

电子技术实验

实验报告

(2020 - 2021 学年度 春季学期)

实验名称 实验三：负反馈放大电路

姓名	<u>刘祖炎</u>
学号	<u>2019010485</u>
院系	<u>自动化系</u>
教师	<u>赵晓燕</u>
时间	<u>2021 年 4 月 29 日</u>

目录

1	实验目的	1
2	预习报告	1
2.1	电压并联负反馈放大电路	1
2.1.1	外加电阻 R_S 的选取及 A_{usf} 的测量	1
2.1.2	输入、输出电阻 R_{if} 、 R_{of} 的测量	2
2.2	负反馈放大电路频率响应	4
3	实验数据整理	6
3.1	A_{usf} 的测量	6
3.2	输入电阻 R_{if} 的测量	6
3.3	输出电阻 R_{of} 的测量	7
3.4	上限截止频率 f_H 的测量	8
4	实验数据汇总	9
5	误差分析	9
5.1	外加电阻 R_S 的选取及 A_{usf} 的测量	9
5.2	输入、输出电阻 R_{if} 、 R_{of} 的测量	10
5.3	负反馈放大电路频率响应	10
6	电路故障原因	10
7	思考题	10

1. 实验目的

- 熟悉负反馈放大电路组态，深入理解负反馈对放大电路性能的影响。
- 掌握负反馈条件下，电路静态与动态参数的测量方法。

2. 预习报告

2.1 电压并联负反馈放大电路

2.1.1 外加电阻 R_S 的选取及 A_{usf} 的测量

- 理论计算

根据电压并联负反馈放大电路组态进行计算，可得：

$$A_{usf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} \approx -\frac{R_f}{R_s} = -10$$

故 $R_s = 10k\Omega$

- 仿真验证

仿真电路图如图1所示。示波器波形如图2所示。测得当 $R_s = 9.4k\Omega$ 时

$$A_{usf} = \frac{-1.408V}{140.789mV} \approx -10.001$$

符合条件。

图 1: 测量 R_S 电路图

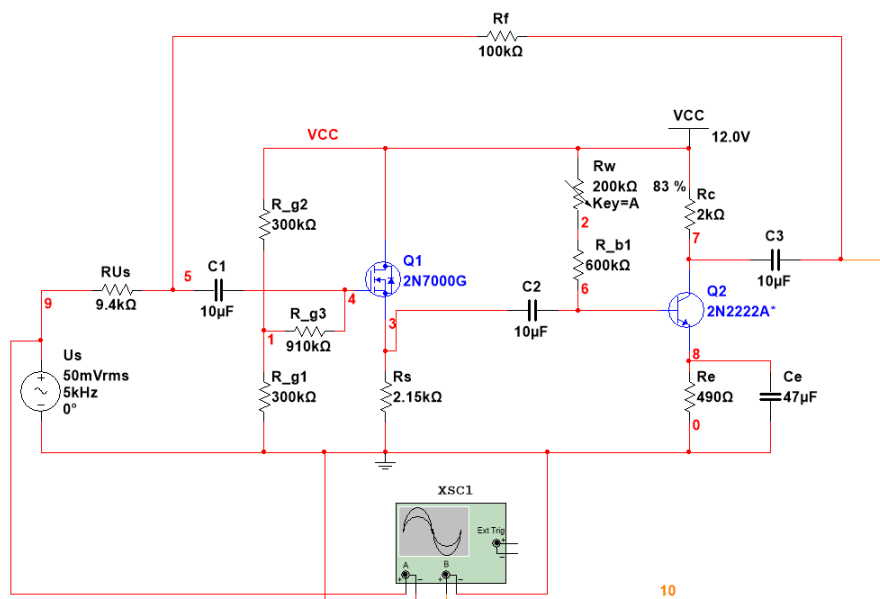
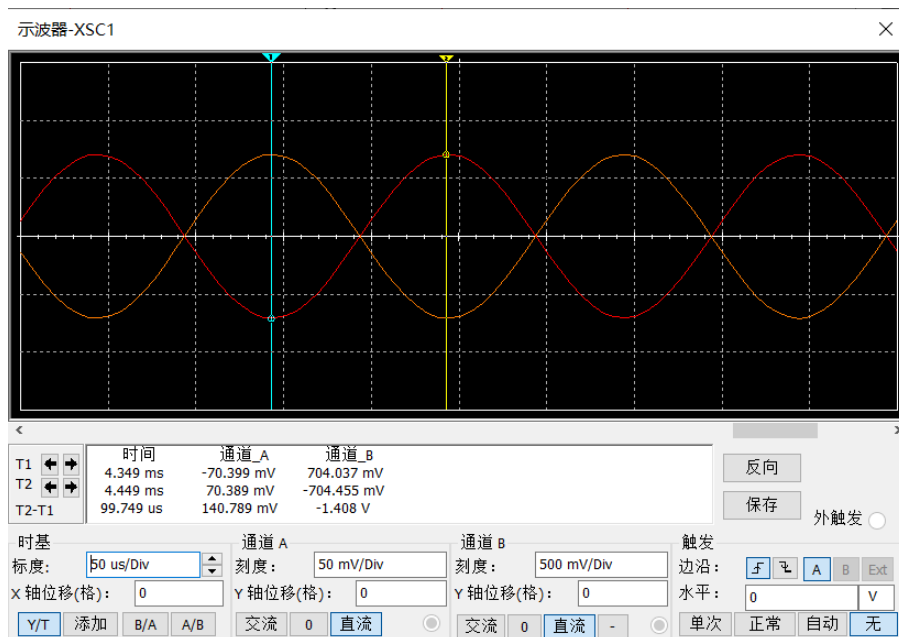


