



工业PON的技术演进及应用创新

曾涛, 蒋铭, 张德智, 杨子尧
(中国电信股份有限公司研究院, 上海 200122)

摘要: 随着国家对新型基础设施建设的大力推动以及工业互联网的快速发展, 工业无源光网络 (passive optical network, PON) 技术在工业领域的应用日益广泛。深入探讨了工业PON技术发展的政策背景, 并对其在宽带提升、组网保护、确定性时延、开放智能, 以及安全防护等方面关键技术进行了阐述, 分析了工业PON在典型业务场景下的应用实践。

关键词: 工业PON; 千兆光网; 确定性时延; 可编程; 边缘算力; 数据安全

中图分类号: TN929.1

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024259

Technology evolution and application innovation of industrial PON

ZENG Tao, JIANG Ming, ZHANG Dezhi, YANG Ziyao
Research Institute of China Telecom Co., Ltd., Shanghai 200122, China

Abstract: Along with the country's vigorous promotion of new infrastructure construction and the rapid development of industrial Internet, industrial passive optical network (PON) technology is increasingly widely used in the industrial field. The policy background of industrial PON technology development was discussed in depth, its key technologies in broadband enhancement, network protection, deterministic delay, open intelligence, and security protection were elaborated, and the application practice of industrial PON in typical business scenarios was analyzed.

Key words: industrial PON, gigabit optical network, deterministic delay, programmable, edge arithmetic, data security

0 引言

在当今数字化高速发展的时代, 工业领域正经历着深刻的变革。随着工业互联网的快速发展, 高效、可靠、智能的通信技术成为推动工业

互联网发展的关键要素, 传统工业场景中网络方案存在以下痛点及瓶颈。

(1) 网络架构设计不统一、不规范。传统工业园区网络通常采用固定的树状或总线型网络拓扑结构, 在面对业务的快速发展和园区功能的拓

展时, 显得不够灵活。当生产企业园区内新增产线或开展新的数字化业务时, 需要对网络进行重新规划布局, 而传统架构会因为其僵化的特点而难以快速适应。

(2) 网络性能和稳定性不足。随着工业园区内数字化程度的提高, 越来越多的生产企业采用大数据分析来优化生产流程, 导致对网络带宽的需求急剧增加。传统工业园区网络带宽往往成为“卡脖子”的主要因素, 进而导致数据传输时延高, 影响生产决策。同时, 传统工业园区网络易受周边电磁干扰等外部环境因素的影响, 从而导致生产网络的稳定性不足。

(3) 接入适配性和扩展性不足。传统工业园区网络对支持各种协议的海量工控设备、物联网设备、生产设备、安防设备等兼容性和适配性不足, 在新增业务、新增设备接入网络或者园区升级演进时, 传统网络的架构扩展性存在明显不足。

(4) 安全防护能力弱。传统工业园区因缺乏标准的安全架构和安全防护体系, 往往存在认证鉴权、数据传输、数据存储、访问控制、入侵检测等安全风险。

(5) 网络成本高。传统工业园区组网设备、型号、协议类型多样, 大大增加了园区网络的运维成本, 以及随着业务发展演进所需的改造和升级成本。

工业无源光网络 (passive optical network, PON) 技术^[1]作为一种具有较大潜力的通信解决方案, 实现了对工业园区内各种工业设备运行数据、生产数据的采集与传输, 因其具备网络架构扁平、抗电磁干扰能力强、高性能、高可靠、易维护等优势 and 特点, 可满足信息化、智能化、数字化的工业园区业务诉求, 正逐渐在工业领域得到发展应用。同时, 国家也高度重视工业互联网的发展, 出台了一系列政策, 加速千兆光网在行业应用的发展。2021年, 千兆光网被写入政府工作报告, 报告指出要加大5G网络和千兆光网建

设力度, 丰富应用场景, 《“十四五”信息通信行业发展规划》也推进了千兆光网的发展, 其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。各部委和省市相继推出实施方案, 持续推进新型云网基础设施的建设, 助力新型工业化建设, 如财政部、工业和信息化部在2024年4月联合发布了《关于开展制造业新型技术改造城市试点工作的通知》; 工业和信息化部等七部门在2024年4月印发了《推动工业领域设备更新实施方案》; 2024年5月, 浙江省通信管理局印发《浙江信息通信行业现代化发展创新赋能新型工业化实施方案(2024—2027年)》等。

基于上述政策背景, 工业PON技术迎来了前所未有的发展机遇, 其不仅能够满足工业场景对大带宽、低时延、高可靠性的要求, 还能为工业企业提供灵活的网络架构和智能化的管理手段。本文将深入探讨工业PON所涉及的关键技术, 并阐述其不同工业场景中的应用创新, 通过对工业PON技术的研究, 为工业领域的数字化转型提供参考和借鉴, 助力工业企业在新时代的竞争中实现可持续发展。

