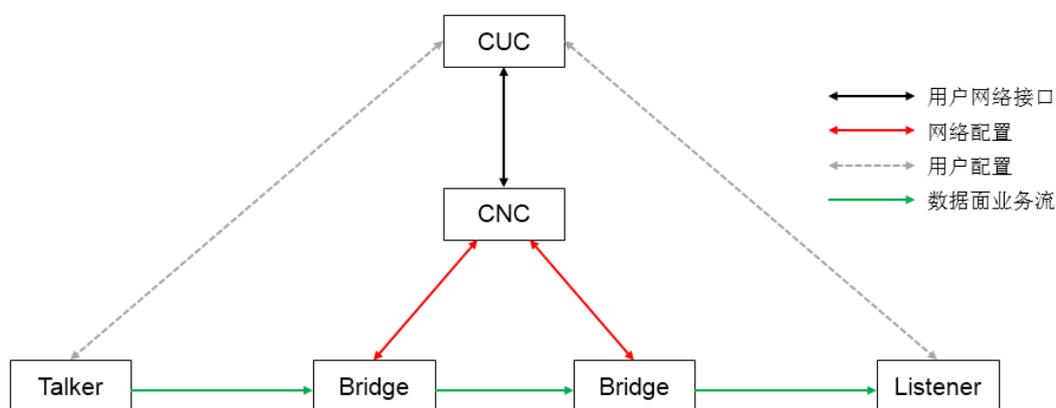


图 8 TSN 集中式配置模型

图中 Talker、Listener 分别是数据流的发送方和接收方，即工业设备或者应用系统；Bridge 可以是不同形态的二层桥接设备，如工业交换机、具有二层交换网口的工业设备；集中式网络配置控制器（CNC）与集中式用户配置控制器（CUC）可作为软件功能模块融合部署于专用服务器上，也可以采用嵌入式系统部署于时间敏感网络其他设备上。

集中式配置模型的控制面工作流程如下：新增数据流时，CUC 代表 Talker、Listener 将用户需求信息告知 CNC，即图 7 中黑色实线（代表用户网络接口）；CNC 根据获得的信息，进行相应的运算，并将得到的网络配置参数下分别下发给网络中相关的各个 Bridge，即图 7 中红色实线（代表网络配置）；Bridge 根据收到的配置信息，即可在转发数据帧时使用相应的策略。图 7 中的灰色虚线代表 CUC 收集用户信息、接收用户对网络的资源申请，并对用户进行配置的过程，一般认为该过程不属于 TSN 技术的范畴。集中式配置模型和混合式配置模型的主要差异在于用户网络接口不同，以及该接口的用户侧是 CUC 还是 Talker/Listener。

