



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

TSN协同高品质工业园区技术 蓝皮书

工业互联网产业联盟（AII）
2025年5月





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

TSN 协同高品质工业园区 技术蓝皮书



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

工业互联网产业联盟

2025 年 1 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：aia@caict.ac.cn

编写说明

《TSN 解决方案白皮书》发布后引起各行业的广泛讨论，为企业网络 IT 和 OT 融合指引了方向，各企业逐步将 TSN 解决方案纳入网络顶层规划或企业建网标准中。但是受限于 TSN 生态的发展、TSN 设备当前不能低成本生产等因素，直接将企业网络切换到 TSN 目标网络的时机还不成熟。

本蓝皮书以《TSN 解决方案白皮书》为目标架构，以当前主流应用的确定性、高可靠、无线化和智能化技术为基座，将 TSN 网络及其技术通过融合、转接等方式协同起来，打造一张融合网络。网络建设中既能实现 IT 与 OT 网络的融合，达到数据上得去、智能下得来的目标，又能将老旧网络逐区域替换到 TSN 目标网络，最终平滑演进到端到端 TSN 目标网络架构，避免一次建设造成投资浪费。因编者水平有限，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。

牵头编写单位：中国信息通信研究院、华为技术有限公司

参与编写单位（排列不分先后）：中国移动研究院、中国电信研究院、中国联合网络通信有限公司青岛分公司、北京数字基建投资发展有限公司、北京天玛智控科技股份有限公司、古井集团有限责任公司、海尔智家

编写组成员（排列不分先后）：张浩、张恒升、赵亮、苗甫、吴彦君、刘鹏、蒋铭、陈洁、朱瑾瑜、高思伟、孙健、邵梅、张涛、张瑞超、何涛、赵能钰

目录

1 工业园区网络发展趋势3

1.1 工业园区网络发展趋势3

1.2 工业园区网络面临的挑战 3

1.3 TSN 技术加快下一代工业网络架构演变 5

2 TSN 协同高品质工业园区解决方案框架7

2.1 需求来源 7

2.2 方案简介 9

2.3 方案价值 13

3 TSN 协同关键技术15

3.1 确定性 15

3.2 高可靠 17

3.3 无线化 19

3.4 智能化 21

4 TSN 协同高品质工业园区典型场景23

4.1 工业制造园区网络应用场景分析23

4.2 泛工业生产网络应用场景分析 25

5 总结与展望27



1

工业园区网络发展趋势

1.1 工业园区网络发展趋势

2015 年 5 月，中国国务院正式印发《中国制造 2025》，并将“中国制造 2025”定位于国家战略高度，发文首次在国家层面提出工业网络各要素的互连互通要求。2017 年 11 月，《关于深化“互联网+先进制造”发展工业互联网的指导意见》正式发布，意见中强调了“夯实网络基础”的重大目标，旨在大力推动工业网络互联的基础设施建设、改造和升级。2020 年 4 月，随着国家发展和改革委员会在新闻发布会上首次明确了“新基建”的范围——包含以 5G、工业互联网和物联网为代表的通信网络基础设施，工业互联网的网络体系建设再次被推向顶峰。2020 年 12 月，工信部发布了《工业互联网创新发展行动计划（2021-2023 年）》，文件中颁布了“网络体系强基计划”，对工厂内外网、设备网联等多个网络领域的发展提出了明确的要求，确定性网络等新型网络技术被重点提及。

1.2 工业园区网络面临的挑战

工业网络作为关键基础设施，为各种工业数据、产品数据和应用数据的全流程流转和无缝集成起到关键作用。为了满足工业网络的需求，传统的网络技术面临新的挑战，如工业领域的自动化控制场景需要解决端到端的确定性传输问题、网络的运维管理要满足工业的部署场景要求。

- 网络对确定性时延要求越来越高

传统以太/IP 网络主要服务于办公互联网、消费互联网，基本没有考虑工业领域的自动化控制、运动控制等场景，在数据传输的时延、抖动、可靠性等方面需要有新的技术突破，才能满足工业网络的严格要求。比如，现场级的自动化控制系统对确定性的数据传输时延要求非常严格，在一些高精度机床上的运动控制的指标甚至要求达到 1ms 以下。

- 各类终端的无线化接入需求愈发强烈

各行业例如工业、电力等都在以未来提高灵活性和多功能性、改善资源效率及成本效益为主要目标。无线通信可以解决有线的部署和维护问题，降低部署和维护成本，可以支持更高的移动性、更方便产线的灵活配置。随着其通信性能越来越接近有线通信性能（例如低时延、高可靠等），越来越多的应用将采用无线的方式进行通信，尤其在未来的智能工厂将采用灵活的模块化生产系统，而不是静态顺序生产系统，这包括更多的设备移动和多功能生产资产，这就需要强大而有效的无线通信技术和本地化服务。

- 网络的可靠性要求显著提升

传统的园区以太/IP 网络主要服务于办公网络，虽然在可靠性方面具有一定的能力，但是面向工业生产还需要进一步增强这些能力。传统园区总的办公、视频监控等业务对可靠性要求不高，亚秒级甚至秒级故障倒换即可满足要求。工业现场的控制业务往往都在毫秒级，这样就要求保护倒换要更快，甚至要达到亚毫秒级。

- 运维管理需要更加智能

随着社会经济的发展、科技的进步，工业生产的规模越来越大、复杂性也越来越高，需要联接的人、机、物越来越多。据测算，到 2030 年，全球联接数将增加到 3000 亿。与此同时，工业生产领域的少人化、无人化发展促进了机器人、机器视觉、视频监控等新业务的广泛应用，这对工业网络也提出了更高的要求，不仅需要带宽更大、时延更短、抖动更小，也要求更易运维管理。工业网络运维管理的一个基本原则就是“0”工作量，即简单直接，不能给工业生产带来额外的负担。未来的工业网络需要满足如下要求。1) 工业终端要做到即插即用，“0”配置。这势必要求未来的工业终端遵循一个开放、标准的协议体系。2) 工业网络必须是服务化的软件定义网络。通过网络控制器的北向接口开放，按需提供自动化的联接服务，实现机器与人、机器与机器之间的无缝联接和业务与网络的融合。3) 网络的数字孪生是智慧工厂数字孪生的一部分，

