



专题：先进数据网络

未来工业互联网发展的技术需求

王俊文

(上海诺基亚贝尔股份有限公司, 上海 201206)

摘要：首先扩大了研究范围，对未来互联网包括 5G 时代和后 5G 时代的发展趋势、前瞻应用、技术需求等方面进行了分析，提出未来互联网的总体架构和关键技术。随后聚焦了 5G 时代的工业互联网，分析了工业互联网架构、工业边缘云、确定性时延工业连接、工业互联网行业云平台、数字化转型、安全、标识与解析等核心技术需求。

关键词：工业互联网行业云平台；工业边缘云；全息传送；确定性时延传送；触觉互联网；可信网络安全；空地一体化互联网

中图分类号： TN915

文献标识码： A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019201

Technical requirement of future industrial internet

WANG Junwen

Nokia Shanghai Bell Co., Ltd., Shanghai 201206, China

Abstract: Firstly, the scope of research was expanded, the development trend of future internet and forward-looking application were analyzed, including the 5G era and beyond 5G era, and the overall architecture of future internet with its key technologies was proposed. Then the technical requirement for industrial internet in the 5G era was researched, including future industrial internet architecture, industrial edge cloud, deterministic delay industrial connection, future industrial internet cloud platform, digital transformation, network security, industrial identification and resolution.

Key words: industrial internet cloud platform, industrial edge cloud, holographic transmission, deterministic delay transmission, tactile internet, trusted network security, convergence of terrestrial and space network

1 引言

首先扩大了研究范围，分析了 2020—2030 年的 5G 时代、2030—2035 年的网络以及网络 5.0(第五代数据网)时代的未来互联网发展。现有互联网主要是消费互联网，连接对象是人，存在几十

亿的连接空间；性能需求主要来自于人的感官敏感度，其发展高峰是移动消费互联网，俗称“互联网上半场”，新用户发展红利基本被挖掘；行业互联网是互联网技术(主要是 ICT(information and communication technology)技术)与传统行业运营技术(operational technology, OT)融合运用，

收稿日期：2019-06-15；修回日期：2019-07-30

广泛部署传感器, 连接对象从人扩展到实体物体以及虚拟的如数字双生、内容、服务等, 连接空间扩大到千亿甚至万亿, 性能需求包括时延、抖动、带宽、并发数据流协同、可靠性、网络安全、数据隐私和地址标识等多个纬度, 对应不同行业不同应用场景的技术需求差异巨大。行业互联网被称为“互联网下半场”, 未来发展空间广阔。工业互联网是行业互联网的一部分, 包含工业制造行业、能源行业(采煤、电厂、新能源、电网、行业内铁路和港口)、车联网行业等诸多典型行业。未来工业互联网发展的技术需求及对应的网络架构和核心技术是本文聚焦研究的重点。

本文分析了未来工业互联网的架构设计、工业边缘云、确定性时延工业连接、工业互联网行业云平台、数字化转型、网络切片在内的技术需求及核心技术。其中, 最引人注目的是未来工业连接的超高性能要求, 通过多层边缘计算的快速广泛部署提升工业现场闭环控制性能, 并与传统工业 OT 系统加速融合, 同时行业工业云平台以基于大数据的人工智能算法来实现创新, 以推动行业降本增效新动能并孵化行业新生态。此外, 工业互联网连接空间巨大, 创新工业连接标识系统、加强数据隐私保护、提升网络安全也是关键的技术需求。

2 未来互联网发展的技术需求

本文从未来的工业互联网发展的技术需求方面进行展望与深入探讨, 获得的见解主要来自对工业制造、能源以及车联网 3 个行业的研究, 这些行业在运用 ICT 技术方面均有着广泛的需求和深厚的基础。深入讨论了工业互联网的典型行业需求、信息网络架构、总体技术需求、工业云、工业边缘云、工业数据以及安全等各领域问题。对工业互联网的分析, 从代际划分看, 主要是针对 5G 时代技术提供行业互联网的方案, 时间跨度主要为 2020—2030 年。在进入对工业互联网的分

析之前, 为了建立从 5G 向更未来的互联网发展的展望, 总结了 5G 后时代的“网络 2030”和网络 5.0 的发展要点, 目的是提高对未来工业互联网发展技术需求分析的前瞻性把握, 时间跨度为 2030—2035 年。对未来网络的分析, 既包含了 5G 时代(2020—2030 年), 又包含了后 5G 时代(2030—2035 年)。

2.1 未来互联网应用(2020—2035 年)

为了总体把握各代际的技术需求, 沿用了如下代际划分: “现在”指基于 LTE 提供的消费及产业互联网的技术方案, “5G 时代”(2020—2030 年), “5G 后时代”(2030—2035 年)指未来网络, 时间跨度是 2020—2035 年。图 1 将上述 3 个代际的技术需求和典型应用一起呈现, 尤其是“网络 2030”定义的如下前瞻性的应用与需求(见图 1 三角的最外圈)主要有: 逼近真实的个人通信、极高带宽的数据搬移、空地一体化未来互联网、基于可信技术实现的新网络安全、互联网自治等。

(1) 逼近真实的个人通信

人和人远程通信从语音开始, 随后发展到增加了视频, 目前演进到利用虚拟现实和增强现实技术加强个人通信体验, 但异地通信中, 双方还是有距离感。“逼近真实的个人通信”指未来个人异地通信将追求满足眼睛和耳朵两种感官以及扩展到触觉、味觉、嗅觉信息的采集和并发协同传输, 由此进一步降低双方的距离感。

(2) 极高带宽的数据搬移

工业互联网需要感知未来世界, 需要大量部署各类传感器, 预测未来 IoT 的连接空间将会从目前的几十亿发展到未来千亿甚至万亿的连接空间, 连接的端点类型会延展到包含人、实体物、虚拟的数据、服务、数字双生和内容。大量的传感器数据需要搬动到各级云中, 经计算分析后产生控制反馈。这样的数据搬动量是巨大的。未来车联网是一个典型海量移动数据搬动的应用。目前车联网自动驾驶是基于单车决策的; 未来更多

