

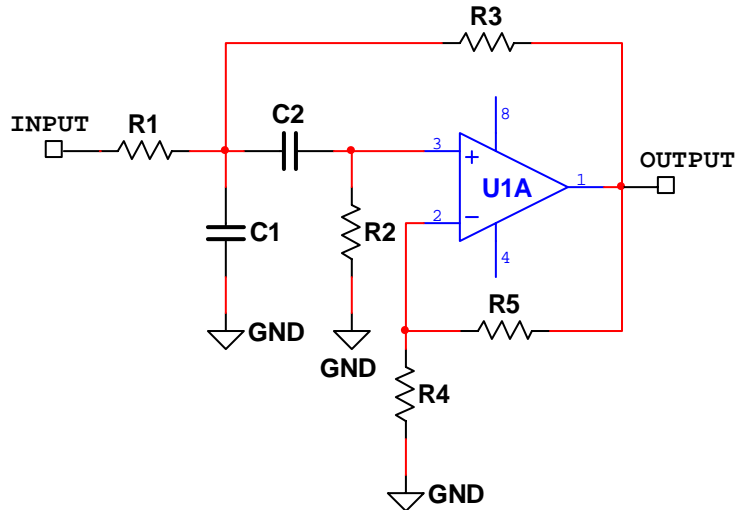
打造一流模拟技术 还原一片真实世界

从去年就一直做有关模拟带通滤波的东西，其间对它是又爱又恨。现将我所接触的模拟有源滤波器拓扑结构总结如下，分别是 Sallen-key BPF、多重反馈 BPF、状态变量滤波器、双二阶滤波器、有源模拟 LC 滤波器(GIC)。

这个总结还有很多不完善的地方：还有很多带通滤波拓扑结构没有介绍，比如说：双 T 带通滤波、多级级联形式带通滤波器。也没有具体给出什么情况选择哪种滤波器，也没有探讨单电源运放下的应用……所以还有很多值得继续研究的东西。

一、Sallen-key(VCVS) BPF

拓扑结构如图所示



特点：输入输出具有同相增益，但是由于同相输入，可能在共模电压的影响下带来失真（其实这句话一直不是明白，可能同相与反相的区别还不是很明白）。在电容确定的情况下，电阻 R1 R2 R3 共同决定中心频率 f0，电阻 R4 R5 影响 Q。一般应用于 Q<10 下。

设计方法：(两种方法)

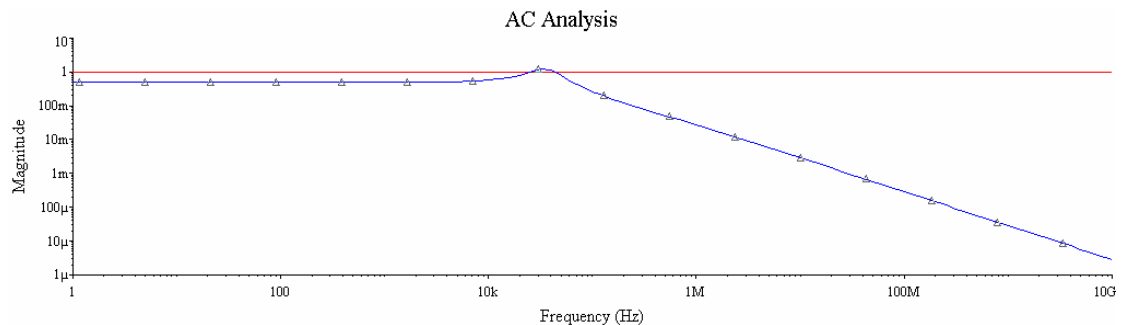
1、如果 $Q > \sqrt{2}/3$ ，假设 $R1=R2=R3=R, C1=C2=C$ 则：

