

1 系统说明

许多适用于直流馈电电机驱动器的低压三相逆变器都由 24V 至 60V 直流电源轨供电。在机器人系统中，电机通常具有不同的额定功率，典型值为 200W、400W、750W、1.5kW 和 2.5kW，甚至偶尔会更高，具体取决于要实现的功能。这些电机对电机驱动器的额定电流有不同的要求。

此设计支持 1.5kW 至 4kW 的电机，采用 48V 直流输入。额定输出电流可以是 32A_{RMS} 至 85A_{RMS}；在某些情况下甚至可以达到 100A_{RMS} 左右。

在设计这种功率级时，高效率是关键目标。凭借高效率，可实现小 PCB 尺寸，并且在功率级只能使用外壳作为散热器的集成电机驱动系统中，驱动器可以安装在系统的外壳内。

为了在此设计中实现较小的 PCB 尺寸，智能栅极驱动器 DRV8162L 在防止功率级击穿、过流和短路故障的集成保护功能方面提供了很大帮助。为防止发生击穿，可以启用 V_{GS} 握手及死区时间插入功能。

为了优化系统效率和 EMI 性能，DRV8162L 添加了无需添加任何外部电路即可对输出拉电流和灌电流进行编程的功能。

为了使驱动器能够以超高效率控制电机，A 相和 B 相采用了具有高共模抑制、零漂移特性的电流检测放大器 INA241A 进行基于同相分流器的电流检测。由于放大器具有高增益，因此使用 0.2mΩ 分流器来支持 ±165A 的线性检测范围。选择低电阻分流器也有助于提高系统效率。在 C 相，使用功能隔离式 Δ-Σ 调制器 AMC0106M05 与 0.3mΩ 分流电阻器来检测电流。通过在 MCU 中使用数字 SINC 三抽取滤波器，线性电流测量范围达到 ±167A。

其他反馈包括直流总线电压以及经过脉宽调制 (PWM) 滤波的三相电压，支持对 InstaSPIN-FOC™ 电机等高级无传感器控制进行验证。

在机器人和工厂自动化应用中，确保系统能够安全停止电机并防止任何意外启动是至关重要的要求。为了满足这些系统级要求并实现所谓的安全转矩关闭 (STO) 功能，此参考设计为栅极驱动器提供了各种关断路径组合，以防止电机意外启动。

1.1 参考设计概述

此参考设计使用智能半桥栅极驱动器实现了适用于低压电机的典型 48V 三相逆变器。主要构建块是六个不同的子系统：

1. 三相功率级，包括栅极驱动器和场效应晶体管 (FET)
2. 电压和电流检测
3. 主机处理器接口
4. 诊断测量
5. 系统电源
6. 栅极驱动器的多级关断选项

图 2-1 展示了此参考设计的方框图。用于控制电机的主机处理器不是此设计的一部分。

此设计的重点是测试三相功率级，包括栅极驱动器和 FET。此外，还对同相电流检测进行功能测试。诊断测量和关断选项尚未进行全面测试。

1.2 主要系统规格

表 1-1. TIDA-010956 规格

参数	值 (典型)	注释
直流输入电压	24V 至 60V	绝对最大直流电压为 80V。
输出相电流	85A _{RMS}	连续电流。可能需要散热器，而且 FET 的气流很重要。
同相电流检测范围	±165A (A 相和 B 相)	A 相和 B 相调整至 0V 至 3.3V 范围，反相，偏置电压 1.65V
	±167A (C 相)	C 相调整至 ±50mV 范围
同相电流检测分流器	0.2mΩ (A 相和 B 相)	A 相和 B 相使用两个差分非隔离放大器 INA241A3，具有增强型脉宽调制 (PWM) 抑制功能
	0.3mΩ (C 相)	C 相使用功能隔离式 Δ-Σ 调制器 AMC0106M05
PWM 开关频率	16kHz	高达 40kHz
PWM 死区时间	用户自定义	硬件 R _{DT} 设置下的默认值为 370ns
温度范围	-40°C 至 85°C	可能需要适当的散热器和气流对 FET 进行散热
保护功能	短路保护	使用默认 R _{VDSLVL} 设置。另请参阅表 2-1
	击穿保护	自动死区时间插入握手
	温度保护	安装在 PCB 上的温度传感器可指示过热情况
	UVLO	集成电压为 4.8V
PCB 温度检测范围和精度	-40°C 至 150°C	使用 TMP6131 ±1% 10kΩ 线性热敏电阻
控制器接口信号	用于 PWM、I-V 检测、PWM 缓冲器和栅极驱动器使能、故障的 3.3V I/O	与 TI BoosterPack™ 插件模块兼容；支持 3.3V 信号电平。请参阅节 3.1.2 中的引脚分配。
指示灯 LED	电源轨和用户自定义	3.3V、12V、V _{IN} 输入，有一个用于用户软件控制。
PCB 层堆叠	八层、70 μm 铜	2oz 铜
外形	80mm × 98mm	3150mil × 3860mil

2 系统概述

2.1 方框图

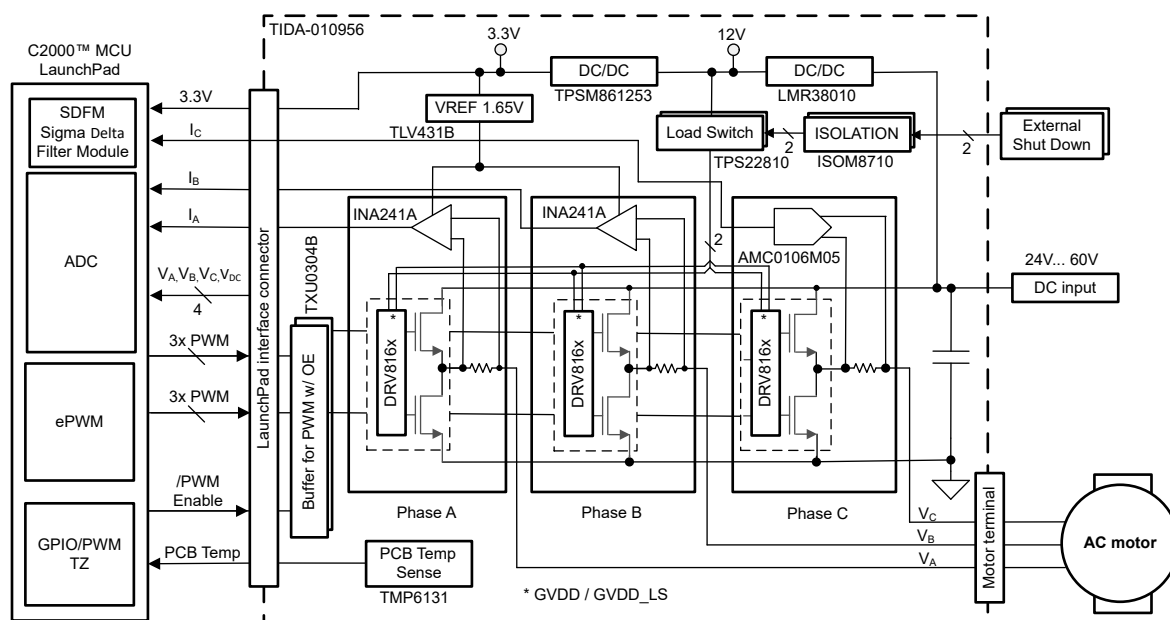


图 2-1. TIDA-010956 系统方框图

2.2 设计注意事项

2.2.1 硬件设计

2.2.1.1 功率级栅极驱动器

2.2.1.1.1 栅极驱动器

DRV8162L 用于驱动半桥配置中的两个 N 沟道功率 MOSFET。该器件支持 16 级输出峰值电流，拉电流高达 1A，灌电流高达 2A。为实现功率级的最佳开关性能，此参考设计对栅极驱动电流进行了优化。

2.2.1.1.2 保护特性

DRV8162L 通过测量 FET 的漏源压降 V_{DS} 来检测功率级的过流事件。DRV8162L 的过流跳变阈值可由具有 13 级选项的配置 (strap) 电阻器进行设置。在 [DRV8162L](#) 数据表电气特性章节的保护电路部分中，使用参数 $V_{DS_LVLx_y}$ 可以找到这些值。最小值为 0.1V，最大值为 2.0V。

凭借此特性，还可以采用消隐时间来确保在 FET 开关期间不会检测到过冲。

更多有关保护特性的信息，请参阅 [DRV8162L](#) 数据表中的栅极驱动器保护电路部分。

2.2.1.1.3 V_{GVDD} 定义

DRV8162L 有两个电源引脚，GVDD 和 GVDD_LS，分别用于高侧和低侧运行。高侧电源 V_{GVDD} 的电压范围为 5V 至 20V。低侧电源 V_{GVDD_LS} 可以更低至最低 3.5V。在 [DRV8162L](#) 数据表的电气特性部分中，使用 V_{GVDD} 参数可以找到这些值。

