

## Analog Engineer's Circuit

## 单电源、二阶、多反馈高通滤波器电路



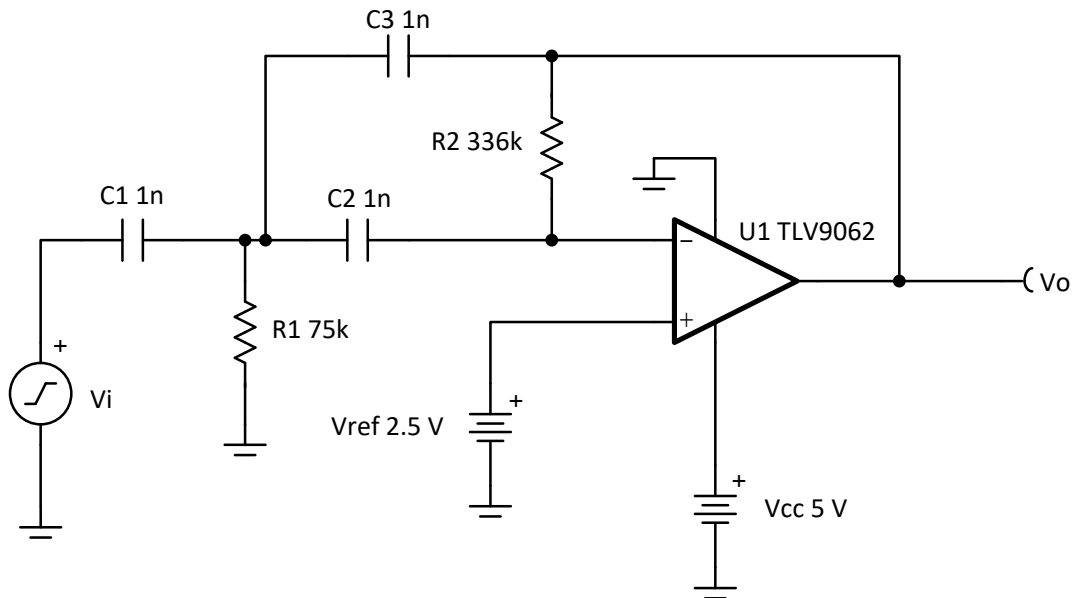
## Amplifiers

输入		输出		电源	
$V_{iMin}$	$V_{iMax}$	$V_{oMin}$	$V_{oMax}$	$V_{cc}$	$V_{ee}$
-2.45V	+2.45V	0.05V	4.95V	5V	0V

增益	截止频率 ( $f_c$ )	最大频率 ( $f_{max}$ )	$V_{ref}$
-1V/V	1kHz	10kHz	2.5V

## 设计说明

多反馈 (MFB) 高通 (HP) 滤波器是二阶有源滤波器。 $V_{ref}$  提供直流失调电压以适应单电源应用。该 HP 滤波器针对通带中的频率将信号反相 (增益 = -1V/V)。当增益较高或 Q 因子较大 (例如 3 或更大) 时, 宜使用 MFB 滤波器。



## 设计说明

1. 选择具有足够输入共模范围和输出电压摆幅的运算放大器。
2. 添加  $V_{ref}$  以偏置输入信号, 从而满足输入共模范围和输出电压摆幅要求。
3. 首先选择电容器值, 因为标准电容器值比电阻器值较为粗略。使用高精度、低漂移电容值来避免  $f_c$  出现错误。
4. 为了尽量减少转换导致的失真量, 请选择具有足够压摆率 (SR) 的运算放大器。
5. 对于 HP 滤波器, 最大频率由运算放大器的增益带宽 (GBW) 设置。因此, 请务必选择具有足够 GBW 的运算放大器。

