

Application Note

基于 TI Sitara PRU-ICSS 的多协议工业通信设计



Wayne Li, Zekun Bai

摘要

工业自动化系统对确定性、多协议实时通信的要求日益严苛。传统的网关设计依赖于专用协议 ASIC 或 FPGA，这导致了更高的成本以及有限的协议灵活性。TI 的 Sitara™ 处理器集成了可编程实时单元和工业通信子系统 (PRU-ICSS)，在单个 SoC 上将确定性的 32 位 RISC 内核与 Arm® 应用处理器集成在一起，支持单周期非流水线型执行方式，并可针对每种协议独立加载固件。本文档介绍了 PRU-ICSS 架构、EtherCAT、PROFINET 和 EtherNet/IP 的技术机制，以及多协议设计示例，为工业设备制造商提供基于 PRU-ICSS 的实用多协议通信设计参考。

内容

1 简介.....	2
2 PRU 功能比较.....	2
2.1 PRUSS：可编程实时单元子系统.....	3
2.2 PRU-ICSS：可编程实时单元和工业通信子系统.....	3
2.3 PRU_ICSSG：可编程实时单元和工业通信子系统 - 千兆位.....	3
2.4 PRU 子系统特性比较.....	4
3 主流工业协议.....	6
3.1 EtherCat：用于控制自动化技术的以太网.....	6
3.2 PROFINET 实时以太网标准.....	8
3.3 EtherNet/IP：通用工业协议.....	10
4 基于 PRU-ICSS 的多协议工业通信架构设计.....	12
4.1 硬件架构.....	12
4.2 软件架构.....	13
4.3 应用示例.....	15
5 工业协议支持矩阵.....	16
6 总结.....	17
7 参考资料.....	18

商标

Sitara™ is a trademark of Texas Instruments.
Arm® is a registered trademark of Arm Limited.
所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

随着工业 4.0 和智能制造的快速发展，工业以太网协议逐渐成为工业自动化的主流通信基础设施。多协议共存是工业环境中的一种常见现象。北美市场更倾向于采用 EtherNet/IP，欧洲市场广泛采用 PROFINET 和 EtherCAT，运动控制应用通常更偏好 EtherCAT 或 PROFINET IRT，而服务于全球供应链的 OEM 制造商往往需要同时支持多种协议。这给设备制造商带来了一个现实挑战：如何使用统一的硬件平台来满足不同地区和行业的协议需求。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 PRU 功能比较

可编程实时单元 (PRU) 是一款 32 位确定性 RISC 内核。PRU 既能提供 FPGA 的实时特性，又保留了 CPU 的可编程性和较低的复杂性。PRU 专为 I/O 引脚的超低延迟控制而设计 (图 2-1)：

- 单周期执行 (5ns，非流水线型 CPU)
- 宽边接口 (1024 位数据总线)
- 多核实时处理 (5ns 并行同步)
- 双周期中断延迟 (10ns 任务切换)
- 双周期仲裁 (10ns 自旋锁)

PRU 内置于 TI 的部分处理器和微控制器中。由于 PRU 可以访问器件引脚 (I/O)、事件以及所有相关的 SoC 资源，因此能够：

- 执行高速实时响应：即时数据处理
- 执行专门的数据处理操作，例如计算自定义多项式的 CRC、FFT、FIR、Sin 等……
- 通过位操作实现定制外设接口，例如并行 ADC/DAC 数据采集接口、多通道 ADC SPI 时序、1-Wire 协议、QEP、PWM 和 LVDS
- 分担 SoC CPU 的任务负载：例如处理高速 UART、维护大容量缓冲区，并将数据移交给 Arm 主核心，以确保数据不丢失

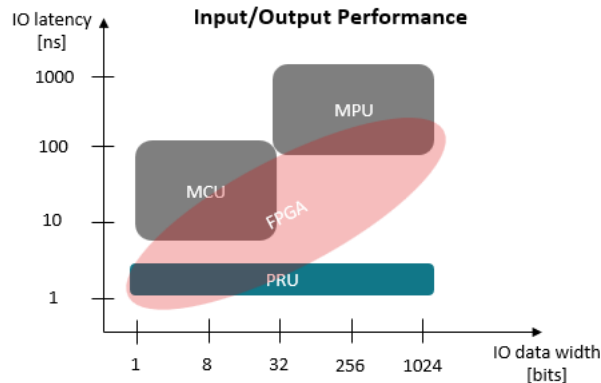


图 2-1. PRU 输入/输出性能

PRU 子系统 (图 2-2) 由两个实时内核组成，每个内核的单条指令执行时间固定为 5ns，且不采用指令流水线，从而确保严格确定性的实时性能。每个 PRU 内核都配备专用的指令存储器和数据存储器，并通过共享内存与 Arm 内核协同工作，从而实现灵活的任务负载分配。

该子系统通过 32 位互连总线连接系统资源，并配备专用外设，包括 MII、MDIO、UART、中断控制器、IEP 以及 MPY/MAC 单元；所有这些外设均可直接访问实时内核，以最大限度地降低延迟。

每个 PRU 支持多达 30 路输入和 32 路输出，能够在可预测的时间窗口内对外部事件进行精确监控和响应，因此非常适合工业以太网和定制 I/O 接口等实时应用。

