

# 时间敏感型网络： 从理论到工业自动化实施



## 作者

**Simon Brooks**

TTTech

奥地利维也纳

[simon.brooks@tttech.com](mailto:simon.brooks@tttech.com)

**Ecehan Uludag**

英特尔® 公司

可编程解决方案事业部

美国圣何塞

[ecehan.uludag@intel.com](mailto:ecehan.uludag@intel.com)

## 简介

时间敏感型网络 (TSN) 有望重塑工业通信格局, 为信息技术 (IT) 和工业操作技术 (OT) 的融合奠定坚实基础。TSN 可为以太网带来工业级稳健性和可靠性, 提供了一种 IEEE 标准通信技术, 支持任何厂商符合标准的工业器件实现互操作性。TSN 还消除了对关键和非关键通信网络进行物理隔离的需求, 从而支持运营部门和企业进行开放式数据交换, 这是工业物联网 (IIoT) 的核心概念。

TSN 可以作为交换端点和交换机的组合在工业器件中实现, 并且需要关联的软件。在将处理器和 FPGA 子系统都集成到单个器件的 SoC FPGA 中实现, 可提供更大的灵活性, 并确保 TSN 硬件和相关嵌入式软件紧密集成。由于 TSN 由一组 IEEE 802.1 标准扩展组成, 因此 FPGA 固有的可重配置功能在实现 TSN 时也具有重要优势。添加新标准或更改标准后, 无需成本高昂的硬件开发工作即可快速重配置 FPGA 以支持所有 TSN 标准。

在网络系统级别, TSN 支持基于网络调度的确定性通信, 网络调度通过标准配置接口分发给器件。TTTech 提供的产品组合使 TSN 不仅易于在器件级别实现, 而且具备系统级易用性。这种端到端方法可实现独特集成、灵活性和性能更高的 TSN。

本白皮书介绍了 TSN 技术的特性和优势, 并展示了如何使用 FPGA 定制和可配置性为您的应用开发优化的 TSN 器件和系统。

## 目录

简介 .....	1
工业应用中的连接挑战 .....	2
TSN 的优势 .....	2
IEEE 标准 .....	2
融合网络 .....	2
使用基于 SoC FPGA 的 TSN 的优势 .....	3
TSN 特性 .....	3
OPC UA 搭配 TSN .....	4
系统级思维在 TSN 中的重要性 .....	4
TSN 定制 .....	5
FPGA 定制 .....	5
Linux 定制 .....	6
TSN 配置 .....	6
远程配置 .....	6
网络调度 .....	6
使用 OPC UA 进行网络调度 .....	6
总结 .....	6
附录 A .....	7

## 工业应用中的连接挑战

如今，市场上有多种工业以太网协议可用。在大多数情况下，选择用于工业器件的工业以太网协议因厂商而异，这意味着器件仅与使用相同协议的同一厂商的其他设备兼容，形成所谓的制造商限制。由于这种限制，客户要么通过一家厂商购买所有工业设备（即使性能或成本效益不佳），要么克服集成多家厂商的设备并在各种工业以太网协议之间实现协议转换网关的巨大挑战。多年以来，这两种选择都导致了不必要的支出，并限制了工厂车间的创新，从而导致工业自动化架构的分层、专用和不灵活等问题。

但是，随着 IIoT 和工业 4.0 的出现，这种结构正在发生巨大变化。完全自动化需求和制造中的更多洞察正推动工业自动化架构实现更高的互操作性、灵活性和无缝性。在这些日益融合的架构中，实时连接对于执行关键流程以及从机器收集和分析数据至关重要。TSN 提供的实时连接功能可以匹配或超过当前的工业以太网协议，但具有 IEEE 标准的更高灵活性。因此，与企业界类似，TSN 以太网可以成为连接不同厂商工业设备的通用通信协议，同时满足工业应用的挑战性要求。

## TSN 的优势

### IEEE 标准

作为一种开放的标准技术，TSN 拥有压倒性优势，且并不隶属于任何组织或公司。对于多年来受困于专有通信协议多样化且相互不兼容的工业自动化市场，TSN 带来了许多优势：

