

A close-up photograph of a network switch or patch panel. Numerous blue Ethernet cables are plugged into the ports, each with a white label. The switch is grey and has various ports and labels, including 'A1+', '13NO', '1NC', '3E', '43NO', 'A1+', '31E', 'G/161103 +E06+', 'K0957', '-2BB40', 'DC 24V', and 'A02K0955'. The background is slightly blurred, showing more of the network infrastructure.

# 支持控制即服务(CaaS)的 实时工业网络体系架构

杨铮  
清华大学

<http://tns.thss.tsinghua.edu.cn/~yangzheng/>

# 个人简介

- 清华大学副教授、博士生导师
- IEEE Fellow
- 国家“万人计划”青年拔尖人才、北京市科技新星
- 国家优秀青年科学基金获得者
- 获国家自然科学基金二等奖
- 研究方向：物联网、工业互联网、无线感知与定位、边缘计算



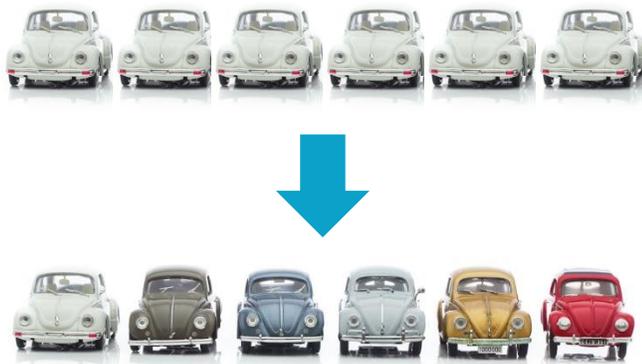
# 目录

- 背景
- 时间敏感网络(TSN)
- 支持控制即服务(CaaS)的实时工业网络体系架构
  - 整体架构
  - CaaS交换机
  - 任务流量协同调度控制器
- ZIGGO TSN交换机
- 总结与展望

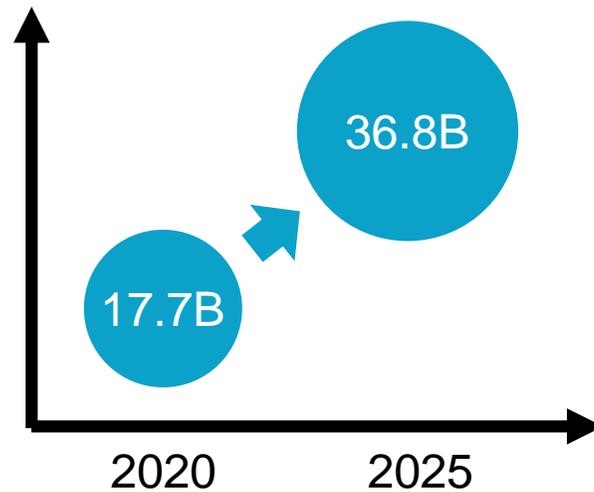


# 工业4.0和柔性制造

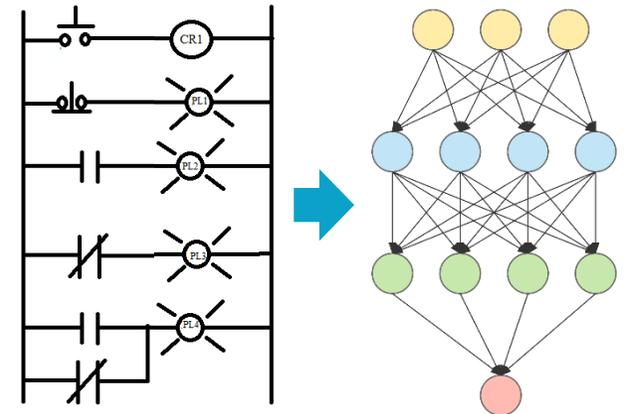
- 近年来，工业制造领域逐渐向**工业4.0**迈进。**柔性制造**场景为现有的工业控制网络带来了新的挑战。



订单规格变化



连接设备激增

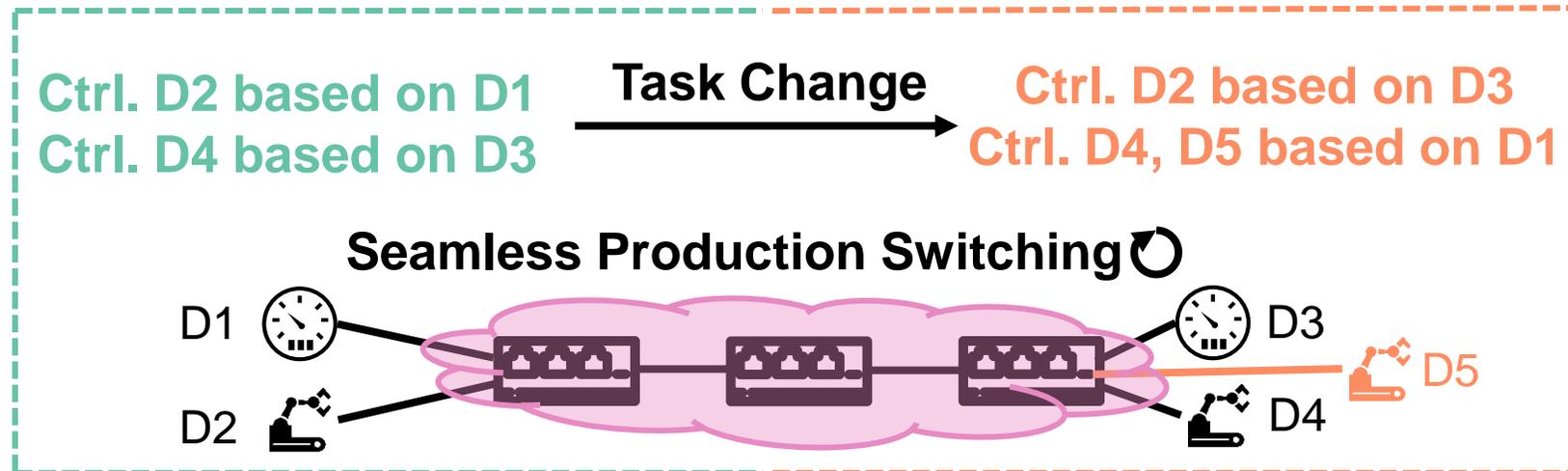


控制任务升级

# 工业4.0和柔性制造

- **柔性制造带来生产线的频繁切换**

- 控制任务转移：控制任务从网络中的一台控制器转移到另一台控制器
- 控制任务增加：由新设备、新传感器引入的新控制任务
- 控制任务升级：简单控制任务升级为复杂控制任务（例如视觉缺陷检查）



# 传统工业控制网络的局限性

传统工业控制系统中控制任务与**专用控制器紧密耦合**，而与**网络传输分离**，在实现**柔性制造**时面临三大问题：

- **配置过程繁琐**：生产线切换需要先停机然后重新配置 PLC 和设备间的物理连接，造成生产效率下降。
- **规模扩展受限**：PLC 物理接口数量限制了产线可以增加的设备数量，难以满足厂商的升级需求。
- **升级成本高昂**：随着控制任务复杂性逐渐增加，算力不足的 PLC 需要更新换代，造成额外停机成本。

Switch time (min)		Switch frequency	Production reduction
Change mold	Reconfig. & pilot run		
10	40	6-8/day	24%

生产线切换成本

	Preprocessing	Printing	Quality control
# new devices	3	1	2
New tasks	Surface ins. <sup>1</sup> Edge ins. Size ins.	Printing ins.	Curvature ins. Appearance ins.
Computation	Arithmetic, CV, PID	CV	Arithmetic, CV

<sup>1</sup> inspection

控制任务升级需求

**根本原因在于控制任务与控制器紧密耦合、与网络传输分离**

# 工业现场网络

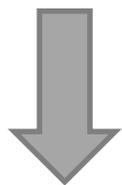
网络名称	容量	最大速率	实时性	现存设备数量	主要企业
 Profinet	256	100Mbps	有	>1亿	西门子
 EtherCAT	65535	100Mbps	有	>5千万	欧姆龙
 EtherCAT	65535	100Mbps	有	>5千万	欧姆龙
 Modbus TCP	N/A	取决于以太网	有	>7百万	施耐德

