

Application Brief

差动 ADC 驱动的运算放大器与全差动放大器



Rachel Scheller

简介

模数转换器 (ADC) (包括嵌入到 [TMS320F2837xD](#) 系列等微控制器中的模数转换器) 呈增长趋势，以支持使用全差动输入，来更大限度地提高产品性能。本文档旨在通过多项规格的实验室分析，展示使用全差动放大器 (FDA) 将单端信号转换为差动信号以驱动差动 ADC 带来的性能提升及其重要意义，并与分立式双通道运算放大器 (如 [OPA2328](#) 或 [OPA2320](#)) 进行比较。评估的主要规格包括偶次谐波 (HD₂、HD₄)、总计谐波失真 (THD)、信噪比 (SNR) 和有效位数 (ENOB)。此外，还总结了其他特性，包括输出共模控制、功耗、有源滤波能力、易用性、设计尺寸和高输入阻抗。

内容摘要

有关汇总以下文档结果的快速参考表，请参阅 [表 1](#)，获取内容摘要。

表 1. ADC 驱动的单信号到差动信号转换方法比较

规格	双路运算放大器	全差分放大器	注释
输出共模控制		✓	FDA 提供集成的 V _{OCM} 引脚，允许输出共模控制独立于输入共模，这在分立式设计中不可用，必须仔细考虑，尤其是在非反相配置中
解决方案尺寸和复杂性		✓	WQFN 10 引脚 (RUN) 是业界超小型 FDA 封装，不需要外部直流偏置电压即可实现超小设计尺寸
谐波失真、CMRR		✓	由于器件匹配和共模抑制列，集成式 FDA 架构可实现更优的 CMRR 和偶次谐波失真 (HD ₂ 、4) 性能
大信号阶跃/相位延迟		✓	与双通道运算放大器相比，FDA 可以处理更大的增益值并缩短趋稳时间，以确保稳定在 ADC 采集时间的 $\frac{1}{2}$ LSB 范围内
静态电流 (功耗)		✓	FDA 通常以与单通道运算放大器相同或更低的功耗运行，且考虑到需要 2 个运算放大器通道时，优势会更加明显
有源滤波		✓	FDA 可以支持在单级在器件上进行 有源滤波 ，无需通过额外元件添加滤波器
高输入阻抗	✓		FDA 输入阻抗始终为电阻式阻抗，如果未在每个输入端添加缓冲放大器，则无法支持高输入阻抗
成本		✓	全差动放大器 (尤其是新的 THS4535 放大器) 成本可能与双通道运算放大器相当或更低

电路配置和实现

[图 1](#) 显示了使用双通道运算放大器驱动差动 ADC 输入时的电路配置。请注意，在非反相配置中使用双通道运算放大器实现高阻抗时，通常需要两个参考电压，因为每个放大器级的输入和输出偏置电压都会影响最终输出共模电压，需要通过这两个参考电压进行调整。这通常需要额外购买 IC (即 [LM27761](#) 等低噪声电压逆变器)，以产生负直流偏置，从而导致设计尺寸更大，系统成本更高。

接下来，[图 2](#) 展示了驱动差动 ADC 时全差动放大器的电路配置，这种配置通常不需要任何外部参考电压。FDA 上的共模电压引脚可以直接连接到 ADC 的参考电压输出，由于 FDA 中集成了内部误差环路放大器，因此不会进行额外的偏置电压处理。

