



中国移动
China Mobile

研究院
CMRI

面向数字孪生的
5G⁺现场网
体系架构白皮书

2021

前 言

数字孪生助推社会及行业发展，实现行业发展的新业态，现场网技术是数字孪生网络连接的重要技术实现，现场网技术作为工业、医疗、交通等场景现场网络与设备间的最后“一百米”，是未来设备低时延、高精度定位、高可靠通信系统的基础，也是未来各行业现场业务信息化升级的核心。本白皮书介绍了面向数字孪生的5G+现场网的体系架构，并根据市场、产业、技术需求等方面给出未来5G+现场网技术演进方向及应用前景，呼吁业内企业在5G+现场网领域通力合作，共同促进垂直行业的数智化转型。

本白皮书在编写过程中得到了各行业专家、企业及研究机构的大力支持，在此向各位专家们提出的真知灼见和宝贵意见表示感谢。

本白皮书版权受法律保护。任何单位和个人转载、摘编、引用或其它方式使用本白皮书文字或者观点的，应注明来源。

目 录

目 录	3
1. 数字孪生是未来行业发展的方向	4
1.1 数字孪生概念与发展历程	4
1.2 数字孪生三层架构与关键技术	4
1.3 数字孪生发展趋势	6
2. 行业现场网的概念与关键技术	7
2.1 5G+现场网体系架构与关键技术	7
2.2 5G+现场网典型应用场景	8
3. 面向数字孪生的 5G+现场网体系架构	9
3.1 面向数字孪生的 5G+现场网三层架构	9
3.2 5G+现场网的六个发展趋势和六个技术维度	10
3.2.1 “感”-感知	11
3.2.2 “通”-通信	12
3.2.3 “算”-计算	12
3.2.4 “数”-数据	12
3.2.5 “智”-智能	13
3.2.6 “用”-应用	13
3.3 5G+现场网的五个连接技术	13
3.3.1 5G+新型无源通信	14
3.3.2 5G+新型短距通信	15
3.3.3 5G+确定性网络	17
3.3.4 5G+高精度室内定位	20
3.3.5 5G 与中低速网络	21
4. 面向数字孪生的 5G+现场网行业典型应用	23
4.1 工程机械制造	23
4.2 智慧矿山	23
4.3 智慧钢铁	24
4.4 智慧楼宇	25
4.5 智慧医疗	26
5. 缩略语	27
参考文献	28
联合编写单位及作者	28

1. 数字孪生是未来行业发展的方向

1.1 数字孪生概念与发展历程

数字孪生是一种数字化理念和技术手段，它以数据与模型的集成融合为基础与核心，通过在数字空间实时构建物理对象的精准数字化映射，基于数据整合与分析预测来模拟、验证、预测、控制物理实体全生命周期过程，最终形成智能决策的优化闭环。

数字孪生的概念始于航天领域，经历了“技术探索、概念提出、应用萌芽、行业渗透”四个发展阶段。数字孪生技术最早在 1969 年被应用于阿波罗计划中，用于构建航天飞行器的孪生体，反映航天器在轨工作状态，辅助紧急事件的处置。2003 年，美国密歇根大学的 Grieves 教授提出了数字孪生概念。经历了几年的概念演进发展后，自 2010 年开始，数字孪生技术在各行业呈现应用价值，大型工业自动化企业开始推广数字孪生技术。近年来，数字孪生技术在工业、城市管理领域持续渗透，并向交通、健康医疗等垂直行业拓展，实现机理描述、异常诊断、风险预测、决策辅助等应用价值，有望在未来成为经济社会产业数字化转型的通用技术。

1.2 数字孪生三层架构与关键技术

数字孪生技术通过对物理对象的数字化镜像，描述物理对象在现实世界中的变化，模拟物理对象在现实环境中行为和影响，以实现状态监测、故障诊断、趋势预测和综合优化等功能。根据 ISO 发布的数字孪生领域首个体系架构标准《ISO/DIS 23247: Digital Twin framework for manufacturing》。数字孪生系统包含三个层级：一是数据采集与控制层，主要涵盖感知、控制、标识等技术，承担孪生体与物理对象间上行感知数据的采集和下行控制指令的执行，其连接了实体层和核心层，有时也看作是实体层的一部分。二是核心层，依托通用支撑技术，实现模型构建与融合、数据集成、仿真分析、系统扩展等功能，是生成孪生

体并拓展应用的主要载体，也可以称为孪生层或能力层。三是用户实体，主要以可视化技术和虚拟现实技术为主，承担人机交互的职能，其属于应用层的范畴。除此之外，需要跨越上述三大层级的跨域实体作为内部支撑，承担各实体层级之间的数据互通和安全保障职能。