迫切需要互联互通的高效率融合网络技术

既有设备数量多、现有标准规格低

# 以太网：OT面前水土不服

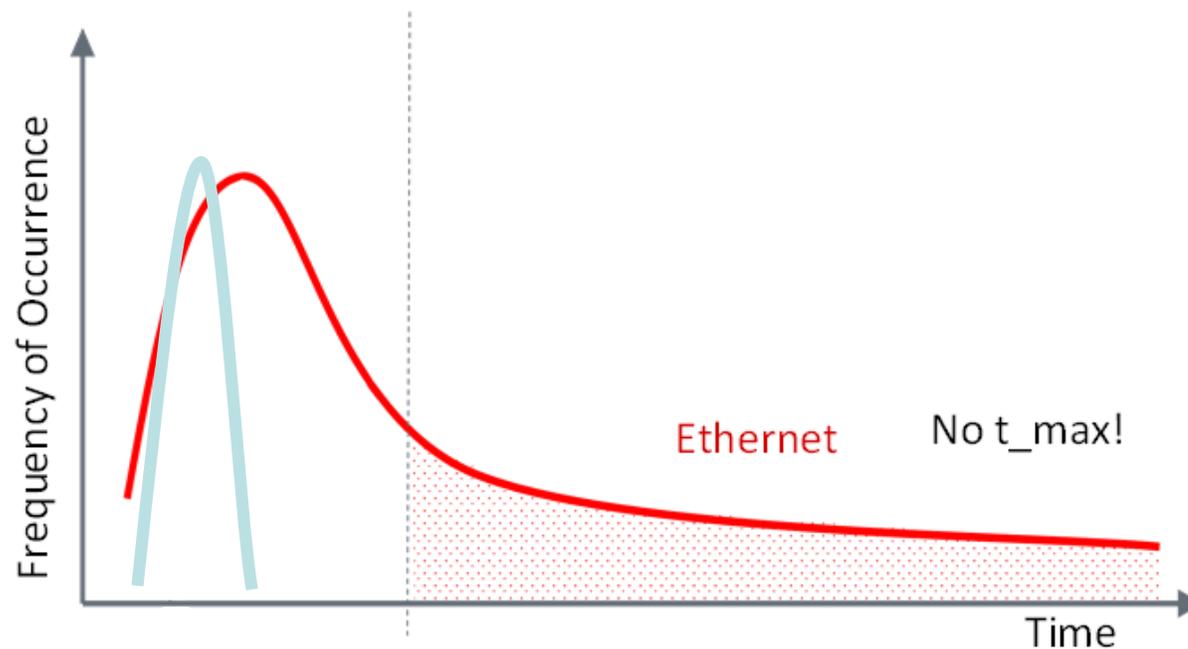
- 发送端**没有**基于时间的流量调度
- **尽力而为**的转发机制



不确定

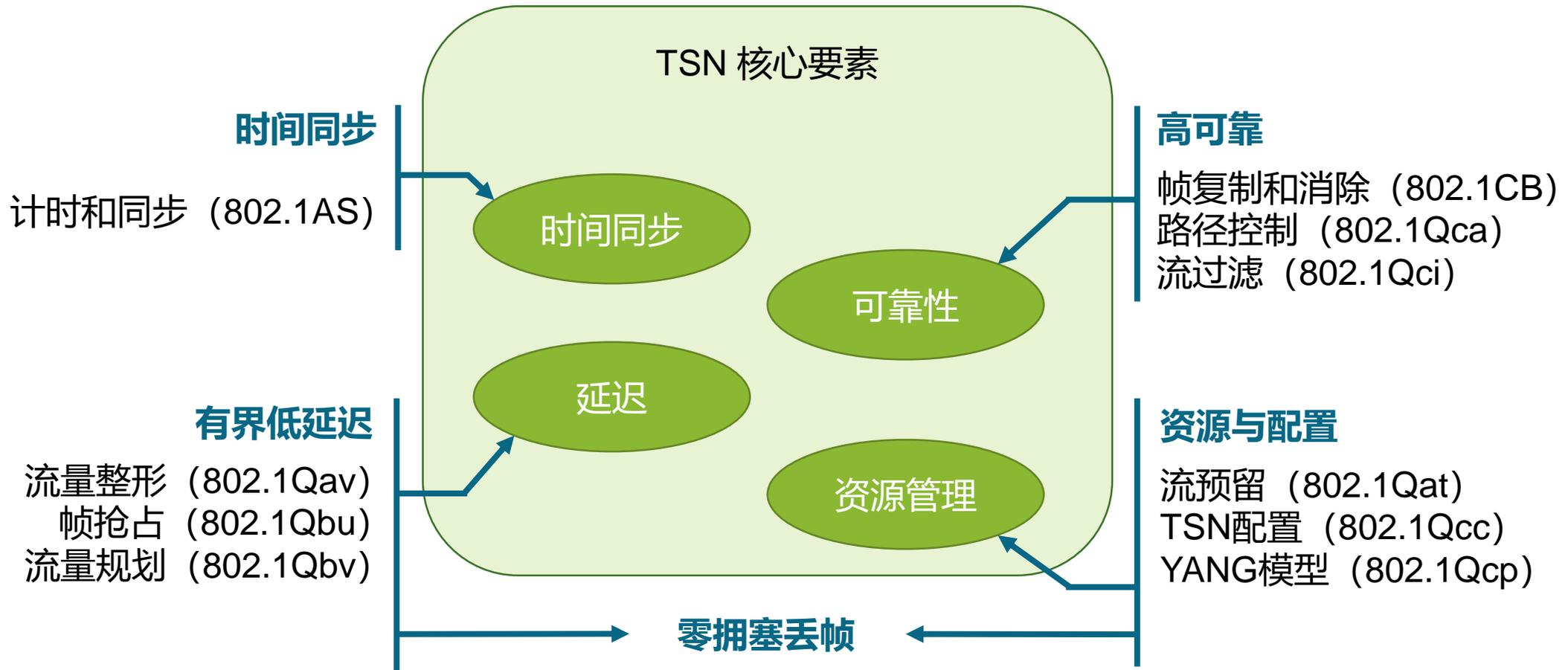
不实时

不可靠



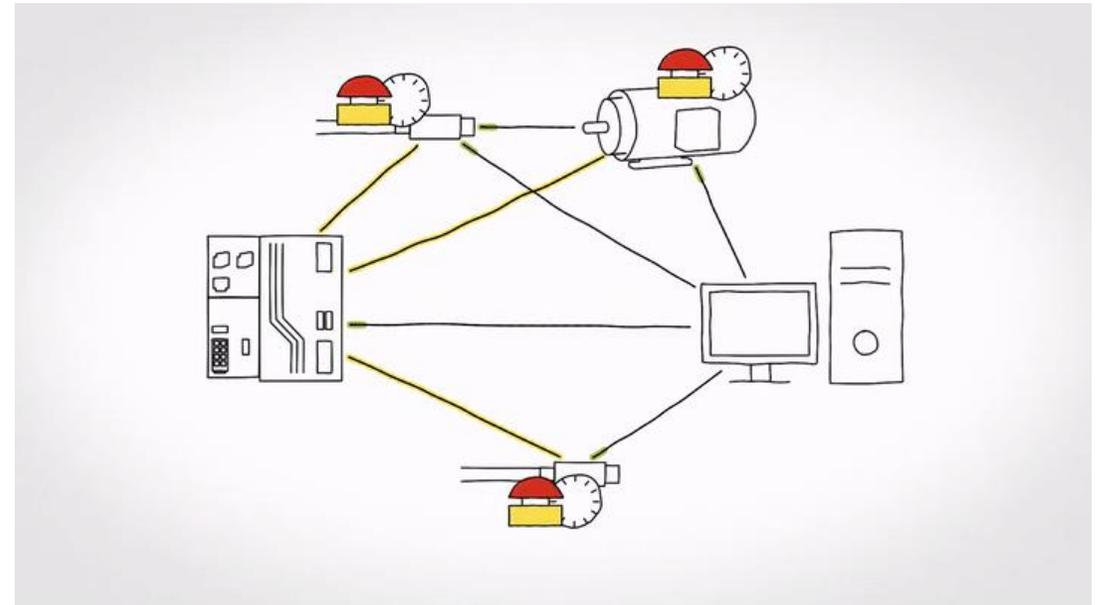
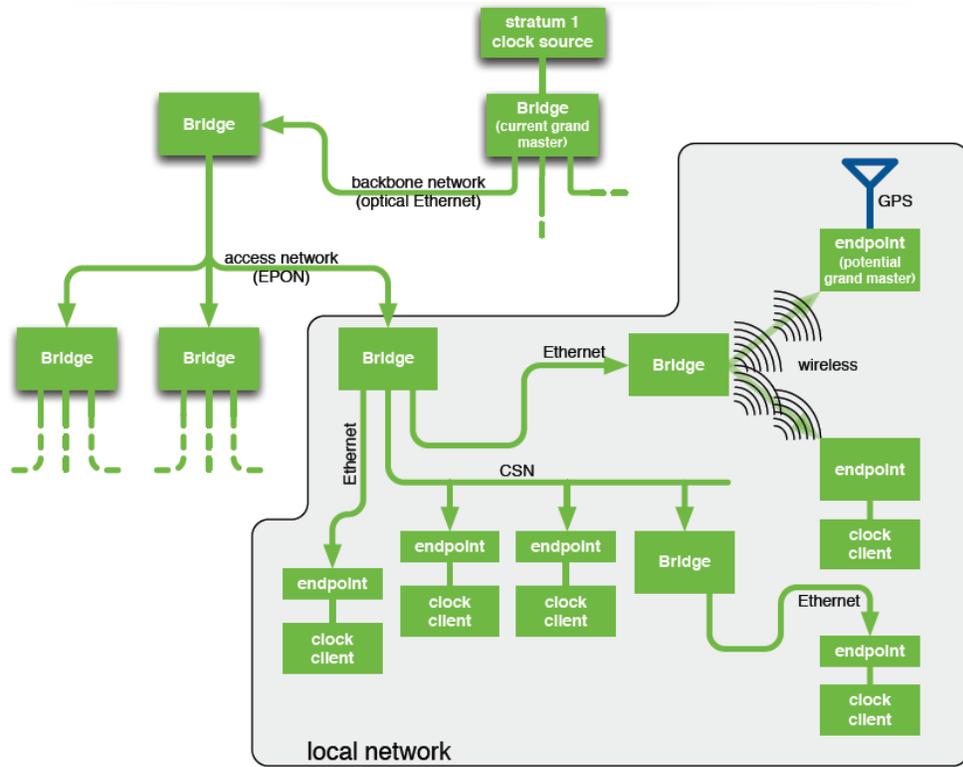
低延迟、确定性的可靠转发

# TSN是什么



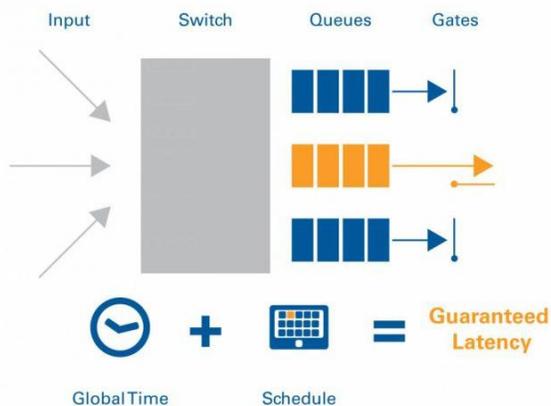
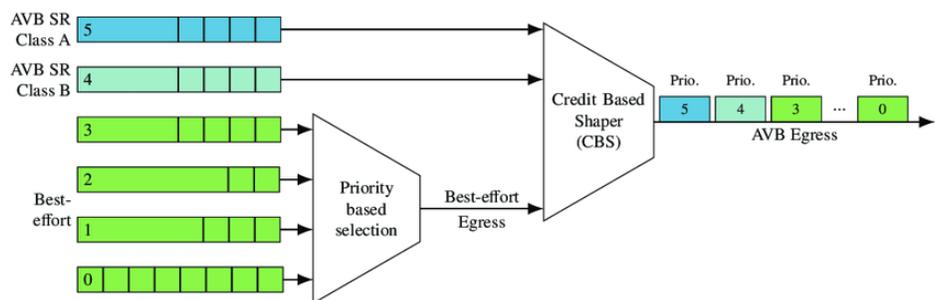
# 时间同步 (IEEE 802.1AS)

实时可控的传输依赖全局同步的时间。TSN使用**中心时间源**，通过延迟测量，逐级同步各设备时间，最终达到**亚微秒级甚至纳秒级**精度。



# 带宽预留 (802.1Qav) 和流量调度 (802.1Qbv)

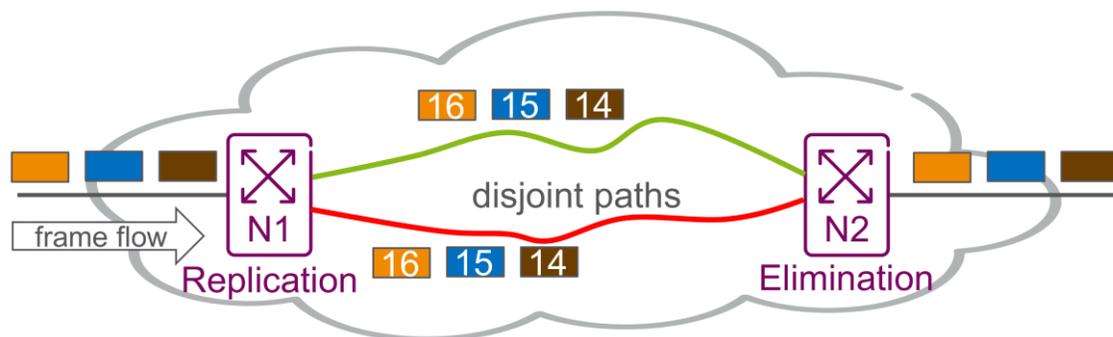
- 带宽预留：数据帧按优先级进入不同队列，通过队列实现带宽的保留。
- 流量调度：通过调度**流量的发送和转发时间**实现对高优先级帧的传输优化，从而提供**确定性的超低时延**（5跳100微秒）。其基本思想是**时分复用**。



