

# Design Guide: TIDA-010979

## 具有工业通信功能的 48V 1kW 机器人关节电机控制参考设计



### 说明

该参考设计采用 TI Sitara™ MCU-AM261x 器件，用于处理基于工业以太网连接的电机驱动器。该设计使用直径为 70mm 的印刷电路板 (PCB) 来驱动人形机器人关节 (48V、1kW Eyoubot 电机)。该设计展现了外形小巧、简化的集成式平台。该平台包括一个使用三个 DRV7167 半桥 GaN 电机驱动器功率级的高功率密度段、一个使用 AM2612 500MHz R5F 核心 MCU 和 AMC0106 功能隔离式  $\Delta$ - $\Sigma$  调制器的精确实时控制级，以及通过工业以太网进行高带宽通信。

### 资源

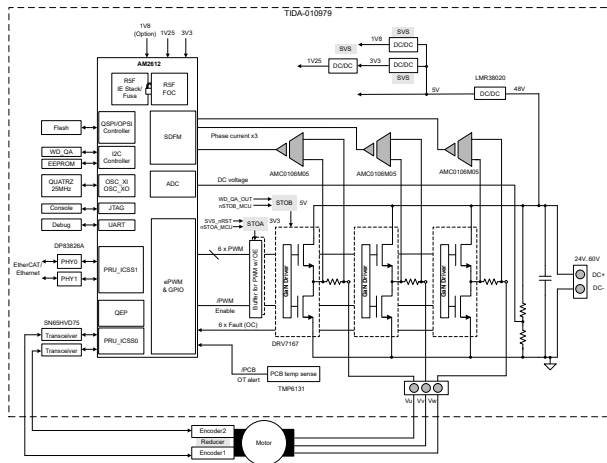
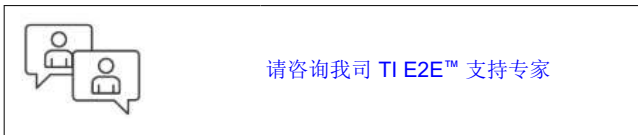
- TIDA-010979 设计文件夹
- AM2612、DRV7167 产品文件夹
- AMC0106、DP83826A 产品文件夹
- AM261x 电机控制 SDK 工具文件夹

### 特性

- 紧凑型设计，具有高度集成的 IC，有助于实现 70mm 直径的 PCB 和 15mm 直径的通孔
- 支持多协议工业以太网通信和多协议编码器接口
- 小巧型号的 DRV7167 半桥 GaN 电机驱动器功率级
- 使用 1m $\Omega$  分流器和 AMC0106M05 功能隔离式调制器进行精密相电流检测

### 应用

- 人形机器人电机驱动器
- 协作机器人伺服驱动器
- 移动机器人电机控制
- 机器人通信模块
- 伺服驱动器功率级模块



## 1 系统说明

此参考设计展示了 TI Sitara™ MCU-AM261x 器件处理工业以太网连接实时伺服电机控制的能力，其中采用直径为 70mm 的印刷电路板 (PCB)，用于 48V、1kW 机器人的关节。

该设计的控制部分包括 AM261x MCU 上的一个 500MHz R5F 核心，采用小型 10mm × 10mm BGA 封装来执行闭环场定向控制 (FOC)，该 AM261x MCU 还包括另一个 500MHz R5F 核心，用于运行 EtherCAT 栈。此外，此 AM261x MCU 上使用了两个可编程实时单元 - 工业通信子系统 (PRU-ICSS)，以支持多协议编码器和工业以太网 MAC 层。该参考设计部署了两个 BissC 数字编码器来反馈转子和减速器的位置信息。PRU-ICSS 还支持 EnDAT、HDSL、BissC 和 Tamagawa 等其他编码器协议。

电源部分包括三个 100V、70A 半桥 GaN 电机驱动器功率级 DRV7167A 器件，这些器件具有集成驱动器和过流保护功能，经过优化可实现极低的栅极环路阻抗和电源环路阻抗。PCB 为顶面冷却式 DRV7167A GaN 电机驱动器功率级和及可选散热器提供了安装孔。集成的自举二极管有助于进一步减小高侧 GaN-FET 辅助电源的空间。

为了实现精密的相电流检测，此参考设计使用三个功能隔离式  $\Delta$ - $\Sigma$  调制器 AMC0106M05 器件，以及三个  $1\text{m}\Omega$  相电流分流器以  $\pm 50\text{A}$  的线性测量范围来测量三相电流。数字接口将 AMC0106M05 连接到 MCU 以运行 SINC<sup>3</sup> 抽取滤波器。

此参考设计还展示了采用 AM2612 MCU 和安全电源方法的独特功能安全概念。此安全概念旨在构建经过安全认证的 CAT3、PLd 或 PLe 架构，以通过一个 MCU 实现逻辑冗余。

### 1.1 术语

<b>SOC</b>	片上系统
<b>FOC</b>	磁场定向控制
<b>MCU</b>	微控制器单元
<b>RPM</b>	每分钟转数
<b>EnDAT/HDSL/BissC/Tamagawa</b>	适用于绝对编码器的多数字双向接口协议
<b>EtherCAT</b>	用于控制自动化技术的以太网
<b>Profinet</b>	Process Field Network ( 过程现场网络 ) 的混成词
<b>ICSS</b>	工业通信子系统
<b>PRU</b>	可编程实时单元
<b>SDFM</b>	$\Sigma$ - $\Delta$ 滤波器模块
<b>SDM</b>	$\Sigma$ - $\Delta$ 调制器
<b>EPWM</b>	增强型脉宽调制器
<b>CMP</b>	事件比较器
<b>CAP</b>	事件捕获
<b>ISR</b>	中断服务例程
<b>EPWM</b>	增强型脉宽调制器
<b>TCM</b>	紧耦合存储器
<b>GPIO</b>	通用输入输出
<b>FIFO</b>	先入先出
<b>SPI</b>	串行外设接口
<b>PHP</b>	超文本预处理器
<b>PDO</b>	PHP 数据对象

## 1.2 主要系统规格

表 1-1. 主要系统规格

参数	典型值	注释
直流输入电压	48V ( 12 V 至 60V )	绝对最大值为 80V
最大三相持续输出电流	17A <sub>RMS</sub>	测试条件：在 25°C 环境温度下无散热器
最大输出功率	48VDC 时为 1kW	功率因数为 0.98
功率 FET 类型	GaN 技术	具有集成高侧和低侧栅极驱动器的半桥电源模块 (DRV7167A)
PWM 开关频率	20kHz 至 100kHz	支持高于 80kHz 的 PWM 频率
PWM 死区	40ns	可配置
功能隔离式调制器	1mΩ 分流器   AMC0106M05	具有外部时钟的 ±50mV 输入、功能隔离式精密 Δ-Σ 调制器
Δ-Σ 数字滤波器	OSR64 或 OSR32	可根据 PWM 频率进行配置
相电流最大范围	±50A	与 MCU 连接的 3.3V 数字接口 ( 时钟和数据 )
PCB 层堆叠	6 层, 1 盎司铜	
PCB 大小	直径为 70mm 的圆形, 通孔直径为 15mm	
Encoder1	BissC、20 位分辨率、单圈	用于速度环
Encoder2	BissC、19 位分辨率、单圈	用于位置环

表 1-2 列出了 TIDA-010979 接口和连接器规范。

表 1-2. 接口和连接器规范

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	
J2-1	GND	UART
J2-2	UART_TXD	
J2-3	UART_RXD	
J3	跳线开启 (QSPI) 跳线关闭 (UART)	引导模式
J4-1	H0_TD_N	PHY0 MDI
J4-2	H0_TD_P	
J4-3	H0_RD_N	
J4-4	H0_RD_P	
J5-1	H1_TD_N	PHY1 MDI
J5-2	H1_TD_P	
J5-3	H1_RD_N	
J5-4	H1_RD_P	
J6-1	GND	编码器 1 RS485 接口
J6-2	ENC1_CLK_P	
J6-3	ENC1_CLK_N	
J6-4	ENC1_DATA_P	
J6-5	ENC1_DATA_N	
J6-6	ENC_5V0	
J7-1	GND	编码器 2 RS485 接口
J7-2	ENC2_CLK_P	
J7-3	ENC2_CLK_N	
J7-4	ENC2_DATA_P	
J7-5	ENC2_DATA_N	
J7-6	ENC_5V0	

## 2 系统概述

### 2.1 方框图

图 2-1 展示了虚线框中所示的 TIDA-010979 系统方框图。

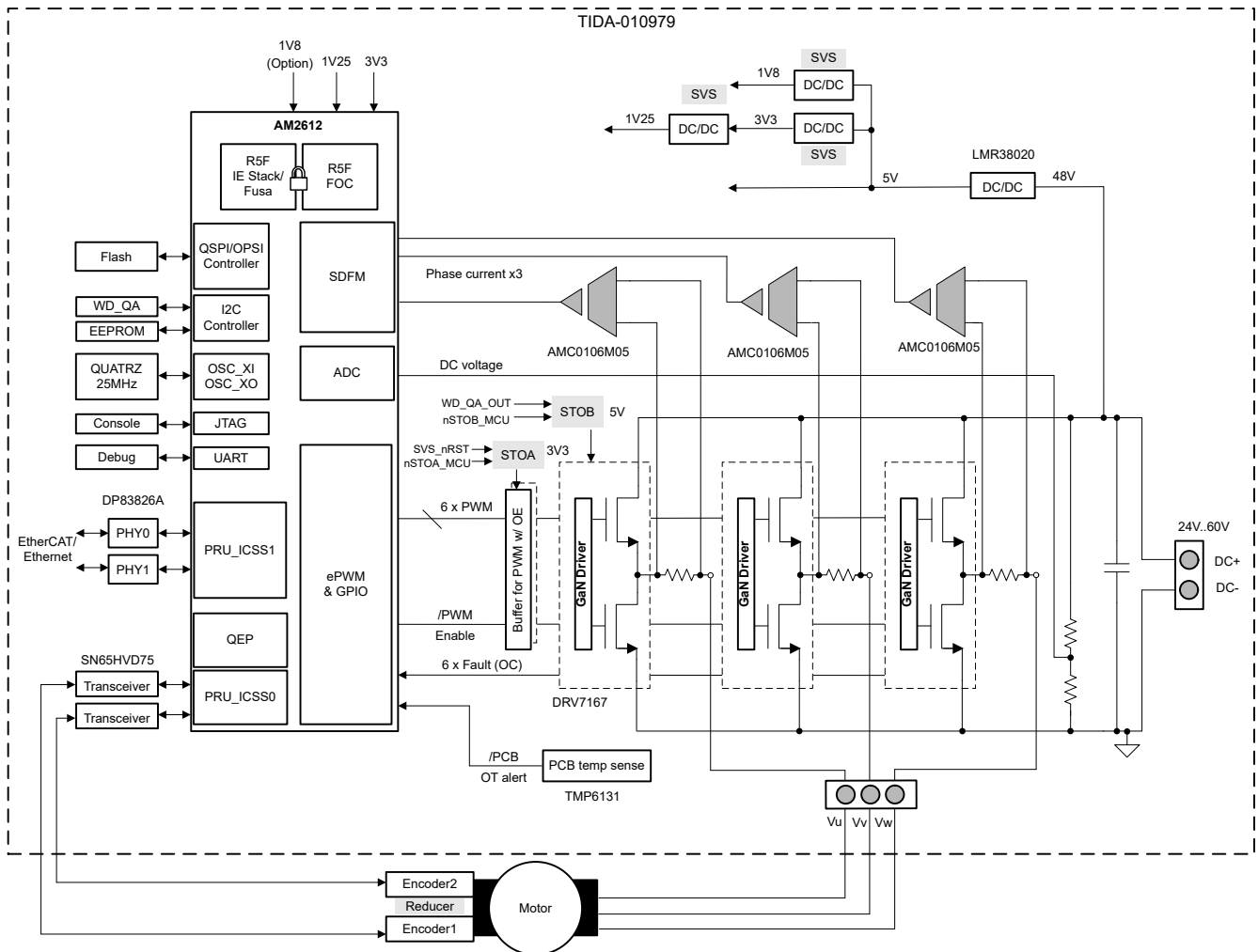


图 2-1. TIDA-010979 系统方框图

### 2.2 设计注意事项

设计目标是为类人机器人关节实现集成的单轴伺服控制。此设计可以在 12V 至 60V 直流，额定电压 48V 的单个直流输入电压和输出三相正弦波下运行，从而驱动交流电机。此设计包含几个子系统，其中包括：

