

# Technical White Paper

## 工业应用的实时通信



Thomas Mauer

### 摘要

应根据应用的具体要求，为工业通信选择合适的处理系统。例如，远程传感器的通信需求与 PLC 等控制器的通信需求有很大不同。德州仪器 (TI) 利用 PRU-ICSS 和 CPSW 工业以太网 MAC 提供了多种解决方案来满足这些不同的要求。这些 MAC 实现支持广泛的工业通信需求，可用于从单核 Arm 微控制器到多核 Arm® 微处理器的可扩展处理器系列。

过去，工业通信由一个单独的子系统处理，该子系统通过并行或串行方式与微处理器或微控制器连接。但是，这些连接可能会成为瓶颈，限制用户应用所需的数据带宽和整体系统性能。

为了克服这些局限性，TI 提供集成了 MAC、工业通信栈和应用处理器的单芯片解决方案。这些解决方案缩减了物料清单 (BOM)、PCB 面积和成本，同时通过利用高速内部总线接口消除了数据交换瓶颈。这种集成确保了工业通信栈/MAC 和应用之间的过程数据传输高效且不受限制。

TI 的工业通信解决方案提供了完整的套件，包括处理器、以太网 PHY、时钟、电源解决方案和评估模块 (EVM)。这些元件辅以工业通信栈库、软件示例和广泛的技术支持，为开发工业通信系统提供了可靠的平台。

### 内容

|                                       |           |
|---------------------------------------|-----------|
| <b>1 简介</b> .....                     | <b>2</b>  |
| 1.1 工厂中的实时通信.....                     | 2         |
| 1.2 工业协议.....                         | 3         |
| 1.3 串行和基于以太网的通信协议.....                | 3         |
| <b>2 工业协议</b> .....                   | <b>3</b>  |
| 2.1 基于以太网的通信协议.....                   | 3         |
| 2.2 网络拓扑.....                         | 4         |
| 2.3 OSI 层模型.....                      | 5         |
| 2.4 工业以太网系统方框图.....                   | 6         |
| 2.5 以太网物理层 (PHY).....                 | 7         |
| 2.6 媒体访问控制 (MAC).....                 | 9         |
| 2.7 工业协议栈.....                        | 10        |
| 2.8 工业通信软件开发套件 (SDK).....             | 11        |
| 2.9 使用 AM243x 处理器的 EtherCAT 器件示例..... | 13        |
| <b>3 结语</b> .....                     | <b>14</b> |

### 插图清单

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 图 1-1. 工厂中的实时通信.....       | 2  |
| 图 2-1. 线性拓扑.....           | 5  |
| 图 2-2. 环形拓扑.....           | 5  |
| 图 2-3. OSI 层.....          | 6  |
| 图 2-4. 两端口以太网器件.....       | 6  |
| 图 2-5. 单端口以太网控制器.....      | 7  |
| 图 2-6. PHY 100mbit.....    | 8  |
| 图 2-7. PHY 1gbit.....      | 8  |
| 图 2-8. PHY SPE.....        | 8  |
| 图 2-9. EtherCAT 协议栈示例..... | 10 |
| 图 2-10. TI SDK 堆栈示例.....   | 11 |

图 2-11. EtherCAT 软件示例的屏幕截图..... 13

## 表格清单

表 2-1. 工业以太网和标准以太网的优势和差异..... 4  
 表 2-2. 工业以太网协议 PHY 特性..... 8  
 表 2-3. 帧处理模式..... 9  
 表 2-4. MAC 特性..... 10

## 商标

EtherCAT™ is a trademark of Beckhoff Automation GmbH, Germany.

Code Composer Studio™ is a trademark of Texas Instruments.

Arm® and Cortex® are registered trademarks of Arm Limited (or its subsidiaries) in the US and/or elsewhere.

PROFINET® is a registered trademark of PROFIBUS Nutzerorganisation e.V. (PNO).

EtherNet/IP® is a registered trademark of ODVA, Inc.

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 简介

### 1.1 工厂中的实时通信

工厂中的实时通信负责管理控制单元 ( 如可编程逻辑控制器 (PLC) ) 与现场器件 ( 包括电机驱动器、传感器和执行器 ) 之间的数据交换。根据制造要求, 此类数据通信的时间为数微秒到数秒不等

如果是较慢的过程, 如天然气和石油行业, 温度和压力的变化是渐进的, 通信时间为几十毫秒到几百毫秒。对于采用传送带和自动化机械的工厂自动化, 数据通信时间为数百微秒到几十毫秒不等。

在机器人和电机驱动应用中, 由于需要快速更新电机控制器和位置数据, 数据交换速度必须更快, 时间从 31.25 微秒 ( 对应于 32kHz 控制环路 ) 到几百微秒不等。

