

Application Brief

使用 INA851 优化应变仪精度设计与分立式设计的比较



Luis Chioye, Cynthia Sosa

本应用简报介绍了使用全差分输出 INA851 的紧凑型集成设计模拟前端，并分享了该设计与包含精密双通道运算放大器 OPA2210 和全差分放大器 THP210 的分立式设计相比的优势和利弊权衡。本文通过测量由惠斯通电桥组成的满量程为 $\pm 30\text{mV}$ 的输入信号源，同时将仪表放大器增益配置为约 119.8V/V ，提供了每个电路的放大器前端固有误差分析。

电阻式应变仪是用于测量施加到物体的应力或力的常用传感器之一。当物体被拉伸或压缩时，可以根据传感器电阻的变化推断出物体所受力或应力大小。应变仪的应变系数是电阻的相对变化与机械应变之比。这些传感器的应变系数可能会因应变仪材料或使用的应变传感器类型而异。根据应变仪的灵敏度和激励电压，许多桥式传感器都能提供几十毫伏范围内的小满量程信号，因此需要与高分辨率 ADC 连接。应变仪测量系统通常由惠斯通电桥、仪表放大器增益级以及驱动模数转换器 (ADC) 的缓冲器级组成。大多数分辨率为 18 位及以上的高分辨率 ADC 都可实现全差分输入；与单端设计相比，全差分系统带来了一些优势，如提高了对外部噪声的抗扰度并将动态范围提高了一倍。

TI 全新的差分输出仪表放大器 INA851 在单芯片设计中整合了高精度、低噪声、差分输入增益级和全差分放大器输出级。电流反馈输入级前端提供超低噪声 [120V/V 增益时为 $3.37\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$]、低失调电压 [$10\ \mu\text{V}$ (典型值)] 和漂移 [$0.1\ \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ (典型值)]。输入级可提供超出电源轨高达 $\pm 40\text{V}$ 的过压保护。INA851 只需一个外部精密电阻器即可设置增益。得益于内部比例式电阻器，集成的四电阻器全差分输出级可提供低增益误差和增益误差漂移性能。INA851 可将共模电压转换为后续 ADC 所需的电平。该输出级专为直接驱动高分辨率 ADC 而设计，支持高达 1MSPS 的采样率，无需额外的缓冲放大器级或单端转差分电路。图 1 显示了 INA851 应变仪测量电路。

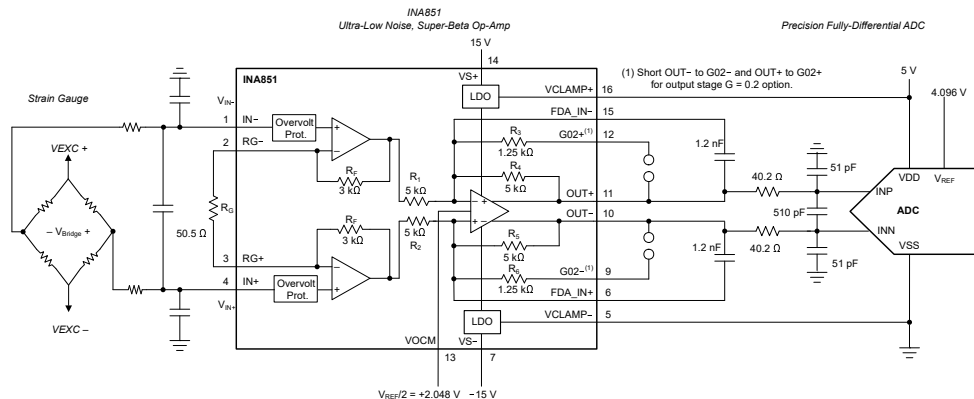


图 1. INA851 应变仪测量电路

在等效分立式设计中，惠斯通电桥连接到 OPA2210 (采用差分输入放大器配置连接的双路超 β 运算放大器)，后跟一个用于驱动 ADC 的全差分放大器 THP210。完整的电路需要七个高精度、低漂移电阻器 R1-R7。图 2 显示了 OPA2210-THP210 应变仪测量电路。

