



实验与创新实践教育中心

# 实验报告

课程名称： 模拟电子技术实验 实验名称： 实验二：单管交流放大电路

专业-班级： 21级自动化6班 学号： 210320621 姓名： 吴俊达

实验日期： 2023年4月14日 评分： \_\_\_\_\_

---

教师评语：

助教签字： \_\_\_\_\_

教师签字： \_\_\_\_\_

日期： \_\_\_\_\_

# 实验预习

## 实验预习和实验过程原始数据记录

预习结果审核：\_\_\_\_\_ 原始数据审核：\_\_\_\_\_

（包括预习时，计算的理论数据）

**注意：所有的波形都必须拍照保存，用于课堂检查和课后分析。**

表 2-2 静态工作点数据

实测数据										根据实测计算的数据		
$U_{BE}/V$	$U_{CE}/V$	$V_B/V$	$V_E/V$	$V_C/V$	$R_e/k\Omega$	$R_c/k\Omega$	$R_p/k\Omega$	$R_{b1}/k\Omega$	$R_{b2}/k\Omega$	$I_B/\mu A$	$I_C/mA$	$\beta$
0.6393	6.147	2.3655	1.7295	7.872	2.3666	2.9876	56.45	19.96	19.950	7.54	1.751	232.2

表 2-3  $C_e$  对放大倍数的影响  $(\frac{V_C - U_{CE}}{R_e} - \frac{V_C - V_C}{R_c})$  2.38 735.7

条件	$U_i(mV)$	$U_o(V)$	$A_u$	$u_i$ 和 $u_o$ 波形
$C_e = 47\mu F$	9.88	1.296V	131.17	见报告五.1 ①
$C_e$ 断开	9.98	23.32mV	2.34	②

表 2-4 测量电压放大倍数

条件	$U_i(mV)$	$U_o(V)$	$A_u$
$R_L = \infty$ ( $R_p$ 不变)	9.84	1.299	132.01
$R_L = 10k\Omega$ ( $R_p$ 不变)	9.84	0.387	39.33
$R_L = 1k\Omega$ ( $R_p$ 不变)	9.86	1.058	107.52

表 2-5 静态工作点对输出电压波形的影响

		$R_p$ 合适 静态工作点合适	$R_p$ 减小 静态工作点接近饱和区	$R_p$ 大 静态工作点接近截止区
Q 点	测量参数/V	$U_{CE} = 6.147 V$	$U_{CE} = 2.7247 V$	$U_{CE} = 9.24 V$
		$U_{BE} = 0.6393 V$	$U_{BE} = 0.6547 V$	$U_{BE} = 0.6212 V$
		$V_B = 2.3655 V$	$V_B = 3.3919 V$	$V_B = 1.4313 V$
		$V_C = 7.872 V$	$V_C = 5.4618 V$	$V_C = 10.057 V$
	计算静态值	$I_B = 2.38 \mu A$	$I_B = 8.77 \mu A$	$I_B = 0.80 \mu A$
		$I_C = 1.751 mA$	$I_C = 2.763 mA$	$I_C = 0.821 mA$
最大不失真输出电压有效值		2.703V	1.652V	0.656V
画输入和输出电压波形		不失真时波形同五.1 同时出现截止与饱和失真时 波形见损③	见报告五.3 ④	见报告五.3 ⑤

## 一、实验目的

1. 掌握单管交流电压放大电路的放大原理，掌握放大电路静态工作点的调试方法。
2. 了解静态工作点的改变对放大电路性能的影响。
3. 观察饱和失真和截止失真对放大电路输出电压波形的影响。
4. 进一步熟悉示波器、低频信号发生器、直流稳压电源及万用表的使用。

## 二、实验设备及元器件

1. 直流稳压电源一台，型号 DP832A
2. 手持万用表一台，型号 Fluke F277C
3. 信号发生器，一台，型号 Tek AFG1062 或 DG4062
4. 电阻若干，阻值分别为  $20k\Omega \times 2$ ,  $1k\Omega \times 2$ ,  $100k\Omega \times 1$ ,  $2.4k\Omega \times 1$ ,  $1M\Omega$ .
5. 电位器 2 只，最大阻值分别为  $100k\Omega$ ,  $220k\Omega$ .
6. 三极管 1 只，型号为 9013.
7. 电容 2 只，容量分别为  $10\mu F$  和  $47\mu F$ .
8. 短接桥和连接导线若干，型号分别为 P8-1 和 50148
9. 实验用九孔方板 1 块，大小为  $300mm \times 298mm$ .
10. 示波器 1 台，型号为 Tek MS02012B.