- TSN 保证了不同厂商的器件在网络级别的兼容性。这为客户提供了用于其系统的更多器件选择，从而避免了厂商限制并实现了跨系统连接。
- 作为以太网标准家族的一员，TSN 自然可以随以太网扩展，这意味着该技术不会受到带宽或其他性能标准方面的限制。新节点可以轻松添加到网络并通过标准协议发现。
- TSN 可用于机器之间以及机器到企业系统的通信。在不对非关键网络基础设施进行任何修改的情况下，可实现基于 TSN 的关键任务系统与基于以太网的现有非关键系统之间的通信。

使用标准技术时，总体系统成本将大幅降低。消费者的多样化选择和激烈竞争导致器件价格下降。当客户可专心使用一种标准技术而不是费心管理多种专有解决方案时，研发和维护成本都将降低。

### 融合网络

TSN 支持融合以往因操作完整性、实时性能或安全性等原因而保持分离的网络和系统。打破关键系统和非关键系统之间的通信障碍是 IIoT 和工业 4.0 的基本概念。

- 不同类别的流量可在网络上共存，较低优先级的流量不会影响较高关键级的流量。TSN 支持关键消息与所有其他以太网流量通过同一条通信线路发送，而不会造成干扰或延迟。
- 通过使用 TSN，即使是最具挑战性的运动控制和安全应用也可融合在以太网上。即使在繁重的流量负载下，端到端延迟也可得到有效控制，标准机制可用于加速消息传输以实现高速通信。
- 融合可帮助用户更轻松地了解访问工业系统的数据。更多系统共享同一网络帮助简化了从不同来源收集数据的任务。工业系统的数据可以通过标准以太网发送到企业系统，而无需网关。
- 新数据流可添加到网络，不会产生干扰现有流量的风险，也无需重新配置整个网络。
- 高层协议可与 TSN 结合使用，因为该技术完全在数据链路层（OSI 模型层 2）实现。这些协议包括开放和标准开放平台通信统一架构（OPC UA）协议等。

通过在单个网络基础设施上融合不同的流量类别，可以显著降低总体系统成本。由于减少了用于网络的器件和电缆的数量，硬件和维护成本有所下降。

## 使用基于 SoC FPGA 的 TSN 的优势

由于其广泛的应用范围和丰富功能，TSN 的优势可在基于 SoC FPGA 的器件中得到充分展现。在实现 TSN 方面，FPGA 相比其他芯片（如 ASIC）具有显著优势，这主要得益于其固有的可重新编程特性。通过使用英特尔® FPGA，工业设备制造商可率先上市，从而提高投资回报率，并确保其产品支持 IIoT。

英特尔 FPGA 可重新编程，支持在任何配置中实现新标准。添加新的 TSN 标准或更改标准后，英特尔 FPGA 可快速重配置，以确保器件支持最新的 TSN 功能，且最终用户可充分受益于 TSN 特性。

在用于工业系统的 FPGA 上实现 TSN 的原因有很多：

- **可重编程性：**基于 FPGA 的设计允许工业设备制造商支持 TSN 标准以及传统的工业以太网协议。在应对不断变化的工作负载和不断演变的标准方面，重新编程器件的能力是关键因素。此可重新编程特性可帮助您提高效率并扩展器件功能，堪称产品创新的关键。
- **工作负载整合和加速：**网络流量的增长正带来数据传输、管理、定时和扩展方面的挑战。边缘的工作负载整合对工业 4.0 工厂至关重要。FPGA 是以太网协议加速的基础。通过卸载工作负载，加速协议连接和数据交换，FPGA 可帮助实现更高的性能。
- **I/O 灵活性：**FPGA 允许在一个器件上实现 TSN 以及其他工业以太网协议。
- **功能安全性：**由于 TSN 连接了以前未连接的关键系统，因此还应考虑功能安全性。英特尔 FPGA、工具和 IP 已通过 IEC61508 安全标准认证。安全解决方案，如安全启动、在网络上进行器件身份验证、用于数据交换的安全通信通道。

## TSN 特性

TSN 描述了已添加到标准以太网的一组特性。这些特性在许多 IEEE 802.1 标准扩展中进行了定义和发布，这些扩展解决了多方面的问题，如定时、同步、转发、排队、无缝冗余和流预留等。这些特性扩展了以太网的功能和服务质量（QoS），可确保通过交换网络传输消息，能够提供工业通信技术所需的固有稳健性、可靠性和确定性。

