

Design Guide: TIDM-02022

2kW 四相交错式降压转换器参考设计，带耦合电感器



说明

数据中心功耗大幅增长，推动市场对高功率密度、高效率直流/直流砖型转换器的需求持续上升。隔离拓扑应用广泛，但控制实现难度较大。相较于电感-电感-电容 (LLC) 等隔离拓扑，采用耦合电感的多相同步降压拓扑具备更优异的负载瞬态性能，且更易于控制。此参考设计展示了使用 C2000™ 微控制器实现功率级的控制（电压模式）。

资源

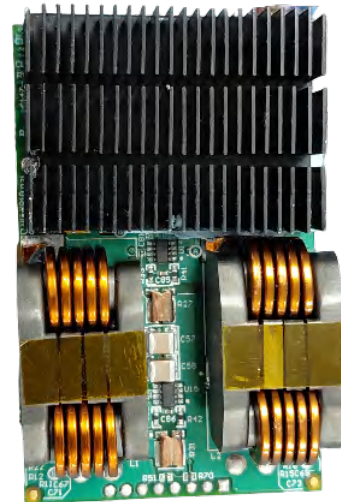
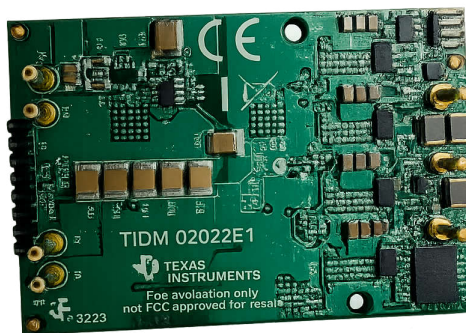
TIDM-02022	设计文件夹
TMS320F28P550SJ	产品文件夹
LMG3100R017	产品文件夹
INA241x-Q1	数据表
C2000WARE-DIGITALPOWER-SDK	产品文件夹

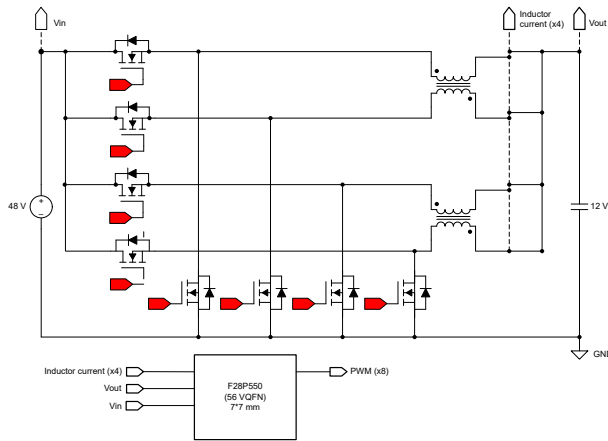
特性

- 48V 直流输入、12V 直流输出标称值，功率 2kW
- 200kHz 脉宽调制 (PWM) 频率切换
- 200kHz 中断服务例程 (ISR) 频率
- 峰值效率高于 98%
- 软件频率响应分析器 (SFRA) 和补偿设计器便于控制环路调优
- 电压模式控制环路
- 使用驱动程序库实现 F28P550 的软件支持

应用

- 具有 48V 输入的配电板
- 电信直流/直流模块





1 系统说明

数据中心 GPU 电源中的 48V 至 12V 级主要是 LLC 转换器。LLC 转换器的控制很复杂。非隔离式拓扑（如多相同步降压转换器）可实现相同的效率运行且控制更简单。耦合电感器可显著改善负耦合时的负载瞬态响应。GaN 模块和 C2000 MCU 小型封装可提高功率密度。

该器件通过耦合电感器实现四相交错式同步降压转换。前两个相位共享一个耦合电感器，后两个相位共享一个耦合电感器。此设计提供一个示例，说明如何使用 C2000 MCU F28P550 器件控制采用耦合电感器的多相降压转换。

1.1 主要系统规格

表 1-1 显示四相同步降压的主要电源规格。

表 1-1. TIDM 02022 的主要规格

参数	规格
输入电压 (Vin)	40V 至 60V，标称值为 48V 直流
输入电流 (Iin)	最大值为 50A RMS
输出电压 (Vout)	标称值为 12V 直流
额定功率	2kW
效率	峰值为 98% 平均值约为 97%
因耦合而产生的有效电感	5.4uH
组合输出电容（基板和模块）	5.5mF
PWM 开关频率	200kHz
ISR 频率	200kHz