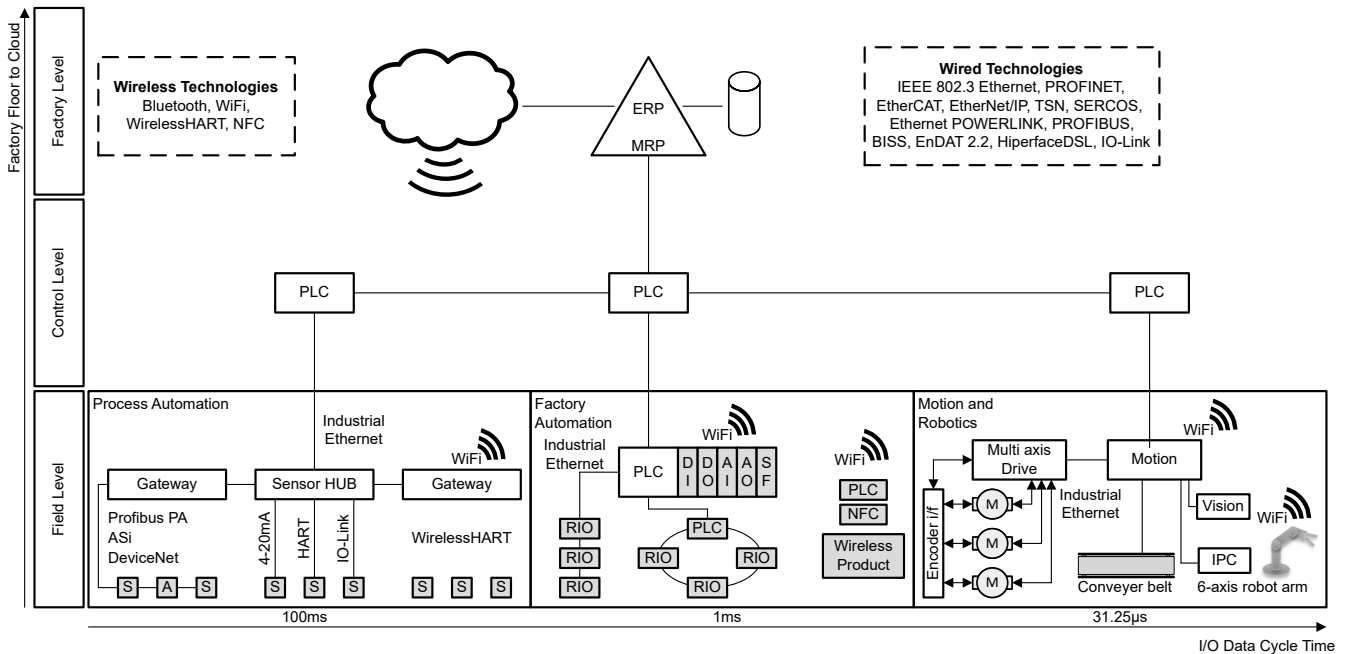


图 1-1. 工厂中的实时通信

PLC 向上层报告状态和诊断信息, 从而为工厂控制和操作员提供信息。工业网络还可以与云通信, 使操作员能够从远程位置监视和控制工厂。

为了实现定期数据交换, 元件必须满足 OSI 模型不同层的要求。例如, 物理 (PHY) 层和媒体访问控制 (MAC) 层必须满足特定的实时数据通信要求。标准以太网 MAC 可能会引入抖动和延迟, 或者可能不支持特定工业协议所需的即时数据处理。

此外，由于系统暴露于互联网，需要安全功能来保护数据通信。例如，欧盟的网络弹性法案对工厂制造商增加了此类要求。

## 1.2 工业协议

目前存在各种工业通信协议，但没有一种占主导地位的协议。各种不同的协议根据流程自动化、工厂自动化、机器人和电机驱动等细分市场的不同而制定。这些协议包括 HART 和 IO-Link 等串行通信协议，以及 EtherCAT、PROFINET® 和 EtherNet/IP® 等基于以太网的协议。

近年来，由于以太网优势的增加，工业以太网比基于串行的通信更为普及，如节 2.1 所述。

某些协议旨在与不同供应商的器件进行互操作，这在使用 PLC、传感器和执行器的工厂自动化中很常见。工厂制造商针对特定设置购买不同类型供应商的产品；因此，不同制造商的设备需要协同工作。

其他系统（如 CNC 机械或多载波系统等封闭系统）可能使用专用或专有协议，不需要与现成器件互操作。不过，如果不需要利用专有协议的特定特性，此类机械也会使用标准化协议。

## 1.3 串行和基于以太网的通信协议

过去，基于串行的协议因成本低且易于使用而用于工厂自动化。示例包括 DeviceNet、CanOpen、Profibus 和 Modbus Serial。但是，它们的通信速度较低且覆盖范围有限，无法进行高速通信。

随着以太网技术的进步，EtherNet/IP、PROFINET 和 EtherCAT 等工业以太网协议越来越流行，可通过 100BASE-TX 以太网提供 100Mbps 数据速率。时间敏感网络 (TSN)、PROFINET TSN 和 CC-Link IE TSN 等新协议支持 1000Mbps 数据速率。

## 2 工业协议

目前存在各种工业通信协议，但没有一种占主导地位的协议。各种不同的协议根据流程自动化、工厂自动化、机器人和电机驱动等细分市场的不同而制定。这些协议包括 HART 和 IO-Link 等串行通信协议，以及 EtherCAT、PROFINET 和 EtherNet/IP 等基于以太网的协议。

某些协议旨在与不同供应商的器件进行互操作，这在使用 PLC、传感器和执行器的工厂自动化中很常见。其他系统（如 CNC 机械或多载波系统）可能使用不需要与现成器件进行互操作的专用或专有协议。

### 2.1 基于以太网的通信协议

过去，基于串行的协议因成本低且易于使用而用于工厂自动化。示例包括 DeviceNet、CanOpen、Profibus 和 Modbus Serial。但是，它们的通信速度较低且覆盖范围有限，无法进行高速通信。

随着以太网技术的进步，EtherNet/IP、PROFINET 和 EtherCAT 等工业以太网协议越来越流行，可通过 100BASE-TX 以太网提供 100Mbps 数据速率。时间敏感网络 (TSN)、PROFINET TSN 和 CC-Link IE TSN 等新协议支持 1000Mbps 数据速率。

与传统的串行现场总线系统相比，工业以太网具有以下几个优势：

- **更高的数据传输速率和更高带宽：**与串行现场总线的较低速率相比，以太网支持的速度范围为 10Mbps 至 10Gbps。以太网还支持摄像头流媒体等高带宽应用，而串行现场总线仅限于执行较简单的任务。
- **可扩展性：**以太网很容易通过各种联网选项进行扩展，而串行现场总线具有固定节点限值且布线复杂。
- **标准化：**以太网基于广泛采用的 IEEE 标准，工业以太网协议基于以太网标准，具有特定于协议的增强和扩展。
- **网络管理和诊断：**以太网提供用于网络监控和诊断的高级工具。
- **降低布线复杂性：**以太网需要单电缆解决方案，无需电缆终点端接，从而降低了布线复杂性。此外，单线对以太网 (SPE) 还可将标准以太网的电缆串从 2 线对或 4 线对减少到 1 线对。
- **增强的安全功能：**与串行现场总线的基本安全功能不同，以太网包含高级安全措施。目前，不同的工业协议组织正在定义工业以太网的安全功能要求，因为他们认为有必要确保工厂内的工业应用免受网络攻击。

此外，工业以太网和标准以太网之间也存在显著差异。标准以太网是在办公室和 IT 环境中使用的以太网类型。工业以太网用于工厂自动化、电网基础设施和楼宇自动化等工业应用，以定期交换过程数据。