## 三、实验原理（重点简述实验原理，画出原理图）

单管交流电压放大电路的最典型电路是共发射极分压偏置式交流电压放大电路，电路如下图 1 所示。

在图 1 中，晶体管为非线性元件，要使放大器不产生非线性失真，就必须建立一个合适的静态工作点，使晶体管工作在放大区。若 Q 点过低（ $I_B$  小，则  $I_C$  小， $U_{CE}$  大），晶体管进入截止区，产生截止失真（如图 2b）；Q 点过高（ $I_B$ 、 $I_C$  大， $U_{CE}$  小），晶体管将进入饱和区，产生饱和失真（如图 2a）。调节基极电阻（电位器） $R_P$  即可调整静态工作点。图 1 中的电压放大倍数为

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = -\beta \frac{R'_L}{r_{be}} \quad (R'_L = R_L // R_C)$$

测量电压放大倍数应保证静态工作点在最佳位置，输出电压波形幅度最高且不失真的前提下进行。

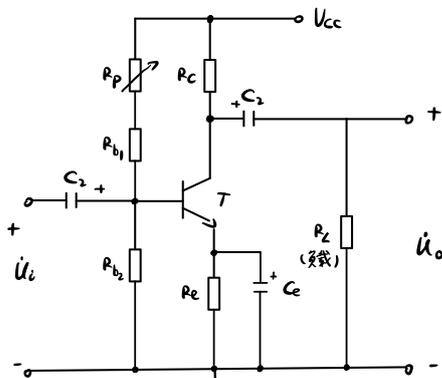


图 1

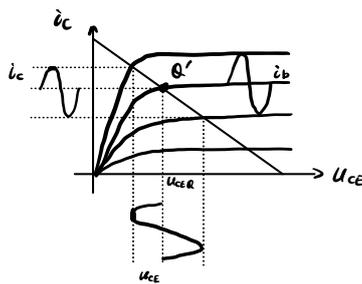


图 2 a  
饱和失真  
(底部失真, NPN)

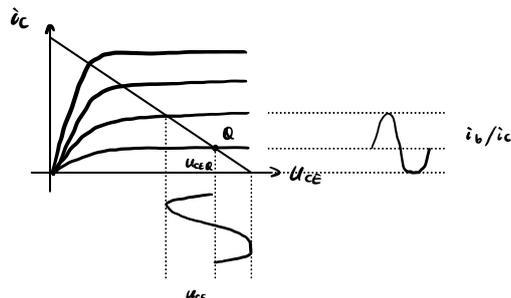


图 2 b  
截止失真  
(顶部失真, NPN)

## 四、实验过程

（叙述具体实验过程的步骤和方法，记录实验数据在原始数据表格，如需要引用原始数据表格，请标注出表头，如“实验数据见表 1-\*”）

### 1. 调整静态工作点

实验电路按图 1 接线， $V_{CC} = 12V$ 。

输入信号  $U_i$  从信号发生器取出，为正弦信号，其有效值  $U_i = 10mV$ ，频率  $f = 1kHz$ ，用交流毫伏表监测；直流电压  $12V$  从直流稳压电源中取出，用万用表的直流电压档监测。

按以下步骤调整静态工作点：

第一步，将输入信号  $U_i = 10mV$  接入电路中，将直流电压  $12V$  接入电路中。检查电路无误后，接通电源。

第二步，按图 1 所示接入示波器，通道 CH1 接放大电路的输入端，通道 CH2 接放大电路的输出端。注意：示波器和直流稳压电源、信号源要共地。用示波器观察放大电路的输出电压波形，等待输出电压稳定以后，采用示波器的 AC 耦合，观察波形是否得到了放大。