- 电源树 - 宽输入电压范围 DC/DC 转换器 (LMR38020) 生成 5V 导轨，为 GaN 电机驱动器功率级、编码器电源以及下游 3.3V 和 1.8V 导轨供电。AM2612 的 1V25 内核电压轨由 3.3V 通过 DC/DC 模块 (TPSM82823) 供电。3.3V 电源模块还为电流检测调制器、PWM 缓冲器、EEPROM、以太网 PHY、MCU IO 和其他模拟部件供电。
- 电源逆变器 - 三个逆变器半桥中的每个半桥都部署集成式 100V，70A 半桥 GaN 电机驱动器功率级 (DRV7167A)，具有短路和过热保护功能。
- 电流传感 - 逆变器相位采用 1mΩ 相电流分流电阻器、具有 ±50A 线性测量范围的功能隔离式调制器 (AMC0106M05)，以及一个连接到 MCU 的数字接口，实现精密电流检测。
- 控制和通信 - 电机控制和通信采用基于 500MHz 双核 Arm® Cortex®-R5F 的 MCU (AM2612)，具有实时控制和安全功能。该子系统包括两个 500MHz R5F 内核，一个用于执行闭环磁场定向控制 (FOC)，另一个用于运行工业以太网栈。此外，两个 PRU-ICSS 内核支持多协议编码器和工业以太网 MAC 层。该参考设计部署了两

个 BissC 数字编码器来反馈转子和减速器的位置信息。PRU-ICSS 还支持 EnDAT®、HDSL、BissC 和 Tamagawa® 等其他编码器协议。对于以太网协议，AM2612 还可以支持 EtherCAT®、EtherNet/IP、Profinet® 和标准以太网。部署两个符合 EtherCAT、IEEE 和 EMC 标准的 10/100Mbps 以太网 PHY (DP83826A)，为 EtherCAT 应用提供具有低确定性延迟的系统计时。

## 2.3 重点产品

### 2.3.1 AM2612

AM261x Sitara Arm 微控制器属于 Sitara AM26x 实时 MCU 系列，旨在满足下一代工业和汽车嵌入式产品复杂的实时处理需求。AM261x 器件具有可扩展的 Arm Cortex-R5F 性能和丰富的外设集，广泛适用于各种应用，同时提供安全特性和优化的外设以进行实时控制。图 2-2 给出了功能方框图。表 2-1 总结了关键特性和优势。

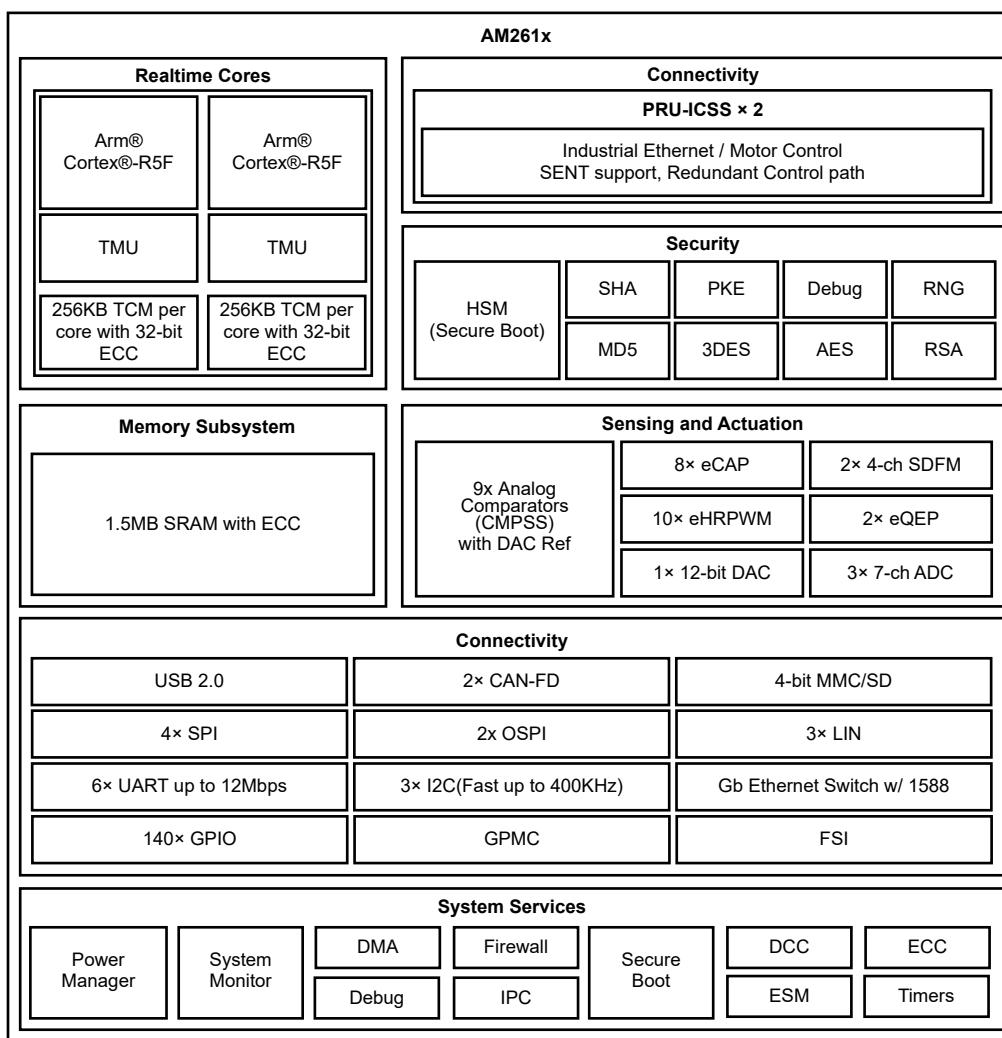


图 2-2. AM261x 功能框图

表 2-1. AM261x 的特性与优势

特性	优势
双 Cortex-R5F 内核，具有 2K DMIPS 和 512KB TCM	提供高 CPU 性能，以满足复杂的实时处理需求
各个 R5F 上的三角函数加速器 (TMU)	加速用于电机控制的三角函数
21 通道 12 位 ADC，10 个 PWM (20 通道)，18 个模拟比较器，8 个 eCAP，8 通道 SDFM	多个外设，用于低延迟控制环路
2 个 PRU-ICSS，USB，集成以太网交换机 (CPSW)，具有多达 2 个千兆位端口，支持直通和 TSN	丰富的通信和连接选项。PRU-ICSS 支持电机控制反馈协议 (例如 EnDat2.2、Tamagawa、BiSS 等)。此外，还支持 EtherCAT、Ethernet/IP、Profinet、IO-link 等工业以太网协议。
锁步可选，硬件安全模块 (HSM)	通过 SIL3 功能安全认证。通过加密加速、安全启动和由 HSM 管理的精细防火墙实现安全系统设计。

### 2.3.2 DRV7167A

DRV7167A 是一款 100V 半桥 GaN 电机驱动器功率级，具有集成栅极驱动器和增强模式氮化镓 (GaN) FET。该器件包含两个 GaN FET，它们由采用半桥配置的另一高频 GaN FET 驱动器驱动，如图 2-3 所示。该器件支持两个 FET 的导通和关断压摆率控制、与 IO 数量受限的控制器配合使用的单 PWM 模式、短路保护 (SCP)、过热检测 (OTD) 以及尽可能缩短第三象限导通时间的零电压检测 (ZVD) 报告。表 2-2 总结了关键特性。

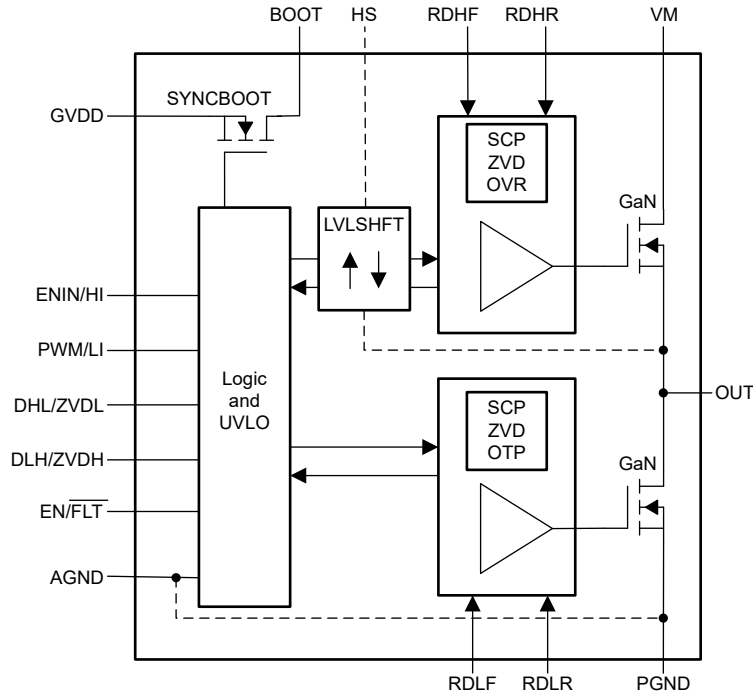


图 2-3. DRV7167A 功能框图

表 2-2. DRV7167A 的特性与优势

特性	优势
集成高侧和低侧 GaN 驱动器和 100V GaN FET、2.2mΩ 器件可支持 70A DC 工作电流。	支持高达 60VDC 的三相逆变器，在 80kHz 高开关频率下具有 16A <sub>RMS</sub> 相电流，适用于低电感和高速驱动器。
完全无接合线封装和经过优化的引脚排列。	最小化封装寄生元件可实现超快速开关，从而降低开关损耗，减少或消除散热器。简单的 PCB 布局。
GaN FET 具有零反向恢复特性（第三象限运行模式）和极小的输入电容 C <sub>ISS</sub> 。	减少或消除硬开关中的响铃，例如在逆变器中减少 EMI。极低的过冲和下冲意味着在相同的最大额定电压下具有比 Si-FET 更高的额定直流链路电压。
出色的传播延迟匹配 (2ns FET)。	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。
独立的高侧和低侧晶体管-晶体管逻辑 (TTL) 输入。	通过 PWM 接口直接连接到 3.3V MCU。
单个 5V 栅极驱动器电源具有自举电压钳位和欠压锁定功能。	轻松进行电源管理。UVLO 可在栅极驱动器欠压的情况下同时关断高侧和低侧 GaN FET。
顶面有两个外露 GaN 裸片 (SW 和 PGND)。 底面有大型 PGND 焊盘。	获得更低的顶部热阻。接受两侧冷却。
集成 SCP、OTD 和 ZVD	针对外部保护电路减少了 BOM。

### 2.3.3 AMC0106M05

AMC0106M05 和 AMC0106M25 是功能隔离式精密二阶  $\Delta$ - $\Sigma$  调制器，设计用于分流式电流检测。M05 版本支持  $\pm 50\text{mV}$  的线性输入范围。隔离栅将在不同共模电压电平下运行的系统器件隔开。AMC0106M05 调制器专为低压应用设计，属于功能隔离型，采用爬电距离和间隙为 1mm 的小型 2.7mm x 3.5mm 无引线封装。AMC0106Mxx 隔离式调制器利用小封装尺寸实现小型 PCB 布局，这对于机器人应用中的小尺寸电机驱动器至关重要。图 2-4 和表 2-3 显示了功能方框图和主要特性。