## 设计步骤

设计的第一步是确定元件值，使归一化截止频率为 1 弧度/秒。第二步是，通过调整元件值，将截止频率调整到所需的值。

二阶 MFB 高通滤波器的传递函数由以下公式确定：

$$H(s) = \frac{-s^2 \frac{C_1}{C_3}}{s^2 + s \frac{C_1 + C_2 + C_3}{R_2 \times C_2 \times C_3} + \frac{1}{R_1 \times R_2 \times C_2 \times C_3}}$$

$$H(s) = \frac{-s^2 \frac{C_1}{C_3}}{s^2 + a_1 \times s + a_0}$$

$$\text{Here, } a_1 = \frac{C_1 + C_2 + C_3}{R_2 \times C_2 \times C_3}, \quad a_0 = \frac{1}{R_1 \times R_2 \times C_2 \times C_3} \quad (1)$$

1. 设置  $C_1$ 、 $C_2$  和  $C_3$  ( $C_{1n}$ 、 $C_{2n}$  和  $C_{3n}$ ) 的归一化值，并通过将  $\omega_c$  设置为 1 弧度/秒 (或  $f_c = 1 / (2 \times \pi) \text{ Hz}$ )，来计算  $R_1$  和  $R_2$  ( $R_{1n}$  和  $R_{2n}$ )。对于二阶巴特沃斯滤波器，请参阅 [有源低通滤波器设计应用报告](#) 中的 [巴特沃斯滤波器表](#)。

$$\omega_c = 1 \frac{\text{radian}}{\text{second}} \rightarrow a_0 = 1, a_1 = \sqrt{2}, \text{ let } C_{1n} = C_{2n} = C_{3n} = 1 \text{ F}$$

$$\text{Then } R_{1n} \times R_{2n} = 1 \text{ or } R_{2n} = \frac{1}{R_{1n}}, \quad a_1 = \frac{3}{R_{2n}} = \sqrt{2}$$

$$\therefore R_{2n} = 2.1213, \quad R_{1n} = \frac{1}{R_{2n}} = 0.4714$$

2. 调整元件值和截止频率。电阻器值非常小，电容器值不切实际，因此必须调整。将截止频率从 1 弧度/秒调整为  $\omega_0$ 。如果我们假设  $m$  是比例因子，则将电阻增加  $m$  倍，电容值必须减小  $1/m$  倍，才能保持 1 弧度/秒的相同截止频率。如果我们将截止频率调整为  $\omega_0$ ，则电容值必须减小  $1/\omega_0$ 。设计目标的元件值在第 3 步和第 4 步中进行计算。

$$R_1 = R_{1n} \times m = (0.4714 \times m), \quad R_2 = R_{2n} \times m = (2.1213 \times m)$$

$$C_1 = \frac{C_{1n}}{m \times \omega_0} = \frac{1}{m \times \omega_0} \text{ F}$$

$$C_2 = \frac{C_{2n}}{m \times \omega_0} = \frac{1}{m \times \omega_0} \text{ F}$$

$$C_3 = \frac{C_{3n}}{m \times \omega_0} = \frac{1}{m \times \omega_0} \text{ F}$$

3. 将  $C_1$ 、 $C_2$  和  $C_3$  设置为 1nF，并计算  $m$ 。

$$\text{Given } \omega_0 = 2 \times \pi \times f_c, \text{ where } f_c = 1\text{kHz},$$

$$C_1 = C_2 = C_3 = \frac{1}{m \times \omega_0} \text{ F} = \frac{1}{m \times 2 \times \pi \times 1\text{kHz}}$$

$$\text{So, } m = 159155$$

4. 根据  $m$  计算  $R_1$  和  $R_2$ 。

$$R_1 = R_{1n} \times m = 0.4714 \times 159155 \approx 75\text{k}\Omega \text{ (Standard Value)}$$

$$R_2 = R_{2n} \times m = 2.1213 \times 159155 \approx 336\text{k}\Omega \text{ (Standard Value)}$$

