

# 实验一 单管放大电路

## 实 验 报 告

姓名： 李显昱

学号： 2018011498

班级： 自 83

日期： 2020.3.13

## 目录

<b>1 实验目的</b>	<b>2</b>
<b>2 实验内容</b>	<b>2</b>
2.1 必做：晶体管输出特性曲线的测量 . . . . .	2
2.2 静态工作点的调节 . . . . .	3
2.3 静态工作点对动态特性的影响 . . . . .	3
2.4 选做：发射极电阻对动态特性的影响 . . . . .	4
2.5 整体数据表格整理 . . . . .	8
<b>3 思考题</b>	<b>8</b>
<b>4 实验小结</b>	<b>11</b>

# 1 实验目的

- (1) 掌握晶体管输出特性、放大电路静态工作点和动态特性的仿真测量方法。
- (2) 掌握放大电路静态工作点的调整与测量方法；掌握放大电路主要动态特性的测量方法。
- (3) 理解静态工作点对放大电路动态特性的影响测量与分析各电阻参数对放大电路静态工作点和动态特性的影响。

# 2 实验内容

## 2.1 必做：晶体管输出特性曲线的测量

如图 1 为测量晶体管输出特性曲线的测量电路图，而图 2 为晶体管的输出特性曲线图。其中图 3(a)和图 3(b)是对  $I_C = 1mA$  时  $\beta$  的测量，而图 4(a)和图 4(b)是对  $I_C = 2mA$  时  $\beta$  的测量。最终的实验仿真数据整理于 2.5 节表 4。

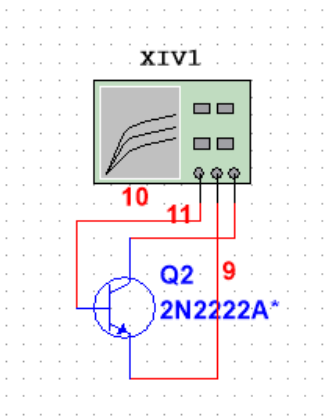


图 1: 三极管输出特性电路图

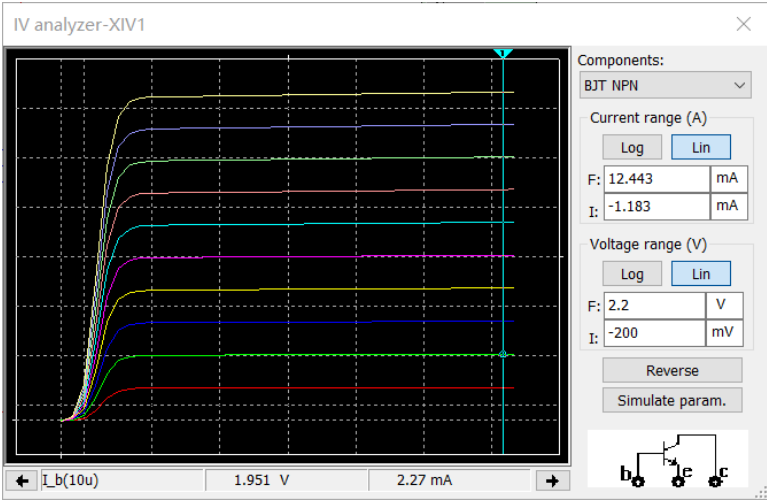
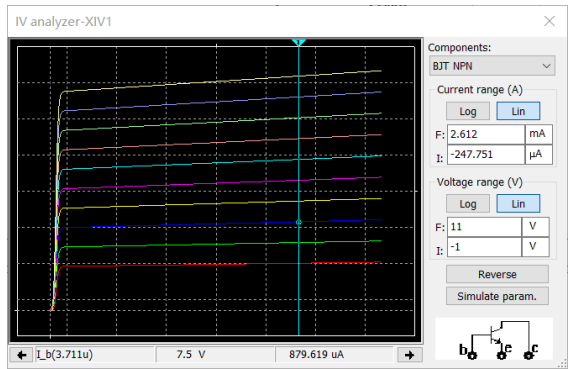
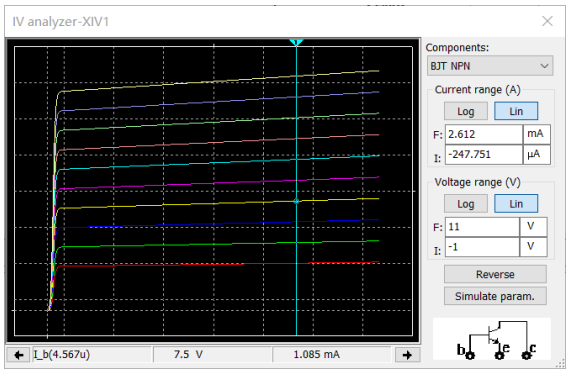


图 2: 三极管输出特性仿真结果



(a)



(b)

