



高性能工业 PON 白皮书



工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

工业互联网产业联盟 (AII)

2023年6月

声 明

本报告所载的材料和信息,包括但不限于文本、图片、数据、观点、建议,不构成法律建议,也不应替代律师意见。本报告所有材料或内容的知识产权归工业互联网产业联盟所有(注明是引自其他文献的内容除外),并受法律保护。如需转载,需联系本联盟并获得授权许可。未经授权许可,任何人不得将报告的全部或部分内容以发布、转载、汇编、转让、出售等方式使用,不得将报告的全部或部分内容通过网络方式传播,不得在任何公开场合使用报告内相关描述及相关数据图表。违反上述声明者,本联盟将追究其相关法律责任。

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

工业互联网产业联盟

联系电话: 010-62305887

邮箱: aii@caict.ac.cn

前 言

工业应用场景，相比传统公众接入场景，对于有线接入网络的性能提出了更高的要求，主要包括更好的确定性（确定性时延和抖动）以及更高的传输带宽需求。

为满足工业应用需求，现有工业 PON 技术需要突破传统时分复用上行机制的固有时延抖动限制，实现确定性网络传输能力；同时需要提供更高带宽的传输能力，为工业客户提供一整套普适化、高性能、自主可控、智能化的新型高性能工业 PON 光网络基础设施。

本白皮书介绍了工业场景对于接入网络能力的需求，对工业 PON 技术支持确定性和高带宽能力的业务场景需求进行了介绍，并针对具体 PON 确定性技术优化方案，以及下一代高带宽 50G PON 研究进展进行了梳理，旨在为高性能的工业 PON 提供全景视图，供产业界参考。

编写组成员（排名不分先后）：

金嘉亮、孙慧、李玉峰

牵头编写单位：

中国电信集团有限公司

参与编写单位：

中兴通讯股份有限公司



工业互联网产业联盟公众号

目 录

第一章 需求分析	1
1.1 工业场景对于网络的需求	1
1.2 什么是工业 PON 技术	2
1.3 什么是高性能工业 PON	4
1.4 高性能工业 PON 与工业 PON 演进路线的关系	5
1.5 网络能力需求调研及分析	6
第二章 确定性工业 PON 技术	11
2.1 工业 PON 系统确定性能力	11
2.2 工业 PON 确定性优化技术	12
2.4 确定性工业 PON 全景视图	18
第三章 高带宽工业 PON 能力分析和演进	19
3.1 现有技术介绍	19
3.2 高带宽 PON 演进技术	20
3.3 高带宽 PON 标准化情况	22
3.4 高带宽 PON 关键技术和能力	25
第四章 总结和展望	26
参考文献	27

第一章 需求分析

1.1 工业场景对于网络的需求

工业互联网网络是构建工业环境下人、机、物全面互联的关键基础设施，可实现研发、设计、生产、销售、管理、服务等产业全要素的泛在互联，促进各种类型工业数据的开放流动和深度融合，推动工业资源的优化集成和高效配置，加速制造业数字化、网络化、智能化发展，有力推动工业转型升级和提质增效。

工厂内网指在工厂或园区内部，满足工厂内部生产、办公、管理、安防等连接需求，用于生产要素互联以及企业 IT 管理系统之间连接的网络。例如工业现场用于连接生产设备的生产控制网络，用于连接企业工业制造管理系统等的企业信息网络，以及用于能源、安防等监控的物联网都属于工厂内网范畴。

网络作为工业互联网的基础，为工业互联网的发展提供了重要的网络连接基座。工业互联网网络与边/云能力共同构筑了基础设施层，提供大带宽、低时延、高可靠的网络入口和高速管道，满足各新建领域的网络连接需要，支持丰富的行业数字化应用。

为了满足工业企业数字化、网络化、智能化的业务转型升级需求，工厂内网承载方案的确定性网络能力，包括确定性时延和抖动能力，是工业客户对于工厂内网网络系统能力的一个重点需求。确定性网络能力可以提供稳定确定的网络传输保证，是承载各类现场总线业务、生产执行系统的必要业务保证。

同时，为了解决工业场景中数据源爆发式增长，数据流转不畅、数据处理不及时制约工业大数据、工业智能等创新应用的发展问题，需要

进一步提升现有工业内网网络的带宽，保证端到端网络带宽，满足产线机器视觉、跨域工业远程控制、AR/VR 实时辅助、产线协同等新业务的高精准、高可靠、高可控，满足行业应用对于网络带宽的爆炸性增长需求趋势。

工业 PON 技术采用先进的无源光纤通信技术，可实现与工厂自动化生产系统融合，是构建未来工厂智能化的基础，可以有效解决智能工厂和数字车间的通信交流，构造安全可靠的工厂内网络，完成智能制造基础设施、工艺、物流、人员等各方面基础信息采集和互通，解决困扰企业的工业协议繁多和异构网络互联问题，实现工业现场协议的灵活转换和统一格式，同时为企业上云做好基础网络和数据服务，与现有工业企业的基础网络有机结合。工业 PON 解决方案已在国务院及工信部的工业互联网发展相关文件和要求中作为高质量工厂网络的重要方式予以采纳。

1.2 什么是工业 PON 技术

工业 PON 源于 ITU-T/IEEE/ETSI 的 PON 标准体系，是一种全新的工业互联网用全光网络连接技术，采用开放软硬件平台架构、SDN 管控模型和能力开放接口，提供工业数据采集解析、确定性传输、边云协同、网络切片、智能化运维等关键能力，实现“人、机、物”全面互联。

该技术可构建抗干扰能力强、传输带宽高、异构协议互转、连接自愈能力强、网络安全性高、部署经济性好的工厂网络，可应用于企业信息网、车间级生产网以及现场级工业闭环控制网络，促进 DICT 融合，实现工业企业“两升三降”，助力产业数字化转型升级。

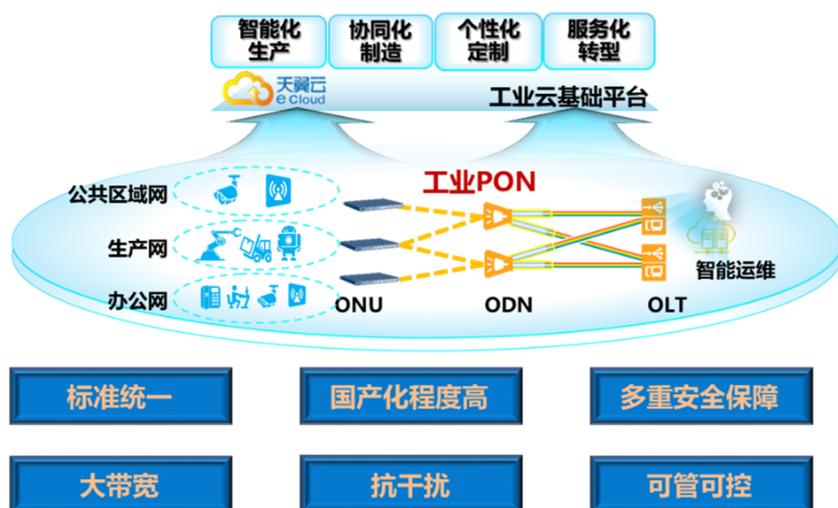


图 1 工业 PON 网络在工厂内网中的位置及其特点

工业 PON 系统由局端 OLT(光线路终端)、用户端 ONU(光网络单元)、及连接局端和用户端设备的 ODN(光分配网络)组成，具体架构可见图 1，采用单纤双向、点到多点的网络结构。下行方向（OLT 到 ONU）为广播选收，上行方向（ONU 到 OLT）采用时分多址接入（TDMA）方式对各 ONU 的数据发送进行调度。ODN 由光纤和一个或者多个无源光分路器等无源光器件组成，在 OLT 和 ONU 之间提供光通道。

