

模电实验报告 1：单级放大电路实验

xy 学号 匡亚明学院

2019 年 2 月 29 日

1 实验目的

1. 学习使用电子仪器测量电路参数的方法
2. 学习共射放大电路静态工作点的调整方法
3. 研究共射放大电路动态特性与信号源内阻、负载阻抗、输入信号幅值大小的关系

2 实验仪器

示波器、信号发生器、交流毫伏表、数字多用表

3 预习内容

1. 三极管及共射放大器的工作原理
2. 阅读实验内容

4 实验内容

实验电路为共射放大器，常用于放大电压。由于采用了自动稳定静态工作点的分压式偏置电路（引入了射极直流电流串联负反馈），所以温度稳定性较好。

1. 连接电路

- (a) 用多用电表判断实验箱上的三极管的好坏。由于三极管已焊在实验电路板上，无法用多用电表的 h_{EF} 档测量。改用多用表测量二极管档测量。对 NPN 三极管，用正表笔接基极，用负表笔分别接射极和集电极，多用表应显示 PN 结导通；再用负表笔接基极，用正表笔分别接射极和集电极，多用表应显示 PN 结截止。这说明该三极管是好的。用多用表判断实验箱上电解电容的好坏。对于 $10\mu F$ 电解电容，可选择 $200k\Omega$ 电阻测量档，用多用表的负极接电解电容的负极，用多用表的正极接电解电容的正极，多用表的电阻示数将不断增加，知道超出示数范围。这说明该电解电容是好的。
- (b) 按图 (1) 连接电路。
- (c) 接通实验箱交流电源，用多用表测量直流 12V 电源电压是否正常。若正常，则将 12V 电源接至图 (1) 的 V_{CC} 处。