第三步，关闭信号源，调节电位器  $R_p$ ，调节静态工作点到理论最佳位置（ $U_{CE} = 6V$  左右）。

第四步，工作点调好之后，用万用表的直流电压挡分别测量  $U_{BE}$ 、 $U_{CE}$ 、 $V_B$ 、 $V_C$ 、 $V_E$ ，用电阻档测试电阻实际值  $R_c$ 、 $R_e$ 、 $R_p$ 、 $R_{b1}$ 、 $R_{b2}$ ，并计算  $I_B$ 、 $I_C$  和  $\beta$  的数值，将相关数据计入表 2-2 中。

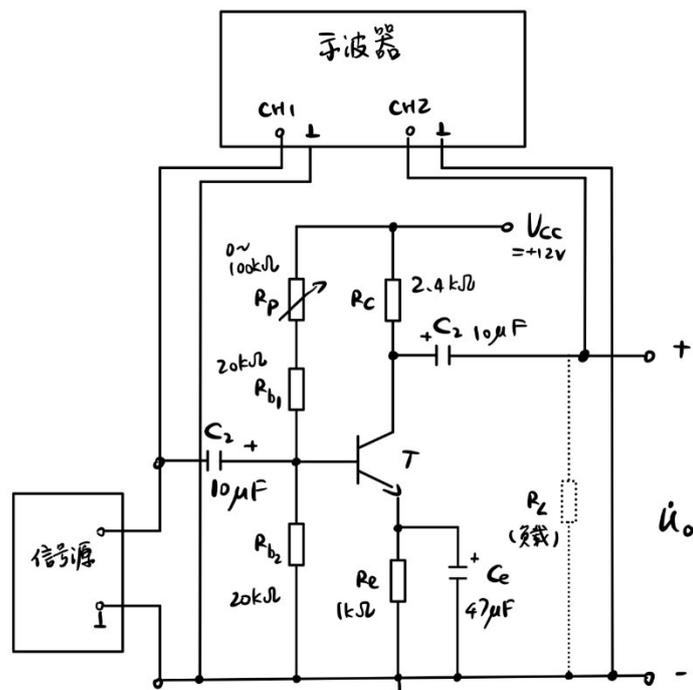


图 1 实验电路接线图

## 2. 观察 $C_e$ 的影响

在图 1 中，当静态工作点测量完毕之后，接入  $1M\Omega$  负载电阻，保持静态工作点不变 ( $R_p$  不变)，接通信号发生器。保持输入正弦信号电压有效值  $U_i = 10mV$ ，频率  $f = 1kHz$  不变（交流毫伏表监测）。用万用表交流  $mV$  档测量输入电压  $U_i$ ，用交流电压档测量  $C_e$  变化（接  $C_e$  和不接  $C_e$ ）时的输出电压  $U_o$ ，计算电压放大倍数填入表 2-3 中。

用示波器的 AC 耦合，观察输入电压和输出电压的波形，在同一时序下记录  $u_i$  和  $u_o$  波形，并思考推导说明  $C_e$  变化对输出波形影响的原因。

## 3. 测量电压放大倍数

在图 1 中，保持静态工作点不变， $C_e = 47\mu F$ ，接通信号发生器。保持输入正弦信号电压有效值  $U_i = 10mV$ ，频率  $f = 1kHz$  不变（交流毫伏表监测）。分别用万用表交流电压档测量负载开路和有载情况下的输出电压有效值  $U_o$ ，计算交流电压放大倍数填入表 2-4 中，并推导分析负载变化对交流电压放大倍数的影响原因。

## 4. 观测静态工作点对输出电压波形的影响

实验电路按图 1 接线，接入  $1M\Omega$  负载电阻。按以下步骤调整静态工作点，测量数据填入表 2-5 中。（注：该实验中，截止失真指的是输出电压波形上部出现明显平坦区域，用示波器 DC 耦合方式观察集电极电位  $V_C$  峰值约为  $11.5V$  左右。饱和失真指的是输出电压波形下部出现明显平坦区域。输出波形会出现不对称现象，是由于晶体管非线性引入的失真，在该实验中忽略。输入输出波形测量均为 AC 耦合。）