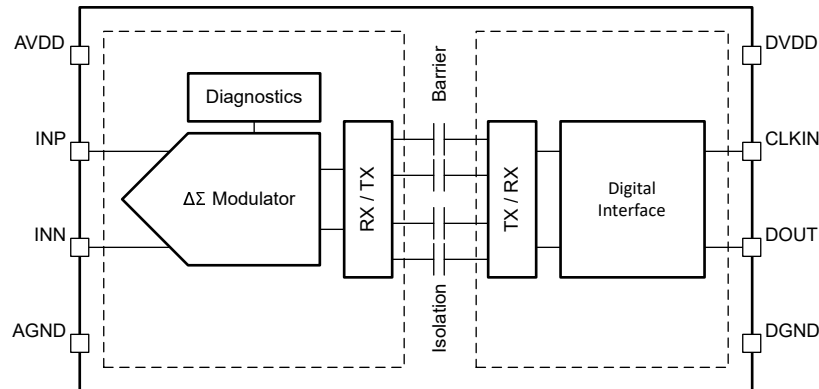


图 2-4. AMC0106M05 功能框图

**表 2-3. AMC0106M05 的特性与优势**

特性	优势
低噪声二阶 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器	支持精确的电流检测，有效位数 (ENOB) 高达 14
偏移漂移： $\pm 3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ (最大值)	支持在整个温度范围内进行精确的电流检测，无需进行依赖于温度的校准
高 CMTI： $150\text{V/ns}$ (最小值)	即使在 PWM 开关期间和 $100\text{kHz}$ 及更高 PWM 频率下也能进行精确的电流测量
数字接口	高 EMC 抗扰度，调制器和 MCU 之间的瞬态接地噪声不会影响测量精确度
小型 $2.7\text{mm} \times 3.5\text{mm}$ 无引线封装	减小了 PCB 空间，支持更小的伺服驱动器和机器人

### 2.3.4 DP83826A

DP83826Ax 能够提供很低的不确定性延迟和低功耗，并支持 10BASE-Te、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基础标准以太网模式，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）的增强以太网模式。图 2-5 展示了功能方框图，表 2-4 则展示了主要特性和优势。

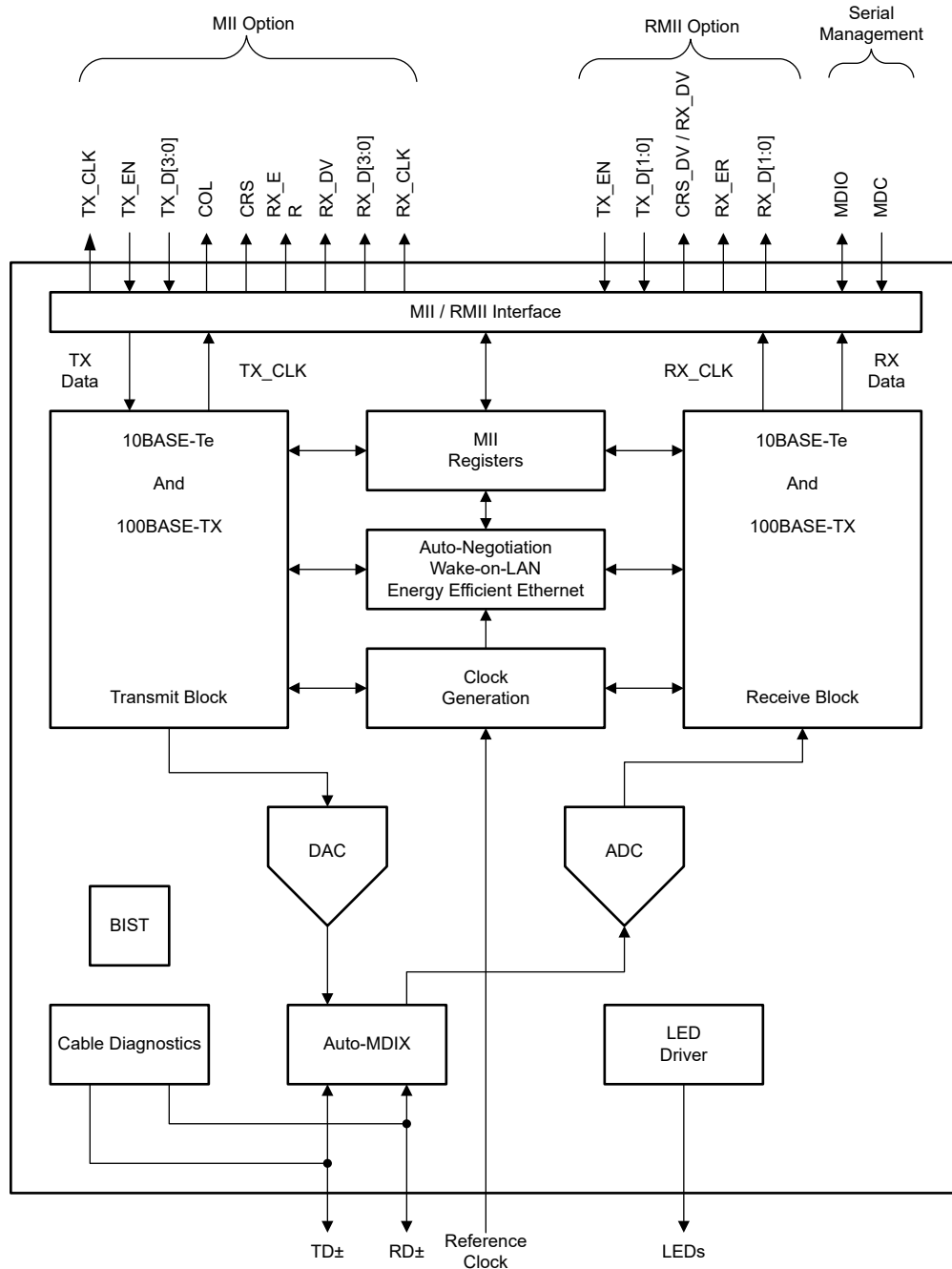


图 2-5. DP83826A 功能框图

表 2-4. 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
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, 例如机器人关节应用

### 3 系统设计原理

本节提供该参考设计的设计指南。

#### 3.1 AM2612 电机控制和通信接口

该设计采用 AM2612 ZNC (10mm × 10mm) 封装作为电机控制和通信控制器。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。此设计部署 ePWM0、ePWM1 和 ePWM2 作为三相 GaN 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。所有三个 PWM 子模块共享 250MHz 的相同时基时钟并彼此同步。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。
- **$\Sigma$ - $\Delta$  滤波器模块 (SDFM)** - SDFM 是一种四通道数字滤波器，专为电流测量而设计。每个输入通道均可接收一个独立的  $\Delta$ - $\Sigma$  调制器位流。位流由四个独立可编程的数字抽取滤波器进行处理。在此设计中，为滤波器选择了 Sinc3 滤波器类型和过采样率 (OSR) 32。使用 20MHz 时钟（Sinc 滤波器的数据速率）时，延迟等于 4.8  $\mu$ s。SDFM 时钟和 SDM 时钟分别由 ePWM8A 和 ePWM8B 生成。使用 ePWM 模块的好处是，可以根据实际应用调整和配置时钟相位和频率。由每个 PWM 周期中心的 ePWM0 SOCA 事件触发的滤波器输出该周期内电流的平均值。此外，这组滤波器包括一个快速比较器（次级滤波器），用于过流和欠流监测的即时数字阈值比较以及过零检测。
- **PRU-ICSS GPIO 模块三通道外设接口** - 此接口支持利用 HDSL、Tamagawa、EnDat 2.2 和 BiSS 协议进行操作的功能。该接口支持 2 线和 4 线串行 RS-485 通信。每个通道的范围为 100kHz 至 16MHz。数据 FIFO 大小为 32 位（用于发送）和 4 位（用于接收）。可以配置移位大小和接收输入时的过采样。此设计中，在减速器齿轮箱之后为电机转子角度和绝对位置反馈配备了两个 BiSS 编码器。两个 PRU-ICSS 实例用于对这两种编码器进行数据解码。位置反馈由 ePWM3 比较事件 C 触发，该事件与 ePWM0 SOCA 时序匹配。
- **PRU-ICSS 实时介质独立接口 (MII\_RT) 模块** - 此模块为 PRU 提供了一个可编程的 I/O 接口来访问和控制至多两个 MII 端口。每个端口都有配备多达 64 字节的 2 级 FIFO，以支持不同的用例，例如自动转发、动态处理和乒乓处理。此外，该模块在 TX 和 RX 路径上均具有链路检测功能和循环冗余校验 (CRC)。使用确定性指令集时，100Mbps 链路下的最小延迟仅为 3ns。