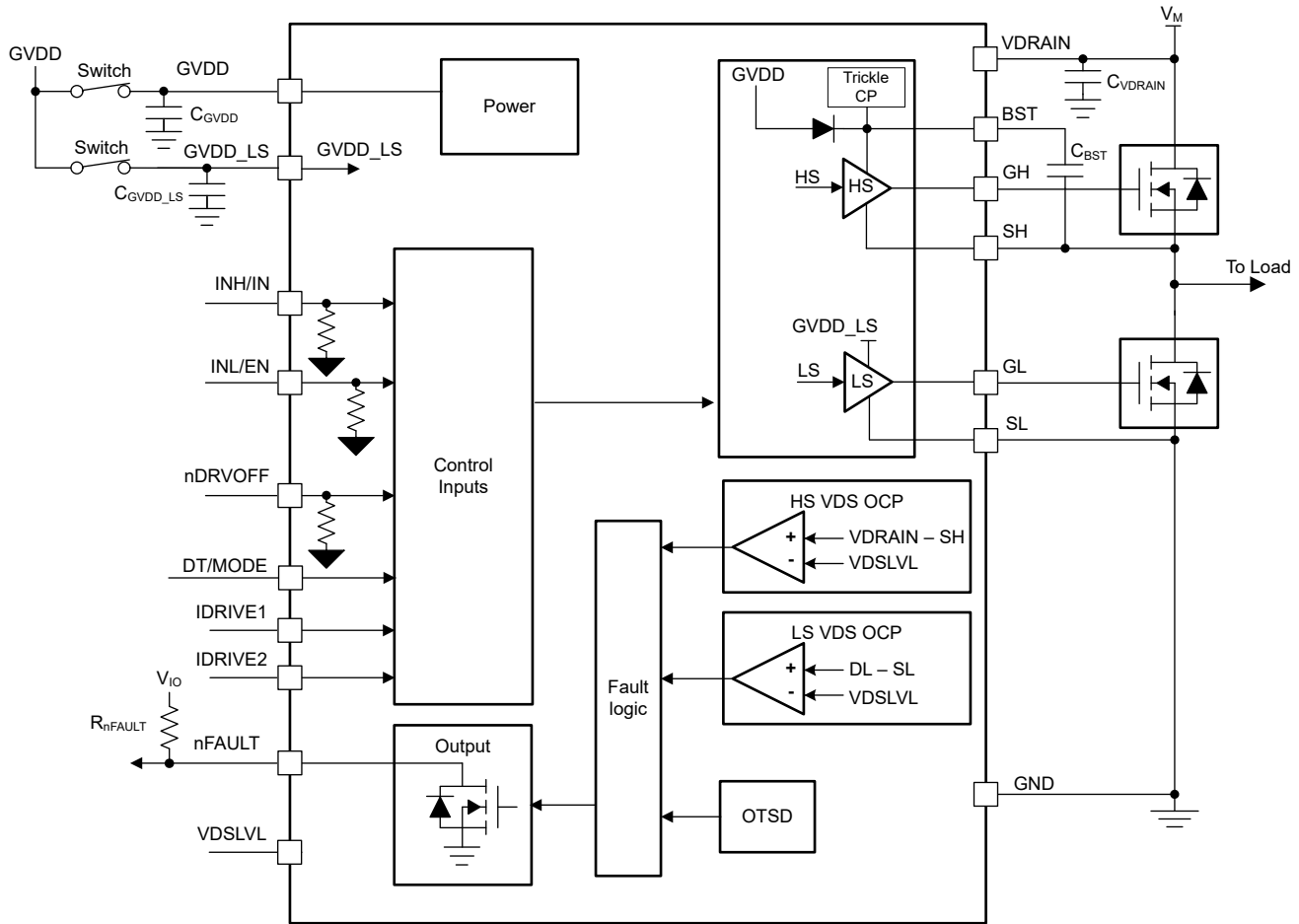


图 2-2. DRV8162L 双电源架构

通常，在该设计中，为获得所选 FET 的最佳性能， V_{GVDD} 和 V_{GVDD_LS} 设置为 12V。

在挑选 FET 时，了解 V_{GS} 和 $R_{DS(ON)}$ 的值非常重要。这些参数对整个系统的效率具有重大影响。

2.2.1.1.4 配置 (Strap) 功能

设计使用 DRV8162L 的应用电路时，可以使用配置 (strap) 电阻器调整以下参数：

- 驱动强度
- 死区时间
- 控制模式
- V_{DS} 过流阈值

2.2.1.2 功率级 FET

鉴于该系统的目标额定功率，选择能够满足系统需求的 FET 很重要。此设计中选择了并联两个 FET 来满足高电流要求。

2.2.1.2.1 V_{GS} 与 $R_{DS(ON)}$ 间的关系

V_{GVDD} 和 V_{GVDD_SL} 电压可以定义导通状态 V_{GS} ，即 FET 在应用中的实际高电平栅极电压。

该值可用于确定 FET 在给定电压下的 $R_{DS(ON)}$ 。定义 DRV8162L 的过流跳变电平时需要 $R_{DS(ON)}$ 。

综合这些考虑因素，对所选 FET 进行了计算，结果如表 2-1 所示。此设计采用两个并联 FET 来实现低 $R_{DS(ON)}$ 并支持高电流输出。该计算是利用欧姆定律完成的。

表 2-1. 与 NTMTSC1D6N10 V_{DS} 相关的 DRV8162L 过流跳变电平

参数	NTMTSC1D6N10		2 × NTMTSC1D6N10	
I_D	267A		534A	
I_{DM}	900A		1800A	
Q_G	106nC		212nC	
结温	25°C	125°C	25°C	125°C
$R_{DS(ON)}$ $V_{GS} = 10V$ 时	1.42mΩ	2.50mΩ	0.71mΩ	0.88mΩ
TRIP LEVEL1-0 : 0.15V	106A	60A	211A	120A
TRIP LEVEL1-1 : 0.2V	141A	80A	282A	160A

使用快速开关 FET 时，每个半桥都可能需要 RC 缓冲器网络来抑制电路振铃。尽管测试用例不需要该缓冲电路，但该设计为每个半桥保留一个 RC 缓冲电路作为测试和调试选项。

2.2.1.3 相电流和电压检测

为了进行技术比较，此设计提供了两种不同的基于分流器的精密相电流检测情况。A 和 B 相采用差分电流检测放大器 INA241A。C 相采用功能隔离式调制器 AMC0106M05。

2.2.1.3.1 A 相和 B 相电流检测

对于 A 相和 B 相电流检测，由于选择用于测试系统的控制器 MCU 的 ADC 模块接受 3.3V 的最大输入电压，因此测量的电压调整至 0V 至 3.3V 范围内。当使用不同的 MCU 时，如有必要，可使用 3.0V 的电压标度。

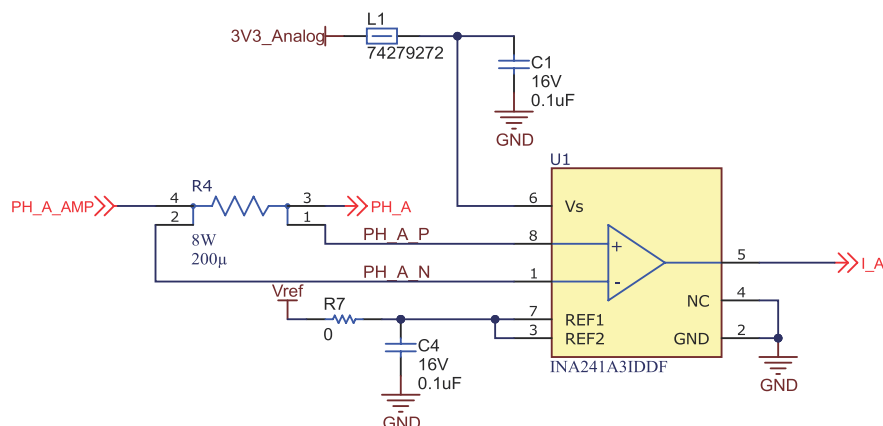


图 2-3. 使用 INA241 进行 A 相内嵌式相电流检测

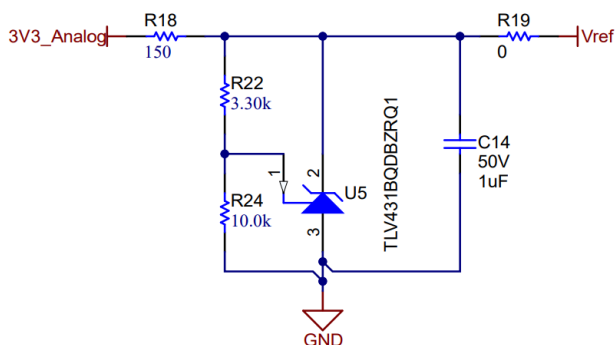
此设计可支持峰值为 85A_{RMS} 或 120A 的额定电机电流。最大电流检测范围设为 165A，留出了一些裕度。根据该规格，选择了 0.2mΩ 8W 分流电阻器，并选择了固定增益为 50 的放大器。

测得的同相电流是双向的，因此计算出的电压范围将进一步扩大到 2 倍。

现在，我们可以使用方程式 1 来计算放大器输出的电压范围。

$$V_{scale} = I_{ph} \times R_{shunt} \times G_{amp} \times 2 = 165A \times 0.2m\Omega \times 50 \times 2 = 3.3V \quad (1)$$

R22 defines the reference voltage:
For $V_{ref} = 1.65V$, choose 3.3k for R22;
For $V_{ref} = 1.50V$, choose 2.1k for R22.



电阻 R18 可限制流入电路的最大电流。选择了 $150\ \Omega$ 电阻器。R22 和 R24 决定了偏置基准电路的输出电压。将 R24 固定为 $10.0\text{k}\ \Omega$ ，则 R22 可选为 $3.3\text{k}\ \Omega$ ，用于 INA241A 的 1.65V 偏置基准。

$$P_{\text{loss}} = I_{\text{RMS}}^2 \times R_{\text{shunt}} = 165\text{A}^2 \times 0.2\text{m}\Omega = 5.445\text{W} \quad (2)$$

2.2.1.3.2 C 相电流检测

C 相电流检测使用功能隔离式调制器 **AMC0106M05** (U4)，其线性输入电压范围为 $\pm 50\text{mV}$ ，以及一个 $300\ \mu\Omega$ 8W 的分流电阻。 $300\ \mu\Omega$ 分流电阻值决定了线性输入范围为 $\pm 167\text{A}$ 。**AMC0106M05** 具有 $\pm 64\text{mV}$ 的输入削波范围，因此最大电流范围可以达到 $\pm 213\text{A}$ 。分流器在 160A 时的功耗为 7.68W 。

