
FilterPro 基本教程

内容简介

尽管滤波器在现代电子学领域的地位越来越重要，但其设计工作仍是冗长乏味且耗时巨大的。FilterPro 程序用于辅助有源滤波器设计，可以帮助用户设计 Sallen-Key 和多反馈（MFB）拓扑结构的多种类型和多种响应的有源滤波器。滤波器类型包括低通、高通、带通、带阻和全通滤波器，滤波器响应包括巴特沃兹、切比雪夫、贝塞尔、高斯和线性相移等。

FilterPro v3.1 有源滤波器设计软件提供一种新的、改进的用户接口界面，以及更精确、更稳定的有源滤波器设计引擎。FilterPro 有源滤波器设计工具允许设计者通过滤波器设计向导轻松地创建和修改滤波器设计。另外，用户还可以调整元件的误差来观察响应的变化，还可以查看和导出滤波器的性能数据至 Excel。

本教程首先介绍了有关滤波器设计的基本知识，然后介绍了 FilterPro 设计滤波器的方法和步骤，最后通过两个实例分别介绍了基于 Sallen-Key 和多反馈（MFB）拓扑结构的巴特沃兹、切比雪夫、贝塞尔三种响应的五阶低通滤波器的设计方法和结果。本教程还介绍了滤波器电路实现方法，以及基于 TI 的通用有源滤波器 UAF42 设计滤波器的方法。

目录

1 滤波器基本知识.....	4
1.1 滤波器种类.....	4
1.1.1 低通滤波器.....	4
1.1.2 高通滤波器.....	4
1.1.3 带通滤波器.....	5
1.1.4 带阻滤波器.....	6
1.1.5 全通滤波器.....	6
1.2 滤波器的频率响应.....	7
1.2.1 频率响应基本知识.....	7
1.2.2 巴特沃兹滤波器（最大幅度平坦度）.....	9
1.2.3 切比雪夫滤波器（等纹波幅度）.....	9
1.2.4 贝赛尔滤波器（最大延迟时间平坦度）.....	10
1.2.5 高斯滤波器（最小群延迟）.....	10
1.2.6 线性相位（等纹波延迟）.....	10
1.3 滤波器的电路实现.....	11
1.3.1 复共轭极点对电路.....	12
1.3.2 多反馈拓扑电路.....	13
1.3.3 Sallen-Key 拓扑电路.....	13
2 FilterProDesktop v3.1 的使用	14
2.1 安装 FilterProDesktop v3.1	14
2.2 创建滤波器设计.....	14
2.2.1 第一步：选择滤波器类型.....	15
2.2.2 第二步：确定滤波器参数.....	15
2.2.3 第三步：选择滤波器响应.....	17
2.2.4 第四步：选择滤波器拓扑.....	19
2.2.5 第五步：交互设计.....	19
2.3 FilterPro Desktop 的其它设计工具	25
2.3.1 打印设计.....	25

2.3.2 管理设计.....	26
2.3.3 从 FilterPro v2.0 移植设计	29
2.4 FilterPro 的使用注意事项	31
2.4.1 在 windows7 中的自动更新	31
2.4.2 设计向导中导航按键的外观.....	32
3 滤波器设计示例.....	34
3.1 五阶滤波器的设计步骤.....	34
3.2 Sallen-Key 滤波器响应示例.....	37
3.2.1 五阶 20KHz Sallen-Key 结构巴特沃兹滤波器电路及响应	37
3.2.2 五阶 20KHz Sallen-Key 结构 3dB 切比雪夫滤波器电路及响 应.....	37
3.2.3 五阶 20KHz Sallen-Key 结构贝塞尔滤波器电路及响应	38
3.3 MFB 滤波器响应示例	38
3.3.1 五阶 20KHz MFB 结构巴特沃兹滤波器电路及响应.....	38
3.3.2 五阶 20KHz MFB 结构 3dB 切比雪夫滤波器电路及响应	39
3.3.3 五阶 20KHz MFB 结构贝塞尔滤波器电路及响应.....	39
3.3.4 五阶 20KHz MFB 结构滤波器电路实现及实际响应.....	40
4 滤波器的实现.....	42
4.1. 电容选择.....	42
4.2. 运放选择.....	42
4.2.1 运放增益带宽积 (GBP)	42
4.2.2 运放压摆率.....	43
4.2.3 全功率带宽.....	43
4.2.4 电流反馈放大器.....	43
4.2.5 全差分运放.....	43
5 滤波器的其它设计方法.....	44
6 总结.....	44

1 滤波器基本知识

1.1 滤波器种类

滤波器具有频率选择的特点，其功能是让特定频率范围内的信号通过，而阻止其它频率范围内的信号通过。滤波器主要应用在需要电路产生特定的幅频特性的场合中，也可应用在需要特定的相移或时延的场合中。根据滤波器的工作频带，将其分为低通、高通、带通、带阻和全通滤波器。

1.1.1 低通滤波器

低通滤波器让频率低于截止频率的信号通过，而阻止频率高于截止频率的信号通过。低通滤波器是应用最广的滤波器类型。截止频率为 1kHz 的低通滤波器的幅频特性如图 1 所示，信号能通过滤波器的频率区域称为通带， f_c 定义为滤波器带宽，低于 f_c 的区域为通带，高于 f_c 的区域称为阻带。

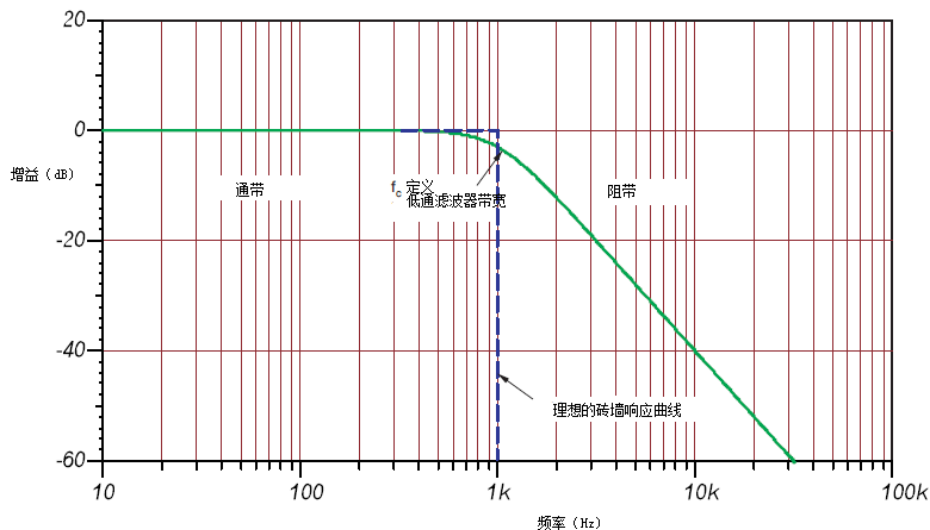


图 1 低通滤波器幅频特性

通常，在通带内，低通滤波器对信号的增益（或称为放大倍数）不会衰减，一旦达到了截止频率，滤波器便开始降低频率高于 f_c 的信号的增益，使输出信号幅值逐渐减小，直至减小到滤波器中非理想电子元件所限制的最小幅值。这些非理想的限制情况包括电路中的杂散电容和引线电感，非理想的运放限制，以及与走线相关的寄生电容效应等。通常，在阻带内希望信号衰减得越快越好，阻带内信号衰减的程度可以用幅频特性的陡峭程度即所谓的滚降来描述。

1.1.2 高通滤波器

高通滤波器让频率高于截止频率的信号通过，而阻止频率低于截止频率的信

号通过。截止频率为 1kHz 的高通滤波器的幅频特性如图 2 所示， f_c 定义为滤波器带宽，频率高于 f_c 的区域为通带，低于 f_c 的区域为阻带。

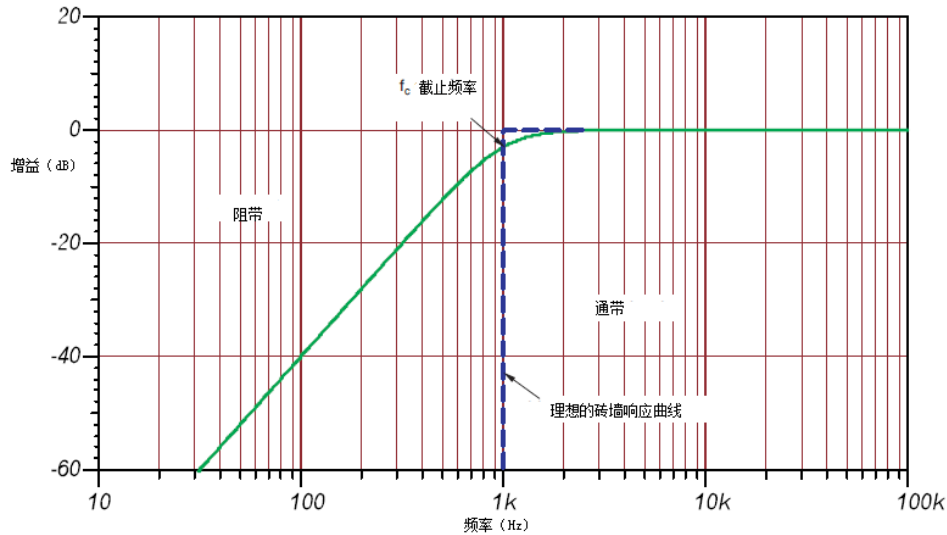


图 2 高通滤波器幅频特性

1.1.3 带通滤波器

带通滤波器允许频率在两个截止频率之间的信号通过，幅频特性如图 3 所示。两个截止频率分别为一个高的截止频率 f_H 和一个低的截止频率 f_L ， $f_H - f_L$ 定义了带通滤波器通带的带宽。 f_L 到 f_H 之间的频段为通带，低于 f_L 和高于 f_H 的频段为两个阻带。在通带内有一个中心频率 f_0 ，如图 3 中的 1kHz 即为 f_0 。在阻带内，信号频率越远离通带，信号被衰减的程度越来越大。

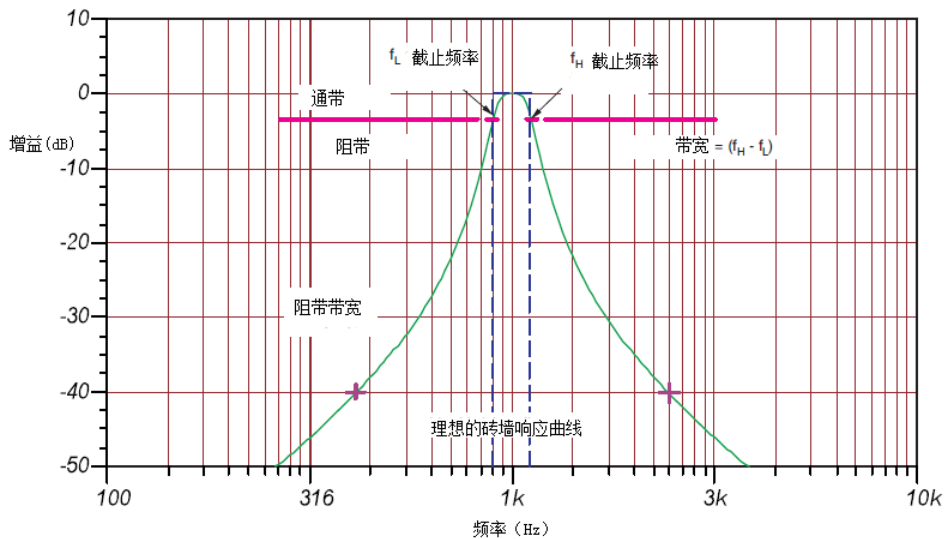


图 3 带通滤波器幅频特性

1.1.4 带阻滤波器

与带通滤波器相反，带阻滤波器不允许频率在两个截止频率之间的信号通过，幅频特性如图 4 所示。由于带阻滤波器的幅频特性有一个凹陷的缺口，因此又被称为陷波滤波器。两个截止频率分别为 f_H 和 f_L ，低于 f_L 和高于 f_H 的频段为两个通带； f_L 到 f_H 之间的频段为阻带， $f_H - f_L$ 定义了带阻滤波器阻带的带宽。在阻带内有一个中心频率 f_0 ，如图 4 中的 1kHz 即为 f_0 。

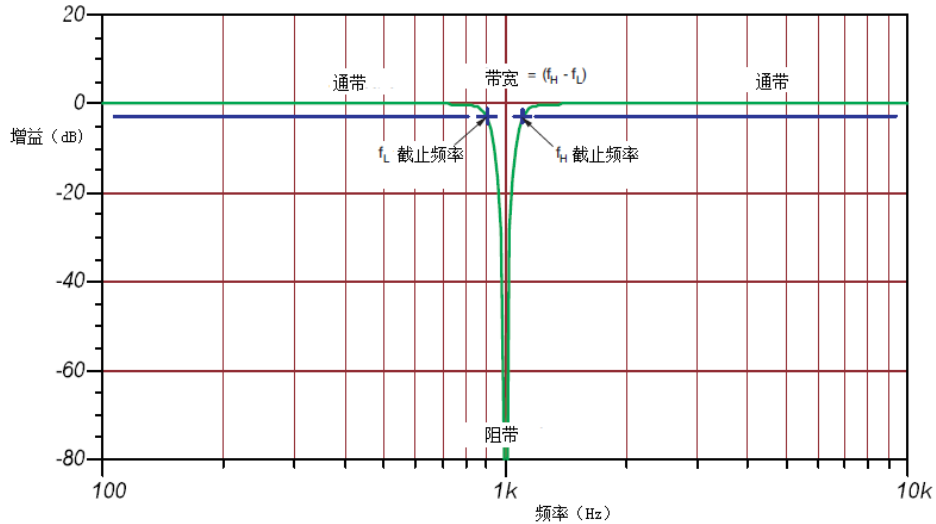


图 4 带阻滤波器幅频特性

1.1.5 全通滤波器

全通滤波器的功能是使频率从 0 到无穷的信号均能通过，但对不同频率的信号产生不同相移或者时延。因此，在整个频率范围内，全通滤波器的幅频特性曲线都是平坦的，但相频特性会变化。例如，一个全通滤波器可以设计为在 1kHz 时具有 -45° 的输入输出相移，而在其它频率信号输入时，输出相移将不等于 -45° 。通常来说，一个简单的一阶全通滤波器能够满足需要的相移。

全通滤波器可以优化为一个特定的时延功能，例如，在 1kHz 的输入频率时具有 159 微秒的延时，则该滤波器输出的相移为：

$$\varphi = -\frac{t_D}{t_p} \times (360^\circ) = -\left(\frac{159\mu s}{1ms}\right) \times (360^\circ) = -57.2^\circ$$

其中， t_D =时延， t_p =周期。

1.2 滤波器的频率响应

1.2.1 频率响应基本知识

滤波器的增益随输入信号的频率而变化,使得滤波器的增益是信号的频率的函数,这种函数关系就称为频率响应或频率特性。增益的幅值和相位将分别随频率而变化,分别是频率的函数,这种函数关系分别称为幅频特性和相频特性。

滤波器的频率响应可以用其传递函数表示,传递函数中分母的 s 的最高次数定义为滤波器的阶数,或者用极点的个数来定义。通常,滤波器的阶数越高,阻带内信号衰减越快。一阶滤波器的阻带衰减速度为频率每变化 10 倍,增益下降 20 分贝。滤波器阻带衰减速度可用其阶数乘以 -20 分贝/10 倍频程表示。通带增益为 1 的一阶和二阶滤波器的传递函数分别如下:

一阶低通

$$A_u(s) = \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_0}}$$

一阶高通

$$A_u(s) = \frac{\frac{s}{\omega_0}}{1 + \frac{s}{\omega_0}}$$

一阶全通

$$A_u(s) = \frac{\frac{s}{\omega_0} - 1}{\frac{s}{\omega_0} + 1}$$

二阶低通

$$A_u(s) = \frac{1}{1 + \frac{1}{Q} \left(\frac{s}{\omega_0} \right) + \left(\frac{s}{\omega_0} \right)^2}$$

二阶高通

$$A_u(s) = \frac{\left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2}{1 + \frac{1}{Q}\left(\frac{s}{\omega_0}\right) + \left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2}$$

二阶带通

$$A_u(s) = \frac{\frac{s}{\omega_0}}{1 + \frac{1}{Q}\left(\frac{s}{\omega_0}\right) + \left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2}$$

二阶带阻

$$A_u(s) = \frac{1 + \frac{s}{\omega_0}}{1 + \frac{1}{Q}\left(\frac{s}{\omega_0}\right) + \left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2}$$