2 系统概述

2.1 方框图

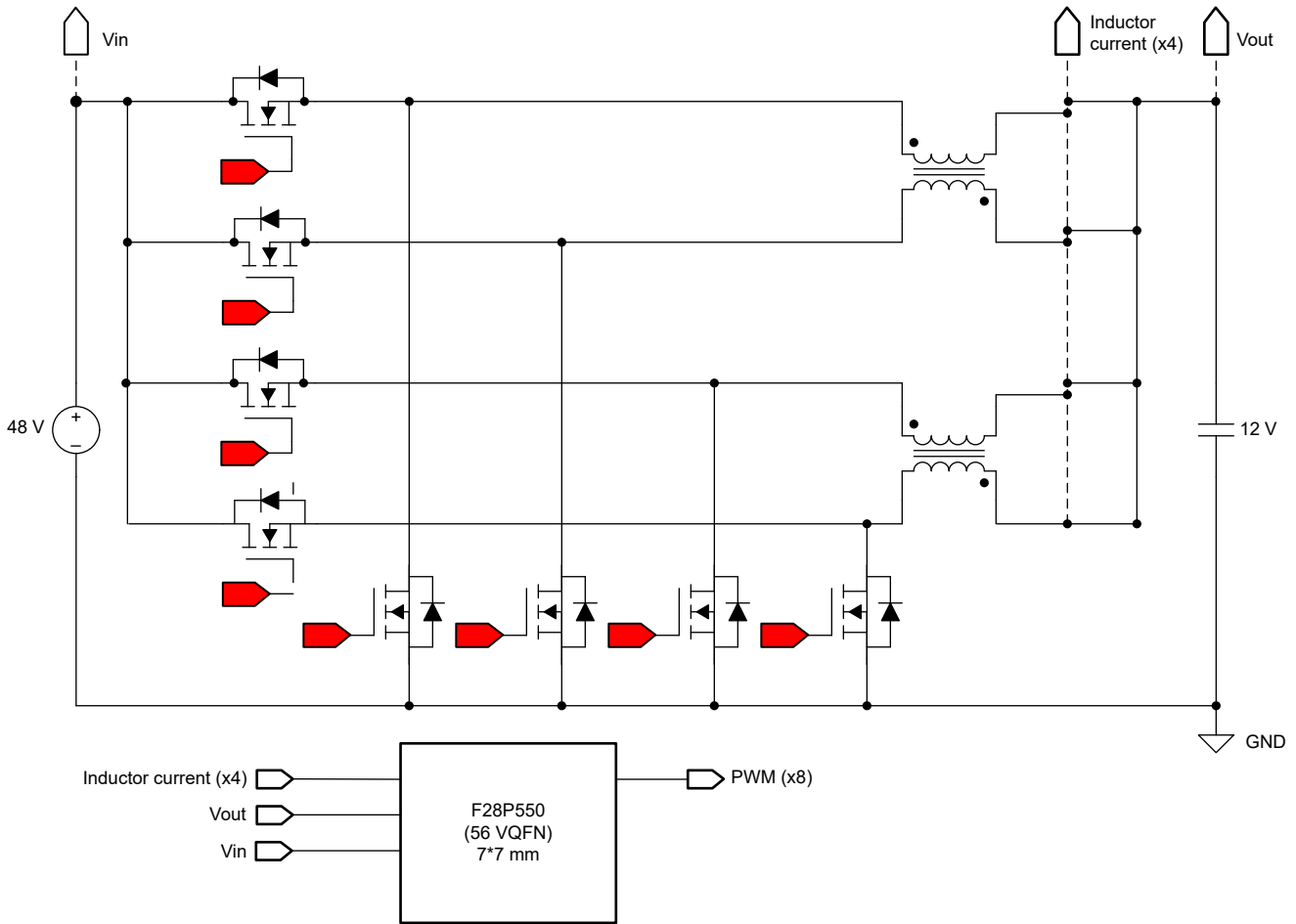


图 2-1. TIDM-02022 方框图

2.2 设计注意事项

要在四分之一砖型封装 (36.8mm × 58.4mm) 中实现 48V - 12V 转换，元件选择至关重要。本节介绍每个器件选择背后的高级细节。

2.2.1 微控制器单元

MCU 对于参考设计的正常运行至关重要。TMS320F28P550SJ C2000 器件可在空间受限的四分之一砖型封装中实现精确控制。为了实现负载阶跃的快速瞬态响应，请使用软件频率响应分析器 (SFRA) 构建经过适当调谐的控制环路。器件中的模拟比较器可启用过流保护。

2.2.2 GaN 功率级

由于集成了 FET + 驱动器以及具备更高的开关能力 (可缩小无源器件的尺寸)，TI GaN 功率级在追求紧凑尺寸的模块领域中发挥着至关重要的作用。为提供高达 2kW 的功率并在中等负载下达到 98.1% 以上的效率，可考虑采用 $1.7\text{m}\Omega$ RDS(on) 的四相交错并联设计。LMG3100 在同一封装中提供不同的 RDS(on) 规格，以在不同的负载和频率条件下轻松调优效率。

2.2.3 电感器

为提供 2kW 的总功率，每个相位电感器必须耐受 42A 电流。电感器还必须耐受更高的饱和电流，具体取决于电感器电流纹波和降额。选择低直流电阻 (DCR) 电感器，以减小影响满载效率的传导损耗。电感器尺寸是另一个限制因素。四个电感器必须安装在 36.8mm 尺寸内，以在 58.4mm 尺寸内实现流畅的功率传输。在产品目录中，具

有这些额定值的最小单电感器仍会占用较大的电路板空间。为解决这个问题，设计采用了 TDK® 的 ERUC23-2R2K 耦合电感器。在耦合电感器中，两个相位共用磁芯的同一部分。两个相位之间会发生负磁耦合，从而消除纹波。此磁耦合带来了另一个优势，即多相结构可在输出端消除纹波。要实现更高的功率和更高的峰值功率传输饱和额定值，应选择电感值更低且 DCR 更小的电感器。如需降低 GaN 中的纹波和开关损耗，可能需要提高开关频率。

耦合电感器设计具有以下优势：

- 降低电流纹波：相位之间的磁耦合能够显著消除纹波电流，从而降低整个电路中的电流纹波。
- 提高效率：纹波电流降低将减少 GaN FET、电感器和 PCB 布线中的 IRMS 损耗，因此有助于整体提高转换器效率。
- 加快瞬态响应：相同纹波下可采用更低的电感，这意味着耦合电感器设计能够更快地响应负载变化，通常可减少大型输出电容器的需求。
- 节省空间和缩小尺寸：在电流额定值不变的情况下，使用单个磁芯实现多个绕组需要缩小电路板面积，还可能缩小磁性元件尺寸。

