

Design Guide: TIDA-050095

支持 GaN 的 48V - 12V 2kW 四相降压转换器、四分之一砖型电源模块参考设计



说明

此参考设计是一款基于四相降压转换器、适用于企业计算的 2kW、高密度 48V 至 12V 闭环总线转换器。该设计在 48V VIN 下可实现高于 98% 的峰值效率和 97.5% 的满载效率。此设计采用 TI 的一款高性能氮化镓 (GaN) 功率级器件 LMG3100R017。控制电路使用 UCD3138A，这是一款采用 40 引脚四方扁平无外伸引脚 (QFN) 封装的高性能微控制器。

资源

TIDA-050095	设计文件夹
TIDA-050089	设计文件夹
LMG3100R017	产品文件夹
UCD3138A	产品文件夹
TPSM365R6	产品文件夹

特性

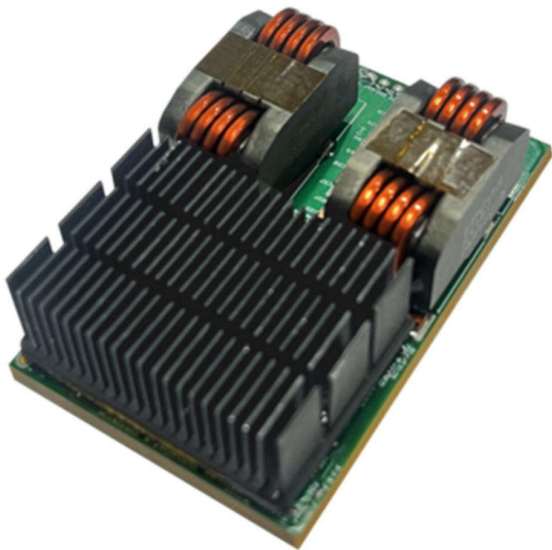
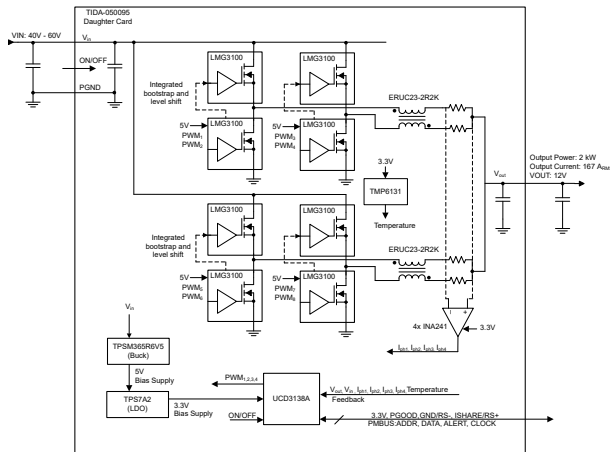
- 高功率密度，具有高峰值 (98% 以上) 和满载效率 (97.5%)
- 无变压器稳压拓扑
- 物料清单 (BOM) 成本低
- 易于在采用四分之一砖型封装 (36.8mm × 58.4mm × 18mm) 的芯片级设计中实现
- 可配置 12V - 48V 升压
- 支持 PMBus®

应用

- 机架式服务器主板
- 高性能计算
- 直流/直流模块
- 低压电池系统



请咨询我司 TI E2E™ 支持专家



1 系统说明

随着 AI 的普及和数据处理负载的增加，服务器电源要求也随之增加。为减少 I^2R 损耗，架构将配电电压从 12V 转变提高到 48V。这种转变需要在主板上实现 48V - 12V 电平转换，从而为主控制器多相功率级和外设（如 PCIe 和 HDD）供电。

由于硬开关，降压转换器的效率不足以达到 98% 以上的峰值效率。但是，TI GaN 集成式功率级采用四相降压拓扑，可在 2kW 功率输出下实现高效的 48V - 12V 转换。

1.1 主要系统规格

参数	规格
输入电压	40V - 60V DC
输出电压	12V DC 稳压
额定输出功率	2kW
最大输出电流	167A _{RMS}
电路板尺寸 (W × L × H)	36.8mm × 58.4mm × 18mm

1.1.1 通用 TI 高压评估用户安全指南



始终遵循 TI 的设置和应用说明，包括在建议的电气额定电压和功率限制范围内使用所有接口元件。务必采取电气安全防护措施，这有助于确保自身和周围人员的人身安全。如需了解更多信息，请联系 TI 的产品信息中心，网址为 <http://support/ti.com>。

备注

保存所有警告和说明以供将来参考。

务必遵循警告和说明，否则可能引发电击和/或灼伤危险，进而造成财产损失或人员伤亡。

术语 TI HV EVM 是指通常以开放式框架、敞开式 PCB (印刷电路板) 装配形式提供的电子器件。该器件严格用于开发实验室环境，仅供了解开发和应用高压电路相关电气安全风险且接受过专门培训、具有专业知识背景的合格专业用户使用。德州仪器 (TI) 严禁将其用于任何其他用途或应用。如果资格不合要求，则必须立即停止进一步使用 HV EVM。

• 工作区安全：

- 保持工作区整洁有序。
- 每次电路通电时，都必须由具有资质的观察员在场监督。
- TI HV EVM 及接口电子元件通电区域必须设有有效的防护栏和标识；指示可能存在高压操作，以避免意外接触。
- 超过 50VRMS/75VDC 的开发环境中使用的所有接口电路、电源、评估模块、仪器、仪表、示波器和其他相关装置必须置于受电气保护的紧急断电 (EPO) 电源板内。
- 使用稳定且不导电的工作台面。
- 使用充分绝缘的夹钳和导线来连接测量探针和仪器。尽量不要徒手进行测试。

