

程控滤波器

摘 要：本系统有四个模块组成：程控放大器，程控滤波器，四阶椭圆低通滤波器，以及简易幅频特性测试仪。程控放大器放大电压增益为 60dB，增益 10dB 步进可调，电压增益误差不大于 5%。通频带 100Hz~200kHz，放大器输出无明显失真。由 MAX262 为核心的程控滤波器可设置为低通，高通滤波器，-3dB 截止频率在 1kHz~20kHz 范围内可调，调节的频率步进为 1kHz。四阶椭圆型低通有源滤波器，带内起伏≤1dB，-3dB 通带为 50kHz，要求放大器与低通滤波器在 200kHz 处的总电压增益小于 5dB，-3dB 通带误差不大于 5%。简易幅频特性测试仪输出扫频信号频率设置范围 100Hz~200kHz，频率 100Hz 步进可调。系统以 AT89S52 为控制核心，经测试验证，系统运行稳定，操作方便。

关键词：程控放大器，程控滤波器，椭圆滤波器，幅频特性测量

1 系统方案

1.1 设计需求

1.1.1 基本要求

(1) 放大器输入正弦信号电压振幅为 10mV，电压增益为 40dB，增益 10dB 步进可调，通频带为 100Hz~40kHz，放大器输出电压无明显失真。

(2) 滤波器可设置为低通滤波器，其-3dB 截止频率 f_c 在 1kHz~20kHz 范围内可调，调节的频率步进为 1kHz， $2f_c$ 处放大器与滤波器的总电压增益不大于 30dB， $R_L=1k\Omega$ 。

(3) 滤波器可设置为高通滤波器，其-3dB 截止频率 f_c 在 1kHz~20kHz 范围内可调，调节的频率步进为 1kHz， $0.5f_c$ 处放大器与滤波器的总电压增益不大于 30dB， $R_L=1k\Omega$ 。

(4) 电压增益与截止频率的误差均不大于 10%。

(5) 有设置参数显示功能。

1.1.2 发挥部分

(1) 放大器电压增益为 60dB，输入信号电压振幅为 10mV；增益 10dB 步进可调，电压增益误差不大于 5%。

(2) 制作一个四阶椭圆型低通滤波器，带内起伏≤1dB，-3dB 通带为 50kHz，要求放大器与低通滤波器在 200kHz 处的总电压增益小于 5dB，-3dB 通带误差不大于 5%。

(3) 制作一个简易幅频特性测试仪，其扫频输出信号的频率变化范围是 100Hz~200kHz，频率步进 10kHz。

1.2 整体方案

基本部分使用集成开关电容滤波芯片 MAX262 完成四阶低通、高通滤波器设计。程控放大器电路由小信号放大电路与 DA 衰减电路构成，可实现小信号放大增益 60dB，增益 10dB 步进可调。幅频特性测试仪由 DDS AD9854 产生扫频信号，有效值采集电路测量被测网络的输出信号的有效值。四阶椭圆低通滤波器通过滤波器设计软件根据题目设置参数生成，电路是由六运放组成的有源低通滤波器。可以实现题目发挥部分要求。由于单片 AT89S52 I/O 口有限，系统采用多机控制，3 I/O 口 4×4 键盘输入，中文液晶显示，友好人机交互界面，系统控制简单，工作稳定。

1.3 系统框图

1.3.1 程控滤波系统框图

单片机主机为系统控制核心控制键盘输入放大倍数与截至频率，并由液晶显示出来。从机 1 控制程控放大电路的放大倍数，从机 2 设置时钟源频率，为滤波电路提供稳定的工作时钟，以设置滤波器的截止频率，框图如下：

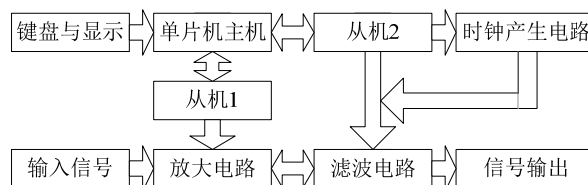


图 1 系统框图

1.3.2 简易幅频特性系统框图

简易幅频特性测试仪系统框图如图 2 所示，其中扫频信号源由 DDS 实现，可输出频率范围的正弦信号，通过有效值检测芯片 AD637 和 AD 转换器测出有效值，由单片机转换为峰值，从而实现峰值检测，通过液晶显示模块显示幅频特性曲线。

