



综述

使能未来工厂的 5G 能力综述

伏玉笋^{1,2,3}, 唐金辉¹

- (1. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240;
2. 系统控制与信息处理教育部重点实验室, 上海 200240;
3. 上海工业智能管控工程技术研究中心, 上海 200240)

摘要: 5G 系统将移动通信服务从移动电话、移动宽带和大规模机器通信扩展到新的应用领域, 即所谓对通信服务有特殊要求的垂直领域。对使能未来工厂的 5G 能力进行了全面的分析总结, 包括弹性网络架构、灵活频谱、超可靠低时延通信、时间敏感网络、安全和定位, 而弹性网络架构又包括对网络切片、非公共网络、5G 局域网和边缘计算的支持。希望从广度到深度, 对相关的理论及技术应用做透彻、全面的梳理, 对其挑战做清晰的总结, 从而为相关研究和工程技术人员提供借鉴。

关键词: 5G 垂直业务; 超可靠低时延通信; 时间敏感网络; 安全; 定位; 网络切片; 边缘计算

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022069

A survey on 5G capabilities enabling the factories of the future

FU Yusun^{1,2,3}, TANG Jinhui¹

1. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China
2. Key Laboratory of System Control and Information Processing, Ministry of Education of China, Shanghai 200240, China
3. Shanghai Engineering Research Center of Intelligent Control and Management, Shanghai 200240, China

Abstract: 5G systems extend mobile communication services beyond mobile telephony, mobile broadband, and massive machine-type communication into new application domains, so-called vertical domains, with special requirements for communication services. A comprehensive analysis and summary of 5G capabilities enabling the factories of the future were provided, including resilient network architecture, flexible spectrum, ultra reliable and low latency communication, time sensitive network, security and positioning. While resilient network architecture includes network slicing, non-public network, 5G LAN, and edge computing. It hopes to have a thorough and comprehensive understanding of the theoretical research and application of 5G, and a clear understanding of its challenges, so as to play a key reference for researchers and engineers in the related fields.

Key words: 5G verticals, URLLC, time sensitive network, security, positioning, network slicing, edge computing

收稿日期: 2021-11-07; 修回日期: 2022-04-13

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2019YFB1705703)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No.2019YFB1705703)

0 引言

工业 4.0^[1-4]旨在提高工业生产和物流的通用性、灵活性、成本效率、资源效率以及质量等，这主要是无处不在且功能强大的连接和计算基础设施的网络物理生产系统促成的，该系统以灵活、安全和一致的方式将人、机器、产品和各种其他设备互连。未来的智能工厂将不再是静态的顺序生产系统，而是以灵活、模块化的生产系统和数据驱动为特征。这包括更多的移动和多功能生产资产及强大而高效的无线通信和本地化服务。

目前，工业中使用的绝大多数通信技术仍然是有线的。其中包括各种专用工业以太网技术（如 SERCOS、PROFINET 和 EtherCAT）和现场总线（如 PROFIBUS、CC-Link 和 CAN）^[5-7]，这些通信技术用于在自动化系统中互连传感器、执行器和控制器。无线通信主要用于特殊应用和场景，如在流程工业中，或用于将标准 IT 硬件连接到生产网络和类似的非关键应用。一方面，过去不需要无线连接，生产设施相对静态且持久；另一方面，大多数现有无线技术无法满足工业应用的苛刻要求，特别是在端到端时延、通信服务可用性、抖动和确定性方面。然而，随着工业 4.0 和 5G 的出现，这种现象可能会发生根本性的变化，因为只有无线连接才能提供未来工厂所需要的灵活性、移动性、多功能性和人体工程学。因此，5G 可能会极大地推动商品在整个生命周期内的生产、运输和服务方式的革命。

5G 提供了一种高度灵活和可扩展的网络技术，用于连接任何人、事、地点。因此，随着数据速率的不断提高，5G 的能力远超移动宽带。特别地，5G 以前所未有的可靠性和极低的时延支持通信和大规模物联网连接，这为许多垂直领域（包括汽车、医疗、农业、能源和制造业）的新应用铺平了道路。特别是在制造业，随着

无线连接、边缘计算或网络切片等相关构建模块进入未来的智能工厂，5G 可能会产生重要影响^[8-17]。

智能工厂在工业界和学术界得到了很大发展和深入探索。国内外的典型智能工厂服务提供商开发了各类有针对性的解决方案^[8-9]。从发展趋势来看，智能工厂的构建仍依托工业大数据平台、软/硬件产品及系统。智能工厂需求强劲、增长迅速，是未来制造业发展的趋势，是智能制造的基石。但是，智能工厂的发展仍处于早期阶段，其整体系统极其复杂。连接是智能工厂的基础，先有大连接才有大数据，才有智能。网络是连接的载体。截至目前，5G（包括边缘计算）和智能工厂的结合也取得了长足的进步，在机器视觉检测、精准远程操控、现场辅助装配、智能理货物流、无人巡检安防等方面获得了一系列的应用成果^[4,7,17]。尽管 5G 已经在多个工业场景应用，但这些场景普遍存在控制流程简单、时延及抖动要求低等问题，且这些工业场景简单，有利于无线信号的覆盖与传播。如何将 5G 渗透到时延及抖动要求高的运动控制和环境复杂的工业场景中，仍需要工业界、学术界的共同努力，包括产业生态和商业模式上的成熟与清晰。5G 和工业互联网亟须突破并进入工业最底部、最基础层面的主流应用。未来随着进一步发展，5G 将有望激活更深层面的创新：从局部或车间产线改造到高度柔性和智能应用、云边端协同、算网融合与算力动态迁移，从非实时到软实时、硬实时再到同步实时，一网到底，完成 5G 全连接工厂的普及化。

本文综述了 5G 使能未来工厂的基本能力，并总结了相关的用例和需求，分析说明了主要构建模块，5G 使能未来智能工厂的关键技术如图 1 所示，介绍了目前的研究工作进展以及一些尚未解决的主要挑战。

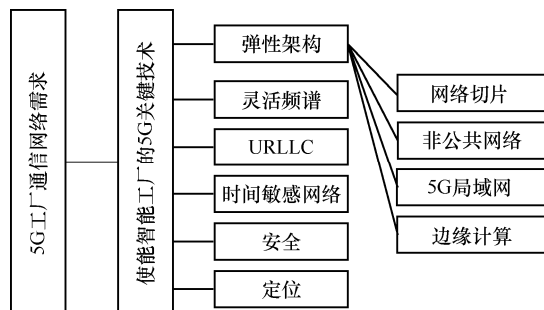


图1 5G 使能未来智能工厂的关键技术

1 5G 工厂通信网络需求

互联互通是推动工业环境中数字化和产品服务化的关键驱动力。工业 4.0 的目标是将当今的工厂改造成智能连接的生产信息系统，这些系统的运行远远超出了工厂的物理边界。未来的工厂利用“信息物理系统”和物联网解决方案在工业过程中智能集成。5G 网络可以在这种集成中发挥关键的支持作用，提供可编程技术平台，能够以无处不在的方式连接各种各样的设备，未来工厂不同应用领域与不同用例的映射关系见表 1^[13]，典型工业自动化用例和性能需求见表 2^[13,18-19]。

必须说明的是，工厂的无线电传播环境可能与 5G 系统其他应用领域的情况大不相同，其典型特征是由发射机和接收机周围的大量通常为金属的物体引起的非常丰富的多径，以及由电机、电弧焊等引起的潜在高干扰。工厂 5G 通信网络需求的主要挑战和特殊性有以下几个方面^[10]。

- 可用性。高可用性意味着终端用户可以始终使用该服务。网络的构建必须确保停机

时间几乎为零，并且可以控制任何系统维护，从而保证最大可用性。这可能包括鲁棒的解决方案和关键元件的冗余结构。

- 可靠性。可靠性是指在预定的持续时间内以高成功概率传输一定业务量的能力。它需要足够的网络覆盖和容量及强大的切换功能。
- 互联互通。5G 系统必须支持与现有（主要是有线）连接基础设施的无缝集成。例如，5G 应允许在同一机器或生产线中灵活地将 5G 系统与其他（有线）技术相结合。非公共网络和公共网络之间的互通也是一种重要的能力。
- 工业级服务质量。服务质量包括吞吐量、时延、抖动、丢包率等。许多应用需要工业级服务质量，在端到端时延、通信服务可用性、抖动和确定性方面有严格的要求。
- 安全性。很多应用对安全性（尤其是可用性、数据完整性和保密性）和隐私有严格的要求。5G 工厂网络需要提供完整的端到端安全，以确保信息、基础设施和人员免受威胁。
- 适应性和可扩展性。不仅存在单一类别的用例，而且存在许多不同类别的用例，具有各种各样的需求，因此需要 5G 系统有高适应性和可扩展性。
- 长生命周期。生产设施的使用寿命通常较长，可能为 20 年甚至更长。因此，5G 通信服务和组件的长期可用性至关重要。

