



工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

TSN产品互通产业发展报告 (2026版)

工业互联网产业联盟 (AII)
2026年6月





工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

TSN 产品互通产业发展报告

(2026 版)

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

工业互联网产业联盟 (AII)

2026 年 6 月

声 明

本报告所载的材料和信息，包括但不限于文本、图片、数据、观点、建议，不构成法律建议，也不应替代律师意见。本报告所有材料或内容的知识产权归工业互联网产业联盟所有（注明是引自其他文献的内容除外），并受法律保护。如需转载，需联系本联盟并获得授权许可。未经授权许可，任何人不得将报告的全部或部分内容以发布、转载、汇编、转让、出售等方式使用，不得将报告的全部或部分内容通过网络方式传播，不得在任何公开场合使用报告内相关描述及相关数据图表。违反上述声明者，本联盟将追究其相关法律责任。

工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet
联系电话：010-62305887

邮箱：aii@caict.ac.cn

编写说明

在工业领域，时间敏感网络作为下一代工业网络的演进方向业内已经基本形成共识。目前时间敏感网络协议族基本完备，技术趋于成熟，主流网络设备厂商纷纷进入产品或者方案研发阶段。为了更好建立工业领域时间敏感网络产业生态，了解行业内部当前技术落地现状水平，工业互联网产业联盟（Alliance of Industrial Internet, AII）启动了时间敏感网络（Time-Sensitive Networking, TSN）相关技术及标准的研究工作，积极开展时间敏感网络在工业领域落地的可行性调研评估，并于2018年12月完成了国内首次TSN设备互通测试工作。包括华为、摩莎科技（MOXA）、亚德诺半导体技术（Analog Devices）及思博伦通信（Spirent）在内的四家厂商的TSN产品参与了首次测试。第二次TSN设备测试工作于2019年10月完成，包括华为、MOXA、时触电子技术（TTTech）、Spirent、是德科技（IXIA）、北京邮电大学，CC-Link协会（CLPA）在内的多家厂商及研究机构参与此次测试。第三次TSN产业测试活动重点关注TSN技术在全产业链产品的落地进展，组织芯片、设备、控制器、测试仪厂家开展协议一致性、设备对接等测试，包括英特尔、博通、TTTech、Spirent、IXIA、新华三、东土、西安云维智联等。

本次 TSN 产业测试活动本次测试由中国信息通信研究院牵头组织，联合迈威通信、研华科技、奕泰微电子、华为、MOXA、亚德诺半导体(ADI)、三旺通信等 11 家厂商共同参与，覆盖 TSN 交换机、交换芯片模组、端设备（如三旺 RT1180、英特尔 TSN 网卡）及测试仪表（思博伦 C50、Calnex Paragon-X）等全产业链产品。测试协议聚焦 TSN 核心标准，包括时钟同步（IEEE 1588v2/IEEE 802.1AS）、门控调度（IEEE 802.1Qbv）、帧抢占（IEEE 802.1Qbu）、流过滤（IEEE 802.1Qci）以及帧复制与消除（IEEE 802.1CB），全面验证跨厂商设备的功能一致性、多跳组网性能及复杂场景适应性。

本测试报告旨在体现当前网络设备对于时间敏感网络特性实现情况，促进工业界对 TSN 网络技术的进一步关注，为时间敏感网络技术的研发、部署和落地提供参考，推动工业网络创新演进。

组织单位：工业互联网产业联盟

参与单位（排名不分先后）：中国信息通信研究院、迈威通信、研华科技、奕泰微电子、华为、MOXA、ADI、三旺通信、英特尔、是德科技、思博伦通信

目 录

一、测试背景及范围	6
1.1、TSN 互通测试概述	6
1.2、测试背景	9
1.3、测试范围	35
二、测试方案	37
2.1、总体组织思路	37
2.2、分项方案说明	38
2.3、设备及配套版本	48
2.4、主要测试内容	58
三、测试情况	62
3.1、两两对接测试情况	62
3.2、混合组网测试情况	64
3.3、总体结论	67
四、发展建议	69
4.1、持续布局	70
4.2、挑战和建议	72
附录	74
A、引用标准	74
B、术语	78

一、测试背景及范围

1.1 TSN 互通测试概述

随着工业互联网向智能化、高实时性方向加速演进，传统工业网络架构（如“两层三级”模式）因技术异构、协议碎片化等问题，难以满足智能制造、自动驾驶等高动态场景对网络确定性传输的严苛需求。时间敏感网络（Time-Sensitive Networking, TSN）作为下一代工业网络的共性技术，通过标准化协议族（如 IEEE 802.1AS、IEEE 802.1Qbv、IEEE 802.1Qbu 等）实现多类流量混合承载下的确定性时延、高可靠传输与全局时钟同步，已成为工业网络向信息技术（Information Technology, IT）与运营技术（Operational Technology, OT）深度融合转型的核心支撑技术。

近年来，TSN 技术在国际标准（如 IEEE 802.1Qcw-2023、IEC/IEEE 60802 工业行规）与国内标准（YD/T 4492-2023《工业互联网时间敏感网络技术要求》）的双重驱动下加速成熟。全球产业链已形成“芯片-设备-应用”的完整生态，但跨厂商设备的协议实现差异、多跳组网性能衰减等问题仍制约其规模化部署。为此，工业互联网产业联盟（Alliance of Industrial Internet, AII）于 2024 年 7 月组织国内主流厂商开展 TSN 设备互通测试，旨在通过技术验证与问题剖析，推动产业链协同优化。

TSN 通过提供确定性通信能力，正在重塑工业与跨行业网络的未来。测试作为技术落地的“试金石”，不仅验证了标准的可行性与设备的可靠性，还通过发现问题、优化性能、推动互操作性，加速了 TSN 从实验室到实际场景的转化。随着测试覆盖场景的扩大（如无线 TSN、多域网络），TSN 技术将在更多关键领域释放其潜力。国际上对于 TSN 的测试场景以及测试环境的部署给予了一定的投入和研究；此次 AII 组织的国内不同提供商之间的 TSN 产品的互通测试在一定程度上为 TSN 的研发、部署和落地提供了参考。

为了更好建立工业领域 TSN 产业生态，了解行业内部当前技术落地现状水平，AII 启动了 2024 年 TSN 产业互通测试，并于 2024 年 7 月底完成了 TSN 设备互通测试工作。本次测试由中国信息通信研究院牵头组织，联合迈威通信、研华科技、奕泰微电子、华为、MOXA、ADI、三旺通信等 12 家厂商共同参与，覆盖 TSN 交换机、交换芯片模组、端设备（如三旺 RT1180、英特尔 TSN 网卡）及测试仪表（思博伦 C50、Calnex Paragon-X）等全产业链产品。测试协议聚焦 TSN 核心标准，包括时钟同步（IEEE 1588v2/IEEE 802.1AS）、门控调度（IEEE 802.1Qbv）、帧抢占（IEEE 802.1Qbu）、流过滤（IEEE 802.1Qci）及帧复制与消除（IEEE 802.1CB），全面验证跨厂商设备的功能一致性、多跳组网性能及复杂场景适应性。

本次测试的核心目标包括协议一致性验证、跨厂商互操作性、技术实现的差异性定位。本次测试不仅为设备厂商提供了技术优化基准，更通过实践验证了 TSN 在智能工厂（如汽车制造柔性产线）、轨道交通（列车多系统协同控制）等场景的可行性，为工业网络从“尽力而为”向“确定性服务”转型提供了技术范本。后续将结合第五代移动通信技术（5th Generation Mobile Communication Technology, 5G）和 TSN 融合、边缘智能协同等方向深化研究，助力构建自主可控的高性能工业通信底座。

本次网络设备互通测试结果将用于评估设备的性能和兼容性，为后续的产品开发和市场推广提供依据。通过测试验证不同厂商、不同型号的 TSN 网络设备之间的兼容性和互操作性，确保当前的网络设备能够按照统一的标准和规范进行通信和协作，从而推动 TSN 技术的标准化与规范化进程。同时，在测试过程中发现当前设备在互通性方面存在的问题，为技术的进一步优化和改进提供依据和意见。此外，互通测试为厂商之间提供平台，促进技术交流与合作，共同推动 TSN 技术的不断发展和完善，加速其落地应用的进程。

本测试报告旨在体现当前网络设备对于 TSN 特性实现情况，促进工业界对 TSN 网络技术的进一步关注，为 TSN 的研发、部署和落地提供参考，推动工业网络创新演进。对于涉及到厂商具体技术细节的部分在本报告中并不体现。

1.2 测试背景

1.2.1 TSN 技术现状

如图 1-1 所示，工厂网络通常呈现“两层三级”的结构。

“两层”是指存在“工厂 IT 网络”和“工厂 OT 网络”两层技术异构的网络；“三级”是指根据目前工厂管理层级的划分，网络也被分为“现场级”、“车间级”、“工厂级/企业级”三个层次，每层之间的网络配置和管理策略相互独立。

伴随着工业互联网/工业 4.0 的广泛推进，工业互联网业务发展对网络基础设施提出了更高的要求 and 需求，工厂内网络将呈现出融合、开放、灵活三大发展趋势。

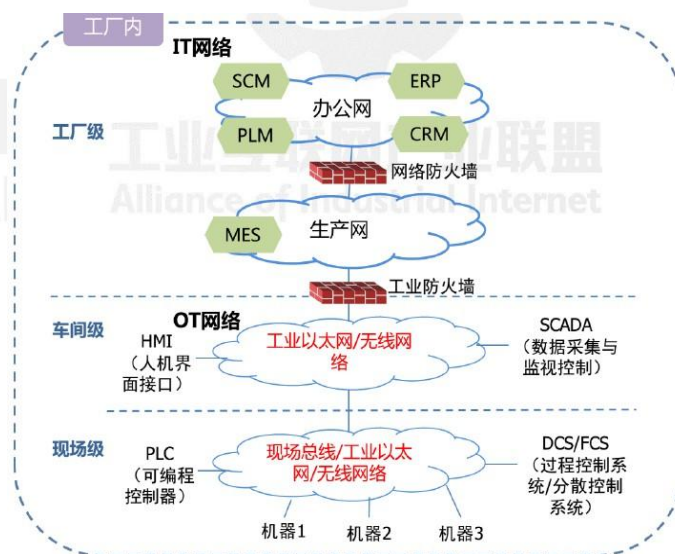


图 1-1 工厂网络“两层三级”结构

TSN 技术由以太网音视频桥接技术（Audio Video Bridging, AVB）网络演进而来，其应用范围也从原来的音视频桥接网络扩展到工业领域、汽车内部网络以及移动前传

网络等各种对传输时间有高稳定性要求的网络。在工业领域，时间敏感网络作为下一代工业网络的演进方向业内已经基本形成共识。目前，时间敏感网络协议族已经基本完备，技术趋于成熟，主流网络设备厂商纷纷进入产品或者方案研发阶段，国内外各类行业组织，如工业物联网联盟（Industry IoT Consortium, IIC）、AII 等，也围绕该技术开展了多轮测试验证，业内期望能尽快实现方案级部署。

TSN 重点在于对当前的二层以太网进行特性增强，为特定的业务流量提供确定时延的网络传输。如图 1-2 所示，目前 TSN 工作组已经制定了一系列标准，通过允许一些流量分组优先转发，利用门控调度机制清理线路以及带宽预留等机制来保证业务流量在以太网中的传输性能。具体而言，IEEE 802.1AS 定义了广义精确时间协议（generalized Precision Time Protocol, gPTP），确保网络设备能够实现高精度的时间同步，从而实现时间敏感型应用的同步操作。IEEE 802.1Qbv 定义了时间触发的传输机制，通过在预定的时间窗口内为特定类型的流量打开“门”（即允许转发），而在其他时间则关闭“门”（即阻止转发），以此来清理线路，确保关键流量不受干扰，实现低延迟和确定性的传输性能。TSN 中很多业务流量对于性能的要求不仅仅局限于时延和抖动，实现流量中的帧可以在确定的、可预测的时间送达是更为重要的指标要求，基于 IEEE 802.1AS 全网的时间同步以

及基于 IEEE 802.1Qbv 协议的门控调度机制即为这种需求提供了实现的底层技术基础。IEEE 802.1Qbu 通过动态或静态的方式为特定类型的流量预留带宽，确保即使在网络负载较高的情况下，关键业务流量也能得到及时处理，实现无阻塞传输。IEEE 802.1Qci 定义了流量过滤和服务质量（Quality of Service, QoS）标记机制，确保关键业务流量能够得到优先处理，提高服务质量。IEEE 802.1CB 定义了冗余和故障恢复机制，包括帧复制和消除机制，确保即使在网络部分出现故障的情况下，关键业务流量也能得到可靠的传输。这些机制共同作用，使得 TSN 能够提供确定性的低延迟传输，满足实时应用的需求，为工业自动化、汽车网络、航空电子等领域的实时通信提供了强大的支持。

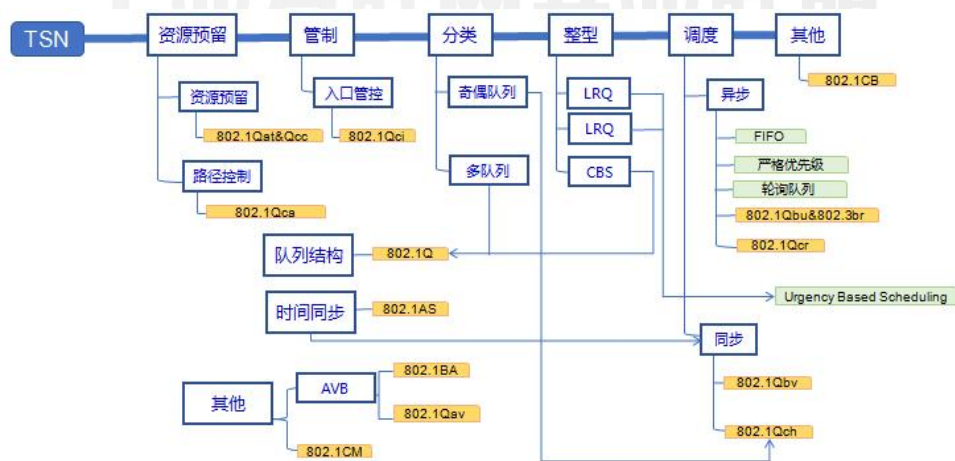


图 1-2 TSN 技术相关标准体系

近几年，TSN 技术标准呈现出加速演进的态势。2020 年发布的 IEEE 802.1AS-2020，进一步优化时间同步机制，为时间敏感应用的时钟同步提供了更精准的规范。2022 年推

