

信号与电路系统实验

盛庆华 吕伟锋 王勇佳 编著

何志伟 主审

杭州电子科技大学

二〇二一年三月

内 容 简 介

本书是信号与电路系统实验教材，共有基础实验 7 个，综合实验 2 个。基础实验内容包括常用实验仪器的使用及一阶动态电路、叠加原理及戴维南定理、RLC 串联谐振电路研究、MATLAB 在信号与系统中的基本使用、无源低通/高通滤波器设计与特性测试、译码器及其应用、触发器与移位寄存器的应用。综合实验包括波形产生分解及合成的综合设计实验、降噪耳机的综合设计实验。

本书可作为本科或高职院校电子、通信、自动化、计算机等相关专业的实验指导教程，也可作为相关专业工程技术人员的学习与参考用书。

| | |
|-------------------------------|----|
| 实验一 常用实验仪器的使用 | 1 |
| 1.1 实验目的 | 1 |
| 1.2 实验仪器及元器件 | 1 |
| 1.3 实验原理 | 1 |
| 1.4 实验内容及步骤 | 2 |
| 1.5 实验预习要求 | 4 |
| 1.6 实验注意事项 | 4 |
| 1.7 总结思考题 | 4 |
| 实验二 一阶动态电路 | 5 |
| 2.1 实验目的 | 5 |
| 2.2 实验仪器及元器件 | 5 |
| 2.3 实验原理 | 5 |
| 2.4 实验内容及步骤 | 7 |
| 2.5 实验预习要求 | 8 |
| 2.6 实验注意事项 | 8 |
| 2.7 总结思考题 | 8 |
| 实验三 叠加原理及戴维南定理应用 | 9 |
| 3.1 实验目的 | 9 |
| 3.2 实验仪器及元器件 | 9 |
| 3.3 实验原理 | 9 |
| 3.4 实验内容和步骤 | 10 |
| 3.5 实验预习要求 | 13 |
| 3.6 实验注意事项 | 13 |
| 3.7 实验总结 | 13 |
| 实验四 RLC 串联谐振电路研究 | 14 |
| 4.1 实验目的 | 14 |
| 4.2 实验仪器 | 14 |
| 4.3 实验原理 | 14 |
| 4.4 实验内容及步骤 | 16 |
| 4.5 实验预习要求 | 17 |
| 4.6 实验注意事项 | 17 |
| 4.7 实验总结题 | 17 |
| 实验五 MATLAB 在信号与系统中的基本使用 | 18 |
| 5.1 实验目的 | 18 |
| 5.2 实验原理 | 18 |
| 5.3 MATLAB 函数 | 18 |
| 5.4 实验内容 | 19 |
| 5.5 实验要求 | 23 |
| 实验六 无源低通、高通滤波器设计与特性测试 | 24 |
| 6.1 实验目的 | 24 |
| 6.2 实验仪器设备元器件 | 24 |

| | |
|----------------------------------|----|
| 6.3 实验原理及说明..... | 24 |
| 6.4 实验内容和步骤..... | 26 |
| 6.5 实验注意事项..... | 28 |
| 6.6 实验预习..... | 28 |
| 6.7 实验总结..... | 28 |
| 误差分析举例..... | 28 |
| 实验七 时域采样与恢复..... | 30 |
| 7.1 实验目的..... | 30 |
| 7.2 实验仪器与器件..... | 30 |
| 7.3 实验原理..... | 30 |
| 7.4 实验内容..... | 32 |
| 7.5 实验注意事项..... | 33 |
| 7.6 实验预习..... | 33 |
| 7.7 实验总结..... | 34 |
| 实验八 降噪耳机的综合设计实验..... | 35 |
| 8.1 命题内容..... | 35 |
| 8.2 方案论证..... | 35 |
| 8.3 理论设计及仿真..... | 36 |
| 8.4 总电路图..... | 38 |
| 8.5 原理图部分..... | 38 |
| 实验九 波形产生、分解及合成的综合设计实验..... | 41 |
| 9.1 设计题目..... | 41 |
| 9.2 方案论证..... | 42 |
| 9.3 理论设计及仿真..... | 43 |
| 9.4 总电路图..... | 54 |
| 附录一 Matlab 基础简介 | 56 |
| 附录二 电路仿真软件 TINA 的使用 | 59 |
| 附录三 电子滤波器设计软件 FilterPro 的使用..... | 65 |

实验一 常用实验仪器的使用

1.1 实验目的

1. 理解并基本掌握示波器观察各种电信号波形、并测试电信号参数的方法。
2. 初步掌握常用电子测量仪器仪表的名称、型号及操作旋钮功能。
3. 学会正确使用和选择常用实验仪器仪表进行电信号输出和测量。

1.2 实验仪器及元器件

| 序号 | 仪器或器件名称 | 型号或功能 | 数量 |
|----|---------|-------|----|
| 1 | 函数信号发生器 | | |
| 2 | 数字示波器 | | |
| 3 | 数字万用表 | | |
| 4 | 交流毫伏表 | | |

1.3 实验原理

1. 广泛应用于实验教学的电子测量仪器设备可分为三大类：函数信号发生器（简称信号源）、测量仪表以及专用仪器仪表（组合式仪器）。信号源的主要功能是向外界提供各种所需参数的电信号，测量仪表用来测试外界电信号的参数或观测电信号波形，专用仪器仪表是指专门应用于某种特殊场合或具有专门用途的仪器仪表。目前普遍使用的电子测量仪器有直流稳压电源、函数信号发生器、数字示波器、交直流电压表、交直流电流表、功率表等。

2. 函数信号发生器输出的信号有正弦波、三角波、方波及脉冲波等；频率从几赫兹到兆赫兹连续可调，电压输出幅度最大可达十几伏。正弦波信号的要素是：幅值（电压 U 或电流 I ）、信号周期 T （或频率 f ）和初相角 φ ；其中幅值又可表征为峰-峰值 U_{P-P} 、峰值（最大值） U_P 、有效值 U 等；脉冲信号主要参数有幅值 U_m 、脉冲重复周期 T （或频率 f ）和脉宽 τ （或占空比 D ）。而方波是占空比为 1：2 脉冲信号。各种参数之间的关系可表示为：

$$U_P = \sqrt{2}U, \quad U_{P-P} = 2U_P = 2\sqrt{2}U, \quad T = 1/f, \quad D = \tau/T, \quad \text{如图 1.1 所示。}$$

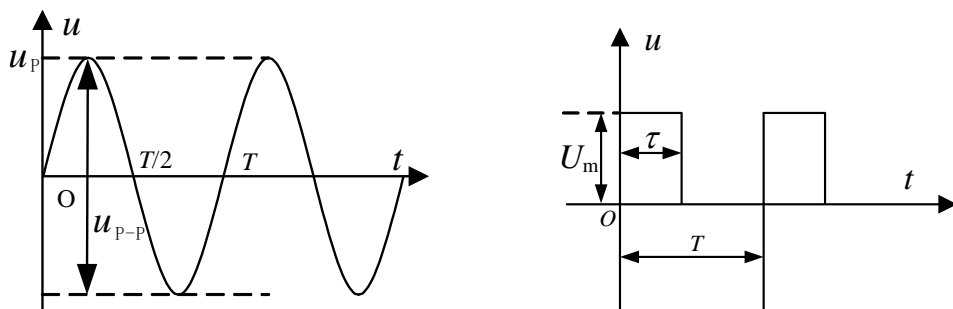


图 1.1 正弦波和脉冲波的波形及主要参数

3. 数字示波器是一种具有多种用途的电信号特性测试仪器。可观察信号波形，测试其幅度、周期、频率和相位；测量脉冲信号的宽度、上升、下降时间以及观察脉冲的上冲、下冲等现象。

4. 数字式万用表是一种高精度 LED 或 LCD 显示的电子仪器，可测量交、直流电压、交直流电流和电阻等参数。一般测量的结果为有效值，故往往称为真有效值表。

5. 交流毫伏表是一种经常使用的指针式模拟电压表，测量范围广，精度较高，输入阻抗高，表头用正弦电压有效值刻度。交流毫伏表价格低廉，特别是在高频电压测量时精度不亚于数字表。

1.4 实验内容及步骤

1.4.1 正弦信号幅值的测量

按图 1.2 接线，使函数信号发生器的“波形选择”按键状态为正弦波，调节函数信号发生器的频率倍率及频率微调旋钮、幅度旋钮，使其输出 1KHz、5V（有效值）的正弦波信号，用同轴电缆线将该信号从“50 Ω 输出”端取出。先输入交流毫伏表（或数字万用表交流电压档），监控调整函数信号发生器的输出幅度为所需的 5V 有效值。再将信号送入数字示波器中观测。调节示波器相应输入通道的幅值灵敏度“VOLTS/DIV”、扫描速度“SWEEP TIME/DIV”等旋钮，从示波器上读取正弦信号的幅值信息，再将函数信号发生器的衰减选择分别调为 20dB 和 40dB，重复测量衰减后的信号幅度，并记入表 1.1 中。

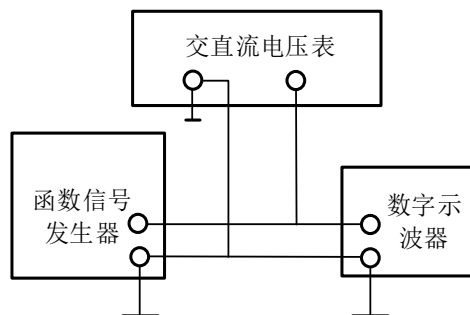


图 1.2 实验接线示意图

表 1.1 正弦信号幅度示波器测量

| 测量项目 | 函数信号发生器输出衰减位置 | | |
|---------------------|---------------|------|------|
| | 0dB | 20dB | 40dB |
| 信号发生器输出电压 (V) | 5 | | |
| 示波器“V/DIV”位置 | | | |
| 峰-峰值 $U_{p.p}$ 波形格数 | | | |
| 峰值 U_p (V) | | | |
| 计算有效值 | | | |

1.4.2 正弦信号频率的测量

保持函数信号发生器的输出幅度不变 (0dB)，改变频率倍率及频率微调旋钮，使其输出频率依次为 100Hz、1.5KHz、20KHz，调节示波器的“SWEEP TIME/DIV”旋钮从示波器上测量信号的实际频率，记入表 1.2 中。

表 1.2 正弦信号频率测量

| 测量项目 | 函数信号发生器的输出频率 | | |
|--------------|--------------|--------|-------|
| | 100Hz | 1.5KHz | 20KHz |
| 示波器“T/DIV”位置 | | | |
| 一个周期占有的格数 | | | |
| 正弦信号的周期 | | | |
| 计算所得频率 | | | |

1.4.3 观察方波和脉冲信号并测量其波形参数

使信号发生器输出频率 $f=10\text{KHz}$ 、峰峰值 $U_{p.p}=1.4\text{V}$ 左右的方波，观察此时示波器上的波形，测量并记录其波形参数到表 1.3 中。改变输出的信号幅度和频率，观察示波器上波形的变化。

调整信号发生器的方波频率 $f=3\text{KHz}$ 、 $U_{p.p}=8\text{V}$ ，打开“波形对称”旋钮，使方波变为脉冲波。根据自行设定的占空比进行调整波形，观察并记录此时示波器上显示的脉冲波形参数。记入表 1.3 中。

表 1.3 方波和脉冲波参数测试

| 测量项目 | 函数信号发生器输出信号 | |
|------------|-------------|-----|
| | 方波 | 脉冲波 |
| V/DIV 位置 | | |
| 电压幅值所占格数 | | |
| 信号电压幅值 (V) | | |
| 信号占空比 | | |
| T/DIV 位置 | | |
| 一个周期所占格数 | | |
| 信号的周期 | | |
| 计算所得频率 | | |

1.5 实验预习要求

1. 预习实验仪器仪表面板上各旋钮的位置，名称、作用及使用方法，特别是数字示波器的“VOLTS/DIV”（即 V/DIV）、“SWEEP TIME/DIV”（即 T/DIV）旋钮的名称及含义。
2. 在正弦信号幅度的示波器测试实验中，用交流毫伏表（或数字万用表交流电压档），监控调整函数信号发生器的输出幅度 5V，思考为什么不直接使信号发生器输出 $U_{p-p}=14.14V$ 的电压？

1.6 实验注意事项

1. 应在对各种电子仪器有一定了解基础上进行实验。接线时须保证各仪器的公共接地端连接在一起，称为共地。
2. 函数信号发生器的输出端不可短路，通常“直流偏置旋钮”不关闭。
3. 数字万用表在使用时应注意测试表棒的插孔位置以及功能选择档位、量程选择档位正确。
4. 交流毫伏表在测量时应从较大量程开始逐渐减小至合适的量程，再进行测量。

1.7 总结思考题

1. 用数字示波器观察正弦信号，除了 AUTO 键外，还可以用哪些按键进行观察波形的调整？
2. 总结使用电子测量仪器仪表的体会及电信号观测的方法。
3. 在 TINA 仿真软件中调用信号源，示波器，万用表进行上述实验电路的仿真及测试。

实验二 一阶动态电路

2.1 实验目的

1. 研究一阶电路的零输入响应、零状态响应及完全响应的特点和规律。
2. 进一步掌握用示波器观察波形并测量一阶电路时间常数的方法。

2.2 实验仪器及元器件

| 序号 | 仪器或器件名称 | 型号或功能 | 数量 |
|----|---------|-------|----|
| 1 | 函数信号发生器 | | |
| 2 | 数字示波器 | | |
| 3 | 数字万用表 | | |
| 4 | 线性电阻 | | |
| 5 | 实验电路板 | | |
| 6 | 导线及连接件 | | |

2.3 实验原理

可以用一阶常系数常微分方程描述的动态电路称为一阶动态电路，分为 RC 电路和 RL 电路两种。以一阶 RC 电路为例，如图 2.1 所示。设开关 S 在位置“2”时电路已稳定，则电容无储能。当 $t=0$ 时，将 S 扳至位置“1”，电容开始充电，充电快慢由时间常数 $\tau=RC$ 决定，当 U_C 从 0 充电到 U_S 时，暂态过程结束，电路达到稳态。此阶段电容电压响应为零状态响应，电压波形如图 2.1 曲线（a）所示：

$$U_C(t) = U_S(1 - e^{-t/\tau}) \quad t \geq 0$$

当开关 S 在“1”处达到稳态时 $U_C=U_S$ ，再将开关接至“2”的位置，此时的响应为零输入响应，电容通过电阻放电，其电压值从 U_S 下降到 0，暂态结束，达到稳态。这一阶段电容电压的响应波形如图 2.1 中的曲线（b）所示：

$$U_C(t) = U_S e^{-t/\tau} \quad t \geq 0$$

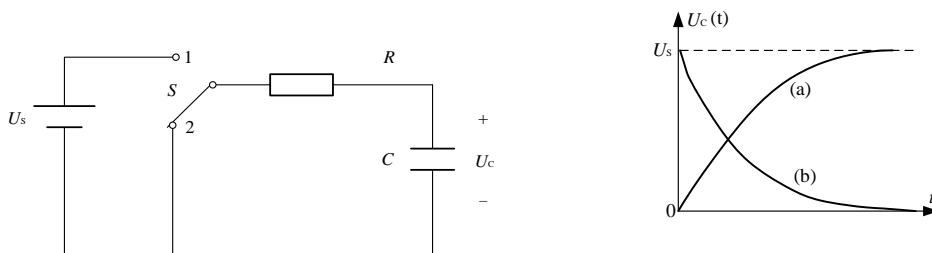


图 2.1 一阶 RC 动态电路及充放电响应波形

一阶动态电路的过渡过程是十分短暂的单次变化过程，为便于用数字示波器观测，必须使这种单次变化的过程重复。方波电压信号可看成是由定时开关控制接通和关断的直流信号，只要方波的周期足够长，在方波作用期间，电路的暂态过程基本结束（ $T/2 \geq 5\tau$ ， T 为方波周期），则方波的正脉宽引起零状态响应；方波的负脉宽引起零输入响应。这样就可实现对 RC 电路的零状态响应和零输入响应的观察，如图 2.2 所示。

一阶 RC 电路的响应按指数规律增长或衰减，如图 2.3 所示。设 $t=0$ 时电容电压从 0 开始上升， $t=\infty$ 时，电压上升至 U_s 。而电压由 0 上升至 $U_s/2$ 所需时间为 $\Delta t = 0.69\tau$ （K1 点），由 0 上升到 $0.632U_s$ 所经历的时间为 τ （K2 点）。事实上，曲线上任意一点起始都遵从这一规律。例如，在图 2.3（b）中，若从 K3 点至稳态值 U_s 间的电压差为 U_p ，则从 K3 开始，电压上升至 $U_p/2$ 的 K4 点所经历的时间也是 0.69τ 。

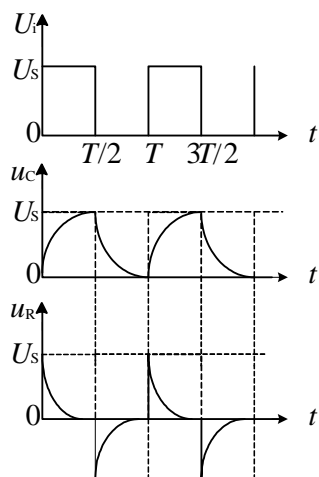


图 2.2 方波激励下 $u_C(t)$ 和 $u_R(t)$ 波形

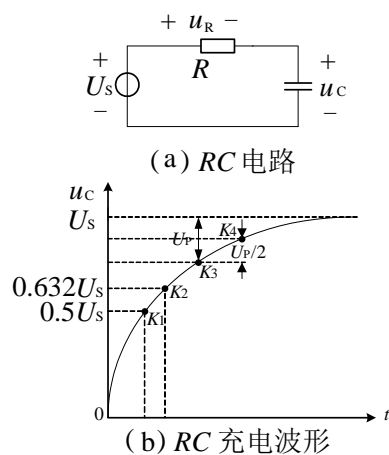


图 2.3 一阶 RC 电路电容的暂态响应波形

因此用示波器测量动态电路的时间常数 τ ，只要从示波器上读出 Δt ，再利用 $\Delta t/0.69$ 即可。用示波器上观察 U_C 波形时，要使屏幕上波形并使起点电压与稳态电压 U_s 之间的差值 U_p 尽可能大，同时使水平展宽的 Δt 对应的长度尽量长些，以减少读取 Δt 时的误差。

积分电路如图 2.4（a）所示。当电路在方波信号激励下满足：输出电压 $U_o(t)$ 是电容上

的响应；电路的时间常数 τ 远大于输入方波的重复周期 T ，即 $\tau = RC \gg T/2$ ，此时：

$$\begin{cases} u_R(t) \gg u_C(t) \\ u_R(t) \approx u_i(t) \end{cases}$$

因此 $i(t) = \frac{u_R(t)}{R} \approx \frac{u_i(t)}{R}$ ，从而 $u_o(t) = u_C(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt \approx \frac{1}{RC} \int u_i(t) dt$ ，输出信号电

压近似与输入信号电压的积分成正比。当输入信号为峰峰值为 $2E$ 的周期方波信号时，输出响应电压近似为三角波，其峰峰值 $2E'$ 远小于 $2E$ ，如图 2.4 (d) 所示。

微分电路如图 2.4 (b) 所示。当电路满足：输出电压 $U_o(t)$ 是电阻 R 上的响应；电路的时间常数 $\tau \ll T/2$ 时，可近似实现微分电路。因为：

$$\begin{cases} u_R(t) \ll u_C(t) \\ u_C(t) \approx u_i(t) \end{cases}$$

因此 $u_o(t) = u_R(t) = Ri(t) = RC \frac{du_C(t)}{dt} \approx RC \frac{du_i(t)}{dt}$ ，输出电压近似的与输入电压的微分

成正比。若输入电压为峰峰值为 $2E$ 的周期方波信号，则输出的响应电压为周期窄脉冲，如图 2.4 (e) 所示。

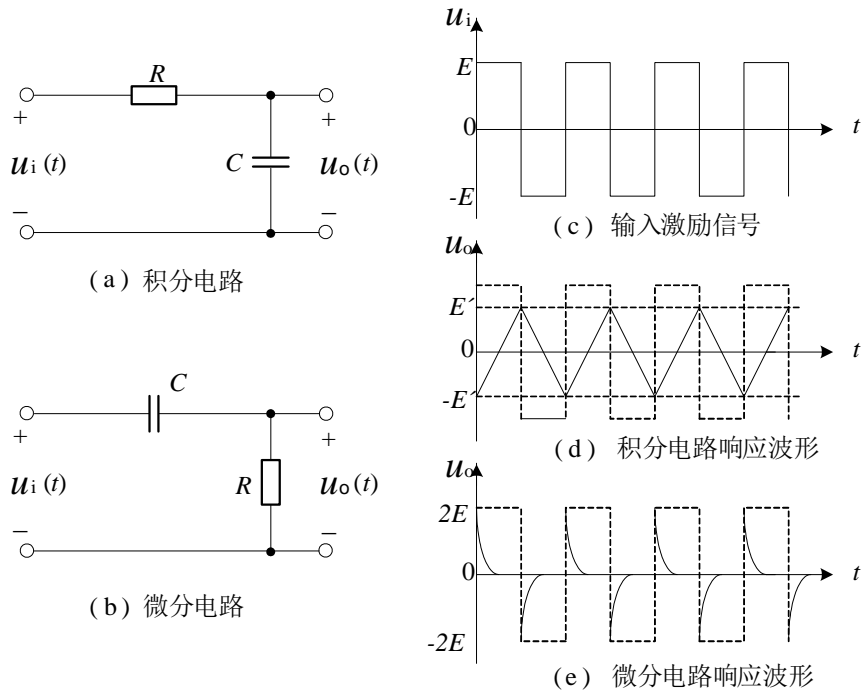


图 2.4 积分、微分电路及其响应

2.4 实验内容及步骤

2.4.1 一阶 RC 电路暂态响应的观察及 τ 值的测量

(1) 根据图 2.3 (a) 所示的实验电路, 在电路板上连接电路。图中 U_S 为函数信号发生器提供的方波信号 $u_S(t)$, 输出信号 $u_o(t)=u_C(t)$ 用示波器观察及测量。

