

# 浅析 IT-OT 融合技术的现状与发展趋势

基金项目：移动边缘计算与软件定义网络联合服务质量评估方法研究（1908085QF289）

付韬，张恒升

（中国信息通信研究院，北京，100191）

**摘要：**工业互联网实现全价值链、全产业链和全要素的全面连接，需要实现企业内多源异构网络的深度融合互通。目前 IT-OT 网络融合的趋势愈发明确，以确定性网络、边缘计算、信息模型等为代表的新兴技术对实现 IT-OT 网络融合起到了关键作用，本文归纳 IT-OT 网络融合的重要特征，进而分析关键技术在此趋势中的作用，最终给出 IT-OT 网络融合在企业内网中的发展方向。

**关键词：**工业互联网；异构融合；IT-OT 网络融合；确定性网络；企业内网

中图分类号：TN915.4

文献标识码：A

## Elementary Analysis on Status and Development trends of IT-OT Convergence Technology

Fu Tao, Zhang Hengsheng

（China Academy of Information and Communications Technology, Beijing, 100191）

**ABSTRACT:** Industrial Internet achieve full connections among the all essential productive factors,entire industrial chain and entire value chain.Therefore, it's critical to improve the convergence of networks in enterprise campus.The trend of IT-OT network convergence is most evident on Industrial Internet. With the development of new technology,such as deterministic network,edge computing etc.,play an important role in the course.This paper concludes the core features of IT-OT network convergence, then analyze effects of key technologies in this trend.Finally, this paper proposes some development trends of the integrated enterprise campus network.

**KEY WORDS:** Industrial internet; Heterogeneous integration ; IT-OT network convergence; Deter-ministic Networking;Enterprise campus network

IT-OT 网络融合是工业数字化转型与升级的必然趋势，涉及技术革新、系统改造、管理模式转变、团队培养等各个方面，产业界对其内涵特点的理解各不相同。工业互联网<sup>[1]</sup>新技术促进企业内网络层次的跨层协同与优化，促进企业形成基于全面连接的数字化经营模式，不仅实现各要素之间的通信，也将企业内网中 IT 网络和 OT 网络的深度融合<sup>[2]</sup>，实现双向互用<sup>[3]</sup>。IT 网络是采用 TCP/IP 协议族连接信息系统的网络，OT 网络是采用工业网络协议的生产网络。IT 网络与 OT

网络在管理模式、技术方案等方面存在差异，两者处于业务分隔、松散连接的割裂状态。本文从 IT 网络和 OT 网络的发展历程出发，厘清 IT-OT 网络融合的概念，分析关键技术对 IT-OT 网络融合的支撑作用，总结 IT-OT 网络融合发展趋势。

## 1 IT-OT 网络发展过程

上世纪 80 年代，面向过程自动化的工业总线得到广泛应用，2000 年后工业以太网已实现生产线的基本互联。随着厂商私有协议和总线标准不断增多，工业网络体系演变出“七国八制”的复杂 OT 网络。OT 网络需要精准的生产设备控制、数据采集和状态监控，对实时性和可靠性的要求十分苛刻。在因特网、以太网等技术大规模推广后，IT 网络开始被用于企业数字化和信息化办公。IT 网络和 OT 网络形成各具特色的产业生态，在企业内普遍独立组建网络，企业内网形成“两层三级”的典型架构<sup>[4]</sup>。IT 网络中各类信息管理系统利用相对廉价的计算、存储、网络资源，实现车间级及工厂级管理功能。

传统工厂中生产控制和管理决策的联系较弱，生产数据无法实时反馈并应用于办公决策。鉴于 IT 网络和 OT 网络之间存在业务、资源和数据等方面的互补关系，产业界一直希望打破两者之间的技术壁垒。在 IT 技术引领通信行业发展后，OT 网络借鉴 IT 网络的理念和技术，工控设备网络化程度不断加深。但 IT 网络与 OT 网络缺乏业务、数据、资源等角度的全维度与深层次的融合。

近年来工业企业在远程控制、无人化生产、精益生产、柔性制造等方面提出更高要求，企业内网正在进入 IT-OT 网络融合阶段。以跨域能力协同为核心，IT-OT 网络融合关键技术正逐步攻克传统企业内网存在的业务无法互操作、资源相互独立、私有数据不公开等问题。能力协同从业务协同、资源协同、数据协同三个角度逐步落地，业务协同打通各层软件和应用，资源协同实现 IT 资源高效借用和资源利用率提升，数据协同打通厂商和行业的信息壁垒。

