Application Note

从标准以太网到单线对以太网迁移指南

Gregory Kobyakov

摘要

在机器人应用中，必须高效收集和处理来自摄像头、传感器和电机的大量数据。以太网提供了一个接口，用于实现传感器、电机控制器和机器人控制器之间的实时通信。随着对更高效、更易操作的机器人的需求不断增长，我们需要优化元件尺寸和重量。在这一优化过程中，一个越来越常见的选择是将机器人中的通信接口从标准以太网切换到单线对以太网 (SPE)。SPE 使用的电缆更小、更轻，可实现更灵活、更紧凑的机器人设计。减轻重量还有助于降低机器人移动的功耗。除了机器人应用，该方法也适用于许多其他同样希望更大限度提高系统性能的领域。本应用手册为从标准以太网设计切换到 SPE 设计时的主要考量提供了指南。

English Document: SDAA576
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

1 简介

从标准到 SPE 的迁移可以分为系统实现、PHY 级差异和实时信令协议选择等类别。本应用手册将讨论这些考量因素，并对这两种类型的以太网应用进行比较。

德州仪器 (TI) 为标准以太网和 SPE 应用提供多种以太网 PHY 收发器。本文档将讨论 DP83826A 标准以太网 PHY 和 DP83TC813-Q1 SPE PHY 作为过渡考量的示例。DP83826A PHY 具有低延时、低功耗的特点，支持 10BASE-Te 和 100BASE-TX 以太网协议。DP83TC813-Q1 是一款符合 IEEE802.3bw 和 Open Alliance 标准的 100BASE-T1 PHY。

2 标准与单线对实现

标准和单线对以太网 PHY 均通过介质独立接口 (MII) 连接到处理器，再通过介质相关接口 (MDI) 连接到链路对端 PHY。这些器件之间的主要区别在于 MDI 连接的实现方式。标准以太网使用多达四对差分线来传输数据。对于 10Mbps (10BASE-TX) 和 100Mbps (100BASE-TX) 以太网，仅使用两对。这种情况的一个示例如图 2-1 所示。对于 1Gbps (1000BASE-T) 标准以太网，则使用全部四对。PHY 和连接器之间会放置一个变压器，以提供与连接器的直流隔离、防止 EMC 事件并实现阻抗匹配。

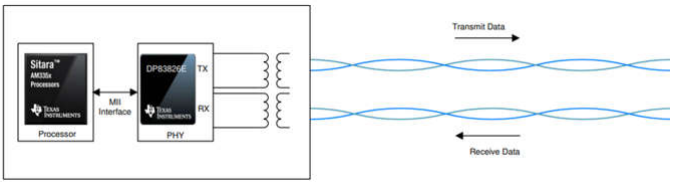


图 2-1. 标准以太网 PHY 实现

单线对以太网仅使用一对导线来连接 MDI，而且不需要变压器。实现示意图如图 2-2 所示。

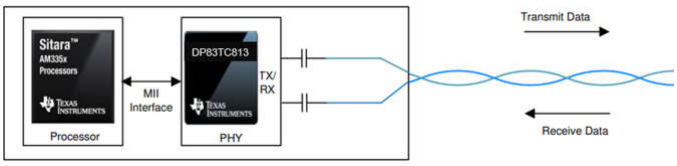


图 2-2. 单线对以太网 PHY 实现

单线对以太网 PHY 实现还在 MDI 上使用额外的元件。共模扼流圈 (CMC) 滤除共模噪声，防止 PHY 接收器中断并抑制辐射发射。两个电容器用于直流隔离，与采用变压器的标准以太网实现方案相比，其尺寸更小。图 2-3 比较了标准以太网和单线对以太网之间完整的 PHY 连接。

