



网络

面向智能制造的 5G 网络部署方案研究

沈鸿¹, 崔凌², 张天魁²

- (1. 中国电信股份有限公司北京分公司, 北京 100010;
2. 北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876)

摘要: 基于 5G 网络等新一代先进信息技术建设智慧工厂, 是赋能产业升级实现智能制造的重要途径。首先梳理了面向智能制造的 5G 网络典型应用场景和所需的 5G 网络性能指标, 然后分别从高容量大连接、高可靠低时延、5G 切片、toC/toB 隔离、网络安全等方面给出了 5G 网络具体部署方案, 为基于 5G 网络等先进信息技术开展的智慧工厂建设提供有益参考。

关键词: 智能制造; 5G 网络; 网络切片

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022116

Research on 5G network deployment scheme for intelligent manufacturing

SHEN Hong¹, CUI Ling², ZHANG Tiankui²

1. Beijing Branch of China Telecom Co., Ltd., Beijing 100010, China
2. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: Building smart factories based on 5G network and other new generation of advanced information technology is an important way for enabling industrial upgrading and realizing intelligent manufacturing. Firstly, the typical application scenario 5G network in intelligent manufacturing was analyzed and then the requirement of 5G network performance indicators was given. Based on these analysis, the specific deployment scheme of 5G network was design, including the high network capacity and large number of connections, high reliability and low delay, 5G slicing, toC/toB isolation and network security. The proposed 5G network deployment scheme provided a useful reference for the construction of smart factory based on 5G network and other advanced information technologies.

Key words: intelligent manufacturing, 5G network, network slicing

0 引言

制造业是国民经济的主体, 是立国之本、兴

国之器、强国之基。当今社会, 以数字化、网络化、智能化为本质特征的工业革命 4.0 正在兴起, 推动工业互联网加快发展已成为国家新战略。我

收稿日期: 2021-10-30; 修回日期: 2022-04-06

基金项目: 江西省“揭榜挂帅”关键技术攻关项目 (No.20213AAE01007)

Foundation Item: The Key Technology Research Project of Jiangxi Province (No.20213AAE01007)

国制定了 2025 年基本实现工业化、迈入制造强国行列的战略目标, 其中加快推动新一代信息技术与制造技术融合发展, 实现智能制造是推进生产过程智能化的重要途经。

智能制造的底层基础是实现各制造单元的设备互联, 为了建成一个信息充分交互的有机整体, 数据通信需要进一步延伸到设备、云端、用户等多个层面与维度; 数据通信系统在智能制造体系中起着承上启下的重要作用^[1]。工业无线网络具有灵活性和移动性强、安装便捷、易于扩展等诸多优势, 这些优势能很好地满足智能制造的通信需求^[2], 因此其成为实现智能制造优先选择的网络通信技术, 这也是继工业以太网后工业通信领域新的研究热点^[3]。在以 3C (computer, communication, consumer-electronics) 制造为代表的精密电子制造业、智能制造中以“个性化、定制化”为特点的柔性制造能够很好地解决传统量产产线无法满足小批量、多品种和高时效性的痛点。但柔性制造目前面临着两个问题: 一是柔性制造对“大带宽、超低时延、多接入、移动性”的需求难以用以太网+Wi-Fi 的组网方式满足; 二是具备高算力的设备, 例如服务器通常放置在企业数据中心, 对边缘侧一些需要高算力和时延敏感的任务显得力不从心^[4]。近年来, 迅速发展的 5G、人工智能 (artificial intelligence, AI)、边缘计算等新兴信息通信技术与工业操作技术不断融合^[5], 以 5G 为代表的通信技术, 可为工厂自动化、柔性化生产提供高可靠、大上行、低时延、有算力、能快速部署调整的网络, 被认为是工业数字化的有力引擎。5G 网络赋能智能制造, 通过对工业要素的互联互通、相关要素的深度协同, 可以实现设备管理精细化、生产过程一体化、企业管理标准化、分析应用数据化和决策支持科学化。

基于 5G 网络等新一代信息技术实现智能制造、建设智慧工厂过程中, 面临的关键技术难题包括:

- 永久在线的大连接: 在智慧工厂网络中, 需

要高密度传感器接入实现全生产要素实时监控, 终端分布可达每平方米内 10~100 个, 因此 5G 网络需要提供随时随地、无处不在的无线连接服务;

- 毫秒级时延: 智能制造行业种类多, 对网络时延的要求不尽相同, 在制造设备控制等应用中, 需要提供超高可靠性、毫秒级的时延用于保障实时的生产流程控制;
- Gbit/s 级别速率: 远程视频控制、基于虚拟现实 (virtual reality, VR)/增强现实 (augmented reality, AR) 的操作和人工智能应用对 5G 的带宽提出了 Gbit/s 的速率要求。