1 工业PON方案关键技术

面向教育、交通、生产制造、应急公共服务、能源等行业需求, 工业PON智联网络在传统PON技术的基础上, 增强了可靠性、确定性、智能化的能力, 并且集成了边缘计算能力、算网控一体化等关键技术, 实现了工业行业的融合组网及工业数据的可靠流通。

工业PON智联网络作为新型千兆光网行业底座, 具备一网到底、一网承载、一网融合三大特点。一网到底是指工业PON实现了从生产现场、办公区域到安防、无线等领域的全覆盖, 打破了信息传输的壁垒, 确保数据在整个工业体系中畅通无



阻。一网承载是指工业PON依托高带宽^[2-3]、低时延、高稳定性的优势,承载着工业生产及办公系统中包括数据、语音、视频、图片、监控等在内的大量数据和业务传输需求。从高清视频监控到精密仪器的实时数据传输,从自动化控制系统的指令下达,到企业资源管理系统的信息交互,工业PON都能实现全业务承载。一网融合是指工业PON在承载全业务的同时,通过将数据采集、人工智能(artificial intelligence, AI)、边缘计算多技术融合,促进了工业互联网中生产、管理、安全等各个环节的紧密连接,实现了不同系统之间的协同工作,从而提高了工业生产的效率和质量。

工业PON智联网可以在泛在互联、确定性承载、智能开放三大类场景中应用,满足工业现场智能化、数字化发展的新趋势和可持续发展要求,为千兆光网在工业领域的发展提供了坚实的基础。

1.1 通用化、标准化的泛在连接

工业PON^[4-5]以PON技术方案为能力基础,与传统的交换机以太方案相比,天然具备全光网络、高速带宽、点到多点的高可靠网络特性。信号在光纤介质传输过程中,避免了传统电信号传输中的电磁干扰问题,从而确保了数据传输的稳定性和准确性。随着工业自动化程度的不断提

升,海量的数据需要在短时间或确定时间内进行传输和处理,工业PON提供的高带宽传输通道,可满足高清视频监控、实时数据分析、远程控制等工业应用对高速数据传输的需求。此外,工业PON采用点对多点的网络架构,具有高效、灵活的特点。一台光线路终端(optical line terminal, OLT)可以连接多个光网络单元(optical network unit, ONU),实现对多个工业设备或生产环节的同时监控和管理。在工业企业中,这种架构可方便地将不同区域的设备接入网络,减少布线的复杂性和成本。同时,点对多点的架构还便于网络的扩展和升级,可根据企业的发展灵活满足新的组网和业务需求。

高可靠性是工业PON在工业领域得以广泛应用的重要保障。工业生产通常处于连续运行状态,对网络故障导致的生产中断零容忍。工业PON基于Type C和Type B的网络保护类型和双归属保护机制,按需选择适合的保护技术方案,以满足工业园区不同业务的传输可靠性要求,为工业生产网络保驾护航。工业PON双归属保护机制组网如图1所示,其依托Type C保护机制为生产网络提供双重保障,当其中一台OLT或主干/分支网络出现故障时,另一台设备及光链

