

C2000 单芯片实现伺服电机控制的方案



Strong Zhang

在伺服电机控制领域，传统的控制芯片架构依赖于 MCU+FPGA+ET1100 三个芯片，这种架构存在诸多不足，如尺寸大、系统复杂且成本高昂，难以满足日益增长的小型化和高性能需求。而德州仪器 C2000™ 实时微控制器家族中的 F28P65，凭借其卓越的性能和高度集成化的特点，可单芯片实现伺服或机器人的功能，替代 MCU+FPGA+ET1100 三个芯片方案。

单芯片实现伺服控制的基本原理

传统的伺服电机控制依赖 MCU+FPGA+ET1100 三个芯片架构。其中，FPGA 负责快速电流环控制，包括 sigma-delta 滤波器、绝对式位置编码器解码、FOC 电流环控制算法以及 PWM 保护等功能；MCU 主要负责电机速度环和位置环控制任务；ET1100 则是由倍福公司设计的专用于 EtherCat 控制的芯片，实现高速以及分布式时钟同步功能的通信。

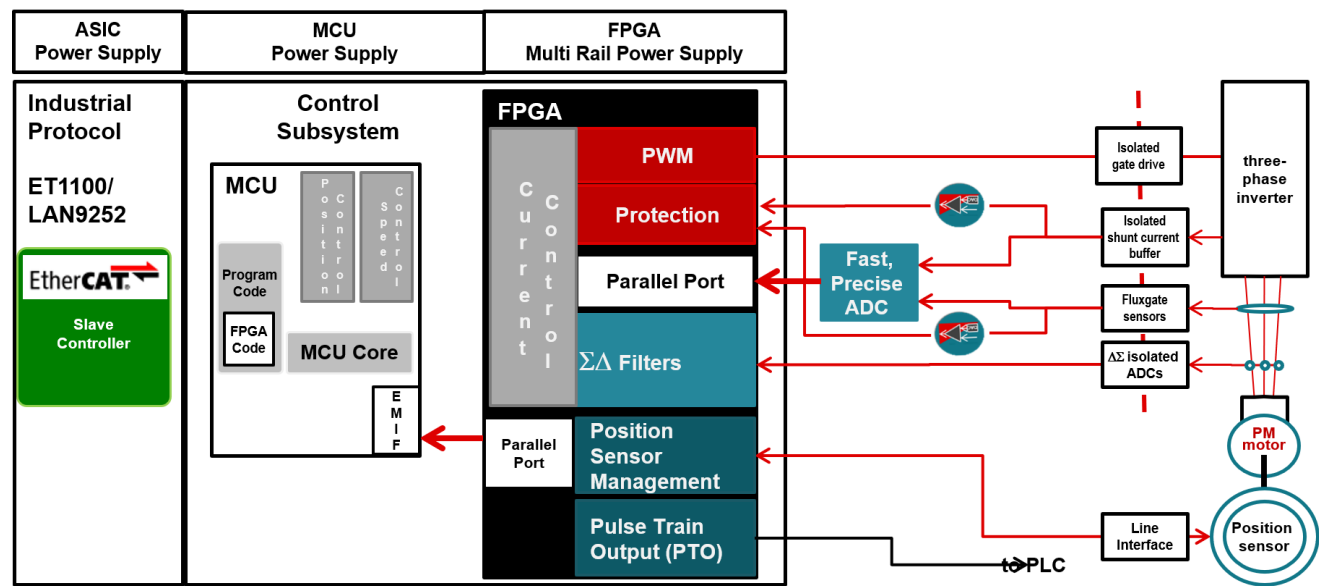


图 1. 传统的三芯片架构的伺服系统

图 1 展示了传统三芯片架构的伺服系统，其存在以下不足：

1. 尺寸大，不满足伺服小型化特别是机器人控制的需求。
