

# 时间敏感网络(TSN)产业白皮书

## (征求意见稿)

工业互联网产业联盟 (AII)

2019 年 10 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：aia@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。



# 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 .....	3
1.	技术现状 .....	3
2.	产业现状 .....	3
(三)	时间敏感网络技术优势 .....	7
1.	互联互通 .....	7
2.	全业务高质量承载 .....	7
3.	智慧运维 .....	8
(四)	时间敏感网络产业驱动力 .....	9
二、	技术体系 .....	11
(一)	标准体系 .....	11
1.	IEEE .....	11
2.	IEC .....	13
3.	IETF .....	13
(二)	时间敏感网络架构 .....	15
1.	工业互联网网络整体架构 .....	15
2.	时间敏感网络逻辑架构 .....	15
3.	时间敏感网络功能架构 .....	17
(三)	时间敏感网络关键特性 .....	19
1.	时间同步 .....	19
2.	流量调度 .....	20
3.	网络管理 .....	21
4.	安全可靠 .....	24

三、	与其他新技术的融合创新 .....	27
(一)	TSN+OPC UA .....	27
(二)	TSN+边缘计算 .....	28
1.	业务需求 .....	28
2.	技术融合 .....	28
3.	应用融合 .....	34
(三)	TSN+5G .....	37
1.	TSN 与 5G 融合的工业需求分析 .....	37
2.	TSN 与 5G 融合的研究现状 .....	38
3.	TSN 与 5G 融合的关键技术挑战 .....	39
4.	TSN 与 5G 融合的演进路线展望 .....	39
四、	应用场景 .....	41
(一)	TSN 在制造业工业网络中的应用 .....	41
(二)	TSN 在车载以太网中的应用 .....	43
1.	车载网络背景概述 .....	43
2.	车载网络以太化的意义 .....	43
3.	TSN 对车载以太网的推动 .....	44



# 一、背景介绍

## （一）工业网络演进概述

工业网络是工业互联网体系架构的基础，主要包括工业控制网络和工业信息网络两个部分，其范畴涵盖工业企业需要网络化支撑的生产、管理、销售、办公等各个环节。

传统的工业网络主要聚焦于工业控制领域，主要包括单点设备控制技术（模拟仪表控制、直接数字控制、集散控制）和现场总线控制技术。现场总线通信协议标准及物理接口种类繁多，彼此之间通信兼容性差，物理接口不统一，这些问题很大程度上制约了工业网络互联互通的发展。工业以太网技术遵从TCP/IP框架，具有接口简单、协议开放、互通便捷等突出优势，逐步成为行业主流技术，已经形成了多个有影响力的国际标准，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

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，针对工业控制网络进行持续优化

升级，但彼此之间相对封闭。

随着工业企业数字化及信息化的进一步深化升级，工业控制网络与工业信息网络呈现融合趋势，未来工业内有线连接将被具有以太网物理接口的网络主导，同时基于通用标准的工业以太网逐步取代各种私有的工业以太网，并实现控制数据与信息数据同口传输。时间敏感网络技术作为一种综合、统一和标准的新兴工业以太网技术，正在打破过去以协议为维度由某一厂商主导的局面，使得工业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

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下一代工业网络承载技术的重要演进方向之一。

在时间敏感网络（TSN）标准的制定过程中，主要由IEEE802工作组TSN负责相关基础协议的制定和应用推进。同时，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。



图 1 时间敏感网络标准关键路标

### 2. 产业现状

目前 TSN 技术已经成为产业链各个环节关注热点：



图 2 时间敏感网络产业现状示意

## 1) 行业组织相关进展

众多独立第三方组织开始积极参与 TSN 标准的测试、推广及产品认证等各项工作。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。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。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。

除此之外，一些制造业的自动化产品厂商（如：B&R）还在去年成立了一个名为 OPCUA TSNShaper 的会议组织，目前来自各行业的产品和服务供应商已经加入到了该组织中，共同推广基于 TSN+OPCUA 协议标准的融合应用。

## 2) 传统自动化厂商

自 2017 年下半年起，在德国纽伦堡工业自动化展览会（SPSIPC Drive）和汉诺威工业展上，不少厂商开始就其产品 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。例如：

- 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，并计划在 2019 年中发布该协议或相关产品。在最近两年的汉诺威展上西门子演示基于 TSN 的 OPCUAPub/Sub 技术在控制层（如机器人）上的应用；
- 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。

### 3) 通信设备厂商

- 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，并在其中提供了 TSN 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。

#### 4) 芯片厂商

- 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。
- 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。
- e) TTEch、SoCe、Xilinx 等公司也已公开宣称可以提供 TSN 相关的芯片 IP core。

### （三）时间敏感网络技术优势

#### 1. 互联互通

时间敏感网络（TSN）技术遵循标准的协议体系，具有更好的互联互通优势。如图 3 所示，传统的通用以太网，开放性好（便宜）、互操作性好，但性能不能满足工业应用要求；传统的工业以太网，为了满足确定性时延等工业场景中的要求，对网络协议进行了专门定制化开发，并需要专用硬件的支持。这样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。而基于通用以太协议的 TSN 技术，在提供确定性时延、带宽保证等能力的同时，给出了一个标准的、开放的二层，改进了互操作性，同时降低了成本。

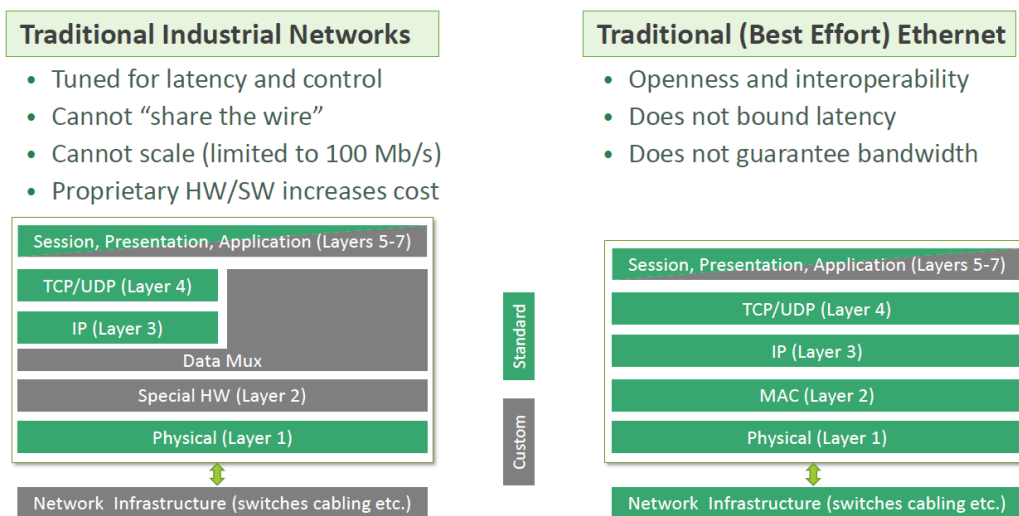


图 3 传统工业网络和以太网的比较

#### 2. 全业务高质量承载

TSN 为原有的分层的、相对隔离的工业网络架构进行扁平化的融合提供了可能，同时支持不同类型的业务流在这张扁平化的工业网络上实现混合承载。时间敏感网络（TSN）技术系列标

