

5G/5G-A 确定性技术体系

5G/5G-A Deterministic Technologies
Empowering Industrial Internet

赋能工业互联网

裴郁杉,王友祥,黄蓉,李瑞华(中国联通研究院,北京 100048)

Pei Yushan, Wang Youxiang, Huang Rong, Li Ruihua (China Unicom Research Institute, Beijing 100048, China)

摘要:

5G网络的超低时延、超低抖动和超高可靠的确定性传输机制,及其无需布线、灵活部署和移动性等优势,在以智能工厂为代表的行业应用中有着广泛应用前景,工业领域项目成熟度不断提升,但是在生产核心环节的应用尚面临简化组网、可靠通信、安全隔离和服务增强等挑战。分析了5G网络应用现场网的技术挑战,从时延确定性、时空确定性、可靠确定性、业务确定性、安全确定性和系统确定性等6个方面全面阐述了5G工业互联网确定性保障体系,并介绍了其在某智能工厂中的初步实践成果。

Abstract:

5G networks not only provide a deterministic transmission mechanism with ultra-low latency and jitter, and ultra-high reliability, but also realize wireless connection and flexible deployment for enhanced mobility. These advantages promise the wide applications in industry scenarios. The maturity of industrial projects is constantly improving, but the application in the core production process still faces challenges such as simplified networking, reliable communication, security isolation and service enhancement. It analyzes the technical challenges of filed applications of 5G networks, and provides a full description of the deterministic capabilities set of 5G industrial Internet including delay, time and position, reliability, services, security, and system. Specifically, it introduces its preliminary practical results in a smart factory.

Keywords:

5G-A; Deterministic capabilities; Industrial Internet; Field network

引用格式:裴郁杉,王友祥,黄蓉,等. 5G/5G-A确定性技术体系赋能工业互联网[J]. 邮电设计技术,2023(5):25-32.

0 引言

5G技术具有高可靠、低时延、大连接等突出特性,可以解决工业场景中移动性差、组网不灵活、特殊环境敷设困难等问题。5G网络突破了原有工业无线技术在可靠性、连接密度、传输能力以及安全性等方面的局限,能够有效满足大规模数据采集、泛在连接、实时分析和远程控制等工业生产制造环节的关键网络能力需求,满足了部分制造环节中的操作空间集中化、操作岗位机器化、运维辅助远程化等数字化管理

关键词:

5G-A; 确定性; 工业互联网; 现场网

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2023.05.005

文章编号: 1007-3043(2023)05-0025-08

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



要求,解决了现阶段工业制造领域的部分痛点^[1]。因此,通信运营商、生产企业和装备制造企业都非常重视“5G+工业互联网”,并且开展了深度试点^[2-6]。从中国5G应用征集大赛2018年—2022年的参赛项目统计可以看出(见图1),工业领域项目成熟度不断提升,2022年实现应用示范、商业落地(含可复制)的项目比例提升至近90%;且已有超过10%的项目实现“解决方案可复制”,并在不同企业成功落地。但是在生产核心——现场网领域,运营商通信网络尚处于应用探索阶段。因此,本文将首先分析5G工业互联网应用的挑战。其次,从时延、时空、可靠、业务、安全和系统6个方面阐述5G-A工业互联网的确定性能力体系及其

收稿日期:2023-03-03

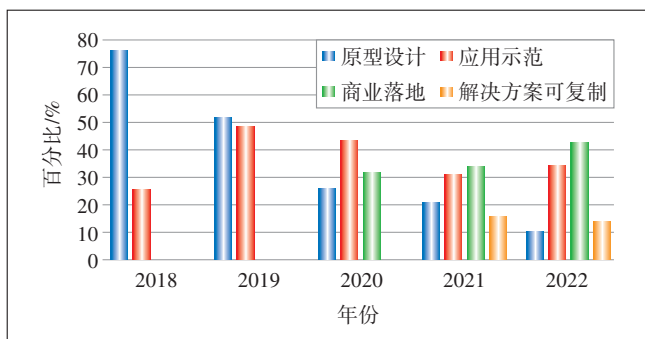


图1 2018年—2022年“绽放杯”大赛中工业领域项目统计

对工业现场网的赋能;并介绍了5G-A确定性工业互联网在实际工厂现场网中的应用。最后对5G-A工业互联网确定性技术进行了展望。

1 5G工业互联网应用挑战

2022年9月,工业和信息化部提出了5G全连接工厂^[7]:充分利用以5G为代表的新一代信息技术,基于工业互联网新型基础设施,新建或改造产线、车间、工厂等生产现场,形成生产单元广泛连接、IT/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。产线级聚焦在设备连接、数据采集和5G应用到生产控制环节等方面的能力建设;车间级聚焦在多产线、多系统之间协同生产,数据打通与系统集成水平提升等能力建设;工厂级聚焦在跨车间、跨层级互联互通,生产、运营、管理等能力的全面提升。

