



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

工业互联网网络连接白皮书

(版本1.0)

工业互联网产业联盟 (AII)

2018年10月

工业互联网网络连接白皮书

(版本 1.0)



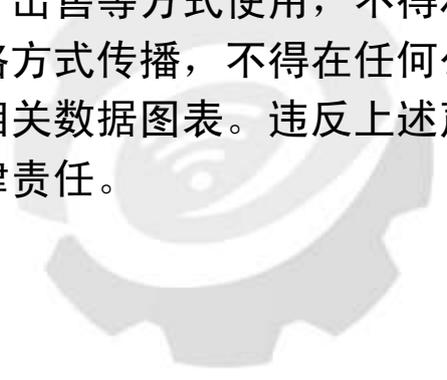
工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

工业互联网产业联盟 (AII)

2018 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

编写说明

2017年11月，国务院在《关于深化“互联网+先进制造业”发展工业互联网的指导意见》中，将“夯实网络基础”作为主要任务之一，提出大力推动工业企业内外网建设。

目前工业领域内已广泛存在各种网络连接技术，这些技术分别针对工业领域的特定场景进行设计，并在特定场景下发挥了巨大作用和性能优势。对工业互联网网络连接技术的理解差异，可能导致后期技术选择路线的分化，影响网络的规划部署，进而影响数据的无缝集成。为此，工业互联网产业联盟（以下简称 AII）启动了工业互联网网络连接的研究，在总结国内外实践及发展趋势的基础上，撰写了工业互联网网络连接白皮书。

本白皮书旨在促进业界对工业互联网的网络连接框架、技术趋势达成广泛共识，为工业互联网网络连接的技术创新、试验验证、应用实践等提供参考和引导，共同推动工业互联网基础设施的健康快速发展。

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。经过多次深入调研和探讨，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新版报告。

组织单位：工业互联网产业联盟

编写单位（排名不分先后）：华为技术有限公司、中国信息通信研究院、中国科学院沈阳自动化研究所、中国电信集团有限公司、中兴通讯股份有限公司、施耐德电气（中国）有限公司、中国移动通信集团公司、大唐电信科技产业集团、北京恩易通技术发展有限公司、沈机（上海）智能系统研发设计有限公司

编写组成员（排名不分先后）：

华为技术有限公司：彭炎、殷佳欣、王冬、王斌、朱作燕、刘恩慧、陈李昊

中国信息通信研究院：张恒升、徐骁麟、段世惠、赵锋、陈洁

中国科学院沈阳自动化研究所：李栋、刘意杨、王智凝、杨明

中国电信集团有限公司：金嘉亮、沈成彬、孙剑平、陈仲华

中兴通讯股份有限公司：李斌、常娥、黄光平

施耐德电气（中国）有限公司：贾德胜、阎新华

中国移动通信集团公司：刘鹏、王蕾

大唐电信科技产业集团：徐晖

北京恩易通技术发展有限公司：陈强

沈机（上海）智能系统研发设计有限公司：刘广杰

目 录

一、	工业互联网网络连接框架.....	1
(一)、	网络连接框架.....	1
(二)、	实现视图.....	2
(三)、	协议视图.....	6
二、	工业互联网网络互联.....	7
(一)、	工厂内网络.....	7
1.	现状.....	7
2.	发展趋势.....	10
3.	有线网络.....	12
4.	无线网络.....	23
5.	工厂内定位.....	29
6.	敏捷网络/工厂 SDN.....	34
(二)、	工厂外网络.....	36
1.	现状.....	36
2.	发展趋势.....	36
3.	企业专线.....	38
4.	移动通信网络.....	41
三、	工业互联网数据互通.....	46
(一)、	现状与趋势.....	46
(二)、	面向工业现场设备的 OPC UA.....	47
(三)、	面向轻量级设备的 LIGHTWEIGHTM2M.....	50
(四)、	ONEM2M.....	53
四、	适配边缘计算架构的网络连接.....	57
(一)、	边缘计算在工业网络中的位置.....	57
(二)、	边缘计算与网络连接的关系.....	58

1.垂直行业现场的边缘计算.....	58
2.移动边缘计算.....	60
五、部署与演进.....	61
(一)、总体原则.....	61
(二)、工厂内网.....	62
(三)、工厂外网.....	63



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

一、工业互联网网络连接框架

在工业互联网体系架构中，网络是基础，为人、机、物全面互联提供基础设施，促进各种工业数据的充分流动和无缝集成。

工业互联网网络连接，涉及了工厂内外的多要素、多主体间的不同技术领域，影响范围大，可选技术多。工业领域内已广泛存在各种网络连接技术，这些技术分别针对工业领域的特定场景进行设计，并在特定场景下发挥了巨大作用和性能优势，但在数据的互操作和无缝集成方面，往往不能满足工业互联网日益发展的需求。工业互联网网络连接的总体目标，是促进系统间的互联互通，从孤立的系统/网络中解锁数据，使得数据为行业内及跨行业的应用发挥更大价值。

(一) 网络连接框架

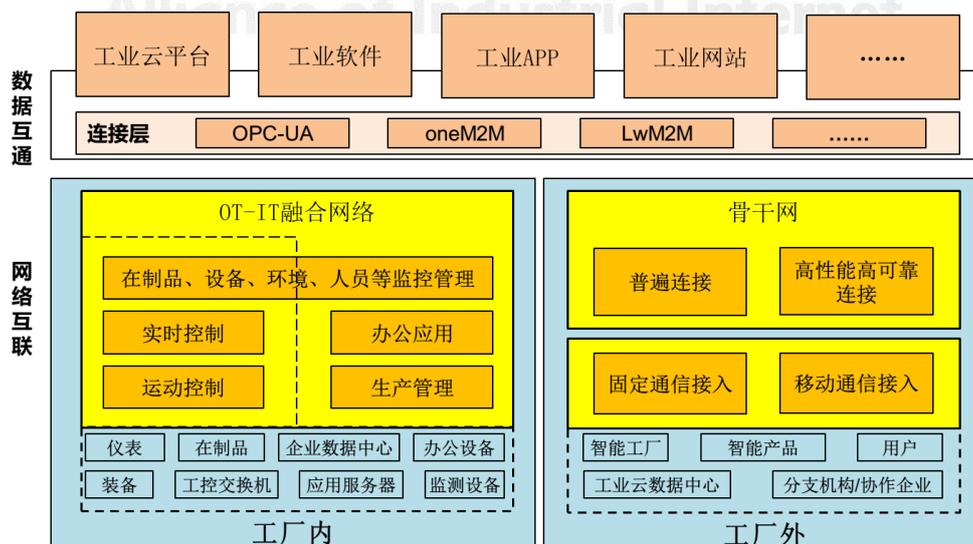


图 1 工业互联网网络连接框架

工业互联网网络连接框架（见图 1），包括网络互联和数据

互通两个层次。

网络互联，包括工厂内网络和工厂外网络。

工厂内网络，用于连接工厂内的各种要素，包括人员（如生产人员、设计人员、外部人员）、机器（如装备、办公设备）、材料（如原材料、在制品、制成品）、环境（如仪表、监测设备）等。通过工厂内网络，与企业数据中心及应用服务器互联，支撑工厂内的业务应用。

工厂外网络，用于连接智能工厂、分支机构、上下游协作企业、工业云数据中心、智能产品与用户等主体。智能工厂内的数据中心/应用服务器，通过工厂外网络与工厂外的工业云数据中心互联。分支机构/协作企业、用户、智能产品，也根据配置，通过工厂外网络连接到工业云数据中心或者企业数据中心。

工业互联网中的数据互通（本白皮书中也以“连接”指代），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。

工业互联网，要求打破信息孤岛，实现数据的跨系统互通，融合分析。因此数据互通的连接层，一方面支撑各种工厂要素、出厂产品等产生的底层数据向数据中心的汇聚；另一方面为上层应用提供对多源异构系统数据的访问接口，支撑工业应用的快速开发与部署。

（二）实现视图

传统的工厂内网络，主要用于连接生产设备和办公设备，

因此呈现为两层三级的结构：OT 网络（又分为现场级和车间级）和 IT 网络，二者通过网关实现互联和安全隔离。

工业互联网工厂内，一方面，工厂的数字化要求很多已有业务流程的数字化由相应的网络来承载。另一方面，大量新的联网设备被引入，如 AGV、机器人、移动手持设备等；大量新的业务流程被引入，如资产绩效管理、预测性维护、人员/物料定位等。新的设备和业务流程的引入，对网络产生新的需求。从而，工厂内传统的两张网（生产网络和办公网络），会变为多张网，这会相应引起工厂内网络架构的变化。

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、CRM 等，集中部署到工厂内数据中心/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/云平台，进行联合分析，快速决策。业务系统部署的变化，也会引起网络架构的变化。

工业互联网对于柔性制造与个性化定制的需求，要求生产域能够根据需求进行灵活重构，智能机器可能在不同生产域间调整和迁移。这就要求工厂内的网络架构，能够适应快速组网与灵活调整的需求。

图 2 是工厂内网络的一个实施参考。其中，工厂内网络可以分为骨干网络和各种边缘网络两大部分，二者可以通过工业 PON 互联，所有的网络设备由网络控制器进行统一管理。

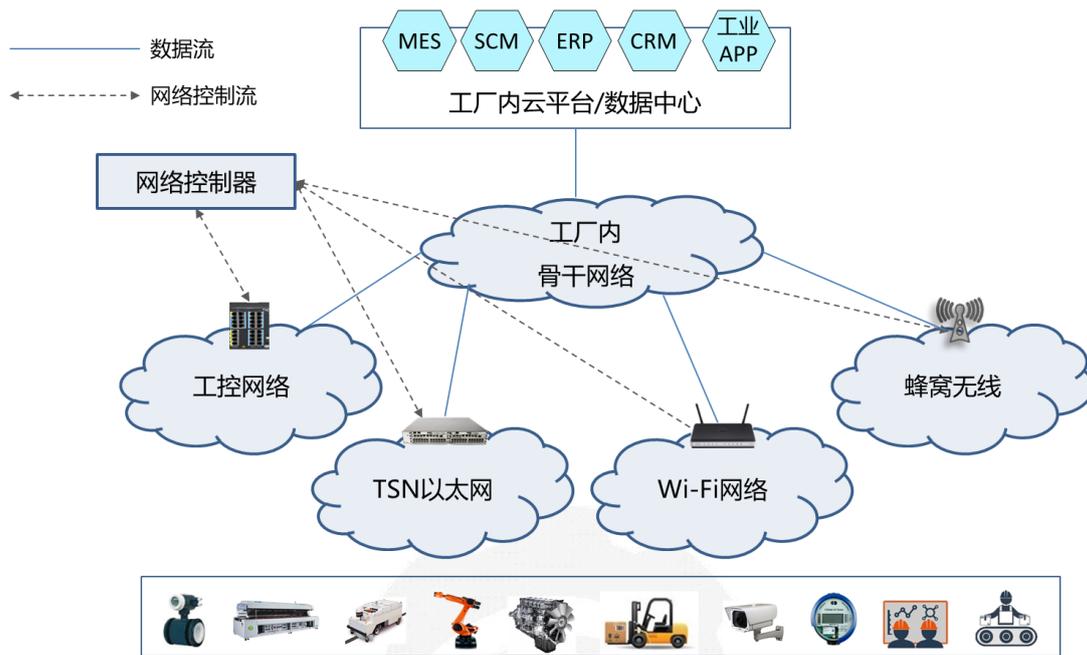


图 2 工业互联网工厂内网络实施参考

由于所连接的工厂要素的多样化，**边缘网络**呈现为类型多样化：根据业务需求，边缘网络可以是工业控制网络、办公网络、监控网络、定位网络等；根据实时性需求来，边缘网络可以是实时网络、非实时网络；根据传输介质来，边缘网络可以是有线网络、无线网络；根据采用的通信技术，边缘网络可以是现场总线、工业以太网、通用以太网、WLAN、蜂窝网络等；边缘网络的范围，可能是一个车间、一栋办公楼、一个仓库等。工业企业可以综合考虑业务需求及成本，选择合适的技术部署相应的边缘网络。

骨干网络用于实现各边缘网络、工厂内云平台/数据中心等之间的互联，要求高带宽、高速率。根据企业的规模不同，骨干网络的规模也可大可小，可以是全互联的路由器集群，也可能仅包一到两台骨干路由器。

工业 SDN，采用网络控制器对工厂内有线、无线网络资源进

行统一管理，以保障关键业务的网络质量需求，实现对网络资源精细控制、灵活调整，提升运维效率；提供全面统一的安全认证机制，增强对威胁的防护能力，保护企业的信息安全；对网络流量进行全面可视化，提供全路径故障检测能力，降低网络运维成本；基于统一的策略配置，保障合法用户在不同边缘网络的无缝接入、一致体验。

工厂外网络，从工业企业关注的角度看，主要包括智能工厂的三个专线，以及出厂产品的一个连接（见图 3）。

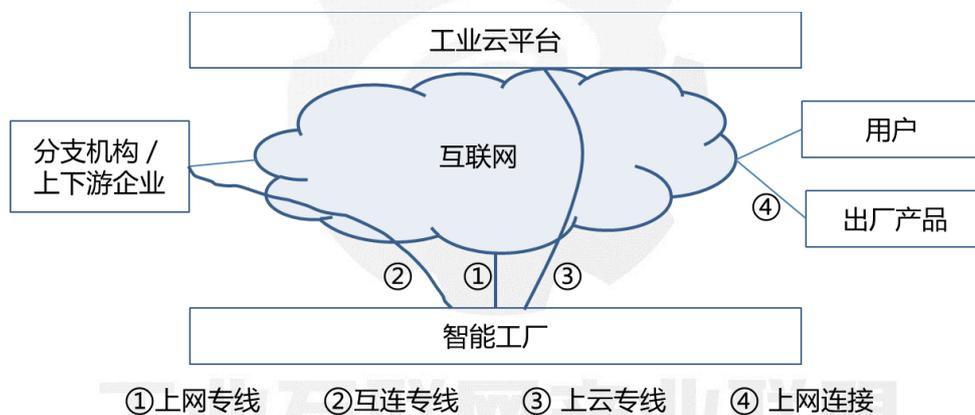


图 3 工业互联网工厂外网络实施参考

- **上网专线**：实现智能工厂连接到互联网。还可以接受用户或者出厂产品通过互联网对智能工厂的访问，这是工业企业基本的专线需求；
- **互联专线**：实现智能工厂与分支机构/上下游企业间安全可靠的互联。对于大中型企业，这是常见的专线需求；
- **上云专线**：实现智能工厂与位于公有云的工业云平台的互联。通常是企业到公有云服务提供商的专线，此类专线需求近年来发展迅速，尤其是随着国家推进“百万企业上云”工程，工业企业对此类专线的需求将尤为强烈；

