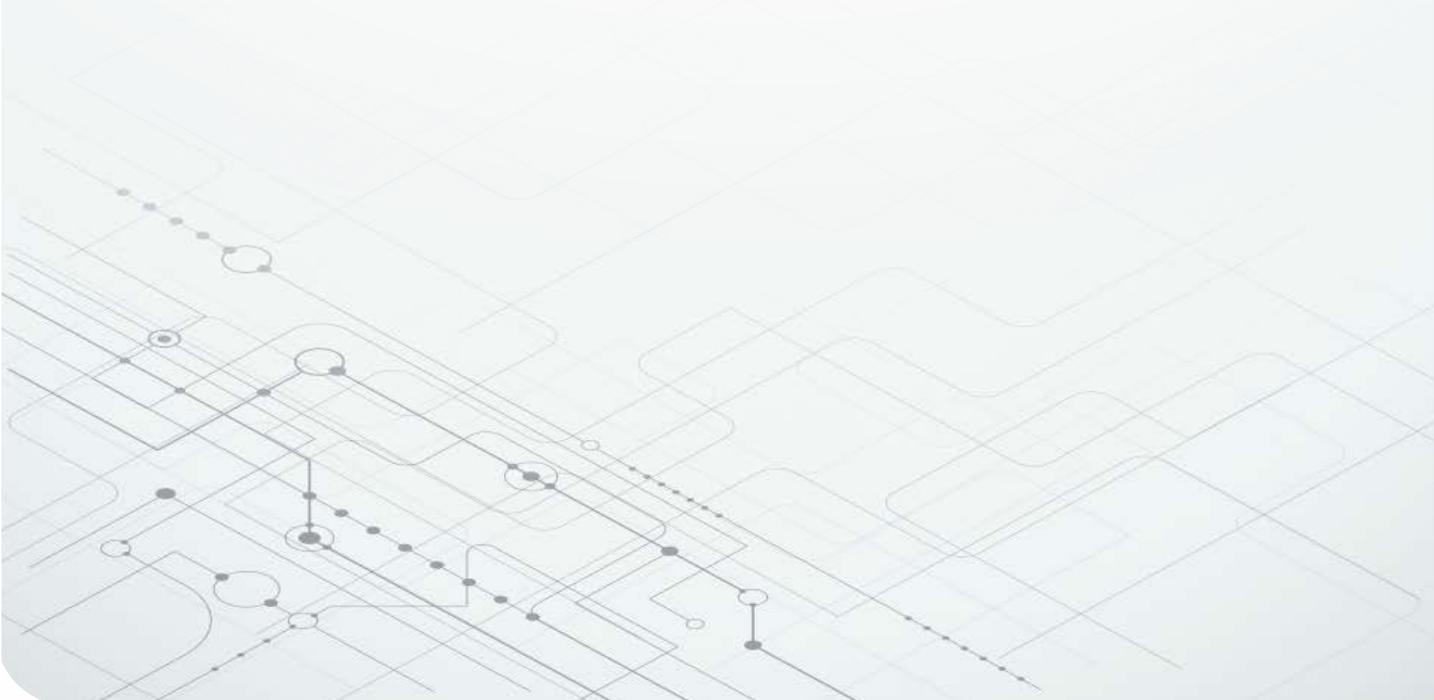


结合使用 TI GaN FET 和 C2000™ 实时 MCU 实现功率密 集且高效的数字电源系统



Cody J. Watkins

C2000 实时 MCU 应用工程师
德州仪器 (TI)



电力电子行业的设计人员需要采用新的技术和方法来提高系统性能。结合使用 C2000 实时 MCU 和 GaN FET 可应对效率和功率密度方面的挑战。

内容概览

本白皮书探讨了具有集成驱动器的 TI 氮化镓 (GaN) 场效应晶体管 (FET) 和 TI C2000™ 实时微控制器 (MCU) 的各项特性如何配合解决电力电子设计人员在开发现代功率转换系统时面临的问题。

