

实验二 单管交流放大电路

2.1 实验目的

1. 掌握单管交流电压放大电路的放大原理，掌握放大电路静态工作点的调试方法。
2. 了解静态工作点的改变对放大电路性能的影响。
3. 观察饱和失真和截止失真对放大电路输出电压波形的影响。

2.2 实验预习要求

1. 复习共发射极交流电压放大电路的组成、放大原理和指标计算方法。
2. 实验之前必须明确本次实验的目的、意义，实验原理，实验电路图。
3. 考虑若提高电压放大倍数 A_u ，应采取哪些措施？

2.3 实验仪器与器件

表 2-1 实验仪器与器件列表

	名称	数量	型号
1	信号发生器	1 台	Tek AFG1062 或 DG4062
2	示波器	1 台	Tek MSO2012B
3	三极管 (NPN)	1 只	9013×1
4	电阻	若干	300Ω、1kΩ、2kΩ、20kΩ×2
5	电容	2 只	1μF、2.2μF、4.7μF、10μF
6	数字电位器	1 个	-----
7	转接板	1 块	-----

2.4 实验原理

单管交流电压放大电路的最典型电路是共发射极分压偏置式交流电压放大电路，电路如图 2-1 所示。

在图 2-1 中，晶体管为非线性元件，要使放大器不产生非线性失真，就必须建立一个合适的静态工作点，使晶体管工作在放大区。若 Q 点过低 (I_B 小，则 I_C 小， U_{CE} 大)，晶体管进入截止区，产生截止失真 (如图 2-2b)； Q 点过高 (I_B 、 I_C 大， U_{CE} 小)，晶体管将进入饱和区，产生饱和失真 (如图 2-2a)。调节基极电阻 (电位器) R_p 即可调整静态工作点。

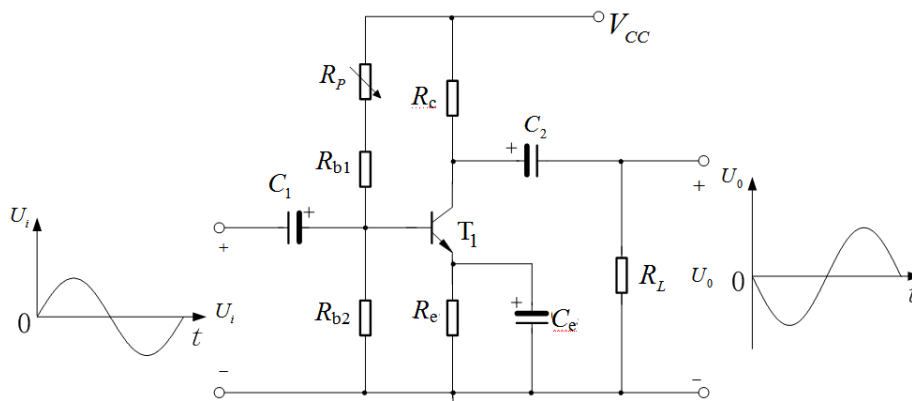


图 2-1 分压偏置式共发射极交流电压放大电路

图 2-1 中的电压放大倍数为

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = -\beta \frac{R'_L}{r_{be}} \quad (2-1)$$