### （1）静态工作点合适的情况

按照实验步骤 1，维持静态工作点在最佳位置时，保持输入正弦信号电压有效值  $U_i = 10mV$ ，频率  $f = 1kHz$  不变，观察输出电压波形，波形画在表 2-5 中。然后逐渐增大  $U_i$ ，注意  $U_i < 40mV$ ，记录最大不失真输出电压有效值，进一步增大  $U_i$ ，观察输出电压波形，使输出电压波形同时出现饱和失真与截止失真，波形画在表 2-5 中。

### （2）饱和失真的情况（静态工作点接近饱和区）

将  $R_p$  的阻值逐渐调小，提高静态工作点（典型值：集电极电位  $V_C$  为  $5V$  以内），输入信号保持不变，观察输出电压波形，波形出现饱和失真，在表 2-5 中画出输出电压波形。然后逐渐减小  $U_i$ ，记录最大不失真输出电压有效值。然后关断信号源，用万用表的直流电压挡测量  $U_{BE}$ 、 $U_{CE}$ 、 $V_B$ 、 $V_C$  的电压值，使用实验步骤 1 中测得的  $R_c$ 、 $R_e$  电阻实际值，计算  $I_B$ 、 $I_C$ ，填入表 2-5 中。

### （3）截止失真的情况（静态工作点接近截止区）

首先断开直流电源，更换两个电阻，即  $R_{b1} = 100k\Omega$ ， $R_p$  为最大阻值  $220k\Omega$  的可调电阻。调节  $R_p$ ，将  $R_p$  的阻值逐渐调大，降低静态工作点（典型值：集电极电位  $V_C$  为  $11V$ ），输入信号  $U_i = 20mV$ ，观察输出电压波形，波形出现截止失真，在表 2-5 中画出输出电压波形。然后逐渐减小  $U_i$ ，记录最大不失真输出电压有效值。然后关断信号源，用万用表的直流电压挡测量  $U_{BE}$ 、 $U_{CE}$ 、 $V_B$ 、 $V_C$  的电压值，使用实验步骤 1 中测得的  $R_c$ 、 $R_e$  实际值，计算  $I_B$ 、 $I_C$ ，填入表 2-5 中。

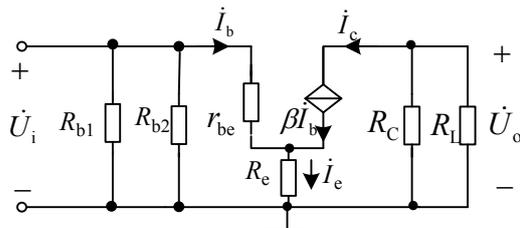
## 五、实验数据分析

（按指导书中实验报告的要求用图表或曲线对实验数据进行分析和处理，并对实验结果做出判断，如需绘制曲线请在坐标纸中进行）

1、在同一时序下，绘制表 2-3 中  $u_i$  和  $u_o$  波形，推导说明  $C_e$  变化对输出波形影响的原因（幅值、相位）。

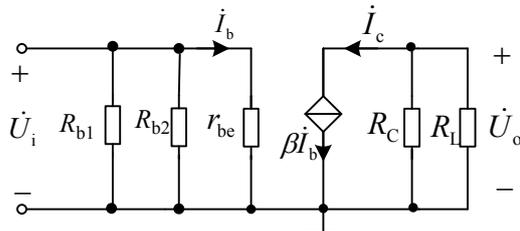
图见报告末页。有  $C_e$  时的图像为①，无  $C_e$  时的图像为②。

推导如下：①在没有旁路电容时，交流等效电路如下图所示，



可推得  $A_u = -\beta \frac{R'_L}{r_{be} + (1+\beta)R_e}$  ( $R'_L = R_L // R_c$ )，输入输出同相位，不过电压放大倍数较小。

②在有旁路电容时，交流等效电路与上图基本相同，只是  $R_e$  要并联上电容。因为旁路电容容量很大，所以对交流信号可视为短路，交流等效电路如下所示。



由此可知电压放大倍数表达式为  $A_u = -\beta \frac{R'_L}{r_{be}} = -\beta \frac{R_L // R_c}{r_{be}}$ 。电压放大倍数较大。

如果考虑了所有电容的影响，定量分析繁杂，采取定性分析：在有旁路电容时，由于旁路电容上电压滞后于电流，所以导致输出电流超前输入电压更多，则输出电压超前输入电压更多，相应地，我们在示波器上也能看到输出电压相对于输入电压有微小的“左移”。

