

Design Guide: TIDA-010992

采用单个 MCU 实现人形机器人手部的集中式六轴电机控制参考设计



说明

此参考设计采用单个 TI C2000™ F28P65 微控制器，适用于具有六轴控制功能的工业以太网电机驱动器。该设计采用小于 42cm² 的印刷电路板 (PCB) 来驱动 6 自由度 (DoF) 的人形机器人手。该设计展现了一种外形小巧的集成式平台。该集成式平台利用六个具有集成电流检测功能和 FET 的 DRV8376 三相电机驱动器作为功率级。该平台集成了实时电机控制和工业以太网通信功能，采用 F28P65 器件，该器件配备两个 32 位 C28x 数字信号处理器 (DSP) 中央处理器 (CPU) 和一个控制律加速器 (CLA) CPU，均在 200MHz 下运行。

资源

TIDA-010992 设计文件夹
 TMS320F28P650DK、TPS650352-Q1 产品文件夹
 DRV8376、DP83826A、LMK3C0105 产品文件夹
 C2000WARE-MOTORCONTROL-SDK 工具文件夹

特性

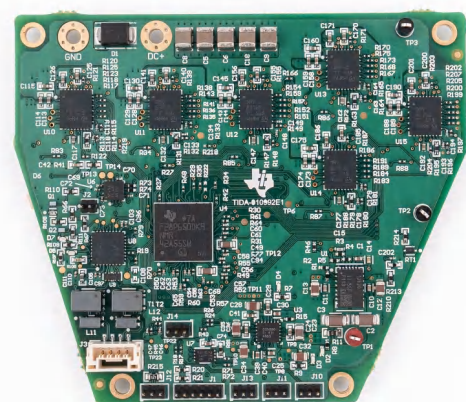
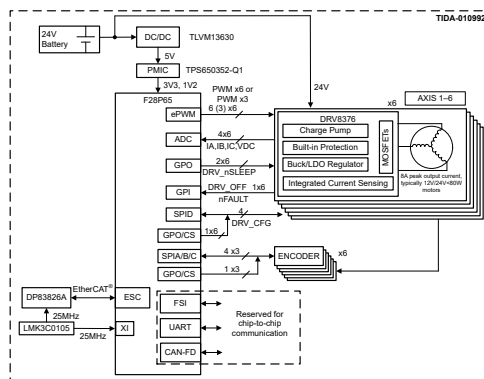
- 采用高度集成电路 (IC) 的紧凑型设计使得 PCB 尺寸小于 42cm²
- 单个实时微控制器 (MCU) 配置了三个 CPU，可控制六个电流、速度和位置独立的闭环磁场定向控制 (FOC)
- 具有集成式低侧电流检测放大器与集成式场效应晶体管 (FET) 的 DRV8376 具有高效率和小外形尺寸
- 针对芯片间通信的灵活通信接口选项，例如快速串行接口 (FSI)、通用异步接收器-发送器 (UART) 和具有灵活数据速率 (CAN-FD) 的控制器局域网

应用

- 人形机器人电机驱动器
- 机器人通信模块



请咨询我司 TI E2E™ 支持专家



1 系统说明

此参考设计展示了 TI C2000™ MCU-F28P65 器件可实现搭载工业以太网通信的六轴实时电机驱动控制。

本设计的控制部分采用封装尺寸仅为 9mm × 9mm BGA 的 F28P65 MCU，搭载一颗主频 200MHz 的 C28x 内核，可实现双轴闭环磁场定向控制 (FOC)，同时运行 EtherCAT 应用程序。同时，该 F28P65 MCU 的另一个 C28x 内核用于执行 4 轴闭环 FOC 电机控制。单个 MCU F28P65 使用高分辨率 epwm 模块生成 36 个互补 PWM 信号，并通过 MCU 中集成的 18 通道模数转换器 (ADC) 测量 6 个电机的三相电流。该参考设计在每个电机上采用一个带有串行外设接口 (SPI) 的数字编码器来反馈电机转子的位置数据。

功率级包括六个具有集成电流检测功能和集成场效应晶体管 (FET) 的 70V、4.5A 峰值三相电机驱动器 DRV8376，该驱动器经优化具有极低的栅极环路和低功耗环路阻抗。400mΩ (高侧和低侧) 的低导通状态电阻 RDS (ON)，可实现大功率驱动能力。使用集成电流检测功能来检测相电流，无需外部分流电阻器。DRV8376 还集成了多种保护特性，包括电源欠压锁定 (UVLO)、电荷泵欠压 (CPUV)、过流保护 (OCP)、过热警告和关断 (OTW/OTSD)、故障状态指示 (nFAULT) 和通过 SPI 进行故障诊断。该控制方案具有高度可配置性，可通过硬件引脚或寄存器设置进行配置，涵盖范围从电机电流限制行为到故障响应。

此参考设计展示了独特的多轴电机控制方案，用于实现 6 个独立的 FOC 控制环路，控制周期时间为 16kHz，PWM 开关频率为 64kHz，以降低电机纹波电流。位置环路可由运动控制器通过 EtherCAT 连接进行控制。

1.1 术语

表 1-1. 术语

SOC	片上系统
FOC	场定向控制
MCU	微编程控制单元
MIPS	每秒百万条指令
CLA	控制律加速器
CLB	可配置逻辑块
BLDC	无刷直流
IGBT	绝缘栅双极晶体管
GaN	氮化镓
SiC	碳化硅
DRAM	动态随机存取存储器
SRAM	静态随机存取存储器
RPM	每分钟转数
EtherCAT	用于控制自动化技术的以太网
EPWM	增强型脉宽调制器
CMP	事件比较器
CAP	事件捕获
ISR	中断服务例程
EPWM	增强型脉宽调制器
GPIO	通用输入输出
FIFO	先入先出
SPI	串行外设接口

1.2 主要系统和接口规格

表 1-2. 主要系统规格

参数	典型值	注释
直流输入电压	24V (12 V 至 36V)	绝对最大值为 36V
最大三相持续输出电流	2A _{RMS}	DRV8376 的输出电流能力峰值为 4.5A
PWM 开关频率	64kHz	DRV8376 能够驱动 100kHz PWM
PWM 死区	100ns	< 200ns
电流检测精度	+/- 5%	基于 DRV8376 数据表
FOC 环路控制频率	16kHz	对于所有 6 个轴
PCB 层堆叠	8 层, 1 盎司铜	
PCB 大小	6 × 7 cm	
编码器	15 位内核分辨率	SPI
电机规格	12mm 直径, 3000rpm, 0.4Arms , 2.8mNm, 1:16 齿轮箱	反电动势因子: 0.55V/krpm, 线路电阻 11.15Ω, 线路电感 220μH, 惯性 0.194g/cm ²

表 1-3. 接口规格

引脚	信号	功能	
J1-1	GND	JTAG	
J1-2	JTAG_TMS		
J1-3	JTAG_TDI		
J1-4	JTAG_TCK		
J1-5	JTAG_TDO		
J1-6	3V3		
J2	跳线开启 (SCI/等待模式) 跳线关闭 (闪存模式)	引导模式	
J3-1	H0_TD_N	PHY0 MDI	
J3-2	H0_TD_P		
J3-3	H0_RD_N		
J3-4	H0_RD_P		
J4-1、J4-2	U	用于 axis1 的电机连接器。 (J5、J6、J7、J8、J9 具有相同的引脚映射)	
J4-3、J4-4	V		
J4-5、J4-6	W		
J4-7	3V3		
J4-8	GND		
J4-9	SPI_MISO		
J4-10	SPI_MOSI		
J4-11	SPI_SCK		
J4-12	SPI_CS		
J10-1	FSI_TXA_CLK		FSI TX
J10-2	FSI_TXA_D0		
J10-3	GND		
J11-1	FSI_RXA_CLK	FSI RX	
J11-2	FSI_RXA_D0		
J11-3	GND		
J12-1	CAN+	CAN-FD	
J12-2	CAN-		
J12-3	GND		
J13-1	UART_TX	UART	
J13-2	UART_RX		
J13-3	GND		
J14-1	DRV_OFF_PMIC	DRV_OFF 源选择	
J14-2	DRV_OFF		
J14-3	DRV_OFF_MCU		

2 系统概述

2.1 方框图

图 2-1 展示了虚线框中所示的 TIDA-010992 系统方框图。

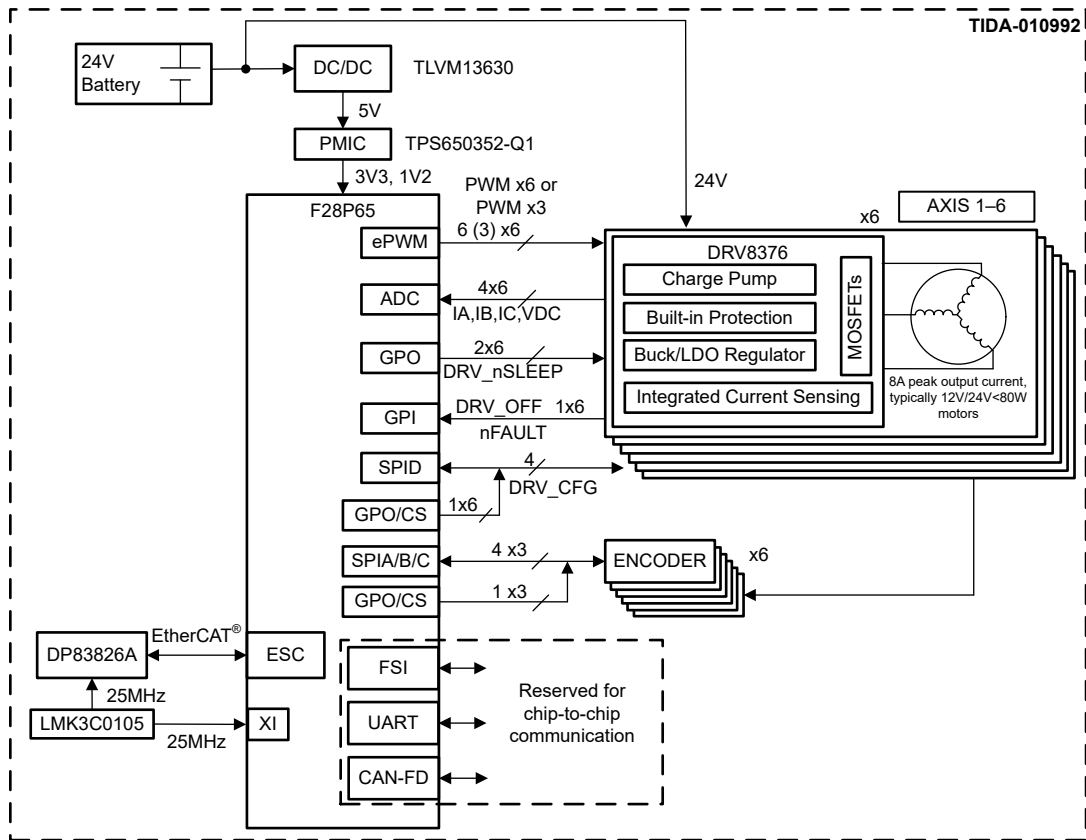


图 2-1. TIDA-010992 的系统方框图

2.2 设计注意事项

设计目标是为 6 自由度人形机器人手部实现一体化多轴伺服控制。此设计可以在 3V 至 30V 直流，额定电压 24V 的单个直流输入电压和输出三相正弦波下运行，从而驱动六个交流电机。该设计含多个子系统，包括：

