

工业互联网网络连接白皮书

（2.0 版）



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

工业互联网产业联盟（AII）

2021 年 9 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： aai@caict.ac.cn

前 言

2018 年工业互联网产业联盟（AII）发布《工业互联网网络连接白皮书（版本 1.0）》，首次提出了工业互联网网络体系，涵盖工业互联网网络体系框架、工厂内外网目标架构、互联互通关键技术等。该白皮书在工业互联网发展初期，推动业界对工业互联网网络概念、定位、功能等方面达成共识起到积极作用，同时明确了符合我国特色的工业互联网网络初级阶段的发展路径，有力的推动了工业互联网网络的快速发展。随着近年来 ICT 新技术快速演进，工业互联网业务规模化部署，我国工业互联网网络的支撑能力逐步增强，各界对于如何有效利用网络新技术进行工业互联网网络化改造实践的需求越发显著。在这一背景下，有必要对《工业互联网网络连接 1.0》进行动态更新，进一步强化对垂直行业应用部署的指导作用，从而为产业界提供科学、清晰和可操作的指南。

基于此，工业互联网产业联盟再次凝聚产学研各界专家，共同撰写了《工业互联网网络连接（版本 2.0）》。本白皮书在继承上一版本核心理念、功能体系基础上，从商业、功能、技术、实施视角下进一步完善工业互联网网络体系，为企业网络化改造实施提供符合工业互联网网络下一阶段发展规划的有效参考依据。此外，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。

组织单位：工业互联网产业联盟

编写单位（排名不分先后）：

中国信息通信研究院、中国电信集团有限公司、华为技术有限公司、中兴通讯股份有限公司、中国科学院沈阳自动化研究所、重庆大学、北京邮电大学、网络通信与安全紫金山实验室

编写组成员（排名不分先后）：

中国信息通信研究院：陈洁、张恒升、朱瑾瑜、曹蓟光

中国电信集团有限公司：孙慧、金嘉亮、蒋铭

华为技术有限公司：郭小龙、李广鹏、徐前锋、耿亮、李汉国、于峰

中兴通讯股份有限公司：李斌、楚俊生

中国科学院沈阳自动化研究所：李栋、俞雪婷、刘金娣

重庆大学：蔡岳平

北京邮电大学：朱海龙、黄韬、汪硕

网络通信与安全紫金山实验室：白钰、张华宇、严园园

目 录

1 工业互联网网络概述.....	1
1.1 工业互联网网络内涵和定义.....	1
1.1.1 工厂内网.....	1
1.1.2 工厂外网.....	2
1.2 工业互联网网络新发展态势.....	2
1.3 工业互联网网络连接 1.0 到 2.0.....	4
2 工业互联网网络场景与需求.....	6
2.1 工厂内网.....	6
2.1.1 生产网.....	6
2.1.2 办公网.....	8
2.1.3 安防网.....	9
2.1.4 企业内数据中心.....	11
2.1.5 小结.....	13
2.2 工厂外网.....	13
2.2.1 互联网连接业务.....	14
2.2.2 企业网专线业务.....	15
2.2.3 企业云网融合业务.....	15
2.2.4 企业无线外网业务.....	16
2.2.5 小结.....	17
2.3 工业园区网.....	18
3 工业互联网网络体系架构.....	20
3.1 概念模型.....	20
3.2 业务架构.....	21
3.3 功能架构.....	22
3.4 部署视图.....	25
4 工业互联网网络技术进展.....	27

4.1 技术体系.....	27
4.1.1 网络互联技术.....	28
4.1.2 数据互通技术.....	32
4.2 技术发展趋势.....	34
5 工业互联网网络产业生态.....	37
5.1 产业链组成.....	37
5.2 产业链生态建设.....	40
6 工业互联网网络部署建议.....	41
6.1 部署路径.....	41
6.2 建设重点.....	42
附录 1:	44
1 网络互联技术.....	44
1.1 工业 PON2.0.....	44
1.2 工业光总线.....	45
1.3 TSN.....	47
1.4 5G 虚拟专网.....	48
1.5 Wi-Fi 6.....	50
1.6 FlexE/切片.....	52
1.7 IPv6+/SRv6.....	54
1.8 DIP（确定性 IP）	56
2 新型数据互通技术.....	57
2.1 OPC UA.....	57
2.2 DDS.....	58
2.3 NC-Link.....	59
3 新型融合技术.....	61
3.1 5G+TSN.....	61
3.2 TSN+OPC UA.....	63

附录 2:	65
缩略语.....	65



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

1 工业互联网网络概述

1.1 工业互联网网络内涵和定义

工业互联网网络是构建工业环境下人、机、物全面互联的关键基础设施，通过工业互联网网络可以实现工业研发、设计、生产、销售、管理、服务等产业全要素的泛在互联，促进各类工业数据的开放流动和深度融合，推动各类工业资源的优化集成和高效配置，加速制造业数字化、网络化、智能化发展，支撑工业互联网下的各种新兴业态和应用模式，有力推动工业转型升级和提质增效。

根据业务需求和数据流向，工业互联网网络又可进一步划分为工厂内网和工厂外网。

1.1.1 工厂内网

工厂内网¹指在工厂或园区内部，满足工厂内部生产、办公、管理、安防等连接需求，用于生产要素互联以及企业 IT 管理系统之间连接的网络。例如工业现场用于连接仪表、机床等设备的生产控制网络，用于连接企业数据库、ERP、MES 等办公业务系统的企业信息网络，以及用于能源、安防等监控的物联网都属于工厂内网范畴。工厂内网的使用主体是工业企业，存在企业自建、运营商代建、以租代建等多种形式。随着工业互联网业务不断发展，工厂内网呈现出融合、开放、灵活的发展趋势。

¹ 本文所指工厂内网的内涵与工业互联网政府文件中企业内网一致。

1.1.2 工厂外网

工厂外网²指以支撑工业全生命周期各项活动为目的，满足工厂数据、工业应用、工厂业务需要出工厂与云平台或者其他网络互联需求，用于连接企业上下游之间、企业多分支机构、企业与云应用/云业务、企业与智能产品、企业与用户之间的网络。例如企业用于开展电子商务业务的公众互联网，租用基础电信企业线路用于异地园区互联的专线等都属于工厂外网范畴。面向工业互联网高质量业务需求，构建多种形式的专网及实现网间互联，打造工业互联网高质量网络平面是工厂外网的重要发展趋势。

1.2 工业互联网网络新发展态势

近年来，工业互联网网络已经从概念探索进入到应用实践推广的新阶段。工业互联网成为“新基建”七大领域之一，助力打造数字化、智能化的新型基础设施，运用数字化、智能化技术改造提升传统基础设施。网络作为工业互联网的基础，为工业互联网的发展提供了重要的网络连接基础。工业互联网网络与边/云能力共同构筑了基础设施层，提供大带宽、低时延、高可靠的网络入口和高速管道，满足各新基建领域的网络连接需要，支持丰富的行业数字化应用，加速传统产业向网络化、数字化、智能化方向发展。

总结归纳起来，工业互联网网络呈现出战略引领、技术创新、产业推进全面发展的良好态势。

² 本文所指工厂外网的内涵与工业互联网政府文件中企业外网一致。

一是工业互联网网络政策体系持续完善。2019 年初工信部发布了《工业互联网网络建设及推广指南》进一步细化工业互联网网络基础设施建设和网络应用创新的目标、任务和措施。

《“5G+工业互联网” 512 工程推进方案》强化“5G+工业互联网”网络关键技术产业能力、创新应用能力和资源供给能力的提升。2020 年 3 月,《关于推动工业互联网加快发展的通知》中通过六个方面二十条推进举措,促进工业互联网在更广范围、更深程度、更高水平上融合创新。2021 年 1 月发布的《工业互联网创新发展行动计划(2021-2023 年)》为工业互联网未来三年发展提出网络体系强基行动,进一步完善新型基础设施。近年来,各省(市、区)因地制宜,相继出台地方产业政策,形成中央部署、地方推进、企业响应的多方协同政策发展模式。

二是工业互联网网络体系加速建设。我国工业互联网网络技术创新能力日益提升,以 5G、时间敏感网络、边缘计算等为代表的新型网络技术融合叠加、互促共进、倍增发展的创新态势初步形成。基础电信企业利用 5G、NFV、SDN、切片等技术,积极构建面向工业企业的低时延、高可靠、广覆盖的高质量外网,已延伸至全国 300 多个地市,连接 18 万家工业企业。工业企业加快探索和采用时间敏感网络、边缘计算、5G 工业模组等新产品在内网改造中的应用。截至 2020 年底,领先省份企业生产设备联网率接近 50%，“5G+工业互联网”在建项目已超过 800 个。

三是工业互联网网络产业生态日益优化。聚焦于产业化能力提升和公共服务能力建设,部署了一批支撑网络技术研发、

标准研制、网络建设应用创新的测试床和公共服务平台。在产业联盟方面，截至 2021 年 7 月底，工业互联网产业联盟会员已经突破 2000 家，新成立的 9 个工业互联网产业联盟实验室作为工业互联网基础研究、关键技术、产业创新的重要载体，将积极探索技术产业化的创新模式及商业模式，解决工业互联网发展中的难题。

1.3 工业互联网网络连接 1.0 到 2.0

2018 年工业互联网产业联盟发布《工业互联网网络连接白皮书（版本 1.0）》，首次提出了工业互联网网络体系，涵盖工业互联网网络体系框架、工厂内外网目标架构、互联互通关键技术等。该白皮书在工业互联网发展初期，推动业界对工业互联网网络概念、定位、功能等方面达成共识起到重要作用，同时明确了符合我国特色的工业互联网网络初级阶段的发展路径，有力的推动了工业互联网网络的蓬勃发展。随着近年来 ICT 新技术快速演进，工业互联网业务规模化部署，我国工业互联网网络的支撑能力逐步增强，各界对于如何有效利用网络新技术进行工业互联网网络化改造实践的需求越发显著。在这一背景下，有必要对《工业互联网网络连接 1.0》进行动态更新，与时俱进地反映最新业界共识和技术发展趋势，进一步强化对垂直行业应用部署的指导作用，从而为产业界提供科学、清晰和可操作的指南。

从网络连接 1.0 向 2.0 发展与演进的同时，工业互联网网络的网络互联、数据互通、标识解析的三大网络功能组成被充

分继承。在此基础上，网络连接 2.0 中升级功能架构，新增业务架构和部署视图，形成面向不同利益关系者的完备架构体系。同时持续探索 TSN、5G 等技术在制造业的应用，加强融合技术所带来的倍增效益。工业互联网网络连接白皮书 2.0 旨在对企业网络化改造实施提供符合工业互联网网络下一阶段发展规划的有效参考依据。



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

2 工业互联网网络场景与需求

依据应用部署场景的差异，工业互联网网络可以按照工厂内网、工厂外网和园区网络维度进一步划分，以此满足不同层级的企业生产、办公、安防、数据中心和云平台等设备连接和数据互通的需求。

2.1 工厂内网

2.1.1 生产网

生产网络可支持控制类业务、采集类业务、连接类业务等多种业务类型。

控制类业务包括远程控制和现场产线控制两种应用场景：

- 远程控制对于网络时延、网络带宽存在一定的要求。例如视频远程控制类业务要求时延一般不大于 20ms，同时应能根据具体远程控制视频清晰度，提供相应的网络带宽保障；
- 现场产线控制，主要包括对产线 PLC、产线 I/O、设备运动控制，其网络流量一般具备周期性特征，根据不同的控制对象，其网络时延和丢包等关键指标参数存在差异化的需求。典型的网络能力需求如表 1 所示。

表 1 现场产线控制类业务典型网络能力需求

	业务	业务需求
工 业 RT 业务	产线级 I/O 控制 (阀岛/变频器/机器人控制器等)	数据报文周期：包括 2ms，4ms， 8ms，16ms 等周期
	机器内部 I/O 控制 (焊枪 抓手 等)	丢包要求：不能连续 3 次业务丢包* 数据包大小：64Byte 至 1500Byte

	产线 PLC 之间控制	
工业 IRT 类业务	运动控制	数据报文周期：包括 0.5ms，1ms，2ms，等周期 丢包要求：不能连续 2 次业务丢包* 数据包大小：一般不大于 50Byte
RT (Real Time Communication)：实时通信，适合周期性数据交换的场合 IRT (Isochronous Real Time Communication)：等时同步通信，对于时间要求严格同步的通信 *：非绝对，一般与看门狗时间相关		

采集类业务包括传感器信息采集、视频检测与采集等，其典型的网络能力需求如表 2 所示。

表 2 采集类业务场景及典型网络能力需求

业务	场景	业务需求
工业 RT/NRT 类业务	环境传感、数据采集	发包周期：100ms-10s 上行速率：<100kbps 数据包大小 < 1500B
	视频检测与采集	上行速率：1080P：>10Mbps 4K：>40Mbps
NRT (Non-Real Time Communication)：非实时性通信，可以用于组态、参数设置、诊断等非实时性要求的场合		

连接类业务包括设备自动化程序下载、生产加工程序下载、基于无线网络的 AGV 导航、远程诊断维修指导等业务。其典型业务需求如下表 3 所示。

表 3 连接类业务场景及典型网络能力需求

业务	场景	业务需求
工业 RT/NRT 类业务	AGV 导航	发包周期：40-500ms 容量 < 100 设备 @ 10000 平 数据包大小 < 1500B 移动速度<50km/h
工业 NRT 类业务	设备程序下载	容量 < 5 @ 100 平 数据包大小 ~100MB

