

## 实验二 BJT 共射极电压放大电路分析（仿真）

独立完成，如发现雷同则重做或无成绩！图纸要求见实验内容，可将多张图片和波形拼接在一页 A4 纸打印，黑白打印，打印的图片或波形，细节必须能看清楚。下文中的图片或波形仅供参考，非标准答案！请自行绘制原理图和波形图，并在图中显示本人班级\_姓名（如“信 123\_张三”，短横可省去）！实验报告中图和表的标号顺序根据实际情况按序规范标记。

### 一、实验目的

1. 学习共射极放大电路静态工作点的设置与调整方法。
2. 学习使用 OrCAD 软件分析放大电路的电压放大倍数、输入/输出电阻。
3. 观察非线性失真，研究参数变化对放大电路性能的影响。

### 二、实验原理

#### 1. 静态工作点

放大电路的基本任务是不失真地放大信号。它的性能与静态工作点的位置及其稳定性直接相关，放大电路要能正常工作，必须要有合适的静态工作点。

为了获得最大不失真的输出电压，静态工作点应该选在输出特性曲线上交流负载线中点的附近，如图 2.1 中的  $Q$  点。若工作点选的太高（如图 2.2 中的  $Q_1$  点），就会出现饱和失真；若工作点选得太低（如图 2.2 中的  $Q_2$  点），就会产生截止失真。

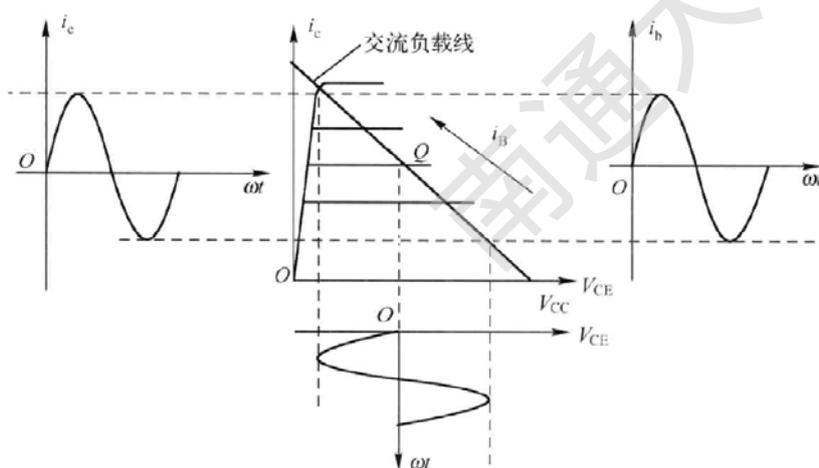


图 2.1 拥有最大动态范围的静态工作点

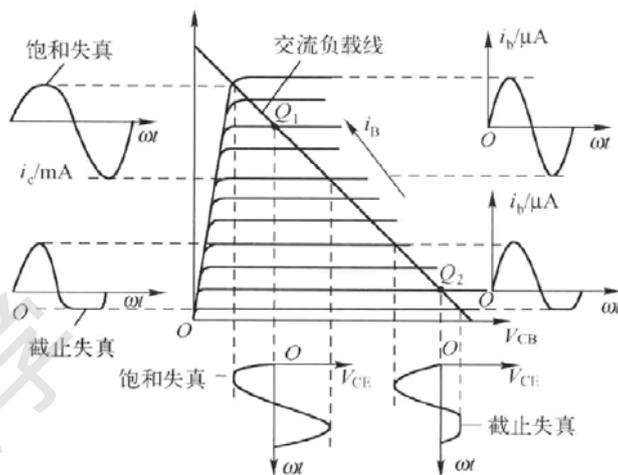


图 2.2 不合适的静态工作点产生输出波形失真

对于小信号放大器而言，由于输出交流幅度很小，非线性失真不是主要问题，因而  $Q$  点不一定要选在交流负载线的中点，可以根据其它指标要求而定。如希望耗电小、噪声低、输入阻抗高时， $Q$  点可以选得低一些；如希望增益高时， $Q$  点可适当选择高一些。

## 2. 集电极电阻 $R_C$

集电极电阻  $R_C$  连接在三极管的集电极与直流电源之间，计算  $R_C$  的原则有两个：一是满足放大倍数的要求，而是不能产生饱和失真。一般来说，输出电压的幅值  $V_{om}$  和电压放大倍数  $A_v$  是已知的设计指标，以图 2.3 为例。

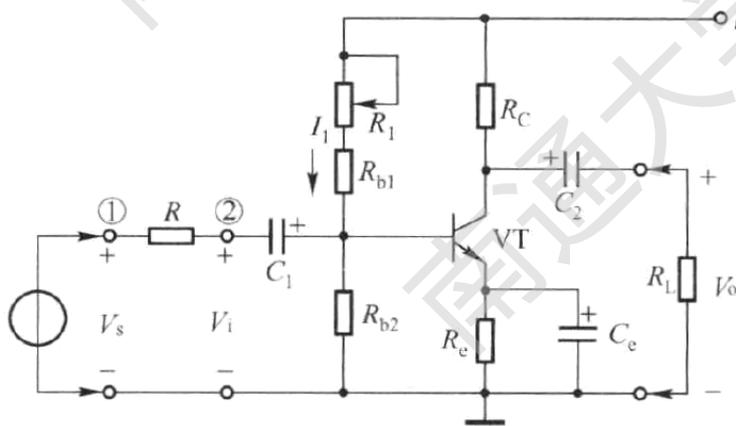


图 2.3 射极偏置共射极放大电路

输入电压的幅值  $V_{im} = \frac{V_{om}}{A_v}$ ，则基极电流的幅值  $I_{bm} = \frac{V_{im}}{r_{be}}$ ，其中  $r_{be}$  按  $1k\Omega$  估算。集电极电流幅

值  $I_{cm} = \beta I_{bm}$ ，而  $R_C // R_L = R'_L = \frac{V_{om}}{I_{cm}}$ 。所以，在负载  $R_L$  已知的情况下，可以由式子  $R_C = \frac{R_L R'_L}{R_L - R'_L}$

计算出集电极电阻  $R_C$ 。但该方法为估算法，求得的  $R_C$  还需通过对静态工作点的验证加以判定，一

般要使  $V_{CEQ} \geq V_{om} + 1V$ ，使放大器不进入饱和区，否则要重新计算  $R_C$  的值。

### 3. 基极偏置电阻 $R_{b1}$ 和 $R_{b2}$ 以及射极电阻 $R_e$

由射极偏置电路的原理可知，要让  $R_e$  构成强直流负反馈，基极电位  $V_B$  就必须高且稳，这就要求电流  $I_1$  要足够大，使  $I_B$  在  $I_1$  中占的比例要小。但  $I_1$  大则要求  $R_{b1}$  和  $R_{b2}$  要小，这又会影响电路的输入电阻及能量损耗，故  $I_1$  也不能太大，通常取  $I_1 = (5 \sim 10)I_B$ 。

$V_B$  越高，电流负反馈越强，但电源的效率却越低，所以  $V_B$  也不能太高，一般取  $V_B = (5 \sim 10)V_{BE}$ ，

或者  $V_B = \begin{cases} 3 \sim 5V(\text{硅管}) \\ 1 \sim 3V(\text{锗管}) \end{cases}$ 。

为了不让信号进入截止区而产生截止失真，要求  $I_{CQ} > I_{cm}$ ，一般取  $I_{CQ} = I_{cm} + 0.5mA$ ，而

$$I_{BQ} = \frac{I_{CQ}}{\beta}, \text{ 所以 } R_{b1} = \frac{V_{CC} - V_B}{I_1}, R_{b2} = \frac{V_B}{I_1}。$$

实际电路中为了方便调节，通常用一个固定电阻串联一个电位器来代替  $R_{b1}$ ，当固定电阻阻值加电位器中间阻值等于所需的  $R_{b1}$  时，较为合适。

射极电阻  $R_e$  一般由式子  $R_e = \frac{V_E}{I_{EQ}} \approx \frac{V_B - V_{BE}}{I_{CQ}}$  计算的到。

