



# 实验报告

课程名称： 模拟电子技术实验 实验名称： 实验四：带负反馈的两极交流电压

放大电路 专业-班级： 21级自动化6班 学号： 210320621

姓名： 吴俊达 实验日期： 2023 年 4 月 27 日 评分： \_\_\_\_\_

---

教师评语：

助教签字： \_\_\_\_\_

教师签字： \_\_\_\_\_

日 期： \_\_\_\_\_

# 实验预习

## 实验预习和实验过程原始数据记录

预习结果审核：\_\_\_\_\_ 原始数据审核：\_\_\_\_\_

(包括预习时，计算的理论数据)

**注意：所有的波形都必须拍照保存，用于课堂检查和课后分析。**

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	5.210V	6.411V	4.4746V	3.8300V	7.492V

表 4-3 有无反馈的放大电路的测试表格

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 $f=1\text{kHz}$	2.04V	1.72V	18.4mV	136	114.67	2.07k $\Omega$	0.37k $\Omega$
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 $f=1\text{kHz}$	464mV	447mV	16.5mV	30.93	29.8	4.7k $\Omega$	76.1 $\Omega$

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	$U_i$ (参考) 频率	$U_i$ (实际) 有效值	$U_i$ (实际) 频率	$U_o$ (不接 $R_L$ )	$A_u$ (不接 $R_L$ )
	15mV	$f_i=$ ___Hz	14.97mV	300Hz	0.908V	60.65
	15mV	$f_L=$ ___Hz	15.03mV	516Hz	1.578V	104.99
	15mV	$f_2=$ ___kHz	15.03mV	1.79kHz	2.233V	148.57
	15mV	$f_H=$ ___kHz	14.98mV	8.04kHz	1.577V	105.27
	15mV	$f_3=$ ___kHz	15.05mV	10kHz	1.381V	91.76
反馈放大电路(AB 连接)	$U_i$ (参考) 有效值	$U_i$ (参考) 频率	$U_i$ (实际) 有效值	$U_i$ (实际) 频率	$U_{of}$ (不接 $R_L$ )	$A_{uf}$ (不接 $R_L$ )
	15mV	$f_i=$ ___Hz	15.04mV	250Hz	0.320V	21.28
	15mV	$f_L=$ ___Hz	15.03mV	270Hz	0.360V	23.95
	15mV	$f_2=$ ___kHz	14.97mV	4.9kHz	0.509V	34.00
	15mV	$f_H=$ ___kHz	15.04mV	34.7kHz	0.360V	23.94
	15mV	$f_3=$ ___kHz	15.04mV	40.0kHz	0.331V	22.01

## 一、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。

## 二、实验设备及元器件

1. 直流稳压电源一台，型号 DP832A
2. 手持万用表一台，型号 Fluke F277C
3. 信号发生器，一台，型号 Tek AFG1062 或 DG4062
4. 电阻一只，阻值为 2kΩ
5. 反馈放大电路模块，型号为 15004002
6. 示波器一台，型号为 Tek MS02012B.
7. 短接桥和连接导线若干，型号分别为 P8-1 和 50148
8. 实验用九孔方板一块，大小为 300mm x 298mm.

## 三、实验原理（重点简述实验原理，画出原理图）

### （一）两级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：

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

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，此结论可推广到多级放大器。

当忽略信号源内阻  $R_s$  和偏置电阻  $R_{B1}$ 、 $R_{B2}$ 、 $R_{B3}$  的影响，放大器的中频电压放大倍数为：

$$A_{u1} = \frac{V_{o1}}{V_s} = \frac{V_{o1}}{V_{i1}} = -\frac{\beta_1 R_{L1}'}{r_{be1}} = -\beta_1 \frac{R_{c1} // r_{i2}}{r_{be1}}$$

$$A_{u2} = \frac{V_{o2}}{V_{o1}} = -\beta_2 \frac{R_{L2}'}{r_{be2}} = -\beta_2 \frac{R_{c2} // R_L}{r_{be2}}$$

$$A_u = A_{u1} A_{u2} = \beta_1 \frac{R_{c1} // r_{i2}}{r_{be1}} \beta_2 \frac{R_{c2} // R_L}{r_{be2}}$$

$R_{F1}$  取值较小，在公式中忽略。 $A_{u1}$ 、 $A_u$  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， $\beta$  和  $I_E$  的提高，必须全面考虑，前后级有相互影响。

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。

## (二) 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，就叫阻容耦合放大电路。本实验采用的就是两级阻容耦合放大电路，如图 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。

