

知乎

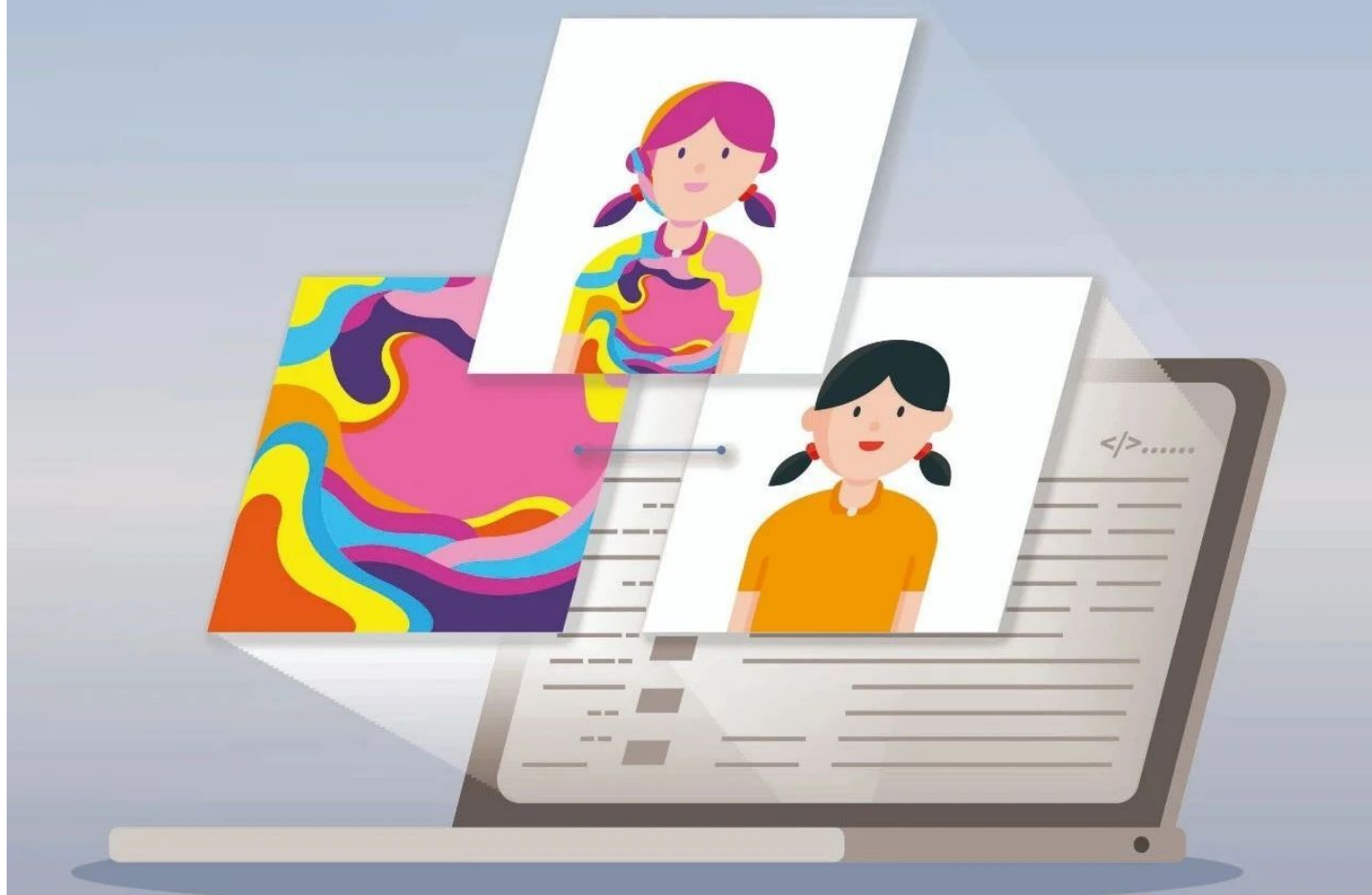
中国计算机学会通讯

COMMUNICATIONS OF THE CCF

2020年10月 第10期

WWW.CCF.ORG.CN

第16卷 总第176期



工业互联网中OPC UA与TSN的融合



CCF

已认证的官方帐号

OPC UA over TSN是制造业一直关注的焦点话题。在过去很长一段时间里，OPC UA和TSN都是独立发展的，分别由OPC基金会、IEEE/IEC制定统一的标准。本文将结合OPC基金会现场级通信工作组在2020年6月的最新发布，阐述OPC UA与TSN融合方面的技术与机制。

