

# 具有低侧基准和一个 IDAC 电流源的三线 PT100 RTD 测量电路

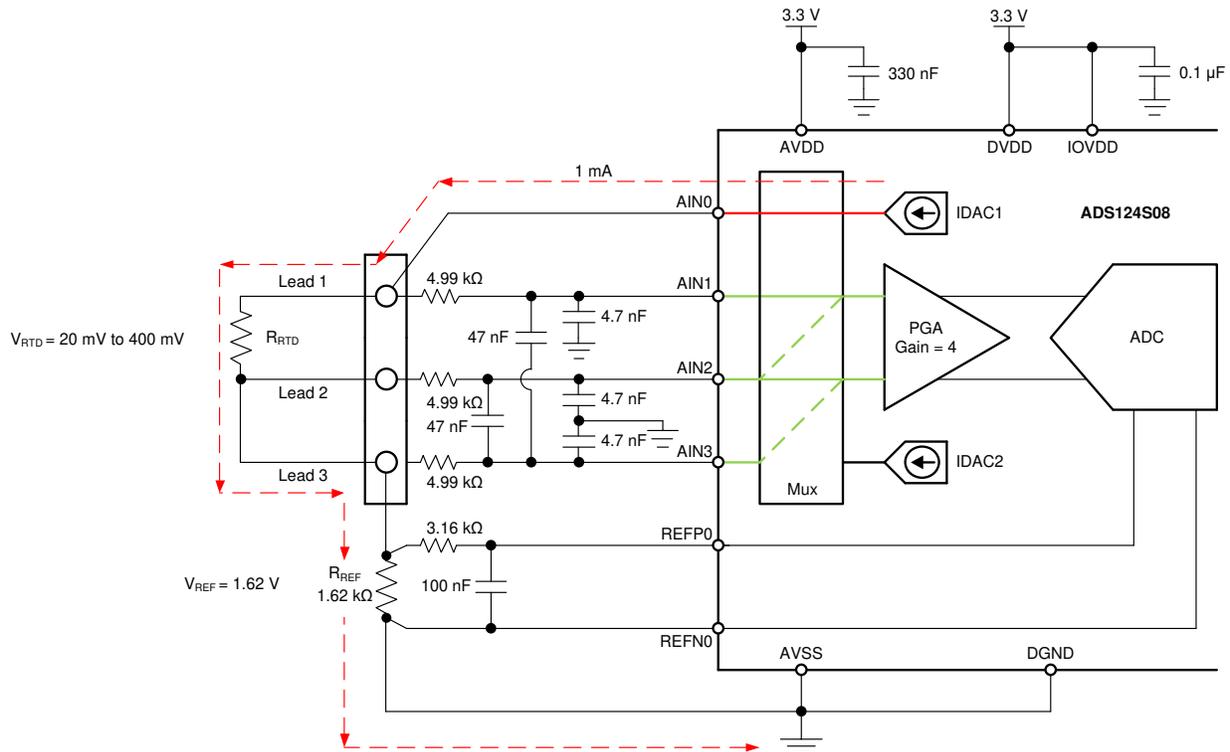


Joseph Wu

电源		
AVDD	AVSS、DGND	DVDD、IOVDD
3.3V	0V	3.3V

## 设计说明

本指导设计介绍了如何使用 [ADS124S08](#) 对具有低侧基准的三线 RTD 进行温度测量。与进行单次测量的 [具有低侧基准和两个 IDAC 电流源的三线 PT100 RTD 测量电路](#) 相比，本设计使用单个 IDAC 激励电流源并进行二次测量以消除引线电阻误差。本设计对温度测量范围为  $-200^{\circ}\text{C}$  至  $850^{\circ}\text{C}$  的 PT100 型的 RTD 进行比率测量。本设计包括设置 ADC 配置寄存器、配置伪代码和从设备中读取信息。此电路可用于 PLC [模拟输入模块](#)、[实验室仪表](#) 和 [工厂自动化](#) 等应用。更多有关使用各种 RTD 接线配置进行精确 ADC 测量的信息，请参阅 [《RTD 测量基本指南》](#)。



