

Analog Engineer's Circuit

采用高增益仪表放大器驱动 ADC 的电路



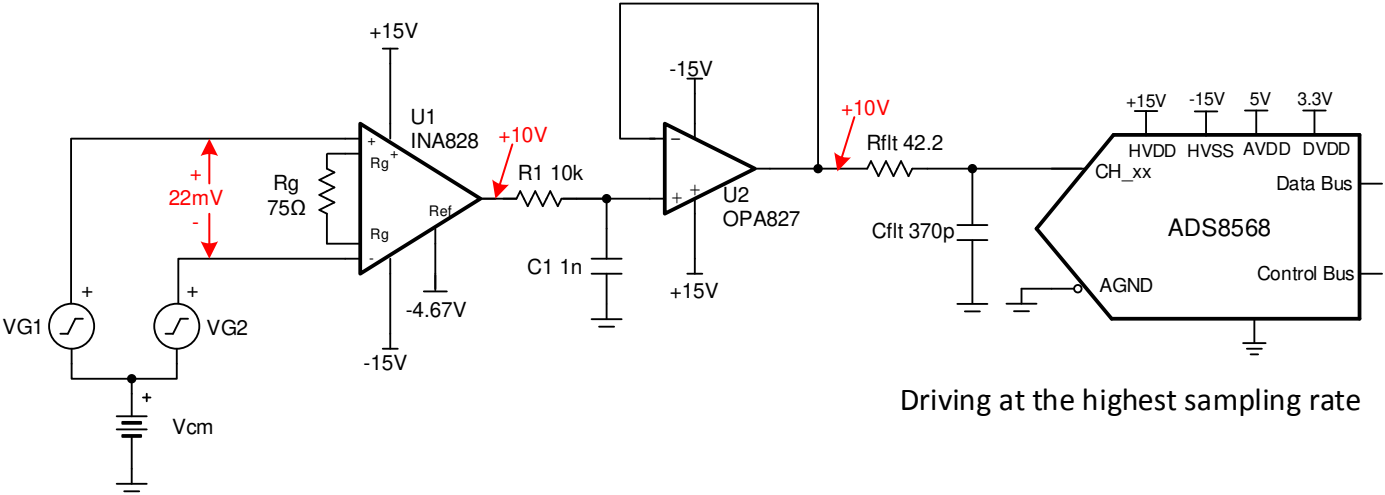
Dale Li, Art Kay

输入		ADC 输入	数字输出 ADS8568
VinDiffMin = - 8mV		CH_x = - 10V	8000H
VinDiffMax = +22mV		CH_x = +10V	7FFFH

电源			
AVDD		Vee	Vdd
5.0V	3.3V	+15V	-15V

设计说明

仪表放大器针对低噪声、低失调电压、低漂移、高 CMRR 和高精度进行了优化，但这些仪表放大器无法驱动精密 ADC，以在 ADC 采集期间正确地使信号稳定。该设计展示了一个有关如何设置增益和失调电压漂移以放大低电平非对称输入信号的示例。此外，高增益会限制 INA828 仪表放大器带宽，因此使用 OPA827 运算放大器作为缓冲器，以便可以实现 ADS8568 的最大采样率。相关的电路指导手册（[采用仪表放大器驱动高电压 SAR ADC](#)）中介绍了一种不采用宽带宽缓冲器的简化方法，与本文档中的缓冲式设计相比，该简化方法具有有限的采样速率。此外，[采用缓冲式仪表放大器驱动高电压 SAR ADC](#) 也分析了该采用单位增益的设计。该电路实施适用于所有需要精密信号处理和数据转换的 PLC 中的桥式传感器和模拟输入模块。



规格

规格	目标值	计算值	仿真值
瞬态稳定误差	>0.5LSB (152μV)	不适用	0.36μV
噪声		1.1mV	1.14mV
系统失调电压误差		33.6mV	不适用
系统失调电压漂移		334μV/°C	不适用
系统增益误差		0.53%	不适用
系统增益漂移		54.2ppm/°C	不适用

