第3章

模拟电子技术基础验证性实验

实验一　共射极单管放大器

一、实验目的

(1) 学会放大器静态工作点的调试方法，分析静态工作点对放大器性能的影响。
(2) 掌握放大器电压放大倍数、输入电阻、输出电阻及最大不失真输出电压的测试方法。
(3) 熟悉常用电子仪器及模拟电路实验设备的使用。

二、实验原理

图 3.1.1 为电阻分压式工作点稳定的单管放大器实验电路图。它的偏置电路采用 R_{B1} 和 R_{B2} 组成的分压电路，并在发射极中接有电阻 R_E，以稳定放大器的静态工作点。当在放大器的输入端加入输入信号 u_i 后，在放大器的输出端便可得到一个与 u_i 相位相反、幅值被放大了的输出信号 u_o，从而实现了电压放大。

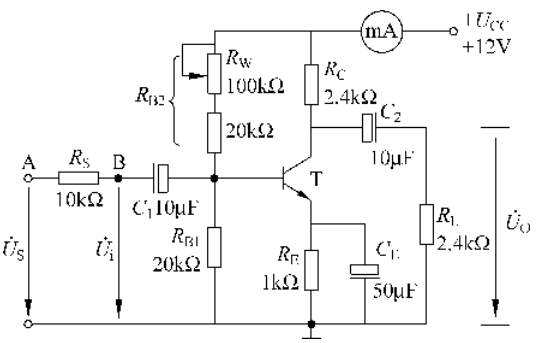


图 3.1.1　共射极单管放大器实验电路

在图 3.1.1 电路中，当流过偏置电阻 R_{B1} 和 R_{B2} 的电流远大于晶体管 T 的基极电流 I_B 时(一般为 5～10 倍)，则它的静态工作点可用下式估算

$$U_B \approx \frac{R_{B1}}{R_{B1}+R_{B2}}U_{CC} \tag{3.1.1}$$

$$I_E \approx \frac{U_B - U_{BE}}{R_E} \approx I_C \tag{3.1.2}$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C(R_C + R_E) \tag{3.1.3}$$

电压放大倍数

$$\dot{A}_u = -\beta \frac{R_C \,/\!/\, R_L}{r_{be}} \tag{3.1.4}$$

输入电阻

$$R_i = R_{B1} \,/\!/\, R_{B2} \,/\!/\, r_{be} \tag{3.1.5}$$

输出电阻

$$R_O \approx R_C \tag{3.1.6}$$

由于电子器件性能的分散性比较大，因此在设计和制作晶体管放大电路时离不开测量和调试技术。在设计前应测量所用元器件的参数，为电路设计提供必要的依据，在完成设计和装配以后，还必须测量和调试放大器的静态工作点和各项性能指标。一个优质放大器必定是理论设计与实验调整相结合的产物。因此，除了学习放大器的理论知识和设计方法外，还必须掌握必要的测量方法和调试技术。

放大器的测量和调试一般包括：放大器静态工作点的测量与调试、消除干扰与自激振荡及放大器各项动态参数的测量与调试等。

1. 放大器静态工作点的测量与调试

(1) 静态工作点的测量

测量放大器的静态工作点，应在输入信号 $u_i=0$ 的情况下进行，即将放大器输入端与地端短接，然后选用量程合适的直流毫安表和直流电压表分别测量晶体管的集电极电流 I_C 以及各电极对地的电位 U_B、U_C 和 U_E。一般实验中，为了避免断开集电极，所以采用测量电压 U_E 或 U_C，然后算出 I_C 的方法，例如，只要测出 U_E，即可用 $I_C \approx I_E = \frac{U_E}{R_E}$ 算出 I_C（也可根据 $I_C = \frac{U_{CC} - U_C}{R_C}$，由 U_C 确定 I_C），同时也能算出 $U_{BE} = U_B - U_E$，$U_{CE} = U_C - U_E$。

