

Design Guide: TIDA-010276

适用于 BLDC 电机控制的 36V、50A 三相 GaN 逆变器参考设计

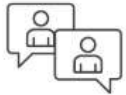


说明

本设计指南展示了一个 36V、50A 氮化镓 (GaN) 场效应晶体管 (FET) 功率级，用于驱动由 5 节锂离子电池到 10 节电池组供电的无线工具中的三相无刷直流电机。此参考设计使用配有集成式 GaN-FET 驱动器的 LMG3100R017 GaN FET 来提高电机控制系统的效率和性能。此外，在本设计所提供的 TI BoosterPack™ 插件模块与 3.3V I/O 接口兼容，此接口能连接至 C2000™ MCU LaunchPad™ 开发套件或 MSPM0 MCU LaunchPad™ 开发套件，以便快速轻松地评估 TI GaN 技术水。

资源

TIDA-010276	设计文件夹
LMG3100、LMR38010	产品文件夹
TPS7B8150、OPA4323	产品文件夹
LAUNCHXL-F2800137	产品文件夹
LP-MSPM0G3507	产品文件夹



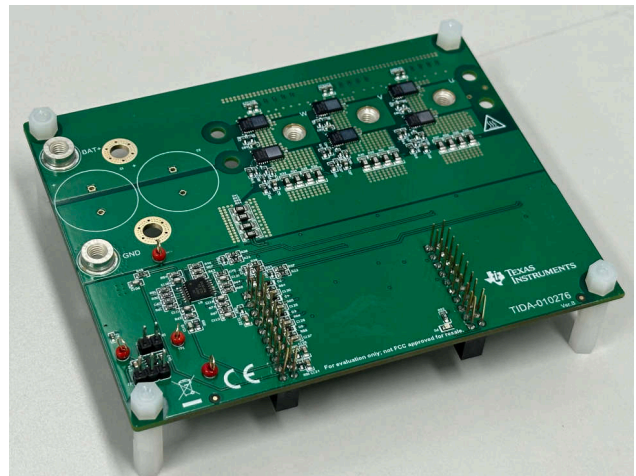
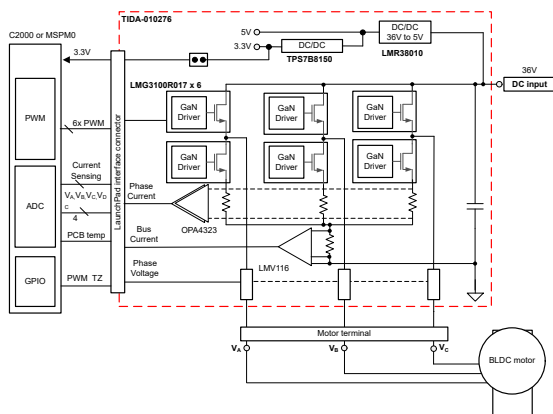
请咨询我司 TI E2E™ 支持专家

特性

- 6.50mm × 4.0mm 的 LMG3100R017 GaN FET 配有集成式驱动器，可实现高功率密度和简单的 PCB 布局
- 在 20kHz PWM 时效率高（峰值大于 99%），可在 25°C 环境温度下运行，在峰值电流高达 50A 时仍无需散热器。在 50A 峰值电流和 80kHz PWM 时，效率为 98.5%
- LMG3100R017 支持以更高的 PWM 频率运行，有助于通过用陶瓷电容器替代电解电容器来减小直流-总线电容器的尺寸和高度
- 零反向恢复损耗可减少开关节点振荡
- 较短的死区时间可更大限度减少相电压失真
- 支持在高 PWM 频率下高速电机控制
- 使用低侧电流采样并添加相电压采样，以验证无传感器磁场定向控制 (FOC) 或无传感器梯形控制

应用

- [无线手持园艺工具](#)
- [无线电动工具](#)
- [无线真空吸尘器](#)
- [割草机](#)



1 系统说明

电动工具用于各种工业和家庭应用，例如钻孔、研磨、切割、抛光、驱动紧固件等。最常见的电动工具均使用电机，而有些则使用内燃机、蒸汽机或压缩空气。电动工具分为有绳或无绳（电池供电）两种。有绳电动工具使用市电（电网电能）为交流或直流电机供电。

无绳工具使用电池电源来驱动直流电机。大多数无绳工具都使用业界先进的锂离子电池，这类电池重量轻，可提供高能量密度并具有较长的使用寿命。电动工具的功率等级和电池电压等级不尽相同。无绳链锯和无绳圆锯等电动工具以及无绳树木切割机等不同的园艺工具需要极高的扭矩和极高的峰值电流。

无绳工具采用有刷或无刷直流 (BLDC) 电机。BLDC 电机效率更高、维护需求更少、噪声更低且使用寿命更长。电动工具对外形尺寸、效率、峰值电流、可靠性和热性能有一定要求。因此、需要使用尺寸紧凑的高效功率级来驱动电动工具电机。小尺寸的功率级便于灵活安装和 PCB 布线、并且设计成本较低。高效率可最大限度延长电池使用时间并降低冷却工作量。高效率要求又要求开关器件具有低漏源电阻 ($R_{DS(on)}$)。功率级还必须确保提供电机失速或任何高电流预防等保护功能。

此设计使用了 GaN FET、更高的脉宽调制 (PWM) 和高达 100kHz 的开关频率，有助于减少直流-母线电容。将陶瓷电容器替代电解电容器后所获得的特性能减小尺寸和高度，并且效率更高，可以进一步减小 散热器的面积，从而有助于减轻 PCB 的重量。此外，需要提高 PWM 开关频率来减小电流，进而降低电机的扭矩纹波，尤其是可以使用低电感无刷交流电机来实现更精确的控制。

在 TIDA-010276 参考设计中，在三相逆变器中使用小型 GaN-FET LMG3100R017。LMG3100R017 在 6.5mm × 4mm 的小型 QFN 封装内集成了驱动器和 80V GaN FET，并经优化后具有极低的栅极环路阻抗和电源环路阻抗。PCB 为顶面冷却式 LMG3100R017 GaN-FET 电源模块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。在该设计中，能进行低侧电流采样和总线电流采样，并增强总线电流过流保护。此外，该设计还增加了直流-总线电压以及 PWM 滤波三相电压，以验证先进的无传感器设计，例如 InstaSPIN-FOC™ 电机。该三相逆变器可在 12V 至 48V 的宽输入电压范围内工作，并提供板载电源管理功能，可为 LMG3100 栅极驱动器提供 5V 电源轨，为电流检测放大器和温度检测提供 3.3V 电源轨。TIDA-010276 提供与 3.3V I/O 接口兼容的 TI BoosterPack 插件模块，能连接到 C2000 MCU LaunchPad 或者 MSPM0 LaunchPad，以便快速轻松评估性能。

1.1 主要系统规格

表 1-1 提供了 TIDA-010276 小型三相 GaN 逆变器参考设计的主要规格。该设计可直接连接到 C2000 MCU，MSPM0 LaunchPad 开发套件，40 引脚实例 (J1 - J3 和 J4 - J2)。TIDA-010276 上有一个跳线选项，可为 LaunchPad 提供 3.3V 电源。

表 1-1. 主要系统规格

参数	规格
输入电压	36V 直流 (最小 12 V 至最大 48V) - 10 节锂离子电池
额定输出功率	1800W
电流	50A
相电流最大范围	±66A
功率 FET 类型	GaN 技术
控制方法	基于传感器的无传感器梯形或 基于传感器的无传感器 FOC
逆变器开关频率	10kHz 至 100kHz
反馈信号	直流总线电压、低侧总线电流、低侧相电流、相电压、霍尔传感器 (连接到 LaunchPad 开发套件)
PCB 层堆叠	4 层, 2 盎司铜
GaN-FET PCB 面积大小	18mm × 58mm
板规格	90mm × 112mm
工作环境	-20°C 至 55°C

警告

TI 建议，该参考设计仅可在实验室环境中运行，不应将该电路板作为成品供一般消费者使用。

TI 建议，该参考设计仅可由熟悉处理高压电子和机械部件、系统及子系统所存在相关风险的合格工程师和技术人员使用。

表面高温！接触会导致烫伤。**请勿触摸！**电路板上电后，某些元件可能会达到 55°C 以上的高温。在运行过程中或运行刚结束时，不得触摸电路板，因为可能存在高温。

小心

请勿在无人照看的情况下使该设计通电。

2 系统概述

2.1 方框图

图 2-1 展示了 TIDA-010276 三相 GaN 逆变器的系统方框图 (以红色虚线框标示)。

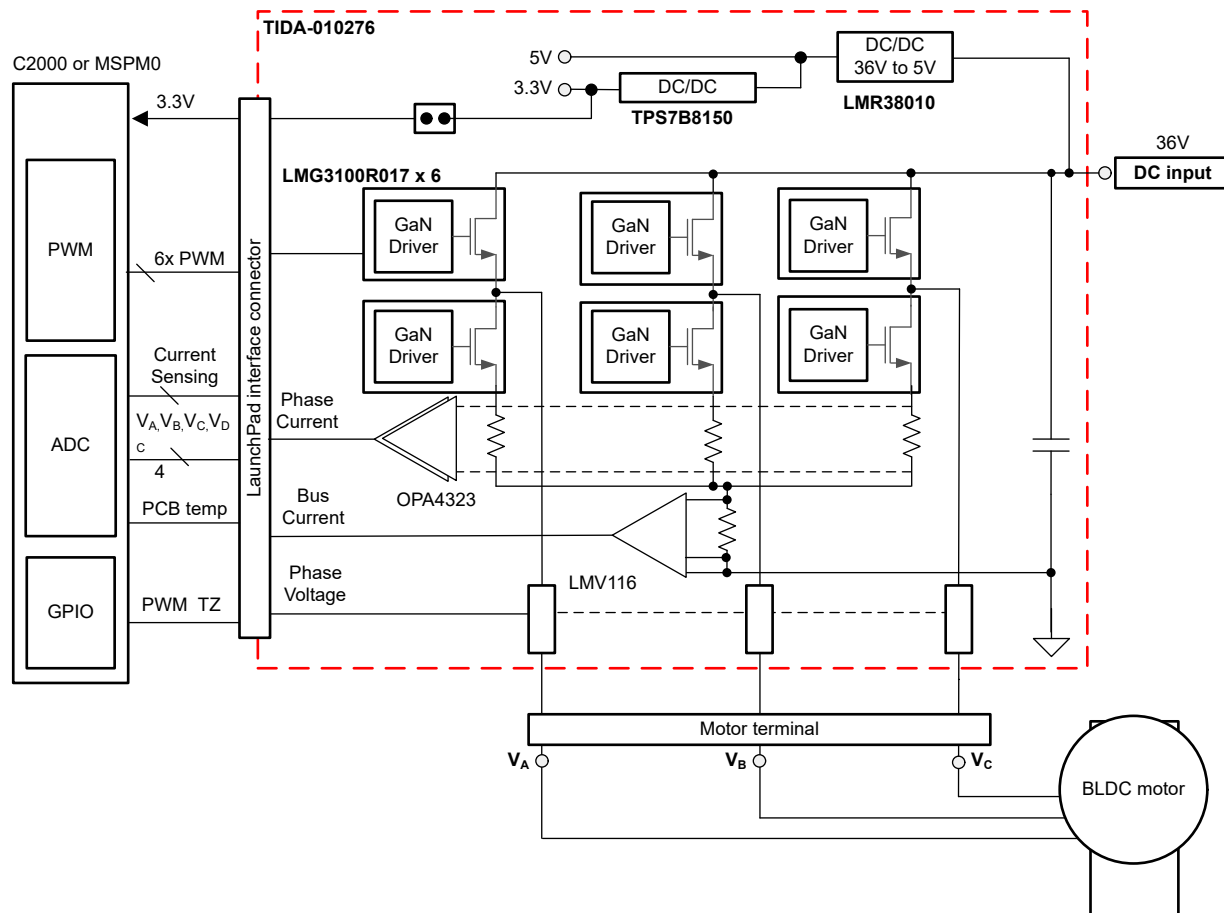


图 2-1. TIDA-010247 方框图

2.2 系统概述

在该参考设计中，设计了以下子块：

- 配有 GaN FET 的三相功率级
- 直流/直流转换器 LMR51606 生成 5V 电源轨，能为 GaN-FET 电源模块供电以及为电流检测放大器和温度传感器提供 3.3V LDO 供电
- 直流-总线电压、低侧总线电流、低侧相电流、相电压检测
- 使用板载温度传感器进行 MOSFET 温度检测
- 主机控制器，用于实现必要的电机控制算法、检测和保护

