

时间敏感网络白皮书



中国电子技术标准化研究院

2020年11月

时间敏感网络白皮书

中国电子技术标准化研究院

2020 年 11 月

编写单位（排名不分先后）

中国电子技术标准化研究院

华中科技大学

重庆邮电大学

东北大学

贝加莱工业自动化（中国）有限公司

北京东土科技股份有限公司

新华三技术有限公司

编写人员（排名不分先后）

张弛 卓兰 杨宏 韩丽 陈冰 王浩 彭玉怀 宋华振

席秋霞 韩世豪 崔自赏 魏旻 刘淑英 程远 雷根 郭晓军

黄学达 赵向阳 黄庆卿 颜建卿

版权声明：如需转载或引用，请注明出处。

前言

物联网、5G、工业互联网等新一代信息通信技术的发展，加快了传统行业转型升级的步伐，物物互联的通信需求也随之增加。例如在智能制造中，实时控制、边缘计算、数字孪生等应用场景对低延时、低抖动和高可靠性的承载需求要求非常严格。传统以太网已经不能满足越来越多的数据和广泛分布的网络需求，时间敏感网络（TSN）技术应运而生。时间敏感网络以传统以太网为网络基础，通过时钟同步、数据调度、网络配置等机制，提供确定性数据传输能力。

中国电子技术标准化研究院组织业内相关单位编写了本白皮书，重点围绕时间敏感网络技术的发展背景、关键技术与新兴技术融合、标准化进展、产业应用等方面展开论述，给出了技术和应用趋势展望。旨在为相关研究机构、高校、芯片设备厂商、解决方案提供商、测试厂商等提供参考。

与此同时，随着技术、标准的演进，以及应用不断深化，编写组也将适时对白皮书进行修订和更新。也欢迎业内专家提出宝贵意见。

目录

前言.....	1
一、发展背景	1
1.1 概述.....	1
1.2 技术演进.....	1
1.3 行业需求.....	4
1.4 TSN 价值.....	5
1.5 小结.....	5
二、TSN 技术	6
2.1 TSN 在 OSI 模型中的位置.....	6
2.2 TSN 核心机制.....	7
2.3 TSN 与新兴信息技术融合.....	14
2.4 小结.....	24
三、标准化进展	25
3.1 标准化组织.....	25
3.2 行业技术组织.....	31
3.3 小结.....	32

四、应用场景.....	33
4.1 智能制造.....	33
4.2 车联网.....	35
4.3 音视频.....	37
4.4 小结.....	38
五、产业图谱.....	39
5.1 TSN 芯片.....	40
5.2 网络设备.....	40
5.3 测试床.....	43
5.3 小结.....	47
六、展望.....	48
附件 1 缩略语.....	50

一、发展背景

1.1 概述

时间敏感网络（TSN）是 IEEE 802.1 任务组开发的一套数据链路层协议规范，用于构建更可靠的、低延迟、低抖动的以太网。TSN 的诞生和发展离不开传统以太网的技术支撑和行业需求的推进。

1.2 技术演进

以太网技术诞生于 20 世纪 70 年代。1983 年，IEEE 802.3《IEEE 标准以太网》标准正式发布。以太网由于高带宽、低成本、互操作性强等优势被广泛应用，从同轴电缆慢慢发展成为千兆以太网。2005 年，IEEE 802.1Q-2005《IEEE 标准局域网和城域网 虚拟桥接局域网》标准正式发布，提出了虚拟局域网（VLAN）技术，使得局域网能够同时支持声音和图像的传输。图 1 给出了以太网的发展历程。

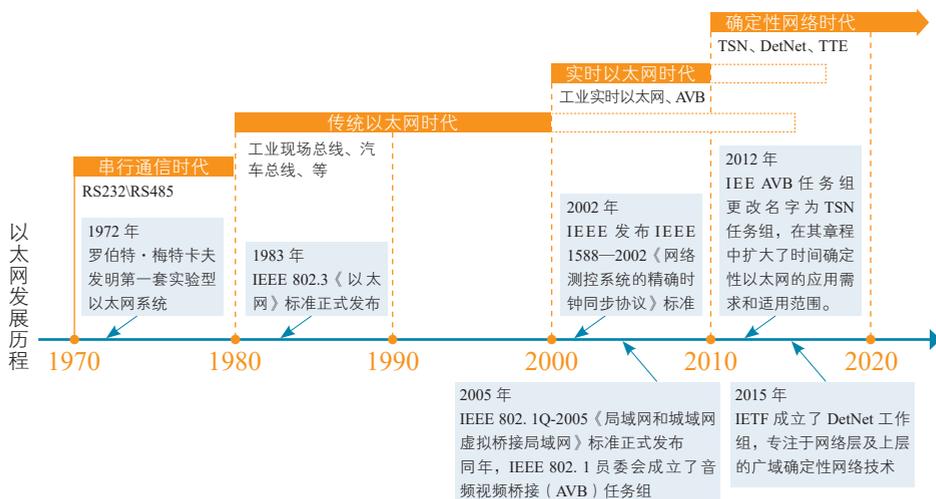


图 1 以太网发展历程

尽管以太网技术一直处于不断发展的过程中，交换技术的采用也大大减少了网络延迟，但是以太网协议采用的“Best-effort”通信机制从本质上仍然缺乏确定性和实时性。为此一些标准化协会、技术组织等一直在推出各自的确定性网络的实现机制，图 2 给出了不同技术实现的集中确定性网络。



图 2 TSN 与确定性网络

在工业自动化领域，在 2000 年提出了多种提供工业以太网实时性的解决方案，整体上推动了以太网技术在工业自动化上的应用。根据 HMS 的 2019 年工业网络数据^①，新安装工业自动化网络节点中，Ethernet/IP^②、Profinet^③、EtherCAT^④、Powerlink^⑤ 四种实时以太网标准占比超过 40%，

① 摘自 HMS《2019 年工业网络市场份额报告》。

② Ethernet/IP 由罗克韦尔自动化公司提出，由 ODVA（Open DeviceNet Vendors Association）管理。

③ Profinet 由西门子公司提出，由 PI（PROFIBUS & PROFINET International）管理。

④ EtherCAT 由倍福公司提出，由 ETG（EtherCAT Technology Group）管理。

⑤ Powerlink 由贝加莱公司提出，由 EPSG（The Ethernet POWERLINK Standardization Group）管理。

此外还有 Sercos III^①、CC-Link IE^② 等实时以太网标准。多种实时以太网协议在物理层实现了统一，但解决实时性的技术路线各不相同，各种实时以太网都形成了各自独立配置的网络系统，彼此之间形成了自动化孤岛，存在互连互通互操作问题。同时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。

在航空电子和汽车电子领域，随着各种机械液压控制转向各种线控，对标准化的高可靠性时间触发通信架构提出了要求。维也纳大学等研究机构把时间触发通信机制与标准的实时以太网机制相结合，提出了时间触发以太网（TTE）技术方案，并在综合航空电子系统中获得应用。

2002 年，IEEE 发布 IEEE 1588-2002《IEEE 标准 网络测控系统的精确时钟同步协议》，启动了在 IEEE 802 标准框架下形成统一实时以太网的进程。2005 年，IEEE 802.1 成立了音频视频桥接（AVB）任务组，开始制定一套基于以太网架构，用于实时音视频的传输协议集。它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，同时又可以 100% 向后兼容传统以太网。AVB 任务组的成果引起了车联网、自动化网络领域厂商和技术组织的关注，2012 年，AVB 任务组更改名字为 TSN 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。在 AVB 标准集的基础上，TSN 任务组综合了多个应用领域对时间敏感通信的需求，形成了一系列标准，建立了时钟同步、数据调度和网络配置等核心机制。TSN 和 TTE 位于数据链路层。

互联网工程任务组（IETF）在 2015 年 10 月成立了 DetNet 工作组，

① Sercos III 由力士乐公司提出，由 the Sercos user organization 管理。

② CC-Link IE 由三菱电机自动化公司提出，由 CLPA（CC-Link Partner Association）管理。

专注于网络层及上层的广域确定性网络技术，旨在将确定性网络通过网际互连协议 / 多协议标签交换（IP/MPLS）等技术扩展到广域网上。

1.3 行业需求

TSN 技术标准起源于音视频行业，用于满足广播、直播、现场等公共媒体的高清视频及音频数据高实时、同步传输的高带宽网络应用需求，同时旨在用以太网取代家庭中的高清多媒体接口（HDMI）、扬声器和同轴电缆。

虽然 AVB 任务组的研究成果没有广泛应用于家庭娱乐设备，但已经在工作室、体育和娱乐等场所得推广。这一成功吸引了汽车界和工业界的关注。

在汽车领域中，随着车载以太网在高级驾驶辅助系统方面的需求日益增加，而传统以太网的高延时及其不确定是无法满足无人驾驶或智能驾驶的车载音视频同步、安全和车联网交互等需求，因此极低延时的高带宽以太网传输技术应运而生。透过以太网实现的 TSN 架构由于能够增加产品的差异化、改善驾驶员的行车体验。

同时在工业领域，许多工业自动化应用对于延迟的要求非常严格，以满足实时数据传输的需求。但是，现有的大部分自动化控制解决方案都是基于传统的以太网实现的，而且各大厂商还研发了一些附加的技术机制，从而导致了协议之间互不兼容，使实时以太网解决方案市场严重分散，无法支持未来工业网络融合、一体化的发展。

因此智能制造、工业互联网的快速发展，迫切地需要通过统一的以太网实现高可靠低延迟、支持同步、具有良好兼容性的确定性工业通信。

1.4 TSN 价值

TSN 提供微秒级确定性服务，保证各行业的实时性需求。TSN 可以达到 10us 级的周期传输，性能优于主流的工业以太网。并且 TSN 面向音视频、工业、汽车等多种行业，将实时性延伸至更高的层次。

TSN 降低整个通信网络复杂度，实现周期性数据和非周期性数据同时传输。以工业为例，当前周期性控制数据使用工业以太网传输，非周期性数据使用标准以太网传输。TSN 通过其调度机制能够实现周期性数据和非周期性数据在同一网络中传输，进一步简化了整个通信中的网络复杂性。

TSN 统一网络传输，提高经济性。TSN 能够帮助实现信息技术（IT）与运营技术（OT）融合，统一的网络能够减少开发部署成本，降低控制器等产品网络配置所需的工程时间。

1.5 小结

以太网经历了串行通信、传统以太网、实时以太网时代，目前进入确定性网络时代。TSN 基于传统以太网，提供更可靠的、低延迟、低抖动的数据传输服务。除了 TSN 之外，近 10 年中也出现了一些网络确定性的技术解决方案，包括工业以太网、TTE、DetNet 等，但 TSN 无疑是当前最为成熟的确定性网络技术之一。

二、TSN 技术

2.1 TSN 在 OSI 模型中的位置

TSN 协议族位于开放式系统互连(OSI)模型的第二层,即数据链路层。它可以采用 IEEE 802.3 的以太网或 IEEE 802.3cg 《IEEE 标准 补篇 5: 单对平衡导线上 10 Mb/s 运行和相关电力输送的物理层规范和管理参数》的标准网络来实现物理层。

