



实验与创新实践教育中心

实验报告

课程名称： 模拟电子技术实验 实验名称： 实验三：射极跟随器

专业-班级： 21级自动化6班 学号： 210320621 姓名： 吴俊达

实验日期： 2023 年 4 月 21 日 评分： _____

教师评语：

助教签字： _____

教师签字： _____

日 期： _____

实验预习

实验预习和实验过程原始数据记录

预习结果审核：_____ 原始数据审核：_____

(包括预习时，计算的理论数据)

注意：所有的波形都必须拍照保存，用于课堂检查和课后分析。

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	$R_B/k\Omega$	$R_E/k\Omega$	V_{BE}/V	V_{CE}/V	I_E/mA	I_B/mA
6.670	7.320	11.995	333.81	1.9798	0.650	5.825	3.369	0.0400

$$\frac{11.995 - 7.320}{333.81}$$

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/V	U_s/V	$U_o/V (=1k\Omega)$	A_u	A_{us}
A 点	1.711	2.022	1.673	0.978	0.827
B 点	1.687	/	1.653	0.980	/

表 3-4 射极跟随器跟随特性测量数据表

U_i/V	0.990	1.091	1.189	1.289	1.388	1.487	1.587	1.686
U_o/V	0.978	1.077	1.174	1.271	1.368	1.464	1.560	1.651

表 3-5 射极跟随器输入电阻测量数据表

	U_s/mV	U_i/mV	$R_i/k\Omega$	
			测量值	理论值
空载	991	912	230.89	196.61
=1k Ω	990	843	114.69	109.00

表 3-6 射极跟随器输出电阻测量数据表

	U_L/V	U_o/V	$R_o/k\Omega$	
			测量值	理论值
A 点接入	0.839	0.911	0.0858	0.087
B 点接入	1.001	1.011	0.010	0.0831

表 3-7 射极跟随器幅频特性测量数据表

		f_L			f_0			f_H	?
f	10Hz	50Hz	100Hz	1kHz	10kHz	100kHz	1MHz	2MHz	3MHz
U_i/V	0.697	0.694	0.697	0.699	0.702	0.700	0.703	0.719	0.701
U_o/V	0.390	0.643	0.664	0.684	0.689	0.687	0.691	0.703	0.746
$A_u = U_o/U_i$	0.560	0.914	0.953	0.978	0.981	0.981	0.983	0.978	/

5MHz 10MHz
 0.750 0.737
 0.655 0.466
 0.873 0.632

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测试方法。

二、实验设备及元器件

1. 直流稳压电源一台，型号 DP832A
2. 手持万用表一台，型号 Fluke F227C
3. 信号发生器，一台，型号 Tek AFG1062 或 DG4062
4. 电阻若干，阻值分别为 20kΩ×1, 1kΩ×1, 100kΩ×1, 2kΩ×1
5. 电位器，最大阻值为 100kΩ
6. 三极管 1 只，型号为 9013。
7. 电容 2 只，容量均为 10μF。
8. 示波器一台，型号为 Tek MSO2012B。
9. 短接桥和连接导线若干，型号分别为 P8-1 和 50148
10. 实验用 90 方板 1 块，大小为 300mm × 298mm。

三、实验原理（重点简述实验原理，画出原理图）

图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射极跟随器，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。

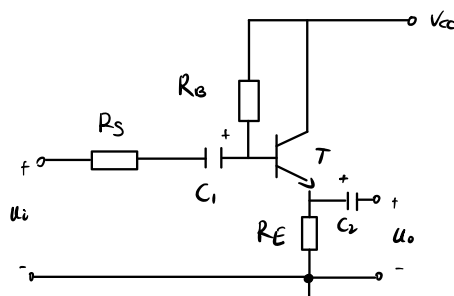


图1 射极跟随器

1. 静态工作点

实验中，可在静态 $U_i = 0$ （信号源短路）时，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：

$$U_{BE} = V_B - V_E, \quad I_C \approx I_E = (1 + \beta)I_B, \quad I_B = \frac{V_{CC} - V_B}{R_B} \text{ 或 } I_B = \frac{I_C}{\beta}, \quad U_{CE} = V_{CC} - V_E$$

