

# 浙江大学

## 本科实验报告

课程名称：电子电路设计实验 1

姓 名：

学 院：信息与工程学院

系：

专 业：电子科学与技术

学 号：

指导教师：李锡华、叶险峰、施红军

2019 年 12 月 9 日

# 浙江大学实验报告

专业： 电子科学与技术

姓名

学号：

日期： 2019/12/9

地点： 东 4

课程名称： 电子电路设计实验 1 指导老师： 李锡华、叶险峰、施红军 成绩：

实验名称： 晶体管共射放大电路设计、仿真与测试 实验类型： 设计型 同组学生姓名： 陈健

一、实验目的

二、实验任务与要求

三、实验方案设计与实验参数计算（3.1 总体设计、3.2 各功能电路设计与计算、3.3 完整的实验电路……）

四、主要仪器设备

五、实验步骤与过程

六、实验调试、实验数据记录

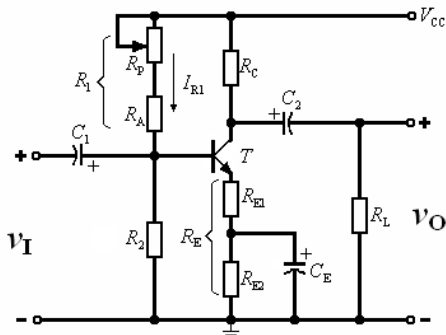
七、实验结果和分析处理

八、讨论、心得

一、实验目的

- 1、学习用 OrCAD 设计与仿真电路。
- 2、掌握放大电路静态工作点的调整和测量方法，了解放大器的非线性失真。
- 3、掌握放大电路电压增益、输入电阻、输出电阻、通频带等主要性能指标的测量方法。
- 4、理解射极电阻和旁路电容在负反馈中所起的作用及对放大电路性能的影响。
- 5、学习晶体管放大电路元件参数选取方法，掌握单级放大器设计的一般原则。

二、实验原理



1、电路分析计算

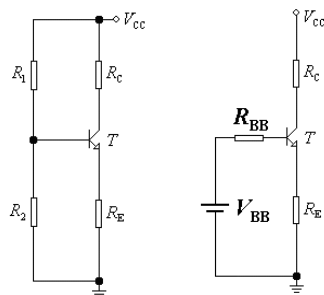
分立电路普遍采用、带射极电流负反馈、阻容耦合共射放大电路。

$R_1$ 、 $R_2$ ：提供静态工作点所需基极电压。

$R_1$ ： $R_P$ 用来调节静态工作点， $R_A$ 起保护作用，避免  $R_P$  调至 0 时基极电流过大、损坏晶体管。

$R_{E1}$ 、 $R_{E2}$  都参与了直流电流负反馈，但只有  $R_{E1}$  参与交流电流负反馈，因为旁路电容  $C_E$  交流时可认为短路

直流分析 ( $V_{CE}$ 、 $I_C$ ，BJT 工作状态、小信号参数)：



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

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

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

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

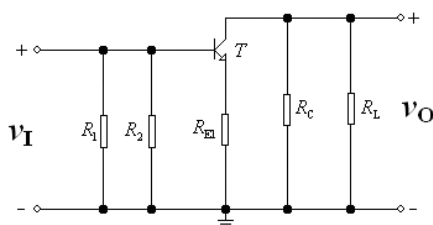
$$R_{BB} = R_1 \parallel R_2$$

实验名称：晶体管共射放大电路设计、仿真与测试

小信号参数计算：

$$g_m = \frac{I_C}{V_T} \quad r_\pi = \frac{\beta}{g_m} \quad r_e = \frac{\alpha}{g_m}$$

交流分析：



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

$$R_o \approx R_C$$

$$A_V = -\frac{R_C \parallel R_L}{r_e + R_{E1}}$$

## 2、静态工作点失真

静态工作点选得过高或过低都易产生非线性失真。

过高：如 Q1，稍大的输入信号正半周将使晶体管进入饱和区，因而  $i_c$  波形将出现顶部压缩、输出电压  $v_{ce}$  波形将在底部压缩，这称为饱和失真。