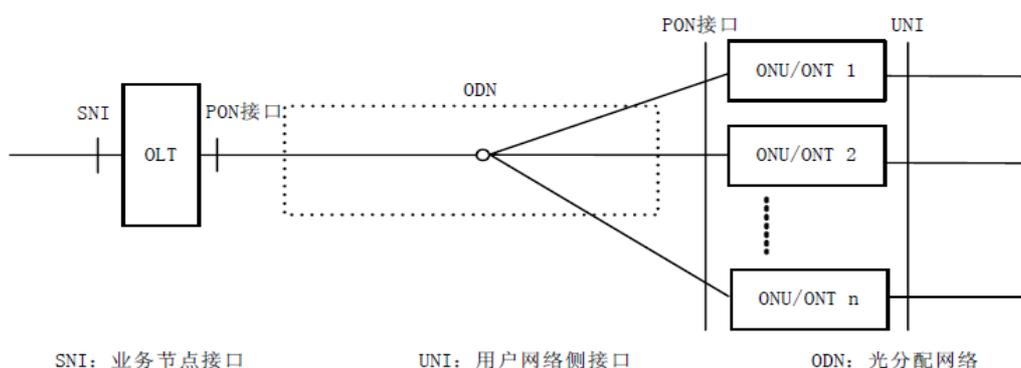


图 2 工业 PON 系统技术架构

工业 PON 网络适用的典型场景有：一是固定生产设备高可靠连接，

二是办公设备有线无线统一承载，三是设备协同高效工作，四是机器视觉监测、环境和设备检测。我国的运营商和 PON 设备厂商，率先在行业推广工业 PON 解决方案，已达到全国规模推广的程度，被广泛应用于工厂网络改造和网络建设，其中包括汽车零部件制造业、家电制造业、装备制造制造业、3C 制造业等行业的知名企业。

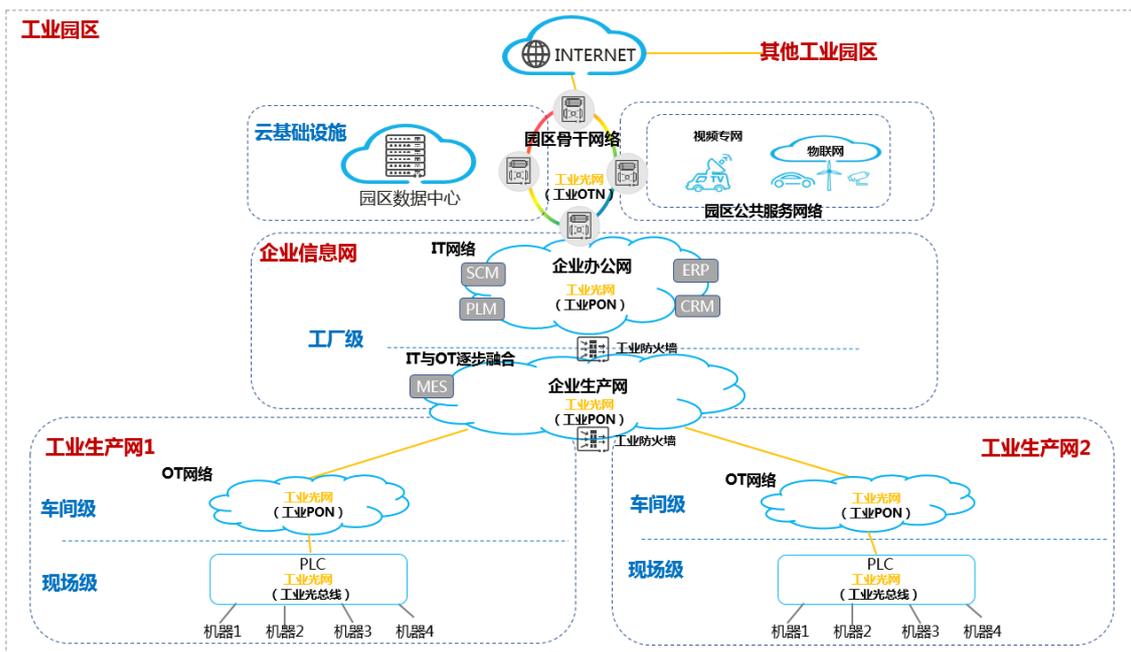


图 3 工业 PON 系统在工业互联网整体网络架构中的位置

工业 PON 系统，可以为工业内网提供确定性传输和高带宽的网络能力，满足工业场景各类业务的典型需求。同时具备高可靠、低成本、广适用、易推广等特点，有效解决企业数字化改造中对多协议数据采集、安全稳定传输、工业应用端边云协同和低成本网络改造等问题，实现企业生产效率和设备使用率的提升，同时降低生产成本、生产设备故障率和资源消耗。

1.3 什么是高性能工业 PON

确定性网络能力，目前不同的行业协会以及标准化组织，对于确定

性网络的定义和侧重点有所不同，其中确定性（有界）的时延和抖动是大家所共同关心的。同时，对于确定性带宽、确定性安全隔离能力、网络可靠性等方面，也会有相应的需求。

高性能工业 PON 主要在数据传输的确定性（确定性时延和抖动），以及网络传输带宽方面，相比现有工业 PON 有了针对性提升，可以进一步满足工业领域大部分应用场景对于网络确定性和高带宽的需求（具体见 1.4 章节），同时结合工业 PON 本身网络保护倒换能力，可以提供差异化的网络可靠性能力。

1.4 高性能工业 PON 与工业 PON 演进路线的关系

工业 PON 是面向工业领域 IT 与 OT 融合、通信网络云端协同、及云网融合的底层网络基座。按照不同的业务承载需求和场景，以及能力演进方向，可以归纳为以下三个阶段。

- 工业 PON 1.0: 目标为满足中小企业一般性网络承载需求，包含了公众 PON 网络的基础功能和性能，OLT 为常规 OLT 设备，ONU 终端为政企网关，可满足企业办公网络、室内 WiFi 覆盖承载、室内视频监控、无特殊时延需求的车间级网络承载需求。

- 工业 PON 2.0: 包含 1.0 版本特性，提供基于网络切片的多业务差异化承载和安全隔离、工业数据采集接口、ODN 网络高可靠、网关工业环境适应性等能力和特性，支持在室外/严酷工业环境工作，提出基于容器技术的 ONU，集成数采功能，可灵活加载第三方插件，可自适应工业协议。

- 工业 PON 3.0: 在 2.0 基础上，提出 PON OLT 设备新型架构，融合通用计算基础设施，支持分布式计算存储等云边协同能力，提供确定性 PON 特性（包含 PON 低时延优化、TSN 技术融合，超高带宽能力，网络

安全特性、智简运维能力等特性，提升工业 PON 方案对前瞻产业升级技术的支持及其适用范围，拓展工业 PON 从中小企业向大型企业、传统制造业向先进制造业的全范围覆盖。

工业 PON 1.0、2.0 和 3.0 是项目组针对成本敏感型、业务稳定性、先进技术能力型等不同类型企业的差异化需求所提出的解决方案，三个阶段非升级替代关系，而是按照不同工业行业客户的场景和需求按需部署。

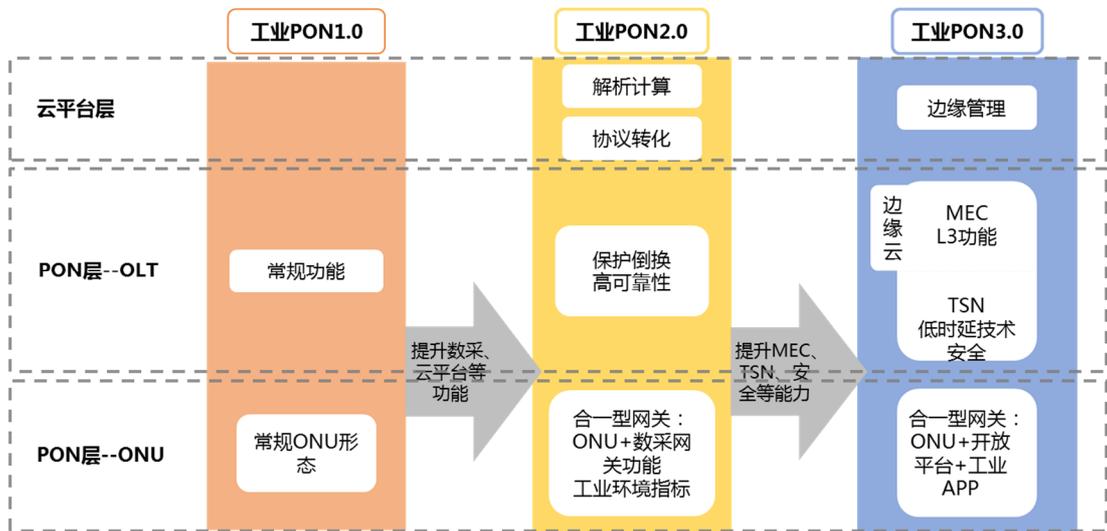


图 4 工业 PON 演进路线示意图

高性能工业 PON，实现了工业 PON 3.0 在确定性、高带宽方面的能力，是工业 PON 3.0 体系的关键组成部分。同时，高性能工业 PON 系统，可以同时集成工业 PON 1.0 和 2.0 的能力，为用户提供类似工业 PON 2.5 阶段的技术能力。