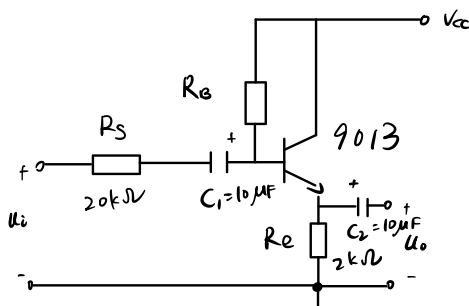


图2 射极跟随器的实验线路图

2. 放大电路动态性能指标

1) 输入电阻 R_i ：画出微变等效电路如下所示：

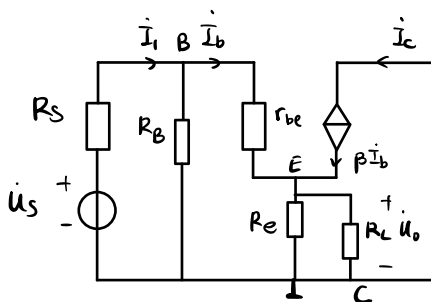


图3 射极跟随器的微变等效电路

如果不考虑负载 R_L 的影响，则 $R_i = R_B / [r_{be} + (1 + \beta)R_E]$ ；如果考虑负载 R_L 的影响，则： $R_i = R_B / [r_{be} + (1 + \beta)(R_E // R_L)]$ 。由上式可知，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。在本次实验中， $r_{be} = 2k\Omega$ 。

射极跟随器的实验电路如图 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，即可推导出 R_i 的计算公式： $R_i = \frac{U_i}{I_i} = \frac{U_i}{U_s - U_i} R_s$

2) 输出电阻 R_o ：

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 $U_L = \frac{R_L}{R_L + R_o} U_o$ ，即可推导出输出电阻 R_o 的计算公式： R_o

$$= \left(\frac{U_o}{U_L} - 1 \right) R_L。$$

3) 电压放大倍数 A_u

射极跟随器的电压放大倍数 A_u 为

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

上式说明射极跟随器的电压放大倍数 A_u 小于等于 1（接近 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。

四、实验过程

（叙述具体实验过程的步骤和方法，记录实验数据在原始数据表格，如需要引用原始数据表格，请标注出表头，如“实验数据见表 1-*”）

1. 测定静态工作点

按图 2 所示连接射极跟随器实验电路。接通+12V 直流电源，在 B 点加入频率为 1kHz 的正弦交流信号 u_i ，（调至 1V 左右），用示波器观察输入电压和输出电压波形，保证输出无失真波形，然后关闭信号源 u_i （将其置零），用万用表直流电压档，测量晶体管各极对地电位，将测得数据填入表 3-2 中。

在下面整个测试过程中，保持 R_B 不变，即静态工作点不变。

2. 测量电压放大倍数

接入负载 R_L 为 $1k\Omega$ ，在 B 点加入频率为 1kHz 的正弦交流信号 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_o 值。填入表 3-3 中。计算放大倍数。

在 A 点加入频率 1kHz 的正弦交流信号 u_s ，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_s 、 U_o 值。填入表 3-3 中。计算放大倍数。

3. 测量跟随特性

接入负载 R_L 为 $1k\Omega$ ，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 ，在输出不失真情况下，测量对应的输出电压 U_L ，填入表 3-4 中（选择较宽范围的 U_i ）。

4. 测量输入电阻 R_i

负载为空载，在 A 点加入频率 1kHz 的正弦交流信号 u_s （调至 1V 左右），用示波器观察输入电压和输出波形，保证输出无失真，用交流毫伏表分别测量 A、B 点对地的电位 U_s 、 U_i ，填入表 3-5 中，然后接入负载 R_L 为 $1k\Omega$ ，重复上述操作。计算输入电阻测量值，与理论计算值比较，分析误差产生的原因，并分析空载和带载两组数据的差异。

