

电气自动化中多设备通讯的技术创新与应用

许海龙

中储粮油脂工业东莞有限公司, 广东 东莞 516000

DOI:10.61369/ME.2025120057

摘 要 : 介绍智能制造场景下的多种通讯技术及应用。包括 OPC UA 与 TSN 融合架构、uRLLC 技术结合 Modbus/Profibus 协议的语义建模转换中间件等, 还涉及基于 PROFINET 协议的人机交互技术创新、多设备通讯异常诊断与恢复等方面, 以及 Modbus、PROFINET、PROFIBUS PA/DP 等协议在不同车间的实践成果, 并探讨物联网与工业协议融合的未来发展方向。

关 键 词 : 智能制造; 通讯技术; 多设备通讯

Technological Innovation and Application of Multi-device Communication in Electrical Automation

Xu Hailong

Sinograin Oils and Fats Industry Dongguan Co., LTD, Dongguan, Guangdong 516000

Abstract : This paper introduces various communication technologies and their applications in the context of intelligent manufacturing. It includes the integrated architecture of OPC UA and TSN, uRLLC technology, protocol conversion middleware for semantic modeling combining Modbus/Profibus protocols, etc. It also involves innovations in human-computer interaction technology based on PROFINET protocol, diagnosis and recovery of multi-device communication anomalies, as well as practical achievements of Modbus, PROFINET, PROFIBUS PA/DP and other protocols in different workshops, and explores the future development direction of the integration of the Internet of Things and industrial protocols.

Keywords : intelligent manufacturing; communication technology; multi-device communication

引言

智能制造是制造业发展的关键方向。随着《中国制造 2025》等政策的推进, 智能制造逐渐成为制造业的核心。在智能制造场景下, 通讯技术是实现设备高效协同、提升生产效率与质量的关键支撑, 其中 Modbus、PROFINET、PROFIBUS PA/DP、OPC UA 等工业协议及物联网技术的融合应用尤为核心。通讯技术贯穿于智能制造系统的多个方面, 从基于工业协议的通讯架构设计到边缘计算节点的调度策略, 再到多协议兼容下的多设备通讯可靠性提升以及人机交互技术创新等, 都离不开通讯技术的不断发展与创新。工业互联网环境下, 多协议协同与物联网融合面临新的挑战, 如网络安全与实时性的协同优化等问题。研究 Modbus、PROFINET 等协议及物联网技术在智能制造中的应用, 可显著提升系统的整体性能。未来, 随着技术的不断进步, 工业协议与物联网的深度融合将在智能制造中发挥更大的作用。

一、工业互联网驱动的多设备通讯架构创新

(一) 智能制造场景下的通讯架构设计

在智能制造场景下, 通讯架构设计至关重要, 核心在于实现 Modbus、PROFINET、OPC UA 等多协议的兼容与协同。基于 OPC UA 与 TSN 的融合架构在离散制造中的部署方案值得深入研究, 其中 OPC UA 作为跨平台统一协议, 负责打通 PROFINET、Modbus 等异构协议的信息壁垒, 凭借良好的互操作性和信息建模

能力, 实现不同协议设备间的高效通讯^[1]; TSN 提供高确定性的网络传输, 保障多协议数据的实时性和可靠性。二者结合, 可满足离散制造中复杂的通讯需求。同时, 时延敏感型业务的调度策略也至关重要, 针对 PROFINET 实时以太网协议的特性, 边缘计算节点靠近数据源快速处理数据, 降低时延。通过合理的调度策略, 可以提高系统的响应速度, 提升生产效率和质量。另外, 5G 与物联网技术的融合应用也为智能制造带来了更多可能性, 如基于 5G 的无线 PROFINET 部署实现超低时延和超高可靠性, 这些