• 电气安全：

- 作为一项预防措施，假定整个 EVM 可能存在用户可完全接触到的高电压是一种好的工程做法。
- 执行任何电气测量或其他诊断测量之前，需切断 TI HV EVM 及其全部输入、输出和电气负载的电源。确认 TI HV EVM 已安全断电。
- 确认 EVM 断电后，继续进行所需的电路配置、接线、测量设备连接和其他应用需求，同时仍假定 EVM 电路和测量仪器均带电。
- EVM 准备就绪后，根据需要将 EVM 通电。

警告

EVM 通电后，请勿触摸 EVM 或电路，因为 EVM 或电路可能存在高压，会造成电击危险。

• 人身安全：

- 穿戴人员防护装备 (例如乳胶手套和具有侧护罩的安全眼镜) 或者用带有互锁机构的足够透明的塑料箱装好 EVM，避免意外接触。

• 安全使用限制条件：

- 勿将 EVM 作为整体或部分生产单元使用。

1.1.1.1 安全性和预防措施

该 EVM 设计用于经过适当技术培训的专业人员，旨在交流电源或高压直流电源下操作。在操作此 EVM 之前，请阅读此用户指南和此 EVM 封装随附的安全相关文档。

小心



请勿在无人照看的情况下使该 EVM 通电。

警告



表面高温！接触会导致烫伤。请勿触摸！

警告



高压！将电路板连接到火线时可能会触电。电路板必须由专业人员小心处理。
为安全起见，强烈建议使用具有过压和过流保护功能的隔离式测试设备。

2 系统概述

2.1 方框图

此参考设计使用了一款小型 GaN 场效应晶体管 (FET) LMG3100R017 来实现三相逆变器。LMG3100R017 在 $6.5\text{mm} \times 4\text{mm}$ QFN 封装内集成了驱动器和 80V GaN FET。该封装经过优化,可实现极低的栅极环路和电源环路阻抗。PCB 为散热器提供了安装孔,可用于顶面冷却式 LMG3100R017 GaN FET 电源模块。集成的自举二极管有助于缩小高侧 GaN FET 偏置电源的占用空间。

该控制系统采用德州仪器 (TI) 的数字电源控制器 UCD3138A。UCD3138A 在一个单芯片解决方案中实现了高度集成和优异性能。UCD3138A 采用 PMBus 通信,可轻松进行固件升级和报告。该设计通过双向电流检测放大器 INA241 监测各相输入电流。5V 辅助电源使用集成降压模块 TPSM365R6,后跟一个低压降 (LDO) 线性稳压器来生成 3.3V 电源轨。

