

实验三 负反馈放大电路

实验报告

姓名： 赵文亮

学号： 2016011452

班级： 自64

桌号： 229—6

日期： 2018年4月27日

目录

1	实验目的.....	1
2	实验必做.....	1
3	实验选做.....	2
4	实验要求.....	3
5	预习任务.....	3
5.1	原理复习.....	3
5.1.1	负反馈放大电路的四种基本组态.....	3
5.1.2	负反馈放大电路的表达式.....	3
5.2	参数计算.....	3
5.3	电路图.....	6
5.4	电路仿真.....	7
5.4.1	必做实验.....	7
5.5	数据记录表格.....	12
5.5.1	必做实验.....	12
5.5.2	选做实验.....	14
6	波形截图.....	15
7	数据处理.....	17
7.1	必做实验.....	17
7.2	选做实验.....	19
8	电路故障及原因分析.....	20
9	实验总结.....	21
9.1	总结、分析发射极电阻对放大电路动态参数的影响.....	21
9.2	总结放大电路主要性能指标的测量方法.....	21
9.2.1	静态参数.....	21
9.2.2	动态参数.....	21
9.2.3	负反馈电路的测量.....	23
10	思考题.....	23

1 实验目的

1. 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。
2. 掌握负反馈条件下，电路静态与动态参数的测量方法。

2 实验必做

设计并实现一个电压并联负反馈放大电路，其基本放大电路采用实验二的两级放大电路。实验参考电路方框图如图 1 所示。

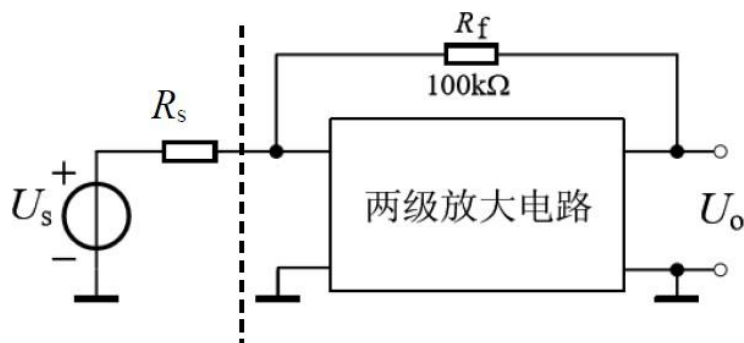


图 1 电压并联负反馈放大电路方框图

图 1 中的 R_s 模拟信号源的内阻； R_f 为反馈电阻，取值为 $100k\Omega$ 。

负反馈放大电路的静态和动态参数要求如下：

- 1) 开环时静态工作点要求同实验二，即电流 I_{DQ} 和 I_{CQ} 均约为 $2mA$ ；结型场效

应管的管压降 $U_{GDQ} < -4V$ ，晶体管的管压降 $U_{CEQ} = 2 \sim 3V$ ；

- 2) 开环两级放大电路的输入电阻约为 $100k\Omega$ ，电压放大倍数的数值 ≥ 100 。

- 3) 闭环电压放大倍数为 $\dot{A}_{usf} = \dot{U}_o / \dot{U}_s \approx -10$ 。

按照“先开环后闭环”、“先静态后动态”的原则，完成负反馈放大电路的设计、调试和测试。

1. 开环两级放大电路调试

开环时，为了考虑图 1 中引入电压负反馈后反馈网络即反馈电阻 R_f 的负载效应，断开 R_f 后需要在两级放大电路的输入端和输出端分别并联与反馈电阻 R_f 阻值相同的电阻 R 和 R_L' 。

开环时考虑反馈电阻 R_f 的负载效后，对两级放大电路的静态和动态参数进行

调试，确保其可以正常工作并满足前述静态工作点要求，然后测量并记录开环电压放大倍数 $\dot{A}_{usf} = \dot{U}_o / \dot{U}_s$ 、输入电阻 R_{if} 和输出电阻 R_{of} 。

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。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。记录 R_s 的阻值。

3. 负反馈放大电路的闭环测试

1) 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 $\dot{A}_{usf} = \dot{U}_o / \dot{U}_s$ 、输入电阻 R_{if} 和输出电阻 R_{of} 。

注意：输入电阻 R_{if} 指图1中虚线右侧部分放大电路的输入电阻，不含 R_s 。

2) 测量负反馈放大电路的上限截止频率 f_H 。

3 实验选做

实现一个由共源放大电路和共射放大电路组成的两级电流并联负反馈放大电路。实验参考电路如图2所示。测量并记录 $\dot{A}_{usf} = \dot{U}_o / \dot{U}_s$ 、 R_{if} 、 R_{of} 。

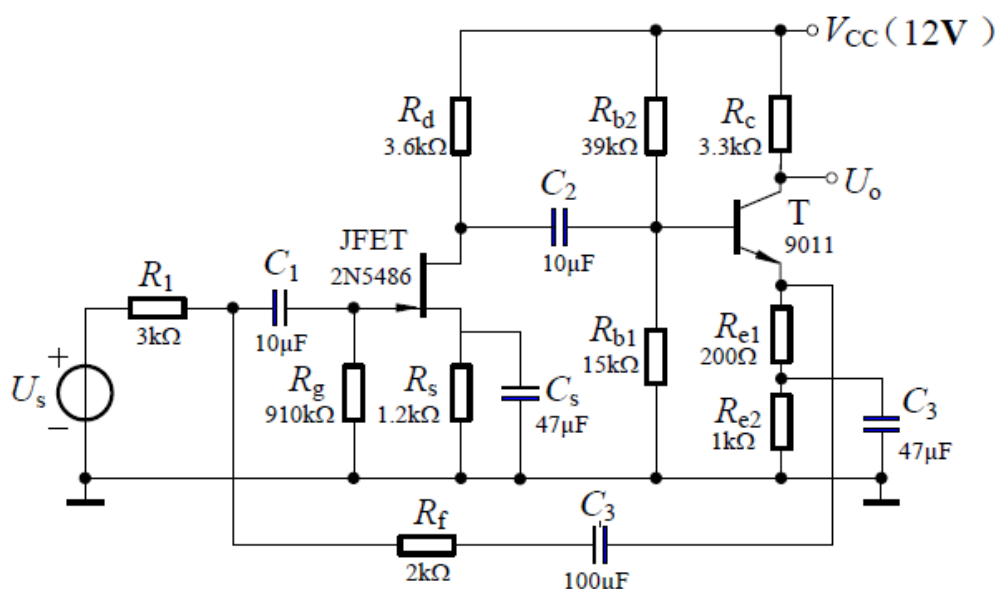


图2 电流并联负反馈放大电路

4 实验要求

1. 对实验内容先进行仿真测试再搭建硬件电路测试。
2. 仿真测试时，分别保存各测试项目的仿真文件或电路截图，将静态与动态的测试数据记录在数据表格中。
3. 硬件电路测试时，记录各项测试数据。

