

华中科技大学  
人工智能与自动化学院

# BJT 放大电路仿真

彭杨哲

U201914634

2021 年 5 月 14 日

## 1 实验目的

- 掌握三极管 (BJT) 单极共射放大电路静态工作点的测量和调整方法
- 了解电路参数变化对静态工作点的影响
- 学习通频带的测量方法
- 用 PSpice 仿真软件对 BJT 单极共射放大电路进行分析

## 2 实验原理

### 2.1 参考电路

实验参考电路如图1所示. 该电路采用自动稳定静态工作点的分压式射级偏置电路, 其温度稳定性好. 电位器为调整静态工作点而设.

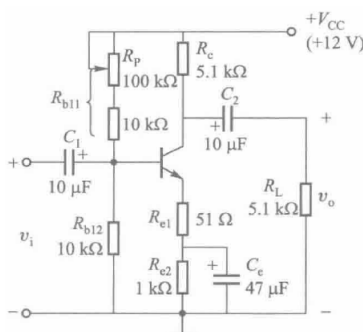


Figure 1: 参考电路

### 2.2 静态工作点的估算与调整

静态工作点是指输入交流信号为零时三极管的基级电流  $I_{BQ}$ , 集电极电流  $I_{CQ}$  和管压降  $V_{CEQ}$ .

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的中点. 若工作点选得太高, 易引起饱和失真, 而选得太低, 又易引起截止失真, 对于线性放大电路, 这两种工作点都是不合适的, 必须对其进行调整。

图1所示电路的直流通路如图2所示. 其开路电压  $V_{BB}$  和内阻  $R_b$  分别为

$$V_{BB} = \frac{R_{b12}}{R_{b11} + R_{b12}} V_{CC}$$

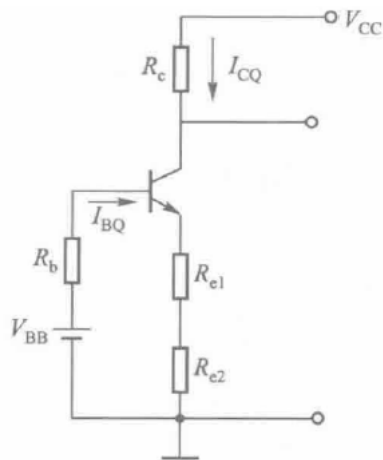


Figure 2: 图1所示电路的直流通路

$$R_b = R_{b11} // R_{b12}$$

则

$$I_{BQ} = \frac{V_{BB} - V_{BEQ}}{R_b + (1 + \beta)(R_{e1} + R_{e2})}$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ}$$

$$V_{CEQ} \approx V_{CC} - (R_c + R_{e1} + R_{e2})I_{CQ}$$

由以上表达式可见，静态工作点与电路参数  $V_{CC}$ 、 $R_c$ 、 $R_{e1}$ 、 $R_{e2}$ 、 $R_{b11}$ 、 $R_{b12}$  及三极管的  $\beta$  都有关。当电路参数确定之后，工作点的调整一般是通过调节电位器  $R_p$  来实现的。 $R_p$  调小，工作点增高； $R_p$  调大，工作点降低。当然，如果输入信号过大，使三极管工作在非线性区，即使静态工作点选在交流负载线的中点，输出电压波形仍可能出现双向失真。

在实验中，如果测得  $V_{CEQ} = 0.5V$ ，说明三极管已饱和；如测得  $V_{CEQ} \approx V_{CC}$ ，则说明三极管已截止。但测量电流。但测量电流  $I_{CQ}$  时要注意。如果直接测电流，需断开集电极回路，比较麻烦，所以常采用测量电压来换算电流的方法，即：先测出发射极对地电压  $V_E$ ，再利用公式  $I_{CQ} \approx I_{EQ} = \frac{V_E}{R_e}$ ，算出  $I_{CQ}$ 。此法虽简便，但测量精度稍差，需选用内阻较高的电压表。

