

实验四 带负反馈的两级交流电压放大电路

4.1 实验目的

1. 加深理解反馈放大电路的工作原理及负反馈对放大电路性能的影响。
2. 掌握电压串联负反馈的组成及方法，能够理论结合实验结果分析引入负反馈后对于放大电路各项性能指标的影响
3. 学习反馈放大电路性能的测试方法。

4.2 实验预习要求

1. 复习负反馈对放大器性能指标的改善及多级阻容耦合放大器的计算方法。
2. 掌握放大电路的静态和动态的测试方法。
3. 实验之前必须明确本次试验的目的、意义、实验原理，实验电路图。

4.3 实验仪器与器件

ORCAD PSPICE 软件 SPB 16.6

4.4 实验原理

4.4.1 两级电压放大电路的电压放大倍数 A_u

对于两级电压放大电路，习惯上规定第一级是从信号源到第二个晶体管 T_2 的基极，第二级是从第二个晶体管 T_2 的基极到负载，这样两级放大器的总的电压放大倍数 A_u 为：

$$A_u = \frac{V_{o2}}{V_s} = \frac{V_{o2}}{V_{i1}} = \frac{V_{o2}}{V_{i1}} = \frac{V_{o2}}{V_{i2}} \times \frac{V_{o1}}{V_{i1}} = A_{u1} \times A_{u2}$$

式中电压均为有效值，且 $V_{o1}=V_{i2}$ ，由此可见，两级放大器的总的电压放大倍数是单级电压放大倍数的乘积，由结论可推广到多级放大器。

当忽略信号源内阻 R_s 和偏流电阻 R_b 的影响，放大器的中频电压放大倍数为：

$$\begin{aligned} A_{u1} &= \frac{V_{o1}}{V_s} = \frac{V_{o1}}{V_{i1}} = -\frac{\beta_1 R'_{L1}}{r_{be1}} = -\beta_1 \frac{R_{c1} // r_{i2}}{r_{be1}} \\ A_{u2} &= \frac{V_{o1}}{V_{i1}} = \frac{V_{o2}}{V_{o1}} = -\frac{\beta_2 R'_{L2}}{r_{be2}} = -\beta_2 \frac{R_{c2} // R_L}{r_{be2}} \\ A_u &= A_{u1} \times A_{u2} = \beta_1 \frac{R_{c1} // r_{i2}}{r_{be1}} \times \beta_2 \frac{R_{c2} // R_L}{r_{be2}} \end{aligned}$$

必须要注意的是， A_{u1} 、 A_{u2} 都是考虑了下一级输入电阻（或负载）的影响，所以第一级的输出电压即为第二级的输入电压，而不是第一级的开路输出电压，当第一级放大倍数已计入下级输入电阻的影响后，在

计算第二级放大倍数时，就不必再考虑前级的输出阻抗，否则计算就重复了。

在两级放大器中， β 和 I_E 的提高，必须全面考虑，是前后级相互影响的关系。

对两级电路参数相同的放大器，其单级通频带相同，而总的通频带将变窄。

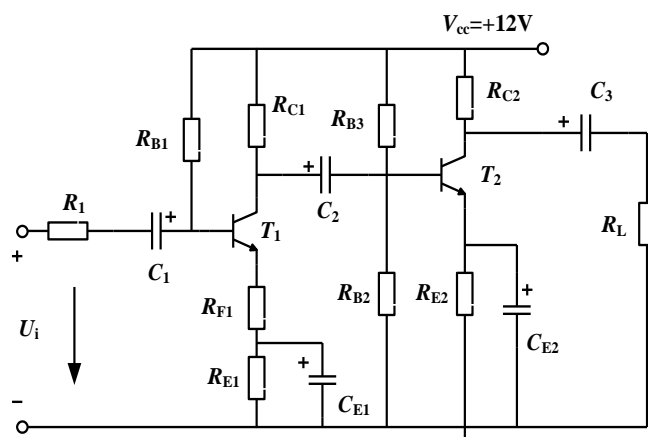


图 4-1 两级阻容耦合电压放大电路的原理图

4.4.2 带负反馈的两级阻容耦合电压放大电路

通常放大电路的输入信号都是很微弱的，一般为毫伏或微伏数量级。为了推动负载工作，因此要求把几个单级放大电路连接起来，使信号逐级得到放大。因此构成多级放大电路。级间的连接方式叫耦合，如耦合电路是采用电阻、电容耦合的叫阻容耦合放大电路。本试验采用的就是两级阻容耦合放大电路，如图 4-1 所示。其中两级之间是通过耦合电容 C_2 及偏置电阻连接，由于电容隔直作用，所以两极放大电路的静态工作点可以单独调试测定。

