

浙江大学实验报告

专业：信息工程
姓名：李昕
学号：3230103034
日期：2024 年 12 月 3 日
地点：东 4-216

课程名称：电子电路设计实验 I 指导老师：施红军, 叶险峰, 邓靖靖 成绩：
实验名称：晶体管共射放大电路的设计、仿真与测试 实验类型：设计型实验 同组学生姓名：罗启航

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

- 提出合理指标，用给定电路结构设计电路，并进行仿真
- 对电路进行验算，将验算结果与仿真结果比较
- 进行波形测量，与仿真值进行比较

三、实验原理

1. 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。

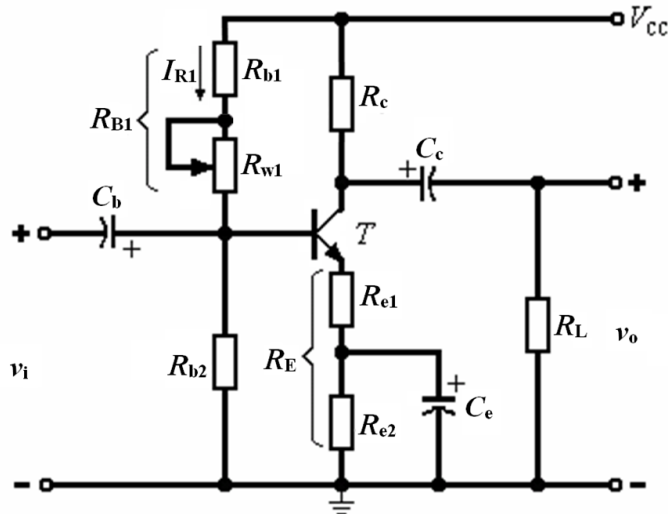


图 1: 共射放大电路

如图为示例共射放大电路。其中 R_{B1} 、 R_{B2} 提供静态工作点所需基极电压； R_{w1} 进行静态工作点的调节； R_{B1} 保护电路，避免 R_{w1} 调至 0 时基极电流过大，损坏 BJT； R_c 为直流负载电阻， R_L 为交流负载电阻， C_b 、 C_c 为耦合电容。其中 R_{e1} 、 R_{e2} 都参与直流电流负反馈，但只有 R_{e1} 参与交流电流负反馈（旁路电容 C_e 交流短路）对共射放大电路进行直流分析，有：

$$\begin{cases} V_{BB} = V_{CC} \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}, \\ R_{BB} = R_{B1} \parallel R_{B2}, \\ I_C = \frac{\beta}{1+\beta} I_B \approx I_E, \\ V_{CE} \approx V_{CC} - (R_c + r_{be}) I_C, \\ I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{r_{be} + \frac{R_{BB}}{1+\beta}} \end{cases}$$

在交流小信号参数计算中，

$$\begin{cases} g_m = \frac{I_C}{V_T} \\ r_\pi = \frac{\beta}{g_m} \\ r_{be} \approx \frac{1}{g_m} \end{cases}$$

对电路进行交流分析，等效电路图如下：

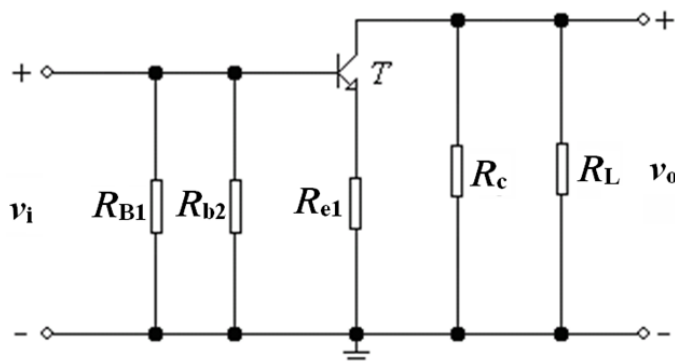


图 2: 共射放大电路交流分析

此时，有：

$$R_i = R_{B1} \parallel R_{B2} \parallel [(1 + \beta)(r_{be} + R_{sl})]$$

$$R_o \approx R_C$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} \approx -\frac{\text{集电极总电阻}}{\text{发射极总电阻}} = -\frac{R_C \parallel R_L}{r_{be} + R_{e1}}$$

