

OPC UA TSN 是工业互联网的基础

摘要：工业互联网成为了热点一事实上，想要实现“信息互联”的努力已经有很多年了，然而，这并非易事，因为制造业的细分造成了垂直领域的壁垒，IT 试图访问 OT 遇到的障碍超出了大多数人的想象，因此，对于如何突破这些壁垒，我们很有必要了解基础互联的问题，必须了解 OPC UA 和 TSN 目前正在国际前沿厂商所寻求的面向未来互联的解决方案。

工业互联网成为了热点一事实上，想要实现“信息互联”的努力已经有很多年了，然而，这并非易事，因为制造业的细分造成了垂直领域的壁垒，IT 试图访问 OT 遇到的障碍超出了大多数人的想象，因此，对于如何突破这些壁垒，我们很有必要了解基础互联的问题，必须了解 OPC UA 和 TSN 目前正在国际前沿厂商所寻求的面向未来互联的解决方案。



图 1-金字塔架构到分布式架构

有的专家认为图 1 左侧为传统的工厂架构，这一架构将在未来为右侧的云计算/边缘计算架构所替代，其实，集中控制与分布式计算是会共存的，并非非此即彼的对立,然而,无论是哪一种方式,互联必须得以有效的实现。

1.IT 与 OT 实现融合的障碍在哪里？

在过去推动的进程里，我们听到最多的是关于底层协议的抱怨，“协议都不开放”、“不知道采集的数据是什么？”、“我们的时间都耗费在了配置参数上”，这种困境使得人们所描绘的美好互联世界变得让人烦躁不安——“这真的是我们期望的互联世界吗？”。

(1)机器间的协议障碍

现实的工厂远非理想的世界，有些情况是连通信接口都没有，而如果有的话，那也经常不同，有时候，你甚至发现同一家公司的不同代次的产品都存在这样的连接问题。

(2)语义互操作的障碍

就像英语你可以说“Hello!”表示问候，中文说“你好！”，不同国家的人都会有不同的语言，不同的机器也有不同的语言，就像有的用“英寸”，而另一个采用“厘米”做单位，这些语义之间的差异使得你不能说“A 机器走了 2 英寸，而 B 机器走了 2 厘米，他们相同的位移”，尽管从获得的数据上来说都是“2”，

但是，这两者却完全不同的尺寸。

(3)多个网络

对于制造业工厂的 CIO 来说，最理想的世界肯定是不需要那么多网络协议，也不要那么多网络接口，更不想为了让不同的接口和协议进行连接而开发“适配器”以及“协议软件接口”，这还仅仅是 OT 端，而 IT 与 OT 采用的是非一致的网络以及网络层次（ISO-OSI 模型）。

IT 与 OT 间的网络所拼接的组合数会是一个巨大的数字，这使得美好的 IT 与 OT 融合在过去的 20 年里被讨论，却直到今天尚未有效实现互联。

2.OPC UA-解决语义互操作问题

为了解决互操作也开发了很多标准，就目前而言，声势最大也被广泛认可的是 OPC UA，OPC UA 基金会属于非盈利组织，而 OPC UA 本身也是不为公司掌握的独立技术，成为 IEC62451 标准以及中国国家标准，而且在德国工业 4.0 组织和美国工业互联网组织 IIC 均将 OPC UA 列为了实现语义互操作的标准规范。

图 2 是关于为什么采用 OPC UA 的总结，读者可以大致了解到它的全局优势。



图 2-为什么选择 OPC UA？

OPC UA 在如图 2 中已经描述了它的优势，但很多人仍然仅仅把它理解为一个通信的规范，而事实上，OPC UA 真正的核心在于“信息建模”。

图 3 是 OPC UA 的基础架构，包括内嵌信息模型、行业信息模型与供应商信息模型几个层面的信息模型。



图 3-OPC UA 解决信息模型问题

信息模型是什么？如果用 OPC UA 的技术来介绍可能不大易于理解，但是，如果我们想实现机器人与注塑机进行协同的工作的时候，我们必须清楚，他们之间需要哪些数据来保证他们之间的工作一致性呢？这就是数据的应用问题，而同样道理，我们希望实现 OEE 的统计，那么 OEE 的计算就是一个信息模型，我们需要与之相关的数据，而垂直行业的信息模型则在于具体的包装、塑料、印刷行业所采集的对象定义不同。

