

5G 无线网络在智慧工厂中的覆盖优化与时延控制研究

韩祺

中国电信股份有限公司杭州分公司，浙江杭州，310020；

摘要：随着工业互联网的快速发展，5G 无线网络已成为智慧工厂数字化转型的关键基础设施。本文针对智慧工厂复杂环境下的 5G 网络覆盖优化和时延控制问题展开系统性研究，分析了 5G 在工业场景中的独特需求及技术挑战，提出了利用 5G LAN 技术与确定性网络、采取端-边-云协同架构等覆盖优化策略，介绍了多种时延控制技术，旨在为智能制造提供强有力的通信网络保障。

关键词：5G；无线网络；智慧工厂；时延控制

DOI：10.69979/3029-2727.26.01.074

引言

制造业是国民经济的主体，推进智能制造是实现制造业转型升级的关键路径。作为智能制造的核心载体，智慧工厂正推动传统生产模式向数字化、网络化、智能化方向转变。在这一过程中，稳定可靠的网络连接已成为生产要素互联互通的基础保障。传统工业网络多采用有线方式，存在布线复杂、灵活性差、维护成本高等问题，难以适应现代工厂对柔性制造和快速响应的需求，而第五代移动通信技术（5G）凭借其高带宽、低时延、广连接的技术特性，为智慧工厂建设提供了全新的网络解决方案。系统分析覆盖优化和时延控制的技术路径，可为 5G 在工业领域的规模化应用提供理论参考和实践指导。

1 智慧工厂对 5G 网络的需求

智慧工厂的生产环境包含多种通信场景，不同业务对 5G 网络的性能需求存在显著差异。从原材料入库到成品出库的全生产链条中，数据采集、设备控制、质量检测、物流仓储等环节构成了一个复杂的通信生态系统。越来越多的事实都已经证明，传统“尽力而为”的网络服务模式无法满足工业控制的确定性要求，智慧工厂需要 5G 网络提供可保障、可预期、可管理的通信服务质量。

在典型的智慧工厂中，业务需求可大致分为三类：一是高可靠低时延业务，如实时闭环控制、运动协调控制等，要求时延低于 10 毫秒，可靠性超过 99.99%；二是机器视觉检测、高清视频监控等大带宽业务，该类业务需要上行带宽超过 100Mbps；三是海量连接业务，如大规模传感器数据采集，需支持每平方公里百万级的连接密度。这些业务通常共存于同一工厂环境中，但需要不同的网络质量保障^[1]，对 5G 网络的资源调度和隔离能力提出了极高要求。

以中国移动为某电池股份有限公司打造的 5G LAN

专网智慧工厂为例，该企业专注于环保型锌锰电池的研发生产，传统工业网络面临组网复杂、响应迟缓等困境。部署 5G LAN 技术之后，工厂实现了设备即插即用，免去了复杂的路由器配置，产线调整时间相比传统方式缩短了 60%，且生产现场的网络延迟从过去的 20-30 毫秒降低到 10 毫秒左右，显著提升了数据传输效率与生产实时性。这一案例充分表明，5G 网络能够有效满足智慧工厂对柔性制造和快速响应的需求。

在铝业制造领域，某铝业公司与中国移动合作建设“5G+AI”智慧工厂，取得了巨大成效，设备数据采集、生产过程管理、高精度自动称重和 AI 表面缺陷质检等都已实现。通过 5G 技术的部署，企业有效打破传统网络的局限，实现了设备数据的稳定高速传输和远程实时监控，网络稳定性和安全性提升超过 50%。AI 表面缺陷质检系统能够精准识别铝卷表面 7 种缺陷，质检准确率提高到 95%以上，缺陷检出反应时间缩短至 0.5 秒。这些应用不仅提升了生产效率，也展现了 5G 网络在支撑高质量工业应用方面的潜力。

2 5G 无线网络覆盖优化策略

2.1 应用 5G LAN 技术与确定性网络

5G LAN 技术是 3GPP R16 标准引入的重要特性，它允许 5G 网络模拟以太网 LAN 的通信行为，支持终端之间的二层通信和组播业务。在智慧工厂环境中，5G LAN 能够实现设备即插即用，免去复杂的路由器配置，极大提高了网络部署效率。尤其是在产线频繁调整的柔性制造场景中，应用 5G LAN 可以实现设备的快速无线组网，使设备间实现高效、实时通信。浙江某电池企业的实践表明，采用 5G LAN 技术后，产线调整时间相比传统方式缩短了 60%，显著增强了生产系统的灵活性。

对于工业控制等关键业务，普通 5G 网络难以提供足够的服务质量保障。在此背景下，就要应用 5G 确定性网络。凭借资源预留、流量调度和优先级管理机制^[2]，

5G 确定性网络能够提供可预期的网络性能,包括时延、抖动和可靠性。中国电信天翼物联面向工业生产核心环节,自主研发了 5G 确定专网,提供 10 毫秒低时延、可靠性达到 99.99%,以及百微秒级低抖动、高可靠性达到 99.999%等确定性网络服务。这种确定性网络能力满足了工业车间级、产线级的自适应时延、抖动、可靠等确定性需求,有效推动了 5G 从外围辅助环节向生产核心环节规模应用。

