

# 基于5G技术的工业物联网通信延迟优化策略研究

刘英新

山东通维信息工程有限公司 山东 济南 250000

**【摘要】**：工业物联网对通信的确定性时延提出毫秒级要求，是5G赋能智能制造的关键挑战。本文聚焦于5G网络在复杂工业环境下面临的延迟瓶颈，系统性地研究并提出了架构、空口与协同三个层面的综合优化策略。核心方案包括通过边缘计算实现数据本地卸载、利用网络切片隔离关键业务、在无线空口引入免调度与短间隙等低时延机制，并推动5G与时间敏感网络深度融合以实现确定性传输。最后，探讨了基于人工智能的自适应调度以应对动态环境。研究表明，上述策略能协同构建端到端的确定性通信能力，为工业无线化奠定基础。

**【关键词】**：5G技术；工业物联网通信；延迟优化

DOI:10.12417/2705-0998.26.03.019

## 引言

随着智能制造与工业互联网的深入推进，传统有线网络在灵活性、可扩展性及移动性支持方面的局限日益凸显，无线化成为必然趋势。5G技术凭借其大带宽、高可靠、低时延的特性，被视为实现工业物联网的关键使能技术。然而，复杂的工厂环境、多样化的业务需求及严格的实时性要求，使得标准5G网络的“尽力而为”模式难以直接满足工业控制场景的确定性通信需求。因此，深入研究针对性的通信延迟优化策略，对于释放5G在垂直行业的潜力、推动制造业数字化转型具有至关重要的意义。

## 1 工业物联网业务模型与延迟需求

### 1.1 工业物联网业务模型分类

工业物联网的业务模型可根据数据特征与时效性要求划分为三大类，第一类是周期性控制业务，例如可编程逻辑控制器对执行器的闭环控制，这类业务数据包小但发送周期极其规律，通常要求毫秒级的确定时延，任何超时或抖动都可能导致控制环路失稳或生产中断。第二类是非周期性事件业务，如设备突发故障告警、安全急停信号等，这类业务发生时间不确定，但一旦发生就必须以最高优先级、最低延迟传递，确保系统能即时响应异常。第三类是大带宽流式业务，典型代表是工业视觉检测系统产生的高清视频流，它对平均吞吐量要求高，但对时延的容忍度相对宽松，允许数百毫秒的延迟，重点在于数据完整性与连续性。这三类业务往往在同一网络中并存，对网络资源的调度与隔离提出了复杂且矛盾的要求。

### 1.2 关键延迟性能指标

衡量工业物联网通信延迟的性能指标主要包含三项，其一是端到端时延，指数据包从发送端应用层生成到接收端应用层正确解析所经历的总时间，这是衡量业务实时性的最直接标准。不同业务对此有从数毫秒到数百毫秒不等的严格上限。其二是时延抖动，即端到端时延的变化范围，它反映了网络传输的确定性。对于精密同步与控制业务，低且稳定的抖动比绝对

低时延更为重要，因为过大的抖动会导致接收端缓冲区设计困难或控制系统性能恶化。其三是可靠性，通常与延迟指标耦合定义，指在特定时间窗口内成功完成数据传输的概率。工业场景要求即使在严苛环境下，网络也必须同时满足极低的时延与极高的可靠性，两者缺一不可，共同构成了工业通信的确定性保障基石。

## 2 工业环境特殊挑战

### 2.1 复杂电磁环境干扰

工业现场充斥着各类大功率设备运行时产生的宽频段电磁干扰，这些干扰源包括变频器、重型电机、焊接设备等，它们不仅强度高，而且频谱成分多变。这种复杂的电磁背景噪声会严重劣化无线通信的信道质量，导致信号失真与误码率急剧上升。对于依赖高精度调制的5G信号而言，电磁干扰会直接破坏其正交性，引发接收端解调失败。其后果是为了保证通信的可靠性，系统不得不频繁触发链路层的数据重传机制，或者降低调制阶数以换取更强的抗干扰能力。这两种应对策略都将显著增加数据传输的额外时延，并降低有效吞吐量，使得理论上极低的空口延迟在实际工业环境中难以实现。因此，设计具有强鲁棒性的波形与抗干扰算法，成为工业5G必须跨越的首道障碍。

### 2.2 密集多径与信号衰落

工业厂房内部结构复杂，金属机械、货架、管道林立，构成了强反射的密集多径传播环境。无线信号经不同路径反射、衍射后，以微小时间差叠加到接收端，会造成严重的符号间干扰。同时，移动的自动导引车、机械臂以及人员走动，会引发电磁波传播路径的快速动态变化，导致信道状态剧烈起伏，产生快衰落。这种密集多径与动态衰落会显著降低接收信号的信噪比，并产生深度衰落点，直接引发数据传输中断。为应对此挑战，5G系统需具备实时的信道估计与快速自适应能力，包括动态调整波束成形方向、切换传输参数等。这些补偿措施虽然能维持链路，但其引入的计算与信令开销本身构成了延迟