1 GaN 将彻底改变电力电子市场

您可能认为 GaN 是一项新兴技术，但 TI 的 GaN 技术可以解决行业挑战，并已准备好进行大规模部署。

2 为 GaN 选择合适的数字控制器

GaN 具有巨大的潜在优势，但只有选择了合适的数字控制器才能完全发挥出这些优势。

3 通过高开关频率降低系统成本

GaN 具有高开关频率，因此可以减少功率磁性元件、风扇和散热器，同时 C2000 实时 MCU 可以解决由此带来的固有控制挑战。

4 将 C2000 实时 MCU 与 GaN 器件连接

C2000 实时 MCU 无需外部胶合逻辑即可控制 TI GaN FET 并获得 GaN FET 的所有反馈。

服务器电源和通信电源是市场上受益于 GaN 技术的两个用例。数字通信基础设施市场持续增长。据估计，机架服务器市场将在未来五年内翻番，而超大规模数据中心将以近 20% 的年复合增长率增长。

在快速发展的趋势下，人们对效率、功率密度和瞬态响应的要求也不断提高。GaN FET 显著降低了开关损耗并提高功率密度，从而可帮助解决随着市场增长而尺寸不断扩大的技术挑战。

本白皮书探讨了具有集成驱动器的 TI GaN FET 和 TI C2000 实时 MCU 的各项特性如何以独特的方式解决电力电子设计人员在开发现代功率转换系统时面临的问题。

GaN 将彻底改变电力电子市场

虽然 GaN 技术已凸显出许多潜在的优势，但您仍不免对它的实用性有一些担忧。尽管人们普遍认为 GaN FET 是一项新技术，但实际上这项技术已经存在 20 多年了。成本、保护特性和可靠性这三个因素使人们并不看好 GaN，但 TI 的 GaN 器件系列解决了所有这些问题。

成本

TI GaN FET 采用的硅基 GaN 工艺利用了 TI 现有的工艺技术节点。我们不仅可以避免使用碳化硅或蓝宝石等昂贵的基板，还可以在使用硅技术中发挥多年的专业优势。TI 可完全在内部进行开发、测试和封装，因此可实现 GaN 的成本优势，而且在未来还会进一步降低成本。

保护特性

TI 的 GaN 技术提供了丰富的诊断和自我保护特性。GaN FET 可以自动检测并处理过流、短路、欠压和过热等故障，同时将这些故障报告给 MCU 来修改控制算法，从而防止这些故障再次发生。

可靠性

TI 已对其 GaN 器件进行了超过 4000 万小时的可靠性测试, 并且 10 年使用寿命的时基故障率小于 1。除进行固有的可靠性测试之外, 我们还在超严苛的开关环境下对 GaN 器件进行了应用内应力测试, 并转换了超过 5GWHrs 的能量。

TI GaN 器件通过将 FET 驱动器和 GaN FET 集成到同一个封装中, 解决了成本、保护特性和可靠性方面的问题。TI GaN FET 具有可快速开关的 2.2MHz 集成栅极驱动器, 与硅器件相比, 可实现两倍的功率密度和 99% 的效率。该技术在交流/直流应用中可提供超低的损耗和超高的效率。此外, 集成的高速保护特性和数字温度报告功能可对电源单元 (PSU) 进行主动电源管理和热监测。凭借所有这些独特的优势, TI 技术使 GaN 的应用成为现实。

为 GaN 选择合适的数字控制器

GaN 能够实现更高的开关频率, 从而提高电源的效率和功率密度。要实现这些, 通常需要更复杂的电源拓扑和控制算法, 例如零电压开关、零电流开关或采用混合磁滞控制的电感器-电感器-电容器 (LLC) 谐振 DC/DC 变换。

数字控制器只适合用于复杂的拓扑, 因此, 您需要一种既能处理时间要求严格的复杂计算, 又提供精确控制还可以通过软件和外设兼容性扩展的数字控制器。C2000 实时 MCU 恰好能满足这些要求。图 1 展示了 C2000 实时 MCU 和 GaN FET 驱动器。

