

浙江大学实验报告

专业:

姓名:

学号:

日期:

地点:

课程名称: 电路与模拟电子技术实验 指导老师: 张治沁 成绩: _____

实验名称: 晶体管共射放大电路 实验类型: 模拟电子电路实验

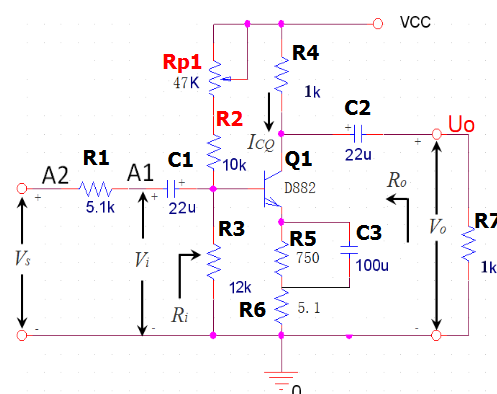
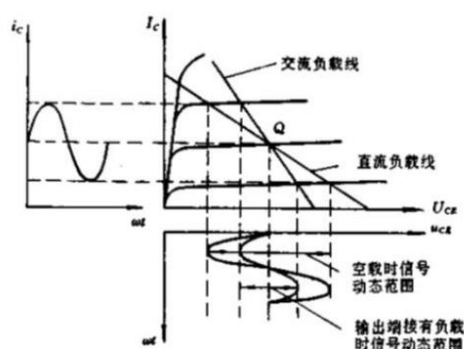
一、实验目的和要求

1. 学习共射放大电路的设计方法与调试技术。
2. 掌握放大器静态工作点的测量与调整方法, 了解在不同偏置条件下静态工作点对放大器性能的影响。
3. 学习放大电路的电压放大倍数、输入电阻、输出电阻及频率特性等性能指标的测试方法。
4. 了解静态工作点与输出波形失真的关系, 掌握最大不失真输出电压的测量方法。
5. 进一步熟悉示波器、函数信号发生器的使用。

二、实验内容和原理

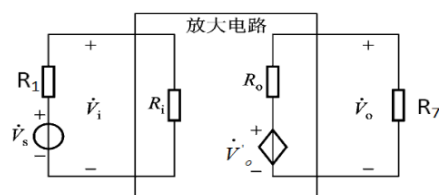
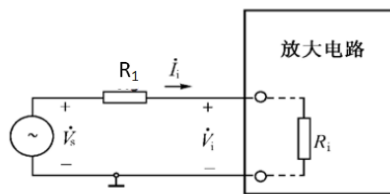
(1) 实验原理:

① 最佳静态工作点:



右图为共射放大电路的实验电路图, 左图为晶体管输出的伏安特性曲线和静态输入的直流负载线。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 $V_{CE} = 1/2 \times V_{CC}$ 或 $I_C = 1/2 \times V_{CC}/R_C$ 。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, 如左图所示。当发射极接有电阻时, 也会使信号动态范围变小。要得到最佳静态工作点, 还要通过调试来确定, 一般用调节偏置电阻 R_P 的方法来调整静态工作点。

- ② 电压放大倍数: 调整好合适的静态工作点使输出电压不失真, 测得输入电压和输出电压的有效值, 则电压放大倍数 $A_v = V_o/V_i$
- ③ 输入电阻 R_i : 输入电阻是指从放大器输入端看进去的交流等效电阻, 其值等于输入端交流信号电压和电流之比。在实验中, 放大电路的输入电阻 R_i 可用电阻分压法来测量, R_1 为已知阻值的外接电阻, 分别测出 V_s 和 V_i (有效值或峰峰值), 则输入电阻 $R_i = V_i/I_i = V_i * R_1 / (V_s - V_i)$ (电路图如左图所示)
- ④ 输出电阻 R_o : 输出电阻是指将输入信号源短路, 从输出端向放大器看过去的交流等效电阻。在实验中, 放大电路的输出电阻可用增益改变法来测量, 分别测出负载开路的输出电压 V_o' 与接入负载 R_7 后的输出电压 V_o , 则输出电阻 $R_o = (V_o'/V_o - 1) R_7$ (电路图如右图所示)