测量电压放大倍数应保证静态工作点在最佳位置，输出电压波形幅度最高且不失真的前提下进行。

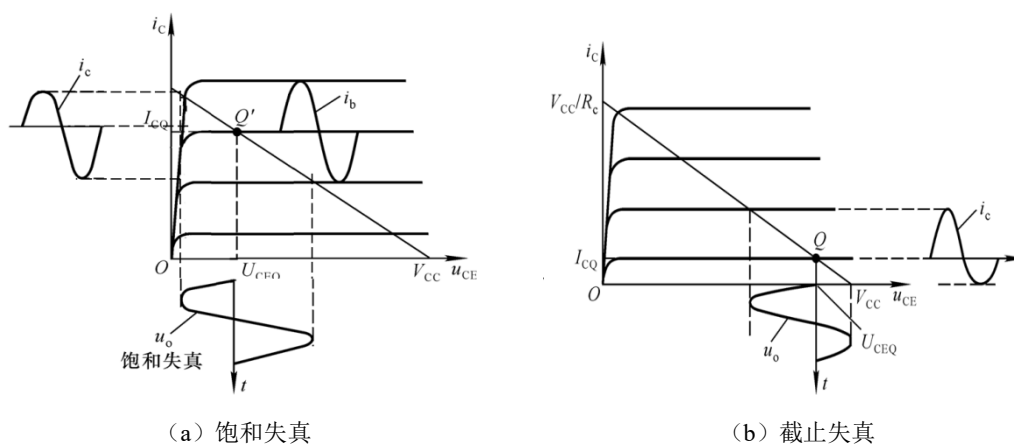


图 2-2 共发射极交流电压放大电路，静态工作点不同造成的饱和失真和截止失真外特性图

2.5 实验步骤

本次实验研究的是交流放大电路，所以输入信号和输出信号都是交流，在用示波器观测信号时，需要用 AC 耦合来提取出信号的交流分量来测量分析。

1. 调整静态工作点

实验电路按图 2-3(b)接线（易星标实验平台的导线内阻较大，需将 R3、R5、C11 直接与地相连，否则后面失真现象将无法正确观测），**截取易星标画布电路图**。（2-3(a)为硬件平台数据，仅作为原理图参考）

设输入信号 U_i 为正弦信号，其有效值 $U_i = 50\text{mV}$ ，频率 $f=1\text{kHz}$ 。此信号从信号发生器取出，用示波器 AC 耦合有效值测量。（由于易星标平台差异，整个实验过程有效值 $U_i=50\text{mV}$ 仅供参考，合适的输入电压的确定原则，将数字电位器调节最小，不断增大输入电压，直到输出出现失真，此时输入电压为 U_{ith} 。后面的实验过程，选取输入电压 U_i 大于 U_{ith} 。）

直流电压 **5V** 从直流稳压电源中取出。按以下步骤调整静态工作点：

第一步，将输入信号 $U_i = 50\text{mV}$ 接入电路中，将直流电压 **5V** 接入电路中。检查电路无误后，点击下发。

第二步，按图 2-3 (b) 所示接入示波器，通道 CH1 接放大电路的输入端，通道 CH2 接放大电路的输出

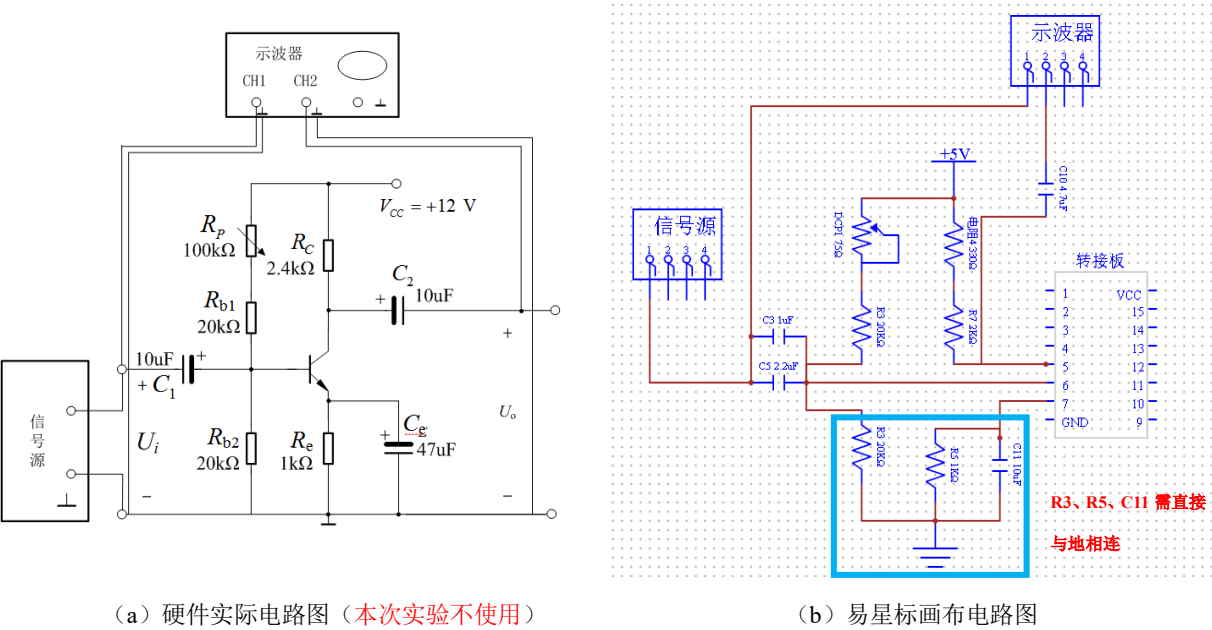
端。

第三步，调节数字电位器，待输出电压稳定之后，用示波器 **AC 耦合** 有效值观察放大电路的输出电压波形。待输出电压幅值达到最大且波形不失真，此时静态工作点位置最佳。