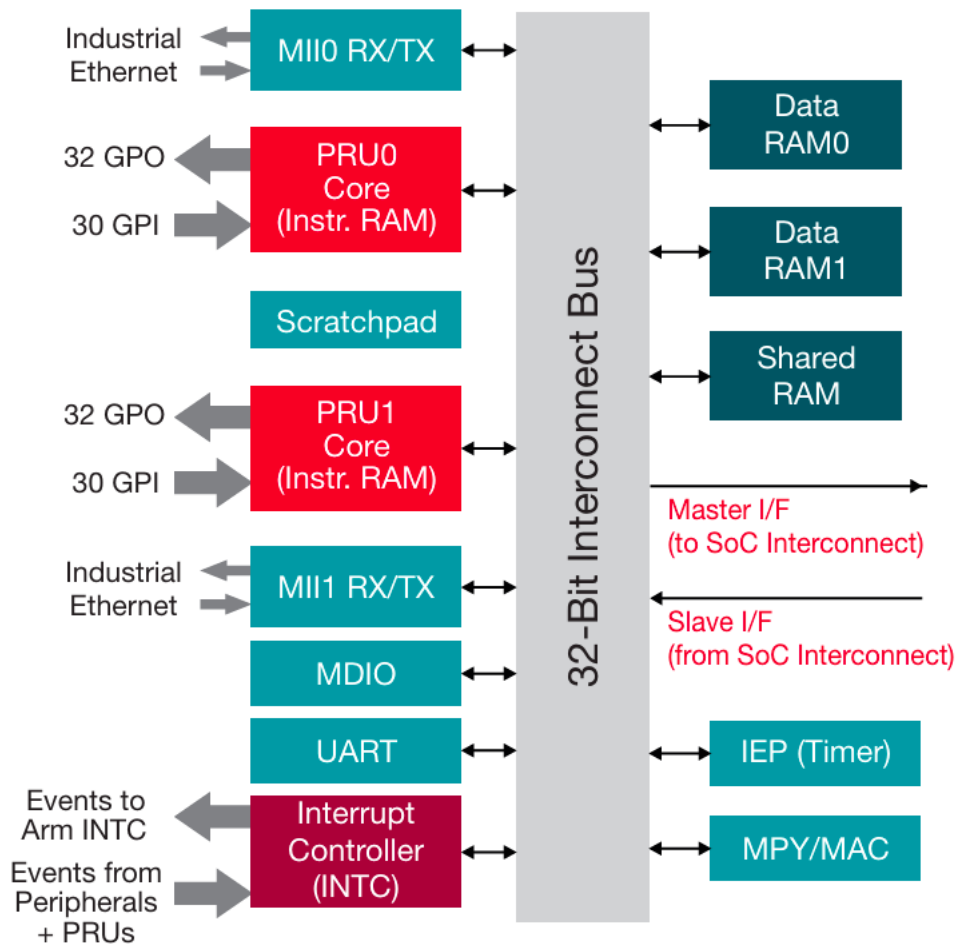


图 2-2. TI PRU 子系统

2.1 PRUSS：可编程实时单元子系统

可编程实时单元子系统 (PRUSS) 是 PRU 子系统系列的基础成员。PRUSS 包含两个 32 位 RISC PRU 内核、共享内存、一个中断控制器 (INTC)，并可直接访问 I/O 引脚和 SoC 资源。PRU 内核的可编程特性使 PRUSS 能够高效处理实时任务，实现自定义外设接口，并与其他处理器内核分担对时序要求严苛的任务。

PRUSS 不支持工业通信子系统功能 — 以太网相关信号 (MII/MDIO) 未引出。

支持的器件包括 AM62x。

2.2 PRU-ICSS：可编程实时单元和工业通信子系统

可编程实时单元及工业通信子系统 (PRU-ICSS) 包含 PRUSS 的所有功能，并增加了用于工业网络应用的集成式工业通信子系统。

PRU-ICSS 支持 EtherCAT、PROFINET、EtherNet/IP、PROFIBUS、EnDat 2.2 以及 100Mbit 工业以太网通信。

支持的器件包括 AM261x、AM263x 和 AM263Px，以及较早的 AM335x、AM437x 和 AM57x 器件。

2.3 PRU_ICSSG：可编程实时单元和工业通信子系统 - 千兆位

可编程实时单元和工业通信子系统 - 千兆位 (PRU_ICSSG) 是 PRU 子系统系列的最高端版本。PRU_ICSSG 包含 PRU-ICSS 的所有功能，并增加了两个辅助可编程实时单元 (RTU) 内核、两个传输 PRU (TX_PRU) 内核、宽边存储器、具有任务管理器的改进型事件管理功能、数据处理和数据移动加速器，以及新外设 (例如 PWM)。

