

浙江大学

本科实验报告

晶体管共射放大电路设计

课程名称： 电子电路设计实验

姓 名：

学 院： 信息与工程学院

专 业： 信息工程

学 号：

指导老师： 李锡华、施红军、叶险峰

2021 年 7 月 5 日

浙江大学实验报告

专业： 信息工程
姓名： _____
学号： _____
日期： 2021 年 7 月 5 日
地点： 东 4-216

课程名称： 电子电路设计实验 指导老师： 李锡华、施红军、戴险峰
实验名称： 晶体管共射放大电路设计 实验类型： 研究实验 同组学生姓名： _____

一、 实验目的

学习晶体管放大电路的设计方法，掌握晶体管放大电路静态工作点的设置、测量与调整方法，了解放大器的非线性失真，掌握放大器电压增益、输入电阻、输出电阻、幅频响应等基本性能指标的测量方法，理解负反馈对放大电路性能的影响。

二、 实验任务和要求

(1) 设计一阻容耦合单极放大电路

已知条件： $V_{CC} = +10V$, $R_L = 5.1k\Omega$, $V_i = 10mV$, $R_s = 600\Omega$

性能指标要求：对于频率为 $1kHz$ 的正弦信号 $|A_V| > 15V/V$, $R_i > 7.5k\Omega$

(2) 设计要求

- 写出详细的设计过程并进行验算
- 用 OrCAD 软件进行仿真分析

(3) 按照自己设计的电路进行组装，并进行测试，并与设计、仿真结果比较。

三、 实验原理

1. 静态工作点计算

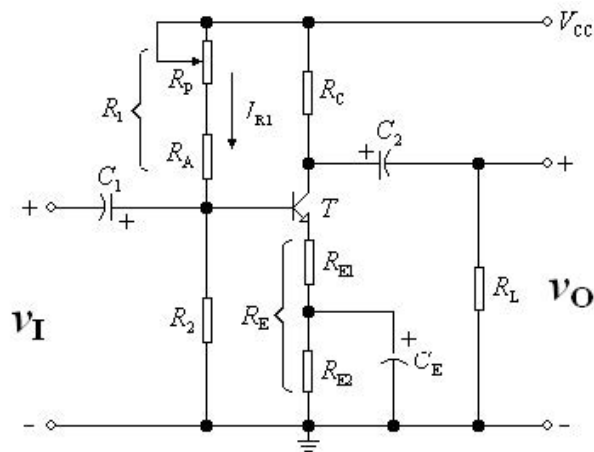


图 1: 电路原理图

通过戴维南等效可以计算：

$$V_{BB} = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$R_{BB} = R_1 || R_2$$

$$I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E + R_{BB}/(1 + \beta)}$$

$$I_C = \frac{\beta}{1 + \beta} I_E \approx I_E$$

$$V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E) I_C$$

2. 交流性能指标计算

$$g_m = \frac{I_C}{V_T}$$

$$R_\pi = \frac{\beta}{g_m}$$

$$r_e = \frac{\alpha}{g_m}$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} \approx -\frac{R'_C}{R'_E} = -\frac{R_C || R_L}{r_e + R_{E1}}$$