为了减小误差，提高测量精度，应选用内阻较高的直流电压表。

(2) 静态工作点的调试

放大器静态工作点的调试是指对管子集电极电流 I_C（或 U_{CE}）的调整与测试。

静态工作点是否合适对放大器的性能和输出波形都有很大影响。如工作点偏高，放大器在加入交流信号以后易产生饱和失真，此时 u_o 的负半周将被削底，如图 3.1.2(a)所示；如工作点偏低则易产生截止失真，即 u_o 的正半周被缩顶（一般截止失真不如饱和失真明显），如图 3.1.2(b)所示。这些情况都不符合不失真放大的要求。所以在选定工作点以后还必须进行动态调试，即在放大器的输入端加入一定的输入电压 u_i，检查输出电压 u_o 的大小和波形是否满足要求。如不满足，则应调节静态工作点的位置。

改变电路参数 U_{CC}、R_C、R_B（R_{B1}、R_{B2}）都会引起静态工作点的变化，如图 3.1.3 所示。但通常多采用调节偏置电阻 R_{B2} 的方法来改变静态工作点，如减小 R_{B2}，则可使静态工作点提高等。

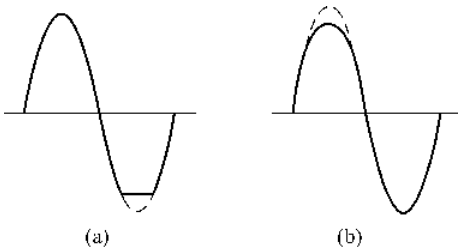


图3.1.2　静态工作点对$\dot{U}_o$波形失真的影响

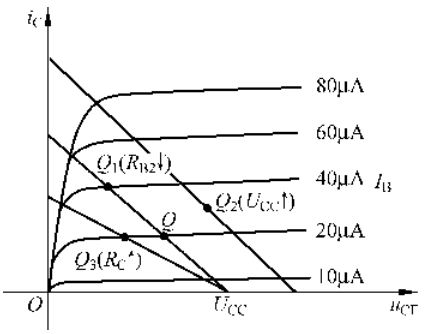


图3.1.3　电路参数对静态工作点的影响

最后还要说明的是，上面所说的工作点“偏高”或“偏低”不是绝对的，应该是相对于信号的幅度而言，如输入信号幅度很小，即使工作点较高或较低也不一定会出现失真。所以确切地说，产生波形失真是信号幅度与静态工作点设置配合不当所致。如需满足较大信号幅度的要求，静态工作点最好尽量靠近交流负载线的中点。

2. 放大器动态指标测试

放大器动态指标包括电压放大倍数、输入电阻、输出电阻、最大不失真输出电压(动态范围)和通频带等。

(1) 电压放大倍数 A_u 的测量

调整放大器到合适的静态工作点，然后加入输入电压 u_i，在输出电压 u_o 不失真的情况下，用交流毫伏表测出 u_i 和 u_o 的有效值 U_i 和 U_o，则

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} \tag{3.1.7}$$

(2) 输入电阻 R_i 的测量

为了测量放大器的输入电阻，按图 3.1.4 所示电路在被测放大器的输入端与信号源之间串入一已知电阻 R，在放大器正常工作的情况下，用交流毫伏表测出 U_S 和 U_i，则根据输入电阻的定义可得

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = \frac{U_i}{\frac{U_R}{R}} = \frac{U_i}{U_S - U_i}R \tag{3.1.8}$$

测量时应注意以下几点。

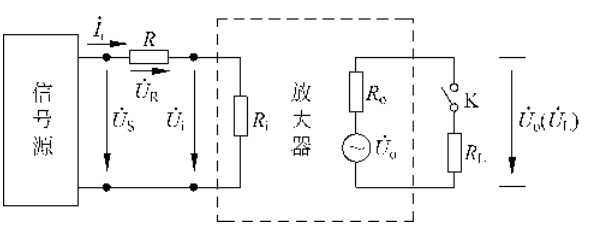


图 3.1.4　输入输出电阻测量电路

① 由于电阻 R 两端没有电路公共接地点，所以测量 R 两端电压 U_R 时必须分别测出 U_S 和 U_i，然后按 $U_R = U_S - U_i$ 求出 U_R 值。