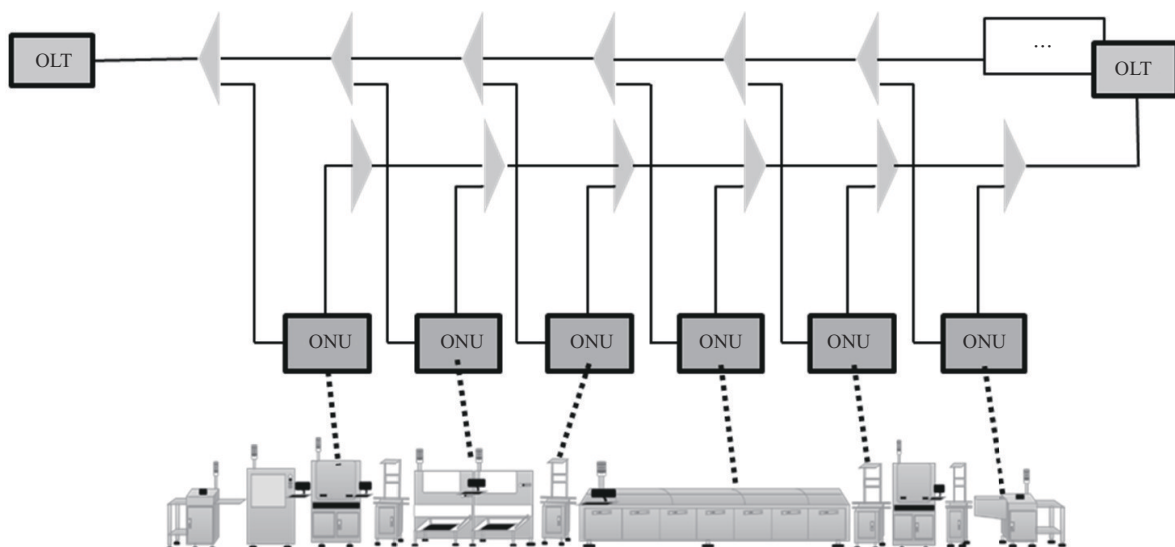


图1 工业PON双归属保护机制组网

路能够迅速响应并接管业务，确保数据传输的连续性，双归属可靠性最高可达 99.999%，业务能在 50 ms 内无缝切换，从而避免网络中断给生产带来的损失，极大地提高了工业网络的可用性和稳定性，为工业企业的持续生产提供了坚实的保障。

随着工业应用的多样化和复杂化，不同业务对网络的需求也日益多样化。基于 PON 切片技术，工业 PON 获得了融合承载的基本能力。基于 PON 切片技术的融合承载方案如图 2 所示，该方案能够根据工业园区不同业务的具体需求，灵活地划分并分配网络资源，从而实现工业场景下多业务的差异化融合承载，不仅提升了工业控制场景的适配能力，还为关键业务提供了高带宽、低时延的专属通道，同时满足了普通业务的基本通信需求。工业 PON 切片技术支持 OLT PON 板、OLT PON 端口和 ONU 粒度的切片，最大支持 8 个切片，每个切片都能实现独立规划和管控，确保了不同业务的相互独立转发及安全隔离。例如，在智能制造场景中，实时控制业务可以通过高优先级的网络切片进行传输，从而确保精确的控制指令能够及时到达设备；数据采集等非实时业务则可以在较低优先级的切片中传输，实现了网络资源的合理分配。这种融合承载的方式使得

工业 PON 能够高效地支持多种业务同时运行，极大地提升了工业网络的适应性和灵活性。

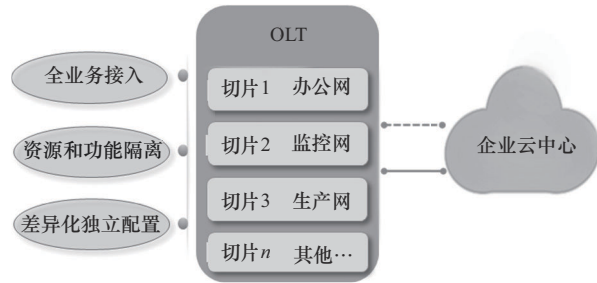


图2 基于 PON 切片技术的融合承载方案

工业领域的数字化进程中，工业 PON 以其通用化、标准化的特性展现出强大的泛在连接能力，为工业领域带来了高可靠、高效能的网络解决方案，助力工业企业在数字化时代实现转型升级和可持续发展。

1.2 工业 PON 确定性技术

在工业领域的业务发展及应用推进过程中，实现工业 PON 系统对工业行业内网确定性业务的承载与保障具有重要意义。与传统交换机网络相比，工业 PON 系统的确定性能力由确定性分析调度、互操作接口和模型及 PON 链路确定性控制这 3 个模块紧密协作共同实现，为工业生产的高效稳定运行提供了坚实的技术基础，多级协同工业 PON 确定性技术方案^[6]如图 3 所示。

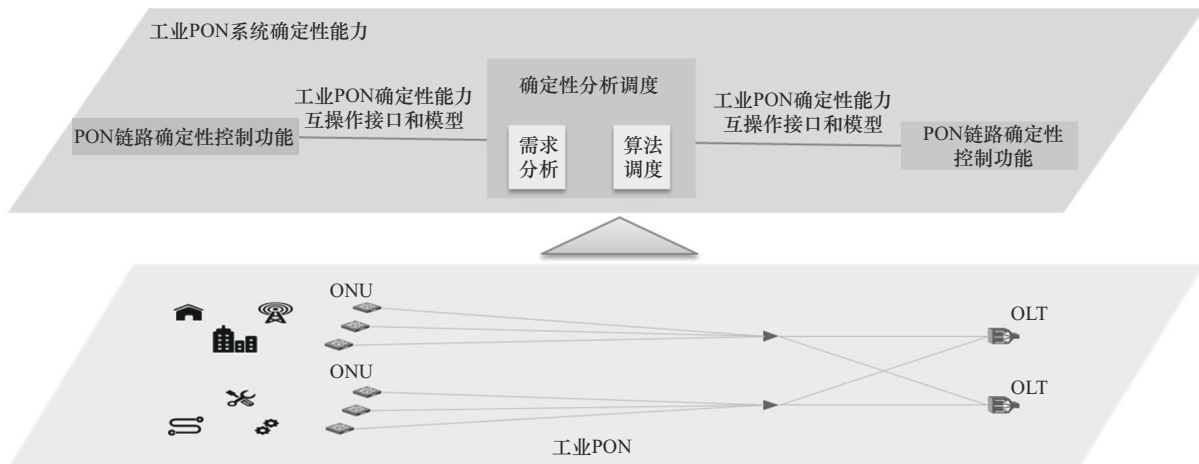


图3 多级协同工业PON确定性技术方案^[6]



