



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

TSN 解决方案白皮书



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

工业互联网产业联盟（AII）

2023年6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
Alliance of Industrial Internet

工业互联网产业联盟
联系电话：010-62305887

邮箱： aii@caict.ac.cn

前 言

随着时间敏感网络（TSN）从理论研究阶段逐渐延展到实体产业应用，TSN 解决方案在工业界的关注度显著上升。一方面，全球工业界迫切需要新的技术变革来为网络化智能化提供新的动力，这促进了 TSN 解决方案的落地；另一方面，工业互联网的兴起为工业现场带来了指数级增长的连接设备、更高的带宽、多线程业务流处理、数据跨域连通等需求，网络变革技术 TSN 理所当然的受到重视。加之中国网络自主可控的重要性程度上升，TSN 可控的优势得到凸显。然而，受限于 TSN 与工业场景业务流的融合应用少、无线场景下 TSN 确定性网络的研究应用薄弱、端到端 TSN 解决方案厂商生态较为稀缺等方面因素，工业企业要享受到 TSN 解决方案带来的益处仍然有一些任务要进行，包括先行者的 TSN 解决方案标杆打造、TSN 上下游生态互通等。

本白皮书旨在加快 TSN 解决方案落地产业，助力工业企业达成提质增效降本；同时为 TSN 产业上下游的有效协同给出指引，让工业界能更快速的利用 TSN 网络技术实现未来网络变革。因编者水平所限，难免存在错误和不足，欢迎业界专家和读者批评指正，后续我们将持续扩大应用、适时修订发布。

本文档由工业互联网产业联盟多家成员单位参加编写完成。主编单位有：中国信通院、深圳市三旺通信股份有限公司、网络通信与安全紫金山实验室、鹏城实验室。

牵头编写单位：

中国信通院
深圳市三旺通信股份有限公司
网络通信与安全紫金山实验室
鹏城实验室

参与编写单位：

清华大学
北京邮电大学
国防科技大学
南方科技大学
重庆大学
CC-LINK 协会
华为技术有限公司
高通无线通信技术（中国）有限公司
飞腾信息技术有限公司
中国联通物联网研究院
联通物联网有限责任公司
南京未来网络产业创新有限公司
北京智芯微电子科技有限公司
中车株洲电力机车研究所有限公司
中车青岛四方车辆研究所有限公司
中车南京浦镇车辆有限公司
毫末智行科技有限公司
上海山源电子科技股份有限公司
安徽链昇科技有限公司
中兴通讯股份有限公司



工业互联网产业联盟公众号

编写组成员（排名不分先后）：

张恒升、朱瑾瑜、徐启宸、熊伟、邓顺义、高一颠、徐龙、刘茂明、葛鹏、张华宇、李庆、严园园、詹双平、成剑、冯景斌、汪漪、万海、朱海龙、全巍、王瑾璠、王向荣、蔡岳平、杨凯、陈李昊、高涛、张印熙、许昌龙、杨雯霞、李元芳、朱大勇、李研、谢仁芳、何非、闵爱佳、白钰、王银河、钱锐、邵静兴、刘勇、殷建华、李鲲鹏、彭文静、田学文、黄涛、吕红强、田向伟、肖瑞、刘碧波、乔梁、王庆东、余智、耿兴元、马恒、胡浩



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

目 录

一、TSN 发展现状	1
(一) TSN 技术发展现状	1
(二) TSN 解决方案发展现状	6
二、TSN 通用解决方案	7
(一) 通用解决方案概述	7
(二) 技术应用路线	9
(三) TSN 相关产品	12
(四) TSN 融合技术解决方案	18
三、TSN 行业解决方案	20
(一) 轨道交通	20
(二) 智能制造	24
(三) 汽车车载	29
(四) 煤矿	33
(五) 钢铁	36
(六) 电力	38
(七) 装备制造	43
(八) 港口	46
四、TSN 解决方案展望	48
(一) 端到端的技术成熟度催化	48
(二) 更具象的应用层面指导标准	49
(三) 树立通用领域的明星典型标杆项目	50
(四) 生态互通，保证端到端一致性	50
五、缩略语对照表	51

一、TSN 发展现状

(一) TSN 技术发展现状

1. TSN 标准发展现状

TSN 标准协议由电气与电子工程师协会 (IEEE) 的 TSN 任务组定义, 是基于标准以太网技术提供确定性服务的解决方案, 最大的特点就是通
过精确的时间调度、确定的时延完成数据包的传输, 从而满足工业等领
域严苛的传输要求。

如下图所示, TSN 协议族包含定时与同步、时延控制、可靠性、资
源管理四个类别的子协议, 同时还定义了不同场景下的应用行规。

类别	协议
定时与同步	IEEE 802.1AS, IEEE 802.1AS-REV
时延控制	IEEE802.1Qav, IEEE 802.1Qbv, IEEE 802.1Qbu, IEEE802.1Qch, IEEE 802.1Qcr
可靠性	IEEE 802.1CB, IEEE802.1Qca, IEEE802.1Qci
资源管理	IEEE 802.1Qat, IEEE802.1Qcc, IEEE 802.1Qcp
应用行规	IEEE 802.1BA, IEEE802.1CM, IEC/IEEE P60802, IEEE P802.1DF, IEEE P802.1DG, IEEE P802.1DP

图 1 TSN 协议族分类情况

① 定时与同步

TSN 采用 IEEE 802.1AS 和 IEEE 802.1AS-REV 实现时间同步。IEEE
802.1AS 在 IEEE1588 的基础上对其进行了删减调整, 形成了更具针对
性的时间同步机制。IEEE 802.1AS 又被称为 gPTP 广义时钟同步协议,
嵌入在 MAC 层硬件中。该协议工作于链路层, 在数据帧中插入时间信息,

并传输至每个网络节点，在最大 7 跳的网络环境中，能够保证时钟同步误差在 1us 以内。

② 时延控制

TSN 不仅要保证时间敏感数据流的可靠到达，同时也要保证这些数据流有界的确定性的时延传输。TSN 时延控制通过流量整形机制实现，流量整形通过为高优先级流量提供确定的传输时隙确保传输带宽和传输时间，从而保证关键业务的可靠性和时延确定性。流量整形涉及的协议包括：

IEEE 802.1Qav：一种基于信用的整形器，可以实现毫秒级的时延上限保证；

IEEE 802.1Qbv：基于队列的时间感知整形器实现类似时间触发的通信，可保证微秒级的延迟上限及亚微秒级的抖动；

IEEE 802.1Qch：一种循环队列转发的整形机制，旨在构建具有固定延迟上限和抖动的传输环境；

IEEE 802.1Qbu：帧抢占功能可以进一步减小关键流量的时延，配合 TAS 和 CQF 等门控机制一起使用可以提高网络带宽利用率；

IEEE 802.1Qcr：TSN 交换机和端系统的异步整形机制，避免了同步依赖。

③ 可靠性

对数据传输实时性要求高的应用也需要高可靠的数据传输机制以便应对 Bridge 节点失效、线路断路和外部攻击等带来的各种问题，来确保功能安全和网络安全。TSN 传输可靠性保证协议包括：

IEEE 802.1CB：通过冗余消息以及在网络中设置冗余链路进行并行传输来提高可靠性，减少链路和节点失效对网络造成的影响；

IEEE 802.1Qca: 提供显式转发路径控制所需要的协议, 如预定义的保护路径、带宽预留、数据流冗余、流同步和流控制信息中控制参数的分配等;

IEEE 802.1Qci: TSN 协议簇中的 PSFP 协议类似于防火墙的机制。它工作于交换机的入口, 通过各种约束来监管每个流的输入, 将故障隔离到网络中的特定区域, 以防止出站队列被非法帧淹没。

④ 资源管理

在 TSN 网络中, 每一种实时应用都有特定的网络性能需求。使能 TSN 网络的某个特性是对可用的网络资源进行配置和管理的过程, 该操作允许在同一网络中通过配置一系列 TSN 子协议, 来合理分配网络路径上的资源, 以确保它们能够按照预期正常运行。

⑤ 应用行规

除了 TSN 功能相关的标准外, TSN 任务组还定义了 TSN 在不同场景的应用规范, 包括 IEEE 802.1BA 音视频桥接网络、IEEE 802.1CM 移动前传网络、IEC/IEEE 60802 工业自动化、IEEE P802.1DG 车载网络和 IEEE P802.1DP/SAE AS6675 航空航天等, 其中前两个应用规范已正式发布, 后面三个还处在草案讨论阶段, 尚未发布正式标准。

2. TSN 技术研究发展现状

近年来 TSN 技术研究主要集中在控制架构、调度算法以及与其他技术融合等方面。

(1) TSN 控制架构

IEEE 802.1Qcc 协议定义了 TSN 控制平面的架构模型, 包括全分布式、分布式用户/集中式网络、全集中式等 3 种控制架构模型。

全分布式架构模型中没有集中的网络控制器, 终端通过资源预留协

议携带用户需求信息逐跳传输，并在沿途的交换机上预留资源。由于交换机仅具备本地可用资源信息，无法以全局视角进行资源分配，因此全分布式模型仅适用于采用 IEEE 802.1Qav 机制的音视频系统，难以支持需要更低延时和更高精度的工业控制等应用。

分布式用户/集中式网络模型为分布式的用户管理和集中式的网络控制模型，终端通过 UNI 向 TSN 网络提交需求，网络通过集中式网络控制器 (CNC)，实现所有交换机的集中管控，并基于全局网络视图计算最优的路径和时隙，通过标准化的南向接口下发到交换机。

全集中式模型体现在用户管理和网络控制均为集中式架构。增加了集中式用户配置 (CUC) 单元对用户终端进行集中管理，能够发现终端节点、检索终端功能和用户需求。此模式下所有的用户需求均在 CUC 与 CNC 之间交互，CUC 采集终端业务的带宽时延抖动等网络服务质量需求，并将其转换后通过 UNI 接口发给 CNC，CNC 完成计算后将结果返回 CUC，并由 CUC 完成终端的配置。

(2) 调度与路由的研究

IEEE 802.1Qbv 标准中定义了时间感知整形器，旨在优化以太网帧的传输优先级，保证时间敏感信息在规定时间内送达，通过一定的调度算法在所有交换机出端口确定每个数据帧的传输顺序和时间，保证所有帧在出口链路上依次传输而不会发生冲突，同时在全网范围保证每个帧能够顺利通过传输路径的所有出端口，并满足流量各自的延时和带宽要求，使不同类别的流量在同一网络上得以共存。

当前主流的调度算法主要包含：整数线性规划、启发式算法、可满足性模理论 / 优化模理论、禁忌搜索、贪心随机自适应搜索等。

(3) TSN 与 OPC UA、5G 等工业新技术融合

TSN 仅提供了数据链路层的协议标准，保证数据实时可靠的传输。但作为完整的确定性网络解决方案，TSN 必然面临与其他技术融合的问题。

TSN 实现了开放的、“一网到底”的网络，解决了网络互联的问题，但各个工业以太网协议在数据层面依旧无法互通。而 OPC UA 使用一套通用的数据解析机制解决了工业互联网中水平信息集成与垂直信息集成两个维度“语义互操作”的复杂问题，实现设备与设备、设备和企业、以及不同厂商设备之间的交互。OPC UA 作为工业 4.0 参考架构模型（RAMI 4.0）中唯一推荐的通信层实现方法，是异构数据交互最通用的国际标准。TSN+OPC UA 真正做到了不同工业设备之间既能听得见又能听得懂，解决了网络互联和数据互通的问题，是构建开放工业网络的理想架构和未来必然的发展方向。

随着 5G 网络系统技术的发展及建设的深入，垂直行业对于网络的需求向超低时延、确定性、高可靠等高性能方向发展。TSN 与 5G 网络系统融合，一方面可以利用 5G 将工业设备以无线的方式接入到有线网络，为 TSN 网络提供不受电缆限制的、可靠的设备接入能力。另一个方面，将 TSN 的核心机制深度集成到 5G 技术当中，如 TSN 中灵活的流量调度机制和高精度的时钟同步机制等，以保证数据在 5G 网络中端到端的确定性传输。通过对 TSN 技术的集成，可进一步增强 5G 的可靠性和确定性。5G+TSN 正在成为工业有线-无线融合、IT-OT 融合的关键技术。

（4）TSN 与已有工业技术的融合

当前工业以太网协议在工厂 OT 网络中发挥重要作用，对于任何工业应用而言，保持技术的稳定性、继承性是一种必须的考量。因此，技术的升级必须尽量平滑，TSN 不会迅速取代现有的工业网络，而是会

有长期共存的阶段。自 TSN 技术问世以来，主要工业以太网协议组织开始积极制定新的标准，开发与 TSN 兼容的工业以太网协议，使得不同工业以太网协议生态系统用户能平滑升级到最新 TSN 技术，如 Profinet over TSN、EtherCAT TSN、CC-Link IE TSN 等。

（二）TSN 解决方案发展现状

1. 国内发展现状

工业互联网产业联盟（AII）于 2020 年启动了“时间敏感网络 (TSN) 产业链名录”计划，打造设备厂商产品研制和工业企业采购选型的风向标，加速 TSN 成为网络化改造与智能化升级的技术支撑。产业链名录从 7 大行业场景、7 种产品门类、8 个技术维度梳理了产业需求、明确产业供给能力。并于 2021 年对 TSN 交换机和网关产品进行测试认证，极大的推进了 TSN 产业生态的发展。

此外，国内许多高校、企业和研究机构，在 TSN 方面进行了相关研究。国防科大研发了支持 TSN 关键技术验证的开源项目 OpenTSN，提供了面向航空航天、车载和工业控制的解决方案；鹏城实验室完成了基于 TSN 的端到端确定性原型系统网络构建和平台发布；飞腾研发了基于 TSN 芯片的高性能国产化处理器，助力国产 TSN 嵌入式控制的市场创新；三旺通信研发了基于特定场景的端到端 TSN 应用解决方案。整体来看，国内 TSN 解决方案发展正处于蓄势期。

2. 国际发展现状

国际主流的自动化厂商都已发布 TSN 产品或测试产品，贝加莱发布了支持 OPC UA over TSN 的交换机、PLC、总线控制器等产品。SIEMENS 在 2018 年汉诺威展发布了 Profinet over TSN 的产品。对于 TSN 在工业网络的应用，西门子在整个控制系统网络中采用 OPC UA over TSN

来实现北向通信；使用 PROFINET over TSN 来实现南向通信。通过 OPC UA 和 PROFINET 共享同一个基于 TSN 的以太网网络，轻松将现场级设备数据实时、高速地传输至 SCADA，MES 和 ERP 系统以及云等整个企业网络，实现真正的互联互通。此外，2019 年三菱发布了 CC-Link IE TSN 产品。TTTech、CISCO、赫斯曼等厂商也发布了 TSN 交换机产品。芯片和模组方面的产品日渐成熟，BCM 博通、MARVELL 美满电子、ADI 亚德诺、INTEL 英特尔和 NXP 恩智浦等多家头部企业都发布了面向工业、车载的 TSN 芯片。

