

东南大学电工电子实验中心

实 验 报 告

课程名称： 模拟电子电路实验

第 3 次实验

实验名称： 三极管放大电路设计

院（系）： 电子科学与工程学院

专 业： 电子科学与技术

姓 名： 孙寒石 学 号： 06219109

实 验 室： 104 实验组别：

同组人员： 实验时间： 2021 年 5 月 8 日

评定成绩： 审阅教师：

一、实验目的

1. 掌握单级放大电路的工程估算、安装和调试；
2. 了解三极管各项基本器件参数、工作点、偏置电路、输入阻抗、输出阻抗、增益、幅频特性等的基本概念以及测量方法；
3. 掌握级联电路设计方法。
4. 掌握负反馈对放大电路特性的影响。

二、实验原理（主要写用到的的理论知识点，不要长篇大论）

1.2 原理分析

1.2.1 静态和动态

静态：交流信号 $u_i = 0$ ，也称直流工作状态，对应直流通路。

动态：交流信号 $u_i \neq 0$ ，也称交流工作状态，对应交流通路。

- 放大电路建立正确的静态工作点，是保证动态工作的前提。

先进行静态分析，确定工作点Q，然后进行动态信号分析。

静态分析

- 确定工作点。

动态分析

- 输入信号与输出信号间的关系，增益。
- 输入电阻与输出电阻。
- 频率特性与稳定性，是否自激振荡。
- 功耗与效率。

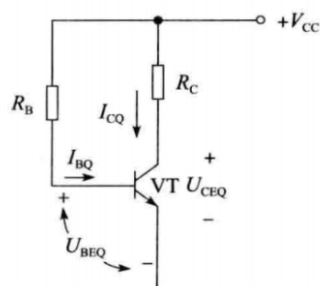
1.2.2 直流通路与交流通路

直流通路（交流信号置零）

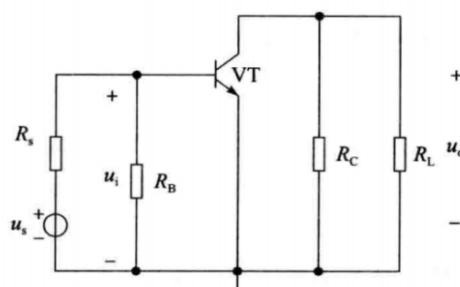
- 耦合电容开路。

交流通路（直流信号置零）

- 直流电压源短路；
- 直流电流源断路；
- 耦合电容短路。



a) 直流通路



b) 交流通路

1.3 图解分析法

1.3.1 静态工作点: 决定了最大不失真幅度

Q: Quiescent, 静态

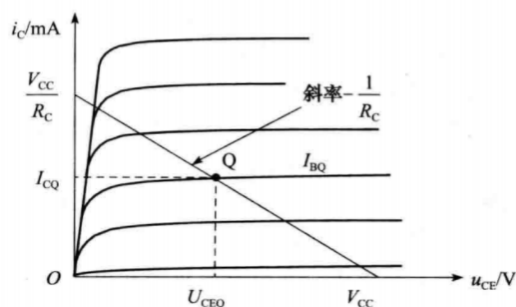
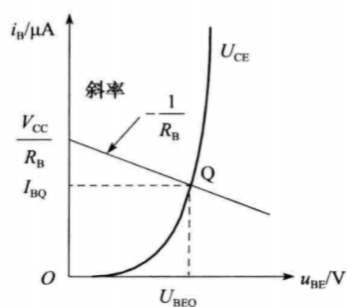
通过图解法, 得到输入回路静态工作点 I_{BQ}, U_{BEQ} 和输出回路静态工作点 I_{CQ}, U_{CEQ} 。

输入回路:

$$i_B = \frac{V_{BB} - U_{BE}}{R_b} \Rightarrow I_{BQ}, U_{BEQ}$$

输出回路:

$$i_C = \frac{V_{CC} - U_{CE}}{R_c} (I_{BQ}) \Rightarrow I_{CQ}, U_{CEQ}$$



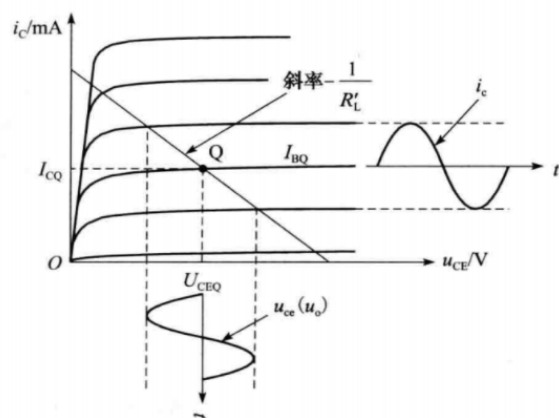
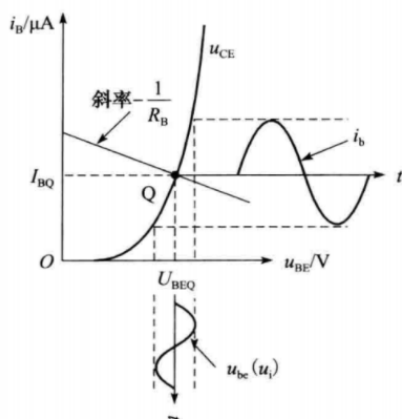
1.3.2 动态特性