表 1 未来工厂不同应用领域与不同用例的映射关系^[13]

对比项	运动控制	控制到控制	带安全装置的移动控制面板	移动机器人	远程接入和运维	增强现实	闭环控制	过程监控	工厂资产管理
工程自动化	A	A		B					
过程自动化				B			A	C	C
HMI 和生产 IT			A			D			
物流和仓储		A		B					
监控和运维					√				

注: A、B、C 和 D 表示通信业务可用性，其中，A 是“99.999 9%~99.999 999%”，B 是“> 99.999 9%”，C 是“99.99%”，D 是“99.9%”。

表 2 典型工业自动化用例和性能需求^[13,18-19]

用例		通信需求					
		链路需求					
		时间关键型或循环			非关键型		
		循环时间/ms	有效载荷	抖动	时延	速率	抖动
运动控制	印刷机	<2	20 byte	<1 μs	—	>1 Mbit/s	—
	机床	<0.5	50 byte	<1 μs	—	>1 Mbit/s	—
	包装机	<1	40 byte	<1 μs		>1 Mbit/s	—
控制到控制通信	控制器间通信	4~10	<1 KB	<1 μs	<10 ms	5~10 Mbit/s	—
过程自动化	闭环控制	10~100	几字节	1~10 ms	—	—	—
	过程监控	50	—	—	—	—	—
	工厂资产管理	50	—	—	—	—	—
移动机器人	精准协同机器人	1	40~250 byte	<50%的循环时间	—	>10 Mbit/s	—
	机床	1~10					
	协同驾驶	10~50					
	视频控制	10~100	15~150 KB				
	标准机器人操作与业务管理	40~500	40~250 byte				
以人为中心的监控	安全控制面板	4~8	40~250 byte	2~4 ms	<30 ms	>5 Mbit/s	<15 ms
	增强现实	<10	20~50 Mbit/s	—	—	—	

此外, 5G 系统应能够支持实时连续监测当前网络状态, 在出现问题时采取快速、自动化的措施, 并进行有效的根因分析, 以避免生产过程出现任何可能造成巨大经济损失的意外中断。特别是在涉及第三方网络运营商的情况下, 需要准确的服务等级协定 (service level agreement, SLA) 监控, 作为违反 SLA 时可能发生的基础。

2 弹性网络架构

5G 为网络切片提供端到端支持, 提供弹性云原生核心网, 支持基于 3 个主要业务类型, 即增强型移动宽带 (enhanced mobile broadband, eMBB)、超可靠低时延通信 (ultra-reliable and low-latency communication, URLLC) 和大连接物联网 (massive machine-type communication, mMTC)^[20]。

4G 移动网络架构旨在满足传统移动宽带服务的需求。该体系架构由大量粗粒度网元组成, 这些网元点到点接口相连, 相当静态、过于复

杂, 无法满足各种垂直用例所需要的灵活性、弹性和可扩展性。为了以最低的复杂性和成本满足这些用例的多样化需求, 3GPP 定义了一个全新的系统架构^[20-22]。5G 支持使用网络功能虚拟化 (network function virtualization, NFV) 和软件定义网络 (software defined network, SDN) 等技术。5G 系统架构设计的一些主要原则和概念是: 控制与用户面分离 (control and user plane separation, CUPS)、模块化设计、基于服务的体系架构、最小化接入网和核心网之间的依赖、统一的身份认证框架、能力开放等, 助力于实现低时延、网络切片、独立的可扩展性、演进和灵活的部署 (如集中式或分布式), 融合统一不同的接入方式。

网络弹性能力能够以自动方式适应负载变化, 以便可用资源在每个时间点都尽可能紧密和高效地匹配需求, 从而获得弹性增益, 如图 2 所示^[23]。弹性维度包括计算性、编排驱动性和切片感知性。

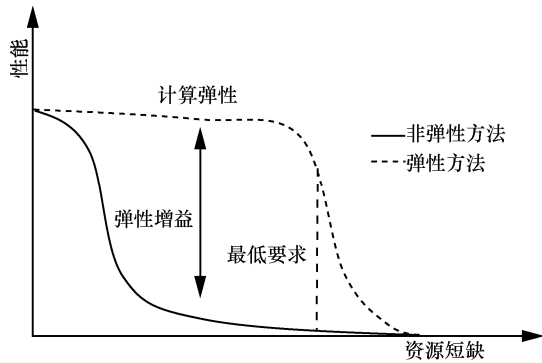


图2 弹性增益

2.1 网络切片

网络切片（network slice）是一个逻辑网络，服务于定义的业务目的或客户，由一起配置的所有必需网络资源组成。它包括切片管理模块创建、更改和删除。网络切片有^[24]以下几个优势：

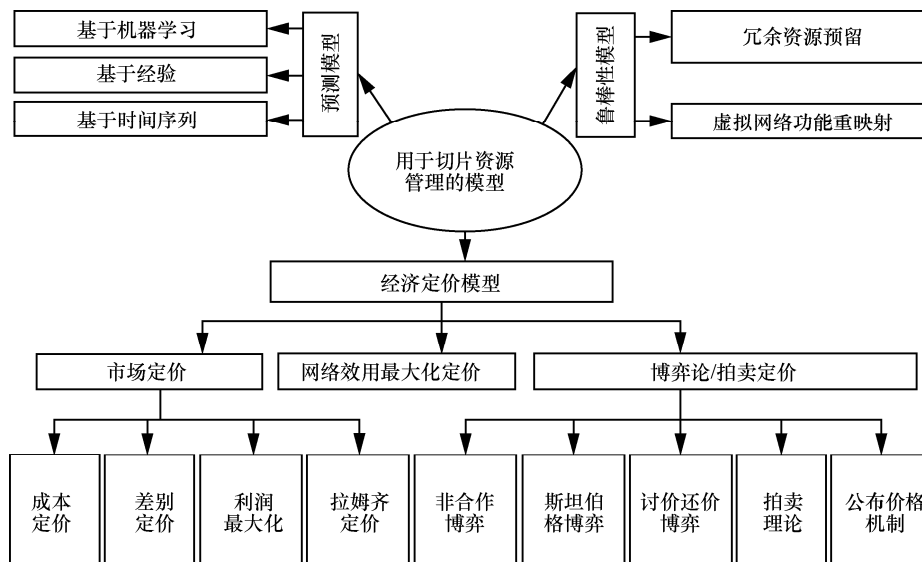
- 关注点分离；
- 不同的用例和需求；
- 相同功能的多个实例化；
- 减少上市时间（time to market, TTM）。

端到端网络切片是 5G 架构的基石，支持多种 5G 服务。它允许运营商为特定的需求和功能提供专用的逻辑/虚拟网络，每个网络都有自己独特的属性。基于网络功能虚拟化和软件定义

网络，物理基础设施从逻辑网络架构中抽象出来^[25-26]。每个网络切片可能有自己的网络架构、协议和安全设置。

端到端网络切片将包括核心网、接入网，可能还包括传输网络。eMBB、URLLC 和 mMTC 切片可以在单个基础设施上独立支持^[21]。eMBB 切片对带宽有很高的要求，并将由能够进行高计算的物理基础设施支持。在过程控制和虚拟或增强现实的应用场景中，URLLC 对网络时延高度敏感，因此移动边缘计算（mobile edge computing, MEC）应靠近用户，以提供较短的往返时间。mMTC 切片向网络发送的数据包很少，但需要大容量来注册数百万个设备。因此，这允许将较低的计算物理资源用于该切片，从而降低总体运营费用。

经济定价、预测和鲁棒性方法已被应用于解决切片资源管理中的许多问题。切片资源管理中的模型分类如图 3 所示^[27-34]，如经济定价分类基于价格的设置方式，即基于市场的定价、博弈论和拍卖的定价及网络效用最大化（network utility maximization, NUM）的定价。对这些不同模型的选择，依赖于服务的目的及商业模式确定。

图3 切片资源管理中的模型分类^[27-34]

2.2 非公共网络

与向公众提供移动网络服务的网络不同, 5G 非公共网络 (non-public network, NPN, 有时也称为专用网络) 向明确定义的用户组织或组织提供 5G 网络服务。5G 非公共网络部署在组织定义的场所, 如校园或工厂。非公共网络有以下几个要求^[35-36]。