## 2.3 放大电路电压增益的测量

需要强调的是，测量电压增益，输入电阻，输出电阻等指标时，必须保证信号不失真，并在中频区（例如  $f=1kHz$ ）

放大电路电压增益  $A_v$  是指输出电压与输入电压的有效值（或者峰峰值）

之比, 即

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{V_{op-p}}{V_{ip-p}}$$

对图1电路所示参数, 放大电路的电压增益  $\dot{A}_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = -\frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)R_{e1}}$

## 2.4 输入电阻的测量

输入电阻越大, 索取前级电流越小, 对前级的影响就越小. 对图1电路所示参数, 放大电路的输入电阻和三极管输入电阻  $r_{be}$  分别为

$$R_i = R_{b11} // R_{b12} // [r_{be} + (1 + \beta)R_{e1}]$$

$$r_{be} = 200 + (1 + \beta) \frac{26(mV)}{I_{CQ}(mA)}$$

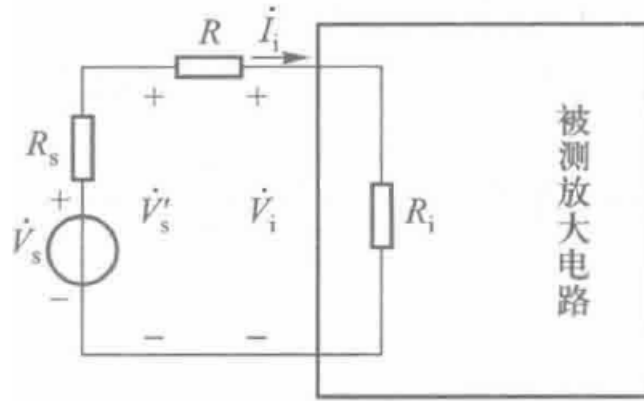


Figure 3: 测试输入电阻原理图

输入电阻的测量原理电路如图12所示. 在信号源和放大电路之间串入一个已知阻值的电阻  $R$ , 用示波器分别测出  $R$  两端对“地”的电压  $V_s'$  和  $V_i$ , 则输入电阻为

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{V_i}{(V_s' - V_i)/R} = \frac{V_i}{V_s' - V_i} R$$

电阻  $R$  的阻值不宜取得过大, 过大易引入干扰, 但也不宜取得太小, 太小容易引起较大的测量误差, 当  $R = R_i$  时, 测量误差最小

## 2.5 输出电阻的测量

输出电阻越大, 带负载能力越强图1所示电路的输出电阻近似等于集电极电阻  $R_c$ , 几乎与  $I_{CQ}$  无关, 即  $R_o \approx R_c$

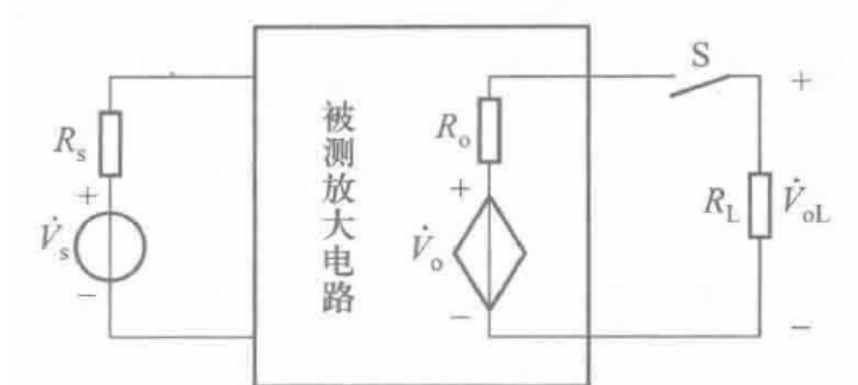


Figure 4: 测试输出电阻原理图

输出电阻的测量原理电阻如图13所示. 用在保证信号不失真时, 用示波器分别测量放大器的开路电压  $V_o$  和负载上的电压  $V_{oL}$ , 则输出电阻  $R_o$  可通过计算求得