### 4. 电源电压 $V_{CC}$

电源电压  $V_{CC}$  既要满足输出幅度、工作点稳定的要求，又不能选得太高，以免对电源设备和三极管的耐压产生不必要的要求。所以  $V_{CC} = V_{CEQ} + I_{CQ}(R_C + R_e)$ ，其中  $V_{CEQ} = V_{om} + V_{CES}$ 。

### 5. 耦合电容和旁路电容

耦合电容和旁路电容的取值，并不一定需要通过计算求得，可以根据经验和参考一些电路酌情选择。在低频范围内通常取  $C_1 = C_2 = 5 \sim 10\mu F$ ， $C_e = 50 \sim 200\mu F$ （电容选取标称值，并注意耐压值）。

### 6. 电路参数的测量

#### (1) 测试静态工作点

对于硬件实验，静态工作点的测量一般使用直接测量法或者间接测量法。直接测量法是将直流电流表串联在集电极与电源之间，直接测量集电极电流  $I_{CQ}$ ，此方法测量精度较高，但比较麻烦。间接测量法是用直流电压表测出  $R_C$  上的电压，再用该电压值除以  $R_C$  的标称值，间接地得到  $I_{CQ}$  的值，此法较为简便，是硬件测量中常用的方法。

对于使用 Orcad 软件的仿真实验,可以使用软件中的 Bias Point 静态点分析功能读取三极管的静态工作点参数。

正常情况下,  $V_{CEQ}$  应该为正几伏,说明三极管工作在放大状态。若发现  $V_{CEQ} \approx V_{CC}$ ,说明三极管工作在截止状态;若  $V_{CEQ} < 0.5V$ ,说明三极管已进入饱和状态。上述两种情况说明静态工作点偏离较大,应该检查电路原理图是否存在错误或读数是否看错等。

## (2) 测量动态参数

### ① 电压放大倍数 $A_V$

$A_V$  是输出电压  $V_o$  和输入信号电压  $V_i$  的比值,即  $A_V = V_o / V_i$ ,  $A_V$  可以用 Pspice A/D 显示的输出电压幅值除以输入电压幅值得到。

### ② 输入电阻 $R_i$

$R_i$  是从放大电路输入端看进去的交流等效电阻,它等于放大器输入端信号电压与输入电流的比值,即  $R_i = V_i / I_i$ 。

对于硬件实验,往往不方便直接测量输入电流  $I_i$ ,所以会采用换算法测量输入电阻,原理图如图 2.4 所示。在信号源与放大电路的输入端之间串联一个阻值已知的电阻  $R_s$ ,只要分别测出  $V_s$  和  $V_i$ ,

则输入电阻为  $R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{V_i}{(V_s - V_i) / R_s} = \frac{V_i}{V_s - V_i} \cdot R_s$ 。

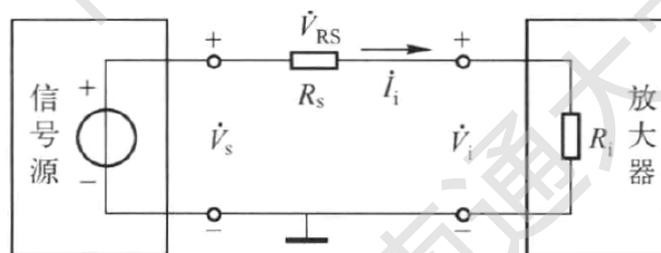


图 2.4 换算法测量  $R_i$  的原理图

对于使用 Orcad 软件的仿真实验,也可以直接使用电压探针和电流探针测量出  $v_i$  和  $i_i$  的波形,再通过读取它们的最大值计算  $R_i$  的值。

### ③ 输出电阻 $R_o$

$R_o$  是将输入信号电压源短路,从输出端向放大电路看进去的交流等效电阻。

对于硬件实验,同样可以使用换算法测量  $R_o$ ,其原理图如图 2.5 所示。在放大电路输入端加一个固定信号电压  $v_s$ ,分别测量当已知负载  $R_L$  断开和接上时的输出电压  $V'_o$  和  $V_o$ ,则  $R_o = \left( \frac{V'_o}{V_o} - 1 \right) \cdot R_L$ 。

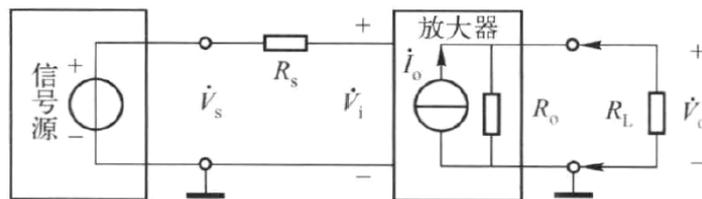


图 2.5 换算法测量  $R_o$  的原理图

对于使用 Orcad 软件的仿真实验，也可以使用  $R_o$  的定义进行测量，如图 2.6。需要将信号源短路，同时将负载断开，在负载的位置外加一个交流源  $v_t$ ，再通过电压、电流探针测量该外加电源的电压  $v_t$  和响应电流  $i_t$  的波形，最后通过两者的最大值计算出  $R_o$  的值。

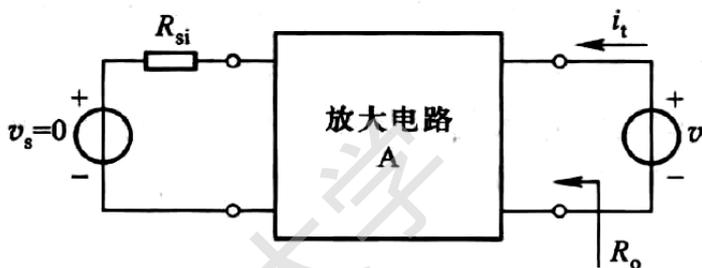


图 2.6 定义法测量  $R_o$  的原理图

### 三、实验内容

#### 1. 研究静态工作点变化时对放大电路性能的影响

实验参考电路如图 2.7 所示。

Orcad 仿真原理图如图 2.8 所示。图中为了方便仿真，用一个定值电阻  $R_{b1}$  代替了图 2.7 中的定值电阻串联电位器的结构， $R_{b1}$  的阻值先设为  $57k\Omega$ ；图中的信号源  $V_s$  选用正弦信号源 VSIN，参数设置为： $V_{OFF}=0$ ， $V_{AMPL}=5mV$ ， $FREQ=1kHz$ ；三极管选用 Q2N3904， $\beta$  改为 70，修改方法：选中三极管，单击鼠标右键打开右键菜单，选 Edit Pspice Model，在弹出的模型编辑器中将参数 Bf 改为 70，如图 2.9。