图 3: 三极管输出特性  $I_C = 1mA$  时  $\beta$  测量图

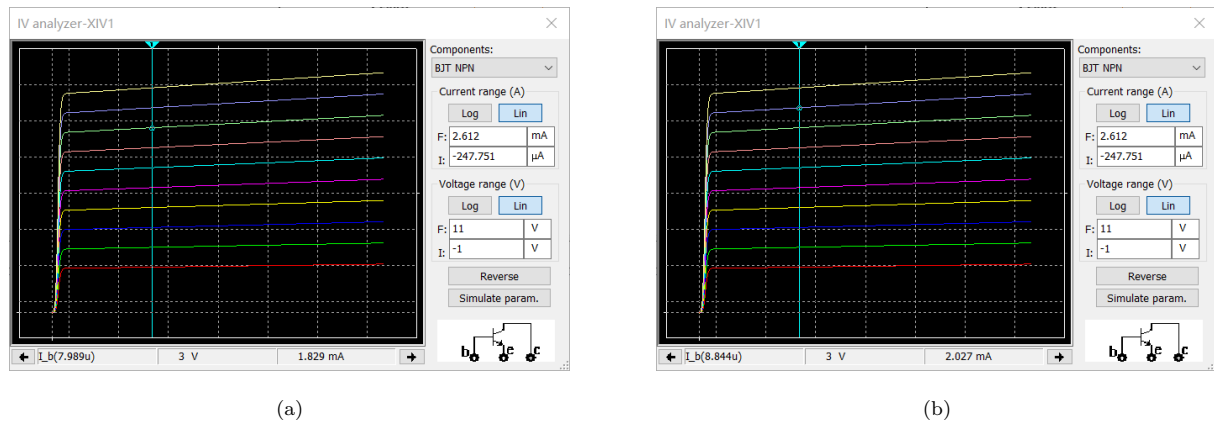
图 4: 三极管输出特性  $I_C = 2mA$  时  $\beta$  测量图

表 1: 理论估算：晶体管静态工作点调节

$I_{CQ}/mA$	$U_{CQ}/V$	$U_{EQ}/V$	$R_{b1}/k\Omega$
1.000	8.7	1.205	76.96
2.000	5.4	2.41	41.22

## 2.2 静态工作点的调节

### · 选做：理论估算

在对本环节进行理论估算时， $\beta \approx 240, r_{bb'} \approx 220\Omega, U_T \approx 26mV, U_{BEQ} \approx 0.7V$ 。

在进行估算时，需要利用共射放大电路相关公式延伸：

$$\begin{cases} I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta} \\ U_{EQ} = I_{EQ}(R_{e1} + R_{e2}) \\ U_{CQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_C \\ I_{EQ} = \frac{1+\beta}{\beta} I_{CQ} \\ U_{BQ} - U_{BEQ} - U_{EQ} = 0 \\ I_{b2} = \frac{U_{BQ}}{R_{b2}} \\ R_{b1} = \frac{V_{CC} - U_{BQ}}{I_{b1}} \end{cases}$$

分别代入  $I_C = 1mA$  和  $I_C = 2mA$ ，可以估算出其对应的  $U_{EQ}$ 、 $U_{CQ}$  和  $R_{b1}$ 。具体计算结果如表 1。

### · 必做：实验仿真

在 Multisim 软件中绘制该电路图的直流通路，如图 5(a)或图 5(b)的左半边，模拟硬件电路实验在晶体管集电极和发射极处各接一个万用表对直流电压进行测量。调节  $R_W$  的阻值，分别使得  $U_{CQ} = 8.7V(I_C = 1mA)$ ， $U_{CQ} = 5.4V(I_C = 2mA)$ ，则可得到对应的  $U_{EQ}$  和  $R_{b1}$ 。实际仿真结果可看 5。最终实验数据汇总于 2.5 节中表 4。

## 2.3 静态工作点对动态特性的影响

### · 选做：理论估算

在对本环节进行理论估算时， $\beta \approx 240, r_{bb'} \approx 220\Omega, U_T \approx 26mV, U_{BEQ} \approx 0.7V$ 。

在进行估算时，需要利用共射放大电路相关公式延伸：

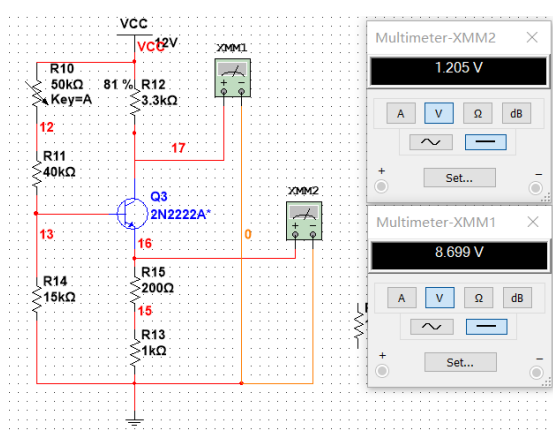
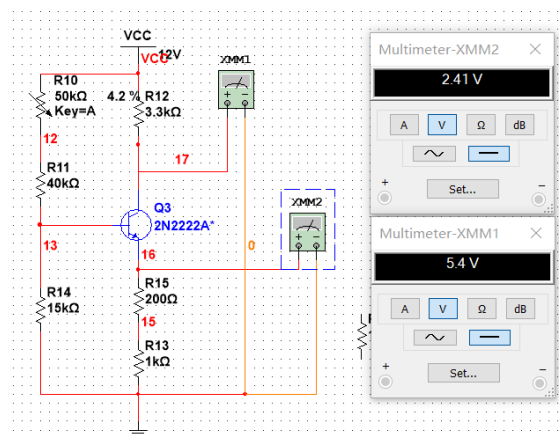
(a)  $I_C = 1mA$  时静态电压测量(b)  $I_C = 2mA$  时静态电压测量