采用随流网络测量、大数据分析、智能化预测等新技术，预测故障的可能发生点，提前消除风险、快速解决问题，降低运维复杂度。

1.3 TSN 技术加快下一代工业网络架构演变

工厂内网技术的进展比较缓慢，一直沿用基于 ISA-95 架构的分层网络。随着传统工控系统向新工控架构演进，整个工厂内网的架构也发生了巨大变化，传统工业网络的架构也需要进行变革。

得益于数据通信技术的快速发展，采用 IP 化的网络方案进行互联互通已成为工厂外网建设的共识。尤其是工业互联网产业联盟发布的《TSN 解决方案白皮书》，使得基于标准以太网技术的工业网络确定性服务成为可能。比如 TSN+OPC UA 解决方案提供了一个实时、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，可以满足工业应用的各种传输需求并提升工业现场的信息交互效率。TSN 最大的特点就是通过精确的时间调度、确定的传输时延、优先的传输工业控制报文、自适应进行非 TSN 终端的流量学习调度，不仅满足新工控架构下智能终端的接入，也能满足传统工控架构的接入。

同时我们也看到，现阶段 TSN 仍然没有得到广泛的应用，《TSN 解决方案白皮书》认为 TSN 的技术难度较高，主要表现在如下几个方面：第一，TSN 需要提供的网络指标（带宽、延迟、抖动、丢包率、可靠性、时钟同步精度等）跟 TSN 的组网拓扑，组网规模，设备异构，网络异构等都有巨大关系，这些指标又和业务需求高度相关；第二，TSN 的目标是实现 IT 和 OT 的融合。但是实际上 IT 和 OT 差距比较大，相关人才也较少；第三，TSN 的管理控制难度大；第四是 TSN 的生态还在持续构建，支持 TSN 的终

端器件、网络设备以及工业控制设备等节点都具备才能达到各个节点相互约定的数据发送和接收，流量的时延和抖动可控等等。

从《TSN 解决方案白皮书》我们提炼出 TSN 解决方案的目标是实现 IT 和 OT 的融合，但是融合不是一蹴而就的，融合是一个新旧交替的过程，因此在进行解决方案设计时，核心的关键点在于 TSN 技术如何与 IT 技术融合、协同。通过 TSN 技术与传统技术的协同，打造一个从既满足于当前业务诉求，又能平滑演进到目标架构的综合解决方案，形成强产业性的关联，为产业持续赋能。



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

2

TSN 协同高品质工业园区解决方案框架

2.1 需求来源

生产要求零中断，网络必须高可用高可靠

精密制造的生产工序超过 1000 道，期间需要不断地循环检测、更改配方，每道工序出现异常都会影响良品率，例如需要不停对硅原料、化学试剂、超纯去离子水、空气灰尘量等大量生产因素进行检测，整个过程要求网络零中断地传输相关数据。另外，精密制造工厂内制造设备和主机服务器之间、工厂内系统之间均存在大量单播、组播消息，消息交互非常频繁，对网络的连续性、可靠性要求高，对网络的智能化运维排障诉求强烈。业界专家预测，半导体工厂一旦生产停工，会造成巨额损失（据典型测算，停工 30 分钟，损失 5000 万美元，平均每秒损失 2.6 万美元），因此必须建设零中断的生产网。

零中断主要的表现为业务不感知网络调整，生产网的关键业务主要为机台和 EAP（Equipment Automation Programming，设备自动化管理系统）等生产业务系统间的通信，其可容忍的网络中断时间均在秒级以内，因此网络调整时间建议在 500ms 左右；在生产业务系统网络内，服务器的双网

卡接入需要网络配套双活网关，并且双活网关需要满足实时的表项备份以及毫秒级别的切换性能。

多业务一网承载

传统的办公网络考虑到运维主体、部门协同、业务带宽等各种因素，办公电脑/笔记本接入、安防监控、物联类哑终端接入都有一张独立的物理网络。传统的工业生产网络由于历史原因，一般都是基于业务系统进行建设。如城市管廊中会建设环境监测、消防和安防独立的物理网络；又如煤矿井下也会建设安全监控环网、控制通信环网、视频监控环网等多张业务环网。基于业务系统建设网络的方式存在建设成本高、设备冗余和维护不便等显而易见的问题。之所以采用这种方式，主要是受限于传统网络技术，无法在同一张网络上保障不同业务之间的 SLA（Service Level Agreement，服务水平协议）。

工业园区各类终端都要接入网络

在企业数字化转型过程中，为了对业务链进行量化、可视化，将之前不可见的线下数据拿到线上，生产现场增加了多个摄像头、仪表、传感器等接入设备；为了实现智能化工厂，车间人员越来越少，移动机器人等智能终端也要接入网络，厂区的接入设备数量爆发式的增长。

在办公园区，通过视频会议等手段加强员工、供应商之间的沟通和交流；在生产现场，将生产设备、仪器仪表、智能终端接入到园区网络，在园区进行汇聚，上传到大数据中心，进行分析建模和生产管理；

由于传统工业内网先天存在互通难、开放性差等问题，目前仍存在着协议“七国八制”、数据大量沉淀形成信息孤岛的问题。为了充分挖掘数据

中的商业价值，为企业降本增效，既要“数据上得去”，这需要企业各类生产设备可以通过有线、无线等方式灵活联网，使数据平稳上传；又能“智能下得来”，即将融合数据、AI 训练、智能决策等结果下达到端，这需要工厂的网络协议统一，能根据业务进行隔离及 SLA 保障。

网络运维水平亟需完善

目前网络运维及故障定位很大程度取决于运维人员水平，缺少先进的运维管控系统，问题定位时间普遍较长。业务在 IP 网络中的走向、传输质量难以感知和控制，例如丢包，时延等。随着网络上承载的业务越来越多，越来越需要智能管控系统，对现网业务进行图形化展现。能针对业务进行故障定界，在网络变更操作前可以对网络故障进行仿真，传统的网管系统已经很难满足日益复杂的网管管控需求。

