

白皮书

EtherCAT 与 TSN——工业以太网系统架构的最佳实践

作者：

EtherCAT 技术协会 Karl Weber 博士

摘要：

EtherCAT 是现场总线领域的主流技术，以太网是使用交换机技术的有线办公应用的标准。TSN 则是在异构环境中实现实时通信的推动者。在某些情况下，这两种技术的结合是一种必然。更好理解 TSN 和“高速通道”（stream）通信概念是在工厂进行成功实施的先决条件。在 EtherCAT 系统中可以高效实现对 TSN 的实施，即在主站侧进行升级，无需更改从站，并可在连接 EtherCAT 网段的网桥上适度扩展。

目 录

I. 目标.....	2
II. EtherCAT 与 TSN ——工业以太网系统架构的最佳实践.....	3
1.TSN 的演变.....	3
2.可能的应用场景.....	5
3.了解 TSN.....	6
3.1 TSN 任务工作组.....	6
3.2 在 IEEE 802.1 网络中的 EtherCAT 高速通道.....	9
4. EtherCAT 和 TSN：完美的结合.....	12

图 目 录

图 1. 工业以太网通信的演变.....	3
图 2. EtherCAT 由于共享帧和最优化转发带来的优越性能.....	4
图 3. 通过阻塞其他通信来改善计划通信的延迟.....	7
图 4. 在 TSN 网络中难以找到最佳规划.....	7
图 5. 高速通道是在以太网通道内预留的通信通道.....	8
图 6. TSN 能独立出网络中的 EtherCAT 通信.....	10
图 7. 高速通道适配和 TSN 提供了一个虚拟以太网通道.....	11
图 8. TSN 和 EtherCAT 协议部分相互独立——无需额外的协议.....	11



I. 目标

自 IEEE 802.1 工作组中的相关任务小组建立以来，TSN 就成为人们所熟知的“时间敏感网络”的缩写。本白皮书阐述了如何在工业自动化环境中使用这一新兴技术。TSN 技术可以被广泛用于各种不同的应用中，包括音频/视频 (AV)、汽车、移动网络基站与能源生产等领域。TSN 模型将“高速数据通道” (stream) 引入 IEEE 802.1 语境。此模型提供一系列的用于提升高速通道实时性的特征，但并未定义如何在特定的环境中使用它。“工具箱”一词用于解释在工业自动化语境中描述 TSN 应用所需要的模型。

EtherCAT 利用 TSN 的方式并不是将两种技术混合，而是定义了为使用 TSN 高速通道所做的适应性改变——“EtherCAT TSN 通信行规”。该行规没有选择特定的 TSN 元素，为主站和从站网段适配器上转发的 TSN 高速通道提供所有选项。不需要对从站网段做任何改变。因此，行规要求主站系统提供商来集成高速通道功能，系统集成商选择适用于 TSN-EtherCAT 网段适配的组件即可。这一规划将帮助自动化组件的制造商、机器制造商和生产技术专家采取合理的步骤使用 TSN。



II. EtherCAT 与 TSN —— 工业以太网系统架构的最佳实践

1、TSN 的演变

TSN 是一组连接终端节点的桥接标准。“桥接”一词用于标准的规范中，但更为大众的说法是“交换”。TSN 独立于底层通信技术，尽管以太网是其首选使用的物理基础。在典型的办公使用场景下，交换机的使用对响应时间无明显影响，这是由于在网络客户端与服务器之间并没有级联过多的交换机，而且人类的互动对于网络传输的响应要求在秒级别即可。对于交换机网络中低延迟通信的理解要求我们更深入地了解标准办公通信。

以太网拥有超过 40 年的历史。它起始于美国 DEC、英特尔和施乐公司对于建立计算机间灵活的连接方式所作出的共同努力。当时主流的使用场景是工作站到服务器之间的连接。在一开始对于灵活性的要求就十分关键，所以通信机制被设定为使用“Best-effort”概念，这一概念就是源于客户端-服务器通信。Best-effort 意味着客户端可以平等的访问数据，任何客户端都不会被给予优先的数据访问权。如果太多客户端同时在单一通路上尝试访问数据，则会导致通信以及服务器响应延时。

这一概念并未随着因特网的发展而改变，只不过工作站转变为个人电脑，最终演变为智能手机，同样连接到网络服务器与云端。以太网是一种本地局域网（LAN）概念，属于因特网的子网。但是子网变得越来越大，原始的以太网概念却没有随着节点数的增多而变化。由 IEEE 802.1 于 25 年前提出的桥接技术可显著改善这一状况。它使得同时使用不同速度的网络成为可能，并且允许方便地与其他网络技术（如无线技术）进行集成。桥接技术将通信网络分为终端节点和通信基础架构。Best-effort 范式曾是所有这些技术发展的基准。