的一部分，增加了端到端时延的不可预测性。

### 2.3 高密度设备接入与资源竞争

现代智能工厂中，传感器、执行器、移动机器人等物联网终端部署密度极高，可能在局部区域形成大规模的设备群。这些终端业务各异，对网络资源的需求存在尖锐矛盾。例如，周期性的控制数据与突发的告警信息会竞争同一无线帧内的调度资源。当海量终端在相近时间发起接入或传输请求时，会引发接入信道的拥塞冲突以及上行资源的激烈竞争。网络侧调度器需在极短时间内为众多终端分配有限的时间与频率资源，这一仲裁过程本身就存在排队时延。若调度策略不合理，将导致高优先级业务被延迟，低优先级业务则可能因长期得不到资源而失效。这种因资源竞争引发的接入延迟与传输延迟，是制约系统规模化部署和确保确定性的核心瓶颈，要求设计全新的、具有业务感知能力的多址接入与资源调度机制。

## 3 基于 5G 技术的工业物联网通信延迟优化策略

### 3.1 基于边缘计算的网路架构扁平化

针对工业场景对极低时延的需求，网络架构扁平化是根本性优化策略。传统模式下，工业设备的数据需经接入网、核心网远程路由至云端服务器处理，再返回指令，漫长的物理路径与多级协议处理带来了难以消除的时延。边缘计算策略的核心在于将计算、存储与网络控制功能下沉至贴近工厂的现场侧，例如在厂区内部署边缘计算服务器或直接升级 5G 基站为边缘节点。该服务器集成了核心网的用户面功能，能够实现数据的本地卸载、处理与转发。对于大部分需要实时响应的控制指令和周期数据，其传输路径被缩短至工厂内部，无需绕行至公网的核心网，从而彻底消除了广域回传带来的延迟。同时，边缘服务器可与工厂内的上位机、工业控制系统直接高速互联，进一步简化协议转换流程。这种架构变革不仅大幅降低了端到端时延，还能有效卸载核心网压力，并为数据隐私与安全提供了本地化保障。

### 3.2 面向业务差异化的确定性网络切片

工业现场多类业务共网传输，其服务质量需求相互冲突，为满足控制类业务对确定性时延的严苛要求，必须引入网络切片技术实现资源的逻辑隔离。该策略并非构建多个物理网络，而是在同一套 5G 网络基础设施上，通过软件定义网络和网络功能虚拟化技术，虚拟出多个独立的端到端逻辑网络。每个切片可独立配置其网络特性，例如为运动控制业务创建具备最高优先级、预留专用无线资源和确定性转发能力的超可靠低时延通信切片，为视频监控业务创建以带宽保障为核心的大带宽增强移动宽带切片。各切片之间实现资源与性能的硬隔离，确保高优先级切片中的业务流量不受公网或其他低优先级业务突发流量的干扰，从而获得稳定可预期的传输时延、极低的抖动与极高的可靠性。网络切片是工业 5G 从消费互联网尽力而为

模式迈向工业级确定性的关键技术桥梁。

### 3.3 空口层的低时延传输机制增强

无线空口是 5G 系统时延的主要来源之一，对其进行优化是达成毫秒级时延的关键。空口低时延传输机制增强主要包含几个核心方向。首先是采用更短的传输时间间隔结构，将无线帧中的基本调度单元时长从 1 毫秒缩短至零点几甚至零点零几毫秒，从而允许数据包在生成后能够被更快地封装和发送，显著降低等待传输的调度时延。其次是引入免调度传输技术，对于工业场景中常见的小包、周期性或突发性上行数据，终端可以在预先配置的资源上直接发送，无需经历申请、授权、调度等繁琐的信令交互过程，从而将上行接入时延降低一到两个数量级。最后是引入更高效的混合自动重传请求机制与更灵活的时频资源分配算法，提升数据传输的一次成功率，减少因重传导致的额外延迟。这些机制共同作用于物理层和媒体接入控制层，从底层重塑了无线传输的时效性。

