

在微型逆变器上使用 TI GaN 的优势

Emma Wang

FAE

摘要

随着全球对减少碳排放和应对气候变化的关注，可再生能源的需求日益增长。而在可再生能源中，太阳能是最具潜力和最广泛应用的一种。随着光伏技术的进步和成本的下降，光伏市场正在迅速扩大。为了更好地利用太阳能，需要将光伏电池板产生的直流电转换为适合家庭或商业用途的交流电，这就需要使用逆变器。微型逆变器是一项越来越多公司正在开发的热门技术，它是可以进行单个光伏面板做最大功率点跟踪的小型逆变器，可直接将单个面板的直流电转换为家用交流电。与传统组串逆变器相比，它具有提高系统效率、安全性和灵活性的优势。为了进一步提高微型逆变器的性能和竞争力，许多公司正在开发使用 GaN（氮化镓）作为功率半导体材料的微型逆变器。GaN 相比于传统的 Si（硅）材料，具有更低的导通损耗、更快的开关速度等特点，这意味着使用 GaN 的微型逆变器可以实现更高的效率和更小的尺寸，从而节省空间和成本，提高系统的可靠性和寿命。

本文介绍了 TI GaN FET 用于 H4 并网逆变器的优势和设计挑战，以及针对这些难点的解决方案。

修改记录

Version	Date	Author	Notes
1.0	May 2023	Emma Wang	First release

目录

1. 微型逆变器的优势	3
1.1. 微型逆变器安全性更高	3
1.2. 微型逆变器系统发电效率更高	3
2. 微逆逆变器的主流拓扑	4
2.1. 单相微型逆变器常见拓扑	4
2.2.1 电流源类型的逆变器	4
2.2.2 电压源类型的逆变器	4
3. 在微型逆变器上使用 GaN 的优势与挑战	5
3.1 在微型逆变器上使用 GaN 的优势	5
3.1.1 使用 GaN 可以提升效率	5
3.1.2 使用 GaN 可以提升整机功率密度	5
3.2 GaN 应用于 H4 并网逆变器的挑战与解决办法	5
4 TI GaN 的优势	6
4.1 通过集成提升了性能和易用性	6
4.2 可靠性和长期稳定性	7
5 总结	7
6 参考文献	8

图

图 1 有遮挡情况下微型逆变器和组串逆变器的表现对比	3
图 2 电流源类型的微型逆变器	4
图 3 电压源类型的微型逆变器	5
图 4 逆变器高电压穿越能力国标要求	6
图 5 SiC 二极管和快恢复 Si 二极管的反向恢复特性对比	6
图 6 LMG3522 和 LMG3422 简化版框图	7
图 7 JEDEC JC-70 GaN 验证指南	7

1. 微型逆变器的优势

逆变器是光伏系统中的重要组件，主要起到直流电(DC)转换为交流电(AC)以及最大功率点跟踪(MPPT)的作用。光伏面板在不同强度阳光照射下提供的是波动的直流电，而电网及大部分负载要求提供频率恒定的交流电，因此逆变器是光伏发电系统中不可或缺的关键设备。

光伏逆变器主要可分为集中式、组串式以及微型逆变器三大类。其中，集中式逆变器是将大量并行的光伏组串在直流端汇集后进行集中逆变并入电网；组串式逆变器是对单串或数串光伏组件进行单独最大功率点跟踪及逆变后在交流侧汇流并入电网；微型逆变器则是可对每一块光伏组件进行单独最大功率点跟踪和逆变的光伏并网装置。

不同逆变器的适用范围存在一定差异，微逆变器作为一种组件级电力电子(MLPE)设备更多的应用于小功率户用领域。从功率上看，目前集中式逆变器的单机功率基本达到 3MW 以上，集成度高，平均成本较低，但在控制精度与发电量损失上相对较差，主要用于大型地面电站。组串式逆变器的单机功率则一般覆盖 3-300kW+的区间，适用范围较为灵活，广泛应用于户用、工商业以及大型电站等场景。微逆变器目前的单体容量则一般在几百瓦至 2-3kW，通常与光伏组件配套安装，主要应用于小功率户用场景。