图 2: 测量 R_S 示波器波形



2.1.2 输入、输出电阻 R_{if} 、 R_{of} 的测量

- 理论计算

输入电阻 R_{if} :

$$R_i = R_{g1} // R_{g2} + R_{g3} = 1060k\Omega$$

计算输入电阻时, 不考虑 R_S , 计算 A_{ui} , 由实验二中计算所得 $A_u = -132.88$:

$$A_{ui} = A_u R_i = -132.88 \times 1060k\Omega = -140.85M\Omega$$

反馈深度 $1 + A_{ui} F_{iu} = 1408.5$, 故闭环输入电阻为:

$$R_{if} = \frac{R_i}{1 + A_{ui} F_{iu}} = \frac{1.060M\Omega}{1408.5} = 752.57\Omega$$

输出电阻 R_{of} :

$$R_o = R_C = 2k\Omega$$

利用诺顿定理, 将电压源及其内阻等效与 R_i 并联可得 $R'_i = R_i // R_s = 9.32k\Omega$

$$A_{ui} = A_u R'_i = -1.24M\Omega, 1 + A_{ui} F_{iu} = 13.38$$

$$R_{of} = \frac{R_o}{1 + A_{ui} F_{iu}} \frac{2k}{13.38} = 149.48\Omega$$

- 仿真验证

接入 $R_1 = 1k\Omega$, 测量输入电阻的电路图如图3所示, 示波器示数如图4所示。

图 3: 测量输入电阻电路图

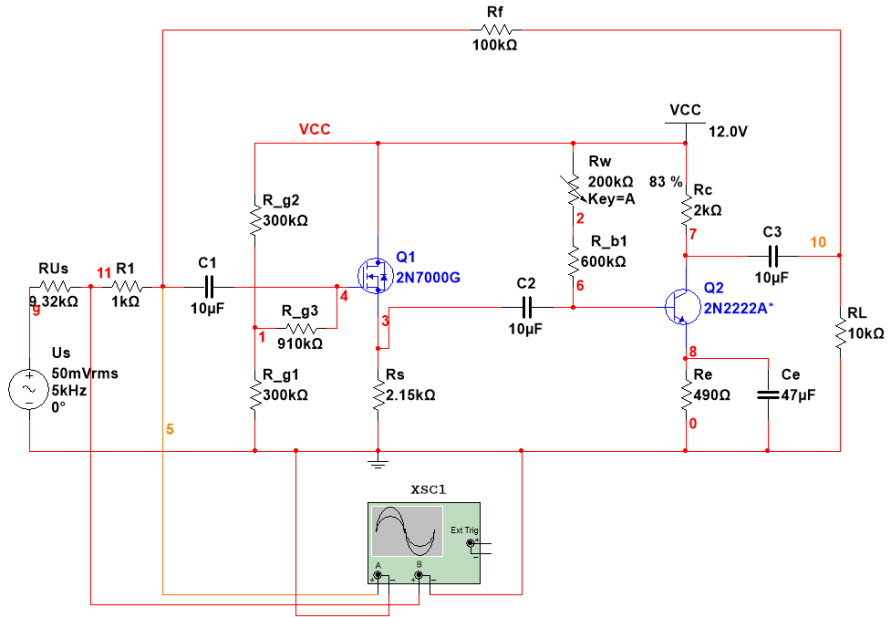
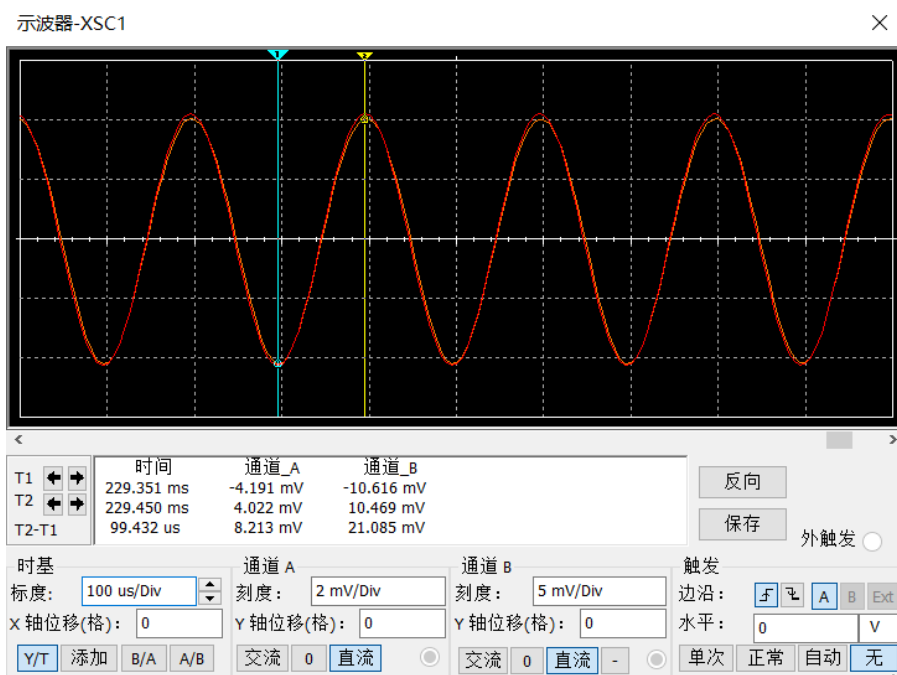


图 4: 测量输入电阻示波器波形



$$R_{if} = 1k\Omega \times \frac{U_i}{U'_i - U_i} = 1k\Omega \times \frac{8.213}{21.085 - 8.213} = 638.05\Omega$$

分别测量 $R_o = 500\Omega$ 、 $R_o = \infty$ 时的输出电压 U_o ，示波器示数如图5、6所示。

图 5: 测量输出电阻示波器波形 ($R_L = 500\Omega$)

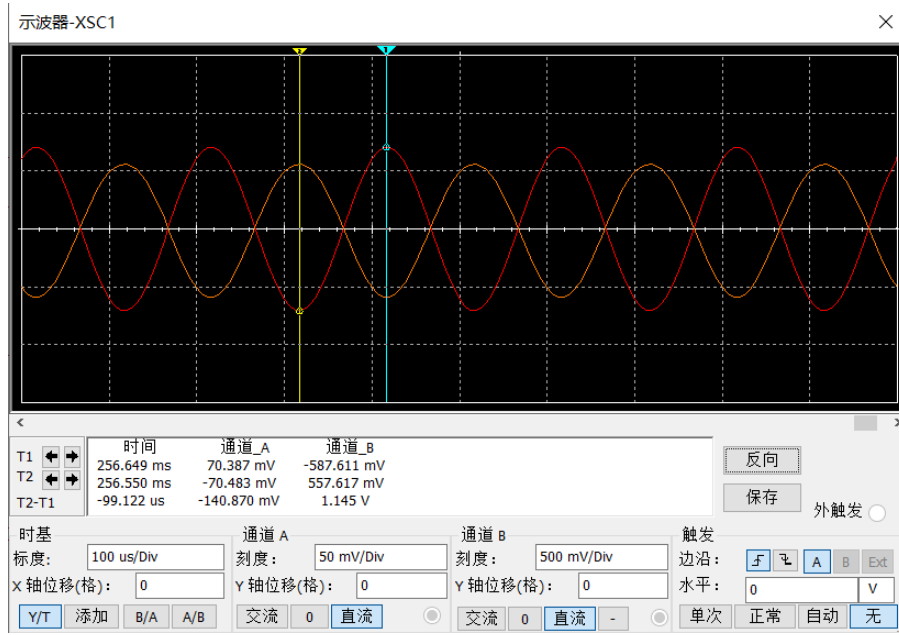
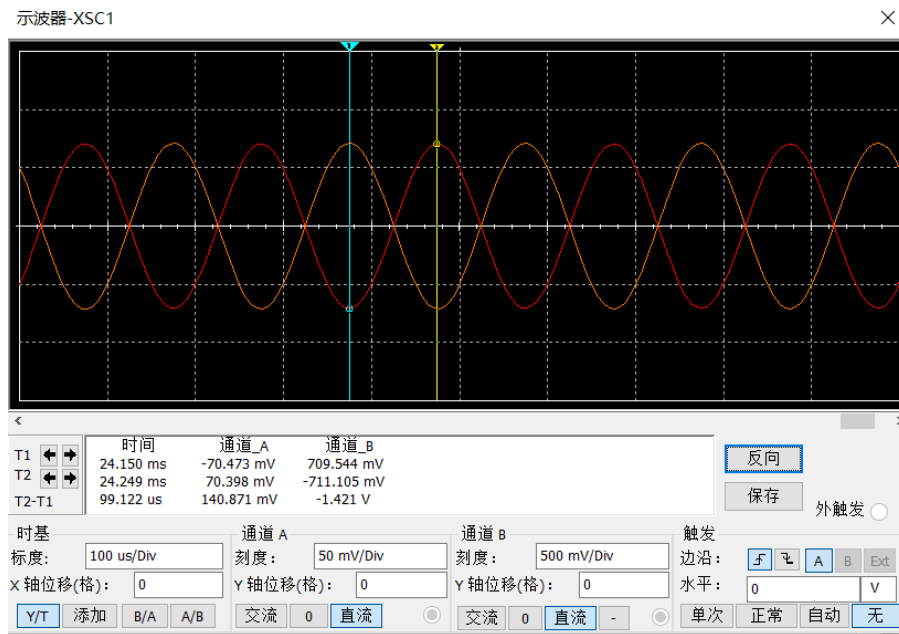


