

TI Designs: TIDA-01541

用于三相逆变器的高带宽相电流和 DC-Link 电压检测参考设计

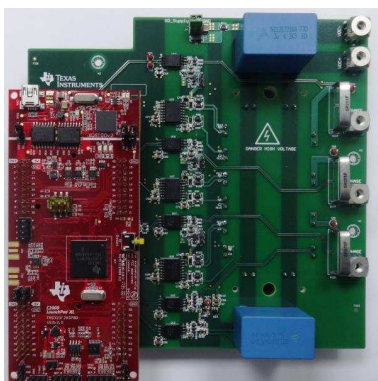


说明

此参考设计在三相逆变器中进行隔离式相电流和 DC-Link 电压测量，能够降低系统成本并支持紧凑型设计，同时可实现高带宽和感应精度。隔离放大器的输出端通过差分到单端电路连接到 MCU 的内部 ADC。借助隔离放大器可以在 MCU 内部使用 SAR ADC，从而降低系统成本，而不必在电流检测方面进行任何折衷。8 引脚封装可减小电路板外形尺寸。借助隔离式放大器的高带宽能够在 3.5 μ s 内保护 IGBT，而借助高性能规格可实现高精度的电流和电压测量。DC-Link 电压测量是在高输入阻抗下完成的，因此可避免由高压分压器引起的源阻抗效应，从而提高精度。

资源

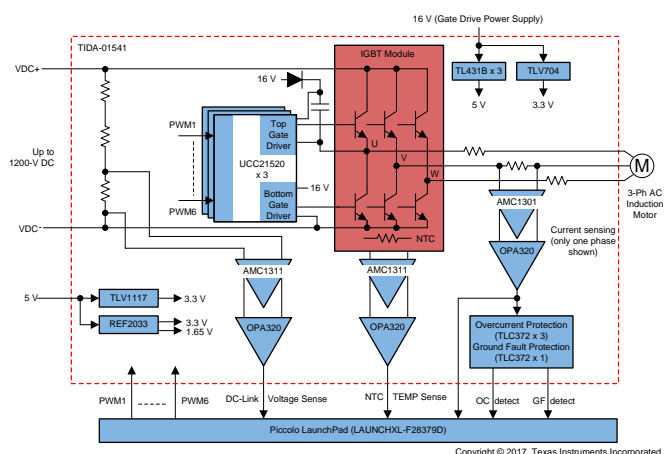
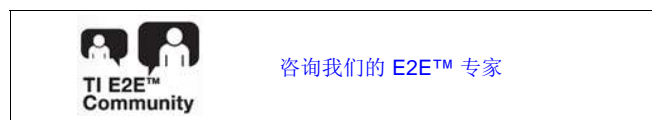
TIDA-001541	设计文件夹
UCC21520	产品文件夹
AMC1301	产品文件夹
AMC1311	产品文件夹
OPA320	产品文件夹
TLC372	产品文件夹
TLV1117	产品文件夹
TLV704	产品文件夹
REF2033	产品文件夹
TL431B	产品文件夹
SN74LVC1G10	产品文件夹
TIDA-00366	工具文件夹



- 具有高带宽（大于 200kHz）的增强型隔离式放大器可实现低延迟电流检测和快速过流检测（小于 3 μ s）以保护功率级
- 具有高阻抗输入的增强型隔离放大器经过优化，可实现高阻抗节点（如 DC-Link 电压）的精密感应，在 0VDC 至 1026VDC 范围内的 DC-Link 电压检测精度仅具有 $\pm 1\%$ 的误差
- 在 ± 50 A FSR 范围和 -25°C 至 $+85^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内，标定电流测量误差为 $\pm 0.5\%$
- 具有低功耗特性的增强型隔离式放大器支持通过栅极驱动器自举电容器简单 LDO 进行供电
- 提供针对直流总线欠压、过压、过载、接地故障和过热的保护

应用

- 交流逆变器和变频驱动器
- 伺服 CNC 和机器人
- 三相 UPS
- 光伏逆变器



特性

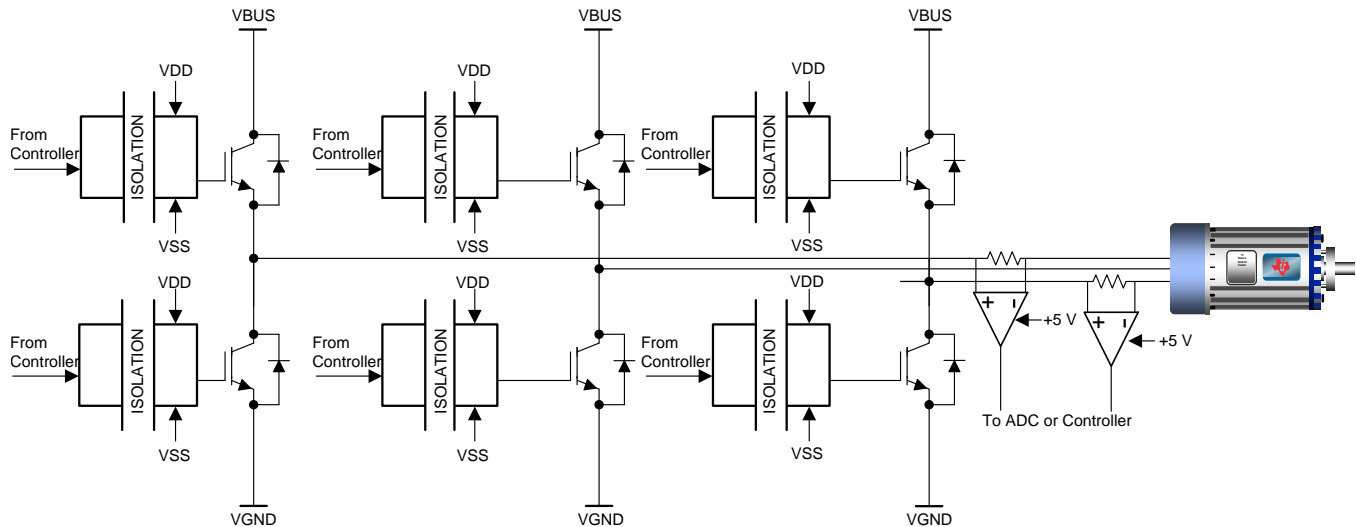
- 增强型隔离式逆变器，适合额定功率高达 10kW 的 400V-1200V DC-Link 驱动器



该 TI 参考设计末尾的重要声明表述了授权使用、知识产权问题和其他重要的免责声明和信息。

1 系统说明

三相逆变器可用于多种应用，例如用于控制交流电机转速的变频器、不间断电源、太阳能逆变器和其他类似逆变器应用。图 1 显示了使用 6 个隔离式栅极驱动器的常见三相逆变器。该系统包含用于 IGBT 的隔离式栅极驱动器，而三相逆变器则包含直流总线电压检测、逆变器电流检测和 IGBT 保护（如过热、过载、接地故障）等功能。



Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated

图 1. 具有隔离式栅极驱动器的三相逆变器

该逆变器可用于多种最终应用，如 HVAC、太阳能水泵和各种电器（这些电器的主要问题是成本，但又不能影响性能）。高端三相逆变器使用 Sigma-Delta ($\Sigma\Delta$) 调制器实现电流检测功能，这也需要使用具有内置 SINC 滤波器的昂贵控制器。使用隔离放大器可连接低成本的 M4 内核 MCU，或 TI 提供的具有内置 SAR 模数转换器 (ADC) 的 Piccolo™。过载保护可实施到外部硬件中，有助于降低软件复杂性。隔离式栅极驱动器需要使用不同的电源来为高侧和低侧栅极驱动器供电。使用自举电源替代昂贵的隔离式电源为栅极驱动器供电，可以在降低电源 BOM 成本的同时减小布板空间。

直流链路检测是电机控制算法的一项重要参数，要求达到 1% 的检测精度。直流链路检测电路使用高阻抗分压器将电压调节到较低的水平。但是，这会导致直流链路反馈信号具有较高的源阻抗。如果高阻抗源与隔离式感应放大器的输入阻抗处于相同的范围，则会对增益误差和偏移误差造成影响。但是，可通过使用 AMC1311 来减少这种误差，它在千兆欧姆范围内具有非常高的输入阻抗。AMC1311 的高输入阻抗可让源阻抗的影响忽略不计。

此参考设计基于 TIDA-00366 硬件设计。如需了解关于功率级和电流检测的系统设计原理和测试结果，请参阅设计指南 [具有电流、电压和温度保护的增强型隔离式三相逆变器的参考设计](#)。此参考设计介绍了使用 AMC1311 隔离放大器用于电压检测应用可实现的直流链路电压检测精度、使用隔离放大器 AMC1301 和 AMC1311 实现的自加热功能、隔离放大器的阶跃响应以及短路检测时间。

1.1 主要系统规格

表 1. 主要系统规格

参数	规范
直流链路输入电压	400V 至 1200V
栅极驱动器电源电压	低侧 IGBT 栅极驱动器: 16V, 高侧 IGBT 栅极驱动器: 15V (自举电源)
IGBT 电源模块	额定电压: 1200V, 额定电流: 50A 或以上
额定功率容量	10kW
逆变器开关频率	4kHz (最低) 至 16kHz; 可通过软件调节
隔离	增强型 (IEC 61800-5)
微控制器	TMS320F28379D
工作环境温度	-25°C 至 +85°C
电机	三相, 400V 交流感应电机 (ACIM)
MCU 电源规范	3.3V ± 5%
反馈	电流检测 (±50A)、直流链路总线电压检测 (0 到 1026V)、IGBT 模块温度检测 用于 3.3V 外部 MCU (具有 3.3V 单极输出输入) 的接口
电流检测精度	±0.5%
直流链路总线电压检测精度	±1%
过流检测延迟	3.4μs
保护功能	过载、过压、欠压、接地故障、过热
PCB	160 × 156mm, 四层, 2 盎司。铜