众多制造企业也提出要加快利用5G改造工业内网,推动“5G+工业互联网”服务于生产核心环节。

但是,目前5G在工业制造中的应用多集中在“辅助生产”环节,仅有小部分项目开始承载核心生产系统。一方面是因为工业无线化的诉求驱动,需要考虑行业发展的自然规律是逐步替代而非一蹴而就;另一方面,在一些关键场景,5G需要更好地满足简化组网、可靠通信、安全隔离、服务增强等业务需求,才能加速深入生产环节,成为工厂最主要的基础设施。

a) 简化组网。当前工厂车间生产网和产线工控网的5G组网,主要是2层、3层通信需求,需要部署和设置隧道类设备,不仅增加了成本和部署难度,也不满足柔性生产需求。因此,需要更加简单的组网方案以适应市场需求。

b) 可靠通信。确定可靠是工业业务最核心的要求,尤其对于控制类业务。主要考虑2个方面:稳定时延的可靠性能否满足业务要求,如PLC控制类业务要

求10ms以内的时延和99.9999%的可靠性;最大时延是否满足生产节拍要求,出现大时延波动可能会导致业务逻辑错误,导致后工序甚至整条产线的停产。如何在保证频谱效率的同时提供一个满足更高业务需求的可靠通信网络,是对现有5G网络能力的新挑战。

c) 安全隔离。相比传统工业专用网络,5G网络带来的网络化协同、个性化定制等对网络的安全隔离能力和安全服务保障提出了更高的要求;5G网络中的大量新IT技术将传输链路上的软、硬件安全威胁也带入了工业互联网;5G核心网UPF下沉造成网络边界模糊。这一系列安全隔离问题亟需解决。

d) 服务增强。现有5G在工业场景中的应用未能完全满足业务需求,如高精度定位、确定性传输、专网运维等方面。其中,定位方面需要基于部署的基站,提供亚米级的定位能力;确定性传输方面缺乏端到端的确定性保障体系;5G专网运维方面需要提供便利简洁的运维服务。

2 5G-A工业互联网确定性能力

工业现场环境复杂,接入设备多样化,业务要求差异化,这就需要网络能够对各类业务提供确定性的质量保障。5G/5G-Advanced自R15版本针对工业互联网业务的确定性需求,逐步引入了高精度定位、ULRRR、TSN、5G-LAN等技术,增强5G对工业业务的支持,并在后续版本中持续演进。图2所示为5G标准化的总体进程。

总体来说,5G/5G-A网络从时延、时空、可靠、业务、安全和系统6个方面构建确定性能力体系,为智能工厂提供端到端的通信确定性保障。

2.1 时延确定性

5G技术对工业互联网最重要的改进就是对传输时延的保障,降低传输时延和时延抖动,加强时延的一致性水平。

a) 低时延。通过工业连接设备、无线网、核心网和传输网等单域时延和多域时延的协同缩短,降低了端到端的业务时延。无线网通过uRLLC技术,采用更加灵活的调度方式(灵活的调度间隔和免授权调度)、更小的调度单元以及灵活的HARQ、ARQ-ACK反馈机制,实现低时延要求,使得用户面空口时延能够低于1ms,传输可靠性预计可达到99.999%。核心网和传输网通过UPF下沉和MEC技术,缩短业务传输路径,从而降低业务时延;对于计算能力需求相对较少