$$G=K/(4-K), f_0=\frac{\sqrt{2}}{2\pi RC}, Q=\frac{\sqrt{2}}{4-K}, K=1+R5/R4$$

例子：Q=0.707,G=1,f0=40KHz

R1=R2=R3=5.6K, C=1nF, R4=10K,R5=20K

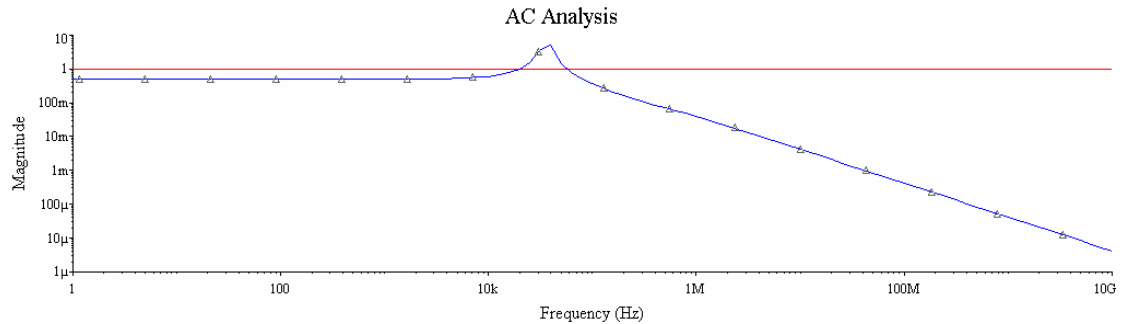
仿真结果：



2、参考 D.E.约翰逊的《有源滤波器的快速实用设计》(tyw 大叔已经上传 21ic)，根据你的参数查询归一化设计表 P149

打造一流模拟技术 还原一片真实世界

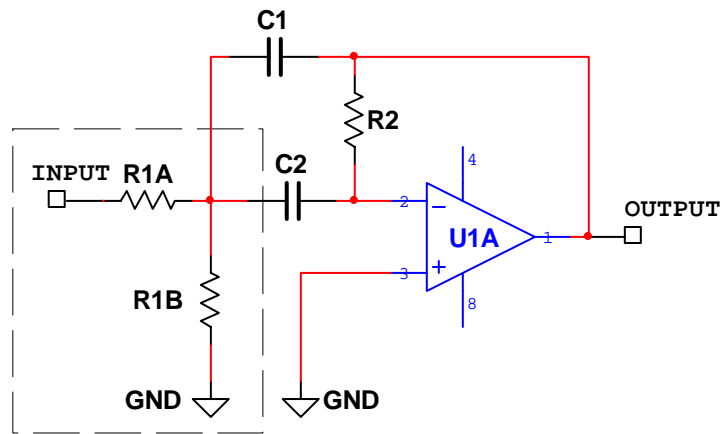
例子：Q=1,G=2,f0=40KHz, R1=R3=6.2K,R2=2R1=12K, C1=C2=620pF, R4=12K,R5=24K
仿真结果：



由图可知：VCVS形式高频衰减还可以，但是低频衰减不明显。高频衰减不难理解，应该是接地电容C1的作用将高频信号直接短接到地，但是低频信号为什么没有受到衰减？

二、无限增益多路反馈 BPF

拓扑结构如图：



特点：具有反相增益，反相输入，同相端接地，所以具有较低的失真(还不是明白这句话)。

设计方法：

1、假设 C1=C2=C 则：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R1R2C}}, \quad Q = 0.5\sqrt{R2/R1}, \quad G = -2Q^2$$