### 3.4 5G 网络与时间敏感网络的深度融合

在工厂内部，有线网络广泛采用时间敏感网络技术来提供确定性的低时延传输。要将 5G 无缝融入工业网络，必须实现其与时间敏感网络的深度融合。该策略的核心在于将 5G 系统构建为时间敏感网络中的一个高可靠性、具有确定性的无线网桥。需要实现 5G 系统时钟与工厂全局精密时钟的严格同步，通常基于 IEEE1588 精确时间协议，确保无线与有线域的时间基准统一，这是所有协同调度的基础。需要在 5G 系统的用户面功能或基站中实现时间敏感网络的关键机制，如时间感知整形器和帧抢占。时间感知整形器为来自工业设备的周期性数据流在无线空口调度时预留特定的、周期性的时间窗口，确保其总能无竞争地传输。帧抢占则允许高优先级帧中断正在传输的低优先级帧，实现微秒级的传输抢占。通过这种深度融合，5G 网络具备了与有线时间敏感网络同等级别的确定性转发能力。

### 3.5 基于人工智能的自适应资源智能调度

面对工业环境中动态变化的信道条件、波动的业务负载和多样的服务质量需求，传统基于固定规则的资源调度策略难以实现全局最优。基于人工智能的自适应资源智能调度策略为解决此问题提供了新范式。该策略利用人工智能与机器学习算法，通过对网络历史数据和实时运行状态的海量数据进行深度挖掘与分析。系统能够学习并预测网络流量模式、信道质量的动态变化规律以及不同业务的时延容忍度特性。在此基础上，智能调度器可以实现多维度的动态优化。例如，在无线侧，它能实时感知干扰分布，动态调整波束成形方向以避免干扰，并预测业务到达，提前为高优先级终端预分配资源。在网络侧，它能根据全局业务负载，动态调整不同网络切片的资源配额，实现跨切片的智能资源借用与回收。通过不断与环境交互学习，该策略能实现复杂工业场景下端到端时延与整体网络效率

的持续优化，提升系统应对未知干扰和突发负载的智能化水平。

### 3.6 基于多接入边缘智能协同的无缝切换优化

工业环境中存在大量移动性场景，例如自动导引运输车、移动机器人及搭载传感器的手持终端在产线间或跨区域移动。这类移动性业务对通信的连续性、稳定性与低时延提出了严苛要求。传统的基站间切换过程伴随着测量上报、切换决策、信令交互及路径转换等一系列操作，会不可避免地引入业务中断和延迟，这在高速控制场景下是致命弱点。为应对此挑战，基于多接入边缘智能协同的无缝切换优化策略应运而生。该策略的核心在于利用部署在多个边缘节点的分布式智能体，结合全局网络视图与终端移动轨迹预测，实现前瞻性的、柔性的切换管理。具体而言，智能协同系统可基于终端上报的位置、速度信息及历史移动模式，利用机器学习算法预测其未来数秒内的移动轨迹和可能的目标服务小区。在此基础上，系统可提前为

目标终端在即将进入的小区预分配和预留无线资源、建立用户面通道，并可能将部分会话上下文信息提前同步至目标基站。当终端实际触发切换时，其流程被大幅简化为近乎无缝的快速重定向，避免了传统切换中因资源竞争和信令交互所导致的业务中断与附加时延。通过多接入边缘的智能协同，该策略确保了移动终端在穿越不同服务区域时，关键控制业务的连续性与确定性时延得到保障。

## 4 结语

5G 技术为工业物联网的无线化与智能化提供了前所未有的机遇，但满足工业级确定性时延要求仍需跨越理论与工程的重重挑战。本文探讨的优化策略构成了一个从网络架构、资源隔离、空口机制到协同融合的多层次解决方案。未来，随着 5G-Advanced、6G 技术的演进以及与人工智能、数字孪生等技术的更深层次结合，工业网络的确定性、智能性与可靠性将得到进一步增强，最终推动全连接、柔性智能工厂的全面实现。

## 参考文献:

- [1] 魏学先.物联网通信技术在有源配电网新能源送出线路保护中的应用[J].电气技术与经济,2025,(12):144-146.
- [2] 赵中礼,王光亚,崔愉婉.融合 5G 通信与物联网技术的虚拟化实训室建设研究[J].网络安全和信息化,2025,(11):68-70.
- [3] 李静.5G 技术支撑下的物联网产业链协同创新机制研究[J].信息与电脑,2025,37(21):84-86.
- [4] 武少鹏.面向物联网多设备通信的边缘计算网络安全监测管理系统研究[J].信息技术与信息化,2025,(10):96-99.
- [5] 王雨朦.5G 通信技术在物联网中的关键角色与性能优化[J].信息记录材料,2024,25(04):55-57.
- [6] 陈云帆.电力系统中 5G 移动通信与物联网技术的应用研究[J].光源与照明,2024,(01):77-79.