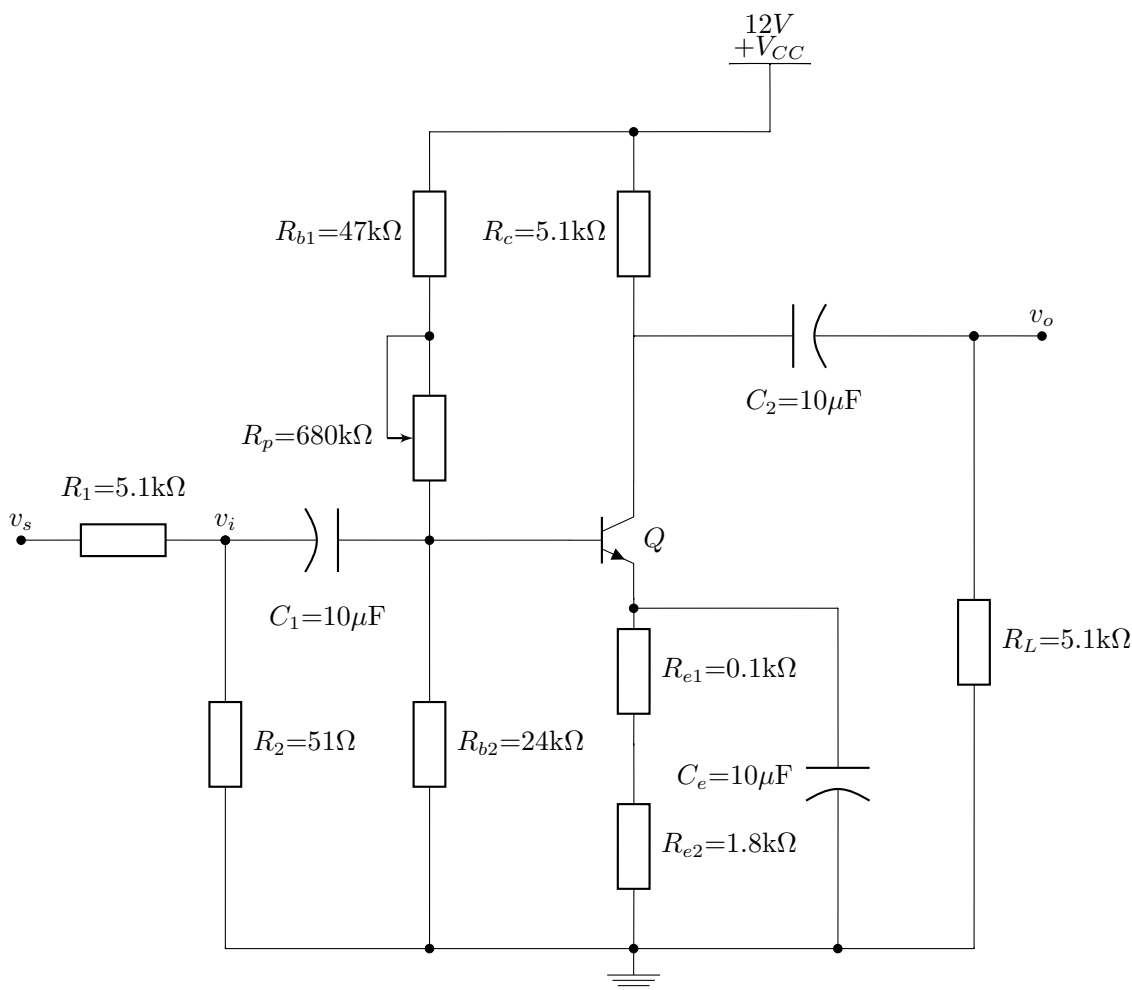


图 1: 共射放大电路

(d) 测量电阻 R_c 的阻值。将 v_i 端接地。改变 R_P (有 $22k\Omega$, $100k\Omega$, $680k\Omega$ 三个可变电阻可选择), 测量集电极电压 V_c , 求 $I_c = \frac{V_{CC} - V_c}{R_c}$ 分别为 $0.5mA$, $1mA$, $1.5mA$ 时三极管的 β 值。建议使用以下方法:

$$I_b + \frac{V_b}{R_{b2}} = \frac{V_{CC} - V_b}{R_b}, R_b = R_{b1} + R_P, \beta = \frac{I_c}{I_b} \quad (1)$$

请注意, 电路断电、电阻从电路中开路后才你用多用表测量电阻值。本实验用测电阻、电压值来计算电流值, 而不是直接测量电流, 是因为本实验电路的电流较小, 测量电流的测量误差较测量电压、电阻的误差大。同时还因为测量电流是多用表的内阻较小, 使用不当很可能损坏多用表。

2. 调整静态

电压放大器的主要任务是失真尽可能小地放大电压信号。为了使输出电压失真尽可能小, 一般地说, 静态工作点 Q 应选择在输出特性曲线上交流负载线的中点。若工作点选的太高, 放大器在加入交流信号后容易引起失真; 若选的太低, 容易引起截止失真。对于小信号放大器来说, 若输出交流信号幅度较小, 电压放大器的非线性失真将不是主要问题, 因此 Q 点不一定要选在交流负载线的中点, 而可根据其他要求来选择。例如, 希望放大器耗电省、噪声低, 或输入阻抗高, Q 点可选的低一些。

将 v_i 端接地，调整 R_P ，使 $V_c = 6V$ ，测量计算并填表，绘制直流负载线，估算静态工作点和放大电路的动态范围；分析发射机直流偏置电阻对放大器动态范围的影响。

3. 动态特性分析

保持上述静态不变，做以下动态分析。

在本实验电路中，在交流信号输入端有一个由 R_1 ， R_2 组成的 $1/101$ 的分压器。这是因为，信号源是有源仪器，其输出的信噪比随输出信号的减小而降低。所以输出信号电压幅值有下限。例如，目前使用的 Agilent 33210A 数字式信号源输出正弦电压的最小幅值为 $50mV$ 。若直接将其作为输入，本实验用的放大器将严重限幅。电阻是无源器件，且阻值较小，而分压器造成的噪声甚少。所以用电阻分压器的达到信噪比较小的小信号。