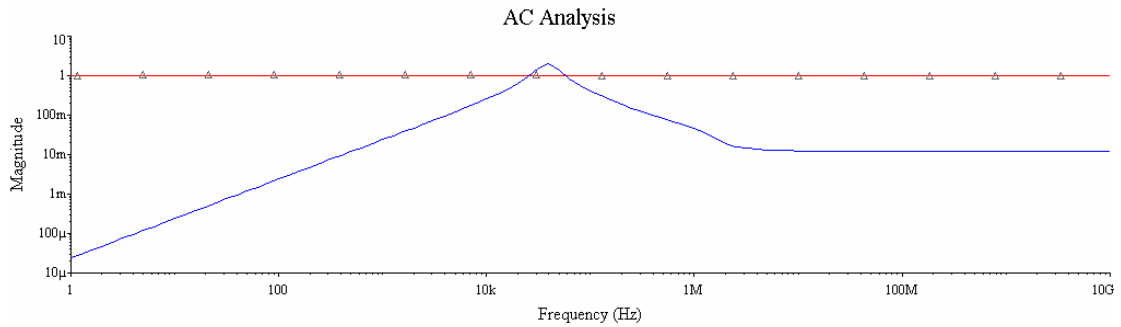
由于 Q 决定增益，在低增益应用下可以用一个电阻来分压，如图虚线框所示：

计算公式如下：R1A=R3/2G; R1B=R3/2(2Q²-A)。

2、参考《有源滤波器的快速实用设计》p155 归一化表

例子：方法 2, f0=40000Hz, Q=2, G=2, R1A=3.9K, R1B=1.2K, R2=16K, C=16K

仿真如下：运放为 358



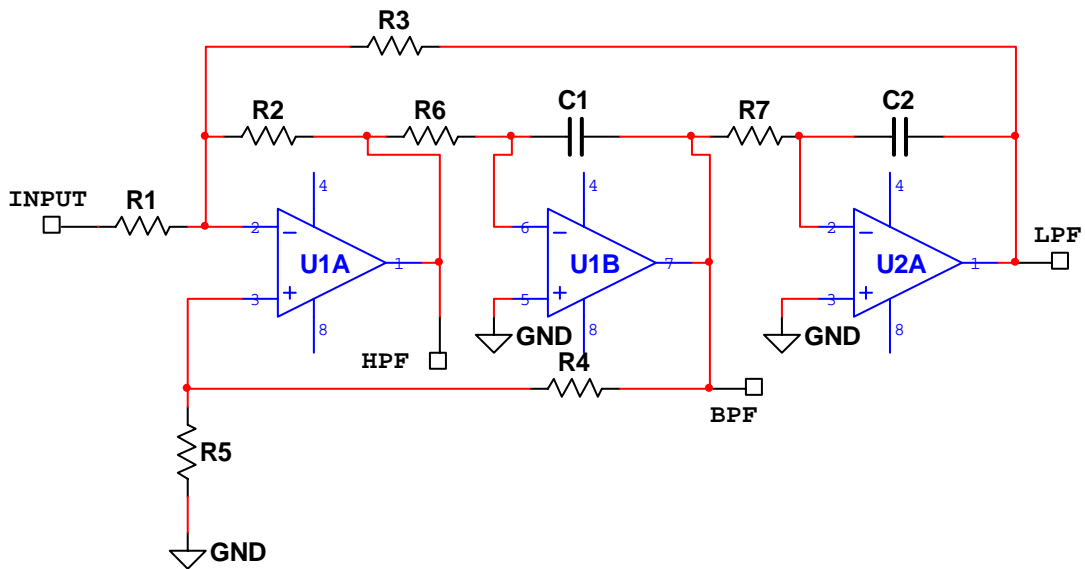
由图可知：低频衰减还可以，但是频率过高时，直接通过电容 C1 到输出端，所以频率大于 1M 时，信号趋近于不变。

三、状态变量滤波器：

状态变量 (SV) 滤波器也成为 KNH (发明者的首字母) 滤波器，两个积分器、一个加法器实现 HPF、LPF、BPF，再加上一个运放就可以组成 BEF 或 APF。由图可知：对高通的积分可以得到带通，对带通的积分可以得到低通。

特点：容易调节、降低了增益灵敏度；Q 可以做得很高。

1、反相输入：



假设： $R_1=R_2=R_3=R_4=R$ ； $R_6=R_7=R_0$ ； $C_1=C_2=C_0$ 则：

$$f_0 = 1/2 * \pi * R_0 * C_0; \quad Q = 1/3 * (1 + R_4/R_5); \quad \boxed{A_{BPF} = Q}; \quad A_{LPF} = R_3/R_1 = 1; \quad A_{HPF} = R_2/R_1 = 1$$

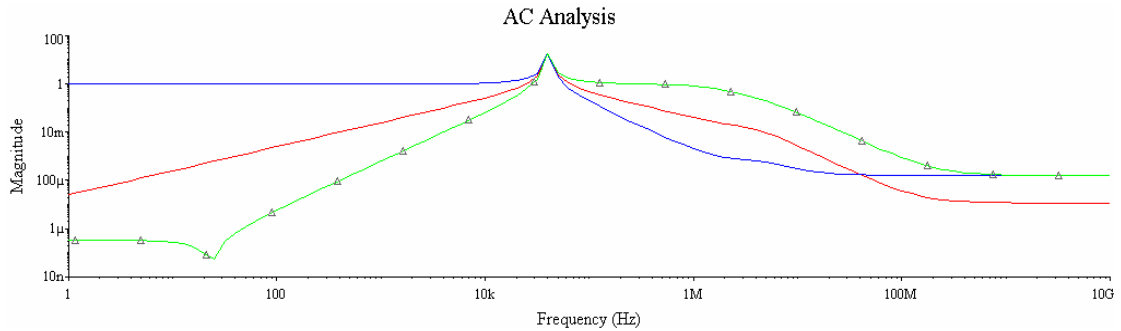
适用于 LPF 或 HPF

例子： $f_0=40000$ ， $Q=100$ ， $R=300K$ ， $R_0=3.9K$ ， $C=1nF$ ， $R_5=1K$ ，运放为 TL084