5 预习任务

5.1 原理复习

5.1.1 负反馈放大电路的四种基本组态

根据放大回路输出回路与反馈网络的连接方式，可以将负反馈放大电路分为电压反馈和电流反馈；根据输入回路与反馈网络的连接方式，可以将负反馈放大电路分为串联反馈和并联反馈。

本次实验的必做任务电路是电压并联负反馈，选做任务是电流并联负反馈。

5.1.2 负反馈放大电路的表达式

放大倍数 \dot{A}_f 的一般表达式为：

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{A}}{1 + \dot{A}\dot{F}}$$

深度负反馈时，有 $|1 + \dot{A}\dot{F}| \gg 1$ ，则

$$\dot{A}_f \approx \frac{1}{\dot{F}}$$

5.2 参数计算

必做任务

根据实验必做内容中的电路参数要求，计算图 1 引入电压并联负反馈后放大电路的 \dot{A}_{usf} 、 R_{if} 、 R_{of} 。

由于必做内容为电压并联负反馈，则不难得出：

$$\dot{F}_{iu} = \frac{\dot{I}_f}{\dot{U}_o} = \frac{-\dot{U}_o/R_f}{\dot{U}_o} = -\frac{1}{R_f}$$

深度负反馈时，有

$$\dot{A}_{uif} \approx \frac{1}{\dot{F}_{iu}} = -R_f$$

由虚断，可以认为 $\dot{I}'_i \approx 0, \dot{U}_s \approx \dot{I}_f R_s$ ，则有

$$\dot{A}_{usf} = \frac{\dot{A}_{uif}}{R_s} = -\frac{R_f}{R_s}$$

本实验中 $R_f = 100\text{k}\Omega$ ，且要求 $\dot{A}_{usf} \approx -10$ ，则解得 $R_s = 10\text{k}\Omega$ 。

必做实验开环时的电路如图 3 所示。不难计算得到开环时基本放大电路的输入输出电阻分别为

$$R_i = 220\text{k} // 300\text{k} + 910\text{k}\Omega = 1036.9\text{k}\Omega$$

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

此处应该将电压源与 R_s 使用诺顿定理等效得到电流源和内阻，并将 R_s 合并到放大电路中，得到 $R'_i = R_i // R_s \approx 10\text{k}\Omega$

放大倍数取上次实验的实测值 $\dot{A}_u = -132.90$ 。可以计算得：

$$|1 + AF| \approx 132.90 \times \frac{1036.9 // 10}{100} = 13.16$$

则有

$$R_{if} = \frac{R'_i}{1 + AF} = \frac{10}{13.16} \text{k}\Omega = 759.88\Omega$$

$$R_{of} = \frac{R_o}{1 + AF} = \frac{3.3\text{k}\Omega}{13.16} = 250.75\Omega$$

选做任务

选做任务的理论计算如下：

$$F = \frac{I_f}{I_o} = \frac{R_{e1}}{R_{e1} + R_f} = \frac{0.2}{0.2 + 2} = 0.0909$$

$$\dot{A}_{usf} \approx \frac{R_o I_o}{R_i I_f} = \frac{R_c}{R_i F} = \frac{3.3}{3 \times 0.0909} = 12.10$$

$$A = \frac{U_o}{U_i} \cdot \frac{R_g}{R_c} \approx 89.845 \cdot \frac{910}{3.3} = 24775.48$$

$$1 + AF \approx 2253.09$$

$$R_{if} = \frac{R_g}{1 + AF} = \frac{910\text{k}\Omega}{2253.09} = 403.89\Omega$$

$$R_{of} \approx R_c = 3.3\text{k}\Omega$$

其中 A 的计算中的 $\frac{U_o}{U_i}$ 一项近似取 $g_m R_{i2} \dot{A}_{u2}$ ，其中 g_m 在上次实验中已经计算过，而且由于静态工作点相差不大，可以拿来近似；同样 R_{i2} 取上次实验的计算值， \dot{A}_{u2} 取上次实验的实测值。

