



Zekun Bai, Donna Xu

**摘要**

工业自动化系统对确定性、低延时的实时通信提出了日益严苛的要求。德州仪器 (TI) Sitara 处理器系列集成了业界领先的可编程实时单元工业通信子系统 (PRU-ICSS)，提供统一的硬件平台，支持多种主流工业以太网协议，包括 EtherCAT、PROFINET 和 EtherNet/IP。本文档阐述了工业通信协议的基本原理、市场发展趋势、常见协议的底层技术机制，以及 TI 处理器对各类协议的支持能力与性能指标，为工业设备制造商提供一份全面的多协议设计参考。

**内容**

<b>1 简介</b> .....	<b>2</b>
<b>2 工业通信协议概述</b> .....	<b>3</b>
2.1 工业通信系统的组件.....	3
2.2 从串行现场总线发展到工业以太网.....	3
<b>3 市场趋势和多协议要求</b> .....	<b>4</b>
3.1 工业以太网的市场规模.....	4
3.2 多协议并存的实际情况.....	4
3.3 统一平台的必要性.....	4
3.4 TI 多协议设计的核心价值.....	4
<b>4 主流工业协议的技术简介</b> .....	<b>5</b>
4.1 EtherCAT (用于控制自动化技术的以太网).....	5
4.2 PROFINET RT/IRT (实时工业以太网).....	7
4.3 EtherNet/IP (通用工业协议).....	7
<b>5 TI 处理器的多协议支持设计</b> .....	<b>8</b>
5.1 关键技术：PRU-ICSS 子系统.....	8
5.2 多协议架构多协议.....	8
5.3 处理器选择矩阵.....	9
5.4 工业协议支持矩阵.....	10
5.5 软件开发接洽模式.....	10
<b>6 总结</b> .....	<b>11</b>
<b>7 参考资料</b> .....	<b>12</b>

**商标**

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 简介

工业自动化系统的核心是在各种元件之间实现可靠高效的通信。虽然工业环境中使用的传统串行现场总线协议（如 PROFIBUS、CAN、Modbus 等）在技术上已经成熟，但这些协议存在带宽限制、可扩展性差和延迟高等问题。随着工业 4.0 和智能制造的快速发展，工业以太网协议应运而生，并逐渐成为工业自动化的标准通信基础设施。

多协议共存是工业系统中的一种常见现象。不同地区和客户对协议的不同偏好给设备制造商带来了挑战：如何使用统一的硬件平台来支持多种协议。TI 通过将 PRU-ICSS 子系统集成到 Sitara 处理器中来应对这一挑战，实现了灵活高效的多协议通信引擎，并为工业设备制造商提供了集成设计。

## 2 工业通信协议概述

### 2.1 工业通信系统的组件

工业自动化系统包含四个主要元件：

- PLC 控制器：系统的大脑，提供逻辑控制、运动控制和过程控制功能
- HMI 面板：用于操作员命令输入与反馈输出的人机界面
- 工业驱动产品：用于执行运动和操命令的电机控制器
- 传感器：实时监控系统状态并提供反馈数据