2.3 重点产品

本参考设计采用了以下重点产品。以下各节介绍为该参考设计选择器件时应考虑的主要特性。如需了解有关重点器件的更多详细信息，请参阅各自的产品数据表。

2.3.1 LMG3100

LMG3100 器件是一款配有集成驱动器的 100V、97A 氮化镓 (GaN) FET。该器件包含一个由高频 GaN FET 驱动器驱动的 100V GaN FET。图 2-2 展示了系统方框图。表 2-1 详细说明了此设计的主要特性和优势。

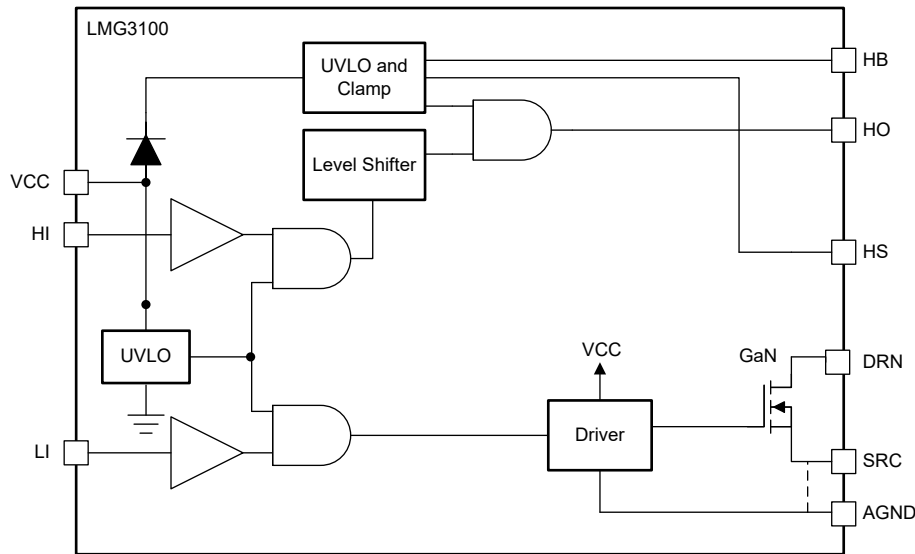


图 2-2. LMG3100 系统方框图

表 2-1. TIDA-010276 中所附 LMG3100 的主要特性和优势

特性	优势
集成 1.7mΩ、90V GaN FET，可实现 97A 运行	支持高达 60VDC 的三相逆变器，在 10kHz 至 80kHz 高开关频率下电流较大，适用于低电感和高速驱动器
集成了 90V、1.7mΩ、GaN FETs、GaN 和驱动器	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，减少使用或不使用散热器
GaN FET 具有零反向恢复特性（第三象限运行）和极小的输入电容 C _{CISS}	减少或消除硬开关中的振铃，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（典型值 29.5ns）和匹配（典型值 12ns）	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
LMG3100 包含高侧电平转换器和自举电路	两个 LMG3100 器件能用于形成半桥，而无需额外的电平转换器
单个 5V 栅极驱动器电源配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。
LMG3100 优化的引脚排列	使用最小电感简化 PCB 布局，从而降低开关损耗
顶部有两个外露 GaN 裸片（SW 和 PGND）。底部有大的 PGND 衰减片。	获得更低的顶部热阻。接受两侧冷却。

2.3.2 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。该器件采用假随机展频，具有超低 EMI，并且开关频率可以在 200kHz 和 2.2MHz 之间配置，从而避开噪声敏感频段。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。

2.3.3 TMP61

TMP61 是一款正温度系数 (PTC) 线性硅热敏电阻。该器件的性能类似于与温度相关的电阻，可根据系统级要求以多种方式对其进行配置，从而监测温度。TMP61 在 25°C 时的标称电阻为 10kΩ，最大容差为 ±1%，最大工作电压为 5.5V，最大电源电流为 400μA。该器件具有以下优点：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处理器时间和内存的简化转换方法。该器件可用于多种应用，通过与典型 0402 封装兼容的极小型 DEC 封装选项来监测靠近热源的溫度。

2.3.4 TPS7B81

TPS7B81 是一款低压降 (LDO) 线性稳压器，可在高达 40V 的输入电压下工作，并可提供高达 150mA 的电流。该器件在轻负载时的静态电流仅为 2.7 μ A，非常适合需要极低待机功耗的宽输入电源设计和多电芯电池应用。45V 瞬态容差为可能存在电感反冲的应用提供了额外的余量，从而减少了用于电压抑制的外部电路。

TPS7B81 具有集成的短路和过流限制功能，可在故障条件下为系统提供保护。除了低待机功耗外，轻负载条件下的极低压降电压也有助于维持电压稳定，即使在电池耗尽的情况下，也是如此。

TPS7B81 采用热增强型 8 引脚 HVSSOP 和 6 引脚 WSON 封装。这两种封装都具有高导热性，且尺寸小，支持紧凑设计，非常适合空间有限的应用，例如电动工具或电机驱动模块和电池包。

2.3.5 OPA4323

OPA4323 是一款低电压 (1.7V 至 5.5V) 和高带宽 (20MHz) 放大器 (op amps)，具有零交叉输入级和轨至轨输出级。对于具有 ADC 驱动器应用中典型轨至轨摆幅的输入信号，OPAx323 零交叉输入级可实现高线性和低失真。在 0.5MSPS 至 5MSPS 之间的 ADC 采样速度下，20MHz 增益带宽能快速稳定响应，具体取决于所需的稳定性能。OPA4323 经良好优化可实现节能，因为该器件仅消耗 1.6mA 的典型静态电流。

OPA4323 实现了 33V/ μ s 的高压摆率，可在电机电流检测应用中快速检测故障。与传统放大器不同，零交叉输入级可在低侧和高侧感应应用中提供相同的精度性能，因此 OPA4323 成为各种终端设备 (例如太阳能串式逆变器、电力输送、高速电机控制) 电流检测的理想选择。

3 系统设计原理

3.1 功率级设计：三相逆变器

36V 直流输入额定电压由 2 个 1000 μ F 电解电容器和 40 个 10 μ F 陶瓷电容器进行缓冲以获得总计 2400 μ F 的直流总线电容。该设计仅可使用陶瓷电容器或仅可使用电解电容器进行测试。可以根据需要减少电解电容器或陶瓷电容器的数量，然后可以评估在开关频率更高时对降低直流总线电容的影响。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。可以选择仅使用陶瓷电容器或仅使用电解电容器来测试 PCB。

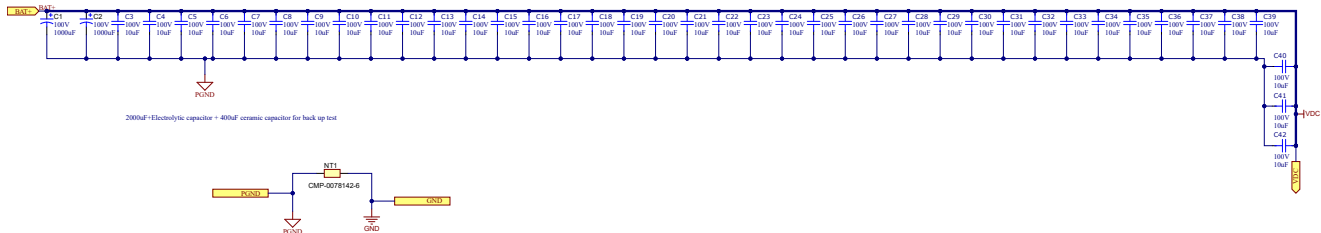


图 3-1. TIDA-010276 直流总线去耦和 GND 方案

3.2 LMG3100 GaN-FET 功率级

LMG3100 包含一个高侧电平转换器和自举电路，因此两个 LMG3100 器件可用于形成半桥，而无需额外的电平转换器。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 3-2 显示了一个半桥的原理图。

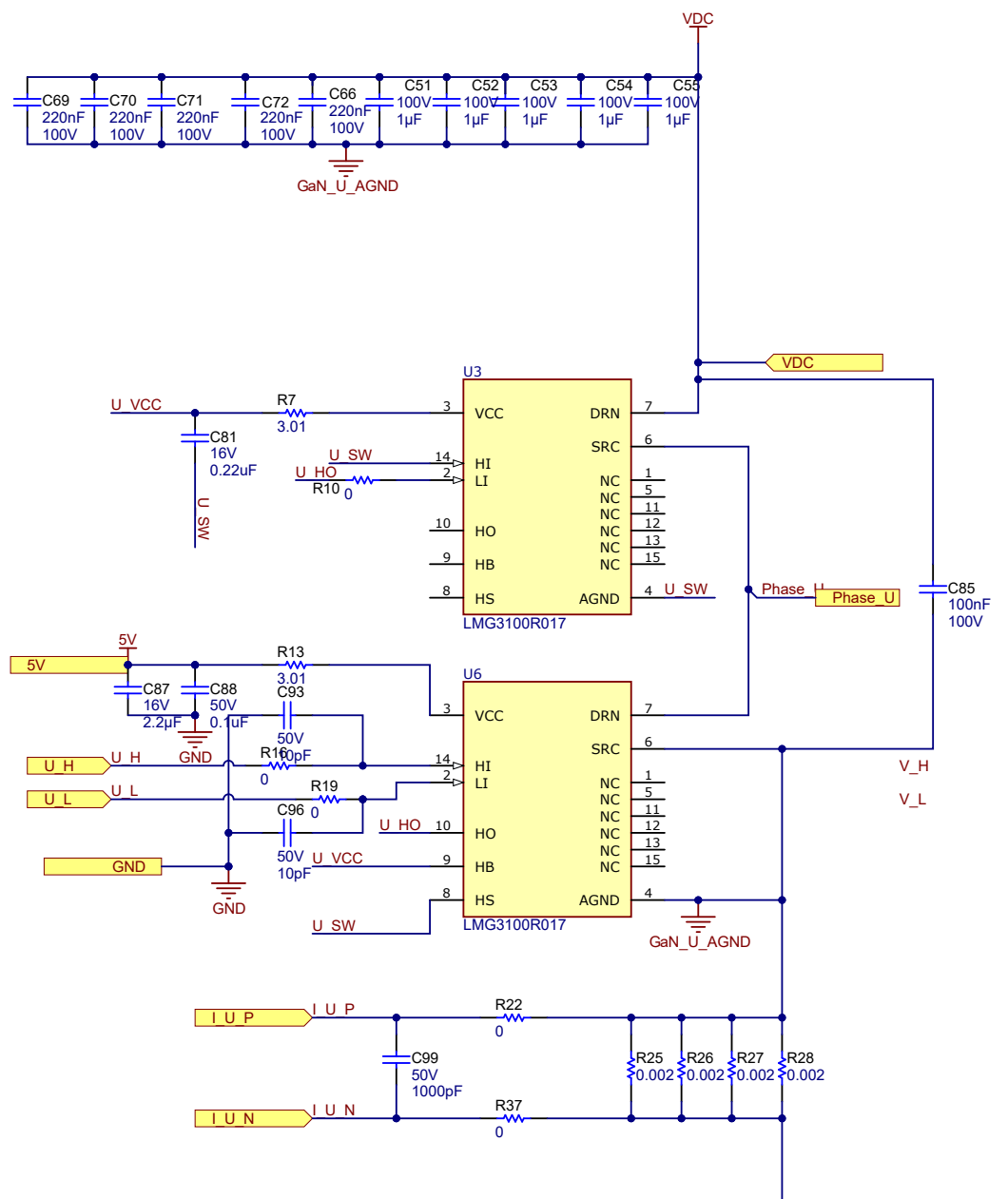


图 3-2. U 相的 TIDA-010276 GaN 功率级原理图

36V 直流链路电压连接到 LMG3100 VIN 引脚并以电源接地 (PGND) 引脚为基准。本地陶瓷旁路电容器 C51、C52、C53、C54、C55 (1 μ F)、C69、C70、C71、C72、和 C66 (220nF) 并联放置，靠近 VIN 和 AGND 引脚之间以最大限度的减少环路电感。半桥 DRN 和 SRC 中还添加了电容器 C85，以降低开关噪声。

