



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

SPE+TSN融合技术与产业发展 报告 (2026年)

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

SPE+TSN 融合技术与产业发展 报告 (2026 年)

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（注明是引自其他方的内容除外），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

联系电话：010-62305887

邮箱：aia@caict.ac.cn

编写说明

随着数智化技术的快速发展，现代工业网络面临着日益增加的需求，尤其是在实时控制、大数据分析和大规模设备接入等新兴应用场景中，这些需求对网络的确定性、可靠性和带宽等提出严峻挑战。传统的工业网络架构，特别是基于现场总线 and 传统以太网的系统，已无法满足高效、低延迟和高可靠性的数据传输需求。

为应对这些挑战，单对线以太网（Single Pair Ethernet, SPE）和时间敏感网络（Time-Sensitive Network, TSN）逐渐引起业内的广泛关注和应用。SPE 通过简化布线、降低成本和高效传输的特性，可解决物联网、车载网络和工业自动化等对通信带宽和物理空间限制问题；TSN 则在传统以太网基础上，提供精准时间同步能力，并通过流量调度等技术，为数据传输提供确定性时延、高可靠性和高带宽，满足了对实时性控制和数据传输的严格要求。因此，SPE 和 TSN 的融合技术推动“一网到底”的以太网架构，是当前工业互联网、智能制造、车载通信等领域的重要发展方向。

本报告系统分析了 SPE 与 TSN 技术的基本原理、发展现状及其在工业自动化、车载网络、楼宇自动化等领域的融合应用。首先，本报告介绍了 SPE 与 TSN 的技术背景及其各自的优势，探讨了这两者如何通过技术融合解决传统网络

架构无法满足的挑战。其次，结合行业应用案例，阐述了SPE+TSN融合技术在各领域的实际应用价值，重点分析了该技术如何推动智能制造和工业互联网的发展，并为各行业的数字化转型提供技术支持。此外，本报告还讨论了当前技术融合面临的挑战，如标准适配、设备互联、生态系统建设等问题，并对未来SPE+TSN技术的发展趋势进行了展望，指出随着标准化进程的推进及技术生态的完善，该技术将在全球范围内的工业通信中占据核心地位。

本报告旨在为相关领域的技术研发、产业链建设及政策制定提供理论依据和实践指导，推动工业通信技术的创新与应用。

牵头编写单位：中国信息通信研究院

参与编写单位（排名不分先后）：深圳三旺通信股份有限公司

紫金山实验室、深圳市汇川技术股份有限公司、华为技术有限公司、长城汽车股份有限公司、北京邮电大学、摩莎科技（上海）有限公司

编写组成员（排名不分先后）：

张恒升、邢可欣、徐龙、阳桂林、贾焱鑫、李庆、严园园、郭恒宇、杨添乐、陈李昊、李广鹏、路燕燕、李腾飞、朱海龙、荆斌等

目 录

一、SPE+TSN 融合发展背景	1
二、SPE 与 TSN 技术概述	3
(一) SPE 技术概述	3
(二) TSN 技术概述	8
三、SPE+TSN 融合技术	11
(一) SPE+TSN 融合技术概述	11
(二) SPE+TSN 融合技术优势	12
(三) SPE+TSN 产业生态发展现状	14
(四) SPE+TSN 融合设计与实现	15
四、SPE+TSN 融合架构应用场景	18
(一) 工业自动化应用	18
(二) 汽车以太网应用	23
(三) 楼宇自动化应用	28
(四) 轨道交通应用	30
五、技术融合挑战与未来展望	32
(一) 技术融合挑战	32
(二) 未来发展方向与趋势	33
参考文献	35

一、SPE+TSN 融合发展背景

工业网络经历了从现场总线到工业以太网的演进，但随着智能制造、人工智能和工业互联网等新兴技术的兴起，现有的网络架构已无法满足未来的需求。带宽、时延、可靠性、扩展性与运维等方面的挑战，推动产业迫切寻求统一而高效的通信架构，从专用封闭网络向通用开放网络技术发展。

（一）现场通信技术的现状与挑战

工业现场网络技术，尤其是传统的现场总线（如 Profibus、Modbus RTU 等），曾在特定行业中发挥重要作用。然而，随着智能化和工业互联网的快速发展，传统现场总线的局限性日益凸显，面临以下主要挑战：**首先，现有现场通信技术在支持超大规模组网及高带宽要求方面存在瓶颈。**

现场智能化对大规模终端（可达十万量级）的高效接入与管理提出需求。然而，现有网络在扩展性和组网复杂度方面受限，维护难度高，难以实现‘即插即用’与简易运维。**其次，随着视觉、AI 等应用的深入部署，现场网络须同时兼顾千兆级大带宽和微秒级超低时延。**此外，复杂的工业现场环境要求网络具备千米级长距离通信能力，并能具备优异的抗干扰和稳定性。在跨越园区与工厂间的 IT/OT 融合大网中，既要保证广域互通，又要维持现场小范围专网级别的确定性与高可靠性，确保核心生产业务的安全稳定运行。特定场景还要求网络系统能实现通信、供电一体化。例如，在防爆区域，网络必须支持本质安全，保障高可靠的实时通信。此外，考虑到工业终端普遍面临多样环境、长时间稳定运行需求，网络的安全性及可靠性须不低于传统总线或专用小网，具备完善的纵深防护与容错能力。

综上所述，现有现场通信技术难以满足未来需求。面向未来，必须加快关键技术创新，建设具备低成本、高带宽、低时延、超大规模组网、广域互通、高安全、高可靠、高确定性的新一代融合工业现场网络，切实支撑智能制造的深度变革与行业高质量发展。

（二）工业网络技术演进

随着泛工业场景对智能化、数字化需求的不断提升，工业网络架构也在持续从传统现场总线向工业以太网演进。最初，以现场总线技术为代表的传统现

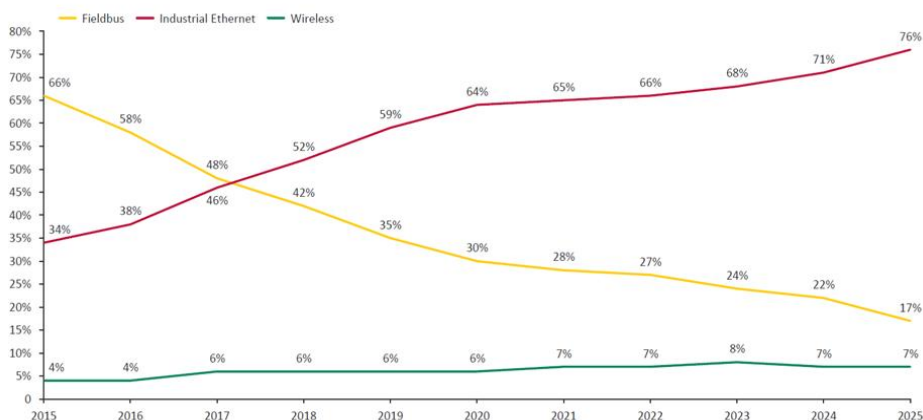
场网络虽具备一定优势，但存在布线复杂、延迟高、协议割裂、带宽有限、互联互通能力不足等问题，难以适应多样化的现场工控场景。

随着以太网技术的引入，工业网络得以实现更高带宽、更低成本、更强互操作性，同时借助 IP 协议栈，有力支撑信息化与自动化的深度融合。这一背景下，**单对线以太网（Single Pair Ethernet, SPE）和时间敏感网络（Time-Sensitive Network, TSN）**技术作为新兴解决方案应运而生。此外，海量实时数据交互与复杂业务协同对网络性能提出了更为严苛的要求，亟需能够兼顾带宽、低时延和高可靠的融合通信网络架构。这一新型架构将打破底层通信的边界，融合包括 SPE 和 TSN 等多种新型网络技术，为工业网络提供高带宽、低时延、高可靠、确定性等网络支撑，为泛工业领域的数智化升级奠定坚实基础。在这一背景下，SPE 与 TSN 的融合结合了两种技术优势。统一的以太网协议体系能够解决多协议割裂和互通性不足的问题，实现“一网到底”，显著降低成本。SPE 提供低成本、简化布线和供电一体化的优势，TSN 则通过时间同步以及网络连接的确切性与高可靠性，两者结合可以满足智能制造对实时控制、运动控制和边缘计算的严苛要求。它不仅能够解决当前的痛点，还为未来工业通信的标准化与规模化应用奠定了基础。由此，SPE+TSN 融合技术的内涵与特性，值得在后续章节中进一步深入探讨。

（三）工业网络市场变化与发展趋势

工业通信技术经历了从现场总线到工业以太网的演进，并且随着市场需求的变化，技术的创新不断推进。从 2015 年到 2025 年，工业网络市场经历了显著的变化。**工业以太网的市场份额持续增长**，从 2015 年的不到 40% 上升至 2025 年预计的 76%，成为主流技术。与此同时，现场总线的市场份额从 2015 年的 66% 下降至预计的 17%，呈现出逐步退场的趋势。2017 年，工业以太网超越现场总线并加速增长。无线技术的市场份额保持稳定，预计到 2025 年将为 7%。总体来看，工业以太网将在未来占据主导地位，而传统的现场总线技术将逐步退出。

2015-2025 工业网络市场份额变化



图源：HMS Networks

图 1 工业网络市场份额变化图

二、SPE 与 TSN 技术概述

随着工业互联网、智能制造、自动驾驶等领域对通信网络的实时性、可靠性和高带宽的需求日益增长，SPE 和 TSN 已成为实现下一代智能网络架构的重要基础。本章将分别解析这两项技术的核心原理与优势、产业进程，并探讨它们如何提升通信网络的性能，满足高实时性、低延迟和高可靠性等应用场景。

（一）SPE 技术概述

1. 物理层特性、性能优势

单对线以太网技术基于物理层架构构建，能够承载完整的以太网协议栈，支持多种协议如 IP、UDP/TCP、MQTT、Profinet 等，并与传统以太网兼容，具备较高的复用性和扩展性。尽管底层物理接口由传统双绞线转变为单对线传输，但在工业互联网应用中，现有协议栈、软件接口和设备通信机制能够无缝迁移。这样大幅降低了协议迁移和系统改造成本，同时提升部署灵活性和系统一致性，促进工业设备轻量化、智能化接入，实现数据透明传输与远程协同管理。