工业 RT/NRT 类业务	远程诊断维修	容量 < 5 @100 平 数据包大小 <1500B 带宽>100Mbps
---------------	--------	---

2.1.2 办公网

企业办公网络是企业工厂内网中面向人与人、人与机器之间连接层级的网络，主要涵盖了企业员工宽带办公和上网业务、固定电话业务、远程视频/语音会议业务以及与工厂内网中其他管理和信息系统互联互通这些主要业务。企业工厂内网办公网络的典型架构如下图 1 所示。

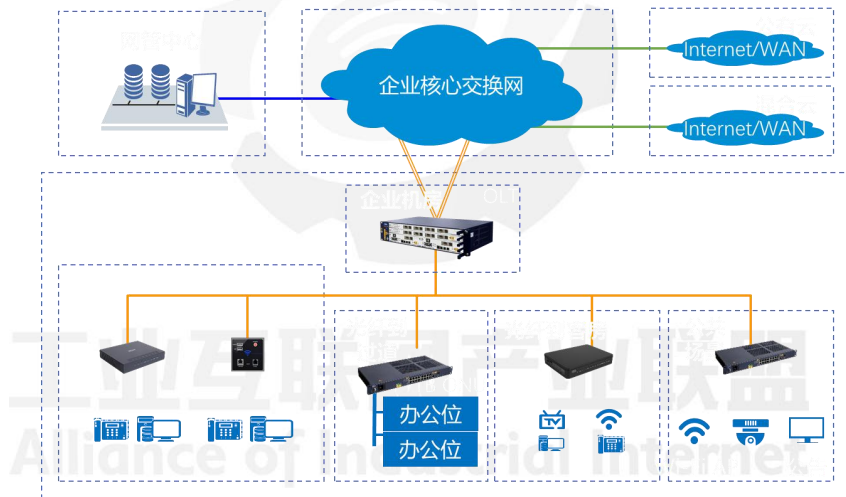


图 1 企业工厂内网办公网络的典型架构

1、宽带办公和上网业务

主要用于企业员工访问企业内部管理和信息系统、公众互联网，其主要业务需求为稳定、低成本、统一接口的的大带宽接入。

2、固话业务

固定电话业务在企业客户中仍然扮演着非常重要的作用，在工业互联网的场景中，其主要实现方式有基于传统电话交换机的固定电话和传真业务，以及基于 VoIP、软交换技术，采用

PON 技术等光纤技术承载的光纤电话形式的固定电话。

3、视频/语音会议类业务

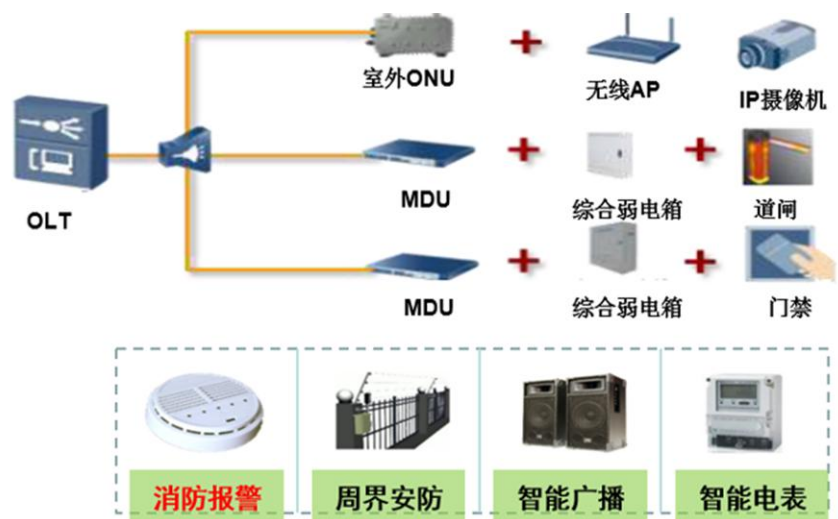
宽带网络连接同样可以用于承载基于互联网的视频/语音会议业务，通过计算机或者专用的视频/语音设备，可以实现工厂内和接入控制工厂内高清/高保真的多方远程会议系统。

4、内网系统互联互通类业务（如：与 MES 系统、安防监控系统等互联互通）

在企业工厂内网中，位于办公网络的操作维护人员，存在与企业生产管理系统和企业/园区安防监控系统的互联互通需求。通过有线/无线的连接方式，接入到企业生产管理系统中，实现生产数据的处理，以及生产任务的配置和下发；同时，通过有线/无线的连接方式，按需及时接入企业/园区安防监控系统，进行紧急事件的处理和监控历史记录调用和分析等工作。

2.1.3 安防网

工业企业的安防网络主要包括企业范围内的视频监控、道闸门禁以及其他基于物联网的传感系统。企业工厂内网安防网络的典型架构如下图 2 所示。



OLT: Optical Line Terminal (PON系统局端设备)
 ONU: Optical Network Unit (PON系统终端设备)
 MDU: Multi-Dwelling Unit (多住户单元, ONU的一种设备形态)

图 2 企业工厂内网安防网络的典型架构

1、视频监控系统

主要实现企业生产车间、办公区域、设备机房、工厂外围等范围的安防监控，其主要业务需求为稳定、低成本的上行大带宽接入。按照接入方式，可以分为基于以太网、PON 等方式的有线接入，和基于 Wi-Fi、5G 的无线接入两种。

对于视频监控摄像头，如果采用以太网方式的有线接入，一般还需要配备以太网供电（PoE）能力，实现一根铜缆同时承载数据和实现供电的能力。

2、门禁系统

主要包括企业外围大门、内部厂房、办公楼等的门禁，其主要业务需求为稳定的有线连接。一般门禁系统通过以太网等有线方式实现接入。

3、物联网传感系统

主要包括企业周界安防、智能电表等数据定期采集业务，

其主要业务流量特征一般为周期性的低带宽业务流，常规连接方式为低功耗的无线/有线连接方式，例如基于 NB-IoT、Wi-Fi 等方式的无线接入和基于常规以太网、单对双绞线以太网的有线接入方式。

2.1.4 企业内数据中心

企业内数据中心，其主要承载企业生产和日常办公所产生的各类生产相关数据，以及企业正常运行所必须的各类管理和信息系统，如制造执行系统（MES）、供应链管理系统（SCM）、产品数据管理系统（PDM）、企业资源计划系统（ERP）、客户关系管理系统（CRM）系统等。

同时，企业内数据中心，也可作为企业日常产生的各类其他数据的存储和处理中心，例如企业内部视频监控、人员出入门禁数据等。

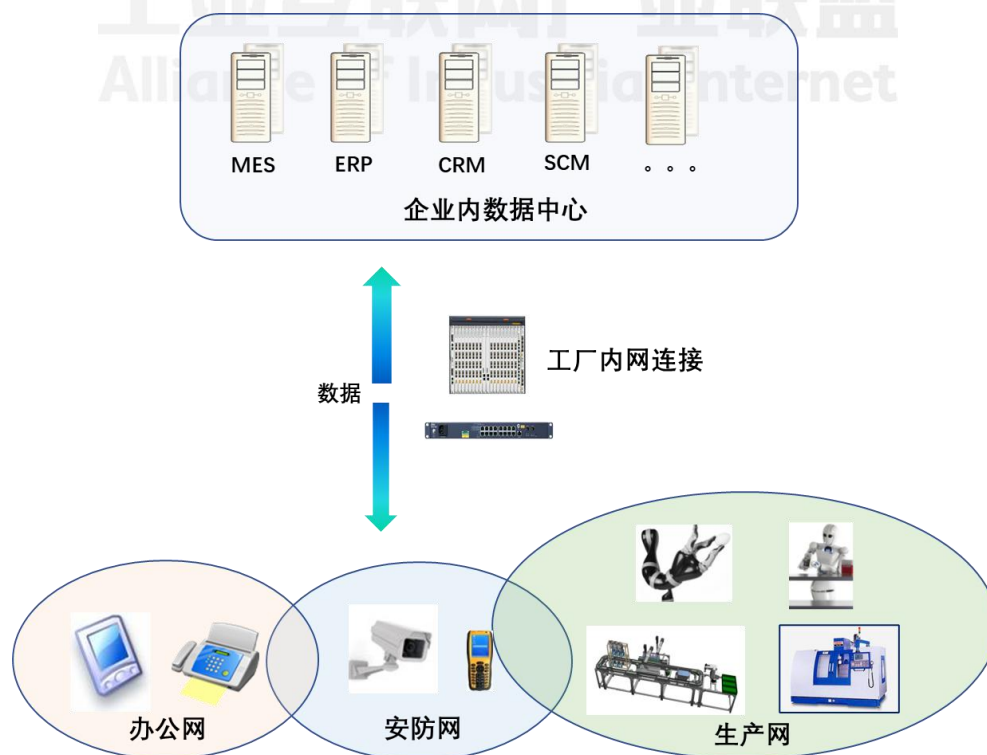


图3 企业内数据中心与工厂内网其他要素之间的关系

企业内数据中心的实现形式包括为独立的业务系统配备独立的通用服务器资源；基于虚拟机、容器等方式，提供虚拟化环境承载多个独立业务系统；以及在网络设备侧集成边缘计算资源板卡，用于运行各类独立业务系统。

企业内数据中心作为工厂内网各类数据和服务的承载中心，承担了企业内部边缘数据的汇聚、存储、处理的主要工作，是工厂内网信息化、智能化的核心节点，也是上联工厂外网，实现跨域数据互通的关键节点。

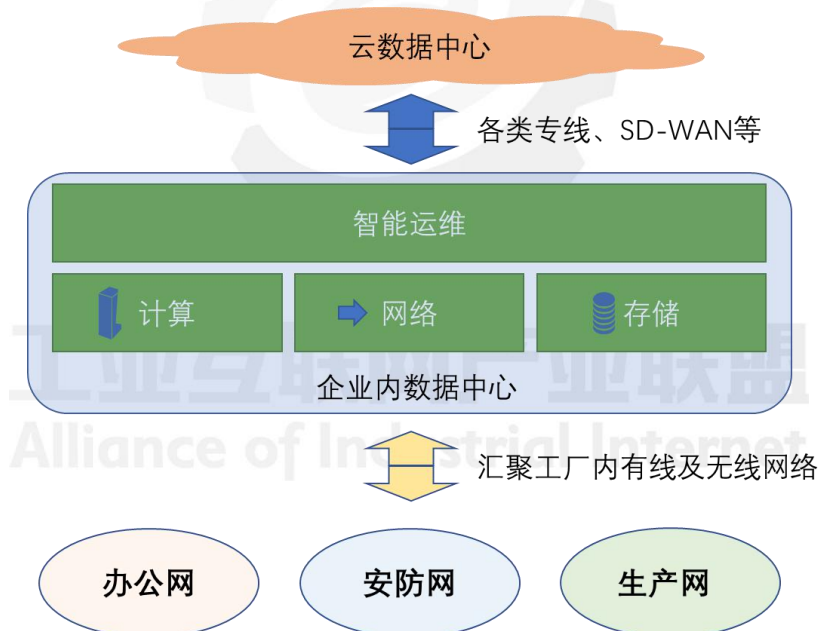


图4 企业内数据中心组网架构以及和工业云的互联

面向工厂内网，企业内数据中心汇聚工厂内各类有线（工业PON、以太网等）及无线网络（5G、Wi-Fi等）承载的生产、办公、安防等子网的数据，并进行数据的处理和存储。

面向外部连接，企业内数据中心通过各类专线（按照企业规模，可包含PON专线、OTN专线、企业入云专线等），以及SD-WAN等新兴外网技术，实现与云数据中心的互联互通，进行

工业数据的传输和异地备份等业务。

2.1.5 小结

从以上场景和需求来看，工厂内网中设备连接类型越来越多，设备连接量越来越大，逐步呈现出全连接的趋势。因此，网络部署上朝着融合方案发展，最典型的是有线无线融合的方案，如：工业 PON/工业以太网+5G+工业 Wi-Fi。随着全连接的融合方案和越来越多的工业设备连接，工厂需要具有对设备、对网络和对业务的整体管控方案，短期内以各管控系统的不断成熟发展为主，将会向全连接、自服务能力不断发展，以满足工厂灵活调配网络适应业务的需求，以及智能化故障预测诊断及远程运维的需求。

2.2 工厂外网

各种新型网络技术的成熟以及不同网络技术之间的融合发展促进和加速了工业互联网的变革，越来越多的工业应用将通过工厂外网在工业云/数据中心落地，如控制类，采集类，交互类，安全类的工业应用都在突破工厂内网的界限而逐渐向工厂外网延伸。

随着远程服务业务的发展，未来海量设备的远程监控、维修、管理、优化等业务都将基于工厂外网开展；新的企业专线技术将针对企业上网、业务系统上云、公有云与私有云互通等不同场景提供精细化服务；工厂外网络根据企业要求提供服务快速开通，业务快速调整能力，为企业广泛互联提供更灵活的

