

以时间敏感网络 (TSN) 应对动态目标

行业合作：风险缓解

1. 引言

关键任务系统越来越依赖模块或设备之间的以太网连接。传统以太网（IEEE 802.3 和 802.1Q）在数据传输方面没有时间的概念，因此无法确保所有实时数据能够按时到达目的地——尤其是在数据负载增加时。这意味着无法实现确定性系统行为。

时间敏感网络（TSN）解决了这一问题，它可以保证网络延迟和抖动最小化，并提供有时间上限端到端延迟和消息传输时间保障。TSN 还允许在同一网络上传输时间敏感和非时间敏感的数据。TSN 主要位于开放系统互联（OSI）模型的第 2 层（数据链路层），IEEE 802.1 和 IEEE 802.1Q-2022（可选）的 TSN 功能使得通用以太网具备确定性网络能力。然而，相关规范的定义仍在进行中，部分已在 IEEE 802.1Q-2022 主规范中定义并纳入，而 cut-through（P802.1DU）等功能仍在开发中——所有这些工作旨在解决不同的问题并提供特定功能。

因此，这给物联网（IoT）边缘设备供应商带来了一个问题：哪些规范与他们的产品相关。此外，这还可能导致对其产品是否具有未来适应性的信心不足。

本文将概述 TSN 的一些正在进行的工作。更重要的是，我们将讨论如何通过“回归基础”的方法应对这一“移动目标”。我们建议用户采用基于 IEEE 802.1 已发布标准作为 TSN 基准方案，用来创建当今的任务关键系统，同时为未来做好准备。

2. TSN 的优势

在本节中，我们将回顾 TSN 在各种边缘和工业应用中能够提供的众多优势。

注意：TSN 和其他调度解决方案也会带来一定的复杂性。然而，这些复杂性并非本文的讨论主题。

优势	TSN 的作用
降低复杂性	模块化系统设计（例如车辆或飞机内）使开发、测试、部署和升级的复杂性降低，从而更具成本效益。以太网通常用于模块间、模块内和组件间的通信，因此系统通常受到非确定性实时数据传输的限制。TSN 解决了这一问题——使系统工程师能够通过标准化的以太网实现准确且可重复的高可靠实时通信，而不是依赖于定制的通信总线/解决方案。
提高服务质量 (QoS)	TSN 支持网络流量的优先级排序和调度机制，从而提升关键应用的服务质量。这对于需要低延迟和高可靠性的实时应用至关重要。
可扩展性	随着边缘设备网络的增长（例如系统中更多的分布式传感器或附加模块），TSN 可确保最高优先级的时间敏感数据持续传输。
数据访问	数据中心应用和存储在智能边缘系统中扮演着至关重要的角色。当网络由不同的总线组成时，在边缘和资源管理功能之间移动数据可能会很困难。TSN 在边缘云环境中实现低延迟实时数据访问方面发挥了重要作用，从而支持需要快速可靠通信的广泛应用。
改善监控/故障检测	高效的优先级机制，分布式的事件通知和纠正措施，将有效的减少系统停机时间。
更好的网络弹性	通过使用以太网，已在 IT 网络中部署的网络安全机制可以针对 TSN 系统进行调整和应用，从而显著降低漏洞风险。
面向未来	以太网将长期存在，持续的 TSN 开发演进保证了供应商的开发工作不会被淘汰。
IT 与 OT 网络的融合	TSN 促进了信息技术 (IT) 和运营技术 (OT) 网络的融合，为企业和工业系统中的尽力而为流量和实时流量提供统一的通信基础设施。
互操作性和供应商中立性	TSN 标准旨在开放和互操作，使不同供应商的设备能够无缝协作，构建开放且强大的生态系统。

表 1：时间敏感网络的优势

3. IEEE 802.1 TSN 回顾

时间敏感网络（TSN）已成为一种技术的总称，旨在为多种应用提供确定性的网络连接并保证最大延迟。IEEE 802.1 工作组的 TSN 任务组自 2012 年以来一直致力于定义相关的 IEEE 标准，并且仍然非常活跃。该任务组将 TSN 协议套件划分为四类子协议。