PRU_ICSSG 能够处理高性能场景，例如千兆位工业通信、高级实时处理和多轴电机控制，使其成为三代子系统设计中功能最全的版本。

支持的器件包括 AM64x 和 AM243x。

2.4 PRU 子系统特性比较

图 2-3 汇总并比较了三种 PRU 子系统之间的差异。

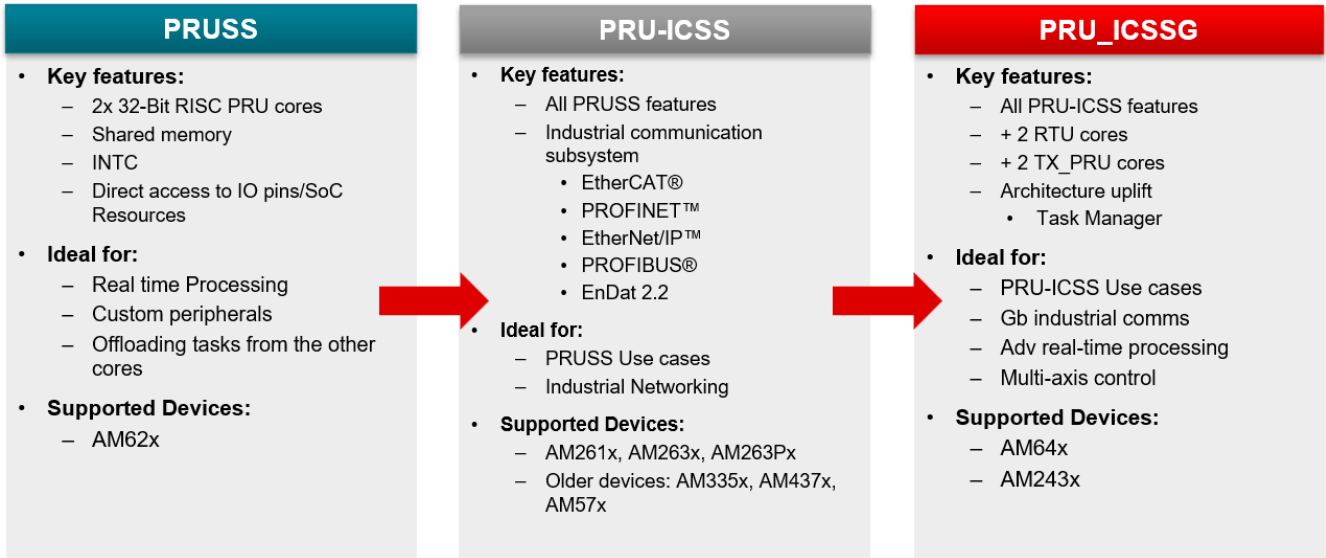


图 2-3. PRU 子系统比较

表 2-1 概述了各 PRU 子系统的主要特性。

表 2-1. PRU 子系统特性比较

类别	特性	PRUSS	PRU-ICSS	PRU_ICSSG
一般 PRU 规格	PRU 内核	是	是	是
	RTU_PRU 内核	否	否	是
	TX_PRU 内核	否	否	是
	IRAM (每个内核)	是	是	是
	DRAM (每个 PRU-ICSS/PRU_ICSSG 2 个 DRAM)	是	是	是
	共享 DRAM	是	是	是
	INTC	是	是	是
通用输入	直接输入	是	是	是
	16 位并行采集	是	是	是
	28 位移位	是	是	是
	3 通道外设接口 (EnDAT)	否	视器件而定	是
通用输出	直接输出	是	是	是
	移出	是	是	是
加速器：数据处理	MPY/MAC	是	是	是
	CRC 16/32	是	视器件而定	是
	高速缓存	是	是	是
	宽边 RAM	否	否	是
	任务管理器	否	否	是
	自旋锁	否	否	是
加速器：数据移动	XFR2VBUS	是	否	是
	XFR2TR	否	否	是
外设	UART	是	是	是
	IEP	是	是	是
	MII_RT 或 MII_G_RT	否	是	是
	MDIO	否	是	是
	PWM	否	否	是
应用	实时处理	是	是	是
	定制外设	是	是	是
	工业通信	否	是	是
	多轴控制	否	否	是
支持	代表性器件	AM62x	AM261x、 AM263x、 AM335x、 AM437x、AM57x	AM64x、AM243x

3 主流工业协议

3.1 EtherCat：用于控制自动化技术的以太网

图 3-1 展示了一个典型的 EtherCAT 网络拓扑结构，其中 EtherCAT 主站以菊花链方式与多个器件节点（包括驱动器、传感器、模拟 I/O 和数字 I/O）进行通信。EtherCAT 的一个关键特性是动态处理 (Processing on the Fly) 机制：当数据帧通过每个器件节点时，器件会直接从数据流中提取寻址到该节点的命令数据，并将响应数据插入到同一帧中，从而实现整个网络极低延迟的实时通信。

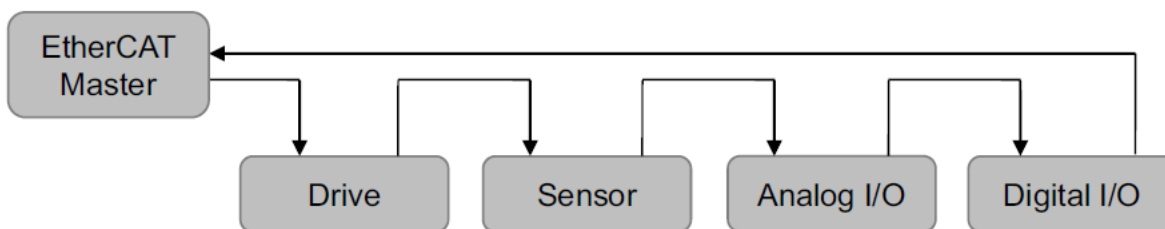


图 3-1. EtherCAT 网络示例

EtherCAT 报文 (图 3-2) 嵌入在以太网帧的有效载荷中，可能包含一个或多个发往 EtherCAT 器件的 EtherCAT 数据报。每个数据报由“报头”、“数据”和“工作计数器”组成。“报头”和“数据”规定了器件必须执行的操作，而成功处理命令的每个器件都会将“工作计数器”加 1，使主站能够确认所有目标器件都已正确处理该数据报。

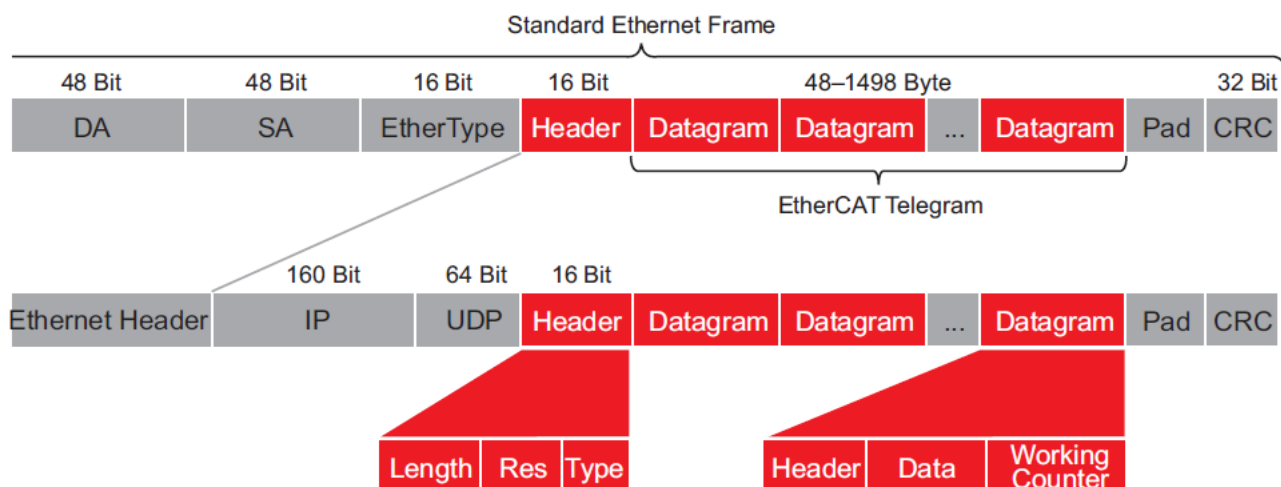


图 3-2. EtherCAT 电报

EtherCAT 固件架构 (图 3-3) 分为两个 PRU 内核：PRU0 负责端口 RX1/TX0、主机接口、同步管理器和 FMMU（现场总线内存管理单元），而 PRU1 则负责端口 RX0/TX1、分布式时钟和错误处理。两个内核共享对 EtherCAT 寄存器、共享内存和数字 I/O 资源的访问权限，从而实现协调的实时处理。整个固件栈通过 PRU 子系统驱动程序和主机 API 层进行管理，EtherCAT 器件协议栈运行于其上，并通过 MII、MDIO 和数字 I/O 物理接口与硬件进行交互。