- ⑤ 静态工作点对输出电压波形的影响： I_{CQ} 较大时， V_O 出现饱和失真，形状为“削底”失真； I_{CQ} 较小时， V_O 出现截止失真，形状为“缩顶”失真；当 I_{CQ} 正常，即处于最佳静态工作点附近时，增大输入信号时， V_O 将同时出现饱和失真和截止失真。

(2) 实验内容：

- ① 静态工作点的测量与调整
- ② 测量电压放大倍数
- ③ 测量输入电阻
- ④ 测量输出电阻
- ⑤ 测量上限频率和下限频率
- ⑥ 研究静态工作点对输出波形的影响
- ⑦ 测量最大不失真输出电压

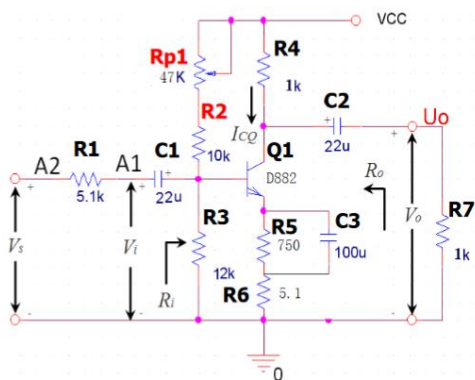
三、实验仪器

Rigol_MSO4054 数字示波器、模电实验箱（D882 型晶体管、 $1K\Omega$ 电阻、电位器）、DG4000 系列信号源、万用表、DP832A 直流电源。

四、操作方法和实验步骤

1. 静态工作点的测量和调试

- (1) 按照右图所示电路图连接电路， V_{CC} 选择 15V 的直流电源输入。
- (2) 静态工作点的 $I_C = 6mA$ ，直接测量电流不太方便，于是调节电阻器的同时应用万用表测量 V_C 的电压，当 V_C 的电压为 9V 时， $I_C = 6mA$ ，同时记录 V_B 和 V_E 。
- (3) 在之后的实验中，若静态工作点为 6mA，则不用调节电位器；若静态工作点改变，则重复步骤二，重新调节静态工作点。



2. 测量电压放大倍数

- (1) 保持 6mA 的静态工作点不变。
- (2) 从 A_2 端输入频率为 1KHz 的正弦波，调节正弦波幅值，使 A_1 端的信号有效值为 10mV，用示波器监测输出的波形，注意保持输出波形不失真，记录此时的 V_S 。
- (3) 分别测量负载开路时的 V_O 和负载为 $1K\Omega$ 时的 V_O' 。
- (4) 求出上述两种情况的电压放大倍数。

3. 测量输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o

- (1) 保持 6mA 的静态工作点不变
- (2) 利用测量电压放大倍数时记录的 V_S 、 V_i 、 V_O 、 V_O' 和实验原理部分输入电阻和输出电阻的表达式即可计算出 R_i 、 R_o 。

4. 测量上限频率和下限频率

- (1) 保持 6mA 的静态工作点不变。
- (2) 负载开路, 从信号发生器输入频率为 1KHz 的正弦波, 调整输出信号幅度, 使输出电压 V_O 等于 1V。
- (3) 保持输入信号幅度不变, 降低输入信号频率, 当输出电压下降到 $0.707V_O$ 时, 得到下限频率 f_L 。
- (4) 保持输入信号幅度不变, 增加输入信号频率, 当输出电压下降到 $0.707V_O$ 时, 得到上限频率 f_H 。
- (5) 换用电阻为 $1K\Omega$ 的负载, 重复步骤 3、4, 测量其对应的上限频率和下限频率。

5. 研究静态工作点对输出波形的影响

- (1) 调节电位器 R_{P1} , 使静态电流 I_{CQ} 增大到 8mA。
- (2) 逐渐增大输入信号, 使输出波形出现明显的失真。记录此时的示波器波形, 测量刚出现失真时的最大不失真输出电压。
- (3) 负载开路, 输入 1kHz、幅度合适的正弦信号, 用示波器监视输出电压。
- (4) 减小输入信号, 使电路回到正常的放大状态 (输出电压无失真)。
- (5) 调节电位器 R_{P1} , 使静态电流 I_{CQ} 下降到 4mA。
- (6) 逐渐增大输入信号, 使输出波形出现明显的失真。记录此时的示波器波形, 测量刚出现失真时的最大不失真输出电压。