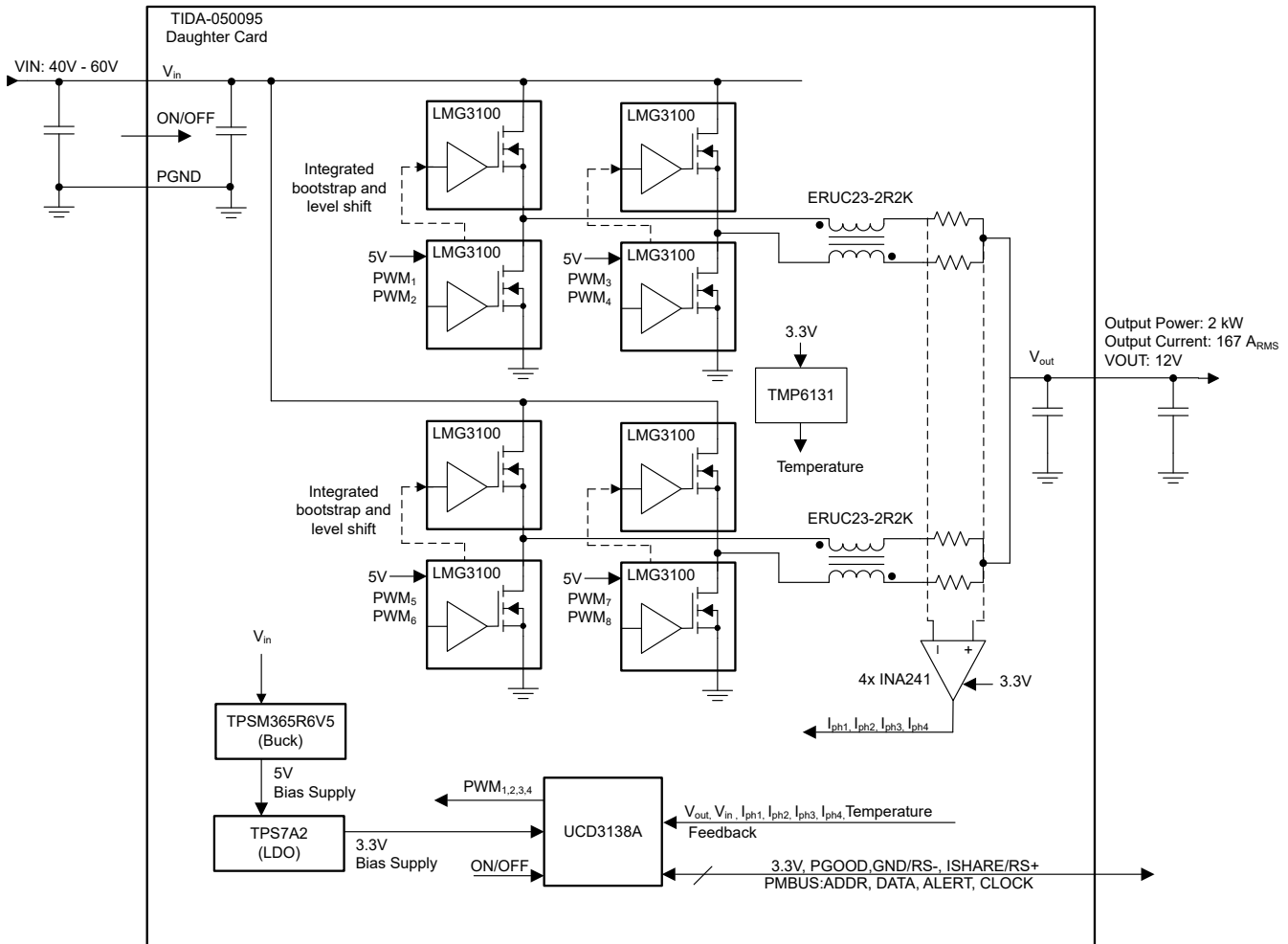


图 2-1. 系统方框图

2.2 设计注意事项

要在四分之一砖型封装 ($36.8\text{mm} \times 58.4\text{mm}$) 中实现 $48\text{V} - 12\text{V}$ 转换,元件选择至关重要。本节介绍每个器件选择背后的考量。

2.2.1 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 $1.7\text{m}\Omega$ $R_{DS(on)}$ 的四相交错并联设计。LMG3100 在同一封装中提供不同的 $R_{DS(on)}$ 规格，便于在不同的负载和频率条件下调整效率。

2.2.2 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。这带来了另一个优势，即多相结构可在输出端消除纹波。

如需获得更高的功率和更高的峰值功率传输饱和和额定值，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 I_{RMS} 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意味着缩小电路板面积，还意味着可能缩小磁性元件尺寸。

2.2.3 控制器

UCD3138A 符合以下要求：

- 中间总线转换器 (IBC) 模块需要通过 PMBus 协议实现精确控制和故障保护，以及向主 MCU 报告
- 检测输入欠压锁定 (UVLO)、输出过压保护 (OVP)、过流保护 (OCP) 和过热保护 (OTP) 等故障
- 基于输入电流和输出电压检测的闭环设计
- 不同模块并联时均流
- 相间电流均衡同样重要，因为电流均衡可确保均匀的功率损耗，并提高效率

尽管此设计并未实现上述所有功能，但硬件设计支持通过固件更改来实现这些功能。

2.2.4 冷却

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 [Alpha Novatech](#) 的 Z35-12.7B 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。

2.2.4.1 散热器放置

为了通过顶部 GaN 裸片实现良好冷却，应尽可能缩短 GaN 裸片与散热器之间的距离。为此，靠近 LMG3100R017 的元件必须具有与 LMG3100R017 相当的高度，以便尽可能减小热界面材料 (TIM) 的厚度。只要元件高度超过 LMG3100R017 的高度，就应在散热器上添加一道凹槽，以补偿这一高度差。

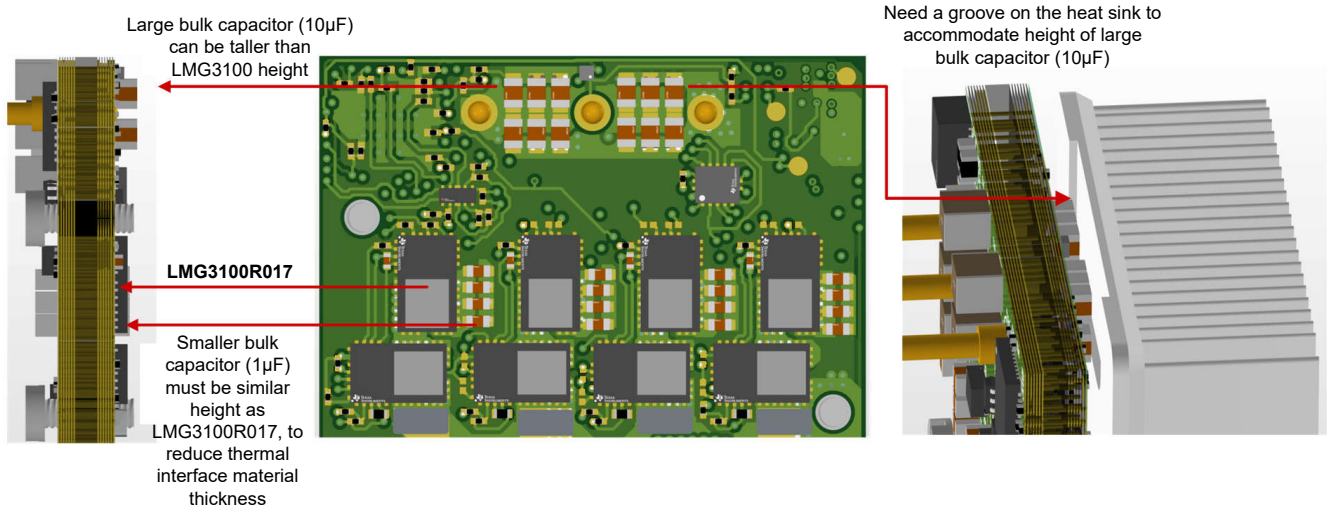


图 2-2. 电容器放置和散热器凹槽

2.2.4.2 过孔的放置

除了使用散热器进行顶面冷却外，从电路板上散热也至关重要。为此，需在焊盘上使用电镀过孔，以将电流导至内层并降低整体热阻。确保添加足够的过孔，以将电流导至多个层，并更大限度地降低 PCB 总体铜损耗。

