

5G赋能工业互联网的实时控制与低时延通信设计

储元舒

河北广电网络集团秦皇岛有限公司 河北 秦皇岛 066000

摘要: 5G技术为工业互联网实时控制与低时延通信提供支撑。通过分层架构设计,集成边缘计算、网络切片等关键技术模块,优化网络架构、传输协议及算法资源调度,实现数据实时采集、精准控制决策与快速执行反馈。针对多协议兼容、网络可靠性及安全隐患等挑战,提出协议转换、冗余传输及端到端安全防护等策略,推动工业互联网向智能化、高效化发展。

关键词: 5G技术; 工业互联网; 实时控制; 低时延通信; 网络切片

引言: 工业互联网推动制造业向智能化转型,实时控制与低时延通信成为关键需求。传统工业网络受限于带宽、时延与可靠性,难以满足复杂生产场景的动态调控需求。5G技术凭借高速率、低时延、高可靠等特性,为工业互联网提供新型通信基础设施。通过技术架构创新与核心策略设计,5G可实现生产数据的实时采集、控制指令的毫秒级响应及多设备协同的精准调度,助力工业生产效率与灵活性的双重提升。

1 5G 赋能工业互联网实时控制的技术架构设计

1.1 分层架构设计

感知层集成工业传感器、执行器、摄像头等设备,实现生产数据的实时采集与边缘处理。传感器捕捉温度压力等参数,执行器响应指令调整设备状态,摄像头记录现场信息。设备通过本地边缘节点做初步处理,筛选关键信息后传输,减少无效数据占用带宽,提供精准原始数据。网络层基于5G网络构建低时延高可靠的通信通道,支持有线与无线网络融合^[1]。5G无线网络覆盖移动设备与分散节点,有线网络连接固定设备与控制中心,两种模式无缝切换保障传输连续。网络层优化信号路径避开干扰,减少衰减让指令与反馈快速传递,搭建稳定通信桥梁。平台层部署工业互联网平台,集成数据处理、智能分析、资源调度等功能,支撑实时控制决策。平台接收感知层数据,经算法分析判断设备状态,预测故障并生成控制策略。资源调度按需求分配计算与通信资源,避免争夺导致延迟,让决策快速转化为指令。应用层面向具体工业场景提供定制化实时控制服务。智能制造中调整设备参数优化流程,智能物流里控制搬运设备路径提升效率,远程运维时借数据反馈调试远端设备。应用层按场景调整控制逻辑,让服务贴合生产需求。

1.2 关键技术模块

边缘计算将计算资源下沉至网络边缘,减少传输距

离降低端到端时延。边缘节点部署在车间附近,直接对接感知层设备,快速处理数据生成指令,无需上传云端等待反馈。近距离处理缩短流转时间,让设备迅速响应控制需求,适应即时调整要求。网络切片为不同工业业务划分独立虚拟网络,确保关键控制指令优先传输。每个切片有专属资源不受干扰,关键业务获更高优先级,负载高时仍能顺畅传递指令。资源按业务繁忙程度调整,高峰期自动增加供给,避免影响控制效果。时间敏感网络(TSN)结合5G实现工业以太网与无线网络协同,保障确定性时延传输。TSN通过精确时间同步协调设备节奏,让数据按预设时间传输,消除拥堵导致的时延波动。与5G结合后,有线无线设备时间一致,数据流转无偏差,确保指令按时到达。URLLC(超可靠低时延通信)通过空口优化、预调度等技术,满足工业控制对时延与可靠性的严苛要求。空口优化减少信号损耗与干扰提升稳定性,预调度提前预留资源避免竞争延迟。技术共同作用让传输快速稳定,应对指令执行的准确与及时要求。

2 低时延通信的核心设计策略

2.1 网络架构优化

小区密集部署通过增加基站密度缩短信号传播距离,降低传输时延。密集分布的基站让工业设备能更近距离接入网络,信号在空气中传输的路径缩短,衰减减少,到达设备的时间相应减少。这种布局能覆盖更多角落,避免信号远距离传输时因障碍物导致的延迟,让设备与网络的连接更直接高效,为实时控制指令的快速传递奠定基础。虚拟专用网络(VPN)构建工业专用逻辑网络,提升数据传输安全性与隔离性。专用网络与公共网络隔离,减少外部数据干扰,工业控制数据在独立通道内传输,避免因公共网络拥堵导致的延迟。逻辑隔离还能降低数据被干扰的风险,让控制指令和设备反馈在

专属路径中顺畅流动,保障传输过程的稳定性。多接入边缘计算(MEC)在靠近用户侧部署计算节点,实现本地化数据处理与快速响应。计算节点部署在工业厂区附近,直接对接生产设备,采集的数据无需传输至远端云端处理,可在本地完成分析并生成反馈指令。这种本地化处理模式大幅缩短数据往返传输的时间,让设备能更快获得控制响应,适应工业场景中对即时调整的需求。