- 电源树 - 宽输入电压范围 DC/DC 模块 (TLVM13630) 生成 5V 电源轨，为电源管理集成电路 (PMIC) 供电；该 PMIC 可输出并监控 3.3V 和 1.2V 电源轨。3.3V 电源轨为 EEPROM、以太网 PHY、MCU IO 和其他模拟器件供电。1.2V 电源轨用于 F28P65 内核电压。
- 电源逆变器 - 每个轴均采用 70V、4.5A 三相集成式 FET BLDC 电机驱动器 (DRV8376)，具有短路、欠压和过热保护功能。该控制方案可通过 SPI 接口进行寄存器配置，具有高度可配置性，涵盖从电机电流限制行为到故障响应的各项参数。使用集成电流检测功能来检测三相电流，无需外部检测电阻，然后将电流数据反馈到 MCU 内的三个 ADC 模块以保持同步检测。
- 电机控制与通信采用 200MHz 双核 C28x MCU (F28P65)，具备实时控制、功能安全及信息安全特性。一个 200MHz C28 内核可对 2 轴电机控制和 EtherCAT 应用执行闭环磁场定向控制 (FOC)，另一个 200MHz C28 内核可为 4 轴电机控制运行 4 个 FOC 环路。此参考设计为每个电机采用一个带 SPI 通信的数字编码器来反馈电机转子的位置数据。

2.3 重点产品

2.3.1 TMS320F28P65x (F28P65x)

TMS320F28P65x (F28P65x) 是 C2000 实时微控制器系列中的一款可扩展、超低延迟器件，旨在提高电力电子设备的效率，包括但不限于：高功率密度、高开关频率，并支持使用 IGBT、GaN 和 SiC 技术。功能方框图如图 2-2 所示。表 2-1 总结了主要特性和优势。

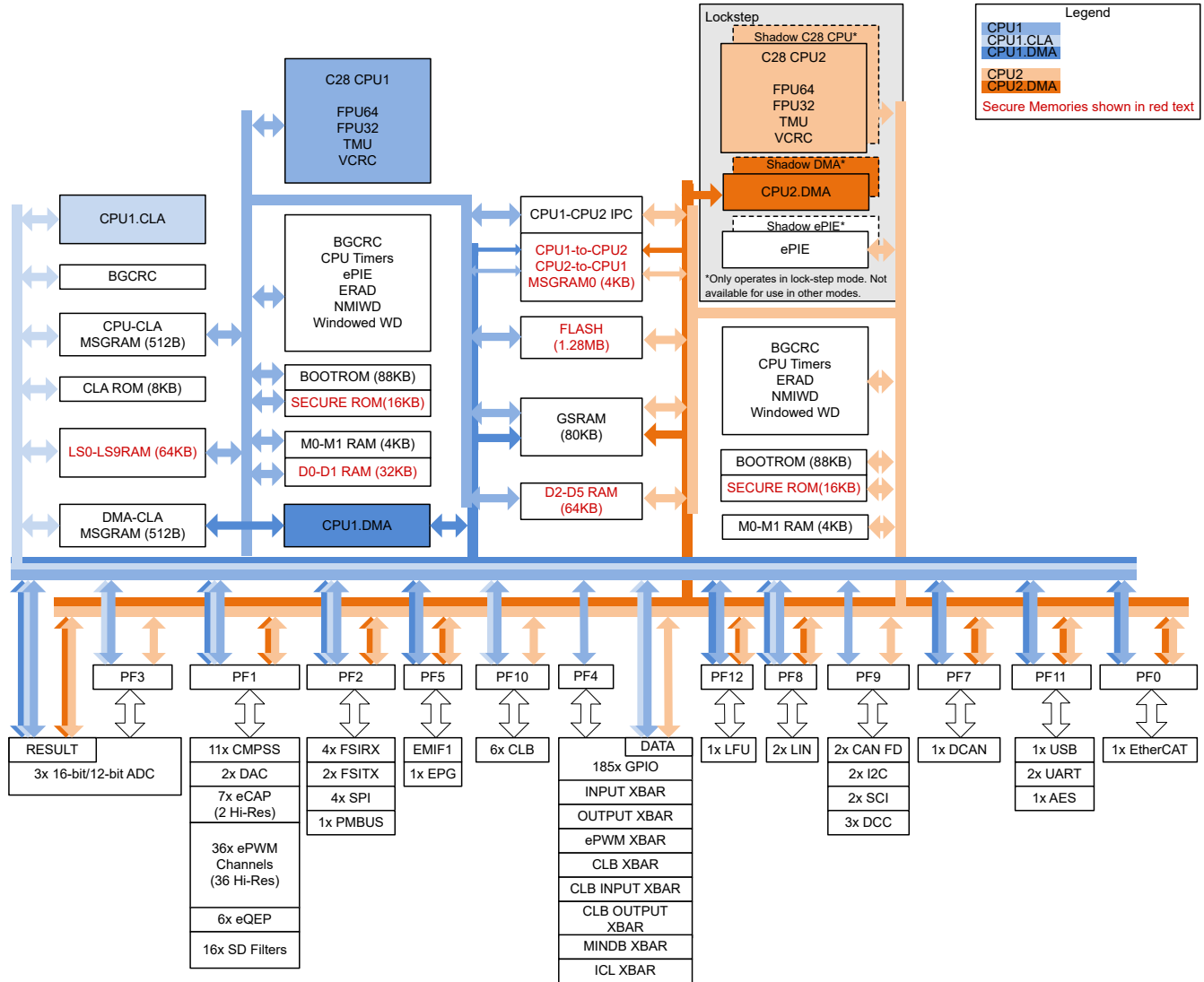


图 2-2. F28P65 功能框图

表 2-1. F28P65 的特性与优势

特性	优势
双 200MIPS 32 位 C28x DSP 内核 + 200MIPS CLA 内核，具有 1.28MB 片上闪存和 248KB RAM	通过小型封装和集成，提供高 CPU 性能，以满足复杂的实时处理需求。有利于实现对小尺寸设计。
各个内核上的三角函数加速器 (TMU)	加速用于电机控制的三角函数
3 × 16 位 ADC，36 × 高分辨率 PWM (18 通道)，7 × eCAP，6 × eQEP，16 通道 SDFM	数量足够多的外设，用于低延电机迟控制环路
EtherCAT 从站设备控制器，4 × 高速 SPI 端口，2 × CAN-FD，6 × CLB 模块，FSI	丰富的通信和连接选项，可支持工业以太网、位置反馈接口和串行通信接口。

表 2-1. F28P65 的特性与优势 (续)

特性	优势
C28x CPU2 锁步核, 存储器上电自检 (MPOST), 硬件内建自测试 (HWBIST), 高级加密标准加速器, JTAG/零引脚启动/双区安全机制。	通过 SIL2 认证, 具有自诊断库, 可实现功能安全。可通过加密加速和安全启动实现安全的系统设计。

2.3.2 DRV8376

DRV8376 器件是一款集成式 $400\text{m}\Omega$ (高侧和低侧 MOSFET 的导通状态电阻之和) 驱动器, 适用于三相电机驱动应用。该器件通过集成三个半桥 MOSFET、栅极驱动器、电荷泵、电流检测放大器以及用于外部负载的线性稳压器, 降低了系统元件数量、成本和复杂性, 如图 2-3 所示。标准的串行外设接口 (SPI) 提供了一种简单的方法, 可通过外部控制器配置各种器件设置和读取故障诊断信息。或者, 硬件接口 (H/W) 选项允许通过固定外部电阻器来配置常用的设置。该架构使用内部状态机来防止发生短路事件, 并防止内部功率 MOSFET 发生 dv/dt 寄生导通。DRV8376 器件集成了三个双向电流检测放大器, 旨在使用内置电流检测来监控流过每个低侧 MOSFET 的电流。可通过 SPI 或硬件接口调整放大器的增益设置。

除了高度的器件集成之外, DRV8376 器件还提供广泛的集成保护功能。这些功能包括电源欠压锁定 (UVLO)、电荷泵欠压锁定 (CPUV)、过流保护 (OCP)、AVDD 和 GVDD 欠压锁定 (AVDD_UV、GVDD_UV) 和过热关断 (OTW 和 OTSD)。故障事件由 nFAULT 引脚指示, 可在 SPI 器件版本的 SPI 寄存器中获得详细信息。DRV8376 器件采用 VQFN 表面贴装封装。VQFN 封装尺寸为 $6\text{mm} \times 5\text{mm}$ 。表 2-2 中汇总了关键特性。

表 2-2. DRV8376 的特性与优势

特性	优势
集成式三相 70V FET 电机驱动器，400mΩ 器件，支持 4.5 A 峰值运行。	支持高达 48VDC 的三相逆变器，相电流达 1ARMS，开关频率高达 100kHz，适用于低电感及高速驱动应用。
主动消磁和经优化的引脚排列。	最小化封装寄生元件可实现快速开关，从而降低开关损耗。简单的 PCB 布局。
低可闻噪声，超低死区时间 < 200ns，传播延迟 < 100ns。	每个半桥均可实现超低死区，从而大幅降低三相逆变器应用中的开关损耗并消除相电压中的死区时间失真。出色的电机控制性能。
6x 或 3x PWM 控制接口，集成电流感应，用于读取/写入 DRV 寄存器的 SPI 接口	不需要外部电流检测电阻器。可通过 SPI 接口实现灵活的器件配置。减小 PCB 尺寸和 BOM。
驱动关断模式和低功耗睡眠模式	启用器件的关断模式以输出所有引脚的 Hi-Z。在 VVM=24V 时，启用 1.5uA 的低功耗睡眠模式。
集成了保护功能：UVLO、CPUV、OCP、OTW、OTSD	针对外部保护电路减少了 BOM。

