

通常的同一个拓扑结构组成的带通和带阻滤波器使用相同的元件来调整他们的 Q 值，而且他们使滤波器在 Butterworth 和 Chebyshev 滤波器之间变化。必须要知道只有 Butterworth 滤波器可以准确的计算出拐点频率，Chebyshev 和 Bessel 滤波器只能在 Butterworth 滤波器的基础上做一些微调。

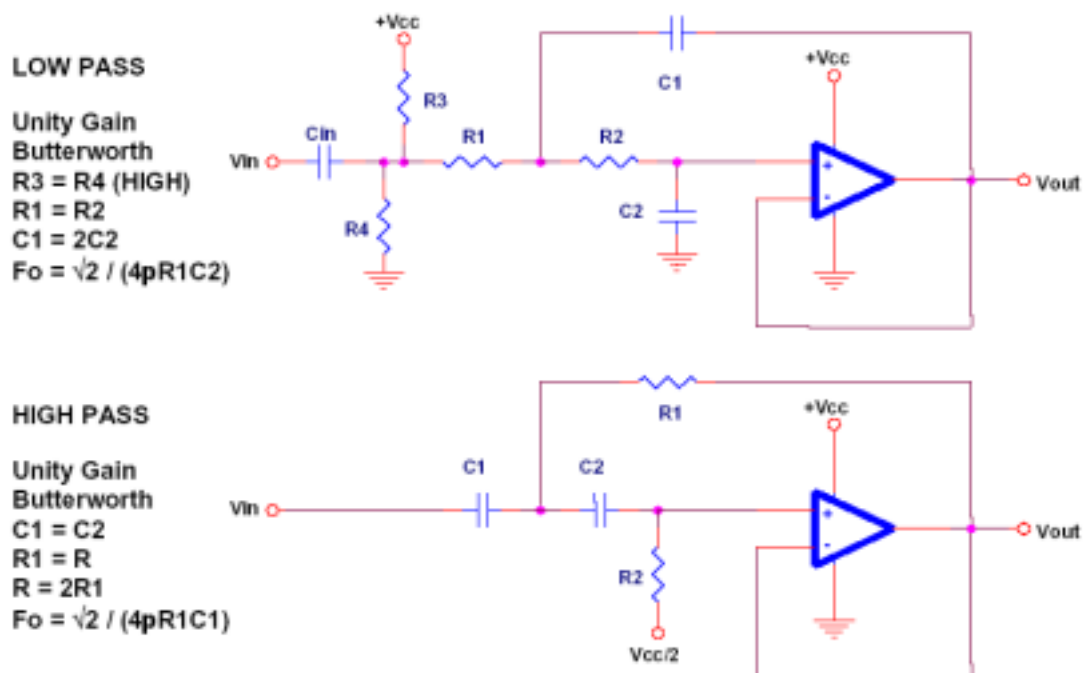
我们通常用的带通和带阻滤波器有非常高的 Q 值。如果需要一个很宽的带通或者带阻滤波器就需要用高通滤波器和低通滤波器串连起来。对于带通滤波器的通过特性将是这两个滤波器的交叠部分，对于带阻滤波器的通过特性将是这两个滤波器的不重叠部分。

这里没有介绍反相 Chebyshev 和 Elliptic 滤波器，因为他们已经不属于电路集需要介绍的范围了。

不是所有的滤波器都可以产生我们所设想的结果——比如说滤波器在阻带的最后衰减幅度在多反馈滤波器中的会比在 Sallen - Key 滤波器中的大。由于这些特性超出了电路图集的介绍范围，请大家到教科书上去寻找每种电路各自的优缺点。不过这里介绍的电路在不是很特殊的情况下使用，其结果都是可以接受的。

3.2.1 Sallen - Key 滤波器

Sallen-Key 滤波器是一种流行的、广泛应用的二阶滤波器。他的成本很低，仅需要一个运放和四个无源器件组成。但是换成 Butterworth 或 Chebyshev 滤波器就不可能这么容易的调整了。请设计者参看参考条目【1】和参考条目【2】，那里介绍了各种拓扑的细节。这个电路是一个单位增益的电路，改变 Sallen - Key 滤波器的增益同时就改变了滤波器的幅频特性和类型。实际上 Sallen - Key 滤波器就是增益为 1 的 Butterworth 滤波器。



图十六

3.2.2 多反馈滤波器

多反馈滤波器是一种通用，低成本以及容易实现的滤波器。不幸的是，设计时的计算有些复杂，在这里不作深入的介绍。请参看参考条目【1】中的对多反馈滤波器的细节介绍。如果需要的是一个单位增益的 Butterworth 滤波器，那么这里的电路就可以给出一个

