

实验一 单管放大电路仿真及实验

自 54 田毅 2015011451

一、实验目的

1. 熟悉放大电路的基本原理，掌握静态工作点的调节方法。
2. 掌握放大电路的主要性能指标的测量方法。
3. 了解静态工作点对放大电路动态特性的影响。
4. 了解发射极负反馈电阻对放大电路性能的影响。
5. 学习基于 Multisim 的电路设计和测量方法。

二、预习要求

请仔细阅读网络学堂中的 ppt 和本文档，完成理论估算（估算时假设 $r_{bb'} = 100\Omega$ ， β 、 f_H 、 f_L 不必估算）、仿真实验内容，熟悉硬件实验内容，拟定测试方法、步骤和数据表格，写出预习报告。实验室安装的软件版本为 Multisim 11.0。

三、实验电路及测试内容

1. 观测晶体管输出特性曲线
2. 静态调试
3. 测量动态特性
4. 射极负反馈电阻对动态特性的影响
5. 静态工作点对最大不失真输出电压 U_{om} 的影响

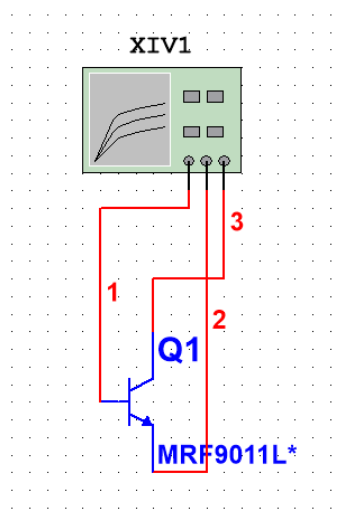
四、仿真实验内容

利用 Multisim 对上述单管放大电路进行仿真，完成“三、实验电路及测试内容”中的全部测试内容。其中三极管选用实际元件，型号为 MRF9011L，将模型参数中的 β （即 BF）改为第四周实验时的实测值；其它元件均选用虚拟元件。

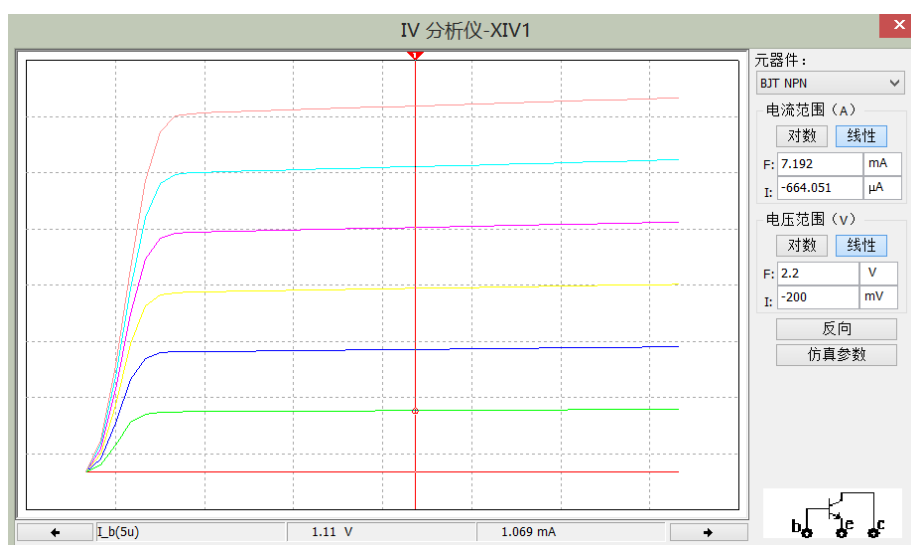
为了更好地指导硬件实验，仿真时请采用硬件实验的测试方法。

1. 观测晶体管输出特性曲线

仿真电路：



仿真波形:



数据记录:

已将基极阶梯电流固定为 $5\mu\text{A}$ 每级, 因为要测量静态工作点附近的 β , 所以应在Y轴为 $1\sim 2\text{mA}$ 时进行测量, 测得结果为 $2.138-1.069=1.069\text{mA}$; $\beta=1069/5=214$ 。

2. 静态调试

理论估算:

(1) $I_{CQ}=1\text{mA}$ 时静态工作点估算

求 R_W :

$$\frac{R_{B2}}{R_{B2} + R_{B1}} V_{CC} \approx 0.7 + I_{CQ}(R_{E1} + R_{E2}) \Rightarrow R_{B1} \approx 79.74\text{k}\Omega$$

$$R_W = R_{B1} - R'_{B1} = 59.74\text{k}\Omega$$

求Q点:

$$U_{CQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_C = 8.7\text{V}$$

$$U_{EQ} = I_{CQ}(R_{E1} + R_{E2}) = 1.2\text{V}$$

$$U_{CEQ} = U_{CQ} - U_{EQ} = 7.5\text{V}$$

(2) $I_{CQ}=2\text{mA}$ 时静态工作点估算

求 R_W :

$$\frac{R_{B2}}{R_{B2} + R_{B1}} V_{CC} \approx 0.7 + I_{CQ}(R_{E1} + R_{E2}) \Rightarrow R_{B1} \approx 43.06k\Omega$$

$$R_W = R_{B1} - R'_{B1} = 23.06k\Omega$$

求Q点:

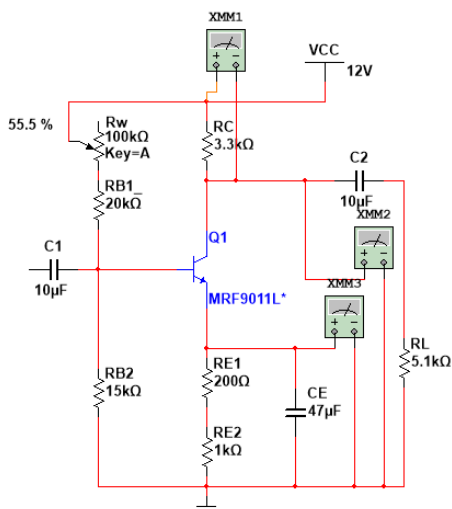
$$U_{CQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_C = 5.4V$$

$$U_{EQ} = I_{CQ}(R_{E1} + R_{E2}) = 2.4V$$

$$U_{CEQ} = U_{CQ} - U_{EQ} = 3V$$

仿真电路:

在仿真电路中, 通过 R_C 两端电压间接检测 I_C :



仿真结果:

$R_W = 55.5\% \times 100k\Omega = 55.5k\Omega$ 时, 三个万用表示数:



$R_W = 19.5\% \times 100k\Omega = 19.5k\Omega$ 时, 三个万用表示数:



数据记录:

测试量	$I_c = 1\text{mA}$ 仿真值	$I_c = 2\text{mA}$ 仿真值
R_W	$55.5\text{k}\Omega$	$19.5\text{k}\Omega$
U_{CQ}	8.705V	5.301V
U_{EQ}	1.203V	2.447V

3. 测量动态特性

理论估算 (取 $R_{bb'} = 100\Omega$, $\beta = 220$) :

(1) $I_{CQ}=1\text{mA}$ 时动态参数估算

求 A_u :

$$r_{be} \approx r_{bb'} + \beta U_T / I_C = 100 + 220 \times 26 / 1 = 5.82\text{k}\Omega$$

$$A_u = -\beta (R_C // R_L) / r_{be} \approx -75.74$$

求 R_i : (取理论值 $R_{B1} = 79.74\text{k}\Omega$)

$$R_i = R_{B1} // R_{B2} // R_{be} \approx 3.98\text{k}\Omega$$

求 R_o :

$$R_o = R_C = 3.3\text{k}\Omega$$

(2) $I_{CQ}=2\text{mA}$ 时动态参数估算

求 A_u :

$$r_{be} \approx r_{bb'} + \beta U_T / I_C = 100 + 220 \times 26 / 2 = 2.96\text{k}\Omega$$

$$A_u = -\beta (R_C // R_L) / r_{be} \approx -148.91$$

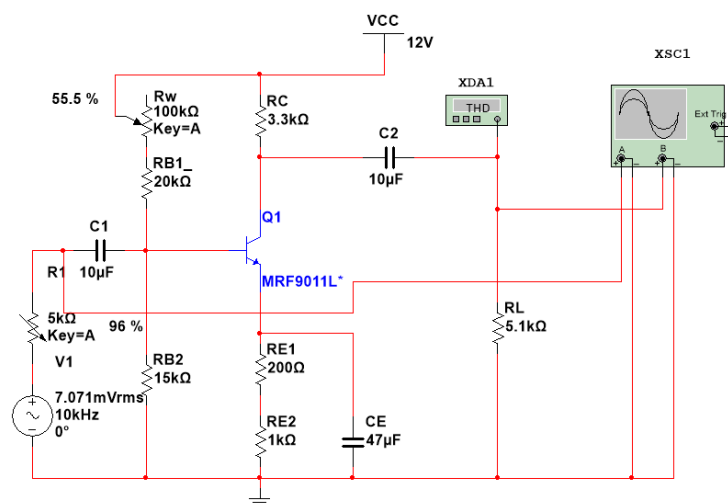
求 R_i : (取理论值 $R_{B1} = 43.06\text{k}\Omega$)

$$R_i = R_{B1} // R_{B2} // R_{be} \approx 2.34\text{k}\Omega$$

求 R_o :

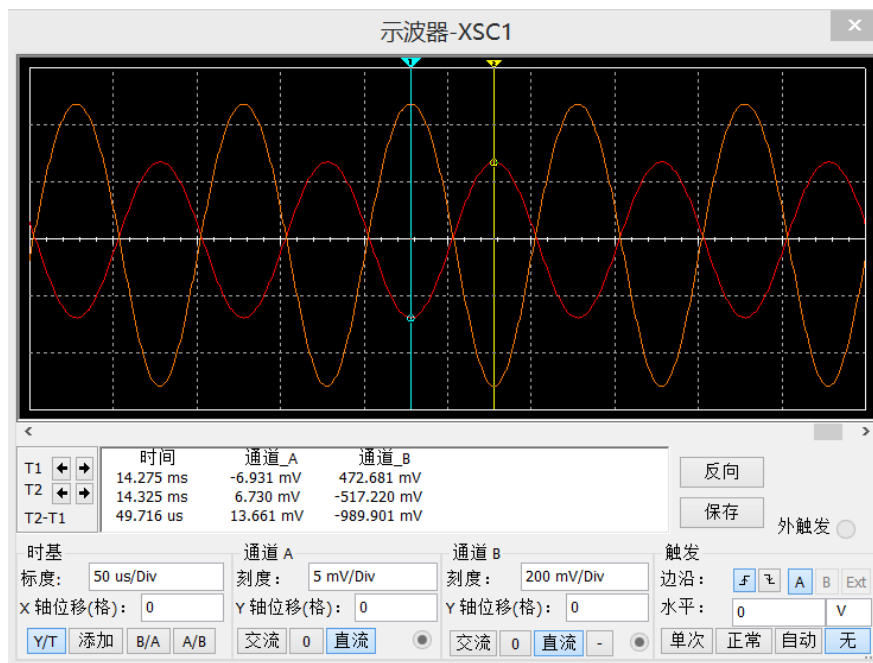
$$R_o = R_C = 3.3\text{k}\Omega$$

仿真电路及结果:



$I_C = 1\text{mA}$ 时:

(1) A_u 测量:

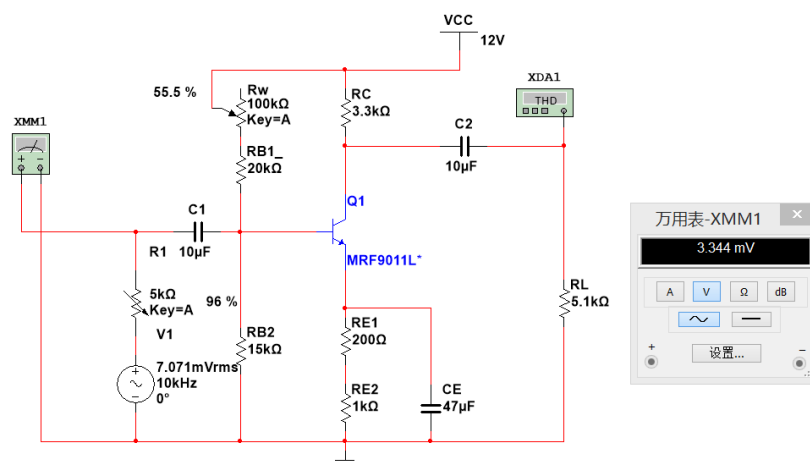


U_o 峰-峰值989.901mV, U_i 峰-峰值13.661mV, $A_u = U_o / U_i = -72.46$ 。

(2) 输入电阻测量:

输入端电阻为 0 时, $U_i = 7.071\text{V}$;

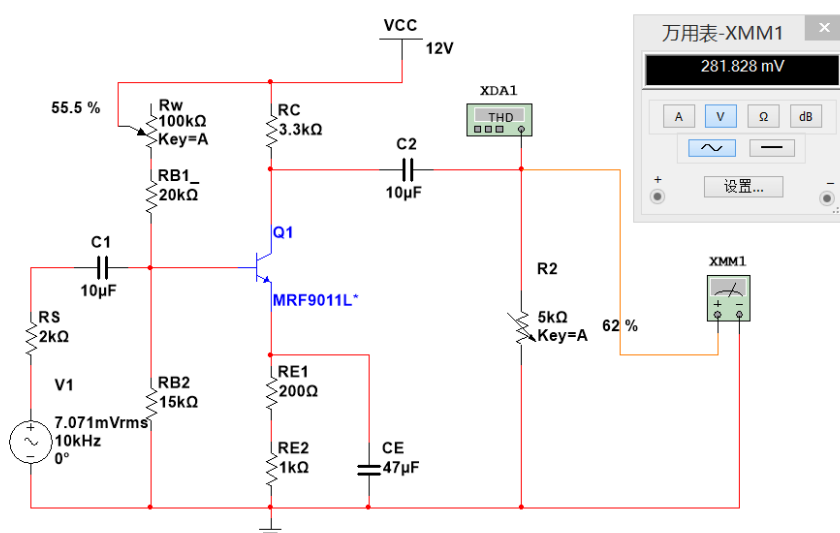
接入可变电阻, 测得 $R_i = 4.8\text{k}\Omega$ 。



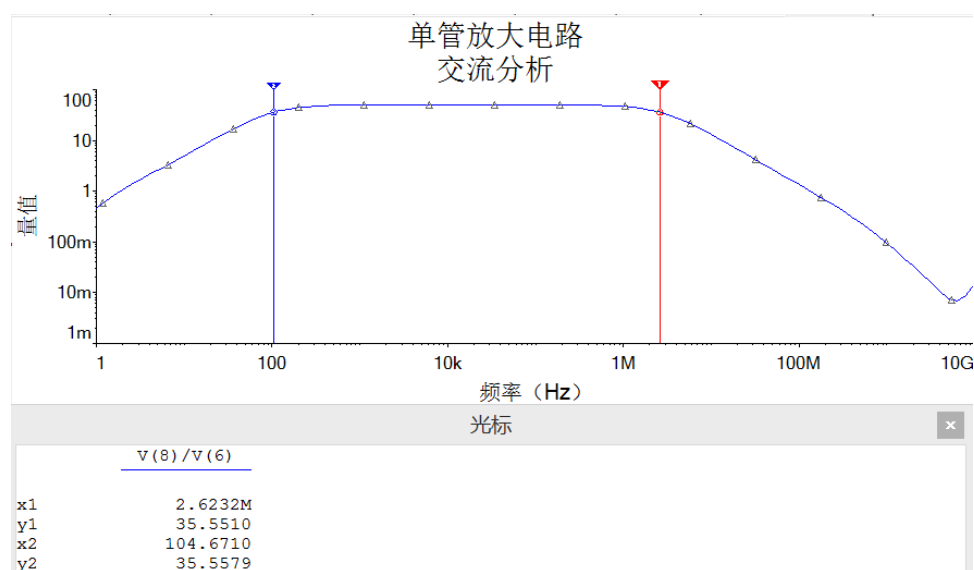
(3) 输出电阻测量:

输出端开路时, $U_o = 562.293\text{mV}$;

接入可变电阻, 测得 $R_o = 3.1\text{k}\Omega$ 。



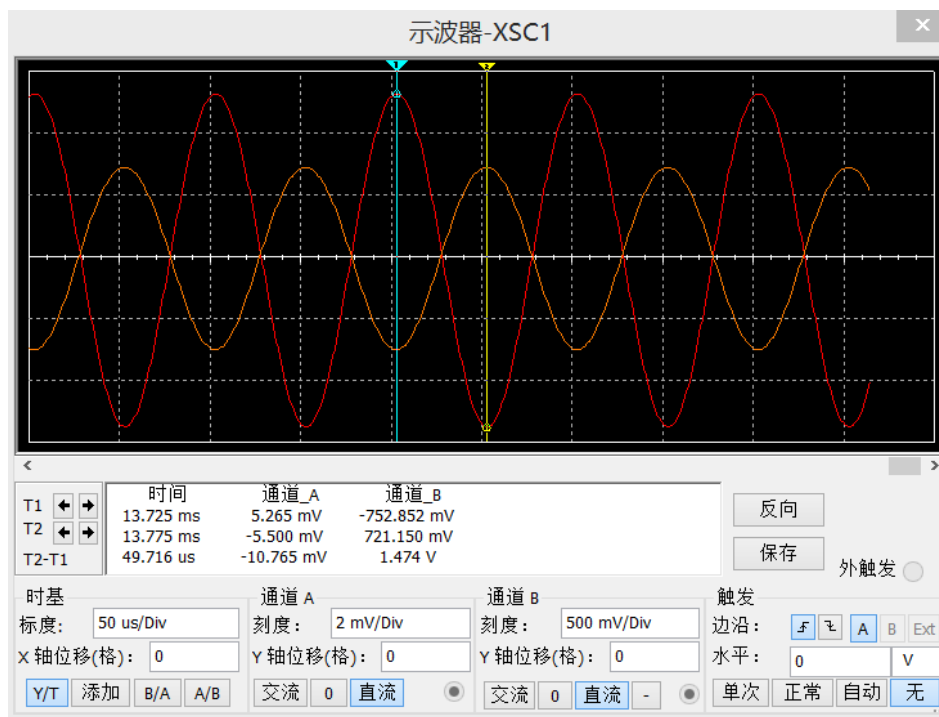
(4) 上下限频率测量:



由交流分析图象可以读出, U_o/U_s 约为 49.85, 0.707 倍对应的 f_H 为 2.62MHz, f_L 为 104.67Hz。

$I_C = 2\text{mA}$ 时:

(1) A_u 测量:

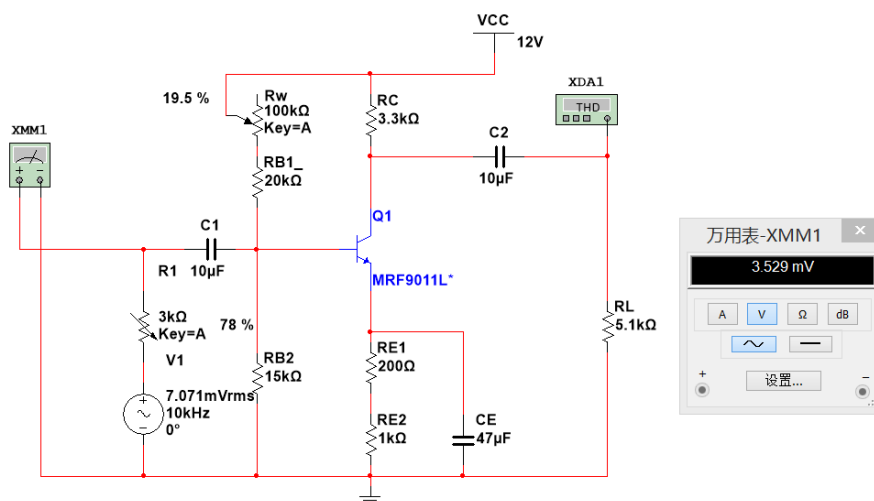


U_o 峰-峰值 1.474V, U_i 峰-峰值 10.765mV, $A_u = U_o / U_i = -136.93$ 。

(2) 输入电阻测量:

输入端短路时, 测得 $U_i = 7.071\text{V}$;