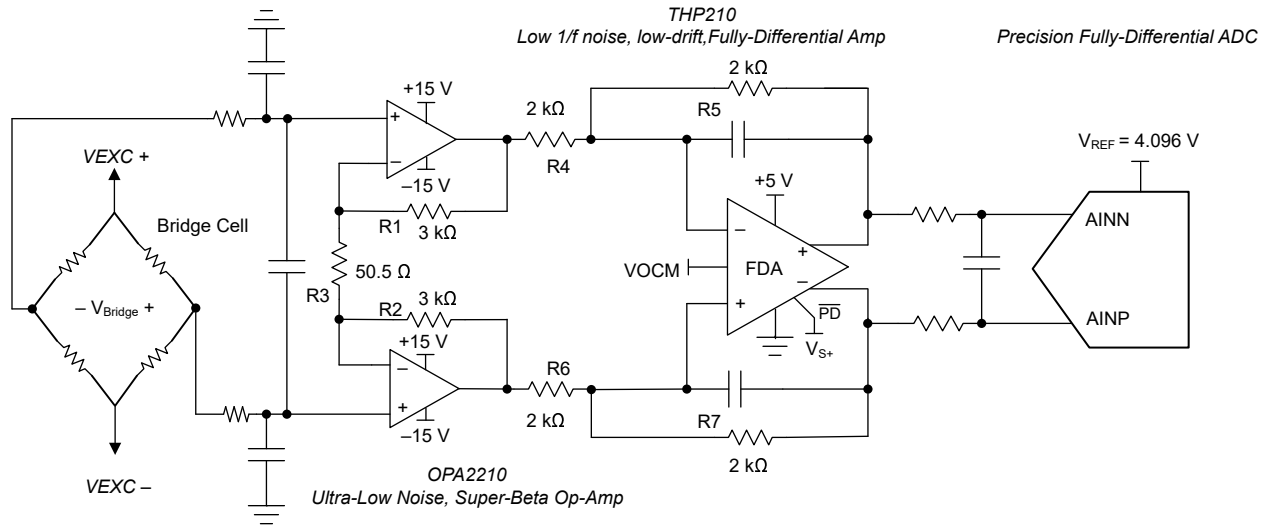


图 2. OPA2210-THP210 应变仪测量电路

两个电路都是针对该传感器设计的，具有不同的利弊权衡。集成式 INA851 设计可简化设计过程，减小整体设计尺寸和降低成本，同时保持高精度性能。相比之下，在选择高精度、低漂移或按比例匹配的电容器时，分立式设计可以更大的空间占用和更高的成本提供出色的性能。

总体而言，集成式 INA851 设计的设计过程要简单得多，只需要一个外部增益设置电阻器，而分立式设计则需要七个高精度电阻器。

此外，集成式 INA851 设计的总系统设计尺寸为 137.16mm²，而 OPA2210-THP210 分立式设计尺寸为 255.6mm²，因此将实现模拟前端所需的电路板空间总量减少了 46%。集成设计所需的元件数量较少，因此也降低了物料清单成本。集成式 INA851 设计的成本比 OPA2210-THP210 分立式设计平均低 30%，具体价格取决于所用的电阻容差。图 3 和表 1 显示了 INA851 设计与 OPA2210-THP210 分立式电路的面积和成本比较。