近似的结果。

LOW PASS

Unity Gain Butterworth

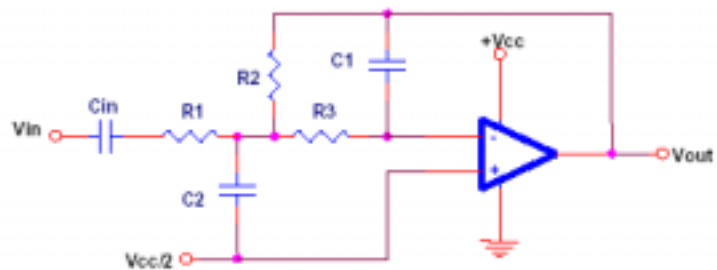
$$F_o = 1/(2\pi RC)$$

$$R_1 = R_2 = R/\sqrt{2}$$

$$R_3 = R/(2\sqrt{2})$$

$$C_1 = C$$

$$C_2 = 4C$$



HIGH PASS

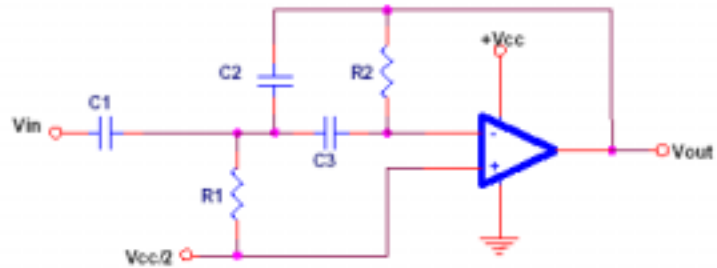
Unity Gain Butterworth

$$F_o = 1/(2\pi RC)$$

$$R_1 = 0.47R$$

$$R_2 = 2.1R$$

$$C_1 = C_2 = C_3 = C$$



BAND PASS

Gain = 2.3 dB

$$F_o = 1/(2.32\pi RC)$$

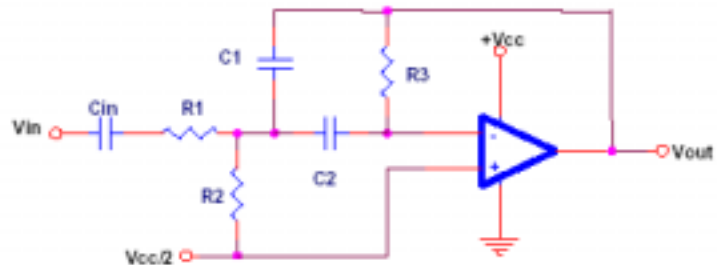
$$R_1 = 10R$$

$$R_2 = 0.001R$$

$$R_3 = 100R$$

$$C_1 = 10C$$

$$C_2 = C$$



图十七

3.2.3 双 T 滤波器

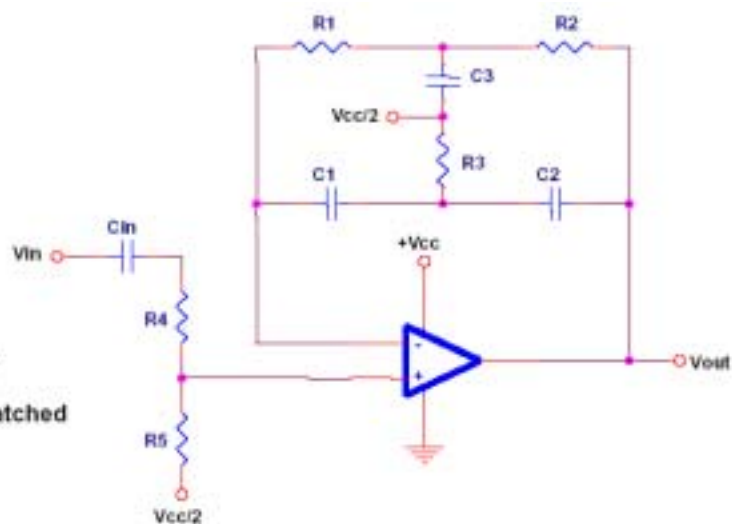
双 T 滤波器既可以用一个运放也可仪用两个运放实现。他是建立在三个电阻和三个电容组成的无源网络上的。这六个元件的匹配是临界的，但幸运的是这仍是一个常容易的过程，这个网络可以用同一值的电阻和同一值的电容组成。用图中的公式就可以同时的将 R_3 和 C_3 计算出来。应该尽量选用同一批的元件，他们有非常相近的特性。

3.2.3.1 单运放实现

BAND PASS

$$\begin{aligned} R1 &= R2 = R \\ C1 &= C2 = C \\ R3 &= R/2 \\ C3 &= 2C \\ F_o &= 1/(2\pi RC) \end{aligned}$$

Gain controlled by $R4$ and $R5$
 $R4 > 100 \cdot R5$
 Q hard to control; need mismatched Resistors; also affects gain



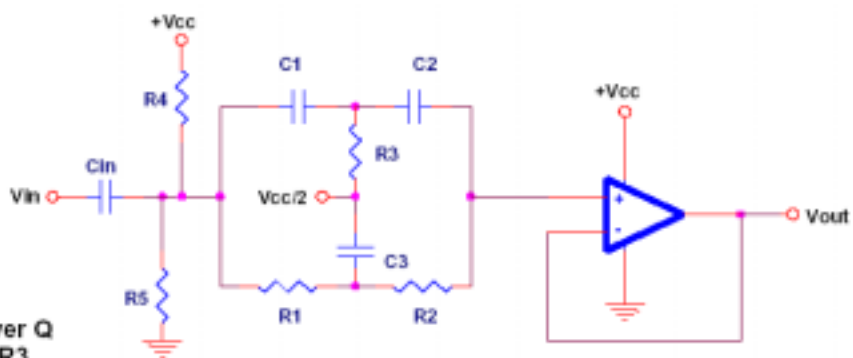
图十八

如果用参数非常接近的元件组成带通滤波器，就很容易发生振荡。接到虚地的电阻最好在 E - 96 1% 系列中选择，这样就可以破坏振荡条件。

NOTCH

$$\begin{aligned} C1 &= C2 = C \\ C3 &= 2C \\ R1 &= R2 = R \\ R3 &= R/2 \\ F_o &= 1/(2\pi RC) \end{aligned}$$