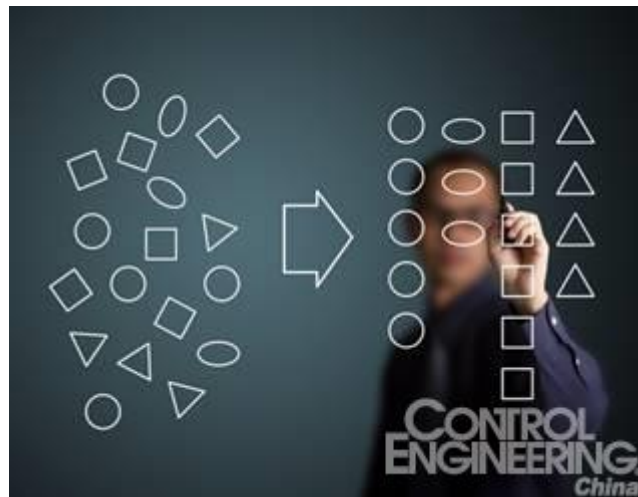


图 4-获得结构化数据是数据应用的前提

简单理解信息模型就是为了实现特定任务，而对数据所进行的标准封装，OPC UA 提供了一个如何封装信息模型的标准，除了已经纳入到 OPC UA 架构下的 PackML、MTConnect、Euromap、Automation ML 等之外，OPC UA 还支持行业自定义的信息模型，OPC UA 采用面向对象的思想，使得这些开发变得简单。

在工业 4.0 中针对设计、生产、制造各个环节的衔接，必须基于信息的标准与规范才能实现协同，那么，如何定义信息之间的协同标准开发了 Administration Shell，而这个管理壳同样基于 OPC UA 的规范来设计并实现在各个管理业务单元之间的数据传输。如图 5 所示。

