



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

工业网络 3.0 白皮书

(2022 年)

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

工业互联网产业联盟

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：aia@caict.ac.cn

前 言

在全球第四次工业革命的浪潮下，人机物需要通过工业互联网彼此交互，相互协同，形成更为高效智能的运作系统。以5G、TSN、边缘计算、云计算、大数据、人工智能为代表的新一代信息通信技术将与工业自动化技术形成合力，实现工业企业在设计、采购、生产、仓储、物流、运营、销售各个环节的智能化运行。网络作为工业互联网基础，需要具备接入海量设备、异构系统互联互通、端到端确定性传输、网络资源智能调度等能力，新一代工业网络呼之欲出。

本白皮书由工业互联网产业联盟组织，中国信息通信研究院牵头行业内相关单位编写，通过对工业网络发展历程梳理，导引工业网络3.0概念及愿景，就其目标架构、关键技术及演进路线进行分析，旨在为工业网络的演进和发展方向进行抛砖引玉。

在本白皮书的编写过程中，得到了联盟成员及国内外众多企业、研究机构、高校的大力支持，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。

编写组成员（排名不分先后）：

张恒升、朱瑾瑜、陈洁、李栋、杨冬、成剑、朱海龙、黄韬、林思雨、卢云龙、杨铮、任杰、张华宇、李庆、贺晓武、冯景斌、詹双平、黄震宁、魏彬、黄蓉、裴郁杉、金嘉亮、孙雷、王健全、赵艳领、公彦杰、李方健、王童童、包华杰、胡慧敏、乔雷、陈晓光、刘艳强、王晔彤、高娴

牵头编写单位：

中国信息通信研究院

参与编写单位：

中科院沈阳自动化研究所
北京交通大学
北京邮电大学
网络通信与安全紫金山实验室
清华大学
鹏城实验室
中国移动通信研究院
中国联合网络通信有限公司研究院
中国电信股份有限公司研究院
北京科技大学
机械工业仪器仪表综合技术经济研究所
华为技术有限公司
北京航空航天大学
浪潮通信技术有限公司



工业互联网产业联盟公众号

目 录

一、愿景	1
(一) 工业网络发展历程	1
(二) 工业网络技术演进	2
(三) 工业网络 3.0 的内涵	3
(四) 工业网络发展驱动力	4
二、场景需求	5
(一) 应用场景	5
(二) 业务挑战	11
(三) 关键指标	13
三、关键能力	15
(一) 目标架构	15
(二) 关键技术	20
四、展望	21
附录	23
(一) 转发技术	23
(二) 管控技术	29
(三) 融合技术	31

一、愿景

（一）工业网络发展历程

人类大致经历了四个工业革命阶段，工业网络的演进与后三次工业革命相对应。

19世纪末20世纪初，随着以电力为动力的第二次工业革命的出现，以反馈系统理论为基础的自动控制方法及技术于20世纪40年代开始广泛应用于工业系统领域，工业系统中的通讯主要依赖于电路系统的模拟电子线路信号实现，可以视为工业网络的雏形或者前身。

20世纪下半叶，以计算机技术为代表的第三次工业革命出现，数字通信成为第三次工业革命新动能。从最初的模数混合起步，基于已有的模拟线路实现数字通信。20世纪80年代，现场总线技术在不同行业兴起，以全数字化、双向串行、多点连接通信技术实现了工业现场执行器、传感器以及变送器等多设备互联。90年代末，随着工业控制应用和管理应用对于承载需求的进一步提升，具有更高传输效率、更大带宽、更好兼容性的工业以太网逐步兴起，开始从工业现场测量控制网络发展向生产管理延伸。进入新世纪，工业无线引入工业应用场景，对工业有线网络形成有效补充。各类工业总线和工业以太网等工业网络诞生于不同行业领域，形成了以IEC 61158、IEC 61784等为代表的工业网络系列标准。

21世纪开始，在美国、德国、中国等科技大国逐渐出现了工业互联网的概念，新的工业应用不断涌现，工业控制系统与信息系统信息交互模式出现变革。随着工业互联网的发展，工业智能化、一体化的趋势愈发明显，在人工智能、清洁能源、无人控制技术、量子信息技术、虚拟现实等新技术的推动下，工业网络正在进行全新的技术革命。

(二) 工业网络技术演进

最初的工业网络基于工业控制系统发展而来，只包含工业控制网络。而随着工业企业网络化、信息化进程不断推进、升级，通过各种网络和信息系统将生产管控、物料管理、事务处理、现金流动、客户交易等业务流程加工成信息资源。工业网络逐步发展，涵盖了工业控制网络和工业信息网络两个层次。前者主要负责工业控制系统内部以及系统之间的互联互通，承载工业测量、控制信号及系统相关的监控、诊断、管理等相关业务；后者主要支撑原始数据转换为信息后，应用于业务分析系统、并实现控制反馈的数据互通，两个网络分别各自演进，形成了分层分域的网络架构。

在新技术的推动下，工业控制网络与工业信息网络逐渐呈现融合趋势，具备支持多业务、多协议、多厂商设备和数据的互联互通、共网承载以及高质量传输能力已经成为网络技术必然的演进方向。具备高实时、高可靠、广覆盖、高安全等特点的工业网络技术，例如时间敏感网络（TSN）、工业5G、OPC UA、工业光网、单对双绞线、卫星网络等，正在逐步成为工业网络热点技术，形成新一代工业网络。

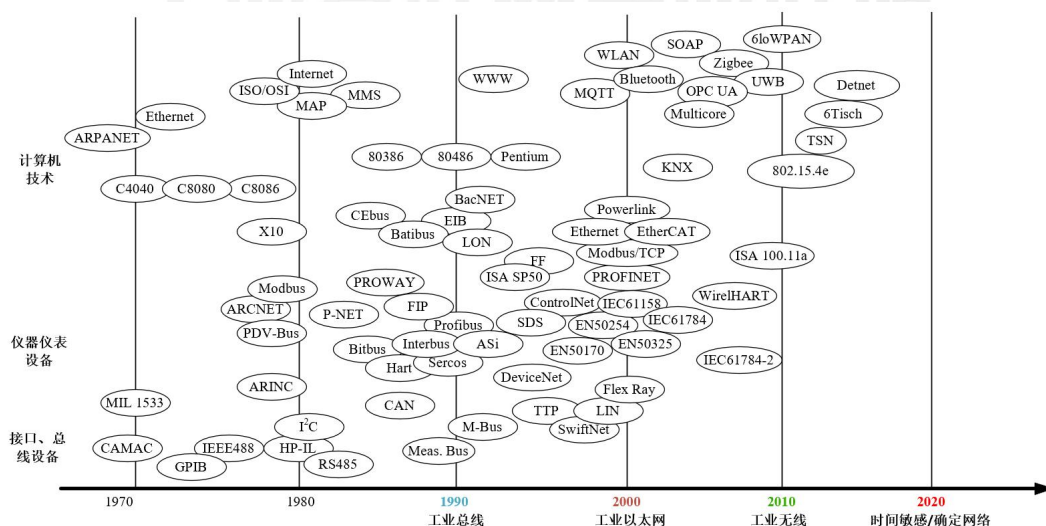


图 1 工业网络技术发展图

总而言之，第二次工业革命时期，在生产系统中，面向基础自动控制设备，以模拟信号通信为主的自动控制网络，称之为工业网络1.0。在第三次工业革命时期，在车间中，面向数字化工业设备及信息化自控系统，以数据通信为主的工业总线和工业以太网，称之为工业网络2.0。随着第四次工业革命的来临，面向工业互联网生产要素全连接、生产过程高智能的目标，网络应用范围从局域扩展到广域，工业网络3.0应运而生。

（三）工业网络3.0的内涵

工业网络3.0是面向2030年及未来，以工业互联网应用为驱动，支撑人、机、平台协同创新应用，技术高融合、部署高灵活、服务可度量、接口可编程的新型工业网络。工业网络3.0以先进网络技术为基础，以**泛在互联、确定承载、智能极简、高效低碳**为目标，全面支撑机器与平台、人与平台、人与机器的互联互通互操作。

泛在互联是基本要求。在新一轮科技革命的驱动下，新一代信息技术正深刻影响制造业发展，工业数据的横向与纵向集成正不断扩展延伸，工业网络3.0的范围不断扩展。一是传统的“聋”“哑”设备将被数字化网络化设备替代，人、机、料、法、环、测实现全面的无死角网络覆盖和连接，从生产现场到云端将通过网络互联和数据互通，构建一套可互操作、可移植的开放架构体系。二是泛在安全成为工业网络的内生属性，通过增强主动防御、智能感知、协同处理等能力，实现网络设施和数据的稳定可靠、安全可信。

确定承载是核心诉求。采集、传输、转发数据是网络的基础能力，更好的承载能力、确定的服务性能成为工业网络3.0的核心能力。一是通过各类新型网络化技术实现端到端融合承载，面向不同垂直行业，多种业务混合传输需求，按需提供确定性网络保障。二是实现多层次、广范围的确定性传输。车间级网络传输时延达到亚毫秒级，机械制造类的机台内部网

络端到端通信响应时间缩减到微秒级。园区级网络反馈控制类业务的端到端传输时延达到毫秒级。城域级网络达到TB级别的传输带宽，确定性端到端时延达到10毫秒级，承载接入和器规模达到百万级以上。