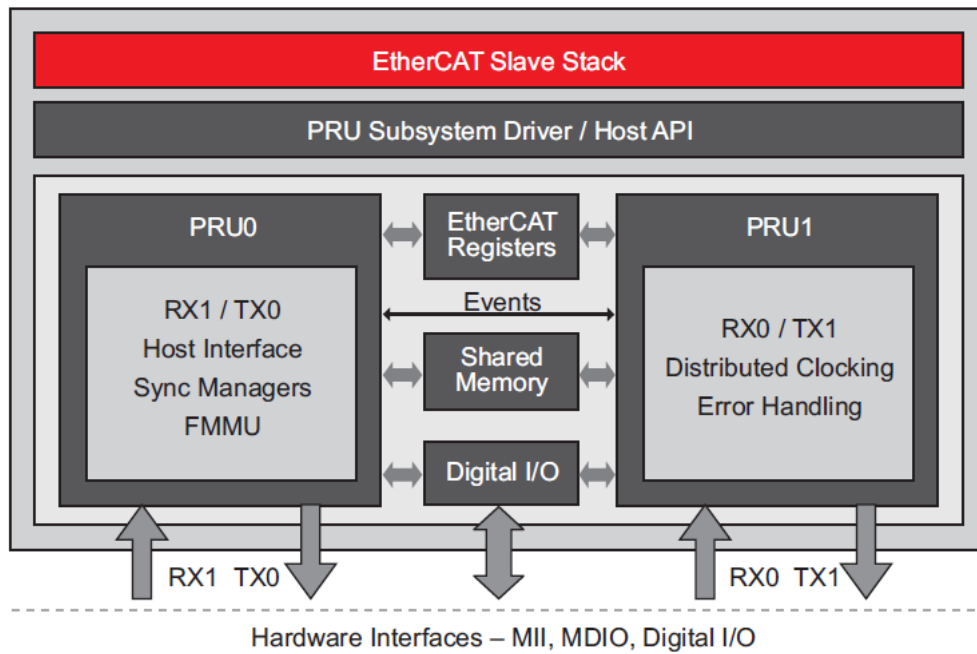


图 3-3. PRU-ICSS 上的 EtherCAT 固件架构

3.2 PROFINET 实时以太网标准

PROFINET 是一种实时以太网标准，面向各种工业应用（包括工厂自动化、过程自动化和楼宇自动化）所需的高速、确定性通信。

PROFINET 标准定义了四个相互构建的一致性类别，旨在用于不同的应用和用例：

- 一致性类别 A (CC-A)：可使用标准以太网硬件实现，支持基础 PROFINET 功能，例如更新时间在 1ms 至 512ms 之间的周期性实时 (RT) 通信。
- 一致性类别 B (CC-B)：在 CC-A 的基础上进行了扩展，增加了通过 SNMP 进行的网络诊断、系统冗余以及通过介质冗余协议 (MRP) 实现的网络冗余。
- 一致性类别 C (CC-C)：在 CC-B 的基础上进行了扩展，支持更新时间小于 250 μ s 的周期性等时实时 (IRT) 通信。
- 一致性类别 D (CC-D)：这是最先进的 PROFINET 类别。它利用时间敏感网络 (TSN) 功能（例如时间感知整形器 (TAS) 和帧抢占），来实现非常高的确定性和低延迟。

PROFINET 标准定义了三种类型的器件：IO 控制器、IO 器件和 IO 监控器。图 3-4 中提供了工厂内简化网络架构的示例。

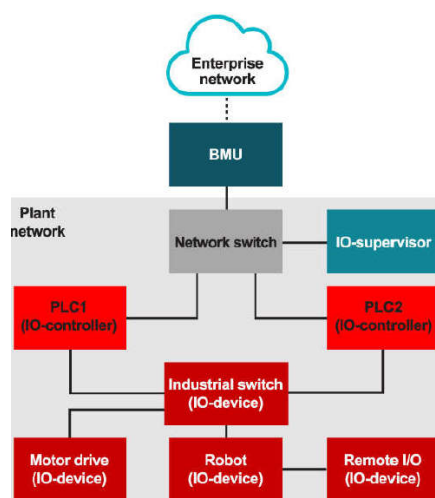


图 3-4. PROFINET 网络示例

Sitara 处理器 (图 3-5) 上集成的 PROFINET 器件实现方案有三个主要软件组件。第一个软件组件是在器件的 PRU-ICSS 中实现第 2 层功能的微代码；第二个是在 Arm 内核上运行的 PROFINET 器件协议栈；而第三个是工业应用。TI 还在支持 Sitara 处理器的软件开发套件中提供了其他组件，如协议适应层和器件驱动程序。

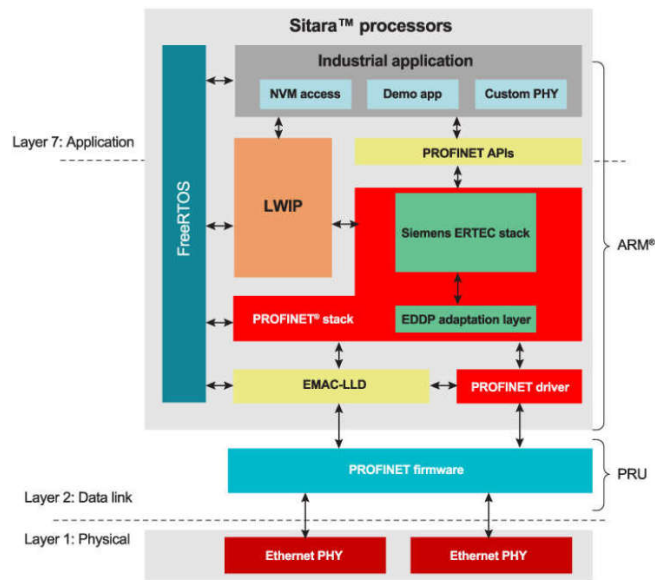


图 3-5. Sitara 处理器上的 PROFINET 软件架构

如图 3-6 所示，PRU-ICSS 集成了完整的 PROFINET 第 2 层功能，包括 CPM/PPM 处理、DHT、DCP 过滤、ARP 过滤、直通交换以及错误检测。其内部共享内存提供了一个 PROFINET 寄存器空间，结合 PRU 的确定性实时处理能力，确保了 PROFINET 帧处理延迟的一致性和可预测性。