二阶全通

$$A_u(s) = \frac{1 - \frac{s}{\omega_0} + \left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2}{1 + \frac{1}{Q}\left(\frac{s}{\omega_0}\right) + \left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2}$$

其中 ω_0 为特征角频率，与滤波器电路中 **R** 和 **C** 等参数有关。**Q** 称为滤波器的品质因数，是反映滤波器特性在截止频率附近特点的参数。根据 **Q** 值的不同，滤波器可分为不同类型，如巴特沃兹、切比雪夫、贝塞尔、高斯和线性相移等。

理想滤波器将完全消除阻带内的信号，并使得通带内的信号完好地通过。对实际的滤波器，通常希望它们的频率响应接近理想，即在通带内，希望滤波器对信号的增益（或称为放大倍数）基本不变（即所谓平坦度很好）或变化很小（即所谓的纹波很小），而在阻带内增益便开始快速下降。通常，在阻带内希望信号衰减得越快越好，阻带内信号衰减的程度可以用幅频特性的陡峭程度即所谓的滚降速率来衡量。然而，对实际的滤波器来说，需要做不同的折衷以逼近理想的状态。例如，某些滤波器类型针对通带内的增益平坦度作了优化；另一些则以通带内的增益变化（即纹波）作为代价，折衷获取陡峭的滚降；还有某些滤波器类型

为了获取较好的脉冲响应保真度而同时对平坦度及滚降速率做了折衷。FilterPro 支持几种最常见的滤波器类型：巴特沃兹、切比雪夫、贝塞尔、高斯和线性相移。

1.2.2 巴特沃兹滤波器（最大幅度平坦度）

巴特沃兹滤波器的幅频响应具有尽可能平坦的通带。截止频率处的衰减为 -3dB，高于截止频率的频带衰减具有适中的斜率，即每极点每十倍频程-20dB 滚降。巴特沃兹低通滤波器的幅频响应如下所示，其中 f_c 为通带截止频率，N 为阶数，N 越大，越接近理想滤波器，但滤波器的实现也越复杂。

$$|A(jf)| = \sqrt{\frac{1}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^{2N}}}$$

巴特沃兹滤波器的脉冲响应具有适当的过冲及振铃，具有良好的综合性能，其脉冲响应比切比雪夫滤波器的好，衰减速度比贝塞尔滤波器的好。

1.2.3 切比雪夫滤波器（等纹波幅度）

与巴特沃兹滤波器相比，切比雪夫滤波器在通带以外的衰减更为陡峭，但该优点是以牺牲通带内的幅度变化（即纹波）为代价的。与巴特沃兹及贝塞尔滤波器频率响应的截止频率定义在衰减为-3dB 处不同，切比雪夫滤波器的截止频率定义为响应滚降至低于纹波带的频点。对于偶数阶滤波器而言，所有纹波均高于 0dB，因此截止频率点位于 0 dB 衰减处，如图 5 所示。对于奇数阶滤波器来说，所有的纹波均低于 0 dB，截止频率则定义为低于纹波带最大衰减的点，即 - ripple dB 的频点，如图 6 所示。在极点数量一定时，增加通带纹波可实现更陡峭的截止。相对于巴特沃兹滤波器而言，切比雪夫滤波器的脉冲响应具有更大的振铃。

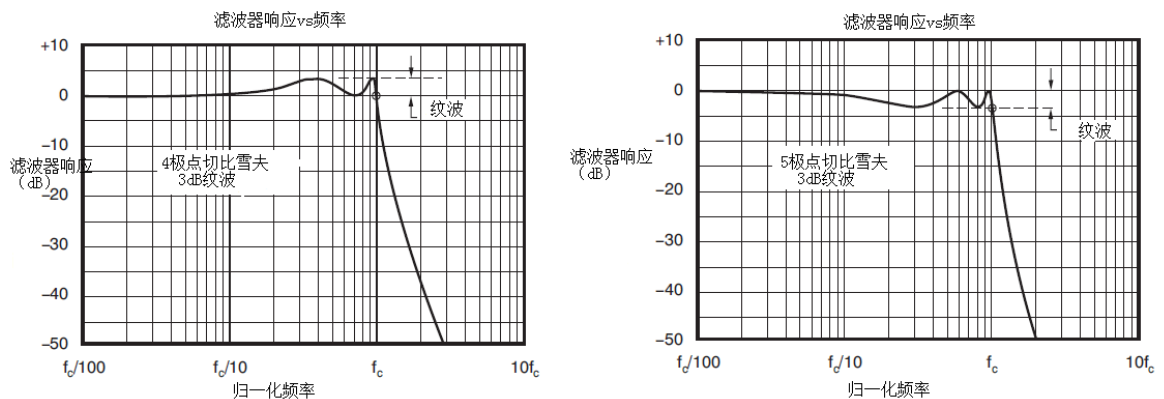


图5 偶数阶（4 极点）切比雪夫滤波器的频率响应，3dB 纹波显示截止频

率位于 0dB 处

3dB 纹波切比雪夫滤波器显示截止频

图 6 偶数阶（5 极点）的频率响应，

率在-3dB

1.2.4 贝赛尔滤波器（最大延迟时间平坦度）

贝赛尔滤波器也称为汤姆逊(Thomson)滤波器，具有线性相频响应特性，即相频响应是频率的线性函数，从而使得此类滤波器具有最优的脉冲响应，即最小的过冲及振铃。但对于阶数相同的滤波器而言，贝赛尔的幅频响应并不如巴特沃兹平坦，-3dB 截止频率以外频带的衰减也不如巴特沃兹陡峭。尽管须要采用更高阶的贝赛尔滤波器来逼近给定的巴特沃兹滤波器的幅频响应，但考虑到贝赛尔滤波器具有最优的脉冲响应，增加一定的电路复杂性来实现它也是值得的。贝赛尔滤波器通常用于音频交叉系统。

二阶贝赛尔低通滤波器的传递函数为：

$$A_u(s) = \frac{1}{3 + 3\left(\frac{s}{\omega_0}\right) + \left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2}$$

1.2.5 高斯滤波器（最小群延迟）

高斯滤波器的脉冲响应是一个高斯函数。高斯滤波器的特点是阶跃输入响应具有最小化的上升和下降时间，同时没有过冲。该特点与高斯滤波器具有尽可能小的群延迟密切相关。

一种高斯滤波器的幅频响应和相频响应如下所示，其中 a 为与带宽有关的常数。实现高斯滤波器时，通常用有理函数逼近其幅频响应。

$$|A(jf)| = e^{-a^2 f^2}$$

$$|\varphi(f)| = 0$$

1.2.6 线性相位（等纹波延迟）

与贝塞尔滤波器响应类似，线性相位滤波器的相频响应是频率的线性函数。贝塞尔滤波器的相频响应具有最平坦的时延曲线，而线性相位滤波器使其时延曲线近似于一个给定的波纹（0.5 度或 0.05 度）。另外线性相位滤波器具有比贝塞尔滤波器更陡峭的幅频特性。该滤波器阶跃响应的过冲比贝塞尔滤波器的稍微大

一点。

1.3 滤波器的电路实现

当滤波器阶数大于二阶时，偶数阶滤波器的传递函数可以表示为多个二阶传递函数的乘积。因此，从电路结构上来说，偶数阶滤波器可以用多个级联的二阶滤波器实现。类似地，奇数阶滤波器则可以用一个一阶滤波器与一个或者多个级联的二阶滤波器实现。通常，一阶滤波器的极点为实数极点，二阶滤波器的极点为一对共轭复数。

FilterPro 的偶数阶滤波器设计由级联的具有复共轭极点对的二阶滤波器组成。奇数阶滤波器则还包含了一个具有实极点的一阶滤波器。图 7 到图 11 展示了推荐的级联排列方式。图示的实极点部分位于其它部分之前，但在某些配置中，实极点部分后置可获得更好的效果。通常，Q 值越大，截止频率处的增益越大，因此 FilterPro 自动地将低 Q 值的滤波器排列在高 Q 值的滤波器之前，以避免运算放大器的输出因增益峰值而饱和。FilterPro 可以用来设计高达 10 阶的低通、高通、全通滤波器，以及 20 阶的带通和带阻滤波器。

表 1 列出了滤波器阶数和相应的示例电路图序号。

表 1 滤波器电路与滤波器阶数

滤波器阶数（即极点数）	示例电路图序号
一阶（即一个极点）	图 7
二阶（即两个极点）	图 8
三阶（即三个极点）	图 9
四阶以上偶数阶（即偶数个极点）	图 10
五阶以上奇数阶（即奇数个极点）	图 11

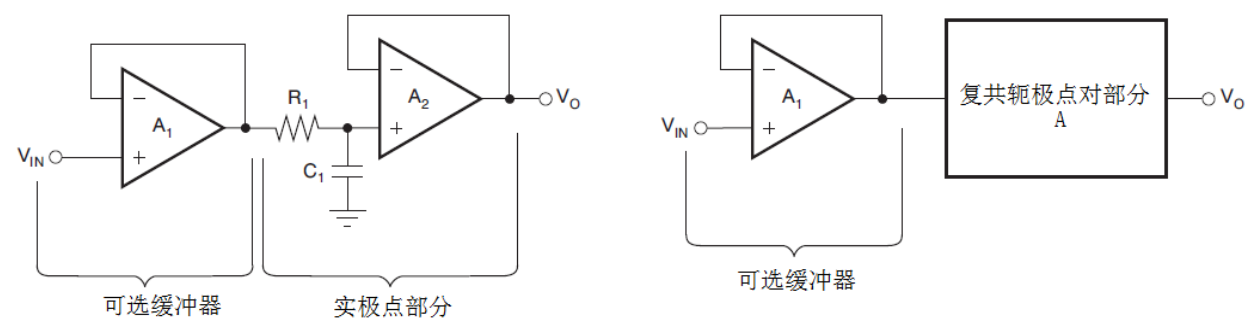


图 7 一阶实极点滤波器（单位增益、

一阶巴特沃兹； $f_{-3dB} = \frac{1}{2} \pi R_1 C_1$ ）

图 8 二阶低通滤波器

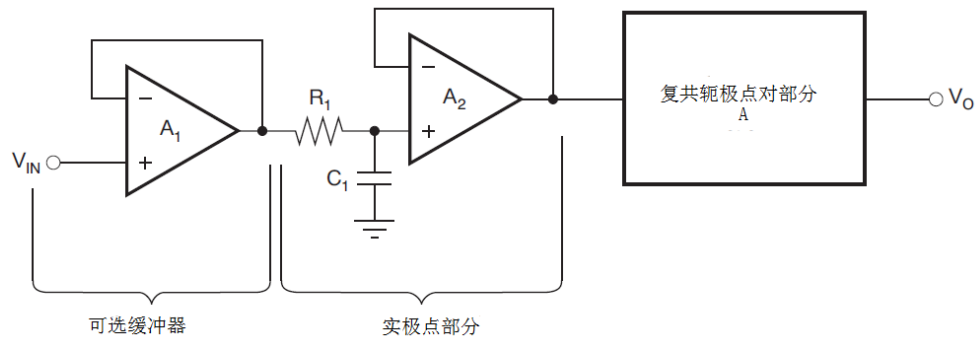


图 9 三阶低通滤波器

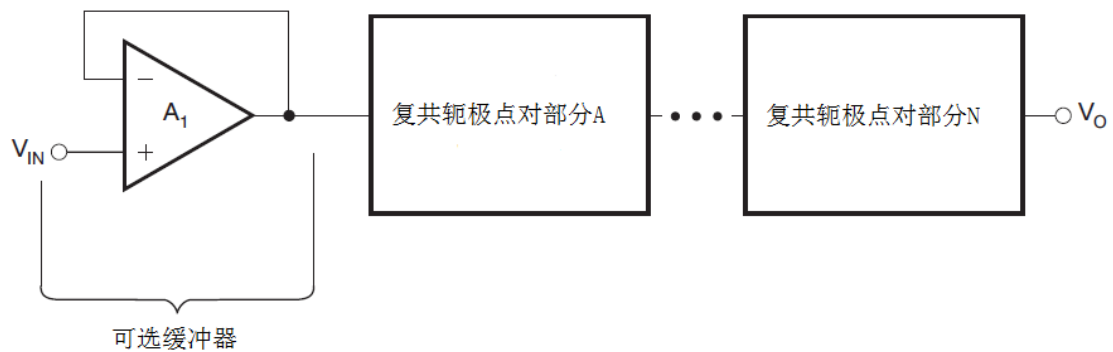


图 10 采用级联复共轭极点对部分的偶数阶低通滤波器

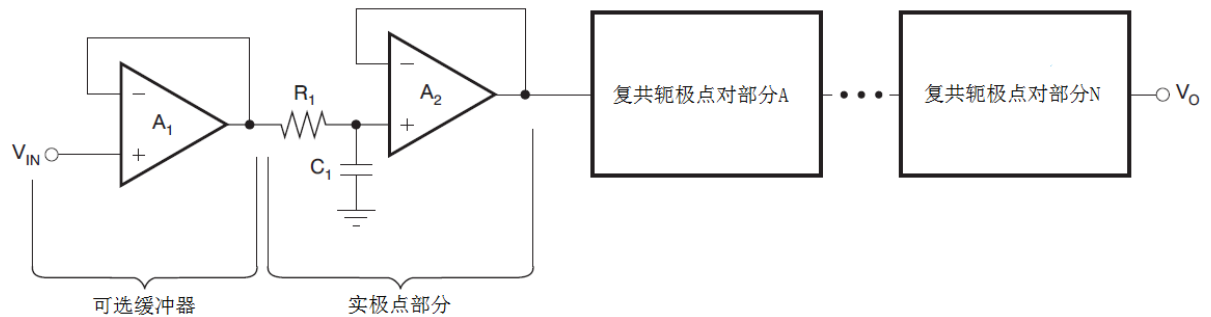


图 11 采用级联复共轭极点对部分外加一个实极点部分的奇数阶低通滤波器

1.3.1 复共轭极点对电路

复共轭极点对电路的选择取决于性能需求。FilterPro 支持两类最常用的有源复共轭极点对电路。

- 多反馈 (MFB)，如图 12 所示；
- Sallen-Key，如图 13 和 14 所示。

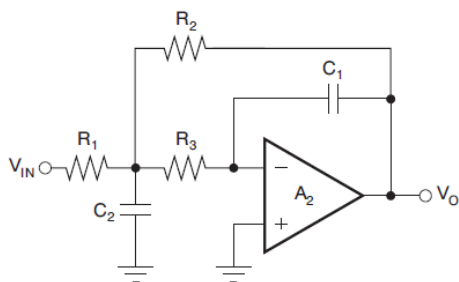


图 12 多反馈复极点对电路

(Gain = $-R_2/R_1$)

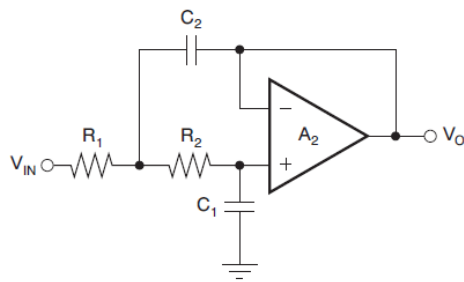


图 13 Sallen-Key 复极点对电路

(单位增益, Gain=1)

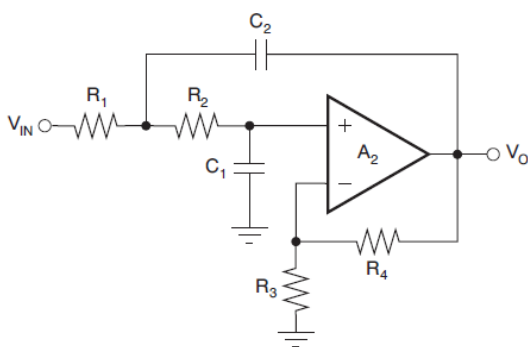


图 14 Sallen-Key 复极点对电路 (Gain = $1 + R_4/R_3$)

1.3.2 多反馈拓扑电路

多反馈拓扑（有时也称为无限增益或 Rauch 拓扑）电路对元件值变化的敏感度较低，因此较为常用。多反馈拓扑电路采用反相输入的二阶系统。因此，偶数级多反馈滤波器的输出信号的极性与输入信号同相，而奇数级多反馈滤波器的输出信号的极性与输入信号反相。例如，一个包含三级多反馈结构的六阶滤波器将会使信号的极性翻转三次，从而使输入信号经过三级滤波后，输出信号与输入信号反相。FilterPro 也允许设计全差分多反馈结构的电路，此时电路为差分输入方式，输出信号与输入信号不再是简单的反相关系了。