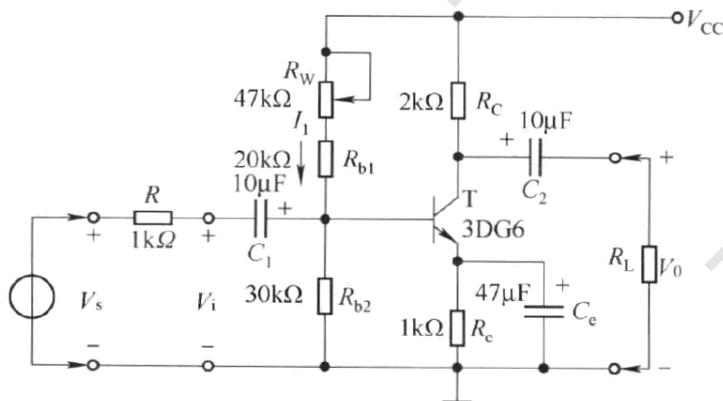


图 2.7 共射极电路实验参考电路图

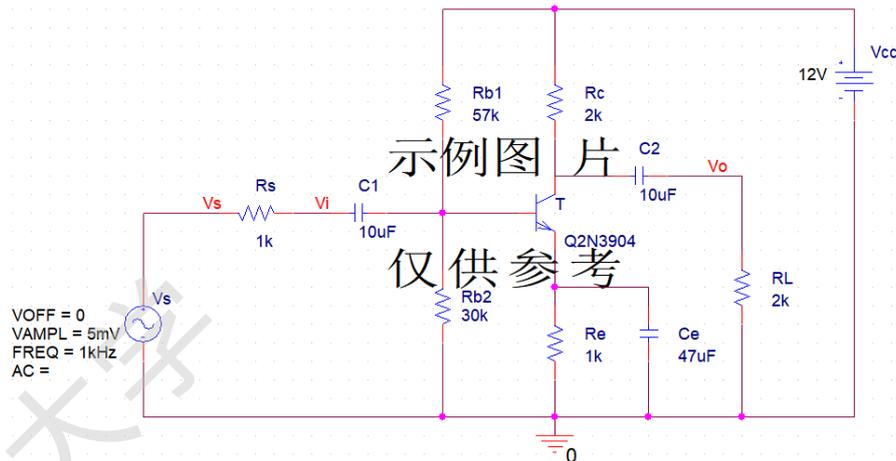


图 2.8 共射极电路仿真原理图

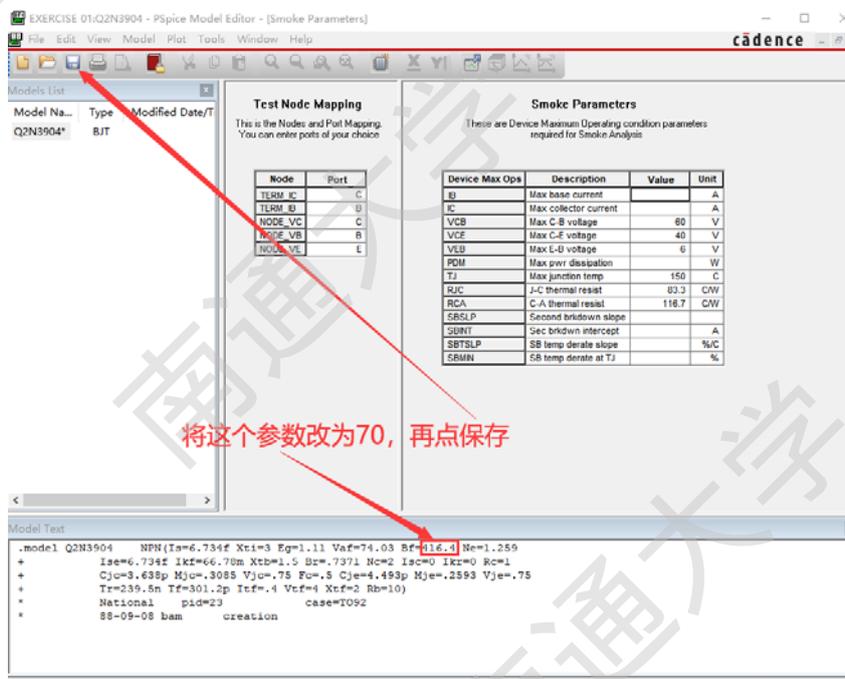


图 2.9 Pspice 模型编辑器

**注意:**

(a) 图 2.8 的原理图在撰写报告时要求打印，在画图工具栏中点击 添加图注文本，标明班级\_姓名文本框，例如“信 123 张三”。

(b) 图 2.8 所示原理图在保存时不要直接在编辑界面截图，使用 Orcad 菜单栏 **File**→**Print Area**→**Set**，选择打印区域，再选择 **File**→**Print Setup**，在弹出的“打印机设置”对话框中将“名称”选为“Microsoft Print to PDF”或者“Microsoft XPS Document Writer”，最后选择 **File**→**Print...**→**OK**，打印为 PDF 或 XPS 格式后再截图。

(1) 在静态集电极电流  $I_{CQ}=2.5\text{mA}$  时，测量并记录放大电路的静态工作点。

点击 Pspice 工具栏中的 ，新建一个仿真配置文件，可以使用默认设置，点“确定”。再点  运行仿真，关闭自动弹出的 Pspice A/D 窗口，点击 Pspice 工具栏中的  和 ，直接在原理图上显示各结点电位和支路电流，这样的显示虽然直观，但有其不足，如图 2.10。

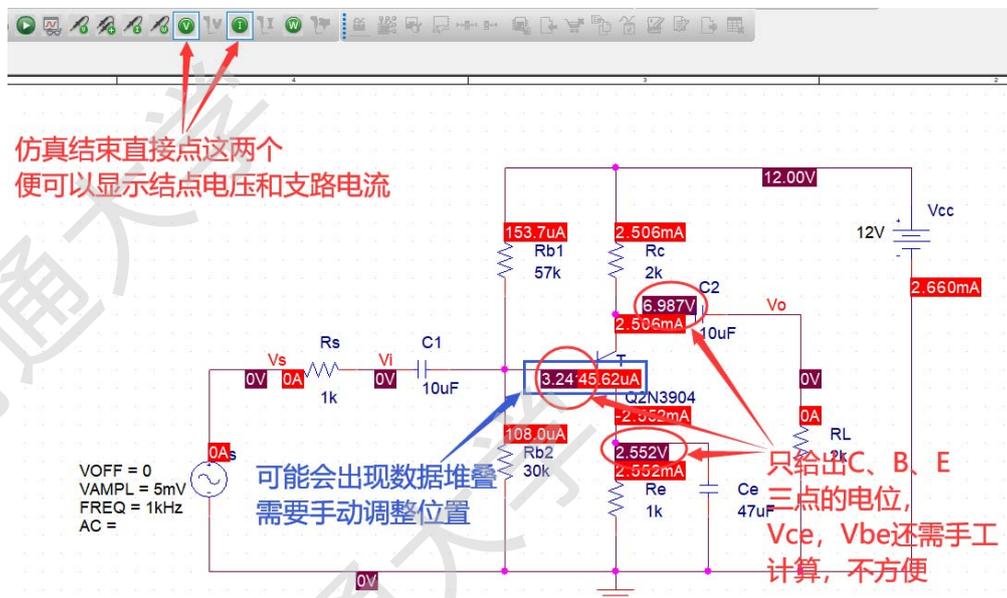


图 2.10 直接显示静态值的原理图

点击 Pspice 工具栏中的 ，修改仿真配置文件，在 Analysis 标签中的 Analysis type 中选择 Bias Point，同时点选右边三个选项中的第一个，如图 2.11，然后点“确定”。

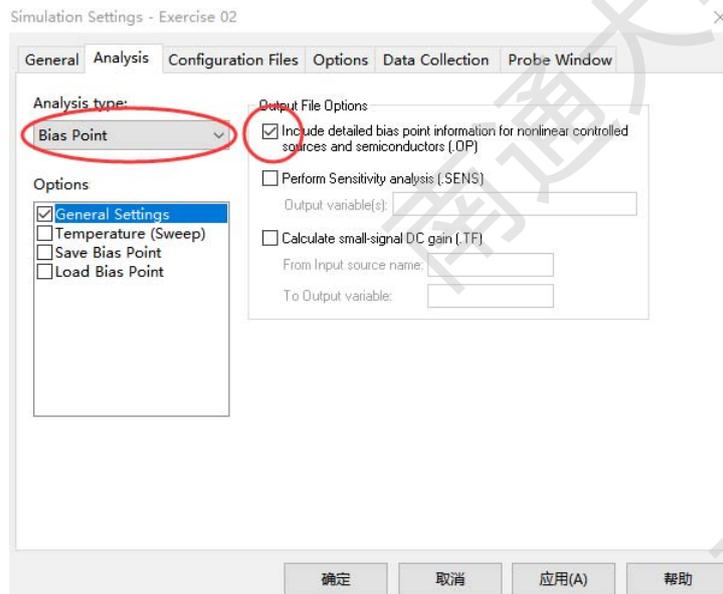


图 2.11 静态工作点分析设置

再次运行仿真，不要关闭自动打开的 Pspice A/D 窗口。在 Pspice A/D 窗口的菜单栏中点 View→Output File，会打开一个.out 文档，如图 2.12，拉动文档右侧的滑动条至文档底部，可以看到