两级阻容耦合放大电路的电压放大倍数：

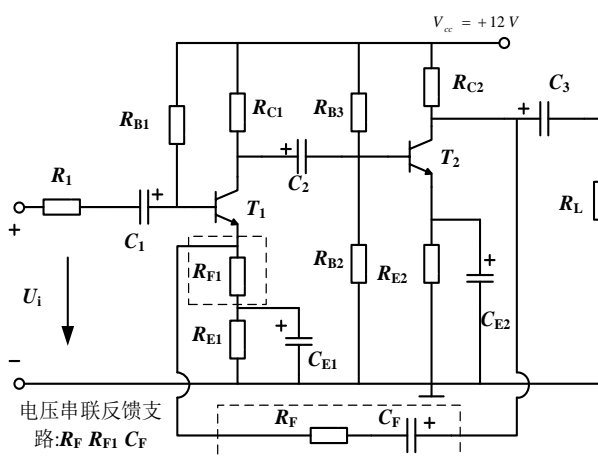


图 4-2 具有电压串联负反馈的两级阻容耦合电压放大电路

$$A_u = A_{u1} \times A_{u2}$$

从表面看，通过对多个单级放大电路的适当级联，可以实现任意倍数的放大。似乎放大电路已经没有什么可以研究的了。但是，问题并不是这么简单。首先静态工作点与放大倍数是互相影响的，其次，放大倍数与输出电阻也可能互相影响，第三，输入电阻与放大倍数也可能互相影响。