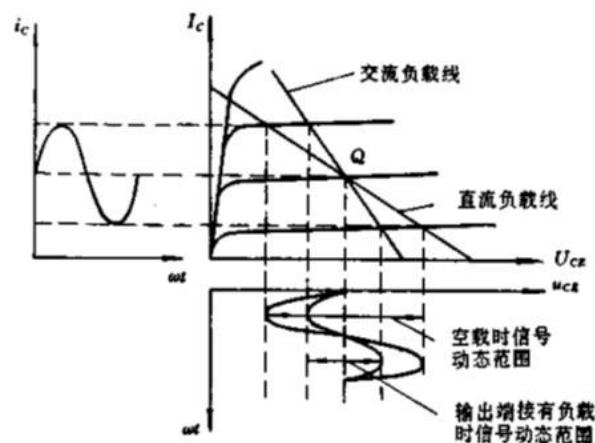
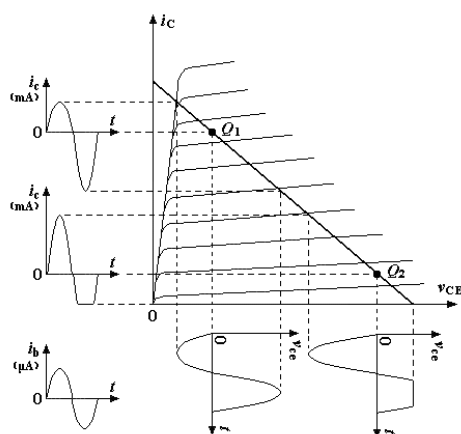
太低：如 Q2，稍大的输入信号负半周将使晶体管进入截止区，因而  $i_c$  波形将出现底部压缩、输出电压  $v_{ce}$  波形将在顶部压缩，这称为截止失真。

要使放大器不失真地放大，工作点必须选择合适。

初选静态工作点时，可以选取直流负载线的中点，即  $V_{CE} = 0.5V_{CC}$  或  $I_C = 0.5I_{CS}$ ，这样便可获得较大输出动态范围。

当放大器输出端接有负载  $R_L$  时，因交流负载线比直流负载线要陡，所以放大器动态范围要变小。

当发射极接有电阻时，也会使信号动态范围变小。



## 三、实验任务与要求

### 1、晶体管共射放大电路设计、仿真

- (1) 提出合理指标，用给定电路结构设计电路。
- (2) 设计、仿真每位组员独立完成，静态电流适当错开。
- (3) 验算结果与仿真结果比较：要求在放大区且有适当的输出信号摆幅，比较  $I_C$ 、 $V_{CE}$ 、 $V_B$ 、 $A_V$ 、 $R_i$ 、 $R_o$ 。
- (4) 电阻取标称值：算完一个、取一个，后续相关计算按标称值计算。电容计算不要求。

实验名称: 晶体管共射放大电路设计、仿真与测试

## 2、晶体管共射放大电路测试

- (1) 静态工作点的调整和测量。
- (2) 电压增益的测量。
- (3) 输入电阻、输出电阻的测量。
- (4) 上限截止频率  $f_H$ 、下限截止频率  $f_L$  的测量。

## 四、实验方案设计与实验参数计算

### (1) 总体设计

设计: 已知  $V_{CC}=12V$ ,  $R_L=3k\Omega$ ,  $V_i=10mV$ ,  $R_s=600\Omega$

指标要求:  $|A_v| > 15V/V$ ,  $R_i > 5k\Omega$ ,  $f_L < 50Hz$

(1) 电路结构及晶体管选择. 选用 9013. 按 160 计算

(2) 静态工作点设置:  $R_E, R_1, R_2$ . 取  $I_C=1mA$

$$\text{取 } V_B = \frac{1}{3} V_{CC} = 4V, \text{ 得 } R_E \approx \frac{V_B - V_{BE}}{I_C} = \frac{4 - 0.7}{1} = 3.3k\Omega$$

当  $I_{R_1} \gg I_B$  时,  $V_{BB} \approx V_B = 4V$ , 由  $V_{BB}$  式可得  $12 \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 4$

$$R_1 : R_2 = 2 : 1$$

考虑  $R_1, R_2$  的取值.