2. 需要更多的辅助电源供电，系统复杂，可靠性下降。
3. 成本高。

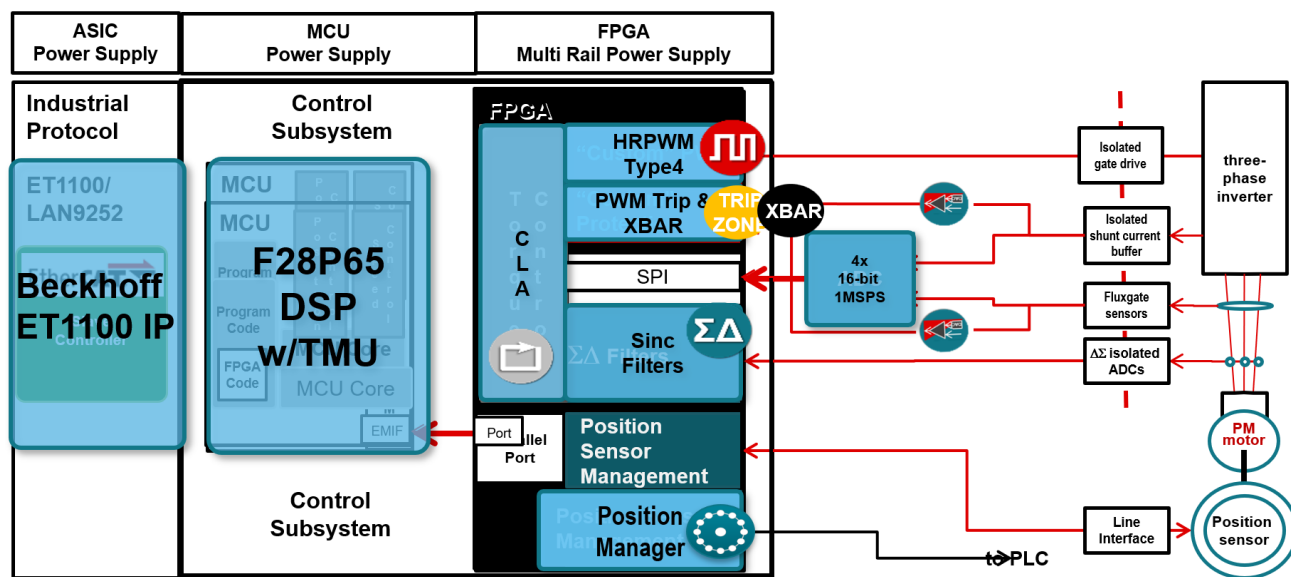


图 2. 基于 F28P65 的单控制芯片架构的伺服系统

F28P65 是德州仪器 C2000™ 实时微控制器家族中的一款高性能产品，具有双 C28 内核+CLA (协处理器) 的多核架构，每个核心提供 200MIPS 的信号处理性能，支持 64 位浮点。它拥有 1.28MB 闪存和 256KB SRAM，集成多达 40 个模拟通道的高性能 ADC 和 36 个高分辨率 PWM，支持多种工业标准协议的通信接口，如 EtherCat，CAN FD 和 USB 2.0 等。F28P65 还集成可配置逻辑块 (CLB)，允许用户自定义逻辑逻辑，在伺服和机器人领域中可以实现编码器解码，PTO 分频输出等功能。

因此 F28P65 可以实现单芯片实现伺服控制的所有功能，其优势如下：

- 高度集成，集成 EtherCat IP，单芯片实现 ARM+FPGA+ET1100 功能。
- 尺寸小(9x9mm 封装)。
- 快速电流环技术，性能媲美 FPGA。
- 完善的功能安全支持，提供芯片级 TUV 认证证书，安全手册，FMEDA，诊断库等资料和系统级功能安全支持。