2 系统概述

2.1 方框图

图 2 显示此参考设计的系统级框图。

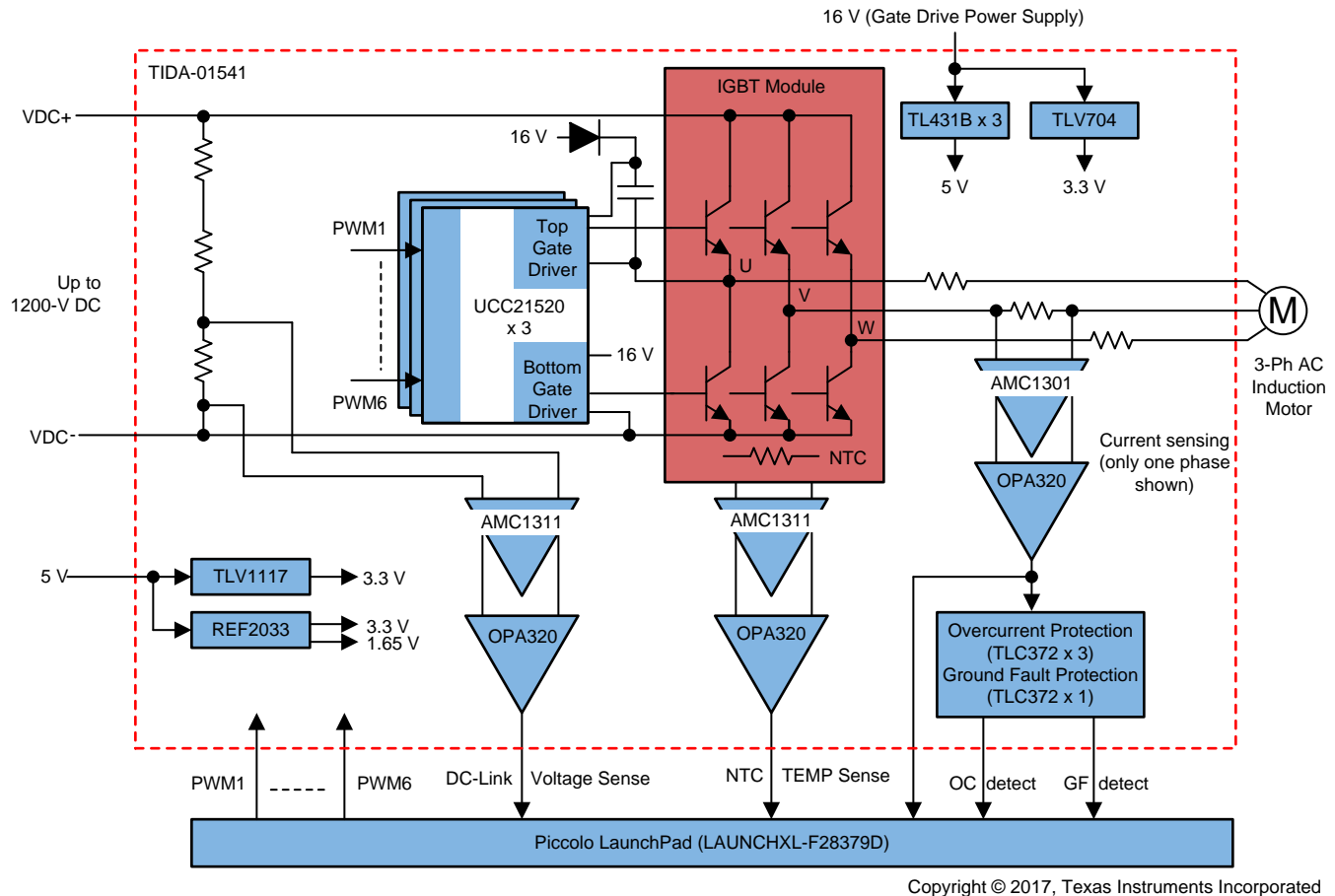


图 2. TIDA-01541 系统级框图

此参考设计可帮助使用额定功率高达 10kW 的三相逆变器。正如图 2 中所显示的，此设计使用三个增强型隔离式双 IGBT 栅极驱动器 (UCC21520) 来驱动 6 个 IGBT。这些 IGBT 与温度传感器 (NTC) 集成在同一个模块中。模块内部的 IGBT 使用半桥配置，每个半桥都由两个 IGBT 栅极驱动器进行驱动，分别为顶层（高侧）和底层（低侧）驱动器。通过使用 20 引脚连接器，此设计可与 TI 的 Piccolo LaunchPad™ LAUNCHXL-F28379D 相连接。互补 PWM 信号由 LaunchPad 生成。IGBT 半桥的三个中点相互连接。电路板经过专门设计，可针对逆变器直流总线电压实现高达 1200V 的直流电压。

精确的相电流检测与三相无刷电机配合使用，是实现电机驱动性能、效率和保护的关键。此参考设计通过使用三个 5mΩ 分流器和三个增强型隔离放大器 (AMC1301) 实现同相位电流检测。使用同相位电流检测的好处如下：

1. 通过分流器实现持续不断的电机电流，独立于 IGBT 开关
2. 轻松检测终端至终端短路和终端至 GND 短路

使用增强型隔离放大器 AMC1301 放大分流器产生的电压。可使用 OPA320 调节 AMC1301 的输出信号，将其转换为单端信号。所有三个通道的输出都会输送到微控制器 (MCU) 中。

逆变器可提供针对过载、短路、接地故障、直流总线欠压/过压和 IGBT 模块过热的保护。系统使用电阻分压器降低直流总线电压，并将电压输送至 AMC1311 进行检测，然后在 MCU 中使用检测到的信号进行欠压和过压编程。同样，系统会使用 AMC1311 检测来自 NTC（集成到 IGBT 模块中）的信号，并将检测到的信号输送到 MCU 以实现过热保护。过载、短路和接地故障保护通过比较器 TLC372 实施，这些比较器会使用从三个分流器检测到的电流。

电路板通过两个外部电源供电：一个 16V，另一个 5V。低侧 IGBT 栅极驱动器通过 16V 电源供电，高侧 IGBT 栅极驱动器通过 16V 电源生成的自举电源供电。MCU、运算放大器和比较器使用 TLV1117 (3.3V) 通过 5V 电源生成的 3.3V 电源供电。该设计使用 TLV704 (3.3V)、TL431B 和 REF2033 在电路板上生成其他导轨和参考设计。

使用隔离放大器（AMC1301 和 AMC1311）测量电机电流、直流链路电压和 NTC 电压，从而降低系统成本。信号可与 MCU 的内部 ADC 相连接。此外，使用自举电源配置运行 IGBT 栅极驱动器也能降低系统成本。

2.2 重点产品

2.2.1 AMC1311

AMC1311 器件是一款高精度、高阻抗输入隔离放大器，通过磁场抗扰度较高的隔离栅隔离输出和输入电路。根据 VDE V 0884-11 和 UL1577 标准，该隔离栅经认证可提供高达 $7kV_{PEAK}$ 的增强型电隔离。当与隔离电源配合使用时，此器件可防止共模高电压线路上的噪声电流流入本地接地并干扰或损害敏感电路。

AMC1311 器件的高阻抗输入针对连接高压电阻分压器电路或具有高输出电阻的其他电压信号源的情况进行了优化。器件性能出色，支持在闭环系统中进行精确的电压或温度检测和控制。AMC1300 的集成共模过压和高侧电源电压缺失检测功能 AMC1311 器件的功能可简化系统级设计和诊断。

- 2V 输入电压范围，针对隔离式电压测量进行了优化
- 低偏移误差和漂移：25°C 时为 $\pm 1.6mV$ ， $\pm 21\mu V/^\circ C$
- 固定增益：1
- 超低增益误差和漂移：25°C 时为 $\pm 0.3\%$ ， $\pm 60ppm/^\circ C$
- 超低非线性度和漂移：0.05%，1ppm/°C

2.2.2 AMC1301

AMC1301 是一款精密隔离放大器，通过磁场抗扰度较高的隔离栅隔离输出和输入电路。AMC1301 的输入经过优化，可直接连接到分流电阻器或其他低电压等级信号源。该器件性能优异，支持精确电流控制，从而降低系统级功耗，尤其在电机控制应用中能够减少扭矩纹波。

- $\pm 250mV$ 输入电压范围，针对使用分流电阻器测量电流进行了优化
- 低偏移误差和漂移：25°C 时为 $\pm 200\mu V$ ， $\pm 3\mu V/^\circ C$
- 固定增益：8.2
- 超低增益误差和漂移：25°C 时为 $\pm 0.3\%$ ， $\pm 50ppm/^\circ C$
- 超低非线性度和漂移：0.03%，1ppm/°C

2.2.3 UCC21520

UCC21520 是一款隔离式双通道栅极驱动器，具有 4A 峰值拉电流和 6A 峰值灌电流。该器件可用于驱动高达 5MHz 的功率 MOSFET、IGBT 和 SiC MOSFET，具有一流的传播延迟和脉宽失真度。输入侧通过一个 5.7kV_{RMS} 增强型隔离栅与两个输出驱动器隔离，共模瞬态抗扰度 (CMTI) 的最小值为 100V/ns。两个次级侧驱动器之间的内部功能隔离支持高达 1500V 的直流工作电压。禁用引脚在设为高电平时可同时关断两个输出，在保持悬空或接地时允许器件正常运行。此器件接受高达 25V 的 VDD 电源电压。凭借 3V 到 18V 的宽输入电压 VCCI 范围，该驱动器非常适合同时连接模拟和数字控制器。

2.2.4 OPA320

OPA320 是一款经优化的精密、低功耗、单电源运算放大器，噪声非常低。该器件在 1.8V 至 5.5V 的电压范围内运行，非常适合驱动 ADC。凭借 40μV 的典型失调电压和极低的温漂（典型值为 1.5μV/°C），该器件非常适合电机控制中控制环路和电流检测等应用。

2.2.5 TLC372 (Q 版)

TLC372 包含两个独立的电压比较器，每个都可在单一电源（3V 至 16V 的电压范围）供电下运行。输出为漏极开路配置，并且可进行连接以实现正逻辑线与关系。TLC372Q 的工作温度范围是 -40°C 至 +125°C。比较器切换的典型响应时间为 200ns。

2.2.6 TLV1117 (I 版)

TLV1117 器件是一款正低压降稳压器，可提供高达 800mA 的输出电流。其内部电路均设计为可在低至 1V 输入-输出压差下运行。额定的最大压差电压为 1.3V（电流为 800mA），该值在负载电流较低时会降低。凭借出色的线路和负载调整，该器件可采用多种封装，并可在 -40°C 至 +125°C 的温度范围内工作。