2.2 方案简介

高品质的工业园区网络，应具备“极致可靠”、“灵活接入”、“智能运维”3 大技术体系。极致可靠包含网络确定性和高可靠，确定性保障网络在承载多种业务类型时，确保每个业务有独立的带宽管道，业务运行中不会受到其他业务带宽冲击。高可靠保障网络承载业务不受损，在网络发生故障时通过检测、隔离、自愈等操作快速切换业务路径，确保承载业务不感知网络故障，达到业务 0 中断的效果。确定性和高可靠确保承载网络满足业务 SLA 诉求。工业园区典型业务 SLA 诉求如图 2-1 所示；灵活接入则指在网络建设中，需要考虑各种类型的终端都能将数据传输到应用平台，用于整体决策分析，尤其是无线终端，要保障在终端移动过程中网络不掉线，业务不受损；智能运维则是通过智能化工具实现网络 and 业务的实时体验可

视，直观的呈现业务、网络、设备三个维度的运行状态，达到业务全路径可视，网络故障 1 分钟发现、3 分钟定位、5 分钟恢复。

业务类型	业务类型描述	业务流向	时延	带宽
启停控制	针对皮带机、堆取料机慢速运转的设备，发送控制指令进行启动停止等操作，针对 5A 系统的风扇等进行启停，调速等操作	南北向	>100ms	25kbps
软实时控制-控制指令	对门机等较高速运转的设备进行远程控制，设备运转相对启停要快，但未达到硬实时	南北向	<20ms	50~100kbs
软实时控制-现场操作视频	需要软实时控制的机械，以门机为例，每台设备会安装 40 个摄像头，用于高清视频回传，充当操作员的“眼睛”，高速移动或者伸缩时带宽会突发	南北向	<100ms	静止 2M/每路，高速移动突发 25M/每路
数据采集	将加装的物理传感器数据或者装备与系统本身的数据上送到数据中心，处理后进行预测性维护等操作	南北向	>100ms	10~20Mbps
视频监控	摄像头视频回传，用于对现场进行安防监控	南北向	>100ms	30~100Mbps
巡检终端/移动电话	巡检人员手持终端进行巡检，巡检数据实时回传到云端；工作人员之间通过移动电话/对讲机进行实时对讲	南北向	>100ms	25kbps/每路

图 2-1 典型业务 SLA 诉求

TSN 协同的理念：以 TSN 为技术基础，以《TSN 解决方案白皮书》中的解决方案为目标，从传统 OT 现场生产网，扩展到生产 IT/OT 融合一张网；TSN 技术协同“极致可靠”、“灵活接入”、“智能运维”3 大技术体系，打造 TSN 协同高品质工业园区网络。

与极致可靠的协同包括网络切片、环网快速倒换协议、M-LAG 冗余协议等技术协同，实现端到端网络中故障快速检测、故障域自我隔离、故障点快速自愈/逃生的可靠性机制，将网络故障控制在业务可容忍范围内，达到业务维度 0 中断。

与灵活接入的协同包括各种类型的终端通过端侧设备接入网络后，端侧 TSN 交换机通过自身流量分析等能力，做到终端流量的合理调度和分配。使得终端无需支持 TSN 即可接入 TSN 网络，实现 TSN 网络即插即用。这样

传统的 Wi-Fi (Wireless Fidelity, 无线保真)、IOT 等各种终端都能接入到 TSN 网络中来, 保障了在往 TSN 目标方案演进过程中传统终端的复用。

与智能运维的协同是指在 TSN 协同工业园区方案建设过程中, 配套人工智能进行故障推理, 提前识别潜在故障, 同时快速提供修复建议, 切实提升网络可用性, 弱化网络运维人员的技术要求, 达成网络的可管可控可运维。

TSN 协同高品质工业园区网络解决方案以 TSN 技术为核心, 协同网络切片、Wi-Fi 等技术, 为制造、矿山、交通等各个工业场景提供 IT/OT 确定承载、有线无线泛在接入的新型工业网络, 打造工业生产的统一网络底座。同时, 结合 SDN、随流检测和大数据分析技术, 使工业网络具备自动化部署和智能化运维能力, 极大简化网络部署难度, 提升网络运维效率, 让工业网络中再无“网络孤岛”。其网络架构如 0 所示。