技术的发展为实现智能制造的高效协同和优化提供了有力支撑。

（二）5G 专网与工业无线集成方案

uRLLC（超高可靠低延迟通信）技术与 Profibus DP 协议结合，在运动控制系统中具有显著应用成效。Profibus DP 作为经典的过程自动化总线协议，专注于高速数据传输，uRLLC 技术则保障传输的实时性和可靠性，二者协同能够满足运动控制对实时性和可靠性的严格要求，确保设备之间的精准通讯和协同操作^[9]。例如，在自动化生产线上的机器人运动控制中，该集成方案可使机器人的动作指令传输延迟极低，从而实现高精度的运动轨迹控制。同时，构建基于数字孪生的信道质量预测模型也至关重要，该模型可实时监测 Modbus、PROFINET 等协议的传输信道质量，为多设备通讯提供更准确的决策依据。通过数字孪生技术，对实际通信信道进行虚拟映射和模拟分析，提前发现潜在的信道干扰和质量下降问题，进而采取相应的优化措施，保障多设备通讯的稳定性和高效性。

二、多设备通讯核心技术创新

（一）异构网络协议转换技术

异构网络协议转换技术是智能制造设备互联的关键，核心解决 Modbus、PROFINET、PROFIBUS PA/DP 与物联网协议（如 MQTT）的兼容问题。语义建模协议转换中间件为核心支撑，可实现上述协议的无损数据映射——通过解析不同协议的数据格式与语义（如 Profibus PA 过程变量、Modbus RTU 寄存器、OPC UA 对象模型），依托统一语义模型完成精准映射。该技术保障跨协议数据准确传递，提升多设备通讯兼容性与可靠性，支撑统一工业通信平台构建，推动智能制造发展。实际应用中，其有效破解多协议设备通信障碍，提升系统集成效率、降低维护成本，保障生产连续稳定^[9]。

（二）高可靠性传输保障机制

构建基于多协议优先级划分的冗余通信模型，能够有效提升多设备通讯的可靠性。在该模型中，对 PROFINET 实时链路、Profibus DP 控制链路、Modbus 数据采集链路等依据其重要性和稳定性等因素进行优先权划分，其中 PROFINET 和 Profibus DP 链路优先级高于普通 Modbus 数据链路。当主链路出现故障时，可依据优先权迅速切换到备用链路，从而保障通信的连续性^[4]。开发基于强化学习的故障链路动态切换算法，强化学习算法具备根据环境反馈不断学习和优化决策过程的能力，这使得它在多协议通讯环境中能够实时监测各协议链路状态，并在检测到故障时快速做出切换决策，选择最优的备用链路进行通信。在多设备通讯中，它可以实时监测链路状态，当检测到故障时，快速做出切换决策，选择最优的备用链路进行通信，进一步提高传输的可靠性和稳定性，减少因链路故障导致的通信中断时间。

三、智能工程中的人机交互技术创新

（一）可视化交互界面设计

1. 多模态信息融合呈现技术

智能工程人机交互中，多模态信息融合呈现技术核心是整合 PROFINET、Modbus、Profibus 等多协议设备状态信息。以 AR-HMI 系统为核心研究方向^[9]，通过融合视觉、听觉等多模态信息精准呈现设备状态。三维可视化层面，采用不同颜色标注多

协议设备异常（如 PROFINET 主从站状态、Modbus 寄存器异常、Profibus DP 链路故障），以动态效果展示运行模式；交互逻辑上，设计手势识别、语音指令等便捷操作方式，支持用户查询特定协议设备运行参数。

2. 语音控制与手势识别集成

该技术核心是实现多协议设备便捷控制，关键在于开发环境自适应降噪语音指令识别系统^[9]：通过学习分析环境噪音特征，自适应调整降噪参数，确保 Modbus 寄存器读取、PROFINET 设备启停等指令在复杂环境下精准识别。同时，设计多维度手势认证机制，全面分析手势形状、轨迹等特征提升识别准确性。此融合技术让操作人员可通过语音查询设备状态、手势控制 PROFINET 机械臂等自然交互方式，显著提升操作效率与安全性，助力智能工程发展。

