

Design Guide: TIDA-010956

适用于集成式电机驱动器的 48V、3.5kW 小型三相逆变器参考设计



说明

此参考设计展示了一款具有 48V 标称直流输入电压和 85A_{rms} 额定输出电流的三相逆变器。100V 智能半桥栅极驱动器 DRV8162L 可实现小尺寸、稳健且高效的功率级。此参考设计提出采用基于 RV8162L 双电源架构的多通道关断路径来实现安全转矩关闭 (STO) 功能。DRV8162L 的内部 V_{DS} 监测和保护功能可为功率级提供击穿过流故障或输出短路保护。精密相电流检测通过 INA241A 实现。此设计提供一个 3.3V I/O 接口来连接 C2000™ MCU 等主机控制器，可快速轻松地进行评估。

资源

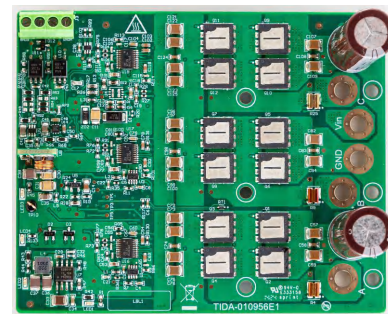
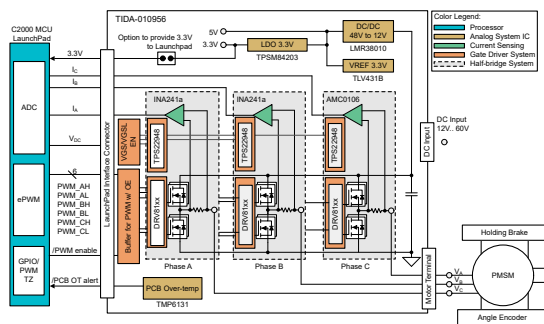
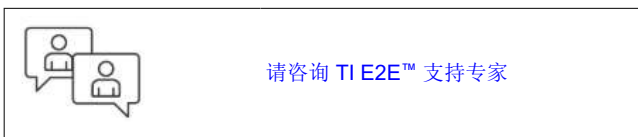
TIDA-010956	设计文件夹
DRV8162、INA241A	产品文件夹
TMP6131、LMR38010	产品文件夹
LAUNCHXL-F280039C	工具文件夹

特性

- 三相逆变器具有 24V 直流至 60V 直流输入和 85A_{RMS} 连续输出电流
- 智能半桥栅极驱动器 DRV8162L 具有片上硬件保护功能
- 功率级受到全面保护 (包括击穿、过流、短路、欠压和过热保护)
- 可编程栅极驱动器拉电流 (16mA 至 1A) 和灌电流 (32mA 至 2A) 可助力轻松优化效率和 EMI 性能
- 可配置死区时间插入可避免击穿
- 通过 INA241A 高共模抑制零漂移电流检测放大器实现基于同相分流器 (0.2mΩ) 的电流检测
- 多通道关断路径可实现灵活的 STO 功能系统设计

应用

- 单轴和多轴伺服驱动器
- 机器人
- 交流逆变器和变频驱动器
- 工业与协作机器人
- 移动机器人



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。对于一个 48V 直流输入电机驱动系统，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。

在设计这些功率级时，高效率是一个重要目标。凭借高效率，可实现小 PCB 尺寸，并且在功率级只能使用电机外壳作为散热器的集成电机驱动系统中，驱动器能够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、过流和短路的集成保护功能方面提供了很大帮助。这些重要功能在过去是使用外部电路实现的，但该电路会增加 PCB 尺寸。

为了优化系统效率和 EMI 性能，但不增加任何外部电路，智能 DRV8162L 栅极驱动器添加了对输出拉电流和灌电流进行编程的功能。为防止发生击穿，可以启用 V_{GS} 握手及死区时间插入功能。

为了使驱动器能够以超高效率控制电机，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。由于该放大器具有高增益，因此使用了 0.2mΩ 分流器；同时，低电阻分流器的选择也有助于提高系统效率。

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伺服电机的 48V 三相逆变器。此设计在 48V 电压下经过全面测试。

此参考设计的主要构建块可分为六个不同的子系统：

1. 三相功率级，包括栅极驱动器和 FET
2. 电压和同相电流检测
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 显示了 TIDA-010956 功能方框图。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，着重关注栅极驱动器和 FET。此外，还会进行同相电流检测的功能测试。此设计中的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	绝对最大值 80VDC
输出相电流	$\pm 85A_{\text{rms}}$	连续电流。可能需要散热器，FET 的气流很重要
同相电流检测范围	$\pm 165A$	调整至 0V 至 3.3V 范围，反相，偏置电压 1.65V
同相电流检测分流器	0.2m Ω	差分非隔离式放大器 INA241A3，具有增强型脉宽调制 (PWM) 抑制功能
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 $\pm 1\%$ 10k Ω 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™ 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 \times 98mm	3150mil \times 3860mil