▲ 赞同



● 添加评论

➤ 分享

♥ 喜欢

★ 收藏



OPC UA over TSN¹是制造业一直关注的焦点话题。在过去很长一段时间里，OPC UA和TSN都是独立发展的，分别由OPC基金会、IEEE/IEC制定统一的标准。本文将结合OPC基金会现场级通信(Field-Level Communication, FLC)工作组在2020年6月的最新发布，阐述OPC UA与TSN融合方面的技术与机制。

现场总线的背景

要想了解今天的工业互联网，首先需要回顾传统现场总线的发展。20世纪70年代初期，电子计算机控制已经在流程工业中得到应用，离散制造业中的可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)也是在这个阶段诞生的。当时工厂已经具备较大规模的产线(如石油炼化生产、制药等)，但随着更多的仪表、传感器接入到系统，产线变得越来越复杂。考虑到接线方便、维护简便等工程集成因素，工业领域的企业开发了现场总线。当然，“现场总线”这个词是在80年代国际电工委员会(IEC)制定统一标准时定义的。

现场总线的特点

传统现场总线常用架构借鉴了ISO/OSI²模型。商业互联网采用的是七层架构，而工业网络为了更好的实时性、降低延时，通常将工业总线设计为以物理层、数据链路层、应用层为整体的三层架构(如图1)，例如Profibus、DeviceNet、Fieldbus Foundation都是三层整体的概念。

知乎

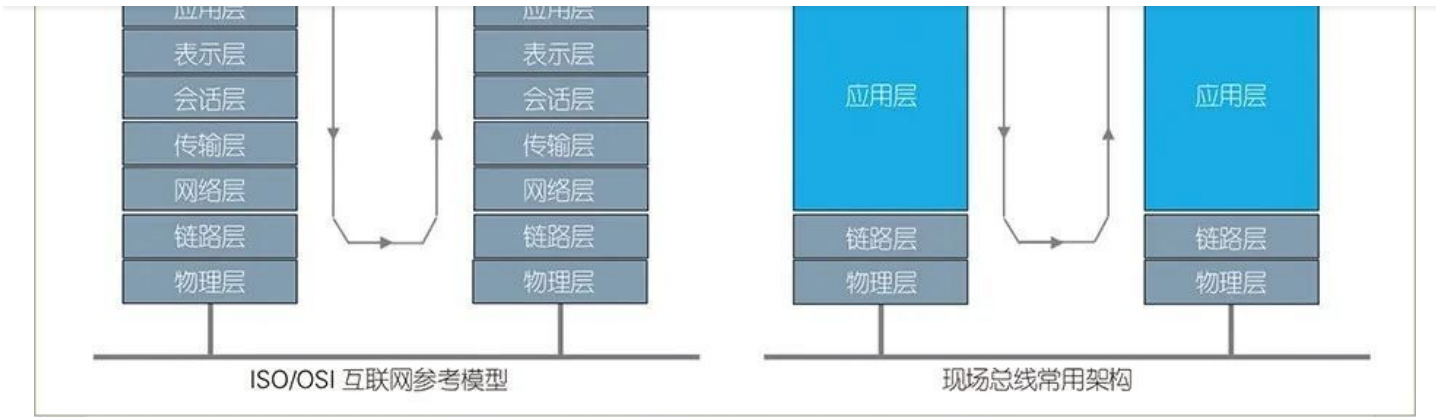


图 1 现场总线常用架构与互联网的差异

现场总线的最大特点是减少了接线的工作量，降低了系统的配置与诊断的工作量。因此，从20世纪80年代中期到21世纪初，现场总线一直占据着工业的主导地位。

随着现场总线的发展，一系列问题也被暴露出来。各个主要的现场总线的物理介质、网络拓扑、带宽、网络间距、校验方式、传输机制、网络诊断等差异巨大，这使得工厂的互联出现了问题。一方面，为了设备的整厂连接，需要配置大量的中转模块，硬件成本增加；另一方面，为此需要开发不同的驱动程序，用于对其数据的互联进行配置。

除了技术上的问题，20世纪90年代中期，IEC组织中爆发了一场现场总线国际标准之争。后来为了平息竞争，IEC61158将各总线都列为同等标准，以至于今天IEC61158有28个不同的子标准。