## 2 IT-OT 网络融合特征

IT 与 OT 网络服务目标不同、发展路径不同、运行生态不同，面对数字化转型新形势，传统工厂网络存在“缺乏全局管理、缺乏资源有效利用、缺乏数据共享”的结构性不足。IT-OT 网络融合是“IT 网络向 OT 网络渗透并延伸、OT 网络向 IT 网络开放并重组”的双向过程，实现设备互联、弹性资源、应用互通。面向“生产流程复杂、生产管理业务流程复杂、现场管理信息量大”的行业，实现现场网络全覆盖、缩短信息反馈链、实时决策信息。

1) 业务协同是跨链、跨层的自动化流程，既实现工业数据采集、决策与控制的小闭环，又实现 IT 信息系统和 OT 生产系统之间的大闭环。在国内企业采集工业实时数据后，小闭环解决无法将决策结果下发现场设备的难题。大闭环可以运行基于复杂算法的智能服务，实现业务系统

与现场级系统间的互操作，加强“端网边”设备间协同，满足柔性制造、智能生产等场景下的弹性敏捷服务。

2) 资源协同是将 IT 资源动态借用给 OT 系统，实现跨层跨域的弹性计算与存储，将网络覆盖到整个企业园区。资源借用主要受限于厂商、平台、网络类型、厂区规划等因素。网络资源协同可实现复合业务流的共网传输。计算资源协同利用实时数据进行分析决策，将算力下沉后可以就近提供计算与存储服务。针对机械臂等现场设备仅采用有线网络导致的动作范围受限问题，有线/无线网络协同提供全域覆盖和灵活接入能力，提升生产活动的灵活性。

3) 数据协同打破信息孤岛，克服厂商和技术体制带来的数据差异。全连接企业内网需要各类数据高效、快速、可靠、安全的汇聚集成。IT 系统通过信息模型构建全局的数据模型和数据集成，通过开放的接口将决策反馈到 OT 系统。

目前 IT-OT 网络融合主要是指高层业务应用和底层控制逻辑的多层次协同和融合，表现为业务上趋向一致，资源上支持动态向底层分配，数据上实现异构数据互操作。进而形成全面覆盖企业的网络，最终转变为针对多业务承载和运维的网络模式。

### 3 促进 IT-OT 网络融合的关键技术

本文在厘清 IT-OT 网络融合特征后，图 2 归纳 IT-OT 网络融合特征与技术的映射关系。1) 网络智能化的计算赋能技术。该类技术促进 IT 网络资源与 OT 生产流程结合，正逐步具备智能服务、算力下沉、端网边协同等特征，以边缘智能技术、控制云化技术为核心，使得 OT 网络对应用场景的适应能力和灵活程度都得到提高。2) 保障多业务调度的网络赋能技术。通过保障多业务调度的确定性网络技术进行精确可靠传输，促进原本独立的多个现场级/车间级网络与 IT 网络合并，实现低成本、易维护、高可靠的企业内网。3) 保障互通的异构融合技术。为满足有线/无线组网、接入灵活等需求，促进各种异构网络互通互联，支持应用业务之间的互连互通互操作。以 5G+TSN 技术、确定性 WIFI 等技术为核心，通过无线网络赋予 AGV 小车、机械臂等设备更加灵活的活动范围和行动模式。4) 开放工业数据的语义描述技术。通过信息模型统一企业内网的数据表达格式，将 OT 的高质量生产数据，在跨层次跨应用的条件下实时集成。



图 2 IT-OT 网络融合关键技术

### 3.1 智慧赋能技术

#### 1) 边缘智能技术

边缘智能技术连接底层 OT 设备和顶层 IT 平台的服务，实现协同推理、智能决策和资源赋能<sup>[5]</sup>。一是支持数据挖掘，使生产线具备敏捷响应、智能决策的能力。二是运行工业模型与算法，在边缘侧进行数据价值转化。三是对海量工业数据充分高效集成。企业内网的管理框架也在不断探索新模式，原生技术概念不断孕育成熟，边缘计算生态初步构建，产业各方积极探索边缘计算商业模式。边缘计算技术在汽车制造行业中控制数据汇聚和共享，通过边缘计算系统接收管理系统的生产计划，智能产线终端系统作为边缘网关，分别处理各产线的生产数据、异常停线、班组绩效等信息，并将数据汇总传输至 MES，最终实现物流扫码确认入库。