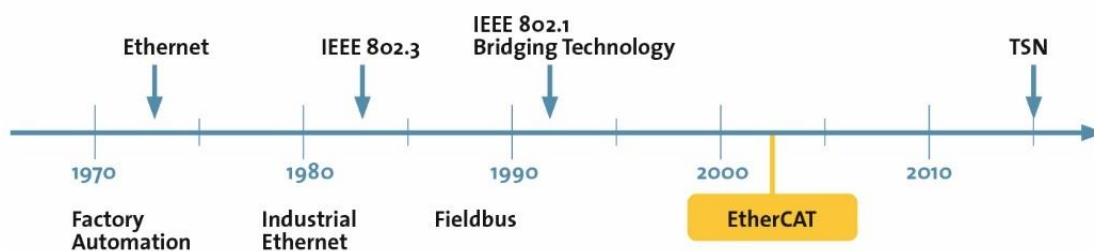


图 1. 工业以太网通信的演变

工业通信协议——一般指各种现场总线，形成于 80 年代晚期，并在将近五年后取得重大突破。工业控制器不再需要集成的、厂家特制的模块与用于连接传感器和执行器的扩展线缆，取而代之的是结构化的来自不同技术提供者的 I/O 模块的网络。自动化领域的技术基准一直是服务质量的保障。这意味着通信带宽的有效利用、低丢帧率和有限的通信延时。开始



时人们大多选用特定的通信技术，而基于 PC 的系统提供的更高的带宽与可用性使得以太网成为了可行的现场总线。但是 **Best-effort** 原则使得以太网很难在自动化领域像在因特网领域那样得到应用，即便一些组织为在现场总线环境中使用未经调整的基础构件而创立了一些规则，如：限制非实时通信量或者减少站点数量。基于以太网的现场总线的方法是一种使用双端口设备的集成化网络，可用于替代通用的现场总线网络中的线性拓扑。在具备典型的 8 字节长度过程数据的现场设备中，使用独立帧的方法将导致效率低下，浪费高达 90% 的以太网带宽，就如同每个包裹都是用单独的一辆卡车转运。这一问题的解决是 **EtherCAT** 方式如此成功的原因。**EtherCAT** 提供了经过完全修改的桥接概念，可以解决如前所述的因特网基础构建带来的问题。共享帧转发和飞速处理是其改善以太网性能的核心机制，它充分利用了以太网资源，显著提升了应用的性能。

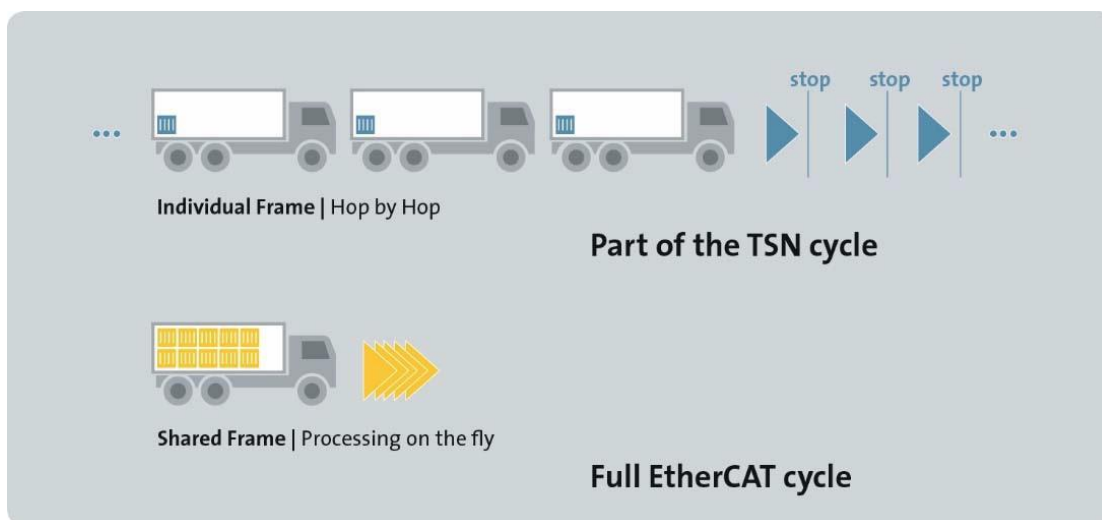


图 2. **EtherCAT** 由于共享帧和最优化转发带来的优越性能

作为 IEEE 802 中发生的范式转移，TSN 瞄准了各种行业中的实时应用。在 IEEE 802.1 环境中，TSN 尽可能快地转发数据帧，并且不因拥堵而导致丢帧。这意味着 **Best-effort** 机制需要做很多修正，可能需要一段时间去解决这个问题。但是这并未解决以太网的基本问题，如独立帧方法带来的效率低下、帧转发进程的复杂性和性能等问题。

