

实验报告

2020 级

19 组

朱云沁 PB20061372

赵明宇 PB19061383

日期 2021-12-03

实验题目:

晶体管共射极单管放大器

实验目的:

1. 掌握放大器静态工作点的测量与调整方法；
2. 学习放大电路交流特性等性能指标的测量方法；
3. 观测静态工作点对电压放大倍数的影响。

实验原理:

1. 对于图 1 中的晶体管(NPN 型)放大电路, 各元件的作用分别为:

T: 三极管, 实现电流放大, 是电路的核心;

V_{CC} : 集电极电源, 为电路提供能量, 保证集电结反偏, 发射结正偏;

R_C : 集电极电阻, 将变化的电流变为变化的电压, 使电路具有电压放大作用;

R_E : 发射极电阻, 引入负反馈来稳定电路的静态工作点;

C_1 和 C_2 : 耦合电容, 隔离输入输出与电路直流的联系, 同时使信号能顺利输出;

C_E : 旁路电容, 在交流情况下短路 RE, 确保放大电路动态性能不受影响;

R_{B1} 和 R_{B2} : 构成的电阻分压式电路: 控制基极的电势大小。

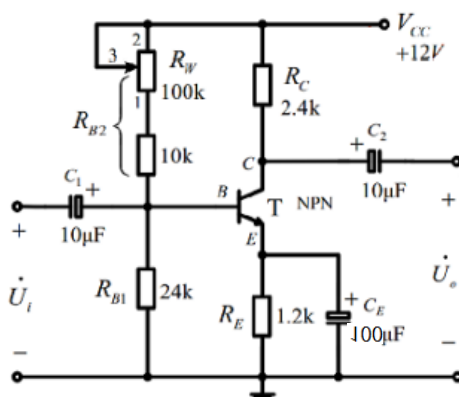


图 1 晶体管共射极单管放大器实验电路

静态工作点的计算

$$V_B \approx \frac{R_{B1}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC}$$

$$I_E = \frac{V_B - V_{BE}}{R_E} \approx I_C$$

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

交流主要参数的计算

$$A_u = -\beta \frac{R_C || R_L}{r_{be}}$$

$$R_i = R_{B1} || R_{B2} || r_{be}$$

$$R_o \approx R_C$$

其中, r_{be} 可用下式估算

$$r_{be} \approx 200\Omega + (1 + \beta) \frac{26\text{mV}}{I_{EQ}}$$

2. 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}) 都会引起静态工作点的变化。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。

实验报告

2020 级

19 组

朱云沁 PB20061372

赵明宇 PB19061383

日期 2021-12-03

5. 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；

测量原理如图 2 所示，由分压公式得到

$$R_i = \frac{U_i}{U_s - U_i} R_1$$

$$R_o = \left(\frac{U_{oc}}{U_L} - 1 \right) R_L$$

- (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。

放大器的幅频特性如图 3 所示，其中 A_u 为电压放大倍数。设 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 $0.707A_{um}$ 所对应的频率分别称为下限频率 f_L 和上限频率 f_H ，通频带 $f_{BW}=f_H - f_L$ 。

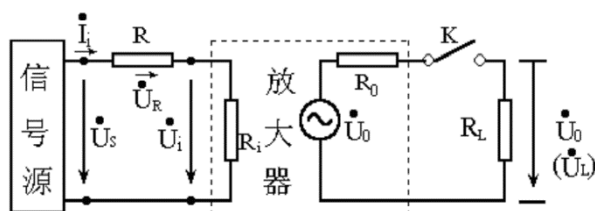


图 2 输入电阻、输出电阻测量原理图

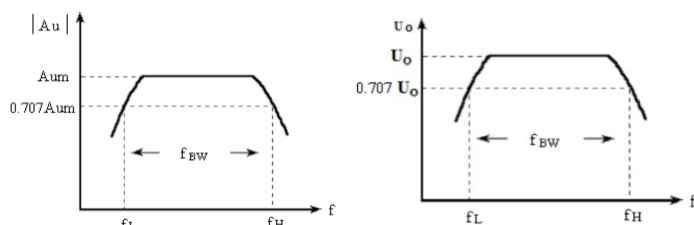


图 3 单管放大器的幅频特性示意图

实验内容：

1. 静态工作点的调整和测量

按图 1 组建电路，输入接地，调节 R_W ，使得 $I_C = 2.0\text{mA}$ ，即 $U_E = 2.4\text{V}$ ，用万用表 DCV 档测量 U_B 、 U_E 、 U_C ，用万用表欧姆档测出电阻 R_{B2} 值。

