Technical White Paper

统一的以太网主干网：单线对以太网 (T1L | T1S) 如何在楼宇自动化领域提高效率

Vivaan Jaiswal *DCC-ENET*

1 摘要

对于现代化楼宇自动化系统 (BAS) 而言，其不断提升的智能化程度与日益老旧的物理基础设施之间的差距逐步扩大。虽然现代化 HVAC 系统和消防安全传感器需要高频率数据流和毫秒级响应时间，但用于传输此类数据的传统串行网络却面临带宽瓶颈、高延迟时间和复杂的多导体布线等问题。本白皮书阐明了与这些传统架构相关的关键风险，并提出了一种可扩展的解决方案：单线对以太网 (T1L 和 T1S) 。本文档通过分析 T1L 在远距离 HVAC 控制方面和 T1S 在确定性消防安全回路方面的技术优势，展示了工程师如何在提供基于原生 IP 基础的同时，将布线成本降低高达 50%。最终，我们将打造统一、安全且面向未来的楼宇架构，以通过以太网功能提高能效和生命安全规范符合性。

内容

1 摘要.....1
2 简介.....2
3 楼宇自动化的现状.....2
3.1 楼宇智能化的发展历程.....2
3.2 断点.....3
4 统一的以太网生态系统.....3
4.1 架构：从核心到边缘.....3
4.2 缩小差距：T1L 和 T1S.....4
5 优点和结果.....4
6 结语.....5

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

2 简介

楼宇自动化系统中使用的传统布线和协议很难满足现代化 HVAC 系统优化（需要密集的传感器数据）和关键消防安全系统（要求确定性性能和可靠性）的当前需求，这可能会导致成本增加、复杂性提高和风险上升。

而采用以太网技术的战略性分层，有助于提供面向未来的基础架构，打造统一的网络拓扑。此采用方案包括：标准以太网，旨在满足主干网或高带宽需求；单线对以太网 (SPE)，旨在实现更具成本效益的传感器连接；SPE 长距离以太网（T1L、IEEE 802.3cg），旨在用于扩展距离 PoDL 应用；以及以太网单线对多点连接（T1S、IEEE 802.3ch），旨在用于低成本传感器网络。

本白皮书探讨了如何通过将 T1L 和 T1S 以太网等新兴以太网技术，并将其与常用的标准以太网主干网结合使用，来将楼宇自动化系统从各种孤立、受限系统的聚合，转变为统一、高带宽的高效平台，从而满足快速、可靠数据和整体系统效率的需求。

3 楼宇自动化的现状

3.1 楼宇智能化的发展历程

在过去的 50 年间，楼宇自动化理念已从*简单的自动化*转变为*智能的协同控制*。然而，尽管 HVAC 和消防安全系统的逻辑和传感功能已呈指数级发展趋势，但用于传输这些系统数据的物理基础设施却在很大程度上停滞不前。

- **离散控制时代（1970 年代至 1980 年代）：**楼宇系统主要采用机械控制方式。HVAC 系统由简单的恒温器到继电器连接组成，而消防安全系统则由硬接线点对点警报组成。当时的数据传输需求微乎其微，*智能化体系*也是采用本地模拟形式。
- **数字现场总线的兴起（1990 年代至 2000 年代）：**随着楼宇管理系统 (BMS) 的出现，数字智能化体系才被引入。在此期间，可变风量 (VAV) 控制器、用于维持热舒适性的复杂 PID 回路和可寻址烟雾探测器等功能相继问世。为了管理这些新增功能，我们采用了低速串行现场总线（RS-485、BACnet MS/TP、LonWorks）。这些新增功能在有限的遥测时间内表现十分出色，但其设计主要面向小型周期性数据包，而非连续数据流。
- **数据驱动需求和传感器爆发式增长（2010 年代至今）：**现已进入所谓的*数据驱动需求*时代。现代化 HVAC 系统不再只是管理温度，还可以管理室内空气质量 (IAQ)、CO^2 水平、湿度、人员占用情况和气流湍流。消防安全系统已不再局限于简单的烟雾检测，而是纳入了多标准传感器、火焰检测，甚至基于视频的烟雾分析技术。