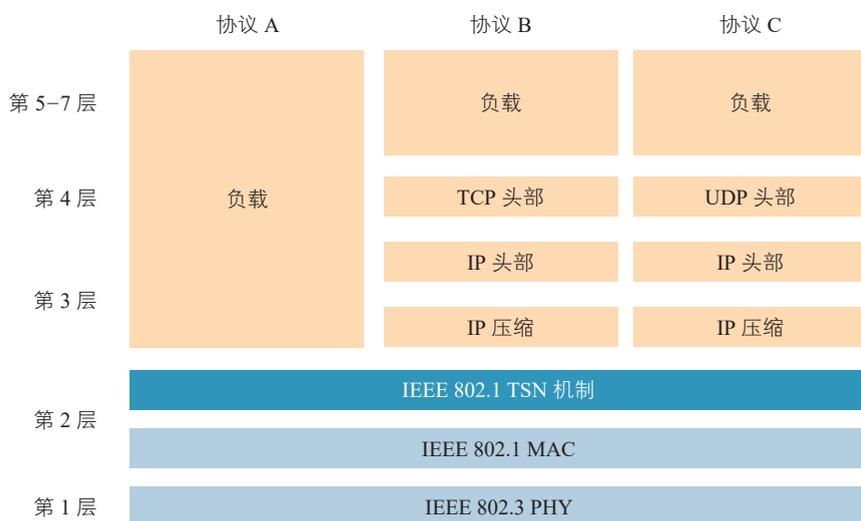


图 3 TSN 在 OSI 模型中的位置

TSN 协议族进一步可以划分为三个子层:

(1) 基础层: IEEE 802.1AS-2020 《IEEE 标准 局域网和城域网 桥接局域网中时间敏感应用的定时和同步》的时钟同步和 IEEE Qat-2010 《IEEE 标准 局域网和城域网 虚拟桥接局域网 修正 14: 流预留协议 (SRP)》、IEEE 802.1Qbv-2015 《IEEE 标准 局域网和城域网 网桥和桥接网络 修正

25: 调度业务的增强》等调度协议；

(2) 中间层: IEEE 802.1Qcc-2018《IEEE 标准 局域网和城域网 网桥和桥接网络 修正: 流保留协议 (SRP) 增强和性能改进》TSN 配置和 IEEE 802.1AB《IEEE 标准 局域网和城域网 站和媒体访问控制连接发现》定义的链路层发现协议 (LLDP) 等支撑协议, Yang 模型的定义等;

(3) 应用适配层: 各种应用配置协议。例如 IEEE 802.1BA-2009《IEEE 标准 局域网和城域网 音视频桥接系统》面向 TSN 在 AVB 系统中的应用, IEEE 802.1CM-2018《IEEE 标准 局域网和城域网 时间敏感网络应用于移动前传网络》面向 TSN 在移动通信前传中的应用。IEEE 802.1DG《车内以太网通信的时间敏感网络应用行规》面向 TSN 在车联网中的应用, IEC/IEEE 60802《面向工业自动化的时间敏感网络行规》面向 TSN 在工业自动化中的应用。此外, 国际电工委员会 (IEC) 制定中的 IEC TR 61850-90-13《电力自动化中的确定性网络》面向 TSN 在能源领域的应用。

2.2 TSN 核心机制

TSN 协议族包含了时钟同步、流量整形、数据调度、网络配置、应用配置等方面的标准。在本节中, 将介绍时钟同步、数据调度、网络配置等 TSN 核心技术。

2.2.1 时钟同步

与 IEEE 802.3 的标准以太网和 IEEE 802.1Q 的以太网桥接相比, 时钟在 TSN 网络中起着重要的作用。对于实时通信而言, 端到端的传输延迟具有难以协商的时间界限, 因此 TSN 中的所有设备都需要具有共同的时间参考模型, 因此需要彼此同步时钟。这不仅适用于诸如工业控制器和制造机器人之类的通信流的终端设备, 而且对于网络组件也是如此, 例如

以太网交换机。只有通过同步时钟，所有网络设备才能够一致操作，并在所需的时间点执行所需的操作。

在 TSN 中，主要的时钟同步标准包括 IEEE 802.1AS 和其修订版 IEEE 802.1AS-Rev。相对而言，IEEE802.1AS-Rev 对于网络的时钟精度要求更高。

IEEE 802.1AS 所规范的协议严格保证了时间敏感的业务在基于以太的桥接网络或虚拟桥接网络等时延固定或对称的传输媒质中的同步传送。图 4 给出了 IEEE 802.1AS 架构。其内容包括在网络正常运行或添加、移除或重配置网络组件和网络故障时对时钟同步机制的维护，并规范了 IEEE 1588 在 IEEE 802.1Q 和 IEEE 802.1D 《IEEE 标准 局域网和城域网 媒体访问控制（MAC）网桥》中的应用。IEEE 802.1AS 和 IEEE 802.1AS-Rev 定义了广义的精确时钟同步协议（gPTP）。与 IEEE 1588 不同，gPTP 支持媒体访问控制（MAC）层的通信，是一个完全基于二层的网络、非 IP 路由的协议。并且，gPTP 定义了一个媒体独立子层，即使采用不同网络技术，甚至不同的媒体接入技术的混合网络，也可采用相同的时间域进行同步。这种情况下，这些时间敏感子网间信息的交换可以采用不同的包格式和管理机制。gPTP 为上层应用程序提供标准的接口定义，而 IEEE 1588 没有定义应用程序如何能得到或者提供时间信息。

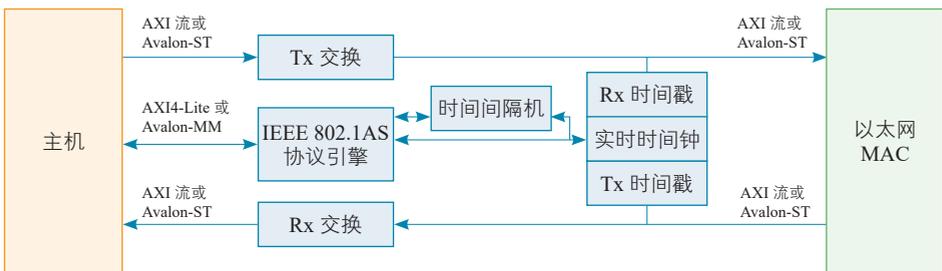


图 4 IEEE 802.1AS 架构

2.2.2 数据调度

TSN 的数据调度是保证时间敏感的基础，它的核心思想是基于不同的整形器（Shaper）来进行不同应用场景的流控制。IEEE 802.1 提供了一系列的标准来确保可靠性的数据传输，一般主要包括以下几种情况。

(1) 基于信用的整形器 CBS (Credit-Based Shaper)

CBS 整形器在 IEEE 802.1Qav-2009《IEEE 标准 局域网和城域网 虚拟桥接局域网 修正 12: 时效性流的转发和队列增强》中规定，它可以通过对不同队列赋予一个“信用值”来进行数据传输的调度，不同传输队列的“信用值”会随着数据传输的过程而自动更改，这样就会保证优先级较低的数据也会得到数据传输的机会。CBS 整形器主要在汽车工业得到应用，但相对工业应用而言还是具有较大的平均延迟。

(2) 时间感知的整形器 TAS (Time Awareness Shaper)

TAS 一般分为两种：抢占式和非抢占式。非抢占式基于 IEEE 802.1Qbv，通过门控制列表（GCL）周期性的控制门的开/关，TAS 需要从发送方（Talker）到接收方（Listener）中间的所有网桥进行时钟同步，对于网桥中的每个端口，TAS 根据已知且商定的时钟表进行开关驱动动作，而数据调度则可以根据每个节点及队列的优先级进行定义，在 IEEE 802.1Qbv 的实现中，那些需要实时传输的数据流通常被第一个安排进行传输，需要在时间调度配置时预先予以确定，而与此同时，还需要为非周期性的数据预留一个通道。注意，这里的非周期性数据并不是低优先级的，相反，它的优先级更高，一旦数据需要发送，那么就需要立刻安排调度。TAS 可以和 CBS 整形器结合使用，在这个机制下，除了原定计划的周期性的调度和非周期性的预留调度外，还可以增加一个 CBS 整形器对其队列内部的数据进行按照信用的排序调度。

在 IEEE 802.1Qbv 中所采用的 TAS 整形器存在一个问题，就是带宽

保护，也就是无论是周期性的数据还是非周期性的预留数据，都需要预留通道。但是，TSN 网络中还存在着一些其他的数据，这些数据也是非周期性的，但是没有足够的预留通道，那么这时的数据传输就是“Best-effort”的数据调度。尽管这些数据是非周期性的，但是可能他们的优先级很高，因此，为了确保严格时间要求的数据传输，IEEE 802.1 Qbv 给每个周期预留了一个“标准以太网”帧作为保护带宽。

而为了节省带宽，IEEE 802.1Qbu-2016《IEEE 标准 局域网和城域网网桥和桥接网络 修正 26: 框架优先》规定了抢占式的 TAS 整形器，在保证时间敏感任务数据可调度的前提下，尽可能的节省带宽。抢占式策略的原理是暂停非时间敏感型数据的传输过程，转而传输时间敏感型数据，时间敏感型数据传输完成后，再继续传输非时间敏感型数据，主要解决低优先级队列对于高优先级队列传输的影响。需要注意的是，抢占式机制需要网桥节点和终端节点支持 LLDP。

(3) 周期性排队与转发机制整形器 CQF (Cyclic Queuing and Forwarding)

CQF 整形器基于 IEEE 802.1Qch-2017《IEEE 标准 局域网和城域网网桥和桥接网络 修正 29: 循环排队和转发》。其中单流过滤和管控机制 (PSFP) 中的时间门控逻辑控制了时间敏感分组进入缓存队列的时间，而时间敏感流增强调度 (EST) 机制中的输出门控机制控制了分组离开输出队列的时间。基于对 PSFP 和 EST 机制的不同配置，TSN 交换机可以实现多样的确定性转发，满足不同场景的需求。CQF 对 PSFP 和 EST 机制进行配置，可以通过简单的计算实现确定性的转发延时。CQF 也是目前 TSN 规范中确定的唯一配置方式。CQF 也可以与抢占式机制进行配合，使得可以在队列中避免低优先级反转压制高优先级数据的传输。

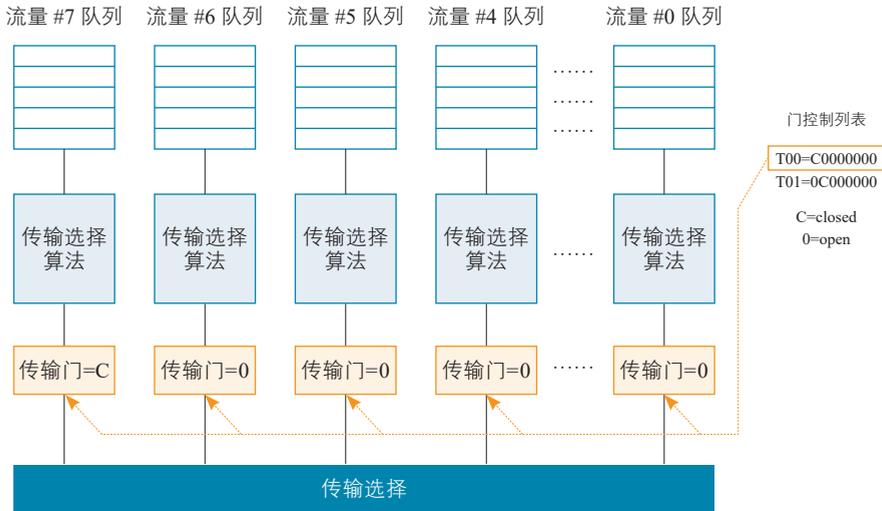


图 5 CQF 原理

(4) 异步数据流整形器 ATS (Asynchronous Traffic Shaper)