首先, 确定性分析调度模块是整个系统的指挥中心, 通过对工业PON确定性能力^[7]和业务需求的智能化分析, 确定系统在不同场景下对确定性指标的要求, 并基于调度算法合理分配确定性资源。其次, 互操作接口和模型模块作为系统中设备和组件之间的通信桥梁, 通过标准化的接口和SDN/YANG模型, 将确定性分析调度的指令和算法消息分发至系统中的各设备和功能节点, 实现调度中心对设备的智能管控和互操作。最后, PON链路确定性控制功能模块接收到分析调度中心的策略和调度算法后, 直接作用于工业PON设备的链路层, 基于单帧多突发、开窗优化等技术方案实现PON链路的精确时延控制, 确保不同业务的传输保障目标得以实现, 确保ONU与ONU之间, 以及OLT与ONU之间数据传输的路径最优、时延最小, 从而体现出工业PON系统的确定性能力。

在PON技术方案中, 1个ONU可以有多个传输容器 (transmission container, T-CONT)。时隙被分配给特定的T-CONT, 而详细的分配信息在下行GPON传输汇聚层 (GPON transmission convergence, GTC) /XG-PON传输汇聚层 (XGTC) 头部的带宽映射 (bandwidth map, BWmap) 部分中得以体现。由于每个物理层 (physical, PHY) 帧只有1个GTC头部, 因此对1个长度为 $125\ \mu\text{s}$ 的下行PHY帧来说, 只有1个BWmap。动态分配突发机制是为了高吞吐量而设计的, 静态分配突发则更适用于确定性网络。在传统的BWmap中, 1个T-CONT只被分配1个时隙, 用于在1个帧中传输1个突发。如果错过了这个时隙, 用户数据包则需要等待到下一帧的时隙才能进行发送。因此, 如果用户数据包在不恰当的时间到达, 最高时延可达 $125\ \mu\text{s}$ 。为了降低时延, 在关闭静默窗口的前提下, 增加一帧中T-CONT的突发数量, 从而缩短时间周期。BWmap在每个PHY帧的下行GTC头部发送给ONU, 但在1个BWmap中, 1个T-CONT可以在1个PHY帧中被

分配2个、4个或更多的时隙。如果有2个突发均匀地分配在1个帧中, 周期将缩短为 $125\ \mu\text{s}/2=62.5\ \mu\text{s}$ 。如果有4个突发, 周期将缩短至 $125\ \mu\text{s}/4=31.25\ \mu\text{s}$, 工业PON确定性时延单帧多burst方案示意图如图4所示。

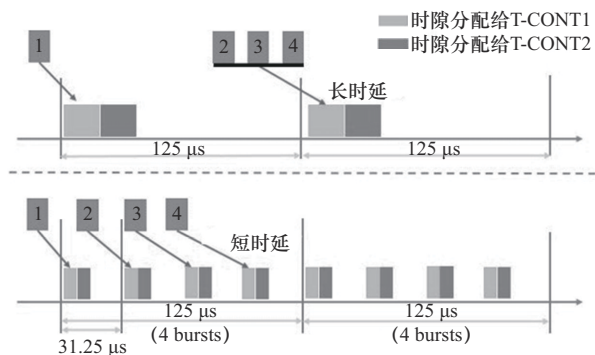


图4 工业PON确定性时延单帧多burst方案示意图

基于上述策略及方案, 并经实验室评估测试验证, 工业PON确定性能力可实现 $10\ \mu\text{s}$ 级的网络确定性时延、 $100\ \text{ns}$ 级的抖动, 以及最小 $55\ \mu\text{s}$ 的工业控制周期等工业领域的关键指标, 这为工业企业的智能化升级和数字化转型提供了强有力的支持, 推动工业领域向更高效、更智能、更可靠的方向发展。

1.3 开放可编程的智能网络管理

工业PON的智能运维技术需要一套统一的管控机制, 以在设备管理、业务配置和编排等多个方面提供实时且高效的管理手段。工业PON开放可编程智能网络体系如图5所示, 该体系通过模型化智能运维、低代码开放可编程和高精度遥测感知等技术方案, 构建了一个开放可编程的智能网络管理系统, 并以其全面的功能编程和智能化特性, 为工业企业的数字化转型和智能化发展注入了全新的活力。

