



面向特定行业的“5G 全连接工厂” 组网技术及验证研究报告

中国工业互联网研究院
新型工业网络实验室
2022 年 11 月

前言

自 2019 年工业和信息化部印发《“5G+工业互联网”512 工程推进方案》以来，5G 与工业互联网的融合呈现叠加倍增效应，5G 在工业领域的应用得到长足进步。2022 年 9 月，工信部出台《5G 全连接工厂建设指南》，旨在进一步推动“5G+工业互联网”融合应用从典型场景向生产现场系统性建设，帮助企业解决数字化转型过程中的难点、痛点和堵点，推进传统产业提质、降本、增效、绿色、安全发展。

5G 全连接工厂可充分发挥 5G 网络聚合作用，有机集成人工智能、数字孪生、云计算等各类新一代信息技术，打造新型工业互联网基础设施，形成生产单元广泛连接、信息（IT）运营（OT）深度融合、数据要素充分利用、创新应用高效赋能的先进工厂。在遵循企业实际需求的前提下，综合考虑 5G 技术应用场景和建设成本，推进各行业企业灵活部署 5G 网络等基础设施，以分类分级为导向建设 5G 全连接工厂，可实现 5G 在企业生产辅助环节的规模化部署和核心环节的深层次拓展，从而进一步推动企业数字化转型升级。

5G 全连接工厂组网技术作为工厂建设的关键一环，直接影响工厂生产模式的转变与企业提质增效水平，组网技术验证则是衡量 5G 全连接工厂通信网络性能的重要手段，可评估验证 5G 全连接工厂组网方案的高效性与健壮性。当前，围绕基础设施建设、厂区现场升级、关键环节应用、网络安全防护等内容，国内众多企业已开展 5G 全连接工厂探索与实践，在装备制造、钢铁、采矿、电力以及石化化工等多个行业取得一系列进展。为进一步推动 5G 全连接工厂建设，提升我国工业领域数字化水平，中国工业互联网研究院依托新型工业网络实验室开展 5G 全连接工厂组网技术研究，联合 20 家单位编写了《面向特定行业的“5G 全连接工厂”组网技术及验证研究报告》。该研究报告介绍了当前核心的 5G 全连接工厂组网关键技术，从实验室测试和现场测试两个角度，分析了 5G 全连接工厂组网技术验证方案，梳理了 5G 全连接工厂在装备制造、钢铁、采矿、电力、石化化工等重点行业发展现状，形成 5G 全连接工厂组网典型案例集，最后给出了未来 5G 全连接工厂在应用部署方面的发展建议。

组织单位：

中国工业互联网研究院

参与编写单位（排名不分先后）：

中国工业互联网研究院、中国移动通信有限公司政企客户分公司、中国移动通信研究院、中移（上海）信息通信科技有限公司、高通无线通信技术（中国）有限公司、辽宁省工业互联网发展研究中心（中国工业互联网研究院辽宁分院）、思博伦通信科技（北京）有限公司、大唐联仪科技有限公司、中国电信股份有限公司研究院、中国电信股份有限公司辽宁分公司、中国移动通信集团辽宁有限公司、中国联合网络通信有限公司辽宁省分公司、中国电信股份有限公司苏州分公司、通力电梯有限公司、鞍山钢铁集团有限公司、抚顺新钢铁有限责任公司、新疆天池能源有限责任公司、辽宁新发展耐火材料集团有限公司、国家石油天然气管网集团有限公司、东北大学、镭云(上海)物联网科技有限公司

编写指导（排名不分先后）：

王宝友、杨鹏、夏权

编写成员（排名不分先后）：

朱浩、薛强、柴安颖、刘如才、李亚丽、陈喻、叶欧海、张玉良、唐墨、历明、赵斯琦、郝森参、侯兰霞、黄震宁、李宜铮、崔旭升、李海伟、马兵、付正军、李腾达、张伟、黄迪、杜泽群、王建、王荷雅、谢亚滨、谭乐波、陈卓、王晓萌、刘晓宇、郑临夏、尹晓亮、孟涛、武志合、丁立曼、孙慧、魏守东、崔铎、张照和、唐剑秋、付江、徐丰、黄同飞、张镇、刘佳伟、王吉勇、杨志勇、王维、王莹、吴志伟、孙家莲

目 录

一、5G 全连接工厂概述	1
(一) 5G 全连接工厂的概念	1
(二) 5G 全连接工厂建设需求与挑战	1
1. 装备制造行业	1
2. 钢铁行业	2
3. 采矿行业	2
4. 电力行业	3
5. 石化化工行业	3
二、5G 全连接工厂组网参考架构及关键技术	4
(一) 5G 全连接工厂组网参考架构	4
1. 工厂级 5G 全连接工厂	4
2. 车间级 5G 全连接工厂	5
3. 产线级 5G 全连接工厂	5
(二) 5G 全连接工厂组网关键技术	6
1. 5G 网络切片	6
2. 边缘计算	7
3. 5G LAN	7
4. 5G 大上行能力	7
5. URLLC 增强	7
6. 高精度定位	8
7. RedCap	8
8. 5G+确定性通信	8
9. UPF 本地分流	9
10. 5G+工业 PON	9
三、5G 全连接工厂组网技术验证	9
(一) 总体测试内容	9
(二) 实验室测试	10
1. 行业 5G 终端测试	10
2. 5G 关键技术测试	11
(三) 现场测试	13
1. 5G 基础服务质量测试	13
2. 行业应用业务质量测试	14
四、5G 全连接工厂组网案例分析	15
案例一：通力电梯 5G 智能互联工厂	15
案例二：鞍山钢铁 5G 智慧冶金	17
案例三：中国一重 5G+智慧工厂	19
案例四：抚顺新钢“5G 创世-灯塔钢企”	21
案例五：新疆天池 5G+智能矿山	23
案例六：南方电网 5G+智能电网	25
案例七：辽宁新发展 5G+工业 PON 融合组网	27

案例八：国家管网 5G+智慧燃气	29
五、5G 全连接工厂应用与部署建议	31
附录：测试指标	33

一、5G全连接工厂概述

（一）5G全连接工厂的概念

5G全连接工厂是充分利用以5G为代表的新一代信息通信技术集成，打造新型工业互联网基础设施，新建或改造产线级、车间级、工厂级等生产现场，形成生产单元广泛连接、信息（IT）运营（OT）深度融合、数据要素充分利用、创新应用高效赋能的先进工厂，将加快推动采矿、港口、电力等重点行业的数字化进程*。

（二）5G全连接工厂建设需求与挑战

《5G全连接工厂建设指南》中提出，将面向电子设备制造、装备制造、钢铁、采矿、电力、石化化工、建材、港口、纺织、家电10个重点行业领域，推动万家企业开展5G全连接工厂建设。由于各行业建设需求存在明显差异，本报告选取了装备制造、钢铁、采矿、电力、石化化工5个重点行业，开展5G全连接工厂组网关键技术分析，从多个维度阐述各行业5G全连接工厂建设的需求与挑战。

1. 装备制造行业

● 5G应用部署需求

随着工业物联网边缘计算能力下沉，音视频识别检测、协同会议、远程诊断等应用场景常会由于带宽不足，导致音视频通信延迟、实时远程诊断效果差等问题，迫切需要5G技术提供高速、大带宽能力，为现场海量数据实时并发上传提供支撑。以5G技术代替工厂内有线连接，可提供厂区超高可靠、超低延迟的无线通信能力，实现生产线柔性制造，从而降低生产成本。

● 5G应用部署挑战

装备制造行业建设5G全连接工厂的挑战主要体现在行业碎片化。装备制造行业本身即为一个大类，可分为白色家电、汽车、大型装备、五金等多个细分行业，其制造流程和环节均不相同，生产管理差异较大，部署方案之间无法互通互用，难以形成标准化的5G全连接部署方案。因此，在5G全连接工厂建设过程中，各细分行业均需制定特定的组网、平台、应用等解决方案，必将导致建设标准繁多，部署应用开销较大等难题。

*数据来源：工业和信息化部—《5G全连接工厂建设指南》

2. 钢铁行业

● 5G 应用部署需求

随着“5G+工业互联网”的融合纵深发展，钢铁行业信息化脚步日渐加快，5G应用与信息化建设需求日益凸显，其中包括以无人天车、质量检测、视频安防、AR远程辅助、无人料场等为代表的5G低延时、大带宽的单场景应用，和以设备数采、数字孪生等为代表的跨场景跨工序场景应用。工业设备的连接与远程监管，可对接承载单设备场景的5G应用落地，同时，钢铁平台的规模复制，还将带来连接的规模化增长，解决厂内路由配置自动化与5G网-企业专网的内外网穿透等众多技术问题。

● 5G 应用部署挑战

面向钢铁行业的5G全连接工厂建设存在行业壁垒和技术壁垒两方面的问题。一方面，钢铁行业生产模式为传统烟囱式形式，流程工艺的信息、数据、人员、系统各自独立壁垒较深，生产数据流通性差，单纯的网与网间的互通并不能解决平台全流程拉通的问题。另一方面，建设5G全连接工厂需要对设备建模与机理、数据特性有深入理解，目前运营商具备5G网络建设、IT软件建设的能力，但对于数理模型算法的建略有欠缺，还需要整合第三方的专业能力，打造全方位解决方案。另外，钢铁行业存在大量易燃、易爆、高温、高压现场环境，需制定面向防尘、防爆、阻燃等特殊设备的部署方案。

3. 采矿行业

● 5G 应用部署需求

矿山生产环境恶劣，工人在露天环境下作业，易出现人员伤亡，同时井下高温、高湿，采掘工作产生大量粉尘对人体健康危害极大。以智能化、自动化采矿装备为核心，以高速率、大容量、双向综合数字通信网络为载体，以智能设计与生产管理软件系统为平台，建设采矿行业5G全连接工厂，实现矿山对象及生产过程的实时、动态、智能化监测与控制，有助于增强矿山安全保障能力，提升矿山开采效率，降低矿山企业生产成本。

● 5G 应用部署挑战

面向采矿行业的5G全连接工厂建设还处于起步阶段，在具体部署与应用中存在一些难题亟待解决。一是矿山行业壁垒高、专业性强，5G技术在矿山智慧勘测、智能开采、智能生产等环节仍存在设备产业链不成熟、网络建设成本偏高、