5.3 电路图

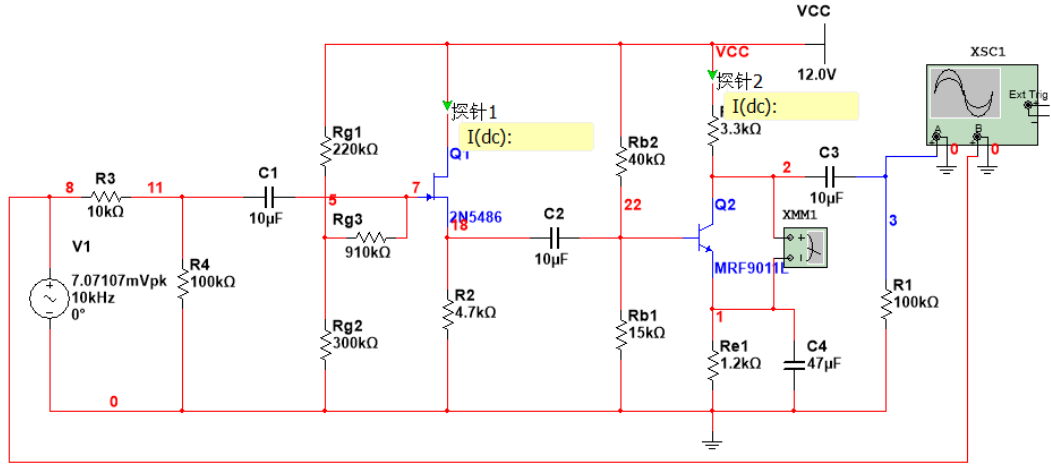


图 3 必做实验开环电路图

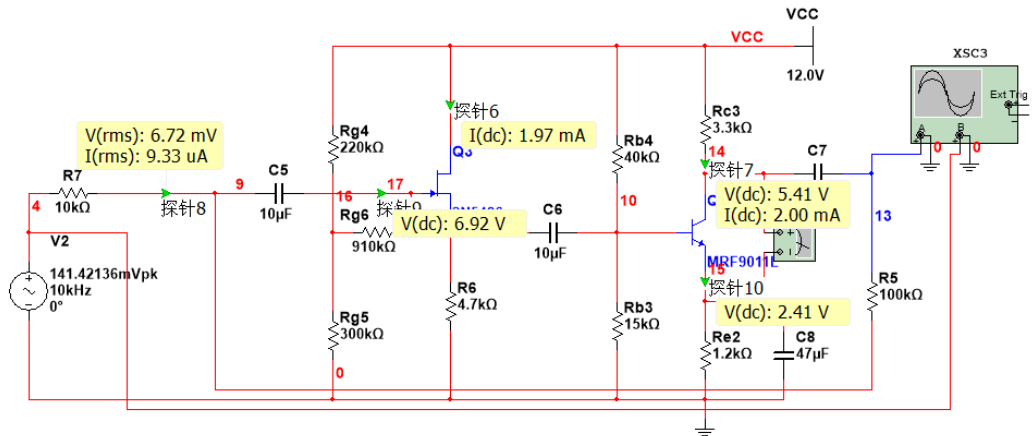


图 4 必做实验闭环电路图

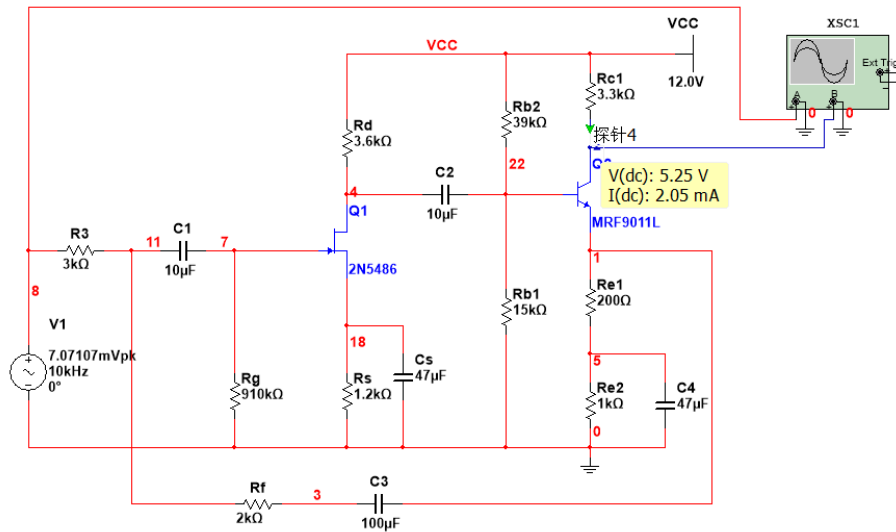


图 5 选做实验电路图

5.4 电路仿真

9周的实验课前搭接仿真测试电路，对电路进行仿真，并将各测试项目的电路截图、实验数据整理为实验文档。

5.4.1 必做实验

开环

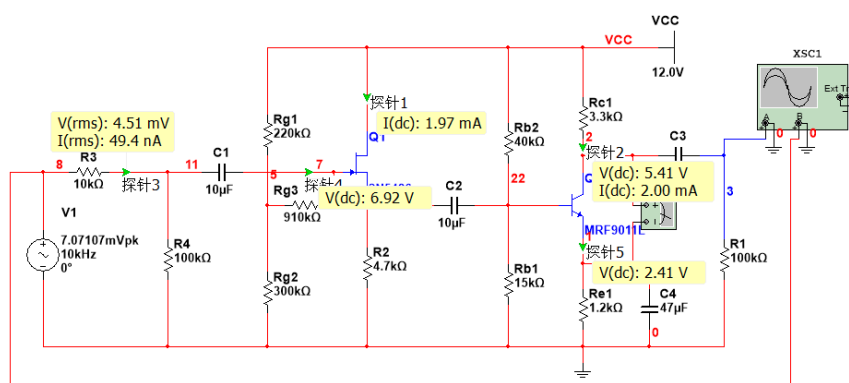


图 6 必做实验开环静态测量

直接通过探针测量静态工作点，从图中不难得到开环时静态工作点的参数

$I_{DQ} = 1.97\text{mA}$, $I_{CQ} = 2.00\text{mA}$, $U_{GDQ} = -5.08\text{V}$, $U_{CEQ} = 3.00\text{V}$ ，均满足要求。

测量开环的输入输出波形，如图 7 所示。则

$$\dot{A}_{usf} = -\frac{858.545}{7.028} = -122.16$$

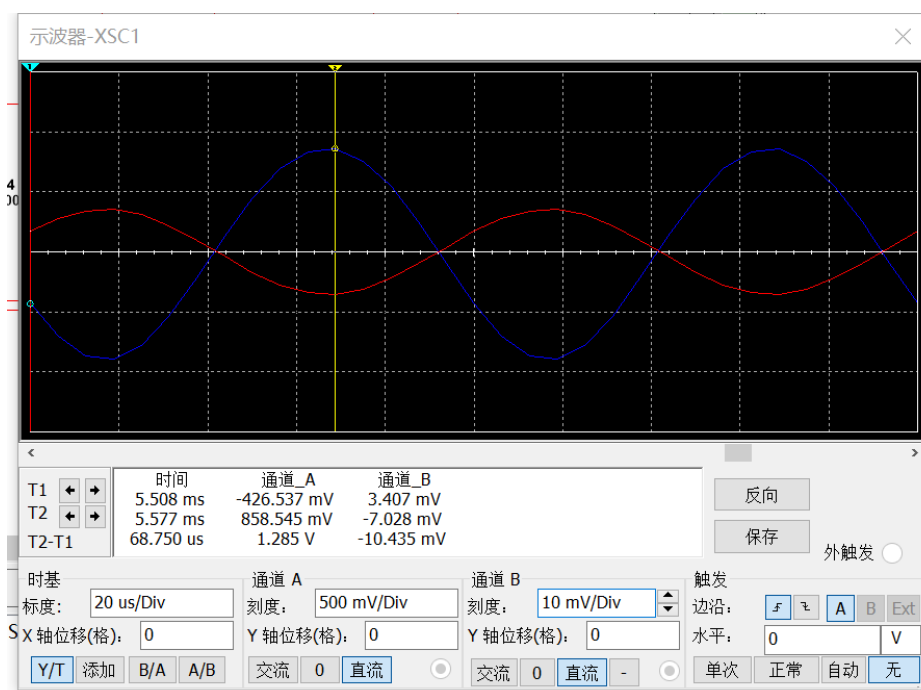


图 7 必做实验开环输入输出仿真波形

可以直接从探针3上读出输入电阻为：

$$R_{if} = \frac{4.51\text{m}}{49.4\text{n}} = 91.30\text{k}\Omega$$

测量负载开路输出电压 $U_o' = 857.867\text{mV}$ ，接入 $R_L = 3.3\text{k}\Omega$ 时测得 $U_{oL} = 462.322\text{mV}$ ，则

$$R_{of} = \left(\frac{U_o'}{U_{oL}} - 1 \right) R_L = \left(\frac{857.867}{462.322} - 1 \right) \times 3.3\text{k}\Omega = 2.82\text{k}\Omega$$