效率是 HVAC 和消防安全系统的关键。效率低下的系统会导致运行成本上升并降低可靠性，正因如此，现代化 HVAC 系统极度依赖准时数据流来管理所有子系统中的大量控制回路，并保持相对良好的性能系数 (COP) 来实现尽可能高效的系统。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

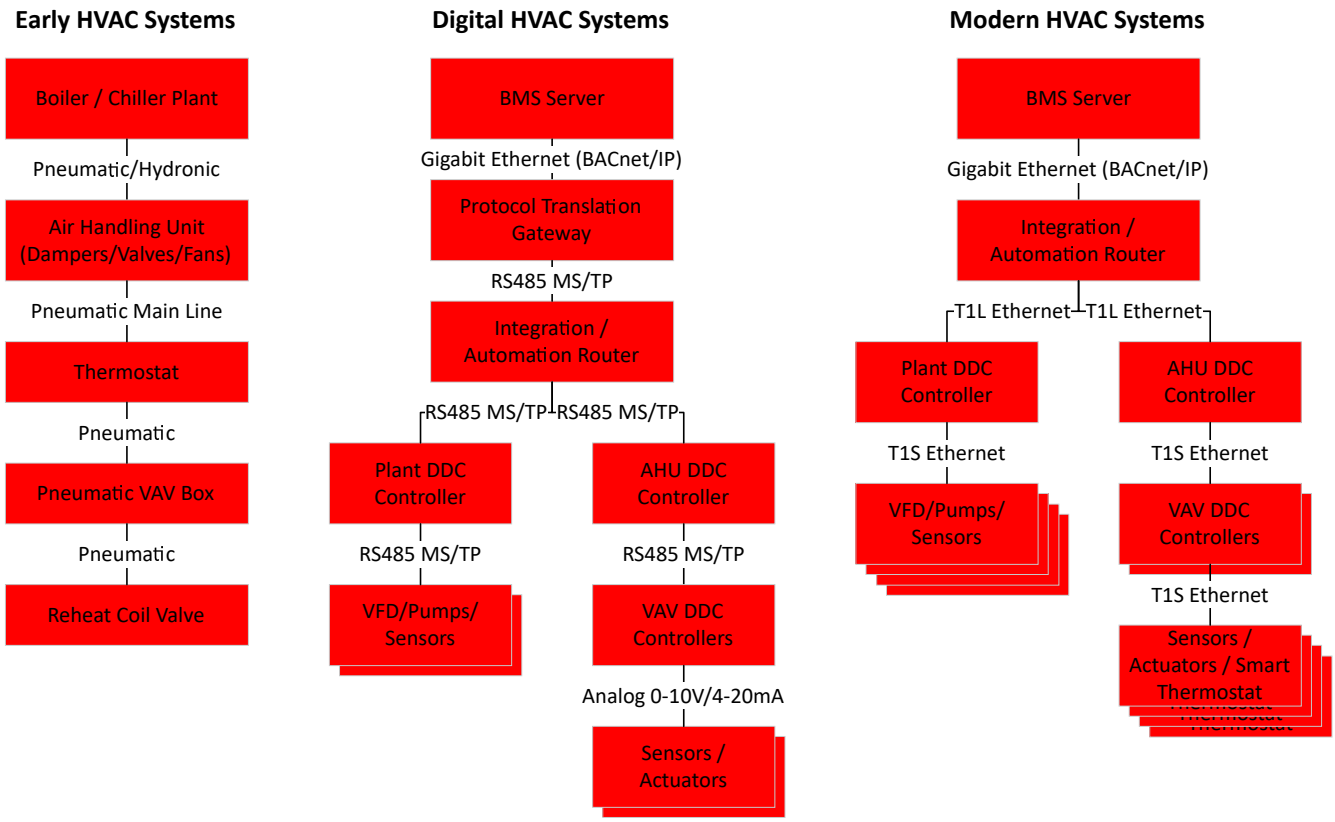

图 3-1. HVAC 系统的发展历程

3.2 断点

数据点的爆炸式增长以及对实时响应能力的要求，导致边缘器件的智能化程度与布线承载能力之间出现根本性失衡。这种失衡会造成三种关键风险：

- **带宽瓶颈（数据扼流圈）**：传统串行网络通常被称为现代数据传输的*瓶颈*。为进行能源审计和预测性维护，我们增加了高分辨率传感器。在此期间，低带宽现场总线会受到高延迟和数据包冲突的影响。在 HVAC 系统中，这种瓶颈会导致控制回路运行迟缓。而在消防安全方面，这种瓶颈则会导致关键警报信号延迟风险。
- **复杂性和成本陷阱**：为提高智能化水平，工程师通常不得不铺设大量昂贵的多导线电缆束，以满足电源和通信的需求。这增加了劳动力成本和物料成本，以及管道占用的物理空间，导致现有楼宇的改造费用极其昂贵。
- **智能化碎片化（孤岛问题）**：由于传统的现场总线无法*支持*原生 IP 地址，每个子系统（HVAC、消防、照明系统）都需要单独的专用网关。这种需求造成了数据孤岛，使消防安全系统无法轻松与 HVAC 系统进行通信以触发烟雾净化通风模式，进而导致集成生命安全响应能力出现缺口。

