

浙江大学

本科实验报告

课程名称： 电子电路设计实验 I

姓 名： 王英杰

学 院： 信息与工程学院

系：

专 业： 信息工程

学 号： 3190103370

指导教师： 李锡华 叶险峰 施红军

2020 年 12 月 17 日

浙江大学实验报告

专业: 信息工程
姓名: 王英杰
学号: 3190103370
日期: 2020/11/25
地点: 东四-216

课程名称: 电子电路设计实验 I 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: 设计型实验 同组学生姓名: 陈希

一、实验目的

- 1.1、学习晶体管放大电路的设计方法
- 1.2、掌握晶体管放大电路静态工作点的设置、测量与调整方法
- 1.3、了解放大器的非线性失真
- 1.4、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
- 1.5、理解负反馈对放大电路性能的影响。

二、实验任务与要求

2.1、设计一阻容耦合单级放大电路

已知条件: $V_{CC} = +9V$, $R_L = 3.0k\Omega$, $R_S = 600\Omega$

性能指标要求: $f_L < 50Hz$, $|A_V| > 15V/V$, $R_i > 4.0k\Omega$

2.2、设计要求

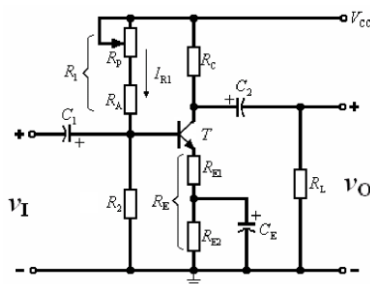
- (1) 写出详细设计过程并进行验算
- (2) 用软件进行仿真, 将仿真结果与理论计算结果进行对比

2.3、电路安装、调整与测量

自己编写调试步骤, 自己设计数据记录表格, 测量 $|A_V|$ 、 R_i 、 f_L 等指标性能

2.4、写出设计性实验报告

三、实验原理



3.1、晶体管共射放大电路分析计算

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

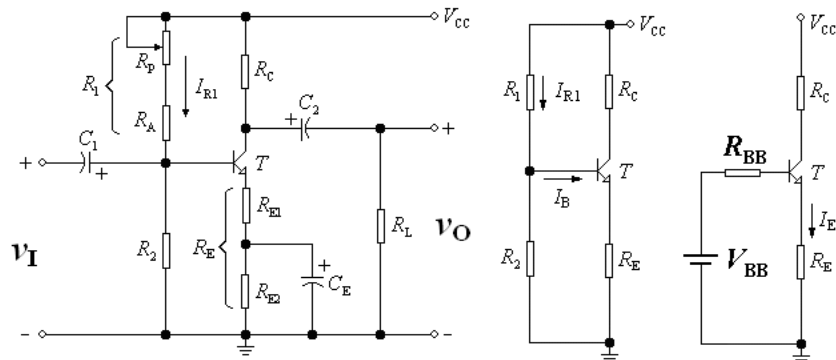
R_L : 交流负载电阻 C_1 、 C_2 : 隔直电容 C_E : 旁路电容

实验名称：晶体管共射放大电路设计、仿真与测试 姓名：王英杰 学号：3190103370

3.2、静态工作点计算（VCE、IC，BJT 工作状态、小信号参数）

静态工作点计算主要是确定晶体管的静态电流 I_C 和集射静态压降 V_{CE} 。

I_C 值可用来计算小信号模型参数，进而计算放大电路的电压增益、输入电阻、输出电阻等主要性能指标， V_{CE} 值用来判断晶体管是否处于放大状态。



戴维宁等效电路中

$$\begin{cases} V_{BB} = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \\ R_{BB} = R_1 \parallel R_2 \end{cases}$$