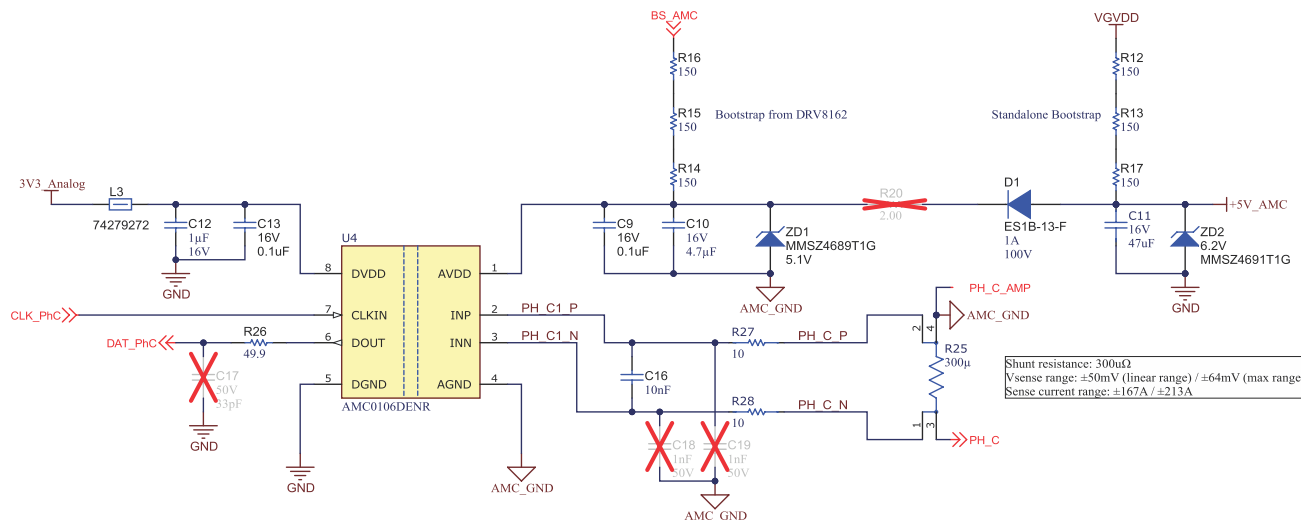


图 2-5. 使用 ACM0306M05 进行 C 相内嵌式相电流检测

此处的应用电路遵循数据表中的建议模式。对于高侧电源，有两个自举电路通道可供选择。一个通道来自 C 相栅极驱动器的自举电压 BS_AMC，通过 R14、R15、R16，然后通过 ZD1 钳位在 5.1V；另一个通道来自由 R20、D1、C11、ZD2 和 R12、R13、R17 构成的独立自举电路。默认情况下，不安装 R20，独立自举电路不处于活动状态。

有关 AMC0106M05 应用和性能的更多详细信息，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。

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](#)应用手册以获取更多设计提示。

2.2.1.3.3 电压感测

此设计测量了直流输入电压 V_{IN} 和驱动器三相输出电压。最大输入电压可达 80V，受限为为栅极驱动器生成 12V 电压轨的 LMR38010 降压转换器。

在此设计中，电压检测分压器设置为支持 80V 最大检测电压，这足以满足系统的 48V 额定 V_{IN} 。

图 2-6 展示了 V_{IN} 电压测量的原理图。

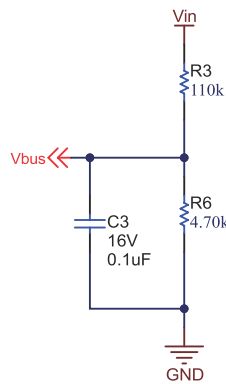


图 2-6. TIDA-010956 V_{IN} 电压检测电路

方程式 3 用于计算。

$$R_6 = \frac{R_3 \times V_{OUT}}{V_{IN} - V_{OUT}} = \frac{110k\Omega \times 3.3V}{80V - 3.3V} = 4,733\Omega \quad (3)$$

其中

- R3 选择为 110k Ω

每个分压器都采用一个低通滤波器；例如在这个具有 C3 的特定通道中。

为了测量相电压和 V_{IN} 电压，将这些值代入方程式 3： $V_{IN} = 80V$ 、 $V_{out} = 3.3V$ 、 $R_3 = 110k\Omega$ 。由此可得 $R_6 = 4733\Omega$ 。选用 4.7k Ω 、1% 电阻。

2.2.1.4 主机处理器接口

处理器接口设计为通过 J1 和 J2 接头与 LAUNCHXL-F280039C 或 LAUNCHXL-F28P65X 配合使用。在此设计中，所有测试均使用 LAUNCHXL-F280039C 控制板完成。有关引脚和信号的更多详细信息，请参阅节 3.1.2.3。

2.2.1.5 栅极驱动器关断路径

由于半桥栅极驱动器 DRV8162L 具有 V_{GVDD} 和 V_{GVDD_LS} 双电源功能，因此可以选择使用独立路径关断三相栅极驱动器的高侧输出和低侧输出。此设计中实施了一个示例电路。

系统中内置了两个分别用于 V_{GVDD} 和 V_{GVDD_LS} 电源的负载开关 (U12 和 U14, TPS22810DRVR)。在 DRV8162L 内部， V_{GVDD_LS} 用于为低侧驱动器电路供电， V_{GVDD} 用于为高侧自举电路供电。

系统中内置的第三个关断路径有一个特定负载开关 (U9 , TPS22948DCKT) 用于控制两个 PWM 缓冲器和电平转换器芯片 (U13 和 U15 , TXU0304BQA) 的 3.3V 电源。两个器件的输出使能 (OE) 引脚都可以配置为馈入系统控制 MCU 的 GPIO 输出 (主机处理器接口的 J2-Pin18) , 或通过光耦仿真器隔离器 (U10 或 U11 , ISOM8710DFF) 馈入外部输入信号。

2.2.1.6 系统诊断测量

2.2.1.6.1 温度测量

此设计中使用的温度传感器 (RT1 , TMP6131DYAR) 为主机控制器提供了一个选项, 可以选择在 PCB 温度 (在 Q3 C 相低侧 FET 旁边的某个点检测到的温度) 过高时直接关闭三相输出或执行某种全面的输出控制。

2.2.1.7 系统电源

如前几章所述, DRV8162L 智能栅极驱动器具有分别用于高侧 (V_{GVDD}) 和低侧 (V_{GVDD_LS}) 的双电源。两者均通过 U12 或 U14 负载开关由 12V 中间电源轨供电。因此, 施加到功率 MOSFET 的实际 V_{GS} 电压可能会受到 12V 电源轨的影响。

2.2.1.7.1 12V 电源轨

为了给 DRV8162L 三相栅极驱动器生成 12V 中间电源轨, 使用了一个 4.2V 至 80V 输入同步降压转换器 LMR38010 (U7), 并使用 $R47 = 25.5k\Omega$ 将其配置为以 1MHz 频率运行。

降压转换器 (U7) 可提供 1A 的最大输出电流。为确保系统电流消耗低于此 1A 电源预算, 需进行负载计算。

表 2-2. 12V 时降压转换器的电流预算

器件型号	电压轨	根据数据表确定的电流消耗	瓦特	12V 电压、80% 效率时的电流
DRV8162L (需要 3 个)	12V	18mA (V_{GVDD})	0.648W	67.5mA
F280039C	3.3V	108mA	0.356W	37mA
总计				104.5mA

这表示在 12V 电源轨中仍有 895.5mA 的剩余输出电流容量可供其他电路使用。

2.2.1.7.2 3.3V 电源轨

在此设计中, 3.3V 电源轨需要为 C2000 主机控制 LaunchPad™ 开发套件和系统控制电路板载组件 (包括检测、诊断和关断控制部分) 提供最大值约为 0.5A 的负载电流。

至于 3.3V 电源轨电路的输入电压范围, 由于 DRV8162L 的 $GVDD$ 采用 12V 电源轨供电, 因此选择具有足够裕度的方案, 以便 3.3V 电源轨电路可以直接使用 V_{GVDD} 作为输入。

该设计使用简单、易用、高效、高功率密度的同步降压模块 [TPSM861253](#) 为 3.3V 电源轨供电。此器件采用 QFN 封装, 输入电压范围为 3V 至 17V, 最大输出电压为 3.3V, 电流为 1A。

2.2.2 软件设计

用于测试此参考设计的软件是根据 [C2000Ware_MotorControl_SDK](#) 中的 `servo_drive_with_can` 示例项目修改的。按照安装文件夹中相关文档中的说明, 调整了示例项目以便适配硬件。

如果之前未安装, 请使用默认设置下载并安装 [C2000WARE-MOTORCONTROL-SDK](#)。在以下路径找到 `servo_drive_with_can` 示例代码:

```
c:\ti\c2000\C2000Ware_MotorControl_SDK_x_xx_xx_xx\solutions\servo_drive_with_can
```

该路径中有多个用于不同 MCU 的子文件夹, 文档也可以在该路径中的 `doc` 子文件夹中找到。

调整工作在 [Code Composer Studio™ 集成式开发环境 \(IDE\)](#) 中完成。如果之前未安装, 请使用默认设置下载并安装 [Code Composer Studio](#)。有关 [Code Composer Studio](#) 的更多说明, 另请参见安装路径上的资源。

若要为参考设计调整示例项目并运行三相电机，请将 **f28003x** 子文件夹中的工程导入 Code Composer Studio，然后进行以下更改：

首先，修改模拟和数字 I/O 端口设置。确保为高侧和低侧 FET 正确配置 C2000™ MCU 的 PWM 信号。确保针对使用的 LaunchPad 开发套件 I/O 端口正确配置了控制输出、故障反馈输入和 ADC 通道。

其次，调整参考设计硬件和系统控制的相关参数和代码。此参考设计使用构建级别 2 进行了测试，这意味着系统在开环配置中运行。

有关软件，C2000Ware_MotorControl_SDK 或 Code Composer Studio 的问题，另请参阅 [C2000 微控制器论坛 E2E 设计支持论坛](#)。

2.3 重点产品

2.3.1 DRV8162L

DRV816x 器件是集成式半桥栅极驱动器，能够驱动高侧和低侧 N 沟道功率 FET。该器件通过 GVDD 电源引脚生成栅极驱动电压，并使用自举电路驱动高侧 FET。有一个涓流电荷泵支持 100% 占空比运行。此栅极驱动架构支持高达 1A 的栅极驱动峰值拉电流和 2A 的栅极驱动峰值灌电流。这些器件可用于驱动各种类型的负载，包括无刷或有刷直流电机、永磁同步电机 (PMSM)、步进电机、开关磁阻电机 (SRM) 和螺线管。

1 引脚 PWM、2 引脚 PWM 和独立 FET PWM 模式支持简单连接到控制器电路和灵活型 FET 功率级配置。硬件引脚有助于配置器件设置，包括电流检测放大器增益、栅极驱动电流和 VDS 过流保护。DRV8161 器件集成的低侧电流检测放大器可将电流测量信息返回至控制器。DRV8162L 器件型号提供单独的 GVDD 和 GVDD_LS 引脚，有助于在系统中设计安全转矩关闭 (STO) 功能。