$$R_i = R_1 || R_2 || [(1 + \beta)(r_e + R_{E1})]$$

$$R_o \approx R_C$$

四、 实验方案设计与实验参数计算

1. 实验方案设计

根据性能指标范围确定静态工作点和元件参数值时有一些原则和经验公式可以参照。

- (1) 在微弱信号放大或前置放大器设计时需要考虑晶体管的噪声系数。通常，高频小信号晶体管工作电流在 $0.5mA \sim 2mA$ 时噪声最小，一般设定在 $1mA$ 以下。
- (2) 由静态电流 I_E ，要使静态工作点较稳定，应取 $V_{BB} \gg V_{BE}$ 。对硅晶体管，一般取 V_{BB} 为 $3V \sim 5V$ 。
- (3) 要保证 V_B 足够稳定，应使 $I_{R1} \gg I_B$ ，常取 I_{R1} 为 $(5 \sim 10)I_B$ 。
- (4) 为获得较大的输出信号摆幅和电压增益，基极静态电压不能太高，工程设计中一般取 V_B 或 $V_{BB} \approx (\frac{1}{3} \sim \frac{1}{4})V_{CC}$ 。
- (5) 由于射极电阻 R_{E1} 的负反馈作用，增大 R_{E1} 能提高电路的输入电阻、能提高电压增益的稳定性，但将使电压增益值 $|A|_v$ 下降。另一方面，当电压增益要求给定时，增大 R_{E1} 就需要提高集电极电阻 R_C ，而这将降低晶体管的集电极静态电压 V_C 、影响输出信号摆幅。因此， R_{E1} 、 R_C 的确定需要根据电压增益 $|A|_v$ 的大小及稳定性、输入电阻要求、输出信号摆幅等进行综合考虑。
- (6) 耦合电容 C_1 、 C_2 和旁路电容 C_E 的取值。一般来说， C_1 、 C_2 、 C_E 取值越大，放大器的下限截止频率越低。但电容越大，体积也大、漏电流也大。如果放大器的低频特性要求不是很苛刻，没有必要每次都计算这三个电容值。 C_1 、 C_2 常取 $(10 \sim 20)\mu F$ 、 C_E 常取 $(30 \sim 100)\mu F$ 。

2. 实验参数计算

(1) 实验参数：

a. 我对实验给定的实验参数进行了些调整如下：

$$V_{CC} = +15V, R_L = 4.7k\Omega, V_i = 10mV, R_s = 600\Omega$$

b. 考虑到晶体管的噪声系数，取 $I_C = 0.8mA$

c. 为了使静态工作点较稳定同时获得较大的输出信号摆幅和电压增益，取 $V_{BB} = 3.92V$

d. 为了满足上述条件，同时考虑到电阻的标称值，取 $R_1 = 110k\Omega$, $R_2 = 39k\Omega$

e. 根据电压增益的大小以及稳定性、输入电阻的要求综合考虑，取 $R_{E1} = 56\Omega$, $R_{E2} = 3.6k\Omega$, $R_C = 3.6k\Omega$

(2) 结果计算：

根据实验原理所示公式，计算具体结果如下：

$$\begin{aligned}
 V_{BB} &= V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 3.93V \\
 I_E &= \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E + R_{BB}/(1 + \beta)} = 0.84mA \\
 I_C &= \frac{\beta}{1 + \beta} I_E \approx I_E = 0.84mA \\
 V_{CE} &= V_{CC} - (R_C + R_E) I_C = 8.90V \\
 A_v &= \frac{v_o}{v_i} \approx -\frac{R'_C}{R'_E} = -\frac{R_C || R_L}{r_e + R_{E1}} = -23.51V/V \\
 R_i &= R_1 || R_2 || [(1 + \beta)(r_e + R_{E1})] = 9.401k\Omega \\
 R_o &\approx R_C = 3.6k\Omega
 \end{aligned}$$

