

运算放大器应用电路的设计与制作

一. 实验目的

1. 掌握运算放大器和滤波电路的基本工作原理；
2. 掌握运用运算放大器实现滤波电路的原理方法；
3. 会用 Multisim10 对电路进行仿真分析；

二. 实验内容

1. 讲解运算放大器和滤波电路的基本工作原理；
2. 讲解用运算放大器实现滤波电路的原理方法；
3. 用 Multisim10 对二阶有源低通滤波电路进行仿真分析；

三. 实验仪器

1. 支持 Win2000/2003/Me/XP/vista 的 PC 机；
2. Multisim10 软件；

四. 实验原理

(一) 运算放大器

1. 原理

运算放大器是目前应用最广泛的一种器件,当外部接入不同的线性或非线性元器件组成输入和负反馈电路时,可以灵活地实现各种特定的函数关系。在线性应用方面,可组成比例、加法、减法、积分、微分、对数等模拟运算电路。

运算放大器一般由4个部分组成,偏置电路,输入级,中间级,输出级。

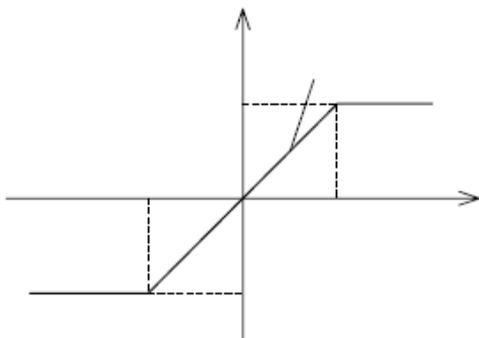


图1运算放大器的特性曲线

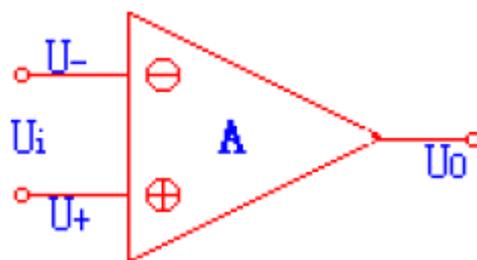


图2运算放大器输入输出端图示

图1是运算放大器的特性曲线，一般用到的只是曲线中的线性部分。如图2所示。 U_- 对应的端子为“-”，当输入 U_- 单独加于该端子时，输出电压与输入电压 U_- 反相，故称它为反相输入端。 U_+ 对应的端子为“+”，当输入 U_+ 单独由该端加入时，输出电压与 U_+ 同相，故称它为同相输入端。

输出： $U_0 = A(U_+ - U_-)$ ； A 称为运算放大器的开环增益（开环电压放大倍数）。

在实际运用经常将运放理想化，这是由于一般说来，运放的输入电阻很大，开环增益也很大，输出电阻很小，可以将之视为理想化的，这样就能得到：开环电压增益 $A_{ud} = \infty$ ；输入阻抗 $r_i = \infty$ ；输出阻抗 $r_o = 0$ ；带宽 $f_{BW} = \infty$ ；失调与漂移均为零等理想化参数。

2. 理想运放在线性应用时的两个重要特性

输出电压 U_0 与输入电压之间满足关系式： $U_0 = A_{ud}(U_+ - U_-)$ ，由于 $A_{ud} = \infty$ ，而 U_0 为有限值，因此， $U_+ - U_- \approx 0$ 。即 $U_+ \approx U_-$ ，称为“虚短”。