第四步，静态工作点调好之后，断开信号源接线，重新下发，用示波器 **DC 耦合** 分别测量平均值 V_B 、 V_C 、 V_E ，并计算 U_{BE} 、 U_{CE} 、 I_B 、 I_C 和 β 的数值，将相关数据计入表 2-2 中。（该实验结果供同学学习静态工作点调节，易星标结果同硬件平台误差较大，仅供参考。）

表 2-2 静态工作点数据

实测数据			根据实测计算的数据				
V_B/V	V_E/V	V_C/V	U_{BE}/V	U_{CE}/V	$I_B/\mu A$	I_C/mA	β



(a) 硬件实际电路图（本次实验不使用） (b) 易星标画布电路图

图 2-3 实验电路接线图

2. C_e 的影响

$C_e=10\mu F$ 时：

在图 2-3 (b) 中，当静态工作点测量完毕之后，保持静态工作点不变（数字电位器不变），接通信号源。保持输入正弦信号电压有效值 $U_i=50mV$ ，频率 $f=1kHz$ 不变。用示波器 **AC 耦合有效值**，测量 $C_e=10\mu F$ 时的输入电压 U_i 和输出电压 U_o ，计算电压放大倍数填入表 2-3 中。截图 $C_e=10\mu F$ 时的 U_i 和 U_o 的示波器测量界面，保持 U_i 和 U_o 在同一时序下。实验报告中需要测量 U_i 和 U_o 的有效值，并观察到 U_i 和 U_o 的相位区别。

断开 C_e 时：

其他电路部分和输入保持不变，需要重新点击下发。用示波器的 **AC 耦合有效值**，测量 C_e 断开时的输入电压 U_i 和输出电压 U_o ，计算电压放大倍数填入表 2-3 中。截图 C_e 断开时的 U_i 和 U_o 的示波器测量界面，保持 U_i 和 U_o 在同一时序下，并思考推导说明 C_e 变化对输出波形影响的原因。

表 2-3 C_e 对放大倍数的影响

条件	$U_i(mV)$	$U_o(mV)$	A_u
$C_e=10\mu F$			
C_e 断开			

3. 测量电压放大倍数

在图 2-3(b)中,保持静态工作点不变, $C_e=10\mu\text{F}$,接通信号源。保持输入正弦信号电压有效值 $U_i=50\text{mV}$,频率 $f=1\text{kHz}$ 不变。分别用示波器 AC 耦合有效值测量负载开路(图 2-3 (b))和有载情况下的输出电压有效值 U_o , 计算交流电压放大倍数填入表 2-4 中,并推导分析负载变化对交流电压放大倍数的影响原因。(开路的情况可以直接用第 2 节的数据)

表 2-4 测量交流电压放大倍数

条件	$U_i(\text{mV})$	$U_o(\text{mV})$	A_u
$R_L = \infty$ (R_P 不变)			
$R_L = 10\text{k}\Omega$ (R_P 不变)			
$R_L = 1\text{k}\Omega$ (R_P 不变)			

4. 观测静态工作点对输出电压波形的影响

实验电路按图 2-3 (b) 接线, 负载开路。测量数据填入表 2-5 中。

(1) 饱和失真的情况

将数字电位器的阻值逐渐调小, 输入信号保持不变, 观察输入和输出电压波形, 使波形出现饱和失真, 截取示波器测量界面 (U_i 和 U_o 在同一时序下)。然后关断信号源, 重新下发, 用示波器 DC 耦合平均值测量 V_B 、 V_C 、 V_E 的电压值, 计算 I_B 、 I_C 、 U_{BE} 、 U_{CE} 填入表 2-5 中。