三极管的静态工作点数值，记录其中的  $I_B$ 、 $I_C$  和  $V_{CE}$ ，写入实验报告。

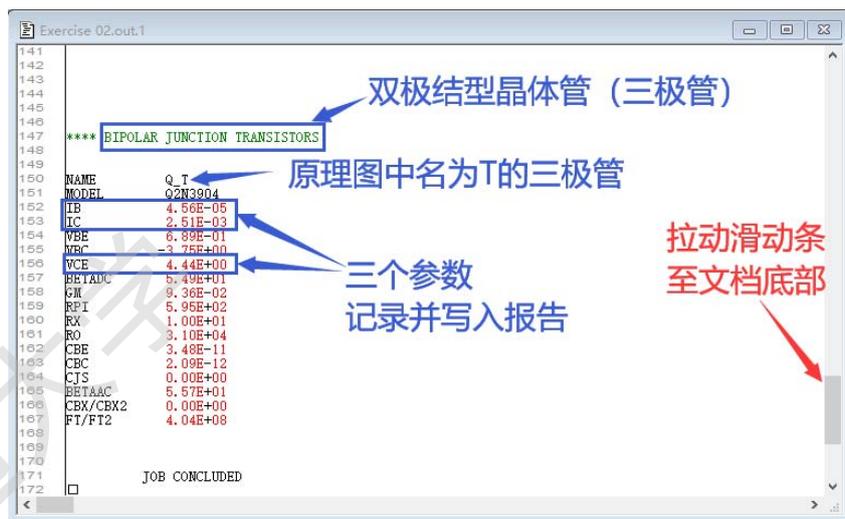


图 2.12 静态工作点分析结果

**注意：**

图 2.12 的数据结果在撰写报告时需要打印，不要直接在仿真软件截屏，在 Pspice A/D 界面选择 File→Printer Setup..., 将打印机选为“Microsoft Print to PDF”，最后选择 File→Print...→OK，输出为 PDF 格式，然后再截图，如图 2.13。



图 2.13 静态工作点数据打印示例

(2) 在不同的静态工作点，观察并记录放大电路的各性能参数

当静态电流  $I_{CQ}=2.5\text{mA}$  时，在放大电路输入端输入频率为  $1\text{kHz}$  的正弦信号，调节信号源电压幅值  $V_{sm}$ ，使输入电压幅值  $V_{im}$  约等于  $5\text{mV}$ ，测量  $V_{sm}$ 、 $V_{om}$  和  $V'_{om}$ ，并记录在表 2.1 中（灰色部分）。

再根据测得的数值计算出  $A_v$ 、 $A'_v$ 、 $R_i$  和  $R_o$ ，也填入表 2.1（蓝色部分）。

之后，改变  $R_{b1}$  的数值，使  $I_{CQ}$  分别等于  $2\text{mA}$  和  $3\text{mA}$ ，重复上述测量（注意  $V_{im}$  必须始终约等于  $5\text{mV}$ ），将各参数的测量与计算结果记入表 2.1。

表 2.1 静态工作点对放大电路性能参数的影响

静态工作点电流 $I_{CQ}/\text{mA}$		2.0	2.5	3.0
保持输入信号 $V_{im}/\text{mV}$		5 (填实测值)	5 (填实测值)	5 (填实测值)
测量值	$V_{sm}/\text{mV}$			
	$V_{om}/\text{mV}$			
	$V'_{om}/\text{mV}$			
由测量数据 计算值	$A_v$ (有负载时)			
	$A'_v$ (空载时)			
	$R_i/\text{k}\Omega$			
	$R_o/\text{k}\Omega$			

① 仿真原理图如图 2.14，将  $R_{b1}$  的阻值改为  $57\text{k}\Omega$ ， $V_s$  的幅值调整至  $11.5\text{mV}$ ，可满足  $V_{im}$  约等于  $5\text{mV}$ ，且  $I_C=2.5\text{mA}$  的要求。可以点击 Pspice 工具栏中的  在  $V_s$  和  $V_i$  的位置事先放好电压探针（请注意探针的针头放置的位置），仿真结束后会在同一个 plot 窗口自动显示二者的波形。然后修改仿真配置文件，启用 Time Domain (Transient) 分析，并设置合适的仿真参数，如图 2.15。

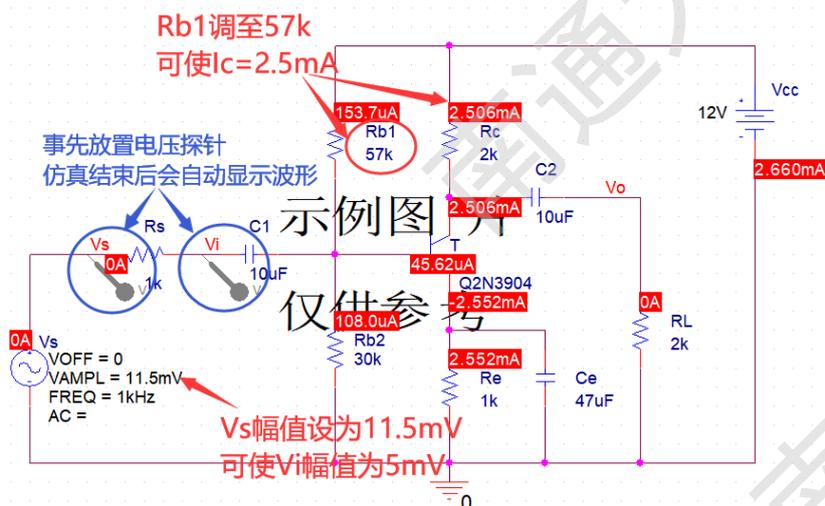


图 2.14  $I_C=2.5\text{mA}$  时的带负载仿真原理图

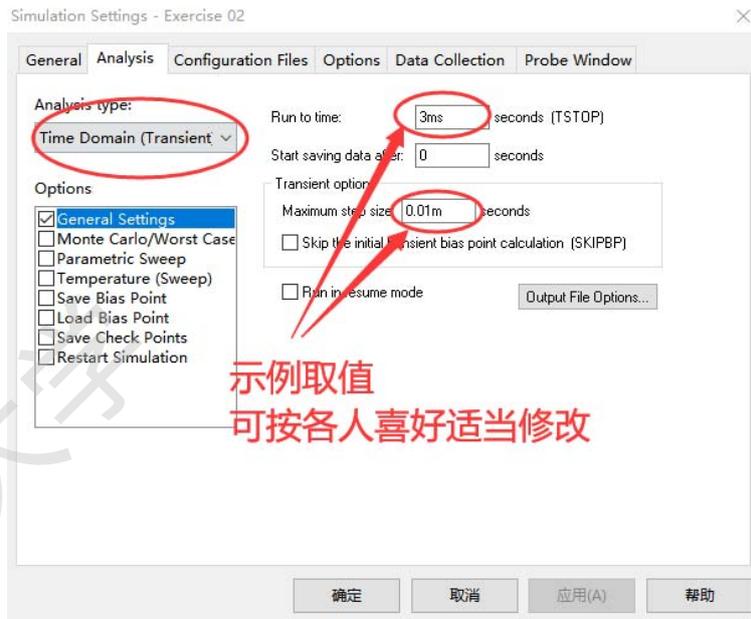


图 2.15 时域分析设置

点击  运行仿真，由于已经事先放置了电压探针，所以在弹出的 Pspice A/D 界面会自动显示  $V_s$  和  $V_i$  这两个波形。分别激活两个波形的 cursor 光标，找到最大值点，并标注，观察  $V_i$  的幅值是否满足实验要求的 5mV，如图 2.16。

