

新一代光纤网络 TS-PON 在工业控制中的应用 (Rev. B)

Version 0.34

06/18/2023

鹏瞰科技
vulcantech.com.cn | 上海 杭州

目 录

第一章 前言	3
第二章 技术概述	5
第三章 技术特性	6
3.1 高带宽、高确定性及低时延	6
3.2 功能安全	7
3.3 IT 和 OT 的融合	8
3.4 安全防御	8
3.5 低成本	9
3.6 生态系统	10
第四章 系统架构	11
4.1 TS-PON 系统架构	11
第五章 应用场景	12
5.1 工厂自动化中的 TS-PON	14
5.2 5G 融合中的 TS-PON	15
第六章 总结	16

第一章 前言

随着信息技术 (IT) 与运营技术 (OT) 的不断融合, 对于统一网络架构的需求变得迫切。智能制造、工业物联网、大数据的发展, 都使得这一融合变得更为紧迫。而 IT 与 OT 对于通信的不同需求也导致了在很长一段时间, 融合这两个领域出现了很大的障碍: 互联网与信息化领域的数据需要更大的带宽, 而对于工业而言, 实时性与确定性则是问题的关键。这些数据通常无法在同一网络中传输。因此, 寻找一个统一的解决方案已成为产业融合的必然需求。

2014 年以后, 随着工业 4.0 的提出, 工业物联网、智能制造的需求逐渐变得迫切, 对于连接的需求产生了变化。工业控制领域的实时通信技术从现场总线阶段逐步发展到各厂家基于标准以太网扩展的实时以太网阶段。但是, 这种特定定义的工业实时以太网和标准以太网无法在同一网络中进行数据的传输。而对于边缘计算、工业物联网、智能制造的全局优化而言, 制造现场控制所需的实时性数据和生产管理与优化层所需的非实时性数据要通过统一网络进行集中, 在统一的数据平台进行数据处理与分析, 并能够下发到各个控制器执行; 而一些全局优化的工作并不需要通过层级的控制器, 而是希望直接到边缘侧或者云端。这使得同一网络的需求变得迫切。

确定性网络(Deterministic Network)用于提供实时数据传输, 保证确定的通信服务质量如超低上界的时延、抖动、丢包率, 上下界可控的带宽以及超高下界的可靠性。时间敏感型网络 (Time Sensitive Network, TSN) 就是业界正在积极推动的其中一种全新工业通信技术, 然而 TSN 的协议十分复杂, 目前市场上的产品都仅能支持一小部分, 协议本身复杂, 成本高, 使用方法复杂, 互联

互通实现非常困难。而且端口数目的增加对交换机的处理能力增加要求很高。鹏瞰科技创新性地推出了基于光纤传输技术的新一代工业控制网络总线架构——TS-PON，其融合了无源光纤通信高速数据传输、超低时延和高可靠性控制功能，提供高安全性、易于布线和全网同步的特性，以及高度安全、可扩展和可靠的端到端工业数据传输解决方案，将光纤传输技术引入控制区域网络，光纤连到节点带来的带宽优势发挥了作用，以极低成本实现 OT/IT 融合，赋能智能制造时代的网络需求。

第二章 技术概述

TS-PON 网络是一种创新性、独立及统一的新型工业控制确定性网络，它可将传统 CAN 网络、传感器设备网络、以太网、扩展的 PCIE 网络、CPU 接入及多 IO 设备控制管理网络统一到一张网中，采用光纤树形结构或灵活的 daisy-chain 结构，将多铜域或者光域内网整合起来，形成一张高效实时大数据传输的工业控制网。其构成元素主要有：

Core switch：核心交换引擎

Core (OLT Root)：局端 OLT 核心节点

Gate (Gate relay)：包含 OLT Root 和 ONU Node 节点

Node (ONU Node)：前端 ONU Node，边缘前端节点

Optical Fiber or Copper cable: 光纤或者铜缆，单域或者多域连接线

在 TS-PON 芯片如 VN1110/VN1110M 架构中，实现了灵活组网的特点，集成了多功能灵活可扩展的 IO 接口，如提供高速 PCIE、USB、CAN、UART、I2C 和一系列灵活的以太网（包含 10G/2.5G/1.25G bps）接口，为用户的选择使用提供了宽阔的空间。

第三章 技术特性

TS-PON 网络所独有的技术特性包括:

- 网络行为的高确定性、高带宽及低时延;
- 极高标准的功能安全和通信的可靠性;
- OT (运营技术) 和 IT (信息技术) 的融合, 单一网络支持不同性质的业务;
- 低成本、低功耗、长距离、长寿命的网络基础设施;
- 强大的防御安全;
- 集中式网络管理, 灵活的网络配置。强大的远程诊断及调试功能, 软件定义网络架构;
- 现有生态系统清晰和简单的迁移;
- 基于无线的 5G URLLC 无缝集成。

3.1 高带宽、高确定性及低时延

- 带宽和带宽利用率
 - 第一代 产品支持 10Gbps 带宽, 未来产品可以平滑升级到 25G/50G/100G/...
 - 网络带宽有效利用率大于 85%
- 时延特性
 - 最大时延限定, 可以配置不同的时延边界, 通常业务保证端到端最大时延小于 100us
 - 重要消息可以保证时延小于 10us

- 高精度全网同步
 - 同步精度性能可以达到 8ns，同步抖动在正负 20ns 范围
 - 全网所有节点实现共享全局时间戳
 - 实现 1pps 的精确全网远程传递
- 硬实时网络调度
 - 无网络拥塞，高效灵活的业务流塑形
 - 高优先级的业务流可以实现抢占低优先级的业务流，IT/OT 融合的基础

3.2 功能安全

- 通信可靠性
 - 光纤通信自身能够提供 BER 小于 $1e-12$
 - 高可靠性需求的消息
 - 提供端到端的 ACK 机制
 - 在物理层实现自动重传机制，最小化额外的重传时延
 - 总的等效 BER 小于 $1e-19$
 - 对环境电磁干扰的强抗性，同时对环境发射的电磁干扰最小
- 系统弹性
 - TS-PON 可以支持全网冗余设计
 - 实时检测网络失败（光纤、器件、设备）
 - 极短时间内自动实施保护倒换

3.3 IT 和 OT 的融合

- 完全受控和管理的网络
 - 精确的全网同步
 - 全网业务精确调度，无业务阻塞和碰撞
 - 抢占式业务调度，OT 流可以有效抢占 IT 流
 - 每个节点可以支持 8 种不同优先级的业务
 - 一个网络支持 128 个节点和 4096 个业务流
 - 多个网络可以级联形成更大的网络
- 软件定义网络
 - 软件可以定义每一个业务流，可以实时改变业务交换规则
 - 软件定义子网络，和子网络之间的隔离，改变网络的逻辑拓扑
 - 提供足够的计数器 MIB 信息，便于网络的诊断和调优
- 无缝连接边缘云与机器设备

3.4 安全防御

- 独特的三层安全防御体系
- 组件层次
 - 嵌入到芯片内部的信任根
 - 可信软件启动校验和可信软件在线更新
 - 提供 SE API 给上层软件
- 网络层次
 - 每个节点接入网络之前都需要事先授权

- 每个节点接入网络的时候都要进行实时认证
- 每个网络中的节点都会周期性地重认证
- 网络中的所有业务都实时 AES 加密
- 行为层次
 - 非侵入式的实时监控所有节点的行为模式，构建行为模型，辨别异常行为
 - 检测硬件老化或者失效
 - 检测黑客入侵

3.5 低成本

TS-PON 网络相较于之前的铜缆以太网，依托成熟的“光纤到户”生态系统，低成本的光模块/光纤/连接器，无源分光器，其具备天然的低成本、低功耗特性，体现在：

- 支持各种网络拓扑：树形、星形、总线、环形等等，适应各种应用场景
- 长距离通信，光纤可以支持 20 公里的传输距离
- 寿命长，维护成本低，光纤本身的寿命很长，约 20-30 年。此外，光网络升级非常容易，布线不需要改变，只要改变 2 端的有源模块即可，平滑升级到 25G/50G/100G。相比铜线网络的不断升级，CAT6A 可能是铜线的终点，光纤则是未来的起点
- 低功耗，光模块的功耗只是同级以太网 PHY 的功耗的 1/3 到 1/4
- 光纤对电磁干扰的强抗性，可以节省屏蔽线的成本

- TS-PON 的架构可以节省大量的端口成本，网络越大，端口越多，成本优势就越明显

3.6 生态系统

TS-PON 网络的生态系统具备很强的友好性，体现在：

- 现有设备的零改动接入 TS-PON 网络
 - TS-PON SoC 提供各种标准的工业设备的接口：以太网、PCIe、USB、MIPI、CAN、RS485 以及丰富的 GPIO
 - TS-PON 网络透传各种不同的协议和组包，各种不同的协议可以同时共存在 TS-PON 网络上。必要的时候，TS-PON SoC 可以做协议转换，实现全网或者部分网络的统一协议