① 从  $R_2$  入手. 取  $R_2 = 3 \times 5 = 15k\Omega$ , 则  $R_1 = 2 \times 15 = 30k\Omega$

② 按  $I_{R_1} \gg I_B$ . 取  $I_{R_1} = 10 I_B = 10 \times \frac{1}{160} = 0.0625mA$

$$\text{则 } R_1 = \frac{V_{CC} - V_B}{I_{R_1}} = \frac{12 - 4}{0.0625} = 128k\Omega, R_2 = 64k\Omega.$$

综合考虑, 取  $R_2 = 30k\Omega, R_1 = 60k\Omega$

(3) 电压增益有关元件值的确定.

由  $I_C = 1mA$  得  $r_e \approx 26\Omega$ , 取  $|A_v| = 20V/V$ .  $A_v = \frac{R_c \parallel R_L}{r_e + R_{E1}}$

① 从  $R_E$  入手, 取  $R_E = 5k\Omega$ .

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

$$\text{则 } R_i = 30k \parallel 60k \parallel [161 \times (26 + R_{E1})] \quad R_{E1} = 15\Omega, R_c = 1.128k\Omega, R_{E2} = 3.285k\Omega.$$

② 取  $V_C = \frac{2}{3} V_{CC} = 8V$ .

$$\text{则 } R_c = 4k\Omega, R_{E1} = 60\Omega, R_{E2} = 3.3 - 0.06 = 3.24k\Omega.$$

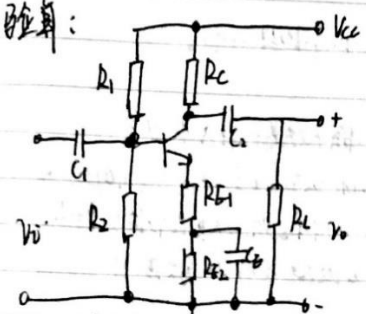
综合考虑, 取  $R_c = 3.3k\Omega, R_{E1} = 43\Omega, R_{E2} = 3.3k\Omega$ .

最终  $R_c = 3.3k\Omega, R_2 = 30k\Omega, R_1 = 60k\Omega, R_{E1} = 43\Omega, R_{E2} = 3.3k\Omega$

实验名称: 晶体管共射放大电路设计、仿真与测试

## (2) 验算

验算:



增益:  $A_v = -\frac{R_c \parallel R_L}{r_e + R_{e1}} = -\frac{3.3k \parallel 3k}{(27.496 + 43) \times 10^{-3}} = -22.2910V/V$

$V_{BB} = V_{CC} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 12V \cdot \frac{30}{30+60} = 4V$

$R_{WB} = R_1 \parallel R_2 = 30k \parallel 60k = 20k\Omega$

$I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_{WB}}{1+\beta}} = \frac{4 - 0.7}{3.3 + 0.043 + \frac{20}{1+160}} = 0.9518mA$

$I_C = \alpha I_E = \frac{160}{160+1} \times 0.9518 = 0.9456mA$

$V_{CE} \approx V_{CC} - (R_C + R_E)I_C = 12 - (3.3 + 0.043 \times 1.33) \times 0.9456 = 5.178V$

$\approx$  极工作在放大区.  $r_e = \frac{26mV}{I_E} = \frac{26mV}{0.9456mA} = 27.496\Omega$

$R_{in} = R_1 \parallel R_2 \parallel [(1+\beta)(r_e + R_{E1})] = 30k \parallel 60k \parallel [161 \times (27.496 + 43)] = 7.2408k\Omega$

$R_{out} = R_C \parallel R_L = 3.3k \parallel 3k = 1.5714k\Omega$

$V_B = \frac{(1+\beta)(r_e + R_{E1})}{(1+\beta)(r_e + R_{E1}) + R_{WB}} \cdot V_{BB} = \frac{161 \times (27.496 + 43)}{161 \times (27.496 + 43) + 20} \cdot 4 = 3.8578V$

$I_{B2} = \frac{V_B}{R_2} = \frac{4}{30} = 0.1333mA$

$I_{B1} = I_B + I_{B2} = 0.00591mA + 0.1333mA = 0.1392mA$

验算值为:  $I_C = 0.9456mA$ ,  $V_C = 8.8795V$ ,  $I_E = 0.00591mA$ ,  $I_{B1} = 0.1392mA$