这些元件通过通信网络协同工作，实现高效的自动化生产。

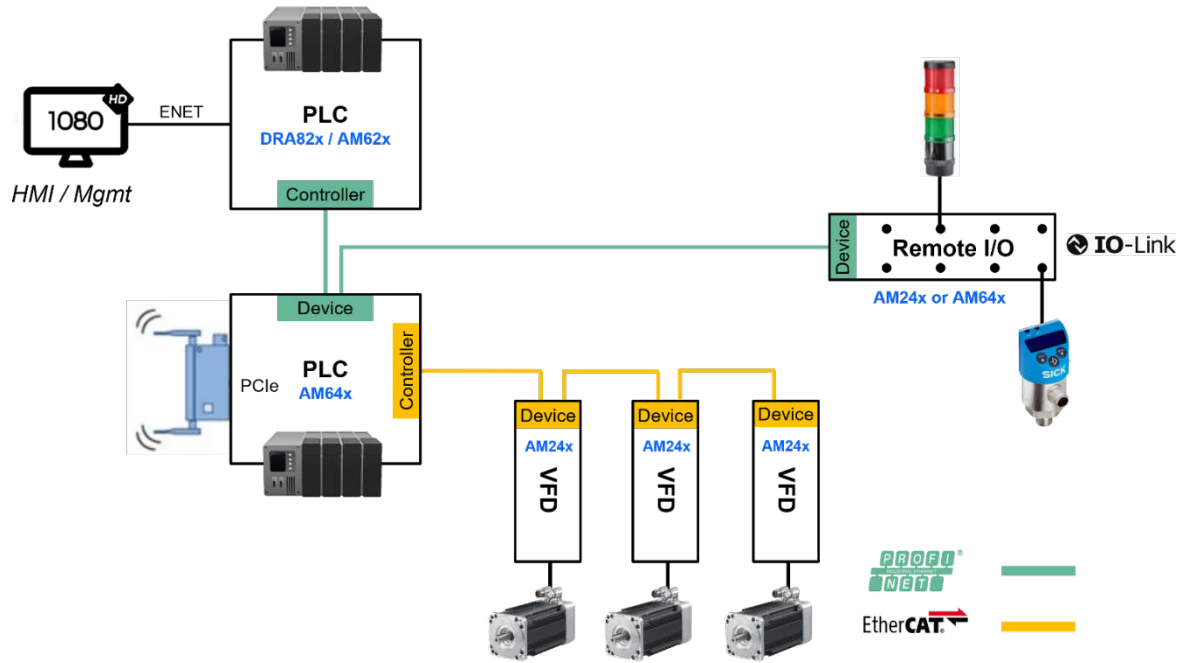


图 2-1. 工业自动化系统拓扑图

### 2.2 从串行现场总线发展到工业以太网

传统工业通信协议以低速串行接口为基础，包括

表 2-1. 传统工业通信协议和主要特性

协议	数据速率	节点计数	主要应用
PROFIBUS	12Mbps	126 个节点	工厂自动化
CAN	1Mbps	64-127 个节点	自动化系统
Modbus	11.5 万波特	247 个节点	常规控制
CC-Link	10Mbps	64 个节点	亚洲应用

随着工业以太网的发展，多种基于 IEEE 802.3 的工业协议应运而生，可提供更高的带宽、更低的延迟、更好的可扩展性和网络灵活性。

## 3 市场趋势和多协议要求

### 3.1 工业以太网的市场规模

根据 PROFIBUS & PROFINET International (PI) 协会的数据，2024 年新增了 962.5 万个 PROFINET 节点，表明工业以太网协议得到了广泛采用。全球工业通信市场（包括 PROFINET、EtherCAT、EtherNet/IP 和其他协议）总额达 255 亿美元 PROFINET\_RT\_IRT\_Deepdive，并呈现持续增长的态势。

### 3.2 多协议并存的实际情况

在实际的工业应用中：

- **区域差异**：北美地区通常选择 EtherNet/IP；欧洲地区更倾向于 PROFINET 和 EtherCAT；亚洲地区则呈现多种协议并存的特点。
- **行业特征**：运动控制应用通常选择 EtherCAT 或 PROFINET IRT；而通用 I/O 应用则可以在多种协议中进行选择。
- **供应链要求**：原始设备制造商或一级供应商往往要求支持多协议，以适配全球供应链的需求。

### 3.3 统一平台的必要性

为了满足多协议要求、工业设备制造商需要：

1. 支持多种协议的**单一硬件设计**
2. **通过固件切换或引导参数选择协议**
3. **完整的软件栈、驱动程序和开发工具**
4. **单一供应商的技术支持**

这可以降低产品开发成本、缩短上市周期，并简化面向全球客户的支持复杂度。

### 3.4 TI 多协议设计的核心价值

#### 可扩展性和可重用性

- 支持所有基于以太网的协议的统一硬件平台。
- 适用于不同协议的不同开发工具链和 SDK。
- 单点联系供应商支持。

#### 开发效率

- 预先认证的协议栈可实现快速应用开发。
- 完整的示例代码和参考设计可加快开发周期。
- 通常只需要修改一个文件即可开始定制应用程序开发。

#### 未来保护

- 在不需要新的 SOC 的情况下，支持新的底层功能的 ICSS + PRU 架构。
- 支持协议标准演进的灵活固件更新机制。
- 长期支持策略，验证稳定的产品生命周期。

