

工业 PON 在工业互联网中的应用研究

杨文国

广东松山职业技术学院, 广东 韶关 512000

DOI: 10.61369/TACS.2025100022

摘 要 : 在国家大力推进新型基础设施建设与工业互联网飞速发展的背景下, 工业无源光网络 (passive optical network, PON) 技术在工业领域得到了推广, 工业 PON 与工业互联网呈现出深度融合发展趋势, 引领着制造业向着数字化、智能化与高端化的方向发展。本文阐述工业 PON 和工业互联网的概念及相关技术, 分析工业 PON 在工业互联网技术的适配性, 重点探讨了工业 PON 在工业互联网中的应用场景, 为二者的融合发展、工业领域的数字化转型升级提供参考和借鉴。

关 键 词 : 工业 PON; 工业互联网; 应用

Research on the Application of Industrial PON in Industrial Internet

Yang Wenguo

Guangdong Songshan Polytechnic, Shaoguan, Guangdong 512000

Abstract : Against the background of the country's vigorous promotion of new infrastructure construction and the rapid development of industrial internet, Industrial Passive Optical Network (PON) technology has been widely promoted in the industrial field. Industrial PON and industrial internet show a trend of in-depth integrated development, leading the manufacturing industry towards digitalization, intelligence, and high-endization. This paper elaborates on the concepts and related technologies of industrial PON and industrial internet, analyzes the adaptability of industrial PON to industrial internet technologies, and focuses on exploring the application scenarios of industrial PON in industrial internet. It aims to provide reference for the integrated development of the two and the digital transformation and upgrading of the industrial sector.

Keywords : industrial PON; industrial internet; application

引言

工业无源光网络技术是一种具有广阔应用前景的通信解决方案, 凭借高可靠、高宽带、低时延、抗干扰能力强等优势, 被应用于工业园区工业设备数据采集、传输与管理, 满足了工业园区信息化、数字化与智能化转型升级需求^[1]。工业互联网是新一代信息通信技术与工业经济深度融合的新型基础设施、应用模式和工业生态包含网络、平台、数据、安全等要素。《“十四五”信息通信行业发展规划》明确提出要完善产业园区、商务楼宇、学校、医疗卫生机构等重点场所的千兆光纤网络覆盖, 推广光纤到房间、到桌面、到机器, 按需开展用户侧接入设备的升级。在此背景下, 推进新型云网基础设施的建设, 成为新型工业化建设的重要方向^[2]。工业 PON 技术迎来发展机遇, 加强对工业 PON 所涉及的关键技术的研究, 分析其在不同工业互联网场景中的创新应用, 助力工业企业高质量、可持续发展势在必行。

一、工业 PON 的关键技术

(一) 通用化标准化网络协议

兼容 GPON、XGS-PON 等主流标准, 支持 OPCUA、Profinet 等工业协议转换, 打破设备协议壁垒, 实现不同厂商终端统一接入, 适配多行业通用组网需求, 降低跨场景应用复杂度。

(二) 确定性技术

通过动态带宽分配 (DBA) 精准调度资源, 结合单帧多突发技术压缩时延, 搭配时间敏感网络 (TSN) 特性, 将端到端抖动

控制在工业级标准内, 保障控制指令等关键业务确定性传输。

(三) 智能化网络管理

搭载光链路监测 (OLM) 技术实时感知链路状态, 支持 AI 驱动的故障自动定位与预警, 结合云化管理平台实现设备远程配置与运维, 减少人工干预, 提升网络管理效率^[3]。

(四) 算网控一体化技术

在 ONU 端集成轻量化边缘算力, 实现数据本地预处理与紧急控制指令执行, 联动网络资源调度与工业控制逻辑, 形成“算力-网络-控制”协同闭环, 支撑工业场景实时决策。

（五）安全技术

集成国密算法实现端到端数据加密，部署工业防火墙拦截异常流量，叠加指令完整性校验机制，防范数据篡改与泄露，同时支持设备身份认证，构建网络层-应用层-设备层安全防护体系。

二、工业 PON 与工业互联网的技术适配性

（一）工业互联网核心需求的技术映射

1. 实时性需求适配

工业互联网中控制类设备（PLC/DCS）需毫秒级指令响应，其核心矛盾在于“传输时延与控制精度的强关联”。工业 PON 通过动态带宽分配（DBA）的精细化调度机制，将带宽资源优先分配给控制指令，结合单帧多突发技术减少帧间隙损耗，实现端到端时延压缩与抖动控制，从技术层面解决“指令滞后导致的控制偏差”问题，满足时间敏感型工业场景需求^[4]。

2. 海量连接需求适配

工业互联网终端呈现“多类型、高密度”分布特征，传统组网面临“端口不足与管理复杂”困境。工业 PON 的 ODN 无源架构基于分光器实现信号分支，单 OLT 可支持数百台终端接入，且通过 ONU 设备的协议兼容性，实现传感器、执行器、机器人等多类型终端的统一接入，解决“多设备接入的网络扩容与协议适配”难题^[5]。