表 2-1 说明了工业以太网和标准以太网的优势和差异：

**表 2-1. 工业以太网和标准以太网的优势和差异**

|              | 工业以太网                      | 标准以太网                          |
|--------------|----------------------------|--------------------------------|
| 数据交换方法       | 确定性、受管理的帧交换、计划数据传输，可避免帧冲突。 | 尽最大努力，无管理的帧交换，可能出现帧冲突          |
| 稳健性          | 信号抗扰度，适用于恶劣环境              | 适用于消费类环境                       |
| 数据内容         | 过程数据、诊断数据和互联网协议 (IP) 帧。    | 包含任何内容 ( 视频、文件、网络服务器 ) 的 IP 帧。 |
| 设备类型         | PLC、远程 IO、传感器、执行器、电机驱动器    | PC、笔记本电脑、打印机、互联网               |
| 位置           | 工厂车间、工厂、发电站、楼宇控制           | 办公室网络、后端                       |
| 媒体访问控制 (MAC) | 专用 MAC 实现 ( ASIC、FPGA )    | 标准以太网 MAC ( 就像每台 PC 中那样 )      |
| MAC 帧处理      | 即时和直通                      | 存储并转发                          |
| MAC 错误处理     | 在 MAC 中进行错误处理              | 在 OLI 第 3 层及以上进行错误处理           |

## 2.2 网络拓扑

可编程逻辑控制器或运动控制器等控制系统通过不同的网络拓扑连接到工厂车间的传感器、执行器和驱动器。拓扑是不同设备之间以太网电缆布线的方法，以便所有现场器件以逻辑方式连接到控制系统。

下面介绍的网络拓扑方法也取决于所用工业以太网协议的类型，因为有些协议需要特定的连接方法，不允许使用所述的其他方法。例如，EtherCAT 通常采用线路拓扑进行布线。

有些协议允许使用多个网络拓扑的组合。例如，PROFINET 和 EtherNet/IP 将线性拓扑和星型拓扑相结合，以逻辑方式将所有器件连接到控制系统。

- **线性拓扑**：构建为从 PLC 到器件的线性连接。每个器件都有两个以太网端口来转发接收到的以太网帧。

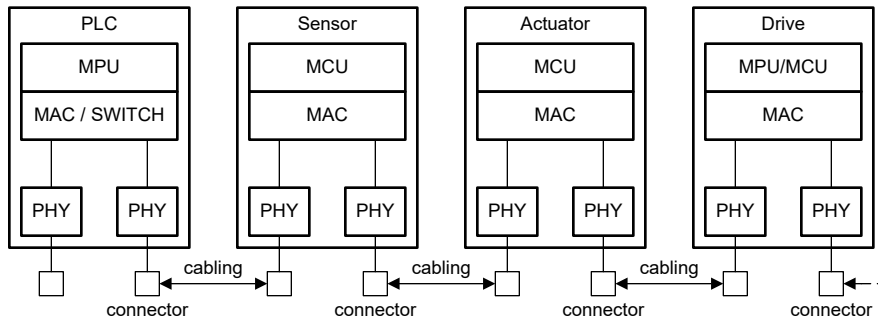


图 2-1. 线性拓扑

- **环形拓扑**：通过将最后一个器件连接回 PLC，可为线路拓扑增加冗余。对于某些协议，PLC 在两个端口上均发出以太网帧。如果两个器件之间发生环断（例如以太网电缆损坏，两个器件之间没有建立链路），则 PLC 以太网帧仍会使用所需的过程数据到达网络中的所有器件。

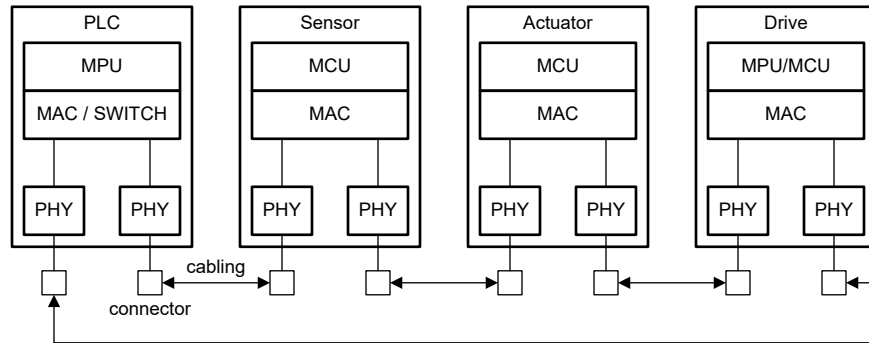


图 2-2. 环形拓扑

- **星型拓扑**：使用多端口以太网交换机分发以太网数据包。这通常与线路拓扑相结合。请注意，通常需要使用特定于工业以太网协议的特定以太网交换机，这样，现成的以太网交换机就不能与工业以太网协议配合使用，或者至少会导致性能下降。

### 2.3 OSI 层模型

开放系统互连 (OSI) 层模型提供了一个概念框架，将通信系统的功能标准化为七个不同的层，从而促进了不同系统和技术之间的互操作性和通信。每一层都具有特定的功能，并与该层的上一层和下一层进行交互，从而提供一种结构化和模块化的网络通信方法。

七个 OSI 层分别是：

- 物理层
- 数据链路层
- 网络层
- 传输层
- 会话层
- 表示层
- 应用层

在工业以太网系统中，OSI 模型用于实现通信协议的标准化，并确保器件之间的兼容性和互操作性。工业以太网协议（如 PROFINET）利用各 OSI 层，尤其是用于硬件连接的物理层、用于以太网帧通信的数据链路层，以及用于协议特定的寻址和路由的网络层。

