

Analog Engineer's Circuit

用于驱动 ADC 的高压至低压电平转换反相电路



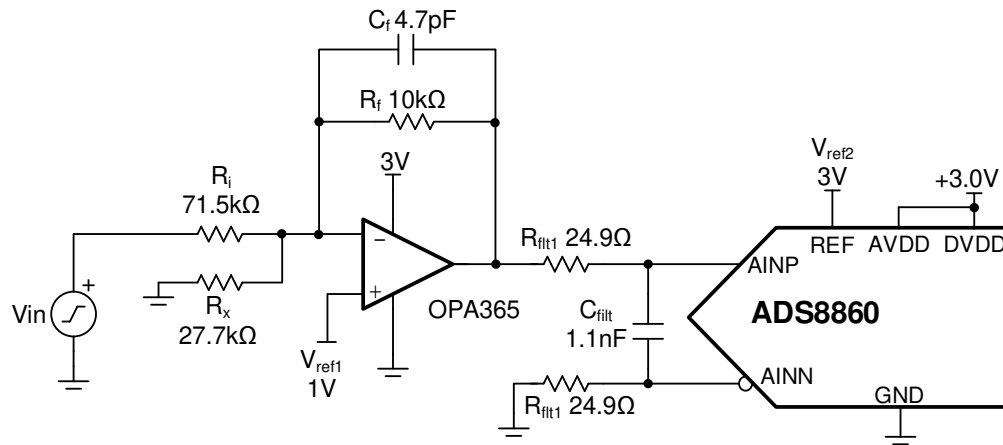
Art Kay

输入	ADC 输入	数字输出 ADS8860
-10V	0.1V	0889 _H 或 2185 _d
+10V	2.9V	F777 _H 或 63351 _d

电源			
Vref1	Vref2	AVDD	DVDD
1V	3V	3V	3V

设计说明

本电路文档介绍了如何将高压信号（例如 $\pm 10V$ ）转换为低压 ADC 输入（例如 $0V$ 至 $3V$ ）。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。该电路显示了 OPA365 和 ADS8860 器件，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、仪表（实验室、分析、现场和便携式）以及工厂自动化与控制。



规格

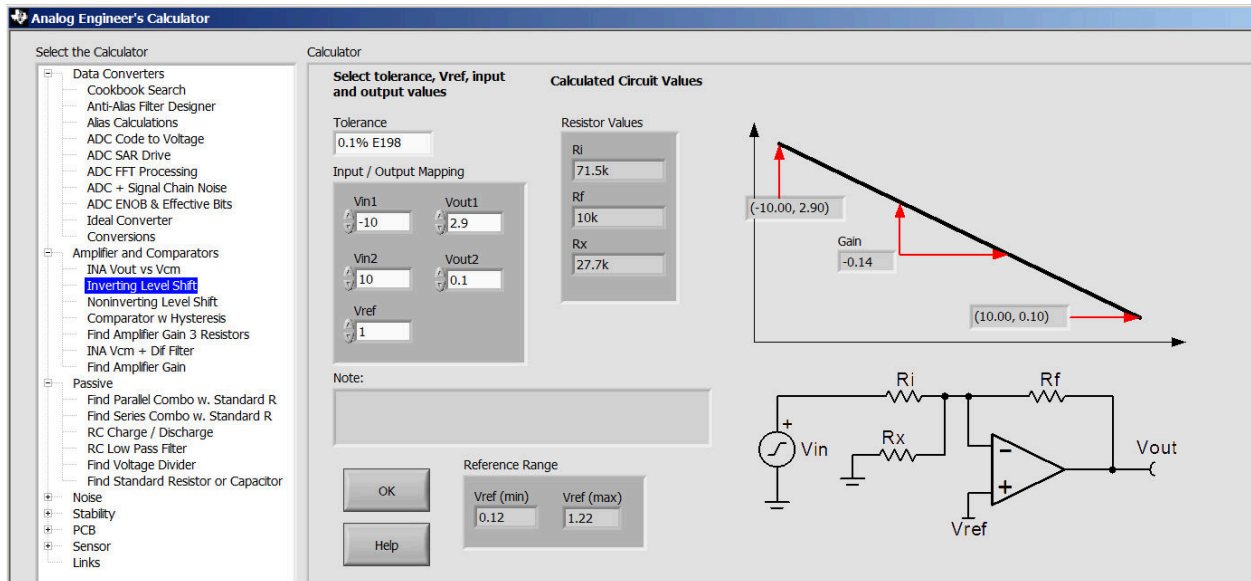
规格	目标值	计算值	仿真值
采样速率	1MSPS (最大采样速率)		800kSPS
带宽	> 1MHz	极点在 3.39MHz 和 4.92MHz 处	2.44MHz
噪声	< 1/2LSB = 38.1 μ V	29.52 μ V	31.55 μ V
瞬态稳定误差	< 1/2LSB = 38.1 μ V		- 2.2 μ V