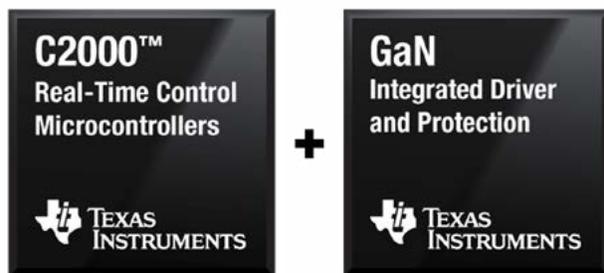


图 1. C2000 MCU 和 TI GaN 器件协同工作可实现高效、可靠和功率密集的数字电源系统。

C2000 实时 MCU 指令效率

C2000 实时 MCU 具有高级指令集, 可显著减少复杂数学计算所需的周期数。计算时间的减少意味着可以在不提高器件工作频率的情况下提高控制环路频率。用户可在不间断的情况下自动实现效率提升。代码编译器、中央处理器 (CPU) 流水线和指令集均用于更大程度提高每个指令周期的计算能力。

用户对浮点单元 (FPU) 和三角函数加速器 (TMU) 更为了解。将这些增强的指令紧密集成到 C28x 内核后, 可以利用流水线来使指令像常规 CPU 指令一样并行执行, 从而进一步提高每个时钟周期的效率。

例如, 与标准定点计算相比, FPU 的速度提高了 2.5 倍以上。同时, FPU 还使 C28x 内核能够利用基于模型、使用浮点数学运算的仿真工具和代码生成工具。这意味着可以花更少的时间来开发代码和进行系统验证, 并更快将产品推向市场。

TMU 作为 FPU 的补充, 与单独的 FPU 相比, 可将性能提高近 20 倍。在采用 C2000 实时 MCU 的双向高密度 GaN CCM 图腾柱 PFC 参考设计中, 当尝试计算脉宽调制器 (PWM) 对时间和死区时间的控制时, 可以将这些计算的时间从大约 10 μ s 减小到小于 0.5 μ s, 带来的好处显而易见。因此, 可以逐周期执行自适应死区计算, 从而对 GaN FET 进行更精确、更有效的控制。

满足瞬态响应要求

为什么小周期的逐周期效率很重要? 一个原因就是这些效率可确保满足更快的瞬态响应要求。

瞬态响应要求描述的是电源对负载变化做出反应的速度。例如, 由于服务器中使用的现代处理器需要更高的功率, 因此更不容易满足瞬态响应要求。以前通常是 1A/ μ s; 但如今的标准要求 2.5A/ μ s 甚至更高。提高控制环路的频率可以通过提高灵敏度和瞬态响应速度产生直接的效果。C2000 实时 MCU 的独特处理能力可以帮助满足这些瞬态响应要求。

为了满足 5A/ μ s 或更高的极端瞬态响应要求, C2000 实时 MCU 会利用其集成的模拟功能完全通过硬件发出 PWM 信号, 无需使用外部元件。实现该控制的方法是, 使用集成的模拟比较器将反馈信号与通过内

部 12 位数模转换器 (DAC) 实现的固定设定点或斜坡发生器信号进行比较。这种技术可以增加完全基于硬件的控制环路的独特速度优势, 同时还可以保持数字控制器的灵活性。在执行过程中会持续监测 PWM 跳变点, 并通过微调软件控制环路内部的 DAC 输出来调整跳变点, 完全独立于 PWM 跳变。最终, C2000 实时 MCU 可以对不断变化的负载提供超快的响应时间, 同时保持满足效率标准的灵活性。

实现精确、安全的系统控制

GaN FET 的击穿和第三象限传导电势需要高精度控制。C2000 实时 MCU 中的高分辨率 PWM 可为 PWM 的周期、占空比、相位和死区提供 150ps 的分辨率。结合使用跳闸区域子模块与内置模拟比较器可以安全处理异常, 此时它们完全异步运行, 并能够在 25ns 内关断 PWM 输出, 而无需 CPU 干预。

多相系统简单易行

除了单相设计, C2000 实时 MCU 还可以解决多相设计的问题; 在多相设计中, 所有相位必须保持同步以防止系统故障, 因此须考虑修改 PWM 的频率、占空比或死区。按顺序对这些值进行更新在如今是很普遍的做法, 但需要对硬件以及所有可能的代码排列有全面的了解, 这一点在基于中断的嵌入式系统中很难做到。