1.3.3 Sallen-Key 拓扑电路

在某些场合下，Sallen-Key 是更好的拓扑，因为 Sallen-Key 是同相输入电路，这也许会使它比多反馈更受欢迎，但是这并不是唯一的潜在优势。作为一个经验法则，Sallen-Key 拓扑在以下情况下会比多反馈拓扑更有优势，即当需要精确的单位增益且 Q 值较低（比如， $Q < 3$ ）时：在单位增益时，Sallen-Key 拓扑具有很好的增益准确度，因为此时滤波器中的运放采用跟随器的形式，单位增益的精度高，且只需要两个电阻来实现滤波器，如图 13 所示。而多反馈拓扑中，增益由

R_2/R_1 决定，因此实现单位增益的精度不如 Sallen-Key 拓扑中的跟随器高，且需要三个电阻实现滤波器，如图 12 所示。

最好的滤波器设计应该是多反馈拓扑部分和 Sallen-Key 拓扑部分相结合，FilterPro 允许用户使用两种电路拓扑进行滤波器的设计。

2 FilterProDesktop v3.1 的使用

FilterPro Desktop v3.1 允许用户采用 Sallen-Key 和多反馈拓扑结构来实现多种类型的有源滤波器。使用该工具可以创建、管理、分享有源滤波器设计。

2.1 安装 FilterProDesktop v3.1

安装 FilterPro 的计算机要求是：

- 1GHz 或更快处理器
- 2GB 或更大内存
- 至少 250MB 的空闲硬盘空间
- 最小是 1024×768 的显示分辨率
- 微软 Windows XP sp3 系统和微软 .NET Framework 3.5 或更高

从 <http://www.ti.com/filterpro-pr> 下载安装程序并运行，即可在电脑上安装 FilterPro。

2.2 创建滤波器设计

程序启动后，出现滤波器设计向导，如图 15 所示。

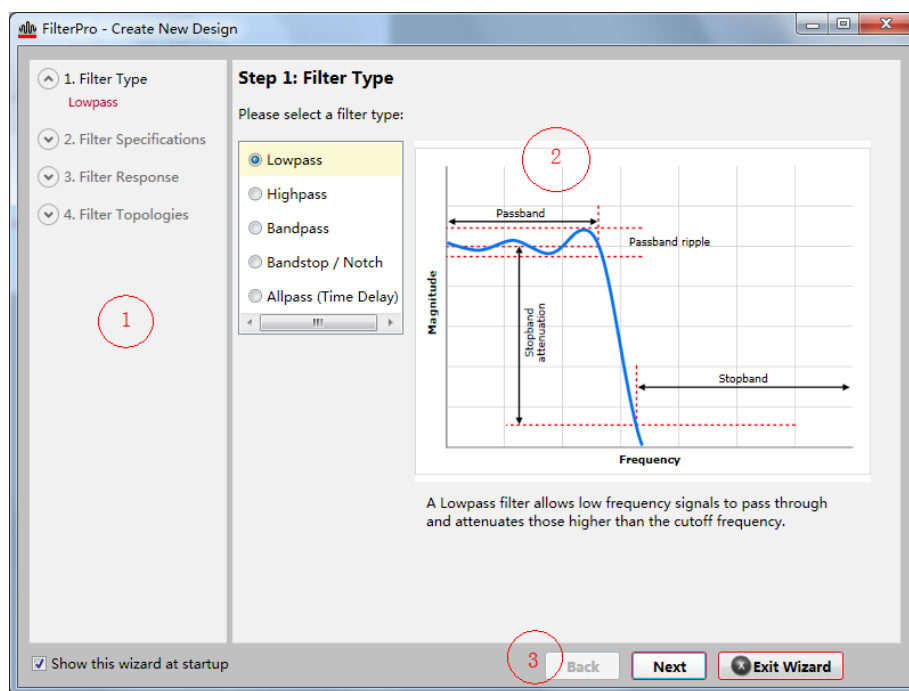


图 15 使用 FilterPro 设计向导

在设计向导的界面上主要有三个区域：

- 1) **总结**：本区域显示正处于设计的哪个阶段。
- 2) **有源滤波器设计区**：该区域是交互式的，用户选择待设计的滤波器类型并输入相关参数。
- 3) **后退/前进和退出向导**：在完成之前，点击**后退**或**前进**可以浏览设计。如果不需要使用设计向导，点击退出向导。

设计向导用于帮助快速完成有源滤波器的设计。当刚启动打开 FilterPro 时，设计向导会出现。若设计向导被关闭，可以通过文件菜单来创建新的设计。

2.2.1 第一步：选择滤波器类型

选择需要的滤波器类型，设计向导提供的滤波器类型有低通、高通、带通、带阻、全通（时延）。

选择了正确的滤波器类型以后，点击 Next 进入第二步。

2.2.2 第二步：确定滤波器参数

图 16 所示为滤波器参数输入窗口，在该窗口中输入第一步已选择的滤波器的特性参数。

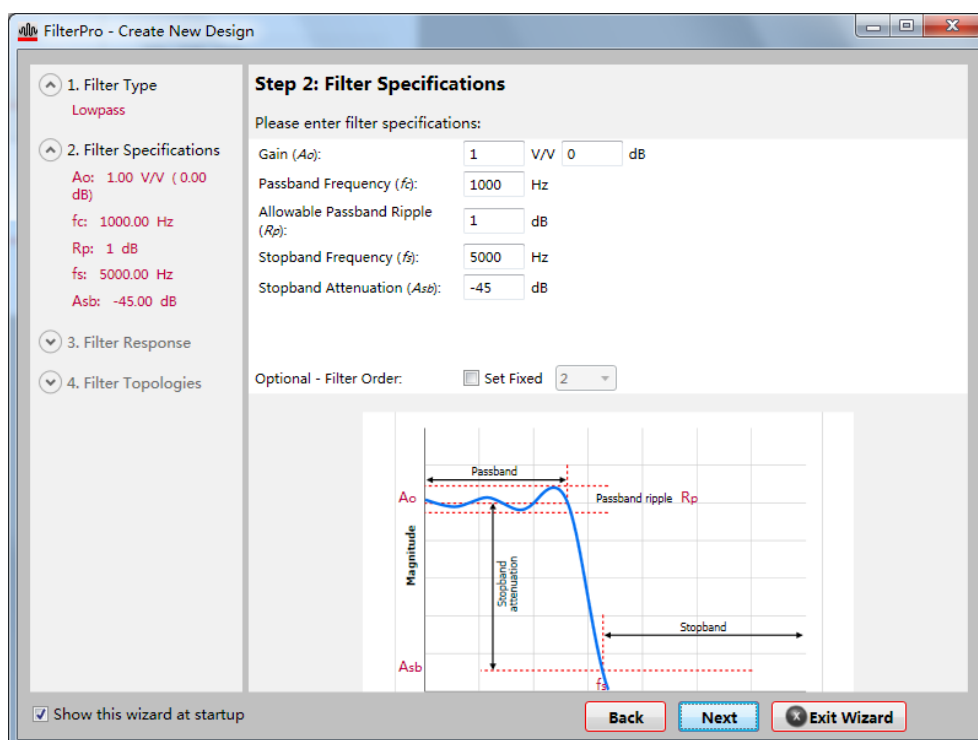


图 16 滤波器参数输入窗口

滤波器的参数说明如下。

- 低通和高通滤波器的参数包括：
 - **增益 Gain (A_0)**: 以伏每伏 (V/V) 或分贝 (dB) 为单位，输入滤波器总的增益值。如只输入了一个单位下的增益值，软件会自动转换并填充另一个单位下的增益值。例如，若在单位 ‘V/V’ 左边的输入框内输入了‘1’，系统会自动在单位 ‘dB’ 左边的输入框内填充‘0’，反之亦然。
 - **通带频率 Passband Frequency (f_c)**: 输入以赫兹 (Hz) 为单位的滤波器的通带频率。
 - **允许的通带纹波 Allowable Passband Ripple (R_p)**: 输入以分贝为单位的允许的最大的通带纹波，范围为 0 到 3dB。
 - **阻带频率 Stopband Frequency (f_s)**: 输入以赫兹为单位的滤波器的阻带频率。
 - **阻带衰减 Stopband Attenuation (A_{SB})**: 输入以分贝为单位的滤波器的阻带衰减。
 - **滤波器阶数 Filter Order**: 若想强制指定滤波器的阶数（最高为 10），选中 **Set Fixed** 按键。

注：在幅频特性曲线上，（通带频率 f_c ，增益 A_0 ），（阻带频率 f_s ，阻带衰减 A_{SB} ）两个点的斜率可以确定滤波器过渡带的滚降，因此，已知通带频率、增益，根据需要的滚降，可以得出阻带频率和阻带衰减，对于固定的滚降值，（阻带频率 f_s ，阻带衰减 A_{SB} ）不是唯一的，可以有很多组。

比如在低通滤波器中，已知通带频率为 1KHz，通带增益为 0dB，需要滚降为-40dB 每 10 倍频程，那么可能的阻带频率、阻带衰减组合可以为（10KHz,-40dB）、（100KHz,-80dB）等。

如果直接指定了滤波器阶数，那么滤波器的滚降也能确定，就不需要填写阻带衰减和阻带频率了。

- 带通和带阻滤波器的参数包括
 - 增益 **Gain** (A_0)：输入滤波器总的增益值。
 - 中心频率 **Center Frequency** (f_0)：输入滤波器的中心频率。
 - 允许的通带纹波 (R_p)：输入以分贝为单位的允许的最大的通带纹波，范围为 0 到 3dB。
 - 通带带宽 **Passband bandwidth** (BW_p)：输入滤波器的通带带宽。
 - 阻带带宽 **Stopband bandwidth** (BW_s)：输入滤波器的阻带带宽。
 - 阻带衰减 (A_{SB})：输入以分贝为单位的滤波器的阻带衰减。
 - 滤波器阶数：若想强制指定滤波器的阶数（最高为 10），选中 **Set Fixed** 按键。
- 全通滤波器
 - 增益 **Gain** (A_0)：输入滤波器总的增益值。
 - 通带频率 (f_c)：输入以赫兹为单位的滤波器的通带频率。
 - 在 f_c 处的时延 **Time Delay at f_c (D)**：输入滤波器在通带频率 f_c 处的时延。
 - 在 f_c 处的大概相移 **Approx. Phase Shift at f_c (s)**：输入滤波器在通带频率 f_c 处的大约的相移。
 - 滤波器阶数：若想强制指定滤波器的阶数（最高为 10），选中 **Set Fixed** 按键。

2.2.3 第三步：选择滤波器响应

图 17 所示为滤波器响应选择窗口，在该窗口中选择第一步已选择的滤波器

的响应。

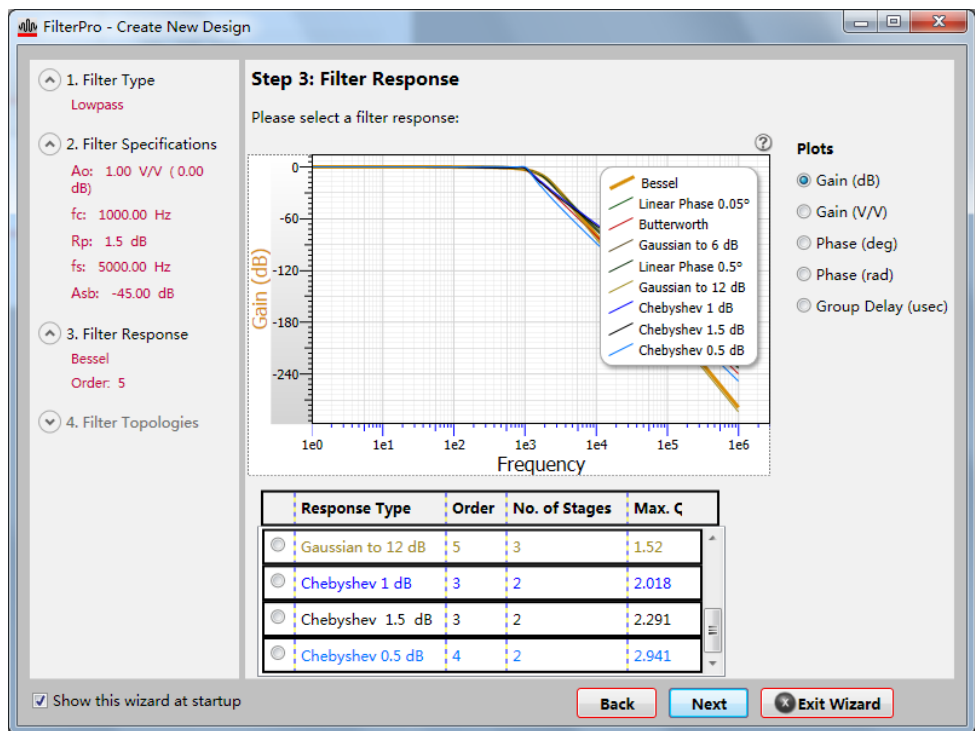


图 17 滤波器响应选择窗口

FilterPro 提供以下滤波器响应：

- 贝塞尔响应 (Bessel)
- 巴特沃兹响应 (Butterworth)
- 通带纹波为 0.5dB 的切比雪夫响应 (Chebyshev 0.5dB)
- 通带纹波为 1dB 的切比雪夫响应 (Chebyshev 1dB)
- 切比雪夫响应 (Chebyshev)，通带纹波为在第二步 ‘允许的通带纹波’ 框中输入的值，例如，在图 17 中，显示了一个 1.5dB 的切比雪夫滤波器，这是因为在第二步 ‘允许的通带纹波’ 框中输入了 1.5 的值)
- 通带纹波为 12dB 的高斯响应 (Gaussian to 12dB)
- 通带纹波为 6dB 的高斯响应 (Gaussian to 6dB)
- 纹波为 0.05 度的线性相位响应 (linear Phase 0.05°)
- 纹波为 0.5 度的线性相位响应 (linear Phase 0.5°)

在图 17 所示选择窗口中选择相应的单选按键来选择滤波器的响应类型。图 17 中部也显示了所选择的响应曲线预览，通过在右边的 ‘Plots’ 下选择相应的单选按键，可分别显示幅频曲线（单位为分贝）、幅频曲线（单位为 v/v）、相频

曲线（单位为度）、相频曲线（单位为弧度）和群延迟曲线。

2.2.4 第四步：选择滤波器拓扑

图 18 所示为滤波器拓扑选择窗口，在该窗口中选择第一步已选择的滤波器的拓扑。

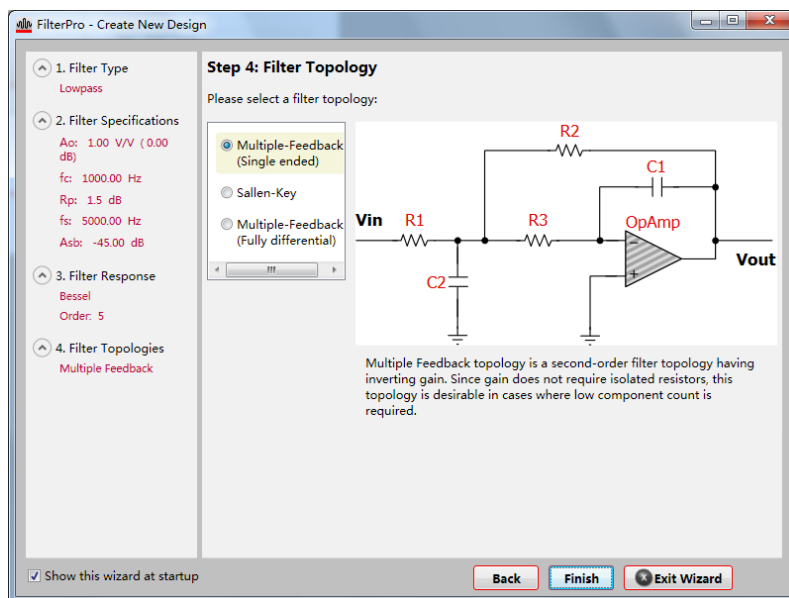


图 18 滤波器拓扑选择窗口

可选的拓扑包括多反馈（单端和全差分输入）和 Sallen-Key。根据所需的拓扑结构选择相应的单选按键，右边窗口显示拓扑预览。点击 Finish 完成一个新的滤波器设计的创建，该设计将会显示在屏幕上。若设计满足要求，则保存设计，以防丢失。