图 3-1 展示了 TIDA-010979 的电机控制和通信接口，图 3-2 展示了电机控制配置。

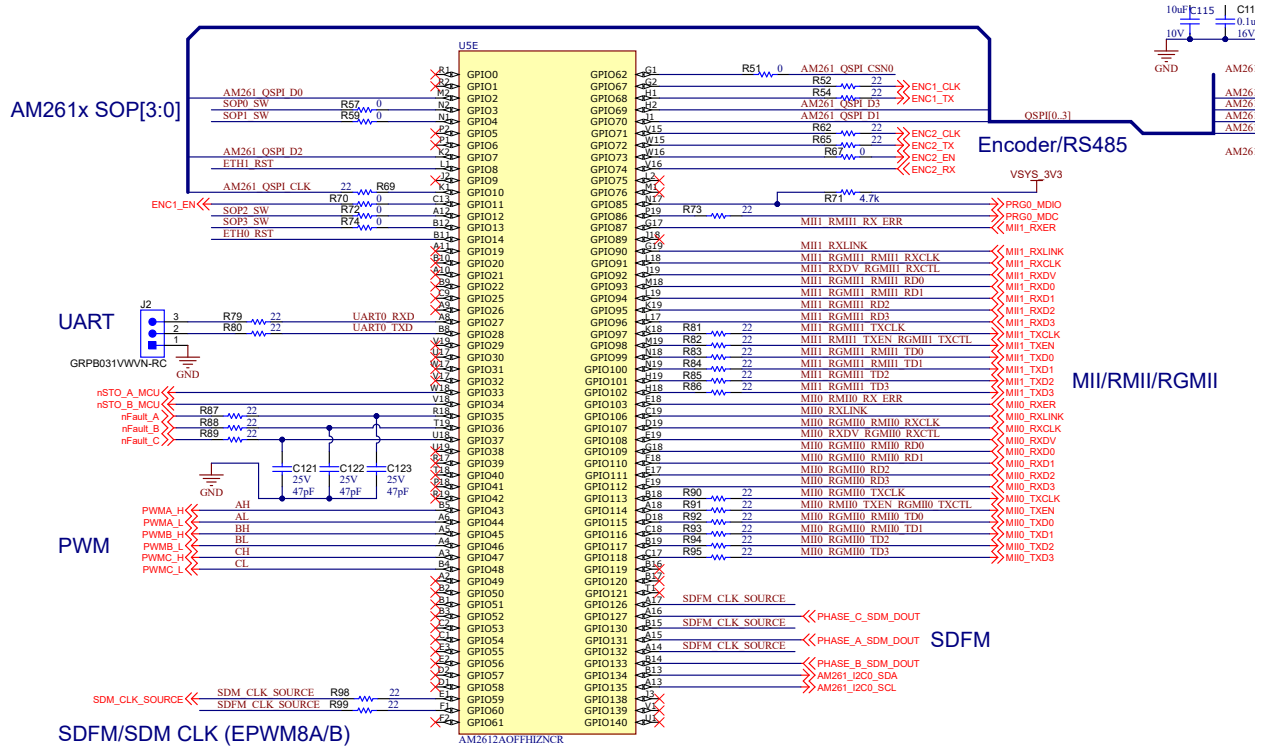


图 3-1. TIDA-010979 - AM2612 电机控制和通信接口

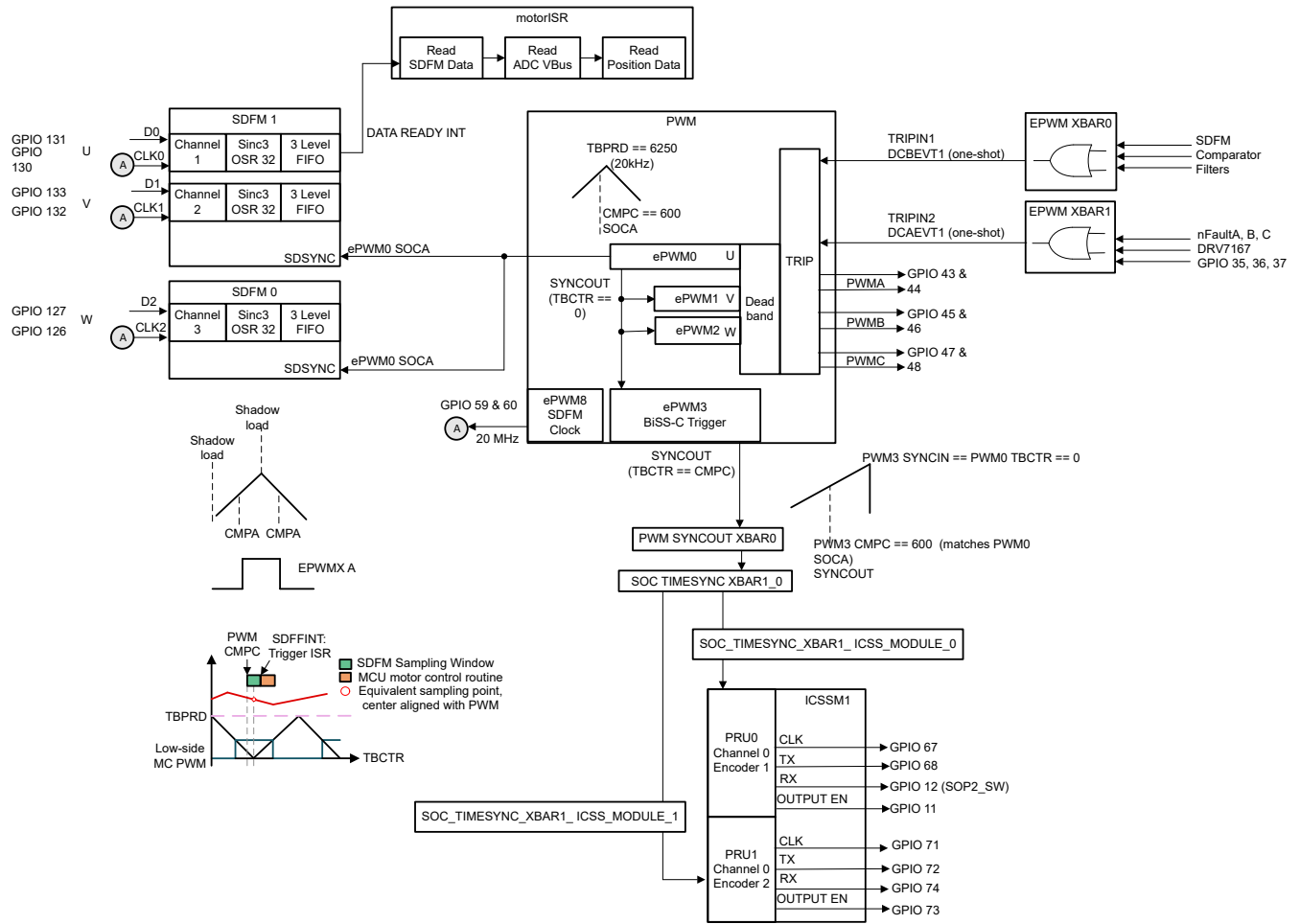


图 3-2. TIDA-010979 电机控制配置

### 3.2 直流链路和接地配置

48V 直流输入额定电压由 17 个 10  $\mu$ F 陶瓷电容器进行缓冲以获得总计 170  $\mu$ F 的直流总线电容。PCB 采用两个单独的接地平面：电源接地 (PGND) 和逻辑或模拟接地 (GND)。两个接地平面都在星型配置中通过网带进行连接，旨在最大限度地减少电源接地平面中的高开关频率电流流入逻辑平面的串扰。图 3-3 展示了直流链路去耦合和接地配置的原理图。

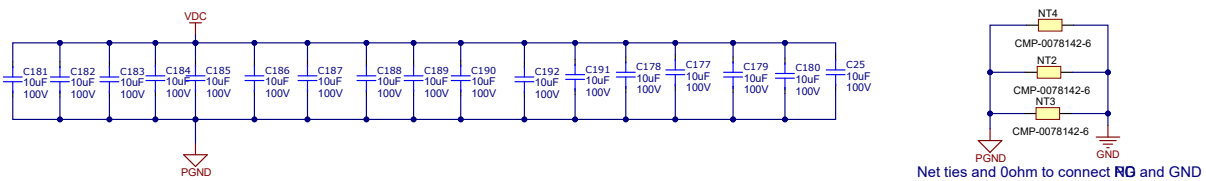


图 3-3. 直流链路去耦合和接地 (GND) 配置



### 3.4 使用 AMC0106M05 功能隔离式 $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器的内联分流精密相电流检测

对于精密和小型相电流检测，该参考设计部署了  $\Delta$ - $\Sigma$  调制器电流传感技术，通过  $1\text{m}\Omega$  内联分流器测量相电流。使用采用小型无引线封装的功能隔离式调制器 AMC0106M05 测量三相电流，并传输到 AM2612 MCU 中集成的  $\Delta$ - $\Sigma$  数字滤波器。

图 3-5 展示了使用功能隔离式调制器 AMC0106M05 (U28) (线性输入电压范围为  $\pm 50\text{mV}$ ) 和  $1\text{m}\Omega$   $3\text{W}$  分流器 (R187) 的相电流检测子系统的原理图。 $1\text{m}\Omega$  分流电阻值决定了线性输入范围为  $\pm 50\text{A}$ 。AMC0106M05 具有  $\pm 64\text{mV}$  的输入削波范围，因此最大电流范围为  $\pm 64\text{A}$ 。分流器在  $35\text{A}_{\text{RMS}}$  时的功耗为  $1.25\text{W}$ 。

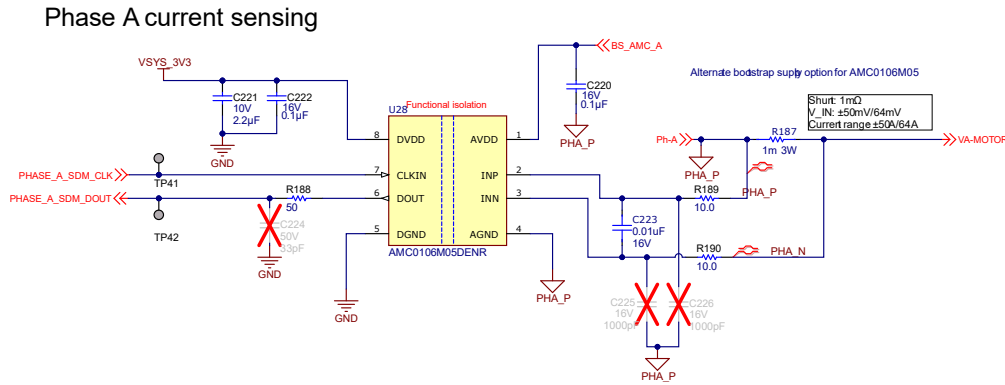


图 3-5. 使用 AMC0106M05 进行 A 相内联相电流传感的原理图

隔离式调制器前面的差分抗混叠低通滤波器 (  $R189 = 10\Omega$  ,  $R190 = 10\Omega$  ,  $C223 = 10\text{nF}$  ) 的截止频率为  $795\text{kHz}$  , 有助于提高信号路径的信噪比性能。使用低通滤波器的目的是将高频输入噪声衰减至低于测量所需的噪声水平。如果没有输入滤波器，接近采样频率或采样频率倍数的噪声会被  $\Delta$ - $\Sigma$  调制器混叠到低频，并通过数字低通滤波器。电容器  $C225 = 1\text{nF}$  和  $C226 = 1\text{nF}$  是可选电容器，用于改善高于  $10\text{MHz}$  的频率下的共模输入电压抑制性能。 $C225$  和  $C226$  的大小比  $C223$  小 10 倍。为了获得最佳性能，请确保  $C225$  和  $C226$  值的匹配度优于 5%。 $C225$  和  $C226$  之间的不匹配会导致共模瞬变期间出现差分输入误差。NP0 型电容器具有低温漂，非常适合用于共模滤波。模拟电源 AVDD 通过  $100\text{nF}$  电容器 C220 进行去耦。

AVDD 由 DRV7167A 内置自举电源供电，其中， $C205 = 4.7\mu\text{F}$ 。AMC0106M05 通常从 AVDD 电源获取  $6.6\text{mA}$  电流。此配置允许在  $10\text{kHz}$  至  $100\text{kHz}$  的 PWM 频率下工作，最大连续占空比为 95% 左右。另请参阅 [适用于 48V 机器人和伺服驱动器的高分辨率、小尺寸相电流检测](#) 应用手册中的测试结果。

数字电源 DVDD 通过电容器  $C221 = 2.2\mu\text{F}$  和  $C222 = 100\text{nF}$  进行去耦合。AMC0106M05 DOUT 引脚上的  $50\Omega$  串联线路端接电阻器 R188 可提高信号完整性。可选电容器  $C224 = 33\text{pF}$  可降低调制器输出位流信号的压摆率，从而进一步降低 EMI。有关改进隔离式调制器到微控制器的数字接口的更多信息，另请参阅 [在电机驱动器中使用隔离式  \$\Delta\$ - \$\Sigma\$  调制器提高信号完整性](#) 和 [隔离式调制器与 MCU 之间的数字接口的时钟边沿延迟补偿应用手册](#) 应用手册。

### 3.5 系统电源管理

图 3-6 展示了电源树。一个宽输入电压 DC/DC 降压转换器会生成 5V 导轨。然后，两个独立的电源模块分别从 5V 生成两个 3.3V 和 1.8V 导轨。该 3.3V 电源为 MCU 以及其他模拟器件（如逻辑门，调制器和收发器）的所有 IO 电压供电。1.8V 电源为 AM2612 的时钟输入提供电压转换器，还可以作为另一个选项提供 1.8V 闪存。另一个电源模块从 3.3V 生成 1.25V 电源轨，用于为 AM2612 的核心电压供电。

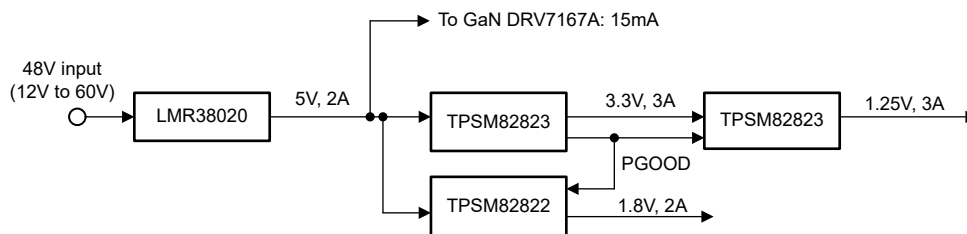


图 3-6. TIDA-010979 系统电源树

LMR38020 DC/DC 降压转换器工作时的输出电压范围为 12V 至 60V。输出电压达到 5V。DC/DC 降压转换器反馈电路旨在实现最小的输出电压纹波，并提供至少 2A 的输出电流。为了最大限度地减小尺寸、开关工作频率为 617kHz，只需使用 22  $\mu$ H 电感器。通过模拟，当输出电流超过 0.1A 时，输出纹波测量值小于 15mV。5V 导轨为下游电源导轨供电，并为 GaN DRV7167A 器件提供逻辑电源。

