

# Analog Engineer's Circuit

## 单电源、二阶、多反馈低通滤波器电路



### Amplifiers

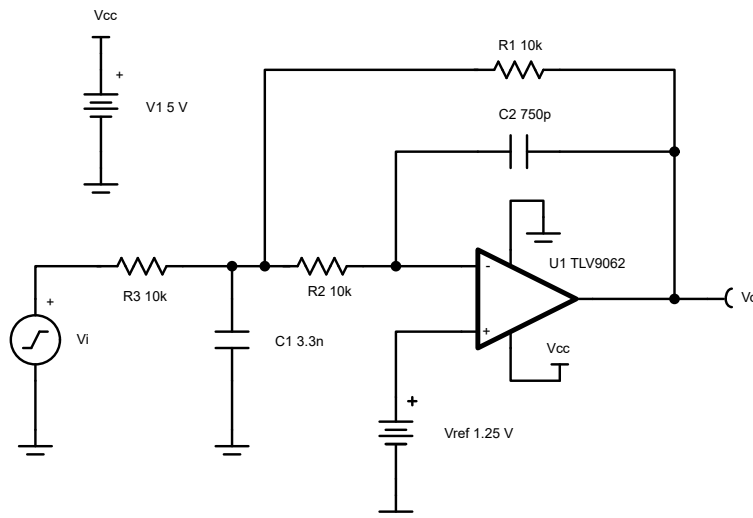
输入		输出		电源	
$V_{iMin}$	$V_{iMax}$	$V_{oMin}$	$V_{oMax}$	$V_{cc}$	$V_{ee}$
-2.45V	+2.45V	0.05V	4.95V	5V	0V

增益	截止频率 ( $f_c$ )	$V_{ref}$
-1V/V	10kHz	1.25V

### 设计说明

多反馈 (MFB) 低通滤波器 (LP 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 LP 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的运算放大器 (SR)。

## 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 低通滤波器的传递函数由以下公式确定：

$$H(s) = \frac{1}{s^2 + s \times \frac{1}{C_1} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) + \frac{1}{R_1 \times R_2 \times C_1 \times C_2}}$$

$$H(s) = \frac{b_0}{s^2 + a_1 \times s + a_0}$$

$$\text{Here, } a_1 = \frac{1}{C_1} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right), \quad a_0 = \frac{1}{R_1 \times R_2 \times C_1 \times C_2}$$

1. 设置  $R_1$  和  $R_2$  ( $R_{1n}$  和  $R_{2n}$ ) 的归一化值，并通过将  $\omega_c$  设置为 1 弧度/秒 (或  $f_c = 1/(2 \times \pi)$  Hz) 来计算  $C_1$  和  $C_2$  ( $C_{1n}$  和  $C_{2n}$ ) 的归一化值。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。

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

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

$$\therefore C_{1n} = \frac{3}{\sqrt{2}} = 2.1213 \text{ F}, \quad C_{2n} = \frac{1}{C_{1n}} = 0.4714 \text{ F}$$

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。

$$R_1 = R_{1n} \times m, \quad R_2 = R_{2n} \times m, \quad R_3 = R_{3n} \times m$$

$$C_1 = \frac{C_{1n}}{m \times \omega_0} = \frac{2.1213}{m \times \omega_0} \text{ F}$$

$$C_2 = \frac{C_{2n}}{m \times \omega_0} = \frac{0.4714}{m \times \omega_0} \text{ F}$$

3. 将  $R_1$ 、 $R_2$  和  $R_3$  设置为  $10\text{k}\Omega$ 。

$$R_1 = R_{1n} \times m = 10\text{k}\Omega, \quad R_2 = R_{2n} \times m = 10\text{k}\Omega, \quad R_3 = R_{3n} \times m = 10\text{k}\Omega$$