(2) 将函数信号发生器的输出信号通过同轴电缆线接入实验电路的输入端, 同时将该信号通过另一条电缆线输入到示波器的 CH1 通道。

(3) 将电路的输出响应信号送到示波器的 CH2 通道。并注意输入、输出的接地端保持了“共地”。

(4) 将示波器的输入耦合方式开关置于“DC”档, 调节函数信号发生器的相关旋钮使之输出 $U_{p-p}=4.0V$, $f=500\sim 1000Hz$ 的方波, 观察并记录 CH1 和 CH2 通道信号的波形。

(5) 保持电路输入信号, 改变元件 R 和 C 参数, 观察电路的输出响应波形。了解时间常数改变对电路响应的影响。

2.4.2 积分电路的响应及观测

(1) 根据积分电路形成条件, 保持原方波信号, 选择合适的 R、C 器件, 组成如图 2.4 (a) 所示的积分电路。观测并描绘在此激励信号作用下响应 u_o 的波形。

(2) 在不改变信号激励频率和积分电路条件的情况下, 改变 R 或 C 的值, 观测并描绘响应的波形, 并记录相关元件参数。

2.4.3 微分电路的响应及观测

(1) 根据微分电路的形成条件, 保持原方波信号, 选择合适的 R、C 器件, 组成如图 2.4 (b) 所示微分电路。观测并描绘在此激励信号作用下响应 u_o 的波形。

(2) 在不改变信号激励频率和微分电路条件的情况下, 改变 R 或 C 的值, 观测并描绘响应的波形, 并记录相关元件参数。

2.5 实验预习要求

1. 试推导原理中测量时间常数 τ 的计算过程。

2.6 实验注意事项

1. 一阶电路时, 同轴电缆线信号端和接地端的夹子不能调换, 输入输出信号须共地。
2. 一阶电路电阻电容元件参数的选取要合理, 不可太大或太小, 否则不利于观测和记录。

2.7 总结思考题

1. 总结一阶动态电路响应波形特点。
2. 根据实验观测结果, 归纳、总结积分、微分电路的形成条件。

实验三 叠加原理及戴维南定理应用

3.1 实验目的

1. 验证基尔霍夫定律，加深对集总电路KCL、KVL的理解。
2. 验证线性电路叠加性和齐次性，加深对线性电路性质的认识。
3. 加深电路的参考方向或参考极性的认识。
4. 用实验方法验证戴维南定理，加深对该定理的理解。
5. 掌握测量有源单口网络等效参数的方法。

3.2 实验仪器及元器件

| 序号 | 仪器或器件名称 | 型号或功能 | 数量 |
|----|----------|-------|----|
| 1 | 电工电路实验台 | | |
| 2 | 直流电压、电流表 | | |
| 3 | 实验电路板及导线 | | |
| 4 | 线性电阻 | | |

3.3 实验原理

线性电路的性质包括叠加性和齐次性两个部份。

叠加性指出：在几个独立电源共同作用的线性电路中，每一元件上的电流或两端电压可以看成是每一个独立源单独作用时，在该元件上产生的电流或电压的代数和。

齐次性指出：当激励信号（独立电源的值）增加或减少为原来的 K 倍时，电路的响应 $r(t)$ （电路中所有元件上的电压和流过的电流值）也将增加或减少为原来的 K 倍，其中 K 为与元件参数和电路结构相关的常数。

为了用实验的方法验证基尔霍夫定律和线性电路性质（叠加性和齐次性）的正确性，可在线性电路中加入两个或以上的电压源或电流源，分别测量这些独立电源单独作用和共同作用于电路、某个独立电源增大或减小 K 倍时，电路中所有元件上的电流、电压值，通过对测量值进行分析和计算来验证定理的正确性。

当实际电路较复杂时，很难直接判断电路各支路电压和电流的真实方向，须先设定各电压和电流的参考方向或参考极性（一般可采用关联参考方向）。测量时，直流仪表的表棒必须按预先设定的参考方向接入电路，若仪表显示数值为正，则说明设定的参考方向与实际电路电流的方向或电压的极性一致，否则表明是相反的。

戴维南定理指出：任何一个线性含源单口网络，都可以用一个实际电压源来等效，此电压源的电动势 E_s 等于该单口网络的开路电压 U_{oc} ，其等效内阻 R_o 等于该网络中所有独立电源均置零（理想电压源视为短路，理想电流源视为开路）后所得无源网络的等效电阻 R_{ab} 。等效电压源的内阻 R_o 和开路电压 U_{oc} 称为含源单口网络的等效参数，可以用实验的方法测得其值。

测量单口网络等效参数，常用的方法有开路电压、短路电流法，伏安法等，而测量 R_{ab} 还可以用实验测试法。本实验中采用开路电压、短路电流法。

（1）开路电压、短路电流法：如图 3.1 所示，由于含源单口线性网络等效的电压源 E_s 就是单口网络的开路电压 U_{oc} ，其内阻 R_{ab} 就是开路电压与短路电流之比，因此可用直流电压表或数字万用表直流电压档测量输出端的开路电压 U_{oc} ，然后将其输出端短路，用直流毫安表或数字万用表直流电流档测量其短路电流 I_{sc} ，则其内阻 R_{ab} 的值可以表示为：

$$R_{ab} = U_{oc} / I_{sc}$$

需注意的是，这种方法对电流表和电压表的内阻有一定的要求，网络等效内阻 R_{ab} 的值应远小于电压表的内阻，而远大于电流表的内阻值，否则会影响测量结果。

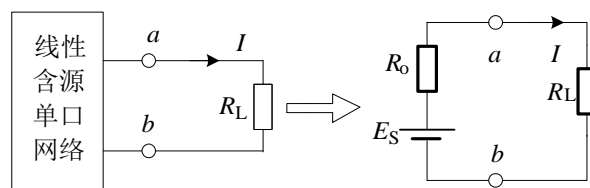


图 3.1 单口网络等效电路和参数

为验证戴维南定理的正确性，则需验证戴维南等效电路端口的伏安关系（VAR）与被等效的含源单口网络的伏安关系完全一致。一般通过分别测试在任意不同负载条件下端口的电压和电流值，所得多组数据拟合成 $U-I$ 平面上的一条曲线，这条曲线即反映了端口的 VAR 特性。若等效电路所得 $U-I$ 平面上的曲线和原被等效电路曲线是完全重合的，即说明它们的 VAR 是相同的，也就证明它们是等效的。通过测试实验数据，得到拟合曲线，从而判断电路的性质和特点是电路分析及其他电子基础课程实验中常用的行之有效的方法。

3.4 实验内容和步骤

3.4.1 叠加定理

（1）根据图 3.2 所示的实验电路原理图，组装电路。

（2）调节直流电压源为所需的电压值（以 $E_1 = +12V$ ， $E_2 = +6V$ 为例），并按照实验电路所要求的极性将电源接入电路。

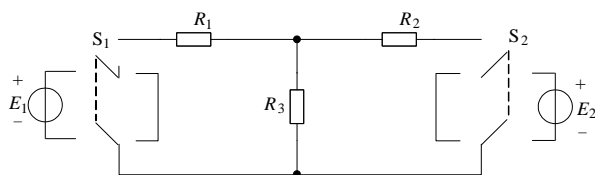


图 3.2 实验电路接线图

- (3) 自主设定电路中各支路电流、电压的参考方向或参考极性，并标注在电路图中。
- (4) 分别令 E_1 、 E_2 电源单独作用（可用开关 S_1 及 S_2 实现），用直流电压表和直流电流表（或数字万用表）测量各支路电压、电流值，并将数据记入表3.1中。
- (5) 令 E_1 、 E_2 共同作用，测量各电压、电流，并将数据记入表中。
- (6) 将 E_2 的数值调至原来的两倍+12V（或将原先 E_1 的电源改接至 E_2 ），重复测量各电压和电流，并记录数据。
- (7) 将表中第一行（ E_1 单独作用）与第二行（ E_2 单独作用）的相应项叠加后，填入第四行中，并计算相对误差（以 E_1 、 E_2 共同作用测量值为真值）。
- (8) 将表中第二行（ E_2 单独作用）值的两倍与第五行的数据（ $2E_2$ 单独作用）比较，并计算相对误差。

表3.1 实验数据记录表

| 测量项目 单位V/mA 实验内容 | | E_1 | E_2 | I_1 | I_2 | I_3 | I_{E1} | I_{E2} | U_{R1} | U_{R2} | U_{R3} |
|------------------------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | E_1 单独作用 | | | | | | | | | | |
| 2 | E_2 单独作用 | | | | | | | | | | |
| 3 | E_1 、 E_2 共同作用 | | | | | | | | | | |
| 4 | E_1 、 E_2 单独作用叠加计算值 | | | | | | | | | | |
| 5 | $2E_2$ 单独作用 | | | | | | | | | | |
| 6 | 相对误差（叠加性） | | | | | | | | | | |
| 7 | 相对误差（齐次性） | | | | | | | | | | |

3.4.2 戴维南定理

(1) 被测有源线性二端网络如图3.3所示，在实验电路板上搭建电路，测量该电路的等效参数 U_{oc} 、 I_{sc} 、 R_o 。

本实验用开路电压、短路电流法测戴维南等效电路的 U_{oc} 、 I_{sc} 和 R_o 。按图 3.3 所示接线 ($R_1 R_2 R_3 R_4$ 阻值建议 $100\Omega \sim 4.7K\Omega$ 间取值)，其中独立电压源 E 由实验台中的直流电压源提供。虚线框内的有源线性单口网络可等效为图 3.3 (b) 的电压源 U_{oc} 与内阻 R_o 串联电路，或者电流源 I_{sc} 和内阻 R_o 并联等效电路，测量并记录图 3.3 (a) 含源二端网络 a、b 两点间的开路电压（负载 R_L 断开）及负载为零时的短路电流：

$$U_{oc} = \underline{\hspace{2cm}}, I_{sc} = \underline{\hspace{2cm}}, R_o = U_{oc}/I_{sc} = \underline{\hspace{2cm}}$$

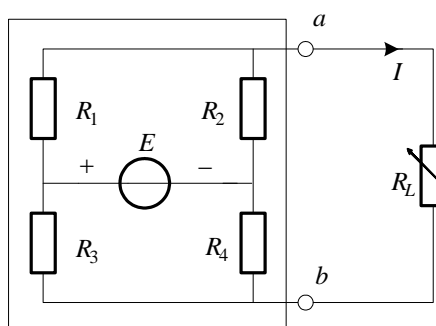


图 3.3 (a)

戴维南
等效电路

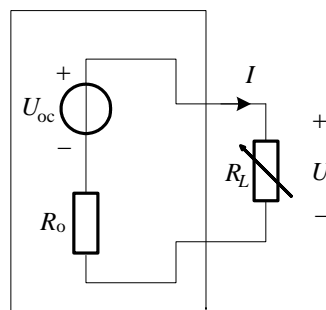


图 3.3 (b)

(2) 用伏安法测量含源单口网络的外特性。

按图 3.3 (a) 所示，将负载 R_L 接入含源单口网络，形成闭合回路。改变负载电阻 R_L 的值从 0 至 $1K\Omega$ ，较均匀的取约十个点的数据。测量其两端的电压及流过的电流值，并将数据记录在表 3.2 中。

表 3.2 待等效含源线性单口网络伏安特性数据

| $R_L (\Omega)$ | 0 | | | | | | | | 1K |
|----------------|---|--|--|--|--|--|--|--|----|
| $U (V)$ | | | | | | | | | |
| $I(mA)$ | | | | | | | | | |

(3) 按图 3.3 (b) 的等效电路接线，其中 U_{oc} 为等效电压源的电压，其值为实验中测得的开路电压值，可由实验台中直流电压源提供。 I_{sc} 为等效电流源的电流， R_o 为等效电压源的内阻，其值为实验 1 中得到的 R_{ab} 值（可用电位器模拟或通过已有电阻串并联等效）。仿照实验 1 中的步骤 (2)，外接一负载电阻 R_L ，改变负载电阻的值，测量该电路的外特性，

对戴维南定理进行验证。

表 3.3 戴维南等效网络伏安特性数据

| | | | | | | | | | |
|----------------|---|--|--|--|--|--|--|--|----|
| $R_L (\Omega)$ | 0 | | | | | | | | 1K |
| $U (V)$ | | | | | | | | | |
| $I(mA)$ | | | | | | | | | |

3.5 实验预习要求

1. 预习基尔霍夫定律和叠加原理的适用范围，思考实验电路中，若有一个电阻是半导体二极管，线路电路的叠加性与齐次性是否还成立？基尔霍夫定律呢？说明理由。
2. 预习电路分析中参考方向或参考极性的知识。
3. 根据电流表测量值一般在几至几十毫安，合理选择电阻阻值，推荐数百欧姆电阻。
4. 思考在求戴维南等效电路时，测短路电流 I_{sc} ，电路应满足的条件。
5. 预习测量有源单口网络开路电压及等效内阻的方法。

3.6 实验注意事项

1. 由电工电路实验台提供的直流电压源 E_1 及 E_2 在使用时需注意不可短接。
2. 在测量各电压、电流前，应预先设定好各支路电压、电流的参考方向或参考极性，设定好后在所有测量中不再改变。
3. 测量各支路电压、电流时，应注意仪表的表棒极性应按设定的参考方向接入电路，数据记录时应带正负符号。
4. 测量时，应合理选择元器件的参数及仪表量程。
5. 实验中，独立电压源置零时，可用一根短路导线代替电压源，不可将该稳压源短接。

3.7 实验总结

1. 根据实验数据分析验证线性电路的叠加性、齐次性及其适用性。
2. 整理实验数据，进行简要的误差计算与误差分析。**不能简单地说:读数误差,电阻等元件的误差。要说明读数误差最多是多大？**
3. 电阻器所消耗的功率能否用叠加原理计算？试根据实验数据进行计算并得出结论。
4. 根据实验内容，分别绘出原电路和等效后电路的伏安特性曲线，并验证戴维南定理的正确性，若有误差，分析产生误差的原因。
5. 如果实验中的某个电阻元件换成普通二极管，则能否验证戴维南定理，说明原因。
6. 在TINA仿真软件中进行叠加定理和戴维南定理的验证。

实验四 RLC 串联谐振电路研究

4.1 实验目的

1. 了解网络频率特性的测量方法，学会用实验的方法测试 RLC 串联谐振电路的幅频特性曲线；
2. 加深对谐振电路特性参数的理解，掌握其测定方法。

4.2 实验仪器

| 序号 | 仪器或器件名称 | 型号或功能 | 数量 |
|----|----------|-------|----|
| 1 | 函数信号发生器 | | |
| 2 | 数字示波器 | | |
| 3 | 实验电路板及导线 | | |
| 4 | 线性电阻 | | |
| 5 | 电感及电容 | | |

4.3 实验原理

一个双口网络，在正弦信号激励下，输出响应相量 \dot{U}_2 与输入激励相量 \dot{U}_1 之比定义为该网络的传递函数：

$$H(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{U_2}{U_1} e^{j(\phi_2 - \phi_1)} = H(\omega) e^{j\phi(\omega)}$$

其中 $H(\omega)$ 为“幅频特性”， $\phi(\omega)$ 为网络的“相频特性”。网络频率特性的测量方法有点测试和扫频法两种，本实验采用点频法。这种方法的过程是，函数信号发生器输出电压和频率均可调节的正弦信号，数字电压表或交流毫伏表用来测量输入、输出电压幅值。相位差计或数字示波器用来测量或观测正弦信号通过被测网络时发生相移，作为相位差测量指示。在被测网络的整个测量频段内，选取若干个频率点，在保持信号发生器输出信号幅度不变的情况下逐点测出各相应频率的电压和相移，即可被测网络的幅频特性曲线和相频特性曲线。

RLC 串联谐振电路如图 4.1 所示，图中 u_s 为信号发生器输出的正弦信号，输出取自电阻上的电压 u_R 。

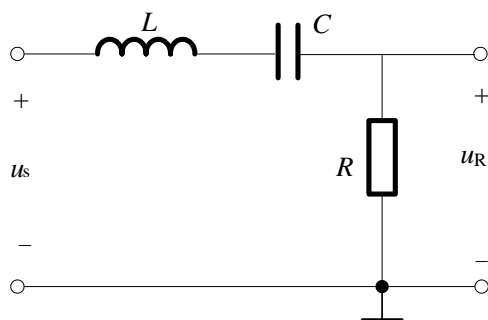


图 4.1 RLC 串联电路

当电路处于谐振时，电路有以下特点：

(1) 电压转移函数 $H(\omega)=1$ ，达到最大，电路输出电压 u_R 等于输入电压 u_s 且相位相同。
当 Hu 下降为其最大值的 0.707 时所对应的两个频率分别被称为上半功率点 f_H 和下半功率点 f_L ，这两频率的差值定义为通频带，即：

$$B_f = f_H - f_L = \frac{R}{2\pi L}$$

(2) 电路阻抗的模最小，且为纯电阻，即 $Z=R$ ；

(3) 在一定输入电压作用下，电路中的电流 $I_0 = \frac{U}{R}$ 最大，且电流与输入电压同相。

假设保持输入正弦电压幅值 U 不变，则回路电流 I 与频率的关系为：

$$I = \frac{U}{|Z|} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{I_0}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f}\right)^2}}$$

其中 $Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{R\omega_0 C} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ ，称为谐振电路的品质因数。其与带宽存在

如下关系：

$$B_f = \frac{f_0}{Q}$$

(4) 电感和电容上的电压为 $U_{Lo} = U_{Co} = \frac{U}{R} \omega_0 L = \frac{U}{R} \frac{1}{\omega_0 C} = QU$ 。

串联谐振电路的的谐振频率测量可用下述方法：在保持输入电压 U_s 不变的情况下，改变信号频率，当 U_R 达到最大值时的频率即为谐振频率 f_0 。因在实际电路中，电感存在一

定内阻，所以会带来一定误差。当采用此法测量 f_0 时，因电路谐振时有 $U_{L0}=U_{C0}$ ，可根据两者是否相等来判断电路是否谐振。回路品质因数 Q 值的测量在测定 f_0 后进行。测量方法也有两种。一是电路谐振时，根据 U_{L0} 或 U_{C0} 值及输入电压 U_S 算出 Q 值；二是通过测量谐振曲线的通频带 B_f 值，根据公式 $Q = \frac{f_0}{B_f}$ 求得，通频带 B_f 值可通过测量 f_H 和 f_L 获得。

4.4 实验内容及步骤

4.4.1 基本实验部分

(1) 测量电路谐振频率 f_0

- 1) 如图 4.1 连接线路，选择合适的电阻 R ，电容 C ，和电感 L 进行实验；
- 2) 函数信号发生器的“正弦波功率输出端”向外送出 $U_S=1V$ （有效值）的正弦波，将此信号接入电路输入端。
- 3) 保持输入电压幅值不变，改变信号频率，监测电阻 R 上的输出电压，当 U_R 达到最大值时的信号频率即为 f_0 ，将 f_0 测量值及电阻上电压最大值 U_{R0} 记入表 4.1。
- 4) 为了确保测量的 f_0 的准确性，测量此时的 U_L 和 U_C ，若其相等或相差不大，则记录入表格 4.1 中，若不相等，则重做步骤（3）。根据公式求得 Q 值，记入表中。
- 5) 根据测得的 U_{R0} ，计算得出 $U_{RL}=U_{RH}=0.707U_{R0}$ ，分别增大和减小信号频率，当 U_R 等于 $0.707U_{R0}$ 时，此时的信号频率高的即为 f_H ，低的即为 f_L ，同时计算 B_f 的值填入表中。

表 4.1 RLC 谐振电路特性参数测量

| f_0/KHz | U_{R0}/V | U_{L0}/V | U_{C0}/V | Q | f_H | f_L | B_f |
|------------------|------------|------------|------------|-----|-------|-------|-------|
| | | | | | | | |

(2) 测量电路的幅频特性

- 1) 保持输入电压为 $1V$ 不变，改变频率，分别在 $f < f_L$ ， $f_L \sim f_0$ ， $f_0 \sim f_H$ ，以及 $f > f_H$ 各频率范围选取数个频率点，测出电路相应的输出电压 U_R ，数据记入表 4.2 中。
- 2) 在方格纸上以频率为横坐标，网络转移函数 $H(\omega)$ 为纵坐标，用描点法画出幅频特性曲线。

说明：由于输入取 $1V$ 不变，因此 $H(\omega)$ 可以用 U_R 表示。

(3) 研究电阻 R 的改变对谐振特性的影响

将 RLC 串联谐振电路中的电阻 R 值换为原来的两倍或 $1/2$ ，重复上述操作，重复测量和

记录上述两个表中的数据，在方格纸上可画出此时电路的幅频特性曲线并与前者对照。

表 4.2 RLC 谐振电路特性参数测量

| | | | | | | | | | | |
|----------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| f /KHz | | | | | | | | | | |
| U_R /V | | | | | | | | | | |

4.4.2 提高部分

(1) 设计一个谐振频率在 10~35kHz 之间（取其中某一个值）、通频带约为 10kHz 左右的 RLC 二阶带通滤波电路。

(2) TINA 仿真该 RLC 电路的幅频特性和相频特性。

(3) 自拟实验测试方案、确定实验测试内容及步骤、设计数据记录表格，选择适当的仪器，测量该电路的频率特性和 Q 、 BW 等电路参数，画出该电路的幅频特性和相频特性曲线。

(4) 自行设计实验方案，用谐振法测量给定元件参数值。

4.5 实验预习要求

1. 在实验之前先进行一些计算，选择合适的元件参数，并估算电路的谐振频率。
2. 理解实验测量谐振点的方案，掌握判断电路发生谐振的方法。
3. 若谐振时输出电压 U_o 与输入电压 U_i 不完全相等，试分析原因；若谐振时，对应的 U_{Lo} 与 U_{Co} 不相等，请分析原因。

4.6 实验注意事项

1. 同轴电缆线信号端和接地端的夹子不能调换，输入输出信号须共地；
2. 测量过程中应始终保持输入电压 1V 不变，否则不能用输出电压 U_R 表示 $H(\omega)$ ；
3. 用交流毫伏表测量电感和电容的电压时，要用浮地测量，毫伏表的“+”端接 C 和 L 的公共端，并注意选择合适的量程。

4.7 实验总结题

1. 根据测量数据，绘出不同 Q 值时的两条幅频特性曲线。
2. 计算通频带 B_f 与 Q 值，说明不同元件参数值对电路的通频带和品质因数的影响。
3. 对两种不同的测量 Q 值的方法进行比较，并分析误差及原因。**不能简单地说:读数误差,电阻等元件的误差。要说明读数误差最多是多大? 元件本身的误差所引起的误差是多大?**