当晶体管处于放大状态时，可得

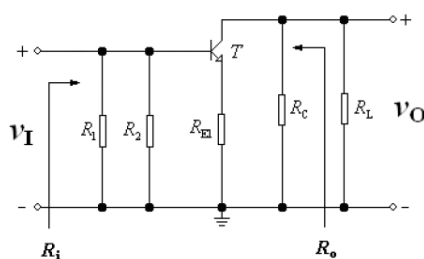
$$\begin{cases} I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_{BB}}{1 + \beta}} \\ I_C = \frac{\beta}{1 + \beta} I_E \approx I_E \\ V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E) I_C \end{cases}$$

3.3、交流性能指标计算

晶体管小信号模型参数

$$\begin{cases} g_m = \frac{I_C}{V_T} \\ r_\pi = \frac{\beta}{g_m} \\ r_e = \frac{\alpha}{g_m} \end{cases}$$

交流分析时，电路转化为



(1) 电压增益 A_v

共射放大电路从基极到集电极的电压增益：值为集电极总电阻与发射极总电阻之比，相位为反相关系。

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} \approx -\frac{\text{集电极总电阻}}{\text{发射极总电阻}} = -\frac{R'_C}{R'_E} = -\frac{R_C \parallel R_L}{r_e + R_{E1}}$$

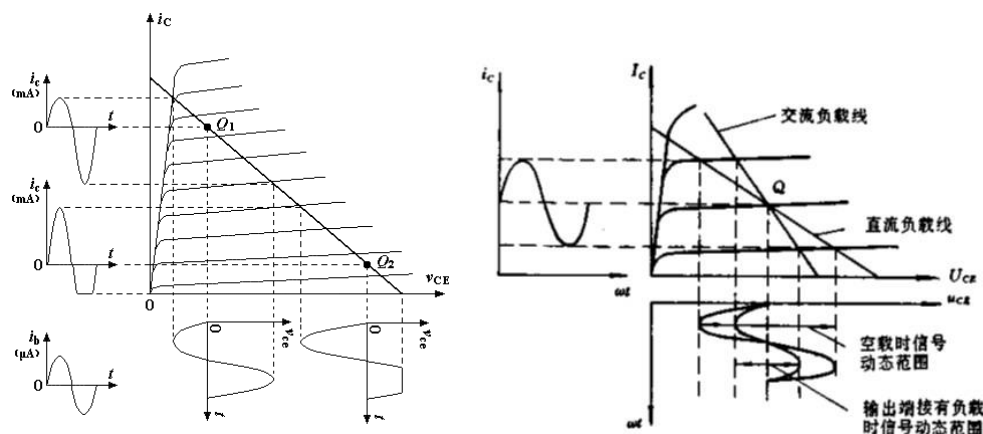
(2) 输入电阻 R_i

放大器的输入电阻是指从信号源位置向放大电路输入端视入的交流电阻。它反映了放大器将从信号源开路电压中获取多少比例的分压。其理论值为

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

3.4、静态工作点与失真

静态工作点选得过高或过低都易产生非线性失真。



过高：如 Q_1 ，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 Q_2 ，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。

输出信号幅度较大时，为了得到最大不失真输出电压幅度，其静态工作点应设在交流负载线的中间位置。小信号放大器输出信号幅度通常较小，失真不是主要问题，此时 Q 点不一定要选在交流负载线中点，而可根据其他要求来选择。例如，希望放大器耗电少、噪声低或输入阻抗高， Q 点可选得低一些；希望放大器增益高、就要求 Q 点适当高一些。

实验名称：晶体管共射放大电路设计、仿真与测试 姓名：王英杰 学号：3190103370

四、实验方案设计与实验参数计算

4.1 实验方案总体设计

已知条件

$$V_{cc} = 9V, R_L = 3k\Omega, V_i = 10mV, R_s = 600\Omega$$

性能指标要求

$$|A_v| > 15V/V, R_i > 4k\Omega, f_L < 50Hz$$

(1) 晶体管选用 Q2N2222, $\beta = 100$

(2) 静态工作点设置：RE、R1、R2

由于被测信号幅度较小，考虑噪声系数、取晶体管静态电流为 $I_C = 1mA$ 。

$$\text{取 } V_B = \frac{1}{3}V_{cc} = 3V, \text{ 得 } R_E \approx \frac{V_B - V_{BE}}{I_C} = 2.3k\Omega$$

$$\text{当 } I_{R1} \gg I_B \text{ 时, } V_{BB} = V_{cc} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \approx V_B = 3V, \text{ 因此 } R_1 : R_2 = 2 : 1$$