C2000 实时 MCU 的全局加载机制可以解决 PWM 更新问题, 其做法是在一个指令周期内更新所有必需的

PWM 寄存器来, 完全无需 CPU 干预。这项创新功能可以控制高频交错式 LLC 拓扑, 同时消除通常由顺序更新引起的一些间歇性、不可重复的错误。使用全局加载机制不仅可以使系统更稳健和安全, 而且可以减少系统验证工作量。

C2000 实时 MCU 产品系列的可扩展性

低成本的 C2000 实时 MCU (例如 F280025C) 降低了 C2000 实时 MCU 产品系列 (如下页图 2 所示) 的成本, 同时既适用于小型服务器电源设计, 又能提供独特的处理和 控制功能。随着系统要求的变化, C2000 平台支持向上或向下扩展实时 MCU 功能 (模数转换器 (ADC) 输入、计算能力、PWM 通道、封装), 同时保持软件投入, 以便加快产品上市速度。

通过高开关频率降低系统成本

我们在前文已经讨论了 TI GaN 和 C2000 各自的优势, 接下来我们将了解系统层面的优势。以前, 由于 FET 的开关损耗, 切换转换器的最大速率被限制到几百千赫兹。为提高开关频率, 只好更大程度降低磁性元件的尺寸, 结果对功率密度和系统成本产生了负面影响。

如前文所述, TI GaN 器件中的集成驱动器可实现高达 2.2MHz 的开关频率, 且开关速度大于 150V/ns,

与分立式 GaN FET 相比, 速度提高到了两倍, 损耗降低了一半。这种集成特性与低电感封装技术相结合, 可提供干净的开关和超小的振铃。这些功能有助于

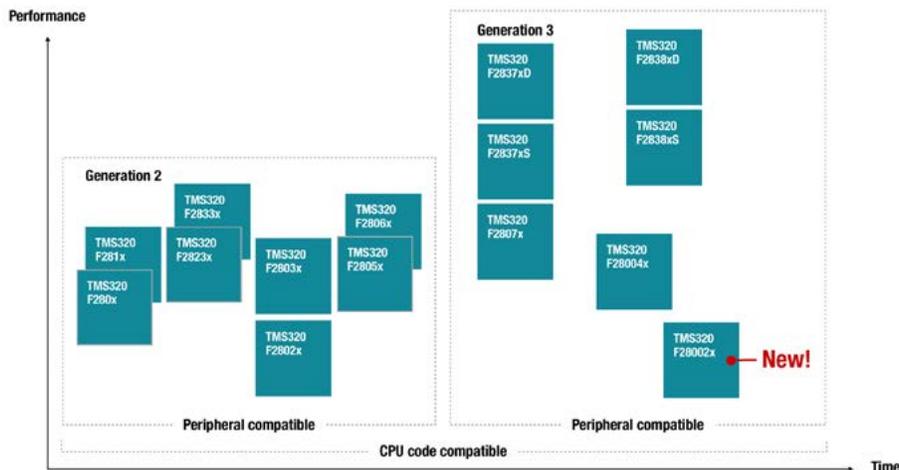


图 2. 支持 TI GaN 器件的 C2000 实时 MCU 产品系列。

减小电源系统所用磁性元件的尺寸,并通过消除对风扇或散热器的需求和提高功率密度,最终降低系统成本。

克服更高开关频率所固有的挑战

TI GaN 器件可以提高系统开关频率,将磁性元件尺寸减小到原尺寸的五分之一,实现比同类硅器件功率因数校正 (PFC) 应用高三倍的功率密度。这些器件不仅在 PFC 级体现出优势,而且在所有电力电子系统中都能一展所长。

那么有什么潜在的缺点呢?实际上,凡事有利也有弊,提高开关频率也面临着种种缺陷和设计挑战。例如,在图腾柱 PFC 中,减小电感器的尺寸可能会导致其他控制问题,例如增加死区引起的第三象限损耗。C2000 实时 MCU 的独特功能集通过以下特性解决了这一问题:

- C2000 实时 MCU 提供 150ps 的高分辨率死区,可实现更精细的边沿位置并减少不必要的第三象限损耗。如需详细了解 TI GaN 的第三象限操作,请参阅应用报告《[GaN 是否具有体二极管?-了解 GaN 的第三象限操作](#)》。
- 如前文所述, TMU 支持自适应死区控制方案,通过加快计算速度进一步减少损耗。

请参阅具有 98.75% 峰值效率和小于 2% THD 的 [3.3kW 双向交错式 CCM 图腾柱 PFC 参考设计](#),了解这些特性的作用。

减小图腾柱 PFC 中的输入电感器会导致过零点处的电流尖峰增加,从而对总谐波失真产生负面影响。

当输入波形在正向和反向之间切换时,电流尖峰会增加,从而在同步有源 FET 反向时引起浪涌电流。电感器两端的电压以及 FET 和二极管的输出电容不断累积,是促使浪涌电流产生的主要原因。C2000 实时 MCU 可通过复杂的影子加载方案解决这些问题。这一方案使 MCU 能够以超少的 CPU 开销实现软启动算法。

最后,集成模拟功能的速度和并行性对于提高数字微控制器中的控制环路频率至关重要。没有此功能,就不可能实现具有集成驱动器的 TI GaN 器件的全部优势。F28002x 系列具有多达 16 个独立的模拟通道,这些通道连接到 2 个独立的模数转换器,每个转换器均具有出色的性能,包括 2 个最低有效位 (LSB) 的积分非线性 (INL)、1 个 LSB 的差分非线性 (DNL)、11 位的有效位数 (ENOB),且速率高达 3.45 兆样本/秒 (MSPS)。由于可以灵活启动转换触发器,多个 ADC 规格的实现可同时多个反馈源进行采样。这些转换触发器与 PWM 单元紧密耦合,可通过调整获得最佳实时控制策略。例如,通过同时测量交流电网的线电压和中性点电压,可以使控制环路运行得更快,并提供更高的系统精度。

在 GaN 的驱动下达到更高效标准 and 功率密度要求后,又出现了新的挑战。C2000 实时微控制器经过独特设计,可以解决在减小磁性元件和提高系统频率时引入的固有控制问题。

将 C2000 实时 MCU 与 TI GaN 器件连接

C2000 实时 MCU 和 GaN 器件之间的连接器件包括一个数字隔离器,例如下面图 3 所示的 ISO7741-Q1

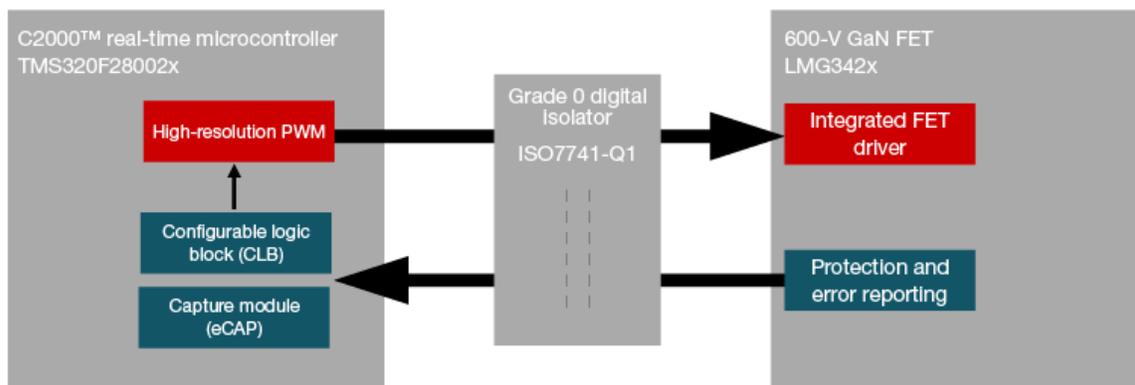


图 3.将 C2000 MCU 与 TI GaN 器件进行连接所需的唯一元件。

。此隔离器件有助于抑制瞬态噪声并保护 C2000 实时 MCU。微控制器、隔离器件和 GaN 器件都是必不可少的连接器件。

TI 数字隔离器具有高达 5.7kVrms 的高隔离额定值并支持高达 150Mbps 的速度，非常适合作为 C2000 实时 MCU 与 GaN FET 之间的隔离栅。隔离器提供了在器件之间建立精确控制与反馈路径所需的速度和低延迟