2.2.7 TLV704

TLV704 是一款具有超低静态电流的 3.3V LDO，可在 2.5V 到 24V 的宽工作输入电压下工作。该器件是存在大型线路瞬变的工业应用的极佳选择。TLV704 采用 3mm × 3mm SOT23-5 封装，非常适合生产经济实用的电路板。

2.2.8 REF2033

REF2033 在 VREF 和 VBIAS 输出端可提供出色的温度漂移（最大 8ppm/°C）和初始精度 (0.05%)，同时可在低于 430μA 的静态电流下运行。此外，VREF 和 VBIAS 输出端可在 -40°C 至 85°C 的温度范围内彼此跟踪，精度达 6ppm/°C（最大值）。所有这些特性都可提高信号链的精度并节省布板空间，相比分立式解决方案而言还能降低系统成本。仅 10mV 的极低压差电压让该器件能够在极低的输入电压下运行。

2.2.8.1 TL431B (Q 版)

TL431 是一款三端可调的并联稳压器，在过热温度范围内具有额定的热稳定性，可以通过两个外部电阻器将输出电压设置为介于 Vref（约为 2.5V）和 36V 之间的任意值。有源输出电路可提供非常急剧的导通特性，从而使这些器件在许多应用中成为齐纳二极管的出色替代品。“B 级”版附带 0.5% 的初始容差（25°C 时），并且 TL431BQ 器件的工作温度范围是 -40°C 至 +125°C。

2.2.8.2 SN74LVC1G10

SN74LVC1G10 采用正逻辑执行布尔函数 $Y = !(A \times B \times C)$ 或 $Y = !A + !B + !C$ 。该与非门的电压范围是 1.65V 至 5.5V，可采用多种封装，工作温度范围可在 -40°C 至 +125°C 之间。

2.3 系统设计原理

此参考设计基于 TIDA-00366 硬件设计。本节仅提供与电流检测、电压检测和相关变化相关的重要系统设计理论。有关 IGBT 逆变器、IGBT 栅极驱动器、板载电源和故障保护功能的相关信息，请参阅[具有电流、电压和温度保护的增强型隔离三相逆变器的参考设计](#)。

注：此参考设计适用于三相逆变器，但节 2.3.1 仅介绍了一个通道（U 相）的电路和组件。此设计介绍同样也适用于其他两个通道（V 相和 W 相）。

2.3.1 隔离式电流检测电路

2.3.1.1 为逆变器选择分流电阻器

所选 IGBT 模块的 10kW 驱动器峰值绕组电流最高可达 51A。如果峰值电流（保留了一些余量）为 50A，分流值可按公式 1 所示的方法计算。

$$R_{SHUNT} = \left(\frac{\pm 250 \text{ mV}}{\pm 50 \text{ A}} \right) = 5 \text{ m}\Omega \quad (1)$$

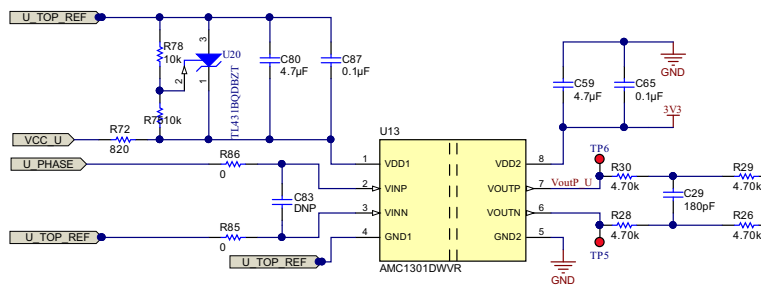
其中 AMC1301 的输入电压范围为 $\pm 250\text{mV}$ 。

2.3.1.2 增强型隔离放大器 AMC1301

AMC1301 是一款精密隔离放大器，通过磁场抗扰度较高的隔离栅隔离输出和输入电路。AMC1301 的输入端经过了优化，可直接连接到分流电阻器。图 3 显示了与 AMC1301 相关的电路和组件。

VDD1 是电源，GND1 是电路热侧的接地端，其中 VINP 和 VINN 输入直接来自 5m Ω 分流电阻器。VDD1 由自举电源生成。GND1 连接到“U_TOP_REF”终端，是半桥顶部和底部 IGBT 之间连接的中点。电容器 C80 (4.7 μF) 和 C87 (0.1 μF) 用于去耦 VDD1 电源，必须非常靠近布局中 AMC1301 的 VDD1 引脚。如果用户要求噪声过滤，请使用差分 RC 滤波器 (R86、R85 和 C83)。要测试该参考设计，请勿使用滤波 (R85 = R86 = 0 Ω 且 C83 = DNP)。

在冷侧，VDD2 由 LDO TLV1117 (3.3V) 生成。电容器 C59 (4.7 μF) 和 C65 (0.1 μF) 用于去耦 VDD2 电源，必须非常靠近布局中 AMC1301 的 VDD2 引脚。AMC1301 的输出可用于引脚 VOUTP 和 VOUTN。截止频率为 95kHz 的差分滤波器使用 R30 (4.7k Ω)、R28 (4.7k Ω) 和 C29 (180pF) 与输出相连。



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

图 3. 增强型隔离放大器 AMC1301

2.3.1.3 使用 TL431B 生成初级侧电源

高侧栅极驱动器的电源使用自举电路生成。高侧 IGBT 栅极驱动器和相关电路的参考点是“U_TOP_REF”。电流检测电路也使用了相同的参考，因此 AMC1301 的 VDD1 电源也必须由相同的自举电源生成。图 4 显示了使用 TL431B 并联稳压器生成 AMC1301 的 VDD1 电源的过程。TL431B 的内部参考值为 2.5V，这有助于决定输出电压。

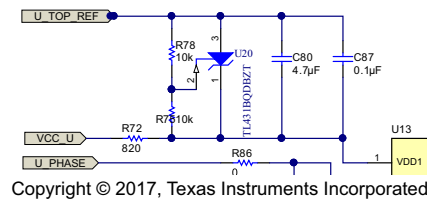


图 4. 使用 TL431B 生成电源

2.3.1.4 使用 OPA320 对电流检测进行差分到单端的转换

AMC1301 的输出为差分式，共模电压为 1.4V。要将它与 MCU 连接，AMC1301 的输出必须转换为单端形式，且必须在 0V 到 3.3V 的范围内（由于 MCU 电源的限制）。

2.3.1.4.1 运算放大器的选择

运算放大器的选择很重要，因为它用于测量电流、直流链路电压和 IGBT 模块温度的信号链中不可或缺的一部分。对于运算放大器，请考虑以下参数：

- 失调电压：运算放大器的失调电压规格可提升整体测量精度，因此对于运算放大器而言，最低失调电压是首选。
- 失调电压漂移：信号链精度是在 -25°C 到 85°C 的温度范围内测量的。失调电压漂移应该很低，以便在额定温度范围内实现误差最小。零漂移运算放大器（如果有）是首选。
- 轨至轨输入和输出：运算放大器的输入和输出应该转至两个轨上，以便在正和负周期内充分利用 1.65V（当输出与 MCU 连接时）
- 输入共模范围：运算放大器的输入应该能获取 $V_{DD}/2$ 的共模电压（在此应用中，等于 1.65V）。
- 共模抑制比 (CMRR)：典型三相工业逆变器的开关频率高达 16 到 20kHz。频率为 100kHz（约为逆变器开关频率的 5 倍）时，CMRR 大于 80dB 通常是此类应用的首选。

鉴于上述所有规格，运算放大器的成本应尽可能低。此设计使用 OPA320，其规格如表 2 中所示。

表 2. OPA320 的主要规格

参数	值
电源电压 (V)	1.8 至 5.5V
$I_q/GBW >$ 比率	1.2mA/20MHz 60 μ A/MHz
1kHz 下的噪声 (nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$)	8nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
轨至轨	RRIO 输入扩展 $\pm 100\text{mV}$ 越轨； $V_{OUT} \pm 10\text{mV}$
零交叉	是
输入偏置最大值 (pA)	最高 1 pA
失调电压 (mV)	最高 100 μ V
温漂	0.5 μ V/ $^{\circ}\text{C}$
封装	SOT23-5、SOT23-6

请注意，使用五个单一运算放大器以简化 PCB 布局中的组件放置。使用 OPA320 可确保在整个输入共模范围内都具有高精度和极好的信号线性，这使得它非常适合驱动采样 ADC。

2.3.1.4.2 放大器增益的计算

AMC1301 的数据表具有 -250mV 至 250mV 的“指定线性满量程 ($V_{INP} - V_{INN}$)”。在标称增益为 8.2 的情况下, V_{OUT} 范围是 -2.05V 至 2.05V 。因此, AMC1301 的 $V_{OUT(P-P)}$ 是 4.10V 。

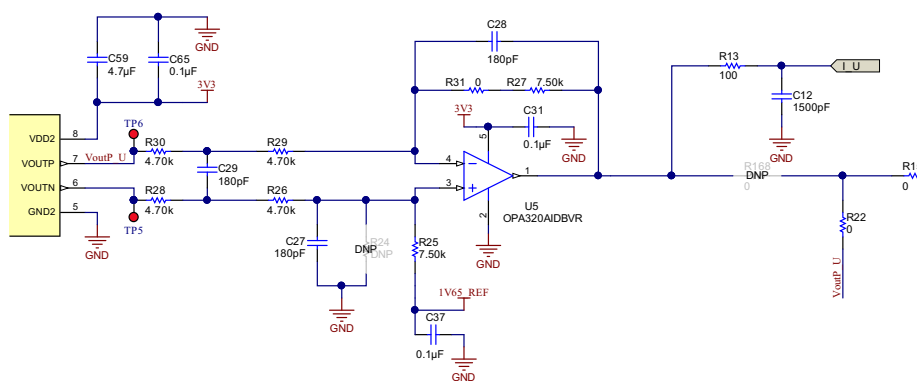
OPA320 需要 $V_{OUT(P-P)}$ 为 3V (电压输出摆幅可提高至 30mV , 与两个轨接近)。运算放大器的增益必须为 0.731, 计算方法为: 运算放大器的增益 = $3/4.10 = 0.731\text{V/V}$ 。

