

Analog Engineer's Circuit

用于驱动 ADC 的高压至低压电平转换同相电路



Art Kay

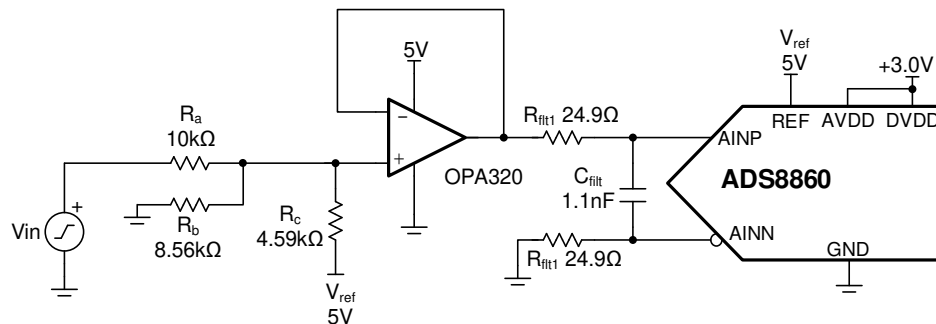
输入	ADC 输入	数字输出 ADS8860
-10V	0.2V	0A3D _H 或 2621 _d
10V	4.8V	F5C3 _H 或 62915 _d

电源

Vref	AVDD	DVDD
5V	3.0V	3.0V

设计说明

本电路文档介绍了如何将高压信号（例如 $\pm 10\text{V}$ ）转换为低压 ADC 输入（例如 0V 至 5V ）。该电路不需要任何高压电源即可运行，而是使用分压器和电平转换来转换输入信号。该电路展示了 OPA320 运算放大器和 ADS8860 SAR ADC，但该拓扑适用于许多不同的 ADC。此设计可用于需要转换高压输入的各种应用，例如 PLC 模拟输入模块、分析实验室仪表以及工厂自动化与控制。



规格

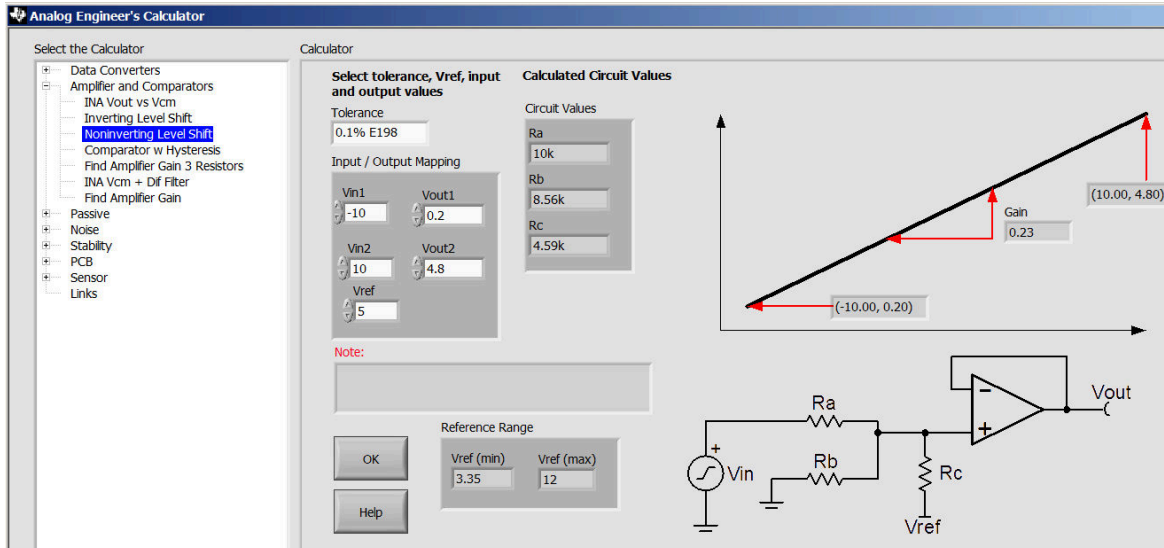
规格	目标值	计算值	仿真值
带宽	> 1MHz	2.9MHz	4.06MHz
噪声	< 1/2LSB = 38.1 μV	23.56 μV_{RMS}	21.04 μV_{RMS}
瞬态稳定误差	< 1/2LSB = 38.1 μV		35 μV