实验五 MATLAB 在信号与系统中的基本使用

5.1 实验目的

1. 掌握使用 matlab 产生典型连续信号和离散信号的 matlab 编程方法;
2. 掌握使用 matlab 进行连续时间信号与离散时间信号的一些运算操作的 matlab 编程方法。

5.2 实验原理

典型的连续时间信号有指数信号、正弦信号、复指数信号、抽样信号、单位阶跃信号、符号函数信号、单位斜坡信号、门函数信号、三角脉冲信号、单位冲激信号、冲激偶信号等，典型的离散时间信号有单位阶跃序列、单位冲激序列、矩形序列、实指数序列、单位斜变序列、正弦序列、复指数序列等，这些信号在信号与系统中有重要作用，在以后的课程里面经常被用到。

信号与系统课程里面对连续时间信号做的运算有：反转、尺度变换、移位、微分运算、积分运算等。对离散时间信号做的运算有：反转、移位、尺度变换、差分运算、累加运算等，这些运算是信号与系统的基本运算，复杂的系统也是由这些基本运算构成的。

5.3 MATLAB 函数

1. 指数信号 Ae^{at} 的 matlab 表示: $A*\exp(a*t)$;
2. 正弦信号的 matlab 表示: $\cos()$ 和 $\sin()$;
3. 抽样函数 $Sa(t)$ 的 matlab 表示: $\text{sinc}(t)$;
4. 矩形脉冲信号的 matlab 表示: $\text{rectpuls}(t,\text{width})$,其中 t 是时间轴, width 是矩形脉冲宽度;
5. 三角波脉冲信号的 matlab 表示: $\text{tripuls}(t,\text{width},\text{skew})$,其中 t 是时间轴, width 是三角波的底宽, skew 是三角的斜率。
6. 绘图函数 plot 与 stem : 在 matlab 中, plot 与 stem 都用来绘出函数的图形, 通常 plot 用来绘出连续函数图形, stem 用来绘出离散函数图形。 Plot 的定义为:
$$\text{plot}(x,y,\text{linespec},\text{'propertyname'},\text{propertyvalue});$$
其中 linespec 表示图像中线的特性, 包括线的形状、颜色、标记的方式等, 调用顺序为线形、标记符号、颜色。 Linespec 的三方面特征如下表所示: 默认实线, 黑色等
 Stem 函数的调用和 plot 类似。
7. 微分 $y=\text{diff}(f)/h,h$ 为数值计算所取时间间隔, diff 这个函数为求得函数 f 的微分函数

y。

8. 积分 `quad('function_name',a,b)`，这个函数求得在 `a` 和 `b` 指定积分区域里求得被积函数 `function_name` 的积分。

5.4 实验内容

5.4.1 使用 matlab 画出典型信号波形

(1) 画出指数函数 $e^{(-0.4t)}$ 的波形，matlab 程序如下：

```
clc;
close all;
t=0:0.01:10;
A=1;
a=-0.4;
ft=A*exp(a*t);
plot(t,ft);
```

(2) 画出三角函数的波形，matlab 程序如下：

```
clc;
close all;
t=-3:0.001:3;
ft=tripuls(t,4,0.5);
plot(t,ft);
ft1=tripuls(t,4,1);
figure,plot(t,ft1);
```

如果不知道某个 matlab 函数的意思或用法，可以输入 `type`，如 `type tripuls`，会显示函数 `tripuls` 的意思及用法。

(3) 产生门函数的波形，使用 matlab 程序如下：

```
clc;
close all;
t=0:0.001:4;
T=1;
Ft=rectpuls(t-2*T,T);
plot(t,Ft);
```

(4) 产生单位冲激函数波形，matlab 程序如下：

```
clc;
close all
k=-50:50;
delta=[zeros(1,50),1,zeros(1,50)];
stem(k,delta);
```

(5) 产生单位阶跃函数波形，matlab 程序如下：

```
clc;
close all
k=-50:50;
uk=[zeros(1,50),ones(1,51)];
stem(k,uk);
```

5.4.2 使用 matlab 进行信号基本运算

对于一般比较简单，不太会输错命令的计算等，可以在命令窗口中直接输入命令，计算式，即可。复杂一些的，还是要建立.m 文件，以方便修改程序。

如图 5.1 所示，点击 file/new/M-File，新建.m 文件。文件名尽可能用英文名或拼音

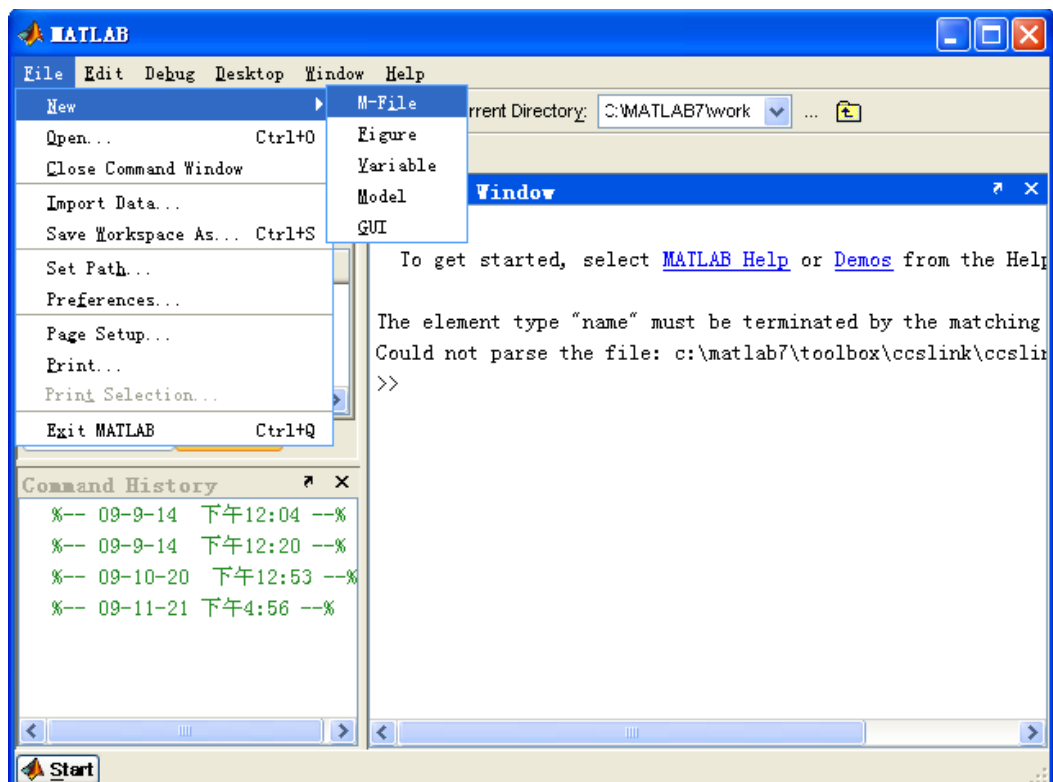


图 5.1 新建.m 文件

5.4.3 编写并运行.m 文件

在新建的.m 文件中写入如图 5.2 所示程序，点击运行程序按钮，使 matlab 自行运行输入程序。

运行程序按钮

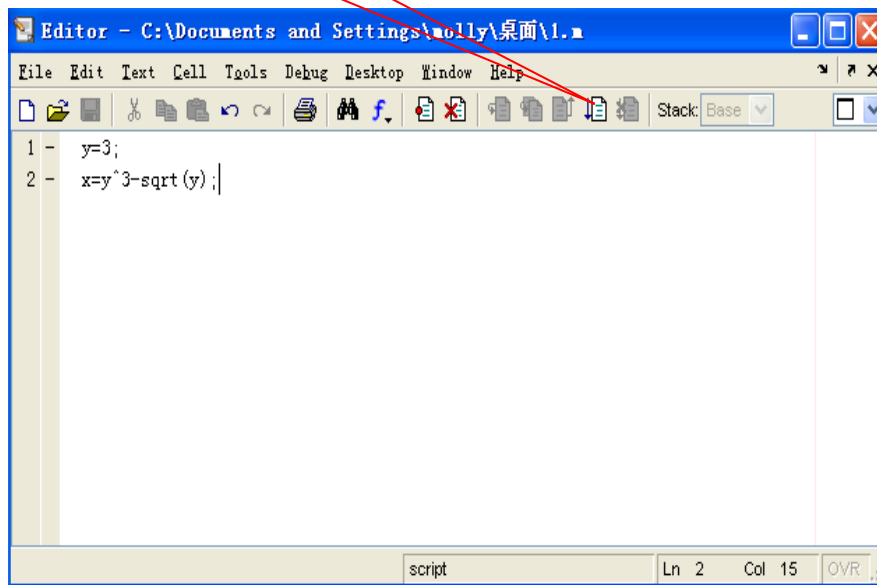


图 5.2 编写并运行.m 文件

以下利用.m 文件仿真：

(1) 信号的尺度变换、反转、时移

```
clc;
close all;
t=-3:0.001:3;
ft=tripuls(t,4,0.5);
subplot(3,1,1);
plot(t,ft);
title('f(t) ');
ft1=tripuls(2*t,4,0.5);
subplot(3,1,2);
plot(t,ft1);
title('f(2t) ');
```

```

ft2=tripuls((2-2*t),4,0.5);
subplot(3,1,3);
plot(t,ft2);
title( 'f(2-2t) ');

```

(2) 求出三角波的微分波形，matlab 程序如下：

```

clc;
close all;
h=0.001;    t=-3:h:3;
ft=tripuls(t,4,0.5);
subplot(3,1,1);
plot(t,ft);
title('f(t) ');
y1=diff(ft)*1/h;
subplot(3,1,2);
plot(t(1:length(t)-1),y1);
title('the differentiation of f(t) ');

```

(3)求 2 个数组的卷积和： $x_1=[4,7,-2]$, $x_2=[3,1,-2,5]$,下标都从-1 开始。

```

x1=[4,7,-2];           %define x1
nx1=-1:length(x1)-1-1; % define  time of x1
x2=[3,1,-2,5];         %define x2
nx2=-1:length(x2)-1-1;
nx=(nx1(1)+nx2(1):length(x1)+length(x2)-2+nx1(1)+nx2(1));
x=conv(x1,x2);  x;
subplot(1,3,1);stem(nx1,x1);  axis([-1.2,2,-3,8]);
subplot(1,3,2);stem(nx2,x2);  axis([-1.2,3.5,-2.5,6]);
subplot(1,3,3);stem(nx,x);    axis([-2.5,3.5,-10,50]);

```

(4) 求 2 个连续函数的卷积

```

clear all;  close all;
dt=0.01;t1=-2:dt:4;

```

```

x=double((t1>0&t1<2));
t2=-1:dt:5; h=double(t2>0).*exp(-t2);
y=conv(x,h);
yzs=dt*y;
t3=t1(1)+t2(1)+dt*[0:length(t1)+length(t2)-2];
subplot(3,1,1);plot(t1,x);
subplot(3,1,2);plot(t2,h);
subplot(3,1,3);plot(t3,yzs);

```

5.5 实验要求

1. 在计算机中输入程序，验证实验结果；
2. 通过对验证性实验，自行编 matlab 程序，并得出实验结果；
3. 在实验报告中写出完整的自编程序，并给出实验结果。

附录 1: matlab 预定义变量

| | | | |
|----------------|------------|----------------|--------------|
| ans | 用于结果的缺省变量名 | pi | 圆周率 |
| eps | 计算机的最小数 | inf | 无穷大 |
| NaN | 不定量 | i 或 j | $i=j=-1$ 的开方 |
| realmin | 最小可用正实数 | realmax | 最大可用正实数 |

实验六 无源低通、高通滤波器设计与特性测试

6.1 实验目的

1. 了解无源低通和高通滤波器的基本结构、特点，比较理想滤波器与实际滤波器的差别。
2. 测试无源 RC 低通滤波及无源 RC 高通滤波器的频率特性。

6.2 实验仪器设备元器件

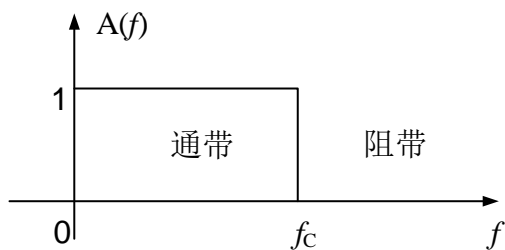
| 序号 | 仪器或器件名称 | 型号或功能 | 数量 |
|----|---------|--------------|-----|
| 1 | 函数信号发生器 | | 一台 |
| 2 | 数字示波器 | | 一台 |
| 3 | 数字万用表 | | 一台 |
| 4 | 九孔方板 | | 一块 |
| 5 | 电阻 | 1K | 2 个 |
| 6 | 电容 | 0.01 μ F | 2 个 |

6.3 实验原理及说明

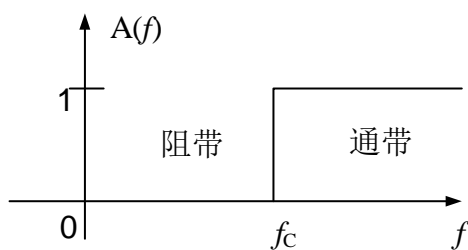
1. 滤波器是一种对输入信号的频率具有选择性的二端口网络，它允许某些频率（通常是某个频带范围）的信号通过，而其它频率的信号受到衰减或抑制。这些网络可以由 R 、 L 、 C 元件或 R 、 C 无源元件组成（这类滤波器称为无源滤波器）。也可由无源元件和运算放大器等有源器件共同组成（这类滤波器称为有源滤波器）。

2. 根据幅频特性所表示出通过或阻止信号频率范围的不同，滤波器可分为低通滤波器（LPF）、高通滤波器（HPF）、带通滤波器（BPF）和带阻滤波器（BEF）四种。我们把允许通过的信号频率范围定义为通带，把阻止或衰减信号的频率范围定义为阻带。而把通带与阻带分界点的频率称为截止频率或转折频率。

3. 各种理想滤波器的幅频特性如图 6.1 所示，其中 $A(f)$ 为通带的电压放大倍数、 f_c 称为截止频率， f_0 为中心频率， f_{CL} 、 f_{CH} 分别称为低端和高端截止频率。



(a) 理想低通滤波器幅频特性



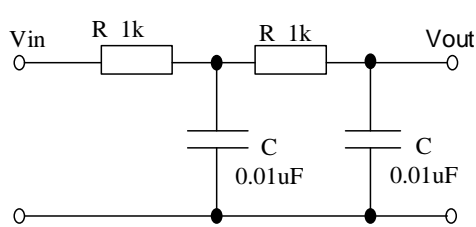
(b) 理想高通滤波器幅频特性

图 6.1 理想滤波器幅频特性曲线

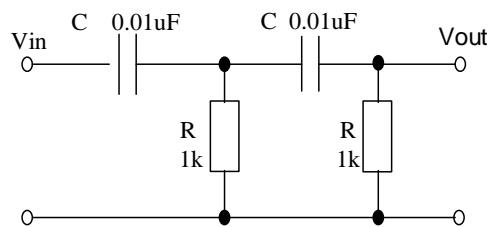
4. R - C 无源低通滤波器频率特性

二阶 R - C 无源低通滤波器电路 (LPF) 如图 6.2 (a) 所示。

其幅频特性和相频特性如图 6.3 (a)、(b) 所示。

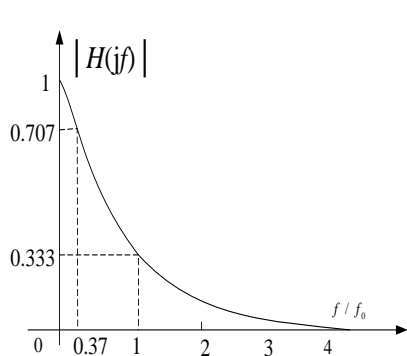


(a) 二阶无源LPF电路

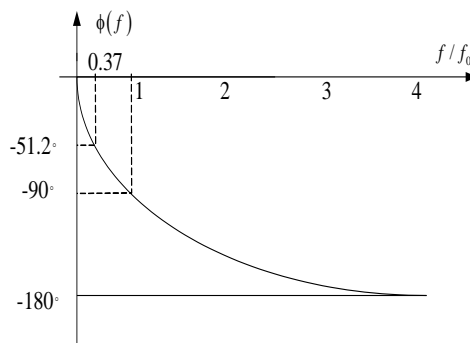


(b) 二阶无源HPF电路

图 6.2 二阶无源低通、高通滤波器电路图



(a) 二阶无源低通滤波器幅频特性曲线



(b) 二阶无源低通滤波器相频特性曲线

图 6.3 二阶无源 LPF 的频率特性

由图 6.2(a)可得无源低通滤波器的系统函数为：

$$H(j\omega) = \frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)} = \frac{1}{1 - \omega^2 R^2 C^2 + j3\omega RC}$$

则其幅频特性为:

$$|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2 R^2 C^2)^2 + (3\omega RC)^2}} = \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2 / \omega_0^2)^2 + (3\omega / \omega_0)^2}}$$

其中 $\omega_0 = \frac{1}{RC}$ 为特征频率

从上式中可以得到:

- 1) 当 $\omega \ll \omega_0$ 时 $|H(j\omega)| \approx 1$
- 2) 当 $\omega \gg \omega_0$ 时 $|H(j\omega)| \approx 0$
- 3) 当 $\omega = \omega_0$ 时 $|H(j\omega)| = 1/3$
- 4) 令 $|H(j\omega)| = 1/\sqrt{2}$ 可求得 $\omega_c = 0.37\omega_0$ 其中 ω_c 为截止频率。

而其相频特性为:

$$\phi(\omega) = \begin{cases} -\arctan \left[\frac{3(\omega/\omega_0)}{1-(\omega/\omega_0)^2} \right] & (\omega < \omega_0) \\ -\pi - \arctan \left[\frac{3(\omega/\omega_0)}{1-(\omega/\omega_0)^2} \right] & (\omega > \omega_0) \end{cases}$$

在 $\omega/\omega_0 = 0.37$ 时 $\phi(\omega) = -52.1^\circ$

由以上分析可知二阶无源 R - C 低通滤波器特性与理想 LPF 特性有很大差别。

5. R - C 无源高通滤波器特性

二阶无源 R - C 高通滤波器的电路如图 6.2 (b) 所示。其幅频特性、相频特性要求自行推导。

6.4 实验内容和步骤

6.4.1 基本要求

(1) R - C 无源低通滤波器幅频特性, 相频特性测试

用同轴电缆线将函数信号发生器的输出信号送入 RC 无源低通滤波器输入端。调节函数信号发生器使之输出幅值为 $V_i=1V$ 的正弦波 (对正弦信号不加说明, 则幅值是指有效值, 下同, 并注意时刻保持该电压恒定), 在 $0 \sim 10f_0$ 范围内调节输出正弦波信号频率, 合理选择 20 以上个不同的频率点, 用仪表测量此时低通滤波器输出电压的幅值 V_o , 并用数字示波器测出在各频率点处输出 V_o 相对于 V_i 的相移, 并记录测量数据到表 6.1 中。

表 6.1 无源低通滤波器测量数据

| 测量条件 $V_i=1V$ 正弦波 (选 20 个以上测试频率) | | | | | | | | | |
|----------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 输入 V_i 的频率 f (Hz) | | | | | | | | | |
| 输出 V_o 的幅值 (V) | | | | | | | | | |
| 输出 V_o 相位 (度) | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |

(2) RC 无源高通滤波器幅频特性、相频特性测试

用同轴电缆线将函数信号发生器的输出信号送入 RC 无源高通滤波器输入端。调节函数信号发生器使之输出幅值为 $V_i=1V$ 的正弦波 (注意时刻保持该电压恒定), 在 $0\sim 10f_0$ 范围内调节输出正弦波信号频率, 合理选择 20 以上个不同的频率点, 用仪表测量此时高通滤波器输出电压的有效值 V_o , 并用数字示波器测出在各频率点处输出 V_o 相对于 V_i 的相移, 并记录测量数据至表 6.2 中。

表 6.2 无源高通滤波器测量数据

| 测量条件 $V_i=1V$ 正弦波 (20 个以上测试频率) | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 输入 V_i 的频率 f (Hz) | | | | | | | | | |
| 输出 V_o 的幅值 (V) | | | | | | | | | |
| 输出 V_o 相位 (度) | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |

6.4.2 设计性要求

(1) 设计一个能让 $0\sim 5kHz$ 正弦信号通过的无源低通滤波器, 自行设计实验电路、选择适当器件参数和测试仪表、自拟实验数据记录表格、确定实验测试方案, 仿真并测量该滤波器的频率特性。

(2) 设计一个能让 $20kHz$ 正弦信号通过的无源高通滤波器, 自行设计实验电路、选择适当器件参数和测试仪表、自拟实验数据记录表格、确定实验测试方案, 仿真并测量该滤波

器的频率特性。

(3*) 设计一个能让 50Hz 三角波信号通过的无源低通滤波器，自行设计实验电路、选择适当器件参数和测试仪表、自拟实验数据记录表格、确定实验测试方案，仿真并测量该滤波器的频率特性。

(4*) 用 TINA 软件仿真的方式验证设计电路幅频和相频特性。

6.5 实验注意事项

1. 在测量时，注意输入、输出信号必须共地。
2. 在实验测量过程中，必须始终保持正弦波信号的输出（即滤波器的输入）电压 V_i 不变。
3. 用示波器测量时，必须将示波器的“地”与信号源的“地”始终可靠的连接。

6.6 实验预习

1. 仿照二阶无源低通滤波器的分析方法，分析二阶无源高通滤波器的频率特性。
2. 计算图 6.2 (a) 所示的 R - C 无源低通滤波器的截止频率 f_c 和特征频率 f_o 的值。
3. 计算图 6.2 (b) 所示的 RC 无源高通滤波器的截止频率 f_c 和特征频率 f_o 的值。

6.7 实验总结

1. 整理各项实验数据，绘制各滤波器的幅频特性曲线和相频特性曲线。
2. 由幅频特性曲线找出各种低通、高通滤波器的截止频率 f_c ，并与理论值比较。
3. 根据实验数据和绘制的频率特性曲线图分析无源低通、高通滤波器的性能特点。
4. 心得体会。