路径一：

- 设备的原有协议传输在 TS-PON 的协议之上
- 不同协议的设备之间通过原有的协议网关来进行互通

路径二：

- 设备的各种不同协议可以转换成统一的网络协议，例如 OPC UA, DDS, TCP/IP 等等
- 各个设备节点直接相互通信

第四章 系统架构

4.1 TS-PON 系统架构

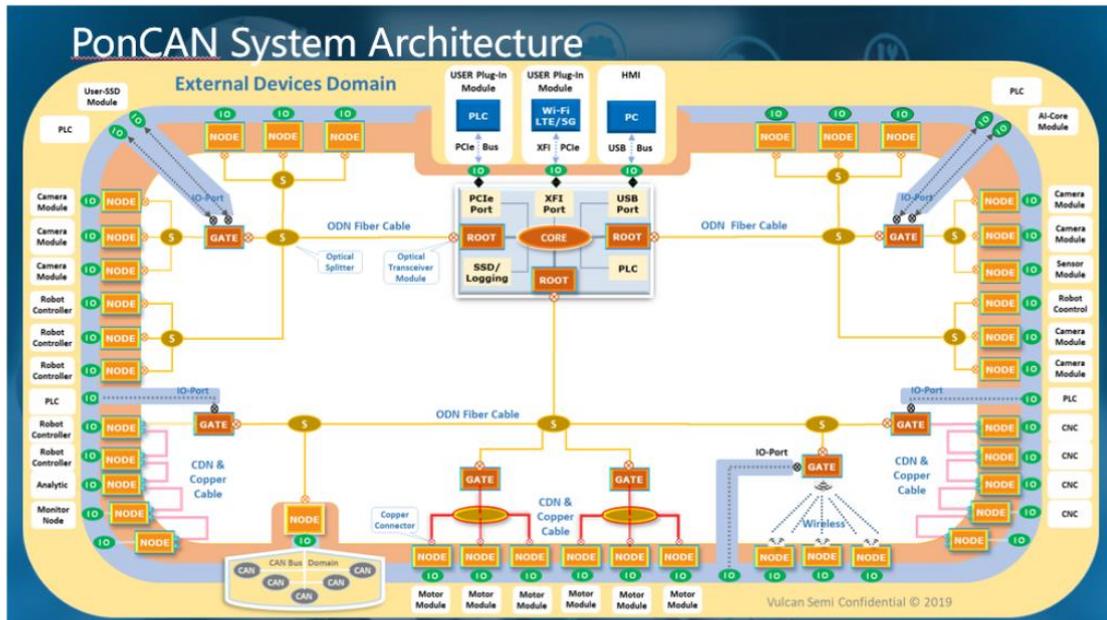


图 1 TS-PON 网络系统架构

如上图 1 所示为典型的 TS-PON 网络系统架构，其主要组成元素为：

- 核心节点（OLT Core）
- 网关中继（Gate Relay）
- 前端节点（ONU Node）
- 分光器或者铜缆

通过如上核心元素的网络组合，可将独立或者多层级的光域或者铜域设备系统集成到一张 TS-PON 网络上，实现高效统一管控。

第五章 应用场景

工业控制网络的发展必须优先解决企业难点和行业痛点问题，工业控制网面临一些新的需求与挑战，比如对网络时延、抖动、安全、带宽及网络融合等确定性网络方面的要求。通过以上章节介绍，我们已经知道 TS-PON 网络能够完美解决这些痛点，为智能制造、自动化工厂等工业控制网领域提供了安全可靠的网络传输方案。

从应用场景角度，具备确定性网络技术的工业控制网的大规模落地，可以推动智能制造业（智能工厂，自动化车间、设备检修等）等工业各行业的网络化、智能化升级。对于工业控制场景，下表所示为工业自动化网络承载的各种不同业务对确定性服务质量的要求。TS-PON 网络的低时延、低抖动特性完美