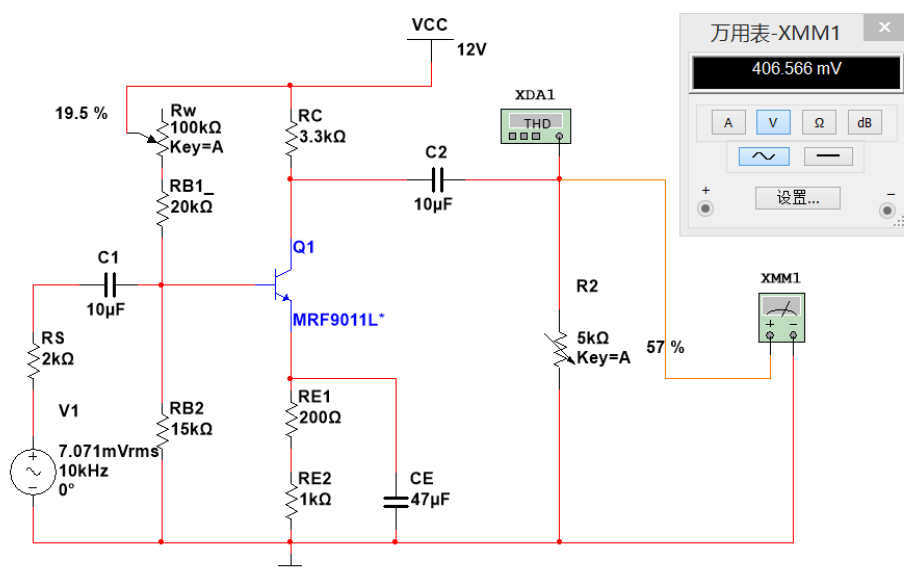
接入可变电阻, 测得 $R_i = 2.34\text{k}\Omega$ 。



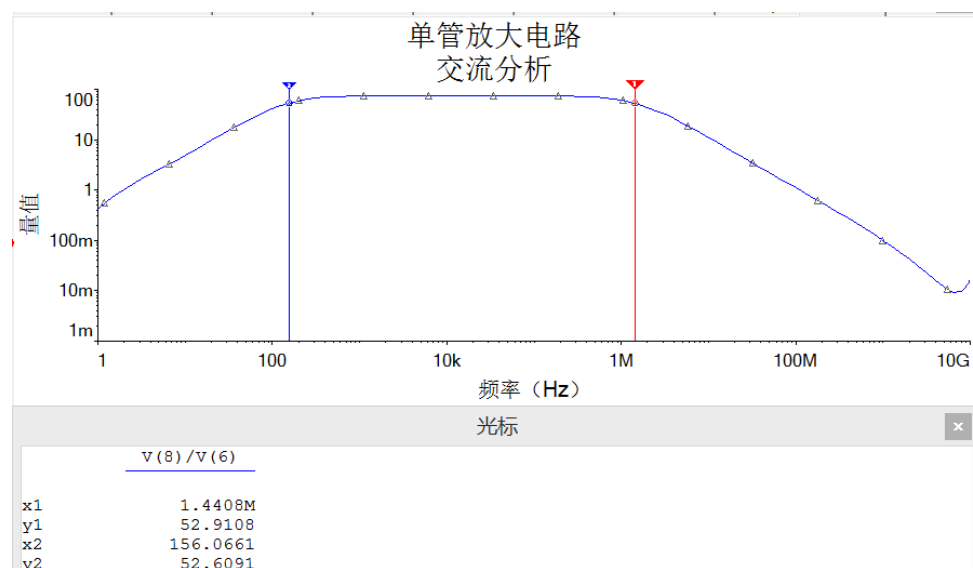
(3) 输出电阻测量:

输出端开路时, $U_o = 813.586\text{mV}$;

接入可变电阻, 测得 $R_o = 2.85\text{k}\Omega$ 。



(4) 上下限频率测量:



由交流分析图象可以读出, U_o/U_s 约为 74, 0.707 倍对应的 f_H 为 1.44 MHz, f_L 为 156.07 Hz。

4. 射极负反馈电阻对动态特性的影响 ($I_C = 2\text{mA}$)

理论计算:

$I_{CQ} = 1\text{mA}$ 时, 改接电容 C_e , 使之与 R_{e2} 并联后, 易知直流通路不变, 故静态工作点都不变。但交流通路中等效为在射极上加一个值为 $(1+\beta)R_{b1}$ 的电阻, 故有:

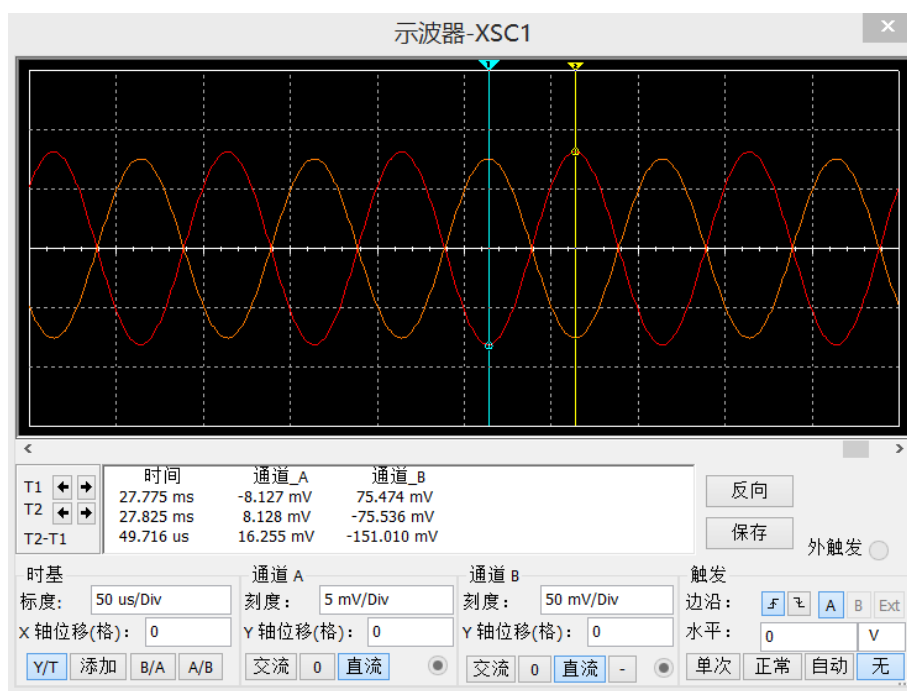
$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = -\frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be} + (1+\beta)R_{e1}}, \quad R_i = R_{b1} // R_{b2} // [r_{be} + (1+\beta)R_{e1}], \quad R_o = R_c。$$

因为 $R_{e1} = 200\Omega$, 故可计算出 $\dot{A}_u = -9.81$, $R_i \approx 10.20\text{k}\Omega$, $R_o = 3.3\text{k}\Omega$ 。

$I_C = 2\text{mA}$ 时同理。

仿真电路及结果:

A_u 测量:

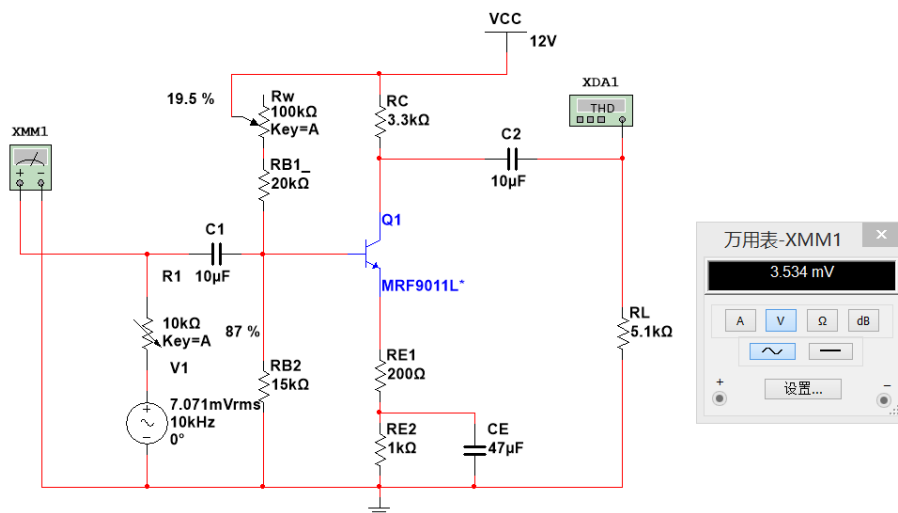


U_o 峰-峰值151.010mV, U_i 峰-峰值16.255mV, $A_u = U_o / U_i = -9.29$ 。

输入电阻测量:

输入端短路时, 测得 $U_i = 7.071V$;

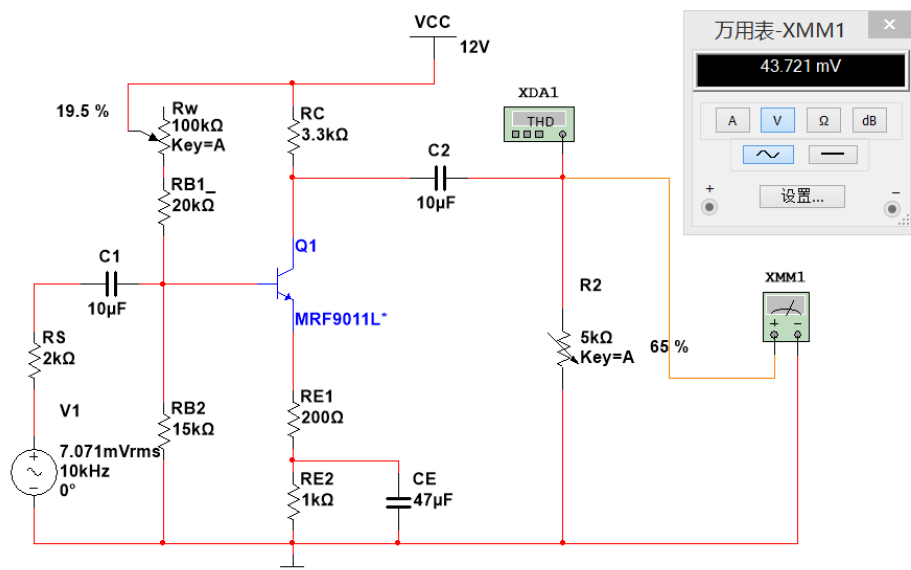
接入可变电阻, 测得 $R_i = 8.7k\Omega$ 。



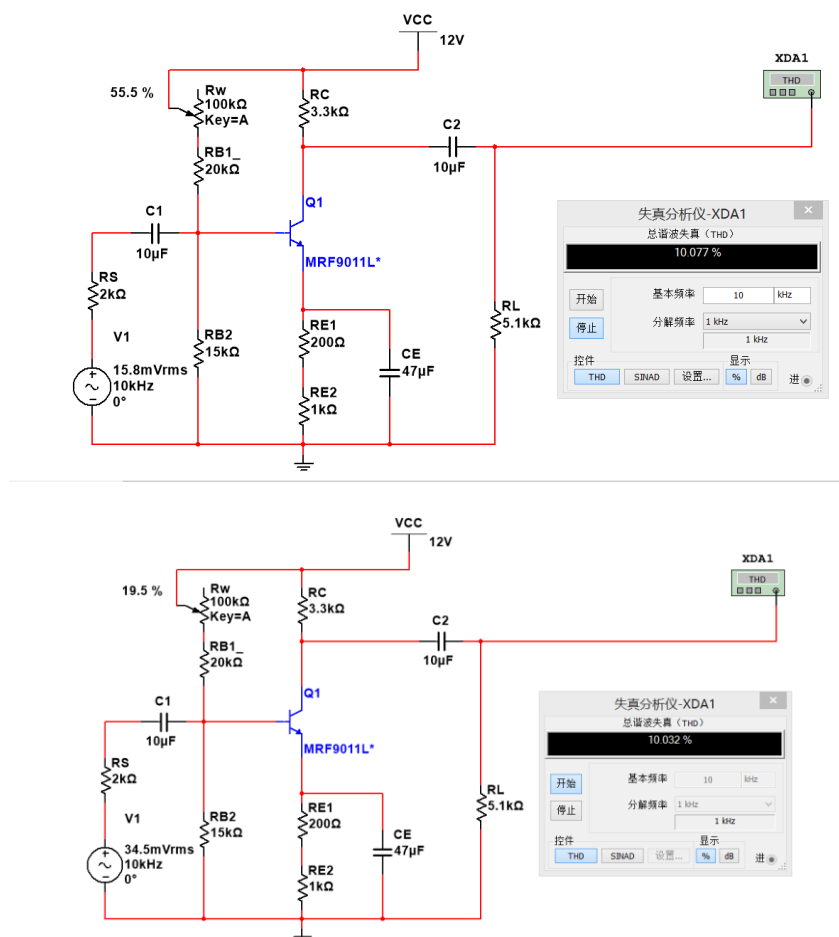
输出电阻测量:

输出端开路时, $U_o = 87.441mV$;

接入可变电阻, 测得 $R_o = 3.25k\Omega$ 。



5. 静态工作点对最大不失真输出电压 U_{om} 的影响
仿真电路及结果:



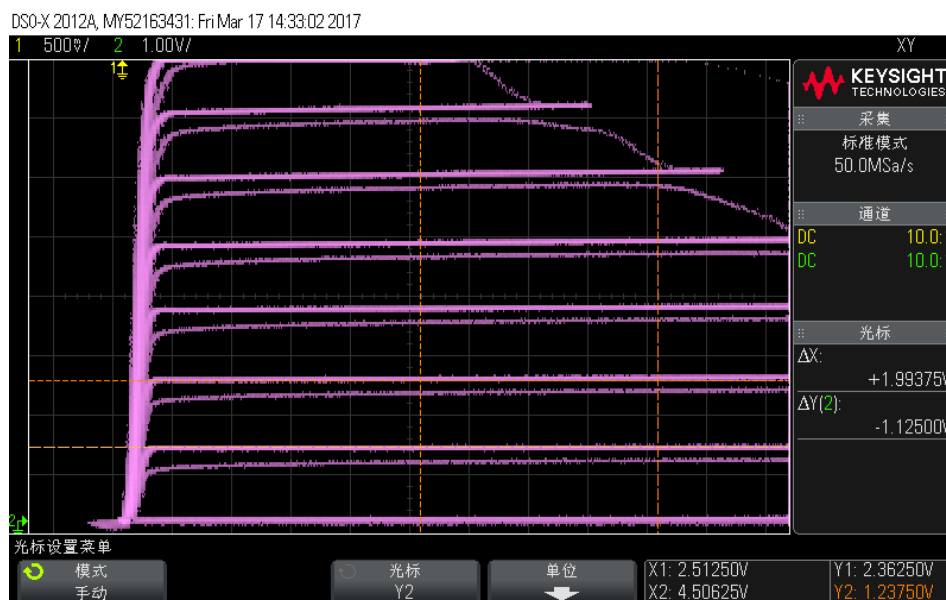
可以看到, $I_C = 1\text{mA}$ 时, 约在有效值15.8mV时失真; $I_C = 2\text{mA}$ 时, 约在有效值34.5mV时失真。

五、硬件实验内容

(一) 必做实验

1. 观测晶体管输出特性曲线

测试方法和步骤：将晶体管三个引脚E、B、C分别插入学习机上对应测试点，“NPN/PNP”开关拨至“NPN”；将示波器CH1和CH2通道分别接学习机“接X轴”和“接Y轴”，并置于“X-Y”工作模式；打开学习机及示波器开关，经过调整，即可在屏幕上看到大小和位置合适的输出曲线如下：



数据分析：测试电路已将基极阶梯电流固定为 $5\mu\text{A}$ 每级，示波器X通道为 U_{CE} ，Y通道为 I_C ， 1mA/V ；本实验静态工作点为 $I_C = 1\text{mA}/2\text{mA}$ ，因此如图中cursor所示，在这一取值附近进行测量，测得 $\Delta I_B = 5\mu\text{A}$ 时， $\Delta I_C = 1.125\text{mA}$ ；计算出 $\beta = \Delta I_C / \Delta I_B \approx 225$ 。仿真修改 $\beta_F = 240$ 后实测 $\beta = 214$ ，与此结果较为接近，参照仿真比较实测结果有一定价值。

2. 静态调试

测试方法及步骤：调节 R_W ，分别使 $I_{CQ} = 1\text{mA}$ 、 2mA ，即 R_C 两端电压为 3.3V 、 6.6V ，记录相应的 U_{CQ} 、 U_{EQ} 以及 R_W ，并根据 $U_{CEQ} = U_{CQ} - U_{EQ}$ 计算出 U_{CEQ} 的值。数据整理如下。

测试量	1mA 实测	1mA 仿真	1mA 理论	2mA 实测	2mA 仿真	2mA 理论
$R_W/\text{k}\Omega$	59.2	55.5	59.74	21.7	19.5	23.06
U_{CQ}/V	8.62	8.705	8.7	5.38	5.301	5.4
U_{EQ}/V	1.21	1.203	1.2	2.42	2.447	2.4
U_{CEQ}/V	7.41	7.502	7.5	2.96	2.854	3

数据分析：从表中可见，静态参数实测值与仿真值、理论值吻合得相当好。

3. 测量动态特性

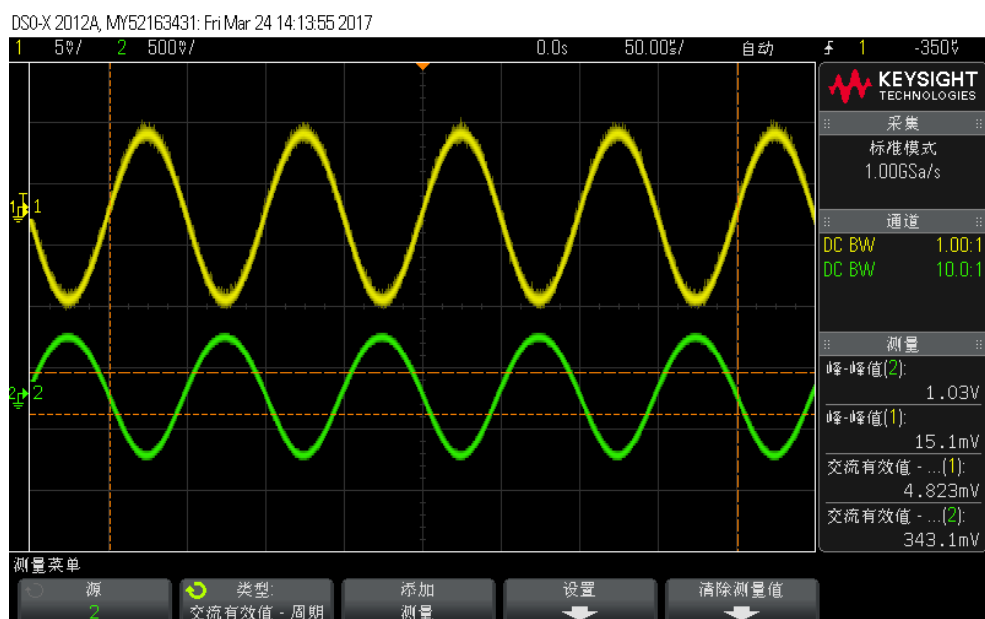
(1) 在静态工作点 $I_{CQ} = 1\text{mA}$ 、 2mA 时，测量电路的动态特性

测试方法及步骤：电路图如仿真。设置信号源输出为峰-峰值为 20mV 、频率为 10kHz 的正弦波，用示波器同时显示 u_i 和 u_o 的波形；注意若波形不好应开带宽限制(BW)，并对于输入信号用 $\times 1$ 探头，

输出信号使用 $\times 10$ 探头。波形调好后,观察失真情况,发现大体不失真后测量 U_i 、 U_o ,使用cursor测量或使用measure的交流有效值功能直接读出,据此计算 A_u 。测量输入(输出)电阻采用仿真中的方法,分别将 $R_S(R_L)$ 替换为可变电阻,直至输入电压是 R_S 短路时的一半(输出电压是 R_L 开路时的一半);此时,断开电路,测量可变电阻阻值即为输入(输出)电阻。对于 f_L 和 f_H 测量,使用示波器自带的信号源,为减少示波器探头电容的影响,将探头1移除,只使用探头2进行本项实验,分别测量 u_o 在低频和高频区大小为中频区0.707倍的位置,即为 f_L 和 f_H 。需要特别注意的是,高频时应取消带宽限制。

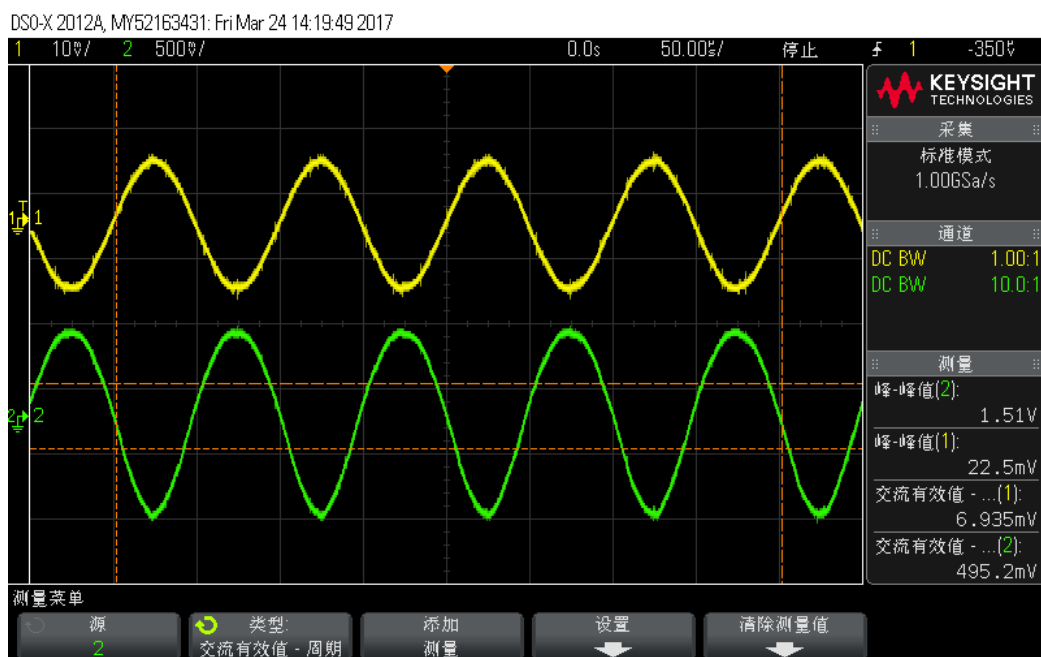
波形图:

i. 1mA时测量 U_i 、 U_o 波形图:

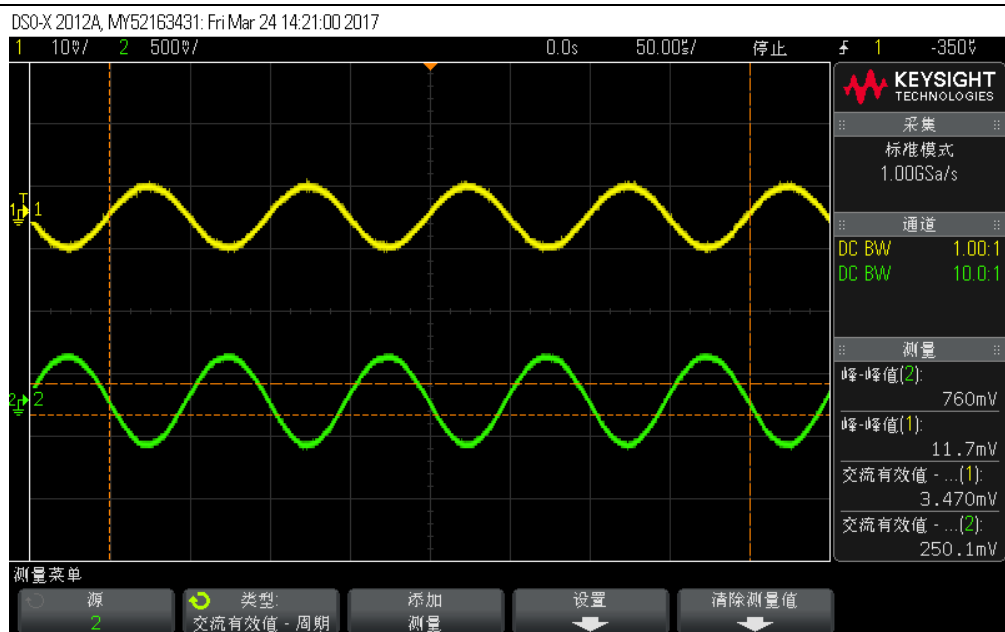


由图中有效值数据,可计算出 $A_u = 343.1 / 4.823 = 71.13$ 。

ii. 1mA时测量输入电阻时 R_S 短路和输入电压减半时的波形图



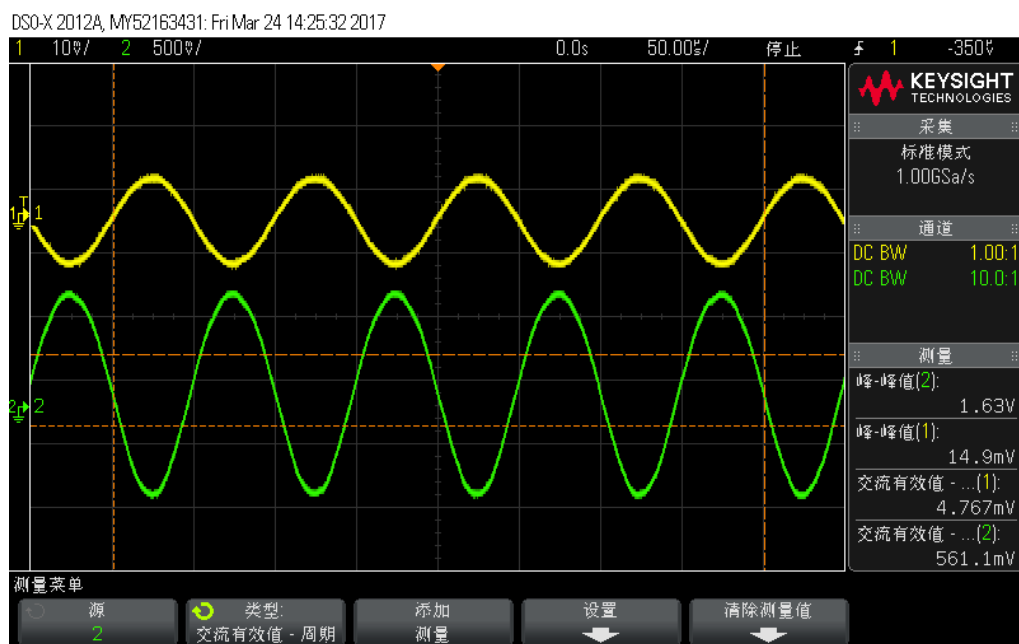
R_S 短路时波形图

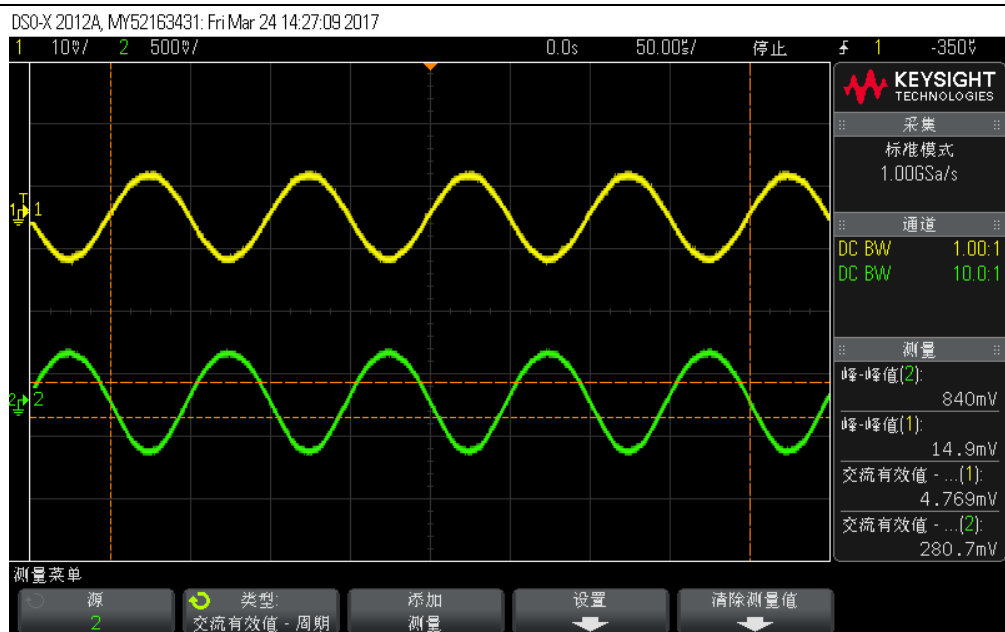


输入电压减半时的波形图

测得输入电阻 $R_i = 4.34k\Omega$ 。

iii. 1mA时测量输出电阻时 R_L 开路 and 输出电压减半时的波形图

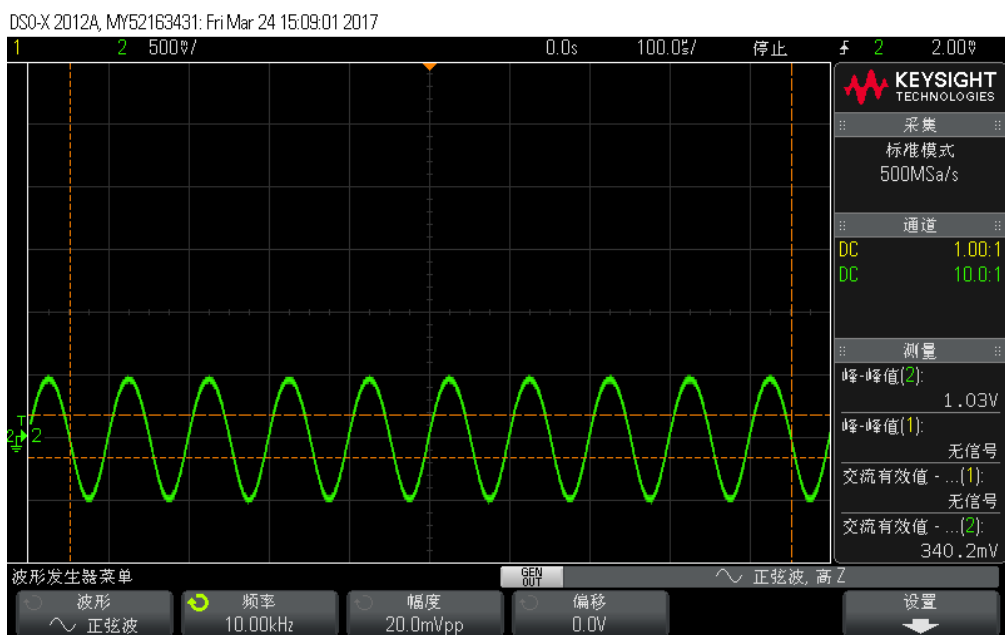
输出电阻时 R_L 开路时波形图

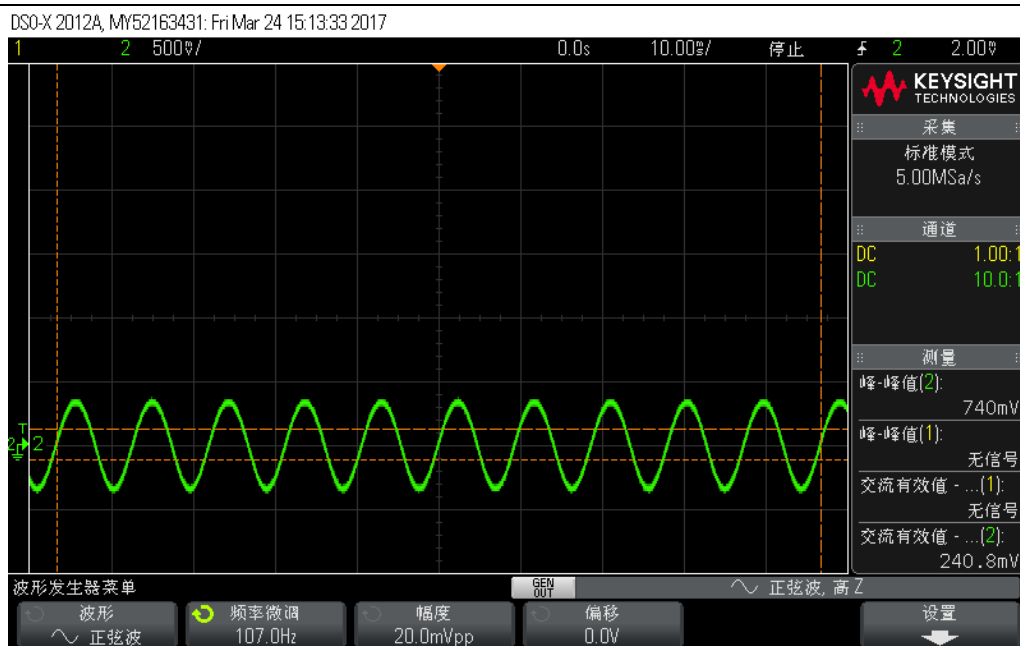