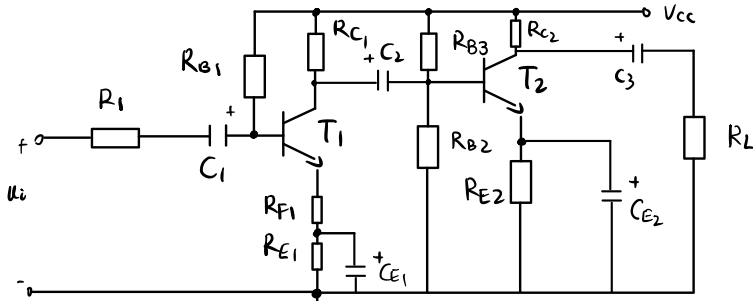


图 1 两级阻容耦合电压放大电路的原理图

两级阻容耦合放大电路的电压放大倍数：

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

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 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。

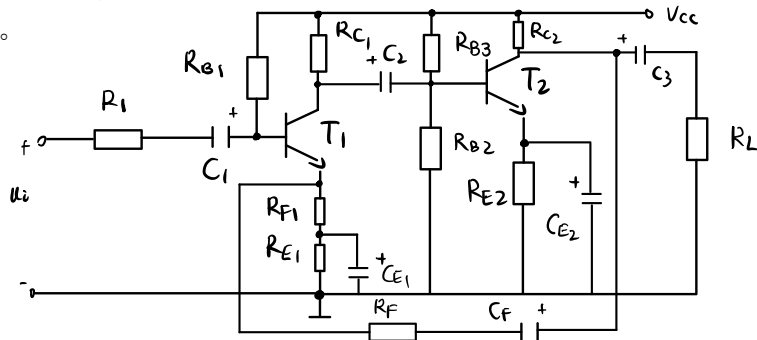


图 2 具有电压串联负反馈的两级阻容耦合电压放大电路

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（为原来的  $A/(1+AF)$  倍， $A$  很大时[即深度负反馈]，净输入信号近似为 0，放大倍数近似为  $1/F$ ）
- ② 提高放大倍数的稳定性（稳定性增强  $1+AF$  倍）
- ③ 改善波形失真（减小到原来的  $1/(1+AF)$ ）
- ④ 展宽通频带（带宽提高到原来  $1+AF$  倍）
- ⑤ 对放大电路的输入电阻和输出电阻的影响（在深度负反馈情形下：对于电压负反馈，输出电阻减小到原来的  $1/(1+AF)$ ，对于电流负反馈，输出电阻增大到原来的  $1+AF$  倍；对于串联负反馈，输入电阻增大到原来的  $1+AF$  倍，对于并联负反馈，输入电阻减小到到原来的  $1/(1+AF)$ 。图 2 所示电路引入电压串联反馈，增大输入电阻、减小输出电阻，带负载能力增强。准确地说，由于有些电阻不在反馈环内，上述输入电阻和输出电阻应该是反馈支路的等效电阻）

此外，直流负反馈还可以抑制温漂，稳定静态工作点。例如图 2 电路中的  $R_{E1}$ ，即起到稳定静态工作点的作用。

## 四、实验过程

### 1.按原理图接线

按照电路原理图选用“15004002 反馈放大电路”模块，熟悉元件安装位置后，开始接线：一根连接直流电源输出的+12V 和电路图中的+12V 端；一根连接稳压电源负端和电路图中的 0V 端；线路经检查无误后，方可闭合电源开关。

### 2.测定静态工作点

将电路 D 端接地，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，用万用表测量表 4-2 中各直流电位（对地）。

### 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  $R_L$ ，用万用表/示波器测量  $U_o$  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)测量基本放大电路的输入电阻  $r_i$

断开 AB 连线，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  $15\text{mV}$ （即 I 与 D 之间为  $U_i=15\text{mV}$ ），测量此时信号源电压  $U_s$ ，并记录于表 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，即为有反馈放大电路。

(1)测量反馈放大电路的放大倍数  $A_{uf}$

与上同，令  $U_i=15\text{mV}$ ， $f=1\text{kHz}$ ，不接  $R_L$ ，测量  $U_{of}$ ，记入表 4-3 中，并用公式  $A_{uf}=U_{of}/U_i$  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  $U_i=15\text{mV}$ ， $f=1\text{kHz}$ ，接入  $R_L=2\text{k}\Omega$ ，用万用表测量输出电压  $U'_{of}$  记入表 4-3 中，并用公式

$$r_{of} = \left( \frac{U_{of}}{U'_{of}} - 1 \right) R_L$$

来计算  $r_{of}$ ，用

$$A'_{uf} = U'_{of} / U_i$$

来计算  $A'_{uf}$ 。

(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，从示波器上看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  $r_i$

与上同，在电路的输入端接入  $R_S=470\Omega$ ，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  $U_{sf}$ ，并记录于表 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)将 D 端接地，AB 不连接(即无负反馈的情况)。

(2)测量不同频率下无反馈放大电路的放大倍数  $A_u$ 。

(3)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），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  $A_u$ 。