$R4 = R5$: HIGH
 The only control over Q is by mismatching $R3$



图十九

3.2.3.2 双运放实现

典型的双运放如图 20 到图 22 所示

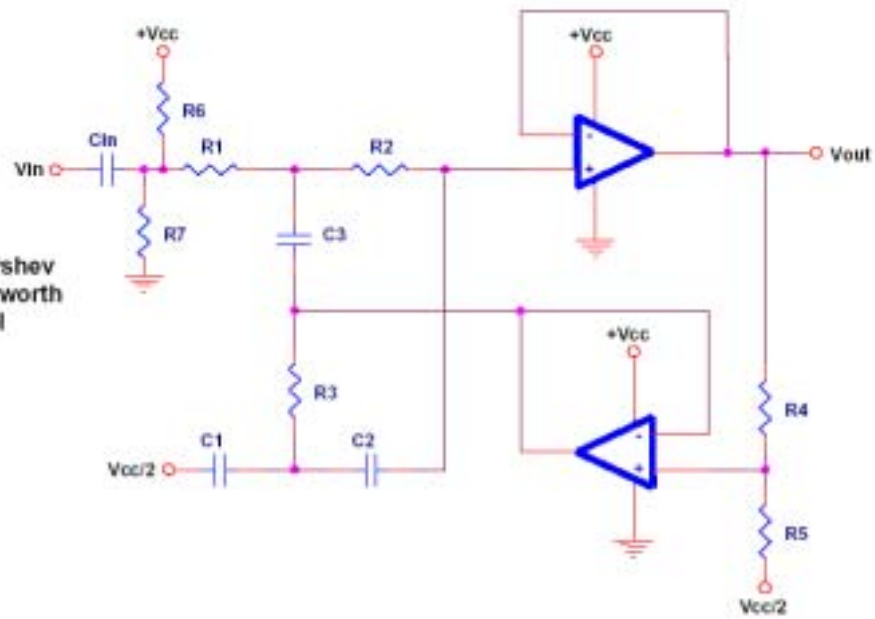
LOW PASS

$R1 = R2 = R$
 $C1 = C2 = C$
 $R3 = R/2$
 $C3 = 2C$
 $Fo = 1/(2\pi RC)$

Unity Gain

$R4 < R5/2$ Chebyshev
 $R4 = R5/2$ Butterworth
 $R4 > R5/2$ Bessel

$R6 = R7$: HIGH



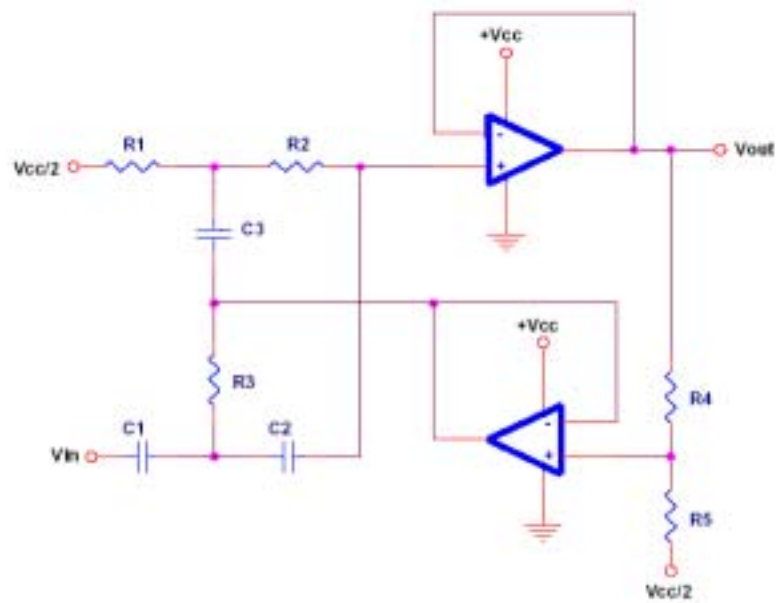
图二十

HIGH PASS

