5G 网络切片技术在工业互联网中的应用与优化研究

张志霞
广东理工学院，广东 肇庆 526100

DOI: 10.61369/TACS.2026080010

摘　　要： 为推进5G与工业互联网深度融合，本文探究5G网络切片技术在工业场景的应用价值与落地可行性。该技术可对物理网络进行虚拟划分，生成适配增强移动带宽、海量物联、超可靠低时延等差异化需求的网络切片，能够匹配工业精密操控、高清传输、海量数据交互等严苛网络要求。实践表明，5G网络切片可有效赋能智能工厂生产优化、工业设备远程管控与工业数据分析传输，能够优化生产流程、降低运维成本、精准调配网络资源、提升网络利用率与生产效率，同时可依托边缘计算进一步提速数据处理。5G网络切片技术可提供低时延、高可靠、大带宽的定制化工业网络服务，有效弥补传统网络的应用短板，是工业互联网智能化升级的重要支撑，具备广阔的行业应用与发展前景。

关 键 词： 5G网络切片技术；工业互联网；场景应用；网络优化

Research on the Application and Optimization of 5G Network Slicing Technology in the Industrial Internet

Zhang Zhixia
Guangdong Polytechnic College, Zhaoqing, Guangdong 526100

Abstract: To promote the deep integration of 5G and the Industrial Internet, this paper explores the application value and practical feasibility of 5G network slicing technology in industrial scenarios. This technology enables the virtual partitioning of physical networks to generate network slices that accommodate differentiated requirements such as enhanced Mobile Broadband (eMBB), massive Internet of Things (mIoT), and Ultra-Reliable Low Latency Communications (URLLC). These slices can meet stringent industrial network demands, including precision control, high-definition transmission, and massive data interaction. Practices indicate that 5G network slicing can effectively empower the production optimization of smart factories, remote control of industrial equipment, and industrial data analysis and transmission. It optimizes production processes, reduces operation and maintenance (O&M) costs, precisely allocates network resources, and improves both network utilization and production efficiency. Furthermore, relying on edge computing, it further accelerates data processing. By providing customized industrial network services with low latency, high reliability, and large bandwidth, 5G network slicing technology effectively compensates for the application shortcomings of traditional networks. It serves as a crucial support for the intelligent upgrading of the Industrial Internet and possesses broad prospects for industry application and development.

Keywords: 5G network slicing technology; industrial internet; scenario application; network optimization

引言

当前5G技术已逐步从标准落地走向规模化商用，但现有商用网络仍难以完全适配工业互联网的差异化严苛需求。工业生产场景对网络性能指标呈现两极化要求：工业自动控制、精密设备协同作业等场景对时延与稳定性要求极高，基于R15版本的商用5G网络端到端时延普遍超过10ms，无法满足汽车制造等行业毫秒级运动控制需求，设备时钟偏差还易引发生产动作紊乱；而机器视觉质检等场景则需要大带宽支撑海量检测数据的高速传输。相较于4G网络可适配工业低时延确定性传输的性能优势，现阶段通用5G网络难以兼顾工业场景的低时延、高可靠、大带宽多元需求。在此背景下，5G网络切片技术成为衔接5G通信技术与工业互联网深度融合的关键纽带，可通过定制化网络资源配置，精准匹配不同工业场景的差异化通信需求，为智能制造升级提供核心网络支撑。

课题信息：2025年广东理工学院校级科技项目（2025YBZK019）、2025年广东理工学院校级科技项目（2025YBZK022）。

作者简介：张志霞（1979.06—），女，汉族，广东省肇庆人，硕士研究生学历，就职于广东理工学院信息技术学院，计算机科学与技术副教授，主要从事计算机网络与通信方面的教学工作。

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

一、5G 网络切片技术概述

5G 网络切片技术是5G 通信系统的核心关键技术之一，核心原理是将单一的物理5G 网络，通过虚拟化、软件定义网络等技术进行逻辑划分，切割出多个相互独立、隔离可控、可按需定制的虚拟子网络。各网络切片共享底层物理网络硬件资源，但在逻辑层面相互独立，带宽、时延、可靠性、算力等网络参数可根据业务场景需求单独配置、动态调整，不会出现业务相互干扰的情况，有效解决了传统单一物理网络难以适配多场景差异化通信需求的痛点。