对于 3.3V 导轨和 1.25V 导轨，采用 2mm  $\times$  2.5mm 超小型封装的独立电源模块 TPMS82823 可满足 3A 的输出电流要求。该电源模块集成了同步降压转换器和电感器，可简化设计、减少外部元件并节省印刷电路板 (PCB) 面积。

与 3.3V 导轨的方式相同，TPMS82822 使用固定输出应用生成 1.8V 导轨以减少外部元件。控制器 MCU AM2612 需要为其提供 3.3V (VDDS33、VDDA33)、1.8V (VDDS1833\_FLASH0、VDDS1833\_FLASH1) 和 1.2V (VDD、VDDARx) 外部电源供电。MCU AM2612 的 3.3V 闪存没有电源序列要求。但使用 1.8V 闪存时，建议 1.2V 和 1.8V 导轨在 3.3V (VDDS33、VDDA33) 斜升后至少斜升 50  $\mu$ s。此参考设计利用 3.3V 电源模块生成的电源正常信号，根据技术参考手册中的建议启用 1.2V 和 1.8V 电源轨。该参考设计使用 3.3V 闪存。

### 3.6 功能安全概念

图 3-7 展示了此参考设计的功能安全概念。安全目标为 3 类、性能 D 或 E (根据安全标准 ISO13849-1)。此安全概念未经过任何公告机构的评审, 仅作为展示电机控制系统内部安全链的示例。本设计中未实现电源轨冗余通道 (两个安全通道均为双路 3.3V)、用于关闭电源的安全开关和诊断电路等附加电路。

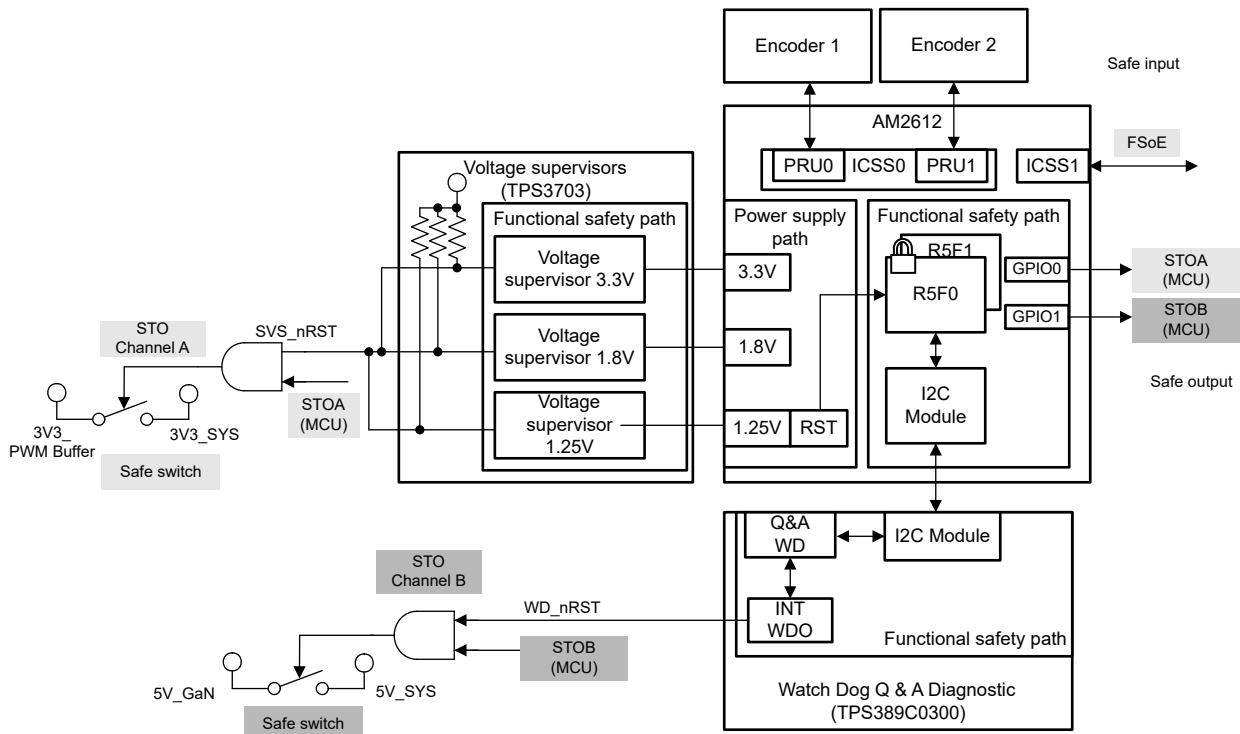


图 3-7. TIDA-010979 功能安全概念

安全链包括安全输入、安全逻辑 (MCU) 和安全输出。安全输入可以来自双通道编码器, 也可以来自安全以太网, 根据需求不同而异。安全数据以黑色通道的形式传输, 安全 MCU 对安全数据执行交叉监控。在安全 MCU 接收到触发命令或诊断电路检测到故障后, 双通道安全输出就会关闭安全开关以触发安全功能。系统进入预先定义的安全状态。表 3-1 描述了电源诊断如何检测危险故障以满足类别 3 性能 D 安全目标。

表 3-1. 电源故障和诊断

故障类型	安全 MCU	电源电压监控器 (SVS)	电源	看门狗 Q&A
电源过压 (OV)	MCU 处于危险状态	检测错误并触发安全状态	电源不运作	Q&A 会检测 MCU 的错误行为 (逻辑或时序) 并触发安全状态
电源欠压 (UV)	MCU 的欠压触发并触发安全状态	检测错误并触发安全状态	电源不运作	Q&A 会检测 MCU 的错误行为 (逻辑或时序) 并触发安全状态
看门狗 (WD) Q&A 失败	Q&A 会检测 MCU 的错误行为 (逻辑或时序) 并触发安全状态	SVS 检测 OV 和 UV	功率在 MCU 的规范内	Q&A 不运作
SVS OV 失败	Q&A 会检测 MCU 的错误行为 (逻辑或时序) 并触发安全状态	SVS 不运作	功率在 MCU 的规范内	Q&A 会检测 MCU 的错误行为 (逻辑或时序) 并触发安全状态
SVS UV 失败	MCU 的欠压触发并触发安全状态	SVS 不运作	功率在 MCU 的规范内	Q&A 会检测 MCU 的错误行为 (逻辑或时序) 并触发安全状态

### 3.7 以太网物理层

该设计利用两个 DP83826A 以太网 PHY 为 EtherCAT 子器件应用实现菊花链连接。图 3-8 展示了一个带有变压器和连接器的 PHY 电路。

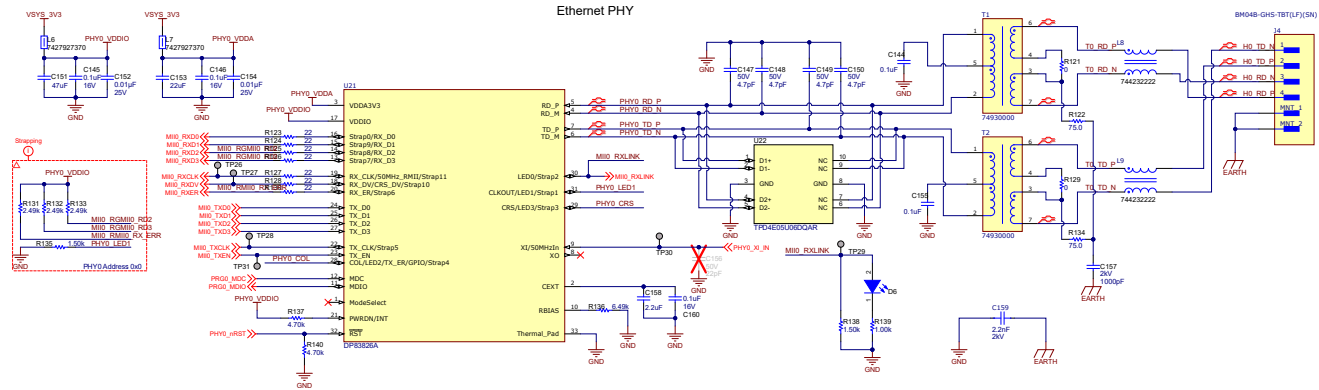


图 3-8. 以太网 PHY0 原理图

通过 U21 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。R131、R132、R133 和 R135 是搭接电阻器。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 L6 和 L7 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 U22 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 (L8、L9) 和连接器 (J4) 而非集成的 RJ45 端口，减少 PCB 占用空间。R122、R134 和 C157 也作为 Bob Smith 终端连接以减少噪声。

### 3.8 位置反馈接口

该设计利用四个 SN65HVD75 RS-485 收发器，通过 BiSS-C 协议提供来自两个位置编码器的反馈。编码器 1 的分辨率为 20 位，提供有关用于 FOC 环路电机控制的电机转子绝对位置数据的反馈。编码器 2 的分辨率为 19 位，为最终用户提供有关绝对位置数据的反馈，并位于齿轮箱减速器之后。差分线路（包括时钟和数据信号）被连接到位置板。来自收发器的 CMOS 信号使用三道外设接口模式直接连接到 PRU-ICSS IO，这一模式专为绝对编码器位置反馈而设计。图 3-9 展示了这两个位置反馈接口的原理图。