5. 测量输出电阻 R_o

接入负载 R_L 为 $1k\Omega$ ，在 A 点接入频率为 1kHz 的正弦交流信号 u_s （调至 1V 左右），用示波器观察输入电压 u_s 和输出波形 u_o ，保证输出无失真，测量空载时输出电压 U_o 和有负载时输出电压 U_L ，填入表 3-6 中。在 B 点接入频率为 1kHz 的正弦交流信号，重复上述操作。计算输出电阻测量值，与理论计算值比较，分析误差产生的原因，并分析 A 点接入和 B 点接入两组数据的差异。

6. 测试频率响应特性

接入负载 R_L 为 $1k\Omega$ ，保持输入信号 u_i 的幅度不变为有效值 0.7V，以 $f=10kHz$ 为基本频率，分别向上和向下调节频率，用示波器测量不同频率下的输入电压 U_i 及输出电压 U_o 有效值，填入表 3-7 中，并在坐标纸中，绘制幅频响应曲线图 $A_u=F(f)$ 。

五、实验数据分析

（按指导书中实验报告的要求用图表或曲线对实验数据进行分析 and 处理，并对实验结果做出判断，如需绘制曲线请在坐标纸中进行）

1. 测定静态工作点

根据表 3-2 的测量数据，和理论计算值比较，分析误差产生的原因。

答：（注：表 3-2 中的“计算值”一栏，填写的是根据测量值计算得值，不是理论计算值）

静态时，电容相当于开路，画出直流通路如右图所示：

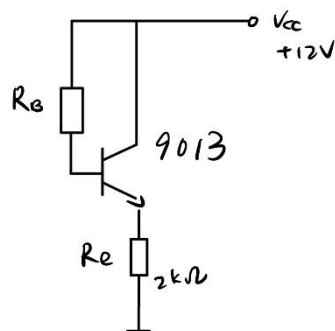
理论推导如下：若给定三极管的放大倍数 β ，导通时发射结压降 U_{BE} ，则：

根据基尔霍夫电压定律，有： $V_{CC} - I_B R_b - U_{BE} - I_E R_e = 0$

根据三极管的电流控制关系，有 $(1 + \beta)I_B = I_E$

解得 $I_B = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R_b + (1 + \beta)R_e}$ ， $I_E \approx I_C \approx (1 + \beta)I_B$ ，

$V_E = I_E R_e$ ， $U_{CE} = V_{CC} - V_E$



误差产生的原因可能有：①实际管子的电压放大倍数、结压降与理论计算时取的值有差异；②电阻实际取值与标注不同；③信号源本身存在内阻；④存在接触电阻；⑤表头内阻的影响；等等。

2. 测量输出电阻 R_o 和输入电阻 R_i

根据表 3-4 和 3-5，测量的输入电阻和输出电阻，与理论计算值比较，分析误差产生的原因。

答：（注：表 3-4、3-5 中的“计算值”一栏，填写的是根据测量值计算得值，不是理论计算值，理论计算值在本题接下来的作答中给出）

根据表 3-2 结果可计算出直流电流增益 $\beta = I_E / I_B - 1 = 239.6$

对于输入电阻，不考虑负载影响时，

$$\begin{aligned} R_i &= R_b // [r_{be} + (1 + \beta)R_e] \\ &= 333.81 // [2 + (1 + 239.6) \times 1.9798] \text{k}\Omega \\ &= 333.81 // 478.34 \text{k}\Omega \\ &= 196.61 \text{k}\Omega \end{aligned}$$

考虑负载影响时，

$$\begin{aligned} R_i &= R_b // [r_{be} + (1 + \beta)(R_e // R_L)] \\ &= 333.81 // [2 + (1 + 239.6) \times 0.6644] \text{k}\Omega \\ &= 333.81 // 161.85 \text{k}\Omega \\ &= 109.00 \text{k}\Omega \end{aligned}$$