(i) 从 R_i 计算式看, $R_i = R_1 \parallel R_2 \parallel [(1 + \beta)(r_e + R_{E1})]$, 一般取 R_2 为 R_i 下限值的3倍即可满足输入电阻要求, 取 $R_2 = 12k\Omega$, 则 $R_1 = 24k\Omega$

$$\text{(ii) 按 } I_{R1} \gg I_B, \text{ 取 } I_{R1} = 10I_B = 0.1mA, \text{ 则 } R_1 = \frac{V_{cc} - V_B}{I_{R1}} = 60k\Omega, R_2 = 30k\Omega$$

综合考虑, 取 $R_1 = 36k\Omega, R_2 = 18k\Omega$

(3) 电压增益有关元件值的确定：RC、RE1

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

$$\text{(i) 从 } R_i \text{ 入手, 取 } R_i = 4k\Omega, \text{ 由 } R_i = R_1 \parallel R_2 \parallel [(1 + \beta)(r_e + R_{E1})],$$

$$\text{得 } R_{E1} = 11.267\Omega, R_{E2} = 2.288\Omega$$

$$\text{(ii) 从输出信号摆幅考虑, 取 } V_c = \frac{2}{3}V_{cc} = 6V, R_c = 3k\Omega, \text{ 得 } R_{E1} = 49\Omega$$

$$\text{综合考虑, 取 } R_c = 3k\Omega, R_{E1} = 47\Omega, R_{E2} = 2.2k\Omega$$

综上所述, 取 $R_1 = 36k\Omega, R_2 = 18k\Omega, R_c = 3k\Omega, R_{E1} = 47\Omega, R_{E2} = 2.2k\Omega$

实验名称：晶体管共射放大电路设计、仿真与测试 姓名：王英杰 学号：3190103370

4.2 各功能电路设计验算

设计参数 $V_{cc} = 9V$, $R_L = 3k\Omega$, $R_1 = 36k\Omega$, $R_2 = 18k\Omega$, $R_c = 3k\Omega$, $R_{E1} = 47\Omega$, $R_{E2} = 2.2k\Omega$

设计要求 $|A_v| > 15V/V$, $R_i > 4k\Omega$, $f_L < 50Hz$

$$V_{BB} = V_B = V_{cc} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 3V, R_{BB} = R_1 \parallel R_2 = 12k\Omega, I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_{BB}}{1 + \beta}} = 0.991mA$$

$$I_c = \frac{\beta}{1 + \beta} I_E = 0.985mA, V_{CE} = V_{cc} - R_c \times I_c - R_E \times I_E = 3.812V, g_m = \frac{I_c}{V_T} = 0.0379A/V$$

$$V_c = V_{cc} - R_c I_c = 6.045V, I_B = \frac{I_c}{\beta} = 0.00616mA$$

$$I_{R2} = \frac{V_B}{R_2} = 0.167mA, I_{R1} = \frac{V_{cc} - V_c}{R_1} = 0.167mA, I_{R1} \gg I_B$$

$$r_e = \frac{V_T}{I_E} = 26.236\Omega, R_i = R_1 \parallel R_2 \parallel [(1 + \beta)(r_e + R_{E1})] = 5.947k\Omega, R_{out} \approx R_c = 3k\Omega$$