LMG3100 集成栅极驱动器的电源电压为 5V。按照数据表中的建议，1 μ F 和 0.1 μ F 陶瓷旁路电容器 (C130、C86) 放置在靠近低侧 GaN FET 的 VCC 引脚和 AGND 引脚处。100nF 陶瓷自举电容器 (C95) 放置在靠近高侧栅极驱动器自举电源轨和高侧 GaN-FET 源极连接引脚处。VCC 路径中的 R6 和 R12 会限制 GaN FET 的导通压摆率。针对 R5 和 R7，本设计使用的是 3 Ω 电阻进行测试。来自 PWM 缓冲器的高侧和低侧开关互补 PWM 信号通过 R15、C89 和 R18、C92 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。由于这是一个半桥应用，因此须将高侧 GaN FET 的 AGND 连接到低侧 DRN 引脚。由于使用低侧电流采样，请将 AGND 连接到采样电阻的上端，并确保采样电阻上的压降尽可能小。

在布局时，需要将电容器 C55 至 C69 连接到 AGND 网络并使连接尽可能短。将 C85 连接到尽可能靠近 Phase_U 网络的位置。

3.3 电源管理

图 3-3 展示了电源树。一个宽输入电压直流/直流降压转换器会生成 5V 电源轨。然后，一个电源模块从 5V 电压生成 3.3V 电压以提供 3.3V 信号链 (如 OPA4323 等)。J1 或 J2 可用于直接禁用 LDO 并为 GaN、OPA4323 和其他电路提供 5V 电源。

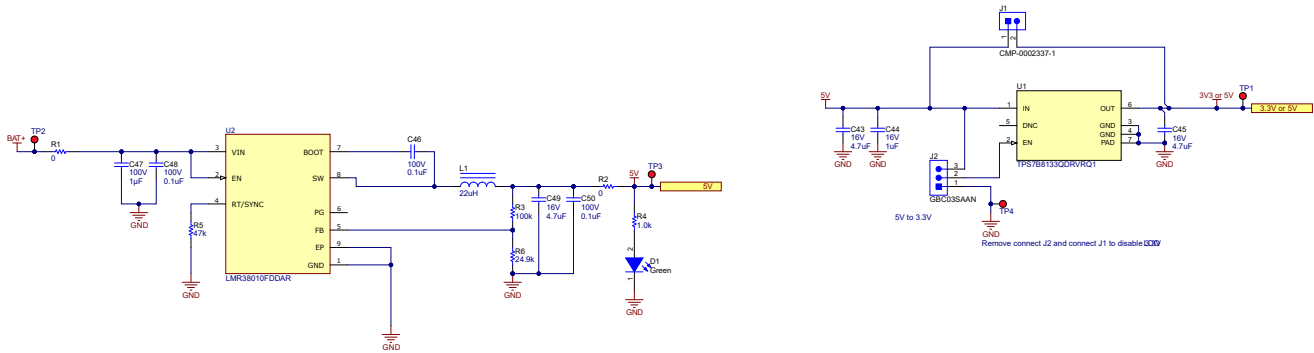


图 3-3. TIDA-010276 直流/直流和 LDO

3.4 电流检测电路

此参考设计还支持使用运算放大器进行总线电流和低侧电流检测。默认情况下使用 $0.5\text{m}\Omega$ 采样电阻，而该设计中使用了差分采样。可通过更改 R54、R62 和 R47 来更改差分采样增益。在此设计中，默认增益为 51，电流范围为 $\pm 64.7\text{A}$ (在 3.3V 时)、 $\pm 98\text{A}$ (在 5V 时) 且截止频率约为 100kHz。

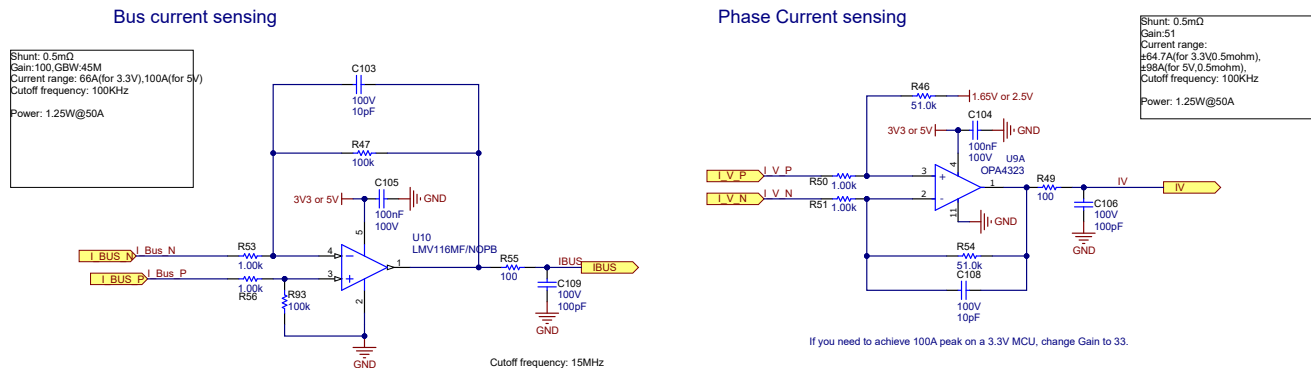


图 3-4. TIDA-010276 电流检测

3.5 过流保护电路

TI 设计了过流保护硬件电路。LM393 用作比较器，可通过 R65 和 R70 设置过流保护阈值。默认为 6A (在 3.3V 时)、9A (在 5V 时)。验证硬件是否正常后，分别将 R65 和 R70 更改为 $1\text{k}\Omega$ 和 $10\text{k}\Omega$ 以进行测试。

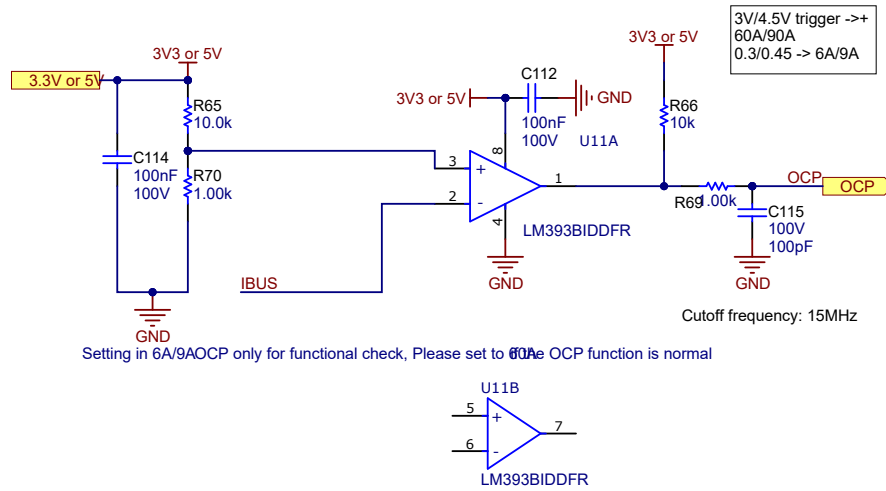


图 3-5. 过流保护硬件电路

3.6 相电压和直流输入电压检测

每个相位的相电压和等于输入电压的直流链路电压通过电阻分压器进行检测。图 3-6 显示了与此相关的示例，此示例用于检测直流链路电压 ($R48$, $R52$)，其中使用低通滤波器 ($C107$) 来衰减 PWM 载波频率。假设绝对最大电压为 80V，相电压调节为 3.3V。

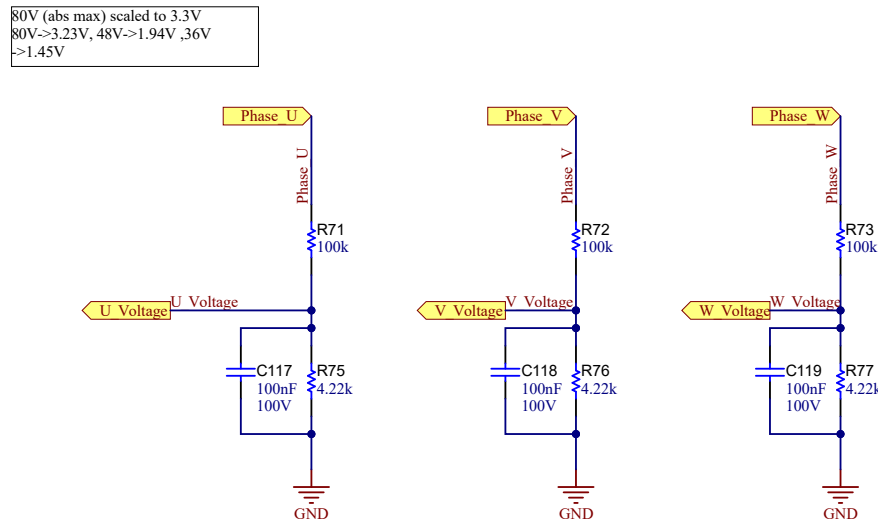


图 3-6. TIDA-010276 相电压和直流输入电压感应

3.7 功率级 PCB 温度监测

为了检测 PCB 功率级的温度，此设计选择 TMP61 系列热敏电阻，因为这些器件采用 0402 和 0603 封装选项，能够在 0°C 至 +70°C 温度范围内提供 $\pm 1\%$ 的精度。TMP6131 器件靠近 LMG3100 放置。根据设计工具，选择一个 10k Ω 电阻作为上拉电阻。TMP6131 的模拟输出信号通过 R87 (20 Ω) 和 C123 (2.2nF) 进行低通滤波，并路由到连接器 J1-11 以进入 C2000 MCU 集成式 ADC。该信号可通过 C2000 MCU 用于实时 PCB 温度检测和过热保护。