智能极简是内生需求。数字化节点的快速增加，灵活化生产的规模扩大，工业网络体系复杂度日益增加，人工辅组甚至无人化的“建、运、管、维”成为工业网络3.0的必然要求。一是**工业网络全生命周期智能化**，通过在网络规划、部署、运维、优化各环节构建感知洞察能力、优化分析能力、决策部署能力等，实现人员成本降低、操作失误减少、故障快速定位解决，大幅提升工业网络支撑能力。二是**服务接口极简**，以数据为基础，以场景为导向、以算法为支撑，配合大数据处理和机器学习技术，免除繁琐的应用安装、部署、维护过程，降低工业网络管理、运营、维护的难度和技术门槛，实现人对系统接口的简洁化。

高效低碳是更高追求。工业互联网数据流量的爆发式增长将导致网络能源消耗的大幅增加，工业网络3.0要实现效率与节能水平的同步提升。一是通过新型转发技术和管控技术，提高网络对各种工业应用的适配支撑能力，一网多用，减少重复建设；提高网络流量的负载水平，重复利用链路带宽，物尽其用。二是通过绿色节能技术降低网络设备能耗，实现设备级的高能效；通过设备间的协作平衡，实现网络级的高能效；利用可再生能源为系统供能，实现系统级的高能效。

（四）工业网络发展驱动力

业务和技术是推动工业网络演进的主要驱动力。

在业务上，随着智能制造和工业互联网的发展，工业网络3.0将以业务服务质量为核心，为工业企业提供百万级接入能力、10Gbps连接速率、微秒级时延/抖动的确定性保证，异构网络资源协同，业务质量智能优化，同时为网络带来超百倍的能效提升及单比特成本降低。未来工业将与IT技

术更加深入地融合，智能工厂内建立有线+无线、实时+非实时、局域+广域的异构生产管理和控制网络，工业网络与消费网络进行互联互通，实现真正的“一网到底”，与此同时，必须解决“信息安全”的问题。

在技术上，从控制、采集等基础能力，向工业互联网人、机、平台全面互联场景演进。从解决产线内部连接单一传输的工业控制网络技术向业务驱动的全融合、智能化网络演进。工业网络3.0以数字化业务为中心构建全方位通信生态系统。工业网络3.0将通过无缝融合的方式，便捷地实现人与机器、机器与机器之间的智能互联，使数据及信息交互突破空间及距离的限制，完成现场数据到工业知识的华丽转变，为工业生产注入智能化的新活力。其中，高清机器视觉、大模型智能的大规模网联化推动机器人对高带宽和高时效性的需求，多机器人协作和高速运动车辆需要稳定的高带宽、低延迟低抖动无线通信技术。确定性网络通信技术将会在兼容现有网络的基础上提供高带宽、低延迟、高可靠的通信能力，将极大的减小使用网络的难度，降低部署和运维成本。泛在连接将推动工业网络3.0呈现消费互联网的大连接、大融合、大数据的新型业态。

网络技术与工业互联网深度融合，可以催生更多工业创新业务，有效提升工业生产效率及产品品质，降低劳动成本，工业网络提供广阔的前景。

二、场景需求

（一）应用场景

工业网络3.0应满足产线、车间、工厂、工业园区、户外作业场景等各类区域生产全要素接入和互联需求实现机器与平台、人与平台、人与机器的互联互通互操作。

1、机器与平台

机器与平台的连接是工业网络3.0的核心应用场景。工业网络3.0的确定承载能力能够支撑未来工业生产中跨产线、跨车间，跨工厂乃至跨地域的生产协同、远程控制场景。无人化、少人化是未来智能工厂发展的重要特征之一，大量的AGV、机械臂、数控设备等工业智能化设备通过云平台或者边缘计算平台实现生产、配料、运输等场景中数据互联互通和协同管控。

基于工业网络3.0的协同管控系统需要通过统一的业务平台实现工厂或某一特定区域内的机器人、车辆、设备、货物及人员的综合调度，通过实时数据采集和分析，做出最优决策，并通过网络实现控制/决策指令在设备间的可靠同步传输，保证多机器间、机器到平台之间运行的可操作性、精准性和灵活性，实现工厂内机器集群编队、多机器协同流水作业等应用。

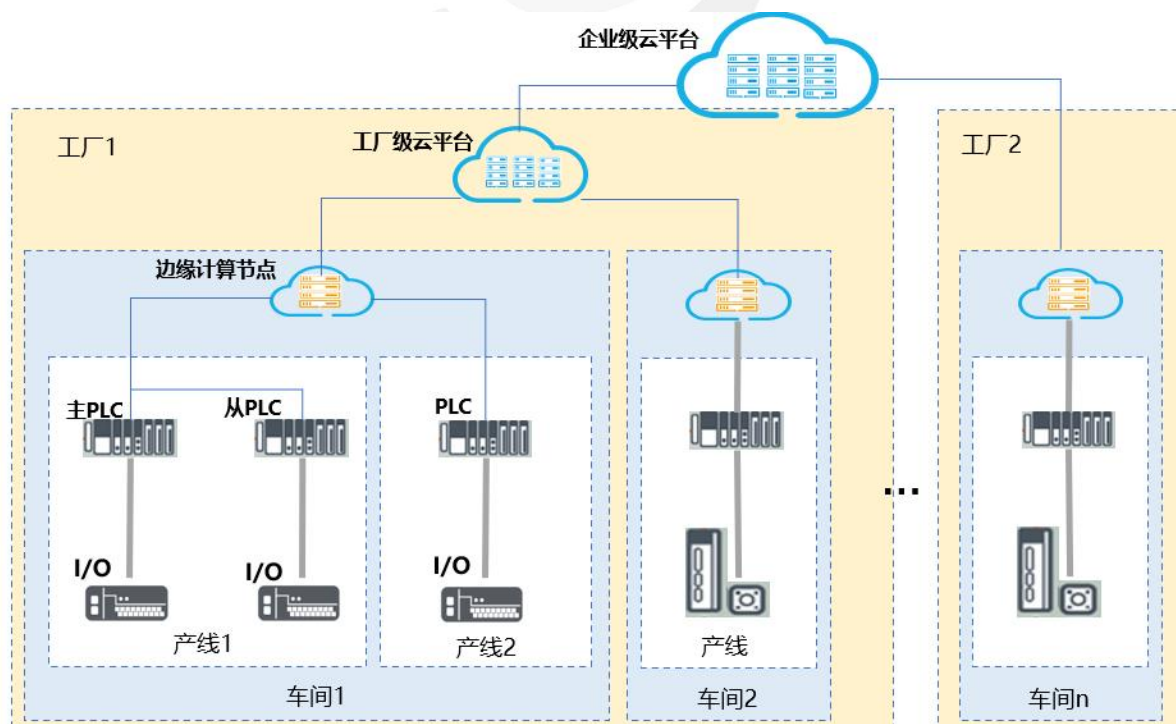


图2 机器与平台连接主要场景示意图

基于控制器到设备（C2D）通信模型是工业网络3.0的基础应用，主要包括逻辑控制（如：PLC到I/O的控制）和运动控制（如机床内部主控到伺服电机的控制）两大类业务。随着工业应用的不断升级发展，远程控制、智能控制等新型业务不断涌现。

基于控制器到控制器（C2C）通信模型的多机器协同是工业网络3.0的重要应用。多机器的集群并不是简单的设备叠加或功能拼凑，而是要实现机器设备间的互联互通、状态共享、资源协同及群体决策等功能，进而实现“1+1>2”的群体智能效应，去完成更加复杂的协同制造任务，从而提升产线的智能化及柔性化生产水平。相比于传统机器，工业网络3.0时代的机器将由机器设备、网络、传感器、控制装备及应用软件等几个部分组成，随着智能机器网络的激增，数据创建过程将会加速，智能机器直接相互对话，传统的网络承载及数据处理方式都面临巨大挑战。

2、人与平台

人与平台的连接是工业网络3.0的关键应用场景。数据是智能工厂构建的基础要素，平台是数据存储、处理的主要载体，是智能化工厂的大脑。平台针对用户的具体交互请求提供信息呈现、配置下发、操作管控等功能。平台提供有线和无线接入方式，提供VPN技术，根据授权等级支持物理隔离、软件隔离、本地和远程操控。平台应具备智能化学习能力，能记录和学习人的合规合理操作，编制自动化操作样本或案例，最终目标是降低人为操作带来的不确定性，使平台自动化、自主化、智能化管理整个工业网络。但无论发展到何种阶段，人始终具备最高的管理控制权限。因此，平台应建立人类教学-机器训练的系统，让机器逐步替代人类的管控操作。

工业网络3.0将实现人与平台的充分连接。支撑工业互联网平台在工艺优化、质量管控、智能维护、信息管理等多个应用场景辅助工作人员作出决策。通过对设备的信息采集、处理、分析、统一管控，集中管控为工

业用户提供统一的管理平台，消除信息孤岛，全面直观的帮助用户采集多种工业数据、快速定位故障。集中管控平台支持多源数据采集、设备自动发现，通过组态式配置方式，结合基本策略和安全策略能够实现批量下发与集中快速部署。支持现场设备-网络-应用三级状态监测，快速发现网络中各种潜在的安全隐患，将传统人工巡检的被动方式变为集中式监控+主动报警方式。全面感知工业控制网络安全态势，帮助用户建立快速有效的事件预测—发现—评估—处置的闭环机制，由被动的故障处置转为主动的预警预测与防护。