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

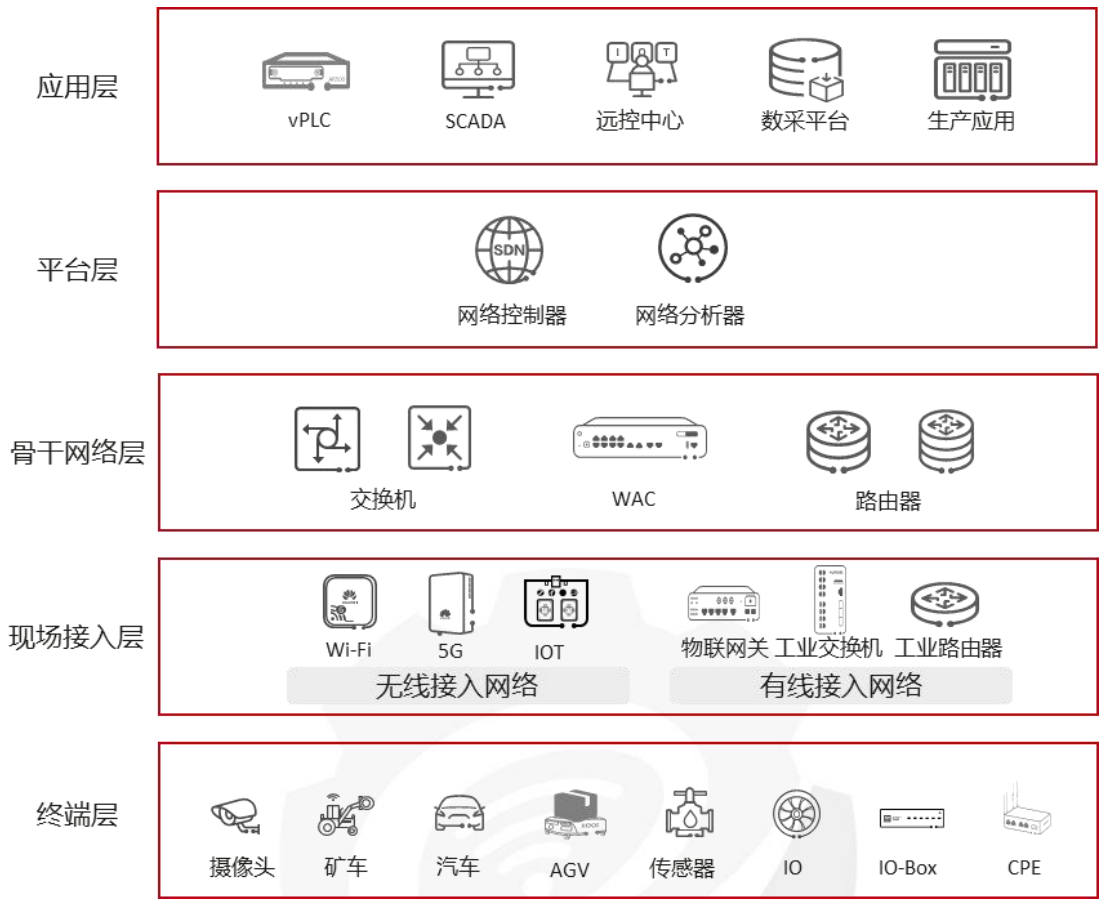


图 2-2 TSN 协同高品质工业园区网络解决方案组网架构

● 终端层

终端层是工业生产环境中的各类终端，包括摄像头、矿车、AGV（Automated Guided Vehicle，自动引导运输车）等。

● 现场接入层

现场接入层是部署在生产作业现场的网络，用于接入现场各类终端。根据通信方式又分为现场无线接入网络和现场有线接入网络。

现场无线接入网络主要为有线部署困难或者有移动通信需求的终端提供 Wi-Fi、蓝牙、ZigBee 等接入能力，满足接入 AGV、扫码枪以及物联传感器终端的需求。同时，通过多跳 Wi-Fi Mesh，可以实现长距离、大带宽无线数据传输。

现场有线接入网络主要通过有线方式连接工业现场控制和监控的各类终端，如 PLC、智能 IO、摄像头和各类传感器等。一般部署在工业运行的现场，如煤矿的采掘面、工厂的产线、隧道沿线等位置，环境较为恶劣，需要设备具备自然散热、IP40 防护、冗余电源等能力。

- 骨干网络层

骨干网络层主要连接各个生产作业现场的网络，实现工业控制、生产管理等业务在生产现场、生产管理区之间的连接，同时提供与外部办公网络的互通能力，如厂区内部不同车间之间的骨干网络。骨干网络一般部署在机柜或机房等环境较好的位置，对工业环境的要求比较弱，也有部分场景部署环境较恶劣，需要工业级网络设备。

- 平台层

平台层是实现工业生产网络的“大脑”，负责整个工业生产网络的自动化部署和智能运维，一般部署在生产网络的数据中心服务器中。

- 应用层

应用层是指工业生产中使用的各类系统，如集中部署的 vPLC（Virtualized Programmable Logic Controller，虚拟化可编程逻辑控制器）、SCADA（Supervisory Control and Data Acquisition，监控与数据采集）等。

2.3 方案价值

TSN 协同高品质万兆工业网络紧随工业网络的发展进程，适配新工控架构的业务需求，支撑企业数字化、智能化，工厂无人化的发展，加速生产数智化、制造柔性化、运维智能化；解决方案具备以下关键价值：

- 极致可靠

基于系统级可靠性设计理念，通过环形、双归树形等多种灵活组网方式，采用 HSR（High-availability Seamless Redundancy，高可用性无缝冗余）、ERPS（Ethernet Ring Protection Switching，以太网环保护）、Eth-trunk 等链路级可靠性技术与堆叠、M-LAG（Multichassis Link Aggregation Group，跨设备链路聚合组）、VRRP（Virtual Router Redundancy Protocol，虚拟路由冗余协议）、VPN FRR（Fast Reroute，快速重路由）等节点级可靠性技术，构建“零中断”工业网络。对于实时性要求不高的生产 IT 类业务，可提供 100ms 以内业务中断时间。为实时要求高的 PLC 控制业务提供 50ms 以内中断时间。对于电力系统或运动控制，可以通过 HSR 技术实现业务零丢包，做到故障无感。

- 统一承载

协同网络切片等确定性网络技术建立扁平化的 IT/OT 融合生产网络，可以同时承载“尽力而为”的生产 IT 业务和“确定性”的生产 OT 业务，使得 IT 与 OT 充分融合打通，全量数据在“一张网”中畅通无阻地流动。TSN 技术可提供微秒级确定性，网络切片可提供毫秒级确定性，能够将 PLC 控制、AOI（Automated Optical Inspection，自动光学检测）质检摄像头、AGV 小车、能环数据采集等多种业务通过工业生产网进行统一承载，无需分别建设 OT 网络和 IT 网络。

● 灵活接入

兼容标准以太、Wi-Fi、WAPI（WLAN Authentication and Privacy Infrastructure，无线局域网鉴别和保密基础结构）、IOT 等多种通信协议，建立起全面的、无处不在的网络覆盖和连接，实现生产环境中“有端必连”，打造全联网的生产系统。对于固定位置部署的 PLC 和 IO 可通过有线网络接入工业网络；对于 AGV 小车、巡检机器人、无线拧紧枪以及频繁变更的机台等终端可通过 Wi-Fi 或 WAPI 无线接入到工业网络；数据采集传感器、非以太网化接口的终端，则需通过 IOT 物联接口转换后接入工业网络。

● 智能运维

借助 SDN、随流检测、大数据和 AI（Artificial Intelligence，人工智能）技术，深度赋能传统工业生产网络规、建、维、优等全生命周期运维管理环节，实现网络规划、网络部署自动完成，网络故障提前发现、快速感知、自动闭环，进入工业生产网络的“黑灯工厂”时代。随流检测技术可对关键业务的网络质量进行实时监控。当网络中出现拥塞或故障导致时延变化或丢包，能够实时感知到网络异常，并通过 AI 和大数据分析给出故障原因分析结果，为网络运维人员提供故障处理指导，或者基于内置策略进行自动处理。

Alliance of Industrial Internet

3

TSN 协同关键技术

3.1 确定性

工业生产网络主要连接工厂内部的各种要素，包括人员（如生产人员、设计人员、外部人员）、机器（如生产装备）、材料（如原材料、过程件、制成品）、环境（如仪表、监测设备）等。接入环境、通信接口和协议等多样性，要求工业生产网络技术接入方式多样性，需要综合考虑布置成本、接口类型等要求，满足生产管理等要求。传统的工业生产网络由于历史原因，一般都是基于业务系统进行建设。主要是受限于传统网络技术，无法在同一张网络上保障不同业务之间的 SLA。当前高品质工业园区网络，为了满足在一张物理网络中不同业务的差异化需求，新建网络使用网络切片功能已成为主流趋势。通过构筑切片网络，可以实现不同业务统一承载，并对不同业务进行精细化管理，实现工业园区业务“一网打尽、一切到底”，如图 3-1 所示：