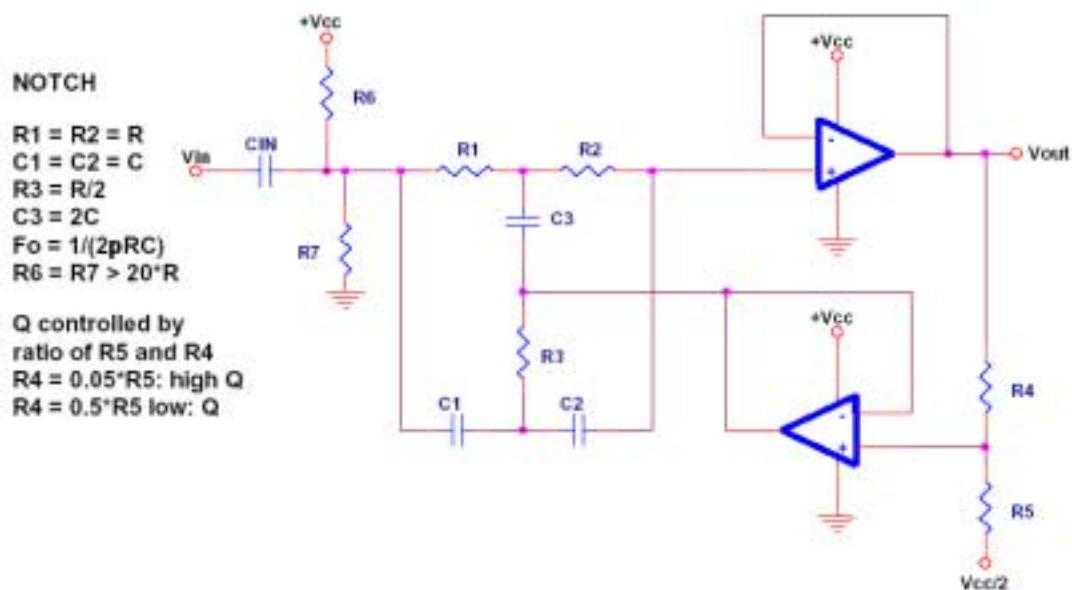
$R1 = R2 = R$
 $C1 = C2 = C$
 $R3 = R/2$
 $C3 = 2C$
 $Fo = 1/(2\pi RC)$

Unity Gain

$R4 < R5/2$ Chebyshev
 $R4 = R5/2$ Butterworth
 $R4 > R5/2$ Bessel



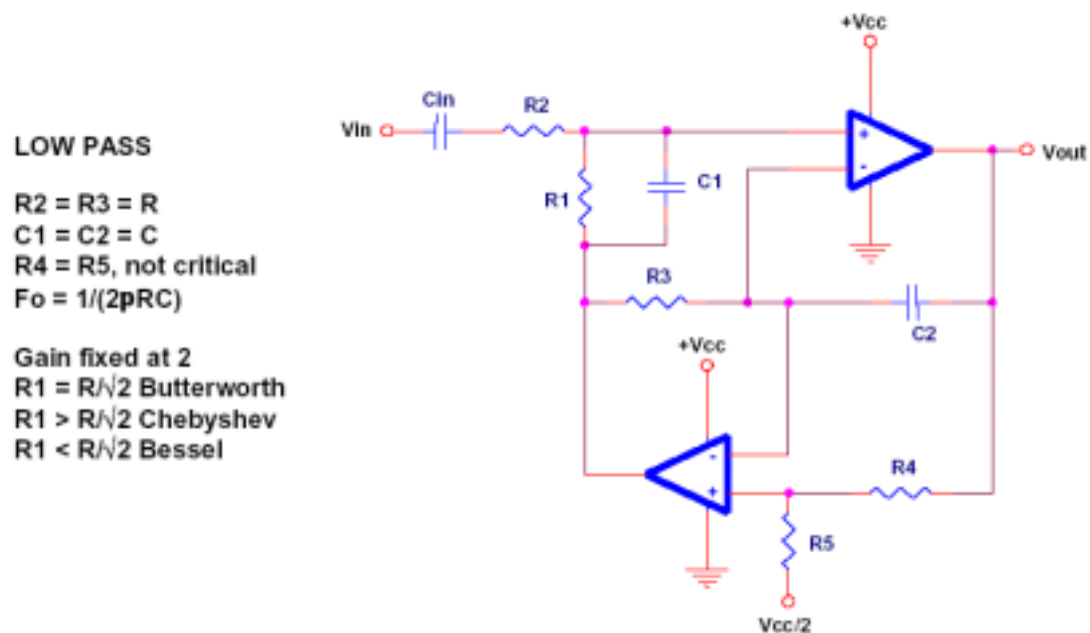
图二十一



图二十二

3.2.4 Fliege 滤波器

Fliege 滤波器采用了双运放结构 (图二十三 ~ 图二十六), 所以相对于单运放实现的滤波器他是一种成本较高的滤波器, 但是他对拐点频率或者 Q 值有非常强的控制能力, 可以非常方便的进行调整, 而且他是一种全新的滤波器。用它组成的低通、高通、和带通滤波器的增益是固定的, 带阻滤波器他的增益是一。



