

具有隔离放大器和伪差分输入 SAR ADC 的 $\pm 12\text{V}$ 电压检测电路

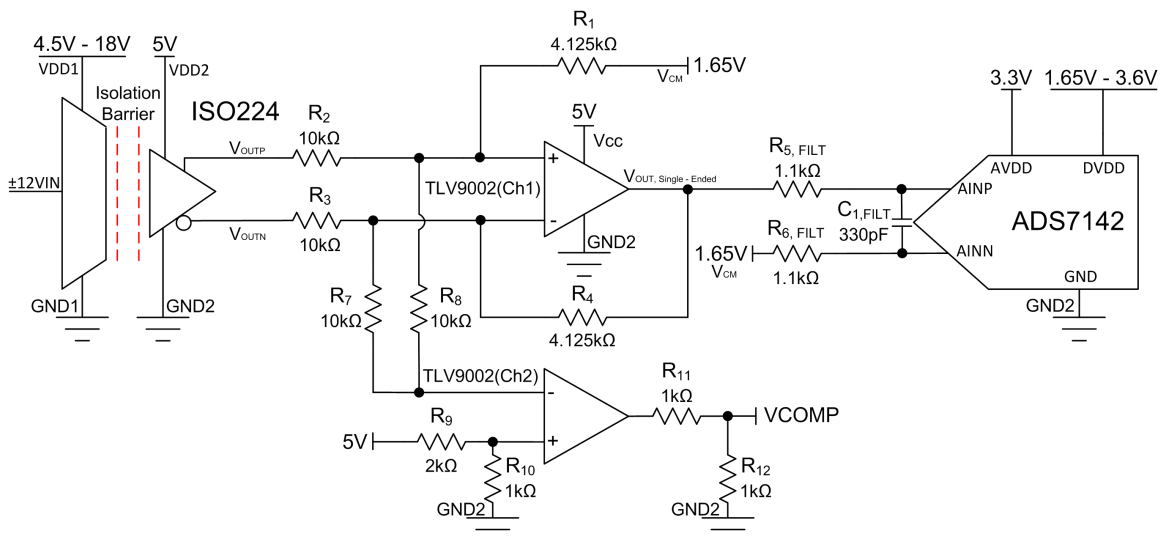
Alex Smith

ISO224 输入电压	ISO224 输出 ($V_{\text{OUTP}} - V_{\text{OUTN}}$)	ADS7142 输入 (伪差分)	ADS7142 数字输出
+12V	+4V	3.3V	FFF _H
-12V	-4V	0V	000 _H

电源和基准电压			
VDD1	VDD2 和 V _{CC}	AVDD	GND
4.5V - 18V	5V	3.3V	0V

设计说明

此电路利用 **ISO224** 隔离放大器、**TLV9002** 运算放大器和 **ADS7142** SAR ADC 执行 $\pm 12\text{V}$ 隔离式电压检测测量。**ISO224** 可以测量 $\pm 12\text{V}$ 的单端信号（具有 $1/3\text{V/V}$ 的固定增益），并生成 $\pm 4\text{V}$ 的隔离式差分输出电压，输出共模电压为 $\text{VDD2}/2$ 。**TLV9002** 的通道 1 用于调节 **ISO224** 的输出以适应 **ADS7142** 的输入范围，而通道 2 用于监控 **ISO224** 失效防护输出。**ADS7142** 是一款具有满量程输入和 AVDD 基准电压（范围为 1.65V 至 3.6V ）的双通道 ADC。本指导手册的电路将在伪差分配置中使用 **ADS7142** 双通道输入，从而可以通过 **ISO224** 测量正负信号。此电路适用于许多高压工业应用，如**列车控制和管理系统**、**模拟输入模块**以及**逆变器和电机控制**。此设计中的组件选择公式和说明可根据系统规格和需求进行定制。



规格

规格	计算值	仿真值
140kSPS 时的瞬态 ADC 输入趋稳	403 μ V	88 μ V
调节信号范围	0V–3.3V	0V–3.3V
噪声（输入端）	262 μ V _{RMS}	526 μ V _{RMS}
闭环带宽	175kHz	145kHz

