

5G[📶]工业应用白皮书

5G工业应用联合创新实验室

2020.09.16



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 5G 工业应用联合创新实验室(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 5G 工业应用联合创新实验室并获得授权许可。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，5G 工业应用联合创新实验室将追究其相关法律责任。

5G 工业应用联合创新实验室

联系电话：010-63462906

邮箱：zhaoyanling@tc124.com

目录

前言	02
编写说明	03
1 概述	04
1.1 5G 技术概述	04
1.2 工业通信的发展趋势	05
1.3 工业发展对 5G 的新需求	07
1.4 5G 工业应用国内外现状	07
2 5G 工业应用场景分析	09
2.1 通用场景分析	09
2.2 典型行业场景示例	10
3 5G 工业应用实施流程	13
3.1 5G 工业应用实施通用流程	13
3.2 工业 5G 网络需求提取	14
3.3 工业 5G 网络方案设计及实施	18
3.4 5G 与工业应用融合建设	20
3.5 工业 5G 网络验收	23
4 总结及展望	24
5 5G 工业应用联合创新实验室简介	25
6 缩略语	26

前言

5G 是新一代移动通信技术，我国已将 5G 技术列为新基建 7 大领域的重点内容。5G 技术具有的大带宽、高可靠、低时延、广连接等特点，使其面向行业深度融合应用成为可能，尤其是 5G 在工业中的应用得到了广泛关注，将赋能工业制造业数字化转型与高质量发展。

为推动 5G 与行业的深度融合发展，在政策方面，工信部、科技部近两年围绕 5G 工业应用陆续出台了相关的产业政策和科研项目布局；在产业生态建设方面，国外的 5G 产业自动化联盟(5G-ACIA)、中国信通院牵头成立的“5G 应用产业方阵”、仪综所与华为发起成立的“5G 工业应用联合创新实验室”等机构和团体在整合行业资源、标准化等方面做了大量工作；在 5G 工业先行应用方面，德国大众、宁波舟山港、上海商飞、南方电网等企业开始使用 5G 技术解决行业难题，实现业务创新。

然而，目前 5G 的工业应用仍然面临一些问题，如：技术层面需满足工业现场对通信提出的实时性、确定性、可用性及安全性等要求，标准层面需建立 5G 工业应用标准体系及实现关键标准制定，以及 5G 在工业场景深度应用的产业生态建设等方面开展进一步研究和探索。

为推动 5G 在工业领域的应用，5G 工业应用联合创新实验室组织相关单位编写本白皮书，分析 5G 工业应用现状和未来发展趋势，梳理典型工业应用场景，指导工业企业开展 5G 工业应用实施。

编写说明

5G 工业应用总体上还处于起步阶段，本白皮书对 5G 工业应用的认识也是阶段性的，后续将根据 5G 工业应用的发展情况和来自各界的反馈意见，在持续深入研究的基础上适时修订和发布新版白皮书。

组织单位：机械工业仪器仪表综合技术经济研究所

编写单位（排名不分先后）：机械工业仪器仪表综合技术经济研究所、华为技术有限公司、中国移动通信集团有限公司

顾问单位（排名不分先后）：中国船舶重工集团海装风电股份有限公司、富士康工业互联网股份有限公司、重庆飞力达供应链管理有限公司、重庆机电智能制造有限公司

编写组成员（排名不分先后）：

机械工业仪器仪表综合技术经济研究所：王麟琨、刘丹、赵艳领、王振、公彦杰、韩丹涛、李方健

华为技术有限公司：谭斌、庞伶俐、李宁、王健、刁岚

中国移动通信集团有限公司：邓伟、郝晓龙、王锐、张龙、程锦霞、李颖、杜晓舟

顾问组成员（排名不分先后）：

中国船舶重工集团海装风电股份有限公司：黄卫民

富士康工业互联网股份有限公司：马力

重庆飞力达供应链管理有限公司：王峰

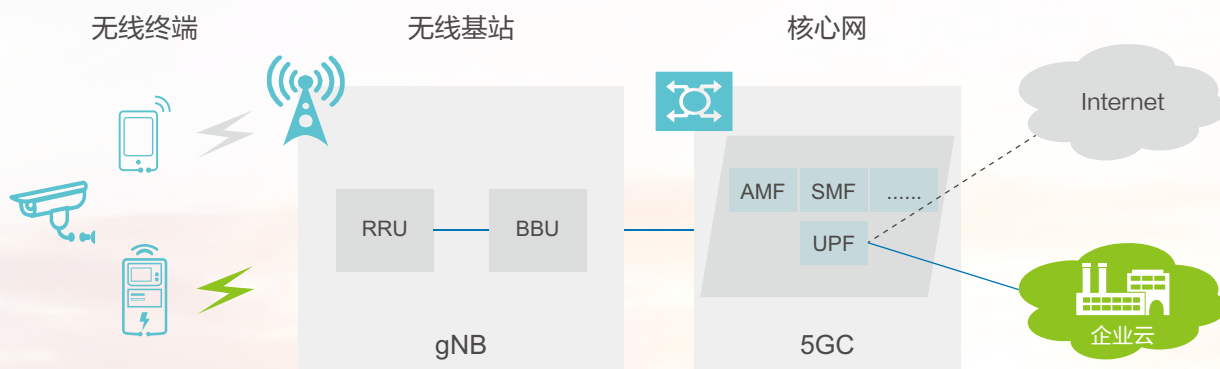
重庆机电智能制造有限公司：岳相军

概述

1.1 5G 技术概述

5G（第五代移动通信技术）是当前最新一代的蜂窝移动通信技术，支持 ITU 定义的：增强移动带宽（eMBB）、超高可靠低时延通信（URLLC）和大规模机器类通信（mMTC）三大场景。相比于前几代移动通信技术，5G 在速率、时延、可靠性及连接数等关键能力指标上都有较大地提升，这使得 5G 面向工业等行业推广应用成为可能。

5G 网络的系统架构如图 1 所示，无线终端的数据首先发送到无线基站侧，然后由无线基站发送给核心网设备，最终发送到目的接收端。其中，无线终端和无线基站之间数据是通过无线信号传输的，无线基站和核心网之间大多通过光纤连接。



无线基站主要由 BBU 和 RRU 两部分功能部件组成，BBU 和 RRU 之间一般通过光纤连接：

- » 基带处理单元（BBU）：主要实现 5G 基带信号的调制和解调功能。
- » 无线射频单元（RRU）：实现射频信号的发射和接收。

核心网按照数据传输的需求划分了多个功能，主要功能如下：

- » 用户面功能（UPF）：主要负责分组路由转发、策略实施、流量报告和 QoS 处理等功能。来自 Internet 或者企业云的用户数据到达核心网即指到达核心网的 UPF，并由 UPF 发送到无线基站设备。
- » 接入与移动性管理功能（AMF）：主要功能包含：执行注册、连接性、可达性和移动性管理，为 UE 和 SMF 提供会话管理消息传输通道，为无线终端接入网络时提供认证、鉴权功能，是终端和基站的核心网控制面接点。
- » 会话管理功能（SMF）：主要负责会话管理、UPF 和无线基站节点之间的隧道维护、IP 地址分配和管理、UPF 的选择漫游等功能。

作为 5G 技术的主要标准化组织，3GPP 已经制定了一系列的 5G 标准，在标准制定过程中，以西门子、博世以及国内南方电网等为代表的行业企业积极参与 3GPP 的标准会议，并以各自领域的业务特征为基础提出对 5G 网络的需求，使得 5G 在演进过程中能够逐渐满足越来越多行业的应用场景及需求。截止到目前，3GPP 已完成了第一版和第二版 5G 标准的制定，第三版的标准化工作在持续进行中。

- » 第一版国际标准（Rel-15）已全部完成，主要针对 eMBB 大带宽业务场景；
- » 第二版国际标准（Rel-16）已于 2020 年 6 月完成冻结，增强了高可靠、低时延的 URLLC 业务场景，更好的支撑 5G 在工业场景的应用。当前，通信设备商和运营商可依据 Rel-16 的标准版本进行相应产品的研发、测试和网络部署。
- » 第三版国际标准（Rel-17）以及之后的版本，一方面将继续对现有功能进行增强和完善，另一方面会引入一些新的功能，来满足新场景下的新需求，例如增加更高速率要求的 mMTC 解决方案、精准定位等使能垂直行业的能力，将促进 5G 在各行业不同应用中的落地。

1.2 工业通信的发展趋势

工业通信网络传统上包含“测”（数据采集）与“控”（控制系统）的所有关联网络，实现现场设备（如传感器、执行设备等）与控制设备（如 PLC、DCS 控制器等）之间的互联互通。与 ICT 领域相比，工业现场使用的通信网络技术应满足工业应用的更严格要求，包括数据传输的实时性、确定性、可用性、安全性等。工业自动化应用所需传输的数据主要分为三类，包括：用于数据采集与控制执行的实时周期性过程数据、用于参数配置与监视控制的非实时非周期变量数据、用于现场工艺及设备诊断报警的实时非周期报警数据。工业通信必须同时满足这三类数据在实时性、数据量级、传输优先级及可靠性等方面的不同传输要求。

工业通信网络技术主要包括现场总线、工业以太网和工业无线网。现场总线起源于二十世纪 80 年代，国际电工委员会 IEC 将其定义为基于串行数据传输、典型应用于工业自动化和流程控制应用的通信系统，具有数字化、双向串行、多点连接的特征。工厂中常用的现场总线有 MODBUS、PROFIBUS、HART、CAN、CC-LINK、DeviceNet/ControlNet 等，物理层信号多采用 RS485、MBP（曼切斯特编码，总线供电）等。

二十世纪 90 年代末，随着以太网与 TCP/IP 技术日趋成熟，并适应企业管理与控制一体化的应用需求，工业以太网（或称实时以太网）逐渐兴起，在 IEEE 802.3 标准以太网上修改 MAC 层或在 MAC 层之上增加一些特定协议机制（如时间调度、通信优先级、时钟同步等），以满足工业应用对通信实时性和确定性的要求。工厂中常用的工业以太网有 EtherCAT、PROFINET、Ethernet/IP、POWERLINK、CC-LINK IE 等。工业以太网与现场总线相比功能全覆盖而性能更高，因此可预见未来工业以太网将替代传统现场总线。但由于流程工业对于物理层具有总线供电、本质安全等特殊要求，现场总线还将继续存在较长时间。现在，国内外正在开展二线制以太网（SPE）和高级物理层（APL）的技术研究和标准制定，基于此，未来以太网技术也可扩展应用到流程工业。

本世纪初，工业无线网从新兴的无线传感器网（WSN）发展而来，目的是将无线通信技术引入工业领域。目前，国际上主要有基于 IEEE 802.15.4（同 ZigBee）的用于过程自动化的 WirelessHART、WIA-PA、ISA100.11a，以及基于 IEEE 802.11（同 WIFI）的用于工厂自动化的 WIA-FA 工业无线网络技术。这四种工业无线都属于短距离无线通信技术，在通用协议基础上修改或定义新的 MAC 层、网络层、传输层和应用层。

随着信息技术的快速发展，工业界由原来比较封闭的自动化 / 运营技术（OT）领域，逐渐向信息技术（IT）领域开放，OT 和 IT 融合是技术发展的必然趋势。一方面，新的信息技术作为使能技术不断应用到工业自动化领域，推动 OT 技术向更高性能、更智能方向发展，如时间敏感网 TSN 技术。TSN 是由一组 IEEE 802.1 标准构成的以太网数据链路层标准，2005 年起源于 IEEE 802.1 AVB（音频视频网桥）后更名为 TSN。由于 TSN 在传统以太网上增加可提供确定性服务的各种功能和性能，包括时钟同步、低时延和预留带宽等，满足了工业应用对实时甚至硬实时通信的需求，而引起了工业界广泛关注，现有的工业以太网技术（如 PROFINET、CC-LINK IE）纷纷与之融合。

另一方面，工厂内 OT 系统和 IT 系统之间要实现互联互通，即各种现场设备、制造装备、控制系统与 MES、ERP 等生产管理系统之间不仅要实现数据相互传输，更要理解所传输数据的含义与作用。OPC UA 是新一代的基于语义和面向服务架构（SOA）的 OPC 规范，将传统 OPC 规范的所有功能集成到一个可扩展框架，并实现了跨平台支持。鉴于其强大的建模能力，OPC UA 被公认为在 IT 系统和

OT 系统融合集成方面具有显著优势，例如通过建立制造装备和生产线的信息模型，很方便实现生产过程管理、故障诊断、设备管理等功能。

1.3 工业发展对 5G 的新需求

5G 技术与标准在设计之初就考虑了工业高实时、高可靠、高安全的通信要求，是新一代信息通信技术演进升级的重要方向。随着智能工厂的建设，工业和制造业对于通信网络技术又不断提出了新的需求。

一方面，5G 可以满足新的工业大数据的传输需求。随着工业智能应用的不断创新发展，工业现场采集的数据种类和量级发生了较大的变革。例如，无人或少人的智能工厂需要大量现场数据做决策支撑，远程诊断、预测性维护等智能应用使得现场设备上云已成“刚需”，视觉检测使得现场数据采集从一维感知到大带宽多维全景感知发展。这些导致了网络通信技术必须支持结构化数据与非结构化数据、实时数据与非实时工业大数据共存的新需求。5G 大带宽和广连接的技术特点，以及保证特定业务需求的 QoS 机制和网络切片技术可很好地满足这些需求。

另一方面，5G 可以满足工业现场网络灵活组网和无线通信的需求。例如，个性化定制要求生产线具有更高的灵活性，甚至可根据订单变化和业务需求而快速增加、移除可移动操作设备实现生产线重构，这要求现场网络也能够支持灵活可重构的组网方式。5G 技术可以很好地满足了对于灵活组网和动态按需分配网络资源的需求。另外，存在必须采用无线通信的生产场景，如旋转类机械装备、老旧工厂升级改造、生产现场距离过远，以及高温高湿高腐等生产环境下，有线网络不适合使用，但是目前现有工业无线解决方案（如基于 IEEE 802.15.4 的短距离工业无线等）无法满足需求。

1.4 5G 工业应用国内外现状

据 GSA 截至 2020 年 5 月的数据，全球已有 384 家运营商投资 5G 网络，95 家运营商已部署 5G 网络，80 家运营商在全球 42 个国家和地区推出了商用 5G 服务。5G 终端发展速度远超预期，已经有 296 款 5G 设备上市，超过 112 款已投入商用。

在政策方面，为推动 5G 与工业的深度融合发展，2019 年我国工业和信息化部出台了《“5G+ 工业互联网”512 工程推荐方案》，旨在推动 5G 和工业互联网的融合发展；目前，我国已将工业互联网和 5G 列为新基建 7 大领域的重点内容，将其作为实现工业、经济、社会数字化转型的重要驱动力量。德国联邦网络管理局已经规划了专用的 5G 频段供大型公司和其他机构申请专用，优先考虑工业或农林业应用，并制定了配套管理政策和技术要求，为我国 5G 专网频率管理提供了参考。

在产业生态建设方面，2018 年 4 月在德国电气和电子制造商协会（ZVEI）的基础上正式成立了 5G 产业自动化联盟（5G-ACIA），旨在推动 5G 在工业自动化领域的应用场景分析、工业 5G 网络融合解决方案构建及落地应用。中国信息通信研究院联合运营商、制造企业、互联网企业、大学和科研院所等企事业单位于 2019 年 6 月 21 日共同发起成立“5G 应用产业方阵”，立足于搭建 5G 应用的融合创新平台，形成 5G 应用产业链协同，实现 5G 应用的孵化与推广。2019 年 6 月 27 日，中国移动与中国电子科技集团、海信、海尔、GE、华为、中兴、陕西丝路机器人智能制造研究院等合作伙伴共同启动了“5G 工业互联网联盟”，以期在 5G 工业互联网领域构建能力互补、资源共享、价值共创的合作体系。2019 年 12 月 24 日，机械工业仪器仪表综合技术经济研究所与华为技术有限公司发起成立了“5G 工业应用联合创新实验室”，聚焦 5G 工业应用的融合技术、工业 5G 网络性能测试与保障等方面，以构建 5G 工业应用的解决方案体系。

在 5G 工业先行应用方面，德国大众利用 5G 网络提供机器人与安全传感器之间的端对端低延迟连接，以确保人类员工与机器人在生产现场协作时的安全性；英国伍斯特郡 5G 工厂，探索使用 5G 进行预防性维护、机器维护远程指导等应用；我国宁波舟山港使用 5G 技术用来实现龙门吊的多台吊车并行工作作业管理、视频回传等应用；南方电网在深圳完成全球首条 5G SA 网络差动保护配网线路测试，用来实现电力终端 5G 网络授时、利用网络切片保证电网业务与非电网业务安全隔离等应用。

在 5G 工业应用技术及标准化研究方面，5G 与现场总线 / 工业以太网、5G 与 OPC UA 和 TSN 等工业通信技术的融合、5G 在工业环境下的性能保障与测试技术、面向 5G 工业应用场景的网络仿真技术、5G 安全技术等是目前的研究重点。全国工业过程测量控制和自动化标准化技术委员会（SAC/TC124）组织华为等单位，开展《工业无线蜂窝网络》国际和国家标准体系研究，并正在制定核心技术标准《工业无线蜂窝网络 第 1 部分：通用技术要求》（国标计划号：20184670-T-604），旨在进一步增强工业 5G 网络术语的统一性和一致性，并用于指导工业 5G 网络的规划、设计和建设优化。

5G 工业 应用场景分析

02

2.1 通用场景分析

5G 作为新一代移动通信技术，具有大带宽、高可靠、低时延、广连接的特点，5G 不仅可以应用到简单的数据采集，未来也可以应用到实时控制等多个层面。主流的工业应用实时等级与应用领域的划分，如图 2 所示，理论上，5G 空口时延可达到 1ms，可以支撑端到端时延要求在毫秒级的应用场景。

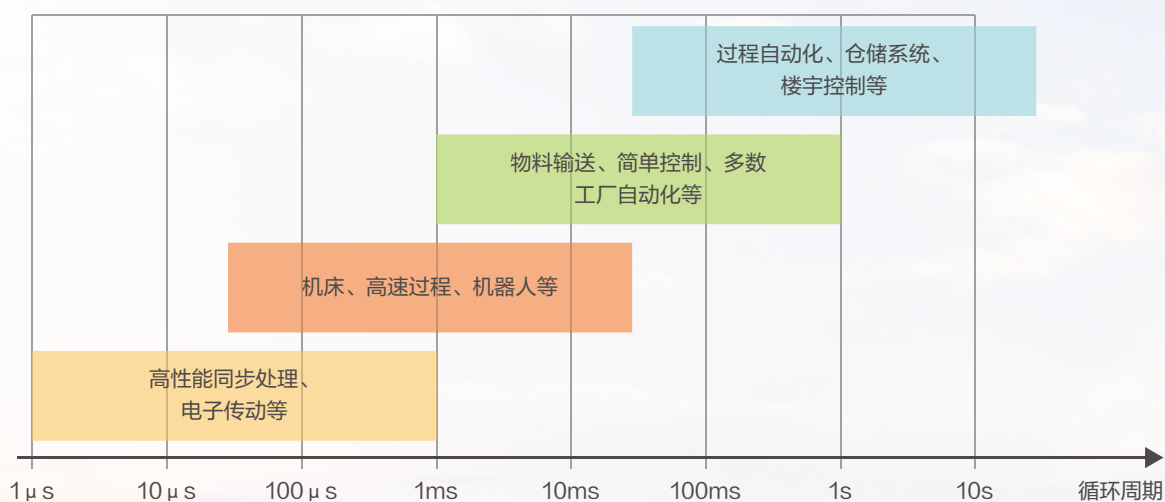


图 2 工业应用实时等级与应用领域

5G 工业应用场景，一方面要聚焦当前企业网络化、数字化建设的现实需求，另一方面要兼顾智能化应用的未来发展趋势。5G 可以应用在实时控制、视觉检测、数字孪生、智能运维、车间物流、远程控制、AR 远程指导等工业场景，简要说明如下：

- 1) 5G+ 实时控制：利用 5G 网络实现设备与设备（如机器人与机器人）之间协同操作；
- 2) 5G+ 视觉检测：使用工业相机对工件或产品进行质量检测并利用 5G 网络传输拍摄的视频或图片以及质量分析结果；

- 3) 5G+ 数字孪生：对生产线进行信息建模，形成生产线数字孪生，利用 5G 网络的大带宽打通物理世界与信息空间的双向流通；
- 4) 5G+ 智能运维：利用 5G 网络传输制造装备的健康状态及故障诊断数据，实现跨工厂跨地域的制造装备的远程运维与预测性维护；
- 5) 5G+ 车间物流：利用 5G 网络传输物料配送、路径、设备状态等信息，实现按需调度分配资源、库存监控，以及物流与加工、装配等协同；
- 6) 5G+ 远程控制：通过 5G 网络实现远距离作业下对现场设备远程操控；
- 7) 5G+AR 远程指导：通过 5G 实现设备、产线等远程指导维修、在线检测等应用。

2.2 典型行业场景示例

2.2.1 3C 行业柔性生产

3C 行业以手机产品为例，具有品种多样、更新换代快、工艺变换频繁、短时间内爆款产品需求量巨大等特点，面临着多款机型同时生产和交付的挑战。其行业特点要求生产过程具有高柔性和订单快速响应。目前主要采用移动设备与不同工作站的配合提高产线柔性，实现生产线一定程度的可重构，如移动工作台完成上下料、换刀等操作，移动视觉检测设备完成质量检测等。移动工作台和移动视觉检测设备需采集和传输高清图像并与上层管控系统进行实时数据交互，对可靠性及延迟要求高，综合考虑采用 5G 方案效果最佳。实施示例如图 3 所示。



图 3 5G 复合 AGV 移动视觉检测和控制

通过在移动工作台和移动视觉检测设备上加装高清机器视觉模块，对加工工件姿态、表面质量和几何尺寸等进行自动检测。视觉模块所拍摄高清图像由 5G 传输至边缘服务器上，通过内置于边缘服务器中的视觉分析算法模块给出姿态、质量判定结果和操作指令，并实时驱动移动设备完成与工作站的协同操作，实现了工艺变换频繁情况下的产线快速切换及柔性生产。

2.2.2 风电行业远程运维

风电机组具有分布地域广、运行环境复杂、风场位置偏远、运维要求高等特点。通过对风电机组实施远程运维管理可消除不同地域的空间限制，实时监测风场环境和机组运行状态，基于状态变化优化机组在线运行和提升维护效率，降低运维成本。



图 4 基于 5G 网络的远程运维

风电机组远程运维的应用场景有许多特殊之处，并且对数据传输也有特定要求：

- » 风机分布距离远，布线困难；
- » 需要采集风机运行状态等实时数据并传送到工业互联网平台上，远程综合控制中心与风机进行实时数据交互；
- » 需要采集震动等非实时数据用于预测性分析，数据量较大，每秒需传输数十兆上行数据。

通过在风电机组端部署 5G 网关、边缘设备，将采集和处理的数据通过 5G 网络发送到工业互联网平台，利用工业互联网平台管理和分析数据，结合预测机理模型实现设备远程运维和智慧风场建设。

2.2.3 电子制造园区智慧物流

电子制造企业生产物流配送应具有快速响应、低差错率等特点。为提高规模化电子制造园区的生产效率、降低运营成本，目前一种发展趋势是通过物流中心实现园区物流统一管理，涵盖物流运输、仓储、包装、装卸搬运、线边配送、信息服务等各个环节，实现零部件供应商、物流中心和电子制造工厂物流协同管控。电子制造园区物流的显著特点包括：

- » 需实时大范围采集运输、包装、装卸、搬运等各个环节的大量数据，感知环节多；
- » 应用场景范围广、移动设备多、网络布线困难；
- » 无人驾驶车辆等移动物流设备对车辆状态和环境的实时采集数据量大，通信连接性要求严格。

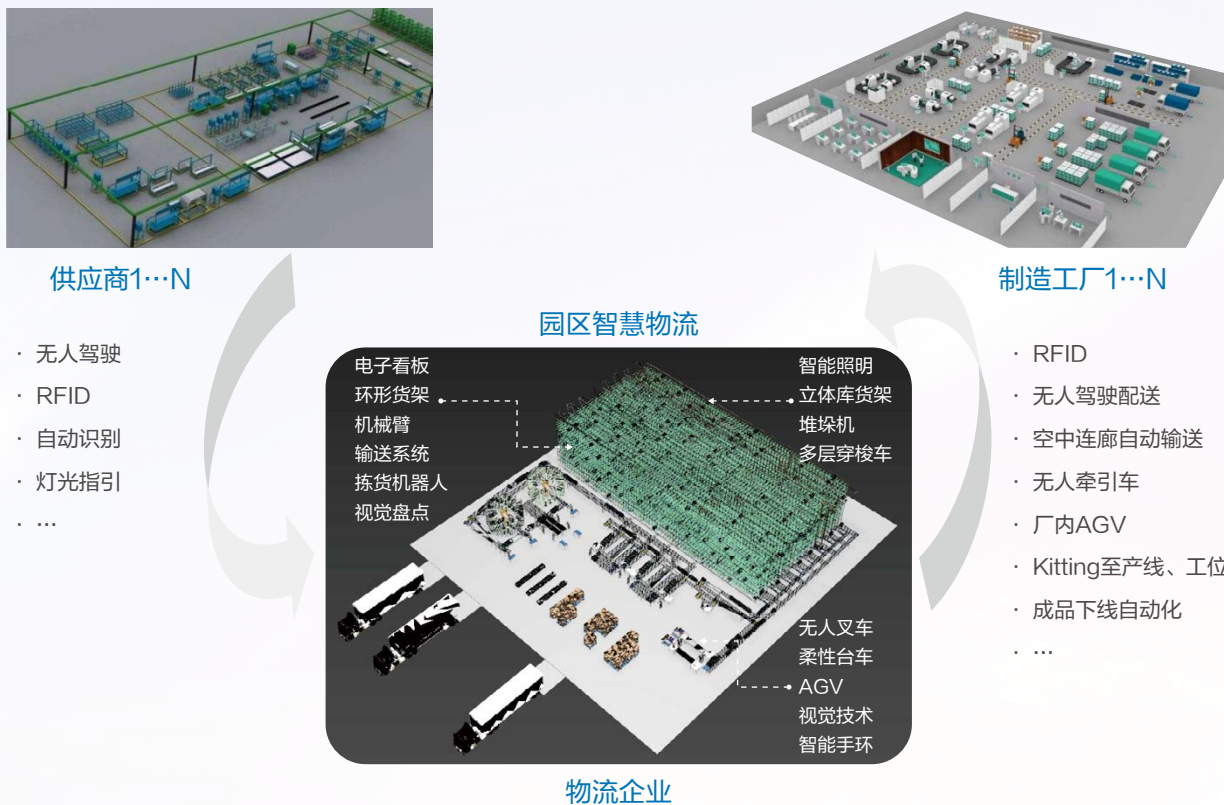


图 5 智慧物流场景

在 AGV、无人驾驶车等物流移动设备端部署 5G 网关、边缘设备等，采用园区内无人驾驶、视觉检测、自动配送等技术，实现园区内物流及时、精准配送和综合管控。

5G 工业应用 实施流程

03.

目前 5G 已经在 3C 制造、电网等典型行业开展示范应用，但在实施过程中仍然存在较多问题，例如工业 5G 网络方案如何选择、5G 技术如何与现有工业网络集成、如何评估工业 5G 网络性能等等，不一而足，这些因素也影响着 5G 技术在工业的应用普及。

本白皮书通过规范 5G 工业应用的实施流程，以期在行业形成一套通用准则，引导企业开展 5G 工业应用，同时对建设过程中参与的各方工作进行梳理，明确各方职责，以此形成清晰的 5G 工业应用建设思路，加速 5G 技术融入工业应用体系。

3.1 5G 工业应用实施通用流程

5G 工业应用实施通用流程包括：工业 5G 网络需求提取、工业 5G 网络方案设计及实施、5G 与工业应用融合建设以及工业 5G 网络验收四个重要阶段，如图 6 所示。

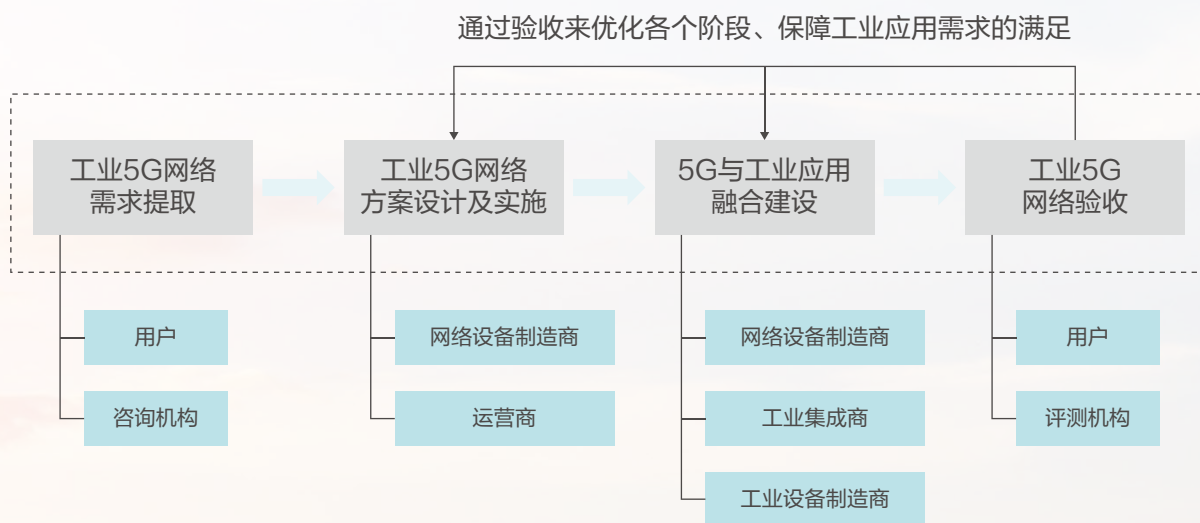


图 6 5G 工业应用实施通用流程及主要参与方

各个阶段的主要活动及主要参与方概括如下：

（1）工业 5G 网络需求提取

用户和咨询机构一起梳理工业应用场景对通信的要求，通过映射转换形成运营商建设工业 5G 网络的性能指标，在此过程中，咨询机构可以使用 5G 工业应用测试床等手段进行方案验证以提升需求的准确性、实用性及经济性。

（2）工业 5G 网络方案设计及实施

运营商根据用户提出的工业 5G 网络性能需求和自身的工业 5G 网络方案，进行工业 5G 网络的规划及建设，使用的 5G 网络设备一般由网络设备制造商提供。

（3）5G 与工业应用融合方案

工业 5G 网络建设完成之后，工业集成商需要综合工业 5G 网络、边缘计算、大数据分析、人工智能等技术实现用户工业应用场景的需求，工业设备制造商、网络设备制造商等角色也会提供相应的设备。

（4）工业 5G 网络验收

工业应用场景需求实施完成后，需要评估机构及用户对建设内容进行评估及验收，以验证工业 5G 网络是否满足工业应用的需求。

3.2 工业 5G 网络需求提取

工业 5G 网络需求提取分为工业应用场景分析、场景模拟与验证、工业 5G 网络需求获取三个重要事项，最终形成运营商需要的工业 5G 网络性能需求信息，详细信息如下：

（1）工业应用场景分析

工业应用场景分析主要是了解用户的实际需求及解决的问题，通过行业、场景、具体的业务、性能参数等不同角度阐述具体的工业应用需求。表 1 描述了工业应用场景分析模板，针对同一企业，会依据工业应用场景分析模板形成一个或多个工业应用场景分析实例。

表 1 工业应用场景分析模板示例

关注项	具体信息	解释
行业名称	制造	具体行业名称
应用编号	3	所属行业不同类型应用的编号
业务名称	质量检测	所属应用对应的具体业务名称

应用区域	室内	5G 网络所需提供服务的区域特征, 包含广域、园区、室内、室外及室内外几种类型
业务方向	发端	该设备所对应的数据传输方向: 发端; 收端; 收发端
业务通信特征 *	实时周期性业务	根据应用数据的通信特征, 分为: 实时周期性、实时非周期性、非实时性、混合业务
业务消息大小 *	100 Byte	应用层数据包的大小, 单位: Byte
传输间隔 *	30 ms	两次连续数据传输之间的时间差, 单位: ms
E2E 最大时延 *	25 ms	应用数据包从源端传输到目的端所需要的最大时间, 单位: ms
生存时间 *	90 ms	应用在没有收到预期消息的情况下可以继续运行的时间, 单位: ms
通信服务可用性 *	99.9%	通信网络实际满足传输要求时的数据传输时间和所期望通信网络满足传输要求时的数据传输时间的比值
时钟同步精度	500 μ s	该应用对应的收发设备间的最大时间偏差, 单位: μ s
定位准确度	None	终端测量位置与其真实位置值的接近程度要求, 包括水平和垂直方向定位准确度, 单位: m
定位时延	None	从触发确定位置相关数据的事件到在定位系统界面处获得位置相关数据之间的时间间隔, 单位: ms
移动类型	静止	该应用类型设备的运动类型: 静止、自由移动、区域限制移动、游牧移动
移动速率	0 km/h	能够自由移动或区域限制移动的设备所移动的速度, 单位: km/h
终端数量	10	具有统一业务特征的设备数量, 单位: 个
服务区域	1000m ²	该应用的终端设备所要求通信服务可访问的地理区域大小, 单位: m ² 或者 m ³
其他	None	工业用户的其他需求

注 1: 在业务方向为”收发端”时, 标 * 的关注项应分别给出作为发端和收端时对应的具体信息。

(2) 场景模拟与验证

5G 工业应用测试床具备工业应用场景模拟、5G 网络能力配置等功能，可以模拟用户的工业应用场景并结合 5G 网络能力配置，验证 5G 网络性能指标是否满足实际的需要，同时可以结合其它技术进行 5G 网络性能指标的优化，例如通过边缘计算、存储和综合调度技术降低对网络带宽的过高要求，提升对通信要求的经济性。

(3) 工业 5G 网络需求获取

基于工业应用对通信的需求，通过指标映射等手段将工业应用需求合理的转化为工业 5G 网络的性能指标内容，表 2 描述了工业 5G 网络性能需求模板，包括速率、时延、可靠性、连接数等不同方面的具体指标，为后续的工业 5G 网络方案和建设奠定基础，针对每一个工业应用场景分析实例需要一个匹配的工业 5G 网络性能需求实例。

表 2 工业 5G 网络性能需求模板示例

5G 网络性能需求编号		1
工业应用场景编号		3
指标项	指标值	解释
数据流向	上行	5G 系统内的数据包流向：上行、下行、上下行。在应用场景分析中，终端设备作为发端，则数据流向为上行，反之为下行
业务特征 *	实时周期性业务	根据应用数据的通信特征，分为：实时周期性、实时非周期性、非实时性、混合业务
单用户峰值速率 *	0.066 Mbit/s	该类工业应用所要求的最大传输速率，单位：Mbit/s
单用户最低速率 *	0.066 Mbit/s	该类工业应用所要求的最小传输速率，单位：Mbit/s
传输数据量 *	164 Byte	传输到 5G 系统的数据包的大小，单位：Byte
传输间隔 *	30 ms	两次连续数据传输之间的时间差，单位：ms

最大网络时延 *	20 ms	工业应用的数据包从到达 5G 系统到 5G 系统交付给工业网络设备或者终端所消耗的最大允许时间，单位：ms
通信可靠性 *	99.99%	在满足 QoS 要求时传输成功的数据包个数和总的传输数据包个数的比值
网络可用度 *	99.99%	网元组成的网络正常运行的时间比例（网络不可用一般指硬件失效）
时钟同步精度	500 μ s	5G 系统的主设备和从设备之间的时钟偏差，单位： μ s
定位准确度	None	终端测量位置与其真实位置值的接近程度要求，包括水平和垂直方向定位准确度，单位：m
定位时延	None	从触发确定位置相关数据的事件到在定位系统界面处获得位置相关数据之间的时间间隔，单位：ms
移动速率	0 km/h	终端设备移动的速度，单位：km/h
电池寿命	None	终端设备所要求的电池的工作时长，单位：天
终端数量	10	该应用场景中具有统一业务特征的终端的个数，单位：个
服务区域	1000 m ²	终端设备所要求 5G 系统的通信服务可访问的地理区域，单位：m ² 或者 m ³
其他项	None	工业用户对网络的其他需求，例如：冗余要求等

注 1：在数据流向为“上下行”时，标 * 的指标项应分别给出上行和下行对应的指标值。

3.3 工业 5G 网络方案设计及实施

工业 5G 网络方案以运营商为主设计实施。工业用户根据自己实际的业务需求及具体应用场景，结合咨询机构意见，进行工业 5G 网络相关参数输入；运营商通过对 5G 无线网络与工业有线网络设备、网络拓扑结构进行建模评估等方式，确定与业务需求匹配的 5G 网络架构与运营模式，将 5G 平滑融入到工厂现有系统和流程中，有效实现工厂业务的提质增效。

3.3.1 网络架构方案

目前运营商根据用户需求，为行业提供 5G 网络服务时，可以提供三种类型的网络：

- » 网络架构一（共享公网）：在园区建设 5G 无线网络，工业用户和公网用户完全共享频率和设备，通过 QoS、网络切片技术等功能性技术与手段做到业务优先保障、业务逻辑隔离，满足网络速率、时延、可靠性优先保障的需求，达到业务逻辑隔离、按需灵活配置的效果。该种模式主要面向大部分广域业务和部分局域业务，且对网络能力和隔离保障有一定要求，网络部署成本较低。
- » 网络架构二（公网专用）：在公网的基础上，通过数据分流和移动边缘计算等技术手段，提供专用切片及专用用户面下沉园区，满足企业用户数据不出厂、超低时延、专属网络的需求，达到数据流量卸载、本地业务处理的效果。该种模式主要面向局域业务，且对网络时延和隔离保障有较高要求的应用，网络部署成本较共享公网方案更高。对于成本极其敏感的行业，可采用基站与用户面融合部署方案，在满足行业需求的同时降低部署成本。
- » 网络架构三（专网专用）：通过基站、频率、核心网设备的专建专享，来进一步满足超高安全性、超高隔离度、定制化网络的需求，达到专用 5G 网络的效果。尤其是通过丰富基站站型、小区专用、上下行性能增强和差异化配置等多种定制化服务重点保障无线空口传输能力，定向支持高优先级应用。该种模式主要面向局域业务，且对网络覆盖、速率、时延和可靠性等部分或全部网络关键性能指标和安全隔离保障有极高的要求的应用场景，网络部署成本较公网专用方案更高。

3.3.2 设备形态

运营商根据行业用户自身实际的 5G 部署环境、业务需求，提供以下基站形态：

- » 宏基站：用于室外大片区域宏覆盖的大功率基站，一般部署于铁塔、楼面站等；
- » 微基站：用于室外的局部区域补充覆盖或补充容量中功率基站，一般部署于街道站灯杆等；
- » 皮基站：用于室内高容量场景的小功率基站，一般用于体育场、交通枢纽、工厂等高容量场景。

通常，室外场景以宏基站为主，室内场景以皮基站为主。

表 3 工业应用基站建设方案

场景	基站方案
室外覆盖、部分楼宇	· 宏基站
工厂室内场景	· 无源分布系统的解决方案 · 一体化皮基站 · 小型的数字直放站等设备
房间隔断多的室内	· 5G 的数字有源分布系统 · pRRU 外接多个拉远无源天线
特殊场景（如矿井等）	· 定制站型（如防尘防爆基站等）

终端是 5G 端到端系统的重要组成部分，千行百业差异化的业务场景和应用需求，需要多模多频多形态的行业终端。

5G 模组

5G 模组是一个独立的无线通信模块，将 5G 基带芯片、射频、存储、电源管理等硬件进行了封装，对外提供特定数据接口和封装方式，具有独立的 5G 无线通信功能，被嵌入行业终端中，使行业终端能够进行 5G 的通信。

5G 行业终端

5G 行业终端除数据处理能力需求存在较大差异外，关注的通信性能需求也不尽相同。此外，行业终端还必须满足行业特有的要求，如防水、防爆、抗震动、低功耗等，以适用于不同工况条件。根据不同的行业终端的形态和承载业务等特点，行业终端可分为三大类：接入类、手持类、视频类。数据接入类终端的主要形态为 CPE、DTU、路由器以及网关，主要用来为若干设备提供局域互联和广域互联功能。行业手持终端是指应用在垂直行业中，具有操作系统、内存、CPU、显卡、电池、屏幕等，可以移动使用的便于携带的数据处理终端。视频类终端主要的业务特点是需将视频或视觉信息无线传输到服务器或云端，或者将视频下载到端侧。

3.3.3 性能增强方案

5G 网络通过专属上行、极致时延、超级可靠、QoS/ 切片优先级保障等性能增强方案，为工业用户提供分场景分级、可灵活定制的 5G 网络服务。

- » 专属上行：工业应用中存在广泛的上行采集类应用，如传感器、视频监控、视觉检测等，对网络上行带宽能力需求较高。运营商可利用频率协同优势，结合专属帧结构、载波聚合、全上行等专属上行方案，分阶段提供分场景大上行方案，充分满足工业需求；
- » 极致时延 / 超级可靠：对于工业控制、电力监控等工业应用，提供极致时延 / 超级可靠的通信是工业 5G 网络建设的必要条件。工业 5G 网络可针对这类应用进行差异性优化配置，通过预调度、短间隙、1ms 帧结构、低码率 MCS、PDCP 复制、重复传输等多种关键技术的灵活组合，提供空口分级的低时延高可靠能力；
- » QoS/ 切片优先级保障：针对工业用户在同一个园区内，普遍存在不同业务之间优先级不同，或者同业务之间不同切片的优先级不同等典型应用，通过提供从承载级、切片级到小区级的分级保障手段，实现工业用户差异化体验。

3.4 5G 与工业应用融合建设

5G 与工业应用融合建设，主要是在工业 5G 网络部署完成之后，为如何使用工业 5G 网络提供技术思路。5G 与工业应用融合体系如图 7 所示，可以在工业网络系统的不同位置接入具备 5G 通信功能的终端，采用 QoS/ 切片技术、UPF 下沉到企业等方式，利用边缘计算、人工智能、大数据分析等技术，实现现场设备层、控制执行层、车间管理层、企业管理层和云平台之间的互联互通和智能化管理。

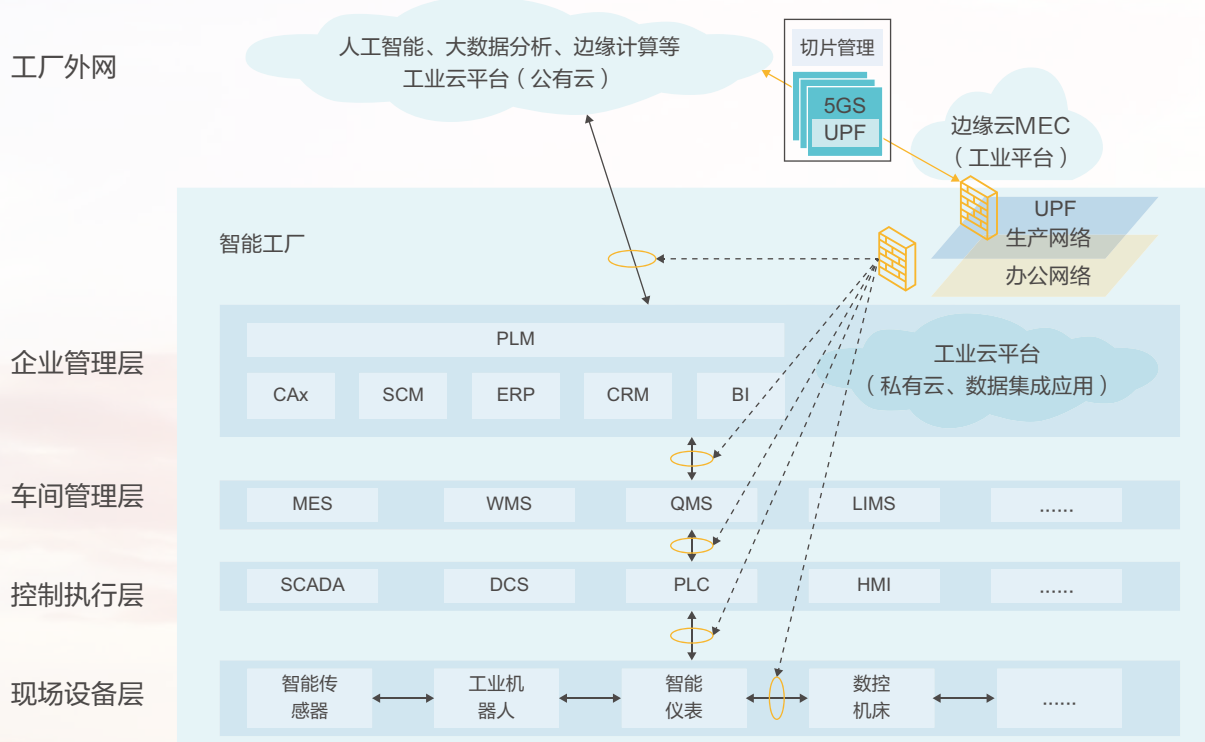


图 7 5G 与工业应用融合体系

5G 与工业应用融合建设的方式有多种，一种是采用 5G 模组（工业设备嵌入 5G 通信模组），通过集成到设备内部，实现 5G 与工业通信的深度融合应用。如图 8 所示，现场设备层、执行控制层、车间管理层的设备，全部采用 5G 工业模组方式接入 5G 网络，形成独立的工业 5G 网络体系以实现工业的互联互通。

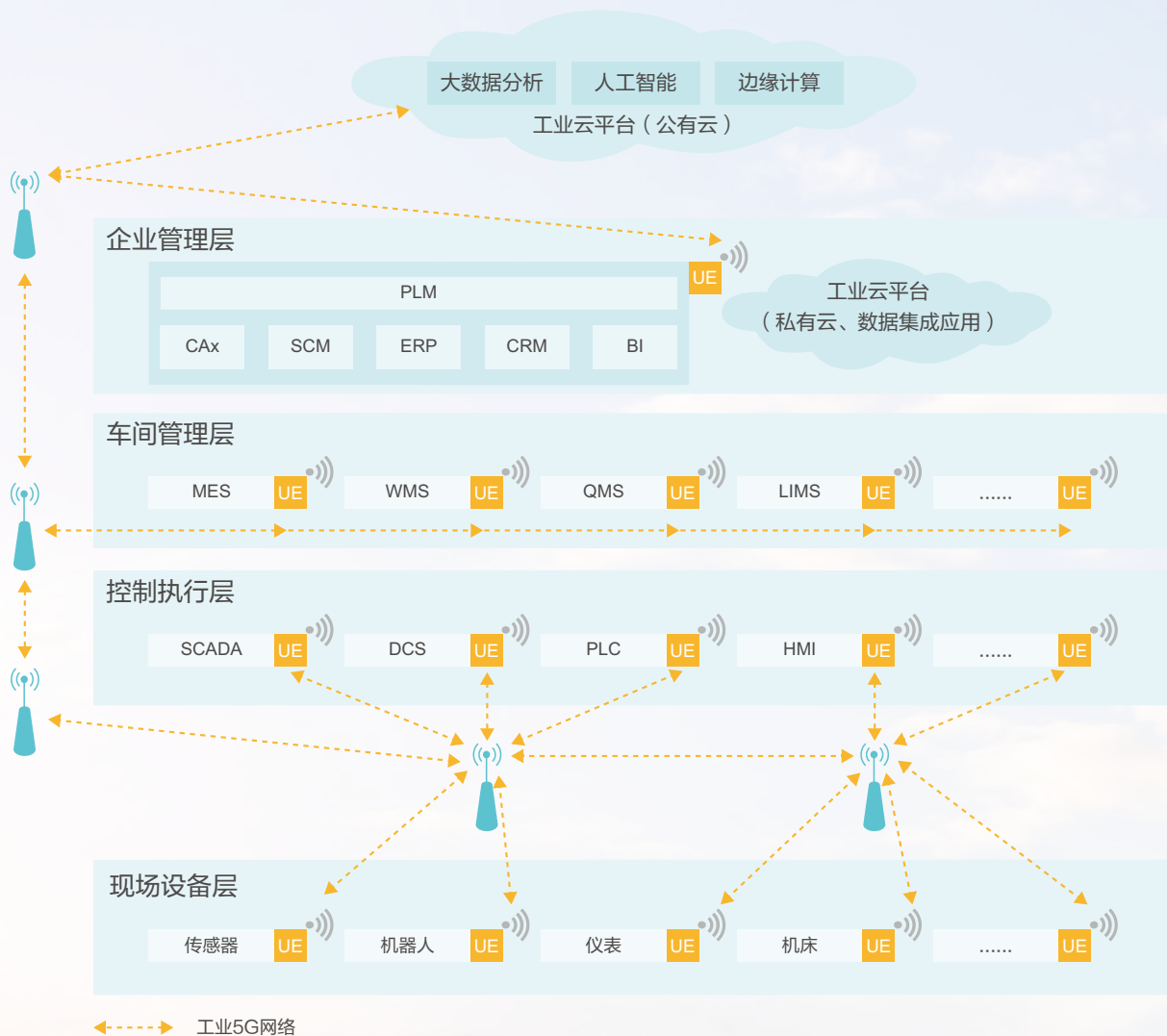


图 8 基于 5G 工业模组的融合建设方案

另一种采用集成网关、CPE 等，可实现 5G 与现有工业体系的无缝连接和互通互操作，如图 9 所示，现场设备层设备种类多、工业网络 / 现场总线协议多样，可采用集成网关实现数据汇聚；控制执行层、车间管理层等以工业网络通信为基础，可采用 CPE、路由器等方式接入 5G 网络，可快速实现工业网络体系的升级改造。

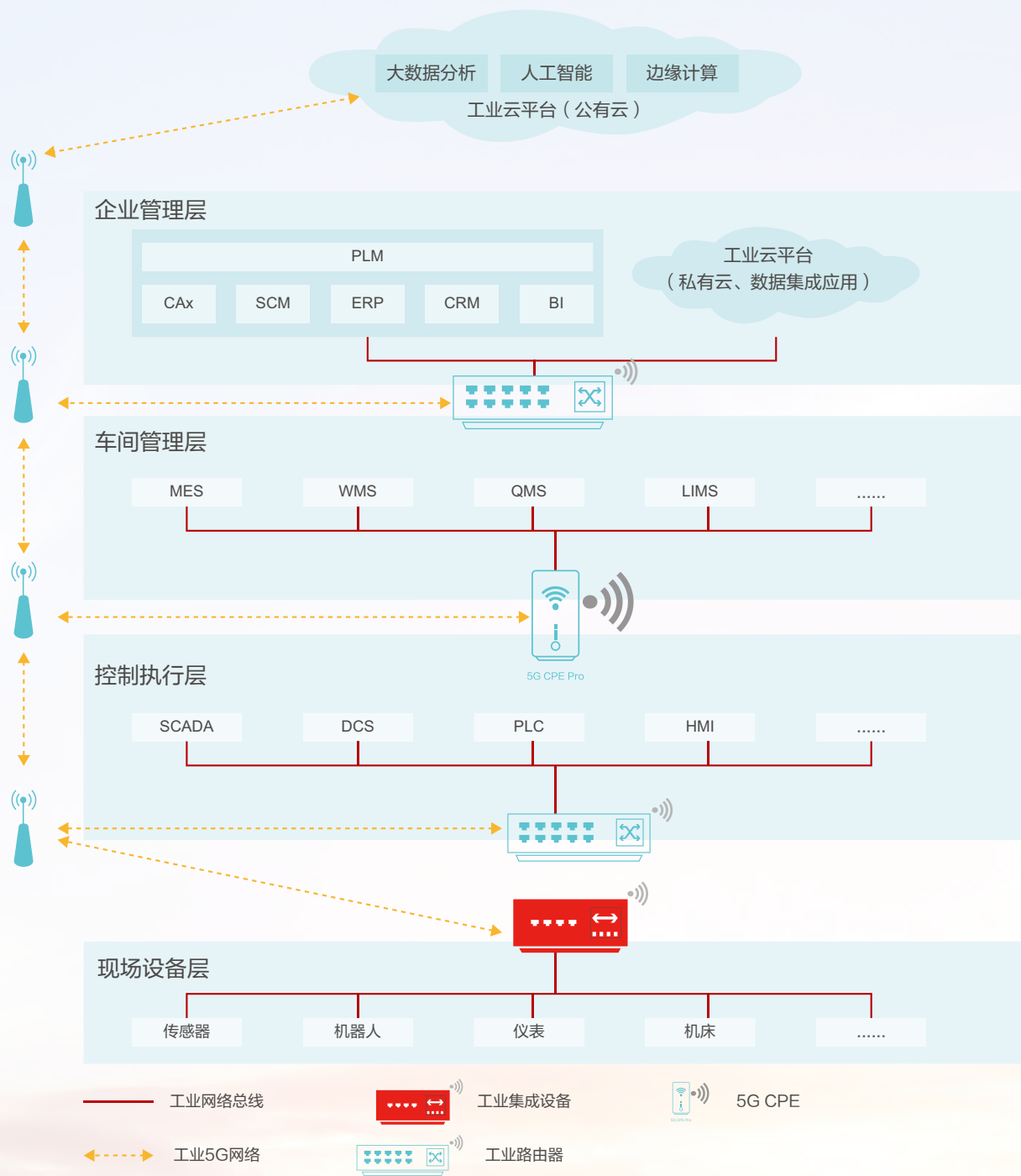


图9 基于网关、CPE的融合建设方案

针对上述提到的 5G 工业应用融合建设方式，可采用 5G 透传和映射两种技术以实现 5G 与工业通信的深度融合。

（1）透传

5G 透传，即 5G 作为工业数据传输的通道，可以将来自工业应用层、IP 层和 MAC 层的工业数据在 5G 网络上实现透明传输，如工业通信网络技术集成标准的 TCP/IP 协议，IP 数据包直接传送到 5G 系统，并通过透传的方式将数据包递交到目的端。采用 5G 透传的方式可以实现 5G 与现有工业通信网络系统的无缝集成，实现工业系统的快速升级改造。截止目前，5G 与工业应用的融合建设采用透传方式居多。

（2）映射

5G 映射，即通过将工业通信网络需求在 5G 系统上进行实现，如数据的优先级调度机制、时间调度策略等，使得 5G 技术满足工业应用的优先级传输、时延等不同传输需求，保障业务的正常运行。相较于透传方式，5G 的映射将工业对通信网络的需求和 5G 的机制相结合，能充分发挥 5G 的技术优势。如 5G 作为工业通信网络的 MAC 层，将工业网络通信技术的优先级调度、时延策略等向 5G 传输机制进行映射，直接通过 5G 保障工业应用的优先级传输，极大地缩短实时报文在协议栈的处理时间，提高实时性能。截止目前，相关领域组织已开展 5G+OPC UA、5G+TSN 等相关技术的映射研究工作。

基于 5G 透传和映射的融合技术方案能够复用现有的工业通信网络技术及设备，并利用 5G 针对垂直行业提供的技术方案，如：5G 网络切片、QoS 等技术，满足灵活组网、柔性生产等工业应用需求。

3.5 工业 5G 网络验收

当工业 5G 网络完成现场部署，5G 工业应用完成基本的功能调试后，产线正式投运前，需要第三方专业机构对工业 5G 网络进行验收测试。测试内容包含 5G 网络性能需求模板中的各项指标，还需要结合工业应用场景，将 5G 网络视作工业应用的组成部分，完成工业 5G 网络与工业应用的融合测试，保证工业 5G 网络及应用投入使用后能够充分满足工业现场需求。

对于工业 5G 网络的验收应考虑老旧工厂改造和新建工厂两种情况，两类网络的验收测试应充分考虑其实际特点，有针对性的设计测试用例。对于无法在投产前触发的测试条件，应通过模拟手段（如模拟大带宽等）进行全面测试。

通过验收测试，可以消除工业用户使用 5G 网络的各种顾虑，也可以避免建设过程中只强调 5G 网络各项性能指标，而未充分考虑其承载的工业应用功能等问题。对工业 5G 网络在使用过程中发生的问题，也可以通过专业的测试手段，判断是运营商网络、系统集成商还是设备等方面的问题，做到责任清晰明确。

总结 及展望

04.

5G 在工业推广应用要解决技术、成本和融合体系问题。技术问题是满足工业对通信的实时性、确定性、可用性、安全性等要求。成本问题是指目前 5G 工业应用模组等软硬件设备 / 部件等成本远高于传统工业通信。融合体系是指当前工业通信、装备和系统已经形成了稳定的技术和产业发展模式，5G 的引入会改变工业现有模式，只有 5G 与工业应用两者高度融合，才能更好地服务新一轮的工业变革。

为此，我们在 5G 工业应用融合发展的过程中，构建 ICT 和 OT 两个领域都认可的 5G 工业应用的标准体系，研究 5G 与工业应用融合、5G 工业应用的性能保证及现场测试评估等技术，解决 5G 工业应用的成本及商业模式问题，构建 5G 工业应用生态，推动 5G 工业应用先行示范与全面推广。

目前，5G 工业应用融合发展刚刚起步，还存在着很多问题，但是我们相信随着我国 5G 网络新基建的快速稳步推进，5G 技术与各行各业的融合发展是大势所趋，产生的新技术、新产品、新业态以及商业新模式将会对数字世界与数字经济时代的到来起着巨大的作用。虽然我们无法预测这一天到来的具体时间，但是这一天一定会比我们预想的更早更快。

5G 工业应用 联合创新实验室简介

05.

“5G 工业应用联合创新实验室”是由机械工业仪器仪表综合技术经济研究所与华为技术有限公司在 2019 年 12 月 24 日发起成立的。实验室将在 5G 工业应用需求分析、技术研究、关键设备研制、测试验证、标准制定以及推广应用等方面开展工作，主要包括：5G 工业应用典型场景分析及综合方案库、5G 工业应用关键技术标准、5G 功能安全与信息安全、5G 与现场总线 / 工业以太网等工厂内网融合技术、5G+OPC UA 关键设备研制、5G 工业应用综合测试床等，并在此基础上开展技术落地与示范应用。

“5G 工业应用联合创新实验室”运营秉承开放、创新的精神，欢迎工业企业、信息技术企业、网络运营商、科研院所等单位加入，联合搭建 5G 工业应用技术研发和推广应用平台，一起为 5G 工业应用的发展贡献力量。

目前已有如下单位受邀成为第一批核心成员：中国移动通信集团有限公司、富士康工业互联网股份有限公司、重庆飞力达供应链管理有限公司、北京邮电大学、上海自动化仪表有限公司等。

后续，“5G 工业应用联合创新实验室”将瞄准定位，充分利用目前承担的工业互联网创新发展工程 - “5G+ 工业互联网”高质量网络和公共服务平台项目的国家支持，汇聚各方资源，共同研究并解决 5G 应用于工业存在的技术问题，提升自身能力，向政府和各类企事业单位提供有关 5G 工业应用的政策分析、技术咨询、测试验证、技术培训、解决方案等综合服务，为企业数字化转型和制造业高质量发展做出应有的贡献。

缩略语

3GPP	Third Generation Partnership Project	第三代移动通信伙伴组织
5G	5th-Generation	第五代移动通信技术
5GC	5G Core network	5G 核心网
5G-ACIA	5G Alliance for Connected Industries and Automation	5G 产业自动化联盟
AGV	Automatic Guided Vehicle	无人搬运车
AMF	Access and Mobility Management Function	接入与移动性管理功能
APL	Advanced Physical Layer	高级物理层
BBU	Building Base band Unit	基带处理单元
BI	Business Intelligence	商业智能
CAX	Computer Aided x	各类计算机辅助软件
CPE	Customer Premise Equipment	客户前置设备
CRM	Customer Relationship Management	客户关系管理
DCS	Distributed Control System	分布式控制系统
DTU	Data Transfer unit	数据传输单元
E2E	End to End	端到端应用
eMBB	Enhanced Mobile Broadband	增强移动宽带
ERP	Enterprise Resource Planning	企业资源计划
gNB	next Generation NodeB	5G 基站节点
GSA	Global mobile Suppliers Association	全球移动设备供应商联盟
HMI	Human Machine Interface	人机接口
ICT	Information and Communications Technology	信息与通信技术
IP	Internet Protocol	网际互连协议
IT	Information Technology	信息技术
ITU	International Telecommunication Union	国际电信联盟

LIMS	Laboratory Information Management System	实验室信息管理系统
M2M	Machine to Machine	机器与机器之间的通信
MAC	medium access control	介质访问控制
Massvie MIMO	Massvie Multiple-Input Multiple-Output	大规模天线
MBP	Manchester Coded, Bus Powered	曼切斯特编码，总线供电
MCS	Modulation and Coding Scheme	调制与编码策略
MEC	mobile edge computing	移动边缘计算
MES	Manufacturing Execution System	制造执行系统
mMTC	massive Machine Type of Communication	大规模机器类型通信
OPC UA	Open Plateform communication Unified Architecture	开放平台通信统一架构
OSI	Open System Interconnection	开放系统互联
OT	Operation Technology	自动化 / 运营技术
PDCCP	Packet Data Convergence Protocol	分组数据汇聚协议
PLC	Programmable Logic Controller	可编程逻辑控制器
PLM	Product Lifecycle Management	产品生命周期管理
pRRU	pico Remote Radio Unit	分布式射频拉远单元
QoS	Quality of Service	网络服务质量
QMS	Quality Management System	质量管理体系
RFID	Radio Frequency Identification	射频识别
RRU	Radio Remote Unit	无线射频单元
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition	数据采集与监视控制系统
SCM	Software configuration management	软件配置管理
SMF	Session Management Function	会话管理功能
SOA	Service-Oriented Architecture	面向服务的建构
SPE	Single Pair Ethernet	二线制以太网
TCP	Transmission Control Protocol	传输控制协议
TSN	Time Sensitive Network	时间敏感网络
UDP	User Datagram Protocol	用户数据报协议
UPF	User Plane Function	用户面功能
URLLC	Ultra-reliable and Low Latency Communication	超高可靠低延迟通信
WMS	Warehouse Management System	仓储管理系统
ZVEI	Germany' s Electrical Industry	德国电气和电子制造商协会