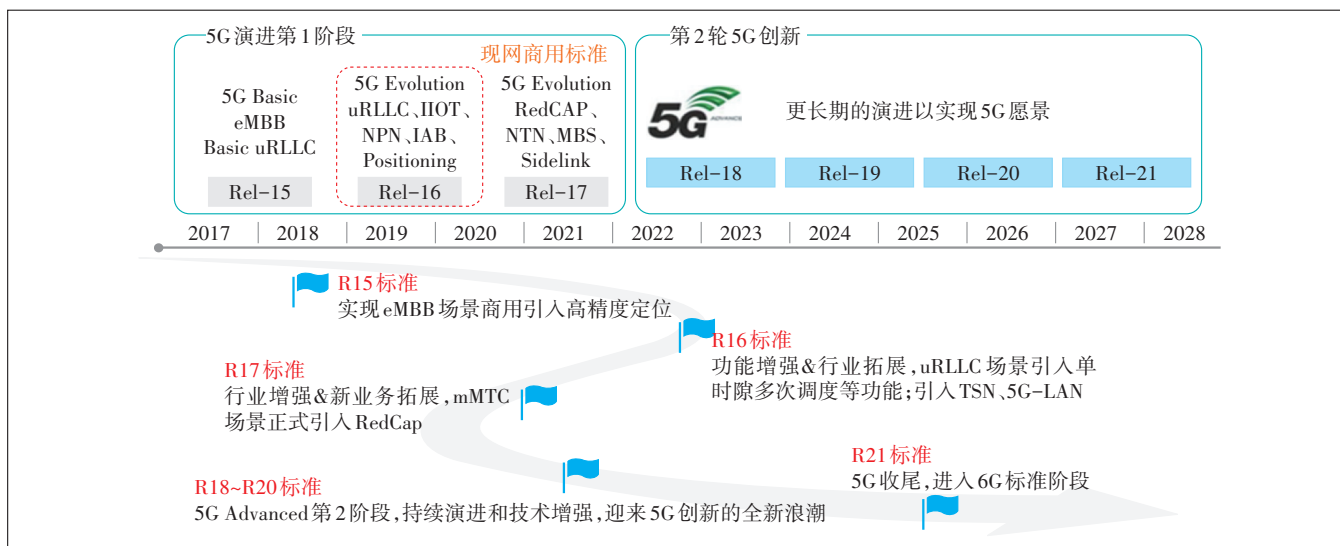


图2 5G标准化进程

的现场业务,可以部署在与基站完全融合的MEC中,进一步降低时延。

b) 低抖动。5G与时延敏感网络(Time Sensitive Networking, TSN)相结合,在5G终端和网络侧部署TSN转换器,将5G系统(包括终端、无线、核心网整体)作为TSN网络的一个透明网桥,由CUC/CNC决策,采用精准授时、流量调度、QoS映射等技术,实现工业业务端到端的确定性服务。进一步地,5G-TSN网络中增加了TSNTSF网元功能,并引入生存时间,不依赖外部TSN网络,在5G内部独立实现更加精确的确定性数据转发。从而满足对时延抖动敏感的工业控制类业务,如电力行业差动保护、PLC控制等。图3所示为3GPP在不同版本引入5G-TSN的主要性能。

c) 优先级保障。5G根据业务需求,通过网络切片实现不同的SLA,并支持多种共享类型进行灵活组网,为高优先级业务提供隔离和QoS保障。此外,通过切片能力开放,应用可以获取UE的状态信息,设置UE切片策略。基于DPI的灵活QoS策略、定制化的网络

功能参数、个性化的切片和流量路径管理等技术,使网络能够更加精细、智能地满足垂直行业应用要求(见图4)。

2.2 时空确定性

5G能够提供时间和空间上的确定性,满足工业网络和业务的高精度授时和定位服务需求。

在时间上,5G网络支持对终端的高精度授时能力;与TSN结合支持多种时钟协议和灵活的时间同步机制,并大幅增强了时钟源的可靠性;支持多个时钟源,当时钟源出现故障时,可将NW-TT/DS-TT等作为新的时钟源,维持TSN网络的高精度时钟同步,从而使得5G-TSN网络中的时间同步精度可达到300 ns;并可以通过能力开放供外部的生产网络调用(3GPP不同版本的特性参见图3)。

在空间上,5G网络支持高精度定位与识别,通过Massive MIMO多波束、高精度同步和更低的网络时延提升了基于时间测量的精度,能够满足如表1所示的性能。借助5G高精度定位,5G-A智能工厂可实现对