出的 IEEE 802.1Q-2022，对网桥和桥接网络进行全面且细致的规定，从网络架构层面提升了 TSN 网络的稳定性与扩展性，有助于构建更大规模、更复杂的 TSN 网络体系。在车载领域，2025 年完成投票流程的 IEEE P802.1DG 意义重大，它清晰界定了车载 TSN 设备需支持严格优先级调度（Strict Priority, SP）、信用整形（Credit-Based Shaper, CBS）和异步流量整形（Asynchronous Traffic Shaping, ATS）混合调度机制，对同步精度等提出严格量化要求，同步误差需控制在极小范围。这一标准促使宝马、通用等众多车企推进 TSN 技术应用，将 TSN 集成至高端车型，推动汽车网络架构向更高效、智能方向升级。在工业自动化范畴，IEEE P802.1Qcr 草案持续迭代，定义了一致性等级 A（Conformance Class A, CCA）、一致性等级 B（Conformance Class B, CCB）两个一致性等级，对时间同步精度（要求 100 跳内达到 1 微秒）、门控调度及帧抢占等关键技术点进行规范，虽尚未正式发布，但已吸引众多工业企业关注，为未来工业自动化生产线的升级改造指明方向。

在应用成果方面，TSN 技术多点开花。在工业自动化的半导体检测场景中，借助 TSN 采集卡搭配 FPGA 硬件触发，实现了±100 纳秒的超高同步精度，相比传统以太网控制自动化技术（Ethernet Control Automation Technology, EtherCAT）方案提升了 10 倍，大幅提高缺陷识别准确率。在柔性产线

方面，东风汽车涂装车间采用 TSN+5G 融合网络，利用时间触发通信实现机械臂与视觉系统微秒级协同，不仅减少了单台设备线束长度的 50%，还将节拍时间缩短了 60%，显著提升生产效率。智能交通领域同样成绩斐然，友达数位与 CLPA 合作开发的 CC-Link IE TSN 核心芯片，应用于小鹏 G9 车型区域控制器，可满足 L4 级自动驾驶传感器数据传输，端到端延迟小于 50 微秒。光路科技的 FR-TSN 系列工业交换机在智慧高速应用里，基于 TSN 调度机制保障关键数据优先传输，降低丢包率与网络抖动，其抗电磁干扰设计适应恶劣环境。医疗领域，北京科技大学研发的 TSN 超声机器人系统，借助边缘计算与 5G 切片，实现机械臂控制信号与 4K 视频流传输端到端延迟小于 50ms，定位精度达 0.1mm，满足严格国际标准。在能源领域，智芯公司 TSN 交换机应用于山西智能变电站，承载多种业务，通信可靠性高达 99.999%，故障恢复时间小于 20ms，有力支撑分布式能源并网控制。这些前沿应用充分展现出 TSN 技术在多领域的巨大潜力，随着技术与标准不断完善，其应用边界还将持续拓展。

1.2.2 TSN 标准现状

1.2.2.1. 国际标准

TSN 作为支撑工业自动化、汽车电子、智能电网等领域确定性通信的核心技术，其国际标准体系由 IEEE 802.1 工作

组下属的 TSN 任务组主导开发，目前正处于持续演进与应用边界快速拓展的关键阶段。从整体发展脉络来看，国际 TSN 标准的制定愈发聚焦“网络精细化管理能力提升”与“核心性能优化”两大方向，旨在通过技术标准化解解决复杂场景下多样化应用的确定性传输、高效管控与智能化部署需求，为垂直行业数字化转型提供坚实的网络技术支撑。2023 至 2024 年是 TSN 标准体系深化完善的关键时期，多款聚焦核心技术场景化落地的标准相继发布，覆盖流量调度、设备配置、时钟同步、QoS 等关键领域，有效应对工业 4.0、汽车以太网、智能制造等场景的技术痛点。

2023 年发布的 IEEE Std 802.1Qcw-2023 针对定时流量调度、帧抢占以及基于流的过滤和控制构建 YANG 数据模型。这一标准的出台顺应了工业自动化、汽车以太网等场景中对数据精准调度与高效管控的趋势，通过 YANG 数据模型的构建，使得网络设备对各类流量的管理更加规范化、智能化，能够在复杂网络环境下精准调配资源，保障关键业务流的稳定传输。

2024 年发布的 IEEE Std 802.1Qdj-2024 致力于简化并改进 TSN 设备配置，尤其针对大规模、复杂 TSN 网络自动化配置难题。随着工业 4.0 推进，工业现场网络规模不断膨胀，设备数量激增，传统配置方式效率低下且易出错。该标准的推出符合工业领域智能化、自动化发展趋势，通过优化配置

流程，提高网络确定性与可管理性，为智能制造、智能工厂等应用场景的大规模部署扫除障碍。

IEEE Std 802.1Qdx-2024 围绕 CBS 制定 YANG 数据模型。CBS 作为 TSN 关键技术，在低延迟、高吞吐场景应用广泛，如工业自动化中大量传感器数据实时传输、汽车以太网中车辆控制系统数据交互以及音视频流媒体高质量播放场景。该标准的制定进一步规范了 CBS 在不同应用场景下的配置、管理与监控，助力各行业在复杂网络条件下充分发挥 TSN 技术优势。

IEEE Std 802.1ASdn-2024 增强了 IEEE 802.1AS 在时间敏感应用中的时钟同步管理可配置性与远程管理能力。在智能电网、工业自动化等对时钟同步精度要求极高的领域，精准时钟同步是保障系统稳定运行的基石。该标准的发布符合行业高精度、远程化管理趋势，使网络同步更加自动化、高效化，为跨区域、大规模工业生产协同运作提供可靠时间保障。

IEEE Std 802.1DC-2024 规范网络系统 QoS，提供通用 QoS 机制，满足不同类型流量服务优先级与资源分配需求。在 5G 与 TSN 融合发展趋势下，网络流量种类愈发繁杂，如高清视频流、工业控制指令流、物联网设备信息流等。此标准为网络流量分类管理提供依据，确保各类业务在共享网络资源时能够获得恰当服务质量，推动 5G 与 TSN 融合应用在

工业、车联网、智慧城市等领域落地。

IEEE Std 802.1ASdm-2024 引入热备份机制防止时钟源故障，并优化时钟漂移误差，增强 TSN 网络时钟同步可靠性与同步精度。在工业控制、自动驾驶等对时钟同步容错性要求严格的场景，时钟源故障可能引发严重事故。该标准顺应行业高可靠性发展需求，通过创新机制设计，提升网络时钟同步稳定性，保障关键业务持续稳定运行。

随着 5G 网络的普及与工业互联网、车联网等产业的发展，“5G+TSN”融合已成为通信技术与垂直行业结合的必然趋势——5G 提供广覆盖、高移动性的通信能力，TSN 提供确定性传输保障，二者结合可满足跨区域、高动态场景的确定性通信需求。第三代合作伙伴计划（3rd Generation Partnership Project, 3GPP）作为移动通信领域的核心标准化组织，近年来在 5G 与 TSN 融合标准制定方面持续发力，发布多个关键标准，明确技术对接路径与商业化支撑体系。

从当前标准动态来看，TSN 国际标准体系呈现两大核心趋势：

技术层面：从“基础功能标准化”转向“场景化深化与性能优化”——例如，通过 YANG 数据模型实现流量、时钟、QoS 的标准化管理，通过自动化配置、热备份时钟等机制解决大规模部署与高可靠性需求，直接响应垂直行业的实际痛点；

生态层面：从“TSN 独立发展”转向“多技术融合”——以 3GPP 的 5G-TSN 融合标准为代表，TSN 正与 5G、物联网等技术深度结合，通过“优势互补”拓展应用场景（如跨区域工业协同、车路协同），推动确定性通信技术从“局域部署”走向“广域应用”。

未来，随着工业互联网、智能汽车、智慧城市等领域的需求升级，TSN 国际标准将进一步聚焦“更高精度同步”、“更灵活调度”、“更便捷运维”，并持续深化与新兴技术的融合，为全球产业数字化转型提供更高效、更可靠的网络技术底座。

1.2.2.2. 国内标准

国内在 TSN 技术标准方面结合自身产业特色积极推进相关标准制定工作，呈现出围绕重点行业应用、强化自主可控的发展趋势。中国通信标准化协会（China Communications Standards Association, CCSA）作为国内通信标准制定核心力量，在 TSN 技术标准化研究领域成果颇丰。

《超高精度时间同步接口要求》（标准号：YD/T 4504-2023）详细规定超高精度精确时间协议（Precision Time Protocol, PTP）接口功能、封装处理、协议模式等内容。在工业自动化、智能电网等对时间同步精度要求极高的行业，该标准为构建高精度时间同步网络提供规范依据，有助于提升国内相关行业设备互联互通性与系统运行稳定性，契合国

内工业转型升级对精准时间同步技术的迫切需求。

《工业互联网时间敏感网络技术要求》（标准号：YD/T 4492-2023）针对工业互联网场景，明确 TSN 总体技术要求，涵盖架构、功能、互操作、可靠性及安全等方面。随着国内工业互联网建设加速，工业企业数字化转型深入，对网络实时性、可靠性要求日益严苛。此标准从多维度规定工业互联网中 TSN 技术应用，为工业企业部署 TSN 网络提供全面指导，推动工业互联网产业健康有序发展。比如在智能工厂中，大量设备的数据交互需要可靠且实时的网络支撑，该标准就发挥了重要作用。

《路由域通用 YANG 数据模型技术要求》（标准号：YD/T 4800-2024）规定 YANG 路由模块分类、代码格式等技术要求。YANG 数据模型在网络配置、管理领域应用广泛，该标准的制定有助于统一国内网络设备在 YANG 数据模型应用方面规范，提升网络管理效率，增强不同厂商设备兼容性，符合国内网络技术规范化、标准化发展趋势。

《5G 移动通信网支持时间敏感网络(TSN)技术要求(第一阶段)》（标准号：YD/T 4738-2024）聚焦 5G 与 TSN 融合，为工业自动化、车联网、智能电网等领域提供低时延、高带宽、高精度同步通信能力。国内 5G 网络建设全球领先，推动 5G 与 TSN 融合，能够充分发挥 5G 网络优势，赋能垂直行业数字化转型。该标准的发布为 5G 与 TSN 融合技术在

国内落地应用奠定基础，促进通信技术与实体经济深度融合。

《工业互联网时间敏感网络与移动前传网络融合部署技术要求》（标准号：YD/T 6114-2024）规定融合 TSN 特性的移动前传网络部署场景、架构、业务需求等内容。在 5G 网络建设过程中，移动前传网络作为关键环节，融合 TSN 技术能够提升网络整体性能。该标准的出台顺应国内 5G 网络建设与工业互联网发展融合趋势，为相关企业网络部署提供技术指引，助力打造更高效、更智能的工业通信网络。

《工业互联网时间敏感网络集中网络配置技术要求》（标准号：YD/T 4671-2024）明确工业互联网 TSN 集中网络配置技术要求，包括框架、功能、性能等方面。在工业互联网大规模网络部署背景下，集中网络配置能够有效提升网络管理效率、降低运维成本。此标准的制定符合国内工业互联网规模化发展对网络管理优化的需求，为工业企业构建高效、可靠 TSN 网络提供技术支撑。

《工业互联网时间敏感网络交换机技术要求》（标准号：T/CCSA 445-2023）应运而生，其在工业互联网时间敏感网络体系中占据关键地位。该标准全面规定了工业互联网场景下 TSN 交换机的各项技术要求，从端口配置灵活性、数据转发性能，到对时间同步协议的精准支持等方面均有细致规范。在工业自动化生产线上，众多传感器、控制器等设备需实时交互海量数据，交换机端口需具备多样化配置，如支持百兆、

千兆甚至万兆速率端口灵活组合，以适配不同设备的数据传输需求。该标准对交换机的数据转发性能提出严苛要求，确保在高负载情况下，仍能实现低时延、高可靠的数据转发，保障工业控制指令与生产数据的及时传输。在时间同步方面，交换机需精准遵循相关时间同步协议，如 IEEE 802.1AS 等，与网络中其他设备保持高度同步，使整个工业网络在统一时间基准下协同工作，为工业生产的精确控制与协同作业提供坚实保障。此标准的制定，有助于规范国内工业互联网时间敏感网络交换机的研发、生产与应用，提升交换机在复杂工业环境中的适应性与可靠性，推动工业互联网产业向更高质量、更智能化方向发展。

1.2.3 TSN 产业现状

1.2.3.1. TSN 产业链情况

(1) 产业联盟与标准制定

2020 年 10 月，在工业互联网产业联盟组织下，中国信通院牵头联合 40 余家产学研用单位启动“时间敏感网络产业链名录计划”，旨在打造全产业链生态，形成产业闭环，推动技术与产业有序发展。依托 CCSA 下属通信标准化技术委员会（Technical Committee 485，TC485），TSN 系列标准布局持续推进，已提交开展标准研究 27 项。2022 年 9 月，国内首个 TSN 标准 YD/T 4134-2022《工业互联网 时间敏感网络