本文首先梳理了面向智能制造的 5G 网络典型应用场景和所需的 5G 网络性能指标, 然后分别从高容量大连接、高可靠低时延、5G 切片、toC/toB (to customer/to business) 隔离、网络安全等方面给出了 5G 网络具体部署方案, 为基于 5G 网络等先进信息技术开展的智慧工厂建设提供有益参考。

1 典型应用场景

智能制造典型应用场景包括视频监控、机器视觉、物流装备管控、数据采集和机器智能协作, 大部分应用场景对 5G 网络技术需求是综合性的, 其中普遍要求上行大带宽、低时延、高可靠、边缘计算。具体应用特征和性能指标要求如下。

视频监控主要用于安全生产方面, 例如通过在工厂门口安装 5G 高清摄像机, 同时结合 AI 人脸及测温技术, 对进出厂房的人员进行人脸、安全帽、人员密集度的自动识别, 实现厂区安全监控; 基于 5G 的高清视频结合云端 AI 识别技术, 可对工厂内人、机、料、法、环等数据进行实时监控, 自动识别危险施工、不规范作业、人员离岗、产线怠工、物料转运轨迹等, 提升工作效率。视频监控应用所需 5G 网络性能指标为: 单个终端上行速率大于 12 Mbit/s, 时延小于 50 ms, 并需要云、大数据存储、AI 算法训练支持。



机器视觉应用主要用于智能下料拣选、智能坡口、小件无人机加工、智能焊接、视觉自动组对、自适应喷涂、大型工件自动装配等生产环节，解决了工人劳动强度大、成本高，难以培养熟练工的难题。机器视觉应用所需要的 5G 网络性能指标为：单点位上行速率大于 240 Mbit/s，需要云、大数据存储、AI 算法训练支持。

物流装备管控应用主要包括工厂无人搬运车（automated guided vehicle, AGV）调度、厂区无人物流等应用场景。相应的 5G 网络性能指标为：满足 AGV 并发接入同时上行带宽达 5 Mbit/s/台，时延<50 ms；物流车调度信号稳定，上行带宽达 11 Mbit/s/台，时延<50 ms。

设备数据采集应用主要是通过传感器采集设备性能参数，如磨损、振动、电流、压力、温度、噪声等，以及通过设备控制系统采集设备运行状态数据，如限位开关、点位状态、位置值等。5G 网络性能指标要求为：上行带宽大于 2 Mbit/s/台，时延要求为 50~100 ms。

机器智能协作更加侧重工厂设备智能化工作，例如两台 AGV 利用 5G 的低时延实现快速联动，构建自动重载物流系统，实现超重、超大、超长物料自动配送及自动上下料，并和设备控制系统集成实现自动生产，时延要求小于 20 ms。

智能制造领域 5G 应用的典型场景与相应的网络性能需求见表 1。

2 5G 网络部署方案

针对上述典型应用场景和网络需求，本文给

出了面向智能制造需求的 5G 网络部署方案。所设计的部署方案实现了 5G 网络在生产制造、视觉管理、智慧物流、智慧园区、智能研发、智慧营销与服务等细分场景应用，贯穿业务全流程，以数据驱动智能应用，渗透到工业生产制造的每个环节，全面提升智能化水平，实现工厂生产制造“剪辫子”（5G 替代网线）、“去机房化”（算力上云）、“少人化”（AI 智能），推动“中国制造”向“中国智造”转型。部署方案主要思路为：首先，针对智能制造应用的数字化、在线化和智能化需求，构建低时延、大带宽、高安全的 5G 独立组网的定制网络与移动边缘计算（mobile edge computing, MEC）基础设施，以满足 5G 全连接工厂在业务隔离、网络时延、数据安全等方面的需求；其次，通过 5G+云+AI 的能力，构建可灵活部署、泛在接入、智能分析的全云化、数字化工厂，助力打造复杂作业过程智能分析、自动重载物流、切割下料无人化作业等工业互联网制造典型特色应用场景。面向智能制造的 5G 组网方案总体设计如图 1 所示，具体部署方案考虑高容量大连接、高可靠低时延、5G 切片、toC/toB 隔离、网络安全等方面需求。

2.1 高容量大连接的网络部署方案

为了满足智慧工厂中的大容量需求，5G 网络采用分布式大规模多入多出天线技术，单小区实现 64 发 64 收的分布式天线阵列，支持最多 16 个传输站点合并成一个小区，不同传输站点之间联合收发无干扰。同时，增加网络带宽，最大化频谱利用和提供极限容量能力。进一步，考虑智慧