## 设计注意事项

1. 模拟和数字电源均使用电源去耦电容。AVDD 必须与至少为 330nF 的电容器解耦到 AVSS。DVDD 和 IOVDD (在未连接到 DVDD 时) 必须与至少为 0.1 $\mu$ F 的电容器解耦到 DGND。有关电源相关建议的详细信息, 请参阅《具有 PGA 和电压基准的 ADS124S0x 低功耗、低噪声、高集成度、6/12 通道、4kSPS、24 位  $\Delta$ - $\Sigma$  ADC》数据表。
2. 不要使用与 ADC 输入和 IDAC 电流源输出相同的引脚使激励电流流过输入滤波电阻器。与串联电阻发生反应的激励电流会增加测量误差。
3. REFOUT 和 REFCOM 之间需要一个 1 $\mu$ F 电容器, 以启用 IDAC 电流的内部基准。
4. 使用具有高精度和低漂移的精密基准电阻器。由于测量是比率式的, 因此精度取决于该基准电阻器的误差。0.01% 的电阻器会产生与 ADC 类似的增益误差。
5. 如果可能, 使用 COG (NPO) 陶瓷电容器进行输入滤波。这些电容器中使用的电介质在电压、频率和温度变化时提供最稳定的电气性能。
6. 使用标准电容器值和 1% 电阻器值选择 ADC 输入和基准输入的输入滤波。《使用 ADS1148 和 ADS1248 系列器件进行 RTD 比率测量和滤波》中提供了这些滤波器的设计示例和分析。
7. 该设计显示了与 ADC 多路复用器的四个输入引脚的连接。其余的模拟输入可用于 RTD、热电偶或其他测量。
8. 三线 RTD 测量比同类的两线 RTD 测量更精确, 而且比使用匹配的 IDAC 电流源的两线 RTD 具有更好的抗 IDAC 电流失配性能。有关其他 RTD 接线配置的测量, 请参阅《RTD 测量基本指南》。

## 元件选型

1. 确定 RTD 的工作范围。

例如, 如果温度测量范围为  $-200^{\circ}\text{C}$  至  $850^{\circ}\text{C}$ , 那么 PT100 RTD 的测量范围约为  $20\ \Omega$  至  $400\ \Omega$ 。基准电阻器必须大于最大 RTD 值。基准电阻和 PGA 增益决定了测量的正满度范围。

2. 确定 IDAC 激励电流和基准电阻器的值。

首先进行该设计, 使激励电流驱入 RTD 引线 1、流经 RTD 再通过引线 3 流出 RTD。此时, 忽略引线电阻误差, 这样从 AIN1 到 AIN2 的测量仅测量 RTD 电阻。

该设计中的激励电流源选择为 1mA。这可以最大程度地增大 RTD 电压的值, 同时使 RTD 的自热较低。对于小型薄膜元件, RTD 自热系数的典型范围为  $2.5\text{mW}/^{\circ}\text{C}$ , 对于较大的线绕元件, 该范围为  $65\text{mW}/^{\circ}\text{C}$ 。在最大 RTD 电阻值下激励电流为 1mA 时, RTD 中的功耗小于 0.4mW, 并将自热导致的测量误差保持在  $0.01^{\circ}\text{C}$  以内。

在选择 IDAC 电流强度之后, 设置  $R_{\text{REF}} = 1620\ \Omega$ 。这会将基准设为 1.62V, 最大 RTD 电压为 400mV。基准电压充当电平转换, 以使输入测量接近中位电压, 从而使测量处于 PGA 输入工作范围之内。使用这些值, PGA 增益可以设置为 4, 以便最大 RTD 电压接近正满度范围而不超过它。

基准电阻器  $R_{\text{REF}}$  必须是具有高精度和低漂移的精密电阻器。 $R_{\text{REF}}$  中的任何误差都反映了 RTD 测量中的相同误差。所示出的 REFPO 和 REFNO 引脚作为开尔文连接与  $R_{\text{REF}}$  电阻器相连, 以获得最佳的基准电压测量值。这消除了作为基准电阻测量误差的一切串联电阻。