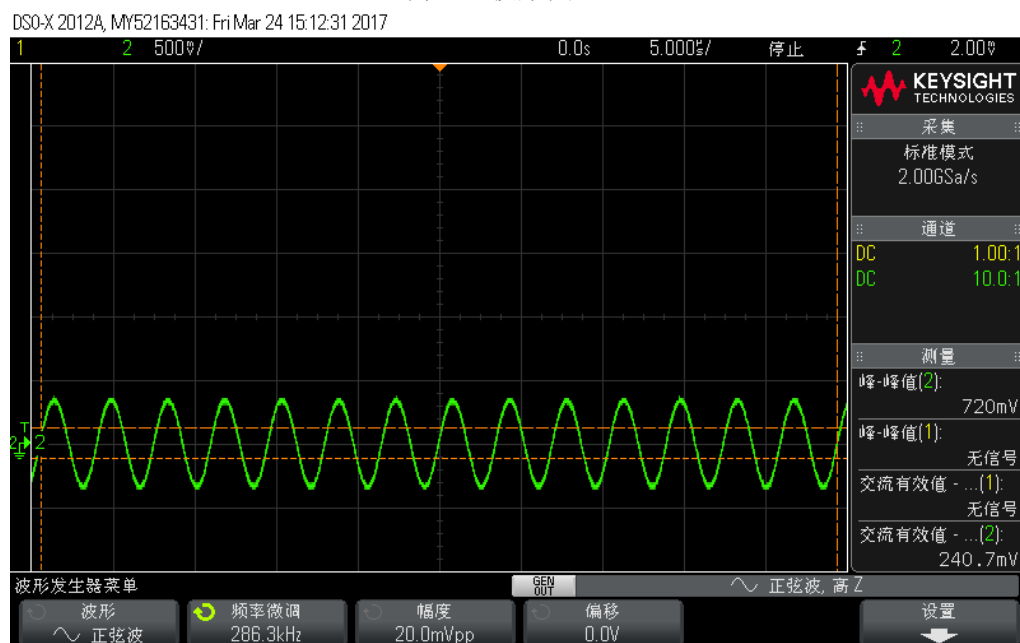


输出电压减半时的波形图

测得输出电阻 $R_o = 3.24k\Omega$ 。

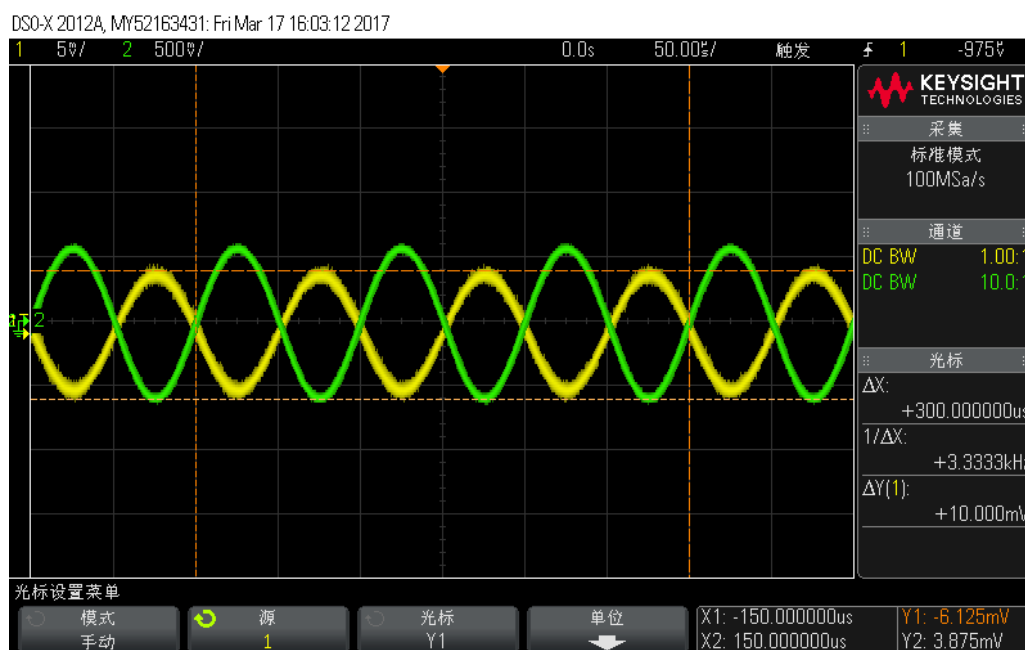
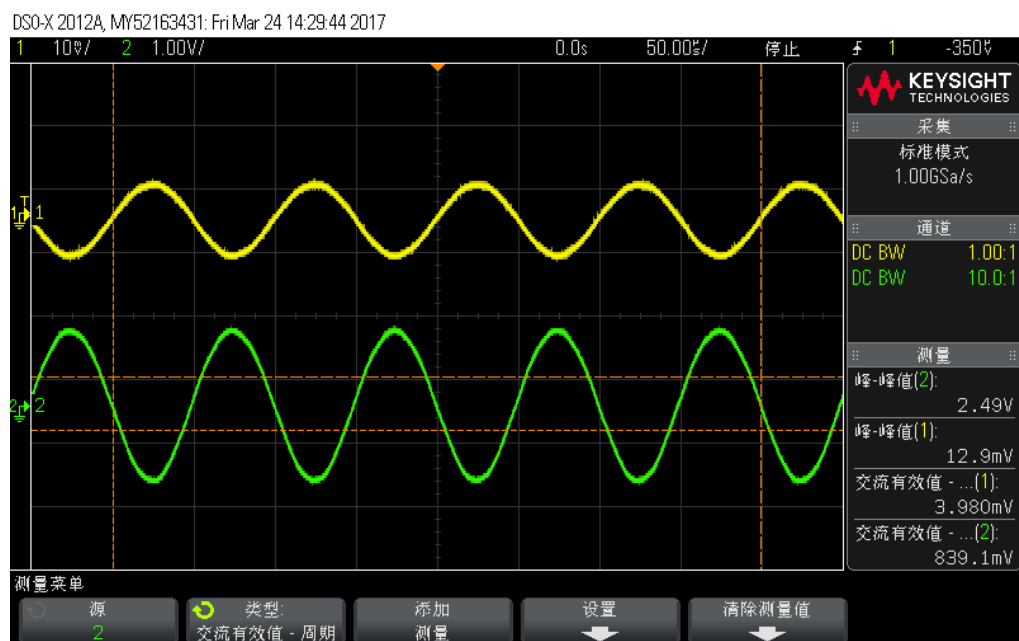
iv. 1mA时上限截止频率和下限截止频率的测量波形图

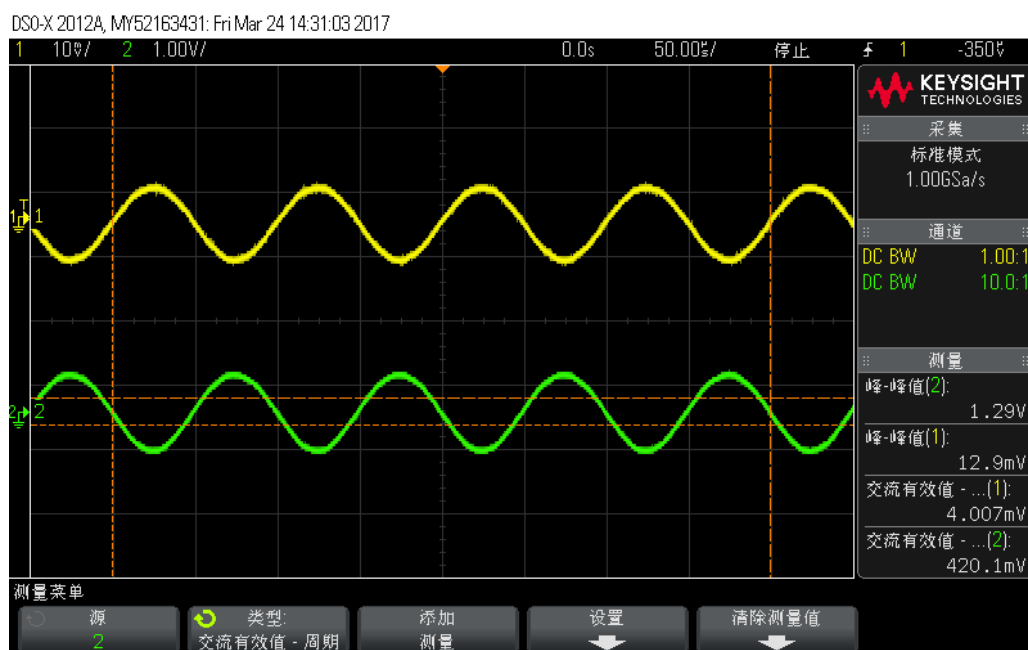
测量 f_H 和 f_L 时的中频参照

测量 f_L 波形图测量 f_H 波形图

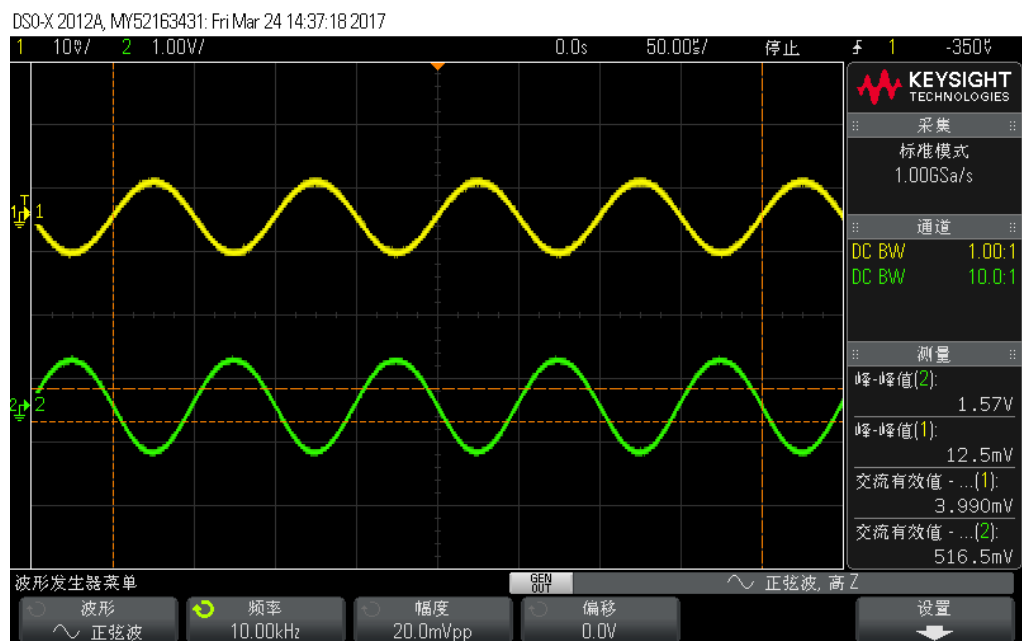
测得 $f_L = 107.0\text{Hz}$; $f_H = 286.3\text{kHz}$ 。