2.2.4 散热

此设计的主要方面之一是通过散热器和风扇高效散热。该设计使用散热器，在 200 线性英尺/分钟 (LFM) 风速下具有大约 2.2°C/W 的热阻。本设计还使用厚度为 1mm 且热导率为 6W/m-K 的热界面材料 (TIM)。如果散热器与 LMG3100R017 GaN 裸片和电容器之间有足够的电气隔离距离，则使用更薄的 TIM 可以改善散热。

2.3 重点产品

2.3.1 TMS320F28P550SG9

C2000 MCU 属于经优化的 MCU 系列，适用于实时控制应用。快速且高质量的模数控制器可实现精确的电流和电压信号测量，集成式比较器子系统 (CMPSS) 集成了过流和过压保护功能，无需使用任何外部器件。经过优化的 CPU 内核可实现控制环路的快速执行。使用片上三角运算单元 (TMU) 加速三角运算，从而进一步提升控制环路的执行速度。

2.3.2 LMG3100R017

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。

3 硬件、软件、测试要求和测试结果

3.1 硬件要求

- 具有以下规格的基板：
 - VIN 输入和 VOUT 输出连接器
 - 输入和输出电容器
 - PMBus 连接器
 - VIN、VOUT 测量测试点
 - 5V、3.3V 偏置电源
 - 未施加 VIN 时，偏置电源会烧录代码
- 水平安装卡槽：
 - 具有辅助电源和控制器的四相降压功率级
- 100V、60A 可编程直流电源
- 12V、180A 可编程直流负载
- 两个空气冷却风扇
 - 风扇对于限制板载温度和防止效率值下降至关重要

3.2 软件

C2000Ware_DigitalPower_SDK 内提供了该设计的软件

3.2.1 在 Code Composer Studio 中打开工程

首先：

1. 安装 CCS
2. 从 [C2000WARE-DIGITALPOWER-SDK 软件开发套件 \(SDK\) | TI.com](#) 安装 C2000Ware DigitalPower SDK
3. 开路 CCS
4. 在 **Project > New CCS Project** 下
5. 点击 **Import Wizard**
6. 浏览到 C2000 DigitalPower SDK 文件夹
7. 打开 **Solutions** 文件夹
8. 选择 **tidm_02022** 文件夹
9. 点击 **Finish**

3.2.2 Digital Power SDK 架构

导入工程之后，CCS 内将显示 Project Explorer。

bick_dcdc.c 和 **brick_dcdc.h** 文件位于 **bick_dcdc** 文件夹中。实验环境设置文件位于工作目录中。

brick_dcdc_main.c 文件包含工程的主要框架。该文件包含对板级配置文件和算法专用文件的调用（有助于构建系统框架）以及中断服务例程 (ISR) 和慢速后台任务。

brick_dcdc_settings.h 文件包含所有用户设置，用于选择实验编号、开关频率、数字补偿器系数等。

Brick_dcdc_vmc.syscfg 文件包含所有外设配置。

3.2.3 中断和实验结构

该工程包含一个 ISR1，其中包含控制环路和 PWM 更新。ADCB 模块的 SOC2 可触发 ISR1。ADC 中断在采样采集窗口结束时发生。ePWM1 模块使用“计时器递增时，时基计数器等于 CMPB”事件触发转换。

本文针对本参考设计的软件进行了两个实验。第一个实验是开环运行，第二个实验是闭环电压模式控制。两个实验均在 **brick_dcdc.h** 中，如图 3-1 所示。