仿真图：

其中：红色为 BPF，蓝色为 LPF，绿色为 HPF

打造一流模拟技术 还原一片真实世界



2、同相输入:

假设: $R_1=R_2=R_3=R_4=R$; $R_6=R_7=R_0$; $C_1=C_2=C_0$ 则:

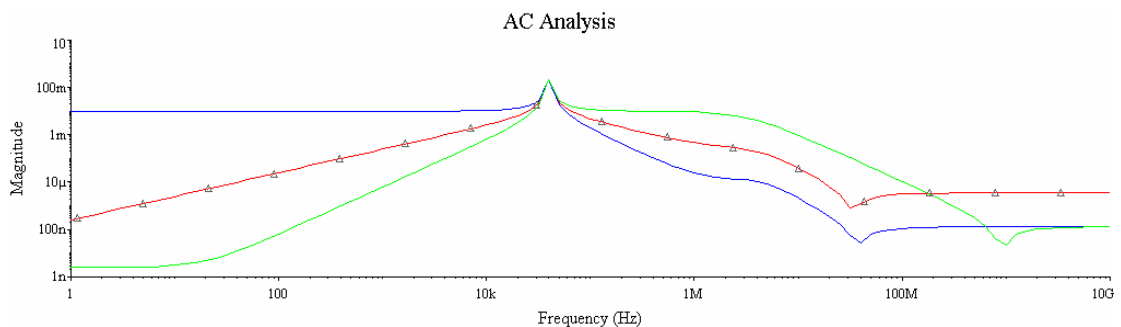
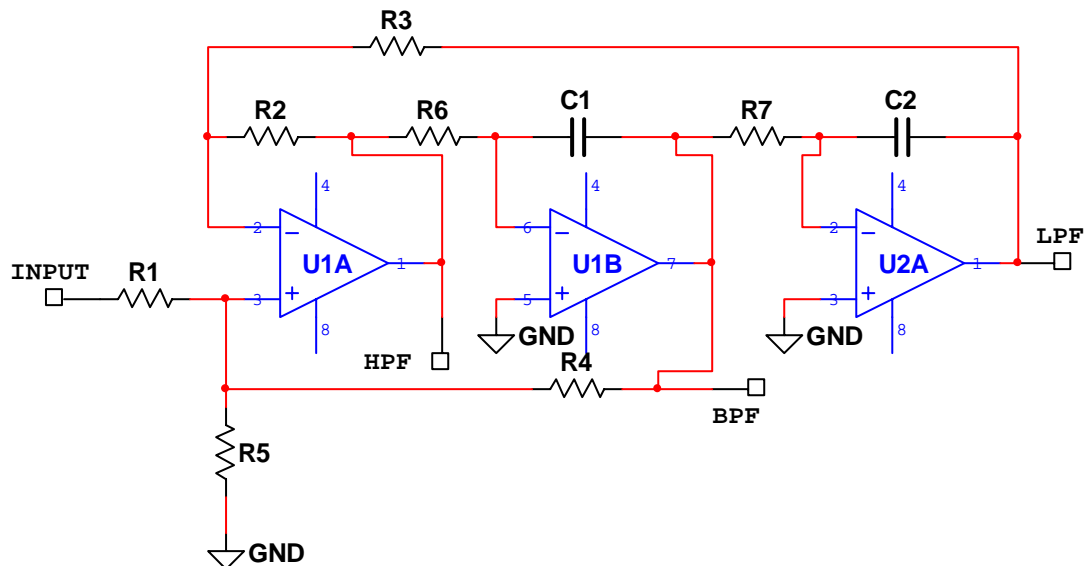
$f_0=1/2\pi R_0 C_0$; $Q=1+R_4/2R_5$; $A_{BPF}=R_4/R_1=1$; $A_{LPF}=R_4/Q R_1=1/Q$; $A_{HPF}=A_{LPF}=1$

适用于 BPF

例子: $f_0=40000\text{Hz}$, $Q=100$, $R=200\text{K}$, $R_0=3.9\text{K}$, $C=1\text{nF}$, $R_5=1\text{K}$, 运放为 TL084