图 2 工业互联网单对线以太网协议栈

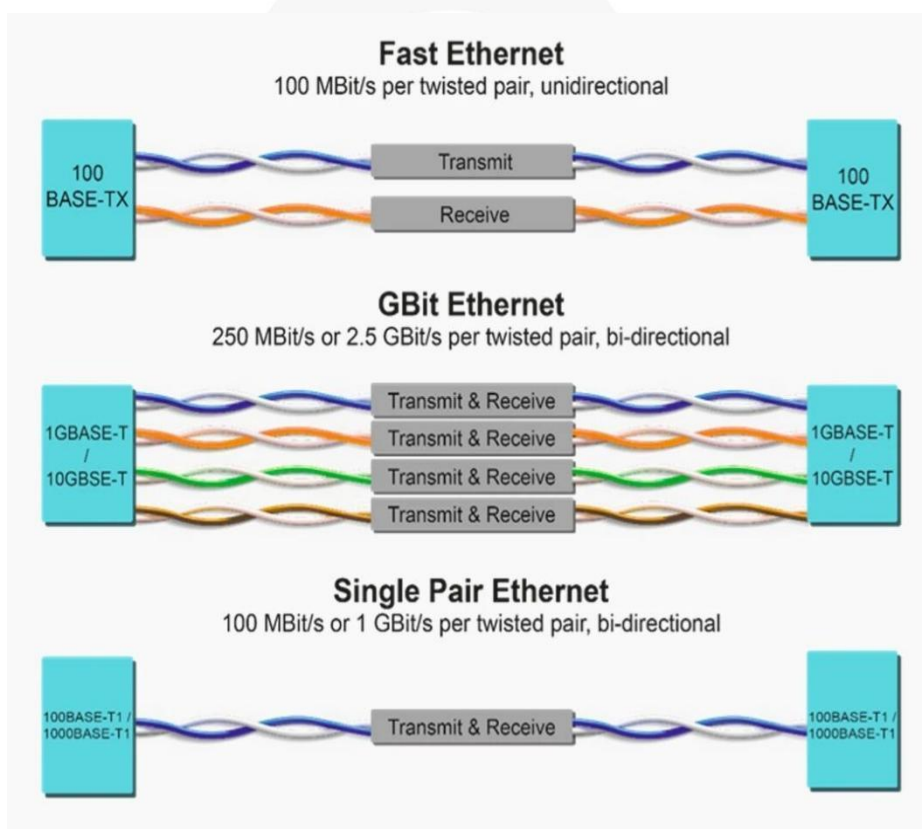


图 3 单对线以太网形态

在工业现场应用中，单对线以太网技术的出现标志着以太网通信首次能够直接覆盖至传感器、执行器等设备层，打通了从云端到现场设备的通信链路，

为实现“一网到底”奠定了技术基础。相较于传统现场总线，单对线以太网具有以下优势：

简化布线： 仅需一对双绞线即可实现全双工通信，布线轻便、成本低、易维护，特别适用于机器人关节、轨道滑块等空间受限或动态设备场景。

数据线供电（PoDL）： 类似 PoE 技术，SPE 在同一对线缆上同时传输数据和电力，支持多等级供电（最高可达数十瓦），满足传感器、I/O 模块等低功耗设备需求，减少独立供电布线。

长距离传输： SPE 中的 10BASE-T1L 可支持长达 1000 米的传输距离，在现场总线（如 Profibus、CAN）原有应用范围内，也能实现以太网延伸，适合大型工厂、隧道、楼宇、流程工业等远距离节点布线。

多速率支持： SPE 已具备覆盖 10 Mbps 至 10Gbps 的多速率体系，从长距离低速到短距高速，均能提供灵活选择，满足工业控制、车载通信、高清视频与智能传感等多样化应用需求。

2. SPE 技术标准化历程

SPE 技术最初源于汽车行业，旨在解决汽车网络中轻量化布线和高效通信的需求。随着工业自动化、智能制造和物联网的发展，SPE 逐渐成为现代网络技术的重要组成部分。IEEE 802.3 工作组主导了相关标准的制定，推动了 SPE 的广泛应用。

2015 年，IEEE 802.3bw-2015（100BASE-T1）： 100BASE-T1 是 SPE 技术的初步应用，支持 100Mbps 速率，满足车载网络对低功耗、轻量化布线的需求。

2019 年，IEEE 802.3cg-2019（10BASE-T1L）： 10BASE-T1L 标准支持 10Mbps 速率，传输距离最高 1000 米，广泛应用于工业自动化和智能建筑。IEEE 802.3cg-2019（10BASE-T1S）：该标准适用于点对点通信，支持 10Mbps 速率，最大传输距离 15 米，并支持混合链路（最多 25 米），主要用于智能交通和建筑自动化。

2020 年，IEEE 802.3ch-2020（2.5GBASE-T1、5GBASE-T1、10GBASE-T1）： 此系列标准支持更高的速率（2.5Gbps、5Gbps、10Gbps），适用于高带宽需求的应用，如工业自动化、车载网络和高清视频传输等。

以太网高级物理层（Ethernet-APL）：基于 10BASE-T1L 的扩展标准，专为过程工业环境设计。在兼容 10BASE-T1L 的基础上，Ethernet-APL 增强了传输距离、抗干扰能力和设备互操作性，优化了网络架构，满足了工业环境中对高可靠性和本质安全的需求，推动了 SPE 技术在高要求领域的广泛应用。

SPE 标准的技术特点与应用

以下是目前 SPE 标准中的主要技术，它们具有不同的速率、传输距离和应用场景，以满足各类需求：

表 1 SPE 标准的技术特点与应用

标准名称	速率	传输距离	标准
100BASE-T1	100Mbps	15m	802.3bw-2015 (CL96)
1000BASE-T1	1000Mbps	15m	802.3bp-2016 (CL97)
10BASE-T1L	10Mbps	1000m	802.3cg-2019 (CL146)
10BASE-T1S	10Mbps	点对点 15m 混合链路 25m	802.3cg-2019 (CL147)
2.5GBASE-T1	2.5Gbps	15m	802.3ch-2020 (CL149)
5GBASE-T1	5Gbps	15m	802.3ch-2020 (CL149)
10GBASE-T1	10Gbps	15m	802.3ch-2020 (CL149)

3. SPE 技术应用场景

SPE 的优势不仅体现在简化布线、降低成本，还通过多速率支持、长距离传输和数据供电一体化等特性，为工业自动化、车载网络、楼宇自动化等多个场景提供了灵活、可靠、成本效益高的通信解决方案。

随着对设备联网密度、系统实时性与布线简化的需求不断提升，单对线以太网因其轻量化结构、以太网兼容性、长距离通信与供电能力，正逐步在多个领域获得广泛应用。相比传统多对以太网或模拟信号线，SPE 在空间受限、设备分布广、环境复杂的场景中展现出独特优势。以下列举了四个典型的 SPE 应用场景，展示其在工业与智能化系统中的实际价值。

(1) 工业现场自动化

单对线以太网凭借长距离（最高可达 1000 米）、抗干扰强和简化布线的特点，广泛应用于工业现场的过程自动化与控制系统。特别是结合 Ethernet-APL 规范，SPE 实现了本质安全供电，使其适用于危险区域，支持传感器、执行器与控制系统的高速可靠通信，替代传统的 4-20mA 和 HART 总线，推动工业数字化升级。

（2）汽车行业

SPE 满足了汽车行业对轻量化、高带宽和高可靠性的需求。100BASE-T1、1000BASE-T1 及更高速的 2.5G/5G/10GBASE-T1 等标准实现了车内摄像头、雷达、传感器与控制单元的高速点对点数据传输，简化了传统多对线缆结构，降低车重和成本，同时支持自动驾驶与智能座舱等先进应用。

（3）智能楼宇

在智能楼宇领域，SPE 因其长距离传输和多点总线能力，成为集成照明控制、安防监控、环境监测等系统的理想选择。利用单对线同时传输电力和数据，减少布线复杂度，支持灵活布局和高密度设备接入，助力实现绿色建筑和智能管理。

（4）物联网

单对线以太网凭借低成本、简化布线和长距离传输优势，广泛应用于物联网和智能传感网络领域。适合连接大量分布式传感器节点，实现环境监测、智慧农业、智能制造等多种场景的数据采集和实时通信。通过支持以太网协议栈，SPE 帮助实现设备的统一接入和高效管理，促进数字化转型。

4. SPE 技术应用案例

2021 年中石油旗下中国寰球工程公司中标巴斯夫湛江化工一体化项目工程实施方，负责设计实施全球首个全厂采用 SPE 数字通信技术替代模拟通信控制信号的项目。寰球提出全网络化工业测控系统架构需求，联合华为共同孵化国产 SPE PHY 芯片并推动成立了中国仪器仪表协会全网络化工业测控系统专业委员会，累计推动国内 SPE 在流程工业示范应用落地三万余点位，应用规模跃居全球首位，并持续迅速发展。截止 2025 年，中石油集团在内部大力推动基于 SPE 技术的全网络化工业测控架构的规模应用，要求 SPE 网络设备产品和生态加速成熟。

（二）TSN 技术概述

1. 核心功能模块

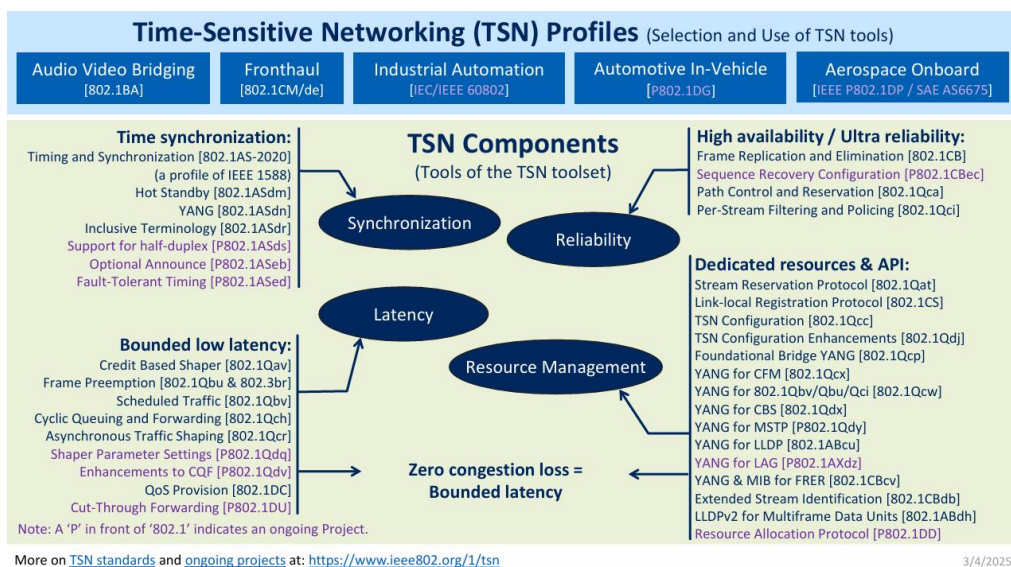


图 4 TSN 标准

TSN 相对于传统以太网在时间同步、确定性调度、冗余与可靠性和配置与管理四个核心功能模块进行显著增强。

（1）时间同步： TSN 采用了 IEEE 802.1AS 标准中的广义精确时间同步协议建立主从时钟同步结构，结合底层时间感知技术减少协议栈不对称的影响，最终在全局网络内实现纳秒级的同步精度。

（2）确定性调度： TSN 在 IEEE 802.1Qav、IEEE 802.1Qbv、IEEE 802.1Qcr 等标准中设立了多种确定性传输机制。TSN 设备按照不同的流量类型映射到相对应的传输队列，再基于调度规则选择性地发送传输，保证关键数据流的传输时延边界。

（3）冗余与可靠性： TSN 在 IEEE 802.1Qci、IEEE 802.1CB 等标准中设立了流量监管和帧复制与消除等机制，提高对接入流量的监管能力，建立冗余通信机制保障关键数据的传输可靠性，确保网络出现异常状况下仍可以稳定传输，保证流量数据的端到端交付率。

（4）配置与管理： TSN 制定了 IEEE 802.1Qcc、IEEE 802.1Qcp 等标准实现对全局网络资源的统一管控，设立了完全分布式、集中式/分布式、完全集中式三种配置模型，结合 YANG 模型和 NETCONF 协议等技术，对 TSN 网络实现全局管控和高效配置，提升网络整体性能。

2. TSN 产业发展情况

TSN 在全球范围内经历了广泛的发展，并逐步成为工业自动化、汽车通信及音视频等领域的核心技术之一。TSN 在多个关键领域得到了广泛应用，并且不断推动全球产业的创新与升级。

国际发展情况：TSN 的标准化进程由 IEEE 802.1 TSN 工作组主导，涵盖了时间同步、流量调度、冗余与可靠性等多个技术领域。通过 IEEE 802.1AS 等标准，TSN 不仅为工业控制、汽车网络等高实时性、低延迟的应用提供了可靠的网络基础，也促使了音视频、智能制造等行业对其技术的快速采纳。