3. 高可靠需求适配

工业生产环境的高温、电磁干扰等因素易导致网络中断，其核心需求是“传输稳定性与环境耐受性”。工业 PON 设备通过 IP67 防护设计、抗电磁干扰屏蔽技术提升环境适应性，无源 ODN 网络无电子器件减少故障点，同时借助链路冗余设计，将网络中断风险降至最低，匹配工业生产“连续运行不中断”的核心诉求^[6]。

4. 多业务承载需求适配

工业互联网需同步传输控制信号（窄带）、视频流（宽带）、监测数据（低速），传统多网并行架构存在“资源浪费与数据孤岛”问题。工业 PON 基于 TDM/Packet 混合承载技术，为不同业务分配差异化传输通道：TDM 保障控制信号低时延，Packet 动态分配带宽承载视频流，实现“一网承载多业务”，简化网络架构并打破数据传输壁垒^[7]。

（二）工业 PON 降低工业互联网落地成本的机制

1. 建设成本优化机制

无源 ODN 架构减少有源设备采购量，光链路复用率高，对比传统铜线网络降低了布线与设备成本；同时，分光器的集中部署减少机房空间占用，进一步降低基础设施投入。

2. 运维成本优化机制

工业 PON 集成光链路监测（OLM）技术，通过光功率检测实时定位故障点，替代传统人工排查，减少运维人力投入；无源设备无电源需求，降低设备维护与能耗成本，长期运维成本可控^[8]。

3. 升级成本优化机制

工业 PON 支持从 10G 到 25G/50G 的代际平滑升级，仅需更

换 OLT/ONU 设备，存量光链路可复用，避免网络重构导致的投资浪费，保障企业数字化转型的“长期投资有效性”。

三、工业 PON 在工业互联网场景中的应用

（一）智能制造场景的应用

1. 柔性生产线的网络支撑

采用“OLT+分布式 ONU”架构，ONU 部署于生产线工位，通过 VLAN 隔离实现工序间数据独立传输，避免跨工序数据干扰；当生产线调整时，ONU 设备可快速迁移，无需重新布线，匹配“多品种小批量生产的动态调整”需求^[9]。关键技术点：VLAN 划分与生产单元的对应性、ONU 设备的即插即用能力、分光器的端口扩展灵活性，解决传统铜线网络“布线绑定工位”的刚性约束，提升生产线调整效率，支撑智能制造的柔性生产模式。

2. 工业机器人协同控制

机器人控制器通过工业 PON 接入，基于 QoS 优先级调度，保障控制信号优先传输；同时，通过低丢包特性避免指令碎片化，确保多机器人协同动作的时序一致性。通过 QoS 优先级的精细化配置、控制指令的传输完整性、多机器人数据交互的同步性，提升机器人协同作业精度，减少因网络问题导致的工序脱节，保障智能制造的生产连贯性。

3. 数字孪生的数据传输支撑

工业 PON 为数字孪生系统提供“双向数据传输通道”：上行传输设备实时运行数据，下行传输三维仿真视频流；通过 TDM/ Packet 混合承载，确保运行数据低时延传输、视频流高带宽支撑，实现物理设备与虚拟模型的实时同步。关键技术点：双方向数据的差异化传输保障、数据传输的实时性与带宽匹配性、虚拟模型与物理设备的同步精度。解决数字孪生“数据传输延迟导致的同步偏差”问题，为生产工艺优化、设备状态模拟提供可靠数据支撑。

（二）能源行业场景的应用

1. 智能电网配网监控

变电站部署工业 ONU 接入电压/电流传感器，构建 PON+5G 双链路架构：正常工况下 PON 承载海量电表数据，5G 作为备用链路；通过链路状态预判技术（如光功率衰减监测），当 PON 链路异常时，5G 毫秒级切换接管，保障配网数据连续采集。关键技术点：双链路智能切换机制、配网数据的优先级传输、链路故障的预判与响应。解决了传统无线传输的信号盲区问题，提升配网监控的完整性与可靠性，支撑智能电网的精准调度。

2. 新能源电站数据采集

针对光伏/风电电站的分布式布局，工业 PON 通过层级分光器实现全区域覆盖（如每 10 个逆变器接入 1 台 ONU），ONU 支持 Modbus/LoRa 协议直接接入，无需协议转换器；同时，抗电磁干扰设计抵御逆变器工作时的电磁辐射，确保数据采集完整性。关键技术点：分布式设备的网络覆盖方案、多协议兼容的终端接入、电磁环境下的传输稳定性。应用价值：打破传统采集系统的“协议孤岛”，保障新能源电站运行数据的精准采集，为能效分析