(4)将 AB 连线， $R_{F1}$  调到中间位置，即构成有反馈放大电路。

(5)测量不同频率下反馈放大电路的放大倍数  $A_u$ 。

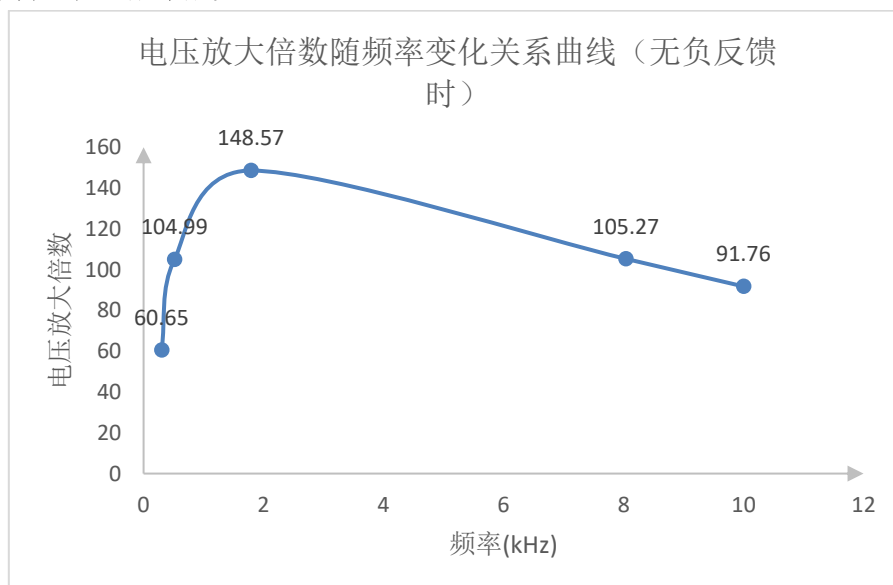
(6)与上同，令  $U_i=15mV$ ，重复步骤（2），不接  $R_L$ ，测量  $U_{of}$ ，并记入表 4-4 中，并用公式  $A_{uf} = U_{of} / U_i$  求取电压放大倍数  $A_{uf}$ 。

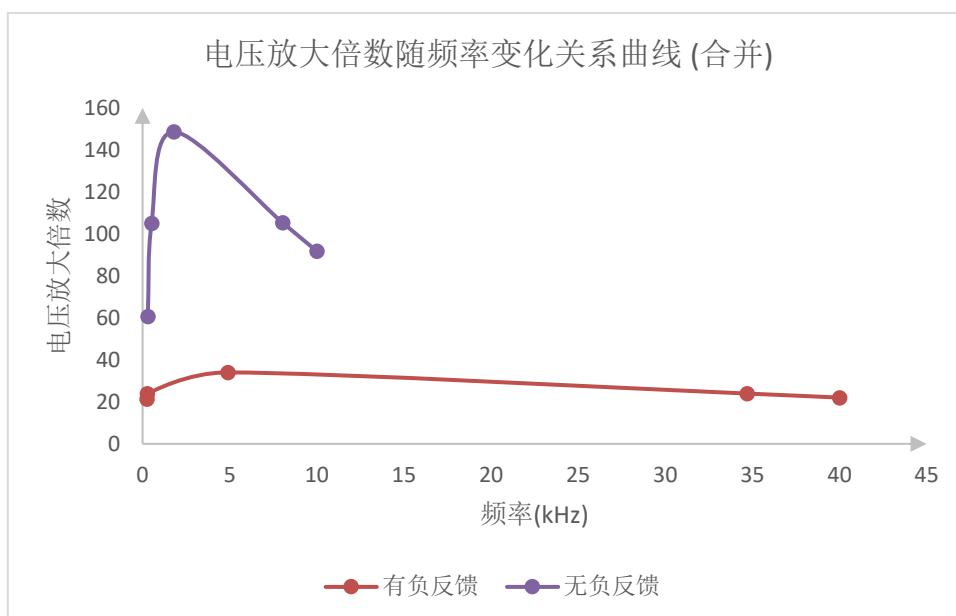
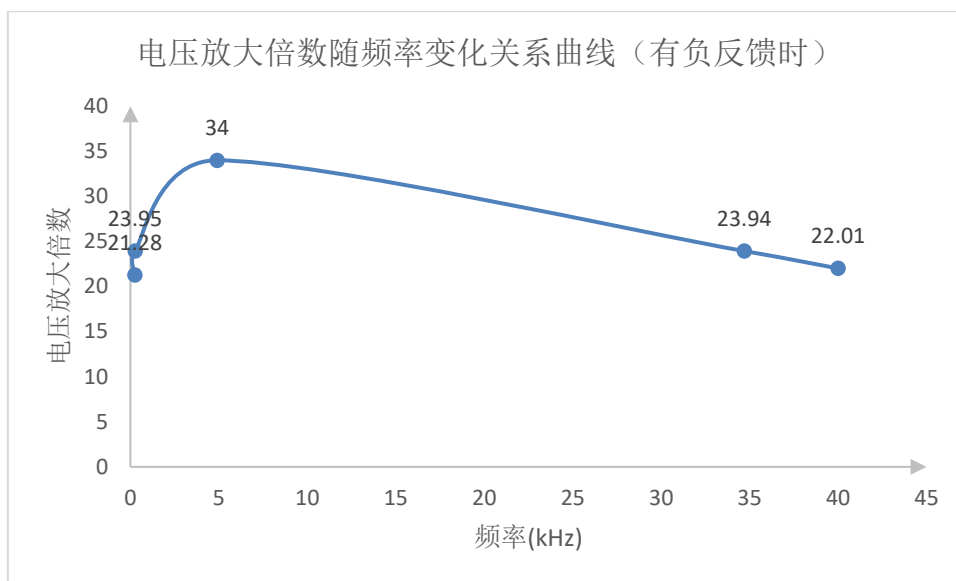
(7)根据表 4-4 数据，画出无反馈和有反馈放大电路的幅频特性曲线（y 轴放大倍数  $A_u$ ，x 轴频率  $f$ ）。

