

Technical Article

GaN 开关集成如何在 PFC 中实现低 THD 和高效率



Brent McDonald

为了在轻负载下改善功率因数校正 (PFC) 并达到峰值效率, 同时缩减无源器件, 需要用到符合成本效益的解决方案, 而这一需求在使用常规连续导通模式 (CCM) 控制的情况下变得越来越困难。工程师们正在对复杂多模解决方案进行大量研究, 以求解决这些问题 [1]、[2], 这些方法吸引人之处在于, 它们使您能够缩减电感器的尺寸, 同时在较轻的负载下利用软开关提高效率。

但在本期电源设计小贴士中, 我将介绍一种实现高效率 and 低总谐波失真 (THD) 的新方法, 此方法不需要使用复杂的多模式控制算法, 可在所有工作条件下实现零开关损耗。此方法采用高性能氮化镓 (GaN) 开关, 它具有一个集成标志, 用于指示开关是否通过零电压开关 (ZVS) 导通。这种方法可在所有工作条件下实现高效率 ZVS, 同时强制 THD 处于非常低的水平。

拓扑

该系统所使用的拓扑为积分三角电流模式 (iTCM) 图腾柱 PFC [3]。对于高功率和高效率系统来说, 图腾柱 PFC 在导通损耗方面具有明显的优势。此拓扑的 TCM 版本会确保电感器电流在开关导通之前始终为足够的负值, 以此强制进行 ZVS [4]。图 1 展示了 iTCM 版本的图腾柱 PFC。

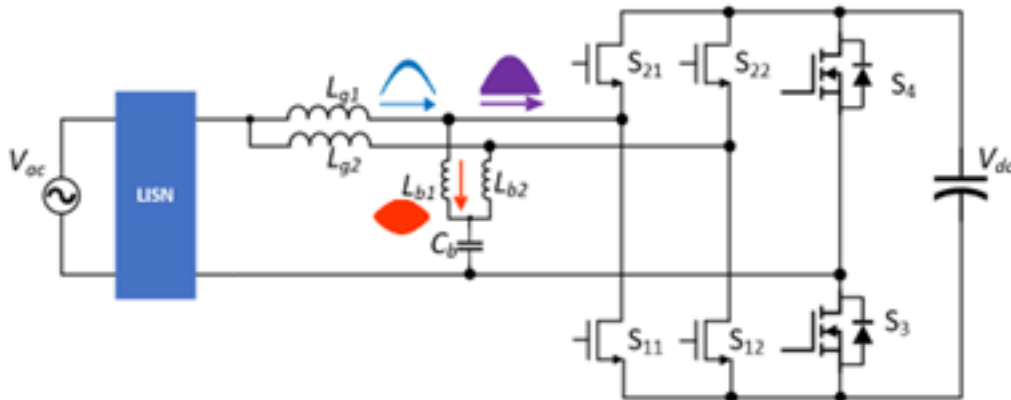


图 1. iTCM 拓扑, 其中显示了交流线路频率电流包络。

TCM 转换器和 iTCM 转换器之间的区别在于存在 L_{b1} 、 L_{b2} 和 C_b 。在正常工作期间, C_b 上的电压等于输入电压 V_{ac} 。以 180 度异相运行的两相会利用纹波电流消除, 并降低 C_b 中的均方根电流应力。 L_{b1} 和 L_{b2} 的大小设定为仅处理 TCM 运行所必需的高频交流纹波电流。这可以消除 TCM 中使用的电感器所需的直流偏置 (如 [4] 中所定义)。在存在 ZVS 所必需的高磁通摆幅的情况下, L_{b1} 和 L_{b2} 的铁氧体磁芯有助于确保低损耗。 L_{g1} 和 L_{g2} 的值大于 L_{b1} 和 L_{b2} (高达 10 倍), 可防止大部分高频电流流入输入源, 进而降低电磁干扰 (EMI)。此外, 由于 L_{g1} 和 L_{g2} 中的纹波电流较低, 因此可以使用成本更低的磁芯材料。图 1 还展示了多个关键分支的纹波电流包络。