此外，多个国际产业联盟和标准组织，推动了 TSN 在音视频、汽车和工业互联网中的应用。AVnu Alliance 专注于确保 TSN 在不同厂商设备中的互操作性，IIC 则将 TSN 视为工业互联网的关键技术，发布了相关白皮书与测试床，推动 TSN 在工业网络中的广泛应用。同时，OPC Foundation 提出了将 TSN 与 OPC UA 协议相结合的“OPC UA over TSN”标准，进一步推动 TSN 在工业自动化领域的普及。

国内发展情况：在中国，TSN 的推广和应用得到政府和产业界高度重视，已被明确列为工业互联网网络体系的关键技术之一。

在政府与政策支持方面，工信部发布的《工业互联网网络建设及推广指南》及“十四五”规划等政策文件中均对 TSN 技术的研发和产业化给予了明确支持。在标准化转化方面，中国标准化机构（如 CCSA）积极推动将国际 TSN 标准转化为国内标准，确保与国际接轨。与此同时，根据国内产业现状，加紧国内 TSN 标准部署。此外，国内产业联盟如工业互联网产业联盟也积极推动 TSN 技术的研究、测试与示范应用，加速技术本地化的进程。产业方面，国内企业已研发出支持 TSN 技术的硬件设备，并在智能制造、电力、轨道交通等多个行业中开展了试点应用，促进了 TSN 技术的产业化。随着技术的不断进步和应用场景的拓展，TSN 在中国的应用领域正在快速扩展，从生产线、智能交通到智能电网等多个领域，推动了工业互联网和物联网的快速发展。

3. TSN 技术应用场景

TSN 提供一套能够实现确定性传输和多业务融合通信的时间敏感机制，并具备良好的兼容性。该技术能够有效促进传统产业的升级改造以及新型产业的布局实施。在工业控制、车载系统、机器人等场景中，TSN 拥有极为广阔的应用前景，提供高确定性、低延迟、高可靠的通信质量保障。

（1）工业控制：TSN 为工业网络提供高数据带宽和确定性传输能力，在多种协议流量接入的同时，保证关键控制类数据在混合流量中的传输时延边界。基于 TSN 可以打破不同工业协议壁垒，实现异构网络融合，结合 TSN 配置模型实现对全局网络的统一管控，提高工业系统效率。

（2）车载系统：TSN 能够高效地整合汽车的各类电子设备，满足多设备和多系统之间的复杂通信要求。基于 TSN 能够实现车辆各设备间的高精度时间同步，利用优先级管控和确定性调度机制，确保刹车、转向等安全类数据的实时传输以及车载系统中各类设备的信息交互要求。利用 TSN 的冗余保障机制，进一步提高车载网络的容错性和可靠性，保障车载系统的稳定安全。

（3）机器人：基于 TSN 建立的机器人通信系统可以显著减少机器人的内部布线，通过高精度的时间同步协议使得机器人各类组件（传感器、控制器、执行器等）处于统一的时间基准，保证感知数据同步获取与控制指令精准执行，提高机器人的运动控制精度和系统运行可靠性。

4. TSN 技术应用案例

智利圣地亚哥的 Movistar Arena 项目是 TSN 技术在大型公共场馆中成功落地的代表性案例。该项目采用基于 TSN 标准的 Milan-AVB 数字音频网络架构，在不改变历史穹顶建筑结构的前提下，实现了确定性、低时延和高可靠性的实时音频传输。通过 TSN 的核心机制——时间同步、流量整形和带宽预留，系统能够在数百通道并行传输的条件下保持稳定的延迟与相位一致性，从而确保整个场馆的声音覆盖精确且均匀。Milan-AVB 网络使所有音频信号在数字域内完成传输，避免了长距离模拟布线带来的信号衰减与电磁干扰，显著提升了系统的声音纯度与信噪比表现。

在工程实践中，该系统依托 TSN 的确定性网络能力，实现了**音频流的冗余传输**。双路 CAT6 以太网链路同时承载音频流量，一旦主链路发生故障，系统可在毫秒级时间内切换至备用通道而不中断演出。网络化的流管理与统一时钟同步机制，使系统能够灵活适配多种演出场景——包括半场、全场及 360° 环绕模式——而无需重新布线。经过百余场大型演出验证，该 Milan-AVB 网络在传输稳定性、时延控制与运维效率方面均表现卓越，充分展示了 **TSN 技术在专业音频领域实现高确定性通信与可扩展系统集成的成熟度与工程价值**。

资料来源：L-Acoustics 新闻稿与 Avnu/Milan 技术资料

三、SPE+TSN 融合技术

（一）SPE+TSN 融合技术概述

随着工业 4.0、智能制造和物联网的快速发展，传统工业网络架构面临严峻挑战：传统工业现场总线依赖多线缆架构，导致安装、维护成本高昂，且难以适应柔性生产需求；标准以太网无法满足运动控制、机器协同等场景的毫秒级确定性传输需求；不同厂商采用私有协议（如 EtherCAT、Powerlink），导致系统互操作性差，升级困难。

SPE 与 TSN 技术的结合，形成“轻量级物理层+高确定性网络”的优化架构，成为下一代工业通信的核心技术方向。SPE 通过单对双绞线实现以太网通信，大幅减少布线复杂度，支持长距离（1km）传输，降低部署成本。TSN 基于标准以太网增强实时性，提供时间同步、流量整形和低延迟保障，实现确定性通信。

SPE 与 TSN 的结合并非简单叠加，通过协议栈的精确融合，针对工业、汽车、智能基础设施等领域的核心痛点提供系统性解决方案。

SPE 与 TSN 技术融合的端到端通信示例如图 5 所示，SPE 作为以太网物理层技术为 TSN 提供底层载体，可直接兼容 TSN 的数据链路层与上层协议。TSN 芯片 MAC 可通过标准接口（如 MII）与 SPE PHY 收发器连接，确保信号高效传输。SPE 实现工业现场传感器层 IP 化，TSN 基于标准以太网扩展，避免协议转换损耗，OPC UA 等工业协议可通过 TSN 调度直接运行于 SPE 链路上，消除网关瓶颈。

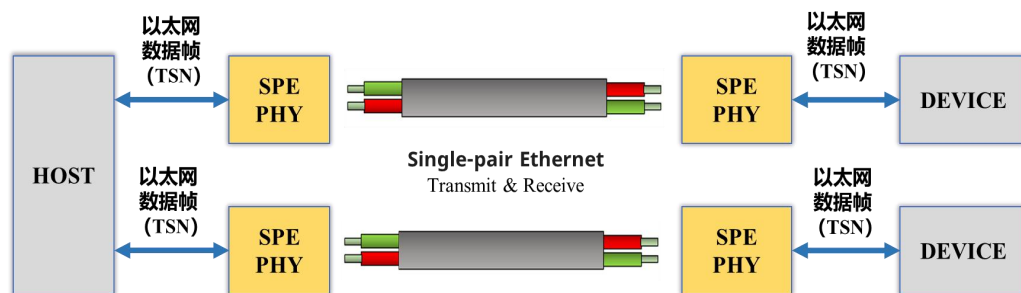


图 5 端到端通信示例

（二）SPE+TSN 融合技术优势

TSN 提供确定性低时延通信保障，为各类系统建立统一的工业骨干网络，SPE 将以太网覆盖范围扩展至现场层，实现设备全连接，构建起真正统一的工业网络。SPE 与 TSN 的融合可降低布线成本、简化设备联网架构，为未来各行业智能化、实时化通信提供新的技术路径。

（1）显著降低部署成本与复杂度

SPE 仅需一对双绞线即可同时传输数据和电力，替代了传统工业网络中复杂的多芯电缆或独立电源线缆。相较于传统以太网（需两对或四对线）或专用现场总线（如 CAN），SPE 布线量大幅减少，重量显著降低，安装空间需求大幅压缩。这不仅直接节省材料成本，还简化了安装、维护复杂度，尤其适合狭窄空间（如机器人内部、汽车线束、密集工厂管道）和高危环境（防爆、高温区域）的部署。

TSN 基于标准以太网扩展，通过 IEEE 802.1 标准（如 802.1AS 时间同步、802.1Qbv 流量调度）实现实时流量与非实时流量（如视频监控、数据采集）在同一网络中共存而互不干扰。

SPE 将以太网覆盖延伸至最底层传感器和执行器，与 TSN 结合后彻底消除了传统工业环境中需部署独立实时控制网络（如 EtherCAT）与非实时网络的割裂架构，显著降低硬件冗余（如交换机、网关）和系统集成成本。

在典型工业场景中，SPE+TSN 融合方案相较传统“现场总线+工业以太网”分层架构，在部署成本、网络性能及运维效率方面具备明显优势。

根据产业实践测算：单对线替代传统多对线后，综合布线成本可降低约 30%-50%；线缆重量可降低约 40%，显著降低设备移动负载；安装与调试时间可缩短 20%-30%；TSN 确定性调度机制可将关键业务端到端时延控制在 $50\ \mu\text{s}$ 以内；

IEEE 802.1AS 时间同步精度可达到 100ns 以内；网络可靠性可达到 99.999% 以上。

在汽车制造、流程工业等典型场景中，SPE+TSN 融合网络能够有效减少网关设备数量与协议转换节点，降低系统复杂度，提高网络可维护性与系统稳定性。

（2）突破性的实时性能与确定性保障

TSN 通过时间感知调度机制（如门控列表、流量整形）为关键控制数据分配专用传输时隙，确保数据包严格按时序传输，端到端延迟抖动可控制在微秒级（ μs 级）。TSN 的时钟同步协议实现纳秒级精度的全局时钟同步，确保所有设备（PLC、传感器、执行器）在统一时间基准下协同工作。结合 SPE 的高带宽传输能力（支持 10Mbps 至 10Gbps 速率），即使在长距离（如 10BASE-T1L 标准下最远 1000 米）或高并发场景中，也能保障运动控制指令、机器人协同信号、工业视觉反馈等实时流量的零丢失、零紊乱传输，满足精密制造（如汽车焊接、多轴同步）、自动驾驶等对时序要求极高的应用需求。

（3）扩展网络覆盖与连接灵活性

SPE 在物理层优化信号编码与传输特性，支持单对线传输距离长达 1000 米（如油田井场、矿区远程监控场景），远超传统以太网或现场总线的覆盖半径。结合 TSN 的带宽预留与路径管理能力，即使在长链路或多级级联拓扑下，仍可保障大量终端（传感器、摄像头、智能仪表）的数据高效回传与实时控制下发，减少中继器部署需求，降低单点故障风险。

（4）支撑工业 4.0 与智能融合应用

SPE+TSN 构建了从传感器到云端的扁平化、端到端以太网架构，实现生产数据、控制指令、运维信息在统一网络中无缝流动。这消除了传统 IT 与 OT 系统间的数据壁垒，为数字孪生、AI 驱动预测维护、自动化优化等创新应用提供实时、全域的数据支撑，显著提升制造透明度、资源利用率和生产柔性。

（5）标准化、开放性与未来兼容性

SPE 与 TSN 均基于开放标准，确保不同厂商设备、网络组件的无缝协同，避免制造商锁定，降低系统升级风险。

TSN 的确定性机制可与 5G URLLC 互补，SPE 作为边缘接入层助力云-边-端协同架构落地，适应工业互联网与物联网的融合趋势。

表 2 技术优势对比

特性	传统以太网	SPE+TSN	现场总线
布线复杂度	高	低	高
数据传输速率	高	中等	高
传输距离	中等	长	短
实时性	低	高	高
网络架构	IT 为主	IT/OT 融合	专有协议
成本与部署复杂度	高	低	高