定制开发要求多等难点；二是我国采矿行业信息化工作缺乏总体规划与设计，面向矿山行业的5G全连接建设标准较少，部分标准技术局限性较大；三是受4G时代井下搭建小型独立核心网、独立网管影响，当前矿山企业同样提出5G独立核心网需求，但由于缺乏统一主体的管理和协调，5G频段规划与应用难以实现跨行业跨区域的有效共享，网络安全难以保证。四是现有的煤机设备厂家协议接口未开放，无法从各类服务系统、应用系统和控制端获取数据，矿山现场多源异构数据融合难度大，煤机设备改造阻碍重重，严重制约井下无人化建设的发展。

4. 电力行业

● 5G应用部署需求

在电力行业中，电力系统生产控制大区需与管理信息大区实行严格的物理隔离。传统通信技术只能依靠光纤+网线来实现工厂远程生产控制，该通信模式存在两方面问题，一方面有线网络部署需要大量人工施工，对现场环境要求极高，一旦损坏很难修复；另一方面厂区移动设备只能通过WiFi或蓝牙等方式接入网络，无法保证连接质量与网络安全，更无法实现远程控制。然而，5G全连接工厂可构建电厂内全域无线连接，满足电力工厂自动化巡检、设备点检、智能运维等方面的需求。

● 5G应用部署挑战

面向电力行业的5G全连接工厂应用与部署挑战，主要体现在信息安全和建设成本两个方面。在信息安全方面，根据国能安全[2015]36号文要求，电力系统生产控制与管理信息两个大区必须实现物理隔离，目前电力行业虽已有5G无人天车、远程驾驶和无人钻矿应用案例，但目前尚无生产控制大区的5G网络建设标准，部署方案及边界有待确定，各电力工厂之间需求、定义各不相同，难以打造标准样板间。在建设成本方面，5G设备目前部署成本及功耗仍然较高，工厂实施5G全连接工厂改造仍存在一定资金压力，无法大范围推广。

5. 石化化工行业

● 5G应用部署需求

石化化工行业生产环境具有一定特殊性，包括加工车间高温高压环境，生产原料多种多样，原材料具有有毒有害，易燃易爆易腐蚀，可挥发可流动等危险属性。这些特性导致石化化工领域生产设备稳定性难以掌握，生产环境极易引发火灾、爆炸等重大安全事故，造成严重的人员伤亡与环境污染。因此，石化化工行

业迫切需要打造无人化、智能化生产环境，建设极端环境下的远程控制机器人作业、无人运输、无人巡检、污染源监控等应用场景，提高厂区安全生产水平，降低石化化工企业生产成本。

● 5G 应用部署挑战

当前石化化工行业 5G 全连接工厂建设仍存在一定挑战。一是 5G 产品形态较少，适用于石化化工行业的 5G 硬件种类较少，面向石化化工行业的 5G 全连接工厂建设标准尚未成型，网络建设方案缺乏灵活性；二是系统集成和数据采集仍有难度，5G 全连接工厂建设涉及智能装备、自动化控制、传感器、工业软件等多领域的供应商，各供应商产品接口不统一，易形成数据孤岛。三是石化化工行业场景复杂，室外、室内防爆要求严格，部署 5G 设备时需根据不同应用场景需求，设计防爆外壳及本安电路，然而目前市场中该类产品较少，对 5G 全连接工厂应用部署造成一定影响。

二、5G 全连接工厂组网参考架构及关键技术

（一）5G 全连接工厂组网参考架构

5G 全连接工厂支持企业建设工厂级、车间级、产线级等不同类型 5G 全连接工厂，具体组网参考架构如下：

1. 工厂级 5G 全连接工厂

工厂级 5G 全连接工厂，着重跨车间跨层级互联互通、场景的深度和系统化应用、全要素生产率提升等能力。工厂级 5G 全连接工厂，可以通过 5G 网络实现多车间的跨层跨域互联互通，也可以在每个车间下沉 UPF，通过工厂核心网络的传输/承载实现车间之间的互联互通；同时，工厂级 5G 网络也需要支持工厂内办公网络和生产网络的共同承载，并根据业务需求选择公网应用和工厂应用逻辑隔离、物理隔离的部署方式。



图 1 工厂级 5G 全连接工厂组网参考方案

2. 车间级 5G 全连接工厂

车间级 5G 全连接工厂，着重多产线多系统协同优化、数据价值充分释放、集成创新水平提升等能力。车间级 5G 全连接工厂组网需要满足 IT+OT 一网融合，支持多样化工业协议适配和多模态接入制式融合，同时也要满足各环节各工序的生产数据的流通和分析能力，驱动工业应用和控制系统的数字化、虚拟化演进，为关键工序数控化、OICT 高效协同提供助力，实现工业数字化转型的效率变革。在实施中，车间级 5G 全连接工厂组网：一是需要支持与 UWB、工业 WiFi、工业总线、RFID 等接入制式的协作，实现车间内设备的互联互通；二是需要支持通过交换机、路由器等设备连接工业 UPF 与现有工业网络，实现二层、三层数据的交换和路由，5G 网络既可以独立部署，也可以作为现有工业生产网络的补充模式；三是需要支持构建算网一体化方案，满足工业多样性算力调度需求和精准高效的工业控制调度要求。



图 2 车间级 5G 全连接工厂组网参考方案

3. 产线级 5G 全连接工厂

产线级 5G 全连接工厂，着重在单一生产环节、业务单元的设备连接、数据采集和 5G 融合应用创新方面能力。产线级 5G 全连接工厂着重面向工业产线提供通信质量、通信精度、便捷连接等有保障的服务能力，可以分成两层：设备接入层实现了工业生产设施到 5G 网络的便捷接入，满足工业多样性设备通讯需求；融合组网层实现了 5G 网络和现有多样化工业网络的互联互通以及兼容并存，并提供确定性、高可靠以及边缘实时算力的服务能力。



图3 产线级 5G 全连接工厂组网参考方案

(二) 5G 全连接工厂组网关键技术

5G 标准在演进过程中，不断引入新的技术以解决行业应用需求。R15 版本聚焦 eMBB 场景，引入切片技术实现差异化的 Qos 保障；R16 版本全面支持垂直行业融合，重点实现 URLLC 增强，定义 0.5~1ms 空口时延，实现 6 个 9 可靠性，通过 5G 承载 TSN 实现确定性网络，通过 NR 定位实现室内 3 米室外 10 米精度，通过 5G LAN 支持工厂二层网络的平滑接入；R17 版本深度面向垂直行业提升 mMTC 场景能力，RedCap 裁剪功能以降低芯片成本，NR 定位实现亚米级精度。5G 通过技术迭代，将不断推进 OT+ICT 走向融合。

1. 5G 网络切片

网络切片是提供特定网络能力的、端到端的逻辑专用网络。一个网络切片实例是由网络功能和所需的物理/虚拟资源的集合，具体可包括接入网、核心网、传输承载网及应用。网络切片可基于传统的专有硬件构建，也可基于 NFV/SDN 的通用基础设施构建。切片管理功能有机串联商务运营、虚拟化资源平台和网管系统，为不同切片需求方（如垂直行业用户、虚拟运营商和企业用户等）提供安全隔离、高度自控的专用逻辑网络。



图4 5G 网络切片架构

2. 边缘计算

移动边缘计算（MEC，Mobile Edge Computing）改变 4G 系统中网络与业务分离的状态，将业务平台下沉到网络边缘，为移动用户就近提供业务计算和数据缓存能力，实现网络从接入管道向信息化服务使能平台的关键跨越，是 5G 的代表性能力。

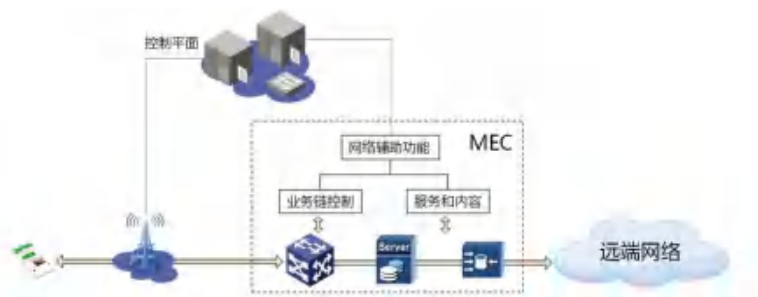


图 5 5G 网络 MEC 架构

3. 5G LAN

3GPP 在 R16 中定义了 5G LAN 组网功能，通过核心网即可支持工业现场网络的二层组网而无需额外的网关路由设备。5G LAN 技术旨在基于 Ethernet 或 IP 网络，面向 5G 垂直行业客户提供局域网点对点或点对多点通信服务，通信方式包含单播、组播和广播。5G LAN 将签约同一网络切片和 DNN 的一组终端指定为一个 5G VN 组，组内终端基于 5G 终端连接能力和 5G 基本网络服务实现局域网通信。

4. 5G 大上行能力

5G 大上行是行业数字化转型的共同需求，5G 大上行能力将驱动视频监控、远程控制、机器视觉等典型场景的快速商用。当前，业界主要通过 1D3U 专属帧结构、SUL 上行增强、上行载波聚合等关键技术提升上行能力。目前普通 5G 公网上行容量约为 200Mbps，通过修改帧结构为 1D3U（DSUUU），可以将上行容量提升到 700Mbps；在此基础上叠加载波聚合功能以及 SUL 功能，则上行峰值容量能超过 1Gbps。除此之外，还可灵活组合多频段组网、小区分裂、毫米波等组网方案，进一步提升上行容量和覆盖，为室外广域、室外局域、室内、全封闭等场景的不同客户提供专属定制化解决方案和网络服务，满足不同行业客户的差异化大上行需求。

5. URLLC 增强

各类工业控制场景对时延和可靠性提出极高要求。3GPP 在 R15 版本中，重

点支持 URLLC 基本功能，通过灵活帧结构、非时隙调度等技术降低空口时延，通过低码率 MCS/CQI、PDCP 重复传输等技术提高空口可靠性；R16 阶段具备完整的 URLLC 能力，引入确定性关键技术，支持工业自动化、时延敏感通信等新业务，满足 99.9999% 的高可靠性和空口单向 0.5~1 ms 时延的业务需求。