准中所定义的队列调度等数据面相关的机制，为二层网络保证不同等级的业务流的差异化的服务需求提供了可能，进而使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。

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



#### （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体系的搭建。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

TSN 技术相应基础共性标准主要由 IEEE802.1 TSN 工作组研究制定。其负责定义 802 架构体系中的网间互操作、安全性和整体网络管理等方面的标准制定和应用推荐。

自 2015 年开始，IETF 开始关注时间敏感网络技术在大规模组网场景下的应用，将其从二层承载扩展到三层网络，即确定性网络（Detnet）并与 IEEE802.1Q 相关工作组开展联合研究。

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，2017 年 9 月 IEEE 与 IEC 联合成立了 60802 工作组专注于 TSN 在工业领域的应用研究。

#### 1. IEEE

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。

IEEE 802.1 TSN 工作组也会定义 TSN 用于不同垂直行业的应用类标准。如已经完成的 802.1CM 项目定义了 TSN 应用于移动前传网络的标准。2018 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。

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

标准编号	标题	状态
IEEEStd 802.1AS-2011	时间敏感应用的时间同步 Timing and Synchronization	2017 年 6 月 12 日发布
IEEEStd 802.1Qbu-2016	帧抢占 Frame Preemption.	2016 年 8 月 30 日发布
IEEEStd 802.1Qbv-2015	预订流量的增强功能 Enhancements for Scheduled Traffic.	2016 年 3 月 18 日发布
IEEEStd 802.1Qca-2015	路径控制和预留	2016 年 3 月 11 日发布
IEEEStd 802.1Qch-2017	Cyclic Queuing and Forwarding	2017 年 6 月 28 日发布
IEEEStd 802.1Qci-2017	Per-Stream Filtering and Policing.	2017 年 9 月 28 日发布
IEEEStd 802.1Qcc-2018	Stream Reservation Protocol ( SRP ) Enhancements and Performance Improvements	2017 年 10 月 31 日发布
IEEEStd 802.1Qcp-2018	YANG Data Model.	2018 年 9 月 14 日发布
IEEEStd 802.1CB-2017	无缝冗余	2017 年 9 月 28 日发布

IEEE Std 802.1CM-2018	Time-Sensitive Networking for Fronthaul	2018 年 5 月 7 日发布
-----------------------	---	------------------

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。在 IEEE 其主要的特性集中在时间同步、流量调度、网络管理以及安全可靠四大类。

## 2. IEC

IEC（International Electrical Commission，简称 IEC）与时间敏感网络相关的标准工作项目及其他主要工作内容包括：

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。

## 3. IETF

IETF 是 Internet 工程任务组（Internet Engineering Task Force）的简写。成立于 1986 年，是推动 Internet 标准规范制

定的最主要的国际标准化组织。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）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。

表 3 IETF 已经发布的 DetNet 相关标准

标准编号	标题	状态
RFC 8557	<b>Deterministic Networking Problem Statement</b>	2019 年 5 月发布
RFC 8578	<b>Deterministic Networking Use Cases</b>	2019 年 5 月发布

## （二）时间敏感网络架构

### 1. 工业互联网网络整体架构

传统的工业网络不能够满足工业互联网场景下设备、网络、系统所构成的物质世界与有连接数据分析的数字世界的融合需求。工业互联网场景下的互联互通，不仅需要实现控制网络中各业务单元的互通，还需要打通从现场控制到云端的数据通路。

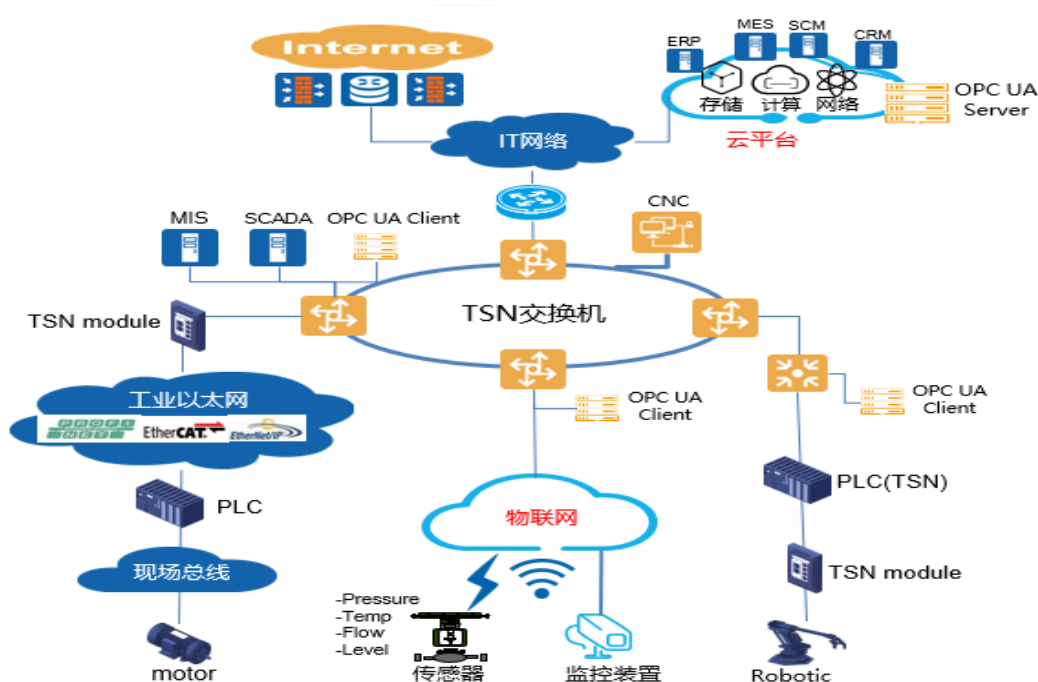


图 4 工业互联网网络整体架构

时间敏感网络将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、负责采集海量工业数据的物联网、以及需要高质量纯属的新型工业应用，承载各类控制和运行维护流量。