需求及场景》正式发布，初步构建起 TSN 技术标准体系，保障产业规范发展。

（2）芯片领域

中国市场增长迅速，尤其在车载和工业自动化领域。全球主要生产商有荷兰恩智浦、美国微芯等。我国国产化进程加快，北京智芯微电子、东土科技等积极布局。东土科技的 KD6530 芯片是我国首款全流程自主可控 TSN 交换芯片，具备帧冗余、帧抢占等特性。不过，整体上我国在高端芯片技术上仍与国际领先水平存在差距，部分关键技术和设备依赖进口。

（3）TSN 设备形态的演进历程

A. 交换机：TSN 技术早期的核心设备，在 TSN 技术发展初期，交换机作为基础设备率先出现。其主要功能是实现数据的转发与交换，为网络中的设备提供连接服务。然而，早期的交换机支持的 TSN 协议单一，不能满足部分场景的需求。这些交换机为 TSN 技术在企业内网的部署奠定了基础，使得数据能够在网络中有序传输。

B. 芯片：赋予设备核心能力的关键组件，随着技术的发展，TSN 芯片应运而生。芯片是设备的核心，为交换机、端设备等提供了强大的运算和控制能力。如东土科技研发的 KD6530 芯片，通过“TSN 产业链名录计划”评测，它集成了时间同步、流量调度等关键功能，大大提升了设备的性能和

功能集成度。芯片的发展让 TSN 设备能够更精准地实现时间同步，优化流量调度算法，提高网络带宽利用率，从而增强了整个 TSN 网络的运行效率和稳定性。

C. 控制器：实现网络智能管理的中枢，控制器作为 TSN 设备的重要补充，在网络资源管理方面发挥着关键作用。紫金山实验室的 PML - TSN 控制器，基于软件定义网络思想，遵从 IEEE 802.1Qcc 完全集中式配置规范，实现了网络规划、拓扑管理、流量配置等多种功能。它能够根据网络中数据流的特点，动态分配网络资源，智能调整带宽，优化网络性能。在工业生产场景中，当不同生产线对网络带宽需求发生变化时，控制器可及时响应，确保关键生产数据优先传输，避免网络拥塞。

D. 端设备：拓展 TSN 应用边界的终端节点，端设备直接面向用户和应用场景，丰富了 TSN 设备的形态。在轨道交通领域，中车大连电力牵引研发中心有限公司的 PQ - 359、北京纵横机电科技有限公司的 TKD562K 等端设备，具备工业适配、TSN 功能及性能等特点，实现了列车与控制中心之间的实时数据交互，保障列车运行的安全和高效。在智能电网中，端设备可以采集电力数据并实时上传，实现对电网的精准监控和管理。端设备的发展使 TSN 技术能够深入到各个行业的核心业务环节，拓展了 TSN 技术的应用范围。

4) 行业应用层面：

A. **轨道交通**: 对数据传输实时性和可靠性要求极高。TSN 技术能满足列车位置、车载视频监控、信号控制等多类型数据传输需求, 实现多业务混合承载。中车大连电力牵引研究中心的 PQ-359 中央控制单元, 作为高性能时间确定性终端设备, 支持 TSN 协议, 为列车网络融合提供保障。

B. **智能电网**: 电力系统对网络同步、通信时延等性能要求严格。TSN 技术可用于电力系统实时监控和智能调度, 提升电网稳定性和可靠性。不过, 目前不同厂家电力设备和系统集成互通仍存在挑战, 需进一步完善相关标准和技术方案。

C. **智能交通 (车载领域)**: 随着自动驾驶技术发展, 对数据传输要求提升。TSN 芯片为汽车智能化提供通信支撑, 满足车辆状态、交通信息等大量数据传输需求, 保障车辆间及车辆与基础设施间实时通信。但在数据安全和隐私保护方面, 还需加强技术研发和标准制定。

5) 测试与验证体系

中国信通院等机构发挥重要作用, 积极建设测试床并组织开展各类测试工作。如工业互联网产业联盟启动“时间敏感网络产业链名录计划”测试; 中国信通院牵头建设 5G+TSN 测试床; 联通、中兴等联合完成 5G+TSN 端到端测试。通过这些测试活动, 推动产品优化升级, 提高产品兼容性和互通

性，促进产业链协同发展。

6) 产业生态构建

众多企业和机构参与，国内自主 TSN 产品逐步成熟，行业解决方案加快孵化。已发布多项白皮书，涵盖产业发展、融合部署、应用等多个方面，为产业发展提供理论支持和方向指引。已有多批产品进入 TSN 产业链名录，产品类型不断丰富、数量持续增加，反映出我国 TSN 领域产业实力逐步增强，初步具备产业链自主供给能力。

尽管 TSN 产业链成果显著，但仍面临一些挑战。部分关键技术如高端芯片技术有待突破，不同行业应用案例仍相对缺乏，制约技术推广和深化应用。不同厂商设备在互联互通方面还存在一定障碍，需要进一步统一标准和规范。未来，需持续加大研发投入，加强产学研合作，推动技术创新和应用拓展；完善标准体系，促进设备互联互通；加强国际合作与交流，提升我国在全球 TSN 产业链中的地位和竞争力，推动 TSN 产业持续健康发展。

1.2.3.2. 国内外产业发展情况

在产品形态方面，国内以 TSN 交换机和网关为主，芯片领域逐步突破（如智芯、奕泰微），但终端设备（如工业网卡）仍依赖进口；国外相对全面，覆盖全产业链，尤其在芯片和嵌入式系统领域占据主导地位，产品形态更丰富（如 Intel 终端芯片、ADI 工业模块）。

在协议支持方面，国内外厂商能支持 TSN 核心协议（IEEE 802.1AS、IEEE 802.1Qbv、IEEE 802.1Qbu、IEEE 802.1Qci、IEEE 802.1CB），满足工业场景基本需求；东土科技、新华三等厂商开始支持高阶协议（IEEE 802.1Qcc、IEEE 802.1Qch），体现技术追赶趋势；国外芯片级协议优化更成熟（如 Intel 流过滤、Renesas 时间同步），且在无线 TSN（如 Avnu 联盟开展的测试）等前沿领域布局领先。

国内厂商在网络设备端已具备较强竞争力，但在芯片和端设备领域仍需突破。未来需通过技术协同（如 5G+TSN）和标准合作缩小差距。下表是国内外部分厂商的 TSN 产品形态以及其支持的协议概览。

表 1 国内外 TSN 厂商协议支持情况表

TSN 产品厂商	产品形态及型号	TSN 协议支持情况
中车大连电力牵引研发中心有限公司	中央控制单元	IEEE802.1AS
	PQ-359	IEEE802.1Qbv
深圳市光路在线科技有限公司	工业级 TSN 交换机 FR-TSN4206	IEEE802.1AS
		IEEE802.1Qbv
		IEEE802.1Qbu
河北远东通信系统工程有	TSN 网络交换机 SF7210-DeT	IEEE802.1AS IEEE802.1Qbv

		IEEE802.1Qbu
		IEEE802.1Qci
		IEEE802.1CB
北京纵横机电科 技术有限公司	TSN 端设备	IEEE802.1AS IEEE802.1Qbv
北京交通大学下 一代互联网互联 设备国家工程实 验室	TSN 交换机 NGIT-TSN-S-I	IEEE802.1AS IEEE802.1Qbv
北京邮电大学	TSN 网关 BUPT-TSAG-V1.0	IEEE802.1AS IEEE802.1Qbv IEEE802.1Qbu IEEE802.1Qci IEEE802.1CB
华为技术有限公 司	S5735I-H-V2 交换机 S5735I-H8T4S2XN- V2	IEEE802.1AS IEEE802.1Qbv
北京智芯微电子 科技有限公司	TSN 交 换 芯 片 SCCC9002SC2404	IEEE802.1AS IEEE802.1Qbv IEEE802.1Qbu IEEE802.1Qci IEEE802.1CB

		IEEE802.1AS
武汉迈威通信股份有限公司	TSN 工业以太网交换机	IEEE802.1Qbv IEEE802.1Qbu
	MISCOM8216TSN	IEEE802.1Qci
		IEEE802.1CB
		IEEE802.1AS
北京源山信创科技有限公司	TSN 交换机	IEEE802.1Qbv
	ThunderSwitch3000	IEEE802.1Qci
		IEEE802.1CB
		IEEE802.1AS
中车青岛四方车辆研究所有限公司	轨道车辆 TSN 交换机 RN-DEH-G28	IEEE802.1Qbv
		IEEE802.1Qbu
		IEEE802.1Qci
		IEEE802.1CB
		IEEE802.1AS
南京奕泰微电子技术有限公司	TSN 芯片模组 ETLX810	IEEE802.1Qbv
		IEEE802.1Qbu
		IEEE802.1Qci
		IEEE802.1CB
		IEEE802.1AS
MOXA 科技有限公司	TSN 交换机	IEEE802.1AS
	TSN-G5008	IEEE802.1Qbv
东土科技股份有	TSN 交换机	IEEE 802.1AS

限公司	SICOM3000TSN	IEEE 802.1Qbv IEEE 802.1Qbu IEEE 802.1Qci IEEE 802.1CB IEEE 802.1Qcc
三旺通信股份有 限公司	TSN 交换机 ICS5400TSN-12GT1 2GS4XS	IEEE 802.1 AS IEEE 802.1 Qbv IEEE 802.1 Qbu IEEE 802.1 Qci IEEE 802.1 CB
深圳市盛博科技 嵌入式计算机有 限公司	TSN 网关 SBS TSN Gateway SIG-0101	IEEE 802.1 AS IEEE 802.1 Qbv IEEE 802.1Qbu
新华三通信技术 有限公司	TSN 交换机 IE4320-34Q	IEEE 802.1 AS IEEE 802.1Qbv IEEE 802.1Qbu IEEE 802.1Qci IEEE 802.1Qch
鹏城实验室	TSN 交换机 iDetTans308A	IEEE 802.1AS IEEE 802.1Qbv IEEE 802.1Qbu
南京未来网络产	TSN 交换机	IEEE 802.1 AS

业创新有限公司	FN-IND-TSN308	IEEE 802.1Qbv IEEE 802.1Qbu
Cisco (美国)	TSN 交换机	IEEE 802.1AS IEEE 802.1Qbv
	Catalyst IE3400 系列	IEEE 802.1Qbu IEEE 802.1CB
		IEEE 802.1AS
Intel (美国)	TSN 终端芯片	IEEE 802.1Qbv
	Intel I210-T1	IEEE 802.1Qci
Renesas (日本)	TSN 芯片	IEEE 802.1AS
	RZ/N2L 微处理器	IEEE 802.1Qbv IEEE 802.1Qci
Marvell (美国)	TSN 交换芯片	IEEE 802.1AS
	Presteria CX 8500 系列	IEEE 802.1Qbv IEEE 802.1Qci
Analog Devices (美国)	TSN 终端设备	IEEE 802.1AS
	fido5100/fido5200	IEEE 802.1Qbv IEEE 802.1Qbu
Hirschmann(德国)	TSN 交换机	IEEE 802.1AS IEEE 802.1Qbv
	Hirschmann Tofino	IEEE 802.1CB
Broadcom (美国)	TSN 交换芯片	IEEE 802.1AS

1.2.3.3. 国际 TSN 测试情况

国际上对于 TSN 的测试也在不断进行，这在推动 TSN 发展和应用中发挥着关键作用。特别是在 Avnu、国际电工委员会（International Electrotechnical Commission, IEC）、电气与电子工程师协会（Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE）、IIC、弗劳恩霍夫应用研究促进协会开放通信系统研究所（Fraunhofer Institute for Open Communication Systems, Fraunhofer FOKUS）研究所等国际标准组织的协作测试下。这些组织对于 TSN 在工业互联网领域、车载网络等领域的应用场景下进行了 TSN 协议的功能以及性能方面的测试，以确保 TSN 的各项功能在不同领域中的互操作性、可靠性。

（1）IIC TSN 测试

IIC 与 Calnex、Belden/Hirschmann、英特尔、Keysight、Kontron、三菱电机、Mobatime、NetTimeLogic、SoC-e 进行合作，搭建了 TSN 时间同步测试平台基于核心设施 Interop Rack 构建，集成多供应商设备（五家厂商的七台设备链式组网）、远程可访问网络基础设施及测试工具（如 Calnex Paragon-X、NetTimeLogic PPS 分析仪），如图 1-3 所示。测试模拟高负载场景（90%带宽占用），通过 Keysight/Ixia 流

量注入验证确定性性能，并支持灵活重构物理连接以测试多样化互操作性场景，涵盖时间同步、网络配置与协议协同（如开放平台通信统一架构（Open Platform Communications Unified Architecture, OPC UA））。测试结果表明，IEEE 802.1AS 时间同步性能远超标准要求：目标误差上限为 $1\mu\text{s}$ ，实际在稳定网络中达到 $\pm 100\text{ns}$ 精度，且多厂商设备链在高负载下仍保持稳定同步，验证了 TSN 跨供应商互操作性与工业级确定性能力。

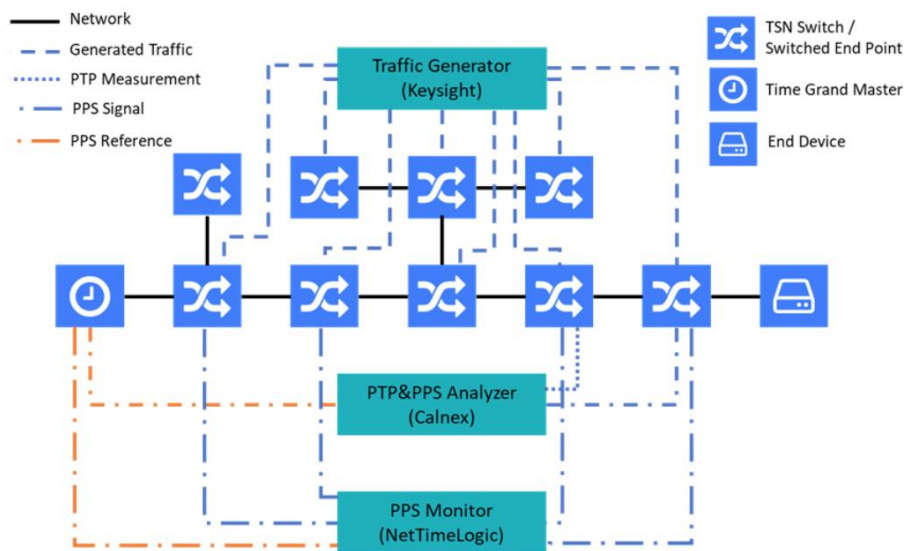


图 1-3 ICC 搭建的测试场景的拓扑结构（所有交换机均来自五家供应商的不同产品）

（2）Avnu 联盟 TSN 测试与认证

Avnu 联盟是推动 TSN 互操作性和认证的重要组织。对于 TSN 测试和认证，Avnu 建立了全面的认证计划，以确保联网设备之间的互操作性。这对于在专业音频/视频、汽车和工业控制等各个领域为低延迟、时间同步的应用创建可靠的生态系统起着至关重要的作用。测试过程旨在确认设备符合