2.2 传输协议优化

实时传输协议(RTP)适配工业场景中音视频、控制指令的实时传输需求。协议设计专注于数据的按时到达,通过时间戳标记和序列号排序,确保音视频流和控制指令按顺序传输,避免因数据乱序导致的处理延迟。在工业监控与远程控制中,这种特性让画面与指令能同步传递,保障操作与反馈的一致性^[2]。轻量化协议设计减少数据包头开销,提升传输效率,降低时延。简化的数据包头包含最必要的信息,减少额外数据占用的带宽,相同时间内可传输更多有效内容。协议处理流程简化,设备解析数据的时间缩短,从接收数据到做出响应的间隔减少,让数据传输的整体效率提升。动态重传机制根据网络状态调整重传策略,平衡时延与可靠性。网络状况良好时减少重传次数,避免不必要的重复传输占用资源导致延迟;网络出现波动时适当增加重传,确保关键数据能成功送达。这种灵活调整让数据传输既能在稳定状态下保持高效,又能在复杂环境中保障基本可靠性。

2.3 算法与资源调度优化

智能资源分配基于业务优先级动态分配频谱、计算资源,保障关键控制指令的实时性。不同工业业务按重要程度划分优先级,关键控制指令获得更多资源支持,在资源有限时优先满足其传输需求。频谱资源向高优先级业务倾斜,计算能力集中处理关键数据,避免非关键业务占用资源导致的延迟。预调度与预测性传输利用机器学习预测工业设备行为,提前分配网络资源,减少等待时延。通过分析设备历史运行数据,预测其即将发出的指令和数据传输需求,在设备发出请求前预留相应资源。这种提前准备让设备接入网络时无需等待资源分配,直接使用预留资源传输数据,缩短从请求到传输的间隔。干扰管理与波束成形通过智能波束赋形技术提升信号质量,降低干扰导致的传输延迟。波束成形将信号聚焦于目标设备,减少向其他方向的信号扩散,降低对周边设备的干扰,同时增强目标设备接收的信号强度。干扰减少后,数据传输时因信号冲突导致的重传减少,传输过程更顺畅,避免因干扰造成的不必要延迟。

3 实时控制系统的功能模块设计

3.1 数据采集与预处理模块

数据采集与预处理模块支持多类型工业协议的适配与解析,实现异构设备数据的统一接入。工业场景中设备来源多样,采用的通信协议各有差异,Modbus适用于简单传感器数据传输,Profinet则更适配复杂机床的实时通信。模块通过内置的协议转换接口,将不同协议格式的数据转化为系统可识别的统一格式,让传感器、PLC、机器人等各类设备的运行数据都能顺畅汇入系统。这种适配能力打破了设备厂商与型号之间的壁垒,让分散的设备数据形成完整的数据流,为后续控制决策提供全面的数据支撑。模块集成数据清洗、压缩与加密功能,确保数据质量与安全性。数据清洗通过预设的规则识别并剔除采集过程中混入的异常值、重复数据和噪声,避免错误信息干扰控制逻辑;数据压缩采用轻量化算法缩减数据体积,在不损失关键信息的前提下减少传输带宽占用,让数据能更快速地在网络中流转;加密功能则对数据进行全程保护,从采集端到处理端的整个传输与存储过程中,数据始终处于加密状态,防止未经授权访问导致的信息泄露,保障工业数据的完整性与机密性。

3.2 实时控制决策模块

实时控制决策模块基于工业互联网平台的数据分析能力,构建实时控制模型。PID控制通过持续监测实际运行值与目标值的偏差,动态调节比例、积分、微分参数,让设备运行状态稳定在设定区间,尤其适用于温度、压力等连续变量的控制;模型预测控制则结合历史运行数据与当前环境参数,预判设备未来一段时间的运行趋势,提前制定控制策略,在偏差出现前进行干预,避免偏差扩大影响生产质量。这些控制模型依托平台的分布式算力支持,能在极短时间内完成复杂运算,确保决策结果与生产节奏同步。模块支持多设备协同控制策略的动态调整,适应生产流程的动态变化。生产线上各设备存在紧密的联动关系,某一环节的速度调整可能影响上下游设备的运行节奏。模块通过分析各设备的实时状态与关联规则,在生产计划变更、设备负载波动或临时故障时,快速调整协同控制逻辑。当订单切换需要改变生产节拍时,模块能重新分配各设备的工作参数,确保整体流程顺畅衔接;当某台设备出现短暂故障时,协同策略会临时调整周边设备的运行状态,避免故障扩散导致全线停机,维持生产的连续性与稳定性。