闭环

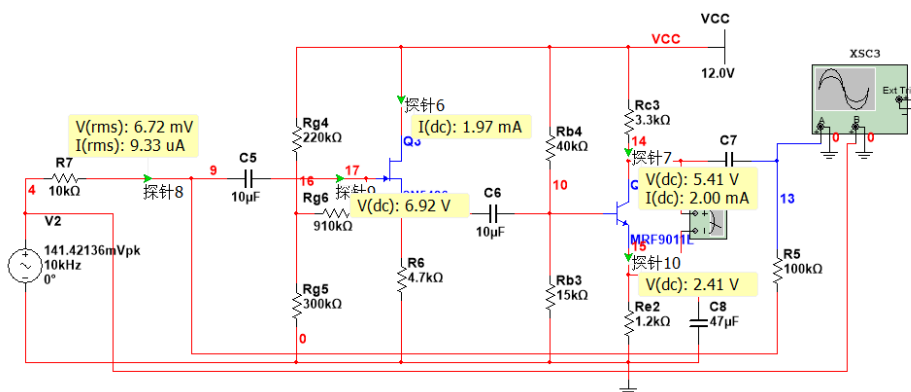


图 8 必做实验闭环静态测量

可见闭环时静态工作点没有变化。测量输入输出波形如图 9。

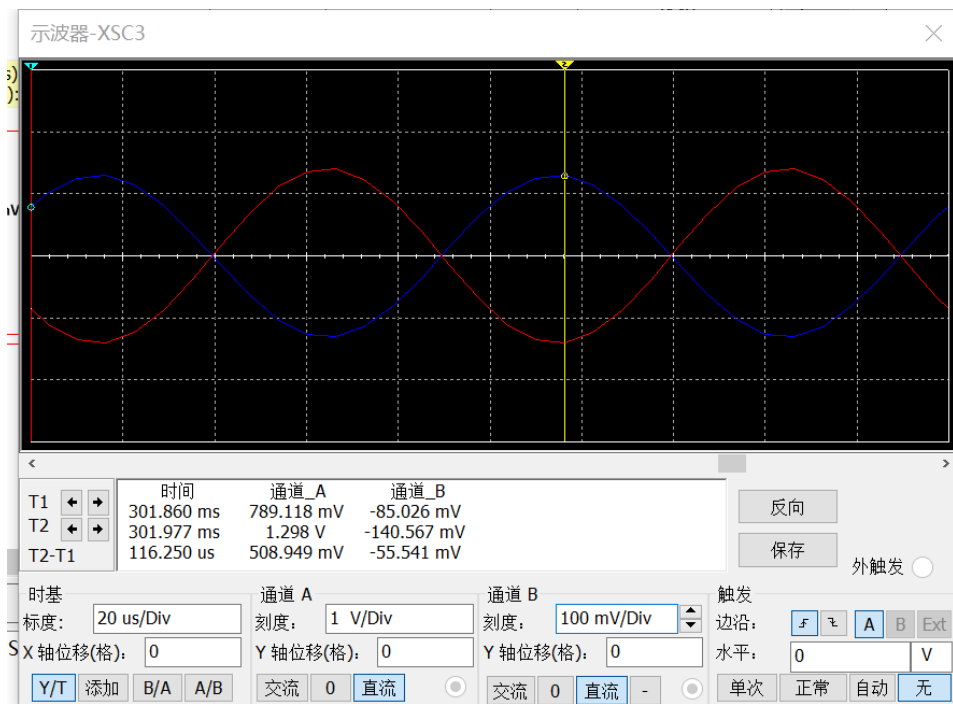


图 9 必做实验闭环输入输出仿真波形

可以计算出

$$\dot{A}_{usf} = -\frac{1.298}{140.567\text{m}} = -9.23$$

直接通过探针读出输入电阻为

$$R_{if} = \frac{6.72\text{m}}{9.33\mu}\Omega = 720.26\Omega$$

测量负载开路输出电压 $U_o' = 1.298\text{V}$, 接入 $R_L = 1\text{k}\Omega$ 时测得 $U_{oL} = 1.015\text{V}$,

则

$$R_{of} = \left(\frac{U_o'}{U_{oL}} - 1 \right) R_L = \left(\frac{1.298}{1.015} - 1 \right) \times 1\text{k}\Omega = 278.8\Omega$$