仿真图:

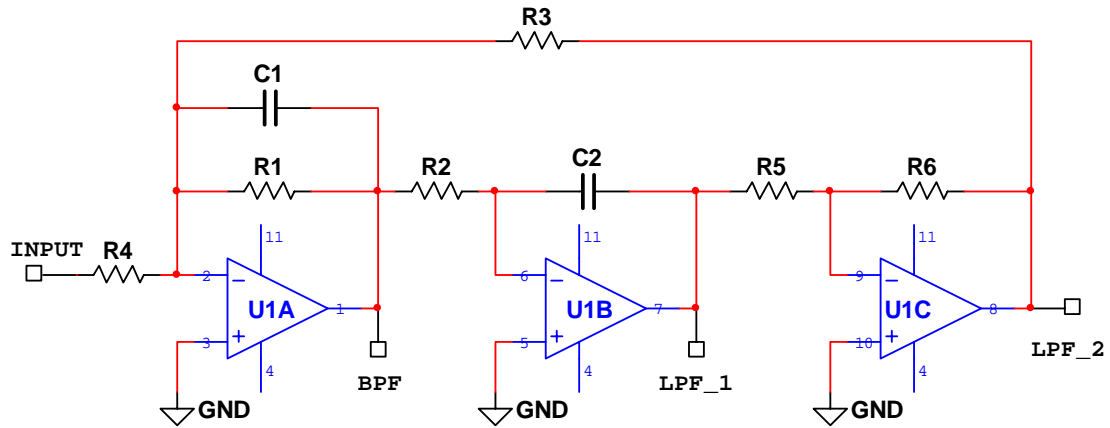
其中: 红色为 BPF, 蓝色为 LPF, 绿色为 HPF



由图可知: 与反相输入相比, 幅值都受到衰减。

四、双二阶滤波器:

也被称为 Tow-Thomas 滤波器, 两个积分器, 其中一个为有耗积分, 一个单位增益反相器, 其目的仅仅为极性反转, 如果两个积分器一个可以为同相积分, 那么这个反相器就可以省掉 (怎么实现?)。



特点：同相端均接地，所以受共模电压影响较小？

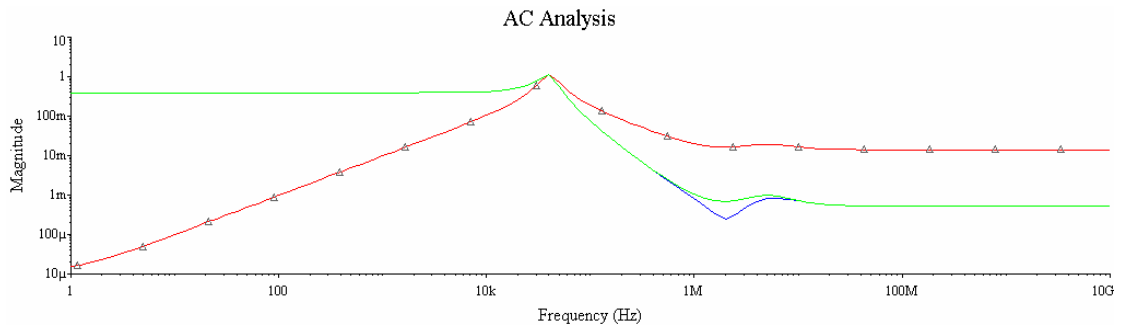
假设：R1=R4; R5=R6; R2=R3=R0; C1=C2=C0 则：

$f_0 = 1/2\pi * R_0 * C_0$; $Q = R_1/R_0$; $A_{BPF} = R_1/R_4 = 1$; $A_{LPF} = R_3/R_4 = 1/Q$

设计方法：参考《有源滤波器的快速实用设计》p163 归一化表

例子： $f_0 = 40000\text{Hz}$, $Q = 100$, $R_1 = R_4 = R_5 = R_6 = 10\text{K}$, $R_0 = 3.9\text{K}$, $C = 1\text{nF}$, 运放为 TL084