由于 $r_i = \infty$ ，故流进运放两个输入端的电流可视为零，即 $I_{IB} = 0$ ，称为“虚断”，这说明运放对其前级吸取电流极小。

上述两个特性是分析理想运放应用电路的基本原则，可简化运放电路的计算。

3. 运算放大器的应用

(1) 比例电路

所谓的比例电路就是将输入信号按比例放大的电路，比例电路又分为反向比例电路、同相比例电路、差动比例电路。

(a) 反向比例电路

反向比例电路如图3所示，输入信号加入反相输入端：

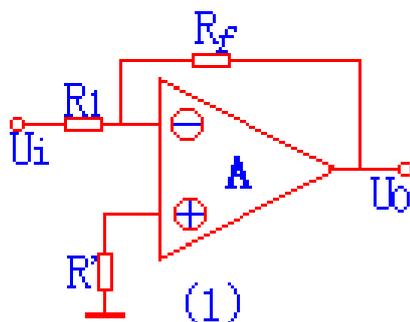


图3反向比例电路电路图

对于理想运放，该电路的输出电压与输入电压之间的关系为：

$$U_0 = -\frac{R_f}{R_1} U_i$$

为了减小输入级偏置电流引起的运算误差，在同相输入端应接入平衡电阻 $R' = R_1 // R_f$ 。

输出电压 U_0 与输入电压 U_i 称比例关系，方向相反，改变比例系数，即改变两个电阻的阻值就可以改变输出电压的值。反向比例电路对于输入信号的负载能力有一定的要求。

(b) 同向比例电路

同向比例电路如图4所示，跟反向比例电路本质上差不多，除了同向接地的一段是反向输入端：

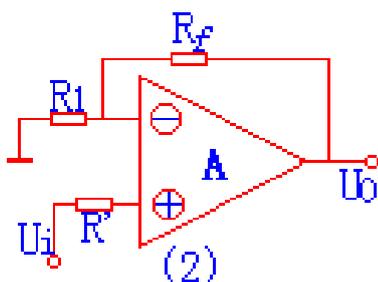


图4 同相比例电路电路图

它的输出电压与输入电压之间的关系为：

$$U_0 = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) U_i \quad ; \quad R' = R_1 // R_f$$

只要改变比例系数就能改变输出电压，且 U_i 与 U_0 的方向相同，同向比例电路对集成运放的共模抑制比要求高。

(c) 差动比例电路

差动比例电路如图5所示，输入信号分别加在反相输入端和同相输入端：

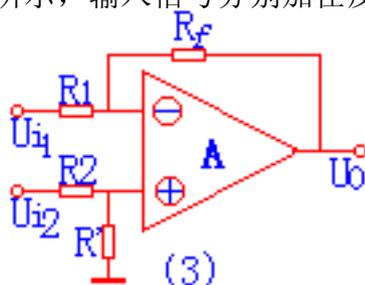


图5 差动比例电路电路图

其输入和输出的关系为：

$$U_0 = -\frac{R_f}{R_1} (U_{i2} - U_{i1})$$

可以看出它实际完成的是：对输入两信号的差运算。

(2)和/差电路

(a)反相求和电路

其电路图如图 6 所示（输入端的个数可根据需要进行调整）：

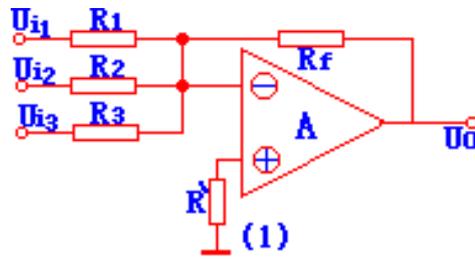


图 6 反相求和电路图

其中电阻 R' 满足：

$$R' = R_1 // R_2 // R_3 // R_f$$

它的输出电压与输入电压的关系为：

$$U_0 = - \left(\frac{R_f}{R_1} U_{i1} + \frac{R_f}{R_2} U_{i2} + \frac{R_f}{R_3} U_{i3} \right)$$

它的特点与反相比例电路相同，可以十分方便的通过改变某一电路的输入电阻，来改变电路的比例关系，而不影响其它支路的比例关系。

(b)同相求和电路

其电路如图 7 所示（输入端的个数可根据需要进行调整）：

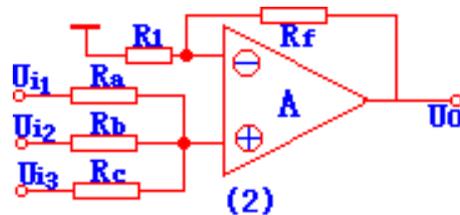


图 7 同向求和电路图

它的输出电压与输入电压的关系为：

$$U_0 = R_f \left(\frac{U_{i1}}{R_a} + \frac{U_{i2}}{R_b} + \frac{U_{i3}}{R_c} \right)$$