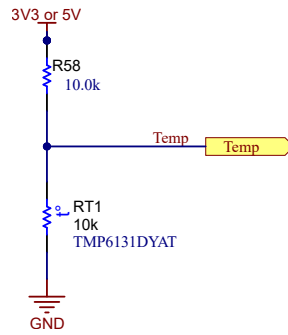


图 3-7. TIDA-010276 Temperature

3.8 用于连接主机 MCU 的接口

用于连接 C2000 MCU 等主机处理器的接口符合 3.3V I/O 标准，可提供所有必需信号，例如 U 相、V 相和 W 相的互补 PWM 信号；PWM 跳闸和禁用信号；以及精确的相电流、相电压和直流链路电压反馈，旨在控制三相 GaN 逆变器。模拟 PCB 温度反馈 (Temp) 有助于进一步保护三相 GaN 功率级并调整安全工作区 (SOA)。在连接到 MCU 集成的 ADC 之前，每个模拟反馈信号都通过 RC 滤波器进行低通滤波，例如 R90 (20Ω) 和 C125 (2.2nF)。2.2nF 电容器用于驱动 ADC 的开关输入电容器 (通常在 5pF 至 15pF 范围内)。肖特基二极管 D2 至 D6 在直流总线电压超过 80V (绝对最大值) 的情况下将最大相电压钳位至大约 3.6V。TIDA-010276 仅可连接到 80 引脚 C2000 MCU LaunchPad (例如 LAUNCHXL-F2800137) 的上部接头。此外，TIDA-010276 主机接口可用于提供 3.3V 电源轨，为 C2000 LaunchPad 供电。此功能可为整个系统提供正确的上电序列。

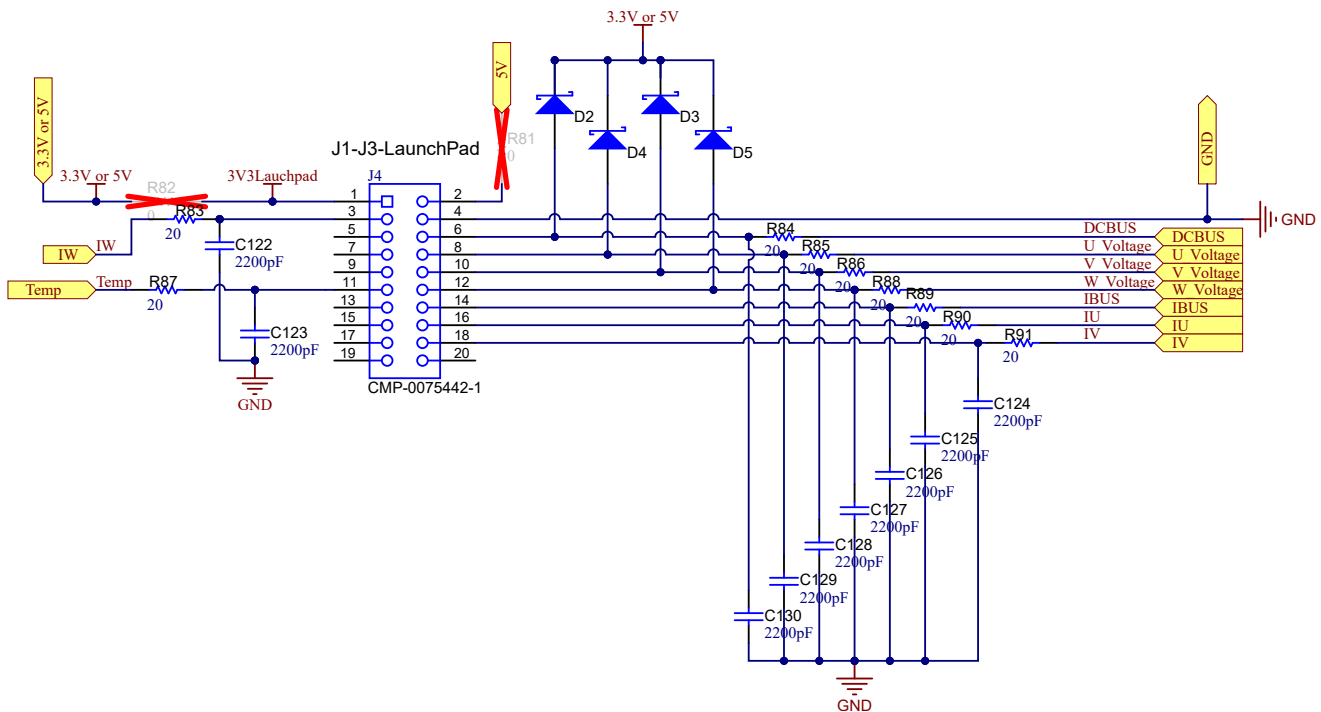


图 3-8. TIDA-010276 接口

4 硬件、测试要求和测试结果

4.1 硬件要求

4.1.1 TIDA-010276 PCB 概览

图 4-1 和图 4-2 显示了 PCB 顶面和底面的标注照片。以下列表中提供了这些器件的说明：

- 电源的两端子输入：该引脚用于连接电池的输入直流电源。
- 用于电机绕组连接的三端子输出：用于连接三相 BLDC 电机绕组的相位输出连接，标记为 U、V、W
- BAT+/GND 附近的 2 引脚连接器：用于连接陶瓷电容器 PCB
- 连接器 J1-J3 和 J4-J2：用于连接 MCU
- 2 引脚连接器 J1：可连接旁路
- 3 引脚连接器 J2：用于启用或禁用 LDO

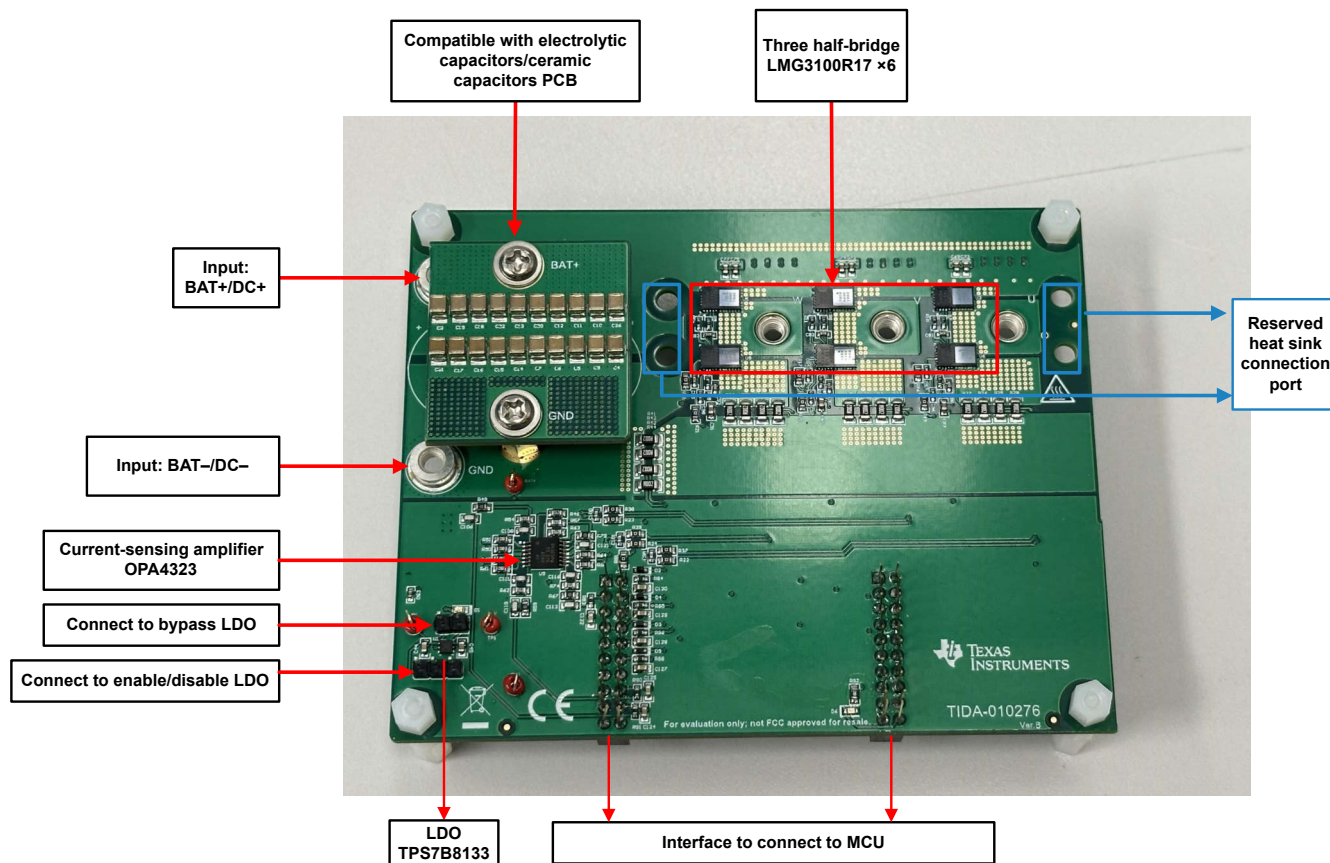


图 4-1. TIDA-010276 PCB 顶视图

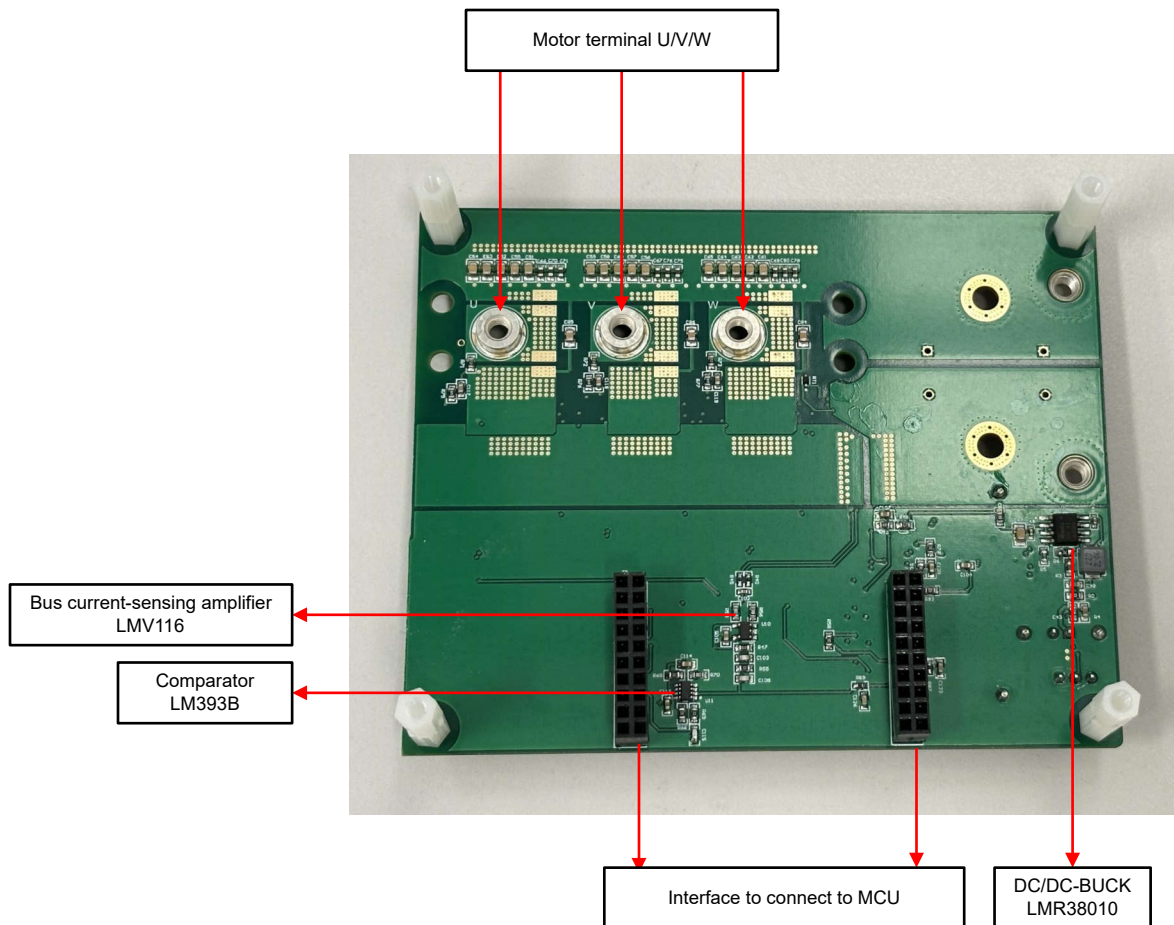


图 4-2. TIDA-010276 PCB 底视图

4.1.2 TIDA-010276 跳线设置

表 4-1 显示了四个 TIDA-010276 跳线。

表 4-1. TIDA-010276 跳线设置

跳线	功能	已组装	未组装
J1	LDO 设置	旁路 LDO 将输出设置为 5V	默认值
J2	LDO 设置	连接 1-2 禁用 LDO , 连接 2-3 启用 LDO	连接 2-3 启用 LDO
J1-J3 , J2-J4	控制 连接	连接 C2000 LaunchPad	非 控制信号
R82 , R81	为 LaunchPad 提供 3.3V 或 5V	为 LaunchPad 供电	未组装 (默认) , LaunchPad 使用自己的 USB 电源