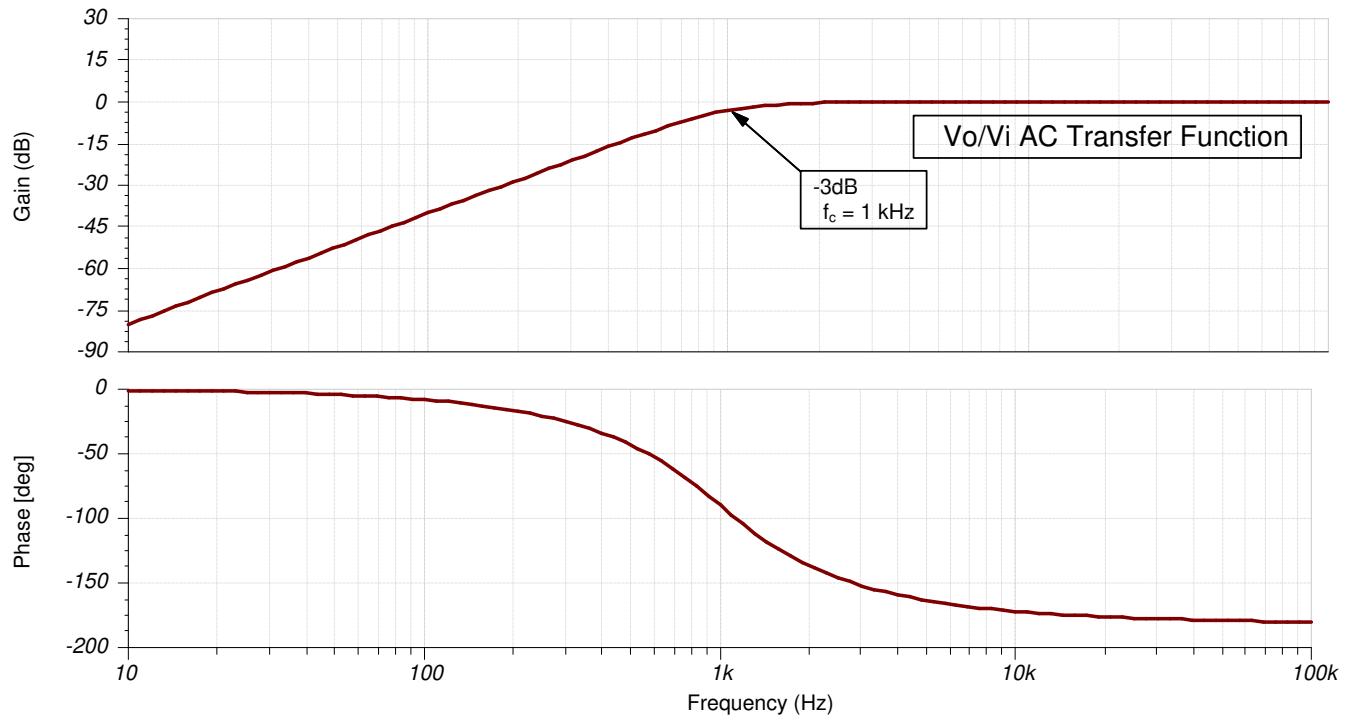
5. 计算  $f_{\text{max}}$  所需的最小 GBW 和 SR。请务必使用噪声增益进行 GBW 计算。请勿使用  $-1\text{V/V}$  的信号增益。

$$\text{GBW} = 100 \times \text{Noise Gain} \times f_{\text{max}} = 100 \times 2 \times 10\text{kHz} = 2\text{MHz}$$