6. 高精度定位

在工厂室内环境，卫星定位无法使用。为此，5G 在 R16 版本中增加了定位功能，利用 MIMO 多波束特性，定义了基于蜂窝小区的信号往返时间（RTT）、信号到达时间差（TDOA）、到达角测量法（AoA）、离开角测量法（AoD）等室内定位技术，定位精度可达到 3-10 米；R17 版本进一步把室内定位精准度提升到亚米级，以满足如 AGV 定位、资产追踪等工业互联网需求。

7. RedCap

RedCap 是 3GPP 在 5G R17 阶段，针对速率、时延要求不高的 5G 应用场景，专门推出的一种轻量化 5G 版本。RedCap 技术旨在通过终端极致裁剪，满足终端低成本、小尺寸需求，同时保留 5G 网络在时延、可靠性、切片、数据不出厂等方面的各类优秀特性，满足视频监控、工业传感等多种业务场景。

8. 5G+确定性通信

工业通信领域对通信确定性要求严格，随着 5G 从辅助生产向融入生产迈进，深入到实施框架的设备层的过程中，需要 5G 提供确定、可靠的服务能力，实现生产过程的 5G 化，进而满足产业层、企业层、边缘层、设备层的 5G 一网直达。

5G 应支持提供内生确定、网业协同的方案，构建有界时延、有界抖动、高精度时间同步的确定性服务能力。一是支持通过引入预调度、DS 帧结构、mini-slot、slot 重复、低码率 MCS、免授权调度、PDCP 复制、URLLC 超高优先级调度等空口原子能力，不断提升空口的确定性保障效果；二是支持通过 TSN 内化，引入 DS-TT、NW-TT 满足 5G 用户面确定性调度，支持网络嵌入 TSN 或者 5G 网络直接提供确定性两种确定性服务能力为满足无线接入网络支持应用 TSN 技术的确定性工业网络互联的需求；三是支持通过双发选收、冗余传输等方式提供业务高可靠服务能力，提升业务的可靠性传输性能；四是支持确定性能力的跨层跨域穿透，5G 专网应支持对外提供高精度时间同步能力，也应支持内外部时钟源的转换和时钟的穿透。

9. UPF 本地分流

5G 网络支持 5G 接入的本地分流，以满足数据不出场、降低业务时延、边缘计算等应用需求。5G 网络支持基于 DNN/切片选择到本地的 UPF，实现本地分流的能力。5G 网络也应支持基于标准 ULCL 的本地分流，ULCL UPF 应支持根据 SMF 提供的分流策略向不同的 PDU 会话锚点 UPF 转发上行业务流，以及将来自链路上的不同 PDU 会话锚点 UPF 的下行业务流合并到 UE。

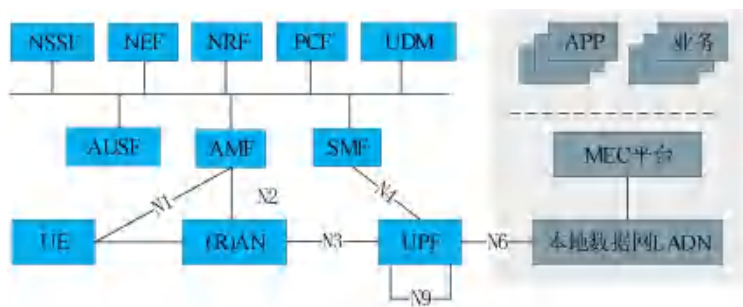


图 6 UPF 本地分流框架图

10. 5G+工业 PON

5G 与工业 PON 融合组网，实现固定、移动设备全连接，结合高带宽、低时延、低损耗、易运维、抗干扰等优势满足企业在智能制造和智能管理过程中的网络连接需求，实现企业园区内的生产控制、厂区监控、办公业务的统一接入。5G 采用 TSN 技术以满足确定性传输要求，而确定性工业 PON 采用 DBA 调度算法、单帧多 burst 技术和优化注册及开窗调度等方法，时延稳定在微秒级(200-400us)，满足闭环控制场景下对网络确定性的严苛需求。

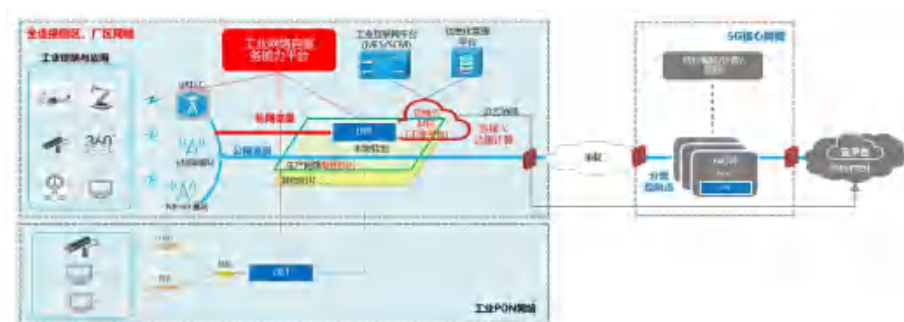


图 7 5G+工业 PON 融合组网示意图

三、5G 全连接工厂组网技术验证

(一) 总体测试内容

5G 全连接工厂的建设涉及芯片、终端、网络、应用等各个层面，针对相关

技术、产品、组网和应用效果开展测试验证，可有效提升 5G 全连接工厂建设效果。针对 5G 全连接工厂的测试，可以根据工厂 5G 网络应用具体场景，提炼需求侧技术指标，有针对性的开展四类测试，一是面向 5G 全连接工厂涉及的 5G 终端接入设备，如工业网关、CPE、5G 终端、模组等，开展协议、射频、RRM、性能相关测试；二是面向 5G 全连接工厂组网方案涉及的 5G 关键技术，如 5G+TSN、高精度定位等，开展技术验证测试；三是开展工厂现场 5G 网络覆盖与服务质量评测，包括工厂 5G 信号覆盖测试，电磁干扰测试，端到端时延、抖动、吞吐量、丢包等性能测试；四是面向 5G 网络支撑的典型业务，包括工业控制、数据采集、现场监测、工业质检等各类上层应用的业务质量和应用效果开展评测。前两类测试可在实验室环境下开展，后两类测试在现场环境下开展。

（二）实验室测试

1. 行业 5G 终端测试

随着 5G+工业互联网新技术向工业生产的各个领域深度拓展，大量行业 5G 终端形态不断涌现，如 5G 网关、5G CPE、搭载 5G 模组的工业设备等，复杂工业场景的应用对这些 5G 终端的射频、RRM、吞吐量以及功耗等能力提出了更高的技术要求。

1) 测试内容

射频测试：测试终端发射机指标、接收机指标、解调性能指标等。

RRM 测试：测试终端无线资源的管理与调度策略，包括终端重选、移动性等过程的精度、时延和成功率是否达标。

数据传输性能测试：测试终端上下行数据传输性能，包括峰值吞吐量、误码率、时延、丢包率等。

功耗测试：测试终端在不同网络模式下耗电及续航能力。

工业典型信道场景：在模拟工业场景的信道环境下测试终端的可靠性、稳定性及数据传输性能。

2) 测试方案

利用 5G 综合测试仪、信道仿真器、电源分析仪等先进设备搭建完整的 5G 终端测试环境，实现对 5G 终端的射频特性、RRM、业务性能与功耗等关键指标进行测试。

利用信道仿真器模拟无线信道，仿真矿井、厂区、港口等工业场景下的无线

信道衰落情形，实现各类工业场景复杂信道下 5G 终端性能的准确测量。



图 8 行业 5G 终端测试方案

2. 5G 关键技术测试

R16、R17 标准中新技术尚未完全产业化，特定行业场景的应用效果亟待实验室验证。以确定性通信和高精度定位为例，5G+工业互联网场景中，存在大量周期性和非周期性业务混合传输的情况和 5G 终端的 A-GNSS 定位需求。其中周期性业务的确定性是远程控制和生成制造的重要保障，5G 终端设备高精度定位是多径场景、移动场景下仓储物流、巡检、协同生产等典型业务场景的重要保障。

1) 测试内容

5G+TSN 测试：主要包括 5G TSN 时钟同步测试、5G TSN IEEE802.1Qbv 时间感知整形测试、5G TSN IEEE802.1CB 冗余保护测试。

5G 高精度定位测试：主要验证 5G A-GNSS 定位功能与性能、5G RTK/PPP 定位功能与性能、5G 3GPP Rel-16 基站定位能力。

2) 测试方案

5G+TSN 的实验室测试，主要通过专用时钟同步测试仪表、TSN 网络测试仪、网络损伤仪、搭建实验室 5G TSN 仿真网络实验环境，与中间 TSN 交换机、5G TSN 虚拟交换实例进行时钟同步精度、Qbv 门控精度以及冗余保护测试，验证相关指标。

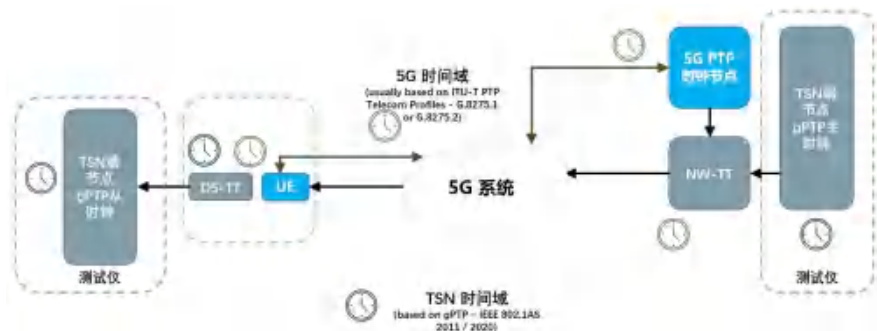


图 9 5G TSN 时钟同步测试方案



图 10 5G TSN IEEE802.1Qbv 时间感知整形测试方案

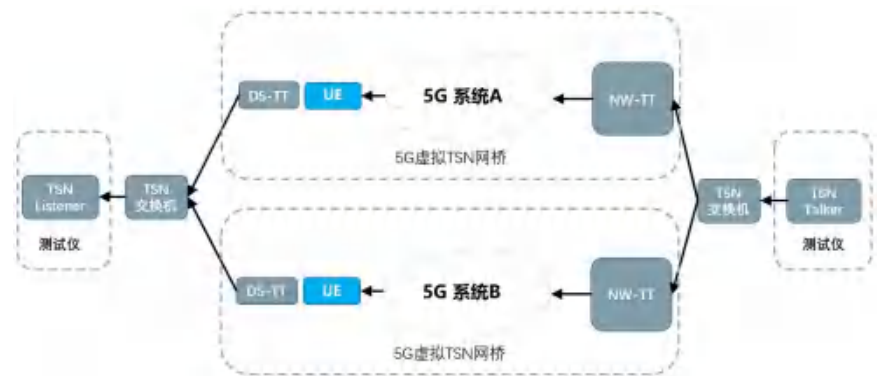


图 11 5G TSN IEEE802.1CB 冗余保护测试方案

5G 高精度定位测试，主要通过 5G 网络仿真器、GNSS 卫星仿真器、SMLC 模拟器或 NTRIP Caster、测试控制电脑、微波暗室搭建实验室 5G 定位模拟测试环境，依照相关规范开展 5G A-GNSS、5G RTK/PPP、5G 3GPP Rel-16 基站定位测试，验证相关指标。