2.2 采取端-边-云协同架构

智慧工厂中的业务具有不同的计算和存储需求,若能利用端-边-云协同架构的合理分配计算任务,就可以有效平衡业务时延和数据处理效率。在该架构中,云端负责海量数据的长期存储和复杂算法模型的训练;边缘计算节点部署在工厂附近,处理实时性要求高的本地业务;终端设备则负责采集数据和执行控制指令。

某“5G 全连接工厂”是端-边-云协同应用的典范。该项目将 UPF(5G 核心网用户面功能)下沉至园区,实现端到端时延 ≤ 10 毫秒的高可靠数据传输,并部署 MEC 边缘计算节点,每秒可处理 20 万点传感器数据。在边缘节点进行实时数据处理和分析的基础上,工厂实现了风冷、液冷、船舶电池三种不同型号产品的柔性生产,仅需 30 分钟即可在一条生产线上完成从磷酸铁锂电芯切换到钠离子电芯生产所需要的全部调整准备工作。

2.3 优化网络规划

智慧工厂的环境复杂性给 5G 网络覆盖带来了严峻挑战。厂房内金属结构密集,各种机械设备都可能会对无线信号产生严重遮挡和反射,容易形成覆盖盲区和干扰区域。针对这些挑战,需要采用专业的网络规划软件和优化策略,实现精准覆盖。

先进的网络规划软件能够基于工厂的三维结构模型,模拟电磁波传播特性,预测信号覆盖情况,自动生成最优的基站部署方案。这些软件通常包含自动拓扑建模、多协议混合组网、带宽与时延在线仿真等功能^[3],能够有效指导 5G 网络部署。在实际应用中,进行软件规划可使项目周期缩短 30%以上,网络故障率下降 40%,设备接入效率提升 50%。

在我国西北地区某纺织厂的 5G 改造项目中,技术团队针对厂房特点,采用“分层覆盖、多频协同”的策略,在设备密集区域部署 5G 小型基站,结合波束成形技术,精准定向覆盖关键生产区域。同时,为每台纺机加装 5G 物联网数据采集终端,搭建起端-边-云一体化平台,实现全流程数据采集监控。项目落地后,吨纱成本下降 368 元,年省 736 万元,年节约电费 360 万度,生产效率提升 15%,质量检测效率提高 50%,产量统计

工作量减少 75%。

3 智慧工厂中的时延控制技术

3.1 时延构成分析及控制挑战

5G 无线网络中的时延主要由传输时延、处理时延和排队时延三部分构成。传输时延是数据在空气中传播所需的时间;处理时延包括基站和终端对数据的编码、调制和解调等处理过程;排队时延则源于网络节点的调度和缓存机制。在智慧工厂的实际环境中,时延控制面临多重挑战:一是无线信道的随机性导致时延波动较大;二是不同业务流的共存导致资源竞争;三是网络设备异构性增加了端到端时延优化的复杂度。

工业过程控制对时延极其敏感,以运动控制为例,当网络时延超过系统稳定阈值时,会导致控制性能下降甚至系统失稳。5G-A 网络作为 5G 的演进版本,对工业互联网智能工厂超低时延控制起到更好地支撑作用。以核心网、传输网、无线接入网多层面为维度对基础架构优化,可以满足超低时延的要求,支撑实时精准控制、海量数据交互、设备协同运作及生产流程动态优化等工业应用。

3.2 抗时延智能控制方法

针对 5G 无线网络时延随机性强的问题,学术界和产业界提出了多种抗时延智能控制方法。其中,基于数据驱动信号补偿器与 PID 控制器结合的抗时延控制器表现尤为突出。该方法利用深度学习算法预测网络时延变化趋势,利用前馈补偿机制消除时延对控制系统的影响。与传统的时延补偿方法相比,数据驱动的方式不需要建立精确的网络模型,更能适应复杂的工厂环境。另一种创新方法是数字孪生与强化学习相结合的控制参数自优化算法。该方法构建与物理对象一致的虚拟模型,在数字空间中进行大量强化学习训练,寻找最优控制器参数,然后将这些参数应用于物理控制系统^[4]。在不影响实际生产的情况下进行控制器优化,避免了试错成本,同时能够适应系统动态变化,此为该种创新方法的优势。

在某纺织厂的实践中,5G 全连接平台集成了预测性维护功能,能够基于实时数据分析和机器学习算法,提前预警设备故障。“以前机器坏了才修,现在快坏了就知道”,一位老师傅如此评价。预测性维护机制本质上也是一种时延控制策略,其通过对故障预警时间的精准控制,将设备维护从被动应对转为主动预防,使停机次数缩减 80%以上。