使用波特测试仪测量幅频特性, 如图 10 所示。

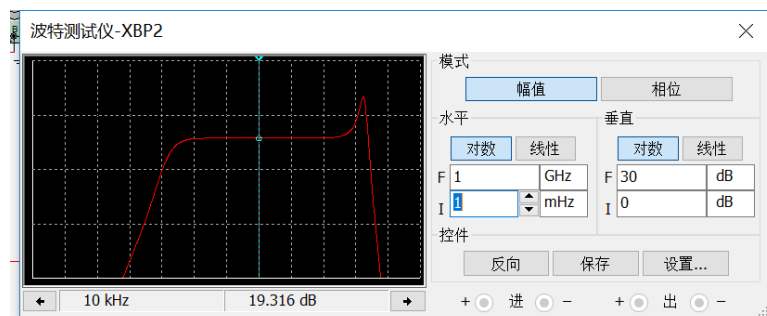


图 10 必做实验幅频特性

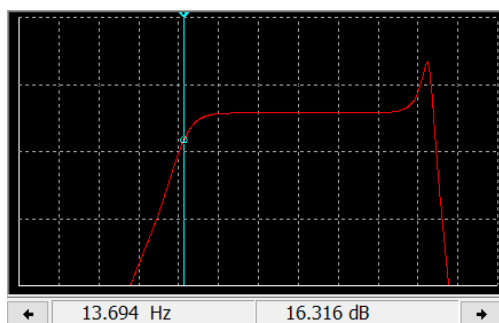


图 11 低频截止频率测量

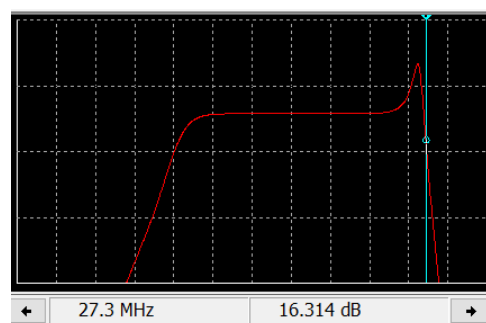


图 12 高频截止频率测量

测量可得 $f_L = 13.694\text{Hz}$, $f_H = 27.3\text{MHz}$ 。

选做任务

选做任务电路如图 5 所示，测量放大电路的放大倍数波形如图 13 所示。从中可以计算得到：

$$\dot{A}_{usf} = \frac{65.675}{7.028} = 9.3448$$

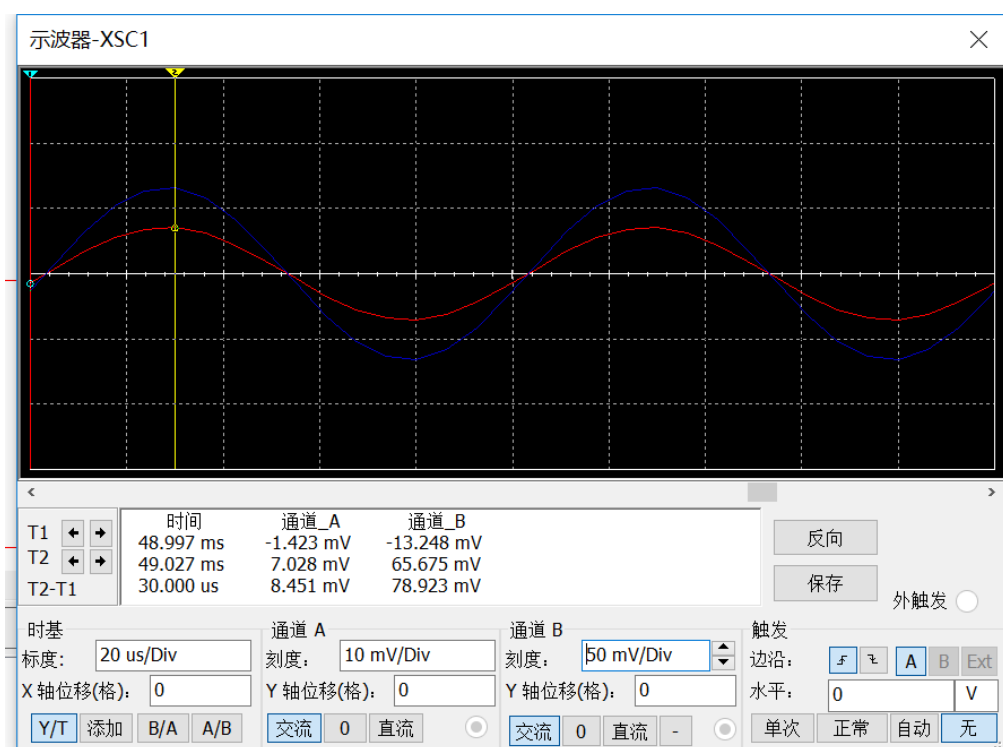


图 13 选做任务放大倍数测量

直接通过探针测量输入电阻：

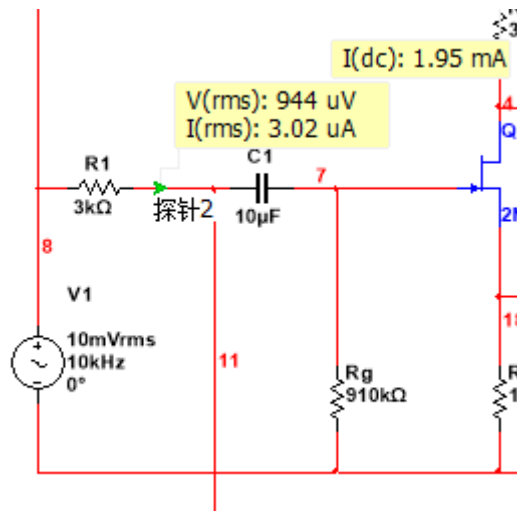


图 14 选做任务输入电阻测量

则

$$R_i = \frac{944}{3.02} \Omega = 312.58 \Omega$$

测量负载开路输出电压 $U_o' = 132.528 \text{ mV}$ ，接入 $R_L = 3.3 \text{ k}\Omega$ 时测得 $U_{oL} =$

66.432 mV，则

$$R_{of} = \left(\frac{U_o'}{U_{oL}} - 1 \right) R_L = \left(\frac{132.528}{66.432} - 1 \right) \times 3.3 \text{ k}\Omega = 3.28 \text{ k}\Omega$$

5.5 数据记录表格

5.5.1 必做实验

开环静态工作点

	I_{DQ}/mA	I_{CQ}/mA	U_{GDQ}/V	U_{CEQ}/V
理论值	2	2	-5.077	3
仿真值	1.97	2.00	-5.08	3.00
实测值				

开环放大倍数

	U_s/mV	U_o/mV	\dot{A}_{usf}
理论值			-138.08
仿真值	7.028	858.545	-122.16
实测值			

开环输入电阻

	U_{o2}/mV	U_{o1}/mV	$R_1/\text{k}\Omega$	$R_i = \frac{U_{o2}}{U_{o1} - U_{o2}} R_1/\text{k}\Omega$
理论值				91.20
仿真值				91.30
实测值				

开环输出电阻

	U'_o/mV	U_{oL}/mV	$R_L/\text{k}\Omega$	$R_o = \left(\frac{U'_o}{U_{oL}} - 1 \right) R_L/\text{k}\Omega$
理论值				3.3
仿真值	857.867	462.322	3.3	2.82
实测值				

闭环放大倍数

	U_s/mV	U_o/mV	\dot{A}_{usf}
理论值			-10
仿真值	140.567	1298	-9.23
实测值			

闭环输入电阻

	U_i/mV	U'_i/mV	R_1/Ω	$R_i = \frac{U_i}{U'_i - U_i} R_1/\Omega$
理论值				759.88
仿真值				720.26
实测值				

闭环输出电阻

	U'_o/mV	U_{oL}/mV	$R_L/\text{k}\Omega$	$R_o = \left(\frac{U'_o}{U_{oL}} - 1 \right) R_L/\Omega$
理论值				250.75
仿真值	1.298	1.015	1	278.8
实测值				

截止频率

f/Hz							
$ \dot{A}_{usf} $							

f/Hz							
$ \dot{A}_{usf} $							

	f_H/MHz	f_L/Hz
仿真值	27.3	13.694
实测值		

5.5.2 选做实验

放大倍数

	U_s/mV	U_o/mV	\dot{A}_{usf}
理论值			12.10
仿真值	9.3448	65.675	9.3448
实测值			

输入电阻

	U_i/mV	U'_i/mV	R_1/Ω	$R_i = \frac{U_i}{U'_i - U_i} R_1/\Omega$
理论值				403.89
仿真值				312.58
实测值				

输出电阻

	U'_o/mV	U_{oL}/mV	$R_L/\text{k}\Omega$	$R_o = \left(\frac{U'_o}{U_{oL}} - 1 \right) R_L/\text{k}\Omega$
理论值				3.3
仿真值	132.528	66.432	3.3	3.28
实测值				

