

# Analog Engineer's Circuit

## 具有前端增益级的隔离式 电流检测电路



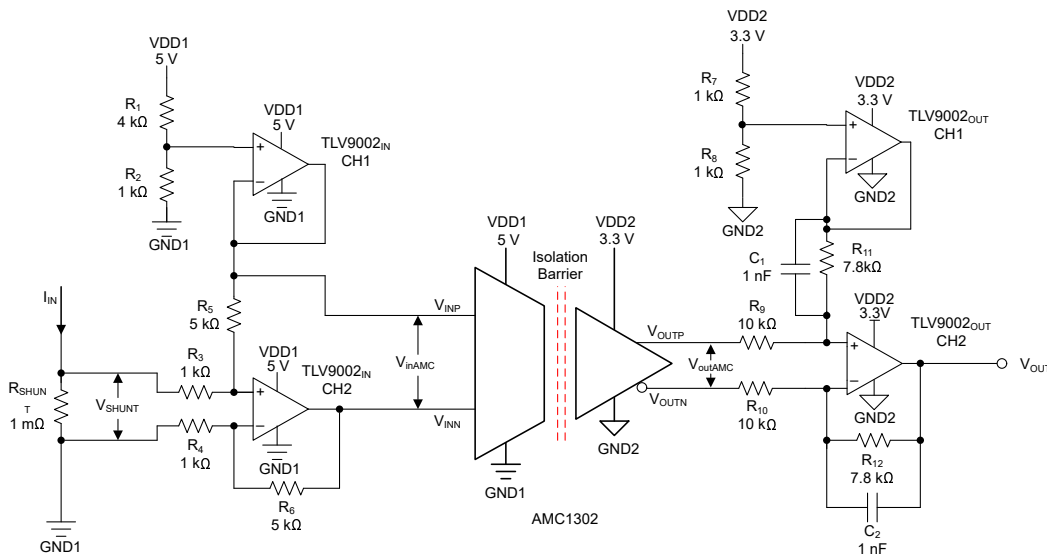
### Data Converters

#### 设计目标

电流源 (标称值)		电流源 (短路)	输入电压		输出电压	电源	
$I_{IN\ MIN}$	$I_{IN\ MAX}$	$I_{SHORT}$	$V_{SHUNT,\ MIN}$	$V_{SHUNT,\ MAX}$	$V_{OUT}$	$V_{DD1}$	$V_{DD2}$
$\pm 10\text{mA}$	$\pm 10\text{A}$	$\pm 200\text{A}$	$\pm 10\mu\text{V}$	$\pm 10\text{mV}$	$55\text{ mV} - 3.245\text{ V}$	$5\text{V}$	$3.3\text{V}$

#### 设计说明

一些应用需要使用电路来测量小标称电流，同时承受高短路电流，例如断路器。本电路设计文档介绍了一种隔离式电流检测电路，可以准确测量  $\pm 10\text{mA}$  至  $\pm 10\text{A}$  的标称负载电流，同时可承受高达  $\pm 200\text{A}$  的短路电流。对于该电路，假设输出与  $3.3\text{V}$  单端 ADC (例如集成到 MSP430 中的 ADC) 一起使用。被测线路电流与 ADC 之间的隔离是使用隔离放大器 (AMC1302) 实现的。在使用  $1\text{m}\Omega$  分流电阻器的情况下，预期的最小标称电流会产生  $\pm 10\mu\text{V}$  信号，由于  $\Delta-\Sigma$  调制器死区，该信号太小而无法在零电压输入附近被准确解析。为了解决此问题，电路可使用一个 2 通道运算放大器 (TLV9002) 以  $5\text{V/V}$  的增益将信号放大并将共模电压设置为  $1\text{V}$ ；这不仅能使最小标称电流脱离死区，而且能使最大标称电流达到隔离放大器的满量程线性输入范围。隔离放大器的满量程线性输入范围为  $\pm 50\text{mV}$ ，差分输出摆幅为  $\pm 2.05\text{V}$ ，输出共模电压为  $1.44\text{V}$ ，内部固定增益为  $41\text{V/V}$ 。在隔离放大器的输出侧，使用了第二个 2 通道运算放大器 (TLV9002)，其中第一个通道用于将单端共模电压设置为  $1.65\text{V}$ ，第二个通道用于将隔离放大器的差分输出信号转换为可与  $3.3\text{V}$  单端 ADC 一起使用的单端信号。