选择。

工厂外网主要包括互联网连接业务、企业网专线业务、企业云网融合业务、企业无线外网业务等业务场景。

2.2.1 互联网连接业务

互联网连接业务为企业提供大带宽公网出口，实现 Internet 连接，主要包括普通互联网业务和企业上网专线业务。

普通互联网业务支持多种接入方式，可为时延、可靠性、灵活性要求不高的工业应用提供尽力而为的网络数据转发，实现工业企业与用户、客户之间的信息沟通，与产品之间的连接互通。典型的普通互联网业务应用包括企业电子商务活动、出厂产品和企业用户通过互联网连接到智能工厂和工业云平台，实现出厂产品的升级维护和人工远程信息访问等。

上网专线为企业客户提供直接连接到互联网的专用链路，实现方便快捷的高速互联网接入访问服务。相对普通互联网业务，企业上网专线通过相对永久的通信链路接入 Internet，保证连接的高速、稳定、安全；提供完全独享的接入方式和带宽保证数据传输的低误码率、低时延；分配固定真实的 IP 地址，方便为 Internet 上其他客户提供信息服务。典型的互联网专线业务应用包括工业企业连接到互联网，企业办公，企业用户访问智能工厂等。

随着运营商网络的持续升级扩容，未来互联网连接业务将为工业客户提供更高带宽、更高可靠性的连接服务，同时可根据客户需求，由运营商或者客户直接对网络服务质量和能力进

行灵活配置，实现带宽灵活调整、服务等级按需切换等功能，进一步满足企业差异化的网络连接需求。

2.2.2 企业网专线业务

企业网专线可为工业企业用户的不同分支机构/上下游企业之间提供基于互联网的虚拟专线（如 SD-WAN、IPsec、MPLS VPN 等）、物理隔离的专线（如 SDH、OTN 等）、网络切片等定制化的专属资源。企业专线具有上网速度快、质量稳定、丢包率低、安全可靠等特性，可为大中型企业不同分支机构/上下游企业之间提供高可靠、高安全、高质量的端到端业务互联和部署服务。典型的企业专线业务应用包括大规模异地协同办公、低延时生产控制、智能安防等场景。

随着网络基础设施的持续建设和升级，未来企业专线将会提供更广范围的覆盖，更高的网络品质，以及更加智能化的随选网络能力。

2.2.3 企业云网融合业务

随着企业在云端部署信息系统成为一种趋势，传统的工业互联网架构和能力已经逐渐无法满足企业“多系统，多场景，多业务”的上云要求。在这种场景下，云和网不再各自独立，开始进行深度协同，云网融合的概念应运而生。

针对云网融合业务需求，可采取入云专线为工业企业提供云数据中心和企业虚拟私有云之间高速、低时延、安全可靠的专属连接通道，实现工业企业本地的数据中心、办公网络、总部和分支机构和云数据中心相连接。企业入云专线应具有固定

路由配置、无缝资源扩展、用户独占、高安全性能等特性，满足工业企业高等级网络连接需求。

工厂外网应支持为企业用户快速提供所需的企业入云专线业务，专线业务类型包括 PON 专线、MPLS VPN、MSTP、5G 入云专线、基于 SD-WAN 技术的互联网专线等。5G 入云专线应支持灵活的专线接入方式，如在边缘计算/UPF、核心网、或骨干网处实现专线分流。

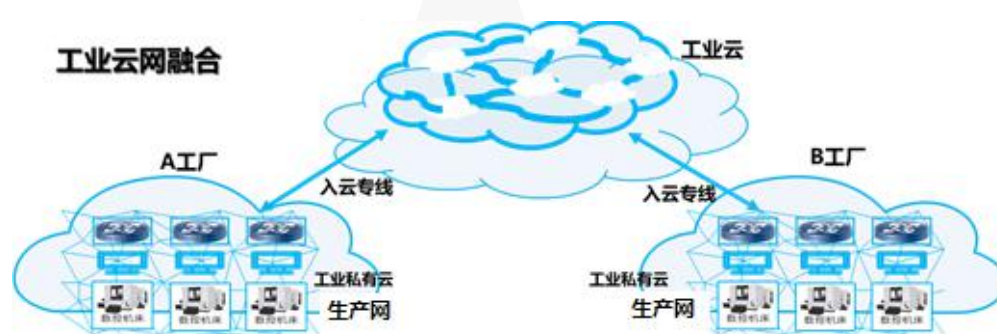


图 5 云网融合典型网络架构

网络服务提供商，未来将重点研制面向工业场景需求的云网融合技术架构，为行业客户提供整体智能化信息服务，打通云网业务开通流程和业务运维体系，提供高质量的服务和保障能力。

2.2.4 企业无线外网业务

基于公共蜂窝网络形式的企业无线外网技术也在逐步延伸到工厂中的各个生产环节，实现机器设备、原材料、控制系统、信息系统、产品以及人之间的网络互联，同时通过对工业数据的全面深度感知、实时传输交换、快速计算处理和高级建模分析，实现智能控制、运营优化和生产组织方式变革。

以 5G、NB-IOT 技术为代表的公共蜂窝网络具有的超大的覆

盖范围以及提供高可靠的无线网络连接，可以解决工业场景下布网困难、工厂内网无法全覆盖，以及在具有电磁干扰、辐射、化学腐蚀等复杂生产环境下的数据采集问题。

5G 网络切片技术支持独立定义网络架构、功能模块、网络能力、业务类型等，减轻工业互联网平台及工业 APP 面向不同场景需求时的开发、部署、调试的复杂度，降低平台应用落地的技术门槛，有效满足不同工业场景连接需求。具有低时延、广连接、大带宽、网络切片、边缘计算等特点的 5G 网络，将会进一步促进企业物联网应用场景的不断成熟，为工业数字化、自动化、智能化的生产管理提供支撑。

NB-IOT 网络技术，在授权频段内满足企业窄带场景下超低功耗、超低成本、超大连接的业务应用需求，可以作为企业物联网等网络的底层承载方案。

2.2.5 小结

工业互联网的发展就是通过开放的网络将企业工厂的设备、生产线、供应商、产品和客户等紧密地连接和融合起来，高效的共享和复用各种要素资源，从整体上提升工业生产的自动化、智能化水平，达到降本增效、延长产业链，推动转型发展的目的。从以上场景和需求来看，工厂外网短期看还是聚焦在企业专线上，但随着业务的发展和新技术的赋能，虚拟切片网络会在一定程度上替代原本的企业专线，还会存在根据业务需求来划分不同性能和保障能力的专网予以匹配。因此，工厂外网的部署上应更加关注云网融合发展，逐步实现网随云动、云随网

生。

2.3 工业园区网

工业园区网络作为工业网络的一种典型部署形态，从承载的业务角度看，工业园区网络主要由工业生产网、企业信息网、园区公共服务网以及云基础设施组成。所用的网络技术、组网方式、发展趋势等方面与工厂内网和工厂外网有重叠之处，在此不再赘述，详细内容可参见《工业互联网园区网络白皮书》。

由于工业园区内部存在生产网、办公网、安防网等多个子网，其网元类型、网元数量、网络能力、网络接口、承载的业务等关键指标存在较大差异，因此需要引入各类所需的网络连接技术方案，实现对于园区内部所有网元和业务的统一融合承载。同时，在工业园区网络的设计和部署过程中，需要考虑整体网络的可扩展演进能力，业界已经采用开放式或基于业务的架构以及标准化的网络连接技术，尽量避免私有化的技术实现，以适应快速发展的工业业务对于网络基础架构的能力要求，同时保护现有网络建设投资，控制园区网络系统完整生命周期的总体成本。

针对新建的工业园区网络场景，需要对网络架构进行统一的规划，结合网络安全和网络管控的要求，可采用“一网到底”和“云网融合”的网络架构。

针对已有工业园区网络改造场景，可采用新型网络替代/补充的方式，除了考虑网络安全和网络管控的要求以外，还需解决现存网络架构和网络性能不满足企业新业务发展的痛点问题，

在改造过程中考虑老设备的利旧及与多类型工业协议数据互通等问题，最终实现工业设备能互联和工业数据能互通的目标。



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

3 工业互联网网络体系架构

3.1 概念模型

工业互联网网络概念模型是对整个工业互联网网络系统的高度抽象化描述，体现工业互联网网络基础要素及其相互间的关联关系。工业互联网网络概念模型主要是由工厂外网和工厂内网构成，如图 6 所示。

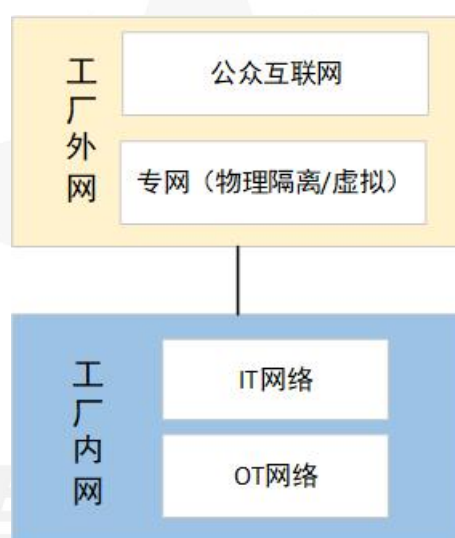


图 6 工业互联网网络概念模型

工厂外网主要包括公众互联网、专网（物理隔离和虚拟）等两种形态。公众互联网是目前使用最为广泛的工厂外网形态之一，提供普通的互联网接入业务。例如员工使用 VPN 访问企业内部系统，上下游企业间的电子商务合作、工厂与用户、产品的信息交互等。专网中的虚拟专网是基于公共物理网络资源进行逻辑隔离的专网，主要为同一企业分支机构间提供高质量、高可靠的网络互联业务。物理隔离的专网指为工业企业行业客户提供独占物理资源的私有网络，实现资源隔离、高可靠、高安全的企业专线服务，满足远程控制等新型工业互联网应用。

工厂外网的利益关系者包括基础电信企业、企业用户、产品用户等。

工厂内网主要包括信息网络（IT 网络）和控制网络（OT 网络）。由于工业互联网新业务的发展，需要 OT 和 IT 系统间协同，因此 OT 网络和 IT 网络也呈现出融合发展的趋势。基于部署范围、业务能力、安全要求等考量，“融合”并不代表两者会合并成一张网络，逻辑上他们仍然以 OT 网络和 IT 网络方式存在。工厂内网利益关系者主要为工业企业业主。

3.2 业务架构

业务架构是定义业务战略、组织、功能、业务流程和信息的结构和彼此间交互的描述。

工业互联网网络业务架构（图 7）主要体现了产品全生命周期的网络实现的连接与贯通，强化产品设计、生产、物流、服务全流程的互连互通，体现数据闭环的核心价值，促进新业务模式下全价值链的资源优化配置及效率提升。工业互联网网络业务架构是面向决策者、企业业主，他们关注的是工业互联网网络业务价值、投资回报、维护成本。因此在架构上体现的是支撑业务的具体网络形态。例如物流环节涉及到利用 Wi-Fi、RFID 等技术实现工厂内部的原料出入库、分拣配送、成品入库等，以及利用 4G/5G 外网技术实现原料、产品的物流配送定位、跟踪等功能。

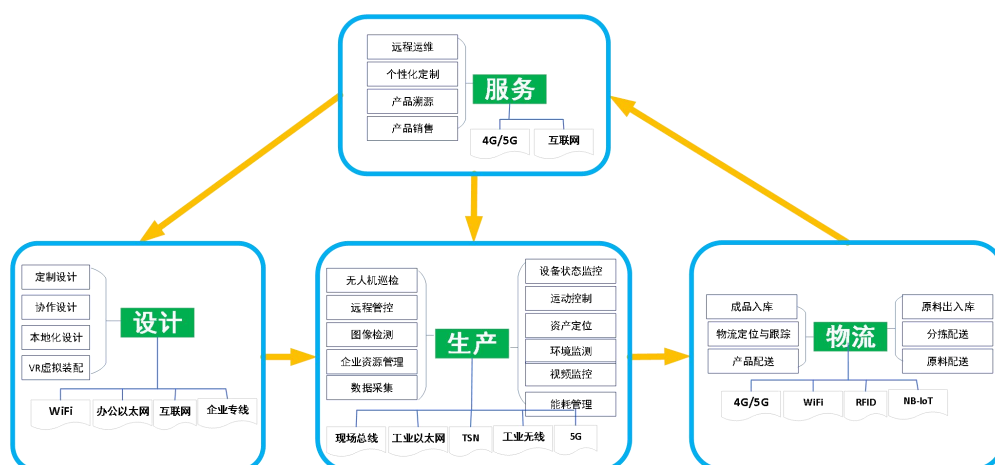


图 7 工业互联网网络业务架构

3.3 功能架构

工业互联网功能架构（如图 8）主要由网络互联、数据互通、标识解析三大模块组成。参考 OSI 七层模型，网络互联主要对应物理层到网络层，完成实体间数据传递。数据互通对应传输层到应用层，建立数据结构和规范，使得数据能够被异构系统有效的理解和利用。标识解析不属于本白皮书研究范畴。