② 电阻 R 的值不宜取得过大或过小，以免产生较大的测量误差，通常取 R 与 R_i 为同一

数量级为好，本实验可取 $R=1\sim2\text{k}\Omega$。

(3) 输出电阻 R_o 的测量

按图 3.1.4 所示电路，在放大器正常工作条件下，测出输出端不接负载 R_L 的输出电压 U_O 和接入负载后的输出电压 U_L，根据

$$U_L=\frac{R_L}{R_O+R_L}U_O \tag{3.1.9}$$

即可求出

$$R_O=\left(\frac{U_O}{U_L}-1\right)R_L \tag{3.1.10}$$

在测试中应注意，必须保持 R_L 接入前后输入信号的大小不变。

(4) 最大不失真输出电压 U_{OPP} 的测量(最大动态范围)

如上所述，为了得到最大动态范围，应将静态工作点调在交流负载线的中点。为此在放大器正常工作情况下，逐步增大输入信号的幅度，并同时调节 R_W(改变静态工作点)，用示波器观察 U_O，当输出波形同时出现削底和缩顶现象(见图 3.1.5)时，说明静态工作点已调在交流负载线的中点。然后反复调整输入信号，使波形输出幅度最大，且无明显失真时，用交流毫伏表测出 U_O(有效值)，则动态范围等于 $2\sqrt{2}U_O$。或用示波器直接读出 U_{OPP} 来。

(5) 放大器幅频特性的测量

放大器的幅频特性是指放大器的电压放大倍数 A_u 与输入信号频率 f 之间的关系曲线。单管阻容耦合放大电路的幅频特性曲线如图 3.1.6 所示，A_{um} 为中频电压放大倍数，通常规定电压放大倍数随频率变化下降到中频放大倍数的 $1/\sqrt{2}$ 倍，即 $0.707A_{um}$ 所对应的频率分别称为下限频率 f_L 和上限频率 f_H，则通频带为 $f_{BW}=f_H-f_L$。

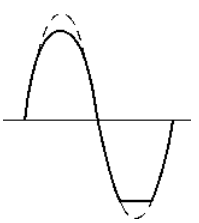


图 3.1.5 静态工作点正常，输入信号太大引起的失真

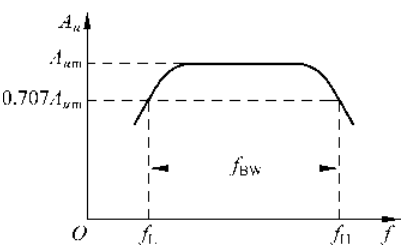


图 3.1.6 幅频特性曲线

放大器的幅率特性就是测量不同频率信号时的电压放大倍数 A_u。为此，可采用前述测量 A_u 的方法，每改变一个信号频率，测量其相应的电压放大倍数，测量时应注意取点要恰当，在低频段与高频段应多测几点，在中频段可以少测几点。此外，在改变频率时，要保持输入信号的幅度不变，且输出波形不能失真。

(6) 干扰和自激振荡的消除

参阅本书附录。

三、实验设备与器件

(1) +12V 直流电源；

(2) 函数信号发生器；

（3）双踪示波器；

（4）交流毫伏表；

（5）直流电压表；

（6）直流毫安表；

（7）频率计；

（8）万用电表；

（9）晶体三极管 3DG6×1（β=50～100）或 9011×1（引脚排列如图 3.1.7 所示），电阻器、电容器若干。

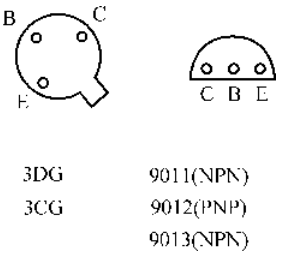


图 3.1.7　晶体三极管引脚排列

四、实验内容

实验电路图如图 3.1.1 所示。各电子仪器按正确方式连接，为防止干扰，各仪器的公共端必须连在一起，同时信号源、交流毫伏表和示波器的引线应采用专用电缆线或屏蔽线，如使用屏蔽线，则屏蔽线的外包金属网应接在公共接地端上。