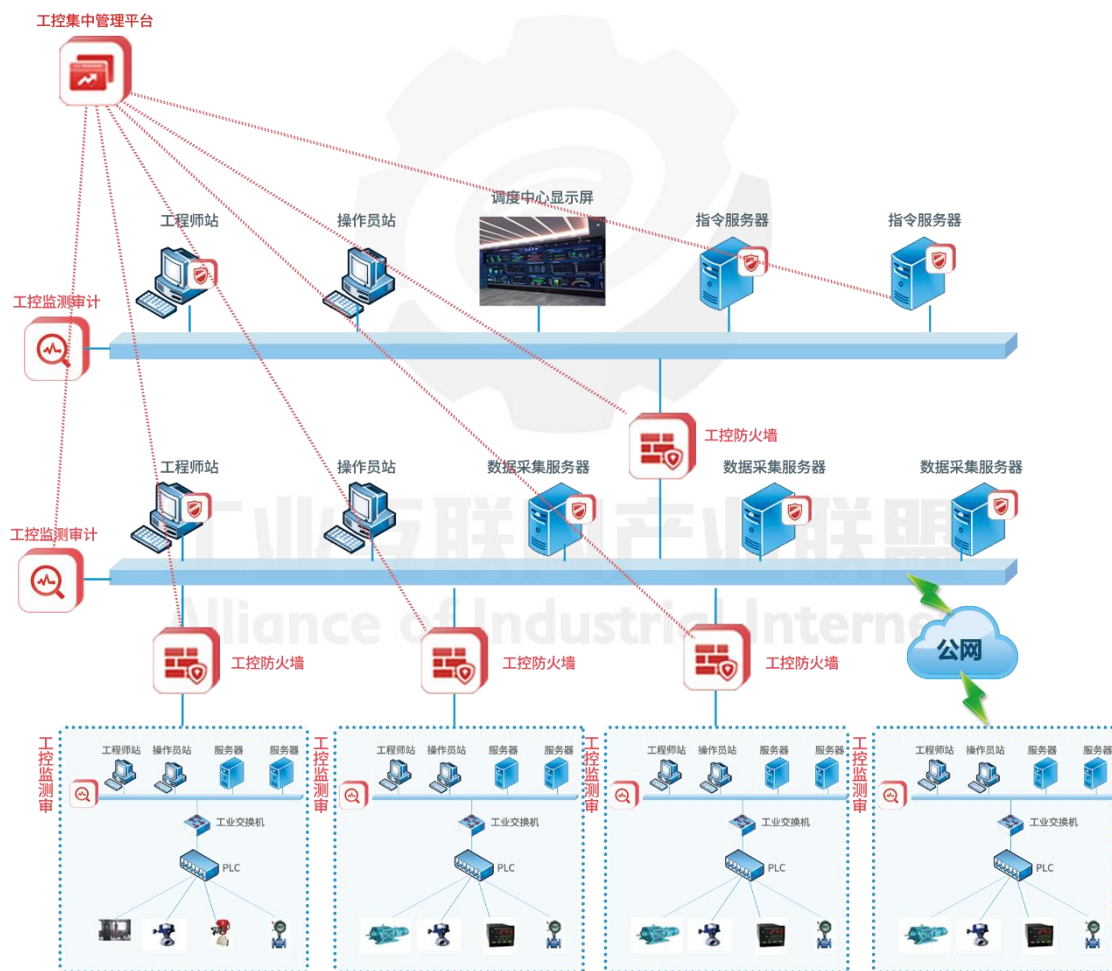


图3 人与平台连接主要场景示意图

工业网络3.0将实现人与平台的泛在连接。工业网络3.0将实现海量传感数据、标识数据、数控信息、安全信息等全连接，基于边缘计算节点或者云计算平台，利用大数据技术、人工智能技术对生产流程、设备状态进行在线实时分析，为人提供信息集中、操作便利的平台，具备多种交互方式和信息呈现形式，支持泛在安全能力。

工业网络3.0将实现人与平台的全面连接。提供获取工业全流程、生产全域数据的能力，结合人工智能技术，将能够感知市场信息、生产情况和制造过程的实时运行状况，通过自学习和自优化决策，实现人与智能优化决策系统之间的协同，使决策者能在动态变化的环境中准确优化决策；并能够对决策过程动态性能的远程移动可视化监控，从而实现企业综合生产指标、计划调度指标、制造生产全流程生产指标、运行指标、生产指标、控制指令的综合优化决策，并对产品质量进行全程的管控及回溯，实现产品质量在生产全过程的有效管理。

工业数字孪生将作为未来智能工厂的重要数字工具，提升智能工厂设备设计、上线及运行效率。基于生产全流程历史数据及实时数据的采集，结合厂房、设备、产线、工装、物料等物理模型，将能够对工业设备进行高精度数字化重构，创建数字孪生虚拟模型。工业3.0网络由于具备低时延、高可靠及确定性特征，在实现数据采集基础上，还能够实现控制/决策数据向执行设备的传输，从而构建数字世界与物理世界的数字化交互“桥梁”。利用传感器、设备运行历史数据结合厂房、设备、产线、工装、物料等物理模型，利用传感器采集数据、历史运行数据，针对真实产线进行高精度数字化重构，创建数字孪生虚拟模型。通过建立产品虚拟模型，可以在产品研发环节，分析产品性能，使用场景及有效功能，数字化展现产品模型优化过程；通过建立生产环境的虚拟模型，使企业可以实现在正式投

产前，对产线运转、生产流程、工艺参数进行仿真，测试及优化。结合VR和数字孪生技术可以为运维工程师进行预测性及远程运维提供便利。

3、人与机器

人与机器的连接是工业网络3.0的重要应用场景。工业互联网时代，实现基于工业网络的工业环境监测、产品质量检测、设备远程运行监测、设备远程集中操控、设备远程运维等场景中，实现危险及恶劣工作环境下的无人化及少人化操作，切实提升生产保障能力及生产效率成为重要需求，构建全新远程化人机交互应用场景，通过网络化新手段延展人类视听及触觉体验。工业网络3.0将为人与机器的多种交互方式（包括鼠标、键盘、触摸屏、VR、AR、语音、手势等）提供连接。

基于高清机器视觉的工业环境监测、产品质量检测场景可大幅度提高生产安全性、生产效率及产品质量。在此场景中，工业网络需要对4K/8K相机系统和质检系统/安全告警系统进行互联通信，保证高清视频的实时无损传输。如在港口天车、物料运输行车等场景中，人员需要长时间高空作业，工作环境较为恶劣且危险。通过高清视频及远程操控技术，将能够实现高空无人化操作，将操作台设置于地面集中监控室，通过设备上装配的高清摄像头实时采集现场数据，保证远程操控的精准性。

基于VR/AR的设备远程运行监测及运维正逐步成为工业互联网新型应用。在工业生产中，一线生产工人将较难处理设备出现的复杂故障或工艺问题。基于高清摄像头的现场数据采集，将能清晰、直观地地将问题反馈给具有丰富经验的专家，后方专家通过VR/AR等技术将能很好地呈现给现场工作人员，指导现场工作人员完成设备故障的检测、排除等较为复杂的任务，从而降低故障响应时间，降低运行维护成本。结合AR/VR技术，采用计算机模拟合成方法实现工业数字孪生，结合生产环境及设备运行数据的实时采集，并可在视觉设备中实现全维度实时生产环境感知，可以更好

帮助生产管理人员实时了解车间工作进度，质量状况，设备状态，及时根据各种状况进行反馈调整。支持更加智能的设计、操作、维护，优质的服务及高水平生产安全

基于数字触觉技术的工业远程操控被认为将成为工业机器人发展的方向。在工业远程操控的部分应用场景中，被操控物体对于精度和灵敏度要求较高，此时完全依赖实时高清音视频数据难以达到设备与环境的精准测量与精准感知。数字触觉技术未来将会广泛应用于工业机器人，通过能够对力矩、压觉、滑觉等精细化传感器，能够检测来自机械刺激、温度和疼痛的刺激，而检测信号需要经过具有低时延、高可靠的网络传输后，能够在源端实时向操作人反馈，并呈现相应生物感觉。具有数字触觉的工业机器人能够检测物体的存在，确定零件的形状、位置、方向，并能借助压力、滑感等完成物体表面纹理的检测、接头检查或损坏检测，从而能够配合远程操控完成精准化的动作反馈和操作。

（二）业务挑战

面向2030年及未来，工业网络的发展需要进一步满足大数据接入工业系统的需求，促进物理与数字世界的深度融合，实现工业领域关键业务的更新升级。主要面临如下四个方面的挑战：

（1）工业网络ISA-95层次化架构无法满足工业互联网应用创新需求

超远距离机器控制、沉浸式在线生产管理、工业数字孪生、基于机器学习的预测性维护、机器视觉辅助质检等业务的出现，运动控制、预测性维护、企业业务上云等存量业务的改造升级。工业互联网场景下，面向机器视觉、XR维护、数字孪生等智能机器创新型业务的层出不穷，业务云化和终端虚拟化，智能设备直接对话将颠覆全网流量模型，云算网协同势在必行，原有的OT、IT分层网络架构难以全面适应新业务的。

业务创新需要更为弹性和智能的网络服务，网络需要及时探知应用需求，实时响应应用指标要求，“泛在互联、智能极简”的新型工业网络架构在未来将成为重要需求。

(2) 工业企业数字化转型带来工业网络规模的快速膨胀

工业互联网创新应用将会驱动数据传输速率大幅度提升。例如机器视觉辅助质检所需要的8K图像/视频，经百倍压缩后传输速率仍达千兆bps，沉浸式在线故障诊断所用到的XR技术，不仅对上下行数据传输速率提出挑战，同时也对时延/抖动提出了“无感知”的苛刻要求。