误差分析举例

学生写实验报告进行误差分析时，往往只定性分析元件误差引起的实验结果误差，却很少有同学（包括电分和模电）定量分析元件误差引起的结果误差。下面就这一点，以信号与系统实验-----低通滤波器为例,进行定量分析。

设元件误差为独立的随机变量。

无源低通滤波器的系统函数为：

$$|H(j\omega)| = 1/\sqrt{(1 - \omega^2 R^2 C^2)^2 + (3\omega RC)^2} \quad (1)$$

$$\text{令 } y = (1 - \omega^2 R^2 C^2)^2 + (3\omega RC)^2 \quad (2)$$

$$\text{则: } |H(j\omega)| = 1/\sqrt{y} \quad (3)$$

对 (1) 求全微分, 得:

$$d|H(j\omega)| = (1/2) y^{-3/2} dy \quad (4)$$

$$\begin{aligned} dy &= [4(1 - \omega^2 R^2 C^2)\omega^2(RC^2 dR + R^2 CdC) + 18\omega^2 RC(CdR + RdC)] \\ &= \left[4(1 - \omega^2 R^2 C^2) \left(\frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right) + 18 \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 \right] \left(\frac{dR}{R} + \frac{dC}{C} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

(5) 式中 ω_0 为特征频率。求得的 $d|H(j\omega)|$ 就是误差, 是绝对误差。相对误差再除以 $|H(j\omega)|$ 。

由此可得: 元件引起的误差, 在不同的频率下, 误差是不同的。

下面就 ① $\omega = \omega_0$, ② $\omega \gg \omega_0$ 的情况讨论一下误差:

① $\omega = \omega_0$ 时: 公式 (5) 的前一项等于零, 且公式中 y 的第一项也等于 0, 则

$$d|H(j\omega)| = - (dR/R + dC/C)/3 \quad (6)$$

式中的 $\frac{dR}{R}$, $\frac{dC}{C}$ 就是电阻, 电容的相对误差, 一般用百分比表示, 计算时, dR , dC 取相同的正负号。若如电阻 R 的精度为 10%, 电容 C 为 20%, 则由 R, C 误差引起的传递函数 $|H(j\omega)|$ 的最大误差为 0.1 或 10%。

② $\omega \gg \omega_0$ 时: (4) 式的分子为 ω/ω_0 的 4 次方, 而分母为 6 次方, 故 $d|H(j\omega)| \rightarrow 0$ 。

而对 $\omega = \omega_c$ 及 ω/ω_0 很小时的情况, 请大家利用公式 (4), (5) 自己讨论。

实验七 时域采样与恢复

7.1 实验目的

1. 了解时域模拟信号的采样方法和过程。
2. 了解信号恢复的方法。
3. 加深对采样定理的认识和理解。

7.2 实验仪器与器件

| 序号 | 仪器或器件名称 | 型号或规格 | 数量 |
|----|---------|-------|----|
| 1 | 信号发生器 | | |
| 2 | 示波器 | | |
| 3 | 直流稳压电源 | | |
| 4 | 九孔方板 | | |
| 5 | 采样门电路模块 | | |
| 6 | 低通滤波器模块 | | |

7.3 实验原理

1. 所谓的“抽样”就是利用抽样脉冲序列 $p(t)$ 从连续时间信号 $f(t)$ 中“抽取”一系列的离散样值的过程，获得的这种离散信号称为“抽样信号”。抽样信号经量化、编码后就可变成数字信号。由于数字通信系统在信号的传输和处理等方面较模拟通信系统优越，所以在实际应用中，常将模拟信号 $f(t)$ 经离散时间信号如冲激序列、窄脉冲序列抽样后，再经量化编码变为数字信号，经过传输，最后经“抽样”的逆过程恢复为原连续信号。

2. 离散时间信号可以是按一定时间间隔输出的数的序列，也可以由连续时间信号经采样得到，抽样信号 $f_s(t)$ 可看成连续时间信号和一组周期性窄脉冲的乘积，即 $f_s(t) = f(t)p(t)$ ，其中 $p(t)$ 又称为采样脉冲序列，如图 7.1 所示， T_s 为采样周期，其倒数 $f_s = 1/T_s$ 称为采样频率。

$$\begin{aligned} F_s(\omega) &= \frac{1}{2\pi} F(\omega) * P(\omega) = \frac{1}{2\pi} F(\omega) * \frac{2\pi\tau}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \text{Sa}\left(\frac{n\omega_s\tau}{2}\right) \delta(\omega - n\omega_s) \\ &= \frac{\tau}{T_s} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \text{Sa}\left(\frac{n\omega_s\tau}{2}\right) F(\omega - n\omega_s) \end{aligned}$$

显然，抽样后的 $F_s(\omega)$ 是原信号 $F(\omega)$ 在频率上以 ω_s 为周期重复，幅度上以 $\text{Sa}(n\omega_s\tau)$ 的变化规律衰减的结果。在 $F_s(\omega)$ 的频谱中含有原连续时间信号的完整信息。

因此，抽样信号在一定的条件下是可以恢复到原有信号的。只要用一截止频率等于原信号频谱中最高频率 f_s 的低通滤波器，滤掉该抽样信号频谱的高频分量，获得包含原有信号频谱全部信息的低频分量，即可在低通滤波器输出端恢复出原始信号波形。

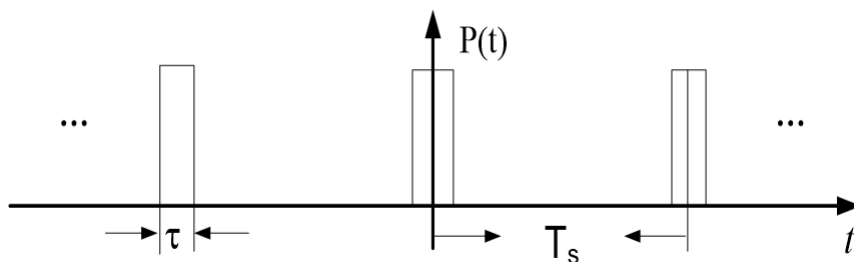


图 7.1 采样脉冲序列

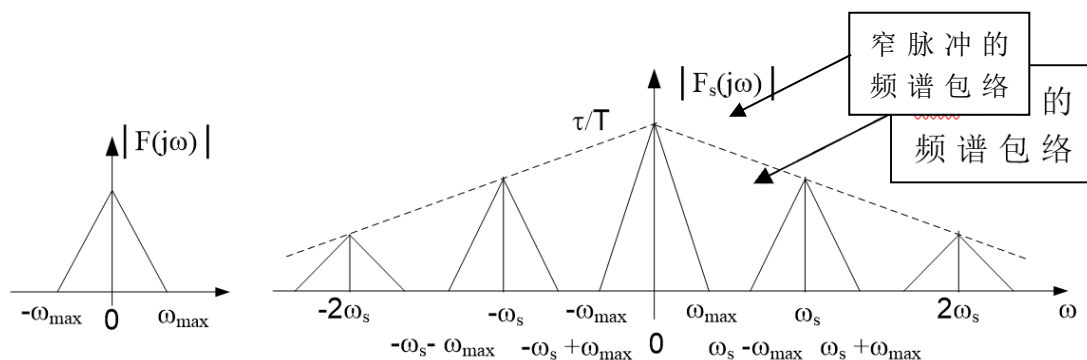


图 7.2 模拟信号及抽样信号频谱

3. 要从抽样信号中不失真地恢复出原来的连续时间信号，条件是采样信号频率 $f_s \geq 2f_{\max}$ (f_{\max} 为原信号的最高频率成分) 或 $f_s \geq 2B$ (B 为原信号占有的频带宽度, $f_{\min} = 2B$ 为最低抽样频率)，当 $f_s < 2f_{\max}$ (或 $f_s < 2B$) 时，抽样信号的频谱会发生混迭，从发生混迭的频谱中我们无法不失真地恢复原信号，图 7.3 (a) 画出了 $f_s > 2f_{\max}$ 和 $f_s < 2f_{\max}$ 两种情况下理想抽样信号的频谱。

本实验中选用 $f_s < 2f_{\max}$ ， $f_s = 2f_{\max}$ ， $f_s > 2f_{\max}$ 三种采样频率，通过对连续时间信号的采样和恢复来验证抽样定理。



图 7.3(a) 连续时间信号及其频谱

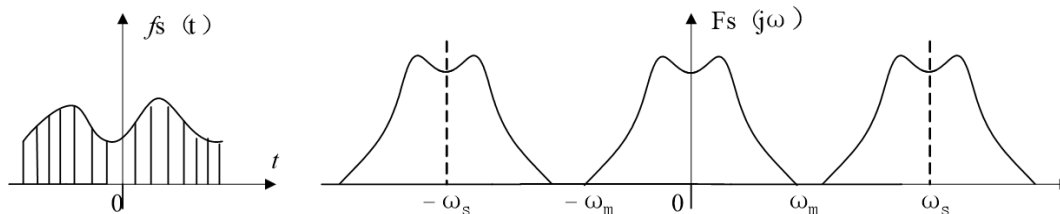


图 7.3(b) 采样信号及其频谱 ($f_s > 2f_{\max}$)

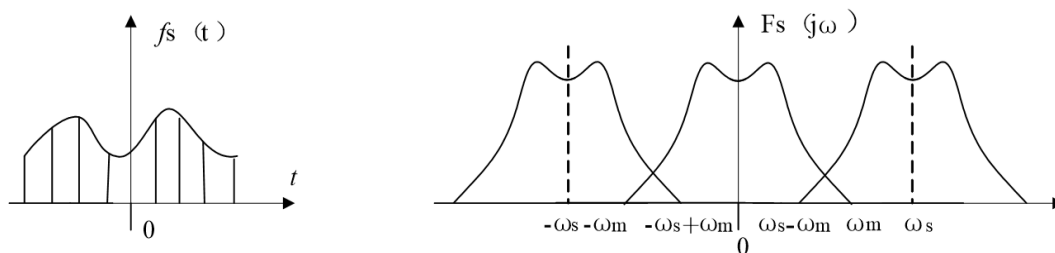


图 7.3(c) 采样信号及其频谱 ($f_s < 2f_{\max}$)

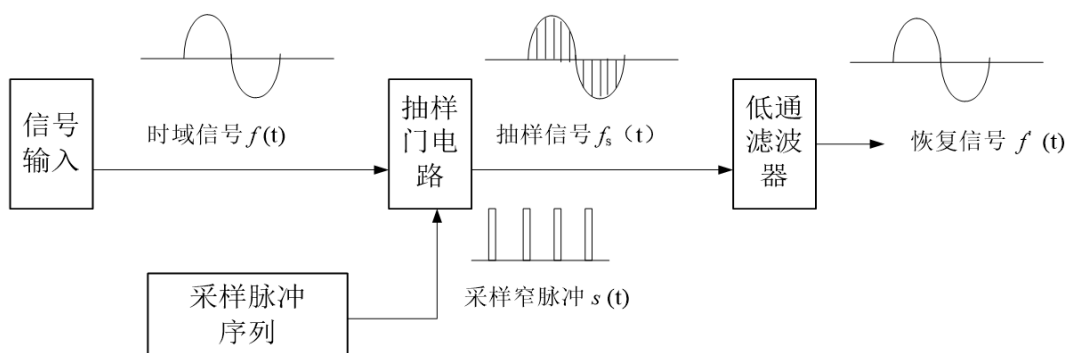


图 7.4 时域采样与恢复原理框图

4. 为了实现对连续时间信号的抽样和恢复，本实验采用如图 7.4 的电路实现。除选用足够高的抽样频率外，常采用前置低通滤波器来防止原信号频谱过宽而造成抽样后信号频谱的混迭。但若实验选用的信号频谱较窄，则可不设前置低通滤波器。

7.4 实验内容

7.4.1 基本要求

按图 7.4 连接好采样器模块的各个部分。

(1) 调节函数信号发生器，使之输出 V_{P-P} 为 5V、频率为 50Hz 的方波信号 $f(t)$ ，将其输入到采样与恢复模块的信号输入端，调节模块的采样脉冲序列发生器的频率和占空比旋钮，观察抽样信号 $f_s(t)$ 波形，及经低通滤波器恢复后的输出信号波形 $f'(t)$ 。

(2) 选择合适的采样频率，分别满足 $f_s < 2f_{\max}$ ， $f_s = 2f_{\max}$ ， $f_s > 2f_{\max}$ 三种情况，记录每种情况下的 f_s 与 f_{\max} 的倍数关系，观察并描绘连续时域信号 $f(t)$ 、抽样信号 f_s

(t)、恢复后的信号 $f'(t)$ 波形。找出该系统实际的最佳奈奎斯特频率 f_s 。

(3) 将函数信号发生器的输出依次变为正弦波和三角波，保持其幅度不变，频率分别为 15Hz、100Hz，重复上述的实验，分析引起信号采样和恢复失真的原因。

7.4.2 设计性要求

(1) 根据时域采样定理，选择适当的采样窄脉冲频率，能对 20Hz 的方波信号进行采样和重建，测试并观察出现混叠、没有混叠两种状态下的原时域信号、采样窄脉冲信号、恢复重建后信号波形等。

(2) 根据频域采样定理，设计一个低通滤波器，以恢复、还原经 2kHz 窄脉冲（占空比为 1: 10）采样的 30Hz 三角波波形。

(3) 要求设计合理的实验测试方案，选择适当的仪器仪表，自拟实验数据记录表格，观察并测试各种信号波形，记录波形参数等。

(4) 设计合理的采样、恢复实验电路，仿真实现对 20Hz、30Hz、50 Hz、100 Hz 等方波、三角波的采样、恢复过程，观察并记录仿真结果。

7.5 实验注意事项

1. 本实验采用的采样和恢复模块的各个组成部分均采用有源器件构成，且均工作在双电源供电状态下，所以必须由双路直流稳压电源经串联后得到 $\pm 9V$ 电压为模块供电。正负电源的接法如下图 7.5 所示。

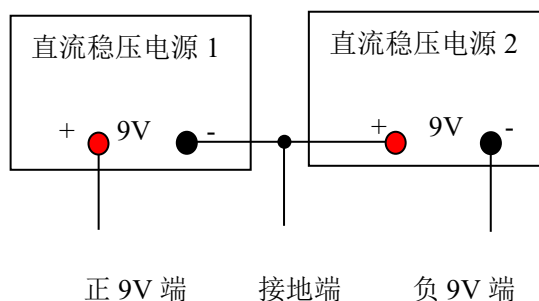


图 7.5 采样模块供电电源连接图

2. 采样器模块中的采样脉冲序列发生器可提供高、低两段频率信号，且可通过调整占空比选钮来改变采样脉冲信号的形状。

3. 模块中低通滤波器的放大倍数可由其 V_{P-P} 旋钮调整，若恢复信号出现截顶失真，可通过减小此旋钮放大倍数来改善。

7.6 实验预习

1. 预习有关抽样定理的相关理论知识。

2. 若连续时间信号 $f(t)$ 为 50HZ 的正弦波, 采样脉冲信号为 $f_s=2\text{KHz}$ 的窄脉冲序列, 试求抽样后的信号 $f_s(t)$ 的频谱 $F_s(\omega)$ 。

设计一个二阶 R-C 无源低通滤波器, 截止频率为 5KHZ, 取 $R=5\text{K}\Omega$ 。

3. 若连续时间信号取频率为 200Hz~300Hz 的方波和三角波, 计算其有效的频带宽度。该信号经频率为 f_s 的周期脉冲抽样后, 若希望通过低通滤波器的信号失真较小, 则抽样频率和低通滤波器的截止频率应取多大? 试设计一满足上述要求的低通滤波器。

7.7 实验总结

1. 整理实验中记录的数据和波形。
2. 绘出各种情况下连续时域信号 $f(t)$, 抽样信号 $f_s(t)$ 和复原信号 $f'(t)$ 的波形, 讨论抽样定理实现的情况。
3. 实验调试中的体会。
4. TINA 软件中仿真图 7.4 的电路。

实验八 降噪耳机的综合设计实验

8.1 命题内容

设计运放电路，对一个音频信号和一个噪声信号进行叠加，再经过滤波电路，对叠加信号进行滤波，测试叠加的声音效果以及滤波之后的声音效果。

要求：

- (1) 使用信号源产生正弦波信号当做噪声信号，信号频率为 6K，振幅为 1V（人可听到的频率范围为 300HZ-3.4KHZ，故认为 3.4K 以上的信号为噪声信号）；
- (2) 设计加法器，将声音信号和噪声信号叠加，测试收听叠加后的混杂音频信号；
- (3) 设计滤波器，确定滤波器的类型，截止频率，将音频信号从低通滤波器中滤除；
- (4) 收听滤波之后的音频信号。

8.2 方案论证

8.2.1 放大器型号选取

在工程设计中运算放大器型号选取是一项重要的工作。设计电路考虑包括压摆率、带宽，供电电压等综合考虑。此次题目工作频率低，对运放的各项特性没有严苛的要求、因此选择易于获得且成本较低的 LM358 运算放大器模块。

8.2.2 题目论证

此题中要将其分解为加法器模块，滤波模块两个进行设计实现，下面对两个模块进行论证。

1) 加法器模块

之前学过了加法器一章，而实际的运算放大器，同相端阻抗高于反向端阻抗，使用同相加法器有利于信号的传输

2) 滤波模块

根据声音信号的频率范围特性，以及噪声信号的频率范围，需要设计低通滤波器。本题选用有源低通滤波器。其中因为巴特沃斯滤波器的特点是在通带以内幅频曲线的幅度最平坦，由通带到阻带衰减较缓，截止频率以后的衰减速率为 6MDB/倍频程，相频特性是非线性的。对阶跃信号有过冲和振铃现象。巴特沃斯滤波器是一种通用型滤波器，又称为最平幅度滤波器。故选用巴特沃斯类型，为实现滤波器更精确，选用 Sallen—key 结构。

整体方案如图 8.1 所示。

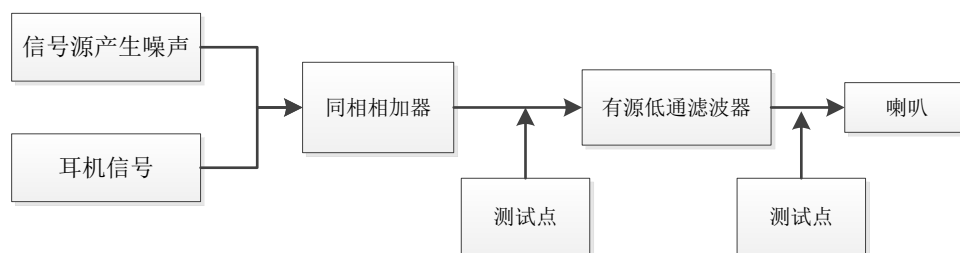


图 8.1 整体方案框图

8.3 理论设计及仿真

下面针对两个模块的理论设计进行详细讲解。

8.3.1 加法器

通过之前学习的加法器，同相两个输入端电阻相同的情况下，结合同相加法器的计算公式：

$$f = \left[1 + \frac{R_1}{R_2} \right] \left[\frac{1}{2} (R_3 + R_4) \right]$$

加法器电路图如图 8.2 所示，仿真图如图 8.3 所示。

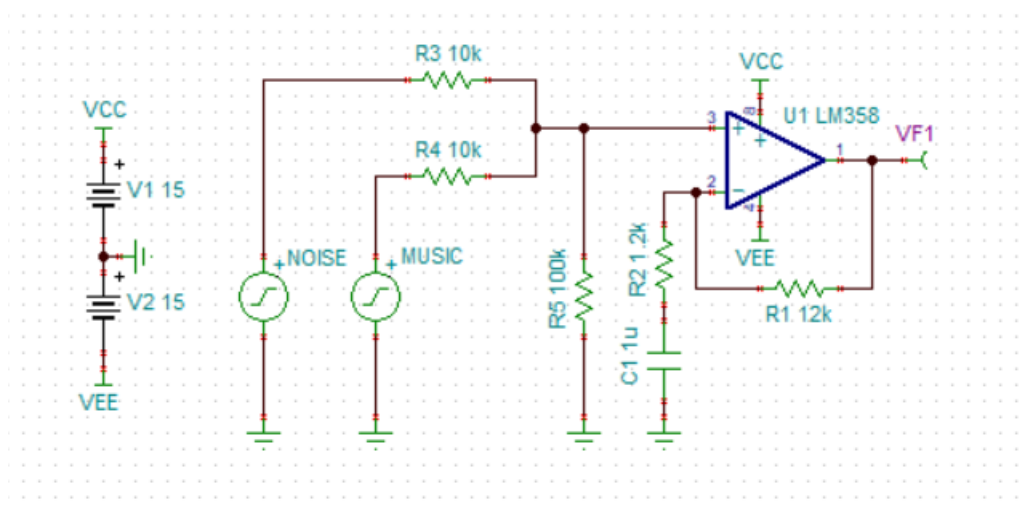


图 8.2 加法器电路图

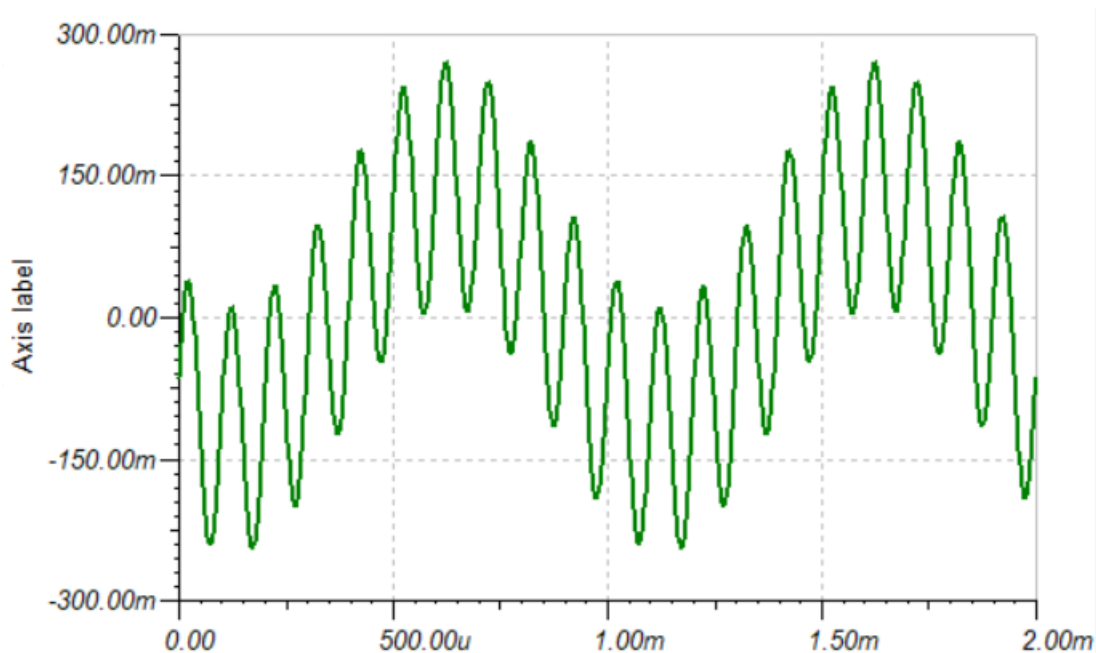


图 8.3 仿真电路图

8.3.2 滤波器设计

在几种滤波器中，巴特沃斯滤波器的特点是通频带内的频率响应曲线最大限度平坦，带内起伏较小，而在阻频带则逐渐下降为零。这就使得在通带内，音频信号可以获得最好的平坦度，提供最好的音质。故选用有源巴特沃斯低通滤波器，Sallen-Key 拓扑结构，6 阶，截止频率 3.4kHz，带内波动 0.5dB，增益为 1V/V。