（6）经济效益

SPE+TSN 融合方案不仅具备技术优势，同时具备较好的经济效益与长期投资价值。

在传统工业网络架构中，现场层、控制层与信息层通常采用不同通信协议与网络体系，导致网络设备种类繁多、布线复杂、维护成本较高。SPE+TSN 通过统一以太网架构实现“一网到底”，可有效减少交换机、协议网关、中继设备等硬件部署数量，降低系统集成复杂度。

从投资回报角度分析，SPE+TSN 主要收益包括：布线与施工成本降低；运维与故障排查成本下降；网络停机损失减少；系统升级与扩展效率提升；IT/OT 融合带来的数据价值提升。在中型制造工厂场景中，SPE+TSN 网络改造项目投资回收周期通常约为 2~3 年，具备较好的长期经济效益。

（三）SPE+TSN 产业生态发展现状

当前，SPE+TSN 产业生态正处于快速发展阶段，产业链已覆盖芯片、PHY 器件、工业交换机、控制器、传感器、测试认证及行业解决方案等多个环节。

国际方面，Broadcom、Marvell、NXP、Texas Instruments 等企业已推出支持 SPE 或 TSN 的相关芯片产品；Siemens、Cisco、Hirschmann 等企业积极推进 TSN 工业交换设备与工业网络解决方案落地。

国内方面，华为、三旺通信、汇川技术等企业正积极布局 SPE+TSN 产业生态，在工业交换机、控制器、工业网络解决方案等领域形成一定产业基础。部分国内企业已开展 SPE PHY 芯片与 TSN 交换芯片研发，推动关键核心技术国产化。

当前我国在工业交换设备、边缘网关等领域已具备较强产业基础，但在高端 PHY 芯片、高性能 TSN 交换芯片等方面仍存在一定进口依赖。总体来看，SPE+TSN 产业链国产化仍处于加速发展阶段，未来需进一步加强核心芯片、测试认证与标准体系建设。

（四）SPE+TSN 融合设计与实现

1. 融合架构设计

SPE+TSN 融合的协议栈参考模型对应关系如图 6 所示。基于 SPE 的单对双绞线连接能力及 TSN 技术的确定性组网能力，融合的核心在于物理层、数据链路层、网络层，通过各协议层的协同工作实现了从物理传输到应用服务的完整解决方案。

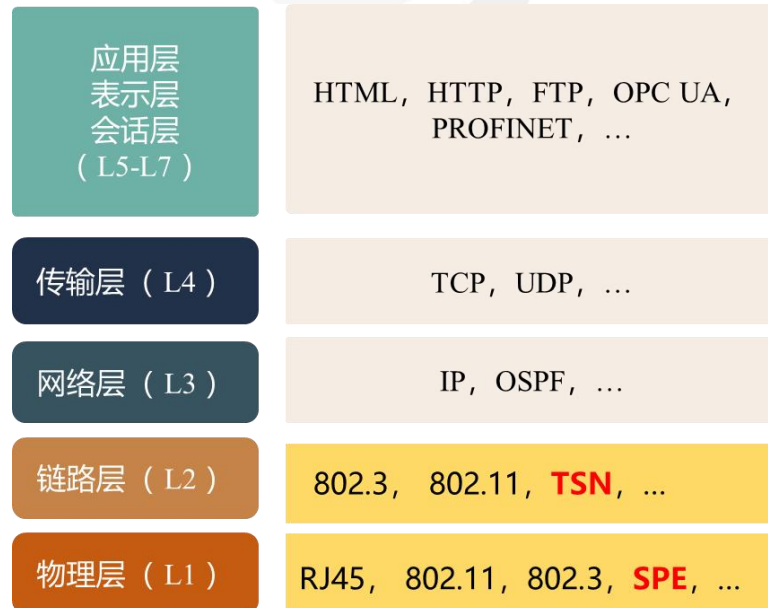


图 6 SPE+TSN 融合协议栈模型示意图（）

SPE 在物理层负责原始数据与电力的物理载体传输，SPE 技术重新定义了工业网络的基础传输介质，采用单对双绞线同时传输数据和电力，这种创新设计不仅大幅简化了布线复杂度，还显著降低了部署成本。SPE 严格规定了传输介

质的电气特性，包括工作电压、信号调制方式和噪声容限等参数，确保在恶劣工业环境下仍能保持稳定通信；其机械特性则对连接器尺寸、防护等级和耐久性做出明确要求，以适应振动、潮湿等严苛工况。在比特流传输层面，SPE 通过特定的编码方式和时钟恢复机制，确保原始数据的可靠传输，为上层协议提供了坚实的物理基础。

TSN 协议族在数据链路层发挥着关键作用，通过一系列精心设计的协议机制为工业通信提供了确定性保障。时钟同步协议建立了全网络统一的时间基准，使分布式设备能够实现微秒级的时间对齐；流量调度算法为不同优先级的业务实施差异化的调度服务，避免了关键数据因网络拥塞而延迟；冗余管理机制则通过路径备份和帧复制等技术提高了通信可靠性。这些功能通过标准化的 MAC 层接口向上层提供服务，其中流量分类和优先级标记（使用 PCP 字段）实现了业务区分服务，拓扑管理功能则动态维护着网络连接状态。TSN 的这些特性使其能够为上层应用提供可预测的通信质量，从根本上解决了传统以太网在实时性方面的不足。

网络层及以上保持标准 IP 协议栈（IPv4/IPv6、TCP/UDP）及工业应用协议（OPC UA、HTTP、MQTT 等），利用下层提供的确定性通信能力，实现设备互联、数据采集和远程控制等功能。这些上层协议与 SPE+TSN 的物理层和链路层实现了透明衔接，应用开发者无需关注底层细节即可获得确定性的网络服务。这种分层架构既保留了传统 IP 网络的灵活性和通用性，又通过 SPE 和 TSN 的引入解决了工业场景的特殊需求，为工业互联网的发展提供了理想的技术基础。整个协议栈体现了“下层优化、上层通用”的思想，在保证性能的同时最大限度地降低了系统复杂度和升级成本。

2. 实现机制

SPE 和 TSN 都是面向泛工业众多场景，SPE 物理层作为通信底座能力，需要兼容多种模式，以适配不同场景的差异化诉求。SPE 支持 10Mbps、100Mbps、1Gbps、10Gbps 等多种速率，适配不同带宽需求场景，结合 TSN 的低时延、低抖动通信能力，可以适用于多行业多场景的不同终端对带宽和实时性的需求。

SPE 技术采用单对双绞线同时传输数据和电力，在简化布线的同时支持长达 1 公里的传输距离。PHY 芯片负责将数字信号转换为差分信号，并采用自适应

均衡技术补偿信号衰减，接收端 PHY 进行自适应均衡和时钟恢复，消除工业环境中的信号衰减和噪声干扰，确保在工业电磁干扰环境下的可靠传输。

TSN 协议栈提供确定性保障。802.1AS 协议通过硬件时间戳实现纳秒级时钟同步，为全网设备建立统一时间基准。802.1Qbv 时间感知整形器将通信周期划分为固定时隙，为关键控制流量预留专用传输窗口。802.1Qbu 帧抢占机制允许高优先级数据中断低优先级传输，确保紧急指令的即时送达。这些机制共同工作，在标准以太网框架内实现确定性时延。

网络传输过程采用智能调度策略。发送端设备根据业务类型为数据帧标记优先级（PCP 字段），TSN 交换机依据预配置的调度表精确控制转发时序。控制指令等关键数据被分配至高优先级队列，确保在指定时间窗口内传输；普通监测数据则利用剩余带宽发送。这种时分复用机制有效避免了网络拥塞。SPE+TSN 融合的技术方案示意如图所示。

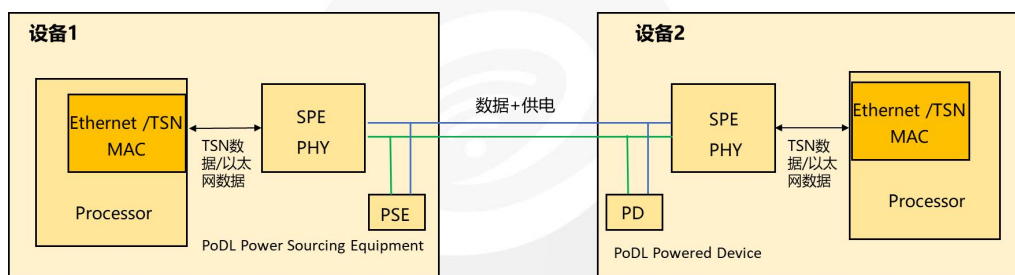


图 7 SPE+TSN 融合技术方案

图中设备可以是交换机、网关或者终端设备等，设备内部集成 TSN 芯片和 SPE PHY 芯片，TSN 芯片一般都内置 Ethernet/TSN MAC，支持 IEEE 802.1 系列时间敏感网络协议。TSN 芯片可以通过标准 MII（Media Independent Interface）接口与 SPE PHY 收发器相连，实现 TSN 数据或标准以太网数据的传输。实时处理器运行 TSN 协议栈，负责时间同步、流量调度等关键功能，确保通信的确定性。

采用 PoDL（Power over Data Line）技术，通过单对双绞线同时传输数据和电力。PoDL 系统包含两个关键组件：PSE（Power Sourcing Equipment）电源设备和 PD（Powered Device）用电设备。PSE 通常集成在交换机或网关设备中，负责检测 PD 设备、协商供电参数并提供功率输出。PD 端则集成 DC-DC 转换电路，将线缆传输的电力转换为适合终端设备的电压。这种设计显著简化了工业现场的布线复杂度，特别适用于分布式传感器和执行器等边缘设备。

图中整个系统中，TSN 芯片通过时间感知整形（802.1Qbv）和帧抢占（802.1Qbu）等机制保障关键数据的实时传输，而 SPE PHY 芯片则确保数据在单对线上的可靠传输。与此同时，PoDL PSE 持续监测供电状态，动态调整输出功率，确保在 1km 传输距离内维持稳定的数据通信和电力输送。这种高度集成的设计方案可广泛应用于工业自动化、流程自动化、智能电网和车载网络等领域。

四、SPE+TSN 融合架构应用场景

（一）工业自动化应用

在工业 4.0 及智能制造的大趋势下，工业场景对通信网络的要求日益严苛，不仅需要高效的数据传输能力，更对实时性、可靠性以及部署的便捷性提出了极高标准。SPE 与 TSN 技术两者结合，为工业场景构建起理想的通信架构。

SPE 与 TSN 的融合组网架构，可以为工业场景带来以下优势：

高实时性。 确保工业控制指令、传感器反馈等高优先级数据在微秒级内完成传输，满足如精密加工、机器人协同作业等对时间极度敏感的应用需求。

高可靠性。 通过冗余链路、设备备份及 TSN 的可靠性机制，保障网络在复杂工业环境下持续稳定运行，数据传输零丢失、零错误，降低生产中断风险。

简易部署与低成本。 利用 SPE 的单对双绞线布线及 PoDL 供电特性，大幅减少线缆使用量与安装复杂度，降低初期建设成本与后期维护难度，尤其适用于既有工厂改造升级场景。