对于输入电阻，信号源内阻较小时，

$$R_o \approx \frac{r_{be}}{1+\beta} = \frac{2k\Omega}{240.6} = 8.31\Omega$$

信号源内阻较大时，

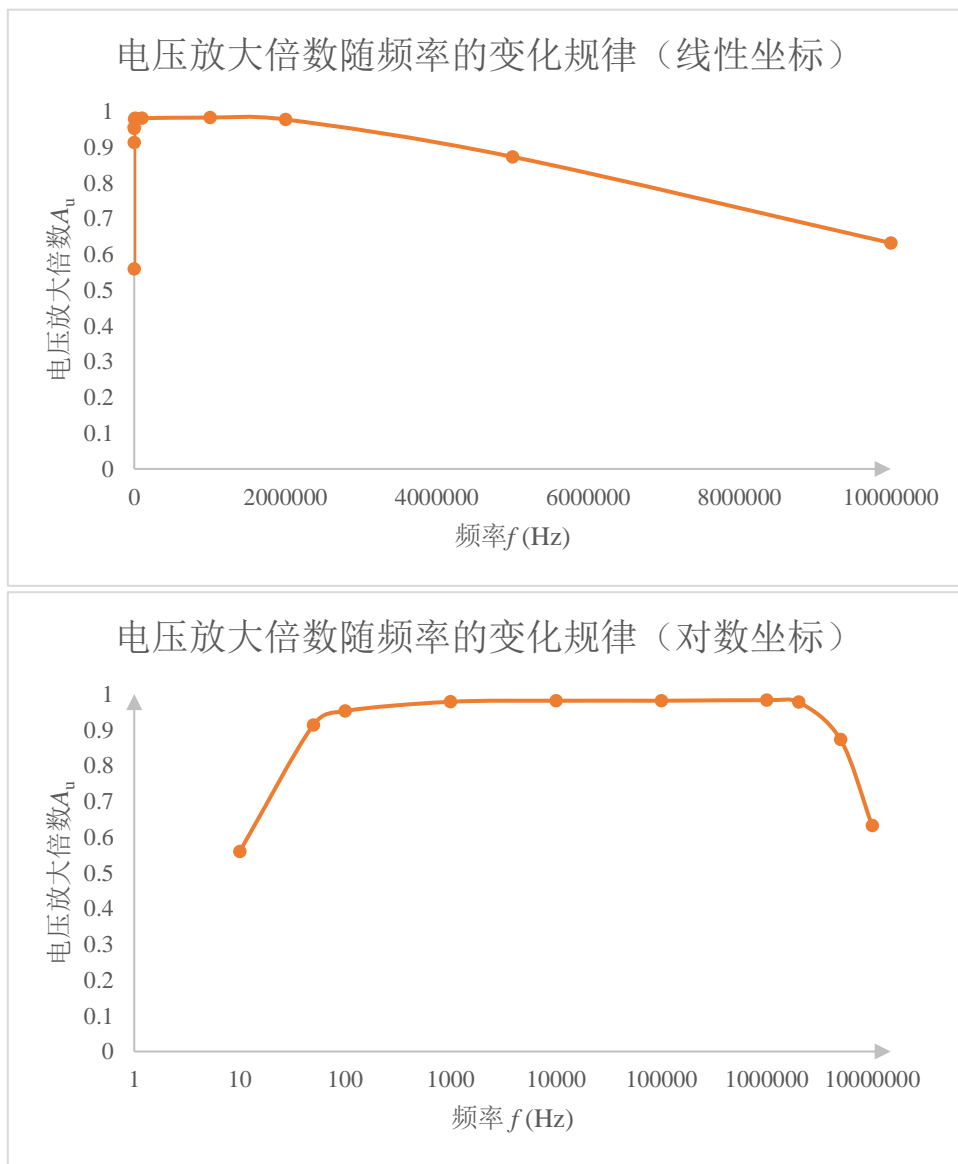
$$R_o \approx \frac{R_B // R_s + r_{be}}{1+\beta} = \frac{2k\Omega + 20k\Omega // 333.81k\Omega}{240.6} = \frac{20.87}{240.6} k\Omega = 0.087k\Omega$$

