

实验 4 BJT 放大器设计与测试

一、实验目的

- 1、了解 BJT 管的基本放大特性。
- 2、掌握 BJT 共射放大电路的分析与设计方法。
- 3、掌握放大电路静态工作点的测试方法。
- 4、掌握放大电路放大倍数（增益）的测试方法。
- 5、掌握放大电路输入、输出电阻的测试方法。
- 6、掌握放大电路幅频特性曲线的测试方法。

二、预习要求

- 1、自学 BJT 管的特性。
- 2、学习 BJT 放大电路的分析方法。
- 3、根据设计任务，设计共射放大器并完成 Multisim 仿真，进实验室前必须完成电路的设计以及电路的搭建。
- 4、放大器输入、输出电阻的物理意义以及测试方案。
- 5、放大电路幅频特性曲线测试方法。
- 6、了解有极性电解电容的使用规则。

三、实验设备及元器件准备

- 1、函数发生器一台
- 2、晶体管毫伏表一台
- 3、示波器一台
- 4、三极管、电阻、电容、导线若干
- 5、面包板一个

四、实验原理

晶体三极管中有两种带有不同极性电荷的载流子参与导电，故称之为双极型晶体管（Bipolar Junction Transistor，简称 BJT），BJT 引出的三个电极分别为基极 b、发射极 e 和集电极 c。BJT 分为 NPN 型管、PNP 型管，其电路符号如图 4-1 所示。



图 4-1 BJT 管符号

使 BJT 管工作在放大状态的外部条件是发射结正向偏置且集电结反向偏置。因此对于 NPN 管工作在放大时，三个电极的电压关系应该满足 $V_C > V_B > V_E$ ；而对于 PNP 管工作在放大时，三个电极的电压关系应该满足 $V_E > V_B > V_C$ 。

三极管在应用中，往往将一个电极作输入端，一个电极作输出端，第三个电极作公共端，即将其作为双口器件来使用。BJT 作为双口器件有实用意义的使用方法有以基极作输入端，集电极作输出端的共射（CE）接法，以发射极作输入端集电极作输出端的共基（CB）接法和以基极作输入端，发射极作输出端的共集（CC）接法。

1、共射放大器原理

共射放大器是晶体管放大电路中常用的一种基本放大电路，它能把频率为几十赫兹到几百千赫兹的信号进行不失真放大。采用基极分压射极偏置电路的共射放大器如图 4-2 所示，其对应的直流通路如图 4-3 所示。

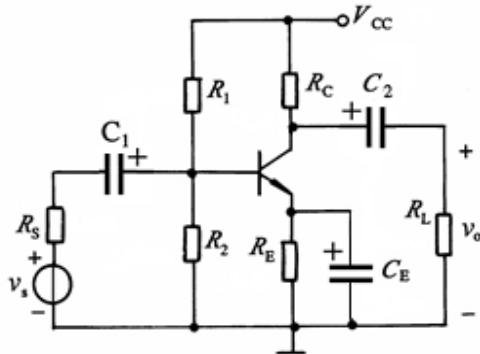


图 4-2 电容耦合共射级放大器

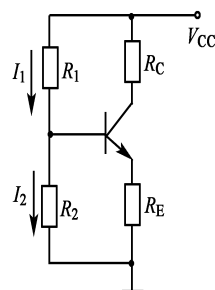


图 4-3 基极分压射极偏置电路

图 4-2 所示的偏置电路称为基极分压射极偏置电路，是一种可以稳定工作点的电路。该电路满足 $I_1, I_2 \gg I_B$ 时，基极电位 V_B 只由 V_{CC} 、 R_1 和 R_2 决定，与 BJT 参数无关。由于 V_{CC} 、 R_1 和 R_2 对温度均不敏感，所以 V_B 稳定。当某种原因（如温度增加，电源电压增加或更换 β 更大的 BJT）使得工作点的 I_C 增加时，则电路依靠直流负反馈的作用，可以抑制 I_C 的增加，使得工作点稳定。