图 5: 静态工作点调节电路图及仿真

表 2: 理论估算: 静态工作点对动态特性的影响

$I_{CQ}/mA$	$r_{be}/k\Omega$	$\dot{A}_u$	$R_b/k\Omega$	$R_i/k\Omega$	$R_o/k\Omega$
1.000	6.46	-74.44	12.55	4.265	3.3
2.000	3.34	-143.97	11.00	2.562	3.3

$$\begin{cases} r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{U_T}{I_{EQ}} = r_{bb'} + \beta \frac{U_T}{I_{CQ}} \\ \dot{A}_u = -\frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be}} \\ R_b = R_{b1} // R_{b2} \\ R_i = R_b // r_{be} \\ R_o = R_c \end{cases}$$

分别代入  $I_C = 1mA$  和  $I_C = 2mA$ , 并结合表 1 中所计算得到的  $R_{b1}$  的值, 可以估算出其对应的  $\dot{A}_u$ 、 $R_i$  和  $R_o$ 。具体计算结果如表 2。

### · 必做: 实验仿真

分别对  $I_C = 1mA$ (实验图可见图 8(a), 图 8(b), 图 9(a), 图 9(b), 图 7(a), 图 7(b), 图 10(a), 图 10(b)) 和  $I_C = 2mA$ (实验图可见图 12(a), 图 12(b), 图 13(a), 图 13(b), 图 11(a), 图 11(b), 图 14(a), 图 14(b)) 进行实验仿真。其中在进行上限及下限截止频率测量的时候, 利用波特仪进行测量的时候, 电路图如图 6, 电路图上没有多余的仪器, 防止对波特仪测量频率特性造成干扰。最终实验数据汇总于 2.5 节中表 5。

•  $I_C = 1mA$

•  $I_C = 2mA$

### · 总结: 静态工作点对电路动态特性的影响

由公式:

$$\begin{cases} r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{U_T}{I_{EQ}} = r_{bb'} + \beta \frac{U_T}{I_{CQ}} \\ \dot{A}_u = -\frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be}} \\ R_b = R_{b1} // R_{b2} \\ R_i = R_b // r_{be} \\ R_o = R_c \end{cases}$$

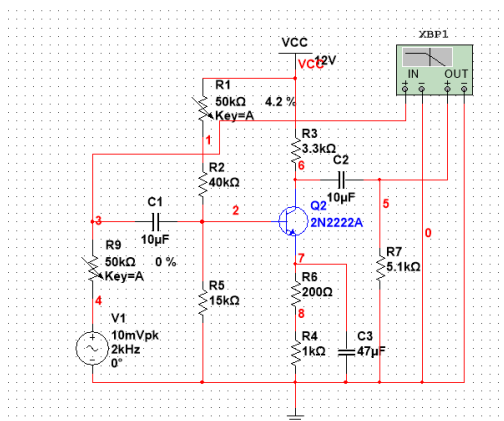
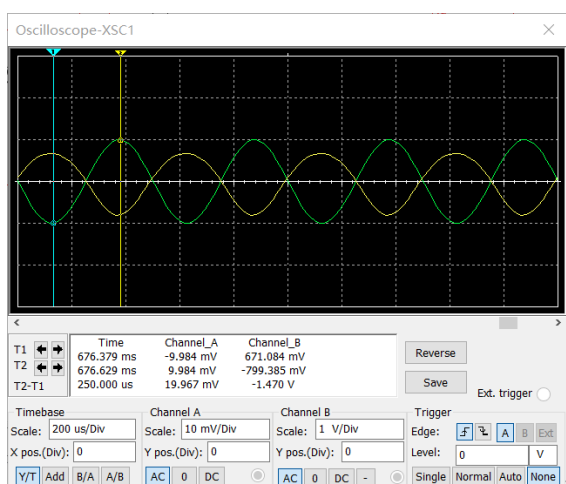
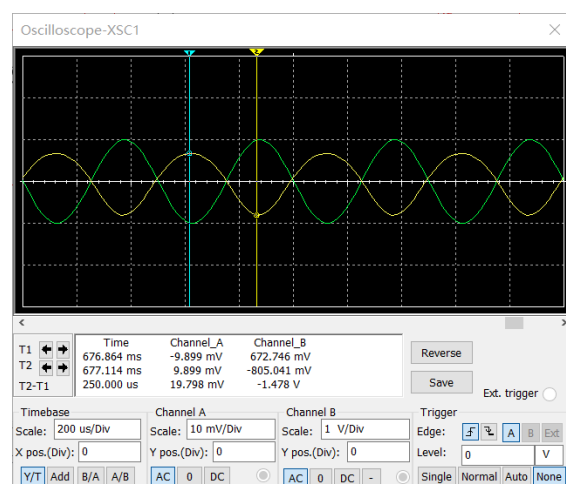
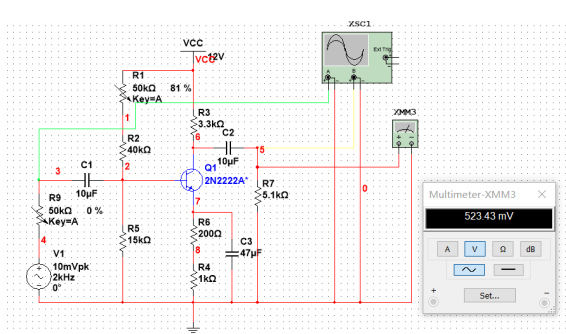
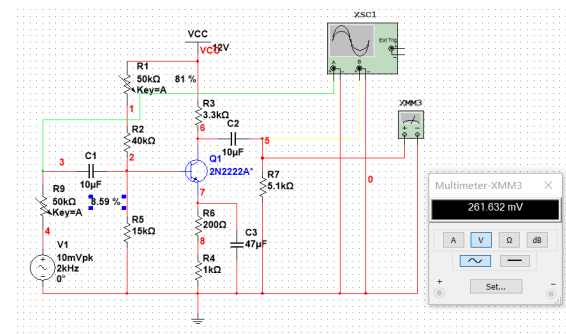


