

面向工业互联网的低时延高可靠通信系统设计

刘洋

重庆电讯职业学院, 重庆 402247

摘要: 随着工业互联网向智能制造核心环节纵深渗透, 底层通信网络正面临前所未有的时延与可靠性考验。本文系统拆解了工业互联网通信的核心诉求, 深入剖析了现有通信技术落地工业场景时的瓶颈, 在此基础上提出一套面向工业互联网的低时延高可靠通信系统设计方案, 整合时间敏感网络与第五代移动通信技术融合架构、多层次确定性传输机制、无线资源智能管控及跨域协同运维等关键模块, 为未来智能制造、远程控制等核心业务筑牢通信底座。

关键词: 工业互联网; 低时延; 高可靠; 通信系统; 设计方案

引言

工业互联网打通了信息技术与制造业的融合壁垒, 已然成为驱动产业数字化、网络化、智能化转型的核心支撑。它通过构建人、机、物全域互联的网络体系, 实现全要素、全产业链的深度协同与高效运转。而实时、可靠的数据传输, 正是架起物理生产与数字管控之间的桥梁, 是实现精准感知、智能调控的核心前提。打造一套适配工业互联网低时延、高可靠、强确定性需求的专用通信系统, 成为推动工业互联网向生产核心环节渗透、释放产业转型价值的关键突破口。

1 工业互联网通信的核心需求

1.1 确定性低时延与严控抖动

工业互联网中, 运动控制、安全联锁等核心场景对通信时延的确定性有着刚性要求。这不仅需要平均时延维持在较低水平, 更关键的是需为最大时延设定可预测、可保障的明确边界, 同时将时延抖动压缩至极小范围。以同步多轴控制为例, 控制器发出的指令需近乎同步抵达各驱动器, 任何微小且不可预判的传输延迟差, 都导致设备动作失步, 轻则影响加工精度, 重则引发设备故障。这种对时延确定性的刚性需求, 与消费互联网侧重平均吞吐量、追求最大带宽的设计逻辑截然不同, 它要求网络彻底跳出统计复用的尽力而为模式, 转向资源预留与精准调度的确定性服务模式。

1.2 极致传输可靠性

工业现场环境复杂多变, 电磁干扰源众多, 而控制指令、设备状态等核心数据的传输可靠性直接关联生产安全, 一次传输失败就引发生产中断、设备损坏甚至安全事故。因此, 工业互联网通信系统需具备极致的传输可靠性, 通常以数据

包送达率或误码率作为核心衡量指标。这种可靠性保障必须覆盖端到端全路径, 从终端接入、网络传输到云端处理的每一个环节都不能缺位。这就要求系统在设计时构建多层次保障体系: 物理层强化抗干扰能力, 链路层实现快速精准重传, 网络层部署冗余路径, 应用层补充数据校验与状态同步。值得注意的是, 低时延与高可靠性往往存在权衡关系, 系统设计的关键在于找到时延边界约束下的最优可靠性解决方案。

1.3 灵活组网与移动性适配

现代工业生产模式正朝着柔性化方向转型, 生产线需具备快速重组能力, 自动导引运输车、移动机器人等设备的应用也日益广泛。这就对通信网络的组网灵活性与移动性支持提出了更高要求: 既要实现有线与无线接入的有机融合, 也要保障移动设备的无缝接入与业务连续性。网络需具备快速自配置与自愈能力, 当部分节点或链路故障时, 能自动切换至最优替代路径, 确保核心业务不中断。面对工厂内复杂的电磁环境与多样化的物理布局, 网络部署需兼顾灵活性与鲁棒性, 既能适配不同规模、不同布局的车间场景, 也能为设备移动、产线调整提供便捷的接入点变更与服务质量延续保障。

2 现有通信技术应用于工业场景的瓶颈

2.1 传统以太网的确定性缺陷

传统以太网采用载波侦听多路访问冲突检测介质访问控制协议, 本质上是基于竞争与随机退避的共享信道机制。这种机制无法确保数据帧在固定时间窗口内稳定发送, 随着网络负载增加, 冲突概率会显著上升, 导致传输时延骤增且波动剧烈, 确定性严重不足。尽管工业以太网通过在应用层