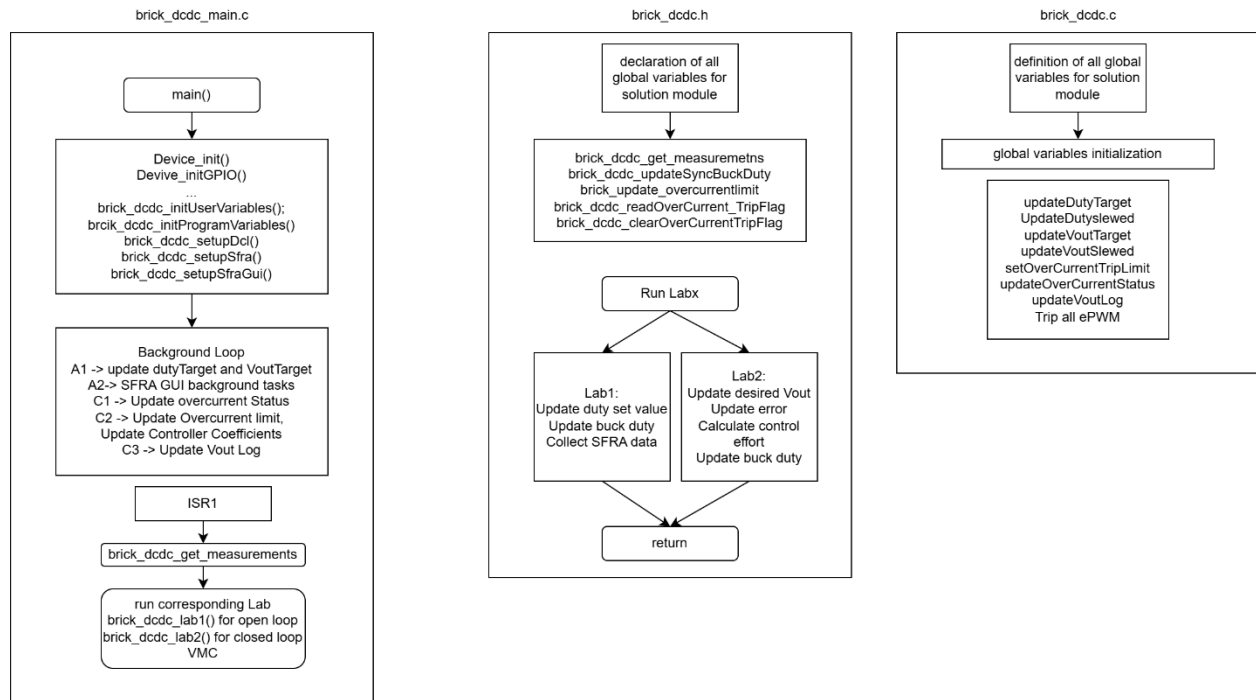


图 3-1. 软件流程图

3.2.4 实验结构和详细信息

图 3-2 显示实验 1 的开环电压模式控制。图 3-3 显示实验 2 的闭环电压模式控制

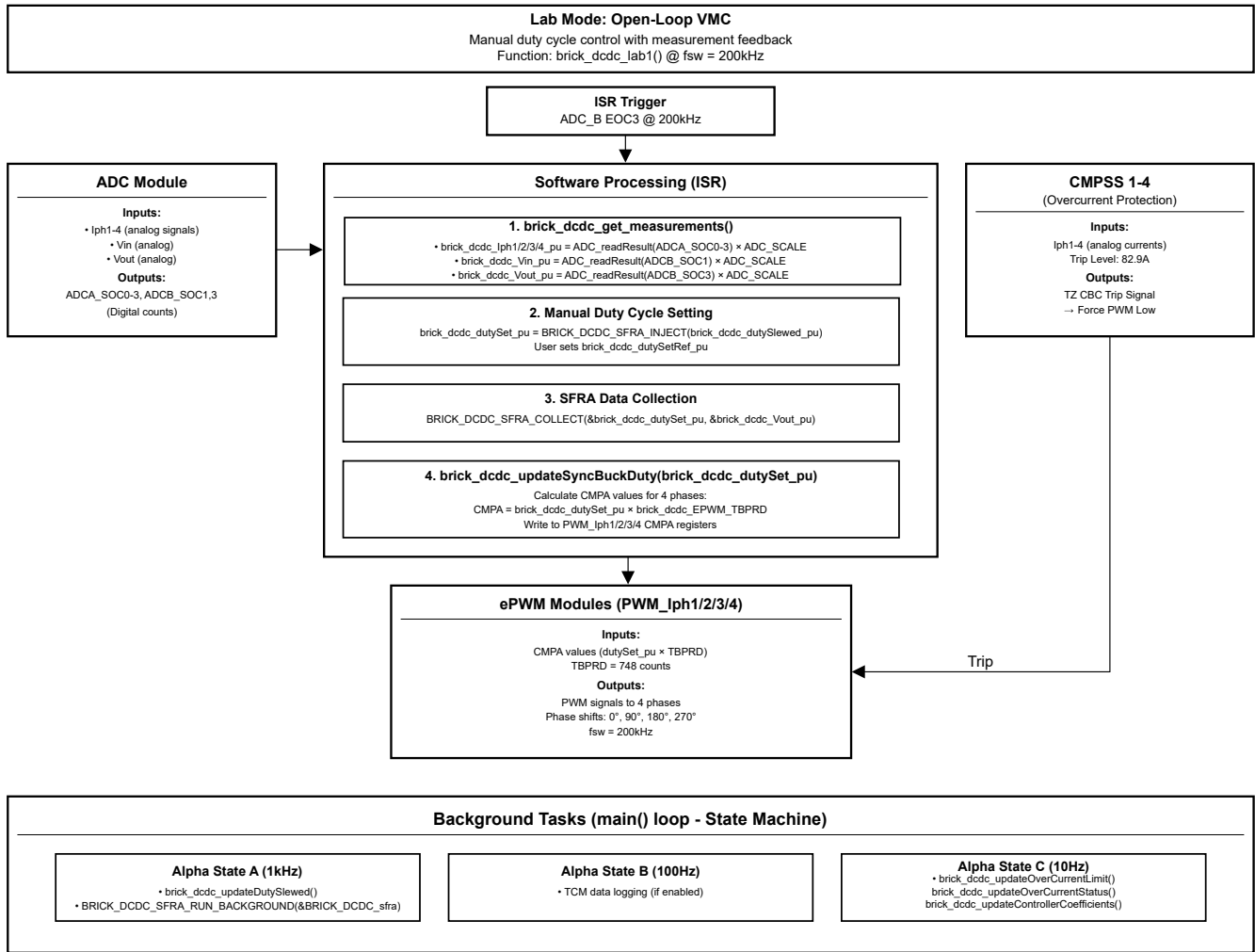


图 3-2. 实验 1 - 开环的软件流程图

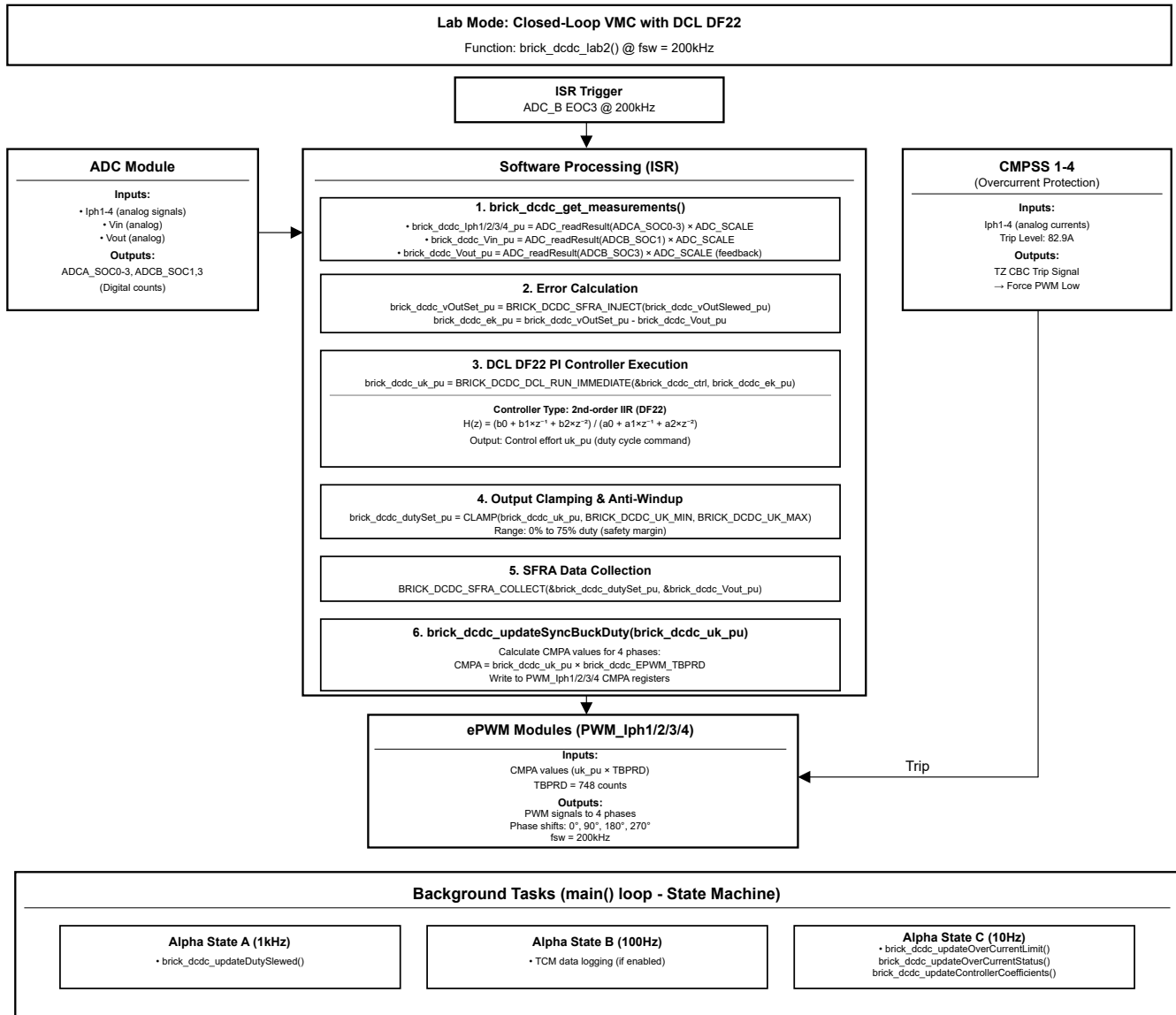


图 3-3. 实验 2 - 闭环电压模式控制的软件流程图

3.2.5 ADC 负载

ADC 负载如表 3-1 中所示。

表 3-1. ADC 负载架构

	ADC_A	ADC_B
SOC0	Iph1 - A1	
SOC1	Iph2 - A9	
SOC2	Iph3 - A5	VOUT - B14
SOC3	Iph4 - A7	
SOC4		

3.2.6 构建、加载和调试固件

若要构建该工程：

1. 右键点击工程名称
2. 点击 **Rebuild Project**。项目编译成功。

若要加载该工程：

1. 在 Project Explorer 中，确认将 targetConfigs (*.ccxml 文件) 下的正确目标配置文件设置为 Active。
2. 点击 **Run** → **Debug** 以启动调试会话。

对于双 CPU 器件，可能会显示一个窗口，用户可以在其中选择要对哪个 CPU 执行调试。在本例中，选择“CPU1”。工程会加载到器件上，同时 CCS 调试视图变为活动状态。代码在主例程开始时停止。

若要调试系统，应监测表达窗口中的变量。

若要使用正确的变量填充此窗口：

1. 点击 **View** → **Scripting Console** 以打开脚本控制台对话框。
2. 在该控制台的右上角，点击 **Open**
3. 导航到工程文件夹内的 **setupdebugenv_lab1.js** 或 **setupdebugenv_lab2.js** 脚本文件。这些脚本将采用调试系统所需的相应变量填充观察窗口。
4. 启用观察窗口中的 **Continuous Refresh** 按钮，以连续更新控制器中的值