图 4-2 为电压串联负反馈的两级阻容耦合电压放大电路，在电路中引入负反馈，可以解决上面的问题。

负反馈对放大电路性能主要有五个方面的影响：

- ①降低放大倍数
- ②提高放大倍数的稳定性
- ③改善波形失真
- ④展宽通频带
- ⑤对放大电路的输入电阻和输出电阻的影响

4.5 实验步骤

1. 画电路图

选择相关元器件仿真模型，按下列按参数进行设置。开始创建仿真电路。

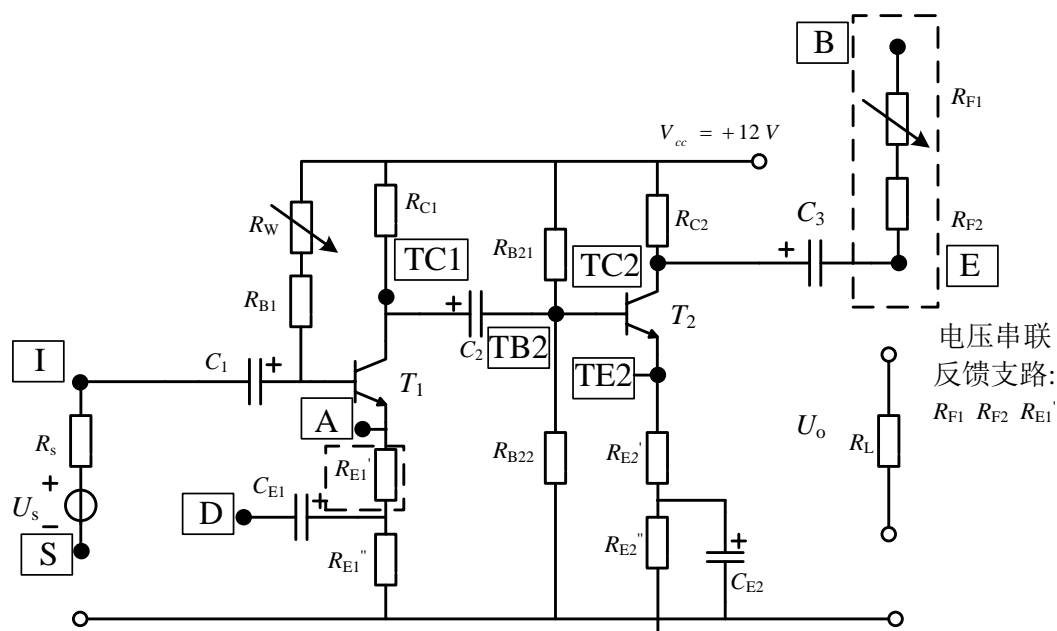


图 4-3 带电压串联负反馈的两级阻容耦合放大电路实验图

其中： $R_{F1}=1\text{k}\Omega$ ， $R_W=150\text{k}\Omega$ ， $C_2=C_3=0.47\mu\text{F}$ ， $C_7=C_8=0.01\mu\text{F}$ ， $C_1=10\mu\text{F}/25\text{V}$ ， $C_{E1}=C_{E2}=47\mu\text{F}/25\text{V}$ ， $R_{E1}=R_{E2}=10\Omega$ ， $R_{F2}=51\Omega$ ， $R_{C1}=R_{E1}=120\Omega$ ， $R_{C2}=R_S=R_{E2}=470\Omega$ ， $R_{B22}=1\text{k}\Omega$ ， $R_{B21}=1.5\text{k}\Omega$ ， $R_{B1}=10\text{k}\Omega$ ， $T_1=T_2=9013$ ，外接电阻 $R_L=2\text{k}\Omega$

2. 测定静态工作点

将电路 D 端接地，输出不接负载（仿真电路中，开路用无穷大电阻代替），AB 之间不连线（即无负反馈的情况）， R_W 调到中间合适位置。输入端（I 与 D 之间为 U_i ）接入信号源，令 $U_i=15\text{mV}$ 有效值， $f=1\text{kHz}$ ，调 R_W 使输出电压 U_o 为最大不失真，（示波器测量输入波形、输出电压波形时，使用 AC 耦合， U_o 尽量最大不失真），然后，撤出信号源，输入端（I）接地，测量下表 4-2 中各直流电位(对地)：

表 4-2 静态工作点电压测试

测量项目	V_{E1}	V_{C1}	V_{B2}	V_{E2}	V_{C2}
测量数据					

3. 测量放大电路的性能

将 D 端接地，AB 不连接（即无负反馈的情况）。

(1) 测量基本放大电路的放大倍数 A_u 。

令 $U_i=15\text{mV}$ ， $f=1\text{kHz}$ 不接 R_L ，测量 U_o 有效值记入表 4-3，并用公式 $A_u=U_o/U_i$ 求取电压放大倍数 A_u 。

(2) 测量基本放大电路的输出电阻 r_o 。

仍令 $U_i=15\text{mV}$ ， $f=1\text{kHz}$ ，接入负载电阻 $R_L=2\text{k}\Omega$ ，测输出电压 U'_o 并记入表 4-3，则

$$r_o = \frac{U_o - U'_o}{U'_o} R_L = \left(\frac{U_o}{U'_o} - 1 \right) R_L$$

式中 U_o 是未接负载电阻 R_L 时的输出电压； U'_o 是接负载电阻 R_L 后的输出电压。

设接负载 R_L 后的电压放大倍数为 A'_u ，则 $A'_u = U'_o/U_i$

(3) 观察负反馈对波形失真的改善

拆下负载电阻 R_L ，当 AB 不连线时，令 U_i 值增大，观察输出电压的波形失真；而当 AB 连线时， R_{F1} 调到中间位置，在同样大的 U_i 值下，波形则不失真。

(4) 测量基本放大电路的输入电阻 r_i

断开 AB 联系，在电路的输入端接入 $R_S=470\Omega$ （电阻已在模块内部，无需外接），把信号发生器的两端接在 U_S 两端（图中 S 与 0V 之间），加大信号源电压，使放大电路的输入信号仍为 15mV（即 I 与 D 之间为 $U_i=15mV$ ），测量此时信号源电压 U_S ，并记录表 4-3，则

$$r_i = \frac{U_i}{U_S - U_i} R_S$$

4. 测定反馈放大电路的性能

将 AB 连线， R_{F1} 调到中间位置，即有反馈放大电路。

(1) 测量反馈放大电路的放大倍数 A_{uf}

与上同，令 $U_i=15mV$ ， $f=1kHz$ ，不接 R_L ，测量 U_{of} ，并记入表 4-3 中，并用公式 $A_{uf} = U_{of}/U_i$ 可求取电压放大倍数 A_{uf} 。

(2) 测量反馈放大电路输出电阻 r_{of}

仍令 $U_i=15mV$ ， $f=1kHz$ ，接入 $R_L=2k\Omega$ ，测量输出电压 U'_{of} 记入表 4-3 中，并用公式 $r_{of} = (U_{of}/U'_{of} - 1)R_L$ 来计算 r_{of} ，用 $A'_{uf} = U'_{of}/U_i$ 求取 A'_{uf} 。