实时以太网技术的发展

21世纪初，以太网技术的大量商用降低了现场总线的成本，因此，各家公司在原有应用层的基础上，将其物理层与数据链路层切换至以太网。由于以太网的带宽、间距、物理接口（RJ45或M12连接器）、MAC层协议、校验、数据帧格式等都是统一的，使得原有的物理层和数据链路层获得了统一，而基于以太网的实时通信技术快速发展，POWERLINK、PROFINET、SERCOSIII、EtherNet/IP、EtherCAT等实时以太网在21世纪的前20年里占据了主导，并逐渐成为主流，其实时性、带宽等与传统现场总线相比均具有更高的性能，确保了高速运动控制、I/O处理等任务的快速响应，也使得机器的加工速度和精度更高。

语义互操作的需求

知乎

元进行通信的机制，可以实现“集中管理、分散控制”的管控一体化。但是OPC本身是基于Windows的，一直无法得到较大幅度的推广。从2006年开始推动的OPC UA使得跨平台的通信成为可能。

IEC TR 62390定义了各个层的任务，现场的网络包括互联（物理介质、接口、数据访问的层级问题）、互通（主要在通信层，参数类型一致性定义），而应用层的语义、应用的行为以及动态功能则是设备行规的范畴，这一层是OPC UA发挥作用的领域，其核心在于统一规范——OPC UA并不包含具体的技术，而是使得各个不同的总线、实时以太网获得统一的语义交互规范。

OPC UA over TSN的意义

OPC UA的意义

随着时间的推进，工业4.0、智能制造、边缘计算等新的业务发展使得对语义互操作规范的需求变得更为迫切。OPC UA主要在工业场景中应用，但随着连接需求的进一步增加，OPC UA的角色不断扩大。如图2所示，传统的工厂“金字塔”架构主要强调工厂内的水平与垂直集成，智能制造更为全局的优化和协同的需求增加，使得整个工厂与数字化设计、云/边缘、供应系统、用户管理系统等商业运营管理系统也需要集成，就形成了图2右侧的“端到端”集成的架构。此时，不同单元间的集成对于语义互操作的需求更为迫切，OPC UA也逐渐被纳入到OICT(Operation-Information-Communication Technology, 运营技术-信息技术-通信技术)领域，扮演更为重要的角色，例如德国工业4.0将其作为“管理壳”传输的规范，使数字化设计、运营维护及业务单元间获得统一的通信，美国IIC也将OPC UA纳入其连接规范中。

知乎



图 2 工业 4.0 所定义的网络连接的变化

图3为OPC UA的整体架构，包含对传统通信机制的支持，包括客户端/服务器(Client/Server)架构、发布者/订阅者(Publisher/Subscriber)架构；也包含信息模型，除了基础信息模型、设备集成 (Device Integration, DI)信息模型之外，还包括各个垂直行业的信息模型，如Euromap针对塑料机械与MES/ERP之间交互的模型、自动化机器语言(Automation ML)针对汽车工业的模型、包装机器语言(Pack ML)针对包装工业的模型、机床连接(Machine Tools Connection, MTConnect)针对机床工业的模型等，这是OPC UA的核心价值，即定义了信息模型，使得工程数据的配置、编程中的调用等变得更为简单，降低工程成本。



图 3 OPC UA 的整体架构

知乎

- 2.信息建模使得应用更为方便，例如MES/ERP读写数据、机器学习所需的结构性数据、建模仿真的模型数据交互，都是其潜在的应用领域；
- 3.统一规范，无需复杂的软件配置和开发工作，降低了工程量。

统一的网络连接问题

在整个工业互联网的集成中，涉及更为广泛的业务数据流集成，需要一个统一的网络对原有的标准以太网的BE（Best Effort，尽力而为）传输机制进行升级，以满足OT网络3的周期性数据传输需求，这是目前OICT厂商聚焦TSN的原因。TSN与传统的实时以太网相比，其意义在于“生态系统”。传统的实时以太网属于“私有技术”，即由一个具体的公司所掌握，或属于其所构成的技术联盟。而TSN作为IEEE的标准具有中立性，TSN的发起者包含华为、思科等OT、ICT厂商代表，因此具有更广泛的共识，其意义在于赋予传统的标准以太网以实时性，同时使得IT数据与OT的周期性数据在同一网络中传输。

TSN的目标是使各种不同的数据流在网络中采用不同的机制进行调度。TSN由IEEE802.1Q VLAN工作组的系列标准构成，其标准分类如图4所示，包括几个关键标准组：

