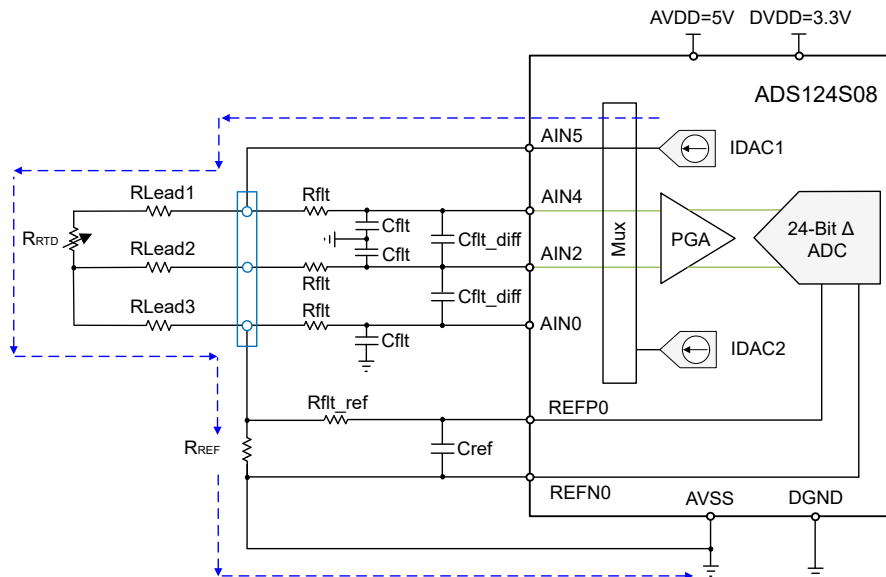




规格		最小值	最大值
过应力信号	电压 (V_{EOS})	-30V	+30V
绝对最大输入电压额定值 - ADC ($AVDD = 5V$, $AVSS = 0V$)	电压 - 模拟输入 (V_{in_Abs})	$AVSS - 0.3V$	$AVDD + 0.3V$
	电流 - 模拟输入 (I_{in_Abs})	-10mA	+10mA

设计说明

此电路展示了一种解决方案，用于在电阻式温度检测器 (RTD) 应用中保护 Δ - Σ ADC ADS124S08 免受电过应力 (EOS) 的影响。该保护电路旨在针对 $\pm 30V$ 直流连续故障和更高瞬态故障提供保护。如果输入端子意外连接到直流电源，则需要针对 $\pm 30V$ 直流故障提供保护。 $\pm 24V$ 是工业系统中的标准直流电源，因此 $\pm 30V$ 保护可提供一定的设计裕度。该解决方案专为使用 PT100 RTD 传感器的 3 线 RTD 输入而开发，但该方法同样适用于 2 线、4 线 RTD 输入和 PT1000 RTD 传感器。该保护电路包括一个外部瞬态电压抑制器 (TVS) 二极管和一个限流电阻器，用于实现针对过应力信号的外部保护钳位，并将对测量精度的影响保持在最低水平。该电路在工厂自动化和控制系统内可编程逻辑控制器的温度控制器和模拟输入模块中非常实用。有关保护高压 SAR ADC 免受电过应力影响的信息，请参阅[采用 TVS 二极管的高电压 ADC 电路输入保护](#)和[通过 TVS 二极管和 PTC 保险丝保护 ADC 的电路](#)电路设计。有关保护低压 SAR ADC 免受电过应力影响的信息，请参阅[用于保护低压 SAR ADC 免受电过应力的影响且对性能影响超低的电路](#)。