### 2. 时间敏感网络逻辑架构

时间敏感网络技术在工业互联网领域的应用主要定位于实

现工厂内网控制网络（OT）中各生产单元之间，控制网络与信息网络（IT）之间的互联互通。如下图

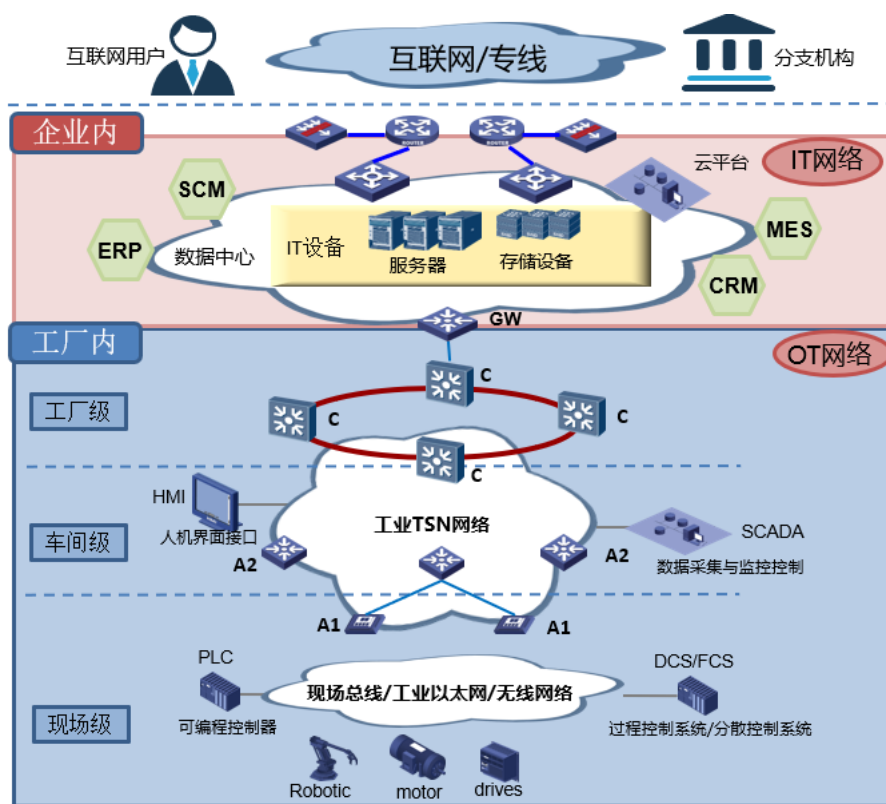


图 5 工业互联网网络整体架构

第一阶段 TSN 的部署将定位于实现工厂内网络的互联互通，根据应用场景及网元在网络中的位置，将 TSN 设备分为网关、桥设备、端设备三个角色。

网关设备主要部署于时间敏感网络域边缘，支持在数据链路层、网络层及应用层实现跨时间敏感网络域及时间敏感网络域与非时间敏感网络域之间的互通。

网桥设备主要部署于时间敏感网络域内部，实现时间网络域内部业务单元（车间、产线、设备）的互联互通。建议以三层架构部署网桥设备，即核心、汇聚、接入层设备。核心层设备部署于工厂级机房，实现工厂内部各车间之间的互联互通；



汇聚层设备部署于车间级机房实现车间内部不同产线之间、集中式控制器与设备之间的互联互通；接入设备部署于生产现场实现现场设备、传感器等通信接口的通信协议转换并与控制器、检测监控装置进行互联互通。

端设备则指具备时间敏感网络功能的工业设备，包括控制器、PLC、伺服、I/O 等设备。

### 3. 时间敏感网络功能架构

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。

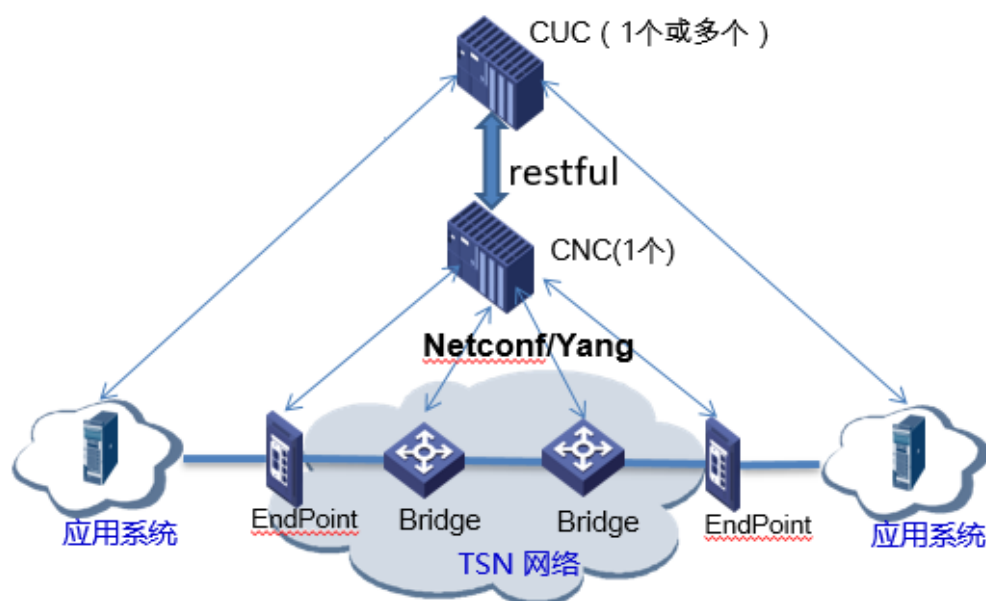


图 6 工业互联网网络整体架构

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

TSN 提供流量的延迟保证的关键特性之一是时间同步, 流量控制和管理组件 (例如 802.1qbv 和 802.1qcc) 利用时间同步来提供准确的有界延迟, 以及为 TSN 应用提供 0 阻塞丢包 (几乎是极少丢包) 和时延抖动。802.1as 提供了可靠准确的网络时间同步, 该标准所规范的协议严格保证了时延敏感的业务 (声音、视频等) 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。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间同步机制的维护。

与 IEEE 1588 一样, 精确时钟协议 (PTP) 定义了一个自动协商网络主时钟的方法, 即最优主时钟算法 (Best Master Clock Algorithm, 简称 BMCA)。BMCA 定义了底层的协商和信令机制, 用于标识出局域网内的主时钟 (Grandmaster)。一旦主时钟被选定, 所有局域网节点的 PTP 设备将以此主时钟为参考值, 如果 Grandmaster 发生变化, 整个网络也能通过 BMCA 在最短时间确定新的主时钟, 确保整个网络保持时间同步。802.1AS 的核心在于时间戳机制 (Timestamping)。PTP 消息在进出具备 802.1AS 功能的端口时, 会根据协议触发对本地实时时钟 (RTC) 的采样, 将自己的 RTC 值与来自该端口相对应的主时钟 (Master) 的信息进行比较, 利用路径延迟测算和补偿技术, 将其 RTC 时钟值匹配到 PTP 域的时间。当 PTP 同步机制覆盖了整

个局域网，各网络节点设备间就可以通过周期性的 PTP 消息的交换精确地实现时钟调整和频率匹配算法。最终，所有的 PTP 节点都将同步到相同的 Grandmaster 时间。在最大 7 跳的网络环境中，理论上 PTP 能够保证时钟同步误差在  $1\mu\text{s}$  以内。

## 2. 流量调度

TSN 在做二层帧的转发、队列调度时，需要考虑工业中各种业务流的特性，作为选择调度机制与优先级的依据。

工业网络中的流量类型众多，并没有统一的分类方法。错误!未找到引用源。7 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
Isochronous	Periodic	< 2ms	Yes	Deadline	0	None	Fixed: 30 - 100 Bytes	High
Cyclic	Periodic	2 - 20ms	No	Latency	$\leq$ 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 7 工业自动化网络中的典型流量

其中，同步实时流 (Isochronous real-time traffic) 对时延的要求最高。同步实时流常用于运动控制 (Motion control)，该类流的特点包括：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

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）。模型如错误!未找到引用源。8:

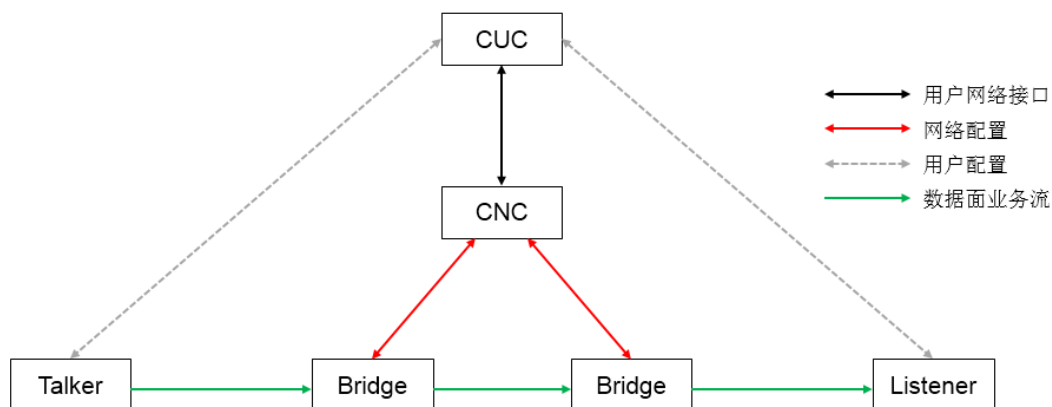


图 8 TSN 集中式配置模型

Talker、Listener 分别是数据流的发送方和接收方；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；CNC（集中式网络配置，Centralized Network Configuration）控制器与 CUC（集中式用户配置，Centralized User Configuration）控制器不一定为独立的实体设备，可作为软件功能模块，如嵌入交换机系统中。

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 8 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 8 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 8 中的灰色虚线代表 CUC 收集用户信息、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。

**混合式配置模型**（分布式用户、集中式网络配置模型）使用集中式网络配置控制器（CNC，Centralized Network Configuration controller）。控制面模型如图 9：

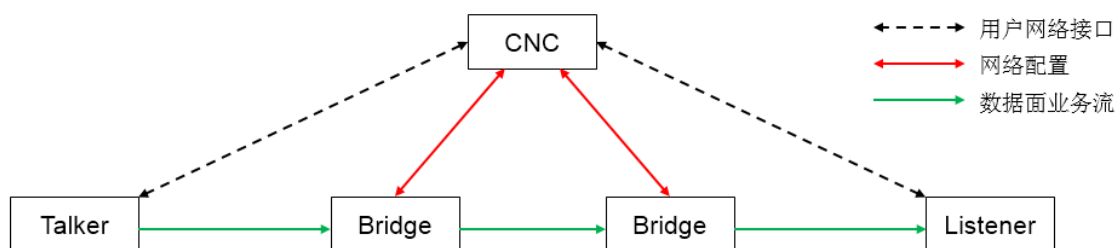


图 9 TSN 混合式配置模型

Talker、Listener 分别是数据流的发送方和接收方；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；CNC（集中式网络配置，Centralized Network Configuration）控制器与 CUC（集中式用户配置，Centralized User Configuration）控制器不一定为独立的实体设备，可作为软件功能模块，如嵌入交换机系统中。

一般的，混合式配置模型的控制面工作流程如下：新增数



据流时，Talker、Listener 将用户需求信息告知 CNC，即图 9 中黑色虚线（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 9 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。

由此可见，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。

- 全分布式配置模型

全分布式配置模型无需 CUC、CNC，控制面模型如图 10：

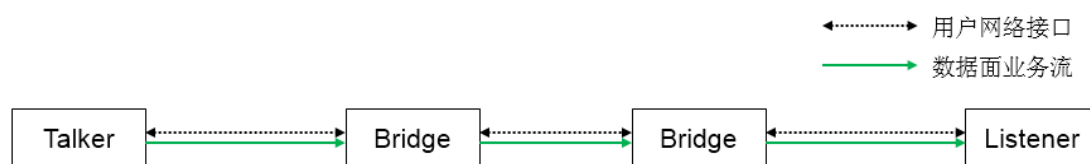


图 10 TSN 分布式配置模型

Talker、Listener 分别是数据流的发送方和接收方；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。

一般的，混合式配置模型的控制面工作流程如下：新增数据流时，Talker 使用一种资源预留协议，该协议报文携带了用户需求信息，逐跳传输，直到抵达 Listener；传输过程中，路径上的 Bridge 都获得了该用户需求信息，并判断是否可以为该流进行资源预留；Listener 若愿意接受该 Talker 发送的信息，则发送该资源预留协议所定义的报文，沿原路返回 Talker；任何时候，若有一个 Bridge 判断带宽不足以为该流进行资源预留，

则资源预留过程失败；资源预留成功后，Talker 可以正式发送业务数据给 Listener。

分布式配置模型的用户网络接口在数据模型的定义上与混合式配置模型基本相同，但分布式配置模型需要额外定义一种资源预留协议的功能。

4. 安全可靠

时间敏感可靠性由 IEEE802.1CB 协议定义（帧复制和消除），能够支持无缝数据冗余，它能够检测并减轻由于循环冗余校验（CRC）错误、断线以及连接松动所引起的问题。时间关键型数据帧被进行扩展以包括一个序列号，并在每个帧遵循网络中的一条单独路径的情况下进行复制。在网络中的任何网桥或合并点上，当这些单独的路径再次汇合到一起时，将从数据流中消除重复的帧，从而允许应用程序无损接收数据帧。

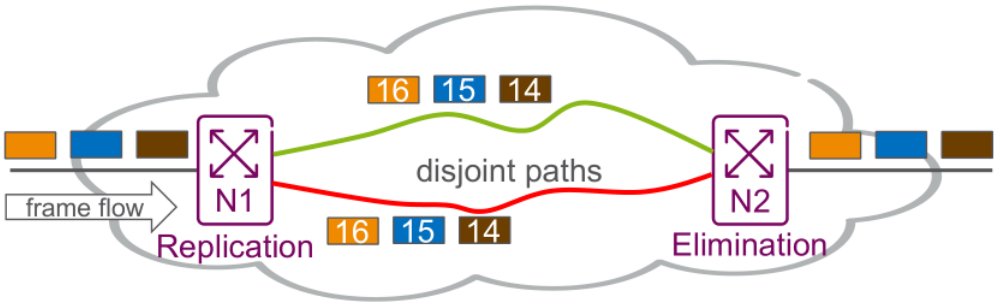


图 11 802.1CB 协议机制

802.1CB 定义了冗余标签，用于发送和识别消除复制的报文。协议类型取值为 0XF1C1

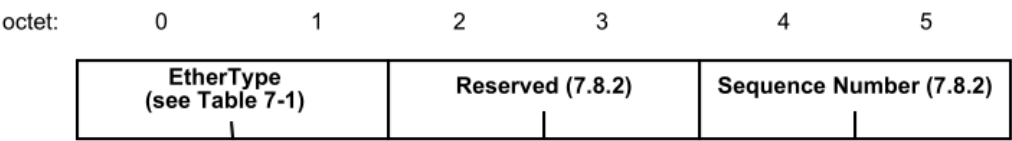


Figure 7-4—R-TAG format



图 12 R-TAG 格式

序号生成器的值则从 0 开始，将生成的值拷贝到报文中后，增量加 1，当达到最大值后，翻转为 0。流分裂功能将带有序号的报文复制相同的为 1 份或者多份，从不同的端口发出，通过冗余的链路转发。流恢复算法则负责通过相关算法恢复受损业务流量。