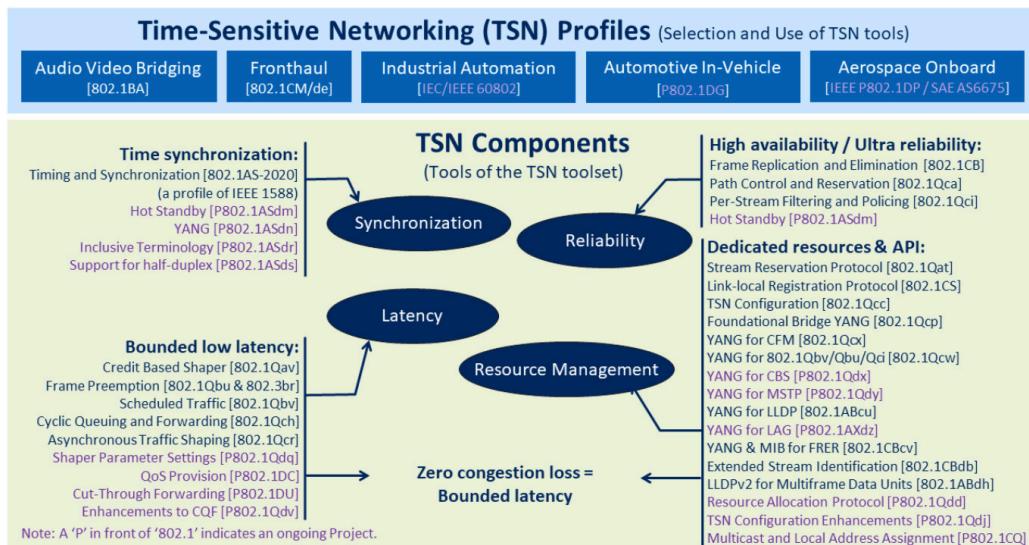


图 1：时间敏感网络的子协议和配置文件 - 2024 年 5 月 (来源: IEEE)

3.1 时钟同步

显然，时钟同步是任何 TSN 解决方案中的基础特性，也是时间感知流量调度（见下文）的前提条件，尽管可以定义一些无需时钟同步的基本 TSN 使用场景。所需的同步精度可以通过精确时间协议（PTP，IEEE 1588-2019¹）实现。行业标准通常引用 IEEE 802.1AS-2020²，该标准定义了在 TSN 中使用 1588-2019 的配置文件，并相较于之前的版本增加了多项时间冗余增强，使其成为主要选择。它也在所有行业配置文件中被指定（稍后讨论）。

使用 PTP 进行 TSN 时钟同步的关键点包括：

- 主时钟：**在 TSN 网络中，一个设备被指定为主时钟。该设备通常具有高度精确的时钟源，并作为时间同步的参考。
- 最佳时间发送器时钟算法 (BTCA)：**在 PTP 网络中，最佳时间发送器时钟算法用于选择最佳时钟源作为主时钟。这确保整个网络与一个共同的时间参考保持同步。

¹standards.ieee.org/ieee/1588/6825/

²standards.ieee.org/ieee/802.1AS/7121/

- **PTP 消息**: 网络中的设备交换 PTP 消息以确定它们的时钟与主时钟之间的偏移量。
- **时钟调整**: 根据从 PTP 消息中收集的信息，每个设备调整其时钟以与主时钟提供的网络参考时间保持一致。此调整以最小化时间偏移并补偿网络延迟的方式完成。

注意: 时钟同步是一个复杂的话题，基于特定的应用和用例，不同平台的实现细节可能会有所不同。

3.2 延迟 - 数据调度与流量整形

流量整形在 TSN 应用中保证了低延迟界限。需要考虑多项规范，其中最重要的是 IEEE 802.1Qbv³（增强调度流量）。该规范定义了时间感知整形器（TAS），它支持设备之间的等时通信。