2 系统概述

2.1 方框图

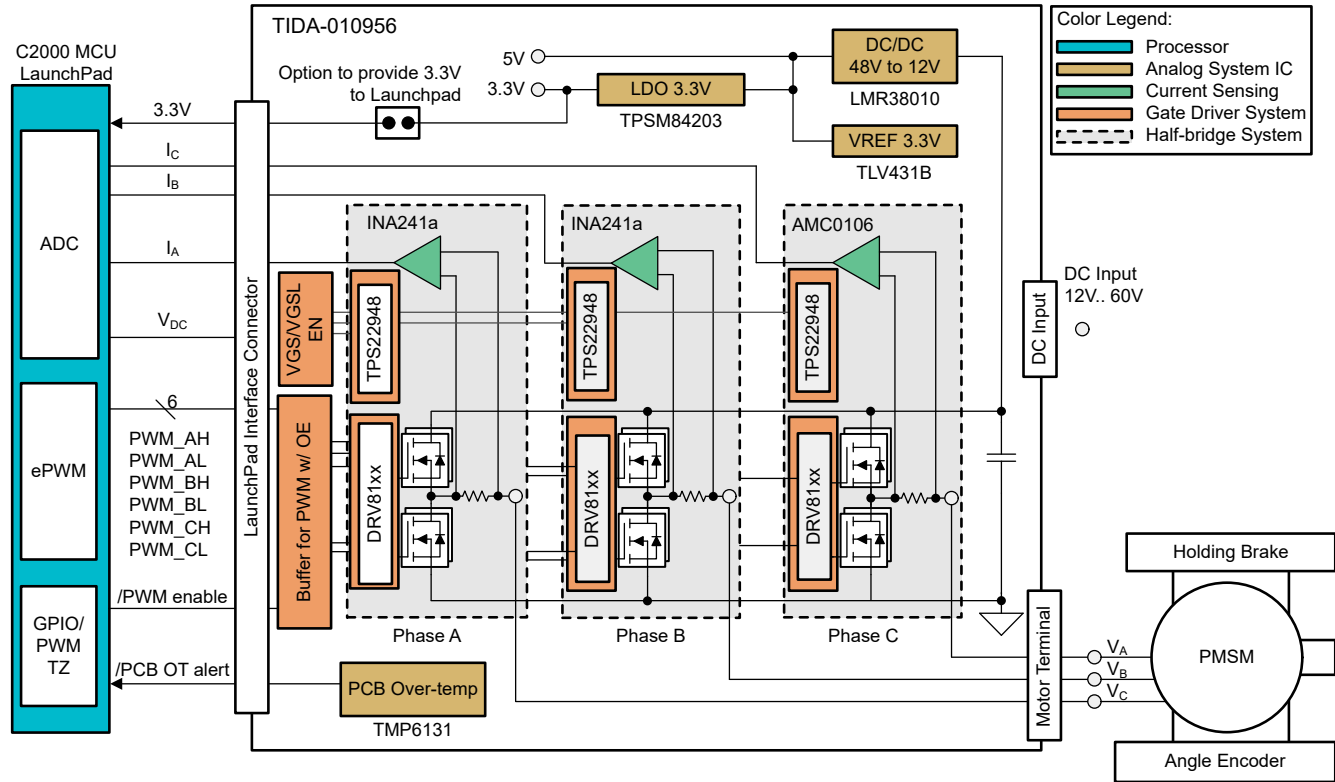


图 2-1. TIDA-010956 的系统方框图

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 级栅极驱动峰值电流，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 级阈值选项的配置 (strap) 电阻器进行设置。在 [DRV8162L](#) 数据表电气特性部分的保护电路中，使用变量 V_{DS_LVL} 可以找到这些值。最小值为 100mV，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。

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。高侧电源电压 V_{GVDD} 可以介于 5V 至 20V 之间，低侧电源电压 V_{GVDD_LS} 甚至可以更低，最低为 3.5V。在 [DRV8162L](#) 数据表的 *电气特性* 部分中，使用 V_{GVDD} 变量可以找到这些值。

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。FET 的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 非常重要。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

具体 V_{GVDD} 和 V_{GVDD_SL} 电压的选择结果可以定义导通状态 V_{GS} ，即 FET 在应用中的实际栅极电压高电平。

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，所选 FET 的计算结果如 [表 2-1](#) 所示。此设计采用两个并联此 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 FET NTMTSC1D6N10 V_{DS} 相关的 DRV8162 过流跳变电平

参数	NTMTSC1D6N10		2 × NTMTSC1D6N10	
	25°C	125°C	25°C	125°C
I_D	267A		534A	
I_{DM}	900A		1800A	
Q_G	106nC		212nC	
$R_{DS(ON)}$ @ $V_{GS} = 10V$	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 的情况下，在每个半桥上都选择了一个 RC 缓冲器网络，以根据需要提供测试和调试选项来抑制电路振铃。我们的测试用例不需要此步骤。

2.2.1.3 相电流和电压检测

为系统测试选择的控制器 MCU 的 ADC 转换器接受 3.3V 最大输入电压。因此，必须将测量的电压调节到 0V 至 3.3V 范围内。

2.2.1.3.1 相电流

具有同相电流检测分流器的放大器需要针对 ADC 转换器的输入将整个电流检测范围调整到 0V 至 3.3V 电压范围。在此设计中，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。

此设计可支持峰值为 $85A_{rms}$ 或 $120A_{rms}$ 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。按照此规格，该设计选择了 $0.2m\Omega$ 、8W 分流电阻器和增益为 50 的放大器。

根据 [方程式 1](#) 得出了放大器输出的电压范围。

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

为了适应测试此设计时所用的 LaunchPad™ 开发套件，选择的是 3.3V 电压范围。当使用其他硬件时，可以使用 3.0V 电压范围。

电压范围设置为 3.3V 的情况下，设置放大器的电压基准，确保电压范围的中心点为 0A。

另外一点很重要的是，要确保检测电阻的功率损耗可以承受系统的电流。

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

165A 仅在出现故障的情况下出现。标称电流可达 85A_{rms}，进而得出功率损耗仅为 1.445W。8W 分流电阻器具有足够的裕度。

2.2.1.3.2 相电流 - 偏置电压基准

由于该设计采用 3.3V 基准电压，因此在测试系统时使用了 LAUNCHXL-F280039C 控制板，同时还考虑了以下因素：

- 选择可同时支持 3.0V 和 3.3V 基准电压的电压基准。这是通过 TLV431 实现的。图 2-2 展示了原理图。

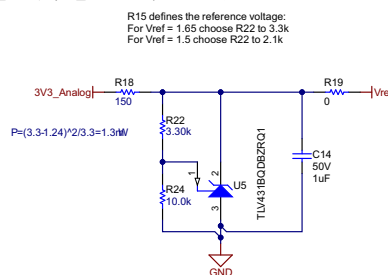


图 2-2. TIDA-010956 中的 TLV431 原理图

- 使用此基准电压电路时，电阻器 R18 可控制流入电路的电流大小。这可能会影响输出电压的稳定性。此处选择了 150 Ω 电阻器。
- 下一步是挑选正确的分压器；这可以通过选择 R15 和 R18 来实现。在此处，R18 固定为 10.0k Ω。然后，INA241A 的偏置基准电压为 1.5V 时，可以选择 R15 为 2.1k Ω，此电压为 1.65V 时，可以选择 R15 为 3.3k Ω。