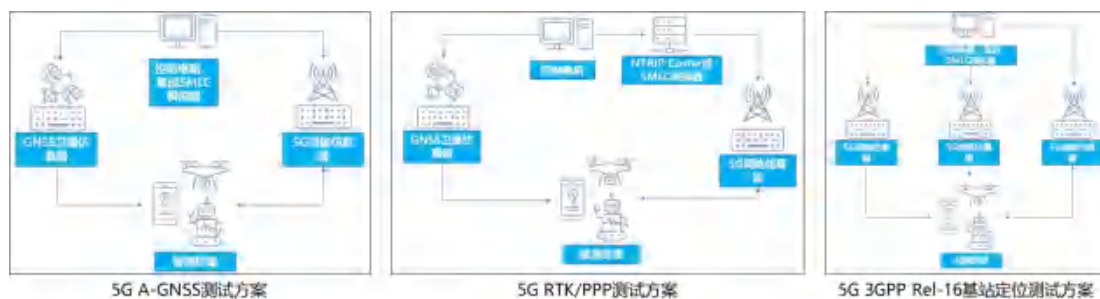


图 12 5G 高精度定位测试方案

（三）现场测试

1. 5G 基础服务质量测试

为确保工业现场 5G 信号覆盖质量，保障业务信道畅通可靠高效，需评估 5G 无线网络在厂区内覆盖质量，5G 终端处于工厂不同位置点时终端接入 5G 网络的性能指标和终端到服务平台之间的网络性能指标等基础服务质量。

1) 测试内容

5G 网络覆盖质量：主要评估 5G 无线网络在厂区内覆盖质量。

5G 终端接入性能：主要测试不同形态、不同芯片的 5G 终端随机接入过程和 5GC 注册过程中各步骤的指标。

5G 网络端到端性能：主要测试 5G 终端处于工厂不同位置点位时终端到服务平台之间的网络性能指标，包括上下行链路的时延、抖动、丢包率，链路的长期稳定性，以及通过绘制终端连续移动过程中的链路时延和抖动的变化曲线来检测工厂环境中的无线信号薄弱点。

2) 测试方案

5G 网络覆盖质量测试，主要通过 5G 终端或扫频仪来测试厂区内覆盖质量 KPI 值，测试后分析处理，得到相应统计数据，包括平均值、最大值、最小值、中位数、标准差、20%分位值、80%分位值，并绘制地图、柱状图、时间趋势图等。



图 13 5G 网络覆盖质量测试方案

5G 终端接入性能测试，主要使用路测工具，测试工厂中不同形态、不同芯片的 5G 终端随机接入过程和 5GC 注册过程的 KPI，测试后分析处理，输出相应统计数据，包括平均值、最大值、最小值、中位数、标准差、20%分位值、80%分位值，并绘制地图、柱状图、时间趋势图等。



图 14 5G 终端接入性能测试方案

5G 网络端到端性能测试，主要通过网络测试仪分别连接 5G 终端和服务平台，模拟发送测试流量进行上行链路和下行链路的性能指标测试，同时测试过程沿选定路线移动，观察长期的性能指标结果。由于该测试对现网流量可能产生影响，需在工厂停产或者停工状态下开展。

测试过程中同步生成连续测试结果集，根据测试结果集绘制时延和抖动时间变化的曲线，叠加移动路线，查找物理环境信号薄弱点。



图 15 5G 网络端到端性能测试方案

2. 行业应用业务质量测试

5G 与垂直行业的“无缝”融合应用必将为行业用户带来巨大变革，5G 网络需满足具体业务场景下针对性的指标要求，如：面向语音、协同会议、移动视频识别检测、远程现场诊断等交互类场景需提供高速、大带宽能力；面向钢铁、制造业现场海量数据的实时并发上传等采集类场景提供大带宽、广覆盖支撑；面向矿区、石化行业设备实时远程操控、设备协同作业、危险因素远程研判等控制类场景需提供低时延、高可靠保障。行业特殊性和工业自动化典型场景应用的差异化，迫使用户需开展定制化的业务质量测试。

1) 测试内容

按照工业自动化场景中业务应用特点，将 5G 行业应用大致分为采集类、交互类和控制类。依据不同典型场景对以上三类业务在带宽、传输时延、可靠性方面的需求，可开展定制化测试验证和综合评估。

2) 测试方案

交互类，如：视频质量和用户体验测。借助质量用户体验测试仪表对捕获到的语音、视频、会议和直播等进行软件处理、分析，并通过视频流畅度、全参考或无参考算法计算评估视频质量用户体验性能。



图 16 视频质量和用户体验测试方案

采集类、控制类，如：多类型设备数据采集准确性和指令控制验证。借助数据点模拟设备和 5G 终端设备、数采网关，打通终端、网络与平台的连接，验证数据采集并发在线数、数据采集准确率等综合性评估指标，通过网络测试仪测试控制指令传输时延和可靠性等关键指标。



图 17 多类型设备数据采集准确性和指令下发验证测试方案

四、5G 全连接工厂组网案例分析

案例一：通力电梯 5G 智能互联工厂

随着我国科技不断发展,电梯行业物联网技术也取得了极大进步,电梯制造

逐渐进入智能化时代。5G 网络通讯技术作为新一代网络信息技术，将与电梯制造与工业互联网深度融合，为电梯产业革命和通信技术创新提供动力。工业互联网是推动电梯安全监管及维保的变革重要手段，智能制造将成为电梯企业转型升级的重要方向。在此背景下，探索 5G 在电梯行业的融合创新应用，将促进我国电梯行业的持续稳定发展。

通力电梯于 1910 年成立于芬兰赫尔辛基，是全球最大的电梯自动扶梯自动人行道的生产供应商之一，全球最大的无机房电梯和无齿轮电梯生产供应商。电梯行业具有客户定制化电梯批量小、批次多、尺寸变化多的特点，原材料配送效率低导致交期延迟；设备异常导致折弯精度无法控制，影响电梯轿厢的装配效果和焊接总成，甚至影响电梯的使用功能；劳动强度大，工作现场安全隐患大。通力电梯同样面临电梯行业普遍存在的痛点问题，因此，借助工业互联网平台的优势，依托 5G 技术对厂区进行升级改造，建立了 5G 智能互联工厂，将 OT 与 IT 深度融合，率先实现了从大规模制造向智能制造的转型，打造了行业领先的生产模式。

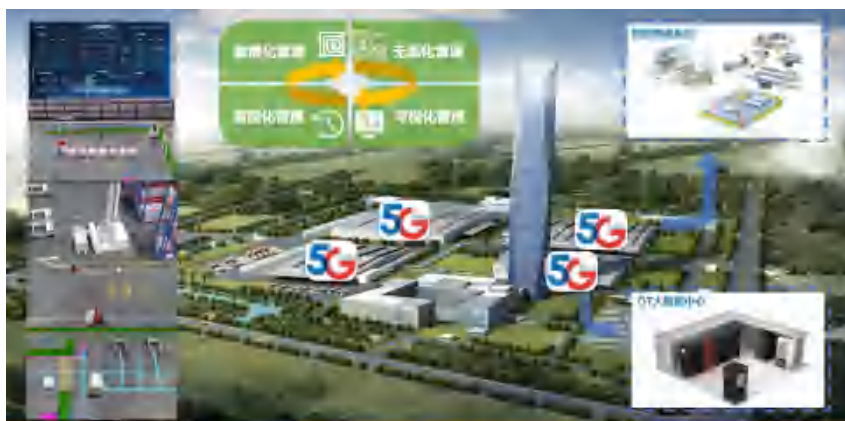


图 18 5G 智能互联工厂部署方案

目前，5G 智能互联工厂已完成马达、电气、轿厢 3 个车间，总共面积 42000 余平方米的 5G 网络全覆盖，厂区内工业设备及生产管理系统可通过 5G 网络实时交互，以 5G 通信技术为基础，已实现智能物流系统、基于 5G 设备数据采集传输的 E-TPM 系统等多种应用；

如下图所示，本案例已实现 CMX、CEP、CCA 三个电梯车间 5G SA 网络全覆盖，车间内生产设备通过 5G CPE 或者 5G DTU 的方式接入 5G 专网，设施类设备如电表、水表、燃气表以及液位监控，通过 LoRa 转 5G 的方式接入 5G 专网。然后依托 OT 大数据中心机房的 MEC 服务，实现数据的认证分流，同时为

