

实验三 负反馈放大电路

自54 田毅

2015011451

May 18, 2017

Contents

1	实验目的	2
2	预习报告	2
2.1	电压并联负反馈放大电路	2
2.1.1	理论估算	2
2.1.2	仿真实验	3
2.2	电流并联负反馈放大电路	6
2.2.1	理论估算	6
2.2.2	仿真实验	8
3	注意事项	9
4	硬件实验	10
4.1	两级放大电路的恢复调试	10
4.2	引入电压并联负反馈	10
4.3	负反馈放大电路的闭环测试	10
4.3.1	动态参数	10
4.3.2	截止频率	13
4.4	电流并联负反馈放大电路的测试研究	14
5	实验中遇到的问题及解决方法	17
5.1	选做实验第一级电路波形下降的问题	17
5.2	选作实验第二级电路动态的问题	17
6	实验体会	17

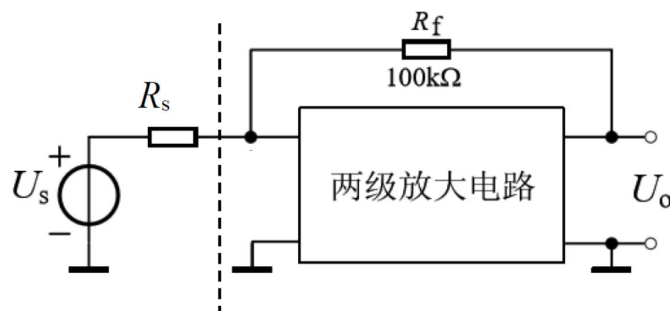
1 实验目的

1. 熟悉负反馈放大电路的组态；
2. 深入理解负反馈对放大电路性能的影响；
3. 进一步熟练掌握基于 Multisim 的仿真以及硬件电路的调试和性能测试方法。

2 预习报告

2.1 电压并联负反馈放大电路

2.1.1 理论估算



假设引入了深度负反馈，则

$$\dot{A}_{usf} \approx \frac{1}{\dot{F}_{iu}} \cdot \frac{1}{R} = -\frac{R_f}{R} = -10$$

因此选取 $R_f = 10k\Omega$ 。根据“两级放大电路”实验中硬件实验中测试结果及实验中电路元件取值，即 $R_{g1} = R_{g2} = 220k\Omega$ ， $R_s = 4.51k\Omega$ ，有，

$$\dot{A}_{ui} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{I}_i} = \frac{\dot{U}_o R_i}{\dot{U}_i} = \dot{A}_u R_i, \quad \dot{F}_{iu} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{U}_o} = -\frac{1}{R_f}$$

其中 \dot{A}_{ui} 测量结果为 -159.6， R_i 为考虑反馈网络负载效应后的输入电阻， $R_i = R / (R_{g3} + R_{g1} / R_{g2}) = 91.07k\Omega$ ，因此

$$1 + \dot{A}_{ui} \dot{F}_{iu} \approx 1 + 159.6 \times \frac{91.07}{100} = 146.3 \gg 1$$

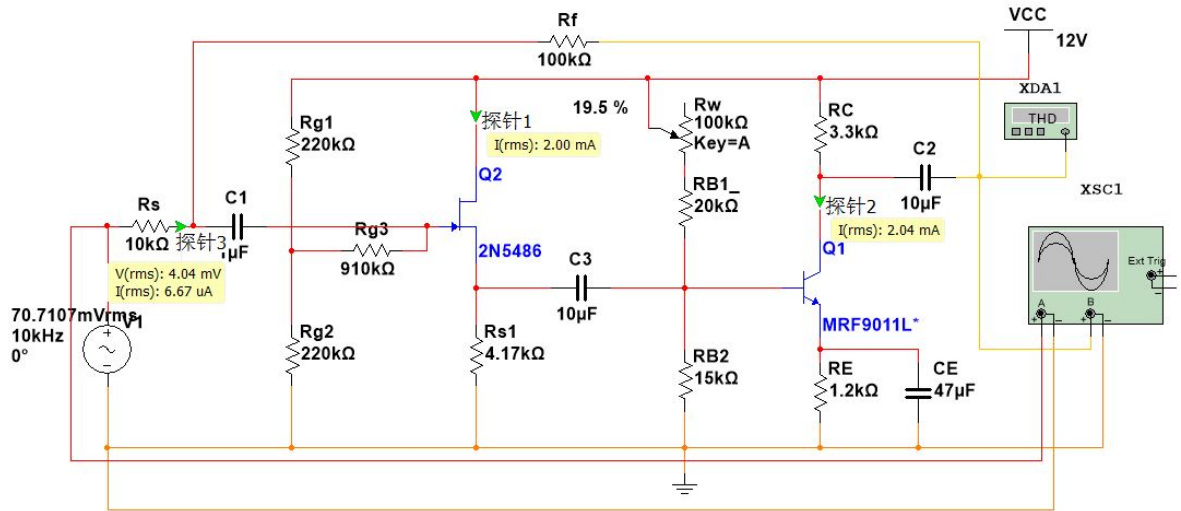
可见对于深度负反馈的假设合理。引入深度负反馈后，

$$\begin{cases} R_{if} = \frac{R_i}{1+AF} = \frac{91.07 \times 10^3}{146.3} \approx 622.5\Omega \\ R_{of} = \frac{R_o}{1+AF} = \frac{3.3 \times 10^3}{146.3} \approx 22.6\Omega \end{cases}$$

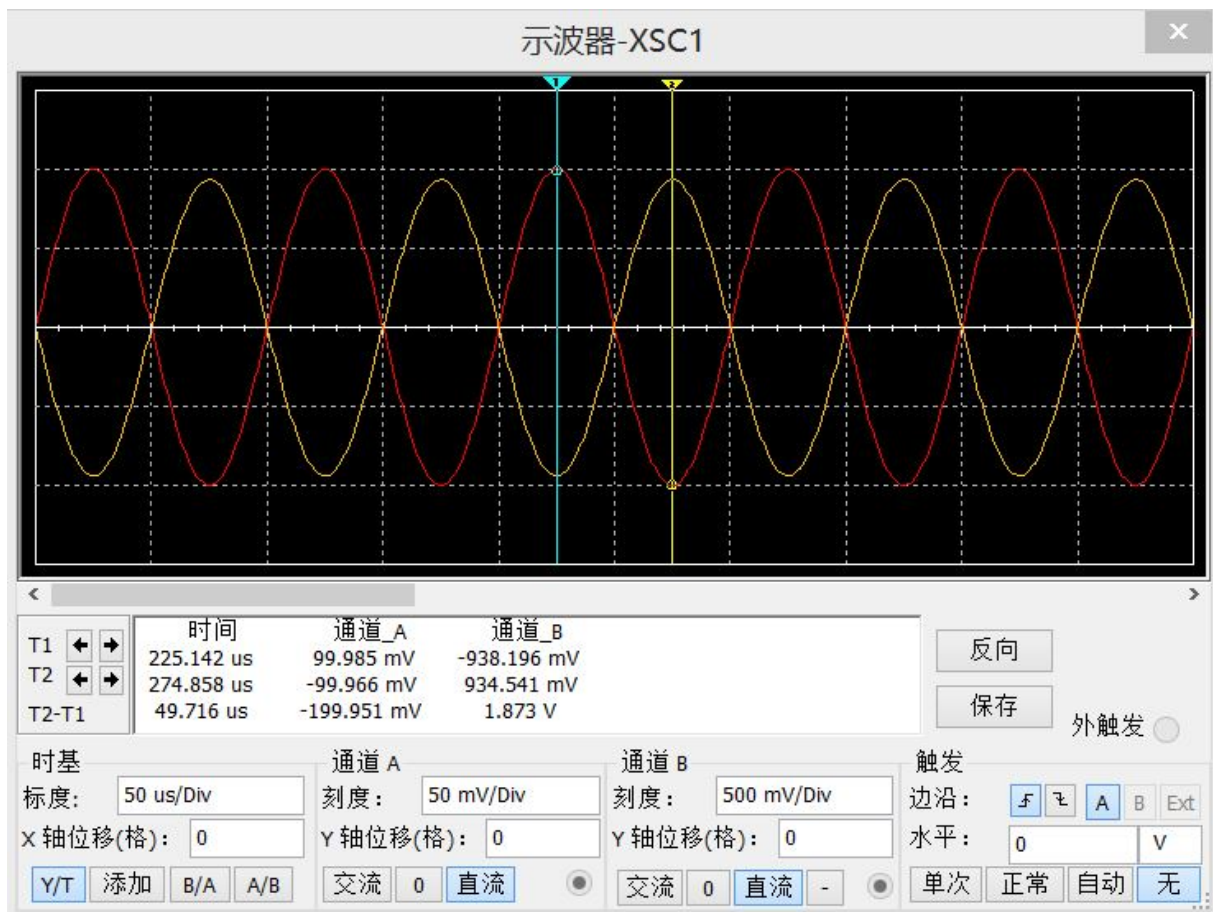
但是，我们注意到， 22.6Ω 与后续的仿真及实验值相差很大，分析原因，在于内阻 R_s 的分流，应修正为