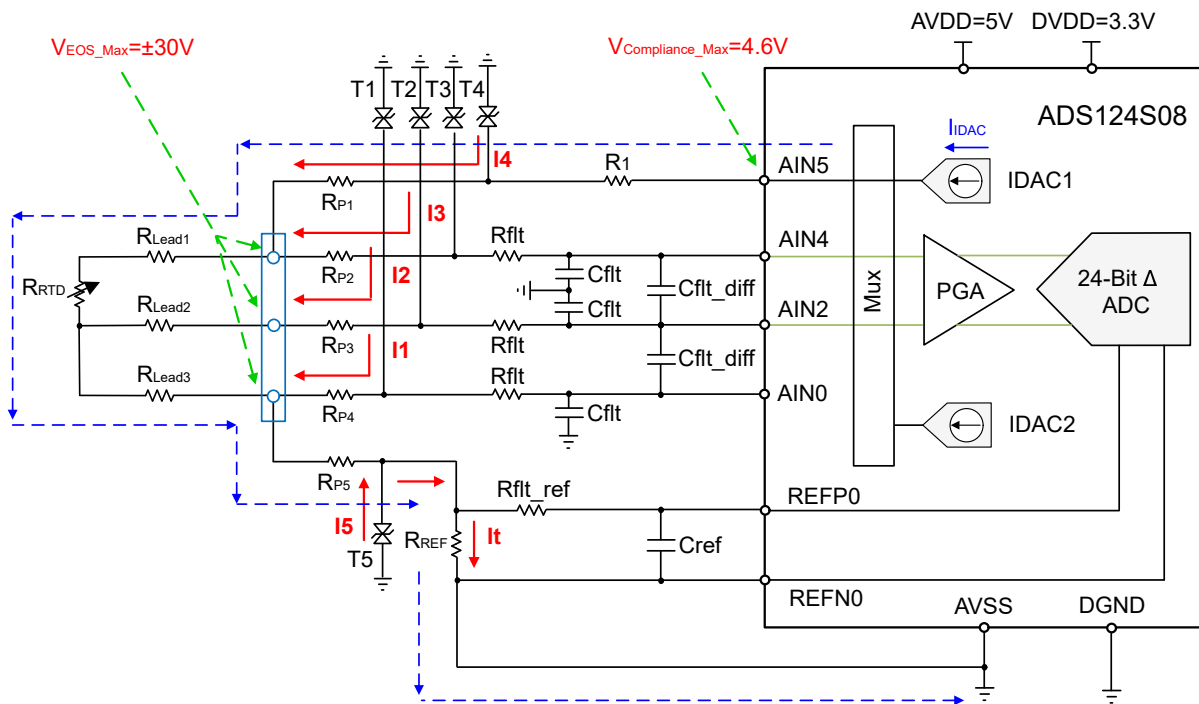
无保护功能的典型 3 线 RTD 测量电路

设计目标

系统规格	目标值	测得值
过应力电压	$\pm 30V$	ADS124S08 上无损坏
精度 (未经校准, $-40^{\circ}C$ 至 $85^{\circ}C$)	$\pm 0.5\%$	$< \pm 0.05\%$

设计说明

- 通过考虑以下因素，我们选择了 Bourns® 的双向 TVS 二极管 SMBJ14CA 来保护 ADS124S08 的每个输入免受电过应力信号的影响：
 - 选择 SMBJ 系列 TVS 二极管，以确保适当的封装尺寸和 600W 功率耗散能力
 - 选择双向 14V 关断电压，以将限流电阻上的功率耗散降至最低
- 限流电阻器 R_{P1} 、 R_{P2} 、 R_{P3} 、 R_{P4} 和 R_{P5} 用于限制故障电流，以保护 TVS 二极管和 ADC，并且通过选择合适的电阻值，还有助于钳制二极管上的输入过应力信号。 R_{P2} 、 R_{P3} 、 R_{P4} 和 R_{P5} 的高电阻值与 R_{P1} 的电阻值完全相同，以避免 TVS 二极管漏电流流经这些电阻时由电阻失配引起的任何额外误差。请注意，在[保护 ADC 免受电过应力影响的输入保护电路](#)中， R_{Lead1} 、 R_{Lead2} 和 R_{Lead3} 代表等效的引线电阻。
- 确保差分电容器的电容值大于或等于共模电容器电容值的 10 倍。确保差分滤波器的带宽大于或等于数据速率的 10 倍。
- 请参阅“TI 高精度实验室 - ADC”中的“数据转换器上的电过应力”视频系列。此视频系列详细讨论了不同类型数据转换器的保护解决方案，包括理论说明、二极管选择、限流电阻器选择和测试结果。



保护 ADC 免受电过应力影响的输入保护电路

元件选型

- ADC 输入电压范围设置为导通内部 ESD 二极管之前的最大电压 (V_{in_Abs})。输入电流范围是内部 ESD 二极管可连续支持的最大电流。
- 当 AVDD 为 5V 时, ADS124S08 上的最大电压为 5.3V, 因此任何高于 5.3V 的正电过应力信号都应受到钳位, 以保护 ADS124S08 的输入。此解决方案中选择了双向 TVS 二极管 SMBJ14CA 来保护 ADC 免受电过应力信号的影响。该二极管将在 15.6V 至 17.9V 之间击穿并可限制输入电压。该电压电平超过 ADC 的绝对最大值, 但限流电阻器与内部 ESD 二极管 ADS124S08S 将保护器件。