图 6: 上限及下限截止频率测量电路图

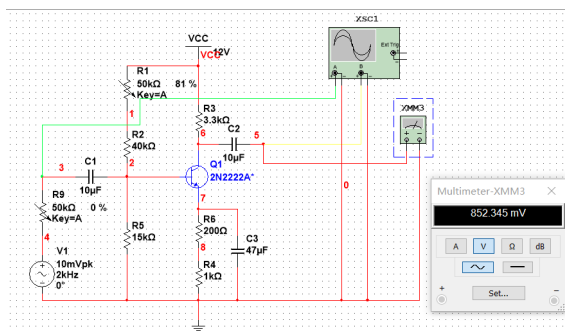
(a)  $I_C = 1mA$  时输入电压(b)  $I_C = 1mA$  时输出电压图 7:  $I_C = 1mA$  时电压放大倍数测量

(a)

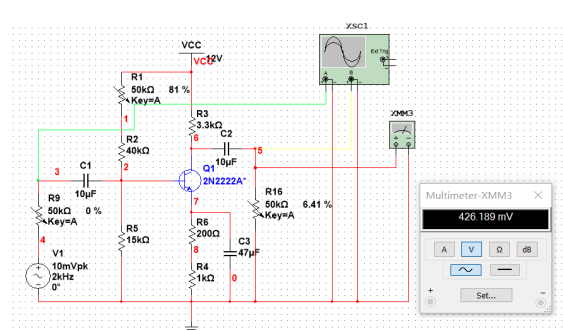


(b)

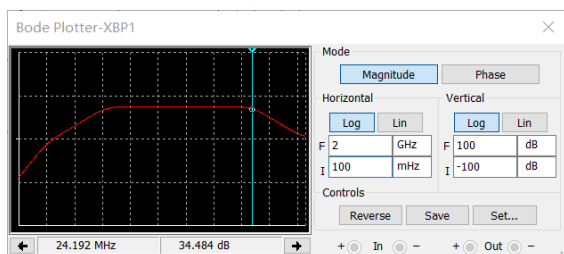
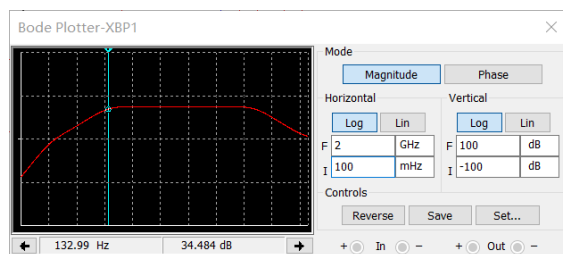
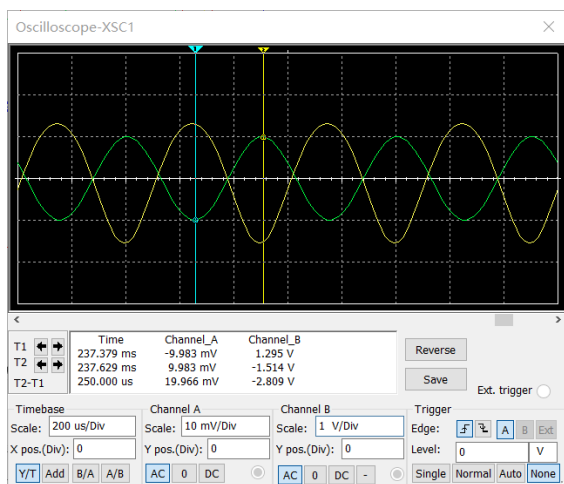
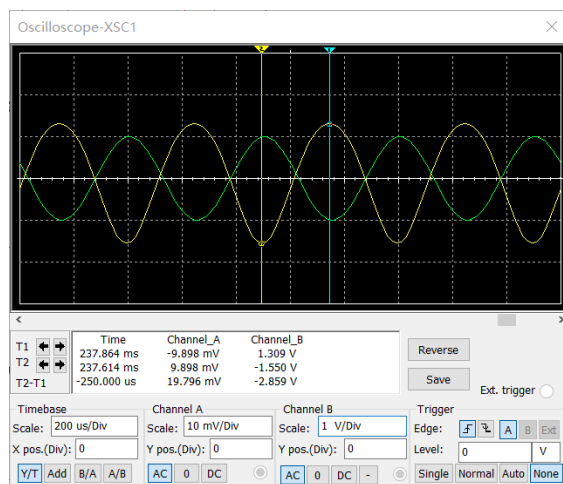
图 8:  $I_C = 1mA$  时输入电阻测量