与集中式逆变器、组串式逆变器相比，微型逆变器输入侧没有直流高压电，安全系数更高；同时，每个组件都有自己的 MPPT，有效消除了不同光伏面板间由于光照不匹配造成的效率浪费，系统效率更高；另外，微型逆变器具备体积小，重量轻，安装更容易的特点，在部署和后期改造的过程中也更为灵活。

1.1. 微型逆变器安全性更高

集中式或组串式逆变器首先将多块光伏组件串联后再进行逆变，每串组件接入的直流电压可达 600-1500V，安装运维人员在直流高压环境下存在一定的触电风险。此外，在光伏组串存在直流高压的情况下，一旦出现接头松动、接触不良、电线受损等现象，存在引发直流电弧造成火灾隐患的风险。

而微型逆变器是将每一块组件产生的直流电先转换为交流电后再进行并联，因此面板侧的直流电压一般不超过 80V，安全系数更高。

1.2. 微型逆变器系统发电效率更高

相较于集中式与组串式逆变器，微型逆变器可以实现更精细化的 MPPT 跟踪，从而提升系统的整体发电效率。对于集中式或组串式逆变器，由于每串组件都在同一电流下进行输出，如果某块组件因为故障、遮挡、阴影等原因出现失效或输出功率下滑，则整串组件的发电效率都将受到影响。而对于采用微型逆变器的光伏系统，每块组件均对应独立的一路 MPPT，可保证每块组件都在各自的最大功率点上输出，因此系统的整体发电效率不会受到单个面板遮挡的影响而出现明显下滑。

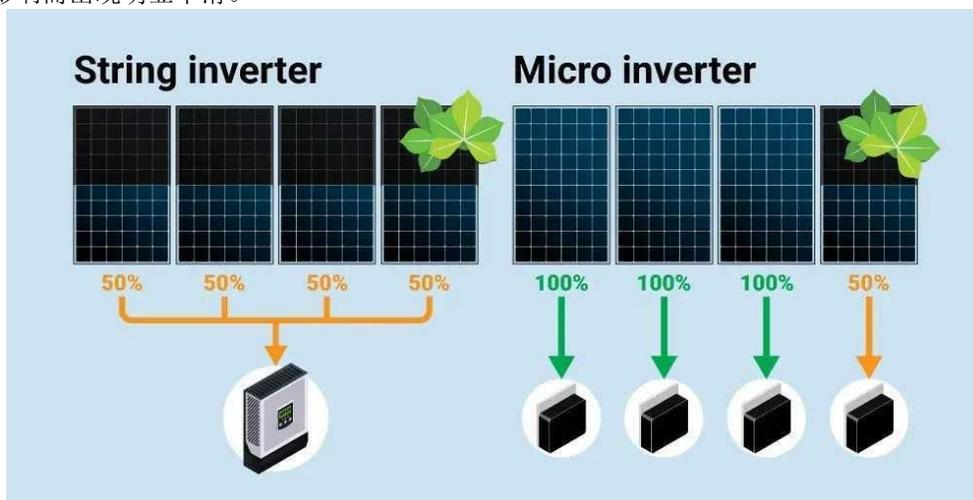


图 1 有遮挡情况下微型逆变器和组串逆变器的表现对比

2. 微逆逆变器的主流拓扑

微型逆变器的应用场景主要是家庭用电，因为家庭用电通常是单相交流电，目前市场上占据主导地位的是单相微型逆变器，它可以将直流电转换为与市电相同的单相交流电，方便用户直接使用或并网发电。除了单相微型逆变器外，还有一些厂家开始开发三相微型逆变器，它可以将直流电转换为三相交流电，适合一些需要三相用电的家庭或小型商业场所。本文将针对单相微型逆变器进行重点分析。

在传统组串式逆变器中，通常采用非隔离的拓扑，由于光伏板和大地存在寄生电容会引入漏电流，所以 DCAC 级经常采用有共模电流抑制能力的 H5、H6 和 Heric 拓扑。从保证安全性的角度出发，各国标准均对并网逆变器漏电流作出了严格限定。例如，在 DIN VDE 0126-1-1 中，规定了无变压器并网逆变器中的系统中漏电流的有效值 (RSM) 必须小于 30mA，否则需要在 0.3s 内切断系统。