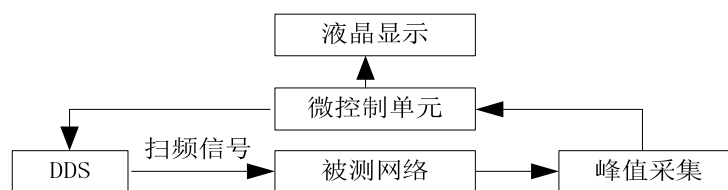


图 2 幅频特性测试仪构成

2 理论分析与计算

2.1 程控放大电路

程控放大有小信号放大与 DA 衰减两部分组成。由于 DA 衰减电路对输入信号的衰减倍数由 DA 的位数 D 决定，即可实现输出 V_o 为输入 V_i 的 $D/2^D$ 衰减，要题目要求最大增益 60dB，因此选择 10 位 DA 可实现对输入信号的 0~1023 倍步进可调。结合 10 位的 DA 对信号的衰减，小信号放大电路设置为固定 1000 放大。

2.2 程控滤波器设计

程控滤波器以 MAX262 为核心，MAX262 集是双二阶开关电容有源滤波器。由微处理器精确控制滤波函数可构成低通、高通、带通等滤波器，且不需外部器件。他含有两个二阶滤波器，在程序控制下设置中心频率 f_0 ，品质因数 Q 和滤波器工作方式。输入时钟与 6 位 f_0 编程输入代码一起决定滤波器的中心或截至频率，不影响其他滤波参数。Q 值也可独立编程，具体公式见(2)。滤波器的截至频率通过改变 MAX262 的时钟信号 fclk 的频率与 MAX262 的频率控制字 N 调节，fclk 与 N 的函数关系见公式(1)。N 设为固定值，即通过改变时钟信号 fclk 就可以控制滤波器的截至频率。因此采用 AD9854 集成 DDS 芯片为其产生稳定的可控的时钟信号源。通过改变 AD9854 的输出信号可以设定滤波器的截至频率。

$$f_{clk} = (26 + N)\pi / 2 \quad (1)$$

$$Q = 64 / (128 - N) \quad (2)$$

f_0 ，Q 值的设定如表 1 所示。

表 1 f₀, Q 值的设定参考表

参考频率源 f _{clk} 范围		截止频率 f ₀ :f _{clk} /(26+N)×1.57(模式 1, 3, 4)范围
Q=1	40Hz~4.0MHz	1.0Hz~140KHz
Q=8	40Hz~2.5MHz	1.0Hz~60KHz
Q=64	40Hz~1.5MHz	1.0Hz~37KHz
Q=90	40Hz~0.9MHz	1.4Hz~32KHz

2.3 椭圆滤波电路

通过 Filter Solutions 2006 滤波器设计软件, 输入题目要求设置参数, 软件经过理论计算以及仿真测试, 然后生成四阶椭圆有源低滤波电路。软件同时生成该滤波器的传输函数如下:

$$\frac{1.131e-04 (S^2 - 1.836e+04*S + 1.944e+12) (S^2 + 6932*S + 1.085e+13)}{(S^2 + 1.967e+05*S + 2.601e+10) (S^2 + 8.418e+04*S + 9.183e+10)}$$

$W_n = 1.394e+06$ $W_n = 3.294e+06$
 $W_o = 1.613e+05$ $W_o = 3.03e+05$
 $Q = .82$ $Q = 3.6$

(3)

2.4 简易幅频特性系统

幅频特性测试仪, 由扫频信号源与有效值采集电路组成。扫频信号源需要频率与幅度可调的正弦信号源, 选用 DDS AD9854 可产生稳定性很高的频率幅度可调的信号, 输入信号由 AD637 采集有效值, 有效值电压芯片测试范围 0~7VRMS, AD 选用 12 位 AD 芯片 A7898-10 可提高测量范围与精度。

3 单元电路设计与程序设计

单元电路主要由四个模块组成, 分别是程控放大电路, 程控滤波电路, 四阶椭圆低通滤波器电路, 幅频特性测试仪电路组成。

3.1 程控放大模块

3.1.1 小信号放大部分的的设计

小信号放大电路采用仪用放大电路。主要由单双转换电路与仪用放大电路组成。如图 3。输入信号经过单双转换电路后由单端信号转换为双端信号送往仪用放大电路进行放大处理。这样可以大大的降低共模信号对系统的影响, 防止放大电路产生自激现象。为了提高电路的共模抑制比在仪用放大电路的第一级输出取出共模信号, 通过运放反馈到电源地, 使得运放的电源地跟随共模信号浮动, 这样前置放大器的共模抑制比提高了 CMRR1 倍。