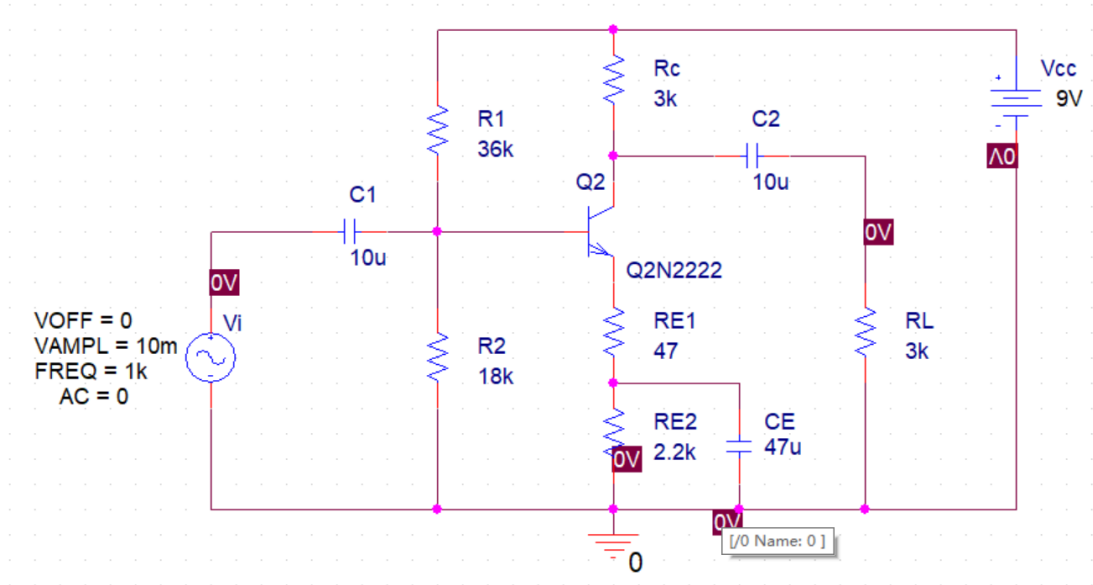
$$V_B = V_{BB} \frac{(1 + \beta)(r_e + R_E)}{(1 + \beta)(r_e + R_E) + R_{BB}} = 2.905V, |A_v| = \frac{R_c \parallel R_L}{r_e + R_{E1}} = 20.482V/V$$

设计时: $I_c = 1mA$, $V_c = 6V$, $I_B = 0.01mA$, $I_{R1} = 0.1mA$, $|A_v| = 20V/V$, $R_i = 4k\Omega$, $V_B = 3V$

验算时: $I_c = 0.985mA$, $V_c = 6.045V$, $I_B = 0.00616mA$, $I_{R1} = 0.167mA$, $|A_v| = 20.482V/V$,

$R_i = 5.947k\Omega$, $V_B = 2.905V$

4.3 完整的实验电路



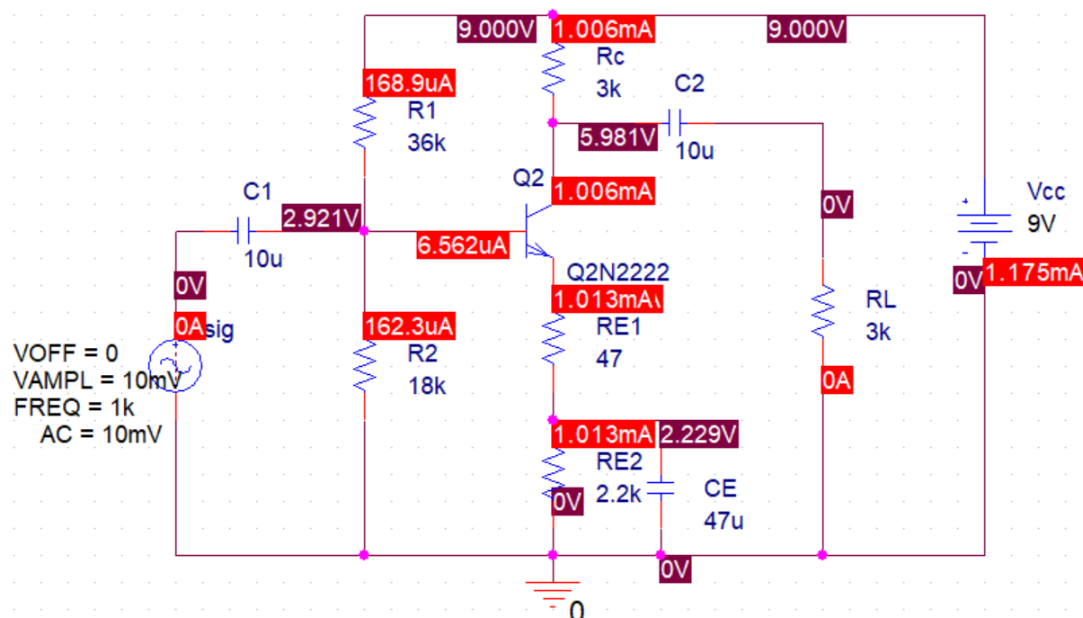
实验名称：晶体管共射放大电路设计、仿真与测试 姓名：王英杰 学号：3190103370