6 波形截图

实验中部分截图如下。

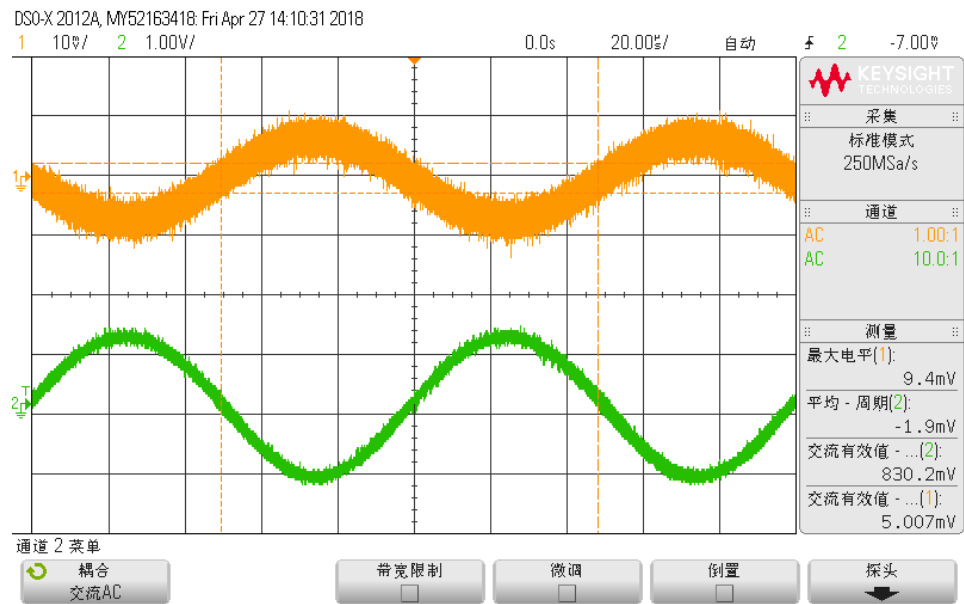


图 15 开环放大倍数测量波形

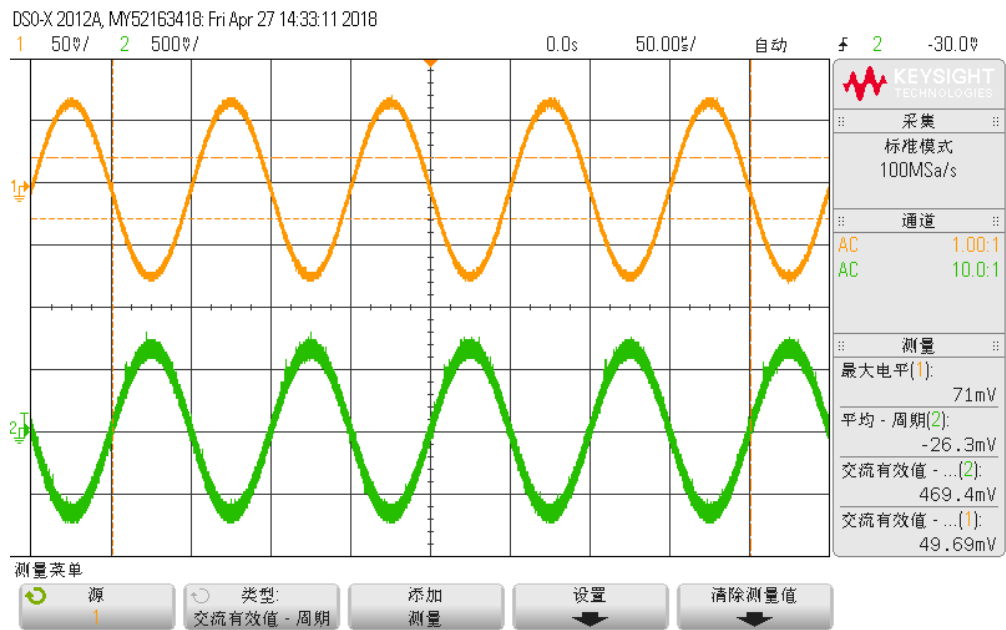


图 16 闭环放大倍数测量波形

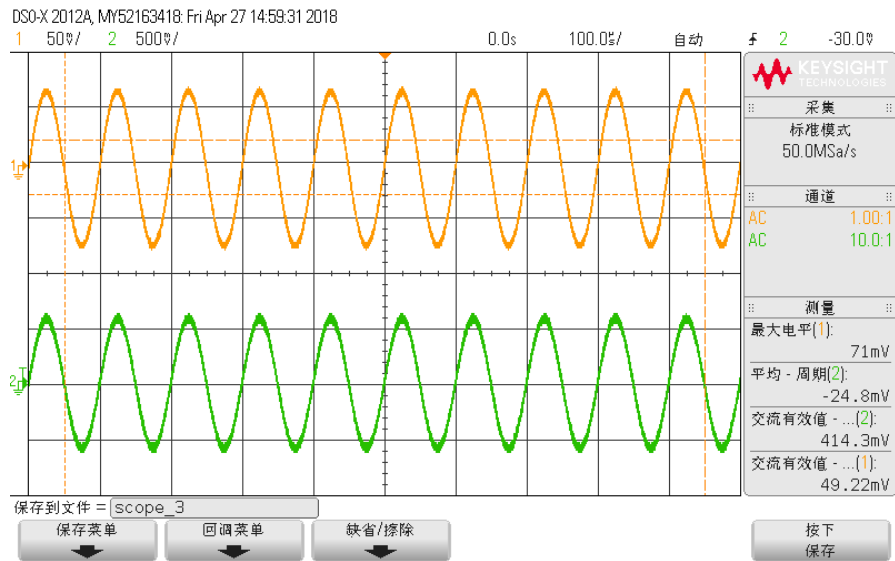
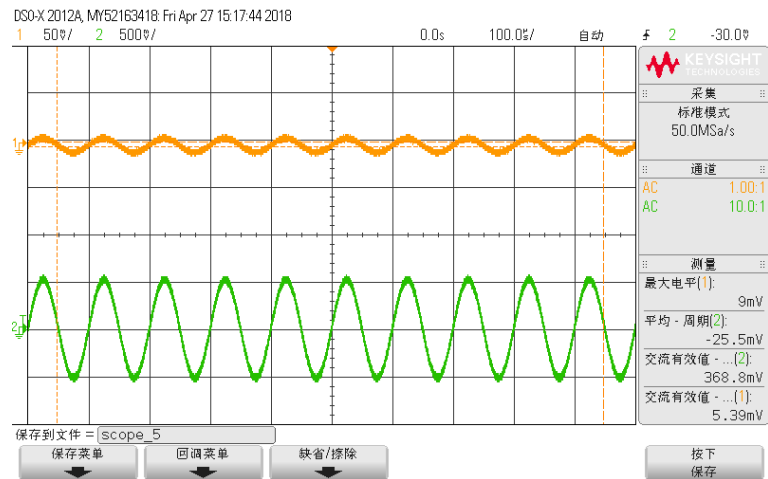
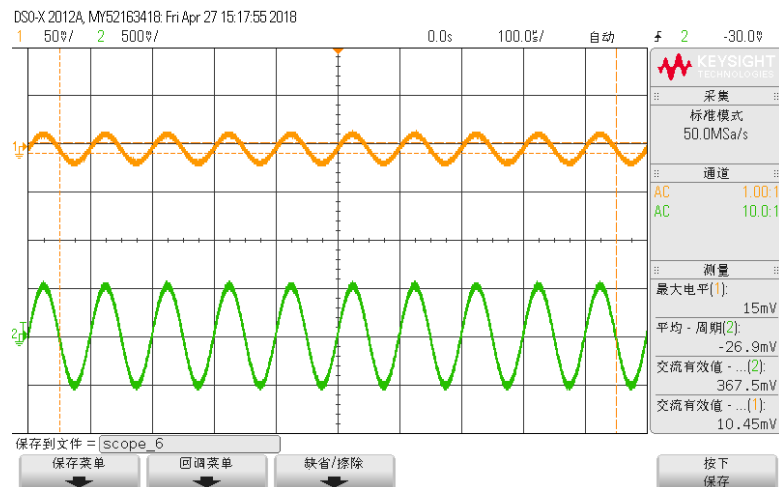