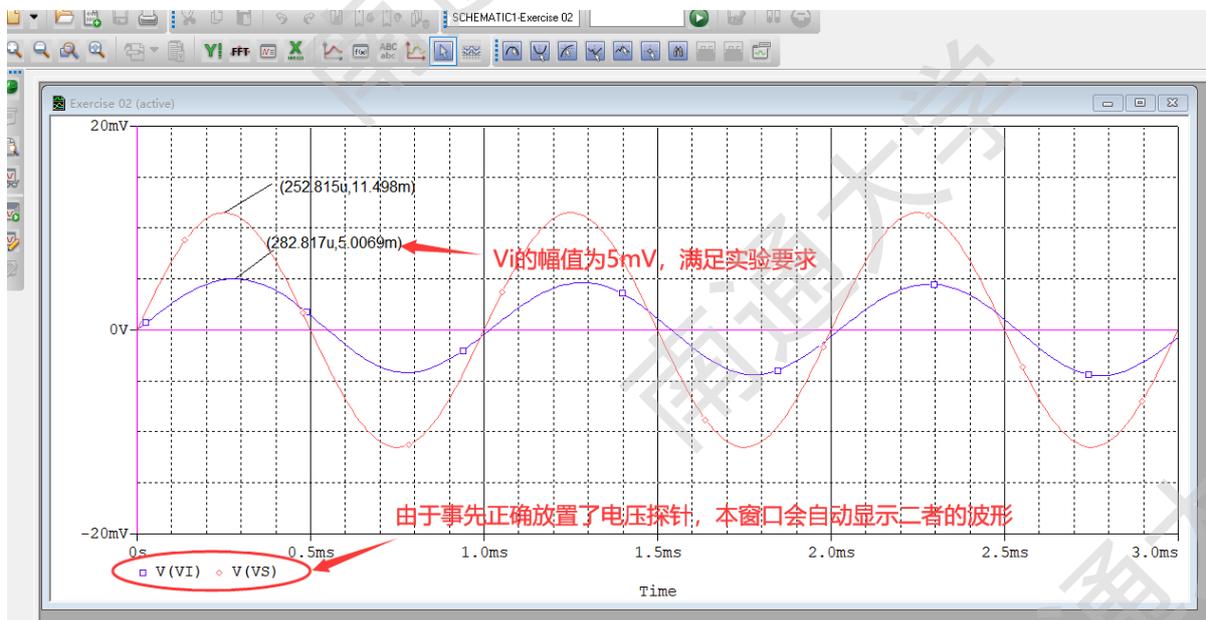


图 2.16  $V_s$  和  $V_i$  波形示例

留在图 2.16 的界面，点击菜单栏中的 Plot→Add Plot to Window，添加一个坐标系，如图 2.17。

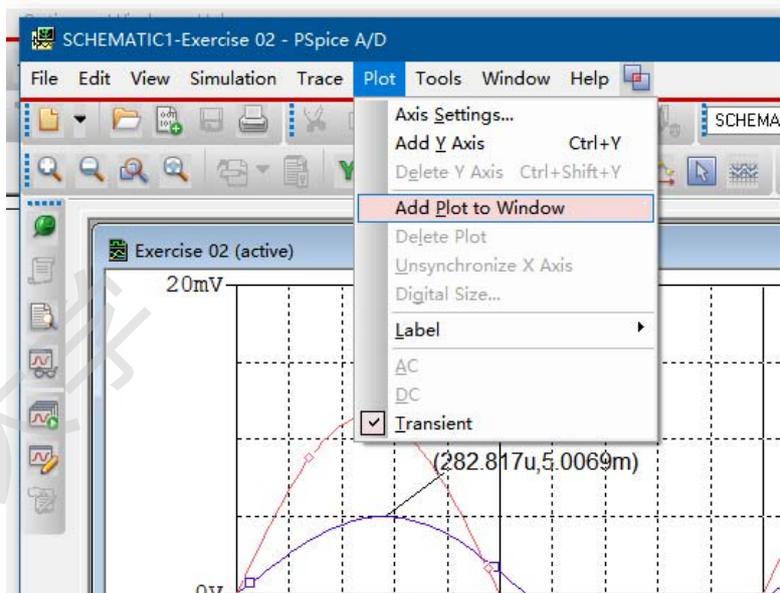


图 2.17 Plot 添加方式

出现新坐标系的界面，点击  在新坐标中添加  $V_o$  的曲线，找到最大值，并标注，如图 2.18。

图中读到的三个电压的幅值都要记录在表 2.1 中的相应位置。

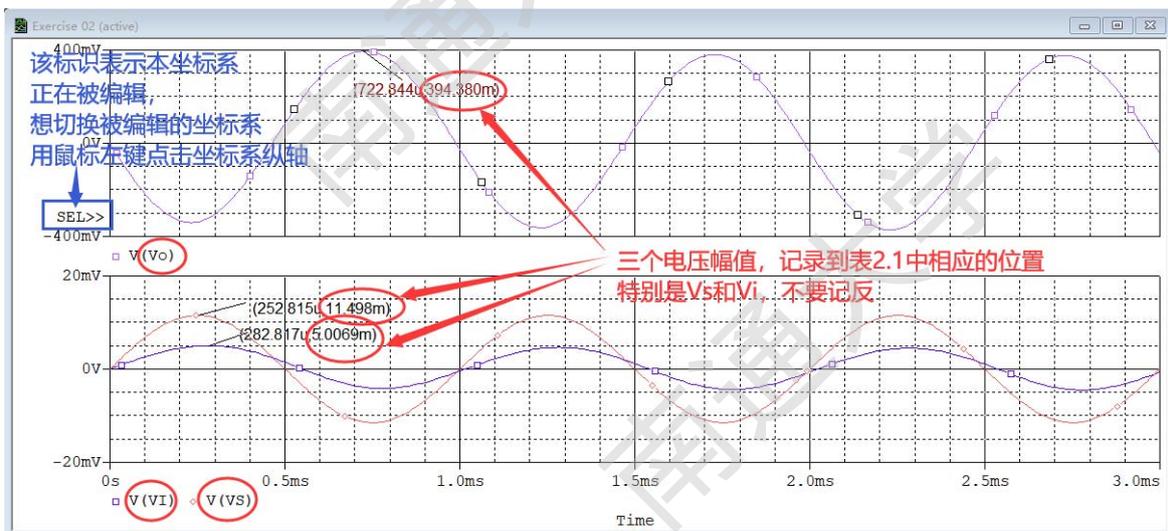


图 2.18  $I_C=2.5\text{mA}$  时的  $V_s$ 、 $V_i$  和  $V_o$  波形

接下来测空载电压  $V_o'$  的最大值  $V_{om}'$ ，将图 2.14 中的负载  $R_L$  改为一个较大的数值，如  $100\text{M}\Omega$

(Orcad 虽然提供了 Place no connect  允许开路，但实际无效，所以只能用大电阻模拟开路工况)，并将  $V_o$  标识改为  $V_{o1}$  (Orcad 不识别  $V_o'$  字符)，同时放置电压探针，如图 2.19。