相较于传统网络，5G 网络切片具备定制化、高可靠、低时延、强隔离、可动态调度的核心特性。技术可依据不同行业、不同业务的传输标准，精准匹配超可靠低时延、超大带宽、海量物联等差异化网络能力，既能满足工业精密控制毫秒级超低时延、超高可靠性的严苛要求，也可适配高清传输、大数据量交互的高带宽需求。同时，独立的切片隔离机制能够有效规避数据篡改、窃取及非法访问风险，大幅提升数据传输的安全性与稳定性，为工业互联网、智能生产、远程管控、AR 工业赋能等多元化工业场景提供专属、优质的网络支撑，是5G 技术深度赋能工业数字化、智能化转型的核心基础。

二、5G 网络切片技术在工业互联网中的应用难点

（一）资源分配僵化与动态适配难

尽管所使用人工智能及多目标模糊优化算法是针对资源分配设计的，但在实际工业互联网场景下，由于业务需求具有不稳定性以及瞬态变化等特点，这对定量化或部分动态化分配策略提出了巨大挑战。现有网络监视方法仅关注单一设备或某一层次，未实现端到端可视性，存在感知“盲点”。尽管已有基于数字孪生体及贝叶斯推断的应用方案，但在动态化程度较高的工厂场景中，数字孪生体与物理实体的实时映射可能存在延迟，导致无法对切片进行实时感知，进而引发控制指令丢失或者时延增加，是现在资源配置最大的难点。不过通过参考工业制造网络数字孪生的应用经验，以5G、物联网为触点和抓手，借助交互式网络可视化技术，实现数据驱动和实时反馈的双向闭环控制，这是解决此类实时映射延迟问题的可行方向；同时数字孪生技术本身具备实时上传硬件设备数据、全面监控流水线运行状态的能力，通过优化数据传输与处理环节，可降低延迟带来的负面影响。

（二）难以提前判断和定位故障点

现有网络监视方法仅关注单一设备或某一层次，并未实现端到端可视化，存在监测“盲点”。虽然已有基于数字孪生体及贝叶斯推断方法的应用，但在动态化程度较高的场景中，依托虚拟化技术实现的逻辑隔离虽解决了网络切片问题，但存在延迟情况，导致无法对切片进行实时感知。而传统的 IP 仍面临较大的物理层面旁路攻击威胁，在工业应用层面，业务达成度缺乏跨层级的相关性分析体系支撑，运维人员难以提前判断和定位故障点，“监测－分析－优化”的闭环流程无法得到有效自动化。

（三）逻辑隔离脆弱与侧信道攻击风险

虽然基于虚拟化技术实现了逻辑隔离，解决了网络切片的问题，但是由于其共享公共的底层资源（如 CPU、缓存、频谱带宽等），仍面临着较大的物理层面的旁路攻击威胁。引入零信任架构会面临性能开销以及互操作性等问题，曾有观点认为过于复杂的加密机制会增加时延，不利于实时业务，但曙光云携手四川农商联合银行在金融级核心业务系统的实测数据显示，引入全链路加密、可信执行环境及硬件级根信任校验等高阶零信任安全能力后，核心交易链路的吞吐能力、响应体验及资源占用等核心性能指标均表现稳健，验证了安全能力内生下的业务连续性；而对于不同安全等级的系统，相互之间功能不关联互助、信息不共享互换的“信息孤岛”（包括数据孤岛、系统孤岛等多种形式，如“管理孤岛”）是其显著特征。如今零信任架构已然成为当下企业最好的网络安全选择，但存在配置失误的现象。一旦攻击流量进入网络内部，又该如何保证其不能从一个环节扩散？由于缺乏统一标准的接口以及多语言适配能力，产线与云平台之间无法实现平滑迁移。

（四）跨域协同壁垒与异构资源孤岛

工厂场景复杂多样，存在多台不同厂商的机器设备、5G+TSN/Wi-Fi 6等异构技术，这些因素导致异构域间资源调度效率不高，正如中国信通院数据显示，我国计算力水平位居全球第二，处于领跑者国家行列。截至2022年底，我国在用数据中心机架总规模超过650万标准机架，算力总规模达到180百亿亿次/秒，且增速排名第一，但算力输送效率仍存在不足，算力网络运载力还有提升空间。同时，端、边、云三者计算架构、开发模式存在较大差异，应用必须多次开发和部署，进一步制约了调度效率，难以满足大规模工业互联应用对低时延和高可靠性的整体需求。