## 五、实验数据分析

1、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  $f$ ）

答：采用 Excel 软件作出如下三幅图所示。对比可见，引入反馈后放大电路的（中频段）放大倍数下降，但通频带展宽。





## 六、问题思考

（回答指导书中的思考题）

1. 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

答：①降低放大倍数。不带负载时电压放大倍数从 136 降低至 30.93，带负载时电压放大倍数从 114.67 降低至 29.8，降低到原来的 1/4 左右。

②提高放大倍数的稳定性。原先带负载前后电压放大倍数变化率为

$\frac{114.67 - 136}{136} \times 100\% = 15.7\%$ ，后来引入反馈后，带负载前后电压放大倍数变化率

为  $\frac{29.8 - 30.93}{30.93} \times 100\% = 3.65\%$ ，放大倍数的稳定性提高到原来的 4 倍以上。

③改善波形失真。在实验第 4 步中，拆下负载电阻  $R_L$ ，当 AB 不连线时，令  $U_i$  值增大，从示波器上看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展宽通频带：由表 4-4 数据得，无负反馈时，通频带  $f_{bw} = f_H - f_L$   
 $= 8.04 - 0.516 = 7.52 \text{ kHz}$ ，而引入负反馈后，通频带  $f_{bw} = f_H - f_L = 34.7 - 0.27$   
 $= 34.4 \text{ kHz}$ ，通频带展宽到原来的 4 倍以上。

⑤对放大电路的输入电阻和输出电阻的影响：电压串联负反馈使电路的输入电阻增大（测量值：从  $2.07\text{k}\Omega$  增大到  $4.7\text{k}\Omega$ ），输出电阻减小（测量值：从  $0.37\text{k}\Omega$  减小到  $76.1\text{k}\Omega$ ，减小到原来的 1/5 左右）。

2. 如果测量时发现放大倍数  $A_u$  远小于设计值，可能是什么原因造成的？

答：可能的原因是：①旁路电容  $C_{e1}$  或  $C_{e2}$  开路。②静态工作点不合适。可能导致这点的因素有： $R_9$ （滑动变阻器）短路【基极电阻不合适】； $C_5$  短路； $C_4$  短路； $C_3$  短路。

（针对这个问题，我搭建了仿真实验电路，详见附录【下一页】）

3. 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，对测量结果有何影响？

答：影响： $R_s$  分走了信号源大部分电压，导致输入电压  $U_i$  很小，则  $U_i$  的测量误差大，由此计算得的输入电阻就不准确。

## 七、实验体会与建议

体会 1. 一定要细致耐心。确保接线无误后再上电。

体会 2. 实验前要做好预习，用好视频资源。

建议 1. 为什么幅频特性不能用 Excel 或 MATLAB 绘图？我此次就使用 Excel 绘图，比手绘简便许多。既然观察趋势、概括结论的过程与作图方式根本无关，为何还强调坐标纸手绘？