1.5 网络能力需求调研及分析

1.5.1 低时延低抖动能力需求

实际工业应用中，工业闭环控制场景对时延/抖动的要求较高，否则

会导致整个生产工序无法按计划执行，对产品合格率带来不利影响。

离散制造业场景中，产品制造往往由多个零件经过一系列并不连续的工序加工装配而成，涉及生产终端类型多，数据通常包括物料、加工设备、工装、加工过程、质量等，网络传输如果出现过大的时延或抖动，将导致制品情况，生产设备关键数据未能按需送达到上层管理平台，影响整体生产流程的进行。

智慧矿山行业场景中，较大的传输时延将提高作业操作难度和施工危险性；同时厂景涉及地面和井下各区域生产数据采集上传到地面调度机房，网络高抖动可能对生产安全带来无法弥补的损失。

工业场景中，生产网络主要包括控制类业务、采集类业务、连接类业务等多种类型。其中控制类业务包括远程控制和现场产线控制两种应用场景。远程控制对于网络时延、网络带宽存在一定的要求，例如视频远程控制类业务要求时延一般不大于20ms，同时应能根据具体远程控制视频清晰度，提供相应的网络带宽保障。现场产线控制，主要包括对产线PLC、产线I/O、设备运动控制，其网络流量一般具备周期性特征，根据不同的控制对象，其网络时延和丢包等关键指标参数存在差异化的需求。

典型的网络能力需求如表1所示。

表 1 现场产线控制类业务典型网络能力需求

	业务	业务需求
工业 RT 业务	产线级 I/O 控制 (阀岛/变频器/机器人控制器 等)	数据报文周期：包括 2ms，4ms， 8ms，16ms 等周期 丢包要求：不能连续 3 次业务丢包 数据包大小：64Byte 至 1500Byte
	机器内部 I/O 控制 (焊枪 抓手 等)	
	产线 PLC 之间控制	

	业务	业务需求
工业 IRT 类业务	运动控制	数据报文周期：包括 0.5ms, 1ms, 2ms, 等周期 丢包要求：不能连续 2 次业务丢包 数据包大小：一般不大于 50Byte
RT (Real Time Communication): 实时通信，适合周期性数据交换的场合 IRT (Isochronous Real Time Communication): 等时同步通信，对于时间要求严格同步的通信		

采集类业务包括传感器信息采集、视频检测与采集等，其典型的网络能力需求如表2所示。

表 2 采集类业务场景及典型网络能力需求

业务	场景	业务需求
工业 RT/NRT 类业务	环境传感、数据采集	发包周期：100ms-10s 上行速率：<100kbps 数据包大小 < 1500B
	视频检测与采集	上行速率：1080P: >10Mbps 4K: >40Mbps
NRT (Non-Real Time Communication): 非实时性通信，可以用于组态、参数设置、诊断等非实时性要求的场合		

连接类业务包括设备自动化程序下载、生产加工程序下载、基于无线网络的AGV导航、远程诊断维修指导等业务。其典型业务需求如下表3所示。

表 3 连接类业务场景及典型网络能力需求

业务	场景	业务需求
工业 RT/NRT 类业务	AGV 导航 (无线网络场景)	发包周期：40-500ms 容量 < 100 网元 @ 10000 平 数据包大小 < 1500B
工业 NRT 类业务	设备程序下载	容量 < 5 @ 100 平 数据包大小 ~100MB
工业 RT/NRT 类业务	远程诊断维修	容量 < 5 @100 平 数据包大小 <1500B 带宽>100Mbps

1.5.2 高带宽能力需求

当前现场级工业控制网络带宽需求呈现出逐步增加的趋势。工业产线的机器视觉与AI新兴技术应用和普及，导致网络带宽需求迅速增加，单路高清晰度视觉检测业务便峰值带宽可高达2Gbit/s，如果多路叠加，现有产线接入网系统的带宽将无法满足需求。

表 4 典型 VR 视频应用对于网络带宽能力的需求

视频类别	Cloud VR Phase 1	Cloud VR Phase 2	Cloud VR Phase 3	Cloud VR Phase 4
分辨率	2-3K	4K	8K	16K-
带宽需求	≥ 80Mbps	≥ 130Mbps	≥ 540Mbps	≥ 1.5Gbps
网络往返时延	≤ 20ms	≤ 20ms	≤ 10ms	≤ 8ms
抖动要求	≤ 15ms	≤ 15ms	≤ 10ms	≤ 7ms
丢包要求	≤ 10 ⁻⁵	≤ 10 ⁻⁵	≤ 5 * 10 ⁻⁶	≤ 1 * 10 ⁻⁶

同时，跨域的远程工业远程控制、多地团队联动合作、AR/VR实时辅助产线搭建及故障维修、产线协同等新业务成为常态化需求，其高精度、高可靠、高可控的业务能力需求也对网络带宽提出来更高的要求。

1.5.3 工业 PON 与其他技术区别与联系

工业PON与TSN、Detnet的网络层次对比如下表所示，可见工业PON与TSN技术，主要聚焦于L2网络。

表 5 工业 PON 与 TSN、Detnet 的网络层次对比

网络层次	工业 PON (L1-L2)	TSN (L2)	Detnet (L2.5-L3)
其他上层			
网络层			
数据链路层			
物理层			

工业PON与TSN，均具备相应的技术方案，以实现确定性的网络能力。目前工业PON的相应技术还在进一步完善过程中，尚无法完全对标实现TSN的相应技术标准功能，但在关键确定性网络性能指标（参见本白皮书第二章内容）方面，已经可以承载大部分工业确定性应用场景的业务。

表 6 TSN 和工业 PON 的确定性技术能力对比

	TSN	工业 PON
高精度时钟同步	SyncE+1588v2, IEEE 802.1AS	
数据流资源管理	YANG 模型及管理技术等具备请求编排、网络配置功能	网络控制器对应管理功能待研发
流控制（周期性，低时延，低抖动）	流量调度、帧抢占、整形等技术	流控制能力：PON 层类 TSN 调度优化机制保证周期性已进行标准化：单帧多burst，开窗优化、独立注册通道、CODBA 等技术
流完整性（高可靠性）	帧复制、路径控制等	具备链路保护倒换技术流完整性技术待进一步完善

相比TSN和Detnet，工业PON技术依托国内成熟的PON产业链，可实现更高的技术和产品自主可控能力，同时在综合成本等方面也具备优势。

同时，工业PON目前可支持10G网络带宽，未来可提供高达50G带宽的能力，相比现有TSN解决方案1G的网络带宽有了数量级的提升，可以满足更多高带宽业务的需求。

第二章 确定性工业 PON 技术

2.1 工业 PON 系统确定性能力

工业PON系统，上行方向采用时分多址接入（TDMA）方式对各ONU的数据发送进行调度。

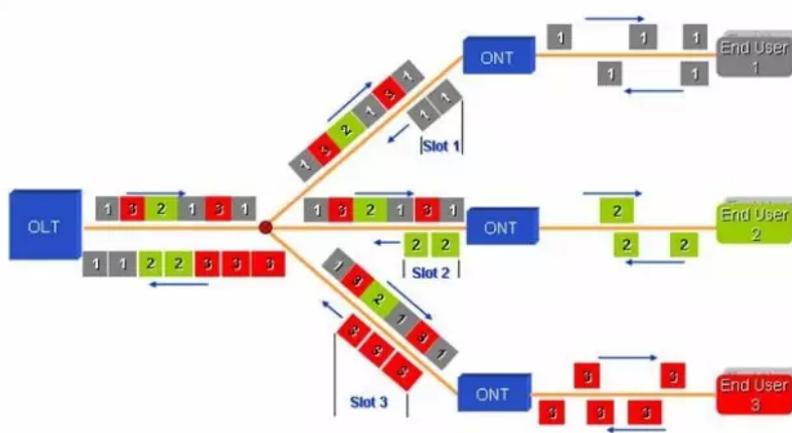


图 5 PON 上下行传输技术方案示意图

工业 PON 网络的上述结构，即上行方向采用时分多址接入（TDMA），下行方向采用广播复用的机制，使得目前工业 PON 网络的上下行数据传输时延和抖动性能有所不同，上行方向由于采用时分多址接入技术，ONU 侧的上行数据报文需要 OLT 侧提前进行带宽分配，相比下行方向，会引入更多的传输时延。