1. 调试静态工作点

接通直流电源前，先将 R_W 调至最大，函数信号发生器输出旋钮旋至零。接通＋12V 电源并调节 R_W，使 I_C＝2.0mA（即 U_E＝2.0V），用直流电压表测量 U_B、U_E、U_C 及用万用电表测量 R_{B2} 值，记入表 3.1.1 中。

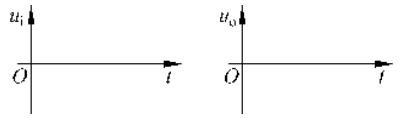
表 3.1.1　I_C＝2mA

测　量　值				计　算　值		
U_B/V	U_E/V	U_C/V	R_{B2}/kΩ	U_{BE}/V	U_{CE}/V	I_C/mA

2. 测量电压放大倍数

在放大器输入端加入频率为 1kHz 的正弦信号 u_S，调节函数信号发生器的输出旋钮使放大器输入电压 U_i≈10mV，同时用示波器观察放大器输出电压 u_o 波形，在波形不失真的条件下用交流毫伏表测量下述三种情况下的 U_o 值，并用双踪示波器观察 u_o 和 u_i 的相位关系，记入表 3.1.2 中。

表 3.1.2　I_C＝2.0mA；U_i＝　mV

R_C/kΩ	R_L/kΩ	U_o/V	A_u	观察记录一组 u_o 和 u_i 波形
2.4	∞			
1.2	∞			
2.4	2.4			

3. 观察静态工作点对电压放大倍数的影响

置 R_C＝2.4kΩ，R_L＝∞，U_i 适量，调节 R_W，用示波器监视输出电压波形，在 u_o 不失真的

条件下，测量数组 I_C 和 U_o 值，记入表 3.1.3 中。

表 3.1.3　$R_C=2.4k\Omega$；$R_L=\infty$；$U_i=$　mV

I_C/mA			2.0		
U_o/V					
A_u					

测量 I_C 时，要先将信号源输出旋钮旋至零（即使 $U_i=0$）。

4. 观察静态工作点对输出波形失真的影响

置 $R_C=2.4k\Omega$，$R_L=2.4k\Omega$，$u_i=0$，调节 R_W 使 $I_C=2.0mA$，测出 U_{CE}值，再逐步加大输入信号，使输出电压 u_o 足够大但不失真。然后保持输入信号不变，分别增大和减小 R_W，使波形出现失真，绘出 u_o 的波形，并测出失真情况下的 I_C 和 U_{CE}值，记入表 3.1.4 中。每次测 I_C 和 U_{CE}值时都要将信号源的输出旋钮旋至零。

表 3.1.4　$R_C=2.4k\Omega$；$R_L=\infty$；$U_i=$　mV

I_C/mA	U_{CE}/V	u_o 波形	失真情况	管子工作状态
		u_o O t		
2.0		u_o O t		
		u_o O t		

5. 测量最大不失真输出电压

置 $R_C=2.4k\Omega$，$R_L=2.4k\Omega$，按照实验原理中所述方法，同时调节输入信号的幅度和电位器 R_W，用示波器和交流毫伏表测量 U_{OPP}及 U_o 值，记入表 3.1.5 中。

表 3.1.5　$R_C=2.4k\Omega$；$R_L=2.4k\Omega$

I_C/mA	U_{im}/mV	U_{om}/V	U_{OPP}/V

*6. 测量输入电阻和输出电阻

置 $R_C=2.4k\Omega$，$R_L=2.4k\Omega$，$I_C=2.0mA$。输入 $f=1kHz$ 的正弦信号，在输出电压 u_o 不失真的情况下，用交流毫伏表测出 U_S、U_i 和 U_L，记入表 3.1.6 中。