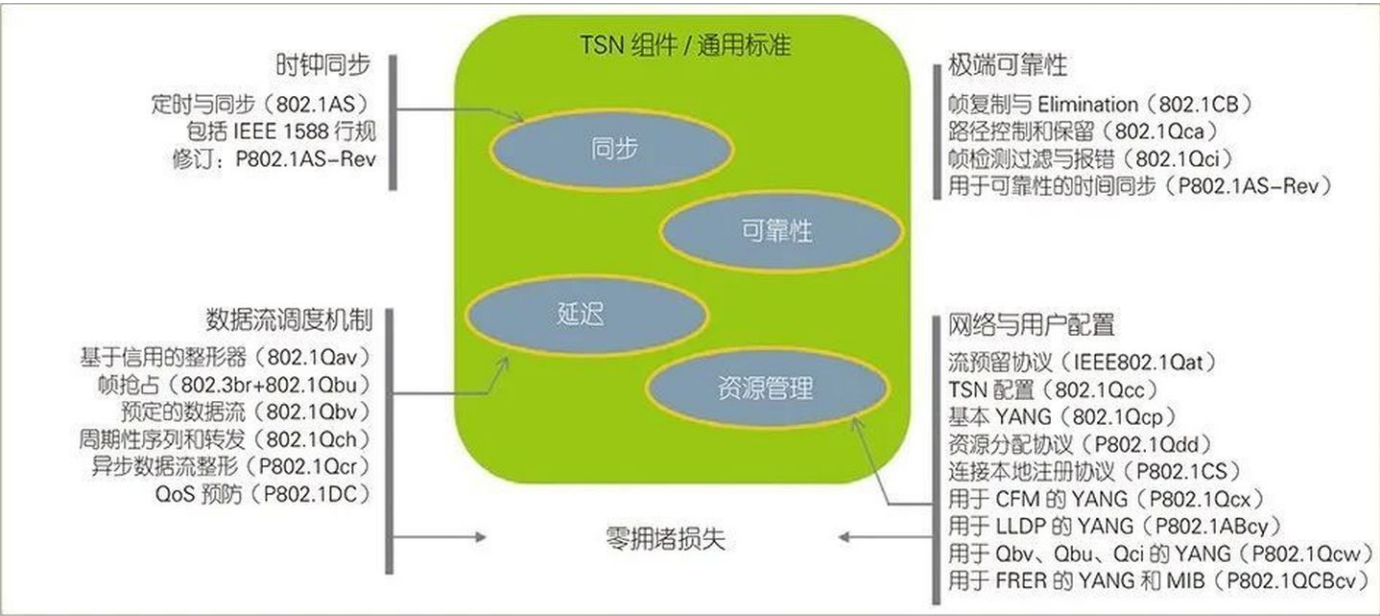


图 4 TSN 相关的标准

时钟同步：基于IEEE1588时钟的修订，采用广义精确时钟协议，并在L2层发送时钟信息给各个终端节点和桥节点（交换机，bridge），以实现整个网络的时钟同步，并采用冗余机制确保时钟容

制，称为整形器，如基于信用的整形器(Credit-Based Shaper, IEEE802.1Qav)、时间感知整形器(TAS-Time Awareness Shaper, IEEE802.1Qbv)、帧抢占MAC的IEEE802.1Qbu+IEEE802.3br、周期性序列和转发的整形器(Cyclic Queuing & Forwarding, IEEE802.1Qch)。车载以太网目前采用IEEE802.1Qav，工业则聚焦于IEEE802.1Qbv和Qbu。

网络与用户配置：对于网络而言，TSN的配置是将用户节点和桥节点的需求与能力进行匹配的过程。在汽车车载以太网方面，IEEE802.1Qat用于对网络进行配置，工业则聚焦于IEEE802.1Qcc的机制。TSN配置分为集中式用户配置(Centralized User Configuration, CUC)和集中式网络配置(Centralized Network Configuration, CNC)的交互，使得需求与能力匹配，支持分布式、集中式、混合配置三种模式。

从上述标准分类可以看到，TSN是一种模块化的设计思想，按照用户的需求分为不同的标准组，厂商据此选择适合自己业务场景的标准来开发产品。

OPC UA和TSN分属不同的组织，OPC UA标准由IEC进行(IEC62451)制定，而TSN标准则由IEEE进行(IEEE802.1Q)制定。OPC基金会成立了OPC UA FLC，用于将TSN的配置融入其中，这与IEC/IEEE60802工作组的工作相关。IEC/IEEE60802工作组旨在将TSN面向自动化领域的设备级互操作进行统一规范，即TSN IA Profile工作组。本文就结合FLC的工作来阐述融合细节。