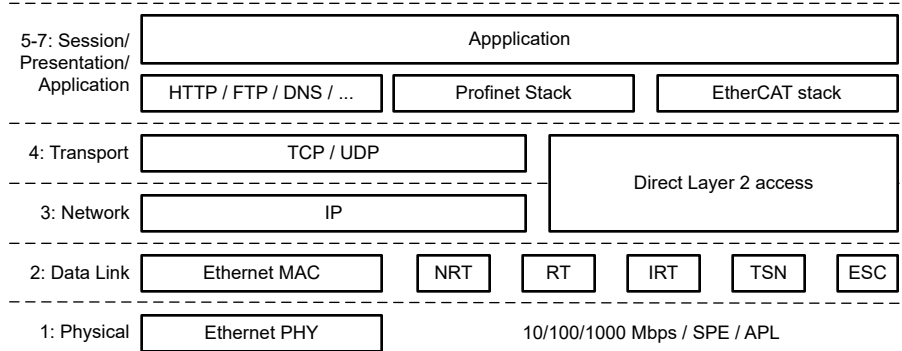


图 2-3. OSI 层

物理层由以太网 PHY 处理。根据协议，使用 10/100Mbit 以太网 PHY 或 10/100/1000Mbit 以太网 PHY。新的市场趋势还要求使用单线对以太网 (SPE) PHY，它也支持从 10Mbit/s 到 1000Mbit/s 的速度。

数据链路层负责托管媒体访问控制 (MAC) 实现。这里常用的是进行 TCP/IP 数据通信的标准以太网 MAC。工业以太网协议对 MAC 层进行了一些扩展，以支持高优先级以太网帧和特定以太网帧处理 (如直通和即时) 的循环数据交换。

网络层和传输层负责以太网通信中的互联网协议 (IP) 和 UDP/TCP。工业以太网协议也可以使用这三个块，但工业以太网协议第 5 层中的协议栈通常可以直接访问第 2 层，从而绕过 UDP/TCP 和 IP 块。

会话层可运行工业以太网协议栈，这是工业协议特有的协议栈。

表示层和会话层包含工业应用，具体取决于器件的客户用例。

## 2.4 工业以太网系统方框图

### 2.4.1 两端口器件

两端口以太网器件用于现场器件，以简化线路拓扑的支持。由于每个器件已经有两个具有以太网交换机功能的以太网端口，因此无需额外的以太网集线器或交换机即可轻松实现线路拓扑。

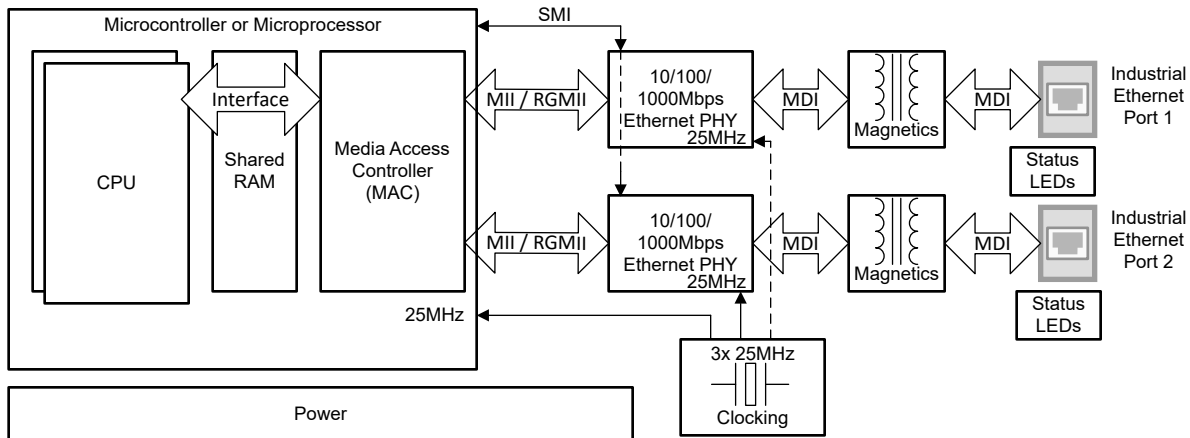


图 2-4. 两端口以太网器件



具有两个物理以太网端口的器件也称为三端口交换机。该器件有两个物理以太网端口和一个用于连接到主机处理器的逻辑端口。某些协议（如 EtherCAT）要求两个以太网 PHY 和 MAC 使用一个 25MHz 通用时钟。这是为了在将以太网帧从 MAC 传输到 PHY 以及从 PHY 传输到 MAC 时减少 RX/TX 抖动。使用独立的 25MHz 时钟时，RX/TX 抖动范围为 40ns（PHY 速度为 100Mbps 时）至 4ns（PHY 速度为 1000Mbps 时）。

根据工业以太网协议，要么部署两个 10/100Mbps 以太网 PHY，要么部署两个 10/100/1000Mbps 以太网 PHY。PHY 通过 MII 或 RGMII 接口连接到以太网 MAC。还有一个称为串行管理接口 (SMI) 的边带信号，由 MDIO 和 MCD 线路组成，用于通过 MAC 对以太网 PHY 进行寄存器编程。如果 PHY 需要在一个特定的工作模式下运行，而这个工作模式在以太网 PHY 上电时尚未通过自举配置进行配置，那么对以太网 PHY 进行编程会很有用。有关自举的更多详细信息，请参阅 [DP83826 确定性、低延迟、低功耗、10/100Mbps 工业以太网 PHY 数据表](#)。

MAC 实现取决于所支持的协议。没有通用 MAC，例如 EtherCAT 和 PROFINET 使用不同类型的以太网帧处理。有关以太网帧处理的不同之处，请参阅 [节 2.6](#)。MAC 通过共享 RAM 提供过程数据或以以太网帧。

CPU 运行工业以太网协议栈、外设驱动程序、附加功能（例如网络服务器或 UPC-UA 数据库）和客户应用。根据软件架构的不同，这些软件任务可以拆分到不同的 CPU 内核上。

### 2.4.2 单端口控制器

图 2-5 展示了某个控制器（例如可以是 PLC 或运动控制器）的系统元件。该控制器通常运行一些 PLC 应用，如 CoDeSys。该控制器有一个工业以太网端口，可连接到传感器、执行器或电机等现场器件。还有第二个以太网端口，用于将控制器连接到控制级和工厂级（请参阅图 1-1）。