在 filter—Pro 设计软件中输入对应参数，可得相应的 6 阶电路如图 8.4 所示，在 TINA 仿真软件中交流传输特性仿真如图 8.5 所示。

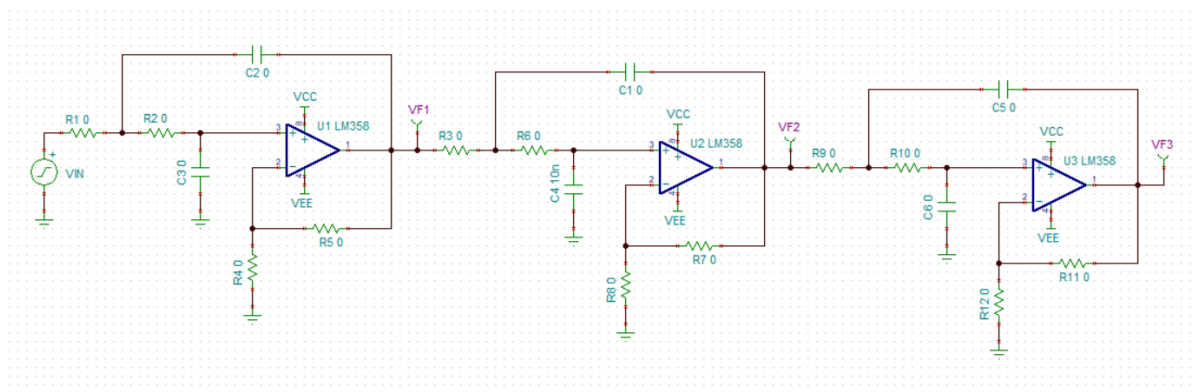


图 8.4 Sallen—Key 结构低通滤波器

(其中 R4, R6, R12 均为预留，不需焊接，其余参数请自行设计)

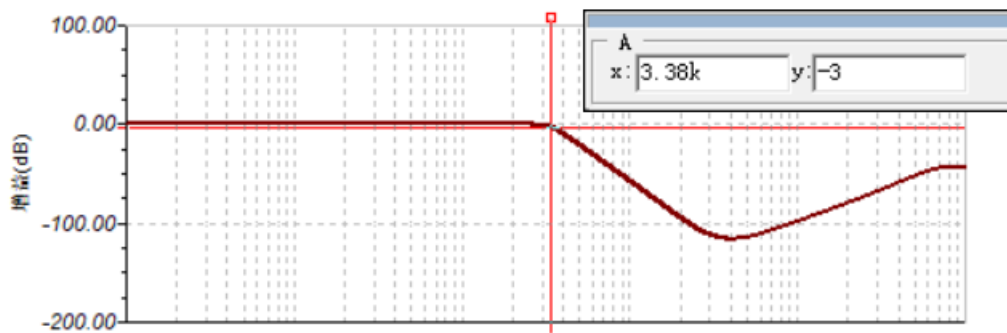


图 8.5 交流传输特性仿真图

8.4 总电路图

在 TINA 绘制整个电路进行仿真，总电路图如图 8.6 所示。

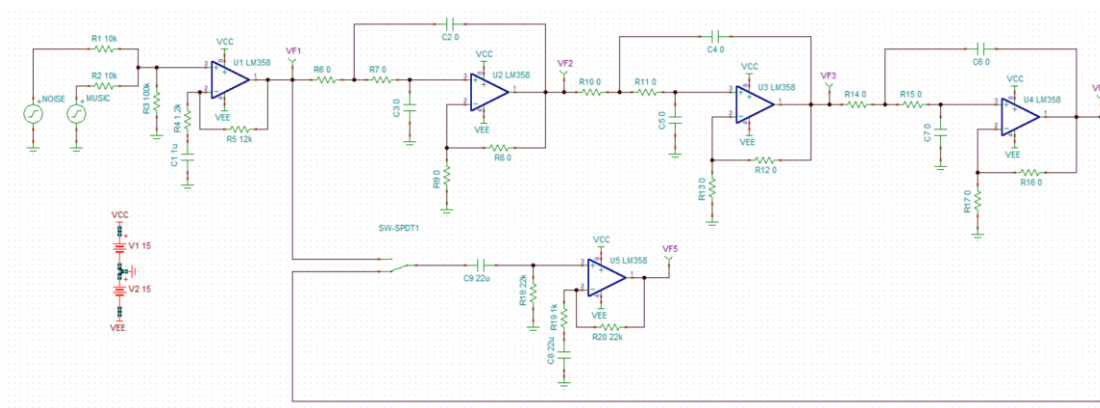


图 8.6 总电路图

8.5 原理图部分

在 AD 中绘制整个电路的原理图，并进行 PCB 设计。各个模块电路分别如图 8.7~8.10 所示，3D 模型的 PCB 如图 8.11 所示。

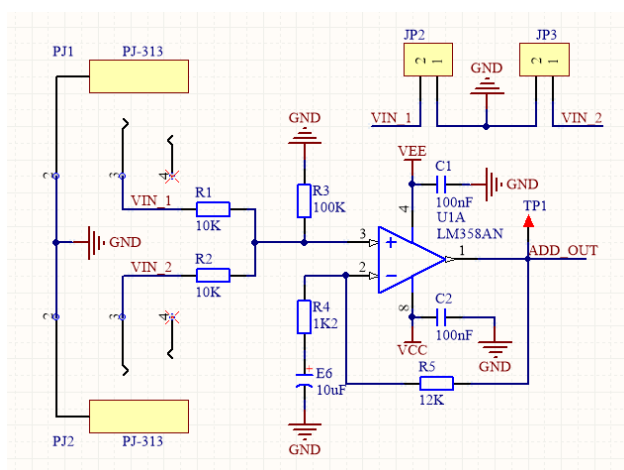


图 8.7 加法器模块

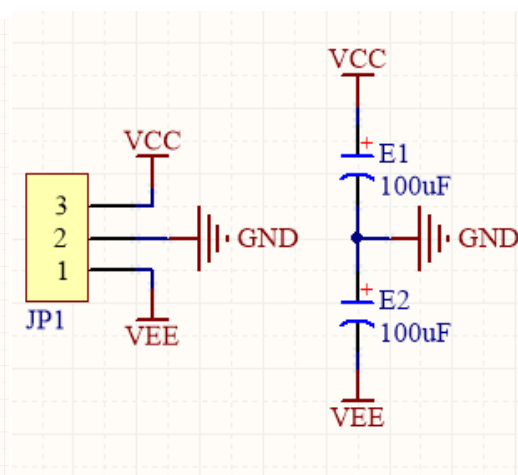


图 8.8 双电源部分

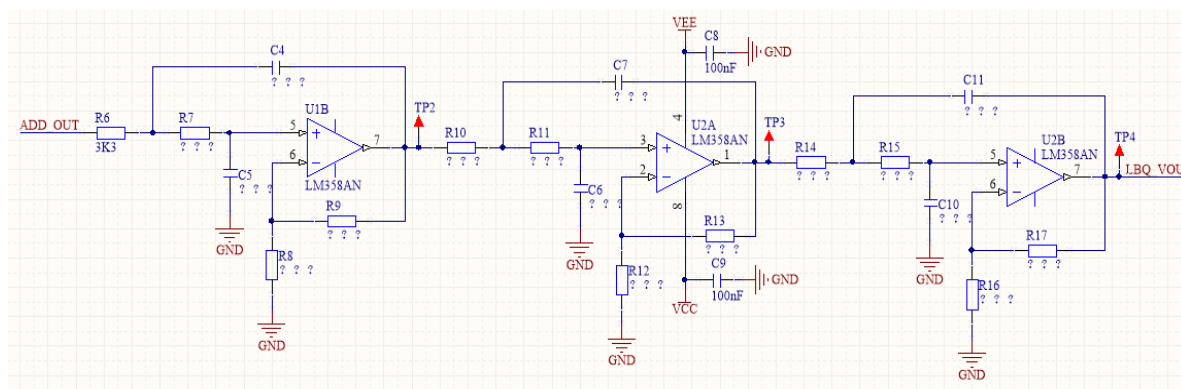


图 8.9 3.4KHz 截止频率 6 阶低通滤波器

(其中 R8, R12, R16 均为预留, 不需焊接。其余参数请自行设计)

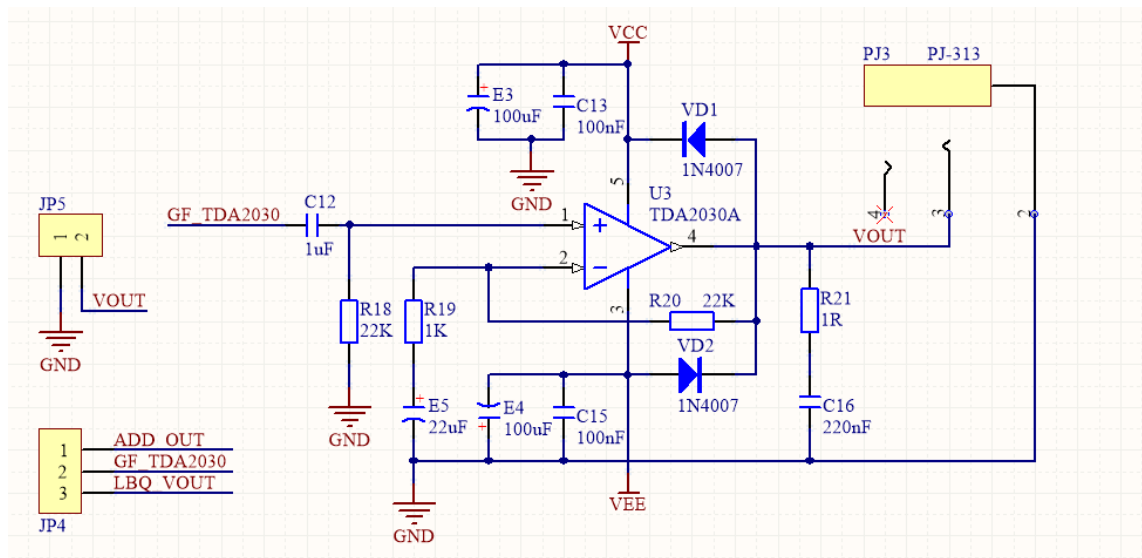


图 8.10 TDA2030 音频功率放大电路

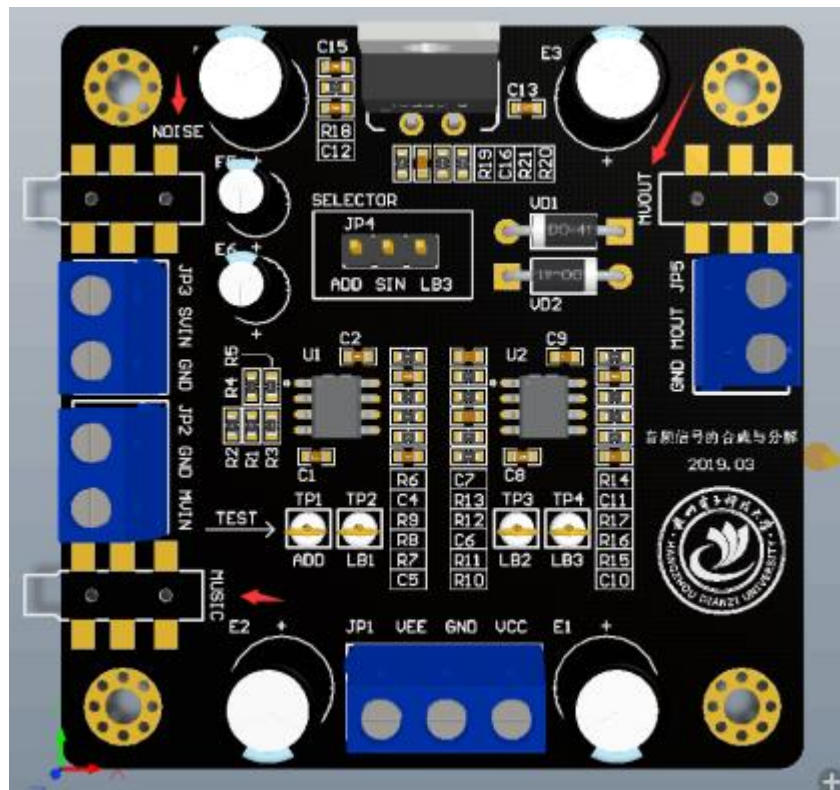


图 8.11 3D 模型图

实验九 波形产生、分解及合成的综合设计实验

9.1 设计题目

设计集成运放电路，对一个方波进行滤波，滤出基波和三次谐波后，对三次谐波移相，并与基波叠加，观察波形叠加的各种结果。这里给出用 Matlab 仿真的波形变换的过程。图 9.1 是频率为 1Hz 的方波及其基波和三次谐波的波形，图 9.2 是对三次谐波移相后与基波叠加的波形。

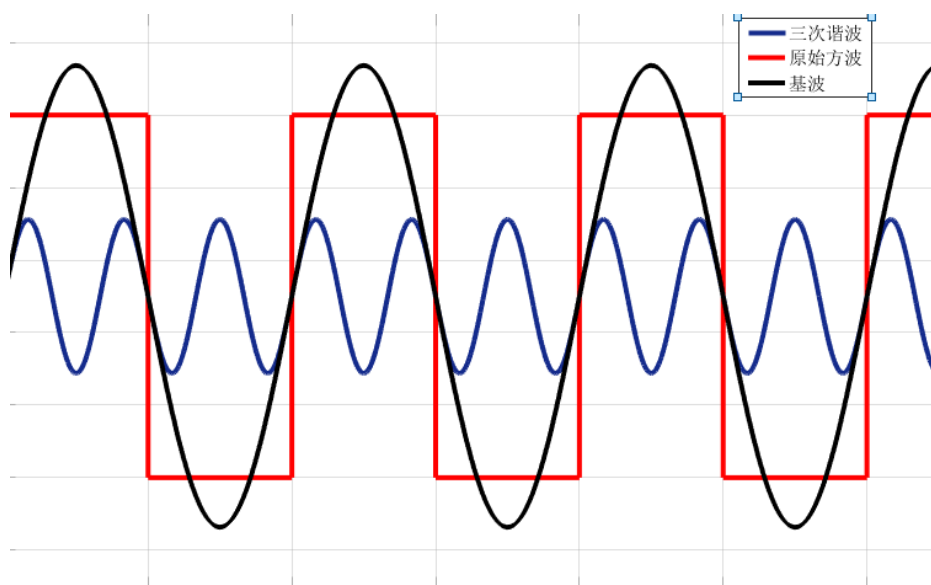


图 9.1 1Hz 的方波及其基波和三次谐波的波形

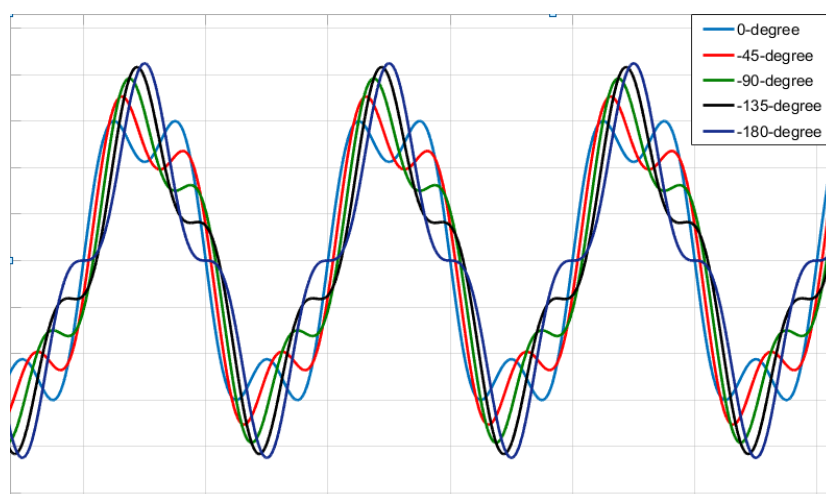


图 9.2 移相后的三次谐波与基波叠加的波形

要求:

1. 设计方波发生器, 频率为 45Hz (某学生学号后三位为 015+30Hz)。
2. 设计滤波器, 用低通滤波器滤出基波, 用带通滤波器滤出三次谐波。确定集成运放的型号, 计算滤波器中电阻和电容的取值, 实现合适的带通增益和阻带抑制。
3. 设计移相器, 对三次谐波移相。在 $0\sim 180^\circ$ 范围内选取具体移相值, 计算移相器相应的电阻和电容的取值。
4. 设计加法器, 叠加基波和移相后的三次谐波的波形。计算加法器中电阻的取值。

9.2 方案论证

9.2.1 运放选型

在工程设计中运算放大器型号选取是一项重要的工作。设计电路时需要结合放大器的特性参数, 其中包括压摆率、共模抑制比等边行综合考虑。此次题目工作频率低, 对运放的各项特性没有严苛的要求、因此选择易于获得且成本较低的 LM324 运算放大器模块。其中方波发生器模块采用 OP07。

9.2.2 题目分解

此题中需要将工程分为解方波发生器、低通滤波器、带通滤波器、移相器和加法器五个模块进行设计实现, 下面对各个模块分别进行论证分析。

(1) 方波发生器。在前面学习了单运放弛张振荡器、双运放构成的弛张振荡器和 555 电路三种产生方波的方法, 本次设计选择由单运放构成的方波发生器。

(2) 低通滤波器。题目中要求将除基波以外的所有谐波全部滤出, 结合之前所学内容得出, 为了滤出基波, 需要设计低通滤波器。本题选取有源 RC 低通滤波器方案。

(3) 带通滤波器。题目要求滤除除三次谐波之外的所有谐波和基波, 结合前面所学内容可知, 此部分需要设计带通滤波器。带通滤波器的设计有两种思路, 一种是采用低通串联高通的方法, 另一种是直接设计带通滤波器, 本设计中采取直接设计带通滤波器的方案。

(4) 移相器。题目中要求实现基波和三次谐波移相相加的功能, 在由运放构成的有源滤波器部分了解到全通滤波器具有移相的作用, 所以选用全通滤波器作为移相器的实现方案。

(5) 加法器。加法器是由运放构成的基本运算电路之一, 有同相相加器和反相相加器两种, 此次方案采取同相相加器的实现方案。

方案总体框图如图 9.3 所示。

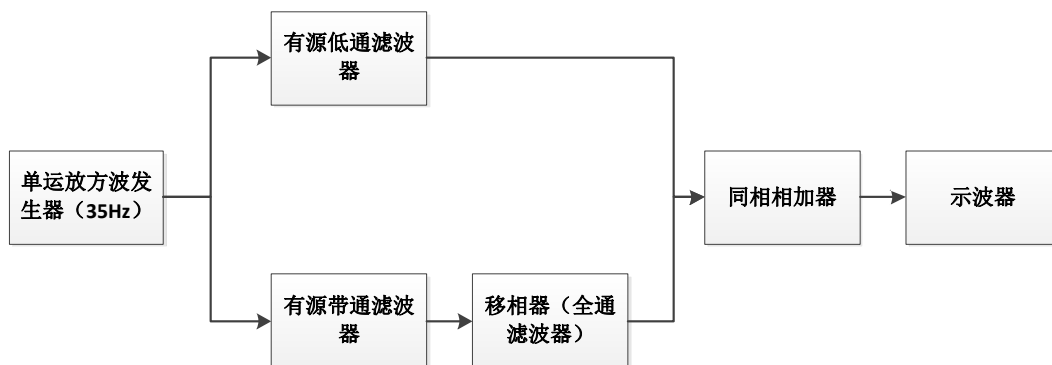


图 9.3 方案整体框图

9.3 理论设计及仿真

下面将结合教材理论知识对各个模块的理论设计进行详细的讲解

9.3.1 方波发生器设计与仿真

方波发生器的设计是题目中比较简单的部分。其主要设计参数为方波频率。本题要求为 **45Hz**。结合单运放弛张振荡器的振荡频率计算公式：

$$f = \frac{1}{2R_5 C \ln\left(1 + 2\frac{R_4}{R_3}\right)}$$

进行参数的计算选取。在工程设计中，一般首先选取电容 C, 因为相对于电阻来说电容的可选容值较少。此次首先选取电容 $C_1=1\mu\text{F}$ ，然后选取电阻 $R_4=5\text{k}\Omega$ ， $R_3=10\text{k}\Omega$ ，算出 $R_5=16.029\text{k}\Omega$ ，电路如图 9.4 所示。考虑到电容电阻值的实际误差、用一个电阻($10\text{k}\Omega$)和一个电位器($20\text{k}\Omega$)串联，调节电位器使方波频率为 **45Hz**。