（二）数据分析与决策支持系统

1. 设备群协同优化算法

设备群协同优化的核心是构建兼容 PROFINET、Modbus 等多协议设备数据采集需求的能耗-效率多目标优化模型，需全面考量多协议设备能耗因素与效率影响，通过精准目标函数定义优化方向^[7]。联邦学习为该问题提供创新分布式求解方案，可在保护设备本地数据隐私的前提下实现协同优化：各设备本地训练模型后，上传参数至中央服务器聚合更新，再将更新参数分发回设备迭代训练，形成闭环优化机制。该机制有效解决多协议设备协同优化难题，显著提升设备群整体性能与运行效率，为智能工程高效运作提供技术支撑。

2. 异常工况预测与自愈系统

采用 LSTM-Attention 组合模型实现多协议设备通讯异常的智能诊断与恢复，模型针对性适配 Modbus、PROFINET、Profibus 等协议的通讯数据特征，结合 LSTM 的时序数据处理能力与 Attention 机制的关键信息聚焦优势，精准捕捉数据丢包、循环周期异常、总线故障等通讯异常特征。通过海量历史通讯数据深度学习训练，模型可实时监测通讯状态，一旦发现异常便快速定位故障点，并生成重启从站、切换备用链路等恢复策略^[8]。该系统大幅提升设备通讯可靠性与稳定性，减少通讯故障导致的生产停滞时间，通过持续监测优化，为电气自动化系统高效运行提供有力保障。

四、典型行业应用案例分析

（一）汽车智能制造车间

1. 产线设备群实时通讯方案

在某主机厂焊装车间的工程实践中，采用 PROFINET 与 Modbus 融合的通讯方案，成功实现了 600+ 设备节点通讯时延的大幅降低，从 120ms 降至 35ms。该车间面临着 PROFINET 机器人、Modbus 传感器等多协议设备节点的通讯协调难题，通过一系列技术创新与应用得以解决。采用了 PROFINET IRT（等时实时）技术优化实时数据传输，同时通过协议转换中间件实现 Modbus 传感器数据与 PROFINET 主站的无缝对接，提高了数据传输的效率和准确性。同时，对网络拓扑结构进行了合理调整，减少了数据传输的路径和节点，降低了传输时延。此外，引入了智能的设备管理系统，能够实时监测 PROFINET、Modbus 设备状态和通讯情况，

及时发现并解决潜在问题。这些措施的综合应用,使得车间的产线设备群能够实现高效、稳定的实时通讯,为汽车智能制造车间的生产效率提升和质量保障提供了有力支撑^[9]。

2. AGV 调度系统人机交互优化

在汽车智能制造车间的 AGV 调度系统人机交互优化中,采用基于 PROFINET IO-Link 的视觉导航与无线通讯协同优化方案,取得了显著成果。通过相关实测数据表明,这一优化使得 AGV 调度效率提升了 42%^[10]。视觉导航为 AGV 提供了精准的位置和路径信息,PROFINET IO-Link 则确保了 AGV 与调度系统之间的实时信息交互,使调度系统能够及时获取 AGV 的状态并做出合理的调度决策。两者的协同作用,有效减少了 AGV 的运行时间和路径偏差,从而大大提高了调度效率,为汽车智能制造车间的高效运作提供了有力支持。

(二) 智能电网监控系统

1. 电力设备状态监测网络

在智能电网监控系统的电力设备状态监测网络中,采用 PROFIBUS PA 与 LoRaWAN (物联网协议)、光纤网络混合架构,具有重要应用。PROFIBUS PA 协议适用于工业过程自动化的现场设备,可在防爆环境下稳定传输电力设备的过程参数,LoRaWAN 技术具有低功耗、远距离传输的优势,能够覆盖较大范围的输变电设备数据采集,光纤网络则确保核心数据的高速、稳定传输。该混合架构可显著提升输变电设备监测的可靠性,既能满足对不同位置、不同类型设备的数据获取需求,又能保障数据在传输过程中的质量。通过这种混合架构,可实现对电力设备状态的更精准监测,及时发现潜在问题,为智能电网的稳定运行提供有力支持。