图 6: 测量输出电阻示波器波形 ($R_L = \infty$)

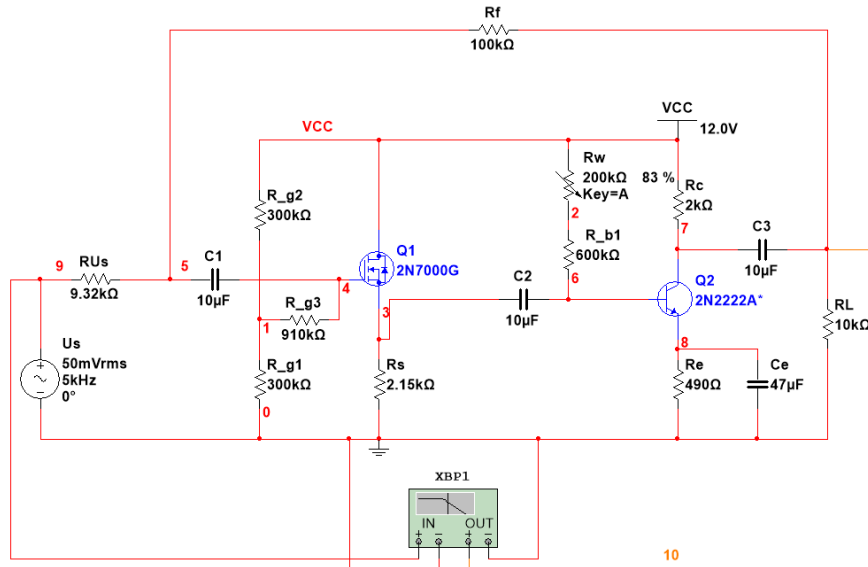


$$R_{of} = 500\Omega \times \frac{U'_o - U_o}{U_o} = 500\Omega \times \frac{1.421 - 1.145}{1.145} = 120.52\Omega$$

2.2 负反馈放大电路频率响应

测量频率响应电路图如图7所示。

图 7: 测量频率响应电路图



波特仪示数如图8、9、10所示。

图 8: 波特仪示数 (中频)

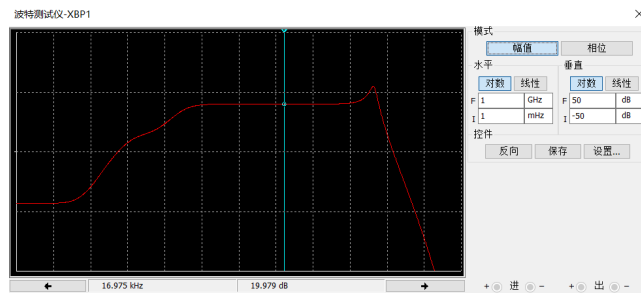


图 9: 波特仪示数 (f_L)