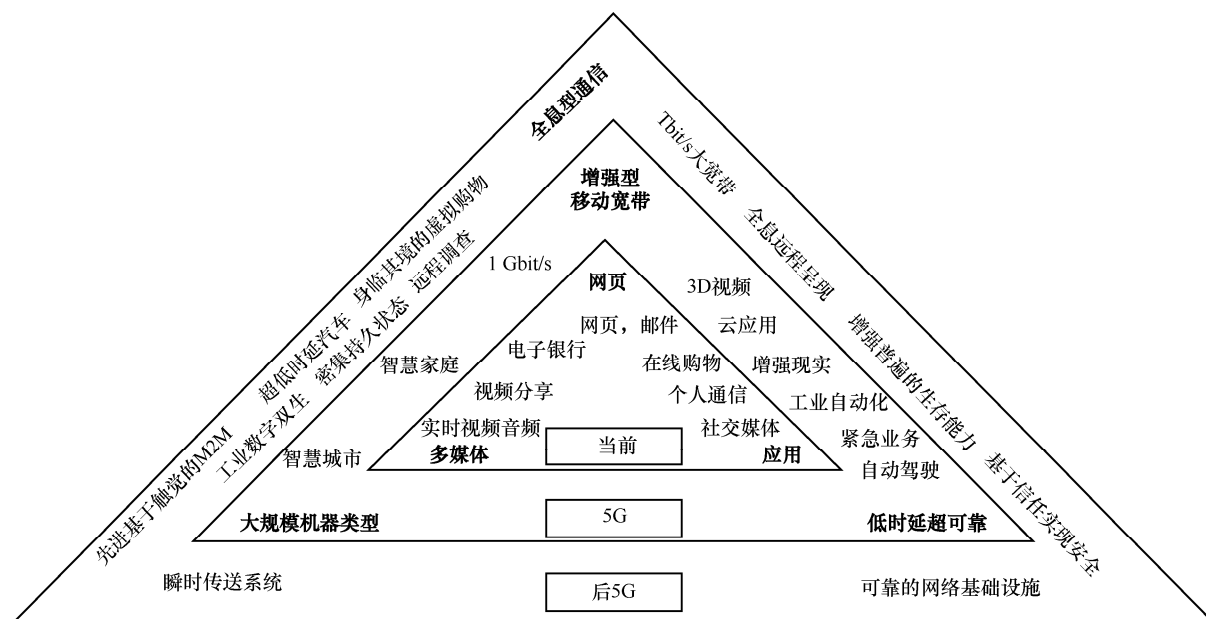


图 1 4G、5G、后 5G：三代网络能力与技术需求（“网络 2030”观点）

的自动驾驶控制以及基于自动驾驶能力的创新车联网应用，将把单车承担的决策移交给未来移动网络的边缘层，由智能网络边缘层承担邻近车辆驾驶的高层控制（行驶路由和平均速度的调整）以及底层控制（油门、刹车、方向盘）。车辆将通过无线的 V2N（vehicle to network）持续上传高数据量的数据地图（HD-map）、高精度、确定性和低时延的车辆定位（车辆高速移动），车辆与现有邻近车辆间通过 V2V（vehicle to vehicle）接收到的消息汇总，通过 V2N 转发到移动网络边缘。此过程需要搬动巨量数据，同时这些车辆需要保持最近的移动边缘的计算处理，即保持边缘的智能分析并实时反馈控制的应用需求与位置强相关信息，这造成需要在移动边缘云间搬移大量数据。

（3）空地一体化的未来互联网

IETF 的 TCP/IP 协议栈和互联网架构是从针对地面固定互联网开始设计的，之后，IMT-2020 沿用了其设计成果，其中包含目前互联网的关键设计成果，如基于位置的 IP 地址标识、可达性拓扑路由广播与计算、由 TCP/UDP 第 4 层基于连接两侧端点协商的连接参数（通信网络 3 层及以下

层对连接参数未感知）和被动式安全设计思路等。“未来网络 2030”考虑了包括航海航空、海上平台、偏远石油矿场、自然灾害、紧急通信、野外车辆等特定应用场景，其技术需求包括路由方式、标识方式、连接方式、物理分组丢失率等方面，是当前基于地面互联网的 IETF 的 TCP/IP 协议栈所不支持的。未来地面互联网和基于卫星的空间互联网融合是工业互联网的一个可能的技术需求。

（4）基于可信技术实现的新网络安全

当前网络安全风险包括对网络用户身份确认、信息内容防止篡改、数据安全和隐私保护、对网络各网元进行拒绝服务攻击、密钥窃取、路由攻击、域名解析攻击等。解决思路是针对每种风险设计各自独立的解决方案，如部署防火墙、NAT 地址转换等。目前正在进一步地加强实现基于人工智能的网络安全方案，如利用机器学习算法具备的捕获复杂规律的能力、对预防性识别网络异常攻击模式进行建模等，但总体实现思路以及方案影响没有改变，比如安全方案带来不便、额外开销增加、性能降低等。未来网络的安全新方案包括：考虑内生型方案、整个网络是可信的、任何网络用

户身份是唯一的、网络操作记账、信用记录保持以及区块链将被考虑作为某种支撑技术。

(5) 互联网自治

互联网自治涉及未来互联网主体上将由谁发展的的问题。当前的互联网公网通常由运营商和政府建设,含接入、汇聚和骨干 3 个层次。相关 ISP(互联网服务提供商)及 Web-scale(网络规模)公司整体上依靠互联网公网提供的全球可达能力,但各家互联网公司为了提高服务性能以及控制应用和数据,会建设各自的互联网私网(overlay 网络)。但是未来互联网的运营主体发展趋势是由各家 ISP 及云服务商或者 Web-scale 公司自建私有互联网,包括铺设海缆、承担通信基础设施建设以及广覆盖的云数据中心建设。而现有互联网公网未来发挥的主要作用是,需要在各家互联网私网之间搬动数据时将借道互联网公网通过。

以下应用在 5G 时代和 5G 后时代(网络 2030),确定性低时延的性能将会被持续优化。

• 制造业应用

低时延、高精度、高可靠性的远程运动控制,要求在几十微秒内。

• 车联网应用

自动驾驶的控制逻辑从车载移交给未来移动网络的边缘云,端到端往返时延几乎在几毫秒内。

• 触觉互联网

包含触觉的远程控制,端到端往返时延接近 1 ms。

网络 5.0 也对未来网络代际演进提出了见解,大致包含了以下关键信息:

- 带宽从当前 LTE 时代的每人 100 Mbit/s 到 1 Gbit/s,发展到 5G 时代的每人 1~10 Gbit/s,发展到后 5G 时代的每人 1 Tbit/s;
- 时延从当前 LTE 时代的秒级,发展到 5G 时代的毫秒级以及亚毫秒级时延,发展到后 5G 时代的微秒级。从 5G 时代开始,时

延和抖动的确定性是行业互联网主要技术需求之一;

- 总体连接数从当前 LTE 时代的几十亿连接空间,发展到 5G 时代的千亿连接空间,再到后 5G 时代的万亿连接空间。

5G 技术开始广泛深入支持行业市场,包括以制造业、能源行业、车联网行业为典型代表的行业。图 2 借用并简化了网络 5.0 提出的代际需求演进。

未来互联网包含以下两个重点应用。

(1) 全息瞬传

全息瞬传是后 5G 时代,最具特色且对网络架构和网络技术产生新需求的典型应用,包含了如下的关键技术需求,如图 3 所示:

- 全息应用会产生 Tbit/s 的带宽需求;
- 时延需求是亚毫秒级的;
- 全息数据流内含并行的几千条数据流;
- 承载网络面临崭新的需求,需要对内容感知以及协同海量并发数据流,是对未来新 IP 和未来新网络传输能力的典型应用。

(2) 工业互联网

工业互联网是推动未来网络发展的第二大典型应用场景,以下总结了未来工业互联网发展的关键技术需求和发展趋势,如图 4 所示。

- 工业互联网关键业务是驱动未来互联网发展的关键动力之一,无论是 5G 时代还是后 5G 时代,其中确定性低时延和高可靠的工业连接是最关键的技术需求。
- 当前基于 IETF 的 TCP/IP 协议栈的互联网,其提供“尽力而为”的网络传送服务以及有限的 QoS 保证。但在未来的工业连接上,不仅要提供确定的、及时的传送服务(in time,时延短),而且要提供确定的、准时的传送服务(on time,抖动小)。
- 超低时延是上述应用的共性需求,有些工业应用的闭环控制的往返时延是毫秒级

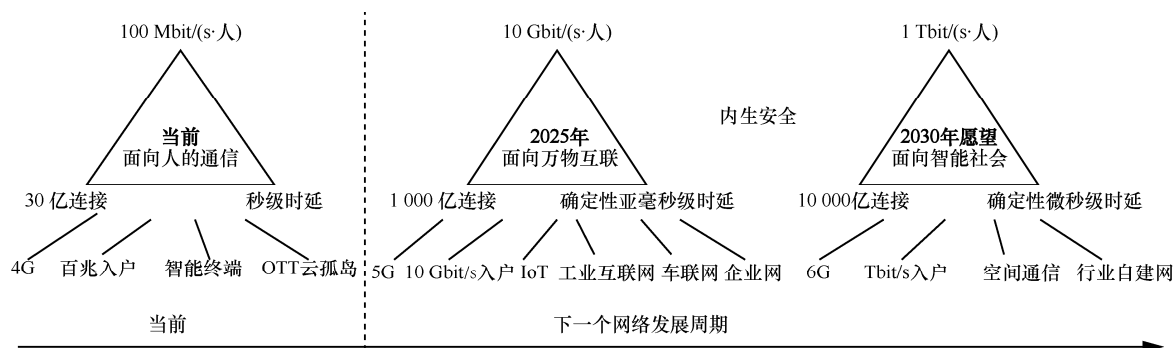


图2 网络能力代际演进与支撑业务变化（网络5.0）

全息瞬传应用			
	4K/8K 高清	VR/AR	全息瞬间
带宽需求（越来越高）	35~140 Mbit/s	25 Mbit/s~5 Gbit/s	4~10 Tbit/s
时延需求（越来越低）	15~35 ms	5~7 ms	亚毫秒
并发数据流量（越来越多）	2条并发数据流（语音流/视频流）	12条并发数据流	几千条数据流

消费者的用户体验从目前的2种感官发展到未来的5种感官					
多媒体演进	全息瞬传				
	VR/AR				
	视频流				
	语音流				
	图片				
	文字				
	视觉	听觉	触觉	味觉	嗅觉

图3 全息业务的性能技术要求

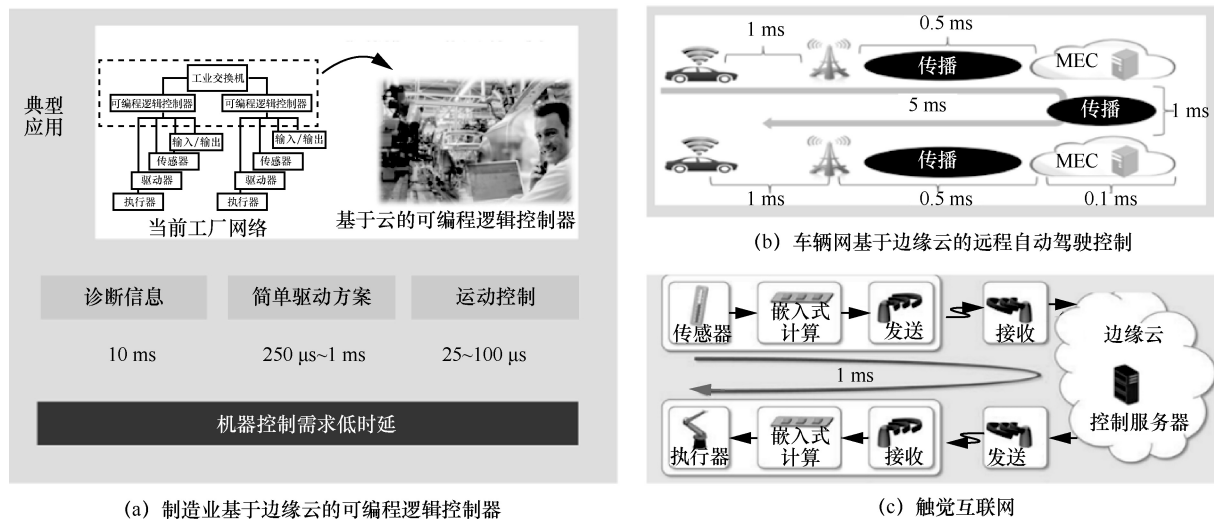


图4 确定性超低时延是未来工业互联网的核心需求

的，有些是亚毫秒级的，有些是微秒级的。其中，典型应用是基于云的 PLC 运动控制、基于 5G 边缘云的实时云端驾驶控制的车联网应用以及基于触觉的远程操作控制应用。