IEEE 标准并增强对 TSN 环境中设备功能。该认证侧重于确保设备之间的互操作性，同时符合这些基础技术，满足低延迟、时间同步的网络要求。

此外，随着 Wi-Fi 和 5G 等无线技术的进步，越来越多的用例可从无线 TSN 功能实现的低确定性延迟和高可靠性中受益。《Avnu Wireless TSN MRD》中讨论了无线用例和要求，包括时间同步、机器人控制、工业控制场景。为了支持这些严格的应用，可实现精确时间同步、低延迟和高可靠性的 TSN 功能已扩展到 Wi-Fi 和 5G。Avnu 一直在为 Wi-Fi (802.11) 和 5G 上的 TSN 功能制定测试规范。

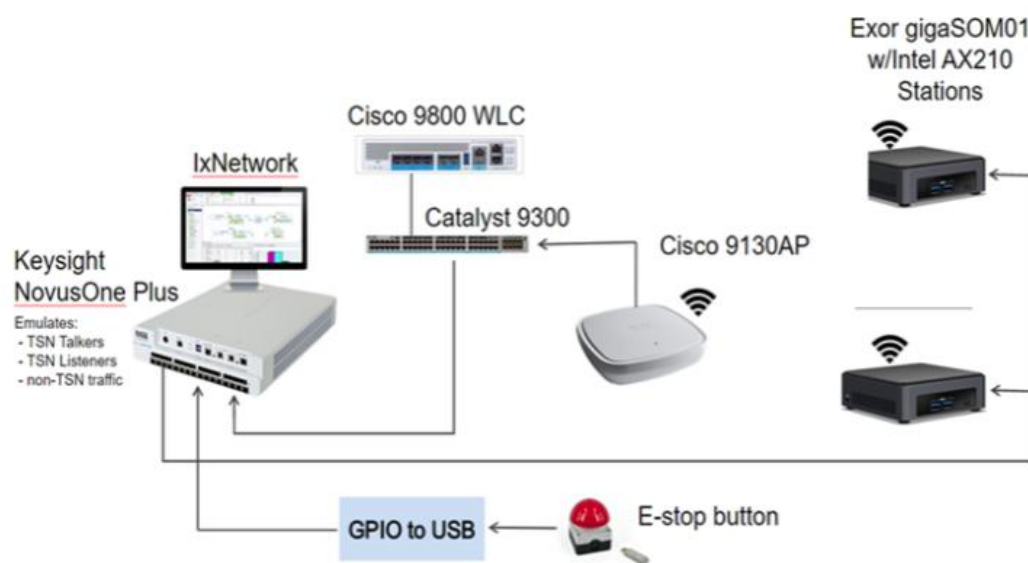


图 1-4 Avnu 基于无线的 IEEE 802.1Qbv 工业安全控制应用测试床

图 1-4 展示了 Avnu 搭建的工业安全控制应用的测试平台，该平台重点展示了控制信号的响应能力和可靠性，尤其是在紧急情况下。该演示由思科、Exor、英特尔和 Keysight 合作，展示了支持 Wi-Fi TSN 的网络基础设施。该设置涉及

在受控环境中测量高优先级紧急停止流量与背景流量的端到端延迟。结果表明，紧急停止流量的平均延迟为 1.1ms，最大延迟为 2ms，证明了无线 TSN 在实现安全关键应用所必需的低延迟性能方面的有效性。

(3) IEC/IEEE 的 TSN 测试

IEC 在 TSN 领域的测试进展主要集中在与 IEEE 的合作项目中，特别是 IEC/IEEE 60802 标准的制定和测试。IEC/IEEE 60802 是由 IEC 与 IEEE 联合制定的工业自动化 TSN 行规，明确了 TSN 在工业网络中的具体应用要求，涵盖时间同步、流量调度及冗余机制等关键技术。

在 IEC/IEEE 60802 中给定了一些参考的测试配置以及用例，用例涉及工业网络的结构定义、双向连接、控制回路和循环操作模型，这些因素对于实时数据处理和互操作性所需的性能至关重要；同时 IEC/IEEE 60802 强调了 TSN 域动态扩展和现有域配置保护的必要性，重点关注在复杂工业应用中保持高可用性的自动化流程和协议。

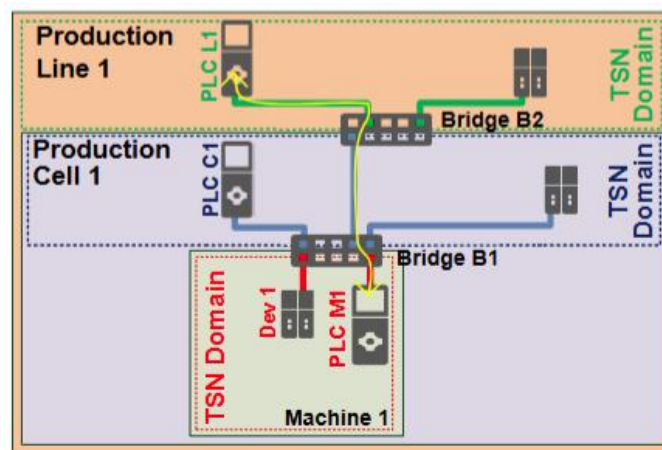


图 1-5 IEC/IEEE 60802 中对于工业网络和 TSN 的一个用例的示意

其测试进展包括：基于 IEEE 802.1AS-Rev 协议验证多设备间时钟同步性能（重点关注时钟选源能力和端到端精度）、通过 IEEE 802.1Qbv 协议测试多优先级流量的调度能力与传输延迟，以及结合 IEC 62439-3 标准对 TSN 帧复制消除机制（Frame Replication and Elimination for Reliability, FRER）在高可用性网络中的表现进行评估。相关测试由 IEC 与 IEEE 联合工作组（SC65C/WG18）主导，并在施耐德电气、西门子等厂商的工业自动化测试床中完成验证。

（4）Fraunhofer FOKUS 研究所的 TSN 测试

FOKUS 内的 TSN IOP 实验室（如图 1-6 所示）成立的目的是测试设备、解决方案、实施和展示完整的端到端设置、迁移车间资产并协调通信基础设施。该研究所发布了 TSN 在工业通信中的测试分析报告，重点关注 IEC 标准与 TSN 的结合点。测试结果显示，TSN 在工业网络中的时钟同步精度可达到亚微秒级别。

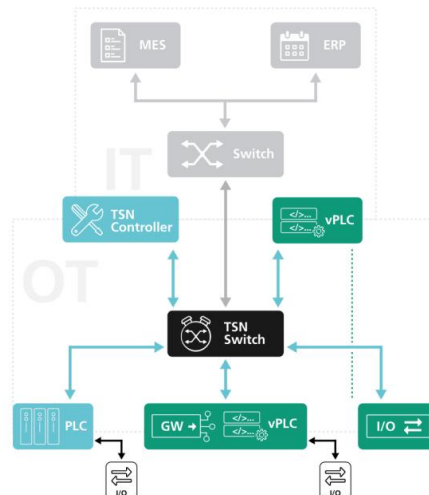


图 1-6 Fraunhofer FOKUS 研究所的 TSN 互操作性测试平台示意

1.3 测试范围

参与此次互通测试的设备包括支持 TSN 功能的交换机、芯片以及端设备。

参与此次互通测试的厂商包括：迈威通信股份有限公司、研华科技有限公司、奕泰微电子技术有限公司、华为技术有限公司、MOXA 科技有限公司、亚德诺投资有限公司、三旺通信股份有限公司、思博伦通信公司、是德科技有限公司。

此次互通测试的内容为参与厂商设备所支持的 IEEE 1588v2、IEEE 802.1AS、IEEE 802.1Qbv、IEEE 802.1Qbu、IEEE 802.1Qci 以及 IEEE 802.1CB 相关功能，并对它们进行交叉直连组网，以测试不同厂商之间的互联互通情况。

根据不同厂家目前所支持的协议功能差异，对其提供的设备各自支持的协议功能进行测试。若提供的设备不支持某一协议，将不对其进行对应协议的测试。

如图 1-7 所示，基于 TSN 网络在工业领域的应用第一阶段定位于实现工厂内 OT 网络的互联互通的判断，根据应用场景及网元在 OT 网络中的位置，将 TSN 设备分为如下三个角色：

- 工厂级网络设备（C 设备）：实现工厂内部各车间之间的互联互通以及工厂与工厂外部企业内部网络的

互联互通；

- 车间级网络设备（A1设备）：实现车间内部不同产线之间、集中式控制器与设备之间的互联互通以及车间与车间外部工厂内部网络实现互联互通；
- 现场级网络设备（A2设备）：实现现场设备、传感器等通信接口的通信协议转换并与控制器、检测监控装置进行互联互通及产线与产线外部车间内部网络之间实现互联互通。

本次测试由不同厂商的交换机、芯片或者端设备交替充当C设备、A1设备、A2设备，不对各个厂商的TSN设备进行拓扑中角色的固定；

本次测试的测试仪设备由思博伦通信公司及是德科技公司提供。

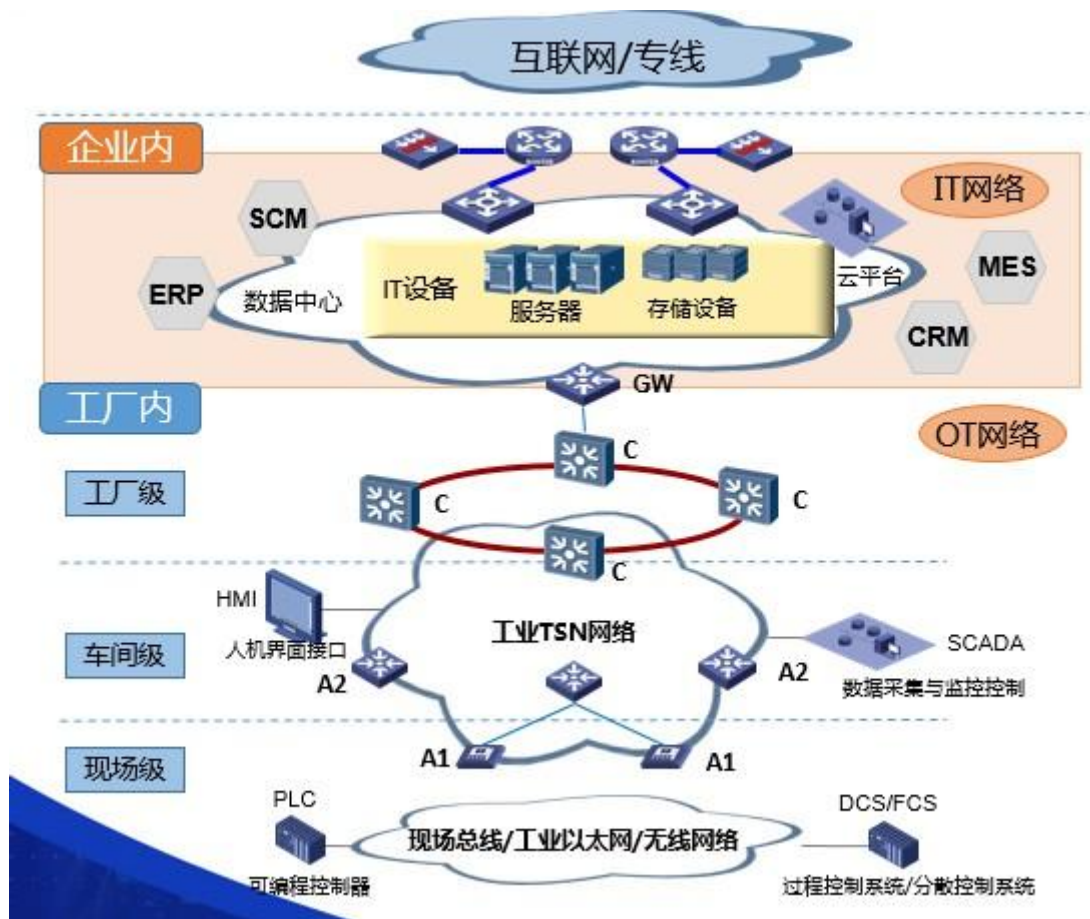


图 1-7 TSN 设备角色分类

二、测试方案

2.1 总体组织思路

本次 TSN 互通测试以 IEEE 802.1AS、IEEE 802.1Qbv、IEEE 802.1Qbu、IEEE 802.1Qci、IEEE 802.1CB 及 IEEE 1588v2 等核心协议为基准，采用“分层递进”的组织方式：先通过两两对接测试验证单协议功能一致性与跨厂商基础互操作性，再通过混合组网测试验证复杂场景下的多协议协同能力、性能衰减特性及规模化部署适应性。