3.3 面向业务特征的差异化时延保障机制

在智慧工厂中,不同业务类型对时延的要求存在显著差异。运动控制类业务通常要求毫秒级的确定性时延,

而工业视觉检测业务则对时延的抖动更为敏感。为此,需要构建面向业务特征的差异化时延保障机制。首先,基于业务 SLA(服务等级协议)的流量分类技术能够根据数据包的源地址、目的地址和应用类型等信息,将网络流量划分为多个优先级类别。对于关键控制业务,可采用预配置的专用信道资源,避免与其他业务竞争无线资源。

其次,基于时隙的调度机制能根据高优先级业务分配固定的传输时隙,确保其获得确定性的传输机会。该机制需要基站侧实现精细化的时隙调度算法,在保证高优先级业务时延的同时,兼顾普通业务的公平性。此外,根据业务对时延的敏感程度,业务感知的缓存管理策略能够动态调整数据包在各级节点的缓存时间,对于时延敏感业务采用更积极的丢弃策略,避免因缓存过长导致时延超标。

3.4 跨域协同的端到端时延优化框架

智慧工厂中的端到端时延涉及无线接入网、传输网和核心网多个域,单一域的优化难以实现整体时延的最小化。跨域协同的时延优化框架利用统一的控制平面来实现多域资源的联合调度。在无线接入侧,缩短传输时间间隔(TTI)和采用更灵活的帧结构设计,可显著降低空口传输时延。同时,基于非正交多址接入(NOMA)的技术允许多个用户在相同时频资源上传输,根据功率区分用户信号,有效减少用户等待调度的排队时延。

在传输网层面,分段路由(SRv6)技术以源路由的方式指定数据包的转发路径,避免传统IP网络中的逐跳路由决策,减少传输路径上的处理时延。核心网侧的用户面功能(UPF)下沉至园区网络边缘,使数据流量在工厂本地完成交换和路由,避免回传至远端核心网带来的额外时延。此类跨域协同框架需要各域控制器之间实时交互网络状态信息,利用集中式优化算法计算全局最优的时延控制策略。某数控机床制造厂采用无线-承载-核心网跨域协同方案,以部署园区级本地交换UPF并配置极简帧结构的方式将128台数控机床的协同加工指令传输时延从18毫秒降至8毫秒,且实现了99.999%的传输可靠性。

3.5 基于预测与反馈的双闭环时延控制体系

面对无线信道时变特性带来的时延波动,单一的静态时延控制策略难以适应网络状态的动态变化。基于预测与反馈的双闭环控制体系将前向预测与反馈校正相结合,实现对时延的精准控制。外环控制器基于历史时延数据和网络负载信息,依靠时间序列分析或机器学习方法预测未来一段时间内的时延变化趋势,据此调整网络资源配置策略。内环控制器则基于实时测量的时延数

据,对预测模型的偏差进行补偿,通过反馈控制算法快速消除时延波动^[1]。

具体而言,该体系包含时延监测、预测分析、决策执行和效果评估四个核心模块。时延监测模块凭借部署在网络各节点的探针采集端到端时延数据;预测分析模块利用深度神经网络或递归神经网络等算法,建立时延与网络负载、信道质量等多维因素的关系模型;决策执行模块根据预测结果调整无线资源分配、路由策略等参数;效果评估模块则对控制策略的实际效果进行评估,并反馈至预测模型进行持续优化。这种双闭环结构既保证了时延控制的及时性,又确保了长期控制效果的稳定性。某精密电子制造商部署了基于LSTM时延预测的双闭环控制系统,提前500毫秒预测网络拥塞并动态调整QoS参数,使高优先级业务在突发流量冲击下的时延超标概率从12%降至1.5%以下,控制系统相位裕度提升约15%。

4 结束语

作为智慧工厂的关键基础设施,5G无线网络的覆盖优化和时延控制直接关系到智能制造的实施效果。采取5G LAN、确定性网络、端-边-云协同等重要优化策略并运用多种时延控制技术,可显著提升5G网络的覆盖质量,满足大多数工业控制场景的严格要求。未来,随着5G-A和6G技术的成熟,以及工业互联网体系的进一步完善,5G无线网络将在智慧工厂中扮演更加重要的角色。同时,标准化、模块化、自动化的网络解决方案将降低5G在工业领域的应用门槛,推动更多中小企业实现数字化转型升级,为制造强国建设提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 袁朋,郝建华,吴培,等.面向智慧工厂的5G无线网络规划及分析[J].长江信息通信,2023,36(8):224-226.
- [2] 吴锦龙.5G时代背景下智慧工厂智能制造自动化模式分析[J].产品可靠性报告,2024(3):99-101.
- [3] 张欣,秦莉.5G+智慧工厂为安全插上"信息化翅膀"[J].江苏应急管理,2023(6):28-29.
- [4] 洪继宇,李伟科.基于5G虚拟专网智慧工厂无线组网设计[J].通信电源技术,2025,42(6):166-168.
- [5] 管文明,王刚.5G定制网技术在智慧工厂中的应用[J].广东通信技术,2023,43(3):49-53.

作者简介:韩祺,男,(1982.8-),浙江长兴,汉,大学本科,研究方向:5G定制网,无线网络、边缘计算、低空经济。