灵活扩展性。 网络架构可灵活适应不同规模工业场景，易于新增设备、扩展网络覆盖范围，支持未来工业应用的多样化发展，如工业 AI、数字孪生等新兴技术的融合应用。

SPE+TSN 融合典型工业场景组网设计示意如图所示。

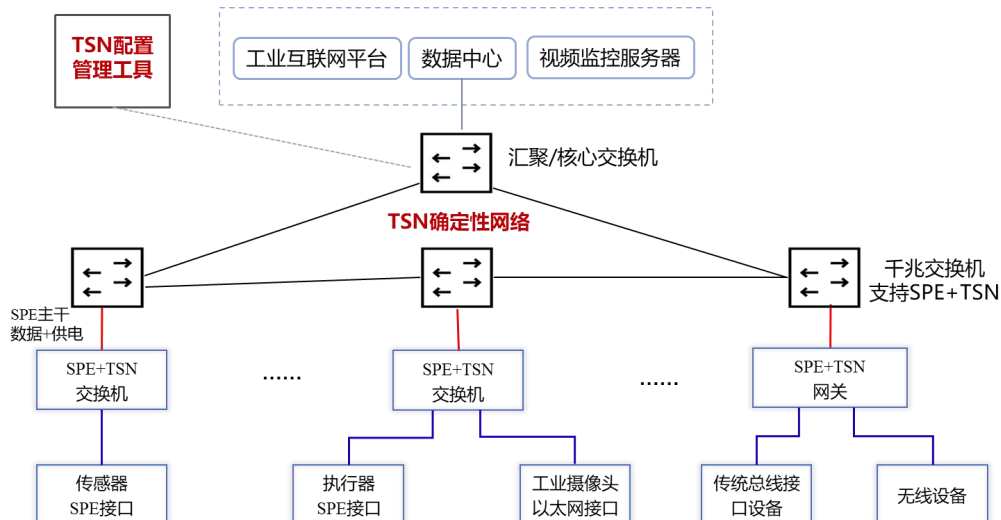


图 8 工业场景组网方案示意

各类支持 SPE 的工业现场设备（如传感器、执行器、智能仪表等），通过 SPE 接口接入 TSN 网络，实现数据采集与控制指令执行。例如，在智能工厂的生产线中，大量的光电传感器、温度传感器通过 SPE 线缆连接至边缘节点设备，这些边缘节点设备集成了 SPE PHY 收发器芯片，负责将设备数据转换为以太网格式，并进行初步的数据预处理。同时，PoDL 技术为现场设备供电，减少额外电源线布线，简化现场布线复杂度。不支持 SPE 和 TSN 的传统仪器仪表等现场设备可通过 SPE+TSN 网关接入 TSN 网络。

现场设备接入支持 SPE 和 TSN 的交换机或网关设备，并依据 TSN 规则对数据进行分类、优先级标记与调度。高性能、高可靠性的工业千兆交换机组建 TSN 冗余环网，负责整个网络的数据高速转发与路由。集中式的 TSN 配置管理工具，如紫金山实验室的 TSN 控制器等，可根据工业网络拓扑及应用需求，方便地配置 TSN 的时间同步参数、流量调度策略、冗余机制等，通过图形化界面，用户可直观地进行网络规划、设备配置及状态监测，降低多厂商设备协同部署的技术门槛，提高网络配置效率与准确性。

1. 离散工业自动化应用

在离散工业领域（如汽车制造、机械加工、3C 电子组装等），生产过程具有“间歇性加工、多工序协同、设备高频启停”特点，这对网络的实时性（如机器人协同控制场景）、灵活性（如产线快速重构需求）、抗干扰能力（如车间复杂电磁环境）提出了极为严苛的要求。与此同时，离散自动化行业正加速

向数字化、智能化和柔性化方向转型，对现场环境的精准感知，以及设备与数据孤岛的互联互通需求日益迫切。在此背景下，SPE+TSN 融合技术凭借“布线简化、实时确定性、协议兼容”的三重核心优势，可以重塑离散工业的网络架构，成为智能制造升级的关键支撑。

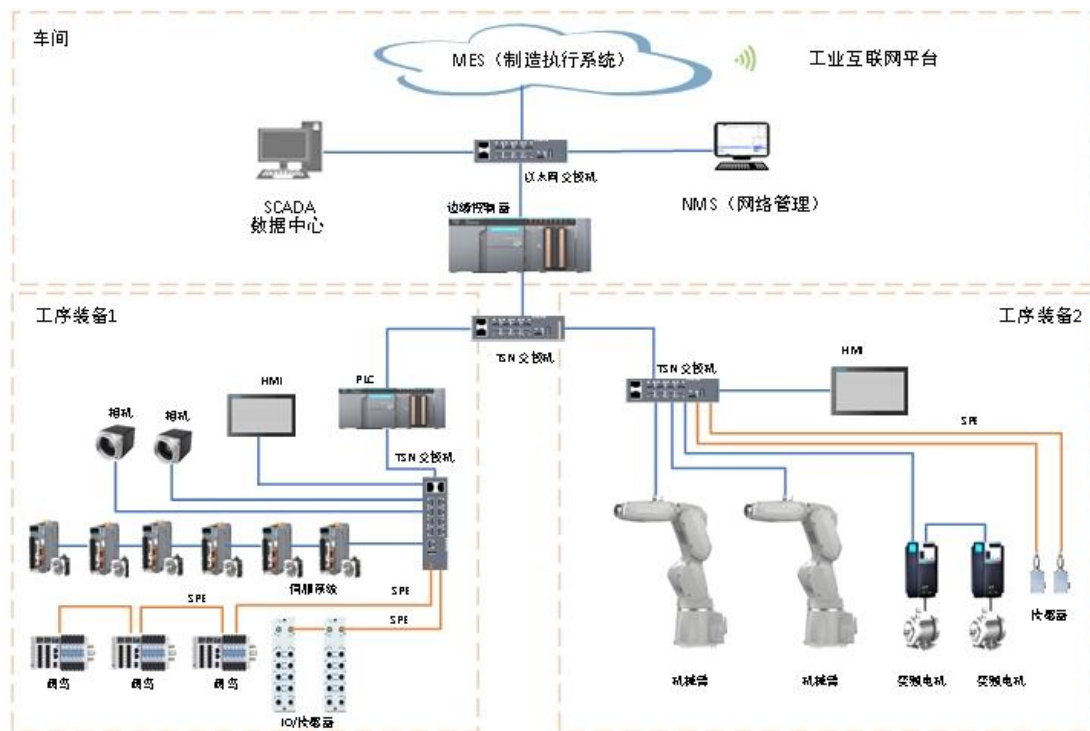


图 9 离散工业-行业应用

（1）布线简化：高效整合传输与供电，适应复杂现场环境

离散工业生产中，设备状态数据（如温度、振动、电流、能耗）和工艺数据（如加工精度、装配进度）的采集点遍布车间各工位，数据来源高度分散。SPE 技术在此场景中展现出独特优势：SPE 支持长距离、多节点数据传输，无需额外部署中继转化网关，同时依托单对线缆实现数据与供电的同步传输（PoDL 技术），彻底避免了大量电源模块的部署麻烦，显著降低布线成本与空间占用。例如，在工业机器人臂控制器与末端执行器（如焊枪、抓取手）之间采用 SPE，不仅能减少机械臂运动时的线缆磨损（单对线缆柔韧性更优），还可通过 PoDL 为末端力控传感器等设备供电，实现布线系统的极致简化。车间内焊接设备、电机等设备产生的强电磁干扰对信号传输构成严峻挑战。SPE 采用屏蔽双绞线结合工业级连接器，能在恶劣电磁环境中保持信号稳定传输，确保数据采集的连续性与准确性。

（2）实时确定性控制：精准调度多类型流量，保障生产协同

离散工业自动化网络需处理多种类型的流量，包括控制信号（如 PLC 指令）、传感器数据（如视觉检测图像）、设备诊断信息（如振动频谱）等，流量特性差异显著。TSN 技术通过以下方式实现精准管控：流量分类与优先级调度：TSN 可对不同类型的流量进行分类，为“实时控制数据”（如机器人运动指令）分配高优先级，确保其低延迟、无抖动传输；为“非实时采集数据”（如设备能耗统计）分配低优先级，避免占用关键资源，从根本上防止数据冲突导致的控制中断。基于 IEEE802.1AS 标准，TSN 可实现分布式传感器、控制器之间的亚微秒级时间同步，确保采集数据的时间戳高度一致，为多工序协同（如汽车焊接工位的多机器人同步作业）和精准诊断提供可靠的时间基准。

（3）多协议融合架构：打破数据壁垒，支撑全链路智能化

TSN 技术可构建统一的骨干网络架构，实现多系统、多协议的无缝融合，为离散工业的数字化转型提供核心支撑。通过 TSN 交换机，可整合 PLC、机器视觉等不同系统，同时传输实时控制数据（如机器人动作指令）、非实时数据（如设备状态监控信息）及音视频流（如质检摄像头画面），无需为不同系统单独部署网络，大幅节省布线与维护成本。

（4）赋能智能化升级：打通全链路数据，支撑柔性生产与精准决策

基于标准以太网的兼容性，低层设备采集的数据可通过简化的布线与确定性网络直达边缘控制器，结合边缘算力支持视觉 AI 质检和预测性维等场景，可实现对产线毫秒级识别与反馈，提升质检效率与精度。确定可靠的转发技术支持 IT（如数据管理）与 OT（如设备控制）业务在同一网络中并行运行，使 PLC 等控制设备可远程集中部署于边缘云，借助边缘云的强大算力实现系统能力的持续增强与灵活扩展，支撑全局协同与柔性产线的高效转产（如 3C 电子车间的多品种快速换产）。

2. 流程工业自动化应用

在流程工业领域（涵盖化工、炼油、制药、食品饮料等），连续生产过程对网络的实时性、可靠性与稳定性提出了严苛要求。由于设备分布广泛且运行环境恶劣，传统工业网络（如专用总线、普通以太网）在布线成本、实时确定

性及扩展性等方面已逐渐难以适配。在此背景下，SPE 与 TSN 的融合技术，凭借其独特优势，具体很好潜在应用价值。

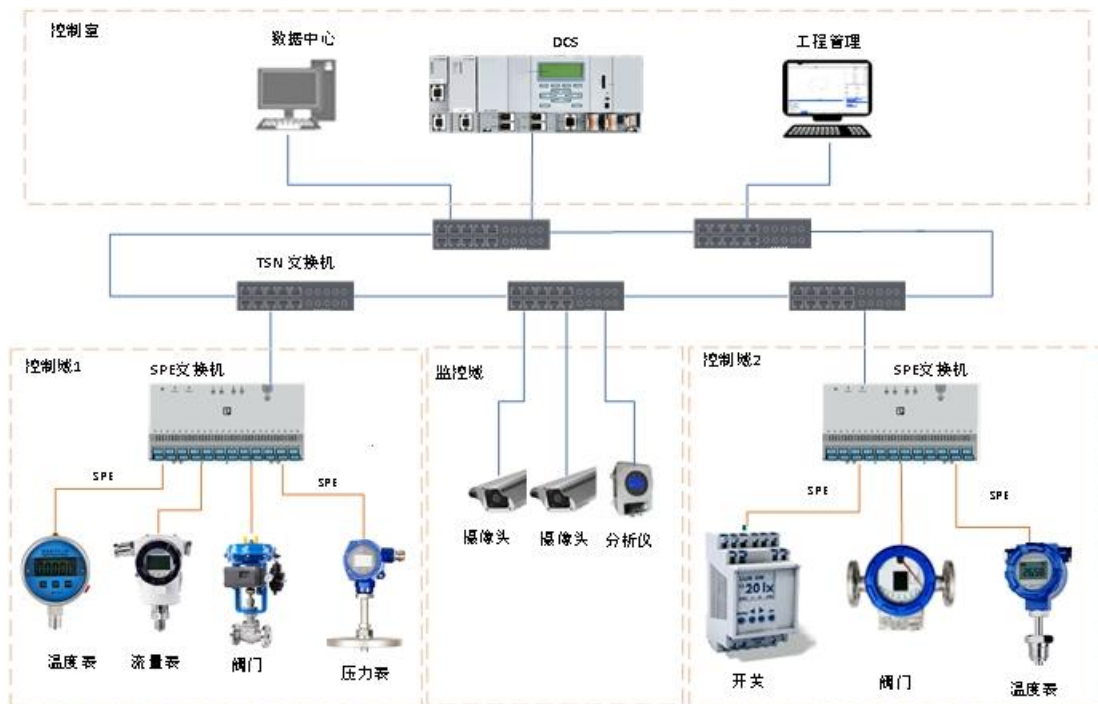


图 10 流程工业-行业应用

流程工业现场部署着海量传感器（如温度、压力、流量、液位传感器）和执行器（如阀门、泵、压缩机等），传统依赖 HART、Profibus 等专用总线，存在带宽低、扩展性差的局限。SPE 技术的引入有效破解了这一难题：其支持的 10BASE-T1L 标准可实现 1000 米距离内的稳定传输，适配厂区庞大、设备分散的特点；通过单对线缆即可连接数百个分散设备，大幅降低大型厂区或管道沿线的布线复杂度；更重要的是，SPE 支持 PoDL 功能，能同时传输数据与最高 50W 电力，省去为传感器、执行器单独布线的成本，尤其适用于防爆、高温等电源部署困难的区域（如炼油装置区）。