# 帧复制与消除 (IEEE 802.1CB)

在网络的源端系统和中继系统中对每个帧进行序列编号和复制，并在目标端系统和其他中继系统中消除这些复制帧。

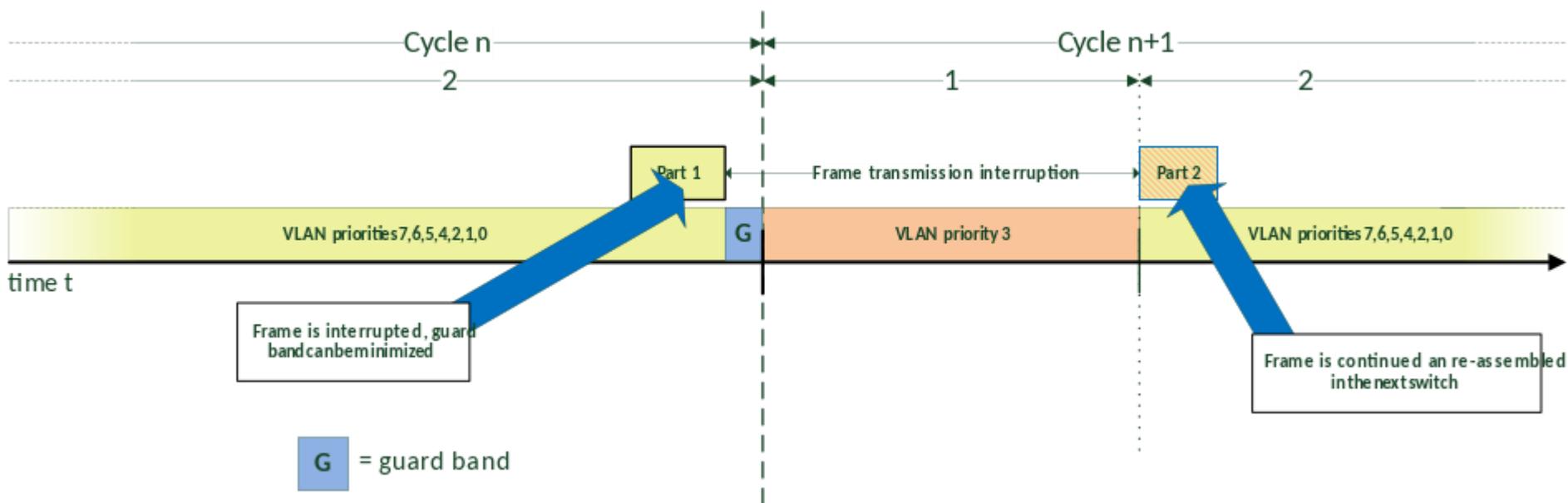
帧复制和帧消除过程为以太网提供**无缝冗余**特性，提高**可靠性**。



# 帧抢占 (IEEE 802.1Qbu & IEEE 802.3br)

传统的以太网中，数据帧一旦开始传输则无法中断。即使后续有更高优先级的帧到来也必须等待上一帧传输完成后才能开始传输。

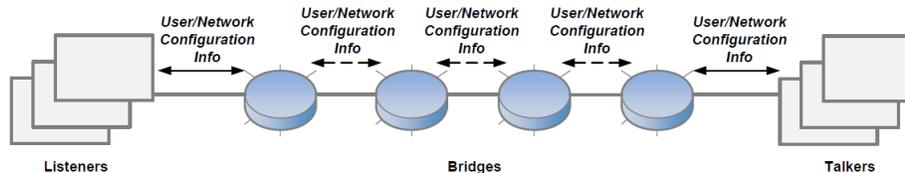
IEEE 802.1Qbu和IEEE 802.3br协同设计了**帧抢占机制**，使得高优先级的帧可以**打断**低优先级的帧的传输。



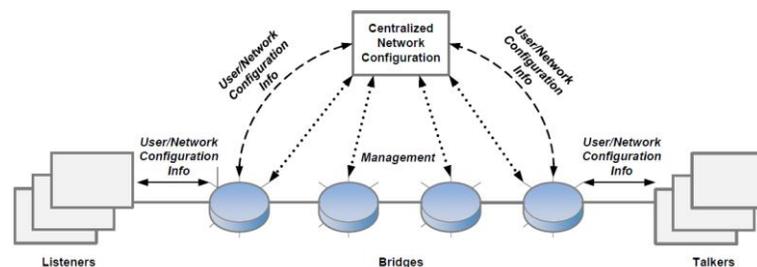
# TSN网络配置 (IEEE 802.1Qcc)

IEEE 802.1Qcc中规定了三种对TSN网络进行配置的方法

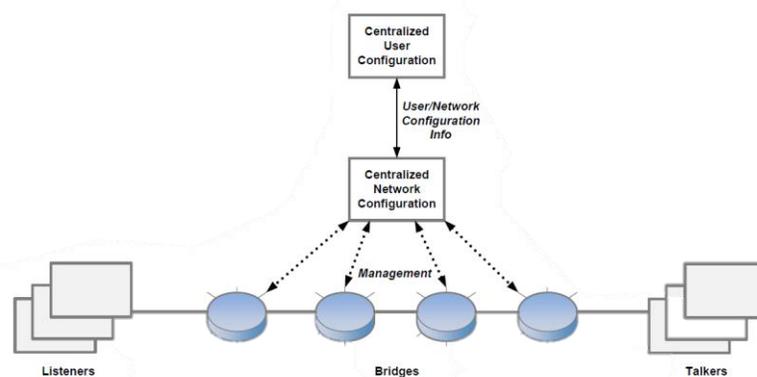
分布式配置



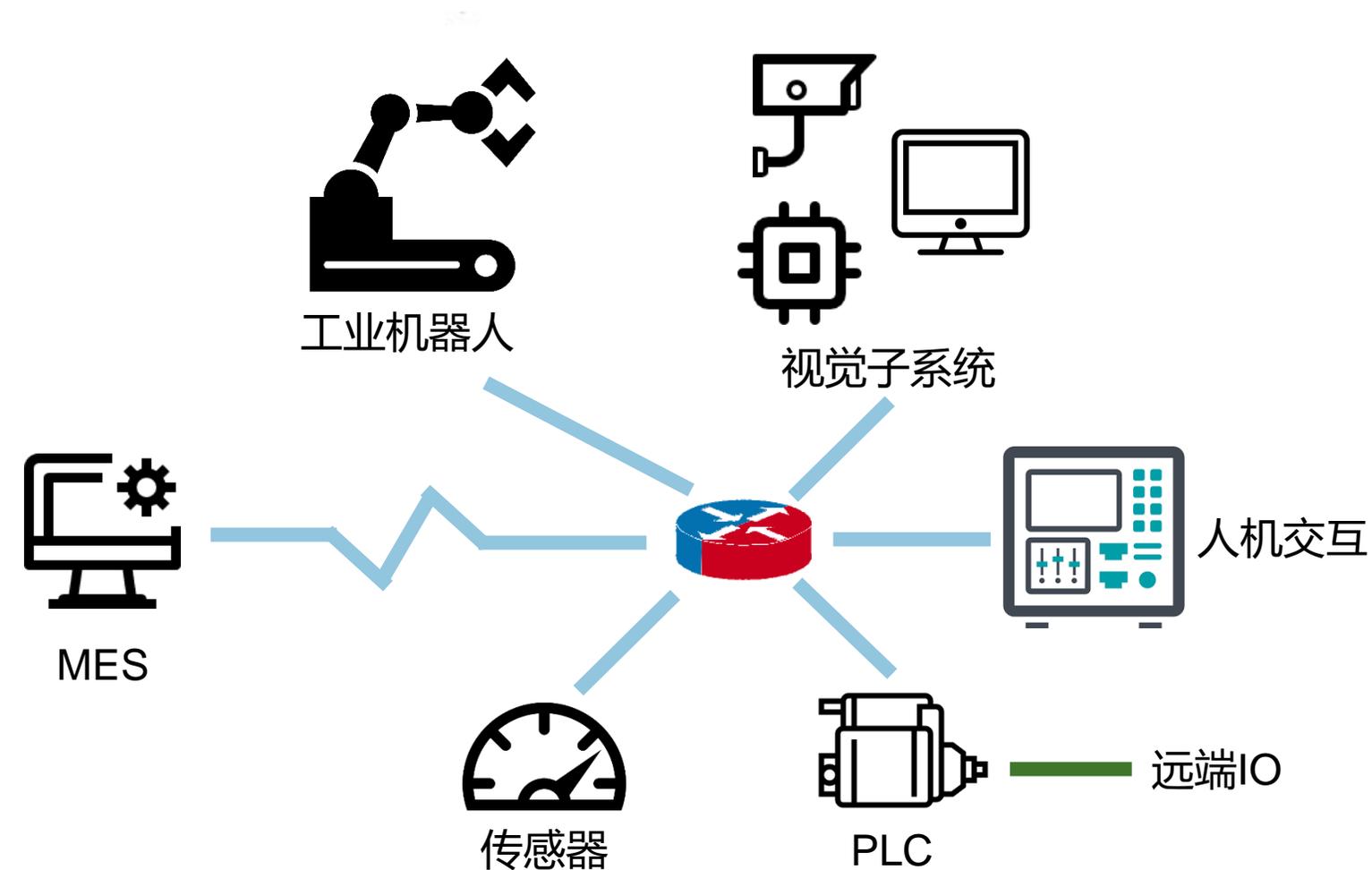
网络中心化、用户分布式配置



中心化配置



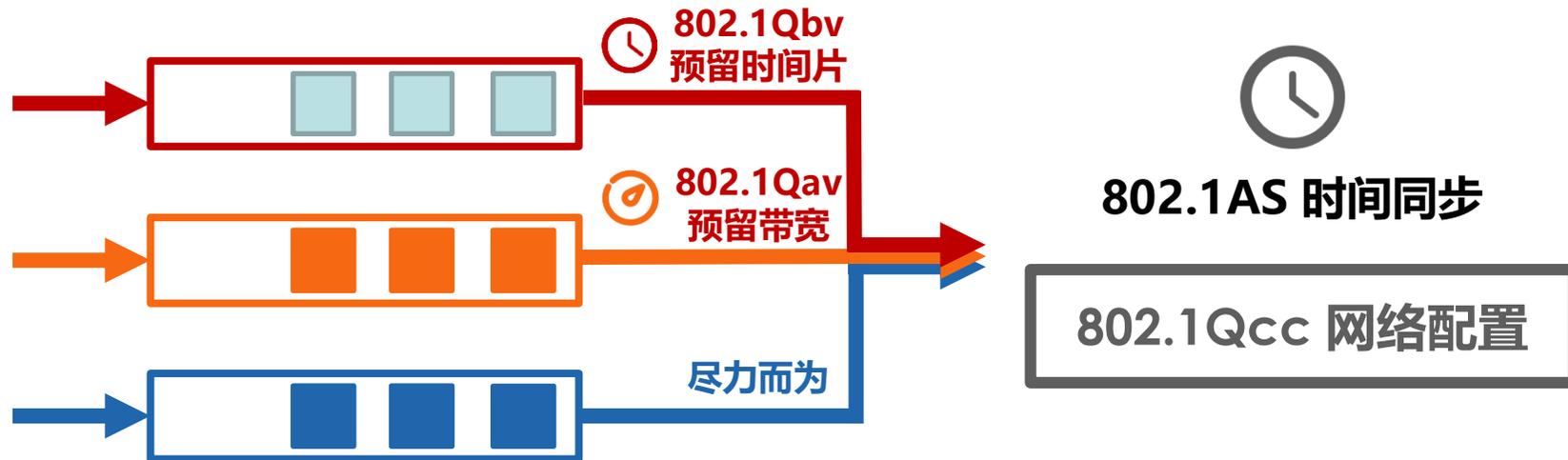
# 在视觉检测中的应用



流	协议	类型
工业画面1	802.1Qav	IT
工业画面2	802.1Qav	IT
机器人	ProfiNet	OT
传感器	EtherCat	OT
PLC控制	ProfiNet	OT
人机交互	TCP	IT
MES	HTTP	IT

# 小结

- IEEE 802.1AS: 给整个网络提供高精度的时间。
- IEEE 802.1Qav: 在不超过预留带宽的前提下, 优先传输。
- IEEE 802.1Qbv: 为流量预留出周期性的时间片。
- IEEE 802.1Qcc: 对网络进行统一配置。