$$R_{of} = \frac{R_o}{1 + AF \times \frac{R_s}{R_s + R_i}} = \frac{3.3 \times 10^3}{146.3 \times \frac{10}{10 + 91.07}} \approx 228.0\Omega$$

2.1.2 仿真实验



由图中探针可知，负反馈并未对静态工作点造成影响，首先用示波器测得输入输出波形如下：



测得

$$A_{usf} = -\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = -\frac{1.873}{199.951 \times 10^{-3}} \approx -9.37$$

与理论的-10较为接近。同时可以看到，波形未出现失真。失真分析仪显示如下：



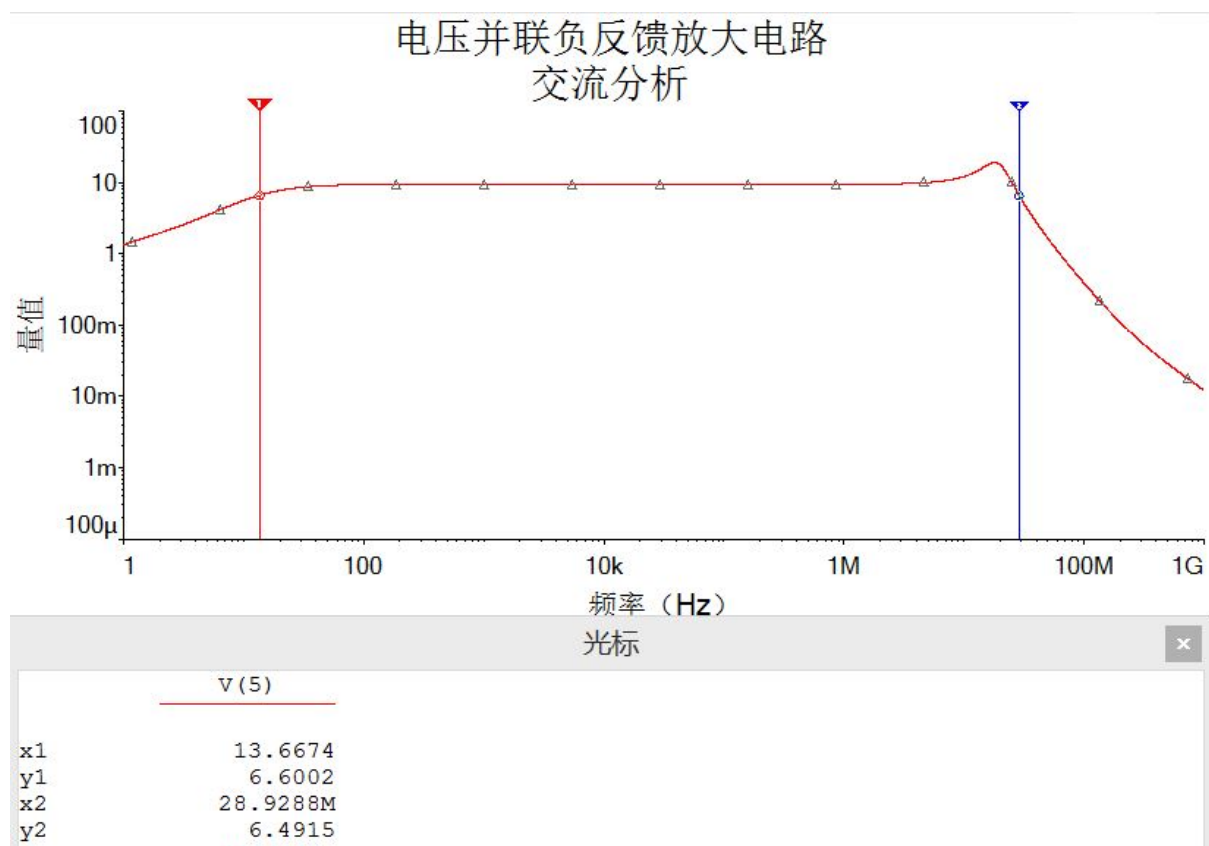
进一步地，通过探针测出输入电阻

$$R_i = \frac{U'_i}{I_i} = \frac{4.04 \times 10^{-3}}{4.67 \times 10^{-4}} \approx 605.7 \Omega$$

输出端开路时，输出电压有效值 $662mV$ ；在输出端接 $R_L = 500\Omega$ 的负载电阻后，输出电压有效值 $448mV$ ，计算出输出电阻

$$R_o = \left(\frac{U_o}{U'_o} - 1 \right) R_L = \left(\frac{662}{448} - 1 \right) \times 500 = 238.8\Omega$$

使用交流分析功能，测得电路的幅频特性如下：

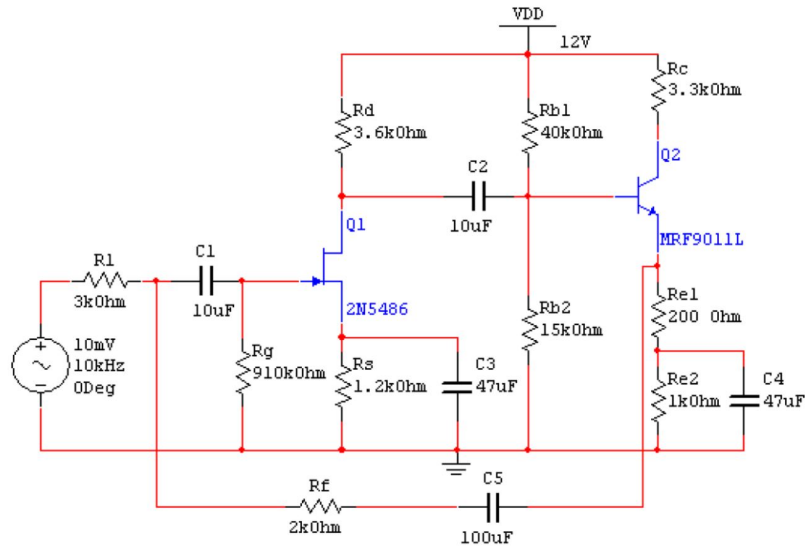


中频幅值为9.37，降为0.707倍的截止频率分别为

$$f_L \approx 13.67Hz, f_H \approx 28.93MHz$$

2.2 电流并联负反馈放大电路

2.2.1 理论估算



静态动作点

对于第一级放大电路，忽略栅极电流，有

$$\begin{cases} U_{GQ} = 0 \\ U_{SQ} = I_{DQ} R_s \\ I_{DQ} = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GSQ}}{U_{GS(off)}}\right)^2 \end{cases}$$