2. 静态工作点与失真

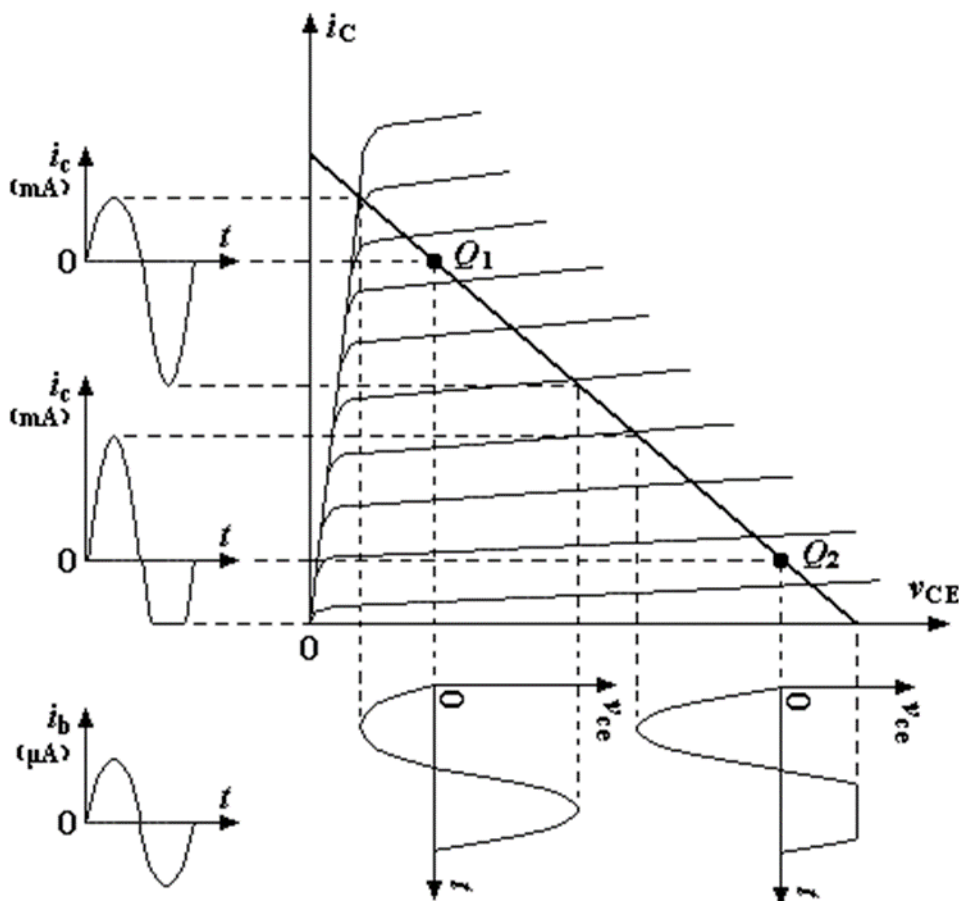


图 3: 波形示意图

静态工作点选得过高或过低都易产生非线性失真。如图，若工作点过高，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，这为**饱和失真**。若选择太低，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 波形将出现底部削平，输出电压 v_{ce} 波形将在顶部削平，这为**截止失真**。

因此，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。

四、 实验方案设计与参数计算

1. 实验电路设计

1.1 提出技术指标

选取 $V_{CC} = +12V$, $R_L = 3k\Omega$, $V_i = 10mV$, $R_S = 600\Omega$, 性能指标要求: $|A_v| > 15V/V$, $R_i > 3k\Omega$, $f_L < 50Hz$.