## 设计说明

1. 得益于 AMC1302 的低功耗、分辨率和  $\pm 50\text{mV}$  满量程输入电压范围，我们选择该器件作为隔离放大器。
2. 得益于 TLV9002 的低成本、低失调电压、小尺寸和双通道封装，选择该器件作为运算放大器。
3. 为 VDD1 和 VDD2 选择低阻抗、低噪声源，这两者为 TLV9002<sub>IN</sub>、TLV9002<sub>OUT</sub> 和 AMC1302 提供电源，同时还用于设置单端输出的共模电压。
  - VDD1 以 GND1 为基准，VDD2 以 GND2 为基准。
4. 为获得超高精度，请使用温度系数低的精密分流电阻器。
5. 根据预期的标称和短路输入电流水平选择分流电阻器。
  - a. 对于连续运行，根据 IEEE 标准，在正常条件下，分流电阻器的工作电流不得超过额定电流的三分之二。对于具有严格功耗要求的应用，可能需要进一步降低分流电阻或增加额定功率。
  - b. 对于短路电流，请查看分流电阻数据表中的短期过载规格。该电流通常是标称功率耗散的 5 倍。
  - c. 如需有关计算功率耗散方面的帮助，请参阅[隔离放大器电流检测 Excel 计算器](#)。
6. 使用适当的电阻分压器值来设置 TLV9002<sub>IN</sub> 和 TLV9002<sub>OUT</sub> 通道 1 上的共模电压。确保不违反隔离放大器的输入共模规格。
7. 为 TLV9002<sub>OUT</sub> 通道 2 上的增益设置电阻器选择合适的值，以便单端输出具有合适的输出摆幅。

## 设计步骤

1. 根据最大标称电流确定相应的分流电阻器值。

$$R_{SHUNT} = \frac{V_{inMax}}{I_{inMax}} = \frac{50\text{ mV}}{10\text{ A}} = 5\text{ m}\Omega$$

2. 由于该分流电阻器必须能够承受 200A 的短路电流，因此进一步将分流电阻器的电阻降低为原来的五分之一，这在[步骤 6](#)中得到了补偿。确定最大标称电流工作期间的分流电阻器功率耗散。

$$PoWer_{R_{SHUNT}} = I_{inMax}^2 \times R_{SHUNT} = (100\text{ A})^2 \times 1\text{ m}\Omega = 0.1\text{ W}$$

确定最小标称电流工作期间的分流电阻器功率耗散。

$$PoWer_{R_{SHUNT}} = I_{inMin}^2 \times R_{SHUNT} = (0.1\text{ mA})^2 \times 1\text{ m}\Omega = 0.1\text{ }\mu\text{W}$$

3. 确定短路期间的分流电阻器功率耗散。请务必验证所选的短期过载规格（通常为标称值的 5 倍）是否能够承受短路耗散的功率。

$$PoWer_{R_{SHUNT}} = I_{inShort}^2 \times R_{SHUNT} = (40,000\text{ A})^2 \times 1\text{ m}\Omega = 40\text{ W}$$

选择功耗降低为原来的五分之一的分流电阻器。因此，如果短期过载要求为 40W，则分流  $P_{dissipation} = 8\text{W}$ 。有关更多详细信息，请参阅[隔离式电流检测的设计注意事项](#)模拟设计期刊。

4. TLV9002<sub>IN</sub> 的通道 1 用于设置 TLV9002<sub>IN</sub> 通道 2 的单端输出的 1V 共模电压。通道 1 的 1V 输出也被发送到 AMC1302 的正输入端。在使用 5V 电源的情况下，可以使用一个简单的电阻分压器将 5V 分压为 1V。在使用  $4\text{k}\Omega$  的  $R_1$  时，可以通过以下公式计算  $R_2$ 。

$$R_2 = \frac{V_{CM} \times R_1}{V_{DD} - V_{CM}} = \frac{1.00\text{ V} \times 4000\text{ }\Omega}{5.00\text{ V} - 1.00\text{ V}} = 1000\text{ }\Omega$$