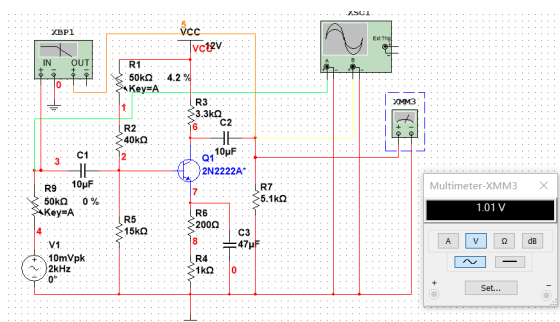


(a)

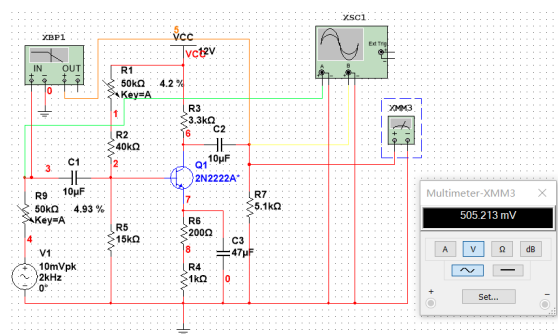


(b)

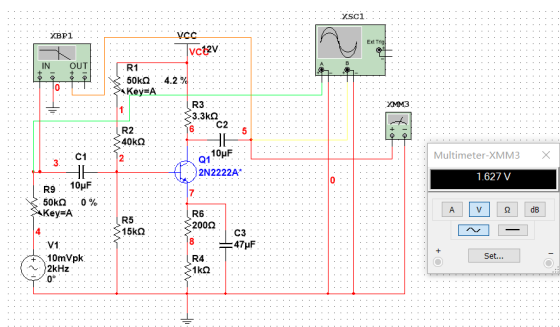
图 9:  $I_C = 1mA$  时输出电阻测量(a)  $I_C = 1mA$  时上限截止频率(b)  $I_C = 1mA$  时下限截止频率图 10:  $I_C = 1mA$  时上限及下限截止频率(a)  $I_C = 2mA$  时输入电压(b)  $I_C = 2mA$  时输出电压图 11:  $I_C = 2mA$  时电压放大倍数测量



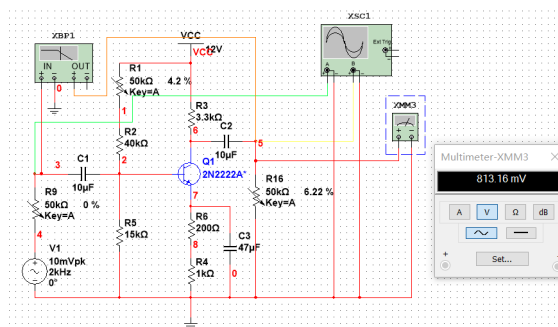
(a)



(b)

图 12:  $I_C = 2mA$  时输入电阻测量

(a)



(b)

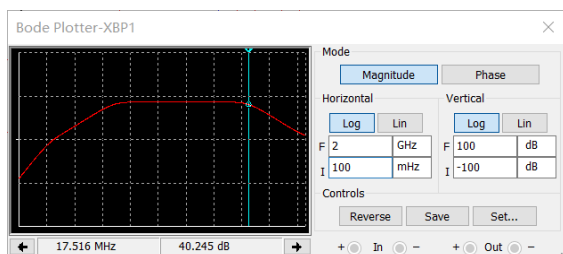
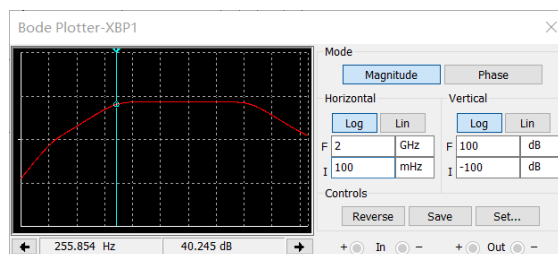
图 13:  $I_C = 2mA$  时输出电阻测量(a)  $I_C = 2mA$  时上限截止频率(b)  $I_C = 2mA$  时下限截止频率图 14:  $I_C = 2mA$  时上限及下限截止频率