## 4 主流工业协议的技术简介

### 4.1 EtherCAT (用于控制自动化技术的以太网)

#### 工作原理

EtherCAT 采用 *动态处理* 机制：

- **主传输**：EtherCAT 主设备生成包含一个或多个数据报的电报，并通过单个以太网帧进行传输。
- **从机处理**：当帧经过每个从设备时，它会以硬件方式读取帧的数据，执行命令，将返回数据写回帧，并更新 CRC。
- **帧转发**：从机会通过第二个以太网端口将整帧原样转发出去。

该机制消除了传统以太网中固有的低效率：主机必须与每个从机分别进行通信。

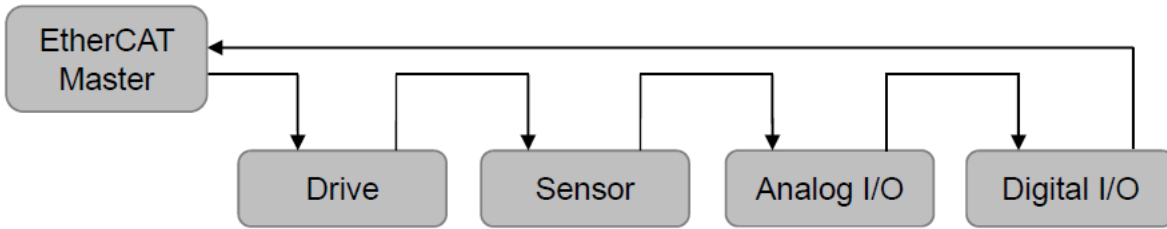


图 4-1. EtherCAT 网络示例

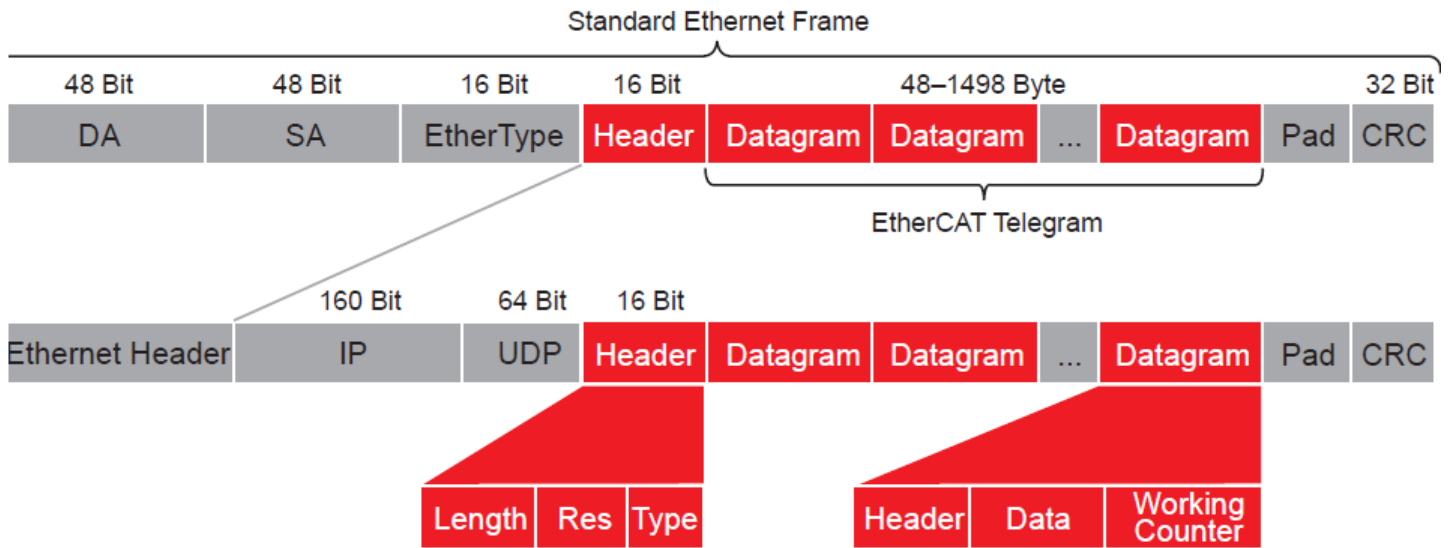


图 4-2. EtherCAT 电报

#### 关键性能指标

- **有效带宽利用率**：在 100Mbps 网络上超过 90% (而传统以太网仅为 5%)。
- **通信延迟**：端到端延时小于 700 纳秒 (ns)。
- **最大从机数量**：65,536 个节点。
- **地址空间**：4GB 逻辑地址空间。
- **周期时间**：支持周期时间低至 31.25 微秒。

#### 协议特征

- **分布式时钟**：所有从机时钟同步时间均在一微秒以内。
- **灵活的寻址模式**：物理寻址、逻辑寻址、多播和广播。
- **现场总线内存管理单元 (FMMU)**：使 EtherCAT 能够将各种从机映射到统一的 4GB 存储器空间。