2.2.1.3.3 电压

此设计测量了直流输入电压 (V_{IN}) 和电机三相电压。这些电压最高可达 80V，受限于为栅极驱动器生成 12V 电压轨的降压转换器 LMR38101。

在此设计中，电压检测分压器设置为支持 75V 最大检测电压，这足以满足系统的 48V 额定 V_{IN} 。

图 2-3 展示了 75V 相电压测量的原理图。

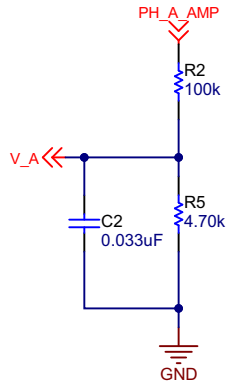


图 2-3. TIDA-010956 相电压检测电路

按照方程式 3 进行计算。

$$R_5 = \frac{R_2 \times V_{out}}{V_{in} - V_{out}} = \frac{100k\Omega \times 3.3V}{75V - 3.3V} = 4,603\Omega \quad (3)$$

其中

- R2 选择为 100kΩ

针对具体的分压器，增加了一个低通滤波器，通过 C2 实现。

为了测量电机相电压和 V_{IN} 电压，在方程式 3 中输入了以下值： $V_{IN} = 75V$ 、 $V_{out} = 3.3V$ 、 $R_2 = 100k\Omega$ 。这意味着 $R_5 = 4603\Omega$ 。因此，选择了 4700、1% 的电阻器。

2.2.1.4 主机处理器接口

处理器接口设计为通过 J1 和 J2 两个接头与 LAUNCHXL-F280039C 配合使用。

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 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 电源轨电源电路的输入电压范围，根据 [DRV8162L](#) 数据表，GVDD 引脚可接受 5V 至 20V 的电源电压，因此有理由让设计涵盖这一完整电压范围，所以，3.3V 电源轨电源电路可直接使用 V_{GVDD} 作为输入。

TPSM84203 具有 4.5V 至 28V 的输入电压范围，可提供高达 1.5A 的输出电流。该器件提供了一些固定输出电压选项，可更大幅度地减少外部元件并缩小 PCB 尺寸。此设计选择了 3.3V 输出版本。

[TPSM84203](#) 数据表 *典型应用* 部分所示的原理图示例显示了如何构建 3.3V 电压轨。需要一个输入电容器和两个输出电容器作为外部元件。对于这些电容器，建议使用 X5R 或 X7R 陶瓷电容器。[TPSM84203](#) 数据表的 *输入电容器* 部分说明了相关示例选择。

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 [TIDA-010956](#) 硬件。

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 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。

从 [C2000Ware_MotorControl_SDK](#) 下载 `servo_drive_with_can` 示例代码。使用默认设置安装该 SDK，然后在以下位置找到示例代码：

`c:\ti\c2000\c2000ware_MotorControl_SDK_5_01_00_00\solutions\servo_drive_with_can`。

也可以在此路径的 doc 文件夹中找到相关文档。

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

2.3 主要产品

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、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。由于输入端的共模电压转换，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 有五个增益选项：10V/V、20V/V、50V/V、100V/V 和 200V/V。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 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。

2.3.4 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。

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。

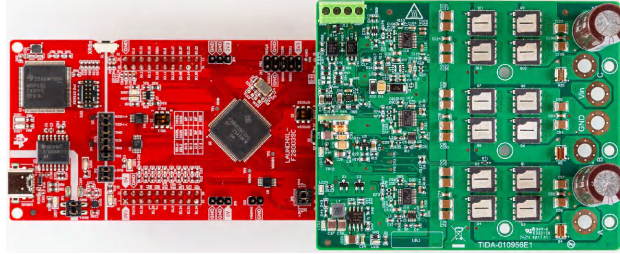


图 3-1. 电路板图片 (顶视图)

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 0Ω 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 显示了由 TIDA-010956 参考设计用于与 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	<i>Vbus</i> ⁽¹⁾	PWM_BH	FAULT
GPIO56 ⁽²⁾	ADCINA10、 ADCINB1、 ADCINC10	PWM4B	GPIO57 ⁽²⁾	NC ⁽²⁾	<i>V_C</i> ⁽¹⁾	PWM_BL	NC ⁽²⁾
GPIO56 ⁽²⁾	ADCINA5	PWM5A	XRSn ⁽²⁾	NC ⁽²⁾	<i>V_B</i> ⁽¹⁾	PWM_AH	NC ⁽²⁾
ADCINA9 ⁽²⁾	ADCINA4、 ADCINB8	PWM5B	SD2_D3 ⁽²⁾	NC ⁽²⁾	<i>V_A</i> ⁽¹⁾	PWM_AL	<i>DAT_PhC</i> ⁽¹⁾
GPIO58 ⁽²⁾	ADCINB4、 ADCINC8 ⁽²⁾	GPIO21 ⁽²⁾	SD2_C3 ⁽²⁾	NC ⁽²⁾	NC ⁽²⁾	NC ⁽²⁾	<i>SD_CLK</i> ⁽¹⁾
GPIO4	ADCINB5	EPWM1B ⁽²⁾	GPIO20	VDSLVLCC	<i>I_B</i> ⁽¹⁾	<i>SD_CLK</i> ⁽¹⁾	EN_DRV
GPIO18	ADCINA12、 ADCINC5	EPWM2A ⁽²⁾	GPIO26	VDSLVLCB	<i>I_A</i> ⁽¹⁾	<i>CLK_PhC</i> ⁽¹⁾	PWM_EN
GPIO19	ADCINA0、 ADCINB15、 ADCINC15	GPIO40 ⁽²⁾	GPIO25 ⁽²⁾	VDSLVLCA	<i>温度</i> ⁽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。