测试过程中，依托思博伦 C50、Calnex Paragon-X、是德

Novus ONE PLUS 等专业仪表，量化评估时间同步精度、频率偏移、转发时延等关键指标，重点定位协议实现差异、多跳性能瓶颈等问题。同时，通过“厂商协作+第三方中立评估”模式，确保测试结果的客观性与权威性，最终为设备优化、标准完善及行业应用提供实践依据，推动构建自主可控的 TSN 产业生态。

2.2 分项方案说明

2.2.1 两两对接测试

2.2.1.1 时钟同步

(1) IEEE 802.1AS

➤ 测试拓扑

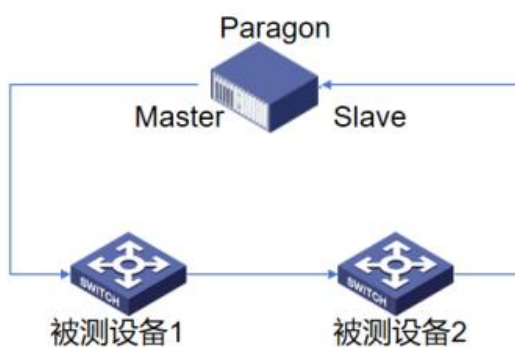


图 2-1 IEEE 802.1AS 两两对接测试拓扑

➤ 测试内容

在进行两台设备之间的 IEEE 802.1AS 协议测试时，采用如图 2-1 所示的连接拓扑，使用测试仪作为主时钟源，组网中各设备使能 TSN IEEE 802.1AS 功能，经过时间对接锁定

后，各设备时间需要稳定同步于主时钟。

IEEE 802.1AS 协议测试主要验证以下内容：

- 验证被测设备时钟选源能力；
- 验证被测设备 gPTP 的 domainNumber 填充是否正确；
- 验证被测设备 gPTP 消息中的目标地址，源地址；
- 验证 time-aware Bridge 时间同步误差；
- 验证 time-aware Bridge 频率同步误差。

(2) IEEE 1588v2

➤ 测试拓扑

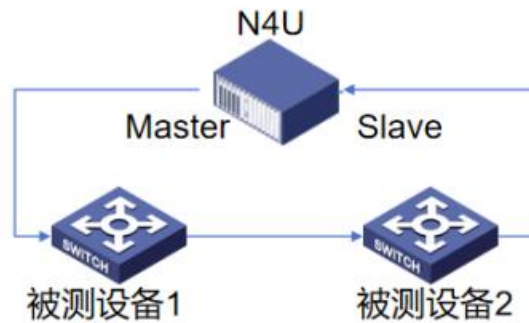


图 2-2 IEEE 1588v2 两两对接测试拓扑

➤ 测试内容

在进行两台设备之间的 IEEE 1588v2 协议测试时，采用如图 2-2 所示的连接拓扑，使用测试仪作为主时钟源，组网中各设备使能 PTP 功能，经过时间对接锁定后，各设备时间需要稳定同步于主时钟。

IEEE 1588v2 协议测试主要验证以下内容：

- 验证被测设备时钟选源能力；
- 验证被测设备 PTP 的 domainNumber 填充是否正确；

- 验证被测设备 PTP 消息中的目标地址，源地址；
- 验证 time-aware Bridge 时间同步误差。

2.2.1.2 门控调度 (IEEE 802.1Qbv)

➤ 测试拓扑



图 2-3 使用(a)思博伦 C50, (b)是德 Novus ONE PLUS 进行门控调度测试

➤ 测试内容

在进行两台设备之间的 IEEE 802.1Qbv 协议测试时，采用如图 2-3 所示的连接拓扑，分别使用思博伦 C50 和是德 Novus ONE PLUS 进行门控调度测试。

IEEE 802.1Qbv 协议测试主要验证以下内容：

- 验证被测设备 QoS 队列优先级数目功能；
- 测试被测设备各个优先级转发时延；
- 验证被测设备在复杂优先级对 IEEE 802.1Qbv 时间感知流量整形调度功能的支持情况；
- 验证被测设备对 IEEE 802.1Qbv 时间感知流量整形调度的门持续时间；

- 验证门控周期的设置功能；
- 验证被测设备门控打开周期内准确传送报文的能力；
- 验证被测设备门控队列关闭功能。

为对上述功能进行验证，设置了如下的三条门控配置：

- ✓ 门控配置 1：包长 256，vlan100，cycletime1ms，队列 5 开 100 μ s 关 900 μ s。
- ✓ 门控配置 2：包长 256，vlan100，cycletime1ms，队列 7-0 各开 125 μ s。
- ✓ 门控配置 3：包长 256，vlan100，cycletime1ms，队列 5 开 10 μ s 关 990 μ s。

2.2.1.3 帧抢占（IEEE 802.1Qbu）

➤ 测试拓扑

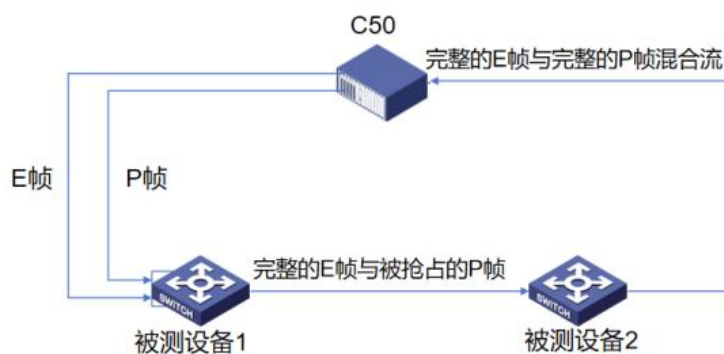


图 2-4 IEEE 802.1Qbu 两两对接测试拓扑

➤ 测试内容

在进行两台设备之间的 IEEE 802.1Qbu 协议测试时，采用如图 2-4 所示的连接拓扑，以验证时间敏感网络设备的抢占与重组能力。被测设备 1 需要被设置为具备抢占功能，通过

对 E 帧与 P 帧的识别并实现 E 帧对 P 帧的抢占；被测设备 2 需要把从被测设备 1 接收到的碎片帧按照正确的顺序进行重组。同一台设备需要分别被作为被测设备 1 与被测设备 2 进行抢占能力与重组能力的测试。

IEEE 802.1Qbu 协议测试主要验证以下内容：

- 正确识别 P 帧 E 帧；
- 高优先级正确抢占低优先级；
- P 帧重组能力。

进行上述三点功能时，将验证被测设备被抢占帧的重组功能、验证被测设备被抢占帧的保序能力、验证被测设备被抢占帧的最小分片能力、验证被测设备是否拒绝碎片计数具有无效值的碎片帧。

2.2.1.4 流过滤 (IEEE 802.1Qci)

➤ 测试拓扑

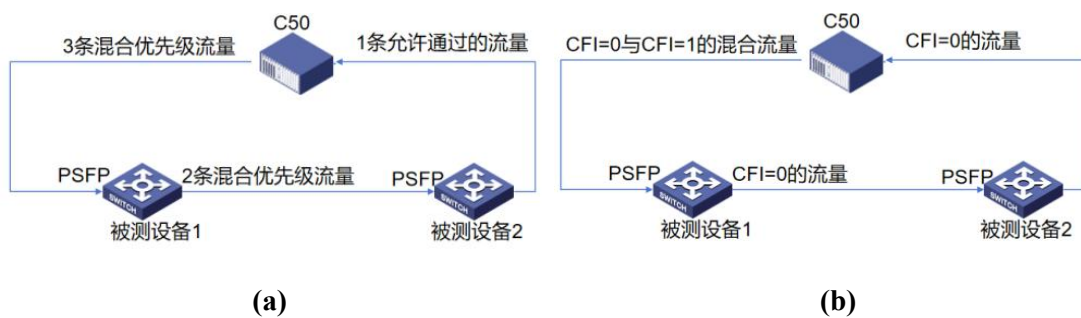


图 2-5 IEEE802.1Qci 测试组合及拓扑

➤ 测试内容

在进行两台设备之间的 IEEE 802.1Qci 协议测试时，采用如图 2-5(a)所示的连接拓扑验证交换机对于特定优先级的

流量的过滤能力，从测试仪表发出三条不同优先级的流量，先使得被测设备 1 过滤掉其中一个优先级的流量，被测设备 2 不进行过滤配置，在仪表的接收端进行一次抓包；然后将被测设备 2 配置为过滤掉另一优先级，在测试仪表的接收端再进行一次抓包。采用如图 2-5(b)所示的连接拓扑进行交换机识别并过滤黄色帧能力验证，通过将 VLAN 中的格式指示符（Canonical Format Indicator, CFI）字段进行 1 和 0 的标记进行黄色帧和绿色帧的区分；测试时，所有被测设备进行黄色帧识别模式的开启，交叉进行被测设备 1、被测设备 2 的丢弃与不丢弃，从而验证被测设备对于黄色帧的识别和丢弃是否正确响应。

IEEE 802.1Qci 协议测试主要验证以下内容：

- 验证被测设备是否在颜色感知模式下识别 Yellow 流量；
- 验证被测设备在色盲模式下未标识为 Yellow 流量；
- 验证被测设备是否在色盲模式下将黄色数据包声明为 Green；
- 验证被测设备当 DropOnYellow 参数设置为 True 时丢弃黄色数据包并且不丢弃多余的数据包；
- 验证被测设备是否允许具有匹配优先级和流句柄的流先决条件无测试设置；
- 验证被测设备在 StreamGate 打开时允许流通过特定

优先级；

- 验证被测设备在针对特定优先级关闭流门时不允许流通过。

2.2.1.5 帧复制与消除 (IEEE 802.1CB)

➤ 测试拓扑

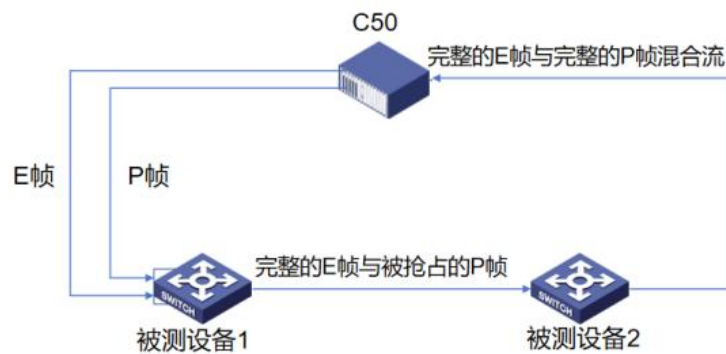


图 2-6 IEEE 802.1Qbu 两两对接测试拓扑

➤ 测试内容

在进行两台设备之间的 IEEE 802.1CB 协议测试时，采用如图 2-6 所示的连接拓扑验证交换机的帧复制与消除能力。测试仪表发送一条业务流量，被测设备 1 对该流量进行识别并复制，通过在被测设备的输出端口进行镜像并抓包查看其复制功能是否正确实现。被测设备 2 被配置为帧消除功能，将接收到的业务流与复制流进行消除，选择传输其中的一条流量，这条流量应该与测试仪表发送的流量相同；断掉业务流与复制流的其中一条链路，需要在测试仪表观察到业务并未中断。

IEEE 802.1CB 协议测试主要验证以下内容：

- 验证被测设备对帧复制、帧消除、帧合并的功能，具体验证被测设备是否为接收到的非 FRER 流的每个数据包生成序列号，并将流拆分为两个副本；
- 验证被测设备是否使用流拆分功能将 FRER 流拆分为两个副本；
- 验证被测设备是否恢复并消除具有重复序列号的数据包；
- 验证被测设备不会丢弃属于两个不同流的数据包。

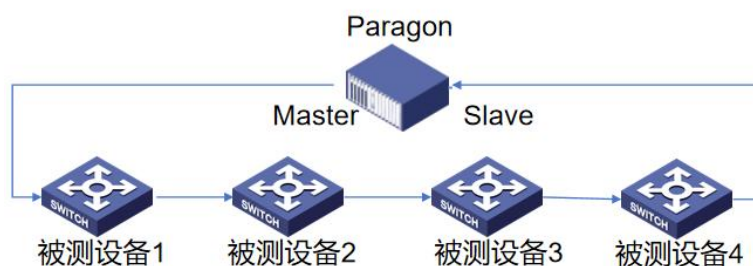
2.2.2 混合组网测试

由两台被测设备以上的组网互通测试主要包含 IEEE 802.1AS 协议测试以及 IEEE 802.1Qbv 门控调度测试。

2.2.2.1. 时钟同步

(1) 交换机组网测试

➤ 测试拓扑



(a)

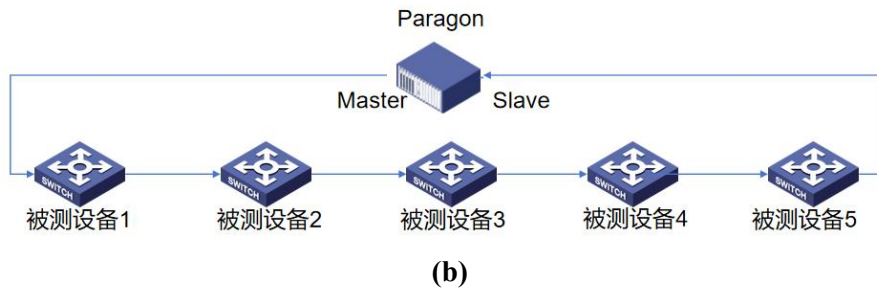


图 2-7 时钟同步多跳组网测试拓扑

➤ 测试说明

时钟同步多跳组网测试基于 IEEE 802.1AS 协议,分别使用四台被测设备和五台被测设备进行两次组网, 拓扑如图 2-7 所示。在稳态运行期间, 由六个及以下数量的时间感知实体 (即七跳及以下) 分隔的任何两个时间感知系统将同步到峰-峰值为 $1\ \mu\text{s}$ 以内 (见 IEEE Std 802.1AS-2011 附录 B 中 B.3 节的相关规定), 5 台交换机的测试拓扑中, 加上测试仪表的输入与输出端口与就已经达到了 7 跳, 由于多跳累计误差的存在, 跳数的增加可能会使得时间同步不能够成功实现, 本次时间同步的互通测试测试拓扑中最多包含 5 台被测设备。