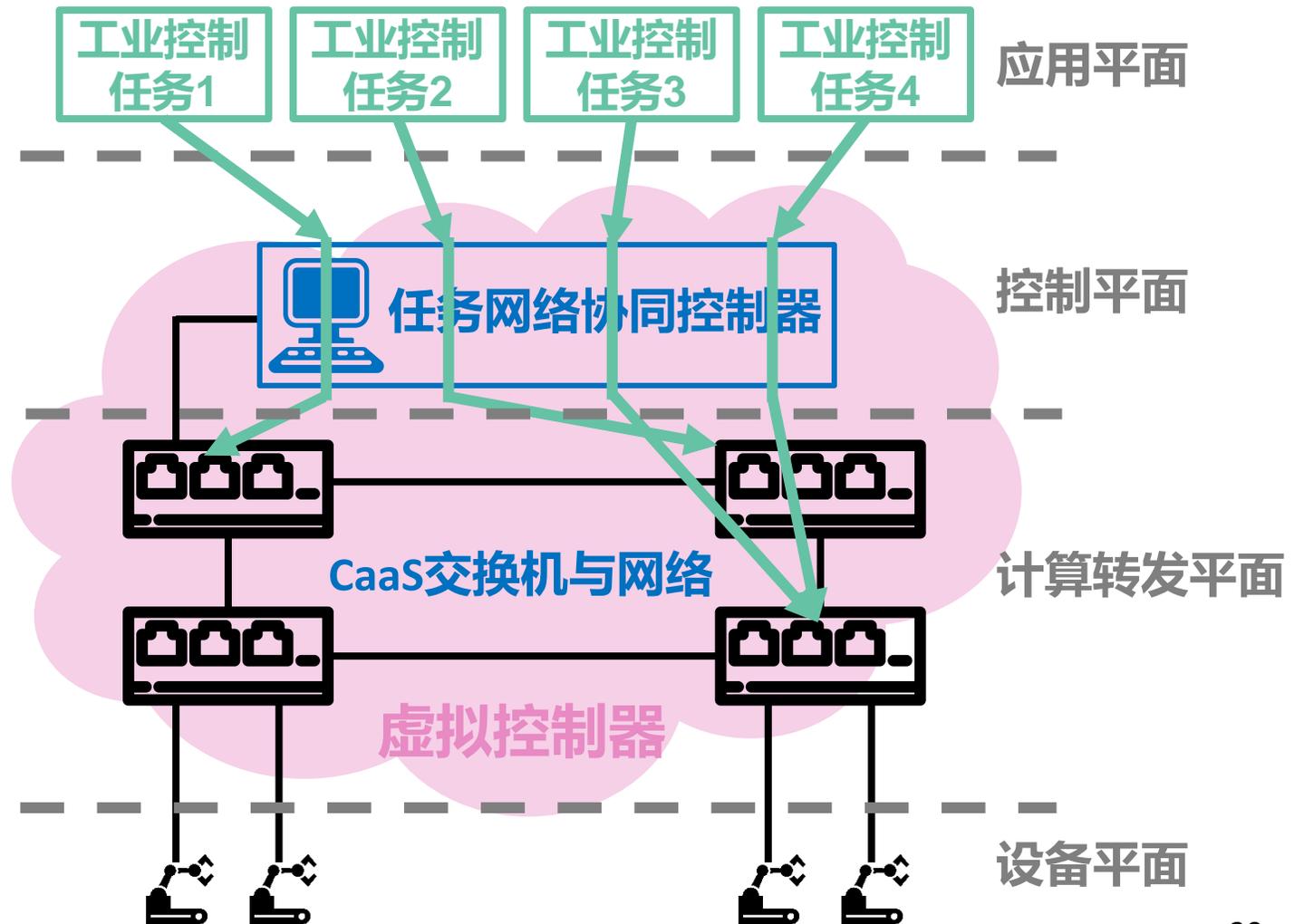


The background of the image shows a blurred industrial setting. On the right side, a person's hand is visible, holding a tablet computer that displays a blue interface with various data points and charts. In the center and left, there are robotic arms and machinery, with some sparks or light effects emanating from the equipment. The overall color palette is dominated by light blues and greys, with a soft, hazy atmosphere.

# 支持控制即服务CaaS的 实时工业网络体系架构

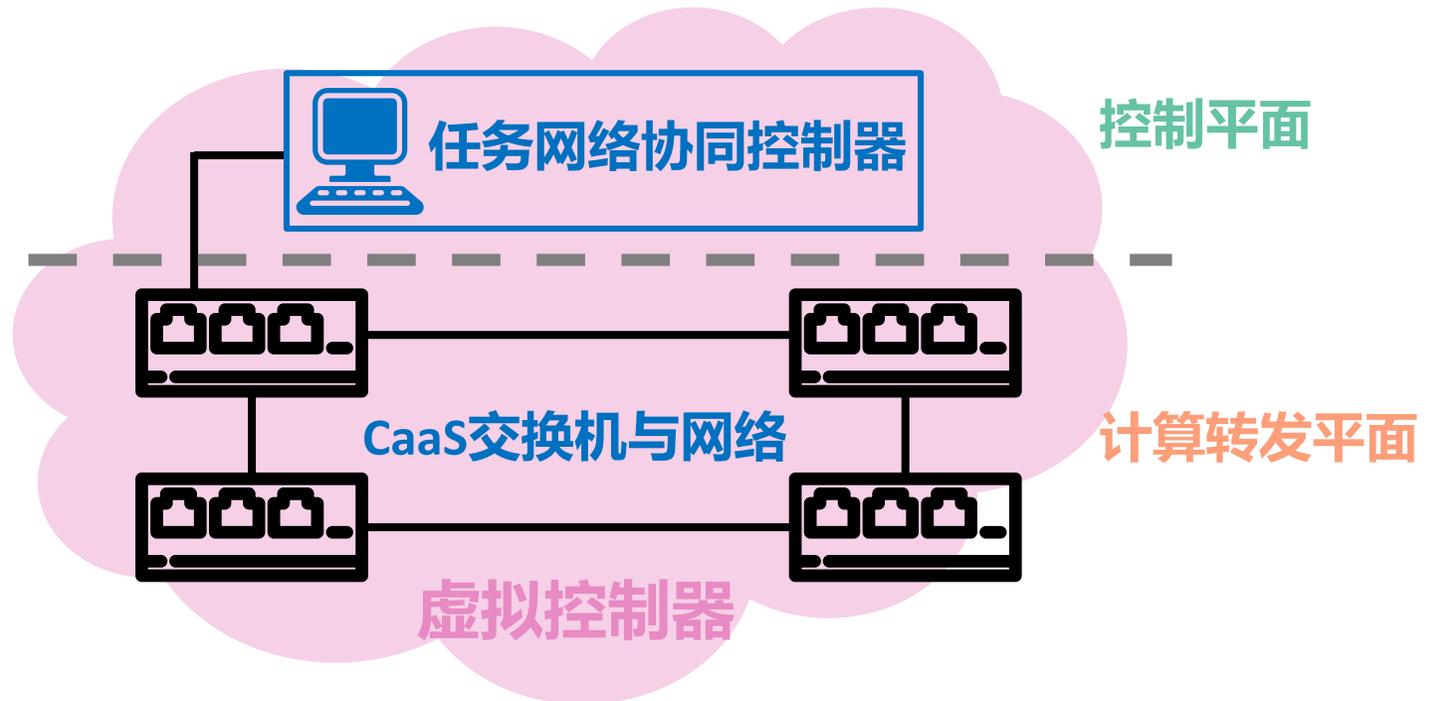
# CaaS: 控制即服务工业网络架构

- **控制即服务 (CaaS)** 技术, 将控制任务与专用控制器**解耦合**, 协同调度控制任务与网络流量, 将控制任务**灵活部署**到网络中任意交换机中。
- 将整个工业控制网络虚拟为一个**通用控制器**, 实现控制功能虚拟化, 支持**生产线灵活切换与升级**。



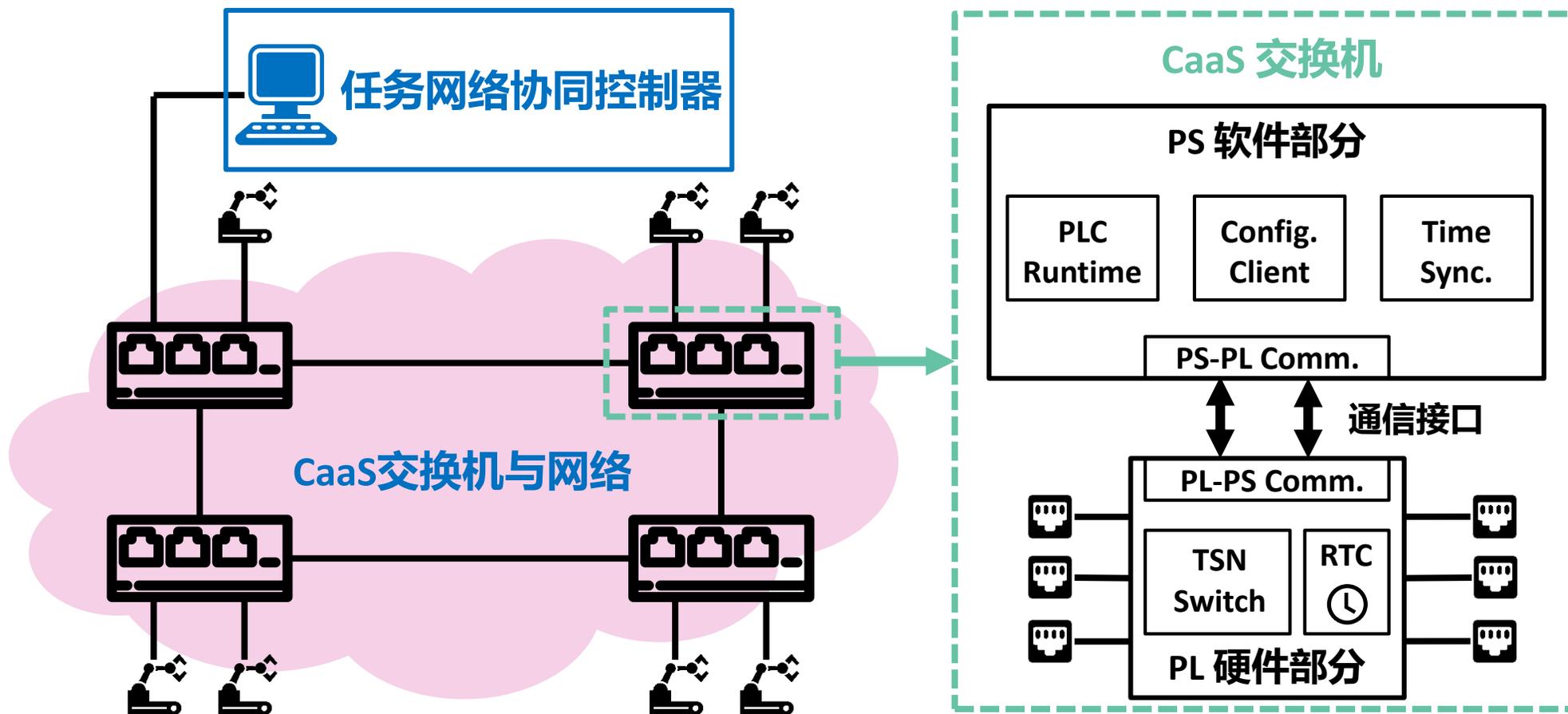
# CaaS: 控制即服务工业网络架构

- 控制平面：
  - 任务网络系统控制器
  - 调度控制任务（控制功能）与数据转发（网络功能）
- 计算转发平面
  - CaaS交换机
  - 执行控制任务（控制功能）与数据转发（网络功能）