四、主要仪器设备

OrCAD 软件

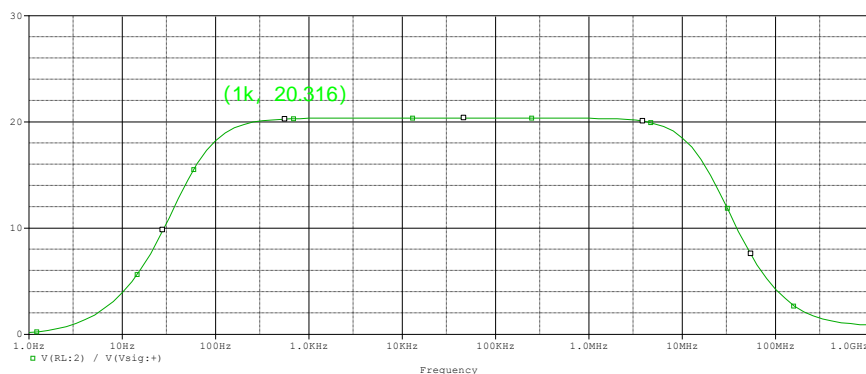
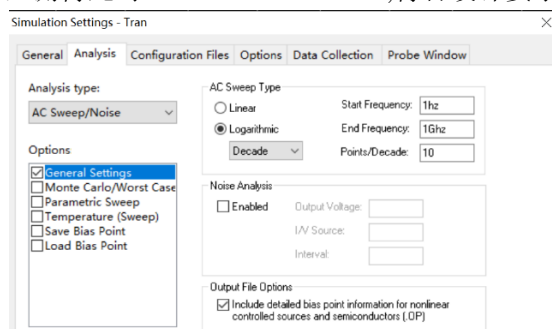
五、仿真