$$V_{oL} = \frac{V_o}{R_o + R_L} \cdot R_L$$

$$R_o = \frac{V_o - V_{oL}}{V_{oL}} \cdot R_L$$

当  $R_L = R_o$  时, 测量误差最小

## 2.6 幅频特性的测量

放大器的幅频特性是指放大器的增益与输入信号频率之间的关系曲线. 一般用逐点法进行测量. 在保证输入信号赋值不变的情况下, 改变输入信号的频率, 逐点测量出不同频率点的电压增益. 利用各点数据, 在单对数坐标纸上描绘出幅频特性曲线. 通常将电压增益下降到中频电压增益的 0.707 倍时所对应的频率称为该放大电路上限, 下限截止频率, 分别用  $f_H$  和  $f_L$  表示, 则该放大电路的通频带为

$$BW = f_H - f_L \approx f_H$$

## 2.7 电路仿真的一般流程

使用 Pspice 软件对电路进行仿真分析的一般流程如图5所示. 说明如下:

1. 新建仿真设计项目。新建仿真设计项目。OrCAD 软件包对电路设计任务按照项目 (Project ) 进行管理。在 Capture 窗门中, 通过执行菜单

命令 File|New|Project 新建一个仿真设计项目（最好新建一个子目录，将新设计项目存入该子目录）。

2. 绘制电路图。在打开的电路图页面上，通过选择 Place 菜单下的子命令，将元器件从库中调出放置在电路页面上，并绘制电路连线。
3. 编辑修改电路元器件标号和参数值，包括直流电源和信号源参数。主要通过选择 Edit|Properties 来完成标号和参数编辑修改（双击元件符号也可打开属性编辑窗）。有源器件参数通过 Edit|Pspice Model 来修改。
4. 创建仿真简要表，设置分析类型和参数。在 Capture 窗口中，选择 PSpice|New Simulation Profile 命令创建一个仿真分析简要表，选择分析类型并设置有关参数。PSpice 将根据简要表中的分析要求进行仿真。当需要进行多个不同分析要求的仿真时，则为每一个分析要求创建一个简要表。
5. 运行 PSpice 仿真程序。在项目管理器窗口中，用鼠标右键单击欲仿真的简要表，然后选择右键菜单 PSpice|Simulate Selected Profile(s)，则开始进行电路连接规则检查和建立网络表文件。然后自动调用 PSpice A/D 程序，并打开其窗口按照简要表的要求进行仿真分析。分析过程能自动报错。分析结果按照 ASCII 码形式存入以.out 为扩展名的文本文件和以.dat 为扩展名的波形数据文件中（也可以选择菜单命令 PSpice|Run 或相应的快捷按钮，对当前处于活动状态的简要表进行仿真）。
6. 仿真结果分析及输出。在 PSpice A/D 窗口中，调用后处理程序 Probe 显示仿真结果。这些结果（文本或波形曲线）也可以复制、粘贴到其他文件中，还可以由打印机打印输出。通常完成仿真后会自动调用 Probe，如果没有出现，用户可以在 Capture 窗口中选择 PSpice | Edit Simulation Profile 命令，在弹出的 Simulation Settings 对话框中选择 Probe Window 标签页，选中 Display Probe window 该项即可。