- 高质量的服务要求。
- 高安全性要求, 由专用安全凭据满足。
- 与其他网络隔离, 以作为防止公共移动网络故障的一种形式。此外, 出于性能、安全、隐私的原因, 隔离可能是必须的。
- 非公共网络也使得对可用性、维护和操作的责任界定变得更加容易。

5G 产业自动化联盟 (5G Alliance for Connected Industries and Automation, 5G-ACIA) 描述了 4 种 NPN 部署场景, 并给出了 NPN 和公共陆地移动网 (public land mobile network, PLMN) 之间的部署关系^[37]。为了支持 5G 系统垂直行业化部署, 3GPP 定义了公网融合 (虚拟专网和混合专网) 和独立专网两种部署模式^[38-39], 并描述了 5G 系统在网络识别方面的增强功能及两种模式下的终端配置和网络选择。5G 系统提供终端接入控制, 支持垂直行业对独立资源的需求, 实现公私网业务互通。这些不同的部署方式, 需要从技术性能、灵活性与可扩展性、安全性、部署简单性、运维与管理简单性、资源与成本效率等维度进行考量选择^[38]。

2.3 5G 局域网

如前面所述, 工业自动化对低时延、高可靠性和消息的确定性传递有严格的要求。此外, 提供 5G 局域网 (local area network, LAN) 类型的服务, 可以增强工厂部署的现有 WLAN 和/或固定 LAN, 也可以作为替代 LAN 技术, 消除对其他 WLAN 和固定 LAN 部署的需求^[40]。为了达到严格的时延和抖动要求, 数据包路由在开放系统

互联 (open system interconnection, OSI) 参考模型第 2 层 (以太网) 而不是 OSI 第 3 层 (IP) 完成。其他重要要求 (如通信服务可用性和可靠性) 需要考虑额外的设计, 如冗余方案以实现极高的通信服务可用性。

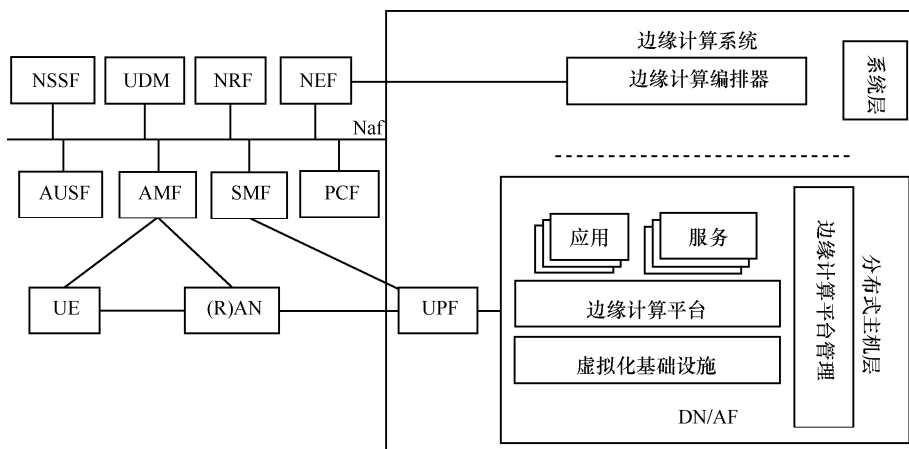
2.4 边缘计算

将用户界面的网元和业务处理能力下移到网络边缘, 实现了业务流量的分布式本地处理, 避免了流量的过度集中, 从而大大降低了对核心机房和集中网关的要求。同时, 边缘计算缩短了回传网络的距离, 减少了端到端的传输时延和用户数据包的抖动, 使得超低时延业务的部署成为可能。

在 5G 网络架构设计之初, 3GPP 就包括对边缘计算部署场景的支持。5G 中集成 MEC 的架构如图 4 所示^[42], 基于服务化架构的 3GPP 5G 系统显示在左侧, 而 MEC 系统架构显示在右侧。欧洲电信标准组织 (European Telecommunications Standards Institute, ETSI) 定义了 7 种场景: 智能视频加速业务场景、视频流分析业务场景、增强现实业务场景、密集计算辅助、MEC 企业部署、车联网和物联网网关业务场景^[41]。

5G 网络架构主要通过以下方面支持边缘计算^[20,43-45]。

- UPF 重新选择。在协议数据单元 (protocol data unit, PDU) 会话建立期间, SMF 将选择适当的 UPF。在 PDU 会话的生存期内, UPF 可以根据用户的位置而改变。
- 本地路由和流量控制。基于上行链路分类器 (uplink classifier, UL CL) 和 IPv6 多宿主等技术, 一些流量可以被过滤以转移到本地 MEC 资源 (称为“对数据网络的本地访问”), 而其余流量可以通过数据网络远程访问。
- 会话和服务连续性。建立 PDU 会话时, 它将与 3 种潜在业务连续性 (session and



注：AUSF (authentication server function)：鉴权服务器功能；
 AMF (access and mobility management function)：接入和移动性管理功能；
 SMF (session management function)：会话管理功能；
 NSSF (network slice selection function)：网络切片选择功能；
 NEF (network exposure function)：网络开放功能；
 NRF (network repository function)：网络存储功能；
 UDM (unified data management)：统一数据管理；
 PCF (policy control function)：策略控制功能；
 AF (application function)：应用功能；
 UPF (user plane function)：用户面功能；
 (R)AN ((radio) access network)：(无线电)接入网；
 DN (data network)：数据网络；
 UE (user equipment)：用户设备。

图4 5G中集成MEC的架构^[42]

service continuity, SSC) 模式之一相关联，从而实现移动性场景的连续性。

- AF影响流量路由。通过直接或NEF与PCF通信，MEC应用功能可以影响流量通过网络的路由方式。
- 网络能力开放。PCF可以直接或通过NEF与AF交换网络能力信息影响MEC的运行。
- 服务质量(quality of service, QoS)和计费。PCF可以为与MEC相关的PDU会话提供QoS和计费规则。这确保与MEC相关的用户面流量得到正确的QoS处理，并因此适当计费。
- 本地数据网络(local area data network, LADN)。5G支持LADN连接，适用于特定地理区域。

对于工厂来说，可能的应用包括实时控制、云控制自动导引车(automated guided vehicle, AGV)、机器视觉质量检测、智能安全等^[4,7,17,46-47]。

3 灵活频谱

5G的频谱灵活性带来了许多新的研究挑战。与前几代相比，5G通过支持高达800 MHz的载波提高了峰值和用户感知的数据速率，但代价是射频和基带信号处理的功耗增加。不同的业务有不同的需求，例如，在mMTC场景中支持大量UE可能需要配置窄带载波以降低UE功耗；另一方面，URLLC场景需要更短的时延，如通过使用更宽的子载波(sub-carrier space, SCS)来实现。

关键通信的先决条件是完全控制频谱，只有获得许可的频谱才能保证系统对频谱使用的控制，使其成为关键通信的首选。然而，未经许可的频谱可以为扩展非关键通信提供额外的资源。在更高的频率下，将在许可和未许可频段提供非常大的频谱分配，这将实现极高的容量和数据速率。未经许可的5G使用与许可5G相同的灵活帧和时隙结构以及基本物理层设计和协议栈。未经

许可的 5G 增加了信道接入过程, 以实现与其他系统 (如 IEEE 802.11 变体或长期演进 (long term evolution, LTE) 授权辅助接入 (licensed assisted access, LAA) 的公平共存。对未经许可的 5G 在通信时延和可靠性方面进行改进, 以更好地促进工业应用。

为了提供参数集和载波带宽灵活的统一解决方案, 3GPP 为 5G 引入了一种称为带宽部分 (bandwidth part, BWP) 的新功能^[48]。

BWP 支持 4 个主要用例场景^[49-51]。场景 1 可以利用 BWP 服务具有比系统带宽更小的带宽能力的 UE, BWP 概念使得具有不同带宽能力的各种类型的用户能够访问同一网络; 场景 2 用于减少 UE 功耗的带宽自适应, UE 可以在较窄的 BWP 中保持监视控制信道, 如果检测到调度控制信息, 则 UE 可以切换到更宽的 BWP 以接收或发送数据, 通过仅在必要时扩宽其带宽, UE 可以最小化由监控控制信道引起的功率消耗; 场景 3 用于在系统带宽内支持多个计数, 其中不同的 BWP 配置了不同的参数集, 通过使用 BWP 特定的参数集, 可以在同一系统中同时支持不同类型的业务, 如 eMBB、URLLC 和 mMTC; 场景 4 提供向前和向后兼容性。

4 超可靠低时延通信

从表 1 和表 2 可以看出, 满足表中的全部要求是非常有挑战的。目前 3GPP 评估结论是: 3GPP

Release 16 物理层满足 99.999 9% 的要求, 对于更高的要求并未评估, 预计需要使用高层的复用技术来满足。端到端通信模型抽象示例如图 5 所示^[13], 可基于端到端视角, 而不是仅仅考虑物理链路的改进提升, 而是需要从逻辑链路出发, 研究合适的关键技术及其组合。

URLLC 解决方案是端到端、全系统的, 可以分为低时延、高可靠及时延和可靠性约束, 如何最大化系统效率这 3 部分, URLLC 关键技术和解决方案总体如图 6 所示^[52]。涉及的关键技术主要是新型帧结构、物理层信道性能增强、灵活架构、资源管理、端到端的多路经分集等^[52-70]。

对于超可靠低时延通信, 文献[52]有详细的论述, 需要强调的是, 图 6 如同提供了工具箱, 具体选择什么工具、网络如何部署, 需要根据具体的应用场景和设计目标确定, 如以低时延和可靠性作为约束条件、以资源或者成本最小化求最优解^[52]。此外, 除了通信中的逻辑链路冗余, 还可以考虑通信和应用功能中的逻辑链路都冗余的方案。

5 时间敏感网络

全连接工厂将依赖云技术及基于以太网时间敏感网络 (time sensitive network, TSN) 和无线 5G 的互联互通。工厂中的业务包括弹性业务和确定性业务。弹性业务有长尾, 但确定性业务没有尾, 弹性业务和确定性业务的时延特性对比如图 7

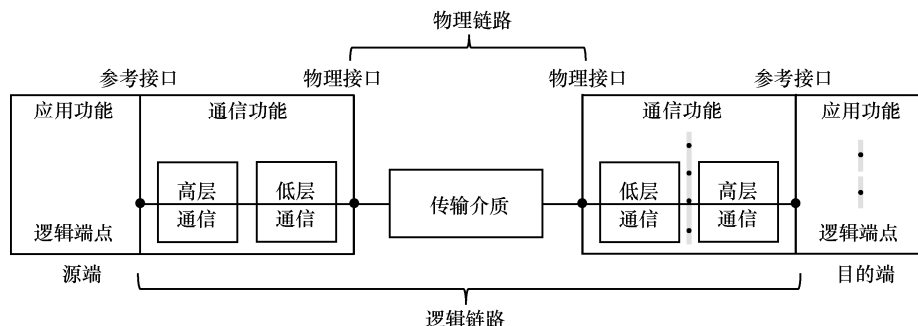
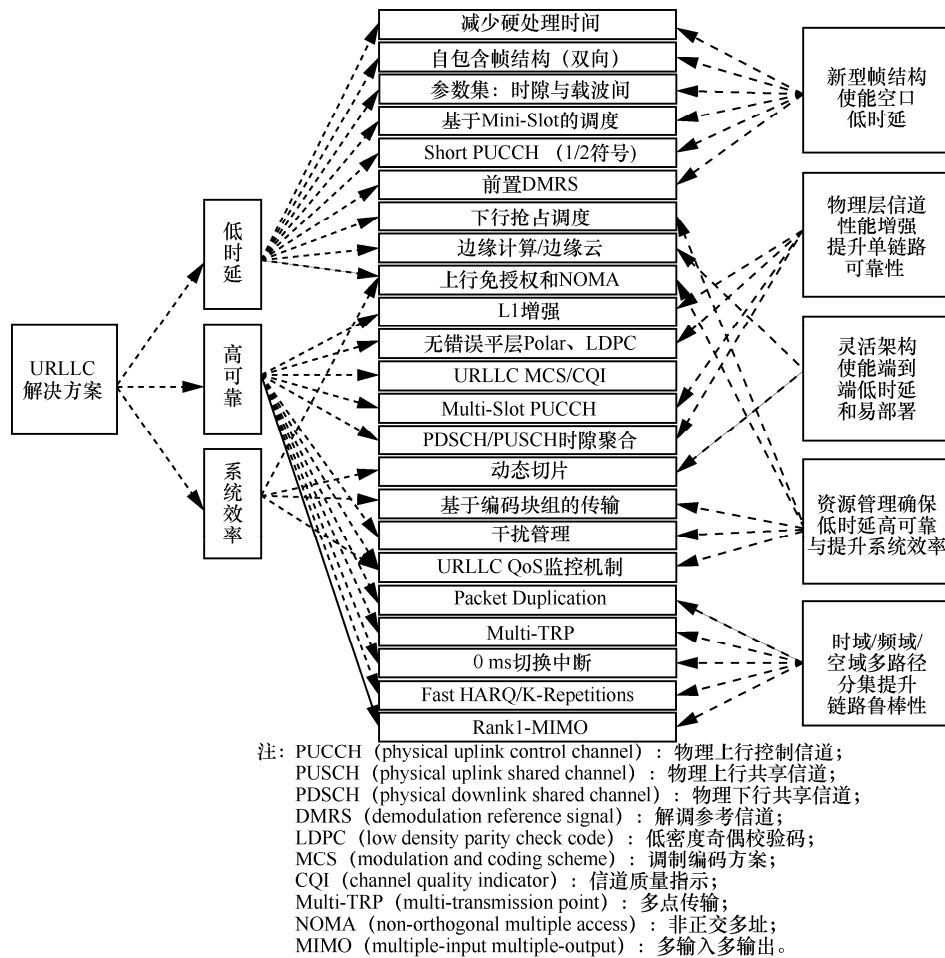


图 5 端到端通信模型抽象示例^[13]

图6 URLLC 关键技术和解决方案总体^[52]

所示。周期性、确定性通信业务是超低时延业务的代表性示例，尤其是在运动控制业务中。

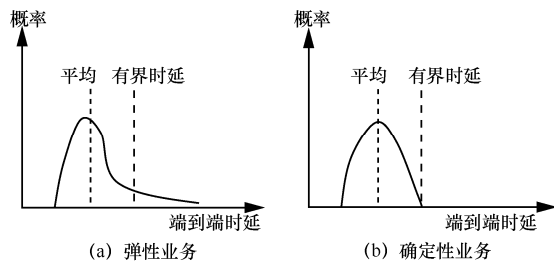


图7 弹性业务和确定性业务的时延特性对比

TSN 的关键技术点见表 3^[71-73]。

目前工业界对 TSN 的研究聚焦在时间同步、低时延流控（包括流整形、流调度、流抢占）、可靠性（包括冗余机制、故障检测与恢复、时间同步可靠性）、网络管控以及应用场景 5 个方向。最

大的挑战是时间敏感网络组网技术研究、无线时间敏感网络技术研究、基于时间敏感网络技术的应用研究^[74]。

在面向 TSN 的分组调度机制（包括调度与路由机制、负载平衡机制相结合）方面^[75-78]，有可满足性模理论（satisfiability modulo theories, SMT）、优化模理论（optimization modulo theories, OMT）、整数线性规划（integer linear programming, ILP）、混合遗传算法等，但这些算法都有在大规模调度场景下的求解时间难以满足调度需求问题，为此，针对网络拓扑规模庞大的问题，通过一种拓扑修剪策略^[75]，减少不必要的约束条件简化调度模型，以减少调度的求解时间。

表 3 TSN 的关键技术点

TSN 组件	技术	IETF 标准
同步 (时间同步)	定时同步	802.1AS IEEE 1588 (P802.1AS-Rev)
可靠性 (高可用/超可靠)	帧复制和消除	802.1CB
	路径控制	802.1Qca
	每流过滤和策略	802.1Qci
	时间同步可靠性	P802.1AS-Rev
时延 (有界低时延)	基于信用的整形器	802.1Qav
	帧抢占	802.3br & 802.1Qbu
	计划业务量	802.1Qbv
	循环排队和转发	802.1Qch
	异步流量整形	P802.1Qcr
	QoS 规定	P802.1DC
资源管理 (专用资源和应用接口)	流预留协议	802.1Qat
	TSN 配置	802.1Qcc
	基本 YANG 模型	802.1Qcp
	连接故障管理 YANG 模型	P802.1Qcx
	链路层发现 YANG 模型	P802.1ABcu
	用于 Qbv、Qbu、Qci 的 YANG 模型	P802.1Qcw
	用于 FRER 的 YANG 模型和 MIB	P802.1CBcv
	链路本地注册协议	P802.1CS
	资源分配协议	P802.1Qdd
	扩展流标识	P802.1CBdb

在 TSN 的控制架构方面^[79-80], 有全分布式控制模型、分布式用户管理与集中式网络控制模型、全集中式控制模型。在实现方面, 基于软件定义网络通过获得网络的全局视图对网络进行集中管控, 从而提供敏捷的网络运维能力和高效的资源调度能力。TSN 控制架构面临的挑战是如何确保实时性和一致性、如何控制有界时延抖动、如何增强应用适配能力。因此, 实现分层分域与多级控制、优化集中配置开销是潜在的研究方向。

5G 和 TSN 可以满足工业物联网的苛刻网络要求^[73]。5G 和 TSN 的结合是智能工厂的完美选择, 因为它提供了超可靠性和低时延的功能。也就是说, 这两种技术需要一定程度的集成, 以提供端到端以太网连接, 满足工业需求。

5G 系统作为 TSN 网桥与外部网络集成。5G 和 TSN 的集成提供端到端确定性连接如图 8 所

示, 这个“逻辑”TSN 网桥包括 TSN 转换器功能, 用于用户面和控制面的 TSN 系统和 5G 系统之间的互操作。5GS TSN 转换器功能包括设备侧 TSN 转换器 (device-side TSN translator, DS-TT) 和网络侧 TSN 转换器 (network-side TSN translator, NW-TT)。5G 核心网和接入网中的 5G 系统特定流程、无线通信链路等仍然对 TSN 隐藏。为了实现 TSN 和 5G 的透明性, 5G 通过 DS-TT 和 NW-TT 提供 TSN 入口和出口端口。例如, TT 支持用于消除抖动的保持和转发功能。通过无线 5G 和有线 TSN 域的集成时间同步为工业端点提供了一个通用的参考时间。

5G URLLC 功能与 TSN 功能非常匹配。这两项关键技术可以组合和集成^[52], 以提供端到端的确定性连接, 如输入/输出 (I/O) 设备及其控制器之间的连接, 这些设备可能位于工业自动化的边

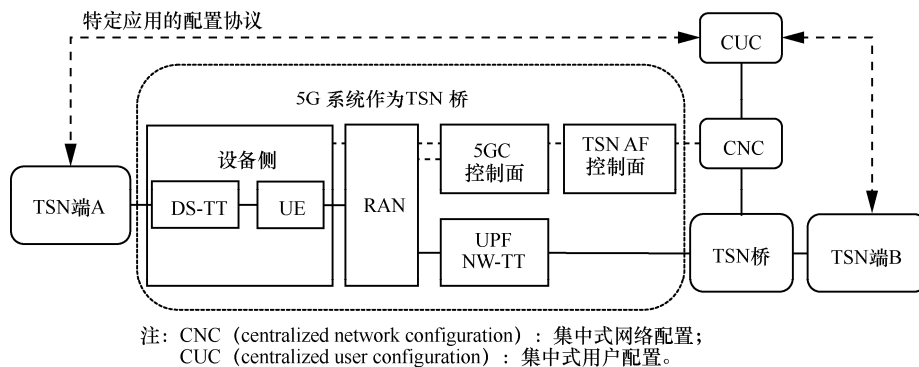


图 8 5G 和 TSN 的集成提供端到端确定性连接

缘云中。集成包括对必要的基本桥接功能和 TSN 附加组件的支持。

6 工业垂直业务安全

5G 架构和技术的演进带来了新的威胁。4G 中的基本安全机制在 5G 中被重用,但是需要一个新的身份验证框架来适应这种变化。与 4G 相比,5G 的安全性在以下几个方面得到了增强^[81-97]:

- 增强的国际移动用户识别码 (international mobile subscriber identity, IMSI) 隐私 (通过空口加密的用户身份);
- 统一认证框架和接入无关认证;
- 主认证;
- 二次认证;
- 加强家乡控制;
- RAN 安全性 (用户平面完整性保护);
- 基于服务架构的安全性;
- 网络切片安全;
- 垂直业务的增强功能;
- 支持 256 位密钥。

垂直市场业务的安全性有以下几个重要支持点:

- 可扩展认证协议 (extensible authentication protocol, EAP) 支持统一身份验证框架;
- 应用层认证和密钥管理 (authentication and key management for applications, AKMA): 安全能力开放;
- 切片安全。

5G 安全架构在 3GPP 技术规范中定义了不同的领域^[83]: 网络访问安全、网络域安全、用户域安全、应用域安全性、服务化架构 (service-based architecture, SBA) 域安全、安全性的可视性和可配置性。3GPP 采用 5G 系统最可靠的 IETF EAP 框架, 支持各种认证方式, 不同类型凭证的 EAP 方法见表 4^[97], 同时支持接入网不可知认证过程。支持各种身份验证方法以支持具有不同安全存储和执行环境的各类设备。独立专网网络中的网络访问认证可以基于任何 EAP 认证方法。对于结合公共移动网络部署的专用 5G 网络, 主接入认证使用 EAP-AKA', 但辅助认证可以使用任何 EAP 方法。例如, 用于访问非公共网络的机器类型通信设备的基于证书的认证、用于访问私有网络的基于密码/生物特征的认证以及用于访问公共网络的基于认证与密钥协商 (authentication and key agreement, AKA) 凭证的认证, 这些认证必须是高效和有效的。

AKMA 是 3GPP 指定的基于蜂窝网络的委托认证系统^[85], AKMA 系统是 5G 标准的一部分。早期的蜂窝网络 (3G、LTE) 包括两个授权认证系统标准, 通用引导架构 (generic bootstrapping architecture, GBA) 和极低吞吐量机器类型通信设备的电池效率安全 (battery-efficient security, BEST), AKMA 系统可以被视为这些系统的继承者。委托认证是一种技术, 使服务提供商能够将其用户进行认证的任务委托给第三方^[96]。通常,

表 4 不同类型凭证的 EAP 方法^[97]

证书类型	EAP 方法	协议
客户端和服务端证书	EAP-TLS	RFC 5216
预共享密钥	EAP-PSK	RFC 4764
一次性密码	EAP-POTP	RFC4793
用户输入的密码	EAP-Pwd	RFC 8146
SIM 卡	EAP-AKA'	RFC 5448
使用证书的服务器身份验证和使用用户键入密码的客户端身份验证	EAP-TTLS	RFC 5281

第三方建立并注册用户的身份，在用户登录服务提供商之前，第三方根据已建立的身份对用户进行身份验证。如果认证成功，第三方将直接或通过用户向服务提供商发送经认证的用户身份。发送的标识可能特定于服务提供商，服务提供商通常被称为依赖方（relying party, RP），第三方实体通常被称为身份提供商（identity provider, IdP）。

AKMA 的基本网络模型如图 9 所示^[96]。AKMA 服务需要一个新的逻辑实体，称为 AKMA 锚功能（AKMA anchorfunction, AAnF）。图 9 显示了 AAnF 作为独立功能部署的情况。根据运营商的部署场景，部署可以选择将 AAnF 与 AUSF 或 NEF 并置。

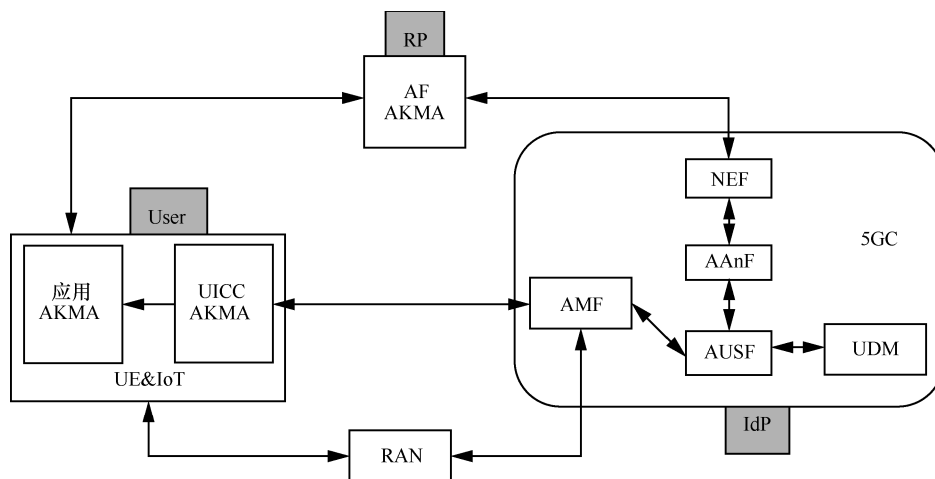
5G 工厂网络利用网络隔离、数据保护和设备/用户身份认证来保护关键资产。企业还可以

控制保留和数据主权，以确保敏感信息保留在本地。

在增加安全机制和实现目标 QoS 要求所需要的计算能力之间存在固有的权衡，如添加完整性保护可能会增加计算复杂性，从而为 URLLC 业务添加不可接受的时延。同时，不提供完整性保护可能会使 URLLC 业务受到可能的攻击。

7 定位

高精度定位正成为未来工厂的关键^[98-104]，原因在于，对移动设备和移动资产的跟踪对于改进流程和提高工业环境中的灵活性变得越来越重要。定位性能需求见表 5，列出了水平和垂直精度、可用性、头向、定位时延和 UE 移动速度的典型场景和相应的高定位要求。



注：UICC（universal integrated circuit card）：通用集成电路卡。

图 9 AKMA 的基本网络模型^[96]

表 5 定位性能需求^[12]

场景	水平精度	垂直精度	可用性	头向	定位时延	UE 移动速度
带安全功能的移动控制面板（非危险区）	< 5 m	< 3 m	90 %	不涉及	< 5 s	不涉及
过程自动化—工厂资产管理	< 1 m	< 3 m	90 %	不涉及	< 2 s	< 30 km/h
智能工厂中的灵活、模块化装配区（用于在工作场所工具跟踪）	< 1 m （相对定位）	不涉及	99 %	不涉及	1 s	< 30 km/h
智能工厂中的增强现实	< 1 m	< 3 m	99 %	< 0.17 rad	< 15 ms	< 10 km/h
带安全功能的移动控制面板（在工厂危险区）	< 1 m	< 3 m	99.9 %	< 0.54 rad	< 1 s	不涉及
智能工厂中的灵活、模块化装配区（用于自动驾驶车辆，仅用于监控目的）	< 50 cm	< 3 m	99 %	不涉及	1 s	< 30 km/h
制造的入内物流（用于室内自动驾驶系统的驾驶轨迹（如果有更多传感器，如摄像机、GNSS、IMU 等其他传感器支持）	< 30 cm （如果有更多传感器，如摄像机、GNSS、IMU 等其他传感器支持）	< 3 m	99.9 %	不涉及	10 ms	< 30 km/h
制造的入内物流（货物储存）	< 20 cm	< 20 cm	99 %	不涉及	< 1 s	< 30 km/h

5G 中有定位参考信号（positioning reference signal, PRS）用于定位，并对上行探测参考信号（sounding reference signal, SRS）进行了一些增强。5G 接入支持的标准定位方式见表 6^[105-106]。

5G 支持使用上述定位方法中的多种方法进行混合定位。例如，多 RTT 可与 OTDOA 和/或 UTDOA 结合使用，以克服基站之间同步不确定性的影响。还支持使用上述定位方法中的一种或多

表 6 5G 接入支持的标准定位方式

方法	基于 UE	UE 辅助，基于 LMF	5G RAN 辅助	SUPL
A-GNSS	√	√		√（基于 UE 和 UE 辅助）
OTDOA		√		√（UE 辅助）
E-CID		√	√	√（UE 辅助）
Sensor	√	√		
WLAN	√	√		√
Bluetooth		√		
TBS	√	√		√（MBS）
DL-TDOA	√	√		√
DL-AoD	√	√		√
Multi-RTT		√	√	√
5G E-CID		√	√	√（DL NR E-CID）
UL-TDOA			√	√
UL-AoA			√	√

注：A-GNSS（assisted-global navigation satellite system）：辅助全球导航卫星系统；OTDOA（observed time difference of arrival）：观察到达时间差；E-CID（enhanced cell-ID positioning method）：增强小区标识定位；TBS（terrestrial beacon system）：地面信标系统；LMF（location management function）：定位管理功能；SUPL（secure user plane location）：安全用户面定位；MBS（metropolitan beacon system）：都市信标系统；DL-TDOA（downlink time difference of arrival）：下行到达时间差；DL-AoD（downlink angle-of-departure）：下行离开角；NR E-CID（NR enhanced cell-ID）：5G 增强小区标识定位；UL-TDOA（uplink time difference of arrival）：上行到达时间差；UL-AoA（uplink angle of arrival）：上行到达角。

种方法的独立模式（如自主、无网络协助）。

5G 定位的优势^[107-110]是更高的载波频率、大信号带宽、大量天线、D2D 通信和网络密度。大信号带宽允许在时间上更好地解析无线信道，因此，可更准确地估计多径分量，尤其是其信号传播时延，可减少由多径偏差引起的定位误差。使用更高的载波频率，特别是毫米波，会增加视距接收条件的概率，因为任何非视距条件都可能被阻挡，降低了非直达偏差导致定位错误的风险。此外，更高的频率和大规模 MIMO 方案允许通过天线阵列的波束图更精确地跟踪各个终端。

根据克拉美罗下界（Cramer-Rao lower bounds, CRLB）分析，到达时间（time of arrival, TOA）测量值的方差下限为^[113]：

$$\text{var}(\text{TOA}) \geq \frac{1}{8\pi^2 B T_s F_c^2 \text{SNR}} \quad (1)$$

其中，B 是带宽，单位为 Hz； F_c 是中心频率，单位为 Hz；SNR 是信号带宽上的信噪比， T_s 是信号的持续时间。其表明较高的频率和信号带宽可以提高 TOA 测量精度。

为了评估 5G 定位技术的性能，以下指标适用。

- 水平精度：计算的水平位置与 UE 的实际水平位置之间的差。
- 垂直精度：计算的垂直位置和 UE 的实际垂直位置之间的差值。
- 时延：包括更高层和物理层时延。
- 网络效率：PRS/SRS 资源利用率是用于评估网络效率的指标。
- 设备效率：UE 功耗可以被视为 5G 定位评估的起点。

物理层时延、UE 功耗、可扩展性/容量、网络部署复杂性、可用性、UE 和 gNB 复杂性可被视为 5G 定位解决方案的重要设计因素。部署额外的无线电信标，如使用近距离定位技术是一种经济高效的解决方案，可以显著提高室内和室外的定位性能。

8 结束语

5G 专网的部署方式有虚拟专网、混合专网和独立专网模式，也涉及与之关联的 MEC 和 UPF 的关系与部署位置等问题。这些不同的部署方式选型时，需要从实际的应用场景与需求出发，考虑如下评价体系^[111-113]。

- 性能类指标体系，如带宽、时延/有界时延、抖动/确定性、丢包率、同步精度、连接数、可用性、定位精度等。
- 安全类指标体系，如设备安全、网络安全、数据安全、应用安全。更进一步，需要考虑弹性能力（即容错性、容侵性和可恢复性）和可信执行环境（即软硬件运行系统环境）。
- 运维类指标体系，如实时连续的可管理、可监测、可控制。更进一步，也包括智能化问题定界。
- 其他指标体系，如成本与不同系统融合等。

工业 4.0 和制造业将从 5G 通信技术中受益。

本文综述了在工业 4.0 部署中实现 5G 的潜在候选关键技术。然而，尽管 5G 在工业领域可能带来巨大的好处，但同样面临巨大的挑战，这不仅包括工业用例的功能需求对应的关键性能指标技术可行性，也包括跨行业沟通、互动、协调、标准化和监管方面的挑战。尤其重要的是，需要持续不断促进信息和通信技术行业与制造业之间的相互理解。

为了确保电信行业充分理解和考虑特定垂直行业的特定需求和要求，垂直行业充分实现和利用 5G 的能力，所有相关参与者之间需要密切合作，5G 反映的是整个生态系统，包括运营技术（operating technology, OT）行业、信息和通信技术（information and communication technology, ICT）行业和学术界的所有相关者群体。



参考文献:

- [1] HENNING K. Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0[R]. 2013.
- [2] WOLLSCHLAEGER M, SAUTER T, JASPERNEITE J. The future of industrial communication: automation networks in the era of the Internet of Things and industry 4.0[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2017, 11(1): 17-27.
- [3] RAO S K, PRASAD R. Impact of 5G technologies on industry 4.0[J]. Wireless Personal Communications, 2018, 100(1): 145-159.
- [4] 边缘计算产业联盟, 工业互联网产业联盟, 网络 5.0 产业和技术创新联盟. 5G 时代工业互联网边缘计算网络白皮书[R]. 2020. ECC, AII AIA, N5A. White paper on industrial Internet and edge computing network in 5G era[R]. 2020.
- [5] IEC 61158. Industrial communication networks-fieldbus specification[S]. 2014.
- [6] IEC 61784. Industrial communication networks – profiles[S]. 2014.
- [7] 施耐德电气, 华为技术有限公司. 5G 和 5G 演进: 工业控制应用场景白皮书[R]. 2021. Schneider Electric, Huawei Technologies Co., Ltd. 5G and 5G evolution: white paper on industrial control application scenarios[R]. 2021.
- [8] 5G ACIA. 5G for Connected industries and automation[R]. 2018.
- [9] 张泉灵, 洪艳萍. 智能工厂综述[J]. 自动化仪表, 2018, 39(8): 1-5. ZHANG Q L, HONG Y P. Intelligent plant review[J]. Process Automation Instrumentation, 2018, 39(8): 1-5.
- [10] Ericsson. Critical capabilities for private 5G networks[R]. 2019.
- [11] 工业互联网产业联盟. 工业互联网体系架构[R]. 2020. Alliance of Industrial Internet. Industrial internet architecture[R]. 2020.
- [12] 3GPP. Service requirements for cyber-physical control applications in vertical domains: TS 22.104[S]. 2020.
- [13] 3GPP. Study on communication for automation in vertical domains: TR 22.804[S]. 2020.
- [14] BANCHS A, GUTIERREZ-ESTEVEZ D M, FUENTES M, et al. A 5G mobile network architecture to support vertical industries[J]. IEEE Communications Magazine, 2019, 57(12): 38-44.
- [15] 5G PPP. 5G and the factories of the future[R]. 2015.
- [16] GHOSH A, MAEDER A, BAKER M, et al. 5G evolution: a view on 5G cellular technology beyond 3GPP release 15[J]. IEEE Access, 2019(7): 127639-127651.
- [17] 确定性网络产业联盟. 5G 确定性网络+工业互联网融合白皮书[R]. 2020. 5G DNA. 5G deterministic network and industrial Internet convergence white paper[R]. 2020.
- [18] 3GPP. Service requirements for the 5G system: TS 22.261[S]. 2020.
- [19] GANGAKHEDKAR S, CAO H W, ALI A R, et al. Use cases, requirements and challenges of 5G communication for industrial automation[C]//Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Communications Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [20] 3GPP. System architecture for the 5G system: TS 23.501[S]. 2020.
- [21] Samsung. 5G core vision[R]. 2019.
- [22] 3GPP. Study on enhancement of 5G system (5GS) for vertical and local area network (LAN) services: TR 23.734 [S]. 2019.
- [23] 5G-MoNArch. 5G architecture and slicing for customized networks[R]. 2019.
- [24] WIJETHILAKA S, LIYANAGE M. Survey on network slicing for internet of things realization in 5G networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, 23(2): 957-994.
- [25] ZHANG S L. An overview of network slicing for 5G[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(3): 111-117.
- [26] AFOLABI I, TALEB T, SAMDANIS K, et al. Network slicing and softwarization: a survey on principles, enabling technologies and solutions[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(3): 2429-2453.
- [27] LUONG N C, WANG P, NIYATO D, et al. Resource management in cloud networking using economic analysis and pricing models: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(2): 954-1001.
- [28] ZHANG Y, LEE C, NIYATO D, et al. Auction approaches for resource allocation in wireless systems: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(3): 1020-1041.
- [29] SU R Y, ZHANG D Y, VENKATESAN R, et al. Resource allocation for network slicing in 5G telecommunication networks: a survey of principles and models[J]. IEEE Network, 2019, 33(6): 172-179.
- [30] CABALLERO P, BANCHS A, DE VECIANA G, et al. Network slicing games: enabling customization in multi-tenant networks[J]. IEEE INFOCOM 2017 - IEEE Conference on Computer Communications, 2017: 1-9.
- [31] LIANG L, WU Y F, FENG G, et al. Online auction-based resource allocation for service-oriented network slicing[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(8): 8063-8074.
- [32] 伏玉笋. 移动通信网络评价准则与解决方案[J]. 电信科学, 2020, 36(11): 28-38. FU Y S. Evaluation criteria and solution of mobile communication network[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(11): 28-38.
- [33] SATTAR D, MATRAWY A. Optimal slice allocation in 5G core networks[J]. IEEE Networking Letters, 2019, 1(2): 48-51.
- [34] TALEB T, AFOLABI I, BAGAA M. Orchestrating 5G network slices to support industrial internet and to shape next-generation smart factories[J]. IEEE Network, 2019, 33(4): 146-154.
- [35] ORDONEZ-LUCENA J, CHAVARRIA J F, CONTRERAS L M, et al. The use of 5G Non-Public Networks to support Industry 4.0 scenarios[C]//Proceedings of 2019 IEEE Conference on

- Standards for Communications and Networking. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-7.
- [36] STRINATI E C, HAUSTEIN T, MAMAN M, et al. Beyond 5G private networks: the 5G CONNI perspective[C]//Proceedings of 2020 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps. Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [37] 5G ACIA. 5G non-public networks for industrial scenarios[R]. 2019.
- [38] ROSTAMI A. Private 5G networks for vertical industries: deployment and operation models[C]//Proceedings of 2019 IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF). Piscataway: IEEE Press, 2019: 433-439.
- [39] 欧阳晔, 王立磊, 杨爱东, 等. 通信人工智能的下一个十年[J]. 电信科学, 2021 37(3): 1-36.
- OUYANG Y, WANG L L, YANG A D, et al. Next decade of telecommunications artificial intelligence[J]. Telecommunications Science, 2021 37(3): 1-36.
- [40] 3GPP. Feasibility study on LAN support in 5G: TR 22.821[S]. 2018.
- [41] ETSI. Mobile-edge computing (MEC); Service scenarios[R]. 2015.
- [42] ETSI. MEC in 5G networks[R]. 2018.
- [43] 3GPP. Architecture for enabling edge applications: TS 23.558[S]. 2020.
- [44] CHOI Y, PARK N. Support for edge computing in the 5G network[C]//Proceedings of 2018 Tenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN). Piscataway: IEEE Press, 2018: 592-596.
- [45] SPINELLI F, MANCUSO V. Toward enabled industrial verticals in 5G: a survey on MEC-based approaches to provisioning and flexibility[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, 23(1): 596-630.
- [46] CHEN B T, WAN J F, CELESTI A, et al. Edge computing in IoT-based manufacturing[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(9): 103-109.
- [47] LIU Y Q, PENG M G, SHOU G C, et al. Toward edge intelligence: multiaccess edge computing for 5G and internet of things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(8): 6722-6747.
- [48] YEO J, KIM T, OH J, et al. Advanced data transmission framework for 5G wireless communications in the 3GPP new radio standard[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2019, 3(3): 38-43.
- [49] 3GPP. On bandwidth parts and “RF” requirements: R1-1711795[S]. 2017.
- [50] JEON J. NR wide bandwidth operations[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(3): 42-46.
- [51] ABINADER F, MARCANO A, SCHÖBER K, et al. Impact of bandwidth part (BWP) switching on 5G NR system performance[C]//Proceedings of 2019 IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF). Piscataway: IEEE Press, 2019: 161-166.
- [52] 伏玉笋, 杨根科. 无线超可靠低时延通信: 关键设计分析与挑战[J]. 通信学报, 2020, 41(8): 187-203.
- FU Y S, YANG G K. Wireless ultra-reliable and low-latency communication: key design analysis and challenge[J]. Journal on Communications, 2020, 41(8): 187-203.
- [53] Nokia Bell Labs. Ultra reliable low latency communication for 5G new radio[R]. 2018.
- [54] Nokia Bell Labs. Wireless for verticals[R]. 2017.
- [55] SCHULZ P, MATTHE M, KLESSIG H, et al. Latency critical IoT applications in 5G: perspective on the design of radio interface and network architecture[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(2): 70-78.
- [56] POPOVSKI P, STEFANOVIC C, NIELSEN J J, et al. Wireless access in ultra-reliable low-latency communication (URLLC)[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(8): 5783-5801.
- [57] Ericsson. 5G Techniques for ultra reliable low latency communication[R]. 2017.
- [58] 3GPP. Feasibility Study on new services and markets technology enablers for critical communications: TR 22.862[S]. 2016.
- [59] 3GPP. Study on physical layer enhancements for NR ultra-reliable and low latency case (URLLC): TR 38.824[S]. 2019.
- [60] 3GPP. Study on NR industrial internet of things (IoT): TR 38.825[S]. 2019.
- [61] 3GPP. Study on enhancement of ultra-reliable low-latency communication (URLLC) support in the 5G core network (5GC): TR 23.725[S]. 2019.
- [62] DURISI G, KOCH T, POPOVSKI P. Toward massive, ultra-reliable, and low-latency wireless communication with short packets[J]. Proceedings of the IEEE, 2016, 104(9): 1711-1726.
- [63] KIM K S, KIM D K, CHAE C B, et al. Ultrareliable and low-latency communication techniques for tactile internet services[J]. Proceedings of the IEEE, 2019, 107(2): 376-393.
- [64] 3GPP. On URLLC design principles: R1-167061[S]. 2016.
- [65] RAO J, VRZIC S. Packet duplication for URLLC in 5G dual connectivity architecture[C]//Proceedings of 2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [66] 3GPP. Multi-connectivity: TR 37.340[S]. 2019.
- [67] AIJAZ A. Packet duplication in dual connectivity enabled 5G wireless networks: overview and challenges[J]. IEEE Communications Standards Magazine. 2019, 3(3): 20-28.
- [68] RAO J, VRZIC S. Packet duplication for URLLC in 5G: architectural enhancements and performance analysis[J]. IEEE Network, 2018, 32(2): 32-40.
- [69] KHOSHNEVISAN M, JOSEPH V, GUPTA P, et al. 5G Industrial networks with CoMP for URLLC and time sensitive network architecture[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2019, 37(4): 947-959.
- [70] NIELSEN J J, LIU R, POPOVSKI P. Ultra-reliable low latency