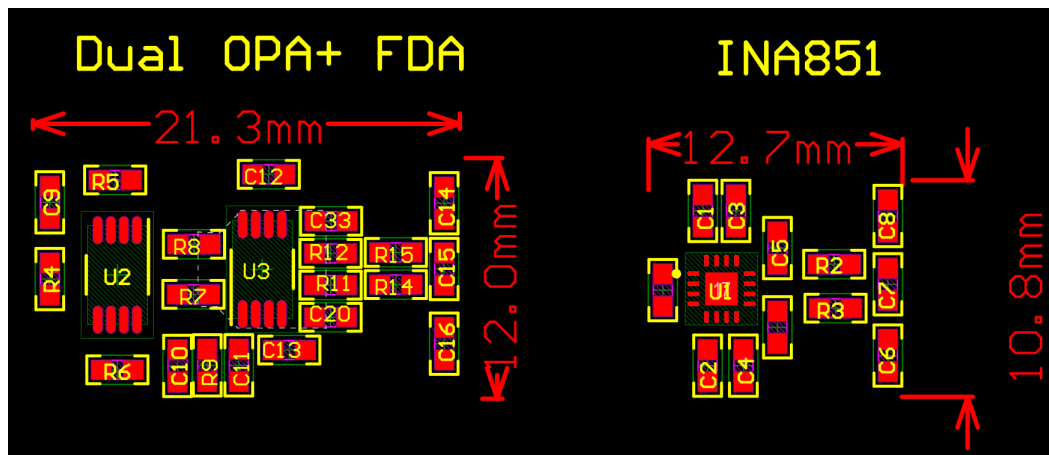


图 3. 估算的 PCB 面积，INA851 与 OPA2210-THP210 对比

表 1. 估算的成本，INA851 与 OPA2210-THP210 对比

	输入级	差分级	精密电阻器	估算的总成本	精密电阻器	估算的总成本
集成设计	INA851	--	1 - 0.1% , 15ppm/°C	4.12 美元 ⁽¹⁾	1 - 0.01% , 5ppm/°C	4.52 美元 ⁽¹⁾
分立式设计	OPA2210	THP210	7 - 0.1% , 15ppm/°C	5.75 美元 ⁽¹⁾	7 - 0.01% , 5ppm/°C	6.74 美元 ⁽¹⁾

(1) 根据 2023 年成本估算，数量为 5k

评估两个系统的性能时，必须注意第一个输入仪表放大器增益级的噪声和失调电压误差将占主导地位；因此，最佳实践是将大部分增益放在第一级，以获得出色精度和噪声性能。因此，在第一输入级使用高性能器件至关重要。分立式设计中的 OPA2210 是低失调电压、超低温漂器件。THP210 是一款精密 FDA，可提供超低失调电压和低漂移。两款器件均基于 TI 的精密超 β 互补双极半导体工艺而构建，此工艺提供超低闪烁噪声，对于低噪声、低漂移测量有直接帮助。

分立式设计的增益误差和增益漂移性能在很大程度上取决于 OPA2210 输入级增益电阻器 (R1-R3) 和第二级 FDA 增益电阻器 (R5-R7) 的精度和匹配度。INA851 包含按比例匹配的增益电阻器网络，只需要使用单个外部精密电阻器，即可提供低增益误差、增益误差漂移和高 CMRR 性能，因此具有明显的优势。当使用 0.1% 容差、15ppm/°C 漂移电阻器时，INA851 可提供比分立设计更高的精度。图 4 显示了使用 0.1% 容差 15ppm/°C 漂移电阻器时，每个电路估算精度的以输入为参考 (RTI) 误差 (以微伏为单位) 图。

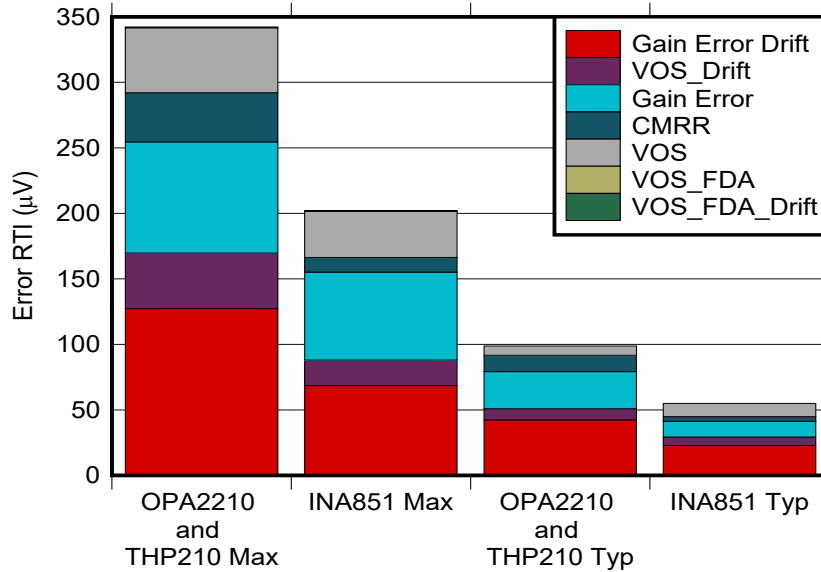


图 4. OPA2210-THP210 与 INA851 : 采用 0.1%、15ppm/°C 电阻器时的直流精度估算 (RTI)