(2) 截止失真的情况

调节数字电位器, 将数字电位器的阻值逐渐调大, 输入信号保持不变, 观察输出电压波形, 使波形出现截止失真, 截取示波器测量界面 (U_i 和 U_o 在同一时序下)。然后关断信号源, 重新下发, 用示波器 DC 耦合平均值测量 V_B 、 V_C 、 V_E 的电压值, 计算 I_B 、 I_C 、 U_{BE} 、 U_{CE} 填入表 2-5 中。

表 2-5 静态工作点对输出电压波形的影响

		数字电位器减小 $U_i=50\text{mV}$	数字电位器增大 $U_i=50\text{mV}$
Q 点	测量参数/V	$V_E=$	$V_E=$
		$V_B=$	$V_B=$
		$V_C=$	$V_C=$
	计算静态值	$U_{CE}=$	$U_{CE}=$
		$U_{BE}=$	$U_{BE}=$
失真判断			

2.6 实验思考题

1. 输入信号合适的情况下, 晶体管放大电路出现饱和失真或截止失真的原因是什么? 在电路中应调整哪个元件才能消除失真?
2. 在此次使用的放大电路中, 如何提高交流电压放大倍数?
3. 总结失真类型的判断方法, 说明本实验中的放大电路的输出出现削顶失真时, 为截止失真, 还是饱和失真?

真？这一结论适用于由 PNP 型管构成的共射级放大电路吗？请说明理由。

2.7 实验报告要求

1. 数据处理过程要写在实验报告上，原始测量需要老师确认。
2. 实验思考题需要写在实验报告中。
3. 实验体会、意见和建议写在实验结论之后。

实验三 射极跟随器

3.1 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测试方法。

3.2 实验预习要求

- 1. 复习有关射极跟随器的工作原理，掌握射极跟随器的性能特点，并了解其在电子线路中的应用。
- 2. 根据图 3-2 的元器件参数值估算静态工作点，并画出交、直流负载线。

3.3 实验仪器与器件

表 3-1 实验仪器与器件列表

	名称	数量	型号
1	信号发生器	1 台	Tek AFG1062 或 DG4062
2	示波器	1 台	Tek MSO2012B
3	三极管（NPN）	1 只	9013×1
4	电阻	若干	2kΩ、20kΩ、33kΩ、100 kΩ、200kΩ
5	电容	2 只	2.2μF、4.7μF、10μF
6	数字电位器	1 个	-----
7	转接板	1 块	-----

3.4 实验原理

图 3-1 是一个共集组态的单管放大电路，输入信号和输出信号的公共端是晶体管的集电极，所以属于共集组态。又由于输出信号从发射极引出，因此这种电路也称为射极输出器或设计跟随器，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做线性变化以及输入、输出信号同相等特点。

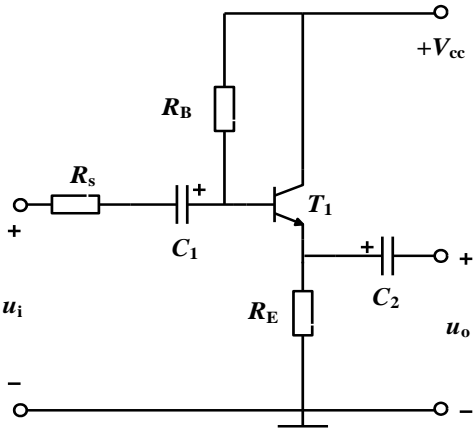


图 3-1 射极跟随器

3.4.1 静态工作点

实验中，可在静态 $U_i = 0$ ，测得晶体管的各电极电位 V_B 、 V_C 、 V_E ，然后由下列公式计算出静态工作点的各个参数：

$$U_{BE} = V_B - V_E$$

$$I_C \approx I_E = (1 + \beta)I_B$$

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_B}{R_B} \quad \text{或} \quad I_B = \frac{I_C}{\beta}$$