图 17 选做任务放大倍数测量波形



(a) U_i 测量波形



(b) U_i' 测量波形

图 18 选做任务输入电阻测量波形

7 数据处理

7.1 必做实验

开环静态工作点

开环时的静态工作点数据如表 1 所示。第一级电路的静态工作点的实测值与理论值、仿真值比较接近，而第二级电路的差别较大。这可能是因为我实际搭接电路时，为了方便完成选做实验， R_{b2} 直接选取了 $39k\Omega$ 而不是仿真中使用的 $40k\Omega$ 。这就会导致基极电位偏高，从而使得集电极电流较大，进而 U_{CEQ} 偏小。虽然有所差别，此时的静态工作点仍然满足实验要求中的取值范围。

表 1 开环静态工作点测量数据

	I_{DQ}/mA	I_{CQ}/mA	U_{GDQ}/V	U_{CEQ}/V
理论值	2	2	-5.077	3
仿真值	1.97	2.00	-5.08	3.00
实测值	1.98	2.11	-5.15	2.37

开环放大倍数

开环放大倍数测量数据如表 2 所示。可见实测值、仿真值和理论值虽然差别较大，但是在数量级上比较接近。一方面，从静态工作点可以看出，实验中的集电极电流较大，则 r_{be} 会较小，放大倍数较大；另一方面，通过前几次实验我们也知道，放大倍数的值与晶体管内部参数有很大关系，并不能保证理论计算取值、Multisim模型参数、实验中元件的实际参数的完全一致，所以结果还是比较合理的。

表 2 开环放大倍数测量数据

	U_s/mV	U_o/mV	\dot{A}_{usf}
理论值			-138.08
仿真值	7.028	858.545	-122.16
实测值	5.007	830.2	-165.81

开环输入电阻

开环输入电阻的理论值约为 $100k\Omega$ ，故需要使用测量高输入电阻的方法进行测量。测量结果如表 3 所示。可见输入电阻的理论、仿真、实测值十分接近。

表 3 开环输入电阻测量数据

	U_{o2}/mV	U_{o1}/mV	$R_1/k\Omega$	$R_i = \frac{U_{o2}}{U_{o1} - U_{o2}} R_1/k\Omega$
理论值				91.20

仿真值				91.30
实测值	396.79	831.14	100	91.35

开环输出电阻

开环输出电阻测量的数据如表 4 所示。可见仿真值与理论值、实测值相比均较小。这个现象在之前的实验中也经常出现，其原因是Multisim中的三极管模型的 r_{ce} 较小，Early效应明显（从输出特性中可以看到曲线明显的上翘），而实际元件的 r_{ce} 较大。所以实测值与理论值较为接近，而仿真值与理论值相差较大。

表 4 开环输出电阻测量数据

	U'_o/mV	U_{oL}/mV	$R_L/\text{k}\Omega$	$R_o = \left(\frac{U'_o}{U_{oL}} - 1 \right) R_L/\text{k}\Omega$
理论值				3.3
仿真值	857.867	462.322	3.3	2.82
实测值	827.0	428.2	3.3	3.07

闭环放大倍数

闭环放大倍数的测量数据如表 5。为了实现闭环放大倍数约等于10，我按照理论计算和仿真中的结果，令 $R_s = 10\text{k}\Omega$ 。实验时我为了能够减少噪声的影响，同时又要保证波形不失真，选取了信号发生器电压的有效值为50mV。可见理论值、仿真值、实测值三者十分接近，满足要求。

表 5 闭环放大倍数测量数据

	U_s/mV	U_o/mV	\dot{A}_{usf}
理论值			-10
仿真值	140.567	1298	-9.23
实测值	49.68	469.5	-9.45

闭环输入电阻

表 6 闭环输入电阻测量数据

	U_i/mV	U'_i/mV	R_1/Ω	$R_i = \frac{U_i}{U'_i - U_i} R_1/\Omega$
理论值				759.88
仿真值				720.26
实测值	2.71	5.46	680	670.11

闭环输入电阻测量的数据如表 6 所示。可见实测值比理论值和仿真值都较

小。从输入电阻的表达式可以看出，如果放大倍数偏小，则输入电阻就偏小。事实上，从开环放大倍数中我们已经可以看到，实测值要比理论值和仿真值都大，所以此处输入端电阻实测值较小也是理所应当。

闭环输出电阻

闭环输出电阻的测量如表 7 所示。和输入电阻类似，输出电阻的误差很大程度上来自于放大倍数的误差。

表 7 闭环输出电阻测量数据

	U'_o/mV	U_{oL}/mV	$R_L/\text{k}\Omega$	$R_o = \left(\frac{U'_o}{U_{oL}} - 1 \right) R_L/\Omega$
理论值				250.75
仿真值	1.298	1.015	1	278.8
实测值	469.5	393.4	1	193.4

截止频率

由于老师说实验中使用的信号源低频特性不好，我们本次实验只测高频截止频率，数据如表 8 所示。由中频的放大倍数可知截止频率时 $\dot{A}_{usf} = 9.44/\sqrt{2} = 6.68$ ，则 $f_H = 4.4\text{MHz}$ 。可见仿真值和实测值仍然有很大差别，在之前的实验中也有类似的结果。

表 8 截止频率测量数据

f/Hz	10k	3M	4M	4.3M	4.4M	4.5M	5M	9M
$ \dot{A}_{usf} $	9.46	9.14	7.7	7.03	6.68	6.5	5.75	2.5