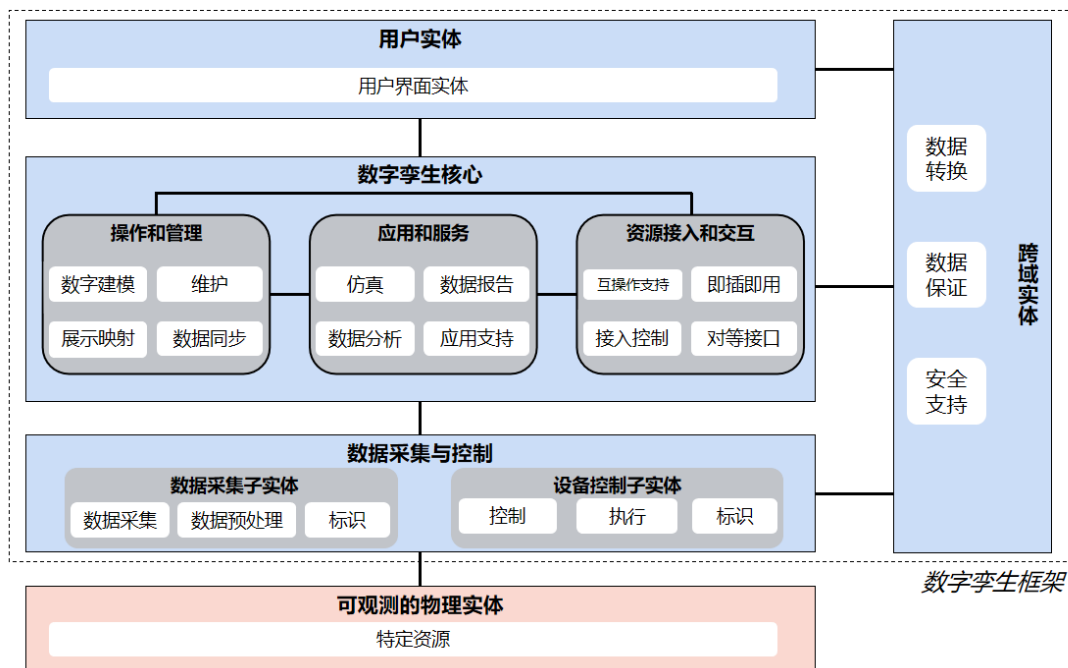


图 1-1 ISO 数字孪生体系架构

为了构建数字化镜像并实现上述目标，需要感知、建模、仿真等基础支撑技术通过平台化的架构进行融合，搭建从物理世界到孪生空间的信息交互闭环。

（一）感知技术

感知是数字孪生体系架构中的底层基础，是实现物理对象与其数字孪生系统间全要素、全业务、全流程精准映射与实时交互的重要一环。因此，数字孪生体系对感知技术提出更高要求，为了建立全域全时段的物联感知体系，并实现物理对象运行态势的多维度、多层次精准监测，感知技术不但需要更精确可靠的物理测量技术，还需考虑感知数据间的协同交互，明确物体在全域的空间位置及唯一标识，并确保设备可信可控。

（二）建模技术

模型构建技术实现了物理空间中的实体向虚拟空间孪生体的映射，并通过在

虚拟空间进行分析和决策，形成交互指令对物理空间进行干预和调控，使整个物理系统保持良好的运行状态。数字孪生模型包括几何模型、信息模型和机理模型。

（三）仿真技术

数字孪生体系中的仿真作为一种在线数字仿真技术，将包含了确定性规律和完整机理的模型转化成软件的方式来模拟物理世界。只要模型正确，并拥有了完整的输入信息和环境数据，就可以基本正确地反映物理世界的特性和参数，验证和确认对物理世界或问题理解的正确性和有效性。从仿真的视角，数字孪生技术中的仿真属于一种在线数字仿真技术，可以将数字孪生理解为：针对物理实体建立相对应的虚拟模型，并模拟物理实体在真实环境下的行为。

1.3 数字孪生发展趋势

数字孪生是物联网发展的新阶段，数字孪生的应用普及将推进以“万物互联”为目标的传统物联网正在向“万物智联”为目标的下一代物联网演进，复杂多样的业务需求和精准泛在的感知数据对以行业现场网在内的通信网络提出了更高要求。

数字孪生正处于发展的上升期，技术体系不断完善，产业融合持续提速，行业应用加速渗透。未来，随着新型 ICT 技术、先进制造技术等共同发展，数字孪生在数据采集、建模、互操作、可视化、平台等多个方面将持续深入提升，数字孪生技术体将一边探索和尝试、一边优化和完善。

2. 行业现场网的概念与关键技术

行业现场网是用于现场设备之间、现场设备与外部设备之间、以及设备与业务平台之间数据互通的通信与管理技术。行业现场网是物联网技术在企业内网的应用落地，为满足企业数智化转型的需求，其研究范围正在不断延伸。2013 年 ISO. 23247 数字孪生标准中首次提出了 Proximity Network（直译为邻近网络）的概念。中国移动在深入分析和广泛调研后，联合产业伙伴共同完善了行业现场网的概念和整体解决方案，强化了现场网设备连接技术与 5G+AICDE 的技术协同。

2.1 5G+现场网体系架构与关键技术

5G+行业现场网是以网关为中心，南向通过无源物联、短距、确定性传输等现场网技术实现现场设备连接与通信，北向通过 5G 网络将行业现场生产及管理数据传输到平台，可服务于行业生产现场，满足各类业务差异化需求。

行业现场网关键技术包括面向资产盘点、出入库管理等场景的新型无源物联技术，面向超低时延、超高可靠设备互通信的新型短距技术，面向数据高可靠确定性通信的确定性传输技术，面向环境监控等场景的中低速技术，及面向设备及人员定位的室内定位技术等。行业现场网与 5G 协同，一方面能够满足不同行业现场通信需求，进一步提升网络的管理和运维能力；另一方面可结合边缘计算、算力感知等能力，提升网络的智能化能力。

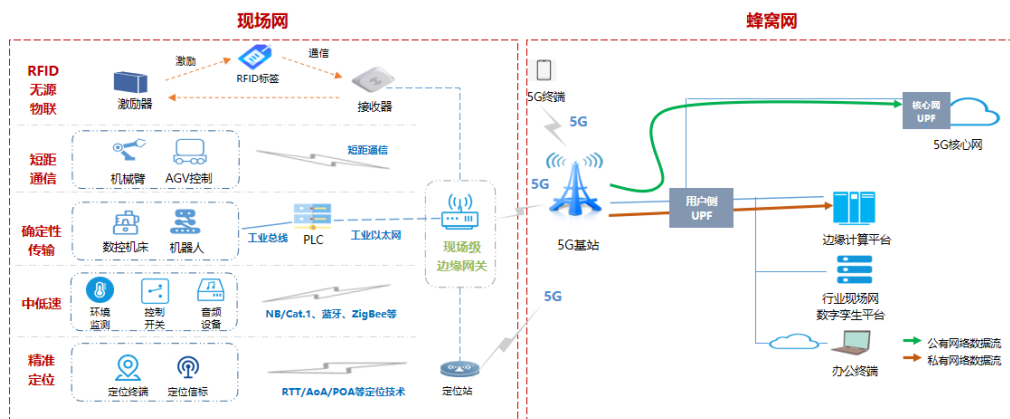


图 2-1 5G+行业现场网体系架构

2.2 5G+现场网典型应用场景

资产盘点：得益于低成本、零功耗的特性，传统收发一体的无源物联系统广泛应用于新零售领域。随着行业数字化转型和业务拓展，库房面积增大、资产数量增多使得行业资产管理对自动化盘点需求越来越强。新型无源物联基于分离式架构，有效解决了系统干扰问题，提升了激励和接收距离；与 5G 融合进一步提升了物联系统的自动化运维管理能力，可解决行业远距离、自动化资产盘点的核心痛点。

移动设备互通：机器人可有效提升行业生产效率，降低人工成本，许多物流企业、制造企业均在生产现场使用 AGV 运输货物。但随着柔性制造的新业务拓展，行业现场对设备移动的灵活度、协同度要求增加，对通信实验的要求也进一步提升。新型短距通信基于优化的帧结构，同时可提供 QoS 保障，可实现微秒级通信时延，从而使行业现场移动设备间的高效协同成为可能。

无线确定性传输：钢厂铁水罐中装载高温铁水，需周期性、确定性上报铁水罐的温度、压力等数据，并实现故障数据的快速传输，从而实现安全预警和问题快速处理，防止生产事故发生。基于 5G+确定性传输可通过精准时间同步、流量调度等实现生产管理数据的确定性传输、故障数据优先传输，保障生产安全。