器件型号	MFG	反向关断电压 (V_R)	击穿电压 (V_{BR})		最大钳位电压 (I_{PP} 时的 V_C)	反向漏电流最大值 (V_R 时的 I_R)	峰值脉冲电流 (I_{PP})	峰值功率耗散 (P_{PP})	稳态功率耗散 (P_{PP})
			最小值	最大值					
SMBJ14CA	Bourns	14V	15.6	17.9	23.2V	1 μ A	25.9A	600W	5W

- 此设计展示了适用于单路 IDAC 电流、低侧外部基准和 3 线 RTD 测量的保护解决方案。IDAC 通道 AIN5 中的限流电阻器 R_{P1} 更为关键, 因为 AIN5 引脚上的节点电压受限於最大顺从电压, 而对于 5V AVDD 电源, 最大顺从电压为 4.6V。 R_{P1} 和 R_1 的高电阻值有助于限制故障电流并在故障条件下保护 ADC; 但是, 这些电阻器的高电阻值会在正常运行时增加 AIN5 引脚上的电压, 从而导致超出顺从电压。该保护解决方案旨在防止将 $\pm 24V$ 电源误接线到 RTD 测量电路输入端而导致对 ADC 的损坏, 同时考虑设计裕度, 故障信号上限设定为 $\pm 30V$ 。ADS124S08 的绝对最大输入电流额定值为 $\pm 10mA$, 因此为了留出裕度, 设计中采用了 $\pm 5mA$ 的电流来限制流入 ADC 输入的电流, 并将通过 R_{P1} 的总故障电流限制为 $\pm 25mA$ 。

EOS 故障电压		ADC 输入电压 (绝对)		ADC 输入电流		故障电流	
V_{EOS_max}	+30V	V_{in_max}	+5.3V	I_{ADC_max}	+5mA	I_{fault_max}	+25mA
V_{EOS_min}	-30V	V_{in_min}	-0.3V	I_{ADC_min}	-5mA	I_{fault_min}	-25mA

R_{P1} 和 R_1 由以下公式中的最大电阻值确定:

对于 +30V 正过应力电压:

$$R_{P1} \geq \frac{V_{EOS_max} - V_{BR_min}}{I_{fault_max}} = \frac{30V - 15.6V}{25mA} = 576\Omega \quad (\text{round up to standard } 590\Omega)$$

$$R_1 \geq \frac{V_{BR_min} - V_{in_max}}{I_{ADC_max}} = \frac{15.6V - 5.3V}{5mA} = 2.06k\Omega \quad (\text{round up to standard } 2.2k\Omega)$$

对于 -30V 负过应力电压:

$$R_{P1} \geq \frac{V_{EOS_min} - (-V_{BR_min})}{I_{fault_min}} = \frac{-30V - (-15.6V)}{-25mA} = 576\Omega \quad (\text{round up to standard } 590\Omega)$$

$$R_1 \geq \frac{-V_{BR_min} - V_{in_max}}{I_{ADC_min}} = \frac{-15.6V - (-0.3V)}{-5mA} = 3.06k\Omega \quad (\text{round up to standard } 3.4k\Omega)$$

为 R_1 选择 3.4k Ω 的较大电阻器, 并为 R_{P1} 选择 590 Ω 的电阻器。

以下公式计算了负电过应力故障事件 (这是这些电阻器的最坏情况) 期间 R_1 和 R_{P1} 上耗散的功率。目标是确保为电阻器 R_1 和 R_{P1} 选择正确的额定功率。

$$P_{RP1} = \frac{(V_{EOS_min} - (-V_{BR_min}))^2}{R_{P1}} = \frac{(-30V - (-15.6V))^2}{590\Omega} = 351mW$$

因此, 为 R_{P1} 选择了 0.5W 的 P_{RP1} , 确保有额外的设计裕度。

$$P_{R1} = \frac{(-V_{BR_min} - V_{in_min})^2}{R_1} = \frac{(-15.6V - (-0.3V))^2}{3.4k\Omega} = 68.85mW$$