2.3.1.4.3 组件选择

对于 AMC1301 的输出, 将使用截止频率约为 94kHz 的差分滤波器 (R30、R28 和 C29 的组合) 对其进行滤波。差分放大器增益的计算如公式 2 中所示。

$$\text{Differential Amplifier Gain} = \frac{R_f}{R_{in}} = \frac{7.5 \text{ k}\Omega}{4.7 \text{ k}\Omega + 4.7 \text{ k}\Omega} = 0.7978 \text{ V/V} \quad (2)$$

图 5 所示为用于将 AMC1301 差分输出转换为单端形式以馈入到 MCU 的差分放大器的电路。差分放大器通过两条路径路由: 一条通过 RC 滤波器 (截止频率高于 1MHz , 时间延迟为 150ns) 进入 MCU 引脚 (I_U), 另一条进入比较器进行过载保护。



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

图 5. 差分到单端信号转换

2.3.2 直流链路电压检测电路

此设计通过测量直流链路电压来实现对直流总线的欠压和过压保护。使用 AMC1311 增强型隔离放大器和 OPA320 运算放大器将直流总线输入电压降低并馈入到 MCU 中。OPA320 的输出可以直接驱动 ADC 输入, 也可以在 ADC 处理该输出前对该输出进一步进行滤波。

要降低直流链路电压, 可考虑选择这样一个电阻分压器网络: MCU ADC 输入电压最高为 3V , 待测量的直流链路电压最高为 1026V 。

为了提高器件的线性和噪声性能, 允许的输入电压为 0 到 2V 。选择分压器电阻时应确保在直流总线为最大值的情况下, 放大器的输入电压小于 2V 。图 6 显示了用于降低 VDC 信号的六个 $1\text{M}\Omega$ 电阻和一个 $11\text{k}\Omega$ 电阻。

注: 此设计的欠压可设置为“ 400V 直流”。在这种情况下, 使用两个 200V 齐纳二极管 (目前是 DNP) 与两个 $1\text{M}\Omega$ 电阻并联。由于高压操作, 电阻与齐纳二极管的间距非常重要。

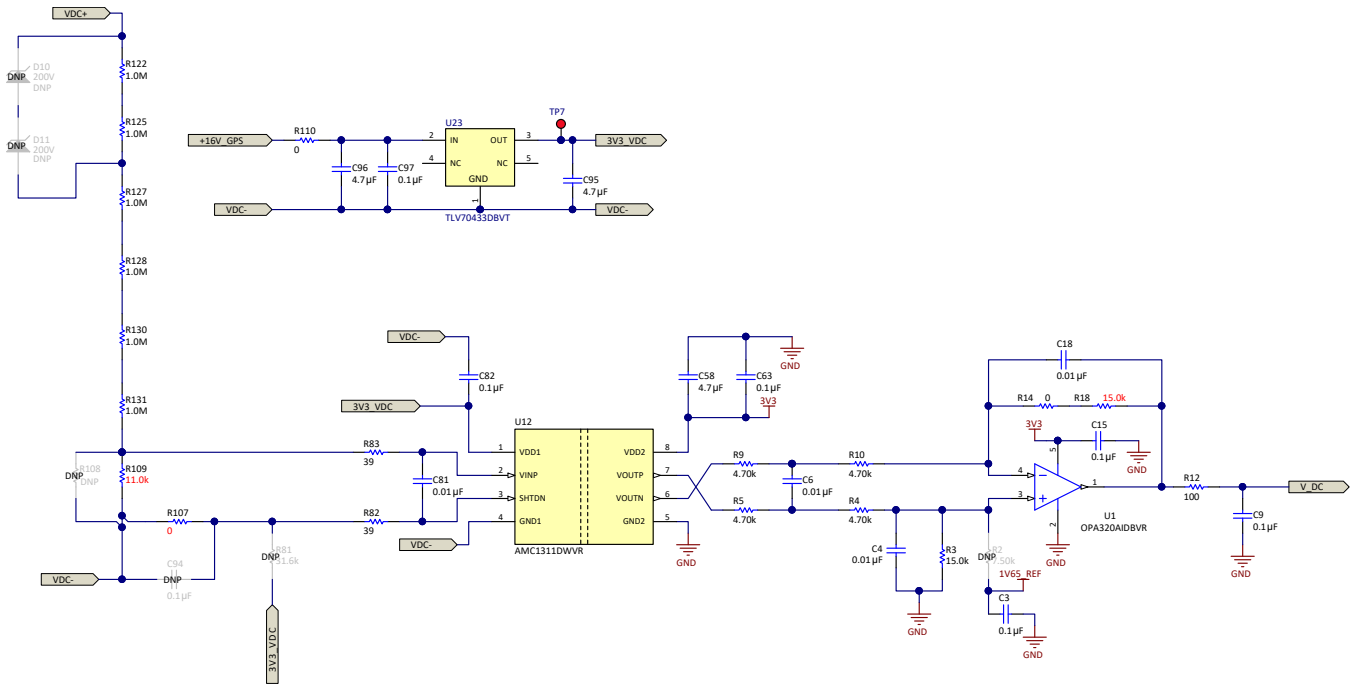


图 6. 直流链路电压检测电路

2.3.2.1 计算电压检测的差分到单端转换的增益

AMC1311 数据表具有 0V 到 2V 的“指定线性满标量程”。在标称增益为 1 的情况下， V_{OUT} 范围是 0V 到 2V。因此，AMC1311 的 $V_{OUT(P-P)}$ 是 2V。

OPA320 需要 $V_{OUT(P-P)}$ 为 3V（电压输出摆幅可提高至 30mV，与两个轨接近）。运算放大器的增益必须为 1.5，计算方法为：运算放大器的增益 = $3/2 = 1.5V/V$ 。

2.3.2.2 组件选择

对于 AMC1311 的输出，将使用截止频率约为 94kHz 的差分滤波器（R9、R5 和 C6 的组合）对其进行滤波。差分放大器增益的计算如公式 3 中所示。

$$\text{Differential Amplifier Gain} = \frac{R_f}{R_{in}} = \frac{15 \text{ k}\Omega}{(4.7 \text{ k}\Omega + 4.7 \text{ k}\Omega)} = 1.5957 \text{ V / V} \quad (3)$$

2.3.3 NTC 温度检测电路

本参考设计中使用的 IGBT 模块具有一个集成的 NTC 热敏电阻。图 7 显示了该 NTC 热敏电阻的特征。

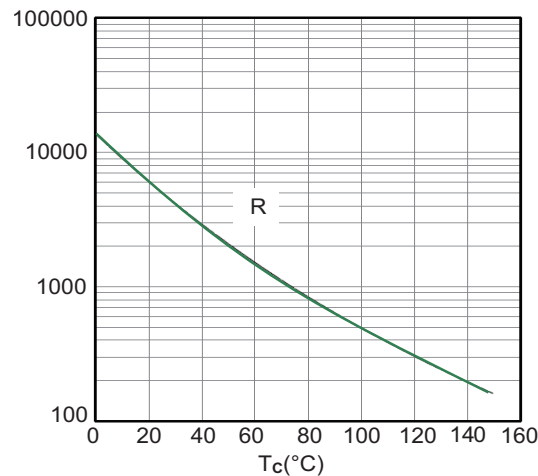


图 7. NTC 的特征

此设计通过检测 NTC 电压并向 MCU 提供关闭 PWM 的信号来实现过热保护。图 8 中显示了使用一个 R106 (15.0kΩ) 电阻偏置 NTC。偏置信号发送到 AMC1311 的 VINP 引脚。使用 AMC1311 输入端的 RC 滤波器对检测到的信号进行滤波。OPA320 采用 1.5 的增益对 AMC1311 的差分输出进行滤波并将其转换为单端信号。使用 RC 滤波器（截止频率 = 16kHz，RC 延迟 = 10μs）对 OPA320 的输出进行滤波并将其作为“MODULE_TEMP”信号馈入到 MCU 中。

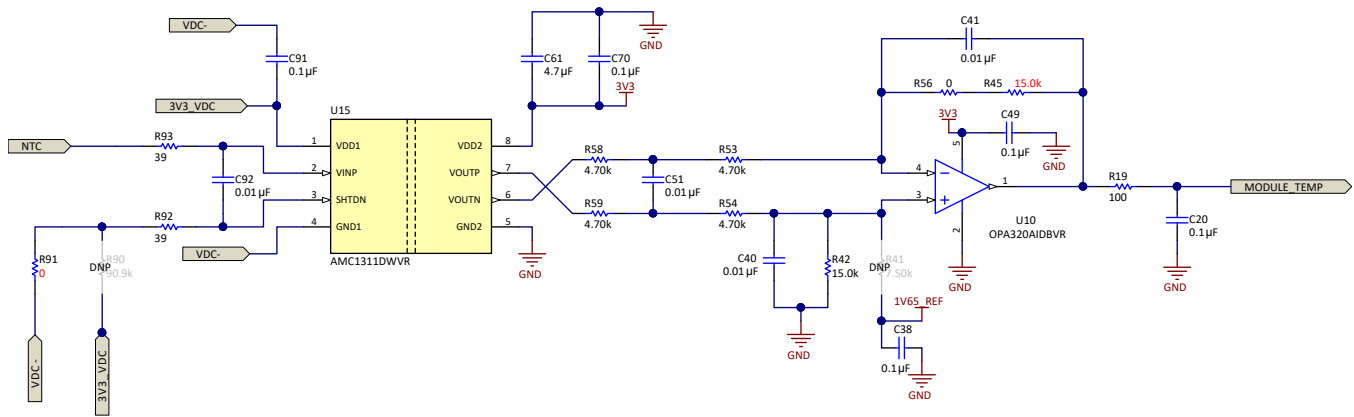


图 8. NTC 温度检测电路

2.3.4 过载（或过流）保护

2.3.4.1 比较器的选择

典型的工业驱动需要拥有过载保护以便在 300 至 500ns 的范围内运转。为了实现这一目标，此参考设计使用了 TLC372，这是一个成本很低的双通道比较器。该器件由一个 3V 至 16V 的电源供电，典型响应时间为 200ns。