基于中低速通信的数据采集：电力数据采集包括采集实时电能数据、工况数据、故障预警等，通过通信接口与网络交互，实现对用电设备过载、短路、漏电等异常情况的远程监测，同时根据业务需求实现远程预警和控制。该场景要求终端实时监测用户负载的电压、电流、功率等电能质量动态信息。

3. 面向数字孪生的 5G+现场网体系架构

面向数字孪生，我们提出 Cube 365 的 5G+现场网体系架构。其中“3”表示面向数字孪生的行业现场网三层架构，包括实体层、能力层、应用层；“6”蕴含两层含义，一是 6 化，包括扁平化、无线化、IP 化、智能化、可控化、精细化的六个发展趋势；二是 6 大现场网技术体系，“感、通、算、数、智、用”六个技术维度；“5”代表面向数字孪生行业现场网的五个连接技术，即 5G+新型无源通信、5G+新型短距通信、5G+确定性传输、5G+高精度定位、5G 与中低速通信。

在该体系架构中，“感”和“通”对应实体层，“算”、“数”、“智”对应能力层，“用”对应应用层，且整个面向数字孪生的现场网体系架构朝着扁平化、无线化、IP 化、智能化、可控化、精准化的发展方向。



图 3-1 面向数字孪生的现场网体系架构（Cube 365）

3.1 面向数字孪生的 5G+现场网三层架构

数字孪生系统通过实体层、能力层、应用层三层架构中的功能实体及核心技术提供面向行业刚需的“感、通、算、数、智、用”六个技术维度。

底层为实体层，可通过数据采集实体和数据传输实体提供“感知”和“通信”能力。数据采集实体包括传感器、摄像头、机械臂、无源物联标签等行业现场生产和管理物理终端，可采集温度、粉尘等环境数据，产线设备运行数据，物料信息及位置数据，设备缺陷等图像数据等反应物理世界运行情况的数据原料；数据采集实体和新型无源、新型短距、确定性传输、中低速传输、高精度定位等数据传输实体，是感知数据北向传输及控制指令南向传输的连接纽带。

中间为能力层，可通过边缘计算、协议适配、AI 等技术为下层的物理实体和上层的应用提供“计算”、“数据”和“智能”三大能力，从而实现数据集成、仿真分析、智能处理、孪生模型构建与融合等。

上层为应用层，可通过数字孪生等技术为行业应用提供更高效便捷的网络及业务全生命周期管理服务，是与用户的直接界面和接口。

3.2 5G+现场网的六个发展趋势和六个技术维度

随着产业数字化转型不断推进，行业客户的定制化生产需求逐渐显现，网络 and 平台正朝着扁平化、无线化、IP 化、智能化、可控化、精准化方向演进。

一是网络架构更加扁平化。现场网络结构复杂，有多种工业总线协议、工业通讯协议和工业无线协议，还有用于设备和人员监测和定位的 Zigbee、UWB 等技术，呈现碎片化。同时，为了采集和处理不同协议的数据，信息系统出现“烟囱式”。网络架构的扁平化有利于数据归一化管理，需要数据按照统一的协议进行采集和传输。

二是网络连接更加无线化。2020 年全球工业网络市场份额中，有线占比 94%，无线占比 6%。随着对设备“剪辫子”的需求逐渐增加，无线网络开始替代有线网络，无线取代有线在带来便利性的同时，也引入了不可靠因素，导致企业对生产环节引入无线通信较为谨慎。5G+现场网技术有望结合两者优势，促进网络连接向无线化发展。

三是网络传输更加 IP 化。传统工业网络多为点对点的层二通信，暂时无法实现数据溯源，灵活路由以及精细化业务网络管理，而工业生产对网络的可扩展性、

高质量、可运维性、可靠性、稳定性和安全性都提出了很高的诉求，网络 IP 化改造需求已越来越迫切。IPv6 有丰富的地址资源，可为每个网络设备分配 IP 地址。IPv6 还提供了对流量和业务的管理能力，便于实现网络 SLA 保障。

四是行业应用更加智能化。现阶段智能分析能力主要依赖云平台，部分工业场景如安全生产、工业质检等对大带宽、低时延和数据隐私要求较高，需要实现关键数据与业务的现场级智能分析和处理，提升业务响应速度，保障业务连续性。利用边缘智能技术，可以实现预测性维护、故障检测、人脸识别、工业质检等智能业务在工业网关上“就近”处理。

五是现场网络更加可控化。传统网管系统尚未延伸至现场网络，无法实时感知客户端侧网络参数，需要实现对现场网络、设备和业务的可视可管可控。通过将质量探针部署在端侧，提供现场级的设备状态、网络覆盖、业务质量等关键信息的监测、分析和告警，有效弥补网管数据的不足，使“端侧不再黑盒”，有助于快速进行故障的定位定界，保证现场客户的网络感知。

六是设备控制更加精准化。随着 5G 和确定性网络技术发展，网络时延和抖动大大缩短，使设备分布式部署，控制集中化管理成为可能。在远程设备操作、设备协同作业等场景中，通过 5G 网络采集传输现场数据，基于软件实现工业控制功能，实现设备远程精准控制。

针对扁平化、无线化、IP 化、智能化、可控化、精准化六大发展趋势，需要构建“感、通、算、数、智、用”较全面的 5G+现场网技术体系，提供标准的软硬件接口，将现场网、协议适配、边缘智能、质量探针等技术模块化，以满足行业的多样化需求。

3.2.1 “感”-感知

“感知”在数字孪生三层架构中的实体层，代表传感器，是行业现场信息的源头。传统生产线存在感知单元不联动、全自动化难以实现等问题。针对智能制造中传感智能化、无线化需求，通过智能传感器技术，实现物联网数据实时和动态的收集，将多源异构的行业现场数据汇聚到行业网关，为边缘侧的数据处理、

业务分析以及向上的确定性传输提供数据支撑。

3.2.2 “通”-通信

“通信”在数字孪生三层架构中的实体层。以工厂为例，其可能拥有数以万计的传感器和执行器，需要通信网络的海量连接能力作为支撑，且车间与中心云控制平台之间的实时通信、传感器与人工智能平台的可靠计算、人机界面的高效交互，都对通信网络的无线化提出了更高的要求。针对不同网络需求，通过 5G+现场网融合技术，为用户提供低时延、高可靠的无线传输能力以及数据本地化分流能力。