满足 $I_1, I_2 \gg I_B$ ，使得基极电位 V_B 稳定是基极分压射极偏置电路能够稳定工作点的条件。又由理论分析计算可知： $I_1, I_2 \gg I_B$ 或 $(1+\beta)R_E \gg R_B$ 是等价的，在工程上将 $\beta R_E > 10R_B$ 作为基极分压射极偏置的稳定偏置条件，并按此条件来选取基极偏置电阻 R_1 、 R_2 和射极偏置电阻 R_E 的值。

分析放大电路时，可以用直流通路求解静态工作点，交流通路求解放大器的性能指标。

直流通路：当放大器未加输入信号（ $v_i=0$ ），即电路处于静态时，直流电流流经的电路称为放大器的直流通路。直流通路其实就是建立放大器工作点的电路。画直流通路时应将电容开路、电感短路。

交流通路：信号输入放大器以后，晶体管和一些元件上的电流电压会在直流电流电压上叠加交流电流电压成分（即信号成分），故可以画出一个只反映放大器交流电流和交流电压之间关系的电路，这称为交流通路或交流电路。画交流通路时，恒压源、耦合电容以及旁路电容应该短路，而恒流源以及高频扼流圈应该开路。

（1）工作点估算

在图 4-3 的直流通路中，因为 $I_1、I_2 \gg I_B$ ，即忽略 I_B ，则 $I_1=I_2$ ，由分压可知基极电压 V_B 为：

$$V_B \approx \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2} R_2 \quad (4.1)$$

又由于发射结正向偏置，可知基极电压与发射极之间电压差为 PN 的正向电压 V_{BE} ，对于 Si 管 $V_{BE} \approx 0.7V$ ，Ge 管 $V_{BE} \approx 0.3V$ ，可求得：

$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{V_B - V_{BE}}{R_E} \quad (4.2)$$

工程估算时有， $I_C \approx I_E$ ，故有：

$$V_{CE} \approx V_{CC} - (R_C + R_E) I_C \quad (4.3)$$

（2）交流指标的计算

图 4-2 放大电路的交流小信号等效电路如图 4-4 所示，由交流小信号等效电路可以该共射放大器的交流指标。

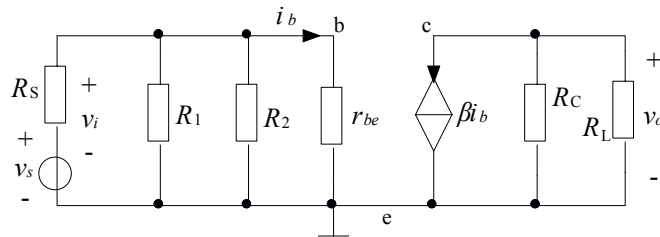


图 4-4 共射放大器交流小信号等效电路

电压增益 A_v ：

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} \approx \frac{-\beta(R_C // R_L)}{r_{be}} \quad (4.4)$$

输入电阻 R_i ：

$$R_i = R_1 // R_2 // r_{be} \quad (4.5)$$

其中, $r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{V_T}{I_{EQ}}$, 室温 (300k) 时, $V_T \approx 26\text{mV}$ 。

输出电阻 R_o :

$$R_o \approx R_C \quad (4.6)$$

(3) 动态范围分析

动态范围分析即放大器线性工作时最大输出电压分析, 当输入信号的振幅不断增大时, BJT 会进入截止区或饱和区。BJT 不会进入截止区或饱和区的最大输出电压即放大器的动态范围可以借助负载线来分析。