仿真图：红色为 BPF



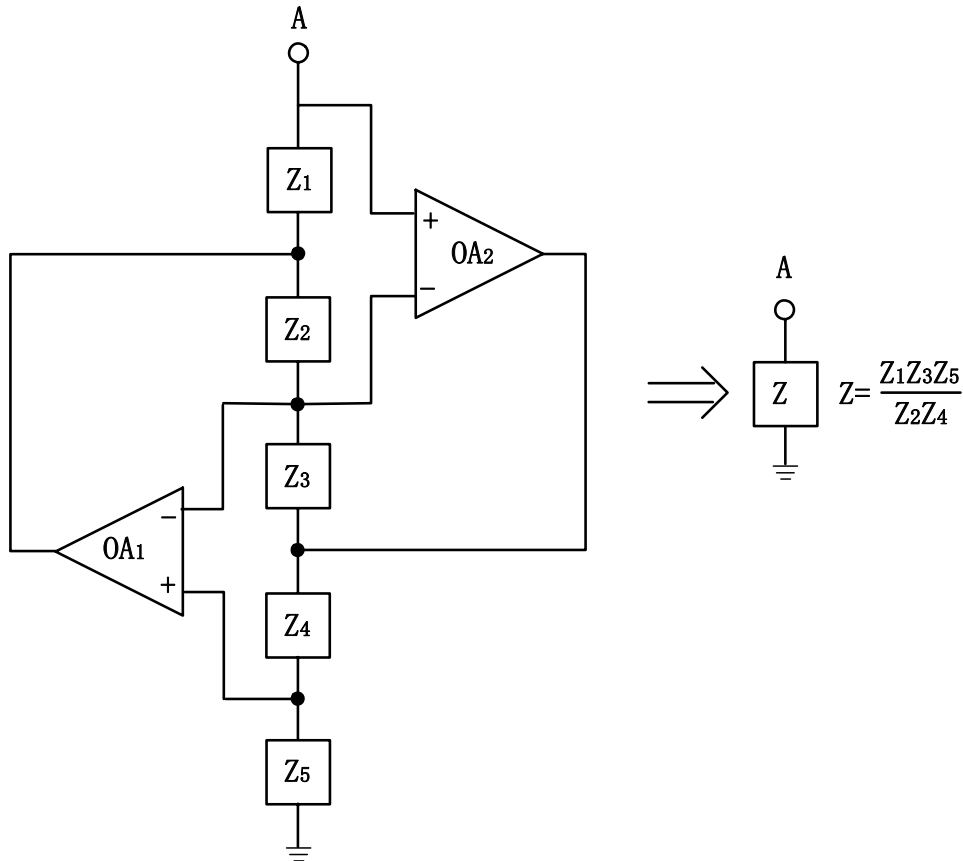
由图可知：BPF 的效果与多重反馈的效果差不多，不如反相输入的状态变量滤波器；但是低通滤波比状态变量滤波器要好，但还是有一些有用信号的衰减。

五、有源模拟 LC 滤波器：

高次的准确的带通滤波器还是 LC 滤波，不过电感体积大造价高，但是 GIC (General Impedance Converter) 电路可以实现模拟 LC 滤波器。

GIC 电路的拓扑结构如图：

$$Z = Z_1 * Z_3 * Z_5 / (Z_2 * Z_4)$$



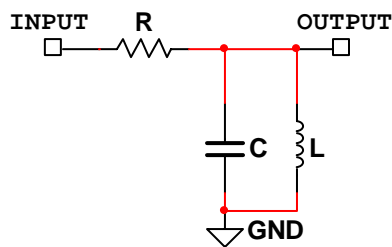
1、接地电感形式：Z2 或 Z4 为电容、其余为电阻，此时：

$$Z = R1 * R3 * R5 / [(1/j \omega C2) * R4] = j \omega L$$

得：等效电感 $L = R1 * R3 * R5 * C2 / C4$

应用：双运放带通滤波器 DABP (Dual Amp BF)