表 1 5G 网络在智能制造领域典型应用场景

网络性能需求	视频监控	机器视觉	物流装备管控	数据采集	机器智能协作
上行大带宽	√	√		√	
下行大带宽					
低时延		√	√		√
高可靠		√	√	√	√
大连接				√	
边缘计算	√	√	√	√	√

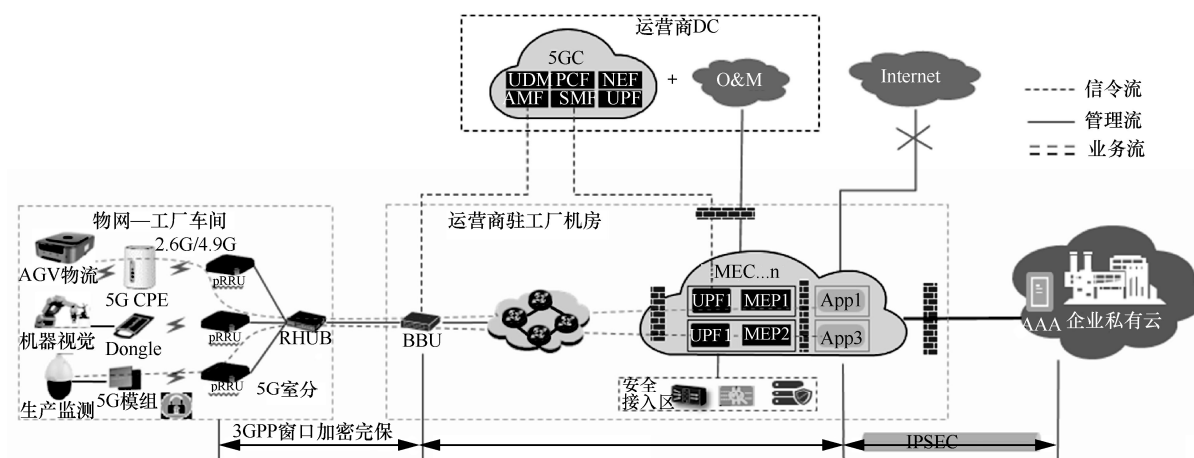


图1 面向智能制造的5G组网方案总体设计

工厂内复杂的传播环境带来的同频干扰问题，采用定向天线方式减少小区间的同频干扰，并减小天线倾角与发送功率，既保证首发大带宽覆盖又避免过高干扰。与4G网络部署相比，上述5G网络部署方案采用了分布式天线阵列部署且多个传输站点联合收发，解决了同频干扰的问题，很好的满足了智慧工厂高容量需求。

2.2 高可靠低时延的网络部署方案

在网络部署中，引入时延的主要因素包括：承载网的设备跳数和光纤长度影响平均时延大小，流量突发影响时延稳定性；无线空口调度及资源保障影响平均时延大小和时延稳定性。首先，考虑承载网时延。承载网的平均时延一般由设备跳数和光纤长度决定，时延可靠性也就是抖动主要受拥塞的影响；通过用户面功能（user plane function, UPF）下沉，能够有效地减少设备跳数和光纤长度，实现平均时延的降低；通过灵活以太网切片硬隔离不同的企业业务，能够有效确保企业业务不受其他类型业务拥塞的影响，从而确保时延的稳定性。然后，考虑空口时延部分。空口的时延和可靠性一般受资源抢占、调度效率、误码重传的影响比较大。因此，针对某一类低时延业务，可以基于5G服务质量（quality of service, QoS）特性进行低时延优化。首先通过GBR或者

RB预留的方式，保证低时延业务的资源保障；其次，通过预调度的方式，减少调度申请等待周期。该方案利用了5G UPF下沉和5G QoS保障能力，实现了智慧工厂中高可靠低时延的性能需求。

2.3 5G切片部署方案

根据3GPP规范，切片由S-NSSAI（网络切片选择辅助信息）来标识，对应差异化的SLA保障，独立的网络KPI监控。S-NSSAI包括SST、SD两部分信息。

SST（slice/service type）为必选字段，标识切片类型，由8 bit组成，取值范围为0~255，其中，取值0~127为协议定义的标准SST，标准SST全网通用；当前协议3GPP TS23.501中定义了4种标准SST，分别为eMBB、URLLC、mMTC、V2X，取值128~255为运营商自定义SST，仅在本运营商网络下有效。

SD（slice differentiator）：可选，对SST进行补充，进一步区分相同SST的多个切片，属于运营商定制的网络切片信息，一般运营商可根据区域、行业和公司等信息自定义SD。