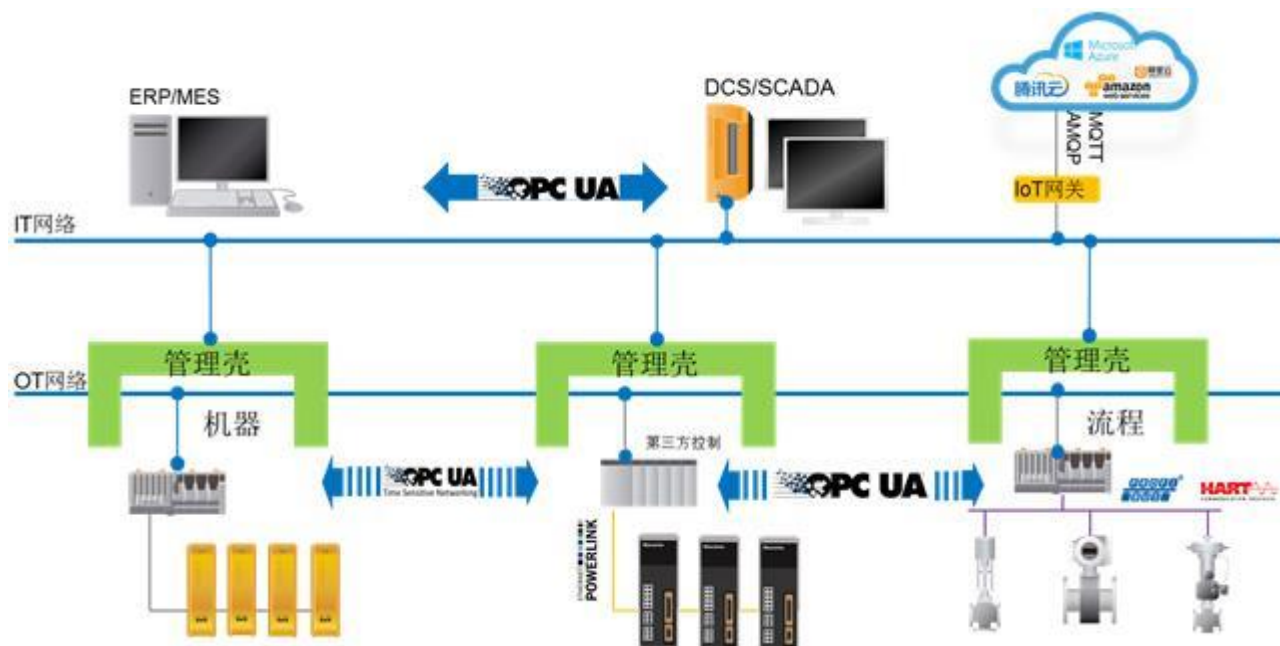


图 5-OPC UA TSN 构成的智能集成架构

3.TSN 技术

在图 5 中，我们看到了 OPC UA 也同时看到 TSN，尽管目前 TSN 尚未正式投入大量应用，但主流的 IT 厂商如 CISCO、华为以及自动化业界的主流厂商均参与 TSN 的开发，并逐渐推出其 TSN 产品。

3.1 TSN 产生的背景

要了解 TSN 推出的意义，就先了解一下目前在网络通信上的障碍：

(1)总线的复杂性

总线的复杂性不仅给 OT 端带来了障碍，且给 IT 信息采集与指令下行带来了障碍，因为每种总线有着不同的物理接口、传输机制、对象字典，而即使是采用了以太网来标准各个总线，但是，仍然会在互操作层出现问题，这使得对于 IT 应用，如大数据分析、订单排产、能源优化等应用遇到了障碍，无法实现基本的的应用数据标准，这需要每个厂商根据底层设备不同写各种接口、应用层配置工具，带来了极大的复杂性，而这种复杂性使得耗费巨大的人力资源，这对于依靠规模效应来运营的 IT 而言就缺乏经济性，因此，长期以来，虽然大家关注，却很少有公司能够在这一领域获得较大的成长。

(2)周期性与非周期性数据的传输

IT 与 OT 数据的不同也使得网络需求差异，这使得往往采用不同的机制，对于 OT 而言，其控制任务是周期性的，因此采用的是周期性网络，多数采用轮询机制，由主站对从站分配时间片的模式，而 IT 网络则是广泛使用的标准 IEEE802.3 网络，采用 CSMA/CD，即冲突监测，防止碰撞的机制，而且标准以太网的数据帧是为了大容量数据传输如 Word 文件、JPEG 图片、视频/音频等数据。

(3)实时性的差异

由于实时性的需求不同，也使得 IT 与 OT 网络有差异，对于微秒级的运动控制任务而言，要求网络必须要非常低的延时与抖动，而对于 IT 网络则往往对实时性没有特别的要求，但对数据负载有着要求。

由于 IT 与 OT 网络的需求差异性，以及总线复杂性，使得过去 IT 与 OT 的融合一直处于困境。

这是 TSN 网络因何在制造业得以应用的原因，因为 TSN 解决了上述几个障碍：

(1) 单一网络来解决复杂性问题，与 OPC UA 融合来实现整体的 IT 与 OT 融合。

(2) 周期性数据与非周期性数据在同一网络中得到传输；

(3) 平衡实时性与数据容量大负载传输需求

明白这个背景，就会明白 TSN 为何被 OT 厂商所共同关注，希望将其引入制造业以解决现实中的融合问题，否则，网络将成为推动智能制造的第一个难点。

IEEE802.1 本身是为了 Audio/Video 领域而设计的标准，在 2005 年即成立，并一直致力于开发针对音频/视频桥的 IEEE802.1AVB 标准的开发，由 Avnu 联盟负责其兼容性以及市场推广。

IEEE802.1AVB 逐渐受到了其它领域的产业关注，并对此产生兴趣，但是，AVB 并非是一个适合于所有产业的名字，在 2012 年 IEEE AVB TG 被重命名为 TSN TG，在 2015 年 Interworking TG 与 TSN TG 合并成为新的 TSN 任务组。

在智能制造时代，我们说 IT 与 OT 融合来实现整个数据透明下的协同制造，但是，对于智能制造而言所遇到的问题却使得 IT 与 OT 的融合产生了诸多的障碍，这包括以下几个方面