注：* 为选做内容，下同。

保持 U_S 不变，断开 R_L，测量输出电压 U_o，记入表 3.1.6 中。

表 3.1.6　I_C＝2mA；R_C＝2.4kΩ；R_L＝2.4kΩ

U_S/mV	U_i/mV	R_i/kΩ		U_L/V	U_o/V	R_o/kΩ	
		测量值	计算值			测量值	计算值

***7. 测量幅频特性曲线**

取 I_C＝2.0mA，R_C＝2.4kΩ，R_L＝2.4kΩ。保持输入信号 u_i 的幅度不变，改变信号源频率 f，逐点测出相应的输出电压 U_o，记入表 3.1.7 中。

表 3.1.7　U_i＝　mV

	f_L	f_0	f_H
f/kHz			
U_o/V			
$A_u=U_o/U_i$			

为了信号源频率 f 取值合适，可先粗测一下，找出中频范围，然后再仔细读数。

说明：本实验内容较多，其中 6、7 可作为选作内容。

五、实验总结

（1）列表整理测量结果，并把实测的静态工作点、电压放大倍数、输入电阻、输出电阻之值与理论计算值比较（取一组数据进行比较），分析产生误差原因。

（2）总结 R_C、R_L 及静态工作点对放大器电压放大倍数、输入电阻、输出电阻的影响。

（3）讨论静态工作点变化对放大器输出波形的影响。

（4）分析讨论在调试过程中出现的问题。

六、预习要求

（1）阅读教材中有关单管放大电路的内容并估算实验电路的性能指标。

假设：3DG6 的 β＝100，R_{B1}＝20kΩ，R_{B2}＝60kΩ，R_C＝2.4kΩ，R_L＝2.4kΩ。

估算放大器的静态工作点，电压放大倍数 A_u，输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o。

（2）阅读实验附录中有关放大器干扰和自激振荡消除内容。

（3）能否用直流电压表直接测量晶体管的 U_{BE}？为什么实验中要采用测 U_B、U_E，再间接算出 U_{BE}的方法？

（4）怎样测量 R_{B2}阻值？

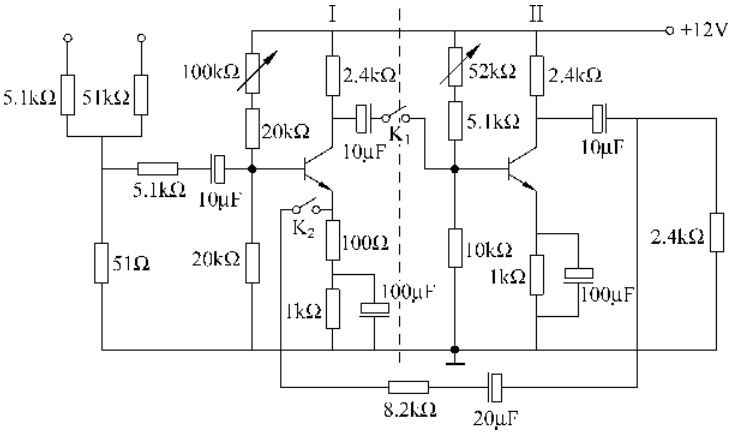
（5）当调节偏置电阻 R_{B2}使放大器输出波形出现饱和或截止失真时，晶体管的管压降 U_{CE}怎样变化？

（6）改变静态工作点对放大器的输入电阻 R_i 是否有影响？改变外接电阻 R_L 对输出电阻 R_o 有否影响？

(7) 在测试 A_u、R_i 和 R_o 时怎样选择输入信号的大小和频率？为什么信号频率一般选 1kHz，而不选 100kHz 或者更高？

(8) 测试中，如果将函数信号发生器、交流毫伏表、示波器中任一仪器的两个测试端子接线换位(即各仪器的接地端不再连在一起)，将会出现什么问题？

注意：附图 3.1.1 所示为共射极单管放大器与带有负反馈的两级放大器共用实验模块。如将 K_1、K_2 断开，则前级(Ⅰ)为典型电阻分压式单管放大器；如将 K_1、K_2 接通，则前级(Ⅰ)与后级(Ⅱ)接通，组成带有电压串联负反馈两级放大器。