1.2 确定电路结构, 偏置方案

下图为确定的实验电路结构

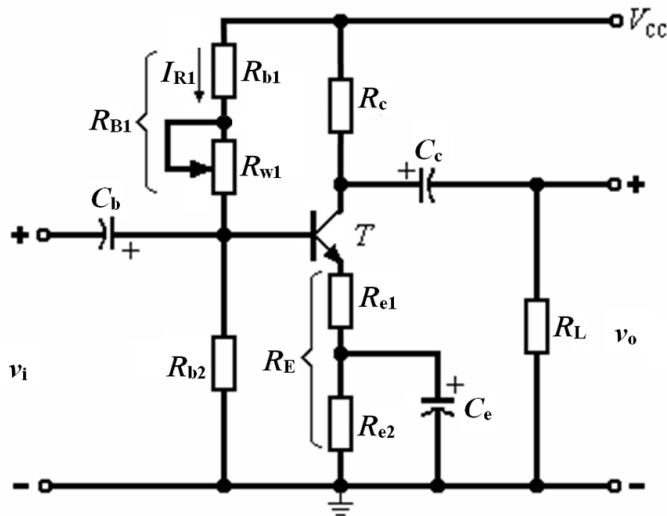


图 4: 实验电路

其中电路结构及晶体管选用 Q2SC1815, β 按 160 计算。

1.3 确定偏置元件值 I_C 、 V_{CE}

- (1) 被测信号幅度较小, 考虑噪声系数, 取 $I_C = 1mA$
- (2) 取 $V_B = 1/4V_{CC} = 3V$, 得 $r_{be} \approx \frac{V_B - V_{BE}}{I_C} = 2.3k\Omega$
- (3) 当 $I_{R1} \gg I_B$ 时, $V_{BB} \approx V_B = 3V$, 即

$$12 \times \frac{R_{b2}}{R_{B1} + R_{b2}} = 3$$

因此, $R_{B1} : R_{b2} = 3 : 1$. R_{B1} 、 R_{b2} 取太大会使 $R_i > 3k\Omega$ 难以满足, 取太大会使工作点稳定要求 ($I_{R1} \gg I_B$) 难以满足。

因此, 有两个思路:

- a. $R_i = R_{B1} \parallel R_{b2} \parallel [(1 + \beta)(r_{be} + R_{e1})]$, 因此, 一般取 R_{b2} 为 R_i 下限值的 3 倍即可满足输入电阻要求, 因此取 $R_{b2} = 15k\Omega$, 则 $R_{B1} = 45k\Omega$ 。

b. 按 $I_{R1} \gg I_B$, 取 $I_{R1} = 10I_B = 0.1 \text{ mA}$, 则 $R_{B1} = \frac{V_{CC}-V_B}{I_{R1}} = 90 \text{ k}\Omega, R_{b2} = 30 \text{ k}\Omega$

(4) 综合考虑, R_{b2} 可取标称值 $20 \text{ k}\Omega$, R_{B1} 可取为 $60 \text{ k}\Omega$

1.4 动态参数有关元件值的确定 (R_C, R_{e1})

- 电压增益 A_v 的计算公式为: $A_v = -\frac{R_C \parallel R_L}{r_{be} + R_{e1}}$
- 输入电阻 R_i 的计算公式为: $R_i = R_{B1} \parallel R_{b2} \parallel [(1 + \beta)(r_{be} + R_{e1})]$

由 $I_C = 1 \text{ mA}$ 得 $r_{be} \approx 26 \Omega$ 。取 $|A_v| = 20 \text{ V/V}$, 有 $\frac{R_C \parallel 3000}{26 + R_{e1}} = 20$
 R_C, R_{e1} 的具体取值有两个思路:

- 从 R_{e1} 入手: 取 $R_i = 5 \text{ k}\Omega$, 可得 $R_{e1} = 48 \Omega$, $R_C = 2.94 \text{ k}\Omega$, $R_{e2} = 2.252 \text{ k}\Omega$
- 从输出摆幅考虑: 取定一使输出摆幅较大的 $V_C = \frac{2}{3}V_{CC} = 8 \text{ V}$, 可获得 4 V 左右的输出信号摆幅。则 $R_C = 4 \text{ k}\Omega$, $R_{e1} = 60 \Omega$, $R_{e2} = 2.24 \text{ k}\Omega$ 。