三、与其他新技术的融合创新

(一) TSN+OPC UA

目前业内有呼声希望自动化模型向“自主型金字塔”模型演进，如图

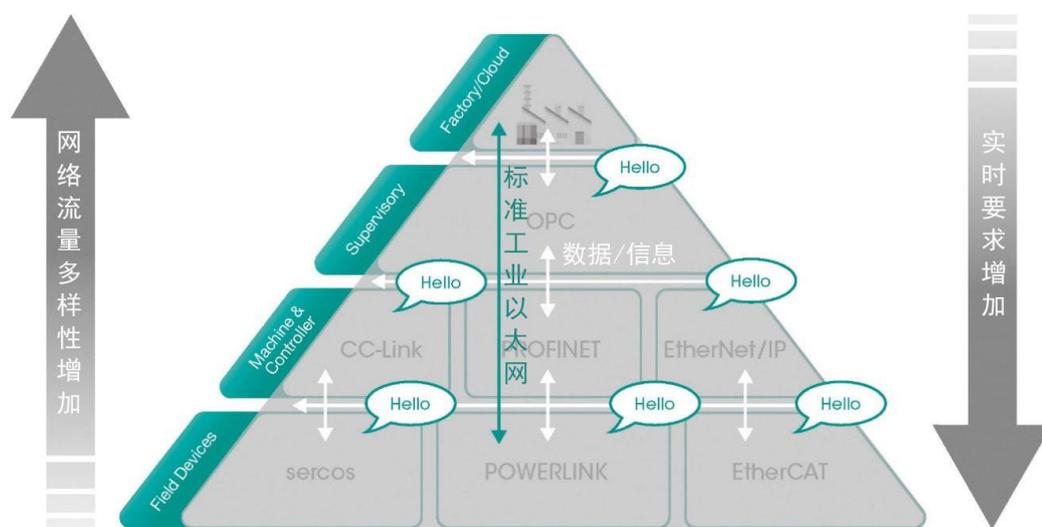


图 9 TSN 集中式配置模型

其描述的工业自动化将是一个无缝连接的完整系统，并具有如下趋势：

- 1) 小型、静态和独立的控制环路发展为大型、动态和开放的控制环路通讯，即“信息物理系统”(CPS)，实现软件和实体组件深度融合。
- 2) 曾经闭环于单一自动系统中的数据将可以在同一基础平台上互相通讯，从而产生新的双向数据通讯流，实现智能沟通。
- 3) 所有商业资产，包括设备、材料和工作人员，均在

统一的基础设施中智能互联，在“正确的时间点”，通过端到端的“自主”通讯、合作、反应、匹配和优化，满足客户的多样化需求。

可以看出，未来工业自动化和控制系统将基于标准化技术和可扩展结构，并致力于融合信息和互联网技术，不断满足升级高可用性和实时通讯的需求，同时在实现成本和收益最佳平衡的基础上，支持新产品和创新解决方案的研发。更确切地说，未来统一的网络基础设施要具备确定性通讯能力，保证性能和服务质量与导致当前自动化孤岛现象的专有协议水平相当，甚至优于专有协议。令人欣喜的是，标准组织和独立供应商均已认识到工业 4.0 的潜在益处，正携手为工业网络开发全新的统一基础——TSN + OPC UA。

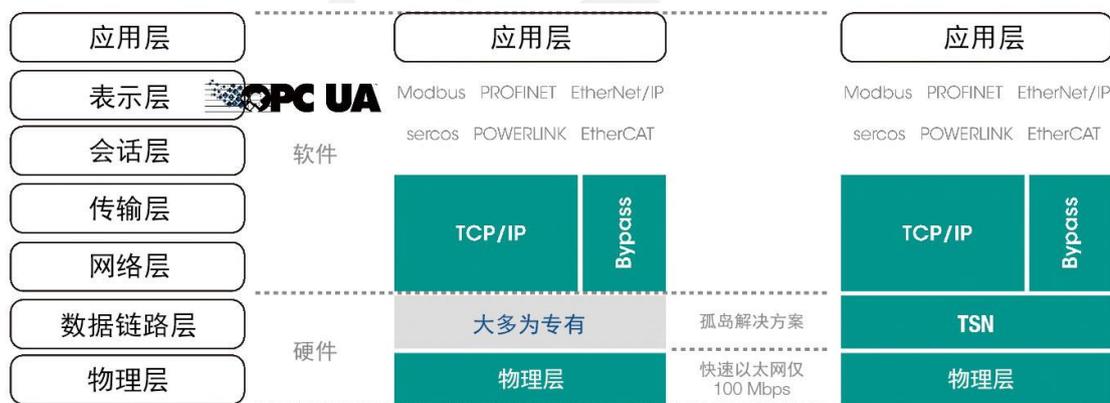


图 10 TSN+OPC UA 协议层对应示意

TSN+OPC UA 组合提供了一个实时、高确定性并真正独立于设备厂商的通信网络，前者基于以太网提供了一套数据链路层的协议标准，解决的是网络通讯中数据传输及获取的可靠性和确定性的问题；后者则提供一套通用的数据解析机制，解决系统互操作的复杂性问题。

在工厂数据采集、传输与生产运营中，都会需要对现场的

机器状态、生产能耗、质量相关、生产相关参数进行采集，TSN+OPC UA 在整体上使得在工厂的各个环节的横向与纵向数据实现了透明交互，并且配置效率更高，程序与应用模块化更强。