2.2.5 第五步：交互设计

FilterPro 提供交互修改设计的功能。当通过以上四个步骤完成滤波器设计后，或者打开一个已完成的滤波器设计时，FilterPro 默认打开图 19 所示的交互设计界面，共包括五个选项卡，即原理图编辑、数据（即参数）显示或导出、物料清单、添加注释、设计报告。

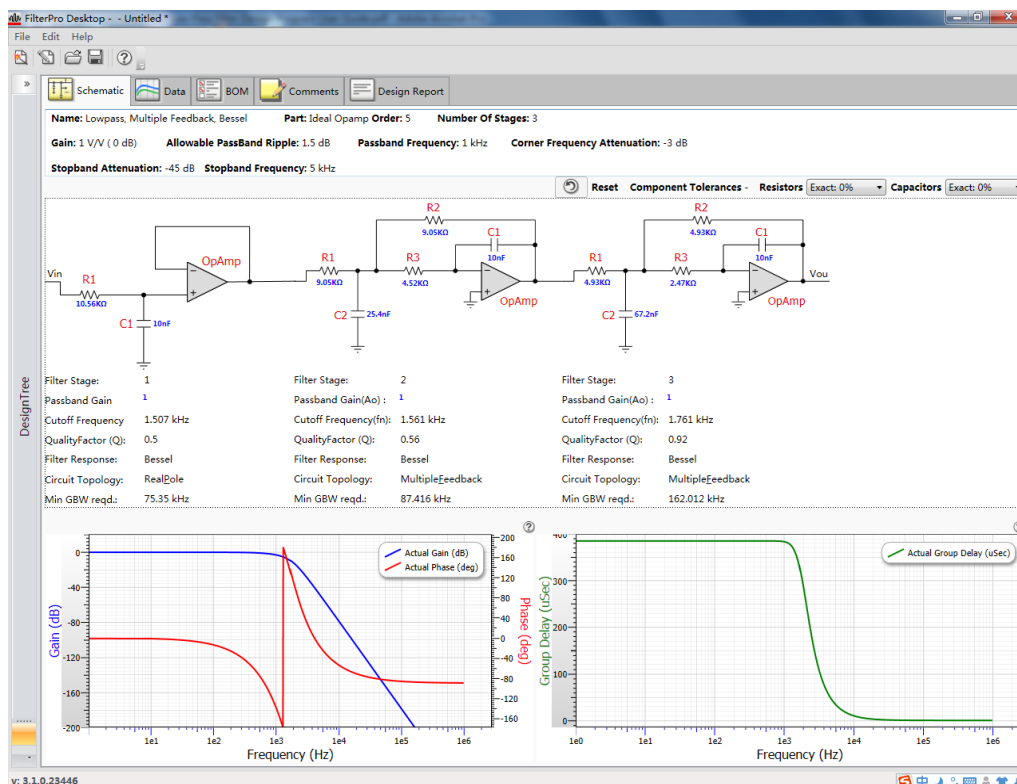


图 19 交互设计主界面（原理图选项卡）

2.2.5.1 原理图选项卡

当一个设计被创建或者被打开时，程序默认显示原理图选项卡。该选项卡的顶部显示了设计的名称和参数，界面上显示滤波器的原理图，原理图的下方是创建的滤波器的增益和相位响应，以及群延迟曲线。通过原理图选项卡可以修改和查看滤波器的设计，其功能说明如下：

1 修改设计

1) 修改元件值

原理图中的标签信息为红色或蓝色。

- **红色标签：**用来指示原理图的某些信息，不能被编辑。
- **蓝色标签：**用来指示元件值，可以被编辑。用鼠标点击元件值，如图 20 所示，在这些蓝色的数字附近会出现一个输入框，然后输入需要被修改的值。

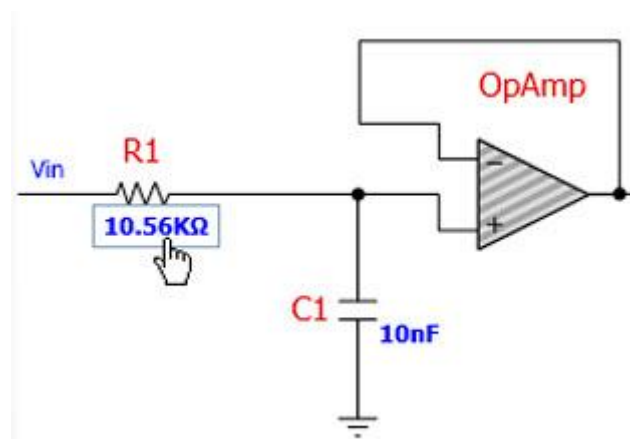


图 20 修改元件值

智能输入：有可能输入的数会太大或太小，比如，电容值为 0.000002F，在这种情况下，可以输入绝对的值 0.000002F，也可以用表 2 所示的标准单位来输入，写为 2uF。再如，图 20 所示电阻 R1，可以输入 10560 Ω，也可以写为 10.56KΩ。

表 2 允许的单位前缀

数字	前缀
10^{-15}	f
10^{-12}	p
10^{-9}	n
10^{-6}	u
10^{-3}	m
10^3	k
10^6	M
10^9	G

2) 修改元件误差

在原理图选项卡的右上角有一个工具栏，如图 21 所示，可以修改电阻和电容的误差，通过下拉菜单从标准的 E6 到 E192 系列中任意选择。



图 21 元件误差选择

默认设置为根据滤波器设计计算出的“精确值”（即理想值）。只要修改了元件误差，软件将会从设置的系列中选择离理想值最近的值，并且重新计算所有的元件值。通常，若电路处于对功耗敏感的环境中（如电池供电、太阳能供电等），则可以通过提高电阻值来降低功耗；而一些高速运放则需要低的反馈电阻值，因

此应减小电阻值。

高电阻值，例如 $100\text{K}\Omega$ ，可以和场效应管 FET 作为输入的运放配合使用。在 70°C 的温度以下，由运放的输入偏置电流引起的直流误差和过量噪声较小，但是，由电阻引起的噪声会以 \sqrt{n} 的形式增加， n 是电阻值增加的倍数。因此，低电阻值，例如 50Ω ，对于使用 TI 的多种高速运放构建的高频滤波器来说，是更好的选择。

相对于电阻，要想获得误差很小的电容比较困难，并且误差小的电容是很昂贵的。除非电容的误差被人为设定，否则，FilterPro 都从 E6 系列（每 10 倍程之间有 6 个值）的电容里选择电容。若 E6 以外的值被使用（比如 E12），则需要人工输入合适的值。

3) 运放的输入阻抗补偿（仅指 Sallen-Key 拓扑）

如果 Sallen-Key 滤波器中的运放的共模输入电容近似的大于 $C_1/400$ (0.25% 的 C_1)，那么为了获得准确的滤波器响应，就必须考虑输入电容补偿。用户可以使用电容输入框对运算放大器输入电容进行补偿，即把运算放大器共模输入电容值与实际的 C_1 值简单地相加。程序随后将根据精确的滤波器响应自动计算出精确的或最接近 1% 误差的电阻值。多反馈滤波器不需要针对运放的输入阻抗进行补偿。

2 复位：复位按键位于元件误差左侧。该按键允许将设计恢复到没有做任何修改时的原始状态，包括恢复元件值和元件误差。

3 查看设计

- 缩放：将鼠标放在图上，使用滚轮放大和缩小图来观察设计的细节。
- 平移：将鼠标放在图上，按下左键拖动图像来根据需要观察图像信息。
- 还原：在图上双击鼠标左键可以将图像还原到初始状态。
- 适合视图：主面板的信息会根据桌面的屏幕分辨率自动调整大小，使得不必调整屏幕就能看到完整的设计。

2.2.5.2 数据选项卡

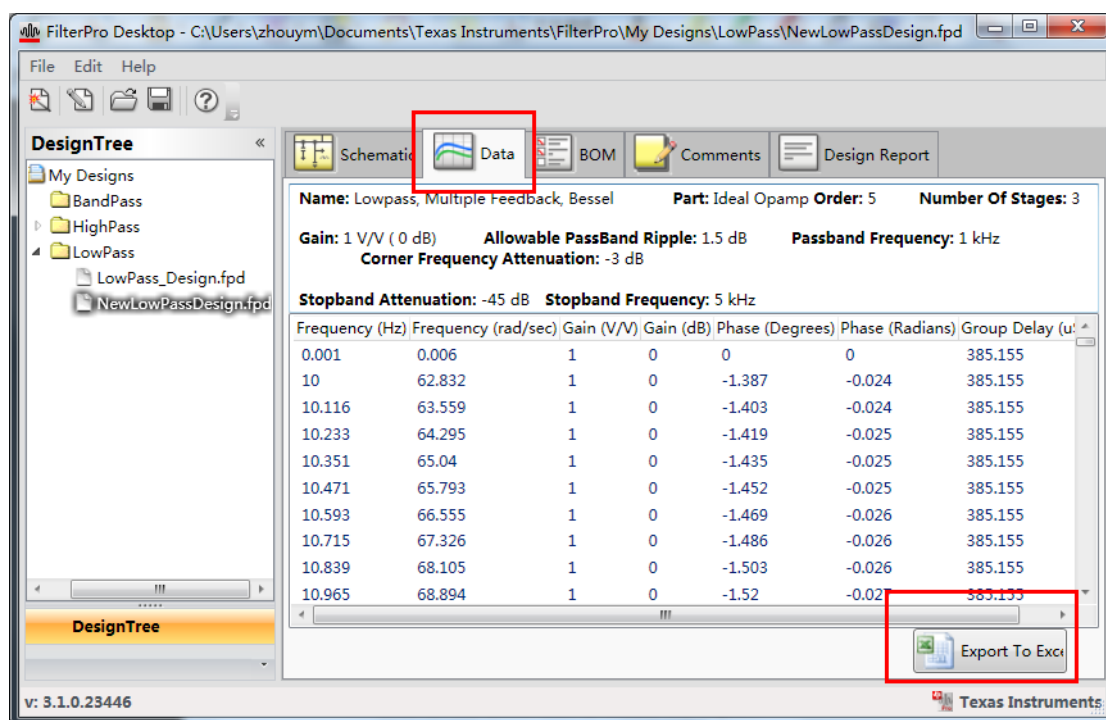


图 22 数据选项卡

数据选项卡包含所有频率下的滤波器信息，包括低频和高频，显示的数据有增益、相位和群延迟。该选项卡的信息可以导出至微软的 Excel 或其它电子数据表格程序中。图 22 所示页面的底端有一个 Excel 图标，点击 Excel 图标可以开始导出。

2.2.5.3 物料清单选项卡

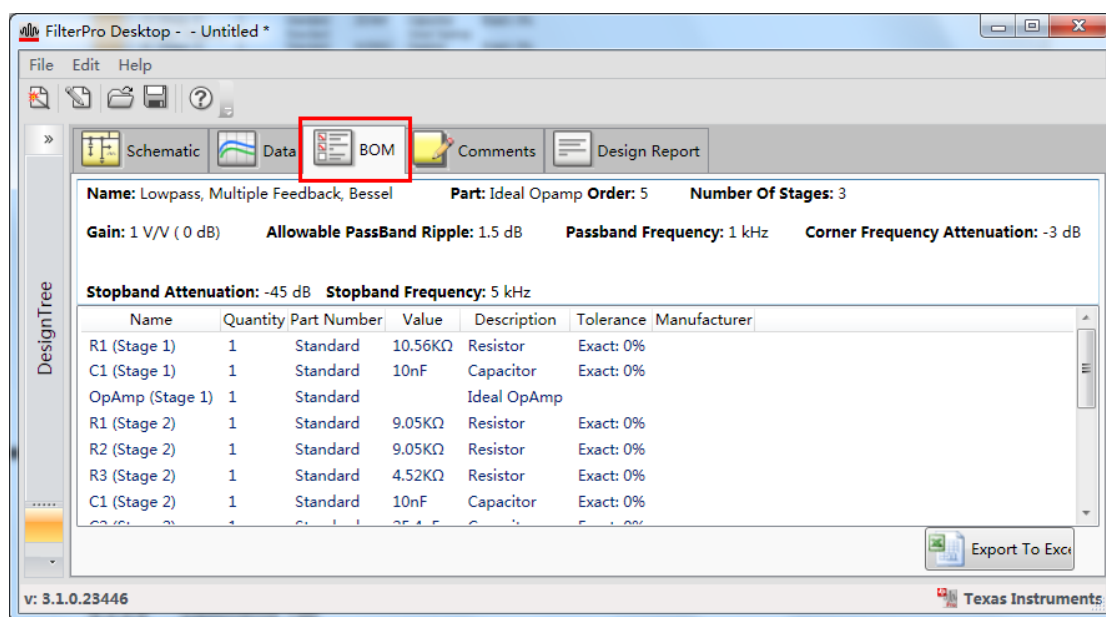


图 23 物料清单选项卡

物料清单选项卡显示滤波器的物料清单，即列出了所使用的元件信息，包括名称、数值、类型、误差、制造厂商和数量等。此时显示的电阻和电容是标准的，运放是理想的。该选项卡的信息可以导出至 Excel。图 23 所示页面的底端有一个 Excel 图标，点击 Excel 图标可以开始导出。

2.2.5.4 注释选项卡

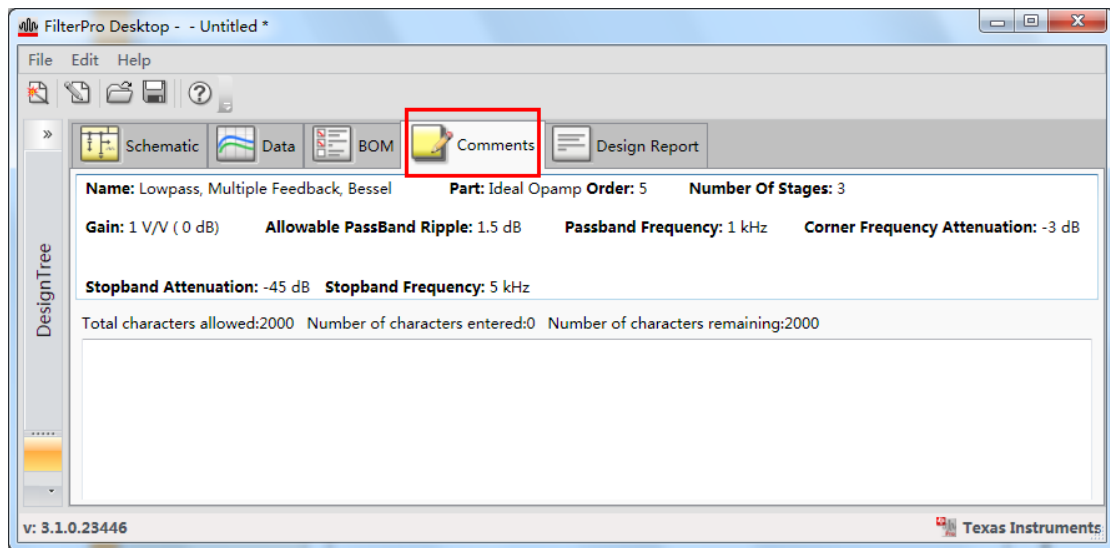


图 24 注释选项卡

通过注释选项卡可以添加所保存的设计的注释，当再次打开设计时，这些信息被保存。

2.2.5.5 设计报告选项卡

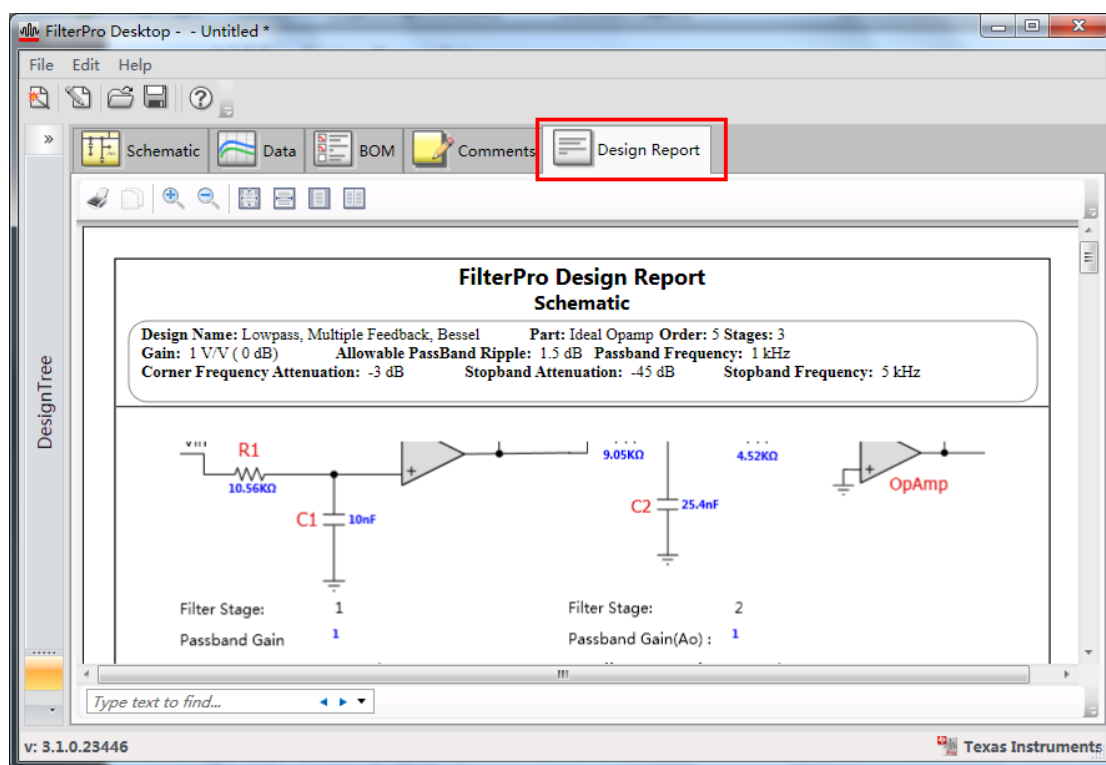


图 25 设计报告选项卡

设计报告选项卡允许查看滤波器的设计报告，包括滤波器参数、原理图、幅频曲线、相频曲线、群延迟曲线、在关键频率的响应数据以及物料清单。

2.3 FilterPro Desktop 的其它设计工具

2.3.1 打印设计

在 FilterProDesktop 中对设计进行更改之前或之后，用户可以在任何时候选择设计报告选项卡中左上方工具栏区域的打印图标，打印设计报告，如图 26 所示。