ATS 整形器基于 IEEE 802.1Qcr 《IEEE 标准 网桥和桥接网络 修正：异步流量整形》标准，为了解决非周期性数据的传输零拥堵问题，并且针对周期性的数据传输而言，网络的严格时钟同步和队列保护带宽等原因无法最大的使用到网络带宽，ATS 进一步优化那些对于时间同步非严苛任务的带宽利用。ATS 整形器旨在通过每跳重塑 TSN 数据流，并不要求网桥和终端节点同步，对于高实时要求和非实时业务混合业务模式下，ATS 整形器也能保持带宽的最大利用率。

2.2.3 网络配置

面向时间敏感网络应用，IEEE 802.1Qcc-2018 《IEEE 标准 局域网和城域网 网桥和桥接网络 修正：流保留协议 (SRP) 增强和性能改进》描述了三种用户 / 网络配置模型，这些模型为后续规范提供了体系结构。每个模型规范都显示了网络中不同实体之间的用户 / 网络配置信息的逻辑流。

(1) 全分布模型

该模式下，用户流的终端直接通过 TSN 用户 / 网络协议传达用户需求。网络以完全分布式的方式配置，没有集中的网络配置实体。分布式网络配置使用一个协议来执行，该协议沿着流的活动拓扑传播 TSN 用户 / 网络配置信息。随着用户需求在每个网桥中传播，网桥的资源管理在本地有效地执行。这种本地管理仅限于网桥知道的信息，不一定包括整个网络的信息。

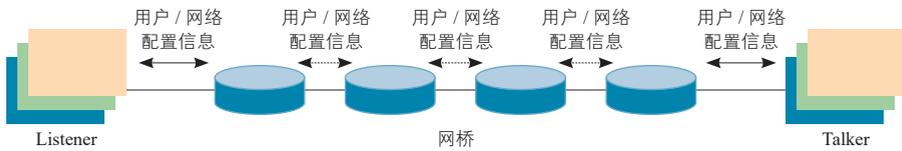


图 6 完全分布式模型

(2) 集中式网络 / 分布式用户模式

有些 TSN 用例在计算上很复杂，对于这样的用例，将计算集中在单个实体（网桥或端）中，而不是在所有网桥中执行计算。一些 TSN 用例可以受益于对网络中所有流的完整了解，对于这些用例，实体可以收集整个网络的信息，以便找到最佳配置。在集中式网络 / 分布式模型中，配置信息直接指向或来自集中式网络配置（CNC）实体。TSN 流的所有网桥配置都是由这个 CNC 使用远程网络管理协议来完成的。CNC 对网络的物理拓扑和每个网桥的能力有一个完整的视图，这使得 CNC 可以集中复杂的计算。CNC 可以存在于端或网桥上，并且知道网络边缘所有与终端连接的网桥地址，CNC 将这些网桥配置为一个代理，直接在网桥和 CNC 之间传输信息，而不是将信息传播到网络内部。

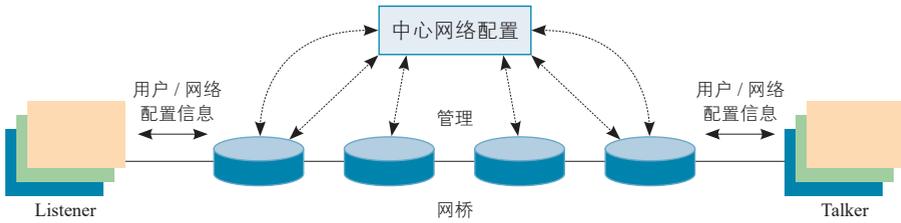


图 7 集中式网络 / 分布式用户模型

(3) 完全集中的模型

许多 TSN 用例需要在终端进行重要的用户配置，例如在许多工业控制应用程序中，物理输入和输出（I/O）的定时是由所控制的物理环境决定的，TSN 的定时需求是由该 I/O 定时产生的。而这些 I/O 计时需求可能在计算上非常复杂，并且涉及到每个终端中应用软件和硬件的详细信息。为了适应这类 TSN 用例，完全集中的模型支持集中用户配置（CUC）实体来发现终端和用户需求，并在终端中配置 TSN 特性。从网络的角度来看，完全集中式模型和集中式网络 / 分布式用户模型的主要区别在于：所有的用户需求都在 CNC 和 CUC 之间进行交换。

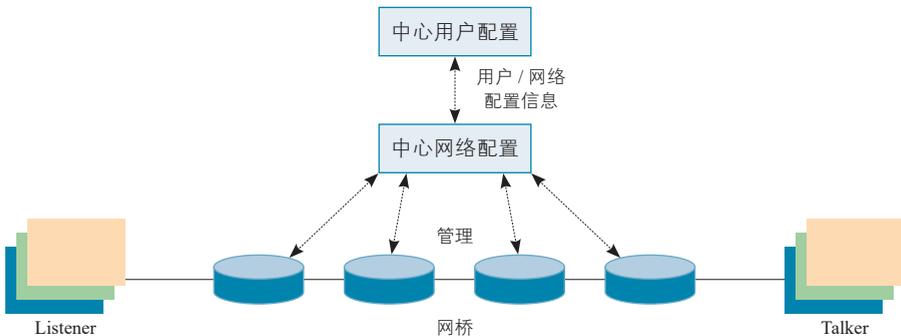


图 8 完全集中式模型

2.2.4 帧复制与消除

IEEE 802.1CB《IEEE 标准 局域网和城域网 可靠性的帧复制和消除》通过在网络的源端系统和中继系统中对每个包进行序列编号和复制，并在目标端系统和其他中继系统中消除这些复制帧，通过帧复制和帧消除过程为以太网提供无缝冗余特性，提高可靠性。当帧复制和消除机制被用于特定的网络结构时，可以用来防止由于拥塞导致的丢包情况，也可以降低由于设备故障造成分组丢失概率及故障恢复时间，有效提高工业自动化网络和车载以太网数据交互的可靠性。

2.3 TSN 与新兴信息技术融合

TSN 仅为以太网提供了一套 MAC 层的协议标准，它确保数据在复杂网络环境下传输的可靠性和实时性。在不同场景的应用需求下，TSN 与新兴的信息技术融合加快未来 TSN 灵活的部署趋势。

2.3.1 TSN 与 IP 网络的融合

(1) 一体化网络架构技术

通过研究工业异构融合网络架构、混合网络容限分析等关键技术，为实现异构网络协议的高速转换、混合业务流的调度、时间敏感业务的确定性传输、网络的动态重构等需求，需建立异构融合网络的拓扑、资源、业务、性能管理的一体化网络技术框架，并通过集中式控制的方式为基于 TSN 的工业异构网络提供支撑。

(2) 软件定义网络 (SDN) 技术

随着工业互联网的发展及部署应用，工业现场呈现出以网络为中心的趋势，为了应对复杂的工业异构网络现场环境，需要建立统一管控工业现场（包括现场设备、控制层、管理层等）的综合管控平台。SDN 技

术将数据平面和控制平面分离，并通过集中控制方式满足定制化的工业业务需求，加快部署时间、提高网络资源利用率，同时稳定硬件投入成本增长速度。

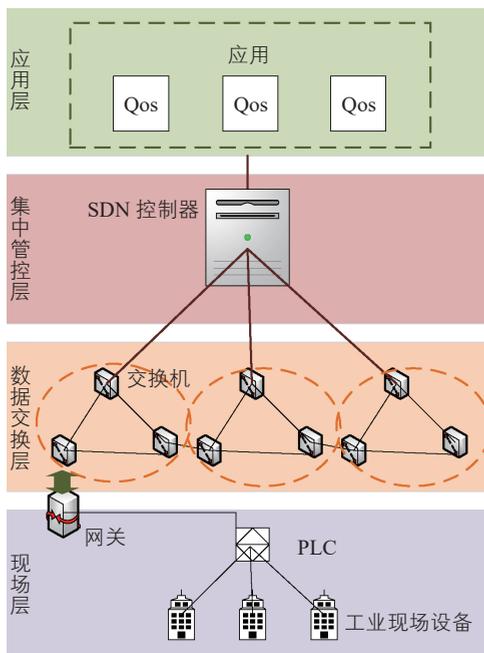


图 9 基于 SDN 的工业异构网络架构

图 9 给出了基于 SDN 的工业异构网络架构，数据交换层的 SDN 交换机是一种为满足时间敏感应用设计的支持 TSN 的自适应交换机，将对数据包的操作能力和操作时间进行封装，接着由 SDN 控制器进行逻辑抽象和集中管理，将不同应用的服务质量（QoS）映射到 SDN 网络基础设施上，从而形成支持 TSN 分时操作的工业 SDN 统一管控架构。

(3) 异构协议高速转换技术

当前的工业异构网络主要支持“单向”信息采集类业务的协议转换，而 IT 网络并不能支持下行协议的转换。因此需要针对不完善的异构协议转换机制，研制新的异构协议高速转换技术，实现双向协议转换中的消息同步、功能完整和高效转换，满足消息事务处理、同步 / 异步处理、提升协议转换效率等需求。进而使得传统 OT 设备在未来的 TSN 网络中，可通过“异构协议高速转换技术”和 IT 系统进行诸如大数据分析、订单排产和能源优化等数据和控制业务的交换。

(4) 混合业务流调度

工业异构网络中不同智能设备具有不同延迟流的数据交换要求，网络承载的业务类型显著增加，而不同业务对网络的 QoS 需求也不同，针对不同业务种类的 QoS，工业应用主要分为采集类业务、交互式业务以及控制类业务。混合数据流具有不同的带宽和实时性需求，且随环境因素而变化，使得跨网实时调度问题更具挑战。另外，实时调度方法直接影响数据流传输延迟上界，是保障传输实时性和 QoS 的核心环节。为实现全工业网络信息的全面互联互通，需要对网络中存在的采集类、交互类和控制类混合业务流进行混合传输，保障包括控制类业务流的各种业务流的传输确定性是工业网络最重要的任务。因此高确定性的混合业务流调度技术对于 TSN 技术的实现具有重要的意义。

(5) 网络动态重构技术

传统工业以太网无法满足智能工厂产线重构、基于数据流动的工业智能处理等应用需求。当前任何设备和业务调整均需通过手工配制网络参数进行使能，不能支持网络动态重构。因此动态重构技术具有很大的理论和实际应用价值。通过动态重构技术可以改善工业网络静态配置，满足 TSN 中在无需网络或设备变动情况下将组件添加至实时系统中的

问题。

(6) 确定性网络技术

IETF 的确定性网络工作组专注于网络层及更高层次的广域确定性网络技术。确定性网络旨在第二层桥接和第三层路由段上实现确定传输路径，这些路径可以提供时延、丢失分组和抖动的最坏情况界限，以此提供确定的时延。确定性网络在二层网络的确定性路径的实现主要依靠 TSN 标准实现。相比于 TSN，确定性网络的工作范围更加广泛，通过 IP/MPLS 技术，以期实现三层的确定性传输。

2.3.2 TSN 与控制网络协议融合

由于自动化领域的各种实时以太网标准已在全球范围内有大量安装节点，因此其与 TSN 的融合具有巨大的现实意义。主流实时以太网技术组织都提出了与 TSN 的融合方案，在二层与 TSN 兼容的同时也保留了各自的应用行规，从而与相应的自动化系统无缝集成。