S-NSSAI的字段标识有限，面对行业的千差万别的业务应用，运营商对该标识有自身的规划。目前对于制造企业S-NSSAI有一定的字段预留，具备细化至业务级别的能力。随着制造端侧设备



能力提升及行业业务应用发展,可按不同分区的业务类型为颗粒度,逐步独立配置 S-NSSAI,分配更多的制造业务切片。针对三一重工智慧工厂建设需求,本方案给出了业务级的切片划分,充分发挥了 5G 切片部署优势。

2.4 toC/toB 隔离方案

基于不同的 toC/toB 隔离需求,可以采用以下两种隔离方式。一种方式是通过跟踪区 (tracking area, TA) 隔离 toB/toC,这种方案实现了 toB/toC 用户的完全物理隔离, toC 用户不允许接入制造专网。另一种方式是通过切片隔离 toB/toC,这种方案主要应用在 toB/toC 用户共享制造全网的场景,为了防止 toC 用户影响 toB 用户的业务,可以给 toB 用户配置独立的切片,并且只允许 toB 用户接入该切片,通过切片来保障 toB 用户的网络体验。上述两种 toC/toB 隔离方案的具体实现方法如图 2 所示。基于切片实现的 toC/toB 隔离方案体现了 5G 切片部署优势,这是 4G 网络不具备的能力。

2.5 网络安全解决方案

智能制造专网的安全需求主要包括终端接入安全、边缘 MEC 安全、应用安全和防攻击等。

(1) 终端接入安全设计

终端分为两大类,分别是 5G 终端(如 5G 工

业网关、5G Dongle 和 5G 摄像机)和其他非 5G 终端(如普通摄像机、数采终端和 AGV 等可以通过连接 5G 工业网关来接入 5G 网络)。

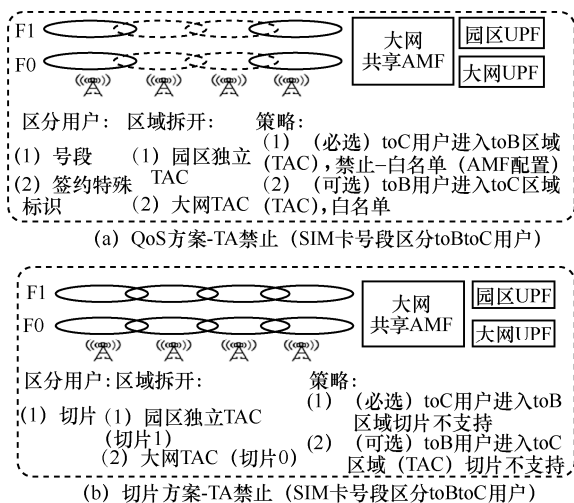


图3 toC/toB 隔离方案

1) 5G 终端接入安全

针对 5G 终端的接入安全,安全防护方案见表 2。

(2) 非 5G 终端接入安全

对于非 5G 终端接入 5G 工业网关,主要是可以通过在 5G 工业网关上进行相关配置支持如下安全防护方案:白名单认证;启用 Wi-Fi 鉴权加密;启用工业网关防火墙。