设计说明

1. 选择 [ISO224](#) 是因为其具有宽输入范围、灵活的功率配置以及高精度特点。
2. 选择 [ADS7142](#) 是因为其具有极低功耗、高集成度、灵活的功率配置以及小尺寸特点。
3. 选择 [TLV9002](#) 运算放大器是因为其具有优化成本、多种配置选项以及小尺寸特点。
4. 为 AVDD、V_{CM} 以及 AINN 伪差分输入（用于设置 ADC 的共模电压）选择低阻抗、低噪声源。
5. 查找 ADC 满量程范围和共模规格。“组件选择”部分中介绍了该内容。
6. 选择适合 C_{FILT} 的 COG 电容器以最大限度减少失真。
7. 为实现最佳性能，请考虑使用 0.1% 20ppm/°C 的薄膜电阻器或性能更佳电阻器作为 R_{FILT1,2} 来最大限度减少失真。
8. [了解和校准 ADC 系统的失调电压和增益](#) 介绍了误差分析的方法。请查看该链接以了解最大限度减少增益误差、失调电压误差、漂移误差和噪声误差的方法。
9. [TI 高精度实验室 - ADC](#) 培训视频系列介绍了选择电荷桶电路 R_{FILT} 和 C_{FILT} 的方法。此类组件值取决于放大器带宽、数据转换器采样速率以及数据转换器设计。此处所示的规格值可为该示例中的放大器和数据转换器提供良好的趋稳和交流性能。如果对设计进行了修改，则必须选用不同的 RC 滤波器。请参阅 [《SAR ADC 前端组件选择简介》](#)，了解如何选择 RC 滤波器以实现最佳的趋稳和交流性能。

组件选择

1. 根据输入电压范围选择隔离放大器并确定输出共模电压和输出电压范围:

ISO224 电源可以是 4.5V 至 18V（对于高侧电源）和 4.5V 至 5.5V（对于低侧电源）。ISO224 具有 $\pm 12V$ 单端输入范围（固定增益为 $1/3 V/V$ ），产生 $\pm 4V$ 差分输出，输出共模电压为 $V_{DD2}/2$ （此示例为 +2.5V）:

$$\frac{\pm 12V_{IN, Single-Ended}}{3} = \pm 4V_{OUT, Differential} @ 2.5V \left(\frac{V_{DD2}}{2} \right) \text{ common-mode}$$

2. 选择尺寸小且功耗低的 ADC:

ADS7142 是一款可在伪差分配置中使用的小尺寸、低功耗、双通道 ADC。最大输入范围取决于基准电压并等于 AV_{DD} ，此示例为 3.3V:

$$ADC_{Full-Scale Range} = V_{REF} = AV_{DD} = 3.3V$$

查找伪差分测量所需的 ADC 共模电压:

$$V_{CM} = \frac{V_{REF}}{2} = 1.65V$$

3. 选择一个运算放大器将 ISO224 的 $\pm 4V$ 差分、+2.5V 共模输出转换为 ADS7142 的 3.3V 伪差分、1.65V 共模输入。此外，首选具有第二通道（该通道可用于监控 ISO224 的失效防护输出特性）的运算放大器:

TLV9002 是一款双通道、轨至轨输入和输出放大器，针对成本敏感和小尺寸应用进行了优化。

通道 1 用于将 ISO224 的 $\pm 4V$ 差分、+2.5V 共模输出转换为 3.3V 峰值伪差分输出，共模电压为 1.65V。当 $R1 = R4$ 且 $R2 = R3$ 时，传递函数由以下公式设定:

$$V_{OUT} = V_{OUTP} \left(\frac{R4}{R3} \right) + V_{OUTN} \left(\frac{R1}{R2} \right) + V_{CM}$$