小心

不要同时组装 R82 和 R81。组装 R82 或 R81 后，确保 C2000 LaunchPad 不会通过 USB 供电。若要完成此设置，请移除 F2800137 LaunchPad 上的电源跳线。

TIDA-010276 接口规范符合 TI BoosterPack 插件模块标准。TIDA-010276 板能连接到 C2000 LaunchPad 接头 J1 - J4。图 4-3 显示了 TIDA-010276 已连接到 F2800137 LaunchPad 接头 J1 - J4。TIDA-010276 不给 LaunchPad 供电。

将直流电源 (12V 至 48V , 额定电压为 36V) 连接到直流输入电压连接器 (MP1 , MP3) , 并将三相电机连接到三相输出电压连接器 (MP2、MP4 和 MP5)。验证三相电机可以在 PWM 开关期间处理相电压的高摆率。

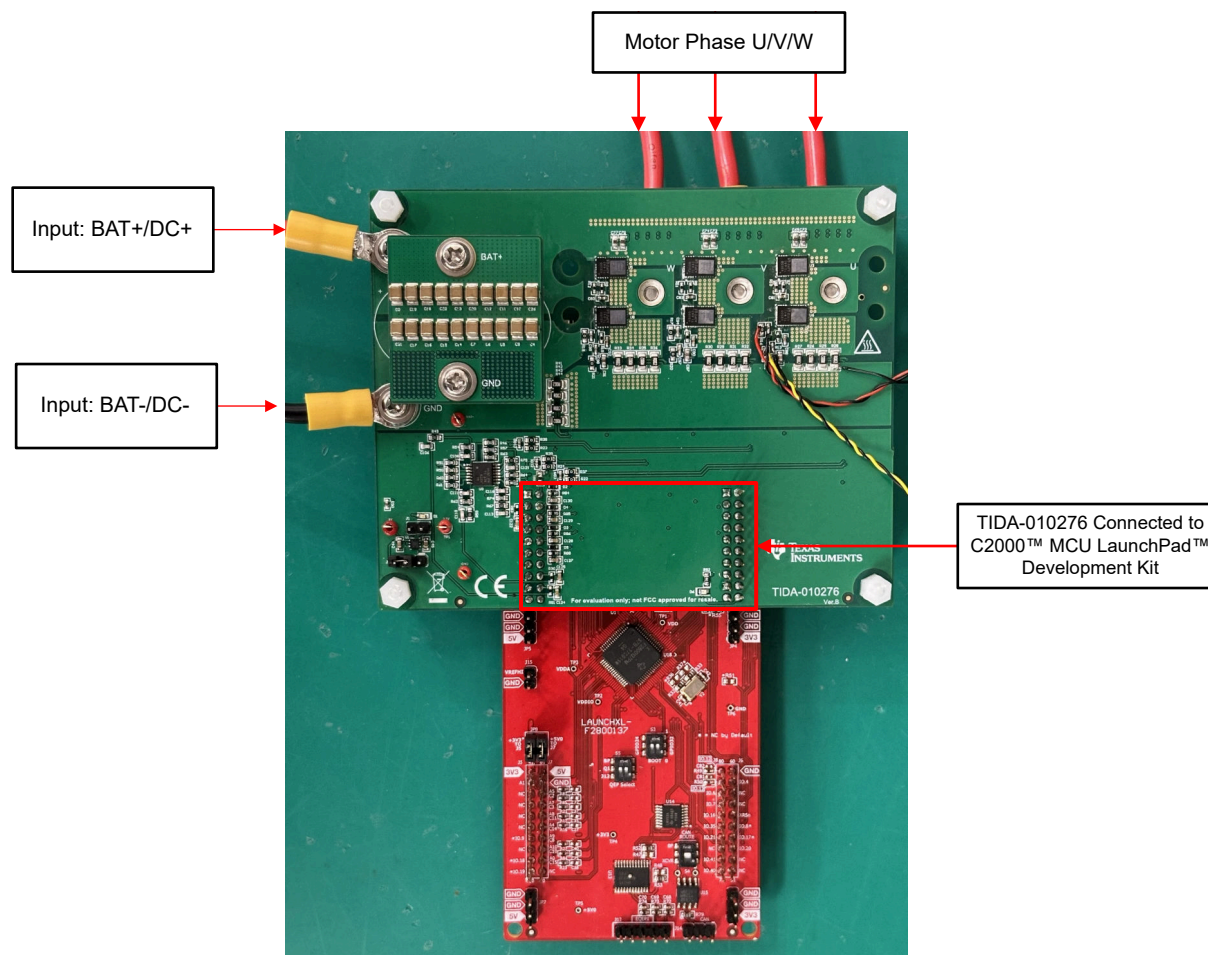


图 4-3. TIDA-010276 PCB 连接到 C2000 LaunchPad™

4.2 测试设置

表 4-2 列出了主要测试设备。具体测试时，测试设置的相关说明和图片在相应测试结果部分中提供。

表 4-2. 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
功率分析仪	HIOKI PW6001
隔离式电流探针	CYBERTEK CP8030H、HIOKI CT6872
测力计	MAGTROL DSP6000
万用表	Fluke 17B+
热像仪	FOTRIC
可调节电源 (10A)	ITECH IT6724H
可调节电源 (20A)	ITECH M3902C
C2000 MCU LaunchPad 开发套件	德州仪器 (TI) LAUNCHXL-F2800137

- 断开电机与电路板的连接，并将输入直流电源通电。确保至少施加 15V_{DC} 输入，并且电路板内产生 3.3V 电压。
- 按详细介绍对 MCU 进行编程
- 移除编程器，并关闭直流输入电源
- 将逆变器输出端连接到电机绕组端子
- 断开 J1 以禁用旁路 LDO
- 连接 J2 (1-2 引脚) 以启用 LDO
- 使用具有电流限制保护的直流电源，并在电路板上施加 36V_{DC}
- 使用 MCU 和调试工具运行电机

4.3 测试结果

以下各节显示了测试数据。测试结果分为多个部分，涵盖 BLDC 电机的稳态性能和数据、功能性能波形以及瞬态性能波形。

4.3.1 电源管理和系统上电和断电

此测试的重点是验证板载 5V 和 3.3V 电源并测量 3.3V 和 5V 电源轨的典型电流消耗。对于这些测试，C2000 MCU LaunchPad 开发套件均不是由 TIDA-010276 供电。由于 36:5 的高降压比 (36V 输入到 5V 输出)，5V 电源轨上的电压纹波也得到了验证。

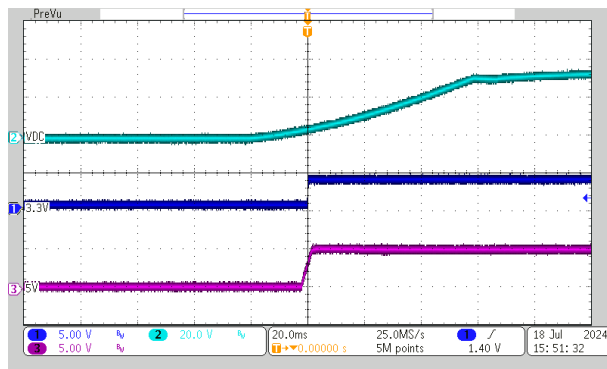


图 4-4. TIDA-010276 上电

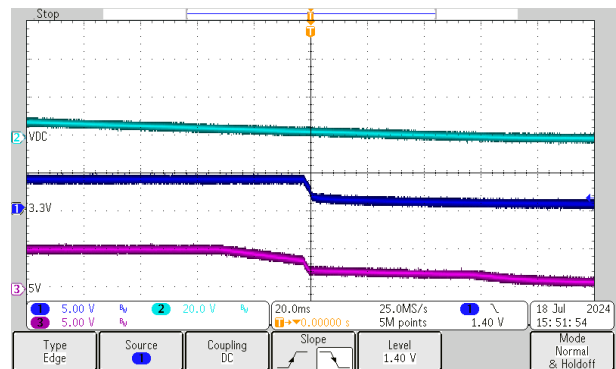


图 4-5. TIDA-010276 断电

在断电阶段，当总线电压降至约 5V 时，LMR38010 的输出随总线电压一起下降。当总线电压低于 3.3V 时，3.3V 电源轨也开始下降。在轻负载条件下，5V 电源轨的交流纹波远低于 10mV_{pp}。纹波频率为 574kHz，与降压转换器的开关频率相匹配。5V 电源轨的偏移量大约为 5.03V。

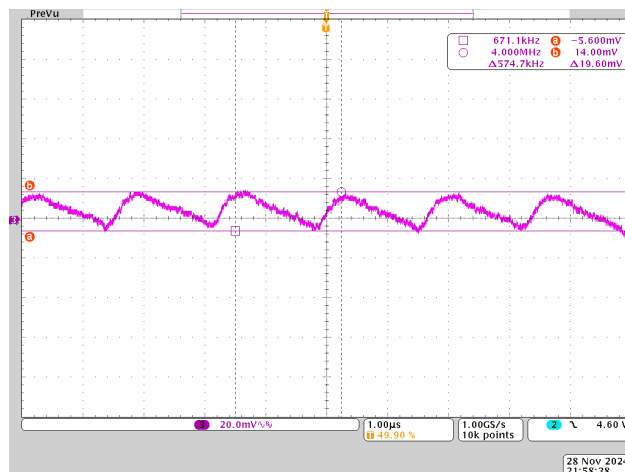


图 4-6. 额定负载 (20mA) 下的 TIDA-010276 输出纹波

4.3.2 GaN 逆变器开关节点电压

此测试的重点是验证 GaN 逆变器开关节点电压在 36V 时瞬态响应。此测试的另一个目的是验证每个 LMG3100 GaN 电源模块上本地旁路电容器的容量。C2000 MCU 经配置后，能生成三相空间矢量及与 16.6ns 死区互补的 PWM。每相的 PWM 占空比经配置后，能驱动相应的相电流 I_A ，且 $I_B = I_C = -0.5 I_A$ 。图 4-7 显示了在 LMG3100 SW 引脚上以 PGND 为基准测量的 LMG3100 开关节点电压。

