

基于单片机和 FPGA 设计的程控滤波器

以单片机和可编程逻辑器件（FPGA）为控制核心，设计了一个程控滤波器，实现了小信号程控放大、程控调整滤波器截止频率和幅频特性测试的功能。其中放大模块由可变增益放大器 AD603 实现，最大增益 60dB，10dB 步进可调，增益误差小于 1%。程控滤波模块由 MAX297 低通滤波、TLC1068 高通滤波及椭圆低通滤波器构成，滤波模式用模拟开关选择。本系统程控调整有源滤波的-3dB 截止频率，使其在 1~30kHz 范围内可调，误差小于 1.5%。此外，采用有效值采样芯片 AD637 及 12 位并行 A/D 转换器 MAX120 实现了对扫频信号幅度的测量。

滤波器是一种用来消除干扰杂讯的器件，可用于对特定频率的频点或该频点以外的频率进行有效滤除。它在电子领域中占有很重要的地位，在信号处理、抗干扰处理、电力系统、抗混叠处理中都得到了广泛的应用。而对于程控滤波器，该系统的最大特点在于其滤波模式可以程控选择，且-3 dB 截止频率程控可调，相当于一个集多功能于一体的滤波器，将有更好的应用前景。此外，系统具有幅频特性测试的功能，并通过示波器显示频谱特性，可直观地反应滤波效果。

1 方案论证与选择

1.1 可变增益放大模块的设计与论证

方案 1：数字电位器控制两级 INA129 级联。用 FPGA 控制数字电位器 DS1267 使其输出不同的阻值，作为高精度仪表放大器 INA129 的反馈电阻。通过控制数字电位器来改变 INA129 的放大倍数，从而实现放大器的增益可调。

方案 2：采用可变增益放大器 AD603 实现。可变增益放大器内部由 R-2R 梯形电阻网络和固定增益放大器构成，加在其梯型网络输入端的信号经衰减后，由固定增益放大器输出，衰减量是由加在增益控制接口的参考电压决定；可通过单片机控制，由 DAC 产生精确的参考电压控制增益，从而实现较精确的数控。

由于输入的正弦小信号振幅 10 mV，电压增益 60 dB，10 dB 步进程控可调，且电压增益误差不能大于 5%。对精度而言两个方案都可实现，在 AD603 后再加一级放大也可实现 60 dB 的放大倍数。但数字电位器内部结构复杂，有电容影响，后级接运放后会带来意想不到的后果，因此采用方案 2。

1.2 滤波器模块的设计与论证

方案 1：采用数字滤波器。利用 MATLAB 的数字滤波器设计 FIR 或者 IIR 滤波器。数字滤波器具有精度高，截止特性好等优点。但是 FIR 滤波器会占用太多 FPGA 资源，IIR 滤波器设计时工作量大且稳定性不高，且要使截止频率可调，必须使用不同的参数，设计起来软件量比较大。

方案 2：采用无源 LC 滤波器。利用电感和电容可以搭建各种类型的滤波器。参照滤波器设计手册上的相关参数，可以比较容易地设计出理想的滤波器。但是如果截止频率可调，只有改变电感电容参数，硬件会非常复杂。

方案 3: 采用集成的开关电容滤波器芯片。开关电容滤波器是由 MOS 开关、MOS 电容和 MOS 运算放大器构成的一种大规模集成电路滤波器。其开关电容组在时钟频率的驱动下, 可以等效成一个和时钟频率有关的等效电阻。当用外部时钟改变时, 等效电阻改变, 从而改变了滤波器的时间常数, 也就改变了滤波特性。开关电容滤波器可以直接处理模拟信号, 而不必像数字滤波器那样需要 A / D、D / A 变换, 简化了电路设计, 提高了系统的可靠性。

综上所述, 本系统采用方案 3, 利用集成芯片 MAX297 实现低通滤波器, 利用 LTC1068 实现高通滤波器; 采用方案 2, 利用无源 LC 滤波器技术来实现四阶椭圆低通滤波器。

2 系统总体设计方案及实现方框图

本系统以单片机及 FPGA 为控制核心, 由可控增益放大模块、程控滤波模块和幅频特性测试模块构成。系统框图如图 1 所示。输入振幅为 1 V 的信号经分压网络衰减后变成振幅 10 mV 的小信号, 经 OPA690 前级放大 2 倍, 同时起到阻抗变换和隔离的作用。与此同时由 AD9851 产生一设定频率的正弦信号, 通过模拟开关选择一道送到后级。信号由程序控制 AD603 进行 0~60dB 的可调增益放大后, 送入滤波模块。滤波模块包括低通、高通、椭圆滤波器, 其中低通、高通由程序控制-3 dB 截止频率在 1~30 kHz 范围内可调, 步进 1kHz。椭圆滤波器截止频率 50 kHz。再通过模拟开关选择某一特定滤波信号输出, 经有效值检波和 A / D 转换后送入 FPGA 进行幅频特性的测试, 再用两块 DAC0800 实现幅频特性曲线的显示。