同时, 低代码开放可编程技术为工业网络的发展带来了前所未有的灵活性, 该技术通过提供从数据到业务功能界面的全流程可视化编辑器, 实现了网络、算力及工控一体化的自动构建能

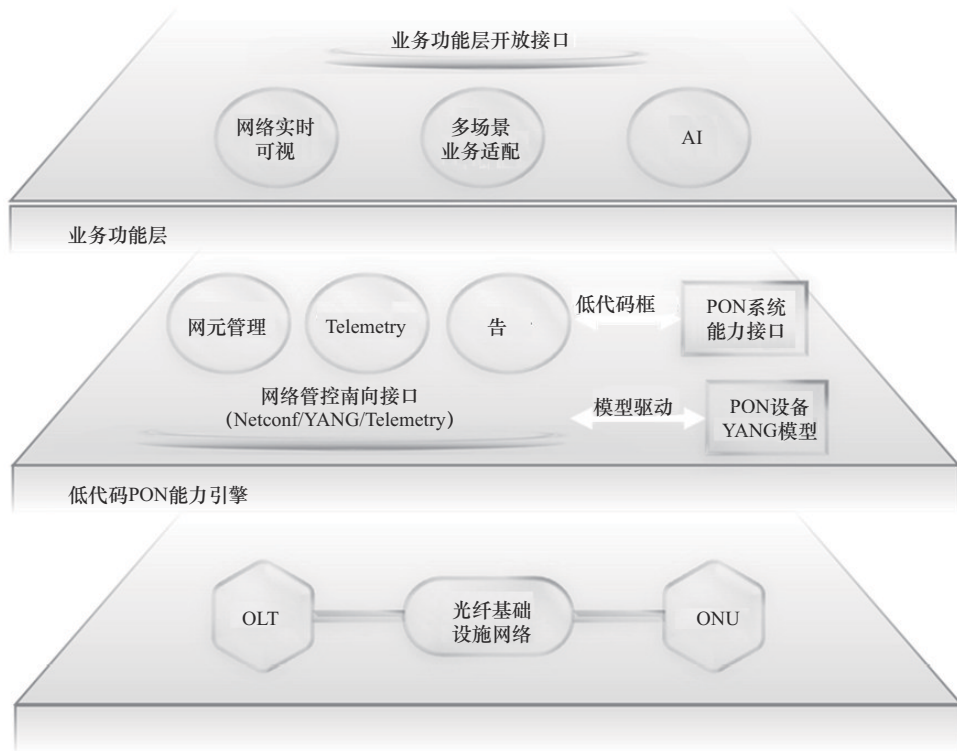


图5 工业PON开放可编程智能网络体系

力，不仅降低了开发的难度和成本，还大大提高了开发的效率，使工业企业能够更加快速地适应市场和业务的变化和需求。

此外，高精度遥测感知技术构建了实时数据采集与主动探测双通道，支持PON亚秒级态势感知和实时全景可视。这使得工业PON运维人员可以及时、准确地了解网络的运行状态，及时发现并解决潜在的问题，为工业生产的稳定进行提供

了坚实的保障。

1.4 集约赋能的算网控一体化技术

在工业应用领域，将边缘计算、生产办公网络和管控能力深度融合，成为工业生产制造的发展趋势及主要业务需求。工业PON技术依托硬件设备、链路协议，以及业务层面的技术融合，实现了工业生产过程的高效管理和业务优化，算网控一体化架构如图6所示。

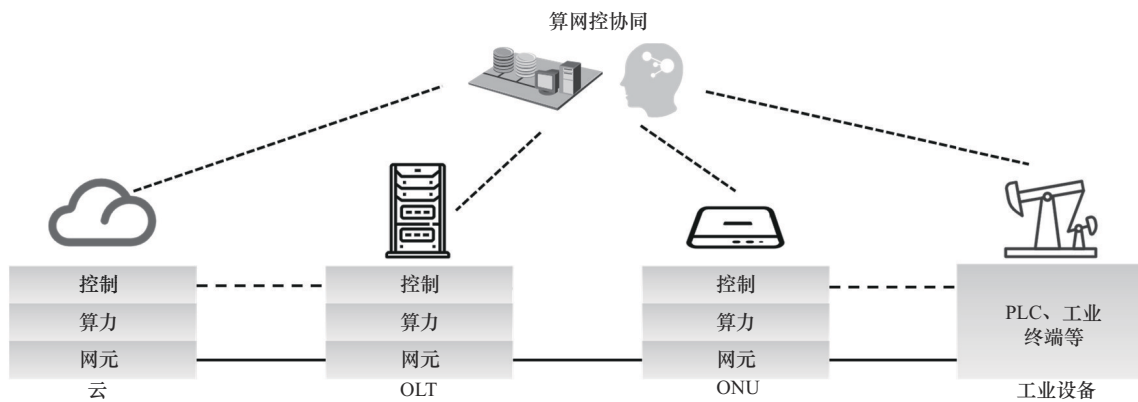


图6 算网控一体化架构



在硬件层面，边缘算力、网络设备和软件化可编程逻辑控制器（programmable logic controller, PLC）的一体化集成，使得单节点具备较强的处理能力和协同工作能力，使工业现场的设备在处理数据、网络通信及控制生产流程等方面的能力得到了较大提升，不再需要多个独立的设备分别承担不同的任务，而是将多种功能整合于一体，提高了设备的利用效率，降低了空间占用，还减少了设备的复杂性和成本，同时提高了系统的稳定性和可维护性。