二、TSN 通用解决方案

（一）通用解决方案概述

TSN 通用解决方案是指利用 TSN 技术和产品构建互联互通的网络，达到工业场景共性数据通信服务需求，其通用性主要表现在符合 TSN 相关标准和满足全产业链基础能力构建两方面。通用解决方案的构成要素包括根据需求选择遵循标准协议的技术，配置桥接器、终端等设备来搭建实际的网络。从 TSN 历史演进、发展现状以及未来趋势的角度，通用解决方案可分为三个阶段。

（1）分布式资源预留和强端网协同

以 AVB 解决方案为代表，AVB 解决方案要求在网络数据转发层面使用基于信用的整形（CBS）、在网络控制管理层面使用流预留协议（SRP）、同时要求支持广义精确时间协议（gPTP）。SRP 和 CBS 的配合使用，使得 AVB 解决方案可以为音视频流量提供两个等级的时延上限保障；而 gPTP 则可以为 AVB 网络中的端设备实现时间同步，进而配合

音视频传输协议（AVTP），在数据报文中携带时间戳，实现应用侧同步播放的要求。

（2）更丰富的 TSN 技术和集中式资源预留

在 CBS、SRP、gPTP 之后，越来越多的新技术也逐渐加入了 TSN 的大家庭，例如门控调度、帧抢占、异步流量整形（ATS）等。TSN 用于移动前传的解决方案中，要求使用基础的严格优先级（SP）调度；TSN 用于工业自动化、承载网、车载网的解决方案中，虽然没有最终确定，但门控调度、异步流量整形等会是重点的可选用的 TSN 子技术。

同时，为了在这些解决方案中实现对网络设备的正确配置，集中式资源预留的方案成为了讨论的热点。TSN 标准定义了“全分布式”、“分布式用户/集中式网络”、“全集中式”三种配置模型，后两者都属于集中式资源预留，其共同特征是需要集中式网络配置（CNC）这样一个功能实体。这个功能实体可以是一个独立网络控制器，也可以是一个运行在电脑、服务器上的软件功能。由于这个阶段，支持 TSN 的端设备成熟度低于 TSN 网络设备，所以 CNC 往往可以支持手动定义业务流量，然后基于网络拓扑和设备能力，生成一套配置方案并下发到 TSN 网络设备上，从而为用户流量提供服务保障。这样形成一种易于兼容演进的、端与网弱协同的 TSN 解决方案。

（3）在 TSN 端网协同的基础上，多种 TSN 解决方案“百花齐放”

不论在哪个行业，不论具体使用哪些 TSN 子技术，TSN 解决方案的核心逻辑都是一致的：用户向网络声明自己的业务特征和对网络服务的需求；网络进行响应，通过对网络设备进行配置，为用户预留资源；完成后通告给用户，用户可以开始按约定发送报文到网络中，这些报文能够获得相应的服务保障。

（二）技术应用路线

1. 应用难点分析

TSN 为通用网络如以太网、无线局域网等提供确定性连接，支持 OSI 模型中的数据链路层和网络层转发，能很好地兼容现有网络，同时能够给网络传输提供确定的时延和低抖动，可以实现各种设备之间的实时、确定和可靠数据传输，满足未来多个行业的多设备之间数据可靠传输。然而，现阶段 TSN 仍然没有得到广泛的应用，主要原因在技术难度较高、产品成熟度、安全等三个方面。

（1）技术难度较高

首先，TSN 需要提供的网络指标：带宽，延迟，抖动，丢包率，可靠性，时钟同步精度跟 TSN 的组网拓扑，组网规模，设备异构，网络异构等都有巨大的关系，这些指标又和业务需求高度相关。因此如何按照标准要求达到适合不同业务场景和规模的调度规划方案是一个难题。现有方案中针对中小规模的静态网络，TSN 的流量规划调度都还能提供高质量的调度方案，但是面对大规模网络、大规模流量以及动态环境的 TSN 流量调度还存在诸多困难，因此，调度算法还需要进一步根据实际的业务场景进行优化打磨。

其次，TSN 的目标是实现 IT 和 OT 的融合。但是实际上 IT 和 OT 的差距比较大，并且既懂 IT 又懂 OT 的人才又较少，因此现阶段不同背景的研究人员的思维方式会受到原始背景的影响。如 IT 人希望一切分层，采用标准化方式，一般会较复杂，比较适合普适情况，而 OT 是从经验方式入手考虑实际问题，希望方案越简单越好，比较适合特殊情况。因此，如何让 TSN 成为连通 OT 和 IT 的桥梁需要 OT 和 IT 领域人才不断交流学习，解决实际问题，通过实际案例来积累经验。

最后，TSN 的管理控制难度大。TSN 解决方案的实施需要契合已有的工业成果，需要做到前向兼容。由于工业门类众多且互异，TSN 的管理控制除了需要考虑 TSN 网络本身如 Qcc 要求的能力，还需要考虑工业场景的管理控制，是融合还是隔离，目前只能由各个行业按照自身需求去设计实施。这些都对 TSN 的控制管理技术水平提出了挑战。

(2) 产品成熟度问题

目前处于 TSN 的产业初期，产品成熟度还有待提升。一方面，TSN 的标准协议簇中部分协议依旧处于修订、更新和评审状态；另一方面，TSN 属于新技术，需要进行市场培育和广泛宣传才能逐渐得到推广。

从网络交换端的角度，目前市面上的 TSN 交换机普遍是原理验证样机或者是基于 FPGA 而开发的，成熟度较低且成本较高。要研发出成熟的工业级 TSN 交换芯片及交换机仍然需要一定的研发周期。

从网络终端节点的角度，要做到对整个网络的统一调度，网络中需要有支持 TSN 各项协议的终端器件，只有整个网络系统中各个节点均支持 TSN 相关协议，整个网络系统才能达到时钟同步效果，网络中各个节点之间才能互相约定数据的发送和接收，做到流量的时延和抖动可控。然而目前各个厂家主要精力均集中在对交换芯片和交换机的研发，对支持 TSN 的终端芯片关注较少，导致目前组网中终端器件难以支持 TSN，进而也难以实现对整个网络的统一调度。

从应用的角度，需要将 TSN 网络的搭建和配置做到简单友好，普通用户能够很快入手，才能较为顺利地推广至传统行业用户。

(3) 安全性

TSN 解决方案需要保障网络安全、功能安全和信息安全。网络安全是指网络免受攻击入侵的安全防范，即网络系统的硬件、软件及其系统

中的数据受到保护，不因偶然的或者恶意的原因而遭受到破坏、更改、泄露，系统连续可靠正常地运行，网络服务不中断。功能安全是指避免由系统功能性故障导致的不可接受的风险，主要关注系统故障后的行为，而不是系统的原有功能或性能。如 TSN 网络不能影响汽车的刹车，加速等功能。信息安全是指需保证信息的保密性、真实性、完整性、未授权拷贝和所寄生系统的安全性。

一方面，TSN 网络规划继承了 Profinet, EtherCat 的功能，因此在通信设计时基本上需要知道具体的传输的信息内容，这种情况若扩展到 TSN 构筑的网络，会存在显式的企业机密泄露事件；另一方面，由于 OT 和 IT 融合方面，OT 的互操作性语义可能会在 IT 层面存在隐性的泄露风险，如可以通过对 IT 的数据报文进行学习，可以对接入的机器设备行为进行行为学分析，从而获得工序、流程等商业秘密信息。因此，在 TSN 解决方案中，需要考虑信息的加密传输机制、脱敏机制以及加扰等隐私保护机制。

2. 应用场景分析

在某些关键应用领域，常规的以太网由于缺乏确定性通信保障机制无法满足高带宽、低延时、低抖动和高可靠的性能要求，但 TSN 技术可以做到。以航空航天、汽车、铁路行业为例，关键程序要求高带宽、零损耗，能够处理速率受限的流量以及同时应对不同类型的数据和通讯需求；另一方面，航空航天等行业具有一定的行业特殊性，传统的网络是基于专有标准的，供应商很少，成本更高。而 TSN 技术是一项全球性技术，组件成本低，已经过大量测试使用，应对航空航天、汽车、铁路行业所面临的通讯技术挑战，TSN 有着完整的解决方案。

3. 技术路线分析

TSN 解决方案的技术路线主要包括 TSN 设备产品选型和 TSN 网络组网架构设计两大块。根据 TSN 芯片的能力选择 TSN 交换机、TSN 网关和 TSN 端设备，根据使用应用需求设计网络架构，包含网络拓扑、TSN 交换机、网关和端设备的部署位置，网络最终通过 TSN 控制器进行网络配置和控制管理实现业务的接入。这当中 TSN 芯片，设备和 TSN 网络控制器是保证 TSN 解决方案落地的关键。

（三）TSN 相关产品

对 TSN 通用解决方案而言，TSN 产品的基础支撑至关重要。TSN 要发挥出其决定性作用，一大前提是要保证 TSN 产品端到端的覆盖，包含了 TSN 芯片及处理器、TSN 模组、TSN 设备、TSN 控制器、TSN 流量规划器等产品。

1. TSN 芯片及处理器

TSN 芯片及处理器是 TSN 端到端覆盖的核心命脉，它决定了其它 TSN 产品的基础性能及底层架构，TSN 芯片及处理器的设计需要将控制命令的传送过程控制在微秒级别的时间精度内。

例如，TI 公司推出了一款多协议千兆 TSN 的处理器芯片 SitaraAM6x。ADI 公司发布的 Fido5000 是一款双端口的实时以太网、多协议 TSN 交换芯片。Broadcom 公司已发布 BCM53570、BCM53112、BCM53154、BCM53162 等不同规格的 TSN 交换机芯片。瑞萨电子株式会社推出支持 CC-Link IE TSN 的工业以太网通信 IC—R-IN32M4-CL3。MARVELL 已发布 88E6390X、88Q5050 用于交换机的 TSN 芯片。NXP 已发布 SJA1105、SJA1105TEL TSN 芯片。在 IP Core 提供商方面。赛灵思 (Xilinx) 公司推出的 TSN IP Core 可在一个 3 端口桥接端点或端点专用配置中支持 TSN 标准。SoC-e 公司推出 TSN IP Core，支持 802.1AS、

802.1Qbv 等。英特尔 (Intel) 公司推出 TSN IP Core。TTTech 公司的 Flex IP Solution 是一个灵活的模块化设计 IP，为定制芯片 (ASICs 或 ASSPs) 提供 TSN 功能。

当前国内的 TSN 芯片及处理器产业进展迅速，已有多家厂商推出了对应的国产化 TSN 芯片及处理器。

例如，飞腾推出了 TSN 处理器 FT-2000/4，为工业网络系统提供支持。

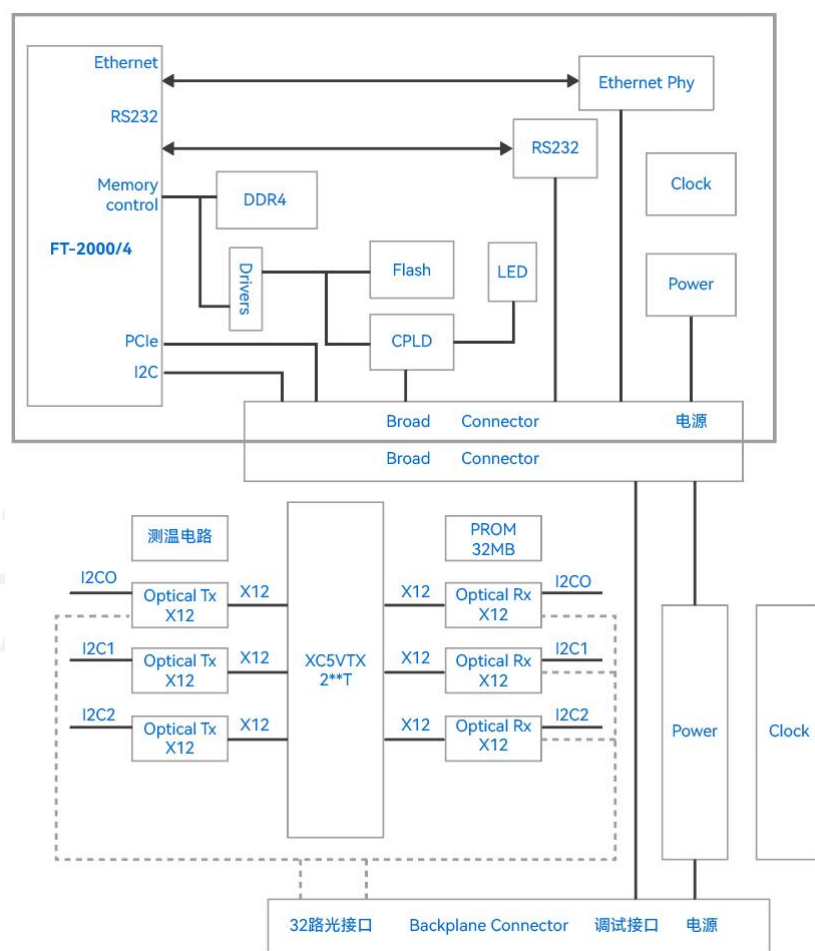


图 2 TSN 网络接口的高速电路设计框图

国防科技大学研制了千兆 TSN 芯片——银河衡芯时间敏感交换芯片 HX-DS09，代号“枫林一号”。

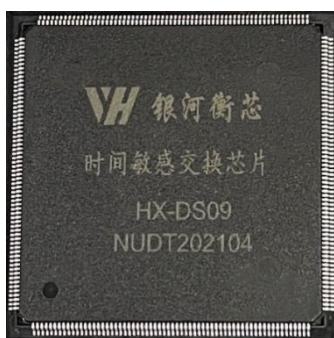


图3 “枫林一号” TSN 芯片

北京智芯微电子研发了一款 SC2404 的 TSN 芯片，支持多种 TSN 协议。



图4 SC2404 TSN 芯片

2. TSN 融合 5G 模组

TSN 融合 5G 模组是 TSN 通用解决方案中实现有线网络和无线网络一致确定性的关键枢纽，TSN 是时延敏感网络，5G 则是 Best Effort 网络，融合的前提是在不确定的 5G 网络实现确定性时延，包括时间同步、流量调度、可靠桥接技术等功能，由此将 5G 作为 TSN 网络的无线部分，扩展网络的覆盖面，大幅提高设备设计和部署的灵活性。

此前，中国信息通信研究院牵头发布“5G+TSN 联合测试床”，中兴通讯联合高通成功演示用于智能电网的端到端 5G TSN 系统，中国联通与北京科技大学发布面向冶金行业的 5G+TSN 系统，爱立信发布基于