快速电流环原理和实现

对于电机电流环控制而言，其核心环节包括 ADC 采样、算法运算以及 PWM 更新，图 3 是矢量 FOC 电流环控制的框图：

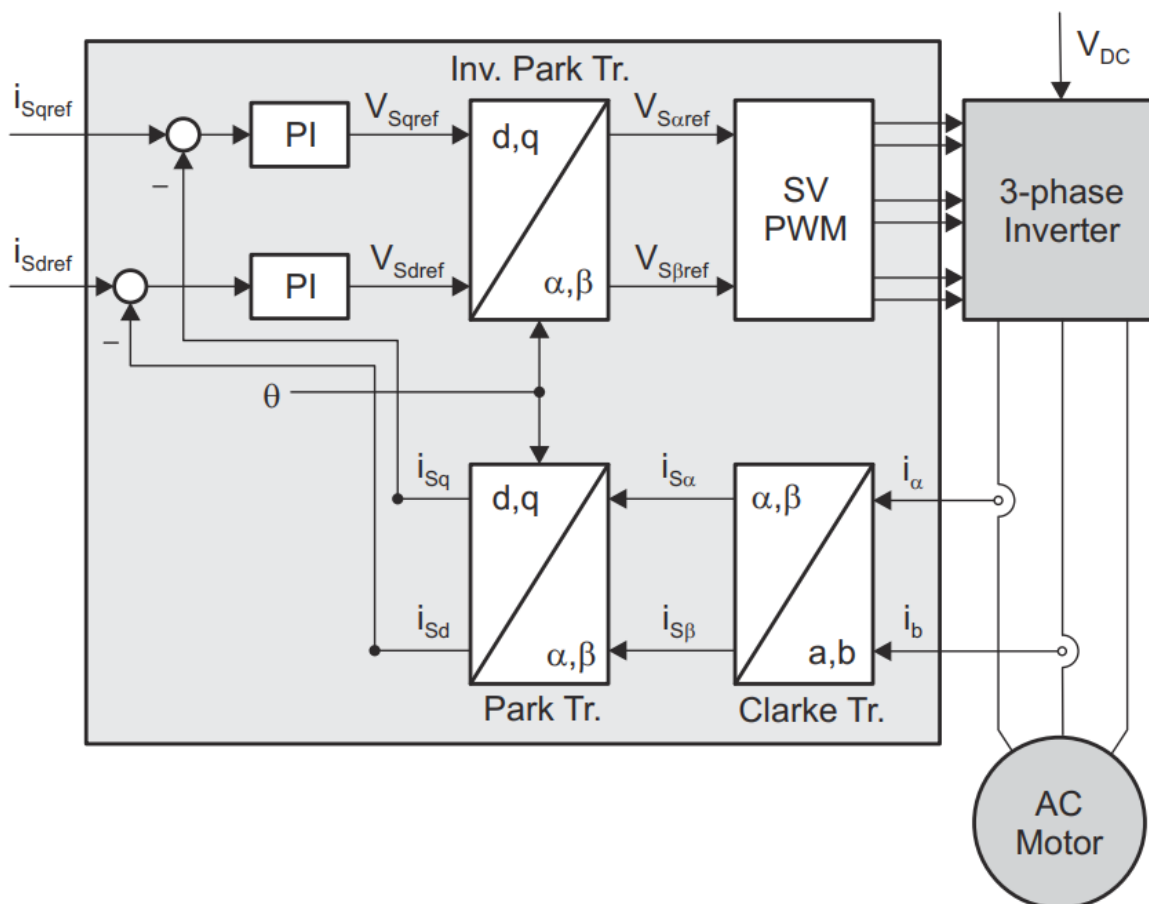


图 3. FOC 电流环基本控制框图

对于传统的电流环控制，一般会在 PWM 载波周期的过零点或者周期点位置更新 PWM 的寄存器，如图 4 所示，在 PWM 载波周期点采样，需等待一个 PWM 载波周期才更新 PWM 寄存器，存在 1 个 PWM 周期的延迟。