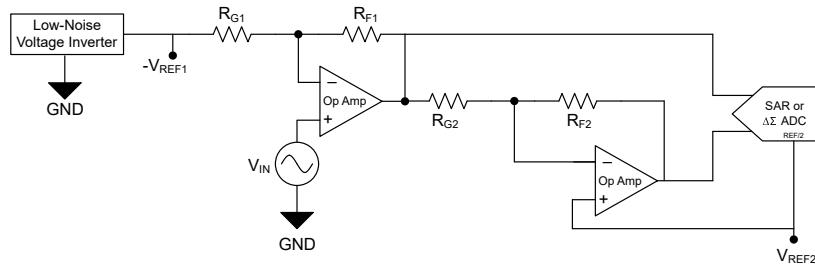


图 1. 用于差动输出驱动的双通道运算放大器配置

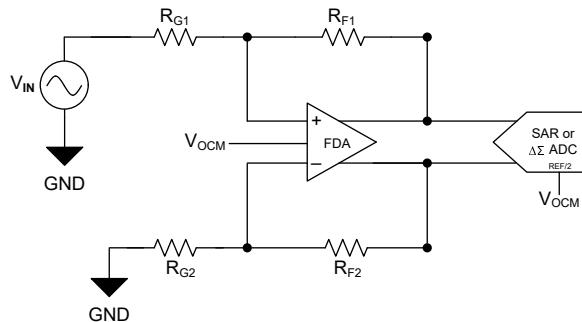


图 2. 用于差动输出驱动的全差动放大器配置

器件架构比较

选择用于比较和分析的两款器件是 OPA2328 运算放大器和 THS4536 全差动放大器。凭借相似的工艺技术、带宽性能和精度规格，在实现高直流精度设计时，它们都是可用于 ADC 驱动的类似器件。

此表还会展示，当全差动放大器和双通道运算放大器都采用 CMOS 处理方面的专业技术设计时，两者在静态电流方面的差异。在使用 5V 电源时，OPA2328 两个通道的电流为 7.6mA，而单通道 THS4536 为 4.7mA，这表明全差动放大器使功耗降低了 14.5mW 或 38%。

表 2. 架构比较图表

规格	OPA2328	THS4536
架构	运算放大器	全差分放大器
工艺	CMOS	CMOS
电源电压范围 (V)	2.2 – 5.5	2.7 – 5.5
增益带宽积 (MHz)	40	80
压摆率 (V/μs)	30	57
1kHz 时的电压噪声 (nV/√Hz)	6.1	4.3
CMRR (典型值) (dB)	120	140
静态电流 (总计) (mA)	7.6	4.7
轨到轨	输入, 输出	输入接近 V-, 输出
偏移电压 (25°C、最大值) (mV)	0.05	0.05
偏移电压温漂 (典型值) (μV/°C)	0.15	0.8
成本	\$\$	\$

总谐波失真 (THD)

总计谐波失真即添加到理想信号 (8) 的不必要频率 (谐波) 的测量值。理想情况下, THD 越低越好。放大器的线性可以通过其 THD 性能进行量化, 一般经验法则是工程师必须在相关频率范围内选择比 ADC 至少高 10dB 的放大器。对于 FDA, 理想情况下差动信号路径中的偶次谐波会减少, 从而降低总计谐波失真 (5)。图 4 展示了该原理的一部分, 因为在为 SAR 16 位 1MSPS ADC (ADS9224R) 驱动多种不同输入频率时, THS4536 的总计谐波失真低于 OPA2328。