测试时, 除了考察各个被测设备的时钟选源能力以及时钟同步是否收敛外, 还重点关注两个参数:

1、前向校正字段 (Forward Correction Field, Fwd CF) 精度: 衡量时间同步精度误差, 通过计算传输的 PTP 时间信息 (包括校正字段) 与时钟同步测试仪 Paragon-X 提供的参考时间相比得到的误差, 用以显示时钟同步的准确性。根据 IEEE 802.1AS 标准, 七跳以内的默认限值为 $\pm 500\text{ns}$;

2、邻居速率比 (Neighbour Rate Ratio, NRR) 精度: 衡

量频率误差，反映上游设备的速率偏移方面的准确性。该参数不准确会影响下游设备准确计算稳定频率的能力，根据 IEEE 802.1AS 标准，默认限值在 ± 0.1 百万分之一（Parts Per Million, ppm）之内。

在进行四台被测设备之间的组网测试时，总共使用迈威、研华、奕泰微、MOXA、三旺五个厂商所提供的设备进行测试；在进行五台被测设备的组网测试时，使用迈威、研华、奕泰微、ADI、MOXA、三旺所提供的设备进行测试。

（2）端设备+交换机混合组网测试

➤ 测试拓扑



图 2-8 2 台端设备+3 台交换机混合组网测试拓扑

➤ 测试说明

本次的端设备提供厂商为英特尔、三旺。在端设备+交换机混合组网时间同步互通测试中，端设备之间不直连，经过交换机组网后再进行测试，作为桥接设备的交换机从一台增加至最多三台，测试拓扑如图 2-8 所示，其中，交换机提供厂商包括三旺、迈威、研华、MOXA。

2.2.2.2 门控调度

➤ 测试拓扑

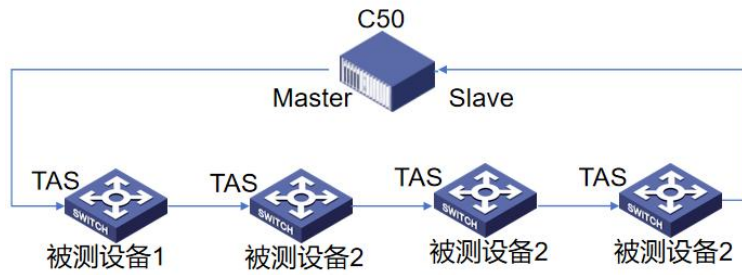


图 2-9 IEEE 802.1Qbv 四台交换机组网测试拓扑

➤ 测试说明

在 IEEE 802.1Qbv 的多跳组网测试中，分别对 3 台被测设备组网和 4 台被测设备组网的拓扑进行了搭建。由于门控调度精度受到时间同步精度的影响，时间同步精度会随着跳数的增加而下降，为了将同步误差控制在合理范围内，因此搭建了包括最多 4 台被测设备的网络，如图 2-9 所示。

三台被测设备的组网使用迈威、奕泰微、研华所提供的设备进行组网；四台被测设备的组网使用迈威、奕泰微、研华、MOXA 所提供的设备进行组网。其中的门控配置依旧使用两台被测设备的三个门控配置。

2.3 设备及配套版本

2.3.1 设备清单

设备类型	厂商	设备型号	软件版本
TSN交换机	迈威	MISCOM8216 TSN	内部版本

	研华	EKI-8510G-2F I-A	EKI-8510_1.0 0.04_r495;
		EKI-8528-4XF -A	EKI-8528-4XF _2.00.10_r498
	华为	----	内部版本
	MOXA	TSN-G5008-2G TXSFP	V1.0
	三旺	ICS5400TSN-2 4GT16GS4XS	----
TSN芯片模组	奕泰微	ETLX810	支持多种内部 版本
	ADI	ADIN6310	内部版本
TSN终端芯片 模组	三旺	RT1180	----
TSN端设备	英特尔	Q6AMV-BD1	内部版本
测试仪表	思博伦	C50	5.36
		N4U	5.49
	Calnex	Paragon-X	配套版本
	是德	Novus ONE	10.00.2312.4

		PLUS	
--	--	------	--

2.3.2 设备介绍

(1) 迈威 TSN 交换机



图 2-10 迈威 TSN 交换机

迈威 TSN 交换机 (MISCOM8216TSN) 具有 4 个万兆光口+4 个千兆光口+8 个千兆电口，可通过自协商与对端设备协商端口速率及双工模式，并且具备配套的可配置 web 页面支持的协议包括 IEEE 1588，IEEE 802.1AS，IEEE 802.1AS-2020，IEEE 802.1Qbv，IEEE 802.1Qbu，IEEE 802.1Qci，IEEE 802.1CB 支持万兆/千兆/百兆传输速率，单跳时延小于 5us，单台设备时间同步精度在 10ns 以内，最大可支持 20 级网络时间同步，时间同步偏差在 50ns 以内。

本次对其可支持的时间敏感网络基础协议 IEEE 802.1AS、IEEE 802.1Qbv、IEEE 802.1Qbu、IEEE 802.1Qci、IEEE 802.1CB 进行了互通测试。

(2) 研华 TSN 交换机

研华科技有限公司本次测试提供了两个不同型号的交换机进行测试。



图 2-11 研华 TSN 交换机-EKI-8510G-2FI-A



图 2-12 研华 TSN 交换机-EKI-8528-4XF-A

EKI-8510G-2FI-A: 支持 8 个千兆端口和两个千兆 SFP 端口，支持的协议包括 IEEE 1588v2, IEEE 802.1AS, IEEE 802.1Qci, IEEE 802.1CB, IEEE 802.1Qbv, IEEE 802.1Qbu 支持 10/100/1000Mbps 速率，以及自协商千兆光纤能够保证平均时延和最大时延分别在 $5.76\mu\text{s}$ 和 $5.79\mu\text{s}$ 以下、抖动在 $0.13\mu\text{s}$ 以下支持的软件版本为 EKI-8510_1.00.04_r495

EKI-8528-4XF-A: 3 个 8 千兆接口支持热插拔模块插槽+和 4 个万兆 SFP+接口，支持的协议包括 IEEE 1588v2, IEEE 802.1AS, IEEE 802.1Qci, IEEE 802.1CB, IEEE 802.1Qbv, IEEE 802.1Qbu 支持 24 个千兆速率，以及 4 个万兆 SFP 能够保证平均时延和最大时延分别在 $5.76\mu\text{s}$ 和 $5.79\mu\text{s}$ 以下、抖动在 $0.13\mu\text{s}$ 以下支持的软件版本为 EKI-8528-4XF_2.00.10_r498。

本次对其可支持的时间敏感网络基础协议 IEEE 802.1AS、IEEE 802.1Qbv、IEEE 802.1Qbu、IEEE 802.1Qci、IEEE 802.1CB 进行了互通测试。

(3) 华为 TSN 交换机



图 2-13 华为 TSN 交换机

本次互通测试对华为公司所提供的交换机进行的是 IEEE 1588v2 的 PTP 协议、IEEE 802.1Qbv 进行了测试。

(4) MOXA TSN 交换机



图 2-14 MOXA TSN 交换机-G5008-2GTXSFP

摩莎科技 TSN 交换机（TSN-G5008-2GTXSFP）是一款集成了时间敏感网络特性的工业以太网接入交换机，单端口最大带宽 1Gbps，具有 4 个 10M/100M/1000M 自适应电口，可通过自协商与对端设备协商端口速率及双工模式，单跳时延小于 10 μ s，抖动小于 500ns，时间同步精度 20ns，支持 8 个千兆以太网端口和 2 个光纤端口支持的协议包括 IEEE 1588v2、IEEE 802.1AS、IEEE 802.1Qbv。

(5) 三旺 TSN 交换机



图 2-15 三旺 TSN 交换机- ICS5400TSN-24GT16GS4XS

ICS5400TSN-24GT16GS4XS TSN 交换机：支持 24 路千兆电口、16 路千兆 SFP 插槽、4 路万兆 SFP+插槽支持 PTP 精确时间协议，提供亚微秒级同步精度，满足高精度时间同步要求支持 IEEE 802.1AS、IEEE 802.1Qbv、IEEE 802.1Qbu、IEEE 802.1CB、IEEE 802.1Qci 和 IEEE 802.1Qcc 等 TSN 时间敏感网络协议标准，为数据提供低时延、高可靠的确定性传输采用 Ring 环网专利技术，支持单环、耦合环、链环、Dual-homing 环网功能，网络故障自动恢复时间<20ms 可选直流或交流双电源冗余，输入电压 12~55VDC 或 85~264VAC，支持-40~75℃工作温度。

本次测试对其提供的交换机进行了 IEEE 802.1AS、IEEE 802.1Qbv、IEEE 802.1Qbu、IEEE 802.1CB、IEEE 802.1Qci 的互通测试。

(6) 奕泰微 TSN 交换芯片模组

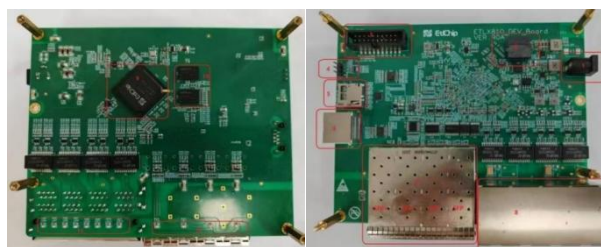


图 2-16 奕泰微 TSN 交换芯片模组

本次测试奕泰微提供了其推出的 TSN 以太网交换芯片星辰系列 ETLX810 芯片模组,支持 8 路 10/100/1000BASE-T、1 路 RGMII 接口和 4 路 Mult-Gig SERDES, SERDES 可灵活配置为 SGMII、2500BASE-X、10GBASE-R/XFI 等不同的工作模式单跳时延小于 3 μ s, 抖动 300ns, 时间同步精度小于 50ns 最大线速交换能力可达 33Gbps 支持丰富的 L2/L3 转发功能、支持 NAT 功能、支持 TSN 全系列协议, 包括 IEEE 802.1AS、IEEE 802.1CB、IEEE 802.1Qbu、IEEE 802.1Qat、IEEE 802.1Qav、IEEE 802.1Qbv、IEEE 802.1Qci、IEEE 802.1Qch 内置单核 RISC-32bit-CPU, 支持 L1/L2-Cache, 支持丰富的外设接口, 支持多种启动模式和灵活版本升级模式。

本次对其可支持的时间敏感网络基础协议 IEEE 802.1AS、IEEE 802.1Qbv、IEEE 802.1Qbu、IEEE 802.1Qci、IEEE 802.1CB 进行了互通测试。

(7) 亚德诺 (ADI) TSN 芯片模组

DITSN 芯片模组支持包括 TSN 在内的多种现场总线协议以向工业 4.0 过渡, 支持基本的 TSN 以太网功能, 以及传统工业以太网与 TSN 网络的协议转化, 未来可用于低复杂度的边缘 TSN 以太网助力传统工业网络与时间敏感网络的融合和演进。

本次对其可支持的时间敏感网络基础协议 IEEE

802.1AS、IEEE 802.1Qbv 进行了互通测试。

(8) 三旺 TSN 终端芯片模组

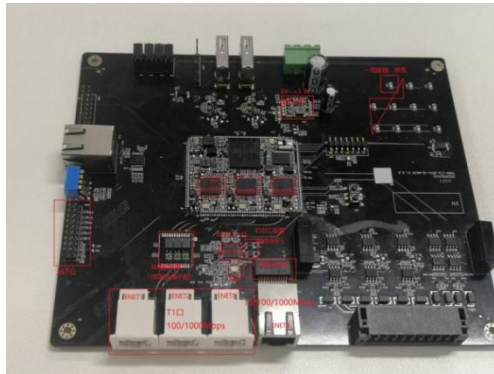


图 2-17 三旺 TSN 终端芯片模组-RT1180

RT1180 端设备：内置 RT1189 芯片，支持 3 路 100BASE-T1/1000BASE-T1。单跳时延在外接 T1 转换器的条件下小于 $15\mu\text{s}$ ，抖动 300ns ，时间同步精度小于 30ns 。最大线速交换能力可达 5Gbps 。RT1180 搭载了 NETC 模块，其包含 TSN Switch 以及普通以太网控制器功能的模块，此模块中的 TSN Switch 引出了 4 个 1G 物理接口，并且内部还包含了一个虚拟接口，最高能够提供 5Gbps 的数据转发能力。支持 TSN 全系列协议，包括 IEEE 802.1AS、IEEE 802.1CB、IEEE 802.1Qbu、IEEE 802.1Qav、IEEE 802.1Qbv、IEEE 802.1Qci、IEEE 802.1Qch。内置双核 cortex-M33 和 cortex-M7，支持 L1/L2-Cache，支持丰富的外设接口。RT1180 还搭载了 EdgeLock®安全锁区，这是一种预先配置的自管理式自主片上安全子系统。该子系统能够为工业物联网应用实现可靠的系统级安全智能，降低安全实现的复杂性。

本次测试将该端设备与英特尔公司提供的端设备结合

部分厂家的 TSN 交换机进行了 IEEE 802.1AS 与 IEEE 802.1Qbv 的互通测试。测试时将其置于整个网络的末端进行测试，并且通过命令行对其进行状态进行捕捉和监控。