时间敏感网络的安全由 IEEE802.1Qci 协议保证，作为 TSN 标准安全协议的一部分，基于流过滤和管制，主要为防止网络攻击和流量过载设计，又称之为 Ingress Policing，它对每个流量都进行过滤和管理，简称 PSFR，数据流滤波器包括数据 ID、优先权、滤波值、Meter（计量）ID、计数器。这项技术还能够检测报文是否在允许通过的时间段内接收到，如果不满足条件，报文就会在引发任何影响之前被过滤和丢弃。802.1Qci 可以对付 DDoS 这样的网络攻击，假如一个数据流流量突然增大，有可能挤压另一个数据流的带宽时，入口管理策略会将数据流整形。流程图如下：

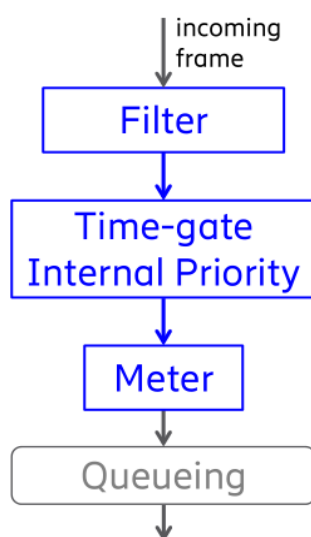


图 13 802.1Qci 流程图

在 TSN 网络中，MACsec (Media Access Control Security, MAC 安全) 保护网络中的各种数据流量。MACsec 定义了基于 IEEE 802 局域网的数据安全通信的方法。MACsec 可为用户提供安全的 MAC 层数据发送和接收服务，包括用户数据加密、数据帧完整性检查及数据源真实性校验。MACsec 通常与 802.1X 认证框架配合使用，通过使用 MKA (MACsec Key Agreement, MACsec 密钥协商) 协议协商生成的密钥对已认证的用户数据进行加密和完整性检查，避免端口处理未认证设备的报文或者经过篡改的报文。



## 三、与其他新技术的融合创新

### （一）TSN+OPC UA

TSN 仅仅是为以太网提供了一套 MAC 层的协议标准，它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；而如果要真正实现网络间的互操作，还需要有一套通用的数据解析机制，这就是 OPC UA。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，确保了在一个系统中来自不同厂家的多种设备可以方便快捷高效地进行协作，将会在带宽、安全、互操作、延迟和同步等方面带来巨大改善，可以满足工业应用的各种传输需求。

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。

## （二）TSN+边缘计算

### 1. 业务需求

随着网络带宽快速提升，以及计算、存储成本的快速下降，极大促进了物联网、云计算、大数据、AI 等技术的发展。这些信息技术，促进了全球进入了数字化浪潮，数字化转型成为企业未来发展的关键能力，各行各业进入了智能发展时代。一方面，数字化浪潮带来了海量的数据，带来了工业的 OT 和 ICT 的极大融合，以及泛在电力物联网的建设和车联网等行业的发展也极大促进了边缘计算、云边协同等技术的起步。另一方面这些技术想要在行业得到更广泛、更深度的应用，对传统以太网提出了更高的要求。边缘计算和 TSN 的相互结合，在本质上是相互依赖的，和其他 IT 技术一起，给各个行业带来深度的变革。

### 2. 技术融合

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、应用核心能力的分布式开放平台，就近提供边缘智能服务，满足行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。它可以作为联接物理和数字世界的桥梁，使能智能资产、智能网关、智能系统和智能服务。边缘计算包括如下特性：

首先，联接性是边缘计算的基础。所联接物理对象的多样性及应用场景的多样性，需要边缘计算具备丰富的联接功能，如各种网络接口、网络协议、网络拓扑、网络部署与配置、网络管理与维护。联接性需要充分借鉴吸收网络领域先进研究

成果，如 TSN、SDN、NFV、Network as a Service、WLAN、NB-IoT、5G 等，同时还要考虑与现有各种工业总线的互联互通。

其次，边缘计算作为物理世界到数字世界的桥梁，是数据的第一入口，拥有大量、实时、完整的数据，可基于数据全生命周期进行管理与价值创造，将更好的支撑预测性维护、资产效率与管理等创新应用；同时，作为数据第一入口，边缘计算也面临数据实时性、确定性、多样性等挑战。

再次，边缘计算产品需适配工业现场相对恶劣的工作条件与运行环境，如防电磁、防尘、防爆、抗振动、抗电流/电压波动等。在工业互联场景下，对边缘计算设备的功耗、成本、空间也有较高的要求。边缘计算产品需要考虑通过软硬件集成与优化，以适配各种条件约束，支撑行业数字化多样性场景。

最后边缘计算实际部署天然具备分布式特征。这要求边缘计算支持分布式计算与存储、实现分布式资源的动态调度与统一管理、支撑分布式智能、具备分布式安全等能力。

### （3）TSN 对于边缘计算的支撑作用

在 AII 发布的《边缘计算参考架构 3.0（2018 年）》中，网络是边缘计算网络架构中必不可少的一部分。



图 14 边缘计算网络架构

TSN 在异构计算、存储、边云协同以及安全性四个方面增强了边缘计算能力：

异构计算 HC 是边缘侧关键的计算硬件架构，边缘计算节点包含了不同种类和数量的计算单元。为了充分利用边缘设备的计算能力，业界在不断优化业务模型。一个方向是将复杂计算自顶向下分解成各个模块，分别单独计算，再把计算结果合成起来输出最终结果。另一个方向是自底向上，即设计新的算法系统，能够分布在各种边缘嵌入式设备中，形成融合计算能力。显然，在 TSN 网络下，异构计算能力更为有保证。

复杂的边缘计算设备必须提供存储能力，尤其是在有大量数据产生的现场，数据要能够保证快速、持久地写入和查询等。边缘计算设备可能自身携带的存储介质有限，更多地通过 IP 网络连接存储介质。只有在 TSN 网络的支撑下，边缘计算设备才能更好地提供这些服务。

边缘计算和云计算之间不是替代关系，而是互补协同关系，涉及 IaaS、PaaS、SaaS 各层面的协同，包括资源协同、数据协

同、智能协同、应用管理协同、业务管理协同、服务协同。这些协同肯定有实时性要求，一个没有延迟界限的服务是没有意义的。在 TSN 网络支撑下，这些云边之间的协同变得稳定可靠，才能形成一个有效的系统。

