

具有低侧基准和两个 IDAC 电流源的三线 PT100 RTD 测量电路

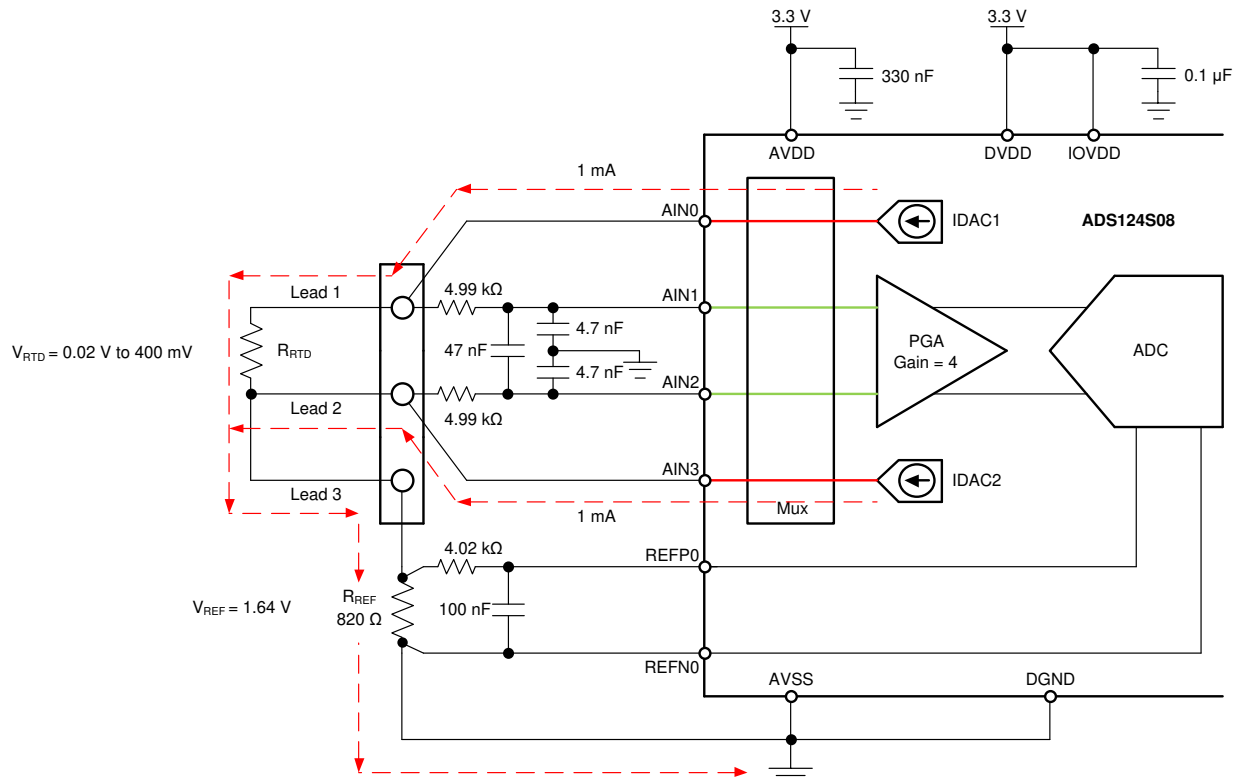


Joseph Wu

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

设计说明

该设计指南介绍了如何使用 [ADS124S08](#) 实现三线 RTD 温度测量。该设计使用两个匹配的 IDAC 激励电流来消除引线电阻。此拓扑专为对 PT100 型 RTD 进行比例测量而设计，温度测量范围为 -200°C 至 850°C 。该设计包含 ADC 寄存器设置和用于配置和读取器件的伪代码。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. 为模拟和数字电源使用电源去耦电容器。必须使用连接到 AVSS 的至少为 330nF 的电容器对 AVDD 进行去耦。必须使用连接到 DGND 的至少为 0.1μF 的电容器对 DVDD 和 IOVDD (在未与 DVDD 连接时) 进行去耦。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 通道和 12 通道 4kSPS 24 位 Δ-Σ 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 1μF 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。测量是比例式的, 因此精度取决于该基准电阻器的误差。0.01% 的电阻器会产生类似于 ADC 的增益误差。
5. 如果可能, 使用 C0G (NPO) 陶瓷电容器进行输入滤波。这些电容器中使用的电介质可在电压、频率和温度变化时提供最稳定的电气特性。
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 比例测量和滤波》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. 由于消除了引线电阻, 与类似的双线 RTD 测量相比, 三线测量可提供更高的精度。有关使用其他 RTD 接线配置进行测量的信息, 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, 如果温度测量范围是 -200°C 至 850°C, 那么 PT100 RTD 具有大约 -200°C 至 850°C 的范围。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量程范围。