设计说明

1. 此电路的共模保持在一个恒定值（在本例中， $V_{ref1} = 1V$ ）。由于共模是恒定的，因此放大器无需轨到轨输入或零交叉失真。有关更多详细信息，请参阅“TI 高精度实验室”中的 [使用运算放大器时确定 SAR ADC 的线性范围](#) 视频。
2. 为 C_{filt} 选择 C0G 型电容器，以便更大限度地减少失真。
3. 使用 0.1% 20ppm/°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。
4. 此电路的输入阻抗为 $R_{in} = R_i$ （本例中为 $71.5k\Omega$ ）。对于高阻抗输入，使用高压放大器缓冲器（例如， $V_{cc} = +15V$ 和 $V_{ee} = -15V$ ）。或者，可以通过将 R_i 、 R_x 和 R_f 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。
5. [TI 高精度实验室 - ADC](#) 视频系列介绍了选择电荷桶电路 C_{filt} 和 R_{filt} 的方法。请参阅 [SAR ADC 前端元件选型简介](#)，了解有关此主题的详细信息。在该示例中，采样速率从 1MSPS 降至 800kSPS，以实现良好的稳定。

元件选型

1. 首先选择放大器输入和输出范围。在该示例中，输入范围为 $-10V$ 至 $+10V$ 。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 3V 基准电压设置。放大器电源设置为 3V 以匹配 ADC 输入范围。由于输出摆幅限制（即 OPA365 器件的线性范围为 $0.1V < V_{OUT} < 2.9V$ ），放大器的输出无法摆动到电源轨。还可以进一步调整输出范围，以提供设计裕度。例如， $0.2V < V_{OUT} < 2.8V$ 可为电源变化等问题提供裕度。
2. 下一步中可以使用 [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（ $-10V < V_{in} < +10V$ 和 $0.1V < V_{out} < 2.9V$ ）。可接受的基准电压范围显示在工具底部（本例中为 $0.12V$ 至 $1.22V$ ）。在该示例中，基准电压选为 $1V$ 。该工具输出了映射电压（ $R_i = 71.5k\Omega$ 、 $R_x = 27.7k\Omega$ 、 $R_f = 10k\Omega$ ）所需的 0.1% 电阻。



3. 以下公式显示了反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_f 的值固定为 $10k\Omega$ 。完成后，求解两个不同输出信号值的 R_i 和 R_x 。此问题的代数运算有些复杂，因此建议使用计算器。使用以下公式来验证传递函数：

$$V_O = -\frac{R_f}{R_i} \cdot V_{IN} + \left(1 + \frac{R_f}{R_i \parallel R_x}\right) \cdot V_{ref}$$