与测量值对比可见，测得的输入电阻偏大，输出电阻相近。

误差产生的原因可能有：①存在接触电阻；②表头内阻的影响；③信号源本身存在内阻，计算时未考虑，而只考虑了外加的模拟信号源电阻；等等。

3. 根据表 3-7，在坐标纸中，绘制幅频响应曲线图 $A_u=F(f)$ 。

答：利用 Excel 作图，第一张图采用线性坐标，发现低频段特性反映得不清晰；所以采用对数坐标画了第二张图，更清晰地反映出每十倍频（频率变化 10 倍）时电压放大倍数随频率的变化规律。



六、问题思考

(回答指导书中的思考题)

1. 测量放大器静态工作点时，如果测得 $U_{CE} < 0.5V$ ，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？

答：① 如果测得 $U_{CE} < 0.5V$ ，说明晶体管工作于饱和区（处于饱和导通状态）。② 如果测得 $U_{CE} \approx U_{CC}$ ，晶体管工作于截止区，处于截止状态。

2. 在图 3-2 所示的实验电路中，偏置电阻 R_B 起什么作用？

答：作用是：限制基极电流，提供合适的静态工作点（ U_{BEQ} 和 I_{BQ} ），使晶体管工作在放大区，并防止输入信号短路。

3. 在测试表 3-7 时，当频率达到 100kHz 以上时，为什么不能使用 F287C 测量，而需要使用示波器，试说明选择示波器进行测量的原因。

答：① 不能使用 F287C 测量的原因：万用表的工作频率范围较小，不能完全满足测量要求。下图截取自 287C 的使用手册，可见频率在 65-100kHz 时误差可达 6%，20Hz 以下和 100kHz 以上的测量范围根本未标出（说明不适合在该频段下使用）。并且用万用表只能测出电压的有效值，无法观察波形，也就无法判断波形是否失真，失真时算出的电压放大倍数无意义。

287/289
用户手册

交流电压规格

功能	量程	分辨率	准确度				
			20 至 45 Hz	45 至 65 Hz	65 Hz 至 10 kHz	10 至 20 kHz	20 至 100 kHz
AC mV	50 mV ^[1]	0.001 mV	1.5 % + 60	0.3 % + 25	0.4 % + 25	0.7 % + 40	3.5 % + 40 ^[5]
	500 mV	0.01 mV	1.5 % + 60	0.3 % + 25	0.4 % + 25	0.7 % + 40	3.5 % + 40
AC V	5 V ^[1]	0.0001 V	1.5 % + 60	0.3 % + 25	0.6 % + 25	1.5 % + 40	3.5 % + 40 ^[5]
	50 V ^[1]	0.001 V	1.5 % + 60	0.3 % + 25	0.4 % + 25	0.7 % + 40	3.5 % + 40
	500 V ^[1]	0.01 V	1.5 % + 60	0.3 % + 25	0.4 % + 25	未指定	未指定
dBV	1000 V	0.1 V	1.5 % + 60	0.3 % + 25	0.4 % + 25	未指定	未指定
	-70 至 -62 dB ^[3]	0.01 dB	3 dB	1.5 dB	2 dB	2 dB	3 dB
	-62 至 -52 dB ^[3]	0.01 dB	1.5 dB	1.0 dB	1 dB	1 dB	2 dB
	-52 至 -6 dB ^[3]	0.01 dB	0.2 dB	0.1 dB	0.1 dB	0.2 dB	0.8 dB
-6 至 +34 dB ^[3]	0.01 dB	0.2 dB	0.1 dB	0.1 dB	0.2 dB	0.8 dB	
	34 至 60 dB ^[3]	0.01 dB	0.2 dB	0.1 dB	0.1 dB	未指定	未指定
Low pass filter ^[4]			2 % + 80	2 % + 40	2 % + 10 -6 % -60 ^[2]	未指定	未指定
LoZ ^[4]	1000 V	0.1 V	2 % + 80	2 % + 40	2 % + 40 ^[6]	未指定	未指定

[1] 量程的 5 % 以下，加 20 个字。
 [2] 规格从 200Hz 的 -2 % 非线性增加到 440 Hz 的 -6 %。量程限制为 440 Hz。
 [3] dBm (600 Ω) 规定为给 dBV 量程值增加 +2.2 dB。
 [4] 仅限 289 型。
 [5] 高于 65 kHz 时增加 2.5 %。
 [6] 量程限制为 440 Hz。
 更多信息请参阅“详细规格”介绍。