直流负载线就是放大器静态时由 V_{CE} 和 I_C 满足的直线方程, 即由式 (4.3) 方程确定的直线。

交流负载线是放大器工作时动点 (v_{CE}, i_C) 的运动轨迹, 交流负载线画法是经过 Q 点, 斜

率为 $-\frac{1}{R_C // R_L}$ 的直线。

由图 4-5 可知: 最大不截止失真的输出电压 $V_{om(cut)} = (R_C // R_L) I_C$, 最大不饱和失真的输出电压 $V_{om(sat)} = V_{CE} - V_{CES} \approx V_{CE}$, 放大器的最大输出电压即动态范围为:

$$V_{om} = \min(V_{om(cut)}, V_{om(sat)})$$

当放大器的工作点选的太低, 或太高时, 放大器将不能对输入信号实施正常的放大而产生失真。

① 截止失真

图 4-6 所示为工作点太低的情况, 由图 4-6 可见, 当工作点太低时, 放大器能对输入的正半周信号实施正常的放大, 而当输入信号为负半

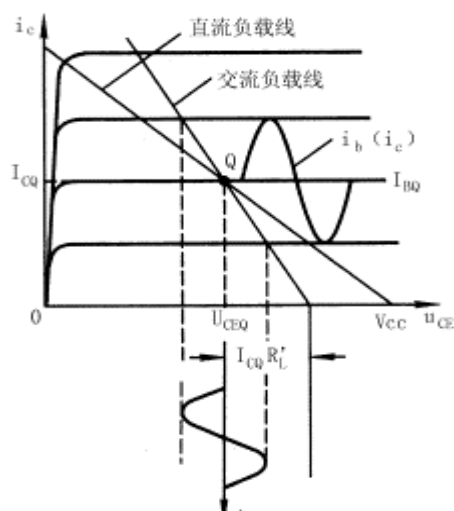


图 4-5 负载线法放大器动态分析

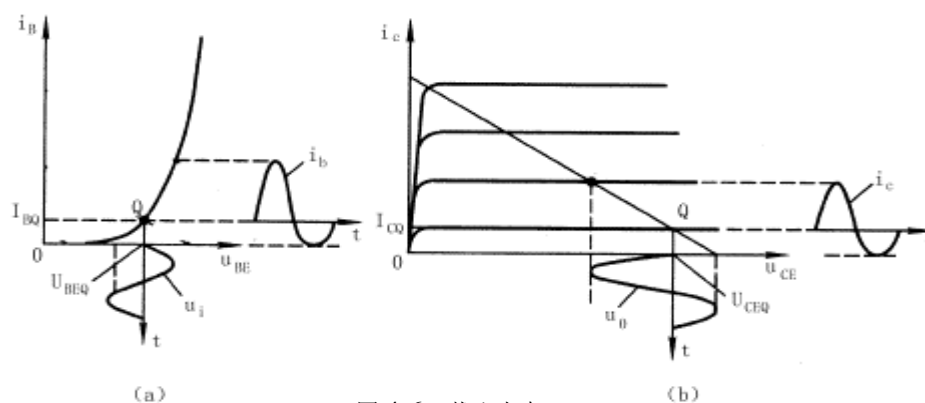


图 4-6 截止失真

周时，因 v_{BE} 将小于三极管的开启电压，三极管将进入截止区，输出电压将不随输入信号而变化，产生输出波形的失真。这种失真是因工作点取的太低，输入负半周信号时，三极管进入截止区而产生的失真，所以称为截止失真。