2. 分布式能源协调控制

在智能电网监控系统的分布式能源协调控制中,基于共识算法的多逆变器通讯协调策略结合 Modbus RTU 协议,对电网谐波抑制具有重要贡献。Modbus RTU 协议用于逆变器的状态数据采集和控制指令下发,共识算法使得多个逆变器能够在通讯过程中达成一致的控制决策,从而优化对谐波的抑制效果。逆变器作为分布式能源接入电网的关键设备,其运行状态和控制效果直接影响电网的电能质量。通过这种协调控制,可减少电网中的谐波含量,提高电网的稳定性和可靠性,为智能电网的高效运行提供有力保障,满足用户对高质量电能的需求。

(三) 食品加工数字化车间

1. 异构设备互联互通实践

在食品加工数字化车间中,异构设备互联互通是关键挑战。

针对 Modbus 温控设备、PROFINET 包装机器人与 EtherCAT 输送线等多协议设备,某包装产线改造项目采用“EtherCAT+工业 WiFi”融合方案,辅以协议转换中间件,实现高效协同。首先对各类设备的通信接口和协议进行调研,随后在核心设备部署 EtherCAT 主站,通过中间件将 Modbus 和 PROFINET 数据统一接入 EtherCAT 总线,保障实时、准确的数据交互。对于移动设备或布线困难区域,则采用工业 WiFi 扩展覆盖。同时开发统一通信管理软件,集中配置多协议通信,支持有线与无线方式无缝切换,显著提升产线效率与质量控制水平。

2. 远程运维人机界面开发

在食品加工数字化车间的远程运维人机界面开发中,基于 WebGL 的 3D 监控界面发挥着重要作用,该界面可集中呈现 Modbus、PROFINET 等多协议设备的运行状态。它能够实时呈现设备的运行状态,通过 3D 可视化效果,运维人员可以更直观地了解设备的各个细节,同时可快速定位 Modbus 数据异常、PROFINET 链路故障等问题。当设备出现故障时,该界面能迅速定位问题所在,大大缩短了故障排查时间。通过高效的数据传输和智能分析算法,将设备故障平均响应时间降低至 15 分钟内。这不仅提高了设备的运行效率,减少了因设备故障导致的生产停滞时间,还提升了整个食品加工车间的生产效益和产品质量,为企业带来了显著的经济价值。

五、总结与展望

Modbus、PROFINET 等工业协议与物联网融合的多设备通讯技术创新,为智能制造提供关键支撑,实现跨协议设备高效协同,提升生产效率与质量。未来,数字孪生与 AI 在多协议通讯领域潜力巨大:AI 可实现协议自适应优化,动态调整传输参数提升兼容性;数字孪生能构建虚拟模型辅助优化通讯架构。同时,多协议协同下需兼顾网络安全与实时性,通过技术与管理创新保障通讯安全。物联网与工业经典协议深度融合将成核心方向,助力更广范围设备互联协同。

参考文献

- [1] 张浩银.考虑数控刀具约束的加工设备调度方法研究与应用[D].重庆大学,2022.
- [2] 邵文婷.面向低碳生产的车间多设备加工参数协同优化方法[D].天津大学,2022.
- [3] 王坤.智能制造背景下 Z 企业设备管理系统研究与实现[D].吉林大学,2021.
- [4] 章玉玲.M 公司基于动作时间分析的线体自动化改善研究应用[D].四川大学,2021.
- [5] 赵磊磊.变电站电气设备多光谱测温仪的研制[D].哈尔滨工业大学,2023.
- [6] 程明杰.通讯技术在发电厂电气控制系统中的应用研究[J].电子元器件与信息技术,2021,005(008):163-164.
- [7] 陆庆.电气自动化设备改造与技术创新研究[J].中外交流,2021,28(3):507.
- [8] 廖军.5G 通讯技术在交通管理中的应用[J].中国安全防范技术与应用,2021(1):41-44.
- [9] 雷红忠.电气自动化在建筑电气设备中的应用[J].今日自动化,2021(7):84-85.
- [10] 罗曼.计算机通讯技术在电子信息工程中的应用[J].中国宽带,2021(2):102.