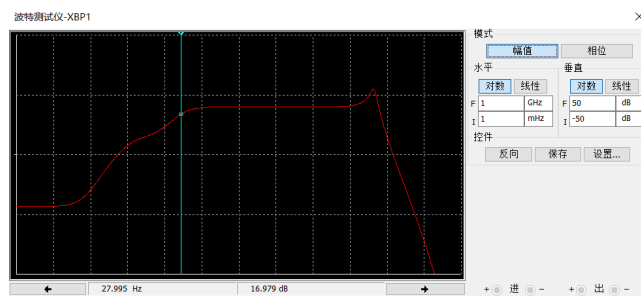
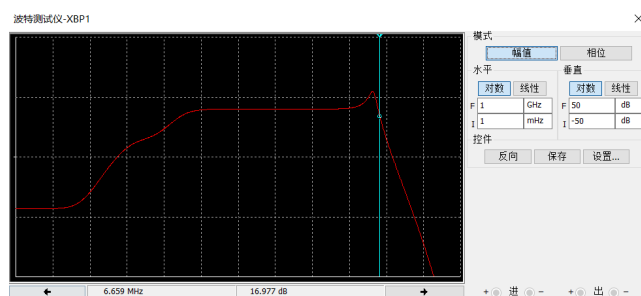


图 10: 波特仪示数 (f_H)



将仿真所得 f_L 、 f_H 的值填入表2中。

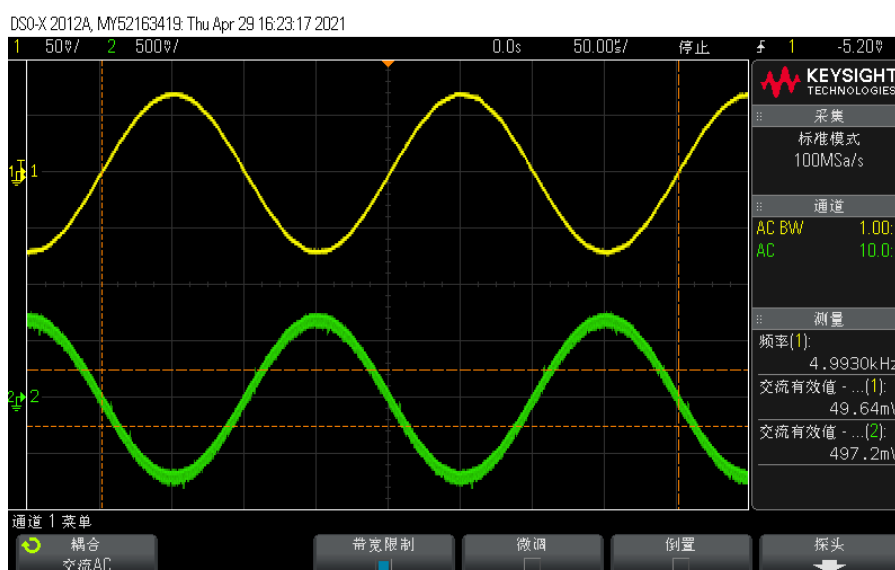
3. 实验数据整理

3.1 A_{usf} 的测量

在实验二的基础上，按电路图正确连接反馈回路和负载电阻，将电位器接入输入回路作为 R_S ，调节信号源有效值为 $50mV$ 。

利用示波器同时监控输入、输出波形，调节 R_S 的阻值直到观察到 $A_{usf} = -10$ 。此时，示波器显示波形如图11所示。

图 11: A_{usf} 测量波形



断开电路，测量电位器阻值 $R_S = 9.48k\Omega$ 。

利用所示波形，计算 A_{usf}

$$A_{usf} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = -\frac{497.2}{49.64} = -10.016$$

将 R_S 、 A_{usf} 测量结果填入表1测量值栏中。

3.2 输入电阻 R_{if} 的测量

采用与实验一相同的输入电阻测量方法，连入电阻 $R_1 = 1k\Omega$ ，利用示波器通道 1 两次监测 R_1 两端波形，分别如图12、13所示。

图 12: R_{if} 测量波形 (1)