层级独立的架构设计

OPC基金会的整体工业互联架构

OPC基金会针对网络与通信连接制定了庞大的计划，但是为了降低复杂性，采用了模块化的设计思想，以便厂商可以根据自身业务需求进行开发。

网络层 在图5所示的OPC UA FLC的架构中，FLC把整个工业通信分为几个模块。网络的模块化设计思想使各层相互独立。新的工业网络采用分离的层级设计，更适合于根据场景-业务流进行划分。在物理层和数据链路层可以采用多种支持，如物理层可以采用单绞以太网(SPE，是2019年发布的IEEE802.3cg标准定义的)、高级物理层(APL)，数据链路层可以采用IEEE802.1Q。IEC60802 IA规范工作组将为该层定义互操作规范，以确保在TSN应用中，不同TSN设备可以实现互操作、互配置。

知乎



图 5 OPC UA FLC 的架构

物理层和数据链路层也为未来的5G/Wi-Fi 6提供了可选项，使得无线网络与有线网络都可以在整个架构中获得支持。

通信层 包括C/S和Pub/Sub两种机制，UDP、TSN、5G都支持这种通信机制。C/S和Pub/Sub是传统的工业通信定义两种机制，最早可以追溯到20世纪90年代的现场总线之争。德国和法国两大阵营分别开发了这两种不同的机制，C/S架构提供垂直方向的连接，Pub/Sub提供水平集成及实时性更高的连接。通信层也支持现有的IT网络的WebService、TCP、UDP。在这里IT与OT被融合，实际上是以一种模块化的访问方式进行了规范，并非创造了一种新的技术。

模型层 与应用相关。对于整个工业网络来说，其包括应用层的信息建模问题，也包括如I/O访问、运动控制、功能安全等系列应用层的任务，以及为垂直行业而设计的伴随模型。

OPC UA over TSN涵盖了整个工业网络的多层连接，采用分层机制实现了不同的应用需求，本身包括模块化的设计思想。

OPC UA over TSN的两个阶段

在OPC基金会FLC中，定义了两个阶段的发展——控制器-控制器(Controller to Controller, C2C)和控制器-现场设备(Controller to Device, C2D)，这两个阶段分别在OPC UA的配置中设计实现，如图6所示。

知乎

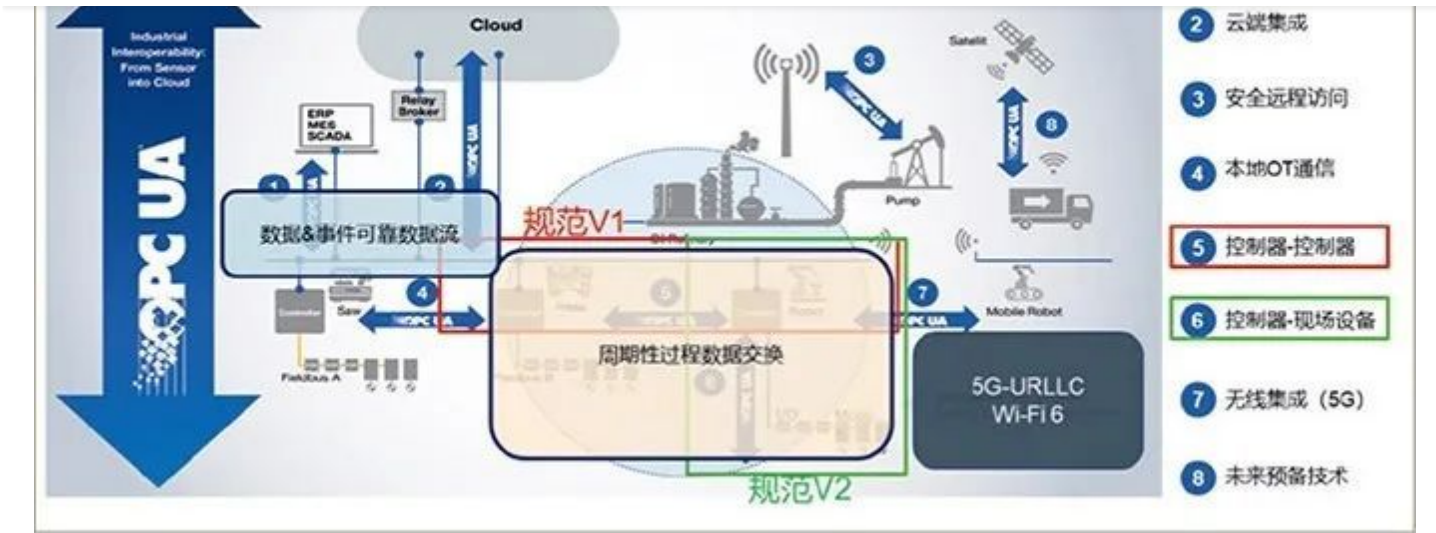


图 6 OPC UA over TSN 的规范 V1/V2

由图6也可以看到，整个OPC UA实现了机器-机器、机器-业务、业务-业务三个方向的集成，即工业4.0、CPS最初提出的三大集成，因此，OPC UA over TSN是整个工业互联网、智能制造愿景的关键实现。