工业 PON 系统中，在各网络层级均会引入一定程度的时延和抖动。例如在物理介质层面，光纤光缆存在一定的固有传输时延（约 $5\mu\text{s}/\text{km}$ ）；在 L1 层，由于 DBA 调度、GPON 系统中 GEM 封装/解封装、可能的加密/解密以及 FEC（前向纠错）处理也会引入一定程度的时延和抖动（时延为 $10\mu\text{s}$ 至 1ms 量级）；在 L2 层，基于帧的网络交换处理，同样会引入时延和抖动（时延在 $100\mu\text{s}$ 至 1.5ms 量级）。

同时，面向工业场景所承载的业务，其网络传输特征一般具备周期性，如果业务的周期性和 PON 系统自身上行 DBA 调度的周期不匹配，或者业务传输被 PON 系统本身固有的上行方向注册开窗所影响，就会带来一定的传输时延和抖动劣化，对整体业务传输的确定性带来影响。

因此，如何通过各类技术优化上述各类变量和因素对于网络确定性的影响，是高性能工业 PON 亟待解决的问题。

2.2 工业 PON 确定性优化技术

2.2.1 现有技术优化

现有的工业 PON 技术标准中（包括 GPON 以及 EPON 技术体系），对于 ONU 业务的带宽、带宽分配等具备非常灵活和精细的配置，可以通过优化现有业务配置，在一定程度上实现低时延低抖动的能力。

例如对于现有标准化的 PON 系统业务配置选项，可以从 SLA 模板、DBA 配置、业务优先级等方面，针对具体业务需求，进行优化配置。

例如，可以根据具体业务承载中，工业 PON 下挂对接的具体网元，其对于时延抖动、以及带宽的具体能力需求，对于工业 PON 系统中 OLT 单个 PON 端口下挂 ONU 的数量、ONU 的业务带宽模板和 DBA 配置等、OLT 上联口带宽能力等关键参数进行针对性优化，可以有效提升现有技术条件下的网络能力，在大部分场景中可以满足所承载的工业业务对于时延抖动和带宽能力的需求。

2.2.2 新型优化技术

现有 10G PON 标准基本已经稳定，针对低时延低抖动的能力进行针对性补充，主要侧重在下一代单波长 50G PON 标准。

下一代的单波长 50G PON 标准，目前正在 ITU-T 进行标准制定工作。该 50G PON 在提供更高带宽的同时，也针对家庭、政企、工业、无线承

载等业务和场景的新需求，针对低时延低抖动的性能也进行了考虑（低时延是 ITU-T 50G PON 相关的 G.HSP 系列标准的需求之一，在发布的 G.9804.1 中提出需要支持低时延业务，比如交互类 VR、5G 前传数据承载等）。以下新型技术将被写入相关标准中并进行实现。

同时，针对现有的 GPON 以及 EPON 技术体系，设备厂商也已经将下面部分新型技术进行了实现和功能集成。但是由于标准已经冻结的原因，尚未进行整体的标准化工作，大部分以个性化的解决方案形式，提供给需要的工业客户。

2.2.2.1 单帧多突发技术

在 TDM PON 系统中，上行采用 TDMA 的复用机制。OLT 负责分配及调度 ONU 的上行发送时隙窗，ONU 只能在 OLT 分配的时隙之内发送上行数据。

对于某 ONU 而言，在其他 ONU 的发送时隙内是禁止发送上行数据的。这段时间内需要发送的数据，将在 ONU 本地缓存，等待下一个时隙到来再发送。因此，ONU 的上行时延，无法优于现有的上行时隙间隔参数。

在 ITU 体系的 TDM PON 系统中，ONU 的上行时隙分配报文位于每个下行帧帧头固定开销的 BWmap 中，目前标准定义的每个上行时隙分配帧为 125 微秒为单元。

按照现有上行时隙分配机制，每个 ONU 的上行时延最大为 125 微秒。如果要减少该上行时延，我们可以考虑加大上行时隙的分配频率，例如可以让每个 ONU 在 125 微秒内具备多次发送机会，例如：当每 125 微秒的帧中，ONU1 只有 1 个上行发送时隙时，其发送间隔可以达 125 微秒，最大上行时延也是 125 微秒；当每 125 微秒中，ONU1 有 4 个上行发送时隙时，那各个时隙之间的间隔是 $125 / 4 = 31.25$ 微秒，上行时延可以

缩减到原来的 1/4。

但是在 TDM PON 系统中，为了保证 OLT 突发接收的正常，ONU 发送的每个突发包都需要有一定的前导码型，该前导码将会占用部分上行时隙，引入一定的开销。在每帧内，突发的个数越多，每个突发前导码部分引入的总开销也越大。

上述方案可以显著优化最大时延，由于多次分配上行时隙资源，引入了额外的突发包头文件开销，导致总体的上行带宽变小。对于工业控制等场景而言，确定性传输能力的优先级高于传输带宽的优先级，因此，目前 OLT 每帧可以给分配的突发数最大可达 16 个，在这种情况下，ONU 突发之间的最小实现可以达到 $125/16 = 7.8125$ 微秒，这可以满足绝大部分低时延应用场景的需求，同时兼顾上行带宽的能力要求。

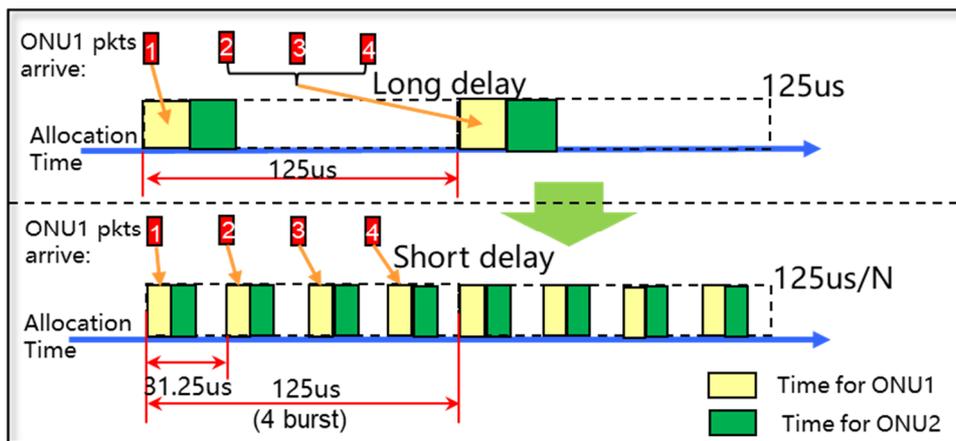


图 6 单帧多突发方案

2.2.2.2 独立注册通道方案

TDM PON 系统中引入时延和抖动的另外一个因素是新 ONU 的注册和测距过程。为了保证能够允许新 ONU 的接入，OLT 会定期开启上行传输静默窗口，在此期间，已上线的 ONU 不允许发送上行数据，只有未注册的 ONU 允许发送注册请求消息。

由于典型 PON 系统允许的 ONU 距离需要覆盖) 0 ~ 20km, 在光纤上传输的往返时延差达到 200 微秒。因此, 在 ONU 注册阶段, 静默窗口大小通常是 250 微秒长度, 包含往返时延差、ONU 响应时间、随机时延等方面的考虑。由于注册/测距窗口是不允许正常 ONU 发送上行数据的, 而如果此时 ONU 有上行业务需要发送时, 只能等待静默窗口结束再发送。因此, PON 系统的注册/测距窗口会引入额外的时延, 通常情况下, 该时延为 250 微秒。