设计说明

- 为 C_{filt} 选择 C0G 型电容器，以便更大限度地减少失真。
- 使用 0.1% 20ppm/ $^{\circ}\text{C}$ 或更高规格的薄膜电阻器以更大限度地减少增益误差和漂移。
- 此电路的输入阻抗为 $R_{\text{in}} = R_a + R_b || R_c$ 。对于高阻抗输入，使用高压放大器缓冲器（例如， $V_{\text{cc}} = +15\text{V}$ 和 $V_{\text{ee}} = -15\text{V}$ ）。或者，通过将 R_a 、 R_b 和 R_c 乘以相同的系数来增加输入阻抗。但是，增加所有电阻器上的电阻会影响系统噪声。

元件选型

- 第一步是选择放大器输入和输出范围。在该示例中，输入范围为 -10V 至 $+10\text{V}$ 。放大器输出范围根据 ADC 输入和放大器线性输出范围进行设置。该示例中的 ADC 输入范围由 5V 基准电压设置。放大器电源设置为 5V 以匹配 ADC 输入范围。由于输出摆幅限制（即 OPA320 的线性范围为 $0.1\text{V} < V_{\text{OUT}} < 4.9\text{V}$ ），放大器的输出不能摆动到电源轨。在此示例中，对于 -10V 至 10V 的输入信号，选择了 0.2V 至 4.8V 的输出摆幅。输出范围可以设置为 0.1V 至 4.9V 以匹配线性范围，但此示例中添加了设计裕度以考虑电源变化。
- 使用下一步中的 [模拟工程师计算器](#) 来选择元件值。输入输入和输出电压以及基准电压（ $-10\text{V} < V_{\text{IN}} < +10\text{V}$ 以及 $0.2\text{V} < V_{\text{OUT}} < 4.8\text{V}$ ）。可接受的基准电压范围显示在工具底部（本例中为 3.35V 至 12V ）。本例中选择了 5V 基准电压，因为电路中的其他部分可以使用该基准电压。该工具输出了映射电压（ $R_a = 10\text{k}\Omega$ 、 $R_b = 8.56\text{k}\Omega$ 、 $R_c = 4.59\text{k}\Omega$ ）所需的 0.1% 电阻。



- 以下公式显示了同相电平转换拓扑的传递函数。可以使用这些公式而不是计算器来求解不同的元件值。为此，请选择基准值并将 R_a 的值固定为 $10\text{k}\Omega$ 。完成后，求解两个不同输出信号值的 R_b 和 R_c 。此问题的代数运算有些复杂，因此建议使用计算器。使用这些公式验证传递函数，如下面的公式所示。

$$V_O = \frac{(R_b \parallel R_c)}{R_a + (R_b \parallel R_c)} \cdot V_{\text{IN}} + \frac{(R_a \parallel R_b)}{R_c + (R_a \parallel R_b)} \cdot V_{\text{ref}}$$

其中

$$R_b \parallel R_c = \frac{R_b \cdot R_c}{R_b + R_c} \text{ and } R_a \parallel R_b = \frac{R_a \cdot R_b}{R_b + R_c}$$