设计说明

1. 仪表放大器的带宽通常不足以以较高的数据速率驱动 SAR 数据转换器。当仪表放大器处于高增益状态时尤其如此。因此，需要使用宽带宽驱动器，因为采用开关电容器输入结构的 SAR ADC 具有需要在每次采集期间充满电的输入电容器。此设计中增加了 [OPA827](#) 缓冲器，从而使 ADC 能够以最大采样速率运行 ([ADS8568](#) 510kSPS，对于并行接口)。
2. 使用 [仪表放大器的共模输入范围计算器](#) 软件工具检查放大器的共模范围。
3. 选择适合 C_1 和 C_{filt} 的 COG 电容器，以便更大程度地减少失真。
4. 增益设置电阻器 R_g 为 0.1% 20ppm/°C 薄膜电阻器或更佳电阻器，以实现低增益误差和低增益漂移。
5. *TI 高精度实验室* 视频系列介绍了选择驱动器放大器以及电荷泵电路 R_{filt} 和 C_{filt} 的方法。有关详细信息，请观看 [SAR ADC 前端元件选择简介](#)。
6. 设置运算放大器和仪表放大器之间滤波器的截止频率，以实现抗混叠并最大程度地降低噪声。有关混叠和抗混叠滤波器的更多详细信息，请观看 [混叠和抗混叠滤波器](#)。
7. 由于仪表放大器的高增益，直流误差 (失调电压、增益和漂移) 的影响很大。校准是最大程度地降低这些误差的好方法。有关校准的更多详细信息，请观看 [了解和校准 ADC 系统的失调电压和增益](#)。

元件选型

1. 根据差分输入信号和 [ADS8568](#) 满量程输入范围确定增益。

$$G = \frac{V_{out} - V_{out}}{V_{in} - V_{in}} = \frac{10V - (-10V)}{22mV - (-8mV)} = 666.7$$

$$R_g = \frac{50k\Omega}{G - 1} = \frac{50k\Omega}{666.7} = 75.1\Omega$$

$$R_g = 75.1\Omega \text{ standard value}$$

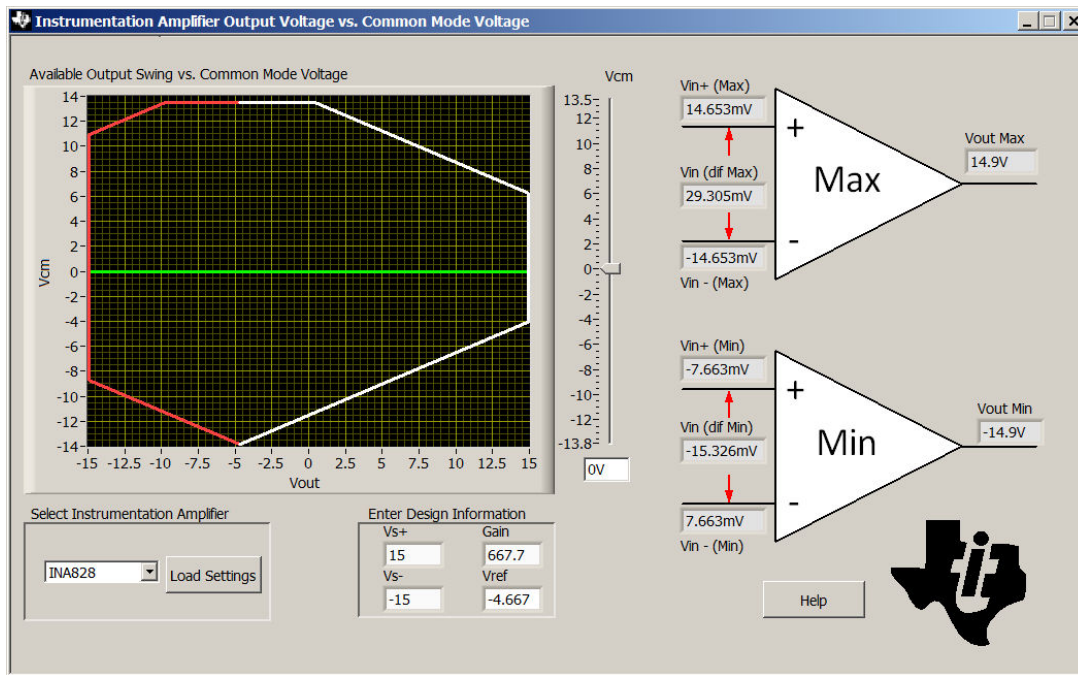
$$G = 1 + \frac{50k\Omega}{R_g} = 667.7$$