② 选择示波器进行测量的原因：示波器可以克服以上问题。首先，示波器带宽较宽。本次实验我们使用的 Tektronix MSO2012B，带宽可达 100MHz（如下图所示）；其次，示波器还可显示波形，便于我们观察是否失真；第三，示波器的精度较高。

模拟带宽	示波器	5 mV/分度到 5 V/分度，环境温度 0 °C 到 40 °C (0 °F 到 104 °F)	5 mV/分度到 5 V/分度，环境温度 0 °C 到 50 °C (0 °F 到 122 °F)	<5 mV/分度
	MSO2024B、MSO2022B、DPO2024B、DPO2022B	直流到 ≥ 200 MHz	直流到 ≥ 160 MHz	20 MHz
	MSO2014B、MSO2012B、DPO2014B、DPO2012B	直流到 ≥ 100 MHz		20 MHz
	MSO2004B、MSO2002B、DPO2004B、DPO2002B	直流到 ≥ 70 MHz		20 MHz

七、实验体会与建议

体会 1. 一定要细致耐心。确保接线无误后再上电。

体会 2. 实验前要做好预习，用好视频资源。

建议 1. 为什么幅频特性不能用 Excel 或 MATLAB 绘图？我此次就使用 Excel 绘图，比手绘简便许多，尤其是还可绘制采用对数坐标的图形。既然观察趋势、概括结论的过程与作图方式根本无关，为何还强调坐标纸手绘？

提问 1. 原始数据表 3-7 中，在测量频率为 3MHz 信号时，波形未失真，但用交流毫伏表测得的输入电压竟比输出电压还小（此时示波器上波形有很大的毛刺，读数不稳，故未采用示波器的数据），很明显是不合理的数据（射极跟随器没有电压放大功能），而当频率进一步提高时，输入电压又比输出电压大了，也即：异常只集中在信号频率取 3MHz 附近时。为何会有这样的现象？