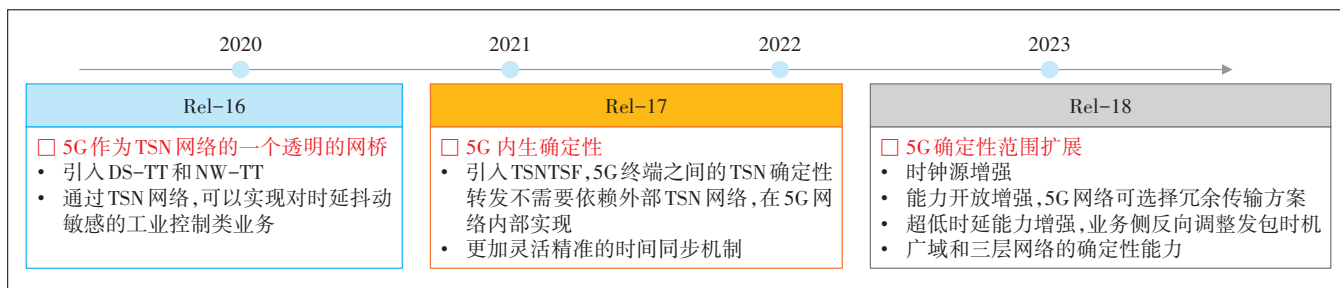


图3 3GPP在不同版本引入5G-TSN的主要性能

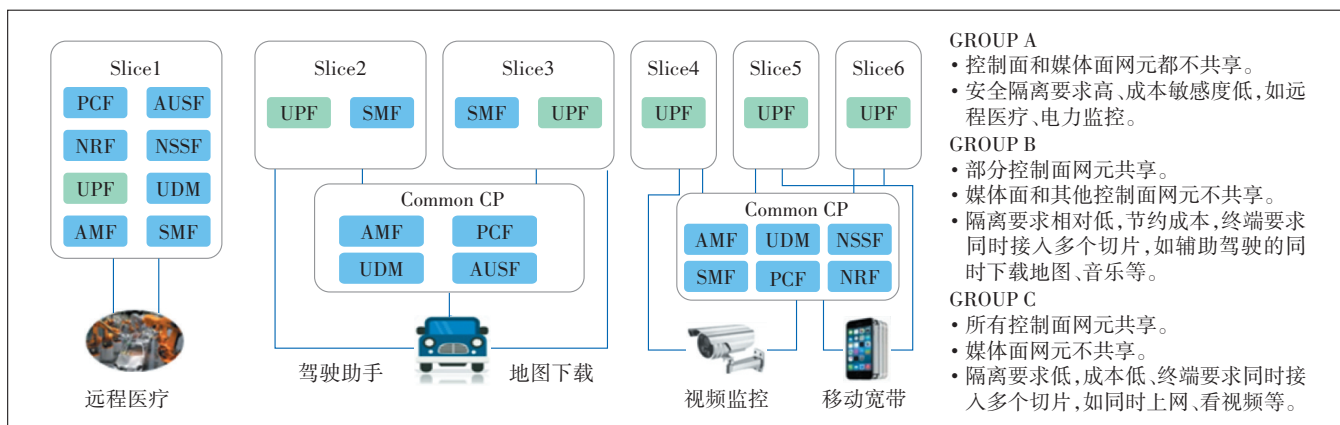


图4 多样化切片设计

表1 5G R17版本商用场景下的定位指标要求

场景	水平精度	垂直精度	端到端时延/ms
商用场景	1 m@90%	3 m@90%	100
IIOT场景	0.2 m@90%	1 m@90%	100

工厂内的人、车、物、料等的精确定位、无缝追踪、智能调配与高效协同,大幅提升工厂的精益生产及精细化管理水平。

随着 Massive MIMO、毫米波、超密集网络等技术的标准化或商用,5G-A 网络还将具有提供高精度感知服务的潜力,如测速、测距、物体识别等。此外,通过无线感知与摄像头感知等多种感知方式的协作,5G-A 将进一步提升整个工业互联网的感知能力,支持更多的应用场景。

2.3 可靠确定性

作为生产现场网的核心业务,工业控制、远程操控等对数据的传输可靠性要求非常高。为此,5G 网络首先通过高可靠的传输协议设计提升5G 自身的数据传输成功率,其次提升5G 网络设备的运行稳定性,保证5G 工业互联网数据准确收发的可靠性。

a) 高可靠传输协议设计。提高传输可靠性的一个简单原理就是利用重复传输获得增益。在链路层,5G 在业务信道上重复发送以提升数据传输的可靠性,并且允许跨时隙重复,在提升可靠性的同时降低时延;采用低码率的调制编码方式进一步降低空口传输误码率。在分组数据汇聚层,采用冗余传输机制,可通过载波聚合和双连接2种模式实现,降低空口数据丢包率,保证数据实时完整。在用户面,通过双发选收冗余机制,面向1个业务建立2个PDU会话,通过独立的通路上承载后进行数据合并,减少因传输网络、核心网处理等环节的数据丢包导致的业务受损,提升

端到端数据传输的可靠性。5G 自身的高可靠传输协议有效地提升了无线工业互联网的数据包传输成功率。

b) 设备运行稳定性增强。5G 工业现场网设备采用1+1、1+N等主备设计,如在5G 基站设备中对电源模块、主控模块、基带处理模块进行热备份部署,当某模块出现故障时,支持在线业务的快速热备倒换,保障网络的正常运行。当采用通用服务器部署时,相同功能的虚机或容器可按照互斥原则部署在不同的服务器上以保证设备的高可靠性;并可以在设备内部采用无状态化设计,解耦设备运行的配置与业务数据,以减少设备故障对业务的影响,进一步提升5G 工业现场网设备运行的稳定性。

2.4 业务确定性

5G 网络引入智能化的手段,基于对业务特征的识别和感知,对网络资源进行准确评估、动态规划、快速部署、全生命周期监控和优化等一系列闭环管理,对关键业务做到感知的全程全网的保障,向用户提供差异化的确定性服务。此外结合高效的标准化运营维护SLA体系,可有效支撑5G 网络向各行业持续延伸。

a) 增强业务感知和调度能力。目前5G 主要通过切片和QoS体系进行业务感知和保障,但是切片尚未广泛使用,QoS类别有限,无法满足业务差异化的确定性需求,因此需要对网络进行增强。首先,构建网络与应用/终端之间的双向感知机制,网络基于应用上报的关键信息,具备更加精细的感知能力。其次,网络通过理解应用数据的发送特征,进行业务的智能调度与编排,从而实现业务的确定性保障(见图5)。

b) 增强确定性度量 and 反馈能力。当前5G 网络的KPI度量体系统计周期长、粒度粗,难以满足工业应用

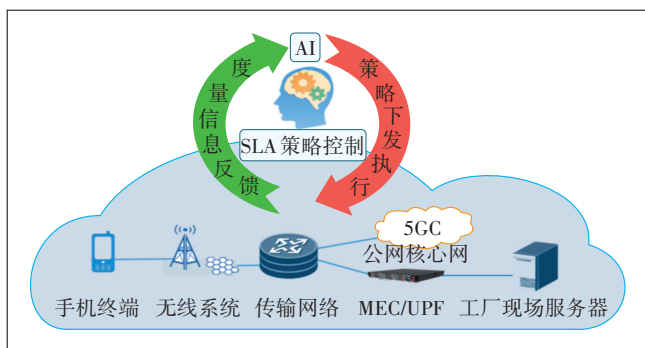


图5 业务确定性保障体系

精细化度量的需求。为实现SLA精确可视和及时定位问题,需要改进数据采集和统计系统,实现时延、带宽、抖动等指标的精细度量 and 全量上报,并且能按照业务需求实现不同粒度的监控可视。同时,业务可以根据网络KPI的确定性度量结果进行适配,达到最优体验。

c) 引入AI等新技术。针对业务确定性保障带来的海量数据,引入AI技术进行高效快速处理,实现确定性业务的实时分析与决策,更好地满足工业确定性需求。

2.5 安全确定性

5G-A网络赋能工业互联网安全体系主要体现在以下2个层面。

首先,5G网络的基础安全能力可大大增强工业互联网的安全保障。针对终端,5G网络定义了多重终端接入认证方式,从基础的网络级主认证到细化的切片级认证,以及进一步的数据网络认证。根据业务安全级别要求,可以灵活配置不同级别的认证策略或策略组合。空口侧,5G网络空口采用加密身份标识,提供增强的用户隐私保护,解决了4G网络中用户标识在空口泄露的问题;5G网络无线接口增加了用户数据的完整性保护,支持更高级的密码算法,提供了完善的机密性和完整性保护方案,防止用户数据被篡改。