若要对放大倍数做精确测量，也常用电阻作为输入分压器。具体的做法和原因可叙述如下：若要求放大器的放大倍数的 A_V ，用电阻做 $1/A_V$ 的分压器，信号源的输出电压可为几百 mV ，调整放大器的参数，使输出电压等于输入电压，这样对输入、输出测量的一起在测量过程中就不用换挡。放大倍数本来就是输出/输入的相对关系。虽然一起测量示数往往有绝对误差，用同一档测量两个量，使其相等，这就避免了仪器测量示数具有的绝对误差。这种测量的误差仅仅包含对两个分压电阻测量的误差，通常很小。若直接用小信号做输入，则测量输入、输出将使用不同的档位，即使用了仪器中的不同的电路，而仪器中的不同电路的测量精度是有差别的，由此而来的误差通常比上述用电阻分压器的要大。

- 取输入信号 v_i 的频率为 $10kHz$ ，有效值为 $3mV$ ，观察 v_s 和 v_o 的波形，比较两者的相位。
- 保持信号频率不变，不接负载 R_L ，用交流毫伏表测量电压，填表，观察 v_o 不严重失真时的最大输入值 v_i ，并填表。
- 保持信号 v_i 的频率 $f = 10kHz$ ，有效值 $3mV$ 不变，接入负载 R_L ，测量并填写表 (3)。在绘制直流负载线的同一张图上绘制交流负载线，分析负载对放大器动态范围的影响。
- 不接负载，测量绘制放大器的空载幅频特性曲线。

请注意，幅频特性曲线的横坐标是常用对数刻度，建议分配特权限的纵坐标使用 $20\lg|A_V/A_{Vo}|dB$ 为刻度。当然也可以适应其他的纵坐标刻度，例如 $20\lg|A_V|dB$ 。但不应该适应线性刻度坐标。

注：测量时要注意交流毫伏表的测量带宽限制，若频率超过其频宽，应采用示波器进行测量。

- 利用数字式示波器测量放大器的非线性谐波失真。取输入信号 $f=10kHz$ ， $R_L = 5.1k\Omega$ 。对输入 v_i 做傅里叶变换，记

$$d_{i2} = \frac{\text{二次谐波谱线幅值}}{\text{基波谱线幅值}} \times 100\% \quad (2)$$

$$d_{i3} = \frac{\text{三次谐波谱线幅值}}{\text{基波谱线幅值}} \times 100\% \quad (3)$$

以 d_{i2} 为例说明具体的测量计算方法。数字示波器给出的谱线幅值是对数幅值，其参考值为 $1V_{rms}$ 。示波器屏幕上显示的信号的谱线是其在示波器时域屏幕上波形的傅里叶变换，计及了示波器输入放大器的放大倍数。输入信号的谱线的数值可有游标读出。记基波谱线幅值为 L_1dB ，二次谐波谱线幅值为 L_2dB ，则

$$d_{i2} = 10^{\frac{L_2-L_1}{20}} \times 100\% \quad (4)$$

对输出做傅里叶变换，记

$$d_{o2} = \frac{\text{二次谐波谱线幅值}}{\text{基波谱线幅值}} \times 100\% \quad (5)$$

$$d_{o3} = \frac{\text{二次谐波谱线幅值}}{\text{基波谱线幅值}} \times 100\% \quad (6)$$

放大器的二次谐波失真 d_2 ，三次谐波失真 d_3 为

$$d_2 = d_{o2} - d_{i2}, d_3 = d_{o3} - d_{i3} \quad (7)$$

4. 测量放大器的输入输出电阻

(a) 测量放大器的输入电阻

将图 (1) 中的 R_2 开路后，放大电路输入端等效电路如图 (2)，由图可计算出 r_i 。应调整输入电压，使放大器输出失真尽可能小，因为希望测到的输入电阻是放大器微变等效电路的输入电阻，该电阻是线性电阻。建议将输出端接负载，以减小输出电压。