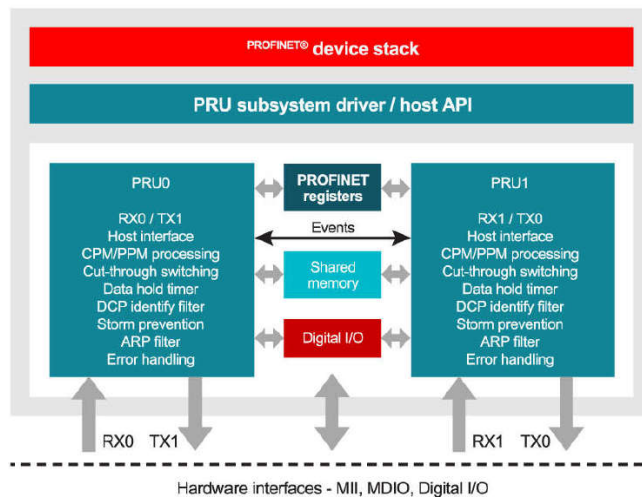


图 3-6. PRU-ICSS 上的 PROFINET 固件架构

3.3 EtherNet/IP：通用工业协议

EtherNet/IP 是一系列网络协议中的一种，其上层实现了通用工业协议 (CIP)。当 CIP 按照 IEEE 802.3 的定义在标准以太网上实现时，便称为 EtherNet/IP。图 3-7 展示了在 TI Sitara 器件上实现 EtherNet/IP 器件所需的三个软件组件：基于 PRU 的第 2 层固件、由 Arm 托管的 EtherNet/IP 器件协议栈以及工业应用程序。

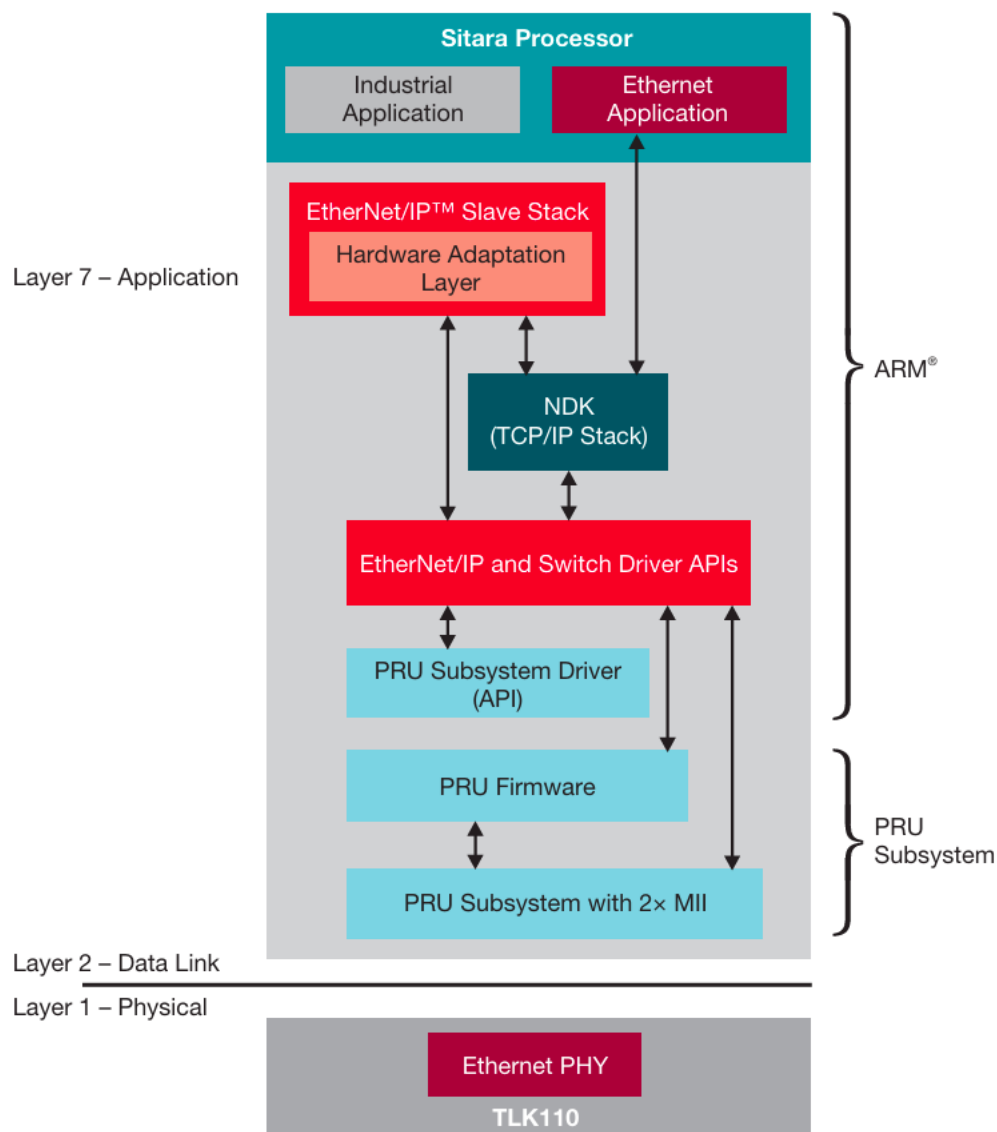


图 3-7. Sitara 处理器上的 EtherNet/IP 软件架构

TI Sitara 器件上用于集成 EtherNet/IP 的 PRU-ICSS 固件架构如图 3-8 所示。PRU-ICSS 负责处理核心以太网交换机功能，包括 MAC 地址学习、风暴抑制以及数据包统计。两个 PRU 内核分别独立管理一个物理端口，并处理专用的 RX/TX 对。核间协调通过专用指令和共享内存实现。该架构支持参数可配置的低延迟存储转发交换，并允许 PRU 实时中断 Arm 内核，以实现确定性处理。