（我又做了仿真实验，仿真结果见附录【下一页】。可见仿真实验并未出现线下实验的结果。难道是交流毫伏表的内部结构导致？）

附录

实验三 射极跟随器 拓展仿真实验结果

210320621 吴俊达 2023-05-08

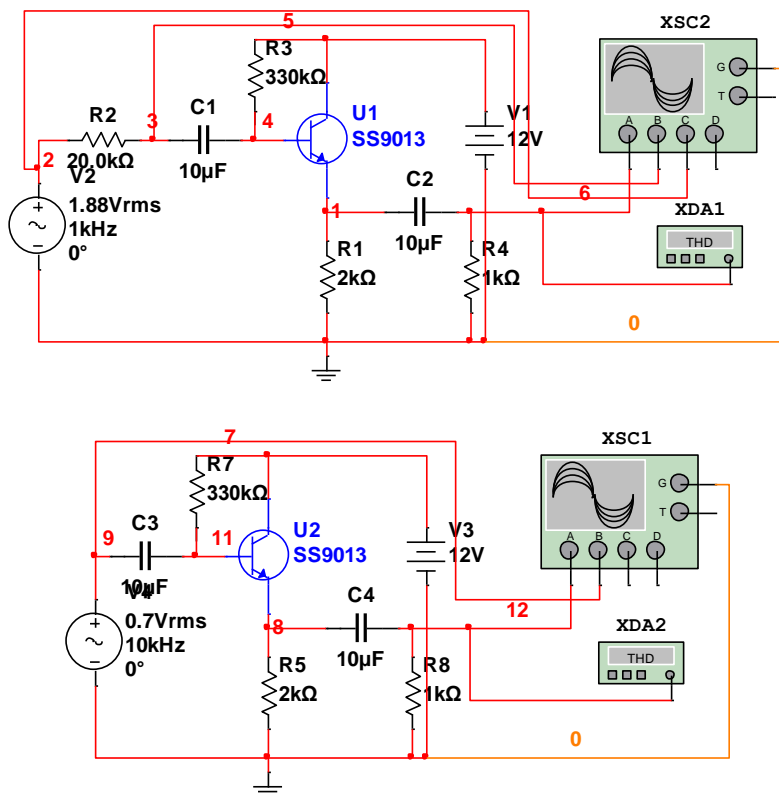
使用软件: Multisim 14.2

系统: Windows 7 Ultimate x86

主要目的: 利用仿真软件的强大分析功能, 对实验中出现的令我疑惑或没法量化(如“最大不失真输出电压”, 实验中只能凭肉眼观察, 仿真软件则可以计算失真度)的现象进行重新实验, 观察大致趋势和数据的大致范围(数量级等), 提高对射极跟随器的特性理解, 与实际实验对照参考。