另一个重要标准是 IEEE 802.1Qav⁴（用于时间敏感数据流的转发和排队增强，在 IEEE 802.1Q-2022 中简称 FQTSS）。该规范定义了基于信用的整形器（CBS），它限制某些流量的带宽，适用于不支持时间同步的简单异步终端设备。

帧抢占由 IEEE 802.1Qbu⁵ 和 IEEE 802.3br（交错特快流量，在主要规范中简称 IET）规定，是 TSN 技术组合中的另一个重要特性。由于 TSN 允许在同一网络中混合实时流量与尽力而为流量，实时流量可能因最大尺寸以太网帧的完整传输时间而受到延迟。802.1Qbu 通过允许特快流量中断低优先级流量的传输来缓解这种问题，从而减少最坏情况下的延迟。汽车和工业应用规范明确要求使用 802.1Qbu。

注意: 自 2018 年起，802.1Qbv、802.1Qav 和 802.1Qbu 已全部纳入桥接和桥接网络的基础以太网标准，其最新修订版本为 IEEE 802.1Q-2022⁶，这进一步证明了其成熟性。

³standards.ieee.org/ieee/802.1Qbv/6068/

⁴standards.ieee.org/ieee/802.1Qav/4401/

⁵standards.ieee.org/ieee/802.1Qbu/5464/

⁶standards.ieee.org/ieee/802.1Q/10323/

3.3 可靠性

在现代网络中，提供可靠通信的能力至关重要，因为对于某些应用而言，通信中断可能会带来灾难性的后果。因此，提供多种形式的冗余显得尤为重要。如前所述，802.1AS 提供时间同步冗余。此外，802.1CB⁷（用于可靠性的帧复制与消除，FRER）为端到端冗余通信提供了规范。通过在多条路径上复制通信，可以实现对硬件故障的抵抗能力。

另一个重要的标准是 802.1Qci⁸（按流过滤和监管），用于根据帧所属的数据流对帧进行计数、过滤、监管以及服务类别选择。监管和过滤功能包括检测并缓解网络中其他系统的干扰性传输，从而提高网络的稳健性。

注意：单独使用 802.1CB 并不足以确保高可靠性。系统开发人员还应考虑物理冗余和以太网结构的分离，以达到所需的可靠性水平。

3.4 资源管理

每个实时应用程序对网络性能都有特定要求，因此配置和管理网络资源至关重要。这同样也是通过遵守以下基于标准的机制实现的：

- IEEE 802.1Qat⁹ – 流量预留
- IEEE 802.1Qcc¹⁰ – 配置
- TSN 配置的 YANG 数据模型 – IEEE802.1ASdn（时间同步）、IEEE 802.1Qcw（计划流量）、IEEE 802.1Qdx（基于信用的整形器）和 IEEE 802.1CBcv（FRER）

4. 行业领域与 TSN 配置文件

作为 TSN 技术的提供者，公司必须选择哪些 TSN 规范适合在其产品中实施。这对仍在发展的技术来说可能是一项艰巨的任务。为了协助这项工作，不同行业领域的组织在 IEEE 802 内部发起了额外的项目，以定义适用于各自市场的特殊 TSN 配置文件。符合一个或多个配置文件有助于确保与特定市场中的供应商实现互操作性。

⁷ standards.ieee.org/ieee/802.1CB/5703/

⁸ standards.ieee.org/ieee/802.1Qci/6159/

⁹ standards.ieee.org/ieee/802.1Qat/4050/

¹⁰ standards.ieee.org/ieee/802.1Qcc/5784/



4.1 IEEE P802.1DP - 用于航空航天机载以太网通信的 TSN¹¹

此标准为航空航天机载桥接以太网网络定义了 IEEE 802.1 时间敏感网络（TSN）和 IEEE 802.1 安全标准的配置文件。这些配置文件选择了网桥、终端站和局域网的特性、选项、配置、默认值、协议和程序，以构建用于航空航天机载通信的确定性网络。