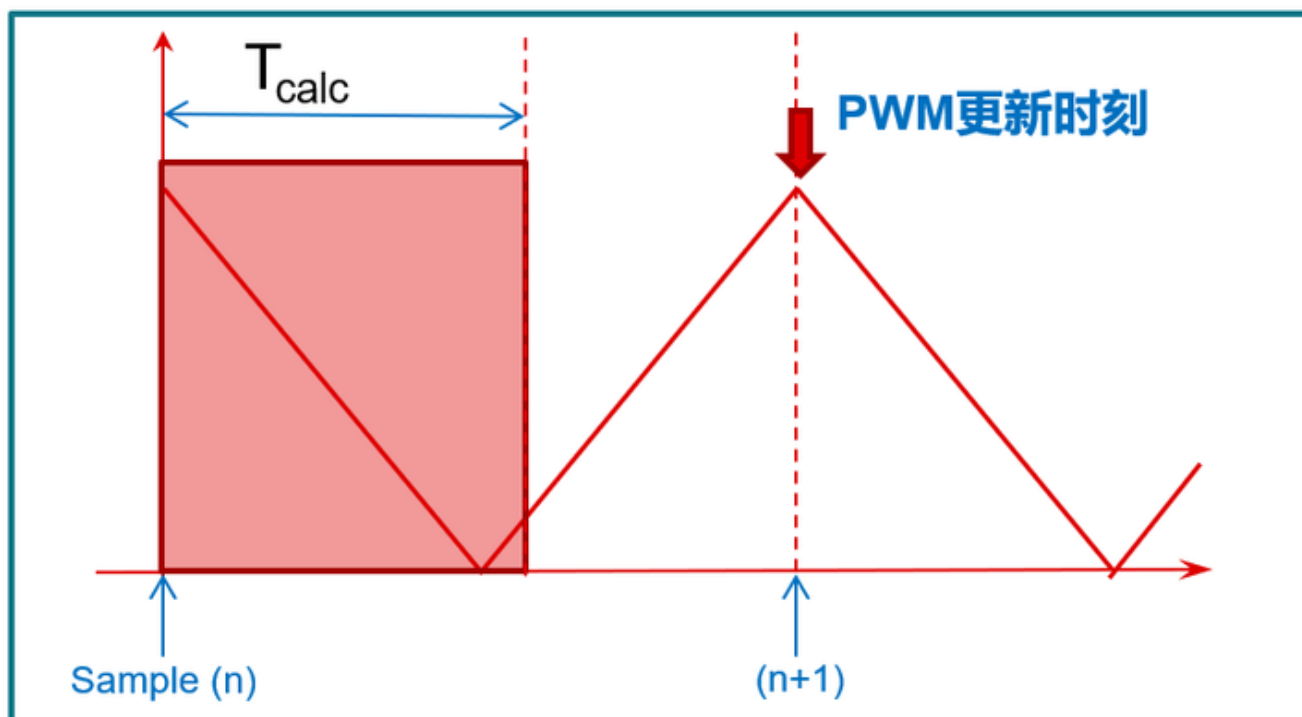


图 4. 传统电流环，PWM 占空比在周期或过零点处更新

而快速电流环配置了 ePWM 模块为立即装载模式，即 PWM 更新不是等到周期点或者过零点才更新，而是在运算完算法后立即更新 PWM 寄存器，如图 5 所示，减少系统延迟，显著提高电流环带宽。

