

工业互联网技术架构设计与数据传输优化

饶毅¹ 柳平²

1.中国移动通信集团湖北有限公司 湖北 武汉 430023

2.中国移动通信集团湖北有限公司武汉分公司 湖北 武汉 430023

【摘要】工业互联网是新一代信息技术与制造业深度融合的核心载体,技术架构的科学性与数据传输的高效性直接决定智能制造落地成效。针对当前工业互联网多源异构设备接入难、数据传输延迟高、带宽利用率不足及安全风险突出等问题,结合工业生产场景核心需求,提出“感知-网络-平台-应用-安全”五层技术架构设计方案,重点优化感知层设备接入兼容性与网络层数据传输效能。在架构设计基础上,从协议适配、智能调度、数据压缩及安全防护四个维度构建数据传输优化体系,通过OPC UA over TSN协议标准化、SDN动态带宽分配、边缘侧数据预处理及国密算法加密等技术手段,实现传输延迟降低、带宽利用率提升与数据安全保障的协同优化。实验验证表明,该架构与优化策略可使工业数据传输延迟控制在10ms以内,丢包率低于0.1%,带宽利用率提升30%以上,为制造企业数字化转型提供高效可靠的技术支撑。

【关键词】工业互联网;技术架构;数据传输优化;协议适配;边缘计算;SDN

DOI:10.12417/2705-0998.25.22.045

1 引言

在中国制造2025与工业4.0战略双重驱动下,工业互联网已成为推动制造业转型升级的核心引擎,其核心价值在于通过设备互联、数据流转与智能分析实现生产要素优化配置与生产效率大幅提升。工信部统计数据显示,我国工业互联网核心产业规模已从2020年的0.9万亿元增长至2023年的1.2万亿元,年均复合增长率超过10%,但实际落地过程中,架构设计不合理与数据传输效能不足导致的生产中断损失仍高达数百亿元。当前工业互联网发展面临多重技术瓶颈,设备异构性突出,传统Modbus、Profinet与新型OPC UA等协议并存导致设备接入兼容性差;数据传输存在延迟高、丢包多、带宽浪费等问题,难以满足数控机床、AGV导航等场景实时性需求;架构扩展性不足,难以适配AI、数字孪生等新技术融合应用;安全防护体系不完善,数据传输过程中存在泄露、篡改等风险。工业互联网的发展需突破重技术堆砌、轻场景适配的误区,构建业务导向型架构与精准化传输优化体系。基于此,本文立足工业生产实际场景,系统设计适配多行业需求的五层技术架构,重点围绕数据传输的实时性、可靠性与安全性展开优化研究,通过理论建模与技术创新提出可落地的解决方案,为工业互联网的工程化应用提供参考。

2 工业互联网技术架构设计

2.1 架构设计原则

工业互联网技术架构需兼顾业务适配性、技术兼容性与安全合规性三大核心原则,业务需求导向聚焦降本、提质、增效核心诉求,针对离散制造与流程制造的不同场景特点优化功能配置,例如离散制造需强化设备协同调度模块,流程制造需突出连续生产数据监控功能;技术栈兼容既要适配存量设备的异构协议,又要预留新技术扩展接口,支持与数字孪生、工业元

宇宙等新兴技术的无缝对接;安全合规底线满足《数据安全法》与工业控制系统安全防护相关要求,实现全链路风险防控,覆盖设备接入、数据传输、存储与应用全环节。

2.2 五层技术架构体系

基于上述原则,本文构建“感知-网络-平台-应用-安全”五层技术架构,各层独立承载核心功能,通过数据与服务流转实现端到端协同:感知层作为设备互联的神经末梢,核心解决多源异构设备接入与标准化数据采集问题,采用工业级边缘网关实现传统RS485设备的协议转换,支持Modbus、Profinet等10余种主流工业协议的双向转换,避免大规模硬件更换,降低企业改造成本^[1];高实时性场景采用时间敏感网络保障数据同步精度,时钟同步误差控制在微秒级,满足精密加工等场景的同步控制需求;高并发场景通过轻量化协议实现高效传输,同时设计离线缓存与断点续传机制,本地缓存容量可达1TB,应对网络波动时的数据完整性问题,确保设备状态、工艺参数等数据的连续采集。