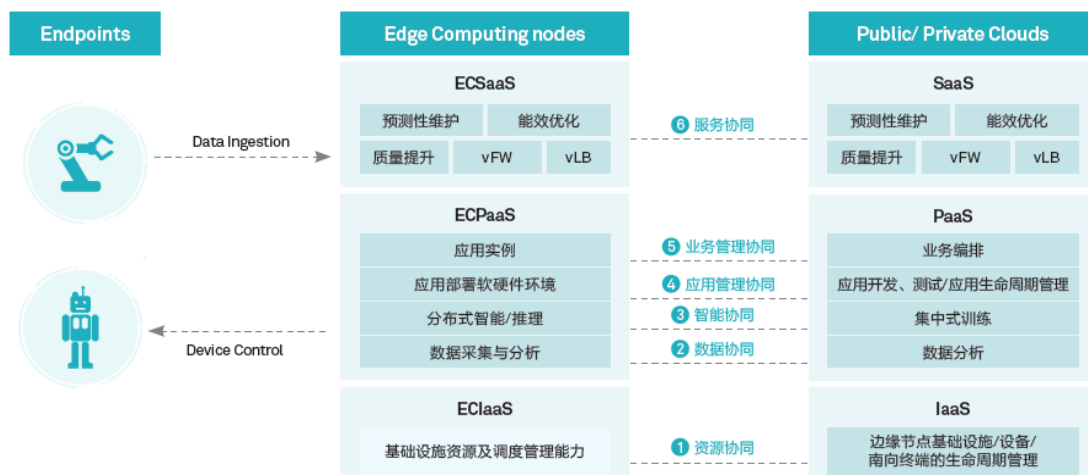


图 15 边云协同架构

边缘计算位于网络侧边缘，需要接入各种各样的物联网终端以及人的访问，因此对设备安全、网络安全、数据安全、应用安全都提出了很大的挑战。TSN 网络从设计上就带有安全性质，能够保证数据被安全地传输，这在一定程度上减轻了边缘计算网络的安全负担。当边缘计算节点都架构在 TSN 网络上时，边缘计算节点之间的计算、存储、数据流动都能得到一定的安全保证，就可以减轻整个系统的设计复杂性，从而降低成本。

#### （4） TSN 与边缘计算发展的相互促进

ICT 技术总共包含四个要素：网络、计算、存储、应用，边缘计算和 TSN 已经成为这些要素中的新的力量，带动了 ICT 新形态的变革，同时驱动 ICT 向各行各业深入发展，引发智能化变革。



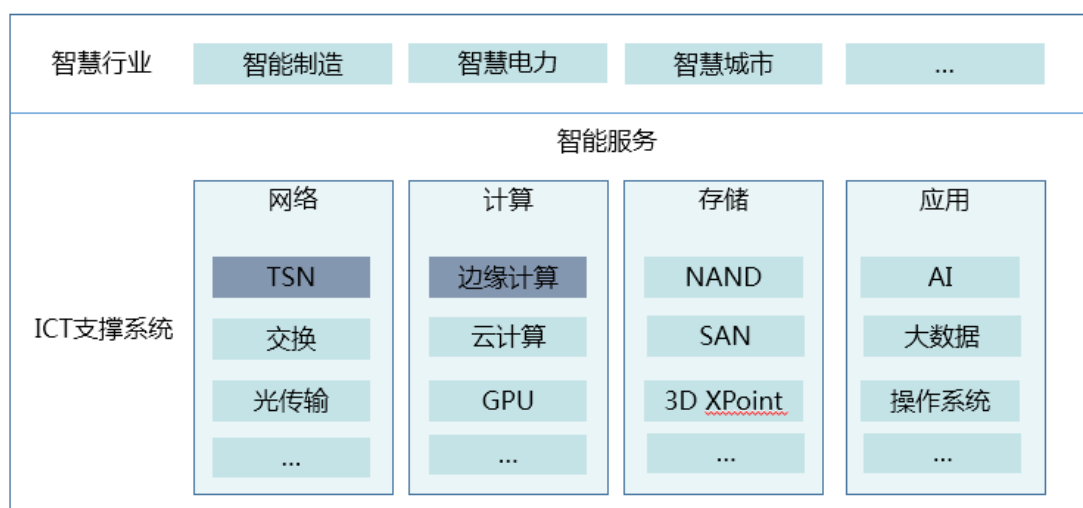


图 16 TSN 与边缘计算的逻辑关系

边缘计算在一定程度上依赖 TSN，反过来，企业部署 TSN 后，会促进终端向智能化方向发展，又会促使边缘计算的产生和部署。大部分企业通过不停升级网络和基础硬件设施，最终网络将会同时部署 TSN 和边缘计算。

#### （5）融合模式

在这个数字化是基础，网络化是支撑，智能化是目标的时代，TSN 和边缘计算有着天然融合。边缘计算又是数字化转型必不可少的部分，我们要实现边缘计算需要 TSN 保证数据传输的实时性，准确性。目前 TSN 与边缘计算的融合模式可以分为 TSN 网络设备融合边缘计算能力及 TSN 网络部署融合边缘计算能力两种模式。

其一，对于网络设备融合边缘计算能力，我们可以在网络中部署具备 TSN 能力的边缘计算网关设备，也可以部署具备边缘计算能力的 TSN 设备来实现。

其二，对于 TSN 网络部署方案中融合边缘计算能力模式，我们可以通过在网络中部署 TSN 设备，同时在网络边缘侧部署



具备边缘计算能力的服务器或控制器来实现。

通过以上两种方式融合，我们可以最终实现云计算到网络边缘的迁移，实现边缘计算就近处理。边缘计算和 TSN 融合将有助于解决边缘计算在工业应用中的下面关键技术：

数据采集是工业互联网的基础能力，也是构建边云协同的第一步。虽然在边缘侧的传感器、执行器也可以作为数据的采集对象，但目前控制器是主流的数据采集对象。工业互联网网关是当前行业内应用比较广泛的数据采集工具，通过控制器支持的驱动协议来采集所需数据，并将数据推送至云平台。市场上网关厂家较多，对 PLC、CNC 等通用控制器的支持较完善，但对私有设备一般需要进行采集协议的定制化开发。网关服务既可以部署在独立的硬件盒子，也可以作为云平台的一项微服务组件嵌入现场设备，使设备入云更加方便快捷。

实时数据是边缘侧监控系统的重要组成部分，是一种带有时态性的数据。实时数据带有严格的时间限制，一旦处于有效时间之外，数据将变得无效，会变成历史数据并存储下来以备后续使用。实时数据分析主要针对工业生产现场当前运行状态进行的信号及数据分析，应用场景如机理模型、设备健康度诊断、设备短期 KPI 等。其作用在于通过边缘计算对数据进行预处理（筛选、聚合、分析等），从而为后续的大数据分析提供可靠的数据基础。该技术在工业资产管理软件、工业控制器、自动化数学工具、机理模型软件中应用比较广泛。

### 3. 应用融合

智能制造：随着消费者对产品需求的日益提高，产品的生命周期越来越短，小批量多批次，具有定制化需求的产品生产模式将一定程度替代大批量生产制造模式，先前制造体系严格的分层架构已经无法满足当前的制造需求，以某消费电子类产品的制造生产线为例，采用 PLC+OPC 的模式构建，由于订单种类增加，单批次数量减少，导致平均每周的切单转产耗时 1~2 天；新工艺升级每年至少 3 次、设备更替每年近百次，导致的控制逻辑/工序操作重置、接口配置耗时约 5~12 周，严重影响了新产品上线效率。另外制造智能化也是中国，美国，德国等世界主要制造大国未来 10 年的发展方向，以中国为例，到 2025 年制造业重点领域全面实现智能化，试点示范项目运营成本降低 50%，产品生产周期缩短 50%，不良品率降低 50%，制造智能化首先需求加强制造业 ICT 系统和 OT 系统之间的灵活交互，显然先前的制造体系也无法支撑全面智能化。

边缘计算有助于制造商将由机器生成的大量数据集转化为具有洞察力和可操作性的数据。它通过利用连接到网络的资源（如温度传感器、报警器或电机驱动器）来实现。这使得大数据分析能够在数据源中衔接这些设备并将其带到互联网协议（IP）域进行进一步边缘处理或回传到云端的一种方式。工业互联网需要能够支持标准的以太网、控制局域网的其他工业协议，还可以支持许多无线协议，如蜂窝，WiFi 或低功耗广域网（LPWAN），如蓝牙，Zigbee 或 LoRa。工业网关的设计始终处于