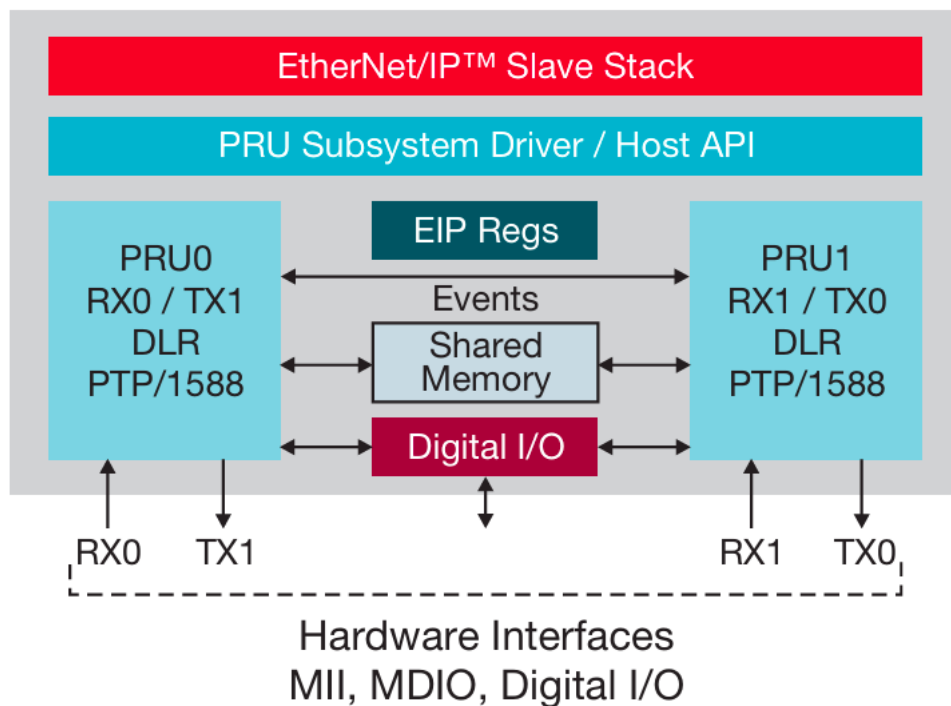


图 3-8. PRU-ICSS 上的 EtherNet/IP 固件架构

4 基于 PRU-ICSS 的多协议工业通信架构设计

4.1 硬件架构

TI 的 PRU 构成了处理器上实时子系统的基础。如图 4-1 所示，每个 PRU 的运行频率为 200MHz，采用单周期、非流水线执行方式，使 SoC 能够直接、确定性地访问外部 I/O。每个 PRU 都配备专用的指令 RAM 和数据 RAM，因此实时固件运行时不会发生内存争用或出现不可预测的延迟。共享 RAM 区域支持 PRU 内核与 Arm 内核之间进行高效的数据交换。传入的中断通过集成式 INTC 直接发送至 PRU，绕过多层互连路径，从而使响应延迟保持在有界且可预测的范围内。

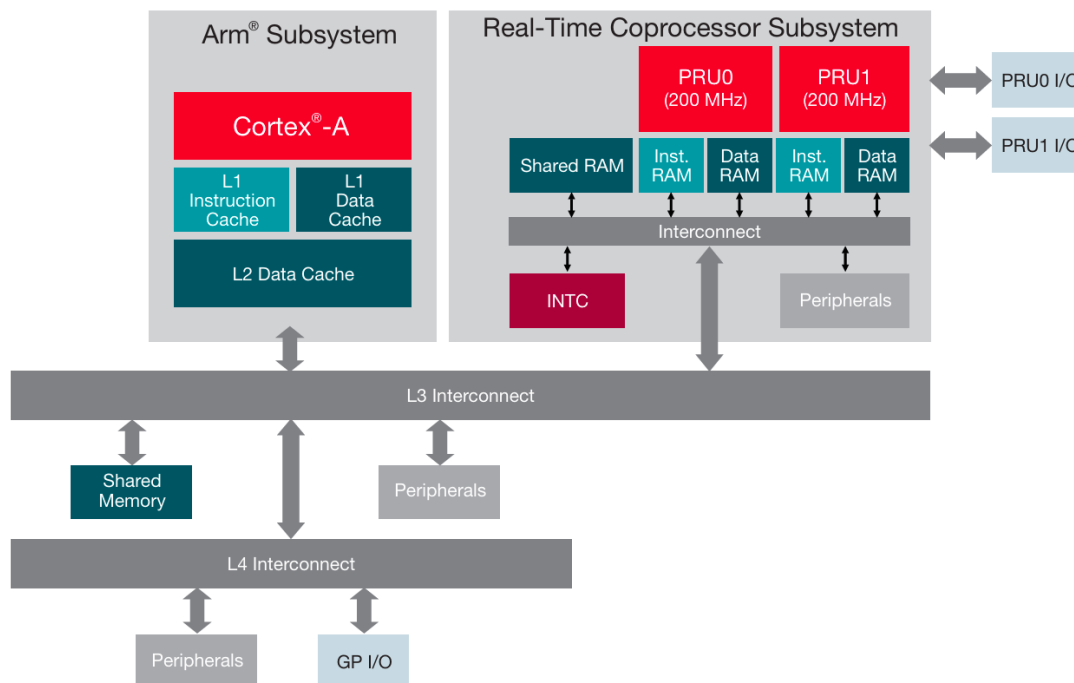


图 4-1. PRU-ICSS 多协议通信硬件架构

4.2 软件架构

软件架构 (图 4-2) 通过分层的 Linux 驱动程序栈，将 Arm 内核与 PRU 子系统紧密耦合。运行在 Arm 内核上的 Linux 内核为 PRU 通信提供了两种驱动机制：RemoteProc 和 rpmsg。RemoteProc 充当基本控制机制：读取从 U-Boot 传递的器件树二进制文件 (DTB)，将 PRU 固件加载到指令内存中，并启动 PRU 执行。一旦 PRU 开始运行，rpmsg 便通过 PRU 数据内存中的共享 vring 缓冲区，处理 PRU 固件与用户空间应用程序之间的双向消息传递，并通过 /dev/rpmsg-pru 接口对外暴露。位于这些核心 Linux 驱动之上的是两个 PRU 专用客户端驱动：RemoteProc-PRU 和 rpmsg-PRU，它们将通用框架抽象为一套统一的 API，供上层协议栈使用。