交流负载线: $I_C - I_{CQ} = -\frac{1}{R'_L} (V_{CE} - V_{CEQ})$

交流负载电阻: $R'_L = R_L // R_c$

通过 Q 点的直线, 斜率为 $-1/R'_L$, 输入交流信号时实际工作点运动轨迹。

- 共射极电路 u_o 与 u_i 相位相反;
- 可以求出放大电路的电压放大倍数;
- 可以确定最大不失真输出幅度。

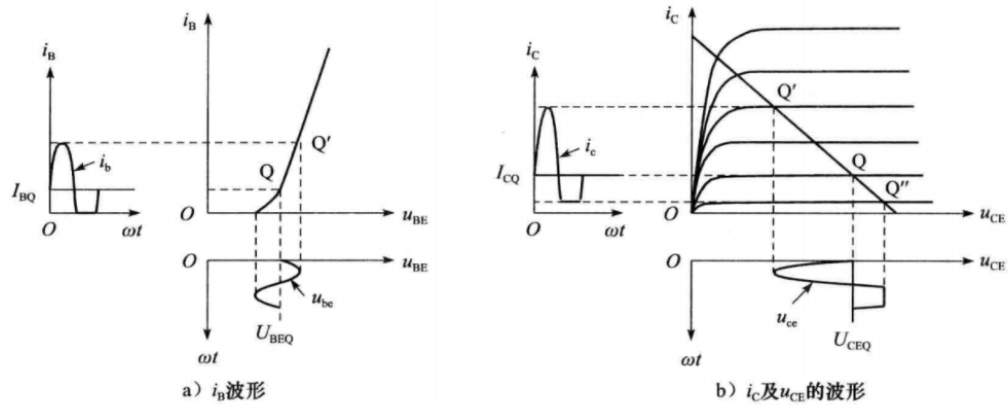


1.3.3 截止失真

截止失真是在**输入回路**首先产生失真！动态工作点下移至截止点。

BJT工作在截止区而引起的非线性失真。NPN共射级，输出电压表现为**顶部失真**。

消除方法：增大 V_{BB} ，即向上平移输入回路负载线至 Q' 。提高静态工作点电流。



1.3.4 饱和失真

饱和失真产生于晶体管的**输出回路**！动态工作点上移至饱和点。

BJT工作在饱和区而引起的非线性失真。NPN共射级，输出电压表现为**底部失真**。

消除方法：

- $\left\{ \begin{array}{l} Q \text{ 点下移: } R_b \uparrow \text{ 或 } V_{BB} \downarrow \text{ 或 } \beta \downarrow \\ Q \text{ 点右移: } R_c \downarrow \text{ 或 } V_{CC} \uparrow \end{array} \right.$

Mention

- $\left\{ \begin{array}{l} \text{对于PNP管, 由于是负电源供电, 失真的表现形式, 与NPN管正好相反。} \end{array} \right.$

三、 预习思考：

查阅 $\mu A741$ 运放的数据手册，自拟表格记录相关的直流参数、交流参数和极限参数，解释参数含义。

上网查询本实验所用的三极管9013的数据手册，画出三极管封装示意图，标出每个管脚的名称，将相关参数值填入下表：

参数符号	参数值	参数意义及设计时应该如何考虑
V_{CBO}	$\leq 45V$	集电极基极电压，电压不在这个范围内将损坏三极管。必须在此范围内工作否则将损坏三极管。
V_{CEO}	$\leq 25V$	集电极发射极电压，同上
V_{EBO}	$\leq 5V$	发射极基极电压，同上
I_C	$\leq 500mA$	集电极电流，同上
I_E	$\approx I_C$	发射极电流，同上
h_{FE}	64—300	直流电流增益
$V_{CE(sat)}$	$\leq 0.6V$	集电极发射极饱和压降，同上
V_{BE}	$\leq 1.4V$	基极发射极正向电压，同上
f_T	$> 150MHz$	特征频率，同上

上网查询本实验所用的场效应管 BJ27(2N5485)的数据手册，画出三极管封装示意图，标出每个管脚的名称，将相关参数值填入下表：

参数符号	参数值	参数意义及设计时应该如何考虑
I_{DSS}	4mA—10mA	饱和漏极电流，与 $U_{GS}=0$ 时所对应的漏极电流
I_{GSS}	$< -1nA$	反向栅极漏电流
$V_{GS(off)}$	-4V—0.5V	夹断电压，对应漏极电流为零
$V_{(BR)GS}$	$> -25V$	栅极击穿电压
I_G	$< 10mA$	直流正向栅极电流
P_D	$< 225mW$	漏极功耗
g_m	3.5mS—7mS	低频跨导，反映了栅压对漏极电流的控制作用

四、 实验内容

1. 实验内容一（见在线实验 10）：

根据图 3.1 所示电路，研究静态工作点变化对放大器性能的影响。

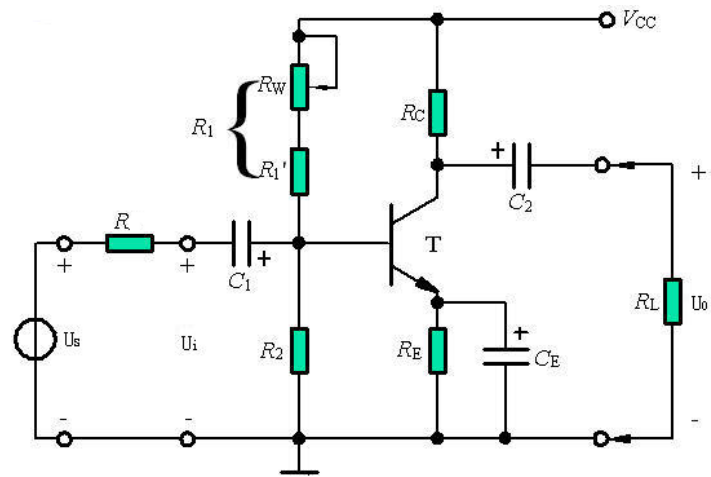
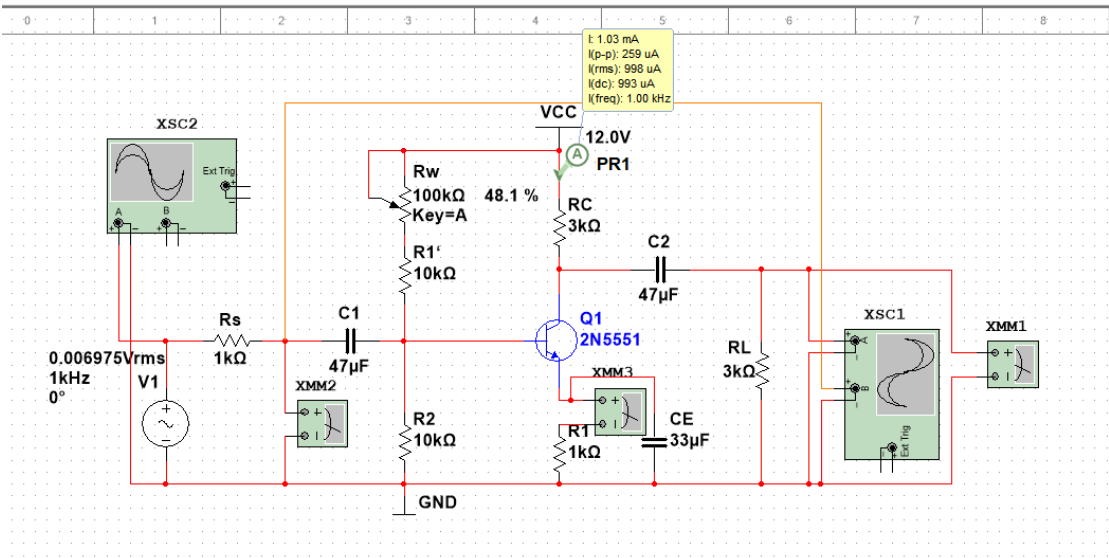