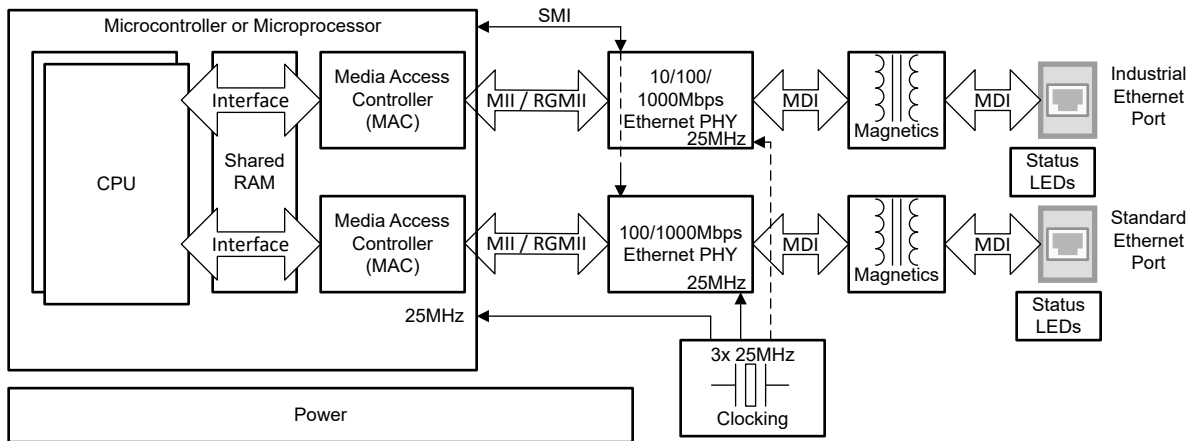


图 2-5. 单端口以太网控制器

连接现场器件的以太网端口可以使用特定 MAC 实现，但某些协议（如 EtherCAT 控制器）仅需要具有时间触发发送功能的标准 MAC。

## 2.5 以太网物理层 (PHY)

工业以太网协议可以使用 10BASE-T、100BASE-TX 和 1000BASE-T，其中大多数协议目前使用 100BASE-TX。对于 10BASE-T 和 100BASE-TX，以太网布线采用 2 根双绞线，对于 1000BASE-T 则采用 4 根双绞线。电缆对上发送的以太网数据为全双工传输，这意味着 PHY 可以同时接收和发送数据。这些以太网标准要求两个现场器件之间的电缆长度为 100m。如果需要更长的电缆，则必须将以太网集线器或以太网交换机插入以太网线路。

对于 10/100Mbps，如图 2-6 所示，使用两对以太网电缆：一对用于发送，另一对用于接收。

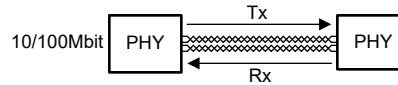


图 2-6. PHY 100mbit

对于 1000Mbps，使用四对以太网电缆。在图 2-7 中，PHY 在全部四对电缆上同时发送和接收数据。

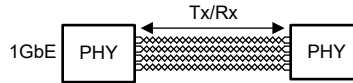


图 2-7. PHY 1gbit

数据传输带宽取决于已建立的链路速度，为 10Mbps、100Mbps 或 1000Mbps。符合这些 IEEE 标准的以太网 PHY 支持多速传输。这意味着 10/100Mbit PHY 支持 10Mbps 和 100Mbps 两种速度，而 10/100/1000Mbit PHY 还支持 1000Mbps。

表 2-2 列出了特定 PHY 特性所需的工业以太网协议。

表 2-2. 工业以太网协议 PHY 特性

| 特性             | 说明  | 协议示例                               |
|----------------|---|------------------------------------|
| 快速链路断开 (FLD)   | PHY 需要能够在发生接收错误时丢弃活动链路。该特性对于需要将以太网帧环回到控制器的工业协议 (如 EtherCAT) 非常重要。具有链路断开功能的器件需要在检测到链路断开后立即切换到环回模式。FLD 处理 PHY LINK LED 状态，并将其反馈回 MAC。请注意，也可使用 MDIO/MDC 协议由 MAC 读取 LINK 状态，这可能需要几微秒的时间才会检测到。 | EtherCAT 要求 FLD 小于 15 $\mu$ s      |
| 低发送和接收延迟       | PHY 延迟必须尽可能低，因为在线路拓扑中，PLC 和最后一个器件之间的延迟会相加。  | EtherCAT 要求端口到端口的直通延迟小于 1 $\mu$ s。 |
| 固定 MDI/X 和固定速度 | 通常，PHY 与链路伙伴 PHY 执行自动协商。这意味着两个 PHY 就以最快速度以及 MDI 连接和极性进行协商。这种协商需要一些时间，只有在协商之后，才能建立链路并交换以太网帧。将 PHY 配置为固定配置会缩短链路建立时间。  | PROFINET 快速启动 (<500ms)             |

工业用例中采用了一种称为单线对以太网 (SPE) 的新以太网标准。SPE 的优势是能够在不同的以太网速度等级 (10Mbps、100Mbps 和 1000Mbps) 将以太网电缆减少到一对。

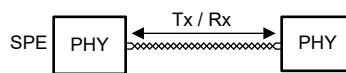


图 2-8. PHY SPE

10BASE-T1L 标准支持 10Mbps 的带宽，电缆长度为 1km (1000m)。这非常好，因为如上所述，标准以太网仅支持 100m 电缆长度。

100BASE-T1 和 1000BASE-T1 目前仅支持 50m 和 15m 的电缆长度，这使标准以太网的最大电缆长度有所减少，但优点是仅使用 1 线对。



## 2.6 媒体访问控制 (MAC)

媒体访问控制 (MAC) 负责管理对物理网络介质的协议访问。主要功能包括：

- 寻址：以太网上的每个器件都具有唯一的 MAC 地址，这是一个用于区分网络上不同器件的 48 位标识符。MAC 可确保将数据包传送到正确的器件。
- 帧定界：MAC 子层定义了用于数据传输的帧结构。以太网帧包括前导码、目标 MAC 地址、源 MAC 地址、类型/长度字段、数据有效载荷和帧校验序列 (FCS)。
- 媒体访问控制：MAC 子层可对器件访问共享通信介质的方式进行控制。工业以太网 MAC 从标准以太网 MAC 派生而来，甚至实现特定的操作模式，如即时处理和直通数据处理。本节稍后将介绍这些方法。
- 错误检测：MAC 子层包括一种检测接收帧中错误的机制，该机制通常使用帧校验序列 (FCS)。如果检测到错误，则通常会丢弃该帧，并通知上层。
- 帧传输和接收：MAC 子层处理网络介质 (第 1 层) 上各帧的实际传输和接收。这可确保帧的格式、地址正确，并在正确的时间发送。某些 IE 协议具有两个不同的传输阶段，一个阶段用于实时数据 (过程数据)，第二个阶段用于非实时数据 (标准以太网帧)。这两个传输阶段是时间多路复用的，称为周期时间。