使用最大 RTD 电阻，ADC 输入电压按以下公式计算。该计算中，可以忽略微小的引线电阻。

$$V_{AIN1} = I_{IDAC1} \cdot (R_{RTD} + R_{REF}) = 1\text{mA} \cdot (400\ \Omega + 1620\ \Omega) = 2.02\text{V}$$

$$V_{AIN2} = I_{IDAC1} \cdot R_{REF} = 1\text{mA} \cdot 1620\ \Omega = 1.62\text{V}$$

$$V_{INMAX} = 1\text{mA} \cdot 400\ \Omega = 400\text{mV}$$

3. 验证设计是否处于 ADC 的工作范围之内。

首先，假设增益为 4，AVDD 为 3.3V，AVSS 为 0V 时，验证  $V_{AIN1}$  和  $V_{AIN2}$  是否在 PGA 的输入范围内。如《具有 PGA 和电压基准的 ADS124S0x 低功耗、低噪声、高集成度、6/12 通道、4kSPS、24 位、 $\Delta$ - $\Sigma$  ADC》数据表中所示，绝对输入电压必须满足以下条件：

$$AVSS + 0.15\text{V} + [|V_{INMAX}| \cdot (\text{Gain} - 1) / 2] < V_{AIN1}, V_{AIN2} < AVDD - 0.15\text{V} - [|V_{INMAX}| (\text{Gain} - 1) / 2]$$

$$0\text{V} + 0.15\text{V} + [|V_{INMAX}| \cdot (\text{Gain} - 1) / 2] < V_{AIN1}, V_{AIN2} < 3.3\text{V} - 0.15\text{V} - [|V_{INMAX}| (\text{Gain} - 1) / 2]$$

$$0.75\text{V} < V_{AIN1}, V_{AIN2} < 2.55\text{V}$$

由于 AIN1 和 AIN2 的最大和最小输入电压 (2.02V 和 1.62V) 介于 0.75V 和 2.55V 之间，因此输入处于 PGA 工作范围之内。

其次，验证 IDAC 输出引脚上的电压是否处于电源顺从电压范围之内。IDAC 引脚是 AIN0，其电压与 AIN1 相同。在最大电压下， $V_{AIN0}$  为 2.02V。如《具有 PGA 和电压基准的 ADS124S0x 低功耗、低噪声、高集成度、6/12 通道、4kSPS、24 位、 $\Delta$ - $\Sigma$  ADC》数据表中的“电气特性”表所示，对于 1mA 的 IDAC 电流，IDAC 的输出电压必须介于 AVSS 和 AVDD - 0.6V 之间。在该示例中，当 AVDD = 3.3V 时，IDAC 输出必须满足：

$$AVSS < V_{AIN0} = V_{AIN1} < AVDD - 0.6\text{V}$$

$$0\text{V} < V_{AIN0} < 2.7\text{V}$$

结合之前的结果，满足 IDAC 的输出顺从性。

4. 使用两种不同的测量方法来测量 RTD 电阻，消除引线电阻误差。

ADC 的第一次测量是在 AIN1 和 AIN2 上测量的，包括引线电阻。

$$\text{Measurement 1} = V_{AIN1} - V_{AIN2} = I_{IDAC1} \cdot (R_{RTD} + R_{LEAD1})$$

由于 IDAC 电流不通过引线 2，其电阻不在测量范围内。然后，将 ADC 的输入多路复用器设置为对 AIN2 和 AIN3 进行第二次测量。这样，测量了引线 3 电阻两端之间的压降。

$$\text{Measurement 2} = V_{AIN2} - V_{AIN3} = I_{IDAC1} \cdot R_{LEAD3}$$

从测量 1 中减去测量 2，得出以下结果。

$$\text{Measurement 1} - \text{Measurement 2} = [I_{IDAC1} \cdot (R_{RTD} + R_{LEAD1})] - (I_{IDAC1} \cdot R_{LEAD3})$$