为了避免注册开窗引入的额外时延和抖动, 一种有效的方法是加入一个额外的波长通道, 专门用于 ONU 注册和测距等功能, 同时该波长通道也可以用于发送上行业务。这样可以有效避免注册开窗的 250 微秒静默窗口对上行业务带来的影响。

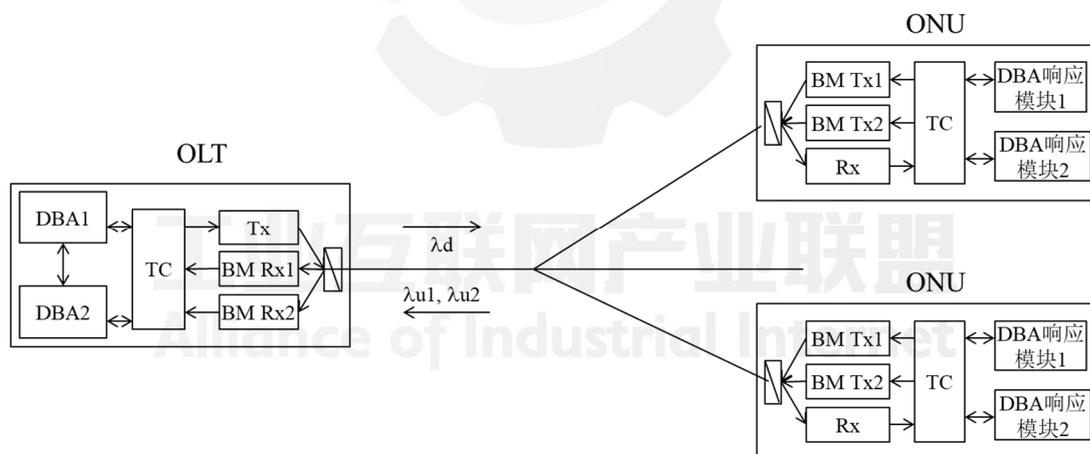


图 7 通道独立注册示意图

2.2.2.3 注册开窗调整方案

PON 系统中, 常规的静默窗口大小为 250 微秒, 其最关键的因素是考虑到系统中可能出现最远和最近的 ONU 距离差为 20km。然而实际的工业 PON 网络部署中, 工厂的规模以及 ONU 之间的距离差距一般不会达到这个量级。对于特定的场景, 如 5G 承载或者工业现场应用, 同一 PON 口

下的不同 ONU 分支光纤差别是可控的。

以单 PON 口下，分支光纤最大距离差 1km 为例，其在光纤上传输的往返时延差约为 10 微秒，如果仍然按常规开窗时 ONU 的随机时延 48 微秒以及 ONU 响应时间差 2 微秒，那开窗大小为 60 微秒即可满足要求。通过这种开小窗的方式，在不增加硬件资源的情况下，可以将原来 250 微秒的额外时延缩减至 60 微秒。

此外，如果在某个特定的 PON 口，如果 OLT 能够识别到系统中已满配或者接近满配，OLT 可以减少上行开窗的频率甚至关闭开窗。还可以通过减少 ONU 的随机时延值，进一步的缩减窗口大小，有效减低系统的上行额外时延和抖动。

2.2.2.4 协同 DBA 方案 (CO DBA)

CO DBA 是通过跟踪超低时延业务流的变化，实现 PON 系统与 PON 下挂以及上联的网元之间的额外交互联动，提前分配和预留上行资源，而不是现有技术中等待业务流到达 ONU 后，再由 ONU 向 OLT 申请下一个周期的上行资源。从而减少常规调度所需的时间，降低上行方向的传输时延。

例如针对移动前传业务，在 DU 中的调度模块可以根据自己为不同的 UE 在即将到来的移动时隙分配的上行带宽，预估上行移动前传负载流量，这使得 PON 能够优化承载移动前传业务。CO DBA 可以使缓冲时延时间降低到几十微秒（远低于 100 微秒）。

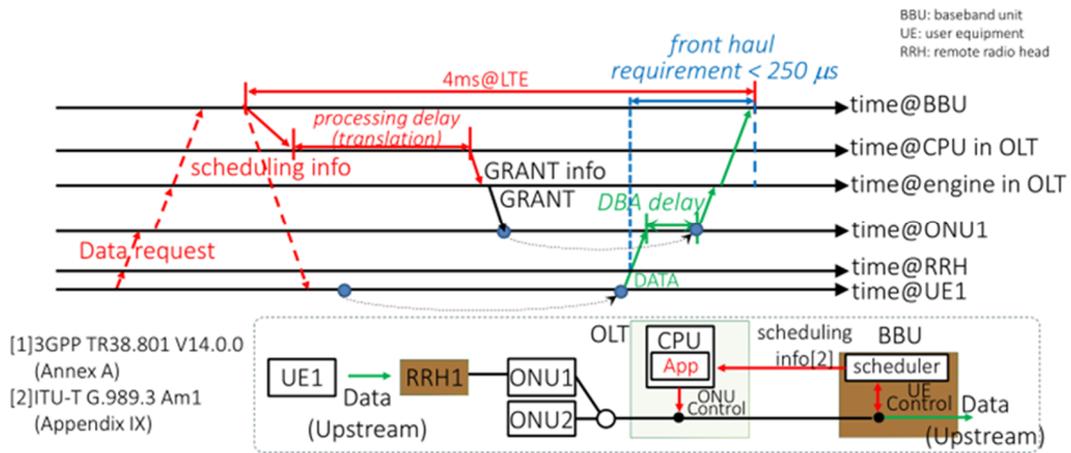


图 8 CO DBA 实现过程示意图

2.2.2.5 确定性全光接入网网络

针对多个工业园区跨区域的互联场景,可以考虑确定性 PON 结合 OTN 硬管道等技术,实现确定性全光网络的能力。

工业 PON 设备可通过改进支持类 OTN 的硬管道功能,实现对于工业业务数据的接近透明传输,进一步降低时延和抖动。同时,可实现带宽隔离和带宽预留保证能力,进一步实现网络传输指标的确定性。

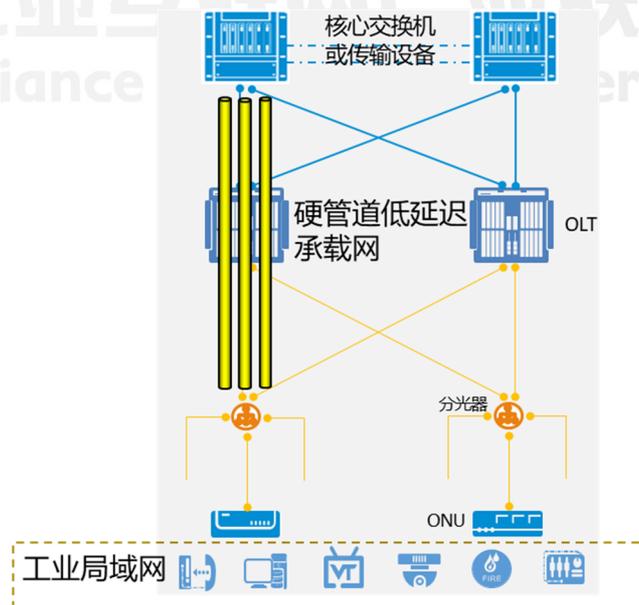


图 9 确定性全光网络架构

2.2.2.6 确定性业务切片

工业 PON 系统本身支持多颗粒度的 PON 切片功能。针对确定性业务需求，后续可针对切片功能进行进一步完善，实现确定性业务的独立切片，以及支持确定性业务与普通非确定性业务共享同一个物理资源（OLT PON 业务板卡、PON 端口等），并与上联硬管道、OTN 硬管道等协同，实现更好的性能。

2.4 确定性工业 PON 全景视图

确定性工业 PON 的全景视图如下所示，通过引入单帧多 burst 等时延抖动优化技术，有效降低现有工业 PON 系统的运行机制对于网络确定性的影响。同时，针对确定性网络的能力度量，需要研发并标准化配套的时延测量方法，包括随流测量和带外测量等各种机制，在不过度消耗系统资源的前提下提供准确的时延度量能力。