- 确定性抖动是另一个关键性能需求，特别适合于多方协作的应用场景，比如多方协作的远程手术，制造现场多机器人协作、设备和人员协作。协作各方对工业连接的确定性抖动性能需求极其敏感。

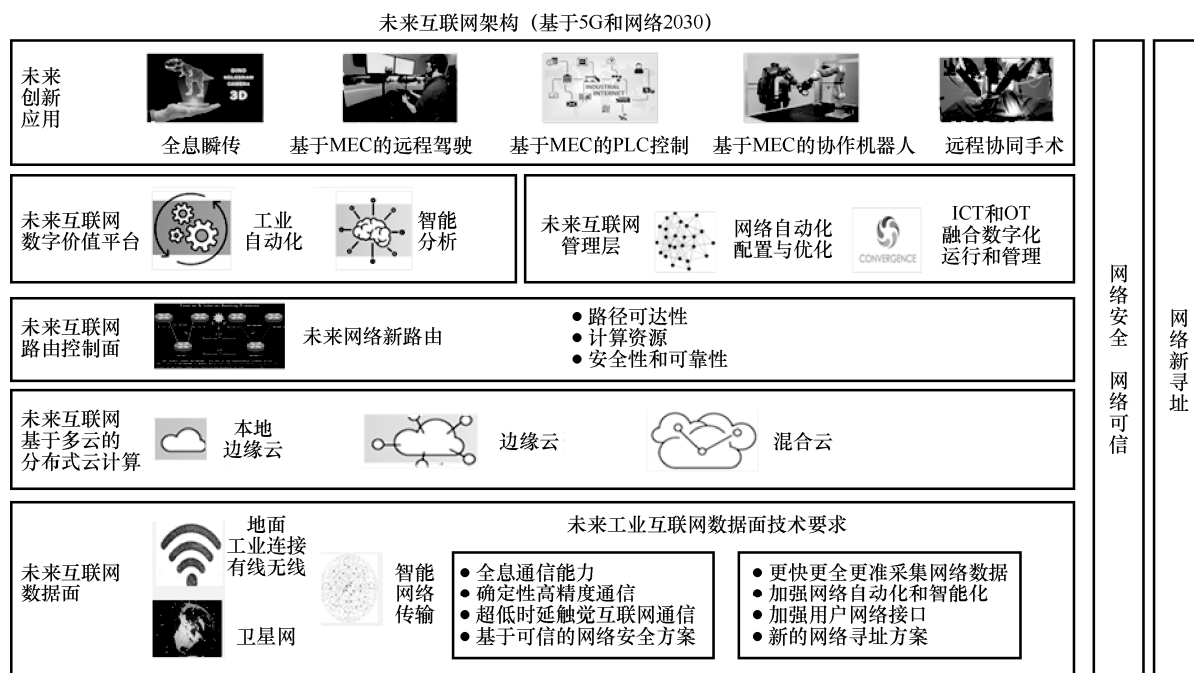


图5 未来互联网架构

2.2 未来互联网技术和架构

提出未来(含5G时代和后5G时代)互联网的架构设计,包含以下4层。图5包含了未来互联网的5层结构,包括数据面、分布式多层云结构、路由控制层、数字价值平面、未来网络管理平面以及未来互联网应用层。图6说明了未来互联网将越来越私有化,而互联网公网的作用将降低。

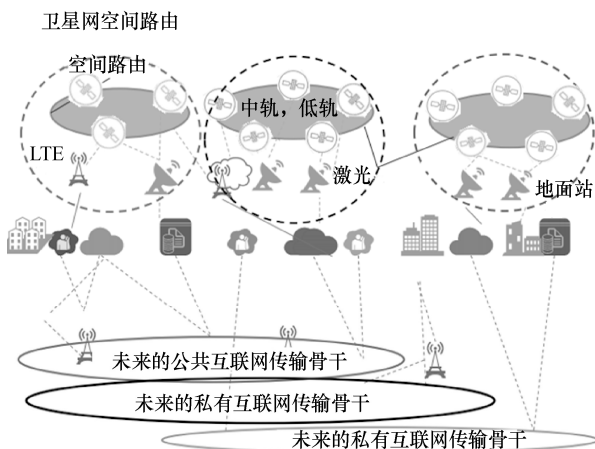


图6 空地一体化的未来互联网

(1) 未来互联网的“数据面”

图5中的数据面总结了未来的8项新技术需求:全息通信能力、确定性高精度通信、超低时延触觉互联网通信、基于可信的网络安全方案、更快更全更准采集网络数据、加强网络自动化和智能化、加强用户网络接口以及新的网络寻址方案。

(2) 未来互联网的“多层分布式云计算”

未来工业互联网应用需要在任意需要的网络位置获得计算资源,而云计算的灵活性和弹性是最佳配置计算的形态。云计算部署的未来趋势将越来越接近数据产生位置、邻近实时分析计算以及迅速的反馈闭环控制。由此多层云计算架构将会流行,包括“边缘云”和“中心混合云”。进一步地,工业“边缘云”也将分为“多层”。

- 其中,“本地边缘云”就部署在生产现场,如制造业的车间或者采矿业矿区边缘,在此位置的工业/企业现有的“运营OT网络”与未来的“IT工业网络”和未来的“本地边



缘云”进行充分融合，这个位置也是最迫切需要确定性时延和高可靠通信的位置。

- “中心混合云”是在工业企业的边界位置，其企业 IT 系统（如 ERP/MES 和办公自动化 OA 系统），其中部分 IT 系统迁移上企业私有中心云，同时与工业企业边界外部署的“行业公有云”融合成为工业企业的“混合中心云”。

（3）未来互联网的“路由控制层”

当前的互联网路由算法是基于网络拓扑的可达性广播和路由计算的。未来工业互联网的计算资源将会以“多云”形态分布式部署，并与网络资源充分融合。未来应用需要考虑位置邻近性，以就近获得云计算资源，所以未来的路由不仅需要可达性广播，还需要云计算资源分布的广播。另外，由于未来互联网实现万物互联并收集了大量敏感的、需要隐私保护的传感器数据，路由计算也需要考虑网络各个自治域的安全情况，支持敏感数据走安全性高的路由路径。

（4）未来互联网的“数字价值平台”