$A_v = -22.2910V/V$ ,  $R_i = 7.2408k\Omega$ ,  $R_{out} = 1.5714k\Omega$ ,  $V_B = 3.8578V$ ,  $V_E = 3.121V$

设计值为:  $I_C = 1mA$ ,  $V_C = 8V$ ,  $I_B = 0.00625mA$ ,  $I_{B1} = 0.0625mA$

$A_v = -15V/V$ ,  $R_i = 7.1420k\Omega$ ,  $R_{out} = 1.5714k\Omega$ ,  $V_B = 4V$ ,  $V_E = 3.3V$

由其中设计中的  $R_i$  由  $R_i = R_1 \parallel R_2 \parallel [(1+\beta)(r_e + R_{E1})]$  算得.

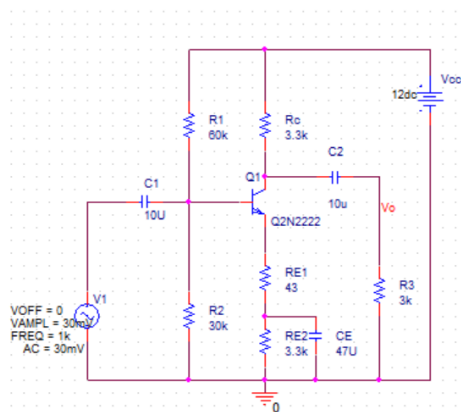
设计中的  $R_{out}$  由  $R_{out} = R_C \parallel R_L$  算得.