图二十三

HIGH PASS

$$R2 = R3 = R$$

$$C1 = C2 = C$$

$$R4 = R5, \text{ not critical}$$

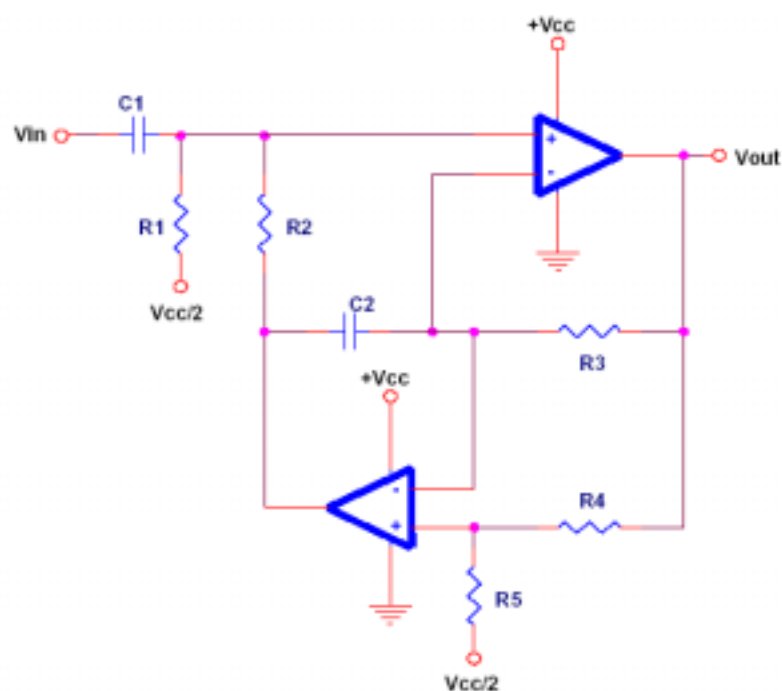
$$F_o = 1/(2\pi RC)$$

Gain fixed at 2

$$R1 = R/\sqrt{2} \text{ Butterworth}$$

$$R1 > R/\sqrt{2} \text{ Chebyshev}$$

$$R1 < R/\sqrt{2} \text{ Bessel}$$



图二十四

BAND PASS

Gain fixed at 2

R1 controls Q

low R1 => low Q

high R1 => high Q

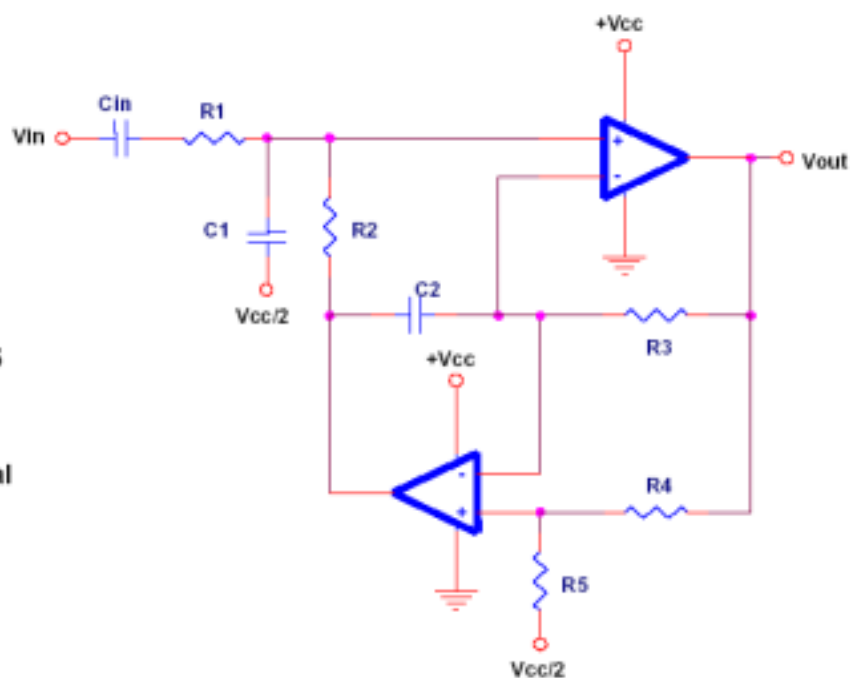
R1 should be > R/5

$$R2 = R3 = R$$

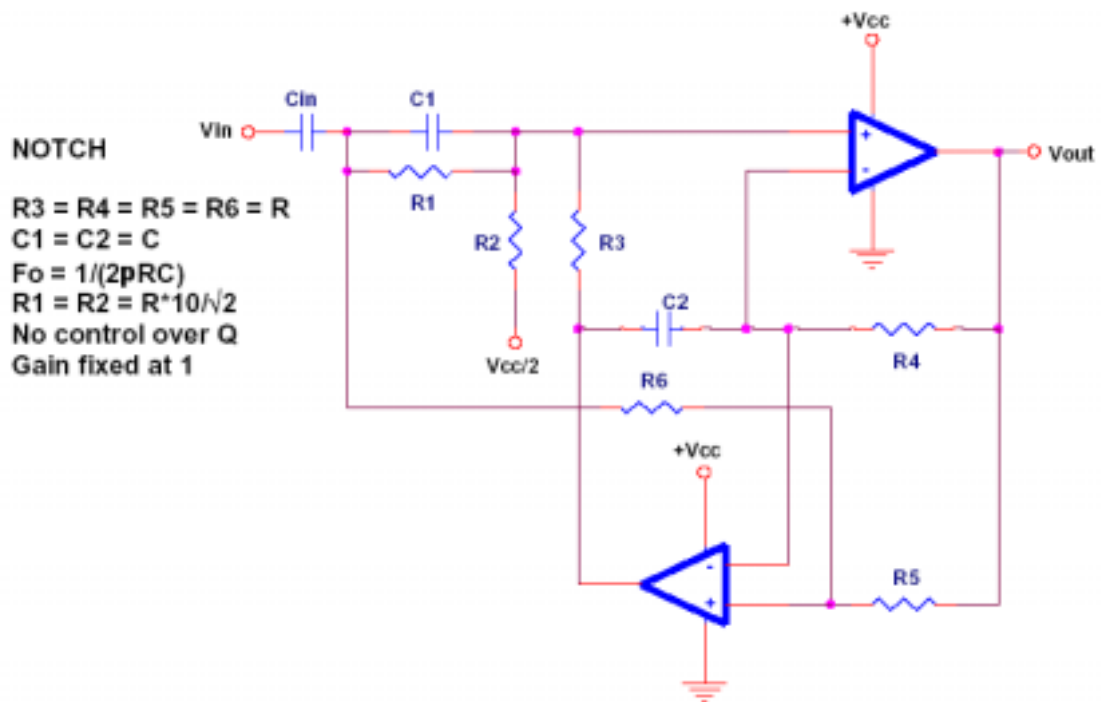