微型逆变器的输入通常是单块面板，电压一般低于 80V，为了适配单相 110V/230V 的户用电网，一般需要用到带变压器的拓扑结构。在隔离型的并网逆变器中，变压器充当升压角色的同时实现了光伏组件和电网之间的电气隔离，消除了因直流电流分量和共模电流产生的隐患。所以微型逆变器的 DCAC 级可以采用结构更简单的 H4 逆变拓扑。

2.1. 单相微型逆变器常见拓扑

目前，市面上常见的单相微型逆变器主要分为电流源类型的逆变器和电压源类型的逆变器。

2.2.1 电流源类型的逆变器

电流源类型的逆变器前级的 DCDC 变换是核心环节，在实现 MPPT 功能的同时，将直流电转换成包络线为单极性二倍工频正弦半波的输出电流。后级的 DCAC 环节的工频换向桥驱动时序跟踪电网电压，将前面的单极性工频正弦半波翻转为正弦波并网电流，保持与电网电压同频同相。

前级 DCDC 的拓扑通常采用反激变换器，一般会选择 DCM 或是 BCM 的控制方式，该拓扑通常采用低压电解电容。反激拓扑的优点是价格相对较低，电路简单，适用于低功率应用。但是对于市面上越来越多的一拖二，一拖四，以及支持更大光伏组件的微型逆变器而言，需要采用交错的方式来提高功率等级。

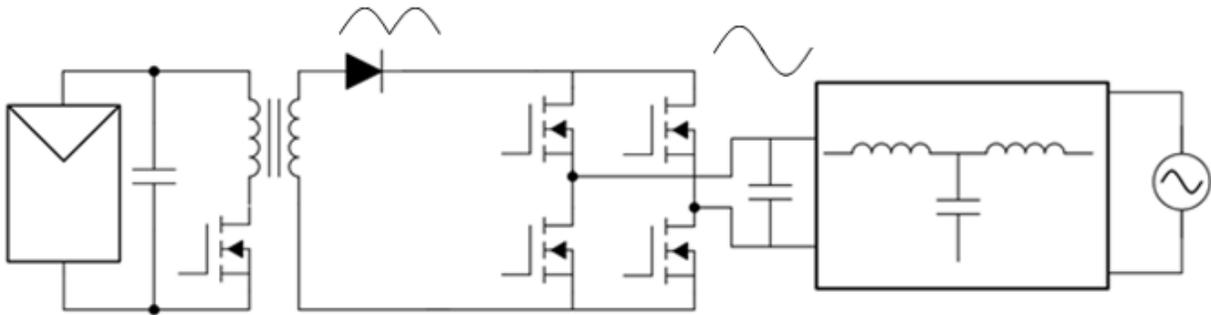


图 2 电流源类型的微型逆变器

2.2.2 电压源类型的逆变器

在更大功率的微型逆变器拓扑中，电压源类型的逆变器更为常见。和电流源类型的逆变器不同，电压源类型的逆变器存在高压电解电容，可以适配到储能功能的逆变器网络中。由于电压型逆变器第一级 DCDC 输出的是直流电压，第二级 DCAC 需要采用高频逆变的控制方式。在 H4 的逆变拓扑中，和双极性调制 (S1-S4 均为高频开关) 相比，单极性调制只有 S1 和 S2 工作在高频下，S3 和 S4 工作在工频下，可以显著减少开关损耗。