五、 主要仪器设备

电路、示波器、信号发生器、万用表、电阻若干、电容若干、电源

六、 实验仿真

1. 测量 I_C 、 V_{CE}

(1) 利用 Bias Point 仿真分析

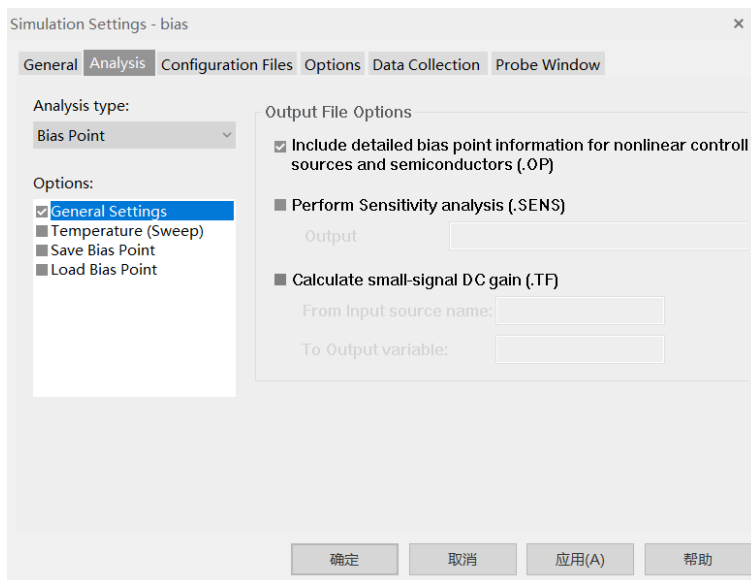


图 2: 测量 I_C 、 V_{CE}

(2) 在输出结果中查看结果

```
139
140 *****
141
142
143
144
145
146
147 **** BIPOLAR JUNCTION TRANSISTORS
148
149
150 NAME      Q_Q1
151 MODEL     Q2N2222
152 IB        7.01E-06
153 IC        8.37E-04
154 VBE       6.39E-01
155 VBC       -8.26E+00
156 VCE       8.90E+00
157 BETADC    1.19E+02
158 GM        3.23E-02
159 RPI       4.00E+03
160 RX        1.00E+01
161 RO        9.83E+04
162 CBE       4.94E-11
163 CBC       3.13E-12
164 CJS       0.00E+00
165 BETAAC    1.29E+02
166 CBX/CBX2  0.00E+00
167 FT/FT2    9.77E+07
168
```

图 3: 结果

得到:

$$I_C = 0.837mA, V_{CE} = 8.9V$$

2. 测量 A_V 、 f_L 、 f_H

(1) 利用 AC Sweep/Noise 仿真分析

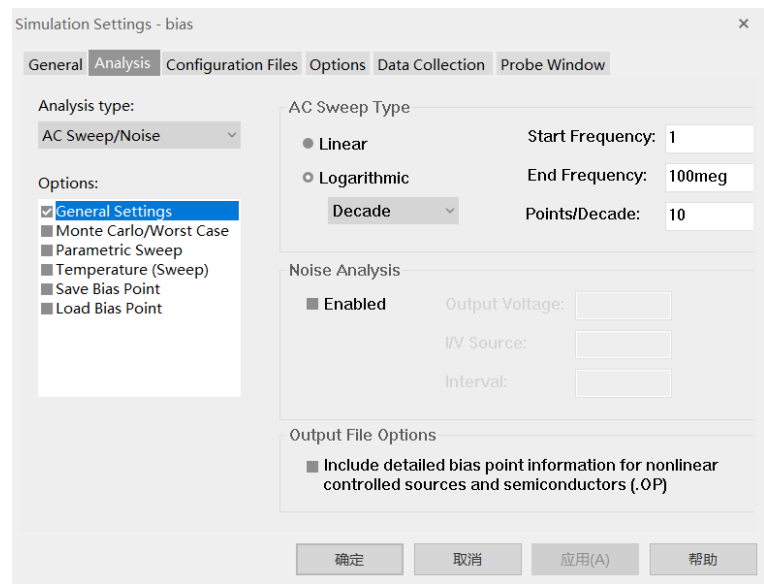


图 4: 仿真设置

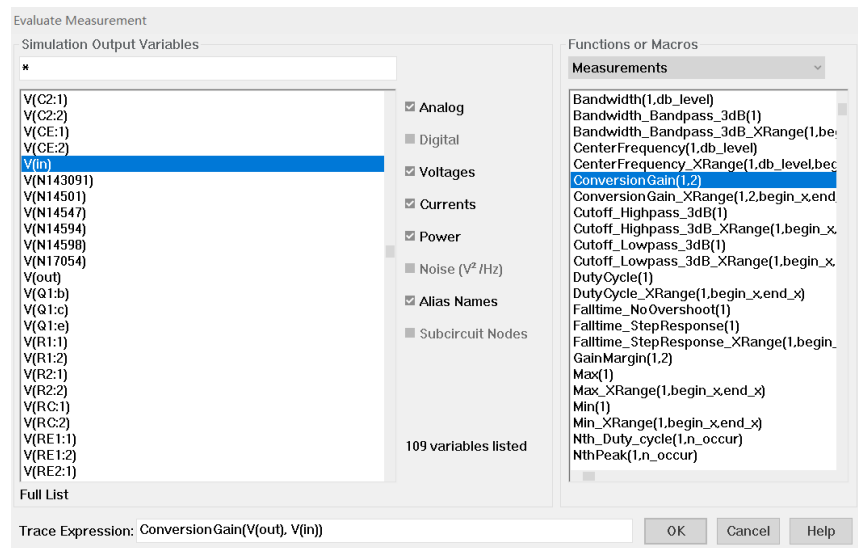


图 5: 仿真设置

(2) 在输出结果中查看结果

	Evaluate	Measurement	Value
	<input checked="" type="checkbox"/>	Bandwidth(V(OUT),3)	2.62252meg
	<input checked="" type="checkbox"/>	Cutoff_Highpass_3dB(V(OUT))	39.29222
▶	<input checked="" type="checkbox"/>	Cutoff_Lowpass_3dB(V(OUT))	2.62256meg
	<input checked="" type="checkbox"/>	ConversionGain(V(OUT), V(IN))	22.26332

图 6: 结果

得到:

$$A_V = -22.26, f_H = 39.29Hz, f_L = 262.26kHz$$

3. 测量 R_i 、 R_o

3.1 测量 R_i

(1) 利用 AC Sweep/Noise 仿真分析 得到:

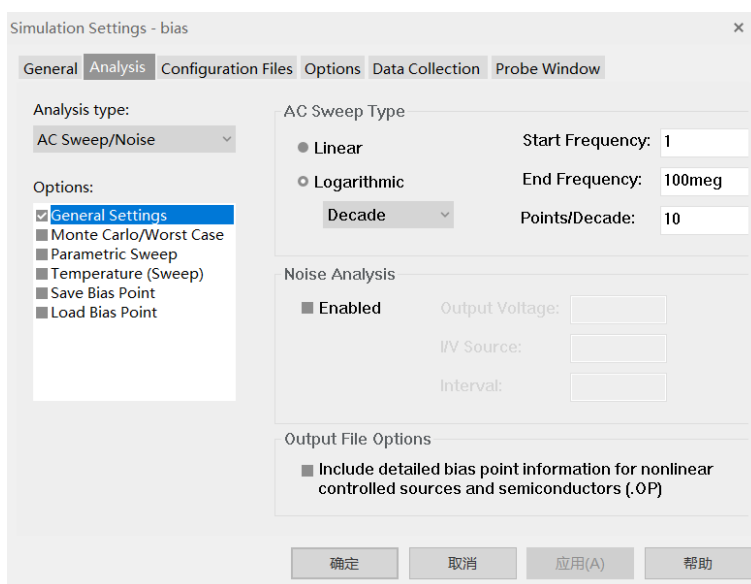


图 7: 仿真设置

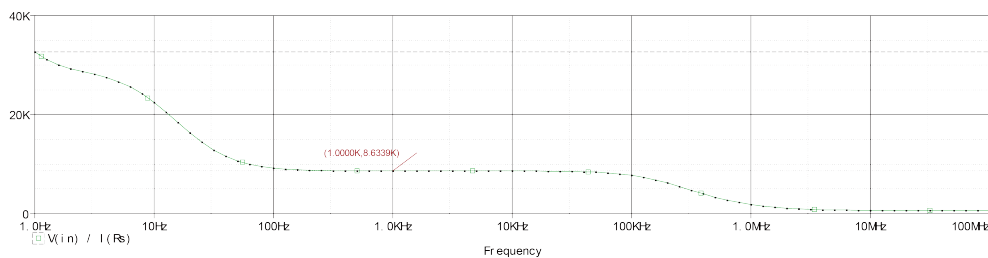


图 8: 结果

$$R_i = 8.6339k\Omega$$

3.2 测量 R_o

(1) 更改电路图如下图

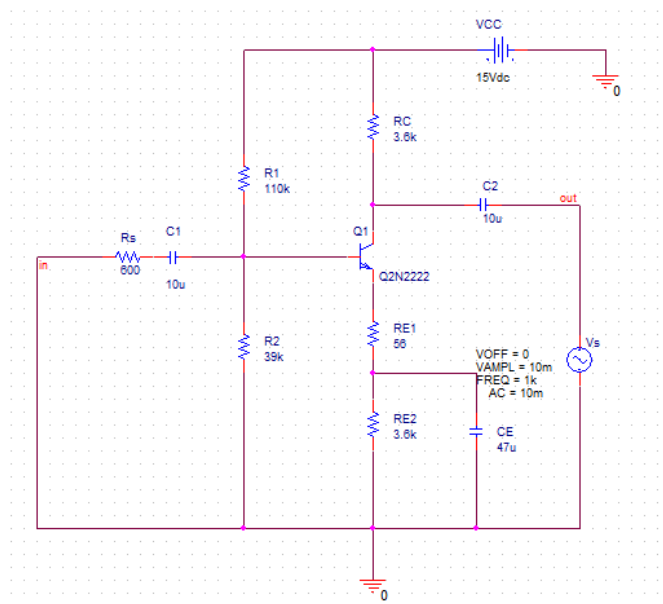


图 9: 电路图

(2) 利用 AC Sweep/Noise 仿真分析

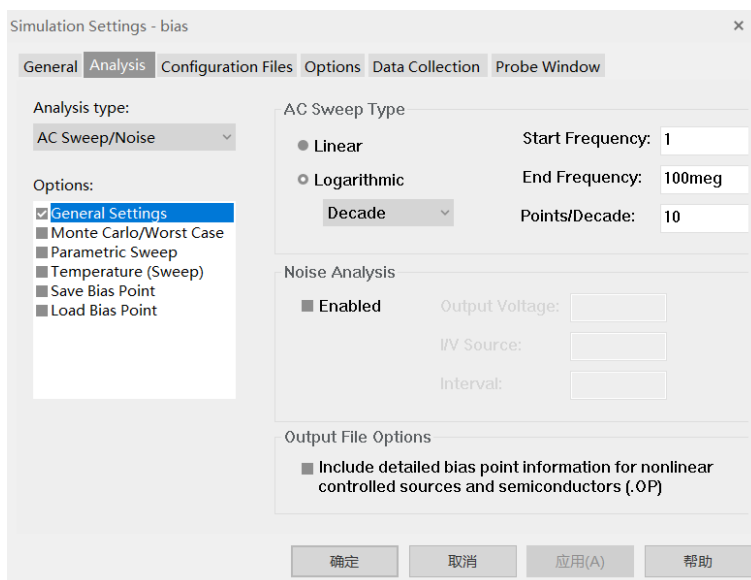


图 10: 仿真设置

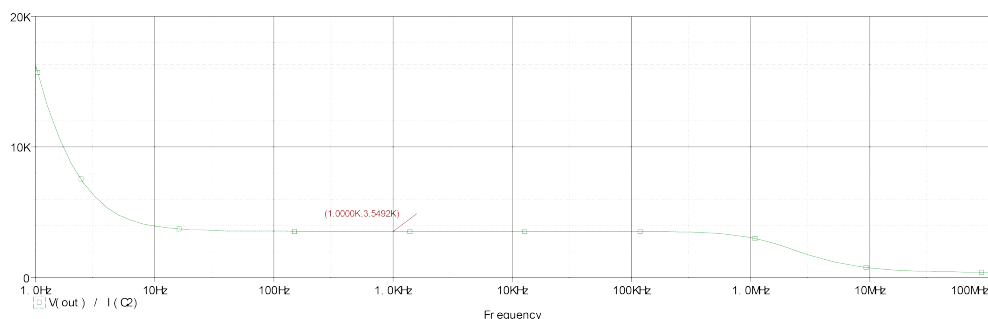


图 11: 结果

得到：

$$R_o = 3.5492k\Omega$$

七、 实验步骤、实验调试过程、实验数据记录

1. 实验参数

实验中采用了小组成员的参数，如下： $V_{CC} = +12V$, $R_L = 5.1k\Omega$, $v_i = 12mV$, $R_1 = 117k\Omega$, $R_2 = 39k\Omega$, $R_C = 3.3k\Omega$, $R_{E1} = 62\Omega$, $R_{E2} = 3.6k\Omega$

2. 实验电路

3. 静态工作点调整与测量

- (1) 按元器件参数安装、连接电路。
- (2) 不加输入信号。调节 R_P (板上 R_{W1})，使 I_C 为设计值 (测量电阻 R_C 两端的压降 V_{Rc})。