5G 与 TSN 融合的移动机器人，这些都需要 TSN 融合 5G 模组。

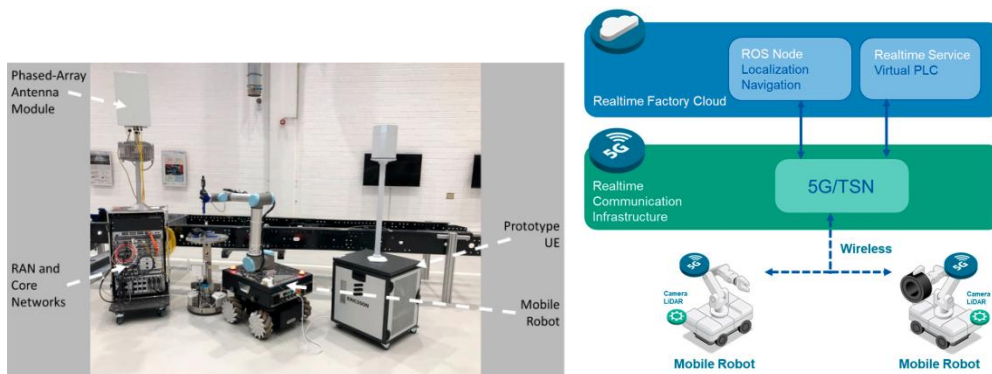


图 5 TSN 融合 5G 模组方案及原型

3. TSN 设备

TSN 设备是 TSN 通用解决方案的主干，不可或缺。主要包括 TSN 交换机、TSN 网关、TSN 网卡、TSN 测试仪、TSN 端设备等，提供 TSN 设备的厂商阵容正在扩大，开始逐步形成端到端的 TSN 产品方案。

例如，Relyum 公司发布了 TSN 网关 RELY-TSN-CPPS。控创（kontron）推出的 KBoxC-102-2 可为现有 PLC、Box PC、网关和工业服务器的硬件/软件升级解决方案。英特尔的 EXOR eXware 707 系列多协议 IIoT 网关可充当 OT 和 IT 之间的桥梁。恩智浦推出了 S32G-VNP-GLDBOX 作为通用车载网关。

三旺通信基于工业场景应用，推出工业级 TSN 交换机、工业级 TSN 交换机板卡、工业级 TSN 网关等端到端多类型 TSN 设备。



图 6 三旺通信 TSN 工业交换机

国防科技大学研制多种型号的 TSN 网络设备，包括 TSN 交换机、TSN 网卡、TSN 网关、TSN 网络测试仪等。



图 7 “枫林一号” TSN 交换机板卡

4. TSN 控制器

TSN 控制器，是 TSN 的用户/网络配置中心，采用集中式的配置模型，具备检索端站和 TSN 设备识别、收集端站功能和流量需求、流量路径调度计算、设备 TSN 配置下发等功能，是推动 TSN 产业发展的核心组件。

例如，网络通信与安全紫金山实验室正在进行 TSN 控制器的研发。其 TSN 控制系统基于软件定义网络思想，遵从 802.1Qcc 完全集中式配置规范，支持全网级时钟同步配置管理、提供 TSN 全部传输协议的纳管、并提供多种调度引擎算法，优化网络资源的管理。

国防科技大学研制了一款适配 OpenTSN 开源项目的 TSN 集中式网络控制器 TSNLight，可以对 OpenTSN 的硬件设备包括交换机、网卡、网关等设备进行管理控制。

TTTECH 公司的 Slate XNS 是一种 TSN 纳管产品方案，作为基于浏览器的软件，它用于为 TSN 网络拓扑建模、添加流和部署配置。Slate XNS 可以调度和配置任何 TSN 标准兼容的网络/设备，在 Windows 或

Linux 上运行，无需专业知识就能配置复杂的 TSN 网络。

Cisco 的 CNC 纳管 TSN 交换机方案，提供分层的架构模型。CNC 是 SDN 控制器，作为集中式的网络控制，拥有全局的视图和网络管理。当前 CNC 专注于自动化配置，包括新增流量需求、转发设备改变场景等。

5. TSN 流量规划器

TSN 流量规划器根据用户需求生成相应的网络拓扑，支持集成多种调度策略，通过全局信息采集，统筹规划流量调度方案，是促进 TSN 工业发展的关键部件。

例如，国防科技大学基于 python 和开源 SMT 求解器开发的 TSN 流量规划器 OpenPlanner，由拓扑及流量生成、拓扑及流解析、约束生成、约束添加和求解、输出解析五个模块组成。

华为针对不同场景业务差异化的 SLA 保证需求，提出 TSN 大规模异构异质流量编排方案，针对业务实际特征进行分类、聚合，并根据拓扑类型，智能选择同步、异步或混合编排方式，实现大规模流量的快速、增量编排，同时具有网络运行态实时调优能力。

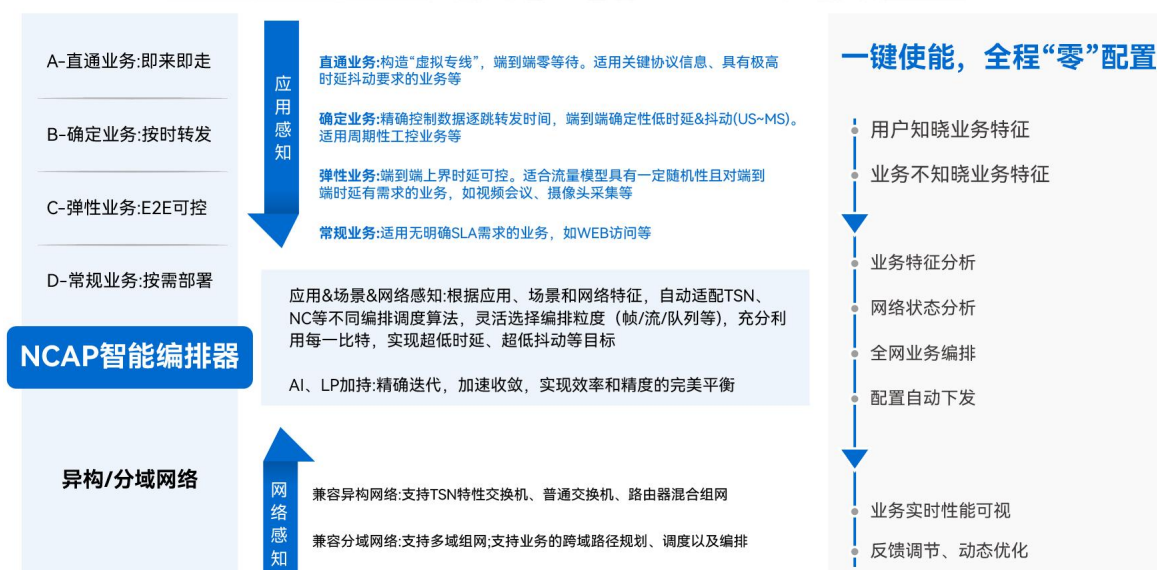


图 8 TSN 大规模异构异质流量编排方案

（四）TSN 融合技术解决方案

1. TSN+OPC UA 解决方案

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，将会在带宽、安全、互操作、延迟和同步等方面带来巨大改善。TSN 技术和 OPC UA 相结合，可以满足工业应用的各种传输需求，提升工业现场的信息交互效率。OPC UA 提供标准的语义定义，统一互操作，统一信息模型，M2M/M2B 协同，以及面向服务架构设计 SoA 降低软件设计难度。TSN 通过良好的互通性，改善现场总线标准不统一的情况，提供高可靠性、多路径/冗余路径技术；提供 us 级时延、ns 级抖动，管理简单，即插即用。

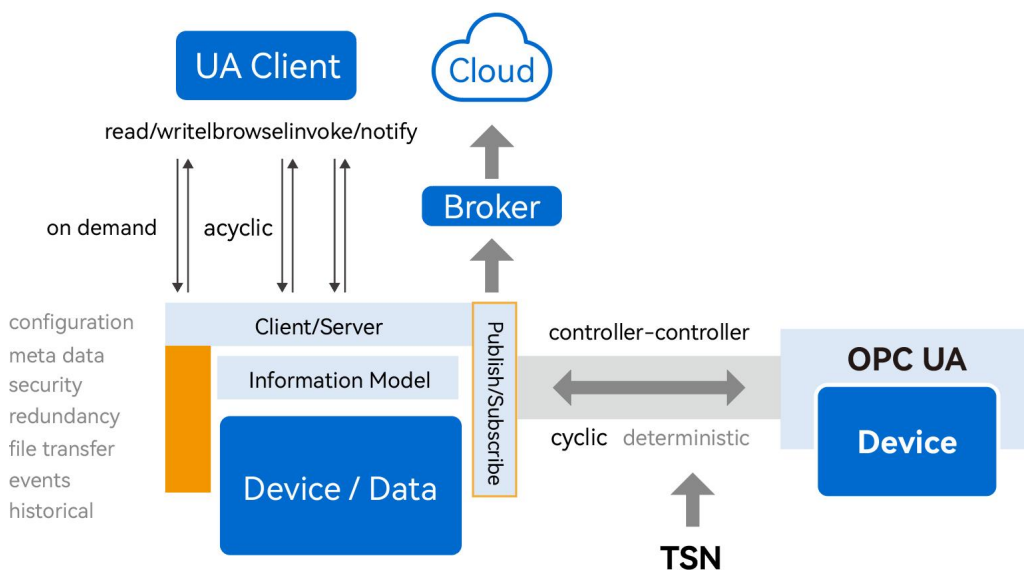


图 9 赛灵思 OPC UA-TSN 通讯框架

2. DDS 融合 TSN: 实时数据交换解决方案

IICF 对象管理组织（OMG）宣布开发了一个 DDS-TSN 标准，以便使用 DDS 数据总线的软件应用程序能够部署在支持 TSN 的网络上。通过将

DDS 置于 TSN 之上，系统架构师和应用程序开发人员可以轻松地创建具有高确定性、可靠性、可扩展性和可用性特性的强大的分布式数据中心软件集成框架。

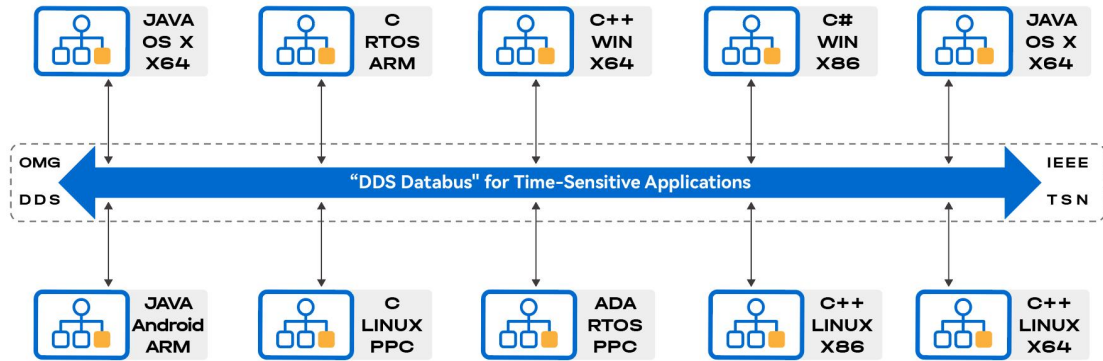


图 10 使用 DDS-TSN 标准启用的 QoS 策略和配置参数简单配置时间敏感数据流

结果表明，DDS 和 TSN 非常适合并完美互补。DDS 系列规范为 IIOT 连接堆栈上较高的软件组件定义了软件数据总线，如图 11 所示，TSN 规范定义了堆栈最低层的硬件接口和信令，两者都是横向标准，适用于许多垂直市场。DDS-TSN 标准的出现，使 IIOT 网络能够融合到单一商品硬件解决方案中，实现所有数据的实时交换。

3. CC-Link IE TSN 解决方案

CC-Link IE TSN 是一种开放式工业网络技术，瑞萨电子为智能工厂应用提供了基于该技术的系统解决方案，作为首个支持 CC-Link IE TSN B 类标准的控制器，R-IN32M4-CL3 芯片上的系统严格的符合规范，可实现超高速和高精度运动控制解决方案，从总体上提高了工厂的生产效率。

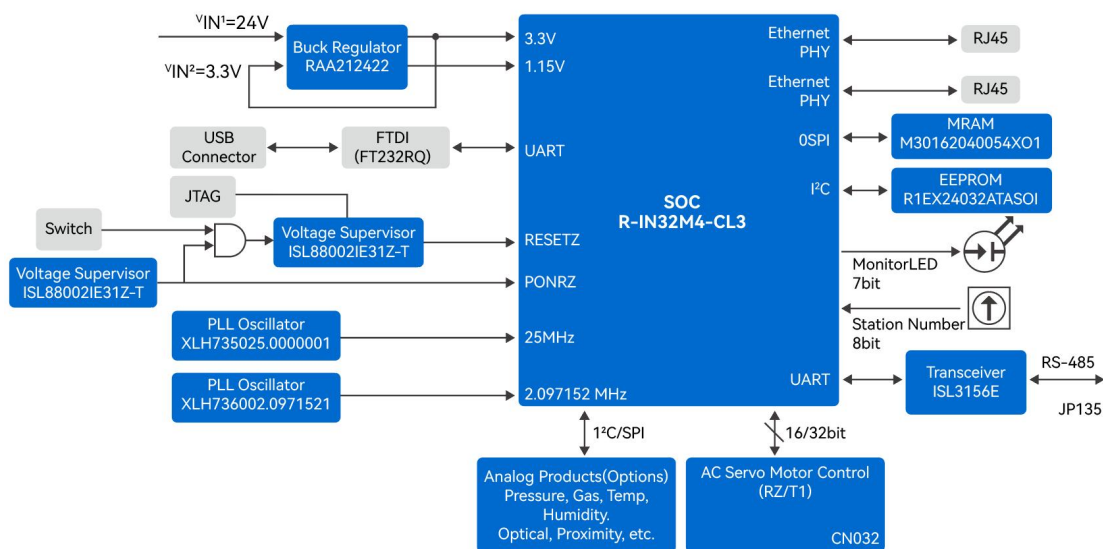


图 11 使用 CC-Link IE TSN 的技术架构

三、TSN 行业解决方案

(一) 轨道交通

1. 需求分析

列车通信网络 TCN，为列车各子系统提供数据通信服务，是列车核心组成部分之一，相当于列车的“大脑”和“神经”系统。为了满足列车信息化和智能化的发展趋势对高带宽的需求，IEC/TC9 于 2012-2018 年陆续制定发布 IEC61375 系列相关标准，将以太网技术引入轨道交通行业。中国于 2020 年陆续发布 GB/T 28029 系列标准，完成中国列车通信网络以太网相关技术标准化。

TCN 采用以太网技术后尽管有足够的带宽，却并未简化列车的整体设计。列车往往部署多个通信网络，分别用于列车控制、铁路信号、视频安全和乘客信息系统等。其主要原因是以太网技术本身不具备确定性，