在业务层面，算网控协同调度技术则进一步提升了工业系统的智能化水平。该技术能够实时感知业务需求，并根据需求动态地优化配置计算、网络和控制资源，使工业生产系统能够根据实际生产情况自动调整资源分配，确保关键业务得到优先处理，从而提高了系统的响应速度和服务质量。

此外，在高速工业生产过程中，时间准确性对协调各生产节点的操作至关重要。工业PON技术在链路层引入高精度时间同步技术，可确保工业园区内全网工业设备、算力系统和网络设备的时间一致性，这为精确的工业控制和数据采集提供了技术基础，避免了时间误差导致的生产故障和数据不准确问题。

集约赋能的算网控一体化^[8]工业PON技术，为工业的数字化转型和智能化发展提供了坚实的技术底座，它不仅提高了工业生产的效率和质量，还降低了成本和风险。

1.5 工业PON安全技术

为满足工业互联网领域在工业生产及数据信息安全防护方面的需求，工业PON安全技术方案构建了覆盖安全业务“全生命周期的四重安全”的安全体系，实现了“设备安全、网络安全、数据安全、管控安全”的防御。该方案还定义划分了SL1（基础级）、SL2（增强级）、SL3（领先级）、SL4（卓越级）4个工业PON安全等级^[9]，

工业PON安全等级体系^[10]见表1。

表1 工业PON安全等级体系^[10]

安全等级	防护目标
SL1	防止偶尔或随机违反的保护措施
SL2	防止通过简单手段、少量资源、通用系统技能和不良动机进行故意破坏
SL3	防止通过适度的资源、特定的系统技能和适度的动机进行故意破坏
SL4	防止通过大量资源、特定的系统技能和强大的动机，以复杂方式进行故意破坏

(1) 设备安全：基于防御编程、应用隔离、应用加固等方案保障应用安全；基于访问控制、入侵检测、认证鉴权等方式加强系统安全，保障工业PON设备的可靠性和稳定性，防止设备被恶意攻击或篡改。

(2) 网络安全：通过设备接入鉴权、防火墙、流量管控、加密技术、访问控制等方式，保障网络通信的可靠性。

(3) 数据安全：基于数据传输加密、数据存储加密、数据备份和恢复等方案，确保数据的完整性和可用性，防止数据泄露或被篡改。

(4) 管控安全：从管理和控制的角度出发，建立包含安全审计、配置核查、安全态势感知等在内的安全管理制度和流程。同时，加强对人员和操作的监管，防止人为因素导致的安全事故。

工业PON安全技术方案，为工业生产的稳定运行和持续发展提供了可靠的安全保障，助力工业企业在数字化转型中稳步前行。

2 工业PON技术应用实践

工业PON技术凭借其具备的全光网、高带宽、低时延、高可靠等特性，已经实现规模部署，作为工业园区的光纤组网能力底座，被广泛应用在钢铁、矿山^[11]、工业制造等典型应用场景。

2.1 多园区大带宽泛在连接

某大型生产企业的园区，面临已有网络带

宽低，无法传输高清图像和数据的问题，且各区域网络割裂，办公生产无法随时接入。为此，工业PON解决方案在园区中心机房部署了一套工业PON智联网^[12]，一张物理网络实现了多个子网的互联，并实现了有线网络和无线网络的全覆盖，同时，采用手拉手保护方案，确保了各区域网络在异常情况下的可靠性，实现了对整个园区网络的可视化、智能化状态监测和运维管理。多园区大带宽泛在连接组网架构如图7所示。

该应用场景中，园区终端和生产设备实现了千兆全光接入工厂数据中心，千兆全光接入使得数据传输速度得到了极大的提升，满足了生产园区内的自动化生产线实时传输大量高清图像和数据的需求，以及研发办公园区大型设计文件的高速下载和上传需求。此外，依托工业PON技术方案的泛在连接、高可靠性及智能运维等特性，该

方案满足了园区内员工随时随地接入网络的需求，实现了对园区网络的自主智能化管控与运维，降低了网络故障率。同时，园区内一次性光网施工避免了多次施工带来的业务影响和成本增加，并实现了业务平滑升级。工业PON技术方案在该应用实践中取得了显著的成效。