增强对生产环节的感知力是工业企业数字化转型的迫切需要，可以预见，未来十年将有海量设备接入工业互联网，工业网络的连接将变得无处不在，随着智能机器、传感器、标识部署的普及，网络终端连接数，连接密度激增，数据创建速度也将会加快。

(3) 面向工业互联网的网络服务质量评价体系尚不完善

网络服务质量体系与消费互联网存在巨大差异，当前的网络还是面向人类认知设计的系统，例如视频内容的帧率选择考虑到人类对运动物体的视觉感知力，定义为30帧/秒，采集的音频也利用了人类认知系统的掩盖效应机制。对于人类的认知，这样的编码质量可以被认为是精细的质量，但是对于需要超越人类的用例则远远不够，如机器人的监控系统可以从超过人类可听频率的声音中检测到异常。普通人看到事件时的响应速度约为100ms，因此很多应用基于这个时延进行设计，但是人类之外的应用，如远程控制系统，则需要进一步缩短响应时间。

面向工业互联网的工业网络是以人机物全面互联为主体的通信，需要注重差异化提供更好的网络服务质量及用户体验。不同的行业不同应用场景，专用网络和专用设备增加网络运维、运营压力，时延、抖动、丢包

传输确定性要求有很大差异，同样是机器视觉应用，在质量检测场景，端到端响应在面向机器控制的场景下，端到端响应时间缩减到10ms。

（4）工业互联网业务数据量的增长带来工业网络能耗的升高

权威机构数据预测，到2030年数字业务带来的流量将达到612ZB，是2020年的13倍。¹如果按照当前能效水平自然演进，能耗与对应的碳排放将增长2.3倍。ICT行业到2030年至少需要减碳45%，²才能达成阶段目标。华为瑞典研究院数据称，2020年全球ICT产业的能耗约2万亿千瓦时，占全球总耗电量的4%，预计到2030年ICT产业全球耗电量最高将增长61%。ICT行业绿色低碳转型已经刻不容缓。但未来世界流量的增长是大势所趋，如何解决它所带来的能耗提升和节能减排之间的矛盾，这将是一个“世界性难题”。

工业互联网时代，工业企业生产流程之间实现互联互通，数据共享，工厂内和工厂件通过网络协同实现柔性生产，将极大提升企业乃至行业的生产效率，但同时工业网络也将呈现规模大，复杂度高的特点，相关成本也将同步升高。因此如何实现高效低碳也是新一代工业网络面临的一大挑战。一方面提升企业整体信息系统效率，资源共享，数据互通，带来的业务转型，实现能效的大幅提升；另一方面降低网络本身能耗，支持网络资源的共享和弹性伸缩，目的是在动态工作负载情况下实现网络和计算资源的高效利用，如支持资源动态线性扩展的能力。

（三）关键指标

工业互联网典型场景涉及产线、车间、园区、办公楼宇、仓储等各种区域，这些区域涉及到生产、研发、物流、办公等各类业务，这些场景中，要考虑工业控制、高清视频监控、AR质检、智慧仓储、数字孪生等工业互

¹ Digital Economy Compass2020. Statista. 2020

² 国际电联 ITU-L. 1470 建议书“遵守《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC)的 ICT 行业温室气体 (GHG) 排放轨迹”

联网典型业务，并结合各场景应用用户的分布，需要同时考虑承载确定性、设备移动性、用户接入密度、定位精度、超大带宽等特征，可能对网络系统造成的影响。工业网络3.0阶段，为满足应用场景及应对业务挑战，网络指标应有更高要求，主要包括业务保证速率、应用端到端时延、传输抖动、连接数密度、连接可用性及业务接入带宽、定位精度等，详情参见下表：

表 1 工业网络 3.0 关键指标表

名称	描述
业务保证速率 (bps)	真实网络环境下工业终端可获得的最低传输速率
应用数据量 (Byte)	指定通信关系中，要求传输的应用数据量。 注： 1)周期性通信业务中，表示应用数据包在传输周期内发送的数据量。 2)非周期性通信业务中，表示单次业务传输的数据量。
最大应用数据量 (MBytes)	每秒内业务要求的最大应用数据量。 注： 1)没有固定传输周期和应用数据量的业务填写，如视频、图片、文件等 2)双向通信时，若上下行要求不一样，需区分上行和下行需求给出。
最小应用数据量 (MBytes)	每秒内业务要求的最小应用数据量。 注： 1)没有固定传输周期和应用数据量的业务填写，如视频、图片、文件等。 2)双向通信时，若上下行要求不一样，需区分上行和下行需求给出。
应用端到端时延(ms)	应用数据包从源节点进入发送转发流程到进入
传输抖动 (us)	工业控制中周期业务中需要抖动需要就有上限，与发送周期相关联。
连接数密度 (/km ²)	单位面积接入网络的工业终端数量
连接可用性	针对工业应用系统，考虑多条链路之间存在业务相关性，系统连接可用性，在5G网络中，可用性A与可靠性度量指标MTBF、可维修性度量指标MTTR关系如下：

名称	描述
	$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$
业务接入带宽	单用户可获得的最大速率
定位能力(m)	移动设备实时位置信息精度要求
时钟同步精度 (us)	经时间同步后,被授时时钟输出的时间与授时时钟输出的时间的一致性程度
业务可用性	根据商定的QoS交付端到端通信服务的时间量除以在特定区域中根据规范预期交付端到端服务的时间量的百分比值。
生存时间(ms)	工业应用在没有收到预期消息的情况下可以继续运行的最大时间
传输周期(ms)	工业应用传输周期性应用数据的时间间隔
业务特征	确定性周期性业务、确定性非周期性业务、非确定性业务
区域范围	移动业务网络需要覆盖的范围
运动速度	终端运动的速度

三、关键能力

(一) 目标架构

工业网络 3.0 面向工业互联网复杂个性的应用需求，越来越庞大的异构网络，种类多样的终端和网络设备，需要从功能、服务、部署三个维度对网络架构上进行重构，达到自适应按需满足工业互联网全场景应用网络需求的目标。

1、功能架构

围绕着“泛在互联、确定承载、智能极简、高效低碳”的整体愿景，工业网络 3.0 的功能架构分为四个主要层次。



图 4 工业网络 3.0 功能架构图

应用层负责识别上层业务提出的需求并将其转换为工业网络内部的各种服务指标。编排层包含上下两个部分，行业应用平台根据应用层所理解的具体需求，对复杂任务进行拆解并为不同业务建立特有的流量模型，同时根据服务指标监控业务和网络的质量；共性能力平台则将工业控制能力以及计算和网络资源融合为统一视图，并基于流量模型对其进行智能编排，进而实现自适应的网络构建。控制层感知当前网络状态并跨域管理网络资源，根据网络编排结果对网络设备进行管理配置，从而为上层业务提供资源保障。网络层提供了工业网络的基础功能，其中，网络 OS 配合控制层的指令调整和监控设备配置，实现网络遥测与资源预留等功能；硬件设备则从硬件层次上保障了网络的确定性转发与实时模态转换，并将工业控制能力集成进网络设备中。

在工业互联网场景下，工业控制网络与信息网络面临深度交融的趋势。工业网络 3.0 需要在传统工业网络确定性转发的基础上，通过功能架构支撑进一步实现实时可靠多模互联、深度智能网络规划以及网络内生工业控

制。在时间同步、数据整形、协议转换、多类型流量调度等技术的支持下，工业网络 3.0 可以实现实时的、确定的跨模态跨协议数据传输。同时，面对柔性制造带来的愈发多变的业务需求，工业网络 3.0 将通过自适应 AI 学习网络流量特征，从而针对不同需求进行智能化地网络规划和资源分配。此外，除了基本的数据通信功能，工业网络 3.0 将计算资源、网络资源、和工业控制结合，通过业务网络融合调度、确定性计算和控制能力集成等技术实现网络内生的工业控制。