工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

（二）TSN+边缘计算

在工业互联网中，工业视觉、远程控制、机器协同等工业应用，需要将建模以及模型训练的高速海量计算过程保留在云端，将模型匹配、数据预处理，策略生成等过程放在边缘计算节点进行，借助“云边端”协同，同时兼顾业务体验的准确性和实时性。

工业互联网中的边缘计算通常部署工业设备或数据源头的网络边缘侧，为工业现场就近提供边缘智能服务，满足工业数字化在敏捷联接、实时业务、数据优化、应用智能、安全与隐私保护等方面的关键需求，即通过基础的连接、数据的传输存储、分析与优化，从而进行制造业现场的规划以及策略性问题的全局处理，达到提高生产制程的效率、降低运营成本、提升产品品质的目的。

边缘计算所处的网络位置决定了其所联接物理对象和应用场景都具有多样性的特点，需要边缘计算节点具备丰富的异构接入和灵活联接的能力，需要充分借助包括时间敏感网络在内的各类网络先进技术和研究成果，解决实时性数据传输和多业务共网传输的问题。可以通过网络设备融合边缘计算能力（如在网络中部署具备 TSN 能力的边缘计算网关设备或者部署具备边缘计算能力的 TSN 设备），时间敏感网络技术可以为工业设备、传感器到边缘计算节点、云端的连接构建确定性、大带宽的标准化算力网络，为实现源协同、数据协同、智能协同、应用管理协同、业务管理协同、服务协同提供网络支撑，大大提升边

缘计算业务性能并增加边缘计算架构部署的灵活性。

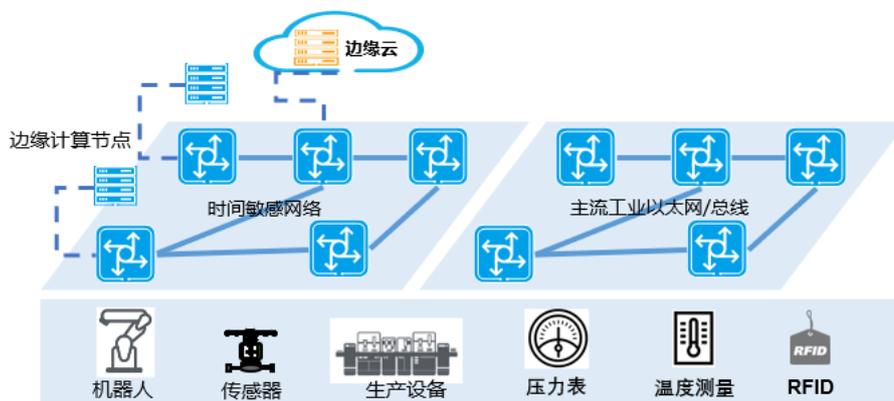


图 11 时间敏感网络支撑边缘计算实时传输

另一方面，时间敏感网络的智能运维在一定程度上需要助力边缘计算，企业在规模部署时间敏感网络后，往往需要网络控制器具备实时的网络资源数据计算分析、网络及流量模型建立和策略生成等能力，以保证相关网络优化，故障恢复的实时性，又会促使部署边缘计算以满足智能化的网络运维管理的需要，通过在时间敏感网络部署方案中融合边缘计算能力（如在网络边缘侧部署具备边缘计算能力的服务器或控制器），可以提升时间敏感网络 CNC 设备的能力性能。