具体电路图见附录 2: 图 1。

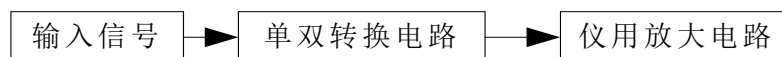
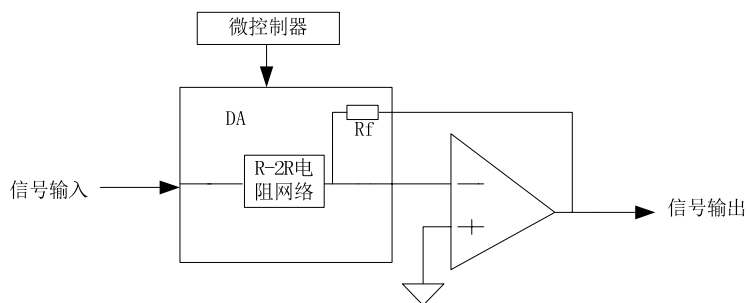


图 3 DA 衰减电路示意图

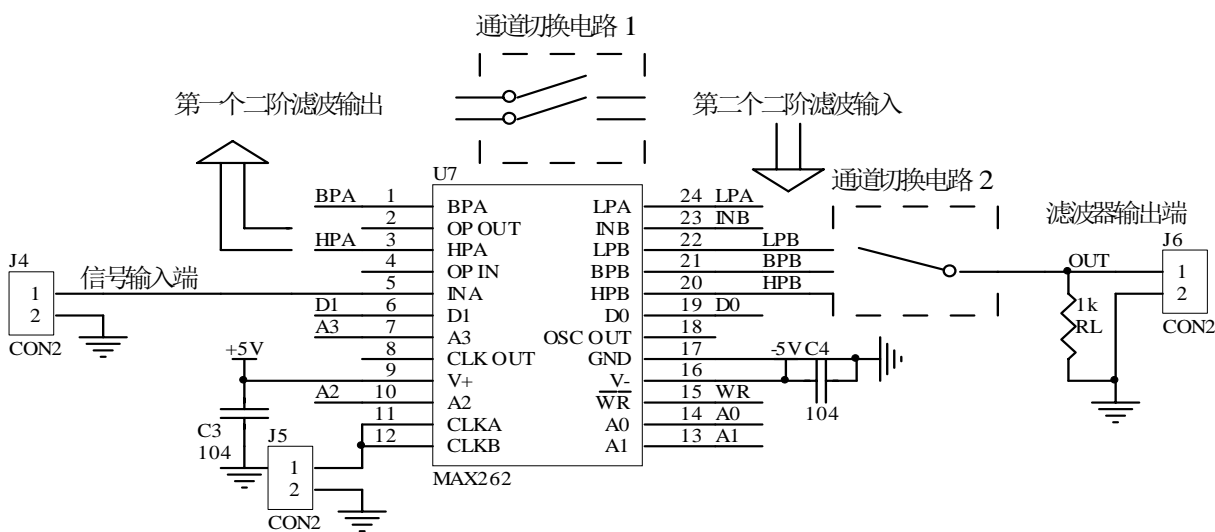
3.1.2 DA 衰减部分的设计

使用了 D/A 元件作为衰减控制, 我们选用的 10 位 D/A 转换器 AD7533, 其内部有

CMOS 电流开关和 R-2R 电阻网络组成,如图 4。只需要改变 AD7533 的输入数 D 即可实现输出 V_o 为输入 V_i 的 $D/1024$ 。前级经过固定放大 1000 倍的小信号放大电路作为 AD7533 参考电压,只需通过单片机往 AD7533 送控制数字 D 即可实现信号的 $D/1024$ 衰减。通过 DA 衰减电路可实现对输入信号最大的阿 1024 倍放大,1 倍~1023 倍步进可调的程控放大电路,指标可以实现题目增益 40dB,10dB 步进的要求。