3.2.3 “算”-计算

“计算”在数字孪生三层架构中的能力层。工业 AI 服务大多基于深度神经网络算法，需要高算力、低功耗的计算单元，而传统存储和计算分离的冯诺伊曼架构的计算单元能效很低，不能满足深度神经网络计算需求。针对存储/计算性能瓶颈问题，利用存算一体芯片技术、算力协同与编排技术，实现计算加速和能效提升。依托边缘智能、负载均衡、分段路由等技术，将区域内的网关算力汇聚为现场级边缘计算资源池，实现统一的算力感知、算力编排和算力调度。

3.2.4 “数”-数据

“数据”在数字孪生三层架构中的能力层，目前存在两大问题。一是传统工业网络层级化严重，协议众多且互不兼容，难以实现数据互通。二是行业客户需要实时感知现场级的设备状态、网络覆盖、业务质量等关键信息，传统网管只能感知到核心层。针对数据灵活接入、现场设备与网络监测的行业需求，一方面，统一对接接口、接入规范、配置规则，云平台智能识别南向协议并下发插件，实现设备即插即用和快速部署；另一方面，通过质量探针技术，采集网关的网络质量数据、网关及下挂设备数据，以及下挂设备的业务数据，提供设备接入多协议适配能力，以及 5G 和现场网的网络监测和网络运维自治能力。

3.2.5 “智”-智能

“智能”在数字孪生三层架构中的能力层。传统云计算存在时延高、能耗大、不利于数据安全和隐私等问题。针对工业现场大数据、低时延、高隐私的需求，边缘智能将计算和智能能力扩展到工业现场，将与云侧智能协同满足行业数字化在实时业务、计算优化、应用智能、安全与隐私保护等方面的关键需求。一是提供边缘 AI 模型智能部署功能，根据原始模型、资源需求，快速实现模型部署和状态监测；二是通过云边协同、轻量级持续学习，实现模型个性化更新；三是利用模型拆分等技术，智能权衡通信时延和计算时延，最大限度降低 AI 服务时延；四是通过内置工业质检、安全监测等场景的预训练模型，提供现场级智能分析能力。

3.2.6 “用”-应用

“应用”在数字孪生三层架构中的应用层。在控制应用方面，传统 PLC 采用封闭软硬件架构，存在成本高、碎片化、难扩展等问题。云化 PLC 基于开放架构，通过软件实现工业控制逻辑，实现 SCADA 下沉，降低 PLC 硬件成本，构建灵活、可扩展的工业控制系统。数字化应用方面，物联网行业应用场景复杂，普遍存在网络异构化、定制化现象。现场网数字孪生支撑网络与业务全生命周期管理，提供网络的可视、可管、可控能力。通过数字孪生平台，提供孪生可视服务能力和智能运维能力，实现网络的低成本试错、高质量运维和智能辅助决策，改善用户体验。

3.3 5G+现场网的五个连接技术

行业现场网连接技术众多，本白皮书重点介绍 5G+新型无源通信、5G+新型短距通信、5G+确定性传输、5G+高精定位、5G 与中低速通信等在现场中广泛使用的五个连接技术。

3.3.1 5G+新型无源通信

无源物联通过物品内置标签，利用电磁感应及信号反射原理进行非接触的数据通信。其由读写器、标签、应用系统三部分组成：读写器向标签发射电磁波，并接收从标签反射回来的电磁波；标签与被测物品紧密结合，无源标签无需外部供电或内置电池，依靠读写器发射的电磁波启动并反射信号，实现数据传输；应用系统控制读写器收发，并处理标签上报的数据。

根据工作频率，无源物联分为低频系统(125-134KHz)、高频系统(13.56MHz)、超高频系统(900MHz左右)和微波系统(2.4GHz以上)，其中超高频无源物联系统基于电磁波反向散射技术，理论传输距离为1-10米，是国际上应用最为广泛的无源物联技术。超高频无源物联最早用于服装和商超零售，之后逐步扩展到资产管理、物流运输、医疗、交通等多个领域。除非特别说明，以下无源物联均指超高频无源物联技术。

传统无源物联读写器采用收发一体全双工架构，同时发射激励信号并接收反射信号，存在较强的系统自干扰和异系统互干扰，导致其读写距离短、识别准确率低、设备管理难。

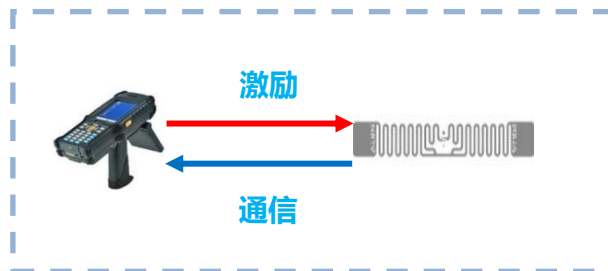


图 3-2 传统的无源物联框架

新型无源物联系统利用分离式架构，旨在解决传统一体式架构自干扰严重、组网部署困难等问题，可以实现无源系统的连续覆盖组网，以满足行业资产自动盘点、物料精细管理、物流智能跟踪等需求。

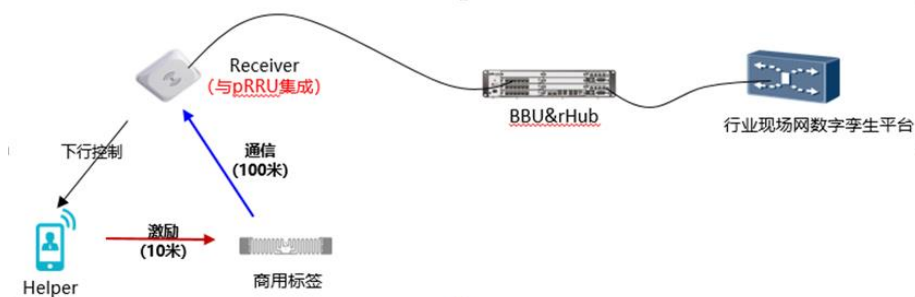


图 3-3 增强型无源物联框架图

新型无源通信通过收发分离提供更加高效的连接服务能力。收发分离后，新型无源物联系统将读写器分成激励器、接收器两个设备，通过物理上的分离解决干扰问题，既能增大通信的距离，提高物品的识别率，也能降低设备实现复杂度和研发成本。

新型无源物联系统与 5G 等蜂窝通信技术结合，将更利于实现组网部署，降低布网成本，并增强运维管理能力。通过无源物联激励器内置模组，无源物联接收器与基站结合，不仅可以实现面向大型仓库的室内连续覆盖，还可以实现与基站共管理共运维，增强无源物联系统的运维管理能力。同时，蜂窝网还可进一步支持无源物联技术，由基站激励标签并接收反射信号，借鉴蜂窝通信的多天线波束赋形、新型空口波形和编码等技术，有望进一步提升通信距离，使无源物联网技术应用到室外场景。