图 3.1 射级偏置电路

利用三极管 9013 设计一个分压式偏置共发射极放大电路。要求：已知： $V_{CC}=12\text{ V}$ ， $U_i=5\text{ mV}$ ， $R_L=3\text{ k}\Omega$ ， $R=1\text{ k}\Omega$ ，设计指标要求： $A_u>50$ ， $R_i>1\text{ k}\Omega$ ， $R_o<3\text{ k}\Omega$ ， $f_L<100\text{ Hz}$ ， $f_H>100\text{ kHz}$ 。理解三极管 9013 的数据手册，掌握关键参数的意义并能正确使用；完成仿真设计并正确连接电路；调整合适的静态工作点；测量放大电路放大倍数、输入电阻、输出电阻及最大输出幅度等；其他性能测量（如不同工作点对放大电路性能的影响、不同的电源电压对放大电路性能的影响。。。）拟定实验方案、设计记录表格、分析数据波形。



(1) 静态工作点的调整和测量：

静态工作点电流 I_{CQ} (mA)		1	2
输入端接 地	U_{BQ} (V)	1.620	2.639
	U_{CQ} (V)	8.140	5.94
	U_{EQ} (V)	1.000	2.000
	U_{CEQ} (V)	7.140	3.92

实验结果分析：

在两种静态工作点电流下 U_{BE} 在 0.6 — 0.7 范围内，所以发射结正向偏置， U_{CE} 大于 U_{BE} ，所以集电极反向偏置，所以该静态工作点下电路工作在放大区。

$$U_{CQ}=12-R_C \cdot I_C(V)$$

当 $I_C=1\text{mA}$ 时，测量值为 8.14V，在误差范围内

当 $I_C=2\text{mA}$ 时，测量值为 5.94V，在误差范围内

当静态工作电流从 1mA 变为 2mA 时， U_{be} 导通电压基本不变，E 点电压增大，所以 B 点电压也增大， U_{be} 导通时存在的压降为 0.6V 左右；而当静态电流为 2mA 时，C 点的电压减小， U_{ce} 减小。可以预见，如果当静态工作点过低， U_{eq} 的电压过低，B 点电压也降低，当达到极限时， U_{be} 将不能到达开启电压，就会出现截止失真；当静态工作点过高时，C 点的电压不断减小，直到和 B 点的电压相近时，集电极无法反偏时，就会出现饱和失真。

(2) 放大性能的测量：

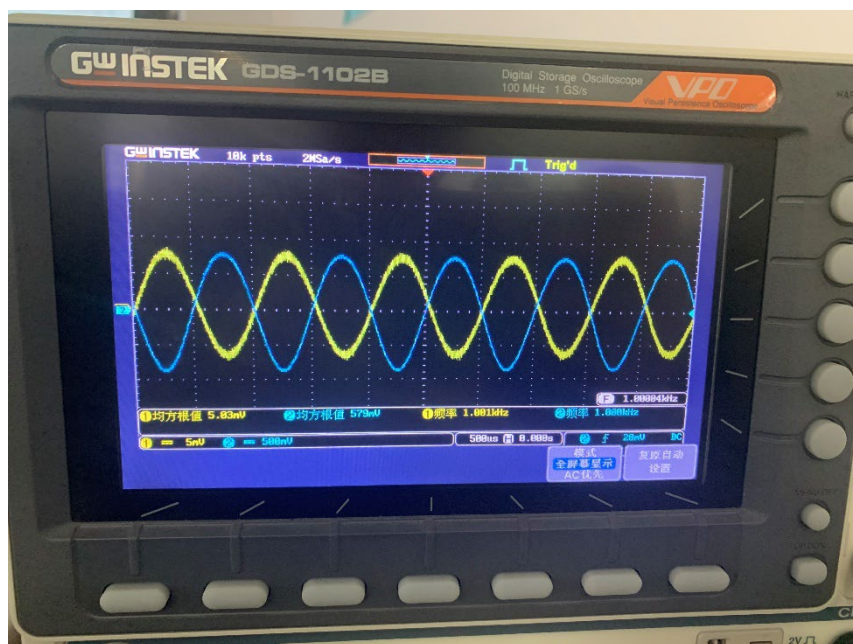
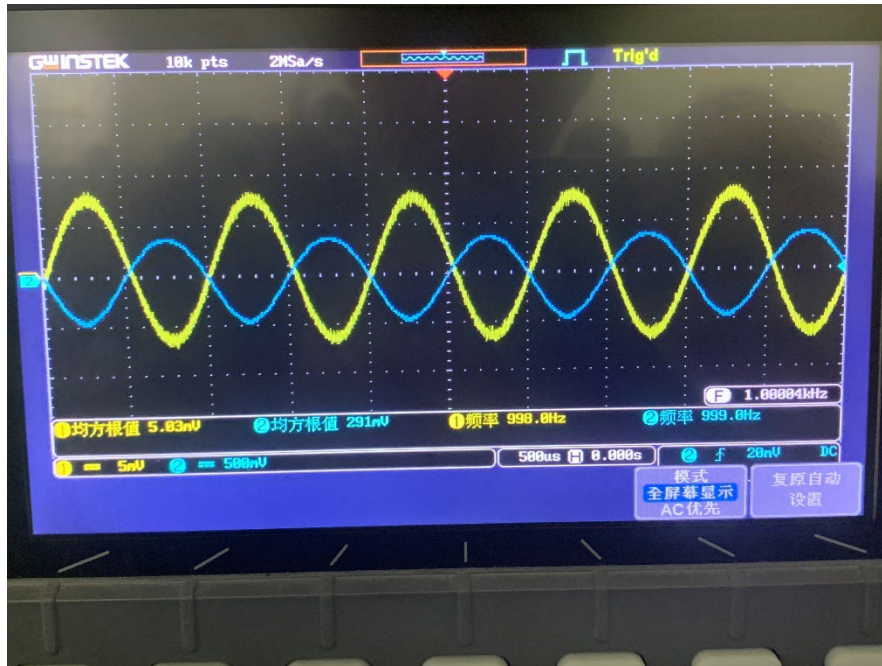
静态工作点电流 I_{CQ} (mA)		1	2
输入信号 $U_i=5\text{mV}$	U_s (mV)	6.7	7.3
	U_o (V)	0.291	0.435
	U_o' (V)	0.579	0.860