#### 2) 控制云化技术

控制云化技术在私有云中划分虚拟资源，实现云化并替代 OT 网络中的对应设备，能够弹性变更云化设备的数量和业务。目前很多行业依然是高危行业，例如矿山、钢铁、化工等企业的一线员工从事着危险的生产活动，传统网络中的端设备需要现场控制，安全生产问题一直是各企业面临的难题。由于云设备天然设置在用户侧，可以实现各功能的远程控制。国内主要将确定性网络与云平台相结合，提供超低时延的实时控制应用，云化 PLC 有效提升运维效率，将产线柔性调整的时间降低 20% 以上。广域网络内，云化 PLC 实现近 600 公里的远距离工业控制，实现 20us 以内的时延抖动控制，网络时延可有效保障在 4ms 以内<sup>[6]</sup>。采用云化设备重构企业内网控制链是未来的重要趋势，从国产化的角度可以解决卡脖子的问题，从安全的角度可以减少现场人员的伤亡概率，从成本的角度可以减少昂贵的国外设备。

### 3.2 网络赋能技术

#### 1) 确定性网络技术

确定性网络技术向共存的 IT 网络业务和 OT 网络业务提供“准时、准确”的服务，确保 IT-OT 网络融合后业务互不干涉、生产任务精确执行。该类技术确保有边界的低时延、抖动、带宽和丢包率，提供满足 OT 系统和设备实时性要求的可靠网络。确定性技术促进多张子网转变为“一网多域”，企业内网实现兼顾多种业务流量的高质量共网传输，从而提升整个网络效率。目前确定性网络技术包括 TSN、DetNet、SRv6 等<sup>[7]</sup>，为企业内网提供开放、确定性的协议和机制，支撑网络向扁平化的架构演进。TSN 技术的互操作架构将会增强二层网络的配置、动态配置与管理的能力，为整个工业网络的灵活性配置提供支撑。

## 2) 网络切片技术

企业内网可采用网络切片技术将需要互相隔离的业务灵活分治<sup>[8]</sup>。细粒度地将网络切片编排成跨 IT 网络和 OT 网络的逻辑链路。首先是 IT 网络和 OT 网络之间，隔离各种信息系统存在不同的业务等级。为防止各业务间干扰服务质量，从网络安全的角度也要隔离各业务的数据流。其次是 IT 网络和 OT 网络内部隔离，网络内部要设置多个控制域，网络切片技术将网络基础设施从物理通道、时间、信号等维度划分成相互隔离的逻辑网络，每个逻辑网络具备独立的业务类型、行业用户、SLA 配置、安全等级等属性，进而满足 IT-OT 网络融合场景下复杂的差异化需求。企业内网中的网络切片主要包含无线网络切片和有线网络切片。无线网络切片以 5G 为代表，有线网络切片以 SPN、FlexE 等为代表。未来企业内网设备可以自动获得有线无线相结合的混合切片服务，实现全局的精细调度和端到端编排。

## 3.3 异构网络融合技术

目前企业内网中存在多个异构网络，以 5G+TSN 技术<sup>[9]</sup>为代表的异构网络融合技术有利于实现“多网归一”，5G+TSN 为实现 OT 与 IT 网络的融合提供广域和灵活接入能力。5G 具有带宽、时延、覆盖范围等方面的优点，TSN 则适用于稳定性强的本地互联，目前存在系统拼接、TSN 承载和 TSN 网桥三种技术方向。传统生产线联网大多依赖有线传输，旧有无线网络存在信号干扰、容量有限、稳定性较差等问题，导致部分生产辅助设备如 AGV 等时常出现掉线、卡顿等问题。运动控制对网络时延、抖动和可靠性有严格要求，稍有差池就可能导致大量原材料的损毁或者严重的生产安全事故，随着企业内网部署的园区越来越大，5G+TSN 能兼顾园区范围内的灵活性与确定性。为确保两者的资源能够及时调度，目前主要从应用和业务层面进行性能优化。

## 3.4 语义描述技术

以信息模型为代表的语义描述技术支撑工业异构数据互通互操作<sup>[10]</sup>，通过对工业信息语义的跨产业链标准描述打破信息孤岛，保证互联后各功能单元的信息能够识别、分析、挖掘、操作。进而建立多层级网络信息模型体系，提升异构工业信息系统的互联互通能力。IT 网络和 OT 网络中的各层缺乏统一的语法和语义，面向不同行业时又存在不同的标准。标准的语义描述将管理知识、工艺机理等各种隐性的经验显性化，通过信息模型来规范全要素、全价值链和全产业链的数

据。从性能角度来看，信息模型提升相关数据的处理、交换和挖掘的效率。从应用角度来看，信息模型在 IT-OT 融合网络内实现知识、工艺、技术等复用、移植、推理，是业务协同的数据结构基础和语义逻辑基础。语义描述技术通过打破各信息系统间的壁垒实现信息跨域无障碍交流，支撑全域互联和生产管理闭环。