由以上方程组，根据“两级放大电路”实验仿真测出的 $I_{DSS} \approx 14.473\text{mA}$ ， $U_{GS(off)} \approx -3.77\text{V}$ ，解出

$$I_{DQ} \approx 1.98\text{mA}, U_{GSQ} \approx -2.376\text{V}$$

对于第二级放大电路，有

$$\begin{cases} U_{BQ} \approx \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} V_{DD} \\ U_{BQ} = U_{BEQ} + I_{EQ} (R_{e1} + R_{e2}) \\ I_{CQ} = \frac{\beta}{1 + \beta} I_{EQ} \end{cases}$$

解上述方程组， $U_{BEQ} \approx 0.7\text{V}$ ，代入“单管放大电路”实验仿真测量结果 $\beta \approx 214$ ，解得

$$U_{BQ} = 3.27\text{V}, I_{EQ} \approx 2.14\text{mA}, I_{CQ} \approx 2.13\text{mA}$$

由此计算出

$$\begin{cases} U_{CQ} = V_{DD} - I_{CQ} \cdot R_c \approx 4.971V \\ U_{EQ} = I_{EQ} \cdot (R_{e1} + R_{e2}) \approx 2.568V \\ U_{CEQ} = U_{CQ} - U_{EQ} \approx 2.403V \end{cases}$$

动态参数

场效应管的跨导

$$g_m = \frac{2}{|U_{GS(off)}|} \sqrt{I_{DQ} I_{DSS}} \approx 2.84mS$$

晶体管 $r_{bb'}$ 取 100Ω ，则有

$$r_{be} \approx r_{bb'} + \frac{\beta U_T}{I_{CQ}} \approx 2.71k\Omega$$

考虑负载效应，由此计算出两级的开环放大倍数分别为：

$$\dot{A}_{u1} = -g_m \{R_d // R_{b1} // R_{b2} // [r_{be} + (1 + \beta)(R_{e1} // R_f)]\} \approx -7.22$$

$$\dot{A}_{u2} = -\frac{\beta R_c}{[r_{be} + (1 + \beta)(R_{e1} // R_f)]} \approx -16.89$$

则基本放大电路的开环放大倍数

$$\dot{A}_{ii} = \frac{\dot{I}_o}{\dot{I}_i} = -\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i'} \cdot \frac{R_g}{R_c} = -\dot{A}_{u1} \cdot \dot{A}_{u2} \cdot \frac{R_g}{R_c}$$

反馈系数

$$\dot{F}_{ii} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{I}_o} = -\frac{R_{e1}}{R_{e1} + R_f} = -\frac{1}{11}$$

因此 $1 + \dot{A}_{ii} \dot{F}_{ii} \approx 121.9 \gg 1$ ，故可认为引入深度负反馈，闭环电压放大倍数为

$$\dot{A}_{usf} \approx -\frac{1}{\dot{F}_{ii}} \cdot \frac{R_c}{R_1} = 12.1$$

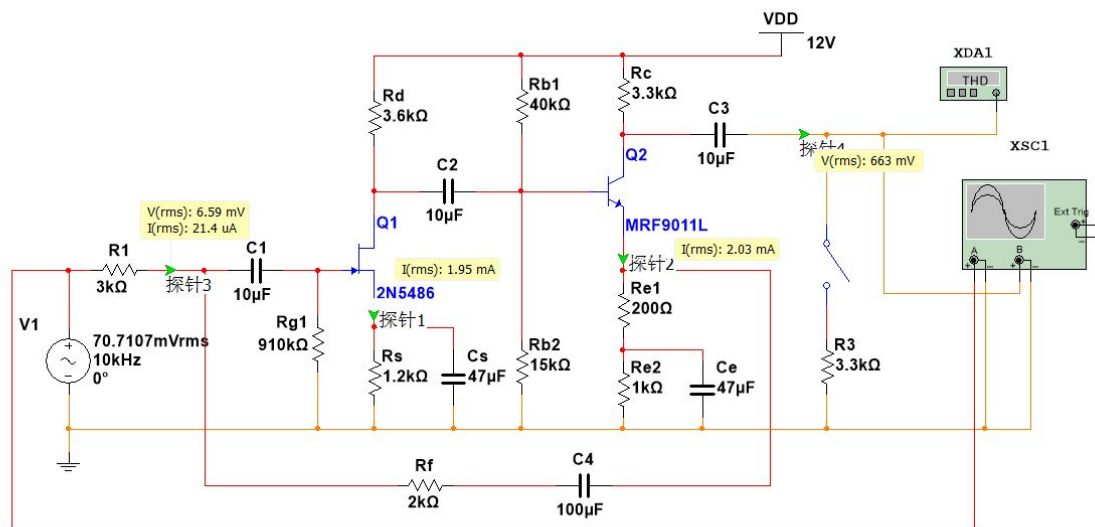
输入电阻

$$R_i = \frac{R_g}{1 + \dot{A}_{ii} \frac{R_g}{R_c} \dot{F}_{ii}} \approx 297.7\Omega$$