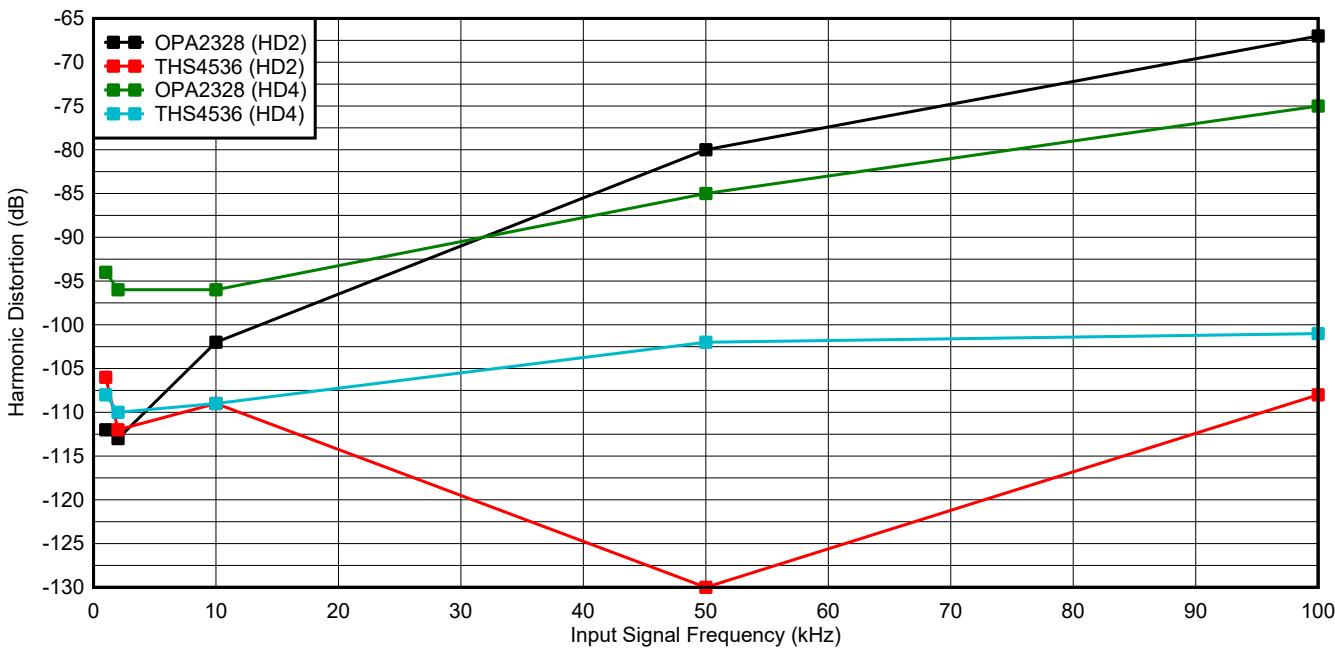


图 3. HD₂ 和 HD₄ 与输入频率间的关系

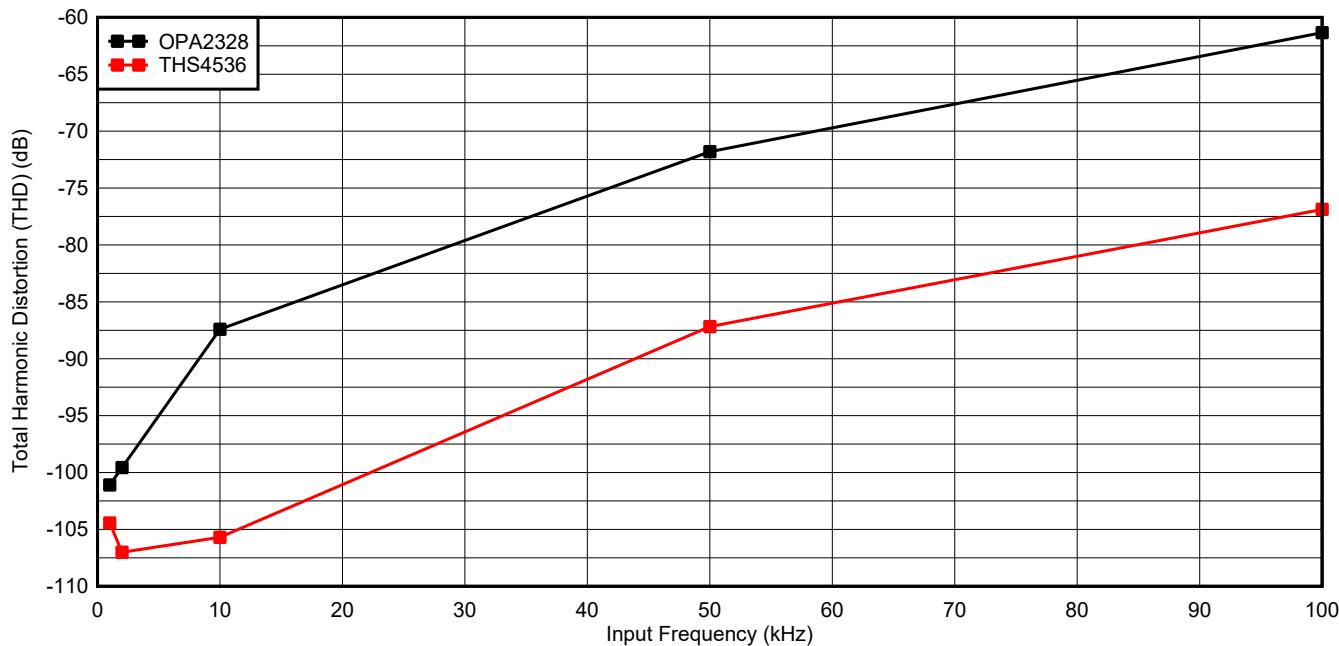


图 4. 总计谐波失真与输入频率间的关系 (1MSPS)