• 实验数据

U_B	U_E	U_C	R_{B2}	U_{BE}	U_{CE}	I_C
3.048V	2.419V	7.120V	(53.080 + 9.7910)k Ω	0.629V	4.710V	1.989mA
$R_E = 1.2098\text{k}\Omega$				$U_{CC} = 11.844\text{V}$		
$R_C = 2.3751\text{k}\Omega$				$R_{B1} = 23.823\text{k}\Omega$		

表 1 静态工作点的调整和测量-实验数据

• 数据处理

根据表 1 测得数据，计算得 U_{BE} 、 U_{CE} 、 I_C ，填入表 1 中。

$$U_{BE} = U_B - U_E = 3.048 - 2.419 = 0.629\text{V}$$

$$U_{CE} = U_C - U_E = 7.120 - 2.419 = 4.710\text{V}$$

$$I_C = \frac{U_{CC} - U_C}{R_C} = \frac{11.844 - 7.120}{2.3751} = 1.989\text{mA}$$

计算 I_B ，进而求得静态工作点下三极管的直流放大倍数。

$$I_B = \frac{U_{CC} - U_B}{R_{B2}} - \frac{U_B}{R_{B1}} = \frac{11.844 - 3.048}{53.080 + 9.7910} - \frac{3.048}{23.823} = 0.01196\text{mA}$$

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{1.989}{0.01196} = 166.3$$

• 数据分析

实验测得数据满足 $U_{BE} \approx 0.7\text{V}$ ， $U_{CE} \gg 0.3\text{V}$ ，三极管工作在放大区，符合静态工作点的基本要求。根据实验数据，算得直流放大系数与仪器典型值 $\beta \approx 160$ 较为接近，可以认为本实验误差较小。

实验报告

2020 级

19 组

朱云沁 PB20061372

赵明宇 PB19061383

日期 2021-12-03

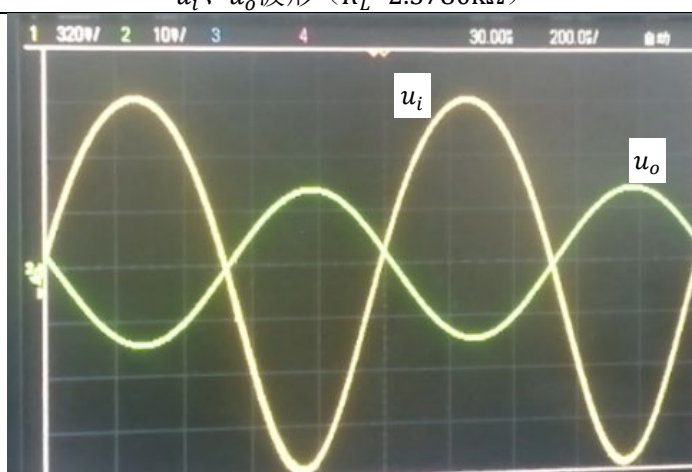
2. 电压放大倍数的测量及输出阻抗的测量

函数信号发生器输出 $f = 1\text{kHz}$ ，有效值为 10mV 的正弦信号 u_i ，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，用示波器测量 $R_L = 2.4\text{k}\Omega$ 、 $R_L = \infty$ （开路）两种情况下 u_o 的有效值 U_o ，并观察 u_o 和 u_i 的相位关系。

• 实验数据

R_C	R_L	U_o	A_u	R_o
2.3751 k Ω	2.3780k Ω	-790.3mV	-78.872	2.3380k Ω
	∞	-1.5673V	-156.417	

u_i 、 u_o 波形（ $R_L=2.3780\text{k}\Omega$ ）



$f = 1000.00\text{Hz}$	$U_i = 10.02\text{mV}$
------------------------	------------------------

表 2 电压放大倍数的测量及输出阻抗的测量-实验数据

• 数据处理

根据表 2 测得数据，计算得 A_u 、 R_o ，填入表 2 中。

$$A_u|_{R_L=2.3780\text{k}\Omega} = \frac{U_o|_{R_L=2.3780\text{k}\Omega}}{U_i} = \frac{-790.3}{10.02} = -78.872$$

$$A_u|_{R_L=\infty} = \frac{U_o|_{R_L=\infty}}{U_i} = \frac{-1567.3}{10.02} = -156.417$$

$$R_o = \left(\frac{U_{oc}}{U_L} - 1 \right) R_L = \left(\frac{U_o|_{R_L=\infty}}{U_o|_{R_L=2.3780\text{k}\Omega}} - 1 \right) R_L = 2.3380\text{k}\Omega$$