3.2.7 保护方案

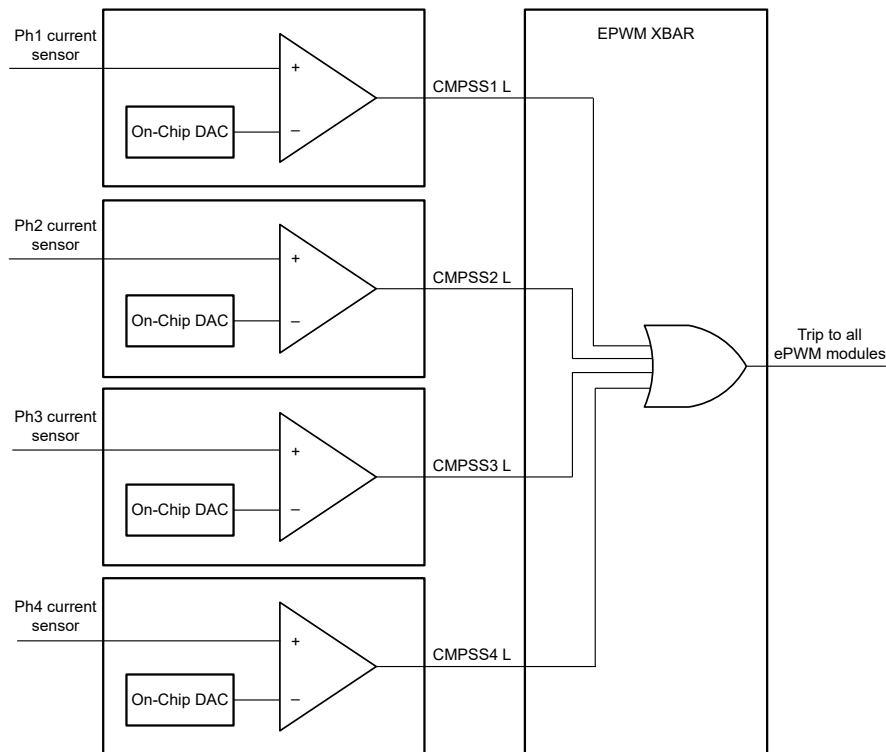


图 3-4. 保护图

在慢速后台任务中定期调用 **brick_dcdc_readOverCurrentTripFlag()** 和 **brick_dcdc_ClearOvercurrentTripFlag()** 函数以更新跳闸标志。