如果引线电阻相等，则引线电阻误差消失以获得最终结果。

$$\text{Measurement 1} - \text{Measurement 2} = I_{IDAC1} \cdot R_{RTD}$$

5. 为 ADC 输入和基准输入选择差分与共模滤波值。

此设计包含差分与共模输入 RC 滤波。差分输入滤波的带宽设置为至少比 ADC 的数据速率高 10 倍。共模电容器选择为差分电容器值的 1/10。由于电容器的选择，共模输入滤波的带宽比差分输入滤波带宽大约高 20

倍。虽然串联滤波电阻器提供一定程度的输入保护，但应使输入电阻器保持低于 10kΩ，以便为 ADC 提供适当的输入采样。

在进行输入滤波的情况下，差分信号以低于共模信号的频率衰减，共模信号会被器件的 PGA 显著抑制。共模电容器的失配会导致非对称噪声衰减，表现为差分输入噪声。当差分信号的带宽较低时，可降低输入共模电容器失配的影响。ADC 输入和基准输入的输入滤波是针对相同的带宽进行设计的。

在此设计中，采用 ADS124S08 的低延迟滤波器将数据速率选择为 20SPS。这种滤波提供了具有单周期稳定和抑制 50Hz 和 60Hz 线路噪声能力的低噪声测量。对于 ADC 输入滤波，通过以下公式近似计算差分滤波和共模滤波的带宽频率。

$$f_{IN\_DIFF} = 1 / [2 \cdot \pi \cdot C_{IN\_DIFF} (R_{RTD} + 2 \cdot R_{IN})]$$

$$f_{IN\_CM} = 1 / [2 \cdot \pi \cdot C_{IN\_CM} (R_{RTD} + R_{IN} + R_{REF})]$$

对于 ADC 输入滤波， $R_{IN} = 4.99k\Omega$ ， $C_{IN\_DIFF} = 47nF$ ， $C_{IN\_CM} = 4.7nF$ 。这将差分滤波器带宽设置为 330Hz，将共模滤波器带宽设置为 5kHz。

通过以下公式近似计算基准输入滤波的带宽。

$$f_{REF} = 1 / [2 \cdot \pi \cdot C_{REF} \cdot (R_{REF} + R_{IN\_REF})]$$

对于基准输入滤波， $R_{IN\_REF} = 3.16k\Omega$ ， $C_{REF\_DIFF} = 100nF$ 。这将基准滤波器带宽设置为 330Hz。由于 REFNO 设置为接地，因此去除了共模滤波。可能无法匹配 ADC 输入和基准输入滤波。然而，保持带宽接近可以减少测量中的噪声。

有关输入滤波元件选择的深入分析，请参阅《使用 ADS1148 和 ADS1248 系列器件进行 RTD 比率测量和滤波》。

## 测量转换

RTD 测量通常是比率测量。使用比率测量，无需将 ADC 输出代码转换为电压。这意味着输出代码仅作为基准电阻器的比率给出测量值，无需激励电流的精确值。唯一的要求是流经 RTD 和基准电阻器的电流相同。

显示了 24 位 ADC 的测量转换公式。首先，显示测量 1 的结果。

$$\text{Output Code 1} = 2^{23} \cdot \text{Gain} \cdot [(V_{RTD} + V_{LEAD1}) / V_{REF}] = 2^{23} \cdot \text{Gain} \cdot [I_{IDAC1} \cdot (R_{RTD} + R_{LEAD1})] / (I_{IDAC1} \cdot R_{REF}) = 2^{23} \cdot \text{Gain} \cdot [(R_{RTD} + R_{LEAD1}) / R_{REF}]$$

$$R_{RTD} + R_{LEAD1} = R_{REF} \cdot [\text{Output Code} / (\text{Gain} \cdot 2^{23})]$$