内部保护功能可用于应对欠压锁定、FET 过流和过热等情况。nFAULT 引脚指示保护功能检测到的故障事件。

2.3.2 INA241A

INA241x 是一款超精密双向电流检测放大器，可在 -5V 至 110V 的宽共模电压范围内测量分流电阻上的压降，不受电源电压的影响。该器件在低失调电压 ($\pm 10\mu\text{V}$ ，最大值)、较小增益误差 ($\pm 0.01\%$ ，最大值) 和高直流 CMRR (典型值为 166dB) 等特性的综合作用下，可实现高精度电流测量。INA241x 适用于开关系统中的高压双向测量，这些系统在器件输入端会出现高共模瞬态电压。尽管输入端存在共模电压转换，INA241x 内部的增强型 PWM 抑制电路可保持输出端的信号干扰最小。

INA241x 由 2.7V 至 20V 的单电源供电，消耗 2.5mA 的电源电流。INA241x 提供 10V/V、20V/V、50V/V、100V/V 和 200V/V 五种增益选项。运用多个增益选项，可实现在可用的分流电阻值和宽输出动态范围要求之间进行优化。

INA241x 额定运行温度范围为 -40°C 至 +125°C。

2.3.3 AMC0106M05

AMC0106Mxx 器件是功能隔离式精密二阶 Δ - Σ 调制器，用于分流式高精度隔离电流检测。AMC0106M05 支持 $\pm 50\text{mV}$ 的线性输入范围，AMC0106M25 支持 $\pm 250\text{mV}$ 。

隔离栅将器件在不同共模电压电平下运行的两个部分隔开，并支持高达 $200\text{V}_{\text{RMS}}/280\text{V}_{\text{DC}}$ 的工作电压以及高达 $570\text{V}_{\text{RMS}}/800\text{V}_{\text{DC}}$ 的瞬态过压。电隔离栅支持高共模瞬变，并且可以将敏感控制电路与功率级的开关噪声隔离开来。

AMC0106Mxx 器件采用小型 $2.7\text{mm} \times 3.5\text{mm}$ 无引线封装，爬电距离和间隙为 1mm。这种小封装尺寸可实现小型 PCB 布局，这对于小尺寸电机驱动应用至关重要。

为了降低电流检测分流器上的功耗，在本设计中，选择了 $300\mu\Omega$ 、8W 的分流电阻器与 AMC0106M05 在 C 相电流检测中配合使用。这使得线性全检测范围达到 $\pm 167\text{A}$ 。

AMC0106M05 的输出位流与外部时钟同步。该器件与 sinc3、OSR 256 滤波器相结合，可实现 16 位分辨率、82.5dB 动态范围和 78kSPS 数据速率。

2.3.4 TPSM861253

TPSM861253 是一款输入电压范围为 3V 至 17V 的简单易用型高效、高功率密度同步降压模块，支持高达 1A 的连续电流。该器件具有固定的 3.3V 输出电压并支持 FCCM 模式。该器件还在模块内部集成了分压电阻器和前馈电容器。此外，还集成了包括 OVP、OCP、UVLO、OTP 和 UVP 在内的全面断续模式保护。

2.3.5 LMR38010

LMR38010 同步降压转换器用于在宽输入电压范围内进行调节，从而更大幅度地减少对外部浪涌抑制元件的需求。LMR38010 能够在输入电压突降至 4.2V 时根据需要以接近 100% 的占空比继续工作，因而是宽输入电压范围工业应用和 MHEV/EV 系统的理想选择。

LMR38010 使用精密使能端，通过支持直接连接到宽输入电压或对器件启动和关断进行精确控制来提供灵活性。附带内置滤波和延迟功能的电源正常状态标志可提供系统状态的真实指示，免去了使用外部监控器的麻烦。该器件采用假随机扩频技术来尽可能降低 EMI，并且开关频率可配置为 200kHz 到 2.2MHz 之间的频率以避开噪声敏感频段。另外，可以选择频率，从而在低工作频率下提高效率，或在高工作频率下缩小设计尺寸。

该器件具有内置的保护功能，例如逐周期电流限制、断续模式短路保护以及功耗过大情况下的热关断功能。

LMR38010 采用 8 引脚 HSOIC PowerPAD 集成电路封装。

2.3.6 TMP6131

TMP61 线性热敏电阻可在整个温度范围内提供线性度和始终如一的灵敏度，支持使用简单而准确的方法进行温度转换。该器件的低功耗和较小的热质量可充分减小自发热。

这些器件具有内置的高温失效防护性能以及对环境变化的强大抵抗力，设计用于长寿命的高性能应用。TMP6 系列器件外型小巧，可靠近热源放置，并具有快速响应时间。

与 NTC 热敏电阻相比，它具有以下优点：无需额外的线性化电路、更大程度减少校准工作量、电阻容差变化更小、高温下灵敏度更高以及可节省时间和内存的简化转换方法。

TMP61 目前采用 0402 X1SON 封装、0603 SOT-5X3 封装，以及 2 引脚穿孔式 TO-92S 封装。

2.3.7 ISOM8710

ISOM871x 系列器件是为数据速率高达 25Mbps 的数字信号提供隔离的光耦仿真器，是光耦合器的单通道、引脚兼容的可直接替代器件。虽然标准光耦合器使用 LED 作为输入级，但 ISOM871x 使用仿真二极管作为输入级。输入级通过 TI 专有的基于二氧化硅 (SiO₂) 的隔离栅与驱动器级隔离，不仅能够提供可靠的隔离，而且还提供出色的共模瞬态抗扰度。订购选项包括 CMOS 输出和集电极开路输出选项。

ISOM871x 器件可隔离高速数字信号，并提供传统光耦合器不具备的性能、可靠性和灵活性优势。这些器件基于实现低功耗和高速运行的 CMOS 隔离技术，因此不受光耦合器中的磨损效应影响，这种磨损会随着温度、正向电流和器件使用年限的增加而降低性能。

3 硬件、软件测试要求和测试结果

3.1 硬件要求

3.1.1 PCB 概述

图 3-1 所示为搭载 LAUNCHXL-F280039C 的 TIDA-010956 PCB 的顶面图。

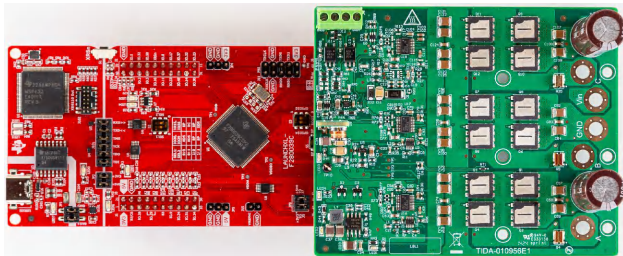


图 3-1. 电路板图片 (顶视图)

3.1.2 硬件配置

3.1.2.1 先决条件

TIDA-010956 设计指南的评估测试需要以下硬件设备和软件。

表 3-1. 先决条件

设备	注释
TIDA-010956	可从 设计文件夹 获取
适用于 C2000™ 实时 MCU 的 TMS320F280039C LaunchPad™ 开发套件	可从 LAUNCHXL-F280039C 获取
Code Composer Studio™ 集成开发环境 (IDE) 版本 12	从 CCSTUDIO 下载
C2000Ware_MotorControl_SDK	从 C2000WARE-MOTORCONTROL-SDK 下载
电机	需要支持设计的电压和电流电平
电源	需要支持设计的电压和电流电平

3.1.2.2 默认电阻器和跳线配置

在使用 TIDA-010956 电路板之前，请确保应用正确的电阻设置。表 3-2 显示了默认电阻设置。由于此基准通过默认设置 R29 直接为 MCU 控制器板提供了 3.3V 电源轨，因此对于 LAUNCHXL-F280039C 上的跳线，请移除 JP1 以从 PC USB 端口断开 5V 电源。

表 3-2. 默认电阻器和跳线设置

接头和电阻器	跳线设置
R51 和 R58	此电阻器可禁用外部关断输入信号的隔离器
R54 和 R56	此电阻器定义了哪条关断路径将驱动 PWM 禁用功能的负载开关
R61 和 R63	此电阻器定义了哪条关断路径可以驱动高侧栅极驱动器禁用功能的负载开关
R67 和 R69	此电阻器定义了哪条关断路径可以驱动低侧栅极驱动器禁用功能的负载开关
R29	此 0 Ω 电阻器通过板载 3.3V 电压为 LAUNCHXL-F280039C 供电。使用前移除 LaunchPad 上的 JP1。
R83、R86；R98、R101；R111、R114	此电阻器可配置 DRV8162L 的三相栅极驱动电流。 <i>IDRIVE1</i> 和 <i>IDRIVE2</i> 的默认设置均为 <i>LEVEL0</i> 。
R84、R99、R112	这些电阻器可配置 DRV8162L 的 V_{DS} 监测阈值电平。默认设置为 <i>LEVEL1</i> 。
R85、R100、R113	此电阻器位于 DT/MODE 外部，用于设置死区时间。默认设置为 <i>LEVEL3</i> 。

3.1.2.3 连接器

3.1.2.3.1 主机处理器接口

表 3-3 显示了 TIDA-010956 参考设计用于与 LAUNCHXL-F280039C 的 C2000 LaunchPad 通信的信号。

表 3-3. J1 和 J2 主机处理器接口的引脚排列

LAUNCHXL-F280039C				TIDA-010956			
J5	J7	J8	J6	J1		J2	
3.3V	5V ⁽²⁾	PWM7A	GND	3.3V	NC ⁽²⁾	PWM_CH	GND
ADCINC1 ⁽²⁾	GND	PWM7B	GPIO27 ⁽²⁾	NC ⁽²⁾	GND	PWM_CL	NC ⁽²⁾
GPIO15	ADCINB11	PWM4A	GPIO47	LED4	Vbus ⁽¹⁾	PWM_BH	故障
GPIO56 ⁽²⁾	ADCINA10、 ADCINB1、 ADCINC10	PWM4B	GPIO57 ⁽²⁾	NC ⁽²⁾	V_C ⁽¹⁾	PWM_BL	NC ⁽²⁾
GPIO56 ⁽²⁾	ADCINA5	PWM5A	XRSn ⁽²⁾	NC ⁽²⁾	V_B ⁽¹⁾	PWM_AH	NC ⁽²⁾
ADCINA9 ⁽²⁾	ADCINA4、 ADCINB8	PWM5B	SD2_D3	NC ⁽²⁾	V_A ⁽¹⁾	PWM_AL	DAT_PhC
GPIO58 ⁽²⁾	ADCINB4、 ADCINC8 ⁽²⁾	GPIO21 ⁽²⁾	SD2_C3	NC ⁽²⁾	NC ⁽²⁾	NC ⁽²⁾	SD_CLK
GPIO4	ADCINB5	EPWM1B	GPIO20	VDSLVLCC	I_B ⁽¹⁾	SD_CLK ⁽¹⁾	EN_DRV
GPIO18	ADCINA12、 ADCINC5	EPWM2A	GPIO26	VDSLVLCA	I_A ⁽¹⁾	CLK_PhC ⁽¹⁾	PWM_EN
GPIO19	ADCINA0、 ADCINB15、 ADCINC15	GPIO40 ⁽²⁾	GPIO25 ⁽²⁾	VDSLVLCA	温度 ⁽¹⁾	NC ⁽²⁾	NC ⁽²⁾