图 8 工业互联网网络功能架构

网络互联实现关键要素间的泛在互联及数据传输。根据协议层次有底向上可以分为设备接入层、数据转发层和数据传输层：

- 1) 设备接入层为采用不同物理介质的工业设备提供接入服务。例如采用现场总线、工业以太网、工业 PON、TSN 等有线方式，以及 5G/4G、Wi-Fi/Wi-Fi 6、WIA、WirelessHART、ISA100.11a 等无线方式，将生产要素接入工厂内网。
- 2) 数据转发层实现工业非实时数据转发、工业实时数据转发、网络控制、网络管理等功能。具体方式包括基于数据链路层的转发和基于 IP 的转发。
 - 工业非实时数据转发功能主要完成无时延同步要求的采集信息数据和管理数据的传输；
 - 工业实时数据转发功能主要传输生产控制过程中有实时性要求的控制信息和需要实时处理的采集信息；
 - 网络控制主要完成路由表/流表生成、路径选择、路由协议互通、ACL 配置、QoS 配置等功能；
 - 网络管理功能包括层次化的 QoS、拓扑管理、接入管理、资源管理等功能。
- 3) 数据传输层传送主要包括基于 TCP、UDP 等实现端到端数据传输模块、端口管理、端到端接口管理、安全管理等。

数据互通实现数据和信息在各要素间、各系统间的无缝传递，使得异构系统在数据层面能相互“理解”，从而实现数据互

操作与信息集成。数据互通包括应用层通信、信息模型和语义互操作等功能。

- 1) 应用层通信通过请求响应模式、发布订阅模式实现数据信息传输通道的建立、维持、关闭，以及对支持工业数据资源模型的装备、传感器、远程终端单元、服务器等设备节点进行管理。
- 2) 信息模型提供完备、统一的数据对象表达、描述和操作模型，包含单元信息模型和组合信息模型等功能块。
 - 单元信息模型针对单一的对象，根据信息交互需要，提取相关信息，实现信息标准化，建立单元信息模型；
 - 组合信息模型则是模块化的信息模型，相互联系的单元信息模型可以组合成纵向工业生产场景，纵向信息模型叠加形成信息集群。
- 3) 语义互操作实现工业数据信息的查询、交互、关联、融合等功能，含数据字典、语义映射与互换、语义关联、语义融合等功能块。
 - 数据字典是用于描述数据的信息合集；
 - 语义映射与互换是将不同描述方式的工业数据进行映射与互换；
 - 语义关联则是将工业数据与工厂生产信息建立关联关系；
 - 语义融合则是语义关联的高层级应用以构建工业场景知识图谱。

3.4 部署视图

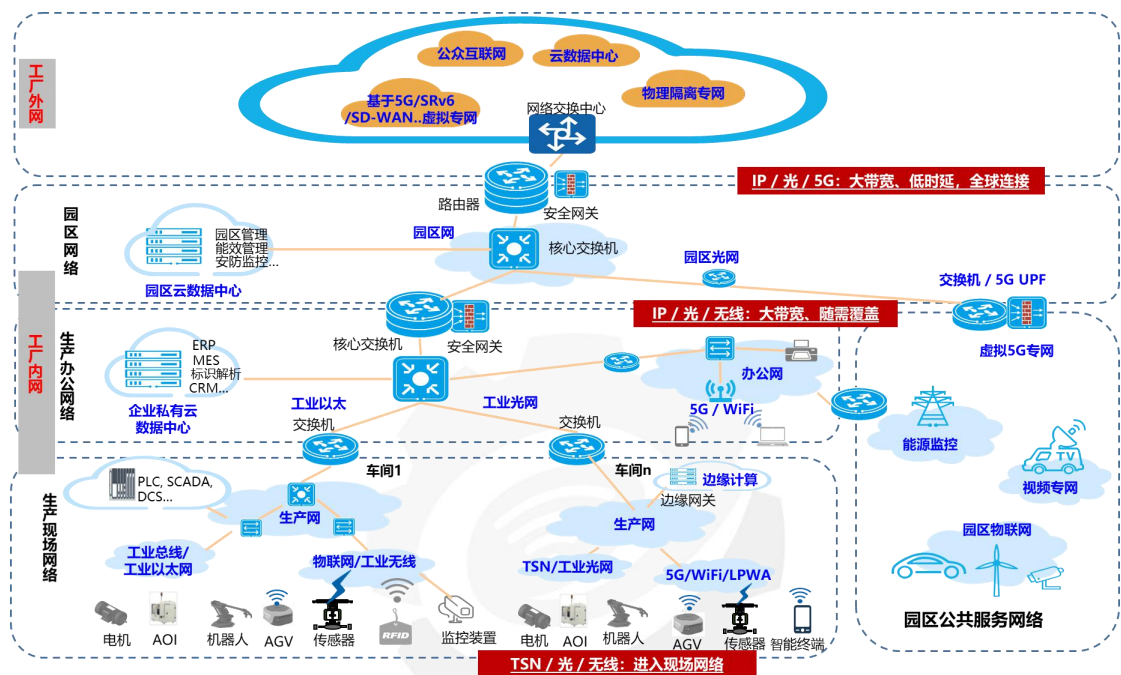


图9 工业互联网网络部署视图

为实现工业互联网完整的业务连通，实现全流程的工业业务能力，工厂内网与工厂外网之间，需要进行有效衔接和融合。因此，需要在网络架构、运维管理等方面实现打通。

网络架构方面，具体部署架构，应能保证工厂内网和外网之间的无缝连接。工厂内网应避免采用私有化的网络技术，建议采用标准化、通用的协议汇聚生产网、办公网、传感网络等多个子网，降低数据流动的障碍，提升网络传输效率。同时，在保证数据顺利流通的前提下，需要考虑网络安全性，在内网和外网连接点，布置必要的网络安全设备，实现客户敏感数据不出工厂，同时有效避免公众互联网中各类恶意网络攻击。

运维管理方面，在保持现有生产业务稳定运行的前提下，建议工厂内网引入智能化的运维管理系统，实现对工厂内网多

个子网的归一化管理，同时与工厂内网现有生产管理系统实现连通，实现网络与生产联动。对于跨地域的工厂多个异地分支机构之间的互联，需要在整体层面实现对于工厂外网专线的统一有效管理。



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

4 工业互联网网络技术进展

4.1 技术体系

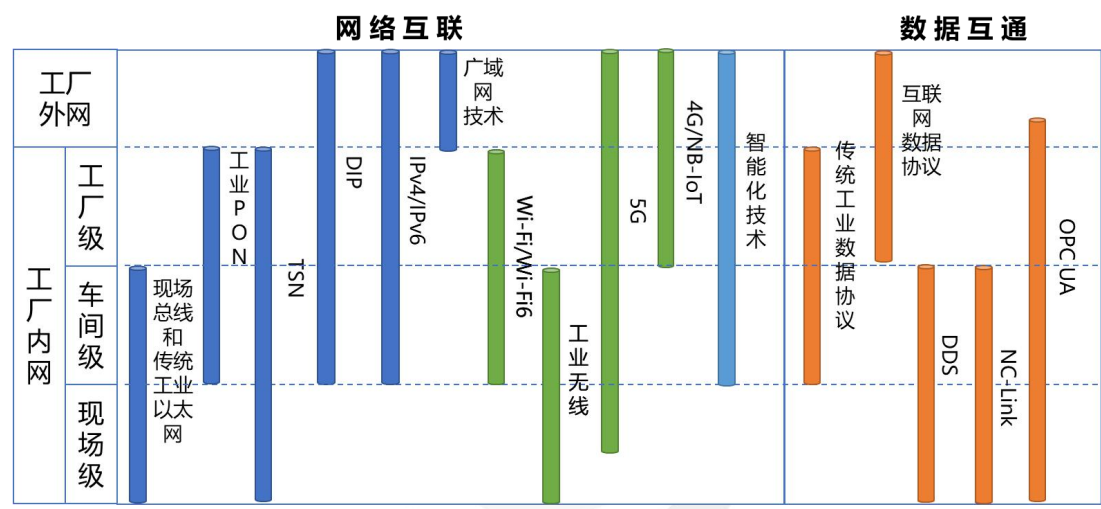


图 10 工业互联网网络连接技术体系

工业互联网网络连接技术从覆盖范围来看可以分为工厂外网与工厂内网两大类。工厂内网呈现“两层三级”的结构，即“工厂 IT 网络”和“工厂 OT 网络”两层技术异构的网络和“现场级”、“车间级”、“工厂级/企业级”三个级别的网络。工业互联网网络连接技术（如图 10）从主要功能来看可以分为网络互联与数据互通两大类。网络互联主要实现智能设备的联接功能，而数据互通主要实现设备间数据流转功能。

不同范围不同层级的网络业务各异，对网络性能的需求也各不相同。现场级和车间级的通信对可靠性和时延要求极高，但当前数十种工业现场总线及工业以太网协议用于现场级的传感器、执行器与工业控制器之间的通信，形成了七国八制“烟囱式”的格局，极大的阻碍了工业互联网的发展。时间敏感网络 TSN 以及工业无线技术等通过时间同步、确定性流调度、高

可靠无缝冗余等功能增强，实现有界低时延高可靠通信服务，正逐步从工厂级网络向车间级和现场级网络延伸。同时，5G 网络技术、确定性 IP 技术、4G/NB-IoT 技术、IP 技术、智能化技术等正从工厂外网的应用逐渐向工厂内网向车间级、现场级网络延伸。工业 PON 技术以及 Wi-Fi 技术等也将在工厂级甚至车间级网络应用中发挥重要作用。

数据互通技术主要集中在工业数据协议的互通演进技术。传统工业数据协议通常为私有协议，应用于工厂级和车间级数据互通，难以与其他层级网络数据通信协议互通。传统互联网数据协议主要用于工厂外网和工厂级网络的数据通信需要，在应对工业互联网智能设备爆发式数据增长和数据格式异构的挑战方面略显不足。DDS 和 NC-Link 主要用于现场级与车间级网络的数据通信与流转，难以扩展至工厂级网络与工厂外网络。OPC UA 打通了工业通信中的各个层级，可完成数据的纵向和横向流通，可灵活应用至工业互联网网络的各层各级，满足当前企业管控一体化发展需求，实现业务数据流的高效流通。

4.1.1 网络互联技术

网络互联技术是实现工业全系统、全产业链、全价值链泛在深度互联的基础。通过打造低延时、高可靠、广覆盖的网络基础设施，实现信息数据在生产各环节和全要素的无缝传递，从而支撑形成实时感知、协同交互、智能反馈的生产模式。

当前，工厂内网络呈现“两层三级”的结构：即“工厂 IT 网络”和“工厂 OT 网络”两层技术异构的网络和“现场级”、

“车间级”、“工厂级/企业级”三个级别的网络。IT 网络主要由 IP 网络构成，并通过网关设备实现与互联网和 OT 网络的互联和安全隔离。OT 网络主要用于连接生产现场的控制器以及传感器、伺服器、监测控制设备等部件等。工厂级/企业级对通信的要求与传统 IT 网络类似，车间级、现场级等 OT 网络对通信可靠性和时延有更高的要求，例如等时运动控制场景中，控制报文通信周期应小于 1ms，网络时延一般不超过 50% 的通信周期且抖动小于 1us，丢包率需优于 10^{-6} 。工厂外网侧重于生产企业与智能产品、用户、供应链等生产全环节的广泛互联，同时为生产系统与互联网融合提供技术支撑。当前，传统工厂外网络主要提供商业信息互联互通。随着公有云、私有云等技术的发展，越来越多 IT 软件（如企业的信息系统和生产管理系统等）都可以基于云提供服务。同时，海量设备的远程监控、维修、管理、优化等业务都将基于工厂外网络开展。随着软件定义网络的发展，工厂外网络将能够根据企业要求快速开通服务，快速调整业务，提高了网络接入的便捷程度和部署速度，为企业实现广泛互联提供更灵活的网络服务。

工业现场总线技术从 20 世纪 80 年代开始，经过 30 多年的发展，目前市场常见的现场总线技术有几十种之多。主流的总线包括：1) FF 总线，由 ISP 协议与 WorldFIP 协议在 1994 年合并形成，符合 IEC 1158-2 标准；2) CAN 总线，由 BOSCH 公司在 1986 年推出，1993 年形成国际标准 ISO 11898；3) PROFIBUS 总线，由西门子公司等在 1987 年推出，在 1996 年成为现场总线国际标准 IEC 61158/IEC 61784 的核心组成部分

(TYPE 3); 4) Modbus 总线, 由施耐德公司在 1979 年提出, 已经成为工业领域通信协议的事实标准; 5) CC-Link 总线, 由三菱电机等在 1996 年推出, 2005 年 7 月 CC-Link 被中国国家标准委员会批准为中国国家标准指导性技术文件; 6) INTERBUS 总线, 由德国的 Phoenix Contact 公司在 1984 年推出, 2000 年 2 月成为国际标准 IEC 61158 之一; 7) DeviceNet, 由美国的 Allen-Bradley 公司在 1994 年推出。现场总线技术普遍存在带宽低、距离短、抗干扰能力较差等问题。而且总线技术的开放性和兼容性不够, 越来越影响了相关设备和系统之间的互联互通。

随着工业信息技术的不断发展, 现场总线向兼容以太网通信技术的方向发展, 工业以太网技术应运而生。目前众多工业以太网协议已经逐步进入到各类工业控制系统中的控制通信应用, 其低成本、高效通信能力以及良好的网络拓扑灵活扩展能力, 为工业现场自动化控制水平的提升奠定了基础。主流的工业以太网技术包括: 1) Modbus TCP/IP, 由 Modbus 演进而来; 2) ProfiNet, 由德国西门子于 2001 年发布, 是 IEC 61158 及 IEC 61784 标准中的一部分; 3) Ethernet/IP, 由 ODVA 和 Control Net International 两大工业组织推动; 4) Powerlink, 由贝加莱公司提出, 已被列入 IEC 61158 标准; 5) EtherCAT, 由德国 Beckhoff 公司推出, 属于 IEC 规范(IEC/PAS 62407); 6) CC-Link IE, 由三菱电机等公司推出。由于协议在链路层和应用层所采用的技术不同, 互联互通性差, 影响到工业以太网技术向更广泛的领域拓展。