信号必须从 $\pm 4V$ 转换为 3.3V，这意味着信号必须降低 $3.3V/\pm 4V = 3.3V/8V$ 倍。用先前计算出的 1.65V 值代替 V_{CM} 并将 $R2$ 和 $R3$ 设置为易于使用的 $10k\Omega$ ，得到以下公式:

$$3.3V = 4V \left(\frac{R4}{10k\Omega} \right) + 1.65V \quad 0V = -4V \left(\frac{R1}{10k\Omega} \right) + 1.65V$$

求解出 $R1$ 和 $R4$ 的值为 $4.125k\Omega$ 。

如需了解有关此主题的更多信息，请参阅《将差分输出（隔离式）放大器连接到单端输入 ADC》技术手册。

TLV9002 的通道 2 用于监控 ISO224 的失效防护输出特性。只要高侧电源 V_{DD1} 丢失，无论 V_{IN} 引脚上的输入信号如何，ISO224 失效防护输出特性都将激活。TLV9002 通道 2 输出 V_{COMP} 被馈送到系统控制器上的 GPIO 端口，并在失效防护输出特性激活时变为高电平。如需了解更多详细信息，请参阅《失效防护输出特性》应用手册。

4. 选择 R_{1FILT} 、 R_{2FILT} 和 C_{FILT} 以实现输入信号的趋稳以及 140kSPS 的采样率:

《优化 R_{FILT} 和 C_{FILT} 值》(TI 高精度实验室视频) 介绍了选择 R_{FILT} 和 C_{FILT} 的方法。经证实， $1.1k\Omega$ 和 $330pF$ 的最终值可确保在采集窗口时间内趋稳至远低于最低有效位 (LSB) $1/2$ 的位置。

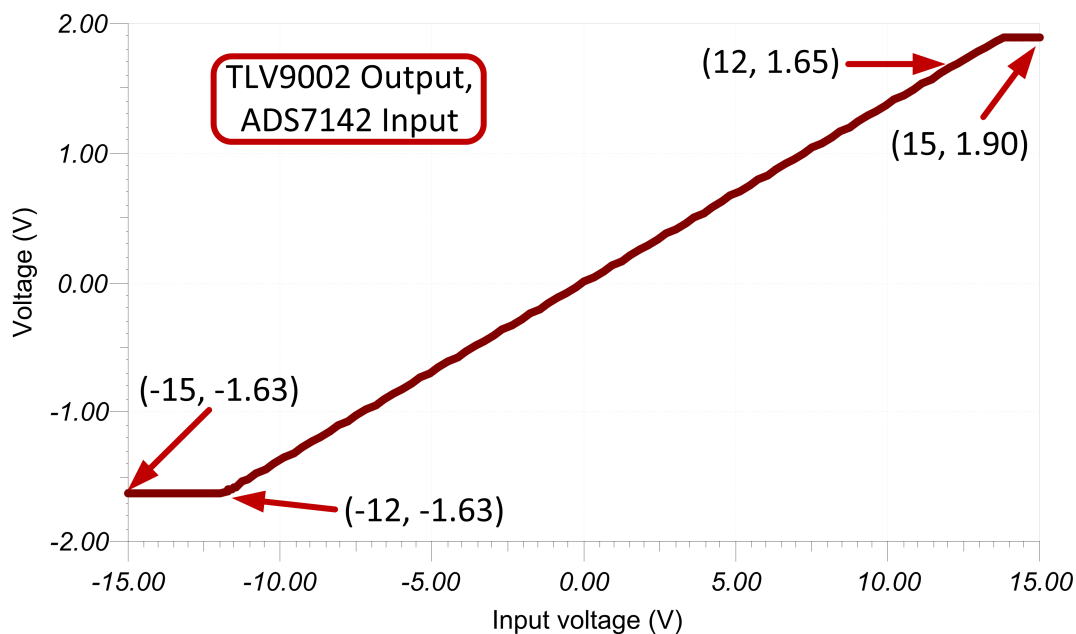
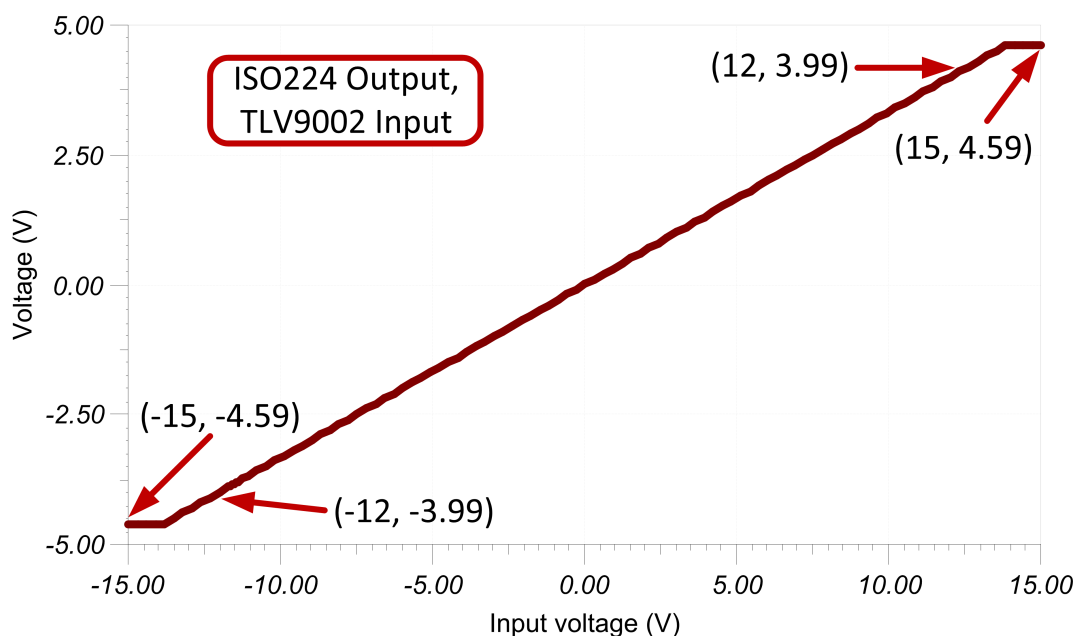
直流传输特性