现有的网络架构却无法兼容支持。由于缺乏统一标准的接口以及多语言适配能力，产线与云平台之间无法实现平滑迁移。虽然区块链技术和边缘技术被寄予厚望，但目前在应用中还存在诸多难点，例如跨域信任机制不完善、边缘节点负载均衡策略待优化等，亟须通过针对性研究来提升边缘计算效率。以上这些限制导致异构域间资源调度效率不高，难以满足大规模工业互联应用对低时延和高可靠性的整体需求。

（五）协议互通障碍与融合部署困难

传统工业以太网与 5G 切片技术融合存在 “水土不服”。现有的工业网关无法保障5G 空口不稳定的接口与 TSN 固定式接口之间的映射关系，尤其是时间对齐（如5G 到 IE-1588）切片资源分配优化的核心是将不同类型的业务灵活适配至对应网络切片，确保各类业务的需求得到满足。“切片”资源分配优化的基本思想就是针对各种各样的业务类型采取不同的处理方式，在工业互联网领域，一方面需要非常高的精度以满足严苛的时延要求，比如运动控制领域的数控机床、激光切割等精密加工设备通常要求控制指令传输时延低于1ms，位置同步误差需控制在微米级，时延增加会导致加工精度急剧下降；工业机器人集群作业时，时延超过2ms 就可能引发“相位差”，造成动作紊乱，汽车焊接生产线就

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

是典型应用场景，以此来完成闭环控制任务；另一方面又需要借助动态带宽分配机制来提供充足的上行带宽，像 DBA 机制就能在微秒或毫秒级的时间间隔内完成上行带宽的动态分配，以此支持每秒 GB 级别的上行带宽需求，保障视觉质检工作开展。

通过监控生产线上的各项业务活动，针对不同业务类型采取差异化处理方式，在工业互联网领域内，一方面需要非常高的精度以达到微秒级时延抖动的要求来完成闭环控制任务，毕竟工业场景下时延直接关系到生产安全、设备精度和系统稳定性，超低时延传输技术更是支撑智能制造等关键应用的基础性技术；另一方面又需要极大的容量才能提供每秒 GB 级别的上行带宽支持视觉质检工作。因此，要实现资源利用率最大化与成本最低化。

工业互联网各场景的网络需求各不相同。比如智能工厂生产过程需低延迟、高可靠性的网络切片，工业大数据传输则对大带宽有需求。在大流量（eMBB）场景之间合理分配计算能力、存储能力和频率等资源。5G 网络切片可根据各类应用的不同需求合理调配有限的网络资源，从而实现资源利用率最大化与成本最小化。工业互联网各场景的网络需求各不相同，比如智能工厂生产过程要求低延迟、高可靠性，但传统网络监测存在明显的滞后性与局限性，比如作为传统网络拥塞监测手段的 AQM，其反映的是一段时间之前的网络状况，当拥塞信息反馈至发送端时还会增加额外延迟，响应相对滞后于实际网络状况。因此需要在5G 切片中实现端到端的透明度。当前我国5G 行业虚拟专网已形成规模化发展态势，企业对其网络服务质量要求更高，远程控制、视频传输等典型应用场景对时延等指标都有差异化需求，而5G 系统的复杂性又使得传统网络运维方式已经无法满足需求，建立这样的全链路遥测机制正是为了解决传统网络监测的不足。将网络参数指标作为约束条件，构建出一个资源分配的目标函数，进而得到相应的计算模型。

三、5G 网络切片技术在工业领域的应用优化

（一）智能工厂生产流程优化

5G 网络切片技术可提供个性化的网络服务，在智能工厂的不同生产阶段提供灵活、高效的支持。工业生产不同环节对网络数据传输有着差异化的要求。比如工业制造中的流程自动化控制，端到端时延要求50ms，机械臂这类运动控制的端到端时延要求更是在1ms 左右，同时还需要达到95% 的区域时延 <20毫秒、丢包率 <0.1% 的高稳定性标准；而质量检查则主要依靠大数据量传输。对于工业设备远程监控、控制来说，在5G 网络切片技术支持下能够建立专门用于工业设备通信的网络通道，且5G 针对这类传输时延严苛的场景最低时延可低至1ms，能更好地匹配工业控制的需求。