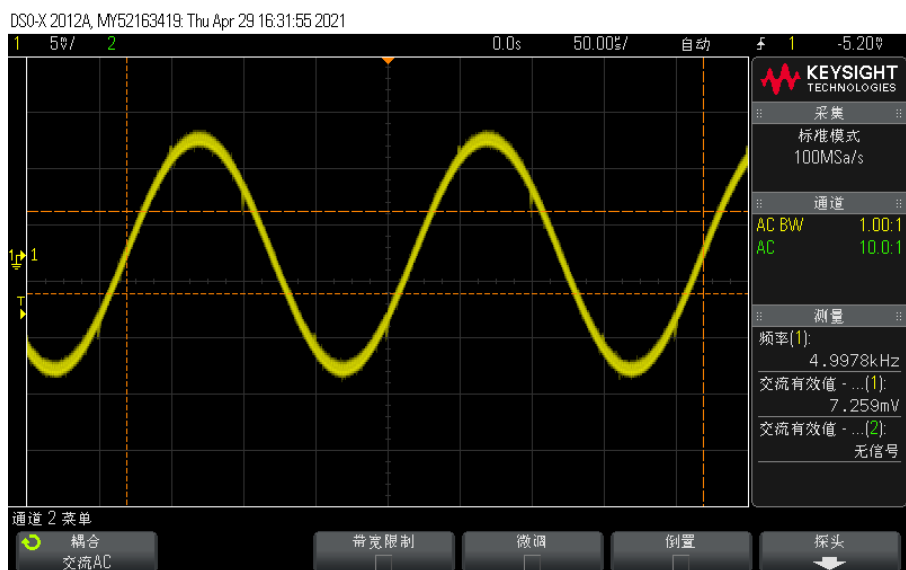
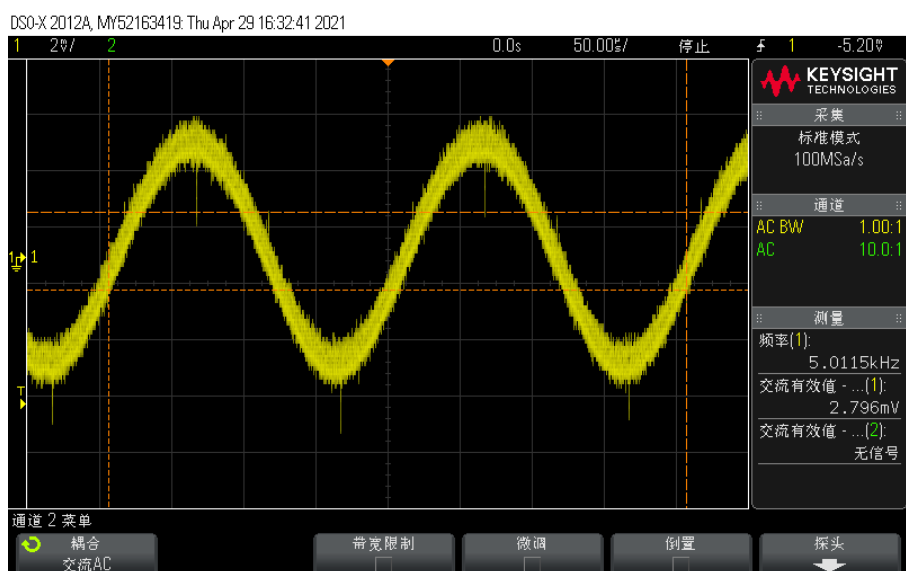


图 13: R_{if} 测量波形 (2)



根据测量结果与计算公式，可得：

$$R_i = 1k\Omega \times \frac{2.796}{7.259 - 2.796} = 626.48\Omega$$

将 R_{if} 测量结果填入表1测量值栏中。

3.3 输出电阻 R_{of} 的测量

考虑到输出电阻阻值较小，且需控制负载电流的大小两方面因素，测量输出电阻时，连入负载电阻 $R_L = 680\Omega$ 。示波器监控输入、输出波形，所示波形如图14、15所示。

图 14: R_{of} 测量波形 ($R_L = 680\Omega$)