它的调节不如反相求和电路，而且它的共模输入信号大，因此它的应用不很广泛。

(c)和差电路

其电路图如图 8 所示，此电路的功能是对 U_{i1} 、 U_{i2} 进行反相求和，对 U_{i3} 、 U_{i4} 进行同相求和，然后进行的叠加即得和差结果。

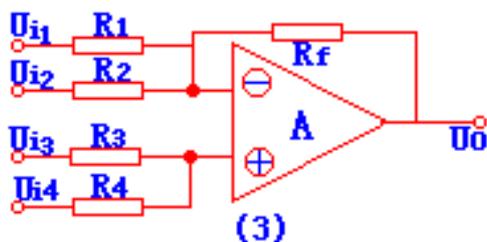


图 8 和差电路图

它的输入输出电压的关系是：

$$U_o = R_f \left(\frac{U_{i3}}{R_3} + \frac{U_{i4}}{R_4} - \frac{U_{i1}}{R_1} - \frac{U_{i2}}{R_2} \right)$$

由于该电路用一只集成运放，它的电阻计算和电路调整均不方便，因此我们常用二级集成运放组成和差电路。它的电路图如图 9 所示：

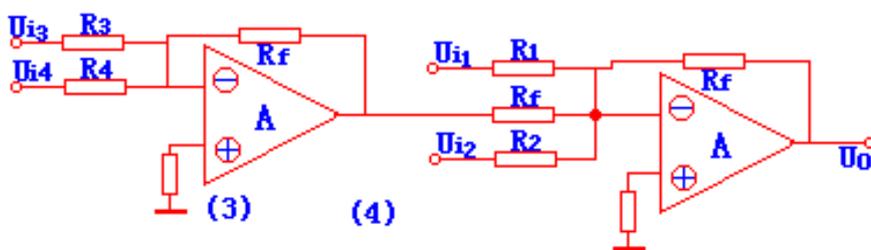


图 9 二级集成和差电路图

它的输入输出电压的关系是：

$$U_o = R_f \left(\frac{U_{i3}}{R_3} + \frac{U_{i4}}{R_4} - \frac{U_{i1}}{R_1} - \frac{U_{i2}}{R_2} \right)$$

它的后级对前级没有影响（采用理想的集成运放），它的计算十分方便。

(3) 积分电路和微分电路

(a) 积分电路

其电路图如图 10 所示：它是利用电容的充放电来实现积分运算，可实现积分运算及产生三角波形等。

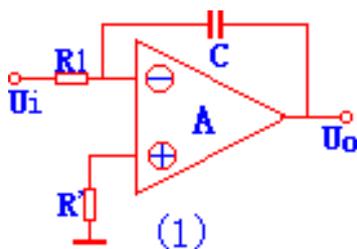


图 10 积分电路图

它的输入、输出电压的关系为：

$$u_0 = \frac{-1}{RC} \int_{t_0}^{t_1} u_i dt + u_c \Big|_{t=0}$$

其中： $u_c \Big|_{t=0}$ 表示电容两端的初始电压值。如果电路输入的电压波形是方形，则产生三角波形输出。

(b) 微分电路

微分是积分的逆运算，它的输出电压与输入电压呈微分关系。电路如图 11 所示：

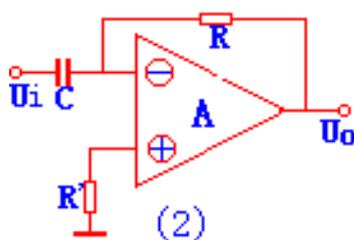


图 11 微分电路图 $u_0 = -R$

它的输入、输出电压的关系为：

$$u_0 = -Ri_f = -Ri_c = -RC \frac{du_i}{dt}$$

(4) 对数和指数运算电路

(a) 对数运算电路

对数运算电路就是是输出电压与输入电压呈对数函数。我们把反比例电路中 R_f 用二极管或三极管代替级组成了对数运算电路。电路图如图 12 所示：

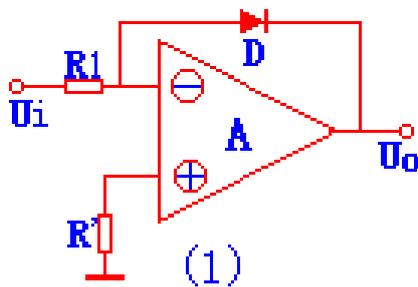


图 12 对数运算电路

它的输入、输出电压的关系为（也可以用三极管代替二极管）：

$$u_0 \approx -U_r \ln \frac{u_i}{RI_S}$$

(b) 指数运算电路

指数运算电路是对数运算的逆运算, 将指数运算电路的二极管(三极管)与电阻 R 对换即可。电路图如 13 所示:

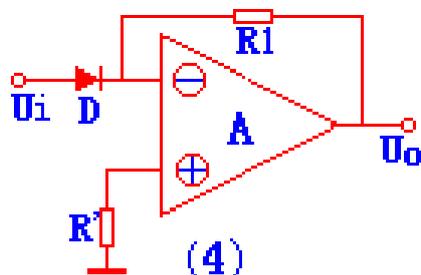


图 13 指数运算电路

它的输入、输出电压的关系为:

$$u_0 = -I_S \operatorname{Re}^{\frac{u_i}{r}}$$

利用对数和指数运算以及比例, 和差运算电路, 可组成乘法或除法运算电路和其它非线性运算电路。

(二) 无源滤波电路

滤波电路的作用: 允许规定范围内的信号通过; 而使规定范围之外的信号不能通过。滤波电路的分类:

- *低通滤波器: 允许低频率的信号通过, 将高频信号衰减;
- *高通滤波器: 允许高频信号通过, 将低频信号衰减;
- *带通滤波器: 允许一定频带范围内的信号通过, 将此频带外的信号衰减;
- *带阻滤波器: 阻止某一频带范围内的信号通过, 允许此频带以外的信号衰减;

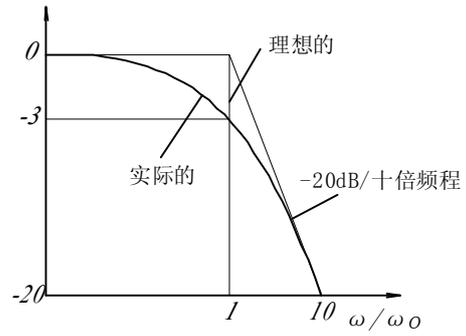
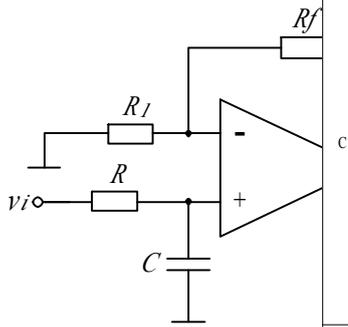
仅由无源元件(电阻、电容、电感)组成的滤波电路, 为无源滤波电路。它有很大的缺陷如: 电路增益小, 驱动负载能力差等。为此我们要学习有源滤波电路。

(三) 有源滤波电路

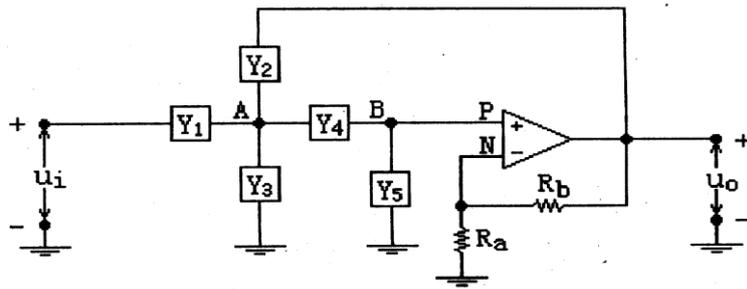
有源滤波器是指利用放大器、电阻和电容组成的滤波电路, 可用在信息处理、数据传输、抑制干扰等方面。但因受运算放大器频带限制, 这种滤波器主要用于低频范围。

(1) 一阶有源低通滤波器

其电路如图 14-a 所示, 它是由一级 RC 低通电路的输出再接上一个同相输入比例放大器构成, 幅频特性如图 14-b 所示, 通带以外以 $-20\text{dB}/十倍频$ 衰减:



$$A_v(j\omega) = \frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)} = \frac{1 + R_f/R_1}{1 + j\omega/\omega_0} = \frac{A_{vo}}{1 + j\omega/\omega_0}$$