在多种业务数据混合传输的场景下，无法保障控制数据的安全。IEC61375 和 GB/T 28029 标准建议将控制网与多媒体网分别组网，如下图所示。

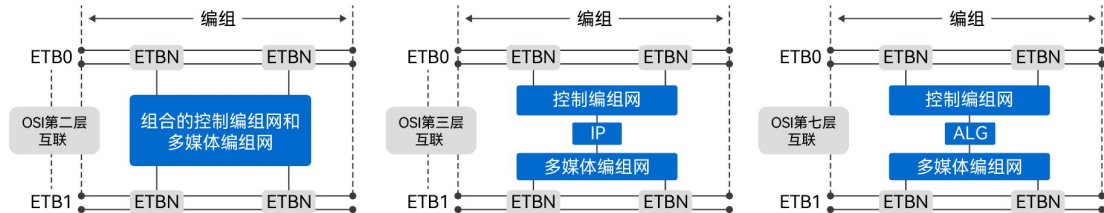


图 12 IEC61375 规定的控制网与多媒体网组网方式

下一代列车通信网络的核心目标是简化列车整体通信的复杂性，把各个子系统的多个网络融合成一个综合承载网络。欧盟 Shift2Rail 计划的 CONNECTA 项目于 2016 年开始进行下一代列车通信网络的研究，西门子、庞巴迪、西班牙 CAF、阿尔斯通、德国 DB，法国国铁等都是该项目组成员。CONNECTA 项目定义的下一代列车通信网络将采用基于 IEEE 802.1 标准的 TSN 技术。IEC/TC9 于 2021 年开始策划 IEC61375 系列标准的修订，有意向增加 TSN 内容。

尽管下一代列车通信网络标准尚未制定，但是 TSN 作为下一代列车通信网络代际特征通信技术基本上已成为业内共识。新的列车通信网络采用 TSN 技术以后，将兼有 MVB/WTB 总线通信技术确定性实时性和以太网技术的高带宽灵活性的优点，列车通信网络将会迎来一个全新的阶段。

2. 应用解决方案

由于基于 TSN 的列车通信网络暂未形成标准规范，本章节根据 IEC61375 与 GB/T 28029 标准的网络架构，结合两种协议的标准和 TSN 的技术特点，提出一种可能的基于 TSN 的列车通信网络架构，如下图所示。

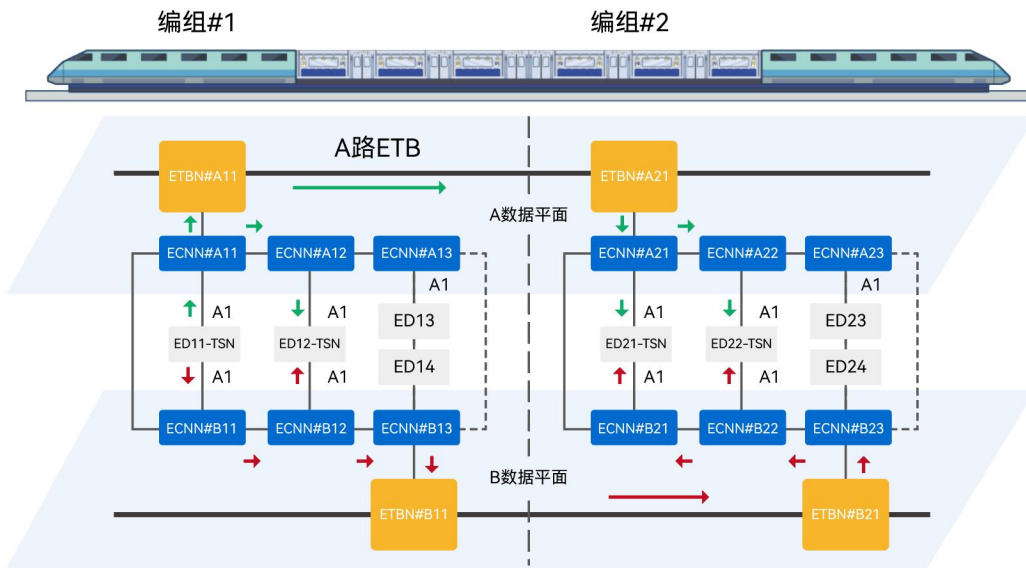


图 13 基于 TSN 的列车网络架构示例

该架构整体采用双平面冗余的结构，与 IEC61375 和 GB/T 28029 相同的分层模式，包含支持 TSN 的以太网列车骨干网节点 ETBN 构成的列车骨干网 ETB，支持 TSN 的以太网编组网节点 ECNN 构成的编组网，以及支持 TSN 终端设备 ED 和普通终端构成的终端层。

TSN 列车骨干网由 ETBN-TSN 设备组成，每个编组固定为两个 ETBN 设备，主要解决列车重联与解编动态编组问题。基于 TSN 的列车骨干网使用双线性结构，摒弃了掉电旁路功能。物理层可能会升级到 1000M 或 10G 以太网，通信线缆可能会继续使用电缆也可能使用光缆。

TSN 编组网由 ECNN-TSN 设备构成，以成对的方式部署，核心作用是向终端设备层提供接入服务。基于 TSN 的编组网物理结构上明确采用环型拓扑，面向双网口控制类终端设备提供并行结构双数据平面冗余方式，面向普通终端设备提供环型冗余服务。物理层可能会升级到 1000M 或 10G 以太网，通信线缆可能会继续使用电缆也可能使用光缆。

终端层由具备 TSN 功能的 ED-TSN 和普通以太网终端 ED 构成，与车

辆控制相关的关键设备比如牵引、制动、辅助等系统要求支持 TSN 且采用双网口冗余方式，与车辆控制无关的其他设备比如车门、空调、PIS 等系统可以继续采用单网口方式。物理层可能会彻底摒弃 10BASE-T，使用 100BASE-TX，线缆采用 CAT5e 电缆。列车实时数据协议 TRDP 需要进行升级修改，以适应新的网络架构、TSN 技术特性并支持版本兼容。

基于 TSN 的综合承载网络分别为控制数据和非控制数据配置不同的优先级，以确保在非控制数据出现异常的情况下，控制数据不受影响。建议优先级分配遵循以下原则：行车安全控车相关数据优先级较高，非行车相关控车数据或服务类控制数据优先级次之，视频等多媒体信息优先级最低。

IEEE 802.1 TSN 已经发布和正在制定中的子标准超过 30 余项，轨道交通行业列车通信网络对 TSN 标准的选择建议如下。

板块	标准选择说明
时间同步	目前车载应用使用的时间同步的方式，比如 NTP 协议、SNTP 协议、基于 TRDP 的授时协议等均无法满足 TSN 的使用需求，必须引入 IEEE 802.1 AS-Rev 这一全新时间同步协议的支持。按照传统的失效不扩散原则，建议骨干网和编组网采用隔离的 PTP 域，某个编组时钟失效不会影响其它编组或骨干网，骨干网时钟失效不会影响编组网
流量整形	目前车载应用流量整形采用的是基于信用、权重或严格优先级的整形策略，为了支持 TSN，需要引入 IEEE 802.1Qbx, 流量调度整形机制的支持
帧抢占	考虑到 IEC61375 和 GB/T 28029 中对于骨干网均明确要求使用 100BASE-TX 物理层，建议列车通信网络在使用 TSN 时引入对 IEEE 802.1Qbu 帧抢占协议的支持，提高对带宽的有效利用率
安全防护	列车通信网络由交换设备承担的安全相关的功能主要包括带宽限制、广播风暴抑制、黑白名单等，引入 IEEE802.1Qci 逐流过滤与监管支持可以使交换机的防护功能更加完善
网络健壮性	IEEE 802.1CB 帧复制与消除 FRER (Frame Replication and Elimination for Reliability) 提供了一种在二层无缝冗余的传输方式，建议引入该标准提升列车网络通信健壮性

图 14 轨道交通行业列车通信网络对 TSN 标准的选择建议

目前无论国际还是国内，IEEE 802.1 TSN 技术将会是轨道交通行业下一代列车通信网络的代际特征，已经是行业共识。我们对此感到乐观，但对于 TSN 落地过程中所面临的问题也要有清醒的认识，只有尽快完成基于 TSN 的列车通信网络标准化才能够真正加快 TSN 技术在轨道交通行业的落地进程。

问题	描述
TRDP 与 TSN 融合	TRDP 是 IEC61375 和 GB/T 28029 规定的列车车载通信协议，需要研究如何将 TRDP 的配置、传输与 TSN 自身的配置、传输机制进行融合，使 TSN 技术满足列车通信网络技术规范
拓扑变化	列车编组改变或者故障会导致列车网络拓扑发生改变。拓扑变化将需要对数据调度配置进行相应调整。如何设计相应的适应机制和快速生成调度，是一个技术挑战
时间同步	TSN 的最关键的部分时间同步，需要研究一种适合轨道交通车载场景的时间同步方案，同时需要思考如何应对拓扑结构变化引起的时间再同步
互联互通	TSN 的测试一致性标准还没有建立，当前厂家互联互通还未完全建立，但各厂商调度机制还存在差异，导致部分厂商设备报文转发丢弃或时延加大的情况，未来还需要加强通信一致性标准的制定和完善，减少报文丢失或延时问题的发生

图 15 轨道交通行业 TSN 落地的问题

（二）智能制造

1. 需求分析

智能制造是一种新型生产方式，该生产方式是基于新一代信息通信技术与先进制造技术深度融合，贯穿于设计、生产、管理、服务等制造活动的各个环节，具有自感知、自学习、自决策、自执行、自适应等功

能。跟传统制造相比，智能制造具有如下特点：

（1）数据量越来越大。智能终端、物联网逐渐普及，全球物联网将保持高速增长，根据 GSMA 发布的报告和世界物联网大会提供的数据显示：2019 年全球物联网总连接数达到 120 亿，其中我国的物联网连接数为 36.3 亿，在全球占比高达 30%，预计到 2025 年，全球物联网总连接数规模将达到 246 亿，年复合增长率高达 13%，而我国预计能够超过 80 亿个。大幅提高的物联网连接数会导致企业内部流量激增，传统的工业以太网、工业总线等技术的带宽已无法满足海量终端联网的需求；

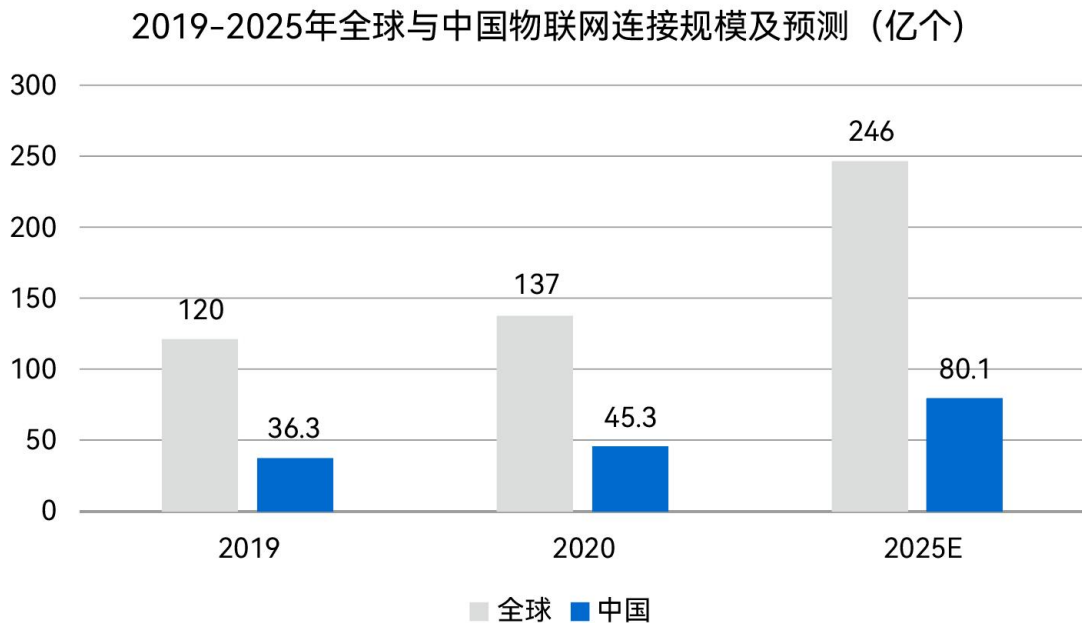


图 16 全球物联网连接规模

（2）业务类型越来越复杂。在制造业数字化转型过程中，AR/VR 辅助运维、数字孪生、机器视觉等新技术的发展，ERP/MES/WMS/PLM 等系统的打通，使得企业内部网络所需承载的业务数据类型越来越多，为不同类型的业务提供差异化的服务，是企业面临的一大难题；

（3）企业上云越来越普遍。企业上云有利于推动企业加快数字化、

网络化、智能化转型，提高创新能力、业务实力和发展水平，越来越多的企业已经上云或者正在规划上云。

2. 应用解决方案

(1) 基于 TSN 的多业务共网传输

在制造业，OT 被认为是现代工厂的支柱，它控制着工厂的基础设施，并使工厂生产线正常运转。同时，IT 也是必不可少的，从客户关系管理，到管理信息系统，到电子邮件，一切都是在 IT 基础架构上运行的，IT 和 OT 一直共存，但往往彼此独立。然而，随着工业物联网 (IIoT) 的出现，将网络传感器及其相关软件与复杂的物理机械结合在一起，IT 和 OT 之间的鸿沟正在迅速消散。OT 网络中普遍采用的工业以太网技术，可以很好地满足机器运动控制等实时性业务的需求，但是无法应对海量数据的连接和传输，而 IT 网络中普遍使用的普通交换机等产品，虽然可以提供更大的带宽和传输能力，但采用的“尽力而为”机制，在实时性、确定性方面又无法满足生产需求。