2、根据表 2-4，并推导分析负载变化对交流电压放大倍数的影响原因。

本次实验电路的电压放大倍数表达式为  $A_u = -\beta \frac{R'_L}{r_{be}} = -\beta \frac{R_L // R_c}{r_{be}}$

则负载  $R_L$  越小，电压放大倍数就越小。

3、绘制表 2-5 中的  $u_i$  和  $u_o$  波形，并注明失真判断。

图和失真判断均见报告末页。其中“静态工作点合适”情形的图片与第 1 题有  $C_e$  时的图像相同，就不重复绘制了；同时出现饱和失真和截止失真的波形如图③；出现饱和失真的波形如图④；出现截止失真的波形如图⑤。

## 六、问题思考

（回答指导书中的思考题）

1. 输入信号合适的情况下，晶体管放大电路出现饱和失真或截止失真的原因是什么？在电路中应调整哪个元件才能消除失真？

答：①本实验中的放大电路的输出出现削顶失真时，为**截止失真**。原因是：静态工作点设置太低（静态时基极电流  $I_{BQ}$  和发射结  $U_{BEQ}$  压降太小，导致基极加信号进入负半周时发射结截止，进而输出信号在正半周增长到最大临界  $V_{CC}$  增长不上去了，出现削顶失真）。可以减小  $R_p$ 、 $R_{b1}$  或增大  $R_{b2}$ ，使基极电位升高来消除截止失真。

②本实验中的放大电路的输出出现削底失真时，为**饱和失真**。原因是：静态工作点设置太高（静态时基极电流  $I_{BQ}$  太大，导致  $I_{CQ}$  太大，管压降  $U_{CEQ}$  太小。则基极加信号进入正半周时，发射结压降升高， $i_B$  增大， $i_C$  增大，集电极电阻  $R_c$  上压降增大，管压降  $u_{CE}$  继续减小，直到  $u_{CE} < u_{BE}$ ，晶体管进入饱和区，此时  $u_{BE}$  再增大时， $i_C$  也不会有明显增大，则输出电压的下降也变得不明显，则输出波形底部变平，出现削底失真）。可以减小  $R_{b2}$  或增大  $R_p$ 、 $R_{b1}$ ，使基极电位降低，或增大  $R_e$ ，使静态时基极和集电结电流减小。

2. 在此次使用的放大电路中，如何提高电压放大倍数？

答：电压放大倍数表达式为

$$A_u = -\beta \frac{R'_L}{r_{be}} = -\beta \frac{R'_L}{r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{U_T}{I_{EQ}}} = -\beta \frac{R_c \square R_L}{r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{U_T}{(V_B - 0.7V) / R_e}}$$

因此提高放大倍数可以通过以下方法实现（前提：使用同一只晶体管）：①增大  $R_c$ ；②减小  $R_e$ ；③增大  $V_B$ （通过减小  $R_p$ 、 $R_{b1}$  或增大  $R_{b2}$ ，使基极电位升高）。

3. 总结失真类型的判断方法，说明本实验中的放大电路的输出出现削顶失真时，为截止失真，还是饱和失真？这一结论适用于由 PNP 型管构成的共射级放大电路吗？请说明理由。

答：①失真类型的判断方法：本实验中的放大电路的输出出现削顶失真时，为**截止失真**；本实验中的放大电路的输出出现削底失真时，为**饱和失真**。

②本实验中的放大电路的输出出现削顶失真时，为**截止失真**。

③这一结论不适用于由 PNP 型管构成的共射放大电路。对于 PNP 型管构成的共射放大电路，结论是相反的：输出出现削底失真时，为**截止失真**；出现削顶失真时，为**饱和失真**。