其次,5G网络通过网络、管理及安全的增强,实现了垂直行业的IT网络与OT网络的融合,为5G工业互联网中的不同应用提供SLA级的安全保障水平。企业部署5G行业专网,通过5G LAN技术将企业自身的网络体系与5G网络融合,可对企业终端地址进行统一管理和规划,5G LAN的虚拟组实现行业网与运营商网络间按需有效的隔离,构建面向企业的统一网管和监控体系,企业专网接入的所有数据通过防火墙过滤,确保敏感数据不出园区。另一方面,5G工业互联网实现

了基于5G技术的OT+IT+CT的扁平化网络架构,解决了传统工业互联网连接与组网配置的物理绑定约束问题,提高了企业现场网络快速部署的灵活性,实现了数据驱动下的柔性制造。通过5G-A网络切片技术为企业用户提供确定性且定制化的网络互联通道,在全域扁平化架构中实现了OT域不同业务间的逻辑隔离,针对不同的OT业务安全需求提供不同等级的安全保障。

2.6 系统确定性

稳定运行的工业现场网络是企业稳定生产、提升利润的基础。在工业生产现场应用中,需要及时可靠地获取工业装备的控制信息和生产运行状态信息,因此,需要保证无线网络长时间连续的高可用性,例如无人化设计的智能制造工厂通常要求现场网络至少保障7×24 h不间断稳态运行。5G通过系统高可用保障机制,提升整个通信系统的稳定性;通过增强网络边缘和局域网,保障5G工业互联网本地系统稳定运行。

a) 系统高可用保障。故障是影响网络稳定运行最主要的因素,降低故障的有效方式是冗余和备份。5G-A工业现场网可支持网元级的负荷分担、主备等容灾机制,如5G基站的BBU热备、RRU的互助、传输链路的汇聚等,支持在线业务的热备倒换,还可通过异地容灾进一步提升系统级可靠性。

b) 边缘确定性增强。5G网络通过下沉UPF或部署MEC,将无线网络和中心云网有效地融合在一起,在边缘侧提供云计算能力和无线网络能力。应用服务和内容部署在本地边缘,可以减少数据传输环节,降低业务对回传网络的依赖,提高终端访问园区业务的可靠性。此外,针对工业生产不中断的业务性能要求,UPF集成AMF、SMF和UDM的极简功能,并备份专网用户相关的网络功能及数据,当核心网回传链路发生故障时,专网用户通过UPF上的备份网络功能实现已有业务的惯性运行和新用户的接入。同时,在园区内的UPF也可以采用1+1主备方式部署,进一步提升网络可用性。借助运营商高可用网络的部署维护经验与团队,可简化MEC维护管理,大幅提升智能工厂系统的稳定性与可靠性,同时降低智能工厂的部署和运维成本(见图6)。