2.3.4.2 阈值电平的计算

假设接地故障条件（高于额定电流的 200%）的阈值为 $50A_{PEAK}$ ，表 3 中显示了用于选择电阻以便为比较器设置阈值的计算。

- $I_{SENSE(RMS)} = 35.4A$
- $I_{SENSE(PEAK)} = 50A$
- $R_{SHUNT} = 5m\Omega$

表 3. 用于实现过载保护的阈值电平的计算

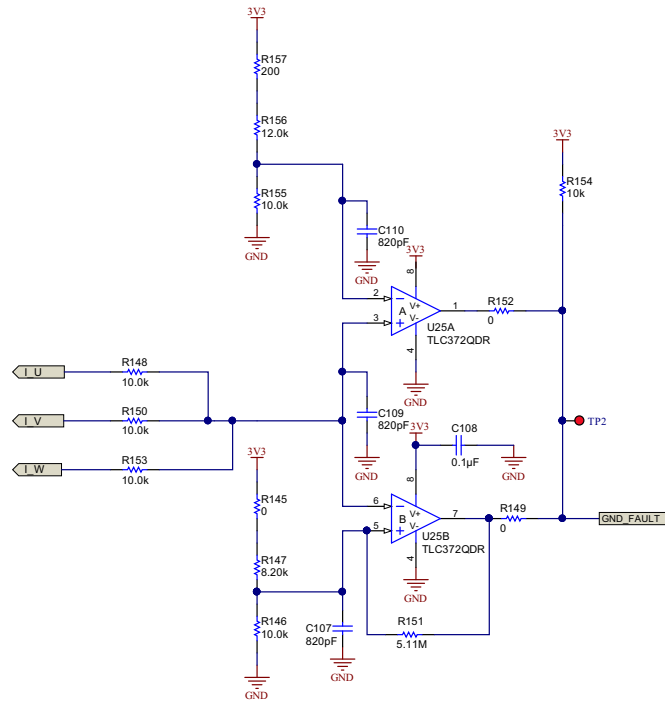
参数	等式	计算出的值	单位
AMC1301 输入（峰值）	$I_{sense(peak)} \times R_{shunt}$	250	mV
输入为 250mV 时，VOUTP 引脚处的 AMC1301 输出	$1.44 + AMC1301 \text{ 输入} \times 4.1$	2.465	V
输入为 -250mV 时，VOUTP 引脚处的 AMC1301 输出	$1.44 + AMC1301 \text{ 输入} \times 4.1$	0.415	V

2.3.4.3 用于设置阈值的电阻的计算

高阈值由电阻 R20 和 R23 设置，而低阈值由电阻 R23 和 R21 设置，如图 9 所示。假设 R21 = 1.5kΩ，R23 和 R20 的计算结果为：R23 = 10.7kΩ，R20 = 3kΩ。

图 9 显示了比较器（与阈值相比）的输入信号来自运算放大器级的输出。TLC372 是一个开漏输出比较器，在输出端需要有一个上拉电阻。R11 即为该上拉电阻。C13 (0.1 μF) 用作 TLC372 比较器的去耦电容器。C23 (0.1 μF) 用作阈值的局部去耦以生成电阻分压器网络。

所有三个通道生成的 OVERLOAD 信号组合在一起。该信号将输入到 MCU 和 DISABLE 逻辑门输入以进一步处理。



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

图 9. 过载保护电路

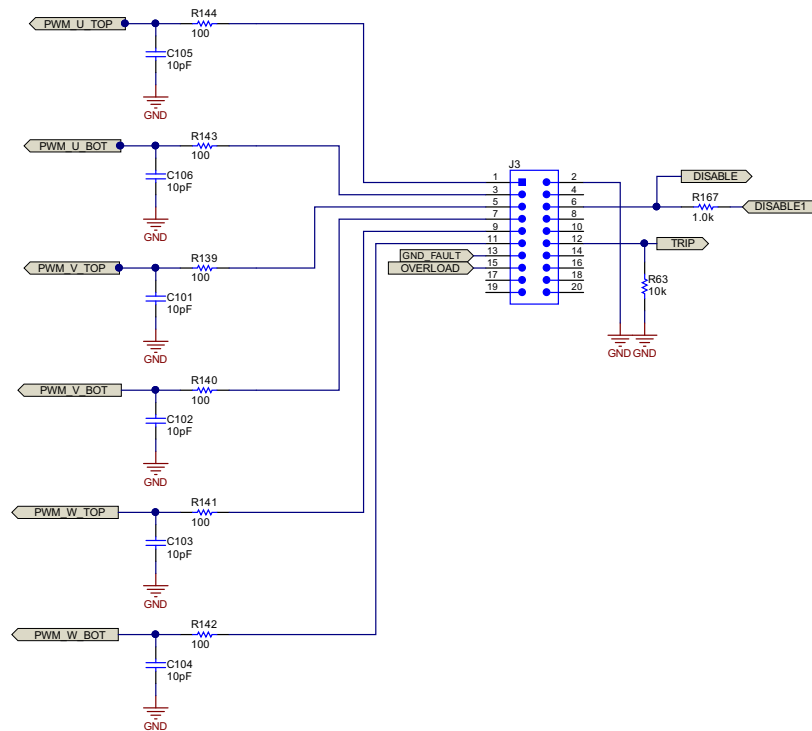
2.3.4.4 用于连接 C2000™ Piccolo™ LaunchPad™ 的连接

表 4 显示了 C2000 Piccolo LaunchPad 的引脚。突出显示的引脚用于连接参考设计板。

表 4. C2000™ LaunchPad™ 引脚

TIDA-01541 上的信号名 称	多路复用值				J1 引脚	J3 引脚	多路复用值				TIDA-01541 上的信号名 称
	X	2	1	0			0	ALT 函数	2	X	
				3.3V	1	1	5V				
				GPIO32	2	2	GND				GND
		SCIRXDB		GPIO19	3	3	ADCIN14	CMPIN4P			1V65_REF
		SCITXDB		GPIO18	4	4	ADCINC3	CMPIN6N			I_U/V_DC
				GPIO67	5	5	ADCINB3	CMPIN3N			I_U
				GPIO111	6	6	ADCINA3	CMPIN1N			3V3_REF
	SPICLKA			GPIO60	7	7	ADCINC2	CMPIN6P			I_V
				GPIO22	8	8	ADCINB2	CMPIN3P			I_W
			SCLA	GPIO105	9	9	ADCINA2	CMPIN1P			V_DC
			SDAA	GPIO104	10	10	ADCINA0	DACOUTA			MODULE_T EMP
TIDA-01541 上的信号名 称	多路复用值				J4 引脚	J2 引脚	多路复用值				TIDA-01541 上的信号名 称
	X	2	1	0			0	1	2	X	
PWM_U_T OP			EPWM1A	GPIO0	1	1	GND				GND
PWM_U_B OT			EPWM1B	GPIO1	2	2	GPIO61				
PWM_V_T OP			EPWM2A	GPIO2	3	3	GPIO123			D1_C1	DISABLE
PWM_V_B OT			EPWM2B	GPIO3	4	4	GPIO122			D1_D1	
PWM_W_T OP			EPWM3A	GPIO4	5	5	RST				
PWM_W_B OT			EPWM3B	GPIO5	6	6	GPIO58			SPISIMOA	TRIP
			OUTPUTXB AR1	GPIO24	7	7	GPIO59			SPISOMIA	
	OUTPUTXB AR7			GPIO16	8	8	GPIO124			SD1_D2	
				DAC1/ GPIO20	9	9	GPIO125			SD1_C2	
				DAC2/ GPIO21	10	10	GPIO29			OUTPUTXB AR6	

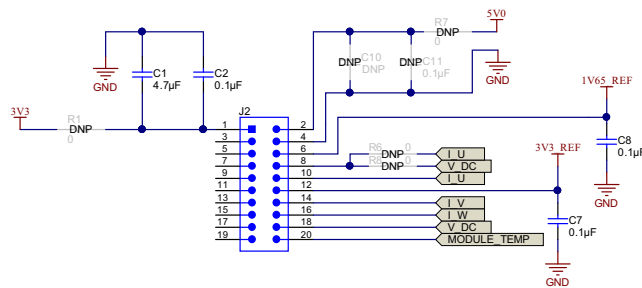
在设计板上，使用了两个 20 引脚的连接器来连接 C2000 LaunchPad，如图 10 所示。逆变器的 PWM 信号是使用 LAUNCHXL-F28027 电路板生成的。对于 MCU 生成的 PWM 信号，使用 $R = 100\Omega$ 且 $C = 10\text{pF}$ （相当于截止频率为 159MHz 且 RC 时间延迟为 1ns）的 RC 滤波器进行滤波。GND_FAULT 和 OVERLOAD 信号由相应的比较器生成。这些信号连接到 GPIO 上的 MCU 和三输入与非门，以便为栅极驱动器生成 DISABLE。如果用户想中断 PWM 信号或如果需要锁存 GND_FAULT 和 OVERLOAD 信号，则 MCU 将生成 TRIP 信号。



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

图 10. 用于连接 LAUNCHXL-F28379D 上的连接器 J1 和 J3 的 20 引脚连接器

使用 TLV1117 (3.3V) 生成的 3.3V 电源作为 LaunchPad 的电源提供，如图 11 中所示。此外，通过安装板载组件 R7、C10 和 C11，电源还可以使用外部 5V 为 MCU 供电。执行 RC 滤波（针对混叠）之后，检测到的信号 I_U、I_V、I_W、V_DC 和 MODULE_TEMP 将连接到 ADC 输入引脚。1V65_REF 和 3V3_REF 也将提供给 ADC 以进行任何比例式测量。