3.3 执行与反馈模块

执行与反馈模块通过5G网络将控制指令实时下发至执行器,实现毫秒级响应。机器人的焊接轨迹修正、AGV的路径重规划、传送带的速度调节等控制指令,经

5G网络低时延通道传输后,能被执行器瞬间接收并转化为具体动作。这种快速响应能力让设备能精准跟上控制节奏,在原材料规格变化、工序切换等生产条件变动时,迅速做出适应性调整,避免因响应滞后导致的产品质量偏差或生产效率下降。模块集成反馈机制,实时监测执行状态并调整控制参数,形成闭环控制系统。执行器在执行指令的同时,通过内置传感器记录自身的运行数据,将实际动作幅度、执行时间、能耗等信息实时回传至模块。模块对反馈数据进行解析,与预期执行效果进行比对,若发现实际结果与目标存在偏差,立即重新计算控制参数并生成新的指令下发^[1]。通过这种指令下发-状态反馈-参数调整的循环过程,系统能持续优化控制精度,确保设备始终在最优状态下运行,即使面对外部环境干扰也能保持稳定的生产表现。

4 技术挑战与应对策略

4.1 技术挑战

多协议兼容性是工业场景中突出的技术难题。工业现场设备来源广泛,不同厂商的传感器、控制器、执行器采用专属协议,在数据格式、传输规则上存在差异。5G网络作为新型通信载体,其数据交互方式与现有工业协议难以直接匹配,若无法实现有效融合,设备数据将难以通过5G网络顺畅传输,实时控制指令也无法准确送达不同协议的设备,阻碍整体系统的协同运作。网络可靠性保障面临复杂工业环境的考验。工厂车间内大量金属结构、大型机械和电子设备,可能导致5G信号反射、折射或遮挡,造成信号衰减。生产过程中设备运转产生的电磁干扰,会扰乱信号传输,导致数据丢包或延迟波动。这种不稳定的通信状态可能使实时控制指令传输中断,或设备反馈信息延迟,影响控制精度和生产安全。系统安全与隐私保护的压力贯穿实时控制全过程。实时控制涉及设备运行参数、生产工艺等敏感数据,一旦被未经授权获取或篡改,可能导致生产异常甚至设备损坏。网络攻击手段的多样化,如恶意入侵控制节点、伪造控制指令等,对系统安全构成直接威胁,数据在传输和存储环节的泄露风险,也会损害工业生产的核心利益。

4.2 应对策略

协议转换与适配层设计为多协议融合提供解决方

案。开发工业网关作为中间转换节点,网关内置多种协议解析模块,能将不同工业协议的数据格式转换为5G网络可识别的格式,同时将5G传输的控制指令转换为对应设备的协议格式。适配层负责协调数据传输节奏,确保转换后的信息在时间同步和交互逻辑上保持一致,降低5G与工业设备的融合难度,实现各类设备的无缝接入。冗余传输与故障恢复机制有效提升网络可靠性。部署多链路传输模式,为关键控制数据同时建立主备两条通信路径,当主链路受干扰出现异常时,系统自动切换至备用链路,确保数据传输不中断。快速重路由技术实时监测网络状态,一旦发现节点故障或链路拥堵,立即计算新的传输路径并完成切换,减少故障导致的通信中断时间,维持网络的持续稳定运行。端到端安全防护体系构建全方位安全屏障。数据传输过程采用加密技术,从源头到终端对数据进行加密处理,防止传输中途被窃取或篡改。访问控制机制严格限制用户权限,只有经过认证的终端和用户才能接入系统,操作关键设备或获取敏感数据。入侵检测系统实时监测网络行为,识别异常访问和恶意指令,及时触发防护措施,通过多层次防护手段保障系统安全与数据隐私。

结束语

5G与工业互联网的深度融合,通过技术架构创新与低时延通信设计,为实时控制提供了可靠支撑。从分层架构到关键技术模块,从网络优化到安全防护,系统化解决方案有效应对了工业场景中的复杂挑战。未来,随着AI、数字孪生等技术的进一步集成,5G赋能的工业互联网将向更高水平的智能化、柔性化演进,为全球制造业转型注入新动能。

参考文献

- [1]庄亚惠,万林,陈嘉鹏,等.配电网5G通信的架构和时延可靠性研究[J].电子产品世界,2024,31(11):11-13.
- [2]齐翼,王宇.一种基于5G网络及高速移动场景的低延时视频通信系统实现[J].现代电视技术,2022(03):40-44.
- [3]陈禹岐.基于5G技术的MIMO通信网络数据超低延时传输方法[J].自动化与仪器仪表,2023(10):1-5.