以下几个图显示了 TLV9002 和 ADS7142 的模拟输入从 $\pm 15\text{V}$ 输入转换为 ISO224 输出的情况。ISO224 具有 $\pm V_{\text{IN}}/3$ 的线性输出，并可以在第一张图中看到 TLV9002 的输入。第二张图显示 TLV9002 进一步将增益降低了 $V_{\text{IN}}/2.43$ ，并将共模电压转换为 1.65V 。因此具有全范围 $\pm 12\text{V}$ 输入信号，并利用了 ADC 的 0V - 3.3V 满量程范围 (FSR)，其中 $\text{AVDD} = \text{VREF} = 3.3\text{V}$ 。

以下传递函数显示 ISO224 和 TLV9002 的增益为 $1/7.28\text{V/V}$ 。

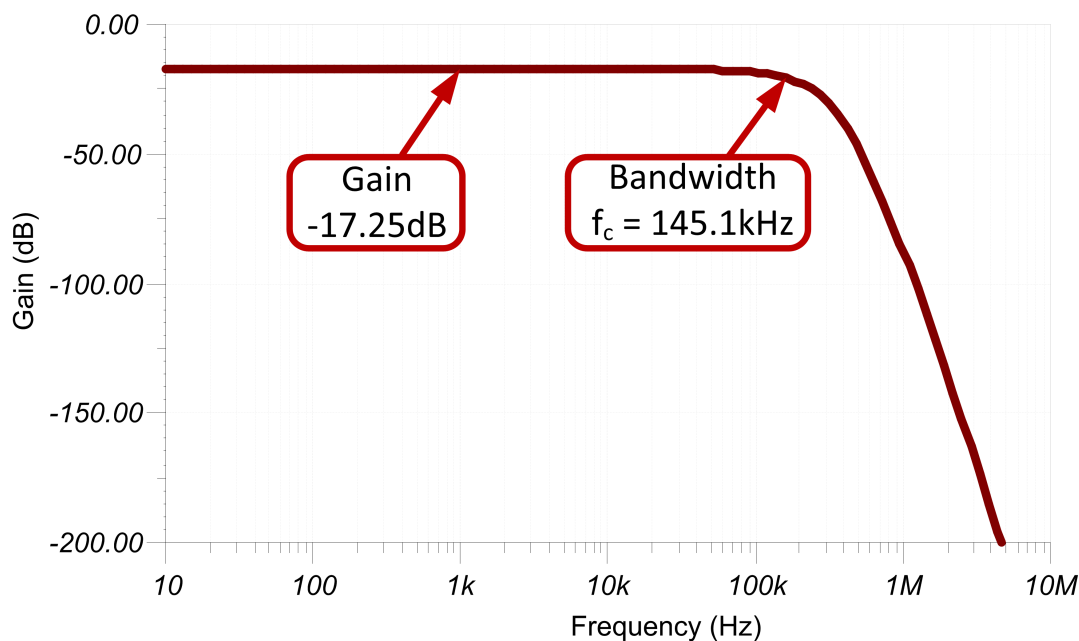
$$\text{Gain}_{\text{ISO224}} \cdot \text{Gain}_{\text{TLV9002}} \cdot V_{\text{IN}} = V_{\text{OUT}}$$