此外，在网络管理层面引入时延感知和时延参数端到端配置能力，根据业务质量请求，结合反馈的网络特性进行计算并下发端到端配置。实现确定性网络能力的智能化按需配置，满足各类应用场景对于网络性能的差异化需求。

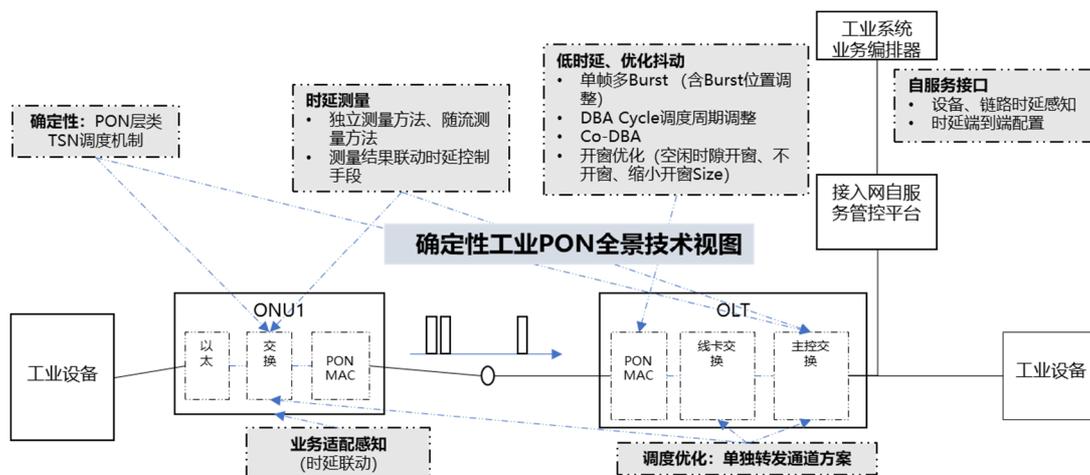


图 10 确定性工业 PON 全景技术视图

第三章 高带宽工业 PON 能力分析和演进

3.1 现有技术介绍

3.1.1 基于 TDM 技术的 10G PON

现有的 10G PON 技术，主要有两种技术路线，分别是基于 IEEE 802.3av 标准的 10G-EPON(含对称和非对称速率)，以及基于 ITU-T G.987 系列标准的 XG(S)-PON(同样是含对称和非对称速率)。

10G-EPON 分为对称模式和非对称模式，对称 10G-EPON 上下行速率均为 10Gbit/s，非对称 10G-EPON 系统上行方向速率为 1Gbit/s，波长范围在国际标准中规定原为 1260nm~1360nm。

XG-PON 系统，其上行速率为 2.48832Gbit/s，下行速率为 9.95328Gbit/s。XGS-PON 系统，其上下行速率均为 9.95328Gbit/s。

3.1.2 WDM PON 技术

目前，基于 WDM PON 技术的 $N \times 25G$ WDM-PON 已经在 CCSA 以及 ITU-T 中进行了标准化工作。

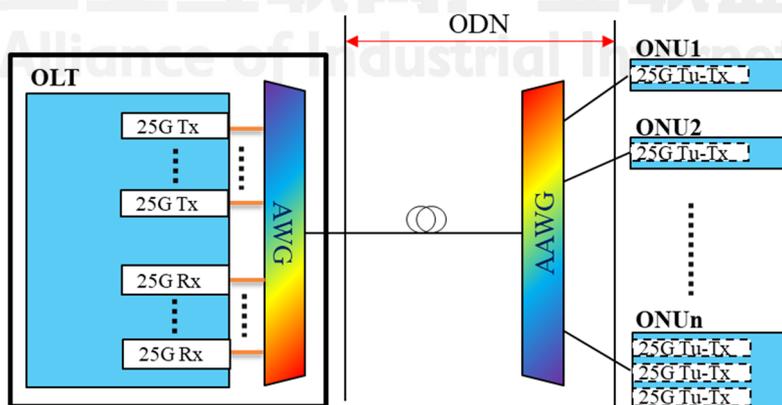


图 11 $N \times 25G$ WDM-PON 系统架构

目前， $N \times 25G$ WDM-PON 主要用于 5G 蜂窝移动通信系统中的前传场景，相比 TDM PON，其优点在于独享带宽、上下行时延低对称、安全性更

好；但是其成本较高，目前产业成熟度和规模尚无法和 TDM PON 系统相比。

3.1.3 TWDM PON 技术

TWDM PON 技术是一种波分复用时分复用的混合 PON 系统，将 4 路 10G TDM PON 系统堆叠起来，应用在 1:64 分光的系统中，从而达到下行 40Gbit/s 和上行 10Gbit/s 汇聚能力，如图所示。其中 ONU 发射是采用 4 波可调发射技术，ONU 接收则采用 4 波可调接收技术，即 ONU 的光收发器可以根据具体业务和系统要求工作在任意一个 OLT 端口下。

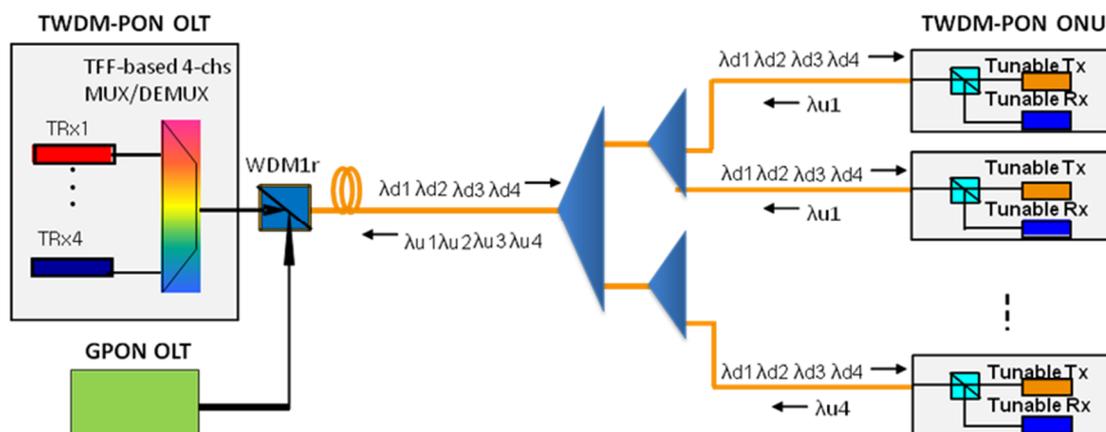


图 12 TWDM PON 系统架构图

TWDM PON 系统由于引入了可调谐激光器，其成本相比 TDM PON 系统无优势，同时，其带宽提升能力有限，通过堆叠四路 10G PON 系统实现 40G 的系统总能力，但是对于单个 PON 口而言，其带宽仍为 10G。因此，该技术方案在国内并无部署和应用。

3.2 高带宽 PON 演进技术

在 2018 年，为实现百兆到千兆的跨越，顺应新兴千兆接入业务的发展，10G PON 网络开始进行了大规模的部署。近年来，随着数字化工业技术的不断发展与创新，用户对带宽的需求不断增大、对时延和抖动的要

求更加严格，已规模部署的 10G PON 网络在未来将逐渐无法满足所有工业用户和业务的需求，更高速的下一代 PON 技术的研究和标准规范的制定越发关键。

在 10G PON 的下一代 PON 技术的速率选择上，存在 25G、50G、100G 等不同的选项。考虑到实现价值、实现难度、成本、以及前期的速率提升规律等因素，最终决定将 50G PON 作为 10G PON 下一代演进的技术方向。