- **网络拓扑**：支持任意拓扑结构，包括线型、星型和树型配置。

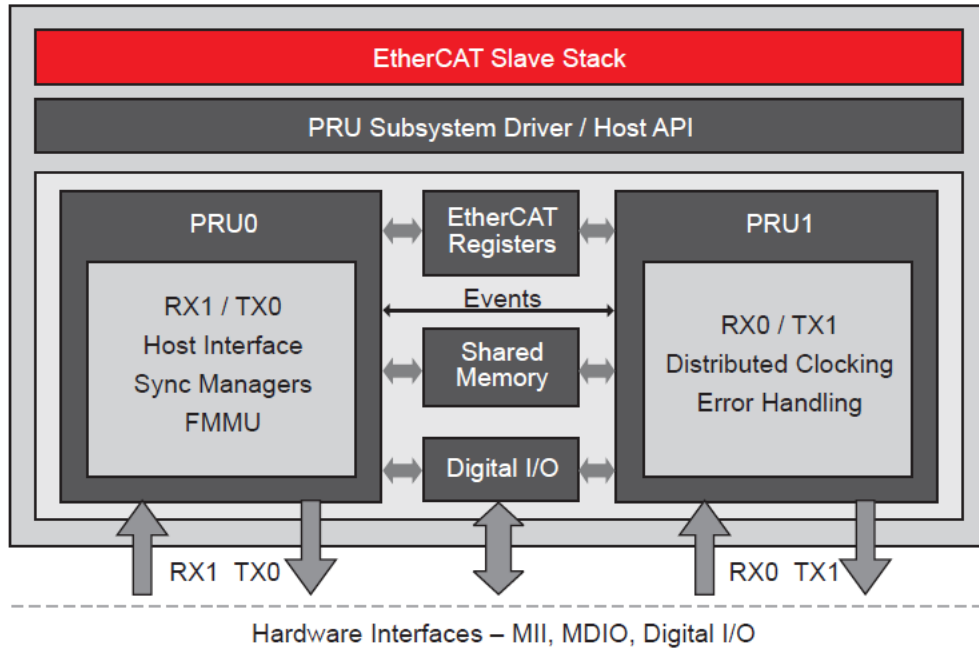


图 4-3. 硬件接口 - MII、MDIO、数字输入/输出

## 4.2 PROFINET RT/IRT ( 实时工业以太网 )

### 通信类

PROFINET 定义了多种通信类来满足不同的实时要求：

#### CC-A ( 实时通信 )

- 周期时间：大约 100ms
- 应用：参数数据，循环 I/O
- 典型使用案例：基础设施和楼宇自动化

#### CC-B RT ( 实时 )

- 周期时间：大约 10ms
- 基于软件的实时方法
- 典型使用案例：工厂自动化和过程控制

#### CC-C IRT ( 同步实时 )

- 周期时间：31.25  $\mu$ s 至 4ms
- 需要专用的硬件支持和交换器件
- 典型使用案例：多轴运动控制、机器人

#### CC-D TSN ( 时间敏感网络，开发中 )

- 将 PROFINET 与 TSN 标准相结合
- 支持超低延迟和抖动
- 实现 IT 和 OT 流量的确定性融合

### 更新时间

- 在同一个设备内，PROFINET 器件的更新时间可能并不相同，导致每个器件的**周期时间**有所不同。
- **传输周期**可确保所有 PROFINET 器件都能接收或发送它们的数据至少一次，此周期的长度由更新时间最慢的器件决定，这样可以有效地调整网络适应最慢器件的节奏。
- **相位时间**被称为 **sendClock**，由所有 I/O 器件的控制器定义。
- **Profinet 基本时钟** = 31.25  $\mu$ s
- **SendClock** = SendClockFactor \* 31.25  $\mu$ s
- **更新时间** = ReductionRatio  $\times$  SendClock = ReductionRatio  $\times$  SendClockFactor  $\times$  31.25  $\mu$ s