IEEE 802.1 标准	特性
802.1AS	时间同步
802.1Qbv	流量调度
802.1CB	无缝冗余、流识别
802.1Qcc	SRP 增强特性
802.1Qbu	帧抢占
802.1Qci	过滤和监管
802.1Qca	路径控制和预留
802.1Qch	循环排队和转发
802.1Qcr	异步流量整形
802.1Qcp	用于桥接的 YANG 模型
802.1Qcw	用于 Qbv、Qbu、Qci 的 YANG 模型
802.1CBcv	用于 CB 的 YANG 模型

有关每项标准的详细说明，请参阅附录 A。

表 1. IEEE 802.1 TSN 标准。

确保消息传递时间的关键 TSN 特性是时间同步和流量调度。802.1AS 和 802.1Qbv 标准分别定义了这两项特性。参与 TSN 网络的所有器件都同步到全局时间，并知悉网络调度，其规定了优先消息何时从每个交换机进行转发。TSN 在交换机的出口为每个端口使用了多个队列，出口处的排队消息将在闸门打开时发出（时间间隔取决于调度安排）。消息的定时释放有助于确定性预测和管理网络延迟，这可帮助在同一网络上融合关键流量和非关键流量。

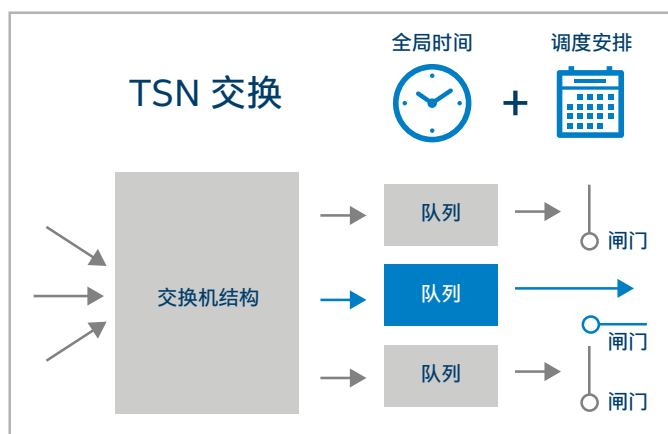


图 1. TSN 中的调度消息转发图示（基于 IEEE 802.1AS 和 802.1Qbv 以太网标准中的定义）

通过 802.1CB 标准，TSN 提供了一种为基于以太网的工业通信提供无缝冗余的标准方法。该特性支持在网络的不同路径上同时传输相同的消息副本。及时接收的第一个消息副本将被处理，而其他副本将被丢弃。这在融合网络中传送关键消息增加了另一层确定性。TSN 802.1Qbu 标准中定义的抢占特性可用于提高非关键消息的带宽使用效率。在高度融合的网络中，大型低优先级帧可能被网络上的高优先级流量延迟并丢失。抢占特性可中断大型帧的传输，以较小的片段发送大型帧并在下一个链路对其重组。这可以最大程度地提高 TSN 网络上所有流量类型的带宽利用率。消息抢占的另一个重要优势是可以减少所谓 Express 流量的传输延迟，帮助其抢占常规的以太网数据包。尤其是在承载高达 1,500 字节甚至更多的大型常规以太网数据包的低速网络（如 10 或 100 兆位每秒（Mbps））上，减少 Express 流量的延迟对于构建融合网络很有帮助。

TSN 的一项关键特性是支持独立于厂商的开放网络配置。这是通过针对各种 TSN 标准的 YANG 模型的 IEEE 标准化实现的。可以使用诸如 XML 或 JSON 之类的编码格式通过 NETCONF 协议进行配置。用于桥接、流量调度、帧抢占、无缝冗余和监管的 YANG 模型，可确保关键 TSN 特性的配置按照标准方法完成。因此，TSN 网络可由来自任何厂商的任何符合标准的器件组成，并可以由任何符合标准的网络配置软件进行配置。

## OPC UA 搭配 TSN

在可以与 TSN 结合的许多高层工业通信协议中，最合乎逻辑的选择是 OPC UA。与 TSN 一样，OPC UA 是一种开放的标准技术，独立于厂商，可用于广泛的工业应用。因此，OPC UA 和 TSN 的组合提供了一个全面、开放、可互操作的标准解决方案，可以满足大多数工业通信需求。

通过以统一的方式表示数据，OPC UA 支持以前无法共享数据的器件之间实现互操作性，帮助您从大量信息中发掘新见解。因此，它已被所有主要的工业自动化厂商采用并集成到产品中。OPC UA 最初仅限于客户端或服务架构，但是最近推出的发布/订阅（PubSub）扩展可支持多播通信。与 TSN 结合使用，OPC UA PubSub 支持以精确的时序发送数据，因此可用于实时工业应用。