控制

控制由德州仪器 (TI) TMS320F280049C 微控制器和 LMG3526R030 GaN 场效应晶体管 (FET) 来实现。这些 FET 具有集成式零电压检测 (ZVD) 信号, 每次开关通过 ZVS 导通时, 此信号都会置为有效。微控制器使用 ZVD 信息来调整开关时序参数, 从而以刚好足够实现 ZVS 的电流来导通开关。为简单起见, 图 2 展示了一个单相 iTCM PFC 转换器。表 1 定义了此图中使用的关键变量。微控制器会使用一种算法来为系统求解精确的微分方程组。这

些方程使用的条件会在两个开关上强制执行 ZVS，并强制电流等于电流命令。只要系统以适合两个开关的正确 ZVS 量运行，这些方程就是准确的。当正确运行时，算法会得出 0% THD 的时序参数和最优 ZVS 量。为了实现 ZVS 条件，每个开关 (S_1 和 S_2) 会逐周期向微控制器报告各自的 ZVS 导通状态。在图 2 中， $V_{hs,zvd}$ 和 $V_{ls,zvd}$ 表示 ZVD 报告。

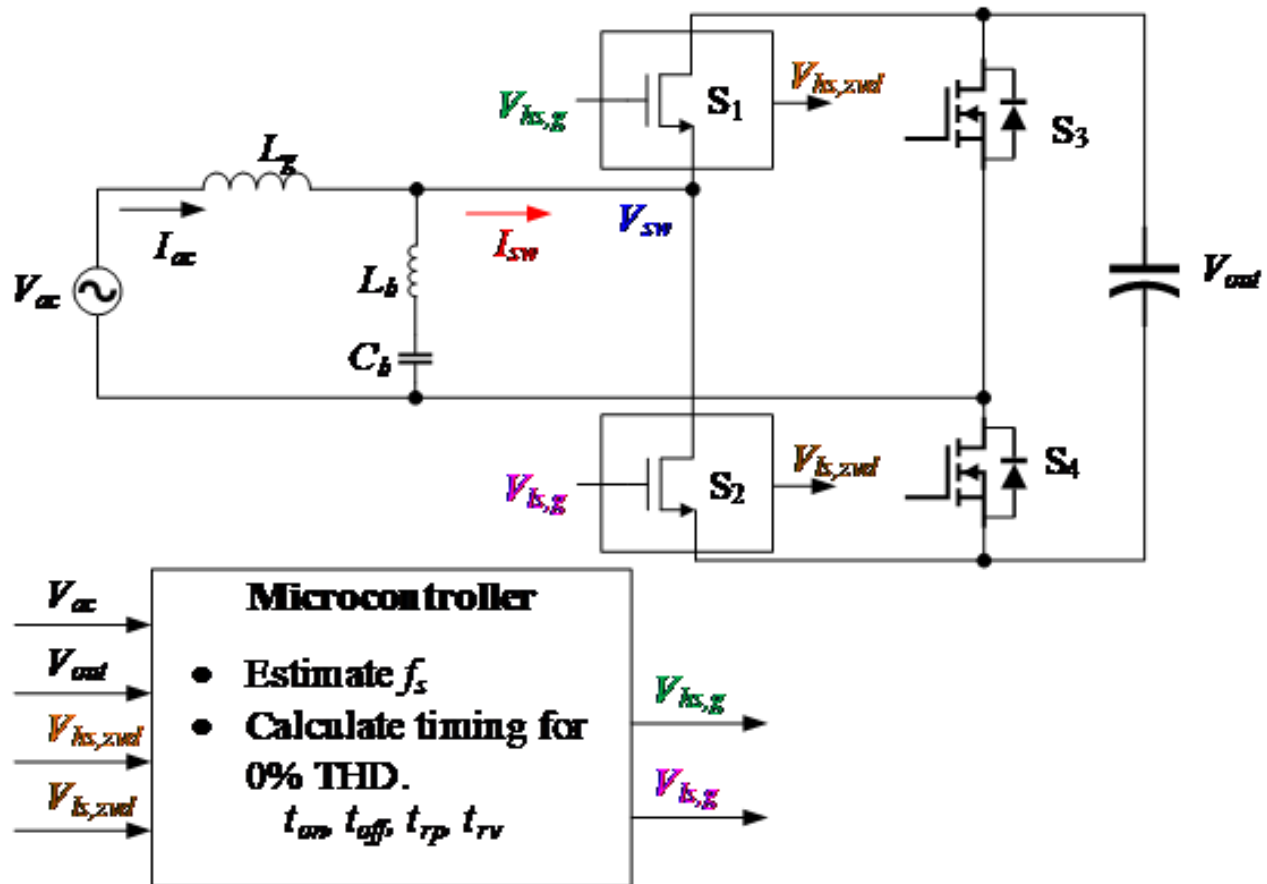


图 2. 具有控制信号的单相 iTCM 原理图。

表 1. 开关时序参数和定义。

Timing parameter	Definition
f_s	Switching frequency
t_{on}	This is the control switch on time; during the positive half cycle, the control switch is S_2 ; during the negative half cycle, the control switch is S_1
t_{off}	This is the off time of the control switch