工业无线技术广泛应用于工厂移动设备以及线缆连接无法实现的场合，大大延伸了工业网络的覆盖范围。目前用于工厂内网的主要工业无线技术包括：1) ISA100.11a 于 2014 年 09 月成为 IEC 62734 标准，是第一个开放的、面向多种工业应用的标准族。适用范围包括传感器、执行器、无线手持设备等现场自动化设备。2) 我国自主研发了 WIA-PA 和 WIA-FA 两项 IEC 国际标准和产品体系，该技术提供一种自组织、自治愈的智能 Mesh 网络路由机制，能够针对应用条件和环境的动态变化，保持网络性能的高可靠性和强稳定性；3) WirelessHART 标准是 2007 年 9 月由 HART 通讯基金会发布，是第一个专门为过程工业而设计的开放的可互操作的无线通讯标准；4) 为了提升 WLAN 在现场应用的可靠性，西门子基于 802.11 b/g/开发工业 WLAN，即 iWLAN。IEEE 802.11ax (即 Wi-Fi 6) 进一步增强 WLAN 的可靠性和实时性能，以提高对时间敏感的工业自动化应用的支持。5) IEEE P802.11be 任务组成立于 2019 年 5 月，旨在解决新的 PHY 和 MAC 修正案的设计问题，期望满足小于 1ms 时延的工业应用。6) 5G 的 3GPP R16 标准于 2020 年 7 月冻结，R16 在非授权频谱组网、网络切片、定位信息、功率、汽车通讯、增强超可靠低延迟通信、专用网络、综合接入回程和物联网服务等领域全面升级。R16 标准冻结有助于全面引入广域物联网技术，将加速 5G 在工业垂直行业的物联网应用。5G 关于 URLLC 标准也在不断演进完善，R16/R17 初步可满足链路级的确定性时延，支持产业进行设备级或小范围的无线化改造；R18 将进一步提升确定性时延，并大幅提升容量，以满足未来产业

规模化的无线化改造。

综上所述，当前大量的异构工业网络的存在，严重制约着产品、服务的集成。OT 网络与 IT 网络逐步融合互通是大趋势，并促进通用网络不断演进发展，从而降低工业网络部署成本，打破七国八制“烟囱式”割裂的格局，推动工业整体产业的发展。同时，为了更好地满足工业新兴系统如智能制造系统、超远程控制系统、智能决策系统等超低时延、超低抖动、超高可靠的确定性通信要求，工业互联网网络技术需朝着泛在确定性网络技术体系演进。

4.1.2 数据互通技术

数据互通技术主要通过数据协议和信息模型的交互，实现数据和信息在各层网络之间、各系统间的传递，使得异构系统在数据层面能相互“理解”，从而实现数据互操作与信息集成。

近年来工业互联网对 OT 网络与 IT 网络的数据互通需求逐步增加，数据互通涉及的内容由原来的只包括机器、控制系统以及信息系统逐步扩展到在制品、智能产品以及用户在内的制造全流程的数据信息，因此需要解决大量的异构系统和网络之间的数据互联与交互；而对于数据本身，数据的本质是智能在工业中的全周期应用，包括“采集交换-集成处理-建模分析-决策与控制”，形成优化闭环，驱动工业智能化，因此对于各类生产/管理/控制系统中的数据间的动态互识互认将是形成全周期应用的重要基础。

传统实现工业数据协议的主要思路有自下而上和自上而下

两种。西门子、施耐德、三菱、欧姆龙等工控设备商采用自下而上的方式，为了将现场的控制器与上位机相连，在各自的设备级工业总线/工业以太网的协议和模型的基础上，设计了 S7、FINS 等私有协议和 OPC 等相对封闭的协议，形成了传统工业数据协议。传统工业数据协议的特点是与各厂商的协议和模型绑定过深，一般只能实现车间向工厂级的纵向、小范围连接，横向打通的能力严重不足。

随着 IT 技术不断向下延申，互联网和物联网的协议也在不断下探，形成自上而下的发展思路。在工业数据采集等场景，互联网/物联网的 MQTT、CoAP、oneM2M 甚至 HTTP 协议都有广泛的应用，主要用于网关向工业互联网平台推送采集的现场数据。互联网和物联网数据协议在工业互联网中的特点是实现了轻量级，能够快速部署，但协议本身在确定性方面先天考虑不足，导致难以下探到与控制相关的业务中，限制了其应用的范围。

随着数据互通的范围和深度不断提高，出现了适应范围更高，开放性和标准化更好的新型数据互通协议，包括 DDS、NC-LINK 和 OPC UA 等。DDS (Data Distribution Service for Real-Time Systems) 是 OMG 在 2004 年发布的中间件协议和应用程序接口 (API) 标准，它为分布式系统提供了低延迟、高可靠性、可扩展的通信架构标准。NC-LINK 是由中国机床工具工业协会下属的数控机床互联通讯标准联盟发布，用于数控装备互联互通的标准。OPC UA 是由 OPC 基金会在 OPC 的基础上推出的一个新的技术标准，是一套安全、可靠且独立于制造

商和平台，可使不同操作系统和不同制造商的设备之间可以进行数据交互，适用于工业通讯的数据交互规范。新型工业数据互通协议打破了各厂商私有协议之间的壁垒，同时兼顾了工业数据确定性的交互需求，正在向能够为整个工业互联网内外网提供数据互通的方向努力。

4.2 技术发展趋势

工业互联网业务场景的不断发展与成熟，对网络基础设施提出了更高的要求，也促进了工业互联网网络技术向融合化、无线化、智能化、归一化方向演进发展。

工业互联网网络技术向融合化发展。一是通过算网协同构建端边云网融合新架构。“哑设备”的改造、智能装备的部署，让数据源爆发式增长，数据流转不畅、数据处理不及时制约着工业大数据、工业智能等创新应用的发展，端边云网融合技术将构建数据采集、传输、汇聚、处理新架构，支撑企业数字化智能化升级。二是通过确定性网络技术实现跨域端到端可靠传输。远程控制、AR/VR 实时辅助、产线协同等新业务要求端到端网络带宽、时延、抖动、丢包等性能确定可控，确定性网络技术通过有界时延保障、大规模网络控制、端到端 QoS 映射等满足跨域工业应用的高精准、高可靠、高可控需要。三是通过泛在 IP 技术推进工厂内“两层三级”网络融合。在办公网络、生产 IT 网络 IP 化基础上，进一步通过智能、灵活、确定的等 IP 技术贯通生产 OT 网络，实现工厂内网络层的融合和数据流转。

工业互联网网络技术向无线化发展。一是高带宽、广覆盖的无线技术成为建设全连接工厂的必要选择。5G、Wi-Fi 6 等新型无线技术弥补了传统工业无线存在的速率低、覆盖小等缺点，成为解决工厂内设备频繁移动、生产环境恶劣等场景下设备连接的首要选择，让无线技术成为工业网络的重要组成部分。二是高可靠、高确定能力成为无线技术向工业生产核心环节延伸的关键。以 5G uRLLC 为代表的高可靠无线技术将有望解决传统无线技术可靠性差的问题，推动无线技术逐步向工业生产现场的各个环节全面应用。

工业互联网网络技术向智能化发展。一是边缘智能技术深入工业现场。对于全连接工厂的海量数据采集，传统的集中式数据处理模式难以实现及时和高效，支持自感知、自学习、自执行、自决策、自适应的边缘智能技术，可提供分布式按需处理能力，将工业智能向生产现场延伸。二是云化技术消除工业装备硬件能力制约。工业装备一般采用专用硬件，难以满足功能弹性扩展的需求，云化技术将推动装备软硬件解耦，实现计算能力的弹性扩展，提升工业装备的智能化水平。

工业互联网网络技术向归一化发展。一是多种工业以太网技术向 TSN 演进。传统工业以太网协议众多，兼容性差，互联互通能力弱，难以满足未来工业互联网发展需要。时间敏感网络基于以太网协议，通过时间同步、流量控制、高可靠机制等增强功能，实现数据流确定可靠传输，将成为统一工业以太网技术。二是多厂家私有工业数据协议向标准化演进。当前多厂家系统之间信息交互、设备上云等场景使用的数据协议众多，

导致跨系统信息流动不畅，容易造成信息孤岛。OPC UA、MQTT等数据协议，通过协议轻量化、信息模型标准化，实现从现场到云的全面数据互通，将成为建设全连接工厂的关键支撑。



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

5 工业互联网网络产业生态

5.1 产业链组成

工业互联网网络产业链（图 11）主要包括 4 大环节，一是基础器件设备，解决对工业设备、过程、环节等方面的数据感知、获取和边缘处理；二是企业（工厂）内网系统，解决工业企业内部的跨系统互联互通问题；三是公共基础设施，服务于广大工业企业的网络共性设施，解决跨企业、跨地域的互联互通问题；四是行业应用服务，促进工业互联网网络产业规模化和生态化发展。

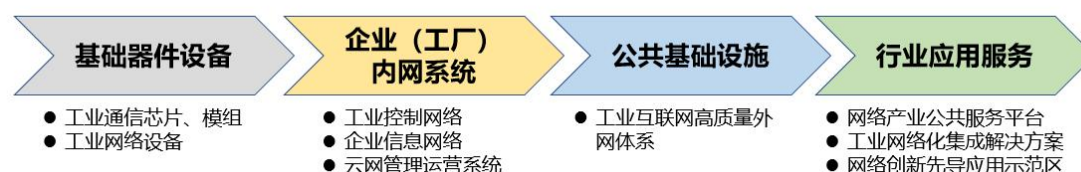


图 11 工业互联网网络产业链

1) 基础器件设备环节涉及到工业通信芯片、模组和工业网络设备。工业通信芯片包括 TSN 芯片、工业 5G 芯片/模组、工业双线以太网芯片等。核心芯片方面虽然国内企业已具备一定研发和试制能力，但目前 95% 的高端专用芯片仍然依靠进口。博通、MARVELL、NXP 均已发布不同规格的 TSN 芯片，消费级 5G 芯片我国企业已实现量产，面向工业级的 5G 模组仍在探索中。以 5G 工业模组为代表的无线技术领域将成为我国工业互联网网络核心自主创新的重要突破口及下一阶段发展关键。工业网络设备包括边缘计算网关、基础仪表、TSN 端设备、5G 工业终端

以及工业定制化核心网设备等等。主流的 ICT 企业依靠传统通信领域技术积累逐步向工业领域进行能力输入。

2) 企业(工厂)内网系统环节包括工业控制网络、企业信息通信网络以及云网管理运营系统。其中工业控制网络仍以欧美传统自动化厂商为首,不断加强与 TSN、OPC UA、5G 等新型网络技术融合,提升用户粘性,马太效应凸显。德国倍福先后发布 TSN 技术的白皮书及 TSN 桥接通讯模块 EK1000。西门子在新的 PROFINET 协议中使用 TSN 及 OPC-UA 技术。以三菱为代表的 CC-Link IE 于 2020 年发布 CC-Link IE TSN 协议。博世力士乐联合高通研究 5G 现网环境下使用 TSN 技术。另一方面,自动化技术厂商通过并购或合资的方式与软件公司合作,实现硬软一体化。欧美工业强国在自动化工业领域形成的领先竞争优势,我国企业短期内依然无法超越,但在企业信息通信网络以及云网管理运营系统产业环节,我国已具备一定发展优势。

3) 公共基础设施包括工业互联网高质量外网体系,如基础电信企业高质量外网、工业互联网交换中心、工业云数据中心等。基础电信企业产业布局也由单一管道提供者向综合服务方案商转变。工业网络连接是工业互联网的关键业务,是基础电信企业参与工业制造行业和市场的重要切入口。基础电信企业在现有网络基础上,探索垂直领域工业互联网应用场景对网络服务保障的新要求,通过提升商业模式、提高网络品质、提供网络化定制服务等,实现由单一管道提供者向综合服务方案商转变。运营商具备网络优势和云资源基础,具备平台和应用的开发能力,具备全国性属地化服务工业客户的实力,通过能

力重组和资源整合将聚焦工业领域成为综合能力集成商。如图 12 所示，运营商通过提供工业连接、工业云网和工业平台为工业客户构筑工业互联网网络整体架构，并配套安全能力和服务能力为整个架构的运营保驾护航，面对工业领域与产业伙伴共建生态繁荣，促进技术、应用、能力和业务的蓬勃发展。



图 12 运营商在工业领域的的能力视图

4) 行业应用服务环节中的网络产业公共服务平台，以壮大产业的孵化和供给能力为目标，通过构建面向新技术的测试床、搭建优秀项目库、供应商名录、方案资源池、人才实训基地、面向行业的应用创新中心、面向产业的监测评估平台等，将现有的网络技术资源向公众开放，促进垂直行业网络化改造及规范网络建设成效评价等。工业网络化集成解决方案为企业的网络化改造提供了全面、可靠的技术支持。网络创新先导应用示范区通过先导区的深化改革、制度创新和融通发展，优化制度建设、应用示范、人才保障等创新发展环境，加快推动工业互联网网络技术突破，加速新技术、新产品的应用推广和产业化，更好地发挥工业互联网服务实体经济发展的作用。