(1) 此设计中尚未测试以斜体显示的信号。

(2) 灰色代码显示的是 TIDA-010956 设计中未连接或保留的引脚。

使用 LAUNCHXL-F280039C 测试与 J5、J7 和 J6、J8 的连接，如表 3-3 所示。TIDA-010956 还可以与 LAUNCHXL-F280039C 或 LAUNCHXL-F28P65X LaunchPad 的 J1、J3 和 J2、J4 连接器搭配使用。

3.2 测试设置

表 3-4 中列出的设备是用于 TIDA-010956 测试会话的设备。

表 3-4. DRV8162L 设置

测试设备	器件型号
示波器	Tektronix DPO3054
探头	Tektronix TPP0200
电流探针	CYBERTEK CP8500A
PMSM 电机	GLOBE6440
电源	Agilent 6030A , ITECH IT6724H

在不同的测试中使用了 表 3-4 所述的某种设备。图 3-2 显示了用于系统的测试设置。

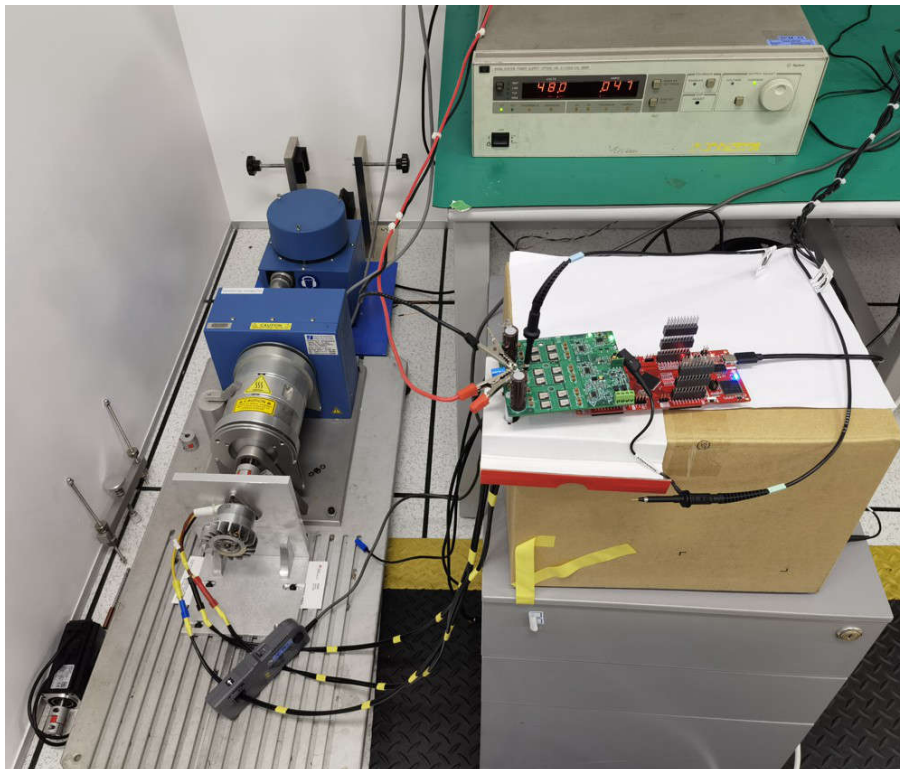


图 3-2. TIDA-010956 系统测试设置

除非另有说明，否则在测试期间以表 3-5 所示的方式设置 DRV8162L 芯片。

表 3-5. DRV8162L 设置

IDRIVEP	1024mA	IDRIVE1 = LEVEL0 ($V_{IDRIVE1} = 0k\Omega$) 且 IDRIVE2 = LEVEL0 ($V_{IDRIVE2} = 0k\Omega$)
IDRIVEN	2048mA	
VDSLVL	LEVEL1-0 : 0.15V 或 LEVEL1-1 : 0.2V	LEVEL1 ($R_{VDSLVL} = 2k\Omega$)
DEAD_TIME	370ns 死区时间	LEVEL3 ($R_{DT} = 3.3k\Omega$)

在测试中使用了 LAUNCHXL-F280039C 的 C2000™ LaunchPad 来控制系统。相关的 MCU 软件设置如 表 3-6 所示。

表 3-6. C2000 MCU 设置

PWM	16kHz	死区时间	200ns
-----	-------	------	-------

测试中使用了不同的设置，相关测试章节中介绍了这些设置。

3.3 测试结果

为了解每个功能块及整个电路板的特性，我们进行了相关测试。具体来说，进行了如下测试：

- 电源管理
- 三相功率级测试
- 电压和电流检测测试
- 系统热性能

测试在约 28 摄氏度的室温条件下执行。

3.3.1 电源管理

本节展示了 TIDA-010956 的上电和断电序列。相关测量是按 图 3-3 所示的过程完成的。

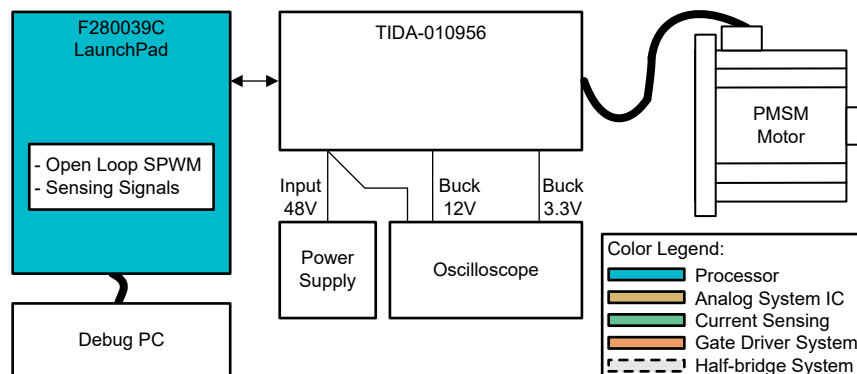


图 3-3. TIDA-010956 电压轨测试设置图

3.3.1.1 上电

图 3-4 展示了 TIDA-010956 上电序列。

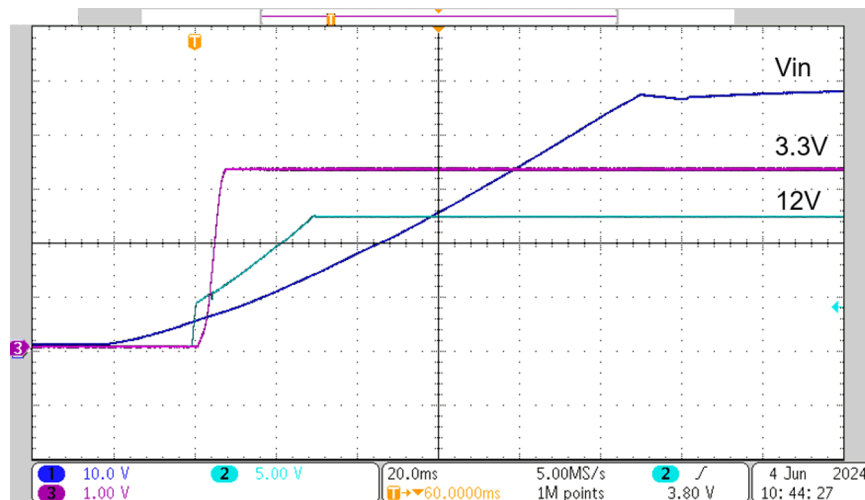


图 3-4. TIDA-010956 上电序列

系统的上电序列如下：48V V_{IN} (以深蓝色显示的 CH1) 首先高于大约 5V，然后 LMR38010FDDAR 开始提供 12V 电源轨 (以浅蓝色显示的 CH2)。当这个 12V 电源轨约为 5V 时，将启用 3.3V 电源轨 (以紫色显示的 CH3)。

为主要由 $330\mu\text{F} \times 2 + 2.2\mu\text{F} \times 20$ (总共超过 $700\mu\text{F}$) 组成的 VDC 总线电容器充电时， V_{IN} 的斜升速度较慢。如果采用电容器板，则需要另外添加 $180\mu\text{F} \times 20 = 3.6\text{mF}$ 。

3.3.1.2 断电

在断电过程中， V_{IN} 的下降速度也很慢，因为 V_{IN} 必须使大于 $700\mu F$ 的电容器放电（请参阅图 3-5）。当 V_{IN} 降至大约 7V 时，12V 电源轨开始断电。当这个 12V 电源轨达到大约 4V 时， V_{IN} 会关断 3.3V 电源轨。然后，电容器的剩余电荷将缓慢消散。