目前已有多个实时以太网组织把先前的时间触发报文调度机制基于 TSN 重新实现，如 Profinet over TSN、CC-Link IE TSN。

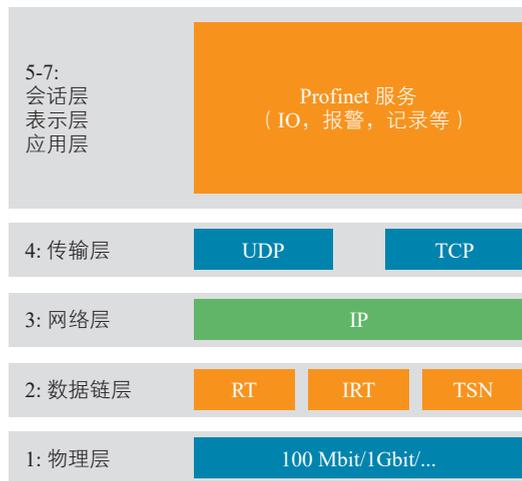


图 10 PROFINET OVER TSN 协议架构图

图 10 的 Profinet over TSN 架构中，TSN 的实时和等时同步的特性无缝集成到 Profinet 架构中，并维护现有的上层 Profinet 功能，包括关于 Profinet 的诊断、配置、报警等服务内容保持不变。这使用户和设备制造商在 TSN 网络中继续使用原来他们开发的应用程序，也使现在提供以太网技术解决方案的制造商，确保他们的技术具有可持续性。

而为了将 EtherCAT 的应用领域进一步扩展到异构网络环境中，EtherCAT 将 TSN 技术补充到了 EtherCAT 中并定义了“EtherCAT TSN 通信行规”，在此规范下 EtherCAT 主站和各个 EtherCAT 网段之间、各个 EtherCAT 主站之间可以通过 TSN 交换机连接，把 EtherCAT 网段和 TSN 流相适配。在此过程中，通过 TSN 网络无需对 EtherCAT 从站设备进行更改，多个工业控制器都可以通过以太网网络与多个不同的 EtherCAT 网段进行实时通讯。

在可以预期的将来，随着各厂商控制协议与 TSN 融合技术的完善。各种不同的实时以太网控制器和 IO 网段都可以物理连接在一个 TSN 网络里，通过 TSN 交换机的配置，实现若干个独立的实时流映射到不同的实时以太网应用层协议。

2.3.3 TSN 与 OPC UA 融合

目前工业界较为普遍的共识在于实现 OPC UA over TSN，OPC UA 与 TSN 分别在整个架构中扮演不同的角色，OPC UA 主要解决语义互操作、垂直行业信息模型、上层传输如 C/S 结构、Pub/Sub 结构的传输，以及信息安全的机制，而 TSN 则负责为其提供实时性、统一的底层网络支撑，两者合起来构成了实现整个工业 RAMI4.0/IIC 的工业互联网参考架构

(IIRA) 的通信框架。不仅如此，OPC UA 在机器学习、数字孪生与底层物理系统交互中也将扮演重要角色，因此，OPC UA over TSN 是未来整个工业通信网络发展的一个重要趋势。

(1) OPC UA over TSN 的结构

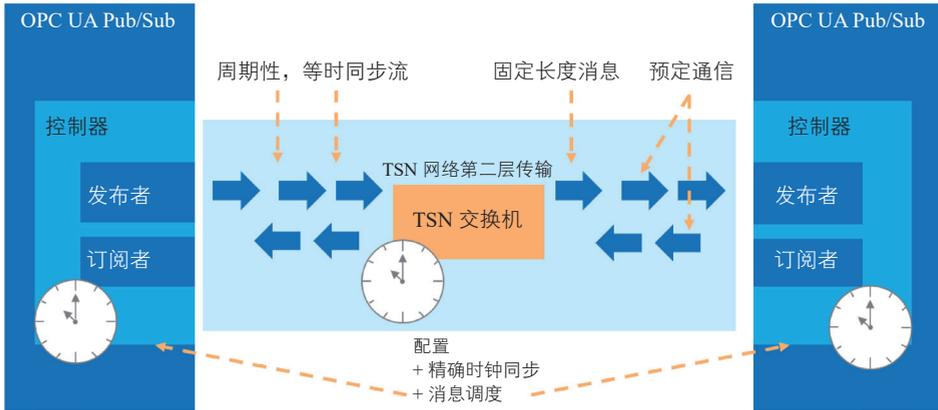


图 11 OPC UA Pub/Sub 运行于 TSN

OPC UA 将实现与 TSN 在控制、传感器层的连接能力，也包括实现与 5G、GSM 等的连接能力。

(2) OPC UA FLC

在整个数字化制造的框架中，由 OPC UA 基金会组织的现场层通信 (FLC) 工作组主要聚焦将 OPC UA 与 TSN 融合，IEC 与 IEEE 合作成立了 IEC/IEEE 60802 工作组，旨在将 OPC UA 与 TSN 融合，由 OPC UA 统一实现对 TSN 的网络配置功能。

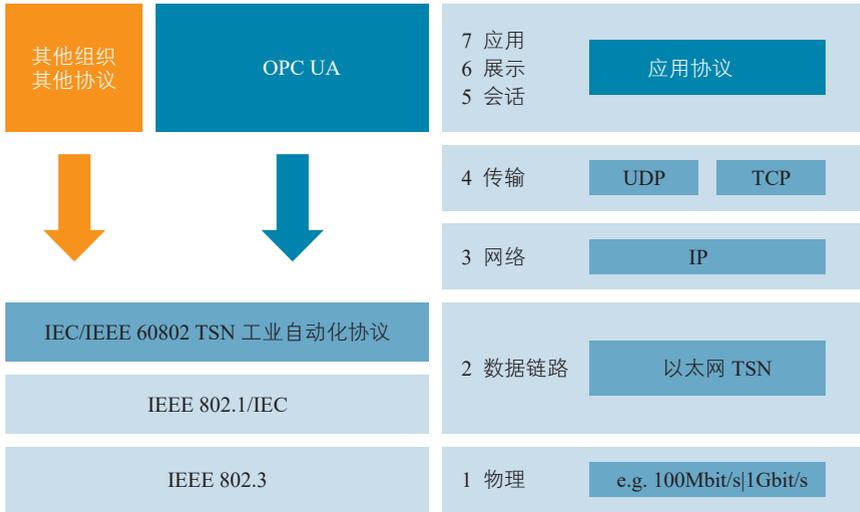


图 12 OPC UA over TSN

OPC UA 通过信息模型支持语义级通信，已成为 RAMI4.0 等智能制造架构的主流通信协议，OPC 基金会发起了 FLC 项目，使得 OPC UA over TSN 既满足车间级的 M2M 横向通信，也满足现场层的等时同步通信。

2.3.4 TSN 与 5G 融合

在前传网络中，经历了几代的发展，其中就包括大家熟知的 3G、4G 等，而近两年大热的 5G 也属于这个领域的。5G 是第五代移动通信技术，具有高可靠、低时延的特性，工业互联网应用场景将在 5G 应用拓展方面占据至关重要的地位。基于以上特性，5G 成为工业设备无线接入 TSN 网络的适配解决方案，不仅提供了更好的可靠性和传输延迟。同时 5G 系统灵活部署的特性也可以很好的解决工业现场环境复杂多变的情况。

在 IEEE 802.1CM-2018 中，定义了适用于前向传输的时间敏感网络。IEEE 802.1CM-2018 对桥接网络中网桥的要求进行了严格的定义，首先要

符合 IEEE 802.1Q 标准中对于网桥的要求，规定了桥接网络支持插入快速通信、帧抢占、支持 64 位片段的大小配置等功能。除此之外，对网桥的同步要求，也规定了必须支持电信 ITU-T G.8275.1/Y.1369.1《支持网络定时的相位 / 时间同步精准时间协议电信概括》配置文件中的一个或多个相关时钟。

在对端站的要求中，同样也规定了除 IEEE 802.1Q 中的一些要求外的同步的规定，其中包括支持的三种类型流的端口以及支持 ITU-T G.8275.1 中的一个或多个时钟等要求。IEEE 802.1CM-2018 中对前传也进行了介绍和规定，并说明了通过桥接网络可以满足这些要求，其中包括除了点对点连接之外，桥接网络还能够在需要时提供 eRE/RE 和 eREC/REC 之间的多点对多点和根点连接。

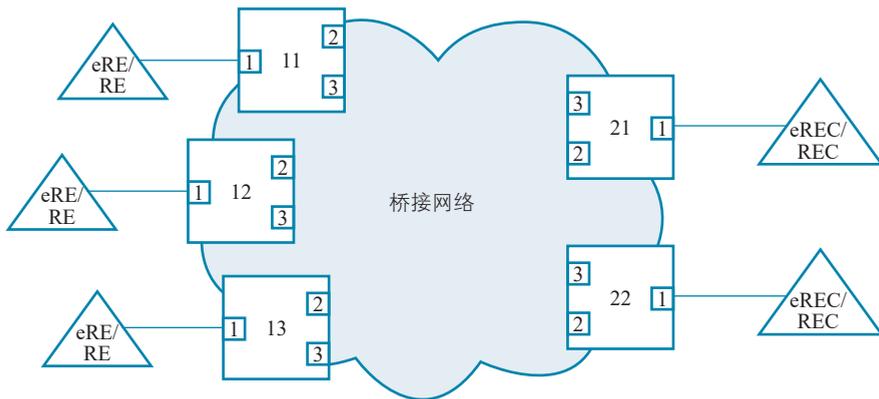


图 13 前传桥接网络

同时在 IEEE 802.1CM-2018 中，重点描述了桥接和同步功能，其中包括延迟组件、网桥延迟计算、帧抢占、网络同步、流控制以及节能以太网。图 14 给出了一个 TSN 与 5G 交互的高级网络架构示例。

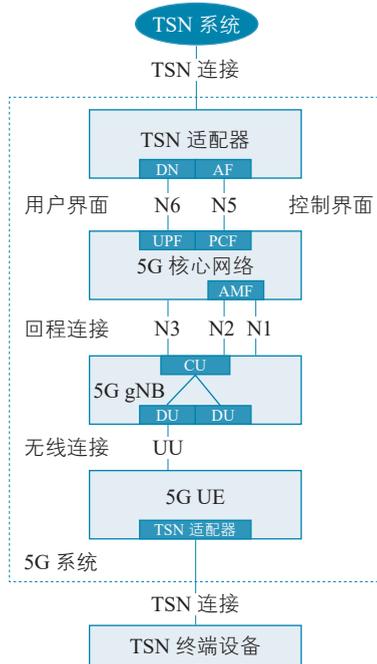


图 14 TSN+5G 网络架构

这种架构允许 TSN 系统将整个 5G 系统视为一个开关，即 5G 系统变成一个具有 TSN 功能的“交换机”。5G 系统通过 N5 和 N6 接口与外部实体交互。应用程序功能 (AF) 的 N5 接口负责接收来自外部系统的配置请求。数据网络 (DN) 的 N6 接口负责接收通过 5G 系统传输的分组数据单元 (PDU)。TSN 适配器负责将 TSN 系统作为 DN 和 AF 呈现给 5G 系统，同时利用可用的 5G 技术，尽量减少 5G 系统定制到 TSN 特定功能。5G 系统应该简单地支持 TSN 系统可以使用的某些操作能力。

为了实现 5G 系统的“TSN 交换机”功能，需要解决四个方面的主要问题。

(1) 本地部署

传统的蜂窝网络部署侧重于广域部署，即宏观网络。工业制造业通

过本地部署通信网络的方式更方便的实现高实时性和高可靠性的需求，同时工厂可以实现工厂内部的数据隐私。3GPP 架构可以支持本地部署的无线接入网络和数据网关。

(2) 5G 网桥

除了通过 5G 本地传输以太网帧外，它还需要支持广播 / 多播包，这些包通常用于局域网而不是蜂窝系统。另一个主要的区别是以太网地址和交换路径是通过学习桥发现的，而不是像典型的蜂窝系统 IP 地址那样分配地址。另外，由于以太网报头与有效负载的大小不同，报头压缩可以显著提高系统容量。