增益  $V_E$ ,  $V_E = I_E R_E \approx I_C R_C = 0.9456 \times 3.3 = 3.121V$

$R_O = R_C = 3.3k$ ,  $R_{out}$  为  $R_C$  与  $R_L$  并联值

## 五、仿真

### 1、实验电路图



实验名称：晶体管共射放大电路设计、仿真与测试

2、静态工作点计算

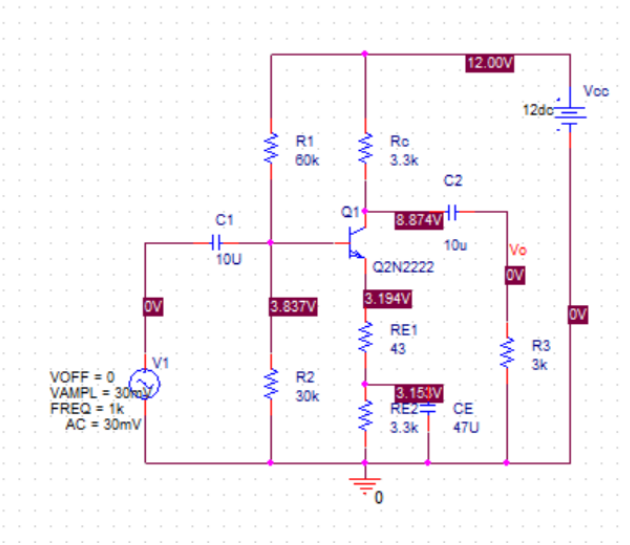


图 偏置电压

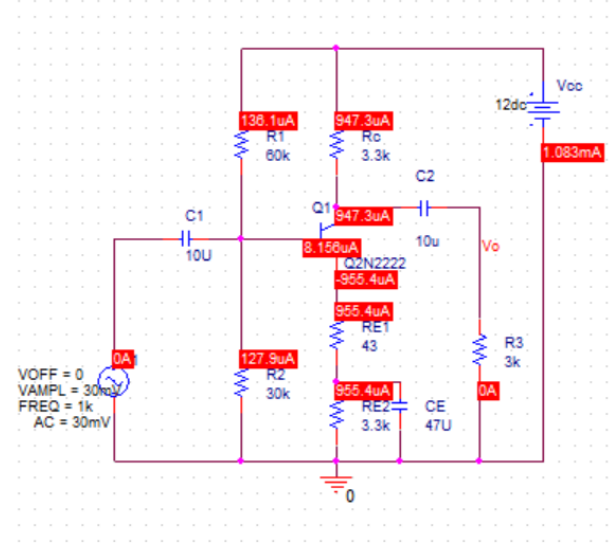
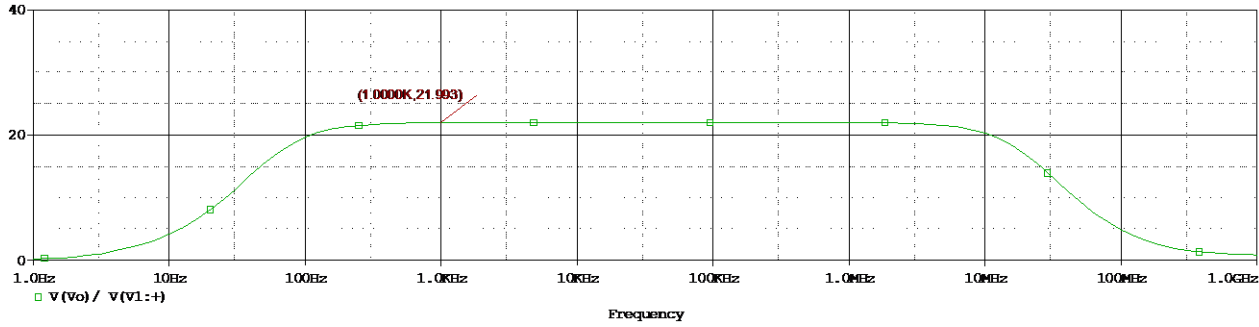
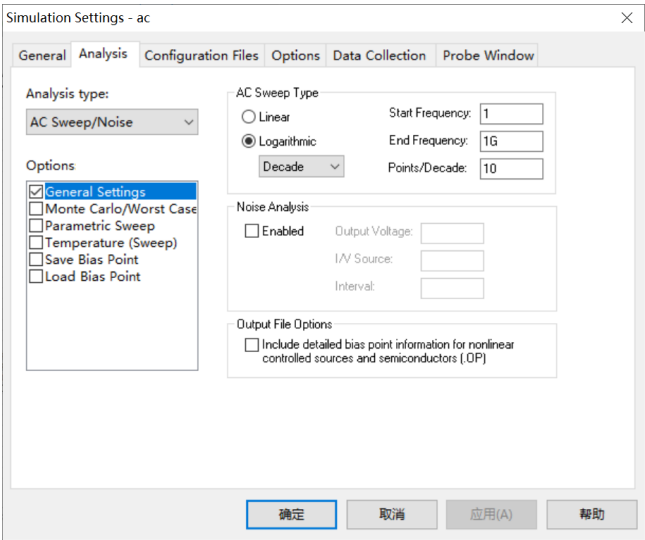


图 偏置电流

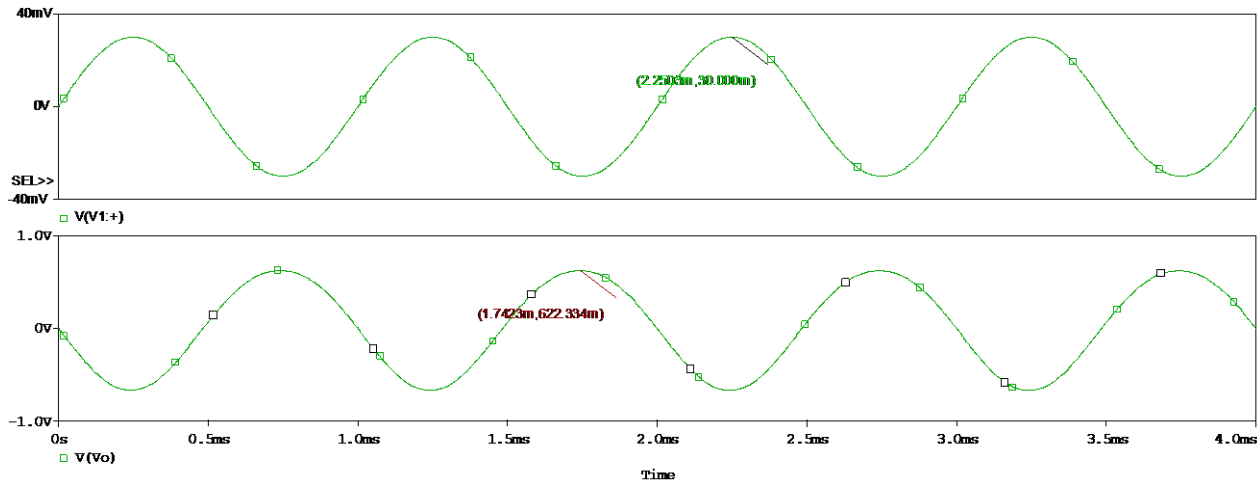
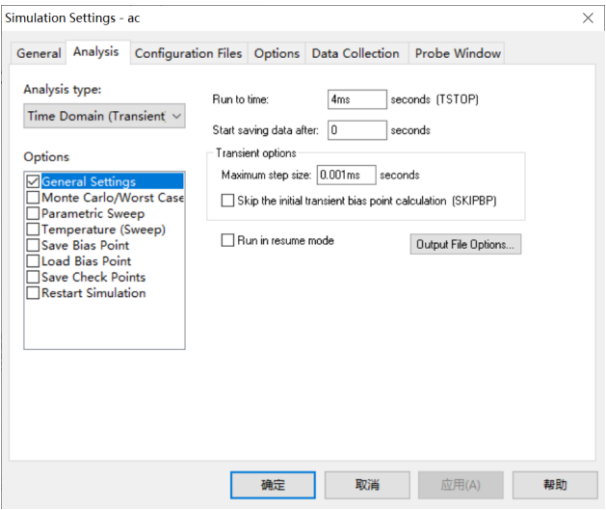
3、电压增益计算