6. 测量最大不失真输出电压

- (1) 负载开路, 调节静态工作点使逐渐增大输入信号幅度时, 输出同时出现饱和失真和截止失真。
- (2) 用示波器测出此时的输出电压有效值, 即为最大不失真输出电压 V_{omax} 。
- (3) 负载接上 $1k\Omega$, 再次测 V_{omax} 。

五、实验数据记录与处理、实验结果分析

(本次实验数据的记录和实验结果的分析放在一起进行)

1. 静态工作点的测量和调试

	V_B/V	V_C/V	V_E/V	I_{CQ}/mA
理论值	5.26	9	4.56	6
仿真值	5.295	9.012	4.744	5.988
实测值	5.165	9.006	4.547	5.994

静态工作点理论值

$$I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta} = \frac{6mA}{150} = 40\mu A$$

$$V_{EQ} = (\beta + 1)I_{BQ}(750\Omega + 5.1\Omega) = 4.56V$$

$$V_{BQ} = V_{EQ} + 0.7V = 5.26V$$

$$V_{CQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_C = 9V$$

(因仿真中软件中没有晶体管 D882, 所以选用的晶体管为 D44C2, 从而各项仿真数据与实际值和理论值存在差别)

2. 测量电压放大倍数 A_V

测试条件	V_s (mV)	V_i (mV)	V_o	A_v	理论值	仿真值
开路	33.08	10.01	897.0	89.7	-112.8	124.4
$R_7=1K\Omega$	33.02	10.04	461.4	46.14	-56.4	77.75

对共射放大电路：

$$\begin{aligned}\dot{A}_{v1} &= \frac{-\beta R_c}{(R_{b1} + R_x) // R_{b2} // (r_{be} + (1 + \beta) R_{e2})} \\ &= \frac{-150}{1.33} \\ &= -112.8\end{aligned}$$

负载开路

$$\begin{aligned}\dot{A}_{v2} &= \frac{-\beta R_c}{(R_{b1} + R_x) // R_{b2} // (r_{be} + (1 + \beta) R_{e2})} \\ &= \frac{-150 / \times 0.5}{1.33} \\ &= -56.4\end{aligned}$$

负载 = $R_c = 1k\Omega$

可以看出，电压放大倍数的实测值较理论值来说较小，这说明了实际电路受导线电阻、耦合电容等的影响，电压放大倍数会减小。

3. 测量输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o

测试条件	V_s (mV)	V_i (mV)	R_i/Ω	理论值/ Ω	仿真值/ Ω
开路	33.08	10.01	2.21K	1.33K	1.89K
$R_7=1K\Omega$	33.02	10.04	2.23K	1.33K	1.85K

V_o (mV)	V_o' (mV)	R_o/Ω	理论值/ Ω	仿真值/ Ω
897.0	461.4	944	1K	978

输入电阻理论值

$$R_i = (R_{b1} + R_x) // R_{b2} // (r_{be} + (1 + \beta) R_{e2}) = 1.33k\Omega$$