$$C1 = C2 = C$$

$$R4 = R5, \text{ not critical}$$

$$F_o = 1/(2\pi RC)$$



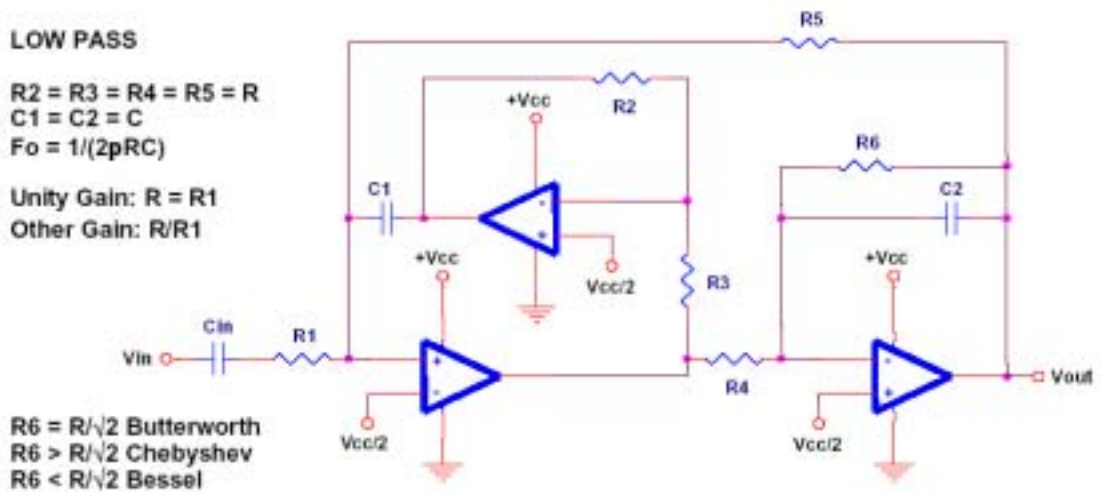
图二十五



图二十六

3.2.5 Akerberg - Mossberg 滤波器

图二十七 ~ 图三十中的三运放滤波器是很容易实现。对于低通和高通滤波器可以很方便的调整增益，对于带通和带阻滤波器可以非常容易的调整 Q 值。带阻滤波器的性能会比双 T 滤波器差一些，但是也不错。



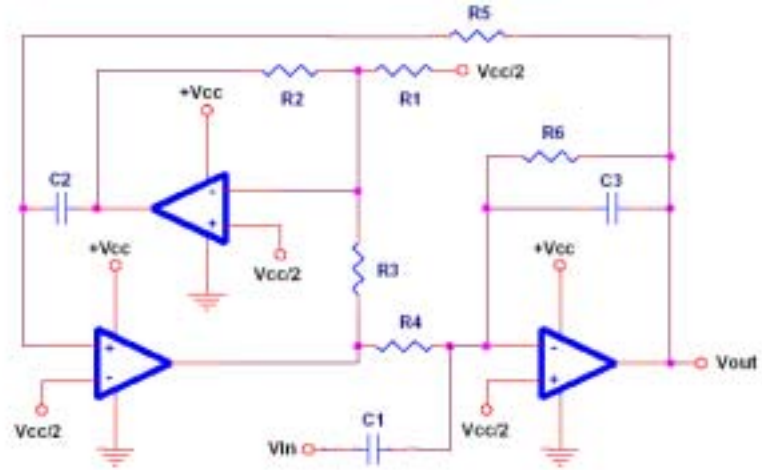
图二十七

HIGH PASS

$R_2=R_3=R_4=R_5=R$
 $C_2=C_3=C$
 $F_o=1/(2\pi RC)$

$R_6 = R/\sqrt{2}$ Butterworth
 $R_6 > R/\sqrt{2}$ Chebyshev
 $R_6 < R/\sqrt{2}$ Bessel