(3) 时间同步

5G 基础设施不仅需要能够将工厂主时钟连接到 5G UE，还需要能够将机器连接 5G UE。

(4) QoS

QoS 需要支持基于跨工厂同步时间的“时间感知调度”。为了识别流量，5G 系统需要理解以太网报头和 VLAN，而不是典型的 IP 地址。同时为了保证延迟还需要正确分配资源，必须理解 TSN 端到端的配置。由于运动控制流量的可预测性和周期性，它也很好地符合 3GPP 中定义的半持续性调度 (SPS) 方案。

2.3.5 TSN 与边缘计算融合

边缘计算是在靠近物或数据源头的网络边缘侧，融合网络、计算、存储、应用核心能力的开放平台。边缘计算的核心，将计算任务从云计算中心，迁移到产生源数据的边缘设备上，不再全部上传至云计算平台，能够满足数据隐私和数据安全性问题、降低运营成本、交互性和弹性、自治能力等方面的关键需求。

在工业现场环境中，复杂多样的总线协议标准、产生的复杂多样的数据、对通讯实时性更高的要求，这些都是影响边缘计算发挥其作用的因素。引入 TSN 网络能够有效保障边缘计算的过程中复杂数据传输的可靠性及实时性。

在 2018 年雪浪大会上，美国国家仪器公司（NI）构建了在基于 NI 模块化、开放式平台的 IIoT 系统上，实现了纳秒级分析和控制、采集任意传感器的数据、适用于边缘计算的硬件以及使用 TSN 同步的架构。TSN 技术的使用，可以达到边缘节点的同步精度高达 100ns，这是 IIoT 系统的一项重大突破。在不远的将来，TSN 与边缘计算的深度融合将提供一个高实时高确定的开放互联通信网络，为智能制造、智慧城市、智慧交通等领域的发展提供强有力的底层保障。

2.4 小结

TSN 位于 OSI 七层模型中数据链路层，能够与传统以太网进行兼容。TSN 的时钟同步、数据调度、网络配置、帧复制与消除等核心机制保证了物理层和数据链路层的确定性时延。TSN 与 IP 网络、控制网络协议、OPC UA、5G、边缘计算等新兴信息技术的融合能够使网络的确定性延伸至网络层及更高层，有助于实现 TSN 在不同领域的部署。

三、标准化进展

3.1 标准化组织

3.1.1 国外标准化组织

IEEE 802.1 TSN 任务组。TSN 是由 IEEE 802.1 工作组下 TSN 任务组开发的一套标准。



图 15 IEEE 802.1 TSN 标准

TSN 任务组的前身是 AVB 任务组，成功解决了音视频网络中数据实时同步传输的问题，从而得到了汽车和工业界的关注。AVB 任务组共发布 4 项标准，包括了 gPTP、流预留协议 (SRP)、基于信用的整形器、

音视频系统配置等内容。IEEE 802.1 的 TSN 表 1 列出了 AVB 任务组已发布的标准。

表 1 AVB 任务组已发布的标准

序号	标准号	标准名称	标准内容
1	IEEE 802.1AS-2011	IEEE 标准 局域网和城域网 桥接局域网中时间敏感应用的定时和同步	该标准提供定时和同步服务。以 IEEE 1588 中规定的精准时间同步协议 (PTP) 为原型进行裁剪和改进, 得到 gPTP, 使得网络中所有节点建立统一时钟同步机制。
2	IEEE 802.1Qat-2010	IEEE 标准 局域网和城域网 虚拟桥接局域网 修正 14: 流预留协议 (SRP)	该标准规定了 SRP。通过协商机制, 从源设备到不同交换机再到终端设备的整个路径上为时间敏感型数据预留出所需的带宽资源, 以提供端到端的服务质量及延时保障。
3	IEEE 802.1Qav-2009	IEEE 标准 局域网和城域网 虚拟桥接局域网 修正 12: 时效性流的转发和队列增强	该标准以 IEEE 802.1Q 协议为基础, 为数据流发送端和交换机提供数据流的处理和转发服务, 主要包括流量整形、优先级划分和队列管理。
4	IEEE Std 802.1BA-2009	IEEE 标准 局域网和城域网 音视频桥接系统	该标准规定了一套使用特定的配置文件来帮助实现使用 AVB 标准的网络设备之间的互操作性, 定义了 AVB 在不同市场的技术规格书和生产制造 AVB 兼容设备过程中使用的预设值及设定, 例如针对车载系统、消费娱乐以及专业 AV 视讯和工业标准等不同的使用环境给出的不同技术要求。

2012 年, AVB 任务组扩大了 AVB 的应用需求和业务范围, 更名为 TSN 任务组。该任务组的工作内容是通过 IEEE 802 网络提供确定性服务, 例如具有低时延、低时延抖动和低丢包率特性的保证分组传输, 更新标准

以太网协议，为时间敏感型数据制定了低延迟数据传输标准。目前 TSN 任务组发布 13 项标准，丰富了增强了数据调度、网络配置和流量整形的各个机制。表 2 列出了 TSN 任务组已发布的标准。

表 2 TSN 任务组已发布的标准

序号	标准号	标准名称	标准内容
1	IEEE 802.1AS-2020	IEEE 标准 局域网和城域网 桥接局域网中时间敏感应用的定时和同步	该标准规定了用于确保跨网络的时间敏感应用（例如音频、视频和时间敏感控制）满足同步要求的协议和过程。这包括维护正常操作期间的同步时间，以及跟随网络组件和网络重构的添加、移除或失败。它规定了 IEEE 1588 规范在 IEEE 802.1Q 的相关内容的使用。
2	IEEE 802.1Qcr-2020	IEEE 标准 局域网和城域网 网桥和桥接网络 修正：异步流量整形	该标准指定了一个桥的程序和管理对象，以便在具有恒定比特率的全双工链路上执行异步流量整形。异步流量整形提供了一个额外的整形出口队列层，以将流合并到现有队列结构中。在出口端口上所需的最小独立队列数是可调的，并且至少是需要合并的特定桥的入口端口数。该标准为静态网络 / 配置中最坏情况延迟分析提供了一个信息框架。
3	IEEE 802.1Qcx-2020	IEEE 标准 局域网和城域网 网桥和桥接网络 修正：用于连通性故障管理的 YANG 数据模型	该标准规定了基于 UML 的信息模型和 YANG 数据模型，用于连通性故障管理（CFM）。它进一步定义了信息和数据模型之间的关系，以及该标准中规定的其他管理能力的模型。

(续表)

序号	标准号	标准名称	标准内容
4	IEEE 802.1CMdc-2020	IEEE 标准 局域网和城域网 时间敏感网络应用用于移动前传网络 修正：对移动前传网络应用行规的增强，以支持新的移动前传网络接口、同步和同步化标准	该标准增强了 IEEE 802.1CM-2018 中移动前传网络应用行规，以解决移动前传网络接口标准以及相关同步和同步化标准的新发展。
5	IEEE 802.1CM-2018	IEEE 标准 局域网和城域网 时间敏感网络应用用于移动前传网络	该标准使时间敏感的前向回传流能够在 TSN 网络中传输。
6	IEEE 802.1Qcc-2018	IEEE 标准 局域网和城域网 网桥和桥接网络 修正：流保留协议 (SRP) 增强和性能改进	该标准规定了 TSN 网络配置模型，增强了 SRP 的功能，改进了性能。
7	IEEE 802.1Qcp-2018	IEEE 标准 局域网和城域网 网桥和桥接网络 修正：YANG 数据模型	该标准规定一个统一建模语言为基础的信息模型和数据模型，进一步定义了信息和数据模型和其他管理模型的关系。YANG 是一个正式的数据建模语言，可以被 NETCONF 使用，能够简化网络配置。
8	IEEE 802.1Qch-2017	IEEE 标准 局域网和城域网 网桥和桥接网络 修正 29: 循环排队和转发	该标准规定了同步循环队列入队和出队过程，管理的对象和扩展现有的协议。
9	IEEE 802.1Qci-2017	IEEE 标准 局域网和城域网 网桥和桥接网络 修正 28: 逐流过滤和校正	该标准规定了流过滤和监督机制，根据帧所属的特定数据流对帧执行帧计数、过滤、维护和服务类选择，以及同步循环时间安排。

(续表)

序号	标准号	标准名称	标准内容
10	IEEE 802.1CB-2017	IEEE 标准 局域网和城域网 可靠性的帧复制和消除	该标准规定了提供交换机和终端站的冗余传输帧的识别与复制、重复帧识别和消除重复帧。
11	IEEE 802.1Qbu-2016	IEEE 标准 局域网和城域网 网桥和桥接网络 修正 26: 框架优先	该标准规定了帧抢占策略, 允许网桥端口在传输一个或多个时间敏感型数据时暂停非时间敏感型数据的传输。
12	IEEE 802.1Qbv-2015	IEEE 标准 局域网和城域网 网桥和桥接网络 修正 25: 调度业务的增强	该标准定义了门结构, 能够控制交换机和终端端口根据 IEEE Std 802.1AS 来控制数据流的输出。
13	IEEE 802.1Qca-2015	IEEE 标准 局域网和城域网 网桥和桥接网络 修正 24: 路径控制与保留	该标准基于路由器的“中间系统到中间系统”的概念, 收集和分配拓扑信息, 经过多次迭代, 所有节点都有整个网络的拓扑信息。

TSN 任务组在研标准 18 项:

(1) 独立的在研标准: IEC/IEEE 60802、IEEE 802.1CS《链路本地注册协议》、IEEE 802.1CQ《多播与本地地址分配》、IEEE 802.1DC《网络系统提供的服务质量》、IEEE 802.1DF《服务提供商网络的 TSN 应用行规》、IEEE 802.1DG《车内以太网通信的时间敏感网络应用行规》

(2) IEEE 802-2014《IEEE 标准 局域网和城域网 概述和体系结构》的补篇: IEEE 802f《EtherTypes 的 YANG 数据模型》

(3) IEEE 802.1Q 的补篇: IEEE 802.1Qcj《自动连接到提供程序主干桥接 (PBB) 服务》、IEEE 802.1Qcw《YANG 用于调度流量、帧抢占、每流过滤和监控的数据模型》、IEEE 802.1Qcz《阻塞隔离》、IEEE 802.1Qdd《资源分配协议》和 IEEE 802.1Qdj《TSN 的配置增强》

(4) IEEE 802.1AB-2016 的补篇: IEEE 802.1ABcu 《LLDP YANG 数据模型》、IEEE 802.1ABdh 《支持多帧协议数据单元》

(5) IEEE 802.1AS-2020 的补篇: IEEE 802.1ASdm 《热备用》、IEEE 802.1ASdn 《YANG 数据模型》

(6) IEEE 802.1CB-2017 的补篇: IEEE 802.1CBcv 《FRER-YANG 数据模型与管理信息库模块》和 IEEE 802.1CBdb 《扩展流识别函数》

ISO/IEC JTC 1。 IEEE 通过 ISO/IEC JTC 1/SC 6 (国际标准化组织和国际电工委员会第一联合技术委员会系统间远程通信和信息交换分技术委员会) 将 IEEE 标准转化为 ISO/IEC 国际标准。目前转化了 ISO/IEC/IEEE 8802-1Q:2016 《信息技术 系统间远程通信和信息交换 局域网和城域网 特定要求 第 1Q 部分: 网桥和桥接网络》、ISO/IEC/IEEE 8802-1AB:2017 《信息技术 系统间远程通信和信息交换 局域网和城域网 特定要求 第 1AB 部分: 车站和媒体访问控制连接发现》、ISO/IEC/IEEE 8802-1AS:2014 《信息技术 系统间远程通信和信息交换 局域网和城域网 第 1AS 部分: 桥接局域网中时间敏感应用的定时和同步》、ISO/IEC/IEEE 8802-1AX:2016 《信息技术 系统间远程通信和信息交换 局域网和城域网 特定要求 第 1AX 部分: 链路聚合》、ISO/IEC/IEEE 8802-1BA:2016 《信息技术 系统间远程通信和信息交换 局域网和城域网 特定要求 第 1BA 部分: 音视频桥接 (AVB) 系统》相关国际标准, 涉及 TSN 的关键技术。