因此,  $m = 10000$

4. 根据  $m$  和  $\omega_0$  计算  $C_1$  和  $C_2$ 。

$$C_1 = \frac{2.1213}{m \times \omega_0} \text{ F} = \frac{2.1213}{10\text{k} \times 2 \times \pi \times 10\text{kHz}} = 3.376\text{nF} \approx 3.3\text{nF} \text{ (Standard Value)}$$

$$C_2 = \frac{0.4714}{m \times \omega_0} \text{ F} = \frac{0.4714}{10\text{k} \times 2 \times \pi \times 10\text{kHz}} = 0.75\text{nF} \approx 0.75\text{nF} \text{ (Standard Value)}$$

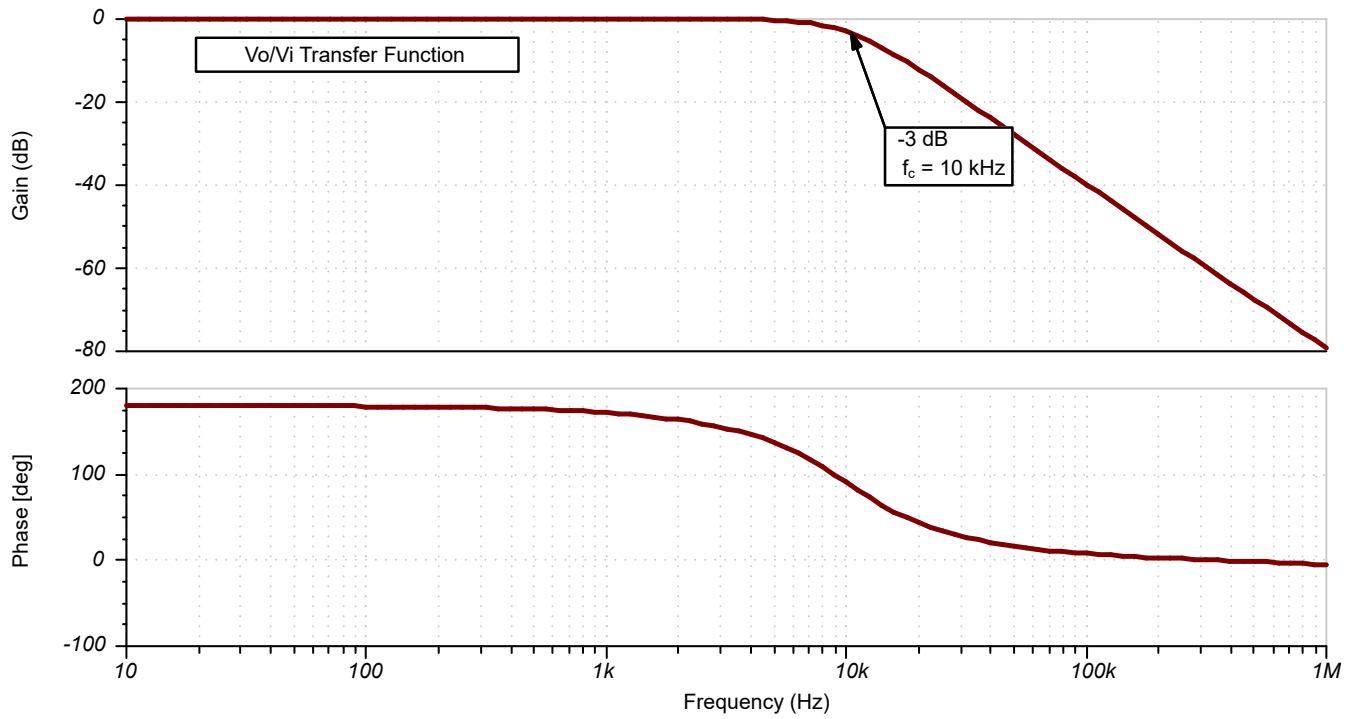
5. 计算  $f_c$  所需的最小 GBW 和 SR。请务必使用噪声增益进行 GBW 计算。请勿使用  $-1\text{V/V}$  的信号增益。

$$\text{GBW} = 100 \times \text{噪声增益} \times f_c = 100 \times 2 \times 10\text{kHz} = 2\text{MHz}$$