2. 使用两个匹配的 IDAC 电流源来消除引线电阻误差。

使用两个匹配的 IDAC 电流源来消除引线电阻。假设引线 1 和引线 2 的电阻相同, 并且 IDAC1 和 IDAC2 的电流相同, 则必须消除引线电阻误差。可以通过 AIN1 和 AIN2 上的测量电压来显示该消除情况。

IDAC1 通过引线 1 将电流驱动到 RTD 中。IDAC2 将匹配的电驱动到引线 2 中。AIN1 的电压用以下公式算出。

$$V_{AIN1} = I_{IDAC1} \cdot (R_{LEAD1} + R_{RTD}) + (I_{IDAC1} + I_{IDAC2}) \cdot (R_{LEAD3} + R_{REF})$$

同时, 还可算出 AIN2 的电压。

$$V_{AIN2} = I_{IDAC2} \cdot R_{LEAD2} + (I_{IDAC1} + I_{IDAC2}) \cdot (R_{LEAD3} + R_{REF})$$

ADC 的测量值是 AIN1 和 AIN2 之间的差值, 即对前面两个公式执行减法所得的值, 如下所示。

$$V_{AIN1} - V_{AIN2} = [I_{IDAC1} \cdot (R_{LEAD1} + R_{RTD}) + (I_{IDAC1} + I_{IDAC2}) \cdot (R_{LEAD3} + R_{REF})] - [I_{IDAC2} \cdot R_{LEAD2} + (I_{IDAC1} + I_{IDAC2}) \cdot R_{REF}]$$

R_{LEAD3} 和 R_{REF} 项会消失。

$$V_{AIN1} - V_{AIN2} = I_{IDAC1} \cdot (R_{LEAD1} + R_{RTD}) - I_{IDAC2} \cdot R_{LEAD2}$$

因此, 如果 R_{LEAD1} 和 R_{LEAD2} 相等并且 I_{IDAC1} 和 I_{IDAC2} 相等 (成为 I_{IDAC}), 那么引线电阻误差会消除。

$$V_{AIN1} - V_{AIN2} = I_{IDAC} \cdot R_{RTD}$$

3. 确定 IDAC 激励电流和基准电阻器的值。

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 的自发热保持在低水平。对于小型薄膜元件, RTD 自发热系数的典型范围为 2.5mW/°C, 对于较大的线绕元件, 该范围为

65mW/°C。在最大 RTD 电阻值下激励电流为 1mA 时，RTD 中的功率耗散小于 0.4mW，并将自发热导致的测量误差保持在 0.01°C 以内。

在选择 IDAC 电流大小之后，设置 $R_{REF} = 820 \Omega$ 。使用两个匹配的 1mA 激励电流将基准设置为 1.64V，最大 RTD 电压为 400mV。基准电压用于电平转换，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，可以将 PGA 增益设置为 4，这样最大 RTD 电压就接近正满量程范围而不超过它。

基准电阻器 R_{REF} 必须是具有高精度和低漂移的精密电阻器。 R_{REF} 中的任何误差都会在 RTD 测量中反映相同的误差。 $REFP0$ 和 $REFN0$ 引脚显示为作为开尔文连接与 R_{REF} 电阻器相连，以获得最精确的基准电压测量值。这可以消除作为基准电阻测量产生的误差的串联电阻。

