

工业互联网背景下设备数据采集与通信技术研究

肖亮¹ 王浩²

1. 中国电信股份有限公司湖北智能云网业务运营中心 湖北 武汉 430023

2. 中国电信股份有限公司孝感分公司 湖北 孝感 432100

【摘要】：工业互联网是新型工业化的重要数字底座，设备数据采集与通信是实现信息技术与运营技术深度融合的关键支撑。本文面向工业现场多源设备接入、高可靠低时延传输、海量连接与协议兼容等核心需求，系统构建工业数据采集技术体系，深入分析5G、时间敏感网络（TSN）、边缘计算、开放平台通信统一架构的协同机理，提出端侧采集、边缘预处理、确定性传输与云边协同一体化技术方案。该方案可有效解决设备异构、协议碎片化、传输实时性不足等行业痛点，对推动工业互联网规模化落地具有重要意义。

【关键词】：工业互联网；数据采集；5G；通信技术；边缘计算

DOI:10.12417/2705-0998.26.05.090

工业互联网是新一代信息通信技术与制造业深度融合的关键载体，是推动制造业数字化、网络化、智能化转型的核心基础设施，设备数据采集与通信作为工业互联网的感知末梢与传输动脉，直接决定工业系统的感知能力、控制精度与决策效率。面对工业现场设备异构、协议封闭、有线部署受限、实时性要求严苛等现实问题，传统通信技术已难以满足新型工业生产需求，5G与时间敏感网络、边缘计算、开放平台通信统一架构深度融合，为工业数据高效采集与可靠传输提供了全新技术路径。本文围绕工业设备数据采集与通信关键技术展开研究，提出一体化解决方案，为工业互联网工程落地提供理论与实践支撑。

1 工业设备数据采集技术体系

1.1 采集架构与层级划分

工业设备数据采集采用云—边—端三级协同架构，实现数据从感知、预处理到云端应用的全链路高效流转。终端层由传感器、可编程逻辑控制器（PLC）、计算机数字控制（CNC）设备、智能仪表、远程终端单元（RTU）、数据传输单元（DTU）组成，完成模拟量、数字量、开关量、图像、振动、能耗等多模态数据原始采集；边缘层以工业智能网关为核心，实现协议解析、数据标准化、本地缓存、断网续传与本地实时控制，显著降低云端传输压力与计算负荷；平台层依托工业互联网平台、时序数据库、人工智能（AI）引擎，实现数据存储、可视化分析、故障预测、能耗优化、生产调度等高级应用。三级架构分层协同、安全解耦，既保障现场控制的实时性，又实现全局数据的集中治理与价值挖掘。

1.2 核心采集技术与性能指标

工业级数据采集以多通道、高可靠、强防护、可追溯为核心技术特征。采集终端支持多路数字量与模拟量并行采集，可同步获取设备运行状态、通断电时间、地理位置、身份标识、故障代码等关键参数；硬件采用多级保护电路，具备过流、过

压、反接、浪涌抑制与抗电磁干扰能力，可在高温、高湿、粉尘、强震动环境下长期稳定运行；软件集成闪存（FLASH）离线存储、断网重传、数据应答缓存机制，网络中断时自动缓存数据，恢复后自动续传，确保数据不丢失、不漏传。经工业现场实测，典型采集系统关键性能指标如下表1所示。

表1 工业数据采集系统核心性能指标

性能指标	测试结果
设备状态采集准确率	≥99.9%
状态时长统计误差	0.48%
数据丢包率	0.31%
端到端通信时延	0.44 s
离线数据缓存准确率	≥99.9%

1.3 异构协议适配与标准化转换

工业现场协议碎片化是数据采集落地的主要瓶颈。当前广泛应用的工业通信协议包括Modbus、OPC UA/数据访问（DA）、Profinet、EtherCAT、控制器局域网（CAN）、RS485/RS232等，不同厂商设备多采用私有协议，难以直接互通。采集系统通过内置多协议解析引擎，对私有协议与标准协议进行深度解析，将异构数据统一转换为OPC UA开放标准格式，完成数据建模、点位映射与语义对齐，实现跨品牌、跨年代、跨接口设备无缝接入，为上层应用提供统一标准的数据接口，从根本上解决工业设备“接入难、互通难、协同难”问题。

2 工业互联网核心通信技术与场景适配

2.1 主流通信技术性能对比

工业通信以实时性、可靠性、连接密度、移动性、部署成本为核心选型依据，新一代工业通信技术以5G、TSN、5G-TSN融合为主体，全面支撑高端制造与确定性控制需求，关键性能