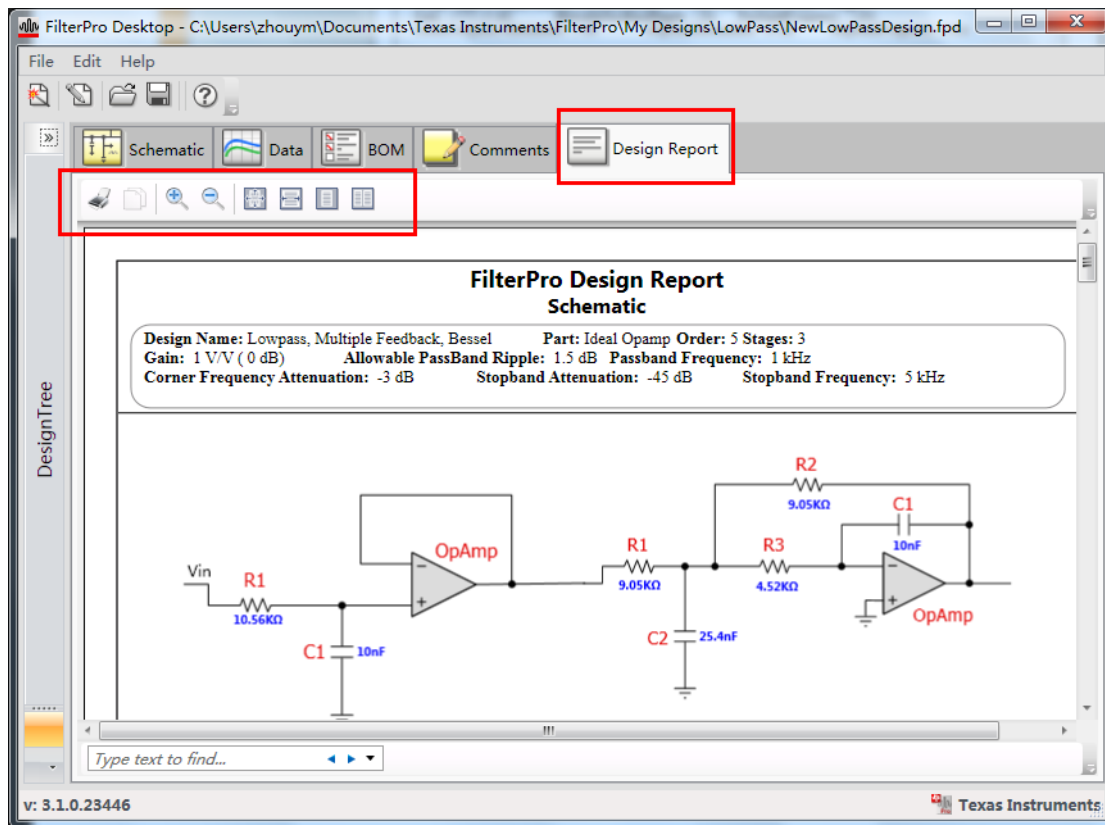


图 26 打印设计报告界面

打印设计时，窗口中必须有一个激活的设计。点击打印图标，窗口中的设计即会被打印。

打印图标所在的二级工具栏共包含下列选项：

- **打印**：打印设计报告。选择打印机和设计需要的打印选项。
- **复制**：当你在设计报告中选择了文本时被激活，高亮的文本将被复制到另外的应用中，比如 word 等等。
- **放大**：增加内容的大小。
- **缩小**：减小内容的大小。
- **100%**：在页面上以 100%的比例显示。
- **页面宽度**：按照页面的宽度显示。
- **整页显示**：在窗口中显示一整页。
- **两页显示**：在窗口中显示两页。

2.3.2 管理设计

在 FilterPro 中管理设计跟微软 windows 资源管理器的页面类似。

2.3.2.1 保存设计

点击菜单栏中的‘文件’，然后选择‘保存设计’，如图 27 所示。在弹出的对话框中选择保存路径，命名设计，然后点击‘保存’按钮，即可保存你的设计，如图 28 所示。

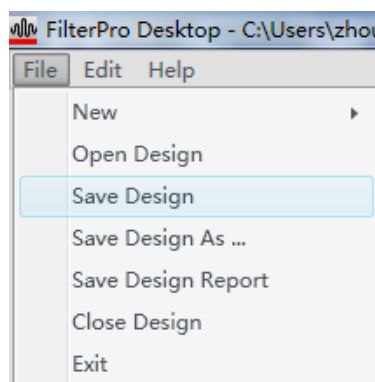


图 27 从文件菜单中保存设计

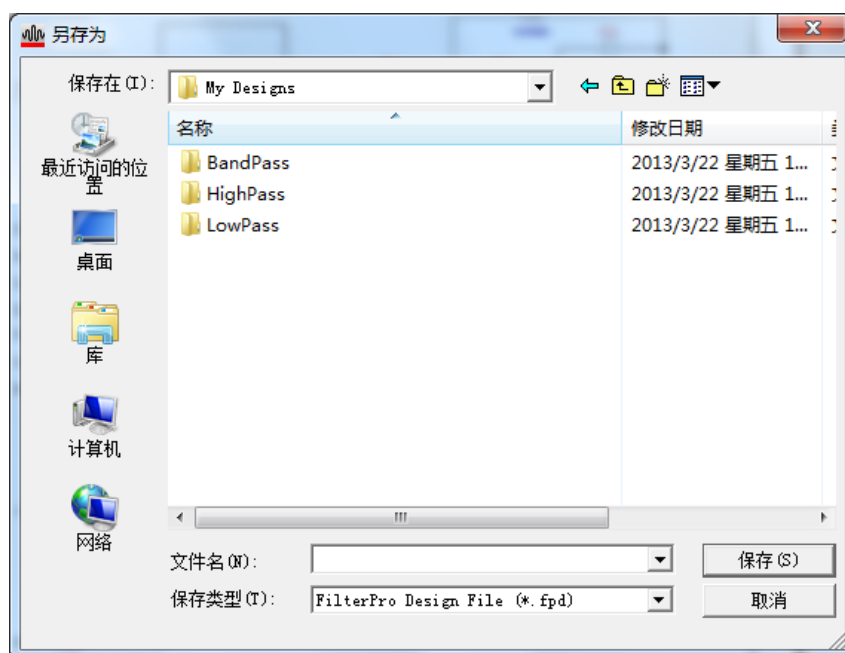


图 28 另存为对话框

图 28 所示的对话框显示了 *ilterPro* 将会保存的默认路径，即 *\$\My Document\Texas Instruments\FilterPro\My Designs*。所有的 *FilterPro* 设计的扩展名均为.fpd。

2.3.2.2 查看保存的设计

有三种方法可以查看之前保存的设计。

第一种方法是点击设计列表选项卡，如图 29 所示。当该区域展开以后，即

可打开文件，添加文件夹至用户设计库，或者根据需要构建层次结构。

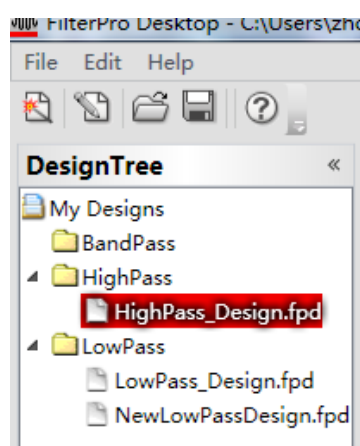


图 29 从设计管理器中选择一个设计

第二种方法是从菜单栏中选择文件，然后选择打开设计，如图 30 所示。

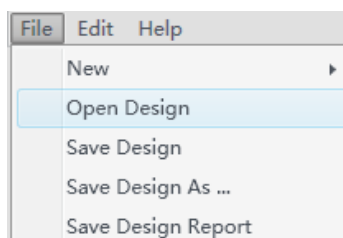


图 30 从菜单栏中打开设计

第三种方式是点击工具栏中的打开图标，如图 31 所示。

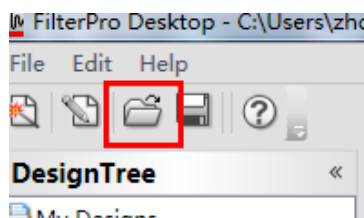


图 31 从工具栏图标打开设计

2.3.2.3 编辑设计

在设计列表中重命名、复制或者删除一个项目时，包含需要进行编辑的项目的文件夹必须先展开。展开之后，即可做需要的任何改变。

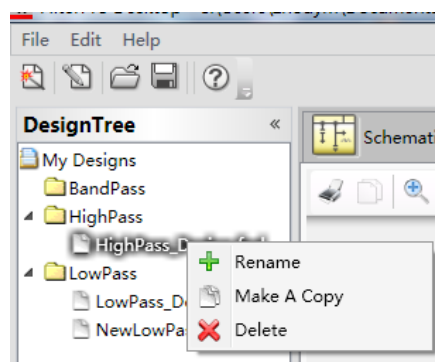


图 32 设计管理器菜单

在图 32 所示的设计列表中，用鼠标右键单击该设计，就会出现选项菜单，选项包括重命名、制作副本、删除。

- **重命名：**在图 32 出现的选项菜单上点击重命名选项来重命名设计。在窗口中会出现一个文本输入框，如图 33 所示，输入要更改的设计名称。另外，原理图选项卡将会出现在中间的面板中。点击 OK 确定更改。

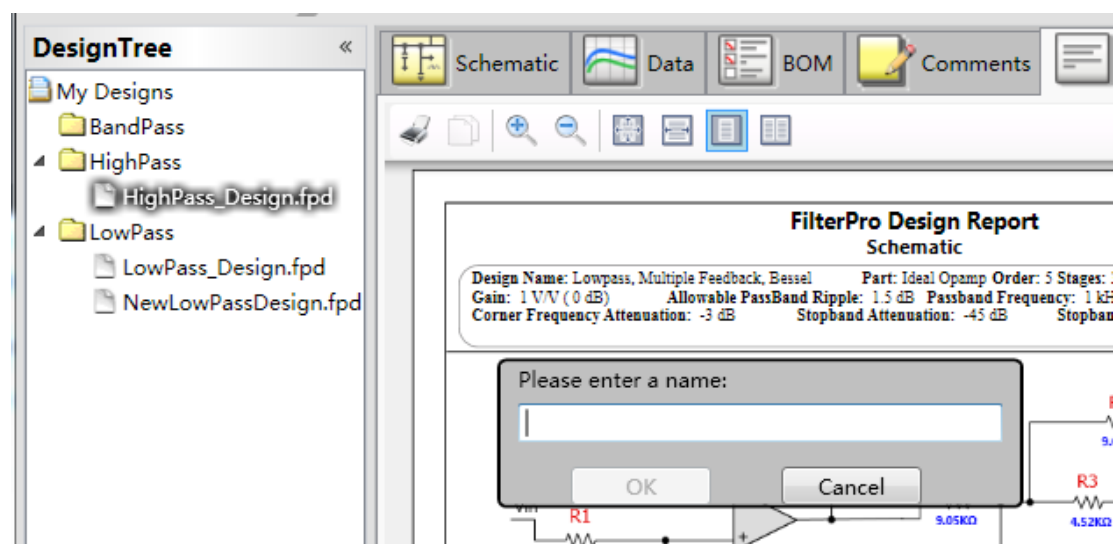


图 33 重命名对话框

- **制作副本：**点击制作副本选项为选中的设计制作副本。副本的名称是在原来设计名称前添加“Copy of”。可以更改副本的名称或者将名称保持原样。
- **删除：**点击删除选项来删除设计。在删除前没有确认信息，所以一定要保证删除的是不再需要的设计。

2.3.3 从 FilterPro v2.0 移植设计

FilterPro Desktop v3.1 允许用户从 FilterPro v2.0 移植设计，从而使以前的设计不至于丢失。

以下是从 FilterPro v2.0 移植设计到 v3.1 的步骤：

- 1) 在打开 FilterPro v3.0 之前,确定 FilterPro v2.0 文件的位置,然后打开 FilterPro v3.1。
- 2) 在菜单栏中点击‘文件’,选择‘打开设计’,如图 34 所示。在弹出的对话框中找到 FilterPro v2.0 的设计存储的路径,如图 35 所示。

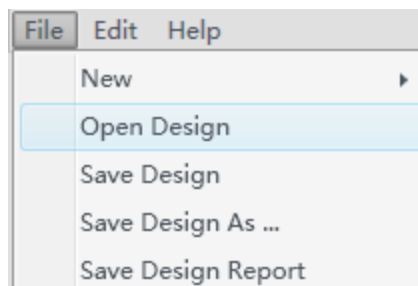


图 34 从菜单栏中的文件菜单打开设计

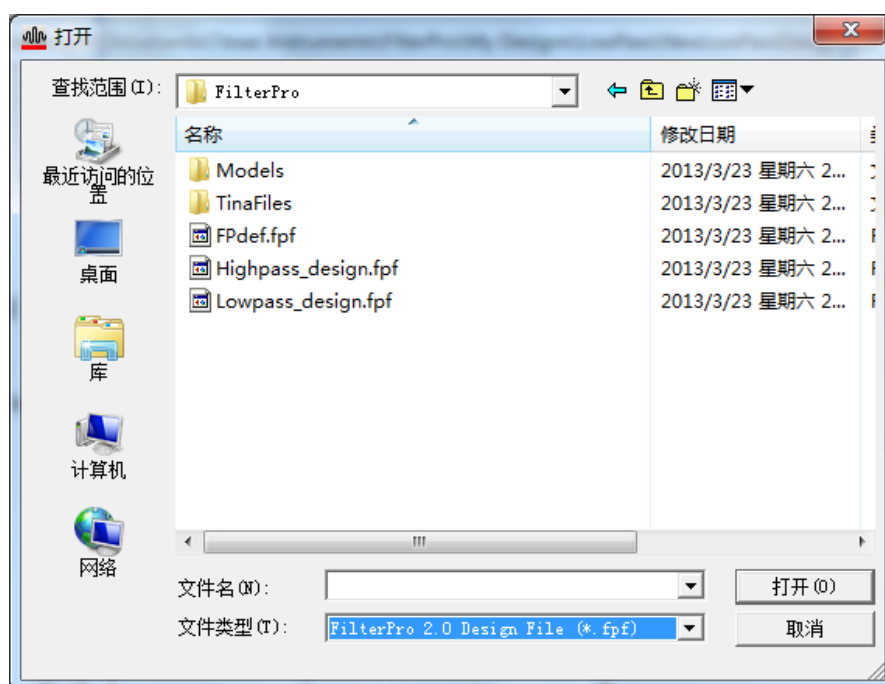


图 35 指定并打开 FilterPro v2.0 格式的文件

- 3) 为了看到 v2.0 的文件,将文件类型改为 FilterPro 2.0 Design File(*.fpf)。选中需要打开的设计并打开,窗口中就会出现滤波器的原理图。移植后的文件在 v3.1 中将会变成未命名,可以通过点击文件->设计另存为,然后输入文件名来保存设计。