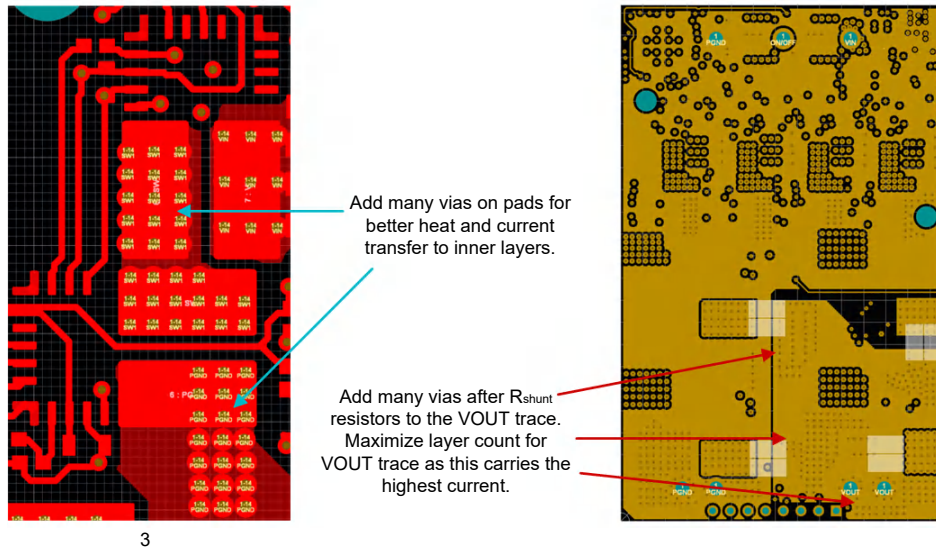


图 2-3. 过孔的放置

2.2.4.3 铜块

满负载时，同步整流 (SR) FET 承载大量电流。为实现更高效率，必须消除 SR FET 产生的热量。低侧 LMG3100R017 的 SRC 焊盘附近可裸露 PGND 铜层。可以使用与 LMG3100R017 高度相同的小型铜块，然后将其连接到散热器。

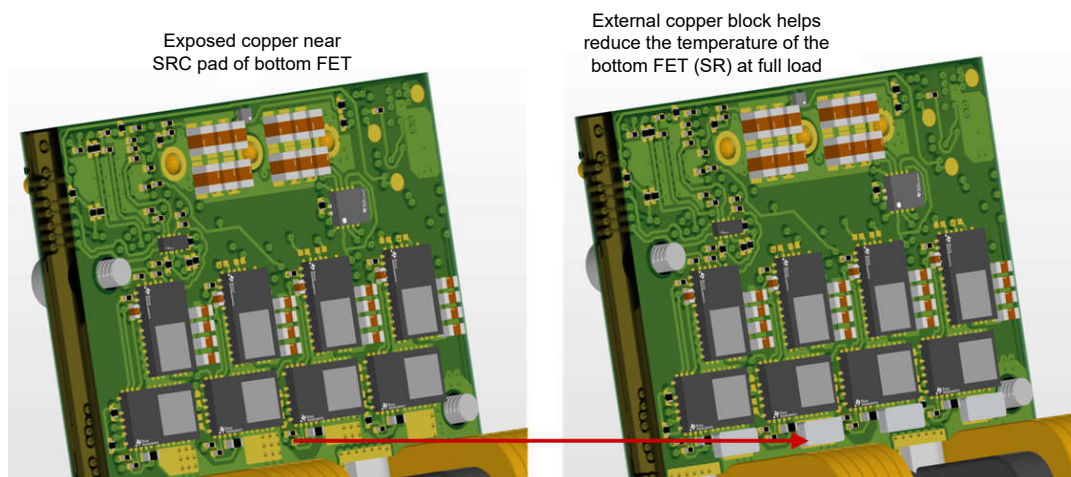


图 2-4. 铜块放置

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 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。表 2-1 详细说明了此设计的主要特性和优势。

表 2-1. TIDA-050089 中 LMG3100R017 的主要特性和优势

特性	优势
集成 1.7m Ω 、90V GaN FET，可实现 97A 运行	低 $R_{DS(on)}$ 可降低 SR FET 的导通损耗
集成了 GaN FET 和 GaN 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。 能够在四分之一砖型尺寸内实现紧凑设计
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和自举二极管
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)	获得更低的顶部热阻。支持双面散热，便于热设计
LMG3100 在同一封装中提供不同的 $R_{DS(on)}$ 型号	在中负载和满负载条件下进行效率调优时，便于更换器件

2.3.2 UCD3138A

UCD3138A 是一款完全可编程、低功耗的数字控制器设计，此设计具有简单设计的优点，可以缩短上市时间，同时保持足够的能力，以便开发高性能且差异化良好的电源设计。除了微控制器的通用用途外，该器件还可包含一个可配置的数字状态机，该数字状态机经优化可满足电信和服务器隔离式电源应用的性能要求。该控制器具有经过优化的数字硬件，可实现许多尖端的电源管理功能，例如突发模式、理想二极管仿真、模式切换、同步整流和更低的恒流消耗。总之，UCD3138A 解决了所有关键问题，例如在整个工作范围内实现高效率、针对各种控制方案和拓扑结构提供高度灵活性、高集成度以提高功率密度、高可靠性以及最低的整体系统成本。