3.2 程控滤波模块的设计



3.3 四阶椭圆滤波模块的设计

3.4 幅频特性测试仪模块的设计

后转换为与被测信号的有效值有关的直流电压信号，通过 AD7898 采集的正弦信号的电压信息回送微控制器，由微控制器换算出电压信号的峰值并将被测网络在测量频段内对应点的电压值由液晶显示。具体电路图见附录 2：图 5。

3.5 软件设计

软件部分主要由程控滤波程序设计与幅频特性测试程序设计构成。

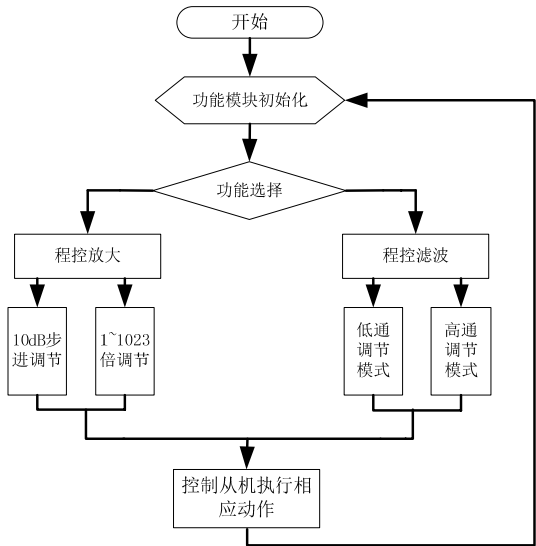


图6 程控滤波模块流程图

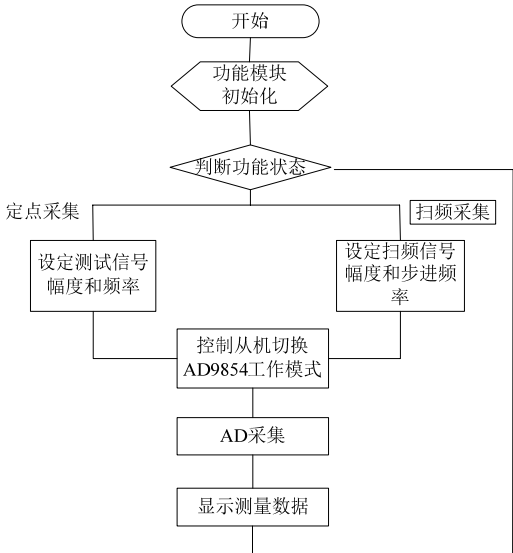


图7 幅频特性测试仪模块流程图

4 系统测试

4.1 测试使用的仪器

Agilent 33250A 函数信号发生器 Tektronix TDS 2012 数字示波器 SS7200 通用智能计数器

4.2 指标测试与测试结果

4.2.1 程控放大器的测试

测试方法：放大倍数有键盘设定好增益,输入端加正弦信号,在输出端用示波器测量输出电压幅度,计算电压增益,观察与设定的增益关系.调节增益然后重复测量.改变输入信号幅值与频率重复测量。并记录数据。

表 2：程控放大器增益测试 测试条件：输入信号 20mv-pp

增益 频率 (KHz)	10dB	20dB	30dB	40dB	50dB
0.1	0.040V	0.224v	0.632v	2.06V	6.24V
1	0.038V	0.218V	0.652V	2.06V	6.48V
40	0.050V	0.218V	0.624V	1.96V	6.12

4.2.2 程控滤波的测试

测试工具:函数信号发生器,数字示波器.

测试方法:设定截止频率,输入端加上该频率的信号,用数字示波器观察其输出电压,调节输入信号频率,使电压增益为-3db，记录此时信号频率即为截止频率,对截止频率进

行步进,然后重复测量.将信号频率设定为 $2f_c$ (低通)或 $0.5f_c$ (高通), 测量总电压增益,与 30dB 相比较。

表 3: 低通滤波器测试 测试条件: 输入信号 20mv-pp 程控放大 40dB

截至频率 (KHz)	输入信号幅度 (V)	输出信号幅度 (V)	$2f_c$ 处信号幅度 (V)
1	2.08	1.40	0.600
10	2.08	1.40	0.560
20	2.08	1.36	0.540
-3dB 误差 (%)		3.9	