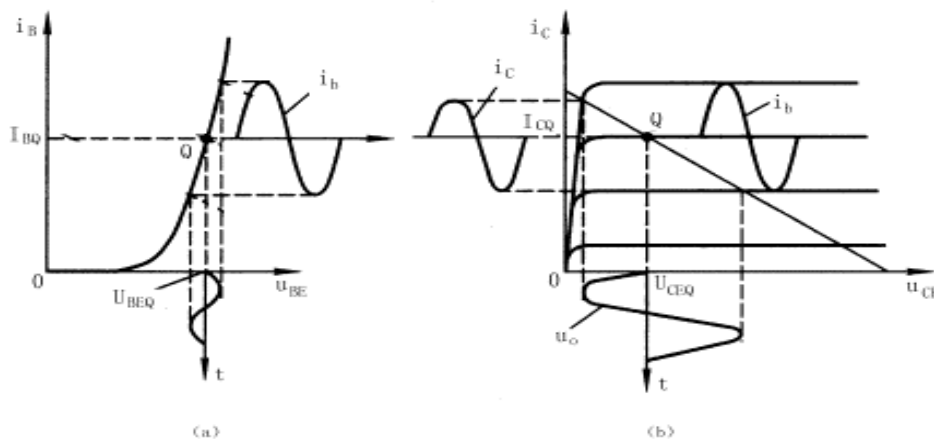


图 4-7 饱和和失真

② 饱和失真

图 4-7 所示为工作点太高的情况，由图 4-7 可见，当工作点太高时，放大器能对输入的负半周信号实施正常的放大，而当输入信号为正半周时，因 v_{BE} 太大了，使三极管进入饱和区， $i_c \approx \beta i_b$ 的关系将不成立，输出电流将不随输入电流而变化，输出电压也不随输入信号而变化，产生输出波形的失真。

这种失真是因工作点取的太高，输入正半周信号时，三极管进入饱和区而产生的失真，所以称为饱和失真。

电压放大器工作时应防止饱和失真和截止失真的现象，当饱和失真或截止失真出现时，应消除它，改变工作点的设置就可以消除失真。在消除失真之前必须从输出信号来判断放大器产生了什么类型的失真，判断的方法是：对由 NPN 管子组成的电压放大器，当输出信号的负半周产生失真时，因共发射极电压放大器的输出和输入倒相，说明是输入信号为正半周时电路产生了失真。输入的正半周信号与静态工作点电压相加，将使放大器的工作点进入饱和区，所以，这种情况的失真为饱和失真，消除的办法是降低静态工作点。当输出信号的正半周产生失真时，说明输入信号为负半周时电路产生了失真，输入负半周信号与静态工作点电压相减，将使放大器的工作点进入截止区，所以，这种情况的失真为截止失真，消除的办法是提高电路静态工作点的数值。

2、电路设计要点

(1) 设置放大器的静态工作点并计算、确定电阻元件的参数

发射结正偏，极电结反偏是三极管构成放大电路的前提条件，因此必须首先设置好电路的直流工作状态，即静态工作点 Q。在设计小信号放大电路时，一般取 $I_C=0.5mA\sim 2mA$ ，将 Q 点设置在交流负载线的中间位置是最为理想的。实际工作中，也经常取 $V_{CE}=0.5V_{CC}$ ，将 Q

点设置在直流负载线的中间,根据 $V_{CE} \approx V_{CC} - (R_C + R_E)I_C$ 初步确定 R_C 及电路其它参数后,再根据动态性能指标的要求,对 Q 点进行一些调整。

(2) 交流性能指标的约束

由于共射放大器输出电阻的公式为: $R_o \approx R_C$, 所以 R_C 的值受到 R 的限制,一般 R_C 要比 R_o 稍微小一些。

又根据增益公式: $A_v \approx \frac{-\beta(R_C // R_L)}{r_{be}}$, R_C 还要根据电路的增益 A_v 进行调整,以满足设计的各项动态性能指标。

(3) 根据设计要求的下限频率 f_L , 确定电路中的耦合电容及旁路电容的参数

要严格按照模拟电路理论来计算电容 C_1 、 C_2 及 C_E 同时存在时对放大器低频特性 f_L 的影响,较为复杂。在工程设计中,为了简化计算,通常以每个电容单独存在时的转折频率为基本频率,再降低若干倍作为下限频率,通常取 $C_1=C_2$ 。本次设计不要求电容的约束,搭建电路时,电容可选 100 微法左右的电解电容。

3、放大电路测试方法

(1) 放大电路静态工作点的测试

静态工作点的测试实际就是直流电压、电流的测试。对直流电压的测量,可以用数字万用表或示波器来进行测量,这里不能采用晶体管毫伏表来进行测量静态工作点,因该仪表只能对交流信号进行测试。用示波器测试直流电压时,先将示波器 Y 轴输入耦合方式开关置于“GND”,在屏幕上选定一刻度线作为 0 电压线,移动时基线,使其与 0 电压线重合。然后将输入耦合开关置于“DC”,输入被测电压,记下时基线偏离 0 电压线的格数值。时基线偏离 0 电压线上移测出的电压为正,下移测出的电压为负。按下式计算直流电压值:

$$\text{直流电压值} = V/\text{div} \times \text{偏离格数值} \quad (4.7)$$

式中 V/div 为示波器的 Y 轴偏转灵敏度。实验中推荐用数字万用直接测量。

对射极电流的测量可采用间接测试方法,即测试出射极电阻两端的直流电压,再除以射极电阻可得到射极静态电流。

(2) 放大电路交流指标的测试

放大电路交流指标如电压增益、输入电阻、输出电阻以及通频带常用输入正弦交流信号的方法进行间接测量。图 4-8 为放大器通用模型,这里以放大器通用模型来说明这些指标的测试方法。

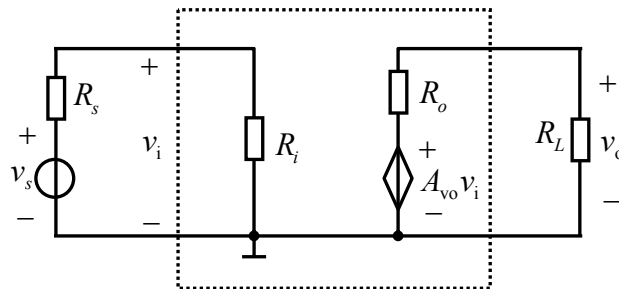


图 4-8 放大器通用模型

1) 电压增益的测试

电压增益的测试比较简单，工作点设定正确以后，用信号源输出一个 5mV 左右的小信号作为放大器的输入信号，然后用晶体管毫伏表或者示波器直接测量放大器的输入、输出电压，由 $A_v = \frac{v_o}{v_i}$ 即可得到。

2) 输入电阻的测试

输入电阻是从放大器的输入口视入放大器的等效交流电阻，输入电阻要向信号源吸收信号功率，因此，输入电阻是在放大器输入口的信号源负载。输入电阻越大，则放大器向信号源索取的功率就小，对信号源的电压利用率就越高。

当被测电路的输入电阻不太高时，可以采用如图 4-9 所示的方法进行测量。在信号发生器与放大器的输入端之间串接入一已知电阻（取样电阻） R ，用交流电压表分别测出取样电阻 R 两端对地的电压 U'_s 和 U_i 的值，则可由下式计算出输入电阻 R_i 的值：

$$R_i = \frac{U_i}{\frac{U'_s - U_i}{R}} = \frac{U_i}{U'_s - U_i} R \quad (4.8)$$

注意：取样电阻 R 的选择应与 R_i 为同一数量级，过小或过大都会使测量误差增大。

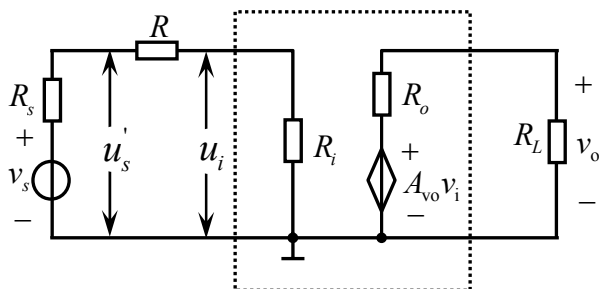


图 4-9 输入电阻的测量原理

3) 输出电阻的测量

放大器要向负载提供信号功率，因此，放大器在输出对负载而言，等效一个新的信号源，该信号源的内阻就是输出电阻。因此，输出电阻是衡量放大器驱动负载能力大小的一个指标，输入电阻越小，则放大器驱动负载的能力就越高。

输出电阻仍然采用间接测量的“两次电压法”测量，测量原理如图 4-10 所示。根据戴维南定理，放大器的输出端口可等效为一个电压源与一内阻的串联，等效电压源 U_o 即为空载 ($R_L = \infty$) 时的输出电压，等效内阻 R_o 即为放大器的输出电阻。因此，分别测出放大器空载（负载 R_L 断开）时的输出电压 U_o 和接入负载时的输出电压 U'_o ，即可计算出输出电阻的值：

$$R_o = \frac{U_o - U'_o}{I_L} = \frac{U_o - U'_o}{\frac{U'_o}{R_L}} = \left(\frac{U_o}{U'_o} - 1 \right) R_L \quad (4.9)$$