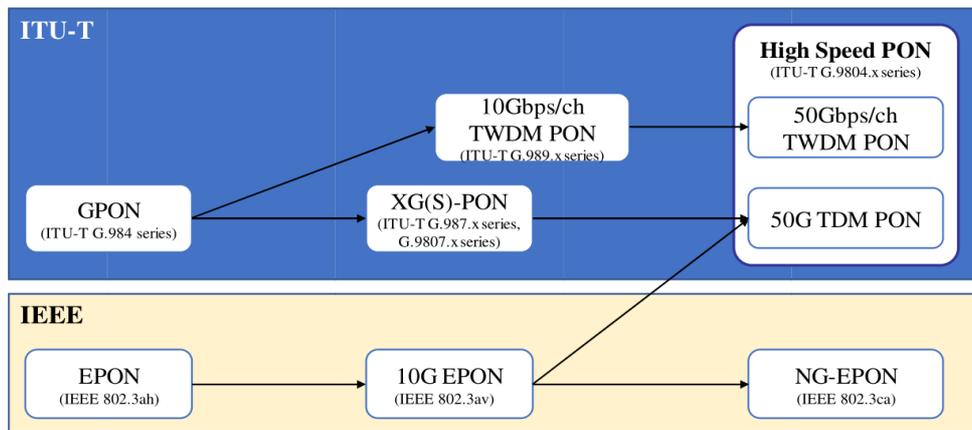


图 13 PON 技术演进路线图

由于工业 PON 网络的 ODN 的生命周期较长，为了保护投资、降低建设成本，下一代的 PON 网络需要在已部署的大量现有系统架构基础上共存过渡，进行平滑升级。50G PON 系统支持采用 WDM 波分共存的技术，使两代 PON 系统在同一套体制下共存，系统的容量互不影响，为现有 10G PON 和传统 PON 网络提供了可持续演进升级能力。

PON 的技术由于历史的原因长期以来同时存在 EPON 与 GPON 两套标准，技术的分歧不利于整个 PON 产业未来的发展。对于下一代 PON 网络来说，PON 产业的融合发展是一个业内趋势，避免标准组织之间相互竞争，产业链的分化也能得到解决，从而也会减少技术难度，降低 PON 产

品成本。

3.3 高带宽 PON 标准化情况

3.3.1 ITU-T 50G PON 标准化进展和现状

ITU-T SG15 Q2 在 2018 年初正式启动了 50G PON 系列标准的立项，并开始制定其系列需求、物理层、通用协议层等标准。直至 2021 年 4 月全会，50G PON 系列标准研究项目取得了较大进展，系列中多个标准完成第一阶段研究，并通过会议审批进入发布流程。

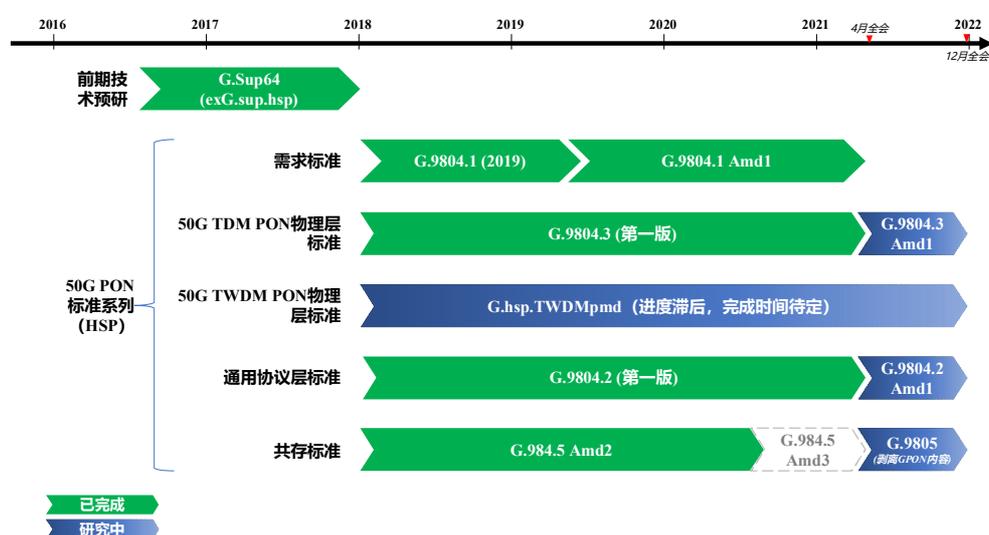


图 14 ITU-T 50G PON 标准系列进展

G.9804.1 Amd1 需求标准增补项目在 2019 年 7 月份立项，研究周期 16 个月，并已通过全会审批，进入 AAP 程序。50G PON 需求标准增补了如删除上行 10G 速率支持、增加对上行速率使能多种可选 FEC 码型、切片等新需求内容，至此已基本稳定。

50G PON 物理层标准涉及 50G 下行光功率指标、TDEC 测试方法、眼图测试方法、jitter 指标规格、前导时间等内容，其第一版已通过全会审核，定为 G.9804.3，同时决定启动 G.9804.3 Amd1 增补研究项目，针对遗留的 TDEC 测试中的少量细节问题、50G 上行波长规划，50G 上行光

接口规格等议题开展持续研究和标准化工作。

针对通用协议层的 ITU-T G. 9804. 2 (前 G. hsp. ComTC) 标准涉及上行 FEC 及其配置方法、上行广播授权窗口的抢占及冲突避免机制、上行最小突发间隔和最大突发大小、TC 层 PLOAM 版本支持能力上报、安全增强等内容。该标准在本次全会中通过 consent, 获得标准号 G. 9804. 2。会议同时决定启动 G. 9804. 2 Amd1 增补研究项目, 针对遗留的上行 FEC 等议题开展持续研究和标准化工作。值得一提的是国密 SM4 机制首次作为可选加密机制被写入 PON 标准。

针对每一代 PON 技术, ITU-T 均制定了对应的标准系列, 而 PON 系统共存机制及器件研究, 因该部分起始于 GPON, 其内容集中在 G. 984. 5 项目中。随着 GPON、XG-PON、XGS-PON、TWDM-PON、50G PON 等越来越多的 PON 技术标准的制定, G. 984. 5 标准中共存机制和共存器件等内容逐渐增多, 成为标准的主体内容, 和原项目范围已不再匹配。目前正在进行的 G. 984. 5 Amd3 项目被分离成 G. 984. 5 Revision 和 G. 9805 两个项目: 其中 G. 984. 5 Revision 项目基于 G. 984. 5 Amd2, 将 GPON 相关的内容抽取出来并形成一个稳定的修订版本; G. 984. 5 Amd2 中 PON 系统共存的已有内容, 和针对 50G PON 的新共存研究, 转移到了新项目 G. 9805 中, 持续开展标准化制定工作。

50G PON 标准系列研究取得了阶段性的进展, 需求、物理层和协议层的关键指标和功能都已趋于稳定, 可用于指导 50G PON 系统样机设计和产品实现。后续将持续开展 50G PON 标准系列第二阶段的研究和制定工作, 推动遗留问题的解决。

3.3.2 CCSA 50G PON 标准化进展和现状

CCSA 中, 接入网技术要求 50Gbit/s 无源光网络分为三部分, 包括

总体技术要求、物理层要求与 TC 层要求。其中第一部分的总体技术要求已进入征求意见稿阶段，随着 ITU-T 的 50G PON 国际标准的逐渐完成，国内行标的推进将持续开展，以指导未来相应技术及需求硬件的产业化。

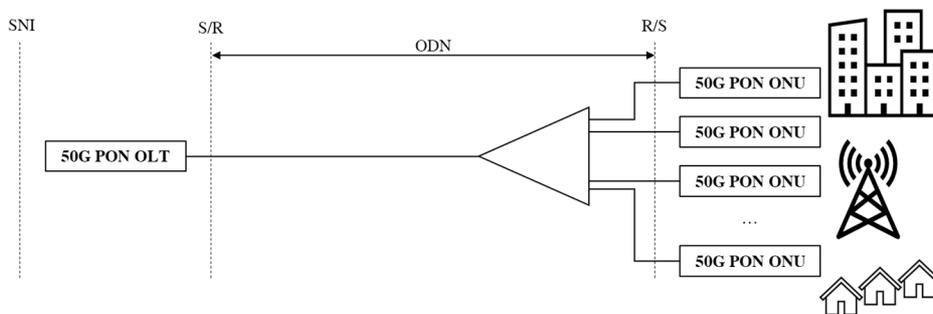


图 15 50G PON 通用基本架构

其中，50G TDM PON 系统采用下行 TDM、上行 TDMA 架构，支持 50Gbit/s 下行与上行的 12.5Gbit/s、25Gbit/s、50Gbit/s 三种（名义）线速率的组合，分别能够满足家庭客户、政企客户、园区以及回传等不同场景的需求；支持 PON 通用 ODN 的设计：20km 传输距离、二级分光、1: 64 分光比；采用通用的 TC 层设计以兼容不同类型的 50G PON，并支持未来更高速 PON 系统。

