

Application Note

不同功率因数校正 (PFC) 拓扑的栅极驱动器需求综述



William Moore

摘要

在设计开关电源时，高效率、高功率因数 (PF) 和低电力线谐波至关重要。本应用手册概述了功率因数校正 (PFC) 拓扑，包括每种拓扑的相对优势以及所需的栅极驱动器。

内容

1 简介.....	2
2 典型 PFC 拓扑.....	3
2.1 升压 PFC.....	3
2.2 交错式升压 PFC.....	4
2.3 无桥升压 PFC.....	5
2.4 无桥图腾柱 PFC.....	6
3 PFC 拓扑中的开关和栅极驱动器.....	7
4 总结.....	7
5 参考资料.....	8

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

要了解 PFC，我们必须首先定义功率因数。功率因数是以瓦特为单位的有功功率与视在功率之比。有功功率是负载消耗的功率，视在功率是在电源和负载之间循环的功率。理想功率因数为 1，这意味着不存在无功功率造成的损耗，所有视在功率都是有功功率。图 1-1 和图 1-2 显示了功率因数为 1 和 0.69 的系统的波形。请注意，功率因数降低会导致峰值电流增加。

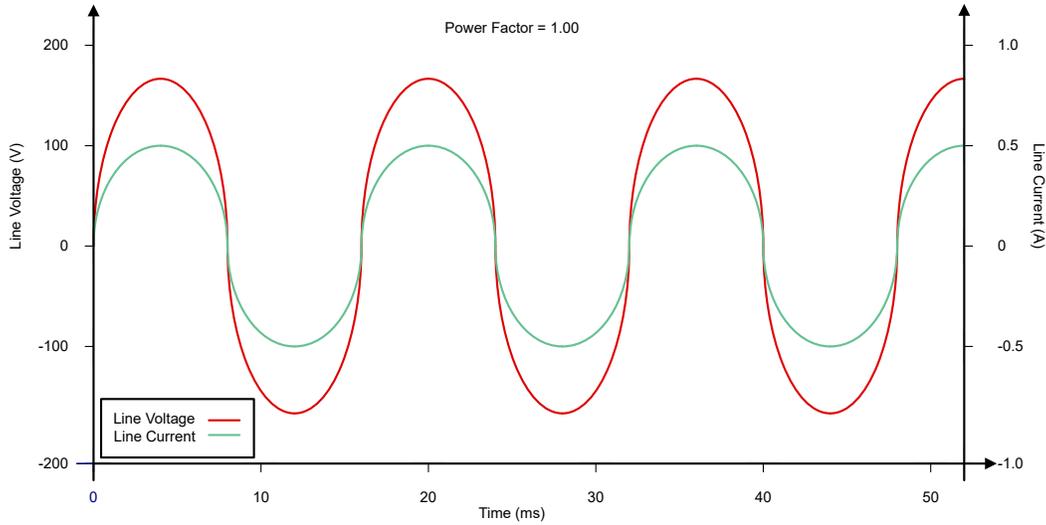


图 1-1. 功率因数 1.00

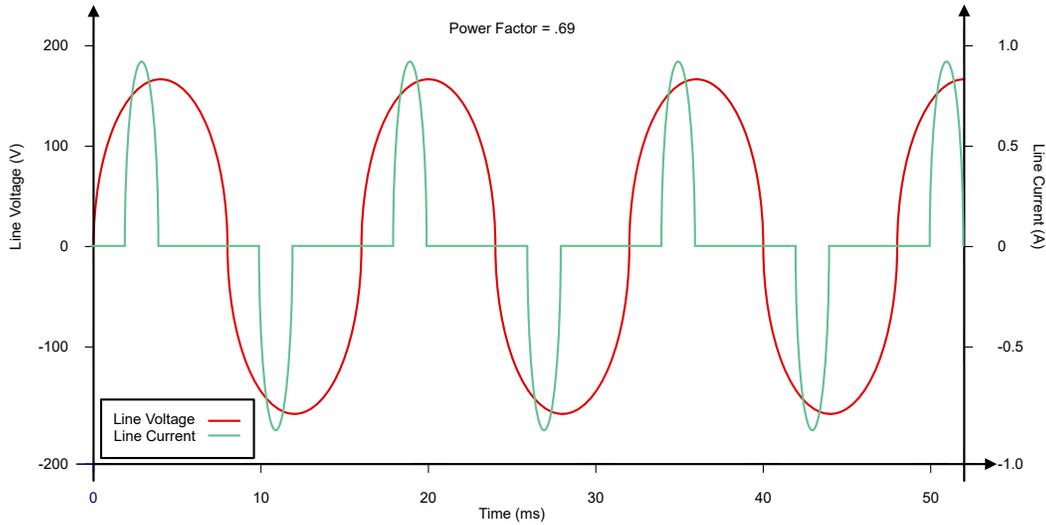


图 1-2. 功率因数 0.69

开关电源通常用于功率因数校正。开关电源通常利用二极管桥将交流 (AC) 信号整流为直流 (DC) 信号。该二极管桥对交流信号进行斩波，从而影响功率因数和总谐波失真 (THD)。滤波器有时用于平滑这个斩波信号并提高功率因数。但是，这些滤波器需要大型无源器件，并产生较大的功率损耗。图 1-3 展示了 PFC 的二极管桥和无源滤波方法示例。