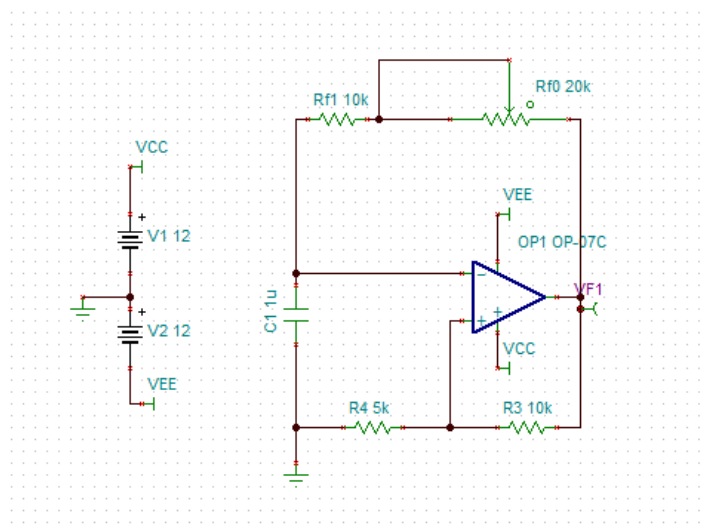


图 9.4 方波发生器

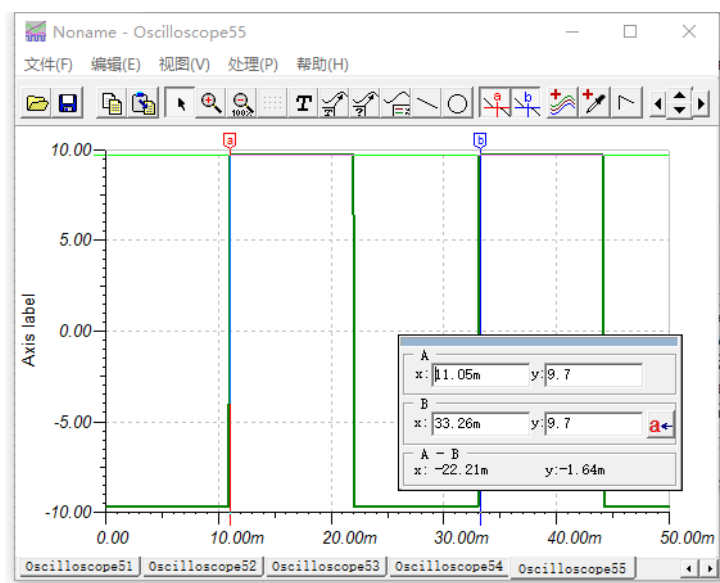


图 9.5 45HZ 方波发生器电路仿真图

9.3.2 滤波器设计与仿真

在进行滤波器的设计之前，首先要知道方波的频谱分布图，将方波进行傅里叶级数展开可得：

$$f(t) = \frac{4E}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \dots \frac{1}{n} \sin n\omega t \right)$$

由展开式可知方波含有基波分量（45Hz）以及三次谐波（105Hz），五次谐波（175Hz）等奇次谐波分量。

（1）低通滤波器的设计与仿真

1）二阶低通滤波器设计与仿真。低通滤波器的任务是滤除基波以外的所有谐波。设计滤波器时需要考虑的因素有拓扑结构，阶数等。拓扑结构可以选取 Sallen-key 结构。如图 9.6 是一个经典的 Sallen-key 二阶低通滤波器，该电路的主要参数如下：

截止频率：

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

通带增益：

$$A_{uf}=1$$

品质因数：

$$Q = \frac{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}{C_1(R_1 + R_2) + R_1 C_2(1 - A_{uf})} = \frac{RC\sqrt{2}}{2RC} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707$$

$Q=0.707$ ，可见是巴特沃斯低通滤波器。

根据以上公式，设计电路：

① 选电容

$$C_1=C_2=1\mu\text{f}, C_2=2C=2\mu\text{F}$$

② 根据截止频率选取电阻

$$R_1 = R_2 = R = 0.707 \frac{1}{2\pi C f_o} = 0.707 \frac{1}{2\pi \times 10^{-6} \times 45} \approx 2.50k\Omega$$

③ 实际电路图

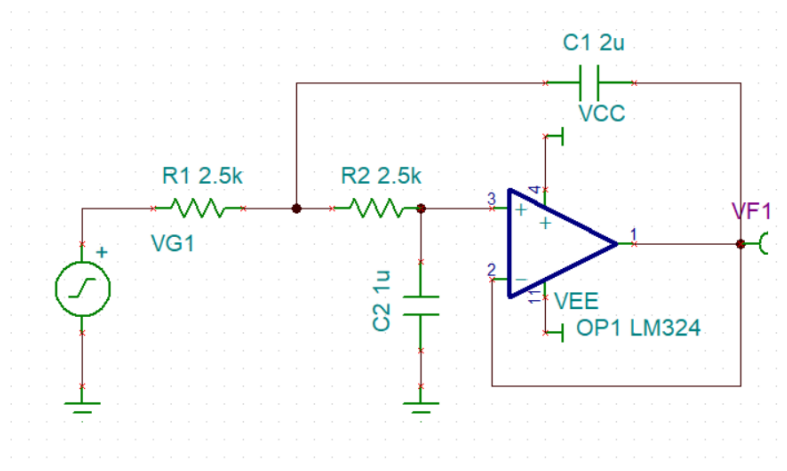


图 9.6 Sallen-key 二阶巴特沃斯低通滤波器

④ 对图电路的频率响应用 Tina 进行仿真，得幅频响应如图 9.7 所示。可见该电路的通带增益为 1(0 dB)，上限频率为 45 Hz(衰减-3.01dB)，三次谐波为 135 Hz(衰减-19.13dB)，其瞬态仿真波形如图 9.8 所示。可见波形不十分理想、说明三次谐波滤除不够，仍然少量混在基波之中，为增大幅频特性的滚降速度、特此增加滤波器阶数为六阶。

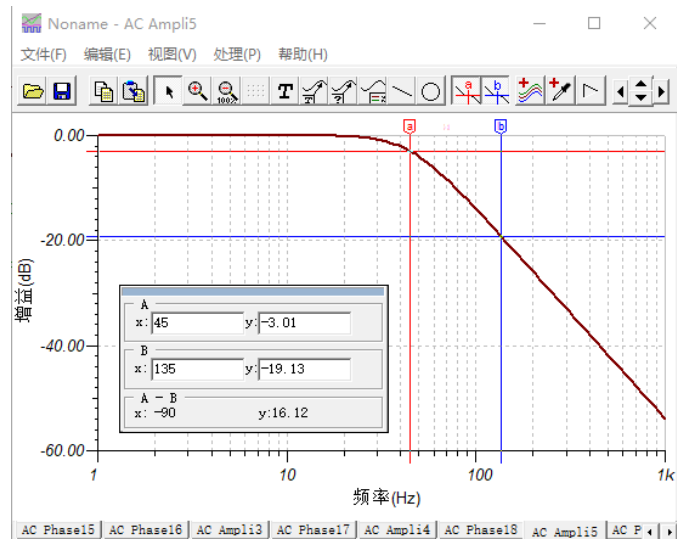


图 9.7 Sallen-key 二阶巴特沃斯低通滤波器的幅频响应

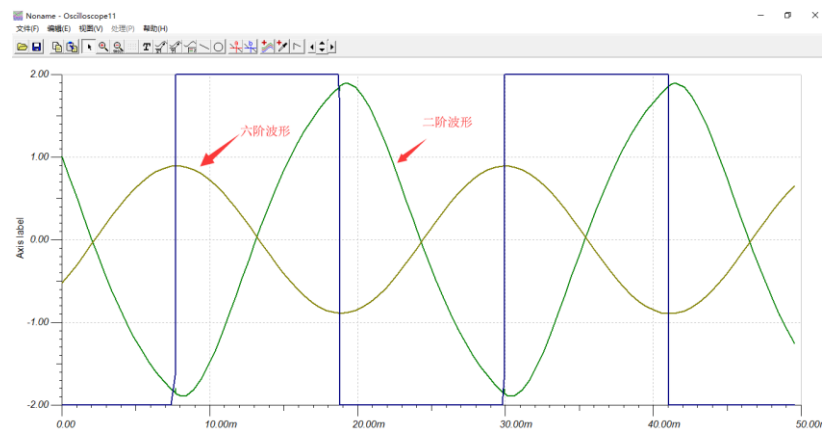


图 9.8 方波经过二阶低通和六阶低通滤波器后得到的基波波形

2) 六阶低通滤波器的设计与仿真。六阶低通滤波器由三级二阶低通滤波器级联而成，电路如图 9.9 所示。

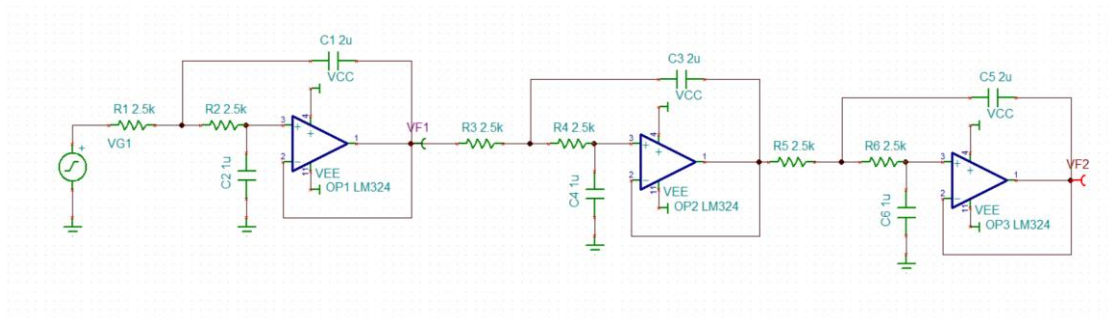


图 9.9 三级二阶级联而成的六阶低通滤波器

六阶低通滤波器的仿真幅频特性如图 9.10 所示。由图可见，带通增益仍为 0dB，曲线滚降大大增大，45Hz 处的衰减为-9.04dB，三次谐波 135Hz 处的衰减为-57.4dB，说明对三次谐波分量抑制得很好。从图 9.8 的波形也证明了这一点，经六阶低通滤波器滤波后的基波波形已经接近理想正弦波了。

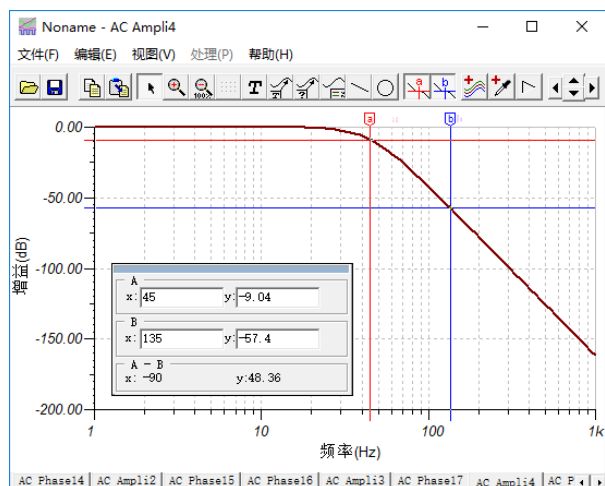


图 9.10 六阶低通滤波器的仿真幅频特性图

(2) 带通滤波器的设计与仿真

带通滤波器的任务是滤出方波的三次谐波，去除基波和其他高次谐波，其主设计共有两种思路，一种是用低通串联高通构成带宽较宽的带通滤波器，另一种是直接构成带通滤波器，即带宽较窄、选择性更好的带通滤波器。在本题目设计中选用后者比较合适、而且仍然采用 Sallen-key 类型的带通滤波器电路。在带通滤波器的设计中，应该把中心频率设置为需要滤出信号的频率即 135 Hz，同时要对基波和五次及以上谐波进行衰减，因此需要把基波和高次谐波置于通频带以外，用一节二阶带通滤波器可能是不行的，但由于高阶可由二阶组合而成，故还是首先从设计二阶带通滤波器入手。

1) 二阶带通滤波器设计与仿真。二阶 Sallen-key 带通滤波器电路如图 9.11 所示

电路参数如下：

中心频率：

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{R_5 C_3 C_4} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}$$

-3dB 带宽：

$$BW_{-3dB} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{R_5 C_3} + \frac{1}{R_5 C_4} + \frac{1}{R_1 C_4} + \frac{1 - A_{uf}}{R_2 C_4} \right)$$

品质因数

$$Q = \frac{f_o}{BW_{-3dB}}$$

$$A_{uf} = 1 + \frac{R_{f2}}{R_{f1}} \quad (\text{注意 } A_{uf} \text{ 并不等于中心频率增益 } H(\omega_o))$$

根据以上理论公式，可以计算出电路元件值

① 本题二阶带通的中心频率 $f_o=135\text{Hz}$ ，选电容 $C3=C4=1\mu\text{F}$ 电阻 $R1=10\text{k}\Omega$, $R5=1.2\text{k}\Omega$ ，根据中心频率表达式可计算出 $R2 \approx 1.3\text{k}\Omega$ 。

② 根据带宽及 Q 值表达式可计算出 A_{uf} 值，带宽越窄， Q 值越高，选择性越好、但 Q 值太高，将使电路工作不稳定，本设计选 $BW_{-3dB}=50\text{Hz}$ 左右， $Q=2.7$ 左右，计算出 $A_{uf} \approx 2.88 = 1 + \frac{R_{f2}}{R_{f1}}$ ，选 $R_{f2}=1\text{k}\Omega$ ，算出 $R_{f1}=532\Omega$ ，选 $R_{f1}=560\Omega$ 。

给出设计后的实际电路图如图 9.11 所示。

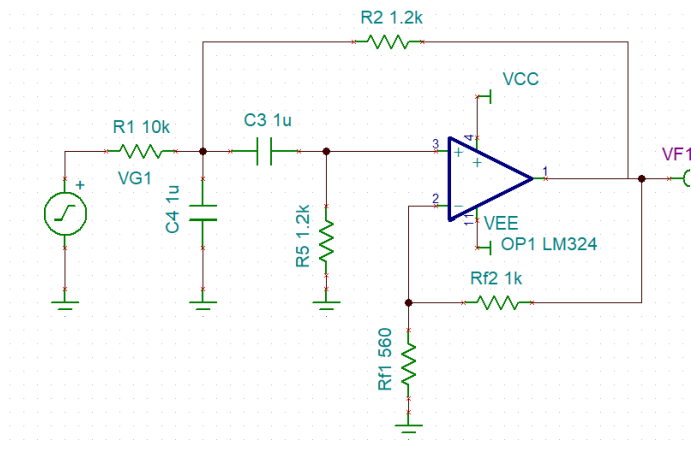


图 9.11 二阶 Sallen-key 带通滤波电路

对该电路进行仿真、得其幅频特性如图 9.12 所示。图中表明该电路的中心频率为 135Hz ，中心频率增益为 -0.26dB ，对基波(45Hz)的衰减为 -18dB ，对五次谐波的衰减仅为 -10.26dB ，可见衰减量太小，瞬态波形仿真进一步说明了这一点。

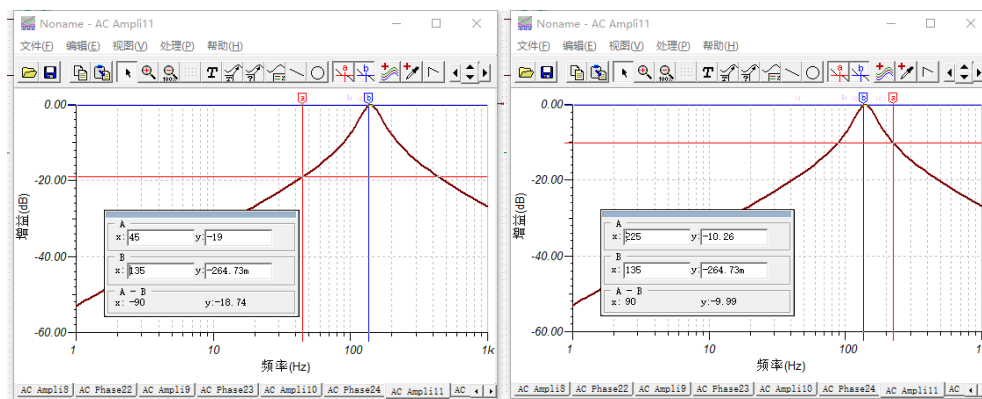


图 9.12 二阶带通滤波器的幅频特性图

2) 波形仿真。图 9.13 给出了二阶, 四阶, 六阶带通滤波器的波形仿真图, 可见方波经二阶滤波器滤出的三次谐波失真极大, 四阶的波形大有改善, 但还不理想, 而六阶的波形失真小, 比较理想, 因此选择六阶滤波器。

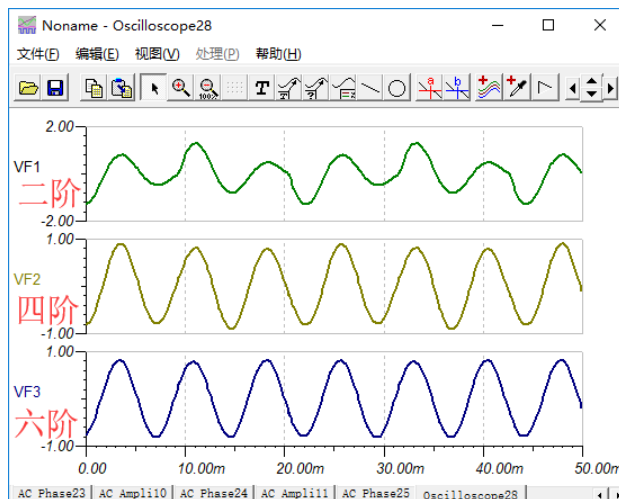


图 9.13 经二阶, 四阶和六阶带通滤波器的三次谐波波形

3) 六阶带通滤波器。六阶带通滤波器采取三级二阶带通滤波器级联构成。为设计方便, 各级采用同样的电路参数, 如图 9.14 所示。

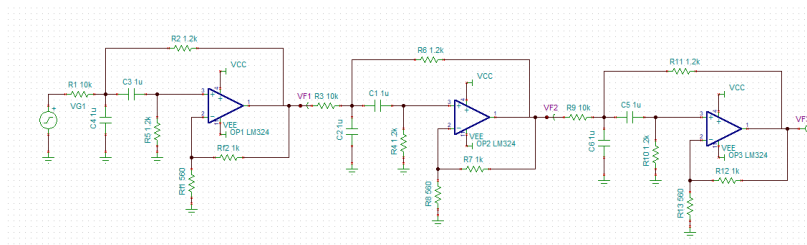


图 9.14 六阶带通滤波器电路

对六阶带通滤波器进行仿真、得其幅频特性如图 9.15 所示。图中表明该电路的中心频率为 135Hz，中心频率增益为-0.79dB，对基波(45HZ)的衰减为-57.01dB，对五次谐波的衰减为-30.77dB.基本满足要求，从图看瞬态波形失真较小。

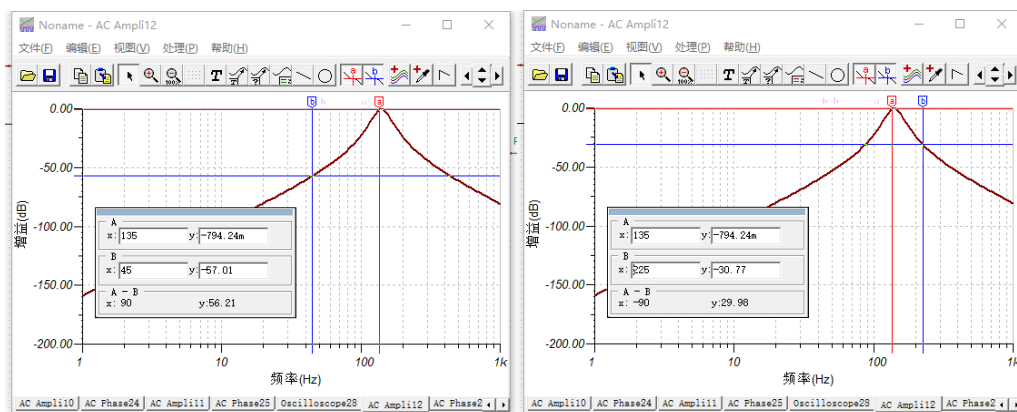


图 9.15 六阶带通滤波器电路的幅频特性图

图 9.16 同时给出方波、基波和三次谐波的波形比较，这里说明经过滤波器后，会产生一定的相移。

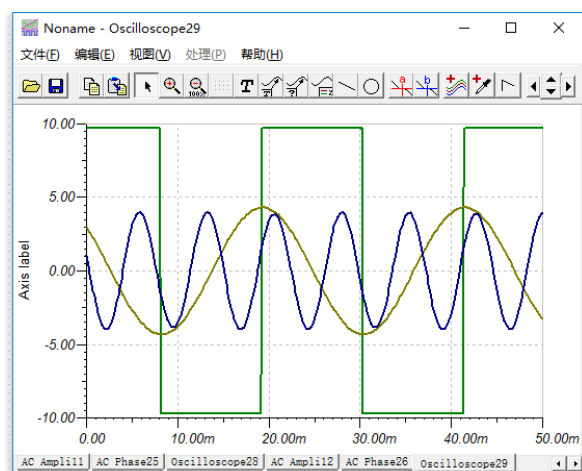


图 9.16 三次谐波与基波和方波的对比

9.3.3 移相器的设计与仿真

移相器的任务是对三次谐波进行移相，采用一阶全通滤波器实现此功能最为简单，电路如图 9.17 所示电路的传递函数为：

$$A(j\omega) = \frac{1 - j\omega R_1 C_1}{1 + j\omega R_1 C_1}$$

$$|A(j\omega)| = 1$$

$$\varphi(j\omega) = -2\arctan\left(\frac{\omega}{\omega_o}\right)$$

$$\omega_o = \frac{1}{R_1 C_1} = 2\pi f_o$$

相频特性图如图 9.18 所示。

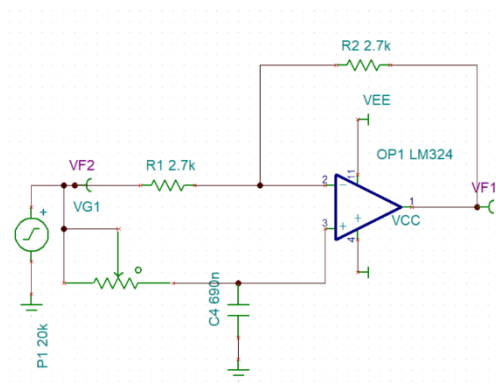


图 9.17 一阶全通滤波器电路

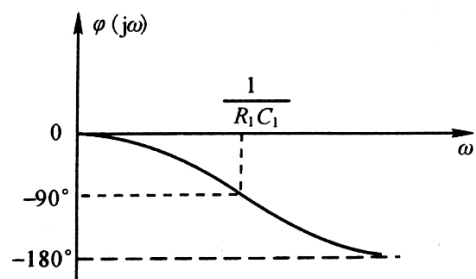


图 9.18 一阶全通滤波器附加相移频率特性

由公式可知

$$R_1 C_1 = \frac{1}{2\pi f_o} = \frac{1}{2\pi \times 135} \approx 1.179 \times 10^{-3}$$