网络层承担数据传输的“血管系统”功能,构建“边缘-园区-云端”三级网络架构,边缘侧部署工业Wi-Fi 6与5G专网,5G专网采用URLLC模式,满足低时延高可靠传输需求;园区骨干网采用工业以太网与SD-WAN技术,通过流量调度策略保障关键业务带宽,可根据业务优先级动态分配带宽资源;跨厂区互联采用加密隧道结合数据切片技术,降低公网传输成本与安全风险^[2]。

平台层作为数据价值转化的“中枢大脑”,采用“私有云+公有云”混合架构,私有云负责生产数据实时处理,响应延迟控制在50ms以内,公有云承担非实时数据分析与弹性扩展需求,支持百万级设备接入与PB级数据存储^[3];构建工业数据中台,通过数据湖存储异构数据、数据仓库支撑结构化分析,

集成机器学习平台与数字孪生引擎，实现设备故障预测、工艺参数优化等智能应用开发，同时提供微服务组件库，包含 100 余种标准化微服务模块，支持应用敏捷迭代与快速部署^[4]。

应用层聚焦业务价值落地，开发场景化应用系统，离散制造领域部署设备综合效率管理、柔性生产排程系统，流程制造领域构建工艺参数监控、安全风险预警平台，供应链协同层面实现订单-生产-物流的动态响应，支持低代码开发模式，提供可视化拖拽式开发工具，允许企业根据实际需求快速搭建个性化应用，降低技术使用门槛^[5]。

安全层贯穿架构全流程，构建“云-边-端”三级防护体系，设备端采用数字证书身份认证，基于国密 SM2 算法实现设备身份可信验证，杜绝伪造设备接入；传输层通过国密算法加密敏感数据，防止泄露篡改；云端部署零信任访问控制系统与安全态势感知平台，实时监测网络攻击、数据异常流转等风险，安全事件拦截率可达 99.2% 以上^[6]。

3 工业互联网数据传输优化策略

3.1 协议适配标准化

针对工业协议繁杂导致的传输兼容性问题，采用“统一协议+协议转换”的双重策略，新部署设备优先采用 OPC UA over TSN 协议，从源头实现语义级数据交互标准化，该协议支持设备描述、数据传输与安全认证一体化，确保异构设备间的数据互通互认；存量设备通过边缘网关完成传统协议向 OPC UA 的转换，网关内置协议转换引擎，可根据设备类型自动匹配转换规则，转换延迟低于 1ms；优化协议数据帧结构，去除冗余字段，将控制指令与状态反馈数据分离传输，控制指令采用短帧格式优先传输，状态反馈数据采用批量打包传输模式，提升协议传输效率，降低解析复杂度^[7]。

3.2 网络调度智能化

基于软件定义网络技术构建智能流量调度系统，通过 SDN 控制器实时监控网络负载状态，采集周期为 500ms，动态调整 VLAN 优先级与路由路径；对数控机床控制、安全生产监控等关键业务设置最高传输优先级，预留专属带宽资源，带宽占比不低于 30%，确保传输延迟稳定在 10ms 以内；对非实时性数据采用错峰传输策略，在网络负载低于 50% 的时段自动触发数据上传，同时支持数据传输优先级动态调整，应对突发业务场景的带宽需求；构建环网与星型混合拓扑，配置 VRRP 协议实现毫秒级故障切换，切换时间低于 50ms，搭配链路质量检测机制，实时识别传输链路异常并自动切换至备用路径，提升网络可靠性^[8]。

3.3 数据处理轻量化

在边缘节点部署数据预处理模块，采用“异常值过滤+特征提取+压缩编码”的组合方案降低传输数据量；通过基于阈值的异常检测算法过滤无效数据，阈值可根据设备类型与业务

场景自适应调整，过滤准确率达 95% 以上；利用主成分分析提取关键特征参数，将高维数据降维至原维度的 30% 以下，减少冗余信息传输；采用 LZ77 改进型压缩算法对结构化数据进行压缩，结合分片传输技术处理海量时序数据，数据压缩比可达 3:1 以上，大幅降低带宽消耗；仅将处理后的特征数据与异常信息上传至云端，减少无效数据传输对网络资源的占用。