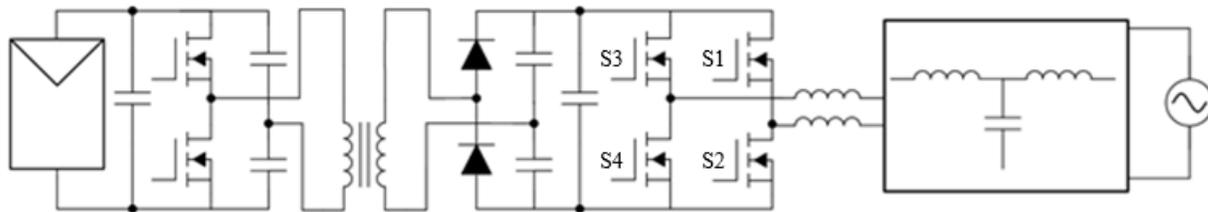


图 3 电压源类型的微型逆变器

3. 在微型逆变器上使用 GaN 的优势与挑战

3.1 在微型逆变器上使用 GaN 的优势

微型逆变器直接安装在光伏组件的背部或者是金属支撑架上(也有厂商将微型逆变器和光伏组件集成在一起)。直接暴露在室外,对逆变器工作的稳定性和整机的功率密度有很高的要求。GaN 的材料属性可使电源开关的导通电阻更低,与同等大小的硅功率晶体管相比,开关速度更快。这些优势使得电源转换解决方案更加紧凑,能源效率也更高。

3.1.1 使用 GaN 可以提升效率

上一节中谈到,在 H4 的逆变拓扑中,单极性调制和双极性调制相比,只有两个开关管工作在高频下,另外两个开关管工作在工频下,可以减少开关损耗。

对于 H4 的单极性逆变,在 DCM 工作模式下,拥有很高的转换效率,但是坏处是电流纹波较大,开关管的应力也比较大。同时也没办法支持更大的功率。在 CCM 模式下工作,则存在反向恢复损耗比较大的问题。与 MOSFET 不同,GaN FET 的横向结构内没有 PN 结,因此,GaN FET 没有体二极管和相关的反向恢复损耗问题。同时,GaN 的材料属性可使电源开关的导通电阻更低,相同的结面积,GaN 的 R_{dson} 仅有 $5\text{m}\Omega/\text{cm}^2$,Si 的 R_{dson} 为 $10\text{m}\Omega/\text{cm}^2$ 。TI GaN 产品 [LMG3422](#) 和 [LMG3522](#) 系列目前均有 R_{dson} $30\text{m}\Omega$ 的版本,导通损耗也比较小。同时,GaN FET 与同等尺寸的硅功率晶体管相比,开关速度更快,TI GaN 产品 [LMG3422](#) 和 [LMG3522](#) 系列可以实现高达 150V/ns 的开关速度,显著降低开关过程中的 overlap loss,从而进一步提高了转换效率。

因此,选择 GaN FET 作为主开关管,在 CCM 模式下也可以实现比较高的转换效率。[TIDA-010203](#) 是一个 4KW 的 totem PFC,高频开关管选用了 TI 的 600V GaN [LMG3422R030](#),峰值效率可以达到 99.1%。

3.1.2 使用 GaN 可以提升整机功率密度

由于微型逆变器安装在光伏面板上,提升功率密度也是微型逆变器的目标之一。使用 GaN 作为主功率管,可以将 DCAC 级的开关频率从小于 25KHz 提高到 100KHz 及以上,减小电感和其他无源器件的体积,进而提高功率密度。在基于 GaN 的 6.6kW 双向车载充电器参考设计中,它使用 [LMG3522R030](#) GaN FET,与同类 SiC 参考设计相比,GaN 能够以更小的外形尺寸实现更高的功率密度和效率。与同样功率的 SiC 设计相比,采用 GaN 可实现比 SiC 高 62% 的开关频率,同时保持大约 60% 的尺寸减小。

3.2 GaN 应用于 H4 并网逆变器的挑战与解决办法

电力系统中交流电网会由于负荷扰动或线路故障因素产生过电压现象,过电压是电力系统常见的电网暂态故障之一。随着光伏发电在电力能源中所占的比例越来越大,光伏并网系统对电网的影响将不能忽视。

对于光伏发电容量较大的电网,光伏系统的离网可能会造成电网电和频率的崩溃,这将会对光伏并网发电的应用造成限制。因此,从电网安全角度,大容量光伏并网逆变器需具备一定的对称与不对称高电压穿越能力。目前,越来越多的国家和地区要求并网逆变器具有高低压穿越的能力³。图 4 为国标 [NB/T32004-2018](#) 对并网逆变器高电压穿越能力的要求。高于电压轮廓线超过允许的时间,则允许逆变器切出,否则必须保持并网。