4.2 IEEE P802.1DG - 用于汽车车载以太网通信的 TSN¹²

此标准基于 IEEE 802.1 时间敏感网络（TSN）标准和 IEEE 802.1 安全标准，为汽车车载桥接 IEEE 802.3 以太网网络定义了安全、高度可靠和确定性延迟的配置文件。此标准为确定性 IEEE 802.3 以太网网络的设计者和实施者提供了配置文件，以支持车载应用的全范围，包括那些需要安全性、高可用性和可靠性、可维护性以及有限延迟的应用。

4.3 IEEE 60802 - 用于工业自动化的 TSN¹³

这是 IEC SC65C/WG18 和 IEEE 802 的联合项目，用于定义工业自动化的 TSN 配置文件。该联合工作将提供一个既是 IEC 标准又是 IEEE 标准的联合开发标准，即双标识标准。此标准为工业自动化定义了时间敏感网络配置文件。这些配置文件选择了网桥、终端站和局域网的特性、选项、配置、默认值、协议和程序，以构建工业自动化网络。

¹¹standards.ieee.org/ieee/802.1DP/10465/

¹²standards.ieee.org/ieee/802.1DG/7480/

¹³standards.ieee.org/ieee/60802/11358/

上述三个配置文件都利用时间感知整形器（属于数据调度和流量整形子协议类别）来实现设备之间的等时通信。它们还使用信用整形器的功能，适用于不支持时间同步的简单异步终端设备。

为多个市场提供技术解决方案的公司必须在其 TSN 解决方案中考虑多个配置文件。尽管这些配置文件仍在开发中，这些标准已经为实施者提供了有用的指导。符合这些配置文件可以保证实施者能够构建与其特定市场中其他供应商互操作的产品。

5. 回归基础的建议

正如我们所见，TSN 是一个非常活跃的领域，其标准已经定义、正在演变或计划中；通过互操作性测试活动验证其兼容性；并建立了试图解决特定用例和场景的行业配置文件。

对于设备供应商而言，这个“不断变化的目标”可能令人望而生畏，并可能阻碍其将 TSN 引入其技术和产品的决策。为减轻这些担忧，应考虑以下三个关键因素：

- 避免过度追求支持所有标准，重点支持具有良好设计的软件基础平台，以用于任务关键型和安全认证的环境。
- 理解并强调硬件依赖性，以满足标准的要求。
- 使用以下推荐的基础标准集。

5.1 实现面向未来的基础标准集

面向未来的 TSN 解决方案需要支持以下内容：

- 时钟同步：802.1AS-2020 — 确保系统所有组件的时间完全一致。
- 数据调度和流量整形：802.1Qav、802.1Qbv 和 802.1Qbu — 驱动确定性流量时序。

此外，对于需要更高可靠性的任务关键型系统，解决方案需要支持：

- 可靠性：802.1CB — 确保系统的弹性。

6. 结论

TSN 的成功取决于互操作性和性能。在本文中，签署的各组织联合确认，此处引用的标准是 TSN 的不可变组成部分，并构成了我们各自市场中产品和服务的基础。

截至目前，大约有 20 项标准已完成，另有 10 项标准处于草案状态¹⁴。

供应商和实施者将继续合作完善构成时间敏感网络 (TSN) 的一套标准。来自实际实施的结果可能会影响这些标准的改进，但本文讨论的标准构成了可信产品开发的基础。

TSN 产品组合至少应包括上述标准，以提供构建面向未来的 TSN 产品的坚实基础。

7. 集体观点

本立场文件反映了以下组织及其代表的联合立场。

• A P T I V •

Craig Turner，高级总监 - DevSecOps ASUX，安波福公司

Craig 在汽车、移动和游戏行业拥有超过 20 年的经验，专注于交付嵌入式产品和软件服务。他于 2020 年加入 Aptiv，担任 UX 全球工程总监，之后转任为 Aptiv 服务部门的高级总监。在加入 Aptiv 之前，Craig 曾在 Harman International、Symphony Teleca 和 Nokia 担任产品经理、工程和软件架构师的职务。