未来工业互联网需要行业操作系统，其平台由 IaaS、PaaS 和 SaaS 组成，核心层是 PaaS 层。行业通过此平台形成行业生态。平台拥有高价值工业数据，通过微服务架构，封装了丰富的基于传统工业机理模型的算法和知识以及未来基于大数据机器学习算法开发的新型数理模型和工业知识。此智能平台支持行业“降本增效”和开展新型业务（例如大规模定制化制造等）。

（5）未来互联网的“管理层”

本层次包含“网络网管”和“BSS/OSS”功能。

网络虚拟化、软件化的控制功能（如 SDN/NFV）在此层次中将包含业务编排功能。

未来互联网将极大地加强对网络自身运行状态数据的及时全面准确采集，并利用机器学习算法对复杂网络进行规律的“黑盒法”建模，从而极大地加强网络自身的自动化和智能化程度。

未来工业互联网的 ICT 技术和 OT 技术的大融合也是趋势，IT 的虚拟化软件化技术会推广到 OT 网络。最典型的就是制造业基于云的生产线 PLC 运动控制。未来 IT、CT、OT 一体的虚拟化、软件化，其综合管理就在此“管理层”。

未来互联网架构中数据面有两项关键新增能力：第一项是为支持全息类应用而增加的定性传送能力，第二项是为支持未来工业互联网的应用而增加的确定性时延能力。定性传送能力将拓展未来 IP 网络层的基本传送能力，图 7 展示了未来网络的定性传送能力。

（1）当前传输网络对承载的 IP 负载内容是不可感知的。所以当前的网络传输可以以数据分组为单位，根据优先级 tag，选择丢弃优先级低的数据分组，发送优先级高的数据分组，但不具备对同一个数据分组的比特流各比特的传送进行差异化处理。

（2）视频流、VR/AR 数据流是自带结构的，比特流上不同比特位置，对视频和语音呈现效果的作用是不一样的。当网络拥塞时，如果未来的网络传输层对应用层承载内容是可以感知的，则可以有选择地丢失数据分组比特流的某些比特，避免整个数据分组的丢失造成重传，也最大化地接收端视频和语音重现效果。图 7 中给每个比特赋予不同的颜色显示不同的优先级。

（3）当前 IP 层没有这个能力，需要扩展 IP 分组的格式和能力。图 7 中，在 IP 数据分组头部和 IP 数据分组承载之间，新增了一个“元数据”，描述承载的应用层数据，让未来互联网的传输层能理解数据分组比特流的每个比特对应用的不同作用。

确定性时延包含了时延的大小、时延抖动的大小以及多数据流间时延协同等方面，如图 8 所示。

（1）及时确定性保证

需要保证时延很小，即数据分组需要尽快

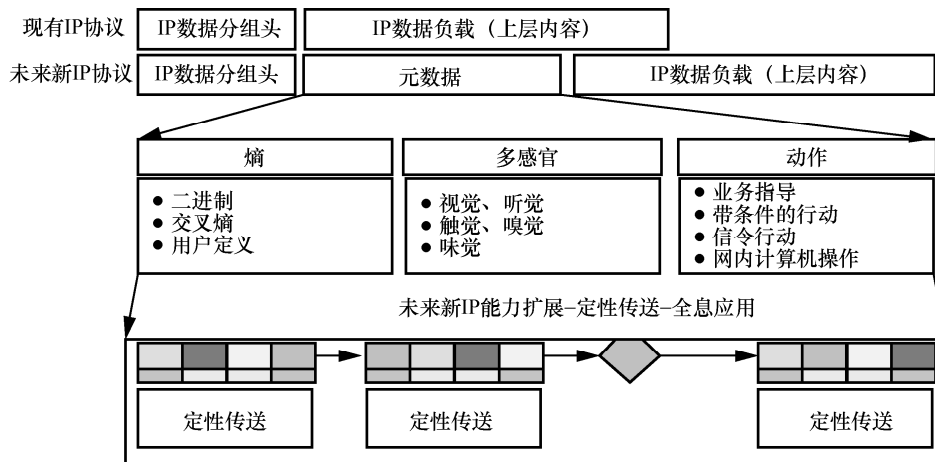


图7 未来新IP能力——定性传送

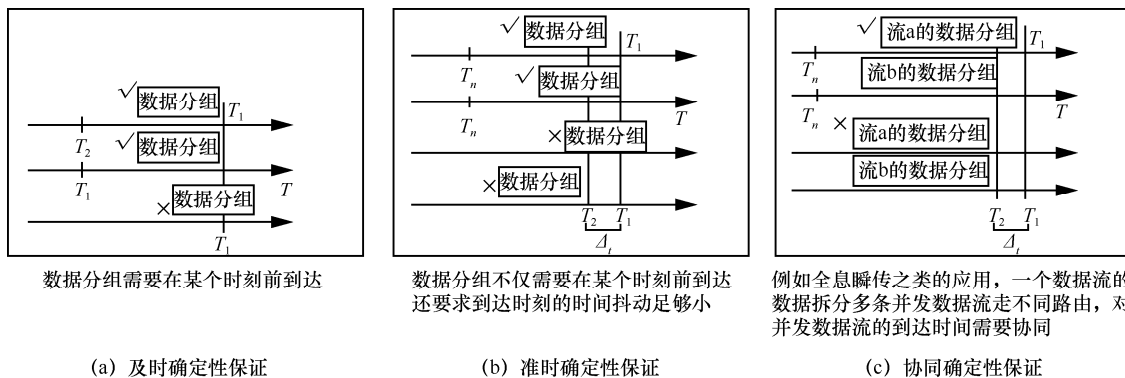


图8 确定性保证传输

到达。

(2) 准时确定性保证

需要保证时延的抖动很小，不仅需要数据分组来得快，还要来得准时。

(3) 协同确定性保证

同一个应用（如全息）的不同并发数据流间的到达时间，需要协同保证及时性与准时性的确定性保证。

网络与时延相关的性能技术标准发展覆盖了“尽力而为”的方式、对带宽的确定性、对时延的确定性以及对抖动的确定性等各种类型，如图9所示。

TSN是确定性时延的主要标准成果，包含以下关键内容，如图10所示。

(1) 当前确定性时延和抖动的主要研究成果是IEEE TSN (time-sensitive networking, 时间敏感网络)，即在二层工业以太网内实现确定性时延应用。