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。用于系统的测试设置如图 3-2 所示。

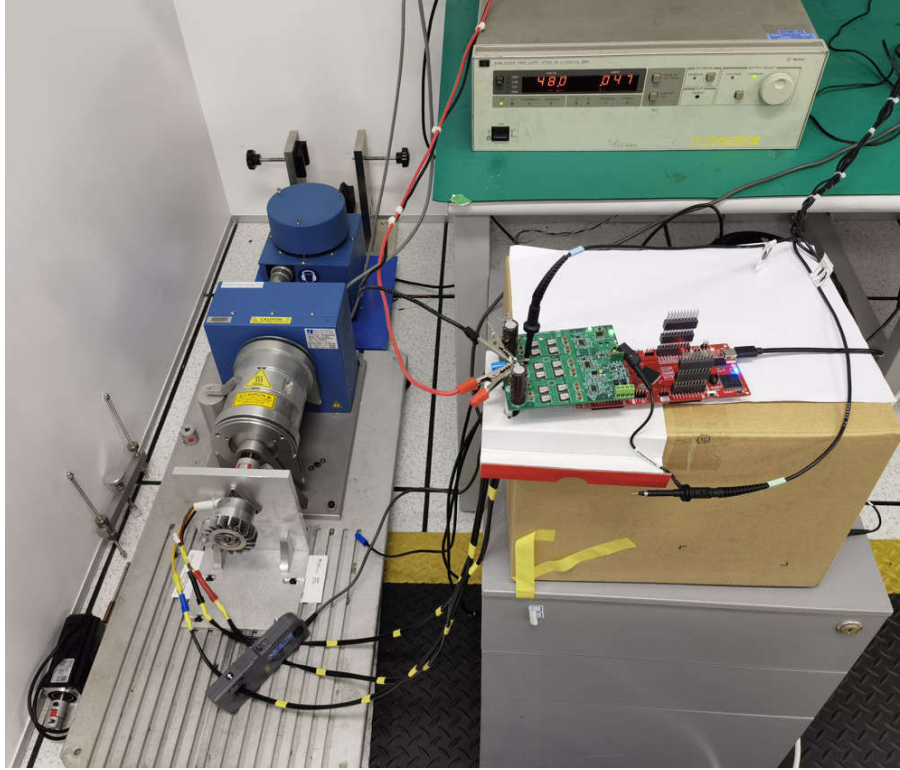


图 3-2. TIDA-010956 系统测试设置

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。

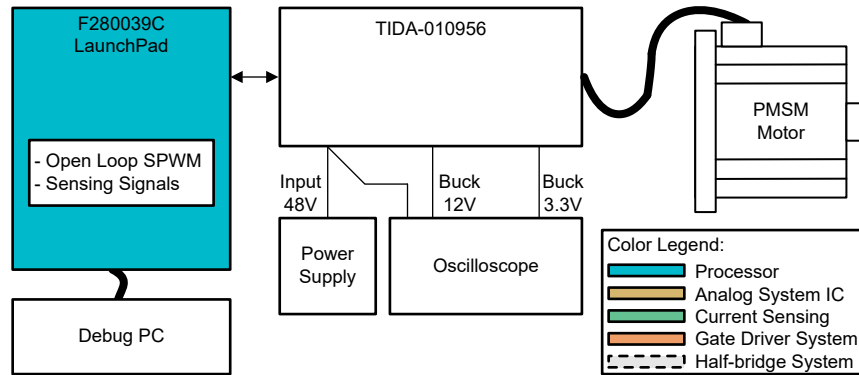


图 3-3. TIDA-010956 电压轨测试设置图

3.3.1.1 上电

图 3-4 展示了 TIDA-010956 上电序列。

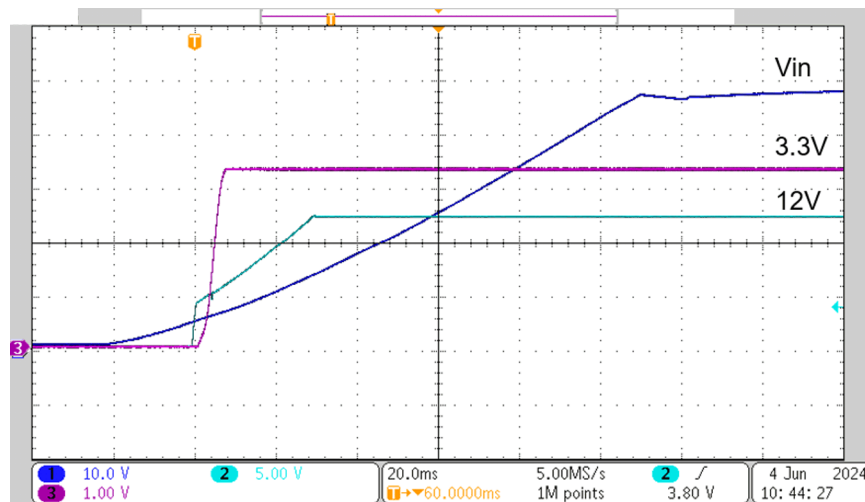


图 3-4. TIDA-010956 上电序列

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 $700\mu\text{F}$ 的电容放电（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。