c) 局域网确定性增强。现有工业互联网生产区域监控、自动化控制以及远程操作等业务场景中,大量使用了有线LAN和Wi-Fi技术。但是,有线LAN技

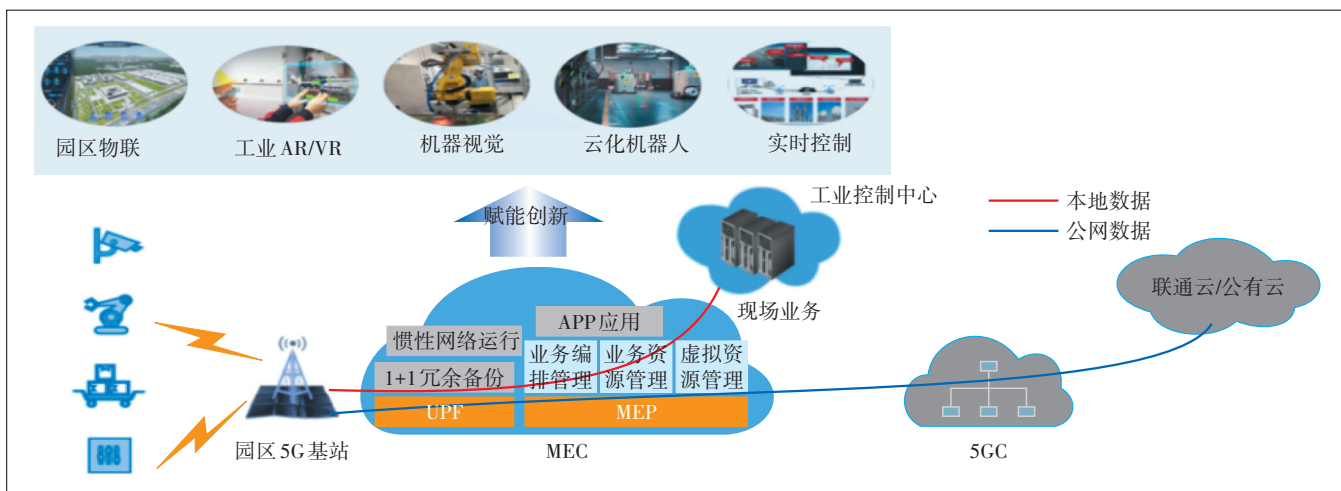


图6 边缘可靠性增强

术的移动性受限,无法满足柔性生产、活动机器人等应用场景;而Wi-Fi技术的QoS保障能力差、安全性差,其稳定性在很多情况下无法满足工业互联网的应用需求。为此,引入5G LAN技术,在5G网络上构建局域网(LAN),为特定的终端组提供IP类型(三层)或者以太网类型(二层)的通信服务,支持点到点以及点到多点(广播,组播)的通信功能;并可以通过组管理服务,第三方应用可以灵活构建不同的虚拟网络(VN)。通过5G LAN技术,移动终端如手持终端、CPE、摄像头、传感器等都能便捷地接入5G网络并在其中组建无线局域网,快速进行协同操作,获得和Wi-Fi相同的便捷使用体验,以及更好的移动性和QoS保障。5G LAN特性应用到局域网可让工业设备摆脱线缆的束缚,提升无线工业互联网的稳定性(见图7)。

3 5G-A确定性技术智能工厂应用试点

2022年,中国联通在某工厂开展了“5G全连接工厂”建设,在生产运营监测、产品检测、仓储物流等应

用上加深合作,打造低碳、安全的智慧工厂,全面建设了生产车间的设备、生产资料、环境等数据采集系统,已完成12个5G+生产运营场景的商用落地,包括产品自动质量检测、无人AVG物流、远程遥控、设备定位及无人监测等多个关键生产工序。并且通过部署内置MEC能力的5G基站,实现工业现场业务的本地分流、超低时延数据转发和AI服务,从而为时延敏感类业务(如焊接质检、工艺参数分析等)提供确定性的通信服务。图8所示是某工厂5G专网逻辑组网图。

3.1 5G-A低时延应用降低生产能耗

搪瓷烧制是某工厂能耗最大的生产环节之一。如图9所示,通过5G网络连接搪瓷烧制炉,数据采集和控制算法部署在边缘MEC上,根据对搪瓷烧制工艺过程和设备特性的分析,基于产量变化对炉温进行远程实时控制以降低能耗,实现了炉温和炉体开启状态的快速反馈和实时远程控制,改善了设备管理模式,提升了搪瓷烧制过程中的能耗效率。根据评估,每年可以实现能耗节约12%以上,年度成本节约300万元