1.5 电容值确定

取 $C_b = 10 \mu\text{F}, C_c = 10 \mu\text{F}, C_e = 47 \mu\text{F}$

2. 实验电路验算

2.1 静态工作点相关参数

取 $V_{be} = 0.7 \text{ V}$, 则:

$$I_e = \frac{V_A - 0.7 \text{ V}}{r_{be}} = \frac{3.3 \text{ V}}{58.2 \text{ k}\Omega} = 1.020 \text{ mA} \Rightarrow I_c = I_e \cdot \frac{\beta}{1 + \beta} = 1.013 \text{ mA}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C \cdot R_C - V_{EQ} = 12 - 1.013 \times 10^{-3} \times 3.9 \times 10^3 - 2.3 = 5.749 \text{ V}$$

$$V_{BE} = 0.7 \text{ V}, V_{BQ} = 3 \text{ V}$$

2.2 放大倍数

$$A_v = \frac{\beta I_b \cdot R_C \parallel R_L}{I_b r_{be} + (1 + \beta) I_b \cdot R_{e1}} = 30.00$$

2.3 输入电阻

$$R_i = R_{B1} \parallel R_{b2} \parallel (r_{be} + (1 + \beta) R_{e1}) = 1.5 \text{ k}\Omega \parallel (26 + 161 \times 56 \Omega) = 1286.57 \Omega$$

2.4 输出电阻

$$R_O = R_C = 3.9 \text{ k}\Omega$$

五、 实验方案仿真

1. 静态工作点

按照之前的参数设定，绘制电路图，如下图所示。

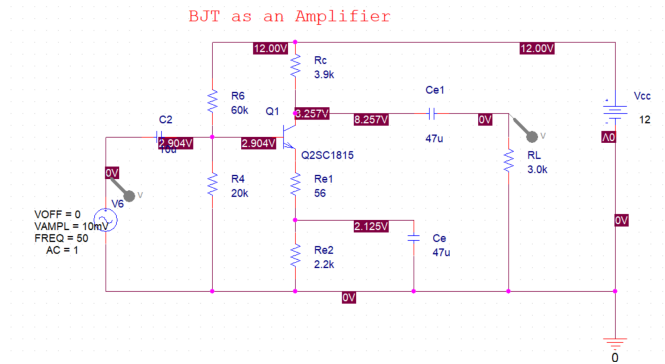


图 5: 仿真电路图

如图所示，有 $I_C = \frac{(12.00 - 6.257)V}{3.9k\Omega} = 0.960mA$, $V_{CE} = 6.031V$, $V_{BE} = 0.725V$, $V_B = 2.910V$

2. $R_L = 3k\Omega$, 测量电压放大倍数

2.1 瞬态分析

测量输入波形，如图所示， V_i 峰值为 $10mV$

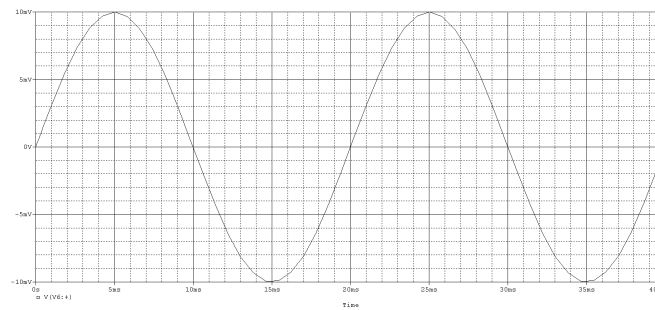


图 6: 输入波形

测量输出波形，如图所示，启动光标，测得的电压峰值为 $154.158mV$

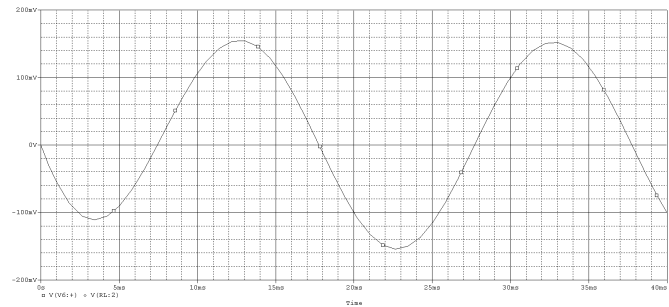


图 7: 输出波形

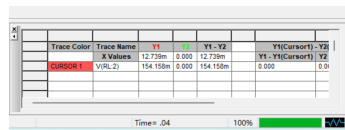


图 8: 光标测量结果

故 $A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{154.158mV}{10mV} 15.41$