3.3.2 5G+新型短距通信

短距无线通信泛指在较小的区域内（通常小于 100 米）提供点对点的无线通信，是典型的行业现场网网络，主要用于设备间的小范围互连，具有部署简单、成本低等优势。



图 3-4 现有短距通信技术

Wi-Fi、蓝牙、Zigbee 是应用较为广泛的短距无线通信技术，其共同点是部署和维护成本低，但通信距离有限，稳定性、组网能力、安全性较差，功耗较大。随着智能泛在连接的快速发展，对大带宽、抗干扰、高可靠通信已经提出了更加极致的性能需求，然而现有的传统短距通信技术无法保障信道资源的高稳定性，难以实现微秒级低时延、抗突发干扰等特性。

星闪联盟在 2020 年 9 月份发起成立，致力于推动新一代短距通信技术创新和产业生态的全球化。星闪联盟主导制定的星闪短距通信技术基于全新的无线空口设计，可以更好地支持超低时延、高可靠、精同步、高并发、高效率和高安全等，满足智能制造、智能汽车、智能家居、智能终端等场景下确定性服务质量保障业务的需求。具体来说，星闪短距利用创新的帧结构设计，引入极简协议栈和跨层透传机制，基于业务特性使能半持续调度，实现单向用户面传输时延小于 20us。同时，引入 Polar 码和 RS 码，针对随机干扰和突发干扰进行优化，结合物理层快速反馈重传机制和灵活的干扰侦听避让机制，实现复杂电磁环境下的高可靠传输。同时受限于帧结构设计，星闪短距无法实现广覆盖部署，通信限定于近距离场景，需要借助 5G 等蜂窝通信技术实现更广泛的部署。

中国移动正在推动新短距技术和 5G 网络的协议融合方案。在星闪短距技术和 5G 网络融合部署方案中，G 节点（管理节点）作为一个路由/桥接节点将 T 节点（通信节点）与 5G 网络链接起来，5G 核心网透过协议适配层可感知所有 T 节点的设备状态，包括网络状态、业务信息、流量使用等。数据格式方面，系统通

过层二中继的方式，在数据链路层以上做适配层，定义数据面和控制面协议的数据格式、数据集，可部署在边缘 UPF、归属用户服务器 (Home Subscriber Server, HSS) 等位置，实现现场级的数据上云，并实现 5G 网络对星闪短距短距通信域中 G 节点和 T 节点的可达，可管理、可配置。

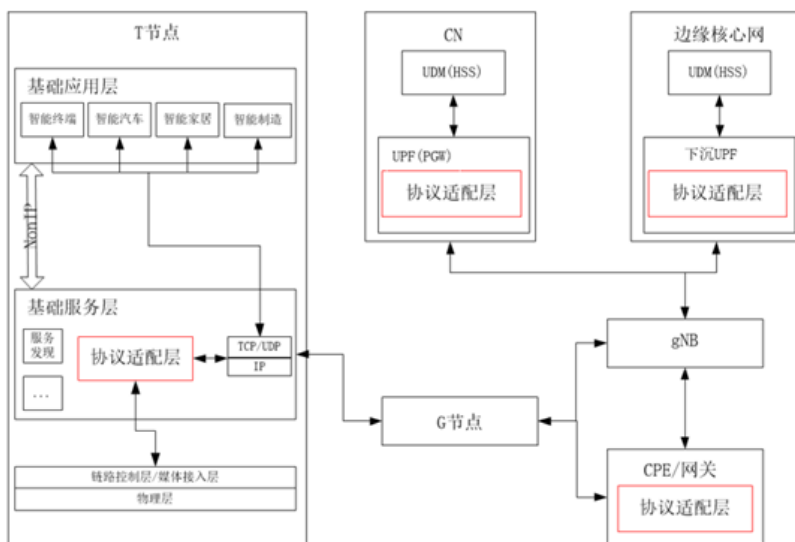


图 3-5 5G 与短距通信技术的网络融合框架图

面向智能制造场景，中国移动联合合作伙伴共同实现了 5G+星闪融合通信技术在电机同步控制的创新应用。传统方案中，伺服驱动器之间必须采用有线连接，以满足齿轮转速的同步对微秒级时延的要求。该创新应用中，多套伺服服务器之间采用星闪短距替代工业有线，并通过在星闪通信节点基础服务层进行协议改造，不仅可以保障伺服驱动器之间微秒级时延的通信需求，还可以通过 5G 云端应用主动下发业务优先级、时延抖动管理等 QoS 策略实时调整短距空口资源，提升现场控制数据流的传输可靠性，实现更高阶的柔性制造。

未来，5G 融合星闪短距通信系统进一步与数字孪生的结合，还将实现工业生产关键环节网络的可管可控可视，以满足生产运营中对通信连接灵活、动态、快速部署的需求，推动 5G 业务向工厂生产核心环节延伸的突破。

3.3.3 5G+确定性网络

现场网确定性网络是指能保证业务的确定性带宽、时延、抖动、丢包率指标

的网络。这里的确定性是指指标可预期，比如确定性时延 10ms，时延的抖动在 $\pm 10 \mu s$ 。

对确定性网络的需求在工业通信领域广泛存在。传统工业现场网络中的现场总线技术如 PROFIBUS、CAN、CC-Link 等，或者工业以太网技术如 EtherNet/IP、PROFINET、EtherCAT、PowerLink 等都在一定程度上解决了该问题。但因通信协议标准多而杂，导致彼此之间通信兼容性不佳，技术实现封闭，可复用性较差，制约了工业网络互联互通的发展。5G 技术的出现，为工业领域提供了新的通信选择。如果现场网络能兼具有线确定性网络和 5G 的优势，满足通信高可靠与确定性要求的同时，解决现场布线问题，那么长期困扰工业现场网络的问题将迎刃而解。

确定性网络所采用的确定性技术并非是伴随 5G+工业互联网发展而诞生的一种新技术，早在 2002 年，IEEE 发布了精准时钟同步协议，2005 年，IEEE 802.1 成立了 AVB 工作组，以制定基于以太网架构的音视频传输协议，解决汽车、工业领域的高实时、低时延、确定性数据传输需求。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，3GPP R16 已经考虑并定义了 5G 系统作为 TSN 逻辑网桥的架构，完成与 TSN 网络的组网与互联。利用 5G 延展现场网络既有的 TSN 网络的覆盖。5G TSN 逻辑网桥架构如下图所示：