2. 该设计中的输入信号是 $\pm 10V$ 高电压信号，因此应将 [INA828](#) 的增益设置为 1，不需要增益电阻器 (R_g)。

$$V_{out} = G \cdot V_{in} + V_{ref}$$

$$V_{ref} = V_{out} - G \cdot V_{in} = 10V - 667.7 \cdot 22mV = -4.667V$$

3. 使用 [仪表放大器的共模输入范围计算器](#) 确定 [INA826](#) 是否超出共模范围。下图中的共模计算器指示对于 0V 共模输入，输出摆幅为 $\pm 14.9V$ 。

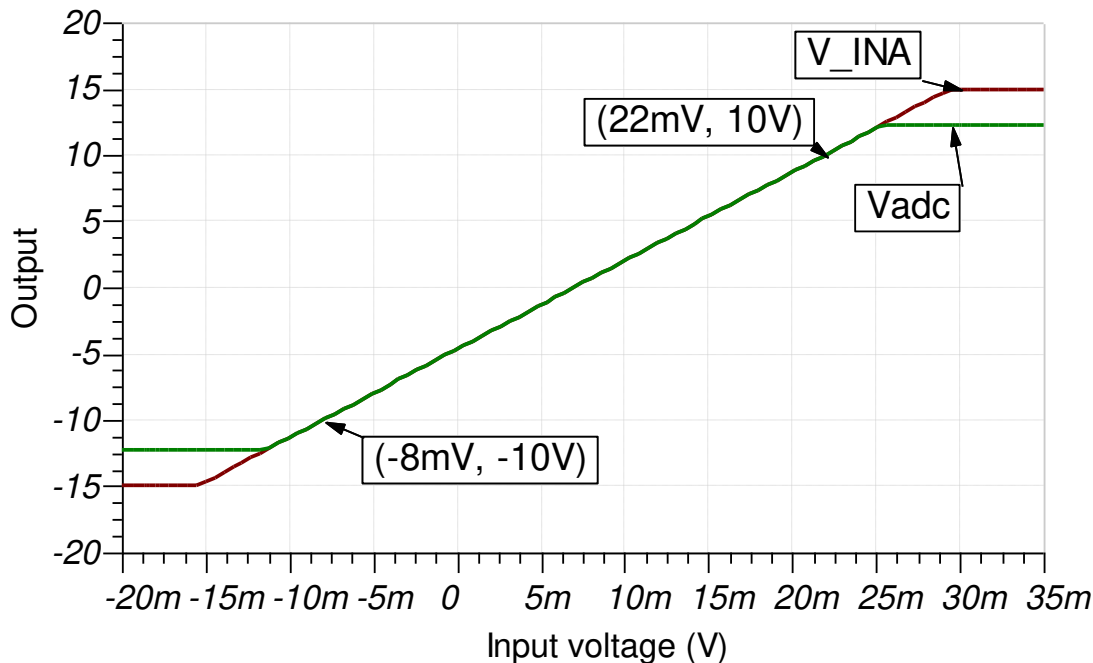


- 使用 TINA-TI SPICE 和 [SAR ADC 前端元件选择简介](#) 视频中所述的方法确定 C_{filt} 和 R_{filt} 的值。本文档中所示的 R_{filt} 和 C_{filt} 值适用于这些电路；但在使用不同放大器时，需要使用 TINA-TI SPICE 确定的新值。
- 根据您的系统要求（在该示例中为 $f_{\text{CRC}} = 15.9\text{kHz}$ ）选择 INA828 和 OPA827 之间的 RC 滤波器。