选 $C_1=690\text{nF}$ ，则 $R_1 \approx 1.7\text{k}\Omega$ （对应相移 -90° ）。

为实现相移可调，选 R_1 为 $20\text{k}\Omega$ 的电位器。两个反馈电阻为 $2.7\text{k}\Omega$ 。图 9.19 给出经过移相器的方波与三次谐波的相位关系，改变可调电阻，相应关系也随之变化。

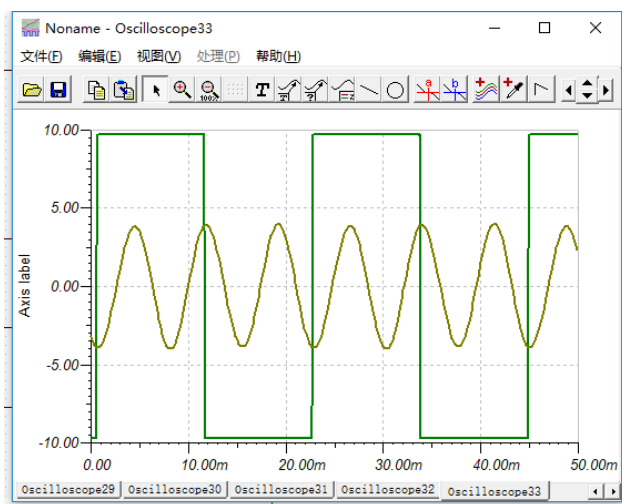


图 9.19 经移相的方波与三次谐波的位移关系

9.3.4 相加器的设计与合成波形的仿真

(1) 相加器的设计

相加器的任务是将方波的基波分量与三次谐波分量叠加，主要考虑方波与三次谐波的幅值大小与其比例问题，因题目没有严格要求，本设计采用同相相加器，电路如图 9.20 所示。

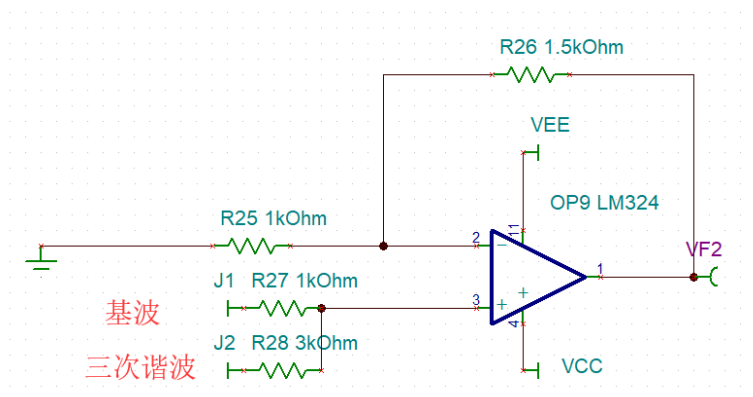


图 9.20 加法器电路

电路对基波和三次谐波的增益分别为

$$A_{u1} = \frac{u_o}{u_{i1}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \left(1 + \frac{R_f}{R} \right) = \frac{3}{4} \times 2 = 1.5$$

$$A_{u2} = \frac{u_o}{u_{i2}} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \left(1 + \frac{R_f}{R} \right) = \frac{1}{4} \times 2 = 0.5$$

因为低通滤波器对基波幅度有所衰减，而带通滤波器对三次谐波幅度有所放大，故此相加器设计对基波的增益比三次谐波的增益大。

(2) 合成波形的仿真

图 9.21 分别给出了方波，基波，三次谐波和合成波，图 9.22 给出了调节移相器 R1 使三次谐波处于另一个相位时是合成波形

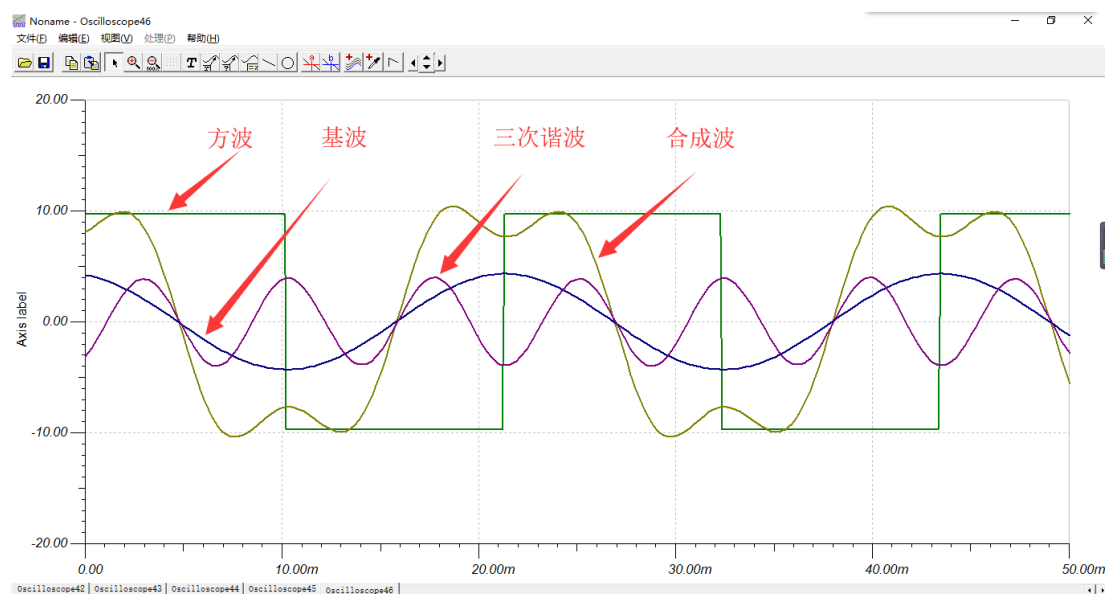


图 9.21 方波，基波，三次谐波以及合成波波形

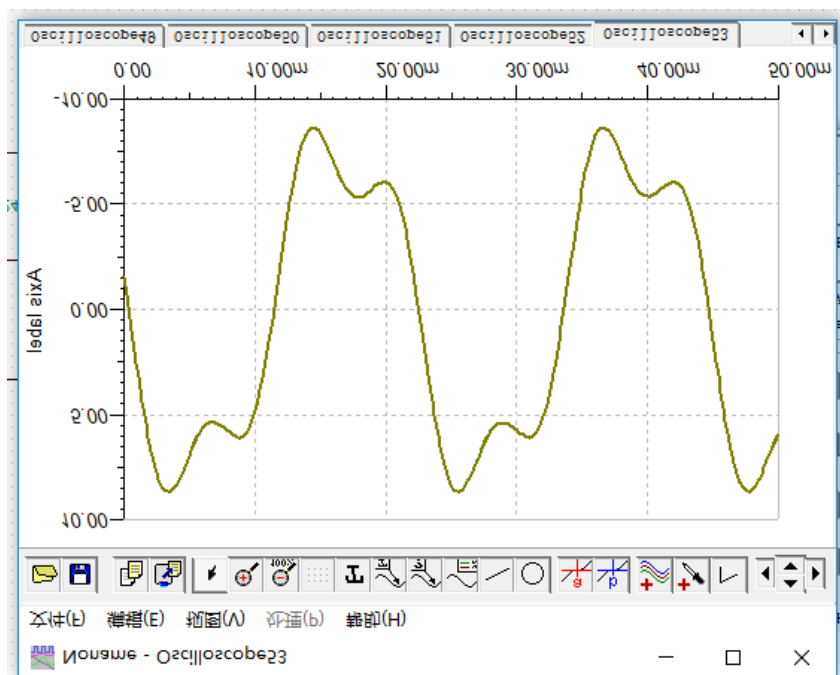


图 9.22 另一个合成波波形

9.4 总电路图

本设计总电路图如图 9.23 所示, 其中 A1(OP07)为方波产生器, A2、A3、A4、(1/4LM324)构成六阶 Sallen-key 巴特沃斯低通滤波器, A5、A6、A7(1/4LM324)构成六阶 Sallen-key 带通滤波器, A8 为移相器, A9 为相加器。LM324 为四运放, 为了连线方便, 三级低通用 1 片 LM324, 三级带通用 1 片 LM324, 移相器和相加器另用 1 片 LM324, 故该电路共用 1 片 OP07 和 3 片 LM324。

如果设计印制板, 连线可设计紧凑合理些, 可充分利用每一片 LM324、从而省掉一片 LM324, 仅用两片就够了。

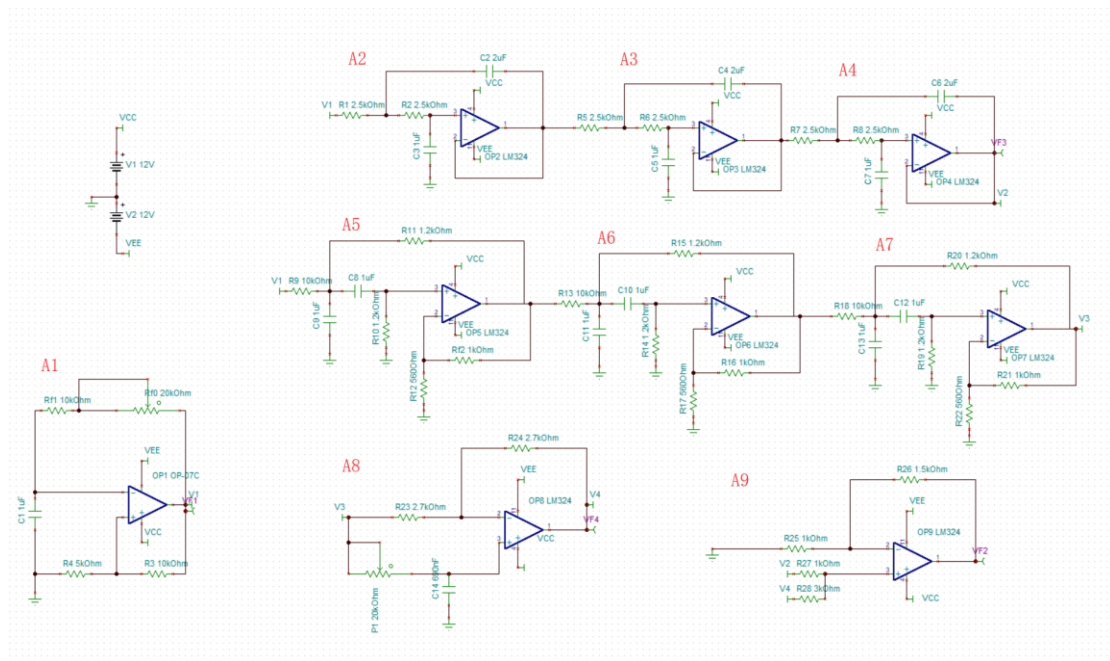



图 9.23 总电路图

附录一 Matlab 基础简介

MATLAB 是 Matrix Laboratory（矩阵实验室）的缩写，当初是 Cleve Moler 教授为学习线性代数的学生而开发的一种解释式语言。Matlab 功能非常强大，几百个核心内部函数，大量可选用的工具箱，且还在不断的增长中。这儿就不做介绍了。只有大家打开 matlab 看一下就明白了。

1. 启动 matlab 有两种主要方法

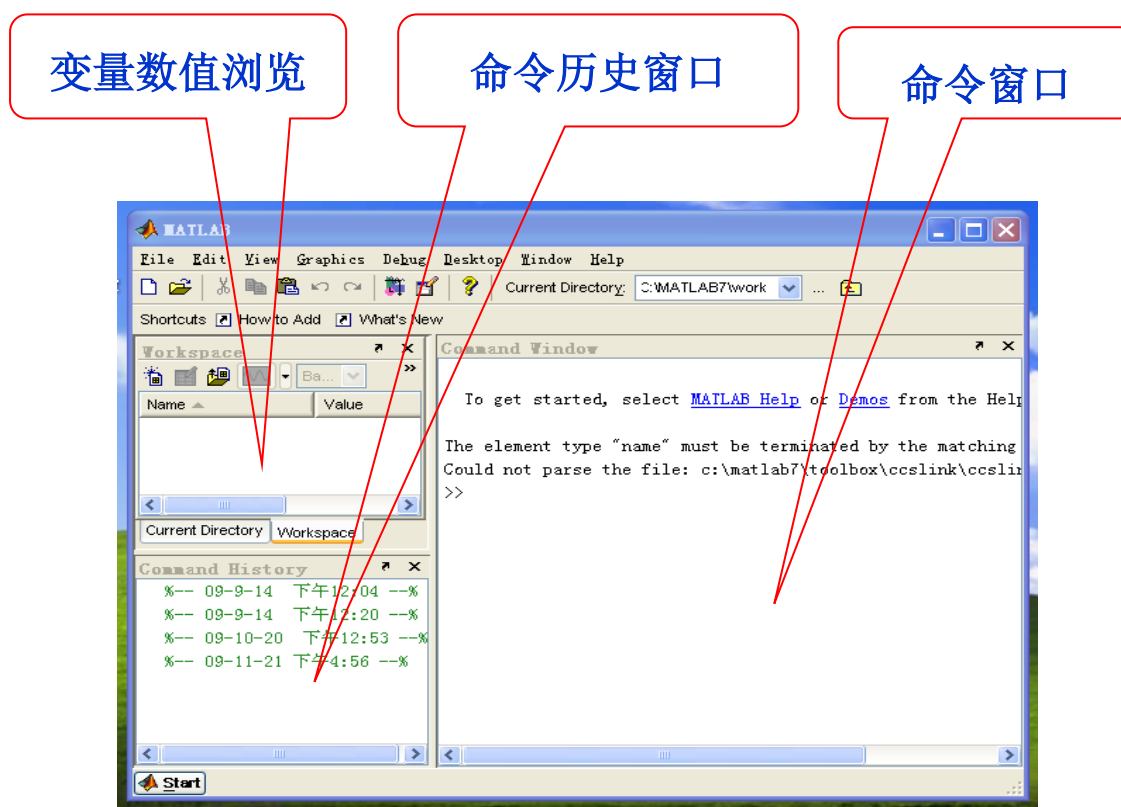
- ✓ 鼠标双击 Windows 桌面上图标 
- ✓ 在 Windows“开始”菜单的“程序”选项中选择 “MATLAB”

2. 退出 matlab 有两种主要方法

- ✓ 命令窗口键入“quit”或 “Ctrl+Q”
- ✓ 鼠标选择菜单 file ▾Exit MATLAB

3. 利用 matlab 计算

启动 matlab 之后看到如附图 1 界面：



附图 1 启动 matlab 界面

1、 matlab 的基本运算等

在命令窗口中，在命令符'>>'输入

```
>> a=2;b=5;
```

```
>> a+b      % 要按回车键，  % 符号表示注释，分号';'表示一句语句结束。  
ans =      %简单地说，就是答案，英文答案的缩写
```

```
      7  
a*c
```

```
ans =
```

```
      14
```

```
>> 21/a
```

```
ans =
```

```
    10.5000
```

对于向量和矩阵，也可以直接计算：

```
>> a=[1 2 3];b=[2 3 4];
```

```
>> a+b
```

```
ans =
```

```
      3      5      7
```

```
>> c=a+b
```

```
c =
```

```
      3      5      7
```

```
>> d=c-b
```

```
d =
```

```
      1      2      3
```

点乘 `.*`

```
>> a.*b    % 向量 a,b 相应分量相乘，类似于线性代数中的内积
```

```
ans =
```

```
2     6    12
```

```
>> b'      % 引号 ' 表示向量或矩阵的转置
```

```
ans =
```

```
2
```

```
3
```

```
4
```

```
>> e=b*b'
```

```
e =
```

```
29
```

```
>> f=b'*a
```

```
f =
```

```
2     4     6
```

```
3     6     9
```

```
4     8    12
```

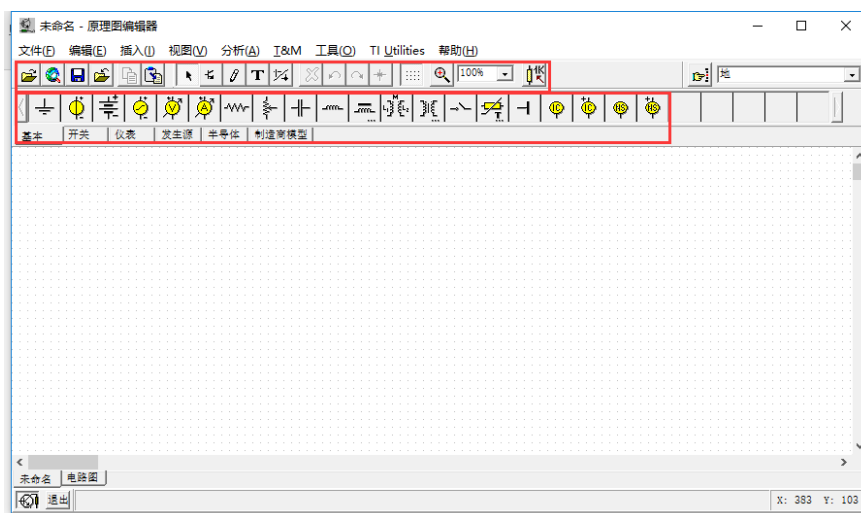
如果命令窗满屏了，可以用 `clc` 清屏命令。

附录二 电路仿真软件 TINA 的使用

TINA 是一款由 DesignSoft 开发的易于使用且功能强大的电路仿真工具，其基于 SPICE 引擎，提供了 SPICE 的所有传统直流、瞬态和频率域分析以及更多的专有功能。TINA 同时具有广泛的后处理功能，可以按照要求设置不同的输出格式，拥有各种虚拟仪器能够直观地显示输入波形、探针电路节点波形和电压。TINA-TI 是 DesignSoft 专为德州仪器 (TI) 开发的定制版 TINA 软件，包含了通用的无源元件和 TI 专有元器件库。

1、 Tina 的主窗口及工具栏

Tina 的主窗口如附图 2 所示，主菜单下的第一排为工具栏，第二排为元件库，中间的空白部分为电路工作区。

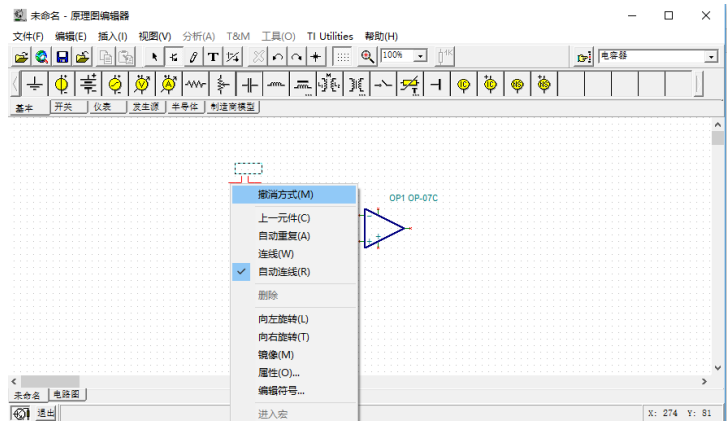


附图 2 Tina 的主要窗口及工具栏

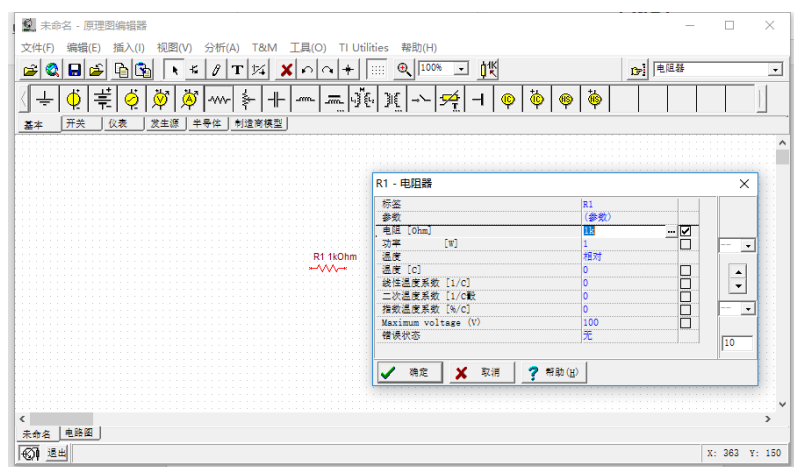
2、 电路图的绘制

(1) 元件库的使用

Tina 的元件库中有常用的元器件，绘制电路图时用鼠标左键单击元件后可将其拖入电路工作区间，若元件选择错误可右键点击撤销方式如附图 3 所示。在放置元件后双击元件，会弹出元件的属性窗口，可对元件参数进行修改如附图 4 所示。