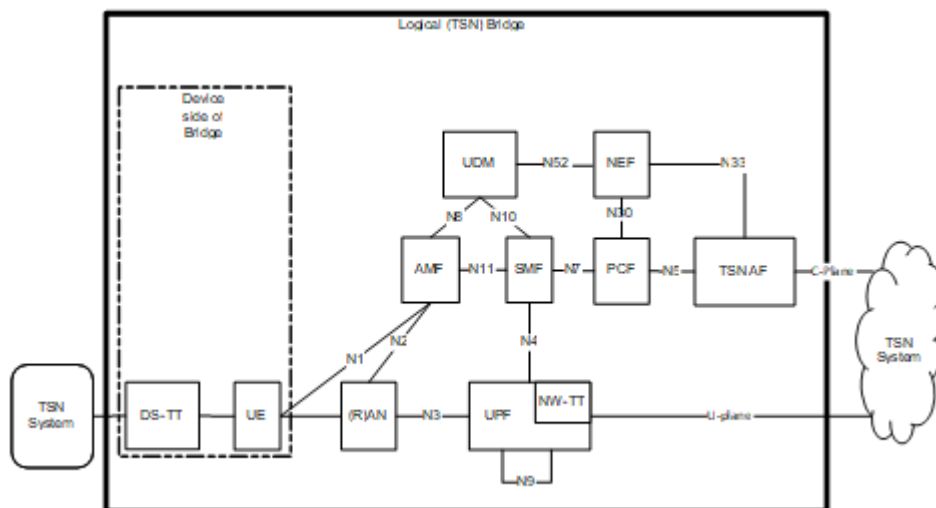


图 3-6 3GPP 定义的 TSN 逻辑网桥系统架构图

为了实现 5G TSN 逻辑网桥和 TSN 网络的对接，5G 系统扩展了如下 3 个功能

模块:

1) DS-TT

终端侧 TSN 转换器 (Device-side TSN translator), 用于连接终端侧的 TSN 系统。

2) NW-TT

网络侧 TSN 转换器 (Network-side TSN translator), 用于连接网络侧的 TSN 系统。

3) TSN AF

TSN 的应用功能 (Application Function), 用于连接 TSN 网络的 CNC 控制器。

5G+TSN 一定程度上解决了工业互联网数智化转型发展所提出的无线替代有线、数据互联互通、确定性数据传输等需求, 具有一定发展前景。

为了更结合有线与无线确定性技术, 简化系统架构, 推动产业发展, 产业提出了有线局域网确定性技术时间明晰网络 (Time Aware Network, 简称 TAN) 技术, 旨在通过轻量化、即插即用的方式为行业应用提供确定性传输服务。时间明晰网络协议是一套用于工业通信的有线局域网演进增强技术, 其在以太网的基础上, 进一步扩展网络通信的特殊能力。一方面, TAN 将高精度时钟与以太网数据通信相结合, 以时钟为基准, 对数据通信进行调度和控制, 使数据通信具备较高的精准度和稳定性; 另一方面 TAN 在以太网的数据格式上, 增加了 TAN 头部定义, 形成 TAN PDU, 使数据在通信中具备更完整的标识, 从而提升网络多业务通信的调度能力和控制能力。5G 技术与 TAN 的融合, 将进一步扩展了 TAN 的应用领域和场景, 具体的融合方案目前正在测试验证阶段。

5G 与 TSN/TAN 解决的是数据传输层间的确定性问题。中国机床工具工业协会推出的 NC-Link 和 OPC 基金会推出的新一代 OPC 标准 OPC UA (Unified Architecture, 统一架构), 则旨在统一工业协议层的互操作接口, 使信息在任何时间, 任何地点对每个授权的应用, 每个授权的人员都可用, 解决泛在工业协议业务层互联互通问题, 为工业数控装备互联互通建立了一套统一的标准。5G 与传输层面的 TSN/TAN 与应用层面的 NC-Link/OPC UA 的组合提供了一个实时、高

确定性并真正独立于设备厂商的完整的有线和无线共存的工业通信解决方案。随着技术之间融合适配方案的日益成熟，将有望逐渐成为工业现场通信的最佳实践。

3.3.4 5G+高精度室内定位

采用载波接收信号强度做指纹库定位实现相对简单，可将 Wi-Fi 或蓝牙的 RSSI 作为参考量，精度一般为 1/3 或者 1/4 站间距，可通过对场景分析优化算法提升精度，但其缺陷是精度低，维护困难，对环境改变的适应性差。

针对定位需求，业界主要有三种技术方向：

一是 UWB 定位，其是通过发送和接收具有纳秒或皮秒级以下的极窄脉冲来传输数据，从而在频域上具有 GHz 量级的带宽。与传统的窄带系统相比，具有穿透力强、功耗低、抗多径效果好、安全性高、系统复杂度低、能提供精确定位精度等优点，实际环境测试中精度能达到亚米级，能够满足人员、物资的高精度定位需求，但由于方案私有化程度较高，终端扩展受限，因此其成本较高。

二是蓝牙角度定位，其基于天线阵列的角度定位 (AoA/AoD)，是基于收发信号之间角度测量的高精度定位方案。根据天线阵列 (ULA 均匀线阵，UCA 均匀圆阵，URA 均匀方阵) 上不同天线链路上的相位差得到信号的来波角度，再根据部署高度计算终端位置。理想情况下精度也可以做到亚米级。得益于成熟的蓝牙产业链，基于蓝牙角度定位更具有成本优势。其系统框架跟 UWB 类似，区别是最终位置的解算是通过不同站产生的角度信息，而不是 UWB 里使用的时间信息。

三是定位基站与 5G 分布式皮基站结合共同部署的方式，定位基站复用 5G 皮基站的站址资源、供电资源和传输资源，同时结合边缘计算、大数据等领先技术，提供亚米级定位精度，满足智慧园区、交通枢纽、工业智能制造、大型展馆等室内场景下的各种定位业务需求。

在 5G 传统定位方式中，绝大多数算法如 RTT、AOA/AOD、TDOA 都依赖于测量得到的时间、角度等信息进行计算。对芯片处理时间、角度测量精度及时域同步精度都有较高要求。

未来对基于 5G 定位技术进行探究，以在带宽受限、不影响现有业务的情况下达到高精度定位的实现方案。除了常用的 RTT、AOA/AOD、TDOA 之外，还可以考虑参考 GNSS 定位，通过收发两端的载波相位信息进行定位。相比传统对时间、角度的测量。5G 载波波长较短，通过测量收发相位差，理论上能够获得厘米级的定位精度。使用载波相位进行定位，除了能够计算终端的绝对位置和相对位置（距离、角度），还可以直接利用载波相位的变化速度，快速计算出两个终端的相对速度变化率，具有一定的应用场景。