5G 网络切片技术可将物理网络切割为具有超可靠低时延通信特性的虚拟网络片层，能根据不同场景的需求灵活定制网络特性，确保每个应用场景都能获得最优的网络性能。比如山东移动联合爱立信在德州音乐节商用的5G-A 网络切片，实测端到端时延控制在100ms 以内，支撑了超高清直播、实时视频分享以及 AI 眼镜即时交互等高带宽、低时延需求场景，这也印证了5G 网络切片可基于多种新技术组合，将所需的网络资源灵活动态地在全网中面向不同的需求进行分配，以极低的时延、极高的可靠性等，满足不同应用场景对网络的要求。同时，该技术作为5G 多重安全措施之一，可有效防止数据窃取、篡改和未经授权的访问，在密集型制造厂或大型物流仓库中，即使大量传感器、机器人、自动化设备同时在线，也能保证工业设备之间实现实时性以及安全性要求下的数据交互，降低因网络故障引发的生产中断风险。工业设备的远程监控及控制依赖稳定可靠的网络环境，需将设备状态信息实时发送至相关终端，供工作人员查看与处理。

（二）工业设备远程监控与控制

对于工业设备远程监控、控制来说，在5G 网络切片技术支持下能够建立专门用于工业设备通信的网络通道，从而保证工业设备之间的数据传输，进而有效避免数据传输卡顿现象的发生。比如在汽车制造工厂中，5G 网络切片技术与边缘计算技术相结合，使机器人协同作业的时延从200ms 降至5ms；在钢铁产线中，边缘 AI 算法结合相关技术让响应速度较云端处理提升10倍，同时边缘计算与工控机的深度结合还能将关键控制响应时间从秒级压缩至毫秒级别，实现对机器的实时精准操控。传统网络一般存在带宽不够或者网络延迟过高等问题，导致其难以满足上述应用中的实际工作需求。借助5G 网络切片技术，可以对每台工业设备分配一个独立的网络切片，促进工业大数据的高速度、高效率传输，这是发展工业互联网的重要要求。

在此方面，5G 网络切片可将一个物理网络切割成多个逻辑独立的虚拟网络，针对工业互联网高清视频实时传输、海量物联动态示踪、低时延精密操控等场景，虚拟出分别具备增强移动带宽、海量物联、超可靠低时延通信特性的网络片层，为工业互联网提供高可靠、低延迟、大带宽的专属网络服务。比如工业5G 独立专网通过该技术可将时延控制在1毫秒级，可靠性提升至99.9999%，三一重工“灯塔工厂”借助相关网络服务连接2000余台设备，实现生产效率提升98%、质量缺陷率下降30%，有效保障工业大数据在短时间内准确传递，满足工业生产对数据传输、控制和协作的需求。目前我国“5G+ 工业互联网”项目数超过1万个，已融入97个国民经济大类中的74个，该技术的应用正持续赋能工业生产。随着现代工业生产持续发展，在实际生产中及时收集并高效处理海量信息的需求愈发迫切，然而传统网络技术受带宽不足、时延过长等问题限制，难以胜任工业大数据的传输工作。随着现代工业生产的不断发展，在高频段毫米波等技术的支持下，能够实现数 Gbps 甚至更高的数据传输速率。深圳试点的毫米波网络峰值速率可达10Gbps，下载一部50GB 的4K 电影仅需40秒，是4G 网络的100倍；其频谱带宽可达800MHz，是 Sub-6 频段的8倍以上，能为工业大数据传输带来质的飞跃，更好适配工业互联这类高密度通信场景。可有效解决传统网络时间延迟过长、无法高效完成工业大数据传送的问题。

5G 网络切片技术可以将网络资源进行逻辑划分，并且在其中给工业大数据的传输设置一个单独的网络切片，而在传统供应链管理模式中，信息往往分散在各个环节，从供应商、制造商、

 Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

分销商到零售商，信息传递存在延迟且容易出现偏差，导致各环节间沟通配合不畅，进而引发库存堆积、断供等一系列运营失误问题。5G 网络切片技术允许建立多个虚拟网络以满足特定业务需求，可将供应链各环节划分至专属网络切片，保障通信稳定可靠，实现数据实时交互，从而加强货物状态的实时追踪，提升供应链透明度，优化库存管理。目前，供应链各个环节的信息能够实时、有效分享，且达到良好的协同效果。

而在传统模式下的供应链管理过程中，由于信息传递存在延迟性和缺失性，导致各个链条之间缺乏有效的沟通配合，从而出现一系列问题，如库存堆积或断供等。5G 网络切片技术可以将供应链中的不同部分划分到各自的网络切片上，保证其在通信过程中不会出现任何问题，并且能够实现及时的数据交换。“5G 网络切片 + 工业互联网”方案利用这种技术来解决相关问题，将网络切片技术与数据结合，利用5G 网络切片提供的高质量服务来实现这些功能，这是十分必要的。在工业维修、培训或设计等方面，该技术可以帮助人们跨越地理距离和行业界限进行网络资源调配，为全球化下的供应链管理带来便利，降低企业经营费用，增强企业自身竞争力。

（三）工业增强现实（AR）应用

工业增强现实的应用对网络有着低时延、大带宽的明确需求，参考资料显示工业 AR 实时作业对5G 网络的需求包括低时延、大带宽等，而5G 增强型移动宽带的超低时延 (<10 毫秒) 可满足工业场景的实时性要求，同时通过网络切片技术，5G 能提供隔离且稳定的高质量网络服务，因此利用5G 网络切片来支撑工业增强现实的应用是十分必要的。在工业5G-A 网络切片技术支持之下，AR 设备能够依托端到端时延控制在100ms 以内、上行速率可达126Mbps、下行速率达398Mbps 的网络性能，快速完成大量信息的传送与分析处理。

正如山东移动联合爱立信在德州音乐节的商用案例中，部分观众使用 AI 眼镜终端，通过拍照就能即时获取舞台艺人信息、演出时间等推送内容，流畅的交互体验让使用者获得了良好的增强现实效果。AR 应用程序对网络性能要求极高，在实时渲染或交互过程中，哪怕出现极细微的时间差，都会导致用户体验感大幅降低。所以，基于5G 的网络切片技术会单独给 AR 应用一个切片，以保证它具有很低的时间延迟和很大的带宽。如在网络切片技术支持下，AR 设备可以在几秒钟之内传送并分析处理大量信息，让使用者获得良好的增强现实效果。除此之外，基于5G 网络切片还可以根据实际需要为 AR 应用程序提供相应的资源配置，并且能够对其进行相应的调节，进而使得其具有更好的运行状态。

四、总结

本文围绕5G 网络切片技术在工业互联网中的应用展开研究，阐述了该技术可通过网络逻辑划分，按需提供低时延、高可靠、大带宽的定制化网络服务，有效适配智能工厂生产优化、工业设备远程管控、工业 AR 交互等多元工业场景，能够提升生产效率、优化资源配置、完善供应链协同，是5G 与工业互联网深度融合的核心支撑。虽然5G 网络切片赋能工业数字化转型价值显著，但仍需攻克安全、协同、适配等技术难题，持续优化技术方案，充分释放其在工业互联网领域的应用潜力。

参考文献

[1] 冯毅雄；杨晨；胡炳涛；赖颢善；石莹；宋光敏；汪勇；谭建荣 . 基于5G 多接入边缘计算的云化 PLC 系统架构设计与应用 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报 ,2024,36(1):33-46.

[2] 钟橙；张燕；唐怀坤 . 工业互联网中5G 切片技术浅析 [J]. 数据通信 ,2021,(1):10-12.

[3] 谭翔天 .5G+ 工业互联网场景下网络切片技术的应用研究 [J]. 通信电源技术 ,2023,40(6):125-127.

[4] 蒋建峰；张运嵩；张娴；张趁香；安淑梅 . 基于 Bayes 评估的5G SA 网络切片安全映射算法 [J]. 南京信息工程大学学报（自然科学版）,2022,14(5):527-534.

[5] 张娅；刘红；程玉松 .5G 网络切片面向工业互联网的技术实践 [J]. 电信工程技术与标准化 ,2021,34(4):34-39.

Copyright © This Work is Licensed under A Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.