一个 RLC 无源带通滤波器如下图：



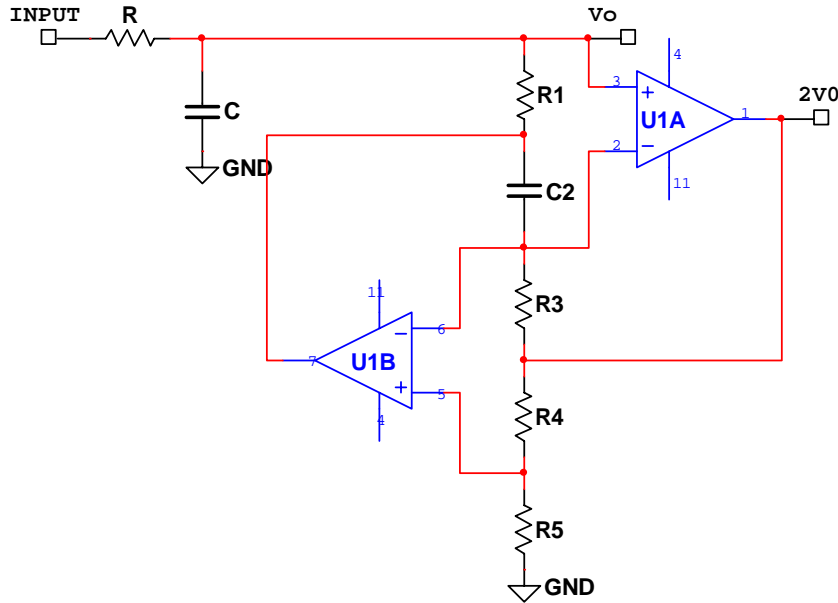
电感 L 用有源模拟替代为：

假设：R1=R3=R0；C=C2=C0；R4=R5 则：

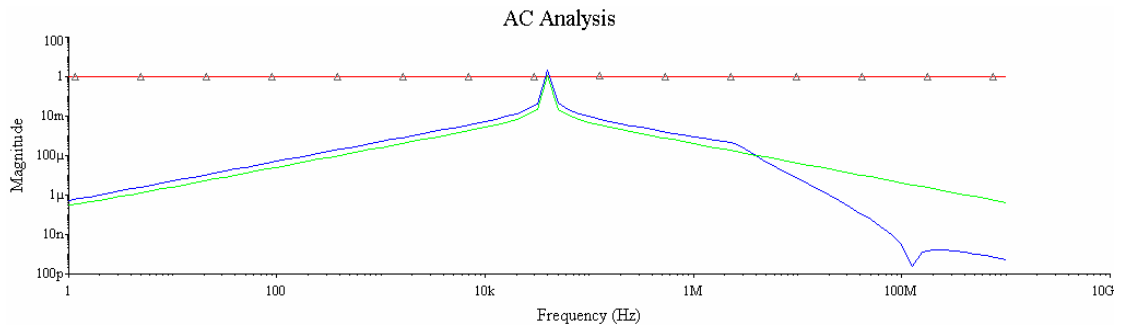
$$f_0 = 1/2 * \pi * R0 * C0; Q = R/R0; A = 2$$

由于 V0 处是运放的同相输入端，输入阻抗很大，作为输出的话会产生负载效应，所以一般利用运放的低输出阻抗在 U1A 的输出作为输出，只不过此时的增益为 $1 + R4/R5$ 倍。

增益固定为 2，Q 可以做到 100。而且只有两运放，所以与双二阶和状态变量相比，高频性能更好些。



例子: $f_0=40000\text{Hz}$, $G=2, Q=100$, $R=390\text{K}$, $R_1=R_3=3.9\text{K}$, $C=1\text{nF}$, $A=TL082$
 仿真图: 蓝色为 $2V_o$ 输出, 绿色为 V_o 输出



2、D 元件形式:

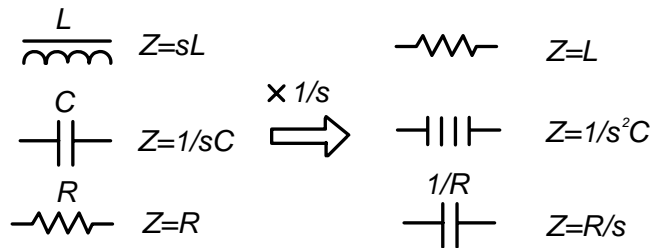
也就是接地频变负阻 FDNR (Frequency Dependent Negative Resistance), 此时 Z_1 Z_5 都为电容, 其余为电阻

$$Z = (1/j\omega C_1) * R_3 * (1/j\omega C_5) / R_2 * R_4 = -1/\omega^2 D$$

则: $D = R_2 * R_4 * C_1 * C_5 / R_3$

设计的步骤:

根据得到的无源 LC 滤波器, 用 Bruton 变换将浮地电感变换为接地 D 元件, Bruton 变换如下:



这种滤波器一般用来实现高阶的 LPF。

在这里就不举例子了, 请参考 21ic 模拟技术精华版上的一个帖子: [我分析这个滤波器时感觉暴难, 请高手多多指教!](#)