3.2 TSN 的目标问题

TSN 主要解决时钟同步、数据调度与系统配置三个问题，如图 6：



图 6-TSN 网络所聚焦的三个问题

(1) 所有通信问题均基于时钟，确保时钟同步精度是最为基础的问题，TSN 工作组开发基于 IEEE1588 的时钟，并制定新的标准 IEEE802.1AS-Rev。

(2) 数据调度机制：为数据的传输制定相应的机制，以确保实现高带宽与低延时的网络传输。

(3) 系统配置方法与标准，为了让用户易于配置网络，IEEE 定义了相应的 IEEE802.1Qcc 标准。

3.3 TSN 相关标准

TSN 目前由 IEEE 在制定相关标准，IEC 也开始将其纳入到标准体系中，并与 IEEE 展开合作，凡是 IEEE 标准的技术，都将不再属于某家公司，而是一个统一的标准，供所有人可以去实现和应用，当然，会有一些芯片厂商和技术服务商为大家提供开发支持。

如图 7 所示，分布式网络中的时钟精确同步是一个基准问题，IEEE 针对工业应用对此进行了升级优化使得其更为适应多主的情况，并对冗余能力进行了增强。这项标准为 IEEE802.1AS-Rev。

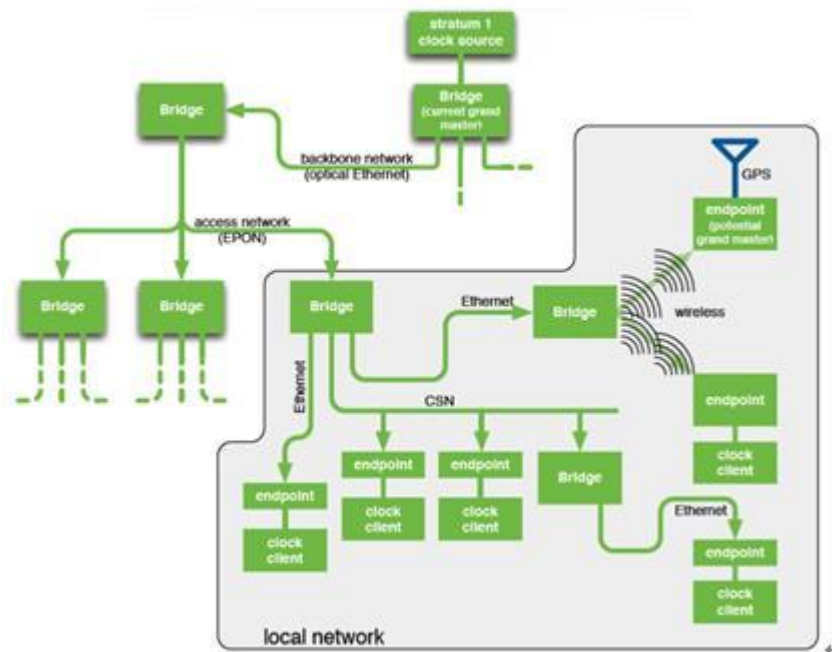


图 7-IEEE802.1AS-Rev 的分布式时钟网络

3.3.1 IEEE802.1Qbv 时间感知队列

TSN 的核心在于时间触发的通信原理，在 TSN 网络中有“Time-aware Shaper-TAS”概念，这是确定性报文序列的传输方式，被标准化为 IEEE802.1Qbv。其机制如图 9 所示。