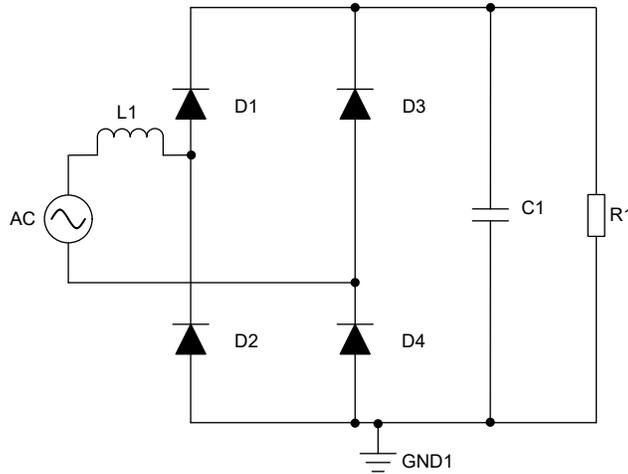


图 1-3. 带有二极管整流桥的简单无源 PFC 电路图

2 典型 PFC 拓扑

此处讨论的一些更常用的有源拓扑包括升压、交错式升压、无桥升压和无桥图腾柱。由于无源拓扑通常用于功率低于 100W 的系统，因此此处不予讨论。这是由于功率更高的系统需要大型无源器件，并且工作范围较窄。有源拓扑依赖 MOSFET 开关进行控制，通过栅极驱动器 IC 来驱动 MOSFET。

2.1 升压 PFC

开关转换器拓扑用于有源功率因数校正，以提高功率效率和密度。在过去的二十年中，最出色的拓扑之一是升压 PFC，它采用了单个低侧 MOSFET、一个电感器和一个二极管。为了实现高效的交流/直流转换，MOSFET 栅极驱动器必须满足特定的要求才能有效驱动 MOSFET。这些驱动器的一些要求包括峰值驱动电流和开关特性。由于 PFC 需要高功率开关，因此需要高驱动电流。上升和下降时间以及传播延迟等快速开关特性可实现快速开关转换，从而减少损耗并提高效率。需要快速开关转换的原因在于 MOSFET 中的开关损耗。由于可以处理动态电压和电流，MOSFET 在导通和关断期间效率很低。其他要求包括欠压锁定和噪声处理能力。升压 PFC 通常由单通道、低侧、非隔离式栅极驱动器驱动。德州仪器 (TI) 拥有可满足甚至超过这些要求的庞大驱动器产品系列，例如 UCC27517A。

通过使用低侧栅极驱动器和 MOSFET 进行开关，升压转换器 PFC 可强制输入电流与输入电压同相，从而校正功率因数。这是通过升压转换器控制器来实现的，该控制器向用于提供电压和电流增益以驱动 FET 的栅极驱动器发送 PWM 脉冲。这种方法通常用于 100W 至 4kW 的功率级别。图 2-1 显示了利用 UCC27517A 的典型升压转换器 PFC。