部署在 MEC 上的系统提供边缘服务，如 E 系统、设备数据采集系统、TPM 系统等。最后由边缘服务提供应用侧的对接，如智能制造运营中心应用服务。

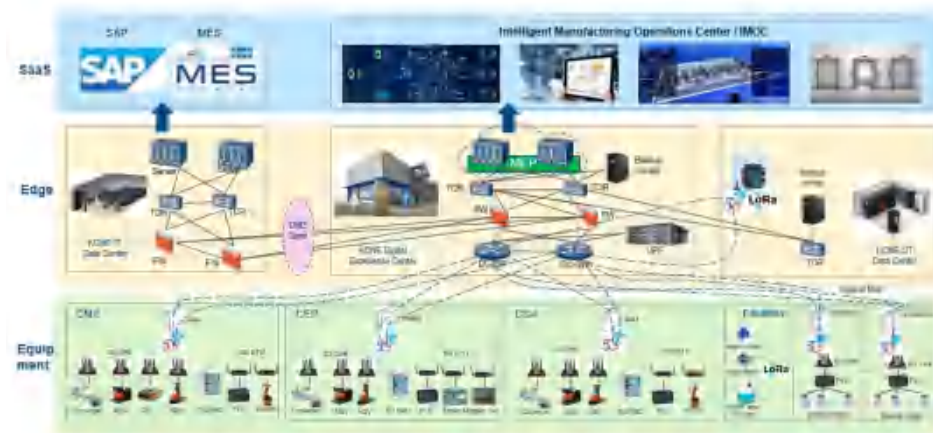


图 19 5G 智能互联工厂部署方案

应用方面，基于 5G+边缘计算技术打造全新的设备管理平台，围绕设备全生命周期管理，从设备资产管理、智能点检保养、故障自动推送、备品备件管理、设备绩效管理、文档管理六大功能维度，打造云边协同、边边协同、边端协同一体化的智能制造系统。



图 20 5G 智能互联工厂设备管理平台

通力电梯融合 5G、边缘计算、人工智能等创新数字技术，在设备互联互通、边缘控制、应用分析与服务三层面，实现了生产设备智能化管理、智能物流配送、智慧工业园区能效管理等多个场景的创新应用，在安全生产、产能拉升、降低库存等方面取得了非常可观的效果，打造了“5G全连接工厂”标杆应用。

案例二：鞍山钢铁 5G 智慧冶金

钢铁工业属于大型复杂流程工业，冶炼钢铁的原料要经过炼铁-炼钢-轧制-

热处理等一个漫长的冶金流程，最终成为钢材产品。钢铁生产现场存在着大量高密度泛在连接场景，同时也伴随高温、灰尘和易燃易爆等恶劣环境，无线网络需具备低时延、高可靠和抗干扰的特性。5G 作为工业互联网的关键使能技术，可有效满足钢铁行业低时延、高可靠和抗干扰的网络通信要求，为高炉炼铁、转炉炼钢等高温环境提供了设备数据通信新方式，助力钢铁企业打造 5G 全连接工厂，有效促进钢铁企业打通决策分析与现场控制系统，实现工控与数采一张网。

鞍山钢铁集团有限公司被誉为“新中国钢铁工业的摇篮”、“共和国钢铁工业的长子”，为新中国钢铁工业的发展壮大作出了卓越贡献。鞍山钢铁目前存在两化融合度低、3D 岗位机器人覆盖率低、安全生产风险高等问题，为促进数字鞍钢建设，加快企业转型突破，鞍山钢铁集团有限公司与中国移动辽宁公司合作，共同开展“鞍山钢铁 5G 智慧冶金”项目建设。

1) 5G 专网建设方案

通过 5G SA 模式建设 5G 专网，在厂区内进行 5G 专网深度覆盖，建设 5G 核心网 i5GC，将核心网用户面及控制面网元下沉到厂区，满足无人铁水运输、无人天车等生产控制类 5G 应用场景的通信需要。在综合考虑成本的情况下，对于 5G 高清视频安防类应用场景，采用 5G 公网专用的方式进行网络建设。



图 21 5G 网络整体组网方案及业务数据流示意图

2) 5G 无人铁水运输建设方案

- 1.新建自动驾驶车载系统，实现机车和鱼雷罐车的无人驾驶相关功能。
- 2.新建地面管控系统，实现铁水生产和机车运行智能化调度、系统虚拟仿真、数据分析以及界面展示等功能。
- 3.新建环境感知系统，用于感知机车行驶前方的行人、车辆等障碍物，为机

车无人驾驶相关控制策略提供依据。

4.微机联锁系统改造，将继电联锁电路改造为计算机联锁系统，提供与无人驾驶系统接口，并开发相应软件。

5.外部信息接口通过与高炉、炼钢、铁路信号综合智能系统、铁路道口系统等现有生产系统进行信息交互，实现计划信息、状态信息等接入和反馈。

3) 5G 无人天车建设方案

1.对天车本体进行改造，包括天车本体传动系统、控制系统。

2.新增防摆控制系统、夹钳传感器系统、行车定位系统、称重系统、遥控系统等相关系统。

3.行车调度及仓库系统建设，包括行车调度管理、作业计划管理、无人行车仓库管理、行车坐标管理、手持系统管理等。

4.地面控制系统建设，包括地面中控管理平台、安全管理等。

目前，本案例已实现 5G+无人智慧铁水运输、5G+无人天车、5G+带钢表面质量检测、5G+电机全生命周期管理、5G+一键炼钢、5G+智慧一键炼钢等多种场景的应用。



图 22 鞍山钢铁 5G 智慧冶金案例应用场景

本案例部署了 5G 专网采用双频覆盖、双发选收技术，保证了 5G 专网通信的稳定性。同时结合人工智能、无人驾驶、云化 PLC 等前沿技术融合创新应用，实现了铁水运输、带钢表面质检、钢卷吊装等环节的少人化、无人化，进一步提升了企业数字化、智能化水平，在保证人员安全的同时，降低了生产成本，对冶金企业建设 5G 全连接工厂具有重要参照价值。

案例三：中国一重 5G+智慧工厂

重型机械制造是钢铁、电力、能源、矿山及国防军工等的重要支撑，是我国

制造强国建设、高端制造转型的重要保障。中国一重是中央管理的涉及国家安全和国民经济命脉的重要骨干企业之一，始建于1954年，是国家创新型试点企业、国家高新技术企业，拥有国家级企业技术中心、重型技术装备国家工程研究中心、国家能源重大装备材料研发中心。

中国一重集团在自身发展过程中与时俱进，落实黑龙江“产业振兴规划”、“十四五”数字经济规划，依托东北老工业基地振兴战略，积极参与“5G+工业互联网”应用场景探索与实践。为适应新形势下公司管理需要，解决生产管理模式较粗放、信息反馈滞后、数据孤岛等问题，进一步提升公司的信息化管理水平，一重集团（黑龙江）重工有限公司与黑龙江移动齐齐哈尔分公司签署合作了“数字化样板车间”项目。

针对一重车间内网络及业务场景需求，中国移动为一重构建了“1+1+1+3”体系，即建设1批5G数采终端、1个精品网络、1个工业互联网平台、3个车间应用。在轧电车间内，通过5G网关实现了机床数控数据、能耗数据、用油数据等数据的采集及上传，部署5G专网解决了现场WIFI传输不稳定等问题，保障了车间现场无线网络质量及安全等，同时部署了中国移动OnePower工业互联网平台，打通了平台与一重既有系统信息屏障，实现了三个应用场景的数据整合。



图 23 中国一重 5G 专网组网架构

在生产方面，基于 OnePower-IOT 子系统实现了 34 台机床联网分析及生产管理，通过采集数据及生产数据相结合，实现了工艺设计、程序编制、程序管理、生产报工、维修管理等全过程的数字化，并通过大数据分析技术，基于订单管理模型实现了人工、动力电（能耗）、低值易耗品、机物料、辅助材料等成本的分摊，为后续订单效益分析提供了支撑。场景实施后，显著提升了生产数据信息量，加工程序管理效率提升 50%，设备利用率提升 20%，总体生产效率提升 10%。

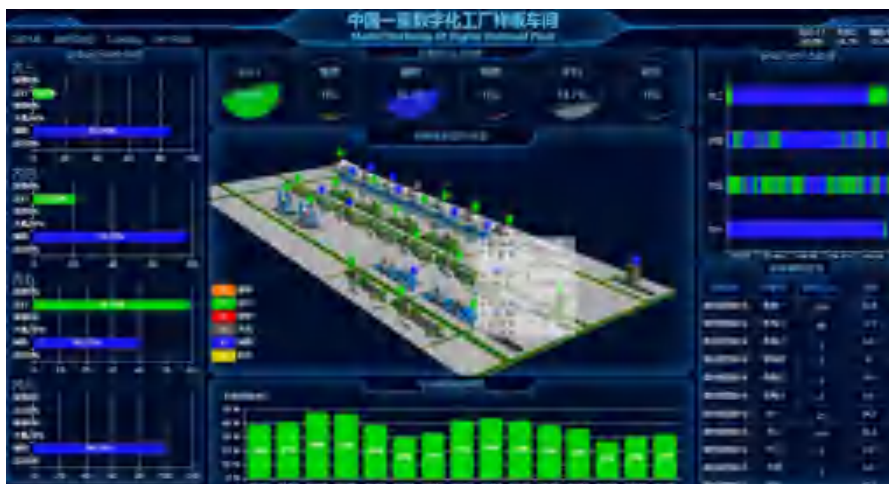


图 24 中国一重 5G+智慧工厂项目工业互联网平台

在物料流转方面，部署了 2 台 5G inside AGV，实现了物料流转自动化，在节约人力成本的同时，提升了整体物料流转率。在安防管理方面，通过 5G 连接 20 个摄像头，结合后台 AI 算法，实现工业现场视频分析与厂区监控，杜绝了现场安全隐患，降低相关安全管理成本。

本案例借助 5G 低时延、大带宽、高可靠的特点，融合边缘计算、人工智能、大数据等前沿技术，实现了机床设备实时控制、海量数据采集、智能决策等，提升了工厂协同生产效率，降低了企业运维成本，为我国重工装备行业数字化与智能化提供可行方案，已受到地市相关部门、媒体及产业链高度关注。同时，基于案例中大规模数据采集的实践意义，中国移动完善了生产现场监测应用场景方案，已在全国内广泛复制。

案例四：抚顺新钢“5G 创世-灯塔钢企”

钢铁行业是我国重要的中游行业，上游承载有色金属、电力和煤炭行业，下游衔接机械、房地产、家电及轻工、汽车、船舶等行业。特钢更是衡量一个国家能否成为钢铁强国的重要标志。按照“抚顺新钢 5G 专网工程”实际需求，辽宁联通为抚顺新钢铁有限责任公司建设了 5G 钢铁全连接工厂，搭建了 5G 混合专网、MEC，将技术难度大、危险程度高的钢铁生产过程与 5G 技术深度融合，结合标识解析二级节点基础能力，开展钢铁行业标识应用业务建设，实现抚顺新钢铁水罐车和铁水天车等智能化、无人化、远程化操控。