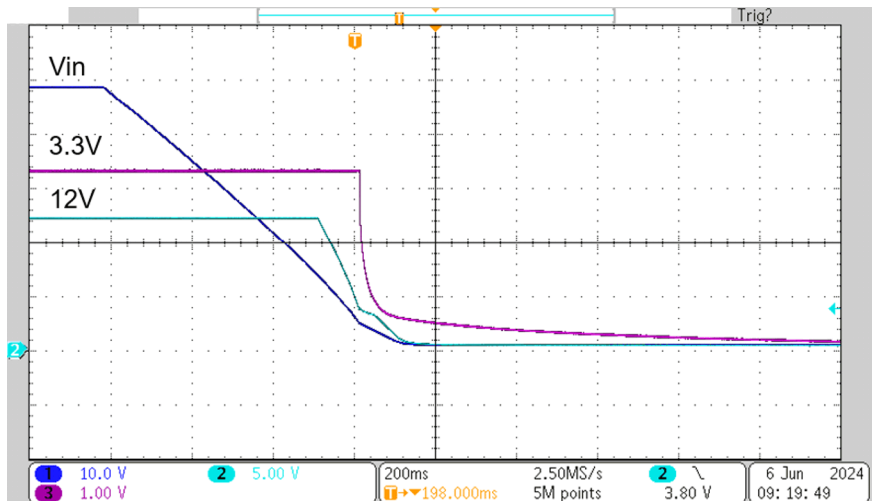


图 3-5. TIDA-010956 断电序列

表 3-7 显示了电流为 12V 电源轨时的系统状态。

表 3-7. 各种系统状态下的 12V 电源轨电流

测量	系统状态	12V 电源轨电流
电流 (mA)	空闲 (禁用栅极驱动器)	73.5
电流 (mA)	16kHz PWM	125.4

备注

默认情况下，此设计中的 C2000 LaunchPad 应由 TIDA-010956 通过 0Ω 电阻器 (R29) 以 3.3V 电源供电。在施加 V_{IN} 之前，先移除 LAUNCHXL-F280039C 上的 JP1 (PC USB 上的 5V 电源)。

3.3.2 栅极电压和相电压

为了测量开关节点上的栅极电压和相电压，执行了以下测量。图 3-6 显示了测试设置。

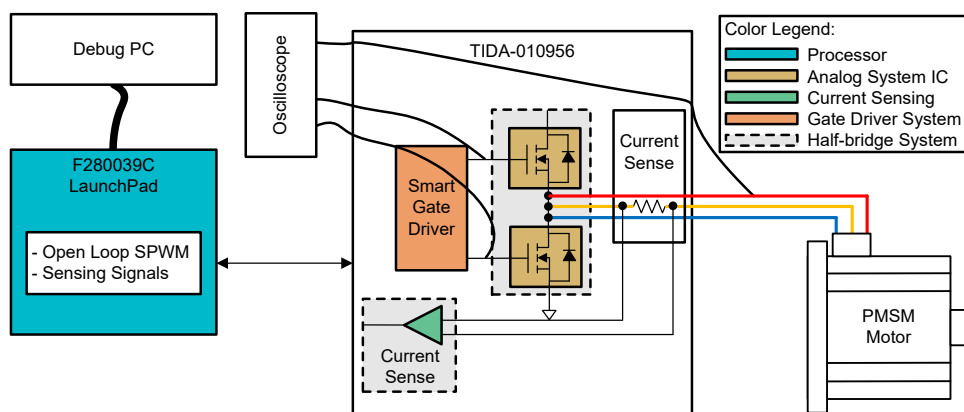


图 3-6. 栅极电压和开关节点电压测量的测试设置

在这些测试中，施加的 VDC 为 48V，将电机设置为固定角度并采用开环矢量控制。在 B 相中测量信号，包括低侧 MOSFET 的栅极电压 (以深蓝色显示的 CH1)、该相位的开关节点电压 (以浅蓝色显示的 CH2) 和输出电流 (以绿色显示的 CH4)。两个电压都以 GND 为基准，相电流的正向为从驱动器到电机。

节 3.3.2.1、节 3.3.2.2 和节 3.3.2.3 中的测量结果显示了当电流设置为正值和负值时相应条件下的相移。这里测量了低侧 MOSFET 的所有四种软开关和硬开关配置。