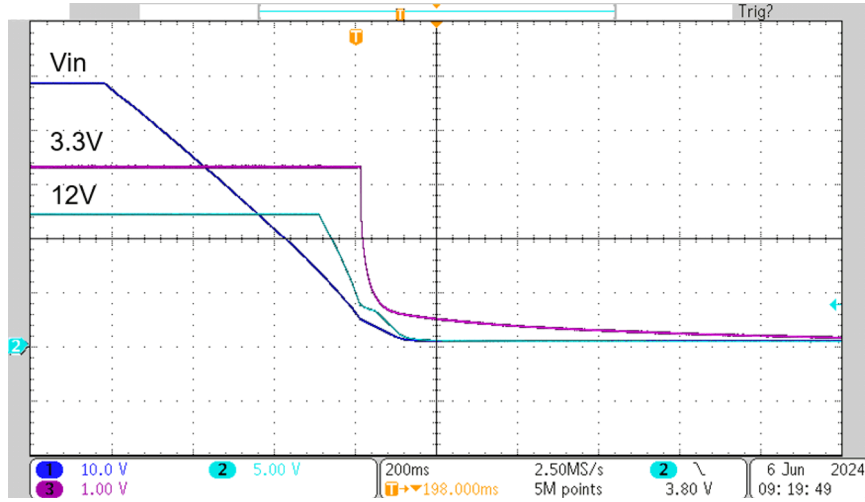


图 3-5. TIDA-010956 断电序列

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。

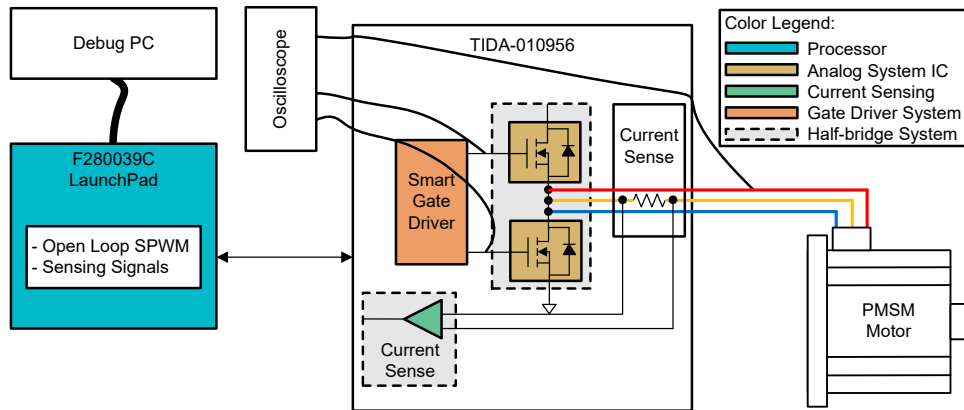


图 3-6. 栅极电压和开关节点电压测量的测试设置

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

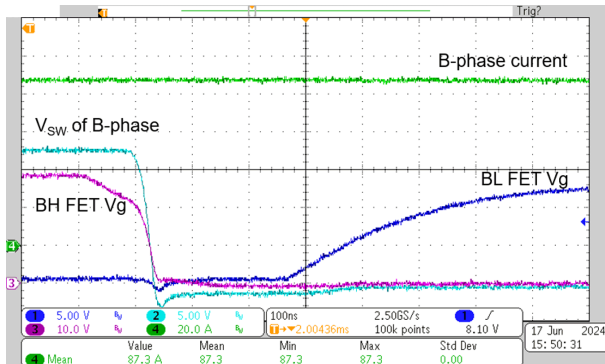


图 3-7. 硬开关，20V、87.3A 时的相电流

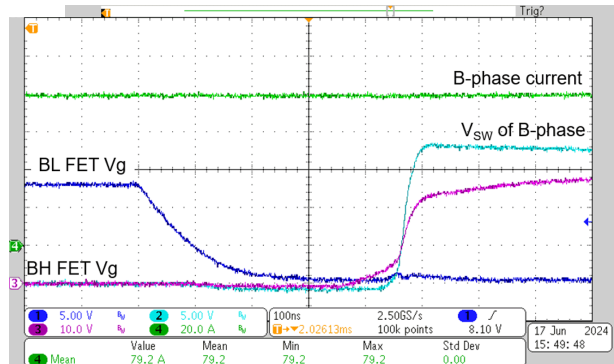


图 3-8. 软开关，20V、79.2A 时的相电流

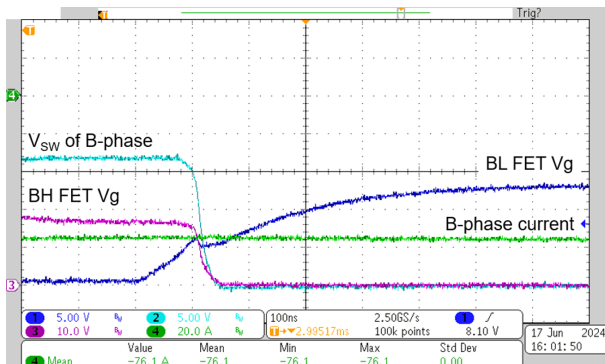


图 3-9. 软开关，20V、-76.1A 时的相电流

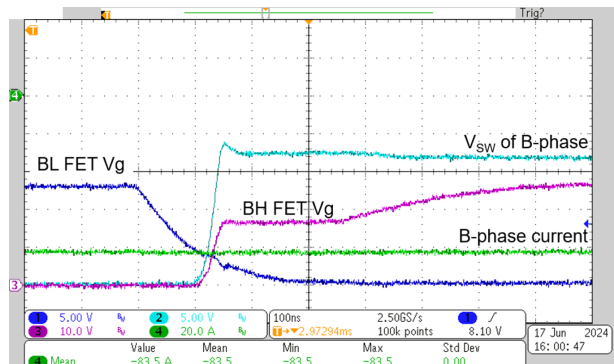


图 3-10. 硬开关，48V、-83.5A 时的相电流

3.3.2.2 48VDC

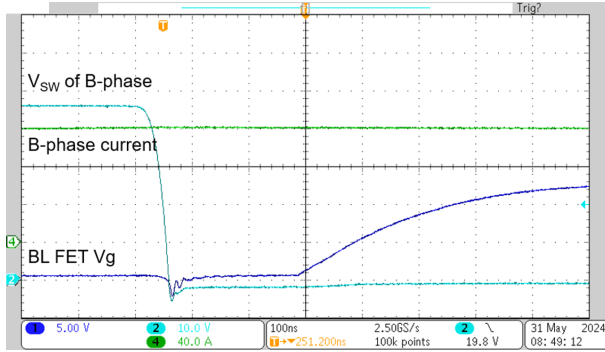


图 3-11. 硬开关, 48V、120A 时的相电流

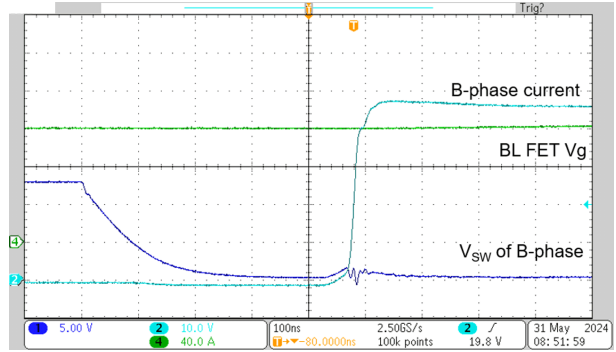


图 3-12. 软开关, 48V、120A 时的相电流

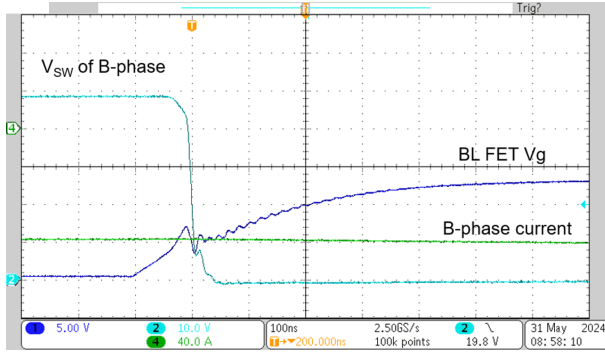


图 3-13. 软开关, 48V、-120A 时的相电流