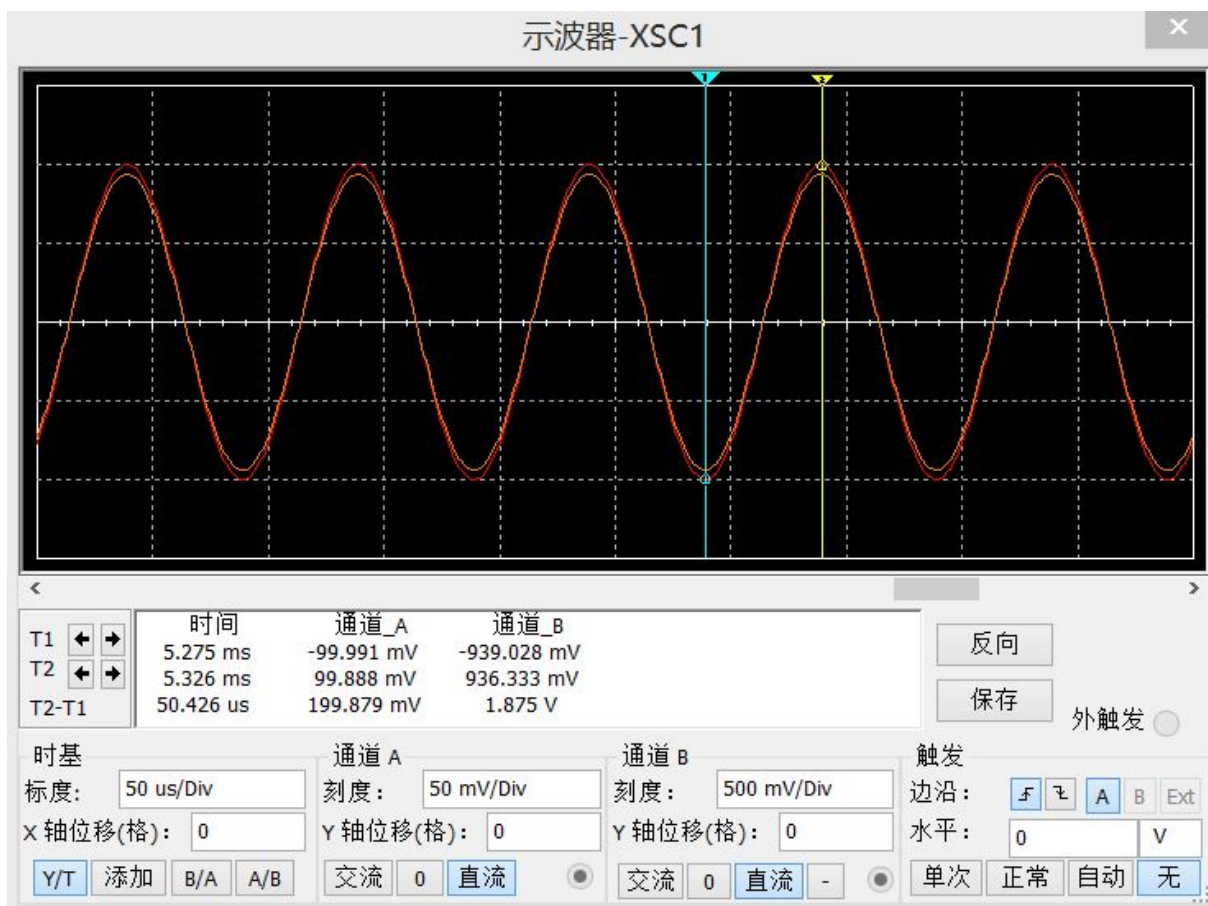
输出电阻

$$R_o = R_c = 3.3k\Omega$$

2.2.2 仿真实验



仿真电路如上所示。输入峰-峰值 $200mV$ 、 $10kHz$ 的交流电压，得到波形如下：



由示波器波形看出输入、输出电压同相，测得电压放大倍数为

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{1.875}{199.879 \times 10^{-3}} \approx 9.38$$

从波形也可看出在此情况下没有出现失真，这可从失真分析仪结果得到佐证：



用与必做实验同样的方法，测得输入电阻

$$R_i = \frac{U'_i}{I_i} = \frac{6.59}{21.4 \times 10^{-3}} \approx 307.95 \Omega$$

输出端开路 $U_o = 663mV$ ，输出端接 $R_L = 3.3k\Omega$ 负载电阻时输出电压 $U'_o = 333mV$ ，因此输出电阻

$$R_o = \left(\frac{U_o}{U'_o} - 1 \right) \cdot R_L \approx 3.27k\Omega$$

3 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。
3. 输入电阻 R_{if} 指图1中虚线右侧放大电路的输入电阻，不含 R_s 。
4. 引入电压负反馈后，输出电阻 R_{of} 的数值较小。在实际测量时，为了防止因负载电流过大而烧坏管子，接在输出端的负载电阻建议不小于 500Ω 。

4 硬件实验

4.1 两级放大电路的恢复调试

开环放大电路采用实验二中的两级放大电路。为了比较开环和闭环电路的动态参数，考虑图 1 中引入电压负反馈后反馈网络的负载效应，在该两级放大电路的输入端和输出端分别并联了与反馈电阻 R_f 阻值相同的电阻 R 和 R_L 。首先对该两级放大电路的静态和动态参数进行恢复调试，确保其可以正常工作并满足前述参数要求。

4.2 引入电压并联负反馈

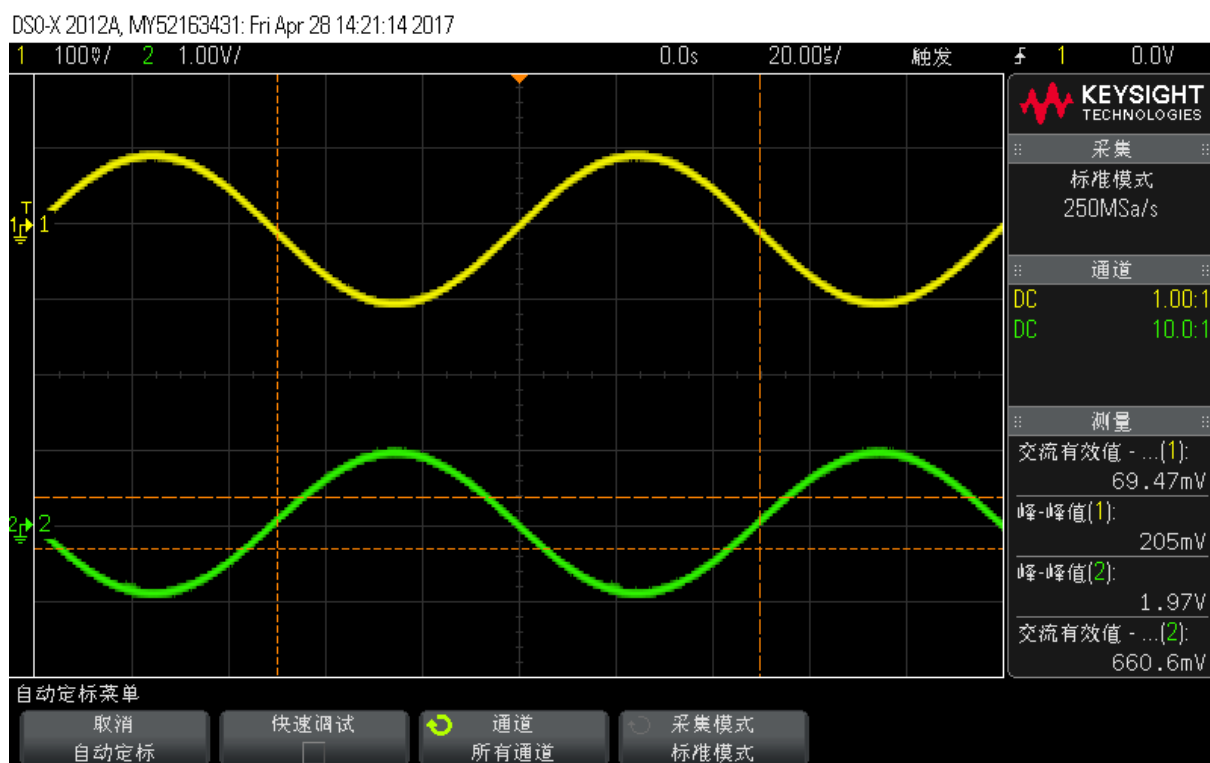
在上述两级放大电路中，去除输入端和输出端的电阻 R 和 R_L ，然后正确引入电压并联负反馈。请合理选取电阻 R_s 的阻值，使得闭环电压放大倍数的数值约为 10。

4.3 负反馈放大电路的闭环测试

4.3.1 动态参数

输入正弦信号 U_s ，幅度为 $200mV$ ，频率为 $10kHz$ ，测量并记录闭环电压放大倍数 $A_{usf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s}$ 、输入电阻 R_{if} 和输出电阻 R_{of} 。