2.3.3 DP83826A

DP83826Ax 能够提供很低的确定性延迟和低功耗，并支持 10BASE-T_e、100BASE-TX 以太网协议，可以满足实时工业以太网系统中的严格要求。该器件包含可实现快速链接的硬件自举、快速链路丢失检测模式以及用于对系统上的其他模块进行时钟同步的专用参考 CLKOUT。两种可配置模式为：使用通用以太网引脚排列的 BASIC 标准以太网模式，以及支持标准以太网模式和多个工业以太网现场总线应用（通过附加功能和硬件自举配置）的 ENHANCED 以太网模式。图 2-4 展示了功能方框图，表 2-3 则展示了主要特性和优势。

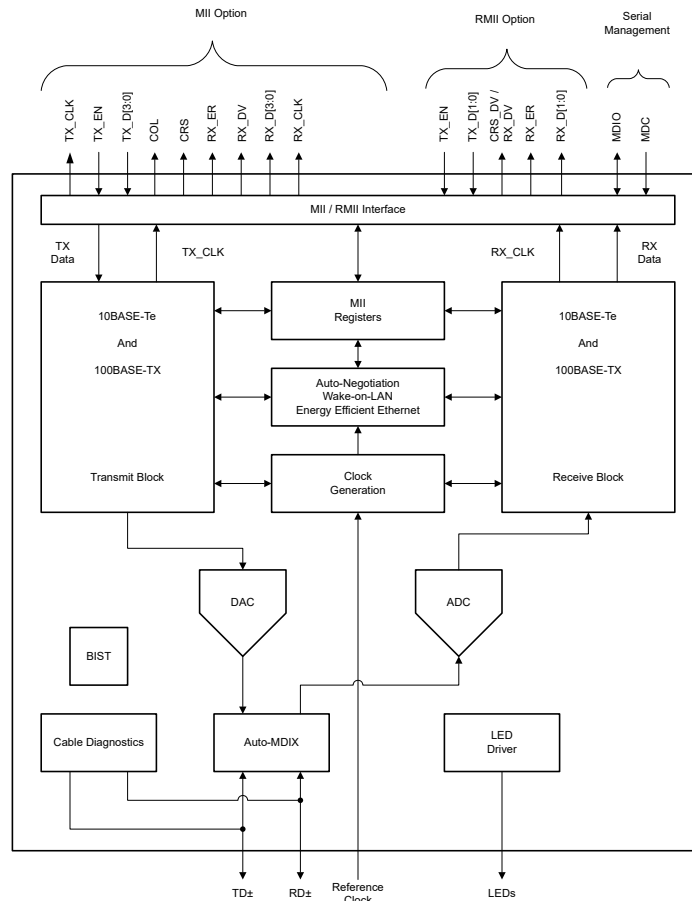


图 2-4. DP83826A 功能框图

表 2-3. DP83826A 的特性与优势

特性	优势
较低的确定性延迟	满足实时工业以太网系统（如 EtherCAT）的严格要求。

表 2-3. DP83826A 的特性与优势 (续)

特性	优势
符合 IEEE 802.3 标准的增强型 EMC 集成电路	实现稳健且符合 EMC 标准的系统设计
低功耗, 可编程节能模式	降低对系统功耗的要求
单个器件中具有两种可选引脚模式	无需任何软件即可提供灵活的硬件自举, 便于配置。
更大的工作温度范围	支持更高的环境温度, 例如人形机器人应用

3 系统设计原理

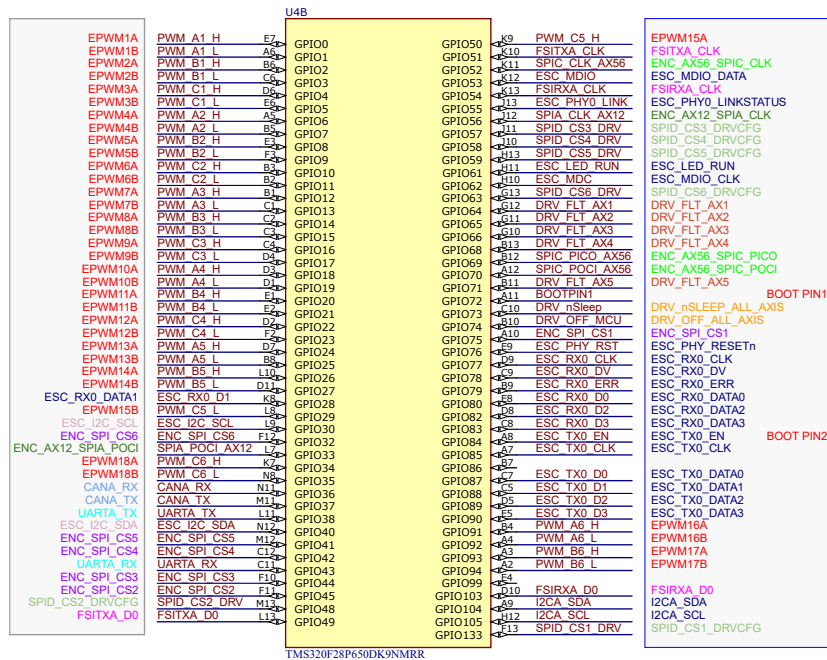
本节提供该参考设计的设计指南。

3.1 F28P65 电机控制和通信接口

该设计利用带有锁步功能外加 CLA 的 F28P65 双核芯片，并搭配采用 NMR 封装 (9 × 9mm) 的 EtherCAT 总线，作为电机控制与通信控制器。电机控制接口包括：

- 增强型脉冲宽调制器 (ePWM) - PWM 外设由具有独立资源的较小单通道子模块构建而成，并且可以根据需要一起运行以形成系统。该设计采用 ePWM 1 至 18 通道，用于 6 轴的三相电机驱动器。每个 ePWM 子模块有两个通道 A 和 B，用于生成两个具有可配置死区的互补 PWM 信号。对于三相电机控制，每个轴总共实现 6 × PWM。所有这些脉冲宽度调制子模块共用 200MHz 的同一时基时钟，采用增减计数模式，并且彼此之间保持同步。每个 ePWM 模块都有一个同步输入和一个输出，可以将其配置为链接到多个源和事件（如 EtherCAT sync0 脉冲和 FSI RXTRIG），从而闭合通信和 PWM 之间的环路。在该参考设计中，轴 1 的 EPWM1 由 EtherCAT sync0 脉冲触发，其他所有 EPWMx 模块的同步输入均由 EPWM1 的同步输出触发。
- 模数转换器 (ADC) - 该 ADC 外设为逐次逼近 (SAR) 型 ADC，可选择 12 位或 16 位分辨率。每个 ADC 模块都包含一个采样保持 (S/H) 电路，可对电机的三相电流进行同步采样。ADC 基准电压由外部高精度电压基准芯片 REF6230 提供。每个轴的相应 ADC 通道起始采样时间由其自己的 ADC 转换启动 (SOCA) 触发，而此 SOCA 事件分别由每个轴 EPWM 模块的比较事件 C 触发。用于 FOC 计算的中断信号会在 ADC SOC 完成数据转换后自动生成。
- EtherCAT 从属器件控制器 (ESC) - 此 F28P65 MCU 上的 ESC 提供多达 2 个媒体独立接口 (MII) 端口来连接到 EtherCAT PHY。过程数据接口采用 16 位异步接口。ESC 还提供了一个可在内部或外部使用的 64 位分布式时钟。可利用 SYNC0/1 与 LATCH0/1 输出信号实现 GPIO 同步，支持从任意 GPIO 接入输入信号，同时为器件内部事件提供多路复用配置选项，并支持时间戳记录功能。ESC 具有 8 个现场总线存储器管理单元 (FMMU)，可支持 RD/、WR/、RDWR 的所有本机类型以及位寻址和字节寻址的内置特性。提供了一个 I²C EEPROM 接口来存储 MAC 地址等信息。初始化阶段将 ESC 访问权限分配至 CPU1 子系统。
- 双核电机控制设计 - 此参考设计利用双 C28x DSP 内核来执行 6 轴电机控制和工业通信，CPU1 处理轴 1 和轴 2 控制及 EtherCAT 应用，CPU2 处理轴 3 至 6 电机控制。需要按如下方式为两个 CPU 分配存储器和外设：
- 闪存组 0 至闪存组 3 (0x80000 - 0xFFFFF) 归 CPU1 所有，而闪存组 4 (0x100000 - 0x11FFFF) 归 CPU2 所有
- 出于数据目的，将 0x00C000 至 0x020000 中的 DRAM1-4 分配给 CPU1，出于代码目的，将 0x008000 至 0x022000 中的 GSRAM0-2 分配给 CPU1。DRAM5 来自 0x020000 且长度为 8KB，GSRAM3-4 来自 0x016000 且长度为 16KB，都分配给 CPU2。
- EPWM1-6 由 CPU1 控制，EPWM7-18 由 CPU2 控制
- ADCA 和 C 由 CPU1 控制，ADCB 由 CPU2 控制
- SPIA 和 D 由 CPU1 (对于轴 1-2 编码器接口) 和 DRV 配置，SPIB 和 C 由 CPU2 (对于轴 3-6 编码器接口) 控制
- EtherCAT 由 CPU1 控制
- CLB1 由 CPU1 控制以触发 SPIA 数据传输，CLB2 和 CLB5 由 CPU2 控制以触发 SPIB 和 C 数据传输。