在节点A有:

$$(U_A - U_i)Y_1 + (U_A - U_o)Y_2 + U_A Y_3 + (U_A - U_P)Y_4 = 0$$

在节点B有:

$$(U_P - U_A)Y_4 + U_P Y_5 = 0$$

联立以上二等式得:

$$U_P \left[\left(\frac{Y_4 + Y_5}{Y_4} \right) (Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4) - Y_4 \right] - U_i Y_1 - U_o Y_2 = 0$$

考虑到:

$$U_P \approx U_N = U_o \left(\frac{R_a}{R_a + R_b} \right)$$

则:

$$A(S) = \frac{U_o(S)}{U_i(S)} = \frac{A_{UF} Y_1 Y_4}{Y_5 (Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4) + [Y_1 + Y_2 (1 - A_{UF}) + Y_3] Y_4}$$

$A(S)$ 即是二阶压控电压源滤波器传递函数的一般表达式。只要适当选择 Y_i ($i=1\sim5$), 就可以构成低通、高通、带通等有源滤波器。

五 . 实验步骤

1. 设 $Y_1=1/R_1$, $Y_2=sC_1$, $Y_3=0$, $Y_4=1/R_2$, $Y_5=sC_2$, 将它们代入 $A(S)$ 中, 可得到二阶压控电压源低通滤波器的传递函数如下:

$$\begin{aligned} A(S) &= \frac{U_o(S)}{U_i(S)} = \frac{A_{UF} \cdot \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}{S^2 + \frac{S[R_2 C_2 + R_1 C_2 + R_1 C_1 (1 - A_{UF})]}{R_1 R_2 C_1 C_2} + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}} \\ &= \frac{A_{UF}}{R_1 R_2 C_1 C_2 S^2 + [R_2 C_2 + R_1 C_2 + R_1 C_1 (1 - A_{UF})] S + 1} \end{aligned}$$

令

$$A_o = A_{UF} = 1 + \frac{R_b}{R_a}$$

$$\omega_n^2 = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}$$

$$Q = \frac{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}{C_2 (R_1 + R_2) + R_1 C_1 (1 - A_{UF})}$$

则有:

$$A(S) = \frac{U_o(S)}{U_i(S)} = \frac{A_o}{\left(\frac{S}{\omega_n} \right)^2 + \frac{1}{Q} \cdot \frac{S}{\omega_n} + 1} = \frac{A_o \omega_n^2}{S^2 + \frac{\omega_n}{Q} S + \omega_n^2}$$