$$\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2.43} \cdot 12\text{V} = \frac{1}{7.28} \cdot 12\text{V} = 1.65\text{V}$$



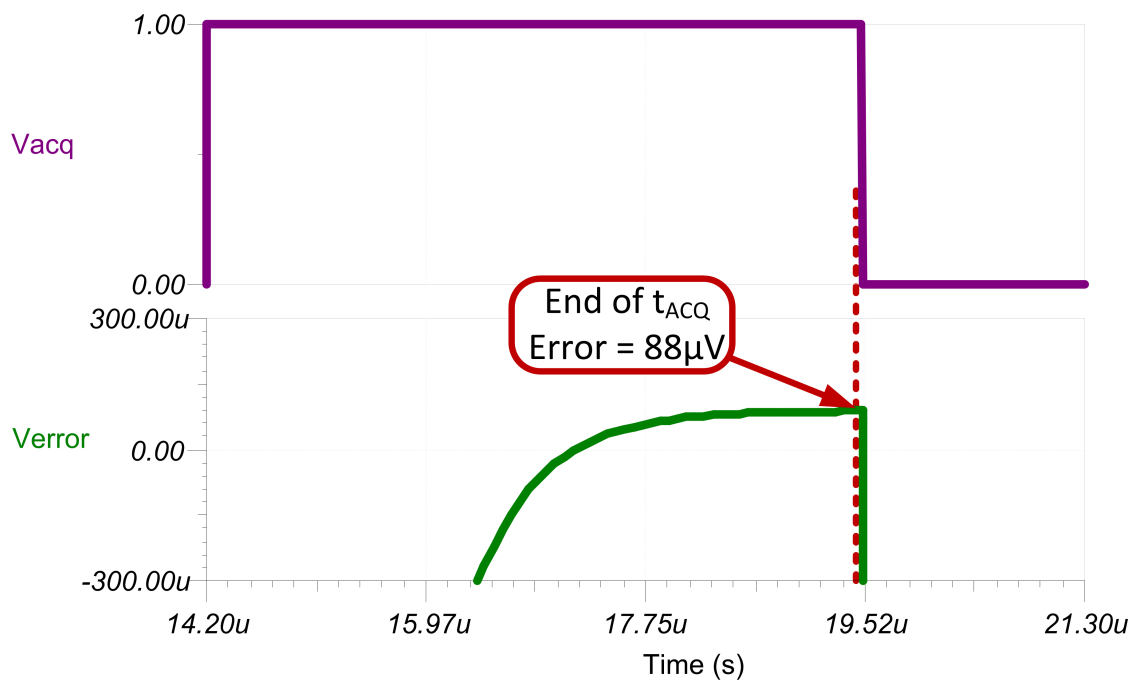
交流传输特性

信号链的仿真带宽约为 145kHz，增益为 -17.25dB，这是约为 0.137V/V 的线性增益（衰减比为 1/7.28V/V）。这符合系统的预期增益。



瞬态 ADC 输入趋稳仿真

以下仿真显示了采集时间为 5.3μs 的瞬态趋稳结果。88μV 的噪声完全处于 0.5 · LSB 限制 403μV 的范围内。请参阅《[优化 Rfilt 和 Cfilt 值](#)》，了解有关此主题的详细理论。