图 3-1 展示了 TIDA-010992 的电机控制和通信接口，图 3-2 展示了轴 1 电机控制外设示例。



F28P65x Pin_IO

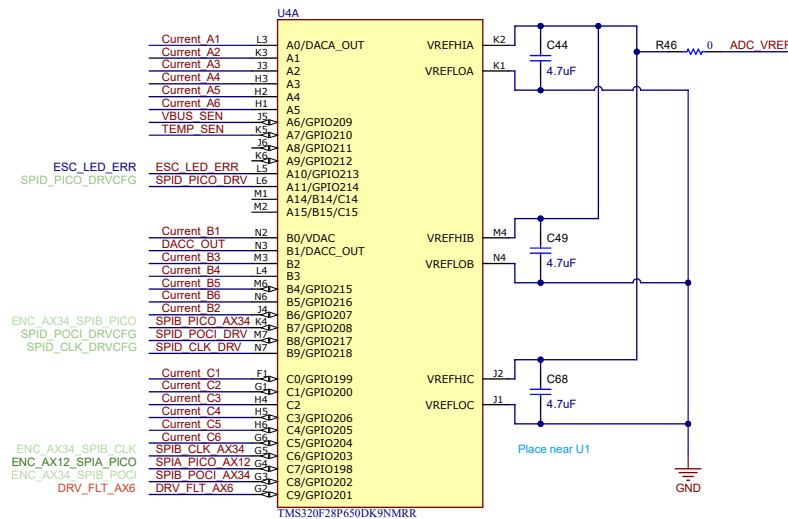


图 3-1. F28P65 电机控制和 TIDA-010992 的通信接口

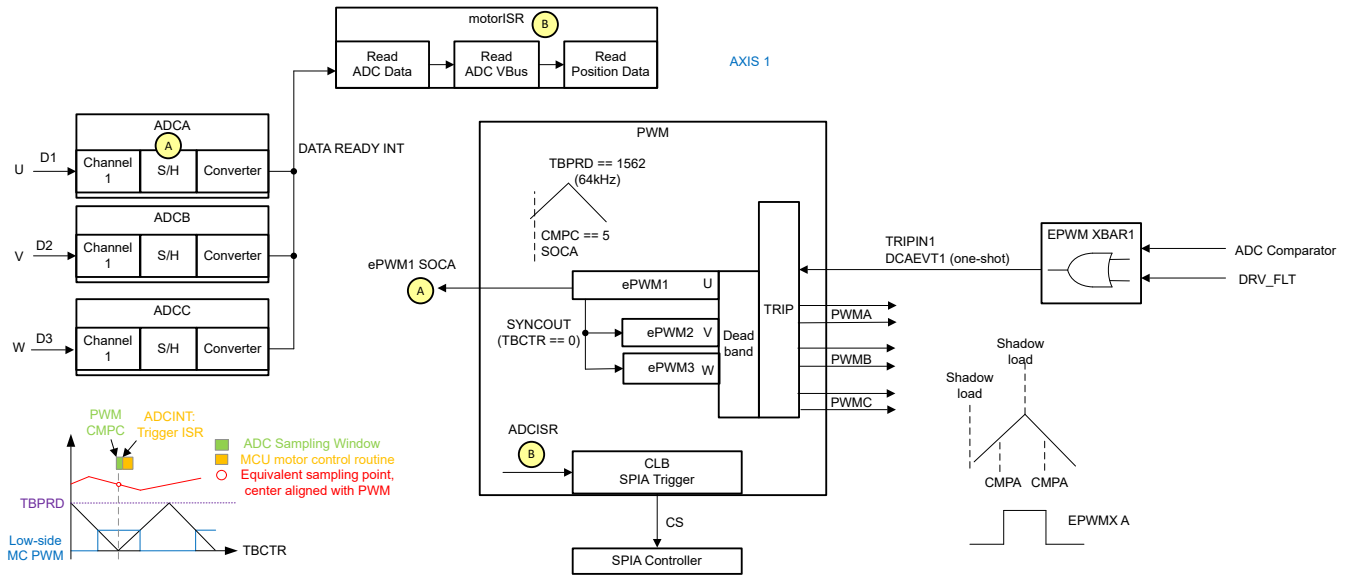


图 3-2. TIDA-010992 的轴 1 电机控制外设示例

3.2 多轴电机控制方案

三路 ADC 模块和三路 SPI 控制器为所有电机轴共享的外设资源，因此必须做好时序规划，防止各轴的电流采样、位置采样在时间上相互冲突。因此，本参考设计采用了特定的控制方案。图 3-3 展示了电机控制的所有轴 FOC 环路的时序方案。触发每个轴的 ADC 采样的 SOCA 事件时序会交错，以确保在一次期间仅对一个轴电流进行采样。此外，位置数据也会在 ADC 中断服务例程中同时请求。采用此控制方案时，所有六轴 FOC 环路均在 16kHz 的特定周期时间内计算，没有任何重叠。而 PWM 开关频率设置为 64kHz 以降低电机的纹波电流。

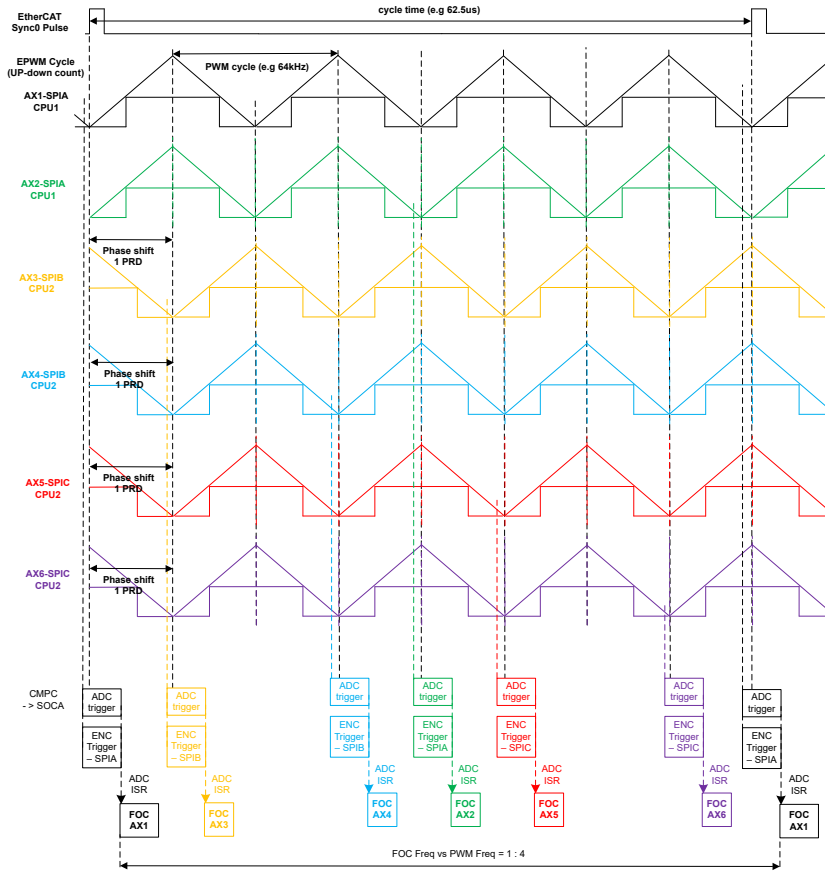


图 3-3. 6 轴电机控制 FOC 环路时序方案

3.3 直流链路去耦

24V 直流输入额定电压由 11 个 10 μF 陶瓷电容器进行缓冲以获得总计 110 μF 的直流总线电容。还采用了瞬态电压抑制器 (TVS) 二极管来保护输入的过压。PCB 采用一个完整的实心接地多边形来提供更好的热性能。图 3-4 显示了直流链路去耦的原理图。

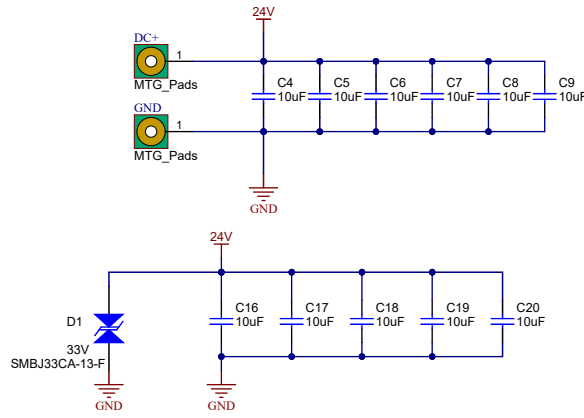


图 3-4. 直流链路去耦原理图

3.4 具有 DRV8376 的三相逆变器

此设计采用六个具有短路、欠压和过热保护功能的 70V、4.5A 三相集成式 FET BLDC 电机驱动器 (DRV8376)。每个轴的三相电流使用集成电流检测功能进行检测，无需外部检测电阻器，然后将电流数据反馈到 MCU 内的三个 ADC 模块以确保同步检测。可通过 SPI 寄存器配置实现高度灵活的 DRV 控制方案，配置范围涵盖电机限流特性至故障响应机制。由于高集成度以及仅需要少量额外的无源元件，PCB 空间进一步减小。图 3-5 展示了单轴逆变器功率级的原理图。

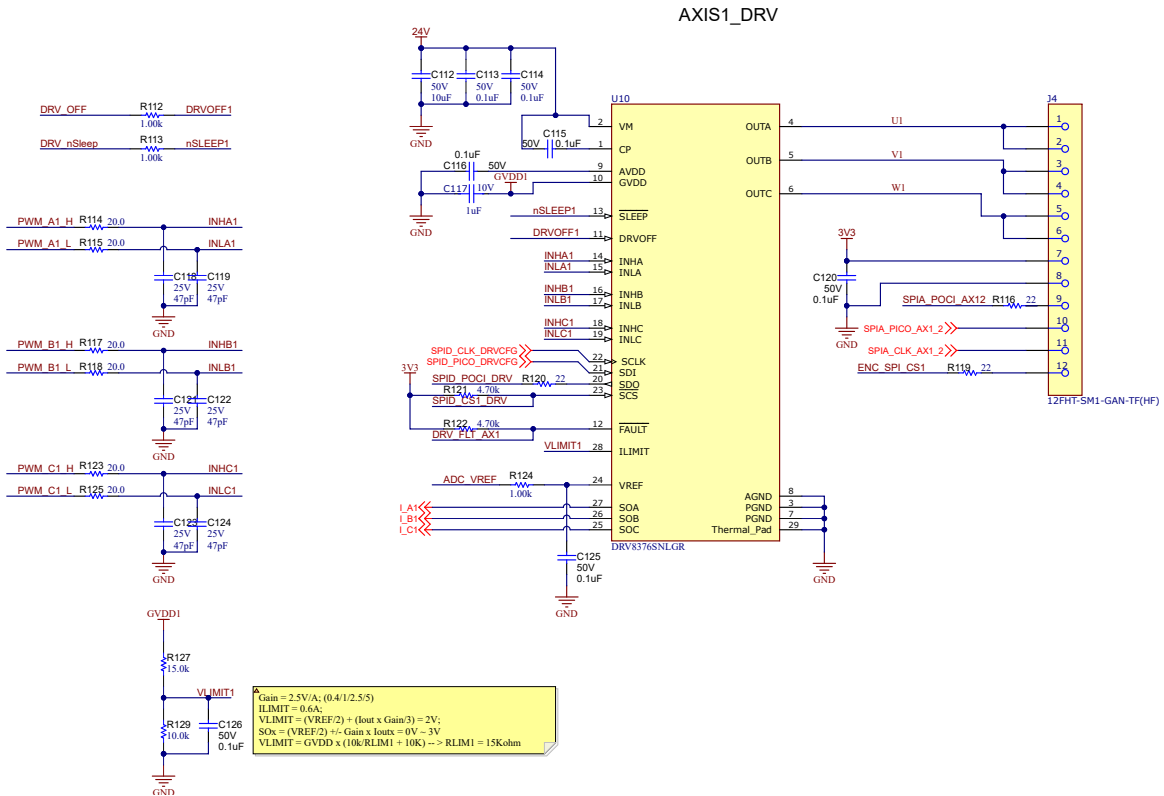


图 3-5. 轴 1 的三相逆变器功率级原理图

24V 直流链路电压连接到 DRV8376 VM 引脚并以接地 (PGND/AGND) 引脚为基准。为最大限度降低环路电感，将本地陶瓷旁路电容器 C112、C113、C114 并联放置在 VM 和 PGND 引脚之间。