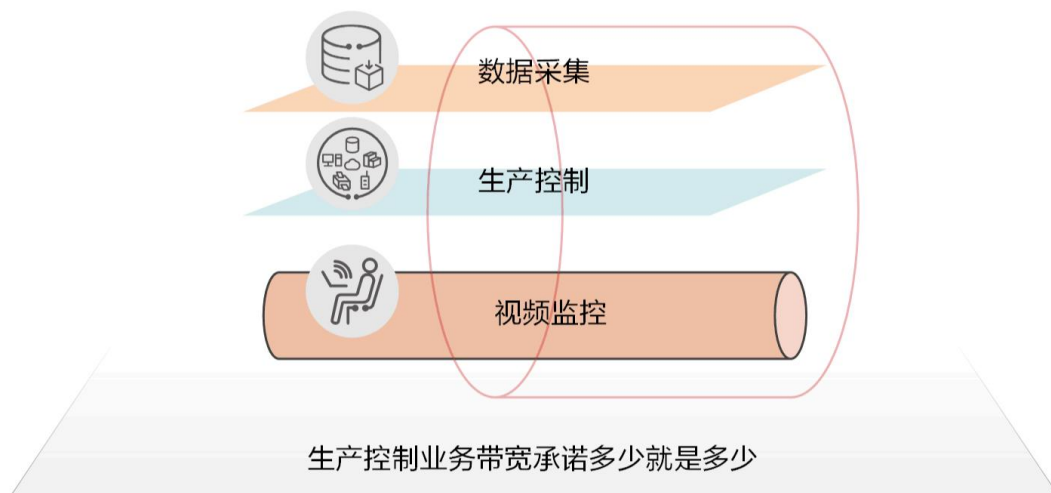
网络切片：一张物理网，多种业务融合承载

图 3-1 网络切片示意图

网络切片是通过网络资源预留的方式，实现业务隔离的一种网络虚拟化技术。传统方案一般采用流量五元组或者终端接入端口来区分业务类型，这在生产 IT 网络中可以按照这种粒度划分。但是在 IT 和 OT 融合后，端侧的网络设备接入了生产 OT 的终端，尤其是搭载工业以太协议的终端。我们知道工业控制各个厂家大多数都针对工业以太有自己的特殊修改，传统的五元组等方式不完全适用。针对工业终端或者不适用传统切片划分粒度的终端，生产 OT 网可以逐步演进到 TSN 网络中，Qbv 门控队列可以基于时间整形，将多个终端的业务流整形为平整流，这样确保了业务流的 SLA 能力，同时在 IT 和 OT 网络的边界设备需要支持 TSN 业务流入切片能力，将不同的业务流再映射到网络切片中，使每个网络切片都可以灵活定义自己的逻辑拓扑，SLA 需求、可靠性和安全等级。保障了业务在端到端网络中的确定性诉求。

综上，TSN 与确定性的协同，是 TSN 技术和当前切片等技术的关联，在部分网络支持 TSN 的技术上，通过两种技术的协同实现业务流端到端的确定性体验，保障端侧数据上送到应用平台。

3.2 高可靠

在工厂智能化发展进程中，数据上得去、智能下得来是核心需求，要保障数据不丢失，网络必须高可靠。当前主流的高可靠技术包括设备级、网络级等维度。设备级的可靠性包括采用堆叠、M-LAG 等技术实现冗余部署，网络级的可靠性包括动态路由技术使能负载分担、环网保护技术、双发选收技术等保障网络故障时业务可快速自愈。

M-LAG 是一种实现跨设备链路聚合的机制，其作为一种跨设备链路聚合技术，除了具备增加带宽、提高链路可靠性、负载分担的优势外，还具备简化组网及配置、独立升级的能力。通过两台设备间进行表项同步，完成控制面板的数据一致性。一旦一台设备故障，另一台设备可快速接管并按照同步好的表项指导数据转发。M-LAG 跨设备链路聚合机制如图 3-2 所示：

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

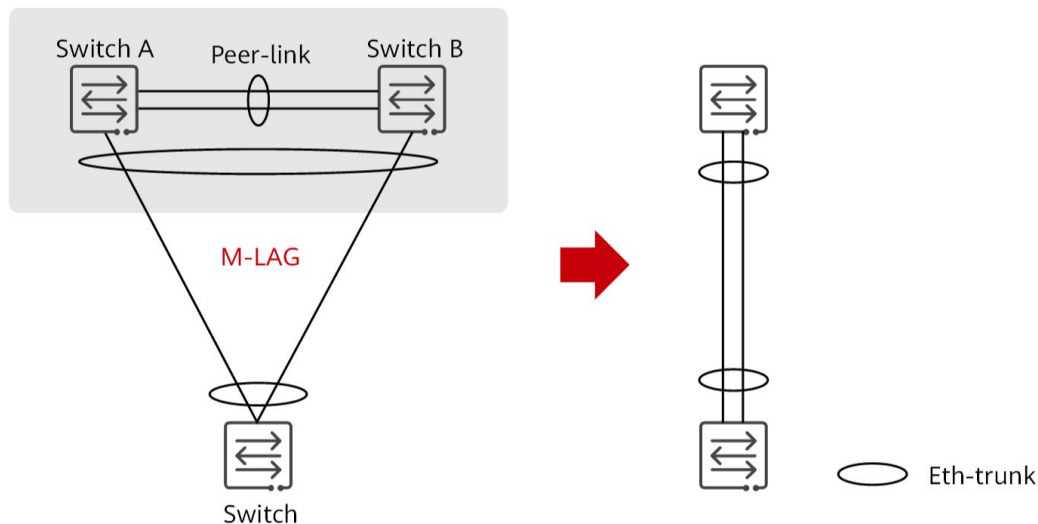


图 3-2 M-LAG 示意图

TSN 与 M-LAG 技术的协同需要将 TSN 相关的表项配置和 M-LAG 两台设备的表象同步协同起来，包括 TSN 的流量学习特征、报文转发表项、TSN 编排配置等等，这样一旦出现设备级的故障，无须重新学习和配置即可完成故障设备隔离和业务平滑切换，保障端到端的网络可用可靠。