### 2.6.1 器件 MAC

对于器件来说，很多时候会使用三端口交换机。三端口交换机包括两个物理端口和一个通过共享存储器接口连接到主机 CPU 的端口。

三端口交换机通过两个物理端口接收和发送工业以太网数据包。当交换机从端口 1 接收到以太网电报时，它会做出转发决策，要么将电报放入主机 CPU 的共享 RAM 接口，要么通过端口 2 将电报发送出去。如果以太网帧是广播帧，则同时执行这两项操作，将以太网帧放入共享 RAM 中并进行转发。

工业以太网器件的工业以太网 MAC 通常在表 2-3 中所示的以下一种帧处理模式下工作。

表 2-3. 帧处理模式

| MAC 帧处理模式 | 说明   | 示例                     |
|-----------|--|------------------------|
| 即时        | 接收以太网帧时将由 MAC 处理该帧。MAC 可以提取以太网帧的字节，或在不更改帧长度的情况下将字节插入以太网帧。MAC 会在帧末尾更新 CRC 校验和，以反映任何修改。<br>端口到端口的典型延迟小于 1 $\mu$ s (以 100Mbps 的速度运行)。   | EtherCAT 器件            |
| 直通        | MAC 接收以太网帧的前一部分字节，通常是 16 至 32 个字节。然后，MAC 分析目标 MAC 和以太网帧类型以获得转发决策。一旦确定了帧的目标端口，就会将帧转发，同时继续接收数据包的其余部分。<br>端口 1 到端口 2 的延迟取决于以太网速度，范围为 1.5 $\mu$ s (1Gbit 速度时) 至 4 $\mu$ s (100Mbit 速度时)。 | PROFINET 和 EtherNet/IP |
| 存储并转发     | 这是一种传统的 MAC 模式，标准 PC 中的许多网络接口卡 (NIC) 都支持该模式。<br>MAC 接收整个以太网帧，然后仅执行转发决策。<br>因此，端口 1 到端口 2 的延迟取决于以太网帧的大小。1Gbit 时的转发延迟为 12.5 $\mu$ s，100Mbit 时为 125 $\mu$ s。                            | 标准以太网网卡                |

表 2-4 展示了某些工业协议使用的其他 MAC 特性。

表 2-4. MAC 特性

| MAC 模式       | 说明   | 示例                               |
|--------------|--|----------------------------------|
| 时间触发发送 (TTS) | 这是 MAC 中的一种特定模式，用于在过程周期内对传输进行精确计时。MAC 将以太网帧连同传输时间一起预加载到发送 FIFO 中。一旦传输时间结束，MAC 就开始传输。该方法用于在时间同步架构中模拟特定模式时隙，以及用于时间同步 | EtherCAT 控制器、Profinet IRT、TSN    |
| 时间戳          | MAC 捕获已接收或已发送以太网帧的时间戳。时间戳发生在 MAC 中。也有一些以太网 PHY 包含 1588 时间戳协议。也可以在处理器侧的以太网协议栈或在工业以太网 MAC 中完成 IEEE1588。              | IEEE 1588、Profinet PTCP、TSN gPTP |

### 2.6.2 控制器 MAC

工业以太网控制器通常有一个专用于连接工业以太网 (IE) 器件的以太网端口。此外，通常还有第二个以太网端口，用于连接网络主干和内联网，从而为管理层级提供诊断和状态信息。第一个端口的速度由所用的特定工业以太网协议决定，通常以 100Mbit/s 的速度运行。第二个端口通常支持更高的速度（通常为 1Gbit/s），以处理额外的数据流量和管理功能。

某些工业以太网协议（如 EtherCAT）不需要具体的 MAC 实现。因此，必须根据所部署的特定工业以太网协议对 MAC 要求进行评估。

控制器 CPU 经常操作 Linux 等高级操作系统 (HLOS)，以支持 PLC（如 CoDeSys 运行时）和 OPC UA 等服务。因此，采用稳健架构的处理器（如 Cortex® A53 或 Cotrex A73）通常用于满足性能要求。

### 2.7 工业协议栈

工业以太网协议栈负责管理在工业环境中实现可靠和确定性通信所需的特定任务。该协议栈专为满足工业应用的严格要求而设计，可提供实时数据传输、高可用性、稳健性，并可与各种工业器件和系统无缝集成。

例如，在 EtherCAT™ 器件中，媒体访问控制 (MAC) 层对于在执行必要的帧操作时以最小的延迟转发 EtherCAT 帧至关重要。当 EtherCAT 帧通过每个器件时，EtherCAT MAC 可以在帧内的特定位置插入或提取数据。EtherCAT 协议栈负责配置 MAC，使 MAC 能够在帧中的适当点正确执行这些操作。