- **上网连接**：实现出厂产品到互联网的连接，进而与智能工厂或者工业云平台互联，这是工业企业实现制造服务化的基础。

(三) 协议视图

工业互联网的网络连接框架，分为网络互联与数据互通两个层次（见图 4）。

- 网络互联指实体间通过网络通信，实现数据传递，对应协议栈层次的物理层到网络层；
- 数据互通指建立数据的结构和规范，使得传递的数据能被有效地理解和利用，对应协议栈的 TCP/UDP 层到应用层。

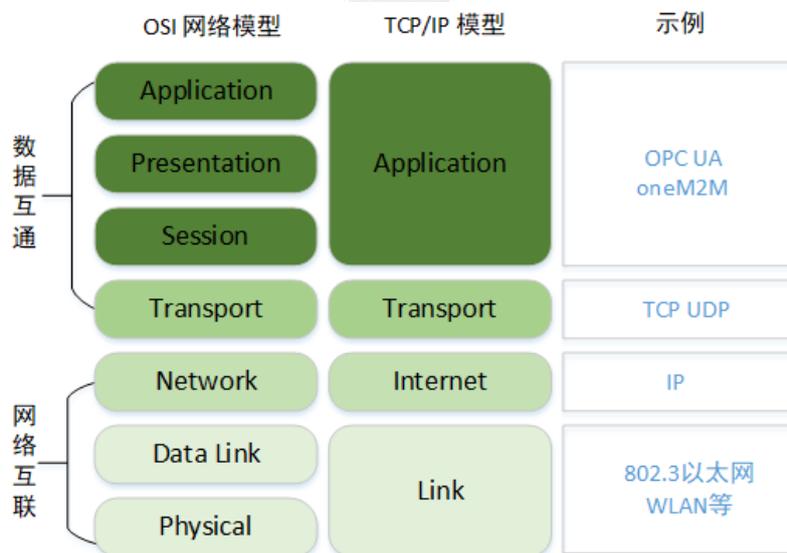


图 4 模型、协议对应关系

在 IEC 61804-1 标准中，定义了 6 个不同的互操作层次。在这些不同层次的互操作中，interconnectable 层次互操作可通过本白皮书中网络互联实现，interworkable 层次互操作可以通过本白皮书中的数据互通实现。

二、工业互联网网络互联

(一) 工厂内网络

1. 现状

(1) 工业控制网络架构现状

当前，工厂内网络呈现“两层三级”的结构，如图 5 示例。“两层”是指存在“工厂 IT 网络”和“工厂 OT 网络”两层技术异构的网络；“三级”是指根据目前工厂管理层级的划分，网络也被分为“现场级”、“车间级”、“工厂级/企业级”三个层次，每层之间的网络配置和管理策略相互独立。

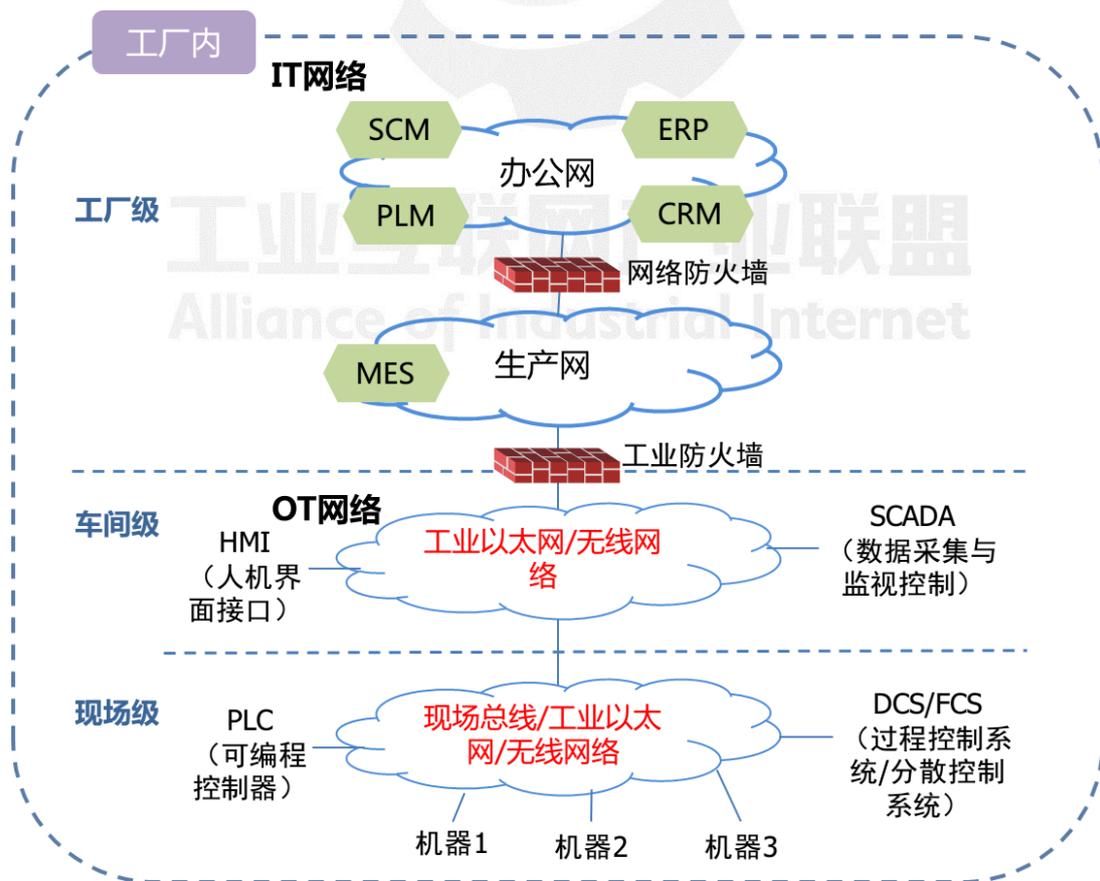


图 5 当前典型的工厂内网络示意

在现场级，工业现场总线被大量用于连接现场检测传感器、

执行器与工业控制器，通信速率在数 kbps 到数十 kbps。近年来，虽然已有部分支持工业以太网通信接口的现场设备，但仍有大量的现场设备依旧采用电气硬接线直连控制器的方式连接。在现场级，无线通信只是部分特殊场合被使用，存量很低。这种现状造成工业系统在设计、集成和运维的各个阶段的效率，都受到极大制约，进而阻碍着精细化控制和高等级工艺流程管理的实现。

车间级网络通信主要是完成控制器之间、控制器与本地或远程监控系统之间，以及控制器与运营级之间通信连接。这部分主流是采用工业以太网通信方式，也有部分厂家采用自有通信协议进行本厂控制器和系统间的通信。当前已有的工业以太网，往往是在通用的 802.3 千兆以太网的基础上进行修改和扩展而来，不同工业以太网协议间的互联性和兼容性限制大规模网络互联。

企业 IT 网络通常采用高速以太网以及 TCP/IP 进行网络互联。

工业互联网的智能工厂中，企业级 IT 管理运营系统对现场实时工艺过程数据和设备状态数据有着强烈需求。如何高效便捷部署现场设备的通信互联，以及如何利用先进的网络技术实现现场与管理级系统间高实时性、高可靠性数据通信，是目前工业网络系统技术领域普遍面临的焦点问题。

(2) 工业控制网络常用协议

目前工业控制领域常用的通信协议分为三类：现场总线协

议、工业以太网协议和工业无线网络协议。

现场总线协议主要提供现场传感器件到控制器、控制器到执行器或控制器与各输入输出控制分站间进行数据通信的支持。目前市场常见的现场总线技术有几十种之多，主要包括 PROFIBUS、Modbus、HART、CANopen、LonWorks、DeviceNet、ControlNet、CC-Link 等。相比起来，现场总线技术普遍存在通信能力低、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。

工业以太网技术是随着以太网技术的不断成熟，将其优化后被引入工业控制领域而产生的通信技术。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，为工业现场控制水平提升奠定了基础。当前主流的工业以太网技术包括 Ethernet/IP、PROFINET、Modbus TCP、Powerlink、EtherCAT 等。各种工业以太网技术的开放性和协议间的兼容性相较于现场总线有所提高，但由于其在链路层和应用层所采用的技术不同，互联互通性仍不尽人意，这在一定程度上也影响到工业以太网协议应用向更广泛的领域拓展。

工业无线技术在工厂内接移动的设备，以及线缆连接实现困难或无法实现的场合，具备很大的必要性。目前用于工业场景的主要的工业无线技术主要 WLAN、Bluetooth、WirelessHART、WIA-PA、WIA-FA 等。在工厂应用中，由于信号传输的可靠性可能受到实际环境因素的影响，这对无线通信的应用产生较大的

阻力。工业无线技术主要的应用领域还是在非关键工业应用中，例如物料搬运、库存管理、巡检维护等场合。同时，由于不同国家和地区对于无线通信频段的管制政策不同，这客观上也限制了工业无线技术的应用规模，目前工业无线技术的成熟度和发展速度都远不如有线通信技术。

2. 发展趋势

伴随着工业互联网/工业 4.0 的广泛推进，工业通信技术的更新换代的节奏，可能会超过之前的任一阶段。

随着工业领域工艺技术的日臻完善，当前工艺突破带来工业生产效率提升的可能性变得越来越小。利用工业互联网技术来提升工业用户从设计、生产和运维等全生命周期的精细化管理，降低整体的人力成本、资源消耗，全面提升生产和运营效率等越来越受到重视。

工业互联网业务发展对网络基础设施提出了更高的要求 and 需求，工厂内网络呈现出**融合、开放、灵活**三大发展趋势。

工厂内网络架构的融合趋势。一是**网络结构的扁平化**。传统的“两层三级”网络架构严重影响着信息互通的效率，随着大数据分析和边缘计算业务的对现场级实时数据的采集需求，OT 网络中的车间级和现场级将逐步融合（尤其在流程行业），同时 MES 等信息系统向车间和现场延伸的需求，推动了 IT 网络与 OT 网络的融合趋势。二是**控制信息与过程数据共网传输**。传统工业网络基本是依附于控制系统，主要实现控制闭环的信息传输，而新业务对工业生产全流程数据的采集需求，促使工厂内

网络将控制信息和过程数据的传输并重。三是**有线与无线的协同**。工业互联网业务对于生产全流程、无死角的网络覆盖需求，使得无线网络的部署成为必然，无线网络的应用也将逐步从信息采集到生产控制，从流程行业到离散行业，而多种无线技术的应用也推动了工厂内定位技术的发展。

工厂内网络的开放趋势。一是**技术的开放**。工业互联网工厂内网络技术体系将打破传统工业网络众多制式间的技术壁垒，实现网络各层协议间的解耦合，控制系统、应用系统将不再与某项具体网络技术强绑定；IEEE、IETF 等国际标准组织加入到技术标准研制，IP/IPv6 在工厂内的深入部署，都将进一步推动工厂内网络技术的开放。二是**数据的开放**。工业互联网业务对数据的强烈需求，促使传统工业控制闭环中沉没或消失的数据开放出来，而生产全流程的数据将由更标准化的语法和数据模型开放给上层应用使用。三是**产业的开放**。网络技术的开放正在打破传统工业网络“烟囱式”的发展模式，打破少数巨头对全产业链的控制，新的芯片厂商、设备厂商、网络提供商加入进来，推动产业开放。

工厂内网络的灵活友好趋势。一是**网络形态的灵活**。未来工厂内网络将能够根据智能化生产、个性化定制等业务灵活调整形态，快速构建出生产环境。二是**网络管理的友好**。随着工业网络化深入发展，工厂内的网络管理都将变得复杂，新的数据互通和软件定义技术应用将提供网络系统的可呈现度，网络管理界面将更为友好。

3. 有线网络

有线网络是在工厂内最广泛使用的网络类型。近些年，随着工业互联网的日益剧增的需求，在不同的协议层，各种针对有线网络的创新技术迅速发展。

按照协议层次划分：在物理层，主要有单对双绞线以太网和工业 PON；在链路层，主要有时间敏感网络 TSN；在网络层，主要有确定性网络 DetNet。这些工作在不同协议层的技术，可以单独或者联合使用，满足不同场景下的特定需求。

(1) 单对双绞线以太网

● 技术介绍

一直以来，以太网技术朝着提供更高传输速度的方向演进，主要采用双绞线网线（内含四对双绞线）、光纤作为传输介质。近些年，随着物联网广泛应用，采用单对双绞线作为传输介质，为低速应用提供更具成本效益，成为业界以太网技术发展方向之一。

当前业界的单对双绞线以太网技术，有三个方向，具备不同技术特性，分别支持十兆、百兆和千兆速率（见表 1）。

表 1 单对双绞线以太网性能对比

	十兆	百兆	千兆
缩写	10BASE-T1	100BASE-T1	1000BASE-T1
传输介质	无屏蔽单对双绞线		
最大传输距离	1000 米	40 米	
数据线供电	支持	支持，与 802.3bu 标准联合使用	
本安	支持	不支持	
国际标准名称	IEEE 802.3cg	IEEE 802.3bw	IEEE 802.3bp
标准发布时间	预计 2019 年中	2015 年 10 月	2016 年 6 月

其中，10BASE-T1 技术由 ABB、Emerson、Endress+Hauser、Hirschmann、Pepperl+Fuchs、Rockwell、Schneider、Siemens 等诸多工业自动化厂商联合推动和制定的。