TSN 不是一个真正的现场总线的替代方案，因其仅仅提供了其他可选方案的 10% 的性能，并且其要求使用者等待技术提供者进行必要的系统微调。由此 TSN 完全取代 CAN 或者 PROFIBUS 的实际机会为零。在给定通信速率的前提下，**EtherCAT** 提供了更加优越的性能。TSN 同样不能取代 **EtherCAT**。

但是，TSN 在有异构网络需求和存在大量因特网传输的应用场景中具有优势。多台相

机（摄像机）和/或大量不同的实时标准的组合应用可能是使用 TSN 作为骨干网络的原因。只有一个以太网接口的嵌入式 PC 通过访问 TSN 网络实现虚拟端口的倍增。作为已有众多可选设备的现场总线，EtherCAT 与 TSN 并存将成为未来十年自动化通信基础架构的另一种选择。

2、可能的应用场景

TSN 不局限于工业自动化，相反，还有很多其他可能的应用实例。

IEEE 802.1 任务组曾被称为 AVB（音频视频桥接），最初的使用案例是在 A/V 应用中。早期的标准曾有助于加强专业的 A/V 设施，例如体育赛事的现场视频传输。该技术也可用于建立大型音频设施。在这种环境下，TSN 的优势之一是能够在不关闭整个系统的情况下快速更改数据流。由于布线减少而得以改善的灵活性是从模拟设备切换到以太网和无线的主要原因。未来将会有更多要求苛刻的应用，例如视角可变的 3D 图像，或者高精度距离测量的系统。这些功能都需要非常精确的时间同步。系统的高可用性对于优质实时高速通道来说是一个非常重要的因素，它需要合理的丢帧率以及对系统故障做出快速反应的可能性。在增强现实（AR）领域的一些要求也可能是在更广泛的应用领域中使用这种技术的原因。未来，TSN 都可以做到。

基于以太网的技术的第二个应用实例是补充汽车基础设施。CAN 已经成为汽车行业中不少子系统的网络技术，但摄像机和其他复杂的娱乐信息系统带动了对更高带宽的需求；车载电子子系统的诊断和服务也是集成以太网骨干网的一个原因；将这两种应用放在同一个网络上需要独立的数据通信模式，先进动力系统对通信的需求可以成为另一原因。

目前，它是由一个单独的网络控制，为接入新的信号，需要额外的电缆和计算能力。连接并同步汽车中的所有网络可以导致额外的控制选项，并且可以监控机械和电气组件，以实现高级状态监控功能和更精确的服务指示。由此产生的“电缆树”是现代汽车中昂贵的部件。通过与高效的子系统相结合，TSN 主干网可以实现时间关键数据交换，从而显著改善汽车设计。虽然 TSN 是汽车骨干和摄像机系统的首选，对 CAN 子系统和动力系统的集成也可能是引人关注的以太网应用领域。尽管如此，两种通信技术都具有类似于工业自动化中的协议的特性，尤其在使用增强型电驱子系统的场合。以太网在汽车系统中的广泛应用将推动该行业的发展，其中相当多以太网的元素可能对自动化行业而言也是有意义的。

另一个受到巨大影响的大众消费行业为移动网络，并会在不久的将来得到 TSN 的推动，以太网将为回程通信基础设施提供支持。这是无线电设备（RE）单元和 RE 控制基础设施



之间的通信层。同步是非常重要的任务，丢帧率则是另一个关键因素。第五代移动网络（5G）将增加不少额外的性能要求，市场上的技术提供商已经启动项目以采用 TSN 作为回程网络的控制基础设施。

A/V 技术也正在被纳入自动化行业，上述领域的进一步发展可以加速这些系统的应用。A/V 节点的字节数通常在 500-1000 字节的范围内，因此可以将其归类于低于工业要求的特定数据通信量级别。机器人市场也将迅速增长，机器人和其他机器的组合需要时间敏感的通信。目前，这是通过使用现场总线通信来解决的，然而，其他机器和/或它们的 PLC 也需要充当这样的网络中的互联设备。机器人和机器人的特定组合中，不支持相同通信协议的可能性很高。TSN 将使通信基础设施变得更简单，因为机器人和机器无需多种接口来满足各种通信需求。这个级别的通用基础设施可以加速机器人和智能机器的使用，所有这些都使用标准通信接口来实现。