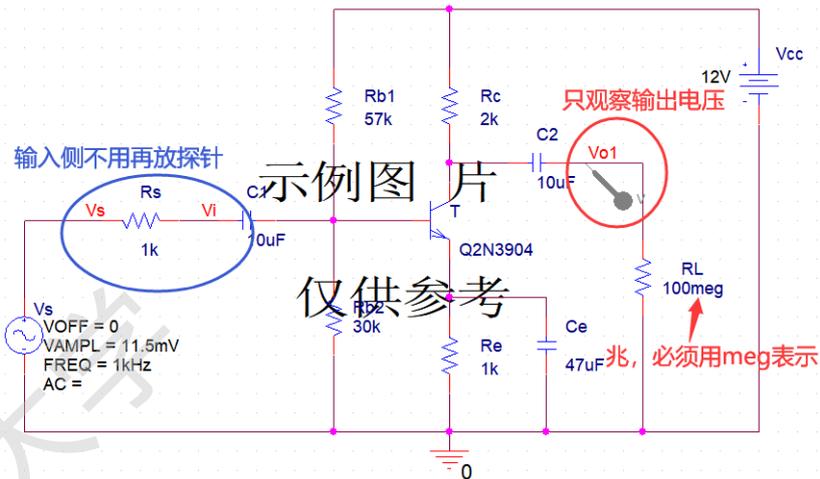


图 2.19  $I_C=2.5\text{mA}$  时的空载仿真原理图

再次运行仿真，波形自动弹出，开启光标标注最大值，并记录进表 2.1 的相应位置。如图 2.20。

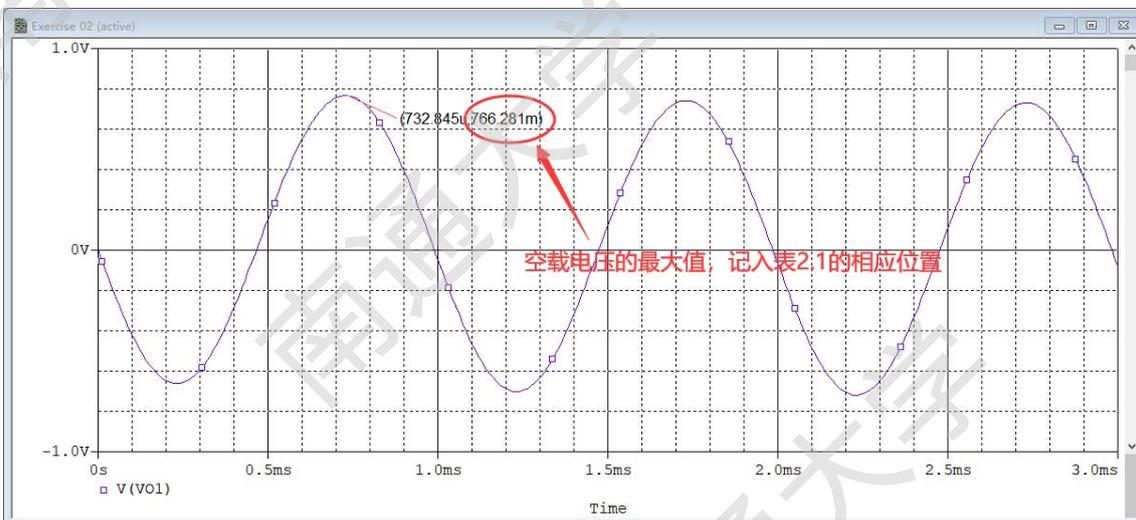


图 2.20  $I_C=2.5\text{mA}$  时的  $V'_o$  波形

至此， $I_{CQ}=2.5\text{mA}$  工况下的所需测量值均测量完毕，可以根据这些测量值计算四个交流参数了。

它们的计算公式分别为： $A_v = \frac{V_{om}}{V_{im}}$ ， $A'_v = \frac{V'_{om}}{V_{im}}$ ， $R_i = \frac{V_{im}}{V_{sm} - V_{im}} \cdot R_s$ （式中  $R_s = 1\text{k}\Omega$ ）， $R_o = \left( \frac{V'_{om}}{V_{om}} - 1 \right) \cdot R_L$

（式中  $R_L = 2\text{k}\Omega$ ）。计算出的结果记入表 2.1。

**注意：**

图 2.14，图 2.19 的仿真原理图在撰写报告时需要打印，打印要求与实验内容 1 的图 2.8 相同，标明班级\_姓名信息。其中图 2.14 需要注明是“ $I_C=2.5\text{mA}$  时的仿真原理图”，图 2.19 需注明是“ $I_C=2.5\text{mA}$  时的空载仿真原理图”。

图 2.18，图 2.20 的仿真波形图在撰写报告时也需要打印，在 Pspice 工具栏中点 **添加图注文**

本，标明班级\_姓名信息，例如“信 123 张三”。图 2.18 应标注“ $I_C=2.5\text{mA}$  时的  $V_i$ 、 $V_s$ 、 $V_o$  波形”。不要在软件仿真界面直接截图，在 Pspice A/D 界面选择 File→Printer Setup...，将打印机选为“Microsoft Print to PDF”或者“Microsoft XPS Document Writer”，最后选择 File→Print...→OK，输出为 PDF 或 XPS 格式，保留图片上方和下方的文档路径和打印日期。

表 2.1 中还有  $I_C=2\text{mA}$  和  $I_C=3\text{mA}$  两种工况需要测试。

③ 将  $R_{b1}$  的阻值改为  $73\text{k}\Omega$ ， $V_s$  的幅值改为  $10.5\text{mV}$ ，负载  $R_L$  改回至  $2\text{k}\Omega$ ，可满足  $V_{im}$  约等于  $5\text{mV}$ ， $I_C=2\text{mA}$  的要求，如图 2.21。空载原理图如图 2.22。

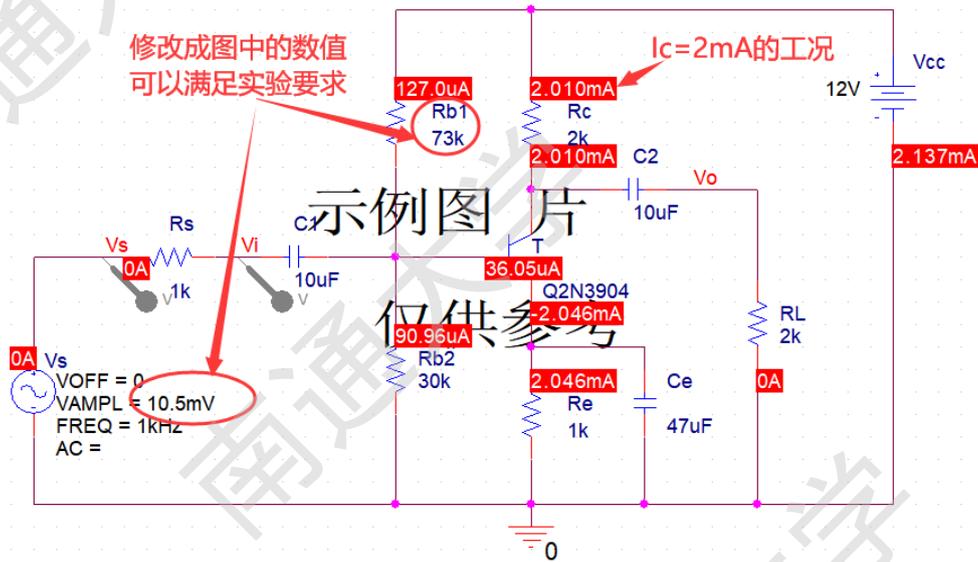


图 2.21  $I_C=2\text{mA}$  时的带负载仿真原理图

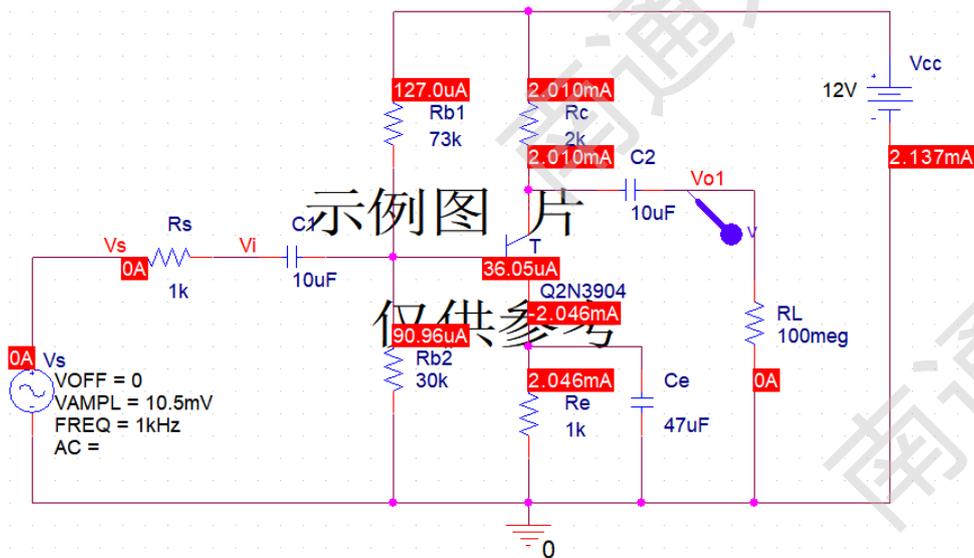


图 2.22  $I_C=2\text{mA}$  时的空载仿真原理图

重复之前的实验操作，测试带  $2\text{k}\Omega$  负载情况下的  $V_s$ 、 $V_i$  和  $V_o$  波形，以及空载时  $V_o'$  的波形，标