其中

$$R_i \parallel R_x = \frac{R_i \cdot R_x}{R_i + R_x}$$

使用计算器中给出的值：

$$R_i = 71.5k\Omega, R_x = 27.7k\Omega, R_f = 10k\Omega, V_{ref1} = 1.0V$$

$$V_O = -0.1399V \times V_{IN} + 1.5009V$$

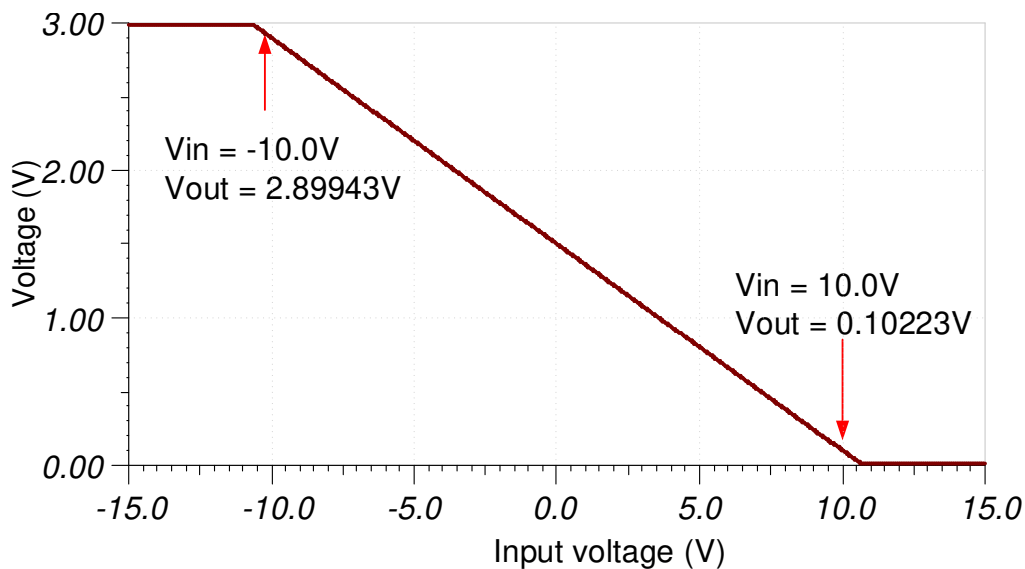
$$V_O(-10V) = 2.8995V$$

$$V_O(+10V) = 0.0123V$$

4. 查找可在 $1MSPS$ 实现稳定的 R_{filt} 和 C_{filt} 。[优化 \$R_{filt}\$ 和 \$C_{filt}\$ 值](#) 视频展示了选择 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 $2.9V$ ，对于 $+10V$ 输入，放大器输出则约为 $0.1V$ 。该设计经过调整，使输出范围距离非线性电源轨具有 $0.1V$ 的安全距离。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](#) 视频。

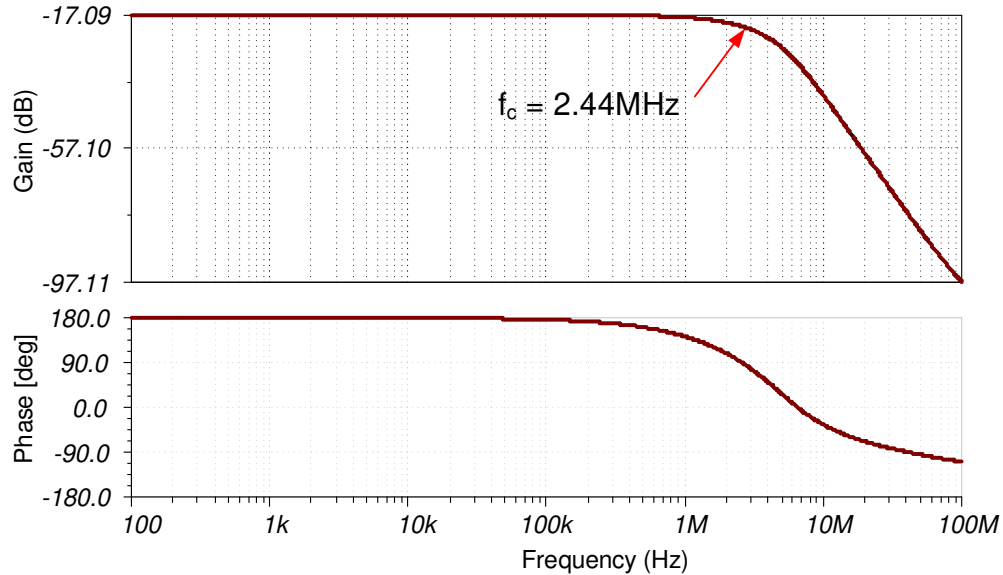


交流传输特性

带宽受限于 $C_f \times R_f$ 滤波器 ($f_{c1} = 3.39\text{MHz}$) 和输出滤波器 ($f_{c2} = 4.92\text{MHz}$)。这两个极点组合形成一个二阶滤波器，其仿真的截止频率为 2.44MHz 。有关该主题的更多详细信息，请观看 [运算放大器带宽](#) 视频系列。

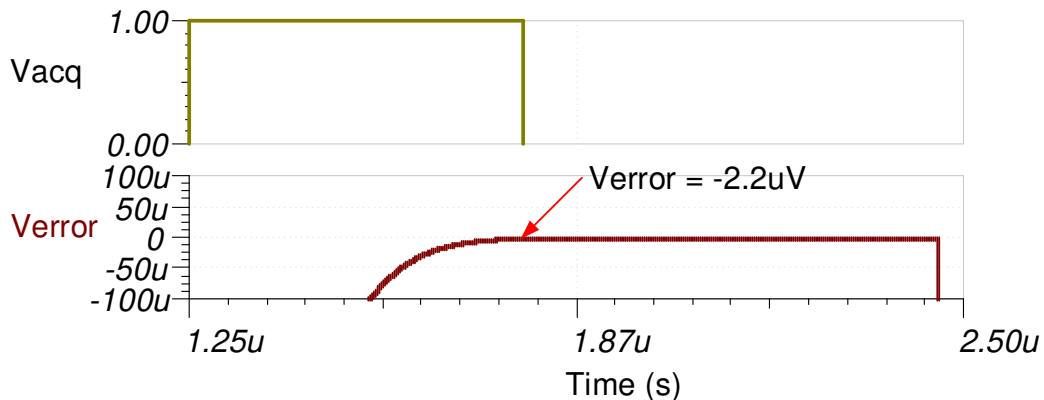
$$f_{c1} = \frac{1}{2\pi \cdot (10\text{k}\Omega) \cdot (4.7\text{pF})} = 3.39\text{MHz from the filter in the feedback network}$$

$$f_{c2} = \frac{1}{2\pi \cdot (2 \cdot 29.4\Omega) \cdot (1.1\text{nF})} = 4.92\text{MHz from the output filter}$$