输出电阻理论值

负载开路时：

$$R_o = R_c = 1k\Omega$$

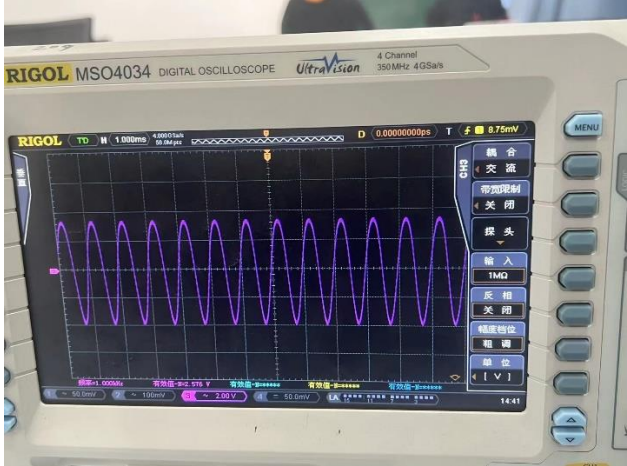
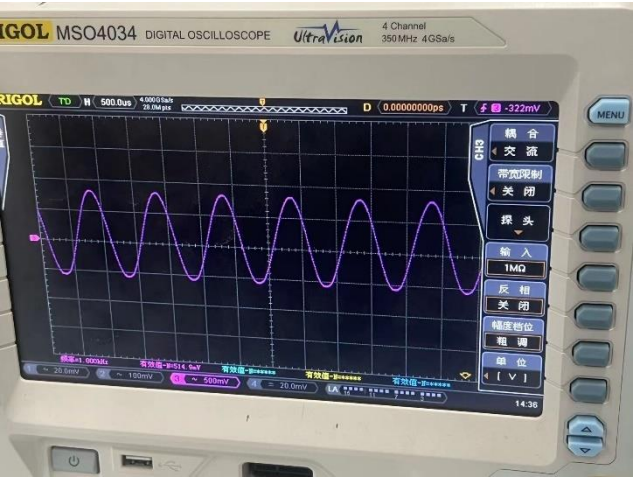
实验中测出的输入电阻与理论值偏差较大，这可能与实际晶体管的电流放大倍数 β 和 $r_{bb'}$ 与参考值偏差较大有关，也可能是因为耦合电容和导线电阻等的微小影响。

4. 测量上限频率和下限频率

测试条件	实测值	实测值	仿真值	仿真值
测试条件	f_L/Hz	f_H/Hz	f_L/Hz	f_H/Hz
开路	80.2	48.6K	19.4	40.6K
$R_7=1\text{K}\Omega$	88.7	81.1K	24.5	59.3K

5. 静态工作点对输出波形的影响

I_{CQ}/mA	先出现	V_{Omax}/V	正/负半周	形状
8	饱和失真	0.728	负半周	削底失真
4	截止失真	3.64	正半周	缩顶失真



左图为 $I_{CQ}=8\text{mA}$ 时的输出波形图，可见输出波形的负半周出现了削底失真，说明晶体管出现了饱和失真；右图为 $I_{CQ}=4\text{mA}$ 时的输出波形图，可见输出波形的正半周出现了缩顶失真，说明晶体管出现了截止失真。这说明了集电极偏置电流 I_{CQ} 越大，放大电路越容易出现饱和失真，集电极偏置电流 I_{CQ} 越小，放大电路越容易出现截止失真，这与晶体管的输出伏安特性相符。

6. 测量最大不失真输出电压

测试条件	实测值	实测值	理论值	仿真值
测试条件	有效值/V	峰值/V	峰值/V	峰值/V
开路	2.577	6.210	6.3	6.56
$R_7=1\text{K}\Omega$	1.384	3.38	3.4	3.61

在实验中由于负载开路时与负载等于 $1\text{K}\Omega$ 时，增大输入电压需要同时出现饱和失真和截止失真，因此在开路时和负载为 $1\text{K}\Omega$ 时我设置的静态工作点并不相同，负载开路时，集电极静态偏置电流 I_{CQ} 为 6.3mA ，因此最大不失真电压理论值为 $I_{CQ}\times R_C=6.3\text{V}$ ，负载等于 $1\text{K}\Omega$ 时，集电极静态偏置电流 I_{CQ} 为 6.8mA ，因此最大不失真电压的理论值为 $I_{CQ}\times (R_C/R_L)=3.4\text{V}$ ，因实验中同时出现饱和失真和截止失真的点较难判断，所以实测的最大不失真输出电压会存在误差。

（仿真中的静态工作点与实验中选取的相同，但由于晶体管的不同，最大不失真电压会存在偏差）

七、讨论、心得

共射放大电路是模拟电子电路中最基础的单管放大电路组态，本次实验完成了对共射放大电路参数的测量，包括静态工作点、动态电阻、输入电阻、输出电阻、电压放大倍数。通过计算理论值并与实际值作对比，深刻理解了共射放大电路的原理，也发现了实际电路与理论存在的差异。