同时，载波相位定位也存在一些问题，如首达径分离困难、相位跟踪精度不够、整周跳变、整周模糊度收敛时间长等，对定位精度、时间影响较大。具体是否能够得到快速应用，还需要进一步进行技术验证。

除上述利用载波相位技术对定位精度进行优化的方案之外，LPHAP(Low Power High Accuracy Positioning)定位技术对定位精度和功耗同时进行了优化。LPHAP 对 5G 协议栈和芯片进行功能精简，利用 RRC-INACTIVE 状态的上行定位参考信号使用 UTDOA 和 AOA 算法进行定位，在 NLOS 场景通过指纹库进行补偿，目标达到亚米级定位精度；同时，通过快速转到浅睡眠/深睡眠状态降低底电流、结合网络侧优化等方式达到降低功耗目的。

3.3.5 5G 与中低速网络

中低速网络是下行传输速率在 10Mbps 以内，上行传输速率在 5Mbps 以内的物联网连接。

为满足物联网应用的发展需求，多种网络制式的中低速网络技术已经涌现，目前已广泛应用的既包括工作在授权频谱的 NB-IoT、Cat.1 等，也包括工作在非授权频谱的 LoRa 和 Sigfox 等。具体来说，NB-IoT 在覆盖、功耗、传输速率等方面符合低功耗广域覆盖类业务需求，适合需远距离传输、通信数据量小、时延要求不高的低速物联网应用；Cat.1 技术适合于对移动性及速率要求较高、数据量大、需要语音功能的业务。

LoRa 是使用非授权频谱的广域低功耗技术代表，与 NB-IoT、LTE Cat.1 等

采用授权频段的技术相比，其可靠性及可信度相对较弱，特别在身份凭证安全、认证机制、密钥管理方面存在差距； Zigbee、BLE 等受限于覆盖有限，还难以满足那些需要远距离传输、通信数据量少、且需电池供电长久的物联网应用。

4. 面向数字孪生的 5G+现场网行业典型应用

4.1 工程机械制造

工程机械制造的数字化是数字孪生的典型用例，以模具管理为例，模具是制造企业主要的生产资源，需频繁记录模具上机时间、成型周期、开合模次数、异常停机时间等重要信息，但传统的模具盘点由资产管理员实施，采用人工寻找和手工记录的方式，耗费时间及人力，且人工统计可能造成数据缺漏或误差。在现有无源物联技术因其采用激励和通信一体化的方式，导致无源物联标签在上下行时需要读写器近距离供电，大部分情况下仍需人工手持读写器扫码，距离远时标签上行信噪比低，导致读写器无法解调标签信号。

使用新型无源物联技术可以打破传统无源物联技术通信距离过近的问题。通过新型无源物联设备可周期性读取并刷新模具当前位置、合模次数、成形周期、使用物料和产品等信息，完全取代人工扫码。

新型无源物联技术还可与网关结合，以网关作为有源中转节点进一步延伸通信距离。通过无源物联标签上报核心数据至边缘云，可满足制造产区业务与数据的本地化处理和安全性要求，且数据上云有效打通整个生产线、各车间、各厂之间的数据隔阂，形成统一资产管理 SaaS 平台，实现模具从购置、使用、维修、报废及其处置等全生命周期的管理，解决了现有管理模式下的诸多管理盲点，有效增大投资边际效益和提高资产使用率，减少无谓的设备投资和闲置浪费。

4.2 智慧矿山

智慧矿山“一张图管控”属于行业中运用的数字孪生架构中的一种，行业现场网在矿山现场网中发挥了重要作用，贯穿整个网络层。面向矿山的数字孪生架构采用分布式、多层体系架构，自顶向下分为展示层、应用层、平台层、网络层、接入层，共计五层，如下图所示，现有的智慧矿山数字孪生平台均是以此架构为参考进行设计。



图 4-2 矿山现场网架构

以井下开采业务中的无人化采掘应用场景为例，无人化采掘是通过在采矿机械上安装远程操控系统、监控设备和感知设备，通过控制台实现对机械设备的实现远程操作控制。当前的井下开采作业过程严重依赖人工操作，主要集中在掘进机、输送机、井下气体传感器查看作业上。由于作业时环境恶劣、危险性大，导致企业招工难、管理困难、成本高、风险大等问题，亟需低时延、高可靠、大范围连接的无人远程操控设备技术代替现场人工操作，助力矿企安全高效生产。

目前井下的通信方式相对落后，均采用有线的方式传递信息。大量的视频监控设备和传感器安装在工作面的液压支架上，线缆多且杂，使用过程中容易造成线缆破损，数据中断。除此之外，工业 Wi-Fi 等无线通信手段无法达到要求，容易相互干扰，而使用 5G 的网络切片技术可以有效地保障远程操作业务。根据矿山业务场景的不同梳理出对行业现场网的不同业务需求，比如传感器信息采集类业务需要有高的可靠性和较大的带宽，对时延和上下行速率并不敏感，而在远程控制类应用场景中，是需要具有极高的可靠性，超低时延，在井下视频监控和井下通信类时则需要大的带宽、较高的上下行速率。

4.3 智慧钢铁

在钢铁中产工序中，炼铁工序是钢铁冶炼过程工艺复杂度较高的环节，且钢铁企业主要成本源于炼铁，传统的炼铁工序自动化水平不高，工艺操作主要依靠人工经验，工序协同能力、生产稳定性和成本控制力不足，钢铁企业可通过炼铁

工艺技术与 5G、大数据、云计算等技术的深度融合和创新应用，实现铁区生产过程的自动化、无人化和智能化，全面提升生产效率，减少潜在的安全生产危害。

机车定位精度需满足静态定位精度 $\pm 2\text{mm}$ ，动态定位精度 $\pm 5\text{mm}$ ，保障车辆位置精度才能实现远程操控精准判断机车位置、协同作业无偏差。目前 5G 只能达到 5-10 米，无法满足行业需求。5G 融合高精度室内定位技术可满足焦化四车毫米级定位的需求。

设备间需实现无人干预下车辆自动、稳定、协同作业，需实现设备间通信，服务等级需得到高保障，且时延需达到微秒级。5G+新型短距可支持超低时延、高可靠、精同步、高并发、高效率和高安全等，满足四大车协同作业场景下确定性服务质量保障业务的需求。

4.4 智慧楼宇

智慧楼宇是一个典型的将建筑、通信、计算机和控制等技术相互融合的数字孪生体，合理集成为最优化的整体，是能够适应信息化社会发展需求的现代化新型建筑。随着物联网技术的不断发展，借助物联网技术提升智慧楼宇的建设水平也成为未来发展的必然趋势。