DRV8376 集成式栅极驱动器由内部电荷泵供电。按照数据表中的建议，0.1 μ F 陶瓷旁路电容器 (C115) 靠近 CP 引脚和 VM 引脚放置。

1uF 陶瓷旁路电容器 (C117) 放置在靠近 GVDD 引脚的位置，该引脚是 5V 内部稳压器输出。

高侧和低侧开关互补 PWM 信号通过 R114、C118、R115、C119、R117、C121、R118、C122、R123、C123、R125 和 C124 进行低通滤波，以便抑制高频脉冲噪声，并通过大约 160MHz 的截止频率和大约 1ns 的传播时间避免误开关。OUT 引脚通过电机连接器 J4 连接到电机三相 A、B 和 C。

SCLK、SDI、SDO 和 nSCS 引脚连接到 MCU 的 SPID 控制器，用于通过 SPI 接口回读参数配置和故障状态。nSCS 和 SDO 引脚由 4.7kΩ 电阻器 R121 和 R126 上拉。

DRVOFF 引脚通过 1kΩ 电阻器 R112 连接到 MCU GPIO74。当该引脚拉至高电平时，六个 MOSFET 将关断，从而使所有输出处于高阻态。

nSLEEP 引脚通过 1kΩ 电阻器 R113 连接到 MCU GPIO73。当该引脚为逻辑低电平时，DRV 器件进入低功耗睡眠模式。可以使用一个 20μs 至 40μs 的低电平脉冲来复位故障条件，而不进入睡眠模式。

VREF 引脚通过 1kΩ 电阻器 R124 连接至高精度电压基准 REF6230 的输出，以提供相电流反馈。引脚 SOA、SOB 和 SOC 连接到三个具有低通滤波器 R48、R49、R50、C50、C56 和 C62 的 ADC 模块。截止频率约为 2.3MHz，传播时间约为 68ns。

ILIMIT 引脚设置为 2V，通过电阻分压器 R127 和 R129 设置。因此，根据 [方程式 1](#)，输出电流限制为 0.6A，根据 [方程式 2](#)，SOA/B/C 输出电压范围设置为 0V 至 3V。

$$V_{LIMIT} = \frac{V_{REF}}{2} + \frac{I_{LIMIT} \times GAIN}{3}, \text{ with } V_{REF} = 3V \text{ and } Gain = 2.5V/A \quad (1)$$

$$SOX = \frac{V_{REF}}{2} \pm (GAIN \times I_{LIMIT}), \text{ with } V_{REF} = 3V, \text{ Gain} = 2.5V/A, \text{ } I_{LIMIT} = 0.6A \quad (2)$$

DRV8376 实现四种类型的保护：

- 过流保护 - 可以通过监测流经 FET 的电流来检测 MOSFET 过流事件。如果流经 FET 的电流超过过流阈值的时间长于抗尖峰脉冲时间，则会识别出 OCP 事件并根据 OCP_MODE 位执行操作。
- 欠压检测 - 在 VM 电源、AVDD、GVDD 和 VCP 电源上均实现 UVLO。当上述任一电源电压低于 UVLO 的阈值电压时，所有集成式 FET、驱动器电荷泵和数字逻辑控制器都将被禁用。
- 热警告和热关断 - 监测器件中的芯片温度并在温度超过阈值时触发警告或故障指示。所有 FET 都被禁用，电荷泵会关断，并且在触发热关断 (OTS) 时，nFAULT 引脚被驱动为低电平。

上述三种故障通过 nFAULT 引脚 (即开漏输出) 指示。一旦置为有效，只要三个故障中的任何一个存在，低电平有效故障信号就会持续被置为有效。

3.5 系统电源管理

[图 3-6](#) 展示了电源树。宽输入电压 DC/DC 降压模块 TLVM13630 旨在为电源管理集成电路 (PMIC) 生成 5V 电源轨。PMIC TPS65035x 器件是一款高度集成的电源管理 IC，整合了三个降压转换器和一个低压降 (LDO) 稳压器。这三个降压转换器可分别输出三个独立的电压轨 (3.3V、1.8V 和 1.2V)。该 3.3V 电源为 MCU 以及其他模拟器件 (如逻辑门和收发器) 的所有 IO 电压供电。在此参考设计上，1.8V 电压轨被保留，没有任何负载。1.2V 电压轨提供 F28P65 的内核电压。所有转换器都在强制固定频率 PWM 模式下工作。

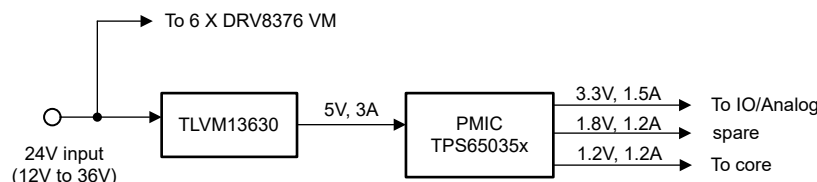


图 3-6. TIDA-010992 的系统电源树

3.6 以太网物理层

本设计采用一个 DP83826A 以太网 PHY，以支持 EtherCAT 从站设备应用。图 3-7 展示了一个带有变压器和连接器的 PHY 电路。

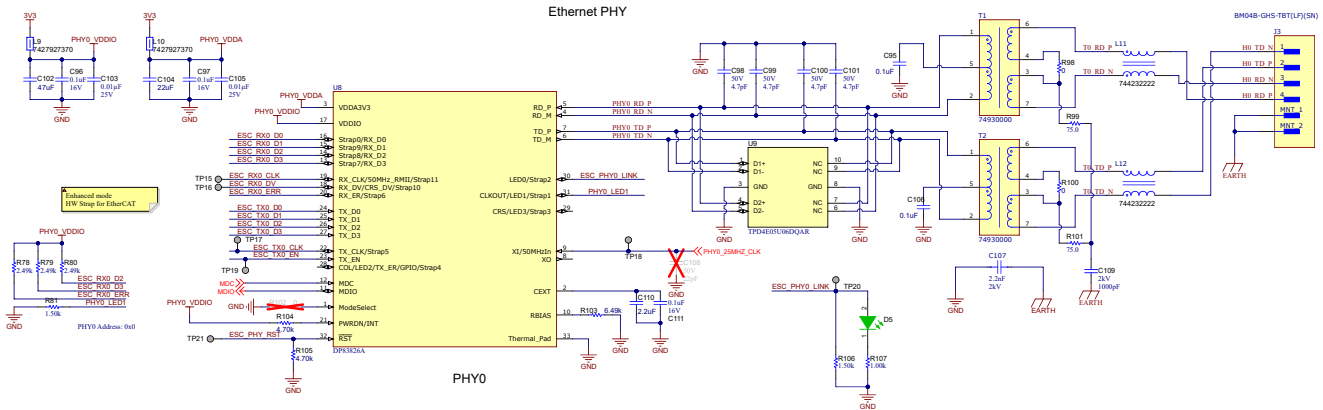


图 3-7. 以太网 PHY 原理图

通过 U8 的悬空引脚 1 来选择增强模式，从而为 EtherCAT 的使用启用硬件搭接配置。R78 至 R81 是自举电阻器。详细信息请参阅[如何以及为何要在 EtherCAT® 应用中使用 DP83826](#) 应用手册。模拟电源 (VDDA3V3) 和数字 IO 电源 (VDDIO) 均通过铁氧体磁珠 L9 和 L10 进行去耦合。介质独立接口 (MII) 用于在 PHY 和介质访问控制 (MAC) 层之间连接的以太网信号路径上实现最小延迟。ESD 二极管 U9 放置在介质相关接口 (MDI) 差分线路上以抑制噪声。采用分立式变压器 (T1、T2)、共模扼流圈 (L11、L12) 和连接器 (J3) 而非集成的 RJ45 端口，减少 PCB 占用空间。R99、R101 和 C109 也作为 Bob-smith 终端连接以减少噪声。C107 连接在电路板接地端和接地端之间，用于抑制干扰。