TSN 与现场总线技术结合的更多可能性将在 EtherCAT 环境下的 TSN 部分进行讨论。

3、了解 TSN

3.1 TSN 任务工作组

在 IEEE 802.1 工作组中有一个 TSN 任务工作组，其任务是强化桥接网络的实时性能。TSN 中终端节点之间的通信是依靠“高速通道”来完成。IEEE 802.1 标准中使用术语“talker”表示高速通道的发起者，术语“listener”表示高速通道接收者。高速通道使用单向的数据传输，数据可以从一个 talker 单向传输到一个或多个 listener。一个实时的高速通道的 talker 不会发送很多帧间有多个字节的帧。为了在 IEEE 802.1 网络中使用高速通道，需要一个标识。同时，还可以使用多个标识体系。但是在少数的 TSN 标准中使用目的 MAC 地址和 VLAN 来标识高速通道。

到目前为止，TSN 工作组建立了如下的标准化项目：

- **提高同步性能（IEEE 802.1ASbt）**

基于 IEEE 1588 标准，IEEE 802.1AS 的早期版本已经为分布式时钟的计时定义了同步协议。这样有利于更好地集成到标准以太网环境中。然而却丢失了与其他的 1588 以太网行规的兼容性。新的版本将包含公认的 one-step 透明时钟。现阶段急需改善的是对错误情况的响应，例如：线路或主站通信故障。新版本也应该能够处理设备中不同时间域的问题。



● **数据帧抢占优先 (IEEE 802.1Qbu)**

时间关键信息的确定性传输的一个主要问题是同一网段上还有传统的通信数据，因为在网段中一个单独数据帧长度甚至可以超过 1500 字节，这可能导致每个节点的周期延时高达 125 微秒。这个问题可以通过数据帧中断机制来处理 (IEEE 工作组在以太网项目 P802.3br 中定义)。最终，这种机制不仅需要新的网络组件，还需要终端系统中新的以太网集成电路 (IC)。

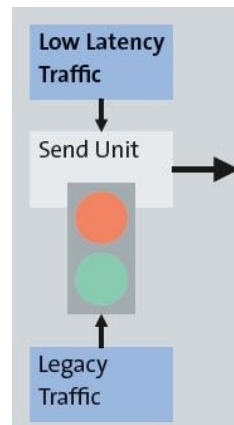


图 3. 通过阻塞其他通信来改善计划通信的延迟

● **提升规划的通信 (IEEE 802.1Qbv)**

在 TSN 中对发送操作的时间控制至关重要。就像实际高速公路一样，在信息高速路上也可能会发生交通堵塞，即使是在有高优先级、实时数据和抢占优先权时，传输时间可能仍有一些偏差。由于时间敏感高速通道是周期性传输，所以在周期性通信之前，不受干扰的通信可以通过阻塞对时间要求较低的数据来实现。这个进程可以类比为交通灯控制。