开启状态，并且坚固耐用，能够承受智能制造工厂车间中可能遇到的恶劣环境。由于这些网关可能将工厂的内部基础设施连接到外部世界，因此它们必须能够支持高度的网络安全特性。随着更多的智能设备从云端转移到边缘，工业互联网网关的作用将变得越来越重要，它不仅是一个网关，而且是一个边缘服务器集成解决方案。这些将提供复杂的功能，例如：

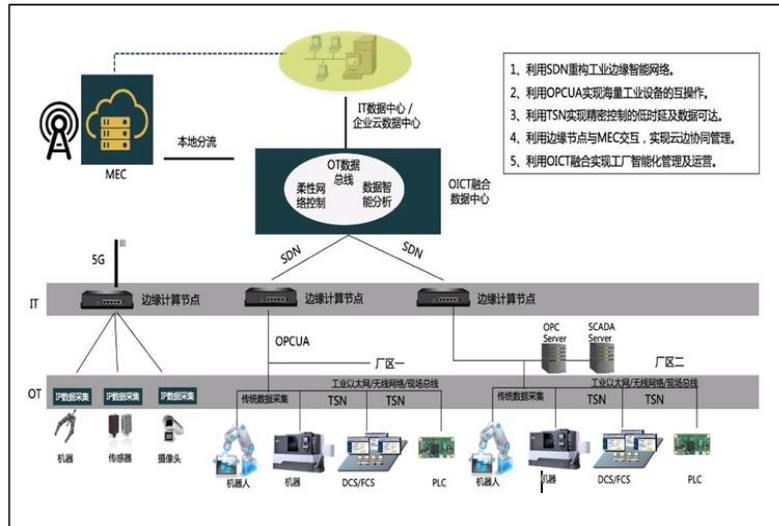
**互操作性：**工业互联网网关可以提供必要的协议转换，以便将工厂内的不能相互通信的设备之间建立通信方式。

**卸载计算任务：**边缘服务器或更高端的工业互联网网关可以通过缓存/存储信息和充当可以远程访问的私有云来卸载来自智能设备的计算任务。

**服务质量：**工业互联网网关可以最大限度地提高带宽效率，同时最大限度地减少端点瓶颈。

**安全性：**工业互联网网关可以实施比在每个终端实施更复杂的安全解决方案，为整个工厂网络创建一个良好的防御和深入的策略。

**本地存储：**边缘存储只需将相关数据发送到云端，有助于节省传输成本。例如，将数据量较大的高频捕获的数据发送到云端进行分析并不理想。相反，将网关作为计算节点来捕获数据并在本地进行分析决策会更高效。这样，只有汇总的数据才会发送到云端。此外，在连续性要求不高的环境中，可以在本地收集和保存数据，以确保最终捕获所有数据。TSN 技术可以保证上述过程中各类数据及信号的准确性，实时性，可调度性和低延时性。



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

### （三）TSN+5G

#### 1. TSN 与 5G 融合的工业需求分析

时间敏感网络 TSN 基于以太网通过功能增强提供高可靠与确定有界低时延流传送服务，是面向未来工业互联网、车辆内通信、智能电网等高可靠确定低时延应用的核心网络技术之一。随着 IEEE 802.1 工作组关于 TSN 相关标准工作的推进，TSN 功能不断增强并逐渐得到工业界的广泛支持，具备在工业互联网中实际部署应用的基础和前景。

无线通信技术也是工业互联网的重要连接技术之一。无线通信技术具备无需布线、部署灵活以及移动性支持等优势，在自动巡检、机器人等工业领域有着广泛应用前景。但无线通信技术由于其本身物理信道特性等限制，在复杂的工业环境中应用时与有线 TSN 网络技术相比面临更大挑战。具备 TSN 特性的无线通信网络技术包括 5G 是未来工业互联网的重要使能技术。

超可靠低时延通信是 5G 的三大应用场景之一。工业互联网是 5G 的典型应用。图 18 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。

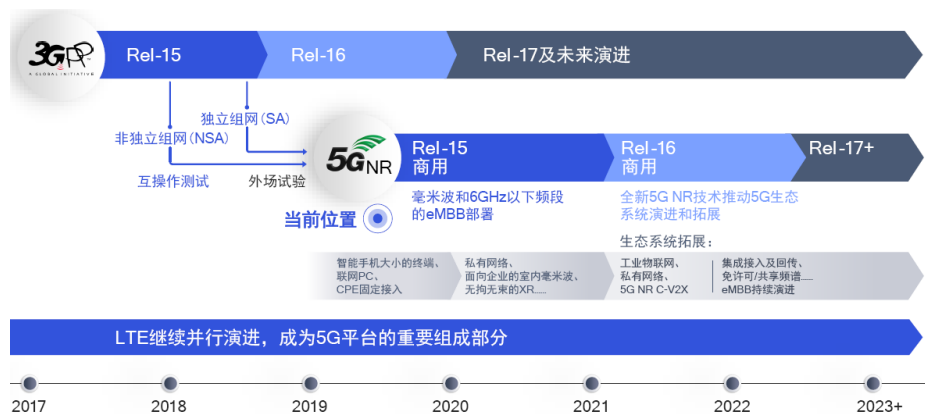


图 18 3GPP 组织内 5G 演进路线与生态系统扩展

TSN 与 5G 分别是未来有线与无线工业互联网的关键技术。TSN 与 5G 融合是构建未来灵活、高效、柔性、可靠及安全的工业互联网的基础。TSN 有线通信网络技术与 5G 无线通信网络技术互为补充，无缝融合，将为未来工业互联网的蓬勃发展奠定坚实技术基础。

## 2. TSN 与 5G 融合的研究现状

5G 的超高可靠低时延通信是实现工业互联网的关键能力之一。如何在 5G 技术上实现 TSN 功能并与其无缝融合是目前产业界与学术界的研究热点之一。高通公司研究组提出了面向工业互联网的利用 5G 实现 TSN 交换机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。因此，如何将无线 5G 技术与有线 TSN 技

术实现无缝融合是工业互联网重要且关键的技术难题之一。

### 3. TSN 与 5G 融合的关键技术挑战

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。

### 4. TSN 与 5G 融合的演进路线展望

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。

初期以 5G 实现 TSN 功能为主，如何使 5G 具备 TSN 功能是融合首先需要解决的技术难题。包括：TSN 与 5G 实现精确时间同步的能力；5G 实现类似 TSN 的流调度与资源分配能力；5G 实现

类似 TSN 的有界确定时延和抖动的能力等。

中期则进入 TSN 与 5G 并行部署阶段，5G 成为 TSN 的冗余部署。当 5G 成为无线 TSN 时，具备实现无线工业以太网的能力，可以与 TSN 并行部署，实现有线与无线的冗余部署，可有效提高工业互联网系统的灵活性与可靠性。但是，TSN 与 5G 网络管控等功能尚未完全融合。