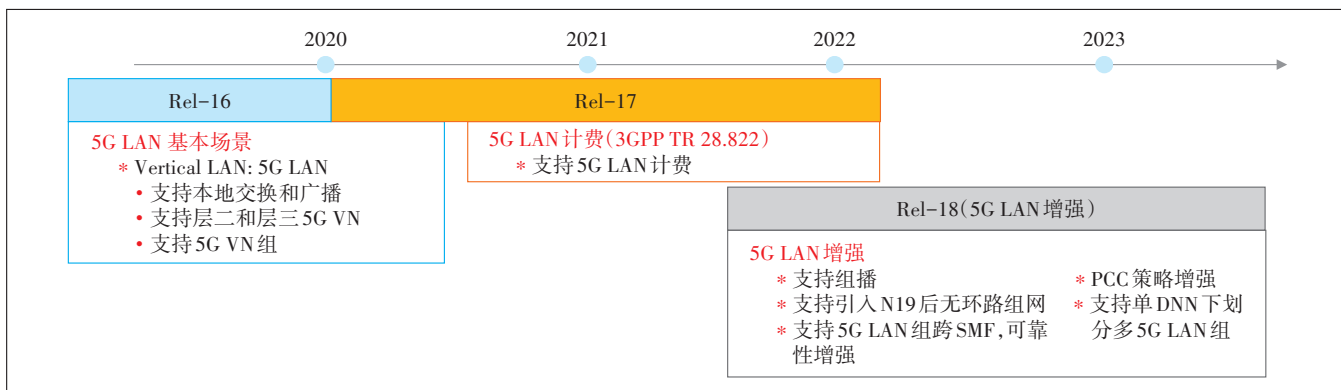


图7 5G-LAN的标准化引入

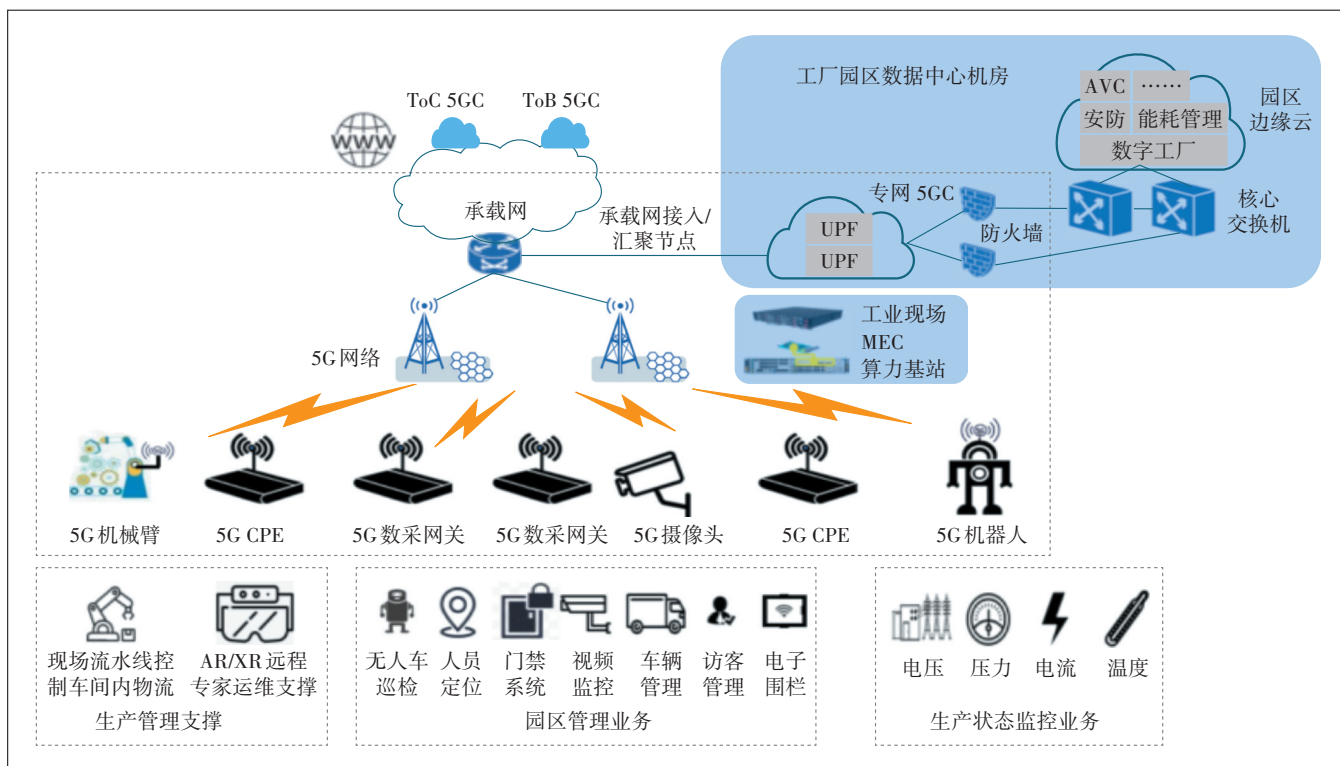


图8 某工厂5G工业专网逻辑组网

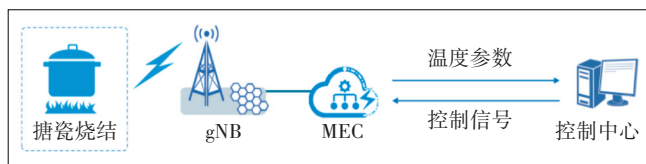


图9 搪瓷线节能案例

以上,减碳约3 656 t。

3.2 5G-A大带宽+算力内置+AI应用提升制造直通率

传统生产工艺采用人工水检,效率低,出错概率大。如图10所示,在5G智能化改造后,通过高频数据采集(20 Hz),对焊接电流、电压、保护气用量等数据进行实时监控,通过基站内置的MEC和AI算法,在本地实现对焊缝质量的自动判断及预警,大幅提升了焊接环节的直通率,极大提高了生产效率。

3.3 5G-A确定性应用使能协同作业

在传统生产车间,AGV按照设计位置停车后机械臂将物料放到AGV上;AGV在物料放置完毕后再次启动将物料送往下道工序。如图11所示,在5G智能化改造后,采用uRLLC+TSN+算网业一体化基站进一步降低无线传输时延和抖动,并采用双发选收机制提升数据传输的可靠性,从而保障AGV的精确定位信息和机械臂的控制信息的实时可靠传输,使得AGV可以在不停车的情况下装载完成,并开往下一道工序,大幅

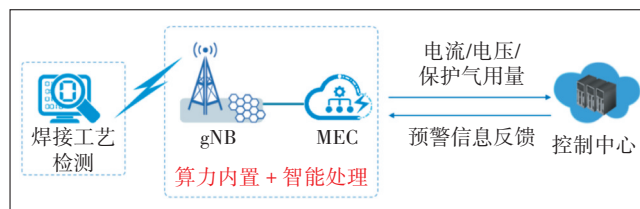


图10 智能工艺检测案例

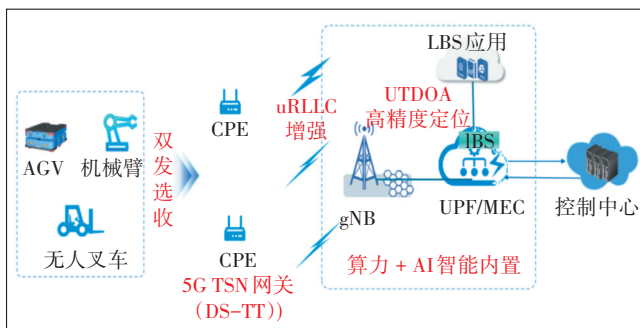


图11 AGV+机械臂协同控制案例

缩短工序间的停顿时间,提高生产效率。

在已经部署5G智慧应用的3个生产车间中,5G确定性服务大幅提升了现场网络的可靠性和便捷性,为该工厂创造了可观的价值:管理效率提升20%,生产成本降低近4 000万元,产品投诉率降低60%以上。该项目已经成为该工厂5G智慧工厂的示范标杆。