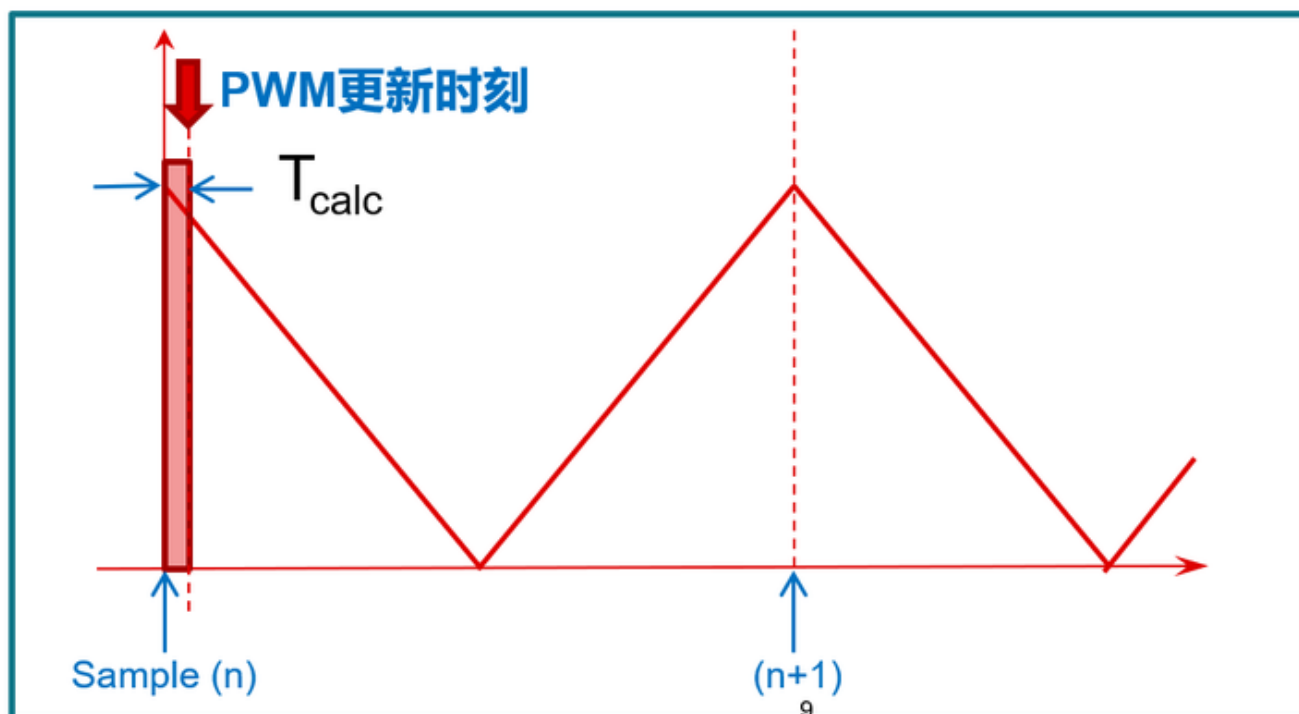


图 5. 快速电流环，PWM 寄存器立即更新模式

快速电流环要求从 ADC 采样到 PWM 更新的时间要尽可能的短，因此 MCU 需要足够的运算处理能力，F28P65 集成了多个 C28 和 CLA 协处理器的并行处理能力，以及 TMU 三角函数加速器等强大运算功能，能在 1us 内完成整个电流环的环路控制。

不过，快速电流环会牺牲一定的最大占空比，例如环路时间为 1us，PWM 载波周期为 100us，则占空比的最大范围为 99%。

因此，在实际应用中，应尽量减小环路时间，以提高最大占空比。对于 sdfm 的电流采样方式，如果 sdfm 本身的滤波时间过长，可能会影响最大占空比，此时可以通过提前采样触发时间来优化，以尽量满足最大占空比范围的要求。

快速电流环具体实现的例程，可以在安装 [Motor Control SDK](#) 后，在以下路径找到：

C:\ti\c2000\C2000Ware_MotorControl_SDK_5_04_00_00\solutions\tmdxiddk379df28p65x

绝对式编码器解码的实现

在伺服控制中，绝对式编码器和分频输出 PTO 功能通常由 CPLD 或 FPGA 实现。而 C2000 的可配置逻辑块 (CLB) 模块类似于 FPGA，是高度灵活的硬件逻辑单元，用于快速实现复杂数字逻辑功能，可支持 T - format、BiSS C、Endat、Hiperface 等多种编码器解码功能。

CLB 模块由多个逻辑块 (Tile) 组成，每个 Tile 包含计数器 (Counter)、状态机 (FSM)、查找表 (Look up table)、HLC (小型微控制器) 等子模块，可处理来自 ePWM、eCAP、XBAR 等外设的信号，并将输出信号传递给其他模块或通过 IO 管脚输出，且无需占用 CPU 资源。