$$U_{CE} = V_{CC} - V_E$$

3.4.2 放大电路动态性能指标

1) 输入电阻 R_i ：图 3-2 为 射极跟随器的实验线路图

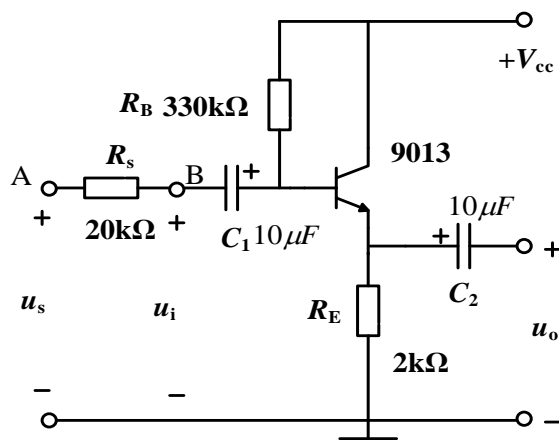


图 3-2 射极跟随器的实验线路图

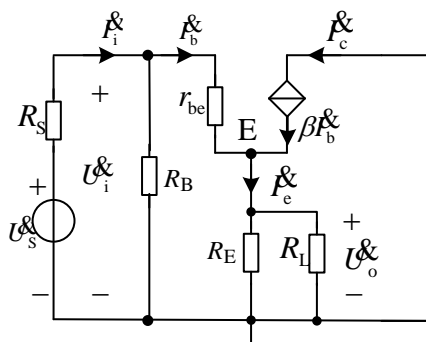


图 3-3 射极跟随器的微变等效电路

如果不考虑负载 R_L 的影响， $R_i = R_B // [r_{be} + (1 + \beta)R_E]$

如果负载 R_L 的影响，则： $R_i = R_B // [r_{be} + (1 + \beta)(R_E // R_L)]$

由上式知，射极跟随器的输入电阻 R_i 比共射极基本放大电路的输入电阻 R_i ($R_i = R_B // r_{be}$) 要高很多。

射极跟随器的实验电路如图 3-2 所示。输入电阻的测试方法：只要测得 A、B 两点的对地电位，按照下面公式即可计算出 R_i 。

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = \frac{U_i}{U_s - U_i} R_s$$

2) 输出电阻 R_o ：根据理论教材，

信号源内阻很小的情况下，射极跟随器的输出电阻 R_o 为 $R_o = \frac{r_{be}}{1 + \beta} // R_E \approx \frac{r_{be}}{1 + \beta}$

信号源内阻较大的情况下，射极跟随器的输出电阻 R_o 为 $R_o = \frac{R_B // R_s + r_{be}}{1 + \beta} // R_E \approx \frac{R_B // R_s + r_{be}}{1 + \beta}$

由上式可知，射极跟随器的输出电阻 R_o 比共射极基本放大电路的输出电阻 R_o ($R_o \approx R_C$) 低很多。晶体管的 β 越高，输出电阻越小。

输出电阻 R_o 的测试方法：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 $U_L = \frac{R_L}{R_o + R_L} U_o$ ，

即可推导出输出电阻 R_o 的计算公式如下: $R_o = (\frac{U_o}{U_i} - 1)R_L$

3) 电压放大倍数 A_u

射极跟随器的电压放大倍数 A_u 为

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

上式说明射极跟随器的电压放大倍数 A_u 小于近于 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极电流大 $(1 + \beta)$ 倍，所以它具有一定的电流和功率放大作用。