因此，为 R_1 选择了 0.1W 的 P_{R1} ，确保有额外的设计裕度。

4. -200°C 时，PT100 传感器的电阻约为 20Ω，而在 +850°C 时则为 400Ω。 R_{REF} 的电阻由 I_{DAC} 电流流经 PT100 时 PT100 两端的最大电压 (R_{RTD}) 决定。为了尽量降低由 PT100 上自热造成的误差，这里选择并配置了来自 AIN5 的 0.5mA 单 I_{DAC} 电流。ADS124S08 上的 PGA 设置为 4。 R_{REF} 上的最小电压 (V_{REF_min}) 可通过以下公式计算：

$$V_{RTD_max} = I_{DAC} \times R_{RTD_max} = 0.5mA \times 400\Omega = 0.2V$$

$$V_{REF_min} = V_{RTD_max} \times Gain = 0.2V \times 4 = 0.8V$$

R_{REF} 上的电压 (V_{REF}) 设置为 1V 以确保有一定的裕度。 R_{REF} 的电阻由以下公式确定：

$$R_{REF} = \frac{V_{REF}}{I_{DAC}} = \frac{1V}{0.5mA} = 2k\Omega$$

5. 输入电阻器与其他通道中的差分 and 共模电容器并联，用于滤除前端电路的噪声。确切的电阻值并不重要，因为这些通道上没有顺从电压限制，并且没有 I_{DAC} 电流流过它。

$$R_{flt} > R_1 = 3.4k\Omega$$

$$R_{flt} < 10k\Omega$$

$$\Rightarrow R_{flt} = 4.99k\Omega$$

$$f_{in_Diff} > 10 \times Data_Rate$$

$$Data_Rate = 200Hz$$

$$\Rightarrow f_{in_Diff} = 3kHz$$

$$C_{flt_diff} = \frac{1}{2\pi \times f_{in_diff} \times (R_{RTD} + 2 \times R_{flt} + 2 \times R_P)}$$

$$= \frac{1}{2\pi \times 3kHz \times (400\Omega + 2 \times 4.99k\Omega + 2 \times 590\Omega)} = 4.6nF$$

因此，为 C_{flt_diff} 选择了标准值 4.7nF。

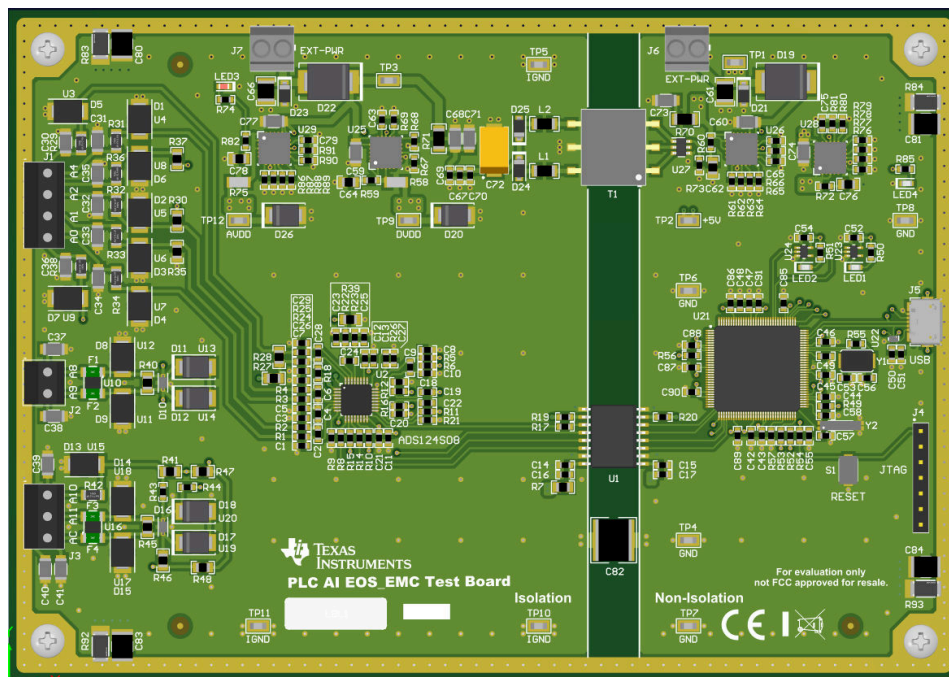
$$C_{flt} = \frac{C_{flt_diff}}{10} = \frac{4.7nF}{10} = 470pF$$