	仿真值	实测值
f_H/MHz	27.3	4.4

7.2 选做实验

放大倍数

选做实验放大倍数的测量数据如表 9 所示。可见实测值<仿真值<理论值。根据放大倍数的计算公式

$$\dot{A}_{usf} \approx \frac{R_o I_o}{R_i I_f}$$

可知，由于仿真时的 R_o 比理论值小，故放大倍数比理论值小；实验中信号源难免

有内阻，导致 R_i 变大，同样导致放大倍数较小。

表 9 选做实验放大倍数测量数据

	U_s/mV	U_o/mV	\dot{A}_{usf}
理论值			12.10
仿真值	9.3448	65.675	9.3448
实测值	49.23	410.3	8.33

输入电阻

选做实验输入电阻的测量数据如表 10 所示。可见实测值和理论值比较接近，而与仿真值相差较大。可以推测这是由于Multisim中的模型参数与实际参数不同导致的。

表 10 选做实验输入电阻测量数据

	U_i/mV	U'_i/mV	R_1/Ω	$R_i = \frac{U_i}{U'_i - U_i} R_1/\Omega$
理论值				403.89
仿真值				312.58
实测值	5.50	10.40	390	437.76

输出电阻

选做实验输出电阻测量数据如表 11 所示。仍然由于Multisim中的三极管 r_{ce} 偏小，导致输出电阻测量偏小。实测值的结果与理论值完美地达到了一致。

表 11 选做实验输出电阻测量数据

	U'_o/mV	U_{oL}/mV	$R_L/\text{k}\Omega$	$R_o = \left(\frac{U'_o}{U_{oL}} - 1 \right) R_L/\text{k}\Omega$
理论值				3.30
仿真值	132.528	66.432	3.3	3.28
实测值	408.1	204.0	3.3	3.30

8 电路故障及原因分析

实验前我已经将大部分电路搭接完成，其中选做部分的第一级电路我也在面包板的另一个位置搭好（某些缺少的元件暂时空置），在切换到选做实验时只需稍加改动即可继续实验。而且经过前两次实验的锻炼，我已经能够很快地将波形调节稳定，所以本次实验总体上十分顺利，几乎没有出现故障。

实验中遇到了一些小问题，总结如下：

1. 开环输入电阻测量时，输入信号衰减得很厉害，很难测出稳定的示数。

这时我想到了采用上次实验中关于大输入电阻的测量方式，顺利地解决了问题。

2. 测量选做任务输入电阻时，我刚开始误把 $3\text{k}\Omega$ 电阻 R_1 当成了放大电路的一部分，测出来的结果是 $3\text{k}\Omega$ 多，使我一度怀疑是选做电路搭接错误。后来我突然醒悟过来，将 R_1 视为信号源内阻后，果然得到了和理论较为接近的结果。

9 实验总结

9.1 总结、分析发射极电阻对放大电路动态参数的影响

1. 一方面，发射极电阻会影响放大电路的静态工作点，发射极电阻越大，其基极电流就会越小，进而导致 r_{be} 增大，放大倍数减小。
2. 另一方面，如果发射极电阻没有被旁路电容短路，则会使得电路的放大倍数严重减小，而输入电阻增大。根据增益带宽积的概念，其上限截止频率 f_H 会增大。

9.2 总结放大电路主要性能指标的测量方法

9.2.1 静态参数

1. 将小信号源短路。
2. 使用万用表或示波器对静态参数进行测量。

9.2.2 动态参数

放大倍数 \dot{A}_u

使用示波器测量输入信号 U_i 和输出信号 U_o 的有效值，注意需要保证波形没有失真。通过公式

$$\dot{A}_u = \frac{U_o}{U_i}$$

可以计算出来 \dot{A}_u 。

输入电阻 R_i

在输入回路中串联一个电阻 R_1 ，并测量电阻 R_1 两端对地电压 U_i 和 U_i' 。此处 R_1 应该取的接近于输入电阻。则

$$R_i = \frac{U_i}{U_i' - U_i} \cdot R_1$$

特别地，如果输入电阻特别大，则需要在输入端串联一个电阻 R_1 ，并测量通过串入前后输出电压 U_{o1} 和 U_{o2} ，即可通过公式

$$R_i = \frac{U_{o2}}{U_{o1} - U_{o2}} R_1$$

计算出输入电阻。

输出电阻 R_o

测量负载开路的电压 U_o' ；接着选取一个与 R_o 接近的负载，测得输出电压 U_{oL} 。则

$$R_o = \left(\frac{U_o'}{U_{oL}} - 1 \right) R_L$$

截止频率 f_L, f_H :

首先在中频段找到放大倍数的最大值 $\dot{A}_{u(\max)}$ ，并计算出截止频率对应的放大倍数为 $|\dot{A}_{u(\max)}|/\sqrt{2}$ 。在低频段和高频段找到放大倍数为 $|\dot{A}_{u(\max)}|/\sqrt{2}$ 的两个频率 f_L, f_H 。如果考虑输出电压的变化，要注意每次调节频率时都要调节信号源的幅度使得输入电压不变；如果考虑放大倍数的变化，应该每次测量时通过输出电压和输入电压来计算放大倍数。

9.2.3 负反馈电路的测量

开环

将反馈回路断开，并按照电路结构将反馈回路电阻等效到输入回路和输出回路，再按照一般放大电路的测量方法进行测量。

闭环

与一般放大电路的测量方法相同。

10 思考题

1. 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？

主要由两方面因素：

- a. 并联负反馈的理论推导中电源为恒流源，故实验中需要将电压源和内阻用诺顿定理等效，这样就会将电源内阻等效成和输入回路并联。由于场效应管放大电路输入电阻很大，经过并联后输入电阻已经和电源内阻近似相等。
- b. 再考虑反馈的效应。此时便可以利用并联负反馈的特点，即

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

其中 $1 + AF$ 在深度负反馈时很大，而 R_i 几乎等于电源内阻。这样，经过两次的衰减，输入电阻变得很小。

2. 在图 5 所示电路中，引入电流并联负反馈前后，输出电阻为什么基本不变？

本实验比较特殊，从电路图中可以看到，输出电压和反馈电流的引出位置不在一个端，而是恰好一个位于集电极，一个位于发射极。这样，从交流通路中不难看出，反馈回路相当于与一个受控电流源串联。而计算输出电阻时就会发现，受控电流源上没有电流，相当于断路，即反馈回路的有无与输出电阻没有关系。所以引入电流并联负反馈前后，输出电阻基本不变。另一方面，如果将输出改为射极输出，则输出电阻就会相应改变。这也提醒我们在计算反馈电路的输入输出电阻时，一定要先关注电路的连接方式，而不能盲目地套用公式，否则可能出现错误。