噪声仿真

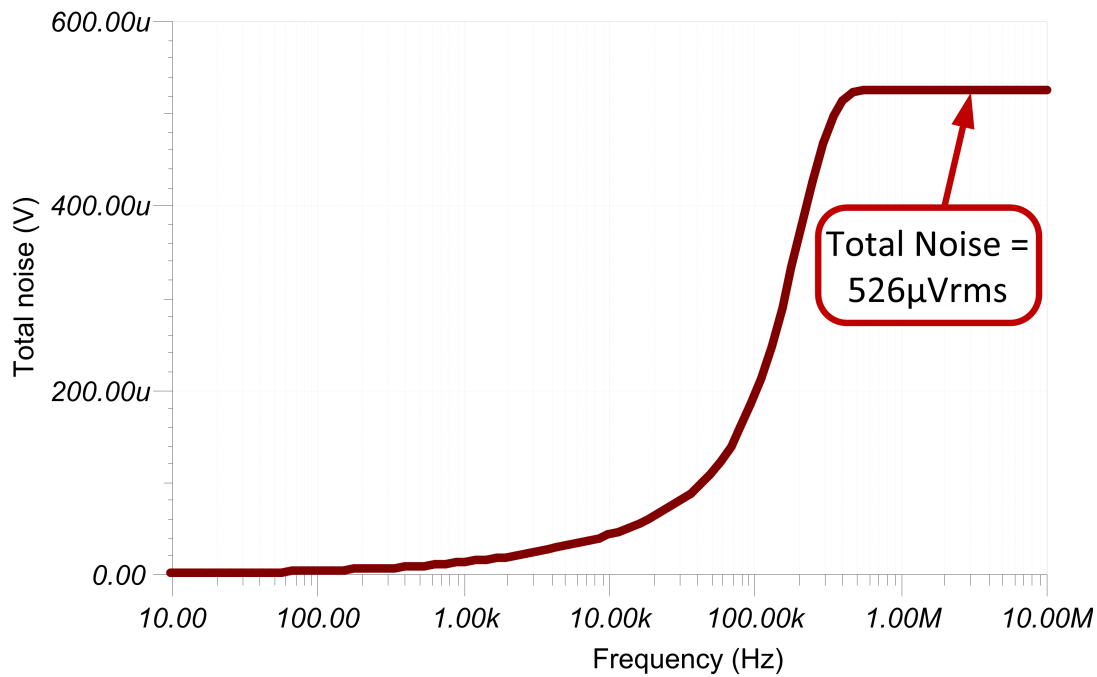
在 ADC 输入端看到的仿真噪声高于预期的计算噪声。此差异由仿真模型中的噪声峰值（未包含在计算中）造成。以下公式表明 ISO224 噪声主导了信号链，而 TLV9002 的噪声可忽略不计。请参阅[计算 ADC 系统的总噪声](#)了解有关此主题的详细理论。

$$E_n = \text{Gain}(e_n) \sqrt{(1.57 \cdot BW)}$$

$$E_{n\text{ISO224A}} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2.43} (4 \mu\text{V} / \sqrt{\text{Hz}}) \cdot \sqrt{1.57 \cdot 145 \text{ kHz}} = 262 \mu\text{V}_{\text{RMS}}$$

$$E_{n\text{TLV9002}} = \frac{1}{2.43} (27 \text{ nV} / \sqrt{\text{Hz}}) \cdot \sqrt{1.57 \cdot 145 \text{ kHz}} = 5 \mu\text{V}_{\text{RMS}}$$

$$E_{n\text{ISO224A+TLV9002}} = E_{n\text{ISO224A}} + E_{n\text{TLV9002}} = \sqrt{262^2 \mu\text{V}_{\text{RMS}} + 5^2 \mu\text{V}_{\text{RMS}}} = 262 \mu\text{V}_{\text{RMS}}$$