- communication using interface diversity[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(3): 1322-1334.
- [71] Ericsson. IEEE 802.1 TSN—an introduction[R]. 2019
- [72] MESSENGER J L. Time-sensitive networking: an introduction[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2018, 2(2): 29-33.
- [73] Ericsson. 5G-TSN integration for industrial automation[R]. Ericsson Technology Review. 2019.
- [74] 蔡岳平, 姚宗辰, 李天驰. 时间敏感网络标准与研究综述[J]. 计算机学报, 2021, 44(7): 1378-1397.
- CAI Y P, YAO Z C, LI T C. A survey on time-sensitive networking: standards and state-of-the-art[J]. Chinese Journal of Computers, 2021, 44(7): 1378-1397.
- [75] 邱雪松, 黄徐川, 李文萃, 等. 面向大规模时间敏感网络的分组调度机制[J]. 通信学报, 2020, 41(11): 124-131.
- QIU X S, HUANG X C, LI W C, et al. Group-scheduling mechanism for large-scale time-sensitive network[J]. Journal on Communications, 2020, 41(11): 124-131.
- [76] 李红艳, 张焘, 张靖乾, 等. 基于时变图的天地一体化网络时间确定性路由算法与协议[J]. 通信学报, 2020, 41(10): 116-129.
- LI H Y, ZHANG T, ZHANG J Q, et al. Time deterministic routing algorithm and protocol based on time-varying graph over the space-ground integrated network[J]. Journal on Communications, 2020, 41(10): 116-129.
- [77] 胡致远, 胡文前, 李香, 等. 面向业务可达性的广域工业互联网调度算法研究[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(9): 2608-2616.
- HU Z Y, HU W Q, LI X, et al. Research on wide area industrial internet scheduling algorithm based on service reachability[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2021, 43(9): 2608-2616.
- [78] DAI X T, ZHAO S, JIANG Y, et al. Fixed-priority scheduling and controller co-design for time-sensitive networks[C]//Proceedings of the 39th International Conference on Computer-Aided Design. New York: ACM Press, 2020: 1-9.
- [79] 王敬超, 高先明, 黄玉栋, 等. 时间敏感网络的控制架构[J]. 北京邮电大学学报, 2021, 44(2): 95-101.
- WANG J C, GAO X M, HUANG Y D, et al. Research of control framework in time-sensitive network[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021, 44(2): 95-101.
- [80] BOEHM M, OHMS J, KUMAR M, et al. Time-sensitive software-defined networking: a unified control-plane for TSN and SDN[C]//Mobile Communication - Technologies and Applications; 24. ITG-Symposium. Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-9.
- [81] RUDOLPH H C, KUNZ A, IACONO L L, et al. Security challenges of the 3GPP 5G service based architecture[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2019, 3(1): 60-65.
- [82] 5G ACIA. Security aspects of 5G for industrial networks[R]. 2020.
- [83] 3GPP. Security architecture and procedures for 5G system: TS 33.501[S]. 2020.
- [84] 3GPP. 3GPP System architecture evolution (SAE); Security architecture: TS 33.401[S]. 2019.
- [85] 3GPP. Authentication and key management for applications (AKMA) based on 3GPP credentials in the 5G System (5GS): TS 33.535[S]. 2020.
- [86] 3GPP. Study on the security of ultra-reliable low-latency communication (URLLC) for the 5G system (5GS): TR 33.825[S]. 2019.
- [87] 3GPP. Study on security enhancements of 5G system (5GS) for vertical and local area network (LAN) services: TR 33.819[S]. 2019.
- [88] 3GPP. Study on security aspects of 5G network slicing management: TR 33.811[S]. 2018.
- [89] 3GPP. Security aspects of common API framework (CAPIF) for 3GPP northbound APIs: TS 33.122[S]. 2019.
- [90] Ericsson. Security standards and their role in 5G[R]. 2020.
- [91] AHMAD I, SHAHABUDDIN S, KUMAR T, et al. Security for 5G and beyond[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(4): 3682-3722.
- [92] CAO J, MA M D, LI H, et al. A survey on security aspects for 3GPP 5G networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2020, 22(1): 170-195.
- [93] YOSHIZAWA T, BASKARAN S B M, KUNZ A. Overview of 5G URLLC system and security aspects in 3GPP[C]//Proceedings of 2019 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [94] Ericsson. A guide to 5G network security 2.0[R]. 2021
- [95] 杨志强, 栗栗, 齐旻鹏, 等. 5G 安全技术与标准[J]. 电信科学, 2020, 36(12): 1-19.
- YANG Z Q, SU L, QI M P, et al. Overview and prospect of 5G security[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(12): 1-19.
- [96] KHAN M, GINZBOORG P, NIEMI V. AKMA: delegated authentication system of 5G[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2021, 5(3): 56-61.
- [97] SETHI M, AURA T. Secure network access authentication for IoT devices: EAP framework vs. individual protocols[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2021, 5(3): 34-39.
- [98] 3GPP. Study on positioning use cases: TS 22.872[S]. 2018.
- [99] DEL PERAL-ROSADO J A, RAULEFS R, LÓPEZ-SALCEDO J A, et al. Survey of cellular mobile radio localization methods: from 1G to 5G[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(2): 1124-1148.
- [100] LIN X Q, BERGMAN J, GUNNARSSON F, et al. Positioning for the internet of things: a 3GPP perspective[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(12): 179-185.
- [101] Ericsson. Positioning with LTE[R]. 2011.
- [102] 3GPP. Study on local NR positioning in NG-RAN: TS

- 38.856[S]. 2019.
- [103] 3GPP. Study on NR positioning enhancements: TS 38.857[S]. 2020.
- [104] 3GPP. Study on location enhancements for mission critical services: TR 23.744[S]. 2020.
- [105] 3GPP. User Equipment (UE) positioning in NG-RAN: TS 38.305[S]. 2019.
- [106] 3GPP. Study on NR positioning support: TR 38.855[S]. 2019.
- [107] GUO X S, ANSARI N, HU F Z, et al. A survey on fusion-based indoor positioning[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 22(1): 566-594.
- [108] CHALOUPKA Z. Technology and standardization gaps for high accuracy positioning in 5G[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2017, 1(1): 59-65.
- [109] Qualcomm. OTDOA positioning in 3GPP LTE[R]. 2014.
- [110] ZHANG P, LU J, WANG Y, et al. Cooperative localization in 5G networks: a survey[J]. ICT Express, 2017, 3(1): 27-32.
- [111] 中通服中睿科技有限公司. 5G 垂直行业专网设计及部署白皮书[R]. 2021.
- China Comservice Zhongrui Technology Co., Ltd. 5G vertical industry private network design and deployment white paper[R]. 2021.
- [112] 5G 应用产业方阵. 5G 行业虚拟专网网络架构白皮书[R]. 2020.

5G AIA. 5G industry virtual private network architecture white paper[R]. 2020.

- [113] 工业互联网产业联盟(AII). 工业互联网安全框架[R]. 2018.
- AII. Industrial internet security framework[R]. 2018.

[作者简介]



伏玉笋 (1972—), 男, 博士, 上海交通大学助理研究员, 主要研究方向为无线通信与系统、无线网联智能系统、工业互联网与安全、智能制造等。



唐金辉 (1999—), 男, 上海交通大学硕士生, 主要研究方向为工业通信系统与安全可信。