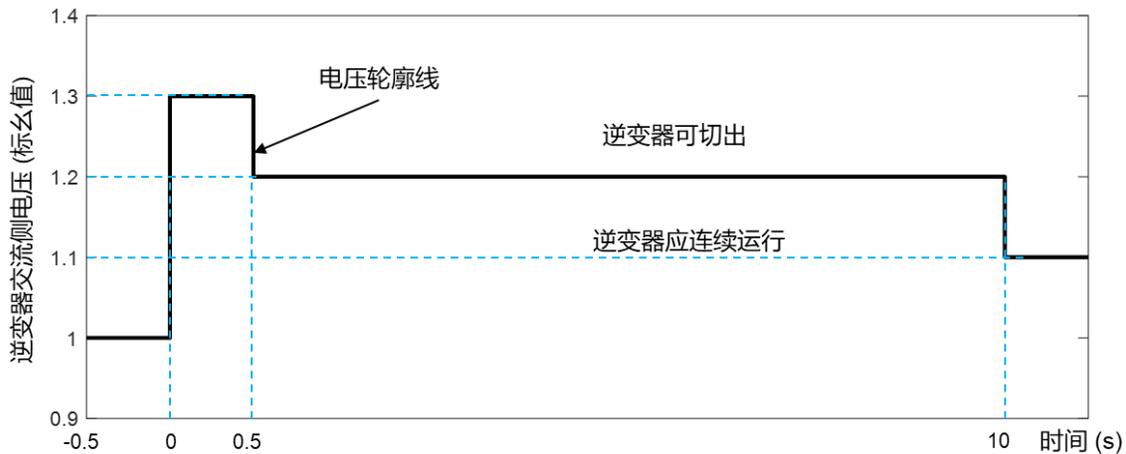


图 4 逆变器高压穿越能力国标要求

在高压穿越过程中，会出现电网电压高于逆变器母线电压的情况，会使得逆变器的开关管处于不控整流的状态。和 Si 基 MOSFET 不同，GaN FET 没有寄生的体二极管，虽然具有第三象限导通能力，但是第三象限电流能力小于高压穿越的要求。

为了帮助使用 GaN 的微型逆变器在高压穿越场景下的可靠运行，我们可以从两个方面来解决问题：一是减小第三象限的电流，比如增加网侧电感的感量，或是提高母线电压；二是提高开关节点能够支持的第三象限电流水平，这里，可以通过给 GaN 反并联一个 SiC 二极管来提高第三象限的耐流能力，SiC 二极管导通阻抗低，同时 trr 反向恢复时间很短，没有反向恢复问题。不会因为并联 SiC 二极管而带来反向恢复损耗和可能的直通问题。

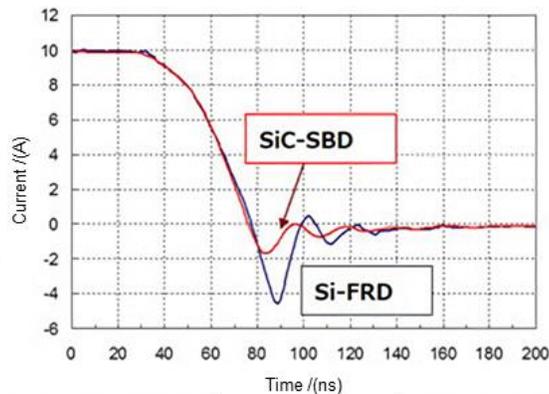


图 5 SiC 二极管和快恢复 Si 二极管的反向恢复特性对比

4 TI GaN 的优势

4.1 通过集成提升了性能和易用性

GaN FET 开关速度较快，需要专用的栅极驱动器，这意味着需要额外的设计时间和工作量。TI 通过在芯片中集成栅极驱动器和一些保护功能，简化了 GaN 设计。

GaN FET 集成的驱动器，可实现高达 150V/ns 的开关速度。与分立式栅极驱动器相比，TI 的集成式精密栅极偏置可实现更高的开关 SOA。这种集成特性与 TI 的低电感封装技术相结合，可在硬开关电源拓扑中提供干净的开关和超小的振铃。可调栅极驱动强度允许将压摆率控制在 20V/ns 至 150V/ns 之间，用于主动控制 EMI 并优化开关性能。