5.2 产业链生态建设

产业链上下游聚焦工厂内网发展的需求和趋势，配套需要的器件、设备、实施等相关产业生态的协同发展，打破烟囱式的发展模式，产业链初步做细分和整合，形成协同发展的新模式，必然会催生新的商业模式来适应新的产业发展趋势。

弥补关键新型网络技术供给短板，抢占创新技术与应用前沿领域，构建自主完备的产业生态，推动工业网络应用创新。

一是补短板，通过创新网络技术的应用，解决工业数据采集关键技术和产品短板，实现跨网络、跨系统的互联互通互操作；**二是建设施**，充分利用我国在 5G 的技术优势和信息通信网络的基础设施优势，进一步完善高质量外网体系，通过创新技术构建 IT 与 OT 融合工厂内网；**三是促应用**，建设全连接工厂示范标杆，培育典型工业应用场景；**四是构生态**，形成技术和产品创新孵化能力，网络监测评估服务能力，解决方案的供给能力。

6 工业互联网网络部署建议

6.1 部署路径

工业互联网网络建设目标是构建全要素全系统全产业链互联互通。面对我国企业内网整体网络化水平不高，且发展参差不齐的现状，应围绕不同垂直行业网络改造需求，结合实际应用场景，依托工业互联网网络实施框架构建具有指导意义、可实施可推广的差异化部署路径，具体可分为以下三步走策略（见图 13）：

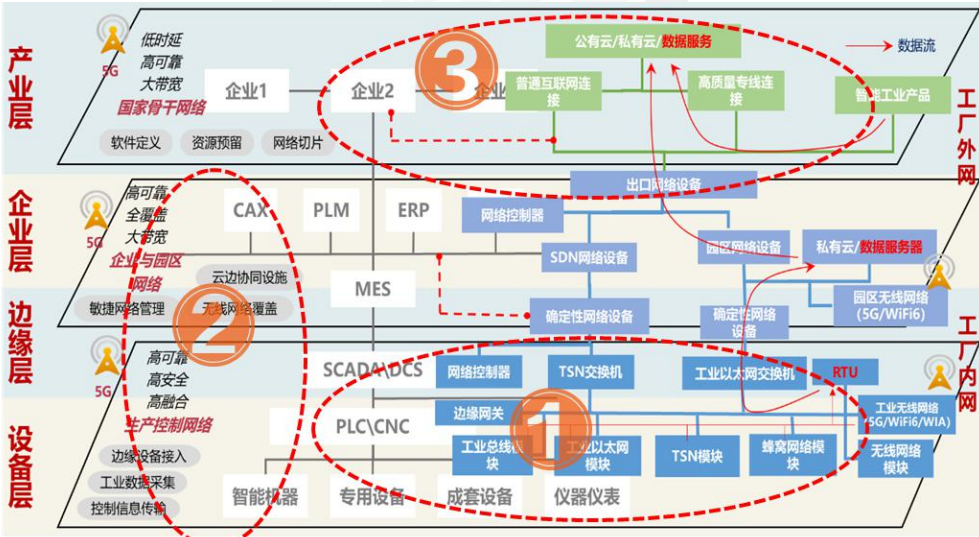


图 13 垂直行业网络架构实施部署路径

第一阶段“打通”主要以提升基础数字化能力、数据质量为目标。从边缘层入手实现向下设备层内部打通及工业数据采集，提升基础数字化能力、数据质量。

第二阶段“优化”主要实现工厂内网一体化控制与各层次协调优化、性能提升。通过敏捷网络管理，实现工厂内网 OT/IT 融合，构建协同化智能化能力。

第三阶段“创新”主要基于低时延、高可靠、大带宽工厂

外网，实现商业模式及业态创新，形成产业链制造资源自优化配置。

6.2 建设重点

利用新型网络技术持续开展工厂内网改造升级。工厂内网建设的难点在于网络技术的选择受限于底层设备所支持的网络技术，因此需要合理考虑兼容性、布置成本、使用场景要求等，建议在生产现场布设工业有线通信和工业无线通信相结合网络，满足生产控制管理和工业应用的需求。当现场级网络能够满足基本生产控制需求时，可以采用部署网关的方式，将传统的现场总线和工业以太网技术转换为统一标准化的网络连接技术，实现数据互通。如果当前网络不能满足业务需求时，需要对已有工业设备和网络设备进行替换或改造升级，宜部署支持 IPv6、支持 OPC UA、MQTT 等标准化数据协议的生产装备、终端单元等。

全面推进工业互联网园区网络基础设施建设。工业互联网园区网络是企业数字化转型的新抓手。园区网络向园区内企业提供高可靠、大带宽、广覆盖的网络基础设施，实现敏捷的网络管理、无死角的网络覆盖、无缝的云边协同。大型企业自建园区可采用传统的接入-汇聚-核心三层架构或大二层的扁平化网络架构，部署 SDN 技术，实现“柔性”和“极简”的网络管理，大幅降低企业管理网络的难度和工作量。也可以根据自身业务需求和预算，选择利用运营商的 5G、NB-IoT 网络或者自建 Wi-Fi 6 网络，构建具备可靠性、大带宽、高性价比的无线网络。园区企业数据中心建设方面采用云边协同技术，将企业办

公和业务系统云化部署，实现企业数据的实时、高效汇聚、分析和交互。中小型企业可以向公有园区运维方租用网络以部署企业的各种业务，同时享受园区各项便捷的公共服务。

加强工厂外网骨干网部署。工业企业使用国家骨干网络主要是普通互联网连接和高质量专线连接两类。骨干网络的建设以运营商为主，在企业与园区网络的出口路由器上，根据不同的网络需求，引导流量去往不同的网络连接。工业企业应梳理自身业务的要求，形成层次化的网络需求。例如企业与客户的信息沟通、面向大众的客户服务等可采用普通互联网连接，高价值产品的远程运维和服务可采用基于互联网的虚拟专线或 5G 切片网络，分支机构使用总部私有云资源和云化业务系统可使用物理隔离的专线。

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

附录 1:

1 网络互联技术

1.1 工业 PON2.0

(1) 最新技术进展

工业 PON2.0 网络技术满足工业企业多业务差异化承载、工业数据采集能力、通用边缘计算能力、网络高可靠性等网络需求。该网络技术主要包括：PON 网络切片、开放式工业数据采集 ONU 网关、OLT 侧边缘计算通用平台、面向工业场景的差异化网络保护倒换等，详细内容可参见《工业 PON2.0 白皮书》。

(2) 主要特点和优势

● PON 网络切片

PON 网络切片技术，采用资源虚拟化、业务隔离等方式，提供不同粒度的切片，实现企业单 OLT 承载不同业务子网能力，可降低投资成本，同时满足工业企业生产网、办公网、安防监控、传感等多个子网融合承载的业务需求。

● 面向工业场景的差异化网络保护倒换

基于非均匀分光模式的双 OLT 手拉手保护链型组网和基于传统等分分光模式的星型组网等方式实现全光路保护，可将企业有线网络可靠性提升到 99.999% 以上。

(3) 适用场景

● 离散制造行业应用场景

离散制造业企业工业PON2.0采用二层扁平架构，实现弹性扩容，满足离散制造业智能制造生产控制、数据采集、无线专网承载、行政办公各种应用场景。工业PON系统采用光纤布线，抗电磁干扰能力强，组网能力强，提高了工业车间网络稳定性。通过双路光纤保护、双机热备、工业级ONU等方案满足了厂区网络可靠性要求。

● 工业园区应用场景

工业PON2.0满足新建园区生产网络、办公网络、安防监控、无线网络承载等多样化业务承载需求，实现园区网络的快速布放和业务开通，以及网络长期稳定运行。工业PON具备高带宽、高安全性、网络切片、保护倒换等技术特点，满足了园区各类业务的承载需求。

1.2 工业光总线

(1) 最新技术进展

工业光总线是将工业总线技术与光网络技术结合以提供现场级高品质互联的网络技术。它不是将传统的工业现场总线与光纤媒质简单组合，而是更高带宽、更高灵活性和更低时延的确定性网络，在其中采用光网络技术对数据传输方式和交互机制做了架构优化，从而实现微秒级确定时延的现场网络，可以支持统一的数字化，满足企业数字化转型要求（详见 AII 发布的《工业光网白皮书》）。

(2) 主要特点和优势

工业光总线通过将单个从站与主站的串行通信机制，改为

多个从站与主站的并行通信机制，缩短了每个从站发送数据的周期，可以满足工业生产现场数据的传输要求。其优势在于：

- 确定性低时延：支持主站与从站之间确定性低时延和低抖动的传输，且单个从站的时延不随从站数量的增加而增加；
- 带宽平滑演进：根据场景的应用和业务发展，主站上下行带宽支持便捷的扩展升级，且现场设备的连线无需改变，仅需替换主站光网关模组的光模块。
- 支持从站远距离接入：主站和从站间通过分光器、光纤连接，支持远距离传输数据。
- 多从站接入：单主站支持多从站的接入；
- 安全可靠：工业光总线方案通过无源器件组网，具备多种组网保护方式，同时，光纤不受到电磁干扰和雷电影响，光模组遵从工业级标准。

（3）适用场景

● 离散制造业运动控制业务

工业光总线的确定性低时延技术可满足运动控制业务通常要求小于 100 微秒级的低时延、小于 100 纳秒级的低抖动以及 99.9999% 的可靠性等要求。

● 视觉检测高吞吐量场景

在实际的工业应用场景中，视觉检测业务可高达 2Gbit/s 的吞吐量，工业光总线可支持业务容量平滑演进，主从站高速传输数据，安全可靠。

1.3 TSN

(1) 最新技术进展

标准层面上 IEEE TSN 工作组近两年在 TSN 管控面协议上做出了多项重大改进。IEEE Std 802.1Qcp-2018 标准提供了 TSN 网桥设备的 Yang Model 基线，并在后续项目 P802.1Qcw 中增补门控队列、帧抢占和流过滤功能的管理配置功能。IEEE Std 802.1CS-2020 和 P802.1Qdd 扩展提升大规模网络中的分布式资源配置能力。而 IEEE Std 802.1AS-2020 标准在 IEEE 1588 和 802.1AS 的标准基础上进一步增加了多时钟域共存等特性。

同时 IEEE 802.1 TSN 工作组与 3GPP、IEC、IETF 等标准组织以及各类行业联盟讨论拓展 TSN 技术的各种应用场景，涉及 5G+TSN、Wi-Fi+TSN、TSN 工业、TSN 车载、TSN 航空、TSN 前传、TSN 运营商广域网等领域。

(2) 主要特点和优势

TSN 是一种具有有界传输时延、低传输抖动和极低数据丢失率的高质量实时以太网络。简要地说，TSN 网络的关键特征在于流量可塑、路径可视、具备同步时钟能力及双发选收高可靠性。TSN 网络控制器依据业务需求和相应的调度策略，通过规划和控制时间敏感数据流的实际传输时间和传输路径，避免了争抢链路所导致的传输性能下降和不可预测性，从而保证时间敏感应用的点对点实时通信。近期 TSN 管控面的协议增强主要体现在两个方面。一个是通过补充 TSN 网桥的 Yang Model 打

通南北向配置通道，提升 TSN 网络实时管控配置能力；另一个是推出第三代 TSN 资源预留协议 LRP 和 RAP 组合，突破了原有 SRP 协议集中管控架构的局限性，可支撑更大规模网络的分布式资源预留。

（3）适用场景

TSN 网络技术在时延保障、高可靠性和时钟同步方面的发展进步，非常适用于工业制造自动化、智能化场景。正在制定中的 IEC/IEEE P60802 标准正在针对工业设备互通、灵活部署、混合承载、分布控制等用户需求给出建议方案和互通框架。

1.4 5G 虚拟专网

（1）最新技术进展

5G 网络拥有更大的带宽、更广的覆盖、更快的速度、更低的时延、更可靠的连接等特征，必将为工业互联网的发展提供更广阔的空间。为促进 5G 网络与工业深度融合，信通院发布的《5G 行业虚拟专网网络架构白皮书》，将“基于现有 5G 公网而构建的能满足各行业业务及安全需求、按需实现软硬件隔离，同时向行业用户提供部分网络管理、监测、独立开户等权力的 5G 虚拟网络”称为“5G 行业虚拟专网”。