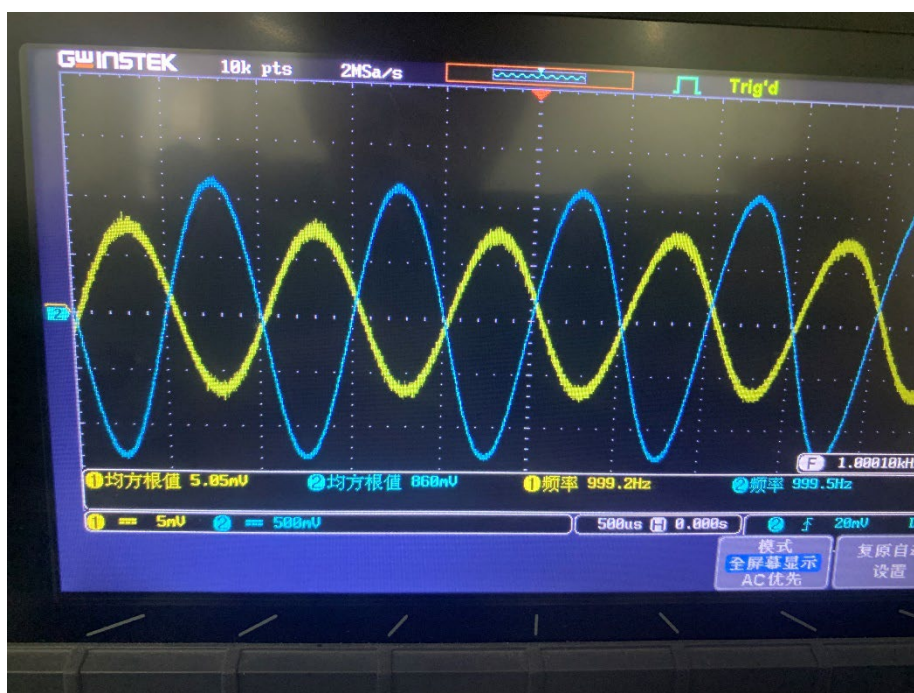
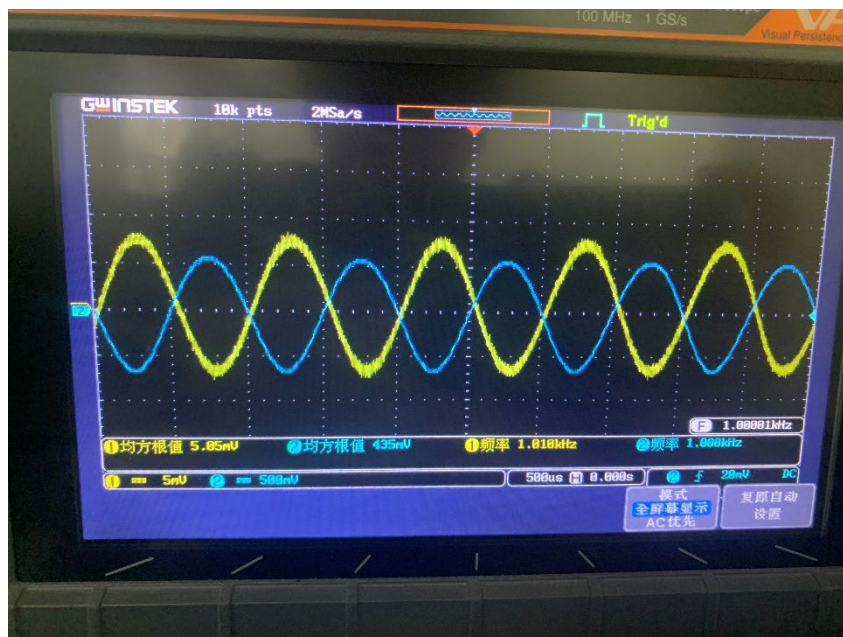
实验结果分析:

U_o 和 U_o' 的不同是由于输出电阻和负载分压的结果。

$A_{u1}=58.2$, $A_{u2}=87$, 符合理论值 $A_u = -\beta \frac{R_c // R_L}{r_{be}}$

当静态电流 I_c 从 1mA 提高到 2mA 时, U_s 增大, U_o 也随之增大, U_o' 也增大, 当三极管处于正常的线性区时, 提高静态工作点对于放大倍数而言不会有较为明显的变化。





(3) 静态工作点对输出波形的影响:

		截止失真	饱和失真	R_w 变化对失真的影响
测量值	U_{BQ} (V)	2.199	3.000	R_w 越小, 则 U_{BQ} 增大, U_{CE} 减小, 饱和失真越明显, R_w 越大, U_{BQ} 减小, U_{CE} 变大, 截止失真越明显.
	U_{CQ} (V)	6.225	3.692	
	U_{EQ} (V)	1.58	2.36	
	波形	见图 1	见图 2	

实验结果分析：

当出现截止失真的时候， U_{bq} 和 U_{eq} 之间的电压差小于 $0.6V$ ，达不到开启电压，则会出现截止失真；而当 E 点电压不断增大，B 点电压增大，C 点电压不断减小，减小到 C 点电压与 B 点电压相近时，无法满足集电极反偏时，则出现了饱和失真。 R_w 越小时， I_{cq} 越大，则 E 点电压也越大，就越容易出现饱和失真；而 R_w 越大时， I_{cq} 越小，则 E 点电压也越小，就越容易出现截止失真。