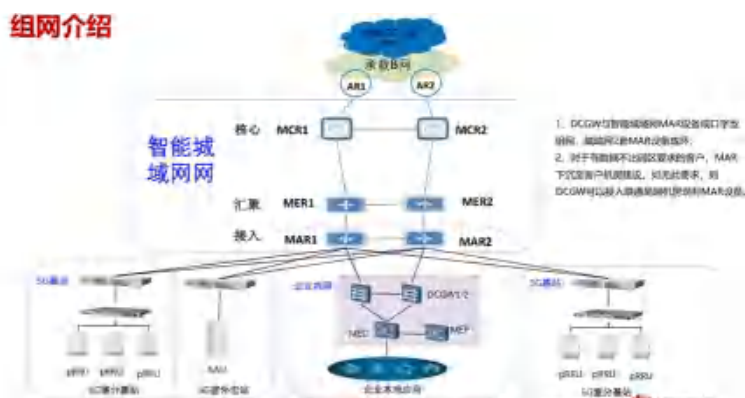


图 25 抚顺新钢“5G 创世-灯塔钢企”组网架构

新钢混合 5G 专网工程已经完成室外信号全部覆盖及核心机房建设，为 5G 应用做好整体底座建设。目前厂内已开通 11 个 5G 基站，新钢 5G 核心机房完成部署，安装布放了 100 台 5G 工业路由器，工业设备可直接通过 5G 工业路由器访问 5G 专网，且具备末端移动接入（移动性、柔性、临时性、灵活跨域）、边缘大流量处理(卸载)、边缘低时延交互、数据不出园等特性。

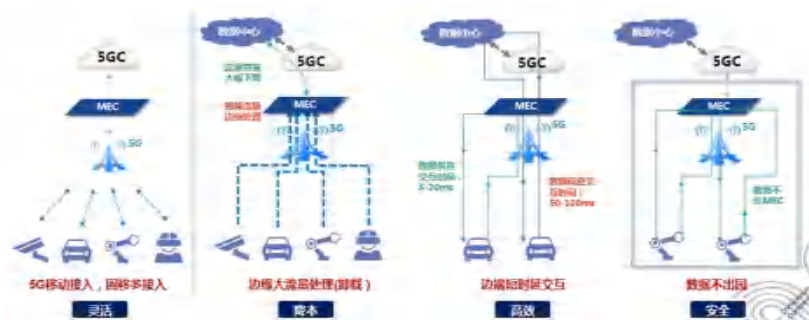


图 26 抚顺新钢“5G 创世-灯塔钢企”特性

本案例实现了铁水转运机车远程集中控制和智能化作业。在地面中控室内通过视频监控及远程控制系统，实现对机车的远程集中控制。机车司机在机车远程控制操作终端上用鼠标点击相应区域和作业类型完成机车作业。这种作业方式的优点是司机作业环境得到显著改善，作业安全得到显著提升。同时，在集中控制模式下，远程控制系统可以与 MES 等生产调度系统进行打通，作业效率有所改善，可以实现一人多机操作，企业实现降本增效。

远程控制系统与 MES 等系统实现无缝对接，业务调度，机车操控、运输过程监控无需人工介入，铁水运输实现无人化，司机仅需在中控室内监控机车运行即可，作业安全性和作业效率得到充分保证。

下图完整示意了抚顺新钢“5G 创世-灯塔钢企”项目“一网、一平台、N 应用”的整体技术方案。

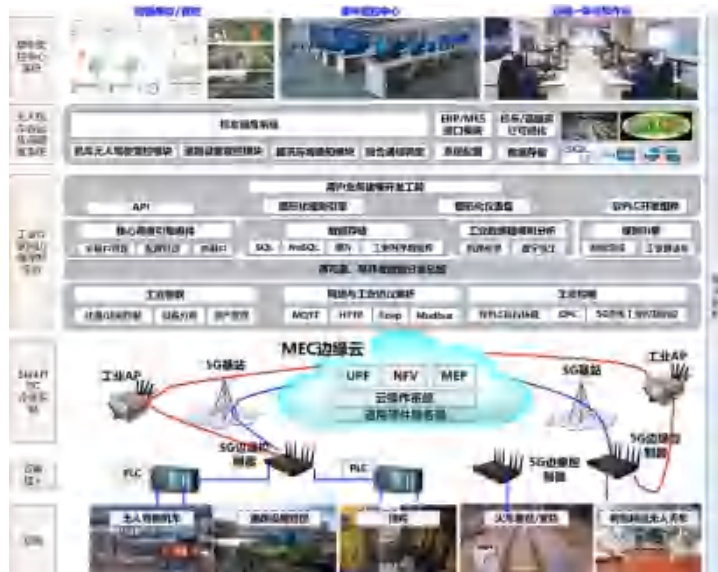


图 27 抚顺新钢“5G 创世-灯塔钢企”整体技术方案

本案例采取 5G 网络为主、其他工业无线技术为辅的双条路径保护，通过 5G、MEC、WIFI 等手段完成机车、工控系统、终端设备、调度系统等网络协同通信，确保了数据传输的连续性以及数据交互的实时性。通过对厂区的 5G 智能化改造，达到了降低人工成本、优化生产配比、提高协同生产衔接效率等效果，对于提升钢铁行业安全生产水平具有重要推动作用。

案例五：新疆天池 5G+智能矿山

煤炭是我国主体能源和重要战略性能源矿产资源，是保障我国能源安全的压舱石和稳定器。在工业化道路的发展中，采矿业作为工业技术的第一生命补给，需求量巨大，矿山的开发效率和开发质量，成为影响我国工业发展的第一要素。露天煤矿作为典型的大型流程型企业，生产作业区域的实时动态性、流程行业生产的实时连续特性、高危行业的敏捷响应特性、工艺流程协同可靠性对无线通信网络提出更高要求，传统的 4G 等无线传输技术无法满足露天煤矿特定场景的需求。5G 作为工业互联网的关键使能技术，具有高速率大带宽、低时延高可靠、大连接广覆盖的技术特性，可有效满足采矿行业的要求。以 5G 技术为依托，建设面向采矿业的 5G 全连接工厂，将有效促进企业内网无线化、扁平化、IP 化发展，实现矿山核心生产单元广泛连接、IT-OT 深度融合、生产数据要素的充分利用、进而实现为智能矿山高效赋能。

新疆天池能源有限责任公司是特变电工打造“风光火氢储硅基新能源循环经济产业链”和“风光火氢储铝基新材料循环经济产业链”组建的大型能源企业。

露天矿生产现场无线组网难度大，应用系统通讯协议不统一、数据不共享、业务不协同，导致多源异构数据无法共享、资源配置效率低、生产/采购成本增加，安全管理效率难以有效提升。为实现露天煤矿安全高效开采，天池能源公司开展“5G+工业互联网”建设，以 5G NSA 模式进行组网，采用现网升级改造后的 4G 核心网 EPC，省去 5G 核心网络的建设，降低了成本，满足园区快速建网的需求。园区改造引入边缘计算方案，提升实时业务响应速度，满足各工业环节不同类型业务对计算处理响应能力的需求。



图 28 新疆天池 5G+智能矿山总体架构

为满足露天矿生产作业区域高质量网络需求，建立 5G+MEC 无线专网，保障数据不出园区，实现业务安全隔离，端到端交互时延减少，并提供了 QoS 保障能力。对于大带宽、时延敏感的计算工作，依托边缘 MEC 执行，提升总体效率。

目前，天池能源公司基于 5G 技术，开展了包括 5G+矿山无人驾驶、5G+无人机航测、5G+视频 AI 风险智能感知、5G+AR/VR+数字孪生和 5G+机器人智能巡检等多种场景的应用，有效提升了矿区智能化水平。

5G+矿山无人驾驶系统系统，运用“工业互联网”、“5G”、“工业大数据”等技术，实现露天煤矿无人驾驶关键技术研究 and 铲运装协同无人化自主作业，为智能矿山赋能。5G+无人机航测系统，采用“5G 网络+工业无人机+云平台”技术，实现矿山三维模型建立及测量验收，显著提高数据采集精度、降低安全风险、数据处理效率。5G+视频 AI 风险智能感知系统，通过 5G 技术与视频监控、AI 分析技术的融合创新，实现露天煤矿传统监控向智能监控转型升级，从“看得到”

向“看得懂”突破，提升安全管理水平。5G+AR/VR+数字孪生系统，应用 5G 技术为数字孪生赋能，采用 AR/VR 技术实现 3D 立体沉浸式投影、运行数据展现与交互，运用数字孪生技术将技术人员的操作与生产现场实现真实与虚拟融合同步。



图 29 新疆天池 5G+智能矿山应用场景

本案例将 5G 通信技术低时延、大带宽、高可靠特点与无人机、AR/VR、AI 分析、数字孪生、无人驾驶等前沿技术融合创新应用，形成全面感知、实时互联、分析决策、自主学习、动态预测、协同控制的智能系统，实现煤矿设计、生产、运输、维修、安全保障、经营管理等生产全生命周期的智能化运行，在保障人员安全的同时，降低了企业人力成本，为露天矿山 5G 全连接工厂部署与应用提供有力的支撑，对于提升煤矿安全生产水平、保障煤炭稳定供应具有重要意义。

案例六：南方电网 5G+智能电网

电力行业作为国家最重要的基础能源产业，关系到国计民生。近年来，国家对于电力行业发展高度重视，密集出台相关政策，推动电力行业向清洁能源转型，智能化升级。5G 技术在电力行业应用广泛，可提供更强大的承载能力，能够为电网分区业务提供差异化的安全隔离服务。

电力业务场景多，差异化大，对安全隔离要求高，网络需求多样化，传统光纤通信建设成本高，尤其是在配电网中点多面广、建设难度大，4G 网络又无法满足安全隔离和通信时延的要求。5G 网络切片技术具备低时延、广连接、大带宽、安全隔离的特性，为电力业务提供定制化、多样化服务。