10BASE-T1 技术面向工业制造场景，使用无屏蔽单对双绞线，同时实现 10Mbps 传输速率以及供电，可支持最长 1000 米传输及本质安全。1000 米传输距离，可以满足工业现场当前绝大部分总线使用场景的需求。相比总线技术，10BASE-T1 技术还具备高速率，高可靠性的优势，且不会受到传输距离增加的影响。

此外，为满足单对双绞线提供更高速率的需求（典型的，如车内通信），IEEE 的 100BASE-T1 技术和 1000BASE-T1 技术，采用无屏蔽单对双绞线，分别提供 100Mbps 和 1Gbps 传输速率。进一步的，这两项技术，还可以与 IEEE 的 PoDL 技术联合使用，支持无屏蔽单对双绞线，在数据传输线上供电。

● 主要特点和优势

作为专用工业现场设计的以太网技术，十兆单对双绞线以太网 IEEE 802.3cg 技术具备诸多优势。

最远 1000 米的有效传输距离。IEEE 802.3cg 引入物理层冲突检测机制，在采用 10 个连接器的情况下，支持最大 1000 米传输距离。

支持恶劣环境下（如工业现场及车内）的高可靠性。IEEE 802.3cg 提供了两种物理层模式：短距模式下，BER 可达到 10^{-10} ；长距模式下，BER 可达到 10^{-9} 。

复用现有工业系统的单对双绞线，提供 10Mbps 数据传输。在现有工业现场，从 4~20 毫安硬接线到多种现场总线，无屏

蔽单对双绞线作为传输物理介质广泛存在，但只能提供数 kbps 到数十 kbps 的传输速率。IEEE 802.3cg 提供全双工或半双工的 10Mbps 传输，可以满足如预测性维护等工业互联网新型应用的需求。

单对双绞线支持本质安全供电及数据传输。在现场设备中，采用单对双绞线，同时进行数据传输和供电的需求广泛存在。IEEE 802.3cg 对 IEEE 802.3bu 标准中定义的 10 个以太网设备供电等级进行了扩展，实际传输的线路电压等级还可采用管理接口配置，或者通信双方自动协商，从而能满足特定环境下（如防爆），本质安全的要求。

● 适用场景

以太网具有技术成熟、高度标准化、高带宽以及低成本等优势，当前已获得广泛应用。但在工厂内，以太网当前主要应用于工业系统的控制层及以上（如 PLC 与 SCADA 之间）。

单对双绞线以太网技术，能够满足工业现场需求，以低成本提供高数据速率传输，将以太网连接扩展到海量现场设备。该技术广泛适用于大量工业场景，包括短距（<15 米）范围的机器内、车辆底盘、座舱内的设备通信，以及中长距（最大 1000 米）范围的建筑控制、电梯控制、过程控制等。

在一些行业中，当前通信使用的双绞线是多年前布设的，用于 4~20 毫安硬接线，或者 Foundations Fieldbus、HART 和 ProfiBus-PA 等现场总线，为了升级而更换线缆完全不现实。使用单对双绞线以太网技术，可以复用已有通信线路，提供更高速率，这可以极大降低升级的成本和难度。

在过程自动化中，往往需要数百米，甚至上千米的传输距离，同时要求数据线供电。如果有传输速率提升需求（如 1Mbps 以上），单对双绞线以太网将是很好选择。

（2）时间敏感网络 TSN

● 技术介绍

时间敏感网络（Time-Sensitive Network, 简称 TSN）是面向工业智能化生产的新型网络技术，为工业生产环境提供了一种即支持高速率、大带宽的数据采集，又兼顾高实时控制信息传输的网络。

在传统工业生产环境中，大量工业应用（例如机器控制、流程控制、机器人控制等）对实时通信有着迫切需求，以保证高效和安全地生产流程。当前满足该要求的通常做法是，修改工厂内网络的以太网协议或者在关键生产流程部署独立的专用以太网。然而，这类方式的互通性、扩展性和兼容性不够的问题，在从传统工厂控制网络，升级到工业互联网的过程中日益明显。时间敏感网络为解决这个难题提供了一个有效的解决方案。

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传输网络。它基于标准以太网，凭借时间同步、数据调度、负载整形等多种优化机制，来保证对时间敏感数据的实时、高效、稳定、安全传输。简要地说，TSN 通过一个全局时钟和一个连接各网络组件的传输调度器，实现网络内的确定性实时通信。调度器依据相应调度策略，控制时间敏感数据流

的实际传输时间和传输路径，以避免链路争抢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。

当前，IEEE 802.1 正在推进 TSN 系列标准的制定，核心内容涵盖时间同步、数据帧控制、数据流调度、传输可靠性保障等多个协议。我国也在同步推进工业互联网 TSN 系列标准的研制。

● 主要特点和优势

TSN 技术让改变工业网络标准“七国八制”成为可能，未来各厂家将可以基于统一的基础网络“TSN+IPv6”进行数据协议设计和应用开发，改变现有“烟囱式”的产业格局。TSN 技术面向 1000Mbps 接口设计，兼容现在工业网络广泛使用的 100M 接口，是工业网络最被看好的向千兆以太网演进的技术方案，现有的 PROFINET、EtherCAT、SERCOS III 等工业以太网均在研究与 TSN 技术的兼容、互通和演进问题。

作为数据链路层技术的 TSN 具备优秀的上层支撑兼容能力。一是 TSN 改变了传统工业以太网技术的“烟囱模式”，能够更好地支持 IP/IPv6、TCP/UDP 等协议，实现 OT 与 IT 网络层次结构的融合；二是 TSN 将构建完善的 YANG 数据模型，能够与上层的 DetNet、SDN 等技术的 YANG 数据模型良好的兼容互通，更好的支撑各类上层应用；三是 TSN 与 OPC-UA 配合，能够解决工厂内的数据互通问题，将 OPC-UA 的数据采集延伸到现场级，实现生产环境全方位实时数据汇集。

时间敏感数据流的传输延迟得到绝对保证，具有确定的时

延上限。在传统网络中，通常通过分配带宽的方式来大致实现时延的保障，具有不确定性和不可预测性；相反，时间敏感网络能够消除这种不确定性和不可预测性，使分配的网络带宽恰好满足要求的时延，从而允许针对应用的实际需求进行带宽分配，既提高了带宽利用率，也保证了传输时延上限。

支持时间敏感数据流和非时间敏感数据流在同一个网络中混合传输，而不会存在相互干扰的风险。在传统网络中，数据流以“Best-effort”的服务模式进行传输。当两种类型的数据流混合在一起时，非时间敏感数据流的调度和传输行为会影响时间敏感数据流的调度和传输，从而无法保证时间敏感数据流的传输延迟。相反，在时间敏感网络中，调度器优先调度时间敏感数据，并通过抢占机制、流量整形机制等确保时间敏感数据流的稳定、实时传输，消除了数据流之间的相互干扰。

时间敏感网络提供稳定的数据传输，网络交换设备通过流量整形机制对数据流进行平滑转发。在传统网络中，不可避免的会有突发高峰负载。这种不稳定的流量特征使得在进行数据转发时无法有效预测传输时延，难以保证实时数据传输。在时间敏感网络内，交换设备对接收到的负载进行整形，特别是对高峰流量进行缓存，尽量平滑地将其转发出去。这种机制保障了数据传输的稳定性和可预测性，确保了时间敏感数据的端到端传输延迟。

● 适用场景

工业控制网络存在大量对时间非常敏感的应用，比如传感器数据实时上报、音视频文件传输、控制指令下发等。这些数

据需要在确定时限内发送到目标，以支持工控设备和应用的正常运转。

时间敏感网络将基于通用的以太网标准来建设，具备确定性网络的属性，能够满足工业网络对于定时、安全和可靠性等方面的要求，现有的专有工业控制网络可以通过网关来连接到时间敏感网络，并实现互联。

(3) 工业无源光网络 PON

● 技术介绍

目前工业 PON 技术，主流有 EPON 技术和 GPON 技术，分别由 IEEE 和 ITU 制定技术标准。EPON 和 GPON 的主要对比可参见表 2。

表 2 EPON 和 GPON 对比

	EPON	10G-EPON	GPON	XG-PON
国际标准	IEEE 802.3ah	IEEE 802.3av	ITU-T G.984	ITU-T G.987
单 PON 口上行速率	1Gbps	1Gbps/ 10Gbps	1.25Gbps	2.5Gbps/ 10Gbps
单 PON 口下行速率	1Gbps	10Gbps	2.5Gbps	10Gbps

EPON 和 GPON 的网络架构均为物理点对多点，均采用 TDM（时分复用）方式实现逻辑上的点对点连接，其原理如图 6 所示。

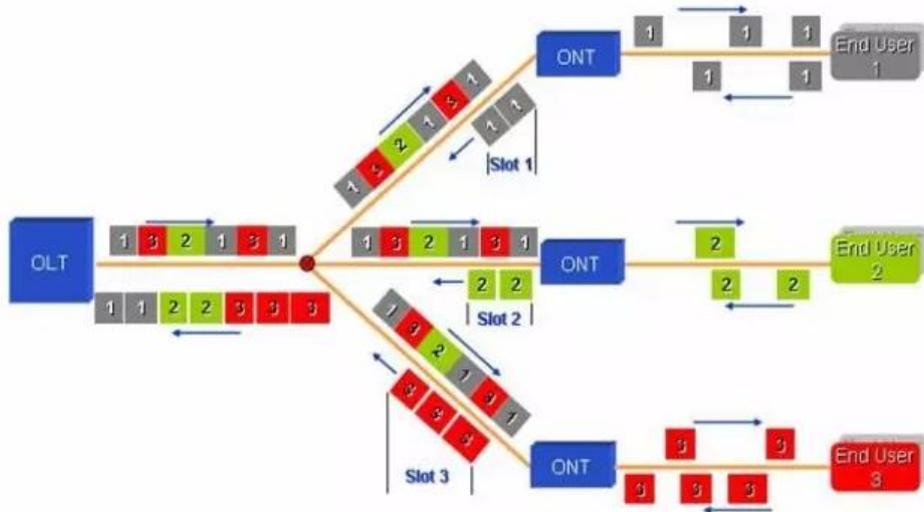


图 6 工业 PON 网络连接示意

工业 PON 网络主要由位于中心站的光线路终端 OLT、位于边缘的光网络单元 ONU，以及二者之间光配线网 ODN（包括光纤及无源分光器）组成，可以提供多种工业接口，适应各种工业设备信息传送及各种专用系统接入场景的要求。

● 主要特点和优势

工业 PON 网络具有以下优点：

高可靠性。 PON 通过无源器件组网，ODN 网络不受电磁干扰和雷电影响；支持冗余组网及多种保护倒换方式，切换时间短、抵抗失效能力强。

部署简单灵活。 PON 技术采用点到多点传输架构，终端并行接入，部署灵活；仅需单根光纤线传输，最远覆盖 20 公里范围。

大容量，支持多种业务。 PON 技术可提供 1Gbps ~ 10Gbps 的传输速率，适合多业务承载，支持数据、视频、语音、时间同步等多种业务。

高安全性。 PON 网络设置 ONU 安全注册机制，下行数据传送

支持加密算法，上行数据传送通过时分机制实现不同终端设备上行数据的隔离。

● 适用场景

参考工业互联网分层架构，工业 PON 在工业互联网体系架构中用于连接工厂内的边缘网络与骨干网络，通过 ONU 设备完成现场级设备与上层实体（如服务器、SCADA 系统等）的连接，实现数据采集、生产指令下达、传感数据采集、厂区视频监控等关键功能。同时，工业 PON 网络也适用于工厂办公网络的承载，可参考现有政企接入网的建设模式。

通过工业 PON 和企业骨干网络，将企业生产网和办公网络实现互联，从而实现生产线数据到工厂/企业 IT 系统的可靠有效传输。

工业 PON 最常用的组网方式是基于 Type D 保护方式的手拉手保护链型组网和星型组网，实现全光路保护，提高了车间通信网络的可靠性，为制造企业的通信可靠性提供了坚实的保障。具体的组网方式可根据工厂实际情况进行选择。图 7 是工厂内应用工业 PON 技术的一个案例。

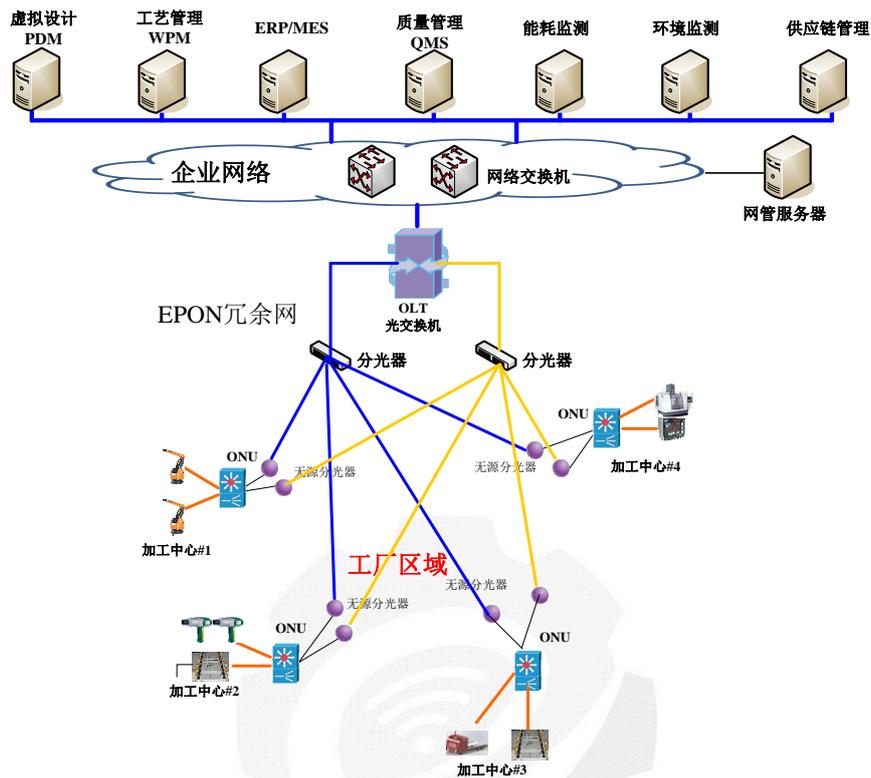


图 7 工厂内应用工业 PON 案例

(4) 确定性网络 DetNet

● 技术介绍

确定性网络 (Deterministic Networking, 简称 DetNet) 是 IETF 正在制定中的网络层标准, 其通过提供有确定范围的时延、丢包和时延抖动参数的数据路径, 为应用提供一个可靠的网络环境。