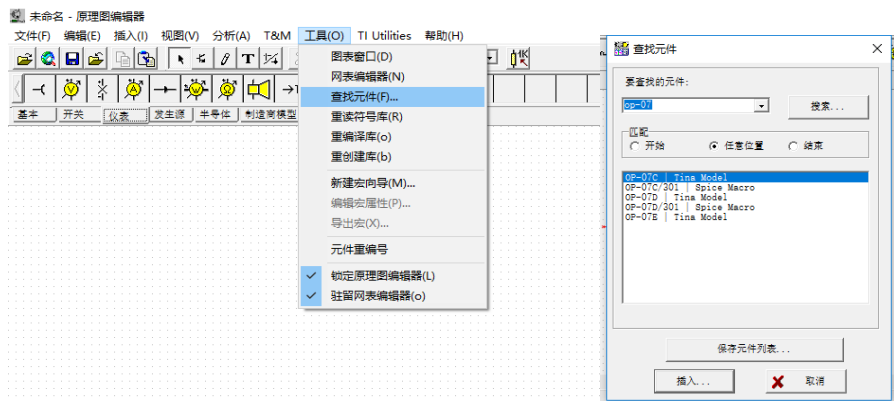
附图 3 选取元件的取消



附图 4 元件参数修改

(2) 芯片及元器件的查找

在工具栏中选择工具→查找元件，输入所许查找的元件的关键字即可，如附图 5 所示。



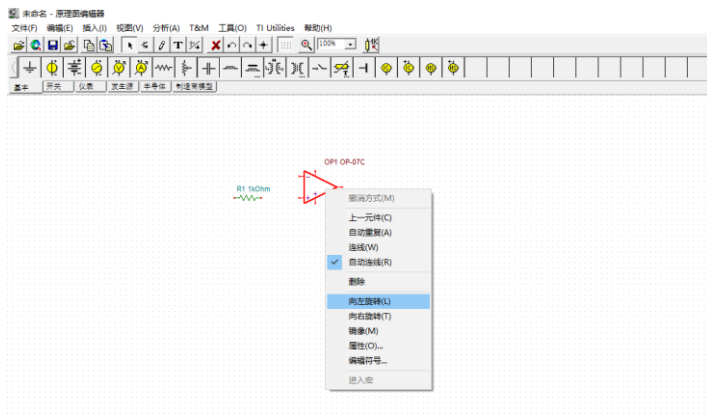
附图 5 元件查找

(3) 电路图的布局、布线

将所需元器件选取完后，若部分元器件需要旋转、翻转，可将元件选中后，右键向右旋

转、向左旋转和镜像，进行调整。如附图 6 所示。

当鼠标放置到器件的连接处时，鼠标会自动变成可连线状态，单击左键即可连线。也可按空格键进入连线状态，右键撤销方式可取消。



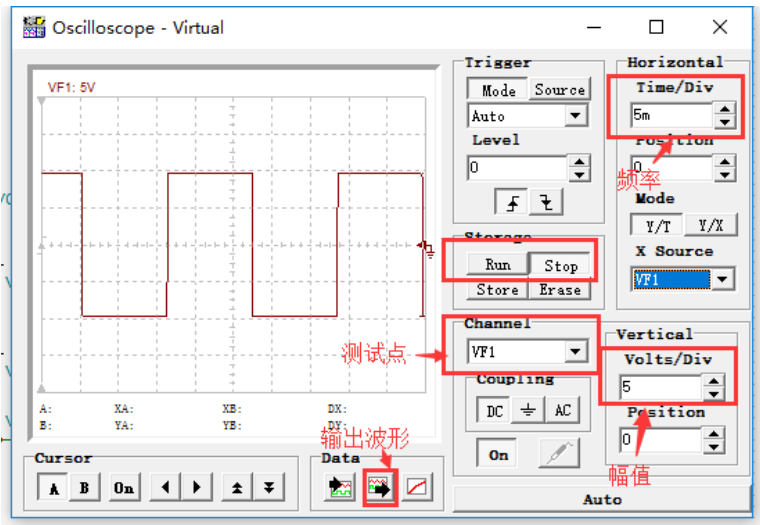
附图 6 元件调整

3、 波形显示

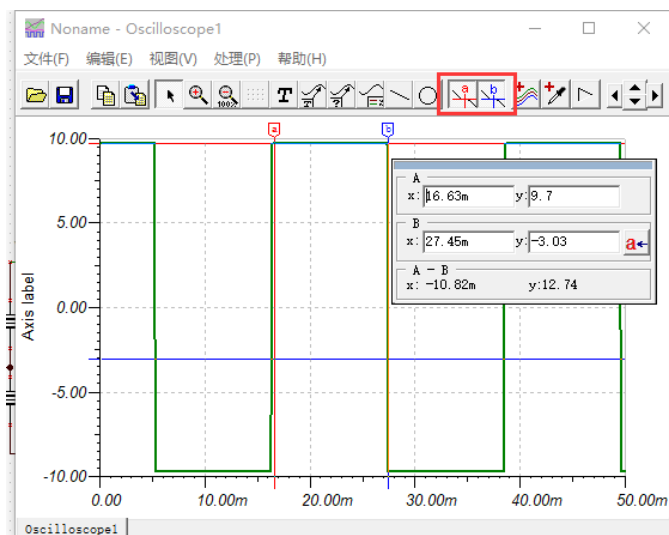
在所需测试点放置指针，指针如附图 7 所示。在工具栏的 T&M 中可选取示波器。按 run 运行后，调整波形频率和幅值。调整在合适状态后，按 stop 暂停输出波形，主要按键如附图 8 所示。如附图 9 使用探针对波形进行测量。



附图 7 探针&示波器



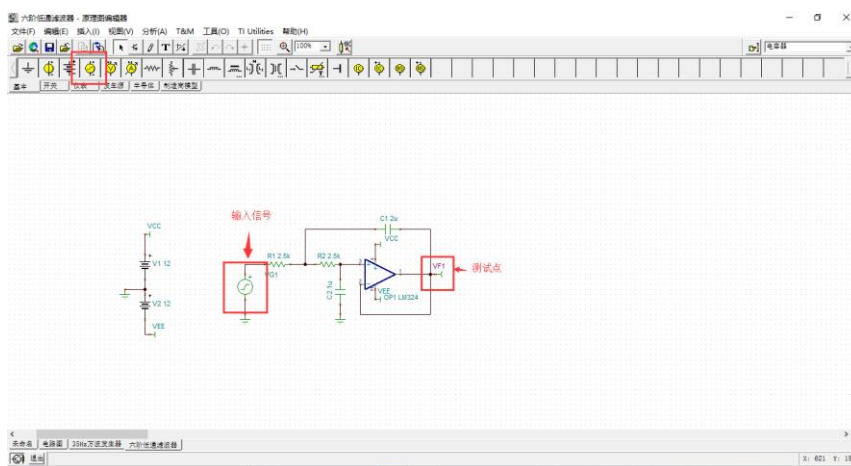
附图 8 示波器界面



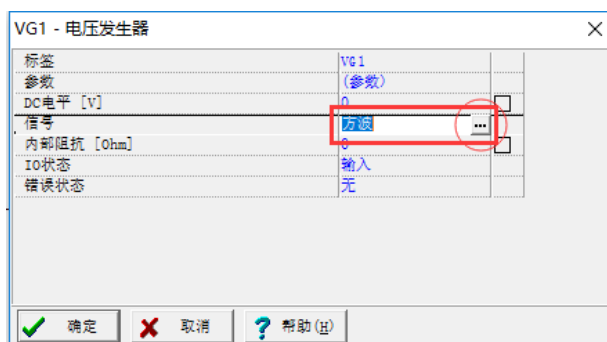
附图 9 波形输出界面

4、交流特性分析

在进行交流特性分析之前，需要一个输入信号和测试点，如附图 10。双击信号源，可对输入信号进行设置，如附图 11。

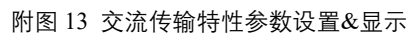
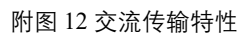


附图 10 输入信号&输出测试

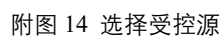


附图 11 输入信号设置

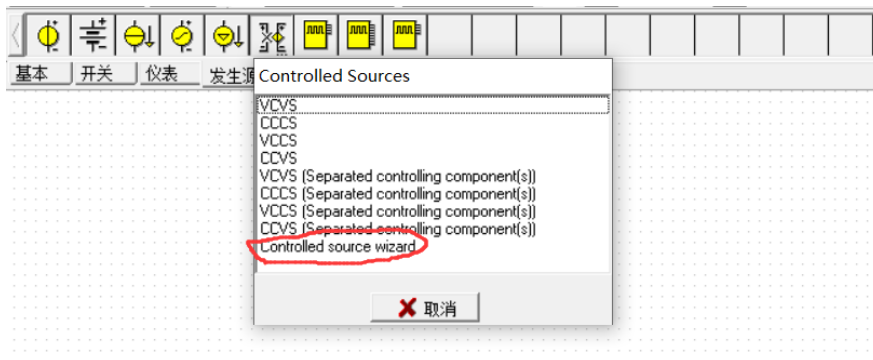
使用指针，可通过手动修改 x 轴参数，实现定位。



a) 打开 TINA-TI, 在元件库中点击发生源选择 Controlled Sources。



b) 下拉菜单中选择 Controlled source wizard。



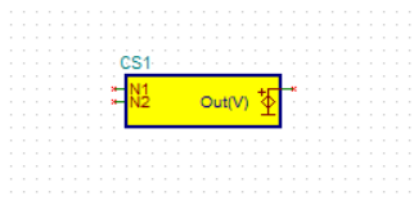
附图 14 选择受控源向导

c) 在受控源编辑器中，将输入电压值数量改为 2，并在表达式窗口中输入乘法器表达式 $V(N1)*V(N2)$



附图 15 编辑受控源表达式

d) 点击确定变生成了一个两输入乘法器。



附图 16 生成理想乘法器

附录三 电子滤波器设计软件 FilterPro 的使用

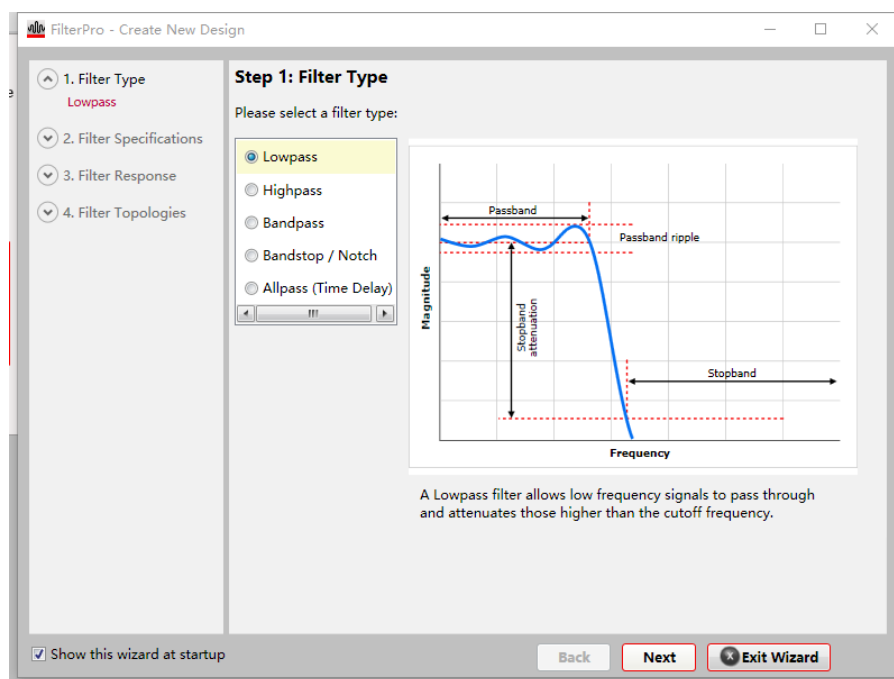
1、功能介绍

FilterPro 程序是由 TI 公司开发的辅助有源滤波器设计软件,其可以帮助用户设计 Sallen-key 和 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思 (Butterworth)、切比雪夫 (Chebyshev)、贝塞尔 (Bessel)、高斯 (Gauss) 和线性相移 (Linear Phase) 等。

FilterPro 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。

2、FilterPro 的简易使用教程:

启动 FilterPro 后,软件直接进入设计向导界面,如附图 17 所示,可以选择的滤波器类型有低通、高通、带通、带阻和全通滤波器,选择所需设计的滤波器后点击 NEXT 进入下一步。



附图 17 FilterPro 设计向导

FilterPro 滤波器设计向导的第二步可设置滤波器的详细参数,如附图 18 所示,包含设

计参数和滤波器频率响应示意图：

Gain: 增益，根据情况调整

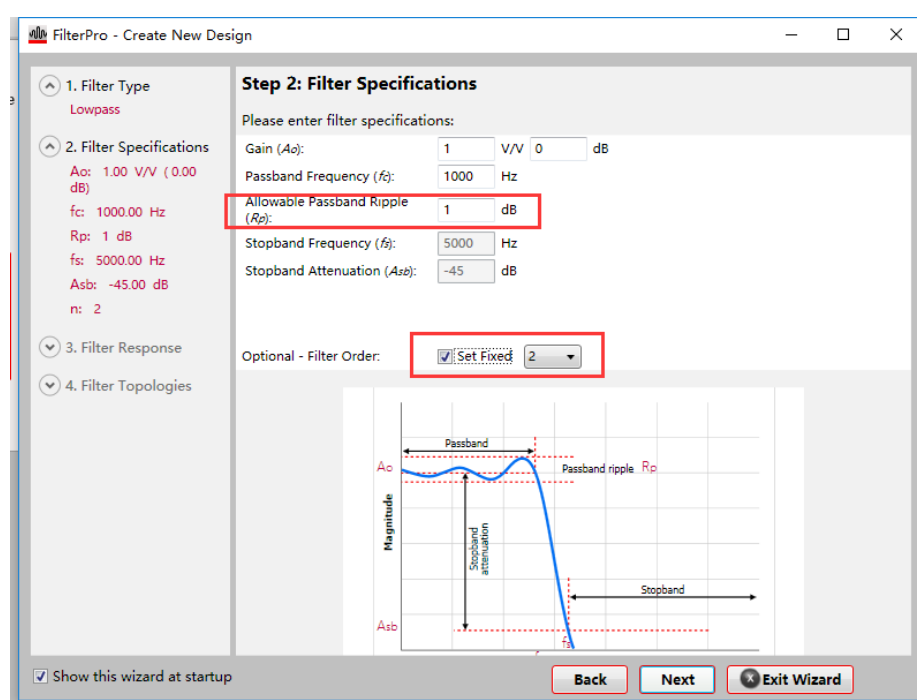
Passband Frequency: 通带频率，考虑信号衰减过程，适当将参数减小或增大

Allowable Passband Ripple: 通带增益波动，无特殊说明无需修改

Stopband Frequency: 阻带频率

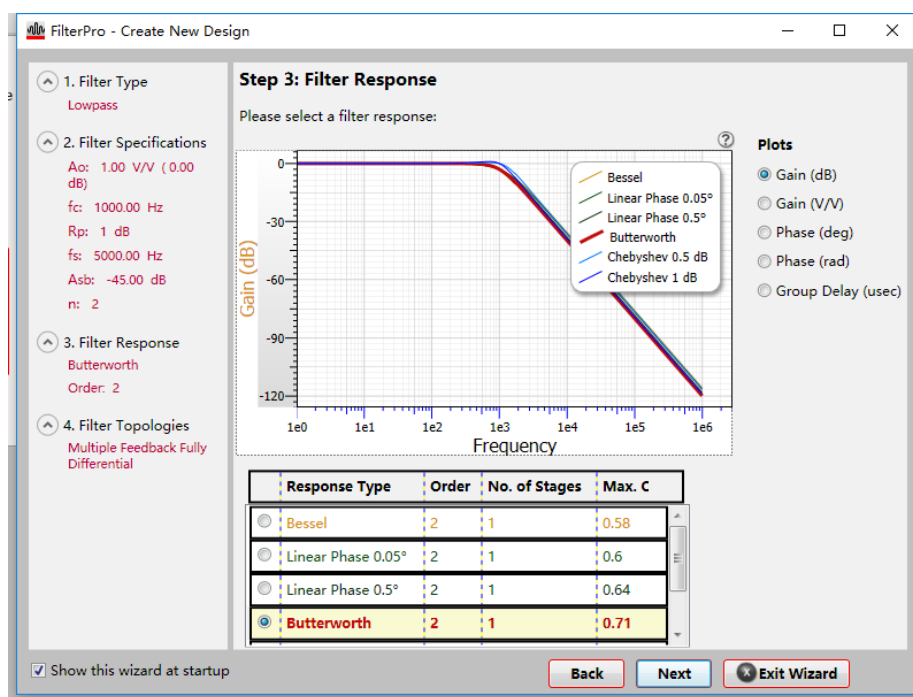
Stopband Attenuation: 阻带衰减，在阻带频率点之后的信号衰减量。

FilterPro 软件会根据上述参数设置自动确定滤波器阶数，也可以选择 **Set Fixed** 设置滤波器固定阶数，固定滤波器阶数后阻带频率将由滤波器阶数决定。设置完毕后点击 **NEXT** 进入下一步



附图 18 FilterPro 滤波器参数设置

FilterPro 滤波器设计向导的第三步可选择滤波器的频率响应，如附图 19 所示，包含巴特沃思 (**Butterworth**)、切比雪夫 (**Chebyshev**)、贝塞尔 (**Bessel**)、高斯 (**Gauss**) 和线性相移 (**Linear Phase**) 等响应类型，也可以切换显示增益频率响应图、相位响应图、群延时图等不同显示方式。



附图 19 FilterPro 滤波器频率响应设置

滤波器的类型主要为:

贝塞尔(Bessel): 延时特性和幅频特性最平坦, 从通带到阻带衰减缓慢。

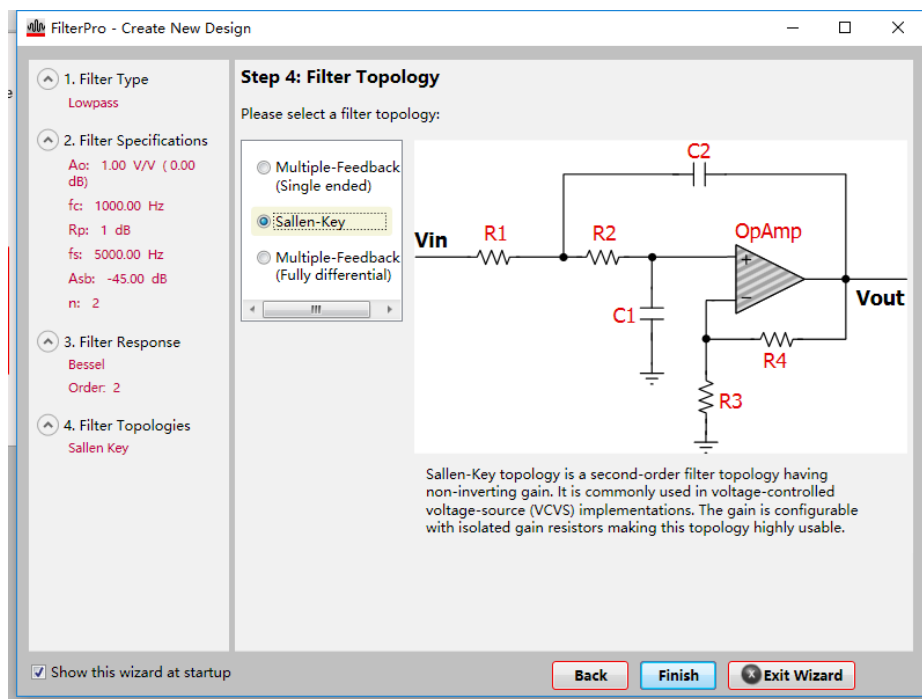
巴特沃思(Butterworth): 在通带内幅频曲线的幅度最平坦, 由通带到阻带衰减陡度较缓。

切比雪夫(Chebyshev): 在通带内具有相等的波纹, 截频衰减陡度比同阶巴特沃斯特性更陡。

通常情况下巴特沃思使用较多。

选择完毕后点击 **NEXT** 进入下一步

FilterPro 滤波器设计向导的第四步可选择滤波器的拓扑, 如附图 20 所示, 包含 **MFB** 拓扑、**Sallen-Key** 拓扑、**差分 MFB** 拓扑以及相应的电路原理图。



附图 20 FilterPro 滤波器拓扑选择

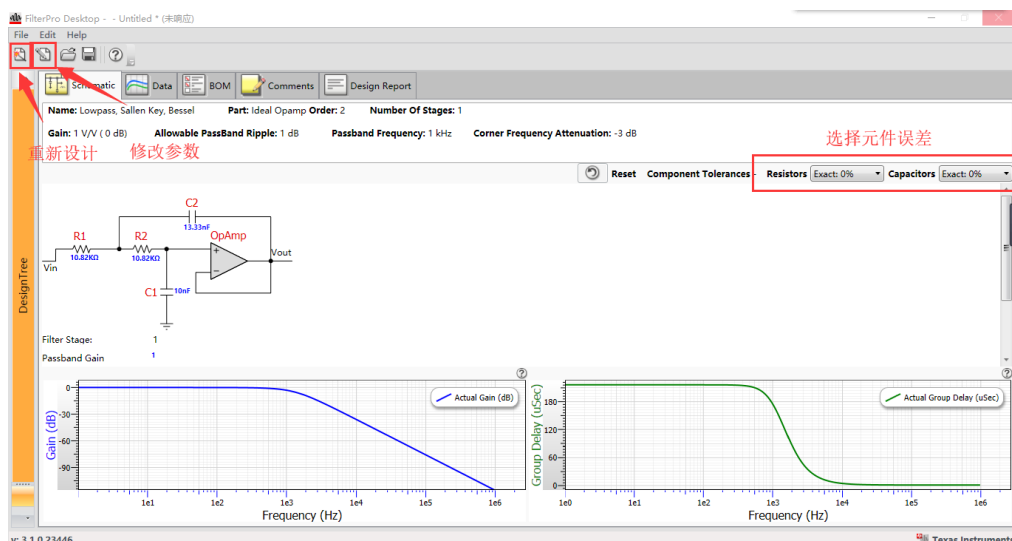
Sallen-Key 拓扑具有高输入阻抗，且增益易配置，运放设置为电源跟随模式

MFB 拓扑对元件值改变敏感低

一般来说，**MFB** 比较常用，但在滤波器为单位增益，且对 **Q** 值要求低时可选择 **Sallen-Key**

选择完毕后点击 **Finish** 完成设计。

FilterPro 滤波器设计报告中包含了丰富的信息，如附图 21 所示，包含电路原理图、电路元件参数、电路的频率响应和相位响应。



附图 21 FilterPro 滤波器设计报告

一般来说，直接设计得到的元件值在实际电路中无法找到，**FilterPro** 软件可以修改元件误差，将元器件的值修改为标准电阻电容值，便于在实际制作中元件值的选择，同时**FilterPro** 软件也会给出电路参数变化以后滤波器频率响应和相位响应的变化。