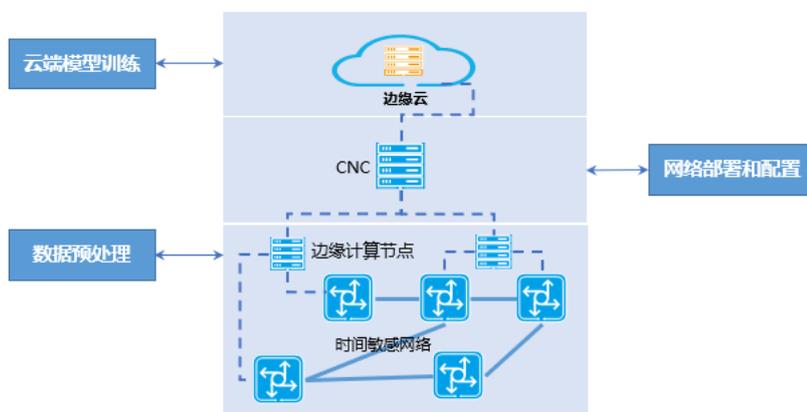


图 12 边缘计算支撑时间敏感网络智慧运维

可见，在以智能化为目标的工业互联网时代，网络和计算

作为基础资源，边缘计算和 TSN 的相互结合，在本质上是相互依赖、相辅相成的，随着工业互联网的进一步发展，网络与计算作为两大基础能力必将彼此支撑，相得益彰。

(三) TSN+5G

5G 商用正处于工业互联网逐渐兴起的关键节点，5G 的大带宽，千亿级别设备的接入能力，以及工业级可靠性和实时性都可以成为支撑工业互联网顺利实施的技术关键。无论是在智能工厂内部的海量设备连接、定位，还是基于机器视觉的故障诊断，再到高精度的云化机器人的运动控制，甚至是工程机械的远程控制，5G 无疑都将成为支撑上述应用场景最为关键的网络技术。

工业互联网是 5G 的典型应用。图 9 是 3GPP 标准组织关于 5G 技术演进及其应用生态系统扩展的路线图。目前商用的 5G 系统基于 Rel-15 版本，主要采用非独立组网技术，而未来的 Rel-16 版本主要针对工业物联网、5G 私有网络以及车联网 C-V2X 等扩展的生态系统应用，主要采用 5G NR 独立组网技术。



图 13 3GPP 组织内 5G 演进路线与生态系统扩展

在工业互联网中，uRLLC 是 5G 最为关键的需求之一。按照

3GPP R16 22.261 《Service requirements for the 5G system》中描述，进一步增强 5G 系统以支持工业场景下时间敏感网络应用的要求，并预测在此场景下最严格的工业应用可能需要网络具备 1 毫秒时延，1 微妙抖动和 99.9999% 的网络传输质量。而时间敏感网络（TSN）的技术机制正是决定了其可以提供高可靠确定有界低时延的传送服务，时间敏感网络（TSN）技术与 5G 网络融合部署将为构建灵活、高效、柔性、可靠及安全的工业互联网网络奠定基础。

目前，如何在工业互联网领域进行 5G 网络与 TSN 技术的融合部署是目前产业界与学术界的热点之一。已经有众多研究机构开展 TSN 与 5G 融合部署相关的研究工作，如高通公司研究组提出了面向工业互联网的利用 5G 实现具备 TSN 特性桥接功能的思想和原型系统，以实现与有线 TSN 网络的互联互通。英特尔公司研究组阐述了将 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 WiFi 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。德国应用科学大学联合诺基亚贝尔实验室提出了融合 5G 与工业以太网的方案并对相应的融合应用场景进行了分析，对融合网络的配置管理技术进行了讨论。