在 IRT 模式下，每个发送时钟周期会被划分为若干个相位：

- **红色相位**：只用于 RTC3 和时间关键型管理
- **绿色相位**：用于其他帧（行为类似于正常的交换机操作）
- **黄色相位**：用于发送缓冲器清空

## 4.3 EtherNet/IP ( 通用工业协议 )

### 架构特征

- **应用层协议**：使用通用工业协议 (CIP) 通过 TCP/IP 实现的应用层协议
- **标准以太网栈**：重复使用标准以太网物理层、数据链路层、网络层和传输层
- **多协议统一**：相同的 CIP 可以在不同的物理介质上工作（在 CAN 上的 CIP 称为 DeviceNet，在专用网络上的 CIP 称为 ControlNet，在以太网上的 CIP 称为 EtherNet/IP）

### 性能特征

- **节点数限制**：无限制、支持跨交换机和跨设施部署
- **通信模式**：支持高效点对点从机通信的完整生产者-消费者架构
- **兼容性**：与标准互联网和以太网协议栈兼容

## 5 TI 处理器的多协议支持设计

### 5.1 关键技术：PRU-ICSS 子系统

TI Sitara 处理器的多协议支持核心是集成式可编程实时单元工业通信子系统 (PRU-ICSS)

**PRU-ICSS 的优点：**

- **硬件支持：**提供底层 MII 接口访问，支持专用通信协议的硬件实现
- **确定性处理：**两个独立的实时内核以可预测的延迟处理数据报
- **固件可编程性：**所有 EtherCAT MAC 层功能均通过固件实现，因而非常灵活
- **具有成本效益：**与 FPGA 和 ASIC 设计相比，成本更低，电源效率更高

### 5.2 多协议架构多协议

TI 的多协议实现方案采用统一的硬件设计，通过不同的固件映像支持不同的协议。

**协议选择机制**

- **启动时选择：**通过硬件开关或软件参数确定启动时的协议
- **自动检测：**器件会自动监听网络，并根据接收到的帧类型选择相应的通信协议
- **固件独立性：**不同的协议使用独立的固件映像而不受干扰