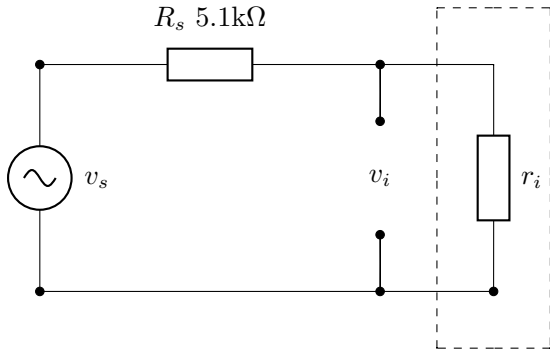


图 2: 输入等效电路

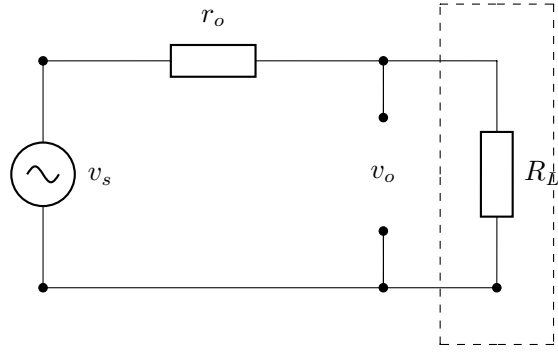


图 3: 输出等效电路

$$r_i = \frac{R_s}{(V_s/V_i) - 1} \quad (8)$$

(b) 测量放大器的输出电阻

放大电路输出端等效电路如图 (3)，此时应将输入端的 R_1, R_2 回复为分压电路， V_i 为 3mV，由图可计算出 r_o 。

$$r_o = \left(\frac{V_{oR_L \rightarrow \infty}}{V_{oR_1=5.1k\Omega}} - 1 \right) \quad (9)$$

将输入输出填入表 (4)。

5 实验数据

1. 静态工作点

静态工作点数据如表 (1)。

2. 动态分析

首先调整输入的函数产生器信号 v_s 使 v_i 为 3mV。此时 $v_s = 309mV_{rms}$, $v_i = 3.009mV$ 。观察示波器的输入输出波形如图 (4) 所示，因此相位差为 π 。

表 1: 调整静态

测量值			测量计算值		
$R_b(k\Omega)$	$V_b(V)$	$V_e(V)$	$I_b(\mu A)$	$I_c(mA)$	β
73.711	2.8659	2.2268	4.505	1.1765	261.15



图 4: 输入输出波形示意图

理论值计算:

根据教材^[1]的式 (5.3.7b):

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26mV}{I_{EQ}} \quad (10)$$

及例 (5.3.2) 中的:

$$I_{EQ} \approx \beta I_{BQ} = 261.15 \times 4.505 = 1176.48\mu A \quad (11)$$

结合实际情况, 取 $r_{bb'} = 800\Omega$, 可得:

$$r_{be} = 800\Omega + (1 + 261.15) \frac{26mV}{1176.48\mu A} = 6.59k\Omega \quad (12)$$

再根据式 (5.3.8) 并进行适当修正, 有 (下文计算中略去负号):

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = - \frac{\beta(R_L || R_c)}{R_b || r_{be}} \quad (13)$$

(a) 空载

空载即 $R_L = 0$, 将各数据代入式 (13) 即得理论放大倍数:

$$A_v = - \frac{261.15 \times 5.1k\Omega}{73.711k\Omega || 6.59k\Omega} \approx 220.17 \quad (14)$$

将理论值与实验测量值填入表 (2):

表 2: 测量交流放大电路（空载）

测量值		由测量值计算	理论估算值
$v_i(mV)$	$v_o(mV)$	A_V	A_V
3	0.5988	199.6	220.17
6	1.1950	199.2	220.17
9	1.7745	197.2	220.17

误差为:

$$Error(v_i = 3mV) = \frac{199.6 - 220.17}{220.17} \times 100\% = -9.30\% \quad (15)$$

$$Error(v_i = 6mV) = \frac{199.2 - 220.17}{220.17} \times 100\% = -9.48\% \quad (16)$$

$$Error(v_i = 9mV) = \frac{197.2 - 220.17}{220.17} \times 100\% = -10.39\% \quad (17)$$

(b) 有载

有载即 $R_L = 5.1k\Omega$ 和 $R_L = 2.2k\Omega$, 将各数据代入式 (13) 即得理论放大倍数:

$$A_v = -\frac{261.15 \times (5.1k\Omega || 5.1k\Omega)}{73.711k\Omega || 6.59k\Omega} \approx 110.09 \quad (18)$$

$$A_v = -\frac{261.15 \times (5.1k\Omega || 2.2k\Omega)}{73.711k\Omega || 6.59k\Omega} \approx 66.35 \quad (19)$$