增益 = 119.8V/V；电阻器：0.1%，15ppm/°C。温度范围：25°C ±60°C

当选择容差为 0.01%、温度系数为 5ppm/°C 的高性能电阻器时，OPA2210-THP210 分立式设计可提供非常精确的设计，并在成本和面积之间进行权衡。图 5 绘制了使用 0.01% 容差、5ppm/°C 漂移电阻器时两个电路的估算 RTI 误差（以微伏为单位）。

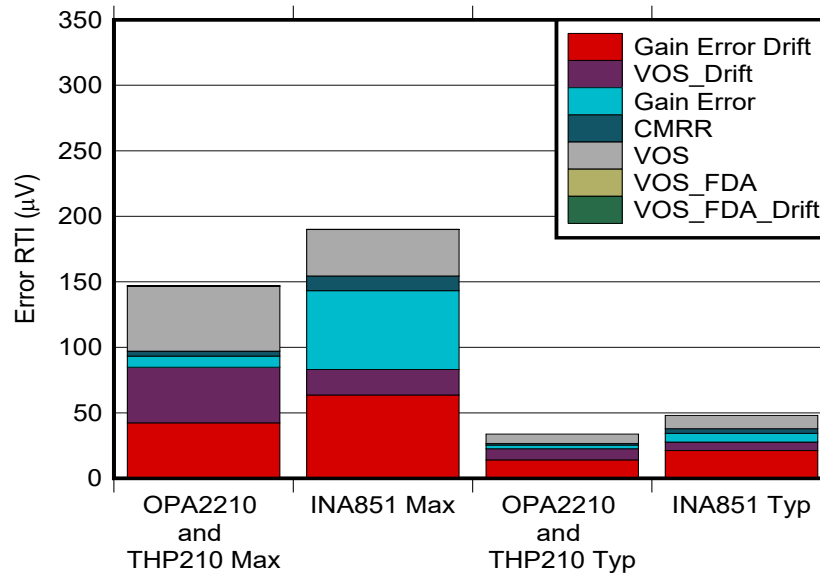


图 5. OPA2210-THP210 与 INA851 : 采用 0.01%、5ppm/°C 电阻器时的直流精度估算 (RTI)

增益 = 119.81V/V ; 电阻器 : 0.01% , 5ppm/°C。温度范围 : 25°C ±60°C

表 2 显示了使用不同容差电阻器时 INA851 与分立式 THP210-OPA2210 设计相比的典型估算误差。该表显示了总误差与典型器件规格的正平方根的函数关系，以及估算的最坏情况误差与最大规格的函数关系。本文档的估算的直流精度计算部分提供了表 2 的详细误差分析计算。

表 2. INA851 与 OPA2210-THP210 计算得出的直流精度

电路	电阻规格	总误差 RTI (µV, 典型值)	总误差 RTI (µV, 最大值)	30mV 满量程的典型误差百分比	30mV 满量程的最大误差百分比
INA851	0.10% , 15ppm/°C	54.3	191.8	0.18	0.64
INA851	0.01% , 5ppm/°C	48.6	177.6	0.16	0.59
OPA2210-THP210	0.10% , 15ppm/°C	75.0	239.3	0.25	0.80
OPA2210-THP210	0.01% , 5ppm/°C	24.2	110.4	0.08	0.37

估算的直流精度计算

表 3 显示了 INA851 估算的直流精度计算示例。此计算使用最大 INA851 数据表规格和最大电阻容差来估算最坏情况下的未校准直流精度。典型的估算精度使用典型的 INA851 性能规格计算得出。典型误差分析假设电阻容差规格 (R_{TOL}) 的 1/3 基于高斯电阻分布，中心为标称值，指定容差为 ± 3 标准差。