对比如表 2 所示。面向新型工业化场景，工业通信已全面进入以确定性、低时延、大带宽、广连接为特征的新阶段，固定设备采用 TSN 实现硬实时控制，移动与泛在接入采用 5G，核心

产线采用 5G+TSN 混合组网，可全面满足智能制造、无人化作业、远程协同等新型生产模式的通信保障要求。

表 2 新一代工业通信技术关键性能对比

通信技术	传输速率	端到端时延	连接密度	可靠性	移动性	部署成本	典型应用场景
工业以太网	100M~1Gbps	10~50ms	中	高	差	中等	固定产线、车间内网
5G 超可靠低时延通信 (uRLLC)	最高 10Gbps	1~10 ms	百万级/平方公里	99.999%	优	中等	远程控制、机器视觉、AGV 调度
TSN	1G~10Gbps	微秒级	中	99.999%	差	高	精密控制、闭环联动
5G+TSN	最高 10 Gbps	< 10 ms	百万级	99.999%	优	中等	全场景确定性通信

2.2 5G 工业级关键能力

5G 为工业互联网提供原生级通信支撑，三大核心特性全面匹配高端制造需求：一是 uRLLC，空口时延低至 1 ms 以内，可靠性达 99.999%，可满足远程机器人控制、精密装配、运动控制等硬实时业务；二是海量机器类通信 (mMTC)，每平方公里可支持百万级设备并发连接，满足海量传感器、仪表、自动导引车 (AGV) 大规模物联接入；三是网络切片，将物理网络虚拟为多个逻辑专网，实现控制、采集、视频链路隔离传输，按业务优先级分配资源，保障服务质量 (QoS) 确定性。在 5G 独立组网架构下，通过上下行资源调度优化、干扰抑制、冗余传输等增强技术，可进一步提升工业场景下的通信稳定性与时延保障能力，同时支持 RedCap 轻量化 5G 接入，在满足采集类业务需求的同时降低终端成本与功耗，实现高可靠业务与大连接业务的分层适配。

2.3 5G+TSN 确定性传输机理

5G 与 TSN 融合是下一代工业网络的核心方向。TSN 通过精准时钟同步、流量调度、门控控制实现微秒级时延抖动与零丢包传输，解决传统工业网络确定性不足问题；5G 提供灵活无线接入、广域覆盖与移动性支持，弥补有线网络部署受限、扩展不便的短板。二者深度融合可构建无线+有线、移动+固定、现场+云端一体化确定性工业网络，从根本上解决“有线不灵活、无线不确定”痛点，为全流程智能制造、跨区域设备协同提供高质量通信保障。5G 与 TSN 的融合遵循 IEEE 802.1 系列与 3GPP R18 及以上标准，通过统一时间同步、协同调度、端到端切片管理，实现从现场设备到边缘节点再到云端的全链路确定性传输，可同时承载运动控制、机器视觉、数据采集等多类型业务，成为新型工业网络的主流技术路线。

3 基于 5G 与云边协同的采集通信一体化方案

3.1 总体架构设计

本文结合工业现场需求与网络能力，提出端侧精准采集—边缘智能预处理—5G 确定性传输—云边协同决策一体化技术

方案，实现数据从感知、传输、计算到应用的全链路闭环。端侧以高可靠工业采集终端为入口，完成多源异构设备数据稳定获取；边缘侧通过 MEC 与工业网关实现协议转换、数据清洗、本地控制与边缘 AI 推理；网络侧以 5G 定制网+网络切片+TSN 提供端到端确定性通道；平台侧依托工业互联网平台实现数据应用、智能决策与业务创新。该架构以数据可信流转为核心，将采集、传输、计算、存储、应用解耦设计，可根据不同行业生产特点灵活配置模块，具备良好的扩展性与兼容性，能够适配离散制造、流程工业、矿山、化工、冶金等多行业差异化需求，同时支持存量设备利旧与新增设备统一接入，有效保护企业前期投资。

3.2 端侧采集终端设计

端侧采集终端以高性能嵌入式处理器为核心，支持多通道并行采集、硬件多级防护、离线缓存、实时时钟 (RTC) 精准授时；具备设备身份识别、定位、状态上报、故障自诊断能力；支持断网缓存、网络恢复续传、数据加密传输，可适配新旧各类工业设备，以最小改造实现数据上云，显著降低企业改造成本。终端采用工业级宽温设计与电磁兼容优化，可在 -40℃~85℃ 环境稳定工作，支持多路模拟量、数字量、脉冲量混合输入，能够同时满足设备状态、工艺参数、能耗数据、环境信息等多类型数据采集需求，通过硬件多级保护与软件容错机制，大幅提升终端在复杂工业环境下的长期运行稳定性。