ERPS (Ethernet Ring Protection Switching, 以太网环保护) 是 ITU-T 定义的一种二层破环协议标准，用于在以太网层面进行环网拓扑的保护倒换。它以 ERPS 环为基本单位，包含若干个节点，通过阻塞 RPL Owner 端口，并控制其他普通端口，使得端口的状态在 Forwarding 和 Discarding 之间切换，达到消除环路的目的。ERPS 正常状态如图 3-3 所示：

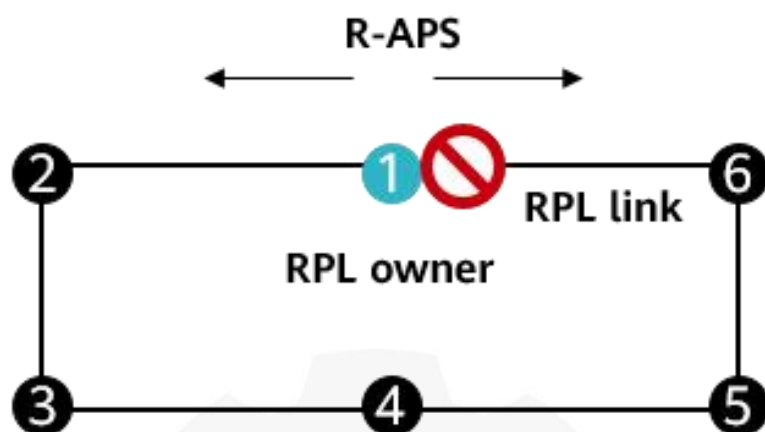


图 3-3 ERPS 示意图

TSN 与环网协议的协同，要侧重在 TSN 编排配置的备份上，当出现故障时，环网协议可快速检测将转发路径切换到备份路径上，此时 TSN 的编排配置应该快速同步到新路径中来，要实现快速切换，则在业务建立初期，就通过控制面协商到备份路径，同时将相关的编排配置下发到备份表项中，这样一旦检测控制面故障，无须重新学习编排，直接切换表项指导业务转发。

3.3 无线化

工业园区生产场景中，柔性制造、AGV 自动搬运车、PDA、扫码枪等都是生产重要的应用，其核心诉求是打造一张全无线连续组网，满足不同终端接入和漫游的诉求，保障终端随时随地都可以获得最佳的业务体验。生产场景中终端在具备移动性的同时还要求网络的丢包率低、时延小，这对无线网络提出了很大挑战，当前主流的方案采用无损漫游和双发选收两种方案。

双发选收方案中，Wi-Fi CPE 设备和 WAC 间建立两条并发数据的链路。发送数据的 WAC 或 CPE 将数据复制为双份，并通过双链路发送，这就是“双发”；接收数据的 WAC 或 CPE 优先处理先到的数据，并将后到的冗余数

据丢弃，这就是“选收”。如图 3-4 所示，双发选收中，两条链路均由 CPE 隧道和 CAPWAP 隧道两部分构成。配套的 Wi-Fi CPE 需支持两个及以上射频，且分别工作在不同的频段（如 2.4GHz 和 5GHz）。当开启双发选收后，Wi-Fi CPE 双射频分别选择其工作频段内信号最好的 AP 射频关联，因此 CPE 双射频并不一定关联到同一 AP；当关联到不同 AP 时，需保证这两个 AP 归属同一 WAC 管理。

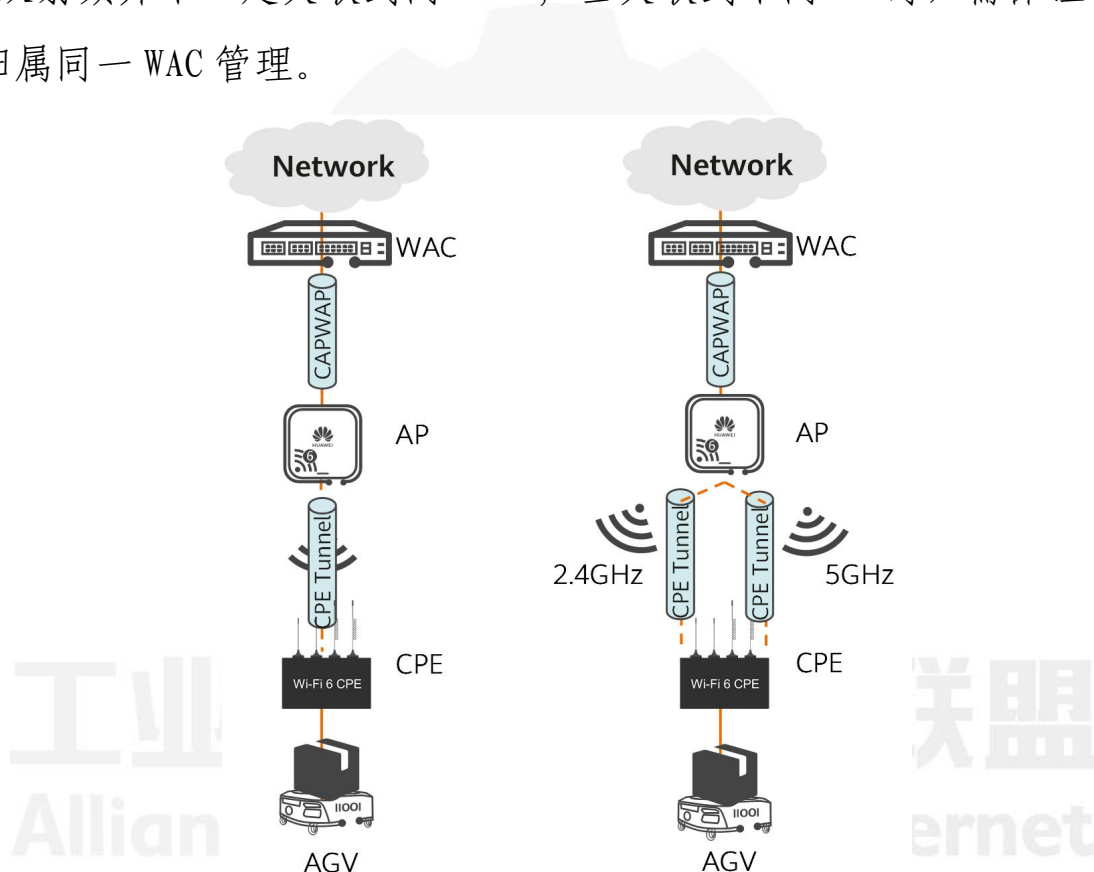


图 3-4 隧道转发方式下的单链路传输（左）与双发选收（右）对比

如上组网架构可见，AP 和 AC 之间进行业务转发时需要经过交换机设备，TSN 与无线化的协同，首先要关注 TSN 技术和 CAPWAP 隧道业务的协同上，承载业务的 TSN 交换机要能识别不同优先级的 CAPWAP 隧道，基于优先级定义 TSN 流、基于 Qbv 门控列表配置业务流，确保无线业务在网络转换中无拥塞，保障生产控制指令稳定下发不丢失。