其他关键功能包括：

- 可对多达三个独立式反馈环路进行数字控制
- 高达 16MHz 的模数转换器 (EADC)
- 多达八个高分辨率数字脉宽调制 (DPWM) 输出
- 完全可编程的高性能 31.25MHz，32 位 ARM7TDMI-S™ 处理器
- 14 通道、12 位、267ksps 的通用 ADC，带集成滤波器
- 通信外设 (I²C/PMBus、UART)
- 可配置的脉宽调制 (PWM) 边沿调节
- 可配置的反馈控制
- 可配置的调制方法
- 快速、自动且顺畅的模式切换
- 高效率和轻载管理
- 带和不带预偏置的软启动和停止
- 快速输入电压前馈硬件
- 丰富的故障保护选项
- 内部温度传感器
- 带可选输入引脚的计时器捕捉
- 多达五个附加的通用计时器
- 内置看门狗：欠压检测 (BOD) 和上电复位 (POR)
- 工作温度：-40°C 至 125°C

2.3.3 TPSM365R6V5

TPSM365R6 是一款简单易用的同步降压直流/直流电源模块，可在 3V 至 65V 的输入电压范围内工作。该器件适用于从 5V、12V、24V 和 48V 电源导轨进行降压转换。TPSM365R6 或 TPSM365R3 配有集成式电源控制器、电感器和 MOSFET，能够以非常小的设计尺寸提供高达 600mA 的直流负载电流，并实现高效率和超低输入静态电流。该器件便于实施，可让您灵活地按照目标应用来优化其使用。该模块不需要控制环路补偿，可缩短设计时间并减少外部元件数量。TPSM365Rx 可以在各种开关频率和占空比下运行。如果最短导通时间或关断时间不支持所需的占空比，开关频率会自动降低，从而保持输出电压调节。借助合适的内部环路补偿，TPSM365Rx 可以最少的外部元件显著缩短系统设计时间。此外，具有内置延迟释放的 PGOOD 输出可以在许多应用中省去复位监控器。使用 RT 引脚或外部时钟信号实现 200kHz 至 2.2MHz 的可编程开关频率。这些功能为广泛的应用提供了一个灵活且易于使用的平台。引脚排列旨在实现简单的布局，这种布局只需很少外部元件。

2.3.4 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 10k Ω ，最大容差为 $\pm 1\%$ ，最大工作电压为 5.5V，最大电源电流为 400 μ A。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温度。

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（用于在未施加 VIN 时烧录代码）
- 水平安装卡槽：
 - 具有辅助电源和控制器的四相降压功率级
- USB-2-GPIO 连接器
- 100V、60A 可编程直流电源
- 12V、180A 可编程直流负载
- 空气冷却风扇

3.2 软件要求

- Code Composer Studio™ 集成开发环境 (IDE)
- Fusion Digital Power Design (Fusion GUI)

3.3 测试设置

完成以下测试设置步骤：

- 将子卡模块插入基板。
- 将 100V 直流电压源连接到基板接头 (J3-J4)。将输入电压范围设置为 40V 至 60V，电流限制设置为 60A。
- 将风扇放置在散热器附近，然后打开风扇。
- 连接可编程直流负载 (J2-J6)。
- 将 PMBus 适配器连接到 J9，再将固件上传到 UCD3138A（可选）。
- 打开直流电压源并将恒流 (CC) 负载增加至 167A。

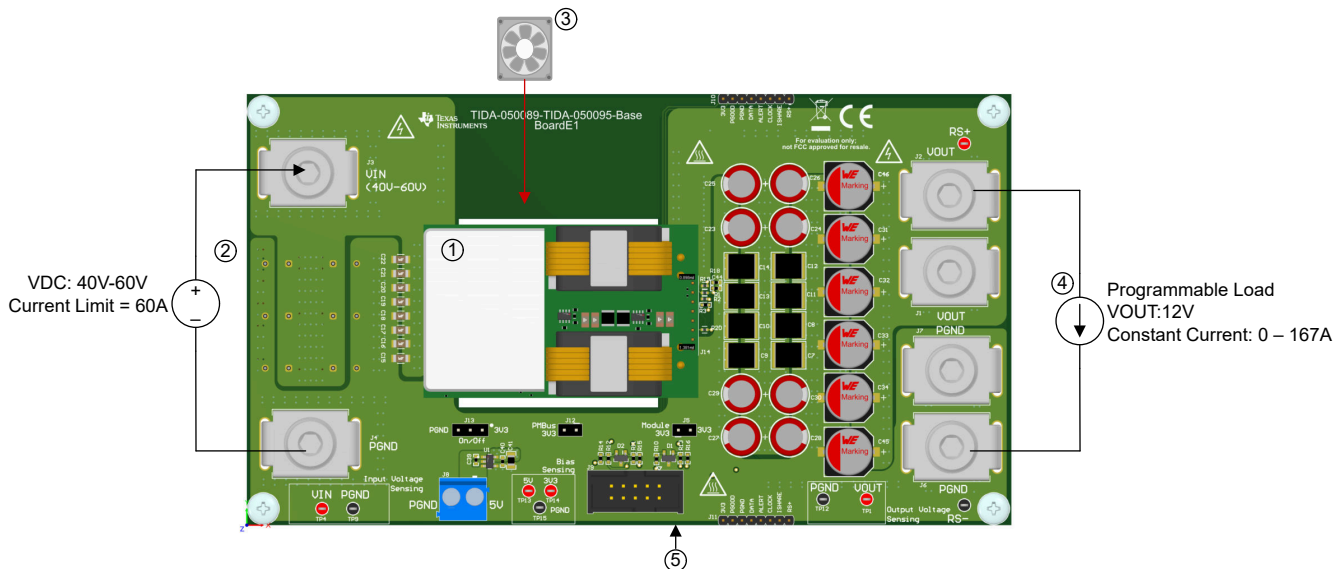


图 3-1. 测试设置

3.4 测试结果

以下测试结果表明，对于 12V 输出电压，在 970.4W 输出功率和 48V 输入电压下，峰值效率约为 98.15%。对于 54V 输入电压，中等负载时的峰值效率为 97.98%，满载时的峰值效率为 97.38%。这些效率测量结果涵盖了所有偏置电源的需求，但不包括输出引脚连接器的功率损耗。