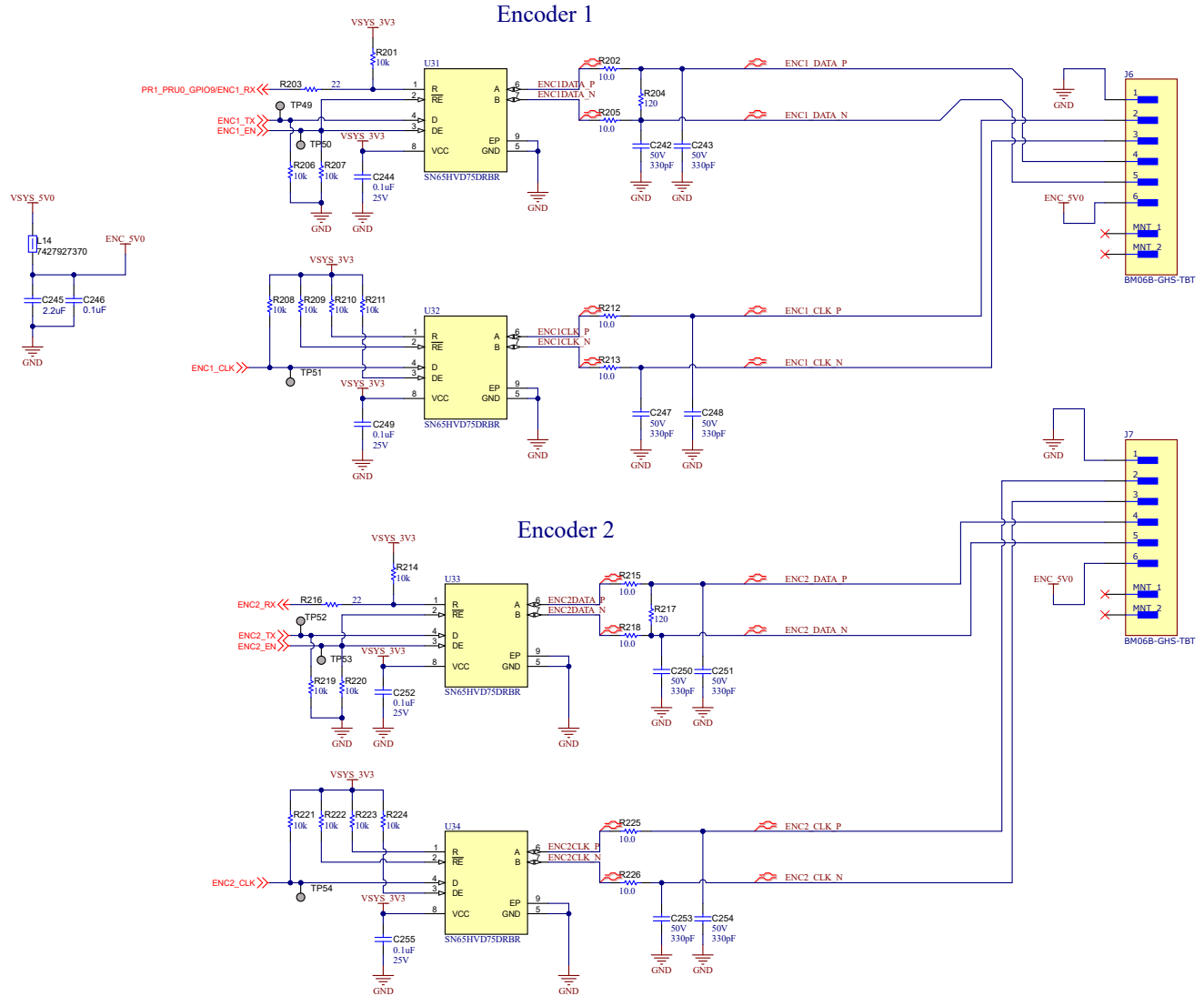


图 3-9. 位置反馈编码器接口原理图

## 4 硬件、软件、测试要求和测试结果

### 4.1 硬件要求

#### 4.1.1 TIDA-010979 PCB 概览

图 4-1 和图 4-2 显示了 PCB 顶面和底面的标记过的照片。

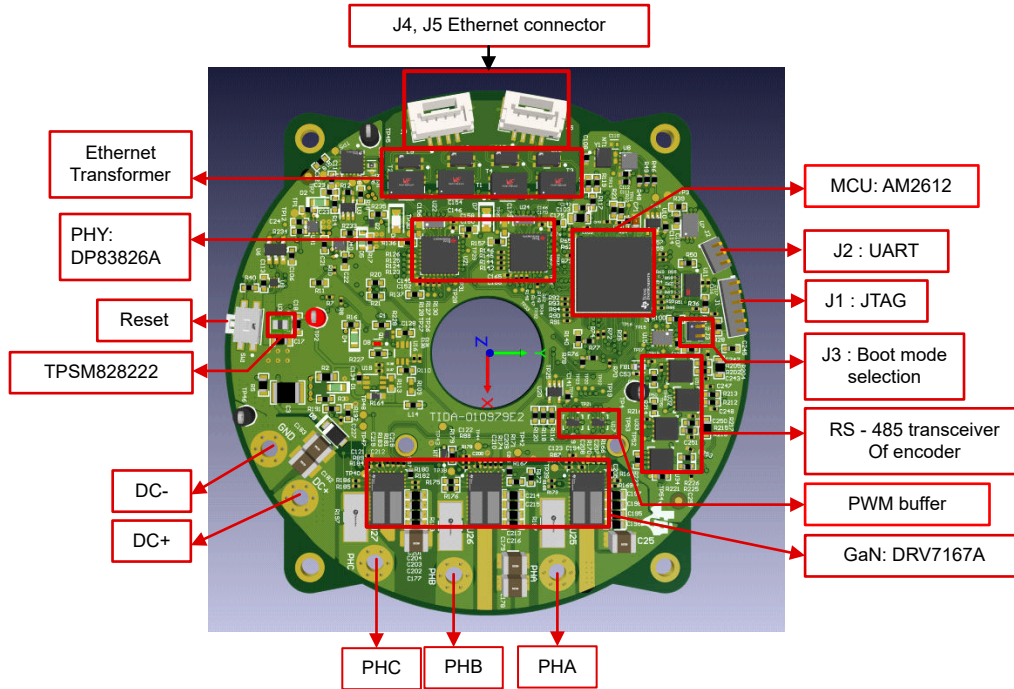


图 4-1. TIDA-010979 PCB ( 顶视图 )

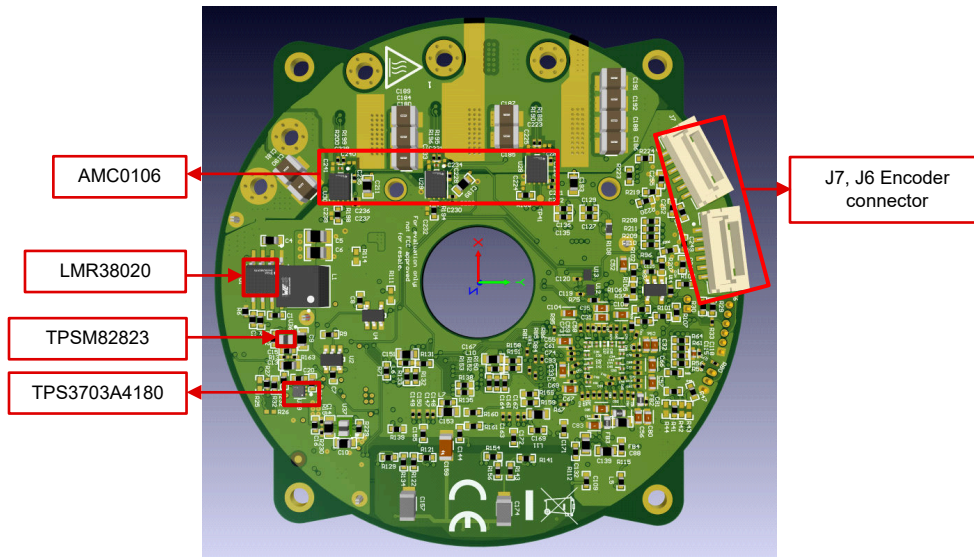


图 4-2. TIDA-010979 PCB 底视图

### 4.1.2 TIDA-010979 硬件设置

要启用 TIDA-010979 电路板，请在 DC+ 和 DC- 穿孔之间施加 48V 直流电压（或更低的电压，具体取决于电机额定值）。通过孔将三根电机相位电源线连接到 PHA、PHB 和 PHC。

将 J1 用作调试软件代码的 JTAG 连接器。将 XDS110 JTAG 调试探针连接到 J1。将 J2 用作 UART 连接器，还可以连接到 XDS110 AUX 引脚，在终端上打印信息或传输数据，例如通过 UART 通信写入闪存。

将 J3 用作引导模式选择跳线。当 J3 短接时，会启用 OPSI (4S) - 四路读取模式作为 MCU 引导模式。当 J3 未连接时，会启用 UART 模式作为 MCU 引导模式。有关 AM2612 引导模式的更多信息，另请参阅 [AM261x MCU+ SDK 11.01.00](#) 用户指南中的 EVM 设置。

将 J6 用作编码器 1 的连接器，以提供电机转子位置信息反馈，将 J7 用作编码器 2 的连接器，以提供齿轮箱减速器位置信息反馈。将 J4 和 J5 用作以太网连接器，可作为菊花链应用的一个端口输入和一个端口输出。图 4-3 展示了 TIDA-010979 硬件设置概览。

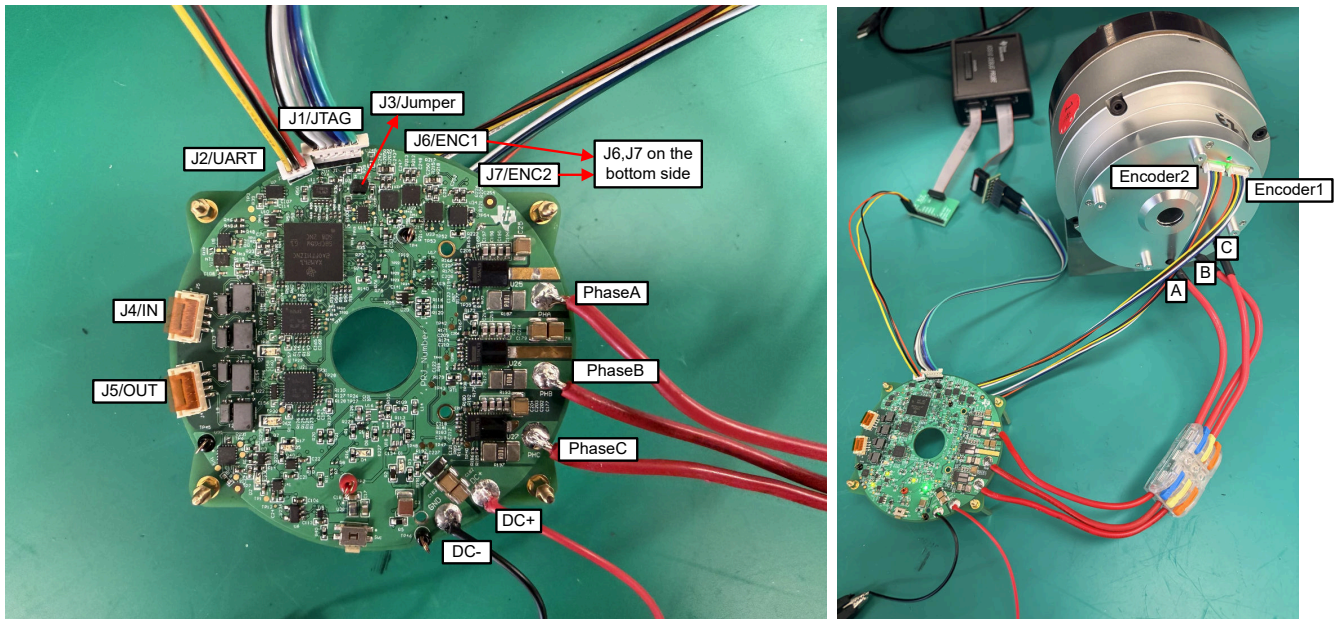


图 4-3. TIDA-010979 硬件设置概览

### 4.2 软件要求

我们为 AM2612 ZNC 封装开发了 TI 内部测试软件来验证此参考设计。有关 AM2612 软件支持，请参阅 [MCU-PLUS-SDK-AM261X 软件开发套件 \(SDK\)](#)、适用于 AM261x 的电机控制 [SDK](#) 和 [IND-COMMS-SDK 软件开发套件 \(SDK\)](#) 工具页面，以及针对 Sitarra 微控制器的 [基于 Arm 的微控制器论坛 - 基于 Arm 的微控制器 - TI E2E 支持论坛](#)。

### 4.3 测试设置

表 4-1 列出了主要测试设备。具体测试的测试设置的相关说明和图片在相应测试结果的部分中提供。

表 4-1. 主要测试设备

说明	器件型号
高速示波器	Tektronix MSO4104B
单端探头	Tektronix P6139B
隔离式电流探针	CYBERTEK CP8030H、HIOKI CT6872
测力计	MAGTROL DSP6000
万用表	Fluke 17B+
热像仪	TESTO 865
可调节电源 (10A)	ITECH IT6724H
可调节电源 (20A)	ITECH M3902C
低压伺服电机 ( 72V、21A )	7H2207124422