Traffic types	Periodic /Sporadic	Typical period	Data delivery guarantee	Tolerance to jitter	Tolerance to loss	Typical data size (Byte)	Criticality	Traffic priorities (VLAN PCP)	Strict priority IEEE 802.1Q	Redund-ancy IEEE 802.1CB	Time synchronization IEEE 802.1AS	Scheduled traffic IEEE 802.1Qbv	Frame preemption IEEE 802.1Qbu	PSFP IEEE 802.1Qci	TSN configuration IEEE 802.1Qcc
Isochronous	P	100 μ s ~ 2 ms	Deadline	0	None	Fixed: 30 ~ 100	High	6	M	O	Yes	M		M(T)	M
Cyclic -Synchronous	P	500 μ s ~ 1 ms	latency bound (τ)	$\leq \tau$	None	Fixed: 50 ~ 1000	High	5	M	O	Yes	M		M(T)	M
Cyclic -Asynchronous	P	2 ms ~ 20 ms	latency bound (τ)	$\leq \tau$	1 ~ 4 Frames	Fixed: 50 ~ 1000	High	5	M	O	No		R	M(R)	M
Events: control	S	10 ms ~ 50 ms	latency bound (τ)	n.a.	Yes	Variable: 100 ~ 200	High	4	M	O	No		O	M(R)	M
Events: alarm & operator commands	S	2 s	latency bound (τ)	n.a.	Yes	Variable: 100 ~1500	Medium	3	M	O	No		O	M(R)	M
Network control	P	50 ms ~ 1 s	throughput	Yes	Yes	Variable: 50 ~ 500	High	7	M	O	No				
Configuration & diagnostics	S	n.a.	throughput	n.a.	Yes	Variable: 500 ~ 1500	Medium	2	M				O	M(R)	M
Video	P	Frame Rate	throughput	n.a.	Yes	Variable: 1000 ~ 1500	Low	1	M	O	No		O	M(R)	M
Audio/Voice	P	Sample Rate	throughput	n.a.	Yes	Variable: 1000 ~1500	Low	1	M	O	No		O	M(R)	M
Best effort	S	n.a.	None	n.a.	Yes	Variable: 30 ~ 1500	Low	0	M				O		

地解决了工业控制网络中高带宽和高确定性并存的问题。

简化的工业控制领域 TS-PON 网络拓扑如下图 2 所示，图中包含了 TS-PON 网络系统的 3 个主要构成要素：Core Root OLT、Gate Relay 中继及前端 ONU Node，其中 Node 节点具备工业控制领域设备接入所需的灵活可便捷接入的多类型 IO 接口，极大地方便了 TS-PON 系统在工业控制领域地推广和应用。

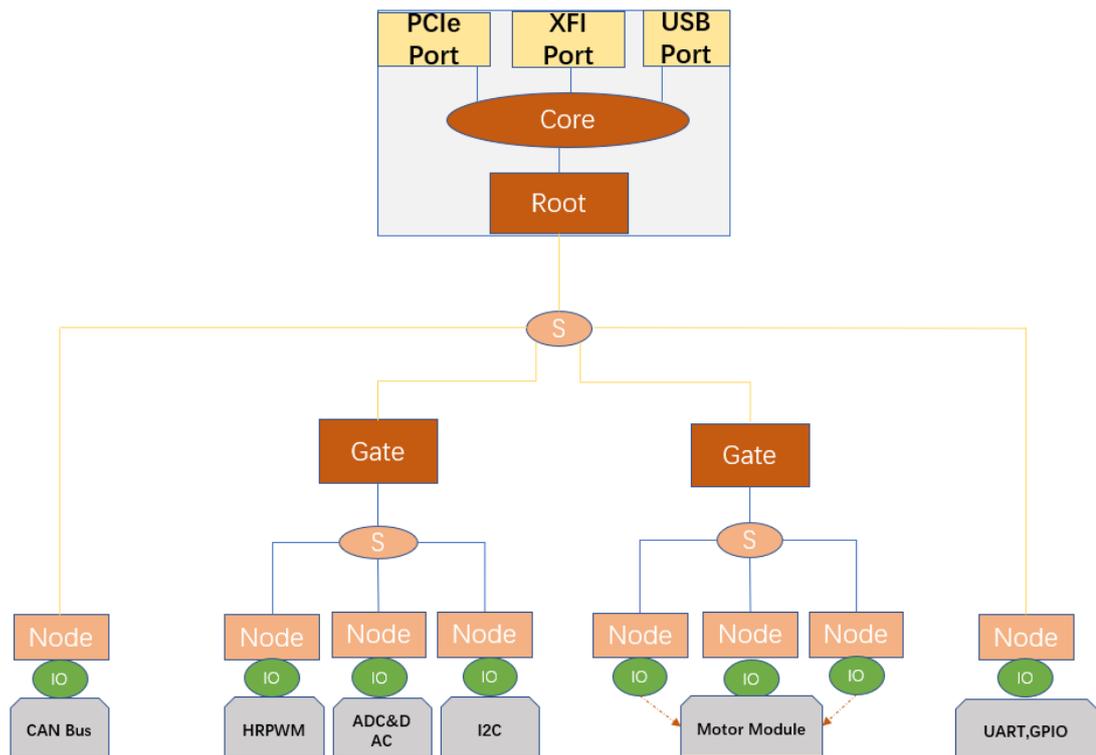
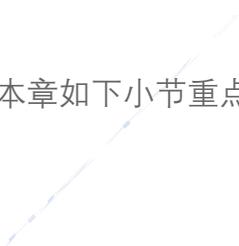