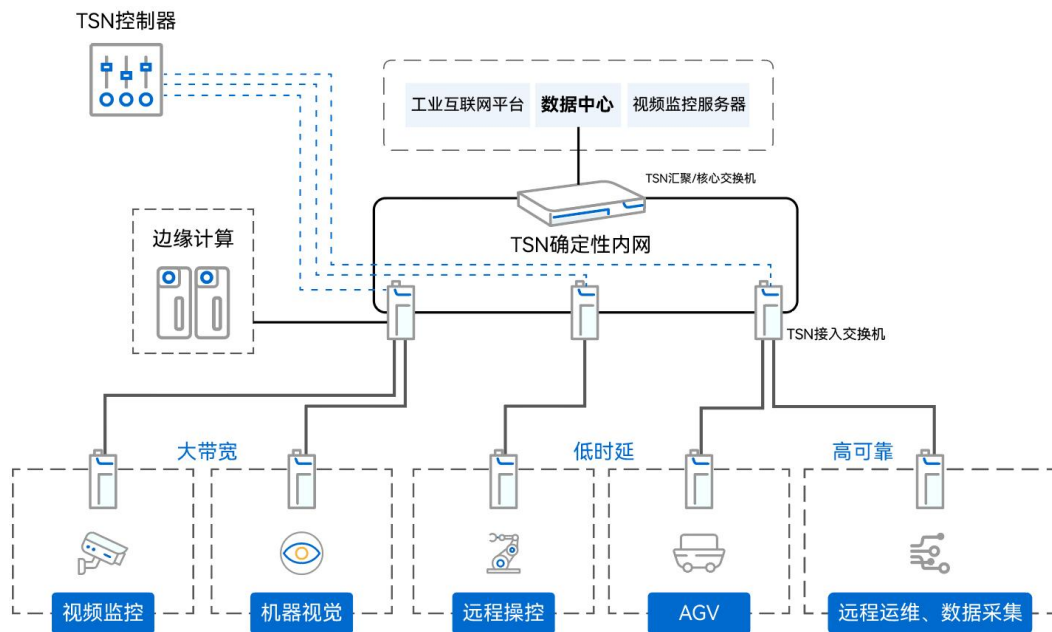


图 17 基于 TSN 的多业务共网传输方案

基于 TSN 交换机构建的确定性内网，既可以满足实时性业务的需求，也可以为海量数据的传输提供网络支撑，具有以下 4 种优势：

- ①通过 IEEE 802.1AS 和 IEEE 1588v2 协议，实现整个 TSN 网络误差在纳秒级的高精度时钟同步，微秒级的端到端传输时延上限，以及纳秒级的网络抖动控制，为远程操控等实时性业务提供确定性网络支撑；
- ②通过 IEEE 802.1CB 链路冗余等技术，提供高可靠的网络保障；
- ③通过 IEEE 802.1Qbv 门控技术，提供差异化服务，实现多种业务共网传输；
- ④TSN 采用标准的以太网协议，具备良好的互通性，改变了传统工业网络七国八制局面，通过与 OPC UA 技术结合，加速了企业 IT、OT 的融合。

(2) 基于 TSN+5G 的 PLC 远程实时控制

PLC 作为可编程逻辑控制器，广泛应用在运动控制、数据处理、工业过程控制、开关量逻辑控制等场景，但是随着智能化需求的日益增长，传统 PLC 已经不能满足工业智能化的需求：协议不统一、开放性低；控制系统除了要处理传感信号，还要处理视觉、语音等信号；要支持 5G 等无线通信。传统的 PLC 是做不到的，且 PLC 通常部署分散，不利于业务的调整与维护。云化 PLC 具备软硬件分离、易扩展、处理性能更强、统一的云端图形化编程和运维的环境等优势，实现了工业控制从有线到无线、从本地到云端的转移。

工业控制类业务，对时间要求极高，如下图所示：

业务类型	可靠性指标	端到端时延要求	消息大小 (Bytes)
运动控制	99.999%~99.999999%	500 us~2ms	20~50
移动机器人	> 99.9999%	1ms~50ms	40~250
对装配机器人、铣床等的远程控制	99.9999%~99.999999%	4ms~8ms	40~250

图 18 工业控制类业务对时间要求

因此 PLC 的云化部署，需要一个能够提供确定性转发能力的网络作为支撑，基于 TSN 和 5G 技术组成的确定性网络可以满足需求。

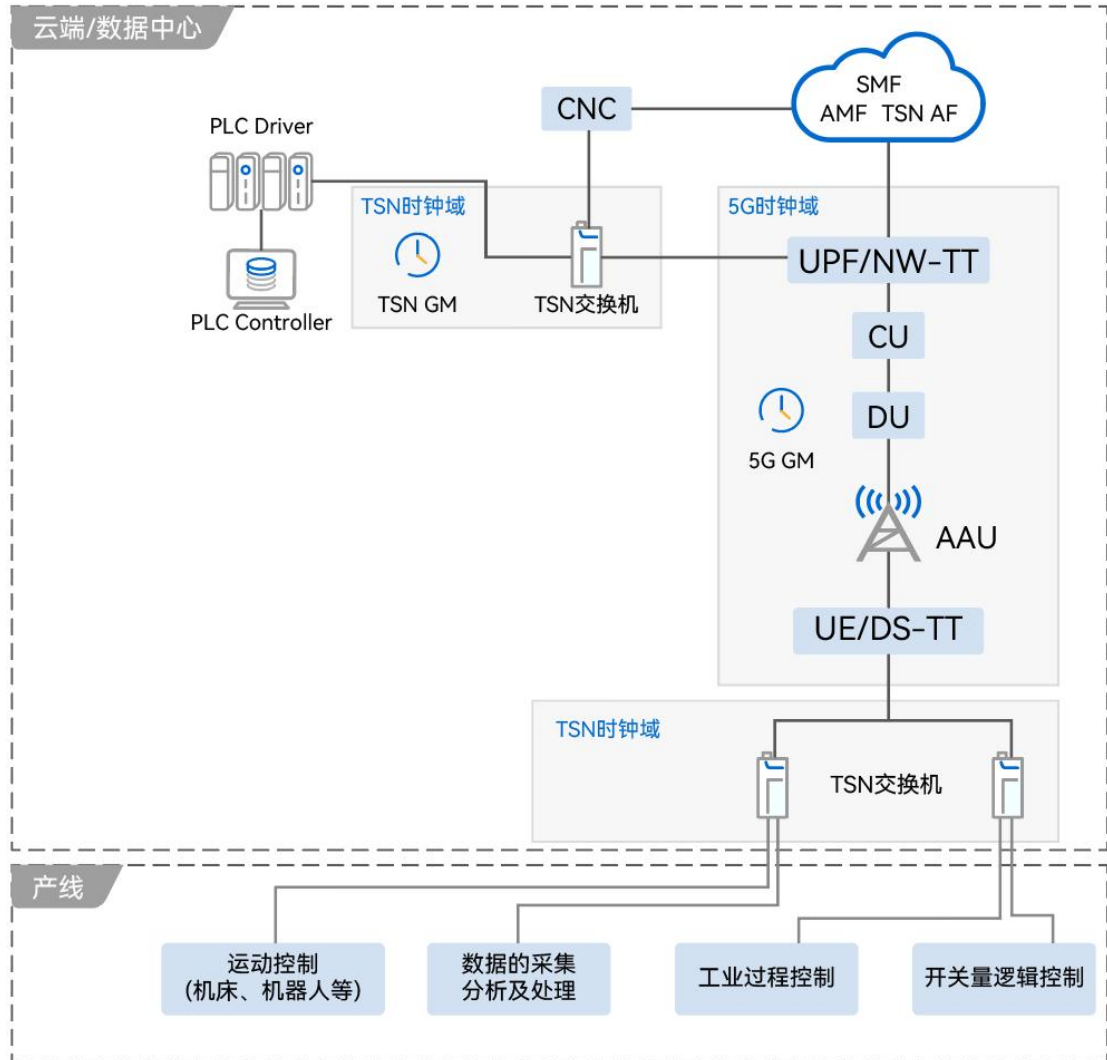


图 19 基于 TSN+5G 的 PLC 远程实时控制

如上图所示，将原先位于现场的 PLC 拉远至云端，通过 TSN、5G 网络，连接至现场设备，共同完成产线的运动控制、工业过程控制等活动。在 TSN 网络中配置 IEEE 802.1AS 使各个设备时间同步，以精确的时间同步为基础，在 TSN 交换机、UE/DS-TT、UPF/NW-TT 上配置基于时间的精确门控管理，实现 PLC 控制报文的低时延、低抖动转发。采用此方案

具备如下优势：①通过 TSN 与 5G 技术的结合，为 PLC 的集中、云化部署提供了技术支撑，有利于业务的及时调整以及 PLC 的统一管理和维护；②通过 CNC 对 TSN 交换机及 5G TSN 网桥的自动化配置与管理，网络维护工作简单；③PLC 云化部署后，减少了对硬件的依赖性，企业可以灵活地选择供应商，允许用户更换或添加组件并且不影响系统的其他部分，轻松实现 PLC 的可扩展性和系统模块化。

（三）汽车车载

1. 需求分析

（1）车载以太网现状

传统的车载网络是多种总线技术共存的，典型的如 CAN、LIN、FlexRay 等，“专线专用”是一大特点。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。

下图为车载网络架构的演进，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，再到未来一网到底，各类系统灵活互通，可以看出，以太网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架构，进行集中式的处理，同时大大降低了总线类型的数量，提升网络传输性能。

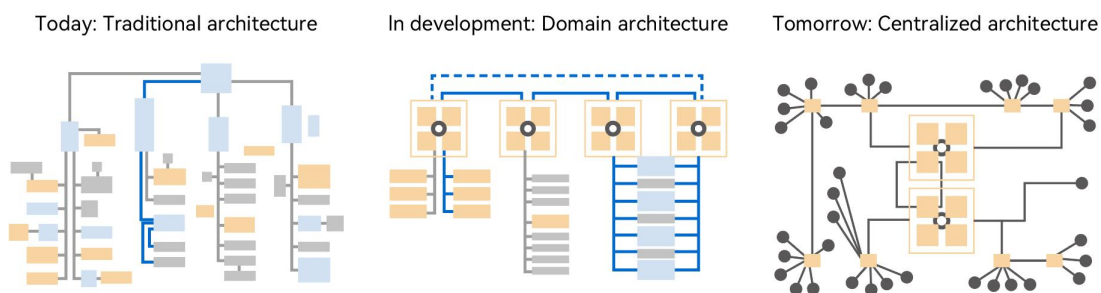


图 20 车载网络架构演进

车载以太网的需求如下：

①高带宽数据传输。自动驾驶系统中，涉及到大量的传感器数据传输需求。最典型的是摄像头图像数据和激光雷达点云数据。

②实时性与确定性。在高带宽数据传输下，如何保证数据在不同控制器，控制器与传感器间的传输时延、波动尽可能小以及部分控制指令满足实时性要求。例如自动驾驶应用对车辆控制报文的需求如下图所示：

需求	当前方案	方案缺陷
时延尽可能少	采用 DDS 通信解决方案中的 QoS 技术，控制报文优先发送	尽管 DDS 尝试通过使用有效的二进制协议来尽力而为，但它不能保证何自知性的行为，因为它不控制底层网络层
报文不丢包	通过丢包重传的机制来保证	可以保证不丢包，但是包的重传会带来时延

图 21 自动驾驶系统对车辆控制报文的需求

③高精度时间同步。不同传感器、控制器需要时间同步，来满足算法对时空同步的需求。比如在自动驾驶解决方案中的技术应用，要求传感器与域控制器之前高精度的时间同步，同时对时间同步的可靠性要求很高，为达到ASIL-D安全等级需要冗余备份主时钟。

(2) 车载以太网遗留问题

①传输确定性与可靠性无法保证。车载软件开发普遍遵循Adaptive

AutoSar（简称AP），但是在AP的规范并没有体现自动驾驶对传输确定性和可靠性方面的要求。另外目前的实现仅在软件协议栈层面做工作，仅仅在软件层面优先转发，在驱动和硬件层能够确定性的到达对端是无法保证的。

②实时性无法满足。在某些车载以太网应用中对传输的实时性有强制要求。比如智能座舱中对于HMI渲染的端到端传输时延要求 $<200\text{ms}$ ，自动驾驶应用中控制报文的传出时延要求 $<1\text{ms}$ 等，这在当前车载以太网的典型实现中都无法满足需求。

③时间同步策略过时。传统的NTP等时间同步策略在当前车载以太网应用中，无论是可靠性还是同步精度都无法满足要求，亟需精度更高和具备安全冗余备份的技术。

2. 应用解决方案

对于新一代车型的车辆控制，通过域控制器的交换机功能进行大量实时性周期数据传输。依赖IEEE 802.1Qbv和IEEE 802.1Qbu功能，可以实现分批分时的确定带宽和确定延时的数据传输，基本能够满足 $100\mu\text{s} \sim 1\text{ms}$ 的延时区间。满足传统CAN网络数据传输需求的同时，车联网的地图等应用也能够保证及时响应，在线音视频应用也能够流畅播放，实现了以以太网为基础的多域融合。

（1）应用场景 1- ADAS 域控制器传感器数据融合

①场景子类描述：

雷达，超声波，摄像头等传感器数据融合，对数据带宽要求很大，要求来自不同传感器的数据可以实时同步的传输到中央计算平台。

②数据流要求：

要求项	具体指标
传输周期	一般<10ms，比如车身反馈的车速、轮速等。
传输实时延	一般要求<1ms
数据丢包率	无丢包
最大帧长度	64-1500
数据安全	一般要求 E2E 校验确保数据安全

图 22 ADAS 传感器融合数据流指标要求

③应用的 TSN 协议标准

应用到的 TSN 协议标准为 IEEE 802.1AS-Rev、IEEE 802.1Qbv、IEEE 802.1Qbu。

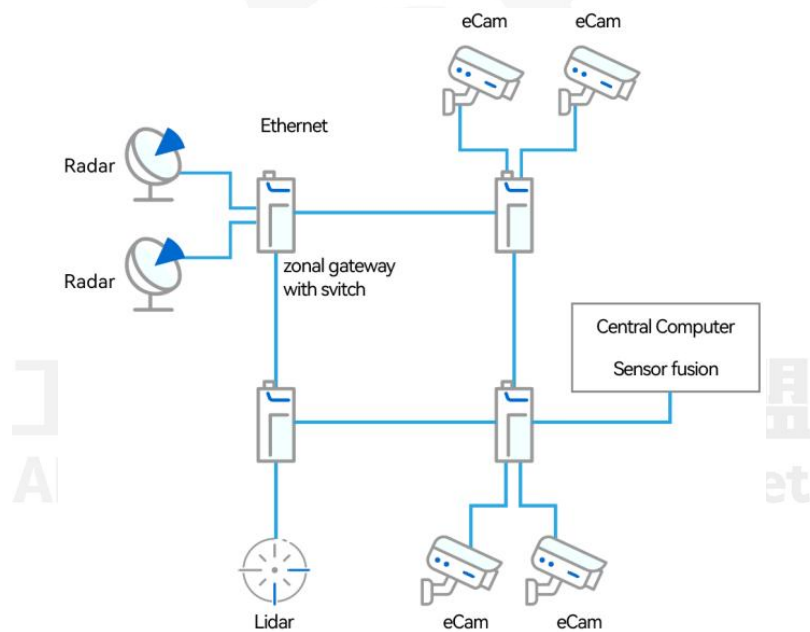


图 23 ADAS 域控制器传感器数据融合示意图

图中ADAS域控制器即Central Computer需要接收海量的传感器数据，对数据时延和网络带宽的要求高，配置IEEE 802.1Qbu和IEEE 802.1Qbv功能，可以保证以上数据传输链路的确定性和可靠性。