4 硬件、软件、测试要求和测试结果

4.1 硬件要求

4.1.1 TIDA-010992 PCB 概览

图 4-1 和图 4-2 显示了 PCB 顶面和底面的标注照片。

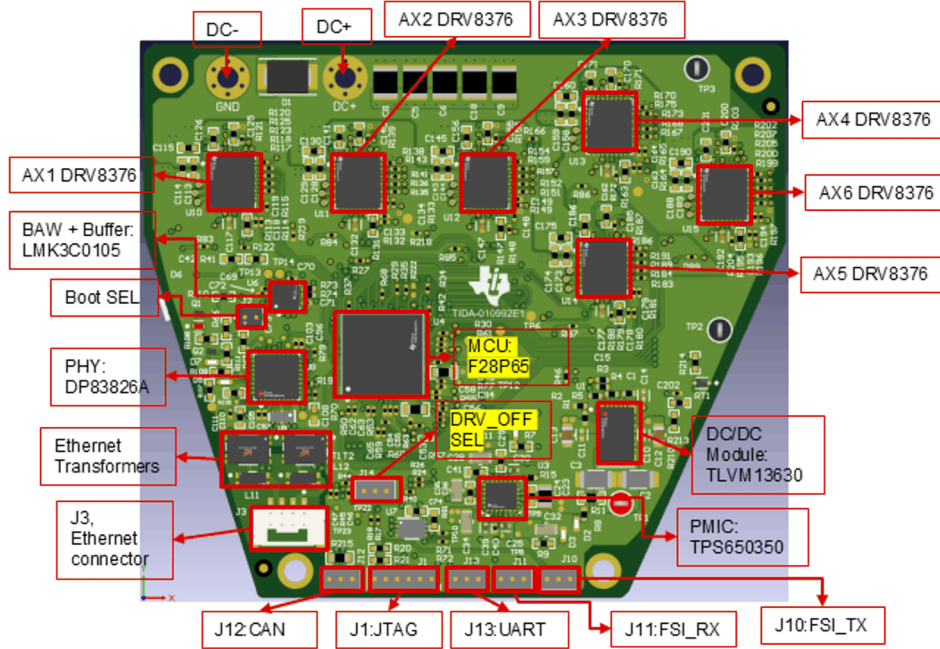


图 4-1. TIDA-010992 PCB (顶视图)

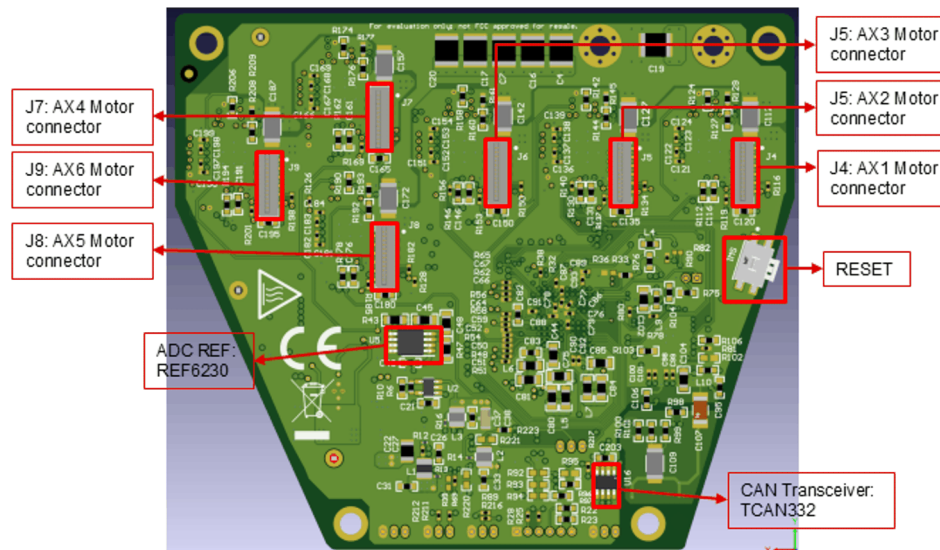


图 4-2. TIDA-010992 PCB 底视图

4.1.2 TIDA-010992 硬件设置

要启用 TIDA-010992 电路板，需要通过 PCB 左上角的孔在 DC+ 和 GND 之间施加 24V 直流电压（或更低的电压，具体取决于额定电机）。电机电源线（包括编码器信号）分别连接到轴 1 至轴 6 的 J4 至 J9 电机连接器。J1 是调试软件代码的 JTAG 连接器。XDS110 JTAG 调试探针可以连接到 J1。J2 是引导模式选择跳线。在 J2 短接

的情况下，MCU 从串行通信接口 (SCI) 引导或启用等待模式。当 J3 未连接时，会启用闪存模式作为 MCU 引导模式。J13 是 UART 连接器，该接口也可接入 XDS110 AUX 引脚，用于在终端打印信息，或是通过 UART 通信传输数据。J3 是以太网连接器，可连接到 EtherCAT 主设备或其他 EtherCAT SubDevice 节点。J12 是为与其他电路板通信而保留的 CAN-FD 接口。J10 和 J11 分别是用于 FSI 发送和接收的连接器，也保留用于与其他电路板通信。图 4-3 展示了 TIDA-010992 硬件设置概览。图 4-4 显示了电机电缆连接方向，因为电机电缆和电机连接器具有单面连接。图 4-5 展示了人形机械手的电机电缆组件。手指应相应地连接到预定义的电机连接器。

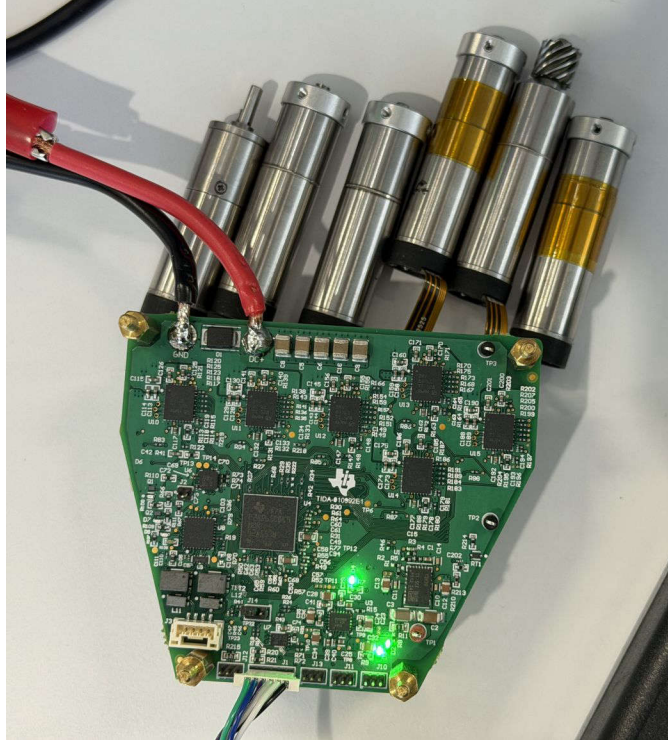


图 4-3. TIDA-010992 硬件设置概览

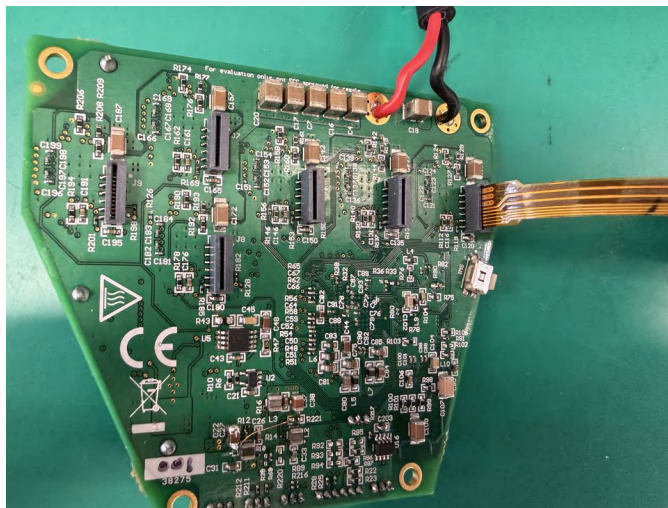


图 4-4. TIDA-010992 电机电缆连接

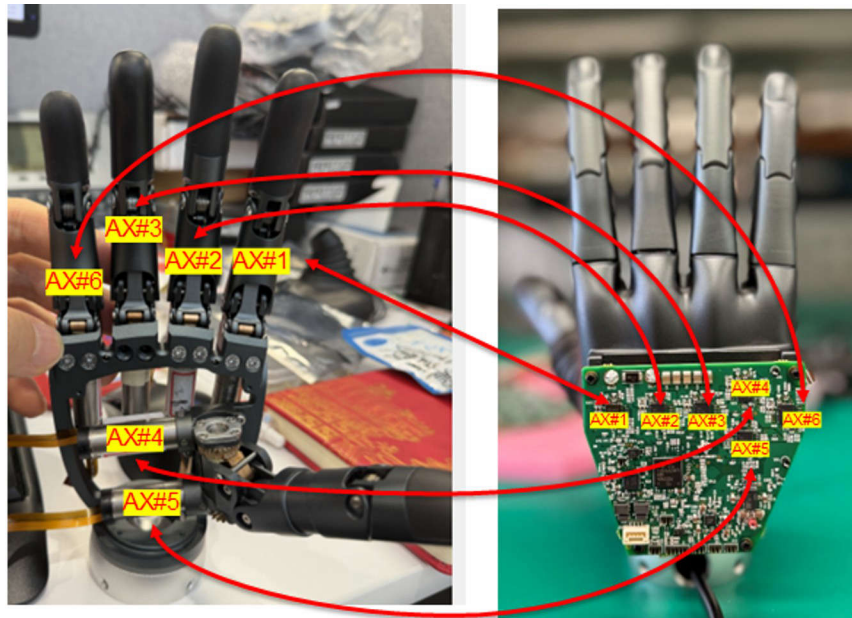


图 4-5. TIDA-010992 机械手的电机电缆组件

4.2 软件要求

为了验证此参考设计，我们为 F28P65 开发了 TI 内部测试软件。有关 F28P65 软件支持，请参阅 [C2000WARE-MOTORCONTROL-SDK 软件开发套件 \(SDK\) | TI.com](#) 和 [C2000WARE 软件开发套件 \(SDK\) | TI.com](#) 工具页面和 [C2000 微控制器论坛 — C2000™ 微控制器 — 适用于 C2000™ 微控制器的 TI E2E 支持论坛](#)。