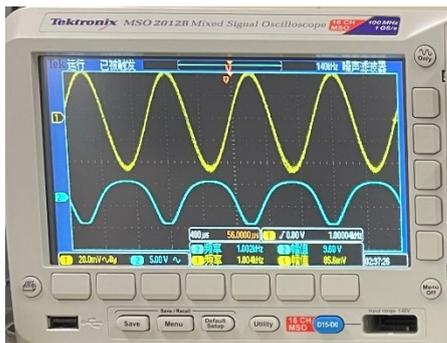
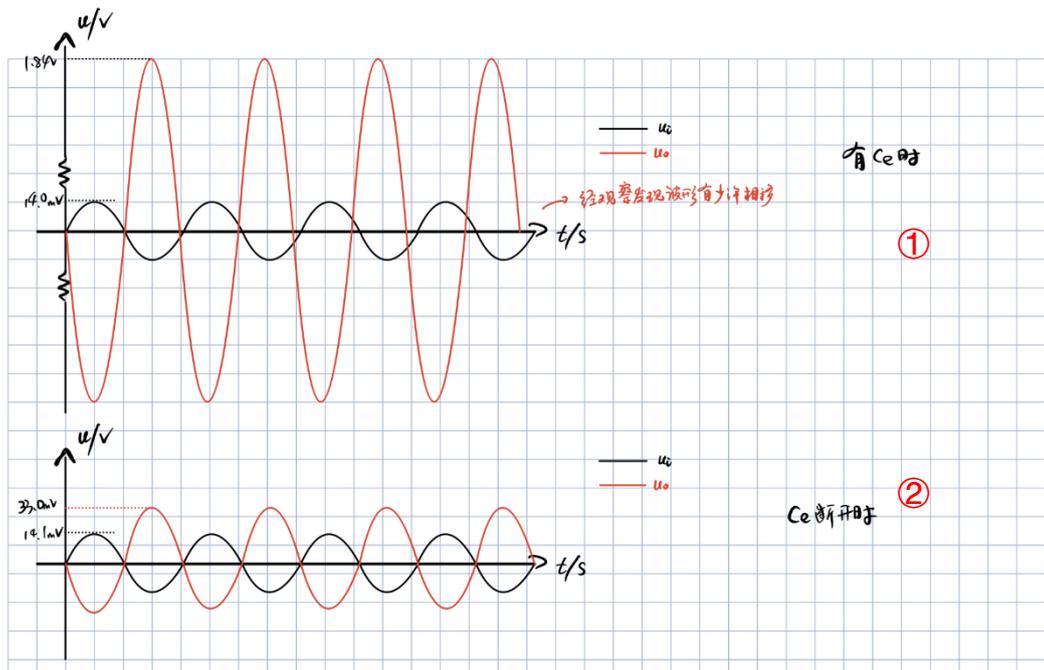
## 七、实验体会与建议

体会 1. 一定要细致耐心。确保接线无误后再上电。

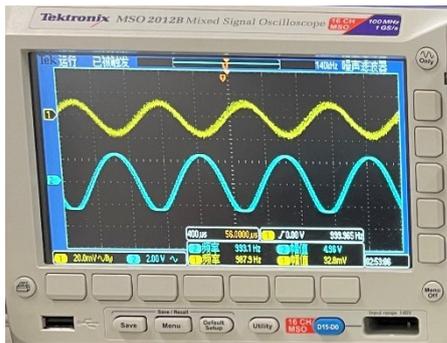
体会 2. 实验前要做好预习，用好视频资源。

建议 1. 都已经能使用示波器了，为什么还要求手绘波形？示波器能显示，拍照也能留存，再加个手绘环节有什么意义？难道抄绘一遍能让学生更加理解晶体管的特性？或是防止抄袭？我认为老师应该给个明确的说法。总之，我以为，此种重复劳动根本是浪费学生宝贵的时间，只要将波形图片附在实验报告中即可，无需手绘。

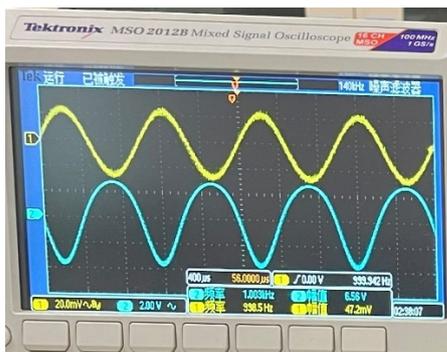
附录 波形图



③（同时出现截止失真与饱和失真）  
（手绘尝试了好多次，削平的波形真的画不好，所以附上了原始图片）



④（饱和失真）



⑤（截止失真）