4 5G-A 工业互联网确定性技术展望

5G为工业现场网业务定义了KPI指标体系,并通过uRLLC+TSN、感知增强、5G LAN、UPF下沉、MEC等技术提升网络能力,增强对现场网通信确定性和可用性的保障能力。随着3GPP 5G-Advanced标准化工作的开展,5G-A确定性技术在支持工业互联网领域,将有更加广阔的发展空间。

a) 更加精细化的故障处理优先级。面向行业用户建立统一的故障处理等级体系,针对不同级别的事件采用不同的响应时间和处理时间标准,保障高优先级业务故障及时处理。可按照故障影响和紧急程度分为:特别重大事故(Critical)、重大事故(High)、较大事故(Medium)、一般故障(Low)(见图12)。



图12 故障事件的优先级

b) 低功耗高精度定位与测距。工业设备需要频繁地获取实时位置信息进行高精度定位和测距,5G-A技术能够提供高精度的位置、相对速度、角速度等全部动态信息,这将为设备间高精度协同、复杂工艺加工等智能生产流程提供有力的支持;但另一方面,频繁的高精度定位与测距将消耗更多的电量,而由于工业场景的特殊性,工业终端无法频繁地更换电池,因此,低功耗的高精度定位与测距在5G全连接工厂中至关重要。

c) 多模态感知通信服务。目前,行业专网中应用了触觉、视频、音频、传感器等多种感知设备,以获取丰富的生产信息;5G-A将具备高精度定位与测距、无线感知的能力。因此,未来5G-A感知与上述感知模式融合,并结合5G-A的确定性时延、超高可靠和安全等网络确定性能力,支持多模态的感知通信服务,获取更加丰富和确定的环境、设备与产品等生产信息,可应用于远程设备操控、设备协同作业、柔性生产制造、现场辅助装配、质检与设备故障诊断、厂区智能物流、无人智能巡检等多个领域。

d) 更有保障的端到端确定性。借助更直接的数据传送机制、更高的频谱,更小的子载波间隔,进一步降低系统端到端传输时延;增强TSN支持超低时延的能力,如支持无线侧向业务网络反馈调度时间的机制,业务侧可基于该信息调整发包时机;更稳定的授时同步和多链路传输机制进一步提升数据传输可靠性,能够为更复杂的协同控制提供有效的数据通路;通过更加精细化的切片运营和SLA能力开放,以及对uRLLC的持续增强,实现对业务确定性更加精细化的保障。

e) 更广泛的端到端确定性。支持5G-TSN与Det-Net的互通,提升三层网络的确定性能力,扩展5G工业互联网的确定性范围。增强5G LAN特性,支持多SMF/多UPF管理VN Group,5G LAN的使用范围和VN组间的互通能力将得到进一步扩展,实现更广域的5G局域网组网,提升工业互联网中多域互通的确定性,为更大规模普及5G在工业互联网中的应用提供更大的支撑。

参考文献:

- [1] 邓爱林,冯钢,刘梦婕. 5G+工业互联网的关键技术与发展趋势[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版),2022,34(6):967-975.
- [2] 工业和信息化部办公厅. 第5届“绽放杯”5G应用征集大赛[EB/OL]. [2023-01-09]. https://www.nesti.gov.cn/kc/fw/ds/202205/t20220505_76685.html.
- [3] 郑显生. 基于5G专网的工业互联网应用实践研究[C]//“2022智慧规划与管理”学术论坛论文集. 重庆:中国智慧工程研究会智能学习与创新研究工作委员会,2022:125-129.
- [4] 祁超,李韩军,吴陈炜. 5G专网在钢铁智造中的应用和研究[J]. 通讯世界,2021,28(9):15-17.
- [5] 工业和信息化部信息通信管理局. 关于发布“5G+工业互联网”十个典型应用场景和5个重点行业实践情况的通知[EB/OL]. [2023-01-09]. https://www.miit.gov.cn/ztzl/rdzt/gylw/gzdt/art/2021/art_689c758fc77045eeb32a5932d3ea4f22.html.
- [6] 陈亿根,尹晓峰,邵黎勋. 5G+工业互联网应用实践[J]. 中兴通讯技术,2020,26(6):2-6.
- [7] 工业和信息化部办公厅. 工业和信息化部办公厅关于印发5G全连接工厂建设指南的通知[EB/OL]. [2023-01-09]. <http://edqg.org.cn/4/10246/912397>.

作者简介:

裴郁杉,毕业于北京邮电大学,高级工程师,博士,主要研究方向为通信感知计算一体化、5G+工业互联网;王友祥,高级工程师,博士,主要研究方向为5G/6G、工业算网等;黄蓉,毕业于北京邮电大学,教授级高级工程师,博士,主要从事移动网络架构及关键技术、边缘计算等领域研究工作;李瑞华,毕业于中国科学院大学,硕士,主要从事通信、感知、计算融合以及工业互联网等领域的研究工作。