• 误差分析

根据测得的静态工作点，有

$$I_E = \frac{U_E}{R_E} = \frac{2.419}{1.2098} = 1.9995\text{mA}$$

$$r_{be} \approx 200\Omega + (1 + \beta) \frac{26\text{mV}}{I_E} = 200 + (1 + 166.3) \frac{26}{1.9995} = 2375.44\Omega = 2.3754\text{k}\Omega$$

故 A_u 的理论值为

$$A_u|_{R_L=2.3780\text{k}\Omega} = -\frac{\beta(R_C||R_L)}{r_{be}} = -\frac{166.3 \times \frac{2.3751 \times 2.3780}{2.3751 + 2.3780}}{2.3754} = -83.19$$

$$A_u|_{R_L=\infty} = -\frac{\beta R_C}{r_{be}} = -\frac{166.3 \times 2.3751}{2.3754} = -166.28$$

实验报告

2020 级

19 组

朱云沁 PB20061372

赵明宇 PB19061383

日期 2021-12-03

A_u 的相对误差为:

$$\left| \frac{A_{u\text{测量}} - A_{u\text{估算}}}{A_{u\text{估算}}} \right|_{R_L=2.3780\text{k}\Omega} \times 100\% = \left| \frac{78.872 - 83.19}{83.19} \right| \times 100\% = 5.19\%$$

$$\left| \frac{A_{u\text{测量}} - A_{u\text{估算}}}{A_{u\text{估算}}} \right|_{R_L=\infty} \times 100\% = \left| \frac{156.417 - 166.28}{166.28} \right| \times 100\% = 5.93\%$$

R_o 的理论值为

$$R_o = R_c = 2.3751\text{k}\Omega$$

R_o 的相对误差为

$$\left| \frac{R_{o\text{测量}} - R_{o\text{计算}}}{R_{o\text{计算}}} \right| \times 100\% = \left| \frac{2.3380 - 2.3751}{2.3751} \right| \times 100\% = 1.56\%$$

实验测得 A_u 与理论估算值的相对误差控制在 10% 以内, 可见误差较小。| A_u | 的测量值偏小, 主要由理论计算时的近似造成, 具体来说, 可能的原因为:

- (1) r_{be} 的估算公式中, r_{bb} 的取值 200Ω 偏小, 导致估算得 r_{be} 偏小, 从而 A_u 的估算值偏大;
- (2) r_{be} 的估算公式中, 由于三极管的工作温度大于室温, V_T 的取值 26mV 偏小, 导致估算得 r_{be} 偏小。

实验测得 R_o 与理论值的相对误差控制在 2% 以内, 可见误差较小。 R_o 的测量值偏大, 可能的原因为: 导线、电容、 R_E 存在一定的阻抗。

3. 测量输入电阻

在输入端接入 R_1 , 在输出电压 u_o 不失真的情况下, 用示波器测出 U_s , U_i , 保持 $U_i = 10\text{mVrms}$, 根据公式算出 R_i 。

• 实验数据

R_1	U_s	U_i	R_i
1.9754 k Ω	10.101mV	5.526mV	2.3860 k Ω
	20.119mV	11.199mV	2.4801 k Ω

表 3 测量输入电阻-实验数据

• 数据处理

根据表 3 测得数据, 由 $R_i = \frac{U_i}{U_s - U_i} R_1$ 计算得两组 R_i , 填入表 3 中。

对两组数据求平均值, 作为 R_i 的测量结果。

$$R_i = \frac{2.3869 + 2.4801}{2} = 2.4331 \text{ k}\Omega$$

• 误差分析

R_i 的理论值为

$$R_i = R_{B1} || R_{B2} || r_{be} = 23.823 || (53.080 + 9.7910) || 2.3754 = 2.4331\text{k}\Omega$$

相对误差为

$$\left| \frac{R_{i\text{测量}} - R_{i\text{计算}}}{R_{i\text{计算}}} \right| \times 100\% = \left| \frac{2.4331 - 2.0883}{2.0883} \right| \times 100\% = 16.51\%$$

实验测得 R_i 与理论估算值相比存在一定误差。 R_i 的测量值偏大, 主要由理论计算时的近似造成, 具体来说, 可能的原因为:

- (1) r_{be} 的估算公式中, r_{bb} 的取值 200Ω 偏小, 导致估算得 r_{be} 偏小, 从而 R_i 的估算值偏小;
- (2) r_{be} 的估算公式中, 由于三极管的工作温度大于室温, V_T 的取值 26mV 偏小, 导致估算得 r_{be} 偏小。

实验报告

2020 级

19 组

朱云沁 PB20061372

赵明宇 PB19061383

日期 2021-12-03

另外，在两组不同的 U_s 下测得 R_i 相差较大，可见示波器的测量精度造成了误差。

4. 测量幅频特性曲线

恢复原电路，取 $I_c = 2.0\text{mA}$ ， $R_c = 2.4\text{k}\Omega$ ， $R_L = 2.4\text{k}\Omega$ ， $U_i = 10\text{mVrms}$ 。首先，找出中频电压放大倍数时的 U_o （取 $f = 1000.00\text{Hz}$ ），然后改变信号源频率 f ，用示波器测量找出 $0.707U_o$ 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_o 。注意实验过程中要求反复调节信号源大小，使 $U_i = 10\text{mVrms}$ 保持不变。

• 实验数据

测量点	中频	f_L 点	f_H 点
U_o	785.9mV	555.6mV	556.0mV
f	1000.00Hz	137.00Hz	785000.00Hz
$U_i = 10.028\text{mV}$			

表 4 测量幅频特性曲线-实验数据

• 数据处理

由 $U_{oL} = U_{oH} = 0.707U_{oM} = 555.63\text{mV}$ ，找出 f_L 、 f_H 的测量值为

$$f_L = 137.00\text{Hz}$$

$$f_H = 785000.00\text{Hz}$$

进而求得通频带为

$$f_{BW} = f_H - f_L = 785000.00 - 137.00 = 784863.00\text{kHz}$$

由 $A_u = \frac{U_o}{U_i}$ ，求得各测量点下 A_u ，如表 5 所示。

测量点	中频	f_L 点	f_H 点
A_u	-78.37	-55.40	-55.44

表 5 测量幅频特性曲线-数据处理

5. 测量最大不失真输出电压

在 $R_c = 2.4\text{k}\Omega$ ， $R_L = 2.4\text{k}\Omega$ 条件下，同时调节输入信号的幅度和电位器 R_W ，用万用表 DCV 档测量静态工作点，用欧姆档测 R_W ，用示波器测量 U_{op+} 和 U_{op-} 值，画出输出波形图，记录数据。调节步骤如下：

- (1) 加大输入 $u_i = 30\text{mVrms}$ 。
- (2) 调节 R_W ，此时 u_o 的上半部一直增大，直到不再增大。
- (3) 减小 u_i 使得 u_o 为不失真波形，进行测量。

• 实验数据

R_{B2}	U_B	U_E	U_C
$(37.125 + 9.7910)\text{k}\Omega$	3.750V	3.067V	5.765V
U_{op+}	U_{op-}	U_i	U_o
1.76V	-2.43V	16.044mV	1.5040V

表 6 测量最大不失真输出电压-实验数据

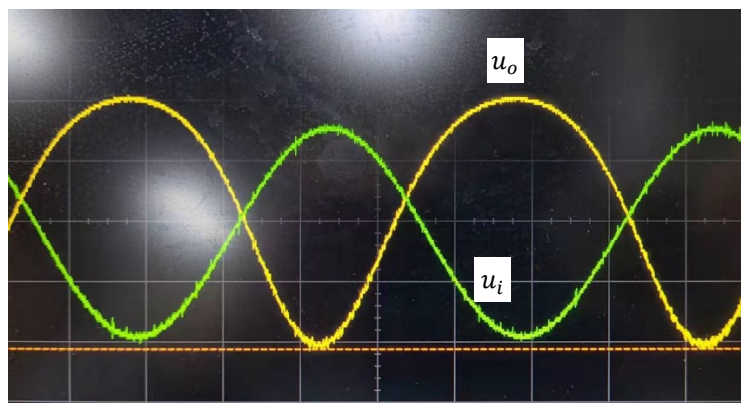


图 4 最大不失真输出电压时的输入、输出波形

实验报告

2020 级

19 组

朱云沁 PB20061372

赵明宇 PB19061383

日期 2021-12-03

• 数据处理

实验测得的最大不失真输出电压高值、低值分别为

$$U_{op+} = 1.76V$$

$$U_{op-} = -2.43V$$

另外，计算此时静态工作点。根据表 6 测得数据，计算得 U_{BE} 、 U_{CE} 、 I_C 、 I_B 。

$$U_{BE} = U_B - U_E = 3.750 - 3.067 = 0.683V$$

$$U_{CE} = U_C - U_E = 5.765 - 3.067 = 2.698V$$

$$I_C = \frac{U_{CC} - U_C}{R_C} = \frac{11.844 - 5.765}{2.3751} = 2.559mA$$

$$I_B = \frac{U_{CC} - U_B}{R_{B2}} - \frac{U_B}{R_{B1}} = \frac{11.844 - 3.750}{37.125 + 9.7910} - \frac{3.750}{23.823} = 0.01511mA$$