设计中采用的器件

器件	主要 特性	链接	类似器件
ISO224	具有 $\pm 12\text{V}$ 单端输入范围、 $\frac{1}{2}$ 的固定增益，可实现 $\pm 4\text{V}$ 差分输出，输出共模电压为 $+2.5\text{V}$ ，高侧电源电压为 4.5V 至 18V ，低侧电源电压为 4.5V 至 5.5V ，输入失调电压在 25°C 时为 $\pm 5\text{mV}$ ， $\pm 42\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ （最大值），增益误差在 25°C 时为 $\pm 0.3\%$ ， $\pm 50\text{ppm}/^\circ\text{C}$ （最大值），非线性度为 $\pm 0.01\%$ （最大值）， $\pm 1\text{ppm}/^\circ\text{C}$ ，并具有 $1.25\text{M}\Omega$ 的高输入阻抗	www.ti.com.cn/product/cn/ISO224	www.ti.com/isoamps
ADS7142	双通道、满量程输入范围和取决于 AVDD 的基准电压，默认为 12 位性能，高精度模式下为 16 位性能，600SPS 时的电流消耗极低（为 $0.45\mu\text{A}$ ）	www.ti.com.cn/product/cn/ADS7142	http://www.ti.com/PrecisionADCs
TLV9002	双通道、轨至轨输入和输出放大器、 $2727\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 低宽带噪声、 $\pm 0.04\text{mV}$ 低输入失调电压	www.ti.com.cn/product/cn/TLV9002	http://www.ti.com/opamps

设计参考资料

请参阅《[模拟工程师电路说明书](#)》，了解有关 TI 综合电路库的信息。

主要文件链接

适用于隔离式设计的 TINA 文件 - <http://www.ti.com/cn/lit/zip/sbac226>。

重要声明和免责声明

TI 均以“原样”提供技术性 & 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，不保证其中不含任何瑕疵，且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、适合某特定用途或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

所述资源可供专业开发人员应用 TI 产品进行设计使用。您将对以下行为独自承担全部责任：(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。所述资源如有变更，恕不另行通知。TI 对您使用所述资源的授权仅限于开发资源所涉及 TI 产品的相关应用。除此之外不得复制或展示所述资源，也不提供其它 TI 或任何第三方的知识产权授权许可。如因使用所述资源而产生任何索赔、赔偿、成本、损失及债务等，TI 对此概不负责，并且您须赔偿由此对 TI 及其代表造成的损害。

TI 所提供产品均受 TI 的销售条款 (<http://www.ti.com.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 以及 ti.com.cn 上或随附 TI 产品提供的其他可适用条款的约束。TI 提供所述资源并不扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品所发布的可适用的担保范围或担保免责声明。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122
Copyright © 2019 德州仪器半导体技术（上海）有限公司

重要声明和免责声明

TI 均以“原样”提供技术性 & 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，不保证其中不含任何瑕疵，且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、适合某特定用途或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

所述资源可供专业开发人员应用 TI 产品进行设计使用。您将对以下行为独自承担全部责任：(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。所述资源如有变更，恕不另行通知。TI 对您使用所述资源的授权仅限于开发资源所涉及 TI 产品的相关应用。除此之外不得复制或展示所述资源，也不提供其它 TI 或任何第三方的知识产权授权许可。如因使用所述资源而产生任何索赔、赔偿、成本、损失及债务等，TI 对此概不负责，并且您须赔偿由此对 TI 及其代表造成的损害。

TI 所提供产品均受 TI 的销售条款 (<http://www.ti.com.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 以及 [ti.com.cn](http://www.ti.com.cn) 上或随附 TI 产品提供的其他可适用条款的约束。TI 提供所述资源并不扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品所发布的可适用的担保范围或担保免责声明。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122
Copyright © 2019 德州仪器半导体技术（上海）有限公司