$$f_{\text{CRC}} = \frac{1}{2\pi \cdot R_1 \cdot C_1} = \frac{1}{2\pi \cdot (10\text{k}\Omega) \cdot (1\text{pF})} = 15.9\text{kHz}$$

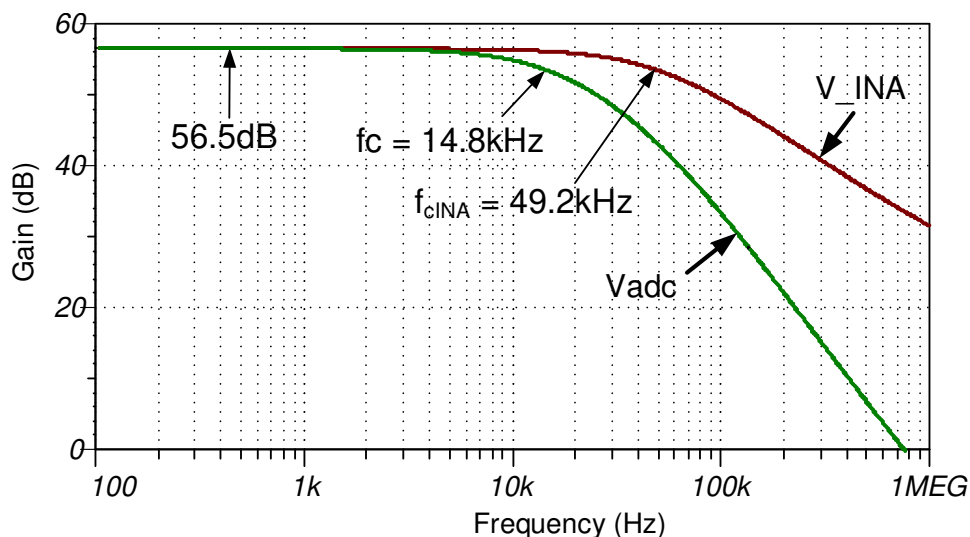
直流传输特性

下图展示了 -10V 至 $+10\text{V}$ 差分输入的线性输出响应。有关该主题的详细理论信息，请参阅 [使用仪表放大器确定 SAR ADC 的线性范围](#)。该 ADC 的满量程范围 (FSR) 处于仪表放大器的线性范围内。



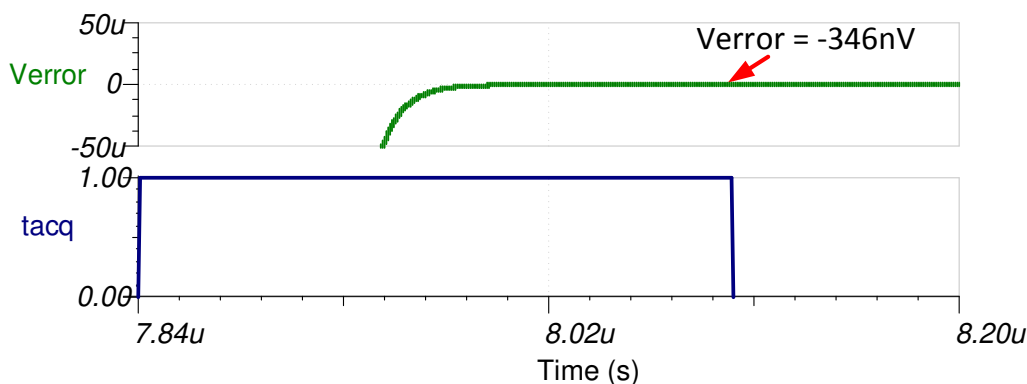
交流传输特性

该设计的带宽被仿真为 14.8kHz，增益为 56.4dB (667.7V/V)。带宽限制由组合 RC 滤波器 ($f_{cRC} = 15.9\text{kHz}$) 和仪表放大器 ($f_{cINA} = 49.2\text{kHz}$) 设置。