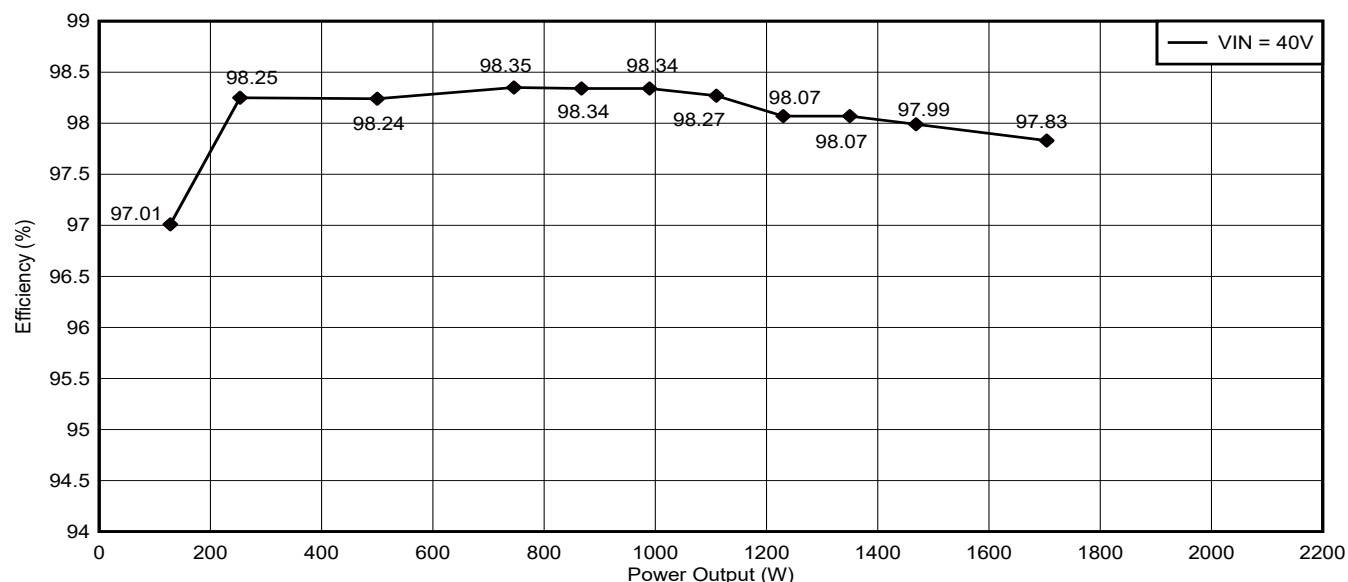


图 3-2. 40V VIN 时的效率

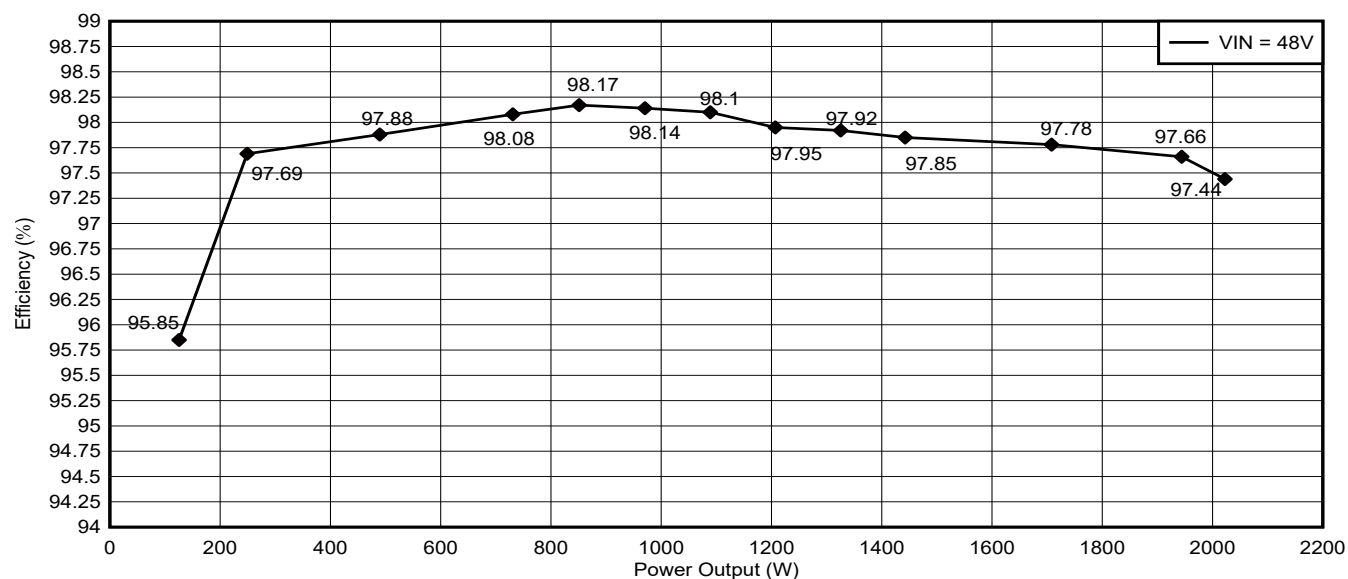


图 3-3. 48V VIN 时的效率

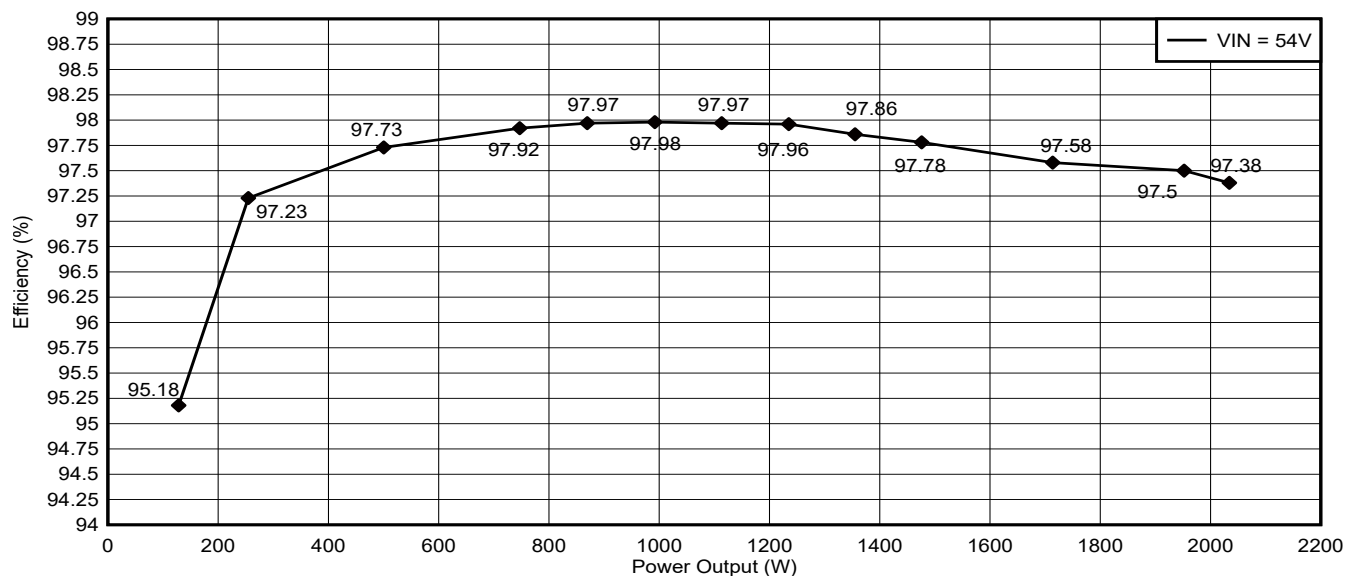