注最大值，如图 2.23 和图 2.24，将读数记入表 2.1 的相应位置。

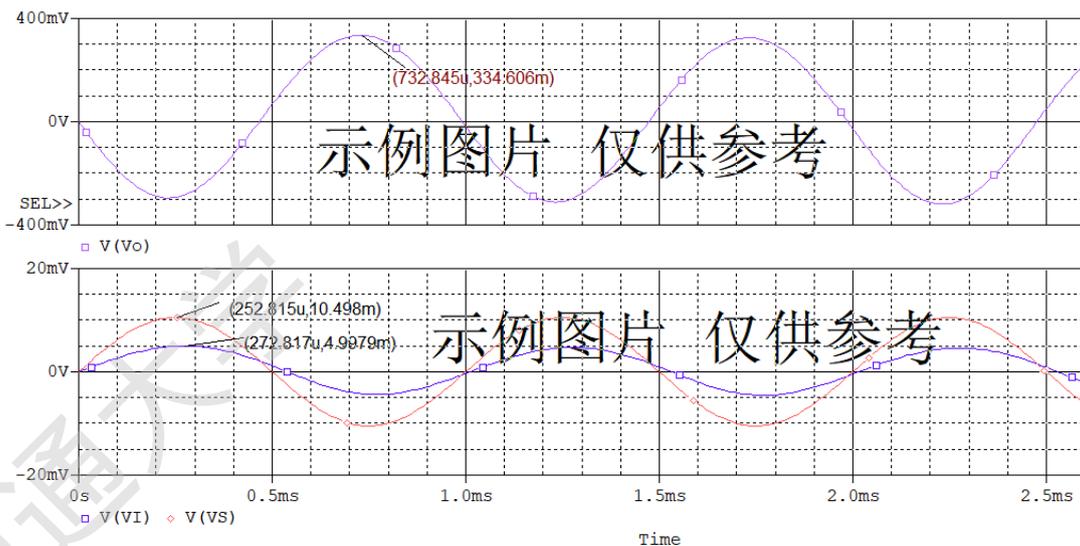


图 2.23  $I_C=2\text{mA}$  时的  $V_s$ 、 $V_i$  和  $V_o$  波形

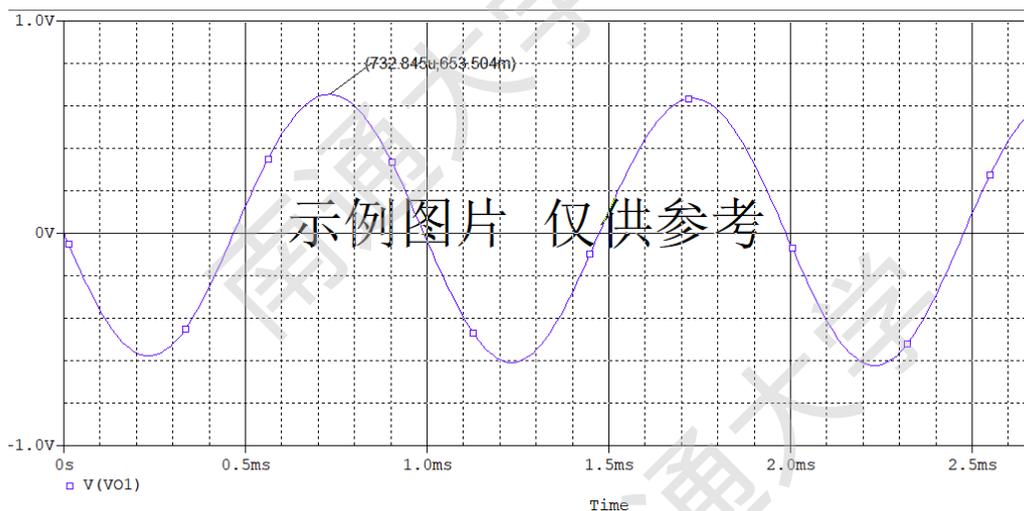


图 2.24  $I_C=2\text{mA}$  时的  $V'_o$  波形

**注意：**

图 2.21~图 2.24 在撰写报告时需打印，其中原理图的打印要求与之前的图 2.14 相同，波形图打印要求与之前的图 2.18 相同。

③ 将  $R_{b1}$  的阻值改为  $45\text{k}\Omega$ ， $V_s$  的幅值改为  $12.5\text{mV}$ ，负载  $R_L$  改回至  $2\text{k}\Omega$ ，可满足  $V_{im}$  约等于  $5\text{mV}$ ， $I_C=3\text{mA}$  的要求。再次重复之前的实验操作，测试带负载情况下的  $V_s$ 、 $V_i$  和  $V_o$  波形，以及空载时  $V'_o$  的波形，并标注最大值，将读数记入表 2.1 的相应位置。

该环节依然需要打印类似图 2.21~图 2.24 的四张图，打印要求也完全相同，这里不再给出示例图片。

## 2. 观察不同的静态工作点对输出波形的影响

### (1) 观察 $R_{b1}$ 较大时发生的非线性失真

在图 2.21 的基础上做如下修改：去掉电阻  $R_s$ ，将信号源  $V_s$  的幅值改为 30mV，将  $R_{b1}$  的阻值改为 100k $\Omega$ ，电压探针放至  $V_o$  处，如图 2.25。

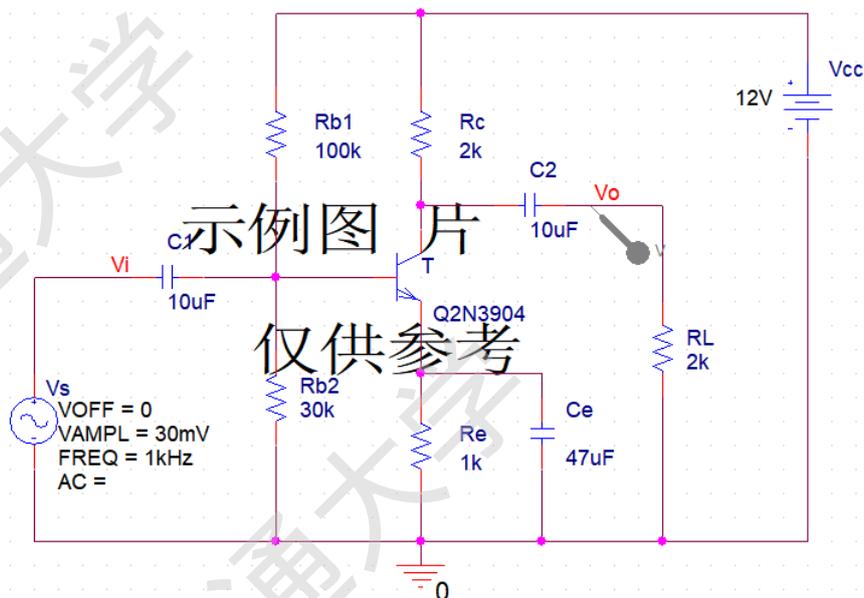


图 2.25  $R_{b1}$  较大时的仿真原理图

点击  修改仿真配置，将 Analysis type 设定为 Bias Point。运行仿真，在弹出的 Pspice A/D 界面，点击菜单栏的 View→Output File，查看三极管的静态工作点参数，如图 2.26，并根据  $I_B$ 、 $I_C$  和  $V_{CE}$  分析现在应该出现哪种失真（饱和失真还是截止失真）。

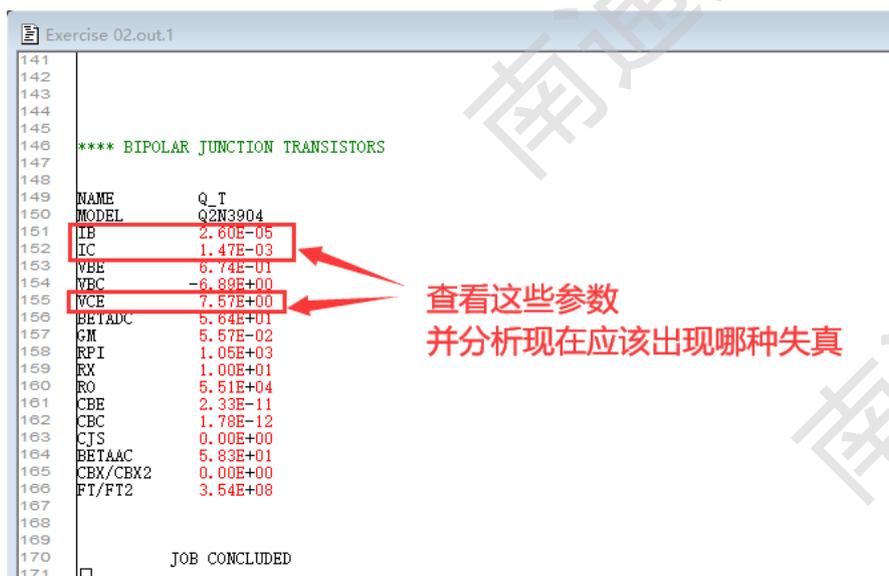


图 2.26  $R_{b1}$  较大时的静态工作点数据

关闭 Pspice A/D 界面，回到 Orcad 界面，修改仿真配置，将 Analysis type 改回 Time Domain (Transient)，运行仿真。观察输出电压  $V_o$  的波形是否与图 2.26 的分析结果相符，如图 2.27。