DetNet 主要采用了**资源预留、确定路径、无缝冗余**三大技术, 实现向用户提供拥塞控制、确定路径、确定性的延迟和抖动、多路径传输、分组编码保护等主要服务。DetNet 网络为 DetNet 流在路由路径的每个节点上预留足够的缓存和带宽资源, 保证 DetNet 流不会因为缓存不够而出现丢包。DetNet 对 DetNet 流的传输路径计算采用相对固定的路由路径技术, 它一方面为

资源预留技术提供了基础的保障，同时路径的固定也为延迟的精确计算提供了可能，是保证确定性延迟和抖动的基础。同时，DetNet 通过无缝冗余技术，即多路径传输的方式，保证在工作路径发生故障时，依然有备份的数据流通过其他路径正确、实时地传输到目标节点。

此外，DetNet 系列技术还包括排队整形技术和流标识技术。排队整形技术用于解决排队带来的时延问题，通过排队和传输选择算法，由中央控制器计算每个节点的时延，并计算它们对每个新增 DetNet 流提供的缓存容量，从而更好的调度和控制节点和终端系统。流标识技术用来区分网络中的确定性流和非确定性流，以及带有不同 QoS 标准的确定性流。

● 主要特点和优势

DetNet 技术的优势在于其在网络的 L3 层来保证网络业务的确定性传送。DetNet 重点针对**多子网的 L3 实时互联**。它在 TSN 现有机制，如资源预留、冗余路径、队列整形等基础上，针对 L3 设备如路由器、防火墙、服务器等进行接口调度融合或机制与算法的 L3 上移，以保障严格的跨域子网之间的确定性网络服务。

随着智能工厂的发展，远程控制的需求将逐渐显现，而目前的工作控制网络主要局限在局域网的范围，不能满足跨局域网的确定性业务传输需求，而 DetNet 则可以很好地解决跨域的问题。

● 适用场景

DetNet 技术可以应用在如工厂设备联网、厂房办公楼的建

筑自动控制等较大范围内，多个实时边缘网络互联的场景。

在智能工厂中，各机器之间通过交换彼此的信息，或者使用一个超级控制器来描绘整个网络的拓扑结构以及网络中的各种状态信息。所以，工厂内网络需要建立在 IP 网络之上，并且对于延时和丢包率有着确定性的要求，与此同时，工业互联网工厂内网络还要求高可靠性和时间同步，例如在个性化定制的场景中，就要求现场设备与管理级系统间高实时性、高可靠性进行通信，DetNet 技术能很好满足此类场景的需求。

DetNet 技术在建筑自动控制中的应用，将有效提升建筑自动控制系统的效率。建筑自动控制系统通过管理整个建筑内的各种设备以及传感器，来提高建筑的环境条件、降低能量消耗，及时发现设备故障和处理紧急情况，例如控制一个车间的温湿度、空气质量，安防、门禁等。在工厂控制中通常有两层网络，即上层管理网络和下层现场网络。目前，在管理网络中，通常使用基于 IP 的通信协议；而在现场网络中，通信技术种类繁多，甚至有企业私有的，导致互通难、集成难。使用 DetNet 技术，可以有效支持采用不同技术的现场网络与管理网络实时互联。

4. 无线网络

在工厂内，采用无线网络，可以消除线缆对车间内人员羁绊、纠缠等危险，使工厂内环境更安全、整洁，且具有低成本、易部署、易使用、灵活调整等优点。

目前工业无线网络，主要用于工厂内部信息化、设备信息采集以及部分非实时控制等目的，采用 Wi-Fi、ZigBee、

WirelessHART、WIA-PA 等技术。这些技术主要基于短距（如 IEEE 802.11）或者近距（如 IEEE 802.15）标准，由于种种原因，尤其是在可靠性、数据传输速率、覆盖距离、移动性等方面的不足，导致在工业领域未能广泛应用。

未来工业互联网，为满足工厂要素全面互联，生产灵活调配的需求，以及一些新的无人操作的诉求（如远程巡检等），对于无线网络有更迫切的需求。工厂内无线网络，将更多采用创新技术，在工业领域逐步渗透，呈现从信息采集到生产控制，从少量部署到广泛应用的发展趋势。

(1) 用于免授权频段的蜂窝无线技术 MulteFire

● 技术介绍

2015 年 12 月，高通、诺基亚，爱立信、英特尔等公司，联合发起了 MulteFire 联盟，旨在发展和推广 4G LTE 技术在免授权频段独立应用。2017 年底发布的 MulteFire 技术 Release1.1 版本，增加了覆盖增强特性和窄带物联特性，重点面向在行业领域的专网应用。

MulteFire 技术运行在免授权频谱（如全球 5GHz、2.4G、Sub-1G），实现将 LTE 的性能优势与 Wi-Fi 类似的简单性相结合，提供比 Wi-Fi 更好的网络覆盖（减少网络盲区），更安全的认证机制以及更优异的网络性能，从而获得更好的用户体验，匹配各类工业无线互联业务的核心诉求。

MulteFire 网络由终端 UE、基站 eNB 以及可选的核心网 EPC 组成，承载业务应用系统，如图 8 所示。

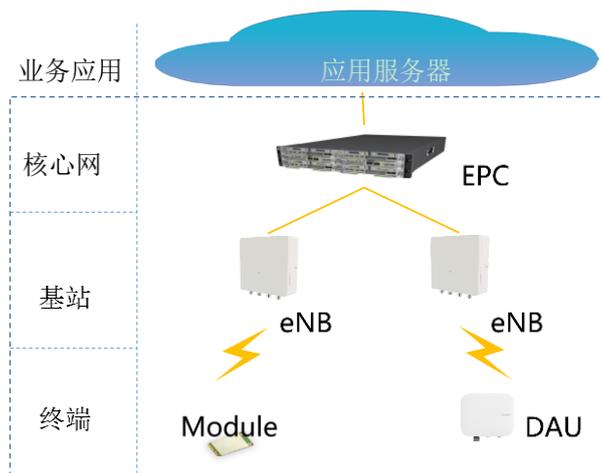


图 8 MulteFire 网络连接示意

工厂内各种设备，通过集成 MulteFire 的模块，或通过以太网网线连接到支持 MulteFire 的 DAU 终端后，接入 MulteFire 网络。数据通过无线接口传递给基站，进而通过有线 IP 网络汇聚到核心网，最后转发到应用服务器，实现采集信息、监测数据的上报。业务应用系统生成的分析结果、控制命令等，通过反向数据流，传递到终端设备。

简化的 MulteFire 还支持免核心网配置，适用于小型区域，不支持设备在基站间切换。

● 主要特点和优势

MulteFire 无线网络技术，包括宽带和窄带两个子集：宽带方案 LTE-U 和窄带物联方案 IoT-U。

MulteFire 宽带方案，最多可使用 80MHz 大带宽，具备高速率，低时延特性，在覆盖、容量、移动性等方面具备诸多优势。

覆盖距离更远。同等发射功率下，MulteFire 宽带方案覆盖距离是 Wi-Fi 的 2~3 倍。

移动性更好。MulteFire 技术基于蜂窝通信系统设计，可支

持高达 160 公里/小时的移动速度。

容量更大。 MulteFire 单小区可以支持 50 个以上的并发终端，并且小区的整体性能不会随着终端数增多而降低。

安全性更高。 支持终端和基站之间的双向认证，支持 AES128/256 位空中接口数据加密，采用 IPsec 确保基站与应用平台间的安全。

完善的**通信服务质量 QoS 保障**机制。通过高级访问控制，无线资源管理，传输资源管理等技术，提供了 9 级 QoS 等级，确保多业务接入场景下的带宽分配和可靠性需求。

传输时延更低。 传输时延最小 20ms，切换时延小于 50ms。

MulteFire 窄带物联方案基于 3GPP NB-IoT 技术修订，适配免授权频谱法规约束，除了具备与 MulteFire 宽带方案相同的安全性以外，更具备广覆盖（覆盖半径 0.5~1km）、低功耗（日上报 1 次，每次 200 字节，2400mAh 电池待机 10 年）、大连接（单站支持 5000 个设备接入）等优势。

● 适用场景

MulteFire 宽带方案，可满足工厂内的宽带数据传输需求，或承载对时延敏感的控制类业务，例如使能视频监控、AGV 调度、连接扫码枪、巡检仪等手持设备。

2017 年 12 月，全球最大的无人自动化码头开港运行，其自动化核心系统—AGV（自动导引集装箱运输车）无人驾驶控制，由 MulteFire 工业无线网络承载。

MulteFire 窄带物联方案，更适合低速率、对时延不敏感，对覆盖、功耗有更高要求的业务，如设备能耗监控、资产跟踪、

工厂环境监控等应用。

(2) 5G 高可靠低时延技术 uRLLC

● 技术介绍

5G uRLLC 是 5G 技术方向之一，满足高可靠低时延需求。2016 年初，国际移动通信标准组织 3GPP 启动了 5G 技术标准由的制定，计划到 2019 年底，5G uRLLC 标准化完成。

5G uRLLC 的特点是高可靠、低时延、极高的可用性，面向工业控制、工厂自动化、智能电网、设备、车联网通讯、远程手术等场景。

● 主要特点和优势

5G uRLLC 在时延和可靠性方面，相比之前的蜂窝无线技术，有了极大提升。

5G uRLLC 技术，实现了基站与终端间，上下行均为 0.5 毫秒的用户面时延。该时延指成功传送应用层 IP 数据包/消息所花费的时间，具体是从发送方无线协议层入口点，经由无线传输，到接收方无线协议层出口点的时间。时延包含上行链路和下行链路两个方向，5G uRLLC 实现低时延的主要技术包括：引入更小的时间资源单位，如 mini-slot；上行接入采用免调度许可的机制，终端可直接接入信道；支持异步过程，以节省上行时间同步开销；采用快速 HARQ 和快速动态调度等。

5G uRLLC 当前的可靠性指标为：用户面时延 1ms 内，一次传送 32 字节包的可靠性为 99.999%。在 5G 标准最终制定完成时，该指标有望进一步提升。此外，如果时延允许，uRLLC 还可

以采用重传机制，进一步提高成功率。5G uRLLC 采用的提升可靠性技术包括：采用更鲁棒的多天线发射分集机制；采用鲁棒性强的编码和调制阶数（MCS 选择），以降低误码率；采用超级鲁棒性信道状态估计。

5G uRLLC 还支持基于 IEEE 1588v2 的同步技术。在运动控制场景下，5G uRLLC 可以在由 50~100 个设备的通信组中，通过无线接口实现亚 us 级的高精度时间同步。

● 适用场景

5G 标准化伊始，西门子、博世等工业企业就积极参与，提出了从运动控制、控制设备互联、移动的生产设备、增强现实等诸多工厂内 5G 技术的应用场景及需求。

传统上，生产线是相对稳定，长期不变的，因此工厂内对无线的需求不强烈。但在未来工厂中，情况可能会发生重大变化。未来工厂所需要的灵活性、移动性和多用途适用性，只有无线连接才能提供。

5G 使能工厂生产柔性化。在制造自动化控制系统中，典型的闭环控制过程周期低至毫秒级别，同时对可靠性也有极高的要求。未来工厂中，静态的顺序制造系统，越来越多的被新型的模块化生产系统取代，从而提供更高的灵活性和多用途适应性。5G uRLLC 技术在满足高可靠低时延的基础上，带来生产设备无线连接的灵活性，使得工厂生产系统模块化和柔性制造成为可能，极大降低生产线重组的时间开销及成本。

基于 5G 的工业增强现实及远程控制。采用增强现实技术，对生产任务进行分步指引，指导工厂工作人员现场手动装配过

程,可以快速满足新生产任务的需求。在恶劣环境下,基于增强现实应用实现人机远程交互与控制,用工业机器人代替人的现场参与。5G 的低时延和高速率特性,使这些应用成为现实。

5G 支持生产设备、移动机器人、AGV 等之间的协作。在未来工厂中,移动机器人、AGV 起到日益重要的作用。在生产过程中,要求这些智能设备间的密切协同和无碰撞作业,需要以无线方式,低时延、高可靠的进行实时数据交换。5G uRLLC 技术对于这些设备间的精密协作至关重要,可以大大提升制造效率。

5. 工厂内定位

工业生产中,智能化面临很多问题亟待解决,如资产定位和统计困难,物料与产品的精细化管理,生产安防能力不足等。定位技术实时提供人员、物品的位置信息,是生产智能化的重要使能技术之一。

(1) 室外定位技术

卫星定位是广泛应用的室外定位技术,其利用多个卫星的参考信号,确定接收机位置,实现全球范围内提供准确位置坐标。由于卫星定位信号功率低,因此通常只能适用于无遮挡的室外场景。

北斗卫星定位是我国自主研发的全球卫星定位系统,可在全球范围内全天候、全天时为用户提供高精度、高可靠定位、导航、授时服务,同时提供短报文通信能力,定位精度 10 米,测速精度 0.2 米/秒。如果再采用地基增强技术,定位精度甚至可提高到厘米级。

卫星定位适用于工业室外定位场景，特别是大型企业，如：油田、港口、电厂、物流等，为企业实现车辆定位和导航，大范围作业管理、大型机械自动化控制等功能，有效提高大规模厂区内，人员、设备动态监控和智能化管理能力。

(2) 室内定位技术

室内定位是指在室内环境下，实现人或者物体的位置定位技术。大量的工业生产主要集中在室内，卫星定位由于信号受建筑物阻挡大，定位精度低，无法满足工业室内应用需求。室内定位主要采用无线信号传输、非可见光传输、惯导定位等技术，实现室内的位置监控。