使用计算器中给出的值：

$$R_a = 10\text{k}\Omega, R_b = 8.56\text{k}\Omega, R_c = 4.59\text{k}\Omega$$

$$V_O = 0.23005V \times V_{\text{IN}} + 2.506V$$

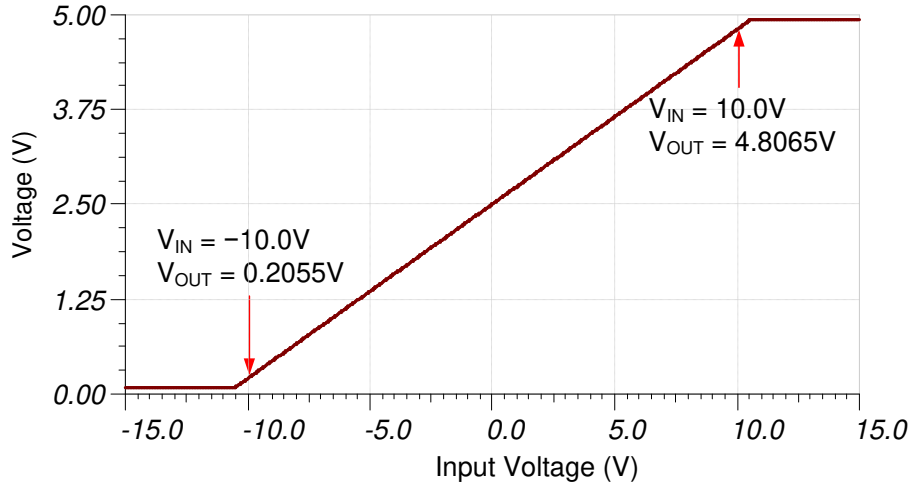
$$V_O(-10\text{V}) = 0.2055V$$

$$V_O(+10\text{V}) = 4.8065V$$

- 查找可在 1Msps 实现稳定的 R_{filt} 和 C_{filt} 。[优化 ADC 驱动器上的 Rfilt 和 Cfilt 值](#) 视频（[TI 高精度实验室 - ADC 视频系列](#)）展示了选择 R_{filt} 和 C_{filt} 的算法。经证实， 24.9Ω 和 1.1nF 的最终值可确保稳定至远低于最低有效位 (LSB) $\frac{1}{2}$ 的位置。

直流传输特性

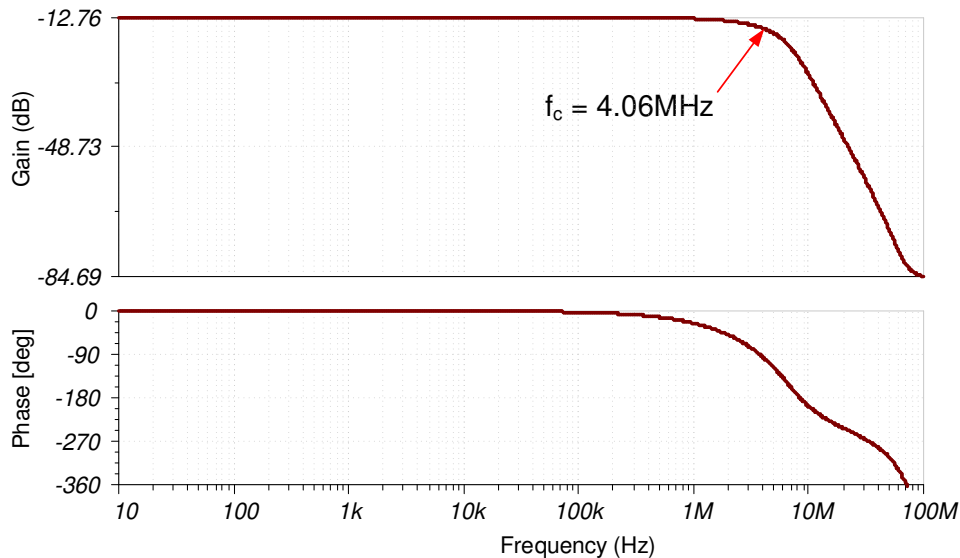
下图所示为 -10V 至 10V 输入的线性输出响应。在这种情况下，对于 -10V 输入，放大器输出约为 0.2V，对于 +10V 输入，放大器输出则约为 4.8V。该设计经过调整，使输出范围距离非线性电源轨具有 0.2V 的安全距离。有关该主题的理论信息，请参阅“TI 高精度实验室 - ADC”中的 [使用仪表放大器确定 SAR ADC 的线性范围](#)。



交流传输特性

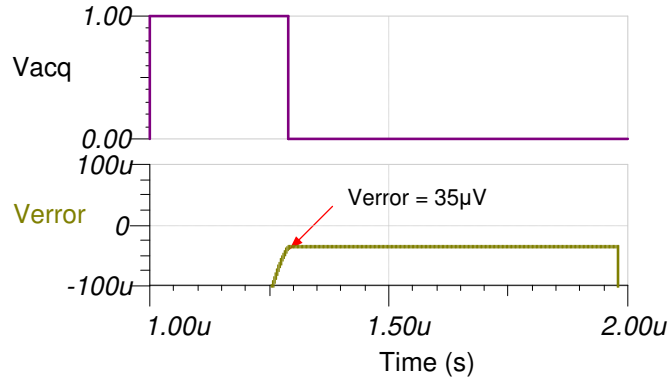
带宽受 RC 电荷桶电路的限制。将计算的带宽和仿真的带宽进行了比较（计算的 $f_c = 2.9MHz$ ，仿真的 $f_c = 4.06MHz$ ），带宽存在微小差异的原因是 OPA320 器件上的增益峰值。