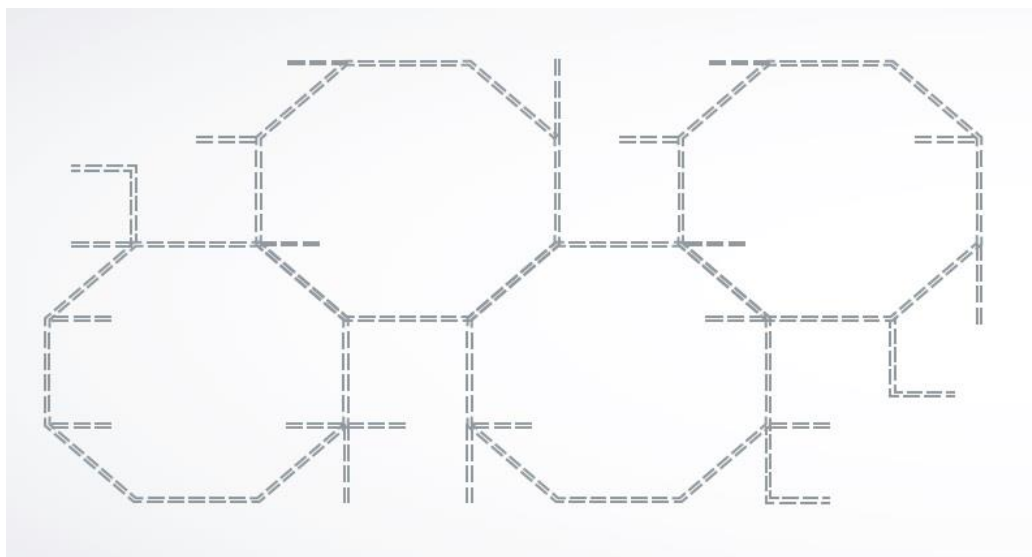


图 4. 在 TSN 网络中难以找到最佳规划

● **路径控制和预留 (IEEE 802.1Qca)**

为了尽快从 A 到 B，你需要地图并进行路由规划。如同在日常生活中一样，网络需要记录部件的排列方式，并决定如何以最有效的方式选择通信路径。该协议可以基于路由器使用的“中间系统到中间系统”(IS-IS) 的概念。这个概念涉及拓扑信息的收集和分配。经过多次迭代，所有节点都拥有来自整个网络的所有拓扑信息。如果有多个到达同一目的地的路线，该进程可找到路径最短的一个。它还可以用来识别冗余路由。这个项目是在 TSN 之外发起的。



- **无缝冗余 (IEEE 802.1CB)**

虽然国际标准已经提供了无缝冗余特定协议，比如高可用性、无缝冗余 (HSR) 或并行冗余协议 (PRP)，他们要求站间全部的数据交换专为冗余设计。这可能会造成问题，因为如果存在错误，则无法维护信息的顺序。此外，故障排除相当复杂。IEEE 802.1 明确决定仅将无缝冗余应用于单个关键数据高速通道。这意味着协议开销的减少，并更容易识别临界点。

- **高速通道带宽预留 (IEEE 802.1Qcc)**

过载情况是以太网的一个主要问题，如，由两个通道接收的数据通过单一的输出转发。采用大存储是次优的解决办法，因为延迟会随着存储字节数的增加而增加。这种延迟 (Best - effort) 不能通过提高自动化技术的响应时间来控制。如果实时数据高速通道具有高优先级，其他通信将有永远被延迟的风险。为此，需要确定并保留所需的高速通道带宽。预留协议允许实时负载占用高达 80% 的带宽。这是对现有保留协议的扩展。尽管仅扩展现有预留协议不可能完全满足对 TSN 的所有扩展要求。这意味着将来仍有必要寻找更多的机制来实施实时通道。

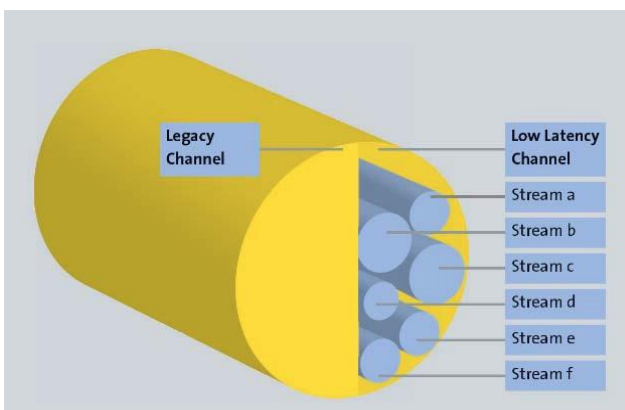


图 5. 高速通道是在以太网通道内预留的通信通道

尽管仅扩展现有预留协议不可能完全满足对 TSN 的所有扩展要求。这意味着将来仍有必要寻找更多的机制来实施实时通道。

- **循环调度 (IEEE802.1Qch)**

该调度过程涉及在每个循环周期中将时间关键信息仅转发给相邻的设备。如果级联深度较浅或者在单个路径中循环调度的节点数目较少，则更加有效。这个方法可以集成无线设备或其他难以确定延迟的组件，而且比时间控制更为稳定。它可以轻松计算循环时间，并可有助于限制复杂系统中的进度计算。

- **每个高速通道的过滤和管制 (IEEE802.1Qci)**

专家们讨论的另外一个方面是如何减少错误响应节点带来的影响。为此，节点的进入侧 (入口) 必须监视每个高速通道上的链路通信量。根据高速通道的数量，这可能是一项艰巨的任务。如果消耗的带宽超过允许范围，将采取特定措施。可能的方式之一是禁用产生错误的高速通道。



- **IEEE 802.1Q YANG 数据模型 (IEEE 802.1Qcp)**

YANG 是代替管理信息库的新的模型化语言，它将重塑管理信息库。出发点是由该标准提供的一个通用桥接模型。IEEE 802.1Qcc 标准建议了一个依赖于 YANG 的配置模型，但这一标准仅提供所需要全部数据的少数几个模型。