## 附录

# 实验四 带负反馈的两级共射放大电路 拓展仿真实验结果

210320621 吴俊达 2023-05-09

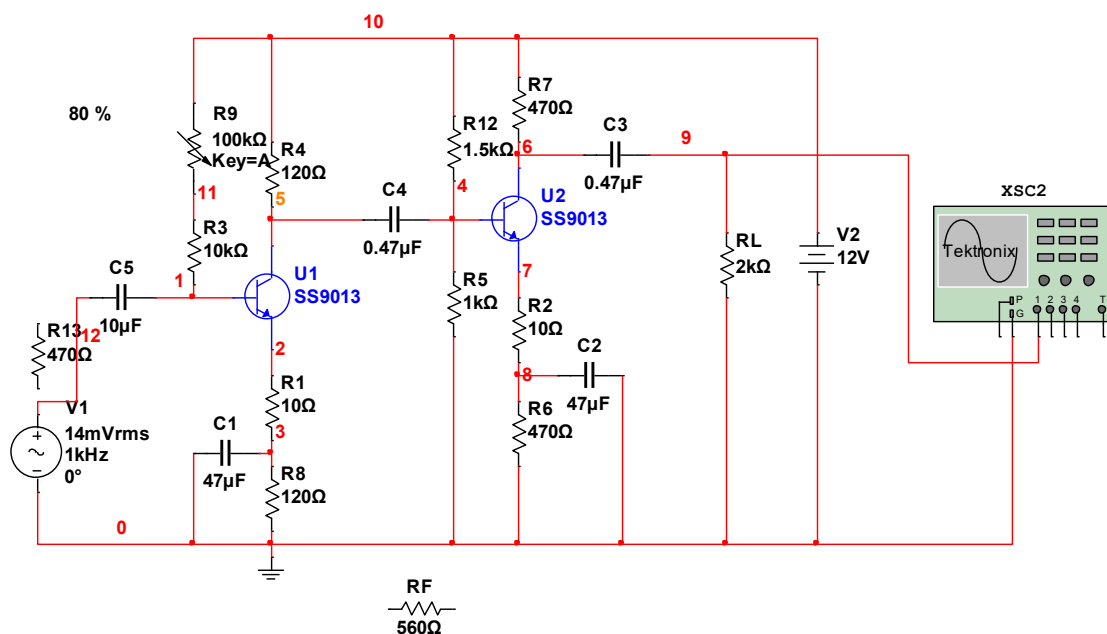
使用软件: Multisim 14.2

系统: Windows 7 Ultimate x86

主要目的: 利用仿真软件的强大分析功能, 分析讨论题第 2 题。

## 电路图

XSC 为示波器。仿真使用的三极管放大倍数为 200 倍。因为放大倍数较高, 所以减小了输入电压幅值 (否则难以调节出不失真的波形)。

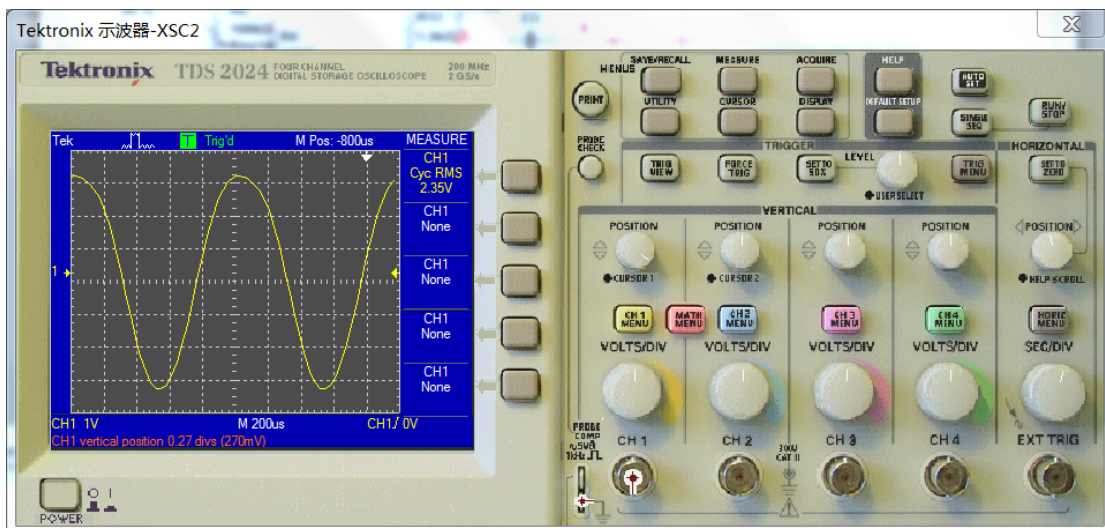


## 静态工作点测试

取  $R_9 = 80k\Omega$ , 测试得静态工作点如下:

Variable	Operating point value
V(2)	2.65341
V(4)	4.77514
V(5)	9.56222
V(6)	8.01051
V(7)	4.09426