控制

GaN FET 的控制是通过使用高分辨率 PWM 模块实现的。该模块可提供 150ps 的分辨率，从而实现 PWM 的周期、占空比、相位和死区控制。PWM 输出端的集成跳变区域子模块可在 25ns 内响应反馈，无需 CPU 干预。

反馈

C2000 实时微控制器集成了独特的外设集，可对 TI GaN 器件（包括最近推出的 LMG3425R030）的反馈信号进行采样，无需其他分立式元件。反馈来自两个主要来源：

- **故障报告。**LMG3425R030 会对其故障信息进行编码。鉴于在软件中进行故障处理存在相关的延迟，在软件中解码这些信息可能会产生不良影响。为了加快响应速度，可在器件外部对故障信号进行整合，但这需要使用分立式元件。C2000 实时 MCU 使用自身的可配置逻辑块 (CLB) 来读取、处理和响应 GaN 器件产生的故障情况，无需使用软件和外部元件，从而优化了性能并降低了系统成本。
- **温度监测。**LMG3425R030 器件的温度监测输出为占空比可变的固定频率信号。常见的实现方式需要使用外部滤波器来实现基于 PWM 的 DAC，而该 DAC 又需要由 ADC 进行采样。C2000 实时 MCU 的增强型捕捉模块完全省去了这些外部元件，同时无需 CPU 开销即可捕捉温度信息，因此进一步降低了成本并节省了布板空间。

结束语

在现代数字电源系统中，效率和功率密度标准带来了诸多挑战。TI GaN 器件提供了可靠且价格合理的技术，同时实现了更高的功率密度和更高的效率。ISO7741-Q1 提供了具有成本效益的接口，而 C2000 实时 MCU 解决了与当今复杂的控制方案相关的难题。这些器件协调工作，可为现代数字电源系统提供灵活而简单的解决方案，同时仍提供先进的功能来实现超安全、超高功率密度的高效数字电源系统。

开发人员可立即刷新电源效率和功率密度记录，TI 将利用 25 年来在实时数字电源控制、电力电子、硬件和软件领域累积的经验，提供经过全面测试的详细参考文件，帮助设计人员更轻松地完成目标。

其它资源

- 参考设计
 - [采用 C2000 实时 MCU 的双向高密度 GaN CCM 图腾柱 PFC 参考设计](#)
 - [基于 GaN 的高效率 1.6kW 高密度 1MHz CrM 图腾柱 PFC 转换器参考设计](#)
 - [高效率 GaN CCM 图腾柱无桥 PFC 参考设计](#)
 - [基于 Vienna 整流器且采用 C2000 实时 MCU 的三相功率因数校正参考设计](#)
- 白皮书
 - [一种在使用条件下验证 GaN FET 在电源线路浪涌中可靠性的新方法](#)
 - [如何降低图腾柱 PFC 交流过零点处的电流尖峰](#)
- 培训
 - [C2000 数字电源培训系列](#)
 - [CLB 培训系列](#)
- 评估套件
 - TMS320F28002x controlCARD 评估模块：<https://www.ti.com.cn/tool/cn/TMDSCNCD280025C>

- LMG3422R030 600V 30mΩ 半桥子卡: <https://www.ti.com.cn/tool/cn/LMG3422EVM-043>
- ISO7741-Q1 评估模块: <https://www.ti.com.cn/tool/cn/ISO7741EVM>
- 软件工具
 - [C2000Ware MATLAB® VisSim Embedded Coder](#)

重要声明: 本文所提及德州仪器 (TI) 及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。TI 建议用户在下订单前查阅全面的全新产品与服务信息。TI 对应用帮助、客户应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不承担任何责任。有关任何其他公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的批准、担保或认可。

平台标识、HotRod 和 PowerCSP 是德州仪器 (TI) 的商标。所有其他商标均属于其各自所有者。

重要声明和免责声明

TI 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安全、安保或其他要求。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 (<https://www.ti.com.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 或 [ti.com.cn](https://www.ti.com.cn) 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。

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 © 2021 德州仪器半导体技术（上海）有限公司