5.1、静态工作点



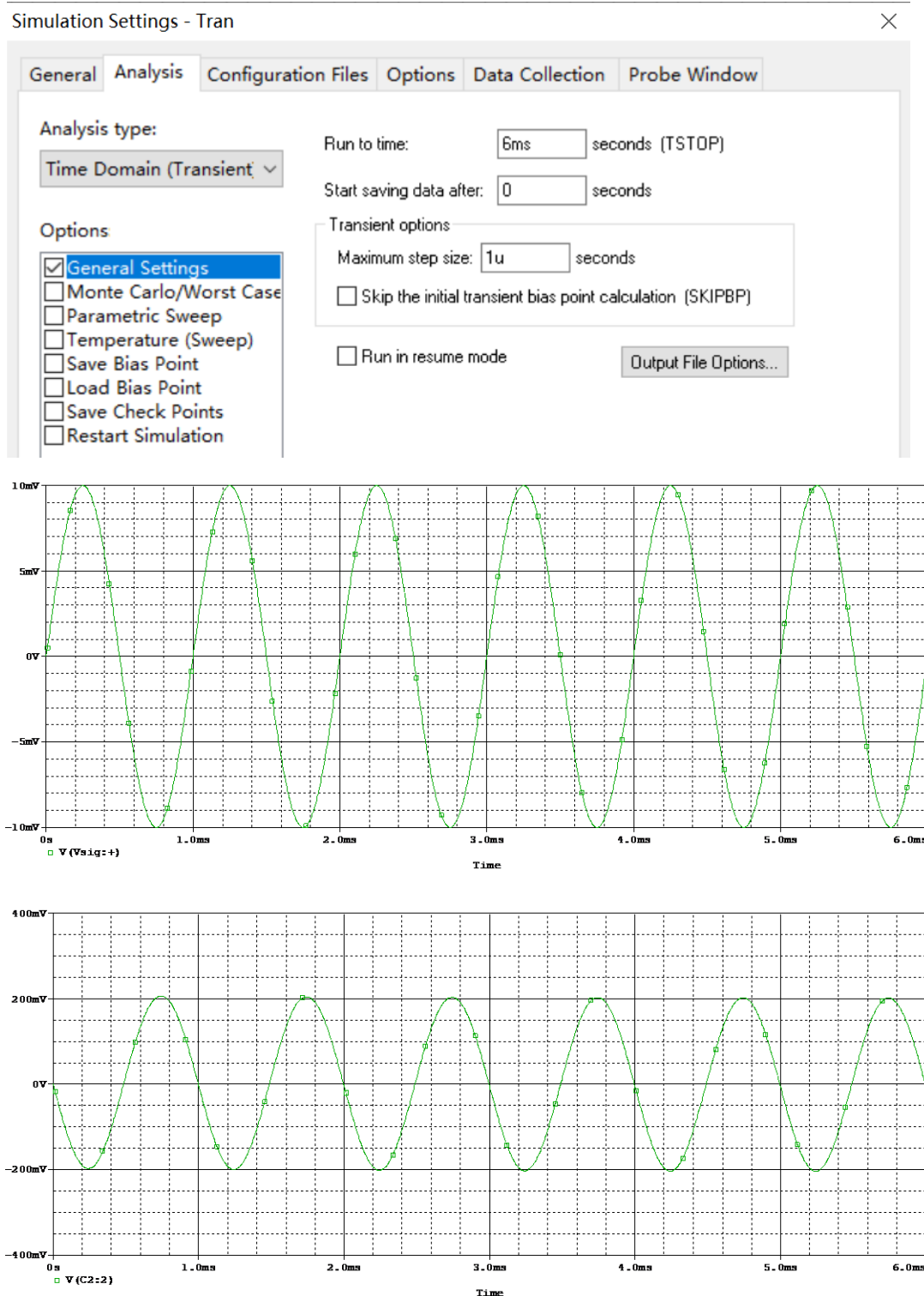
5.2 电压增益及 f_L 计算

(1) 进行交流分析，运行后在 Probe 窗口中，添加 $V(RL: 2) / V(Vsig: +)$ 作输出，显示出频响特性，游标测得当频率为 1kHz 时增益 $|Av| = 20.316$ ，当增益为中频增益 $|Av|$ 的 0.707 倍时，即 $|Av'| = 14.366$ ，测得此时 $f_L = 49.443\text{Hz} < 50\text{Hz}$ ，符合设计要求， $f_H = 21.76\text{MHz}$ 。