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

图 11. 用于连接 LAUNCHXL-F28379D 上的连接器 J4 和 J2 的 20 引脚连接器

3 硬件、测试要求和测试结果

3.1 硬件

本节介绍参考设计 PCB 的俯视图和仰视图。本节还介绍了用于连接外部世界的电源要求和连接器。

3.1.1 TIDA-01541 PCB 概述

图 12 显示了 PCB 的俯视图。三相（U、V 和 W）具有电流检测电路和双通道栅极驱动器，如图中亮显部分所示。

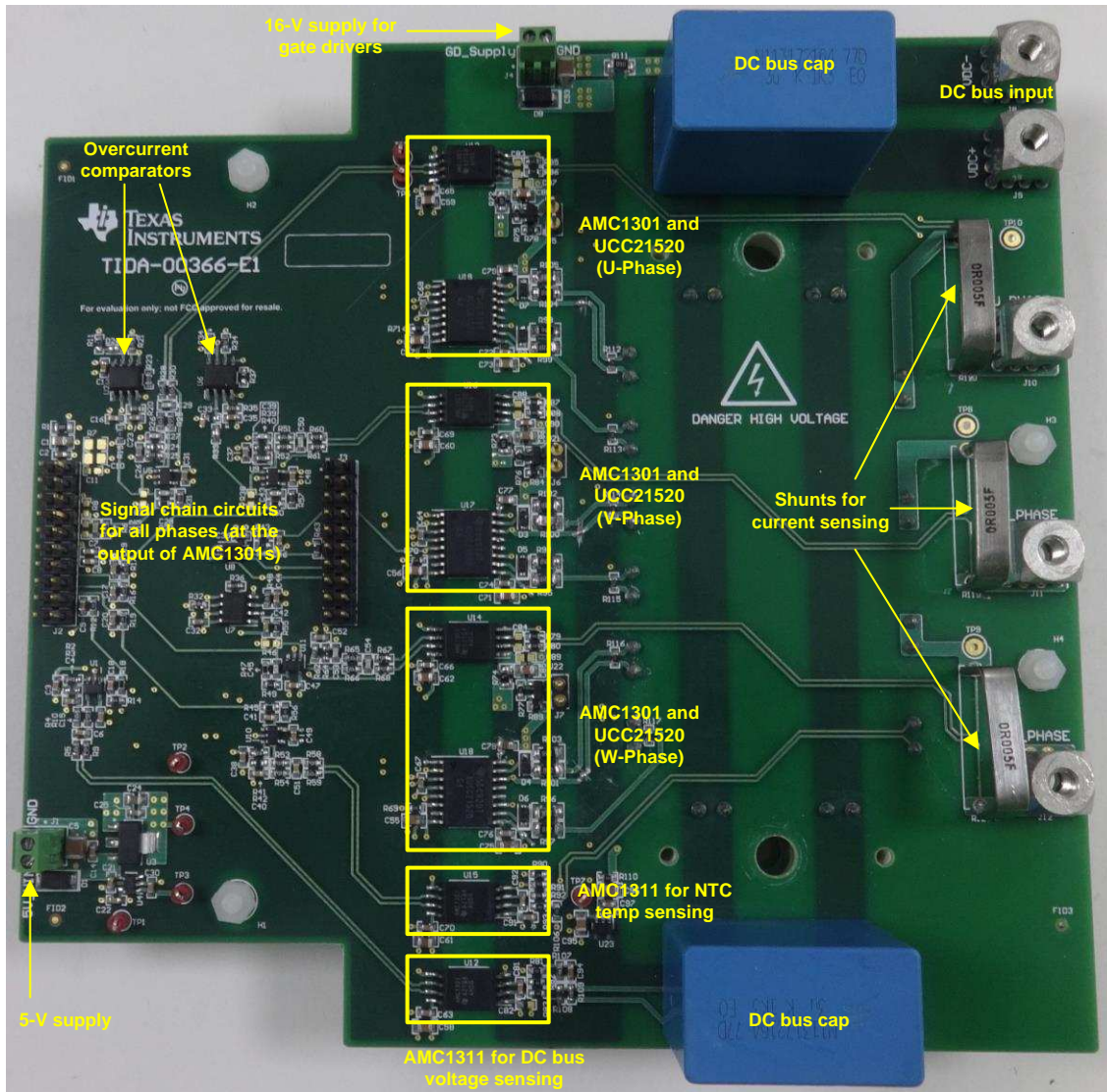


图 12. TIDA-01541 的 PCB 的俯视图

图 13 显示了 PCB 的仰视图。IGBT 模块安装在底层，以便散热器可以根据输出功率级别的要求连接到底层。

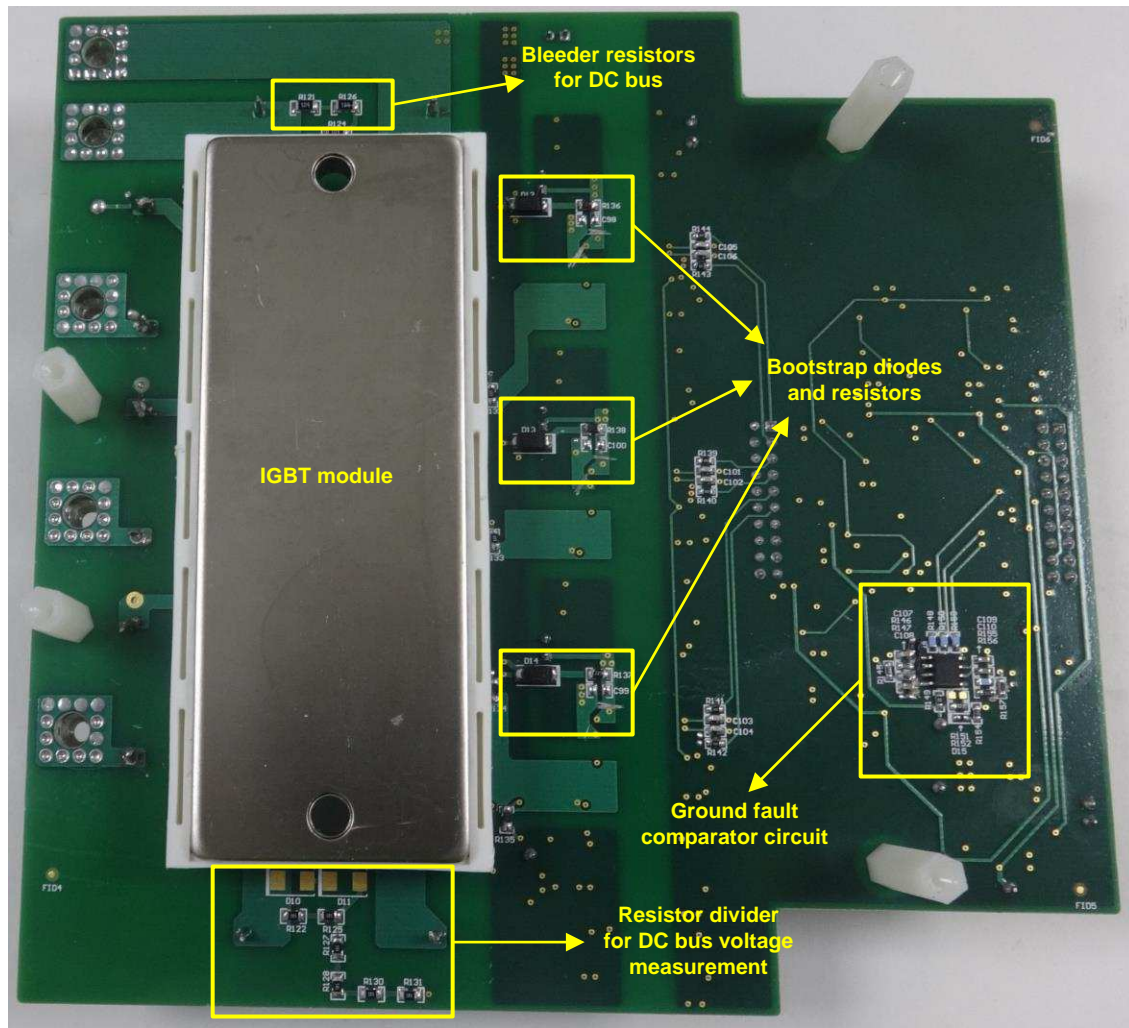


图 13. TIDA-01541 的 PCB 的仰视图

3.1.2 连接器

表 5 显示了参考设计 PCB 上使用的连接器及其用途。

表 5. 连接器

连接器	用途
J1	为 MCU、运算放大器、AMC1301 的低侧、AMC1311 的低侧和比较器供电的 5V_VIN 电源
J2	用于连接到 LAUNCHXL-F28379D 的 J1-J5
J3	用于连接到 LAUNCHXL-F28379D 的 J6-J2
J4	为低侧栅极驱动器供电的 16V GD 电源
J5	如果未使用自举配置, 则用于为 U 相低侧栅极驱动器提供外部隔离式 16V 电源
J6	如未使用自举配置, 则用于为 V 相低侧栅极驱动器提供外部隔离式 16V 电源
J7	如未使用自举配置, 则用于为 W 相低侧栅极驱动器提供外部隔离式 16V 电源
J13	VDC 输入
J14	用于连接电机的输出端

3.2 测试和结果

3.2.1 测试设置

以下各小节提供了测试设置的说明和图片。表 6 列出了后续测试中使用的主要测试设备。

表 6. 主要测试设备

说明	测试设备部件号
C2000 F28379D LaunchPad	德州仪器 (TI) LAUNCHXL-F28379D
可调节电源	Keithley 2230G-30-1 (两个电源, 可确保 16V 和 5V 导轨之间隔离)
高压电源	Sorensen SGI 1000/5
负载电机	ACIM, 三相交流电, 415V (L-N, 三角形连接), 8.4A _{RMS} (最大), 额定功率 3.7kW, 50Hz, 1460RPM
示波器	Tektronix MSO2024B
示波器	Tektronix MDO3024
高压差分探头	Tektronix THDP0200
低压探头	Tektronix TPP0200

图 14 显示了使用的测试设置。该电路板由三个电源供电：直流链路电源为 0 至 1000V，栅极驱动电源为 16V，低压侧偏压电源为 5V。C2000 LaunchPad 由 3.3V 电源供电。1000V 电源和栅极驱动电源相互隔离，并且也与 3.3V 和 5V 电源相互隔离。