## 3 实验内容

### 3.1 模拟参数设置

1. 创建工程项目文件
2. 画原理图

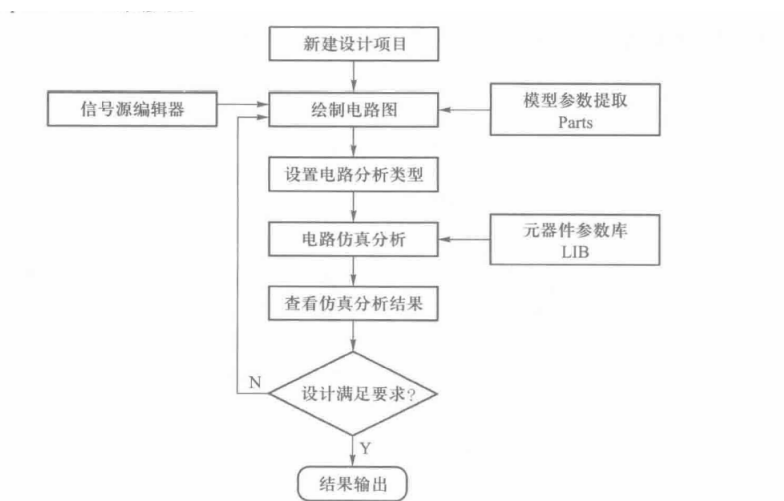


Figure 5: 电路仿真设计的一般流程

- (a) 调用元件
- (b) 元件移动、旋转和删除
- (c) 画线
- (d) 修改元器件标号和参数

### 3. 设置仿真分析类型

- (a) 静态工作点分析

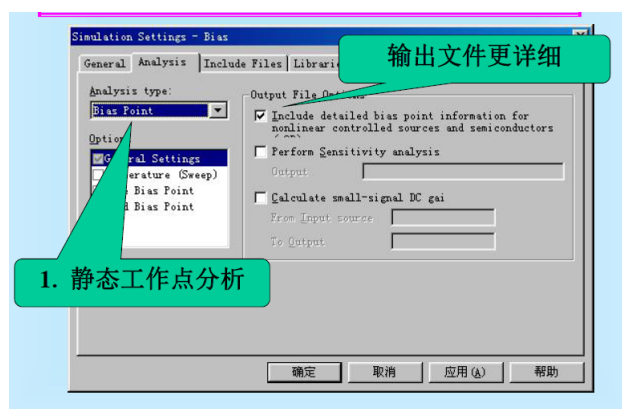


Figure 6: 静态工作点仿真设置

- (b) 瞬态分析（时域分析）
- (c) 交流小信号分析（频域分析）



Figure 7: 时域与频域仿真设置

4. 保存与自动检查
5. 仿真-文本结果

### 3.2 单管共射电路设计

1. 在 Schematics 中画出已设计好的电路图
2. 测量静态工作点:  $I_B, I_C, V_{BE}, V_{CE}$  (out 文件)
3. 观测输入, 输出电压波形, 并计算电压增益  $A_V$
4. 分别观测中频增益, 上限频率和下限频率的幅频响应曲线:  $\text{db}(V(V_o)/V(V_{s: +}))$  和相频响应曲线:  $V_p(V_o) - V(V_{s: +})$
5. 观测输入电阻的频率响应:  $R_i - V(V_i)/I(V_s)$
6. 观测输出电阻的频率响应:  $R_o - V(V_o)/I(V_s)$
7. 观察非线性失真现象