English Document: SDAA576
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

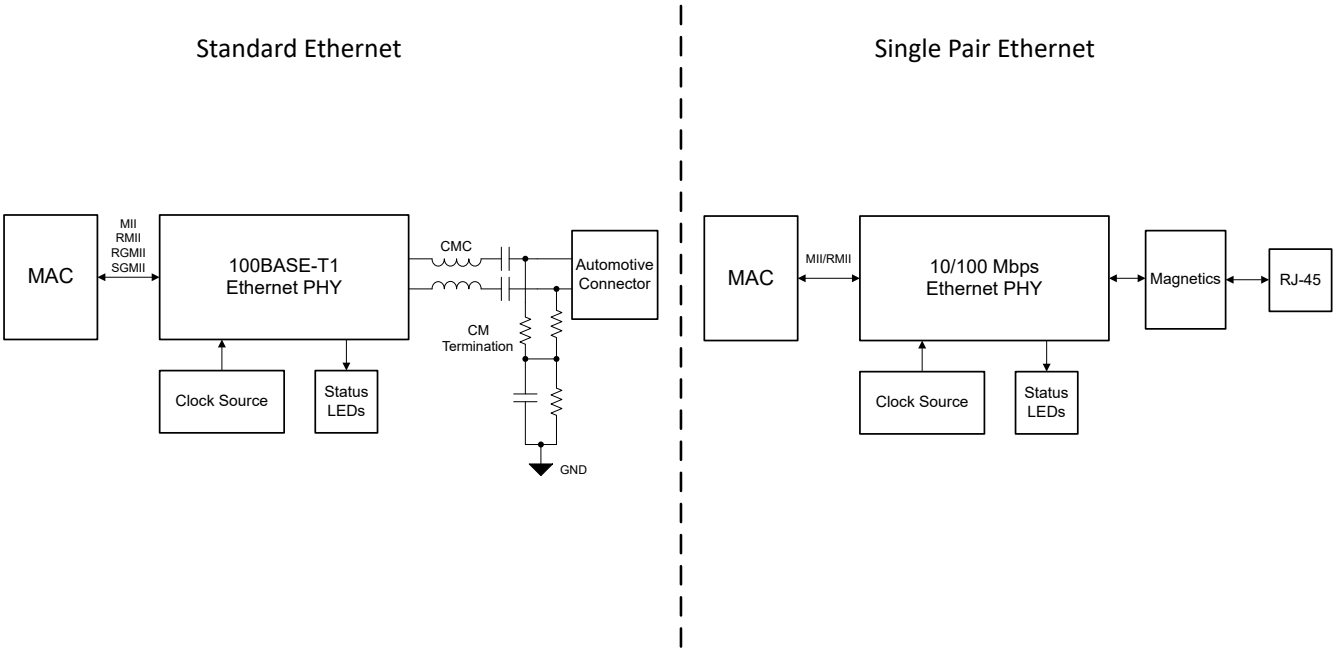


图 2-3. 标准与 SPE PHY 实现

图 2-4 根据 IEEE802.3 标准展示了标准以太网和 SPE 的完整概览，包括拓扑、电缆和连接器类型以及示例应用。

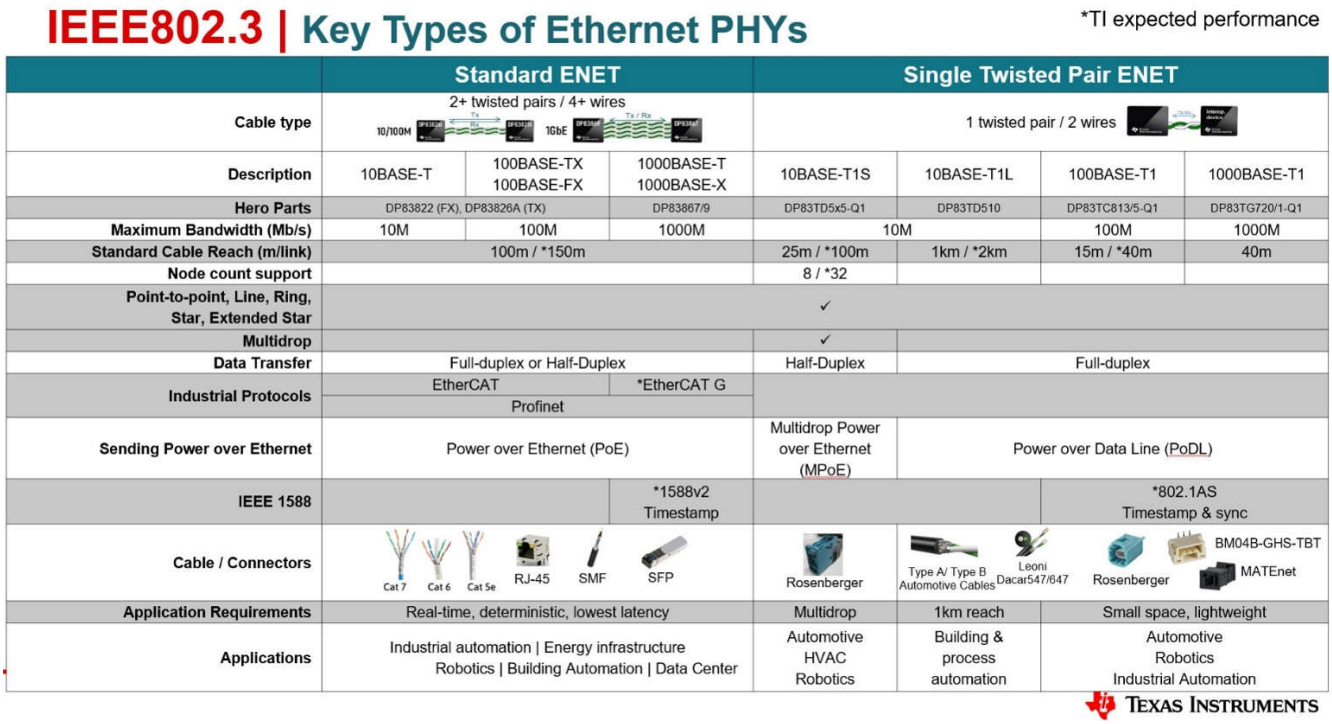


图 2-4. IEEE 以太网标准

English Document: SDAA576
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

3 PHY 主要差异

从标准以太网设计迁移到单线对以太网设计时，需要考虑几个 PHY 级差异。主要应评估尺寸和功耗等因素。此外，标准和 SPE PHY 通常具有不同的工作温度范围。下表定义了这些参数以及它们在标准和单线对以太网 PHY 之间的差异。

表 3-1. PHY 级差异

参数	标准以太网 DP83826A	单线对以太网 DP83TC813-Q1
数据速率	10/100 Mbps	100 Mbps
IC 大小	5x5mm	5x4mm
功耗	< 160mW	< 230mW
工作温度	DP82826AE：–40°C 到 +105°C DP82826AI：–40°C 到 +85°C	-40°C 至 +125°C
EMC	ESD 直接接触：± 9kV A 类	ESD 直接接触：± 8kV
延时 (TX + RX)	210ns	724ns

除了 IC 尺寸外，还必须考虑 PHY 实现所需的布板空间。为了进行此项对比，下图分别比较了 DP83826A EVM 和 DP83TC813-Q1 EVM 的 PCB 布局。虽然这是示例应用所用布板空间的示例，但论证了 SPE 所需布板空间小于标准以太网这一总体趋势。