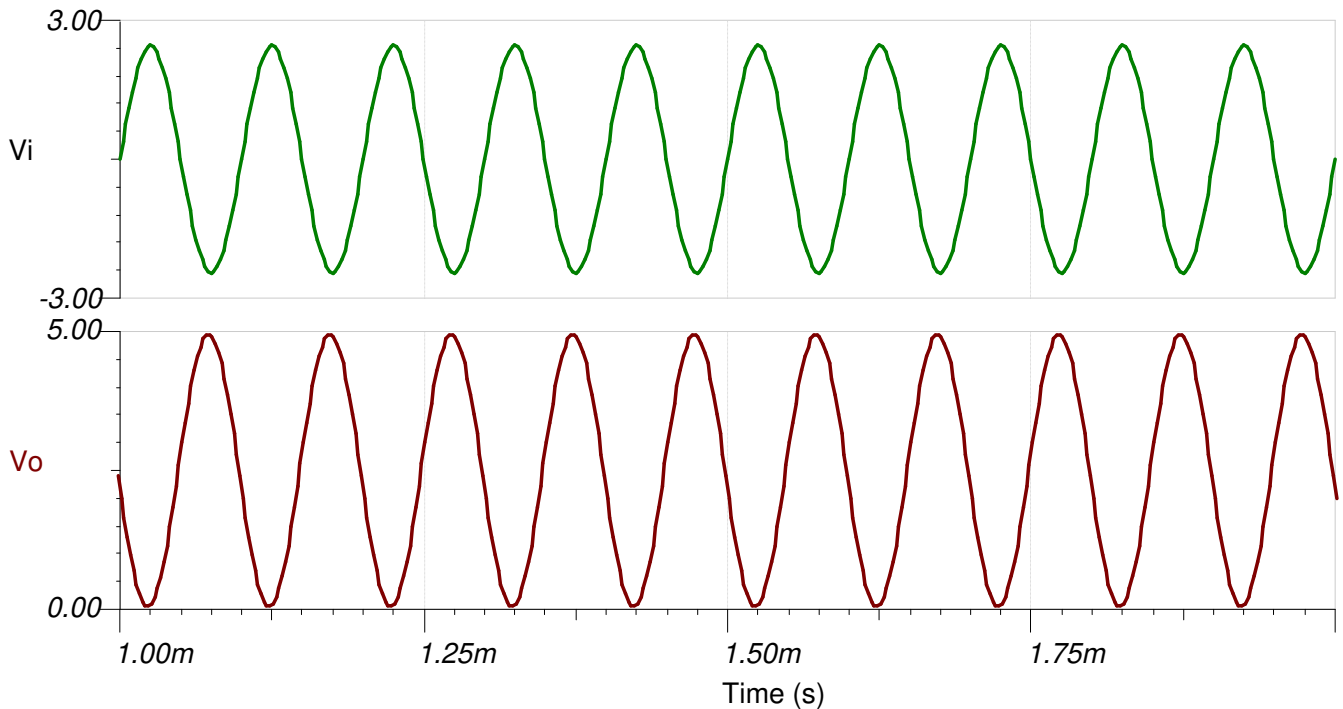
$$\text{SR} = 2 \times \pi \times f_{\text{max}} \times V_{i\text{Max}} = 2 \times \pi \times 10\text{kHz} \times 2.45\text{V} = 0.154 \frac{\text{V}}{\mu\text{s}}$$