智慧楼宇停车管理应用场景对行业现场网有较强需求，例如，车位检测对定位精度要求较高，且对网络的可靠性、时延和边缘计算能力都有一定要求。同时，考虑改造成本、施工难度、车位数量等影响因素，需要网络具备较强的部署灵活性，支持较大连接密度等。借助行业现场网无源物联技术的身份识别、精准定位的能力，可实现智慧楼宇的车辆进出管理和高效车位监测，解决智慧楼宇停车难、管理难等业务痛点。基于通信激励分离的新型无源通信技术实现智慧楼宇停车管理，可利用无源物联标签作为车辆识别、信息传输的设备，利用普通的移动终端作为激励设备，利用室内蜂窝小基站作为通信接收设备，实现空间隔离避免干扰，提升信息传输效率。

同时，基于无源物联的行业现场网技术也有望降低设备成本，并借助无源物联的定位能力，提高停车场内停车导航、反向寻车中的定位精度，整个过程无需

用户多次刷卡，极大的提高停车管理效率。

除停车管理外，5G+现场网也能为智慧楼宇的资产管理、人员管理、楼宇节能等典型应用提供网络能力保障，满足多样化网络需求，提升智慧楼宇的精细化、智能化运营管控能力。

4.5 智慧医疗

医院资产类型众多，人流密集。针对人员和资产管理程序繁复。当前医院管理中人工占比仍然较大，而通过引入 5G+现场网技术，可以深入传统网络无法触及的场景，推动智慧医疗服务。

在医疗监护方面，当有紧急病患时，医生和护士必须先寻找该病人过往病例，，才能够针对情况进行及时施救。传统的人工登记不仅速度缓慢而且错误率也很高，对于危重病人根本无法正常登记。无源物联技术可以有效地解决这类问题。每位住院的病人都将佩戴一个采用无源物联技术的腕带，这里存储了病人的相关信息，包括基本个人资料以及药物过敏史等重要的信息，并通过无源物联标签上的编码对应到医院的数据库中。通过一条简单的无源物联智能腕带，医护人员就可以随时随地掌握每一位病人的准确信息，提高救治效率。

在医院资产管理方面，一方面，无源物联技术来跟踪手术器械和其他物品，以此通过减少手动计数工作来节省时间，确保每个物品被适当灭菌来降低感染的风险，以及更好的管理库存。另一方面，护士和医生每周浪费时间寻找设备。通过将无源物联标签连接到轮椅、床和其他物品，医院可以对其定位并改进资产利用率。这为护理人员节省了时间，并能帮助医院通过更准确的资产计数来避免不必要的资产浪费，即节省时间又节省资本。

5. 缩略语

5G	第5代通信技术 (The Fifth-Generation)
AGV	无人导航小车 (Automated Guided Vehicle)
AoA	到达角度定位 (Angle of Arrival)
BBU	室内基带处理单元 (Building Base band Unite)
CNC	数控车床 (Computerized Numerical Control)
DT	数字孪生 (Digital Twin)
DTU	分布式终端 (Distribution Terminal Unit)
eMTC	基于LTE演进的物联网技术 (LTE enhanced MT0)
GIS	地理信息系统 (Geographic Information System)
GPS	全球定位系统 (Global Positioning System)
HSS	归属用户服务器 (Home Subscriber Server)
IT	信息技术 (Internet Technology)
LoRa	远距离无线电 (Long Range Radio)
mMTC	海量机器类通信 (Massive Machine Type of Communication)
NB-IoT	窄带物联网 (Narrow Band Internet of Things)
OPC UA	OPC统一架构 (OPC Unified Architecture)
OT	操作技术 (Operation Technology)
PLC	可逻辑编程控制器 (Programmable Logic Controller)
pRRU	远端射频单元 (Pico Remote Radio Unit)
QoS	服务质量 (Quality of Service)
RFID	无源射频识别 (Radio Frequency Identification)
RSSI	接收的信号强度指示 (Received Signal Strength Indication)
SLA	服务级别协议 (Service Level Agreement)
TAN	时间明晰网络 (Time Aware Network)
TDoA	到达时间差法 (Time difference of Arrival)
ToF	时间飞行法 (Time of flight)
TSN	时间敏感型网络 (Time Sensitive Network)
UPF	用户端口功能 (User Plane Function)
uRLLC	超可靠低时延通信 (Ultra Reliable Low Latency Communication)
UWB	超宽带 (Ultra-Wide Band)

参考文献

- [1] 《5G+工业互联网应用场景白皮书》，中国移动，2019.12
- [2] 《工业互联网园区网络白皮书》，工业互联网联盟，2019.
- [3] 《5G 毫米波(mmWave)技术白皮书》中兴，2020.12
- [4] 《基于 UWB 与 GNSS 融合定位的港口高精度定位技术》，天津港股份有限公司，交通运输部水运科学研究所，2019
- [5] 《5G 确定性网络为提升业务体验和优化成本打造专业性“联接”》，周艳、银宇、周汉，2020.06
- [6] 《5G 确定性网络架构产业白皮书》，5G 确定性网络产业联盟 2021.02
- [7] 《EPC Radio-Frequency Identity Protocols Class-1 Generation-2 UHF RFID Protocol for Communications at 860 MHz – 960 MHz》，EPCGlobal, 2006.06
- [8] 《5G+煤矿智能化白皮书》，阳泉煤业(集团)有限责任公司、中国移动，2020.10
- [9] 《5G 室内融合定位白皮书》，中国移动、中兴通讯，2020.10
- [10] 《Theory of Operation for TSN-enabled Systems》，AVnu Alliance, Tech. Rep., 2017.02
- [11] 《White paper: TSN – Time Sensitive Networking》，Belden, Tech. Rep., 2017.02
- [12] 《3GPP. 3GPP TS 23.501: System architecture for the 5G System》Stage 2 [S], 2017.
- [13] 《3GPP. 3GPP TR 23.734: Study on 5GS Enhanced support of Vertical and LAN Services [R]》，2017.

联合编写单位及作者

中国移动通信有限公司研究院物联网技术与应用研究所：

季瓚、王迪、魏颖慧、郑师应、罗达、睢菲菲、韦安妮、左辰、孙琳、李宜
铮、王晴、李响

华为技术有限公司

李汉涛、阮韬、汪孙节、伍勇

北京紫光展锐科技有限公司

康国昌、汪大海、周晓萌

新华三技术有限公司

张元

徐州重型机械集团有限公司

李忠福、张翔

首钢集团

宋海洋

南京钢铁股份有限公司

楚觉非，王芳，林锦斌，汝金同，鹿玮，马子义

宝信软件

杨海荣

华菱湘潭钢铁有限公司

周旻昊

联发科技股份有限公司

范恭达、李旭