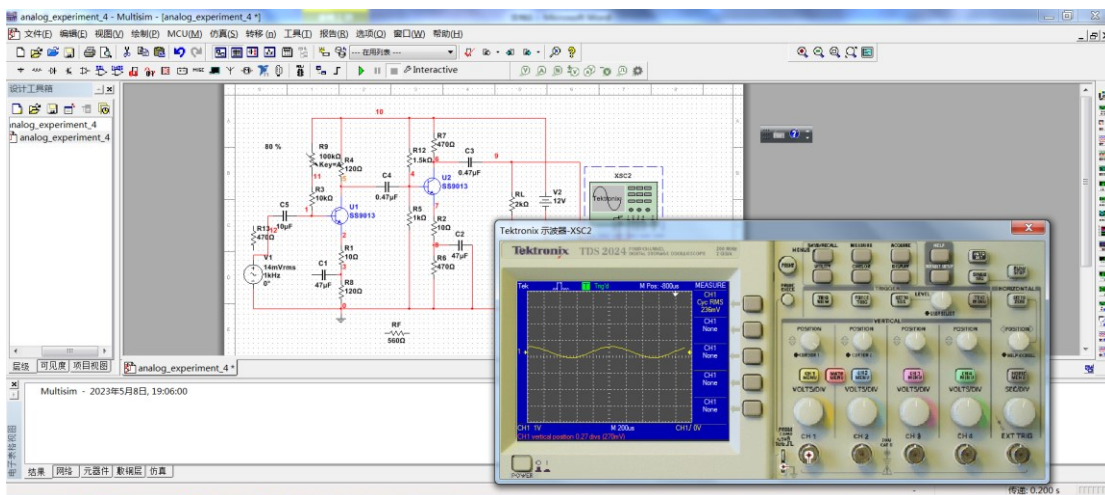
V(2) 为 T1 发射极静态电位, V(4) 为 T2 基极静态电位, V(5) 为 T1 集电极静态电位, V(6) 为 T2 集电极静态电位, V(7) 为 T2 发射极静态电位。此静态工作点比较合适。此时用示波器观察到的输出波形如下: (已设置 measure, 有效值为 2.35V)