图 3-4. 54V VIN 时的效率

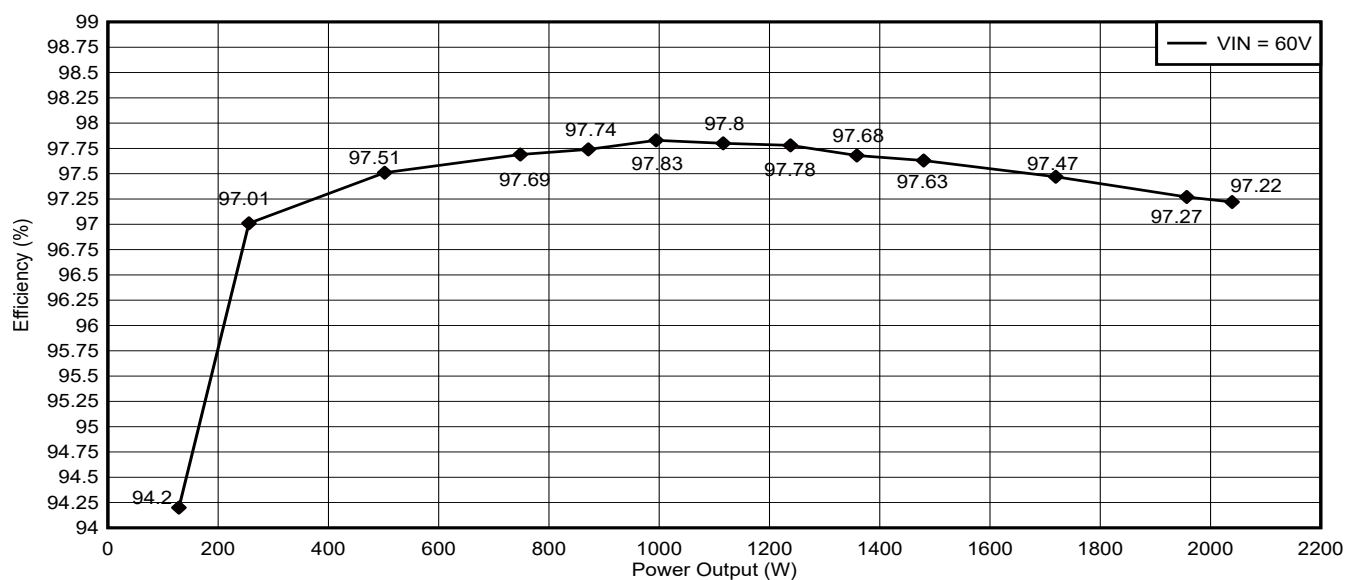


图 3-5. 60V VIN 时的效率



图 3-6. 热成像 (48V - 12V、2kW、25°C 环境温度、41.2 立方英尺/分钟风速)