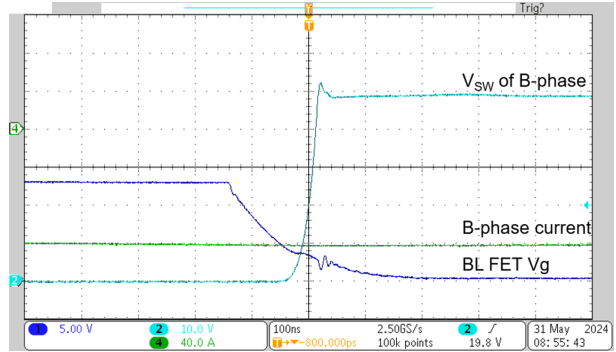


图 3-14. 硬开关, 48V、-120A 时的相电流

3.3.2.3 60VDC

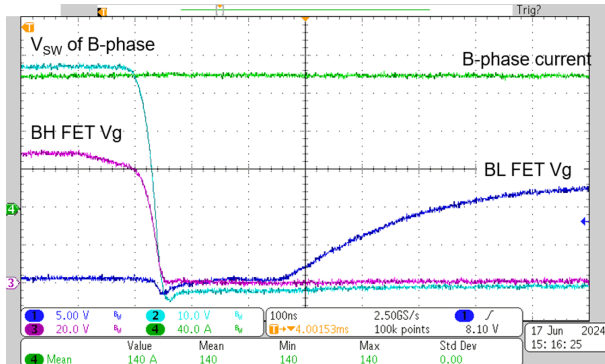


图 3-15. 硬开关, 60V、140A 时的相电流

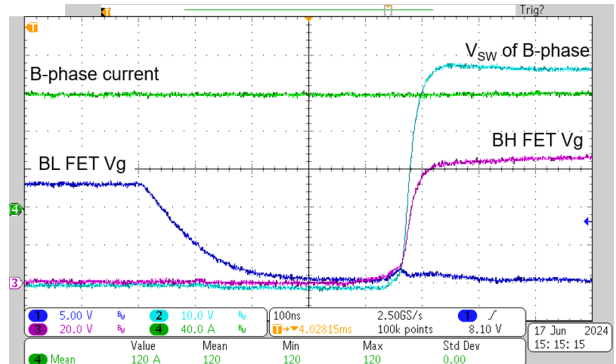


图 3-16. 软开关, 60V、120A 时的相电流

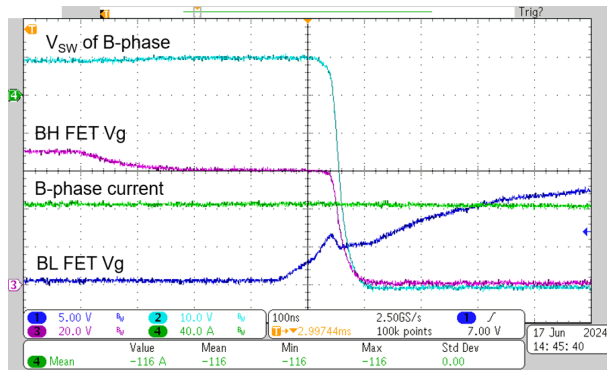


图 3-17. 软开关, 60V、-116A 时的相电流

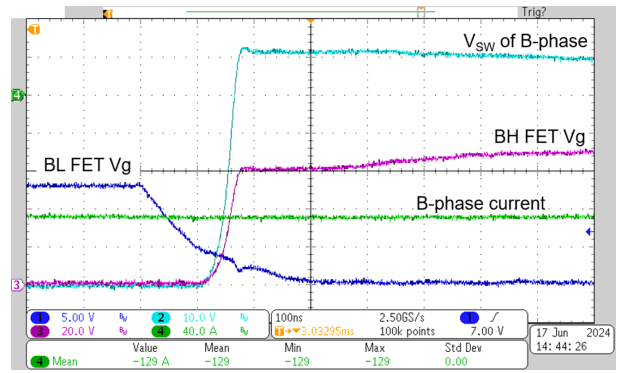


图 3-18. 硬开关, 60V、-129A 时的相电流

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。

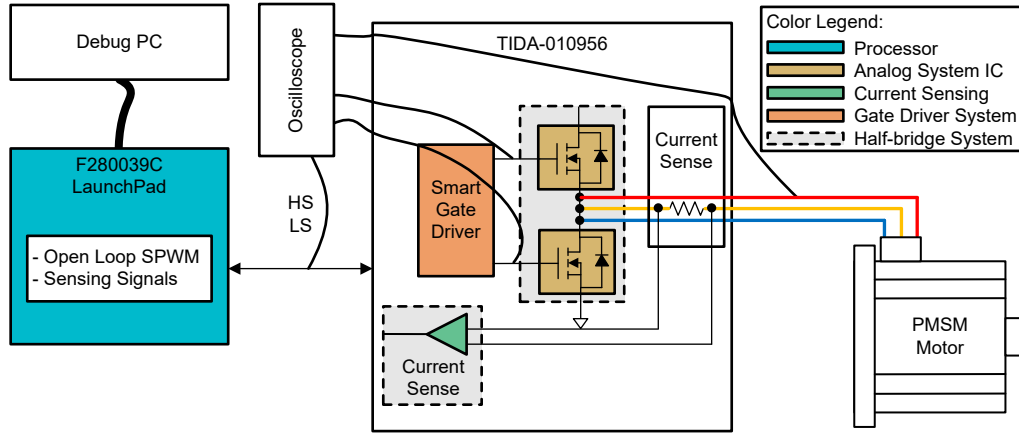


图 3-19. 数字 PWM 和栅极电压测量的测试设置

在这些测试中，系统使用的是 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。

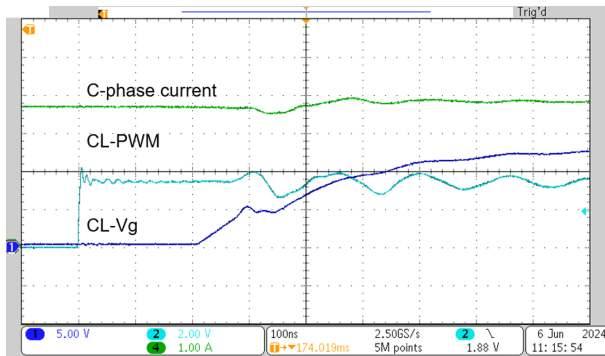


图 3-20. 导通传播延迟

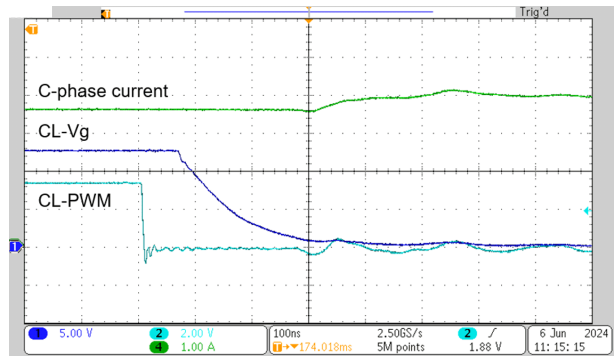


图 3-21. 关断传播延迟

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。

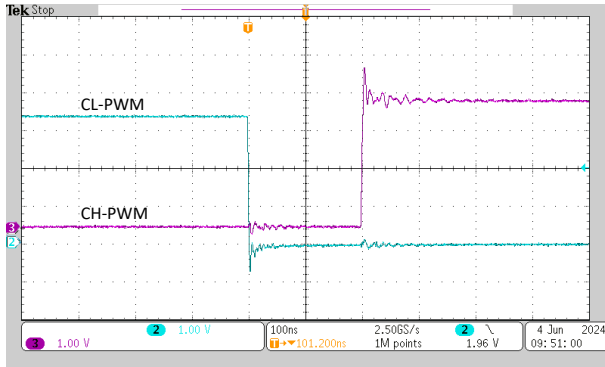