IEC/TC 65。 2017 年 6 月, IEC/TC 65 (工业过程测量控制和自动化) /SC 65C (工业网络分委会) 成立 TSN 项目组, 与 IEEE 联合开展 TSN 国际标准《工业通信网络 行规 第 6 部分: 基于 IEEE 802.1 和 IEEE 802.3 的时间敏感网络 (TSN) 行规》的制定。

2019 年 7 月, 我国研制的工业物联网技术 AUTBUS 在 IEC/TC 65/SC 65C 成功立项。AUTBUS 是一种新型时间敏感的宽带工业物联网技术, 将

无线通信常用的正交频分复用 (OFDM) 技术引入有线工业通信领域, 解决了工业物联网最关键的确切性问题, 报文交付时间可达 8 微秒, 同时, 支持基于 IPV6 地址统一寻址, 可实现 IT 网络和 OT 网络的全 IP 化解决方案。

3.1.2 国内标准化组织

SAC/TC 28。全国信息技术标准化技术委员会数据通信分技术委员会 (SAC/TC 28/SC 6) 正在制定 2 项 TSN 的国家标准, 一是《信息技术 系统间远程通信和信息交换 局域网和城域网 桥接和桥接网络》(计划号: 20190835-T-469), 该标准修改采用 ISO/IEC/IEEE 8802-1Q:2016 国际标准。二是《信息技术 系统间的远程通信和信息交换 局域网和城域网 桥接局域网用时间敏感应用的定时和同步》(计划号: 20194195-T-469), 该标准修改采用 ISO/IEC/IEEE 8802-1AS:2014 国际标准。两项标准规定了 TSN 的关键技术和主要的协议机制。

SAC/TC 124。全国工业过程测量控制和自动化标准化技术委员会也在研究 TSN 在工业领域应用。正在制定《基于时间敏感技术的宽带工业总线规范 AUTBUS》(计划号: 20194001-T-604)。

CCSA。中国通信标准化协会 (CCSA) 也在进行确定性网络的标准化研究工作, 研制《超高精度时间同步接口要求》(计划号: 2019-1248T-YD)、《增强型同步设备时钟技术要求》(计划号: 2019-1250T-YD)、《路由域通用 YANG 数据模型技术要求》(计划号: 2019-1276T-Y) 相关通信行业标准。

3.2 行业技术组织

AVnu 一直致力于建立和推广 IEEE 802.1 AVB 网络标准, 建立了一整套一致性测试流程从而确保所有基于 AVB 网络架构的音视频设备之间的兼容性和互通性。联盟成员一同致力于将 TSN 标准应用于音视频、汽车、

消费电子以及工业。一旦厂家的产品通过了 AVnu 的测试，就可以在其产品上使用 AVnu 的标志。

OPC 基金会。2017 年，OPC 基金会开始关注 TSN 技术与 OPC UA 的融合问题。2018 年 5 月，成立新的工作组来识别 OPC UA 和 TSN 的协调需求，映射与包括 TSN 在内的以太网上的实时操作有关的 OPC UA 应用程序配置文件，与 IEC/IEEE 60802 工业自动化 TSN 配置文件相适配，并将 OPC 基金会的标准和规范扩展到现场，从而推动 OPC UA 在整个工业自动化中的采用。

在最近的工作计划中，OPC 基金会继续把 OPC UA 与 TSN 映射列为工作目标之一。把 OPC UA PubSub 的传输映射添加到 TSN，基于此映射，可以在 UA 应用程序之间进行确定性的数据交换。

3GPP。随着 5G 的快速发展，5G 和 TSN 融合也成为一项研究热点。在 3GPP Rel. 16 的规划中，3GPP 降低了 5G NR 的延迟，增加了可靠性，以便支持 5G 在时间敏感的工业场景下应用，更好地集成 5G 和 TSN。

EtherCAT 技术协会的《EtherCAT 与 TSN——工业以太网系统架构的最佳实践》白皮书于 2018 年发布。通过利用 TSN，多个工业控制器可以通过以太网网络与多个不同的 EtherCAT 网段进行实时通讯。TSN 还扩展了用于控制之间通讯的 EtherCAT 自动化协议 (EAP)，从而在控制层上更具有确定性。

3.3 小结

TSN 是 IEEE 802.1 工作组研究制定的一套标准协议。目前国内外标准化组织及行业协会等，均十分重视 TSN 技术及应用标准化工作。标准能够使 TSN 获得更大范围内的应用推广，为 IT 与 OT 融合、统一网络传输提供支撑。

四、应用场景

4.1 智能制造

4.1.1 现状

智能制造代表着先进制造技术与信息化的融合，概念提出至今仅 30 年，已发展到至今以万物互联为主要特征的网络化制造阶段。这一阶段依赖于生产系统、信息系统、工业应用、云等各系统间充分的协调及融合。而传统的工业网络结构由于 IT 和 OT 网络技术标准各异，底层数据链路无法打通，导致工业生产全流程存在大量“信息死角”，无法为大规模复杂数据的交互和传输提供一个完整的共性平台，TSN 网络在工业中的部署可以帮助解决这个关键问题。

TSN 提了一个可互操作的系统，并支持多个制造商、协议和机构在同一个网络上共享，同时数据使用相同的语言进行解析，使得更多企业可以在此架构上实现 OT 和 IT 的融合。使得过去人们对于 IT 与 OT 连接的各种障碍得以获得一个清晰而可行的解决之道，最终实现工业互联，在这个基础上，大数据应用、人工智能分析等才能被实现，在工业现场环境下，TSN 网络较工业以太网主要有以下几个优势：

一是同一的网络传输，提供了市面上更低成本的网络接口。

二是优于目前工业以太网的扩展性。TSN 对传输速率的定义灵活。可用于 100 Mbps，也可同样用于 1 Gbps、10 Mbps 或 5 Gbps。

三是 TSN 能够更好的优化拓扑结构，因为现在可以针对各个不同的区段选择与之相适应的数据速率。无论是 1 Gbps、100 Mbps 还是 10 Mbps，都使用统一的第 2 层——IEEE 802.1/TSN。

四是统一的网络基础设施易于建设和维护，因为通过 TSN，解决方案现在可以用于自动化以外的其它领域，如建筑、过程和工厂自动化以及能源分配等。

4.1.2 TSN 行业实现

工厂的运营者面对 TSN 网络部署的趋势，强调的重点都是如何让工厂的网络结构能够轻松顺利地过渡到 TSN。近年来各大厂商也提出了相应的协议解决方案来保障工业以太网协议不会在一夜之间消失。如 Powerlink on TSN、CC-LINK IE TSN 等，帮助当前正在使用 Powerlink、Profinet、CC-LINK IE 或类似普遍的工业以太网协议的工厂能够升级协议来兼容 TSN 网络方式。现有工业网络的接口由网关 (Sercos)、带耦合器 (EtherCAT) 或没有任何特殊硬件 (Profinet RT) 的接口组成。特别是 Profinet 和 EtherNet/IP 计划将其完整协议作为第 2 层用于 TSN，这使得现有的工厂以太网方式顺利过渡到 TSN 成为可能。

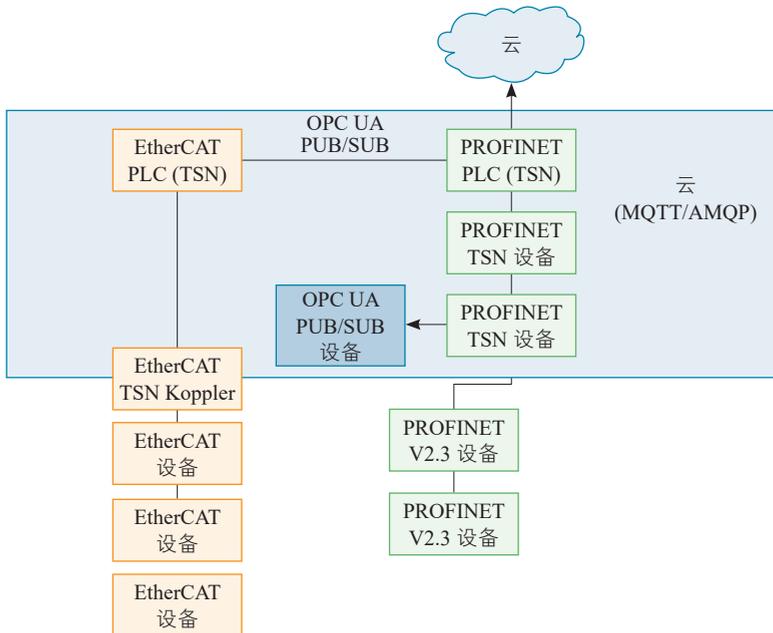


图 16 TSN 网络与 PROFINET 和 EtherCAT 相结合

随着 TSN 网络的继续发展,更多新的协议将会出现在工业以太网领域。对于现场设备的制造商来说,这意味着它们不得不同时支持传统的工业以太网解决方案以及 TSN 和新协议。

4.1.3 应用 TSN 的核心标准

主要应用于工业领域的 TSN 技术标准包括 IEEE 802.1AS 时钟同步、IEEE 802.1Qbv 时间感知调度程序、IEEE 802.1Qcc 网络管理和配置、IEEE 802.1CB 高可靠、IEEE 802.1Qci 逐一串流过滤与管理等。

未来 5 年,随着 TSN 技术不断的落地及推进,智能制造将会成为 TSN 技术主要应用的核心场景之一,第一批时间敏感型网络产品的部署实施也会让我们越来越接近智能制造新阶段这一事实。

4.2 车联网

4.2.1 现状

在智能网联汽车时代浪潮下,随着处理器运算能力和硬件的高速发展,使得许多创新在汽车环境下得到迅速推进,汽车电子产品在整车中所占比重也与日俱增,连接电子控制单元(ECU)的网络带宽需求也相应的增大,这一需求将远远超出控制器局域网络(CAN)等传统车载网络的容量极限。此外,伴随着车辆网联化、智能化的推进,云和大数据的运用,以及高级驾驶辅助系统(ADAS)的普及,构筑新电子网络总线平台已经成为新一代汽车的必然任务。

目前以太网在车内的主要应用形式还是点到点以太化总线连接方式,且总线各具特色、复用性差,导致车内网络结构复杂,通常一辆整车上需使用 5 至 14 种总线技术,繁杂的总线类型无法融合,在未来汽车电子化、智能化的趋势下,增加了设计难度和生产成本。如何构建统一的网络架构,

在混流的条件下，保证各种不同类型的流量对端到端传输，并满足时延、抖动、丢包率等需求，是车载智能平台遇到的技术难点。TSN 技术标准就是未来的解决方案。

4.2.2 TSN 行业实现

车载网络以高速以太网作为骨干网络，目前新的车内网络架构将核心域控制器（动力总成、车身、娱乐、ADAS）连接在一起。各个域控制器在实现专用的控制功能的同时，还提供强大的网关功能。这种基于域控制器的架构改变传统的车载网络中 ECU 到 ECU 的点到点通信方式，如：在车身控制域内部，各部件通过 CAN、LIN 沟通实现数据共享。在娱乐子网中，娱乐域控制器与其子部件的通信将通过以太网实现，当一个域需要与其他域交换信息时则经由网关、以太网路由实现。