上式为二阶低通滤波器传递函数的典型表达式。其中 ω_n 为特征角频率，而 Q 则称为等效品质因数。

2. 启动 Multisim10，按图 16 在工作区搭建二阶有源低通滤波器。

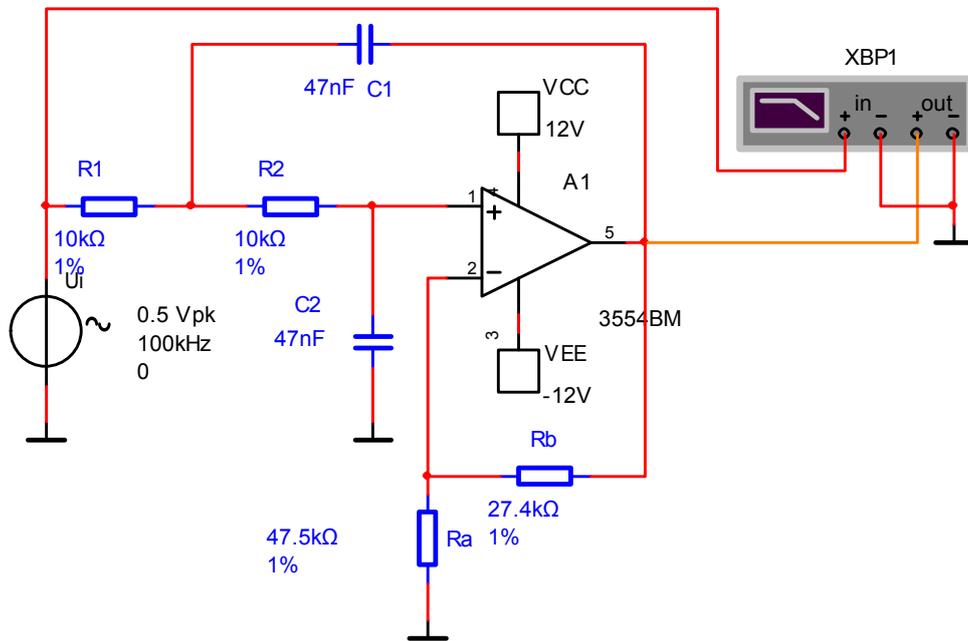


图 16 二阶有源低通滤波器电路

3. 启动仿真，点击波特图仪，可以看见二阶有源低通滤波器的幅频特性如图 17 所示。

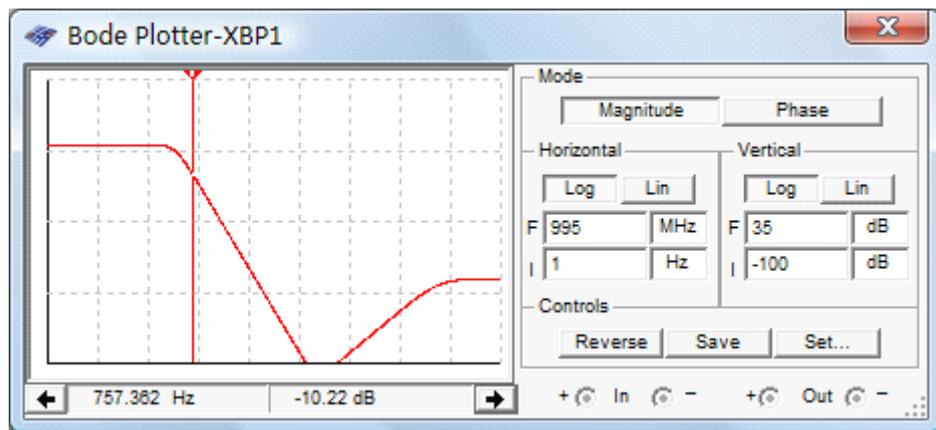


图 17 二阶有源低通滤波器的幅频特性

4. 利用 AC Analysis (交流分析) 分析二阶有源低通滤波器电路的频率特性。分析步骤如下：

① 点击 Options→Preferences→Show node names 使图 16 电路显示节点编号，在本电路中输出节点编号为 2。

② 点击 Simulate→Analysis→AC Analysis，将弹出 AC Analysis 对话框，进入交流分析状态。

在图 18 所示 Frequency Parameters 参数设置对话框中，确定分析的起始频率、终点频率、扫描形式、分析采样点数和纵向坐标（Vertical scale）等参数。其中：在 Start frequency 窗口中，设置分析的起始频率，默认设置为 1Hz，在本例中设置为 1Hz。