表 4: 高通滤波器测试 测试条件: 输入信号 20mv-pp 程控放大 40dB

截至频率 (KHz)	输入信号幅度 (V)	输出信号幅度 (V)	$0.5f_c$ 处信号幅度 (V)
1	2.08	1.52	0.360
10	2.08	1.42	0.288
20	2.08	1.44	0.260

4.2.3 椭圆滤波器测试

测试方法: 测试信号由函数信号发生器产生, 改变信号频率测量椭圆滤波器-3dB 通带. 改变输入信号频率由示波器观察带内电压变化并计算带内起伏. 将信号调到 200KHz 观察其总电压增益. 测量数据绘出幅频特性曲线图如图 8。

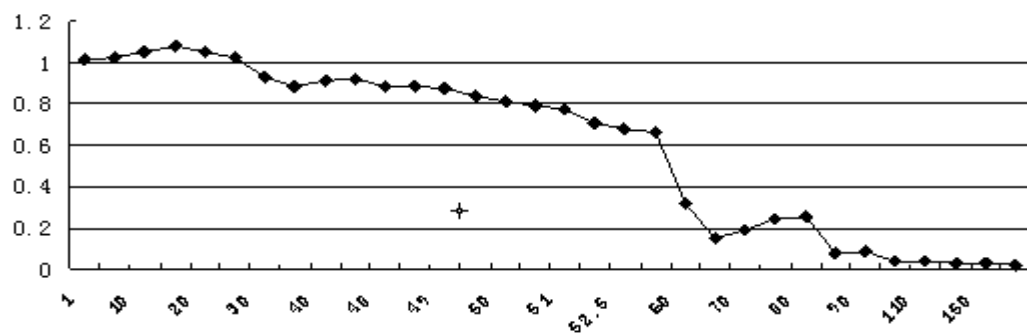


图 8 椭圆滤波器幅频特性曲线

4.2.4 扫频信号源测试

扫频信号由 DDS 输出 5V-pp, 频率 10Hz~200KHz, 10KHz 步进。具体表格见附录表五。

5 结束语

本系统有 AT89S52 单片与 MAX262, 基本实现了题目基本部分与发挥部分的要求, 部分指标甚至超过了题目的要求。电路控制简便另外采用节省 IO 资源的三口键盘作为输入, 中文液晶显示, 友好的人机交互界面。

参考文献

- [1] 康华光. 电子技术基础[M].第五版.武汉: 高等教育出版社, 2005.
- [2] 陈尚松,雷加, 郭庆.电子测量与仪器[M].北京: 电子工业出版社,2005.
- [3] 吴金戌,沈庆阳, 郭庭吉.8051 单片机实践与应用[M].北京:清华大学出版社.2002.

附录 1 部分参考程序

```
#include<reg52.h>
#include"ST7920GraphDisplayAdvanced.h"
#include"ThreeIOKeyboard.h"
#include"MultiMCUCommut.h"
void main(void)
{
    uchar temp = 0;
    Parallel_Init_LCD();           //液晶初始化
    Parallel_Clear_Ram();
    Parallel_ClearDisplay();
    InitUART();                   //串口初始化
    UART_ok = 1;                  //UART 一开始空闲,这句很重要!!!!
    EA = 1;
    UpdataDisplayTop();
    while(1)
    {
        Delay10ms(35);
        GetKeyValue();           //键盘扫描
        Delay10ms(35);
        switch(KeyRslt)
        {
            .....
            case 12:
                if(DisplayTop)
                {
                    if(DisplayTopSelect==1)
                    {
                        Parallel_ClearDisplay();
                        UpdataDisplayAmplify();
                        DisplayTop = 0;
                    }
                    else if(DisplayTopSelect==2)
                    {
                        Parallel_ClearDisplay();
                        UpdataDisplayFilter();
                    }
                }
            }
        }
    }
```

```

        DisplayTop = 0;
    }
}
else if(DisplayAmplify)
{
    //确认放大倍数,发送控制字 ,命令从机控制 DA 动作
    TB8 = 1;
    do
    {
        PutUARTchar(SLAVER_1_ADDRESS);           //呼叫从机 1
        temp = GetUARTchar();                     //接收从机 1 应答
    }
    while( temp!=SLAVER_1_ADDRESS );
    TB8 = 0;
    PutUARTchar(SetAmp);
    while(GetUARTchar()!=SetAmp)                  //握手信号
        PutUARTchar(SetAmp);
    PutUARTchar(AmplifyFactor/0x100);
    PutUARTchar(AmplifyFactor%0x100);
    TB8 = 1;                                       //通讯完毕
    Parallel_DisplayStrings_WithAddress(0x98,"确认触发!!");
}
else if(DisplayFilter==2)
{
    ReverseTypeFlag = 0;
    //确认低通频率设置,主机控制 AD9832 发送时钟,同时从机控制继电器动作
    TB8 = 1;
    do
    {
        PutUARTchar(SLAVER_1_ADDRESS);           //呼叫从机 1
        temp = GetUARTchar();                     //接收从机 1 应答
    }
    while( temp!=SLAVER_1_ADDRESS );
    TB8 = 0;                                       //握手完毕,开始通讯
    PutUARTchar(SetLowPass);
    while(GetUARTchar()!=SetLowPass)              //握手信号
        PutUARTchar(SetLowPass);
    TB8 = 1;                                       //与从机 1 通讯完毕
    do
    {
        PutUARTchar(SLAVER_2_ADDRESS);           //呼叫从机 2
        temp = GetUARTchar();                     //接收从机 2 应答
    }
    while( temp!=SLAVER_2_ADDRESS );
}

