

晶体管共射极单管放大器

微电子学院

2022.11.28

17号台

PB21061324 徐铭鸽

PB21081565 王蕴璇

一、实验题目

· 晶体管共射极单管放大器

二、实验目的

1. 掌握放大器静态工作点的调试方法，学会分析静态工作点对放大器性能的影响；
2. 掌握放大器电压放大倍数、输入电阻、输出电阻及最大不失真输出电压的测试方法；
3. 熟悉常用电子仪器及模拟电路实验设备的使用。

三、实验原理

实验原理电路如图1所示

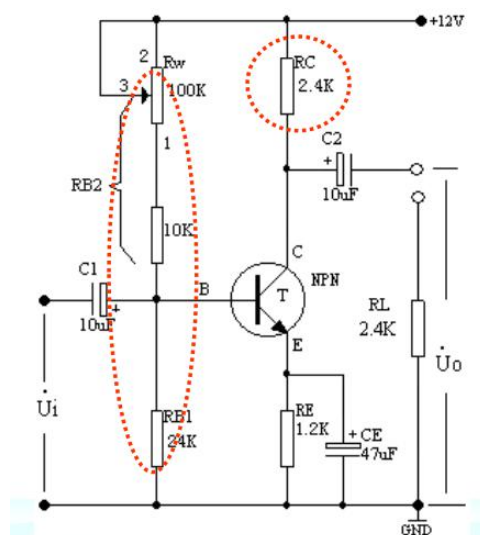


图1 共射极单管放大电路

图1为电阻分压式工作点稳定单管放大器实验电路图。它的偏置电路采用 R_{B2} 和 R_{B1} 组成的分压电路，并在发射极中接有电阻 R_E ，以稳定放大器的静态工作点。当在放大器的输入端加入输入信号 U_i 后，在放大器的输出端便可得到一个与 U_i 相位相反，幅值被放大的输出信号 U_o ，从而实现了电压放大。

在图1电路中，当流过偏置电阻 R_{B1} 和 R_{B2} 的电流远大于晶体管T的基极电流 I_B 时(一般5~10倍)，则它的静态工作点可用下式估算， U_{CC} 为供电电源，此为+12V。

$$U_B \approx \frac{R_{B1}}{R_{B1} + R_{B2}} U_{CC}$$

$$I_E = \frac{U_B - U_{BE}}{R_E} \approx I_C$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C (R_C + R_E)$$

$$\text{电压放大倍数 } A_u = -\beta \frac{R_C \parallel R_L}{r_{be}}$$

$$\text{输入电阻 } R_i = R_{B1} \parallel R_{B2} \parallel r_{be}$$

$$\text{输出电阻 } R_o \approx R_C$$

晶体管共射极单管放大器

微电子学院

2022.11.28

17号台

PB21061324 徐铭鸽

PB21081565 王蕴璇

晶体管输入电阻 $r_{be} = 300\Omega + (1 + \beta) \frac{26\text{mV}}{I_E(\text{mA})}$

1. 静态工作点的调试：

放大器静态工作点的调试是指对三极管集电极电流 I_C (或 U_{CE}) 调整与测试。改变电路参数 V_{CC} , R_C , R_B (R_{B1} , R_{B2}) 都会引静态工作点的变化。

一般所说的工作点“偏高”或“偏低”不是绝对的，应该是相对信号的幅度而言，如信号幅度很小，即使工作点较高或较低也不一定会出现失真。所以确切的说，产生波形失真是信号幅度与静态工作点设置配合不当所致。如须满足较大信号的要求，静态工作点最好尽量靠近交流负载线的中点。

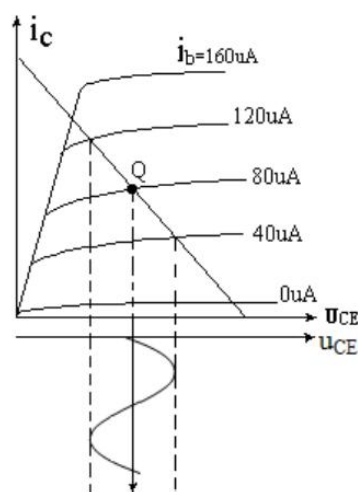


图2 电路参数对静态工作点的影响

2. 放大器动态指标测试：

- 1) 电压放大倍数 A_U 的测量
- 2) 输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 的测量
- 3) 最大不失真输出电压 U_{OP-P} 的测量
- 4) 放大器频率特性的测量