从业界的研究内容可以看出，目前时间敏感网络与 5G 融合部署的研究可分为 5G 网络与 TSN 技术无缝拼接以及 5G 网络与 TSN 深度集成两个方向。

一方面可以利用 5G 将工业设备以无线方式接入到有线网络，5G 本身的技术优势可以为 TSN 网络提供不受电缆限制的、可靠

的设备接入。

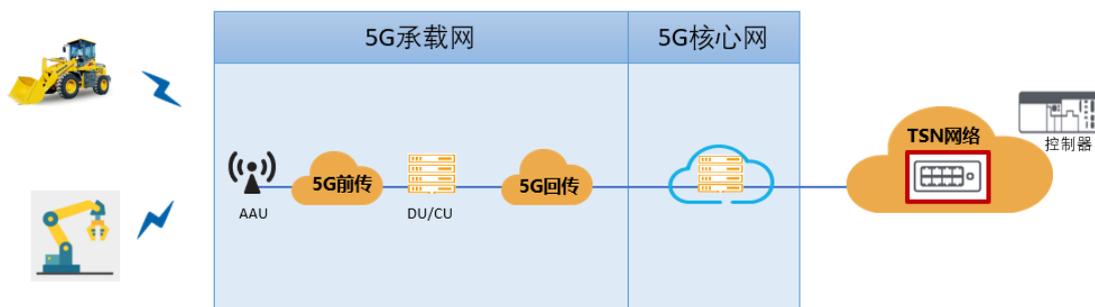


图 14 5G 与 TSN 无缝拼接示意

另一个方面，则要将 TSN 相关技术原理深度集成进 5G，致力于保证数据在 5G 网络的端到端确定上限时延传输。目前 3GPP 已经开展与 TSN 相对应的时间同步、流量调度等相关特性与 5G 空口、前传网络在物理层、数据链路层映射的相关研究。目标是通过以太网时间敏感网络技术的集成，进一步增强 5G 的可靠性，实现更为灵活的上行链路流量调度和更为快速的高精度时间同步。

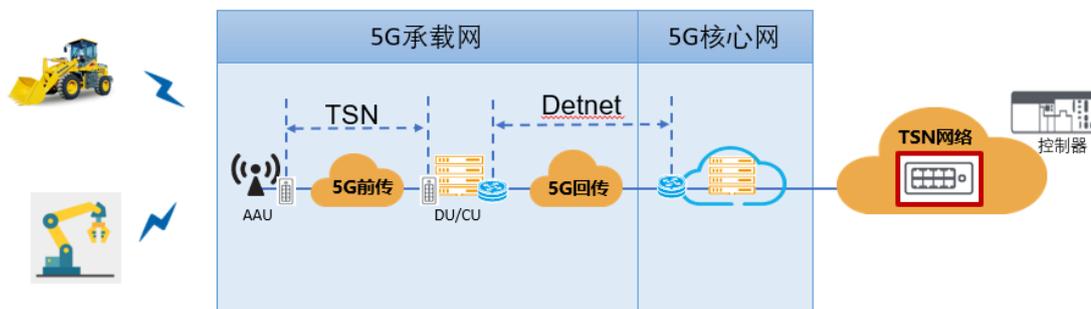


图 15 5G 与 TSN 深度集成示意

从当前的研究进展及成果分析可以看出 TSN 与 5G 融合具有如下技术挑战需要应对：

第一，TSN 与 5G 融合的时间同步机制存在挑战，有线 TSN 与无线 5G 实现时间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 协议实现时间同步，如何在 5G 网络中实

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挑战之一。

第二，TSN 与 5G 融合的协同流量调度机制存在挑战，5G 技术面向工业互联网应用，需要提供确定性低时延流调度能力，如有线 TSN 的 802.1Qbv 标准提供的流调度能力。如何在 5G 无线网络环境中实现类似于 802.1Qbv 的流调度能力，并与有线 TSN 技术实现流调度的协同机制成为关键技术挑战之一。

第三，TSN 与 5G 融合的高可靠桥接技术存在挑战，5G 技术是连接有线 TSN 网络与工业以太网或工业总线的候选技术之一。如何使 5G 技术实现类似于 TSN 交换机的高可靠桥接功能是实现 TSN 与 5G 融合的关键技术挑战之一。

因此，TSN 与 5G 融合不可能一蹴而就，将会随着关键技术的突破以及应用场景的需求变化而不断向前演进，为未来工业互联网的逐步部署奠定技术基础。

四、应用场景

(一) TSN 在制造业工业网络中的应用

随着制造业的生产经营系统数字化、信息化、智能化进程不断深化升级。需要网络同时具备良好的互通性、实时性、互操作性和可靠性，时间敏感网络成为制造业工厂内部网络的建设的主要技术选择就顺理成章了。