实验名称: 晶体管共射放大电路设计、仿真与测试 姓名: 王英杰 学号: 3190103370

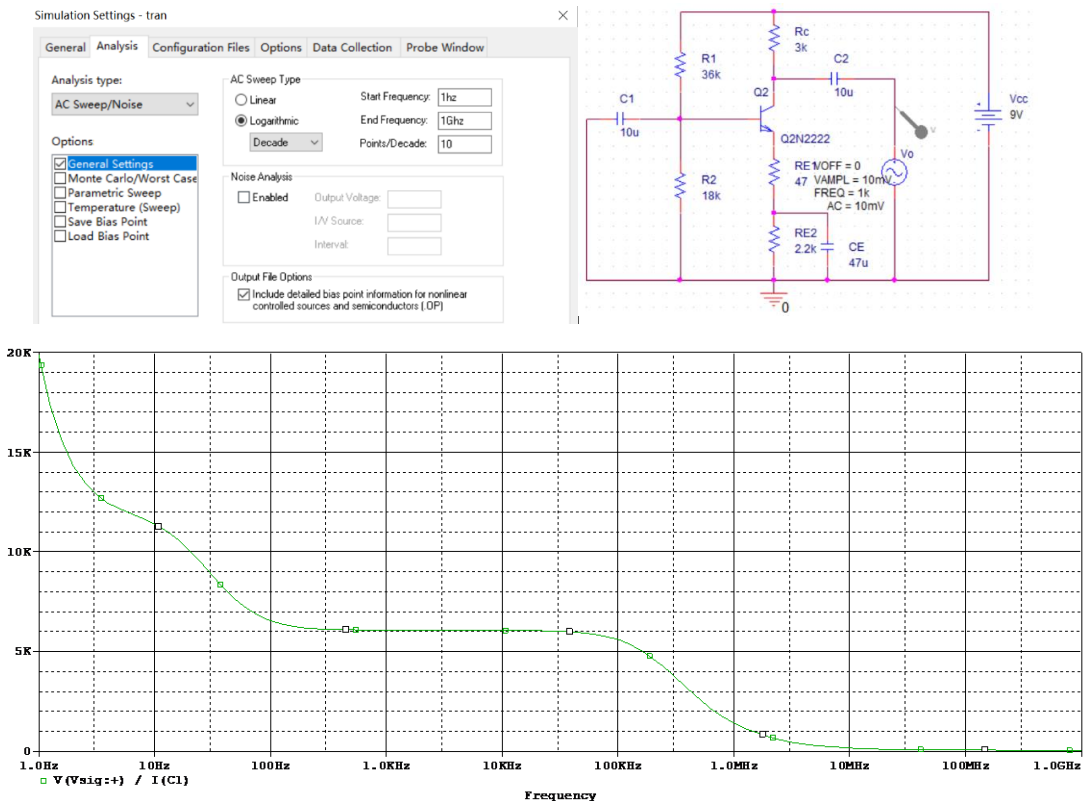
(2) 进行瞬态分析, 得到 $V(\text{Vsig:}+)$ 和 $V(\text{RL:}2)$ 的波形图像, 如下图所示。测量出它们的峰值 $V(\text{Vsig:}+) = 10.000\text{mV}$, $V(\text{RL:}2) = 203.098\text{mV}$, 计算得 $|A_v| = 20.310$



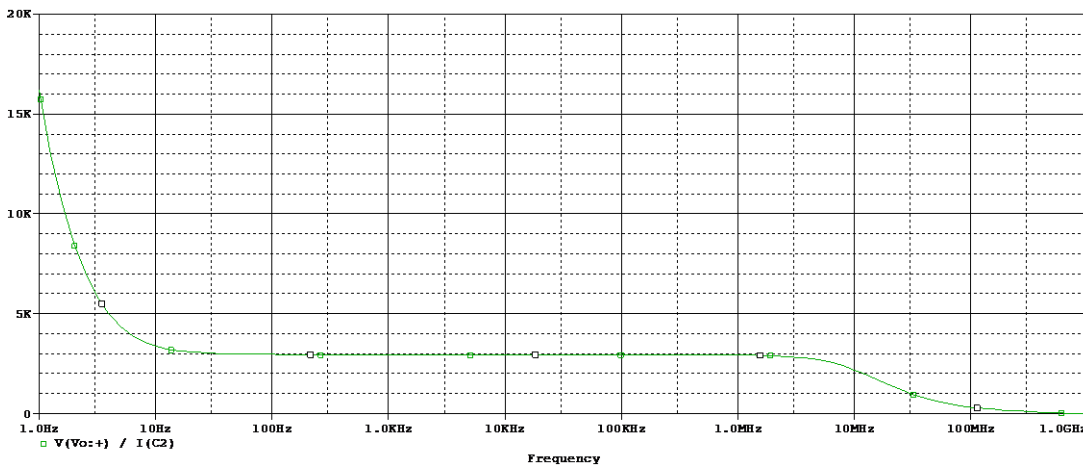
5.3 输入、输出电阻的计算

(1) 输入电阻：进行交流分析后，在 Probe 窗口中，执行 Trace/Add Trace 命令，选择 $V(Vsig:+)/I(C1)$ 作输出量，显示出输入电阻的频率特性如图所示。启动标尺测出在 $f=1\text{kHz}$ 处的输入电阻 $R_i \approx 6.067\text{K}\Omega$ 。