## 系统级思维在 TSN 中的重要性

TSN 标准涉及广泛的功能，它们的实现方式同样广泛，包括交换机 IP 内核、嵌入式软件、标准接口、路由算法和配置工具。为确保最高的 TSN 性能，系统级解决方案需考虑每个元素并在它们之间提供无缝接口。TTTech 采用这种方法为基于英特尔 SoC FPGA 的硬件推出了确定性以太网产品组合和参考设计。

TTTech 的 TSN 产品：

- 旨在端到端地无缝工作
- 基于标准且可互操作
- 可定制且可配置

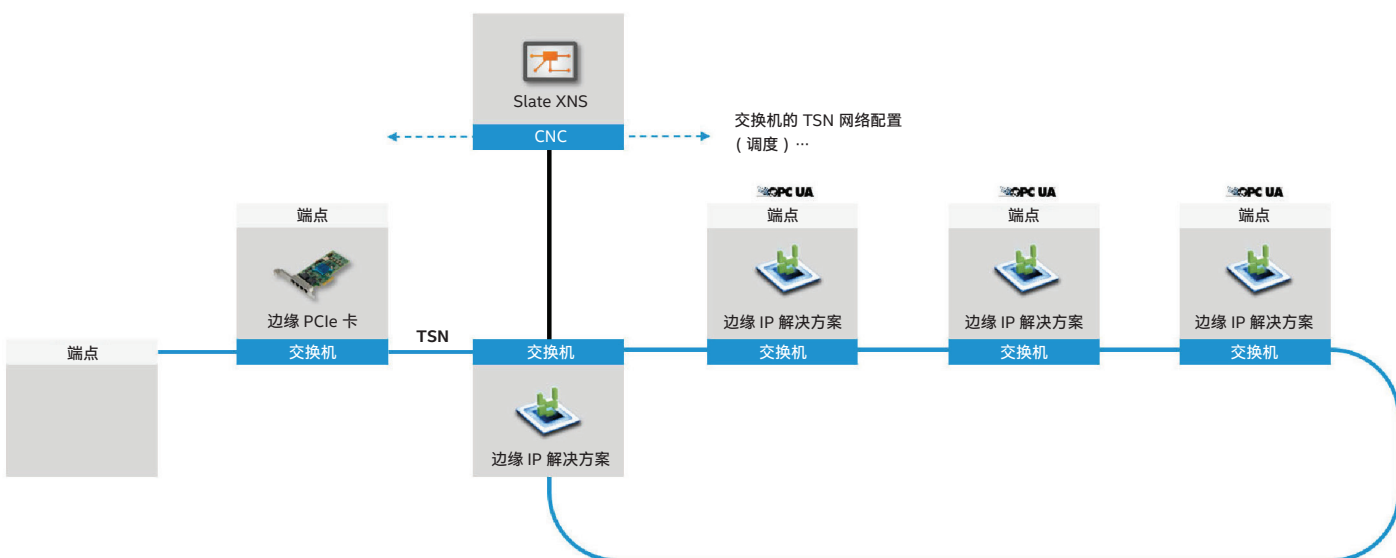


图 2. TTTech TSN 产品的系统级设计 ( 现已上市 )

DEIP Solution Edge 是 IP 内核和嵌入式软件包，可为基于 FPGA 的器件提供 TSN 交换端点功能。多达五个 10/100/1000 Mbit/s 交换机端口可支持 TSN 标准特性，包括时间同步、流量调度、帧抢占以及无缝冗余和监管。嵌入式软件包括 NETCONF 服务器、802.1AS 堆栈、YANG 模块支持以及面向 Linux\* 操作系统的交换机驱动程序。

DEPCIe Card Edge 是一种网络接口卡，在基于 Cyclone® V SoC 的开箱即用硬件中，集成了面向 DEIP Solution Edge 的定义特性集和软件设计。该卡可用于将交换端点功能快速添加到具有 PCI Express\* (PCIe\*) 接口的现有器件。

Slate 包括一系列网络配置产品，可用于为 TSN 网络进行拓扑建模、创建调度安排和部署配置。Slate 软件产品包括 NETCONF 客户端、REST 服务器、YANG 模块支持以及 TTTech 的强大调度引擎。由于 Slate 支持标准接口，因此可用于调度和配置任何符合标准的 TSN 器件。Slate XNS 版本包括用于输入系统参数的图形用户界面 (GUI)。未来，Slate YNS 版本将包括一个 PubSub 代理，用于从 OPC UA 收集系统参数。