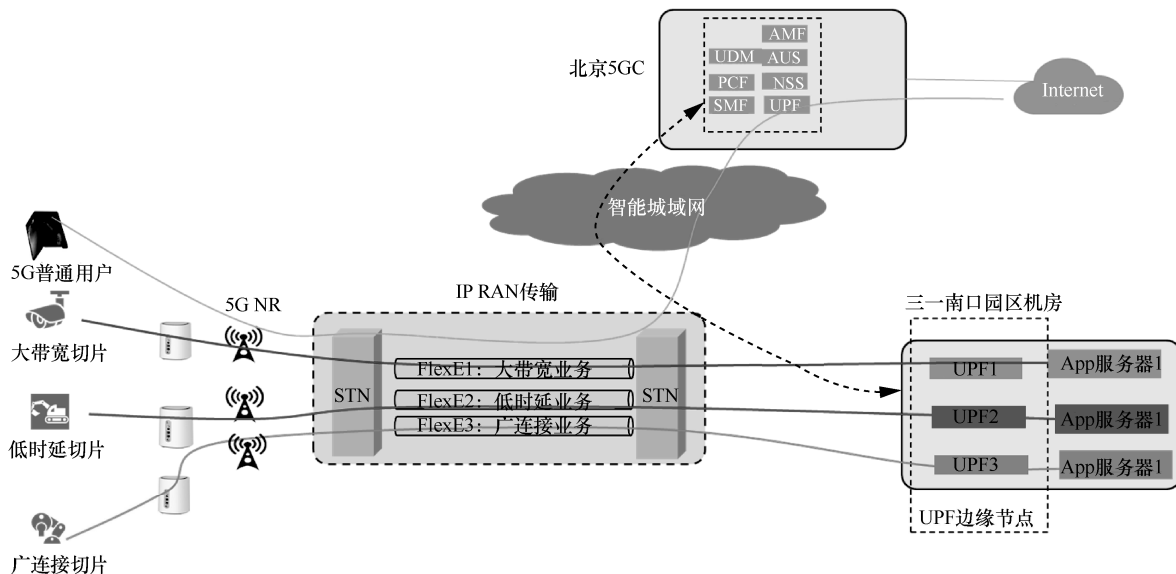


图2 5G 切片部署方案(三一重工智慧工厂建设案例)

表 2 5G 终端接入安全防护方案

方案	软件	硬件
双向鉴权和加密, 5G 网络缺省提供	现网 5GC (运营商)	现网 5GC (运营商)
位置控制, 通过 5GC 配置控制	现网 5GC (运营商)	现网 5GC (运营商)
切片接入控制, 通过 5GC 配置控制	现网 5GC (运营商)	现网 5GC (运营商)
二次认证, 通过企业 DN-AAA 控制	DN-AAA 软件 (企业)	DN-AAA 硬件 (企业)
专网业务访问控制, 通过企业 MSCG (多业务控制网关) 控制	MSCG 软件 (企业)	MSCG 硬件 (企业)

(3) MEC 安全设计

MEC 分区安全隔离, 实现由外向内的分层隔离与防护, 分别利用两个防火墙实现 MEC 外部攻击防护和 MEC 内部领域隔离。

上述方案充分考虑了智慧工厂建设过程中各应用场景的网络性能需求。其中, 基于分布式天线阵列部署的高容量部署方案满足了视频监控、机器视觉和数据采集类业务的上行大带宽需求; 高可靠低时延部署方案为机器视觉、物流装备管控、数据采集和机器智能协作等业务应用提供了保障; 5G UPF 下沉和边缘计算部署则满足了智能制造典型应用的计算处理能力与快速响应能力需求。上述方案用于三一重工智慧园区实际部署, 实现了工业制造与新一代信息技术的结合, 推动了智能制造的发展。

3 结束语

5G 网络赋能智能制造, 通过对工业要素的互联互通、相关要素的深度协同, 可以实现设备管理精细化、生产过程一体化、企业管理标准化、分析应用数据化和决策支持科学化。面向智能制造典型应用的 5G 网络部署面临海量终端连接、毫秒级别时延、Gbit/s 级别速率等挑战。本文分别从大容量大连接、高可靠低时延、5G 切片、toC/toB 隔离、网络安全等方面给出了 5G 网络具体部署方案。所提方案已经用于三一重工智慧园区实际部署, 同时也将为后续其他智慧工厂建设提供有益参考和可行方案。

参考文献:

- [1] 李小敏. 面向智能制造的工业无线网络服务质量优化关键技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
LI X M. Research on key technologies of quality of service optimization for industrial wireless networks in intelligent manufacturing[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [2] BONAVALONTÀ F, TEDESCO A, MORIELLO R S L, et al. Enabling wireless technologies for industry 4.0: state of the art[C]//Proceedings of 2017 IEEE International Workshop on Measurement and Networking (M&N). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-5.
- [3] DRATH R, HORCH A. Industrie 4.0: hit or hype?[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2014, 8(2): 56-58.
- [4] 沈云, 丁鹏, 薛裕颖, 等. 基于 5G 边云协同的柔性智能制造技术方案[J]. 移动通信, 2021, 45(2): 18-23.
SHEN Y, DING P, XUE Y Y, et al. Flexible intelligent manufacturing technology solution based on 5G edge-cloud collaboration[J]. Mobile Communications, 2021, 45(2): 18-23.
- [5] 中国工业互联网产业联盟. 工业 PON2.0 白皮书[R]. 2020.
Alliance of Industrial Internet. Industrial PON 2.0 white paper[R]. 2020.

[作者简介]



沈鸿 (1977—), 女, 中国电信股份有限公司北京分公司科技创新部总经理助理、高级工程师, 主要研究方向为 IP 城域网/承载网、云数据中心网络、CT 云等云网领域规划和运营管理。

崔凌 (2000—), 男, 北京邮电大学信息与通信工程学院硕士生, 主要研究方向为工业互联网、边缘计算等。

张天魁 (1980—), 男, 北京邮电大学信息与通信工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为工业互联网、边缘计算、无人机通信网络等。