电路图

上图为 A 点接入(有信号源内阻), 下图为 B 点接入(直接是输入信号)。XDA 为失真分析仪, XSC 为示波器。仿真使用的三极管放大倍数为 200 倍。



静态工作点测试

Variable	Operating point value
V(1)	6.38127
V(4)	7.03417
V(5)	12

V(1) 为发射极静态电位, V(4) 为基极静态电位, V(5) 为集电极静态电位。

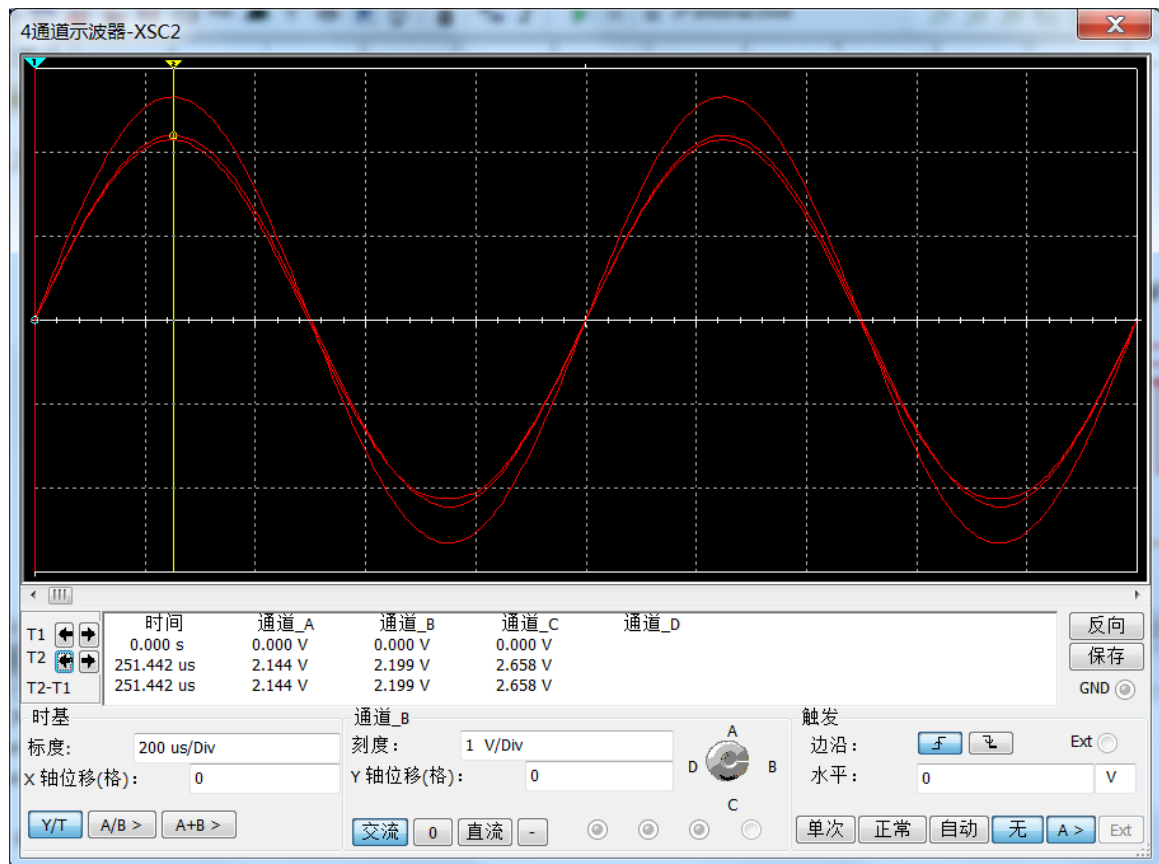
放大倍数测量

判断“最大不失真”的标准：失真分析仪测出的“总谐波失真”(THD)不超过 1%。

对于 A 点接入情况，有（此时对应输入电压有效值 1.88V）



用示波器测出峰值得：（通道 A 为输出，通道 B 为输入电压，通道 C 为信号源）

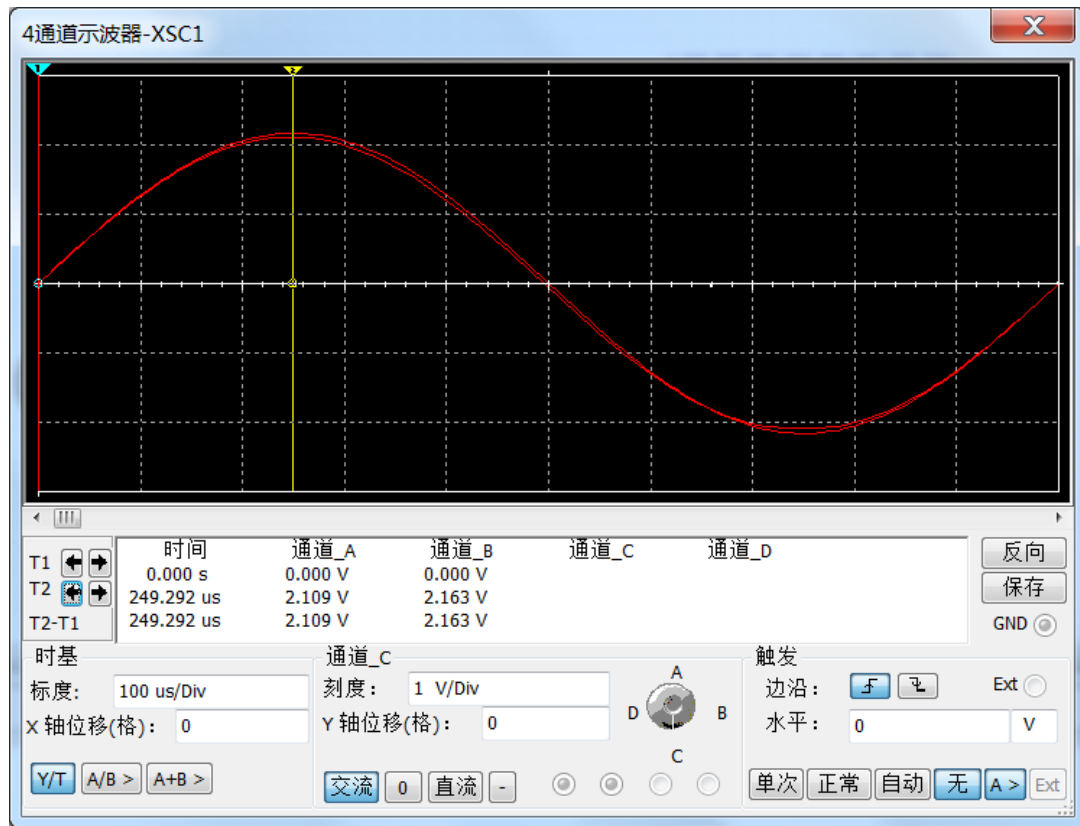


可计算得 $A_u=0.974$, $A_{us}=0.807$

对于 B 点接入情况，有（此时对应输入电压有效值 1.53V）



用示波器测出峰值得：（通道 A 为输出，通道 B 为输入电压）



可计算得 $A_u=0.975$.

频率响应

利用 Multisim 的交流扫描分析绘制出下图。（图 1 幅频特性、图 2 相频特性、图 3 放大倍数的变化规律）可见并未出现电压放大倍数大于 1 的情况，排除掉那个点之后，仿真结果与实际实验结果相吻合。