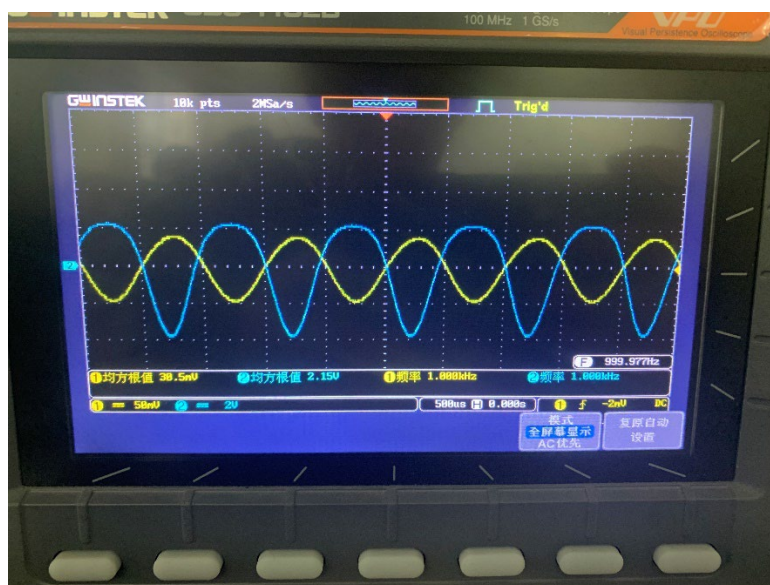


图 1

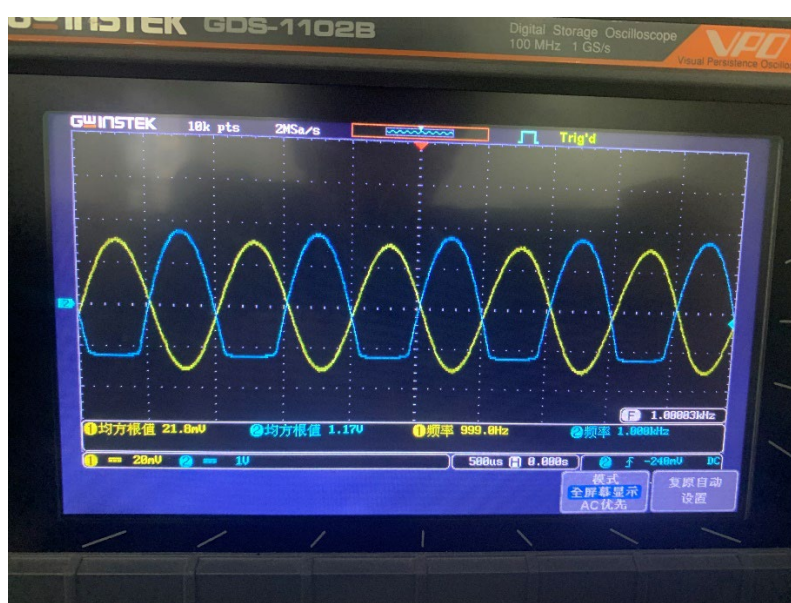
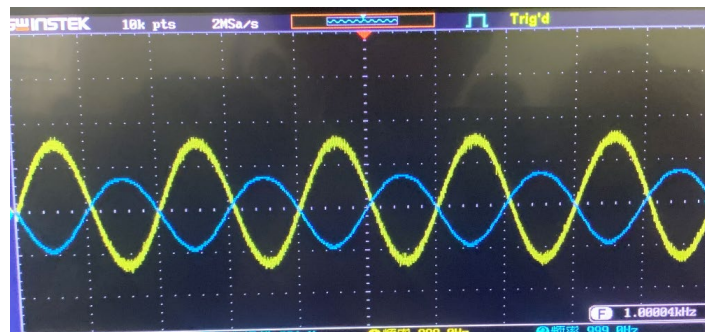


图 2

(4) 测量放大器的最大不失真输出电压:

测量值	记录数据
U_{BQ} (V)	2.58
U_{CQ} (V)	3.77
U_{EQ} (V)	1.72
U_{OPP} (V)	4.08

最大不失真输出波形:



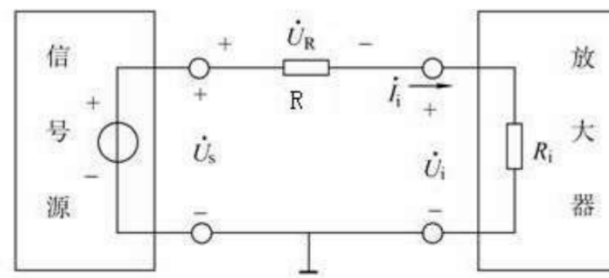
实验结果分析:

经过不断调整 R_w 以及 U_s , 最后测得的最大不失真输出电压为 4.08V。

(5) 输入电阻的测量:

静态工作点电流 I_{CQ} (mA)		1	2
输入信号 $U_i=5mV$	U_s (mV)	7.87	8.23
	R_i (Ω)	2.00K	1.76K

实验结果分析:

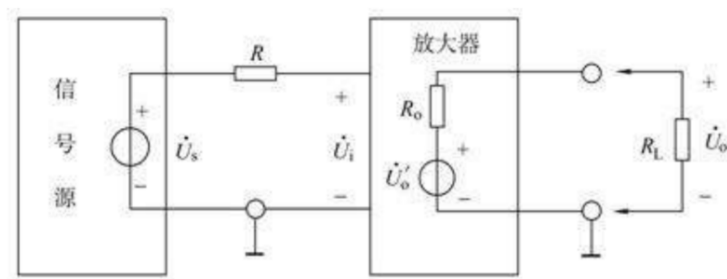


由于静态电流影响 r_{be} 进而影响输入电阻, 所以当 I_C 增大时, r_{be} 减小, 输入电阻减小。

(6) 输出电阻的测量:

静态工作点电流 I_{CQ} (mA)		1	2
输入信号 $U_i=5\text{mV}$	U_o (V)	0.235	0.454
	U_o' (V)	0.446	0.815
	R_o (Ω)	2.69K	2.39K

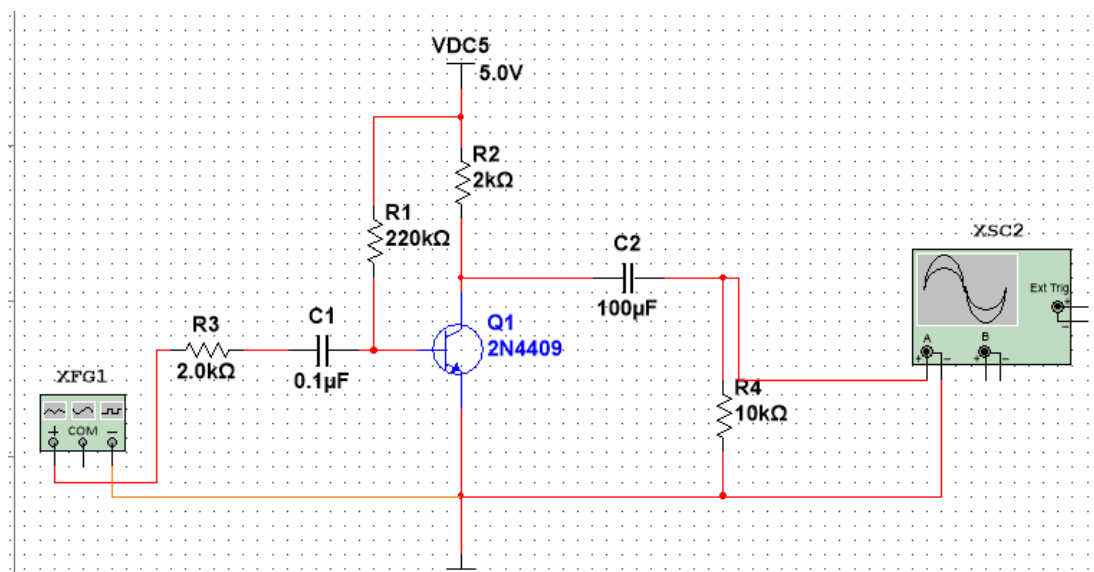
实验结果分析:



两次实验结果相对一致，在误差范围内。利用公式： $R_o = \frac{U_o' - U_o}{U_o}$ ，计算输出电阻，我们发现，静态工作点的提高（当三极管工作在线性区的时候），对于输出电阻的影响并不会会有太大的改变。

2. 实验内容二（见在线实验 11）:

设计 RC 耦合共发射极放大电路，用软件完成频率特性的仿真测量。完成放大电路的频率特性测量，记录放大倍数和频率的对应关系，画出幅频特性曲线；按仿真设计的电路参数完成电路的连接；如果去掉发射极旁路电容，合理调整电路参数，测量下限频率的变化，分析原因。其他（如去掉负载 R_L 对频率特性的影响，加大或减小耦合电容对频率特性的影响。。。）拟定实验方案、设计记录表格、分析数据波形。



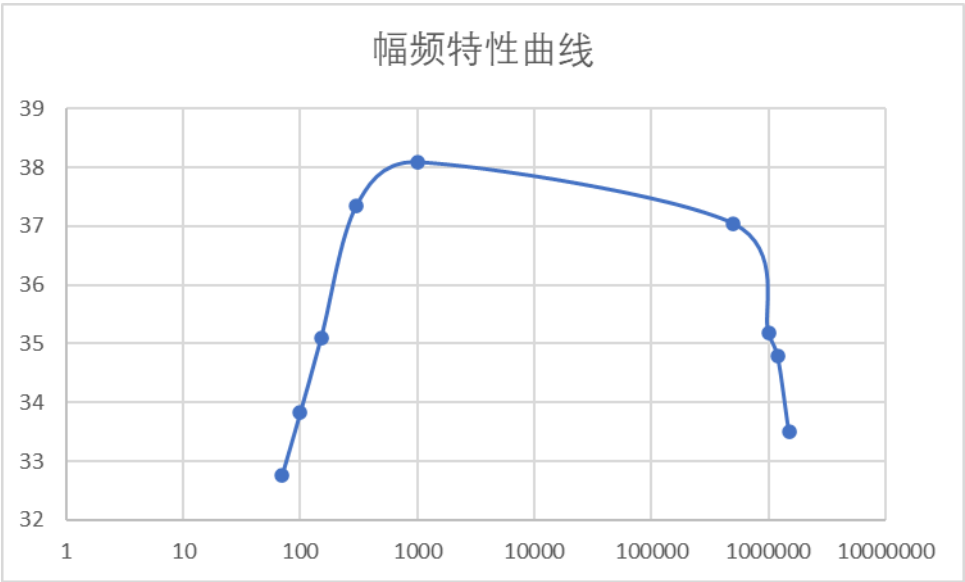
(1) 放大电路频率特性测量与研究:

逐点法测量放大电路的频率记录表

f/KHz	$f_1=0.07$	$f_2=0.1$	$f_L=0.15$	$f_3=0.3$	$f_M=1$	$f_4=500$	$f_H=1000$	$f_5=1200$	$f_6=1500$
U_o/V	0.215	0.247	0.283	0.361	0.395	0.341	0.256	0.234	0.201
A_u	43.5	49.2	56.9	73.7	80.3	71.2	57.5	54.9	47.3

幅频特性曲线:

旁路电容, 耦合电容会影响频率特性的低频区域, 影响下限截止频率; 结电容和分布电容会影响频率特性的高频区域, 影响上限截止频率。



其中纵坐标为 $20\lg|A_u|/\text{dB}$ ，横坐标为 f/Hz

实验结果分析:

测得 f_L 约为 100Hz, f_H 约为 1MHz, 与设计理论值相符合。

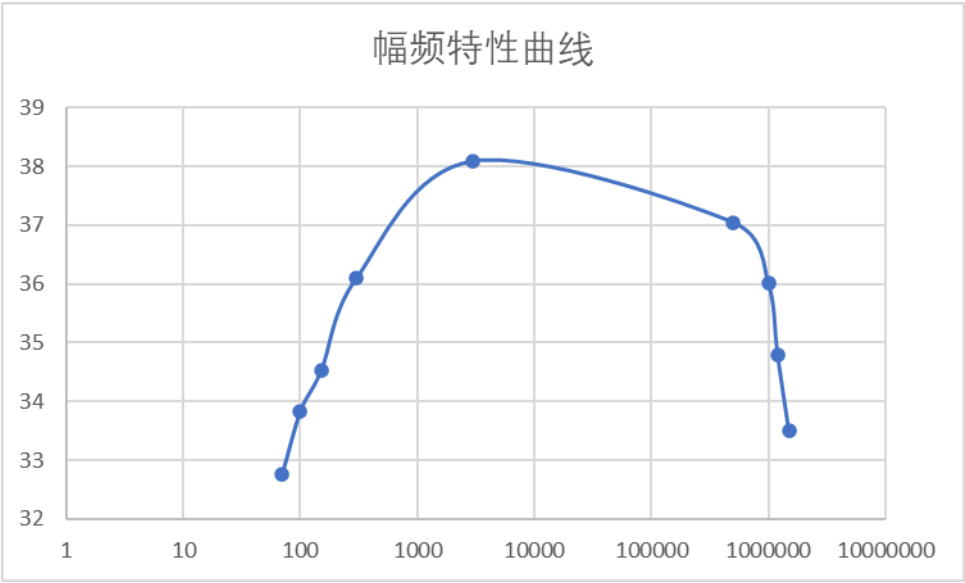
频率从较小的频率 100HZ 开始不断增大时, 输出电压也不断的增大, 当频率增大到一定值时, 达到 10KHZ 左右时, 输出电压不会有较为明显的变化, 只会在一个固定的值附件上下徘徊, 当信号频率继续不断增大, 输出电压反而减小。我们将频率从低到高变化时, 输出电压第一次达到最大输出电压的 0.707 倍时, 我们将这个频率称为下限截止频率, 输出电压第二次达到最大输出电压的 0.707 倍时, 我们将这个频率称为上限截止频率。中间的频率范围我们称为带宽。

(2) 电路参数对频率特性的影响：

电路参数对频率特性的影响记录表

$C_e=33\mu\text{F}$	$f_L=320\text{Hz}$	$f_M=3\text{KHz}$	$f_H=1\text{MHz}$
$C_1=10\mu\text{F}$	$f_L=120\text{Hz}$	$f_M=1\text{KHz}$	$f_H=1\text{MHz}$
$C_2=10\mu\text{F}$	$f_L=120\text{Hz}$	$f_M=1\text{KHz}$	$f_H=1\text{MHz}$