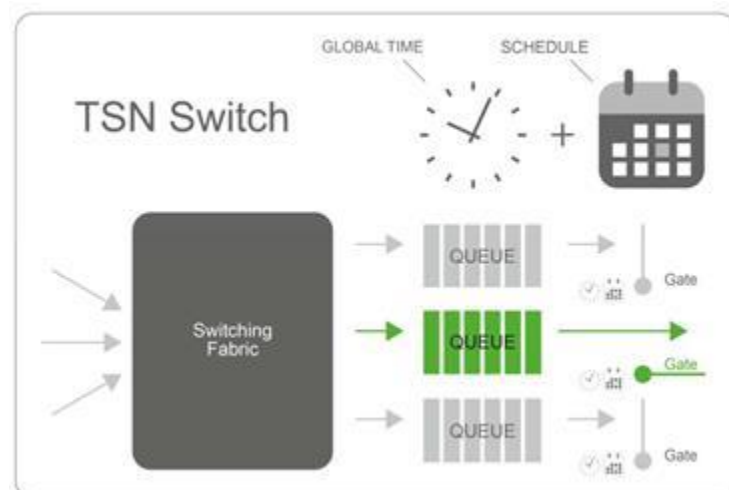


图 8-IEEE802.1Qbv 的传输机制

通过时间感知整形器(Time Aware Shaper)概念使得可通过 TSN 使能交换机来控制队列报文,以太网帧被标识并指派给基于优先级的 VLAN Tag,每个队列在一个时间表中定义,然后这些数据队列报文的在预定时间窗口在出口执行传输。其它队列将被锁定在预定时间窗口里。因此消除了周期性数据被非周期性数据所影响的结果。这意味着每个交换机的延迟是确定的,而在 TSN 网络的数据报文延时被得到保障。TAS 介绍了一个传输门概念,这个门有“开”、“关”两个状态。传输的选择过程-仅选择那些数据队列的门是“开”状态的信息。而这些门的状态由网络时间表进行定义。关闭到非时间表的门是另一种提供对时间严苛型报文进行带宽与延时保障的方法。TAS 保障时间严苛报文免受其它网络信息的干扰,它未必带来最佳的带宽使用和最小通信延迟。当这些因素非常重要时,抢占机制可以被使用。

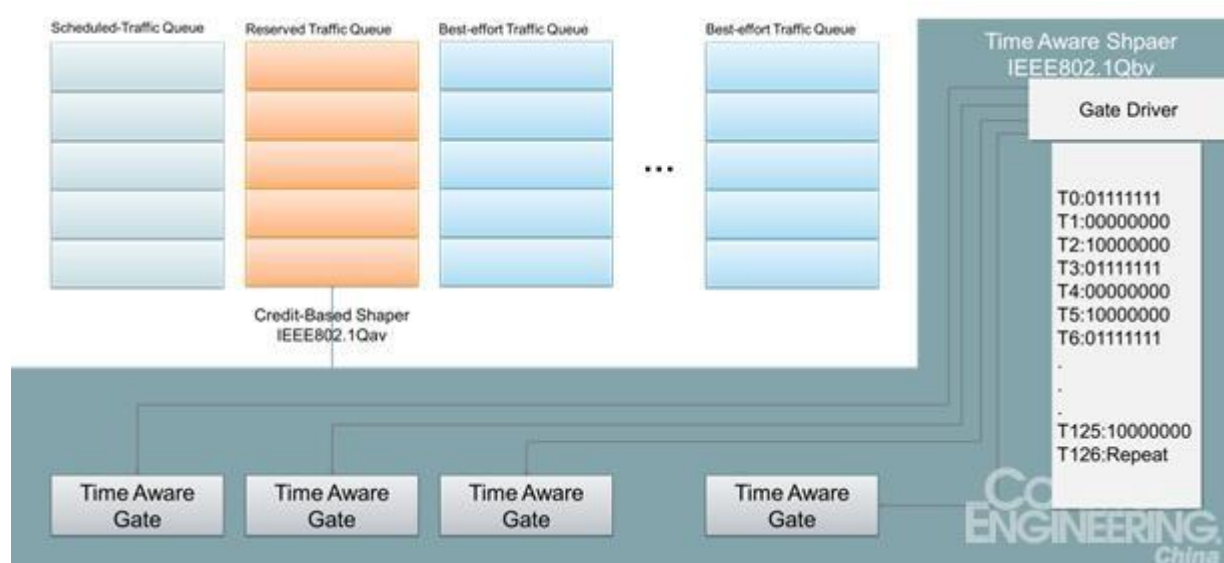


图 9-IEEE802.1 Qbv-Time Aware Shaper 工作机制

如图9所示,在网络进行配置时队列就分为 Scheduled Traffic、Reserved Traffic、Best-effort Traffic 三种,对于 Schedule 而言则直接按照原定的配置时间通过,其它则按优先级。Qbv 主要为那些时间严苛型应用而设计,其必须确保非常低的抖动和延时。Qbv 确保了实时数据的传输,以及其它非实时数据的交换。