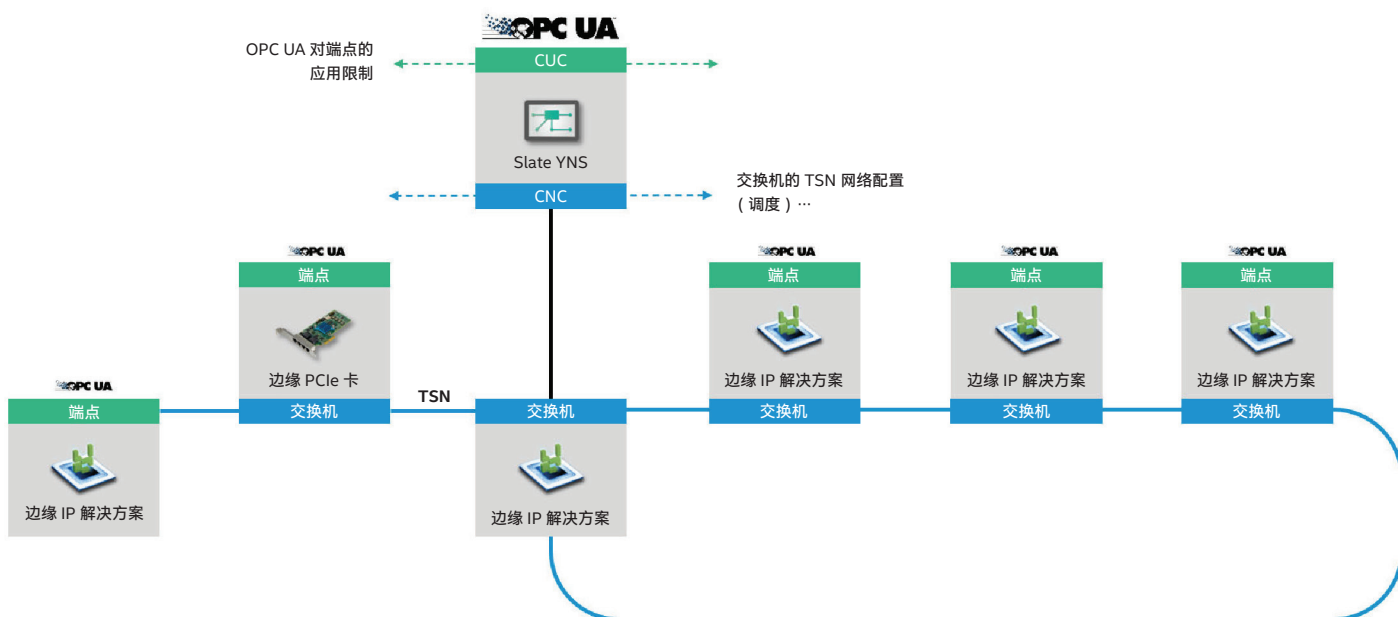


图 3. TTTech TSN 产品的系统级设计 (2019 年及未来陆续推出)

## TSN 定制

### FPGA 定制

DEIP Solution Edge 支持您定制 TSN 和其他交换机特性，以创建优化的 FPGA 集成。我们已为 DEIP Solution Edge 开发了一个英特尔 Platform Designer 组件，该组件可帮助将 TSN IP 特性轻松集成到英特尔 FPGA 中。该组件支持您定制 Quartus® Prime 软件中的各种交换机功能，通过自动生成互连逻辑来连接 IP 功能和子系统，节省了 FPGA 设计流程所需的大量时间和精力。

IP 支持定制，以启用或禁用交换机特性，扩展交换机特性，并从各种独立于介质的接口中进行选择。IP 特性支持定制，以适合特定 FPGA 器件的资源容量和器件要求。根据这些限制，通过设置参数可提供更少的端口或有限的 TSN 特性。

例如，该工具可用于定义：

- 用于转发根据同步时间加上时间戳的消息的端口 (IEEE 802.1AS)
- 用于根据网络调度转发关键消息的端口 (IEEE 802.1Qbv)
- 用于转发可抢占的非关键帧的端口 (IEEE 802.1Qbu)
- 每个端口具有最多八个队列的优先级队列数 (IEEE 802.1Q)
- 用于直通式转发消息的端口。例如，在收到整帧之前转发消息
- 介质无关接口 (MII、GMII、RMII、RGMII、SGMII) 到物理层的每个端口