表 4-3 有无反馈的放大电路的基本性能测试表格

测量电路	测量项目				计算项目			
基本放大电路(无反馈)	U_i	U_o (不接 R_L)	U'_o (接 R_L)	U_S (接 R_S)	A_u (不接 R_L)	A'_u (接 R_L)	r_i	r_o
	15mV $f=1kHz$							
反馈放大电路(AB 连接)	U_i	U_{of} (不接 R_L)	U'_{of} (接 R_L)	U_{sf} (接 R_S)	A_{uf} (不接 R_L)	A'_{uf} (接 R_L)	r_{if}	r_{of}
	15mV $f=1kHz$							

(3) 测量反馈放大电路输入电阻 r_{if}

与上同，在电路输入端接入 $R_S=470\Omega$ ，把信号发生器的两端接在 U_S 两端，加大信号源电压，使放大电路的输入信号仍为 15mV，测量此时信号源电压 U_{sf} ，并记入表 4-3。则

$$r_{if} = \frac{U_i}{U_{sf} - U_i} R_S$$

5. 比较无反馈和有反馈放大电路的通频带性能

- 1) 两个三极管的基级和发射级之间分别连接 1uF 的电容。
- 2) 将 D 端接地，AB 不连接(即无负反馈的情况)。
- 3) 测量不同频率下无反馈放大电路的放大倍数 A_u 。
- 4) 令 $U_i=15mV$ (I 与 D 之间)，调节频率，确定通频带及 5 个特征频率点（包括下限截止频率 f_L ，上限截止频率 f_H ，以及低频段、中频段、高频段中的频率点各一个），表 4-4 给出了相应频率的参考值（仅供参考），在表 4-4 记录下输入信号的实际频率和有效值大小，不接 R_L ，测量 5 个频率下 U_o 有效值记入表

4-4，并用公式 $A_u = U_o / U_i$ 求取电压放大倍数 A_u 。

- 5) 将 AB 连线， R_{F1} 调到中间位置，即有反馈放大电路。
- 6) 测量不同频率下反馈放大电路的放大倍数 A_u 。
- 7) 与上同，令 $U_i = 15\text{mV}$ ，重复步骤（2），不接 R_L ，测量 U_{of} ，并记入表 4-4 中，并用公式 $A_{uf} = U_{of} / U_i$ 求取电压放大倍数 A_{uf} 。
- 8) 根据表 4-4 数据，画出无反馈和有反馈放大电路的幅频特性曲线（Y 轴放大倍数 A_u ，X 轴频率 f ）。

表 4-4 有无反馈的放大电路的通频带性能测试表格

测量电路	测量项目			计算项目
基本放大电路(无反馈)	U_i (参考) 有效值, 频率	U_i (实际) 有效值, 频率	U_o (不接 R_L)	A_u (不接 R_L)
	15mV $f_1=100\text{Hz}$			
	15mV f_L 约为 800Hz			
	15mV $f_2=10\text{kHz}$			
	15mV f_H 约为 3000kHz			
	15mV $f_3=5000\text{kHz}$			
反馈放大电路(AB 连接)	U_i (参考) 有效值, 频率	U_i (实际) 有效值, 频率	U_{of} (不接 R_L)	A_{uf} (不接 R_L)
	15mV $f_1=100\text{Hz}$			
	15mV f_L 约为 250Hz			
	15mV $f_2=10\text{kHz}$			
	15mV f_H 约为 24000kHz			
	15mV $f_3=40000\text{kHz}$			

4.6 注意事项

- （1）仿真电路在测量开路时的输出电压，输出端需要需要连接无穷大电阻。
- （2）通频带特性测试时，三极管的基级和发射级之间需连接 $1\mu\text{F}$ 电容。

4.8 实验思考题

1. 结合测试数据，总结电压串联负反馈对放大电路性能的影响，包括输入电阻，输出电阻，放大倍数及波形失真的改善等；
2. 测量放大电路输入电阻时，若串联电阻的阻值 R_s 比其输入电阻的值大很多或小很多，对仿真结果有何影响？

4.9 实验报告要求

1. 数据处理过程要写在实验报告上，数据，波形必须手写、手画，拍照粘贴到实验报告中，原始测量数据在课堂上需要老师确认。
2. 实验思考题、实验体会、意见和建议需要写在实验报告中。