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot (2 \cdot 24.9\Omega) \cdot (1.1nF)} = 2.9MHz$$



瞬态 ADC 输入稳定仿真

以下仿真显示了稳定至 +10V 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。有关该主题的理论，请参阅 [最终 SAR ADC 驱动器仿真](#) 视频。



噪声仿真

以下噪声计算考虑了电阻器网络的热噪声、放大器噪声以及 RC 滤波器的带宽限制。计算得出的总噪声为 $23.5\mu\text{V}_{\text{RMS}}$ ，仿真得到的总噪声为 $21.04\mu\text{V}_{\text{RMS}}$ 。有关放大器噪声计算的详细理论，请参阅[运算放大器噪声计算](#)视频；有关数据转换器噪声，请参阅[计算 ADC 系统的总噪声](#)视频。

噪声等效输入电阻器网络：

$$R_{\text{eq}} = \frac{1}{\frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b} + \frac{1}{R_c}} = \frac{1}{\frac{1}{10\text{k}\Omega} + \frac{1}{8.56\text{k}\Omega} + \frac{1}{4.59\text{k}\Omega}} = 2.3\text{k}\Omega$$

电阻器网络噪声：

$$e_{n\text{Req}} = \sqrt{4kTR} = \sqrt{4 \cdot (1.381 \cdot 10^{-23}) \cdot (273 + 25) \cdot 2.3\text{k}\Omega} = 6.164 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}$$

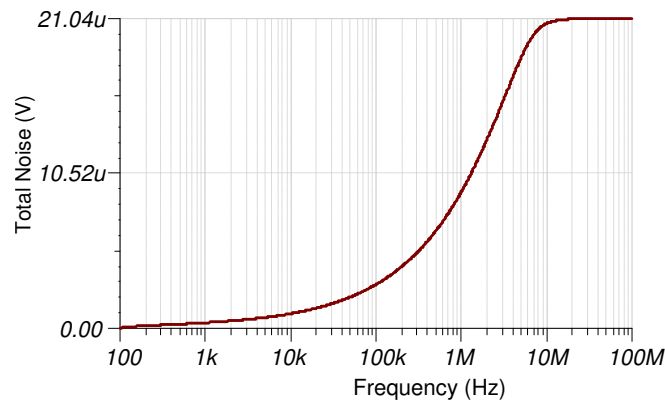
OPS320 噪声密度：

$$e_{n\text{OPA320}} = 7 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}$$

总噪声：

$$e_{n\text{TOT}} = \sqrt{e_{n\text{OPA320}}^2 + e_{n\text{Req}}^2} \cdot \sqrt{K_n \cdot f_c}$$

$$e_{n\text{TOT}} = \sqrt{\left(7 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}\right)^2 + \left(6.164 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}\right)^2} \cdot \sqrt{1.57 \cdot 4.06\text{MHz}} = 23.56\mu\text{V}_{\text{RMS}}$$



设计采用的器件和备选器件

器件	主要特性	链接	其他可能的器件
ADS8860	16 位分辨率, SPI, 1Msps 采样速率, 单端输入, Vref 输入范围为 2.5V 至 5.0V	具有单端输入、SPI 和菊花链的 16 位、1MSPS、单通道 SAR ADC	精密 ADC
OPA320	20MHz 带宽、轨到轨 (零交叉失真), $V_{OS}(MAX) = 150 \mu V$, $V_{OS}(DriftMAX) = 5 \mu V/^\circ C$, $e_n = 7nV/\sqrt{Hz}$	零交叉、20MHz、0.9pA Ib、RRIO、CMOS 精密运算放大器	运算放大器

主要文件链接

德州仪器 (TI), [SBAC250 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