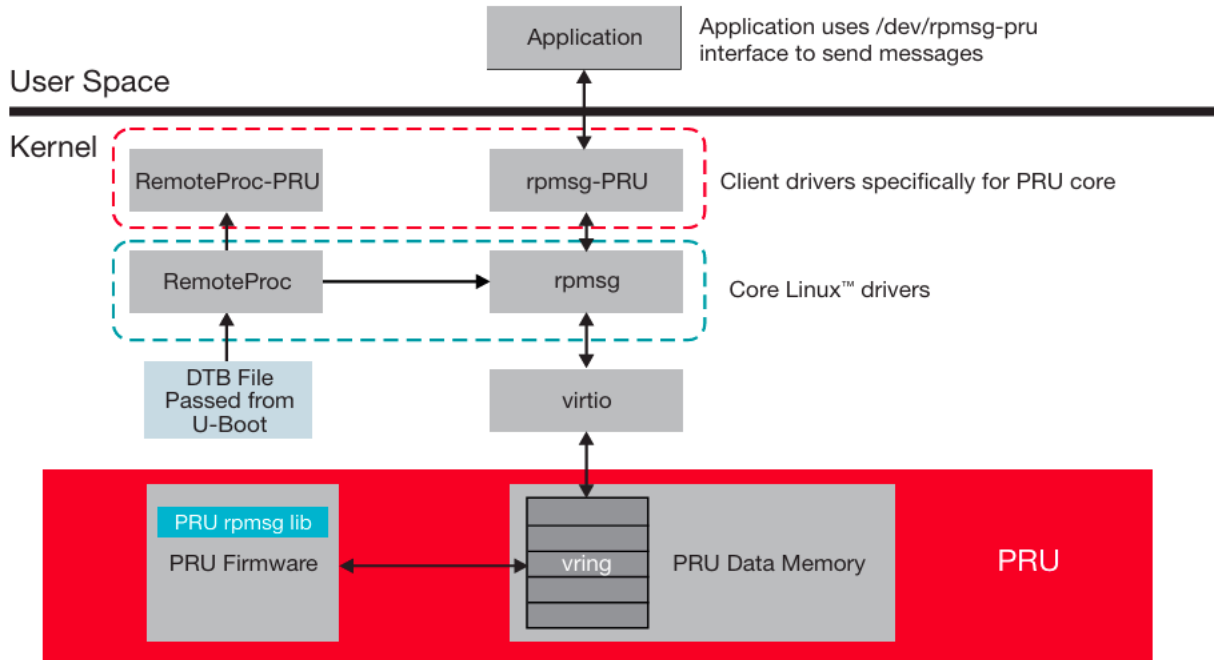


图 4-2. Sitara Arm/PRU 软件架构

图 4-3 将此通用协议栈映射到 AM335x 上具体的 EtherCAT 器件实现。图 3-3 中的 PRU 子系统驱动程序 (API) 对应于图 3-2 中的客户端驱动程序层：它提供一个统一的接口，将底层的固件加载和消息传递机制对上层隐藏。运行在 Arm 核心上的 Protocol Adaptation Layer、EtherCAT Device Stack 和 Industrial Application 共同对应于图 4-2 中的用户空间应用程序，并通过 /dev/rpmsg-pru 接口与 PRU 交换数据。PRU 固件处理第 2 层数据链路功能：帧处理和 MII 接口控制。这种分层设计允许将不同的工业协议固件独立加载到 PRU 上，从而在无需修改应用层软件的情况下实现多协议运行。

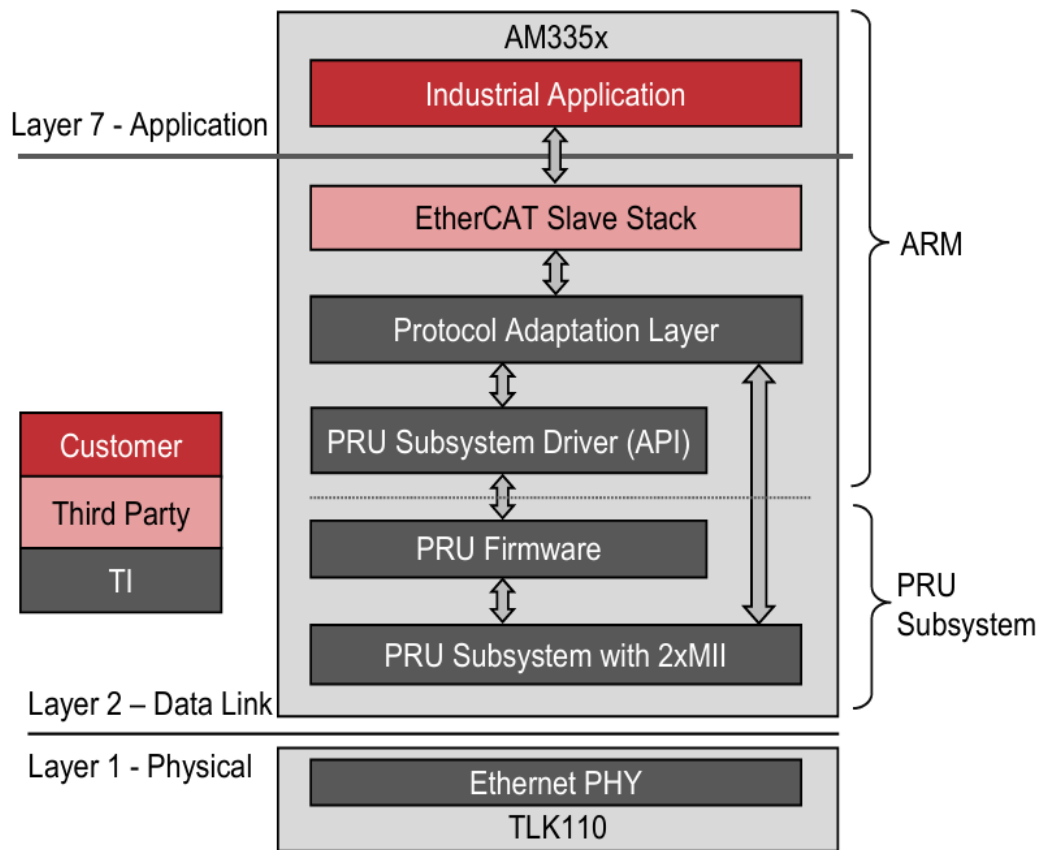


图 4-3. PRU-ICSS 上的 EtherCAT 器件软件架构

4.3 应用示例

图 4-4 展示了基于 TI Sitara 处理器构建的典型工业自动化拓扑结构。AM62Px/AM62x 作为顶层 PROFINET RT 控制器运行梯形逻辑，同时驱动 1080p HMI 显示屏。AM64x 同时充当 PROFINET RT 器件和 EtherCAT 控制器，通过 EtherCAT 控制下游基于 AM243x 的 VFD 节点，并由 PCIe Wi-Fi 模块提供无线连接。每个节点独立加载各自的 PRU 固件，使得 PROFINET、EtherCAT 和 IO-Link 能够在网络中共存，而无需对应应用层进行任何修改。