2、服务架构

工业设备、应用和平台的上云是工业互联网的发展趋势，有利于降低企业信息化建设成本，促进制造业全过程、全产业链和产品全生命周期的优化，构建工业互联网创新发展生态。

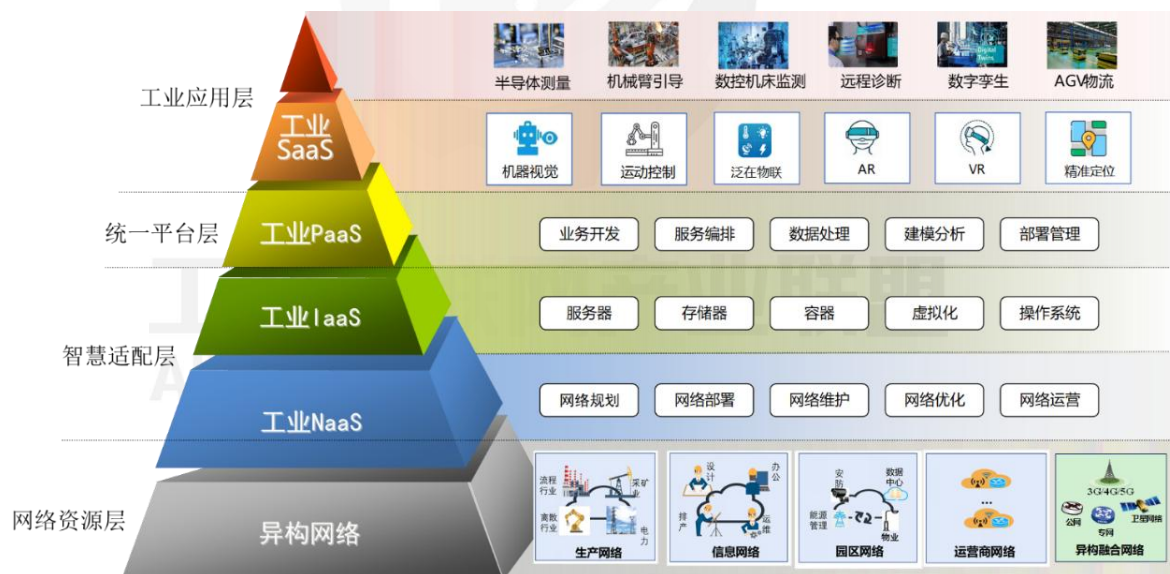


图 5 工业网络 3.0 服务架构示意图

传统互联网应用门槛较低，发展模式可复制性强，易于形成 SaaS、PaaS 和 IaaS 等云服务模式。工业网络涉及应用行业标准杂、专业化要求高，难以找到普适性的发展模式，需要总结和凝练行业知识，形成专用的工业 SaaS、工业 PaaS 和工业 IaaS 云服务模式。

专用的工业SaaS通过网络租用的形式提供多种工业专用软件，包括机器视觉类应用、运动控制类应用、泛在物联类应用、AR/VR类应用、精准定位类应用等。工业PaaS面向工业用户及工业应用开发者，提供软件运行的平台环境和接口，包括业务开发、服务编排、数据处理、建模分析、部署管理等。工业IaaS面向整个企业或应用的开发者，提供基础资源的支持，包括服务器、存储器、容器、虚拟化、操作系统等。

更重要的是，工业网络3.0时代要求云网的深度融合。传统的上云解决了云与端的连通性问题，端设备可以灵活使用云侧的资源和服务，然而由于工业应用对网络实时性、可靠性的要求很高，需要云端协作通信时能深度协调各种网络资源，提供确定性通信保障。此外，随着云端协同的应用场景日益多样化，底层各种可用的异构网络融合并存发展，云网协同调度适配日益复杂。为此，需要设计针对工业网络专用的“网络即服务”（NaaS）的服务模式，引入高级智能技术，实现极简化的云网资源智慧适配，为工业应用提供高效、确定的云服务。

具体来看，工作在NaaS模式中的SDN控制器、CNC、NFV管理等集中控制器将各自管理域中的网络资源进行抽象聚合，同时将其网络管理与控制能力封装为标准的API接口。当网络用户的应用或业务通过NaaS获取服务时，可通过集中控制器标准的服务调用接口按需地使用网络资源，从而实现业务与网络的紧密融合。。网络对业务的快速灵活响应和快速业务创新也是软件定义网络的本质。在具体实现上，集中式的控制架构和可编程的底层网络设施是实现“网络即服务”的基础，是工业网络3.0部署的重要条件。

3、部署架构

随着人、机、平台等连接数量的增加以及网络规模的扩大，网络的控制也变得越来越复杂。工业3.0网络应具备网络分层、集中管控、统一接

口和弹性智能等能力。在部署层次上，工业3.0网络分为**边缘层**、**承载层**、**互联层**。

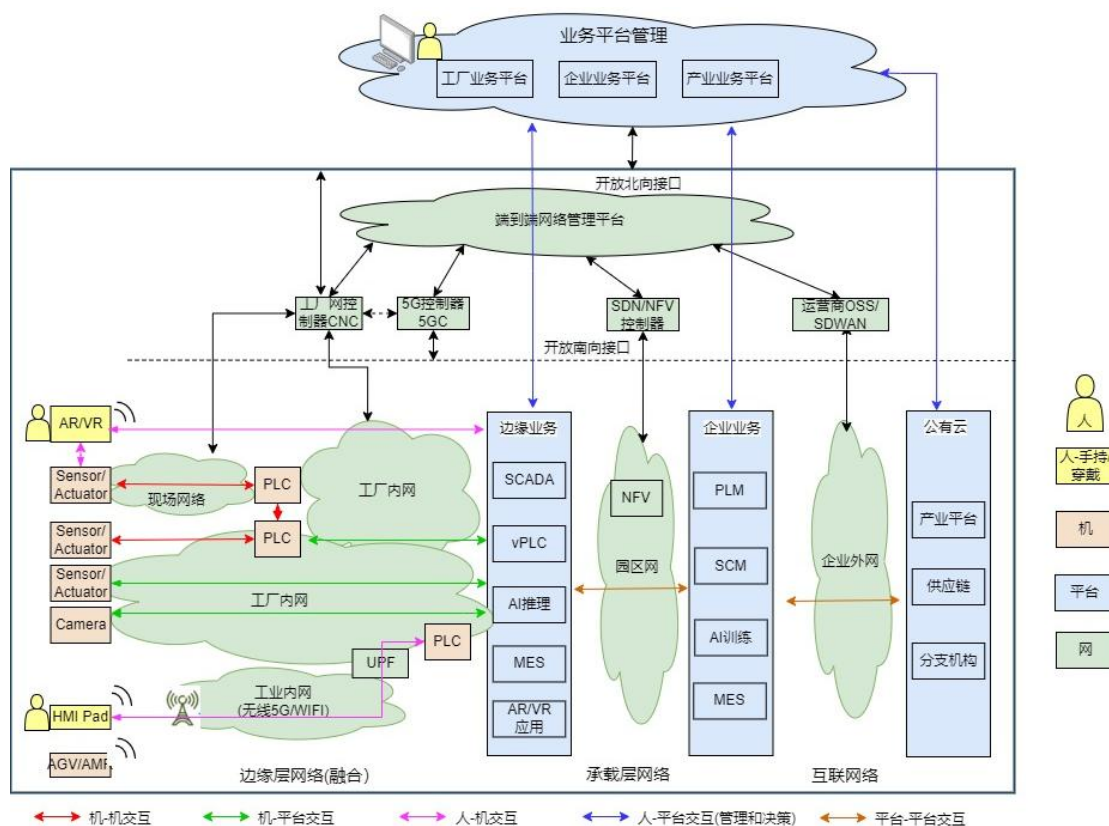


图6 部署架构图

边缘层是人、机、平台三者紧密交互的主要区域。边缘层现有的现场网络、工厂有线无线内网，将融合成统一、高带宽、灵活组网、具有确定性的IT/OT共网承载能力的网络。兼容以太网/IP协议、具备确定性能力的时间敏感网络TSN及其演进技术（如具备3层能力的TSN），将成为边缘融合网络的主要有线网络技术；边缘融合网络的无线部分将采用5G和WIFI/WIFI6，通过TSN+5G、TSN+WIFI的融合，实现无线与有线TSN在数据层面端到端同步和确定性承载，在控制层面的东西向协同和统一控制；已有工业总线、工业以太网、工业无线网将通过通用网关连接到边缘融合网络中。

承载层的目标是打造企业工业互联网业务平台，并基于平台开展数据智能分析应用，驱动企业智能化发展。企业为了打破信息孤岛、提高运营效率，会将原来分散部署在各服务器的业务系统，如MES、PLM、ERP、SCM等，集中部署到工厂内数据中心/企业云平台。各联网设备、业务流程产生的数据，都要能够实时汇聚到数据中心/企业云平台，进行联合分析，快速决策。承载层网络用于实现各工厂边缘平台、企业云平台/数据中心等之间的内部互联，提供高带宽、高速率和软件定义网络能力。

互联层的目标是通过构建产业工业互联网平台，广泛汇聚产业资源，支撑开展资源配置优化和创新生态构建。互连层网络相比企业骨干网，其覆盖范围更加广泛、业务模式更加复杂。其部署方式与企业骨干网类似，NFV管理器和网络控制器分别将云和网的能力开放给业务协同编排器（Orchestrator），由其完成云和网的协同，建立一张云网融合的业务网。区别在于跨地域分布的网络连接需要借助运营商网络提供的专线服务如MPLS VPN、OTN专线等或者SD-WAN等Overlay网络。

在集中管控方面，除了边缘、承载、互连网络层有独立的1个或多个网络集中控制器外，还需要全域集中的端到端网络管理平台，提供各层次融合的、云边端之间网络资源的按需分配和灵活调度。

网络管理接口方面，采用统一开放南向和北向接口，实现网络服务即插即用。

此外基于SDN/NFV技术构建的各层次网络设施为网络提供了足够的灵活和弹性。SDN提升了网络的可编程性，简化网络管理；NFV实现了网元功能的虚拟化，按需分配资源，弹性伸缩和自动化部署。