$$C_{ref} = C_{flt} = 470pF$$

$$R_{flt_ref} = R_{flt} = 4.99k\Omega$$

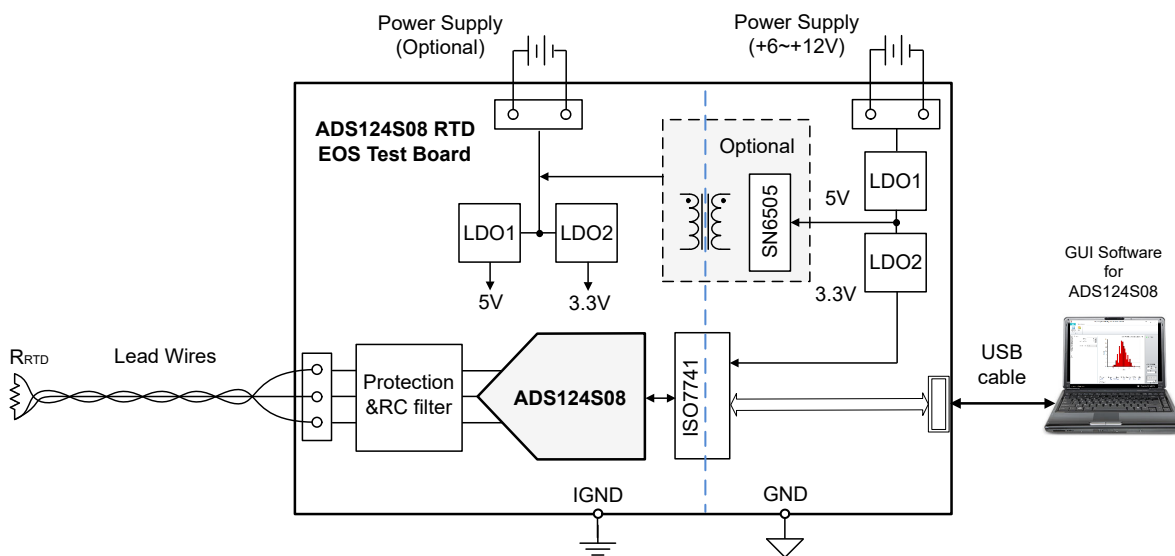
在硬件上测得的精度

具有输入保护电路的 **ADS124S08 测试板** 展示了用于 RTD 测量的 ADS124S08 EOS 测试硬件板，该板采用了 Bourns 的 TVS 二极管 SMBJ14CA 和德州仪器 (TI) 的双向 TVS 二极管 TVS1401 进行保护。测试板上的隔离式电源和数字通信电路专为 EMC (电磁兼容性) 测试而设计，本文档并未涉及这些测试。该测试板采用板载 TM4C1294NCPDT Tiva™ Arm® 处理器，通过串行外设接口 (SPI) 与 ADC 通信，并通过通用串行总线 (USB) 接口与 PC 通信。该软件包括从 [EVM 工具页面](#) 下载 Δ - Σ ADC 评估软件安装程序和 ADS124S08 器件软件包安装程序，用于从 ADC 收集转换数据并检查性能。