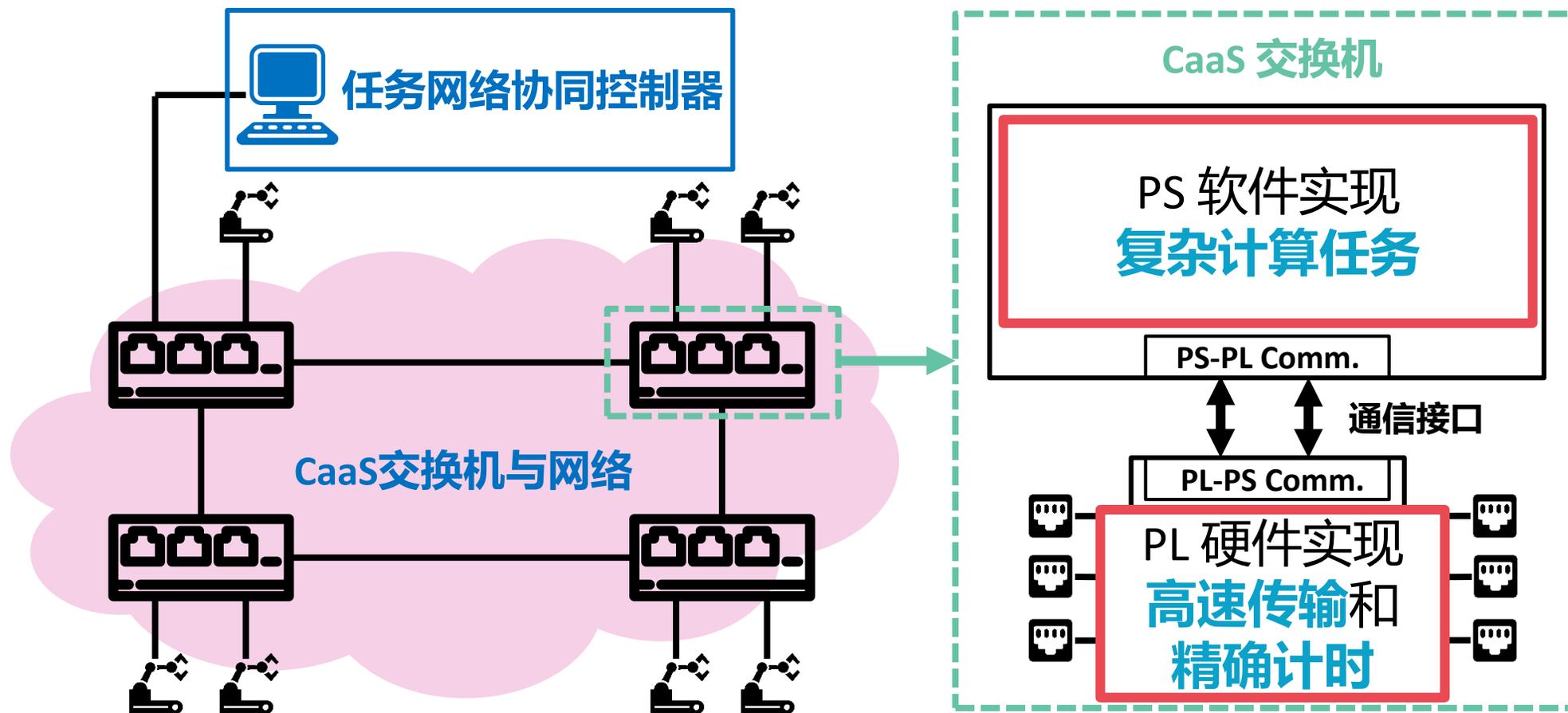
# CaaS 架构——CaaS交换机

- 软硬件协同设计，实现**传输功能（网络）**和**计算功能（控制）**的融合



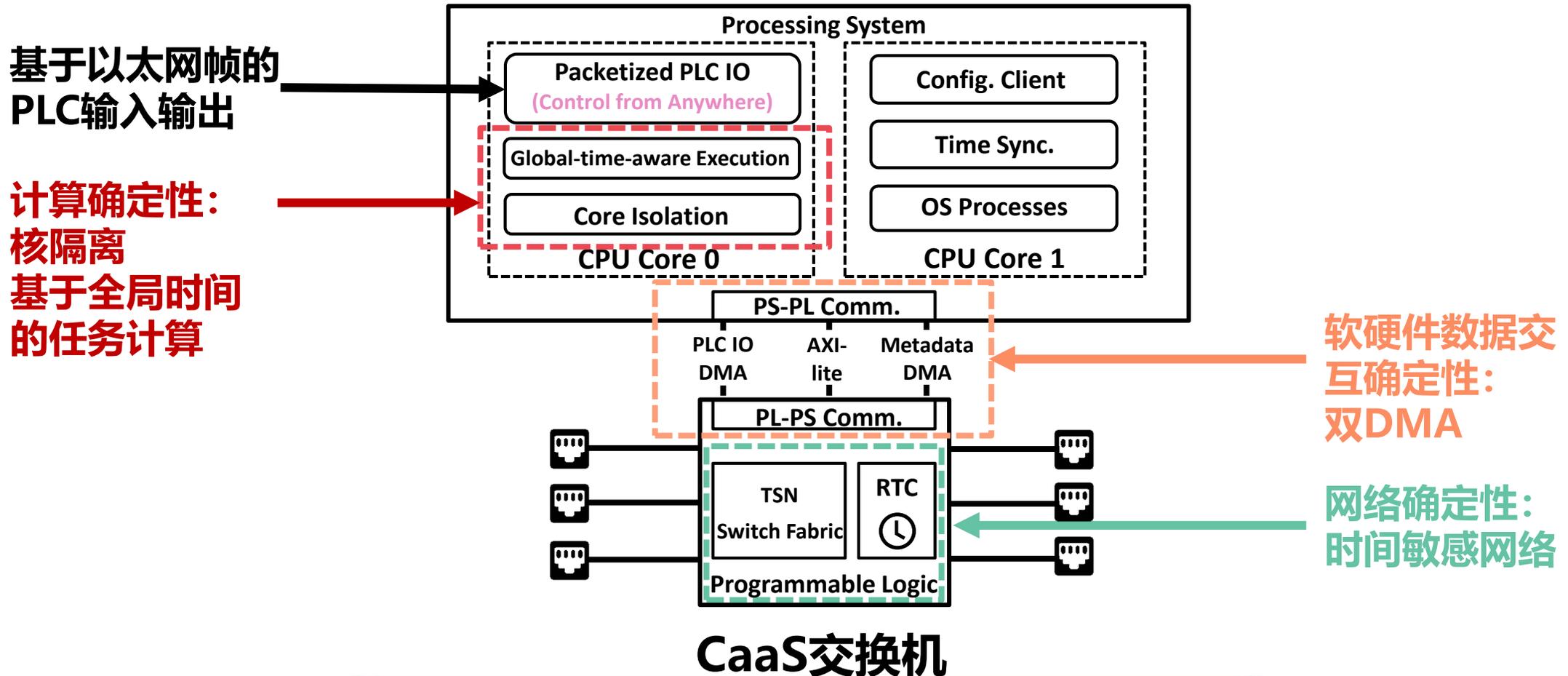
# CaaS 架构——CaaS交换机

- 软硬件协同设计，实现**传输功能（网络）**和**计算功能（控制）**的融合



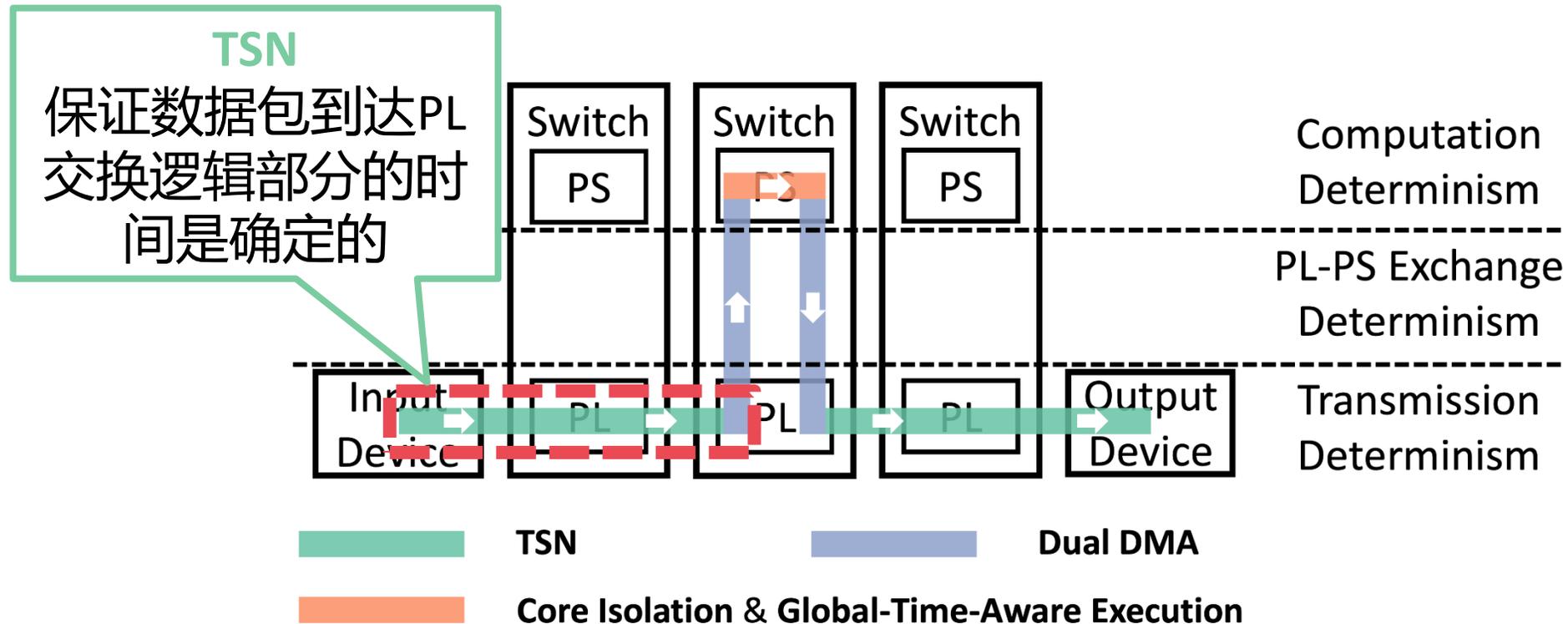
# CaaS 交换机设计

- CaaS交换机及协议栈，保障工业控制任务端到端确定性。



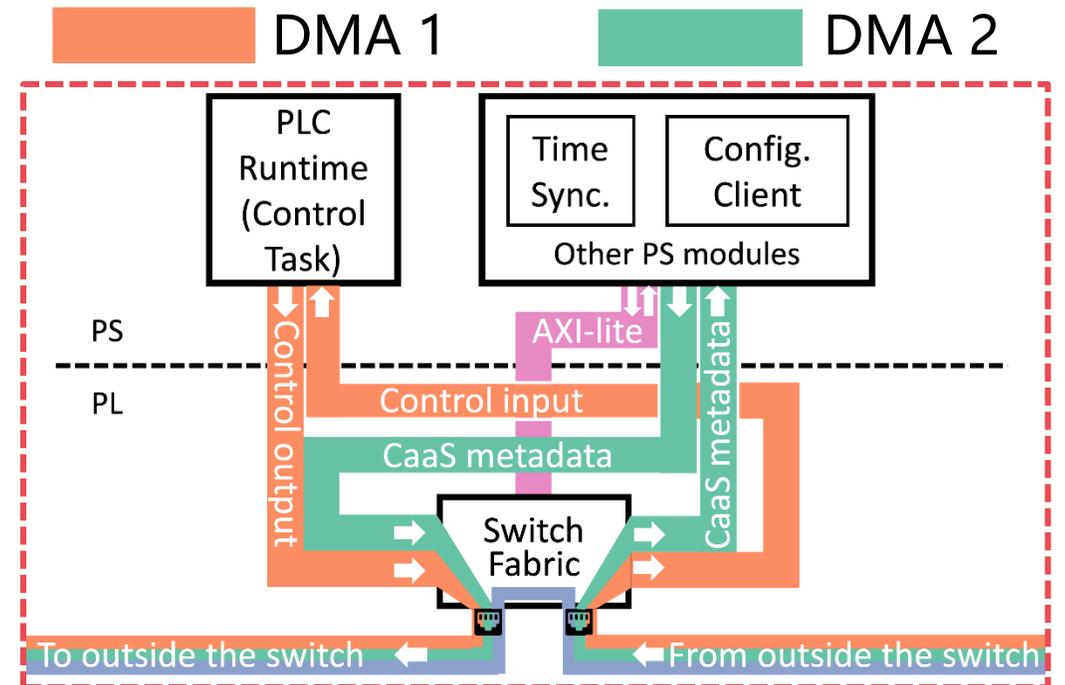
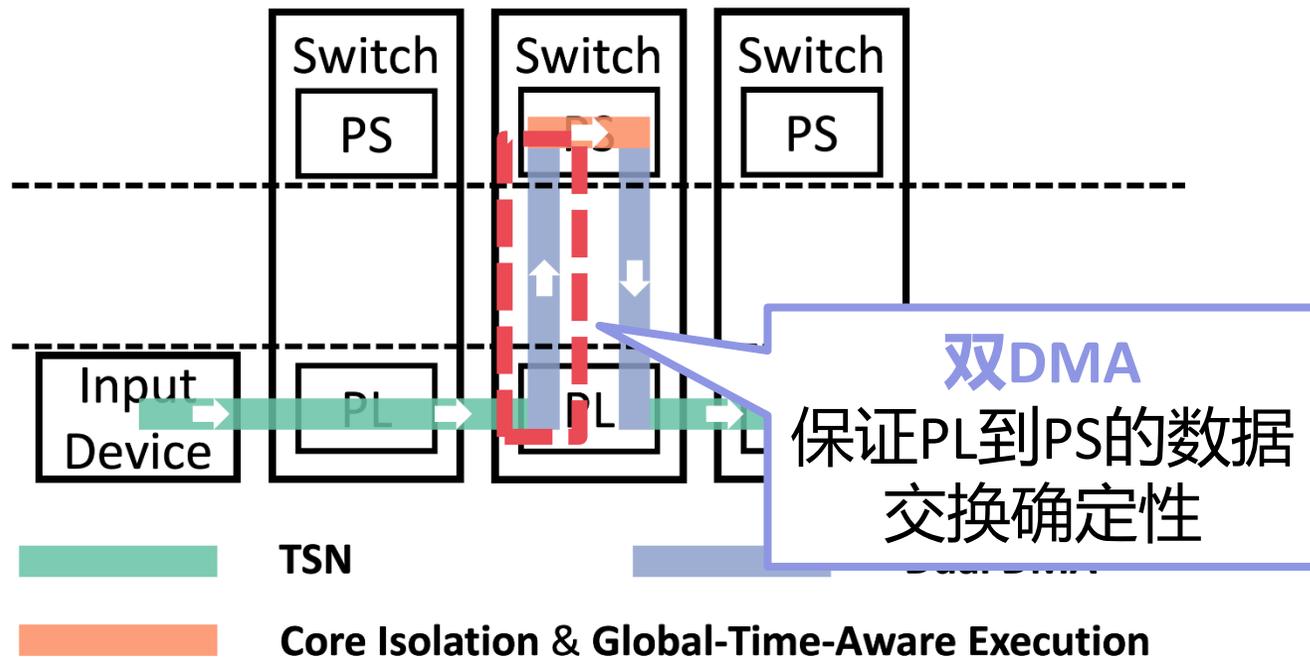
# 端到端的确定性保证