表 3: 理论估算: 发射极电阻对动态特性的影响

$I_{CQ}/mA$	$r_{be}/k\Omega$	$\dot{A}_u$	$R_b/k\Omega$	$R_i/k\Omega$	$R_o/k\Omega$
1.000	6.46	-8.83	12.55	10.085	3.3
2.000	3.34	-9.37	11.00	9.059	3.3

可以发现其中主要受静态工作点影响动态特性为  $\dot{A}_u$  和  $R_i$ , 原因在于  $r_{be}$  受到  $I_{CQ}$  的影响, 而  $\dot{A}_u$  有和  $r_{be}$  有关; 同时  $R_i$  和  $R_b$  相关, 但是当静态工作情况不同时,  $R_b$  是不同的, 会受到影响, 但是输出电阻的阻值和静态工作点没有关系。

除此之外, 由实验结果可得, 静态工作点也会影响上限及下限, 其中当  $I_{CQ}$  变大时, 整个通频带会变小。

## 2.4 选做: 发射极电阻对动态特性的影响

### · 选做: 理论估算

在对本环节进行理论估算时,  $\beta \approx 240, r_{bb'} \approx 220\Omega, U_T \approx 26mV, U_{BEQ} \approx 0.7V$ 。

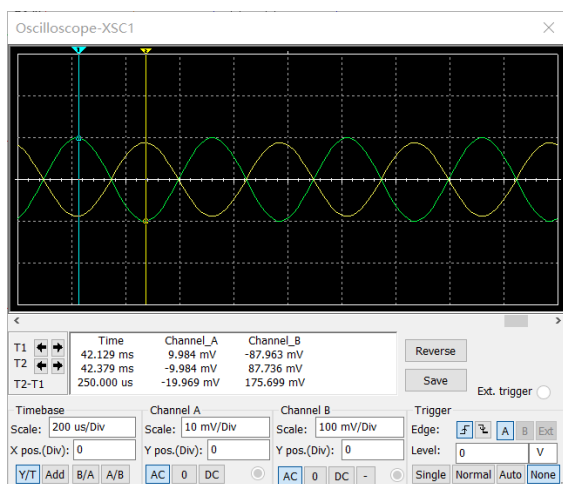
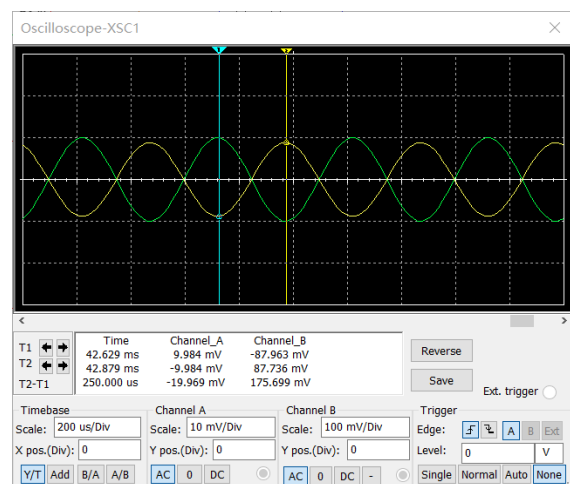
在进行估算时, 需要利用共射放大电路相关公式延伸:

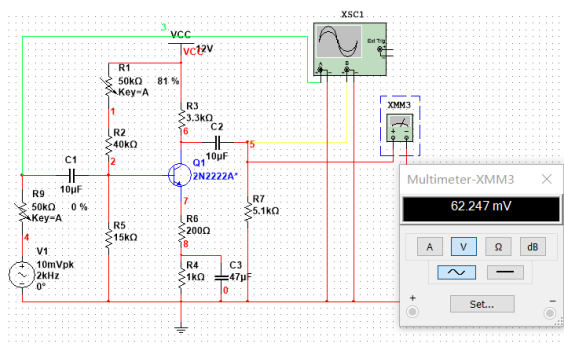
$$\begin{cases} r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{U_T}{I_{EQ}} = r_{bb'} + \beta \frac{U_T}{I_{CQ}} \\ \dot{A}_u = -\frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)R_{e1}} \\ R_b = R_{b1} // R_{b2} \\ R_i = R_b // (r_{be} + (1 + \beta)R_{e1}) \\ R_o = R_c \end{cases}$$

分别代入  $I_C = 1mA$  和  $I_C = 2mA$ , 并结合表 1 中所计算得到的  $R_{b1}$  和表 2 中所计算得到的  $R_{b1}$  的值, 可以估算出其对应的  $\dot{A}_u$ 、 $R_i$  和  $R_o$ 。具体计算结果如表 3。