● Wi-Fi 定位技术

Wi-Fi 定位是利用 WLAN 网络无线信号，基于无线信号强弱实现定位的技术。定位算法分：传播模型法和信号强度指纹法。传播模型法，可实现 5-10 米定位精度。信号强度指纹法，可实现 3-6 米定位精度，但需采集大量指纹特征，当室内环境复杂多变时，指纹库维护成本较高。

Wi-Fi 定位可利用企业现有 WLAN 网络，增加位置计算服务器，完成人员和资产的定位。定位终端只需支持 Wi-Fi 功能，因此，Wi-Fi 定位成本较低。Wi-Fi 定位支持网络端被动定位，向企业提供人、物品位置信息，提高企业智能化水平。

另一方面，如果工厂 Wi-Fi 热点密度不满足定位要求，则定位精度会明显下降。此外，Wi-Fi 终端定位器能耗较高。

Wi-Fi 定位支持覆盖半径 90 米以内的区域，适用于对定位

精度要求不高，并且已部署 WLAN 网络的工业场景。由于 WLAN 网络支持无线数据传输，因此 Wi-Fi 定位可以实现数据通信与无线定位的有效融合，大大节约企业成本。

● 蓝牙定位技术

蓝牙定位是利用蓝牙无线传输，基于无线信号强弱实现定位的技术。蓝牙定位算法与 Wi-Fi 相似，不再赘述。

蓝牙定位终端支持蓝牙 4.0 协议，成本低，体积小。如果工厂内每 30-50 平方米部署一台定位信标，可实现 1-3 米的定位精度。

蓝牙定位支持覆盖半径 100 米以内的区域，适用于主动定位场景，即：定位终端主动发起定位请求，实现终端定位，如：工厂内导航，员工考勤和监控以及服务领域等。

但是，蓝牙定位无法实现网络端定位，不能由服务端主动发起终端定位。

● RFID 定位技术

RFID 定位是采用射频识别技术，通过 RFID 信号识别终端的定位技术。该定位由阅读器获取终端数据，采用 RSSI 或者 TDOA 计算方法，实现终端位置的计算。

RFID 定位可识别距离小，支持覆盖半径 30 米以内的区域。另一方面，RFID 定位精度高，可实现厘米级定位，终端标签成本低，能耗小。

RFID 定位支持网络端被动定位，适用于库房物料管理，流水线加工对象识别以及操作监控，满足企业自动化生产、智能库存管理等需求。

● UWB 定位技术

UWB 定位是采用超带宽无线通信的定位技术。所谓超带宽通信，是指通过发送和接收纳秒或纳秒级以下的极窄脉冲传输数据，从而具有 GHz 带宽的无线通信技术。

UWB 定位精度可达 5-10 厘米，具有精度高、功耗低、抗多径、安全性高、复杂度低等优点。另一方面，UWB 传输距离约 10 米，穿透能力弱，无法穿透混凝土墙体。同时，为保证定位精度，需要任意时刻有四个基站接收到标签发出的脉冲信号，因此 UWB 定位建设成本较高。

UWB 定位技术适用于小范围内，高精度的物料、半成品、工具、人员定位的工业场景。比如：装配车间部件高精度定位，智能仓储和物料定位管理和生产可视化管理等。

● 基站定位技术

基站定位是基于 4G/5G 通信网络和移动通信技术，有效提高定位精度的定位技术。该技术采用 TDOA 算法，通过移动通信下行链路，实现终端的位置计算。

基站定位支持半径 1-10 公里的定位区域，可实现 3 米定位精度，特殊场景下支持 1 米定位精度。基站定位源于蜂窝通信网络，在定位基础上，实现宽带移动通信与室内定位的有效合一，同时支持室外与室内无缝覆盖。

基站定位可实现广域覆盖，适用于大型企业。特别是，企业存在宽带移动接入或者物联网接入需求时，通过部署蜂窝网络，同时满足通信与定位的需求，大大降低企业建设成本。

(3) 融合定位技术

工业生产环境复杂，单一定位技术往往无法满足工业各领域对精度、覆盖、成本等要求。而且，工厂范围内，WLAN 网络、蓝牙网络、蜂窝网络等可能共存。因此，未来企业内的定位系统，很可能是以融合定位技术为核心的异构架构（见图 9），包括：室内定位与室外定位的有机融合，多种室内定位技术融合，从而提供广覆盖、多场景、连续无缝、高精度的定位。

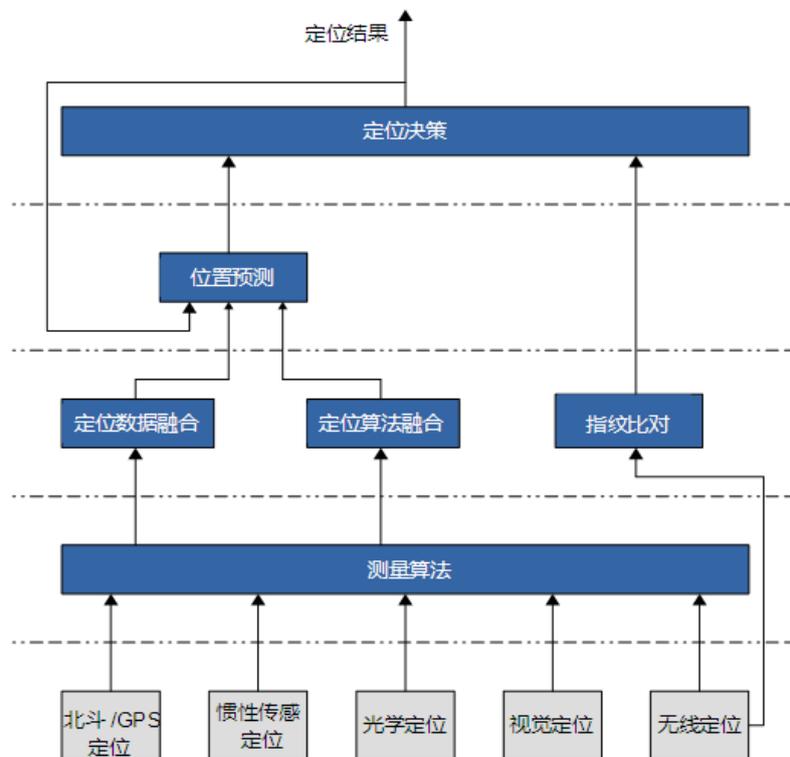


图 9 融合定位机制

融合定位技术需要建立一体化融合的异构体系架构，通过有效评估和决策机制，输出最优的定位结果。融合定位技术需要支持多层次的融合，包括：室内与室外定位融合，不同定位技术融合，不同定位数据融合，基本定位与辅助定位融合等。此外，融合定位需要支持反馈式决策机制，即：实现实际位置结

果和预测结果之间的反馈机制，从而提高定位的可靠性和稳定性。

6. 敏捷网络/工厂 SDN

● 技术介绍

目前的工厂内的信息网络（IT 网络）和控制网络（OT 网络），相互独立运行，网络拓扑刚性，跨网络的信息交互和管理十分困难。工业 SDN（Software Defined Networking，简称 SDN）网络，就是借鉴了软件定义网络的思想，为实现 IT 网络与 OT 网络的深度融合，构建柔性、灵活和敏捷的工业网络而提出来的。

工业 SDN 网络由多种协议的终端设备、可编程的工业 SDN 交换机和集中式的工业 SDN 控制器构成。终端设备通过北向接口向工业 SDN 控制器提交数据的流量特征和传输需求，集中式的工业 SDN 控制器根据流量特征和传输需求，生成工业 SDN 网络的转发规则，通过标准化的南向接口下达到工业 SDN 交换机中执行，如图 10 所示。

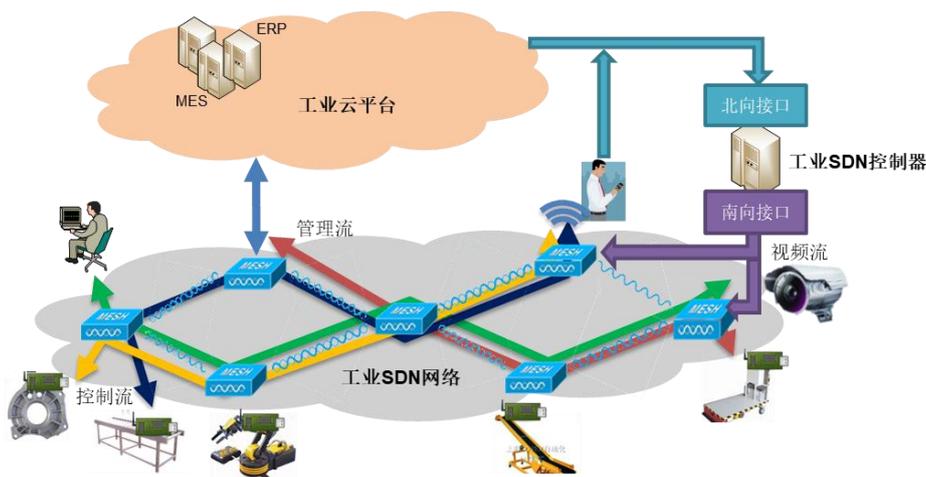


图 10 工厂内的软件定义网络

工业 SDN 的核心是通过软件定义的方式，对交换机等网络

设备进行管理和配置，同样也可以支持面向未来的 TSN 网络设备。工业 SDN 网络能够支持 IT 设备和 OT 设备的统一接入和灵活组网，为 IT 业务提供高带宽的传输保障，并为 OT 业务提供端到端实时性的保障。通过工业 SDN 网络，可以对 IT 和 OT 设备和流量进行统一的监控和管理。

● 主要特点和优势

工业 SDN 技术支持多种协议的 IT 和 OT 设备的统一接入。

目前的 IT 设备普遍适用标准的 IP 和以太网协议，OT 设备则使用经过修改的以太网协议，工业 SDN 技术能够通过可编程的交换机识别和区分这些协议，并按照这些协议规定方式转发数据报文，实现多种协议设备的统一接入。

工业 SDN 技术支持设备的灵活组网。当生产过程根据原料、订单或环境的变化发生改变时，设备之间的联网和通信关系也会发生改变。工业 SDN 使用软件定义的方式重新修改交换机中的转发规则，使之能够快速适应新的联网方式和通信关系，实现设备的灵活组网。

工业 SDN 技术同时满足 IT 和 OT 业务的传输需求。工厂内的 IT 业务一般需要比较高的带宽，而 OT 业务往往对实时性和可靠性有明确的要求。工业 SDN 集中式的控制器能够按照不同的传输需求，对整个网络中的资源进行统一调配，通过带宽限制和优先级配置等方式进行管理，满足不同业务的传输需求。

工业 SDN 技术有助于实现工厂全网的可视化管理。工业 SDN 构建了扁平化的工厂内网络架构，网络终端设备和网络转发设备能够被统一高效的管理起来，工业 SDN 控制器能够在线检测

设备入网情况；通过流量的跟踪，分析网络故障；通过异常流量监控，提高网络安全性；为整个 IT&OT 融合网络提供统一的拓扑管理、警报管理、性能管理、审计管理、报表管理等功能。

● 适用场景

工业 SDN 网络在能够保证工业控制业务实时性与可靠性的前提下，提高了网络的灵活性，适合在生产设备经常发生变化的场景中使用，比如个性化定制或批量定制生产。

在个性化定制或批量定制生产中，生产过程会根据订单的切换而发生变化，导致生产设备的管理和控制逻辑发生变化，进而影响设备之间的通信关系。与传统工业控制网络往往需要重新组态不同，工业 SDN 网络可以支持设备的灵活组网，重新组网之后的管理和控制业务同样可以得到相应的传输保障。同时，工业 SDN 网络具备网络的统一接入和管理能力，能够快速发现设备重新组网时出现的问题，指导现场人员快速进行处理。

（二）工厂外网络

1. 现状

由于工业不同行业和领域信息化发展水平不一，对工业化数据信息开发利用的广度、深度不尽相同，因此存在着工厂外网络建设和发展不均衡，部分工业企业仅申请了普通的互联网接入，部分工业企业的不同区域之间仍存在信息孤岛的现象。

2. 发展趋势

随着工业网络化、智能化的发展，工厂内的系统与应用逐

步向外扩展，工业互联网工厂外网络的服务呈现普遍化、精细化、灵活化趋势。

工厂外网络服务普遍化。传统工厂外网络主要提供商业信息的沟通，企业的信息系统也都部署在工厂内网络上，工厂外网络连接对象少，服务单一。随着云平台技术的发展，一些企业信息系统（如 ERP、CRM 等）正在外网化，越来越多 IT 软件也都基于互联网上云提供服务。随着工业产品和装备的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络开展。

工厂外网络服务精细化。工业互联网工厂外网络将实现全产业链、价值链的泛在互联，复杂多样的连接场景促进了服务的精细化发展。一方面，海量设备的连接需求，推动了工厂外移动网络的建设和广覆盖服务的快速发展；另一方面，企业上网需求向上云需求的转变，促使专线服务精细化，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细分服务。

工厂外网络服务灵活化。网络虚拟化、软件化的发展，提高网络服务的灵活性，使得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；大量移动通信网络技术的应用，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方式选择。

3. 企业专线

(1) 现状及趋势

工业实体的广域互联网业务需求主要包括以下几个方面：

- 工业实体的互联网接入需求
- 工业实体跨区域之间的互联与隔离需求
- 工业网络与混合云互联的需求
- 工业互联网对广域承载网络的差异化需求（QoS、安全/保护等）

当前满足以上需求,广泛使用的运营商专线业务主要包括：
MPLS VPN 专线、基于 OTN 的光网专线。

MPLS VPN 虚拟专网，为用户在公共 MPLS 网络上构建企业的虚拟专网，满足其不同城市（国际、国内）分支机构间安全、快速、可靠的工业化通信需求，并能够支持办公、数据、语音、图像等高质量、高可靠性要求的多媒体业务。