2.4 FilterPro 的使用注意事项

2.4.1 在 windows7 中的自动更新

FilterPro 在 windows7 中运行自动更新需要管理员权限，通过 FilterPro 的桌面快捷方式设置“以管理员身份运行”来使 FilterPro 获得管理员权限。具体操作时，右键单击 FilterPro 桌面快捷方式，然后菜单中选择属性，如图 36 所示。在弹出的对话框中，在‘兼容性’选项卡中选中‘以管理员身份运行’，如图 37 所示。

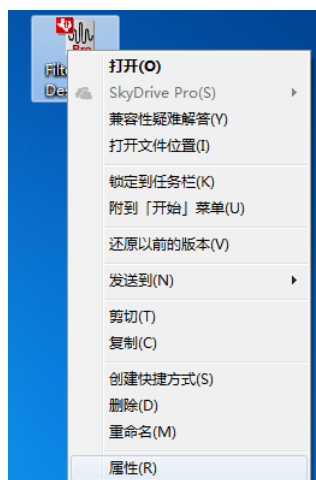


图 36 Windows7 桌面属性选择

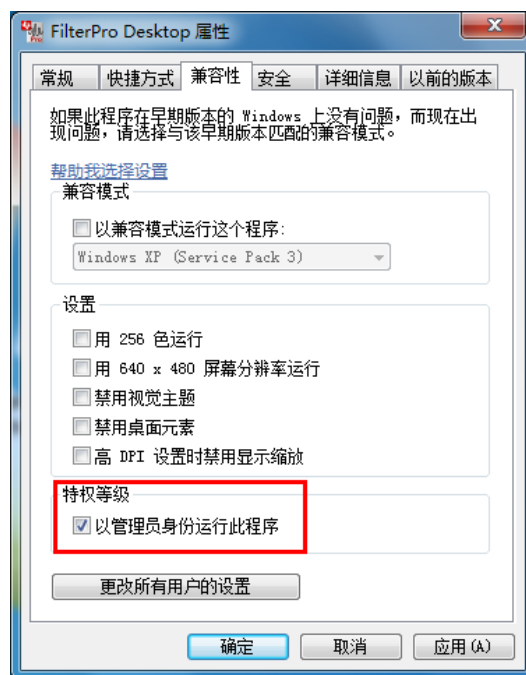


图 37 在桌面属性设置权限等级

2.4.2 设计向导中导航按钮的外观

图 38 所示为 FilterPro 设计向导，若用户设计向导不像图 38 所示，而是像图 39 所示，则是因为用户计算机可能设置为最佳性能，而不是最佳视觉显示。

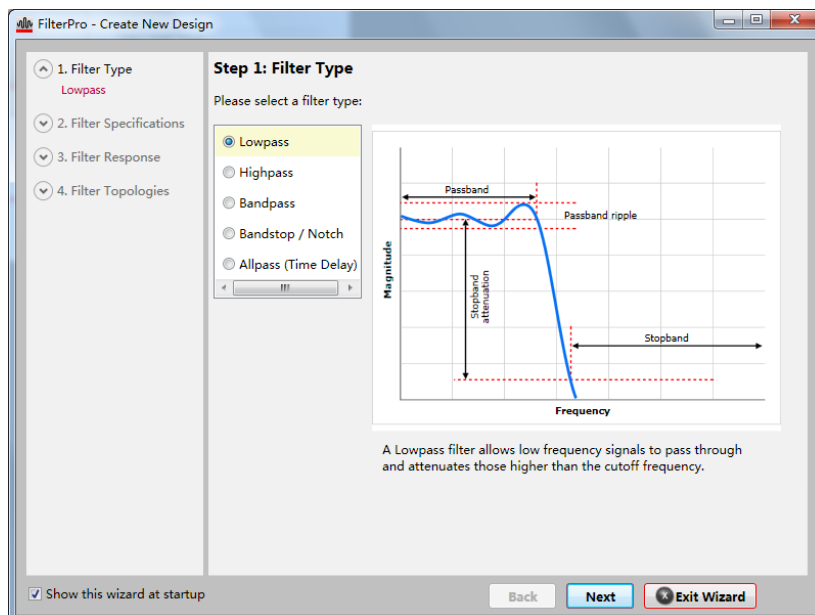


图 38 正确的设计向导外观

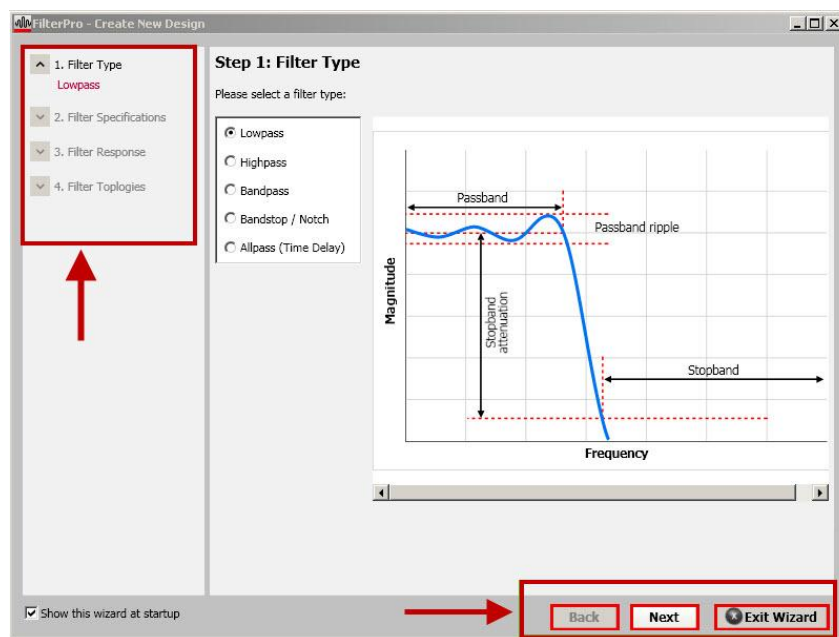


图 39 不正确的设计向导外观

根据下列步骤可以更改设置，以便使设计向导如图 38 所示：

步骤 1：右键单击我的电脑，选择属性，如图 40 所示。



图 40 从桌面菜单选择属性

步骤 2: 在高级选项卡中，点击性能下面的设置，如图 41 所示。

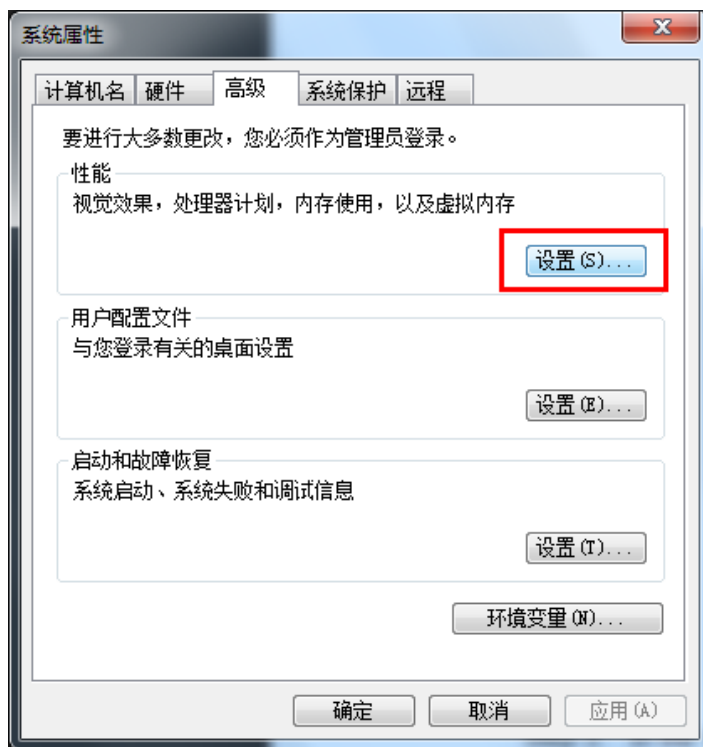


图 41 系统属性的设置按钮

步骤 3: 在性能选项的弹出窗口的‘视觉效果’选项卡中，选择选项“让 Windows 选择计算机的最佳设置”，如图 42 所示。

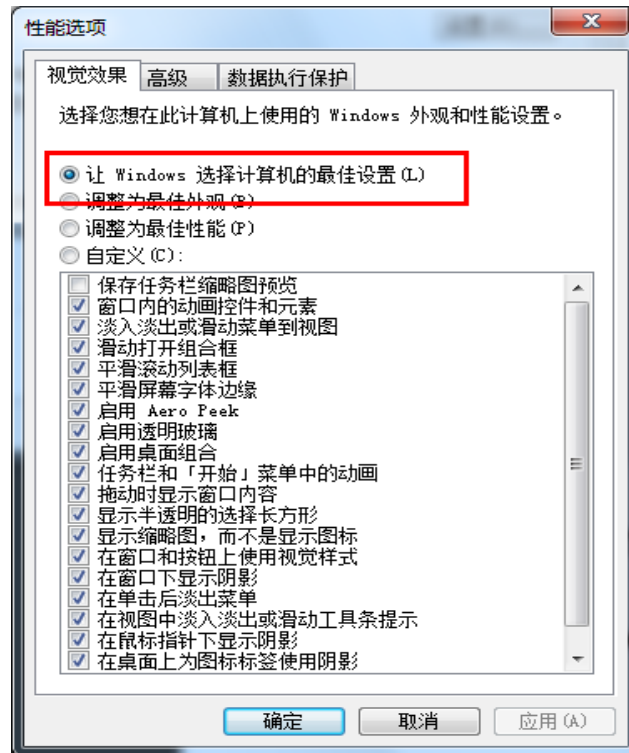


图 42 选择性能选项

3 滤波器设计示例

本节以五阶 20KHz 的巴特沃兹、3dB 切比雪夫和贝塞尔低通滤波器为例，介绍 FilterPro 的使用步骤及不同响应类型、不同拓扑结构的滤波器的设计方法。

首先介绍上述五阶滤波器的设计步骤，然后分别介绍按照 Sallen-Key 或 MFB 拓扑结构设计出的三种响应的滤波器。

3.1 五阶滤波器的设计步骤

Step1: 点击 File->New->Design，弹出设计向导，选择滤波器类型为低通滤波器，如图 43 所示，点击 Next 进入下一步。

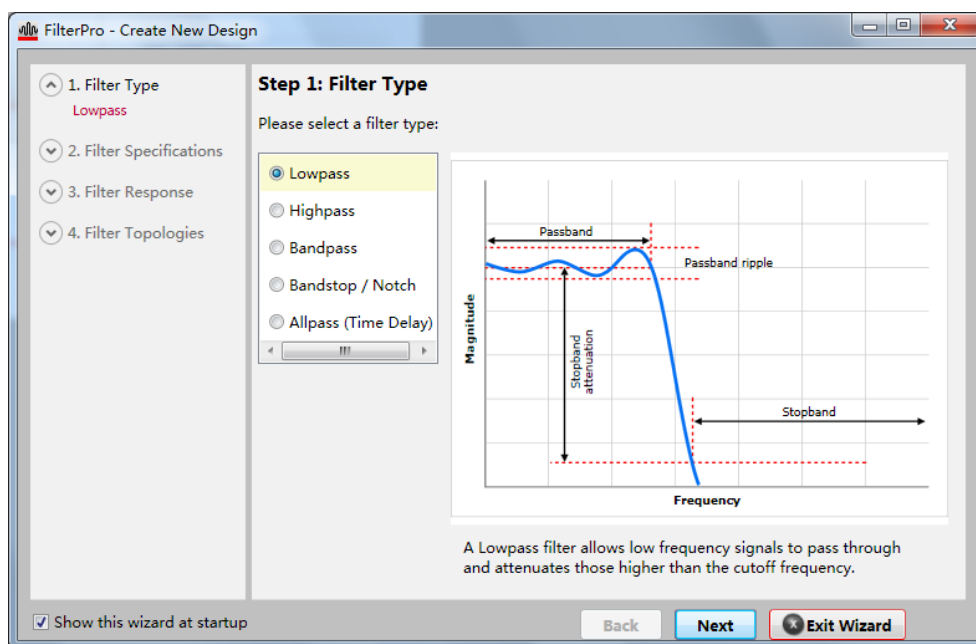


图 43 选择滤波器类型

Step2: 输入滤波器参数，通带增益为 0dB，通带频率为 20000Hz，允许的通带纹波为 3dB，设置滤波器阶数为 5，不需要输入阻带频率和阻带增益，如图 44 所示。