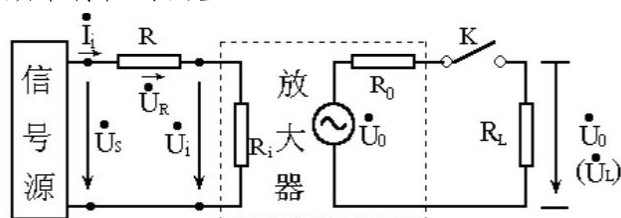


图3 输入和输出电阻测量电路

放大器的幅频特性就是测量不同频率信号时的电压放大倍数 A_U , A_{um} 为中频电压放大倍数，通常规定电压放大倍数随频率变化下降到中频放大倍数 $0.707A_{um}$ 所对应的频率分别称为下限频率 f_L 和上限频率 f_H , 则通频带 $f_{BW} = f_H - f_L$

晶体管共射极单管放大器

微电子学院

2022.11.28

17号台

PB21061324 徐铭鸽

PB21081565 王蕴璇

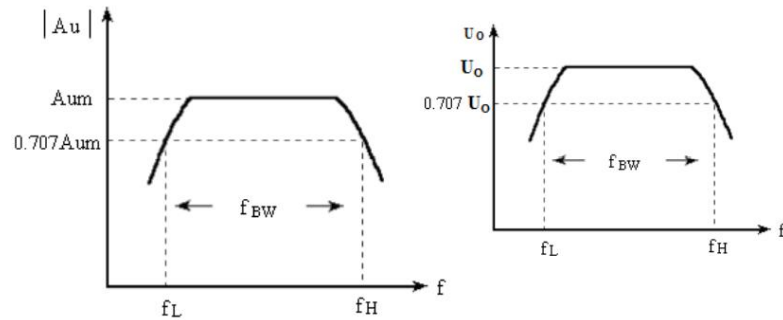


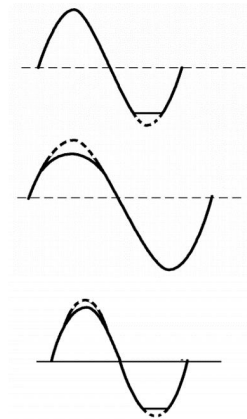
图4 幅频特性曲线

3. 观察静态工作点对输出波形的影响

$I_{CQ} \uparrow$, 三极管进入饱和区而引起的失真, u_o 出现饱和失真, 形状为“削顶”失真。

$I_{CQ} \downarrow$, 三极管进入截止区而引起的失真, u_o 出现截止失真, 形状为“缩顶”失真。

I_{CQ} 正常, 即工作点选在交流负载线的重心, 当加大输入信号时, u_o 同时出现饱和失真与截止失真。



四、实验内容

1. 静态工作点的测量与调整

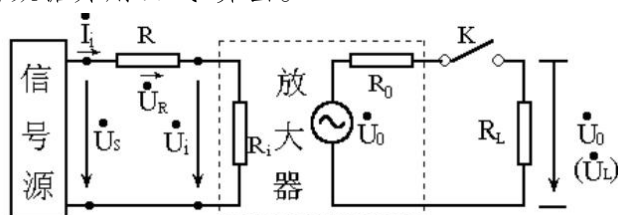
- 1) 输入端短接, 调节 R_W , 使得 $I_C = 2.0\text{mA}$, 即 $U_E = 2.4\text{V}$;
- 2) 测量差模放大倍数 A_{ud} 用万用表DCV档测量 U_B , U_C 和 U_E ;
- 3) 用万用表欧姆档测出电阻 R_{B2} ;
- 4) 静态工作点测量条件—输入接地。

2. 电压放大倍数的测量

调节频率为1KHz的正弦波作为输入信号 U_i 。同时用双踪示波器观察放大器输入电压 U_i 和输出电压 U_o 的波形, 在 U_o 波形不失真的条件下, 用毫伏表或者示波器测量开路和带载两种情况下 U_o 的有效值, 并用双踪示波器观察 U_o 和 U_i 的相位关系, 观察并记录一组 U_o 和 U_i 的波形。

3. 输入电阻和输出电阻的测量

按图5所示, 取 $R = 2\text{k}\Omega$, 置 $R_C = 2.4\text{k}\Omega$, $R_L = 2.4\text{k}\Omega$, $I_C = 2.0\text{mA}$ 。输入 $f = 1\text{KHz}$ 的正弦信号 U_S , 在输出电压 U_o 为不失真的情况下, 用毫伏表或者示波器测出 U_S , U_i , 用公式算出 R_i 。输出电阻 R_o 可根据所测的数据并用公式算出。