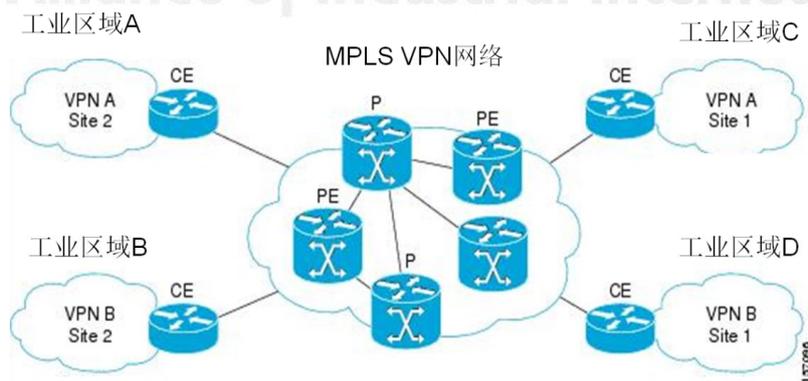


图 11 MPLS VPN 虚拟专网

MPLS VPN 专线基于 IP、高速标签转发技术实现，可以通过 QoS 位的设置，实现业务等级的区分及质量服务保障。

基于 OTN (Optical Transport Network) 的智能光网络是

大颗粒宽带业务传送的理想解决方案，如果企业外部专网的主要调度颗粒达到 Gb/s 量级，可以考虑优先采用 OTN 技术进行网络构建。

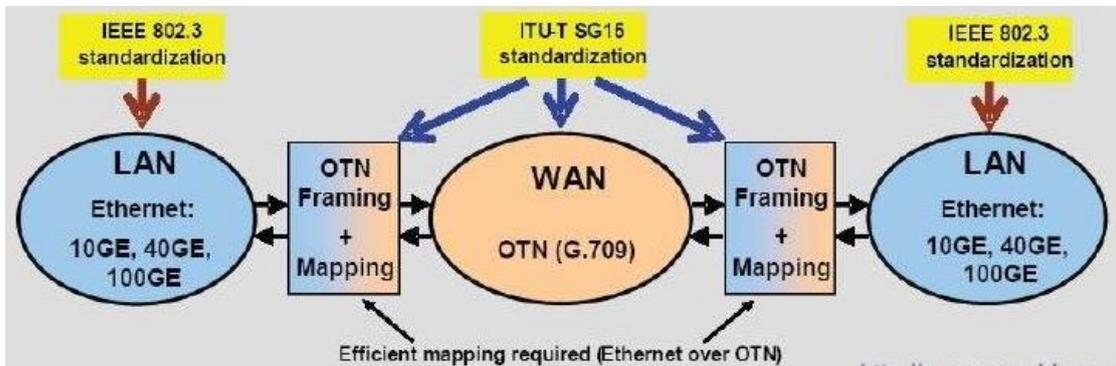


图 12 面向高带宽的 OTN 专网

随着企业网应用需求的增加，大型企业也有了大颗粒的电路调度需求，引入 OTN 技术可以实现大颗粒电路的调度灵活性。相比 MPLS VPN，OTN 技术可以实现端到端的物理专网，在大带宽承载（Gbps 以上）、对数据和业务的可靠性及安全性要求更高的特定企业，更具备吸引力。

此外，新兴的 SD-WAN、CloudVPN 等技术，可以与已有技术互补，整合各类专线资源，并通过统一的能力开放调用平台，对用户形成透明的、一体化的、并屏蔽部分技术复杂性的工厂外网解决方案，更经济的满足企业对专线业务快速变化的需求。

(2) 云化专线 CloudVPN

CloudVPN 云专线新一代企业专线网络解决方案，以云服务为中心重新定义了企业互联，将业务部署工作最大的进行简化。CloudVPN 可以将传统上以周或者月为单位的开通及调整 VPN 的时间，降低到分钟级，从而可提供便捷灵活的业务选择，实现即需即用的企业互联。

CloudVPN 云专线解决方案包括基础网络设备层、管理控制层、协同层以及用户界面。运营商专线接入能力封装为简单的 OpenAPI 接口，支持开发者应用通过直接调用接口实现企业专线服务、Internet 接入专线等业务的快速订购、开通、按需调整。

CloudVPN 专线网络按需实时开通和弹性扩容：支持工业环境中远程教育、数据互通、视频会议等专线网络带宽的实时调整。

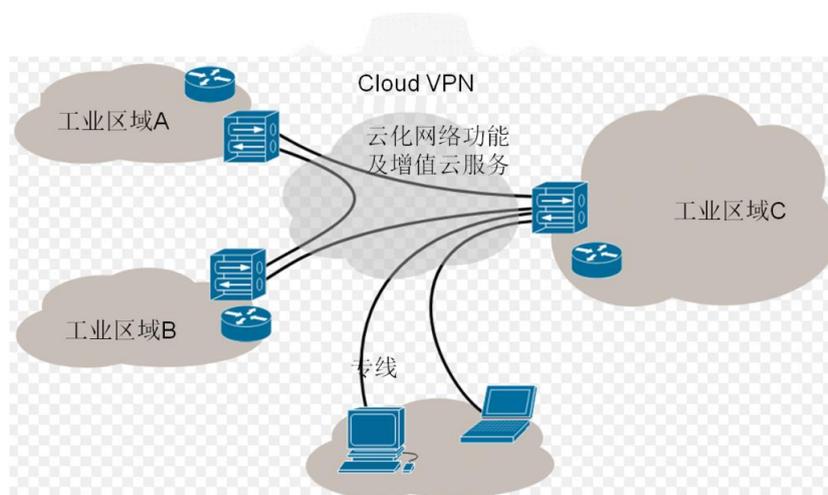


图 13 面向即需即用的 CloudVPN 技术

(3) 软件定义的广域网 SD-WAN

SD-WAN 是一种将新型 SDN 技术，应用于广域网场景所形成的一种外网互联服务。这种服务用于连接广阔地理范畴上的企业网络、数据中心、互联网应用及云服务。

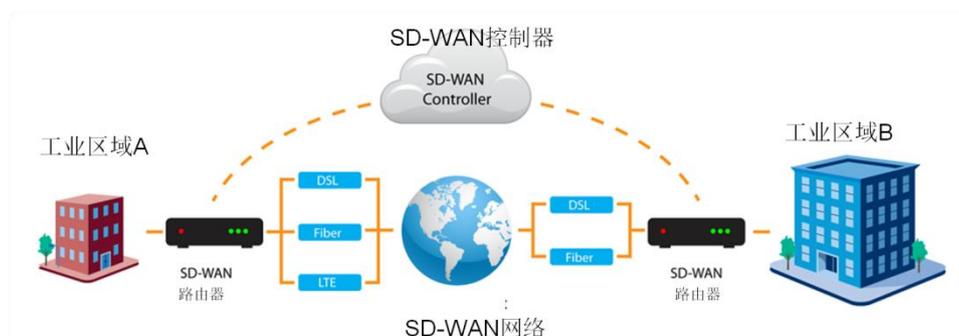


图 14 基于 SD-WAN 技术的企业专线

SD-WAN 的技术特点包括:

- SD-WAN 将硬件网络的控制能力通过软件方式进行云化，从而支持用户可感知的网络能力开放；
- 引入 SD-WAN 技术，降低了用户侧广域网运营维护的复杂度和技术门槛；
- SD-WAN 技术具备高度自助服务能力，用户可自助开通、修改、调整专网互联的参数。SD-WAN 的核心理念是用户的组网需求与组网意向，可以通过通信服务商提供的集中控制编排器进行翻译并实现管理，屏蔽了底层网络技术的复杂性；
- SD-WAN 支持网络随选（可以采用包括互联网在内的多种不同方式进行接入，其他接入方式例如 OTN、其他专线等），接入设备一般在用户侧，业务区分点在用户侧；支持用户通过自助界面进行灵活业务调整。

SD-WAN 技术具备网络随选和运维灵活的优点，但由于其虚拟专网可能基于互联网接入实现，导致存在受到网络攻击和数据安全方面的一些隐患，需要通过加密协议实现端到端的加密。

4. 移动通信网络

随着工业互联网的发展，工业生产过程已不仅仅局限在工厂内，开始逐步通过工厂外网络，将工业生产与互联网业务模式、工厂和产品及客户之间进行深度融合。在一些生产过程中，工厂与厂外设备、传感器间的通信需求也大幅增长。

这些场景中，移动通信网络由于广覆盖、高速率、网络可

靠性高和产业链成熟等特点，已经越来越多的用于工业生产中，极大拓展了传统工业网络的内涵和外延，为工业互联网的发展提供了良好基础。

(1) LTE

● 技术介绍

LTE 是新一代的宽带移动通信技术，提供了更高的带宽和更快的传输速率。LTE 网络可以保证各种业务服务质量，网络更加安全可靠。

LTE 网络架构简化了网络架构，降低了系统复杂度、实现了全 IP 网络架构。

LTE 网络可以提供丰富的无线多媒体通信服务，包括语音、数据、视频等业务，让用户可以在任何时间、任何地点接入到系统中，实现用户的永远在线。

● 主要特点和优势

LTE 已具备从终端、系统及核心网较完善的商用产业链布局。LTE 是全球唯一主流的 4G 标准，全球 200 个国家和地区的运营商提供 LTE 网络服务，实现网络无缝漫游，具备成熟的产业链支持。

LTE 网络可以用较少的基站覆盖更广的区域，单站的覆盖范围最多可支持十几公里甚至几十公里。

LTE 网络具有时延小、可靠性高的特点，满足工业场景中高速数据传输要求，可以通过 LTE 网络实现工厂间的视频传输、数据传输等业务。与传统的无线网桥相比，LTE 网络在覆盖范围、

传输带宽和移动的支持等方面均有明显的优势。

● 适用场景

以 LTE 网络为代表的移动通信网络，可满足工业互联网工厂外网络普遍覆盖和高速传输的需求，实现 IT 系统与互联网的融合、企业专网与互联网的融合等。

LTE 网络可以提供高可性、大带宽、低时延的连接，满足工厂与公有云之间的数据传输，此外，工厂间的信息系统，如 CRM、ERP 等，甚至 SCADA 等也可以通过 LTE 网络实现互联。

(2) NB-IoT

● 技术介绍

NB-IoT 网络基于 LTE 核心网网络架构，通过对 LTE 网络架构的优化满足了物联网应用中大连接、小数据、低功耗、低成本、深度覆盖等需求。

为了提升小数据的传输效率，NB-IoT 系统对现有 LTE 处理流程进行了增强，支持两种优化的小数据传输方案，可以使用控制信令来传输 IP 数据或非 IP 数据，也可以通过简化信令过程快速重建连接来传输数据。

● 主要特点和优势

NB-IoT 系统，是 3GPP 根据物联网业务的特点，对 LTE 技术进行优化或简化而来，以达到降低系统复杂度和终端功耗，节省开销以及支持覆盖增强和更有效的小数据传输等一系列目的。

NB-IoT 系统主要对现有 LTE 系统的接口和功能进行了优化，并引入了业务能力开放单元优化小数据传输和支持非 IP 数据传

输，根据物联网业务的特点，对 LTE 的机制进行了优化，增强了 NB-IoT 系统的安全控制。

NB-IoT 技术实现了低功耗设备在广域网的蜂窝数据连接，实现了对待机时间和覆盖有较高要求设备的高效连接。具有覆盖广、连接多、速率低、成本低、功耗少、架构优等特点。

● 适用场景

在工业互联网中，及时了解工厂外设备或者产品的运行情况至关重要。利用 NB-IoT 技术的低功耗和广覆盖特性，工厂可以收集工厂外设备或者产品整个生命周期的操作情况、运行状态、工况状态、环境参数，通过进一步分析，实现对制造设备的实时监控、故障检测和诊断、预测性维护、整体设备效率、质量检测、能耗管理、人员安全监管等，从而可以对整个生产过程进行优化，还可以满足工厂对服务化转型升级的需求。

(3) 5G

● 技术介绍

3GPP 的 5G 定义了 3 类应用场景：增强型移动宽带（eMBB）、大规模机器类通信（mMTC）、高可靠低时延通信（uRLLC）。其中，eMBB 场景，可支撑工业互联网逐渐兴起的大流量业务，如虚拟工厂和高清视频远程维护等，大规模机器通信场景主要针对海量的现场设备通信。

5G 网络是控制和转发分离的网络，转发面更专注于业务数据的高效路由转发，具有简单、稳定和高性能等特性，以满足未来海量移动流量的转发需求。而控制面则采用逻辑集中的方

式，实现统一的策略控制，保证灵活的流量调度和连接管理。集中部署的控制面通过移动流控制接口实现对转发面的可编程控制。

5G 核心网支持低时延、大容量和高速率的各种业务，核心网转发平面进一步简化下沉，同时将业务存储和计算能力从网络中心下移到网络边缘，以支持高流量和低时延的业务要求，以及灵活均衡的流量负载调度功能。

● 主要特点和优势

5G 网络是基于控制转发分离和控制功能重构的新型网络，提高了接入网在面向 5G 复杂场景下的整体接入性能，简化的核心网结构，提供灵活高效的控制转发功能，支持高智能运营，开放网络能力，提升全网整体服务水平。

控制面和转发面的分离，使网络架构更加扁平化，网关设备可采用分布式的部署方式，从而有效的降低业务的传输时延。

多样化的业务场景对 5G 网络有多样化的性能要求和功能要求。5G 网络具备向业务场景适配的能力，针对每种 5G 业务场景提供恰到好处的网络控制功能和性能保证，实现按需组网的目标。

● 适用场景

5G 为工业互联网提供更可靠、更开放、按需定制的网络。5G 网络将更好地支撑工业互联网逐渐兴起的大流量业务，如虚拟工厂和高清视频远程维护等业务。5G 网络还支持工厂内、外的大量设备监控，如各类设备的远程监控和控制、无线视频监控的远程控制，远程监测并上报环境参数和控制机械的数据，满足工业互联网应用需求。

三、工业互联网数据互通

(一) 现状与趋势

据不完全统计，目前国际上现存的总线/工业以太网协议数量高达 40 余种。还存在一些自动化控制企业，直接采用私有协议实现全系列工业设备的信息交互。在这样的产业生态下，形成了一个竖井型的业务系统，同一个系统内的数据可以一定程度的互通，但跨系统的数据互通非常困难。