个人感觉此次仿真对实测值和理论值没有太大的参考价值，主要是因为仿真中所用的晶体管与实验中的晶体管型号不同，对应的参数也就有较大差异，不过本次仿真的电路较为复杂，通过不断的测量调试也让我对 Multis 仿真软件的使用更加熟悉。

思考题

1. 当静态工作电流 I_{CQ} 通过测量 V_E 或 V_C 来间接地得到时，分析万用表内阻对测量误差的影响

根据之前仪表内阻的实验，万用表内阻会使电压的实测值小于电压的理论值，从而设置的静态工作电流 I_{CQ} 较大，但查手册可得，万用表 20V 量程下内阻为 $10\text{M}\Omega$ ，根据公式计算可得 $\Delta U = 6 \times 10^{-4}\text{V}$ ，所以几乎没有影响。

2. 各仪器的接地端不再连在一起，示波器上的波形将发生什么变化？

各仪器的接地端未接在一起，会造成示波器各通道的参考零电势点不同，从而波形会出现竖直方向的平移，但各通道波形的形状不会发生变化。

3. 在测试各项参数时，为什么要用示波器监视输出波形不失真？

如果输出波形出现失真，则表明晶体管未工作在放大区，此时测量的各项参数没有实际意义。这种情况是静态工作点设置不合理导致的，因此时刻监测输出波形就能保证测量出的各项参数是在放大区及合适的静态工作点下测得的。

4. 与负载开路相比，接上负载对放大电路的上下限频率有什么影响？在测上限和下限频率时，如何选择输入信号的大小？为什么使输出电压为 1V？

接入负载后，电路的等效负载变小，时间常数变小，而上限截止频率由高频时间常数中最大的一个决定，则上限频率 $f_H = 1/(2\pi R_S C_i)$ 增大，通频带宽也会增大，但下限频率基本不受影响。输入信号在中频（1KHz 左右）确定，使输出电压为 1V 即可，之后无需更改输入电压的大小，只需调整频率。使输出电压为 1V 是因为测上限和下限频率时应保证输出电压为中频输出的 0.707 倍，因此中频输出电压为 1V 时之后的测量易于判断。

5. 用示波器同时观察放大电路输入、输出波形的相位关系时，示波器上有关按钮应置什么位置？

假设用示波器的通道一观测放大电路的输入波形，用示波器的通道二观测放大电路的输出波形，打开示波器上的 measure 按钮，信源先选择通道一，然后将右侧的选择按钮调至水平（表示测量水平扫描的相关量），选择相位即可在示波器上显示输入波形的相位，通道二进行同样的操作，即可显示出输入输出波形的相位关系。

6. 在测量输入电阻时，为什么不能直接测 R_S 两端的压降？

因为 R_S 两端没有公共的接地端，无法用示波器进行测量，若用一端接地的交流电压表进行测量，会干扰输入信号，造成较大的测量误差。

7. 如何判断放大器的截止和饱和失真？当出现这些失真时应如何调整静态工作点？

当放大电路的输出波形的负半周出现削底失真时，表明放大电路出现饱和失真；当放大电路的输出波形的负半周出现缩顶失真时，表明放大电路出现截止失真。当出现饱和失真时，应减小静态偏置电流 I_{CQ} ，当出现截止失真时，应增大静态偏置电流 I_{CQ} 。

8. 在共射放大电路的静态工作点测量时，测得 $V_{CEQ} < 0.5V$ ，说明三极管已处于（饱和）状态；若 $V_{CEQ} \approx +V_{CC}$ （电源电压），则说明三极管已处于（截止）状态；若 $V_{BEQ} > 2V$ ，估计该晶体管已被（击穿）。
9. 共射电路实验中所用的耦合电容是（电解）电容。在共射放大电路实验我们选用的 D882 是 NPN 管对吗？描述怎样从外观判别 e、b、c 三个管脚。

在共射放大电路实验我们选用的 D882 是 NPN 管，在实验中对于标准的晶体管，将字样 D882 对准自己时，从左到右三个脚分别为 e、c、b

仿真：
共射放大电路：