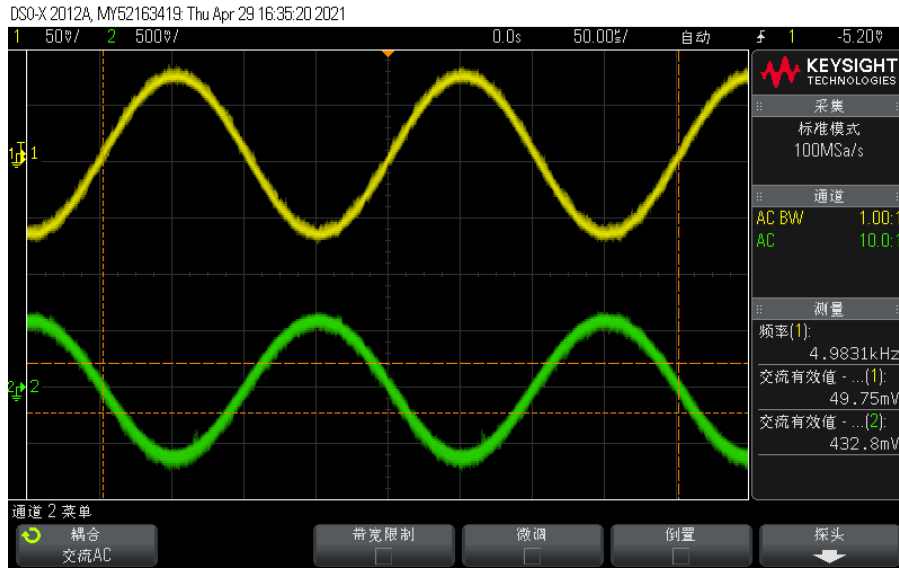
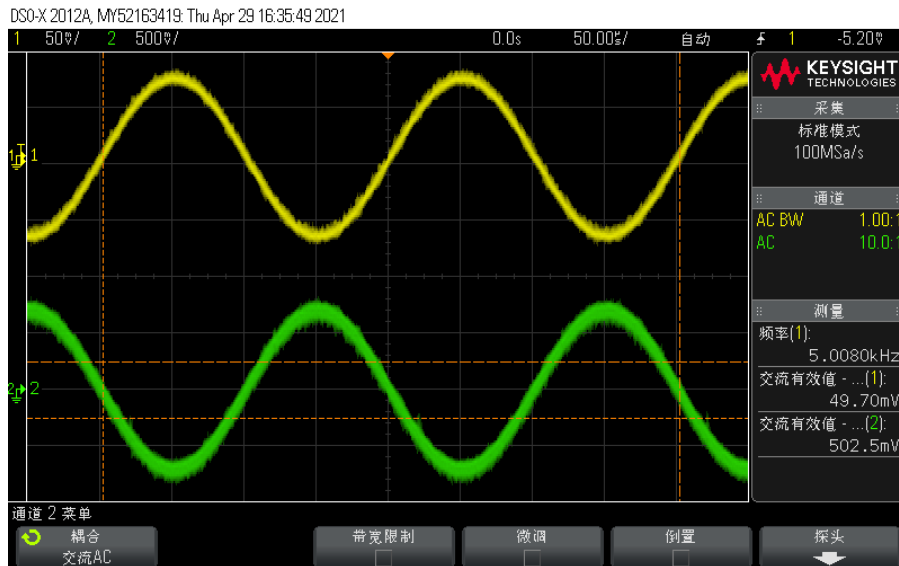


图 15: R_{of} 测量波形 ($R_L = \infty$)



根据测量结果与计算公式，可得：

$$R_o = 680\Omega \times \left(\frac{502.5mV - 432.8mV}{432.8mV} \right) = 109.51\Omega$$

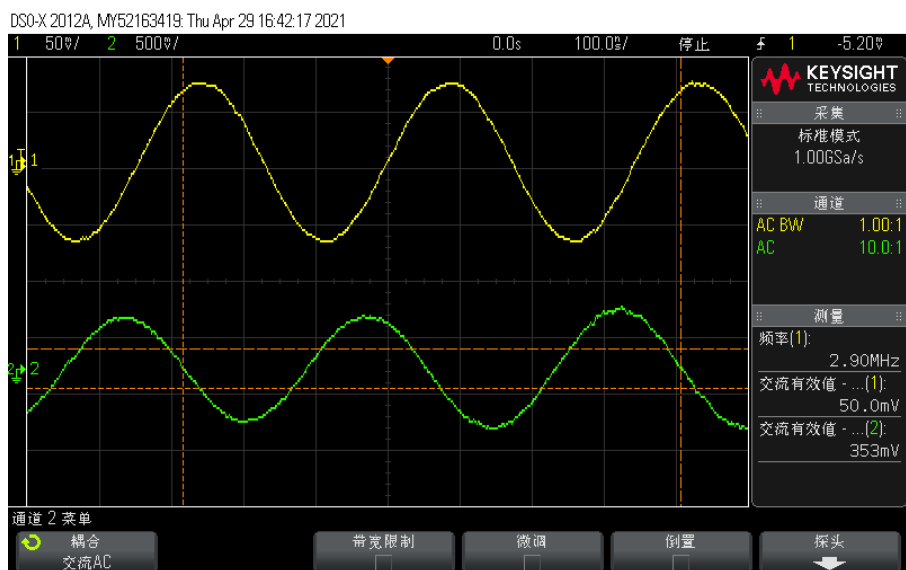
将 R_{of} 测量结果填入表1测量值栏中。

3.4 上限截止频率 f_H 的测量

根据测量 A_{usf} 时的结果， $A_{usf} = -10.016$ ，输出电压 $\dot{U}_o = 497.2mV$ ，故在测量上限截止频率时，应当调节 $U'_o = \frac{\sqrt{2}}{2} \dot{U}_o = 351.6mV$ 。