3.3.2 IEEE802.1Qbu 转发与队列机制

对于高带宽的非时间严苛型应用而言,Qbu 的抢占式方式可以解决其传输的问题。当出现优先级更高的数据包传输时立即中断当前传输,被中断的传输从中断点处被重发。

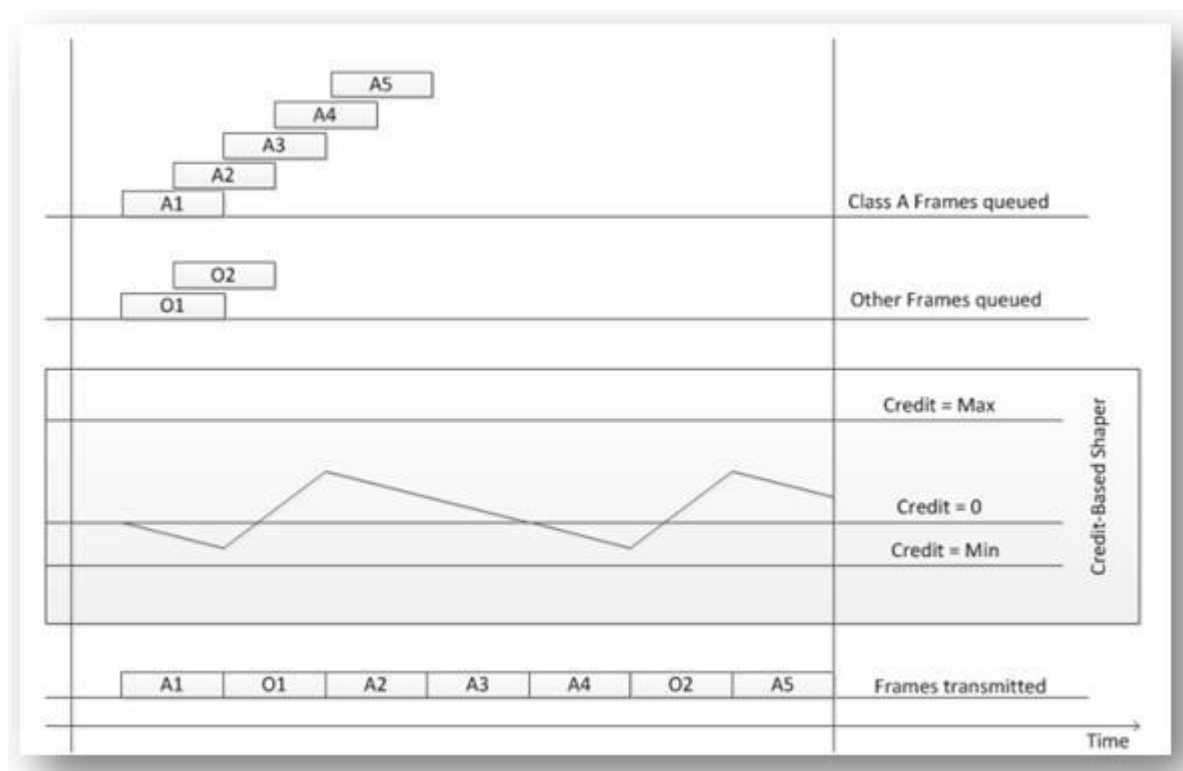


图 10-Qbu 的传输序列

IEEE 802.1Qbu 与 IEEE 802.3br（穿插快速报文任务）一同工作于一个标准化的抢占机制上。该标准解决 IEEE802.1Qbv 所描述的 TAS 为避免传输抖动而在严苛型数据帧到来之前锁存了低优先级序列的问题（在一个最大干扰帧的持续时间内）。在需要预定的消息的最小延迟的情况下，TAS 机制可能不是最佳的解决方案。因此，在支持由 IEEE 802.1Qbu 定义的优先级的链路上，可以中断标准以太网或巨型帧的传输，以允许高优先级帧的传输，然后在不丢弃之前传输的被中断的消息。有几种用于抢占正在进行的传输的通信选项是有利的，例如，以允许即时传输预定的消息并确保最小的通信延迟，或者促成