## Linux 定制

DEIP Solution Edge 支持您为器件定制软件映像。该产品附带 Yocto Project\*-build 系统，它可用于为嵌入式器件创建定制的 Linux 映像。Yocto Project 支持您定义嵌入式 CPU 架构，并添加与应用相关的 Linux 功能。Yocto Project 中的标准工具可用于配置各种交换机功能，例如虚拟局域网 (VLAN)、转发和端口状态。

DEIP Solution Edge 随参考 Linux 架构提供，用于基于英特尔 FPGA 的评估硬件，也可用作软件定制的基础。Linux 交换机驱动程序针对核心 4.9 LTSI 进行了优化，可为实现工业器件提供长期稳定性。

## TSN 配置

### 远程配置

交换机器件设置完成后，通常需要配置为更广泛的设备网络的一部分。设置 TSN 网络时，远程可配置性为您提供了另一层灵活性。DEIP Solution Edge 可帮助您远程配置联网器件中的 TSN 和其他交换机特性。该产品支持 NETCONF 网络配置协议服务器，YANG 被用作 NETCONF 上的数据建模语言。DEIP Solution Edge 支持的 YANG 模型可用于配置各种交换机功能，例如 VLAN、转发和端口状态。

- 面向桥接的 IEEE 802.1Qcp YANG 模型可结合 NETCONF 在网桥之间实现基本桥接配置数据的通信
- 面向 Qbv、Qbu、Qci 的 IEEE 802.1Qcw YANG 模型扩展了 802.1Qcp 的功能，结合 NETCONF 支持在网桥之间实现调度、抢占和监督配置数据的通信
- 面向 CB 的 IEEE 802.1CBcv YANG 模型扩展了 802.1Qcp 功能，可结合 NETCONF 支持在网桥之间实现冗余配置数据的通信

### 网络调度

网络调度是 TSN 中的一种机制，可在特定时间点触发排队消息的转发，并确保网络中没有意外的延迟或冲突。调度安排将综合考虑应用的延迟、抖动和缓冲区要求，并保证网络中数据的确定性通信。

IEEE 802.1Qbv 标准规定了相应方法来定义终端节点消息的传输时间以及每个后续交换机的转发时间，确保消息在指定的时间窗口内到达接收者。网络中的每个器件都使用 IEEE 802.1AS 协议同步到同一时钟。

尽管可以手动编写使用 802.1Qbv 标准的 TSN 网络调度安排，但是对于稍微复杂的网络和器件逐渐增加的网络来说，这一方法很快会不切实际。因此，TTTech 提供了 Slate 网络配置软件，该软件将应用参数作为输入，计算匹配的 TSN 网络调度，并创建配置数据，以通过标准 NETCONF/YANG 接口部署到网络交换机。Slate 软件解决了复杂的问题，并减轻了网络工程师的网络计算和测试负担。

Slate XNS 软件提供了一个 GUI，用于对网络拓扑建模和输入系统参数。在将来的版本中，网络拓扑将支持自动发现，系统参数将由 OPC UA 应用直接提供，从而进一步简化设计流程。

### 使用 OPC UA 进行网络调度

将 OPC UA 与 TSN 相结合，不仅带来了实时进行开放的标准数据交换的优势，而且支持使用标准方法在线动态配置 TSN 网络。这样，您无需为调度程序输入任何系统参数，因为这些参数包含在每个器件的 OPC UA 应用参数中。OPC 基金会定义的代理机制提供了 OPC UA 应用和 TSN 调度软件之间的接口。

TTTech 正在开发组合强大调度引擎与 OPC UA PubSub 代理的网络配置软件 Slate YNS。该软件将把 OPC UA 器件参数转换为 TSN 调度要求，然后将计算出的调度信息反馈给器件。Slate YNS 软件可以在工业 PC、智能交换机或服务器上运行。

## 总结

TSN 包含一组 IEEE 以太网标准，这些标准适用于一系列应用，可从单个组件扩展到复杂的大型网络。由于应用范围广泛，企业需要以全面的系统视角规划和执行 TSN 的实现，而不是仅关注一个特性或组件。为了充分发挥 TSN 的开放性和融合性优势，企业必须确保 TSN 的实现方案符合标准并采用标准接口。