#### 4 IT-OT 网络融合发展方向

IT-OT 网络融合趋势体现为 IT 网络向 OT 网络生产现场渗透，OT 设备管控和数据上移至 IT 网络，具体如图 3 所示。边缘计算技术承载 IT 业务，深入部署到 OT 网络内部。OT 开放自动化运维以 IT 技术模式集中控制 OT 设备。异构组网支撑 IT 业务与 OT 生产活动互联。在完成上述各层次的互联和交互后，需要解决数据格式和含义的理解，信息模型支撑 IT-OT 数据的标准化表示与互操作。经过调研和总结国内外案例，IT-OT 网络融合正在向确定灵活、技术开放、智能敏捷、技术原生的方向发展。

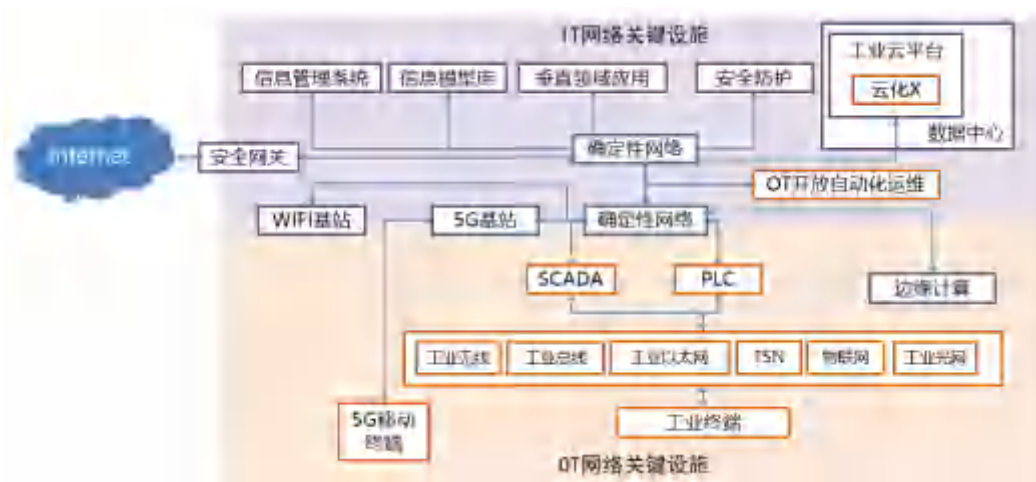


图 3 IT 网络和 OT 网络融合示意图

1) 确定灵活的网络服务。未来企业根据行业业务定制确定性配置，确定性保障能力将从数据链路层、网络层向应用层发展，为实现“网边端”深度融合提供通信条件。再通过有线与无线协同实现生产全流程、全区域的可靠网络覆盖。2) 技术开放的管理平台。确定性网络打破网络制式、协议间的技术壁垒，边缘计算开放计算资源和存储资源，信息模型促使工业控制闭环数据向上层开放。开放自动化平台借鉴 IT 技术模式，提供 OT 设备的集中式管理与可编程动态控制，为各行业提供集成度较高的运维控制台。3) 智能敏捷的闭环控制。TSN 应用将提升网络系统的智能管控与自动化，对业务的传输服务更为精细敏捷。通过控制器定义细粒度、边缘化、差异化、定制化的服务质量。边缘计算设备则强化边缘数据处理智能，实现生产闭环控制，促进生产线进一步自动化、无人化。4) 技术原生的跨领域融合。各界积极探索 IT-OT 网络融合技术的原生机

制、算法或模式，突出工业场景定制特性。

## 5 结论

IT-OT 网络融合可以提升企业柔性化能力，优化生产组织方式和管理模式，提升产业链协作效率，是办公系统、生产过程整合的必然结果。IT-OT 网络融合也存在一些问题，新技术产业需要简单易用、功能全面、性能可靠的重点产品。部分关键技术缺乏大规模部署的实验验证，需要面向应用场景集成与优化。国内相关企业需要进一步加强供需对接，加快形成市场反哺的良性循环。缺乏原生技术的问题十分突出，关键技术需要面向垂直行业融合与优化。IT-OT 网络融合还是一个不断演进的领域，未来将不断深化和丰富技术框架，分析技术与相关产业发展的关系和影响。

## 参考文献

- [1]工业互联网产业联盟.工业互联网体系架构（版本 2.0）白皮书[R].2020.4.
- [2]工业互联网产业联盟.工业互联网网络连接白皮书（版本 2.0）白皮书[R].2021.9.
- [3]洪学海,蔡迪.面向“互联网+”的 OT 与 IT 融合发展研究[J].中国工程科学,2020,22(04):18-23.
- [4]黄韬,汪硕,黄玉栋,郑尧,刘江,刘韵洁.确定性网络研究综述[J].通信学报,2019,40(06):160-176.
- [5]王睿,齐建鹏,陈亮,杨龙.面向边缘智能的边缘协同推理综述[J/OL].计算机研究与发展:1-17[2022-06-10].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1777.tp.20220426.1612.006.html>
- [6]全球首个广域云化 PLC 试验成果发布，加速下一代工业控制边缘计算架构升级[J].自动化博览,2021,38(07):3.
- [7]第五届未来网络发展大会组委会.确定性网络技术体系白皮书[R].2021.6.
- [8]董昱呈,伊学博,焦毅.解析工业互联网中 5G 切片技术[J].数字通信世界,2021(09):108-109.
- [9]工业互联网产业联盟.5G+TSN 融合部署场景与技术发展白皮书[R].2021.12.
- [10]工业互联网产业联盟.工业互联网信息模型园区应用白皮书[R].2021.11.