(2) 5G TSN是当前的研究热点，包含对5G无线网和核心网进行优化，从而实现5G TSN性能，以及如何融合工业以太网 TSN 和 5G TSN，以提供端到端 TSN 的性能保证。

(3) TSN 网络核心思路是在数据流发送前，由一个新增的核心网元 CNC (central network controller, 中央网络控制器) 负责规划数据流的路由路径，确认沿途各交换机需要的资源配置以及数据流的时延，其思路类似火车地铁运营的時刻管理，各数据流的数据分组通过网络各节点的

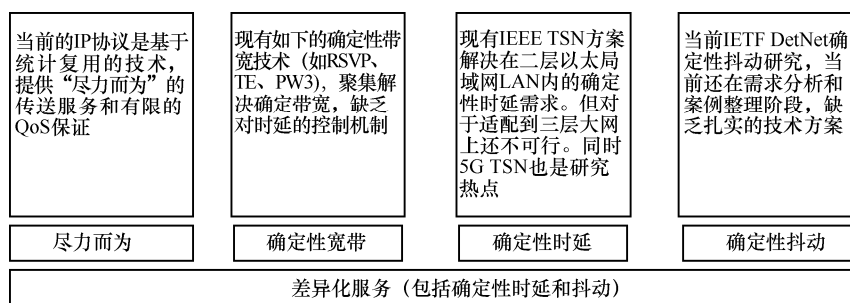


图9 确定性时延和抖动研究的基线

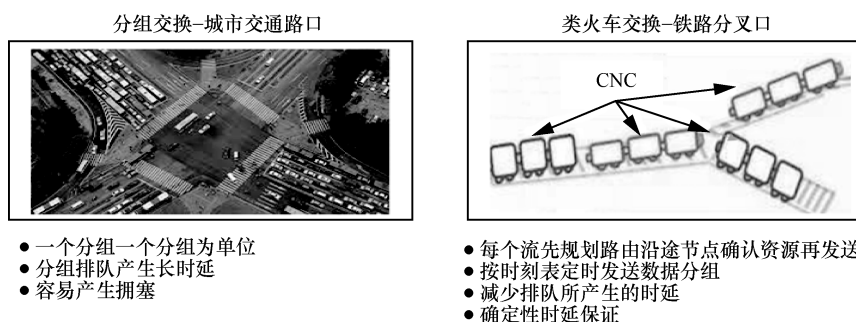


图10 基于TSN思路的确定性时延机制

时间提前规划，避免拥塞和减少缓存。

3 未来工业互联网发展的技术需求

3.1 未来工业互联网发展的重点领域

上一节扩展了研究的范围，代际范围包含当前互联网和4G技术、5G时代（2020—2030年）和后5G时代（2030—2035年），行业范围包含了消费互联网和产业互联网（工业互联网是其子集）。将聚焦研究空间，对未来工业互联网发展以及技术需求进行深入分析。工业互联网是“中国工业2025”的核心内容，在行业选择上，将重点分析未来制造业、未来能源行业以及未来车联网的行业发展，其中能源行业包含采矿、发电、电网、行业港口以及行业铁路。聚焦研究未来5年（2020—2025年）内工业互联网的技术需求、相应的新架构与新技术。

首先分析了最具共性、最重要的技术需求。

（1）确定性低时延、高可靠的工业连接。

（2）多层次边缘云：边缘云部署位置邻近于

生产现场以及数据产生源头。边缘云配置的计算能力和智能分析能力越来越强。当前边缘云主要执行训练好的人工智能模型，未来边缘云还将承担针对现有人工智能算法模型的优化训练，不断实时提升本地闭环控制的性能。

（3）边缘云部署更多采用私有云形式，边缘的工业网络更多采用企业专网形式。

（4）网络边缘位置。随着未来ICT技术和OT深度融合，大量创新的位置将出现。IT界的虚拟化、软件化、云化技术将被运用到OT界。本文对制造业生产线、煤炭矿区、车联网云控远程驾驶3个工业应用场景进行深入研究。

其次，未来工业各行业需要新型的、基于大数据的人工智能建模分析能力。拥有大量高价值工业数据的不同行业的工业互联网云平台，可以被看成未来的行业操作系统OS。建设工业互联网云平台和支持工业/企业“上云”，是国家级战略规划。高端设备企业（如美国通用汽车和德国西门子）、行业制造龙头（如海尔）、ICT企业（如

阿里巴巴、腾讯、中国电信)以及工业软件龙头企业等,是承接国家工业云平台的主要参与方。工业互联网云平台从底向上包含 IaaS、PaaS、SaaS,其中 PaaS 是核心,被称为未来的工业操作系统 OS。工业互联网云平台架构如图 11 所示。

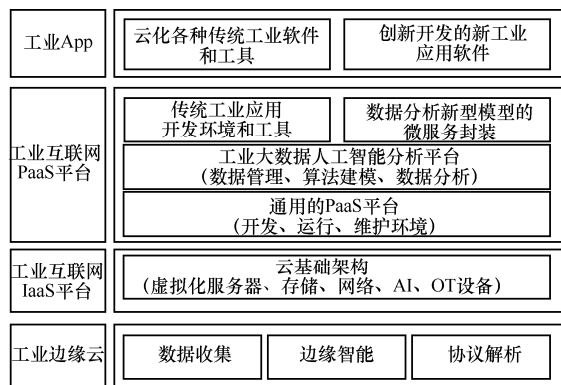


图 11 工业互联网云平台

(1) 在工业互联网云平台中,首先可以看到各分层的核心能力。原先的工业控制设备和工业软件被虚拟化迁移上云,以此降低工业企业的 ICT 成本。

(2) 使用微服务软件架构,将现有的工业知识、工业机理模型封装进平台 PaaS 层向生态链开放,使得工业知识模型被更多企业普及使用;然后在 PaaS 开发基于大数据和人工智能分析的新型数理模型,并使用微服务模型进行封装。当前遇到的最大挑战是如何选择共性的课题,使同一个课题的成果可以跨行业推广。例如光伏行业良品率提高的课题成果,在其他行业良品率提高课题中无法被推广的问题。

(3) 当 PaaS 层初具规模,其微服务封装的工业知识、工业机理模型和工业数理模型已非常丰富,进入应用生态环境的打造和繁荣阶段。大量新型工业软件公司将基于工业云平台敏捷地迭代开发新型工业软件。