```



```

TB8 = 0; //握手完毕,开始通讯
PutUARTchar(SetFre);
while(GetUARTchar()!=SetFre) //握手信号
    PutUARTchar(SetFre);
switch(LowPassF0)
{
    .....
}
TB8 = 1; //与从机 2 通讯完毕
Parallel_DisplayStrings_WithAddress(0x98,"确认触发!!");
}
else if(DisplayFilter==3)
{
    ReverseTypeFlag = 0;
    //确认高通频率设置,主机控制 AD9832 发送时钟,同时从机控制继电器动作
    TB8 = 1;
    do
    {
        PutUARTchar(SLAVER_1_ADDRESS); //呼叫从机 1
        temp = GetUARTchar(); //接收从机 1 应答
    }
    while( temp!=SLAVER_1_ADDRESS );
    TB8 = 0; //握手完毕,开始通讯
    PutUARTchar(SetHighPass);
    while(GetUARTchar()!=SetHighPass) //握手信号
        PutUARTchar(SetHighPass);
    TB8 = 1; //与从机 1 通讯完毕
    do
    {
        PutUARTchar(SLAVER_2_ADDRESS); //呼叫从机 2
        temp = GetUARTchar(); //接收从机 2 应答
    }
    while( temp!=SLAVER_2_ADDRESS );
    TB8 = 0; //握手完毕,开始通讯
    PutUARTchar(SetFre);
    while(GetUARTchar()!=SetFre) //握手信号
        PutUARTchar(SetFre);
    switch(HighPassF0)
    {
    }
}
else if(DisplayFilter==5)
{
    ReverseTypeFlag = 0;
    Parallel_DisplayStrings_WithAddress(0x98,"确认触发!!");
}