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-050095](#) 中的设计文件。

4.1.2 BOM

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-050095](#) 中的设计文件。

4.1.3 PCB 布局建议

4.1.3.1 电源环路优化

确保高频电流通过尽可能小的电感路径返回电容器。这将降低硬开关转换期间开关节点上的峰值电压。靠近高侧 LMG3100R017 的 DRN 引脚放置多个电容器，并在低侧 LMG3100R017 的 SRC 焊盘上使用过孔，从而通过紧邻的下一层（内层 1，参阅图 4-1）完成电源环路。此外，在底层添加多个容值更高的电容器，以提供足够的电流并满足瞬态纹波规格。

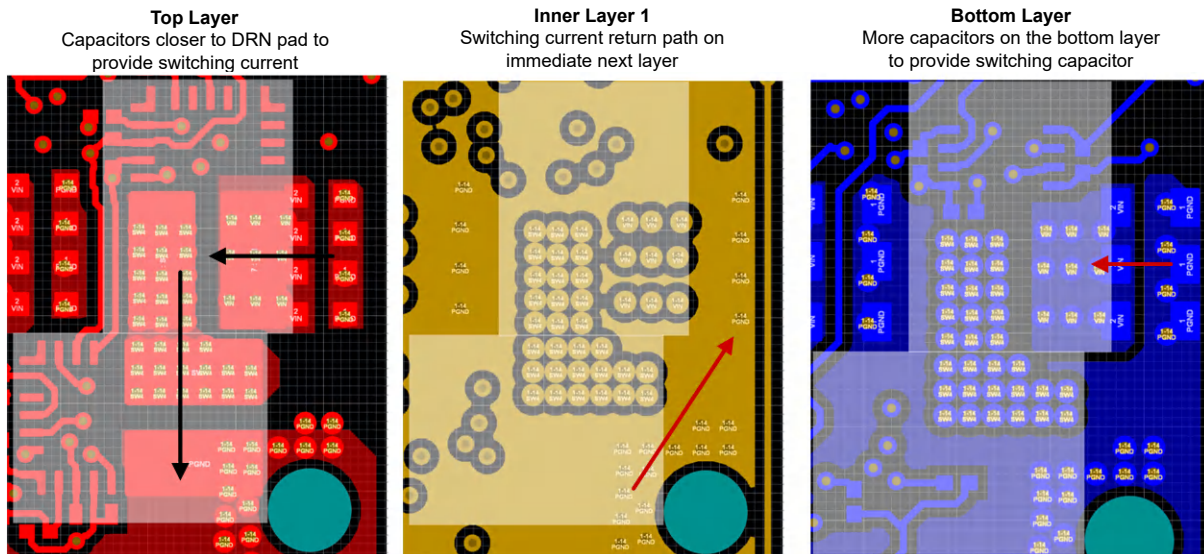


图 4-1. 电源环路路径

4.1.3.2 流经输出功率接地端的返回电流

进行布局时，应优先考虑 VOUT 布线，因为该布线在设计中承载最高电流。确保 PGND 返回路径具有足够的层数。在当前设计版本中，PGND 返回路径有四个专用层。如有必要，为减小电路板厚度或更大限度地降低 PCB 损耗，可以在底面外部添加一个铜棒，以便将返回电流从 PGND 输出引脚导至低侧 LMG3100R017 PGND。

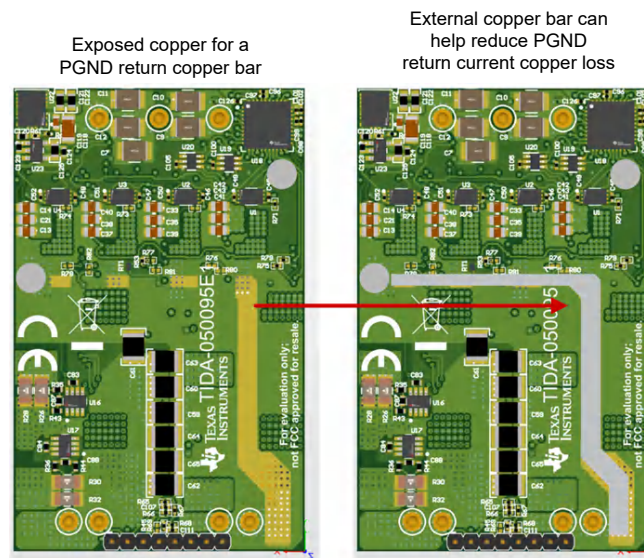


图 4-2. 铜棒放置

4.2 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。

软件

FUSION_DIGITAL_POWER_DESIGNER Fusion Digital Power™ 半导体器件图形用户界面 (GUI) 软件用于配置和监视精选的德州仪器 (TI) 数字电源控制器以及序列发生器/运行状况监视器。此应用使用 PMBus 协议，通过 TI USB 适配器经由串行总线与控制器进行通信。

4.3 文档支持

1. 德州仪器 (TI), [附有集成式驱动器数据表的 LMG3100R017 100V, 97A GaN FET](#)
2. 德州仪器 (TI), [多相降压转换器的优势, 模拟设计期刊](#)
3. 德州仪器 (TI), [多相降压从设计到完成的应用报告](#)

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

TI E2E™, Code Composer Studio™, and Fusion Digital Power™ are trademarks of Texas Instruments.
PMBus® is a registered trademark of System Management Interface Forum, Inc.
TDK® is a registered trademark of TDK Kabushiki Kaisha.
所有商标均为其各自所有者的财产。

5 作者简介

Madhur Wagle 是专注于服务器、企业和电信市场领域的 GaN 功率级应用程序工程师。他负责使用 GaN 功率级开发高功率密度的参考设计。Madhur 拥有浦那工程学院 (COEP) 的电气工程学士学位 (技术学士)。

Srijan Ashok 是负责服务器、企业和电信市场领域 GaN 功率级产品的产品营销经理。

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 © 2025，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月