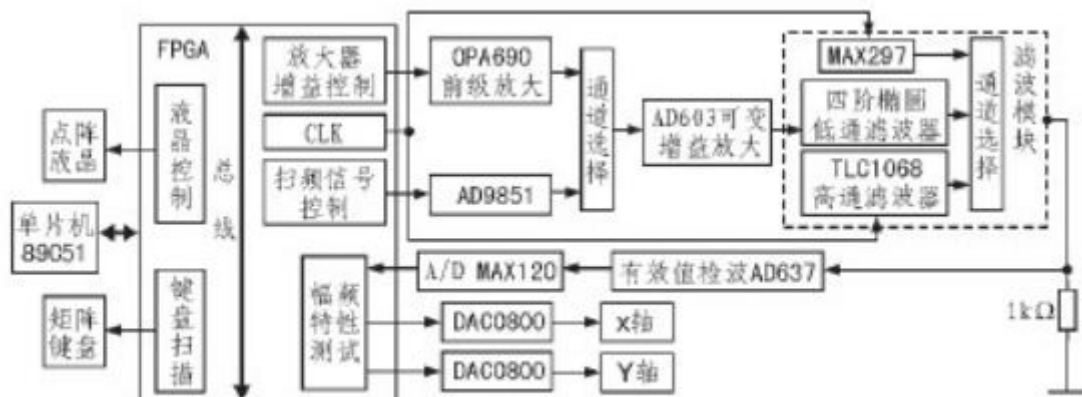


图 1 系统整体框图

3 主要功能电路设计

3.1 放大模块

放大模块的具体电路如图 2 所示。第一部分是一个分压网络, 其中前 4 个电阻将输入信号衰减 100 倍, 并与信号源内阻共同构成 51Ω 阻抗, 后面的 51Ω 为匹配电阻。第二部分采用 OPA690 将小信号放大 2 倍, 同时起到阻抗变换和隔离的作用。由于 AD603 输入阻抗为 100Ω, 所以在后面串接一个 100 Ω 的电阻进行匹配。第三部分即为 AD603 可变增益放大, 它的增益随着控制电压的增大以 dB 为单位线性增长。1 脚的参考电压通过单片机进行运算并控制 DAC 芯片输出电压来得到, 从而实现精确的数控。增益 $G(\text{dB})=40VG+G_0$, 其

中 VG 为差分输入电压，范围-500~500mV；G0 是增益起点，接不同反馈网络时也不同。在 5、7 脚间接一个 5kΩ 的电位器，从而改变。

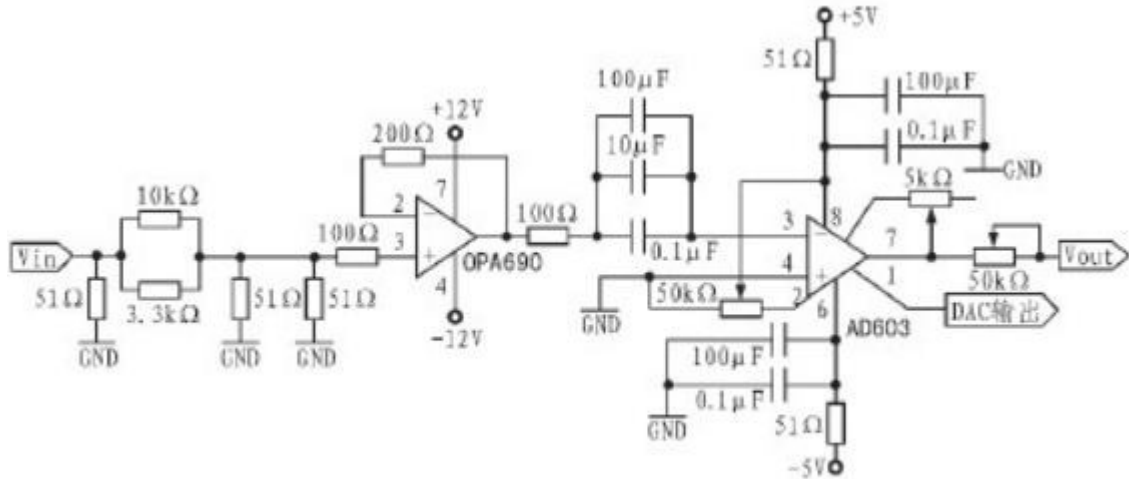


图 2 放大模块

3.2 高通滤波模块

LTC1068 是低噪声高精度通用滤波器，当其用于高通滤波时，截止频率范围 1 Hz~50 kHz，并且直至截止频率的 200 倍都无混叠现象。由于 LTC1068 的 4 个通道都是低噪声、高精度、高性能的 2 阶滤波器，因此每个通道只要外接若干电阻就可以实现低通、高通、带通和带阻滤波器的功能。具体电路如图 3 所示。其中 B 端口 Q 值 0.57，A 端口 Q 值约为 1。在电路的调试中发现，A 口的 Q 值需比 B 口 Q 值大，否则信号在截止频率处幅值会有上翘。