然后，显示测量 2 的结果。

$$\text{Output Code 2} = 2^{23} \cdot \text{Gain} \cdot (V_{LEAD3} / V_{REF}) = 2^{23} \cdot \text{Gain} \cdot (I_{IDAC1} \cdot R_{LEAD3}) / (I_{IDAC1} \cdot R_{REF}) = 2^{23} \cdot \text{Gain} \cdot (R_{LEAD3} / R_{REF})$$

$$R_{LEAD3} = R_{REF} \cdot [\text{Output Code} / (\text{Gain} \cdot 2^{23})]$$

假设引线电阻相等，则测量 1 减去测量 2 的结果，得到等效的 RTD 电阻。

$$R_{RTD} = R_{REF} \cdot [(\text{Output Code 1} - \text{Output Code 2}) / (\text{Gain} \cdot 2^{23})]$$

ADC 将测量值转换为 RTD 等效电阻。由于 RTD 响应的非线性，电阻到温度的转换需要通过公式或查找表进行计算。更多有关 RTD 电阻到温度转换的信息，请参阅《RTD 测量基本指南》。

## 寄存器设置

### 具有低侧基准和一个采用 ADS124S08 的 IDAC 电流源的三线 PT100 RTD 测量电路的配置寄存器设置

寄存器地址	寄存器名称	设置	说明
02h <sup>(1)</sup>	INPMUX	12h	选择 AIN <sub>P</sub> = AIN <sub>1</sub> ，AIN <sub>N</sub> = AIN <sub>2</sub>

具有低侧基准和一个采用 ADS124S08 的 IDAC 电流源的三线 PT100 RTD 测量电路的配置寄存器设置  
(continued)

寄存器地址	寄存器名称	设置	说明
03h	PGA	0Ah	启用 PGA, 增益 = 4
04h	DATARATE	14h	连续转换模式, 低延迟滤波器, 20SPS 数据速率
05h	REF	12h	启用正基准缓冲器, 禁用负基准缓冲器, 选择 REFPO 和 REFNO 基准输入, 始终开启内部基准。
06h	IDACMAG	07h	IDAC 大小设置为 1mA
07h	IDACMUX	F0h	IDAC1 设置为 AIN0, 禁用 IDAC2
08h	VBIAS	00h	VBIAS 未用于任何输入
09h	SYS	10h	正常工作模式
02h <sup>(2)</sup>	INPMUX	23h	选择 AINP = AIN2, AINN = AIN3

- (1) 该输入多路复用器设置用于测量 1。  
 (2) 该输入多路复用器设置用于测量 2, 作为引线电阻误差的测量。

### 伪代码示例

下面显示了伪代码序列以及设置器件和与 ADC 接口的微控制器, 以便在连续转换模式下从 ADS124S0x 获取后续读数。专用的  $\overline{\text{DRDY}}$  引脚指示新转换数据的可用性。在使用 STATUS 字节和 CRC 数据验证的情况下显示伪代码。ADS124S08 固件示例代码可从 ADS124S08 产品文件夹中获得。

```

Configure microcontroller for SPI mode 1 (CPOL = 0, CPHA = 1)
Configure microcontroller GPIO for /DRDY as a falling edge triggered interrupt input
Set CS low;
Send 06; // RESET 命令确保器件在上电后正确复位
Set CS high;
Set CS low; // 配置器件
Send 42 // WREG 起始地址为 02h
05 // 写入 6 个寄存器
12 // 选择 AINP = AIN1, AINN = AIN2
0A // 启用 PGA, 增益 = 4
14 // 连续转换模式, 低延迟滤波器, 20SPS 数据速率
12 // 启用正基准缓冲器, 禁用负基准缓冲器
// 选择 REFPO 和 REFNO 基准, 始终开启内部基准 07 // IDAC 大小设置为 1mA
F0 // IDAC1 设置为 AIN0, 禁用 IDAC2
Set CS high;
Set CS low; // 为了验证, 回读配置寄存器
Send 22 // RREG 起始地址为 02h
05 // 从 6 个寄存器中读取
00 00 00 00 00 00; // 发送 6 个 NOP 进行读取
Set CS high;
Set CS low;
Send 08; // 发送 START 命令以在连续转换模式下转换
Set CS high;
Loop
{
Set CS low; // 配置器件用于测量 1
Send 42 // WREG 起始地址为 02h
00 // 写入 1 个寄存器
12; // 选择 AINP = AIN1, AINN = AIN2
Set CS high;
等待 DRDY 转低;
Set CS low;
Send 12 // 发送 RDATA 命令
00 00 00; // 发送 3 个 NOP (24 个 SCLK) 到时钟输出数据
Set CS high;
Set CS low; // 配置器件用于测量 2
Send 42 // WREG 起始地址为 02h
00 // 写入 1 个寄存器
23; // 选择 AINP = AIN2, AINN = AIN3
Set CS high;
等待 DRDY 转低;
Set CS low;
Send 12 // 发送 RDATA 命令
00 00 00; // 发送 3 个 NOP (24 个 SCLK) 到时钟输出数据
Set CS high;
测量 1 减去测量 2; // 消除引线电阻误差