(2) 应用场景 2- L4 以上自动驾驶全冗余备份线路

①场景子类描述:

L4 以上自动驾驶, 需要保证数据传输链路的可靠性, 通过全冗余链路传输路径的设计保证关键信息流的可靠传输。

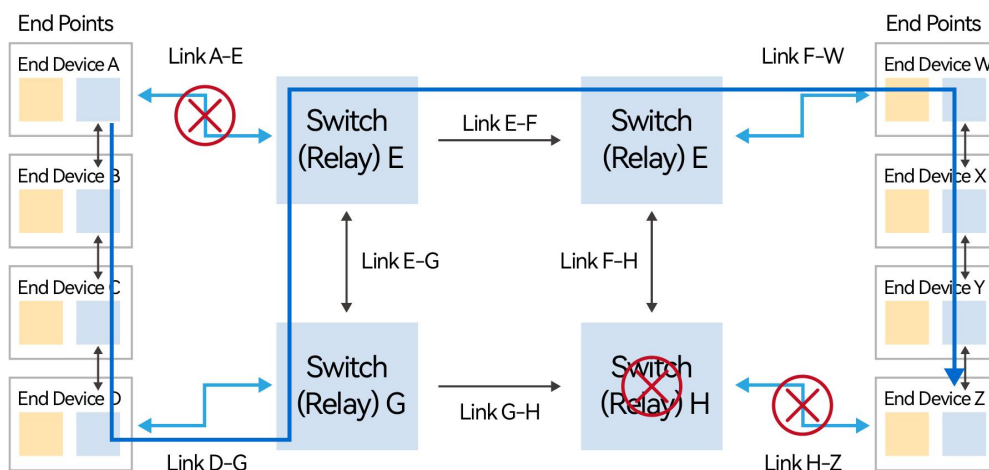


图 24 冗余备份线路示意图

②数据流要求:

包含链路全冗余设计以及无缝切换。

③应用的 TSN 协议标准:

应用到的 TSN 协议标准为 IEEE 802.1CB。

(四) 煤矿

1. 需求分析

近年来, 随着国家发改委、工信部和国家能源局等部门联合发布的《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》的落地, 智慧矿山领域愈加受到更多人的关注。特别是在 5G 技术的赋能下, 为打造智慧矿山创新型应用, 助力矿山行业转型升级奠定了坚实基础。通过 5G 技术赋能产业, 不仅有助于我国经济社会的绿色发展, 实现“双碳”目标, 也有助于推动人类命运共同体的构建。

作为能源矿产的重要组成部分, 我国煤矿大部分处于地表以下, 并

下掘进面、综采面等核心工作区存在较高危险性。因此，人员安全问题始终是煤矿生产的头等大事，利用 5G、大数据、新型网络等技术手段，实施智能采矿，将煤矿工人从艰苦的工作环境和高强度的体力劳动中解放出来，最大限度实现“少人则安，无人则安”。

综上，智慧煤矿行业主要围绕人员安全展开研究，在 5G 技术的赋能下，通过实现“无人矿卡、高清视频传输、远程控制、井下定位”以及“5G+融合通信一张网”等技术达到矿山的智能化和数字化的要求。目前，网络中不同设备以及不同制式系统下设备间的信息交互极为复杂，这对“这张网”提出了很高的要求。

2. 应用解决方案

不同于传统的以太网，面向工业互联网的下一代工业网络 TSN 在以太网的基础上引入了时钟同步、流量调度和网络配置等关键特性，可为对时间敏感的数据提供低时延、低时延抖动和低丢包率特性的传输服务。

无人矿卡场景中，用于远程控制的控制信息对 TSN 网络下不同设备的同步提出了较高的要求。结合 TSN 网络的时钟同步特性，实现远程对无人矿卡的控制，降低因网络造成的信号传输时延的影响。

此外，针对基于 TSN 的远程控制场景。

如下图所示，在 CPE1-1 与 CPE1-2 之间建立 L2VPN 链路 1，在 CPE2-1 与 CPE2-2 建立 L2VPN 链路 2，这种在 TSN 网络下的冗余传输（FRER）方案，可以提升数据传输的可靠性。井下的 TSN 网络（如图中的 TSN1）与井上的 TSN 网络（如图中的 TSN2）分别执行数据的上传和下载，利用 TSN 的特性以达到改善时延抖动和变无序为有序等目的。

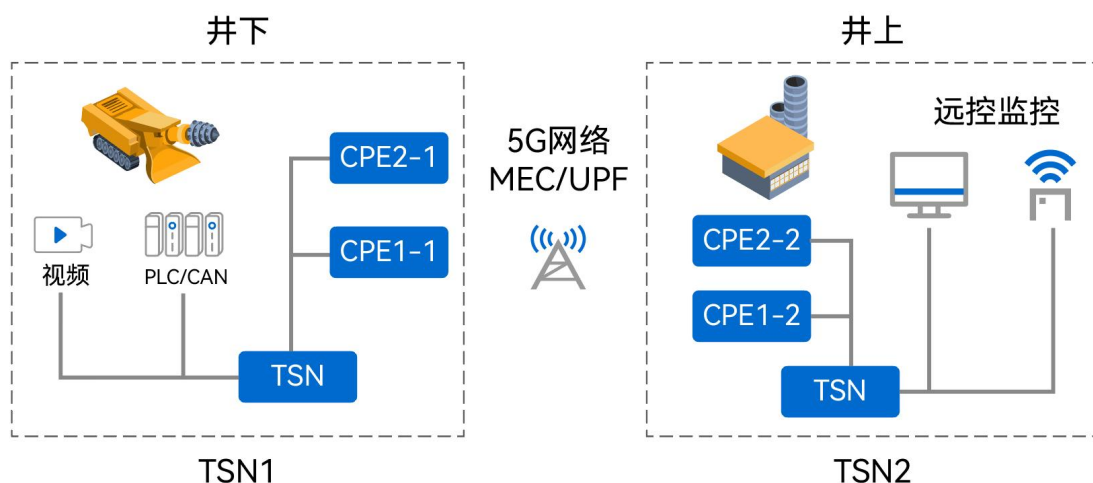


图 25 远程控制总体方案示意图

具体的特点如下：

视频流、PLC/CAN 的控制信息流通过不同的端口进入 TSN 网关的交换模块，PLC/CAN 的控制信息流为时间敏感的数据流，将时间敏感的数据流和时间非敏感的数据流在 TSN 网关处融合，TSN 在进行数据转发时，可以针对工业互联网不同优先级的业务数据进行队列调度，以保证质量的差异化。在这种应用场景下，TSN 可以针对各类工业应用涉及的业务流特性进行建模和定义，比如视频流和 PLC 远程控制流，以提供不同或相匹配的优先级与调度机制。

无论是无人矿卡、远程控制、高清视频传输还是定位等场景，都可通过时分复用或者频分复用机制实现不同优先级数据流的传输，对于应用在煤矿领域的 TSN 网络，虽然支持井上和井下使用一张网，但考虑到井上井下传输环境的不同，在同属于一张网的情况下，从信号的可靠性、时延要求等方面，实现两种不同网络的配置。煤矿各类井上、井下终端设备之间的控制信息传输，通过引用 TSN 网络下的帧复制和帧消除技术，通过增加冗余的方式来保证网络下系统的可靠性传输。

（五）钢铁

1. 需求分析

钢铁业务类型繁多，对时延的要求也不近相同，尤其是嵌入生产环节的控制类业务，对网络时延要求极高，如高速控制的连轧控制、运动控制的伺服电机控制的 PLC 扫描周期都要求在 1ms 以内，无人行车业务的 PLC 控制指令下达要求时延小于 10ms，一般启停控制操作如连铸的翻包机控制指令时延在 20ms-50ms。下面对钢铁中天车远控和连铸连轧控制对网络需求进行详细分析。

（1）天车远程操控/无人天车需求

钢铁企业生产制造、产品销售等环节涉及各类库区的天车作业，尤其炼钢以后的工序，涉及炼钢坯库、热轧坯库、成品库、冷轧原料库、中间库、成品库，集港集站区域物流暂存库等，库区天车作业无人化是钢铁行业的发展趋势。无人天车系统由检测感知系统、定位系统、视频监控系統、调度决策系统、PLC 控制系统、有线无线网络构成。

钢铁企业的天车设备大多用于搬运钢材和废钢，传统作业模式为天车工人 24 小时轮班现场作业，天车悬挂操作室人工操作，高空地面协调操作的方式，工作效率低，且工作环境恶劣，影响工人健康，所以天车远程控制，车间少人无人化将是未来天车操控的必然趋势。

通讯需求：①业务类别为控制信令下发，高清视频传输；②上行带宽： $\geq 50\text{Mbps}$ ；③下行带宽： $\geq 10\text{Mbps}$ ；④传输时延： $\leq 20\text{ms}$ ；⑤时延抖动： $\pm 5\text{ms}$ ；⑥可靠性： $\geq 99.99\%$ ；⑦覆盖范围：生产线。

（2）连铸连轧控制需求

连铸连轧短流程工艺是将钢水铸成不同规格的热坯直接进行轧制，自动控制轧机动作，以每秒几米至 20 米的轧制速度，将铸坯在相变温

度 723℃和 1200℃之间，按要求的金相结构和厚度精度进行压力加工，生产满足用户要求的热轧板卷。

通讯需求：①业务类别为控制信令下发，现场设备 PLC 响应；②上行带宽： $\geq 10\text{Mbps}$ ；下行带宽： $\geq 10\text{Mbps}$ ；③传输时延： $\leq 1\text{ms}$ ；时延抖动： $\pm 200\mu\text{s}$ ；可靠性： $\geq 99.99\%$ ；④覆盖范围：生产线。

在钢铁行业打造智能工厂过程中，行业涌现出的需求有以下几点：①对于工业控制的场景，网络通讯必须非常可靠；②现代钢铁制造拥有高度自动化的工艺生产线装备和大规模、标准化的制造过程管理体系。对有效发挥装备产能、实现效益最大化并降低成本有着迫切需求；③钢铁冶金劳动强度大，危险性高，生产工作环境恶劣，现场环境差，生产厂区大，设备布置分散。对通过网络化、数字化、智能化改造来提升工作效率和员工安全的需求十分迫切；④钢厂传统网络的部署和维护成本高，网络拓扑结构复杂，断网对生产影响大。急需稳定、可靠、安全的无线网络应用于现场生产中，作为基础生产网络的有利补充。

2. 应用解决方案

5G+TSN网络的低时延，确定性和高可靠等特性可以赋能钢铁企业生产网络。钢企生产网络可大体分为三个连接段：现场级设备部分、骨干/承载网络部分、中央管理/边缘云部分。为了支持跨层级数据全连接，5G+TSN网络与钢企生产的工控网络融合包括以下几种模式：

(1) 生产线集中控制器与单个机器自身控制器之间的通信 (L2C)。对应图中A，应用场景如产线自动装配、AGV自动化搬运、传送带、柔性生产等应用。

(2) 控制器与现场设备IO模块之间的通信 (C2D, C2/I0)。应用场景有远程控制，包括龙门吊远程控制、天车远程控制、堆取料机远程

控制，机器人动作控制，对应图中B。

(3) 机器控制器与控制器之间通信 (C2C)。典型应用场景如钢铁焦化四大车远程协同控制、机械臂协同装配，对应图中C、D、E。

(4) 设备与计算平台之间的通信 (D2Cmp)。设备与云平台、工业互联网平台、数据采集平台等之间的通信，非控制相关的通信，如钢铁行业智能监控系统、设备预测性维护，对应图中F。

(5) 应用于钢企生产网络，可为工业现场设备提供泛在无线网络接入，满足现场设备之间的通信；为工业现场设备和位于中央管理部分的控制器设备提供低时延高可靠的网络传输；以及现场设备通过5G+TSN网络进行数据采集、上云。

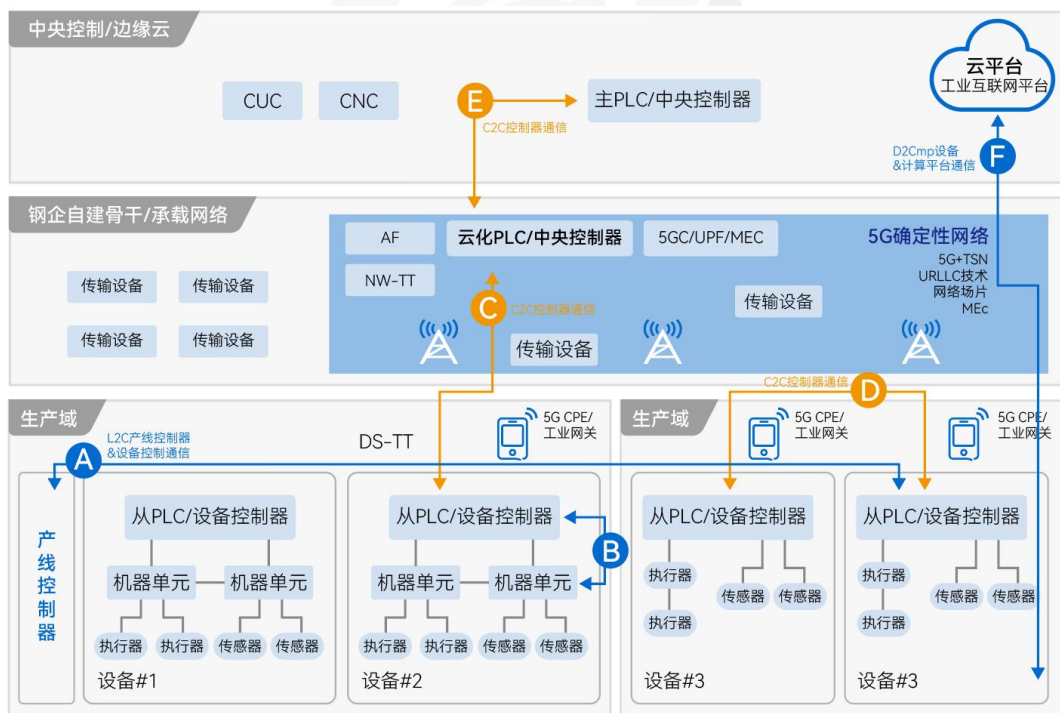


图 26 5G+TSN 网络与钢企生产网络融合的几种模式

(六) 电力

1. 需求分析

电力通信网的基本组成包括电力骨干通信网、电力厂站实时监控网以及电力通信接入网等，各类网络均需要在一定程度上满足电力业务的时间同步、通信服务质量保障、网络冗余、网络安全等确定性通信需求。

IEC 61850标准是电力系统自动化领域的全球通用标准，目前已经扩展到IEC 61850标准在风电、水电、变电、配电、分布式能源、微电网、储能及电动汽车等智能电网领域。国际上，采用TSN技术与IEC 61850等电力专用通信标准相结合的技术路线是当前电力确定性网络通信的研究热点。