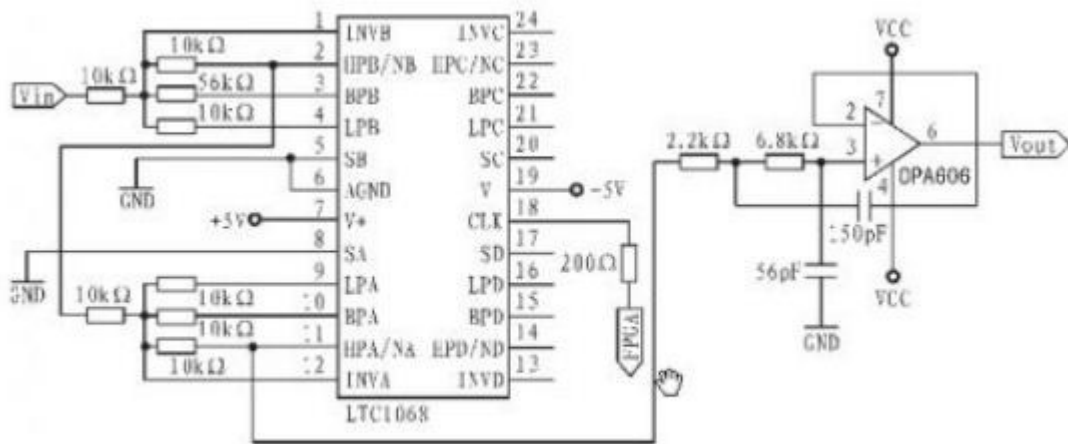


图 3 LTC1068 高通滤波

LTC1068 的时钟频率与通带之比为 200: 1，由于 LTC1068 内部对时钟信号 CLK 二倍频，所以当截止频率最小为 1 kHz 时，内部时钟频率其实为 400kHz，故在 LTC1068 后面再加一个截止频率为 450kHz 的低通滤波器以滤除分频带来的噪声及高次谐波。

3.3 低通滤波模块

用 MAX297 实现低通滤波器。开关电容滤波器 MAX297 可以设置为 8 阶低通椭圆滤波器，阻带衰减为 -80dB，时钟频率与通带频率之比为 50: 1。通过改变 CLK 的频率，即可满足滤波器 -3 dB 截止频率在 1~20kHz 范围内可调，步进 1 kHz 的要求。

在使用 MAX297 时要注意的，当信号频率和采样频率同频，开关电容组在电容上各次采到相同的幅度为信号幅值的信号，相当于输入信号为直流的情况，使滤波器输出一个直流电平。同理，当信号频率为采样频率的整数倍时，也会出现相同的现象。为此，在其前面，要增加模拟低通滤波器，把采样频率及其以上的高频信号有效地排除。故又用一级 MAX297，截止频率设置为 50kHz。其中时钟频率设置为 2.5 MHz。在其后面，也要增加低通滤波器，其截止频率为 150 kHz，以滤去信号的高频分量，使波形更加平滑。具体电路如图 4 所示。

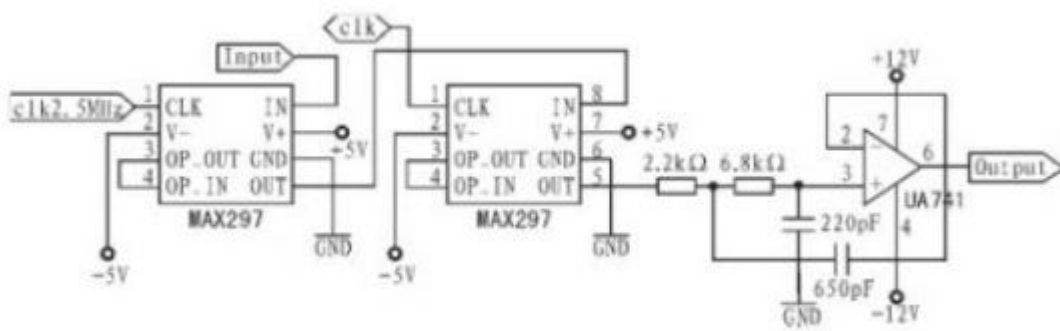


图 4 MAX297 低通滤波

3.4 四阶椭圆低通模块

系统要求制作一个四阶椭圆型低通滤波器，带内起伏 ≤ 1 dB，-3 dB 通带为 50 kHz，采用无源 LC 椭圆低通滤波器来实现。用 Filter Solution 模拟仿真滤波器，随后在 Multisim 中再模拟仿真并调整电容、电感的参数使其为标称值。此外，在椭圆滤波器前后接射级跟随器避免前后级影响。具体电路如图 5 所示。