- **异步数据帧整形 (IEEE 802.1Qcr)**

整形器优化了一定通信量等级下使用多个高速通道的通信延迟。这方面的标准工作刚刚起步，要求一个 IEEE 802.1Qci 内的数据库。

- **链接本地注册协议 (IEEE 802.1CS)**

该标准实施了组件配置的基本协议。它被优化以携带比 MRP 更大的数据量。关于该标准的工作已经启动。

- **自动附加到 PBB (IEEE 802.1Qcj)**

Provider bridging 配置采用链路层发现协议（即 LLDP，Link Layer Discovery Protocol，不用于工业自动化）

- **Profile for fronthaul (IEEE 802.1CM)**

电信 TSN 行规（不用于工业自动化）

3.2 在 IEEE 802.1 网络中的 EtherCAT 高速通道

TSN 可以用于异构网络，但是它并不能替代 EtherCAT。因为 EtherCAT 在其主站端使用了标准的组件，所以它可以被连接到 TSN 架构中。但是，与 TSN 的连接将使 EtherCAT 主站和从站之间增加多余的通信延迟。然而，如果主站有多个通信任务，它可提供更高的数据传输率。因此，虽然在一个 TSN 网络中的几个路由跃点消耗了大概 10 μ s，但是可以在一个网络中连接 4 个 EtherCAT 子系统和 1 个视频系统，可与一个子系统的控制站之间进行通信，并将所有连接接通到互联网。单个千兆以太网接口就足以满足多个不同的通信要求。因此，标准的架构和嵌入式系统可以在 TSN 的支持下作为自动化应用中的多用途设施。

I/O 层的结构和性能与典型的交换式环境截然不同。基于效率的原因，一个 EtherCAT 网段需要紧密连接在一起。再次强调，10 个 EtherCAT 从站的传输延迟大约为 10 μ s（仅基于现在使用的 100M 以太网）。因此会形成这样的网络结构：主站在一端，带有多个从站的网段在另一端，而 TSN 网络居中。在从站网段和主站之间增加一个网络结构并不会影响这样一组的隔离模式，它将物理上分离的网络转变为逻辑上分离的网络。这将使得主站设备具有更高的灵活性，同时它将保持确定的延迟和可预测的丢帧率。