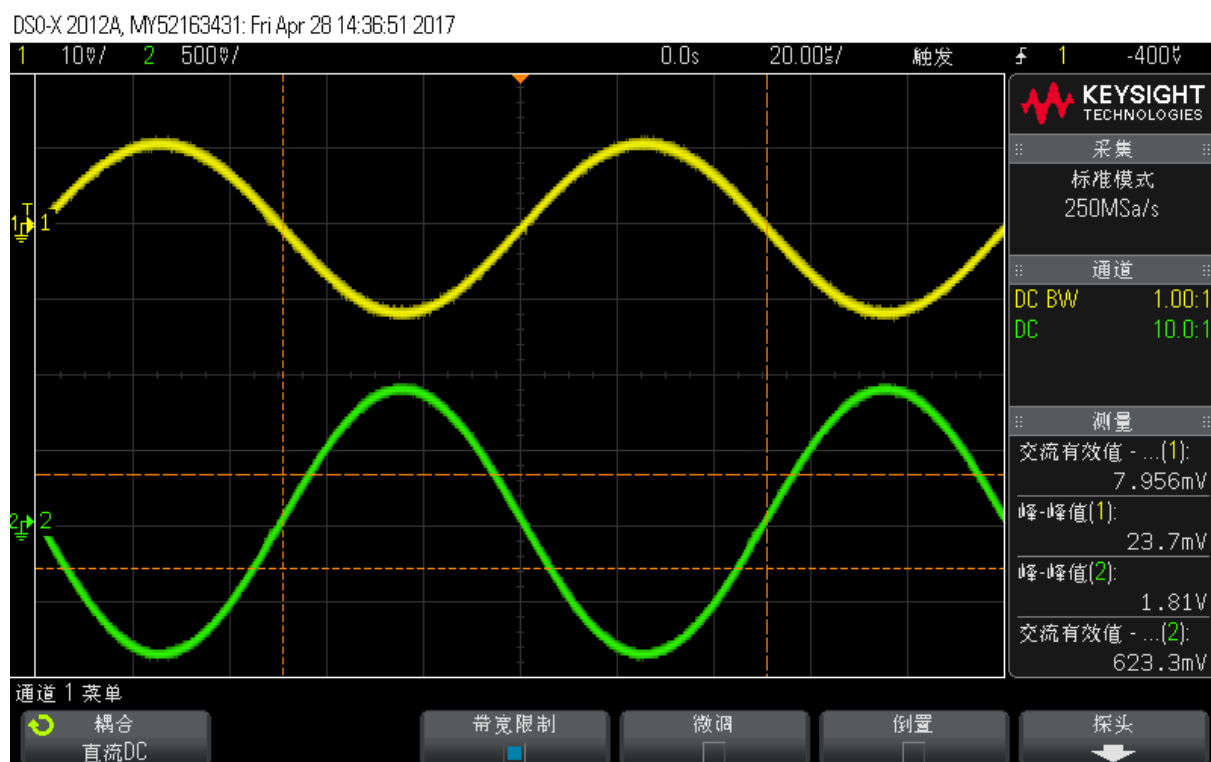
闭环放大倍数 实验测得输入、输出波形如下。

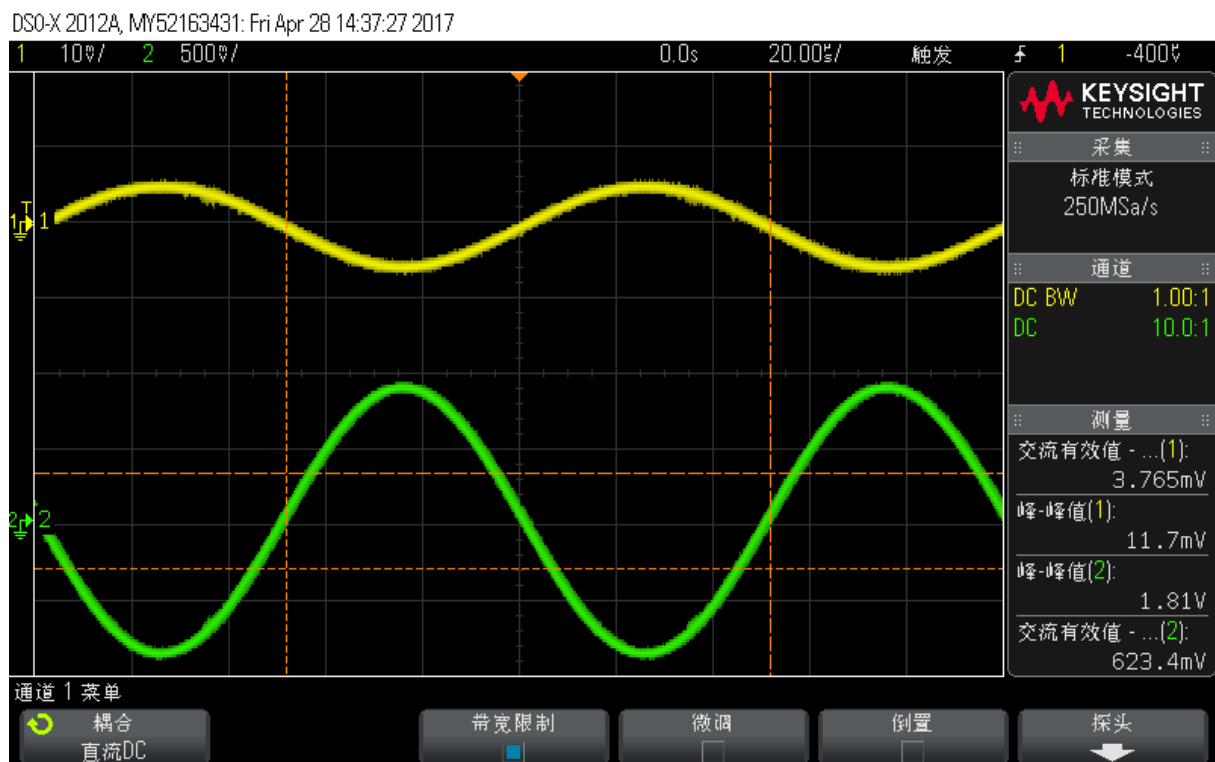


由此计算出 $A_{usf} = \frac{660.4}{69.48} \approx 9.50$ 实验中，交流有效值等电学量有 $0.1mV$ 级别的微小抖动，计算中使用这一抖动的均值，因此计算中数值与截图中数值可能有 $0.1mV$ 级的差别。后面不再特别为此做出说明。

输入电阻 输入电阻采用在 R_s 后串接 $R_1 = 680\Omega$ 的方法进行测量。

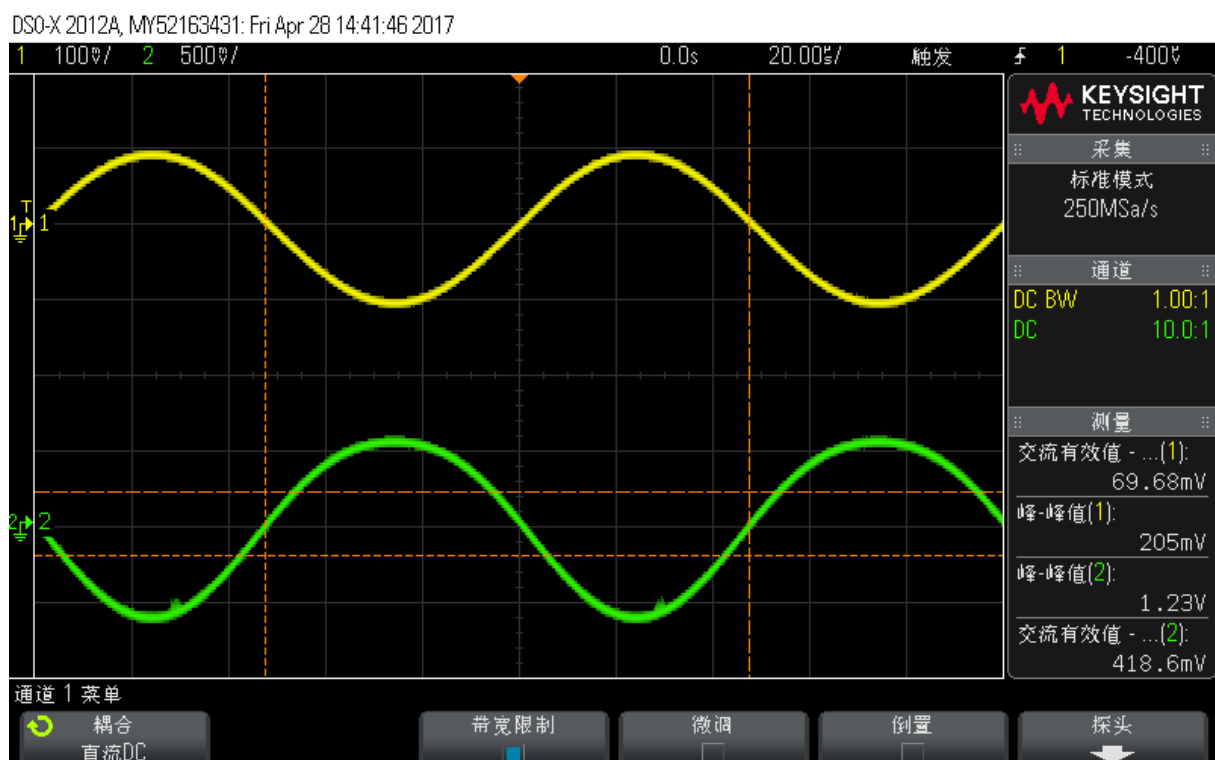
串接后， R_1 与输入总分压有效值 $U_i' = 23.7mV$ ，输入部分两端分压 $U_i'' = 11.9mV$ ，波形图分别如下。