OPC UA中TSN的融合

OPC UA Server中的流控制与调度包含了TSN Talker和Listener的连接机制，包括状态、端口、流规范等信息的交互。OPC UA的网络配置如图7所示。OPC UA将TSN作为一种传输机制予以支持。

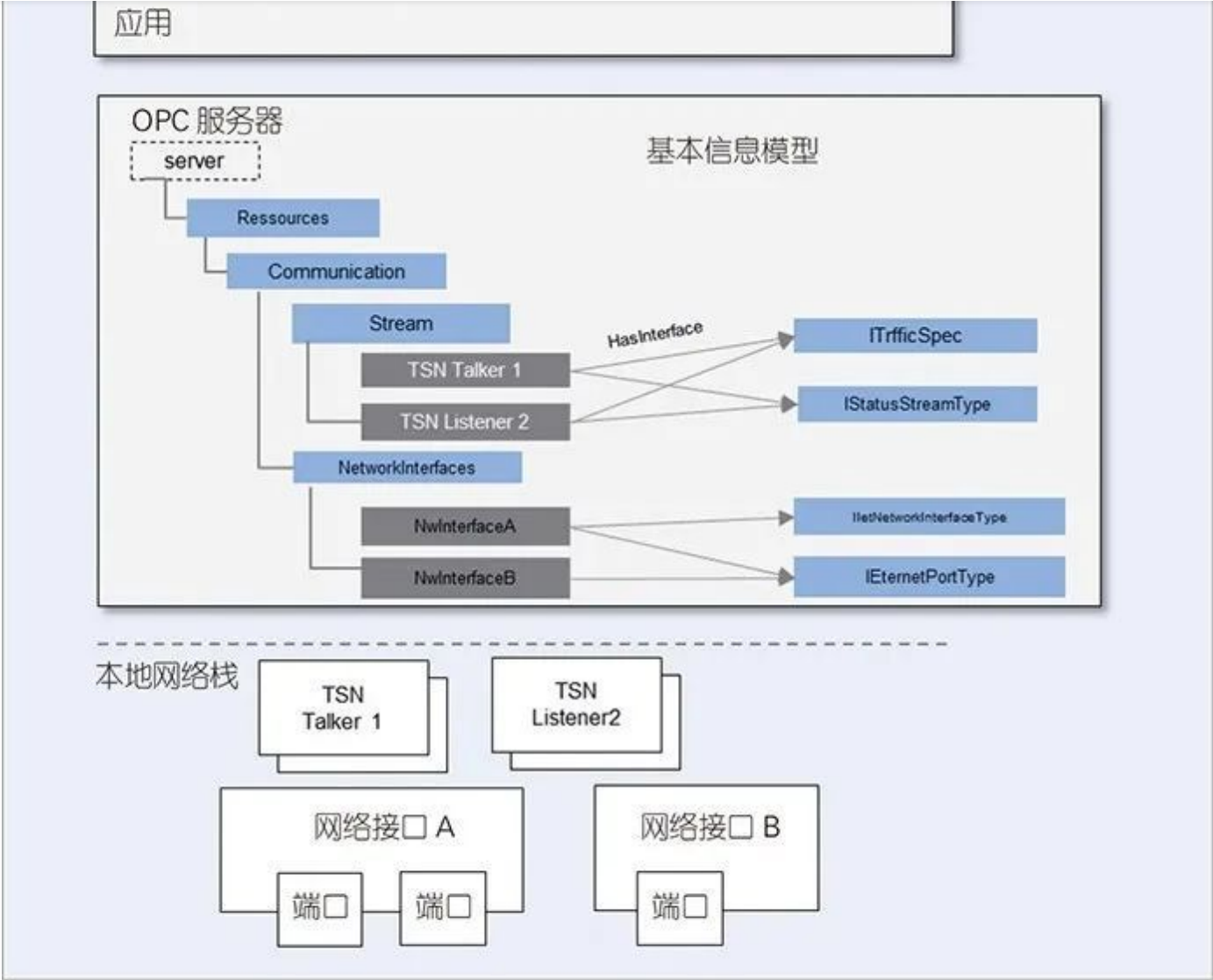


图 7 OPC UA 中的网络配置

OPC UA的网络配置中，底层为硬件的TSN实现层，上层为软件的交互层，由OPC UA完成通信连接的建立、保持和关闭等任务。OPC UA旨在对整个网络进行配置，目前其进展尚在规范制定中。