引入主从轮询、时间片分割等优化手段，在特定拓扑与轻载场景下改善了实时性，但底层介质访问控制协议的竞争本质并未改变，难以在多业务混合的复杂工业环境中，提供具备严格数学上界的时延与抖动保障。传统以太网的流量控制机制也引入额外的不确定延迟。

2.2 无线通信的可靠性与抗干扰难题

无线局域网、传统蜂窝通信等无线技术为工业设备提供了灵活的接入方案，但在工业现场的复杂环境中却面临诸多挑战。工厂内大量金属结构会造成信号多径衰落与遮挡，电机、变频器等设备则会产生强烈的电磁干扰，导致无线信道质量波动大、误码率居高不下。无线频谱的共享特性使其易受同频、邻频设备干扰，且这类干扰具有随机性与突发性。尽管现有无线通信协议具备一定的抗干扰与纠错能力，但面对工业级高可靠需求，其数据包丢失率、重传时延等指标仍无法满足精密控制、安全类应用的严苛要求。

2.3 异构网络融合与端到端服务质量困境

工业现场往往并存现场总线、工业以太网、无线网络等多种通信网络，这些网络采用不同的协议栈，在实时性、可靠性、拓扑结构等方面存在显著差异，实现深度融合与协同工作成为行业难题。目前主流的解决方案是通过网关进行协议转换，但这种方式不仅会引入额外处理时延，还破坏原有协议的确定性时序。更关键的是，跨异构网络的端到端服务质量保障难以实现，例如在有线与无线混合传输路径中，整体时延确定性往往受限于可靠性最差的无线段，而现有技术缺乏有效的全局资源协同机制，无法对全路径资源进行统一预留、调度与监控，难以给关键业务流提供贯穿全网络的可预测性能保障。

3 工业互联网低时延高可靠通信系统设计方案

3.1 构建时间敏感网络与第五代移动通信技术融合架构

系统采用分层融合设计思路，以支持时间敏感网络的有线网络作为车间骨干，搭配深度定制的第五代移动通信技术工业无线接入构成边缘接入层。在车间层面，部署具备时间敏感网络能力的交换设备，搭建确定性有线主干网，时间敏感网络通过精准时间同步、精细化流量调度、帧抢占等核心技术，为传统以太网赋予了确定性传输能力，可完美适配运动控制、同步数据采集等对时延与抖动要求极高的业务。针对移动设备、旋转部件或布线困难区域，引入基于第五代移动通信技术空口增强技术的工业无线专网，通过配置微秒级

空口时隙结构、高精度时间同步及抗干扰编码调制方案，提升无线传输的定时精度。有线时间敏感网络与无线第五代移动通信技术域通过融合网关实现深度耦合，网关依据业务流的端到端时延预算，在时间敏感网络域执行门控列表调度，在第五代移动通信技术域进行时隙化资源分配，构建跨介质的确定性传输路径。在网络控制层部署集中式网络控制器，统筹负责全网拓扑管理、业务流路径规划及资源统一编排。

3.2 设计多层次协同确定性传输机制

数据传输层面需构建从应用层到物理层的全栈协同确定性保障体系。首先在应用层或中间件层，对工业业务流进行精细化建模与分类，区分周期性实时控制流、事件触发报警流及非实时后台流，并为各类流打上明确的时敏性与可靠性等级标签。其次在网络与传输层，针对实时流采用资源预留协议扩展或软件定义网络流表编程技术，确保传输路径的确定性。数据链路层是确定性保障的核心环节：有线侧全面部署时间敏感网络协议簇，通过精准时间协议实现纳秒级全网同步，采用信用值整形器或时间感知整形器划分周期性传输窗口，为不同优先级流量分配专属传输时段，结合帧抢占机制大幅降低高优先级流的等待时延；无线侧则依托第五代移动通信技术灵活帧结构，划分微时隙或迷你时隙资源，为关键业务流分配周期性专属资源块，实现免竞争接入。全栈机制通过集中式路径计算单元协同配置，确保从源端到宿端的全路径具备一致的确定性传输能力。