由于这些原因，TTTech 提供的产品组合涵盖了根据 IEEE 标准设计的 TSN 实现方案的所有要素。这样可以确保 TTTech 产品在集成到更广泛的系统中时，可以与其他厂商符合标准的其他 TSN 产品互操作。结合英特尔 FPGA 技术，TTTech 产品可通过定制和可配置性提供灵活性，从而支持为您的工业应用开发优化的 TSN 器件和系统。

## 附录 A

### 802.1AS

定时和同步是实现确定性通信的重要机制。802.1AS 是 IEEE 1588 PTP 同步协议的配置文件，支持不同的 TSN 器件实现同步兼容性。这为通过每个参与的网络器件进行流量调度奠定了基础。此外，我们正着手制定 802.1Asrev 以增加对容错和多个活动同步 master 的支持。

### 802.1Qbv

流量调度是 TSN 的核心概念。根据 802.1AS 提供的共享全局时间，创建调度安排并将其分发给参与的网络器件。802.1Qbv 定义了通过 TSN 交换机出口处闸门控制排队流量的机制。这些队列中的消息将在安排的时间窗口内传输。通常，在这些时间窗口内，其他队列的传输将被阻止，这可以避免调度流量被非调度流量阻止的情况。这意味着通过每个交换机的延迟是确定的，并且通过启用 TSN 的组件网络的消息延迟将得到控制。

### 802.1Qbu

尽管 802.1Qbv 机制可以保护关键消息免受来自其他网络流量的干扰，但不一定会实现最佳带宽使用或最小通信延迟。如果这些因素很重要，可使用 802.1Qbu 定义的抢占机制来保障。802.1Qbu 允许中断标准以太网帧或巨型帧的传输，为传输高优先级帧让路，然后在不丢弃先前传输的被中断的消息的情况下恢复运行。

### 802.1CB

在 802.1CB 中实现的冗余管理，应类似于高可用性无缝冗余 (HSR) - IEC 62439-3 第 5 条和并行冗余协议 (PRP) - IEC 62439-3 第 4 条描述的方法。为了提高可用性，同一消息的冗余副本通过网络在不相交的路径上并行传输。802.1Qca 路径控制和预留标准定义了设置此类路径的方式。然后，冗余管理机制将这些冗余消息组合在一起，以生成发送给接收者的单个信息流。

### 802.1Qcc

流预留协议 (802.1Qat) 的增强功能包括对更多流的支持、可配置流预留类别和流、更完善的流特征描述、对第 3 层流的支持、确定性流预留融合以及用于路由和预留的用户网络接口 (UNI)。802.1Qcc 支持 TSN 网络调度的离线和/或在线配置。

### 802.1Qci

防止受到故障和/或恶意端点和交换机的干扰。将故障隔离到网络中的特定区域。它在交换机 (转发引擎) 的入口运行，以防止出站队列被帧淹没。

### 802.1Qca

防止受到故障和/或恶意端点和交换机的干扰。将故障隔离到网络中的特定区域。

### 802.1Qch

定义转发排队流量的周期，802.1Qci 用于分配缓冲区，802.1Qbv 用于流量整形。

### IEEE 802.1Qcr

提供有限的延迟和抖动 (较低的性能级别)，无需时间同步。



<sup>1</sup> 测试考评特定系统上具体测试中的组件性能。硬件、软件或配置的任何差异都可能影响实际性能。当您考虑采购时，请查阅其他信息来源评估性能。有关性能和基准测试结果的更完整信息，请访问：<http://www.intel.cn/content/www/cn/zh/benchmarks/benchmark.html>

OpenCL 和 OpenCL 标识是苹果公司的商标，需获得 Khronos 的许可方能使用。

© 2019 英特尔公司版权所有。保留所有权利。英特尔、英特尔标识、Intel Inside 标记和标识、Altera、Arria 以及 Stratix 字眼和标识是英特尔公司在美国和/或其他国家的商标。英特尔保留随时更改任何产品和服务的权利，恕不另行通知。英特尔不承担因应用或使用本文所介绍的任何信息、产品或服务而产生的任何责任或义务，除非英特尔以书面形式明确同意。建议英特尔客户在使用任何发布信息以及下单购买产品或服务前，先获取器件说明书的最新版本。\*其他商标和品牌可能是其他所有者的资产。