2.2 确定性产线工业控制

钢铁行业生产环境复杂、生产工序要求严格，其自动化、智能化生产对工业控制网络时延、抖动和稳定性等指标要求很高。该应用实践采用基于PON的新型全光工业网络解决方案，构建了一套“算网控一体化”的全光工业控制网络^[13]。该方案充分验证了PON网络在工业自动化生产环境中的超低时延/抖动、稳定可靠和灵活接入能力，以及支撑高精度工业控制业务场景、助力钢铁行业数字化转型的赋能作用。确定性产线工业控制流程及组网如图8所示。

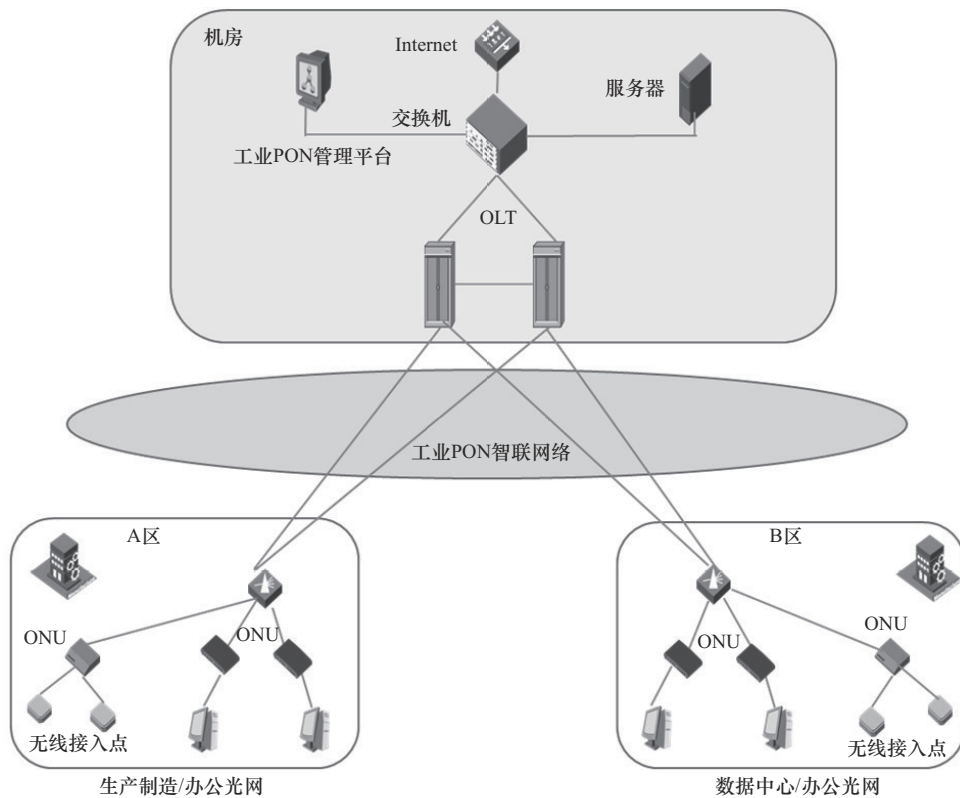


图7 多园区大带宽泛在连接组网架构

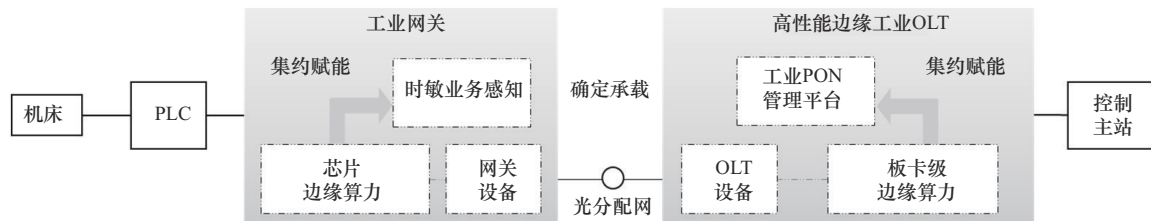


图8 确定性产线工业控制流程及组网

在该试点中,网络时延低于 $60\ \mu\text{s}$,远低于轧机生产线工业控制周期 $1\ \text{ms}$ 的需求,有效承载了轧钢设备的工业控制流,保障了工业控制的高精度和自动化生产的稳定运行。相较于传统网络,基于PON的工业控制网络采用二层极简架构,满足了PLC主站部署在生产现场或集中部署等不同组网需求,实现了生产设备的灵活接入和快速建网。在OLT边缘算力板卡上运行的电信工业管理平台,提供了算、网、控一体化管控自服务入口和确定性传输的调度能力,提升了业务和网络质量感知能力,助力了网络的智能化运维。