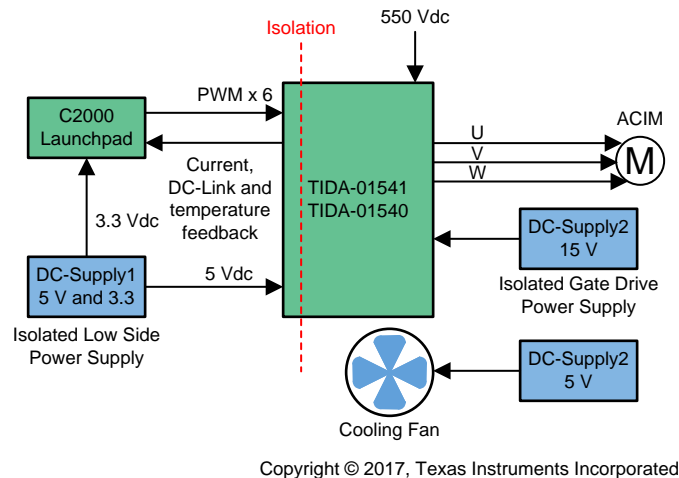


图 14. TIDA-01541 测试设置

3.2.2 测试结果

本节介绍有关直流链路精度、电流和电压检测直方图、AMC1301 的阶跃响应以及短路响应时间的测试结果。

3.2.2.1 热像

图 15 是电路板的热像。在此测试中，电路板由 3.3V 和 5V 低压偏置电源供电，栅极驱动电源为 16V；但直流链路处于关闭状态。对于逆变器的所有三个半桥，均采用 50% 的互补 PWM 进行驱动。需要具备此 PWM 才能生成自举电源，从而为高压侧上的 AMC1301 供电。由于直流链路处于关闭状态，因此热像会采集由于 AMC1301 和 AMC1311 自发热而产生的温度，而非 IGBT 模块的功耗。AMC1301 和 AMC1311 电路板的温度为 30.2°C，与环境温度相比，温度上升了 7.4°C。

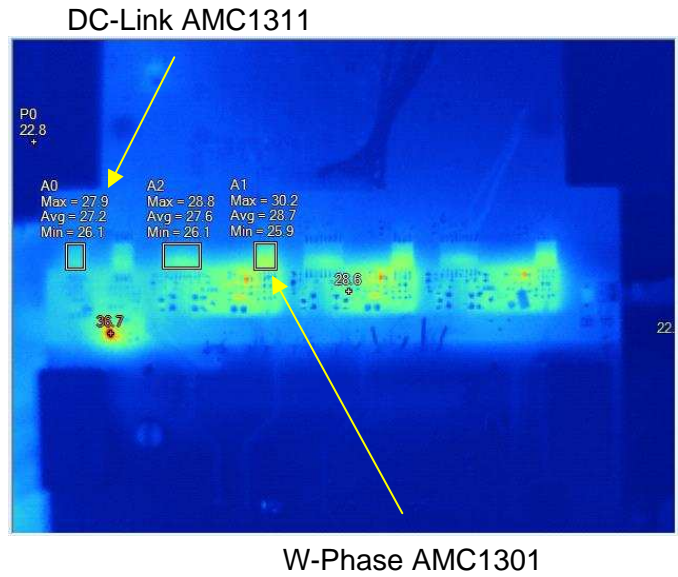


图 15. AMC1301 和 AMC1311 表面温度

3.2.2.2 直流链路电压测量精度

图 16 显示了直流链路电压测量精度，是满量程误差百分比与直流链路电压测量的对比图。可以测量的满量程为 1026V。测量是通过施加 50V 至 1000V 之间的直流链路电压来完成的。在此测试期间，逆变器在运行并且电机保持断开连接状态，从而带来 16kHz 的开关频率。在整个测量范围内观察到的未校准误差为 $\pm 1\%$ 。

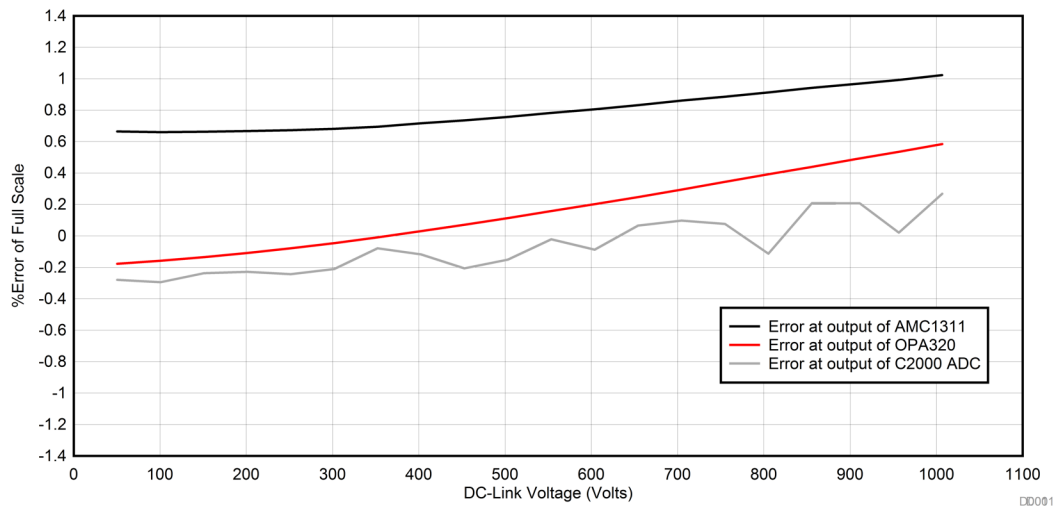


图 16. 未校准满量程误差百分比与空载时的直流链路电压

图 17 显示电机中存在电流时，直流链路电压的测量精度。该误差是在 C2000 ADC 的输出端测得的。该测试针对空载电流进行，并且由逆变器将 $3A_{RMS}$ 和 $5A_{RMS}$ 电流输入交流感应电机中。请注意，当电流为 $3A_{RMS}$ 时，整个范围内的精度保持相对一致。当输入电机的电流为 $5A_{RMS}$ 时，在一端测量出的电压读数为 600V。

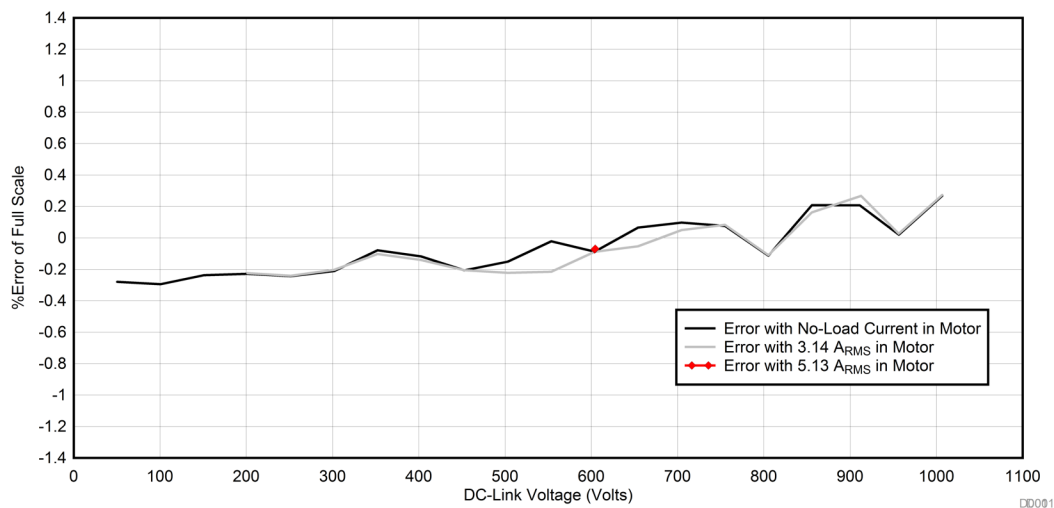


图 17. 未校准满量程误差百分比与空载但带电流的直流链路电压

3.2.2.3 直流链路电压测量直方图

直流链路电压反馈信号的直方图是通过以下方式获得的：使用 C2000 的 12 位 ADC，并以 16kHz 的采样率缓冲 1s 的样本。在图 18 显示的直流链路反馈直方图中，以 600V 为直流链路供电，并且由逆变器将 $3A_{RMS}$ 的三相正弦电流驱动到电机中。样本与中心相差 4 个 LSB，相当于满量程范围的 0.1%。

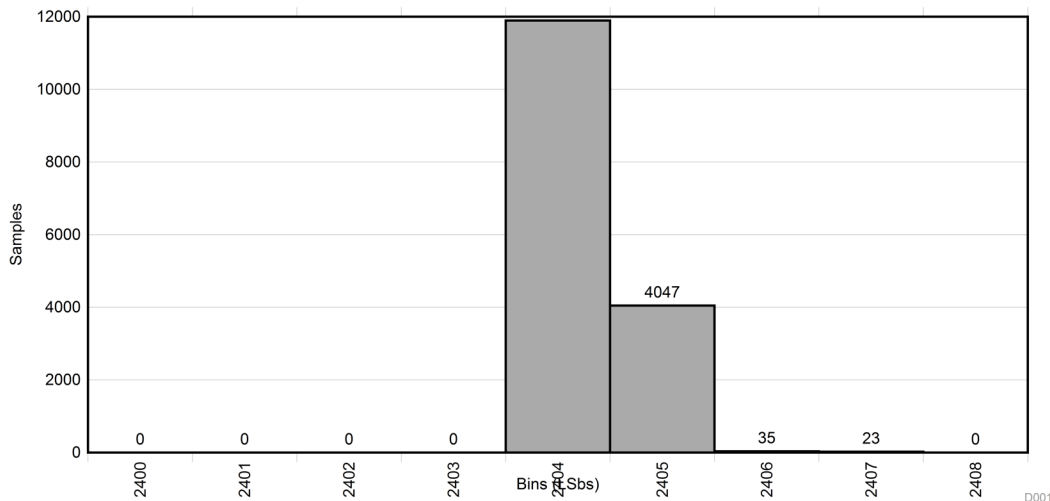


图 18. 600V 直流链路检测测量直方图（电机中输入 $3A_{RMS}$ 电流）

3.2.2.4 相电流检测直方图

相电流反馈信号的直方图是通过以下方式获得的：使用 C2000 的 12 位 ADC，并以 16kHz 的采样率缓冲 1s 的样本。图 19 所示为通过以下方式获得的相电流反馈直方图：使用 600V 直流链路，并由逆变器将直流电流驱动到电机中。这项测试是通过以下方式来完成的：固定三相中的 PWM 占空比，以便 U 相使用 3A 直流，V 相和 W 相均使用 -1.5 直流。样本跨 4 个 LSB 分布，相当于满量程范围的 0.1%。