在过程控制中，DCS（分布式控制系统）作为流程工业的“大脑”，负责协调化学反应温度控制、炼油分馏塔压力调节等连续生产环节，对数据传输的实时性和可靠性要求极高。SPE+TSN 的融合在此层面发挥关键作用：借助 SPE 的长距离传输能力，可直接连接厂区内相距 1 公里的反应釜与控制室等远距离控制单元，减少信号衰减导致的误差；TSN 技术则通过 IEEE 802.1Qbv 等实时调度机制，将控制信号（如 PID 调节指令、阀门开关信号）的传输延迟控制在 100 微秒以内，避免因延迟引发生产波动。同时，TSN 的精确时间同步（PTP）

功能实现了 PLC、IO 模块等控制节点的时钟对齐，确保多阀门同步调节等协同控制的一致性，成功替代传统 DCS 的专用控制总线，简化了网络架构。

安全仪表系统（Safety interlocking System, SIS）作为流程工业的“安全防线”，需在检测到压力超标、泄漏等危险工况时，触发紧急停车（ESD），其核心要求是“零延迟、零丢失”。TSN 与 SPE 的组合为 SIS 提供了全方位保障：TSN 的流量隔离机制（如 IEEE 802.1Qci）将 SIS 紧急信号标记为最高优先级，避免被其他数据阻塞；结合 TSN 的冗余协议（IEEE 802.1CB），通过双路径传输实现故障无缝切换，消除单点故障风险。而 SPE 的抗干扰设计（如屏蔽双绞线），能在电机附近等电磁干扰强的环境中稳定传输信号，大幅减少误触发或漏报情况。

随着流程工业从“自动化”向“智能化”转型，打通设备层、控制层、信息层（MES/云平台等）的数据链路成为关键。SPE+TSN 基于标准以太网协议，无需专用协议转换即可实现“现场设备-控制中心-云端”的端到端互联，避免了传统多协议转换的复杂性。TSN 的优先级调度机制确保控制层实时数据（如生产参数）优先传输，同时不影响大带宽数据（如生产报表、视频监控）的传输。此外，该融合技术支持未来扩展，通过更高带宽标准（10Gbps 等），可满足新增 AI 视觉检测、数字孪生建模等智能化应用的海量数据传输需求，为流程工业的持续升级奠定坚实基础。

（二）汽车以太网应用

随着近年来汽车电子化的快速发展，车内电子产品数量逐年增加，连接和互通的复杂性日益提高，以太网所具有的技术优势可以很好地满足汽车制造商对车内网络连接的需求。从物理层角度出发，减少线缆重量和提升通信速率是车载以太网演进的方向。从数据链路层角度出发，提高数据帧转发的实时性、可靠性，提升网络带宽，是车载以太网的典型技术特征。

SPE 仅使用一对双绞线，电缆直径比传统 4 对线缆重量更轻。SPE 支持 10Mbps 至 10Gbps 速率，传输距离可达 1 公里（10BASE-T1L）。SPE 基于 IP 协议，消除传统总线网关，实现从传感器到云端的统一通信架构，提升网络安全

性和维护效率。基于以上特征，SPE 适用于狭小空间（如车载）或高密度布线场景，实现高速高效的的车载以太化网络通信。

时间敏感网络 TSN 基于标准以太网技术，在数据链路层提供一整套增强保障网络 QoS 的机制，例如时钟同步，门控队列，帧抢占，帧复制消除等。随着高等级自动驾驶所需部署的智能设备数量激增，网络通信需求也不断增长，车载时间敏感网络已经成为学术界、产业界研究的热点，并成为一种公认的下一代车载网络通信技术。

通过 SPE+TSN 技术融合，可以实现涵盖物理层和数据链路层的高实时性、高带宽、高可靠车载以太网络，同时可降低网络成本。SPE+TSN 融合架构在汽车以太网领域的应用场景包括简化布线减轻重量、拥堵条件下的自动驾驶、高速公路自动驾驶等方面。



图 11 高速公路自动驾驶示意

简化布线减轻重量。高度自动驾驶（Level 4）尤其是完全自动驾驶（Level 5），需要部署大量智能设备，导致车内物理连接增多、布线复杂，且通信协议复杂、不统一。例如一辆高端汽车，线束系统长度会达到 6000 米，包含约 1500 根线束，近 4000 个连接点，重量约为 70 公斤，若按照目前方式推算，无人驾驶汽车的线束重量将超过 100 公斤，由此带来的布线和人力成本也十分高昂。据估算，对于燃油车，重量每减少 100 公斤，每百公里的油耗可降低 0.3-0.5 升，对应减少二氧化碳排放 8-11 克。SPE+TSN 融合架构，能够统一物理层

和数据链路层通信协议，大幅简化车载网络布线，减轻车身重量，从而降低布线和人力成本、降低油耗、减少碳排放。

拥堵条件下的自动驾驶。拥堵场景中车距短、动态变化快，高时延可能导致连环碰撞，要求端到端时延 $\leq 10\text{ms}$ ，确保车辆能实时响应突发状况。信号遮挡（如大型车辆）、多径效应等可能中断关键指令传输，要求通信成功率 $\geq 99.99\%$ ，尤其在 V2X（车与车、车与基础设施）交互中。拥堵区域车辆密集，网络需同时处理大量高清视频和点云数据，要求单辆车网络带宽不小于 1Gbps，支持多传感器（摄像头、激光雷达）数据实时共享。突发拥堵导致局部区域流量激增，需避免网络拥塞，网络需基于 SDN/NFV 技术动态调整频谱和计算资源。SPE+TSN 融合架构，满足拥堵条件下自动驾驶的低时延、高可靠、高带宽、动态调整等网络通信需求，支撑场景实现。

高速公路自动驾驶。高速公路自动驾驶对通信网络提出了高要求，需要具备低时延、高可靠、大带宽和广覆盖等网络能力。首先，网络必须实现端到端时延低于 20ms，确保车辆能够实时响应高速状态下的突发状况，如前方急刹或变道；其次，通信可靠性需达到 99.99% 以上，避免因信号丢失导致的安全风险。同时，网络需支持大带宽传输（单辆车至少 1Gbps），以满足多传感器（如摄像头、激光雷达）数据实时交互的需求，并实现车辆与云端、路侧设备（RSU）及周围车辆（V2X）的高效协同。此外，网络覆盖必须连续且稳定，尤其在隧道、山区等信号盲区需通过 5G 或卫星通信补充。为应对车流密集场景，网络应支持动态资源分配和边缘计算（MEC），就近处理交通数据，减少云端依赖。最后，网络安全至关重要，需采用加密认证和抗干扰技术，防止恶意攻击或虚假信息干扰自动驾驶决策。SPE+TSN 融合的车载以太网灵活架构方式，能够提供较强的本地通信能力，支持安全可靠接入，同时支持车载计算平台完成本地计算以实现端云协同，满足此场景的网络通信需求。

根据 GB/T 40429-2021 将汽车驾驶自动化分为 6 个等级，分别为 0 级（应急辅助）、1 级（部分驾驶辅助）、2 级（组合驾驶辅助）、3 级（有条件自动驾驶）、4 级（高度自动驾驶）、5 级（完全自动驾驶）。随着驾驶自动化等级的提升，车载传感器及车载网络设备的数量和种类不断增多，网络通信需求也随之增长，最终驱动车载网络组网方案的改变，不同形式的组网方案满足不同

等级自动驾驶的网络通信需求。典型的车载网络组网方案包括基于中央网关的组网方案、基于域控制器的组网方案和基于区域控制器的组网方案等，它们分别应用于不同的车载场景。

基于中央网关的组网方案如下图所示。

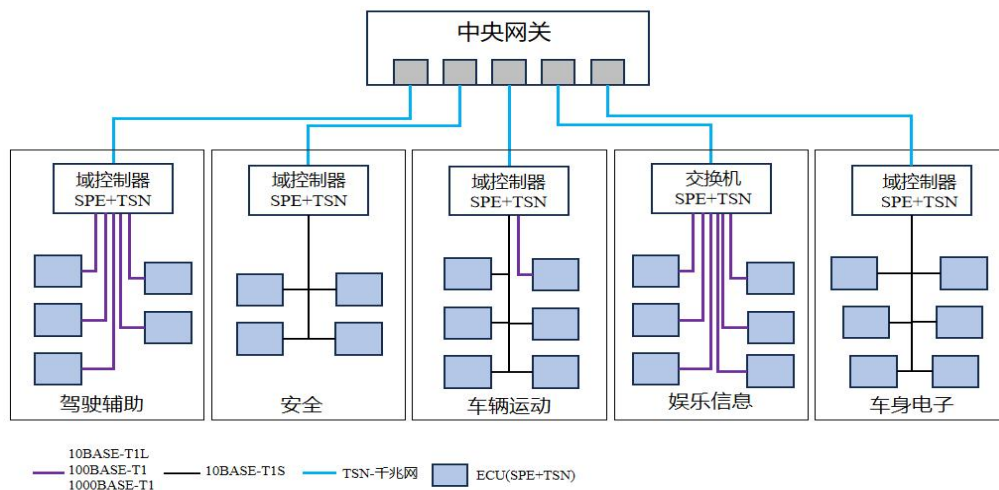


图 12 基于中央网关的组网方案

基于中央网关的组网方案可用于 0 级、1 级、2 级驾驶自动化等场景，如前向碰撞预警、自适应巡航、车道保持等。辅助驾驶、集中配置管理等功能在中央网关实现，中央网关统一处理信息，实现网络配置，并下发相关指令。域控制器实现 SPE+TSN 融合，其物理层支持 SPE 技术，链路层支持 TSN 技术。SPE 用于驾驶辅助、车辆运动等域控制器或娱乐信息交换设备与 ECU 间的通信，实现域内高效以太化通信。TSN 组成骨干网，可用于与驾驶辅助功能、安全控制功能等相关的域控制器与中央网关之间信息传输。