## 4 实验结果及分析

### 4.1 实验结果

1. 设计的电路图连线  
如图8, 实际
2. 测量静态工作点  
如图9, 可得出结果如表1



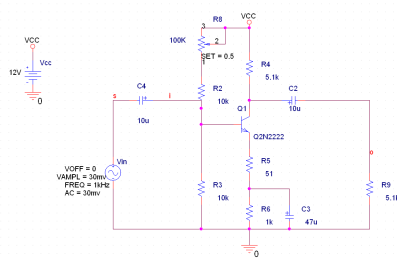


Figure 8: 仿真电路图连线

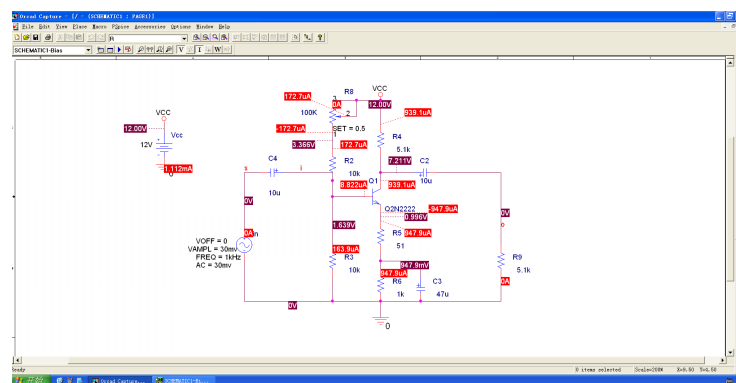


Figure 9: 测量静态工作点

### 3. 输入输出电压波形

如图10, 由图中数据, 可以计算出  $A_v = -32.143$

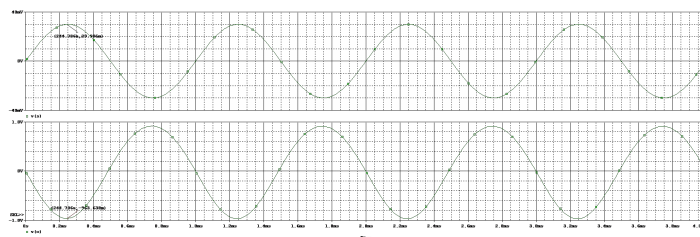


Figure 10: 输入输出波形

#### 4. 幅频响应与相频响应

如图11, 同时可以得到通频带为  $15.445MHz$

### 5. 输入电阻的频率响应

如图12

## 6. 输出电阻的频率响应

$I_B$	$I_C$	$V_{BE}$	$V_{CE}$
8.822uA	939.1uA	0.643V	6.215

Table 1: 静态工作点仿真结果

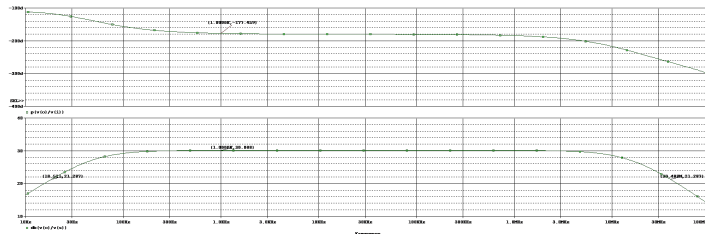


Figure 11: 幅频响应和相频响应

如图13

#### 7. 观察非线性失真现象

饱和失真如图14(b), 截止失真如图14(a)

## 4.2 实验结果分析

### 1. 理论计算

$$V_{BB} = 1.7143V$$

$$R_b = 8571\Omega$$

$$I_{BQ} = 0.00647mA$$

$$I_{CQ} = 0.9123mA$$

$$V_{CEQ} = 6.388V$$

$$A_v = -34.729$$

$$R_i = 4689\Omega$$

$$R_o = 5.1k\Omega$$

### 2. 结果对比

将理论计算结果与模拟的结果进行比较, 可以计算得出相对误差为:

$$e_r(V_{CEQ}) = \frac{6.388 - 6.215}{6.215} = 2.7\%$$

$$e_r(I_{CQ}) = \frac{0.9391 - 0.9123}{0.9391} = 2.8\%$$

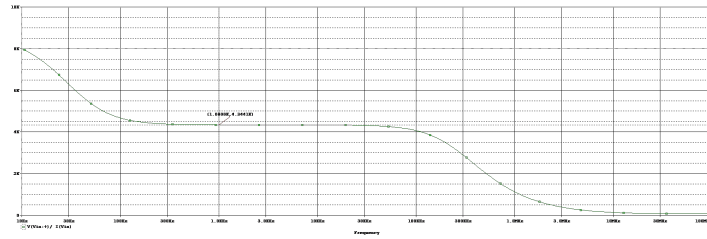


Figure 12: 输入电阻

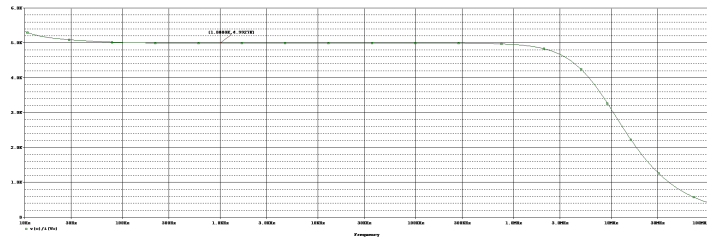


Figure 13: 输出电阻

$$e_r(A_v) = \frac{34.729 - 32.143}{32.143} = 8.0\%$$

$$e_r(R_i) = \frac{4689 - 4344.1}{4344.1} = 7.9\%$$

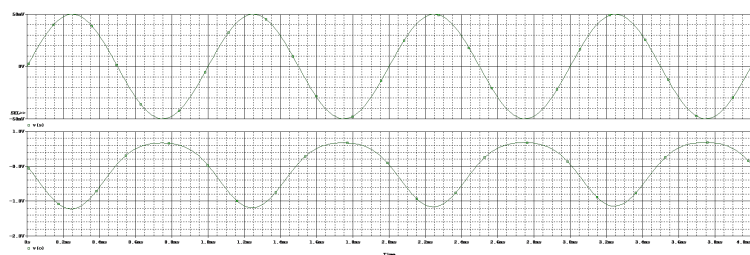
$$e_r(R_o) = \frac{5100 - 4992.7}{4992.7} = 2.1\%$$

### 3. 分析

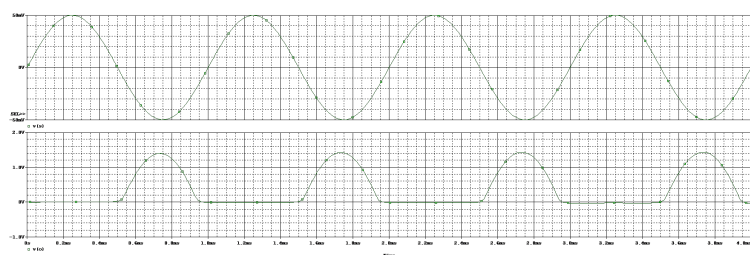
由相对误差可以看出, 理论计算值与实际仿真值仍然存在着一一定的误差, 推测应该是在理论计算的过程中进行了诸多的近似处理, 如输出电阻计算时, 直接近似约等于  $R_c$ , 显而易见, 近似过程会引入误差. 同时, 与实际插板的结果进行比较, 可以发现, 实际插板中的误差一部分也是由与理论计算过程中的近似处理引入的, 所以可以看出插板的误差尚处于可接受范围内.

## 5 小结

通过此次实验, 我学习了经典模拟电子技术的仿真软件 PSPICE 的使用, 最关键的是学会了如何使用该软件进行电路工作参数的仿真测量, 也见识到了电路仿真软件的强大之处.



(a) 截止失真



(b) 饱和失真

Figure 14: 非线性失真现象

## 6 实验中出现的問題，分析及解决方案

在本次实验过程中，我收集了一些常見的問題，小結如下：

- 电路连接时不能出现错误，如电解电容的方向不能接反，连接线路时要尤其注意不能使线直接从元件内穿过（尤为重要，很难排查出来，必须关注!!!），电路的参数要设置正确，三极管等元件要注意更改其参数。信号源的设置要正确，在本实验中信号源的幅值不能设置得太大，不然极易出现失真的情况。
- 仿真参数的设置要正确，不要随意更改仿真参数，如交流扫描时的起始频率就不能从 1Hz 开始，而应从 10Hz 开始，不然也会导致仿真结果波形不正确