5. TLV9002<sub>IN</sub> 的通道 2 用于放大分流电阻器的电压，以便在测量最大标称电流范围时利用 AMC1302 的满量程输入电压范围。对于 1mΩ 的分流电阻器和 ±10A 的最大标称电流，分流电阻器的输出电压为 ±10mV。由于 AMC1302 的最大输入电压为 ±50mV，必须以 5V/V 的增益放大分流电阻器的输出。在保持 R<sub>3</sub>|R<sub>4</sub> 为 1kΩ 的同时，可以通过以下公式计算 R<sub>5</sub>|R<sub>6</sub> 的电阻值。

$$Gain \left( \frac{V}{V} \right) = \frac{R_{5,6}}{R_{3,4}}; R_{5,6} = Gain \left( \frac{V}{V} \right) \times R_{3,4} = 5 \frac{V}{V} \times 1 \text{ k}\Omega = 5 \text{ k}\Omega$$

6. 根据所选的分流电阻器，验证在短路期间是否未违反 AMC1302 输入的绝对最大电压限制。200A 短路电流会在 AMC1302 上施加 1V 的差分电压。由于输入共模被设置为 1V，因此相对于 GND1，AMC1302 的负输入端上会施加最大 2V 的电压。

$$V_{inAMC} = 200 \text{ A} \times 0.001 \Omega \times 5 \frac{V}{V} = 1 \text{ V}$$

AMC1302 的绝对最大输入电压比高侧电源电压高 500mV ( 如 [AMC1302 精密、±50mV 输入、增强型隔离放大器](#) 数据表中所述 )。在使用 5V 高侧电源电压时，不会违反绝对最大输入电压额定值。

7. TLV9002<sub>OUT</sub> 的通道 1 用于设置 TLV9002<sub>OUT</sub> 通道 2 的单端输出的 1.65V 共模电压。在使用 3.3V 电源的情况下，可以使用一个简单的电阻分压器将 3.3V 分压为 1.65V。在使用 1kΩ 的 R<sub>7</sub> 时，可以通过以下公式计算 R<sub>8</sub>。

$$R_8 = \frac{V_{CM} \times R_7}{V_{DD} - V_{CM}} = \frac{1.65 \text{ V} \times 1000 \Omega}{3.3 \text{ V} - 1.65 \text{ V}} = 1000 \Omega$$

8. 虽然 TLV9002 是轨至轨运算放大器，但 TLV9002 的输出最多只能相对于电源轨摆动 55mV。因此，TLV9002<sub>OUT</sub> 的单端输出摆动范围为 55mV 至 3.245V (3.19V<sub>pk-pk</sub>)。
9. AMC1302 的 V<sub>OUTP</sub> 和 V<sub>OUTN</sub> 输出为 2.05V<sub>pk-pk</sub>，具有 180 度的相位差，共模电压为 1.44V。因此，差分输出为 ±2.05V 或 4.1V<sub>pk-pk</sub>。

为了保持在 TLV9002<sub>OUT</sub> 的输出限制范围内，AMC1302 的输出需要衰减为原来的 3.2/4.1。当 R<sub>9</sub> = R<sub>10</sub> 且 R<sub>11</sub> = R<sub>12</sub> 时，可以使用差分转单端级的以下传递函数来计算 R<sub>11</sub> 和 R<sub>12</sub>。

$$V_{OUT} = (V_{OUTP} - V_{OUTN}) \times \left( \frac{R_{11,12}}{R_{9,10}} \right) + V_{CM}$$

10. 通过使用之前计算的 TLV9002<sub>OUT</sub> 输出摆幅并将 R<sub>9</sub> 和 R<sub>10</sub> 设置为 10kΩ，可以使用以下公式计算得出 R<sub>11</sub> 和 R<sub>12</sub> 为 7.8kΩ。

$$3.2 = (2.465 \text{ V} - 415 \text{ mV}) \times \left( \frac{R_{11,12}}{10 \text{ k}\Omega} \right) + 1.65$$