据此计算出 $R_{if} = \frac{11.9}{23.7-11.9} \times 680 \approx 685.76\Omega$ 。

输出电阻 输出端开路时, $U_o = 663.0mV$; 在输出端接入 $R_L = 390\Omega$ 电阻, 测得 $U'_o = 419.0mV$, 波形如下。



据此计算出 $R_{of} = (\frac{663.0}{419.0} - 1) \times 390 = 227.1\Omega$ 。

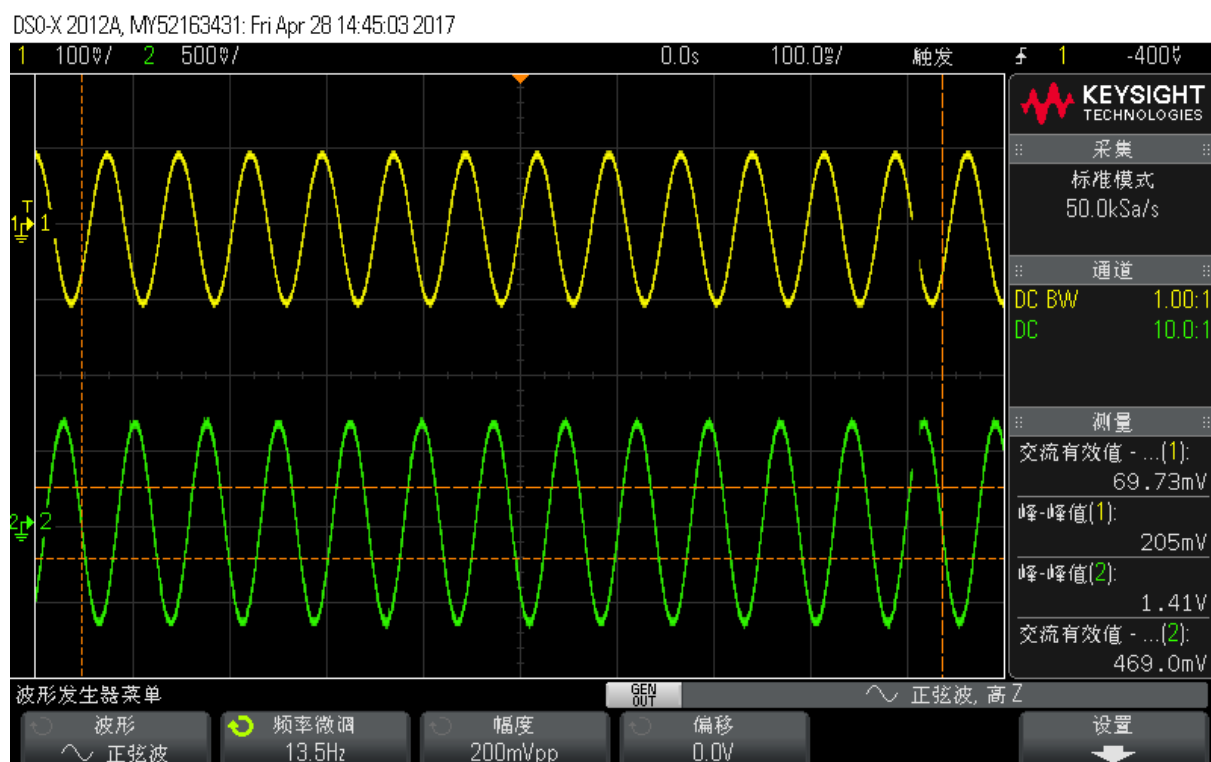
最后将理论、仿真、实验值整理为如下表格。可以看到，实验与理论、仿真符合得相当好。

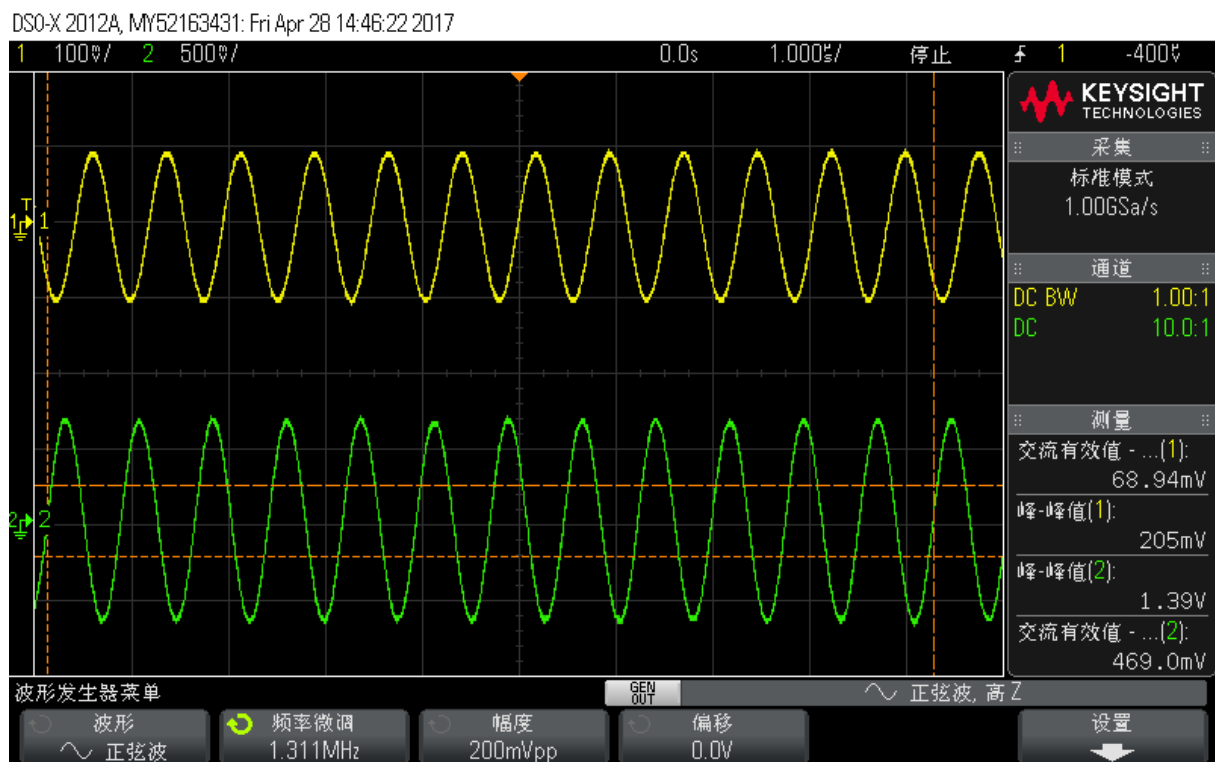
	A_{usf}	$R_{if}(\Omega)$	$R_{of}(\Omega)$
理论值	-10	622.5	228.0
仿真值	-9.37	605.7	238.8
实验值	-9.50	685.76	227.1