(1) 进行交流分析。运行后在 Probe 窗口中，执行 Trace/Add Trace 命令，选择 V (o) / V (V1:+) 作输出量，显示出幅频特性，用游标得到频率为 1kHz 时的增益为 21.993。



实验名称：晶体管共射放大电路设计、仿真与测试

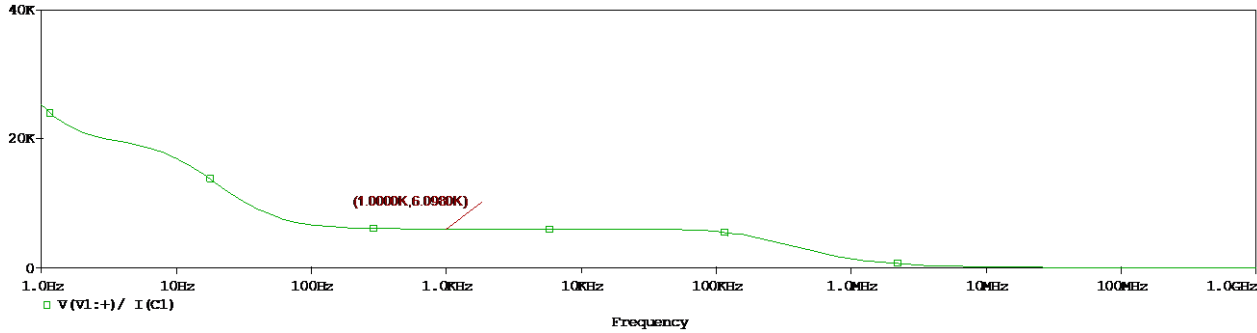
(2) 进行瞬态分析运行后得到输入输出波形，如图所示。启动标尺测出它们的峰值  $V_o=622.334\text{mV}$ ， $V_i=30\text{mV}$ ，两者相除，得到电压放大倍数 $\approx 20.744$ 。



因为后面仿真均采用交流扫描，故在两个数据间选择增益为 21.993。（OrCAD 里面交流分析和瞬态分析可以都用 VSIN 实现，只要把 VSIN 的 AC 值设置为 30mV，其仿真效果与只用 VAC 一样）