Unity Gain:
 $C_1=C$, $R_1=R$
 Other Gain:
 R_1/R AND C_1/C



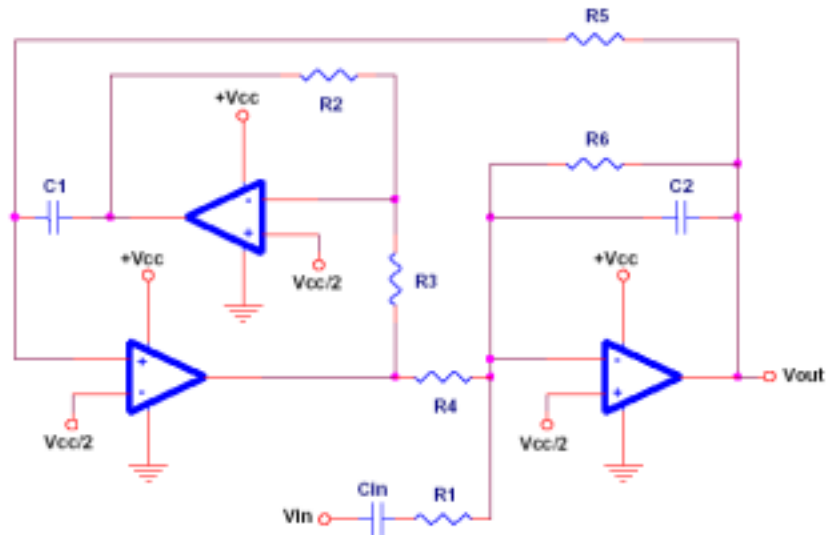
图二十八

BAND PASS

$R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R$
 $C_1 = C_2 = C$
 $F_o = 1/(2\pi RC)$

Unity Gain:
 $R_1 = R_6$
 Other Gain:
 $-R_6/R_1$

R_1, R_6 also control Q
 low values, low Q
 high values, high Q

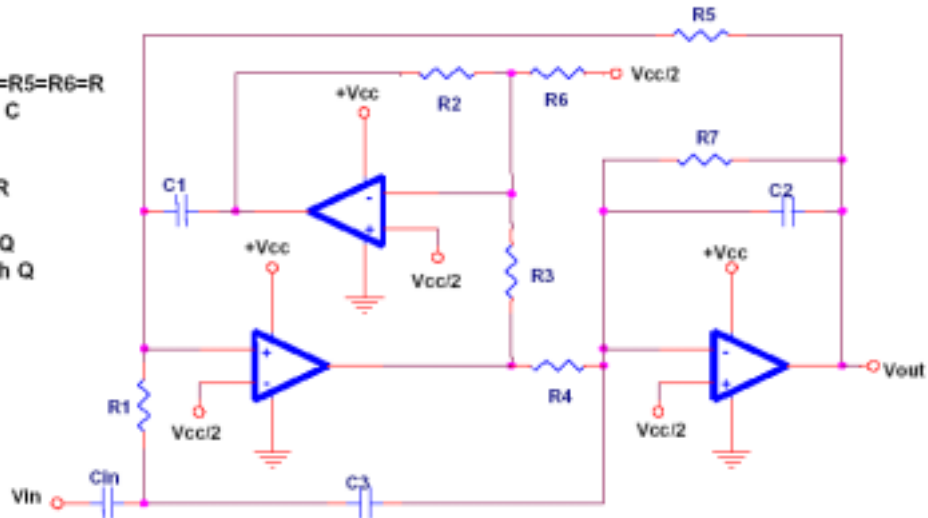


图二十九

NOTCH

$R_1=R_2=R_3=R_4=R_5=R_6=R$
 $C_1 = C_2 = C_3 = C$
 $F_o = 1/(2\pi RC)$

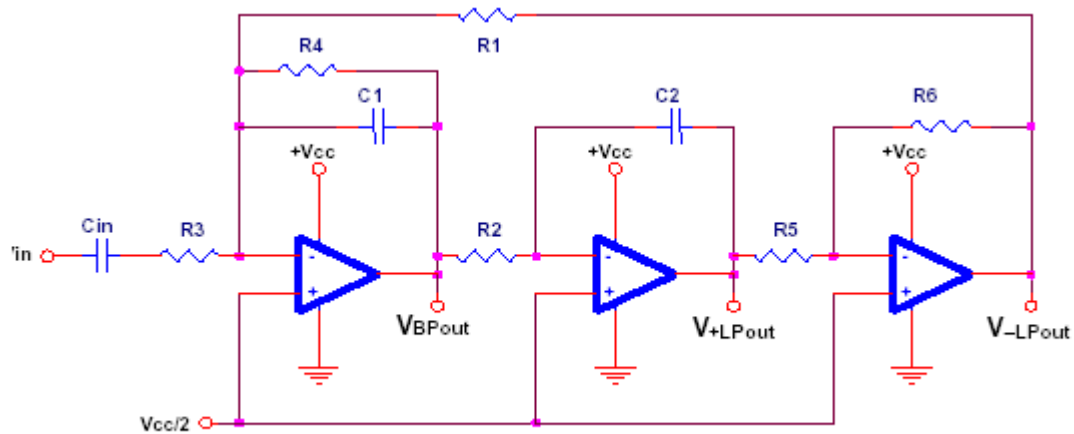
$R/2 < R_7 < 2 \times R$
 R_7 controls Q
 low value, low Q
 high value, high Q



图三十

3.2.6 BiQuad

BiQuad 滤波器是一种出名的滤波器结构(图三十一)。他只能组成低通和带通滤波器。低通滤波器可以根据需要做成同相和反相输出。



LOW PASS

$R_1 = R_2 = R$
 $R_5 = R_6$, not critical
 $R_4 = R/\sqrt{2}$
 $C_1 = C_2 = C$
 $F_o = 1/(2\pi RC)$
 $R_4 = R/\sqrt{2}$ Butterworth
 $R_4 > R/\sqrt{2}$ Chebyshev
 $R_4 < R/\sqrt{2}$ Bessel