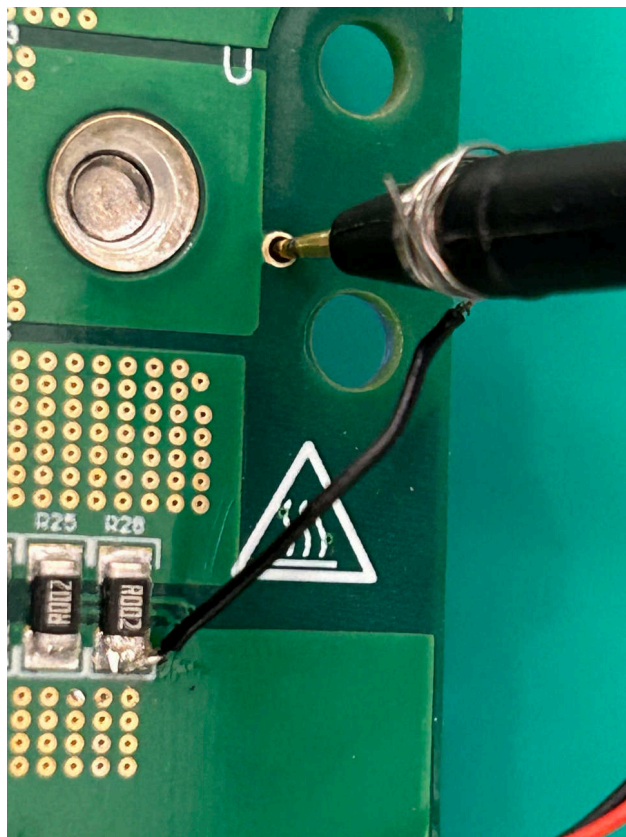


图 4-7. LMG3100 开关-节点的测试设置

图 4-8 和 图 4-9 示了上下桥臂之间 PWM 输入的死区时间。TI 建议死区时间 > 50ns。

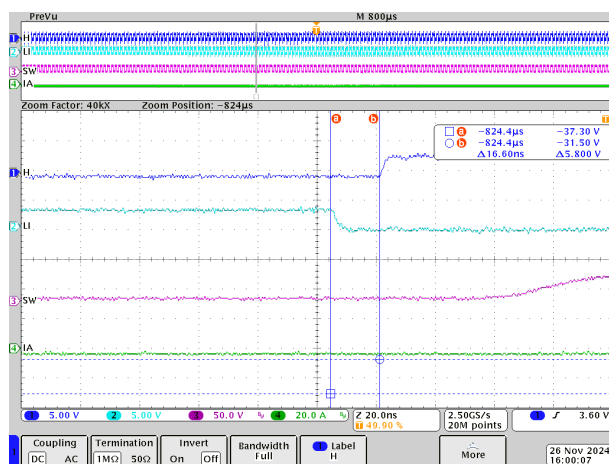


图 4-8. 上升沿 PWM U (H 和 L)

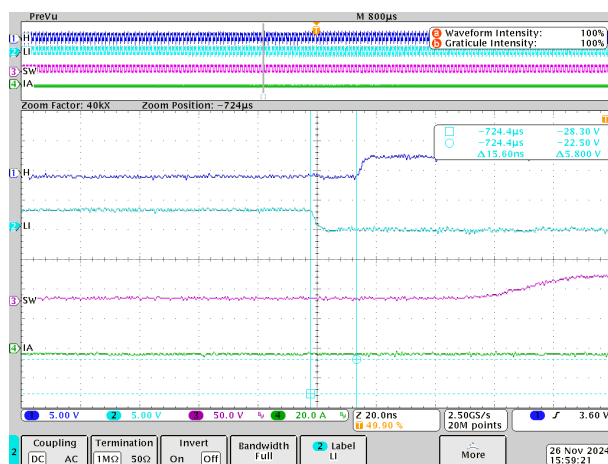


图 4-9. 下降沿 PWM U (H 和 L)

4.3.3 开关节点电压瞬态响应

图 4-10 至 图 4-13 所示的硬开关和软开关时的 SW 瞬态电压。在图中可以轻松识别出 PWM 频率 (20kHz)、LMG3100 传播延迟以及 16.6ns PWM 死区。由于相电流较低, 因此存在硬开关以及软开关和硬开关的组合, 如下波形所示。GaN-FET 的导通和关断压摆率 (20% 至 80%) 配置为大约 10V/ns 至 15V/ns。

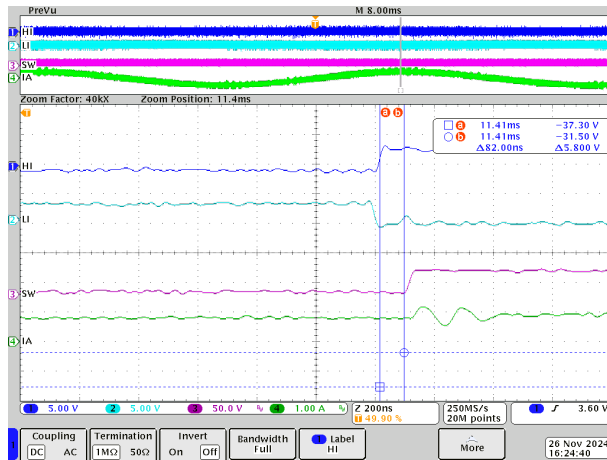


图 4-10. U 相上升 SW、相电流 36V、1A

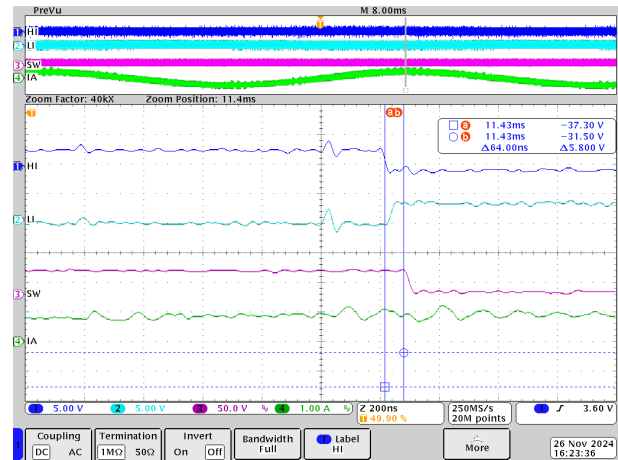


图 4-11. U 相下降 SW、相电流 36V、1A

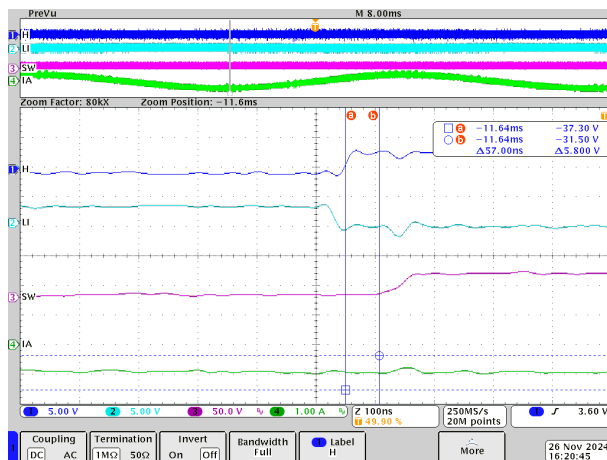


图 4-12. U 相上升 SW、相电流 36V、-1A

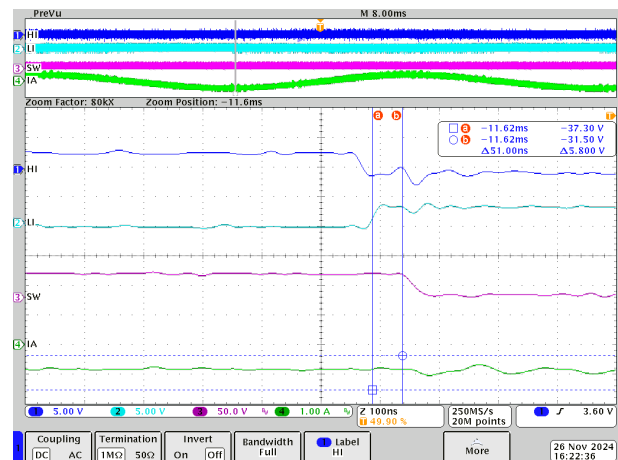


图 4-13. U 相下降 SW、相电流 36V、-1A

图 4-14 至图 4-17 所示的是在 1A 和 20A 输出时将 PWM 输入至 GaN-FET 传播延迟进行测试所得结果。传播延迟对于电机控制系统来说足够小。



图 4-14. U 相上升 SW、相电流 36V、20A

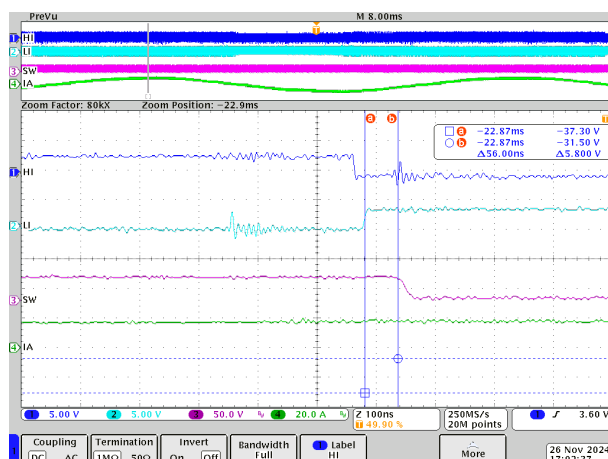


图 4-15. U 相下降 SW、相电流 36V、20A

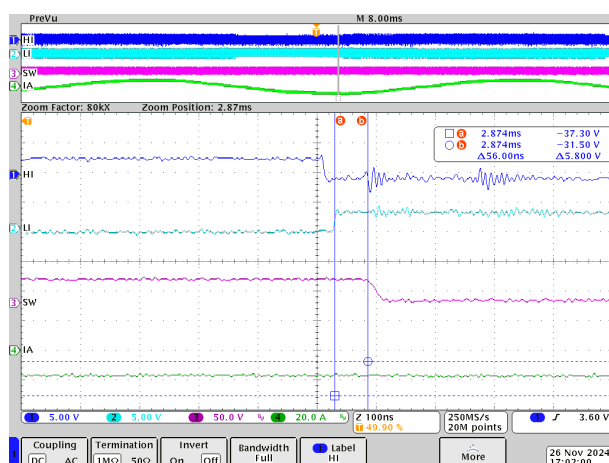


图 4-16. U 相上升 SW、相电流 36V、-20A

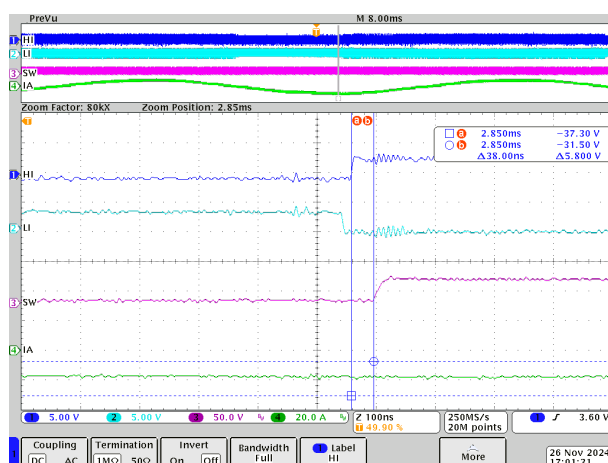


图 4-17. U 相下降 SW、相电流 36V、-20A

4.3.4 PWM 频率对直流总线电压纹波的影响

总线电容器的主要功能是使总线电压变得平滑并在开关中提供转换电流，从而保持总线电压纹波足够小，以使 FET 时间变得更短，电容器所需的容量变小，且使用更高的 PWM 开关频率降低所需的总线电容值。通常，将总线电容器用电解电容器安装。在以下测试中，尝试用陶瓷电容器代替电解电容器，从而在不同的频率下增加 PWM 纹波电解电容器和陶瓷电容器的频率。