整个行业正处于十字路口：是继续修补老化的低速串行网络，还是从根本上升级楼宇的*神经系统*？采用单线对以太网（T1L 和 T1S）为缓解这些日益提升的风险提供了一种可行途径。通过切换到完全基于以太网的物理层，系统可以从分散的低速架构转为统一的高带宽、确定性生态系统。这种转换不仅解决了接线问题，还实现了传统系统根本无法支持的真正闭环智能控制和集成生命安全防护。

4 统一的以太网生态系统

4.1 架构：从核心到边缘

为了消除不断增长的数据需求与基础设施老化之间的紧张关系，楼宇自动化系统必须经历范式转变，即从分散的串行现场总线迁移到基于 IP 的统一单线对以太网 (SPE) 架构。建议的解决方案并不是要取代某些网络元素，而是扩展网络的覆盖范围。一座面向未来的现代化楼宇将采用分层以太网架构：

- **IP 主干网（核心）**：高速多线对千兆位以太网可作为在楼宇内传输数据的可靠*高速通道*，用于连接楼宇管理系统 (BMS)、云端服务器和楼层级分配交换机。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

- **SPE 延伸网络（边缘）**：T1L 和 T1S 以太网可充当*专用装置*，将该网络架构直接扩展到最精细的设备。如此一来，数据无需通过将 IP 转换为慢速串行协议的网关，而是作为标准以太网数据包顺畅地在传感器与核心之间往返传输。