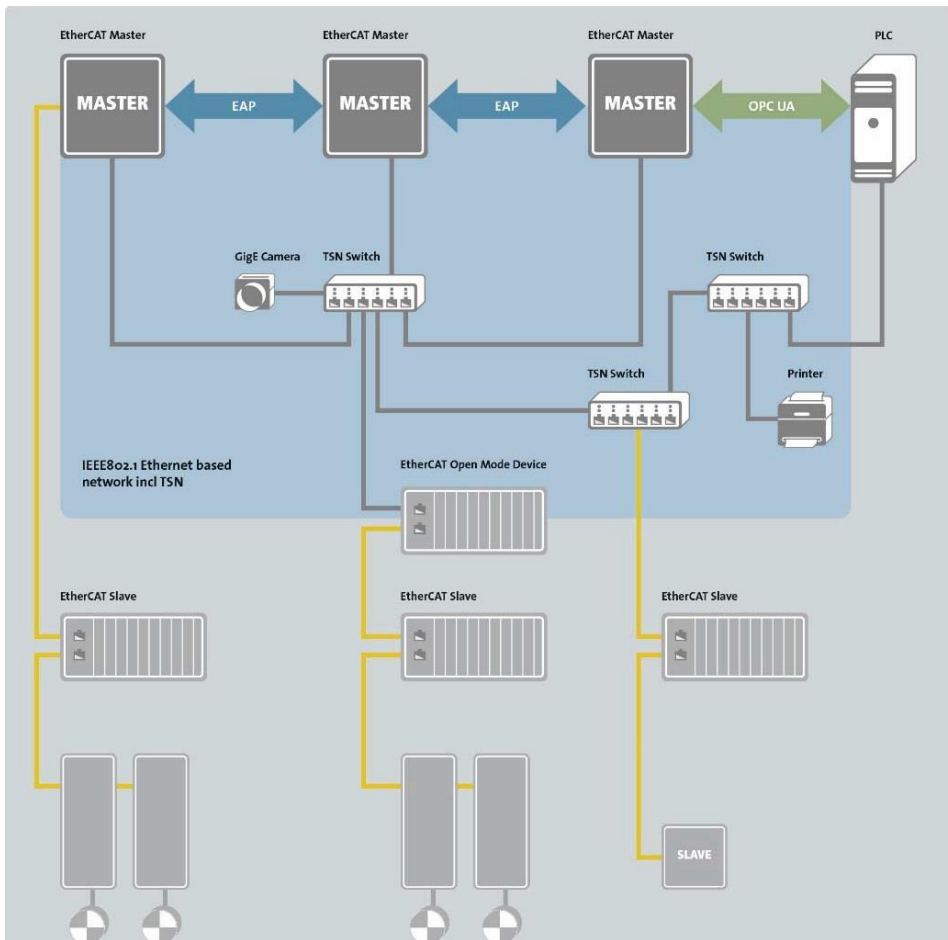


图 6. TSN 能独立出网络中的 EtherCAT 通信

在没有其他的明确指定时，EtherCAT 只使用 TSN 中 talker 和 listener 之间一对一的关系。TSN 高速通道将在一个指定的时间间隔传输特定数量的字节。定义的数据量可能比传输的字节数大，但是不能小于预留的带宽资源。

在主站和一个 EtherCAT 网段间至少要建立两个高速通道。一个从主站到从站网段及相反的方向；而另一个高速通道可以用于对一组 EtherCAT 从站进行控制（客户端/服务器类通信），该通信可以有不同的传输特性并采用更低的优先级。更多的通信需求可要求另一对高速通道，如用于状态监控的数据采集。

TSN 行规描述了如何在桥接网络中按照 IEEE 802.1 规范传输 EtherCAT 数据。对于桥接的配置和其他桥接相关的服务功能并没有在 EtherCAT 协议相关的行规中描述，但将在 TSN 相关的文档中定义。对主站中的虚拟 EtherCAT 通道的基本要求包括有一个相对应 EtherCAT 网段的专用标识符、发送间隔，被发送数据量的限值，以及可选的发送时间间隔。这些是主站上发送高速通道时需要定义的参数。主站需要高速通道数据流自从站网段返回的



接收时间。

从站网段的最大的延迟必须完成规划。桥接相关的参数是另外的时间限定条件，用于计算 EtherCAT 数据帧返回时间。结构视图如下：EtherCAT 网段的标识符将在 IEEE 802.1 中唯一定义。地址重复将因为单个请求出现多个响应高速通道而被检测到。

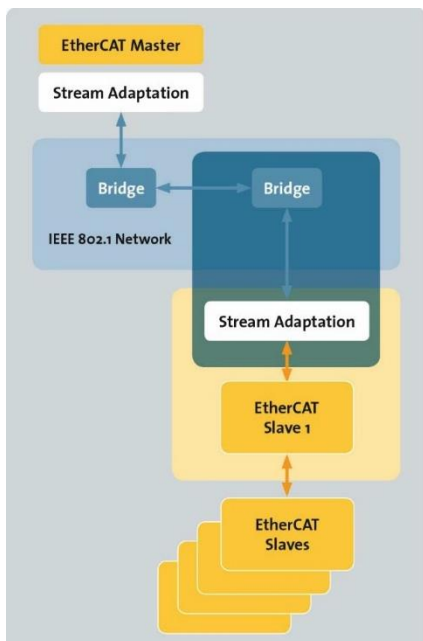


图 7. 高速通道适配和 TSN 提供了一个虚拟以太网通道

识别符是一个 12 位的值，它可以由位于高速通道中的或紧邻高速通道的 EtherCAT 设备设置。另一种选择是在与 EtherCAT 网段相连接的桥接接口处给 EtherCAT 网段配置 VLAN 识别符 (VID)。VID 端口是管理型交换机所熟知的参数，因此使用 VID 的方式将更有利于在 IEEE 802.1 环境中处理 EtherCAT 网段。

在主站端及 EtherCAT 网段起始端对高速通道的适配通过采用标识符来设置高速通道需要的从站地址。根据 TSN 标准，高速通道需要唯一寻址。该寻址通过标识符和为 EtherCAT 预留的地址区间推演而来。