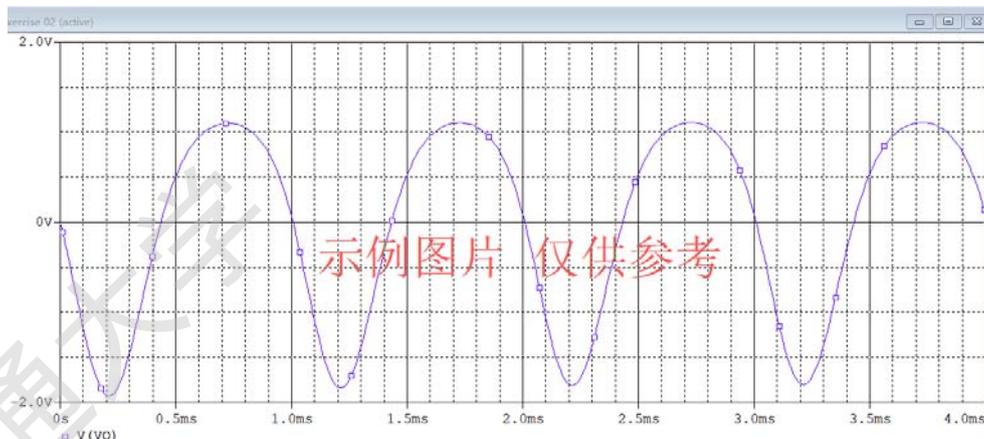


图 2.27  $R_{b1}$  较大时的  $V_o$  波形

**注意：**

仿真原理图 2.25 在撰写报告时需要打印，打印要求与图 2.8 相同。

静态工作点数据图 2.26 在撰写报告时需要打印，打印要求与图 2.12 相同。

$V_o$  波形图 2.27 在撰写报告时需要打印，打印要求与图 2.18 相同。

(2) 观察  $R_{b1}$  较小时发生的非线性失真

将图 2.25 中的  $R_{b1}$  阻值改为  $20k\Omega$ ，重复①中的实验步骤，先根据  $R_{b1}$  较小时的静态工作点数据分析应发生什么失真，再观察此时的  $V_o$  波形是否与分析结果相符。仿真原理图、静态工作点数据和  $V_o$  波形分别如图 2.28、图 2.29 和图 2.30 所示。

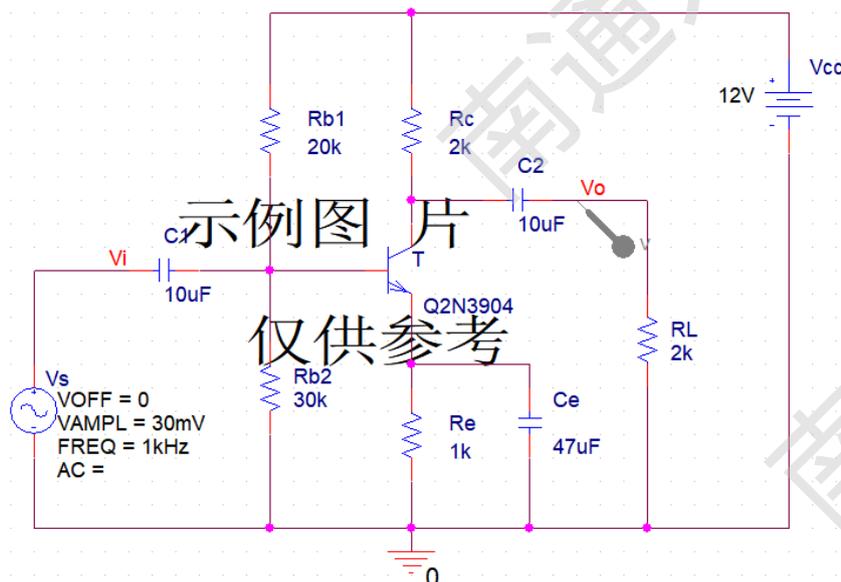


图 2.28  $R_{b1}$  较小时的仿真原理图

```

i5
i6 **** BIPOLAR JUNCTION TRANSISTORS
i7
i8
i9 NAME          Q_T
i10 MODEL        Q2N3904
i11 IB           2.00E-04
i12 IC           3.90E-03
i13 VBE          7.06E-01
i14 VBC          6.01E-01
i15 VCE          1.05E-01
i16 BETADC       1.95E+01
i17 GM           3.45E+02
i18 RPI          3.45E+02
i19 RX           1.00E+01
i20 RO           3.06E+02
i21 CBE          5.18E-11
i22 CBC          8.29E-10
i23 CJS          0.00E+00
i24 BETAAC       5.02E+01
i25 CBX/CBX2     0.00E+00
i26 FT/FT2      2.65E+07
i27
i28

```

图 2.29  $R_{b1}$  较小时的静态工作点数据

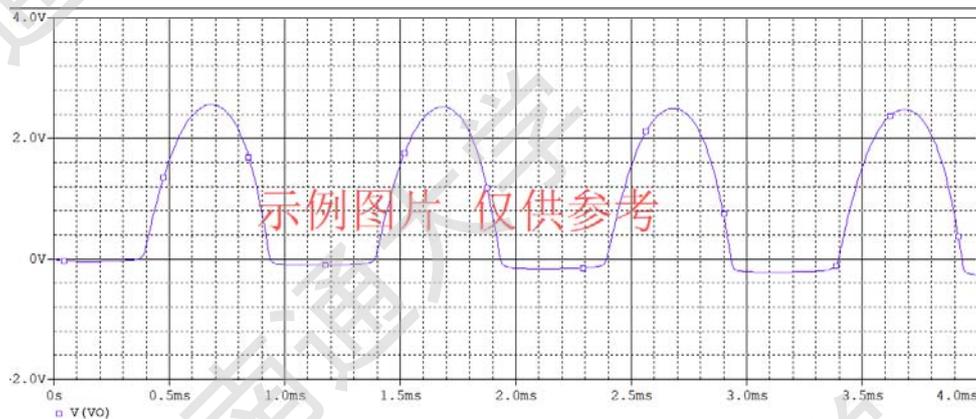


图 2.30  $R_{b1}$  较小时的  $V_o$  波形

**注意：**

仿真原理图 2.28 在撰写报告时需要打印，打印要求与图 2.8 相同。

静态工作点数据图 2.29 在撰写报告时需要打印，打印要求与图 2.12 相同。

$V_o$  波形图 2.30 在撰写报告时需要打印，打印要求与图 2.18 相同。

**四、报告要求**

1. 通过 Cadence OrCAD 软件，根据实验内容中的要求绘制并打印电路原理图和仿真波形图。
2. 整理实验数据，完成表 2.1，比较  $A_v$ 、 $A'_v$ 、 $R_i$  和  $R_o$  的理论值与测量值（表 2.1 中的计算值），并分析。
3. 讨论静态工作点变化对放大电路性能（失真、 $R_i$ 、 $A_v$  等）的影响。

**五、思考题**

1. 如果将实验中的 NPN 管换成 PNP 管，电路要做哪些改动才能正常工作？
2. 实验中若基极偏置电阻  $R_{b1}$  和  $R_{b2}$  的取值过小，会对电路的动态指标产生什么影响？