美国能源部TSQKD项目（2018~2021）提出基于TSN及QKD（量子密钥分发）技术来实现安全可靠的确定性电力及工控通信网络，该项目中，TSN技术提供时间同步、确定性调控、配置管理和流量控制，QKD提供流量安全保护，同时实现通过TSN模型对QKD进行配置管理。

在国内，电力通信网对TSN技术特性的网络存在刚性需求，目前相应测试及应用正在有序进行。

2. 应用解决方案

TSN网络技术在新能源发电监控系统、智能变电站辅控系统、大型用电企业能源管理等电力领域具有一定的应用前景。

（1）大型并网光伏电站监控系统 TSN 网络应用

大型并网光伏电站必须配备自动运行、功能完善的数据采集与运行监控系统。通信网络是保证监控系统上传下达、高效快捷的关键环节，而通信网络体系在很大程度上决定了监控系统的拓扑结构，因此开展适应光伏电站数据采集与运行监控要求的通信网络技术研究势在必行。

TSN 技术应用于大型并网光伏电站监控系统，可使各个地理位置上较为分散的分布式发电单元之间实现时钟的精确同步，站控层关键控制

命令下发、现场层紧急状态上传等时间敏感数据与其他非敏感数据共享同一通信网络。这样既解决分布式网络中同步对时问题，又能够对不同厂商、不同类别的逆变器和其他相关电气设备进行监控，采集运行状态数据，智能控制现场设备，达到数据传输与共享，从而实现新能源电站管理效率的最优化。同时结合大数据模型进行故障预测与分析，能够及时发现并定位设备故障，为用户快速发现故障和排除故障提供有力支持，提供电站的整体发电效率，增加电站的经济效益。

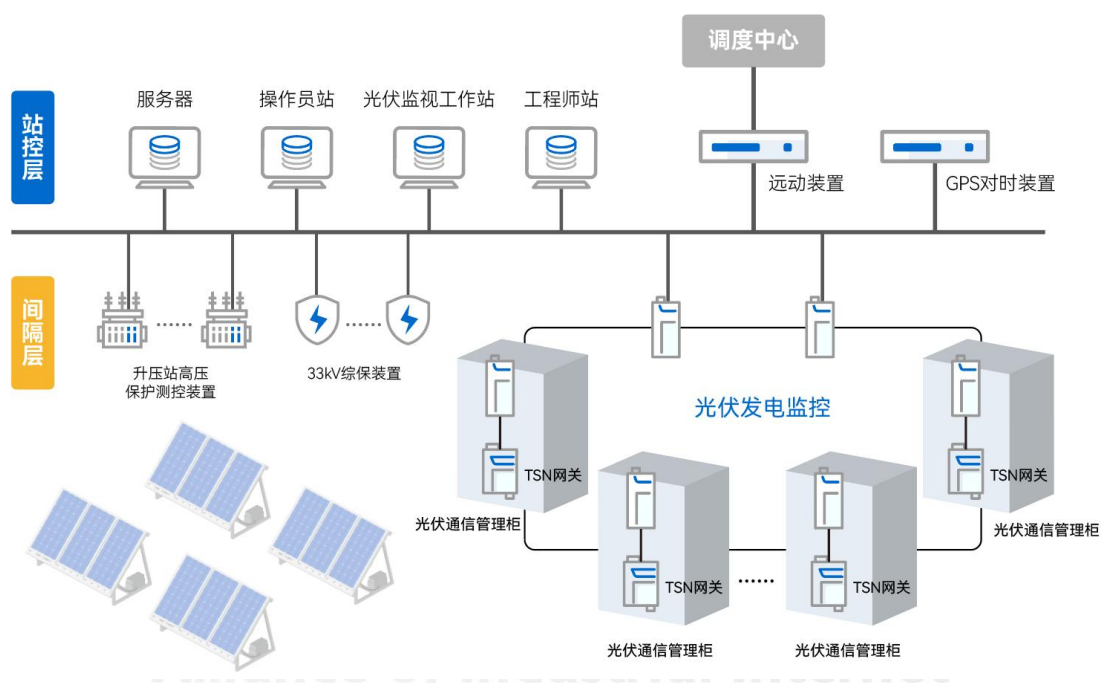


图 27 基于 TSN 的大型并网光伏电站监控系统结构图

(2) 智能变电站辅控系统 TSN 网络应用

变电站辅助设备监控系统提供视频监控、安全防护、环境监测、辅助控制等功能，对保障变电站安全可靠运行至关重要，是变电站信息化建设的重要支撑部分。

如下图所示，面对变电站中的安防、环境与视频监控等系统功能需求，应用 TSN 网络技术构建变电站辅控系统智能网络，既可以实现视频、

环境、安全防护等多元异构数据融合，又可以实现不同来源数据的统一建模与交互联动，为辅助生产设备及变电站运行环境提供完备的全景信息库，还可以实现原先各个独立的系统间数据的融合，从而达到变电站“数据集成、业务协同、管理集中、资源共享”的管理要求，可从根本上解决辅控系统的“信息孤岛”问题。

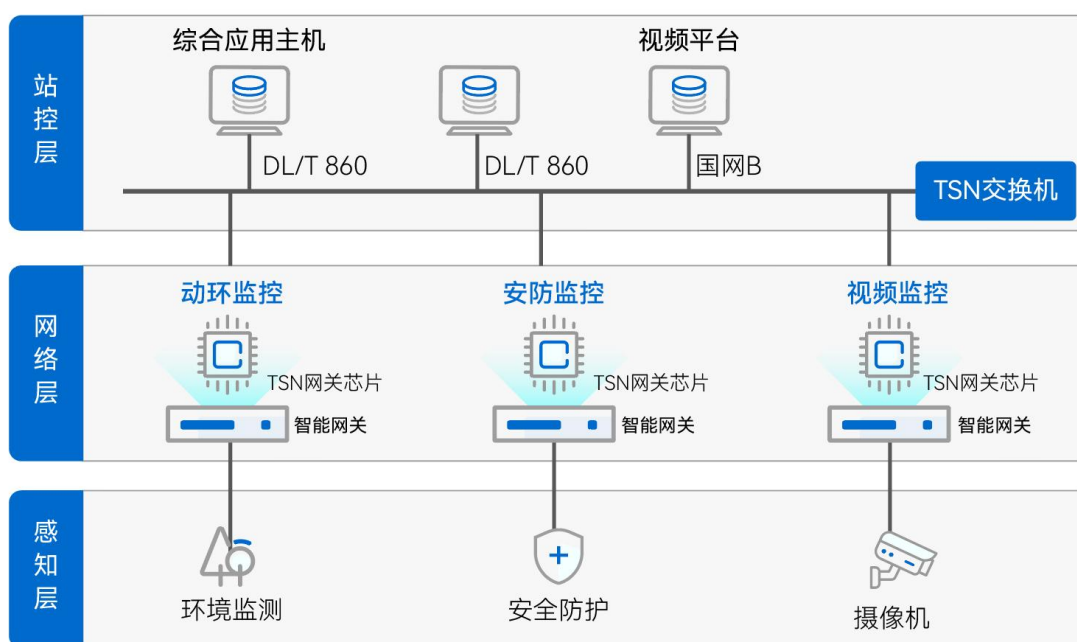


图 28 基于 TSN 的智能变电站辅控系统架构图

(3) 大型用电企业能源管理系统 TSN 网络设备应用方案

大型用电企业能源管理系统（以下简称 EMS 系统）是集动力能源过程监控、能源信息管理、能源调度为一体综合信息化管控平台。

在 EMS 系统应用 TSN 技术可提升 EMS 系统通信网络以下性能：①保证控制和告警等重要信息传输的确定性和可靠性；②实现 EMS 系统通信网络的智能运维管理，提升网络的运行可靠性；③支撑 EMS 系统网络升级到融合网络，支持设备灵活扩展、满足设备即插即用；④支持智能传感器、视频终端等异构信息安全无缝的接入；实现多业务数据的安全、

可靠、实时、高效的共网传输。

尽管 TSN 技术在电力行业有广泛的应用前景，但工程应用中依然亟需解决以下问题：①缺少工程化网络设计规划仿真工具；②缺少自主可控的 TSN 交换及端点芯片产品；③缺少电力专用的网络配置管理和网络监测软件；④缺少能够对电力各种场景应用的网络性能进行模拟验证的测试系统；⑤考虑 TSN 技术的工程化以满足现有电力各场景自动化通信系统的标准；⑥考虑现有存量的电力自动化通信系统的兼容和升级演进。

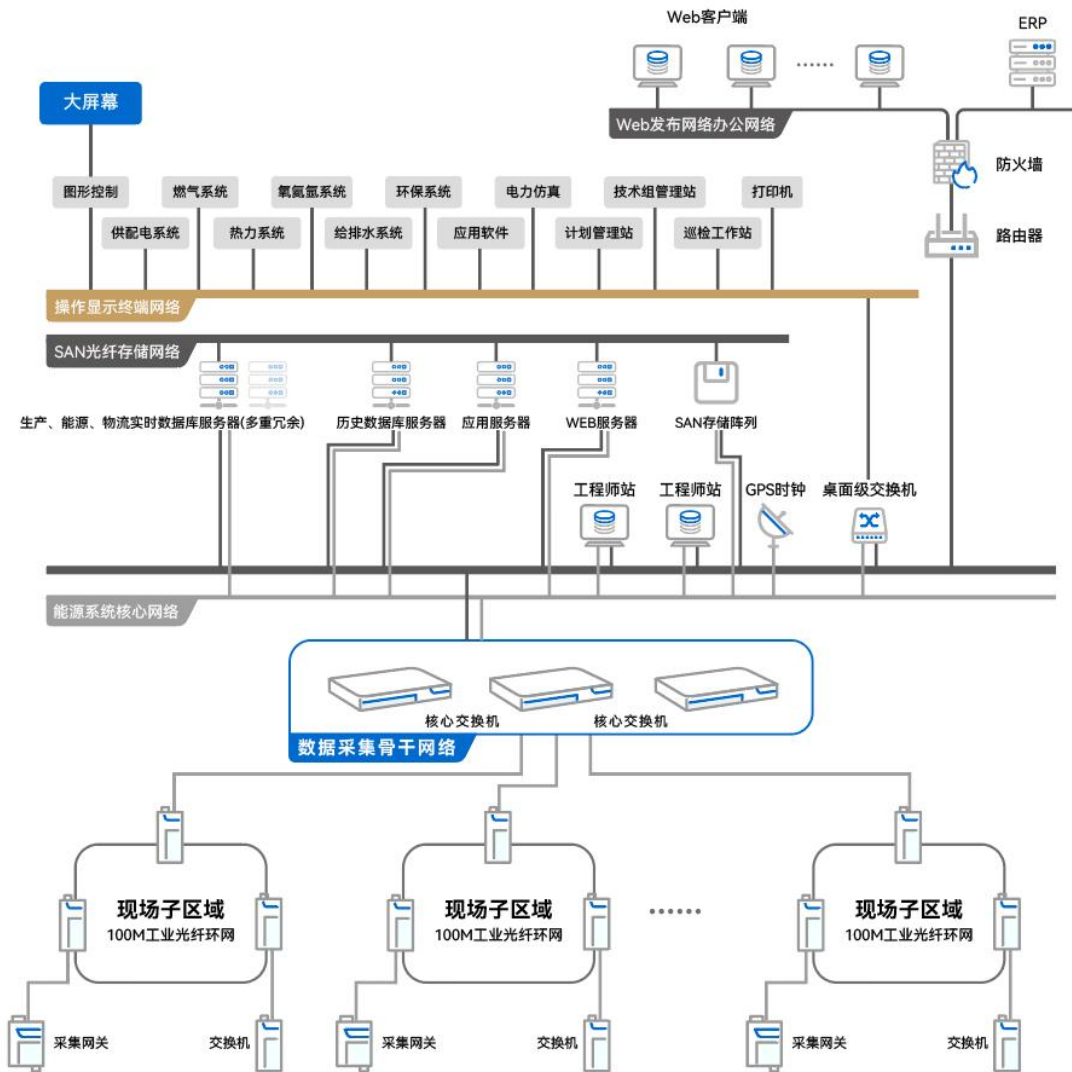


图 29 基于 TSN 的大型用电企业能源管理系统结构图

（七）装备制造

1. 需求分析

装备制造业涵盖了国民经济行业分类中生产投资类产品，主要包含金属制品业、通用设备制造业、专用设备制造业、交通运输设备制造业、电气机械及器材制造业、通信设备/计算机及其他电子设备制造业、仪器仪表及文化办公用机械制造业、金属制品/机械和设备修理等八个行业，其中部分装备制造业所生产的产品，如加工厂生产和物流成套设备，船舶、地铁、航空航天、军事装备等，其生产组织过程都非常复杂，这些对相关装备的设计和架构提出了较高的柔性可定制化的需求。并且，随着世界制造强国的高技术优势、国际产业转移态势和国际贸易的新动向，以及我国制造业发展的资源、环境和成本压力加大，我国装备制造业面临巨大的升级压力。

在网络选择上，传统的标准以太网和实时以太网无法在同一网络中进行数据传输，而对于边缘计算、工业物联网、智能制造的全局优化而言，制造现场控制所需的实时性数据和生产管理与优化层所需的非实时性数据，又需要通过统一网络在统一的数据平台上进行算法处理与数据分析，并能够下发到各个控制器执行；而一些外围传感器或者监测相关的数据并不需要通过层级的控制器，而是希望直接到边缘侧或者云端，但当使用同一网络时，这些需求存在一定的冲突。另外，对于装备制造业的用户而言，生产系统往往由来自不同企业的设备与系统构成，因此也希望有统一的网络与协议规范，独立于单一厂商的总线来满足系统整体智能化的需求。

2. 应用解决方案

（1）典型应用概述

随着 TSN 技术的发展，其低时延、确定性、高可靠的特点，统一网络实现实时与非实时数据承载的能力，以及基于以太网技术带来的高带宽和良好互通性等优势，在新研制的高端智能装备中逐步得到了应用。以面向工业 4.0 生产和物流应用场景的智能装备制造智能机器人飞毯 Fluid Logistics（简称 FL）系统为例，该系统为满足用户不同工业应用场景，实现柔性流水线、智能仓储等项目定制解决方案，采用了模块化设计架构，以积木式模组搭建的方式提供丰富的功能和灵活的扩展性。

FL 系统可提供超高密度地面存储，存储高度可根据需求、SKU 种类、Mover（移动平面）大小设置，柔性极强，库位大小可根据存储物品种类规格等进行随意组合，对于规格大小不同的存储单元实时自主动态的分配库位，不用根据规格进行库存位置的分类划分，全面提升空间利用率和库存效率。

（2）解决方案

在 FL 系统实现中，引入 TSN 网络架构实现了模组之间的实时信息传递和严格运用时序控制，统一了网络完成管理和监控，减轻工程部署的难度，提升不同规模应用场景下的灵活部署。