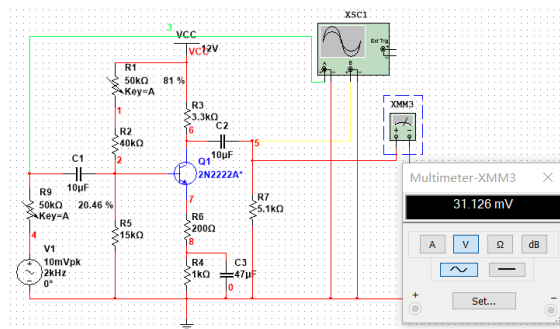
### · 选做: 实验仿真

#### · $I_C = 1mA$

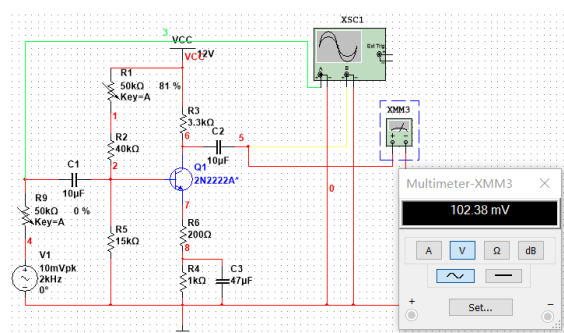
(a)  $I_C = 1mA$  时输入电压(b)  $I_C = 1mA$  时输出电压图 15:  $I_C = 1mA$  时电压放大倍数测量 (选做)



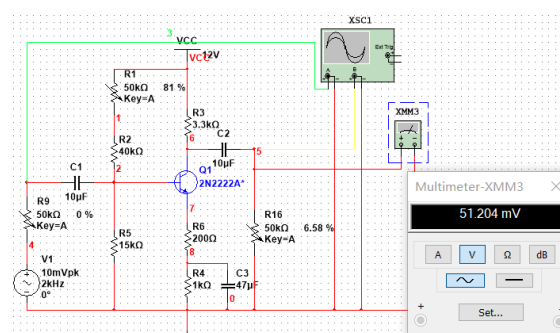
(a)



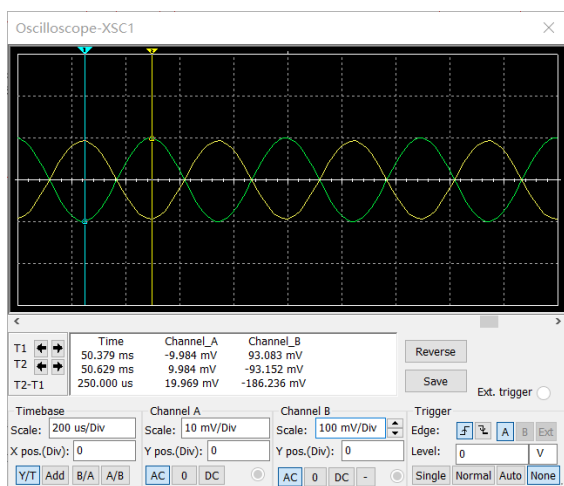
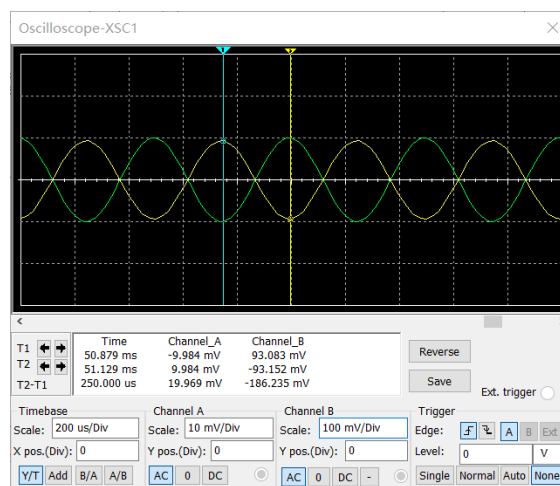
(b)

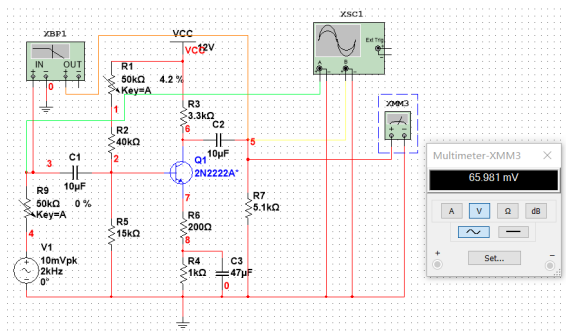
图 16:  $I_C = 1mA$  时输入电阻测量 (选做)

(a)

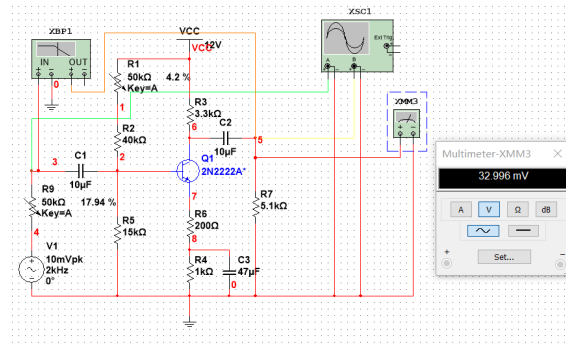


(b)