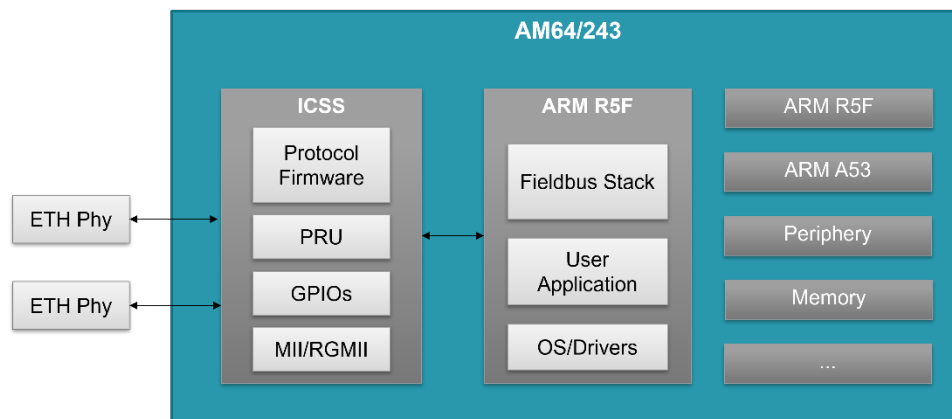


图 5-1. AM64/AM243 上的多协议方案

**协议栈结构 ( AM335 上的 EtherCAT 示例 )**

TI 的 EtherCAT 软件栈包含三个主要层：

1. 第 2 层 ( 数据链路层 )：PRU 固件
  - - PRU 内核负责 EtherCAT 电报传输和接收
  - 实施 FMMU 和同步管理器
  - 分布式时钟处理
2. 第 7 层 ( 应用层 )：EtherCAT 从机协议栈
  - - 在 Arm 内核上运行
  - 支持 Beckhoff 本机栈或第三方栈
  - 通过中断与 PRU 通信
3. 应用层：用户工业应用
  - 实现面向设备的专用逻辑 ( I/O 处理、传感器驱动等 )

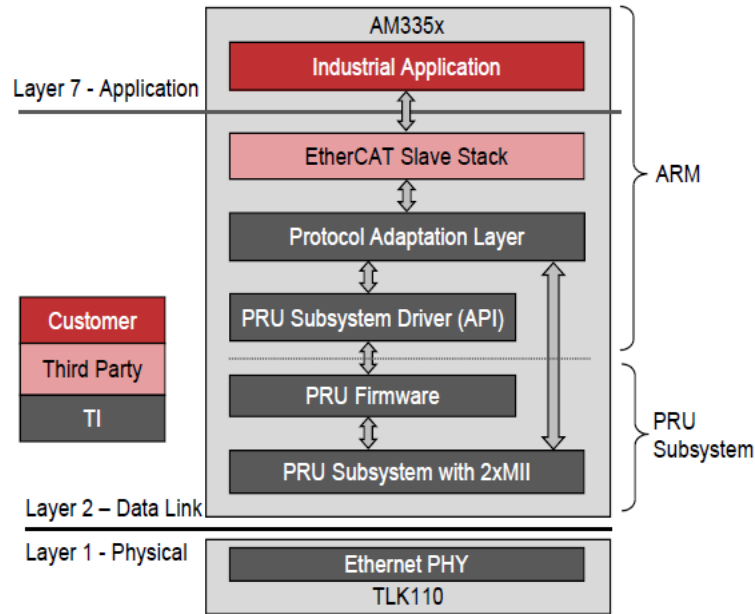


图 5-2. EtherCAT 从机的软件架构

### 单一硬件平台的优势

- 无需多个开发板和参考设计
- 相同的原理图和 PCB 布局
- 共享电源和 EMI 设计
- 显著降低 BOM 成本并缩短上市时间

### 5.3 处理器选择矩阵

TI 提供多种支持工业通信的处理器

表 5-1. TI 处理器工业通信支持对比情况

特性	AM243x	AM62x	AM64x	DRA821	DRA829
最快的周期时间	大约 100 $\mu$ s	大约 250 $\mu$ s	>200 $\mu$ s	大约 100 $\mu$ s	大约 100 $\mu$ s
R5F/A 内核	4x R5F	4x A53	4x R5F + 2x A53	2x A72	2x A72
处理能力	6.4k DMIPS	21k DMIPS	12.4k DMIPS	25k DMIPS	25k DMIPS
多控制器支持	是	是	是	是	是
从机支持	是	否*	是	否*	否*
多协议支持	是	否	是	否	否
千兆以太网端口	高达 5	2	高达 5	高达 5	高达 9
ICSS 数目	2x	标准 ETH	2x	多个	多个
PCIe/USB3.0	1 通道/USB3	USB2	1 通道/USB3	4 通道/USB3	8 通道/USB3