3.3 部署业务感知型无线资源管理与冗余传输策略

为应对工业无线环境的复杂性，系统需构建业务感知型无线资源管理体系与多层次冗余传输策略。无线资源管理单元实时采集业务需求特性、信道状态及干扰信息，动态调整资源分配方案，为周期性控制流分配固定周期专用资源块，为突发性事件流预留快速接入资源池。同时引入先进的干扰检测与规避技术，当检测到频段干扰超标时，自动将关键业务切换至洁净频段或调整调制编码方案。可靠性保障方面，除物理层、链路层抗干扰增强外，在网络层与应用层补充冗余传输机制：终端与接入点之间采用双发选收模式，通过两条独立路径并发传输数据，接收端选取最先正确抵达的报文；针对极端重要指令，采用网络编码多径冗余方案，将原始数据包编码后通过多路径分发，接收端只需获取足够数量编码包即可解码恢复原始数据，在提升可靠性的同时优化冗余开销。

3.4 实现异构网络无缝融合与跨域协同控制

打破异构网络壁垒、实现端到端服务质量保障的核心，是引入逻辑集中的跨域协同控制器。该控制器整合全网拓扑、资源状态及业务服务质量需求信息，当新的确定性业务流发起请求时，不再孤立处理单一网络域，而是执行全局路径计算与资源编排：先规划穿越多网络域的端到端传输路径，再将总时延预算、抖动容限分解至每一段网络链路，通过标准化南向接口向时间敏感网络交换机下发调度门控列表，向第五代移动通信技术接入单元推送时隙资源授权配置。控制器持续监控各网络域运行状态，实时采集队列时延、信道质量等关键指标，一旦检测到服务质量违规风险，立即触发路径重路由或资源重调配，实现跨域动态优化，确保核心业务流的端到端性能始终满足需求。

3.5 搭建智能运维与状态感知体系

高性能通信系统的长期稳定运行，离不开智能化的运维保障体系。本方案构建端到端网络状态感知与闭环运维机制：数据平面的时间敏感网络交换机、第五代移动通信技术接入点等所有节点，均集成高精度时间戳功能，实时标记关键业务流的入出节点时间，结合队列深度、误码率等性能数据，实时上报至分析平台。管理控制层搭建数字孪生网络模型，精准映射物理网络状态，依托机器学习与数据挖掘技术实现性能趋势预测、异常检测及根因定位，例如提前预判链路时延是否会突破阈值，当端到端时延异常时快速定位故障网络域与节点。基于分析结果，系统可自动或经人工确认后执行优化策略，包括调整调度参数、切换无线信道、重规划业务路径等。这种从被动故障响应转向主动预测优化的闭环

运维模式，是保障系统长期稳定高效运行的关键。

4 结束语

工业互联网的深度发展，对通信网络的确定性与可靠性提出了前所未有的高要求。本文系统拆解了工业互联网通信的核心诉求，明确了传统通信技术适配工业场景时的根本性短板。在此基础上，提出一套涵盖融合架构、传输机制、资源管理、跨域协同及智能运维的低时延高可靠通信系统设计方案。各模块相互支撑、层层递进，共同构建起适配柔性化、智能化工业生产的通信基础设施。未来，随着确定性网络、算力网络与人工智能技术的深度融合，工业互联网通信系统将朝着更智能、更自主、更具弹性的方向演进，为产业数字化转型提供更加强劲的支撑。

参考文献：

- [1] 成威. 基于 5G 移动机器人远程控制网络系统实时性研究 [D]. 北方工业大学, 2024.
- [2] 周莊. 基于双目视觉的工业互联网 LOS 链路阻塞预测技术研究 [D]. 华北水利水电大学, 2024.
- [3] 陈广硕. 智融边缘网关及数据平台系统的设计与实现 [D]. 北京交通大学, 2024.
- [4] 樊勇. 基于极化码的高可靠低时延电力线通信系统设计与实现 [D]. 西安电子科技大学, 2024.
- [5] 张九川. 面向工业互联网的边缘计算卸载与资源分配策略研究 [D]. 北京信息科技大学, 2024.
- [6] 秦欢欢, 王梦凡, 柯熙政. 工业互联网下的无线光通信研究进展 [J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(10):1-13.