无线化网络中还包括端侧蓝牙、UWB、RFID 等各种无线化协议的终端接入，这就需要网络设备具备通过终端接入端口、终端流量的 IP 地址、MAC 地址、以太类型、端口号等各种特征，在自主学习分析后，自动将终端的流量划分成不同的类型，再基于这些类型可接入 TSN 网络，完成 TSN 业务的配置。

3.4 智能化

网络规模和连接数指数级增长，网络负载持续增加，网络技术不断迭代更新，使得网络运维人员的能力要求越来越高，企业网络运维成本不断增加。在 TSN 目标网发现过程中，除了技术的迭代，也需要考虑相关的数据输出，比如转发路径、带宽、时延、时钟、门控等等。因为输出的数据越全面、运维界面呈现的粒度会越细。

传统的网络控制器使用 SNMP 协议获取设备数据，SNMP 协议是有限的处理能力设计，分钟级的轮询周期无法满足智能运维实时管理的业务诉求。目前业界采用事实标准的 Streaming Telemetry 技术，其高效的编解码技术可以一次获取多个数据，实现秒级数据获取能力。TSN 目标网络就需要通过 Telemetry 技术，结合现有的随流可视技术，将网络转发过程中的设备状态、协议状态、流量状态、业务状态、用户状态等全方位的数据快速输出到网络运维平台，网络运维平台以数字方式构建物理网络实体的虚拟孪生体，并且可以和物理网络进行实时交互映射。网络数字孪生体作为物理网络设施的数字镜像，与物理网络具有几乎相同的网络拓扑、业务及流量数据模型，是真实物理网络全生命周期、多维度的精细化副本，可以为网络运维提供真实的数字化验证环境。

通过数字孪生这个平台，网络实施的调整、维护、优化等变更操作，都可以先在数字孪生网络中进行充分的试验和验证，并通过其反馈来不断的评估、修正、优化操作方案，最大限度降低对真实网络带来的冲击；同时数字孪生网络还会实时记录网络的状态和行为，支持对历史的追溯和回放。从而在能不影响网络运营的情况下完成预验证，极大地降低试错成本。



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

4

TSN 协同高品质工业园区典型场景

不同行业的工业园区网络部署方案差异大，有各自的特点。例如，汽车工厂主要是在工业园区内，面积一般不超过数平方公里，网络建设较为密集；矿石采掘则往往需要在地下挖掘数十公里的地下通道用于采掘，因此工业网络需沿着地下通道进行长距离建设。根据各行业的特点，TSN 协同高品质工业园区网络行业场景可分为工业制造园区网络和泛工业生产网络，分别对应为面状区域和线状区域两大部署场景。

4.1 工业制造园区网络应用场景分析

工业制造园区网络承载了大量不同种类的业务，例如工业设备的数据采集、物流与配送、生产监控、办公、园区物联感知等，接入网络的终端数量多、终端类型各异。企业内网通过有线、无线的方式，将各类设备全面接入 IP 网络。其中，无线连接的方式主要有 Wi-Fi，例如 AGV、仓储物流类移动性业务。

工业制造园区网络主要连接工厂内部的各种要素，包括人员（如生产人员、设计人员、外部人员）、机器（如生产装备）、材料（如原材料、过程件、制成品）、环境器材（如仪

表、监测设备）、安防装备（如摄像头）等。有的生产用终端（如工位 PC、拧紧机、打标机等）使用有线方式连接生产网络；有的生产用终端（如 AGV、电检 EQS（Electronic Quality Support）、无线拧紧扳手、物流手持等）使用无线方式连接生产网络；还有部分制造装备直接通过工业交换机连接在 PLC 侧，本地直接完成生产控制。

在工业制造园区典型生产场景中，各类业务对网络指标的关键要求主要有：工业控制过程中，要求网络的确定性时延小于 100ms；工业控制、生产监控等要求网络提供零中断的高可靠性；智慧物流、数据采集、视频会议、视频监控等均要求提供万兆的网络带宽。

TSN 协同工业制造园区网络的典型架构如图 4-1 所示，分为骨干网络层和现场接入层。

- 骨干网络层：采用双归树形组网，主要用于连接园区内部各条产线、各个厂房之间的生产网络。建议采用双节点堆叠或者双节点 M-LAG 技术，提升网络可靠性。
- 现场接入层：有线网络以双归树形组网为主，主要用于连接产线内部的各类生产装备如机台、工业机器人等，以及无线接入的 AGV、PAD 等终端。基于实际的线缆铺设条件和业务需求，也可以采用环形组网。不建议采用链形组网，链形组网可靠性低，容易因中间节点或链路故障导致终端业务中断。随着网络的演进和接入交换机生命周期更替，接入层的网络可优先替换为 TSN 网络，这样接入和骨干通过 TSN 协同起来，共同实现业务承载诉求。