附图 3.1.1　共射极单管放大器与带有负反馈的两级放大器

实验二　射极跟随器

一、实验目的

(1) 掌握射极跟随器的特性及测试方法。

(2) 进一步学习放大器各项参数的测试方法。

二、实验原理

射极跟随器的原理图如图 3.2.1 所示。它是一个电压串联负反馈放大电路，具有输入电阻高、输出电阻低、电压放大倍数接近于 1、输出电压能够在较大范围内跟随输入电压作线性变化以及输入输出信号同相等特点。

射极跟随器的输出取自发射极，故称其为射极输出器。

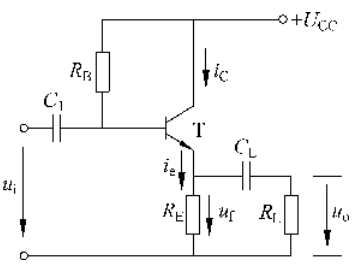


图 3.2.1　射极跟随器

1. 输入电阻 R_i

$$R_i = r_{be} + (1+\beta)R_E \tag{3.2.1}$$

如考虑偏置电阻 R_B 和负载 R_L 的影响，则

$$R_i = R_B \,/\!/\, [r_{be} + (1+\beta)(R_E \,/\!/\, R_L)] \tag{3.2.2}$$

由式(3.2.2)可知射极跟随器的输入电阻 R_i 比共射极单管放大器的输入电阻 $R_i = R_B // r_{be}$ 要高得多，但由于偏置电阻 R_B 的分流作用，输入电阻难以进一步提高。

输入电阻的测试方法同单管放大器，实验线路如图 3.2.2 所示。

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = \frac{U_i}{U_s - U_i}R \tag{3.2.3}$$

即只要测得 A、B 两点的对地电位即可计算出 R_i。

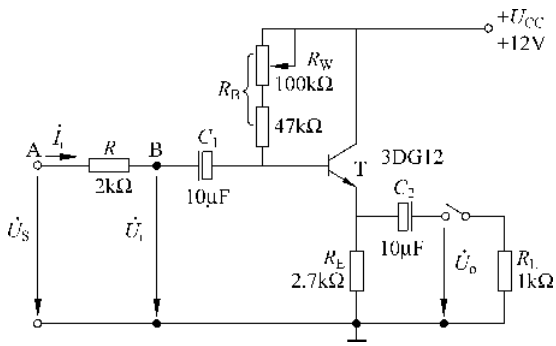


图 3.2.2　射极跟随器实验电路

2. 输出电阻 R_o

$$R_o = \frac{r_{be}}{\beta} // R_E \approx \frac{r_{be}}{\beta} \tag{3.2.4}$$

如考虑信号源内阻 R_S，则

$$R_o = \frac{r_{be} + (R_S // R_B)}{\beta} // R_E \approx \frac{r_{be} + (R_S // R_B)}{\beta} \tag{3.2.5}$$

由式(3.2.5)可知射极跟随器的输出电阻 R_o 比共射极单管放大器的输出电阻 $R_o \approx R_C$ 低得多。三极管的 β 愈高，输出电阻愈小。

输出电阻 R_o 的测试方法也同单管放大器，即先测出空载输出电压 U_o，再测接入负载 R_L 后的输出电压 U_L，根据

$$U_L = \frac{R_L}{R_o + R_L}U_o \tag{3.2.6}$$

即可求出 R_o。

$$R_o = \left(\frac{U_o}{U_L} - 1\right)R_L \tag{3.2.7}$$

3. 电压放大倍数

$$A_u = \frac{(1+\beta)(R_E // R_L)}{r_{be} + (1+\beta)(R_E // R_L)} \leqslant 1 \tag{3.2.8}$$