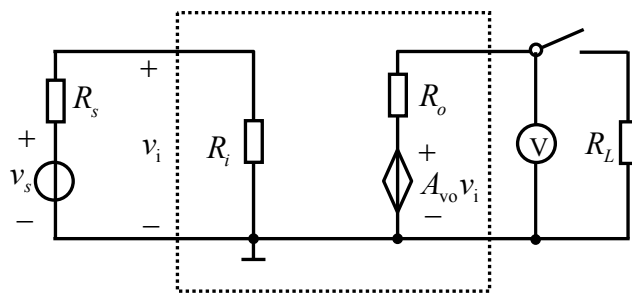


图 4-10 输出电阻测量原理

4) 幅频特性测量

获取二端网络幅频特性曲线可以采用点频法又叫逐点法，即保持输入信号大小不变，改变输入信号的频率，测量对应的输出电压值，即可绘制幅频特性曲线。在测试过程中通常用毫伏表或示波器监测输入信号，并保持输入信号不变，如果改变频率后输入信号有所变化，必须调节信号发生器使输入信号维持原来的大小。具体测试方法参见实验 3。

五、实验内容

用给定的三极管 2SC1008 设计具有最大动态范围的共射放大器，三极管参数为 $r_{bb}' = 200\Omega$ 、 $\beta = 100$ （可用图示仪实测晶体管的 β 值）。已知 $V_{CC} = 12V$ ，设计要求： $I_C = 1.5 \sim 2.0mA$ 、 $R_i > 1.5k\Omega$ 、 $R_o < 2.5k\Omega$ 、 $A_v > 50$ 。在面包板上搭建所设计电路，并完成下列测试。

1、静态工作点调整与测试

令 $V_{CC} = +12V$ ，用万用表测量 V_E 、 V_B 、 V_C ，计算 V_{BE} 、 I_{EQ} 、 V_{CE} ，数据记入表 4-1 中。

表 4-1 静态工作点的测量

V_E	V_B	V_C	V_{BE}	I_{EQ}	V_{CE}

2、放大倍数的测试

用函数发生器输出一个正弦波信号作为放大器的输入信号，设置信号频率 $f = 1kHz$ ， $U_i = 5mV$ ，测量 U_o ，计算放大器的电压放大倍数（增益） A_v 。数据填入表 4-2 中，并定量描绘输出波形图。

表 4-2 放大倍数的测量

测试条件	工作状态	输出电压 (U_o)	放大倍数 (A_v)	输出波形
$f = 1kHz$ $U_i = 5mV$	正常			

3、放大器输入电阻的测量

在放大器输入口串接一取样电阻 R ，用“两次电压法”测量该放大器的输入电阻 R_i ，数

据填入表 4-3 中。

表 4-3 输入电阻的测量

U'_s	U_i	取样电阻 R	R_i

4、放大器输出电阻的测量，

在放大器输出端选择一个合适的负载电阻 R_L ，运用两次电压法分别测量空载与接上负载时的输出电压值，数据填入表 4-4 中。

表 4-4 输出电阻的测量

U_o	U'_o	负载电阻 R_L	R_o

5、放大器频率特性的测量

用点频测试法测量放大器的频率特性，并求出带宽，测试数据填入表 4-5 中，并绘出幅频特性曲线。

表 4-5 幅频特性的测试

频率值 (Hz)	$f_L/2$	f_L		$f_0/2$	f_0	$2f_0$		f_H	$10f_H$	带宽 Δf
					1K					
U_0 (V)										

六、实验报告要求

- 1、要体现电路设计的基本过程。
- 2、系统地说明各种指标的测试方案。

七、思考题

- 1、在 BJT 放大电路中，直流电源的作用以及如何设定放大器的静态工作点？
- 2、影响放大器增益的主要因数哪些？
- 3、放大器输入电阻、输出电阻的物理意义？