瞬态 ADC 输入稳定仿真 (510kSPS)

之所以使用 OPA827 缓冲器 (22MHz GBW)，是因为它能够响应 ADS8568 的电荷反冲产生的快速瞬态。该运算放大器缓冲器使系统能够实现 ADS8568 的最大采样率 (510kSPS)。以下仿真显示了使用 INA828 和 OPA827 缓冲器以及 ADS8568 趋稳至满量程直流输入信号的情况。该类型的仿真表明已正确选择采样保持反冲电路，满足所需的 $\frac{1}{2}\text{LSB}$ (152 μV)。请参阅 [SAR ADC 前端元件选择简介](#)，了解有关此主题的详细理论。



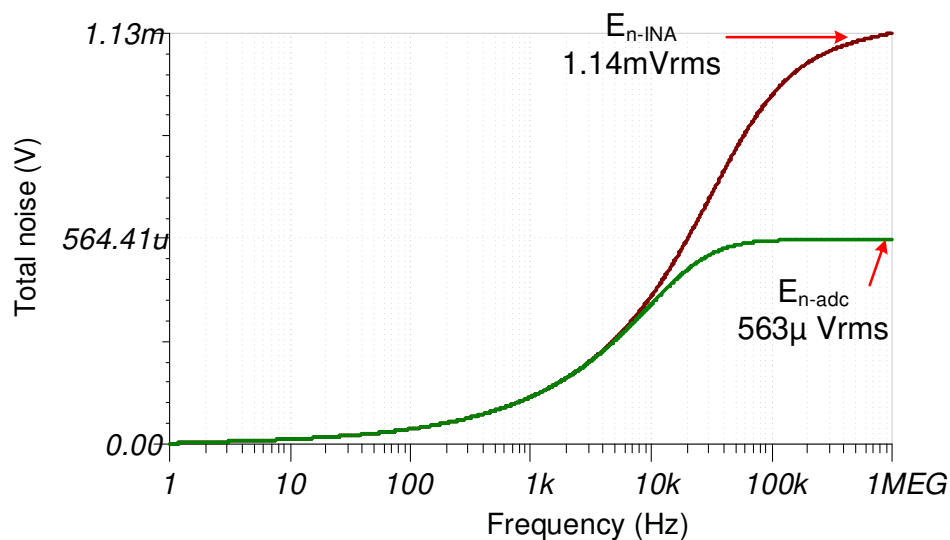
噪声仿真

该部分概要介绍如何使用简化的噪声计算方法进行粗略估算。我们在该计算中忽略了 OPA827 产生的噪声，因为 INA828 的噪声占主导地位，也忽略了电阻器噪声，因为它在高于 15.92kHz 的频率下会衰减。

$$E_n = \text{Gain} \cdot \sqrt{e_{NI}^2 + \left(\frac{e_{NO}}{\text{Gain}}\right)^2} \cdot \sqrt{K_n \cdot f_c}$$

$$E_n = 667.7 \cdot \sqrt{(7\text{nV} / \sqrt{\text{Hz}})^2 + \left(\frac{90\text{nV} / \sqrt{\text{Hz}}}{667.7}\right)^2} \cdot \sqrt{1.57 \cdot 14.8\text{kHz}} = 595\mu\text{Vrms}$$

请注意，计算值与仿真值之间匹配良好 (仿真值 = 563 μV_{RMS} ，计算值 = 595 μV_{RMS})。有关放大器噪声计算的详细理论，请参阅 [TI 高精度实验室 - 运算放大器：噪声 4](#)；有关数据转换噪声，请参阅 [计算 ADC 系统的总噪声](#)。