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

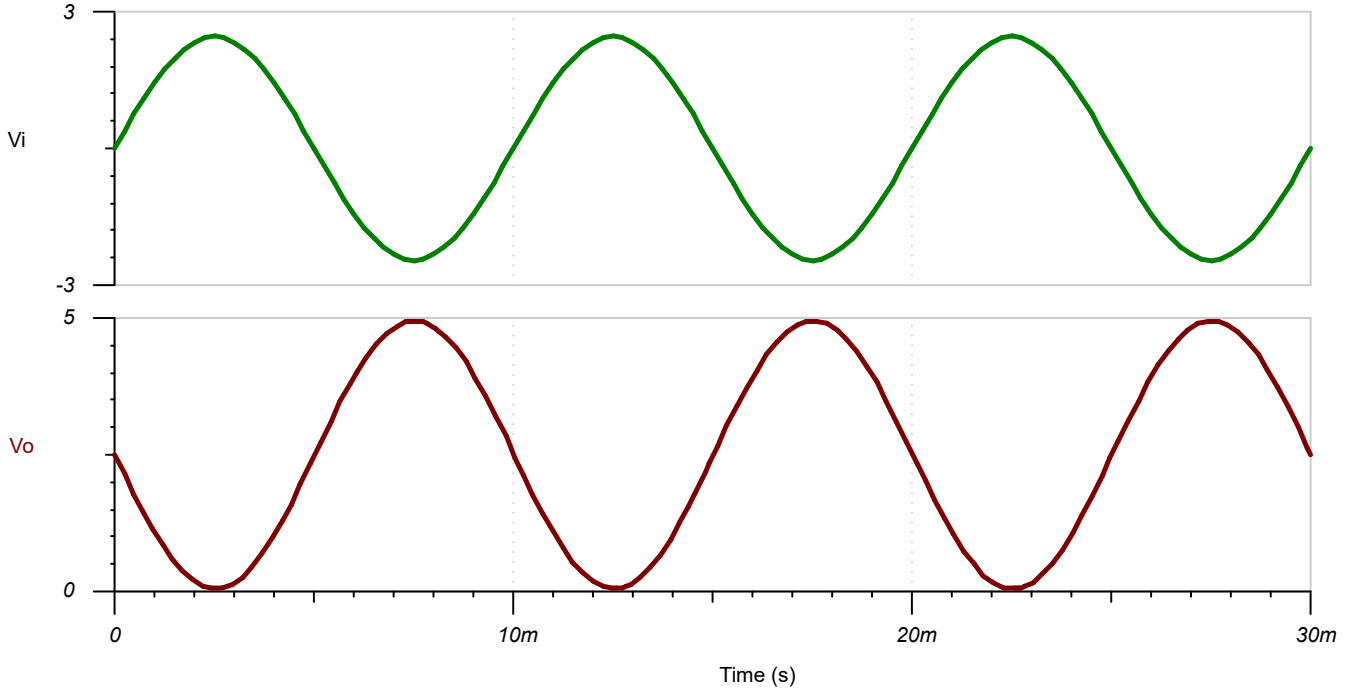
TLV9062 器件的 GBW 为 10MHz，SR 为 6.5V/ $\mu\text{s}$ ，因而满足要求。