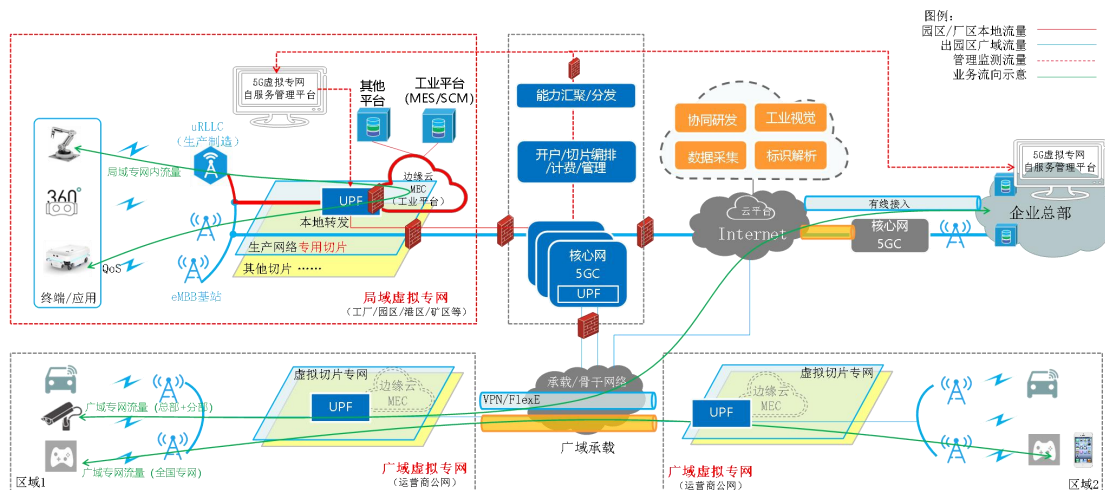


图 14 5G 虚拟专网架构

(2) 主要特点和优势

行业虚拟专网，与行业独自建设一张私有网络比较，存在巨大的优势，主要体现在如下几个方面：

- **成本优势：**无线通信产业链培育成本极高，比如 5G 芯片的研发耗资巨大，虚拟专网模式让行业可以借助运营商网络规模市场的成本优势，以更低成本获得 5G 服务；
- **安全优势：**安全保障是行业引入 5G 的大前提，虚拟专网模式将让行业/企业获得来自运营商的电信级安全保障服务；
- **频谱干扰协调优势：**频谱干扰管理复杂度极高，且由于公网是由运营商规划、建设，因此，虚拟专网模式选择运营商做为网络建设、规划、优化的主体，可避免行业/企业直面这些复杂问题；
- **商业模式优势：**行业企业以往通常是一次性从供应商获得网络服务，一次性自建专网，成本较高。而虚拟专网基于运营商公网按需提供 5G 网络服务，运营商与行业

企业之间将建立长期持续的服务关系，有效降低行业引入 5G 的成本。

(3) 适用场景

● 局域虚拟专网

适用于工厂、园区、港区、矿区型的行业。由基站、UPF、边缘计算平台、企业业务平台、5G 虚拟专网自服务管理平台等部分组成，其中基站一般部署于企业内，UPF、边缘计算平台可以部署于企业内，也可以部署于附近的运营商机房，具体部署位置应根据企业需求和机房条件决定。

● 广域虚拟专网

适用于跨地域的大型企业或集团公司，如图14区域1和区域2的跨域专网，或企业总部和区域1或区域2的跨域专网。由运营商公网资源、企业云平台、5G虚拟专网自服务管理平台等部分组成。基于运营商公网资源，可通过公共核心网切片管理单元、核心网、承载网VPN/FlexE、无线网独享或无线网频率划分或无线网QoS等方式进行网络切片端到端构造，实现跨域的虚拟切片专网，广域虚拟专网的端到端构建是一个系统而复杂的工程，企业可以根据具体需要选择不同等级或不同隔离程度的虚拟专网。

1.5 Wi-Fi 6

(1) 最新技术进展

无线 Wi-Fi 20 年的发展历程，其实就是人们对高带宽不断追求的过程。Wi-Fi 几乎每经过 4-5 年左右就会出现一次技术

变革，变革的主要目的是提高带宽。2018 年 10 月，Wi-Fi 联盟为更好的推广 Wi-Fi 技术，参考通讯技术命名方式，重新命名 Wi-Fi 标准，其中 802.11ax 被命名为 Wi-Fi 6，11ac 被命名为 Wi-Fi 5，以此类推。2019 年被看作是 Wi-Fi 6 元年。Wi-Fi 6 单空间流在 80MHz 的频宽下最大速率达到 600Mbps。同时 Wi-Fi 6 更注重用户体验的提升。



图 15 Wi-Fi 发展史

(2) 主要特点和优势

Wi-Fi 6 通过引入的 5G 同源的 OFDMA（正交频分多址）、DL/UL MU-MIMO、1024-QAM 高阶的调制等无线通信技术，在非授权频段实现了比拟 5G 的大带宽、低时延、多连接的能力，同时大幅降低了企业建设和使用无线网络的成本，还满足了企业对内部网络数据流量的安全自主可控的诉求。

Wi-Fi 6 技术会带来以下改变以提高接入用户的体验：

- 理论带宽 9.6Gbps 的超高带宽（160MHz 频宽下 8 条流）。
- AP 接入容量是 Wi-Fi 5 (802.11ac) 的 4 倍，支持更多的终端并发接入。
- 终端功耗节约 30% 以上，满足物联网终端对低功耗的要求。

(3) 适用场景

制造业主要发展方向：精益生产、数字化、工作流程以及

生产柔性化。在传统模式下，制造商依靠有线技术来连接应用。随着传感器、AGV、工业 AR、机器视觉规模应用兴起，车间级无线宽带物联成为刚需，设备级时延敏感网络正在起步。Wi-Fi 6 的大带宽、低时延功能将 Wi-Fi 的应用场景从企业办公网扩展到了工业生产场景。

1.6 FlexE/切片

(1) 最新技术进展

FlexE (Flexible Ethernet, 灵活以太网) 技术是基于高速 Ethernet 接口，通过 Ethernet MAC 层与 PHY 层解耦而实现的低成本、高可靠、可动态配置的电信级接口技术。该技术利用了业界最广泛、最强大的 Ethernet 生态系统，并且契合了视频、云计算以及 5G 等业务的发展需求，自 2015 年提出以来，受到业界广泛关注。

近年来，随着云计算、视频以及移动通信等业务的兴起，人们对 IP 网络的诉求从以带宽为主逐渐转移到业务体验、服务质量和组网效率上。为满足上述需求，作为底层连接技术的 Ethernet 在保持既有低成本、高可靠、可运维等优势之外，还需要具备多粒度速率灵活可变、面向多业务承载的增强 QoS 等能力。多业务承载条件下用户体验增强，是高速 Ethernet 技术发展的重要关注点。Ethernet 如果能在物理层接口上提供通道化的硬件隔离功能，就可以在物理层保证业务基于不同分片的隔离，进一步与上层网络/应用配合，结合高性能可编程转发以及层次化 QoS 调度等功能，即可在多业务承载条件下实现增强

QoS 能力。FlexE 技术也由此应运而生。

(2) 主要特点和优势

FlexE 技术通过在 IEEE802.3 基础上引入 FlexE Shim 层实现了 MAC 与 PHY 层解耦(如图 16)，从而实现了灵活的速率匹配。

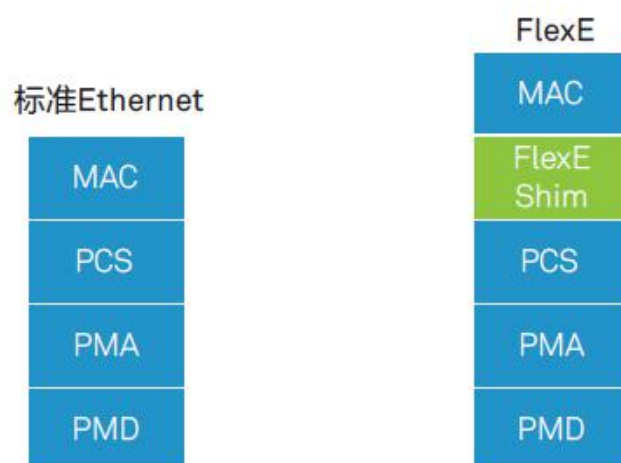


图 16 FlexE 与标准以太网对比

灵活以太网基于 Client/Group 架构定义，可以支持任意多个不同子接口 (FlexE Client) 在任意一组 PHY (FlexE Group) 上的映射和传输，从而实现上述捆绑、通道化及子速率等功能。

FlexE 的核心功能通过 FlexE Shim 层实现，它可以把 FlexE Group 中的每个 100GE PHY 划分为 20 个 Slot (时隙) 的数据承载通道，每个 PHY 所对应的这一组 Slot 被称为一个 Sub-calendar，其中每个 Slot 所对应的带宽为 5Gbps。FlexE Client 原始数据流中的以太网帧以 Block 原子数据块 (为 64/66B 编码的数据块) 为单位进行切分，这些原子数据块可以通过 FlexE Shim 实现在 FlexE Group 中的多个 PHY 与时隙之间的分发。

(3) 适用场景

基于 FlexE 实现 5G 网络切片，网络切片 (Network Slicing) 通过网络资源的分割来满足不同业务的承载需求，并保证服务的 SLA (如带宽、时延等)。按照 NGMN 发布的 5G 白皮书，切片可以实现不同业务 (如 eMBB 增强宽带、自动驾驶、uRLLC 及海量 IoT 互连等) 在同一个 IP 网络中承载。FlexE 的通道化技术提供了接口级不同 FlexE Client 之间的物理切分及相互隔离，进一步与路由器架构结合，构建端到端网络切片。



图 17 基于 FlexE 网络切片

1.7 IPv6+/SRv6

(1) 最新技术进展

IPv6 段路由 SRv6 (Segment Routing IPv6) 是基于源路由理念而设计的在网络上转发 IPv6 数据包的一种协议。

SRv6 TE Policy 是在 SRv6 技术基础上发展的一种新的隧道引流技术。SRv6 TE Policy 按照代表业务 SLA 要求的 COLOR 属性计算隧道路径，业务网络头节点通过扩展的业务路由 color 团体属性和网络远端节点信息来匹配对应的 SRv6 TE Policy 隧道实现业务流量转发，通过 SRv6 TE Policy 技术可

以实现对具有特定 SLA 要求的业务定制 SRv6 隧道路径，实现应用级的业务转发网络细分。

(2) 主要特点与优势

● 负载分担

SRv6 TE Policy 隧道支持负载分担。SRv6 TE Policy 的候选 path 可以配置多个 SID list，流量可以在多个 SID list 下进行负载分担转发。

● Make Before Break

在 Path 切换或 Segment-List 增删场景中，支持慢切和慢删的 MBB 过程，支持配置全局的慢切和慢删时间来控制所有 Policy 的慢切、慢删过程。

● TI-LFA FRR for SRv6 TE Policy

IPv6 IS-IS TI-LFA (Topology-Independent Loop-free Alternate FRR) 技术可以用显式路径表达备份路径，对拓扑无约束，提供了更高可靠性的 FRR 技术。

IPv6 TI-LFA FRR 能为 Segment Routing 隧道提供链路及节点的保护。当某处链路或节点故障时，流量会快速切换到备份路径，继续转发，从而最大程度上避免流量的丢失。LFA 和 Remote LFA 对于某些大型组网，特别是 P 空间和 Q 空间既没有交集，也没有直连的邻居，当某处链路或者节点故障时，无法计算出备份路径，导致流量丢失，不能满足可靠性要求。这种情况下实现了 TI-LFA。

(3) 适用场景

SRv6 L3VPN 迭代 SRv6 TE Policy 隧道

网络内通过 L3VPN 承载 DCI 业务，采用每租户每 VPN 在 DC 内实现租户隔离，DC 网关上采用 VLAN 子接口接入 L3VPN。租户 VPN 通过不同的 SRv6 TE Policy 隧道承载。

1.8 DIP（确定性 IP）

（1）最新技术进展

DIP（Deterministic Internet Protocol）是在基于统计复用原理的 IP 网络基础上，通过增强的周期排队和转发技术实现的一种新型网络转发技术，也被称为确定性 IP。确定性 IP 网络是能够保证网络报文传输时延上限、时延抖动上限、丢包率上限的 IP 网络。与 IETF 的 DetNet 工作组聚焦于单一或者封闭管控的网络（主要支持专业家庭影音、多媒体传输、引擎控制系统和其他广泛的工业和车辆等应用）的确定性网络解决方案有显著的差别。

（2）主要特点和优势

DIP 技术通过在原生报文转发机制中，加入周期排队和转发技术，通过资源预留、周期映射、路径绑定、聚合调度等手段实现大网的确定性转发能力。如图 18 所示。

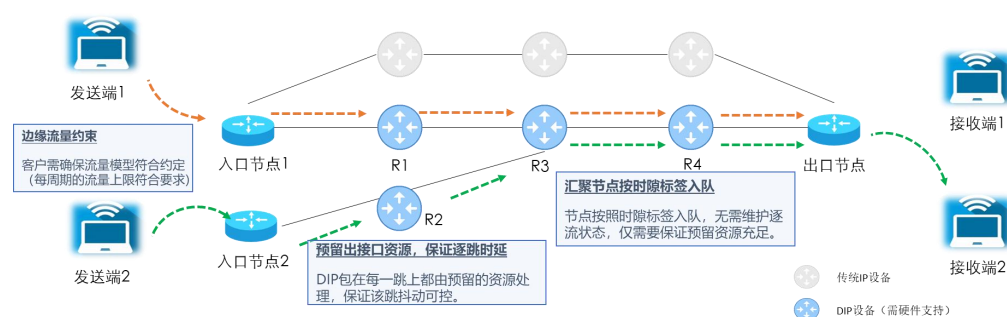


图 18 DIP 网络部署示例及关键技术

DIP 技术既可以利用改进的周期排队和转发技术增加网络

的确定性转发能力，同时无需在中间节点维护逐 DIP 业务实例状态，因此可以在大规模网络中实现灵活的小颗粒度确定性业务承载。可以有效支撑工厂外网、工厂内网等全场景网络应用，实现“一网到底”的综合确定性工业承载网络。