晶体管共射极单管放大器

微电子学院

2022.11.28

17号台

PB21061324 徐铭鸽

PB21081565 王蕴璇

图5 输入输出电阻测量电路

4.幅频特性曲线的测量

取 $I_C=2.0\text{mA}$, $R_C=2.4\text{k}\Omega$, $R_L=2.4\text{k}\Omega$ (此时原先测输入阻抗接入的 R_1 去掉)。保持 $U_i=10\text{ mVrms}$ 不变, 先找出中频电压放大倍数时的 U_0 , 然后改变信号源频率 f , 用示波器测量找出 $0.707U_0$ 对应的 f_L 和 f_H 记录 f_L 和 f_H 以及对应的输出电压 U_0 (因 f 变化的同时, U_i 会有所变化, 所以, 实验过程中要求反复调节信号源的幅度, 使 $U_i=10\text{ mVrms}$ 保持不变。)

5.测量静态工作点对波形失真的影响

- 1) 按电路图接线, 输入端短接, 调节 R_W , 使 $I_C = 2.0\text{mA}$, 即 $U_E = 2.4\text{V}$;
- 2) 用万用表DCV档分别测量T管对地点位 U_B 、 U_E 、 U_C 和电阻 R_{B2} 的值;
- 3) 加入测试信号, 即频率 1kHz 的正弦波信号 u_i , 有效值 12mV 左右, 使输出电压 u_o 足够大但不失真, 示波器监视输出;
- 4) 保持输入信号不变, 分别增大和减小电位器 R_W , 使波形出现失真, 绘出 u_o 的波形, 并测出这两种失真情况下的电压 U_B 、 U_E 、 U_C 和电阻 R_{B2} 的值。

五、原始数据

1. 静态工作点的测量与调整

测量值如下表1

$U_B(\text{V})$	$U_E(\text{V})$	$U_C(\text{V})$	$R_{B2}/\text{k}\Omega$
3.0084	2.3996	6.9746	62.865

表1 静态工作点的调整和测量实验的测量结果

2. 放大器动态指标测试

测量值如下表2 $I_C = 2.0\text{mA}$

$U_i = 10\text{mVrms}$ (参考值) $U_i = 10.03\text{mVrms}$ (测量值)

$R_L/\text{k}\Omega$	U_0	A_u
2.4	0.766V	150.9
趋于无穷	1.514V	76.4

表2 电压放大倍数测量输出阻抗测量实验的测量结果

R_0 (测量值) = $2.28\text{k}\Omega$, R_0 (计算理论值) = $2.34\text{k}\Omega$

波形图见数据记录纸。

3. 测量输入电阻

测量值如下表3

晶体管共射极单管放大器

微电子学院

2022.11.28

17号台

PB21061324 徐铭鸽

PB21081565 王蕴璇

U_s	U_i	R
10.22mV	6.10mV	1.9993k Ω

表3 测量输入电阻实验的测量结果

4. 幅频特性曲线的测量

测量值如下表4

f/Hz	200	300	400	800	900	1k
U_o /mV	0.486	0.593	0.658	0.752	0.762	0.754
U_i /mV	10.19	10.16	10.15	10.12	10.11	10.13
f/Hz	2k	5k	100k	500k	700k	800k
U_o /mV	0.782	0.799	0.764	0.660	0.611	0.564
U_i /mV	10.10	10.05	9.72	9.71	10.19	10.02
f/Hz	850k	870k	900k	1000k	263 (fL)	867k(fH)
U_o /mV	0.542	0.532	0.519	0.478	0.537	0.537
U_i /mV	9.93	9.90	9.86	9.70	10.11	10.03

表4 测量幅频特性曲线实验的测量结果

5. 测量静态工作点对波形失真的影响

输入端短接后，测量得

$$U_B = 3.0000(V), U_E = 2.4015(V), U_C = 7.0012(V)$$

$$R_{B2} = 62.212(k\Omega)$$

测量值如下表5

U_B (V)	U_E (V)	U_C (V)	R_{B2} (k Ω)	失真情况	管子工作状态
4.0100	3.4065	5.2219	40.920	削顶失真	饱和区
3.1050	2.4026	7.1539	63.1201	不失真	工作区
2.0475	1.4485	9.0400	107.62	缩顶失真	截止区