时间敏感网络初步主要满足工厂 OT 网络设备的互联互通以及 OT 网络和 IT 网络互联需求。在 OT 内部，根据网络架构和交换机在网络中的位置，可以分为工厂级、车间级、现场级应用。下图为 TSN 在制造工业场景中典型网络部署举例，

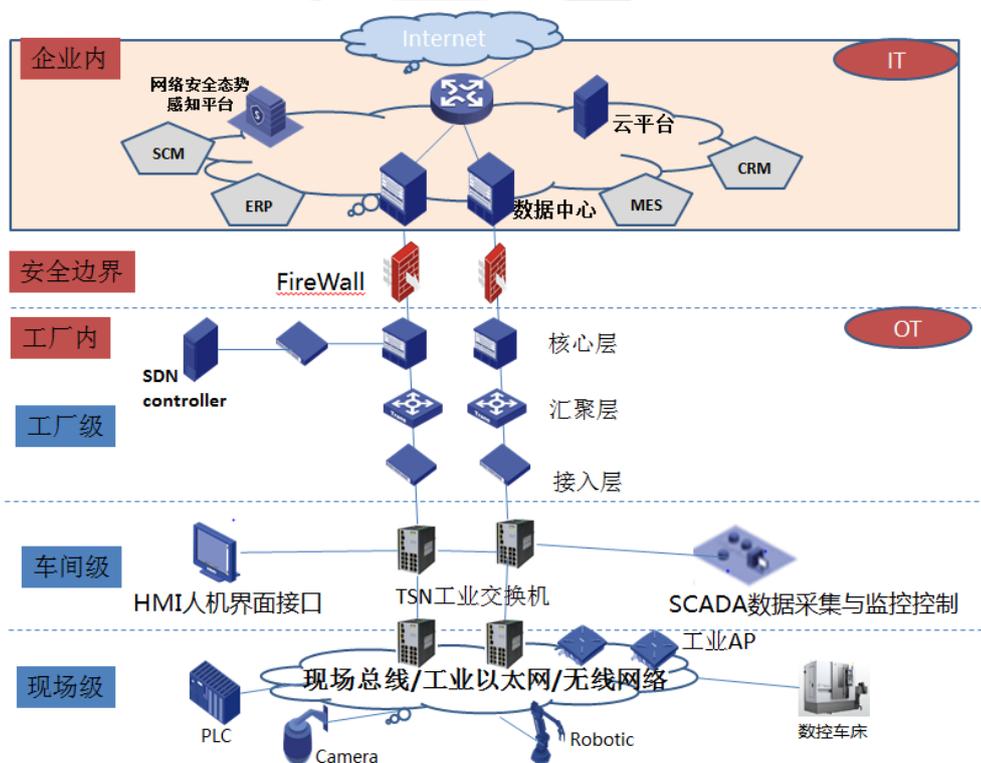


图 16 TSN 制造工业场景网络拓扑图

TSN 时间敏感网络能够保持控制类、实时运维类等时间敏感数据的优先传输，从而实现实时性和确定性。同时其大带宽高精度调度又可以保证各类业务流量共网混合传输，可以更好地将工厂内部现场存量工业以太网，物联网及新型工业应用连接起来，根据业务需要实现各种流量模型下的高质量承载和互联互通。同时 TSN 基于 SDN 的管理架构将极大提升工厂网络的智能化灵活组网的能力，以满足工业互联网时代的多业务海量数据共网传输的要求。



工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

（二）TSN 在车载以太网中的应用

传统的车载网络中多种总线技术共存，典型的如 CAN、LIN、FlexRay 等，“专线专用”是一大特点。虽然当前的部分车载网络中以点到点连接的以太网是为主，并非交换式以太网，其在车载网络中所扮演的角色，与其它总线技术类似。由于各种总线技术各有特色，可复用性差，故当前汽车业界绝大多数厂商需要在一辆车上使用 5-14 种总线技术。繁多的总线类型大大增加了线缆的总长度与总重量，也增加了布线的难度和人工成本。