图 2 工业控制领域中的 TS-PON 网络

本章如下小节重点介绍工业控制领域应用的 2 种场景。



5.1 工厂自动化中的 TS-PON

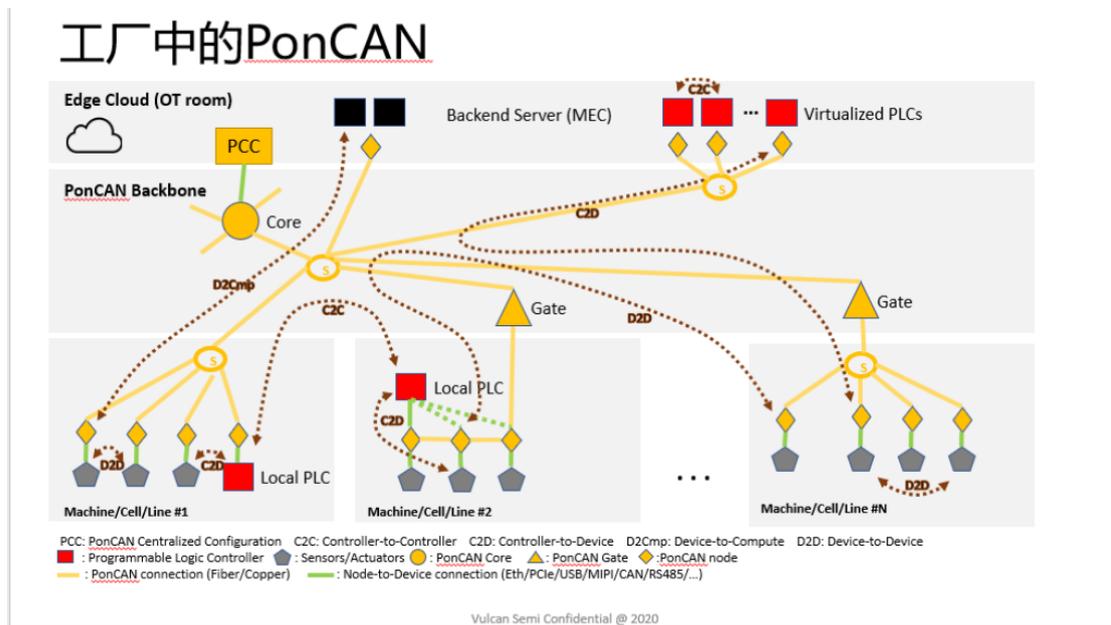


图 3 TS-PON 工厂自动化应用框图

在当前实际工厂向自动化控制转变过程中，除了面临上述章节所描述的确定性网络及网络融合问题，还有一个现实的部署实施的问题，如果采用类 TSN 的网络技术来执行，则不可避免还需要众多以太网交换机设备及铜缆网线，在工厂面积过大或者需统一接入的设备厂家或协议众多，将带来部署繁杂及兼容统一的问题，并不能完全发挥 TSN 网络技术的优势，而采用 TS-PON 网络技术，则完美解决如上问题，全程采用一根光纤，融合集成为一张网。如上图 3 所示，通过 TS-PON 网络核心节点 Core、Gate 及 Node 将工厂自动化生产场景中的各类前端设备（各类传感器、执行器等）、本地各种协议总线的 PLC 控制器及集中的虚拟化的 PLC，以一根光缆及相应光分连接器统一整合到一张 TS-PON 数据传输网中，可在边缘云中心控制端，实现信息数据流和操作过程流的高速、实时安全、大带宽传输和控制。