(4) 平台核心能力。首先,对数据进行采集和分析处理;其次,基于大数据和人工智能分析构建新型数理模型以实现“降本增效”;然后,软

件技术(如微服务封装模型和算法)向生态圈开放,沿袭互联网软件开发的敏捷迭代方式,开发新型工业软件,以繁荣基于工业云平台的新工业创新应用生态。

其次,可以看到工业连接的无线化趋势。无论是工业还是企业的转型过程,都需要改造现有的生产设施,如部署传感器、未来制造的大规模定制化需求(需要生产线、设备、物料、计划、人员、AGV(automated guided vehicle,自动导引运输车)的动态调整)、车联网边缘云远程驾驶控制类的应用、煤矿工作面的开采类应用等,均需要长期广泛应用无线方案。工业连接无线化是未来工业网络发展的又一大趋势。

再次,未来工业连接迫切需要具备确定性低时延和抖动的传送能力。越靠近制造现场、生产现场、车联网应用的高速移动车辆端的位置,需要工业连接提供确定性低时延的需求就越迫切,目前主要技术成果就是 IEEE TSN。未来,一方面要研究如何向三层大网扩展提供 TSN 服务,另一方面要研究如何实现 5G TSN,最后融合无线与有线形成三层大网的端到端 TSN 能力。

总之,边缘计算、云平台、工业连接的无线化且具备确定性低时延和抖动的需求,是本文认为的未来工业互联网的三大重点创新领域。同时工业网络的新安全、工业标识及解析也是业界关注的热点。

3.2 工业/企业未来数字化转型

大量工业/企业,尤其是每个行业的头部企业,是其行业面向未来工业互联网转型的主力。这些企业具备一定规模的 ICT 水平。企业需要制定未来 10~20 年的战略目标,并量化当前企业 ICT 和 OT 技术水平,对量化结果进行建模,并对标国际先进的企业水平,以明确其间差距。同时提出企业数字化转型的主要需求:例如使用远程自动化控制替换地下矿掘进工作面的工



人，以实现人员最大程度的安全；例如使用 OT 设备，如制造业当前基于硬件形态的 PLC 控制器被虚拟化、云化迁移上工业边缘云，以实现 PLC 设备更大程度的共享，从而达到“降本增效”的目的等。最后企业对提出的多条转型路径进行投入产出比分析，决定企业战略转型目标与路径。

数字化转型的必要条件包含以下几点。

(1) 广泛连接

工业的头部大型企业拥有广泛的资源，例如国内的一些大型能源企业，拥有广泛的煤矿、电厂、行业内铁路/港口等资源；另一些则拥有大型国内电网。其资产、劳力、设施、供应链广泛分布并动态移动。企业需要优化资产利用率以提高其生产力和绩效，因而必须随时知道其所有资产的状态，并通过智能分析动态编排、调整资产的分配，以促进业务决策。所以企业需要提升企业网络，以广泛连接劳动力、设备、机器、工具、供应链、合作伙伴、客户、售后产品和服务。

(2) 无处不在的计算

在 IT 行业，云计算的敏捷性和效率被充分认可。私有云和混合云是工业/企业实施数字化转型的一部分现有方案。但对于高性能和低时延的业务，需要计算资源邻近性地部署，否则智能工厂的机器人控制、矿井的远程控制、自动驾驶车辆以及远程手术无法保证其性能要求。边缘云使分析控制应用更接近分布式的工业资产、人员。多层边缘云部署也已出现，甚至远端边缘云以本地云的形式出现。云技术的敏捷性和计算弹性，适应工业现场计算需求的动态改变。

(3) 运用工业分析见解，准确地执行工业控制

随着工业传感器的广泛部署，工业数据从数据匮乏迅速发展到数据泛滥，大量数据含义不被理解。工业数据价值有衰退期，需要被及时、全

面、正确地收集，而且需要把产生数据的生产背景情况一起收集。但过去的基于传统机理的建模对复杂工业规律的建模捕获能力薄弱。幸运的是，机器学习适合通过对高价值大数据的学习建模掌握复杂高维问题。当然基于“黑盒法”建模的机器学习算法，其可信度和可解释性在当代还存在一定的问题，需要结合知识图谱等技术进行优化。所以对超低时延的关键生产业务实现基于机器学习算法的闭环控制还需一段时间。但最终的目标，即完全自动化的基于预测实现闭环控制自动化，一定能够实现。

3.3 未来工业互联网架构

从地理分布上，工业互联网的架构包含了工厂内网络和工厂外网络两个部分。

工厂内网络包括 IT 信息网络和 OT 生产运营网络。IT 网络主要包括企业办公自动化 OA 系统、ERP 系统、MES 系统（制定生产计划）以及工业设计开发相关的软件；而 OT 网络包括 3 层，最低一层是通信性能要求最高的生产设备控制，中间一层是生产线控制，最高层是生产车间级控制，其中典型的生产型 OT 设备有 PLC 和 SCADA 系统。

相应地，云计算也有 3 个部署位置，最低的、最接近生产现场的是边缘云(OT 与 IT 融合位置)。在工厂边界部署企业私有云或者混合云 (IT 上云位置)，工厂外部署行业云（产业链和生态环境）。工业互联网架构还包含工业连接、安全、标识和解析、工业智能等多个环节。工业互联网架构如图 12 所示。

3.4 若干关键技术需求

不同的工业网络应用位于网络的不同位置，需要不同的时延和抖动性能。本文总结了制造业核心应用的性能需求，尤其说明了哪些应用需要毫秒级的时延，而哪些应用需要微秒级的时延。图 13 为工业互联网不同位置所需要的网络性能技术需求。