t_{rp}	This is the dead time between the turnoff of the control switch and the turnon of the synchronous rectifier
t_{rv}	This is the dead time between the turnoff of the synchronous rectifier and the turnon of the control switch

图 3 说明了 ZVD 时序调整过程。在每个开关周期中，微控制器会根据 ZVD 信号的累积历史记录计算开关时序参数 (t_{on} 、 t_{off} 、 t_{rp} 和 t_{rv})。图 3b 显示系统正以理想频率运行。理想情况下，我是说当 THD 为 0%，高侧和低侧 FET 会达到完美的 ZVS 量。图 3a 显示了当工作频率比理想频率低 50kHz 时会发生什么。请注意，高侧 FET 会失去 ZVS (如高侧 ZVD 信号损耗所示)，而低侧 FET 的负电流则大于实现 ZVS 所必需的值。结果会导致效率损失和功率因数失真。图 3c 会在工作频率比理想值高 50kHz 时会出现。在这种情况下，高侧 FET 具有 ZVS，但低侧 FET 失去 ZVS。同样，也会存在明显的效率损失和失真。

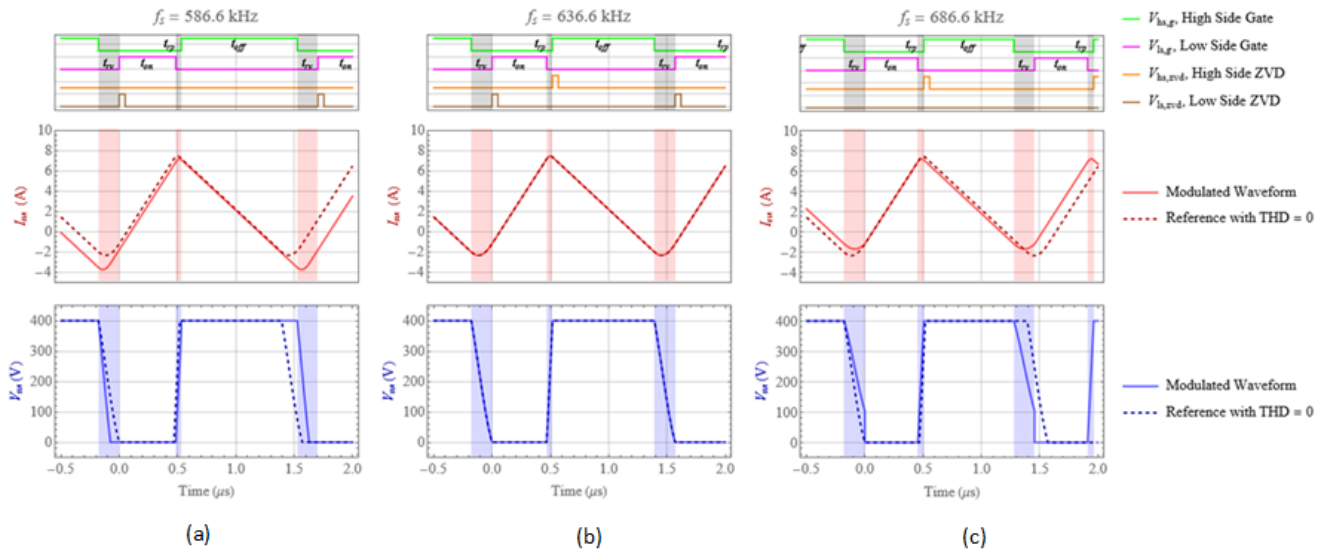


图 3. 低 f_s (a)、理想 f_s (b) 和高 f_s (c) 下的 ZVD 行为。

根据是否存在 ZVD 信号，控制器可以增加或降低将系统推至最佳工作点的频率。这样一来，控制活动相当于一个尝试找到最佳工作频率的积分器。当系统在每个周期徘徊在勉强实现 ZVS 的临界状态时，就会达到最优状况。