CLB Structure

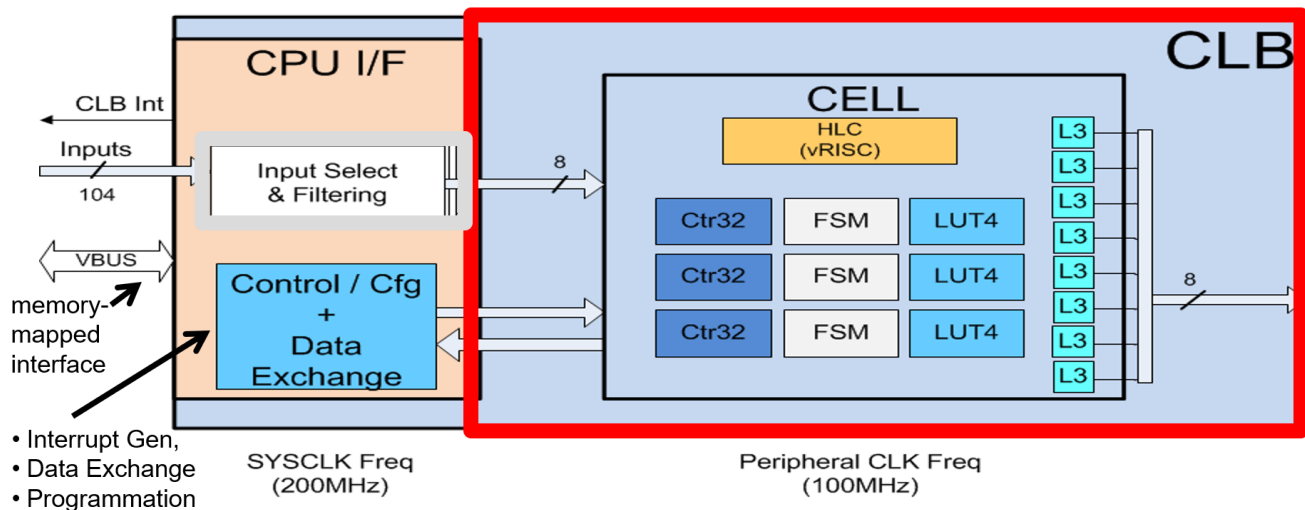


图 6. CLB 内部模块

以与 Tamagawa T - Format 绝对编码器通信为例，采用 CLB + SPI 模块实现，CLB 负责生成符合 T - Format 协议要求(2.5 MBPS)的 SPI 模块时钟信号(SPICLK)，并通过时钟信号对齐补偿电缆传输延迟，提高通讯精度和可靠性，同时自带 CRC 校验功能实时校验数据，减轻 CPU 负担；SPI 则是 T - Format 协议中数据传输的核心模块，负责与编码器进行实际串行通信数据收发。