映射原理是明确的：EtherCAT 部分并不会被 TSN 所改变，而 TSN 的部分也不会用于 EtherCAT 数据处理。

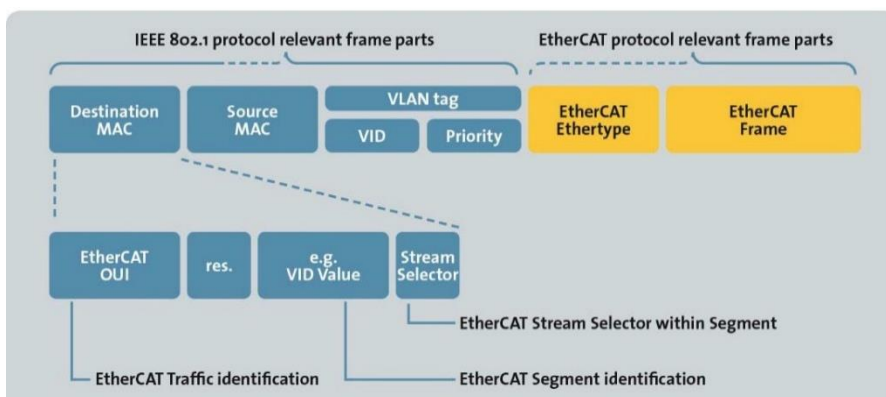


图 8. TSN 和 EtherCAT 协议部分相互独立——无需额外的协议

一个 EtherCAT 从站网段对应一个 VID。在这种特殊的情况下，VID 与 VLAN tag 中的 Priority 内容结合即可操作。这是只有两个终端节点的特殊形式的 VLAN。TSN 高速通道的数



据处理通过高速通道寻址到帧的目的地址实现。这些地址决定带宽的分配及发送。因此，ID 需要映射到单独的高速通道。

EtherCAT Stream Address (Header)				Identifier	
0x	01	05	06	yy	yz

X=2: Locally Administered Address
Used for Unicast Communication

X=3 Group Address
Used for TSN Streams

yyy: Set by Device ID/ VID
z: Stream Selector

在这样的网络中也可以进行同步的操作，通过从 IEEE 802.1 的网络中向 EtherCAT 从站网段按照固定的时间间隔发送帧来实现。这样要求有限的延时变化。向 EtherCAT 网段发送的时间由最差的延迟确定。TSN 允许超过一个 EtherCAT 从站网段的同步操作并提供全局时间基准。同步操作的质量取决于 TSN (IEEE 802.1AS) 内部保持精确计时和以很低的抖动执行定时动作的同步质量。EtherCAT 的精确度是在 100ns 级别。在 EtherCAT 主站和第一个从站之间推荐采用可以提供 100ns 级精确时间的桥接。

4. EtherCAT 和 TSN: 完美的结合

不同的自动化应用会在形式、规模和性能要求方面各有不同。

比如，车身制造工厂是一个非常复杂的应用：约有 1000 台机器人和几千个控制单元与上万台传感器和执行器相连。

一台机器人由几台伺服驱动器和 I/O 组成。很多传感器仅提供一个数字量或者模拟量信号数据传输给控制系统。成千的 I/O 模块组提供过程数据的采集和分布。在这样的系统顶端，一个 IEEE 802.1 的网络可以作为自动化架构的主干。

如果将该类应用中的所有 I/O 模块组，伺服驱动器和控制单元直接连接并配置到一个经过 TSN 优化的网络，那将是一场噩梦，因为将有无穷尽的问题，而且那意味着所有机器组件将在机器制造商以外进行配置。虽然这样的应用非常开放，但是有可能导致机器被错误配置或者达不到预期的服务质量水平。

TSN 的限制

TSN 并不提供应用层：TSN 不是一种现场总线。

TSN 不会挑战现场层的 EtherCAT 设备协议。

然而

TSN 将影响现有的和未来的解决方案，如 EtherCAT Automation Protocol (EAP)，EtherCAT 拓扑拓展，OPC pub/sub 模式。



因此，需要一种理念去保证一种适合的从上至下以及从下至上的架构。

本白皮书的目的并不在于去覆盖方方面面，只是探讨如何将机器层集成到 TSN 网络中。一种方式就是在 EtherCAT 主站端用一个网关解耦 EtherCAT 和 TSN。Ethernet TCP/IP 通信可以通过主站路由。网络配置的灵活性可以通过连接 EtherCAT 主站接口和 EtherCAT 网段到 TSN 来实现。将一组从站（I/O 模块组，伺服驱动器等）组合到 EtherCAT 网段的方式将显著缩减 TSN 需要提供的高速通道的数量，并在按数量级提升 EtherCAT/TSN 系统的效率时有力保护该组从站。这样集成的原因可能在于在主站端缺少 Ethernet 接口（千兆以太网口可以实现几个虚拟接口），或将 EtherCAT 和视频/音频集成在同一个网络架构中。此外，在共享已有的通信线缆的同时，升级现有的 EtherCAT 系统是使用 TSN 的原因之一。TSN 的应用将提升自动化系统的灵活性，并有助于为自动化单元层提升实时性能，同时保留对于各种自动化任务的整体控制。

总之，EtherCAT 可以支持与 TSN 的完美集成，而无需改变 EtherCAT 技术的基础本身。