在使用最大 RTD 电阻的情况下，可以使用以下公式来计算 ADC 输入电压。对于该计算，可以忽略微小的引线电阻。

$$V_{AIN1} = (I_{IDAC1} \cdot R_{RTD}) + [(I_{IDAC1} + I_{IDAC2}) \cdot R_{REF}] = (1mA \cdot 400 \Omega) + (2mA \cdot 820 \Omega) = 2.04V$$

$$V_{AIN2} = (I_{IDAC1} + I_{IDAC2}) \cdot R_{REF} = 2mA \cdot 820 \Omega = 1.64V$$

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

4. 验证设计是否处于 ADC 的工作范围之内。

首先，验证当增益为 4 并且 AVDD 为 3.3V、AVSS 为 0V 时 V_{AIN1} 和 V_{AIN2} 是否处于 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 通道和 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：

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

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

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

在 AIN1 和 AIN2 上看到的最大和最小输入电压 (2.04V 和 1.64V) 介于 0.75V 和 2.55V 之间，因此输入处于 PGA 工作范围之内。

第二，验证 IDAC 输出端的电压是否处于电流源顺从电压范围之内。IDAC1 引脚是 AIN0，其电压与 AIN1 相同。在最大电压下， V_{AIN0} 为 2.04V。如《具有 PGA 和电压基准的 ADS124S0x 低功耗、低噪声、高集成度、6 通道和 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 引脚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 输出必须满足以下条件：

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

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

结合之前的结果，IDAC1 的输出顺从性得到满足。IDAC2 引脚的电压始终低于 IDAC1 电压，因此两个电流源都处于顺从范围内。

5. 选择 ADC 输入和基准输入的差分与共模输入滤波值。

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是 ADC 的数据速率的 10 倍。将共模电容器选择为差分电容器值的 1/10。由于电容器选择，共模输入滤波带宽大约是差分输入滤波带宽的 20 倍。虽然串联滤波电阻器会提供一定程度的输入保护，但应使输入电阻器保持低于 10k Ω ，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，后者会被器件的 PGA 显著抑制。共模电容器的失配会导致非对称噪声衰减，这会表现为差分输入噪声。差分信号的带宽较低，从而可以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，将数据速率选择为 20SPS (使用 ADS124S08 的低延迟滤波器)。此滤波可提供低噪声测量以及单周期稳定，并且能够抑制 50Hz 和 60Hz 线路噪声。对于 ADC 输入滤波，可以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， $R_{IN} = 4.99k\Omega$ ， $C_{IN_DIFF} = 47nF$ ， $C_{IN_CM} = 4.7nF$ 。这会将差分滤波器带宽设置为 330Hz，将共模滤波器带宽设置为 5.6kHz。

可以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， $R_{IN_REF} = 4.02k\Omega$ ， $C_{REF} = 100nF$ 。这会将差分滤波器带宽设置为 330Hz。将 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。不过，保持带宽接近可能会降低测量中的噪声。

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

- 如果 IDAC 电流失配误差很大，请使用两次测量来消除误差 (可选)。

在引线电阻消除中，原来的假设前提之一是 IDAC1 和 IDAC2 匹配。如果两个 IDAC 电流不匹配，该失配会导致表现为增益误差的误差。RTD 上的电压来自 IDAC1 电流，而基准电阻器上的电压来自 IDAC1 + IDAC2 电流。对于 ADS124S08，1mA IDAC 电流的典型 IDAC 电流失配为 0.07%。该失配误差会导致测量中的增益误差为 0.35%。为了消除该电流失配误差，可对 IDAC 激励电流执行斩波。这涉及在交换 IDAC 电流的情况下进行两次测量。

为了进行斩波，首先在 IDAC1 设置为 AIN0 且 IDAC2 设置为 AIN3 的情况下进行测量。然后，将 IDAC1 设置为 AIN3，将 IDAC2 设置为 AIN0，交换电流源，再进行第二次测量。在第一种情况下，IDAC1 驱动 RTD，在第二种情况下，IDAC2 驱动 RTD。在这两种情况下，均由 IDAC1 和 IDAC2 的总和驱动基准电阻器。通过对两个斩波情况求平均，即可从测量中消除失配误差。有关斩波的更详细分析，请参阅《RTD 测量基本指南》应用报告中的“IDAC 电流斩波”部分。