为了解决数据互通的问题，很多行业企业已纷纷在自己的业务范围内，为用户提供一揽子解决方案，可以实现数据互通。但这种方式仍然只是将一个个小的竖井系统变成了稍大型竖井系统，并没有从根本上解决数据互通的问题。而且，用户的所有业务系统，也很难全部依赖于一两家供应商的产品来完成。

随着工业互联网的发展，企业对数据互通的需求越来越强烈，呈现以下趋势。

首先是**实现信息的标准化**。在传统的工业控制系统中，为了满足最基本的工艺管理需求，数据被固化在明确的因果关系内。例如 PLC 控制过程，有明确固定的处理对象，数据信息只会在固定的设备间流动。而工业互联网对数据处理的主体更广泛，例如采用大数据分析进行设备故障诊断，需要跨系统的对数据进行理解和集成，这就要求数据的存储与传输，更加的通用化与标准化。

其次是**加强与云的连接**。借助云平台，不仅可以利用专家经验共享、智能决策库，提高运维领域的装备管理水平，降低

运营成本，还可以通过数据集的切分和规律查找，帮助实现人员投入及控制过程的节能提效；不仅可以利用大数据分析结果使能制造企业提供针对性营销、定向研发、智能维保等服务，还可以预测设备未来可能出现故障的时间，提供避免风险的解决方案，消除设备故障停机给客户带来的损失。

最后是**强调与现场级设备的互通**。传统的工业生产过程中，设备与设备往往独立操作。而工业互联网智能工厂的核心，就是要打通现场设备层，将智能装备通过通信技术有机连接起来，实现企业内资源的垂直整合。设备与设备之间的沟通与互联已成大势，未来设备与设备之间或者物与物之间的互通互联的数量将远远超过人之间的互联。

因此，为了满足数据互通的需求，业界进行了一系列建立统一数据互通方式的努力，希望能使用一整套接口、属性和方法的标准集，提供工业互联网工厂系统中各系统、各单元数据的无缝集成。

（二）面向工业现场设备的 OPC UA

● 技术介绍

在现实的智慧工厂建设时，数据互通却是不可忽略的第一个障碍。特别在工业现场的数据采集、传输与运营中，我们需要对运行的机器状态、生产能耗、质量以及生产相关参数进行采集，不管上层架构如何能够进行智能分析与优化，如果缺乏统一的标准与信息模型，都会遇到无米之炊的困境。

OPC UA（OPC 统一架构）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。OPC UA 的目的是为工厂车间和企业之间的数据和信息传递提供一个与平台无关的互操作性标准。

面对工厂中各种生产设备异构接口以及信息模型异构的问题，OPC UA 通过地址空间建模以及面向服务的架构为搭建智能工厂提供了解决方案。OPC UA 可以促进企业纵向集成，解决企业内部的信息孤岛，在实现信息网络与物理设备之间的连通方面具有十分广阔的应用前景。

目前 OPC UA 技术还正在积极考虑与 TSN 等技术进行结合，提高数据互联的实时性和可靠性，向现场设备端延伸。

● 特点和优势

OPC UA 作为工业 4.0 参考架构模型中，唯一推荐的通信层实现方法，可以解决智能设备研发及使用过程中面临的多数据源互通的集成问题。OPC UA 的基础是传输机制和数据建模，即如何兼容各种设备异构的接口以及通讯协议，以及如何统一异构设备之间的信息模型。

OPC UA 传输机制：解决复杂设备的互联互通。设备之间之所以难以实现互联互通，是因为数据总是在不同的系统、不同的语言、不同的通讯协议之间流转。OPC UA 提供了一套安全、可靠的信息交换技术，独立于生产或提供具体应用程序的供应商和系统供应商。OPC UA 的通讯独立于具体的编程语言，也独立于应用程序运行的操作系统，是一种不与专有技术或供应商绑定的开放式标准。OPC UA 在整体上，使得在工厂的各个环节

的横向与纵向数据实现了透明交互，并且配置效率更高，程序与应用模块化更强，使得工厂组织更为便利，即使面对复杂的变化，也可以实现快速的切换。

OPC UA 信息模型：解决面向生产过程的信息模型异构。数据收集到了，如何使用呢？例如，当我们想实现机器人与数控机床的协同工作时，首先需要清楚，二者间需要哪些数据来保证他们之间的工作一致性。OPC UA 信息模型从应用层提供了一种解决方案。OPC UA 提供了生产过程中的数据及其语义，利用服务为其提供标准的接口，实现服务与设备的解耦。由于建立在一个基本模型上，OPC UA 信息模型具有很高的灵活性，包括标准化的信息模型或者供应商特有的信息模型，不仅数据以互操作形式交互，而且还具有明确被定义的语义。

● 适用场景

工业互联网需要在企业内部建立各环节信息的无缝链接，沿信息流，实现底层设备、控制层、MES 至 ERP 的纵向集成。纵向集成主要解决企业内部的信息孤岛问题，解决信息网络与物理设备之间的联通问题。

如图 15 所示，信息通过级联的 OPC UA 组件，安全、可靠地从生产层传输到 ERP 系统中。现场设备层的嵌入式 OPC UA 服务器和企业层中 ERP 系统内的集成式 OPC UA 客户端，直接相互连接。同时 OPC UA 可以将历史数据上传至云端，实现数据的远端管理。从而构建了一个具有工业 4.0 能力的系统或一个独立于存储数据位置的信息物理系统（CPS）。OPC UA 提供了一个具有无与伦比的统一性、跨层的安全性和可扩展的架构，从而确

保了信息的双向联通。

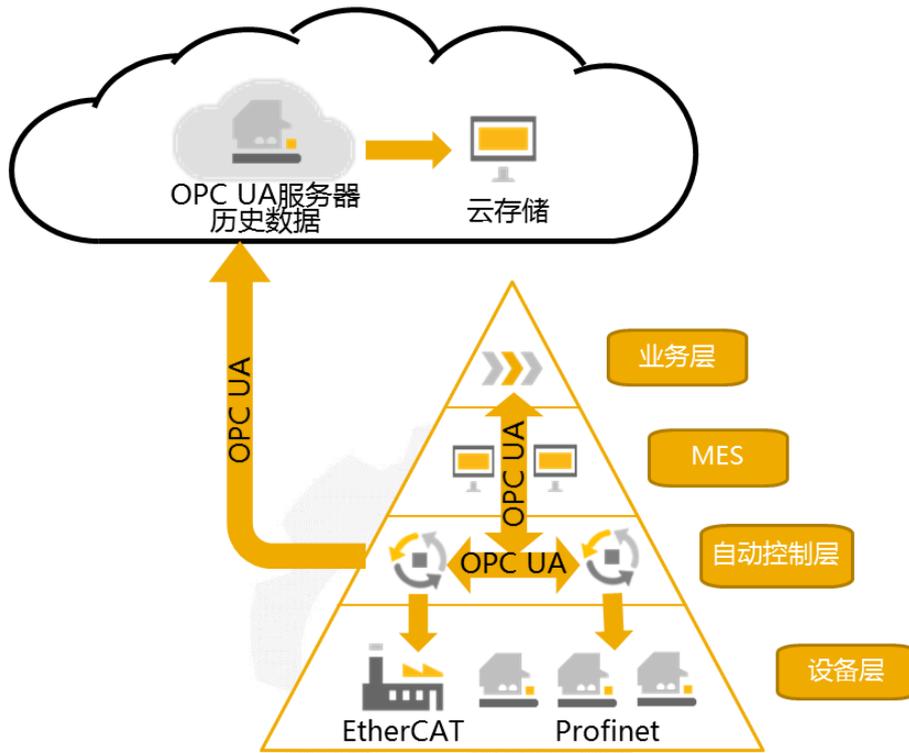


图 15 OPC UA 部署

(三) 面向轻量级设备的 LightweightM2M

● 技术介绍

LightweightM2M (简称 LwM2M), 是一种轻量级的物联网设备管理协议, 由国际标准组织 OMA (Open Mobile Alliance) 制定。协议定义了终端设备和物联网服务平台/业务应用之间的接口标准, 尤其适合工业领域的各种计量设备或仪表。此类设备通常是资源非常受限的嵌入式终端, 无 UI, 计算能力和网络通信能力都有限, 而且数量巨大, 种类众多, 尤其需要一种通用的轻量级设备管理协议。

LwM2M 协议架构被设计为 Client/Server 模式, 物联网服务平台/业务应用实现 LwM2M 服务器功能, LwM2M 客户端通常被部

署于受限制的物联网设备之中，负责上报信息及执行服务器的命令。

LwM2M 协议定义了一系列通用的设备管理和 Service 管理的操作，例如：设备启动、恢复出厂设置、设备配置、固件/软件升级、设备诊断、设备锁定和数据擦除、远程命令的下发执行、连接管理等。

LwM2M 提供了请求/响应和订阅/发布两种业务交互机制，支持多样化数据上报方式：使用请求/响应机制，执行如平台读取设备数据、下发执行命令、设置设备参数等操作；使用订阅/发布机制，实现设备数据采用周期性或阈值触发的方式，进行自动上报。

LwM2M 将设备的能力属性，抽象为开放的对象模型，支持对于特定设备定义可扩展的管理对象。同时，LwM2M 还面向整个物联网产业，提供了“对象注册表”的方式，支持对第三方扩展的对象进行注册和维护。

LwM2M 属于应用层协议，基于由 IETF 所制定的 CoAP 协议承载，可进行 DTLS 安全保护，通过 UDP/IP 或 SMS 传送。

LwM2M 作为一种轻量级的物联网设备管理协议，当前已被业界广泛采用，例如微软 Azure 平台、华为 OceanConnect 平台，以及 ARM、Samsung 的物联网芯片等。

● 主要特点和优势

LwM2M 提供了一种通用、开放的轻量级设备管理标准。

轻量级，对设备硬件要求低，功耗小。相比传统基于 TCP 的连接协议，LwM2M 在传输层基于 UDP 协议，协议业务交互机制

简洁，每种业务交互需要的消息交互数都尽量缩减到最少。LwM2M 消息载荷格式简洁，且大多数业务交互流程都是由平台侧发起，可以最大限度降低终端设备功耗。

易于系统集成。LwM2M 协议采用了在 web 通信中最常用的 RESTful 架构，所有对设备的访问均被抽象为对资源的 CRUD 操作。LwM2M 协议已有成熟的开源项目，开源 License 商业友好，适合快速集成。

强大的对象和资源模型。LwM2M 使用了三层树形结构的数据模型：对象 (Objects)、对象实例 (Object Instance)、资源 (Resource)。LwM2M 提供了通用的设备管理对象，如 Access Control、Device、Firmware Update、Location、Connectivity Monitoring 等，支持多样化格式用于描述设备属性，如 Plain text、JSON、TLV、opaque 等。

协议设计开放，易于拓展。LwM2M 标准协议允许设备厂商或组织根据自己的设备属性，设计新的对象模型进行扩展，并提供了方便的对象注册工具，支持将自定义对象注册为标准。目前，由第三方注册的对象，已有一百多个，诸如 Digital Input、Digital Output、Analogue Input、Analogue Output、Temperature Sensor、Actuation、Light Control 等大量的工业领域常用设备的对象模型。现有很多工业现场协议定义的数据模型，也很容易移植和注册到 LwM2M 支持的对象列表中。

● 适用场景

未来工厂中，将各环节设备进行全面连接，支撑工业用户对设计、生产和运维等过程进行全生命周期管理，从而实现降

低成本、提高效率、保障安全的目标，正逐步形成趋势。

为此，当前工业现场中正越来越多使用各种计量设备或仪表，这些设备功能相对单一（如可能仅仅为了上报数据或者示数），对设备硬件成本和功耗敏感。此外，工业企业面临生产服务化的转型，未来的出场设备，可能广泛采用移动网络连接，对于通信流量敏感。LwM2M 消息交互过程简洁，数据格式精炼，适合资源受限性的轻量级设备，连接到平台。

在未来工厂，LwM2M 协议可以广泛应用在能耗监控、环境检测、物流跟踪、简单控制等生产辅助环节的受限设备上，完成进行数据采集、检测值上报、设备升级维护等。各领域的设备，都能方便快速的采用 LwM2M 集成到平台，进行数据汇聚及互通，从而使能全流程、全方位的运营优化。

（四）oneM2M

● 技术介绍

oneM2M 是由全球 8 家 ICT 行业领先的标准制定组织（中国 CCSA、欧洲 ETSI、北美 TIA 和 ATIS 等）和 6 家行业联盟（宽带论坛 BBF、健康联盟 Continua、家庭网关组织 HGI 以及开放移动联盟 OMA 等）联合制定的物联网标准。oneM2M 致力于不同行业及标准之间协作和沟通，例如工业、车联网、健康医疗、智慧城市、家居等，主要目标是通过定义通用的业务能力规范，实现不同协议、不同类型 IoT 设备和应用间的跨行业的连接和互通。

oneM2M 定义了支持设备管理、数据模型和连接控制等在内

的业务体系架构，及基于该体系架构的开放接口和基于语义的互操作能力。

在 oneM2M 中，端到端物联网业务被抽象为层次化模型（见图 16），分别包含：应用实体 AE（Application Entity）、公共业务实体 CSE（Common Service Entity）以及网络业务实体 NSE（Network Service Entity）三层。oneM2M 聚焦于公共业务层与应用层。

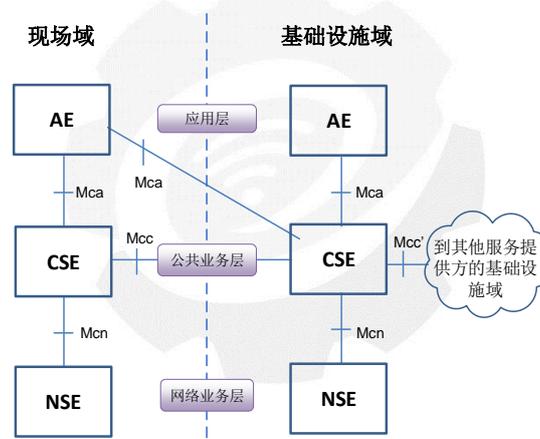


图 16 oneM2M 功能架构

AE 是应用层中实现业务逻辑的实体，例如 AE 可以是工业远程监控、故障诊断、车队跟踪应用、功率计量应用等。CSE 部署在平台或者网关，向应用（即 AE）提供访问能力。CSE 之间可以通过 Mcc 接口进行信息交互。

oneM2M 标准通过抽取不同 IoT 行业和场景中的公共部分，定义了 12 个 CSE 公共能力部件，包括：数据管理和存储、设备管理、发现、群组管理、位置、注册、安全等。