(2) 输出电阻：将电路的输入端短路，负载开路，在输出端加一信号源 V_o 。进行交流分析后，在 Probe 窗口中，执行 Trace/Add Trace 命令，选择 $V(Vo:+)/I(C2)$ 作输出量，显示出输出电阻的频率特性如图所示。启动标尺测出在 $f=1\text{kHz}$ 处的输出电阻 $R_o \approx 2.959\text{K}\Omega$ 。



输入电阻响应曲线



输出电阻响应曲线

实验名称：晶体管共射放大电路设计、仿真与测试 姓名：王英杰 学号：3190103370

5.4 仿真值与验算值对比

	$I_C(\text{mA})$	$I_B(\text{mA})$	$V_B(\text{V})$	$V_{CE}(\text{V})$	$ A_v $	$R_i(\text{k}\Omega)$	$R_o(\text{k}\Omega)$
验算值	0.985	0.00616	2.905	3.81	20.482	5.947	3
仿真值	1.006	0.00656	2.921	3.70	20.316	6.067	2.959

分析：仿真值与验算值接近，且都符合设计要求。

六、测试

6.1 静态工作点的调整与测量

- (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})。
- (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
理论估算值	1.006	3.70	0.644	2.921
测量值	1.007	3.71	0.629	2.89

6.2 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。 答：两者相差 π (反相)

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 (如图所示) 答：首先出现的是饱和失真。

测出最大不失真输出电压峰-峰值，记入下表。

- (3) 接入负载 $R_L = 5.1\text{k}\Omega$ 。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	2.4V	6.2V	40	40.399
$R_L = 3\text{k}\Omega$	60mV	1.2V	×	20	20.316

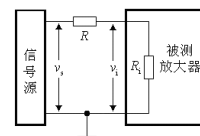
分析：当存在负载时，放大器的电压增益会降低。

6.3 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

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



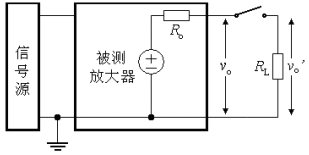
R_i (理)	R	v_s	v_i	R_i (实)
6.067 k Ω	6.16 k Ω	82.4mV	38.6mV	5.625 k Ω

实验名称：晶体管共射放大电路设计、仿真与测试 姓名：王英杰 学号：3190103370

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

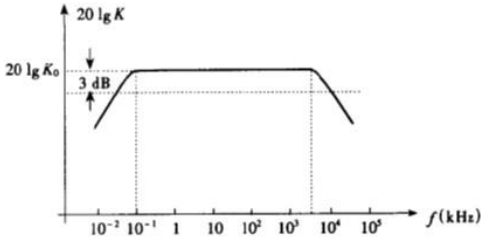
R_o (理)	V_o	V_o'	R_L	R_o (实)
2.959 k Ω	3.240V	1.640V	2.99 k Ω	2.917 k Ω



6.4 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 $BW = f_H - f_L$

	f_L	f_H	BW
理论值	49.443Hz	21.76MHz	21.76MHz
实验值	49.8Hz	390kHz	389.95kHz



七、讨论、心得

通过此次实验，初步了解了电路设计的流程。在仿真模拟的过程中，对仿真软件、电路工作原理等都有了进一步的认识，在不断的试错中收获很大。

实验中的理论值和测试值都较为接近，且符合设计要求，表示此次设计参数取的还是比较成功的。仅有 f_H 的仿真值和测试值相差较大，这是由于三极管型号不同所造成，并不在此次实验考虑范围内。