设计仿真  
交流仿真结果

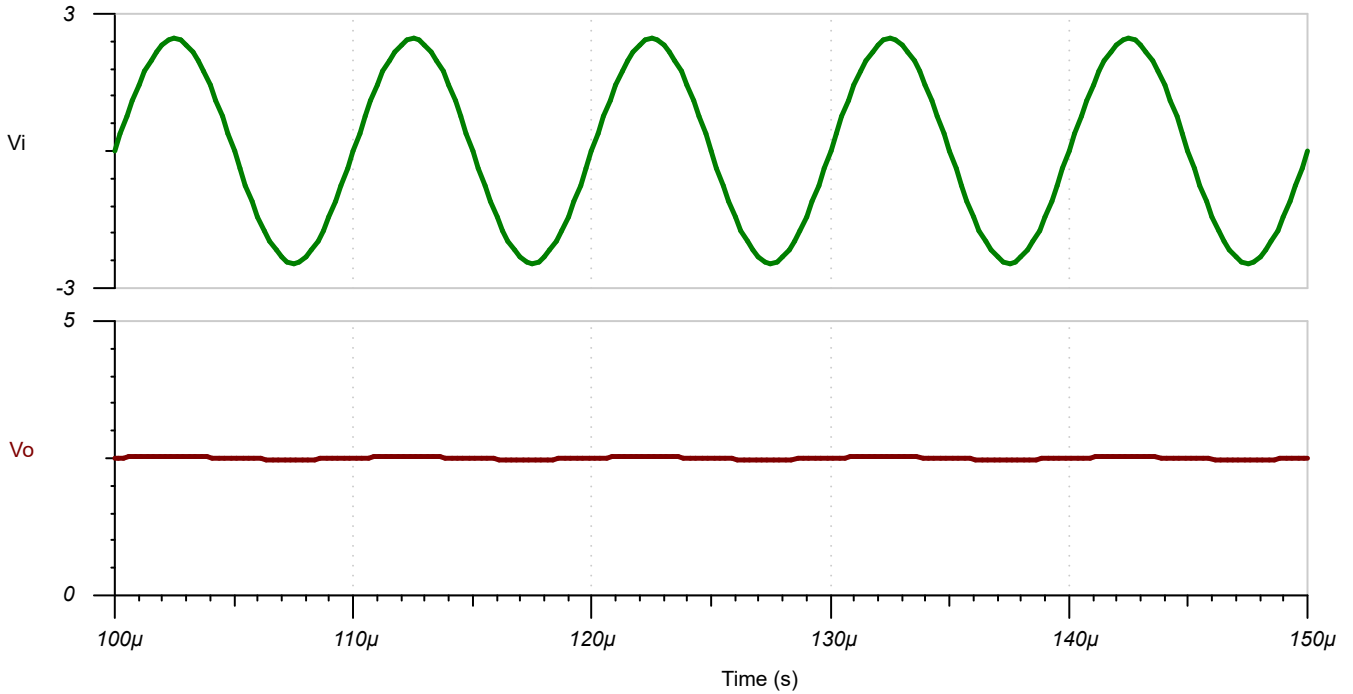


### 瞬态仿真结果

下图展示了响应  $5V_{pp}$ 、 $100\text{Hz}$  输入信号 (增益 =  $-1V/V$ ) 的滤波器输出。



下图展示了响应  $5V_{pp}$ 、 $10\text{kHz}$  输入信号 (增益 =  $-0.01V/V$ ) 的滤波器输出。



### 设计参考资料

1. 有关 TI 综合电路库的信息，请参阅[模拟工程师电路说明书](#)。
2. SPICE 仿真文件 [SBOC597](#)
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	
<b>V<sub>ss</sub></b>	1.8V 至 5.5V
<b>V<sub>inCM</sub></b>	轨至轨
<b>V<sub>out</sub></b>	轨至轨
<b>V<sub>os</sub></b>	0.3mV
<b>I<sub>q</sub></b>	538μA
<b>I<sub>b</sub></b>	0.5pA
<b>UGBW</b>	10MHz
<b>SR</b>	6.5V/μs
<b>通道数</b>	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
<b>V<sub>ss</sub></b>	1.8V 至 5.5V	2.2V 至 5.5V
<b>V<sub>inCM</sub></b>	轨至轨	轨至轨
<b>V<sub>out</sub></b>	轨至轨	轨至轨
<b>V<sub>os</sub></b>	0.75mV	0.150mV
<b>I<sub>q</sub></b>	400μA	650μA
<b>I<sub>b</sub></b>	10pA	0.2pA
<b>UGBW</b>	10MHz	10MHz
<b>SR</b>	6V/μs	5V/μs
<b>#通道数</b>	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