（二）关键技术

工业网络3.0需要适应工业互联网时代要素全连接，数据全流转，系统智能化的趋势，要解决工业网络确定性从局域延伸到广域，新型网络技

术从园区下沉到产线，网络对垂直行业的支撑从网络互联到数据互通的诉求。

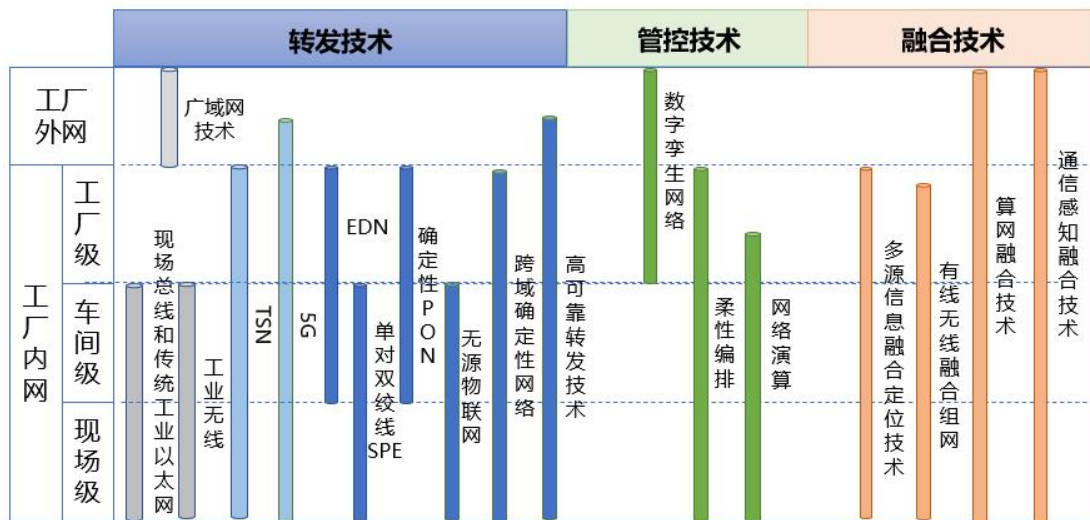


图 7 工业网络 3.0 关键技术图谱

工业网络 3.0 技术继承工业网络原有的网络技术（包括现场总线和工业以太网、工业无线及广域网技术），在 5G、TSN 等新型网络技术应用于工业网络的基础上，在转发技术、管控技术及融合技术三个方面进行进一步创新。在转发技术领域以确定性承载为目标，依赖 TSN、5G URLLC、确定性 PON、单对双绞线 SPE、无源物联网、跨域确定性网络、高可靠转发技术、增强确定性网络等技术的演进构建内生确定性承载网络技术；在管控面技术领域以开放自治为目标，网络演算、算网融合、数字孪生网络等技术的演进发展智能原生的网络运维技术；此外以提升工业应用服务体验为目标，工业网络 3.0 还将通过算网融合、通信感知融合、多源信息融合和有线无线融合组网融合通信信息技术，推动工业互联网网络不断演进升级。

四、展望

工业企业数字化转型的进程一直缓慢而稳步在进行中，工业互联网将加速这一进程的推进，工业企业将通过数字化转型实现更广泛意义的智能化，并逐步拥有更为强大的行业适应能力及出众效率。

现在是未来的起点，工业网络3.0并不是对当前工业网络的颠覆，而是以支撑工业企业数字化、智能化为目标，基于业务需求，不断融合新技术，迭代重构新架构。

面向2030年及未来的工业互联网业务需求，工业网络3.0将重点支持机器与平台的确定性连接，人与平台的随心访问及人与机器的无缝交互场景，将分别在以确定性为目标的转发技术、以开放自治为目标的管控技术和以业务体验为目标的融合技术三条技术路线进行迭代演进。

我们愿与全球相关组织、企业、科研机构 and 高校加强合作，共同定义工业网络3.0概念及技术路线，合力推动全球工业网络3.0标准及产业发展。



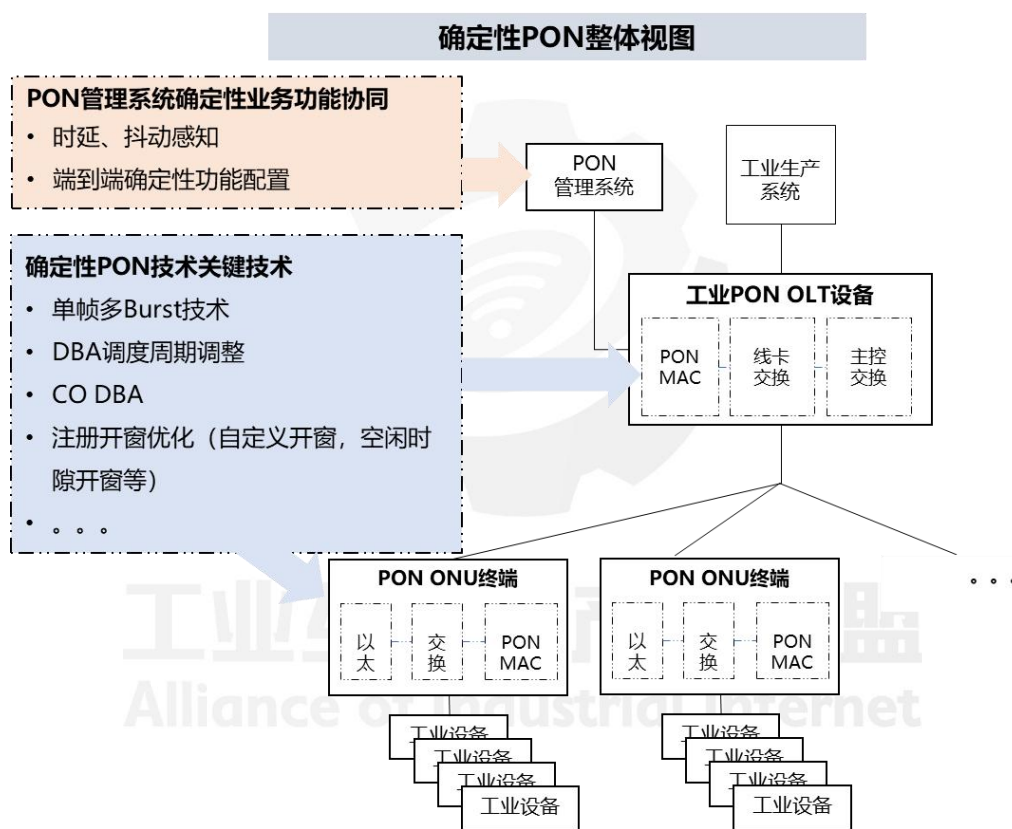
工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

附录

(一) 转发技术

1、确定性 PON 技术

确定性 PON 源于 ITU-T/IEEE/ETSI 的 PON 标准体系，是一种全新的工业互联网用全光网络连接技术，已经成为工业园区有线网络的新兴解决方案。



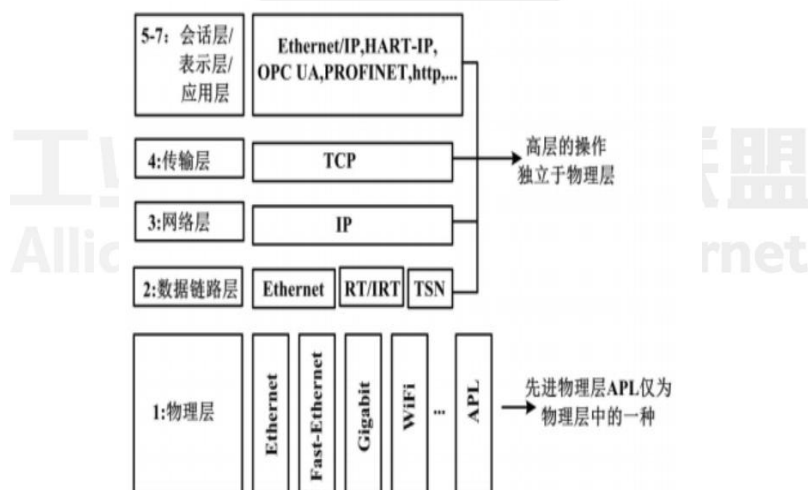
附录图 1 确定性 PON 技术整体视图

确定性 PON 技术，采用单帧多突发、上行注册开窗优化、协同 DBA 等新技术，优化现有 PON 系统的上行时延和抖动性能，增强 PON 系统确定性传输的能力，满足工业行业对于有线网络确定性的承载需求。

确定性 PON 技术，目前可以实现 PON 系统内上行传输时延抖动小于 50us，下行传输时延抖动小于 15us 的能力。可以满足工业场景大部分业务的网络传输性能要求。同时，确定性 PON 技术继承了工业 PON 数据采集解析、边云协同、网络切片、智能化运维等优点，可以实现工业企业各类业务的确定性融合接入能力，助力工业企业向智能制造转型升级。

2、 SPE 技术

单线对以太网SPE（Single Pair Ethernet）是近年来广泛用于工业控制、车载总线、楼宇控制领域的一个技术族。SPE在继承原有的海量单线对双绞线物理介质的基础上，引入了以太网技术，极大地提高了单线对双绞线的数据传输能力，同时保持了其供电与数据传输合一的优势。



附录图 2 APL 协议栈示意图

其中，由巴斯夫、西门子、恩特斯豪斯等欧洲厂商主导的APL（advanced physical layer）技术，被率先用于流程工业仪表自动

化系统改造。APL包括了10BaseT1L物理层标准、和IEEE 802.3cg数据链路层协议在内。APL将单线对双绞线的数据传输率提高到10Mbps，有线传输距离达到1000米，且可以实现对仪表、阀门等工业终端的本安供电，适用于要求苛刻的过程自动化应用，有望成为流程工业智能制造的底层使能技术，实现流程仪表、阀门的远程运维，和DCS系统的预测性维护，同时大幅度降低从现场仪表到控制室的线缆布设成本与定制化施工时间。