## 作者简介

**付韬**: 中国信息通信研究院技术与标准研究所产业互联网研究部高级工程师，主要从事工业互联网网络的研究工作。

**张恒升**: 中国信息通信研究院技术与标准研究所产业互联网研究部副主任，长期从事工业互联网网络、确定性网络的研究工作。

# 工业网络新技术的研究与运营思考

梁晓辉<sup>1</sup>, 黄骅<sup>2</sup>, 施晓东<sup>1</sup>

(1 中国电信股份有限公司四川分公司, 四川成都 610000;

2 国网四川综合能源服务有限公司, 四川成都 610000)

**摘要:** 工业网络是支撑数字经济发展和实体经济转型的新型基础设施, 在制造业数字化转型背景下, 急需构建企业生产环境下人、机、物全面互联的网络, 以实现工业设计、研发、生产、管理等产业要素的泛在互联互通。本文通过对工业互联网网络现状的分析, 以时间敏感网络技术为代表, 从架构、关键技术、与其他先进技术融合等方面阐述了下一代工业网络新技术的特点, 最后, 从业界探索入手, 对运营商网络方面的未来工作提出了几点思考。

**关键词:** 工业互联网; 下一代工业网络; 时间敏感网络; 运营商网络

中图分类号: F626; TN929.5

文献标识码: A

## Research and Thinking on New Technology of Industrial Network

LIANG Xiaohui<sup>1</sup>, Huang Hua<sup>2</sup>, SHI Xiaodong<sup>1</sup>

(1 China Telecom Sichuan Branch, Chengdu Sichuan 610000, China;

2 State Grid Sichuan Integrated Energy Service Co., Ltd, Chengdu Sichuan 610000, China)

**Abstract:** Industrial network is a new type of infrastructure supporting the development of digital economy and the transformation of real economy. Under the background of digital transformation of manufacturing industry, it is urgent to build a comprehensive interconnection network of people, machines and things in the enterprise production environment, so as to realize the ubiquitous interconnection of industrial elements such as industrial design, R & D, production and management. Through the analysis of the current situation of industrial Internet network, represented by time sensitive network technology, this paper expounds the characteristics of the new technology of next-generation industrial network from the aspects of architecture, key technology and integration with other advanced technologies. Finally, starting with the exploration of the industry, this paper puts forward some thoughts on the future work of Telecom operator network.

**Key words:** Industrial Internet; Next generation industrial network; Time sensitive network; Telecom operator network

近年来, 我国智能制造发展迅速, 工业经济由数字化向网络化、智能化深度拓展, 互联网创新发展与新工业革命形成历史性交汇, 催生了工业互联网。



作为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,工业互联网是第四次工业革命的重要基石,更得到了政府和业界的高度重视。工信部从 2018 年开始,连续 5 年印发《工业互联网专项工作组年度工作计划》,从网络、标识、平台、数据、安全等多方面,从标准建设、关键技术攻关、产业协同、人才保障等多视角细化重点工作,指引年度工业互联网创新发展工作。

## 1 工业互联网网络

网络体系为工业互联网的基础。工业互联网网络体系将连接对象延伸到工业全系统、全产业链、全价值链,可实现人、物品、机器、车间、企业等全要素,以及设计、研发、生产、管理、服务等各环节的泛在深度互联。网络与联接是网络体系中的关键基础底座。

在工厂环境下,尤其是车间内的网络,有线连接仍为主要方式。工厂内常见的主要有现场总线、工业以太网、工业 PON 等网络。

### 1.1 现场总线

现场总线技术通过标准化的通信接口解决了工业控制系统内部执行器、传感器以及变送器等设备的互联问题,实现了各类工业数据信号的共总线传输。但现场总线存在布线成本高、布线复杂、布线周期长的问题,且低速率,兼容性差、互联互通互操作性差,无法支撑工业应用对于承载网络更高传输效率、更大带宽、更好兼容性的需求。