图 16 所示为车载网络架构演进方向的一种可能的示意，从传统的各类总线相互隔离的网络架构，到目前部分功能集中到域控制器，各类系统通过以太网与域控制器实现互通，再到未来的以太网一网到底，各类系统灵活互通，可以看到，以太网网络将成为车载网络的主流技术。在未来的架构中，高带宽的以太骨干链路可以支持软件驱动的架构定义，进行集中式的处理，同时大大降低了对总线类型数量上的需求，提升网络传输性能。

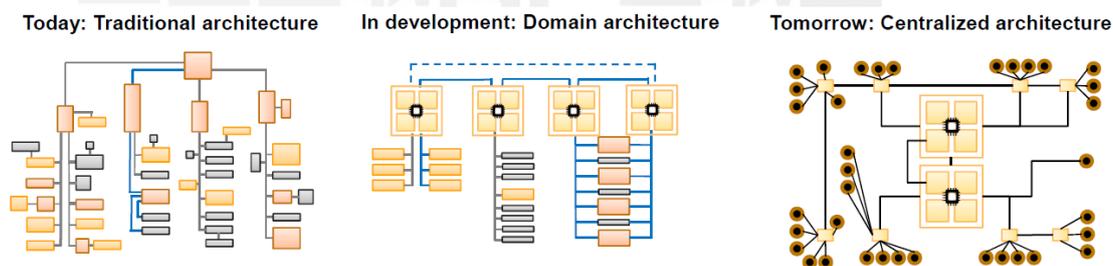


图 17 车载网络架构的一种演进示意图

随着汽车工业的发展，汽车的智能化已经成为必然趋势，车载网络需要满足以高级辅助驾驶系统（ADAS）、智能车载诊断系统（OBD）、车载多媒体系统以及其他各类车载系统的承载和互联要求。如前所述，目前车载网络仍然各总线并存，以音视

频等为代表的辅助媒体信号和控制信号仍然在不同的总线上分别传输，而不能在同一链路上进行统一传输。之所以如此，是因为这里存在一个最主要的技术难点，也是车载以太网面临的质疑点，即如何在混流的条件下，保证各种不同类型的流量对端到端传输时延、抖动、丢包率等需求均得到满足。

TSN 技术正是可以改善传统以太网尽力而为的转发特性，根据数据流量的不同优先级，提供不同程度的端到端有界时延的保障和更小的抖动等。并且，服务质量可以通过理论得到证实。从而满足车载以太网的应用要求。

五、发展趋势展望

（一）供给侧产业发展趋势

目前时间敏感网络作为下一代工业网络的演进方向业内已经基本形成共识。时间敏感网络的基础技术标准（时间同步、转发、管理等）已经基本完备，基础技术体系已经趋于稳定。行业内各类厂商已经纷纷投入到相关产品的研发当中，主流厂商绝大部分已经推出样机，并已经有多款产品上市。国际上，在近两年的汉诺威展会上多家企业展出了自己的时间敏感网络测试床，对其的关注度甚至可以和 5G 技术相提并论。在国内，由于全球产业界看好国内市场巨大潜力，国内外厂商在工业互联网峰会，工博会、数字中国等展会上也不遗余力地秀出各自在时间敏感网络技术上的实力。时间敏感网络技术已经俨然成为现今工业网络技术的代名词，并将在未来一段时间内保持相

当热度，吸引越来越多厂商投入其中。

然而新技术的规模部署，基础技术体系的成型只是第一步，供给侧对新技术的热情想要被需求侧认可，实际转化成产业力量，单凭各类展会炫目的 demo 是远远不够的。下一步，各类厂商的产品乃至解决方案研发将会更多聚焦垂直行业，对基础技术体系进行针对具体应用场景进行细化完善，按照工业级部署要求，加快完善相关产品及解决方案技术指标，尽快形成可实际部署的方案级产品。