表5 测量静态工作点对波形失真的影响

六、数据处理与分析

1. 静态工作点的调整和测量

测量结果见原始数据部分。

由测得的数据可以计算出：

$$U_{BE} = U_B - U_E = 0.6088V$$

$$U_{CE} = U_C - U_E = 4.575V$$

$$I_C \approx I_E = \frac{U_E}{R_E} = 1.999mA$$

理论值：

$$U_{B理论} = \frac{R_{B1}}{R_{B1} + R_{B2}} U_{CC} = 3.4286V$$

晶体管共射极单管放大器

微电子学院

2022.11.28

17号台

PB21061324 徐铭鸽

PB21081565 王蕴璇

$$U_{C_{理论}} = U_{CC} - I_C R_C = 7.1707V$$

误差分析：

- 电阻 R_E 的实际阻值与标称值 $1.2k\Omega$ 有误差，因此即使 U_E 为 $2.4V$ ，实际上 I_C 与 $2mA$ 也有偏差；
 - 电阻 R_C 的实际值与标称值 $2.4k\Omega$ 有误差，因此 $U_{C_{理论}}$ 与 U_C 略有偏差；
 - 电阻 R_{B1} 的实际值与标称值 $24k\Omega$ 有误差，因此 $U_{B_{理论}}$ 与 U_B 略有偏差；
 - 测量仪器（万用表）的测量误差。
2. 测量电压放大倍数

理论值：

取三极管的 $\beta = 160$ ，可得：

$$r_{be} = 300\Omega + (1 + \beta) \frac{26mV}{I_E(mA)} = 2380\Omega$$

$$\text{当 } R_L \approx 2.4k\Omega \text{ 时, } A_{u_{理论}} = -\beta \frac{R_C \parallel R_L}{r_{be}} = -80.67$$

$$\text{当 } R_L \text{ 趋于无穷时, } A_{u_{理论}} = -\beta \frac{R_C}{r_{be}} = -161.34。$$

发现若取 $\beta = 160$ ，理论值与实际测量值偏差较大，因此不能采用160这个经验值。

下面根据实验1和实验5的数据计算三极管的实际 β 值

由实验1的数据可以算出：

$$I_{B1} = \frac{U_B}{R_{B1}} = 125.35\mu A \quad I_{B2} = \frac{U_{CC} - U_B}{R_{B2}} = 143.03\mu A$$

$$I_B = I_{B2} - I_{B1} = 17.68\mu A \quad I_C = 1.999mA$$

$$\text{所以 } \beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{1.999mA}{17.68\mu A} = 113.07$$

以该值作为三极管的 β 计算，可得：

$$r_{be} = 300\Omega + (1 + \beta) \frac{26mV}{I_E(mA)} = 1783.65\Omega$$

$$\text{当 } R_L \approx 2.4k\Omega \text{ 时, } A_{u_{理论}} = -\beta \frac{R_C \parallel R_L}{r_{be}} = -76.07$$

$$\text{当 } R_L \text{ 趋于无穷时, } A_{u_{理论}} = -\beta \frac{R_C}{r_{be}} = -152.14$$

可见若取 $\beta = 118.4$ ，则计算出的理论值与实际测量值更加相符，考虑到受制作工艺限制使三极管 β 值与标称值离散程度大，以及长期使用器件老化、损坏等原因，可以认为118.4比经验值160更接近实验使用的三极管的真实 β 值。

相对误差为：

$$\text{当 } R_L \approx 2.4k\Omega \text{ 时, } \frac{|A_{u_{理论}} - A_u|}{|A_{u_{理论}}|} \times 100\% = 0.43\%。$$

晶体管共射极单管放大器

微电子学院

2022.11.28

17号台

PB21061324 徐铭鸽

PB21081565 王蕴璇

当 R_L 趋于无穷时, $\frac{|A_{u理论} - A_u|}{|A_{u理论}|} \times 100\% = 0.81\%$ 。

误差分析:

- 由于 I_B 数量级较小, 测量、计算受误差影响大, 所以计算出的 β 值受 I_B 的误差影响;
- β 的误差导致 $A_{u理论}$ 、 r_{be} , 使得他们的误差也不小, 因此采用 $\beta = 94.4$ 进行计算, 理论值与实际值仍有一定差距;
- 万用表测量误差使 U_i 、 U_o 测量值有误差, 使得 A_u 测量值与真实值有偏差。

3. 测量输入电阻

由测得的数据可以计算出:

$$R_i = \frac{U_i}{U_s - U_i} R_1 = 2.96k\Omega,$$

理论值:

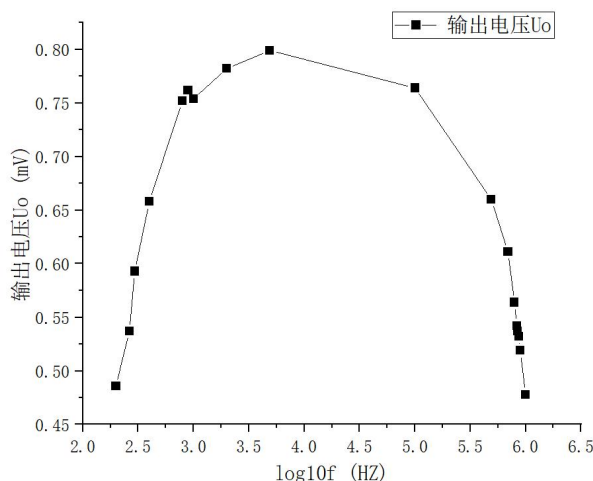
$$R_i = R_{B1} || R_{B2} || r_{be} = 2.09k\Omega$$

误差分析:

- r_{be} 的计算误差传导到 R_i ;
- 电阻实际阻值与标称值存在差距;
- 万用表测量误差。

4. 测量幅频特性曲线

根据测量值, 以 $\log_{10} f$ 作为横坐标, U_o 作为纵坐标。做出如下幅频特性曲线。



测量得到的 $f_H = 867kHz$, $f_L = 263Hz$ 。

误差分析:

- 信号源内阻导致实际输出值与标称值之间存在误差;
- 万用表、示波器测量误差。

5. 测量静态工作点对波形失真的影响

晶体管共射极单管放大器

微电子学院

2022.11.28

17号台

PB21061324 徐铭鸽

PB21081565 王蕴璇

测量结果如原始数据部分所示。

误差分析：

- a. “波形是否失真”这个问题判断起来具有一定的主观性；
- b. 万用表、示波器测量误差。

七、思考题

1. 加入输入信号时，输出波形会出现哪几种失真？分别是什么原因引起的？

答：（1）饱和失真，当晶体管Q点设置过高而进入饱和区时，会出现输出信号底端“被削平”的情况，即为饱和失真。Q点设置过高，使输入信号正半周靠近峰值的某段时间内晶体管进入饱和区（超出放大区动态范围），导致集电极动态电流产生顶部失真，则集电极电阻上的电压波形随之产生同样的失真。由于输出电压与集电极电阻上的电压变化相位相反，从而导致输出波形产生底部失真，出现饱和失真。

- （2）截止失真，当晶体管Q点设置过低而进入截止区时，会出现输出信号顶端“被削平”的情况，即为截止失真。

Q点设置过低，使输入信号负半周靠近峰值的某段时间内晶体管进入截止区（超出放大区动态范围），导致基极电流产生底部失真，则集电极电流和电阻上的电压波形随之产生同样的失真。由于输出电压与集电极电阻上的电压变化相位相反，从而导致输出波形产生顶部失真，出现截止失真。

- （3）同时出现饱和失真和截止失真。

即使工作点选择合适，但当输入信号的振幅足够大时，仍然会同时出现双向失真。

2. 调整静态工作点时， R_{B2} 是10k电阻与 R_W 相串联，而不能直接用电位器，为什么？

答：串联使得无论如何调节 R_W 的阻值， R_{B2} 均大于10k Ω ，这样可以防止 U_B 过大，烧毁三极管。

3. 对于本次的单管放大电路，实现放大的条件是？

答：调试合适的直流电源和相应的偏置电路使三极管处于静态工作点，以保证三极管工作在放大区，即对于本次的NPN型晶体管应使 $U_C > U_B > U_E$ 。

八、实验总结

晶体管共射极单管放大器

微电子学院

2022.11.28

17号台

PB21061324 徐铭鸽

PB21081565 王蕴璇

-
1. 通过本次实验，学习了放大电路输入输出电阻，放大倍数，幅频特性等的测量方法，并主动完成测量，达到了实验目的，达到了实验要求；
 2. 理解静态工作点的设置对电路放大性能和稳定性的重要影响；
 3. 实际实验中，误差较大，三极管的工作状态受温度、实验环境等的影响较大，万用表、示波器等测量工具测量精度较低，尤其数字跳动大，环境不同得到的结果可能不同，会产生较大的误差。
-