增益误差和失调电压估算

以下失调电压和失调电压漂移计算由仪表放大器主导，因为它具有高增益。增益误差计算包括 ADC 和仪表放大器的增益误差。对于失调电压和增益误差，使用最大室温值。有关系统增益和失调电压误差的详细信息，请观看 [误差分析背后的统计数据](#)。

System Offset Calculation:

$$V_{osi} = 50\mu V, V_{oso} = 250\mu V \text{ max at room temp}$$

$$G = 667.7V/V$$

$$V_{osRTI} = V_{osi} + \frac{V_{oso}}{G} = 50\mu V + \frac{250\mu V}{667.7} = 50.4\mu V$$

$$V_{osRTO} = G \cdot V_{osRTI} = 667.7 \cdot 50.4\mu V = 33.6mV$$

$$V_{os(System)} \approx 33.6mV \text{ total system offset is dominated by INA828 offset}$$

System Offset Drift Calculation:

$$V_{osDrift(INA828RTI)} = 0.5\mu V/^{\circ}C$$

$$V_{osDrift(INA828RTO)} = G \cdot V_{osDrift(INA828RTI)} = 667.7 \cdot 0.5\mu V/^{\circ}C = 334\mu V/^{\circ}C$$

$$V_{osDrift(System)} \approx 334\mu V/^{\circ}C \text{ the INA drift dominates because of the high gain.}$$

System Gain Error Calculation:

$$GE_{ina} = \pm 0.15\%, \text{ max room temp INA828}$$

$$GE_{Rg} = \pm 0.1\%, \text{ Rg Tolerance}$$

$$GE_{ADS8568} = \pm 0.5\%, \text{ max room temp ADS8568}$$

$$GE_{total} = \sqrt{(GE_{ina})^2 + (GE_{Rg})^2 + (GE_{ADS8568})^2} = \sqrt{(0.15\%)^2 + (0.1\%)^2 + (0.5\%)^2} = 0.53\%$$

System Gain Drift Calculation:

$$\frac{\Delta GE_{INA}}{\Delta T} \approx 50ppm/^{\circ}C$$

$$\frac{\Delta GE_{Rg}}{\Delta T} \approx 20ppm/^{\circ}C$$

$$\frac{\Delta GE_{ADC8568}}{\Delta T} \approx 6ppm/^{\circ}C$$

$$\frac{\Delta GE_{System}}{\Delta T} \approx \sqrt{(50ppm/^{\circ}C)^2 + (20ppm/^{\circ}C)^2 + (6ppm/^{\circ}C)^2} = 54.2ppm/^{\circ}C$$

设计中采用的器件

器件	主要特性	链路	其他可能的器件
ADS8568	16 位分辨率, SPI, 500kSPS 采样率, 单端输入, 同步采样, 内部基准, 高达 $\pm 12V$ 的可编程范围	16 位、8 通道同步采样双极输入 SAR 模数转换器 (ADC)	模数转换器 (ADC)
INA828	带宽 1MHz (G=1), 低噪声 $18nV/\sqrt{Hz}$, 低失调电压 $\pm 40\mu V$, 低温漂 $\pm 0.4\mu V/^{\circ}C$, 低增益漂移 $0.1ppm/^{\circ}C$ (典型值)	$50\mu V$ 失调电压、 $7nV/\sqrt{Hz}$ 噪声、低功耗、精密仪表放大器	仪表放大器
OPA827	增益带宽 22MHz, 低噪声 $4nV/\sqrt{Hz}$, 低失调电压 $\pm 75\mu V$, 低失调电压漂移 $\pm 0.1\mu V/^{\circ}C$ (典型值)	低噪声、高精度 JFET 输入运算放大器	运算放大器

主要文件链接

德州仪器 (TI), [SBAC215 源文件](#), 软件支持

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

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