### 4.4 测试结果

#### 4.4.1 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 5V、3.3V、1.8V 和 1.25V 电源轨。

图 4-4 和图 4-5 展示了加电和断电时各自的波形。

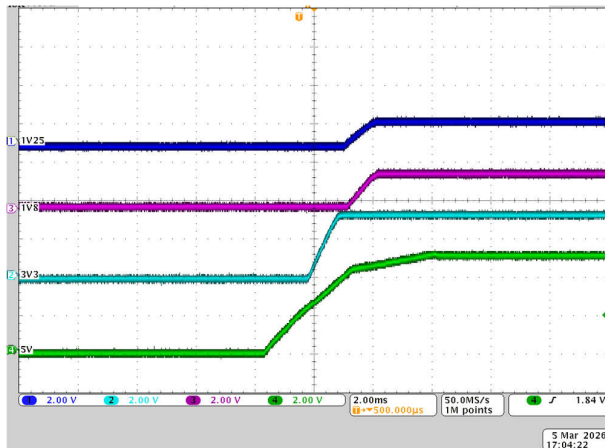


图 4-4. TIDA-010979 系统上电

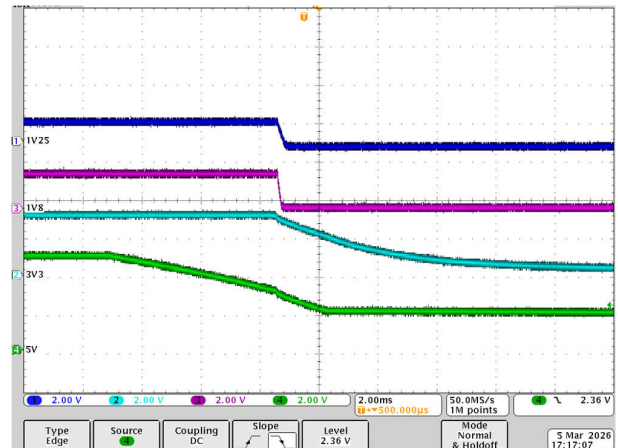


图 4-5. TIDA-010979 系统断电

#### 4.4.2 半桥 GaN 电机驱动器功率级开关节点

图 4-6 到图 4-9 概述了输出相电流为  $10A_{RMS}$ ，频率为  $80kHz$  PWM 时，上升沿和下降沿的开关瞬态电压、传播延迟和可配置的转换率（20% 至 80%）。实施  $0\Omega$  控制电阻时，过冲电压约为  $14V$ 。

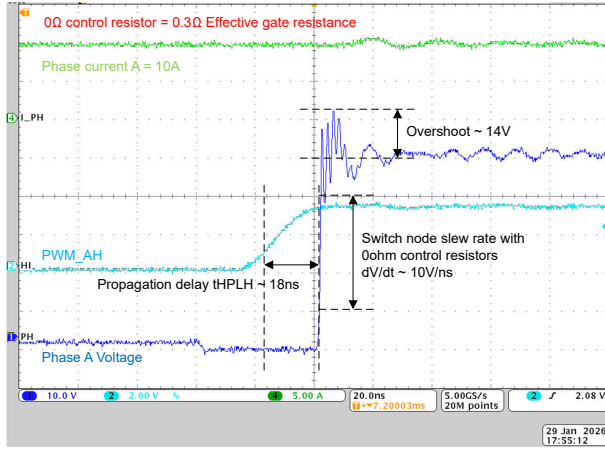


图 4-6. 使用  $0\Omega$  控制电阻时的上升沿转换率

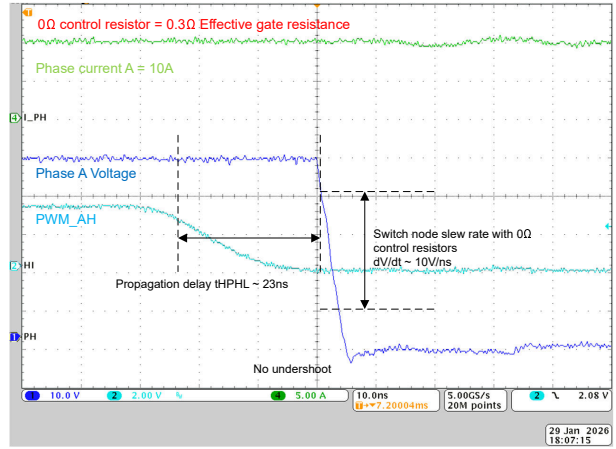


图 4-7. 使用  $0\Omega$  控制电阻时的下降沿转换率

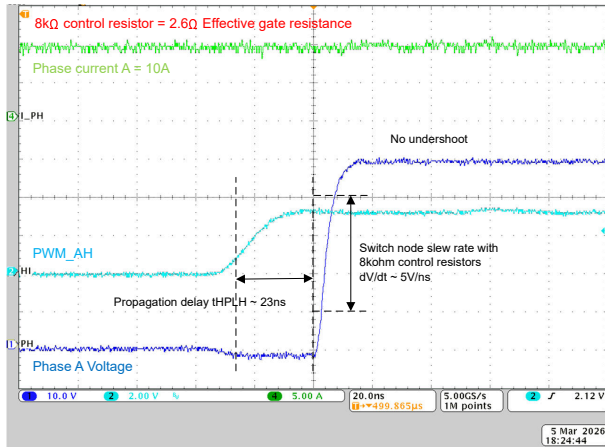


图 4-8. 使用  $8k\Omega$  控制电阻时的上升沿转换率

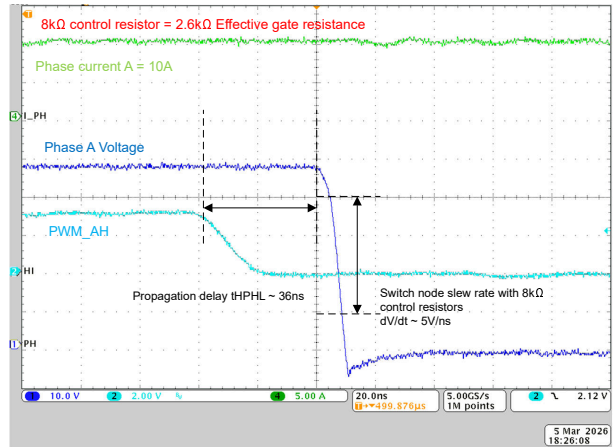


图 4-9. 使用  $8k\Omega$  控制电阻时的下降沿转换率

#### 4.4.3 功率级热测量

热测量测试在 25°C 的实验室温度下完成。TIDA-010979 电路板由 48V 直流电源供电，并连接到大功率伺服电机、该电机作为负载，提供的最大性能为 72V、21A。一个测力计为电机提供高负载。PWM 工作载波频率在 40kHz 至 80kHz 之间。死区工作时间为 40ns。电机工作转速为 80Hz。图 4-10 展示了热测试设置。在所有这些测试中，均未使用散热器和风扇，因此仅使用 TIDA-010979 PCB 的自然对流。

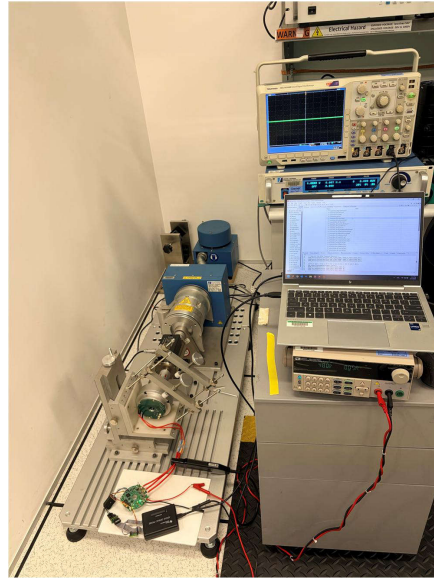


图 4-10. 热测量的测试设置

由于 DRV7167A 将裸片暴露在顶部，因此 DRV7167A 的管壳温度非常接近裸片温度。建议的结温高达 125°C。在此测试中，GaN 器件在 20kHz PWM 频率，16A<sub>RMS</sub> 相电流条件下，温度达到 115°C，而在达到热平衡状态时，在 80kHz PWM 频率，14A<sub>RMS</sub> 相电流条件下，温度达到 118°C。图 4-11 展示了 TIDA-010979 在 16A<sub>RMS</sub>、20kHz PWM 时的热成像图，图 4-12 展示了 TIDA-010979 在 14A<sub>RMS</sub>、80kHz PWM 时的热成像图。图 4-13 展示了两种测试条件下的升温曲线。在 20kHz PWM 载波频率下，2 分钟内的最大相电流约为 17.4A<sub>RMS</sub>。当 17A<sub>RMS</sub> 为 48V 时，假设功率因数等于 1，此时逆变器输出峰值功率达到 1kW。

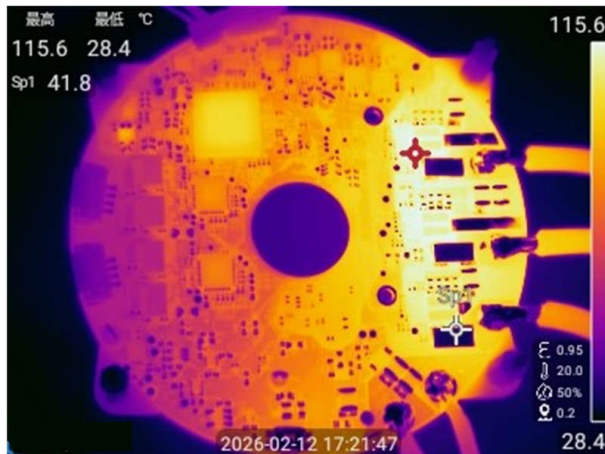


图 4-11. DRV7167 在 16A<sub>RMS</sub>、20kHz PWM 时的热成像图



图 4-12. DRV7167 在 14A<sub>RMS</sub>、80kHz PWM 时的热成像图

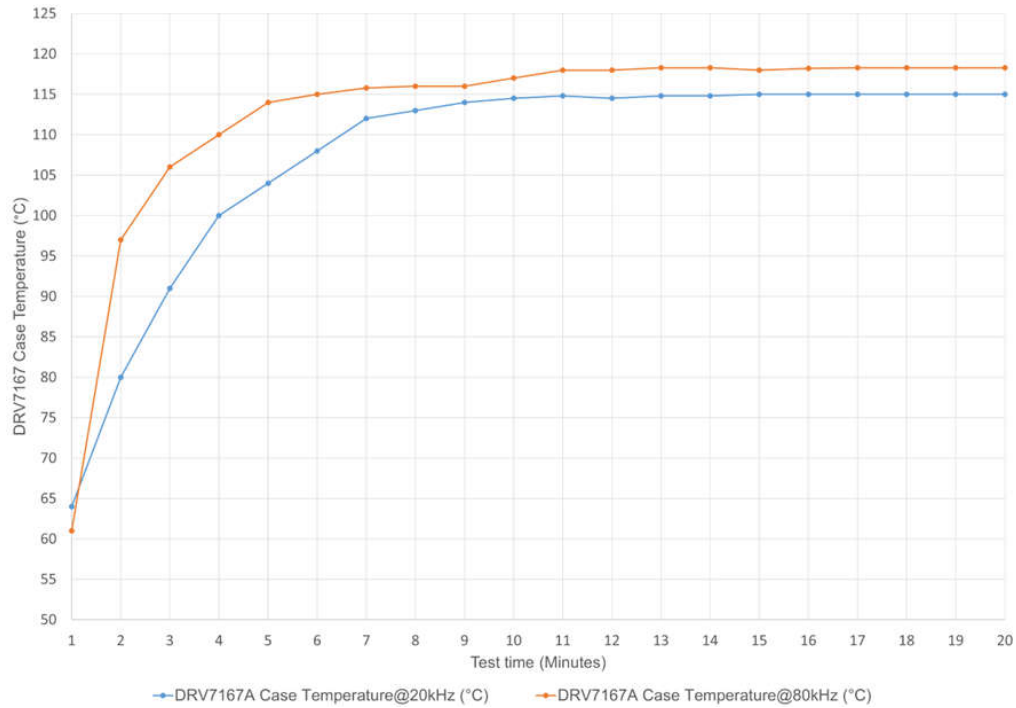


图 4-13. DRV7167A 升温曲线

#### 4.4.4 相电流检测和位置反馈

AMC0106M05 调制器时钟输入通过一个 EPWM 模块驱动，调制器输出数据位流在 AM2612 MCU 上通过以 32 至 256 的过采样率 (OSR) 运行的 Sinc3 滤波器进行抽取。有关使用功能隔离式调制器 AMC0106M05 进行相电流检测的详细测试结果，请参阅 [适用于 48V 机器人和伺服驱动器的高分辨率、小尺寸相电流检测应用手册](#)。图 4-14 展示了 Q 轴的参考电流设置为 20A 时的 A 相和 B 相电流波形。根据测试结果，可以观察到峰值电流与软件中给定的参考电流非常匹配。