### 1.2 工业以太网

工业以太网技术遵从 TCP/IP 框架,基于以太网架构构建工业应用层协议,有接口简单、协议开放、传输速率快、可靠性高、互通便捷等突出优势,也能为工业领域提供安全、稳定的网络基础。以电力控制系统为例,其工业以太网架构图如图 1 所示。

世界工业自动化巨头,如西门子、施耐德、ABB 通过主导网络协议研发一些附加技术机制,从实现网络设备与协议绑定,到基于协议进行持续优化升级,再到形成解决方案,构建了研究-产业-应用相对封闭的生态圈,也增加了网络复杂性。近年新一代信息技术和先进制造技术的融合应用,工业以太网封闭生态导致的互通性、标准化问题逐步凸显。

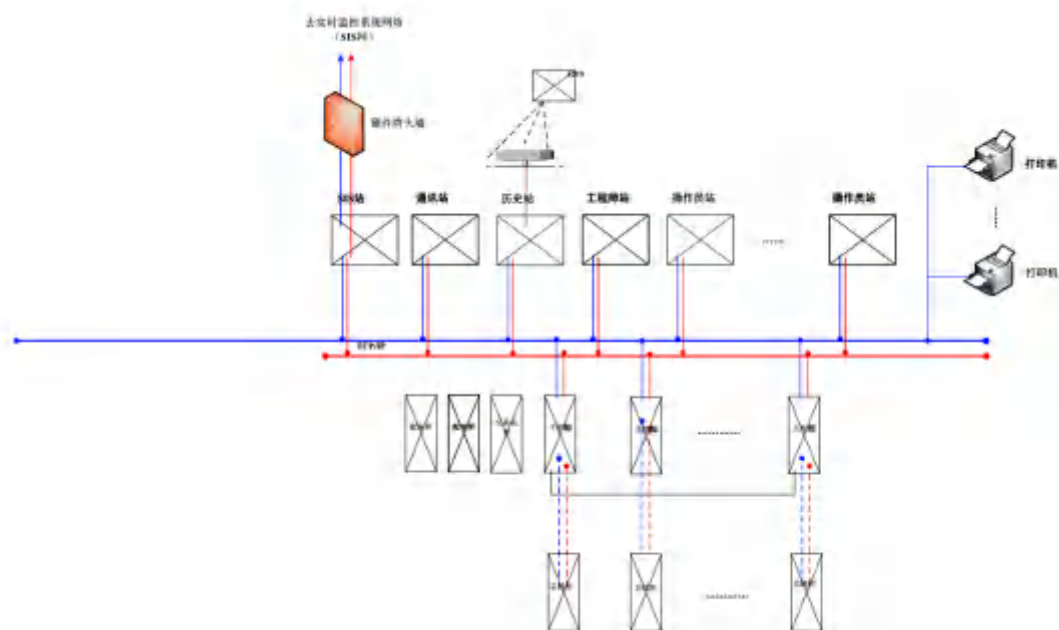


图1 电力场景的工业以太网架构图

### 1.3 工业 PON

工业 PON 接入网关(ONU)实现多种工业设备、传感器的接入,实现光网络到设备层的连接,实现工业数据的可靠有效传输。

工业 PON1.0[1]主要基于公众接入网的 PON 系统,针对工业场景,优化了环境参数和保护方式,由 PON 系统提供底层网络承载。组网方式如图 1 所示。

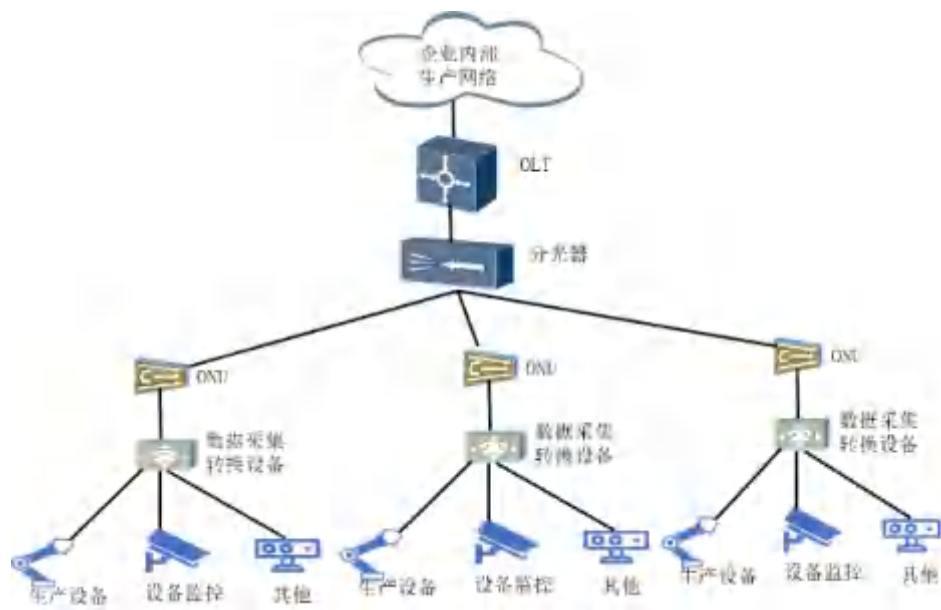


图2 工业 PON1.0 组网示意图

工业 PON2.0 体系（见图 3）在终端 ONU、局端设备 OLT 和云平台层做了升级。对接入网关（ONU）而言，一方面提升环境指标、保护倒换、工业协议灵活转换等工业场景下特有的性能；另一方面将 ONU 作为开放平台，配置多种嵌入式数据采集功能。同时，ONU 还支持集成开源或者客户定制的工业应用，进行个性化工业数据采集和转换处理，并与工业云平台进行交互。局端设备 OLT，增加提供了完备的保护倒换功能，可以在一路 ODN 网络或者 PON 设备端口发生故障导致网络中断时，快速进行主备链路切换和业务恢复。在云平台侧，将工业 PON 数采终端与工业云平台有效整合，实现工业数据的解析计算和协议转换等功能。图 4 是工业 PON1.0 到工业 PON2.0 的演进路径。