原型性能

图 4 展示了一个使用我目前所述拓扑和算法构建的原型。

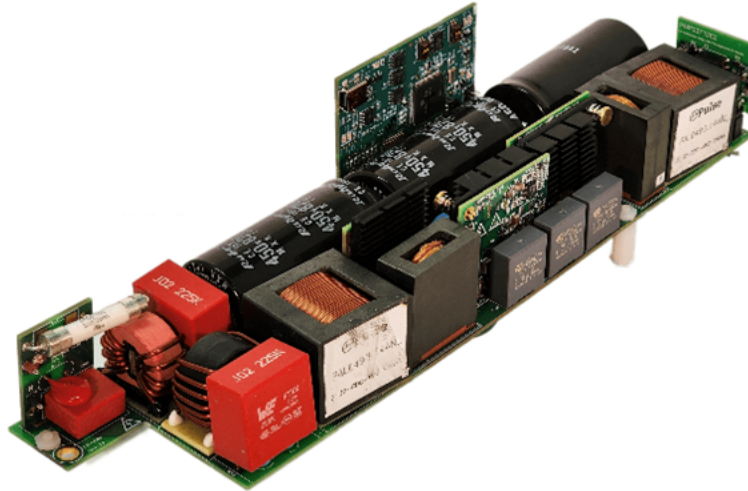


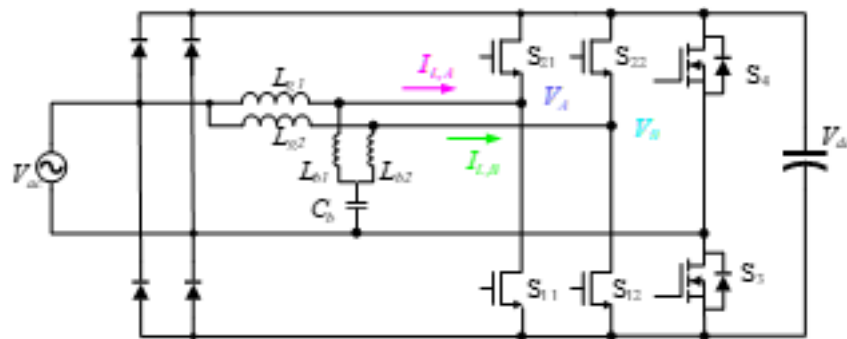
图 4. 功率密度为 120W/in^3 的 $400\text{V } 5\text{kW}$ 原型。

表 2 概述了该原型的规格和重要元件值。

表 2. 系统规格和重要元件

Parameters	Value
AC input	90 V-264 V
Line frequency	50-60 Hz
DC output	400 V
Maximum power	5 kW
Holdup time at full load	20 ms
L_g , low-frequency inductor	140 μ H
L_b , high-frequency inductor	14 μ H
C_b , high-frequency blocking capacitor	1.5 μ F
THD	Open Compute Project (OCP) v3
EMI	European Standard 55022 Class A
Operating frequency	Variable, 75 kHz-1.2 MHz
Microcontroller	TMS320F280049C
High-frequency GaN FETs (S_{11} , S_{12} , S_{22} , S_{21})	LMG3526R030
Low-frequency silicon FETs (S_3 , S_4)	IPT60R022S7XTMA1
Internal dimensions	38 mm \times 65 mm \times 263 mm
Power density	120 W/in ³