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滤波器。有关该主题的理论，请参阅 [最终 SAR ADC 驱动器仿真](#) 视频。注意：在此示例中，放大器存在稳定问题，因此采样速率从 1MSPS 降至 800kSPS 。降低采样速率会增加采集周期以改善稳定性能 ($t_{\text{acq}} = 1 / f_{\text{samp}} - t_{\text{conv}} = (1/800\text{kSPS}) - 710\text{ns} = 540\text{ns}$)。



噪声仿真

以下噪声计算考虑了电阻器网络的热噪声、放大器噪声以及滤波器的带宽限制。计算得出的总噪声为 $29.52 \mu\text{V}$ ，仿真得到的总噪声为 $31.55 \mu\text{V}$ 。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：

$$R_{\text{eq}} = \frac{1}{\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_f}} = \frac{1}{\frac{1}{71.5\text{k}\Omega} + \frac{1}{27.7\text{k}\Omega} + \frac{1}{10\text{k}\Omega}} = 6.67\text{k}\Omega$$

电阻器网络噪声：

$$e_{n\text{Req}} = \sqrt{4\text{kTR}} = \sqrt{4 \cdot (1.381 \cdot 10^{-23}) \cdot (273 + 25) \cdot 6.67\text{k}\Omega} = 10.48 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}$$

OPA365 噪声密度：

$$e_{n\text{OPA365}} = 4.5 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}$$

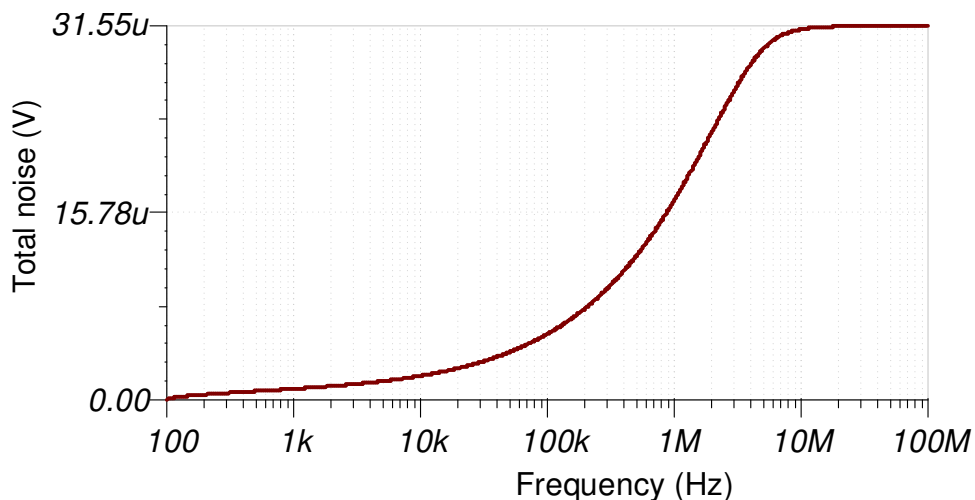
噪声增益：

$$G_n = \frac{R_f}{R_i \parallel R_x} + 1 = \frac{10\text{k}\Omega}{(71.5\text{k}\Omega) \parallel (27.7\text{k}\Omega)} + 1 = 1.501$$

总噪声：

$$e_{n\text{TOT}} = G_n \cdot \sqrt{e_{n\text{OPA365}}^2 + e_{n\text{Req}}^2} \cdot \sqrt{K_n \cdot f_c}$$

$$e_{n\text{TOT}} = (1.501) \sqrt{\left(4.5 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}\right)^2 + \left(10.48 \frac{\text{nV}}{\sqrt{\text{Hz}}}\right)^2} \cdot \sqrt{1.22 \cdot 2.44\text{MHz}} = 29.52 \mu\text{V}$$



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
OPA365	50MHz 带宽, 零交叉失真拓扑, 轨到轨输入和输出, 噪声 $4.5\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$	2.2V、50MHz 低噪声单电源轨到轨运算放大器	运算放大器

主要文件链接

德州仪器 (TI), [SBAA375 源文件](#), [SBAC251 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