3.3.3 WDM PON 标准化进展和现状

针对 5G 承载的应用场景，在国内已经进行了相应行业标准的立项和制定工作。“面向 5G 承载的 $N \times 25G$ 的波分复用无源光网络（WDM PON）”的总体要求和 PMC 层技术要求定义了物理层、收发器指标和性能指标等要求，对应行业标准已经在 CCSA 审查通过并正式发布。《接入网设备测试方法 面向 5G 前传的 $N \times 25G$ bits 波分复用无源光网络（WDM PON）》规定了 $N \times 25G$ WDM 测试方法，已经在 CCSA 完成报批。

国际标准方面，早在 2017 年 6 月，ITU-T SG15 Q2 G. Suppl. 66 (ex G. sup. 5GP) 项目完成立项，开始了应用于 5G 前传的单波 25G WDM PON 技

术白皮书研究。针对 5G 前传需求，开展高效前传网络架构研究，突破高速无色 ONU 技术、AMCC 技术等关键技术，加速 WDM PON 标准产业化进程。G. Suppl. 66 规定了 PON 应用于 5G 前传的系统架构、传输距离、系统代价、时延等。

ITU-T SG15 Q2 也对 25G WDM PON 进行了立项，标准编号为 G. 9802. 1，包含系统的基本功能等内容。对于 12/20/40 通道的系统架构进行了定义，可以为企业客户、蜂窝无线承载等提供网络连接。支持对称 10G、对称 25G 的线路速率，并可根据未来业务发展的需求进行速率的升级。ONU 发射机可调，ONU 接收机为宽谱接收方案，可以灵活按需调谐到与 ODN AWG 任何端口上的波长信道。

3.4 高带宽 PON 关键技术和能力

3.4.1 高带宽能力

50G PON 原定支持上行 10Gbit/s (名义) 速率，由于：(a) 10Gbit/s 与 12.5Gbit/s 速率接近，而 12.5Gbit/s 速率的支持会带来同比 40% 的提升；(b) 提供两种速率能力光器件可重用且成本相当；(c) 12.5Gbit/s 速率与 25Gbit/s 和 50Gbit/s 速率呈一定倍数关系，利于光模块和系统实现。综合以上等因素，最终决定的 50G PON 上行速率删除了 10Gbit/s，收敛为 12.5/25/50Gbit/s 三种。

表 7 50G PON 线路速率

Direction	Units	Line Rate
Downstream	Gb/s	49.7664
Upstream	Gb/s	49.7664
	Gb/s	24.8832
	Gb/s	12.4416

3.4.2 共存演进能力

50G PON 具备从现有 10G PON 平滑演进升级的能力，可以有效保护现有客户的网络建设投资，实现按需升级，平滑演进的使用需求。

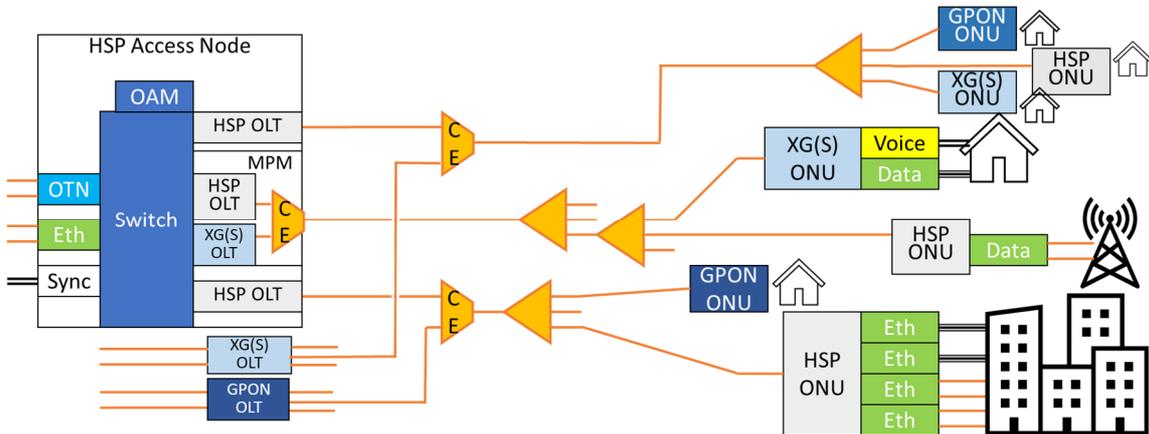


图 16 更高速 PON 与传统 PON 共存系统的部署架构

第四章 总结和展望

高性能工业 PON 主要包含确定性和高带宽两个方面。

工业行业的多样性，导致工业网络连接对于网络时延、抖动以及传输可靠性存在碎片化的需求。常规工业网络，包括新型的工业 PON 等技术，可以满足大部分企业的车间网络承载需求。但是工业企业基于 PLC、DCS 等工业现场总线技术的现场网络，未来如果用工业 PON 等新型网络方案进行承载，其对于网络的确定性提出了更高的要求，工业 PON 技术需要进一步进行技术研发，突破传统时分复用上行机制的固有时延抖动限制，实现确定性网络传输能力。工业 PON 实现确定性网络能力，主要涉及到物理层以及协议层的新技术研发工作。重点在于突破现有时分复用（TDM）上行机制，对于上行方向业务确定性的影响。技术突破手段包

括单帧多 burst、独立注册通道、注册开窗优化等技术路线。

工业场景中，高带宽场景应用需求主要来源于产线的图像和视频处理、机器视觉、Cloud VR 远程协作等方面。这些场景中，传统的 10G PON 网络带宽可能无法满足需求，同时，此类业务应用往往对于网络的上行带宽提出了更高的要求。单波长 50G TDM PON 已经完成大部分标准化工作，目前各主流设备厂商已有原型机推出。工业 PON 具备向 50G PON 平滑演进升级的能力，实现单 PON 口 50G 对称上下行的网络带宽能力。

PON 技术已在运营商网络规模应用，相比其他有线接入技术，具有技术优势和成熟的产业链生态。经过国内运营商、设备厂商等产业链各个层级成员的合力推动，PON 技术已经在工业领域生根落地。

但工业 PON 仍需要不断进步，去解决工业领域典型的核心需求和痛点，确定性网络能力和高带宽能力，是进一步提升工业 PON 性能的关键能力。

需要产业链共同进行技术攻关以及标准化，为工业客户提供一整套普适化、高性能、自主可控、智能化的新型高性能工业 PON 光网络基础设施。

参考文献

[1] ITU-T Recommendation G.987.1, “10-Gigabit-capable passive optical networks (XG PON): General requirements,” Mar. 2016; <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.987.1-201603-I/en>

[2] ITU-T Recommendation G.9807.1, “10-Gigabit-capable symmetric passive optical network (XGS-PON),” June 2016;

[https:// https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9807.1-201606-I/en](https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9807.1-201606-I/en)

[3] ITU-T Recommendation G.9804.1, “Higher speed passive optical networks – Requirements,” Nov. 2019;

<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.9804.1-201911-I/en>

[4] ETSI 白皮书 No. #41, “The Fifth Generation Fixed Network (F5G): Bringing Fibre to Everywhere and Everything,” , September 2020;

<https://www.etsi.org/images/files/ETSIWhitePapers/etsi-wp-41-F5G-ed1.pdf>

[5] ETSI Group Report F5G 002, “Fifth Generation Fixed Network (F5G); F5G Use Cases Release #1,” Version 1.1.1, Feb. 2021.

[6] CCSA TC6WG2 研究报告 2020B39 《PON 支持低时延和确定性时延技术》，2020 年

[7] CCSA 行业标准 2018-0172T-YD 《工业互联网联网用技术 无源光网络（PON）总体技术要求》，2019 年

[8] 3GPP TS 22.104 – Service requirements for cyber-physical control applications in vertical domains, 2021.