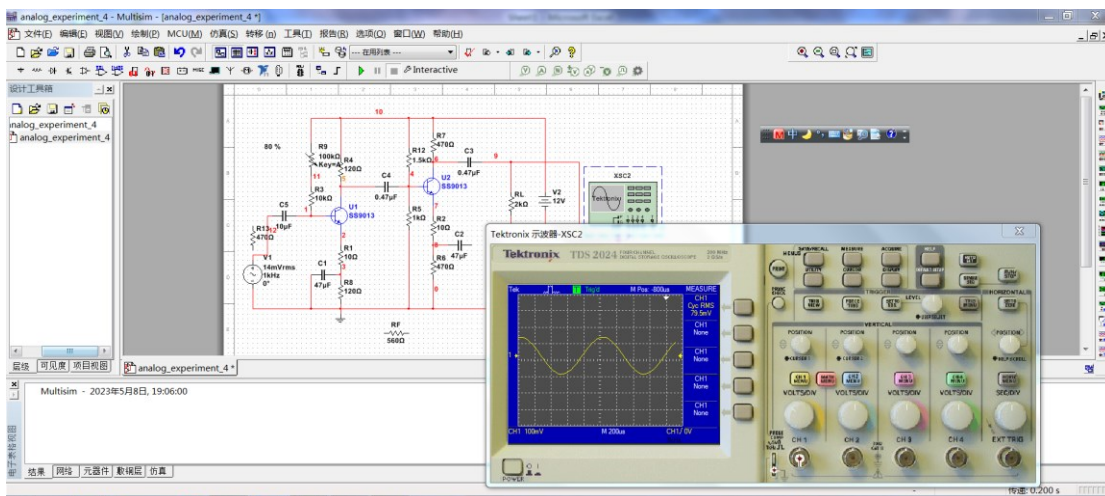
### 尝试 1: 断开旁路电容

定性分析：断开旁路电容会让射极电阻增大，显著减小电压放大倍数（射极电阻在电压放大倍数表达式中带有因子  $1+\beta$ ，且位于分母）。

仿真结果：断开  $C_{E1}$ ，示波器观察到的输出波形如下，有效值变为 236mV。



断开  $C_{E2}$ ，示波器观察到的输出波形如下，有效值变为 79mV。



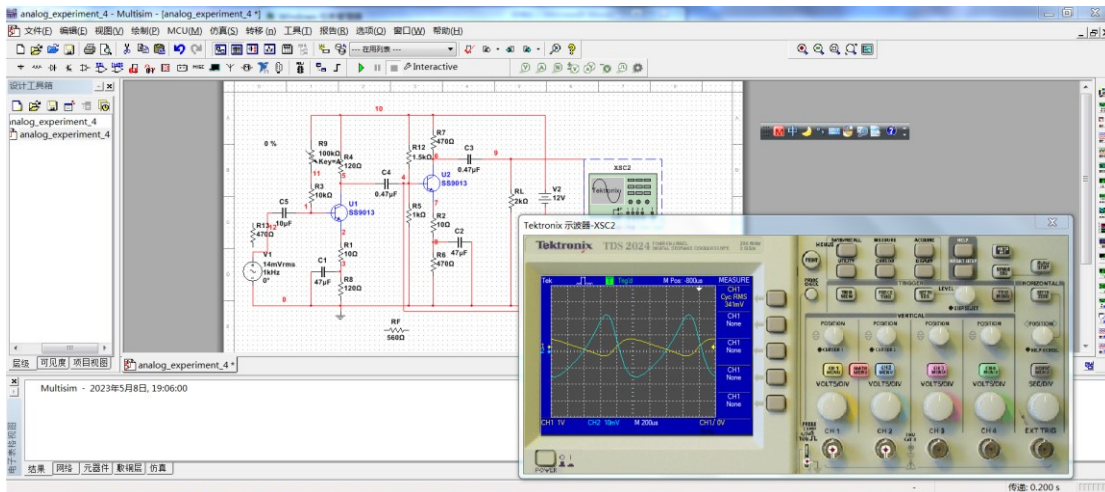
可见，若旁路电容开路，电压放大倍数会大大减小。

以下尝试对电路影响归结为：电路元件的变化导致静态工作点不合适。

### 尝试 2： $R_9$ （滑动变阻器）或 $R_3$ （基极电阻）短路

定性分析：可能使第一级静态工作点不合适，使第一级晶体管工作在饱和状态。

仿真结果：使  $R_9$ （滑动变阻器）短路，示波器观察到的输出波形如下（CH1[黄色]为输出电压，CH2[蓝色]为 T1 输出端），可见发生明显失真，有效值变为 341mV。



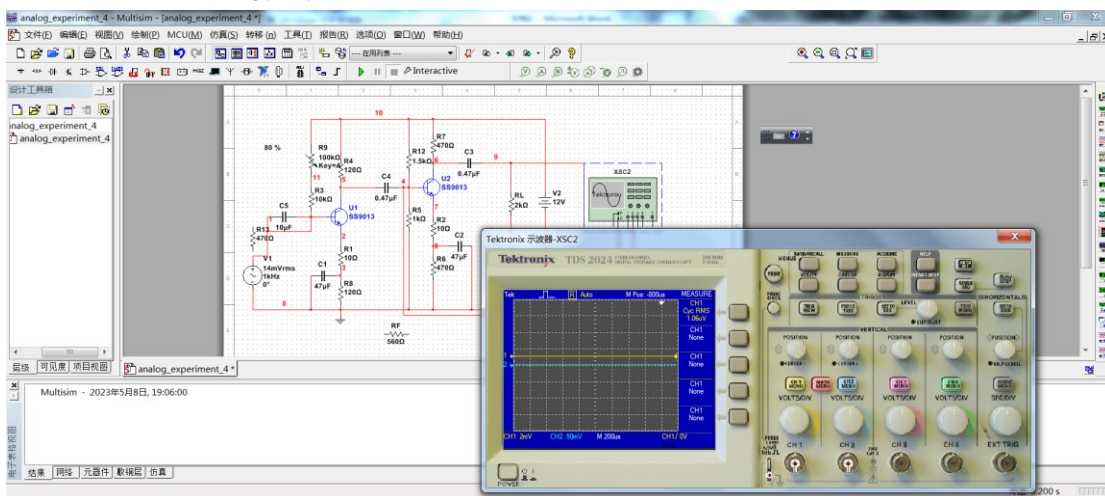
使  $R_3$ （基极电阻）短路，示波器测得的有效值变化不大。因为  $R_9$  还正常工作且比  $R_3$  大得多，基极电阻变化不大，静态工作点仍合适。