具有输入保护电路的 **ADS124S08 测试板**

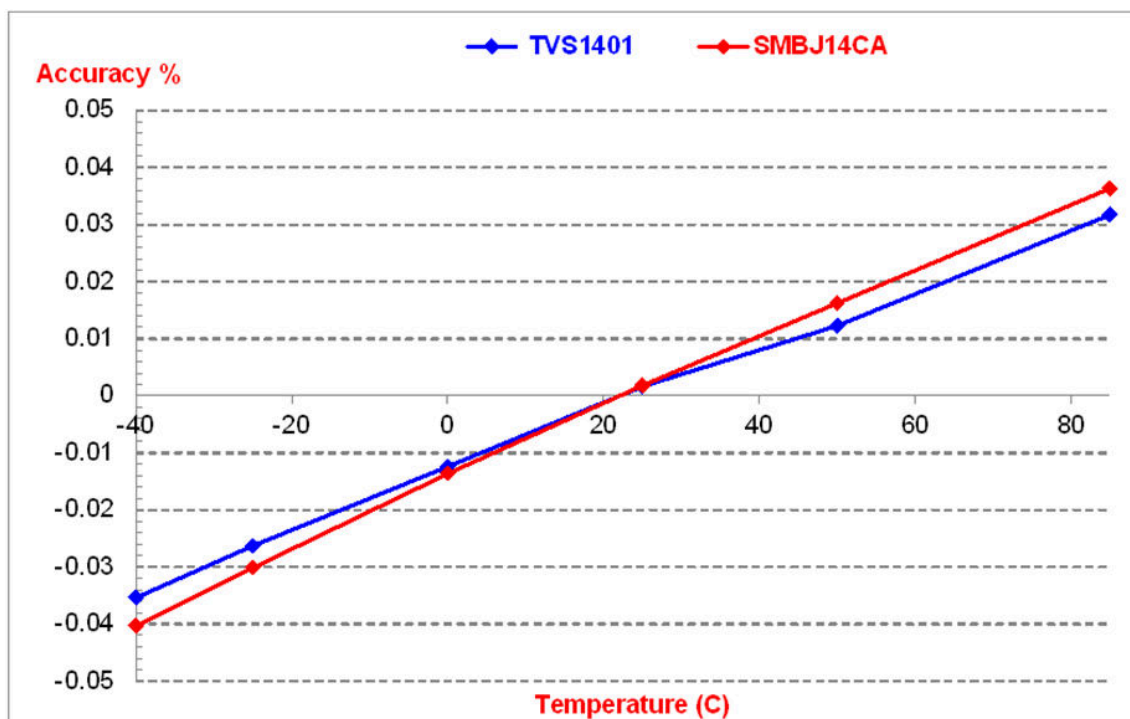
下图展示了用于测量精度和性能的测试设置。



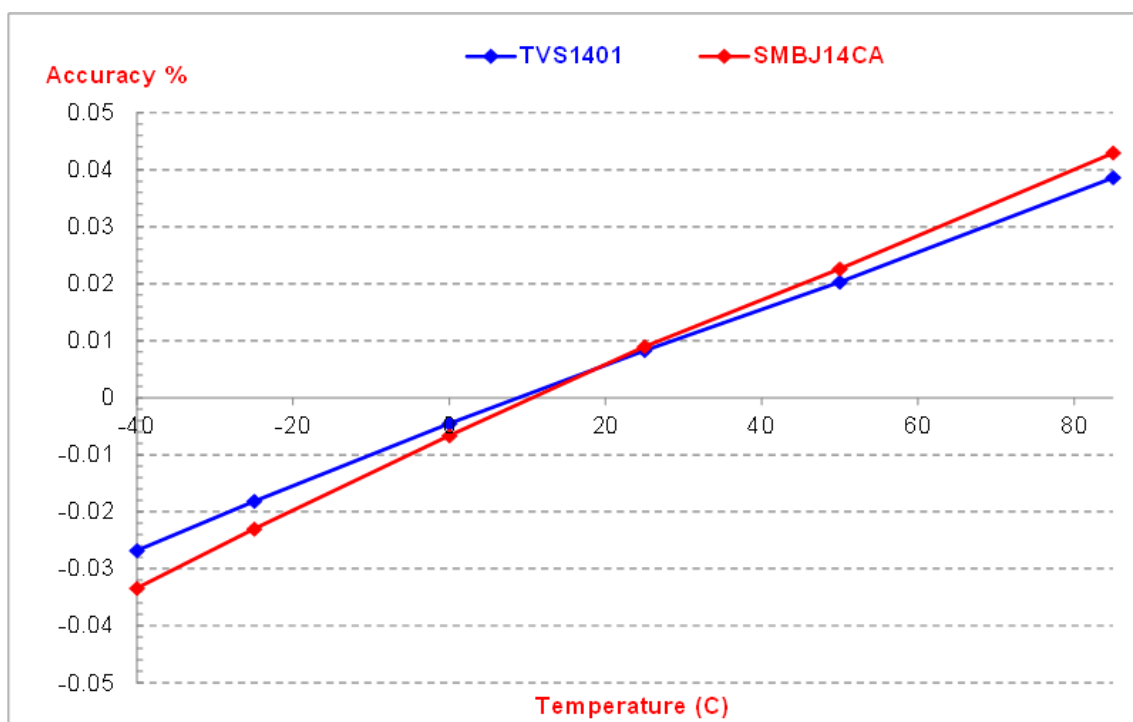
测试设置

接下来的几个图像展示了在从 -40°C 到 $+85^{\circ}\text{C}$ 的环境温度范围内测量的满标度和零标度 RTD 值的精度性能。该测试的目的是确认 TVS 二极管的漏电流在整个系统环境温度范围内没有造成显著的误差。测试结果表明，在整个