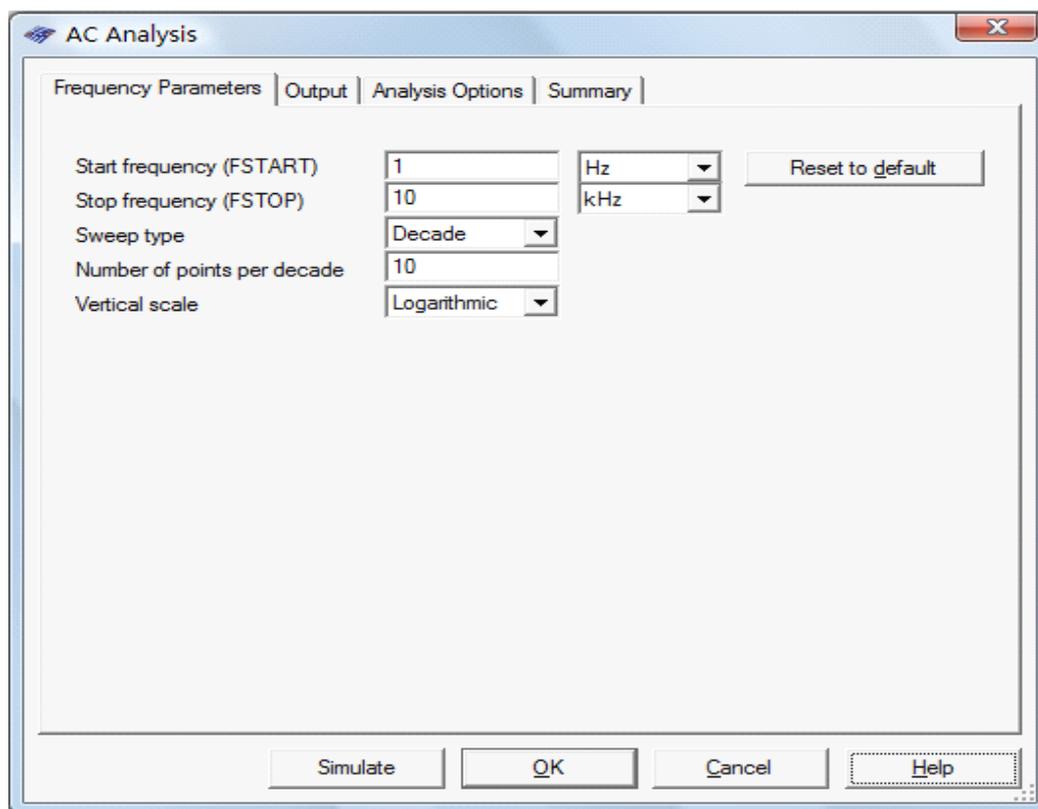


图 18 Frequency Parameters 参数设置对话框

在 Stop frequency (FSTOP) 窗口中，设置扫描终点频率，默认设置为 10GHz，在本例中设置为 10KHz。

在 Sweep type 窗口中，设置分析的扫描方式，包括 Decade（十倍程扫描）和 Octave（八倍程扫描）及 Linear（线性扫描）。默认设置为十倍程扫描（Decade 选项），以对数方式展现，在本例中选择默认设置。

在 Number of points per decade 窗口中，设置每十倍频率的分析采样数，默认为 10，在本例中选择默认设置。

在 Vertical Scale 窗口中，选择纵坐标刻度形式：坐标刻度形式有 Decibel（分贝）、Octave（八倍）、Linear（线性）及 Logarithmic（对数）形式。默认设置为对数形式，在本例中选择默认设置。

③ 在图 19 所示 Output 对话框中，可以用来选择需要分析的节点和变量。

在 Variables in Circuit 栏中列出的是电路中可用于分析的节点和变量。点击 Variables in circuit 窗口中的下箭头按钮，可以给出变量类型选择表。在变量类型选择表中：

点击 Voltage and current 选择电压和电流变量。

点击 Voltage 选择电压变量。

点击 Current 选择电流变量。

点击 Device / Model Parameters 选择元件 / 模型参数变量。

点击 All variables 选择电路中的全部变量。

在本例中选择 All variables。首先从 Variables in circuit 栏中选取输出节点 2，再点击 Add 按钮，则输出节点 2 出现在 Selected variables for analysis 栏中如图 19 所示：