2.2 交流分析

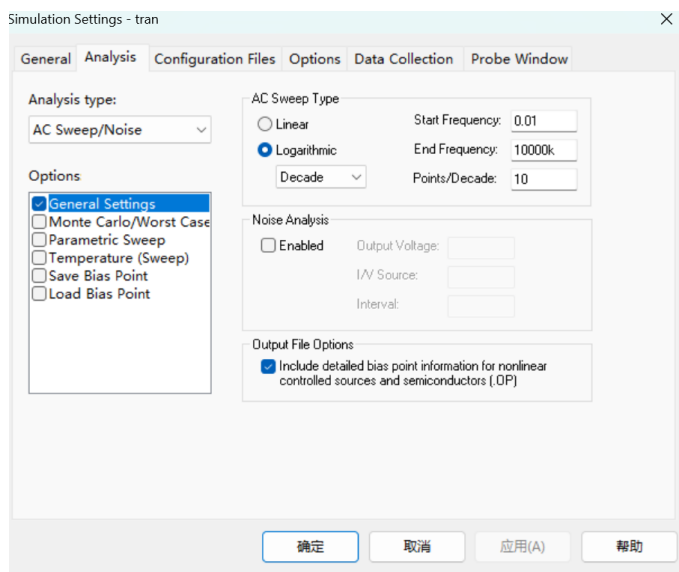


图 9: 交流参数设置

进行交流分析。运行后在 Probe 窗口中，执行 Trace/Add Trace 命令，设置参数如上，显示出幅频特性如下图所示。

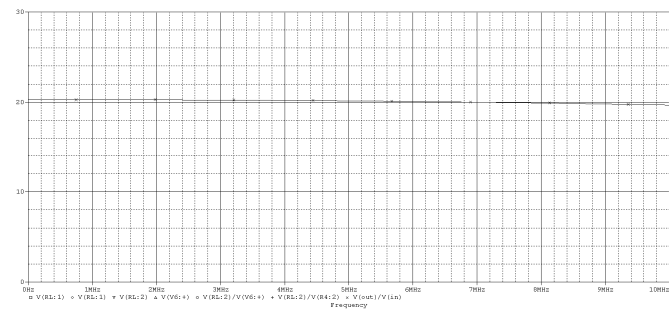


图 10: 交流分析频谱图

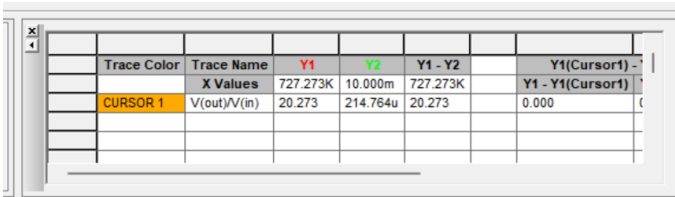


图 11: 交流分析的光标测量结果

由光标测量结果，可知放大倍数 $A_V = 20.273$

3. $R_L = \infty$ ，测量电压放大倍数

如下图，设计仿真电路图测量 $R_L = \infty$ 时的交流放大倍数：

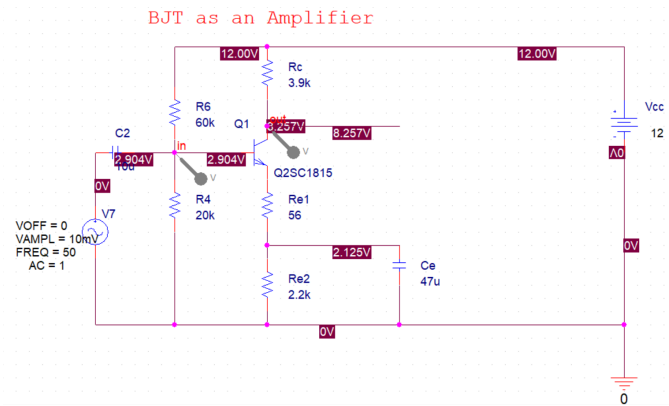


图 12: $R_L = \infty$ 测量电压放大倍数电路

同理，对电路进行交流分析，设置同上，仿真波形如下：

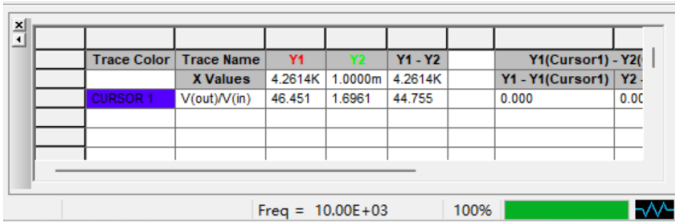


图 14: $R_L = \infty$ 测量电压放大倍数电路光标

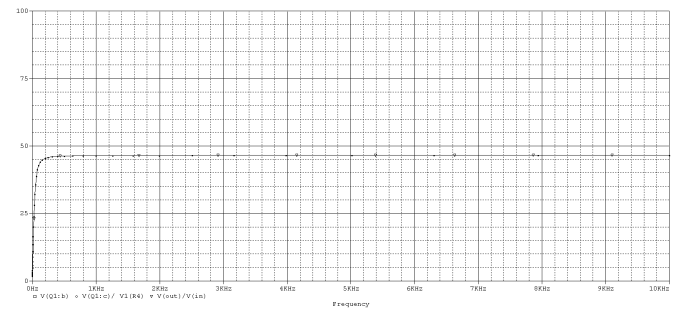


图 13: 交流分析

光标测量结果如下： 放大倍数为 46.451.