3.4 安全防护全链路

除传输加密与身份认证外，引入区块链技术实现数据传输溯源，对工艺参数、质量检测等敏感数据生成唯一哈希值，通过区块链节点分布式存储，确保数据不可篡改；建立传输行为日志审计机制，记录数据收发地址、传输时间、操作权限等信息，日志留存时间不低于 6 个月，实现异常行为可追溯；针对工业无线传输的抗干扰需求，采用跳频通信技术与信道容错编码，跳频频率间隔为 2MHz，信道编码采用 LDPC 码，提升复杂工业环境下的传输稳定性，降低电磁干扰导致的丢包风险；定期对传输链路进行安全检测，检测周期为 7 天，涵盖漏洞扫描、渗透测试等内容，及时发现并修复安全隐患。

4 实验验证与效果分析

4.1 实验环境搭建

在某汽车零部件制造企业搭建实验平台，涵盖 320 台工业设备，包括数控机床、机器人、传感器等，其中数控机床 50 台、工业机器人 80 台、各类传感器 190 台；部署 20 个边缘节点与 5G 专网，边缘节点采用工业级服务器，配置 8 核 CPU、32GB 内存与 1TB 存储，5G 专网采用独立组网模式，覆盖整个生产车间；模拟离散制造全流程的数据采集与传输场景，涵盖零部件加工、装配、质量检测等环节；测试指标包括传输延迟、丢包率、带宽利用率及安全防护效果，对比传统架构与本文方案的性能差异。

4.2 实验结果分析

实验结果显示，采用 5G 专网与 TSN 技术后，关键业务数据传输延迟从传统方案的 35ms 降至 8ms，满足工业自动化控制的实时性要求；通过 SDN 调度与容错编码技术，数据丢包率从 1.2% 降至 0.08%，网络可用性达到 99.99%；经边缘预处理与数据压缩后，带宽利用率从 62% 提升至 95%，同等网络条件下可支持更多设备接入，较传统方案设备接入容量提升 40% 以上；成功拦截 99.3% 的模拟攻击，包括设备伪造接入、数据篡改等，敏感数据传输未出现泄露情况，满足安全合规要求。实验过程中，对不同业务场景的传输性能进行专项测试，精密加工场景的设备协同控制延迟稳定在 5ms 以内，质量检测数据传输的丢包率为 0.05%，均优于传统方案。实验结果表明，本文设计的技术架构与传输优化策略能够有效解决工业互联网数据传输中的核心痛点，为智能制造提供稳定、高效、安全的技术支撑。

5 结论与展望

本文立足工业生产实际需求,设计了“感知-网络-平台-应用-安全”五层工业互联网技术架构,通过标准化设备接入、分级网络部署、混合云平台构建与全链路安全防护,实现了业务需求、技术适配与安全合规的三维平衡。针对数据传输问题提出的协议适配、智能调度、数据压缩与安全防护四大优化策略,有效提升了传输实时性、可靠性与资源利用率。实验验证表明,

该方案可显著降低传输延迟与丢包率,提升带宽利用率,为制造企业数字化转型提供了可落地的技术路径。未来研究方向将聚焦三个方面,一是探索AI与网络调度的深度融合,通过强化学习算法实现传输资源的自适应分配;二是优化边缘计算节点的算力调度策略,提升多任务并行处理能力;三是拓展跨行业架构适配方案,针对流程制造、能源电力等领域的特殊需求进行定制化优化,进一步扩大技术应用范围。

参考文献:

- [1] 王建民,张霖,陶飞.工业互联网技术体系与标准化进展[J].计算机集成制造系统,2022,28(5):1301-1318.
- [2] 陈德进,王丽波,卜小琳,等.基于5G uRLLC的工业网关端到端低时延通信研究[J].邮电设计技术,2025,(6):30-33.
- [3] 施巍松,杨帅,黄韬,等.边缘计算赋能工业互联网:架构、技术与应用[J].计算机研究与发展,2021,58(1):1-27.
- [4] 刘增基,孙其博,杨放春.工业互联网网络架构及关键技术[J].通信学报,2020,41(7):1-36.
- [5] 邓晓衡,李蕊,陈朋朋.工业互联网多协议转换网关设计与实现[J].计算机工程与应用,2023,59(12):234-241.
- [6] 赵兴龙,陈姊昀,王竑达.工业无线网络技术在工业互联网中的应用研究[J].邮电设计技术,2024,(11):12-18.
- [7] 吕华章,张阳,李军.时间敏感网络(TSN)在工业互联网中的应用与标准化[J].计算机研究与发展,2022,59(3):521-536.
- [8] 于亚男,于明帅.基于多层边缘计算的工业互联网资源管理与优化[J].移动通信,2023,47(8):33-38.