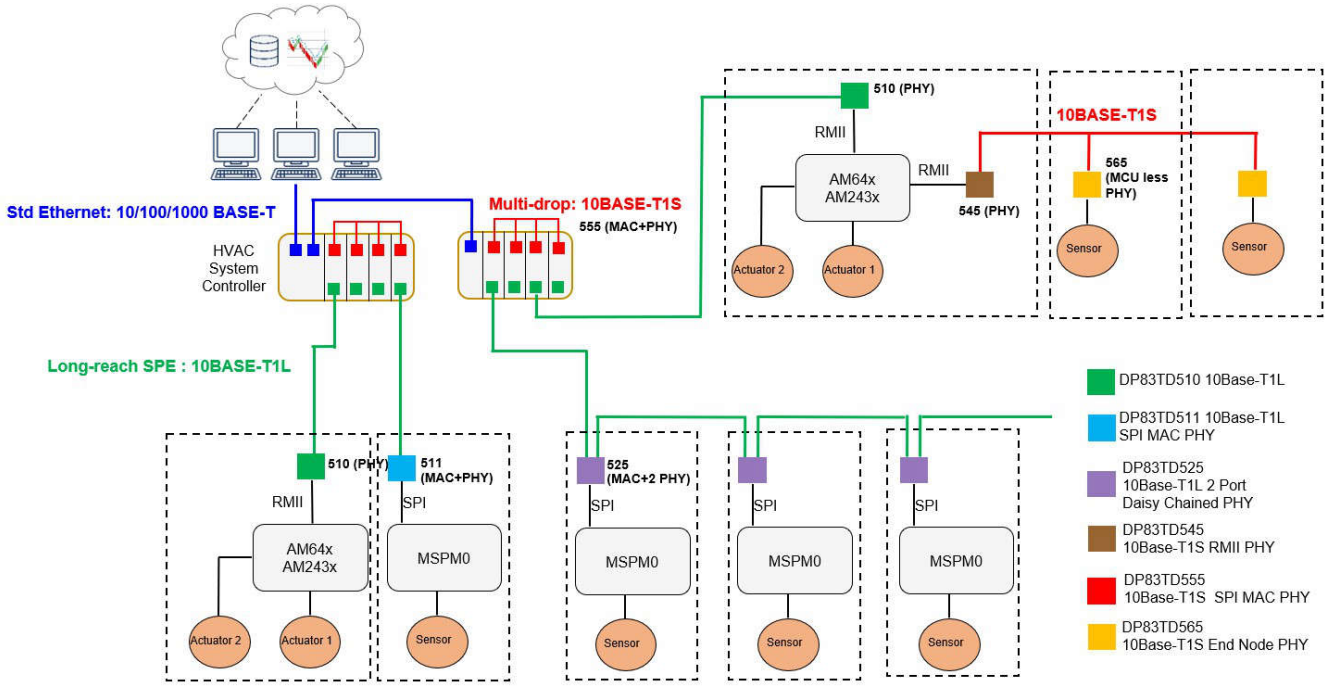

图 4-1. 建议的系统架构

4.2 缩小差距：T1L 和 T1S

通过部署单线对以太网，可以解决传统系统遗留的特定技术缺口：

- **长距离智能层 (10BASE-T1L)**：T1L 旨在取代长距离、低速串行链路，如 RS-485 或 M-Bus。传统 HVAC 系统通常需要处理大型有效载荷传输、固件更新、高延迟和接地回路等问题，而这些问题可能导致通信故障。T1L 以太网的传输距离可达 2km 且吞吐量可达 10Mbps，可以消除带宽上限，用于远离控制器的器件，例如 VAV 箱、室外环境传感器及远程 HVAC 风门等。其模拟前端新增的隔离功能可彻底断开接地回路，使通信更能抵御电气干扰，同时还可以利用增加的 PoDL 支持来消除对单独电源线的需要。T1L PHY 提供的多种电缆诊断功能还支持使用远程故障检测功能，来实现实时电缆监控、电缆运行状况预测性检查和轻松调试。可调终端还支持使用现有的电缆基础设施进行通信和供电。
- **多点连接智能层 (10BASE-T1S)**：T1S 旨在取代短距离的局部现场总线，如 CAN 和 LIN。与 T1L 类似，T1S 以太网可提供更高的带宽、显著提升的稳健性和 PoDL 支持，同时还添加了多点连接以太网功能。传统的多点连接系统依赖控制器-目标轮询或 CSMA/CD 令牌传递机制。但在网络流量较高时，这两种机制的性能会大幅降低。当多个智能控制器尝试同时通信时，通常会出现数据冲突、非确定性时序和令牌超时循环等问题。T1S 引入了物理层冲突避免机制 (PLCA)，通过轮询方式来完全消除数据冲突。其工作原理是为总线上的每个节点分配唯一 ID 和传输时隙，使每个节点都能获得确定性的通信延迟，并拥有平等的通信机会，不受网络拥塞程度影响。