图 5 显示了该原型的测量节点，图 6 展示了该原型在全功率 (5kW) 下运行时的系统波形。开关节点电流 $I_{L,A}$ 和 $I_{L,B}$ 是其各自分支的 L_g 和 L_b 中的电流之和。图中的放大部分显示了正半周期内的波形细节。电流波形为理想的三角形，具有刚好足够实现 ZVS 的负电流，如开关节点电压 V_A 和 V_B 所示。此外，电流波形的正弦包络表明 THD 较低。


图 5. 原型测量节点

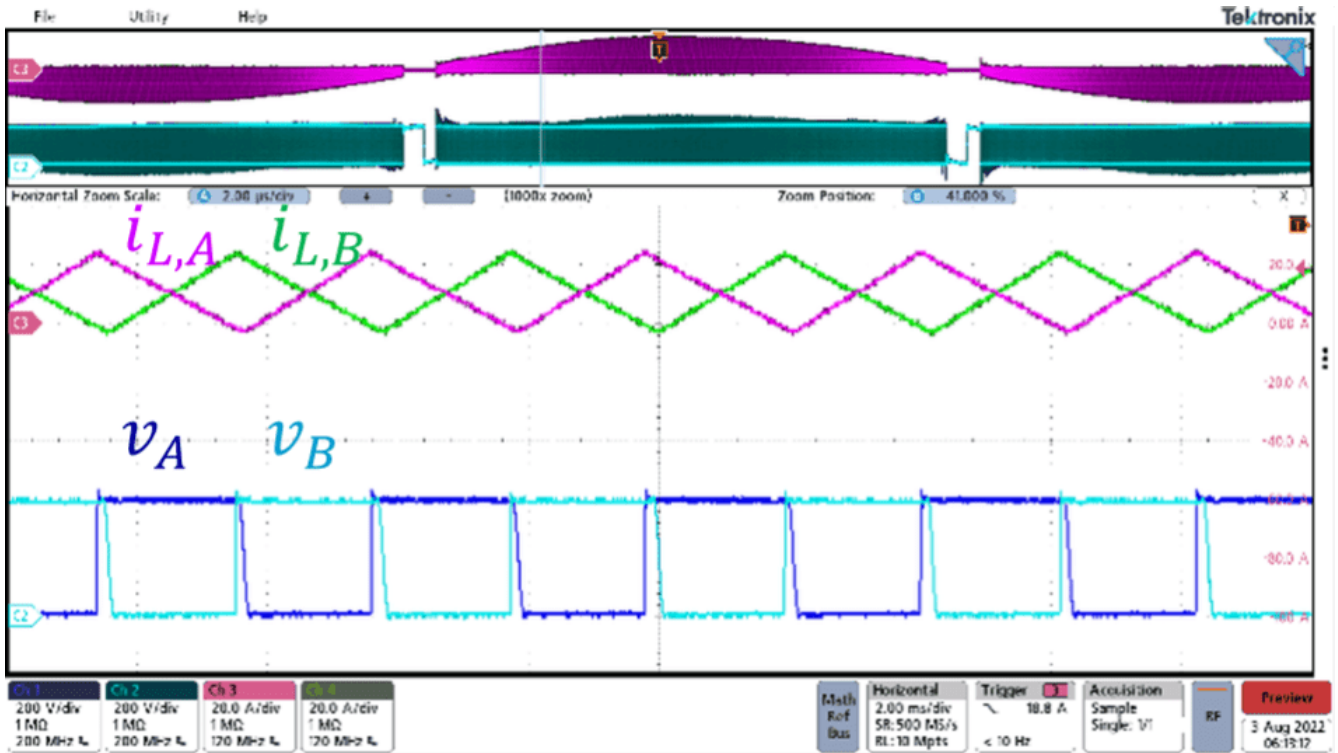


图 6. 在全功率下 ($V_{in} = V_{out}/2$, 负载 = 5kW, $V_{in} = 230V_{ac}$, $V_{out} = 400V$) 运行的原型的系统波形。

图 7 显示了在整个负载范围内测得的效率和 THD。效率峰值达到 99% 以上，几乎在整个负载范围内都高于 98.5%。THD 最大值为 10%，在大多数负载范围内都低于 5%。为了优化性能，单位相以大约 2kW 的功率减相或增相。