工业 PON2.0 和工业 PON1.0，在目前甚至未来很长一段时间内，都是共存和按需部署的关系。

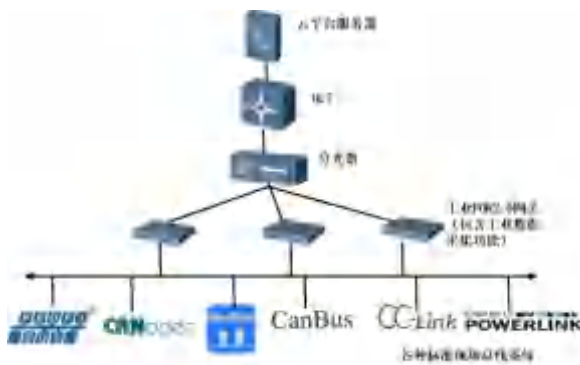


图 3 工业 PON2.0 架构图

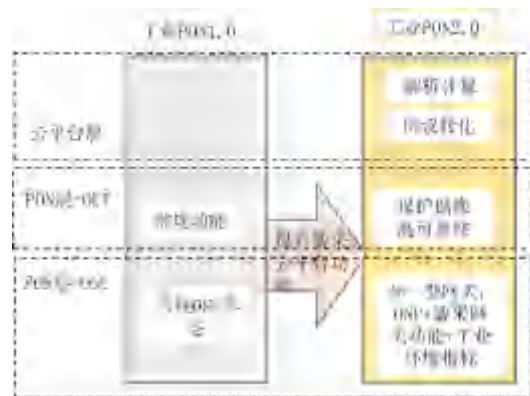


图 4 工业 PON1.0 到工业 PON2.0 的演进

在国家推进智能制造背景下，工业企业数字化、信息化改造面临进一步升级优化。工业网络要承载的不仅仅是数据的传输，更是基于语义的信息交互。具备支持多业务、多协议、多厂商设备和数据的互联互通、共网承载以及高质量传输能力，是下一代工业互联网网络技术必然的演进方向。

## 2 时间敏感网络技术

时间敏感网络（Time Sensitive Network）技术改善传统以太网尽力而为的转发特性，是具有时间同步、延时保证等确保实时性的新一代以太网技术，是下一代工业网络承载技术的重要演进方向之一<sup>[2]</sup>。

### 2.1 关键技术

工业生产需要网络提供确定性服务，即确定的网络时延和抖动，而以太网是传统的“尽力而为”网络，在车间多种业务流（如视频、数据采集、高速生产设备实时控制等）共享这张物理网络的场景下，难以满足生产中高优先级业务需要的时延确定、稳定可控。

时间敏感网络主要在体系架构、时间同步、流量控制以及容错四个方面对以太网技术协议进行了优化升级以解决如上问题。

### 2.1.1 体系架构

时间敏感网络 (TSN) 架构基于 SDN (Software Defined Network)<sup>[3]</sup>, SDN 架构的控制面和数据面分离的机制, 逻辑集中控制和管理流的特性, 实现设备及网络的灵活配置、监控、管理及按需调优, 提升工厂网络的智能化灵活组网的能力, 提升网络资源利用率, 保障网络安全, 实现网络智慧运维。