大信号阶跃和相位延迟

相位延迟即差动 ADC 正负输入端子的相位差。为了从 ADC 获得最高性能和精度，进入 ADC 的输入信号的相位和振幅分量应尽可能匹配，确保偶次谐波 (2 阶和 4 阶) 受到的影响尽可能小，信号带宽得到优化，并且趋稳误差降低。在双通道运算放大器配置中，第一级放大器的增益通常会增加，这会导致放大器速度变慢，而第二级放大器会加剧增益和相位不平衡。相比之下，FDA 的架构本身具有出色的输出平衡，因为输入级是并行处理的 (包括应用增益)，从而尽可能降低相位延迟。这些原理以及噪声性能和趋稳误差可以通过 ADC 的有效位数 (ENOB) 来体现。

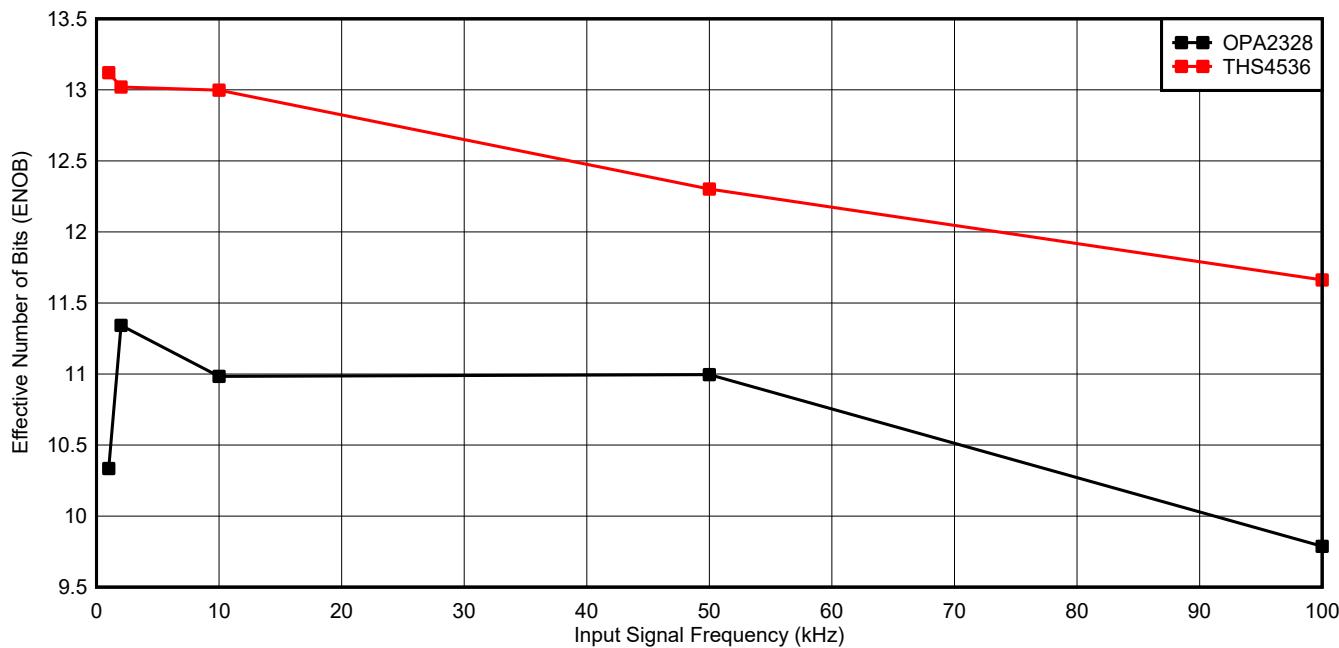


图 5. ENOB 与输入频率间的关系

频谱噪声

外部放大器对系统噪声的影响是一项复杂的分析；然而，一般指导原则是，选择一个在所需增益水平下等于或低于整体系统噪声的放大器。有关 ADC 有效噪声带宽 (ENBW) 计算方式以及外部放大器的影响的深入讨论，请参阅参考资料 9 精密 ADC 噪声分析的基本原理第 2 章和第 3 章。在短期考虑和评估中，图 6 展示了驱动 ADS9224S (1kHz 信号) 的 OPA2328 和 THS4536 频谱噪声的快速傅里叶变换 (FFT) 与频率间关系图，表明 THS4536 具有较低的闪烁噪声。闪烁 ($1/f$) 噪声越大，闪烁噪声和宽带噪声之间的交叉频率越高，ADC 将采样的噪声就越多，从而导致输出代码结果降低，并降低 ADC 的有效带宽。此外，信噪比 (或 SNR) 衡量输入信号强度与不必要的噪声的比率，可用于展示 THS4536 在驱动 ADC 时的性能优势。