而车载以太网协议架构对应 OSI 参考模型，主要分为物理层、数据链路层、网络层、传输层、应用层，每一层都有各自的功能，车载以太网的协议架构图和支持的应用协议及协议簇见图 17。

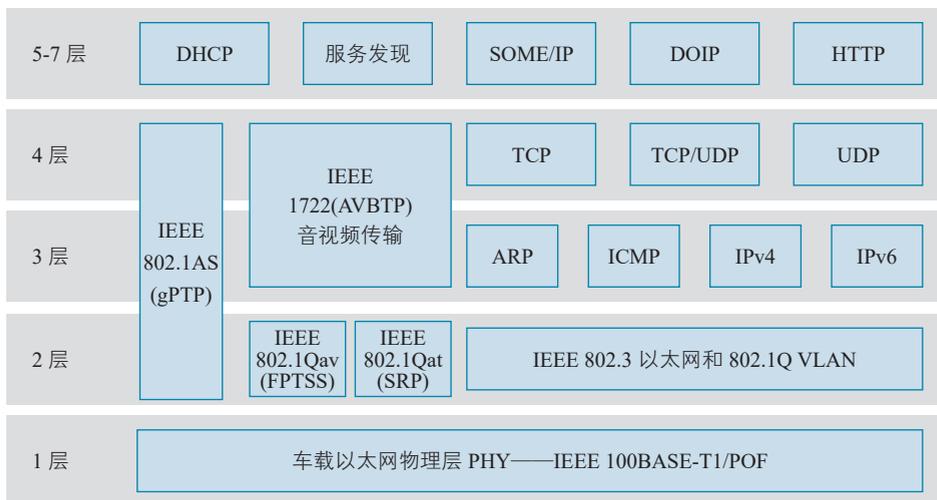


图 17 车载以太网协议架构图

基于以上架构，目前车载 TSN 网络，在现有的 IEEE 802.1 与 IEEE 802.3 以太网标准增加一系列的扩展功能，进一步确保其确定性效能。透过以太网实现的 TSN 架构由于能够增加产品的差异化、改善驾驶人的行车体验。为了广泛布署这项重要的技术架构，业界标准组织正为此车用网络技术进行标准化。

最终，一旦这些新的确定性功能尘埃落定后，将使 TSN 网络成为更具可行性的选择，从而取代目前汽车中所使用的传统网络，最终成为汽车的核心网络骨干，实现整车网络的融合统一。

4.2.3 应用 TSN 的核心标准

主要应用于车联网领域的 TSN 关键技术标准包括 IEEE 802.1AS 时钟同步、IEEE 802.1Qbv 时间感知调度程序、IEEE 802.1CB 高可靠、IEEE 802.1Qci 逐一串流过滤与管理标准。

未来随着 TSN 技术标准的更新与完善，及 TSN 技术成果转化的不断落地，TSN 技术在车载网络的应用将会成为未来车载网络构架主要趋势。

4.3 音视频

音视频制作、直播、广播、电影院、现场音乐会的公共广播媒体和应急系统等传输音频和视频信息的网络需要遵守严格的时序规则。如果音频或视频分组不能按指定的时序规则到达目的地，则接收设备（例如视频屏幕或扬声器）可能会发生视频帧被丢弃、音频伪像的情况。此外，这种网络还需要可预测的延迟，保证视频和相关音频流之间的同步。另一方面，足球赛事的实况转播有很多高清的数据要通过网络传输到处理中心，对带宽的需求极大。而且为了最大限度的提供实时性，这些图像、音频必须实现高实时的传输与处理，可以想象其对带宽和实时性的需求。

AVB 任务组成功解决了音频视频网络中数据实时同步传输的问题，借助 AVB 能较好的传输高质量音视频。随着技术标准的革新，在专业音视频领域，AVB 标准落后于专有竞争对手 Dante 数字音频传输技术，所以 TSN 是否是专业音视频领域的趋势还有待商榷。

4.4 小结

TSN 致力于适应于不同行业的通信需求，目前在智能制造领域得到了大力推广。TSN 能够为工业网络提供微秒级确定性数据传输，降低网络复杂度。虽然学术界和产业界认为 TSN 有着广泛的应用前景，但是目前 TSN 还没有实际的产业化应用，处于测试床阶段。

五、产业图谱

TSN 的技术趋于成熟，行业应用初见雏形。已有芯片厂商和设备厂商推出支持 TSN 特性的交换芯片和支持部分特性的 TSN 交换机。来自工业自动化和汽车领域的企业开始研究和应用 TSN 的解决方案。科研机构、标准化机构和测试厂商初步组成了“技术 - 标准 - 检测”产业技术路径。TSN 的产业图谱如图 18 所示。



图 18 TSN 产业图谱

5.1 TSN 芯片

主流半导体公司正积极在芯片级支持各类 TSN 网络终端设备和交换设备的开发。

荷兰恩智浦半导体（NXP Semiconductors）公司的 LS1028A 工业应用处理器内置了 TSN 转换器和 TSN 终端模块。德州仪器（TI）公司的 Sitara 处理器、瑞萨电子（Renesas Electronics）公司 RZ/N1D 处理器都内置了 TSN 支持。NXP 和亚德诺半导体（ADI）公司也推出了专用 TSN 交换芯片。赛灵思（Xilinx）等 FPGA 厂商，也提出了基于现场可编程门阵列（FPGA）的 TSN IP 核心解决方案。在可以预期的未来，基于 TSN 的以太网 MAC 将被普遍集成到各类嵌入式 SoC（System-on-a-Chip）芯片中。

5.2 网络设备

5.2.1 TTTech TSN 网卡

TTTech 推出 PCIE-0400-TSN 网卡。该网卡是一个基于 FPGA 的超薄型千兆以太网接口卡，支持 IEEE 802.1AS、IEEE 802.1Qbv、IEEE 802.1Qbu、IEEE 802.1Qcc 等标准，用于将工控机连接到符合 IEEE 802.1 TSN 的网络。PCIE-0400-TSN 具有四个 10/100/1000 Base-T 以太网端口，可用于从生产层到 IT 层的融合网络中构建确定性控制应用。

5.2.2 思科交换机

思科展出了（IE）4000 系列 TSN 交换机，该交换机为工业领域提供高带宽交换（第 2 层）和经过验证的基于 Cisco IOS 软件的路由（第 3 层）功能。IE 4000 系列交换机可承受极端环境，同时符合整体 IT 网络设计，合规性和性能要求。它们使用思科弹性以太网协议（REP）提供高度安全的访问并且支持工业协议。具有更高的整体性能，更大的带宽，更全面的

功能集和增强的硬件，可提供：具有 Cisco DNA 中心管理的扩展企业功能，并支持物联网的软件定义访问扩展。带宽和容量：40-Gbps 无阻塞交换容量，每个交换机最多 20 个千兆以太网端口；一个简单的，即用即付的软件升级路径，带有通用软件映像；它支持高密度工业有源以太网（PoE）/ PoE+ 支持，可为多达 8 个电源设备提供在线电源，如 IP 摄像头，电话或无线接入点。

5.2.3 赫斯曼交换机

2017 年百通（Belden）发布了其模块化管理的赫斯曼（Hirschmann）交换机类型 RSPE35 和 RSPE37 的软件更新，使得在这些交换机上实现 TSN 功能成为可能。此外，这两种 RSPE 类型的旧交换机也可以针对 TSN 技术进行升级。

根据 Belden 的说法，RSPE 产品系列的管理型交换机包括一个带有八个双绞线和四个组合端口的基本单元，可以通过各种媒体模块进行扩展。RSPE35 和 RSPE37 版本支持符合 IEEE 1588-2008 的精确时间协议（PTP），并具有 FPGA 模块，这意味着可以实现基于硬件的选择性冗余机制，如高可用性无缝冗余（HSR）、并行冗余协议（PRP）。

5.2.4 摩莎 TSN 交换机

摩莎（MOXA）推出 2 款 TSN 交换机 TSN-G5004 和 TSN-G5008，采用紧凑型设计，配有用户友好配置界面的全新 Moxa web GUI，简化了网络部署。支持 IEEE 802.1 AS，IEEE 802.1 Qbv 等 TSN 协议，并将进一步提供对其他 TSN 协议的支持。

5.2.5 研华 TSN 交换机

研华公司于 2020 年发布了 EKI-8500G 工业级 TSN 以太网交换机，采用 TSN 专用芯片设计，具备 8 个千兆 RJ45 端口 + 2 个千兆 SFP 端口。

支持 IEEE 802.1AS、IEEE 802.1Qbu、IEEE 802.1Qbv 和 IEEE 802.1CB 等 TSN 协议。

5.2.6 东土 TSN 交换机

东土推出 2 款 TSN 交换机 SICOM3000TSN、SICOM3028TSN 及基于基于 SDN 的时间敏感网络交换机的组网管理配置平台，具有完成 IEEE802.1Qbu、IEEE802.1Qbv、IEEE802.1Qci、IEEE 802.1Qch、IEEE 802.1Cr 等协议功能模块，工业现场级时间敏感网络交换机支持 8 口，提供 8 个千兆端口，其中包括两个千兆光口和 6 个千兆电口 10/100/1000BASE-TX；车间级时间敏感网络交换机支持 24 口，提供 24 个千兆端口，其中包括两个千兆光口和 22 个千兆电口 (10/100/1000BASE-TX)；2 个万兆光口；Console 接口支持 RJ45 接口，ALARM 接口支持 1 个 DI、1 个 DO。

5.2.7 华为 TSN 交换机

2018 年的汉诺威工业展上，华为展出了中国国内第一款 TSN 交换机样机，支持 IEEE 802.1AS 和 IEEE 1588v2 时钟同步协议，支持 IEEE 802.1Qbv（门控调度），IEEE802.1Qbu（帧抢占），IEEE 802.1Qci（流过滤），IEEE 802.1CB（无缝环网冗余）等 TSN 协议。同时打通了 OPC-UA 至 TSN 协议栈，并可通过 YANG 模型从网络控制器对网络中 TSN 交换机进行集中配置。样机集成了 8 个千兆（GE）TSN 端口，具有双电源备份功能。

5.2.8 新华三 TSN 交换机

H3C 推出 2 款 TSN 工业交换机 IE4320-10S-UPWR、IE4320-10S，同时支持基于 SDN 的时间敏感网络交换机的网络管理配置平台，目前已支持 IEEE802.1as，IEEE802.1Qbv，IEEE802.1Qcc 等 TSN 特性；具体性能

为：转发延时最低小于 10us 秒，时延抖动最高指标能达到正负 2us 内，802.1Qbv 门控精度可达到 ns 级。这两款设备可部署在工业现场和车间网络，支持 IP40 防护等级，包括 8 个千兆电口 + 2 个万兆光口，1 个 Console 接口（RJ45）和 1 个 ALARM 接口（1 个 DI，1 个 DO），IE4320-10S-UPWR 的 8 个千兆电口支持 POE 方式供电，工作环境温度满足 -25 ~ 55℃ 的要求。

5.3 测试床

5.3.1 贝加莱测试床

2017 年 SPS 贝加莱 (B&R) 展出 OPC UA over TSN 系统, 如图 19 所示。



图 19 2017 年 SPS 贝加莱展出 200 个 IO 站的 OPC UA over TSN 演示系统

该系统总计 200 个 I/O 站接近 10,000 个 I/O 点，5 个 1920*1280 的高清摄像头，采用 1 个工业 PC 和 2 个桥节点（TSN 交换机）连接，整个系统达到的性能为 100μs 的刷新速度、50ns 抖动、50μs 交叉通信能力。