可见，若  $R_9$ （滑动变阻器）短路【更根本地说是基极电阻显著减小，使静态工作点不合适】，电压放大倍数会大大减小。

### 尝试 3： $C_5$ 短路

定性分析：可能使第一级静态工作点不合适，交流信号直接作用在发射结，没有驮载在直流信号上，无法使晶体管发射结导通。

仿真结果：使  $C_5$  短路，示波器根本无法观察到正常的输出波形（如下图）。

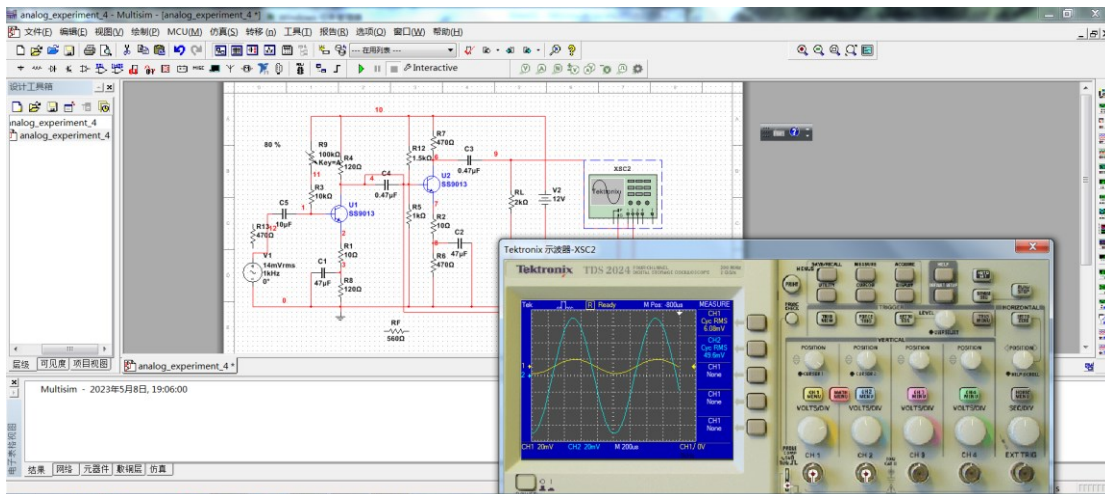




## 尝试 4: $C_4$ 短路

定性分析：可能使两级的静态工作点相互影响。设置的静态工作点中，第一级集电极电位较高，若直接输出至第二级的基极很可能使 T2 工作在饱和状态。

仿真结果：使  $C_4$  短路，示波器竟在输出端观察到了正弦波（如下图，CH1[黄色]为输出电压，CH2[蓝色]为 T1 输出端），但是其电压有效值（6mV）竟比 T2 输入端（T1 输出端）的电压有效值（49.6mV）还小！



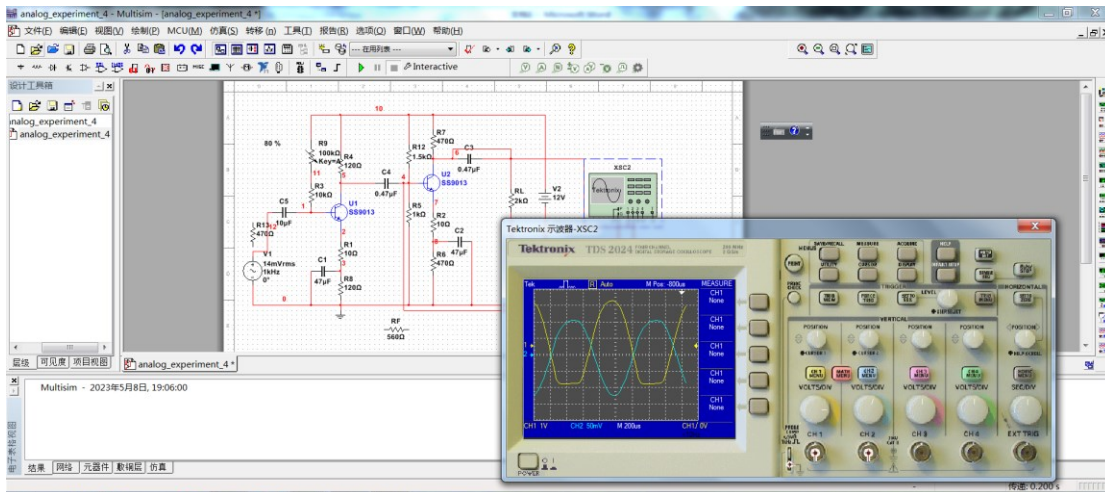
再利用直流工作点分析得静态工作点如下。可见， $C_4$  的短路使 T2 管工作在饱和状态！由此可见，当我们为阻容耦合放大电路设计好了静态工作点后，耦合电容的短路可能使电路的工作状态完全不同！

Variable	Operating point value
V(2)	2.61857
V(4)	8.29551
V(6)	7.25746
V(7)	7.2427

## 尝试 5: $C_3$ 短路

定性分析：可能使 T2 的静态工作点受到影响。集电极等效电阻减小，等效  $V_{CC}$  减小，集电极电位变化情况不明。

仿真结果：使  $C_3$  短路，示波器观察到了饱和和失真（底部失真）的波形，如下。



再利用直流工作点分析得静态工作点如下。可见， $C_3$ 的短路使 T2 管的集电极静态电位降低很多，更接近基极电位，进而使其更容易饱和。

同尝试 4，可见，当我们为阻容耦合放大电路设计好了静态工作点后，耦合电容的短路可能使电路的工作状态完全不同！

Variable	Operating point value
V(2)	2.65341
V(4)	4.77458
V(6)	6.48753
V(7)	4.09308