- 工业控制系统需要确保从输入到输出设备的**端到端确定性**通信。
- 包括：**网络传输确定性**、**软硬件数据交换确定性**、**控制计算确定性**。



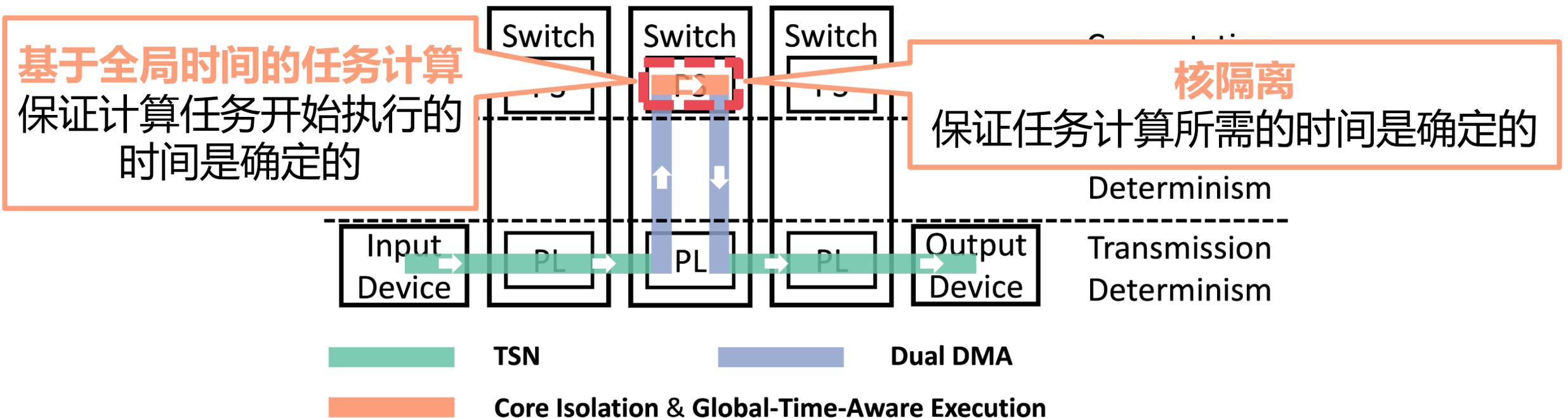
# 端到端的确定性保证

- 工业控制系统需要确保从输入到输出设备的**端到端确定性**通信。
- 包括：**网络传输确定性**、**软硬件数据交换确定性**、**控制计算确定性**。



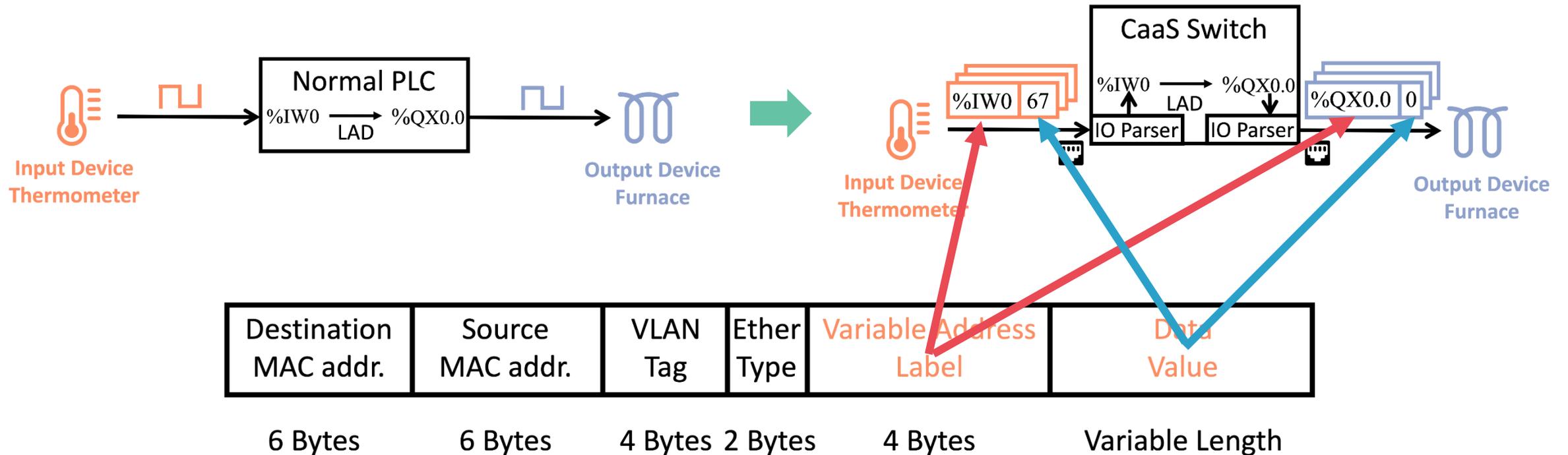
# 端到端的确定性保证

- 工业控制系统需要确保从输入到输出设备的**端到端确定性**通信。
- 包括：**网络传输确定性**、**软硬件数据交换确定性**、**控制计算确定性**。



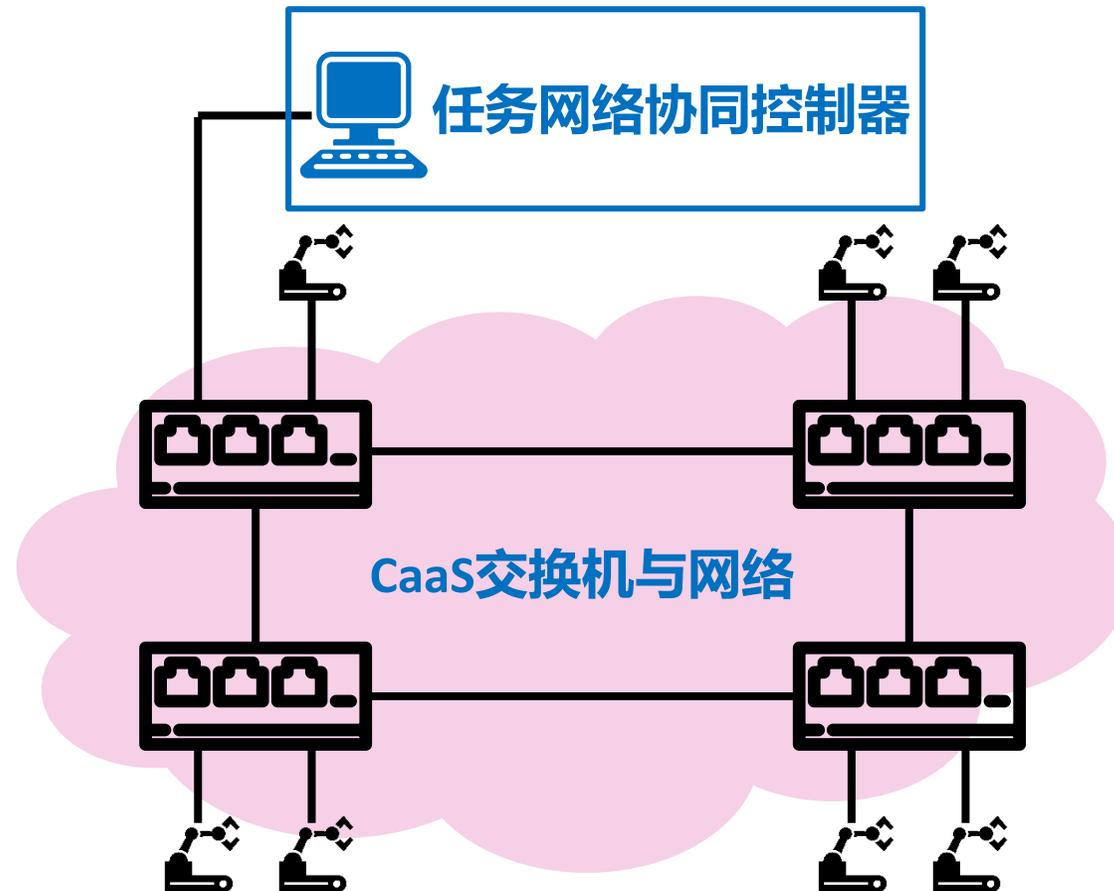
# 基于以太网帧的PLC输入输出

- 基于以太网帧的PLC输入输出将梯形图变量封装在以太网帧中，以解耦设备的物理IO与梯形图的逻辑IO



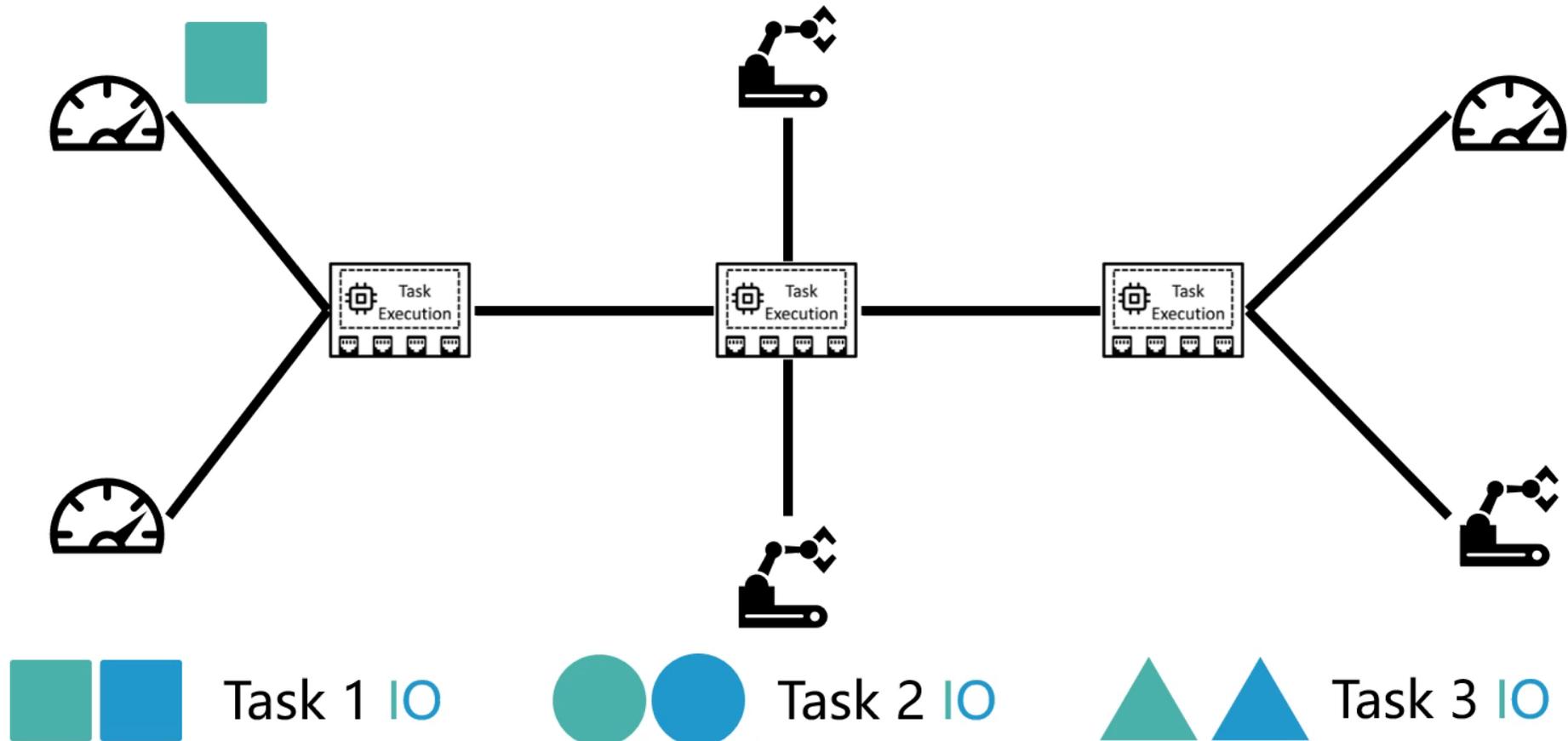
# CaaS 架构——任务网络协同控制器

- 任务网络系统控制器：协同调度控制任务与网络流量。



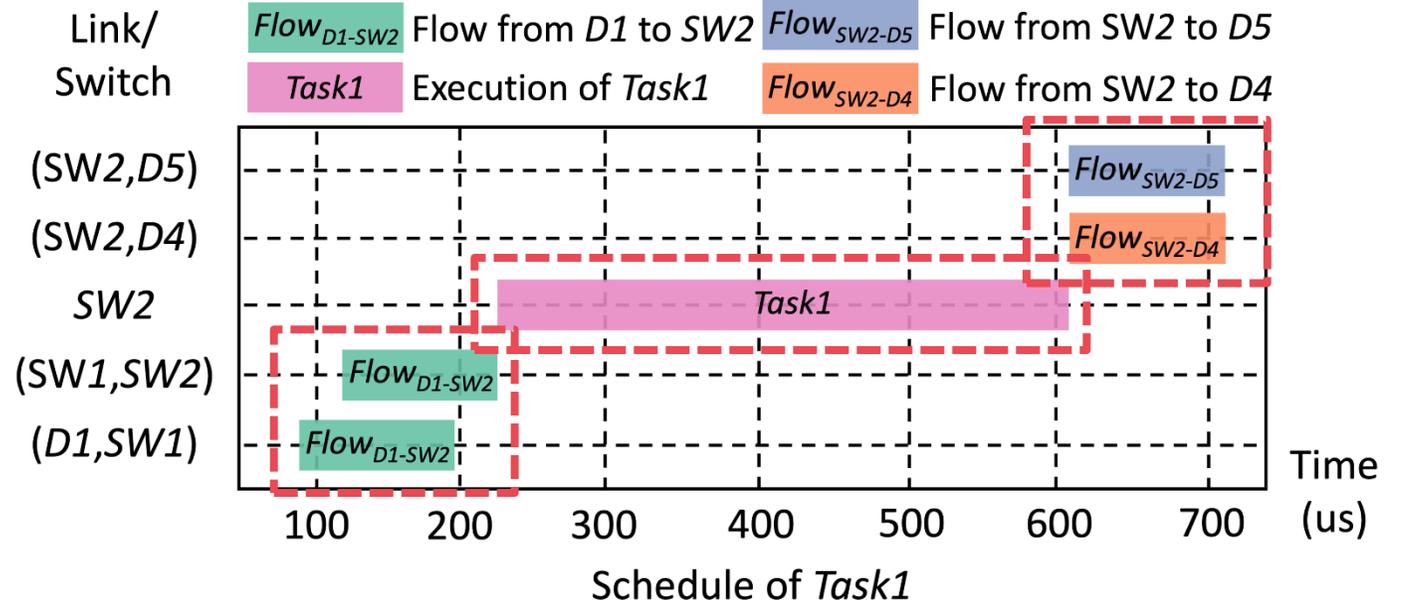
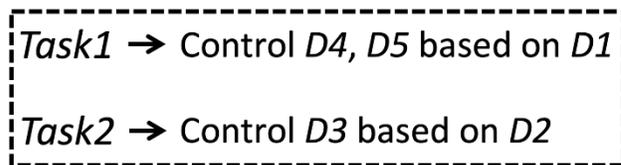
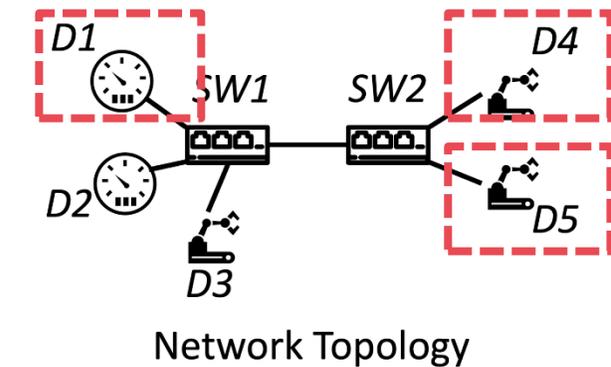
# 任务和流量协同调度

- 合理规划任务和流量，以**避免冲突并保证传输和计算的确定性**



# 任务和流量协同调度

- 调度目标：任务何时/何处执行以及数据流何时经过链路



# 任务和流量协同调度算法

- 基于SMT建模的**任务和流量协同调度算法**

流-任务依赖约束

$$\forall j_i \in J, \forall f_{ik} \in F_i, \forall h \in V_{sw} :$$

$$m \leftarrow \begin{cases} f_{ik}.src, & \text{if } f_{ik} \text{ is an input flow,} \\ f_{ik}.dst, & \text{if } f_{ik} \text{ is an output flow,} \end{cases}$$

$$sp \leftarrow \text{shortestpath}(h, m).$$

$$\forall (s, e) \in E,$$

$$\text{AddConstraints}(\text{Implied}(j_i.host = h \wedge (s, e) \in sp, x_{ikse} = 1)),$$

$$\text{AddConstraints}(\text{Implied}(j_i.host = h \wedge (s, e) \notin sp, x_{ikse} = 0)),$$

流约束

$$\forall j_i \in J, \forall f_{ik} \in F_i :$$