在使用标准的 0.1% 电阻值时，可以使用 7.8kΩ 电阻器。这提供了 TLV9002 限制范围内的最大输出摆幅。

11. 电容器 C<sub>1</sub> 和 C<sub>2</sub> 与电阻器 R<sub>11</sub> 和 R<sub>12</sub> 并联放置，可限制高频信号。当 R<sub>11</sub> = R<sub>12</sub> 且 C<sub>1</sub> = C<sub>2</sub> 时，可以通过以下公式计算截止频率。

$$f_c = \frac{1}{2 \times \pi \times R_{11,12} \times C_{1,2}}$$

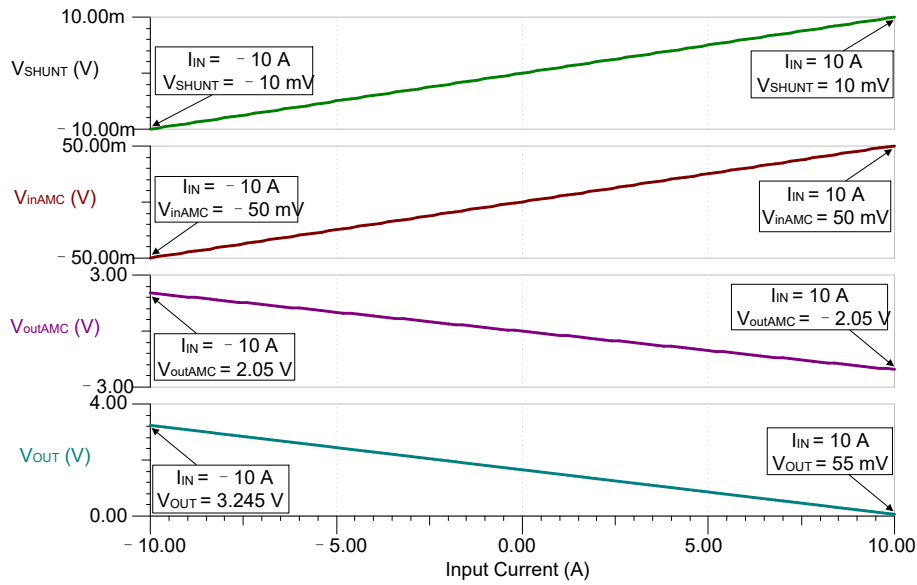
当 C<sub>1</sub> = C<sub>2</sub> = 1nF 且 R<sub>11</sub> = R<sub>12</sub> = 7800Ω 时，可以计算得出截止频率为 20.414kHz。

$$f_c = \frac{1}{2 \times \pi \times 7800 \Omega \times 1 \text{ nF}} = 20.414 \text{ kHz}$$