3.2.8 PWM 开关方案

图 3-5 显示 PWM 开关方案。该图仅显示了 PWM1 时基，其他时基均相同。

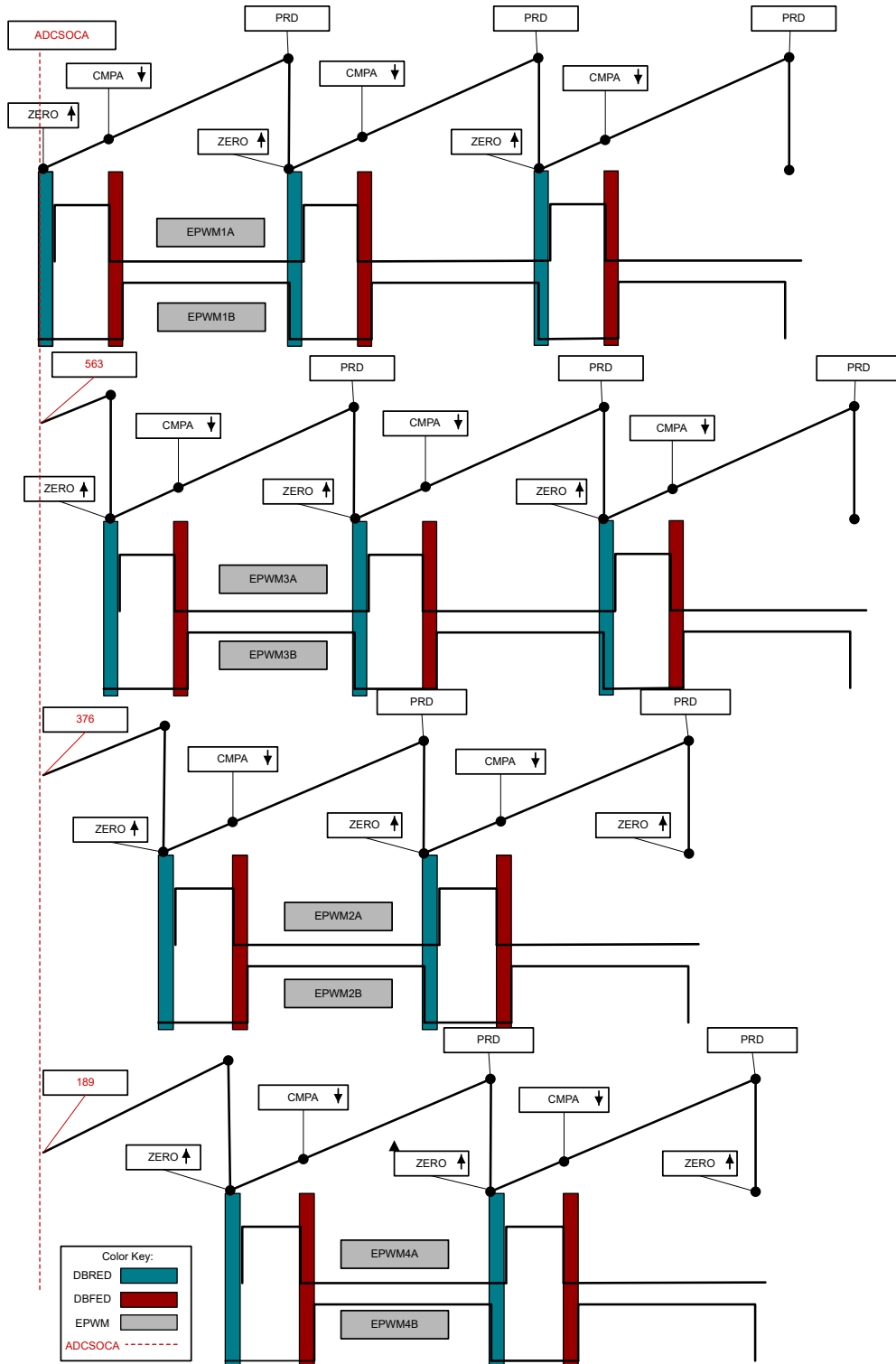


图 3-5. PWM 配置

3.3 测试设置

完成以下测试设置步骤：

1. 将子卡模块插入基板。
2. 将 100V 直流电压源连接到基板接头。
3. 将输入电压范围设置为 40V 至 60V，电流限制设置为 60A。
4. 将风扇放置在散热器附近，然后打开风扇。
5. 连接可编程直流负载。
6. 将固件上传到 F28P550 器件。
7. 打开直流电压源并将恒流 (CC) 负载增加至 167A。

3.4 测试结果

以下测试结果表明，对于 12V 输出，在 1000W 输出功率和 48V 输入电压下，峰值效率约为 98.1%。使用两个风扇可将温度保持在 100°C 以下。

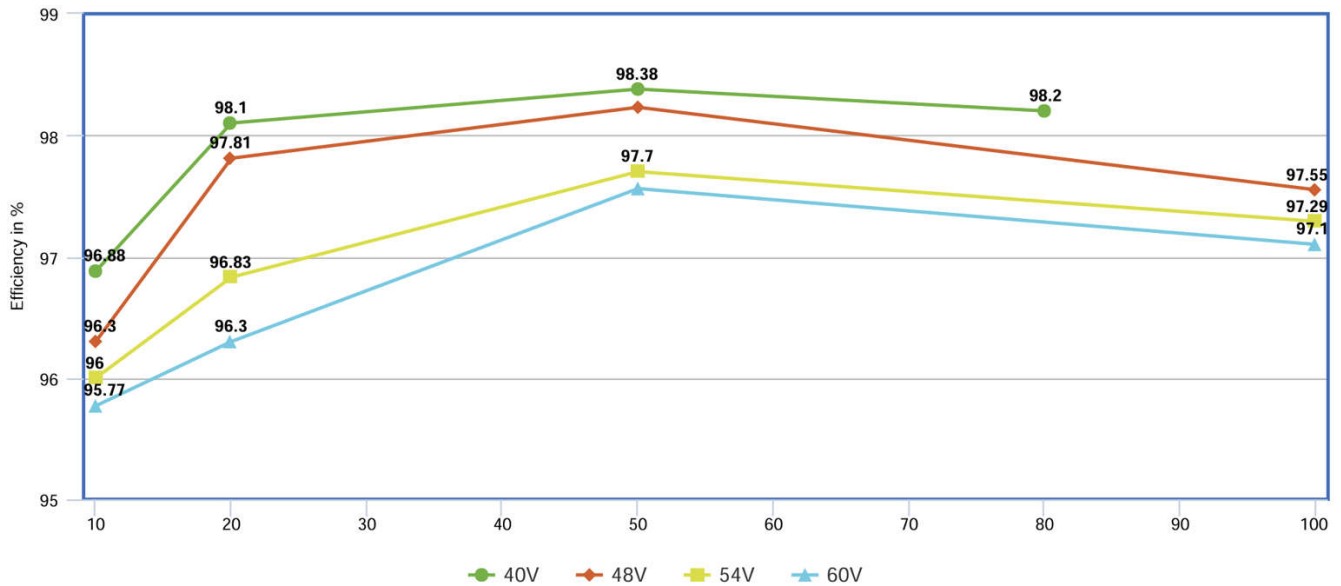


图 3-6. 效率与负载间的关系 (以满载百分比表示)

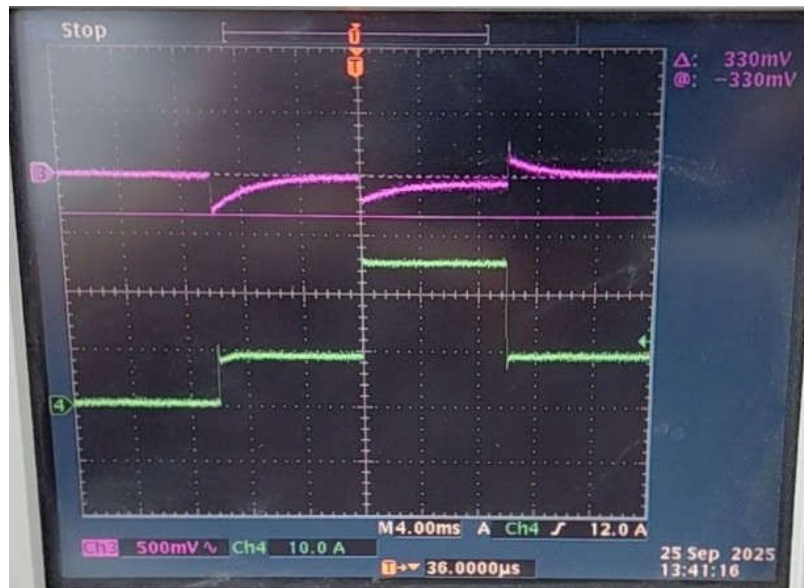


图 3-7. 48V 输入电压下负载从 25%到 75%再到 25% 变化的瞬态响应 (变化速率为 5A/us)