Unity Gain: $R_3 = R$
 Other Gain: $-R/R_3$

BAND PASS

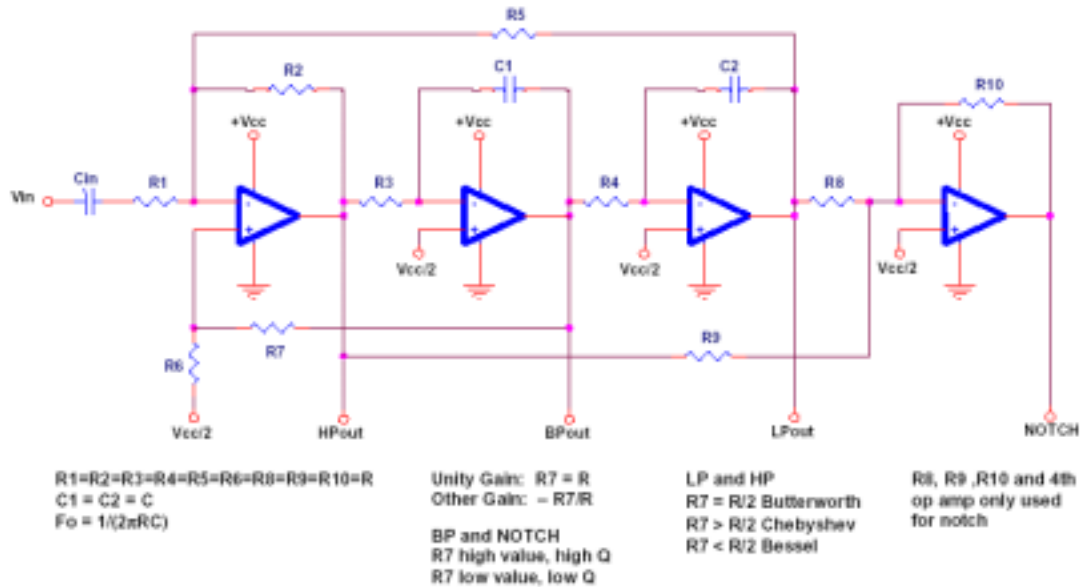
$R_1 = R_2 = R_5 = R$
 $R_6 = \text{about } R/\sqrt{2}$, not critical
 $C_1 = C_2 = C$
 $F_o = 1/(2\pi RC)$

$R_3 = R_4$ unity gain
 Gain = $-R_4/R_3$
 R_4 also controls Q
 low value, low Q
 high value, high Q

图三十一

3.2.7 State Variable

State Variable 是一种三运放或四运放的拓扑结构。第四个运放在带阻滤波器中必须使用。他也是一种非常便于调整的滤波器拓扑结构,并且他可以很方便的在低通和高通滤波器之间相互转换,另外对于带通和带阻滤波器的 Q 值也可以非常方便的进行调整。但是不幸的是, Akerberg - Mossberg 并不是一种令人喜欢的拓扑结构。因为调整增益、类型、Q 值和限制的电阻是同一个电阻。这就是很多人不愿意用它的原因,除非在应用中同时需要高通、低通、带通和带阻滤波器。



图三十二

4 参考条目

- 1 . 有源滤波器设计 , 德州仪器应用报告 , 文献编号 : SLOA049
- 2 . 对 Sallen - Key 滤波器的分析 , 德州仪器应用报告 , 文献编号 : SLOA024A
- 3 . Op Amps for Everyone , Ron Mancini (Ed.) , 十二章 , 德州仪器 文献编号 : SLOD006

附录 A - 标准电阻电容值

E - 12 电阻/电容 值

1.0	1.2	1.5	2.2	2.7	3.3	4.7	5.6	6.8	8.2
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

E - 24 电阻/电容 值

1.0	1.1	1.2	1.3	1.5	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4
2.7	3.0	3.3	3.6	3.9	4.3	4.7	5.1	5.6	6.2
6.8	7.5	8.2	9.1						

E-96 电阻/电容 值

1.00	1.02	1.05	1.07	1.10	1.13	1.15	1.18	1.21	1.24	1.27	1.30	1.33
1.33	1.37	1.40	1.43	1.47	1.50	1.54	1.58	1.62	1.65	1.69	1.74	1.78
1.82	1.87	1.91	1.96	2.00	2.05	2.10	2.15	2.21	2.26	2.32	2.37	2.43
2.49	2.55	2.61	2.67	2.74	2.80	2.87	2.94	3.01	3.09	3.16	3.24	3.32
3.40	3.48	3.57	3.65	3.74	3.83	3.92	4.02	4.12	4.22	4.32	4.42	4.53
4.64	4.75	4.87	4.99	5.11	5.23	5.36	5.49	5.62	5.76	5.90	6.04	6.19
6.34	6.49	6.65	6.81	6.98	7.15	7.32	7.50	7.68	7.87	8.06	8.25	
8.45	8.66	8.87	9.09	9.31	9.53	9.76						