表 3: 测量交流放大倍数（有载）

负载	测量值		由测量值计算	理论估算值
R_L	$v_i(mV)$	$v_o(mV)$	A_V	A_V
$5.1k\Omega$	3.009	0.3055	101.5	110.09
$2.2k\Omega$	3.009	0.1866	62.0	66.35

误差为:

$$Error(R_L = 5.1k\Omega) = \frac{101.5 - 110.09}{110.09} \times 100\% = -7.80\% \quad (20)$$

$$Error(R_L = 2.2k\Omega) = \frac{101.5 - 110.09}{110.09} \times 100\% = -6.56\% \quad (21)$$

3. 空载幅频响应（通频带）

取中频为 10kHz, $v_{o,rms} = 3.091mV$ 得出 $\frac{v_o}{\sqrt{2}} = 2.1857mV$ 。测得对应的通频带为:

下限 $f_L = 860Hz$, 上限 $f_H = 570kHz$ 。

4. 输入输出电阻

理论值计算:

根据教材 (5.3.9) 和 (5.3.10) 两式, 可以得出输入输出电阻的理论值:

$$r_i = R_b || r_{be} = 73.711k\Omega || 6.59k\Omega = 6.05k\Omega \quad (22)$$

$$r_o \approx R_c = 5.1k\Omega \quad (23)$$

表 4: 测量输入输出电阻

测输入电阻 r_i $R_s = 5.1k\Omega$				测输出电阻 r_o			
测量值		测量计算值	理论估算值	测量值		测量计算值	理论估算值
$V_s(mV)$	$V_i(mV)$	r_i	r_i	$V_o, R_L \rightarrow \infty$	$V_o, R_L = 5.1k\Omega$	$r - o$	r_o
36	18.828	5.6 k Ω	6.05k Ω	0.5988	0.3055	4.9k Ω	5.1k Ω

则输入输出电阻的误差为:

$$Error(r_i) = \frac{5.6k\Omega - 6.05k\Omega}{6.05k\Omega} \times 100\% = -7.44\% \quad (24)$$

$$Error(r_o) = \frac{4.9k\Omega - 5.1k\Omega}{5.1k\Omega} \times 100\% = -3.92\% \quad (25)$$

5. 空载谐波失真

空载谐波失真测量相关数据如下:

$$L_1 = -5.623 \text{ dB}$$

$$L_2 = -36.577 \text{ dB}$$

$$L_3 = -51.256 \text{ dB}$$

$$d_{o2} = 10 \frac{L_2 - L_1}{20} \times 100\% = 2.83\%$$

$$d_{o3} = 10 \frac{L_3 - L_1}{20} \times 100\% = 0.52\%$$

6 误差分析

1. $r_{bb'}$ 的数值

式 (10) 中的 r_{be} 数值与掺杂浓度及制造工艺有关, 而在本实验中并没有方法知道 r_{be} 的精确值。教材中例题的取值为 200Ω , 此时误差约为 20%; 而我在处理数据时使用的 r_{be} 为 800Ω , 误差约为 10%。因此 r_{be} 的值不确定是误差的一个重要来源。

2. 测量误差

测量过程中发现, 仪器的读数并不稳定, 有时会出现随时间递增或递减的现象。这就给读数的准确性造成影响。尤其是当读数特别小, 如 I_b 为 μA 量级时影响更为严重。

7 思考题

1. 降低低频截止频率的方法

从教材的式 (6.3.13):

$$f_L = \frac{1}{2\pi C_2(R_c + R_L)} \quad (26)$$

可知, 若要减小低频截止频率, 可以增大 C_2 , R_c 或 R_L 。

2. 减小非线性谐波失真的方法

由教材可知，要减小非线性谐波失真，可以选用 β 的值随 i_b 变化尽可能小的三极管。

3. 实验体会

本次实验让我了解了模拟电路最基本的放大电路的组成结构，熟悉了常用的仪器设备和使用方法。同时网络资源给我们的预习带来了极大便利，能让我们提前了解实验的主要内容。我对实验还有一些建议，比如前后实验使用同一个实验箱，确保实验的连贯性。

参考文献

- [1] 康华光. 电子技术基础 (模拟部分). 高等教育出版社, 2006.