SPE技术的潜力尚未被彻底发掘出来，国内头部业主和厂商正在APL的基础上，致力于进一步提升数据传输率，同时降低对物理线缆的标准要求，以便更好地支持我国流程工业智能制造的飞速发展。

3、增强确定性网络技术（Enhanced DetNet, EDN）

为了能在3层网络支持对时间确定性要求较高的工业等应用，IETF成立了确定性网络工作组DetNet，采用资源预留、显式路由、业务保护来提供确定性传输。在工业网络3.0阶段，存在大规模组网的端到端差异化的确定性服务的承载需求，给现有的Detnet架构带来面向大规模组网多流并发控制、大规模网络端到端确定性时延抖动保障、多样化确定性转发技术共存等挑战，为此IETF DetNet工作组已于2022年7月正式修改工作组简章，将增强确定性网络技术（Enhanced DetNet, EDN）正式列入路标工作计划。



附录图 3 增强确定性技术架构示意图

预计未来 2 年内完成相关技术方案标准化。EDN 技术在 DetNet 架构上进行增强：从资源层，路由层和业务层三个维度增强 Detnet 架构，满足工业网络 3.0 等大规模确定性网络的演进需求。三个维度的架构具体包括下面的关键技术特性：

- 资源层支持大规模端到端的确定性资源管控和预留，实现异构多样化的确定性链路和子网的资源统一管控；
- 路由层提供大规模端到端确定性链路的路由能力，在路由层提供资源层确定性链路和子网确定性路由转发。
- 业务层具备大规模端到端确定性 SLA 承载服务，具备分类分级的差异化 SLA 的确定性业务承载能力。

4、无源物联网

无源物联网是利用环境能量采集技术，将周围可利用的信号与能量转化为可驱动自身电路的电，同时利用以反向散射为核心的通信模式，实现向目标节点传递信息的技术。其最显著的特征是完全不依

赖传统电池供电，能够很好地解决低功耗物联网发展过程中的瓶颈问题，是下一代物联网发展的关键技术。

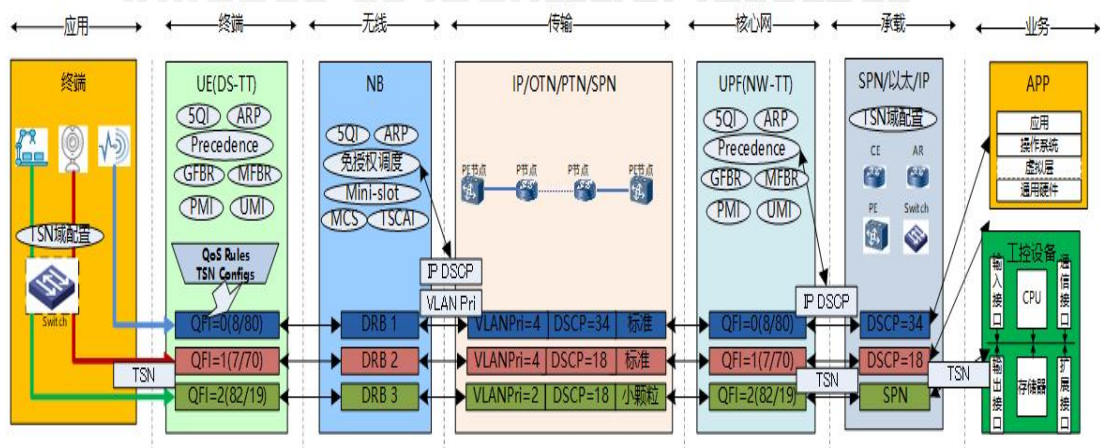
工业场景具有作业环境特殊，时延敏感等特点，一般要求网络通信时延为十毫秒至百毫秒级，标签可支持多种传感，且具备耐高/低温、抗腐蚀能力。

新型无源标签因其免电源、免维护的特性，可部署在以上制造工厂特殊环境中，同时，有望基于环境能量采集技术，实现传感器终端的自供能。另外，其极低成本的特性，有助于实现“一码到底”，打通现代制造业从采购、加工、流转、到报废等各个环节，实现业务流程、数据无缝对接，协同上下游部门管理，对资产库存进行精准控制与及时共享，避免“多采重复采”等问题，加速生产效率。

5、跨域确定性网络技术

工业网络在使用多种网络技术进行对接时需要多域多层网络协同，满足业务标识的统一和确定性保障方案的端到端贯通。

跨域确定性网络，需要实现控制融合、业务融合及管理融合。



附录图 4 跨域确定性网络技术及架构示意图

这需要两方面能力支撑：一方面，需要支持面向不同组网方式、不同功能需求进行跨域一体化设计，在架构层面实现网络组织的融合；另一方面，需要支持构建统一、标准的标识解析、协议转换机制，满足确定性能力的端到端实现；进一步，需要支持确定转发能力的纵向穿越，满足按照业务需求的灵活确定性转发调整和高效协同的管理机制。

6、高可靠性技术

在工业网络全面融合，工业控制系统、工业信息系统共用一张网络的情况下，需要构建高可靠能力，实现数十微妙故障探测、倒换，保障工业业务在下一个业务周期内完成业务恢复。网络故障检测时间和倒换时间决定了网络可靠性能力，在工业骨干环网层面，实现数十微秒级探测故障、快速恢复，保障工控业务平稳运行。相比双发选收，既满足了工控业务可靠性要求，又实现了更低的吞吐开销。

作为工业生产设备之间的桥梁，工业互联网网络应确保控制指令的准确接收，才能实现工业生产的稳定运行。工业网络应支持从设备级、系统级、业务级三个方面提供可靠性保障机制。其中，设备级可靠性支持提供但设备维度的高可用，支持通过 2N/N+1 冗余设计、虚拟机之间的反亲和部署等方式保证设备内模块故障时的业务无损接替；

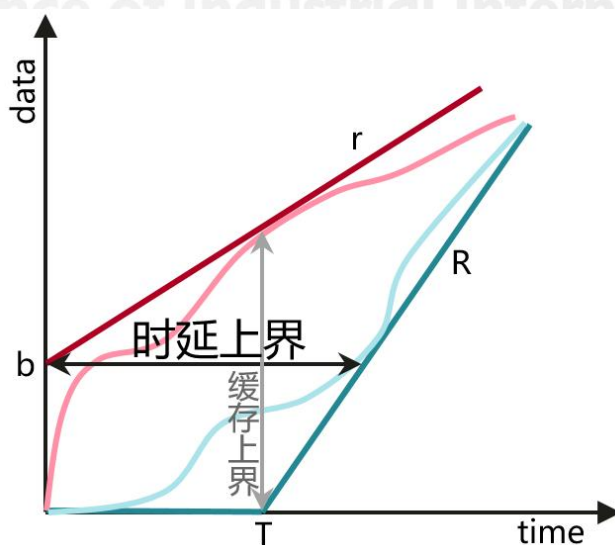
系统级可靠性应支持通过设备间的负载分担、异地容灾、主备等容灾机制满足，应支持设备之间的业务倒换；

业务级可靠性应支持通过链路冗余、双发/多发选收等数据冗余传输机制，将工业数据同时多次在一条/多条物理/逻辑链路上进行发送，提升端到端数据传输的可靠性。

（二）管控技术

1、网络演算技术

工业网络中的控制类业务一般具备周期性特性，可以通过组态软件配置或者网络业务感知两种方法获得。同时网络设备的 TSN 或者 QoS 调度服务能力也可以使用服务曲线公式表达，因此在工业网络场景中，基于网络演算的同步异步混合资源调度和编排可做到精确布放和动态优化调整。网络演算是用于分析如通信网络、数字电路、并行程序等人造系统的一种数学方法，主要分析目标是时延等“服务保障（performance guarantees）”，主要由流量建模、服务建模和计算方法等关键部件组成，通过建立流量到达曲线和服务曲线，网络演算可以把复杂且非线性的网络系统转变为易于分析的线性系统，进而计算求解。网络演算除了支持单点性能计算之外，也适用于多节点级联网络的端到端时延上界的计算，并支持网络中存在大量不同特征流量互相交汇干扰的情况。具体地，需要应用代数类、优化类等算法进行求解。



附录图 5 时延上界与缓存上界

2、柔性编排技术

柔性编排面向工业企业智能化、柔性化制造诉求，在工厂内、跨厂区/园区的协同场景，从业务的个性化且持续变化的诉求出发，以灵活调整、按需编排的网络管理控制能力，高效适配业务对网络拓扑、转发、资源管理等诉求，最大限度提高网络调整效率、降低网络管理复杂度。

柔性编排将最大程度的利用网络节点自动学习、简化管控的能力。针对有规律可循的工业业务流，自动学习业务流特征，灵活调整拓扑、转发规则，快速完成端到端网络资源预留及流编排；针对跨网络层次、并穿越不同速率的网络节点的业务流，亦通过强化自学习，在相邻网络节点构建基于时间片周期映射关系的编排结果；针对跨产线、跨厂区、跨园区等场景，以自学习活动的业务流特征，合理选择编排层级，按需分配网络切片资源，透明承载各类业务流；结合实际业务特征，合理设定编排参数、调度因子，并针对特定业务模块有选择地应用网络级逻辑时钟，降低业务之间相互影响，实现异构流量共网混跑，分门别类保障各类业务流端到端 QoS，确保各类业务互不干扰、平稳运行，同时简化网络管理，挖掘网络潜力、降低网络管理成本，加速智能化、柔性化制造在工业企业落地应用。