4.3 测试和结果

4.3.1 电源管理和系统上电和断电

本次测试的重点是验证板载电源电压和序列，包括 24V、5V、3.3V 和 1.2V 电源轨。图 4-6 和图 4-7 展示了加电和断电时各自的波形。

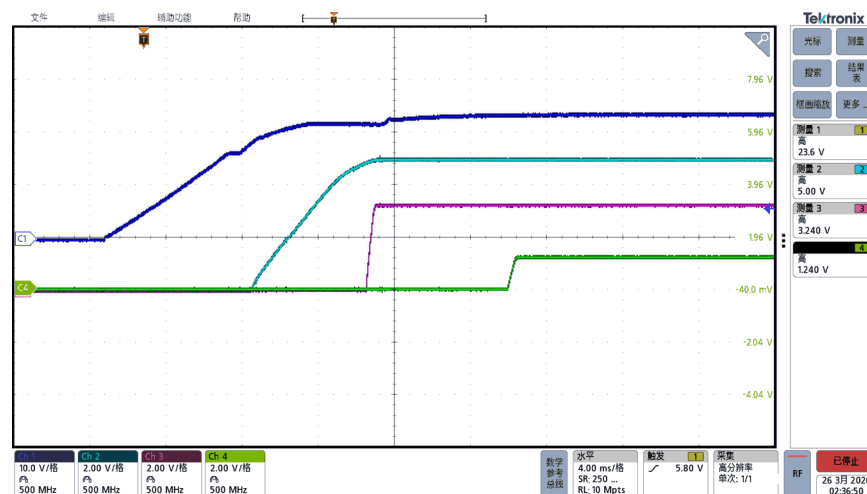


图 4-6. TIDA-010992 系统上电

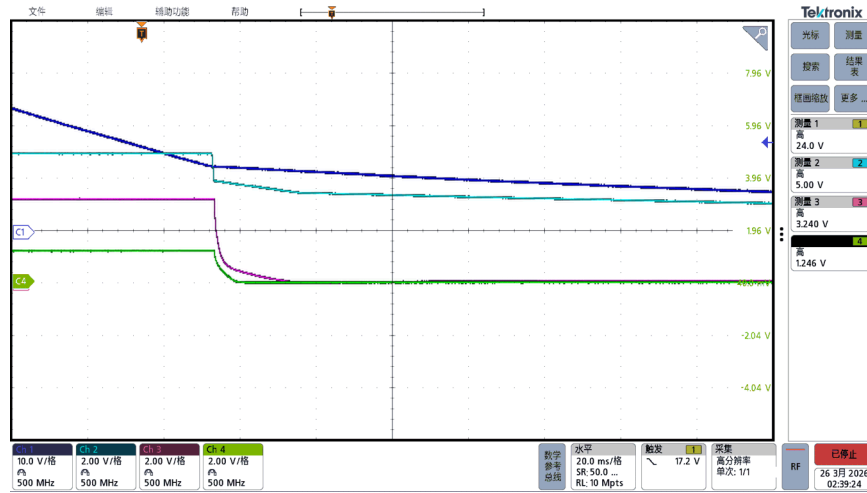
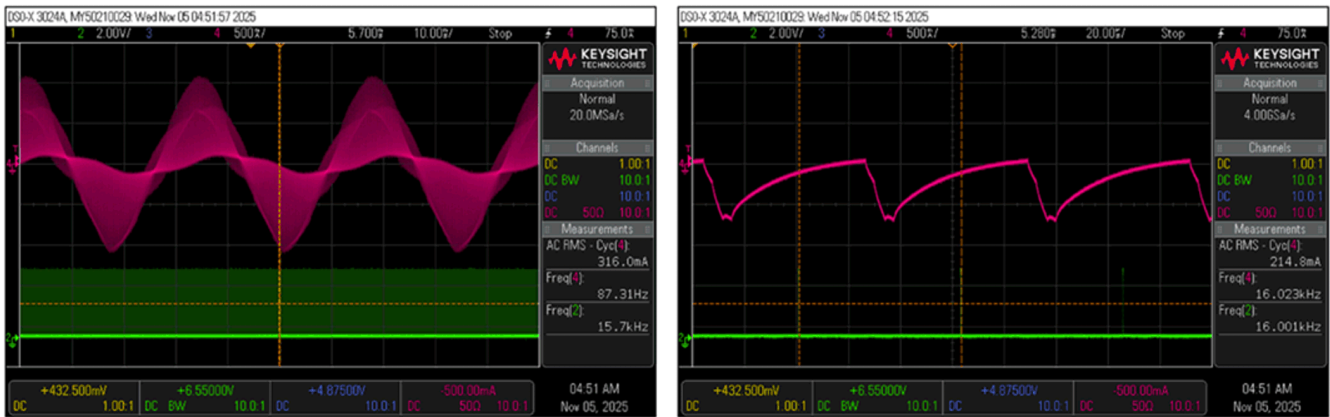


图 4-7. TIDA-010992 系统断电

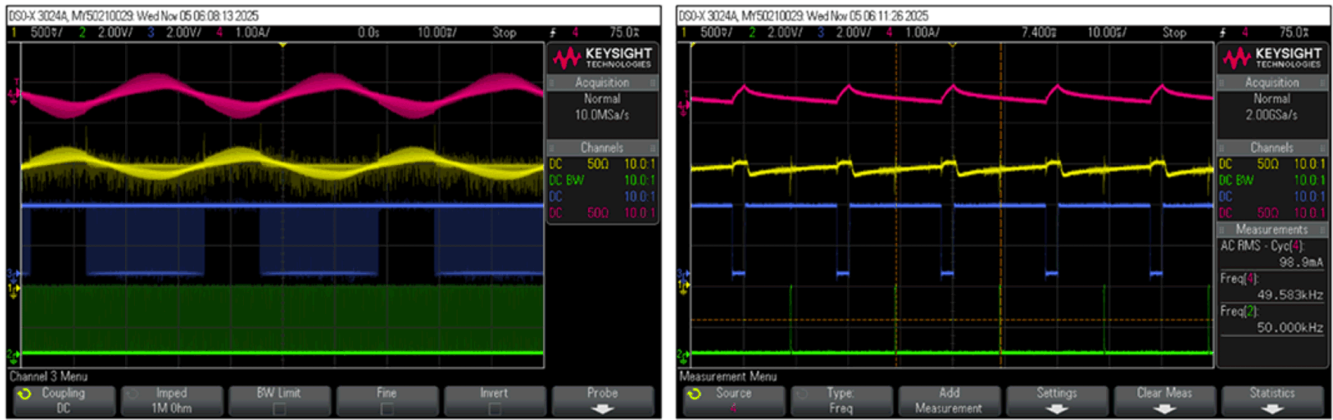
4.3.2 电流反馈

每个轴的三相电流使用集成电流检测功能进行检测，无需外部检测电阻器，然后将电流数据反馈到 MCU 内的三个 ADC 模块以确保同步检测。图 4-8 展示了空载电机使用 16kHz PWM 频率进行的电流检测采样。峰值纹波电流约为 1A，每个 PWM 周期的 RMS 纹波电流约为 214mA。图 4-9 显示了 50kHz PWM 频率下的电流检测采样。峰值纹波电流约为 250mA，每个 PWM 周期的 RMS 纹波电流约为 98mA。从比较测试结果中可以看出，随着 PWM 开关频率的增加，电机电流纹波显著降低。为了获得更好的电机控制性能并避免电机过热，本参考设计实现了 64kHz PWM 开关频率。人形机器人的电机类型都是无芯电机，电感非常小。因此，控制 PWM 开关频率应设置为大于 50kHz。



Pink = PhA current (Probe)
Green = EPWM_U ADC SOCA (OUTPUTXBAR)
Peak ripple = 1A, RMS ripple per PWM cycle = 214mA

图 4-8. TIDA-010992 使用 16kHz PWM 进行电流检测采样



Pink = PhA current (Probe)
Yellow = IU Current ADC pin
Blue = PWM_U_L
Green = EPWM_U ADC SOCA (OUTPUTXBAR)
 Peak ripple = 250mA, RMS ripple per PWM cycle = 98mA

图 4-9. TIDA-010992 使用 50kHz PWM 进行电流检测采样

4.3.3 三相半桥电机驱动器功率级开关节点

图 4-10 和图 4-11 所示为具有 0.3A 输出相电流时的开关电压、导通和关断传播延迟。开关节点上没有明显的瞬态。C 相轴 1 的导通传播延迟约为 88ns，关断传播延迟约为 140ns。图 4-12 和图 4-13 显示了上升沿和下降沿的压摆率，分别为 600V/us 和 258V/us。DRV8376 的转换率可通过 SPI 进行配置。对于此参考设计，压摆率设置为 250V/us。