(9) 英特尔端设备



图 2-18 英特尔端设备

本次英特尔提供的端设备为搭载酷睿第 12 代处理器 (Q6AMV-BD1), 具备 6 个千兆网口 (Intel I210AT & I225-V); 1 个 TSN 千兆网口: Intel Corporation Ethernet Controller I226-T1; PCIe 可扩展; 1 个 DP1.4a (最大输出分辨率: 7680 × 4320, 60Hz); 1 个高清晰度多媒体接口 (High-Definition Multimedia Interface, HDMI) 2.0b (最大输出分辨率: 4096 × 2160, 60Hz); 6 个 USB3.0 接口, 2 个 RS232 串口 (均支持 RS232/485/422); 1 个复合 IO 接口 (8DI&8DO、4 路光源输出、4 路外触发输入); 1 个 LINE-OUT 3.5mm 音频输出插座; 1 个 MIC-IN 3.5mm 音频输入插座; 1 个 M.23042/52B-Key (支持 4G/5G 模块扩展); 1 个 M.2 2230 E-Key (支持 WIFI+蓝牙扩展); 2 个 PCIE X16 扩展槽 (PCIE X8 信号); 3 个预留 SMA 天线扩展孔位。本次测试将其与三旺公司所提供的端设备经过 TSN 交换机进行互通测试, 对

IEEE 802.1AS 以及 IEEE 802.1Qbv 进行了测试。

(10) 思博伦 C50 测试仪



图 2-19 思博伦 C50 测试仪

思博伦公司的 C50 型号测试仪不仅可以支持传统的以太网功能及性能测试，并且是搭配 TT Workbench 可以进行包括时间敏感网络特性在内的以太网协议一致性测试的综合以太网测试仪表。

(11) Paragon-X 时钟同步测试仪



图 2-20 Calnex Paragon-X 时钟同步测试仪

Calnex 公司的 Paragon-X 可以对同步以太网（Synchronous Ethernet, SyncE）、PTP、gPTP 和网络时间协议（Network Time Protocol, NTP）同步机制从抖动和漂移到测量恢复本次测试中，我们将其用于 IEEE802.1AS 的时间同步测试，并主要关注时间同步精度、NRR 是否符合标准要求。

(12) 是德 ixia Novus ONE PLUS 测试仪



图 2-21 是德 ixia Novus ONE PLUS 测试仪

是德科技有限公司提供的 Novus ONE PLUS 将便携性和高性能融为一体,可以基于铜缆和光纤介质创建经济高效的以太网测试环境本次测试 IEEE 802.1Qbv 门控调度的功能时,将其用于观察各个门控落窗是否正确。

2.4 主要测试内容

测试项目	主要测试内容	测试项	测试仪
时钟同步	IEEE 1588v2	华为+研华1	N4U
		华为+研华 2	
		华为+迈威	
Time Synchronization	IEEE 802.1AS	MOXA+研华1	Paragon-X
		MOXA +奕泰微	
		研华2+奕泰微	
		迈威+奕泰微	

		迈威+ADI	
		三旺+迈威	
		迈威+研华1+研华2+奕泰微	
		迈威+奕泰微+研华1+MOXA	
		三旺+迈威+研华1+MOXA	
		三旺+迈威+研华1+奕泰微+MOXA	
		ADI+MOXA+迈威+研华1+研华2	
		MOXA+研华1+研华2+迈威	
		MOXA+研华1+研华2+奕泰微	
门控调度 Time-aware	IEEE 802.1Qbv	迈威+奕泰微	C50+Novus ONE PLUS
		迈威+研华1	
		研华1+奕泰微	

Shaping (TAS)		研华1+ MOXA	
		ADI+ MOXA	
		华为+研华1	
		ADI+迈威	
		迈威+奕泰微+研华1	
		迈威+奕泰微+研华1+ MOXA	
帧抢占 Frame Preemption	IEEE 802.1Qbu	研华1+迈威	C50
		迈威+研华1	
		迈威+研华2	
		研华2+迈威	
		研华1+研华2	
		研华2+研华1	
		迈威+奕泰微	
		奕泰微+迈威	
		奕泰微+研华1	
研华1+奕泰微			
流过滤	IEEE	迈威+研华1	C50

Per-Stream Filtering and Policing(PSFP)	802.1Qci	研华2+迈威	
		研华1+研华2	
		奕泰微+研华1	
		奕泰微+迈威	
帧冗余 Frame Replication and Elimination for Reliability (FRER)	IEEE 802.1CB	奕泰微+迈威	C50
		迈威+奕泰微	
		研华1+奕泰微	
		奕泰微+研华1	
		迈威+研华1	
		研华1+迈威	
		迈威+研华2	
		研华2+迈威	

注：表中研华 1 为：研华交换机 EKI-8510G；研华 2 为：
研华交换机 EKI-8528-4XF

三、测试情况

3.1 两两对接测试情况

3.1.1 时钟同步

(1) IEEE 802.1AS

在测试过程中，被测设备时钟选源能力、gPTP 的 domainNumber 填充、gPTP 消息中的目标地址、源地址、被测设备 time-aware Bridge 时间同步误差皆满足测试要求。

两台设备对接的时间同步测试总共使用迈威、研华、奕泰微、ADI、MOXA、三旺六个厂商所提供的六台设备进行对接测试，在进行被测设备 time-aware Bridge 频率同步误差的测试中，某些厂商作为上游设备的组合下未通过，频率误差大于标准规定的 0.1ppm，并且当频率误差大于 0.1ppm 时将会影响时间同步误差，使得下游设备出现时间同步无法锁定的异常状态。

(2) IEEE 1588v2

采用华为、研华、迈威三个厂商提供的设备进行对接测试，对于 2.2.1.1 节中 IEEE 1588v2 协议的验证点，被测设备均能够正常实现，且其时间同步误差在 50ns 左右。

3.1.2 门控调度 (IEEE 802.1Qbv)

采用华为、迈威、研华、奕泰微、ADI、MOXA、三旺

七个厂商所提供的设备进行两两对接测试。测试结果表明，被测设备的 QoS 队列优先级数目功能、各个优先级转发时延、在复杂优先级对 IEEE 802.1Qbv 时间感知流量整形调度功能的支持情况、对 IEEE 802.1Qbv 时间感知流量整形调度的门持续时间、门控周期的设置功能、门控打开周期内准确传送报文的能力、门控队列关闭功能皆满足测试要求。

两台交换机串联时各优先级平均转发时延最大为 12.1 μ s；在复杂优先级情况下，两台交换机串联时各优先级平均转发时延最大为 8.9 μ s；在 1ms 的传输周期中，两台交换机串联时交换机的最小门控能够达到 7.3 μ s。

3.1.3 帧抢占 (IEEE 802.1Qbu)

帧抢占测试共使用迈威、研华、奕泰微、三旺四个厂商所提供的设备进行两两对接测试。测试结果表明，被测设备被抢占帧的重组功能、被抢占帧的保序能力、被抢占帧的最小分片能力、能够拒绝碎片计数具有无效值的碎片帧均满足测试要求。

3.1.4 流过滤 (IEEE 802.1Qci)

流过滤测试使用迈威、研华、奕泰微、三旺四个厂商所提供的设备进行两两对接测试。测试结果表明，所有厂商提供的被测设备均能够实现流量识别与过滤的功能，被测设备

是否在颜色感知模式下识别黄色流量、是否在色盲模式下将黄色数据包声明为绿色、当 DropOnYellow 参数设置为 True 时丢弃黄色数据包并且不丢弃多余的数据包、验证被测设备是否允许具有匹配优先级和流句柄的流先决条件无测试设置、验证被测设备在 StreamGate 开关为时允许特定优先级流通过情况皆满足测试要求。

3.1.5 帧复制与消除 (IEEE 802.1CB)

帧复制与消除测试使用迈威、研华、奕泰微、三旺四个厂商所提供的设备进行两两对接测试。测试结果表明，所有厂商所提供的被测设备能够为接收到的非 FRER 流的每个数据包生成序列号，并将流拆分为两个副本；可启用是否使用流拆分功能将 FRER 流拆分为两个副本、可启用是否恢复并消除具有重复序列号的数据包、可启用是否会丢弃属于两个不同流的数据包。

3.2 混合组网测试情况

由两台被测设备以上的组网互通测试主要包含 IEEE 802.1AS 协议测试以及 IEEE 802.1Qbv 门控调度测试。

3.2.1 时钟同步

(1) 交换机组网测试

在进行四台被测设备的混合组网测试时，使用迈威、研

华、奕泰微、MOXA、三旺五个厂商所提供的设备进行测试；在进行五台被测设备的组网测试时，使用迈威、研华、奕泰微、ADI、MOXA、三旺所提供的设备进行测试。

测试结果表明，当部分厂商所提供的交换设备作为上游设备时，会导致下游设备与其共同组成的时间敏感网络无法实现时间同步，且频率偏移较大（NRR 超过 0.1ppm，如图 3-1 所示）。但是将其作为最末端设备时，原先参与组网的设备构成的新网络能够实现频率同步和时间同步。其原因可能是对结果产生影响的设备的时钟频率相对于测试仪表的时钟频率有较大偏差，并且一些厂商的设备并不对 NRR 进行修正。时钟频率偏移较大的设备不作频偏修正且作为上游设备时，便会产生偏差，以此偏差进行时钟传输便导致了整个网络无法达到 $\pm 0.1\text{ppm}$ 以内的要求。

```
sequenceId: 12351
controlField: Follow_Up Message (2)
logMessagePeriod: -3 (0.125000 s)
preciseOriginTimestamp (seconds): 1643373358
preciseOriginTimestamp (nanoseconds): 368429240
v Follow Up information TLV
  tlvType: Organization extension (0x0003)
  lengthField: 28
  organizationId: 32962
  organizationSubType: 1
  cumulativeScaledRateOffset: -5497
  [cumulativeRateRatio: 0.999999997500254]
  gmTimeBaseIndicator: 0
  lastGMPhaseChange: 000000000000000000000000
  scaledLastGmFreqChange: 0
  > [calculatedSyncTimestamp: 1643373358.41608]
  [calculatedSyncRateRatio: 0.999995424988202]
  [calculatedSyncRateRatio PPM: 4]
```

图 3-1 组网互通测试中某次未实现时间同步的抓包结果（Rate Ratio: 4ppm）

在正确实现时间同步的组合中，七跳内时间同步精度误差最大为 92ns，被测设备时钟选源能力、被测设备 gPTP 的 domainNumber 填充、被测设备 gPTP 消息中的目标地址，源地址、被测设备 time-aware Bridge 时间同步误差皆满足测试

要求。

(2) 端设备+交换机混合组网测试

本次的端设备提供厂商有英特尔、三旺，在端设备时间同步互通测试中，端设备之间不直连，经过交换机组网后再进行测试，作为桥接设备的交换机从一台增加至最多三台。测试结果表明，端设备与交换机相较而言时间同步精度较低。Fwd CF 精度误差最大在微秒级别；NRR 精度高于 0.1ppm，超过 IEEE 802.1AS 标准对于时间感知系统的要求。其原因分析如下：

频率同步影响着时间同步，当时钟频率比存在较小的偏差时，将会对时间同步的精度产生较大的影响。在进行互通测试时，端设备没有被当作桥接设备接入到网络中，而是被置于网络的最末端，时间同步消息的优先级由一侧端设备向另一侧端设备逐级递减，端设备之间由交换机相连。这样的拓扑将使得其中一个端设备作为主时钟进行时间同步，其中晶振的精度相较于使用时钟测试仪表进行测试是有所下降的，且交换机与端设备之间的晶振频率有所偏差，若交换机或者端设备不进行频偏修正，这将使得时间同步误差进一步增大。

3.2.2 门控调度

三台被测设备的组网使用迈威、奕泰微、研华所提供的

设备进行组网；四台被测设备的组网使用迈威、奕泰微、研华、MOXA 所提供的设备进行组网。测试结果表明，三台交换机串联时，各优先级的流量平均时延最大为 $16.4\mu\text{s}$ ，四台交换机串联时各优先级的流量最大时延为 $21.4\mu\text{s}$ ；在复杂优先级情况下三台交换机串联时各优先级平均转发时延最大为 $12.4\mu\text{s}$ ，四台交换机串联时各优先级平均转发时延最大为 $24.6\mu\text{s}$ ；在 1ms 的传输周期中三台交换机串联时交换机的最小门控能够达到 $17.2\mu\text{s}$ ，四台交换机串联时交换机的最小门控能够达到 $22.3\mu\text{s}$ 。需要注意的是，在串联四台交换机时，由于将门控设置为 $10\mu\text{s}$ 的开门时间是较为严格的，正常发包无法满足正确落窗，出现了门控偏移的情况，我们调整发包 offset 后才能够正确落窗，其原因分析如下：

当交换机跳数过多时，同步精度会逐跳下降，导致门控 Base time 无法对齐，从而产生门控偏移现象，使得各优先级传输时等待时间窗的时延变大，当串联四台交换机时，还需要额外调整发包 Offset 参数，使发包与开门对齐。

3.3 总体结论

测试结果的整体情况如下：

(1) 从当前测试情况来看，大部分支持 IEEE 802.1AS 的精确时间同步特性的时间敏感网络设备能够在 5 跳之内相互同步，并维持良好的时间同步精度和频率同步精度，各厂

家之间基本能够实现时间同步功能的互通。

(2) 当前测试结果显示,有极少数厂商在 IEEE 802.1AS 同步中,不对频偏进行修正,导致这个问题的原因是各厂商对于 IEEE 802.1AS 同步协议的理解有所差异。

(3) 目前有部分厂商不支持 IEEE 802.1AS 时间同步,仅支持 IEEE 1588v2 同步。在对接测试中,各厂商均能够实现 IEEE 1588v2 同步的良好互通。

(4) 各厂商均能够对门控调度、帧抢占、流过滤、帧冗余协议提供良好的协议一致性以及精度,并且多厂商互通测试时也表现出很好的协议一致性与精度,体现出各厂商对于这些协议的理解与标准一致性较高。

(5) 混合组网时钟同步测试中,交换机组网时,部分厂商设备作为上游会导致网络无法时间同步且频率偏移大,作为末端则新网络可同步,正确同步组合在七跳内精度等均达标;端设备与交换机混合组网时,端设备时间同步精度较低,相关精度误差超过标准要求。

(6) 混合组网门控调度测试中,三台、四台交换机串联时,不同情况下各优先级流量平均时延不同,且四台串联时因门控设置严格出现偏移,可通过额外调整参数使发包与开门对齐来解决。