TLV9062 器件的 GBW 为 10MHz，SR 为  $6.5\text{V}/\mu\text{s}$ ，因此可满足要求。

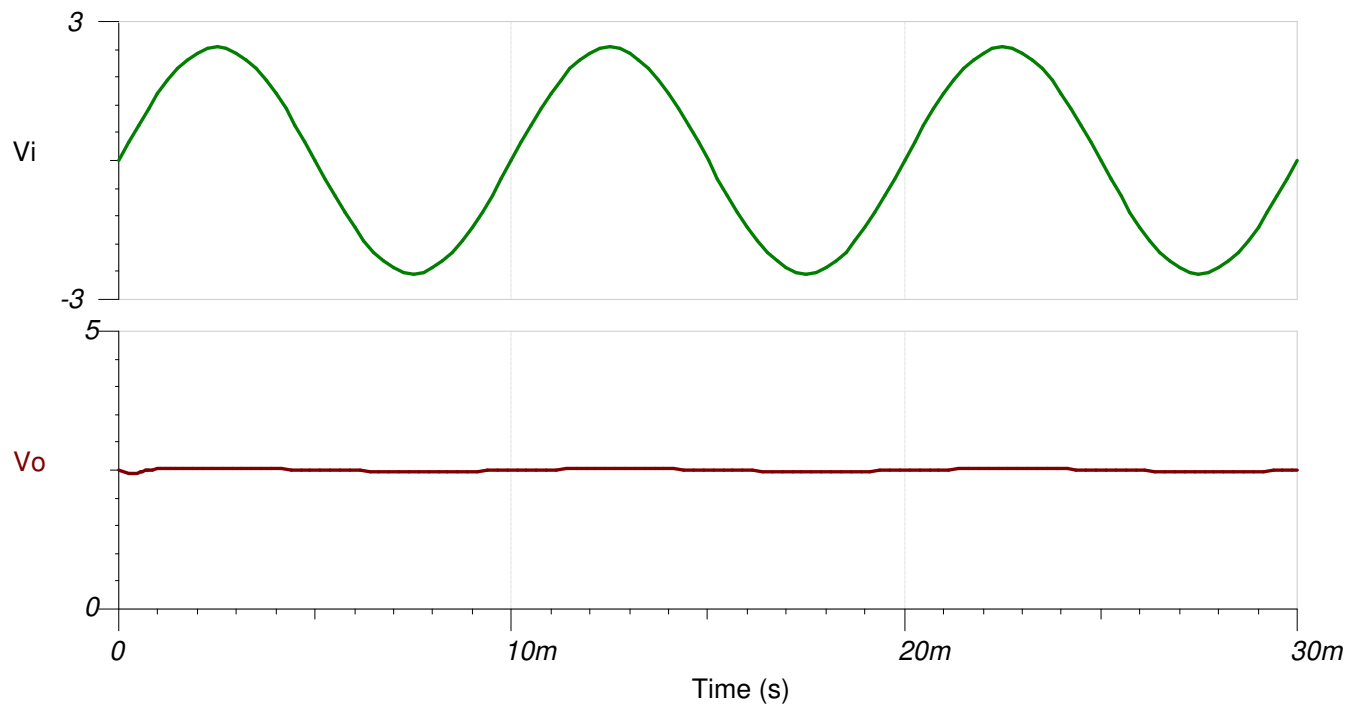
设计仿真  
交流仿真结果



瞬态仿真结果



响应  $5V_{pp}$ 、10kHz 输入信号的滤波器输出 (增益 =  $-1V/V$ )



响应  $5V_{pp}$ 、100Hz 输入信号的滤波器输出 (增益 =  $-0.01V/V$ )

### 设计参考资料

1. 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。
2. SPICE 仿真文件：[SBOC599](#)。
3. [TI 高精度实验室](#)。
4. [有源低通滤波器设计应用报告](#)

### 设计采用的运算放大器

TLV9062	
$V_{SS}$	1.8V 至 5.5V
$V_{inCM}$	轨至轨
$V_{out}$	轨至轨
$V_{os}$	0.3mV
$I_q$	538 $\mu$ A
$I_b$	0.5pA
UGBW	10MHz
SR	6.5V/ $\mu$ s
通道数	1、2、4
<a href="http://www.ti.com.cn/product/cn/TLV9062">www.ti.com.cn/product/cn/TLV9062</a>	

### 设计备选运算放大器

	TLV316	OPA325
$V_{SS}$	1.8V 至 5.5V	2.2V 至 5.5V
$V_{inCM}$	轨至轨	轨至轨
$V_{out}$	轨至轨	轨至轨
$V_{os}$	0.75mV	0.150mV
$I_q$	400 $\mu$ A	650 $\mu$ A
$I_b$	10pA	0.2pA
UGBW	10MHz	10MHz
SR	6V/ $\mu$ s	5V/ $\mu$ s
#通道数	1、2、4	1、2、4
	<a href="http://www.ti.com.cn/product/cn/TLV316">www.ti.com.cn/product/cn/TLV316</a>	<a href="http://www.ti.com.cn/product/cn/OPA325">www.ti.com.cn/product/cn/OPA325</a>

## 重要声明和免责声明

TI 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安全、安保或其他要求。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 (<https://www.ti.com/legal/termsofsale.html>) 或 [ti.com](https://www.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。

邮寄地址: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2021, 德州仪器 (TI) 公司

## 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