电压放大倍数 A_u 和 A_{us} 可通过测量 U_s 、 U_i 、 U_o 的有效值计算求出。

3.5 实验步骤

1. 测定静态工作点

按图 3-4 所示连接射极跟随器实验电路（原理图见图 3-2，电容电阻以图 3-4 为准）。**截取易星标画布电路图。**

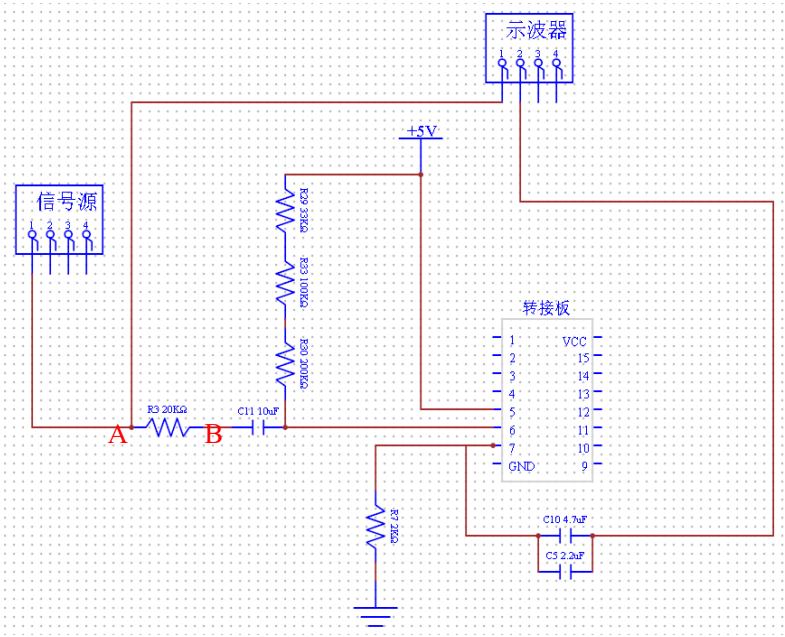


图 3-4 易星标画布电路图

接通+5V 直流电源，在 **B 点**加入频率为 1kHz 的正弦交流信号 U_i ，（ U_i 有效值调至 0~1V 左右，参考值 0.5V），**用示波器观察并截取输入电压和输出电压波形**（示波器测量界面，使偏移都为 0，垂直档位设置成一致），保证输出无失真波形，然后关闭信号源 $U_i=0$ ，断开信号源的连线，重新下发，**用示波器 DC 耦合平均值**测量晶体管各极对地电位，将测得数据计入表 3-2 中。

表 3-2 射极跟随器静态工作点数据表

测量值			计算值			
V_E/V	V_B/V	V_C/V	V_{BE}/V	V_{CE}/V	I_E/mA	I_B/mA

2. 测量电压放大倍数 A_u

空载情况下，在 A 点加入有效值为 0.5V，频率为 1kHz 的正弦交流信号 U_s ，用示波器观察输入电压 U_i 和输出波形 U_o ，（输出须不失真，否则降低输入电压），用示波器 AC 耦合有效值测 U_i 、 U_s 、 U_o 值。计入表 3-3 中。计算放大倍数。

接入负载 R_L 为 10k Ω ，在 A 点加入有效值为 0.5V 频率 1kHz 的正弦交流信号 U_s ，用示波器观察输入电压 U_i 和输出波形 U_o ，（输出须不失真，否则降低输入电压），用示波器 AC 耦合有效值测 U_s 、 U_o 、 U_i 值。计入表 3-3 中。计算放大倍数。

表 3-3 射极跟随器放大倍数测量数据表

	测量值			计算值	
	U_i/mV	U_s/mV	U_o/mV	A_u	A_{us}
A 点			空载， $U_o=$		
A 点			$R_L=10\text{k}\Omega$ ， $U_o=$		

3. 测试跟随特性

空载情况下，在 B 点加入频率为 1kHz 的正弦交流信号 U_i ，逐渐加大信号幅度，用示波器观察输入电压 U_i 和输出波形 U_o ，输入信号幅度增加至输出出现失真情况，停止后续数据测量。对于相应的输入，用示波器 AC 耦合有效值，测量对应的输出电压 U_L ，计入表 3-4 中。

表 3-4 射极跟随器跟随特性测量数据表

信号源给定值 (有效值/V)	0.1	0.2	0.3	0.4	...	最大不失真点对应的 输入电压
U_i/V						
U_o/V						

4. 测试频率响应特性

不接负载，在 B 点接入输入信号 U_i ，其有效值为 0.5V（如果受线路阻抗影响， U_i 变化超过 0.05V，须调整信号源电压，保持 U_i 的测量有效值为 0.5V 左右），以 $f = 10\text{kHz}$ 为基本频率，分别向上和向下调节频率，用示波器 AC 耦合有效值测量不同频率下的输出电压 U_o ，填入表 3-5 中。绘制幅频响应曲线图 $A_u=F(f)$ 。

表 3-5 射极跟随器幅频特性测量数据表

	低频			f_0			高频
f	50Hz	100Hz	1kHz	10kHz	100kHz	200kHz	500kHz
U_i/V							
U_o/V							
$A_u=U_o/U_i$							

3.6 实验思考题

1. 测量放大器静态工作点时，如果测得 $U_{CE}<0.5\text{V}$ ，说明晶体管处于什么工作状态？如果测得 $U_{CE}\approx U_{CC}$ ，晶体管又处于什么工作状态？
2. 在图 3-2 所示的实验电路中，偏置电阻 R_B 起什么作用？