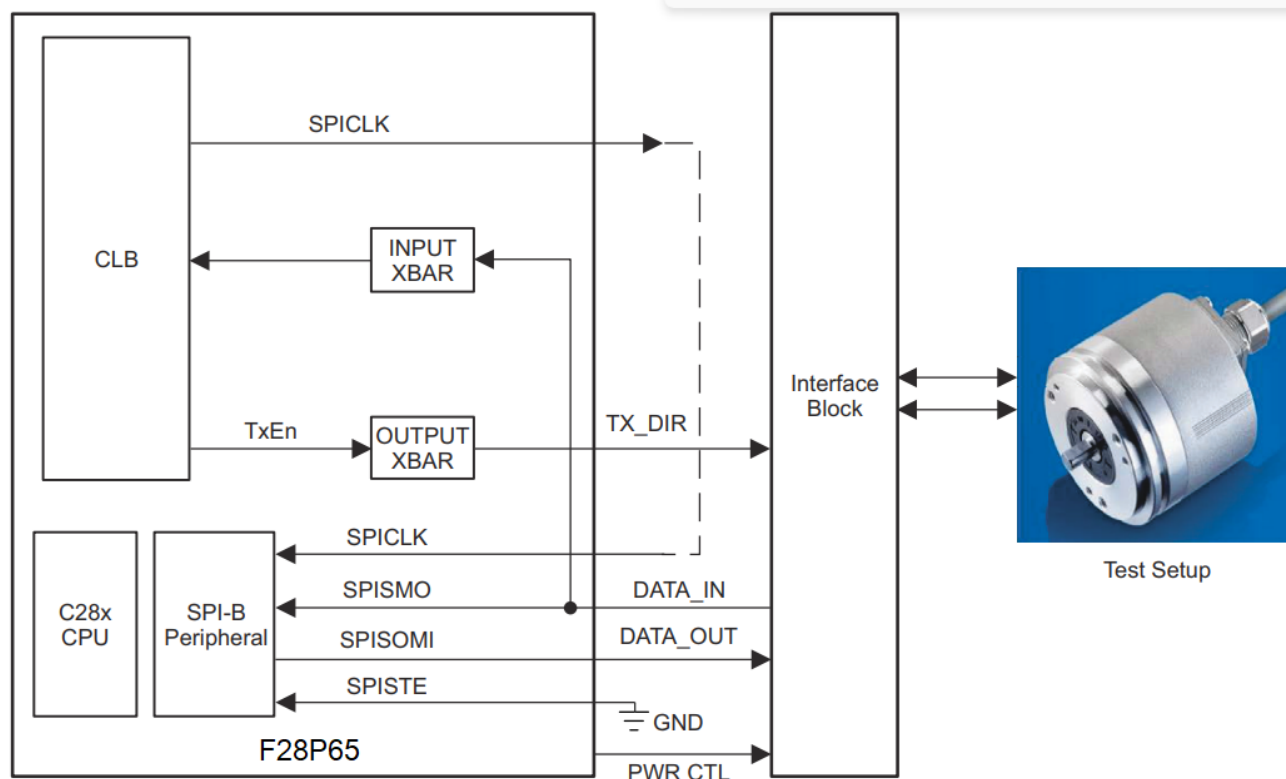


图 7. T-format 的实现框图

相关绝对式编码器的例程可以在安装 [Motor Control SDK](#) 后，在以下路径找到：

C:\ti\c2000\C2000Ware_MotorControl_SDK_5_04_00_00\solutions\boostxl_posmgr

EtherCat 通讯

EtherCat 是一种基于以太网的现场总线系统，由 Beckhoff® Automation 公司发明，并在 IEC 61158 中标准化。F28p65 器件集成 Beckhoff EtherCat 硬件 IP 内核，支持两个 MII 端口连接 EtherCat PHY。

微控制器 MCU 负责处理 EtherCat 从站协议栈代码和应用程序运行。数据链路层由 EtherCat IP 实现，MCU 和 EtherCat IP 的通讯通过 16 位异步总线接口 PDI 实现。F28P65 的 EtherCat 从站节点支持 EtherCat 分布式时钟模式用于网络同步和锁存，具备标准 I2C EEPROM 接口，其 EtherCat 子系统拥有 32 个通用输入和 32 个通用输出，可时控选择性驱动或检测 GPIO，相比分立元件更具优势，能在特定 EtherCat 事件（如帧开始、同步事件或闪存事件）上捕获输入事件，通用输出也可根据帧结束、同步事件或看门狗触发起设置，且将同步和锁存事件集成到器件外设中，实现同步和事件时间戳。