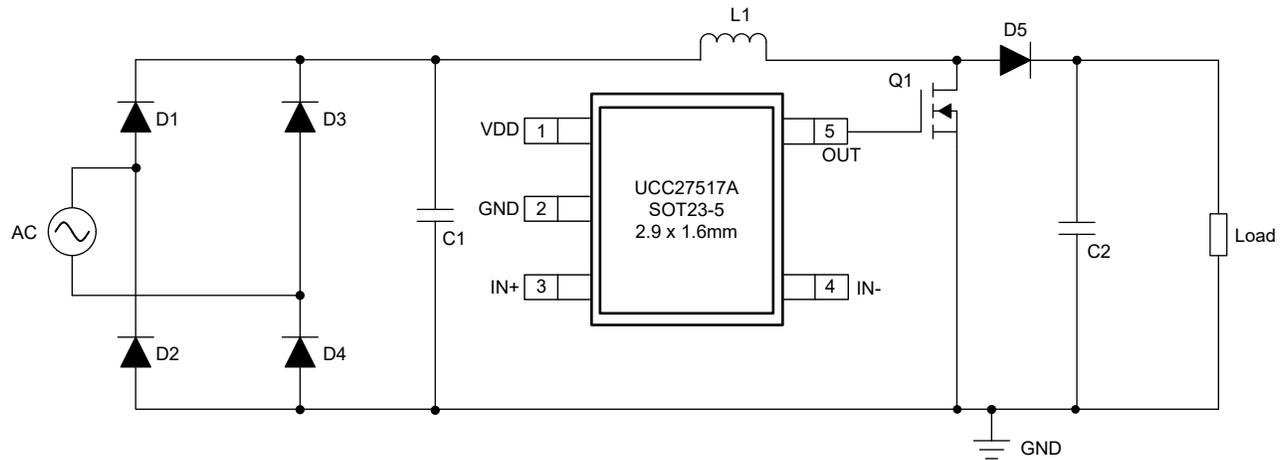


图 2-1. 使用 MOSFET、整流桥、电感器和具有输出电容器滤波器的二极管的升压 PFC

UCC27517A 是一款非隔离式单通道低侧栅极驱动器，可用于驱动升压拓扑中的这些大功率 MOSFET。此驱动器具有 4A 灌电流和 4A 拉电流的输出电流能力，在 VDD 额定值下，建议的最大工作电压为 18V。UCC27517A 的输出传播延迟为 13ns，上升时间为 9ns，下降时间为 7ns，这也有助于更大限度地提高这些系统所需的效率。该器件具有欠压锁定 (UVLO) 功能，可在上电和关断瞬态期间保持无干扰运行，从而提高系统稳健性。

2.2 交错式升压 PFC

与传统的升压 PFC 相比，交错式升压 PFC 是一种更高效、更复杂的选择。交错式升压 PFC 可提高系统效率，但会增加元件数量。交错式升压系统的栅极驱动器要求与升压系统非常相似，只是第二个 MOSFET 需要一个额外的通道。为了驱动此拓扑所需的两个 MOSFET，通常使用双通道低侧栅极驱动器，例如 UCC27624。图 2-2 显示了一个交错式升压电路示例。