```

附录 2 电路原理图

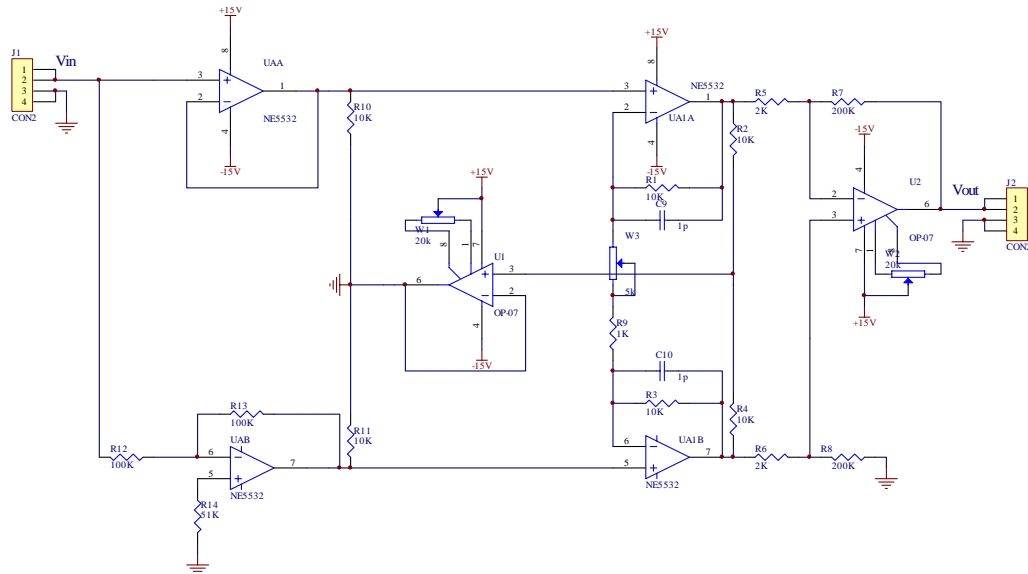


图 1 小信号放大电路

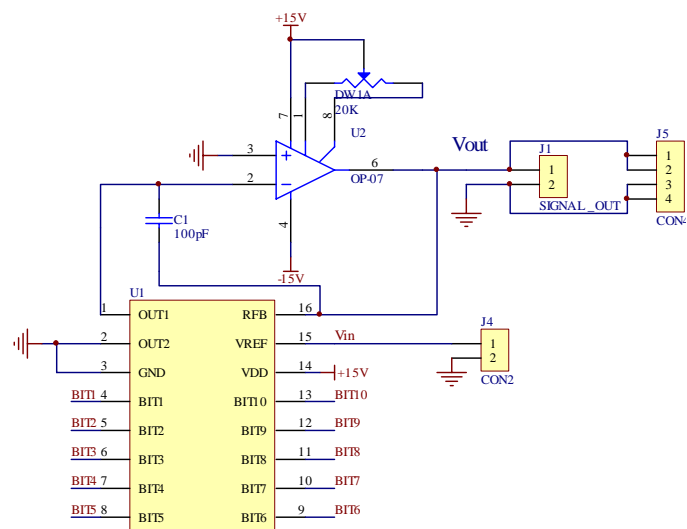


图 2 DA 衰减电路

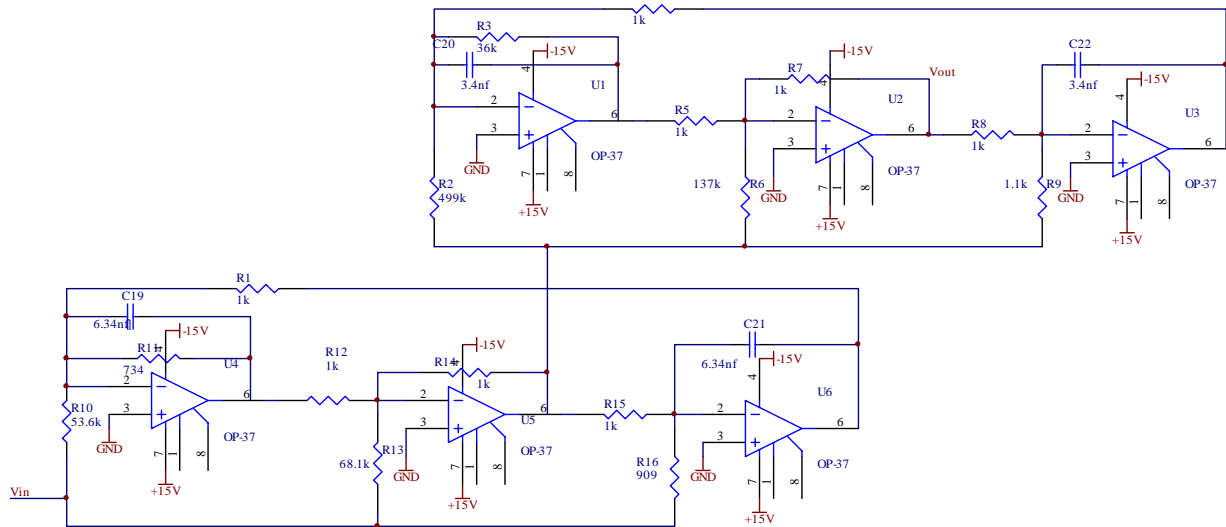


图 4 四阶椭圆滤波电路

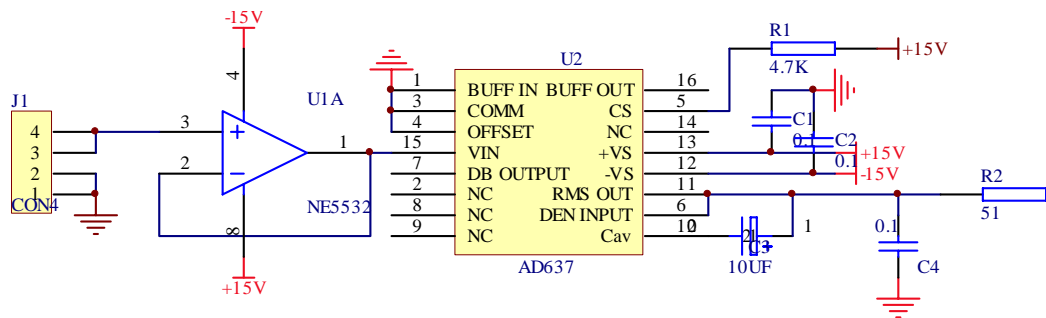


图 5 有效值采集核心电路

附录 3 电路数据测试表

表一：程控放大器增益测试

测试条件：输入信号 20mv-pp

增益 f(KHz)	10dB	20dB	30dB	40dB	50dB
0.1	0.040V	0.224v	0.632v	2.06V	6.24V
1	0.038V	0.218V	0.652V	2.06V	6.48V
10	0.042V	0.212V	0.636V	2.04V	6.36V
20	0.045V	0.214V	0.634V	2.02V	6.28
40	0.050V	0.218V	0.624V	1.96V	6.12

表二：低通滤波器测试

测试条件：输入信号 20mv-pp 程控放大 40dB

截至频率 (KHz)	输出信号幅度 (V)	2fc 信号幅度 (V)	2fc 增益 (dB)
1	1.40	0.540	28.6
2	1.40	0.540	28.6
5	1.42	0.580	29.2
10	1.40	0.560	28.9
12	1.38	0.540	28.6
15	1.32	0.540	28.6
19	1.32	0.540	28.6

20	1.36	0.540	28.6
----	------	-------	------

表三：高通滤波器测试 测试条件:输入信号 20mv-pp 程控放大 40dB

截至频率 (KHz)	输出信号幅度 (V)	0.5fc 信号幅度 (V)	0.5fc 增益 (dB)
1	1.50	0.350	24.9
2	1.50	0.350	24.9
5	1.48	0.340	24.6
10	1.44	0.340	24.6
12	1.44	0.340	24.6
15	1.44	0.340	24.6
19	1.40	0.320	24.1
20	1.44	0.260	22.3

表四：椭圆滤波器测试