测量转换

RTD 测量通常是比例测量。使用比例测量，无需将 ADC 输出代码转换为电压。这意味着输出代码仅将测量值作为与基准电阻器值的比例进行提供，不需要激励电流的精确值。唯一的要求是流经 RTD 和基准电阻器的电流相等。

下面显示了针对 24 位 ADC 的测量转换公式 (无 IDAC 电流斩波)：

$$\text{Output Code} = 2^{23} \cdot \text{Gain} \cdot (V_{RTD} / V_{REF}) = 2^{23} \cdot \text{Gain} \cdot (I_{IDAC1} \cdot R_{RTD}) / [(I_{IDAC1} + I_{IDAC2}) \cdot R_{REF}]$$

如果 I_{IDAC1} 等于 I_{IDAC2} ，则 IDAC 项会消失。

$$\text{Output Code} = 2^{23} \cdot \text{Gain} \cdot (I_{IDAC} \cdot R_{RTD}) / (2 \cdot I_{IDAC} \cdot R_{REF}) = 2^{22} \cdot \text{Gain} \cdot (R_{RTD} / R_{REF})$$

$$R_{RTD} = R_{REF} \cdot [\text{Output Code} / (\text{Gain} \cdot 2^{22})]$$

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

具有低侧基准和两个 IDAC 电流源并采用 ADS124S08 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	INPMUX	12h	选择 $AIN_P = AIN_1$, $AIN_N = AIN_2$
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, 内部基准始终开启
06h	IDACMAG	07h	IDAC 大小设置为 1mA
07h	IDACMUX	30h	IDAC1 设置为 AIN0, IDAC2 设置为 AIN3
08h	VBIAS	00h	VBIAS 未用于任何输入
09h	SYS	10h	正常工作模式
07h ⁽¹⁾	IDACMUX	03h	IDAC1 设置为 AIN3, IDAC2 设置为 AIN0

(1) 此处的第二个 IDACMUX 设置和转换用于对 IDAC 激励电流源执行斩波 (可选)。

伪代码示例

下面显示了伪代码序列以及设置器件和微控制器所需的步骤, 该微控制器与 ADC 相连, 以便在连续转换模式下从 ADS124S0x 获取后续读数。专用的 **DRDY** 引脚指示新转换数据的可用性。显示的伪代码中未使用 STATUS 字节和 CRC 数据验证。ADS124S08 [固件示例代码](#) 在 [ADS124S08 产品文件夹](#) 中提供。

```

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, 用以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 = 8
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 基准输入, 内部基准始终开启
07 // IDAC 大小设置为 1mA
30 // IDAC1 设置为 AIN0, IDAC2 设置为 AIN3
Set CS high;
Set CS low; // 对于验证, 读回配置寄存器
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 命令以开始以连续转换模式转换;
Set CS high;
Loop
{
Set CS low; // 配置器件进行首次斩波测量
Send 47 // WREG 起始地址为 07h
00 // 写入 1 个寄存器
30 // IDAC1 设为 AIN0, IDAC2 设为 AIN3
Set CS high;
Wait for DRDY to transition low;
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, 记录测量 1
Set CS high;
Set CS low; // 配置器件用于斩波电流源 (可选)
Send 47 // WREG 起始地址为 07h
00 // 写入 1 个寄存器
03 // IDAC1 设为 AIN3, IDAC2 设为 AIN0
Set CS high;
Wait for DRDY to transition low;
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, 记录测量 2
Set CS high;

```

```

Average Measurement 1 and Measurement 2;
}
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, 对 IDAC 失配的敏感度低于使用低侧基准	需要额外的电阻器以用于偏置, 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

设计中采用的器件

器件	关键特性	链接	其他可能的器件
ADS124S08	适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 Δ - Σ ADC	www.ti.com.cn/product/cn/ADS124S08	指向类似器件的链接
ADS114S08 (1)	适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 Δ - Σ ADC	www.ti.com.cn/product/cn/ADS114S08	指向类似器件的链接

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

设计参考资料

请参阅《[模拟工程师电路设计指导手册](#)》, 了解有关 TI 综合电路库的信息。

其他资源

- 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 比例测量和滤波](#)》

如需 TI 工程师的直接支持, 请登陆 E2E 社区:

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 B (March 2020) to Revision C (August 2021)	Page
更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式。.....	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