同时，TI 的 GaN 集成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。GaN FET 的温度通过可变占空比 PWM 输出进行报告。图 6 是 TI 第二代 GaN FET 简化版框图。

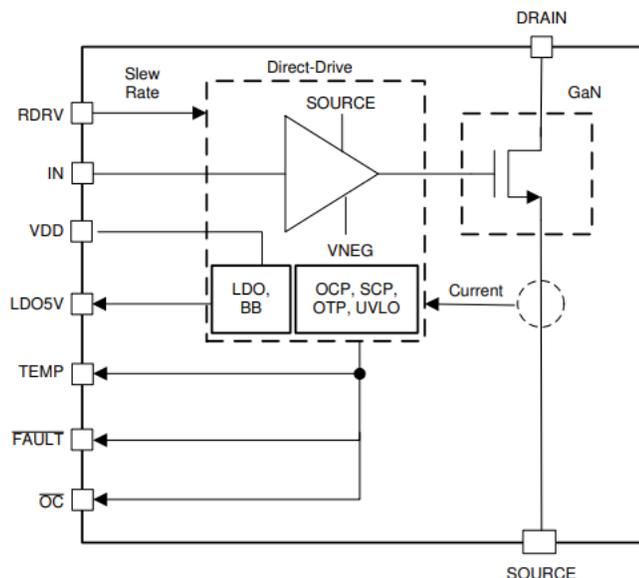


图 6 LMG3522 和 LMG3422 简化版框图

4.2 可靠性和长期稳定性

TI 的 GaN 器件采用专有的硅基 GaN 工艺且已经过 4,000 多万小时的可靠性测试，并具备各种保护功能，旨在确保高压系统的安全。不仅具备器件级的可靠性，同样具备系统级可靠性以及出色的动态 RDS(ON) 稳定性。下图是 TI GaN 通过的组件级和电源级的可靠性测试，JEDEC JC-70 GaN 验证指南涵盖了组件和电源级运行，可作为对成熟标准的补充，进行 GaN 可靠性的验证

Component level	Established framework for Si qualification and reliability	JESD47, AEC-Q100, JEP122
	GaN Failure mechanisms, lifetime extrapolation	JEP122, JEP180, literature
Power-supply level	Switching reliability for power management usage of GaN	JEP180: Switching Reliability Evaluation for GaN Power Devices
	GaN-specific test methods	JEP173: Dynamic ON-Resistance Test Method JEP182: Continuous Switching Test Method
	Extreme operation (Lightning surge, short circuit)	IEC 61000-4-5, VDE0884-11

图 7JEDEC JC-70 GaN 验证指南

5 总结

本文介绍了使用 GaN（氮化镓）作为功率半导体材料的微型逆变器的技术优势和挑战。微型逆变器是一种将光伏组件产生的直流电转换为交流电的设备，它可以使每个光伏组件独立工作，提高系统的效率和灵活性。使用

GaN 的微型逆变器可以进一步提高整机效率并提升功率密度。然而，使用 GaN 的微型逆变器也面临着一些技术挑战，比如针对并网系统中的第三象限电流挑战，本文也给出了对应的解决方案。TI 公司推出的集成栅极驱动器和保护功能的 GaN 器件，可以简化微型逆变器的设计、具有优异的可靠性，并通过了完善的组件级和电源级的可靠性测试，非常适合于微型逆变器这种对器件可靠性要求高的场合。

6 参考文献

1. [Achieving GaN Products With Lifetime Reliability](#)
2. [Reverse Recovery Characteristics of SiC-SBDs and Si-PNDs](#)
3. [Multimode Inverter Control Strategy for LVRT and HVRT Capability Enhancement in Grid Connected Solar PV System](#)
4. [TIDA-010203 采用 C2000 和 GaN 的 4kW 单相图腾柱 PFC 参考设计](#)

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 © 2023，德州仪器 (TI) 公司