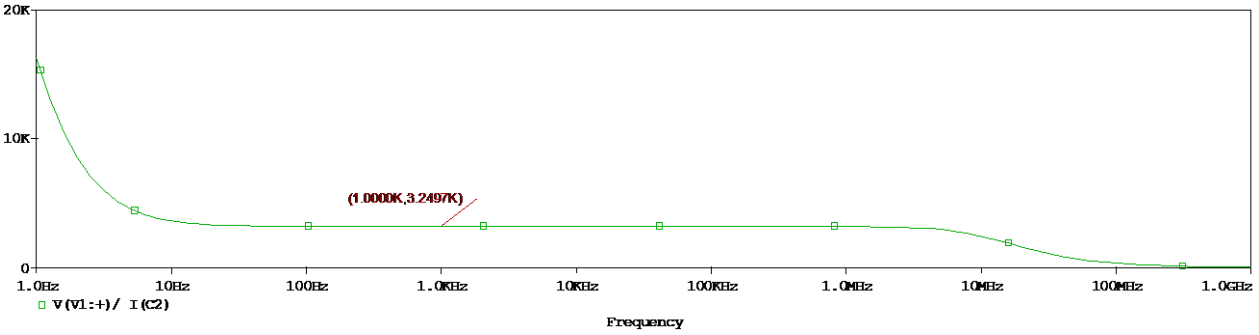
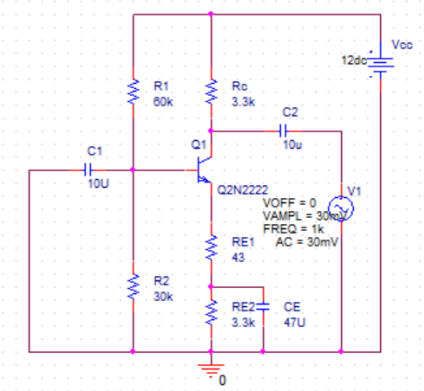
### 3、输入电阻、输出电阻计算

(1) 进行交流分析，在 Probe 窗口中，执行 Trace/Add Trace 命令，选择  $V(V1:~)/I(C1)$  作输出量，显示出输入电阻的频率特性，得到  $R_i=6.098\text{k}$ 。



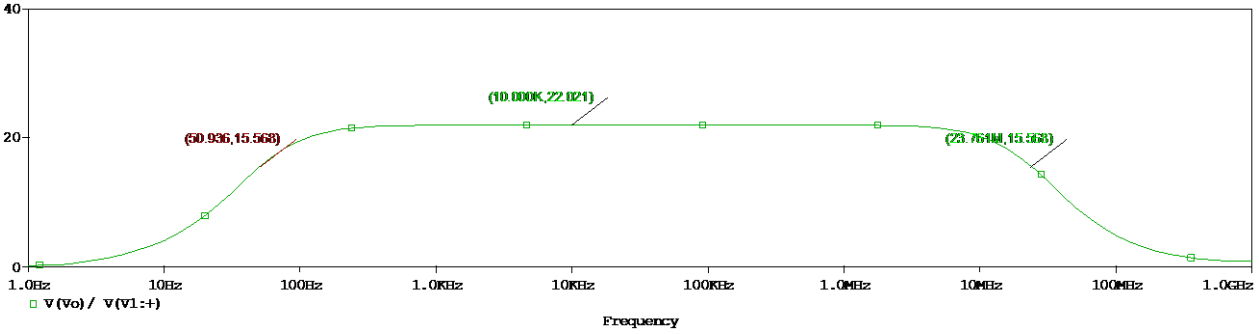
实验名称：晶体管共射放大电路设计、仿真与测试

(2) 将电路的输入端短路，负载开路，在输出端加一信号源 V1。进行交流分析后，在 Probe 窗口中，执行 Trace/Add Trace 命令，选择 V (V1:+) / I (C2) 作输出量，显示出输出电阻的频率特性如图所示。得到  $R_0 \approx 3.2497\text{K}\Omega$ 。



4、 $f_L$  和  $f_H$  计算

中频增益为 22.021，中频增益的 0.707 倍约为 15.568，启动标尺计算，得到  $f_L=50.936\text{Hz}$ ， $f_H=23.761\text{MHz}$ 。



说明：设计时忽视了  $f_L < 50\text{Hz}$  这个条件，导致一项指标不合理，算是一种教训，之后设计时一定根据指标多次调整。

5、验算值与仿真值比较

	$I_C(\text{mA})$	$V_{CE}(\text{V})$	$V_B(\text{V})$	$ A_V $	$R_i(\text{k}\Omega)$	$R_o(\text{k}\Omega)$
验算值	0.9456	5.758	3.8578	22.291	7.2408	3
仿真值	0.9473	5.68	3.837	21.993	6.098	3.2497