(3) 适用场景

它既适用于中小规模网络，也适用于解决大规模、长距离 IP 网络的数据流端到端确定性传送问题。比如，工业网络、智慧城市、车联网、医疗健康、影音娱乐等场景中的 IP 承载网络。

2 新型数据互通技术

2.1 OPC UA

(1) 最新技术进展

OPC UA 打通了工业通信中的各个层级，从传感器到企业云都可以通过 OPC UA 的通信方式将数据层层传递。同一层级的不同设备部署 OPC UA 也能完成数据的横向传递，为整个工厂的智能车间提供了活力。OPC UA 推出的 Pub/Sub 传输模式是其演进的重要方向，它的实施有助于 OPC UA 在现有工厂车间的应用推广。OPC UA 的 Pub/Sub 传输模式将在制造业 IoT 和 IIoT 应用程序和设备集成中发挥重要作用。

(2) 主要特点和优势

- **统一架构：**

采用一套优化的基于 TCP 的统一架构二进制协议进行数据交换；同时支持网络服务（WEB SERVICES）和 HTTP。在防火墙

中只需打开一个端口即可。集成化的安全机制可确保在互联网上的安全通信。

- **平台开放:**

OPC UA 软件的开发不再依靠和局限于任何特定的操作平台。过去只局限于 Windows 平台的 OPC 技术拓展到了 Linux、Unix、Mac 等各种其它平台。

- **安全通讯:**

OPC UA 支持会话加密、信息签名等安全技术，每个 UA 的客户端和服务端都要通过 OpenSSL 证书标识，具有用户身份验证，审计跟踪等安全功能。

- **可扩展性:**

OPC UA 的多层架构提供了一个“面向未来”的框架。诸如新的传输协议、安全算法、编码标准或应用服务等创新技术和方法可以并入 OPC UA，同时保持现有产品的兼容性。

(3) 适用场景

OPC UA 技术可以应用在所有自动化层面上，包括：人机界面、现场智能设备，以及企业高级应用，如 MES、ERP 等。OPC UA 技术可以方便不同系统间完成信息兼容。其高安全性、网络兼容性、可升级性、独立平台等优点可以满足当今工控企业管控一体化发展需求，方便企业在地域、业务上扩展。

2.2 DDS

(1) 最新技术进展

DDS 数据分发服务面向工业互联网领域专为分布式实时系统而设计，提供了一种将时间敏感的大型设备互联在一起的方法，成功构建了大型分布式系统，为工业互联网实现广泛应用提供基础架构。

(2) 主要特点和优势

DDS 使用实时发布订阅 (RTPS) 机制，提供服务质量保障。它具有大量可精细控制的实时 QoS 参数，包括可靠性、带宽控制、传输截止期、活跃状态、资源限制和安全性等。DDS 以数据为中心，共享“全局数据空间”。这意味着所有数据看起来都像存在于每个设备和算法中。DDS 的工作原理是跟踪每个应用程序需要什么数据以及何时需要这些数据，将数据保存在本地存储器中，以实现快速的数据交付。DDS 系统的应用程序之间无编码交互，数据总线自动发现并连接发布和订阅应用程序，无需更改配置便可向网络中添加新的智能机器，自动完成 QoS 的匹配和实现。DDS 克服了与点对点系统集成扩展性差，互操作难的问题，实现了即插即用的简单、可扩展、高效性。

(3) 适用场景

DDS 可以用于包括交通、能源、医疗系统、工业自动化、航空航天和国防等行业。

2.3 NC-Link

(1) 最新技术进展

数控装备工业互联网通讯协议（简称 NC-Link）是由我国提出并具备自主知识产权的统一、规范的数控装备交互协议。是

与美国 MTConnect、欧盟 OPC UA 同级的 M2M (Machine to Machine) 通信协议。该协议面向数控装备的多源异构系统，解决了上层应用系统与数控装备交互的瓶颈问题，于 2020 年 12 月正式发布，2021 年 01 月开始实施。

(2) 主要特点和优势

NC-Link 采用 JSON (Java Script Notation) 格式进行模型描述与数据传输，保证了数据内容的可读性，降低了带宽压力；兼容多种数控设备，同时可以描述数控机床、机器人及各类工控设备。接口定义简单，只有侦测、查询、设置、采样四个接口，易于实现，容易理解。满足毫秒级数据采集，使其成为建立数控装备 CPS 模型首选的通讯协议。使用全双工通信方式，满足端到端双向通讯需求。

NC-Link 与当前互联网常用通讯协议 OPC UA、MTConnect 及 umati 的对比如表 4 所示：

表 4 NC-Link 与 OPC UA、MTConnect 对比

技术指标	OPC UA	MTConnect	umati	NC-Link	说明
传输格式	二进制、XML	XML	二进制、XML	JSON	二进制可读性差，XML 过于冗余，JSON 格式轻量化。
语义模型	无	有	有	有	语义模型是协议的核心，易于设备互联互通。
数据类型	强类型	强类型	强类型	弱类型	弱类型是物联网数据轻量化的必然要求。
数据流通方向	双向	单向	双向	双向	反向控制设备是数字孪生必然需求，是数控机床互联互通协议显著优势。

安全	有	无	有	有	数据安全保障，是数据双向传输的基础。
大数据支持能力	弱	弱	弱	强	此项为数控机床互联互通协议显著优势。

（3）适用场景

NC-Link 主要应用于异构设备、系统的连接与多源异构数据的集成，打破因工业设备通讯接口相异造成的“信息孤岛”，覆盖了面向整个工厂、产线或车间的数据传输、数据存储、数据分析和智能决策等应用场景。为工业报警分析、产品溯源、效率分析、生产过程监测、车间生产管理、预测性分析、设备远程运维、工艺优化等智能应用提供稳定、可靠、可持续的数据服务。

3 新型融合技术

3.1 5G+TSN

（1）最新技术进展

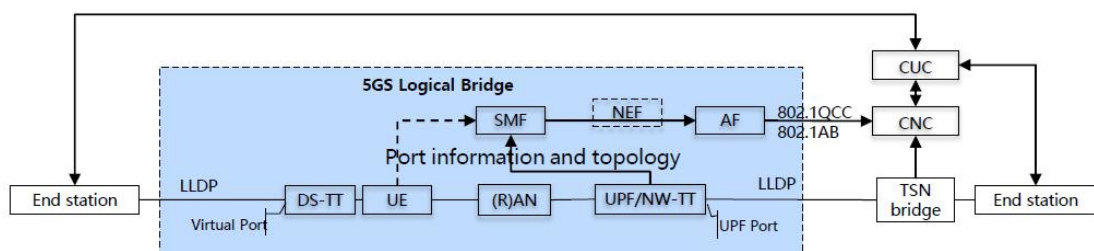


图 19 5G 系统作为 TSN 逻辑桥

5G 系统在 TSN 网络架构中相当于桥接黑盒子，即 5GS 桥。5GS 桥包括了 UPF 的 NW-TT (Network-side TSN translator, 网络侧 TSN 转换器) 端口、UE 和 UPF 之间的用户面隧道，还有 UE DS-TT (Device-side TSN translator, 终端侧 TSN 转换

器) 端口。5G 系统支持 TSN，基于 IEEE802.1Qcc 全集中配置模型，把 5G 系统作为 TSN 网络的一个透明网桥使用，5G 系统逻辑交换机管理机制如下：

- 端口创建和标识分配：UPF 上预配置逻辑交换机标识及网络侧的端口标识。UE 会话虚拟为 5GS 交换节点的端口，UPF 为 UE 分配终端侧的端口标识。
- 端口能力和拓扑上报：UPF 通过 SMF 向 AF 上报端口能力及拓扑信息，UE 通过 N1 或者用户面向 SMF 上报端口能力及拓扑信息。AF 支持 802.1Qcc 和 802.1AB 管理接口，向 TSN 网络控制器上报 5G 逻辑交换机能力及拓扑信息。
- 5G 系统通过 802.1AS 中定义的透明时钟方案向下游设备同步 TSN 时钟，为了实现 TSN 同步机制，整个 5G 系统可看作是一个 IEEE 802.1AS 时间感知系统。在 5G 系统内部，5G GM（5G 内部主时钟）实现与 UE、gNB、UPF、NW-TT 和 DS-TT 的时间同步。只有 5G 系统边缘的 TSN 转换器（TT）才需要支持 IEEE 802.1AS 的相关功能，例如：支持(g) PTP、时间戳、最佳主时钟算法（BMCA）等。

（2）主要特点和优势

● 端到端确定性通信服务

时间敏感网络技术在现有的以太网 QoS 功能基础上增加了包括时间同步、流量调度、无缝冗余等一系列关键技术能力，根据业务流量的特点配合使用相关特性，可以确保流量的高质量确定性传输。将时间敏感网络 TSN 技术与 5G 网络的传输过程进行融合，可以更为有效地保证工业互联网等垂直行业端到端

高可靠低时延传输要求。

● 有线无线异构融合服务

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。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。

（3）适用场景

作为移动通信的 5G 与 TSN 结合，能充分发挥 5G 的灵活性和 TSN 的极低延迟性，非常适合智能工厂如工业移动场景、智能电网等场景应用。两种技术的集成和应用富有前景，将成为未来工业网络应用的重要方向之一。

3.2 TSN+OPC UA

（1）最新技术进展

TSN+OPC UA 即时间敏感网络 TSN 与 OPC UA 融合，该融合技术实现了工业通信网络中 IT 和 OT 的无缝融合，从传感器到云端建立全面的通信基础结构。TSN 将 ProfiNet 等实时以太网现场总线和 OPC UA 共享到同一个通信设施上，识别底层 IO 设备，实现了从现场层、控制层、管理层直到云端的数据通信。TSN+OPC UA 融合技术不与某特定厂商绑定，从而减少了非技术原因的人为干预，其适用性比以往现场总线更强，将在许多应用中取代当前基于以太网的现场总线。当前，针对工业应用的 OPC UA 标准和 TSN 标准已经完成，主要芯片制造商正在制造适用于现场设备互联的产品，努力降低成本的同时实现快速推广应用。

(2) 主要特点和优势

TSN+OPC UA 具有众多优点，包括跨厂商部署、应用领域广泛、融合网络、大而灵活的拓扑结构、完整的 IIoT 功能、高实时性、集成安全和现代数据建模等。

(3) 适用场景

TSN+OPC UA 将在许多应用中取代当前基于以太网的现场总线。TSN+OPC UA 技术是预测性维护、数据分析、机器学习和人工智能等新技术的关键推动因素，可以帮助工业企业提升效率，例如减少停机时间、提高设备综合效率和降低总体成本等。

附录 2:

缩略语

4G	4th Generation Mobile Communication Technology	第四代移动通信技术
5G	5th Generation Mobile Communication Technology	第五代移动通信技术
ACL	Access Control Lists	访问控制列表
AF	Application Function	应用功能
AGV	Automated Guided Vehicle	无人搬运车
CoAP	Constrained Application Protocol	受约束设备的专用 Internet 应用程序协议
CRM	Customer Relationship Management	客户关系管理
DDS	Data Distribution Service for Real-Time Systems	实时系统数据分发服务
ERP	Enterprise Resource Planning	企业资源规划
HTTP	Hyper Text Transfer Protocol	超文本传输协议
I/O	Input/Output	输入/输出
IIoT	Industrial Internet of Things	工业物联网
IoT	Internet of Things	物联网
IPsec	Internet Protocol Security	互联网安全协议
LRP	Link local Registration Protocol	链路本地注册协议
MES	Manufacturing Execution System	制造执行系统
MPLS	Multi-Protocol Label Switching	多协议标签交换
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport	消息队列遥测传输
MSTP	Multi- Service Transport Platform	多业务传送平台

NB-IoT	Narrow Band Internet of Things	窄带物联网
ODVA	Open DeviceNet Vendor Association	开放式设备网络供应商协会
OLT	Optical Line Terminal	光线路终端
OMG	Object Management Group	对象管理组
ONU	Optical Network Unit	光网络单元
OSI	Open System Interconnection Reference Model	开放式系统互联通信参考模型
OTN	Optical Transport Network	光传送网
PDM	Product Data Management	产品数据管理
PLC	Programmable Logic Controller	可编程控制器
PoE	Power Over Ethernet	以太网供电
PON	Passive Optical Network	无源光纤网络
QoS	Quality of Service	服务质量
RAP	Resource Allocation Protocol	资源分配协议
RFID	Radio Frequency Identification	射频识别
SCM	Supply Chain Management	供应链管理
SDH	Synchronous Digital Hierarchy	同步数字体系
SD-WAN	Software Defined Wide Area Network	软件定义广域网
SLA	Service Level Agreement	服务级别协议
SMF	Session Management Function	会话管理功能
SRP	Stream Reservation Protocol	流预留协议
TCP	Transmission Control Protocol	传输控制协议

TSN	Time Sensitive Networking	时间敏感网络
UDP	User Datagram Protocol	用户数据报协议
UE	User Equipment	用户设备
UPF	User Plane Function	用户面功能
VoIP	Voice over Internet Protocol	基于 IP 的语音传输
WIA	Wireless Networks for Industrial Automation	工业自动化无线网络
Wi-Fi	Wireless Fidelity	无线通信技术



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