### 2.1.2 时间同步

时间同步特性是时间敏感网络的基础特性, 其目标是提供全局统一时钟信息以及节点的参考时钟信息, 进而实现本地时钟的调整和整个网络的时间同步。工业网络中的所有设备都需要共同的时间参考, 通过同步时钟来确保端到端 (End-to-End) 的传输延迟时间界限。此外, 由于时间同步的误差可能带来流量调度效果劣化甚至失效, 该特性同时也是保证 TSN 流量调度性能的基础。TSN 网络中的时间通常从一个中央时间源直接通过网络分配, 冗余主时钟与网络节点间的冗余同步路径能在网络链路甚至网桥丢失时依然提供同步时基, 实时保证网络的正常运行。

### 2.1.3 流量控制

流量控制机制是 TSN 实现确定低时延传输的关键技术, 主要包括流分类、整形、调度和抢占。

在工业场景下, 需要对各类工业应用涉及的业务流特性进行定义建模, 作为制定调度机制与优先级的依据。这样, TSN 网络在做数据转发时, 可针对不同优先级的流量进行承载质量差异化保证。目前, 工业网络中的业务流类型众多, 还没有统一的分类方法。

流量整形算法的时延、抖动和网络配置开销, 影响着不同算法在多个流实时传送业务场景下的应用<sup>[4]</sup>。如时间感知整形器 (Time Awareness Shaper, TAS) 具有最佳的低时延和低抖动性能, 配置复杂性也最高; 信用整形器 (credit-based shaper, CBS) 的时延性能最差, 但却保证了流的 QoS; 异步数据流整形器 (Asynchronous Traffic Shaper, ATS) 时延性能介于两者之间, 配置复杂性最低。

流量调度为不同等级的业务流提供差异化承载, 使能各类工业业务数据的传输和流转。调度方案一般分为两大类: 一是基于时隙化的调度方案, 需要全网进行时间同步; 二是基于 QoS 的调度方案, 所有参与实时通信的设备在处理和转发通信包时需遵循相同的规则, 为时间敏感的业务流传输提供时延上界。

抢占可以进一步将不同技术的多个网络融合在一个以太网和 IP 的基础架构里, 实现自动化操作以及订单控制生产。通过大幅压降优先级低的信息流对重要信息流的影响, 两种信息流可以混合在同一链路上。

#### 2.1.4 容错

时间敏感网络中，TSN 的调度、抢占和冗余功能提供更确定的延迟，更高效的数据包传输，以及跨网络冗余路径的无缝时钟同步。所有参与实时通信的设备在选择通信路径、预留带宽和时隙方面遵循相同的规则，可以利用多条路径来排除故障，防止硬件或网络故障影响数据传送。

### 2.2 与其他技术的融合

制造业企业是数字化转型的主力军。5G、边缘计算、大数据、人工智能等新技术都在寻找与工业最契合的应用场景，从而改变工业制造的流程、模式，提升产品品质、制造效率、改善服务，提高企业数字化水平。

时间敏感网络（TSN）技术特点决定了其与 OPC UA（OLE for Process Control）、边缘计算以及 5G 等先进技术相互融合，将形成更为强大的网络方案体系，助力支撑工业网络。

TSN 与 OPC UA 的结合解决异构系统互联互通问题，也是 OT 与 IT 的深度融合，同时实现网络的互联和数据层面的互通，进一步提升制造流程的自动化水平，使个性化定制成为可能。

边缘计算提供边缘智能服务，TSN 技术构建确定性网络。TSN 和边缘计算结合，可以满足企业数字化在敏捷联接、实时业务、应用智能、安全与隐私保护等方面的关键需求，同时满足边缘计算架构部署的灵活性。

5G+TSN 将时间敏感网络技术与 5G 网络进行融合，有效地保证工业生产网络的端到端高可靠低时延传输要求，是实现工业互联网无线化和柔性制造的重要基础。

#### 2.2.1 TSN + OPC UA

工业通信分为互联(硬件接口的连接)、互通(软件层面的数据格式与规范)、语义互操作(语义的定义与规范)几个层面。各种总线解决的是连接问题，互通解决了应用层的匹配，OPC UA 是针对嵌入式应用的 OPC 通信标准的重大发展，解决不同系统之间的语义的互操作，还带有内置的安全模型。

TSN+OPC UA 组合通过 TSN 解决底层数据获取的问题，OPC UA 解决应用层语义解析的问题，组合构建的通用数据解析机制，提供实时、高确定性、独立于设备厂商的通信网络，解决了工厂内系统互操作的复杂。TSN+OPC UA 不与某特定厂商绑定，不仅将彻底统一数据链路的服务标准，配置效率更高，程序与应用模块化更强，有可能打破传统工业的结构，实现扁平化。图 5 为 TSN+OPC UA 与 ISO/OSI 参考模型各层关系。