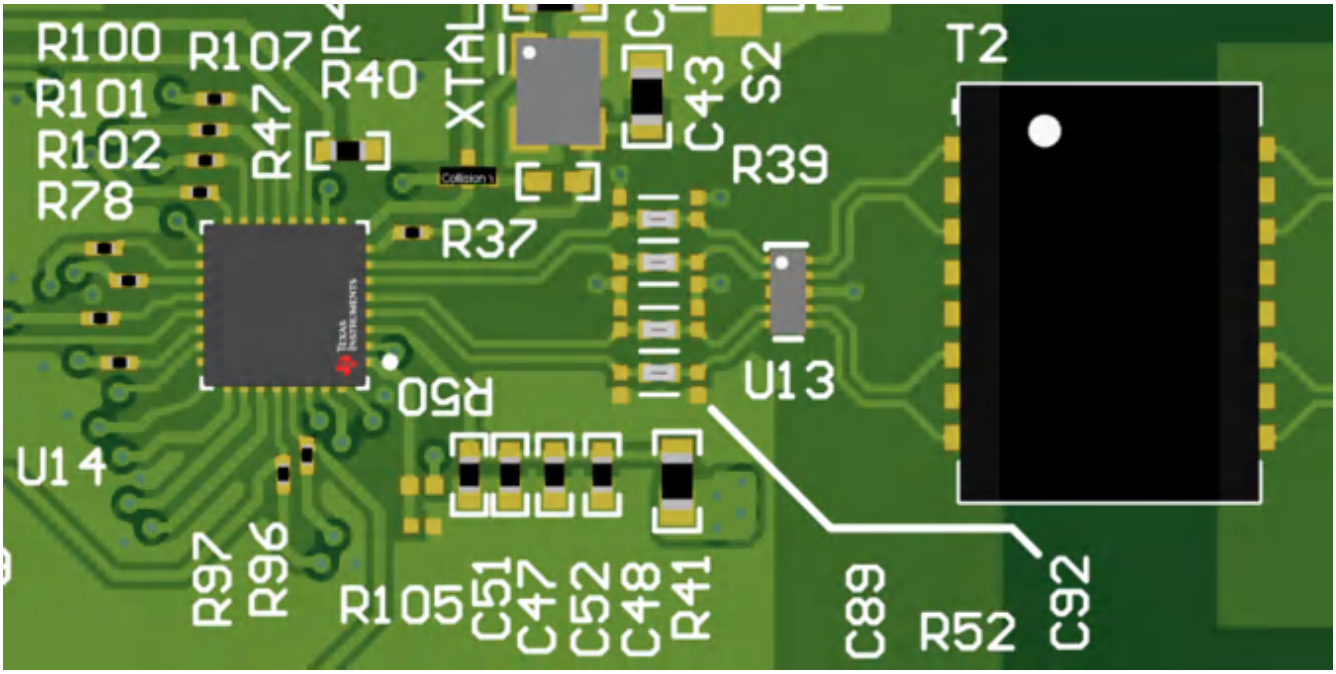


图 3-1. DP83826A EVM 布局

布板空间：约 40mm × 约 25mm

PHY 封装尺寸：5mm × 5mm

变压器 (T2)：12.7mm × 9.09mm

English Document: SDAA576
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

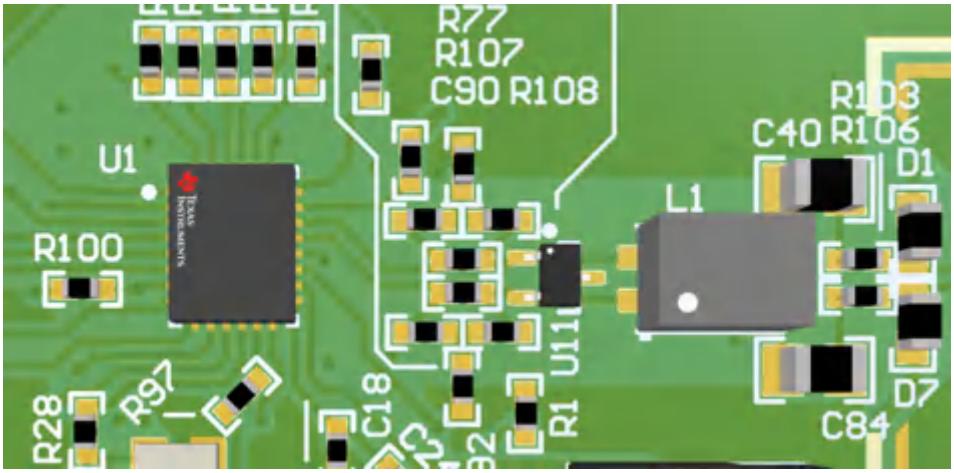


图 3-2. DP83826A EVM 布局

布板空间：约 30mm × 约 15mm

PHY 封装尺寸：5mm × 4mm

CMC (L1)：4.5mm × 3.2mm

最后，必须检查标准以太网和 SPE 之间的外形尺寸差异。不同的电缆、连接器和其他外部元件都会影响系统实现的总体尺寸和重量。表 3-2 中概述了这些考量因素。该表展示了 SPE 的一个主要优势是通常所需的布线尺寸和重量更小。

表 3-2. 外形尺寸差异

元件	标准以太网	单线对以太网
布线	导线数量：4 或 8 总直径：5 – 6.5mm 总重量：30-50kg/km	导线数量：2 总直径：2.5 – 4.0mm 总重量：15-50kg/km
连接器	RJ45 连接器：30g，2cm³	M8 连接器：20g，约 8mm 直径 M12 连接器：30g，约 12mm 直径
磁性元件	以太网连接需要单独的隔离变压器（约 1cm²）	无需外部磁性元件

English Document: SDAA576
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

4 EtherCAT 和 TSN

对于许多应用（例如机器人的实时控制）而言，常规以太网通信通常速度不够快且可预测性不足。工业协议提供了一种可实现超低延时和精确数据传输的解决方案。使用最广泛的协议之一是用于控制自动化技术的以太网 (EtherCAT)。EfherCAT 由 Beckhoff Automation 专门针对工业应用而开发，采用与以太网相同的物理层/数据链路层。在以太网系统中，数据通过控制器/外设配置中的多个不同节点进行路由，并根据数据包请求进行发送或接收。在 EtherCAT 系统中，控制器是唯一允许发送数据帧的节点。它通过让数据包穿过每个节点，来为整个节点网络发送数据。该拓扑如图 4-1 中所示。