David Zage，时间架构负责人，网络与边缘集团 (NEX)，英特尔公司

David Zage 是英特尔网络与边缘集团 (NEX) 的时间架构负责人。他在英特尔工作超过 8 年，在分布式系统和安全领域拥有丰富的专业知识，专注于为边缘系统创建安全的、软件定义的时间敏感架构。在加入英特尔之前，David 是 Sandia 国家实验室的主要工作人员，负责网络安全项目。他拥有普渡大学计算机科学博士学位，并发表了二十多篇同行评议的文章。

¹⁴ [1.ieee802.org/tsn/](https://ieee802.org/tsn/)



Kirk Avery, 任务系统海事与任务系统首席架构师, 洛克希德·马丁公司

Kirk Avery 是一名高级研究员，同时担任洛克希德·马丁旋翼任务系统海事与任务系统的首席架构师，拥有超过 34 年的固定翼、旋翼和无人平台及解决方案的架构、开发和集成经验。他的职责包括实施组织的系统/软件工程模块化开放系统方法和产品线战略。



Dave Walsh, 首席技术官, Parry Labs

Dave Walsh 是 Parry Labs 的高级副总裁兼首席技术官，负责领导研究、技术、产品战略、工程和能力开发。Dave 是一位经验丰富的战略工程领导者，在飞机和地面武器系统开发以及 DoD 和国际范围内的 MOSA 方面有深入的经验。在加入 Parry 之前，他是 Collins Aerospace 军用航空电子和直升机开放系统部门的总监，领导组织转型以实现公司的 Mosarc 产品线。在此之前，他是 Leidos 的首席工程师、陆军航空项目管理办公室多个系统的系统架构师、MQ-1C 多个实地版本的系统集成负责人，以及通用原子航空系统公司多个自主、自动化和远征研发项目的联合创始人，同时也是一名前陆军飞行员。



Pekka Varis, 高级技术人员, 德州仪器 (Texas Instruments)

Pekka Varis 是德州仪器 (TI) 的高级技术人员，在 TI 处理器的实时和网络应用方面拥有丰富的经验。他从 1998 年开始在诺基亚使用 TI 处理器工作，担任高级研发经理，专注于使用 TI C55x DSP 的软件工程项目。他于 2007 年加入 TI，并于 2009 年至 2019 年担任基于 Sitara™ Arm® 处理器的首席技术专家。目前，他的研究兴趣涵盖系统应用，重点关注实时处理、工业自动化、有线网络和汽车分区架构。Pekka 积极参与以太网 TSN 插件活动，并为 AVNU 内的标准化工作做出贡献。



Salvador Rodriguez, 公司战略与产品管理副总裁, TTTech Auto

Salvador Rodriguez 是 TTTech Auto 的公司战略与产品管理副总裁, 在汽车软件领域从事软件开发到战略领导工作已有 12 年。他的职业生涯涵盖了软件架构、项目领导和产品经理的角色, 最终担任现任高级职位。他拥有电信硕士学位, 其专业知识将技术创新与战略愿景相结合。



Michel Chabroux, 边缘产品管理副总裁, 风河公司

Michel Chabroux 负责风河公司边缘设备产品组合的战略和管理, 包括风河开物RTOS和风河开物Hypervisor产品线。在从事产品管理工作之前, 他是一名现场应用工程师。Michel 还曾在风河公司屡获殊荣的支持、培训和服务组织工作。他于 2006 年加入风河, 是一位拥有 15 年以上嵌入式系统经验的行业资深人士。在从事嵌入式系统工作之前, Michel 是一名管理信息系统的顾问。

风河就在您身边

风河开物科技（上海）有限公司

地址：上海市黄浦区中山南一路768号博荟广场C座21楼03单元

电话：021-63585586

风河开物科技（上海）有限公司北京分公司

地址：北京市朝阳区霄云路38号现代汽车大厦19层1902室

电话：010-84777100

风河开物科技（上海）有限公司深圳分公司

地址：深圳市福田区车公庙天安数码时代大厦A座606室

电话：0755-25333408

风河开物科技（上海）有限公司成都分公司

地址：成都市高新区天府软件园D区7号楼1401-1404号

关于风河更多内容请访问：<https://www.windriver.com.cn> Email: inquiries-ap-china@windriver.com



官方微信

WNDRVR