5.2 5G 融合中的 TS-PON

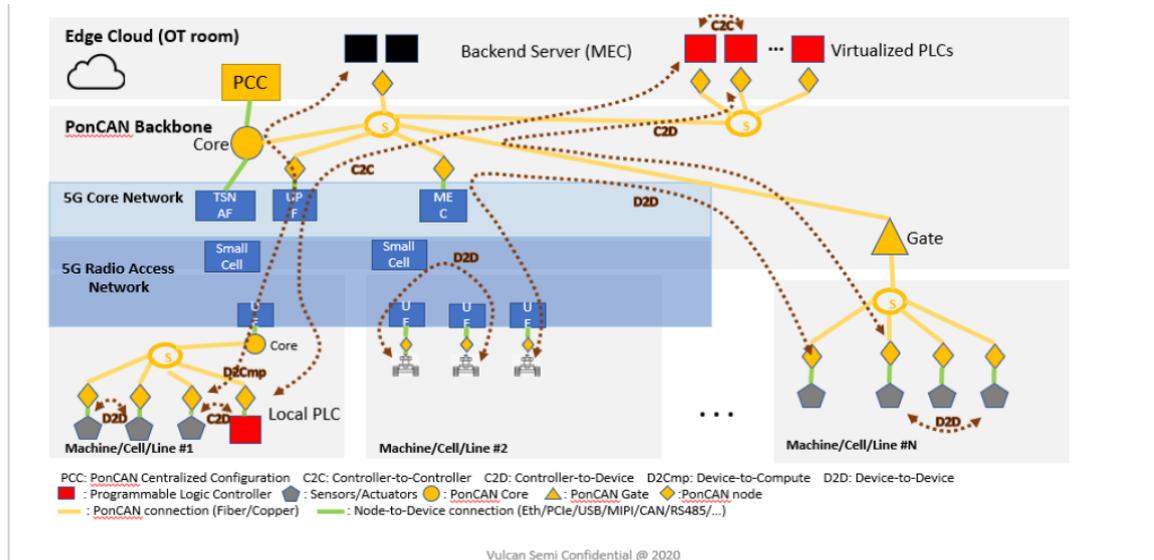


图 4 TS-PON 与 5G 的融合组网

目前随着 5G 技术的高速发展及愈加广阔的应用，TS-PON 支持与其融合是必然的趋势。在某些工业控制网络场合，可能面临着跨区域、跨网络的场景，此时 TS-PON 网络支持通过与 5G 核心网络的融合，满足跨区域的数据传输需求。在 5G URLLC 场景中，5GS 支持 1566 based PTP 组包的处理，5GS 能够测量 1588 组包在 5GS 系统里面的额外时延并记录在出口的 1588 组包里面，就可以实现和 TS-PON 的无缝组网。这时，5GS 是一个时间感知的子系统。TS-PON 和 5G URLLC 联合组网并不需要 5GS 支持其他的 TSN 的特性，TS-PON 自身可以调度和做流量整形。如果 5GS 支持 TSN 特性的话，TS-PON 和 5G URLLC 的联合组网可以实现更多更细致的业务控制，但这个非必须。因此，5G URLLC 可以看作是 TS-PON 网络中的一段虚拟的时间感知的子网络，无论 5GS 是否支持 TSN，都足以和 TS-PON 一起无缝联合组网。TS-PON 和 5G URLLC 是两个高度互补的技术，相互不可替代而可以很好地协同工作。

第六章 总结

综上所述，TS-PON 网络在工业控制领域的应用优势主要有：

- ◆ 高带宽、可保证的超低时延，高确定性的实时和同步，具备以太网确定性网络所需的一切网络性能特性，甚至更优；
- ◆ 多种工业控制接口，可节省大量外围器件，如高精 HRPWM、ADC&DAC，PCIE、CAN-FD、UART、USB 等高低速控制接口，即简化了系统设计又节省了大量成本；
- ◆ 统一的网络架构完美解决 IT 和 OT 的一网融合；
- ◆ 光纤通信的可靠安全及冗余的弹性系统为系统高可靠运行提供了保证；
- ◆ 体系层次完整的网络安全性保证；
- ◆ 光纤长距离的传输距离、寿命长、维护成本低、多种网络拓扑等特性完美适应工厂控制网络组网的应用需求，可带来低功耗、低成本、抗电磁干扰等应用优势；
- ◆ 支持与 5G URLLC 的联合组网，无障碍地将高速有线与无线网组合起来，满足跨网络域的工业控制传输组网需求。

即将到来的新一代工业网络，必将是一个无线，铜线和光纤共存而且互补的网络。鹏瞰半导体，致力于光纤网络的工业网络通信协议的前沿技术，推动实现工业领域的“光进铜退“！