示波器波形如图16所示。

图 16: f_H 测量波形



根据波形，交流有效值 $U'_o = 353mV$ ，频率 $f_H = 2.90MHz$ ，表明电路的上限截止频率测量值 $f_H = 2.90MHz$ 。

将 f_H 测量结果填入表2的测量值栏中。

4. 实验数据汇总

表 1: 电压并联负反馈放大电路数据表格

参数	理论值	仿真结果	实测值
$R_S/k\Omega$	10.0	9.4	9.48
A_{usf}	-10.000	-10.001	-10.016
R_{if}/Ω	752.57	638.05	626.48
R_{of}/Ω	149.48	120.52	109.51

表 2: 负反馈放大电路频率响应

参数	仿真结果	实测值
f_L/Hz	27.995	—
f_H/MHz	6.659	2.90

5. 误差分析

5.1 外加电阻 R_S 的选取及 \dot{A}_{usf} 的测量

由于此次实验在仿真、测量的过程中均以 \dot{A}_{usf} 作为调节参数的标准，故测量 \dot{A}_{usf} 的误差极小。

在理论值计算时，利用近似式进行计算： $\dot{U}_S = \dot{I}_i R_S$ ，将会对 R_S 的值造成误差。从理论角度对该误差进行修正，由于 $R_S : R_i \approx 10k : 1000k$ ，电流比 $I_S : I_i \approx 1600 : 1$ ，二者相乘可得电压比 $U_S : U_i \approx 16 : 1$ ，

因此：

$$U_S \approx \frac{16+1}{16} \dot{I}_i R_S \approx 1.06 \dot{I}_i R_S$$

$$R_S = \frac{100k}{10 \times 1.06} \approx 9.4k\Omega$$

由此可知，修正后的结果与仿真结果及实测值极为接近，亦即 R_S 的误差主要来源于对并联负反馈电路的近似。

5.2 输入、输出电阻 R_{if} 、 R_{of} 的测量

实际测量得 R_{if} 、 R_{of} 均小于仿真结果。分析可知，这可能是因为 \dot{A} 的差异造成的。由于 $\dot{F} = \frac{1000k}{10k} = 10$ ， \dot{A} 的变化将被放大十倍，故 \dot{A} 的波动将会造成 R_{if} 、 R_{of} 产生误差。此外，由于在测量输入、输出电阻时，均对应着两次接线和读数，故示波器测量时示数的波动也可能造成较大的误差。

5.3 负反馈放大电路频率响应

与实验二的误差分析同理，实验测得的放大电路上限截止频率小于仿真结果。一方面，这可能是因为元器件在高频时的特性可能会发生变化，例如导线可能会对电路的高频特性产生影响；另一方面，这可能是由于仿真时模型与实际元器件有一定差异造成的。

6. 电路故障原因

由于本次实验电路搭建、测量内容均较简单，所有测量方法在此前的实验中均已经熟练使用，且笔者对实验原理进行了充分的计算、仿真、预习，并正确完成了电路的搭接，故本次实验未出现任何故障，实验过程中顺利、迅速完成了所有内容的测量。

本次实验使笔者对负反馈放大电路有了更深的认识，通过理论计算环节，更加充分地掌握了电压并联负反馈放大电路的原理以及相关计算方法。

7. 思考题

在两级放大电路中，第一级为场效应管放大电路，输入电阻很大，引入并联负反馈后，输入电阻很小，为什么？

- 一方面，由于在并联负反馈的推导中考虑电源为恒流源，故在此次实验中需要将电压源和电源内阻利用诺顿定理等效为电流源，与输入回路并联。由于两级放大电路的输入电阻极大，与电源内阻并联后的等效电阻与电源内阻近似相等。这一等效过程大大降低了输入电阻的值 (大约为 $10k\Omega$ 量级)
- 另一方面，考虑到并联负反馈的特点：

$$R_{if} = \frac{R_i}{1 + AF}$$

由于 $1 + AF$ 在深度负反馈的条件下很大 (由此前的理论计算可知，约为 10^3 量级)，因此在两方面因素的综合作用下，输入电阻在引入并联负反馈后很小。