## 5.4 工业协议支持矩阵

表 5-2. 工业协议主要特性对比情况

特性	PROFINET	EtherCAT	以太网/IP	IO-Link
认证标准	规格 2.45	Beckhoff SSC + TI 栈	ODVA CT21	V1.1.4
循环时间	250 $\mu$ s IRT	50 $\mu$ s DC	标准以太网	400 $\mu$ s ( 最多 8 个端口 )
主要特性	分布式时钟，共享器件/输入	分布式时钟，CoE 对象字典	标准对象，DHCP/BOOTP	所有帧类型和波特率
可靠性	系统冗余 S2，MRP	灵活的拓扑	网络冗余 DLR，ACD	CPU 负载较低

## 5.5 软件开发接洽模式

TI 提供灵活的软件开发接洽模式，以满足不同的客户需求：

### 直接从 TI 购买

- 由 TI 直接提供完整的栈设计
- 由 TI 团队提供支持
- 器件随附许可
- 预先认证的解决方案
- 单一许可支持所有由 TI 提供的协议栈

### 从第三方购买

- 由第三方许可方提供协议栈
- 由第三方提供堆栈支持
- 灵活的许可模式（买断、按项目、按系列）
- 预先认证的设计
- 每个协议需要单独的许可

### 第三方解决方案支持

- 器件栈：EtherCAT、EtherNet/IP、PROFIBUS、PROFINET、Powerlink、CC-Link IE TSN、OPC UA TSN、Modbus TCP
- 控制器栈：EtherCAT、EtherNet/IP、PROFINET
- 安全配置文件：FSoE、CIP Safety、PROFIsafe
- 驱动配置文件：PROFIdrive、CIP Motion、CiA402

## 6 总结

TI Sitara 处理器系列通过集成 PRU-ICSS 子系统，提供了一个统一的硬件平台，支持主流工业以太网协议。多协议解决方案具有以下优势：

### 核心价值

1. **单芯片设计**：支持多种协议，协议选择通过固件切换实现
2. **业内先进的性能**：EtherCAT 可实现 <700ns 的端到端延迟；而 PROFINET 可支持 31.25  $\mu$ s 的周期时间
3. **完整的生态系统**：从芯片到软件栈、开发工具以及技术支持的一体化解决方案
4. **具有成本效益**：相比基于 FPGA 和 ASIC 的设计，成本可降低超过 30%
5. **长期支持**：确保稳定的产品生命周期和寿命

### 解决的问题

#### 可扩展性和可重用性

- 灵活的产品组合，包含所有必需的组件 (PHY、电源管理等)
- 预认证协议栈能够实现向定制应用程序的快速过渡
- 从片上系统到所有协议设计，均采用单一联系点

#### 开发效率

- 支持所有基于以太网的协议的单一硬件平台
- 适用于所有协议的工具和开发框架
- 通常只需要修改一个文件即可开发用户应用

#### 未来保护和支持

- 在不需要新的 SOC 的情况下，支持新增底层功能的 ICSS + PRU 架构
- 长期支持策略，确保稳定的产品生命周期
- 支持协议标准的发展的

### 应用前景

随着工业 4.0 和智能制造的进步，工业以太网通信将继续发展和融合。未来趋势包括：

- **TSN 融合**：将工业协议与时间敏感网络 (TSN) 集成
- **增强的可靠性**：集成的安全性和网络冗余支持
- **通用平台**：支持新旧协议兼容性的可编程硬件平台

TI 的 PRU-ICSS 架构为实现这些趋势提供了坚实的基础，为全球工业设备制造商提供了灵活且具有前瞻性的工业通信解决方案。

## 7 参考资料

1. 德州仪器 (TI), [多协议工业通信：赋能下一代工业自动化](#), 在线研讨会。
2. 德州仪器 (TI), [Sitara™ 处理器上的 EtherCAT®](#) 营销白皮书。
3. 德州仪器 (TI), [AM64x Sitara™ 处理器](#), 数据表。
4. 德州仪器 (TI), [AM243x Sitara™ 微控制器](#), 数据表。
5. 德州仪器 (TI), [CPU \(PLC 控制器\) 设计资源](#), 产品页面。

## 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