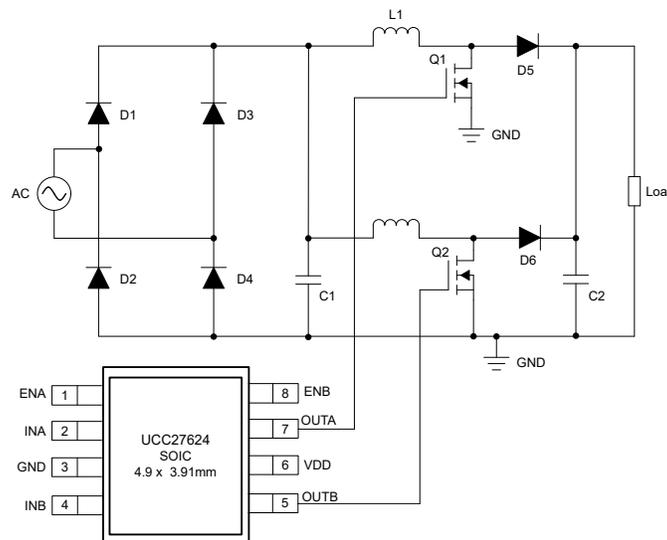


图 2-2. 具有并行升压转换器和二极管整流桥的交错式升压转换器 PFC

总体而言，通过将两个升压电路交错成一个交错式升压 PFC，可以降低电磁干扰 (EMI) 和升压电感器的尺寸。不过，这需要在减小电感器尺寸或减小开关频率之间进行权衡。降低开关频率有助于减小 EMI 滤波器的尺寸，但需要更大的电感器，从而增加磁体积。此外，由于交错，升压电容器中的均方根 (RMS) 电流大幅降低，但这样会增加成本和复杂性。

UCC27624 通常用于交错式升压 PFC 电路设计。UCC27624 是一款双通道器件，用于驱动两个 MOSFET，并且是非隔离式低侧栅极驱动器。得益于 5A 灌电流和 5A 拉电流的高输出电流能力以及 30V 的额定电压，UCC27624 可以驱动交错式升压拓扑中使用的高功率 MOSFET。该驱动器在输出通道上具有 17ns 的传播延迟和 1ns 的延迟

匹配以及 6ns 的上升时间和 10ns 的下降时间，有助于实现这些系统所需的高效率。UCC27624 在输入端具有 UVLO 和 -10V 的容差，从而提高系统稳健性。

2.3 无桥升压 PFC

除了输入整流桥 (图 2-2 中的二极管 D1、D2、D3 和 D4) 外，无桥升压 PFC 与交错式升压 PFC 相似。与交错式升压拓扑相比，移除这些二极管可消除每个开关周期中的两个损耗要素。未导通的 FET 的体二极管会产生损耗，因为体二极管在半个周期的关断状态下充当慢速二极管。在该拓扑中，由于输出电压接地相对于输入交流信号保持悬空，因此会产生 EMI。这样一来，所有寄生电容都会导致难以滤除的共模噪声。提高开关频率可降低寄生电容导致的损耗。

因此，可减小所需的无源器件 (电感器和电容器) 尺寸，从而更大限度地减小系统尺寸并降低成本和 EMI。图 2-3 显示了此拓扑中的开关可由双通道低侧驱动器 (例如 UCC27624) 驱动。

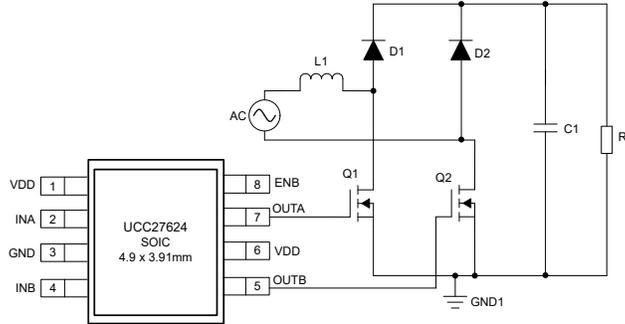


图 2-3. 采用 UCC27624 低侧双通道栅极驱动器的无桥升压 PFC 电路

2.4 无桥图腾柱 PFC

最新开发的一种 PFC 拓扑是图腾柱 PFC。有源无桥拓扑使用开关替代前面所示的无源拓扑中的二极管整流桥。这些附加的电源开关通常为硅 (Si)、碳化硅 (SiC) 或氮化镓 (GaN)。这里重点介绍用于此拓扑的 Si 和 SiC FET。碳化硅 (SiC) FET 只有两个串联的结 (而升压拓扑中有三个)。利用 SiC FET 可实现更快的开关和更低的反向恢复电荷, 从而降低开关损耗。图 2-4 和图 2-5 显示了图腾柱 PFC 拓扑的两种配置。