● 主要特点和优势

便于应用开发。oneM2M 标准利用 CSE 提供的统一接口，可以屏蔽设备通信方式间的差异；在 AE 与 CSE 之间，CSE 与 CSE 之

间，采用在 Web 中广泛采用的 Restful API 访问。底层支持多样化的传输协议，如 HTTP、CoAP、MQTT 或 WebSocket，适配各行业的需求。

便于数据共享。 oneM2M 基于语义 web 的方法，将工业互联网数据建模为标准的、机器可识别、可互操作的方式，实现跨设备、跨应用、跨行业的信息共享，从而支撑工业互联网在全面数据分析和业务逻辑驱动方面的需求，例如柔性制造、预测性维护等。

强调跨行业连接和数据的互通性。 oneM2M 通过定义统一的资源模型以及标准协议互通技术，实现非 oneM2M 设备服务到 oneM2M 资源的双向映射。oneM2M 引入了 14 项跨多行业的互操作规范，例如 OMA LwM2M, OCF, OSGi, OPC-UA, Modbus, 3GPP, DDS, W3C WoT 等，实现对汽车、医疗、智慧城市、智能家居和工业领域的使能。

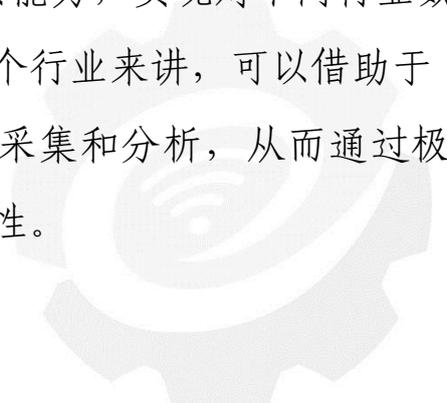
● 适用场景

在工业互联网场景中，如柔性制造、C2M (Customer-to-Manufacturing)、Digital Thread 等，除了工厂内控制系统设备间的互联互通外，还要求工厂内不同系统间乃至不同工厂间、产业链上下游的互通。

例如在智能电网的场景中，因为未来用电量无法预测性，造成发电企业很难预估发电量，这样容易造成用电高峰到来时的发电不足，或者因用电量不足造成的电网过载。跨行业的数据互通可以很有效的解决这一问题。通过收集大量用电行业的数据例如充电汽车的行驶情况、制造企业的排产情况、智能家

居的供热情况、天气数据等，可以根据这些跨行业的数据分析未来一段时间内的用电量，例如电动车充电、家庭取暖、制造业大规模集中生产或新增产线，进而预测应有的发电量。避免不足和过载情况的发生。

oneM2M 通过定义统一的信息模型，以及不同行业协议和信息到 oneM2M 的映射，实现跨行业的互通。应用可以通过调用 oneM2M 提供的公共能力，实现对不同行业数据的访问、查询、订阅等业务。对单个行业来讲，可以借助于 oneM2M 实现对周边相关跨行业的数据采集和分析，从而通过极大的丰富该行业可以提供的业务多样性。



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

四、 适配边缘计算架构的网络连接

(一) 边缘计算在工业网络中的位置

工业互联网早期的架构，一般考虑云平台统一部署，对现场设备和机器都进行集中控制。但由于工业领域对高可靠、低时延、确定性以及业务安全性等的实际需求，当前又呈现计算能力向边缘分布的发展趋势。

未来的工业网络中，业务不仅仅只部署于云端，很可能在工业现场和云端均有部署。工业现场设备和机器，会在网络边缘产生可观的上行数据，而处于整个网络靠近工业现场的边缘网络设备，就要求具备开放的数据处理能力，以及灵活的业务承载转发能力。

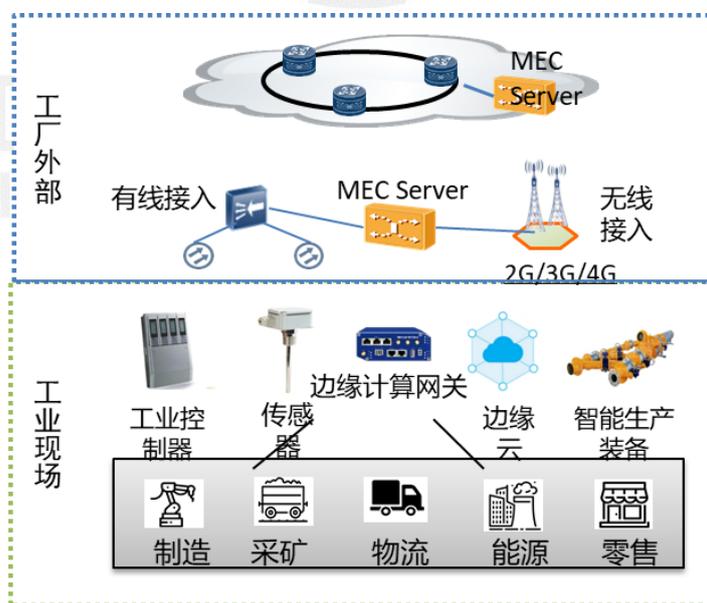


图 17 边缘计算在工业互联网中的位置

如图 17 所示，工业现场中的边缘计算所部署的位置，是工厂设备接入网络的第一个节点。边缘计算的载体设备可以是工业控制器、传感器、边缘计算网关、边缘云和智能生产装备等

各类设备，其应用场景也不限于制造业，而是可以广泛应用于采矿、物流、能源、零售等各大垂直行业中。将业务部署到工业现场中的边缘设备，有助于实现数据的实时处理，以及从现场设备节点到云端中心控制节点的网络端到端的保障。

不同于工业现场的边缘计算，移动网边缘计算 MEC，在工厂外网络中，靠近工厂的网络边缘，提供 IT 服务环境以及云计算能力，旨在进一步减小网络时延，提高网络服务效率，满足工业现场对网络的低时延、安全隔离、现场服务等要求。MEC 的部署位置，即可与宏基站或者厂区室内站共址，避免绕经广域网络，实现工厂在哪，网络和计算服务在哪的本地就近服务。

(二) 边缘计算与网络连接的关系

1. 垂直行业现场的边缘计算

边缘计算构建丰富多样的工业现场网络连接能力。工业互联网网络的边缘侧，面向海量异构的工业设备、终端设备接入：这些网络大部分情况下采用不同的网络协议，支持需求各异的功能或应用；同时由于场景不同，设备终端可能通过多种不同形态的物理接口接入网络。边缘计算通过提供强大的通信、计算和存储能力，在保障工业现场各异的物理接入的同时，可以实现灵活的协议转换和互通，从而提供丰富多样的现场接入能力，为用户提供统一的网络和业务数据接入能力。

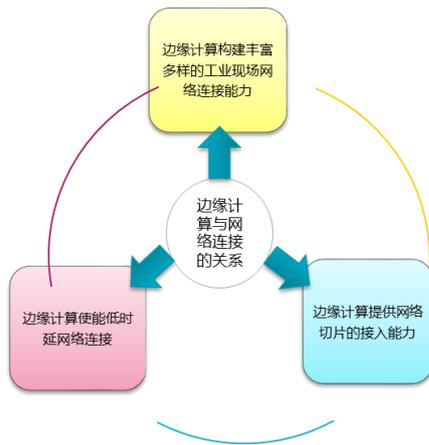


图 18 边缘计算架构对网络的要求

边缘计算使能低时延网络连接。边缘计算能够为网络连接提供超低时延和确定性时延的承载能力。工业现场业务往往对网络实时性要求非常高，部分检测和控制场景要求毫秒级甚至微秒级时延。如果检测和控制逻辑都置于云端，则不能满足业务的低时延需求。因此，在越来越多的工业场景中，边缘设备进行快速、短周期的数据分析和轻量级的计算显得尤为重要。边缘计算得益于其部署位置和业务处理能力，能够更好地支撑本地业务的智能化处理与执行，以支持业务的低时延转发，保证工业现场网络时延指标满足业务要求。

边缘计算提供网络切片的接入能力。很多工业场景，需要网络能够提供定制化的、独立的网络能力，以满足用户诸如低时延、高带宽、海量连接和高安全性等不同需求。切片将网络存储、计算和连接等资源分割成多个独立而又隔离的网络平面，为差异化的业务实现定制化的服务。处于工业现场的边缘计算节点，可以把工业内网中需要连接外网的业务进行标识和分类，与不同的外网切片进行映射，为差异化的业务实现定制化的切片服务。与网络切片结合，边缘计算既能够充分发挥其高实时

性、安全性等优势，又可以借助网络切片的专用资源，为工业互联网提供端到端的网络连接和业务承载保证。

2. 移动边缘计算

移动边缘计算 MEC，为工业企业提供了云端服务外的另一种近端服务，通过该连接形态，公众网络运营商可以对企业提供如下三种服务：

- **低时延专网保障服务：**在未来 5G 网络中，空口性能大幅提升，结合移动网络切片技术，可为工业现场提供端到端低时延安全隔离的专网保障服务；
- **数据本地分流服务：**即工业现场制造设备上采集的数据通过无线网络直接传递到企业本地平台，由企业实现就近逻辑处理或者工业数据的集中解析、适配、存储和策略制定，并能够在毫秒级时延内反馈给执行系统，实现在工业现场闭环控制等；
- **现场高带宽的监控和分析服务：**即在工业现场为生产设备提供近端网络服务的同时，也可以为厂区内基于 AR 现场质量监控、视频监控等提供高带宽服务。

移动网 MEC 适合应用于具有较高计算需求、安全隔离需求以及工业现场服务需求的场景，其在工业领域典型的应用场景如：码头自动化调度、仓储自动化、工厂终端和平台高密度协同、智慧园区管理等。

五、部署与演进

（一）总体原则

工业互联网的业务发展，对网络基础设施提出了更高的要求 and 需求。总体上，网络的部署与演进，需要匹配企业业务系统的部署与演进，需要遵循以下原则：

- **网络作为基础设施，需要与业务系统统一规划，同时需要考虑未来的演进。**一方面，网络为业务系统提供支撑；另一方面，网络并不依附于特定的业务系统，即一个网络可以为多个业务系统提供支撑，如一张覆盖厂区的无线网络，同时为安全巡检、设备监测、视频监控等业务应用提供支撑；
- **网络部署需要整体规划，避免传统的网络物理隔离及碎片化。**互联互通是工业互联网的基本要求，为了避免形成新的孤岛以及技术绑定，在进行网络规划时应考虑，在条件允许的情况下，尽量采用面向未来的、通用的网络连接技术；
- **工厂内、外网络需要统一协调，但可以技术解耦，分开演进。**不管是工厂内还是工厂外网络，都是为了端到端的支撑企业业务系统。不管是在企业业务系统上云的场景，还是总部集中部署的数据中心为所有分支机构提供服务的场景，都需要企业内外网络的统一协调。

（二）工厂内网

具体而言，工厂内网络，需要解决的是怎么建，怎么管的问题。

首先，建立工厂内骨干网络，搭建网络互联架构，使得各业务网络与数据中心，及各业务网络间实现互联互通。伴随着分散在各网络中的企业业务系统服务器，集中部署到企业数据中心，工厂内网络架构也需要进行调整。

工厂内网的难点，在于工厂内边缘网络的演进，需要结合实际情况，制定针对性策略。总体而言，主要有两种模式：

新建模式：在已有网络难以满足新业务需求时，**新建支撑新业务流程的网络以及相关设备**，例如在已有的工业控制网络与办公网络的基础上，新增安全监控网络；再比如，为了更深入的分析质量问题根因，需要更全面采集生产现场数据及动态调优，需要部署新的监测设备、传感设备、执行设备等，已有的控制网络可能难以满足需求，此时可以新建一个叠加网络连接新部署的设备。再比如，对在制品通过内嵌通信模块或附加标签等方式，并与工业系统的进行信息交互。

升级模式：对已有设备进行升级，相应的对已有网络进行升级。这种模式下主要问题是如何处理设备升级和网络升级二者间的关系。

对于现有工业装备或装置，如机床、产线等，如果当前网络连接技术能够满足业务需求，主要问题在于打破数据孤岛，可以采用在边缘网络部署网关，将传统的网络连接技术，转接

为通过的网络连接技术，连接到工厂骨干网络。如果当前的网络连接技术已不能满足业务需求的，如已有的总线速率难以满足预测性维护的速率需求时，将设备的通信接口进行改造，并相应将网络升级为以太网。此外，在对生产线设备进行升级换代，可根据新产线设备支持的网络接口，对网络进行升级。

进行网络升级时，选用何种网络技术，需要结合具体场景考虑，如通信需求、现场布线、电源供应等，并充分考虑工厂内网络的融合、开放、灵活等趋势：如针对生产装备或装置，可以利用现有已部署的双绞线，升级为单对双绞线以太网，也可以考虑增加无线接口，部署无线网络；针对监测设备，如果实时性要求不高，可以采用无线技术。

升级模式下，对设备的升级和网络的升级应该统一考虑：在设备升级时，应考虑新设备对更面向未来的网络连接技术的支持；相应的，根据业务需求，及设备支持的接口情况，重新部署网络。

不管是部署新的网络，还是对已有网络进行升级替换时，都需要考虑网络设备对 SDN 特性的支持。

（三）工厂外网

工厂外网络，通常基于公众通信网络，工业企业面临的是怎么用的问题。这主要有两方面：

随着工业互联网的发展，智能工厂与工厂外实体的联系日益密切，尤其是当工厂的部分业务系统上云后，工业企业应该对上云专线更加重视。

此外，出厂设备与工厂的连接，是服务化转型的基础，当前的蜂窝移动技术，已具备覆盖完善，产业链成熟等优点。对于出厂设备的上网连接，工业企业可以优先考虑采用移动蜂窝技术。



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