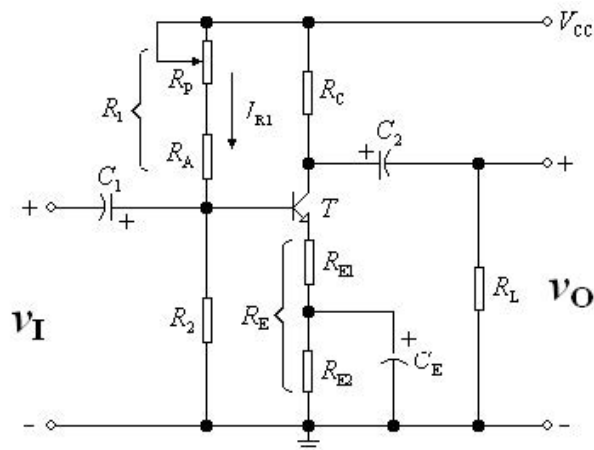


图 12: 实验电路

(3) 测量放大电路的静态工作点，并将理论估算值与测量值记录在下表中。

$mA、V$	I_C	V_{CE}	V_{BE}	V_B
理论估计	0.728	8.93	0.7	3.5
测量	0.729	8.90	0.61	3.58

表 1: 静态工作点调整与测量

4. 电压增益测量

- 保持 I_C 不变，调节信号源，使输出 $1kHz$ 正弦波，加至放大电路输入端，使输入电压 v_i 幅度 $30mV$ （以示波器显示为准）不接负载电阻，即： $R_L = \infty$ (开路)。输入、输出波形用双踪显示观察，指出它们的相位关系。当输出波形无失真时，分别读出 v_i 、 v_o 的峰-峰值，记入下表。
- 增大输入信号幅度，用示波器监视输出波形。使输出波形出现失真，记下此时输出波形草图，说明首先出现的是哪种失真。测出最大不失真输出电压峰-峰值，记入下表。

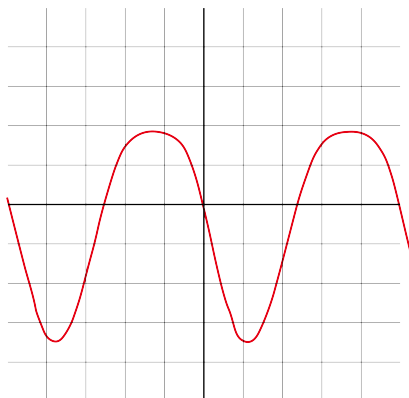


图 13: 波形图草图

结果：首先出现的是截止失真。

- (3) 入负载 $R_L = 5.1k\Omega$ 。重做步骤 (1)，记入表中。计算电压增益 A_V ，分析负载对电压增益的影响。

测试条件	实测值 (峰-峰值)				理论值
	V_i	V_o	V_{omax}	A_V	A_V
$R_L = \infty$	60mV	2V	2.2V	-33.33	-33.86
$R_L = 5.1k\Omega$	60mV	1.192V	×	-19.87	-20.56