图 3-22. 正移位中的 PWM 输入，DT = 200ns

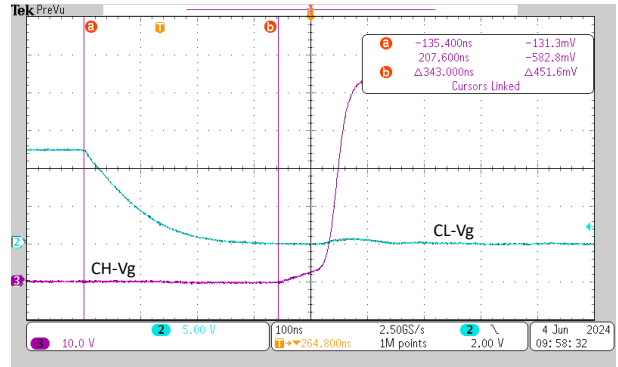


图 3-23. 正移位中的栅极电压，DT = 343ns

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。

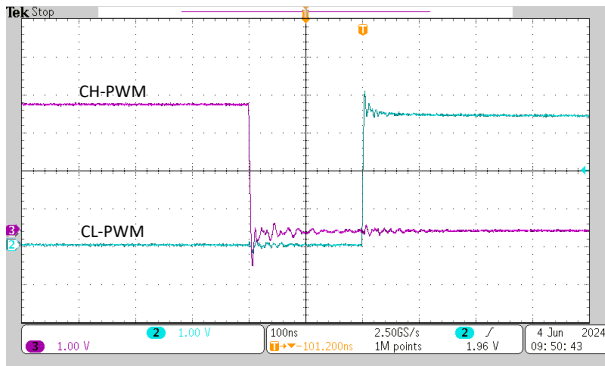


图 3-24. 负移位中的 PWM 输入，DT = 200ns

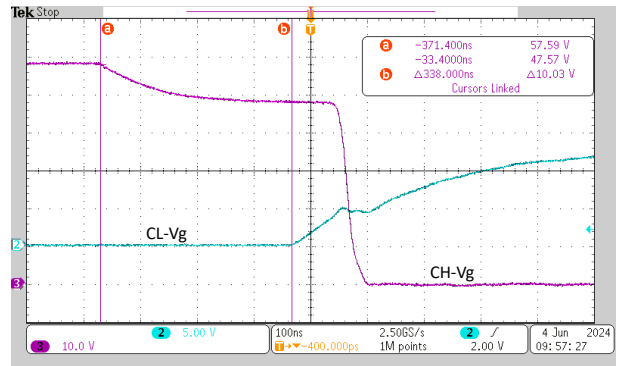


图 3-25. 负移位中的栅极电压，DT = 338ns

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。

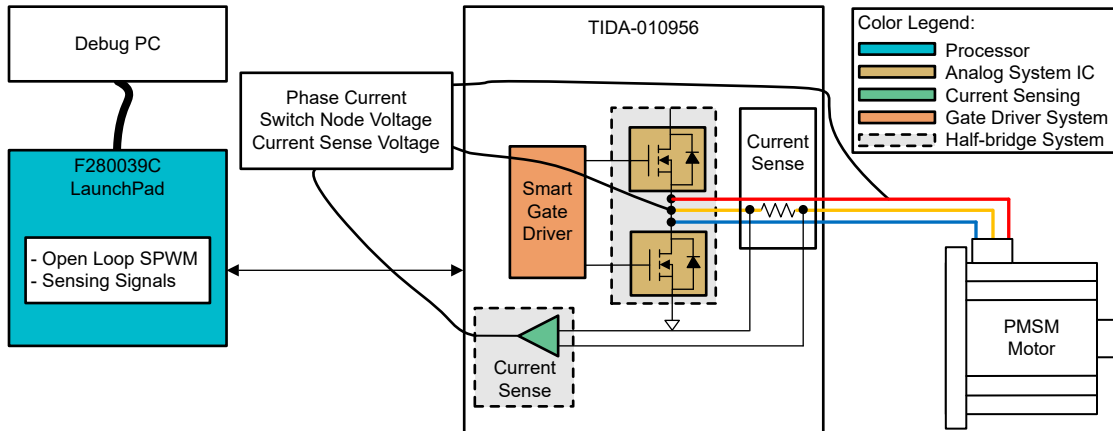


图 3-26. TIDA-010956 电流测量测试设置图

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。

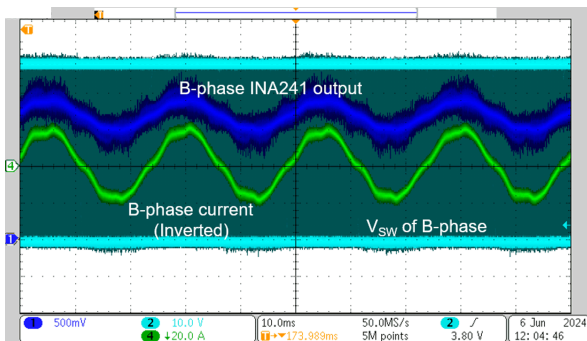


图 3-27. 在 INA241 输出端测得的旋转电流

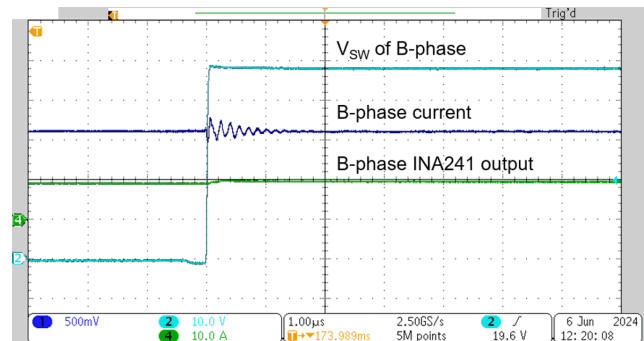


图 3-28. 开关点期间测得的 INA241 输出

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 $48\text{V } V_{\text{IN}}$ 和 16kHz PWM 进行的。一个低压 PMSM 电机在 $26.2\text{A}_{\text{rms}}$ (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。