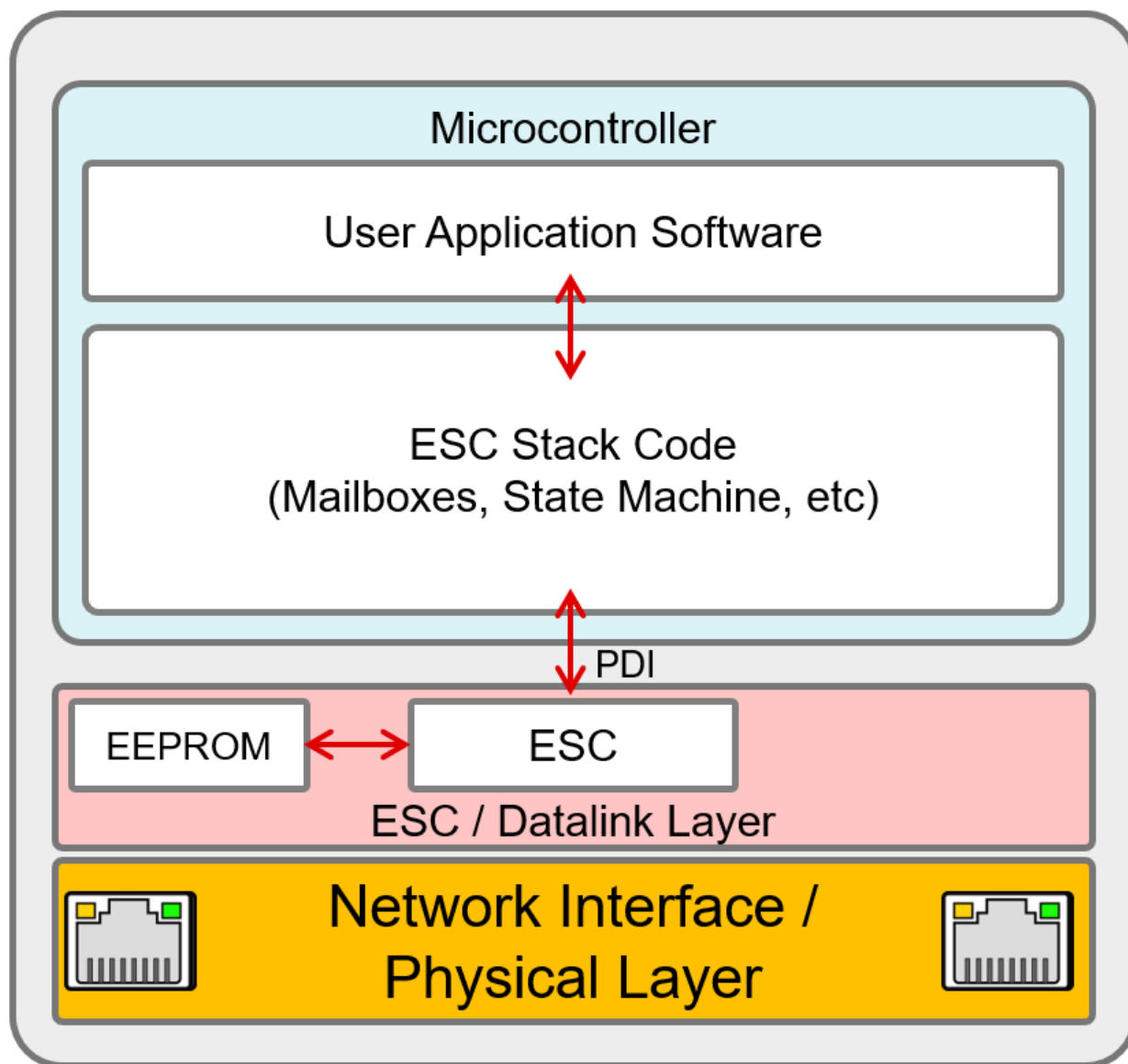


图 8. EtherCat 从站节点框图

EtherCat IP 可分配给 CPU1 或 CPU2，根据需求灵活选择哪个 CPU 运行 EtherCat 应用程序。

相关 EtherCat 例程可以在安装 [C2000ware](#) 后，在以下路径找到：

C:\ti\c2000\C2000Ware_5_04_00_00\libraries\communications\EtherCat \f28p65x

参考资料：

[BiSS-C Absolute Encoder, Master-Interface Reference Design for C2000™ MCUs \(Rev. A\)](#)

[Tamagawa T-Format Absolute-Encoder Master Interface Ref Design for C2000 MCUs \(Rev. E\)](#)

[Fast Current Loop performance: better than we thought, and measurable in your own \(Rev. A\)](#)

[EtherCat® Interface for High-Performance C2000 MCU User's Guide](#)

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、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。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

版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATA SHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you will fully indemnify TI and its representatives against, any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to [TI's Terms of Sale](#) or other applicable terms available either on [ti.com](https://www.ti.com) or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may have proposed.

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2025, Texas Instruments Incorporated