分析：除  $R_i$  外，其他值验算与仿真结果接近。后续测试采用仿真数据。



实验名称：晶体管共射放大电路设计、仿真与测试

五、测试（所有理论估算值均采用 OrCAD 仿真结果）

1、静态工作点的调整和测量

- (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  $V_{R_C}$ ）。
- (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	$I_C$	$V_{CE}$	$V_{BE}$	$V_B$
理论估算	945.6	5.68	0.643	3.837
测量	945.5	5.66	0.626	3.77

2、电压增益测量

- (1) 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。
- (2) 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。

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	2.60V	4.24V	43.333	45.816
$R_L = 3k\Omega$	60mV	1.296V	×	21.6	21.993

- (3) 接入负载  $R_L = 3k\Omega$ 。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。

分析：示波器显示输入与输出波形反相，符合共射放大器的特点。增大输入信号幅度，首先出现的是截止失真。接入负载，使得电压增益下降。

3、输入电阻、输出电阻的测量

(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）
6.0980k	6.2k	60.8mV	31.2mV	6.535k

(2) 输出电阻测量

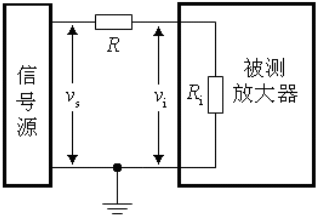
输出波形不失真情况下，分别测出输出端空载时的输出电压  $v_o$ 、和接入负载  $R_L$  后的输出电压  $v_o'$ ，则放大器的输出电阻为

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

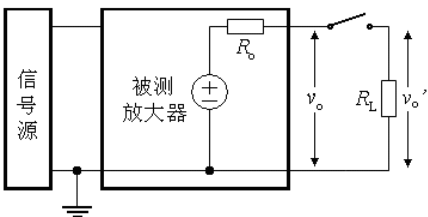
装  
订  
线

实验名称：晶体管共射放大电路设计、仿真与测试

$R_o$ (理)	$R_L$	$v_o$	$v_o'$	$R_o$ (实)
3.2497k	3k	2.76V	1.288V	3.428k



测输入电阻原理

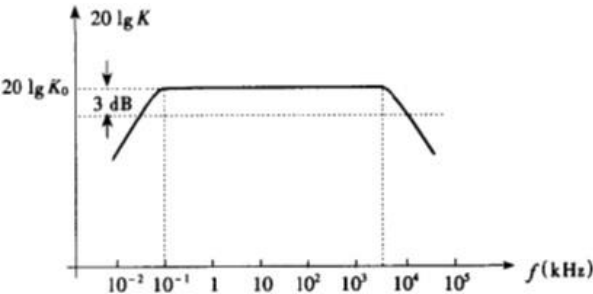


测输出电阻原理

4、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 BW。即  $BW=f_H-f_L$ 。



频率特性曲线图

(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。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  $0.707 V_{OP-P}$  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  $f_L$ 。

$V_{OP-P}$	$f_L$	$f_H$
2.12V	50Hz	300kHz

六、讨论、心得

- 1、实验设计时忽视了  $f_L<50\text{Hz}$ , 这个指标, 导致仿真结果  $f_L=50.936\text{Hz}>50\text{Hz}$ 。直到测试完写实验报告时才发现这个指标被疏忽了, 所以改不了电路了。这周五上了频率响应后才知道  $f_L>50\text{Hz}$  用作音频的放大器后可能使输出信号失真。这次算是教训, 下次实验设计时一定要看清楚指标, 反复调整电路。
- 2、这次我们实验还是做的很慢, 并不是没有好好预习, 而是实验课前我与搭档缺乏沟通, 决定用我的数据做实验也是实验课开始了, 然后因为实验要求的原因, 略微改动了一下电路图, 所以有些仿真就得在课上重做, 最后就做的很慢。
- 3、一点点疑惑, 就是手算的  $R_i$  和仿真以及测试的结果差了 1k 左右, 未能想通。
- 4、这次实验学会了分压式偏置晶体管共射放大器, 也初步学习了电路设计的方法, 虽然实验过程遇到了很多问题, 但在解决问题中我感觉收获还是很大的。