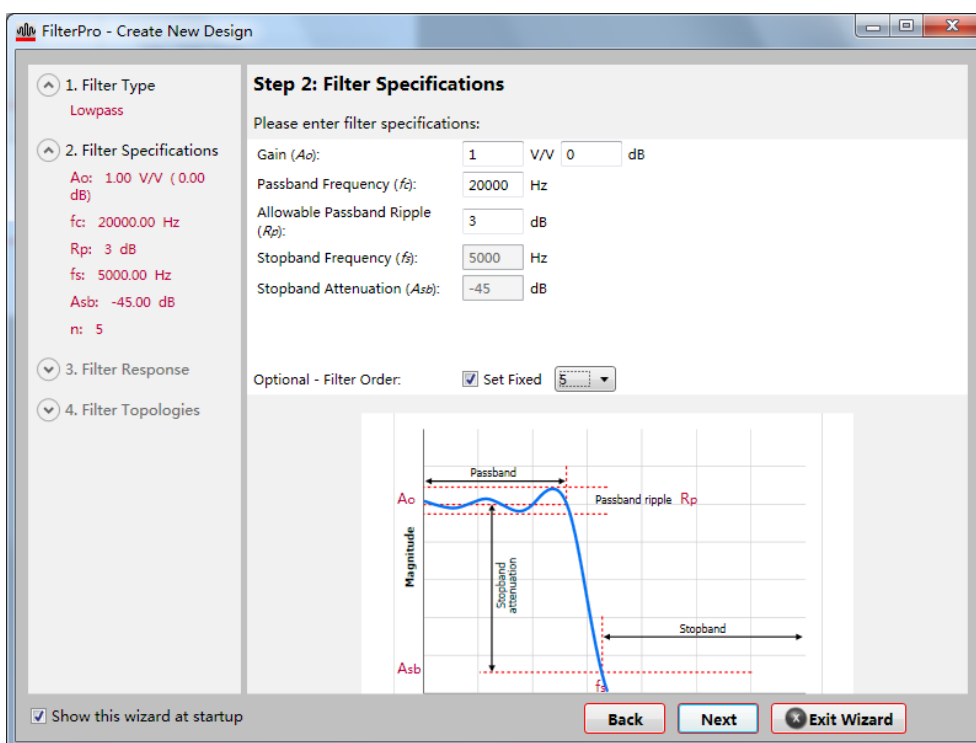


图 44 填写滤波器参数

Step3: 选择滤波器响应为巴特沃兹、3dB 切比雪夫或贝塞尔，如图 45 所示。

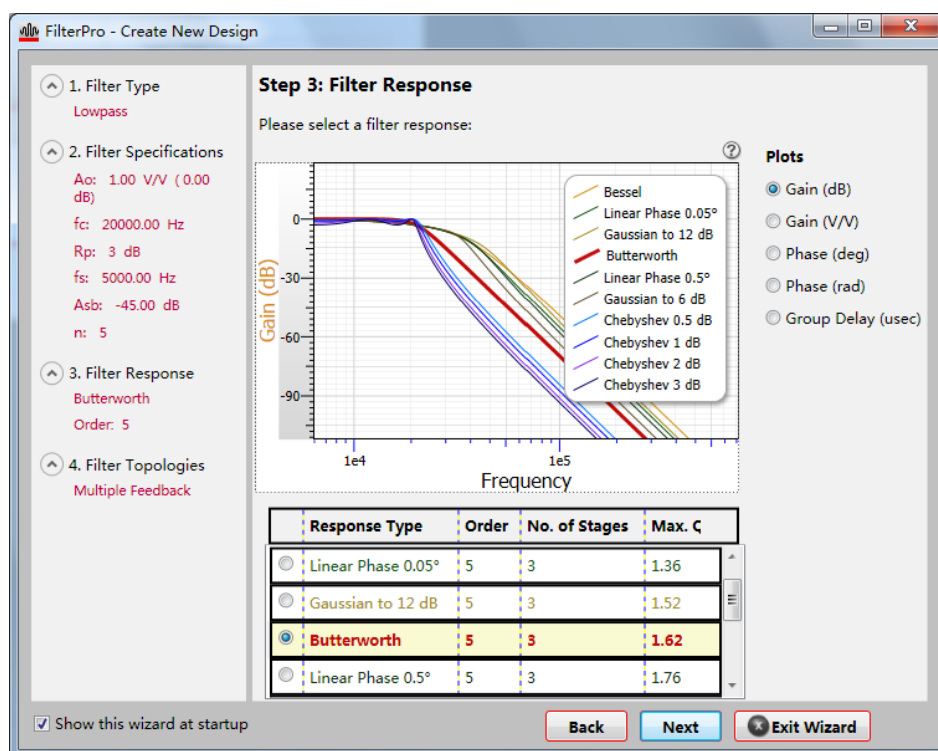


图 45 选择滤波器响应

注意：转动鼠标滚轮可以缩放图中的响应曲线，按住鼠标左键拖动可以拖动响应曲线，双击图中的响应曲线可以恢复为初始状态。

Step4: 选择拓扑结构为 Sallen-Key 或 MFB 形式。选中相应的拓扑结构以后，图中会给出简单的说明及电路图，如图 46 所示。

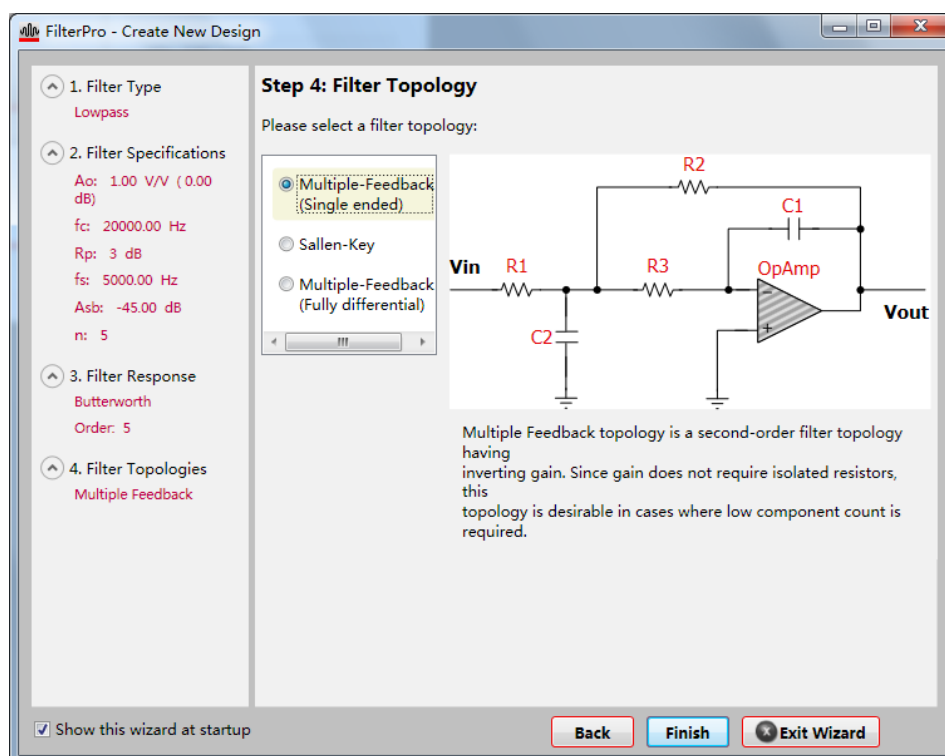


图 46 选择滤波器拓扑

根据上述步骤，设计出的 Sallen-Key 和 MFB 拓扑结构的滤波器电路及响应分别如 3.2、3.3 节所述。

3.2 Sallen-Key 滤波器响应示例

3.2.1 五阶 20KHz Sallen-Key 结构巴特沃兹滤波器电路及响应

如图 47 所示为五阶 20KHz Sallen-Key 结构的巴特沃兹滤波器电路及响应，可以看出，巴特沃兹滤波器幅频响应的通带没有纹波。

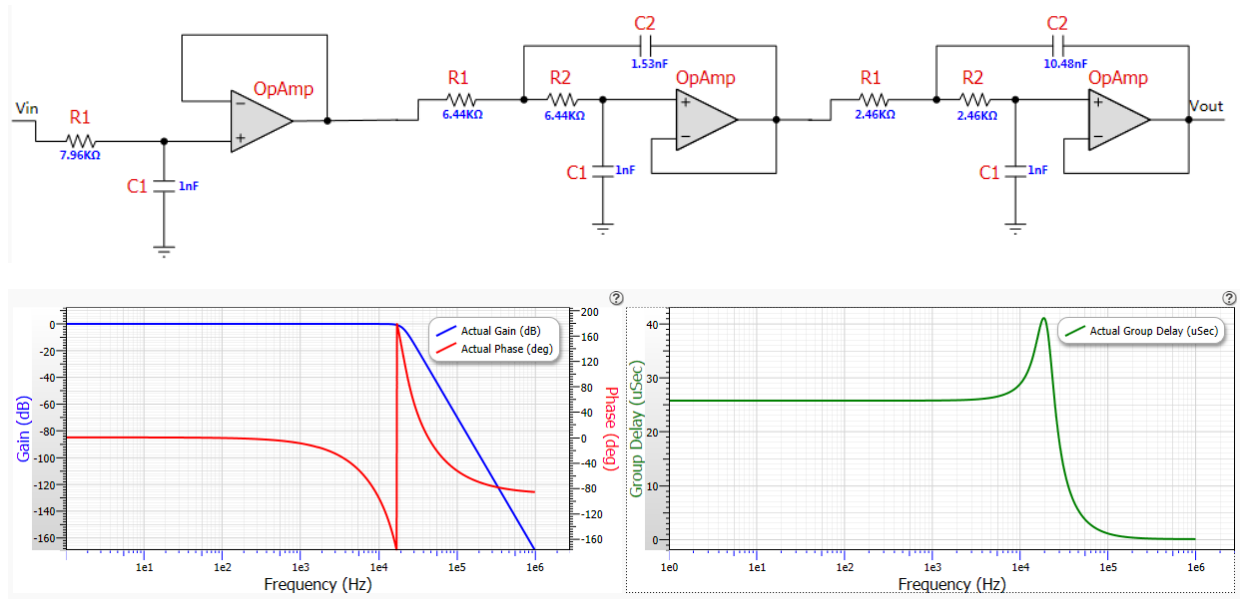
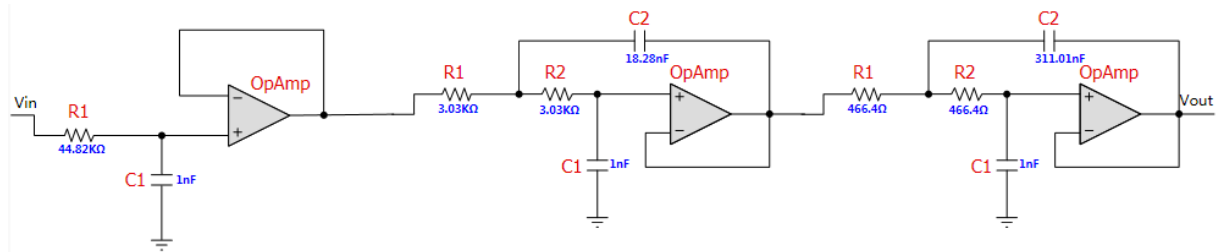


图 47 上：电路原理图 左：幅频和相频响应 右：群延迟

3.2.2 五阶 20KHz Sallen-Key 结构 3dB 切比雪夫滤波器电路及响应

如图 48 所示为五阶 20KHz Sallen-Key 结构的 3dB 切比雪夫滤波器电路及响应。



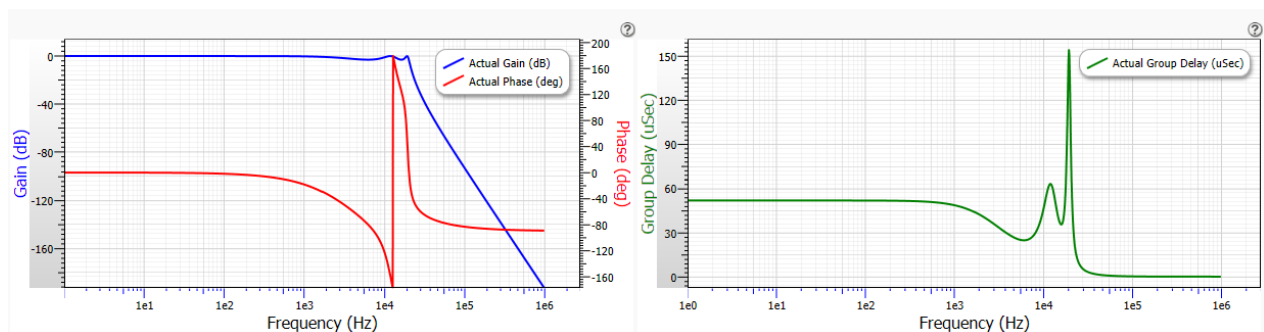


图 48 上：电路原理图 左：幅频和相频响应 右：群延迟

3.2.3 五阶 20KHz Sallen-Key 结构贝塞尔滤波器电路及响应

如图 49 所示为五阶 20KHz Sallen-Key 结构的贝塞尔滤波器电路及响应。

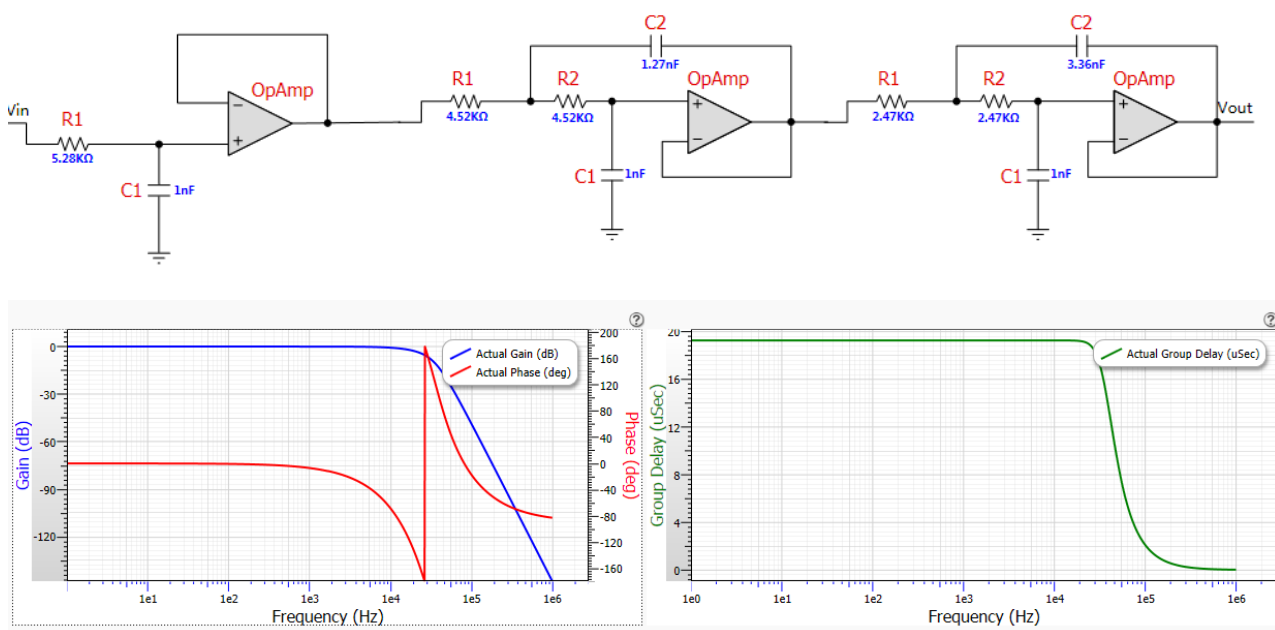
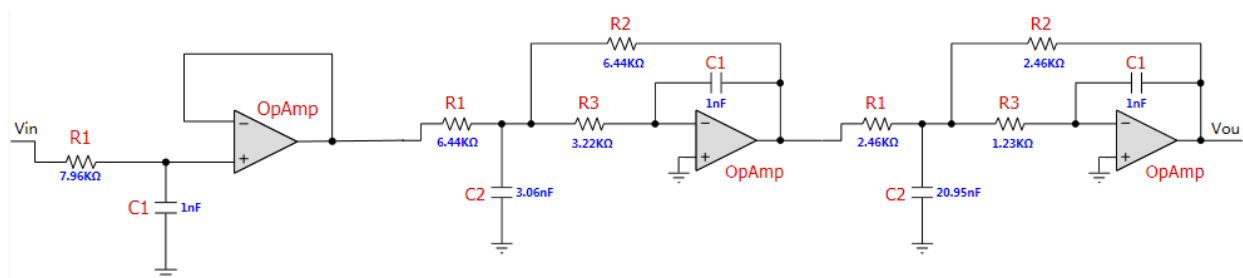


图 49 上：电路原理图 左：幅频和相频响应 右：群延迟

3.3 MFB 滤波器响应示例

3.3.1 五阶 20KHz MFB 结构巴特沃兹滤波器电路及响应

如图 50 所示为五阶 20KHz MFB 结构的巴特沃兹滤波器电路及响应。



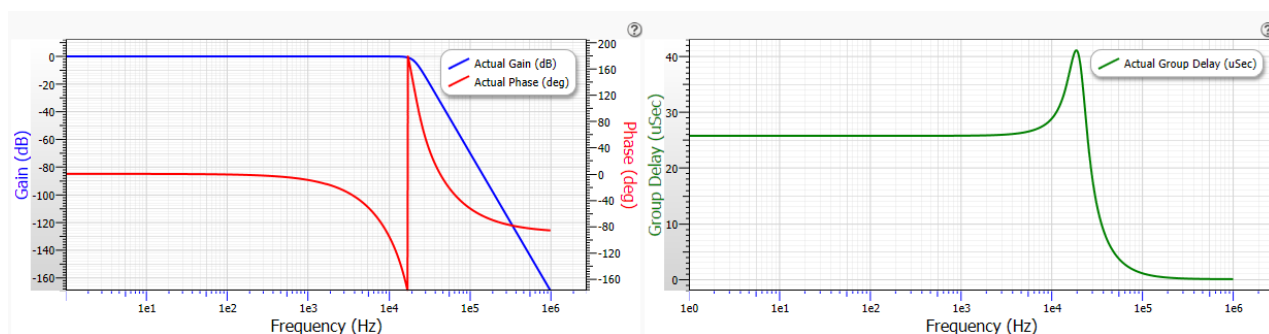


图 50 上：电路原理图 左：幅频和相频响应 右：群延迟

3.3.2 五阶 20KHz MFB 结构 3dB 切比雪夫滤波器电路及响应

如图 51 所示为五阶 20KHz MFB 结构的 3dB 切比雪夫滤波器电路及响应。

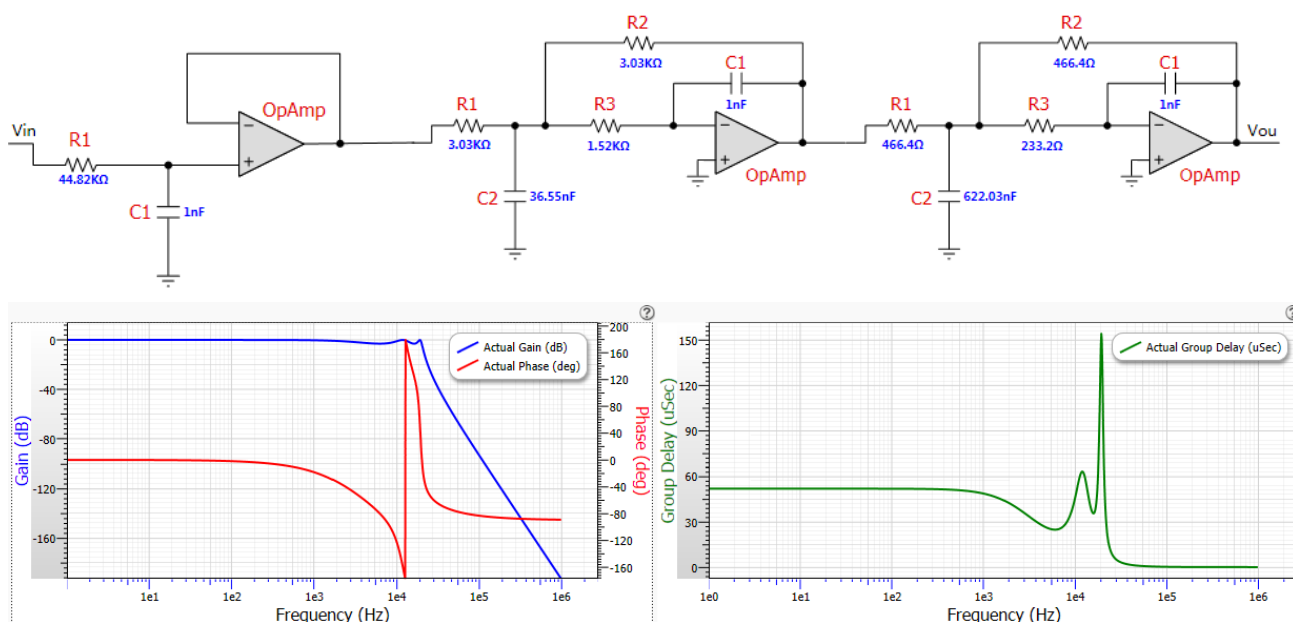
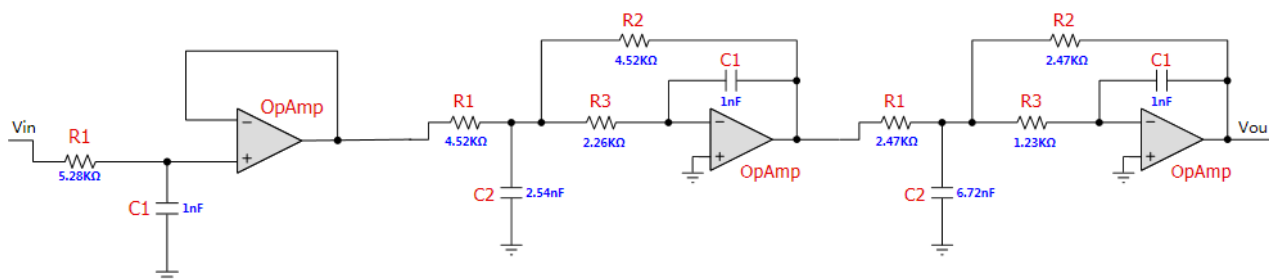