4.3.2 截止频率

对负反馈放大电路的上限截止频率 f_H 和下限截止频率 f_L 进行测量，并和两级放大电路的测试结果进行比较。

在中频时，测得 $U_o = 663.0mV$ ，因此分别降低、升高频率，测得在 $\frac{U_o}{\sqrt{2}} \approx 468.8mV$ 时， $f_L = 13.5Hz$ ， $f_H = 1.311MHz$ 。波形图分别如下所示。

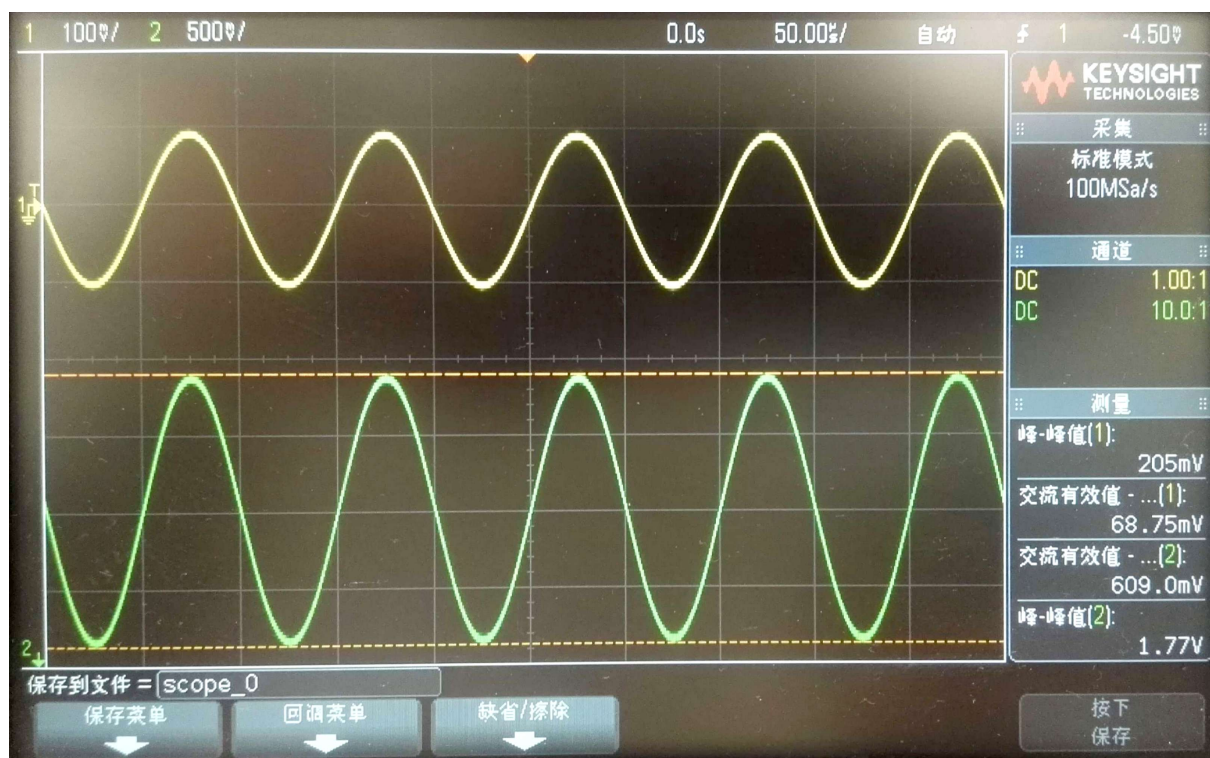




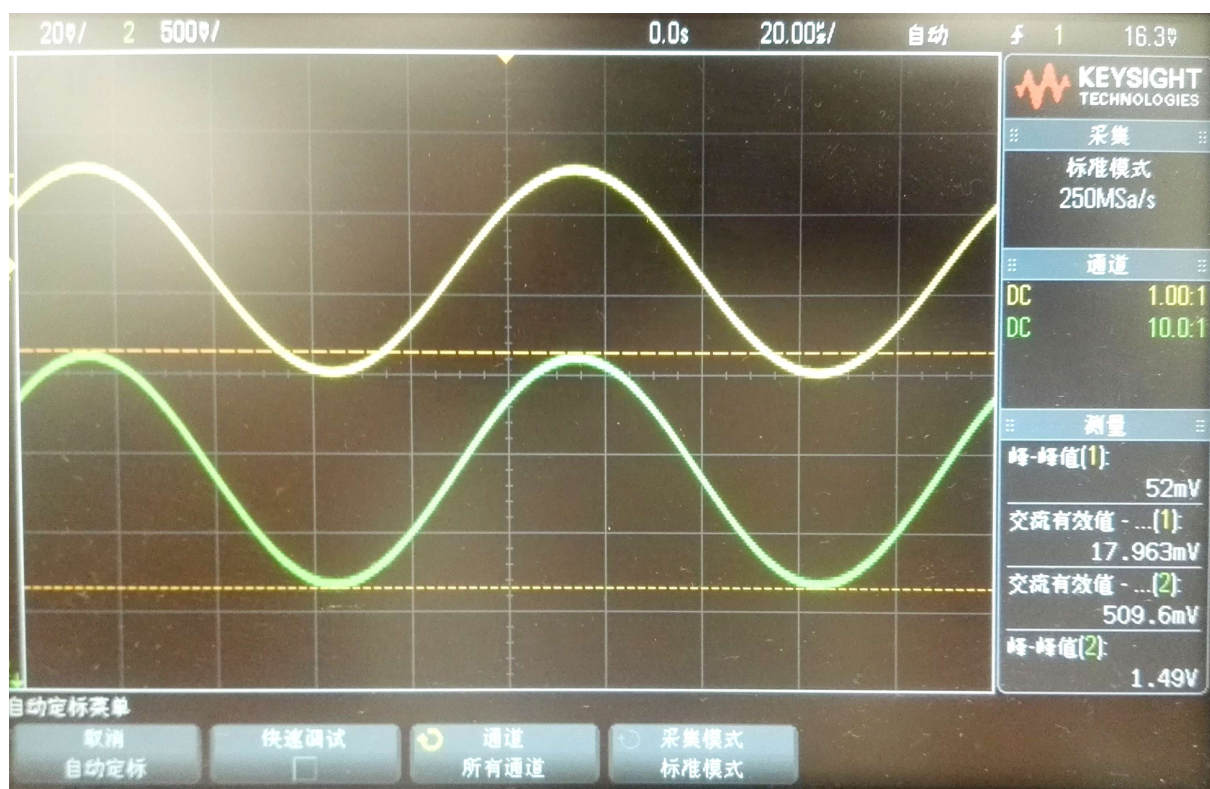
4.4 电流并联负反馈放大电路的测试研究

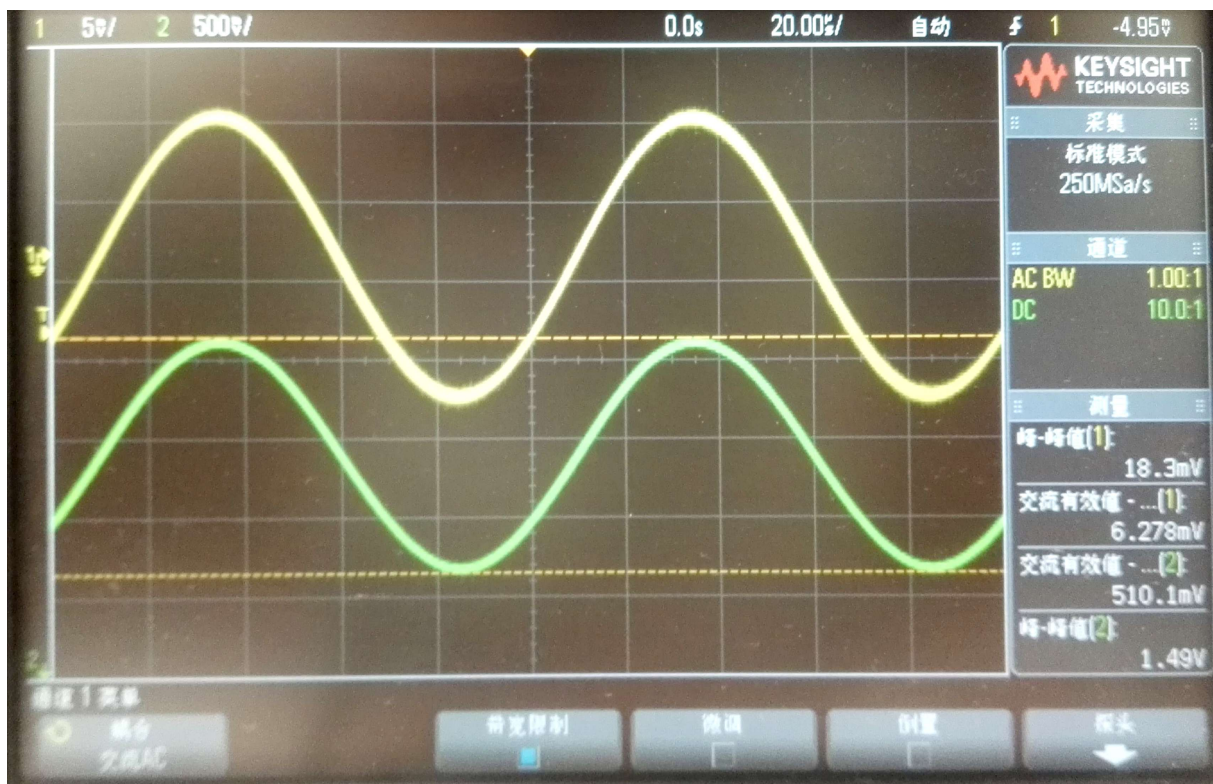
输入正弦信号 U_s ，幅度为 200mV ，频率为 10kHz ，测量并记录闭环电压放大倍数 $A_{usf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s}$ 、输入电阻 R_{if} 和输出电阻 R_{of} 。

电压放大倍数 波形如下。据此计算出 $A_{usf} = \frac{609.1}{68.80} \approx 8.85$ 。

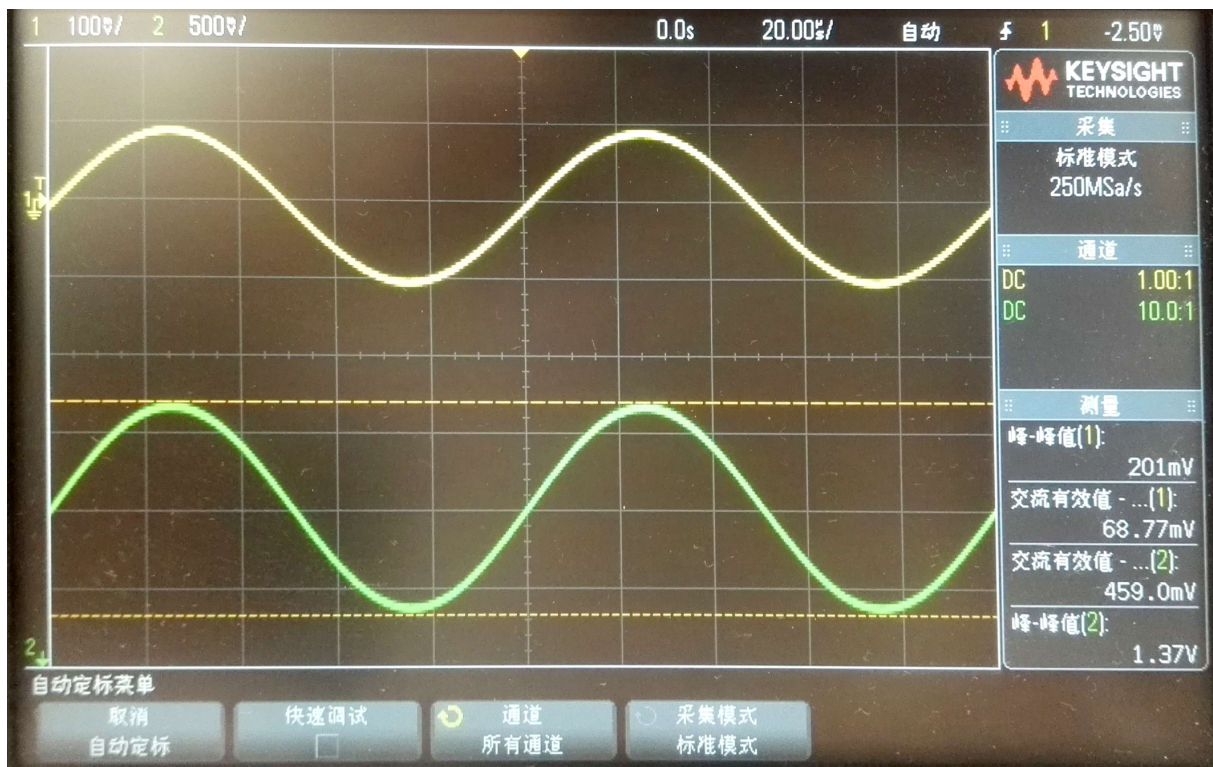


输入电阻 方法与必做实验相同。 $R_1 = 680\Omega$ 和输入部分总分压 $U'_i = 17.72mV$ ，输入部分分压 $U''_i = 6.27mV$ ，据此计算出 $R_{if} = \frac{6.27}{17.72-6.27} \times 680 = 372.4\Omega$ 。波形图分别如下所示。