本案例以“融合 5G 的智能电网端到端融合网络架构”作为顶层设计，从“融合组网、管理协同、统一安全、标准化体系”四方面对各系统层指导建设。系统架构包含业务接入、通信适配、网络通信、支撑系统、安全接入体系五个部分。其中，通信适配层可适配 5G 电力终端及面向泛在业务接入的 5G 通信终端模组；

网络层实现了 5G 网络与电力通信网的融合通信，满足电力业务的高可靠需求；支撑系统将 5G 及电力无线通信进行统筹管理，引入切片敏捷管控技术，实现电网企业对 5G 网络切片的高效管理；在安全接入体系方面，根据系统网络层级，建立终端、网络的信息安全体系，充分保障了系统的安全性。

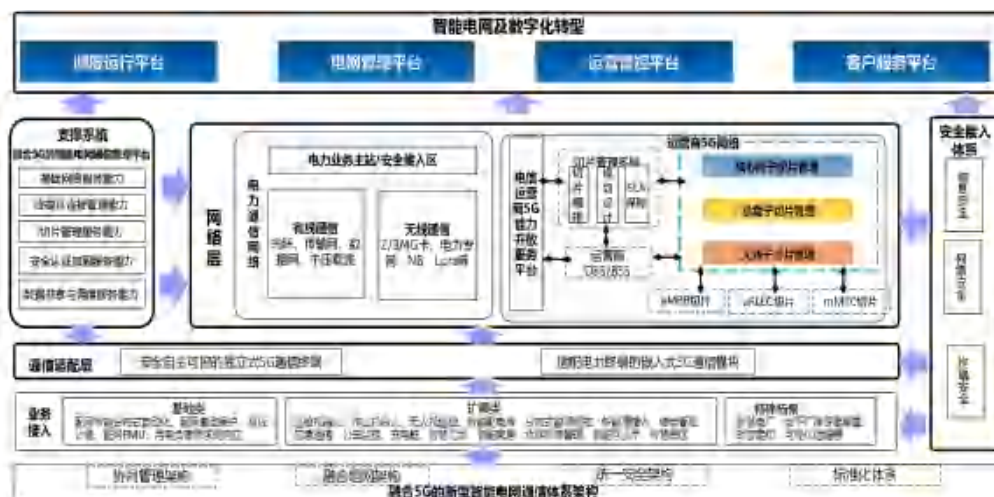


图 30 南方电网 5G+智能电网通信体系架构

1) 无线网建设方案

结合南沙电网重点需求场景，围绕 PMU、智能配电房场景规模验证，结合移动现有站址资源，共新增 111 个 5G 站点，广州南沙供电局 5GPMU 共计 15 个点匹配现网工参，满足终端点位全覆盖。

2) 传输网网络方案

SPN 接入层采用 50G 组网，汇聚/核心层使用 200G 组网。SPN 接入设备配置 50G 单板与 10G 单板，初期使用 10GE 上联 PTN 网络快速开通 5G 基站。南沙片区 SPN 核心（NPE）、重要汇聚（SPE）和汇聚设备建设完成后，接入层使用 50G 割接至 SPN 汇聚设备，10G 端口预留接入 5G 基站，发挥 SPN 网络价值最大化，实现移动、集客、家宽等业务的统一承载。

3) 核心网网络方案

在广州局机房部署两套 UPF，采用专线 UPF 部署方案用于承载通用型切片业务的分流功能。专线 UPF 采用专有 U 面的模式建设，设备自身成为一个独立资源，含有独立的 OMC、MANO、VIM 管理，同控制面资源池分开。

4) 无线通信资源管理系统

设计 5G 电力通信支撑系统整体架构、功能蓝图，开发连接管理、终端管理、

5G 切片管理、切片计费、台账稽查等功能，对接中国移动能力开放平台，实现电力终端、业务、网络等状态信息的全程管控，支撑数字电网四大平台（调度运行平台、电网管理平台、运营管控平台、客户服务平台）业务展示。

本案例充分分析了电力场景现有承载情况，实现了 51 类智能电网业务场景测试验证，通过融合 5G 智能电网泛在业务切片式资源编排与管控技术，解决了面向 5G+智能电网应用场景中的切片资源编排管理难题。通过研发面向数字电网的 5G 电力通信支撑系统，开发连接管理、终端管理、5G 切片管理、切片计费、台账稽查等功能，实现对电力 5G 业务应用的可观、可管、可控，同时对接数字电网四大平台，支撑数字电网转型发展。

案例七：辽宁新发展 5G+工业 PON 融合组网

电熔镁砂是国家重要战略材料之一，广泛应用于航空航天、电器、陶瓷、冶金等行业中，在国民生产和国防建设中发挥着重要作用。我国已探明菱镁矿储量占全球储量的 28.7%，居世界首位，借助资源优势我国已成为全球最大的电熔镁砂生产国和供应国。电熔镁砂熔炼过程能耗极大，单炉年耗电量约为 1460 万千瓦时，我国目前拥有电熔镁炉上千台，电能成本占整个生产成本的 60%以上。在电熔镁砂生产企业集中的辽宁省大石桥市，电熔镁行业的电耗占当地工业电耗的 70%以上，给当地造成了严重的用电和环保压力。在国家“双碳”目标的指导下，如何实现节能降耗是电熔镁砂企业最为关注的问题。以 5G 和工业 PON 为代表的新型网络契合镁砂冶炼行业需求，可充分连接电熔镁砂冶炼设备、工业传感器和实时摄像头等现场设备，在高温、高粉尘的生产环境中，尤其在夜间生产状态下，可大大降低现场人员工作负重，减少镁炉熔穿带来的生产损耗，同时通过 5G+工业 PON 网络可实现实时调整冶炼设备的工作电流，来减少企业用电能耗。

中国电信联合东北大学流程工业国家重点实验室为辽宁新发展耐火材料集团公司电熔镁砂生产场景实施升级改造，主要建设内容包括镁炉等现场设备的升级，基于 5G+工业 PON 的系统通信模式的部署，控制系统、工况识别系统的更替，大型服务器集群的搭建等。

如下图所示，本案例采用 5G 公网和工业 PON 专网结合的方式进行部署，将网络与云融合部署应用。5G 组网方案主要通过终端设备增加 5G 模组或连接 CPE 设备，来接入 5G 宏站、5G 核心网，进一步实现 Internet 访问功能。工业 PON 专网方案是将 PON 系统设备（局端设备 OLT、无源光分配网络 ODN、终

端设备 ONU) 下沉到工厂部署, 采用 P2MP 模式, 在工业现场部署 ONU, 在工厂机房部署 OLT。客户终端 (机器设备、PLC、摄像头等) 靠近接入 ONU, 通过 ODN 无源光分配网络汇聚与局端设备 OLT 连接, 完成设备数据的传输及汇聚。



图 31 辽宁新发展 5G+工业 PON 融合组网架构

与此同时,在工厂机房部署了工业 PON 自服务平台,用于实时监测工业 PON 网络运行状态和故障告警等,并且配合工业控制需求进行工业 PON 网络的动态配置,将业务需求与网络能力配合起来。已部署应用的工业 PON 专网支持上下行对称 10Gbps,满足上行大带宽业务的传输需求。该平台可接入 2000 个工厂终端,满足了工厂未来 10 年新增终端的接入需求,无需改造即插即用,可提供时延<1ms、抖动<1ms 的数据传输能力,来支持稳定性业务传输需求。在工厂机房中,与 OLT 背靠背部署核心交换机、控制云服务器、边缘控制器和企业智能业务系统,通过工业 PON 网络传输的生产数据、控制数据在企业业务平台、控制系统中进行数据分析和智能应用,有效支撑电熔镁砂工厂数字化转型需求。

在电熔镁砂生产厂区中,采用 5G 网络连接监控摄像头、手持终端等设备,将工业现场数据远程传输到控制平台,满足远程实时监控的需求;采用工业 PON 承载生产网,连接 PLC、工业相机、生产机柜等设备,实现工业设备与边缘控制器、控制云服务器以及工业 PON 自服务平台的组网;采用确定性工业 PON 技术承载电熔镁炉闭环控制业务,根据控制平台实时分析监控数据的结果做出决策,实时调整电熔镁炉闭环控制系统。

本案例利用 5G+工业 PON 融合组网架构大带宽、低时延、高可靠能力,解决电熔镁砂冶炼行业痛点问题,显著降低了用电能耗,提升了智能制造水平,对于该行业具有典型示范意义。首先,该案例实现了生产过程减人化:通过实时监控现场镁炉熔炼,采集镁炉熔炼三相交流电数据进行综合分析,判断现场生产情

况，通过控制器下达指令以实时调整镁炉熔炼，在人员投入方面相较于传统人工操作方式降低 75%。二是节能减排，降低用电能耗：通过 AI 智能化监控系统将能耗数据实时采集并分析，合理优化设备用电策略，与改造前系统对比可节约 5%左右能耗。三是提升生产设备使用率：相比传统纯人工监控的方式，AI 智能监控及闭环回路控制的方式，有效降低了镁炉烧穿而导致的设备报废率和损坏率，根据当前应用情况估算，平均每年可减少大于 3 次的电熔镁炉更换和大修工作。

案例八：国家管网 5G+智慧燃气

危化品企业安全生产一直以来都是国家安全风险防控重中之重，液化天然气接收站作为天然气的核心交接点，承担着极重要的能源应急储备调峰作用。国家管网集团作为全国最大的液化天然气接收站管理公司，着力天然气行业推动数字化转型升级。在业务方面，管网 LNG 场站属于易燃易爆高风险区域，且现场特种作业较多。工作人员面临较多安全问题，如缺乏对于作业风险、隐患的预判与管理；生产过程数字化程度不高，工人多为线下作业，作业过程出现多环节不可视、不可控、不可管和过程无记录；作业监管和风险主要依赖人工巡查，缺乏有效的数字化、智能化监管手段，一旦发生事故会造成人员和财产的极大损失。在网络方面，接收站生产区需网络全覆盖，多路监管视频需高清稳定回传，有线传输的施工难度大，成本高，作业风险大，后期维护难；4G 专网带宽不足，其安全性较 5G 下沉 UPF 专网有较大差距。该项目充分运用 5G 高速率、低时延、广连接的特性，提升液化天然气接收站智能化管理水平，满足天然气行业安全高效的生产需求。