$$\forall (s, e, c) \in \{(s, e, c) \in V \times V \times V \mid (s, e) \in E \wedge (e, c) \in E\} :$$

$$\text{AddConstraints}(\text{Implied}(x_{ikse} = 1 \wedge x_{ikec} = 1,$$

$$(t_{ikec} + o_{ikec} \times j_i.P) - (t_{ikse} + o_{ikse} \times j_i.P) \geq e.d))$$

任务约束

$$\forall j_a \in J, j_b \in J, a \neq b :$$

$$P^s \leftarrow \text{lcm}(j_a.P, j_b.P)$$

$$\forall u \in \{u \in \mathbb{N} \mid u \leq \frac{P^s}{j_a.P}\}, \forall v \in \{v \in \mathbb{N} \mid v \leq \frac{P^s}{j_b.P}\} :$$

$$\text{AddConstraints}(\text{Implied}(j_a.host = j_b.host,$$

$$j_a.start + u \times j_a.P + j_a.T < j_b.start + v \times j_b.P \vee$$

$$j_b.start + v \times j_b.P + j_b.T < j_a.start + u \times j_a.P))$$

$$\forall j_i \in J, \forall f_{ik} \in F_i^{src} :$$

$$endt \leftarrow \sum_{(s,e) \in E} \text{If}(x_{ikse} = 1 \wedge j_i.host = e,$$

$$t_{ikse} + o_{ikse} \times j_i.P + f_{ik}.l, 0),$$

$$\text{AddConstraints}(j_i.start + j_i.o \times j_i.P \geq endt),$$

$$\forall (f_{ik}, f_{wz}) \in \{(f_{ik}, f_{wz}) \in AF \times AF \mid i \neq w \vee k \neq z\} :$$

$$P^s \leftarrow \text{lcm}(j_i.P, j_w.P)$$

$$\forall u \in \{u \in \mathbb{N} \mid u \leq \frac{P^s}{j_i.P}\}, \forall v \in \{v \in \mathbb{N} \mid v \leq \frac{P^s}{j_w.P}\} :$$

$$\forall (s, e) \in E :$$

$$\text{AddConstraints}(\text{Implied}(x_{ikse} = 1 \wedge x_{wzse} = 1,$$

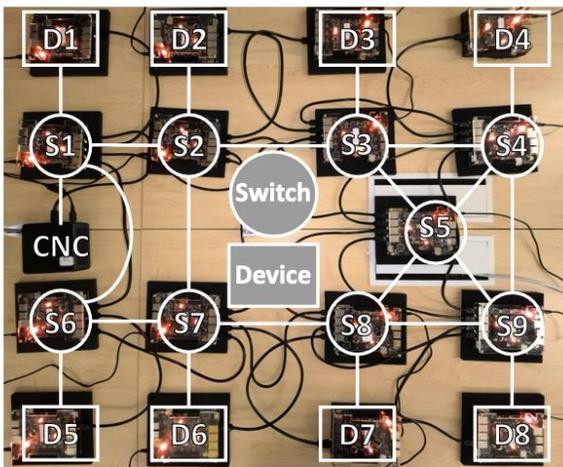
$$(t_{wzse} + v \times j_w.P) - (t_{ikse} + u \times j_i.P) \geq f_{ik}.l \vee$$