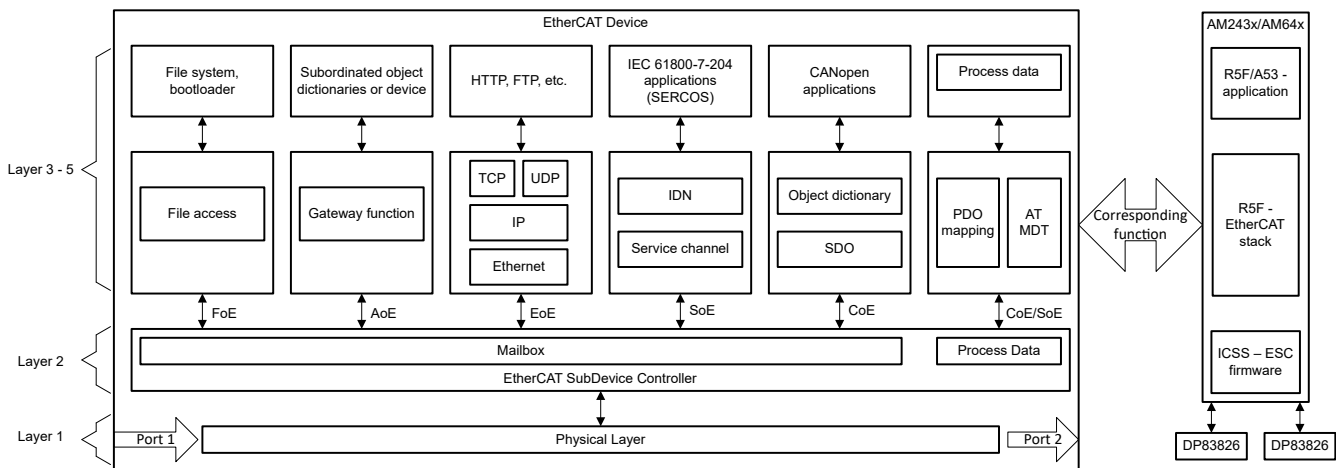


图 2-9. EtherCAT 协议栈示例

EtherCAT 协议栈可处理各种功能，包括：

- 帧处理和同步：确保 EtherCAT 帧的精确计时和处理。
- 过程数据处理：通过过程数据对象 (PDO) 管理过程数据的交换。
- 网络管理：监督网络拓扑并确保器件之间稳定通信。
- 错误处理和诊断：监控和解决网络中的错误。
- 通信服务：支持多项服务，例如 CAN Application Layer over EtherCAT (CoE)、File Access over EtherCAT (FoE)、Ethernet over EtherCAT (EoE) 和 Servo Drive Profile over EtherCAT (SoE)。
- 从站信息接口 (SII)：便于配置和识别器件。
- 功能安全性 (FSoE)：确保在 EtherCAT 框架内安全地处理安全关键型数据。

EtherCAT 只是一个具体示例，其他工业以太网协议栈可根据各自的要求提供类似的功能。

德州仪器 (TI) 提供集成了 TI 芯片的预认证堆栈解决方案，客户无需从第三方供应商采购堆栈即可构建其最终产品。这种单一供应商方法简化了开发过程，用户可以直接通过 TI 获得工业通信栈、演示示例、演示板和全面的技术支持。

## 2.8 工业通信软件开发套件 (SDK)

德州仪器 (TI) 提供工业通信软件开发套件 (SDK)，旨在简化工业通信协议的开发和实现。

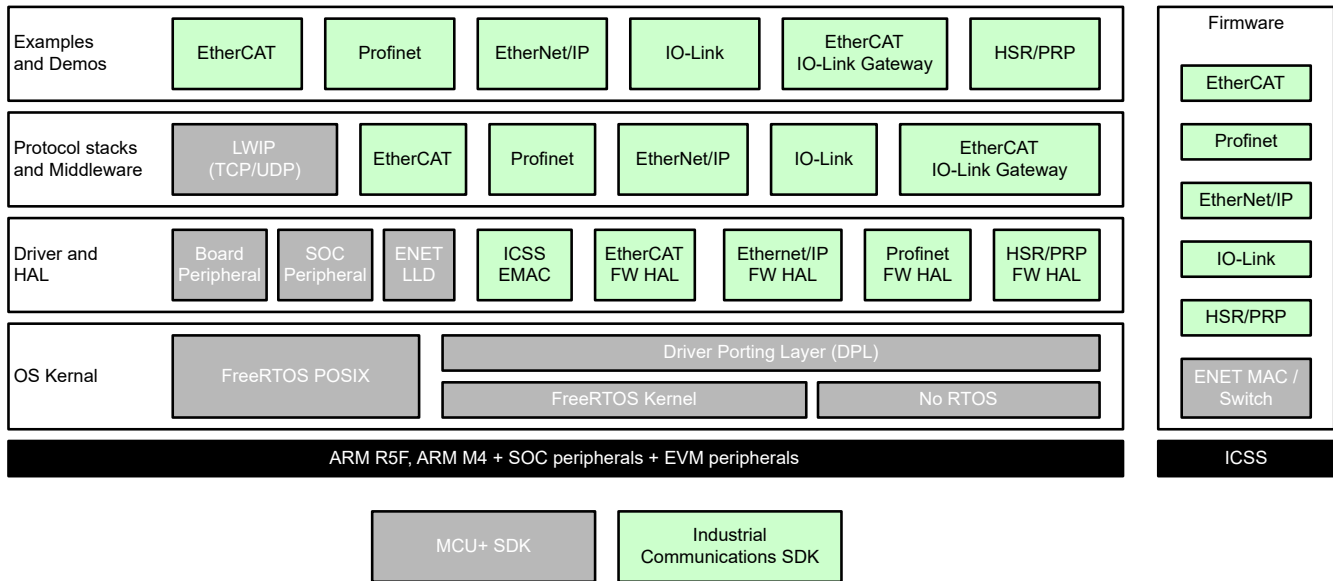


图 2-10. TI SDK 堆栈示例

该 SDK 为在工业环境中工作的开发人员提供了许多优势：

- **全面的多协议支持**：该 SDK 支持各种工业通信协议，包括 EtherCAT、PROFINET、EtherNet/IP 等。这些协议都与同一处理器系列兼容，利用了可编程实时单元和工业通信子系统 (PRU-ICSS)。
- **高性能和实时功能**：该 SDK 针对基于 Arm 的高性能处理器进行了优化，包含 PRU-ICSS 等专用硬件加速器。它支持实时操作系统 (RTOS) 以及裸机实现，可提供工业通信协议所需的确定性性能。

- **易于开发**：该 SDK 通过提供一整套协议栈库、软件工具和示例应用，简化了开发过程。开发人员可在 TI 评估模块 (EVM) 上评估工业通信解决方案，并快速启动定制硬件的开发。预配置的示例和参考设计可缩短上市时间并加快开发进度。
- **可扩展性和灵活性**：SDK 采用模块化设计，可轻松进行定制和扩展，以满足特定应用要求。该 SDK 可在 TI 的微控制器和处理器系列之间进行扩展，所有这些系列都支持 PRU-ICSS。
- **与 TI 生态系统集成**：该 SDK 与 TI 的开发工具 (包括 Code Composer Studio™ (CCS) 和系统配置工具 (SysConfig)) 无缝集成，从而增强整体用户体验。它还与其他 TI 产品兼容，包括微控制器和模拟元件 (如 ADC)，可为工业应用提供完整的解决方案。
- **丰富的文档和支持**：该 SDK 包含全面的技术文档，如数据表、应用手册和用户指南，可为开发人员提供帮助。TI 的产品工程师通过 e2e 论坛提供直接技术支持，旨在帮助解决问题并指导开发人员完成开发过程。