图 3-8 显示热成像图采集 (48V - 12V , 2kW , 环境温度为 25°C) 。

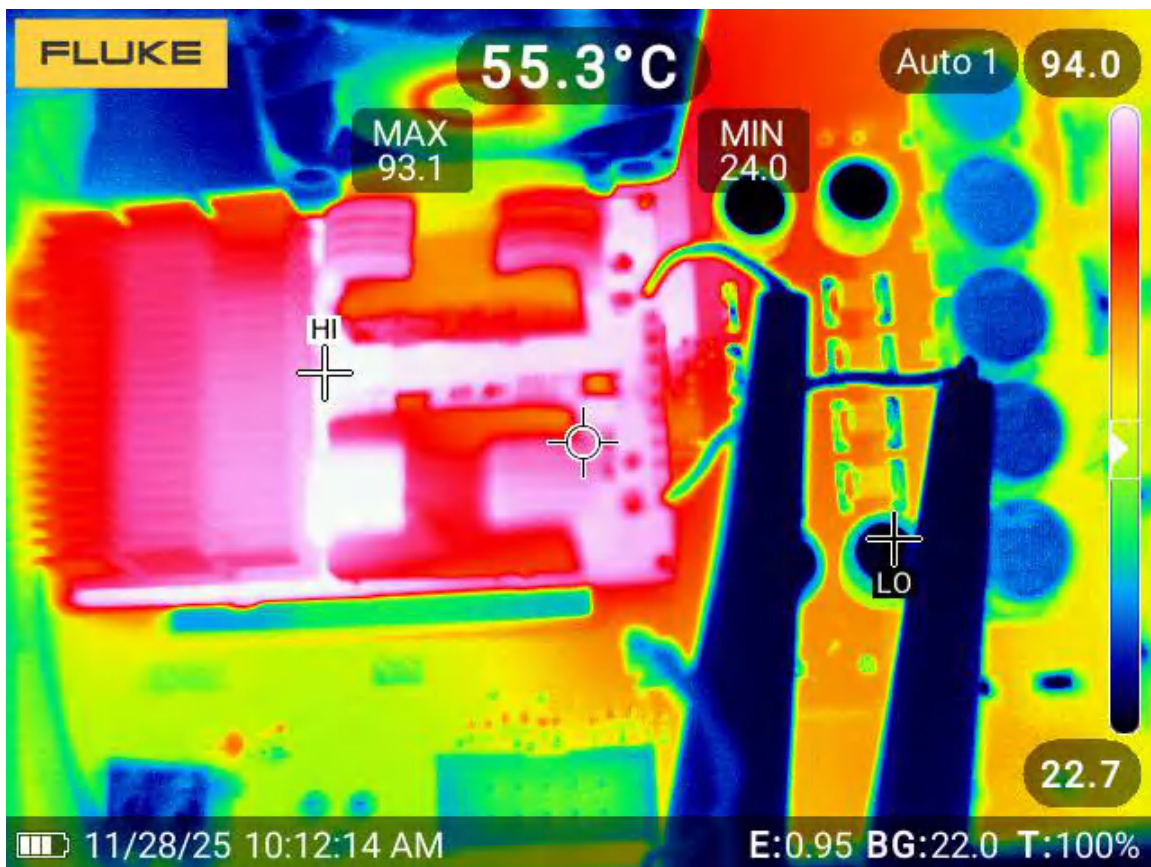


图 3-8. 满载，48V 输入，环境温度为 25°C 时采集的热成像图

4 设计和文档支持

4.1 设计文件

4.1.1 原理图

从 [TIDA-02022 设计文件夹](#) 下载原理图。

4.1.2 物料清单

从 [TIDA-02022 设计文件夹](#) 下载物料清单 (BOM)。

4.1.3 PCB 布局图

从 [TIDA-02022 设计文件夹](#) 下载层图。

4.1.4 Altium 工程

从 [TIDA-02022 设计文件夹](#) 下载 Altium Designer 工程文件。

4.1.5 Gerber 文件

从 [TIDA-02022 设计文件夹](#) 下载 Gerber 文件。

4.2 文档支持

1. 德州仪器 (TI), [TMS320F28P55x 实时微控制器 数据表](#)
2. 德州仪器 (TI), [采用集成式驱动器的 LMG3100R017 100V, 97A GaN FET 数据表](#)
3. 德州仪器 (TI), [多相降压转换器的优势 模拟设计期刊](#)
4. 德州仪器 (TI), [多相降压设计全流程 应用报告](#)

商标

C2000™ is a trademark of Texas Instruments.

TDK® is a registered trademark of TDK Kabushiki Kaisha (TDK Corporation).

所有商标均为其各自所有者的财产。

5 关于作者

SOMINA VENKATA PRANEETH 是 ASM Industrial Digital Power 团队的一名应用工程师。他于 2025 年在位于班加罗尔的印度理工学院完成了电气工程专业的研究生课程。其技术兴趣包括数字电源转换和控制算法。他于 2025 年加入 TI。

STEVAN DURASKOVIC 是 ASM Industrial Digital Power 团队的一名应用工程师。他于 2023 年春季毕业于佛罗里达大学，获得电气工程学士学位。他于 2023 年 10 月全职加入 ASM IND 团队。其工作主要涉及能源基础设施任务和参考设计、太阳能电网、数据中心、客户支持以及 PCB 设计。

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月