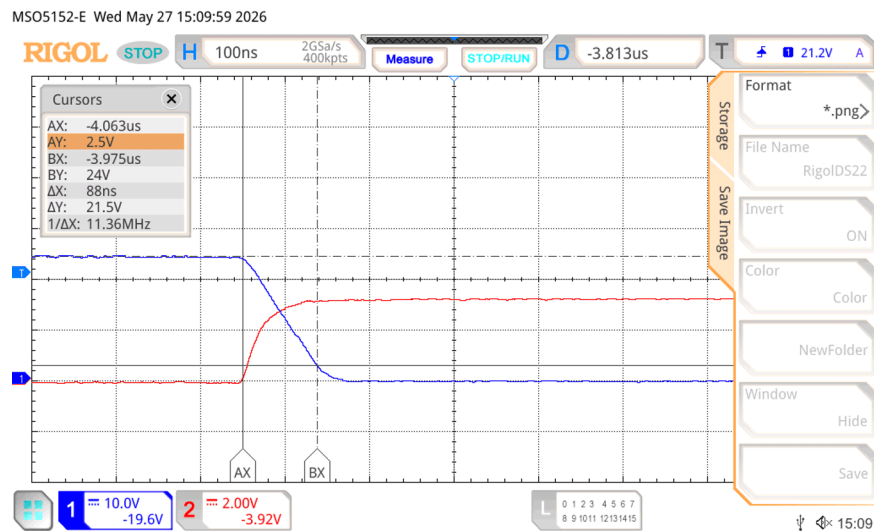


图 4-10. 导通传播延迟

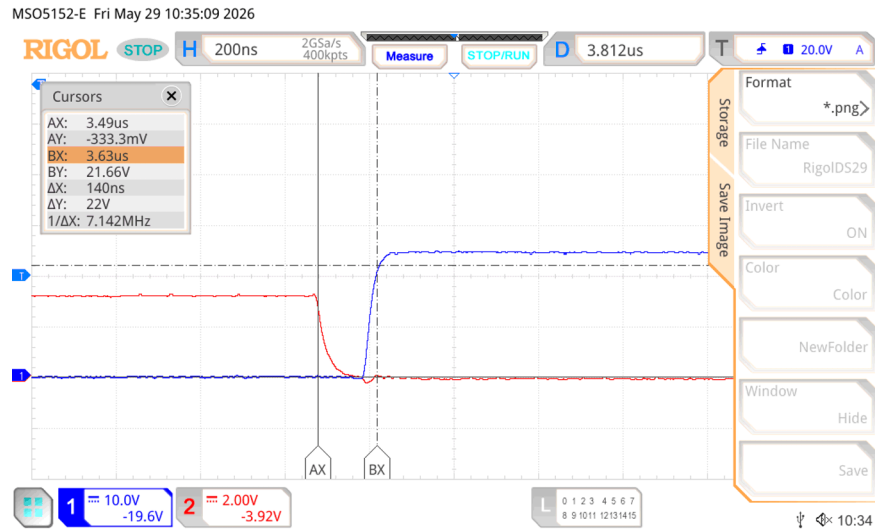


图 4-11. 关断传播延迟

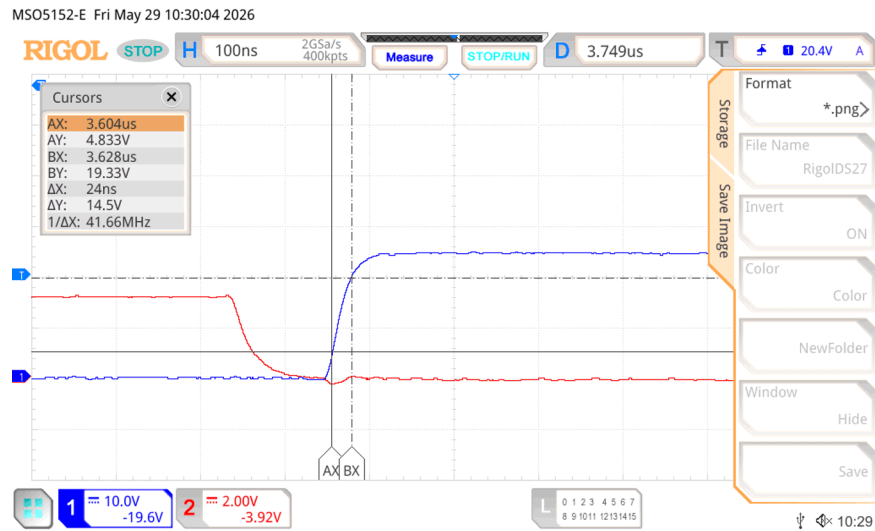


图 4-12. 上升沿压摆率

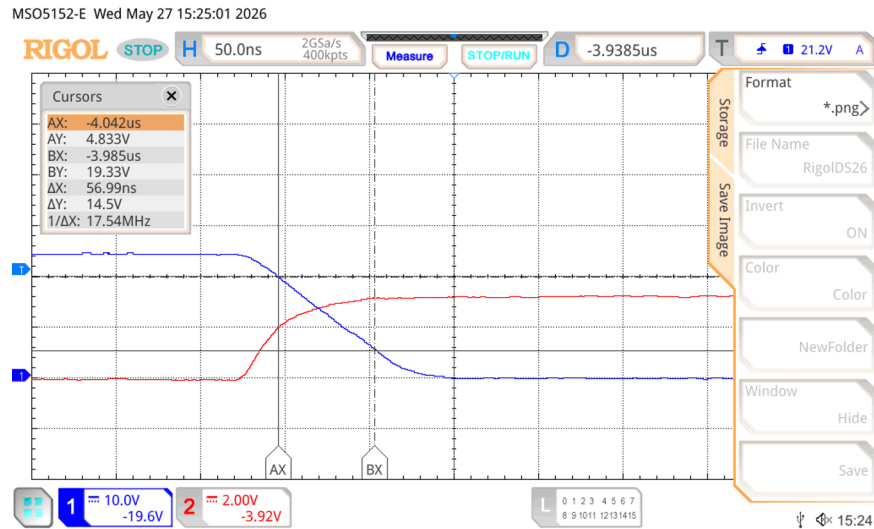


图 4-13. 下降沿压摆率

4.3.4 多轴电机控制方案验证

图 4-14 显示了 6 轴电机控制方案的验证过程。每个通道代表每个轴的电机控制 FOC 环路中断服务例程 (ISR) 功能。在每个轴的电机控制 ISR 开始和结束期间，配置 6 个 GPIO 进行切换。从测试结果可以看出，所有 6 轴 FOC 环路都在 62.5us 周期时间内，没有任何重叠。每个轴的速度和电流控制 FOC 环路约为 7.41us。

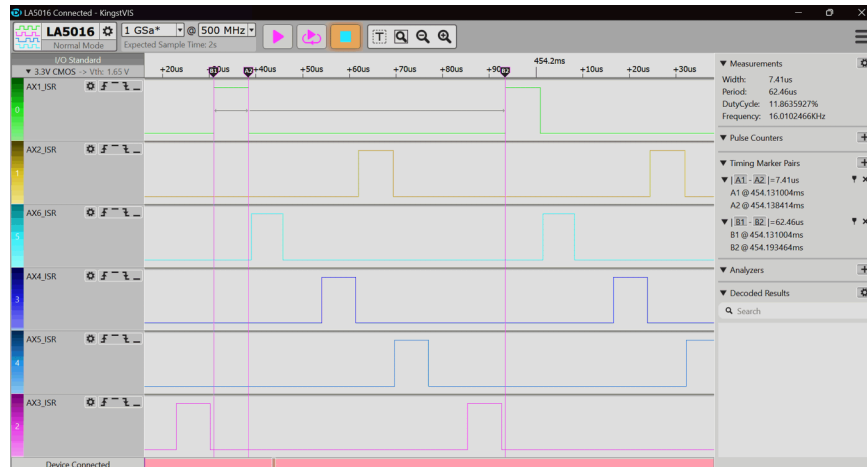


图 4-14. 验证 6 轴马达控制皮带盘

4.3.5 系统热性能测量

热测量测试在 25°C 的实验室温度下完成。TIDA-010992 电路板由 24V 直流电源供电并连接到 6 个独立电机。电机的额定电流为 0.4A。我们将基准 Iq 电流设置为 0.3A，以闭合电流环路驱动 6 个电机旋转。PWM 载波频率运行于 64kHz。电机工作转速为 5Hz。图 4-15 展示了热测试结果：由于未使用散热器和风扇，TIDA-010992 PCB 仅依靠自然对流进行散热。MCU F28P65 的温升约为 31 度，室温为 28.1 度，最热的功率级 DRV8376 是轴 5，温升为 30.3 度。

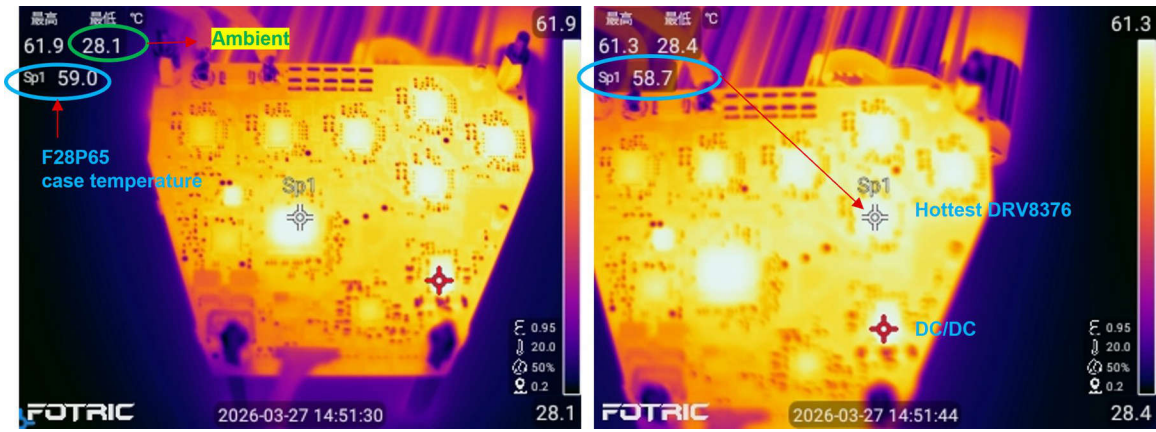


图 4-15. TIDA-010992 温升静止结果

5 设计和文档支持

5.1 设计文件

5.1.1 原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDA-010992](#) 中的设计文件。

5.1.2 BOM

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-010992](#) 中的设计文件。

5.1.3 板层图

要下载板层图，请参阅 [TIDA-010992](#) 中的设计文件。

5.1.4 Altium 工程

要下载 Altium 工程文件，请参阅 [TIDA-010992](#) 中的设计文件 CAD/CAE 符号。

5.1.5 Gerber 文件

要下载 Gerber 文件，请参阅 [TIDA-010992](#) 的设计文件。

5.1.6 装配图

要下载装配图，请参阅 [TIDA-010992](#) 中的设计文件。

5.2 工具与软件

工具

CCSTUDIO Code Composer Studio™ 集成开发环境 (IDE)：下载适用于 Microsoft® Windows® 或 Linux® 的 CCS 12 或 20 版

C2000-CGT C28x/CLA 代码生成工具 (CGT) - 编译器

SYSCONFIG SysConfig 独立桌面版本：下载适用于 Microsoft Windows 或 Linux 的 SysConfig 1.26.2

软件

C2000 WARE 适用于 C2000 MCU 的 C2000Ware

C2000 电机控制 SDK 适用于 C2000 MCU 的 MotorControl 软件开发套件 (SDK)

5.3 文档支持

- 德州仪器 (TI)，[C2000™ TMS320F28P65x 实时微控制器数据表](#)
- 德州仪器 (TI)，[C2000™ TMS320F28P65x 实时微控制器技术参考手册 \(TRM\)](#)

5.4 支持资源

TI E2E™ 中文支持论坛 是工程师的重要参考资料，可直接从专家处获得快速、经过验证的解答和设计帮助。搜索现有解答或提出自己的问题，获得所需的快速设计帮助。

链接的内容由各个贡献者“按原样”提供。这些内容并不构成 TI 技术规范，并且不一定反映 TI 的观点；请参阅 TI 的 [使用条款](#)。

商标

C2000™, TI E2E™, and Code Composer Studio™ are trademarks of Texas Instruments.

Microsoft® and Windows® are registered trademarks of Microsoft Corporation.

Linux® is a registered trademark of Linus Torvalds.

所有商标均为其各自所有者的财产。

6 作者简介

CHEN GAO 是德州仪器 (TI) 工业系统机器人团队的系统工程师，负责为工业电机驱动器和机器人指定并开发参考设计。

作者感谢 **HAN ZHANG** 为支持 TIDA-010992 参考设计的软件开发所做的出色贡献。

7 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

Changes from Revision * (December 2025) to Revision A (June 2026)	Page
• 更新了整个文档以提供完整的 TIDA-010992 参考设计支持。.....	2

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