幅频特性曲线：



其中纵坐标为 $20\lg|A_u|/\text{dB}$ ，横坐标为 f/Hz

实验结果分析：

发射极旁路电容 C_E 从 $100\mu\text{F}$ 换成 $33\mu\text{F}$ 后，高频部分曲线不变，下线截止频率变为 320Hz ，即原来下限频率的三倍，符合理论。

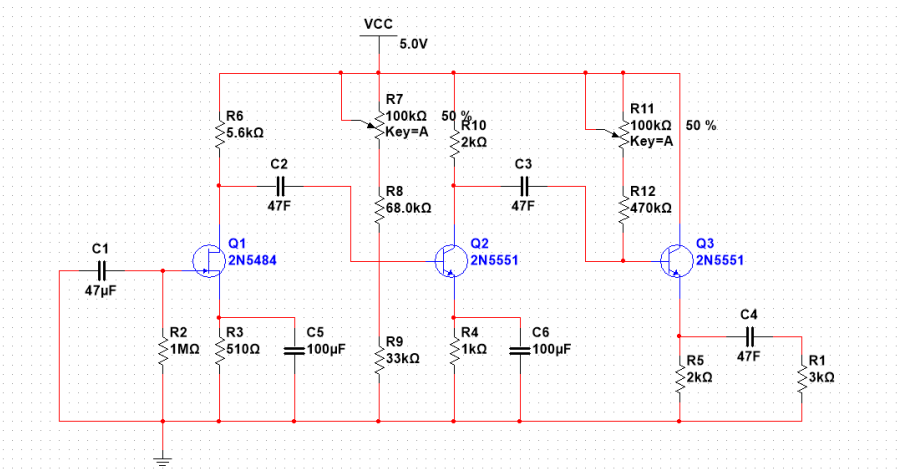
另外可以看到中频最大增益部分也从原来的约 500Hz 到 200KHz ，变成约 3kHz 到 200kHz 。

3. 实验内容三（见在线实验 12）:

（1）设计一个分别由共源（CS）、共射（CE）和共集（CC）构成的三级放大电路，要求满足以下指标：（设共源、共射和共集的输出电压分别为 U_{O1} 、 U_{O2} 和 U_O ）

$$A_u > 100, R_i > 1\text{M}\Omega, R_o < 100\Omega。$$

写出具体设计过程，计算电路参数以及 A_u 、 R_i 和 R_o 的理论值。设置合适的静态工作点，在放大器输入端输入频率为 $f=1\text{kHz}$ 的正弦信号，调节信号源输出电压 U_S 使 $U_i=5\text{mV}$ ，用示波器双踪显示 U_i 、 U_o 的波形，在输出波形不失真的情况下，记录波形，测量 U_S 、 U_O 和 U_O' （负载开路时输出电压）并计入表中。根据测量结果计算放大器的 A_u 、 R_i 、 R_o ，与理论值比较。



1) 静态工作点的测量和调试:

静态工作点测量记录表			
设计值	第一级	第二级	第三级
	$I_{DQ}=2\text{mA}$	$I_{DQ}=2\text{mA}$	$I_{DQ}=2\text{mA}$
测量值	$U_{DQ}=5.76\text{V}$	$U_{CQ}=6.71\text{V}$	$U_{BQ}=3.62\text{V}$
	$U_{SQ}=0.073\text{V}$	$U_{EQ}=4.10\text{V}$	$U_{EQ}=4.00\text{V}$
	$I_{DQ}=2.26\text{mA}$	$I_{CQ}=1.96\text{mA}$	$I_{CQ}=2.03\text{mA}$

实验结果分析:

由于实验器材与测量器材所产生的其误差，该实验的测量值与理论值略有误差。

2) 以频率为 1kHz 的正弦波为输入信号，测量电路的交流性能，将实验数据填入放大倍数测量记录表中。

放大倍数测量记录表				
增益	第一级	第二级	第三级	总增益
A_u	$U_i=5\text{mV}$	$U_{O1}=44\text{mV}$	$U_{O2}=4.5\text{V}$	$U_i=5\text{mV}$
	$U_{O1}=44\text{mV}$	$U_{O2}=4.5\text{V}$	$U_{O3}=3.8\text{V}$	$U_{O3}=3.8\text{V}$
	$A_{u1}=8.758$	$A_{u2}=100.7$	$A_{u3}=0.81$	$A_u=714.36$
$A_u(\text{dB})$	$A_{u1}=18.85$	$A_{u2}=40.06$	$A_{u3}=-1.83$	$A_u=57.08$

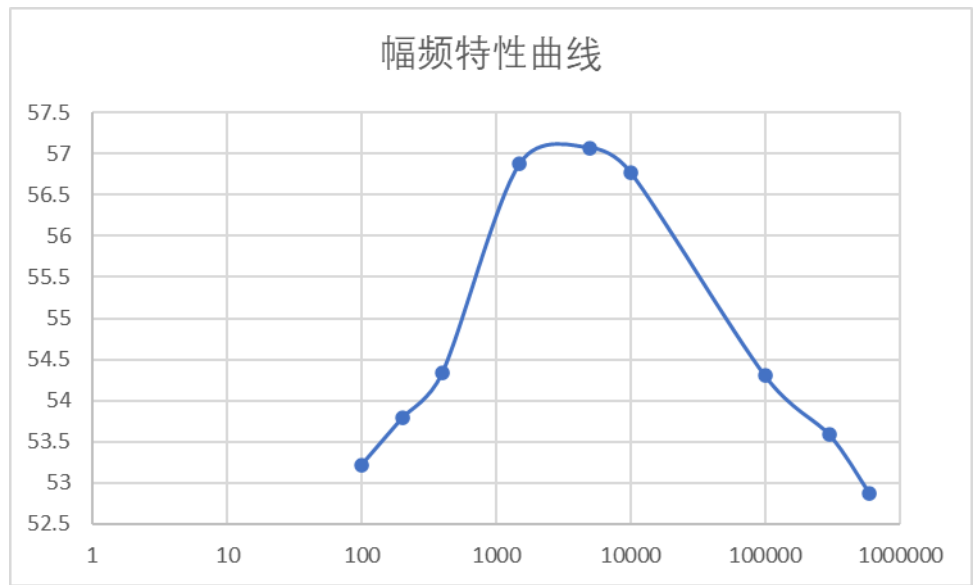
实验结果分析：

由于实验器材与测量器材所产生的其误差，该实验的测量值与理论值略有误差。且在测量第二级的过程中，误差更大，认为是由于波形失真导致的数据偏离过大，或是测量器材自身带有的漂移量导致的。