表 3. INA851 : 使用 0.1%、15ppm/°C 电阻器根据最大规格估算的直流精度计算

误差源	误差计算	规格 (最大值)	误差 RTI (μV)	30mV FS 的误差百分比
25°C 时的绝对精度				
输入级失调电压 V_{OSI}	V_{OSI}	35 μV	35.0	0.12
FDA 输出级失调电压 V_{OSO}	$\frac{V_{OSO}(G_{OUT} = 1)}{G_{IN}}$, $G_{IN} = 119.8 \text{ V/V}$	650 μV	5.4	0.02
计算得出的以输入为基准的总失调电压 V_{OS_TOTAL}	$\sqrt{V_{OSI}^2 + \left(\frac{V_{OSO}(G_{OUT} = 1)}{G_{IN}}\right)^2}$, $G_{IN} = 119.8 \text{ V/V}$		35.4	0.12
共模抑制比 $CMRR_{ERROR}$	$\frac{V_{CM}}{10 \frac{CMRR}{20}}$: $V_{CM} = 2.048 \text{ V}$	120dB	2.05	0.01
来自 INA851 的增益误差 GE_{INA}	$GE_{INA} \% \times \text{FullScaleSensor}$	0.20%	60.0	0.20
来自 RG 外部电阻器 0.1% 的增益误差 $GE_{Resistor}$	$R_{TOL} \% \times \text{FullScaleSensor}$	0.10%	30.0	0.10
计算得出的总增益误差 GE_{TOTAL}	$\sqrt{GE_{INA}^2 + GE_{Resistor}^2}$		67.1	0.22
25°C 时的总误差 (RSS)	$\sqrt{V_{OS_TOTAL}^2 + GE_{TOTAL}^2 + CMRR_{ERROR}^2}$		75.9	0.25
$\pm 60^\circ\text{C}$ 温度变化时计算出的最大漂移误差				
输入级失调电压漂移 V_{OSI_Drift}	$V_{OSI_Drift} \cdot \Delta T$	0.3 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	18.0	0.06
FDA 输出级失调电压漂移 $V_{OSO_Drift} \text{ (RTI)}$	$\frac{V_{OSO_Drift}(G_{OUT} = 1)}{G_{IN}} \cdot \Delta T$, $G_{IN} = 119.8 \text{ V/V}$	15 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	7.5	0.03
计算得出的总 RTI 温漂 $V_{OS_Drift_TOTAL}$	$\sqrt{V_{OSI_Drift}^2 + \left(\frac{V_{OSO_Drift}(G_{OUT} = 1)}{G_{IN}}\right)^2}$, $G_{IN} = 119.8 \text{ V/V}$		19.5	
来自 INA851 的增益误差漂 移	$\frac{GE_{INA_Drift_PPM} \cdot \Delta T}{10^4} \% * \text{FullScaleSensor}$	35ppm/°C	105.0	0.21
来自 RG 外部电阻器的增 益误差漂 移	$\frac{R_{G_Drift_PPM} \cdot \Delta T}{10^4} \% * \text{FullScaleSensor}$	15ppm/°C	45.0	0.09
计算得出的总温漂误差	$\sqrt{V_{OS_Drift_TOTAL}^2 + GE_{INA_Drift}^2 + R_{G_Drift}^2}$		115.9	0.39
计算出的总绝对误差	25°C 时的总误差 + 总温漂误差		191.8	0.64

表 4 展示了 OPA2210-THP210 分立式设计估算的直流误差计算的示例。此计算使用最大器件规格和电阻容差 (R_{TOL}) 来估算最坏情况下的未校准直流精度。典型误差是使用典型规格和 1/3 电阻容差计算得出的。典型误差分析假设采用高斯电阻分布，中心在标称值，指定电阻容差为 ± 3 标准偏差。或者，使用 R_{TOL} 的 PSpice-FOR-TI Monte Carlo 仿真给出了一个电路增益误差的估算值。