最后 TSN 与 5G 将实现无缝融合，5G 与 TSN 交换机融合。当 5G 与 TSN 无缝融合时，可以作为 TSN 交换机间的无线链路或直接作为 TSN 交换机系统实现交换功能，融合网络实现统一管控和资源分配。TSN 与 5G 融合成为一个整体，作为工业互联网的完整解决方案。

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



## 四、应用场景

### （一）TSN 在制造业工业网络中的应用

时间敏感网络技术协议族对标工业互联网网络发展趋势，提出了一系列技术标准。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。

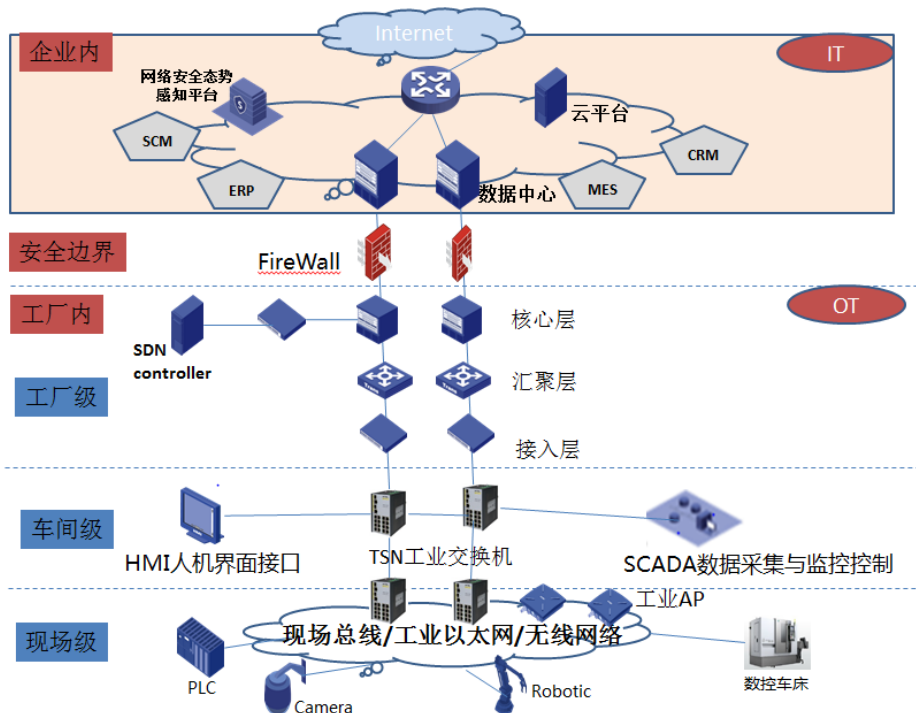


图 19 TSN 制造工业场景网络拓扑图

上图为 TSN 在制造工业场景中典型网络部署举例，下面针对该网路部署介绍下 TSN 在制造工业网络中的应用：

1) 现场级：实现现场设备检测监控装置进行互联互通及产线与产线外部车间内部网络实现互联互通。现场层采用工业级交换设备，使用 4G 等技术完成实时性链接，使用 NB-IoT 实现

温控、电表等基础环境数据传输，高效的网络实现 PLC、电脑终端等设备互联。

2) 车间级：车间级网络设备以产线为单位进行监控与集成控制，实时获取产线运行形式，实现车间内部不同产线之间、集中式控制器与设备之间的互联互通以及车间与车间外部工厂内部网络实现互联互通。

3) 工厂级：工厂级网络设备对整体数据汇总并做集中管控，实现工厂内部各车间之间的互联互通以及工厂与工厂外部企业内部网络的互联互通。工厂内同时部署 SDN 解决方案技术，由 SDN 控制器进行统一资源和业务管理，满足可视化管理、智能调度，提升应用体验，简化运维，降低 CapEx 的要求

4) 在安全边界，我们同时在工厂出口部署了防火墙设备，保障网络的安全性。

5) 企业内：部署 ERP/PLM/SCM/CRM/MES 系统、云计算平台，安全态势感知平台等，实现设备效率可视化、工业云数据收集分析，安全监控等功能。

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。

## （二）TSN 在车载以太网中的应用

### 1. 车载网络背景概述

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。车内网络架构一般是中心网关架构，或类似于中心网关架构。在当前的部分车载网络中已经有以太网技术的存在，然而以太网技术在车载网络中所扮演的角色，与其它总线技术类似。点到点连接的以太网是当前车载网络中以太网技术的主流应用方式（而非交换式以太网）。

### 2. 车载网络以太化的意义

随着汽车技术的发展，汽车的智能化和网联化，都会对车内网络带来更高的带宽需求。前者要求更多种类、更多数量的车载感知设备，以及配置相关的计算单元，使得车内需要传输的数据量大大增加；后者由于要求更多的车与车之间的通信，这些数据信息必然也会在车内网络上进行传输。与此同时，总线技术通信速率低（10k 到 10M 左右不等）的天然劣势就变得越来越明显。相比之下，以太网在带宽上具有显著的优势。当前，IEEE P802.3ch 项目已经在对 1G 以上的车载以太网进行标准化。

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。厂商希望能通过技术的归并甚至归一化来改善这个问题。而以太网在带宽、时延保障（TSN）、可扩展性（网

络节点数量不受限、拓扑类型支持性好)、安全性等方面都有着优秀的竞争力, 故而非常有望成为大家所期待的那个归并甚至归一后的网络技术。

智能汽车、自动驾驶等等汽车的新功能驱动了车内功能部件数量(如 ECU) 的增加, 且单 ECU 的功能也会越来越复杂。车载网络的以太化可以支持以太骨干架构, 使各个功能模块可以灵活的接入, 计算功能也可以灵活配置在边缘节点上或集中到某些专用中心节点上。

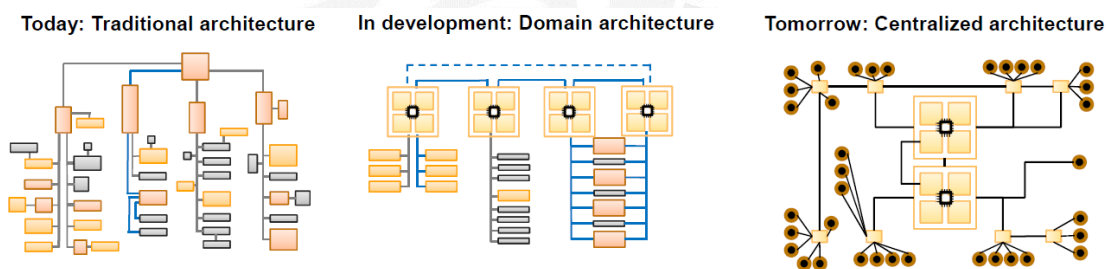


图 20 车载网络架构的一种演进示意图

上图所示为车载网络架构演进方向的一种可能的示意图。可以看到, 当前的架构会为各个应用配置 ECU 以及部署总线系统, 有很少量的以太链路; 当前在研的架构中, 部分功能可以集中到域控制器上, 以太链路比例有所提升; 而在未来的架构中, 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。

### 3. TSN 对车载以太网的推动

如前所述, 虽然车载网络以太化有着诸多优势, 然而目前以太在车内的主要应用形式还是点到点的连接, 也可称为以太化的总线。如音视频等媒体信号和控制信号仍然在不同的总线

或以太上分别传输，而不在同一链路上进行混流。

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。