注:涉及到技术细节的详细测试情况在本版本中略去。

四、发展建议

工业互联网是新一代信息技术与制造业深度融合的产物，而 TSN 技术作为工业互联网的重要支撑技术之一，其互通性测试对于推动工业互联网的发展具有重要意义，通过测试验证的 TSN 网络设备可以更好地融入工业互联网体系，确保用户在实际应用中获得稳定、可靠的网络通信性能，有助于降低用户的运维成本，提高生产效率和质量。

本次网络设备互通测试（2024.07）在中国信息通信研究院的组织下，联合各设备厂商和仪表厂商成功展开。从当前测试情况来看，在由芯片厂商、设备制造商、解决方案提供商、行业协会和测试方共同组成的 TSN 生态系统中，各方合作取得了一定成果。

参与此次互通测试的支持 TSN 功能的交换机、芯片以及端设备等相关设备在时间同步、门控调度、帧抢占、流过滤、帧复制与消除协议能够提供良好的协议一致性以及精度，体现出各厂商对于这些协议的理解与标准一致性较高。但也要看到，目前也存在少数厂商设备在互通测试中仍存在一些问题，如对于时间同步中，不对频偏进行修正；不支持 IEEE 802.1AS 时间同步，仅支持 IEEE 1588v2 同步；多跳门口偏移的现象；端设备与交换机相较而言时间同步精度较低等。未来希望各设备厂商进一步完善相关功能，为制造业的数字

化转型和智能化升级提供有力支持。

基于此次互通测试的结果，给出如下发展建议。

4.1 持续布局

(1) 设备级布局：强化核心器件与协议支持

在设备级方面，建议着重于芯片与模组优化、设备功能升级及端侧设备协同。

芯片与模组优化：推动国产芯片厂商加速 TSN 协议栈的完整集成，支持 IEEE 802.1AS-Rev、IEEE 802.1Qbv 等关键协议，提升时间同步精度（如端设备同步误差从微秒级优化至亚微秒级），并完善频偏修正功能，解决多跳组网中的 NRR 偏移问题。

设备功能升级：鼓励交换机厂商加强设备级功能适配，支持动态门控调度（如最小门控周期 $\leq 10\mu\text{s}$ ）、多路径冗余（IEEE 802.1CB）等特性，提升复杂场景下的确定性传输能力。

端侧设备协同：推动端设备（如三旺 RT1180、英特尔 TSN 网卡）与交换机的深度协同，优化时钟晶振精度与同步算法，减少末端设备的时间累积误差。

(2) 行业级布局：推动跨行业场景落地

针对行业级应用，希望相关行业聚焦于重点行业的深耕、场景化解决方案的开发以及测试认证体系的建立。

重点行业深耕：针对汽车制造、电力自动化、轨道交通等高实时性需求领域，制定行业专属 TSN 应用规范（如车载网络的时间同步精度 $\leq 100\text{ns}$ ），联合头部企业（如施耐德、西门子）打造示范性工厂网络。

场景化解决方案：结合行业特性开发定制化方案，例如在工业控制中融合 TSN 与 OPC UA 协议，实现控制层与数据层的无缝互通；在智能电网中整合 TSN 与 5G 冗余传输，提升电力调度的可靠性。

测试认证体系：建立行业级 TSN 测试平台（如 AII 互通测试环境），完善功能、性能及互操作性认证标准，确保设备符合行业严苛要求。

（3）产业级布局：构建开放协同生态

从产业级视角出发，建议致力于产业链纵向整合、跨领域技术融合以及国际标准话语权的提升。

产业链纵向整合：加强芯片厂商、设备制造商、解决方案提供商与终端用户（如车企、能源企业）的协作，形成“芯片-设备-应用”闭环，降低 TSN 部署成本。

跨领域技术融合：推动 TSN 与 5G、边缘计算、人工智能（Artificial Intelligence, AI）的深度融合，探索“5G+TSN”工业无线组网方案，支持柔性制造、远程运维等新型业务场景。

国际标准话语权：依托 CCSA、AII 等组织，深度参与

IEC/IEEE 60802、3GPP TS 24.519 等国际标准制定，输出中国方案（如多域 TSN 配置管理模型），提升全球产业影响力。

4.2 挑战和建议

面对技术标准、产业发展和应用发展的多重挑战，我们需要不断推进技术研发、加强产业合作、完善标准体系建设，并积极探索新的应用场景，以加速 TSN 技术的普及和应用。

（1）技术标准

尽管 TSN 协议族已经基本完备，但在实际应用中仍面临一些挑战。首先，部分厂商的设备仅支持 IEEE 1588v2 同步而非 IEEE 802.1AS 时间同步，这在多厂商互通测试中可能导致时间同步精度不足的问题。其次，虽然大多数厂商能够实现良好的门控调度、帧抢占、流过滤和帧复制与消除协议的一致性，但在多跳组网中仍存在同步误差（如 NRR 超过 0.1ppm），需要进一步优化频偏修正功能。建议各厂商加强在这些方面的研发，确保设备能够满足更高的时钟同步精度要求，并积极推动相关标准的制定和完善。

（2）产业发展

TSN 产业的发展已经取得了显著进展，但仍面临一些瓶颈。一方面，芯片和自动化设备端主要以国外企业为主，国内厂商主要集中在网络设备端，这在一定程度上限制了国内产业链的整体竞争力。因此，建议国内厂商加大对 TSN 核心

技术的研发投入，尤其是芯片级的支持，提升国产化水平。另一方面，尽管许多厂商已经推出了支持 TSN 特性的交换机、芯片及端设备，但市场上产品的兼容性和互操作性仍有待提高。为此，可以借鉴 AII 组织的互通测试经验，建立更加完善的测试认证体系，推动行业标准化进程，促进设备间的互联互通。

(3) 应用发展

在实际应用方面，TSN 技术已经在多个领域展示了其优势，但要实现大规模推广和落地仍需克服一些障碍。首先，在复杂场景下的确定性传输能力仍有待提升，尤其是在无线 TSN 和多域网络的应用中，需要解决多跳组网中的门控偏移问题。建议通过技术创新和优化算法，增强设备在网络复杂环境下的性能表现。其次，跨行业的应用场景需求各异，定制化的解决方案开发难度较大。可以通过联合头部企业（如施耐德、西门子）打造示范性工厂网络，并结合行业特性开发定制化方案，例如在工业控制中融合 TSN 与 OPC UA 协议实现无缝互通。此外，推动 TSN 与 5G、边缘计算、AI 的深度融合，探索新型业务场景（如柔性制造、远程运维），为各行各业提供更高效、可靠的数据传输服务。

附录

A、引用标准

- 3GPP TS 24.519 Rel-17 Protocol for User Equipment (UE) Policy Configuration in 5G System (5GS) Time Sensitive Communication (TSC) Applications; Stage 3(5G系统时间敏感通信应用中的用户设备策略配置协议；第3阶段)
- IEC/IEEE Std 60802-2025 IEC/IEEE Standard for Time-Sensitive Networking Profile for Industrial Automation(IEC/IEEE工业自动化时间敏感网络(TSN)配置文件标准)
- IEC Std 62439-3:2021 Industrial Communication Networks—High Availability Automation Networks—Part 3: Parallel Redundancy Protocol (PRP) and High-availability Seamless Redundancy (HSR)(工业通信网络——高可用性自动化网络——第3部分：并行冗余协议(PRP)和高可用性无缝冗余(HSR))
- IEEE Std 1588-2019 IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems (用于网络测量和控制系统的精密时钟同步协议的IEEE标准)
- IEEE Std 802.1AS-2011 IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications (IEEE局域网和城域网标准--时间敏感应用的局域网和城域网定时与同步标准)
- IEEE Std 802.1AS-2020 IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications (IEEE 局域网和城域网标准-时间敏感应用的局域网和城域网定时与同步标准)
- IEEE Std 802.1ASdn-2024 IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Enhancements to IEEE 802.1AS for Configurability and Remote Management in Time-Sensitive Applications (IEEE 局域网和城域

	网标准-增强 IEEE 802.1AS 在时间敏感应用中的可配置性和远程管理能力标准)
IEEE Std 802.1ASdm-2024	IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Hot Standby and Clock Drift Optimization for IEEE 802.1AS (IEEE 局域网和城域网标准-IEEE 802.1AS 的热备份和时钟漂移优化标准)
IEEE Std 802.1CB-2017	IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Frame Replication and Elimination for Reliability (IEEE 局域网和城域网标准-基于可靠性的帧复制和消除)
IEEE Std 802.1DC-2024	IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Quality of Service (QoS) Enhancements for Time-Sensitive Networking (IEEE 局域网和城域网标准-时间敏感网络服务质量 (QoS) 增强标准)
IEEE Std 802.1Q-2018	IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Bridges and Bridged Networks (IEEE 局域网和城域网标准 桥接和桥接网络)
IEEE Std 802.1Qcw-2023	IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - YANG Data Models for Timing, Frame Preemption, and Per-Stream Filtering and Policing (IEEE 局域网和城域网标准-局域网和城域网定时、帧抢占及逐流过滤与管制 YANG 数据模型标准)
IEEE Std 802.1Qdj-2024	IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Simplified Configuration for Time-Sensitive Networking Devices (IEEE 局域网和城域网标准-时间敏感网络设备简化配置标准)
IEEE Std 802.1Qdx-2024	IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - YANG Data Model for Credit-Based Shaping (CBS) IEEE 局域网和城域网标准-基于信用的整形 (CBS) YANG 数据模型标准)
IEEE Std 802.1Qbv-2018	(Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Media Access Control (MAC) Bridges and Virtual Bridged Local Area Networks Amendment: Enhancements for Scheduled Traffic(局域网和城域网

	标准-媒体访问控制（MAC）网桥和虚拟桥接局域网修正案：针对计划流量的增强功能)
IEEE Std 802.1Qbu-2016	IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Bridges and Bridged Networks - Amendment 26: Frame Preemption (IEEE 局域网和城域网标准-网桥和桥接网络-修订 26: 帧抢占)
IEEE Std 802.1Qcc-2018	IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Bridges and Bridged Networks—Amendment 31: Stream Reservation Protocol (SRP) Enhancements and Performance Improvements(IEEE 局域网和城域网标准——桥接网络与桥接设备——修正案 31: 流预留协议（SRP）增强与性能改进)
IEEE Std 802.1Qch-2017	IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Bridges and Bridged Networks—Amendment 29: Cyclic Queuing and Forwarding(IEEE 局域网和城域网标准——桥接网络与桥接设备——修正案 29: 循环排队与转发)
IEEE Std 802.1Qci-2017	IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks --Bridges and Bridged Networks - Amendment 28: Per-Stream Filtering and Policing (IEEE 局域网和城域网标准-网桥和桥接网络-修订 28: 逐流过滤和监管)
IEEE Std P802.1DG-2025	IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—TSN Profile for Automotive In-Vehicle Ethernet Communications(IEEE 局域网和城域网标准——面向汽车车载以太网通信的时间敏感网络（TSN）配置文件)
YD/T 4504 - 2023	超高精度时间同步接口要求
YD/T 4492 - 2023	工业互联网 时间敏感网络技术要求
YD/T 4800 - 2024	路由域通用YANG数据模型技术要求
YD/T 4738 - 2024	5G移动通信网支持时间敏感网络（TSN）技术要求（第一阶段）
YD/T 6114 - 2024	工业互联网 时间敏感网络与移动前传网络融合部署技术要求

YD/T 4671 - 2024

工业互联网 时间敏感网络集中网络配置技术要求

YD/T 4134-2022

工业互联网 时间敏感网络需求及场景

T/CCSA 445-2023

工业互联网 时间敏感网络交换机技术要求



工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet

B、缩略语

3GPP	第三代合作伙伴计划	3rd Generation Partnership Project
5G	第五代移动通信技术	5th Generation Mobile Communication Technology
AI	人工智能	Artificial Intelligence
IIA	工业互联网产业联盟	Industrial Internet Alliance
AVB	音视频桥接技术	Audio Video Bridging
ATS	异步流量整形	Asynchronous Traffic Shaping
CBS	基于信用的整形	Credit-Based Shaping
CCA	一致性等级A	Conformance Class A
CCB	一致性等级B	Conformance Class B
CCSA	中国通信标准化协会	China Communications Standards Association
CF	校正字段	Correction Field
CFI	格式指示符	Canonical Format Indicator
CQF	循环排队与转发	Cyclic Queuing and Forwarding
EtherCAT	以太网控制自动化技术	Ethernet Control Automation Technology
Fraunhofer FOKUS	弗劳恩霍夫应用研究促进协会开放通信系统研究所	Fraunhofer Institute for Open Communication Systems
Fwd CF	前向校正字段	Forward Correction Field
FRER	帧复制与消除	Frame Replication and Elimination for Reliability
gPTP	广义精确时间协议	Generalized Precision Time Protocol
HDMI	高清晰度多媒体接口	High-Definition Multimedia Interface
IEC	国际电工委员会	International Electro-technical Commission
IEEE	电气和电子工程师协会	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IIC	工业互联网联盟	Industry IoT Consortium
IT	信息技术	Information Technology
NTP	网络时间协议	Network Time Protocol
NRR	邻居速率比	Neighbour Rate Ratio

OPC UA	开放平台通信统一架构	Open Platform Communications Unified Architecture
OT	运营技术	Operational Technology
ppm	百万分之一	Parts Per Million
PTP	精确时间协议	Precision Time Protocol
PSFP	逐流过滤与管制	Per-Stream Filtering and Policing
QoS	服务质量	Quality of Service
SP	严格优先级调度	Strict Priority
SyncE	同步以太网	Synchronous Ethernet
TSN	时间敏感网络	Time-Sensitive Networking
VLAN	虚拟局域网	Virtual Local Area Network



工业互联网产业联盟
Alliance of Industrial Internet