（二）需求侧产业发展趋势

基于时间敏感网络的技术特点和优势，业内判断工业互联网将是其最先实现落地的一个应用领域之一。

- 1) 首先，工业互联网将需要时间敏感网络打通采用传统技术的存量产线与工厂内部信息 (IT) 网络之间的网络通路，实现现场产线之间，现场产线与各类工业信息系统之间的互联互通，时间敏感网络技术在智能工厂的应用将成为控制网络 (OT) 与信息网络 (IT) 融合的关键路径。
- 2) 进一步，工业互联网需要时间敏感网络通过与物联网、边缘计算技术的完美融合，实现海量设备与控制网络、信息网络的互联互通。
- 3) 最后，工业互联网需要通过部署时间敏感网络满足日益复杂工业新业务流量的高质量传输，实现对工业生产过程的实时监控，是生产设备状态的实时反馈，从而进一步实现对生产现场的智能控制。

然而，目前需求侧对于时间敏感网络技术更多停留在概念上，随着工业互联网的不断深入发展，各类工业企业的信息化智能化进程将不断加快，对于高质量网络的需求也将不断加大，结合自身需求，其目光也正逐渐被时间敏感网络所吸引，从成本及传输质量角度考虑，网络技术的选择也必将不断聚焦于时间敏感网络技术。

在未来几年，时间敏感网络技术将在工业互联网的智能装备制造行业的智能工厂中率先落地应用，并进一步在其他垂直行业逐步铺开落地。后续智能装备制造、能源电力、石油与天然气、轨道交通、汽车等工业行业中从事同步精准控制、测量、设备监测、设备维护及控制应用的需求都将成为时间敏感网络技术大展拳脚的用武之地。

（三）商业模式分析

考虑当前时间敏感网络技术成熟度及产业发展现状，有关时间敏感网络技术的商业化进程，将分为技术推介、试点应用及规模部署三个阶段。

1) 技术推介

时间敏感网络技术的研究前期主要依托 IEEE 的相关工作组进行，随着技术理论的成熟及产业关注度的提升，越来越多的行业组织、研究机构，主流厂商投入到相关研究当中来，后期针对实际应用场景和技术落地将产生大量专利技术，各大机构也将展开一轮知识产权抢点风潮。并由此后续围绕相关的知识产权产生相关的商业模式。如芯片 IP 的授权，同类厂商间关键

技术产权的互换等。

2) 试点应用

随着成熟产品的推出，时间敏感网络技术想要或者业内认可，也需要一系列的产品及解决方案推广，形成若干新技术应用试点。在此阶段，可能会出现需求侧主动创新结合政府资金扶持及供给侧与需求侧联合试点两种商业模式。前者更多由需求侧根据自身需求对网络升级改造提出明确创新需求，结合政府相关专项资金扶持，建设时间敏感网络部署应用试点，为规模部署的可行性论证提供依据。后者则更多由供给侧发起与需求侧达成协议，厂商提供设备及技术支持，需求侧则提供场地和需求场景共同建设应用试点。

3) 规模部署

通过技术推介和试点应用阶段，时间敏感网络技术将为规模部署阶段做好相关铺垫和准备，真正的行业市场将起步并逐步趋于成熟。在此阶段的初期，一些大型的行业内标杆企业将率先启动部署，承接上一阶段模式，并融合两种模式，即由需求侧主导，按照传统 ICT 项目模式，建设部署自主知识产权的时间敏感网络系统，政府提供相应资金扶持，供应侧或第三方研究机构提供技术支持。随着产业的不断升级，工业互联网信息化智能化模式的不断普及，越来越多的企业对时间敏感网络的部署将产生需求，并可能会出现企业出资建设，由第三方进行设计、部署运维的托管的建设模式。但一些中小型企业不具备规划、部署、运维时间敏感网络的资金及技术能力，此时依托工业互联网园区运作，可能会出现以租代建的模式，即由园区

出资规划、建设及管理，为中小型企业提供相应的时间敏感网络服务。此外，在某些特殊的应用场景，例如“5G+工业互联网”的部署过程中，运营商也将成为建设主体，对基础设施进行出租，进行网络能力开放，面向企业用户开展平台出租业务，从而实现规模化运营。



工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet