

# 5G 与工业自动化融合应用 研究报告

中国工业互联网研究院  
西门子(中国)有限公司

2024 年 4 月

## 声 明

本研究报告所有内容的知识产权归中国工业互联网研究院和西门子(中国)有限公司共同所有，并受法律保护。任何单位和个人未经中国工业互联网研究院和西门子(中国)有限公司共同授权，不得使用或转载本报告中的任何部分。违反上述声明者，中国工业互联网研究院和西门子(中国)有限公司将追究其相关法律责任。

## 前言

当前，数字化浪潮已成为变革性力量，深化 IT、CT 与 OT 融合是全球数字化技术发展的大趋势。需要充分发挥新一代信息通信技术对制造业数字化转型的创新驱动作用，加快推进新型工业化。

工业是 5G 应用的主战场。自 2019 年 5G 规模商用以来，我国通过政策引导、建设指引、试点示范等措施，持续推进 5G 在各行业的应用，全国范围内“5G+工业互联网”项目成规模化发展态势。欧美各工业强国通过制定政策、成立联盟、分配工业专用频段等方式，加快推动 5G 工业应用。5G 工业应用已成为国内外工业企业推动数字化转型、建设智能工厂的重要抓手。

5G 为工业控制系统提供新的通信方式。当前，5G 工业应用已从生产外围辅助环节逐步深入至生产核心控制环节。工业自动化厂商、运营商、ICT 厂商等均积极探索实践 5G 与工业自动化融合应用的新技术、新产品、融合网络架构、应用方案等。为加快推动 5G 在工业自动化领域的规模化应用，中国工业互联网研究院、西门子(中国)有限公司联合编写《5G 与工业自动化融合应用研究报告》(以下简称《研究报告》)。

研究报告重点梳理了 5G 与工业自动化融合应用的需求、组网架构，展示了 5G 在移动机器人、AGV、远程控制和工业控制器

间实时通信中应用的解决方案，从终端、技术、网管三个方面总结了 5G 与工业自动化融合应用挑战，并对 5G 与工业自动化融合应用的未来发展方向进行了展望。

希望研究报告将为我国 5G 在工业自动化领域应用中技术攻关、产品研发和应用实施提供参考。

## 编写组

中国工业互联网研究院：

朱 浩 张玉良 历 明 宋欣桐 马新翔 王辰菲

西门子(中国)有限公司：

张兆中 王加雷 李卉琳 张 哲 李 纶

# 目 录

<b>一、 国内外 5G 工业应用情况 .....</b>	<b>1</b>
(一) 我国 5G 工业应用情况 .....	1
(二) 国外 5G 工业应用情况 .....	2
<b>二、 5G 与工业自动化融合应用的需求 .....</b>	<b>5</b>
(一) 5G 促进生产方式变革及工业自动化技术发展 .....	5
(二) 工业自动化对 5G 网络的需求 .....	6
1. 5G 网络产品要满足工业产品特性要求 .....	6
2. 5G 网络的可靠性是在工业环境中应用的核心要求 .....	6
3. 低抖动是低时延需求的关键参数 .....	6
4. 5G 需要承载工业以太网通信协议 .....	7
5. 5G 网络需要提供故障诊断接口 .....	8
6. 5G 网络安全需要融入工业自动化网络纵深防御中 .....	8
<b>三、 5G 工业应用组网方式 .....</b>	<b>9</b>
(一) 组网架构 .....	9
(二) 组网模式 .....	10
1. 虚拟专网 .....	10
2. 混合组网 .....	11
3. 独立专网 .....	13
(三) 5G 专网部署的 5G 版本情况 .....	14
<b>四、 5G 与工业自动化融合应用典型案例 .....</b>	<b>15</b>

(一) 5G 在移动机器人和 AGV 中的应用 .....	15
1. 应用场景 .....	15
2. 解决方案 .....	17
(二) 5G 在远程控制中的应用 .....	18
1. 应用场景 .....	18
2. 解决方案 .....	19
(三) 5G 在工业控制器间实时通信中的应用 .....	20
1. 应用场景 .....	20
2. 解决方案 .....	21
(四) 5G 在运动控制中的应用 .....	22
1. 应用场景 .....	22
2. 5G 现有版本还不能满足运动控制应用要求 .....	23
五、 5G 与工业自动化融合应用挑战 .....	24
(一) 工业自动化低时延场景 5G 终端种类不够丰富 .....	24
(二) 网络确定性与高实时性不足 .....	24
(三) 网络管理困难 .....	25
六、 5G 与工业自动化融合应用发展展望 .....	26
(一) 丰富工业自动化低时延场景 5G 终端种类 .....	26
(二) 攻关工业 5G 确定性和高实时网络技术 .....	26
(三) 建设工业网络综合管理平台 .....	26

## 一、国内外 5G 工业应用情况

5G 通信网络为工业控制系统提供新的通信方式。传统应用于工业控制系统中的工业网络技术主要是工业以太网和现场总线。随着生产线的柔性化发展，工业通信的无线化需求日益增加。5G 的低时延、高可靠特性为工业控制系统适应更加灵活生产方式的变革提供了可能。5G 网络可为生产现场中 PLC、HMI 等控制设备之间，及控制中心 SCADA 与现场控制设备之间提供数据传输通道。我国及欧美工业强国根据本国实际情况，采取系列措施推动 5G 在工业的应用。

### （一）我国 5G 工业应用情况

自 2019 年 5G 规模商用以来，我国通过政策引导 5G 行业应用持续深化。工业和信息化部在 2019 年印发《“5G+工业互联网”512 工程推进方案》，2021 年分两批共发布 20 个典型应用场景和 10 个重点行业实践案例，2022 年发布《5G 全连接工厂建设指南》。系列政策为开展 5G 工厂建设提供了指导，推动“5G+工业互联网”由起步探索阶段迈向深耕细作、规模化发展的关键阶段。

当前，5G 在工业领域的应用已从生产外围辅助环节逐步深入至生产核心控制环节。目前，飞机、船舶、汽车、电子、采矿等主要产业已开展“5G+工业互联网”创新实践，形成远程设备操控、机器视觉质检、无人智能巡检等一批典型应用，

我国“5G+工业互联网”建设项目数超过10000个，对企业降本、提质、增效的支撑重要作用不断显现。2021年至2023年，5G工厂连续三年作为工业互联网试点示范项目，共遴选83家。

目前从国内5G专网总体应用情况来看，部署方式以虚拟专网和混合专网方案为主，可满足对实时性要求相对不高的工厂应用需求。

## （二）国外5G工业应用情况

欧美各国通过制定政策、成立联盟、分配工业专用频段等方式，加快推动5G工业应用。

2017年德国开始实施“5G Strategy for Germany”战略，推进5G在德国的应用，尤其在工业领域，以西门子、博世为代表的工业企业积极推进5G服务工业的应用研究与实践。2018年欧盟成立了5G-ACIA联盟，推动5G工厂建设。2018年以来欧盟各国电信运营商纷纷与制造企业合作开展5G应用探索。2019年，爱立信在伍斯特郡建设了英国第一个5G工厂，探索使用5G进行预测性维护、机器维护远程指导等应用。

2018年以来美国电信运营商加快了5G与制造业融合应用的实践。2018年，美国电信运营商AT&T与三星电子在德克萨斯州打造了美国第一个专注于5G在制造业应用的创新区，促进制造业工厂转型升级。2021年美国实施“National Strategy to Secure 5G Implementation Plan”，通过建设5G

系统设备制造基地，面向工业界提供 5G 测试床等措施，加快 5G 技术研发，满足行业应用需求。

对于工业 5G 的部署，欧美各国纷纷选择了优先发展“5G 工业专频专网”建网路线。德国、法国、瑞典、英国等欧洲工业强国，均分配了工业专用频段。例如，为帮助企业独立部署 5G 专网，推动 5G 专网创新与发展，2019 年 11 月 21 日德国联邦网络局 BNetzA 正式对外开放 3.7GHz-3.8GHz 的 5G 专网频段申请。企业只需按照流程申请并支付较低的费用，就可获得这些 5G 专网频段使用权来自建 5G 专网。在频谱政策的带动下，垂直行业的龙头企业积极申请频谱自建 5G 专网。截至 2023 年 1 月德国联邦网络局累计已受理并通过 293 份 3.7-3.8GHz 频段的 5G 专用网络频率申请。在这些申请机构中，奥迪、宝马、西门子、博世、巴斯夫等多家工业巨头成为主力。

美国也在 2020 年通过拍卖 CBRS 频段（3.55GHz 至 3.7GHz 之间的共享频谱），为 5G 专网发展提供了频谱资源。企业可以在没有频率干扰风险的区域利用该频段自建 5G 专网。随着频谱释放，美国运营商、云厂商、垂直行业已经展开了争夺 5G 专网市场的竞争。例如，美国最大的移动运营商 Verizon 推出了面向 5G 专网的 On Site 5G 一体化解决方案，亚马逊 AWS 已推出 AWS Private 5G 服务，农机巨头约翰迪尔已在其工厂利用 CBRS 自建 5G 专网。

欧美各国分配工业专用频段主要基于以下考虑：

1. 催生大量新的微型网络运营商，这些“运营商”各自专注于不同的垂直领域；
2. 催生大量的设备及技术供应商，这些供应商能为垂直行业提供更优化的设备和应用；
3. 倒逼传统公网运营商面向垂直行业加速商业模式转型；
4. 专网频段将增强垂直行业尤其是工业巨头的全球竞争力。

从工业应用落地角度看，目前欧美部署的 5G 专网主要基于 3GPP R15 版本标准。对于支持高实时性工厂应用存在技术局限，还未在工厂大规模部署。随着基于 R16 版本标准的 5G 产业链成熟，以及工业频段为主的建网模式逐渐形成规模，未来欧美国际工业龙头将会继续探索 5G 高实时与高价值应用，以及与现有工业网络融合互补的优化方案。

## 二、5G 与工业自动化融合应用的需求

### （一）5G 促进生产方式变革及工业自动化技术发展

当前，全球供应链面临着短期复杂变化的风险，如何快速响应不断变化的市场需求，并且根据供求关系快速决策生产，是我国企业面临的巨大挑战。通过 5G 网络与工业自动化系统深入融合，可以替代紧密耦合的生产线，实现更灵活的生产方式。通过 5G 网络实现全厂数据互通，加速 OT 与 IT 系统的融合，可实时、动态、快速的制定生产计划，从而提高产线利用率和生产灵活性，助力企业应对多变的市场挑战。

随着工厂数字化、智能化转型升级的深入，工厂设备的移动化、生产线的柔性化、通信的无线化需求日益增加。当前 5G 在工厂的应用已从生产外围辅助环节逐步深入至生产核心控制环节。通过利用以 5G 为代表的新一代信息通信技术，并充分融合工业自动化技术，建设产线级、车间级、工厂级的 5G 工厂，将带来工厂生产方式根本性变革。

工业自动化技术是 5G 工厂的基础技术。在 5G 工厂中，5G 支撑升级的工厂自动化应用主要包括 HMI、远程控制、AGV、工业机器人、闭环控制，其与 5G 高数据传输速率、海量设备接入和低时延、高可靠三大特性对应关系如图 2-1 所示。可以看出，主要应用 5G 的低延时、高可靠和高速率特性，增加 HMI、工业机器人的移动性，增强 AGV 移动的灵活性，提高远程控制

的可靠性，及现场控制回路组网的灵活性。

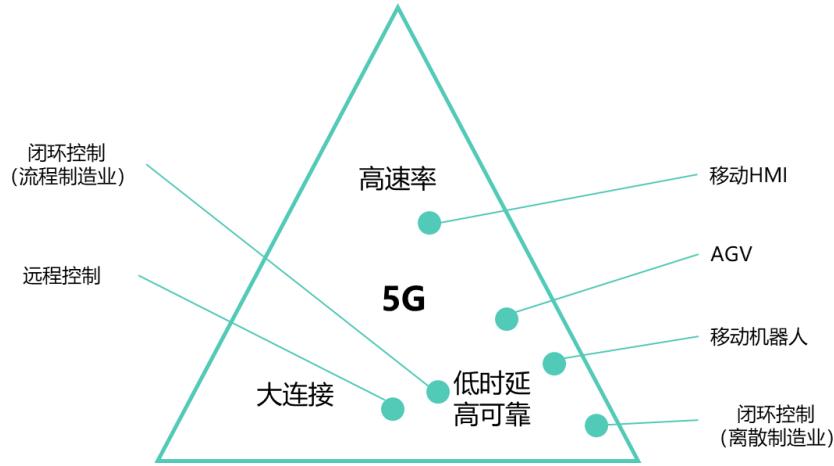


图 2-1 与 5G 三大特性相对应的工业自动化应用

## (二) 工业自动化对 5G 网络的需求

### 1. 5G 网络产品要满足工业产品特性要求

5G 行业终端，集成到 PLC、AGV 等工业自动化设备的 5G 模组，及应用于工业现场 5G 组网的 5G 网络设备，须具备抗电磁干扰、抗粉尘、抗震动、适应高低温环境等工业产品的特性。

### 2. 5G 网络的可靠性是在工业环境中应用的核心要求

工厂通信服务的可用性取决于通信网络的可靠性。典型的工厂自动化系统需要连续运行，短暂的通信中断可能会导致自动化应用程序故障，进而导致生产中断。用于闭环控制应用的 5G 网络需要满足高可靠的无线通信，保证最大丢包率不高于  $5 \times 10^{-7}$ ，且没有连续丢包。

### 3. 低抖动是低时延需求的关键参数

工业网络中最重要的因素是时延和可能的抖动。传输时间

或时延是信息从源传输到目的地所花费的时间。在自动化控制应用场景中，数据和控制指令的传输须在给定的时间段内完成。该时间段决定了最大允许的端到端时延。基于 R15 版本标准的 5G 专网，时延加上抖动有可能达到 100ms 以上，如图 2-2 所示，无法满足运动控制等实时性要求高的工业自动化应用要求。基于 R16 标准版本 5G 专网将提供更低时延更低抖动的通信质量。

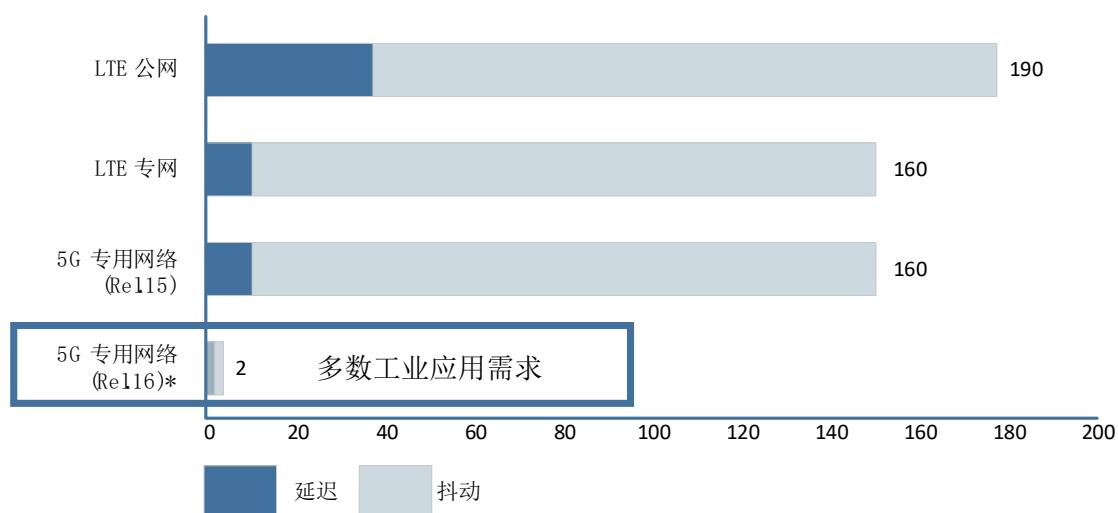


图 2-2 无线通信抖动时间是影响工业实时应用的关键参数

#### 4. 5G 需要承载工业以太网通信协议

随着 5G 向工业生产核心控制环节应用发展，5G 网络技术需要与工业以太网技术进行融合，满足生产现场自动化生产对低时延、确定性等通信需求。目前，西门子已经实现在 5G 网络中传输 PROFINET 协议。

## 5. 5G 网络需要提供故障诊断接口

5G 网络需要提供允许工业用户对 5G 通信服务的 QoS 进行诊断和监控的接口，用来持续捕获表征 5G 通信服务质量所需的数据，包括有关物理连接、逻辑链路和子网络等数据，实现 在发生网络故障时快速分析故障原因。

## 6. 5G 网络安全需要融入工业自动化网络纵深防御中

5G 网络的基础设施需要融入到工厂自动化网络纵深防御体系中，保障通信安全，并防止服务中断和数据损坏。此外，通过 5G 与工业网络安全的融合，可以检测潜在的网络攻击，全面保护设备和网络的安全并减少停机。

### 三、5G 工业应用组网方式

#### (一) 组网架构

不同工厂的实际连接需求、接入设备类型、实际应用需求的不同，使得 5G 工厂网络也会有区别，但总体网络架构一般遵循如图 3-1 所示的组网架构。

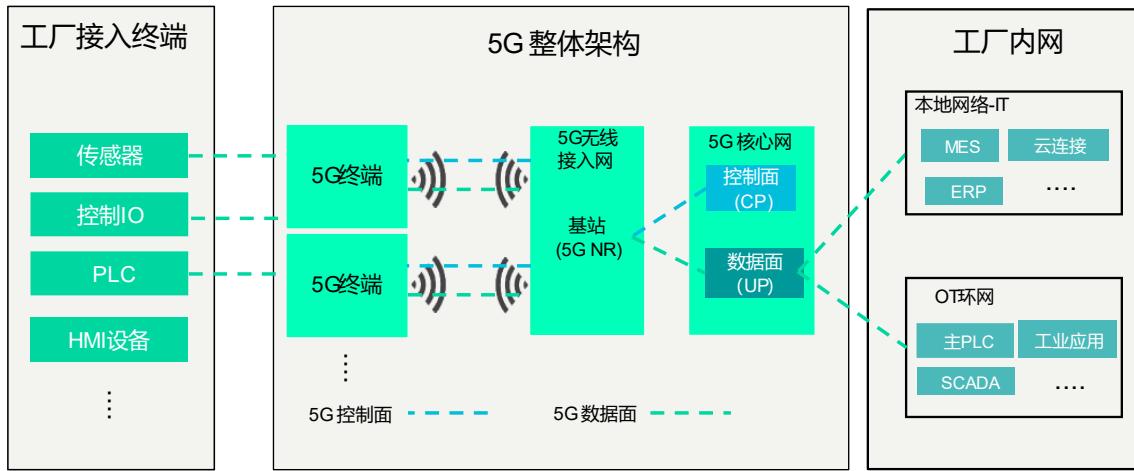


图 3-1 工业 5G 组网架构图

具体来看，5G 工厂典型组网架构由如下几部分组成：

**工业终端：**需通过 5G 无线连接的工厂设备，根据不同的应用场景需求，包括各类工业传感器、PLC、控制 I0 模块、HMI 设备、工业摄像头等。

**5G 终端：**用于将各种类型工业设备接入至 5G 网络，并支持 3GPP 定义的终端功能，与 5G 网络进行通信。5G 终端根据需求场景不同存在多种形态，包括 5G 工业路由器、5G 工业网关、5G CPE、集成 5G 模组的工业设备等。

**5G 无线接入网：**主要负责与 5G 终端的无线连接、物理层

信号处理、无线资源管理等。主要由 5G 基站（包括 AAU/BBU、CU、DU），以及配套前传、中传与回传的传输设备组成。

**5G 核心网：**负责 5G 核心控制以及用户数据路由，主要由控制面（CP）与用户数据面（UP）组成。控制面（CP）基于 SBA 架构，负责 5G 用户开通、鉴权、计费、移动性管理、会话管理、QoS 策略管理、切片等功能。用户数据面（UP）主要指 UPF 网元，负责用户数据路由、流量上报、QoS 策略执行等功能。

**工厂内网：**包括工厂内 OT 环网及 IT 网络。在 OT 环网中部署 SCADA、PLC 等工业控制系统及边缘工业应用，在 IT 网络中部署 MES、ERP 等生产管理系统、运营管理系统。5G 作为统一无线接入传输通道，将需要 5G 无线接入的工业设备，通过二层或三层连接，接入到工厂内网。

## （二）组网模式

### 1. 虚拟专网

虚拟专网主要依托于运营商建设的公共网络，通过端到端网络切片等技术为用户提供虚拟专用的网络，在一定程度上保障业务逻辑隔离，以及网络速率、时延、可靠性的优先级。在该组网模式下，由于 5G 主要设备需要与运营商公网共享，资源容易受其它公网用户抢占，一般提供尽力而为 QoS 保障。因此，虚拟专网适用于广覆盖类业务，或者数据面时延等性能指标要求不高的工业应用场景，比如基于公有云的非实时应用，

如远程监测。虚拟专网典型组网架构如图 3-2 所示。

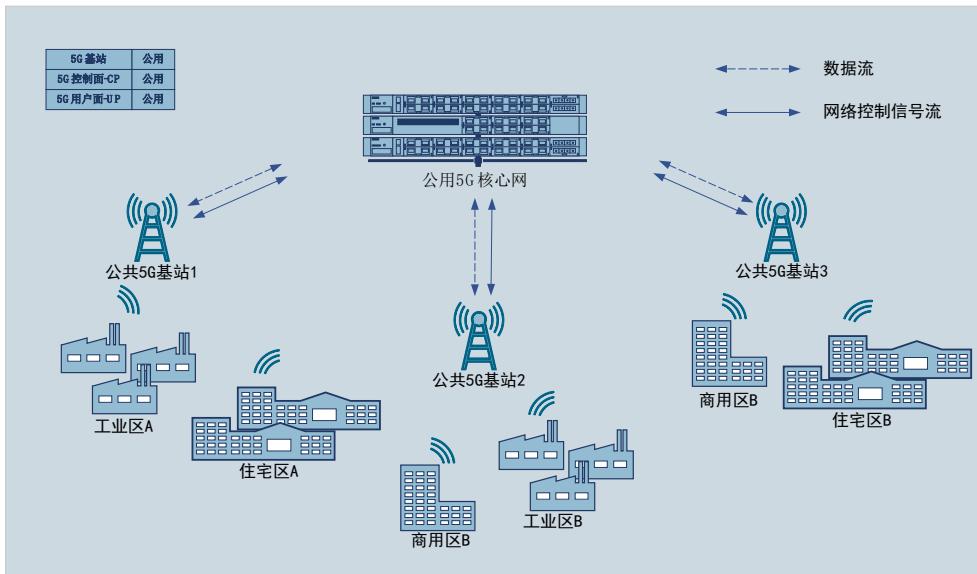


图 3-2 依托运营商公共网络基于切片技术搭建的 5G 虚拟专网架构

## 2. 混合组网

混合组网将 5G 网络中部分网元及设备下沉到厂区或园区。

混合组网常规为 UPF 下沉模式，如图 3-3 所示。针对 UPF 下沉模式，基于运营商公共网络，将 5G 网络中核心网数据面 UPF 网元下沉至厂区或园区，满足工业企业数据不出场、低时延等需求。针对安全及专用要求更高的工业企业需求，可采用 UPF 下沉+专用基站的增强模式，如图 3-4 所示。将专用 5G 基站或更多核心网设备下沉至厂区，较适用于对无线性能要求较高的局域性工厂业务。

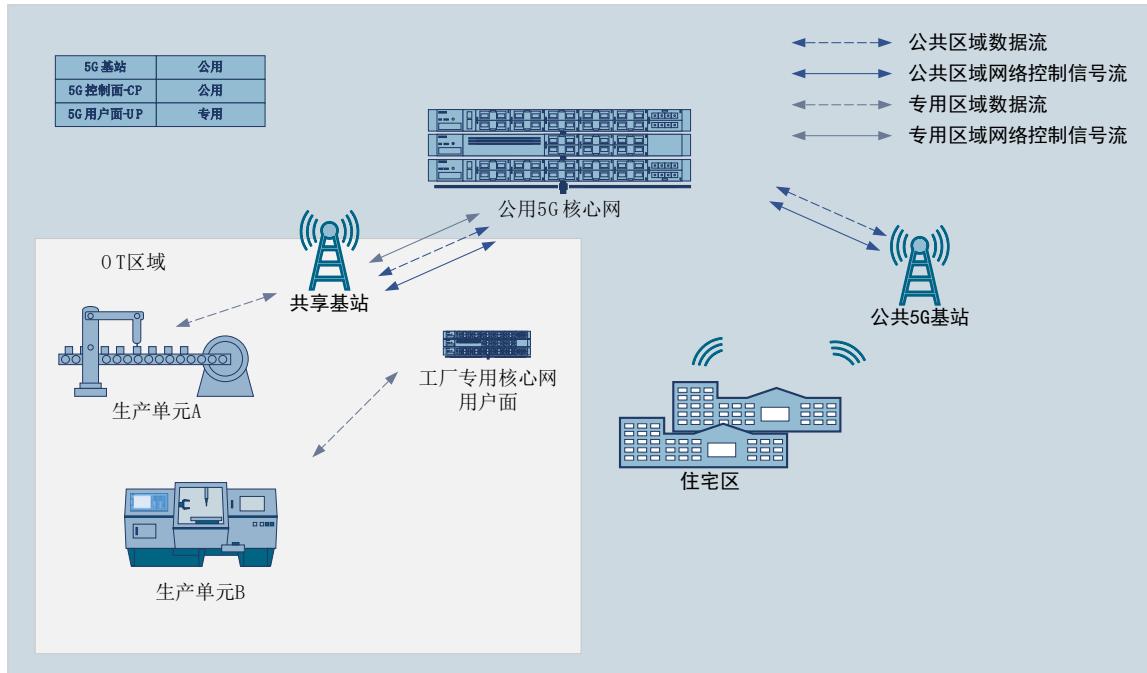


图 3-3 基于运营商公共网络搭建的 5G 专网 UPF 下沉模式

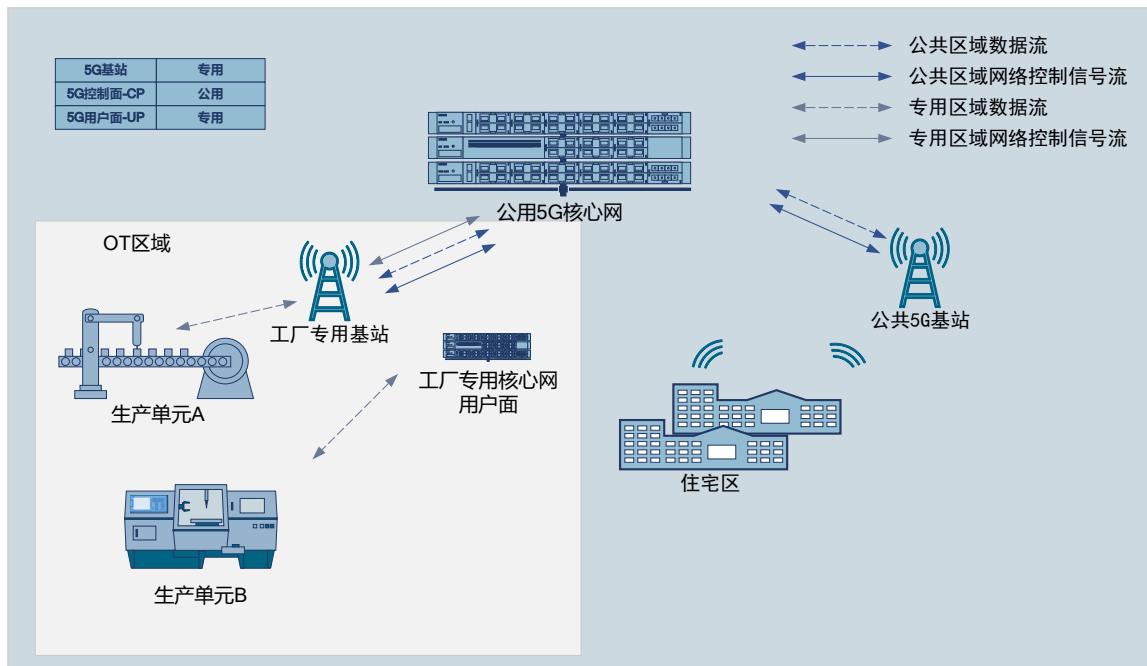


图 3-4 基于运营商公共网络搭建的 5G 专网 UPF 下沉+专用基站模式

### 3. 独立专网

独立专网为全部专用的 5G 建网模式，即所有 5G 网元、配套传输、及网管系统等均为工厂独立建设，能够为工厂内业务场景提供最高级别 QoS 保障。在 5G 演进到 R16 版本及后续版本标准后，该模式可最优化地保障高实时、高确定性通信。此外，在独立专网模式下，运维系统等也将为工业企业单独建设，工业企业完全自主运维 5G 网络。独立专网典型组网架构如图 3-5 所示。

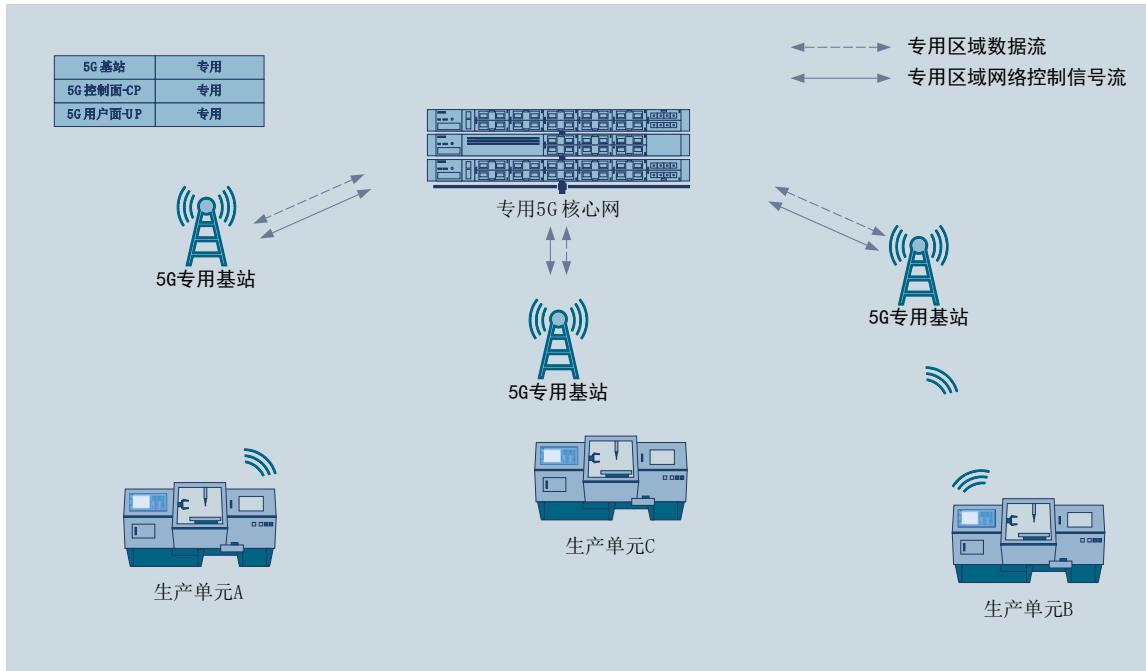


图 3-5 独立专网模式

独立专网主要为工业企业主导，5G 网络建设可委托运营商。工业企业一般从工业应用场景整体考虑出发，结合各种综合因素，寻找 5G 应用的合适的定位，进而提出对 5G 网络建

设的需求。

通常，虚拟专网和混合组网模式主要为运营商主导建设。运营商通过与工业企业交流，将 5G 作为工业无线连接新技术部署到工业企业。对于实时性及确定性要求不高的应用场景，如大带宽类业务，虚拟专网和混合组网两种模式可按需选择。而对于支持高实时、高确定性工业应用场景，以及多种特性混合应用的场景，需要大量 5G 适配及调优工作。这种场景下，独立专网由于其灵活性等优势，能更好的融入工厂现有工业网络与应用系统。

### （三）5G 专网部署的 5G 版本情况

当前由于技术局限性，5G 尚未完全融入工业生产现场。不管是虚拟专网、混合组网，还是独立专网组网模式，目前均处于 3GPP R15 版本标准阶段。R15 版本标准可支持大部分非实时类工业应用，而从 R16 版本标准开始，5G 才逐步支持低时延、高可靠特性。因此随着 R16 版本标准及后续版本商用的成熟，5G 才能在工业自动化领域进一步深入应用。目前 R16 版本标准及以上版本的新技术由于整体产业链尚未成熟，仍没有大规模部署。随着基于 R16 版本标准的 5G 技术产业链逐渐成熟，以及终端芯片成本进一步下降，5G 将加速融入工业自动化领域。

## 四、5G与工业自动化融合应用典型案例

实时性是指端到端的数据传输的时延大小。在工业自动化生产中，将实时性分为软实时和硬实时。由于实时性要求对5G应用非常重要，因此5G在工业自动化中的应用场景主要分为两类：

软实时：周期时间和时延因素中等关键， $100\text{ms}-1\text{s}$ ；

硬实时：周期时间和时延非常关键，约数毫秒甚至数微秒。

表4-1展示了5G在工业自动化中的典型应用场景及其对应的实时性要求。

表4-1 5G在工业自动化中典型应用场景及其对应的实时性要求

	应用场景	类别
1	移动机器人和AGV ( $100\text{ms}-1\text{s}$ )	软实时
2	远程控制 ( $100\text{ms}-1\text{s}$ )	软实时
3	工业控制器间实时通信 ( $10-100\text{ms}$ )	硬实时
4	运动控制 ( $<1\text{ms}$ )	硬实时

### (一) 5G在移动机器人和AGV中的应用

#### 1. 应用场景

移动机器人和自动导引车(AGV)为工业环境增加了灵活性，并且部署频率越来越高。5G可为移动机器人和AGV的应用提供高速率、低时延通信网络，在保障移动机器人和AGV安全生产的同时，提高产线和车间生产的柔性化程度。移动机器人常见的应用包括仓库和生产工厂的物料搬运(拣选/入库)。拣

货机器人从不同的存储位置取回物品并将它们运送到预定的目的地，例如包装站或集装箱。在生产工厂，移动机器人用于检索产品并将它们从一个生产步骤移动到下一个生产步骤。5G 在轮胎厂移动机器人应用场景如图 4-1 所示。



图 4-1 5G 在轮胎厂移动机器人应用场景

超大型 AGV 经常部署在汽车厂中。它们通常由控制室中的操作员远程控制。操作员观察安装在 AGV 上的摄像头拍摄的图像。摄像机信号以无线方式传输。如果操作员发现 AGV 路径中有障碍物或任何其他故障，他们会立即停止 AGV。摄像头信号传输的任何故障或延迟都可能导致严重事故，或者至少对 AGV 的运行造成不必要的中断。5G 在汽车厂中的 AGV 应用场景如图 4-2 所示。

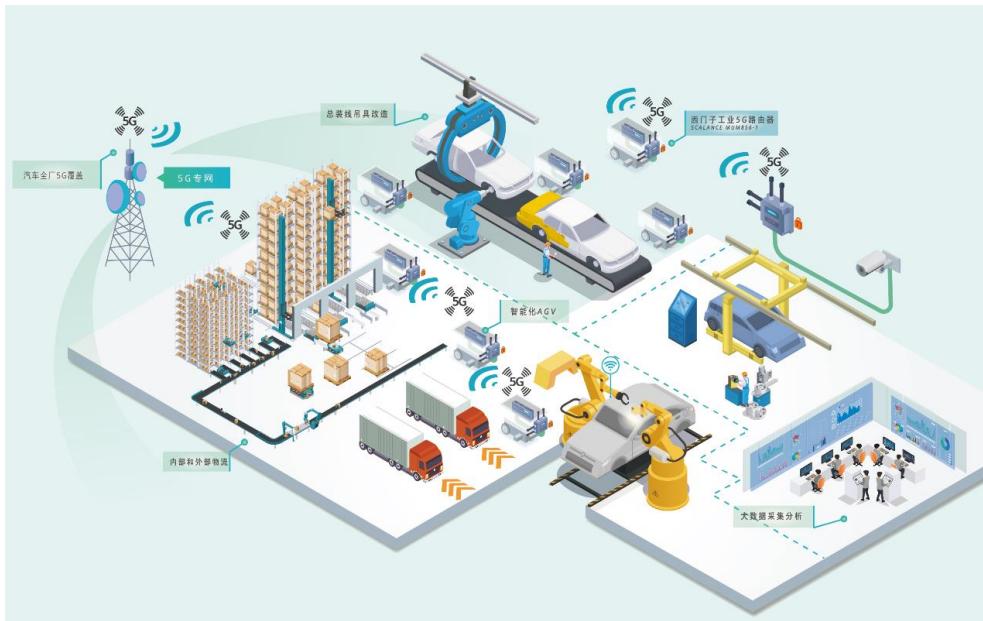


图 4-2 5G 在汽车厂中的 AGV 应用场景

## 2. 解决方案

5G 在汽车厂中 AGV 调度应用的网络拓扑图如图 4-3 所示。

在总装车间 AGV 上部署工业 5G 路由器，实现 AGV 车载 PLC、高清摄像头的 5G 网络接入。调度中心主控 PLC 与总装车间车载 PLC 之间通过 5G 专网承载工业以太网 PROFINET 通信。车载高清摄像头通过 5G 专网实现与调度中心服务器的高清视频传输。

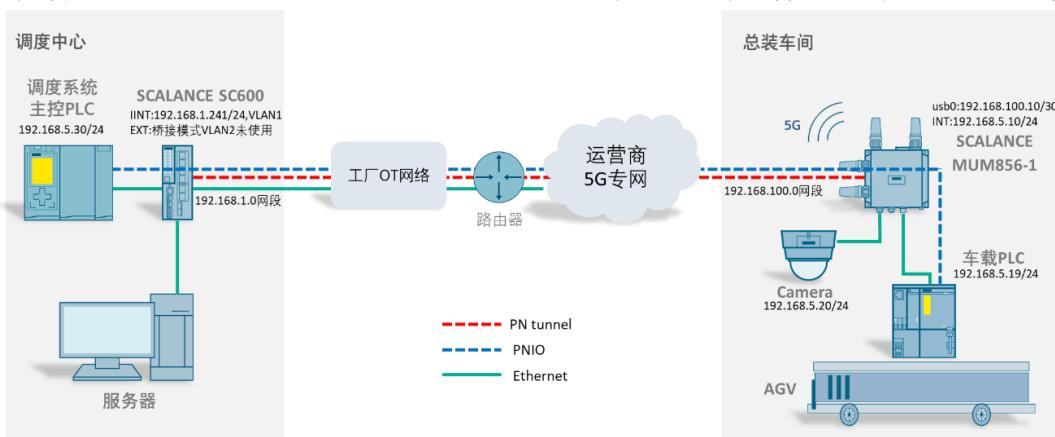


图 4-3 5G 网络实现 AGV 调度组网方案

## (二) 5G 在远程控制中的应用

### 1. 应用场景

由于矿山环境复杂，部署有线网络较为困难且成本高，且钢结构、高粉尘环境往往导致无线信号衰减严重，强电磁干扰场景多，网络覆盖难度高。使用有线网络、Wi-Fi、3G/4G 网络进行厂区连接，都因成本、难度或者网络抗干扰差，网络带宽不足、时延长等原因，难以满足生产应用需求。5G 网络的低时延、高可靠、高速率特性能够较好满足矿山远程开采过程对无线通信的要求。5G 在矿山远程开采中的应用场景如图 4-4 所示。



图 4-4 5G 在矿山远程开采中的应用

港口龙门吊、钢铁行业等需要人员在高空进行操作，高空作业的安全性低、视野受限，还需专门配备地面指挥员协助作业。低时延 5G 技术的应用，能实现自动化码头的远程操作。

不仅能减少操作人员的介入，提升安全性，也大大提高了操作效率。此外，通过冗余的一体化工业通信设计，可有效避免网络切换造成的停机时间，提升了数据传输的连贯性。5G 在港口龙门吊远程操控中的应用场景如图 4-5 所示。



图 4-5 5G 在港口龙门吊远程操控中的应用

## 2. 解决方案

5G 网络实现远程控制组网方案如图 4-6 所示。PLC 设备连接远程生产设备，通过工业 5G 路由器，将 PLC 设备接入 5G 专网，进而和主控 PLC 进行通信。通过工业 5G 路由器和有线路由器可以建立 PN Tunnel1，通过 PN Tunnel1，主控 PLC 与现场控制 PLC 之间传输 PROFINET 协议。

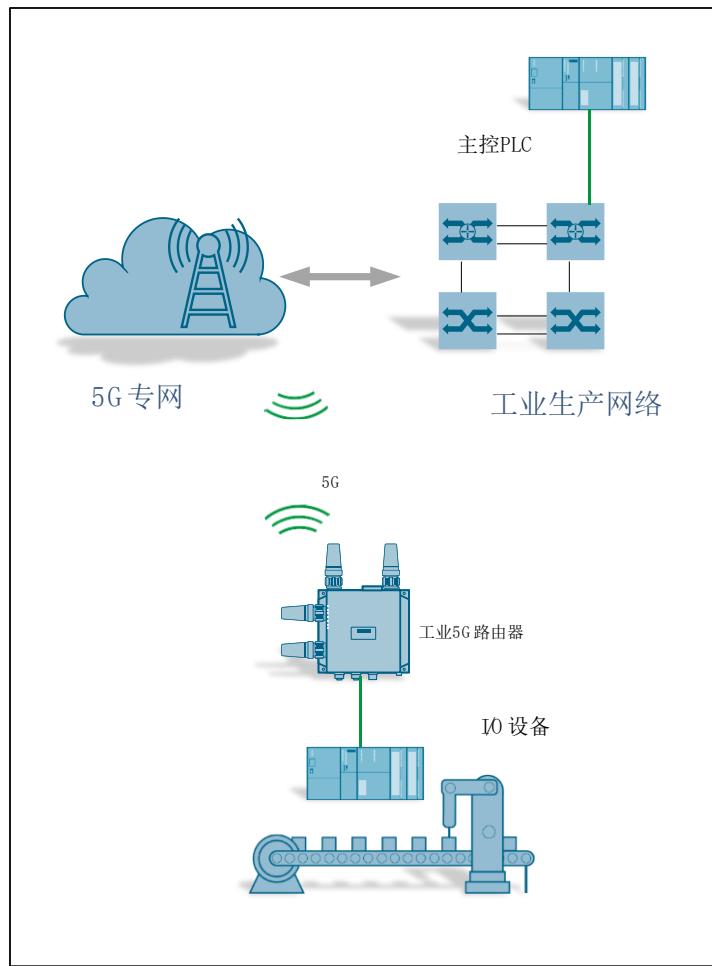


图 4-6 5G 网络实现远程控制组网方案

### (三) 5G 在工业控制器间实时通信中的应用

#### 1. 应用场景

当具备工业控制器的设备之间需要交互、共同完成任务时，需要控制器到控制器之间的实时通信。上述设备可能是大型装备的组件，或者是生产车间内的多台机器。这些设备在现场彼此靠近，因为距离相对较短，采用的通信方式主要是二层通信。

例如对于先进的包装机，一个或多个基于轨道的穿梭车在

一台装置内或多台机器之间传送材料。穿梭车具有本地板载控制器，通过 5G 网络与其他设备控制器交互其位置和控制数据。基于 5G 低时延、高可靠的特点，采用 5G 网络可避免因数据传输失败或延迟导致的机器操作停止。5G 在穿梭车和堆垛机中的应用场景如图 4-7 所示。

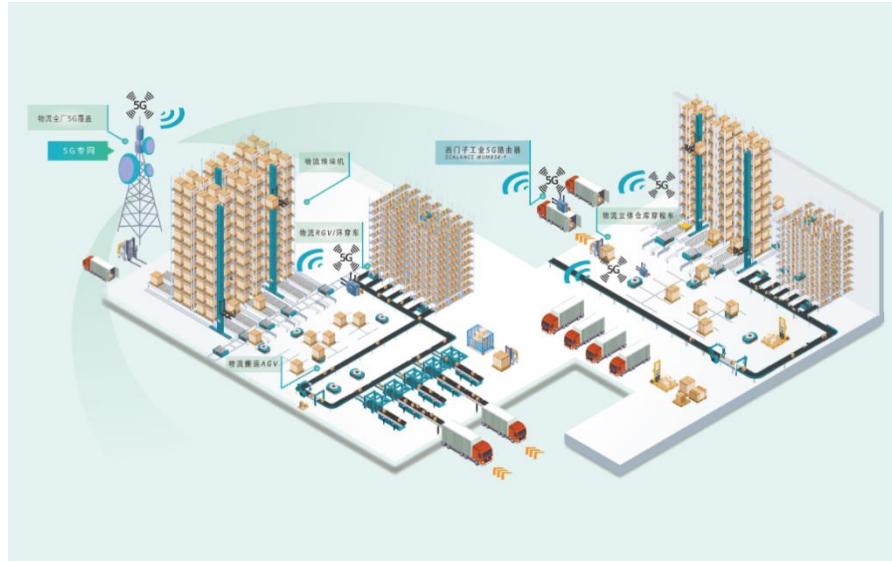


图 4-7 5G 在穿梭车和堆垛机中的应用

## 2. 解决方案

以 5G 实现两个 PLC 之间实时通信为例，组网方案如图 4-8 所示。两个 PLC 分别与 5G 路由器有线连接，然后 5G 路由器接入 5G 专网，实现两个 PLC 之间通过 5G 网络互联。此外，采用 5G 网络承载传输 PROFINET 协议，不仅能够充分利用 5G 网络低时延和高可靠的特性，而且能够保证通信的实时性，从而满足工业现场级的通信需求。

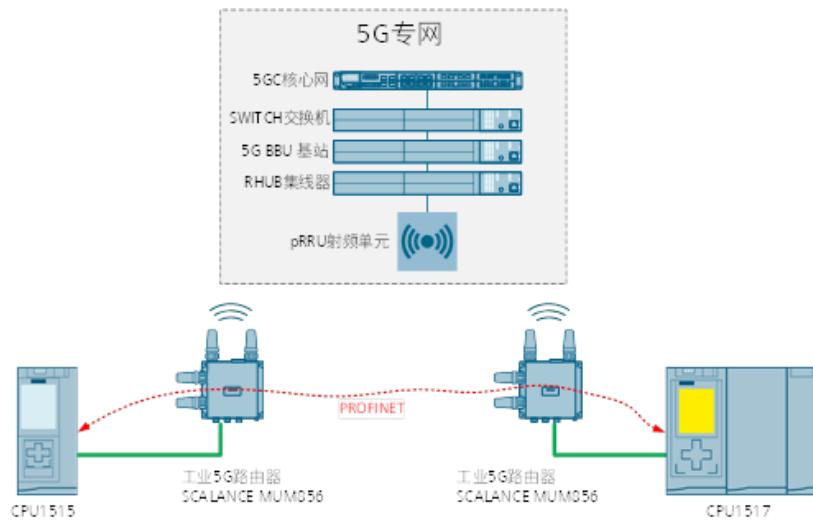


图 4-8 5G 实现两个 PLC 之间实时通信的组网方案

#### (四) 5G 在运动控制中的应用

##### 1. 应用场景

部分运动控制系统中的设备（例如传感器、执行器和驱动器）性能要求较高，并不适宜无线连接，同时运动控制又需要无线连接带来的自由移动便利性。针对上述需求，运动控制系统需要将有线工业通信网络组件与无线 5G 组件集成在一起。这种无缝集成必须支持运动控制应用程序的苛刻性能要求，例如周期时间和微秒延迟。