T1L 和 T1S 共同构成高速以太网主干网和低速边缘器件之间的桥梁。这种集成的另一优势在于，从主干网到边缘网络的整个网络架构均支持原生 IP 通信，这意味着网关、转换和故障点都会有所减少。每个传感器或器件都可以配置特定的 IP 地址，以便更轻松地访问网络上的所有器件。

5 优点和结果

从分散的传统现场总线架构（RS-485、CAN、LonWorks 等）迁移到统一的以太网主干网，并不只是简单的布线升级，而是楼宇基础设施在经济、功能和未来适应性方面的一次根本性转变。传统串行总线对数据速率、距离和确定性具有严格的物理限制，无法满足现代化楼宇分析和生命安全系统的需求。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

表 5-1. 传统协议与以太网 IP 间的关系

功能	传统架构	统一的以太网架构	结果
带宽	遥测粒度	• 数十个器件共享带宽，传输速率通常只有几 Kbps 到几 Mbps • 轮询间隔通常较长，且仅传输当前值	• 速度范围为 10Mbps (T1L/T1S) 至千兆位 (Gbps+) • 可以 10Hz 至 100Hz 的频率进行流式遥测 • 支持采集完整波形（振动、压力、瞬态变化等）	• 更高的数据采集精度支持在 VAV 风门、AHU 风扇等关键系统中进行预测性维护。 • 更高的吞吐量能让系统更快地响应环境变化，从而节省能源
确定性和控制延迟	• 控制器-目标轮询会显著增加延迟；CSMA/CR 在节点数量较多时可能不可靠，在某些情况下甚至可能导致无限期延迟传输	• 时间敏感网络支持确定性延迟，并将抖动降至最低 • 使用 PLCA，以在分配的时间内在多节点系统中传输数据包	• 支持构建更可靠、更具弹性且时间敏感的 PID 回路网络 • 每个传感器或节点都有机会传输关键数据
网络拓扑	• 单个故障点会导致菊花链拓扑中的网络发生中断，并使所有下游器件断开连接	• 支持使用多种不同的拓扑（星形、环形、总线）和协议（HSR、MRP 等） • 可针对单点故障提供冗余保护	• 在发生故障时，可让消防安全回路等生命攸关的系统更加可靠
协议互操作性	• 该系统由 BACnet MS/TP、Modbus RTU、LonTalk、专有协议等孤立栈组成 • 需要在多个位置部署网关，才能实现 IT/OT 融合	• 使用 BACnet IP、Modbus TCP、MQTT 等将本机 IP 栈扩展至边缘器件。 • 无需网关 • 云端可以直接与 VAV 箱等边缘器件通信	• 借助统一的系统网络架构，实现边缘器件*智能化*，从而使系统能够满足未来需求 • 无需在不同子系统之间进行*转换*
布线和接线	• 使用多芯电缆束，分别输送电力和数据 • 缺乏标准化的电缆或连接器	• 具有标准化的电缆和连接器。 • 使用 PoDL 通过同一根电缆输送电力和数据	• 显著减轻电缆重量并降低布线复杂性 • 可调终端支持对现有基础设施进行改造

6 结语

采用 T1L（用于分布式智能化控制）、T1S（用于确定性本地多点网络和消防安全回路）和标准以太网（用于主干网或云连接）的最终结果是消除分散的楼宇管理系统。

在传统系统中，HVAC 系统在一条总线上运行，消防安全系统则在另一条总线上运行，每条总线都需要多个网关进行协议转换，方可捕获数据。在这类条件下，几乎无法进行实时分析和调试。使用全以太网架构后，只需一根电缆即可同时输送电力和数据，并且通过一种协议就能从云端扩展到边缘器件。在这类条件下，云端通过单个基于 IP 的仪表板便可与所有边缘设备进行交互。这项变革不仅改变了网络架构，更是打造了自主、自优化的楼宇自动化系统架构。此系统中的子系统无需争夺优先级，而是集成到同一个智能网络架构中。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做出任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 TI 销售条款)、TI 通用质量指南 或 ti.com 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。 除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月