与设备运维提供数据基础。

3. 储能系统协同控制

储能电池簇部署工业 ONU，实时采集电池电压、SOC 数据，通过 PON 传输至电网调度中心；充放电指令采用端到端加密传输，防止指令篡改；借助 PTP 时间同步技术，确保各储能单元指令执行时序一致，避免电网负荷波动。关键技术需要实现储能数据的加密传输、多储能单元的时间同步、指令执行的精准性控制。在应用价值上，有助于提升储能系统与电网的协同响应效率，保障储能运行安全，助力新能源消纳与电网负荷平衡。

（三）流程工业场景的应用

1. 石油化工远程操作

炼化装置区部署防爆型 ONU（防爆等级 ExdIIBT4），接入阀门控制器、压力变送器，通过 PON 将数据传输至中控室；操作人员远程下发控制指令，工业 PON 的低延迟特性确保“指令-响应”闭环时间符合工艺要求，减少人员进入高危区域^[10]。关键技术点：防爆型设备的环境适应性、远程指令的实时传输、多装置协同的数据调度。应用价值：降低人员安全风险，提升操作响应效率，保障石油化工生产的安全稳定。

2. 冶金高炉监测

高炉周边部署耐高温 ONU（耐受 120℃ 以上），接入红外温度传感器、炉壁振动传感器，通过 PON 实时传输监测数据；当数据超出阈值时，系统通过 PON 快速下发调整指令，实现炉况动态优化。关键技术点在于耐高温设备的结构设计、监测数据的实时分析与反馈、炉况调整指令的快速传输。应用价值：避免传统设备因高温损坏导致的监测中断，提升高炉炉况预判精度，减少停产损失。

（四）物流港口场景的应用

1. 港口无人集卡调度

构建 PON+5G-A 融合网络，岸桥 / 场桥通过 PON 接入保障

装卸数据稳定传输，无人集卡通过 5G-A 接入实现移动性；SDN 控制器统一调度资源，当集卡靠近岸桥时，提升 5G-A 切片优先级并协同 PON 带宽，确保“装卸指令-位置信息”实时交互，解决切换延迟导致的对接偏差。通过固移网络的资源协同调度、无人设备的定位与指令传输、多设备协同的时序控制等关节节点，提升港口无人化作业精度，优化装卸效率，支撑港口自动化升级。

2. 智能仓储分拣

分拣线部署 ONU 接入机器人、扫码终端，通过 PON 构建“分拣设备-管理系统”直连通道；货物扫码数据实时回传，系统快速生成分拣指令并下发，低丢包特性确保指令与货物信息匹配准确，避免错分。通过分拣数据的实时传输、指令与货物信息的匹配精度、库存数据的动态更新等关键技术节点，提升仓储分拣效率与准确性，减少人工干预，支撑物流行业的智能化转型。

四、结束语

综上所述，工业 PON 作为工业互联网的核心连接技术，通过与工业场景需求的深度适配，在智能制造、能源、物流等领域实现规模化应用。其与 AI、5G、边缘计算的融合创新，进一步拓展了应用边界，从“基础连接”向“智能决策”“安全管控”升级。尽管面临定制化、门槛、安全等挑战，但通过标准构建、中小企业赋能、安全强化、技术创新等策略，工业 PON 将持续深化在工业互联网中的应用，成为推动制造业数字化转型的核心技术支撑，助力工业高质量发展。

参考文献

- [1] 曾涛, 蒋铭, 张德智, 等. 工业 PON 的技术演进及应用创新 [J]. 电信科学, 2024, 40(12): 136-145.
- [2] 赵兴龙, 陈姊昀, 王玟达. 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.
- [3] 黄威皓, 鲍自翔, 肖逸军, 等. 工业 PON 技术在油气生产场站组网的应用 [J]. 化工管理, 2021, (34): 89-91.
- [4] 张东, 白宇, 张腾飞. 工业 PON 时间确定网络及智能控制融合系统 [J]. 信息通信技术与政策, 2024, 50(05): 87-91.
- [5] 姜山, 唐忠友, 宋仕斌, 等. 5G 与工业 PON 技术在智慧工厂中的应用研究 [J]. 自动化博览, 2024, 41(02): 64-67.
- [6] 张佳玮, 苏琛, 纪越峰. 工业 PON 中确定性网络传输技术研究 (特邀) [J]. 光通信研究, 2024, (01): 7-19.
- [7] 马兆冉, 孙慧. 面向智能制造的工业 PON 技术能力与发展趋势 [J]. 通信企业管理, 2024, (02): 52-55.
- [8] 王铖, 路晓虎, 王佳馨. 5G+ 边缘计算技术在工业互联网云边协同场景中的部署 [J]. 通信企业管理, 2024, (02): 60-62.
- [9] 吴帮杰. 50G-PON 技术发展与应用场景 [J]. 长江信息通信, 2024, 37(01): 228-231.
- [10] 徐梅香, 相森. 工业 PON 赋能智能制造应用研究 [J]. 电信快报, 2023, (10): 14-17.