基于域控制器的组网方案如下图所示。

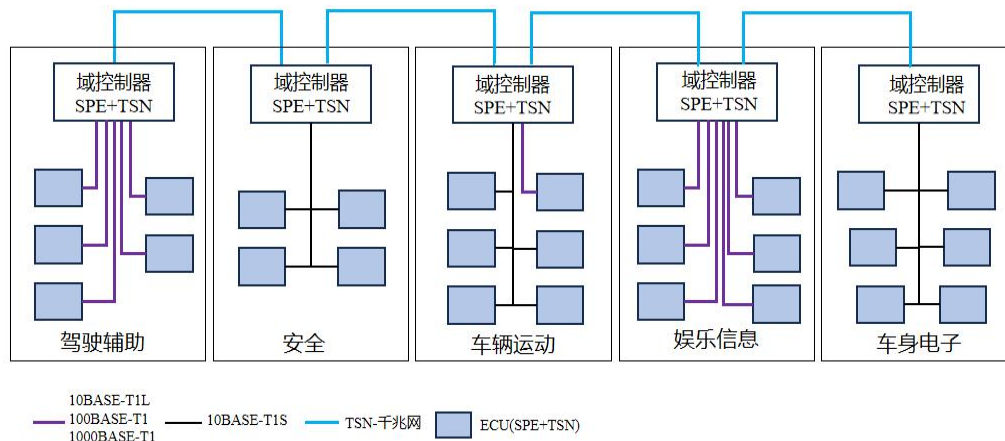


图 13 基于域控制器的组网方案

基于域控制器的组网方案可用于 3 级驾驶自动化场景，也可用于 4 级驾驶自动化的部分场景，如拥堵条件下的自动驾驶、在停车场内自动代客泊车等。此种组网方案中，取消了集中式的中央网关，驾驶自动化、网络管理等功能由各域控制器实现，域控制器的功能得到进一步增强，各域功能保持独立，降低域间耦合。SPE 用于驾驶辅助、车辆运动、娱乐信息等域控制器与 ECU 间的通信，实现域内高效以太化通信。SPE+TSN 组成车载骨干网，用于各域控制器间必要的信息传输。

基于区域控制器的组网方案如下图所示。

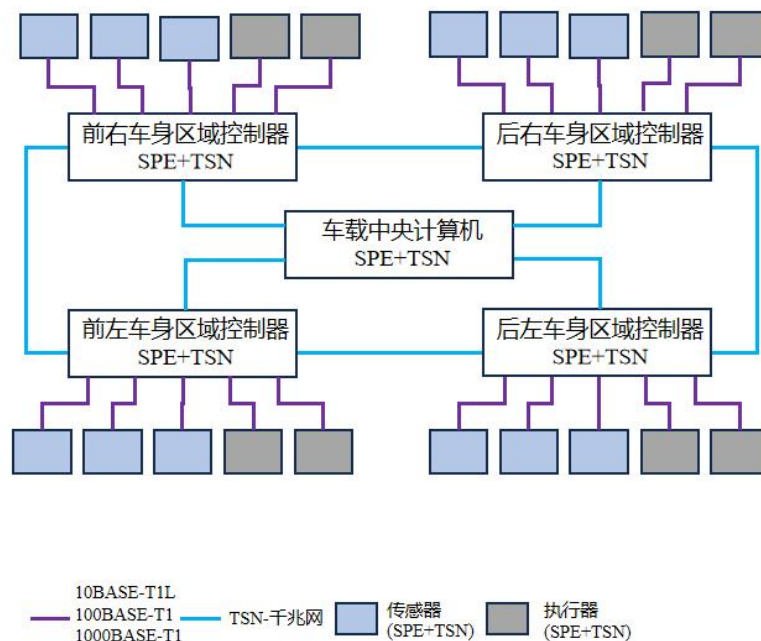


图 14 基于区域控制器的组网方案

在高级别自动驾驶场景中，域控制器进一步向区域控制器演变。基于区域控制器的组网方案可用于 4 级驾驶自动化场景，也可用于 5 级驾驶自动化部分场景，如高速公路自动驾驶，在城市或郊区的特定区域内自动驾驶等。区域控制器完成本区域内的驾驶自动化、网络管理等功能，同时与车载中央计算机通信，获取远程控制、云端计算更新等信息，提高驾驶自动化水平。SPE 用于各区域控制器与传感器或执行器间的通信，实现区域内高效以太化通信。SPE+TSN 组成车载骨干网，用于各区域控制器间、各区域控制器与车载中央计算机间的信息传输。

（三）楼宇自动化应用

楼宇自动化系统涵盖消防安全、电梯控制、暖通空调、视频监控等多个关键子系统，是智慧楼宇与智能园区建设的重要基础。然而，现有楼宇通信网络普遍存在布线复杂、协议分散、实时性不足和运维成本高的问题，难以满足绿色节能、智慧运营和安全联动等需求。例如，消防报警需在极端情况下实现毫秒级传输，传统总线架构存在延迟和互通性不足；电梯群控对实时调度与跨层通信依赖性强，但现有网络缺乏确定性保障；暖通空调需要大规模传感器数据支撑智能调度，传统网络在供电和扩展性上存在瓶颈；视频监控对带宽和供电需求高，部署成本大，且与其他业务系统缺乏有效融合。

SPE+TSN 的融合架构为楼宇自动化提供了新的解决路径。SPE 通过单对双绞线实现通信与供电一体化，并支持 1000 米长距离传输，可有效降低布线复杂度和运维成本，适合楼宇吊顶、管井等空间受限环境下的传感器与控制器部署。TSN 基于标准以太网扩展，提供纳秒级时间同步和微秒级低时延通信能力，确保消防报警、电梯调度等关键业务的确定性与可靠性，同时允许视频监控与能耗管理等大带宽业务在同一网络中共存而互不干扰。

方案优势如下：

（1）简化布线与供电一体化：SPE 采用单对双绞线传输数据并支持 PoDL，可同时为末端传感器、控制器供电，大幅减少独立供电布线需求，适合走线空间有限的楼宇吊顶、墙体内部。

（2）长距离覆盖：10BASE-T1L 支持 1000 米传输，可覆盖整栋楼宇或园区的分布式设备，避免中继器部署，降低运维成本。

（3）实时性与可靠性保障：TSN 提供纳秒级时间同步与微秒级低延时通信，确保照明控制、安防报警、消防联动等关键业务的实时性与确定性。

（4）多业务融合承载：同一 SPE+TSN 网络可同时承载视频监控流、门禁控制数据、环境监测信息，保障不同优先级流量互不干扰，实现“楼宇一网到底”。

（5）支撑绿色建筑：统一架构下的能耗监测、照明智能调节、HVAC（暖通空调）优化调度，可基于 SPE+TSN 的实时数据联动，提升节能效率。

应用场景举例

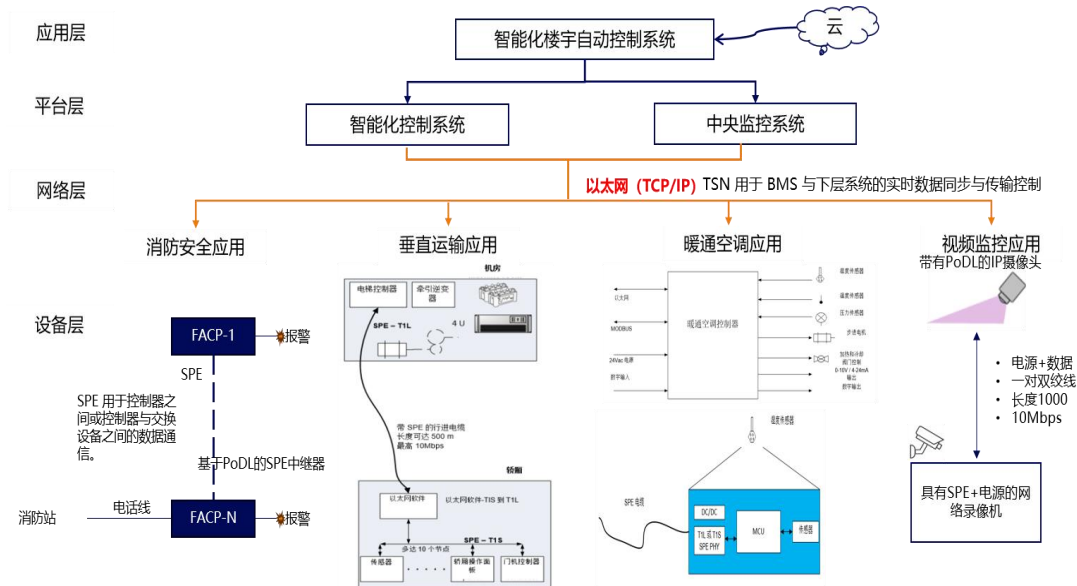


图 15 智能化楼宇控制系统应用图

(1) 消防安全应用：TSN 确保报警信号和控制指令在规定时间内必达，满足实时性要求。SPE 支持最长 1 公里传输，适应大楼范围布设；更远距离可通过 PoDL 供电的中继器扩展，无需外部电源，进一步简化系统。

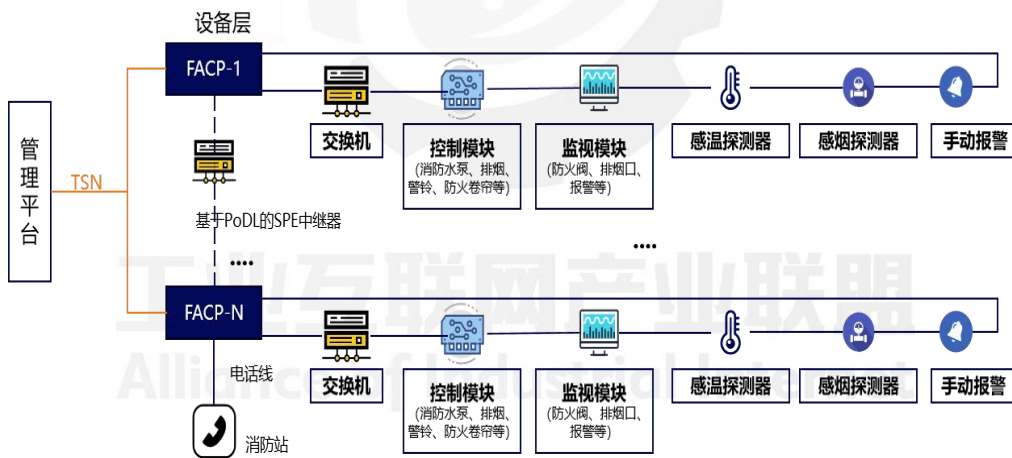


图 16 消防安全应用

(2) 电梯控制系统：电梯群控调度和实时运行监控依赖低时延和高可靠通信。TSN 提供微秒级时延保障，SPE 长距离传输覆盖整栋楼宇，实现跨层快速联动。

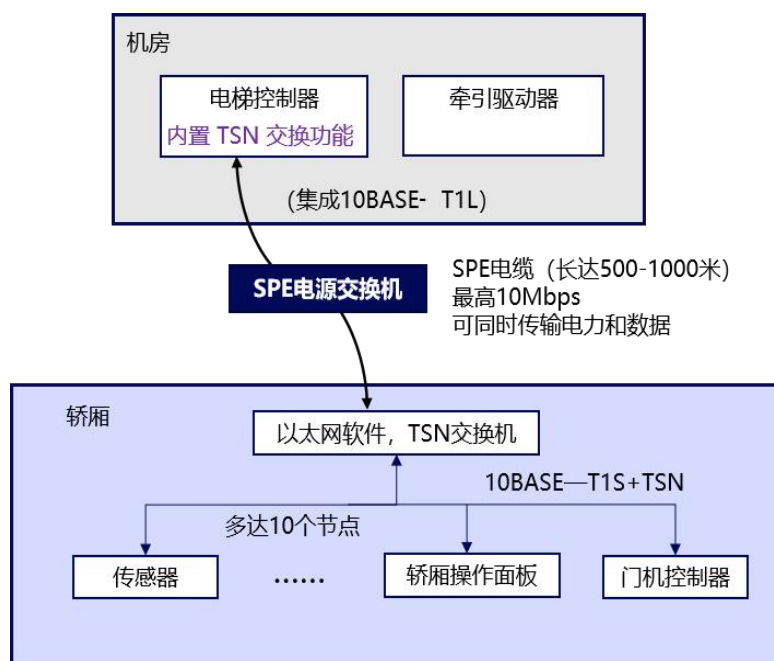


图 17 电梯控制系统

(3) 暖通空调应用：HVAC 系统需根据传感器采集的温湿度、空气质量等数据进行动态调节。SPE 支持分布式传感器的长距离接入，并通过 PoDL 简化布线与供电；TSN 保证调控指令低时延传输，使空调与新风机组能够及时响应，既满足室内舒适度，又提升节能效果。