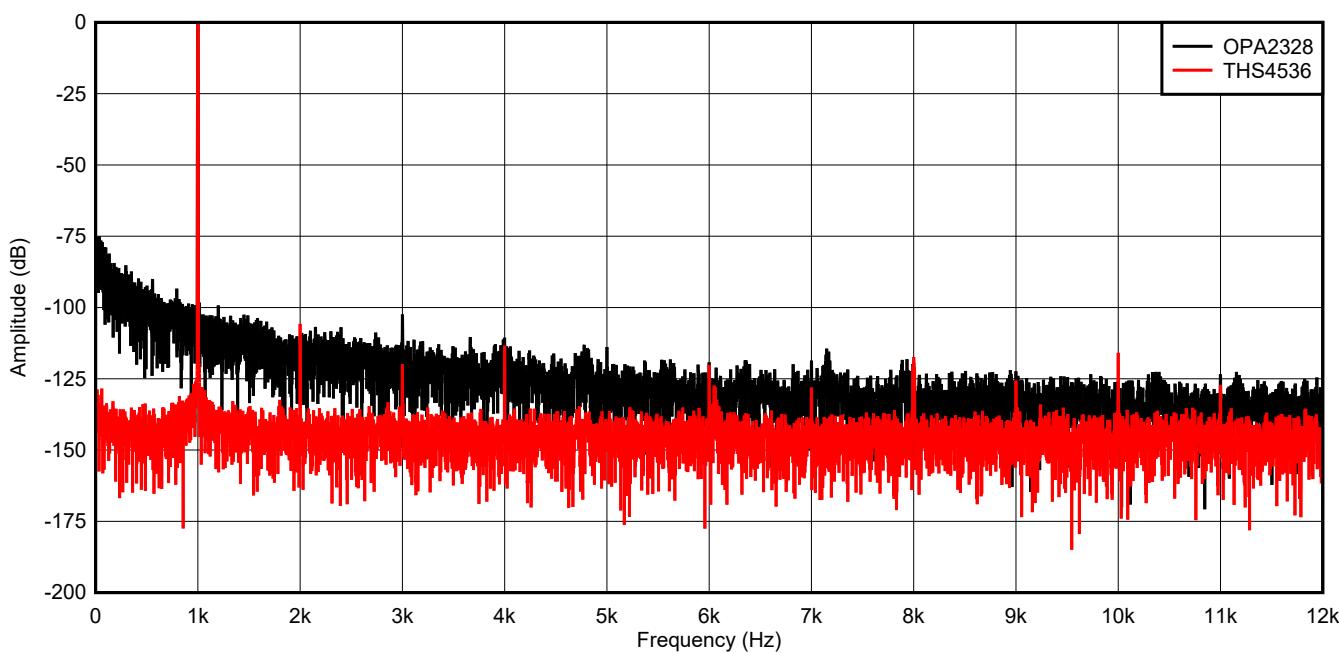


图 6. FFT 与频率间的关系

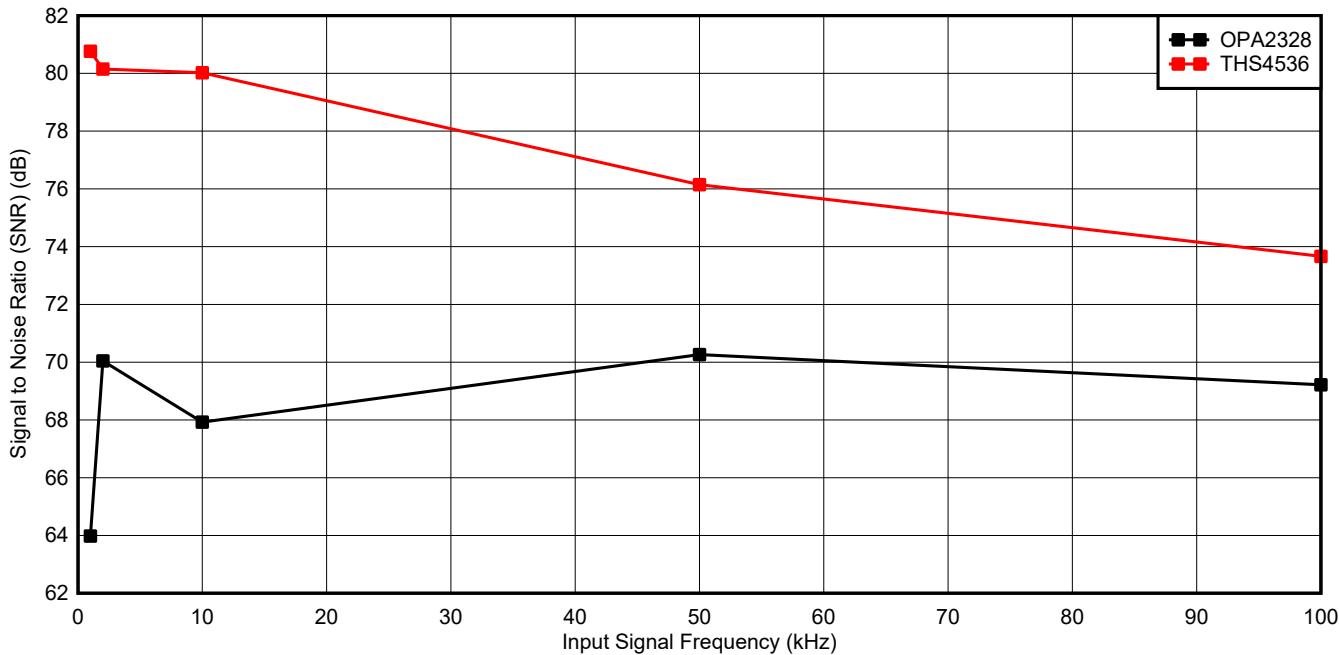


图 7. SNR 与频率之间的关系 (1MSPS)

结语

由于全差动放大器具有集成的架构和固有的差动信号特性，因此可实现诸多信号链改进。在相同或更低的功耗下，工程师应该会发现以下优势：对 SNR 影响最小、THD 最低、ENOB 最大、设计尺寸更小、集成输出共模控制，并且能够通过易于使用、成本更低的器件，为同一元件添加有源滤波器。通过为 ADC 选择正确的 FDA，可确保 ADC 及后续最终系统实现卓越性能且实现方式简单。

常用 ADC 和 FDA 建议

表 3. 采用建议 FDA 驱动器的常用差动输入 ADC

模数转换器 (ADC)	ADC 架构	建议的全差动放大器驱动器
ADS1675	$\Delta\Sigma$ 、24 位、4MSPS	LMH6551
THS1209	管道、12 位、8MSPS	THS4551
ADS9224	SAR、16 位、3MSPS	THS4551
ADS9327	SAR、16 位、5MSPS	THS4551
ADS1278	$\Delta\Sigma$ 、24 位、144kSPS	THS4536
ADS127L11	$\Delta\Sigma$ 、24 位、400kSPS	THS4536
ADC3544	SAR、14 位、125MSPS	THS4541
ADS1602	$\Delta\Sigma$ 、16 位、2.5MSPS	THS4561

可供了解更多信息的其他参考资料

1. 高精度实验室系列：全差动放大器
2. 设计用于驱动差动输入 ADC 的前端电路
3. 差分 ADC 的有源滤波器设计
4. 全差动放大器
5. Carissa Slipp、Microwave Journal、全差动放大器和驱动 ADC 时的优势
6. 将 ADC 驱动器与全差动输入 ADC 配对以进行宽带宽数据采集
7. 放大器是否遭遇了失真？获得更多带宽！
8. 使用高速放大器尽可能提高信号链失真性能
9. 精密 ADC 噪声分析的基本原理
10. 全差动放大器 (FDA) 的常见设计挑战和正确使用方式
11. 全差动在线计算器
12. THS4536 数据表

商标

所有商标均为其各自所有者所有。

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出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 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月