## 设计仿真

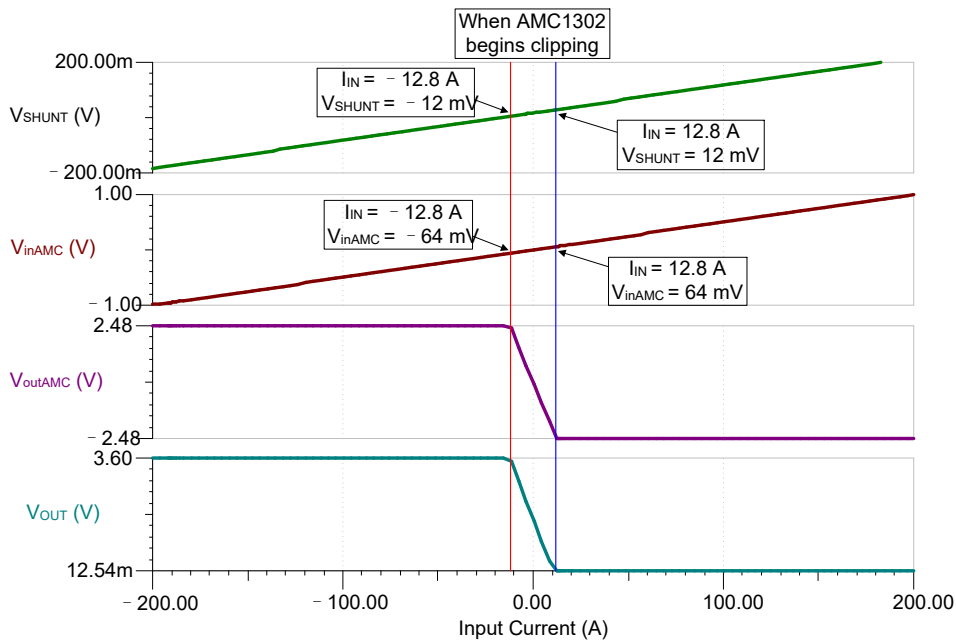
### 直流仿真结果

仿真结果展示了分流器电压的仿真直流特性、AMC1302 的差分输入/输出以及 TLV9002 放大器的单端输出 ( -10A 至 10A )。



仿真结果

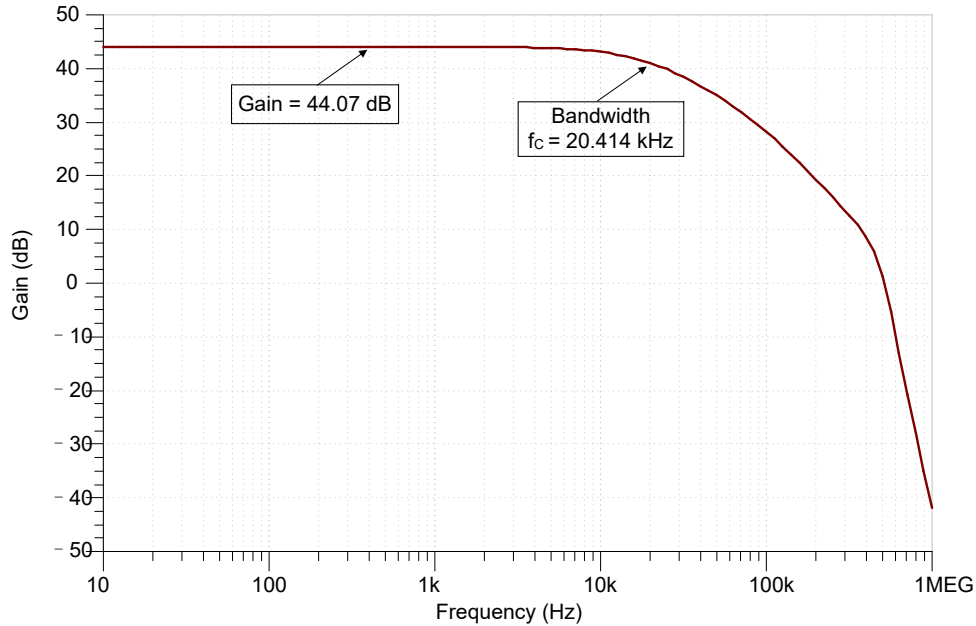
短路事件仿真通过演示输入和输出如何在  $\pm 200A$  下做出反应，显示了短路事件期间的电路仿真。穿过图形的红线和蓝线标记了 AMC1302 的输出开始削波点。从该点开始，电路的目的是在发生短路事件后继续运行。在设计步骤部分中，选择了适当的 AMC1302 高侧增益和分流电阻值以避免在该事件期间造成损坏。以下仿真验证了这些选择：在短路事件中进入 AMC1302 的最大输入电压为  $\pm 1V$ ，低于该器件的绝对最大额定值。因此，仿真确认电路在短路事件过去后继续运行。