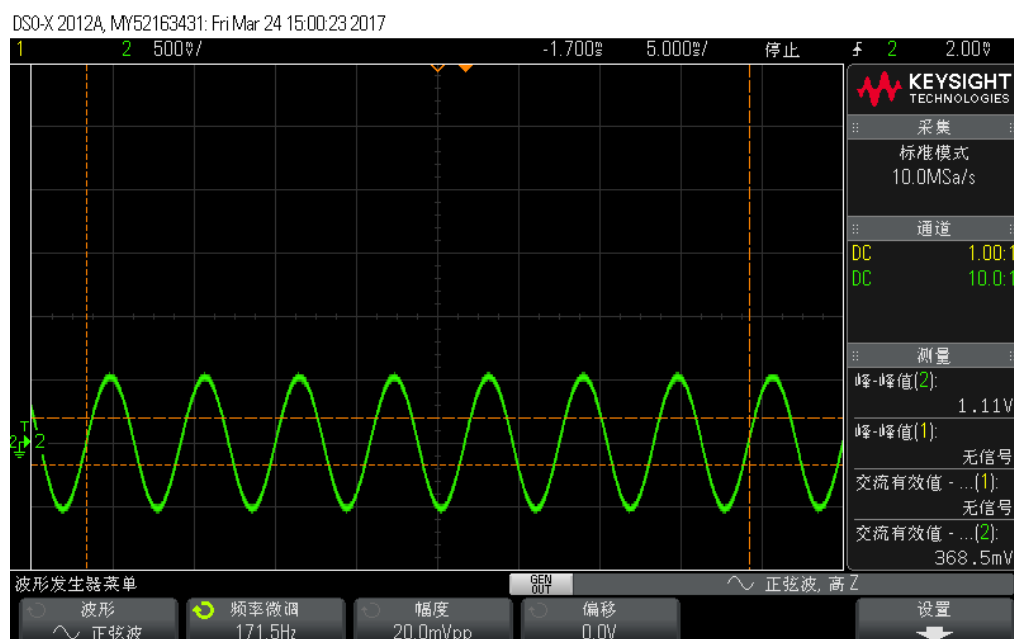
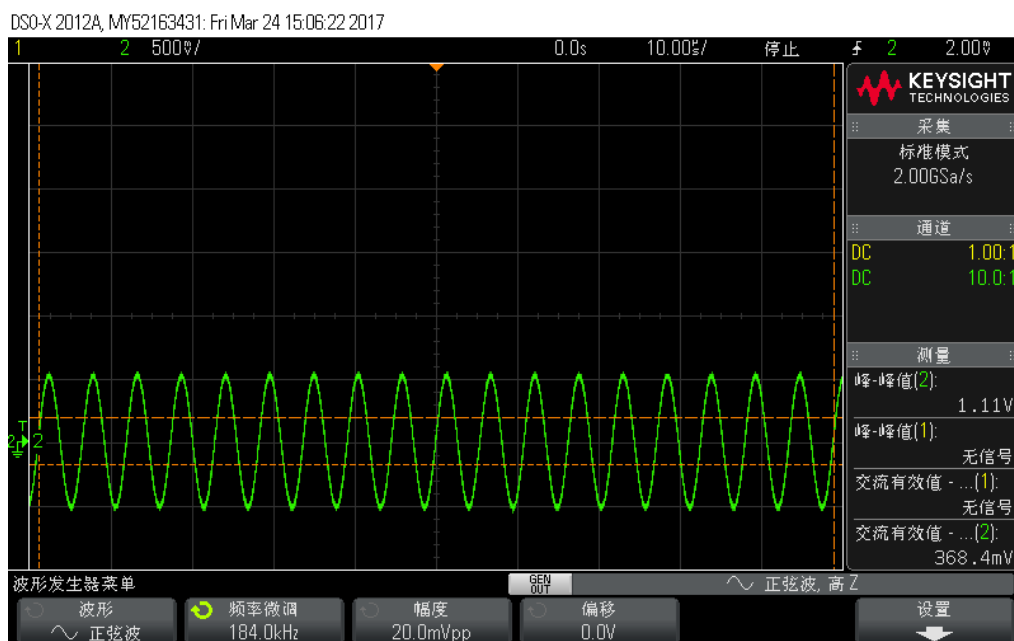
- v. 2mA时, 测量波形类似, 不一一赘述, 整理列出如下

测量 R_i 输入电压减半时的波形图输出电阻时 R_L 开路时波形图



输出电压减半时的波形图

测量 f_H 和 f_L 时的中频参照即测 A_u 波形图

测量 f_L 波形图测量 f_H 波形图

最终数据整理如下表:

测试量	1mA 实测	1mA 仿真	1mA 理论	2mA 实测	2mA 仿真	2mA 理论
U_i (峰-峰值)	13.647mV	13.661mV	-	12.500mV	10.765mV	-
U_o (峰-峰值)	970.7mV	989.901mV	-	1568.75mV	1.474V	-
A_u	-71.13	-72.46	-75.74	-125.5	-136.93	-148.91
R_i	4.34k Ω	4.8k Ω	3.98k Ω	3.31k Ω	2.34k Ω	2.34k Ω
R_o	3.24 k Ω	3.1k Ω	3.3k Ω	3.17k Ω	2.85k Ω	3.3k Ω
f_L	107.0Hz	104.67Hz	-	171.5Hz	156.07Hz	-
f_H	286.3kHz	2.62MHz	-	184kHz	1.44MHz	-

数据分析:

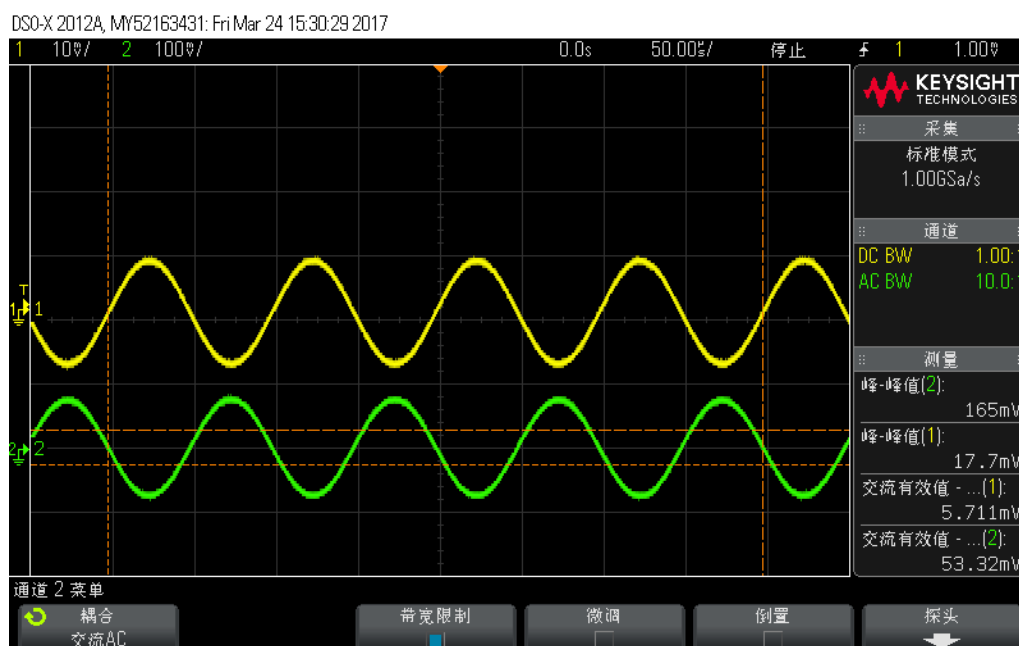
可以看到,除了 f_L 和 f_H 以外,其他动态参数实测、仿真、理论偏差都较小,特别是 1mA 时的数据,实测与仿真非常接近, 2mA 的实测数据与仿真偏差较大可能是因为 2mA 数据分别在间隔一周的两节课测量,实验条件不完全一致。无论如何,比较 A_u 、 R_i 、 R_o 三个基本的动态参数,我们可以看到,实测和仿真都体现出了一致的趋势,即 I_{CQ} 大时, A_u 更大、 R_i 更小、 R_o 基本不变。