具有大量预定流量的网络链路上的最大带宽使用率。

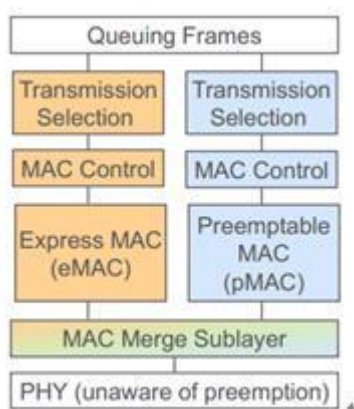


图 11-可抢占 MAC 与快速 MAC

如图 11 所示，快速帧的 MAC 数据通道可以抢占 Preemptable MAC 的数据传输。

正在进行的传输可以被中断，报文按等级可被分为可被抢占和抢占帧，抢占生成框架，最小以太网帧受到保护的，127 字节的数据帧（或剩余帧）不能被抢

占。采用标准以太网 PHY。

3.3.3 IEEE802.1Qcc 系统配置

Qcc 用于为 TSN 进行基础设施和交换终端节点进行即插即用能力的配置。采用集中配置模式，由 1 或多个 CUC(集中用户配置)和 1 个 CNC(集中网络配置)构成。CUC 制定用户周期性时间相关的需求并传输过程数据到 CNC，CNC 计算 TSN 配置以满足需求。CUC 用于 OPC UA Pub/Sub，另一个用于 OPC UA C/S，也会有其它用于应用协议如安全。配置采用标准化的配置协议（TLS 上的 NETCONF）以及匹配的配置文件（YANG），如果单一设备则 CUC 和 CNC 并不牵扯协议。如果 CUC 和 CNC 是在分布式网络，RESTCONF 用于他们之间的通信协议。