对工作状态下的 400 μ F 陶瓷电容器进行了以下测试，并与 1000 μ F 电解电容器数据进行了比较。

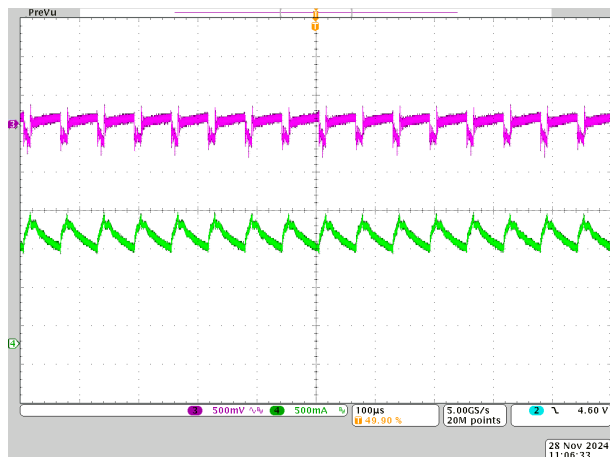


图 4-18. 电解电容器在 8kHz PWM、10A 时的纹波电流和纹波电压

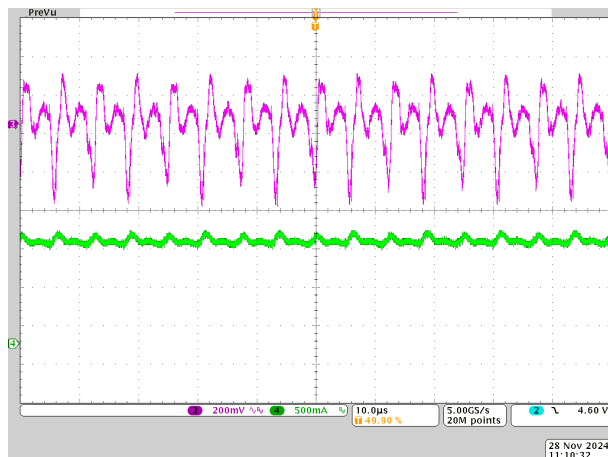


图 4-19. 电解电容器在 80kHz PWM、10A 时的纹波电流和纹波电压



图 4-20. 陶瓷电容器 8kHz PWM、10A 时的纹波电流和纹波电压

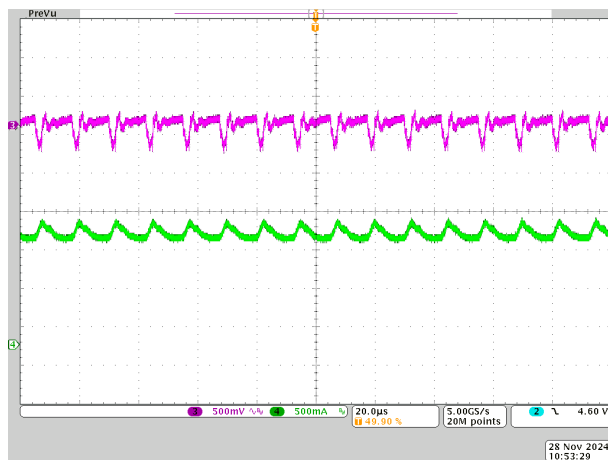


图 4-21. 陶瓷电容器 80kHz PWM、10A 时的纹波电流和纹波电压

如结果所示，一旦频率增加，总线上的纹波会逐渐降低，因此可以使用电容较小的电容器。但陶瓷电容器在低频下的电压纹波要大得多。由于该 $10\ \mu\text{F}$ 陶瓷电容器在 36V 电压下的实际电容仅为 $4\ \mu\text{F}$ （来自 [GRM32EC72A106KE05](#) 数据表），因此对应于 $400\ \mu\text{F}$ 陶瓷电容器的实际有效电容为 $160\ \mu\text{F}$ 。当 PWM 频率增加到 80kHz 时， $400\ \mu\text{F}$ 陶瓷电容器（ $160\ \mu\text{F}$ 有效电容）和 $1000\ \mu\text{F}$ 电解电容器的电压纹波是类似的。因此，GaN 的超低开关损耗可用于将 PWM 频率提高到 80kHz 。同时，为了减小尺寸，可以将电解电容器替换为容量相同的陶瓷电容器。

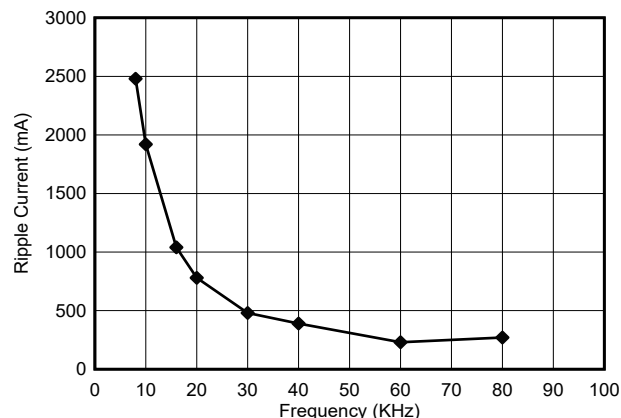


图 4-22. 陶瓷电容器纹波电流从 8kHz 变为 10kHz

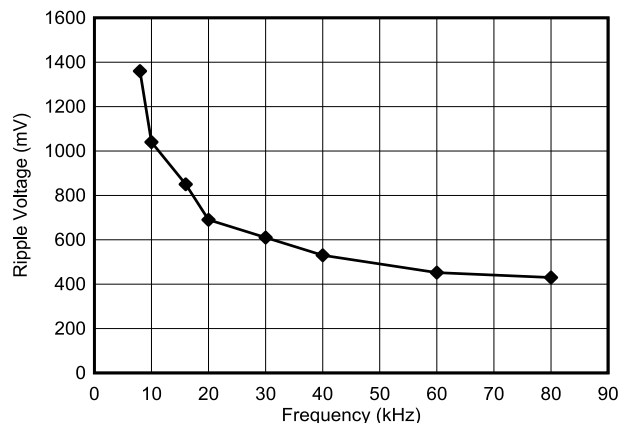


图 4-23. 陶瓷电容器纹波电压从 8kHz 变为 10kHz

4.3.5 效率测量

效率测试是在 27°C 实验室温度下使用 HIOKI® PW6001 电源分析仪和 HIOKI® CT6872 电流互感器完成的。PWM 载波频率设置在 20kHz 至 80kHz 之间。电压为 36V，电机转速为 600rpm，在电流模式下运行电机以测试功率损耗。图 4-24 显示了测试设置图。在所有这些测试中，均未使用散热器和风扇，因此仅运用 TIDA-010276 PCB 的自然对流。

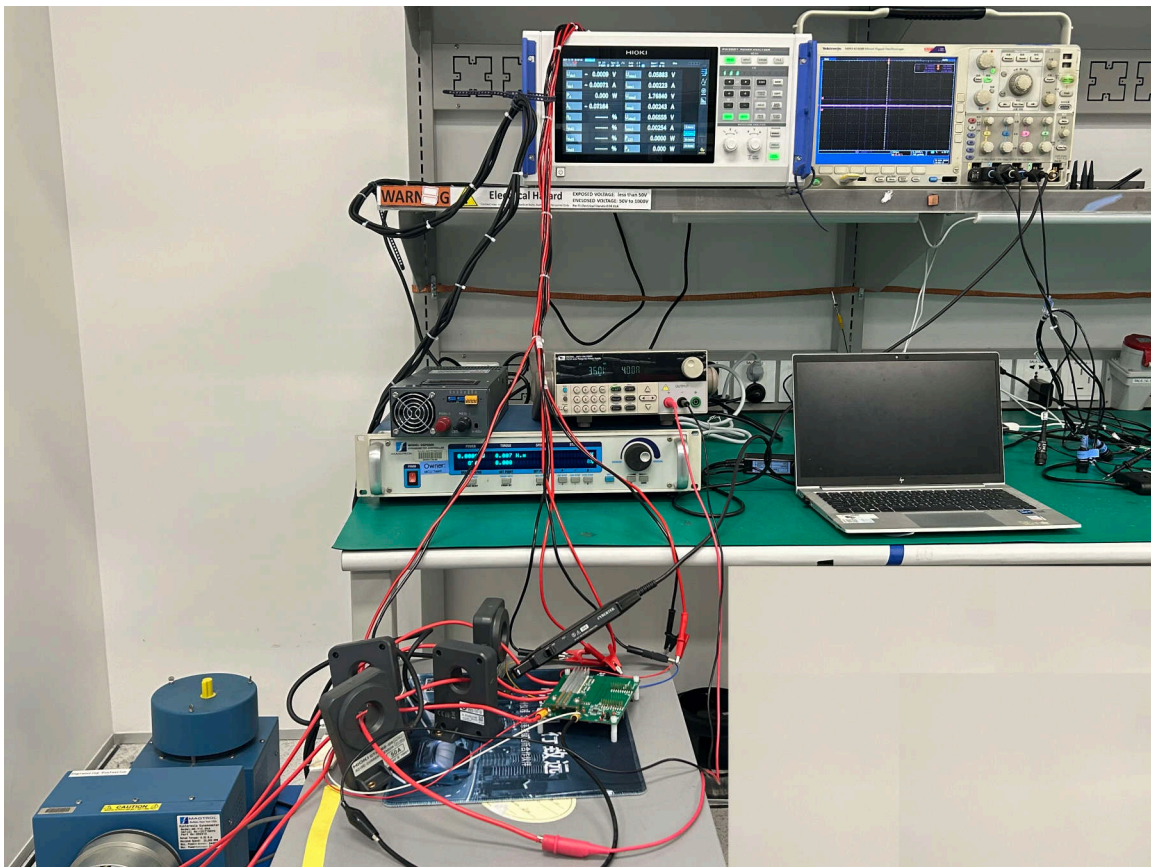


图 4-24. 逆变器效率分析用的测试设置

图 4-25 显示了 TIDA-010276 功率损耗与三相电机负载电流（以 A_{RMS} 为单位）间的关系。这些数字不包括 C2000 MCU LaunchPad 开发套件的功率损耗。

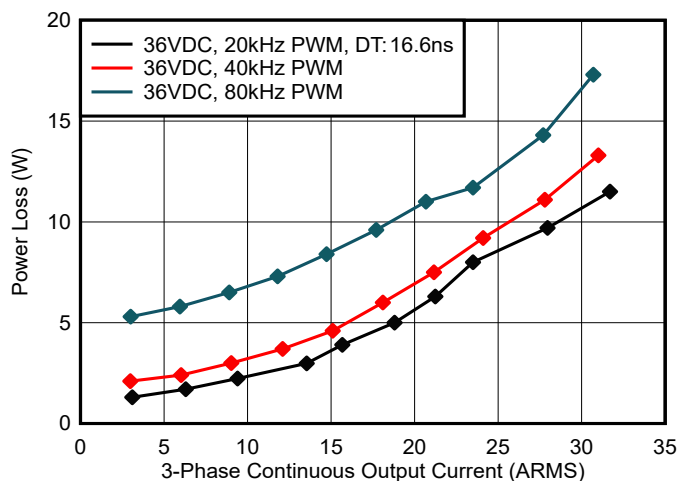


图 4-25. TIDA-010276 电路板在 36V 输入电压下的损耗与三相输出电流间的关系

TIDA-010276 功率损耗主要由 GaN FET (LMG3100) 中的损耗、 $0.5\text{m}\Omega$ 总线电流分流电阻器和三个 $0.5\text{m}\Omega$ 低侧 FET 分流电阻器中的损耗决定。最大相间电压为 $14.69\text{V}_{\text{RMS}}$ (第三次谐波的空间矢量 PWM)、功率因数为 0.9 及 36VDC 时, 理论最大峰值效率在 20kHz PWM 时为 99.16%、在 40kHz PWM 时为 99.01%、在 80kHz 时为 98.58%, 具体的计算结果如图 4-26 所示。