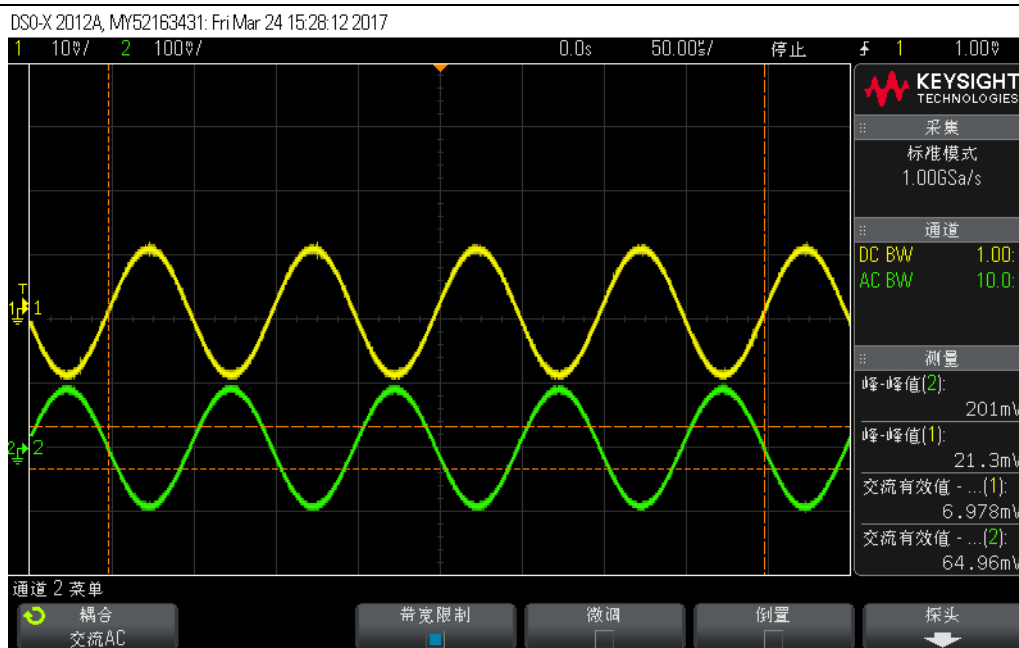
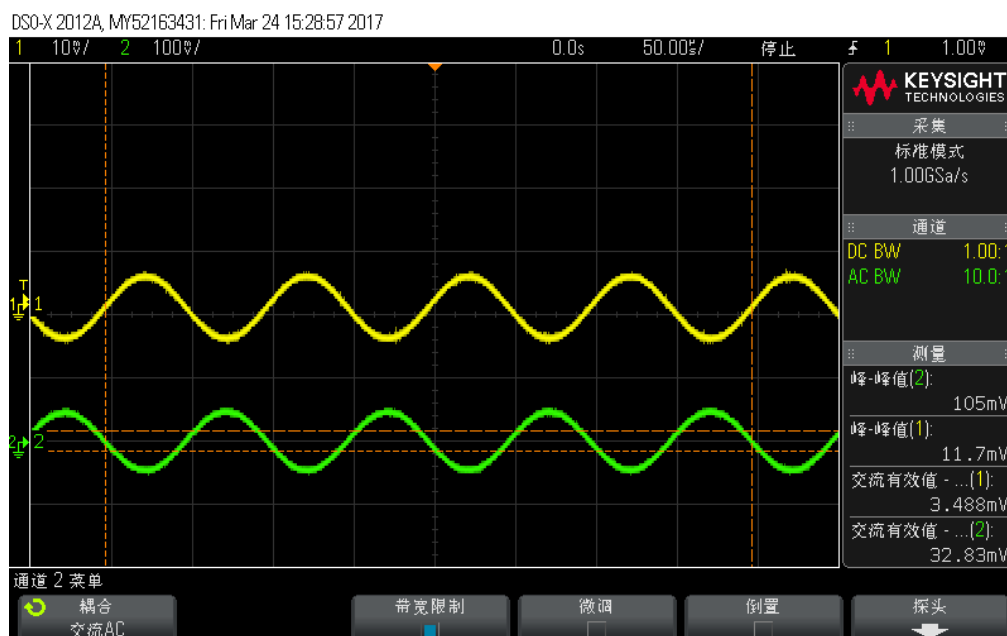
f_L 和 f_H 的测量,实测比仿真的通频范围窄得多,这与仿真的参数过于理想化有关,例如未考虑示波器探头的电容。这也启示着我们不能过于依赖于仿真软件,特殊条件下实验比仿真更有说服力。

(二) 选作实验

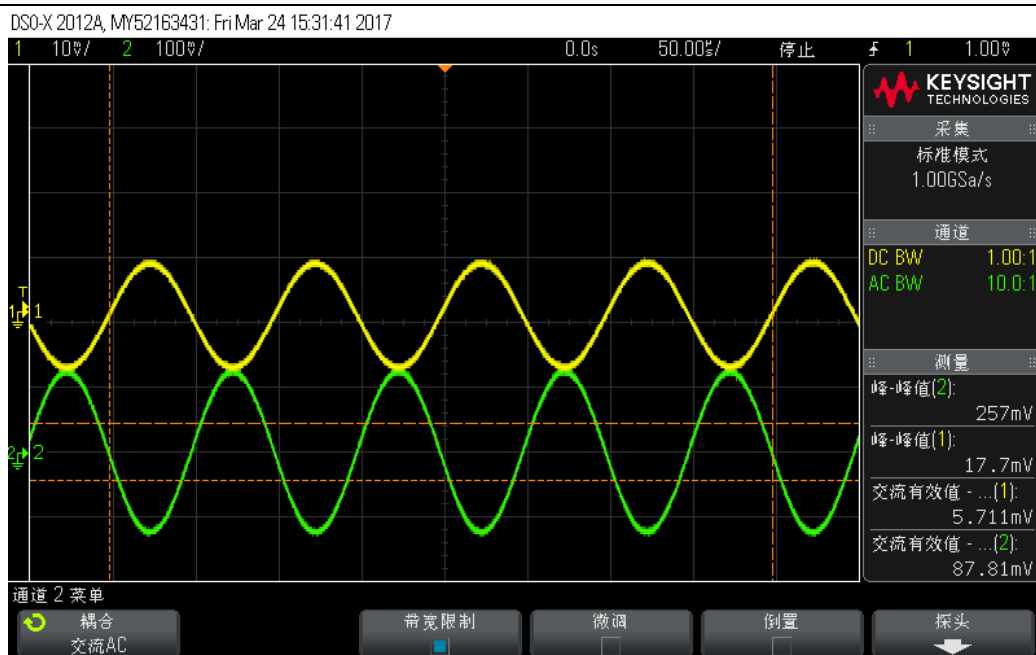
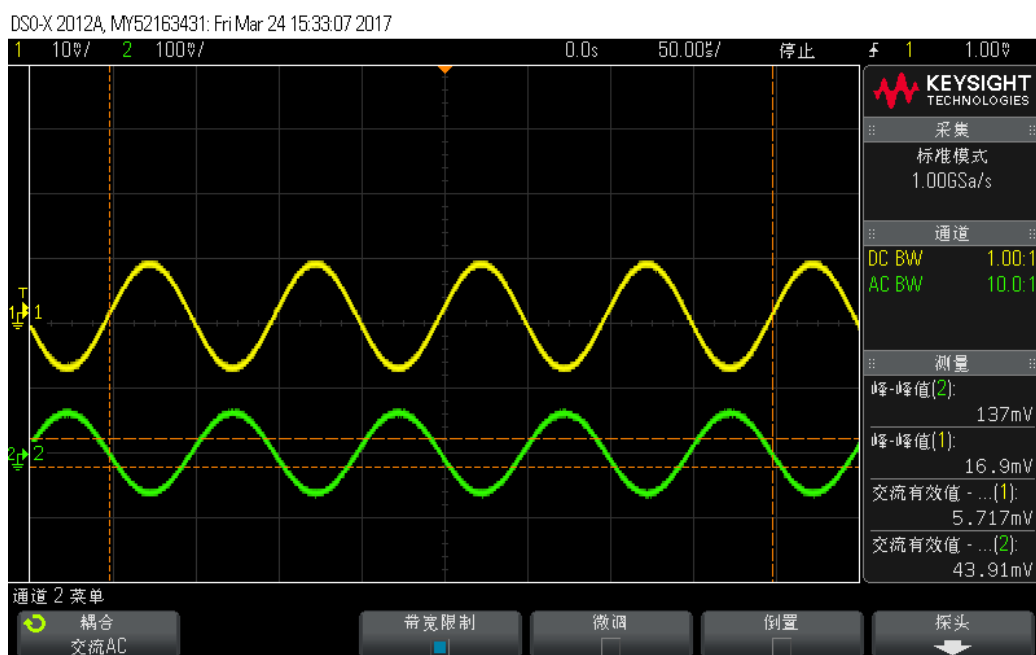
4.射极负反馈电阻对动态特性的影响

改接的电路如仿真电路图所示。测量方法与第3项完全相同,在此不做赘述,将波形图整理后统一列出如下。

测量 A_u 时波形图

R_S短路时波形图

输入电压减半时波形图

输出电阻时 R_L 开路时波形图

输出电压减半时的波形图

数据整理如下:

测试量	选作实测	选作仿真	选作理论
U_i (峰-峰值)	16.18mV	16.255mV	-
U_o (峰-峰值)	150.84mV	151.010mV	-
A_u	-9.32	-9.29	-9.81
R_i	8.91k Ω	8.7k Ω	10.20k Ω
R_o	3.30k Ω	3.25k Ω	3.3k Ω

数据分析: 选作实验中实测、仿真、理论值符合得相当好。可以看到, 当 R_E 没有与旁路电容并联时, 会显著降低电压放大倍数, 并增加输入电阻, 但对输入电阻基本无影响。

六、硬件实验注意事项

1. 实验中要将学习机、信号源、示波器等电子仪器和实验电路共地，以免引起干扰。
2. 测量 R_W 的阻值时，须断电、断开电阻所在支路的连线。
3. 测量放大电路的各项动态特性时，要始终用示波器监视输入、输出波形。只有在输入输出信号不失真的情况下进行测量才有意义。

七、实验中遇到的问题及解决方法

1. 波形不稳的问题

问题：最初示波器波形不稳，时现时无，检查原因在于测量方式。示波器探头若直接与电阻腿接触测量，则容易在晃动过程中带出电阻，导致电路连接故障。

解决方法：使用示波器测量，应从面包板接出引线，这样才能保证稳定的探头连接，并保证电路不被破坏。在以后的实验中均注意了这一经验。

2. 波形不稳的问题

问题：在改变频率后波形不稳，呈移动状态。

解决方法：尝试改变带宽限制选项，如果还不能解决则调节trigger旋钮。

八、实验体会

1. 本次实验中，首先加深了对三极管输出特性的理解，对于其测量方式亦有掌握。三极管是模拟电路的基本元件，对三极管特性的熟悉对于以后的学习有很大帮助；
2. 本次实验体会了放大电路测试的基本流程，遵循“先静态、后动态”的原则，由浅入深，循序渐进地完成了实验；
3. 在实验方法上，本次实验中通过测量电压间接得知 I_c 电流、通过电压减半测输入、输出电阻的实验方法令我体会到电路中测量方法的魅力，并将启示我在以后的实验中注重测量方法的设计；
4. 在实验经验上，本次实验是我积累了用示波器探头测量小信号、高频信号的经验，使我对示波器 $\times 1$ 、 $\times 10$ 挡的区别，以及示波器探头的电容效应体会更加深入；
5. 本次实验还使我对放大电路的频率响应的问题有了基本的认识，为模拟电路课程第四章的继续学习做了铺垫；
6. 本次实验中曾麻烦任老师、助教老师检查波形、数据，老师们丰富的经验使得实验变得更加有趣、更加像一门科学而非玄学，在此对老师们的帮助表示感谢。