4. 测量输入电阻、输出电阻

4.1 输入电阻

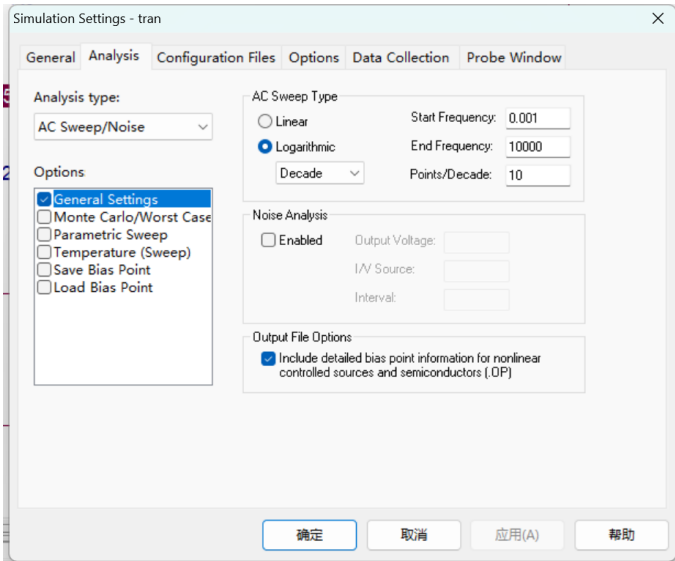


图 15: 交流分析参数

进行交流分析, 按上图设置参数, 测得输入电阻的频率特性图如下：

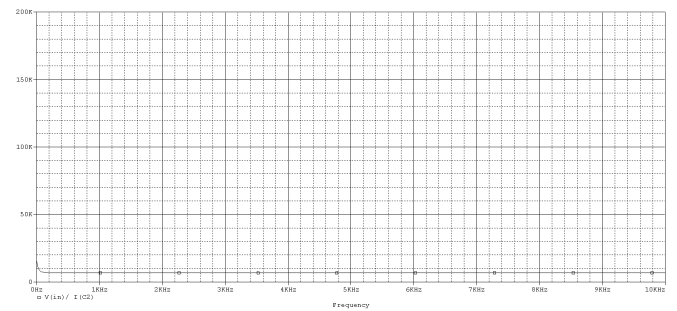


图 16: 输入电阻的频率特性

光标测的结果如下，则 $R_{in} = 6.8126k\Omega$

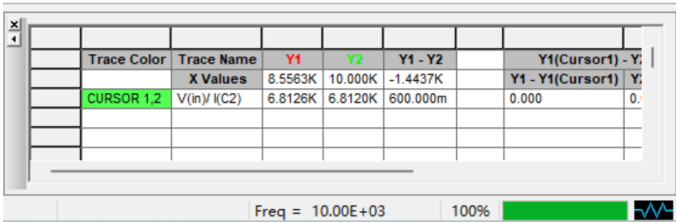


图 17: 光标测量结果

4.2 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，选择 $V(out)/I_{Ce1}$ 作为统计量。电路图如下：

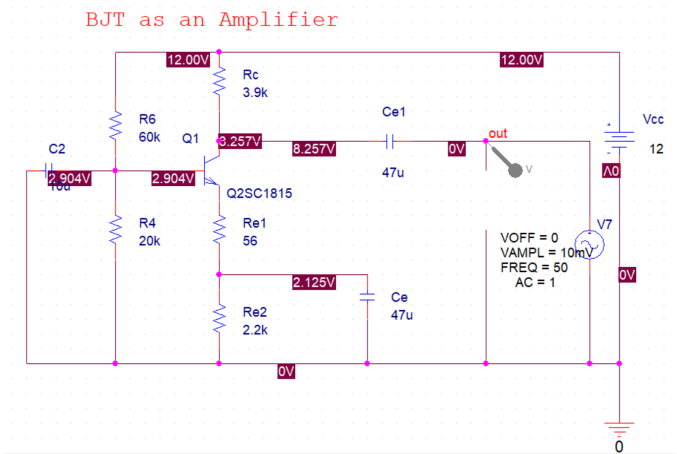


图 18: 输出电阻测量电路

输出波形如下：

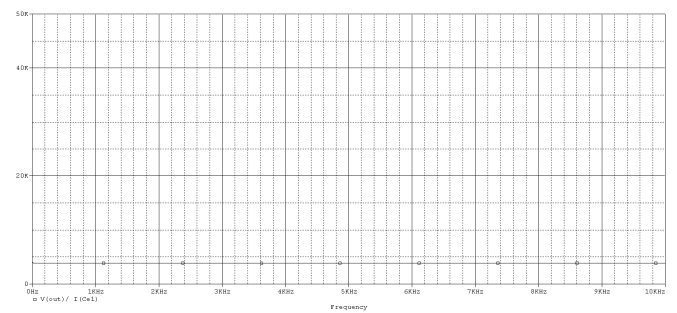


图 19: 输出电阻测量波形

光标测量结果如图：