3) 利用逐点测量法或扫频仪测量法，测量多级放大电路的频率特性，参数记录于频率特性测量记录表中，可以画出放大电路的频率特性图。

频率特性测量记录表									
f/KHz	$f_1=0.1$	$f_2=0.2$	$f_L=0.4$	$f_3=1.5$	$f_M=5$	$f_4=10$	$f_H=100$	$f_5=300$	$f_6=600$
U_o/V	2.346	2.478	2.653	3.619	3.780	3.587	2.659	2.531	2.266
A_u	458	489	521	698	714	690	519	478	440

幅频特性曲线：



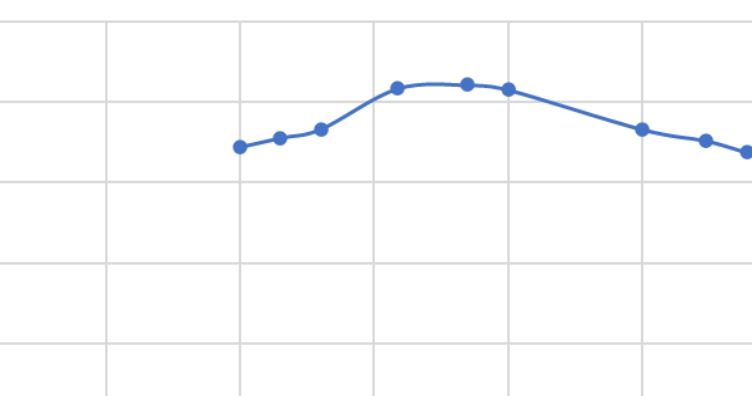
其中纵坐标为 $20\lg|A_u|/\text{dB}$ ，横坐标为 f/Hz

实验结果分析：

多级放大电路的上限截止频率较小，下限截止频率较大。

无负反馈	引入负反馈	分析对比 A_u 与 A_{uf}
$U_i=5mV$	$U_i=5mV$	引入负反馈后，放大倍数大大降低
$U_{O3}=3.8V$	$U_{O3}=56.1mV$	
$A_u=714.36$	$A_{uf}=11.24$	

幅频特性曲线



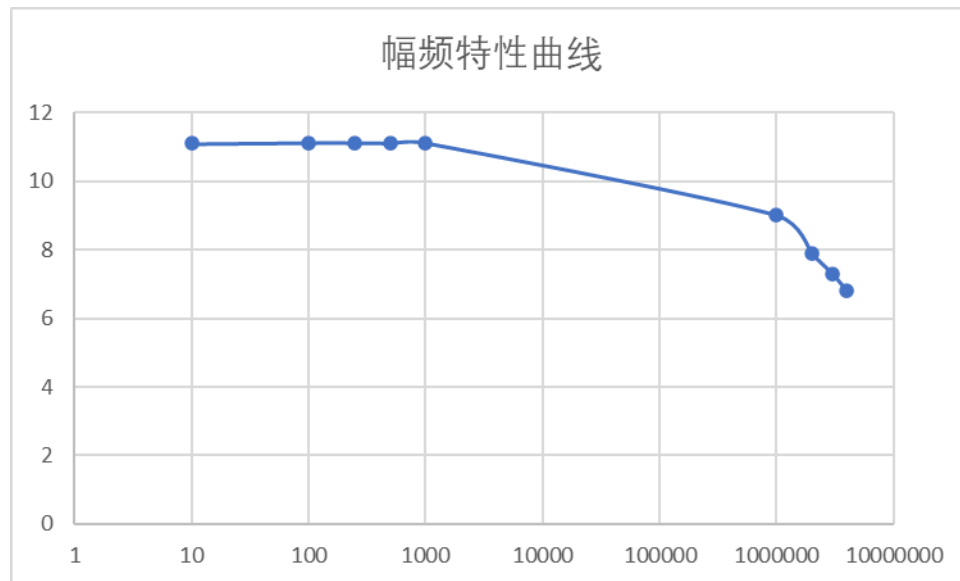
幅频特性曲线图，展示了幅值（Y轴，0到25）与频率（X轴，对数刻度，1到1,000,000）的关系。曲线在1000附近达到峰值，约为21。数据点如下表所示：

频率 (Hz)	幅值
100	17.5
200	18.0
400	18.5
1000	21.0
4000	21.2
10000	20.8
100000	18.5
300000	17.8
600000	17.0

实验结果分析:

f/KHz	$f_1=0.01$	$f_2=0.1$	$f_L=0.25$	$f_3=0.5$	$f_M=1$	$f_4=1000$	$f_H=2000$	$f_5=3000$	$f_6=4000$
U_o/V	0.0551	0.0556	0.0556	0.0555	0.0556	0.0449	0.0397	0.0364	0.0347
Au	11.10	11.13	11.13	11.12	11.13	9.01	7.89	7.30	6.79
分 析 对比	与未引入负反馈时相比，下限频率几乎接近 0HZ，上线频率也增大了数十倍，所以带宽也增大了数十倍。								

幅频特性曲线:



其中纵坐标为 $20\lg|A_u|/\text{dB}$ ，横坐标为 f/Hz

实验结果分析:

引入负反馈使得与未引入负反馈时相比，下限频率几乎接近 0Hz，上线频率也增大了数十倍，所以带宽也增大了数十倍。

注意：电子报告必须上传提交到 MOOC 实验第 10、11、12 单元的作业中。

五、 实验总结

本次实验电路设计耗费较多时间，主要是我参数选择的问题，还有电阻的不精确，电位器的调整问题。开始时，在电脑上，仿真输出波形不正确，我前前后后修改了多次，最后终于得到正确结果。参数选择考虑静态工作点，三极管的 R_C 、 R_E 取过大则集电极电流过小，三极管不能正常工作，自然不能将输入信号放大。

此外，我发现在实验过程中不容易看出来失真的波形，这导致我在做测量放大器的最大不失真输出电压的时候不可避免地产生了较大误差。

另一问题是，在计算过程中发现噪声干扰依旧很大，如上面的波形图所示，信号中存在高频干扰，要在输入端与地端接一电容把高频噪声滤掉，可是实际我做的时候，高频噪声并没有滤掉，信号干扰依然很大，有较多毛刺。实际上，示波器采用平均取样会好很多的。

六、 实验建议（欢迎大家提出宝贵意见）

建议减少实验量，内容较多。