式(3.2.8)说明射极跟随器的电压放大倍数小于等于 1，且为正值，这是深度电压负反馈的结果。但它的射极电流仍比基流大$(1+\beta)$倍，所以它具有一定的电流和功率放大作用。

4. 电压跟随范围

电压跟随范围是指射极跟随器输出电压 u_o 跟随输入电压 u_i 作线性变化的区域。当 u_i

超过一定范围时，u_o 便不能跟随 u_i 作线性变化，即 u_o 波形产生了失真。为了使输出电压 u_o 正、负半周对称，并充分利用电压跟随范围，静态工作点应选在交流负载线中点，测量时可直接用示波器读取 u_o 的峰峰值，即电压跟随范围；或用交流毫伏表读取 u_o 的有效值，则电压跟随范围

$$U_{OPP} = 2\sqrt{2}U_o \tag{3.2.9}$$

三、实验设备与器件

(1) +12V 直流电源；
(2) 函数信号发生器；
(3) 双踪示波器；
(4) 交流毫伏表；
(5) 直流电压表；
(6) 频率计；
(7) 3DG12×1 (β=50～100)或 9013，电阻器、电容器若干。

四、实验内容

按图 3.2.2 所示组接电路。

1. 静态工作点的调整

接通+12V 直流电源，在 B 点加入 f=1kHz 正弦信号 u_i，输出端用示波器监视输出波形，反复调整 R_W 及信号源的输出幅度，使在示波器的屏幕上得到一个最大不失真输出波形，然后置 u_i=0，用直流电压表测量晶体管各电极对地电位，将测得数据记入表 3.2.1 中。

表 3.2.1

U_E/V	U_B/V	U_C/V	I_E/mA

在下面整个测试过程中应保持 R_W 值不变(即保持静工作点 I_E 不变)。

2. 测量电压放大倍数 A_u

接入负载 R_L=1kΩ，在 B 点加 f=1kHz 正弦信号 u_i，调节输入信号幅度，用示波器观察输出波形 u_o，在输出最大不失真情况下，用交流毫伏表测 U_i、U_L 值，记入表 3.2.2 中。

表 3.2.2

U_i/V	U_L/V	A_u

3. 测量输出电阻 R_o

接上负载 $R_L=1k\Omega$，在 B 点加 $f=1kHz$ 正弦信号 u_i，用示波器监视输出波形，测空载输出电压 U_o，有负载时输出电压 U_L，记入表 3.2.3 中。

表　3.2.3

U_o/V	U_L/V	R_o/kΩ

4. 测量输入电阻 R_i

在 A 点加 $f=1kHz$ 的正弦信号 u_s，用示波器监视输出波形，用交流毫伏表分别测出 A、B 点对地的电位 U_S、U_i，记入表 3.2.4 中。

表　3.2.4

U_S/V	U_i/V	R_i/kΩ

5. 测试跟随特性

接入负载 $R_L=1k\Omega$，在 B 点加入 $f=1kHz$ 正弦信号 u_i，逐渐增大信号 u_i 幅度，用示波器监视输出波形直至输出波形达最大不失真，测量对应的 U_L 值，记入表 3.2.5 中。

表　3.2.5

U_i/V	
U_L/V	

6. 测试频率响应特性

保持输入信号 u_i 幅度不变，改变信号源频率，用示波器监视输出波形，用交流毫伏表测量不同频率下的输出电压 U_L 值，记入表 3.2.6 中。

表　3.2.6

f/kHz	
U_L/V	

五、预习要求

(1) 复习射极跟随器的工作原理。

(2) 根据图 3.2.2 所示的元件参数值估算静态工作点，并画出交、直流负载线。

六、实验报告

(1) 整理实验数据，并画出曲线 $U_L=f(U_i)$ 及 $U_L=f(f)$ 曲线。