本案例采用 5G 2.6G+700M 双频段，完美避开防爆区域，满足厂区 5G 网络全覆盖需求，5G 终端可高速可靠接入、灵活部署。同时，具备高质量、多维度数据云端汇聚和在线智能监测等能力，助力人工智能科学决策。通过建设 5G+智能监管、5G+智能作业、5G+融合应用等多种场景，完成了风险快速感知、智能分析预警、运维辅助远程化等重要任务。



图 32 国家管网 5G+智慧燃气应用场景

5G+智能监管，让监管更规范，让基层更轻松。在槽车区部署智能挂轨巡检机器人，利用 5G 监管无人机、电力 5G 布控球、智能安全帽等手段，实现多路高清视频快速回传，采用人工智能算法和激光泄漏检测技术，实现作业活动高精度识别、气体泄漏实时检测、自定义报警和区域远程监控等，满足系统异常状态的实时提醒。与改造前对比，5G+智能监管投入运营后，风险感知率提升 90%、不规范作业减少 80%、监管强度降低 60%。

5G+智能作业，让数据多跑腿，让基层少跑路。通过作业许可管控数字化，全国首次将 5G 双域专网部署在液化天然气高风险区域。终端设备实现内网、公网数据有效安全分流，轻松实现一部设备两个角色，双域之间按需切换；物联终端采用专用切片，实现数据不出园区、安全隔离访问。作业全过程可视、可控，大幅减少人员在危险区域的逗留时间；许可填写智能推荐，待办事项自动提醒，审批流程一目了然，彻底解决跨部门协作响应难的问题。应用后，票证合规率提升至 100%，审批效率提升 75%，2 小时可缩短到 30 分钟。

5G+融合应用，让监管更聪明，让作业更高效。本案例融合 5G 智能作业和 5G 智能监管应用，通过 5G 高速数据通道汇聚数据，搭建作业大脑—安全作业管理平台，实现作业全流程智能管控。通过现场作业一张屏、安全作业一平台、安全管理一张屏，全过程实现“岗位标准化、流程规范化、管理数字化”。应用后，作业效率提升 60%，事件发生概率降低 50%，员工作业安全、高效又轻松。

本案例大幅提升了风险作业管控效率，降低了人员劳动强度，提升了现场安全管理水平。据测算，可节约人力成本 20%，单站年经济效益可达 400 万元。单站数字化、智能化建设拉动配套行业创新融合应用约 1000 万元。2022 年 3 月，获得时任应急管理部刘玮副部长的高度肯定，已被国家应急管理部遴选为全国三家之一的优秀案例，深圳 LNG 园区也被深圳市授予“5G+工业互联网”试点园区。

五、5G全连接工厂应用与部署建议

“十四五”时期，“5G+工业互联网”将从探索起步阶段进入产业深耕、赋能发展的新阶段。面向重点行业建设5G全连接工厂，支持企业开展5G、人工智能、数字孪生、云计算等新一代信息技术的融合应用与落地，进一步推动传统产业提质、降本、增效、绿色、安全发展。在未来，要进一步加强关键技术攻关，夯实产业基础，拓展融合应用场景，构建网络安全保障体系。

从行业角度来看，要聚焦“5G+工业互联网”应用与实践较为突出的重点行业领域，率先推进以电子设备制造、装备制造、钢铁、采矿、电力、石化化工、建材、港口、纺织、家电为代表的重点行业的5G全连接工厂建设，培育行业典型应用场景，打造一批分类分级、特色鲜明的5G全连接工厂，形成数字化、网络化、智能化转型升级标杆。进一步汇聚工业企业、基础电信企业、5G终端和网络设备制造商、垂直行业解决方案提供商等各方资源，协同推动5G全连接工厂在重点行业、重点领域落地实践，促进创新链、产业链、供应链融合发展。同时，鼓励更多行业企业积极探索5G在工业生产各环节创新应用，按照业务开展实际需求，综合考虑技术成本，基于企业自身网络应用基础，选择在产线、车间、工厂等任一层级实施5G全连接工厂建设，助推5G技术产业发展壮大，加快“5G+工业互联网”新技术新场景新模式向工业生产各领域各环节深度拓展，实现提质、降本、增效、绿色、安全发展。

从发展阶段来看，5G全连接工厂建设需遵循“两步走”原则，从初级阶段逐步走向高级阶段。初级阶段目标主要形成以有线为主、5G为辅的融合工业网络体系，实现5G承载部分环节的有限的核心业务，初步构建信息感知、数据传输、智能决策、反馈控制的纵向信息传输体系，逐步完成企业各环节数字化、网络化及智能化改造，加快5G技术在工业生产核心环节的应用突破，推动企业内工业网络互联互通、5G工业控制应用创新、数据价值充分释放、IT/OT应用融合，拓展5G行业市场，降低5G技术使用成本。高级阶段的目标主要形成以5G为主、有线为辅的融合工业网络体系，实现工业企业人、机、料、法、环、测的全面连接，达到5G承载各环节核心业务，构建研发协同、生产控制、企业管理、售后服务等信息纵向及横向流动体系，推动工业网络的标准化、生产制造的柔性化检测监测的智能化、市场营销的精准化、产品服务的高效化，普及智能

化制造、网络化协同、个性化定制、服务化延伸、数字化管理等新模态新业态。

从产业支撑来看，加快5G全连接工厂相关技术标准制定，鼓励大企业探索行业标准方案、中小企业提升标准应用水平，同时针对特定行业典型场景对5G的需求，定制化5G技术标准，通过应用最新的5G关键组网技术，提高面向垂直行业的连续广域覆盖能力、低时延高可靠能力、低功耗大连接能力。加快推进5G工业芯片、模组、网关等产品设备研发与应用，降低产业推广成本，推进工业数据模型化组织，进行标准化描述和信息建模。加强5G+工业互联网、数字化转型等领域人才培养，建立多层次、体系化、高水平的人才队伍，加快复合型人才储备。

附录：测试指标

一、5G 终端测试项及指标：

测试项	关键指标项
射频特性	1) UE maximum output power 2) UE maximum output power reduction 3) Configured transmitted power 4) Minimum output power 5) General ON/OFF time mask 6) Absolute power tolerance 7) Frequency error 8) Error Vector Magnitude 9) Carrier leakage 10) In-band emissions 11) EVM equalizer spectrum flatness 12) Occupied bandwidth 13) Spectrum Emission Mask 14) Adjacent channel leakage ratio 16) Reference sensitivity power level 17) Maximum input level
RRM	1) 小区重选 2) 小区切换 3) 竞争随机接入 4) 非竞争随机接入 5) UE 发送定时精度 6) 定时提前调整精度 7) 无线链路监测失步测试 8) 无线链路监测同步测试 9) DL 激活 BWP 切换 10) 事件触发报告 11) SS-RSRP 绝对测量精度 12) SS-RSRP 相对测量精度 13) SS-RSRQ 测量精度
业务性能	1) 上行峰值吞吐量、误码率 2) 下行峰值吞吐量、误码率 3) 上行业务时延； 4) 下行业务时延； 5) 高中低速率下的上行丢包率 6) 高中低速率下的下行丢包率 7) 高低速率下的业务长保测试
功耗	1) 终端待机功耗； 2) 连接态 CDRX 功耗； 3) 上行峰速业务功耗； 4) 下行峰速业务功耗；

工业典型信道场景	<ol style="list-style-type: none"> 1) 上行吞吐量、误码率、丢包率、时延; 2) 下行吞吐量、误码率、丢包率、时延; 3) 终端待机功耗; 4) 连接态 CDRX 功耗; 5) 上行业务功耗; 6) 下行业务功耗;
----------	---

二、5G+TSN 测试项及指标:

测试项	关键指标项
5G TSN 时钟同步测试	<ol style="list-style-type: none"> 1) 5G 时间域同步 2) TSN 时间域同步
5G TSN IEEE802.1Qbv 时间感知整形测试	<ol style="list-style-type: none"> 1) TSN Talker 节点 Qbv 流量发送能力 2) TSN Bridge 节点 Qbv 门控精度 3) 5G TSN Virtual Bridge 节点 Qbv 门控精度
5G TSN IEEE802.1CB 冗余保护测试	<ol style="list-style-type: none"> 1) 5G TSN 网络帧复制 2) 5G TSN 网络帧消除

三、5G 高精度定位测试项及指标:

测试项	关键指标项
5G A-GNSS	<ol style="list-style-type: none"> 1) 5G 终端的 A-GNSS 定位性能 2) 定位协议 LPP 支持符合度 3) 定位协议 SUPL 2.0 支持符合度 4) OTA 环境整机灵敏度
5G RTK/PPP	<ol style="list-style-type: none"> 1) NTRIP 工作模式下 RTK/PPP 定位性能 2) SUPL/PosSIB 工作模式下 RTK/PPP 定位功能与性能
5G 3GPP Rel-16 基站定位	<ol style="list-style-type: none"> 1) NR RSTD 测量性能 2) 终端接收发送时间差测量性能 3) NR PRS 信号 RSRP 测量性能

四、5G 网络厂区覆盖质量 KPI:

测试项	关键指标项
5G 网络覆盖质量	SS RSRP (本小区有用信号的强度)
	SS RSRQ (本小区接收信号的质量)
	SS SNR (信号和噪声之间的相对大小)
	DL pathloss (基站与终端之间的信号衰减)
	PDSCH BLER (下行业务信道的质量)
	PUSCH BLER (上行业务信道的质量)

五、5G 终端接入性能 KPI:

测试项	关键指标项
5G 终端接入性能	RACH Contention Resolution Duration (MSG3 到 MSG4 的时延)
	RACH Initial Tx Power (MSG1 起始发射功率)
	RACH MSG1 Tx Power (MSG1 发射功率)
	RACH MSG3 Tx Power (MSG3 发射功率)
	RACH Latency (MSG1 到 MSG4 的时延)
	RACH Number of MSG1 Attempts (MSG1 发射次数)
	RACH RAR Duration (MSG1 到 MSG2 的时延)
	RACH Timing Advance (MSG2 中的时间提前量)
	RACH Success Rate (随机接入成功率)
	RRC Setup Success Rate (RRC 连接建立成功率)
	Registration 5GC time (5GC 注册请求到注册接受的时延)
	Registration5GCSuccessRate (5GC 注册成功率)