在该静态工作点下，求出的直流放大系数为

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{2.559}{0.01511} = 169.36$$

与实验 1 的静态工作点比较，还可求得交流放大系数为

$$\tilde{\beta} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{2.559 - 1.989}{0.01511 - 0.01196} = 181.95$$

• 误差分析

由于判断是否达到最大不失真输出电压是通过观察示波器所显示波形决定的，所测得的静态点有可能并非最大不失真输出电压所在的静态点，故本实验可能存在较大的误差。

思考题：

1. 加入输入信号 U_i 时，输出波形会出现哪几种失真？分别是什么原因引起的？

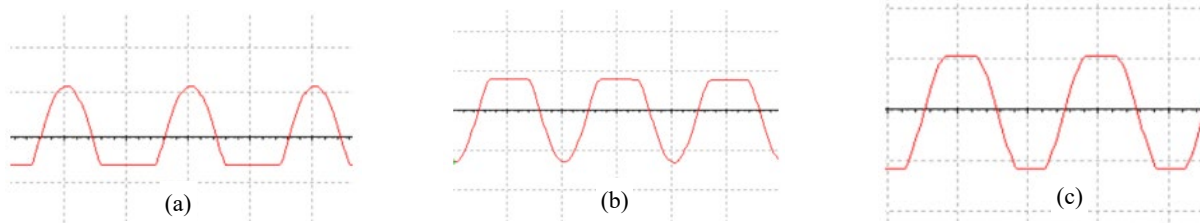


图 5 输出波形的三种失真

(1) 饱和失真：如图 5 (a) 所示。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：如图 5 (b) 所示。与饱和失真类似，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，如图 5 (c) 所示。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 $10\text{ k}\Omega$ 电阻与 R_W 相串联，而不能直接用电位器，为什么？

(1) R_W 与 $10\text{ k}\Omega$ 电阻串联，即使 R_W 调节为 0，支路仍有 $10\text{ k}\Omega$ 电阻，避免流经支路的电流值过高，进而导致烧毁重要元器件。

(2) R_W 与 $10\text{ k}\Omega$ 电阻串联，控制支路电阻值不会过小，使支路电流控制在一定范围以内，从而保证流入基极的电流 I_E 不会太大，使三极管能正常在放大区工作。

实验报告

2020 级

19 组

朱云沁 PB20061372

赵明宇 PB19061383

日期 2021-12-03

3. 如果在发射极与 R_E 之间串联一个 $200\ \Omega$ 电阻, 则电路存在哪些类型的负反馈? 此时电压放大倍数、输入阻抗、输出阻抗、幅频特性有何变化趋势? 为什么?

当温度升高时, I_C 增大, $U_E = (R_E + 200\Omega)I_E$ 增大, U_B 基本不变, 从而 U_{BE} 减小, I_B 减小, 使得 I_C 减小——可见, 该电路存在电流串联负反馈。

考虑交流回路。在发射极与 R_E 之间串联一个 $R = 200\ \Omega$ 电阻, 则电压放大倍数变为 $A_u = -\beta \frac{R_C \parallel R_L}{r_{be} + (1 + \beta)R}$, 故 $|A_u|$ 减小; 输入阻抗变为 $R_i = R_{B1} \parallel R_{B2} \parallel [r_{be} + (1 + \beta)R]$, 故输入阻抗变大; 输出阻抗仍近似为 $R_o \approx R_C$, 基本不变; 由于电压增益的模减小, 幅频特性曲线, 即 $|U_o| - f$ 曲线的中频电压减小, 而带宽增大。

实验总结:

通过本次实验, 学习了放大电路输入电阻、输出电阻、放大倍数、幅频特性等测量方法并完成了测量, 达到了实验目的, 完成了实验要求。通过学习测量最大不失真输出电压的实验, 加深了对各种失真波形的掌握, 也达到巩固模拟电子线路相关课本知识点的效果。