图 51 上：电路原理图 左：幅频和相频响应 右：群延迟

3.3.3 五阶 20KHz MFB 结构贝塞尔滤波器电路及响应

如图 52 所示为五阶 20KHz MFB 结构的贝塞尔滤波器电路及响应。



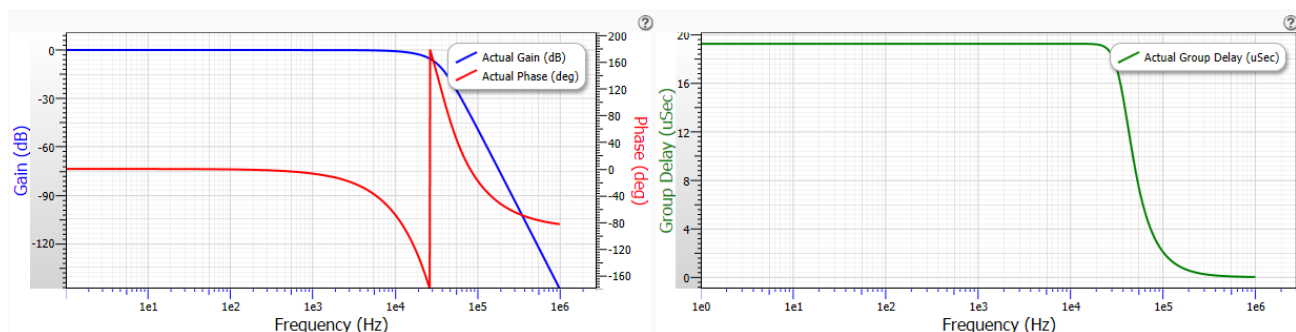


图 52 上：电路原理图 左：幅频和相频响应 右：群延迟

3.3.4 五阶 20KHz MFB 结构滤波器电路实现及实际响应

图 53 和图 54 展示了用 FilterPro 设计的五阶 20KHz 的巴特沃兹、3dB 切比雪夫和贝塞尔滤波器的实际测量的幅频曲线。所有滤波器使用的运放都是 OPA627。从图 53 可以看出，切比雪夫滤波器的开始滚降较快，而贝塞尔滤波器的滚降是最慢的。但是，这三个五阶滤波器的最终滚降均为 $-N \times 20\text{dB}/\text{十倍频程}$ 即 $-100\text{dB}/\text{十倍频程}$ ， N 是滤波器阶数。

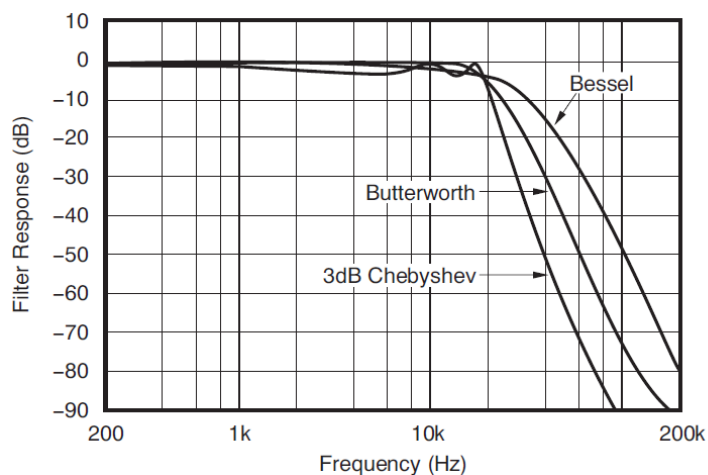


图 53 5 阶 20KHz 巴特沃兹、切比雪夫、贝塞尔单位增益 MFB 低通滤波器的幅频特性曲线，所示为全过程响应

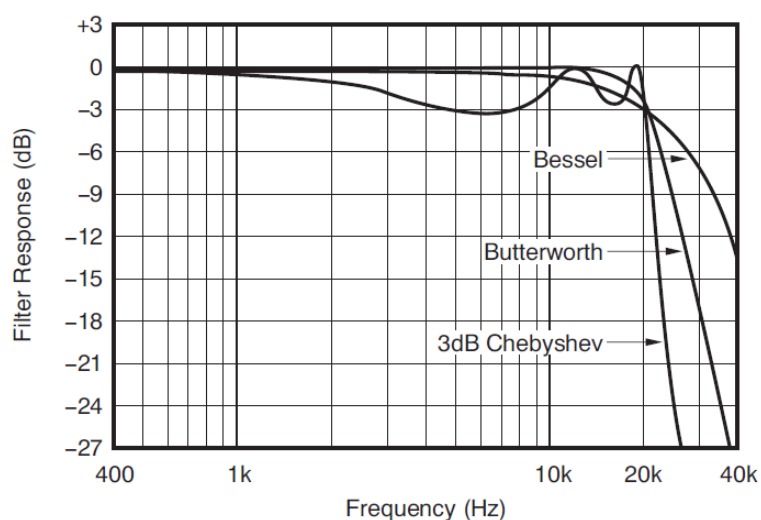


图 54 5 阶 20KHz 巴特沃兹、切比雪夫、贝塞尔单位增益 MFB 低通滤波器的幅频特性曲线，所示为过渡带响应

图 55 到图 57 所示的示波器图像显示了每个滤波器的阶跃响应。与预期的一致，切比雪夫滤波器具有最多的振铃，而贝塞尔滤波器的最少。图 58 展示了三个滤波器的失真随频率变化的关系，贝塞尔滤波器的失真整体较小。



图 55 5 阶 20KHz 巴特沃兹 MFB 低通滤波器的阶跃响应

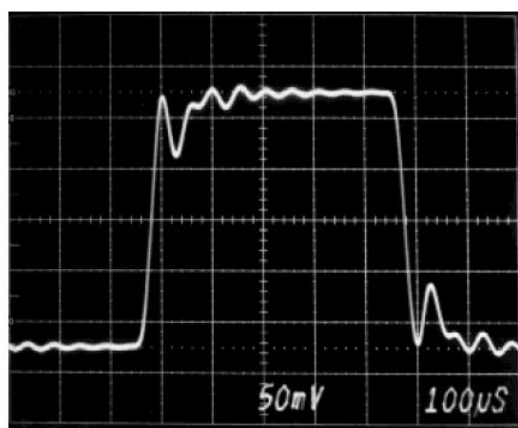


图 56 5 阶 20KHz 切比雪夫 MFB 低通滤波器的阶跃响应

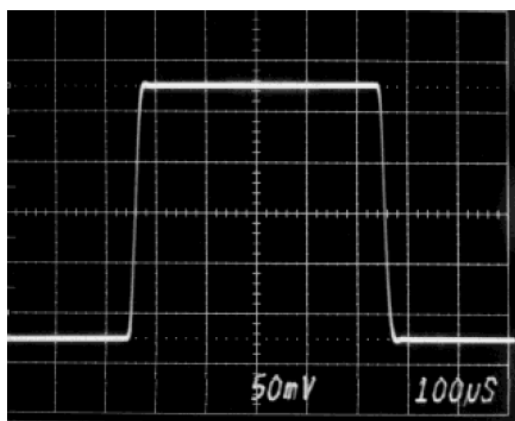


图 57 5 阶 20KHz 贝塞尔 MFB 低通滤波器的阶跃响应

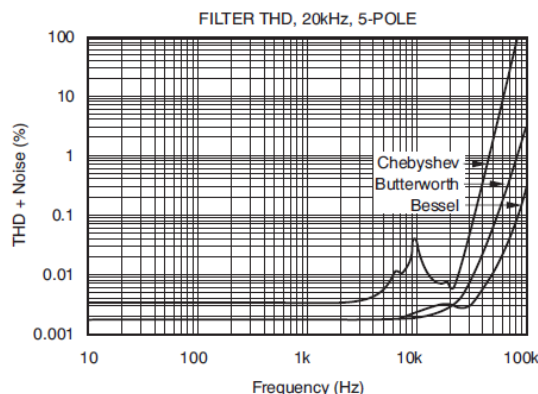


图 58 三种 20KHz MFB 低通滤波器的测量失真

4 滤波器的实现

实现滤波器关键是选择好电容和运放。

4.1. 电容选择

对高性能的滤波器而言，电容的选择极为重要。实际电容的性能可能与理想状态相距甚远，将引入串联电阻及电感，从而限制 Q 值。同时，电容值随电压非线性地改变将导致输出信号失真。

普通的陶瓷电容，例如 high-K 类型，具有较高的介电常数，可能导致滤波器的误差。推荐的电容类型为：NPO 陶瓷、银云母(silver mica)、金属化聚碳酸酯；对于温度高达 85°C 的情况，推荐类型为聚丙烯或聚苯乙烯。

4.2. 运放选择

选择满足直流精度、噪声、失真及速度需求的运放是非常重要的。FilterPro 默认使用的是理想的运放。德州仪器提供了多种高品质的运算放大器，可用于高性能的有源滤波器。为了帮助运放选型，FilterPro 的原理图选项卡中，每一级的极点对下面都显示了其 f_n 和 Q ，当通过比较每一级滤波器的实际响应与目标响应的不同来寻找滤波器问题时，这两个参数是有用的信息。

为滤波器选择运放时需要评估的参数包括以下几项。

4.2.1 运放增益带宽积 (GBP)

低通滤波器部分的最大增益峰值近乎等于频率为 f_n 时的 Q 值。因此，经验

的方法为：

- 对于 MFB 滤波器：运放的 GBP 至少为 $100 \cdot \text{GAIN} \cdot Q \cdot f_n$ 。
- 对于 Sallen-Key 滤波器：高 Q 值的 Sallen-Key 滤波器需要更高的运放增益带宽积。Q>1 时，运放的 GBP 至少为 $100 \cdot \text{GAIN} \cdot Q^3 \cdot f_n$ ；Q≤1 时，运放的 GBP 应大于 $100 \cdot \text{GAIN} \cdot f_n$ 。
- 对于实极点部分：运放的 GBP 应大于 $50 \cdot f_n$ 。

尽管 Q 值在形式上仅取决于复极点，但仍可使用 Q=0.5 简便地计算实极点部分对运放增益的需求。

例如，单位增益、带宽为 20kHz、5 极点、3dB 纹波的切比雪夫 MFB 滤波器，第二组极点对的 f_n 为 19.35kHz，Q 值为 8.82，则运算放大器单位增益带宽的需求至少为 17 MHz ($100 \cdot 1 \cdot 8.82 \cdot 19.35\text{kHz}$)。再例如，5 极点的巴特沃兹 MFB 滤波器，最小 Q 值为 1.62，则仅需要一个 3.2 MHz ($100 \cdot 1 \cdot 1.62 \cdot 19.35\text{kHz}$) 的运放。同样的 5 极点巴特沃兹滤波器当采用 Sallen-Key 拓扑实现时，高 Q 值部分需要一个 8.5 MHz 的运放。

注意：FilterPro 中的原理图选项卡中显示的对运放 GBP 的要求，没有考虑拓扑结构，都采用 $100 \cdot \text{GAIN} \cdot f_n$ 进行计算。

4.2.2 运放压摆率

为了实现适当的全功率响应(full-power response)，运放的压摆率必须大于 $\pi \cdot V_{opp} \cdot \text{滤波器带宽}$ 。例如，100 kHz 的滤波器，具有 20V_{pp} 的输出，要求运算放大器的转换速率至少为 6.3 V/μs。

4.2.3 全功率带宽

运算放大器的全功率带宽应至少为通过信号的最大带宽。

4.2.4 电流反馈放大器

尽管有可能将电流反馈放大器配置为滤波器，但使用 FilterPro 所定义的元件值，无论 MFB 拓扑还是 Sallen-Key 拓扑均不应用做低通滤波器。

4.2.5 全差分运放

FilterPro v3.1 可以在多反馈拓扑中使用全差分运放来设计全平衡的滤波器。图 59 展示了一个使用全差分运放的多反馈滤波器。

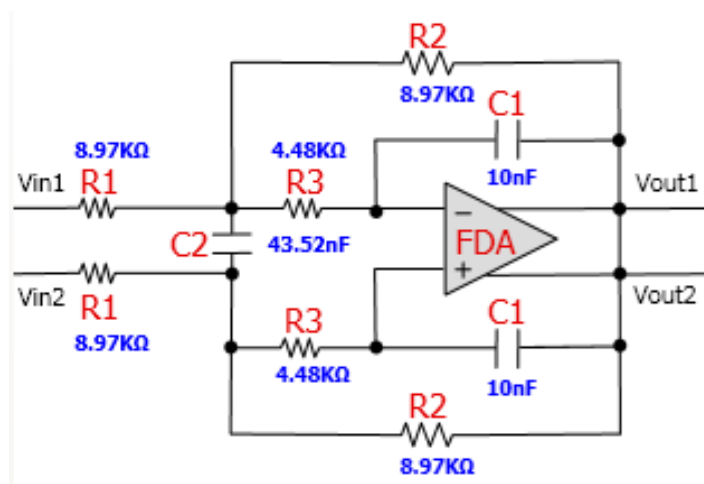


图 59 使用 FilterPro v3.1 设计的全差分多反馈滤波器示例

5 滤波器的其它设计方法

滤波器还可使用通用有源滤波器进行设计，如采用德州仪器的 UAF42 通用有源滤波器。该器件采用了经典的状态变量架构，即一个反相放大器和两个积分器组成极点对，可配置为各种各样的低通、高通、带通及带阻滤波器。积分器包括了片上的精度为 $\pm 0.5\%$ 的 1000pF 电容，解决了有源滤波器实现的最棘手问题，即以合理的成本获取小误差、低损耗的电容。

UAF42 简化了设计流程，允许实现巴特沃兹、切比雪夫、贝赛尔及其他类型的滤波器。UAF42 上额外的 FET 输入运算放大器可用于实现附加级或特定的滤波器类型，例如反切比雪夫滤波器。如需更多信息，可从 TI 网站下载 UAF42 的数据手册。

6 总结

使用 FilterPro，设计者不需要经过复杂的计算，即可为多种不同的应用设计多种类型、多种响应、Sallen-Key 和多路反馈拓扑结构的有源滤波器，大大提高了电路设计效率。

FilterPro 的帮助可以通过菜单栏的帮助菜单或者工具栏按键进行访问。