温度范围内，所有保护电路（包括 TVS 二极管和限流电阻）测得的精度 ($<\pm 0.05\%$) 均符合预期的精度要求 ($\pm 0.5\%$)。



RTD = 100 Ω 时的 RTD 测量精度 (0°C)



RTD = 400 Ω 时的 RTD 测量精度 (850°C)

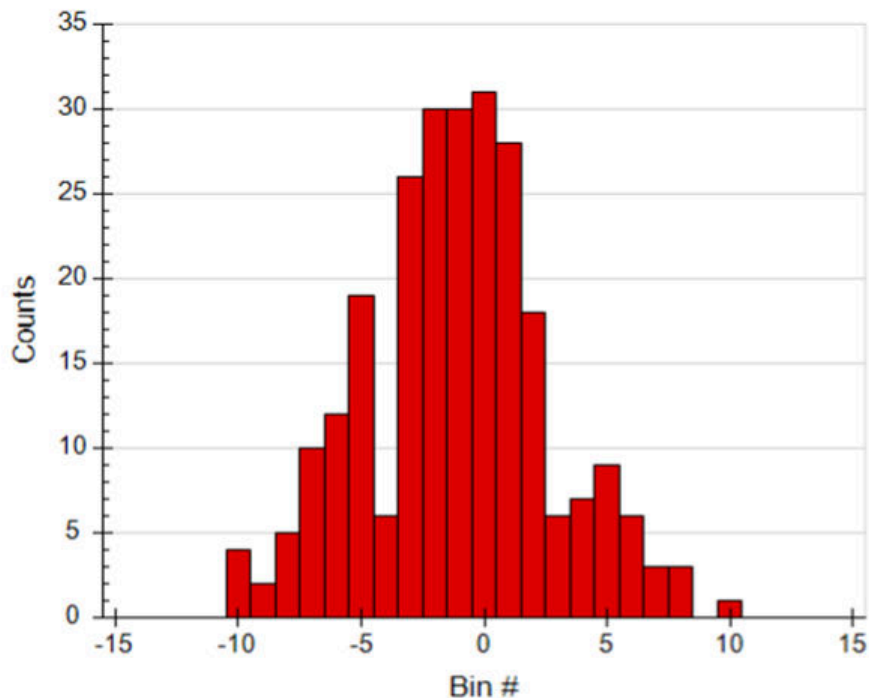
在硬件上测得的分辨率

下一个图像展示了使用德州仪器 (TI) 双向 TVS 二极管 TVS1401 测量的有效位数 (ENOB) 和无噪声分辨率。该测试表明，保护电路对 ADC 噪声性能没有显著影响。

表标题

测量结果	ENOB (位)	无噪声分辨率 (位)
高温 (+85°C)	21.2	18.8
室温 (+25°C)	21.3	19.0
低温 (-40°C)	21.5	19.1