```

```

}
Set CS low;
Send 0A;//STOP 命令用于停止转换并将器件置于待机模式
Set CS to high;
    
```

## RTD 电路比较表

RTD 电路拓扑	优势	劣势
双线 RTD, 低侧基准	最经济	精度最低, 无引线电阻消除
三线 RTD, 低侧基准, 两个 IDAC 电流源	允许引线电阻消除	对 IDAC 电流失配敏感, 可以通过交换 IDAC 电流并对两次测量求平均值来消除失配
三线 RTD, 低侧基准, 一个 IDAC 电流源	允许引线电阻消除	需要进行两次测量, 第一次用于 RTD 测量, 第二次用于引线电阻消除
三线 RTD, 高侧基准, 两个 IDAC 电流源	允许引线电阻消除, 与使用低侧基准相比, 对 IDAC 失配的敏感度更低。	需要额外的电阻器进行偏置, 增加的电压可能与低电源操作不兼容
四线 RTD, 低侧基准	精度最高, 无引线电阻误差	最昂贵

## 设计精选器件

器件	关键特性	链接	其他可能的器件
ADS124S08	用于精密传感器测量且具有 PGA 和电压基准的 24 位、4kSPS、12 通道 $\Delta$ - $\Sigma$ ADC	<a href="http://www.ti.com.cn/product/cn/ADS124S08">www.ti.com.cn/product/cn/ADS124S08</a>	<a href="#">链接到类似器件</a>
ADS114S08 (1)	用于精密传感器测量且具有 PGA 和电压基准的 16 位、4kSPS、12 通道 $\Delta$ - $\Sigma$ ADC	<a href="http://www.ti.com.cn/product/cn/ADS114S08">www.ti.com.cn/product/cn/ADS114S08</a>	<a href="#">链接到类似器件</a>

(1) ADS114S08 是 ADS124S08 的 16 位版本, 可用于类似的应用。

## 设计参考资料

有关 TI 综合电路库的信息, 请参阅 [《模拟工程师电路手册》](#)。

## 附加资源

- 德州仪器 (TI), [ADS124S08 评估模块](#)
- 德州仪器 (TI), [《ADS1x4S08 评估模块用户指南》](#)
- 德州仪器 (TI), [ADS1x4S08 固件示例代码](#)
- 德州仪器 (TI), [《RTD 测量基本指南》](#)
- 德州仪器 (TI), [《使用 ADS1148 和 ADS1248 系列器件进行 RTD 比率测量和滤波》](#)

要获得 TI 工程师的直接支持, 请登陆 E2E 社区 :

[e2e.ti.com](http://e2e.ti.com)

## 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

---

### Changes from Revision A (March 2020) to Revision B (September 2021) Page

- 更新了整个文档中的表格、图表和交叉引用的编号格式。 ..... 1

---

### Changes from Revision \* (December 2018) to Revision A (March 2020) Page

- 更改了原理图以从 REFNO 中移除滤波 ..... 1
- 更改了基准输入滤波器的带宽计算 ..... 1
- 更改了寄存器设置表以禁用负基准缓冲器 ..... 1
- 更改了伪代码示例以禁用负基准缓冲器 ..... 1

## 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/legal/termsofsale.html>) 或 [ti.com](https://www.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。

邮寄地址: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2021, 德州仪器 (TI) 公司

## 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 © 2022，德州仪器 (TI) 公司