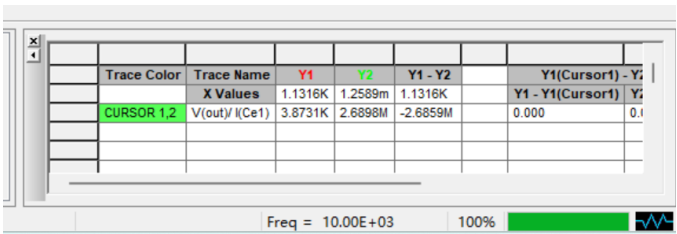


图 20: 输出电阻光标测量结果

输出电阻为 3.8731kΩ

六、 实验仪器设备

- (1) 电路板
- (2) 万用表
- (3) 示波器

七、 晶体管共射放大电路测试步骤、实验数据记录

1. 静态工作点的调整和测量

mA、V	I_c	V_{CE}	V_{BE}	V_B
仿真	0.960mA	6.031V	0.725V	2.910V
测量	1.003mA	5.86V	0.620V	2.90V

表 1: 静态工作点测量

该晶体管处于放大状态

2. 电压增益测量

- (1) 保持 I_C 不变，调节信号源，使输出 2kHz 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）。不接入负载电阻，即 $R_L = \infty$ 。
- (2) 用双踪显示观察输入-输出波形，他们的相位互补，和为 2π （见下失真图像）
- (3) 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。