短路事件仿真

## 闭环交流仿真结果

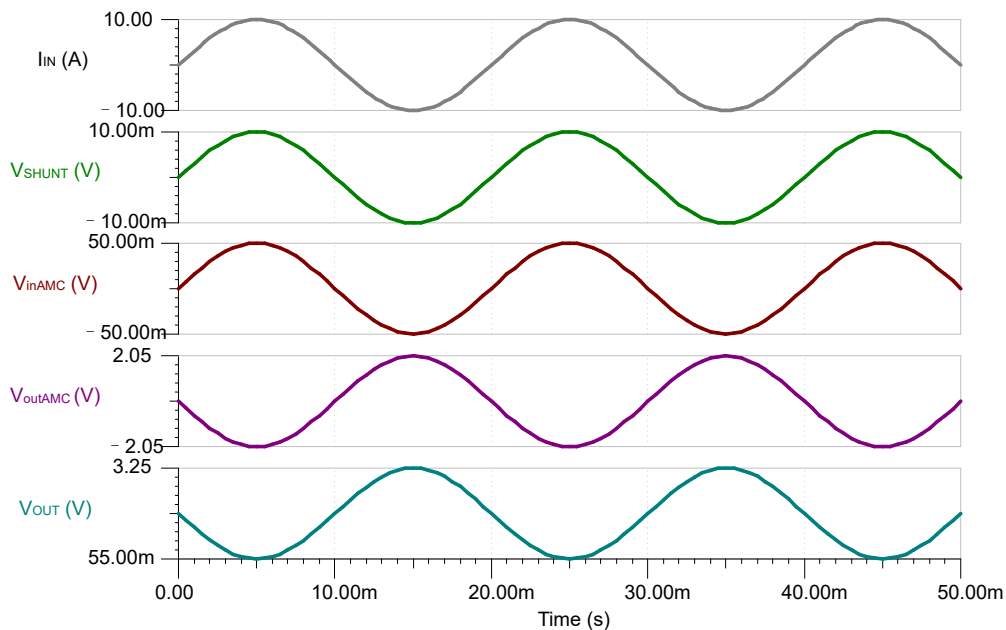
交流仿真显示了单端输出的交流传递特性。该仿真显示当频率接近并超过使用步骤 11 中第二个公式计算的截止频率时预期的增益 (dB)。模拟前端增益为 5V/V，AMC1302 增益为 41V/V，差分转单端增益为 0.78V/V；因此，预计增益为 44.07dB，如下图所示。



交流仿真

## 正弦波仿真结果

正弦波模拟展示了分流器的输出、AMC1302 的差分输入和输出以及 TLV9002 响应正弦波的单端输出 ( 振幅为 -10A 至 10A )。AMC1302 的差分输出为  $\pm 2.05V_{pk-pk}$ ，与预期相符，单端输出为  $3.19V_{pk-pk}$ ，摆动范围为 55mV 至 3.245V。



正弦波仿真

## 设计参考资料

请参阅 [模拟工程师电路设计指导手册](#)，了解 TI 综合电路库，并参阅 [将差分输出（隔离式）放大器连接到单端输入 ADC 应用简报](#)，了解有关差分至单端转换输出的更多信息。

## 设计采用的隔离式放大器

AMC1302	
工作电压	1500 V <sub>RMS</sub>
Gain	41 V/V
带宽	280 kHz (典型值)
线性输入电压范围	±50mV
输入电阻	4.9kΩ (典型值)
输入偏移电压和漂移	±50μV (最大值)、±0.8μV/°C (最大值)
增益误差和漂移	±0.2% (最大值)、±35ppm/°C (最大值)
非线性度和漂移	0.03% (最大值)、1ppm/°C (典型值)
隔离瞬态过压	7071V <sub>PEAK</sub>
共模瞬态抗扰度 (CMTI)	100kV/μs (最小值)

## 设计备选隔离式放大器

AMC3302	
工作电压	1200 V <sub>RMS</sub>
Gain	41 V/V
带宽	334 kHz (典型值)
线性输入电压范围	±50mV
输入电阻	4.9kΩ (典型值)
输入偏移电压和漂移	±50μV (最大值)、±0.5μV/°C (最大值)
增益误差和漂移	±0.2% (最大值)、±35ppm/°C (最大值)
非线性度和漂移	±0.03% (最大值)、1ppm/°C (典型值)
隔离瞬态过压	6000V <sub>PEAK</sub>
共模瞬态抗扰度 (CMTI)	95kV/us (最小值)

AMC1202	
工作电压	1000 V <sub>RMS</sub>
Gain	41 V/V
带宽	280 kHz (典型值)
线性输入电压范围	±50mV
输入电阻	4.9kΩ (典型值)
输入偏移电压和漂移	±50μV (最大值)、±0.8μV/°C (最大值)
增益误差和漂移	±0.2% (最大值)、±35ppm/°C (最大值)
非线性度和漂移	±0.03% (最大值)、1ppm/°C (典型值)
隔离瞬态过压	4250V <sub>PEAK</sub>
共模瞬态抗扰度 (CMTI)	100kV/μs (最小值)

## 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