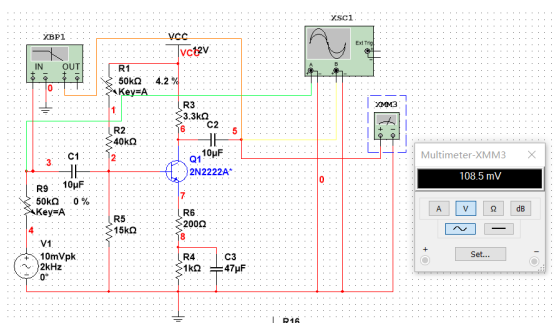
图 17:  $I_C = 1mA$  时输出电阻测量 (选做)(a)  $I_C = 2mA$  时输入电压(b)  $I_C = 2mA$  时输出电压图 18:  $I_C = 2mA$  时电压放大倍数测量 (选做)



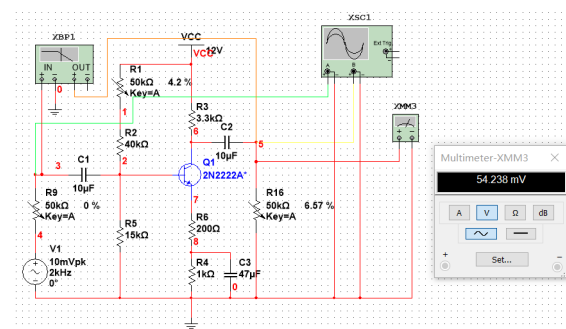
(a)



(b)

图 19:  $I_C = 2mA$  时输入电阻测量 (选做)

(a)



(b)

图 20:  $I_C = 2mA$  时输出电阻测量 (选做)

表 4: 晶体管输出特性曲线测量和静态工作点调节

$I_{CQ}/mA$	$\beta$	$U_{CQ}/V$	$U_{EQ}/V$	$R_{b1}/k\Omega$
1.000	239.93	8.699	1.205	80.5
2.000	231.58	5.4	2.41	42.1

表 5: 静态工作点对动态特性的影响

$I_{CQ}/mA$	$\dot{A}_u$	$R_i/k\Omega$	$R_o/k\Omega$	$f_L/Hz$	$f_H/MHz$
1.000	-74.02	4.295	3.205	132.99	24.192
2.000	-143.19	2.465	3.11	255.854	17.516

表 6: 发射极电阻对动态特性的影响

$I_{CQ}/mA$	$A_u$	$R_i/k\Omega$	$R_o/k\Omega$
1.000	-8.80	10.23	3.29
2.000	-9.33	8.97	3.285

•  $I_C = 2mA$

• 总结: 发射极电阻对电路动态特性的影响

由  $\dot{A}_u = -\frac{\beta(R_c//R_L)}{r_{be} + (1+\beta)R_{e1}}$  可得, 发射极电阻越大, 放大倍数越小。而且由于表达式中发射极前有系数  $1 + \beta$ , 故放大倍数其实受发射极电阻的影响很大, 会使放大倍数大幅减小。

同时, 根据输入电阻计算公式  $R_i = R_b // (r_{be} + (1 + \beta)R_{e1})$ , 可见输入电阻随发射极电阻增大而增大, 而输出电阻不受发射极电阻的影响。

和 2.3 节对比, 可以发现, 发射极电阻和静态工作点均不影响输出电阻, 但均会影响电压放大倍数以及输入电阻。

## 2.5 整体数据表格整理

## 3 思考题

1.  $R_{b1}$  为什么要由一个电位器和一个固定电阻器串联组成?

答: 为了调节静态工作点, 需要使用电位器, 但是如果没有固定电阻器的话, 当电位器调节到阻值最小时, 很可能导致电路中电流过大, 从而烧坏元器件。所以, 需要使用一个电位器和固定电阻器串联来实现调节。同时, 通过计算可以知道, 通过电位器和固定电阻器串联完全可以满足静态工作点的调节需求。

2. 测量放大电路  $R_i$  时, 若串联电阻的阻值比其  $R_i$  的大得多或小得多, 对测量结果会有什么影响? 请对测量误差进行分析。

答: 测量电压时, 电压越小, 受噪声影响而产生的相对误差越大。如果串联电阻的阻值过大, 则在  $R_i$  上的分压  $U_i$  就很小, 极易受到噪声影响; 如果串联电阻的阻值过小, 则在  $R_1$  上的分压  $U'_i - U_i$  就很小, 同样极易受到噪声影响。所以, 串联电阻的阻值比  $R_i$  过大或过小都会导致测量结果对噪声的敏感性增加, 从而使得测量相对误差变得很大, 所以在实验中, 串联电阻阻值  $R_1$  与  $R_i$  相当, 会使得测量结果对噪声的敏感度降低, 所以使实验的误差减小。

## 4 实验小结

本次实验是接触过的第一个模电实验，由于疫情原因，只能做仿真，但是在仿真的过程中，老师要求我们尽量模拟硬件实验，而我一开始只想着怎么简便怎么来，比如果定位  $I_C$  时，想的只是将一个万用表串联进电路中，但后来老师说明，我明白了还是要多方位考虑。

同时，模电实验很细，很多时候测完了一个量之后，发现有个参数忘了调，然后又重测了一遍，这次实验中走了很多这样的回头路，效率很低。这告诉我在每次实验中步调要稳，不要急。

总的来说，此次实验收获很大，感谢老师、助教和同学！