可以发现, 随着 PWM 开关频率增加, 电路板的功率损耗不会显著增加。这也反映了 LMG3100R17 GaN-FET 具有极低的开关损耗, 即使在更高的 PWM 开关频率下也能实现极高的效率。

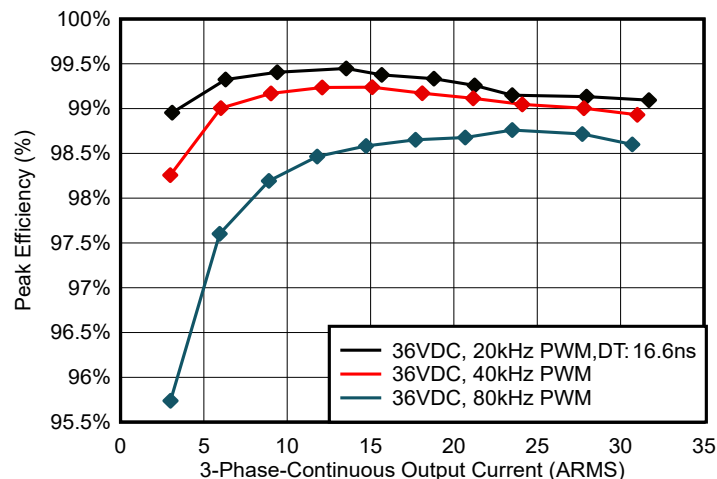


图 4-26. 在 36VDC 以及 40kHz、60kHz 和 80kHz PWM 条件下计算出的最大峰值效率

系统测试时采用了 TIDA-010276 设计和电动自行车电机。测试表明, 增加开关频率也可以提高电机驱动的总效率。表 4-3 详细说明了 TIDA-010276 电机系统效率测试结果。

表 4-3. TIDA-010276 电机系统效率测试结果

参数	20kHz (死区时间 $1\mu\text{s}$)	80kHz (死区时间 16.6ns)
P_{IN}	49.8W	48.2W
P_{OUT} (逆变器)	49.2W	47.5W
η (逆变器)	98.70%	98.50%
速度	480rpm	480rpm
扭矩	0.68Nm	0.68Nm
P_{mech}	34.178W	34.178W
η (电机)	68.63%	70.90%
η (总计)	67.7%	69.9%

4.3.6 热分析

本设计的热分析是在 27°C 实验室温度、36V_{DC} 输入、20kHz、40kHz、80kHz 频率以及驱动大功率电机的条件下完成的。在采集温度前，电机运行约 10 分钟。本测试的运行未使用散热器，而是通过外部风扇在一定距离提供气流。

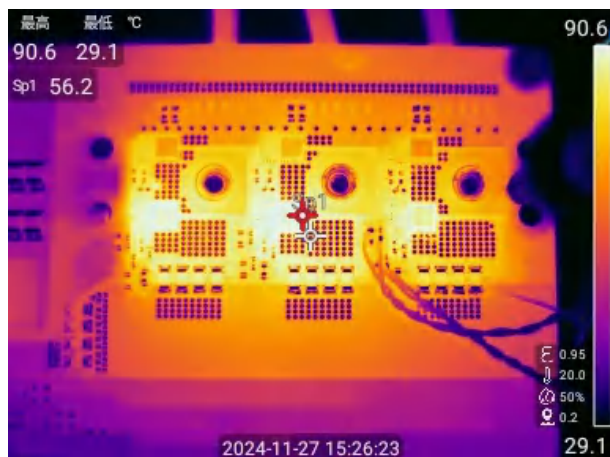


图 4-27. TIDA-010276 在 50A 峰值、20kHz PWM 下的热像图

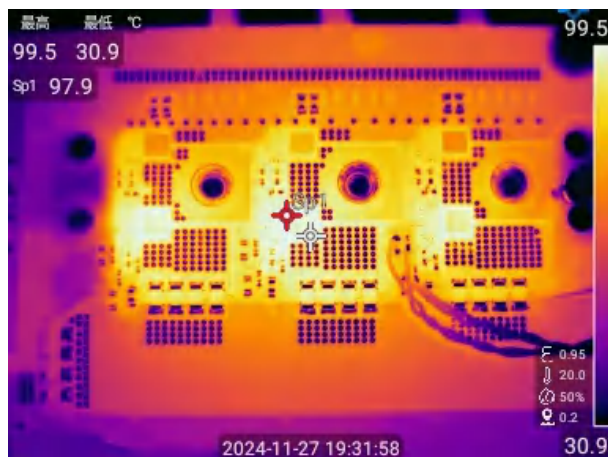


图 4-28. TIDA-010276 在 50A 峰值、40kHz PWM 下的热像图

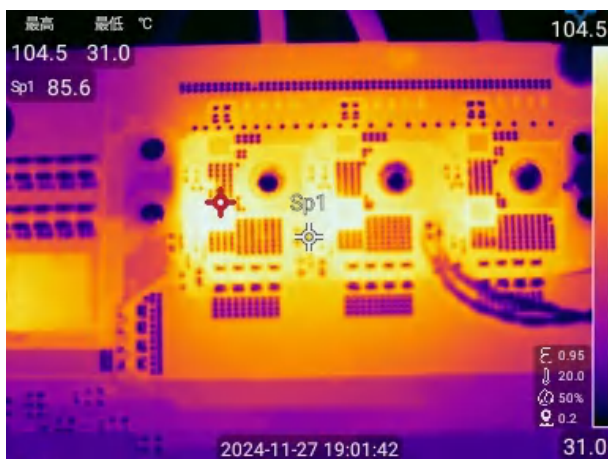


图 4-29. TIDA-010276 在 50A 峰值、80kHz PWM 下的热像图

由于 LMG3100 将裸片暴露在顶部，因此 LMG3100 的管壳温度非常接近裸片温度。最高结温可高达 175°C。在此测试中，结温上仍有一些裕量。

测试 TIDA-010276 时使用了小型散热器。以 80kHz、50A 峰值电流 (27°C 实验室温度) 运行电机。图 4-30 所示的是采用小型散热器的设计, 图 4-31 所示的是生成的热图像。如果使用 TIDA-010276 以更高的功率运行, 请选择更大的散热器以满足散热要求。

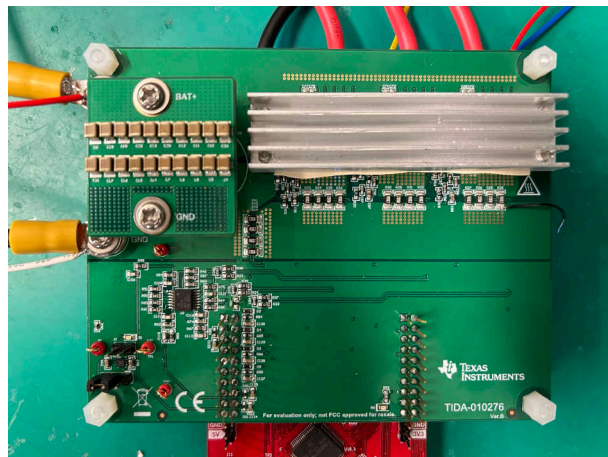


图 4-30. 带小散热器的 TIDA-010276

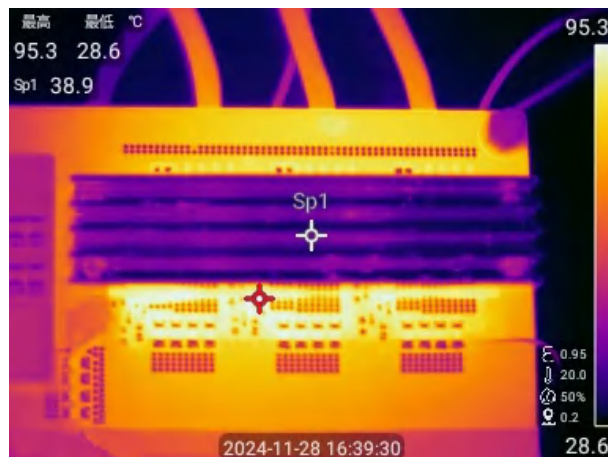


图 4-31. TIDA-010276 在 50A 峰值、80kHz PWM 下的热像图

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-010276](#) 中的设计文件。

5.1.2 BOM

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-010276](#) 中的设计文件。

5.2 工具与软件

工具

CCSTUDIO

Code Composer Studio 是适用于 TI 微控制器和处理器的集成开发环境 (IDE)。该 IDE 包含一整套用于开发和调试嵌入式应用的工具。Code Composer Studio 可下载到 Microsoft® Windows®、Linux® 和 macOS® 系统上。此外，还可以通过访问 TI 开发人员专区在云中使用该软件。

适用于 C2000™ 实时
MCU 的
TMS320F2800137
LaunchPad™ 开发套件

LAUNCHXL-F2800137 是一款适用于 TI C2000™ 实时微控制器系列 F280013x 器件的开发板。该套件提供易于使用的标准化平台来开发下一个应用，非常适用于初始评估和原型设计。该扩展版本 LaunchPad™ 开发套件可提供额外引脚用于开发，并支持连接两个 BoosterPack™ 插件模块。作为庞大的 TI MCU LaunchPad 生态系统的一部分，该工具还与各种插件模块交叉兼容。

软件

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

适用于 C2000™ 微控制器 (MCU) 的 MotorControl SDK 包含一套全面的软件基础架构、工具和文档，旨在尽可能缩短基于 C2000 实时控制器的电机控制系统开发时间，可适用于各种三相电机控制应用。该软件包括在 C2000 电机控制评估模块 (EVM) 和针对工业驱动器、机器人、电器和汽车应用的 TI 参考设计上运行的固件。MotorControl SDK 包含高性能电机控制应用在开发和评估等各阶段所需的所有资源。

5.3 文档支持

1. 德州仪器，[附有集成式驱动器数据表的 LMG3100R017 100V，97A GaN FET](#)
2. 德州仪器，[LMR38010 4.2-V 至 80-V、1-A、同步 SIMPLE SWITCHER® 电源转换器，附有 40-μA I_Q 数据表](#)
3. 德州仪器，[TPS7B81 150mA、40-V、超低 I_Q、低压降稳压器数据表](#)
4. 德州仪器，[TMP61 附有 0402 和 0603 封装选项数据表的 ±1% 10-k Ω 线性热敏电阻](#)
5. 德州仪器，[OPAx323 20MHz 高带宽、114dB CMRR、低压 \(1.7V 至 5.5V\) RRIO 零交叉运算放大器数据表](#)

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

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

HIOKI® is a registered trademark of Hioki E.E. Corporation.

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

Linux® is a registered trademark of Linus Torvalds.

macOS® is a registered trademark of Apple Inc.

所有商标均为其各自所有者的财产。

6 作者简介

JENSON FANG 是德州仪器 (TI) 的系统工程师，负责开发与电器系统相关的电机控制和 BMS 设计等。

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 * (January 2025) to Revision A (June 2025)	Page
• 更新了 TIDA-010276 电流检测 图像。.....	9
• 添加了措辞以阐明文本。.....	9
• 更新 TIDA-010276 相电压和直流输入电压感应 图像。.....	10
• 将死区时间建议值从 16.6n 更改为 > 50ns。.....	16

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