(4) 视频监控应用：楼宇中分布密集的高清摄像头对带宽和供电要求高。SPE 实现数据与电力一体化接入，减少独立电源布设和布线复杂度；TSN 保障视频流在与消防、门禁等控制信号共网时的稳定传输，支持安防与其他子系统的高效联动。

(四) 轨道交通应用

本方案面向轨道交通列车通信网络设计，遵循 IEC 61375 列车通信网络架构，网络分为列车骨干网（Ethernet Train Backbone, ETB）与编组网（Ethernet Consist Network, ECN）两级，如下图所示。

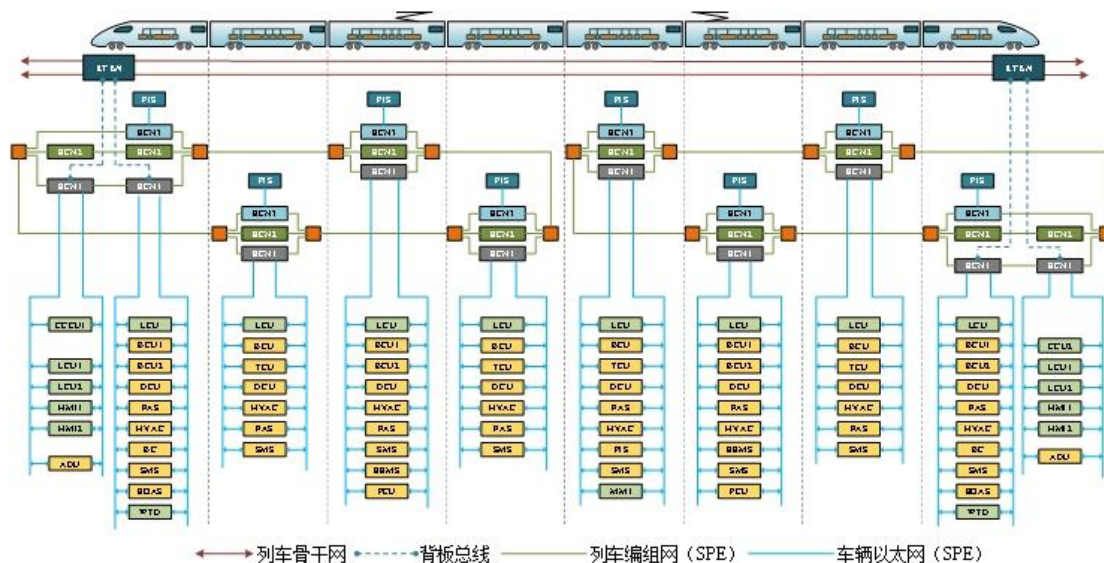


图 18 采用 SPE 的列车网络拓扑

ETB: 保持常规设计不变，在线性基础上增加备用链路，实现物理冗余。采用工业以太网冗余协议（如 PRP 协议等）实现链路切换，提升可靠性。贯穿整列车各编组，用于列车级数据交换与控制信息传输。

ECN: 在编组内部采用 SPE 环网作为核心交换机互联结构，形成高可靠、低线缆重量的编组级网络。环网协议可选 MRP 或 RSTP 协议，满足毫秒级链路切换要求。

ED: 各类设备节点如 PIS、CCTV、HVAC 控制器、门控系统、传感器等）通过 SPE 接入最近的 ECN 交换机，形成“星-环混合”结构。SPE 物理层满足 IEEE 802.3cg 标准，可同时提供数据通信与远程供电 PoDL，减少独立供电布线需求。

方案优势如下：

（1）轻量化与布线简化：线缆减重，SPE 仅使用一对导线，直径小、重量轻，相比传统四对双绞线以太网线缆减重可达 30~40%。布线空间节省，线径小、弯曲半径小，适合列车车厢内狭窄管道与走线槽。

（2）高可靠性：ECN 核心交换机采用 SPE 环型拓扑，任一链路或节点故障不影响网络整体运行，满足轨道交通高可用性要求。MRP/RSTP 等冗余协议保证在单点故障时毫秒级恢复，避免列车控制或乘客信息中断。

（3）统一的接入与供电：SPE 支持 PoDL，可为 ED 同时提供通信与电力，减少独立供电线缆及接插件数量。SPE 可直接支持远距离（最长 1km）点对点连接，适合沿车厢布置的摄像头、门控单元、传感器等。

（4）成本与维护优化：降低施工与维护成本，线缆数量减少，施工时间缩短，布线复杂度降低，且采用统一 SPE 接口标准，便于模块化更换与故障定位。

（5）面向未来的扩展性：SPE 支持 10 Mbps-10Gbps 多档速率，兼容未来高带宽车载设备需求。目前 SPE 已被广泛纳入工业以太网与车载通信标准，在未来可获得成熟的器件与生态支持。

该方案保留现有 ETB 架构，重点优化 ECN 层，采用 SPE 技术将编组交换机互联与终端接入统一到同一物理层和布线体系中。

这样既减重、节省空间，又能提高可靠性与易维护性，特别适合对重量、空间、供电和可靠性要求极高的轨道交通列车环境。

五、技术融合挑战与未来展望

（一）技术融合挑战

SPE 与 TSN 的融合虽为工业通信升级提供了方向，但当前在标准适配、设备互联、生态配套及测试体系等方面仍存在显著挑战，制约技术规模化落地。

首先是标准层级的适配难点。不同速率的 SPE 技术（如 10BASE-T1L 的长距低速、1000BASE-T1 的短距高速）与 TSN 流量调度机制（如 802.1Qbv 时隙分配）如何协同、避免带宽变化引起的数据传输时延波动；同时，Ethernet-APL 等 SPE 扩展标准与 TSN 的冗余协议（如 802.1CB）配合使用的细节未完全定义，在防爆等特殊工业场景中，可能出现协议冲突导致的通信中断。

其次是设备互联的厂商差异问题。各厂商对 SPE+TSN 技术的实现细节存在差异：TSN 设备的硬件时间戳精度从几十纳秒到几百纳秒不等，SPE PHY 芯片的信号处理算法也各有不同，导致不同品牌的交换机、终端设备互联时，时钟同步偏差可能超 1 微秒，关键控制数据出现丢包（如汽车域控制器与传感器互联时，转向指令传输偶发中断）；部分厂商还在私有协议中添加自定义功能，进一步加剧了跨品牌设备的兼容难度。

再者是生态配套的不完善困境。产业链仍缺乏成熟的产品与解决方案：支持 PoDL 功能的 SPE 传感器、适配多场景（工业 / 车载 / 楼宇）的 TSN 交换机等产品品类少，且价格比传统设备高 30%-50%，中小企业采购成本压力大；针对特殊场景的定制方案不足，如流程工业的防爆型 SPE-TSN 网关、车载高抗

振的 SPE 连接器，尚未形成规模化供应，导致部分高需求场景（如化工反应区、L4 级自动驾驶车辆）无法快速部署。

最后是一致性测试体系的缺失。目前尚无统一的 SPE+TSN 融合技术一致性测试标准与工具：国际上仅针对单一技术（如 SPE 物理层、TSN 时钟同步）有零散测试规范，缺乏覆盖“物理层 - 链路层 - 应用层”的全链路测试指标；国内也未形成权威的测试认证平台，企业无法验证设备是否符合融合技术要求，可能导致部署后出现时延超标、可靠性不足等问题，增加试错成本与落地风险。

（二）未来发展方向与趋势

基于当前 SPE 与 TSN 技术的核心技术产业链发展以及相关标准的持续完善，未来的发展将呈现以下趋势：

趋势一：技术深度融合，从“连通”走向“智能确定性”

SPE+TSN 成为主流方向：单纯的 SPE 解决了现场层的“以太网到底”和布线简化问题。而未来工业互联网、车联网等场景对数据的实时性、确定性和可靠性要求极高。因此，将具备不同速率和距离特性的 SPE（如 10BASE-T1L, 1000BASE-T1）与 TSN 的时钟同步、流量整形、高可靠性机制相结合，是构建统一、开放、确定性的工业网络架构的必然选择。

从物理层到应用层的全栈协同：未来发展方向将是 SPE 物理层芯片、TSN 交换机芯片、操作系统协议栈以及上层应用的深度协同优化。这将实现从现场传感器到云端的数据无缝、无损、实时传输。

趋势二：应用场景纵深拓展，从示范走向规模化普及

重点行业的深度渗透：在工业自动化领域，SPE+TSN 融合技术正全面替代传统总线，构建扁平化架构以实现“一网到底”；在汽车电子领域，它通过减轻线束重量和提供确定性时延，成为支撑软件定义汽车和自动驾驶的关键；同时，在智能楼宇和轨道交通领域，其价值在于通过简化布线与融合多业务系统，显著提升运营效率与可靠性。

向更多垂直行业辐射：SPE+TSN 融合技术“长距离、供电一体化、确定性通信”的独特优势，将使其在智慧城市（如边缘感知网络）、能源电力（如智

能电网）、航空航天及农业监测等需要大量分布式、低功耗、高可靠连接的新兴领域找到用武之地，最终演进为支撑万物智联的通用网络基础设施。

趋势三：产业链与生态体系持续壮大与协同

芯片与关键元器件国产化加速：国内厂商如裕太微等的突破仅是开始。未来，在 SPE PHY 芯片、TSN 交换芯片、本安接口模块等核心部件上，将出现更多的国产化产品，降低成本和供应链风险，并催生更具针对性的本地化解决方案。

解决方案趋于成熟与标准化：设备制造商、控制系统厂商与终端用户的协同创新将不断深化。成果将体现为更多经过验证的、开箱即用的行业解决方案包，极大降低用户的部署难度和集成成本。

此外，随着工业互联网的发展，SPE+TSN 未来也将与 5G、边缘计算等技术形成协同，进一步满足移动设备接入、柔性产线以及云边协同等场景需求，推动工业网络向开放化、智能化方向持续演进。



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

参考文献

- [1] 张晓东. 软件定义时间敏感网络与同步技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2025.
- [2] 张旭. 基于时间敏感网络的列车以太网通信技术研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2022.
- [3] 时间敏感网络控制系统白皮书[R]. 北京: 中国电子技术标准化研究院, 2023.
- [4] TSN 解决方案白皮书[R]. 上海: 华为技术有限公司, 2022.
- [5] 蔡岳平, 姚宗辰, 李天驰. 时间敏感网络标准与研究综述[J]. 计算机学报, 2021, 44(10): 2133-2146. DOI: 10.11897/SP.J.1016.2021.01378.
- [6] 许方敏, 伍丽娇, 杨帆, 赵成林. 时间敏感网络(TSN)及无线 TSN 技术[J]. 电信科学, 2020, 36(8): 81-91. DOI: 10.11959/j.issn.1000-0801.2020178.
- [7] 孙志刚. 场景驱动的时间敏感网络定制关键技术研究[与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2020.
- [8] 工业网络 3.0 白皮书[R]. 北京: 中国信息通信研究院, 2021.
- [9] Belden Inc. Single Pair Ethernet in the Industrial Field [R]. St. Louis, Missouri: Belden Inc., 2024.

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