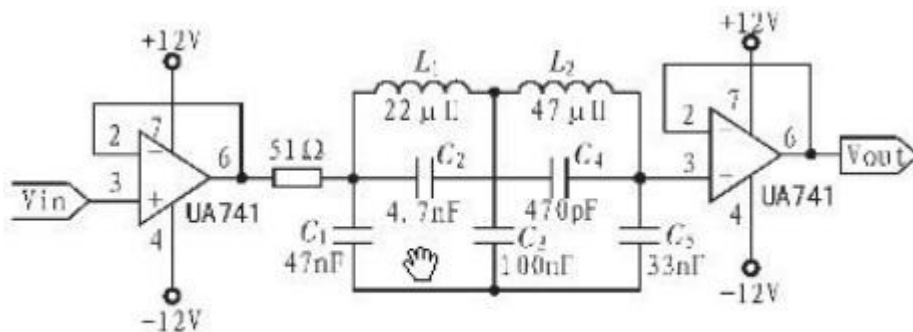


图 5 椭圆代通滤波

4 系统软件设计

系统软件设计由单片机和 FPGA 组成，用户可以通过界面的显示选择高通、低通和椭圆滤波器，可以设置截止频率，同时可以显示幅频曲线。其中单片机主要完成用户的输入输

出处理和系统控制，FPGA 主要完成的功能有：控制 AD9851 产生扫频信号、控制滤波器截止频率的时钟信号的产生以及控制两块 D / A 以显示幅频特性曲线。程序流程图如图 6 所示。

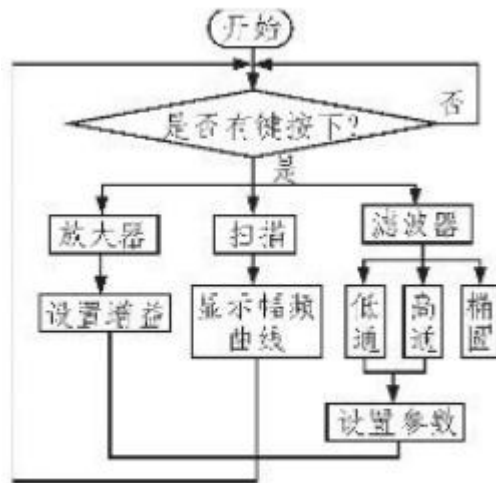


图 6 程序流程图

5 测试方案与测试结果

5.1 放大器测试

放大器输入端的正弦信号频率为 10 kHz，振幅为 10 mV，设定增益大小分别为 10、20、30、40、50、60dB，用示波器测量实际输出幅值，计算出实际增益，其误差小于 1%。此外，测得放大器通频带为 1~200kHz。

5.2 低通、高通滤波器测试

将放大器增益设置为 40dB，滤波器设置为低通滤波器，预置滤波器截止频率在 1~30 kHz 范围，步进为 1kHz。用示波器测量实际截止频率，计算相对误差小于 1.5%，且 2fc 处的电压总增益小于 20dB。高通滤波器测试方法同理。

5.3 椭圆滤波器测试

放大器增益设置为 40 dB，用示波器测量实际 -3 dB 截止频率和 200 kHz 处的总电压增益。测得 $f_c=50.0$ kHz，在 150 kHz 处幅度就已几乎衰减到 0。

5.4 幅频特性与相频特性测试

测量低通、高通滤波器的频率特性，在示波器上显示其幅频特性曲线，与所设置的滤波模式及截止频率相符。

6 结束语

本系统放大器增益范围 10~60 dB，通频带 1~200 kHz，增益误差小于 1%。滤波器截止频率范围 1~30kHz，误差小于 1.5%。椭圆滤波器截止频率误差为 0，在 150 kHz 处幅度几乎衰减到 0。误差主要来源于时钟频率，当截止频率为 20 kHz 的时候，所需最高的时钟频率为 2MHz，不能保证很好的时钟沿，而且时钟频率也不可能精确地控制，以及放大器的非线性误差。此外，利用 DAC0800 和有效值检波电路实现了幅频特性测试仪，系统



中国高科技行业门户

整体性能良好。整个系统在单片机和 **FPGA** 的有机结合、协同控制下，工作稳定，测量精度高，人机交互灵活。