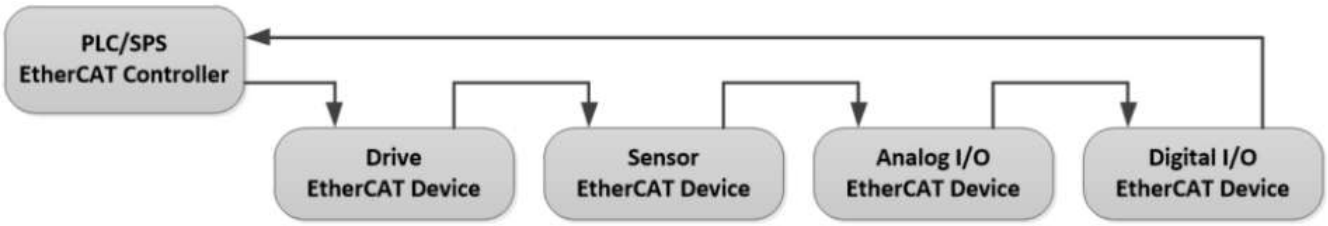


图 4-1. EtherCAT 拓扑

EtherCAT 的主要特性包括：

- 分布式时钟：跨 EtherCAT 设备和控制器的精确时间同步方法
- 带回送功能的快速链路断开检测：当以太网 PHY 检测到链路断开时，PHY 会通知 EtherCAT MAC。在 10µs 内，EtherCAT MAC 回送 EtherCAT 帧
- 环形拓扑：EtherCAT 设备以圆形配置连接，形成闭环。每台设备都连接到另外两台设备，为数据传输创建一条连续路径
- 电缆冗余：双端口电缆冗余可补偿 EtherCAT 系统中通信外设的任何故障

但是，SPE 应用不支持 EtherCAT。因此，迁移到单线对系统时，必须考虑其他实时信令选项。时间敏感网络 (TSN) 正成为这一场景中日益流行的路径。TSN 是一组 IEEE 标准，允许通过常规以太网基础设施发送确定性、时间同步的数据。通过在 TSN 之上启用必要的协议和服务来支持 TSN 元件，这组标准可以与 EtherCAT 的功能相匹配。有关实现 TSN 的更多信息，请参阅 *设计面向机器人的确定性可扩展以太网主干*。

English Document: SDAA576
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

5 主要过渡考量

从 DP83826A 设计过渡到使用 DP83TC813-Q1 的设计时，除了本文前文概述的一般性迁移建议外，还需要考虑若干其他事项。参见表 5-1。

有关这两款器件的实现和配置的更多详细信息，可参阅各自的原理图评审检查清单：DP83TC813 原理图评审检查清单和 DP83826A 原理图评审检查清单

表 5-1. 从 DP83826A 过渡至 DP83TC813

	DP83826A	DP83TC813
引脚排列/封装	32 引脚 QFN	28 引脚 VQFN
电缆	2 线对或 4 线对 CAT5/6 电缆	单对双绞线电缆
MDI	磁性元件	CMC、直流阻断电阻器、MDI 耦合电容器和 ESD 分流电阻器
MAC 接口	MII 和 RMII	MII、RMII、RGMII 和 SGMII
配置	• 可以通过 MDIO 寄存器写入或自举进行配置 • 不需要初始化脚本	• 可以通过 MDIO 寄存器写入或自举进行配置 • 需要一个初始化脚本来符合 TC10 标准

English Document: SDAA576
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

6 总结

本应用手册讨论了从标准以太网设计过渡到单线对以太网设计时的重要考量因素。它评估了系统和外形差异、PHY 特性和实时信令。此外，还对 DP83826A 标准以太网 PHY 和 DP83TC813-Q1 SPE PHY 进行了简要比较。

7 参考资料

1. 德州仪器 (TI)，*DP83TC813x-Q1 符合 TC-10 标准的小尺寸 100BASE-T1 汽车以太网 PHY*，数据表。
2. 德州仪器 (TI)，*DP83826Ax 确定性、低延时、低功耗、10/100Mbps 工业以太网 PHY*，数据表。
3. 德州仪器 (TI)，*使用单线对以太网推动人形机器人发展*，应用简报。

English Document: SDAA576
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