表 2: 电压增益测量

5. 输入电阻输出电阻测量

5.1 输入电阻测量

在信号源与被测放大器之间串入一个与 R_i 同一数量级 (理论估算) 的已知电阻 R ，在输出波形不失真的情况下，分别测出 v_s 和 v_i ，则放大器的输入电阻为

$$R_i = \frac{v_i}{(v_s - v_i)/R} = \frac{v_i}{v_s - v_i} \times R$$

R_i (理)	R	v_s	v_i	R_i (实)
1.0213k Ω	10k Ω	30.2mV	15mV	9.868k Ω

表 3: 输入电阻测量

5.2 输出电阻测量

输出波形不失真情况下，分别测出输出端空载时的输出电压 v_o 、和接入负载 R_L 后的输出电压 v_o' ，则放大器的输出电阻为

$$R_o = \frac{v_o - v_o'}{v_o'/R_L} = \left(\frac{v_o}{v_o'} - 1\right) \times R_L$$

v_o	v'_o	R_o (理)	R_o
0.416V	0.256V	3.3k Ω	3.1875k Ω

表 4: 输出电阻测量

6. 上限截止频率 f_H ，下限截止频率 f_L 测量

电压增益下降到中频增益 0.707 倍时 (分贝数下降 3dB) 所对应的上、下限频率即 f_H 、 f_L 。
放大电路的通频带宽度 B_W 。即 $B_W = f_H - f_L$

测量方法

- (1) 在 I_C 为设计值、 $R_L = \infty$ 情况下，输入 1kHz 正弦信号，改变输入信号幅度，使输出电压峰-峰值为 $0.5V_{OP-Pmax}$ 左右（主要是为了避免输出过大而出现失真或输出过小影响测量精度）。准确测出此时输出电压峰-峰值 V_{Op-p} 。
- (2) 保持放大器输入电压 v_i 幅度不变，改变信号源输出频率（增加或减小），当输出电压值达到 $0.707V_{Op-p}$ 值时，停止信号源频率的改变，此时信号源所对应的输出频率即为 f_H 、或 f_L 。

测得：

$$V_{Op-p} = 1.104V$$

$$f_H = 37.0Hz$$

$$f_L = 275kHz$$

八、 实验结果与分析

最后的实验是采用的组员的设计参数，如下

$V_{CC} = +12V$, $R_L = 5.1k\Omega$, $v_i = 12mV$, $R_1 = 117k\Omega$, $R_2 = 39k\Omega$, $R_C = 3.3k\Omega$, $R_{E1} = 62\Omega$, $R_{E2} = 3.6k\Omega$ 从结果中可以看出，测量值和仿真、设计值比较符合，同时也满足最初的设计要求。同时由于仿

	I_C	V_{CE}	A_V	R_i	R_o	f_L	f_H
理论值	0.728mA	8.9283V	-20.556	1.0213k Ω	3.3k Ω	34.51Hz	\times
仿真	0.7271mA	8.915V	-20.261	8.7118k Ω	3.2649k Ω	37.115Hz	224.46kHz
测量	0.729mA	8.90V	-19.87	9.868k Ω	3.1875k Ω	37.0Hz	275kHz

表 5: 结果比较

真软件中三极管与设计实验中的三极管有所区别导致最后 R_i 相对误差偏大。

九、 讨论、心得

以前在电子电路基础的课程学习的时候，仅仅是简单的从理论层面对该放大电路进行分析，并没有真正理解电路中每个元件的作用以及每个元件的大小取舍会怎样影响放大效果。但是通过本次实验，我学会了如何根据设计要求去选择每个元件，知道了每个电阻和电容的大小会怎样影响电路的放大效果。其次，通过本次实验，我对 OrCAD 软件的使用有了更加深入的理解，认识到其的强大，但是也了解到了仿真可能带来的误差。