图8对TSN的配置过程进行了描述。OPC UA FLC是基于Pub/Sub机制实现这个配置过程的，包含发布者写入组、Talker数据流对象、Listener流对象、订阅者读取、消息超时等多个参与者。FLC通信管理器可以是一个终端控制系统的配置工具，也可以由TSN交换机厂商提供配置。

知乎

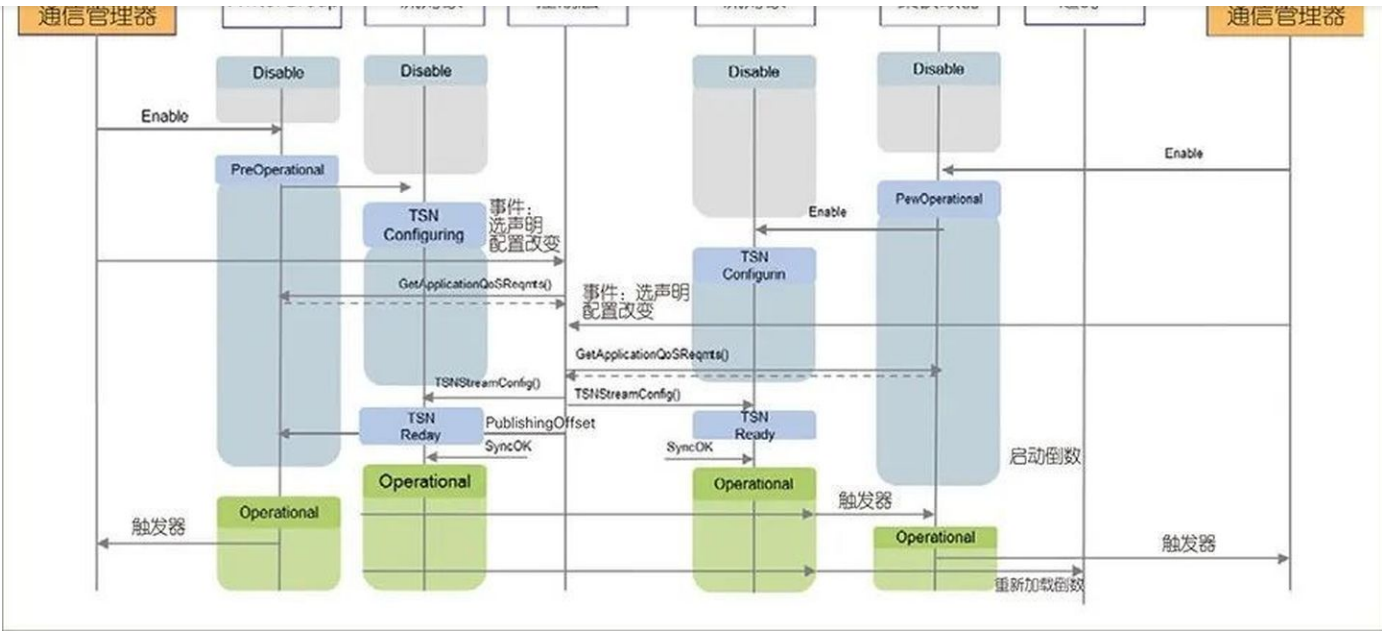


图 8 OPC UA 中的网络连接建立过程

在整个OPC UA over TSN的配置中，包括FLC终端节点的两种不同的配置方式。图9左侧为完全集中式配置，右侧为完全分布式控制。集中式配置中包括CNC-集中式网络配置和CUC-集中式用户配置，两者的交互会将需求与能力进行匹配。这个工作将由OPC基金会与IEC/IEEE60802工作组配合完成，IEEE60802工作组定义TSN的互操作，OPC UA对TSN机制进行整体的配置，即将IEEE802.1Qcc标准按照OPC UA标准进行统一规范。