3 结束语

工业PON作为工业互联网领域的光纤组网能力底座,构筑了工业网络的全光智联能力,其构建的泛在连接、确定性承载、智能开放三大应用场景分别从不同维度满足了工业生产的多样化需求。这些场景实现了工业园区内设备的无缝接入、园区网络的无缝覆盖、生产等关键业务的可靠性传输,以及园区网络和业务的智能化和可视化运维,此外,还提供了灵活开放的业务发展平台。随着工业4.0的不断推进和数字化转型的加速,工业PON技术在未来的工业发展中将发挥更加重要的作用,逐步成为推动工业高质量发展的关键能力,为工业领域带来更多的创新与变革。

参考文献:

[1] YU X, SUN H, ZHANG D Z, et al. Industrial PON system architecture and applications[C]//Proceedings of the 2023 32nd

Wireless and Optical Communications Conference (WOCC). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-4.

- [2] JIN J L, ZHANG D Z, JIANG M, et al. Industrial PON application innovation pilot based on 50G-PON and XG-PON hybrid architecture[C]//Proceedings of the 2023 Asia Communications and Photonics Conference/2023 International Photonics and Optoelectronics Meetings (ACP/POEM). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-4.
- [3] ZHANG D Z, LUO Y Q, JIN J L. Highspeed 50 Gb/s passive optical network (50G-PON) applications in industrial networks[C]//Proceedings of the 2022 IEEE 23rd International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR). Piscataway: IEEE Press, 2022: 113-118.
- [4] 中华人民共和国工业和信息化部. 工业互联网联网技术无源光网络(PON)总体技术要求: YD/T 4651—2024[S]. 2024. Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Technologies for industrial internet networking overall technical requirements for passive optical networks (PON): YD/T 4651—2024[S]. 2024
- [5] 中华人民共和国工业和信息化部. 工业互联网联网技术无源光网络(PON)设备技术要求: YD/T 4443—2023[S]. 2023. Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Technologies for industrial internet networking technical requirements for passive optical network (PON) equipment: YD/T 4443-2023[S]. 2023.
- [6] JIN J L, ZHANG D Z, LI Q Z, et al. Latency and jitter optimization of industrial PON system by frame-based dense burst allocation[C]//Proceedings of the 2022 Asia Communications and Photonics Conference (ACP). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1211-1214.
- [7] WENG Y, JIN J L, ZHANG D Z, et al. Model and analysis of the maximum upstream latency of a deterministic industrial PON system applying frame-based dense burst allocation method[J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(9): 3210-3220.

- [8] JIANG M, LUO Y Q, ZHANG D Z, et al. Enabling next-generation industrial networks with industrial PON[J]. IEEE Communications Magazine, 2023, 61(4): 129-135.
- [9] 中华人民共和国工业和信息化部. 工业通信网络 网络和系统安全术语、概念和模型: GB/T 40211—2021[S]. 2021. Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Industrial communication networks network and system security terms, concepts and models: GB/T 40211—2021[S]. 2021.
- [10] 中国电信股份有限公司研究院. 工业PON安全白皮书(2024年)[R]. 2023. China Telecom Corporation Research Institute. Industrial PON security white paper (2024) [R]. 2023.
- [11] LUO Y Q, JIANG M, SUN H, et al. Industrial passive optical network (PON) applications in smart mining[C]//Proceedings of the 2023 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-4.
- [12] 宽带发展联盟. 工业制造企业千兆光网建设指南白皮书(2022)[R]. 2023. Broadband Development Alliance. White paper on guidelines for building gigabit optical networks for industrial manufacturers (2022) [R]. 2023.
- [13] 未来网络发展大会. 未来网络白皮书: 确定性网络技术与产业应用白皮书(2022年)[R]. 2023. Future Network Development Conference. Future of the web white paper: white paper on deterministic network technology development and industrial applications (2022) [R]. 2023.

[作者简介]



曾涛 (1984-), 男, 中国电信股份有限公司研究院网络技术研究所接入网络研究中心副总监、工程师, 主要研究方向为光接入网、工业PON、全光组网、接入网切片等。



蒋铭 (1977-), 女, 博士, 中国电信股份有限公司研究院网络技术研究所副所长、教授级高级工程师, 主要研究方向为光网络、下一代PON技术及工业PON技术等。



张德智 (1978-), 男, 中国电信股份有限公司研究院网络技术研究所接入网络研究中心总监、中国电信集团光接入领域高级专家、FSAN副主席, 主要研究方向为下一代高速PON、工业PON、全光组网、光接入网SDN和智能化等。



杨子尧 (1990-), 男, 中国电信股份有限公司研究院网络技术研究所接入网络研究中心总监助理、工程师, 主要研究方向为光接入技术及其应用、SDN、工业PON等。