TI 的工业通信 SDK 提供各种工业以太网协议栈，包括 EtherCAT、PROFINET 和 EtherNet/IP。PRU-ICSS 的固件包括专为 PRU 内核量身定制的软件二进制文件，其中每个工业通信协议都有特定的 MAC 实现方式，例如 EtherCAT ESC、PROFINET MAC、EtherNet/IP MAC 和 IO-Link Master 帧处理程序。

SDK 结构包括：

- **操作系统内核**：该 SDK 包括 FreeRTOS 实现，可提供必要的实时操作系统支持。
- **驱动程序和硬件抽象层 (HAL)**：该部分包含外设驱动程序和 HAL，它们支持各种工业协议。
- **协议栈和中间件**：该部分包括 [ToDo add reference] 部分所述的工业通信协议栈。
- **示例和演示**：它们为器件特定功能 (如传感器、执行器和驱动器) 提供用户软件。

随 SDK 提供的文档详细说明了如何构建和操作每个示例，从而确保开发人员拥有利用工业通信打造成功产品所需的资源。

## 2.9 使用 AM243x 处理器的 EtherCAT 器件示例

该示例演示了如何使用 AM243x 处理器和 AM243x LaunchPad (LP) 开发板构建和运行 EtherCAT 器件应用。图 2-11 提供了示例说明，将指导您完成设置和执行 EtherCAT 器件演示的过程。

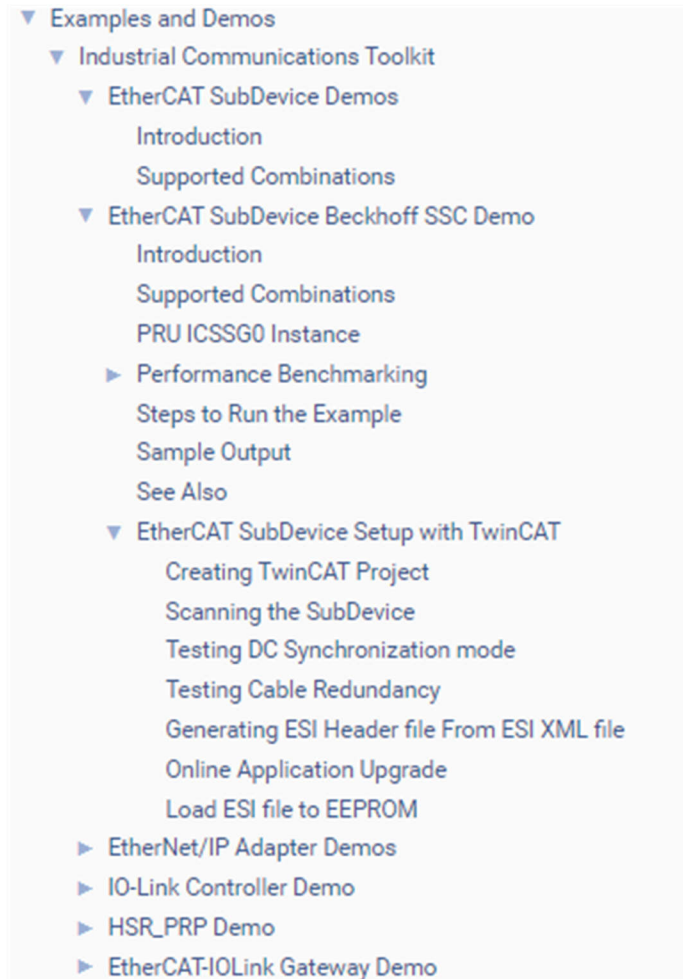


图 2-11. EtherCAT 软件示例的屏幕截图

有关构建 EtherCAT 器件演示的分步说明，请参阅工业 SDK 文档（示例：），具体来说就是 *示例和演示* 部分。本文档包含以下方面的详细指导：

- **将工程导入 Code Composer Studio (CCS)：**有关如何将 EtherCAT 演示工程正确导入 CCS 的说明，包括任何必要配置。
- **构建 EtherCAT 演示应用：**有关如何使用提供的工程文件和 SDK 工具编译和构建 EtherCAT 器件演示的分步指南。
- **使用 TwinCAT EtherCAT 控制器应用运行示例：**有关如何执行 EtherCAT 器件演示并将其与 TwinCAT EtherCAT 控制器应用连接的详细步骤，演示了实时通信和控制。

按照这些说明，开发人员可以利用 TI 全面的工业 SDK，在 AM243x 平台上有效地评估和试验 EtherCAT 通信。

### 3 结语

应根据应用的具体要求，为工业通信选择合适的处理系统。例如，远程传感器的通信需求与 PLC 等控制器的通信需求有很大不同。德州仪器 (TI) 利用 PRU-ICSS 和 CPSW 工业以太网 MAC 提供了多种解决方案来满足这些不同的要求。这些 MAC 实现支持广泛的工业通信需求，可用于从单核 Arm 微控制器到多核 Arm 微处理器的可扩展处理器系列。

过去，工业通信由一个单独的子系统处理，该子系统通过并行或串行方式与微处理器或微控制器连接。但是，这些连接可能会成为瓶颈，限制用户应用所需的数据带宽和整体系统性能。

为了克服这些局限性，TI 提供集成了 MAC、工业通信栈和应用处理器的单芯片解决方案。这些解决方案缩减了物料清单 (BOM)、PCB 面积和成本，同时通过利用高速内部总线接口消除了数据交换瓶颈。这种集成确保了工业通信栈/MAC 和应用之间的过程数据传输高效且不受限制。

TI 的工业通信解决方案提供了完整的套件，包括处理器、以太网 PHY、时钟、电源解决方案和评估模块 (EVM)。这些元件辅以工业通信栈库、软件示例和广泛的技术支持，为开发工业通信系统提供了可靠的平台。



## 重要声明和免责声明

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任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面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功能安全、信息安全、监管或其他要求。

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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/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。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2024，德州仪器 (TI) 公司