频率 (KHz)	输入信号幅度 (V)	输出信号幅度 (V)	起伏 (V)	带内起伏 (dB)
1	1	1.01	0.010	0.09
5	1	1.02	0.020	0.16
10	1	1.05	0.050	0.42
15	1	1.08	0.080	0.67
20	1	1.05	0.050	0.42
25	1	1.02	0.020	0.16
30	1	0.930	0.070	-0.59
35	1	0.888	0.112	-0.92
40	1	0.912	0.088	-0.73
45	1	0.920	0.080	-0.67
48	1	0.888	0.112	-0.92
48.5	1	0.880	0.112	-0.92
49	1	0.872	0.128	-0.93
49.5	1	0.840	0.160	-1.23
50	1	0.808	0.192	-1.52
50.5	1	0.792		
51	1	0.776		
52	1	0.710		
52.5	1	0.680		
53	1	0.660		
60	1	0.312		
65	1	0.192		

70	1	0.140		
75	1	0.112		
80	1	0.070		
85	1	0.078		
90	1	0.045		
100	1	0.037		
110	1	0.034		
120	1	0.030		
150	1	0.032		
200	1	0.018		

表五：扫频信号源带宽测试 测试条件:输出信号 5V-pp

输出信号频率	100Hz	1 KHz	10KHz	20KHz	30 KHz
输出信号幅度	5.08V	5.08V	5.08V	5.02V	5.04V
输出信号频率	40 KHz	50 KHz	60 KHz	70 KHz	80 KHz
输出信号幅度	5.02V	5.02V	5.04V	5.02V	5.00V
输出信号频率	90 KHz	100 KHz	110 KHz	120 KHz	130 KHz
输出信号幅度	4.98V	4.98V	5.00V	5.02V	5.04V
输出信号频率	140 KHz	150 KHz	160 KHz	170 KHz	180 KHz
输出信号幅度	5.00V	4.96V	4.94V	4.92V	4.90V
输出信号频率	190 KHz	200 KHz			
输出信号幅度	4.86V	4.74V			