表 4. OPA2210-THP210 : 使用 0.1%、15ppm/°C 电阻器根据最大规格估算的直流精度计算

误差源	误差计算	规格 (最大值)	误差 RTI (μV)	30mV 满量程的 误差百分比
25°C 时的绝对精度				
输入级失调电压 V_{OS_Input}	$\sqrt{V_{OS_OPA_A}^2 + V_{OS_OPA_B}^2}$	35 μV	49.5	0.16
FDA 输出级失调电压 V_{OS_FDA}	$\frac{V_{OS_FDA}}{G_{IN}}$, $G_{IN} = 119.8\text{V/V}$	40 μV	0.3	0.001
计算得出的以输入为基准的 总失调电压 V_{OS_TOTAL}	$\sqrt{V_{OS_Input}^2 + \left(\frac{V_{OS_FDA}}{G_{IN}}\right)^2}$, $G_{IN} = 119.8\text{V/V}$		49.5	0.16
共模抑制比 (dB) 基于 FDA 电阻器不匹配的 CMRR	$CMRR(\text{dB}) = 20 \times \text{LOG}\left(\frac{1 + R_F/R_G}{4 \times R_{TOL}\%/100}\right)$, $R_F = R_G = 2\text{k}\Omega$		计算得出的 CMRR (dB) = 53.98dB	
共模抑制比 CMRR _{ERROR}	$\frac{\left(\frac{V_{CM}}{10^{CMRR(\text{dB})/20}}\right)}{G_{IN}}$, $G_{IN} = 119.8\text{V/V}$, $V_{CM} = 2.048\text{V}$		37.6	0.13
来自输入级的增益误差 GE_{Input}	$2 \times R_{TOL}\% \times \text{FullScaleSensor}$	0.10%	60.0	0.20
来自 FDA 级的增益误差 GE_{FDA}	$2 \times R_{TOL}\% \times \text{FullScaleSensor}$	0.10%	60.0	0.20
计算得出的总增益误差 GE_{Total}	$\sqrt{GE_{Input}^2 + GE_{FDA}^2}$		84.82	0.28
25°C 时的总误差 (RSS)	$\sqrt{V_{OS}^2 + GE_{TOTAL}^2 + CMRR_{ERROR}^2}$		105.2	0.35
$\pm 60^\circ\text{C}$ 温度变化时计算出的最大漂移误差				
输入级失调电压漂移 $V_{OS_Input_Drift}$	$\sqrt{(V_{OS_OPA_A_Drift} \times \Delta T)^2 + (V_{OS_OPA_B_Drift} \times \Delta T)^2}$	0.5 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	42.4	0.14
FDA 输出级失调电压漂移 $V_{OS_FDA_Drift}(\text{RTI})$	$\frac{V_{OS_FDA_Drift}}{G_{IN}} \times \Delta T$, $G_{IN} = 119.8\text{V/V}$	0.35 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	0.2	0.001
计算得出的总 RTI 温漂 $V_{OS_Drift_TOTAL}$	$\sqrt{2 \times (V_{OS_OPA_Drift} \times \Delta T)^2 + \left(\frac{V_{OS_FDA_Drift}}{G_{IN}} \times \Delta T\right)^2}$		42.4	
来自输入级的增益误差漂移 GE_{Input_Drift}	$\frac{2 \times R_{OPA_Drift_PPM} \times \Delta T}{10^4} \% \times \text{FullScaleSensor}$	15ppm/°C	90.0	0.36
来自输入级的增益误差漂移 GE_{FDA_Drift}	$\frac{2 \times R_{FDA_Drift_PPM} \times \Delta T}{10^4} \% \times \text{FullScaleSensor}$	15ppm/°C	90.0	0.36
计算得出的总温漂误差	$\sqrt{V_{OS_Drift_TOTAL}^2 + GE_{Input_Drift}^2 + GE_{FDA_Drift}^2}$		134.2	0.45
计算出的总绝对误差	25°C 时的总误差 + 总温漂误差		239.3	0.80

总结

INA851 集成式设计是出色的低成本紧凑型设计，具有高精度性能。当使用高精度、低漂移、匹配的外部电阻器时，采用分立式 OPA2210-THP210 设计可以以更高的成本实现更高的性能。

以上讨论了使用 INA851 的集成全差分输出仪表放大器设计与使用带精密分立式电阻器的 OPA2210 和 THP210 的分立式设计的设计权衡及两种设计的性能差异。本文档提供的信息可帮助设计工程师根据成本和性能要求实现设计。

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