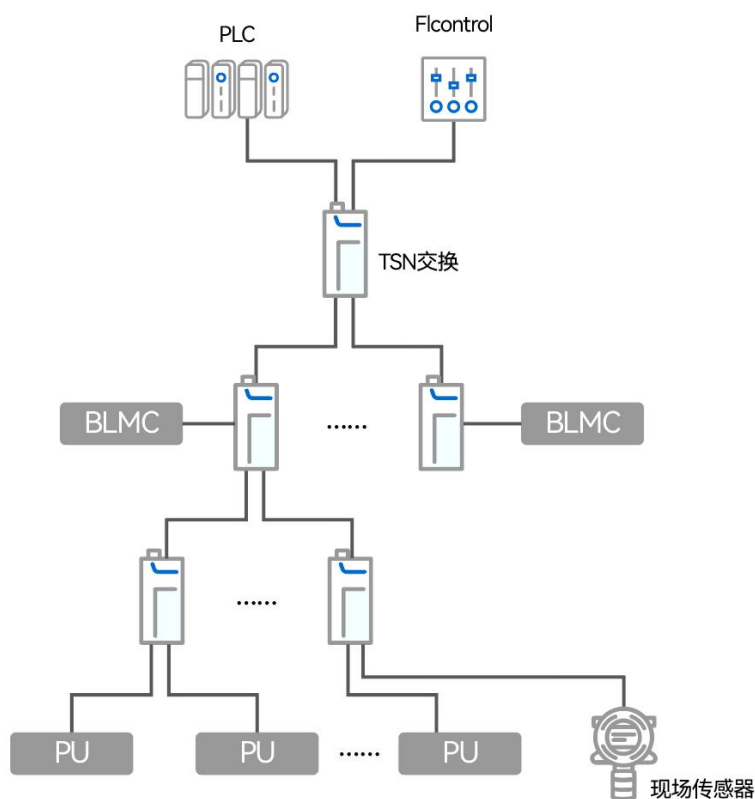


图 30 基于 TSN 的 FL 系统

通过 TSN 交换机提供的 GE 接口，实现 PU 与 PU 之间 100us 级的实时信息交互、PU 与 BLMC 以及 FL Control 之间的准实时信息交互，并且同一网络可支持视觉识别、光栅、位置等传感器工业物联网信息的统一传输，减轻了网络部署的难度，方便调度算法和控制逻辑的整体解决方案，具备良好的部署规模可扩展性。

系统在实际部署中，为进一步减少时延抖动，PU 模组内部实时应用软件通过与 TSN 网络时隙对齐的方式，对周期性数据进行同步处理，通过控制器对时隙的自动调配，进一步减小了邻居间信息传递的时延抖动，相比于传统通过大量低速直连的物理隔离链路带来的 4us 左右的时延抖动，引入 TSN 后，在降低网络物理链路复杂度的同时，邻居间信息交互时延抖动可降低到 1us 以内。

(八) 港口

1. 需求分析

港口作为连接海路运输和内陆运输的关键枢纽，在船舶在进港之后的整个作业流程中，各单位可通过对讲系统进行作业协同调度指挥。岸桥、龙门吊、集卡车等在内的几百台重型机械设备密集部署，具备典型的工业作业环境。港口生产的作业效率和自动化水平，是决定港口未来竞争力和经济效益的重要因素。在工业互联网大背景下，港口的数字化与自动化发展不仅将降低码头用工成本，最大限度地减少人机接触，保障人员安全，也将实现港口的高效、安全生产运营。

2. 应用解决方案

(1) 典型应用概述

TSN带来的高可靠、低延时和低抖动的特性支撑了港口远程控制方面的应用，港口龙门吊、自动行驶集卡以及各种PLC控制和传感器采集是目前比较典型的应用。如传统龙门吊需要司机爬到位于龙门吊顶端的驾驶台去操控龙门吊，具有存在安全风险、转场难等缺点。叠加TSN+5G技术后，利用网络的低延时性，可以把驾驶台后移到办公室，实现远程控制，不仅能节约成本，改善工作环境，还能提高工作效率。

应用场景	场景描述	网络需求	时延	带宽	可靠性
控制级通信	起重机远程操作之控制信息	超低时延，高可靠	10 ⁻ 20ms	50 ⁻ 100kbps	99.999
	起重机远程操作之视频信息	低时延，高可靠，大带宽	50 ⁻ 80ms	30 ⁻ 100Mbps	99.90%
	港区内自动集卡等应用	低时延，高可靠，多客户端，移动	<50ms	5 ⁻ 20Mbps	99.90%

监控级通信	人员通信	较大带宽，较大容量	<200ms	2~5M	90%
	传感器数据采集	容量要求高	尽量保证 尽量保证	尽量保证 尽量保证	90%

图31 港口物流业务对网络的需求

仓储系统的智能化要求越来越高，智能仓储系统需要解决大型货物的堆叠存放、抓取及传送的问题，涉及到机器人等机械设备大范围空间跨度的移动，以及多设备之间的协同操作，而且在生产安全方面要求即停即止，仓储货物平稳有序存取和传送。

但是传统网络连接方式，无法保障确定的网络传输，网络不稳定带来的时延，丢包会导致多设备协同操作存在问题，不仅影响产生效率，严重时还会出现设备失衡，或者传送时发生碰撞侧翻等生产事故。为解决此难点，需要一种高稳定时延、高可靠的有线+无线网络来取代传统网络，提升仓储智能化。

(2) 解决方案

如下图所示，针对港口物流引入的5G+TSN技术，集成了5G的移动性和TSN的低时延高可靠特性，使得集装箱装卸桥、轮胎吊等大型集装箱作业机械的自控系统状态信号、视频监控图像信号等信息，都可以实时传到后方机房服务器上，后方调度人员下达的作业指令，也可以迅速回传到机械，从而使得生产调度人员更加合理地调配生产机械，同时大型机械自动化改造的成本和难度也大大降低。

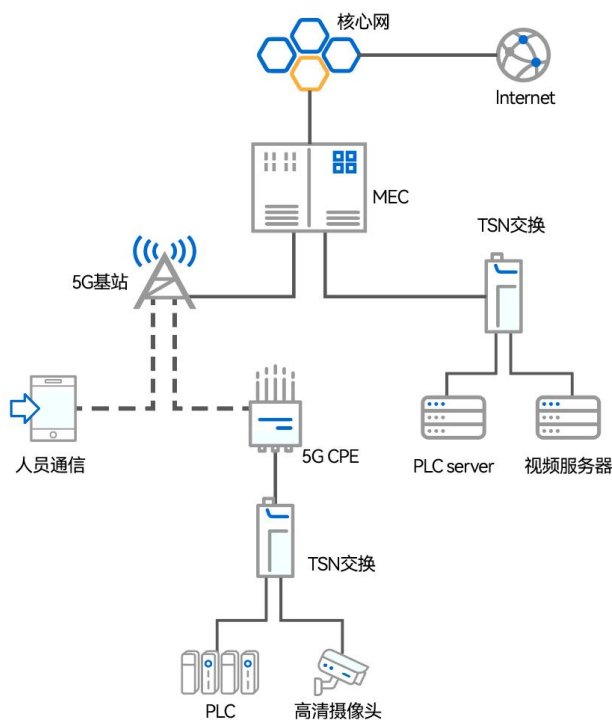


图32 港口物流业务引入5G+TSN技术

通过引入5G+TSN技术，统一网络实现时钟同步、确定性时延保障，并通过智能化调度，及时优化网络性能，保障端到端的SLA，支撑仓储物流场景的智能化，实现确定性时延，为智能仓储中紧急停机，远程控制，多设备协调等特有场景，提供了高可靠、低延迟的无线通信技术。方便引入机器人、PLC以及各种传感设备，实现对仓库中货物的智能管理，通过对各类货品进行堆叠摆放达到最大化的空间利用率。

四、TSN 解决方案展望

（一）端到端的技术成熟度催化

当前 TSN 核心关键技术挑战仍需攻关。一是端到端的 TSN 架构与技术，包括：TSN 终端设备协议栈、TSN 交换机芯片、TSN 网络控制器等。

二是有线与无线混合的 TSN 架构与技术，包括：时间敏感 Wi-Fi 技术、5G 确定性网络技术、5G-TSN 混合网络架构与技术、TSN over Wi-Fi 等。三是大规模 TSN 架构与技术，包括：TSN over DetNet 网络架构与技术、大规模 TSN 时延抖动控制技术、大规模分组网络确定转发技术等。TSN 关键技术的攻关将为其解决方案的完善与应用奠定理论与技术基础。

在未来，TSN 解决方案能否扩大，一个最核心的关键点在于 TSN 技术与各应用领域的技术融合程度。例如，在轨道交通应用领域，TSN 如何与 TRDP 协议进行融通，让 TSN 能承载关键业务流的确定性传输；在智能制造应用领域，TSN 与 Profinet/modbus 等众多协议融通，构建 IT 层与 OT 层的确定性通信；TSN 解决方案的技术攻关应该聚焦于此，形成强产业性的关联，为产业赋能或是 TSN 解决方案的正道。

（二）更具象的应用层面指导标准

当下，工信部发布的《工业互联网综合标准化体系建设指南》已经对 TSN 技术提出了一定的基础性标准建议和要求，IEEE 802.1TSN 工作组也对 TSN 技术中长期的标准框架提出了规划，从技术本身来说，TSN 的标准体系已较为完整。

但从 TSN 应用层面来说，标准体系几乎为空白，现有的规划不涉及到应用，例如 TSN 与各应用领域、各种协议、各种特定场景等结合应用后的强制性基本标准要求尚未出台，更不用说建设性的高标准性能标准。另外，TSN 应用在各个领域实现全面部署，前提之一是需要企业或工厂的数字化、信息化水平达到一定的程度，然而我国不少企业仍然存在明显不足。根据 2021 年工业互联网产业联盟针对我国工业企业调查数据显示，企业面临着数据存量不大、管理手段落后的突出问题：66%的企业存储数据总量不到 20TB，51%的企业仍在使用文档等原始的方式进行

数据管理。综上所述，TSN 应用解决方案的标准体系仍有极大完善空间。

（三）树立通用领域的明星典型标杆项目

聚焦汽车车载、轨道交通、电力、煤矿、航空航天、智能制造等行业，通过深入理解行业需求，有的放矢的制定高可靠、低成本、实施快的 TSN 解决方案，打造出知名标杆性先进应用示范项目，大范围推动 TSN 解决方案在行业的广泛应用。

当前 TSN 解决方案相对于成熟的现场总线方案并没有明显的优势，为了以点带面，扩大 TSN 解决方案的应用范围，需要考虑系统的兼容性并灵活处理。对于 TSN 解决方案可以较好应用的重点项目，推出完整的解决方案，尽可能考虑到每一种情况的应对措施。对于 TSN 解决方案并不算刚需的通用领域，可以从部分替代开始，比如用 TSN 交换机代替原有接入层和汇聚层交换设备，提高流量的可操控性和传输可靠性；用 TSN 网关代替原有网关，提高系统对于不同协议的兼容性，解决新旧设备不能兼容的常见问题；用 TSN 管理设备代替原有管理节点，提高系统整体的计算能力和空余带宽的利用率。

在 TSN 设备仍不能低成本量产的当下，TSN 标准与现有解决方案的融合同样是各解决方案提供商的思路。而一旦 TSN 技术成熟，大范围应用就只剩下时间问题，我们将会看到 TSN 大放异彩，TSN+5G 的应用也会在出现在日常生活的方方面面。

（四）生态互通，保证端到端一致性

TSN 要发挥出卓越的作用，基础是端到端都能支持 TSN，这要求 TSN 解决方案中涉及到的所有软硬件产品都支持 TSN，且互通性一致性良好。这意味着解决方案生态圈的构建至关重要，没有一个成熟可靠的 TSN 解决方案生态，商业应用可行性犹如空中楼阁，皆为梦幻泡影。

TSN 解决方案生态圈的构建，大体可从 TSN 芯片、TSN 端设备、TSN 桥设备、TSN 控制器、TSN 配置工具软件等五个方面出发，同时考虑到不同厂商之间的解决方案的生态互通性问题。

未来，无论是数字孪生，VR 还是 AR，亦或是元宇宙，都需要极高的确定性网络、极高的网络带宽、极高的柔性网络，这些明确且清晰的市场需求会催化 TSN 等确定性网络的前进。

我们现在能确定的是，TSN 亦或其它基于 TSN 衍生的未来网络，一个更好用更可靠的网络这是人们一直追求的，刚需不会被忽略，爆发前夜，前景无限。

五、缩略语对照表

中文名称	英文缩写	英文全拼
时间敏感网络	TSN	Time-sensitive Networking
确定网	DetNet	Deterministic Networking
5G 确定性网络	5GDN	5G Deterministic Networking
服务质量	QoS	Quality of Service
增强型移动宽带	eMBB	Enhanced Mobile Broadband
超可靠和低时延通信	URLLC	Ultra-reliable Low Latency Communications
大型机器通信	mMTC	Massive Machine Type Communication
软件定义网络	SDN	Software-defined Networking
尽力而为	BE	Best-Effort
媒体访问控制	MAC	Medium Access Control
网卡	NIC	Network Interface Card
中心用户配置	CUC	Centralized User Configuration
中心网络控制	CNC	Central Network Controller
广义时钟同步协议	gPTP	generalized Precision Time Protocol
运营/操作技术	OT	Operational Technology

中文名称	英文缩写	英文全拼
第三代合作伙伴计划	3GPP	3rd Generation Partnership Project
用户网络接口	UNI	User Network Interface
整数线性规划	ILP	integer linear programming
OPC 统一架构	OPC UA	OLE for Process Control Unified architecture
Profinet 总线标准	Profinet	Process Field Net
以太网控制自动化技术	EtherCAT	EtherNet Control Automation Technology
控制与通信链路系统	CC-link	Control&Communication Link
音视频桥接技术	AVB	Audio Video Bridging
开放式系统互联	OSI	Open System Interconnection
终端侧 TSN 转换器	DS-TT	Device-side TSN translator
数据分发服务	DDS	Data Distribution Service
工业物联网	IIOT	Industrial Internet of Things
芯片系统	SoC	System on a Chip
列车通信网络	TCN	Train Communication Network
多功能车辆总线	MVB	Multifunction Vehicle Bus
绞线式列车总线	WTB	Wire Train Bus
以太网列车骨干网节点	ETBN	Ethernet Train Backbone Node
以太网编组网节点	ECNN	Ethernet Consist Network Node
可编程逻辑控制器	PLC	programmable logic controller
能量管理系统	EMS	Energy Management System
高级驾驶辅助系统	ADAS	Advanced Driving Assistance System
汽车安全性等级	ASIL	Automotive Safety Integrity Level
自动导引运输车	AGV	Automated Guided Vehicle