3.3.2.1 20VDC

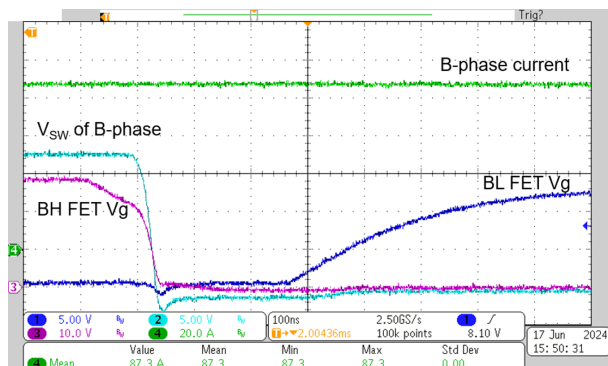


图 3-7. 硬开关，20V、87.3A 时的相电流

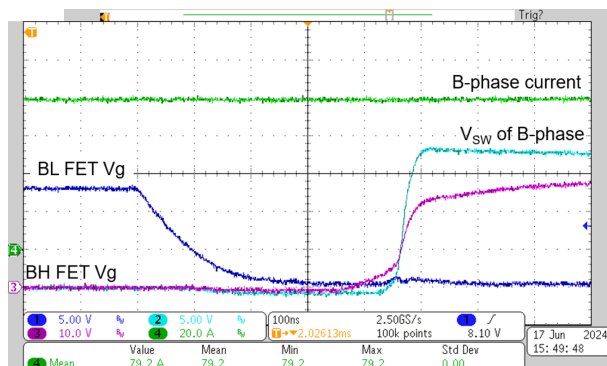


图 3-8. 软开关，20V、79.2A 时的相电流

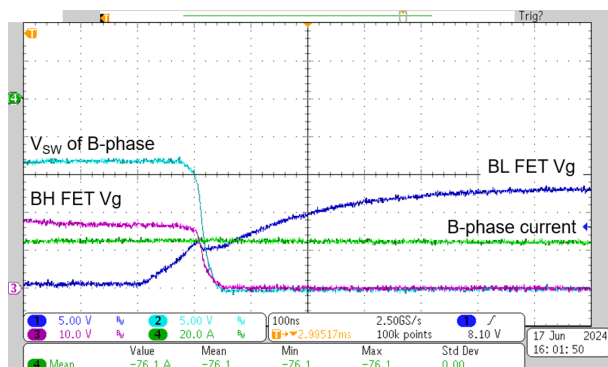


图 3-9. 软开关，20V、-76.1A 时的相电流

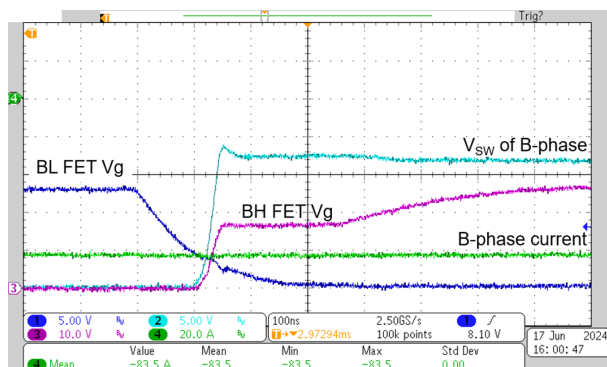


图 3-10. 硬开关，48V、-83.5A 时的相电流

3.3.2.2 48VDC

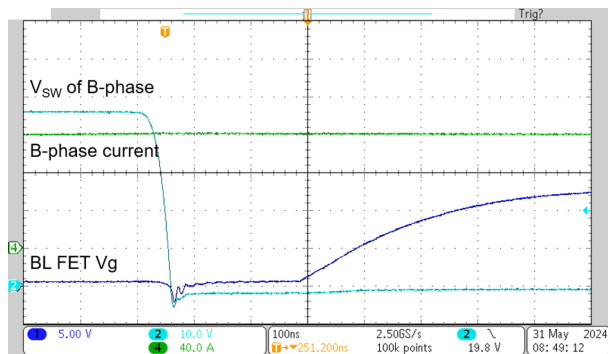


图 3-11. 硬开关, 48V、120A 时的
相电流

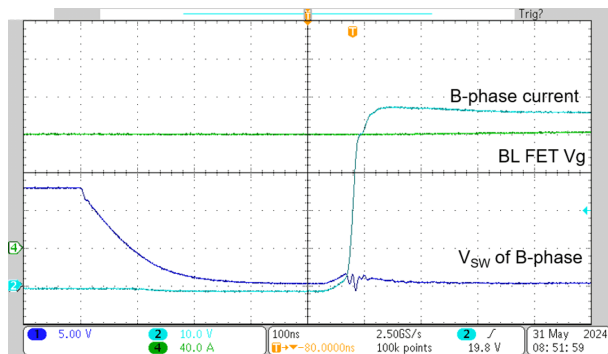


图 3-12. 软开关, 48V、120A 时的
相电流

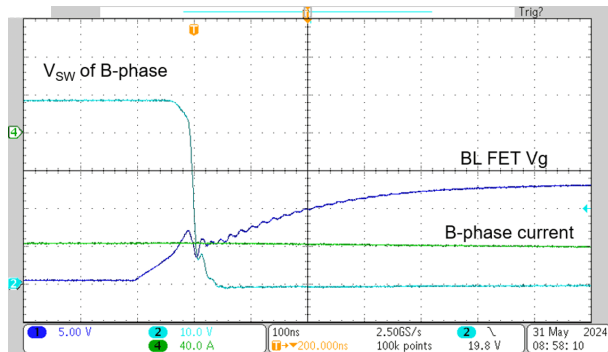


图 3-13. 软开关, 48V、-120A 时的
相电流

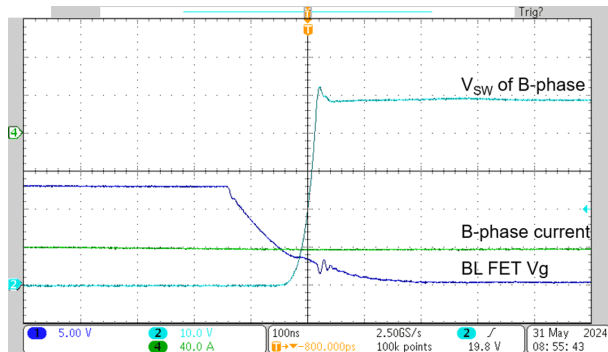


图 3-14. 硬开关, 48V、-120A 时的
相电流

3.3.2.3 60VDC

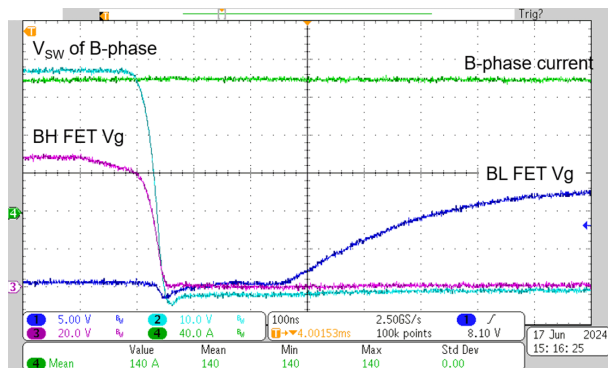


图 3-15. 硬开关, 60V、140A 时的
相电流

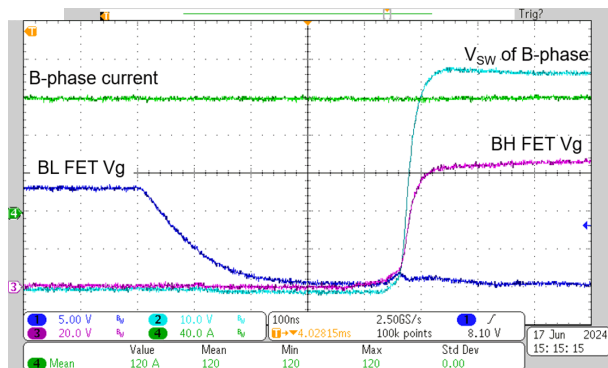


图 3-16. 软开关, 60V、120A 时的
相电流

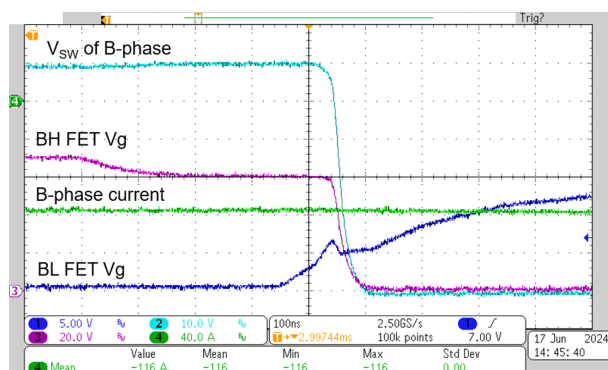


图 3-17. 软开关，60V、-116A 时的
相电流

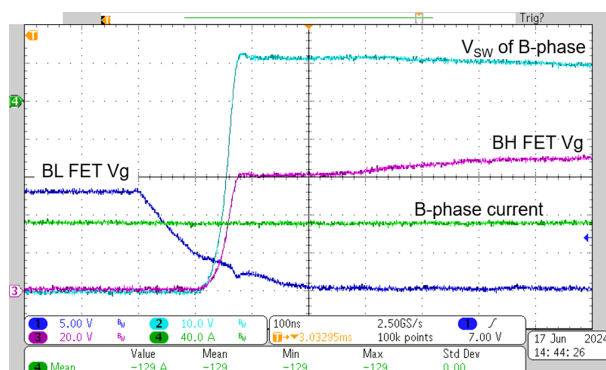


图 3-18. 硬开关，60V、-129A 时的
相电流

3.3.3 数字 PWM 和栅极电压

在这些测试中，首先在低侧通道中测量 PWM 信号与 MOSFET 栅极电压之间的传播延迟；然后测量高侧和低侧数字 PWM 之间的死区时间以及 MOSFET 的栅极电压。图 3-19 显示了测试设置。

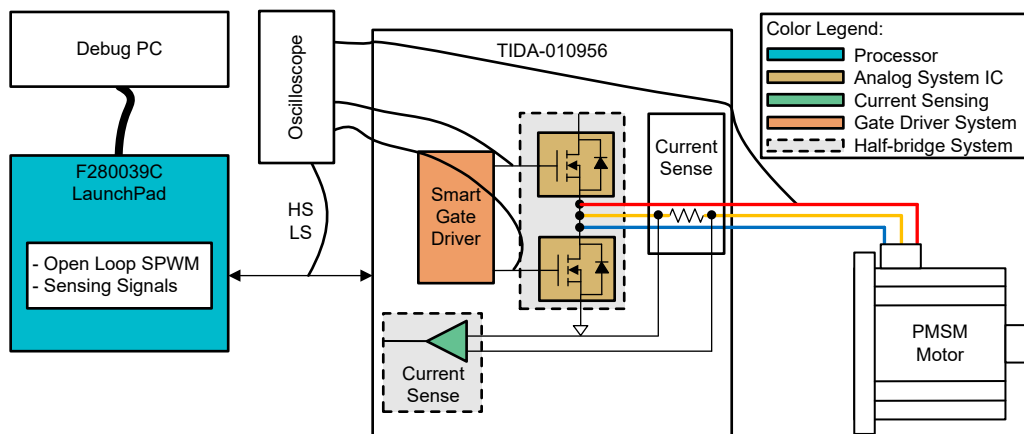


图 3-19. 数字 PWM 和栅极电压测量的测试设置

在这些测试中，系统使用 48V V_{IN} ，将电机设置为固定角度并采用开环控制。在 C 相中测量信号，所有信号都以 GND 为基准。

图 3-20 和图 3-21 显示了导通和关断中的传播延迟。

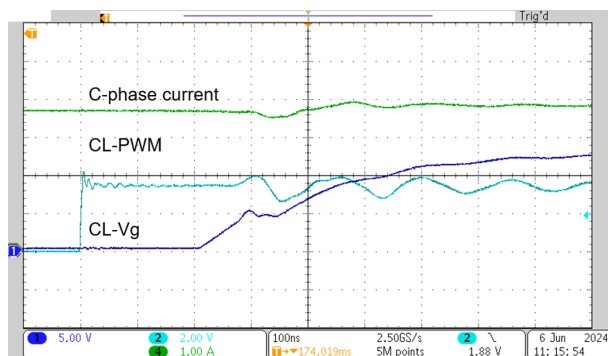


图 3-20. 导通传播延迟

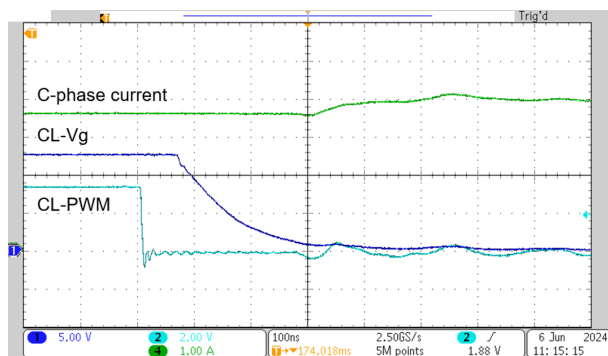


图 3-21. 关断传播延迟

导通延迟的测量值约为 200ns，关断延迟的测量值约为 70ns。由于连接到 GND 的 3.3k Ω R_{DT} 进行 DT 引脚设置之后 DRV8162L 引入了额外的死区时间，因此导通延迟约 130ns。

图 3-22 和图 3-23 显示了半桥从低电平切换到高电平 (CL 的 CH2 和 CH 的 CH3) 时 PWM 信号的 200ns 死区时间和相应的栅极电压。