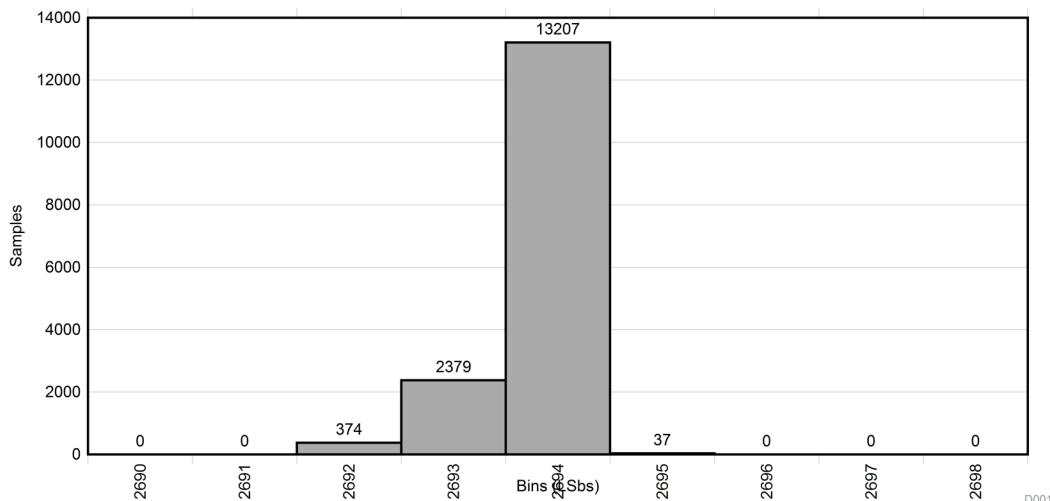


图 19. 相电流反馈信号检测测量直方图（电机中输入 3A 直流电流，直流链路为 600V）

3.2.2.5 阶跃响应和过流检测延迟

在 PCB 上拆焊 $5\text{m}\Omega$ 分流器之后，将通过在 AMC1301 的输入端施加 250mV 的阶跃输入，采集电流测量的传播延迟。

图 20 显示了当 AMC1301 的输入为从 0V 到 250mV 的阶跃电压时，AMC1301 输出的响应和窗口比较器。同样，图 21 显示的也是输入为 0V 到 250mV 的阶跃电压时的响应。表 7 总结了所测量的延迟。

表 7. 测量延迟总结

参数	传播延迟
从 AMC1301 进行输入到进行输出期间，正阶跃输入的传播延迟	$1.8\mu\text{s}$
从 AMC1301 进行输入到比较器 TLV372 进行输出期间，正阶跃输入的传播延迟	$3.2\mu\text{s}$
从 AMC1301 进行输入到进行输出期间，负阶跃输入的传播延迟	$1.8\mu\text{s}$
从 AMC1301 进行输入到比较器 TLV372 进行输出期间，负阶跃输入的传播延迟	$3.3\mu\text{s}$

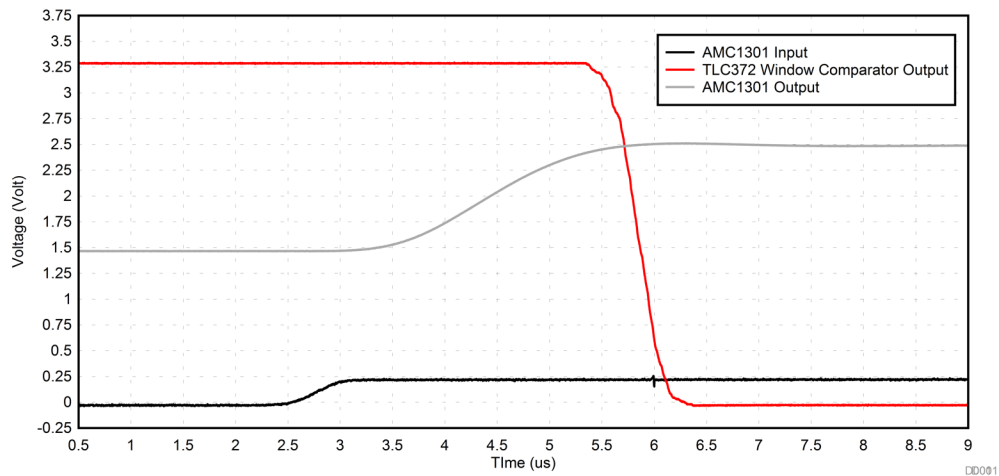


图 20. 正 250mV 阶跃输入响应

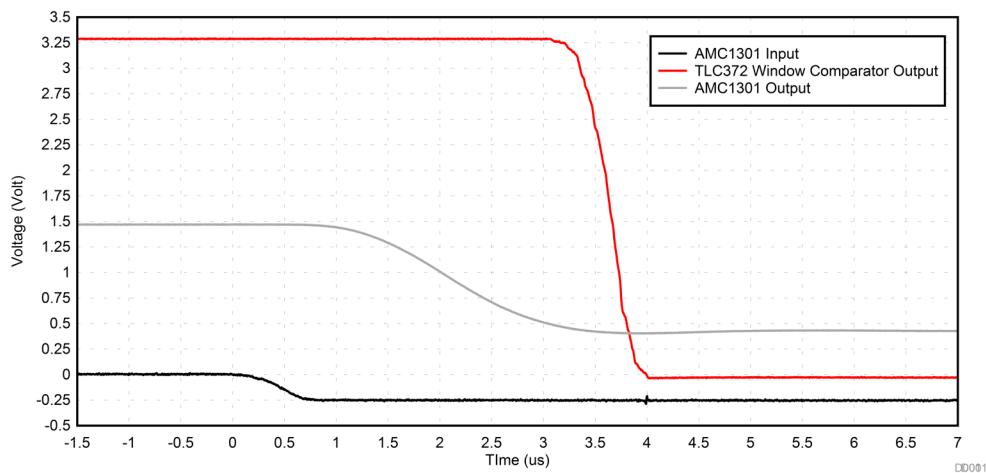


图 21. 负 250mV 阶跃输入响应

4 设计文件

4.1 电路原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDA-01541](#) 中的设计文件。

4.2 物料清单

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-01541](#) 中的设计文件。

4.3 PCB 布局建议

此参考设计的硬件基于 TIDA-00366 参考设计。有关 PCB 布局建议，请参阅[具有电流、电压和温度保护的增强型隔离三相逆变器的参考设计](#)。

4.3.1 布局图

要下载层图，请参阅 [TIDA-01541](#) 中的设计文件。

4.4 Altium 项目

要下载 Altium 项目文件，请参阅 [TIDA-01541](#) 中的设计文件。

4.5 光绘文件

要下载光绘文件，请参阅 [TIDA-01541](#) 中的设计文件。

4.6 装配图

要下载装配图，请参阅 [TIDA-01541](#) 中的设计文件。

5 相关文档

1. 德州仪器 (TI): [《LAUNCHXL-F28379D 概述用户指南》](#)

5.1 商标

E2E, Piccolo, LaunchPad are trademarks of Texas Instruments.
All other trademarks are the property of their respective owners.

6 术语

PWM— 脉宽调制

MCU— 微控制器

IGBT— 隔离式双极栅极晶体管

RPM— 每分钟转速

RMS— 均方根

NTC— 负温度系数热敏电阻

7 关于作者

NELSON ALEXANDER 是德州仪器 (TI) 的系统工程师，负责开发面向工业电机驱动领域的子系统设计解决方案。Nelson 于 2011 年开始在 TI 工作，参与设计了嵌入式系统，并且在微控制器、隔离、模拟信号链、IGBT 栅极驱动器方面具有丰富的经验。Nelson 拥有班加罗尔 MSRIT 电气和电子工程专业工程学士学位。

N. NAVANEETH KUMAR 是德州仪器 (TI) 的系统架构师，负责开发适用于工业系统电机控制的子系统解决方案。N. Navaneeth 在电力电子设备、EMC、模拟和混合信号设计领域拥有丰富经验。他拥有驱动器、太阳能逆变器、UPS 和保护继电器领域的系统级产品设计经验。N. Navaneeth 拥有印度巴拉蒂尔大学的电子与通信工程学士学位以及英国博尔顿大学的电子产品开发理学硕士学位。

修订历史记录

注：之前版本的页码可能与当前版本有所不同。

Changes from Original (December 2017) to A Revision	Page
• 更新了 节 2.3.2 。	9
• 已更改 图 6	10
• 更新了 节 2.3.2.1 。	11
• 更新了 节 2.3.3 。	11
• 已更改 图 8	12

重要声明和免责声明

TI 均以“原样”提供技术性 & 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，不保证其中不含任何瑕疵，且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、适合某特定用途或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

所述资源可供专业开发人员应用 TI 产品进行设计使用。您将对以下行为独自承担全部责任：(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、安保或其他要求。所述资源如有变更，恕不另行通知。TI 对您使用所述资源的授权仅限于开发资源所涉及 TI 产品的相关应用。除此之外不得复制或展示所述资源，也不提供其它 TI 或任何第三方的知识产权授权许可。如因使用所述资源而产生任何索赔、赔偿、成本、损失及债务等，TI 对此概不负责，并且您须赔偿由此对 TI 及其代表造成的损害。

TI 所提供产品均受 TI 的销售条款 (<http://www.ti.com.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 以及 [ti.com.cn](http://www.ti.com.cn) 上或随附 TI 产品提供的其他可适用条款的约束。TI 提供所述资源并不扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品所发布的可适用的担保范围或担保免责声明。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122
Copyright © 2018 德州仪器半导体技术（上海）有限公司

重要声明和免责声明

TI 均以“原样”提供技术性 & 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，不保证其中不含任何瑕疵，且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、适合某特定用途或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

所述资源可供专业开发人员应用 TI 产品进行设计使用。您将对以下行为独自承担全部责任：(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、安保或其他要求。所述资源如有变更，恕不另行通知。TI 对您使用所述资源的授权仅限于开发资源所涉及 TI 产品的相关应用。除此之外不得复制或展示所述资源，也不提供其它 TI 或任何第三方的知识产权授权许可。如因使用所述资源而产生任何索赔、赔偿、成本、损失及债务等，TI 对此概不负责，并且您须赔偿由此对 TI 及其代表造成的损害。

TI 所提供产品均受 TI 的销售条款 (<http://www.ti.com.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 以及 [ti.com.cn](http://www.ti.com.cn) 上或随附 TI 产品提供的其他可适用条款的约束。TI 提供所述资源并不扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品所发布的可适用的担保范围或担保免责声明。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122
Copyright © 2018 德州仪器半导体技术（上海）有限公司