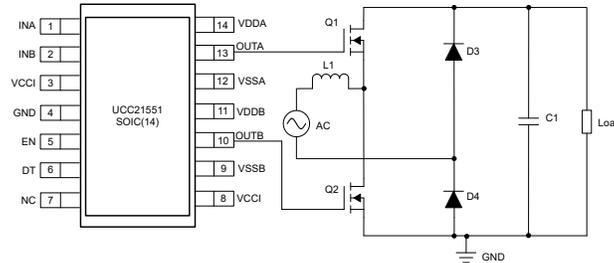


图 2-4. 采用二极管进行线路整流的图腾柱 PFC 电路

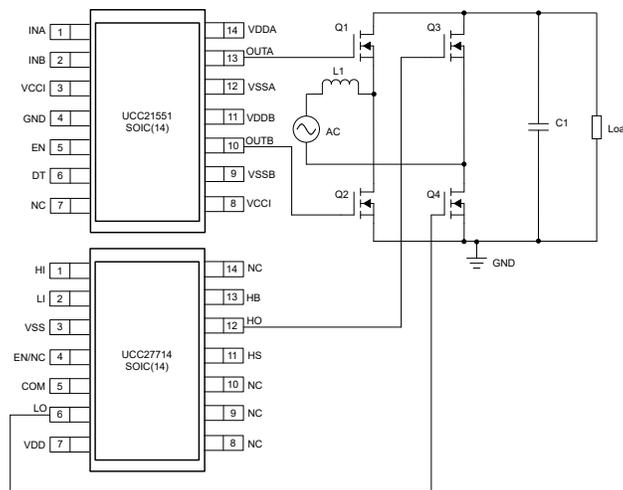


图 2-5. 采用 MOSFET 进行线路整流的图腾柱 PFC 电路

图腾柱拓扑有两个开关分支, 右侧分支带有两个硅 (Si) MOSFET (图 2-5 中的 Q3 和 Q4) 或两个二极管 (图 2-4 中的 D3 和 D4), 左分支带有两个 SiC FET (图 2-4 中的 Q1 和图 2-5 中的 Q2)。右侧分支称为慢桥臂, 能够以电网频率 (通常为 50Hz 或 60Hz) 为交流信号提供线路整流。慢桥臂采用半桥配置, 因此需要一个 600V 半桥驱动器。之所以出现这种电压额定值, 是因为这些电路通常输出大约 400V 直流。左侧分支即快速桥臂, 以高频 (100kHz 至 250kHz) 进行开关, 用于升高电压并调整输入电流。在这种高开关频率下, 产生噪声的瞬态会导致操作困难, 从而降低效率。这些瞬变是由两个单独接地基准之间的差分电压引起的。栅极驱动器对此噪声的耐受性称为共模瞬态抗扰度 (CMTI)。隔离式栅极驱动器可提供高 CMTI, 因此需要隔离式双通道栅极驱动器来输出 SiC 功率 FET 所需的高电流并保持高效率。

对于慢速桥臂, 需要一个 600V 半桥栅极驱动器, 该驱动器提供高驱动电流和快速开关特性, 以驱动所使用的大功率开关。UCC27714 是一款 600V 非隔离式驱动器, 具有 4A 峰值灌电流和 4A 峰值拉电流的高输出电流能力。90ns 的低传播延迟、20ns 的延迟匹配以及 HO 和 LO 15ns 的上升和下降时间有助于实现这些系统所需的高效率。

快速桥臂上通常使用的 SiC FET 需要低延迟时间、高 CMTI 和高电流, 以更大限度地提高效率。UCC21551 是满足快速桥臂需求的驱动器示例。UCC21551 的 CMTI 额定值为 125V/ns, 驱动电流为 4A 拉电流和 6A 灌电流。UCC21551 还具有所需的快速开关特性, 例如 33ns 传播延迟和 5ns 最大延迟匹配。UCC21551 的输入侧隔离额定值为 5kV_{RMS} 峰值增强型隔离栅以及 12V 或 17V UVLO 保护。

3 PFC 拓扑中的开关和栅极驱动器

在 PFC 电路中，开关元件（二极管和 MOSFET）约占所有损耗的 20%，因此，仔细选择电源开关以及控制电源开关以优化性能的驱动器非常重要。为了更大程度地降低损耗，具有低 $R_{DS(ON)}$ 导通损耗和低栅极电荷 (Q_G) 的 MOSFET 很重要。为了比较 FET，创建了一个额定值，该额定值是一个标量值，其损耗影响参数是 $R_{DS(ON)}$ 乘以 Q_G 。该标量结果是一个品质因数，它创建了一个评级表来比较 FET，其中最低的额定值会产生最高效的电源开关。对于大多数此类拓扑，Si MOSFET 是理想选择并可根据需要运行，但要实现高效应用所需的高开关频率，则需要 SiC 或 GaN FET。