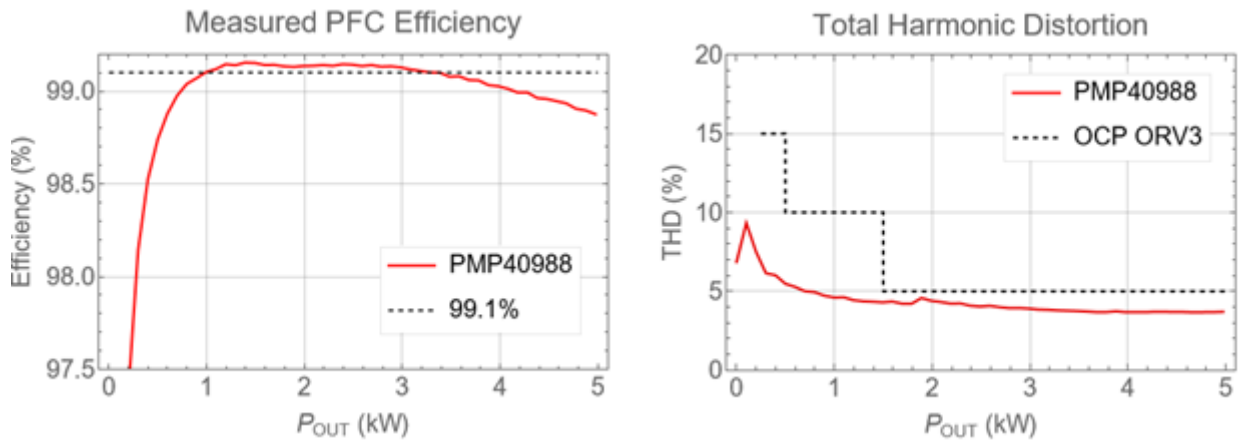


图 7. 整个负载范围内的原型效率和 THD。

实现图腾柱 PFC 的高效率 and 低 THD

您可以使用 ZVD 信号来控制图腾柱 PFC 转换器的工作频率，从而实现高效率和低 THD。有关此方法的更多信息以及系统仿真模型，请参阅[变频](#)、[ZVS](#)、[5kW](#)、[基于 GaN 的两相图腾柱 PFC 参考设计](#)。

相关内容

- 电源设计小贴士 114：潜在的固件错误可能会导致控制不稳定
- 电源设计小贴士 113：两个可实现 8W 或更低功率的简单隔离式电源选项
- 电源设计小贴士 112：用于故障测试的板载装置
- 电源设计小贴士 111：为什么电流检测在协作式移动机器人中必不可少
- PFC 图腾柱架构与 GaN 组合实现高功率和高效率
- 用于实现高效功率转换的 GaN 晶体管：降压转换器

参考文献

1. Fernandes、Ryan 和 Olivier Trescases。“A Multimode 1-MHz PFC Front End with Digital Peak Current Modulation.” 发表于 IEEE 电力电子学汇刊第 31 卷第 8 期 (2016 年 8 月)：第 5694-5708 页。doi：10.1109/TPEL.2015.2499194。
2. Lim、Shu Fan 和 Ashwin M. Khambadkone。“A Multimode Digital Control Scheme for Boost PFC with Higher Efficiency and Power Factor at Light Load.” 发表于 2012 年第二十七年度 IEEE 应用电力电子会议暨博览会 (APEC)，2012 年 2 月 5-9 日，第 291-298 页。doi：10.1109/APEC.2012.6165833。
3. Rothmund、Daniel、Dominik Bortis、Jonas Huber、Davide Biadene 和 Johann W. Kolar。“10kV SiC-Based Bidirectional Soft-Switching Single-Phase AC/DC Converter Concept for Medium-Voltage Solid-State Transformers.” 发表于 2017 年 IEEE 第 8 届分布式发电系统电力电子 (PEDG) 国际研讨会，2017 年 4 月 17-20 日，第 1-8 页。doi：10.1109/PEDG.2017.7972488。
4. Liu、Zhengyang。2017。“Characterization and Application of Wide-Band-Gap Devices for High Frequency Power Conversion。” 弗吉尼亚理工学院暨州立大学博士论文。<http://hdl.handle.net/10919/77959>。

之前在 [EDN.com](http://www.edn.com) 上发布。

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