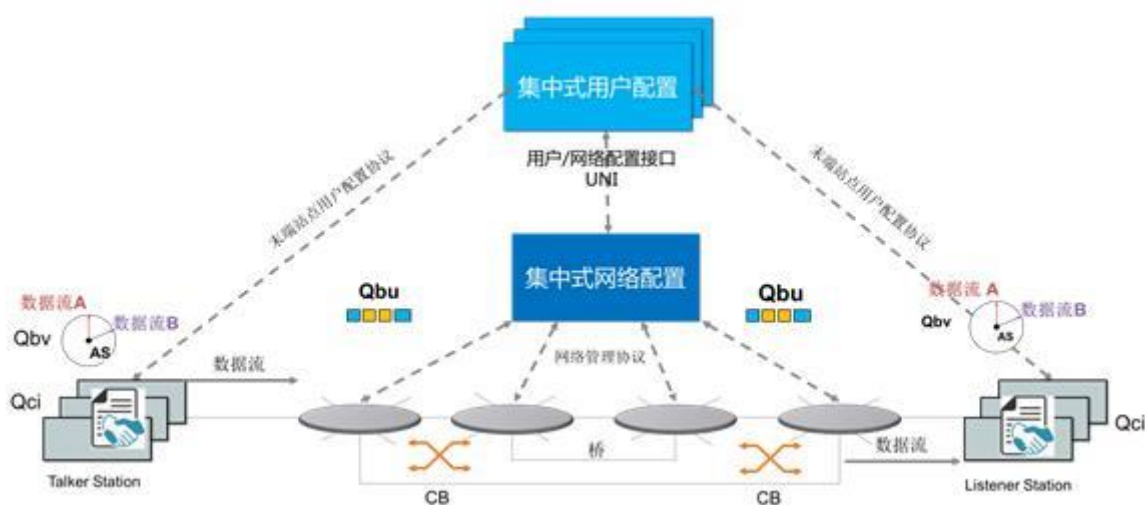


图 12-IEEE802.1 Qcc-CNC 用于 TSN 网络与用户配置的协议

图 12 显示了 IEEE802.1Qcc 的 CNC 与 CUC 的配置,对不同的 Qbv,Qbu,QCB 的配置。

当然了 IEEE 关于 TSN 相关的标准还包括其它，可以在 IEEE 官方网站获得相关信息。

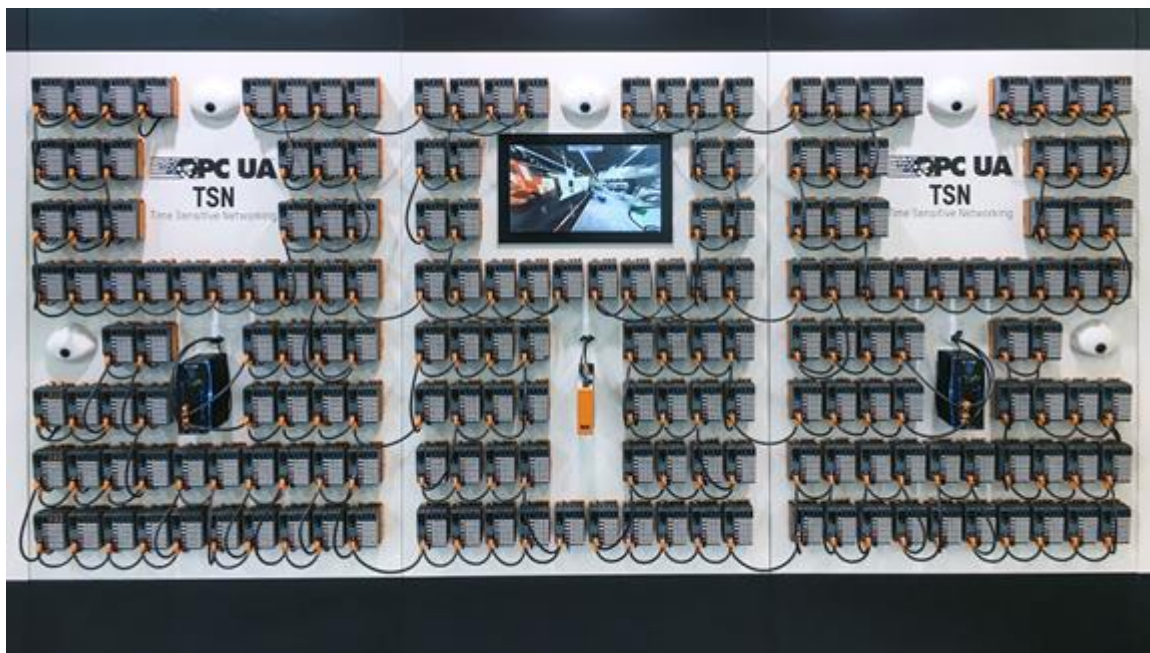


图 13-贝加莱 2017 年 SPS 展展出 200 OPC UA TSN 演示系统

图 13 为 2017 年纽伦堡 SPS 展会上贝加莱展出的 OPC UA TSN 演示系统，针对 200 个 I/O 站、5 个高清视频，达到 100 μ S 的数据刷新能力。

4.OPC UA+TSN 是构成工业互联网的基础

如果我们回到最初 Internet 被创建时的 ISO/OSI 七层协议模型，我们就会发现，在 OPC UA 与 TSN 构成的网络中，正是实现了这一“Internet”协议的七层结构。

TSN 解决的是数据链路层的问题，结合标准的以太网物理层，但是，我们去看 TSN 的参考网络以及机制可以看到它能支持到网络交换机制的 Network 和 Transport 层的问题，而 OPC UA 则解决了 Session 会话层、Presentation 表示层与 Application 应用层的问题。

我们可以把 OPC UA TSN 理解为一个 Internet 的工业版协议族，就像当年 Internet 被创建的时代一样。

无论技术如何理解，但 OPC UA 与 TSN 对于未来的 IT 与 OT 融合奠定了基础，使得过去人们对于 IT 与 OT 连接的各种障碍得以获得一个清晰而可行的解决之道，最终实现工业互联，在这个基础上，大数据应用、人工智能分析等才能被实现。