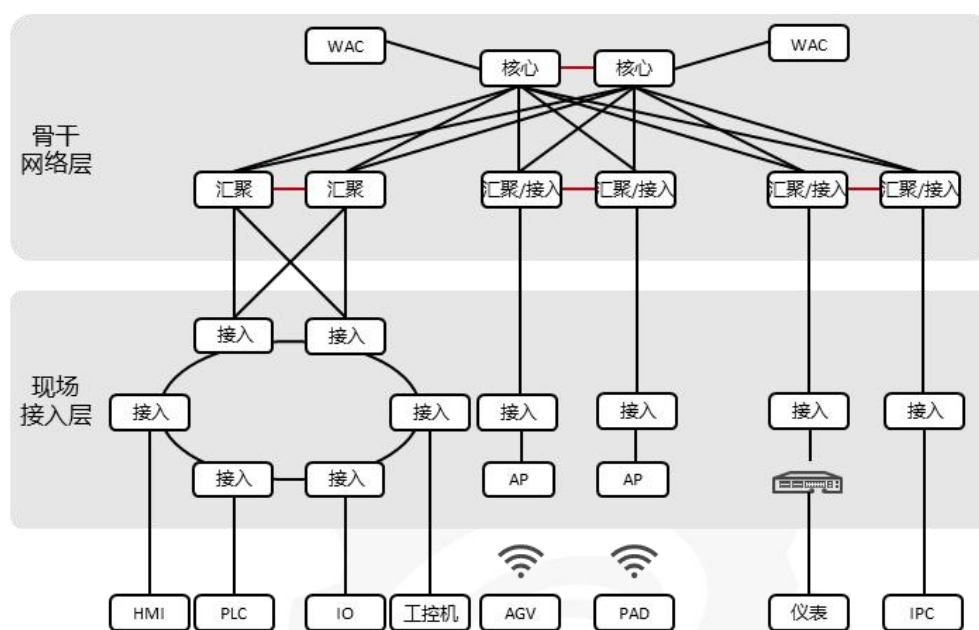


图 4-1 工业制造园区网络方案架构

4.2 泛工业生产网络应用场景分析

泛工业生产网络适用于线状区域的工业生产场景。线状区域主要包括隧道、城市道路、管廊、金属矿、煤矿等场景。在这些场景中，各类生产终端一般都是沿着地下的通道或地面的道路进行部署，物理位置比较分散，覆盖距离为数公里到数十公里，光纤资源较紧缺，该场景下网络拓扑适合环形组网。

TSN 协同泛工业生产网络架构如图 4-2 所示，整个物理网络分为骨干网络层和现场接入层：

- **骨干网络层**：采用环形组网，主要用于连接各类作业现场网络，如城市道路的各个路口、管廊中各个舱室以及沿线的视频监控、AP 等终端。建议采用双节点堆叠技术，提升网络可靠性。
- **现场接入层**：以环形组网为主，主要用于连接产线内部的各类生产装备，如机台、工业机器人以及无线接入的 AGV、PAD 等终端。

部分现场网络层可基于实际的线缆铺设条件和业务需求，采用双归树形组网。不建议采用链形组网，链形组网可靠性低，容易因中间节点或链路故障导致多个节点下挂的终端业务中断。泛工业生产网 TSN 协同方案主要以环网为主，现场接入层可逐步改造到 TSN 架构，这样设计到 TSN 和网络切片、TSN 和环网协议等协同，支撑端侧数据全量上送。

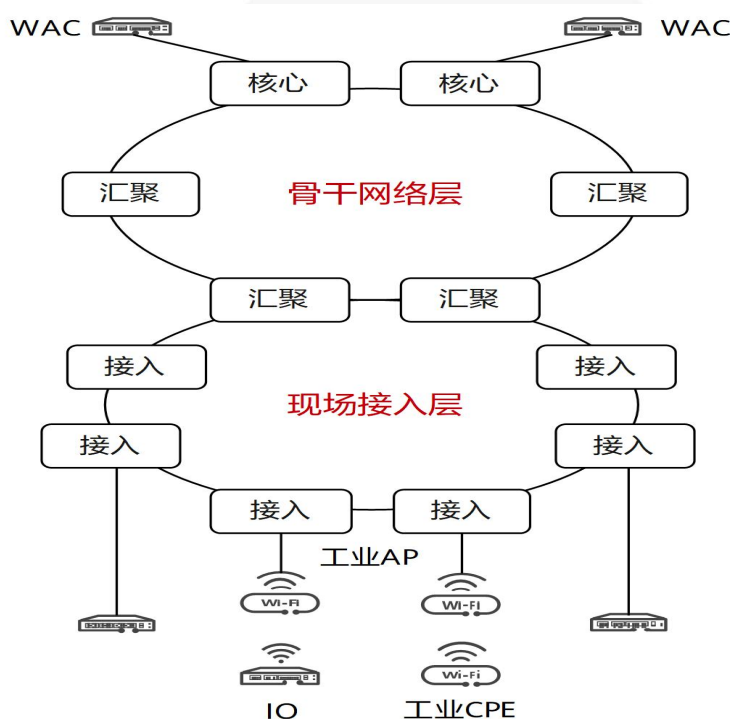


图 4-2 泛工业生产网络架构

5

总结与展望

随着工业数字化和智能化的发展，越来越多的工业企业加入到了数字化转型的浪潮中。但工业企业历史包袱重、生产工艺复杂、组织流程冗长，导致当前工业企业的数字化转型进程仍处于追随者的位置，未来任重而道远。在《工业数字化/智能化 2030》表皮书中提出了 2030 年工业实现全面的数字化转型的“新四化”趋势，推动实现新型工业化：

- 工业装备数字化：实单机智能基础，支撑工业提质增效。
- 工业园区网络全连接：构架泛在感知的工厂乃至供应链，支撑柔性生产。
- 工业软件云化：从从用软件到用服务，通过新型云化工业软件实现全局优化、商业模式创新。
- 工业数据价值化：打通全量数据，突破工厂边界，全面释放数据价值。

其中，工业园区网络作为数据传输的媒介，广泛连接着工业现场的“人机料法环”等要素，支撑工业企业构建泛在感知的工厂乃至供应链，并实现高稳定高可靠的数据交互、连续不间断的生产活动、柔性灵活的生产模式。从当下看，大部分工厂已实现基础网络覆盖，可满足办公和基础生产活动需求；但面向数字化场景的持续拓宽和升级，工业企业正呼唤更优移动性能、更高确定性、更低时延、更大带宽的工业园区网络，保障数字化场景的稳健落地。

因此，工业企业需要从实际业务需求出发，以按需配置、适度超前为基本原则进行组网规划，打造全连接工厂。以按需配置、适度超前为原则。工业企业组网时除了要满足当下需求，还应具备一定前瞻性，以《TSN 解决方案白皮书》规划方案为目标，以《TSN 协同高品质工业园区蓝皮书》为参考，针对特定场景选取最合适的技术，打造适配、经济的工业网络，共同向着工业数字化和智能化持续努力。