3、数字孪生网络技术

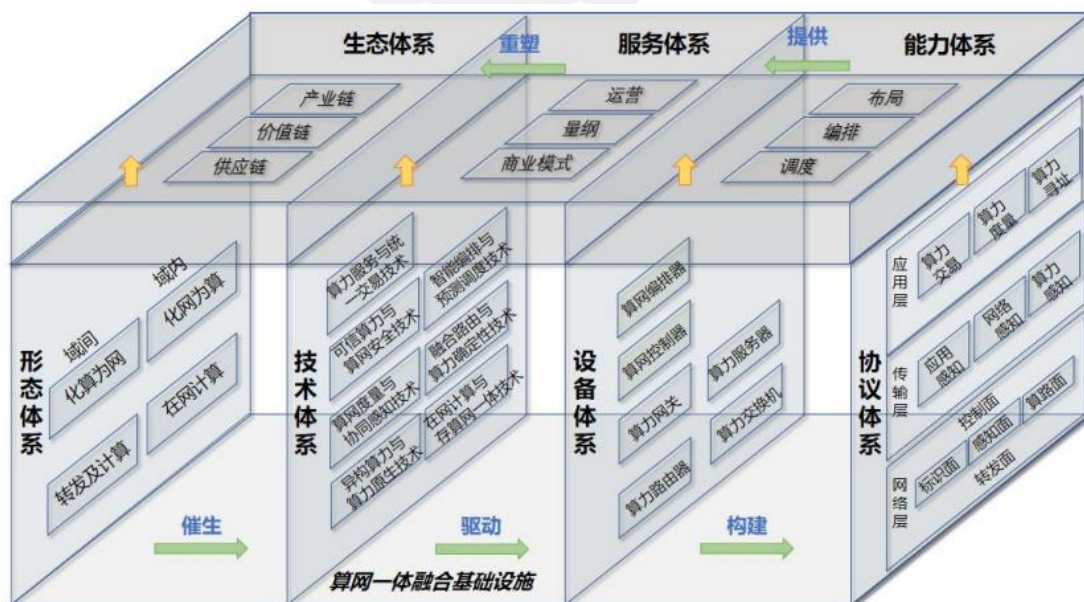
网络数据感知：研究搞性能网络近似测量，实现近似零误差测量。构筑建模层与预测层，构造高精度近似仿真模型，研究通过网络演算，排队论，提供有理论保障的 SLA 搞性能仿真。在控制管理方面，通过快慢控制结构理论求解网络巨系统的资源分配与优化问题。

在网元层面，从把 AI 用于运维到应用于网元算法和功能重构，实现 AI native 网元。针对网元设备的针对性实时数据，通过 AI 进行实时处理及分析，动态补偿和优化参数，提高网络设备算法精确度，实时智能超宽带，如认知无线、认知光网络等，需要将设备计算能力提升十倍。

（三）融合技术

1、算网融合技术

工业网络的产业现代化水平的增强，需要进一步促进面向工业网络的计算和网络两个产业深度融合。基于网络 and 计算深度融合的算网一体发展是算力网络发展的目标阶段，是计算和网络两大学科深度融合形成的新型技术簇，是融合贯通多要素的一体化服务，是实现算力网络即取即用社会级服务愿景的重要途径。

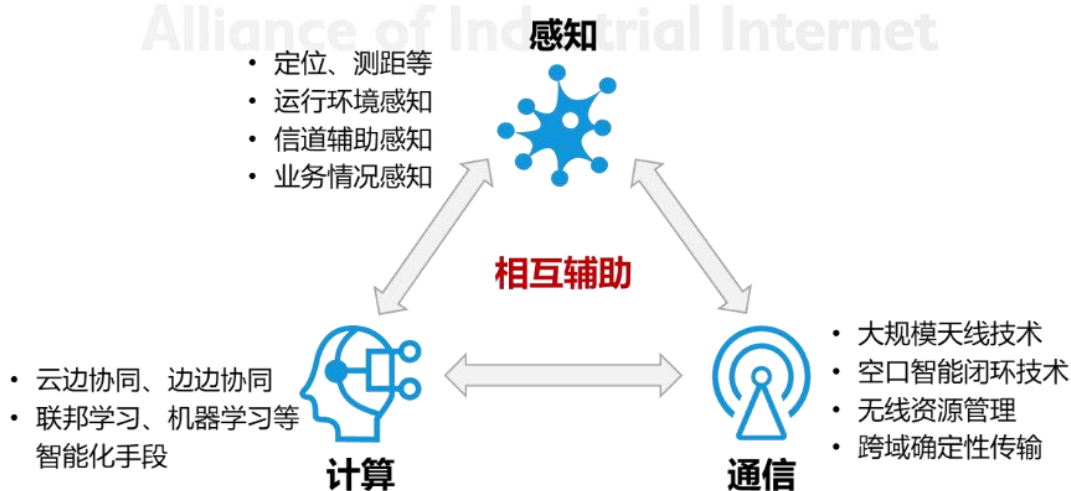


附录图 6 算网融合架构体系示意图

算网一体最基本的组成单元是计算设备和网络设备，最初开始从设备层面呈现技术要素的融合（如上图所示），并且随着技术要素、能力要素、资源要素的不断驱动，由设备一体向系统一体发展，最终实现服务一体。从设备层次看，算网一体主要表现在设备既具备一定信息处理功能，同时具备信息转发能力；从服务层次看，算网一体服务也将逐步呈现一体化，可以实现算力如水、电一般即取即用的社会级服务。

2、通信感知融合技术

在通信感知融合网络中，通信和感知功能可以共享相同的频谱、基带和射频资源。根据需求不同，一方面可利用现有通信网络资源向客户提供感知业务，另一方面实时环境感知信息等也可辅助保障空口传输稳定性。通信信息和感知信息在相同架构下的共享和高效融合处理将使能通信系统原生提供面向人、车、装备、物料等的扩展感知业务，有效降低工业现场网络部署和协议转换复杂度，提升无线网络的业务服务能力。



附录图 7 通感算一体关键技术示意图

通信感知融合系统空口设计包括一体化波形设计、一体化波束赋形技术、一体化干扰消除技术等，同时在系统层面引入边缘计算等技术。采用云、边、端多级感知数据计算架构，在综合折算带宽、实时性、处理资源等基础上，将实时感知数据进行本地计算卸载处理，在计算资源间进行实时数据计算任务分配，最终用于支持工业控制决策信息。另外，在通信感知融合设计过程中会逐步引入机器学习、联邦学习等 AI 手段进行性能优化以及多节点协作优化，因此需要引入设计合理的分布式智能架构和算法，在兼顾成本的情况下实现计算资源和算法层面的快速协同。

工业 3.0 将人、机、物等各种要素进行协同，需要工业应用与工业网络的深度融合，在公共网络基础设施上满足更多工业应用需求。通信感知融合将是关键技术之一。通感融合可实现高精度定位，用于智能机器人运动控制、智能物流管理、人员/设备位置管理等应用。在智能工厂中，基于高频的高分辨率成像技术可用于缺陷检测和故障检测，有效降低机器视觉系统部署带来的系统复杂度和成本。

3、多源信息融合定位技术

目前 GNSS、5G、Wi-Fi、蓝牙、惯导等单系统定位技术存在着各自的优势与不足，在场景差异、环境复杂的室内仅使用一种方法进行定位面临着较大的局限。为了充分发挥单系统定位的优点，提高室内定位的性能，多源融合定位成为一种可靠的定位方法。多源融合定位是将多种有互补特性的传感器数据组合，获得比单系统定位精度更高的定位方法。根据场景自适应融合的即插即用多源信息智能融合定位是未来解决复杂场景高精度鲁棒定位的有效途径和发展趋势。当前，

多源融合定位面临的首要问题是时间同步问题。第一个层面是传感器数据之间的时间同步问题；第二个层面是来自不同定位源的定位结果之间的时间同步问题。确定性无线网络为传感器数据时间同步和定位结果时间同步提供了基础，有助于实现多源信息融合定位。

在复杂、恶劣环境中往往存在着单节点信息不足、未监测到节点信息、节点数据异常、添加或删除某些节点、节点属性关系等技术问题，严重影响了导航定位的精准性。充分利用信号之间的关联结构，探寻信号之间的协同关系，基于有线与无线融合的工业确定性网络的精确时间同步机制构建多终端、多用户协同定位技术，有效解决恶劣环境下传感器部署、维护更新难题。

4、有线与无线融合的确定性组网技术

随着 AGV、机器人等工业智能设备的成熟及海量传感器的应用，工业无线接入需求进一步凸显。而工业控制数据需要具有确定性的网络进行承载，因此，有线与无线融合的确定性组网技术是工业网络 3.0 确定性保障的关键技术之一。

在关键技术方面，TSN 与 5G、WiFi、VLC 的融合成为关键，在实现跨系统时间同步的基础上，将 TSN 的差异化队列管理机制及整形机制应用于无线通信系统中，并增强 5G、WiFi 等系统在接入、资源保障方面对时间敏感类业务的保障，从而实现跨网传输的确定性。

在频谱方面，工业场景现场网络线路复杂，工业无线技术选用的电磁波谱段需要具备：大频谱带宽，借以使能冗余通信；高方向性，避免随机性的多径到达和使能可控制的 MIMO 方案。