输出电阻 方法与必做实验相同。开路时, $U_o = 609.3\text{mV}$; $R_L = 10\text{k}\Omega$ 时, $U'_o = 459.4\text{mV}$, 据此计算出 $R_{of} = (\frac{609.3}{459.4} - 1) \times 10\text{k} \approx 3.26\text{k}\Omega$ 。波形图如下。



将理论、仿真、实验值整理为如下表格。可以看到, 三者较为接近。

	A_{usf}	$R_{if}(\Omega)$	$R_{of}(\Omega)$
理论值	12.1	297.7	3.3k
仿真值	9.38	307.95	3.27k
实验值	8.85	372.4	3.26k

5 实验中遇到的问题及解决方法

本次实验分两次完成。在第一次实验时间，顺利地恢复出两级放大电路并完成了必做实验。但选做实验花费大量时间调试第二级电路，导致在下课前没能做出。在开放时间，得益于秦俭老师的指点，对于问题得到了有效的解决。

5.1 选做实验第一级电路波形下降的问题

第一级电路的波形，在示波器上有时会随时间稳定地下降。这一问题十分令人困惑，最后不知什么原因波形重归于稳定。现在想来，如果将输入置为AC模式，这一问题可能会得到解决。

5.2 选作实验第二级电路动态的问题

第二级电路在第一次课和第二次课的调试中，均出现了第二级静态正确，动态却不能正常放大的问题。经秦俭老师提示，发现问题在于，在测试时输入没有经过电容耦合。所以，这相当于直接将三极管的基极接地，发射结没有正偏，当然不可能有正常的实验结果。最初以为电容对于交流通路等效于导线，可有可无，却忽略了它对直流通路的极端必要性。

6 实验体会

本次实验首先令我熟悉了负反馈放大电路的组态的概念，令我对负反馈、深度负反馈对电路性能的影响有了实验上的体会。另外，这次实验中令我印象尤为深刻的，是第二个问题的解决，这个问题反映出理论分析对于实验调试的重要指导意义。在实验波形的调试过程中，秦俭老师还为我介绍了Trigger稳定波形的原理，令我印象深刻。十分感谢助教和老师，特别是秦俭老师在这次实验中的帮助。