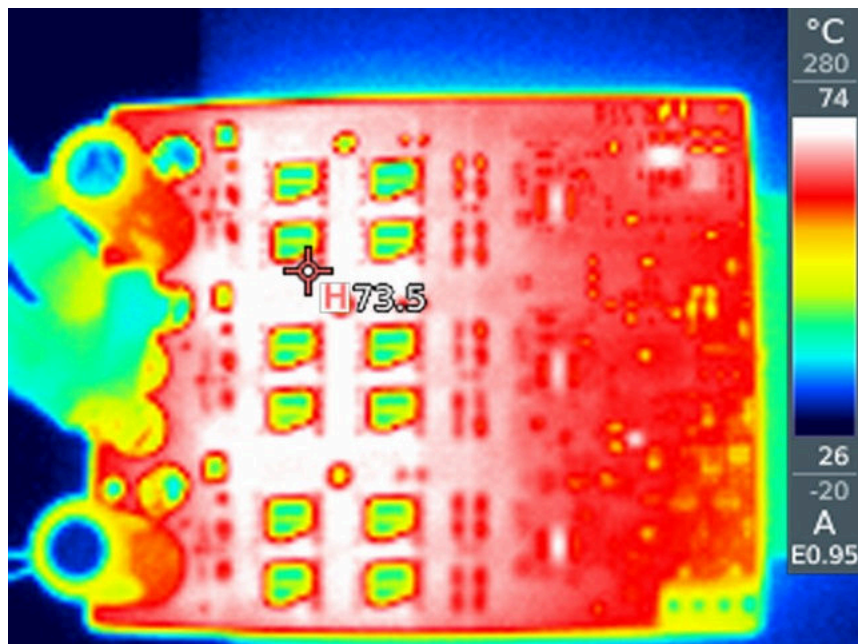


图 3-29. TIDA-010956 在 $26.2\text{A}_{\text{rms}}$ 输出下的热像图

此测量结果显示在 $26.2\text{A}_{\text{rms}}$ 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 $26.2\text{A}_{\text{rms}}$ 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)，[TMP61 具有 0402 和 0603 封装选项的 ±1% 10k Ω 线性热敏电阻](#) 数据表
4. 德州仪器 (TI)，[LMR38010 具有 40 μA I_Q 的 4.2V 至 80V、1A 同步 SIMPLE SWITCHER 电源转换器](#) 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™, 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。

重要声明和免责声明

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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。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

Copyright © 2024，德州仪器 (TI) 公司