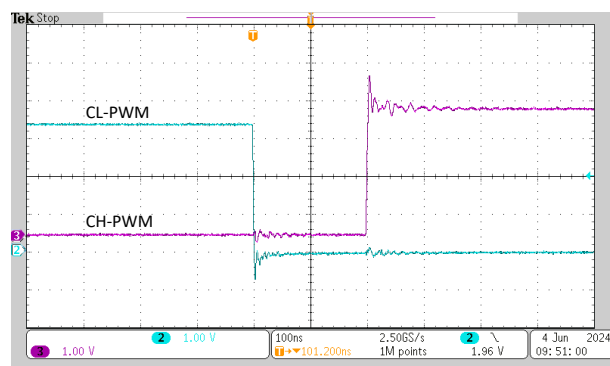


图 3-22. 正移位中的 PWM 输入，DT = 200ns

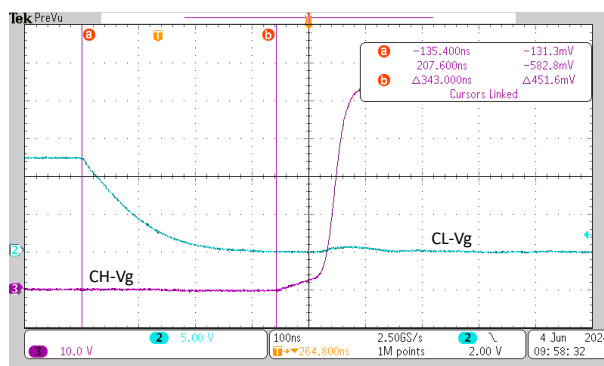


图 3-23. 正移位中的栅极电压，DT = 343ns

采用 DRV8162L 时，高侧和低侧栅极电压之间的死区时间增加到了约 340ns。

图 3-24 和图 3-25 显示了半桥从高电平切换到低电平的情况。采用 R_{DT} 设置时，死区时间也增加到了约 340ns。

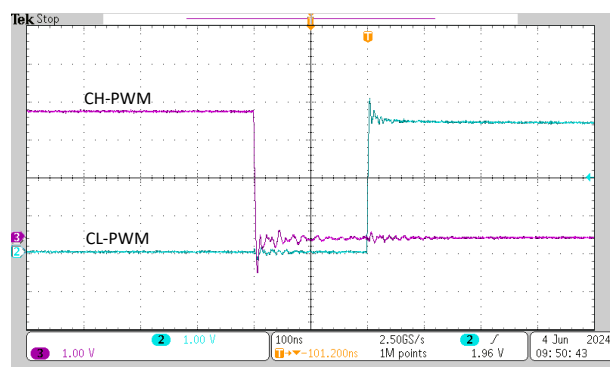


图 3-24. 负移位中的 PWM 输入，
DT = 200ns

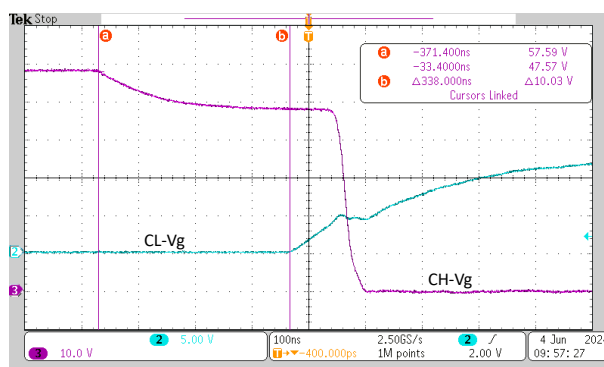


图 3-25. 负移位中的栅极电压，
DT = 338ns

此 DRV8162L 自动插入死区时间，并可以在 20ns 至 370ns 之间变化，具体取决于 R_{DT} 值。有关详细信息，请参阅数据表。

3.3.4 相电流测量

本节介绍为电机控制产生开环旋转磁场的相电流测量性能。

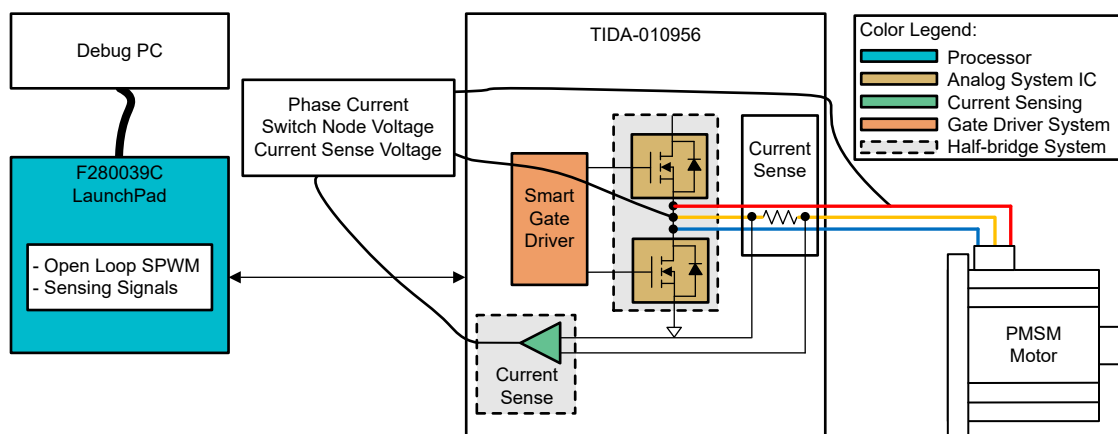


图 3-26. TIDA-010956 电流测量测试设置图

图 3-27 所示为 INA241 B 相测量的电机电流 (以绿色显示的 CH4) 和电流检测放大器输出电压 (以深蓝色显示的 CH1)。此外, 还显示了开关节点电压 (以浅蓝色显示的 CH2)。

图 3-28 所示为 INA241 的类似正弦波形输出。当系统在开环中运行时, 正弦波会显示明显失真。图 3-28 所示为 INA241 的共模性能。

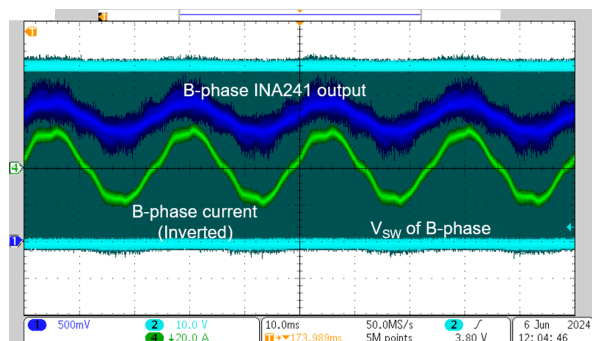


图 3-27. 在 INA241 输出端测得的旋转电流

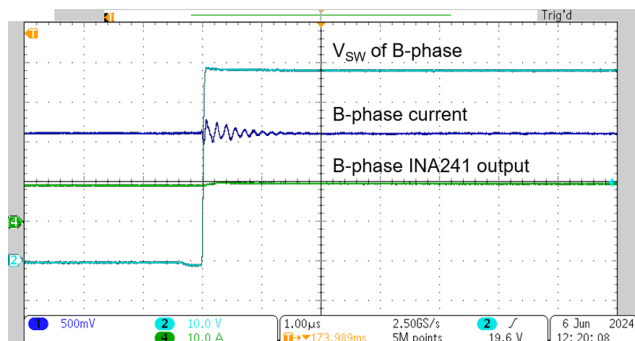


图 3-28. 开关点期间测得的 INA241 输出

此测量会捕捉放大器稳定时间的最差情况。请注意, 预计的最大稳定时间约为 $1.0 \mu\text{s}$ 。

3.3.5 系统测试结果

3.3.5.1 热分析

此设计的热分析是在 28°C 实验室温度下使用 48V V_{IN} 和 16kHz PWM 进行的。一个低压 PMSM 在 26.2A_{RMS} (37.0A 峰值) 的负载电流下由正弦相位电流进行驱动。此测试未使用散热器和风扇。图 3-29 显示了电路板的热像图。

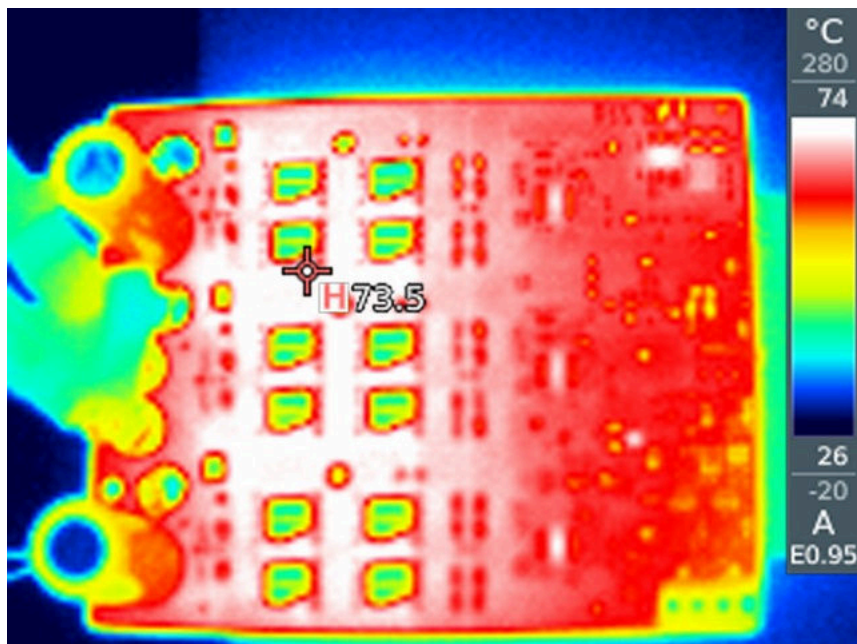


图 3-29. TIDA-010956 在 26.2A_{RMS} 输出下的热像图

此测量结果显示在 26.2A_{RMS} 负载电流下 MOSFET 的温升为 45.5°C。可考虑将 MOSFET 的结温保持在 125°C 以下，当前设计能够以 26.2A_{RMS} 的负载电流在高达 79.5°C 的环境温度条件下运行，无需散热器。电流更大或环境温度更高的条件下，可能需要散热器和冷却风扇。

4 设计和文档支持

4.1 设计文件

4.1.1 原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDA-010956](#) 中的设计文件。

4.1.2 BOM

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-010956](#) 的设计文件。

4.2 工具与软件

工具

[LAUNCHXL-F280039C](#)

C2000™ 实时 MCU F280039C LaunchPad™ 开发套件

软件

[C2000WARE-MOTORCONTROL-SDK](#)

适用于 C2000™ MCU 的 MotorControl 软件开发套件 (SDK)

4.3 文档支持

1. 德州仪器 (TI)，[DRV816x 具有集成式保护和电流检测放大器的 100V 半桥智能栅极驱动器](#) 数据表
2. 德州仪器 (TI)，[INA241x 具有增强型 PWM 抑制功能的 -5V 至 110V、双向、超精密电流检测放大器](#) 数据表
3. 德州仪器 (TI)，[AMC0106M05 具有外部时钟的精密、±50mV 输入、功能隔离式 \$\Delta\$ - \$\Sigma\$ 调制器](#)，数据表。
4. 德州仪器 (TI)，[TMP61 具有 0402 和 0603 封装选项的 ±1% 10k \$\Omega\$ 线性热敏电阻](#) 数据表
5. 德州仪器 (TI)，[LMR38010 具有 40 \$\mu\$ A \$I_Q\$ 的 4.2V 至 80V、1A 同步 SIMPLE SWITCHER 电源转换器](#) 数据表
6. 德州仪器 (TI)，[TPSM86125x 采用 QFN 封装的 3V 至 17V 输入、1A 同步降压模块](#) 数据表

4.4 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](#)。

4.5 商标

C2000™, E2E™, InstaSPIN-FOC™, BoosterPack™, LaunchPad™, Code Composer Studio™, and TI E2E™ are trademarks of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

5 关于作者

KRISTEN MOGENSEN 是德州仪器 (TI) 工业系统机器人团队的系统工程师，负责开发机器人系统的技术配套资料，主要侧重于功能安全、通信和电机驱动器。

JEROME SHAN 是德州仪器 (TI) 工业系统电机驱动器团队的系统工程师，负责开发工业电机驱动器的技术配套资料。

6 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 A (November 2024) to Revision B (May 2025)	Page
• 在 说明 中的 C 相电流检测中添加了 AMC0106M05 信息。.....	1
• 在 资源 中添加了 AMC0106M05 和 TPSM861253。.....	1
• 更新了系统方框图 AMC0106M05、TPSM861253 和外部关断。.....	1
• 更新了系统方框图。.....	4
• 添加了 DRV8162L 的双电源架构图。.....	5
• 根据最新数据表添加了 AMC0106M05 电路说明并更新了电路参数。.....	7
• 将电压检测分压器的高侧电阻从 100k Ω 更新为 110k Ω ，以便将最大电压检测范围从 73.5V 扩展至 80.5V。..	8
• 更新了 12V 至 3.3V 方案、以包含 TPSM861253 同步降压模块。.....	9
• 更新了 SDK 测试软件修改说明。.....	9
• 在 节 2.2.1 中添加了 AMC0106M05 信息。.....	11
• 更新了 C 相电流检测中 AMC0106M05 的 MCU 接口信号。.....	14

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