3.3 边缘智能预处理

边缘节点是工业数据的本地枢纽与智能大脑，可完成多协议解析与数据标准化，对原始数据进行滤波、去冗余、异常检测与本地脱敏；将时延敏感型控制逻辑部署在边缘侧，实现现场闭环控制，大幅降低云端往返时延；同时对敏感数据本地处理，减少上云数据量，提升系统安全性与响应速度。边缘层支持规则引擎与轻量级 AI 推理部署，可实现阈值告警、趋势预测、故障诊断等本地智能分析，结合数据缓存与断点续传机制，确保网络波动时数据不丢失、业务不中断，真正实现“现场感

知、边缘决策、云端优化”的协同运行模式。

3.4 5G 确定性传输保障

方案采用 5G 独立组网 (SA) 与网络切片技术, 为工业控制业务分配高优先级、低时延、高可靠专属网络资源; 通过时隙配比优化、干扰协调、边缘计算卸载, 确保端到端时延稳定低于 10 ms, 为远程控制、机器视觉、AGV 调度、高精度定位等关键业务提供高确定性保障。中国电信在工业园区规模部署 5G 小基站、分布式皮基站与 MEC 边缘节点, 可实现厂区无缝覆盖与低时延就近处理, 为工业级通信提供稳定支撑。通过网络质量实时监测与动态资源调度, 可有效应对工业现场多设备并发、干扰复杂、移动切换频繁等问题, 保证控制链路与服务链路的稳定性, 满足工业场景对通信网络高实时性、高可靠性、高安全性的核心要求。

4 关键技术挑战与应对策略

在工业互联网规模化部署过程中, 设备数据采集与通信系统仍面临环境、设备、安全、性能等多维度现实挑战: 工业现场复杂的物理环境与设备现状, 会导致 5G 信号在钢结构密集区域出现明显衰减, 易产生覆盖盲区与切换卡顿, 直接影响控制系统稳定性; 大量在役老旧设备缺乏标准通信接口, 协议封闭不开放, 硬件升级改造成本高、周期长, 难以快速接入工业互联网; 海量终端上云进一步扩大网络攻击面, 数据传输与存储过程中存在泄露、非法接入、指令篡改等安全隐患, 对工业生产安全构成威胁; 工业闭环控制对时延与抖动指标要求严苛, 无线信道易受环境波动影响, 确定性传输保障难度显著提

升。

针对上述挑战, 采取技术、工程、管理相结合的综合应对方案: 网络层面, 采用 5G 小基站、室分系统、分布式皮基站实现厂区无缝覆盖, 结合干扰协调与冗余组网提升稳定性; 设备层面, 研发轻量化协议适配网关与采集模块, 以最小侵入式改造实现老旧设备接入; 安全层面, 构建终端身份认证、传输加密、边缘脱敏、平台权限管控的全链路安全体系, 强化工业数据全生命周期保护; 标准层面, 加快推进 5G+TSN 端到端标准化、OPC UA 信息建模标准化, 实现设备、网络、平台全链路互通。同时, 建立统一的设备接入规范与数据接口标准, 加强网络运维与安全运营体系建设, 全面提升系统可用性与可靠性。

5 结语

设备数据采集与通信技术是工业互联网的核心基石, 直接决定制造业数字化、网络化、智能化转型的深度与效率, 5G、TSN、边缘计算、多协议适配技术的深度融合, 为工业全域互联、数据高效传输、智能实时控制提供了完整解决方案。本文构建的一体化技术体系, 在采集精度、传输可靠性、系统实时性、场景适配性上具备显著优势, 可有效支撑智能制造、远程运维、预测性维护、无人化作业等高端工业场景落地。未来, 随着 5G-A、无源物联网、空天地一体化通信、AI 原生边缘节点等技术持续演进, 设备数据采集与通信将向更低时延、更广连接、更智能、更安全方向发展, 为工业互联网深度赋能新型工业化提供持续、强劲的技术支撑。

参考文献:

- [1] 黄劲安, 蒋绍杰. 5G+工业互联网发展探讨[J]. 广东通信技术, 2021, 41(05): 19-24.
- [2] 范苑. 5G 技术面向工业互联网的价值实现研究[D]. 北京邮电大学, 2022.
- [3] 刘佳乐. 5G+工业互联网综述[J]. 物联网技术, 2021, 11(12): 53-58.
- [4] 王显海. 多通道工业设备远程数据采集系统[J]. 自动化仪表, 2021, 42(07): 46-51.