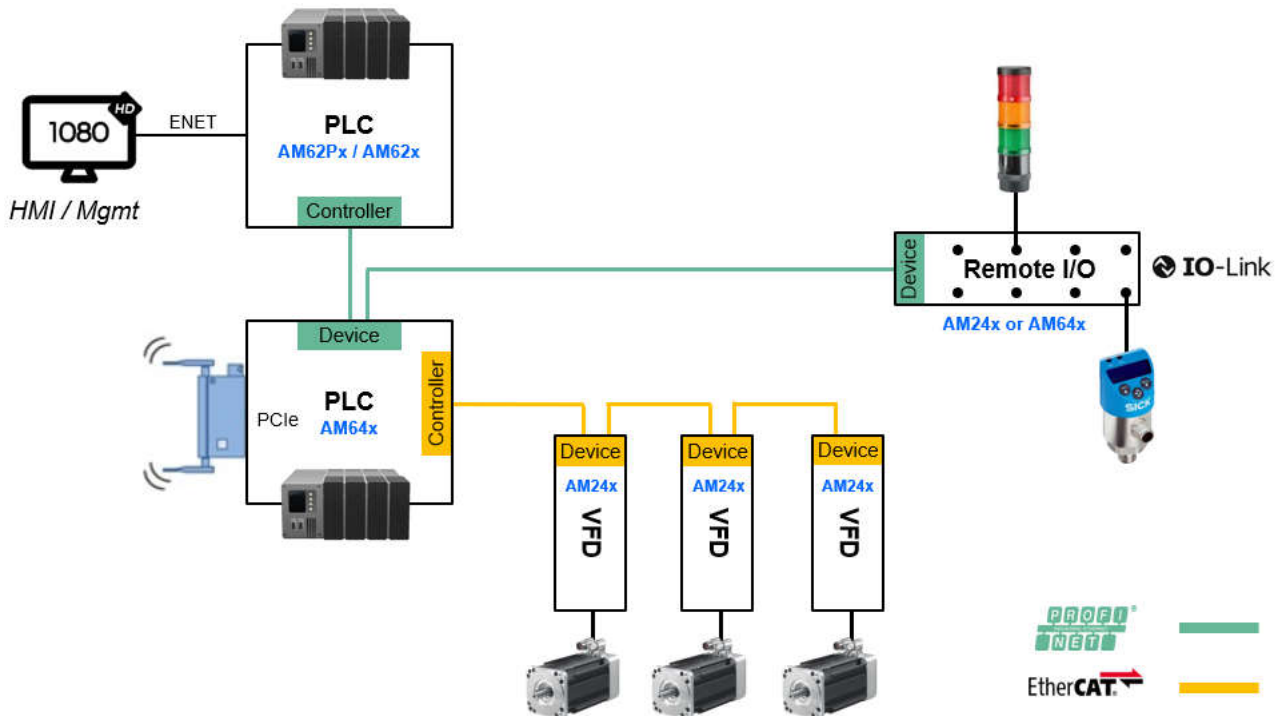


图 4-4. TI Sitara 处理器多协议工业通信系统

5 工业协议支持矩阵

表 5-1. 工业协议支持矩阵

特性	AM62x	AM261	AM263	AM243	AM64x
子系统	1x PRUSS	2 个 PRU-ICSS	1 个 PRU-ICSS	2 个 PRU_ICSSG	2 个 PRU_ICSSG
R5F/A 内核	4x A53	2x R5F	4x R5F	4x R5F	4x R5F + 2x A53
处理能力	16.8k DMIPS	2K DMIPS	3.2K DMIPS	6.4k DMIPS	12.4k DMIPS
多控制器支持	是	是	是	是	是
器件支持	否	是	是	是	是
多协议支持	否	是	是	是	是
千兆以太网端口	2	2	2	高达 5	高达 5
PCIe/USB3.0	2x USB2	1x USB2	否	1x 通道/USB3	1x 通道/USB3

6 总结

本文档介绍了 PRU-ICSS 架构、EtherCAT、PROFINET 和 EtherNet/IP 的技术机制，以及 TI Sitara 处理器上的多协议设计示例。PRU 子系统历经 PRUSS、PRU-ICSS 和 PRU_ICSSG 三代演进，功能集不断增强，其中 PRU_ICSSG 为最高端版本。每个 PRU 内核均采用单周期、非流水线型执行方式，并独立加载特定于协议的固件，为 EtherCAT、PROFINET 和 EtherNet/IP 实现第 2 层功能；这种分层设计实现了多协议运行，无需修改应用层软件。一个典型的系统示例展示了 AM62x、AM64x 和 AM243x 器件在单个工业网络中共存，且每个器件都运行指定的协议固件。协议支持矩阵进一步证实了 AM261x、AM263x、AM243x 和 AM64x 的多协议能力。

7 参考资料

1. 德州仪器 (TI), [PRU 子系统特性比较](#), 应用手册
2. 德州仪器 (TI), [PRU 入门指南](#), 地震应用
3. 德州仪器 (TI), [确保实时可预测性：充分利用 TI Sitara™ 处理器的可编程实时单元](#), 营销白皮书
4. 德州仪器 (TI), [AM261x Sitara™ 微控制器](#), 数据表
5. 德州仪器 (TI), [AM263x Sitara™ 带实时控制功能的微控制器](#), 数据表
6. 德州仪器 (TI), [TI 处理器和 MCU 支持的工业通信协议](#), 应用手册
7. 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。
8. 德州仪器 (TI), [Sitara™ 处理器上的 EtherCAT®](#), 营销白皮书。
9. 德州仪器 (TI), [TI Sitara™ 处理器上的 PROFINET®](#), 营销白皮书。
10. 德州仪器 (TI), [TI Sitara™ 处理器上的 EtherNet/IP™](#), 营销白皮书。

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