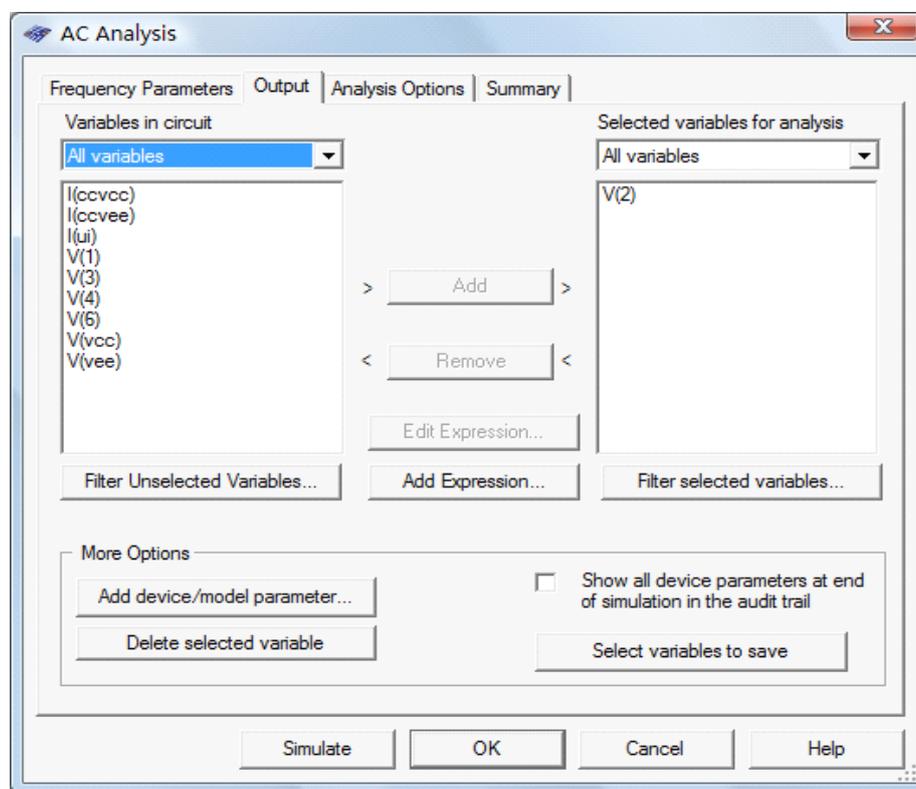


图 19 Output 对话框

④ 点击 Simulate 按钮即可进行仿真分析，仿真分析结果例如图 20 所示。

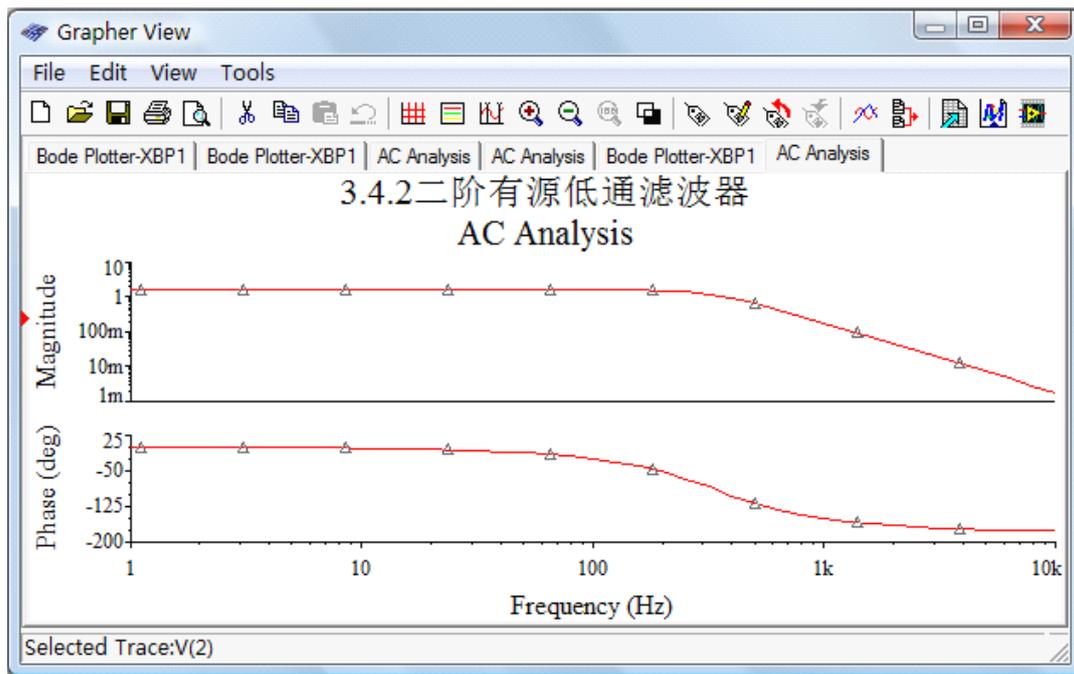


图 20 二阶有源低通滤波电路仿真分析结果

六 . 实验报告要求

1. 根据图15提供的滤波器模型，设计二阶有源压控电压源高通滤波器, 并做仿真分析, 要求:

- (1) 计算二阶压控电压源高通滤波器的传递函数;
- (2) 设计出其电路图;
- (3) 在 Multisim10 中, 进行电路的幅频特性和 AC Analysis 仿真分析;