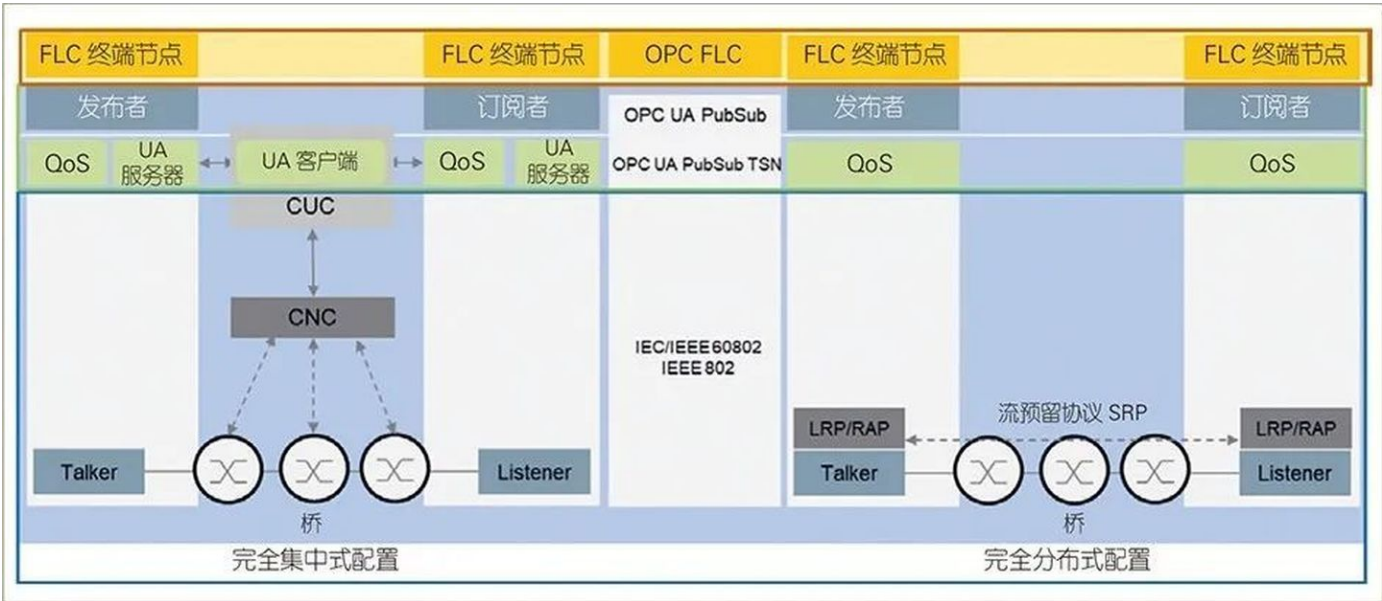


图 9 OPC UA over TSN 的配置方法与架构

展望

知乎

目前在国际工业通信中，标准、各家公司的硬件研发、网络的规范与标准、信息建模、配置工具等都在齐头并进地推进。而我国本土企业的工业互联网平台往往缺乏统一的规划，因此我们需要采取参与、影响和主导三步走的规划来参与到工业通信技术的规范与标准制定中：首先参与学习，然后根据本土情况进行局部的修订以适应自身发展，最后根据自身的市场影响来主导技术、标准与规范的发展。

对于如今轰轰烈烈的工业互联网平台、智能制造工程，必须切实地制定统一的规范与标准，否则将会增加新的信息孤岛，而非解决问题。只有采用统一的规范与标准，才能真正发挥数据的价值，实现生产协同与全局优化。

脚注

1 OPC UA，即OPC统一架构(OPC Unified Architecture)，相对于传统的OPC架构(OLE for Process Control)，OPC标准以微软公司的OLE(Object Linking and Embedding)技术为基础；TSN，即时间敏感型网络(Time Sensitive Network)，用于解决智能制造、工业互联网中的信息技术(IT)和运营技术(OT)融合问题。

2 OSI，即开放式系统互联通信参考模型(OpenSystem Interconnection Reference Model)。

3 OT 网络是用于连接生产现场设备与系统，实现自动控制的工业通讯网络。

特别声明：中国计算机学会(CCF)拥有《中国计算机学会通讯》(CCCF)所刊登内容的所有版权，未经CCF允许，不得转载本刊文字及照片，否则被视为侵权。对于侵权行为，CCF将追究其法律责任

作者简介



知乎

贝加莱工业自动化（中国）有限公司技术传播经理。参与编写的书籍包括《工业实时以太网 POWERLINK详解》《面向中国制造业2025 的智能化转型》《美国制造创新研究院解读》。

huazhen.song@br-automation.com



conf.ccf.org.cn/banjian... (二维码自动识别)

CCF颁奖典礼限量门票开售

编辑于 2020-10-18

CCF (中国计算机学会)

推荐阅读

知乎



ACM/IEEE计算课程体系规范



图神经网络的预训练



细分万物

还没有评论

因作者设置，评论已关闭