截止 2019 年 11 月，贝加莱的 TSN 产品可批量化的产品为工业计算机（APC）和 X20BC008T 的 TSN 总线控制器，可以构成的拓扑架构如图 20 所示。

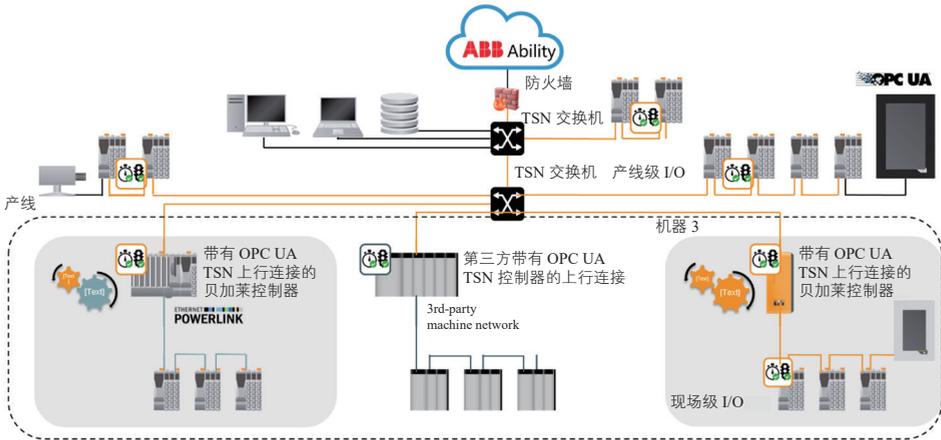


图 20 由 OPC UA over TSN 构成的机器 - 工厂至云端的网络连接架构

5.3.2 华科 + 电子标准院测试床

中国电子技术标准化研究院和华中科技大学 / 国家数字化设计与制造创新中心联合搭建的 TSN 测试床。测试床的网络拓扑如图 21 所示。

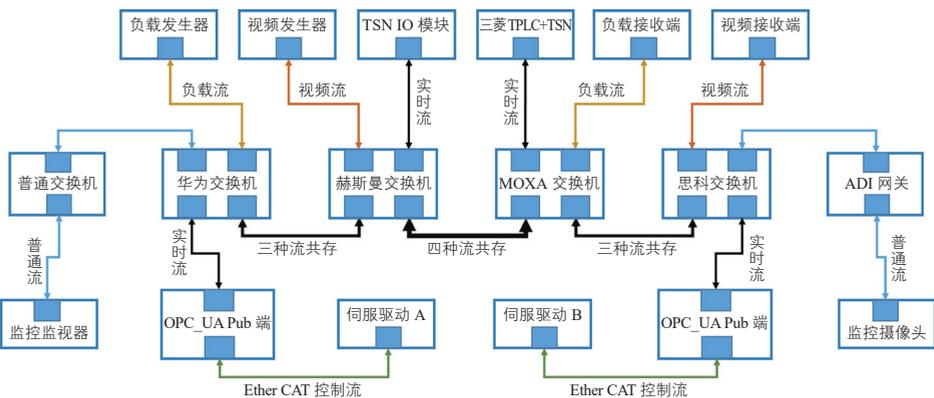


图 21 测试床网络拓扑

TSN 测试床交换机设备包括：

- 1) 1 台赫斯曼 TSN 交换机：RSPE37
- 2) 1 台赫斯曼 TSN 交换机：BRS40
- 3) 2 台思科 TSN 交换机：IE-4000-8GT4G-E
- 4) 1 台华为 TSN 交换机：AR550
- 5) 1 台 MOXA TSN 交换机：TSN-G5004
- 6) 2 台非 TSN 工业以太网交换机：

终端设备包括：

- 1) 1 套三菱电机自动化 Q 系列 PLC 和 CC-Link IE TSN 通信模块、TSN IO 模块。
- 2) 4 台支持 TSN 网卡的研华工控机。
- 3) 1 台支持 TTEch 公司 TSN 网卡的工控机。
- 4) 基于 ADI 公司 TSN 芯片的嵌入式 arm 工控主板
- 5) 基于 NXP 公司 LS1028A 的嵌入式 arm 工控主板

TSN 测试床当前主流的 TSN 交换机设备和终端设备，用于进行 TSN 设备的兼容性测试、互操作性测试，面向典型应用场景的网络配置和性能测试。

在兼容性和互操作性测试方面，目前主要针对 IEEE 802.1AS、IEEE 802.1Qbv 和 IEEE 802.1Qcc 的核心内容进行测试。

在网络延迟和抖动等性能测试方面，主要参照正在制定中的 IEEE 60802 标准，对 8 种类型网络流量的 QoS 进行测试。

表 3 8 种类型网络流量特性

流量类型	周期性	QoS	同步性	关键可靠性
等时同步流量 (Isochronous)	典型周期 50 μ s-2ms	严格时限(Deadline), 抖动要求高	有	高
周期同步流量 (CyclicSynchronous)	典型周期 100 μ s-2ms	有最大延迟要求	有	高
周期异步流量 (CyclicAsynchronous)	典型周期 2-20ms	有最大延迟要求	无	高
报警和事件流量 (Alarms and Events)	异步 / 偶发	有最大延迟要求	无	高
配置和诊断流量 (Configuration & Diagnostics)	异步 / 偶发	带宽	无	中
网络控制流量 (Network Control)	周期	带宽	无	高
尽力传输流量 (Best Effort)	异步 / 偶发	无	无	低
视频流量 (Video)	异步 / 偶发	有最大延迟要求	无	低
音频流量 (Audio/Voice)	异步 / 偶发	有最大延迟要求	无	低

5.3.4 IIC 测试床

工业互联网联盟 (IIC) 搭建了多个 TSN 测试床, 如柔性制造 TSN 测试床, 参与的厂商 / 技术组织超过二十多家, 包括了:

(1) 交换机和通信设备厂商: Belden/Hirschmann、Cisco、TTTech、摩莎 (Moxa) ;

(2) 测量和传感器、自动化厂商: 博世力士乐 (Bosch Rexroth) 、 B&R、库卡 (KUKA) 、美国国家仪器 (NI) 、菲尼克斯 (Phoenix Contact) 、施耐德 (Schneider Electric) 、Pilz、德国西克 (SICK) 、通

快（TRUMPF）、德国万可（WAGO）；

（3）半导体厂商：英特尔（Intel）、Xilinx、亚德诺半导体（Analog Devices）；

（4）通信测试仪器厂商：思博伦（Spirent）；

（5）研发机构和技术组织：弗劳恩霍夫光学微系统研究院（Fraunhofer IPMS）、ISW、Avnu。

IIC 基于测试床分别在美国和欧洲开展了多次互插拔测试（plugfest）活动。

5.3.5 LNI4.0 测试床

LNI4.0 是德国电气电子协会（ZVEI）、德国机械设备制造业联合会（VDMA）、德国信息技术、电信和新媒体协会（bitkom）等协会和西门子（SIEMENS）、思爱普（SAP）、费斯托（FESTO）等企业发起的技术组织，LNI4.0 搭建了多个面向数字制造的测试床，包括 TSN 测试床。该 TSN 测试床也得到了通信厂商和自动化厂商的广泛支持，目前开展了多次接口兼容性测试，重点包括 IEEE 1588-2008、IEEE Std 802.1AS 时钟同步协议测试和 IEEE 802.1Qbv 流量调度验证。目前，LNI 4.0 测试床正围绕制定中的 IEEE 802.1CS、IEEE 802.1Qdd，进行 TSN 网络分布式配置的验证实验。

5.3 小结

目前 TSN 产业初具规模，产业链包括了科研机构、标准化机构、芯片厂商、设备厂商、应用厂商和测试厂商。TSN 产品主要包括芯片、交换机等终端设备以及测试床。从 TSN 产业发展看来，国内外差距明显。大部分的 TSN 芯片厂商和设备厂商为国外企业。国内厂商主要以开发 TSN 交换机为主，但数量远远不及国外厂商。

六、展望

随着智能制造进入高速发展阶段，IT 与 OT 的不断融合，工业对网络传输实时性、统一网络架构的需求变得迫切。TSN 允许周期性与非周期性数据在同一网络中传输，并且能够提供实时可靠的数据传输服务，目前是国内外产业界正在积极推动的工业通信技术。

在技术标准方面，IEEE、IEC 等组织均在制定 TSN 关键技术以及应用于工业的底层互操作性标准与规范。在应用落地方面，自动化设备厂商、网络设备厂商纷纷推出符合相关 TSN 标准的芯片、交换机、终端设备等，加快推进了 TSN 协议标准的落地。随着 TSN 技术日趋完善，许多企业、组织尝试将 TSN 与其他信息技术进行融合，拓宽 TSN 的应用领域。总体来说，TSN 还处于技术攻关和产业落地的关键时期，因此有四点建议。

一是加大 TSN 芯片、网络设备的研发力度。目前国内厂商推出的 TSN 芯片、网络设备寥寥无几，面市的 TSN 交换机仅满足少数 TSN 标准。大力推进芯片、网络设备研发，对 TSN 技术成果及时进行转化，避免出现“缺芯”问题：

二是健全 TSN 标准体系，开展相关国家标准研制工作。继续依托 SAC/TC 28、CCSA、SAC/TC 124 开展 TSN 关键技术以及 TSN 在通信、工业等领域应用标准的研制工作，加强国际标准和国家标准的相关转化。注重标准技术组织之间的联络沟通，保障标准的协调一致。

三是加强 TSN 技术与新兴网络技术融合的研究工作，为智能制造、电力等领域提供综合解决方案。通过融合 TSN、5G、F5G 等高带宽网络技术，形成广义的时间敏感型骨干网络，提供低延迟接入机制。通过 TSN 与边缘计算平台的融合，为预测性维护、数字孪生等端 / 边 / 云协同等工

业应用提供支撑。

四是加快 TSN 行业应用推广，建设 TSN 的行业应用试点。TSN 在智能制造、车联网领域的应用前景可期，但目前实际应用较少。建议政府设立相关资金支持，鼓励企业，尤其是龙头企业联合上下游企业建设 TSN 行业应用试点，为 TSN 的大规模推广做好示范。

附件 1 缩略语

缩略语	中文含义
3GPP	第三代合作伙伴计划
5G	第五代移动通信技术
AF	应用程序功能
ATS	异步数据流整形器
AVB	音频视频桥接
CBS	基于信用的整形器
CFM	连通性故障管理
CNC	集中式网络配置
CUC	集中用户配置
CQF	周期性排队与转发机制整形器
DN	数据网络
EAP	自动化协议
EST	时间敏感流增强调度
FLC	现场层通信
F5G	第五代固定网络
gPTP	广义的精确时钟同步协议
GCL	门控制列表
HDMI	高清多媒体接口
I/O	输入和输出
IEEE	电子电气工程师学会
IETF	互联网工程任务组
IEC	国际电工委员会
IIRA	工业互联网参考架构
IP	网际互连协议
IT	信息技术

(续表)

缩略语	中文含义
LLDP	链路层发现协议
LRP	本地链路注册协议
MAC	媒体访问控制
MPLS	多协议标签交换
OFDM	正交频分复用
OSI	开放式系统互连
OT	运营技术
PDU	分组数据单元
PSFP	单流过滤和管控机制
QoS	服务质量
SDN	软件定义网络
SPS	半持续性调度
SRP	流预留协议
TAS	时间感知的整形器
TTE	时间触发以太网
TSN	时间敏感网络
UML	统一建模语言
VLAN	虚拟局域网



时间敏感网络白皮书

- 📍 北京市东城区安定门东大街1号
- 📮 100007
- ☎ 张弛 010-64102830
- ✉ zhangchi1@cesi.cn