表 3-1 显示了一些已用于 PFC 电路参考设计的电源开关示例。

表 3-1. PFC 参考设计中使用的 MOSFET

拓扑	升压	升压	无桥升压	交错式升压	交错式升压	图腾柱	图腾柱	
功率 (W)	1000	1000	300	1500	700	6600	3000	
类型	Si	SiC	Si	Si	Si	SiC	SiC	Si
V_{DS} (V)	650	900	550	600	650	1000	750	600
$V_{GS(th)}$ (V)	4	2.1	3	3	3	2.1	4.8	3.5
R_g (Ω)	3.5	3.5	2.2	0.85	1.3	3.5	4.5	0.45
$r_{DS(on)}$ (Ω)	0.171	0.065	0.22	0.063	0.22	0.065	0.018	0.015
C_{oss} (pF)	76	66	63	215	54	70	217	200
Q_g (nC)	37	30	27	170	26	37	37.8	340
等级	6.327	1.95	5.94	10.71	5.72	2.405	0.6504	3.6
栅极驱动器	UCC27614	UCC21520	UCC27624	UCC27517A (2)	UCC27524	UCC21520	UCC21551	UCC27714

表 3-1 还突出显示了用于其中各种开关的一些栅极驱动器。对于 SiC 开关，使用 UCC21551 和 UCC21520 等隔离式栅极驱动器。这是由于 SiC FET 需要高电压、功率和开关频率。对于 Si 电源开关，可以根据拓扑使用单通道或双通道栅极驱动器。如升压电路所示，需要使用 UCC27517A 或 UCC27614 等单通道器件驱动这些功率晶体管。对于双通道栅极驱动器场景，经常使用 UCC27524 和 UCC27624。这些场景包括无桥升压和交错式升压 PFC。对于使用 GaN FET 的应用，UCC27517A、UCC27624 和 UCC21222 等驱动器都能够驱动 GaN FET。

4 总结

功率因数校正电路需要战略性的设计和产品选择来实现高效率。每个 PFC 拓扑中的许多元件都会影响这些电路的效率。具体而言，选择适当的栅极驱动器是保持高效率的关键，因为开关转换期间产生的损耗由驱动器处理。为此，需要各种栅极驱动器，其中包括隔离式和非隔离式驱动器、低侧和半桥驱动器以及单通道和双通道驱动器。德州仪器 (TI) 提供各种栅极驱动器，包括隔离式、低侧和半桥栅极驱动器，可满足所有这些电路的需求。

5 参考资料

- 德州仪器 (TI), [电动汽车充电站的电源拓扑注意事项](#) 应用手册。
- 德州仪器 (TI), [功率因数校正 \(PFC\) 电路基础知识](#) 电源设计研讨会。
- 德州仪器 (TI), [用于高功率转换器的交错 PFC 前置稳压器](#) 文档。
- 德州仪器 (TI), [对无桥升压 PFC 电路拓扑的比较分析](#) 模拟设计期刊。
- 德州仪器 (TI), [效率为 98.6% 且适用于混合动力汽车/电动汽车车载充电器的 6.6kW 图腾柱 PFC 参考设计](#) 设计。
- 德州仪器 (TI), [功率因数校正 \(PFC\) 拓扑比较](#) 视频。
- 德州仪器 (TI), [具有 5V UVLO 和负输入电压处理能力的 4A/4A 单通道栅极驱动器](#) 产品页面。
- 德州仪器 (TI), [具有 4V UVLO、30V VDD 和低传播延迟的 5A/5A 双通道栅极驱动器](#) 产品页面。
- 德州仪器 (TI), [4A、600V 半桥栅极驱动器](#) 产品页面。
- 德州仪器 (TI), [适用于 IGBT 和 SiC 且具有 EN 和 DT 引脚的 4A/6A 5kVRMS 双通道隔离式栅极驱动器](#) 产品页面。

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