测试条件：低侧基准，采用 TVS1401 保护解决方案的 3 线 RTD。



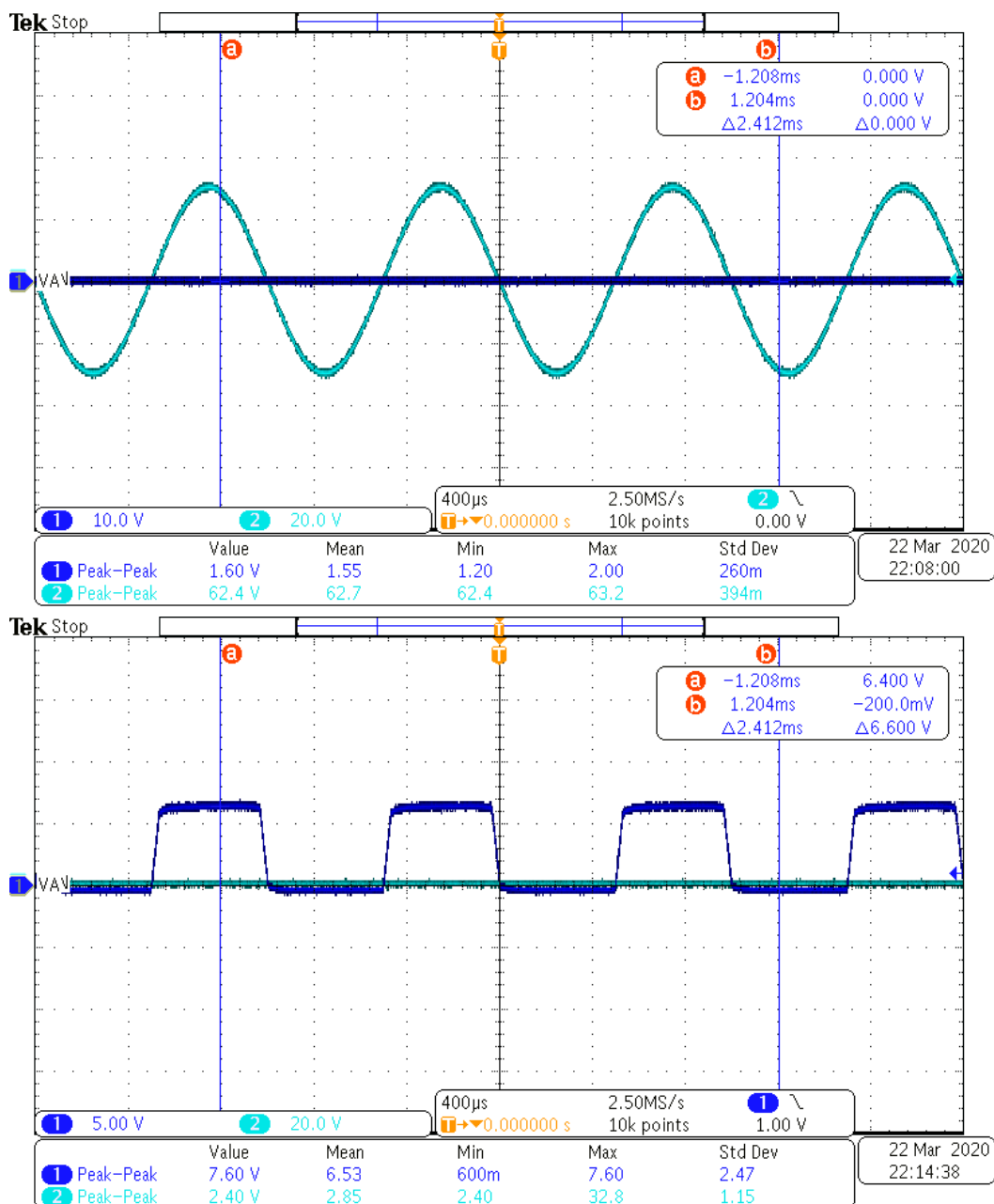
Channel	Samples	Mean	Std Dev	Pk-to-Pk	ENOB	NFB
ADC0	256	1679321.4	6.9	38	21.2	18.8

+85°C 下采用 TVS1401 且 RTD = 100 Ω 时测得的分辨率

ADC 输入过压条件

此电路使用过应力直流信号进行了测试和验证。为观察保护电路的工作效果，向 EOS 测试板的输入端施加了过应力正弦波信号 ($\pm 60V_{\text{peak-peak}}$)。IDAC 通道输入端的仿真 EOS 信号和钳位波形展示了在 ADS124S08 的 AIN5 输入端捕获的钳位波形。外部 TVS 二极管已导通，过驱动信号被钳位在 -200mV 和 +6.4V 之间。请注意，钳位波形是在 IDAC 通道输入端 (AIN5) 上捕获的，因此 R_1 的电阻值受到 ADS124S08 顺从电压限制的影响。

ADS124S08 其他通道上的 R_{fit} 电阻器不受顺从电压的限制，因此使用了较大的 R_{fit} 电阻值来限制 ADC 输入端的故障电流，并将过压正弦波信号钳位到小于 ADS124S08 上 +5.3V 的绝对最大输入电压。ADC 器件针对外部电过应力信号受到了有效的保护。



IDAC 通道输入端的仿真 EOS 信号和钳位波形

设计中采用的器件

器件	主要特性	链接	其他可能的器件
ADS124S08	具有 PGA 和电压基准的低功耗、低噪声、24 位、4kSPS、12 通道 Δ - Σ ADC	ADS124S08	ADC
ADS124S06	具有 PGA 和电压基准的低功耗、低噪声、24 位、4kSPS、6 通道 Δ - Σ ADC	ADS124S06	ADC
TVS1401	14V 双向平缓钳位浪涌保护器件	TVS1401	电路保护

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 © 2024，德州仪器 (TI) 公司