$$(t_{ikse} + u \times j_i.P) - (t_{wzse} + v \times j_w.P) \geq f_{wz}.l))$$

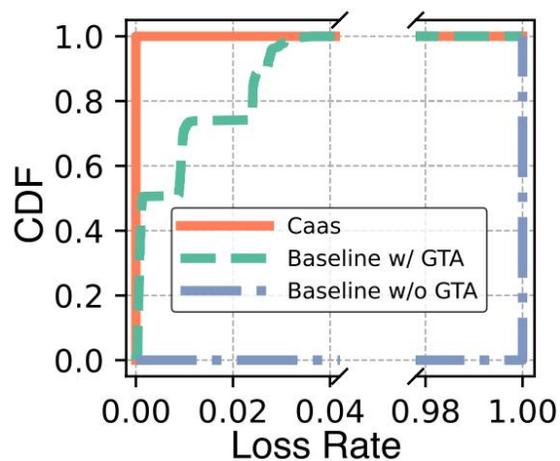
•••••

# CaaS 系统整体性能表现

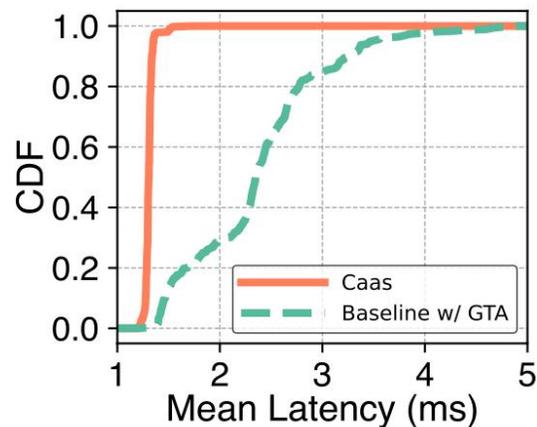
- 相比传统方法, CaaS 通过多种技术**保障确定性控制**, 实现了零丢包率, 并将延迟降低 42-45%, 抖动降低三个数量级。



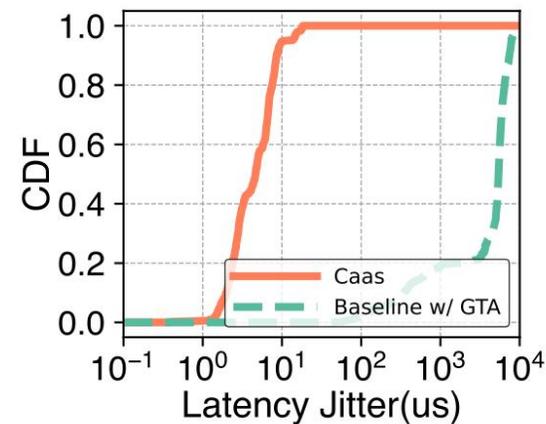
(a) A380 network topology



(b) A380, CDF of loss rate



(c) A380, CDF of mean latency



(d) A380, CDF of jitter

# CaaS 总结

- 提出支持**控制即服务 (CaaS)** 的实时工业网络体系架构
- 将控制任务与专用控制器解耦，根据控制任务与网络流量的协同调度，灵活部署到网络中任意交换机中，将整个工业控制**网络虚拟为一个通用控制器**，实现**控制功能虚拟化**。
- 采用软硬件协同设计的方法，研发了**支持CaaS的网络交换机及协议栈**，设计了一系列保障网络确定性、计算确定性、软硬件数据交互确定性的机制，从而最终保障了工业控制任务从输入到输出的端到端确定性。
- CaaS将推动工业控制网络向着**分布化、虚拟化和服务化**的方向迈进。



ZIGGO

知更——

TSN工业网络交换机

# ZIGGO 系统特色

- 全面支持802.1AS、Qav、Qbv、Qcc等协议
- 支持IT流量与OT流量的共网传输
- 实现关键数据流量的确定性转发与超低时延传输
- 基于FPGA的软硬件协同设计
- TSN部分100%自主知识产权

纳秒

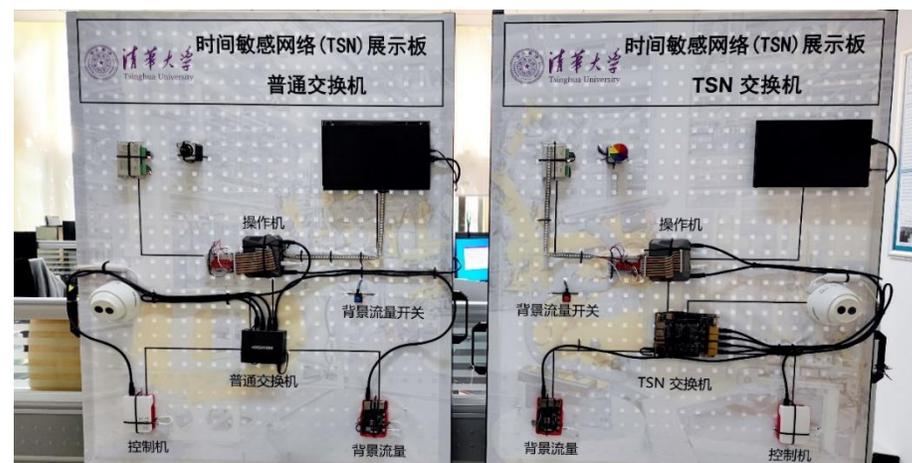
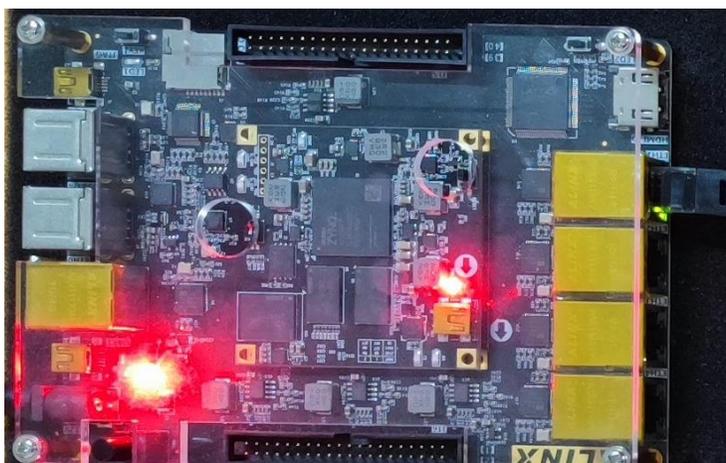
时间同步精度达到纳秒级

微秒

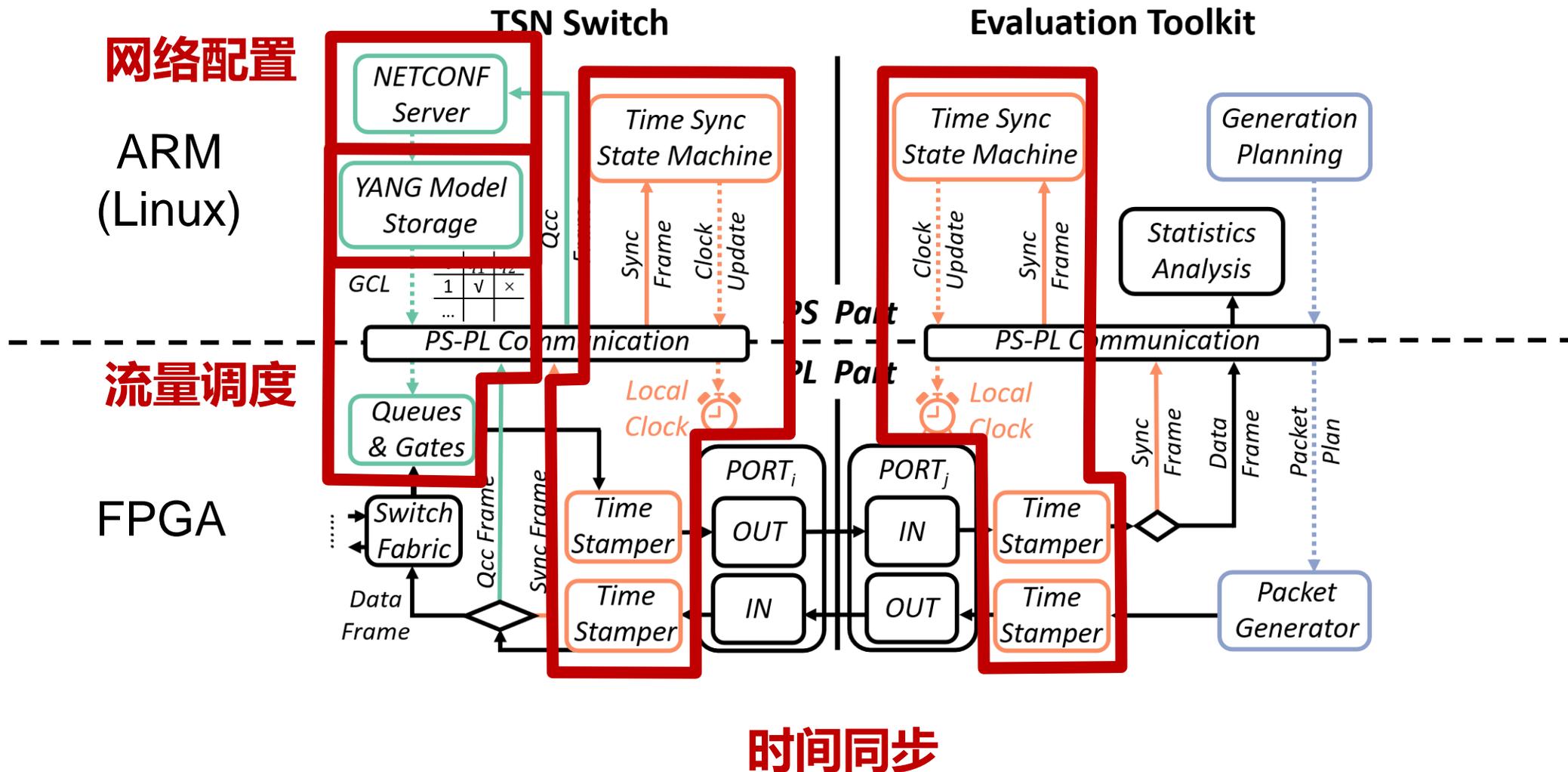
每跳时延抖动小于一微秒

万兆

带宽最大支持万兆以太网



# ZIGGO 系统架构



# ZIGGO 演示





# 知更(ZIGGO) —— TSN工业网络交换机

<http://tns.thss.tsinghua.edu.cn/ziggo/>

# 总结与展望

- 工业4.0、智能制造、柔性制造
- **时间敏感网络 (TSN)** 支持关键数据流量的**确定性转发与超低时延传输**，实现OT与IT流量的共网传输。
- 提出支持**控制即服务 (CaaS)** 的实时工业网络体系架构，将控制任务与专用控制器解耦，根据控制任务与网络流量的协同调度，灵活部署到网络中任意交换机中，将整个工业控制**网络虚拟为一个通用控制器**，实现**控制功能虚拟化**。
- 研发知更 (ZIGGO) 系列TSN交换机及协议栈
- 工业控制网络向着**分布化、虚拟化和服务化**的方向迈进。