运动控制场景以汽车制造场景为例，汽车制造中底盘和车身的连接的过程需要承载底盘的输送机和承载车身的输送机之间进行通信。底盘和车身彼此靠得更近，以便将它们用螺栓固定在一起。这些运动必须得到精确控制，因为任何碰撞都会导致汽车部件损坏。

## 2. 5G 现有版本还不能满足运动控制应用要求

5G 的 R16 版本标准的技术能够满足工业运动控制需求，但目前尚未成熟商用。而当前基于 R15 版本标准的商用 5G 网络，端到端的时延大多数在 10ms 以上。因此包含汽车制造在内的相关行业还没有使用 5G 实现运动控制的案例。

## 五、5G与工业自动化融合应用挑战

### (一) 工业自动化低时延场景 5G 终端种类不够丰富

目前基于 3GPP R15 版本标准的工业应用实践，主要分为两类，第一类是高带宽应用场景，第二类是实时性要求不高的应用场景。高带宽应用场景包括全厂视频监控、现场辅助装配、无人智能巡检等，对应的 5G 终端包括摄像头、AR/VR 眼镜、巡检机器人等。实时性要求不高的应用场景包括厂区智能物流、远程设备操控等，对应的 5G 终端包括物流 AGV、港口龙门吊等。对于具有低时延需求的制造业中闭环控制场景，相应的 5G 终端产品主要处于研发阶段，如支持 5G 的 PLC。

### (二) 网络确定性与高实时性不足

现有有线工业网络协议已经从技术上提供了一定的确定性与实时性保障机制，如何将这些工业网络协议与 5G 网络进行深度融合，将成为 5G 确定性保障的关键性技术之一。5G 技术需要与成熟的工业网络技术，例如工业以太网技术深度融合。虽然当前基于 R15 版本实现了 5G 承载工业以太网协议，但对于以运动控制为代表的工业自动化应用场景，目前技术路线仍不能满足确定性与高实时性需求。此外 5G+TSN 在工业现场应用落地仍存在与现有工业网络融合的问题，包括 5G+TSN 网桥拓扑与转发还存在一定功能局限。

### (三) 网络管理困难

传统的工业网络为多层设计：从现场工业控制网络、SCADA 到 MES。各设备、系统通过工业冗余网络接入工业主干环网。通过环网进行冗余通信，保障网络的可用性。现场工业控制网络通过二层网络实现实时通信，有线网络保证数据的低时延和高可靠的通信需求。

当前商用 5G 网络侧重对工厂全面连接覆盖的部署与实现，缺乏对工业网络各层级的融合。目前大多数 5G 项目以单系统通信为主，工业 5G 提供无线接入，但没有考虑和传统工业骨干网和现场工业控制网络的融合。5G 网络与工业网络融合现状如图 5-1 所示。因此，5G 网络与传统工业网络不得不独立配置与运维，融合网络难以统一管理。

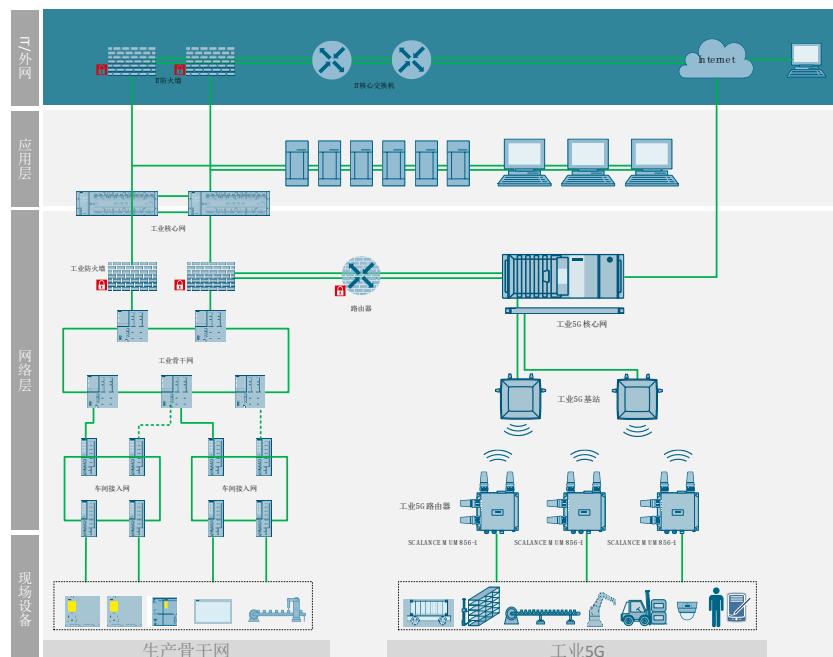


图 5-1 5G 网络与工业网络融合现状

## 六、5G与工业自动化融合应用发展展望

### (一)丰富工业自动化低时延场景5G终端种类

随着5G向生产核心控制环节深入应用，应用于工业自动化低时延场景5G终端需求越来越迫切。面向制造业闭环控制、设备协同作业等场景，加强支持5G的PLC、仪表、执行器、工业相机等产品研发。同时面向不同细分行业，研发满足如石化行业的特殊需求、低时延通信需求的应用于工业自动化场景的5G终端。

### (二)攻关工业5G确定性和高实时网络技术

3GPP从5G R16开始的各个版本，针对工厂自动化技术均有不同程度的增强，引入了多种关键技术，包括5G LAN、TSN、uRLLC、NPN等。5G LAN从一定程度上具备将5G网络融入现有工厂二层网络的能力。TSN是支撑5G确定性的另一关键技术，5G系统可作为TSN网桥融入到TSN网络中。基于5G LAN、TSN、uRLLC等技术，攻关工业5G确定性网络技术及满足工业自动控制高实时要求的5G网络技术。

### (三)建设工业网络综合管理平台

随着5G逐步在工业深入应用，端到端运维越来越成为5G融入工业生产的关键因素。其中工业网络跨域QoS指标监控与诊断将会成为其中的核心技术。跨域QoS组网及诊断需要各域之间，如工业控制系统设备、5G网络、工业有线/无线网络之

间，整体协同设计网络架构。涉及包括冗余架构、端到端重点工业网络性能指标协同、端到端诊断机制协同等。建设工业网络综合管理平台，支持对工厂 5G 网络与传统工业网络的统一管控，包括配置管理、拓扑管理、故障管理等，实现 5G 在工业自动化应用中的跨域网管与运维。