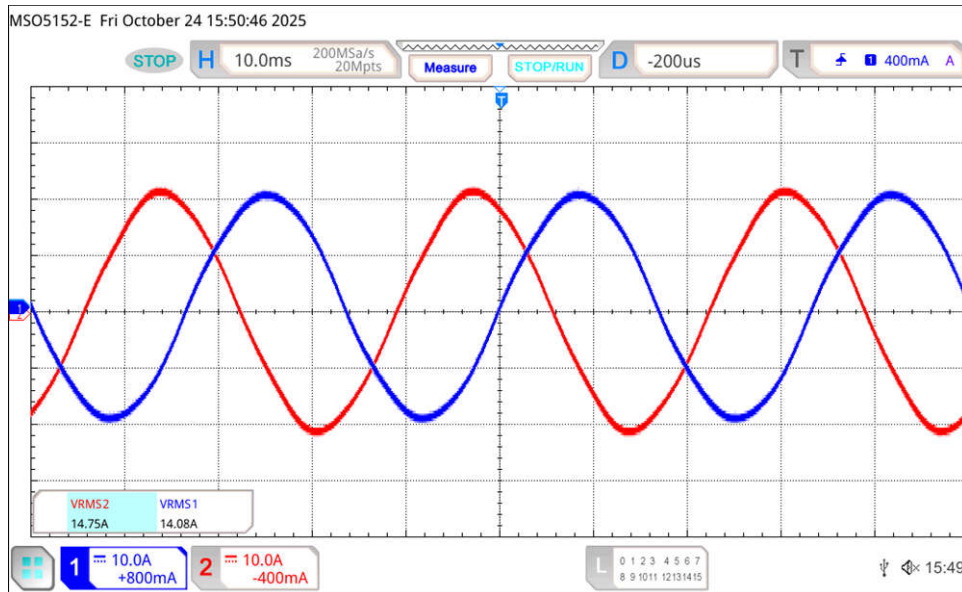


图 4-14. 20A 峰值时的相电流

图 4-15 展示了从编码器 1 收集的位置数据，这些数据表示机械电机旋转角度和用于 FOC 控制环路的电角度。电角度等于电机的机械角乘以电机极对数。EYOU 电机有八个极对。

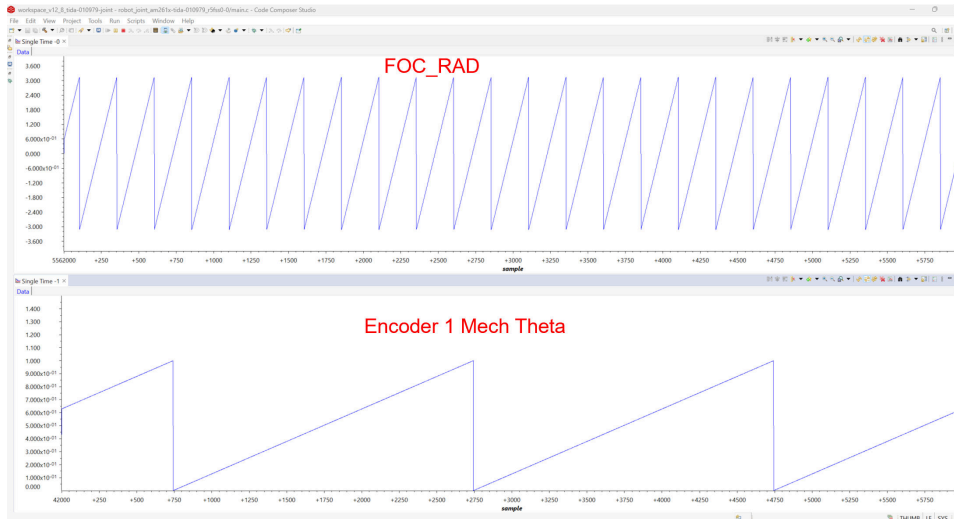


图 4-15. 编码器位置反馈数据

#### 4.4.5 EtherCAT® 通信

该测试验证物理层与介质访问控制 (MAC) 层之间的数据传输。此外，还在用于位置环路控制的数据访问抽象层上验证 EtherCAT 链路和 PDO 数据对象 (PDO) 是否建立。图 4-16 展示了物理层和 MAC 层的连接。

```

Local Implementation
Pruicss max =3 selected PRU:3
pRegPerm = 0x48002000, dram1=0x48002000, offset = 0x00000000, size = 0x00001400
PRU ESC: Rev 0590 | Bld 0537 | INTC base: 0x48020000 , id = 0x4e82a900
INTC.HIDISR addr: 0x48020038
EC_SLV_INT_EEPEMU_prepare:652: Set CatSyncMan[1]:sa=0x100, len=0x100, ctrl=0x26, ena=1
EC_SLV_INT_EEPEMU_prepare:661: Set CatSyncMan[2]:sa=0x1100, len=0x100, ctrl=0x22, ena=1
EC_SLV_INT_EEPEMU_prepare:670: Set CatSyncMan[3]:sa=0x1200, len=0xc00, ctrl=0xc64, ena=1
EC_SLV_INT_EEPEMU_prepare:687: Set CatSyncMan[4]:sa=0x1e00, len=0xc00, ctrl=0xc20, ena=1
+EC_SLV_APP_setObdValues
Configure Phy bits: PhyAddr:2, LinPol:LOW, PhyAddr:0, LinPol:LOW, (0x5)
DP83826E detected
DP83826E detected
PRU_PHY_detect:152 Phy 0 alive
PRU_PHY_detect:152 Phy 2 alive
PHY Disable Magnetics
PHY Enable Magnetics
TI EtherCAT Toolkit CiA402 for AM261X.R5F - e000059dh / 54490029h
Explicit Device ID : 0x 5

****EC SubDevice*****
Numeric Version: 0x0020101
Source Id: <04930bfed349b5aced41953f837ced6ed9d62c30>
****HWAL*****
Numeric Version: 0x0020100
Friendly Version: <KB HWAL v00.02.01.00>
Source Id: <3764cbbee02563e73129376ccac8d785bd6e2773>
****OSAL*****
Numeric Version: 0x0010301
Friendly Version: <KB OSAL v00.01.03.01>
Source Id: <5e1dcc50bb40791bdb358cecc4e4fd35beca6d1e>

SSC_checkTimer:MaxD:9420448 (9)
SSC_checkTimer:MaxET:7
SSC_checkTimer:MaxD:11999872 (11)
PDO size In:0x27/0xd
PDO size Out:0x27/0xd, In:0x27/0xd
    
```

图 4-16. PHY 和 MAC 之间的数据传输

图 4-17 展示了 EtherCAT 状态机和 PDO 框数据。

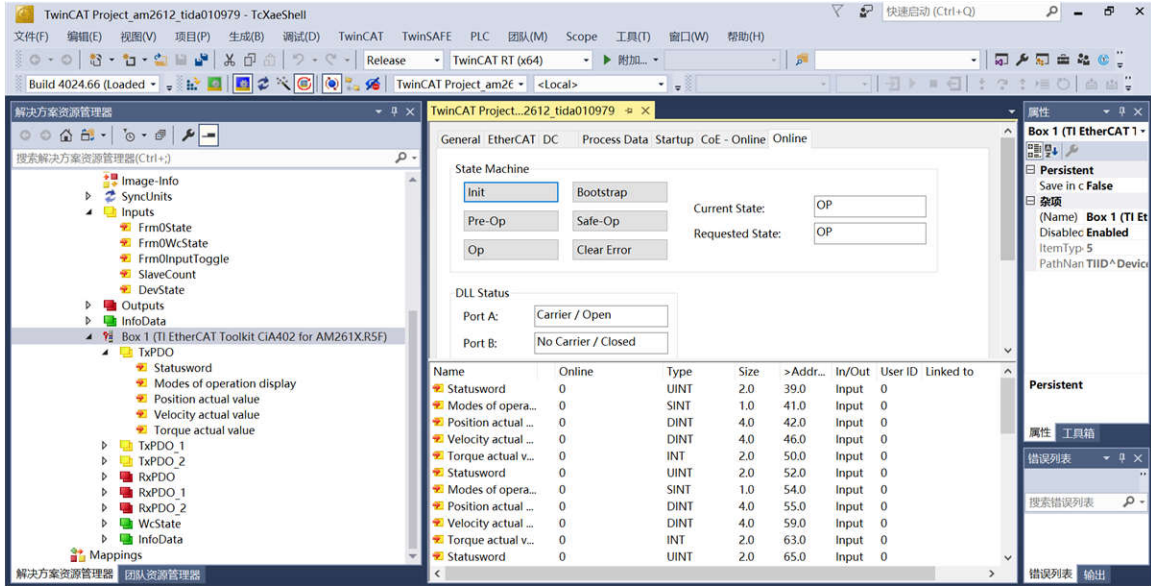


图 4-17. EtherCAT® 状态机和 PDO 框

## 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-010979](#) 中的设计文件。

#### 5.1.2 BOM

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-010979](#) 中的设计文件。

#### 5.1.3 布局图

要下载板层图，请参阅 [TIDA-010979](#) 中的设计文件。

#### 5.1.4 Altium 工程

要下载 Altium 工程文件，请参阅 [TIDA-010979](#) 中的设计文件。

#### 5.1.5 Gerber 文件

要下载 Gerber 文件，请参阅 [TIDA-010979](#) 的设计文件。

#### 5.1.6 装配图

要下载装配图，请参阅 [TIDA-010979](#) 中的设计文件。

### 5.2 工具与软件

#### 工具

<a href="#">CCSTUDIO</a>	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
<a href="#">ARM-CGT-CLANG</a>	Arm® 代码生成工具 - 编译器：下载适用于 Microsoft Windows 或 Linux 的 TI ARM CLANG LTS
<a href="#">SYSCONFIG</a>	SysConfig 独立桌面版本：下载适用于 Microsoft Windows 或 Linux 的 SysConfig 1.26.2

#### 软件

<a href="#">AM261x MCU+ SDK</a>	MCU PLUS SDK Microsoft Windows 安装程序
<a href="#">AM261x 电机控制 SDK</a>	电机控制 SDK Microsoft Windows 安装程序
<a href="#">AM261x 工业通信 SDK</a>	工业通信 SDK Microsoft Windows 安装程序

### 5.3 文档支持

- 德州仪器 (TI)，[AM261x Sitara™ 微控制器数据表](#)
- 德州仪器 (TI)，[AM261x Sitara™ 微控制器技术参考手册附录 \(TRM\)](#)

### 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](#)。

## 5.5 商标

Sitara™, TI E2E™, and Code Composer Studio™ are trademarks of Texas Instruments.  
Arm® and Cortex® are registered trademarks of Arm Limited.  
EnDAT® is a registered trademark of Dr. Johannes Heidenhain.  
Tamagawa® is a registered trademark of reg.  
EtherCAT® is a registered trademark of Beckhoff Automation GmbH.  
Profinet® is a registered trademark of PROFIBUS Nutzerorganisation e.V.  
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。

**EASON TIAN** 是德州仪器 (TI) 工业系统机器人团队的系统工程师，负责为机器人指定并开发参考设计。

作者感谢 **HAN ZHANG** 和 **LORI HEUSTESS** 为支持 TIDA-010979 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

<b>Changes from Revision * (October 2025) to Revision A (March 2026)</b>	<b>Page</b>
• 更新了整个文档以提供完整的 TIDA-010979 参考设计支持。.....	<a href="#">2</a>

## 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