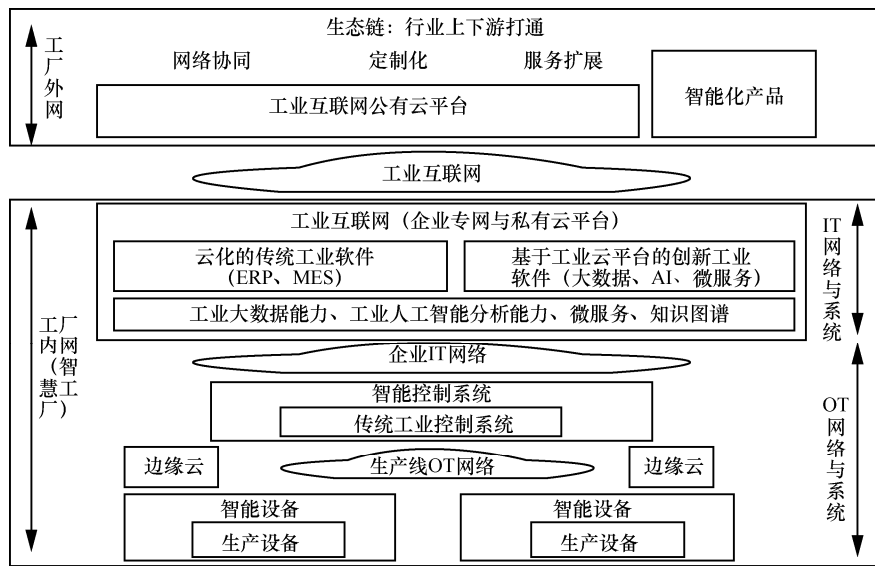


图 12 工业互联网架构

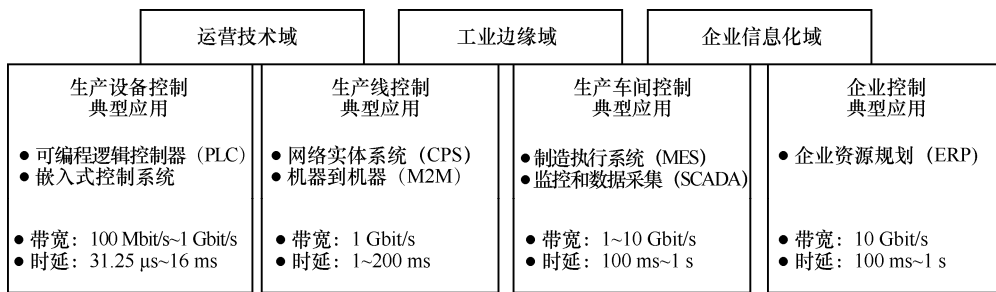


图 13 工业应用分布位置与性能技术要求

不同应用类型的工业数据具备的信息价值的衰减速度不同，如图 14 所示。相应地，价值衰减越快的工业数据，越需要邻近性的计算资源（如边缘云）；而价值衰减越慢的工业数据，就可以在中央云中进行处理。

未来工业网络的安全性，一方面会追求智能分析，以驱动闭环网络的动态编排，同时未来会

考虑网络内生可信安全架构（区块链）。

未来工业标识和解析也是我国工业互联网独立发展的基础课题，包含 3 层架构：顶层是国际根节点，解决国际互通；中间层是国家级节点，既是对外互联的国际关口，又是对内统筹的枢纽节点（如北京、上海、广东、湖北、重庆）；最低层为二级节点，面向行业提供标识注册和解析服务。

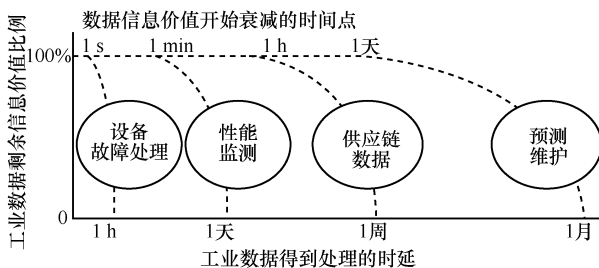


图 14 工业数据价值衰减规律—边缘云及时处理

4 结束语

工业互联网将在未来 5~10 年蓬勃发展，新应用、新技术需求和新架构设计将不断涌现。未来工业互联网的进步伴随着工业企业数字化转型，展现出计算资源广泛边缘化、信息技术



与运营技术加速融合化、工业网络传送性能高精度确定化、网络高度弹性化/智能化/自动化/可编程化以及工业知识与工业智能的平台化/生态化。

未来将围绕工业边缘云、工业云平台产生大量丰富创新的应用，如制造生产线协同机器人、基于边缘云的 PLC、基于边缘云的远程采矿控制、基于边缘云的自动驾驶车辆远程控制、基于工业云平台的大规模定制化生产以及基于工业云平台的“降本增效”方案等。

高精度确定性工业连接、工业专网、切片技术、多层边缘云、工业云平台、可信网络安全以及工业网络标识与解析将会是未来工业互联网的创新研究重点。

参考文献：

- [1] 中国信息通信研究院. 工业互联网体系架构(版本 1.0)[R]. 2016.
CAICT. Industrial internet architecture(v1.0) [R]. 2016.
- [2] 李子姝, 谢人超, 孙礼, 等. 移动边缘计算综述[J]. 电信科学, 2018, 34(1): 87-101.
LI Z S, XIE R C, SUN L, et al. A survey of mobile edge computing[J]. Telecommunications Science, 2018, 34(1): 87-101.
- [3] 中国信息通信研究院. 工业互联网平台白皮书(2017) [R]. 2017.

CAICT. White paper on industrial Internet platform(2017) [R]. 2017.

- [4] 王庆扬, 谢沛荣, 熊尚坤, 等. 5G 关键技术与标准综述[J]. 电信科学, 2017, 33(11): 112-122.
WANG Q Y, XIE P R, XIONG S K, et al. Key technology and standardization progress for 5G[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(11): 112-122.
- [5] Industrial Internet Consortium. Industrial networking enabling IIoT communication, IIC: WHT: IN23: V1.0: PB: 20180829[R]. 2018.
- [6] 陈山枝. 发展 5G 的分析与建议[J]. 电信科学, 2016, 32(7): 1-10.
CHEN S Z. Analysis and suggestion of future 5G directions[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(7): 1-10.
- [7] Industrial Internet Consortium. Introduction to edge computing in IIoT. IIC: WHT: IN24: V1.0: PB: 20180618[R]. 2018.
- [8] 周一青, 李国杰. 未来移动通信系统中的通信与计算融合[J]. 电信科学, 2018, 34(3): 1-7.
ZHOU Y Q, LI G J. Convergence of communication and computing in future mobile communication systems[J]. Telecommunications Science, 2018, 34(3): 1-7.

[作者简介]



王俊文 (1973-), 男, 上海诺基亚贝尔股份有限公司高级工程师, 中国区贝尔实验室与首席技术官办公室 (BL&CTO China) 应用分析与新技术负责人, 主要研究方向为网络架构、数据分析与人工智能、工业互联网。