测试条件	实测值				理论值
	V_{IP-P}	V_{OP-P}	$ V_{OP-P,max} $	A_v	A_v
$R_L = \infty$	57.65mV	2.1976V	6.2073	38.120	46.451
$R_L = 3k\Omega$	57.81mV	1.196V	×	20.688	20.273

- (4) 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，此时输出波形草图如下，C2 的最大值和最小值的绝对值之差超过了 0.3V，出现了饱和失真。此时，测出最大不失真输出电压峰-峰值，记入表中。（见上表）



图 21: 失真波形图

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

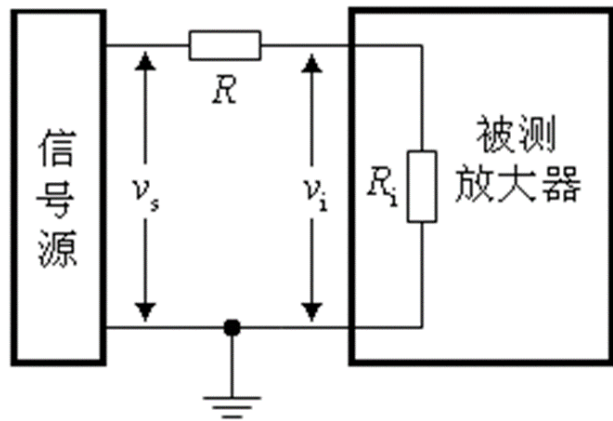


图 22: 输入电阻测量示意图

测得的相关数据如下表。

$R_i(\text{理论})$	R	v_s	v_i	$R_i(\text{实际})$
$6.8216k\Omega$	$10k\Omega$	$57.81mV$	$23.59mV$	$6.894k\Omega$

表 2: 输入电阻测量表

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

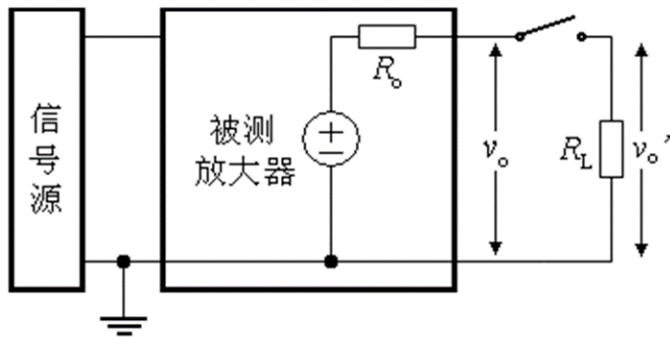


图 23: 输出电阻测量

基于此原理，测得的数据如下：

$R_o(\text{理论})$	R_L	v_o	v'_o	$R_o(\text{实际})$
$3.8731k\Omega$	$3k\Omega$	$1.056V$	$467.1mV$	$3.7823k\Omega$

表 3: 输入电阻测量表

5. 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 (-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 $BW = f_H - f_L$ 。

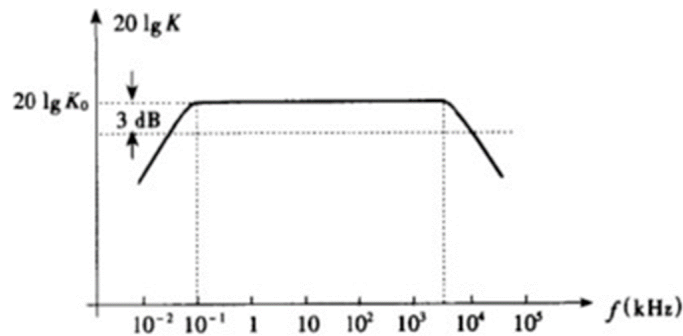


图 24: 频率特性曲线图

- (1) 在 I_C 为设计值、 $R_L = \infty$ 情况下，输入 2kHz 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 $V_{Op-p} = 3.14V$
- (2) 保持输入电压 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。
- (3) 此时，测得 $f_L = 39Hz$, $f_H = 385kHz$

八、心得与体会

本次实验中，我亲自实现了三极管共射放大电路，并进行了从仿真到实体测量的过程，所得到的测量值与仿真结果也较为接近。