

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 四 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 专 业： 电子科学与技术

姓 名： 顾豪阳 学 号： 06220143

实 验 室： _____ 实验组别： _____

同组人员： _____ 实验时间： 2022 年 5 月 27 日

评定成绩： _____ 审阅教师： _____

三极管放大电路设计

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。

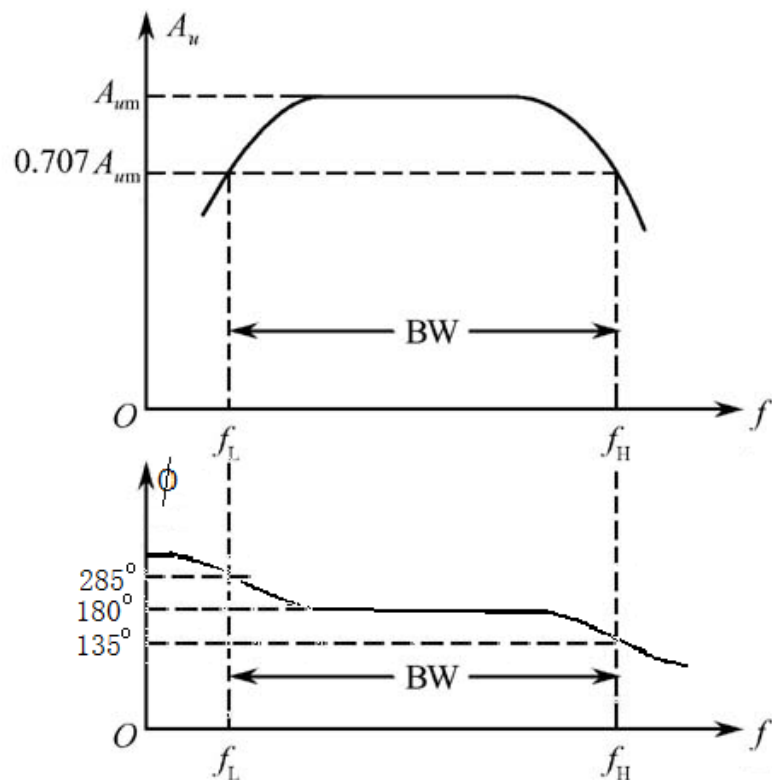
二、 实验原理（主要写用到的的理论知识点，不要长篇大论）

通过实验的方法，测量放大电路的频率特性，研究频率特性和电路参数之间的关系

测量方法一般有“逐点测量法”和“扫频仪测量法”

通过改变输入信号频率测量对应的放大倍数从而获得放大电路的幅频特性曲线，通过测量输入/输出信号的相位差，得到放大电路的相频特性曲线

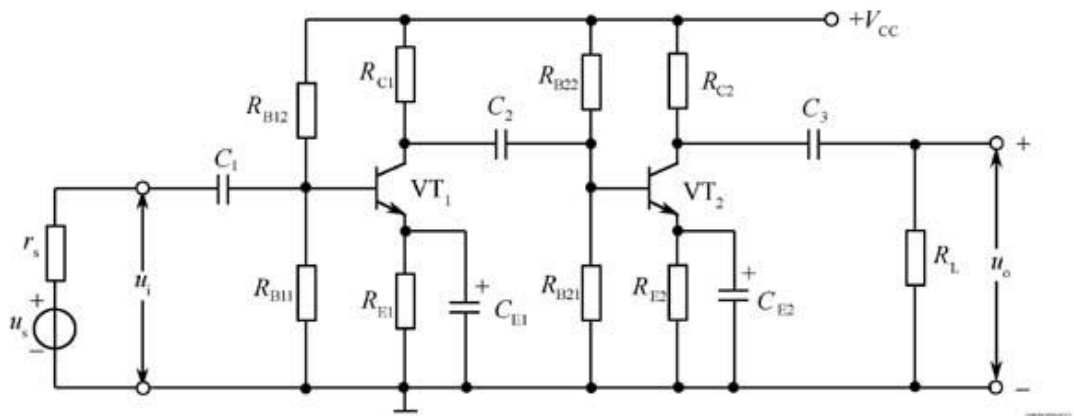
逐点测量法是手工调整信号频率，扫频仪测量法是自动完成信号频率的变化



1、级间耦合方式

多级放大器各级之间连接的方式称为耦合方式。常用的耦合方式有三种，即阻容耦合、变压器耦合和直接耦合。各种耦合方式各有其特点及使用场合。级间耦合时，一方面要确保各级放大器有合适的直流工作点，另一方面要保证级与级之间的合理匹配，保证信号能比较顺利地传递，一般情况下应使前级输出信号尽可能多地传送到后级输入。

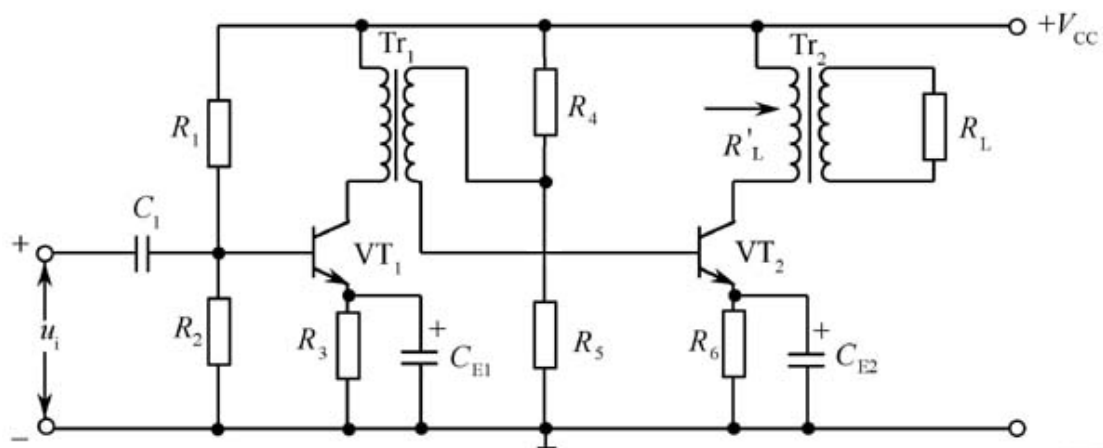
① 阻容耦合—电容耦合



优点：静态工作点相互独立

缺点：不能放大直流信号

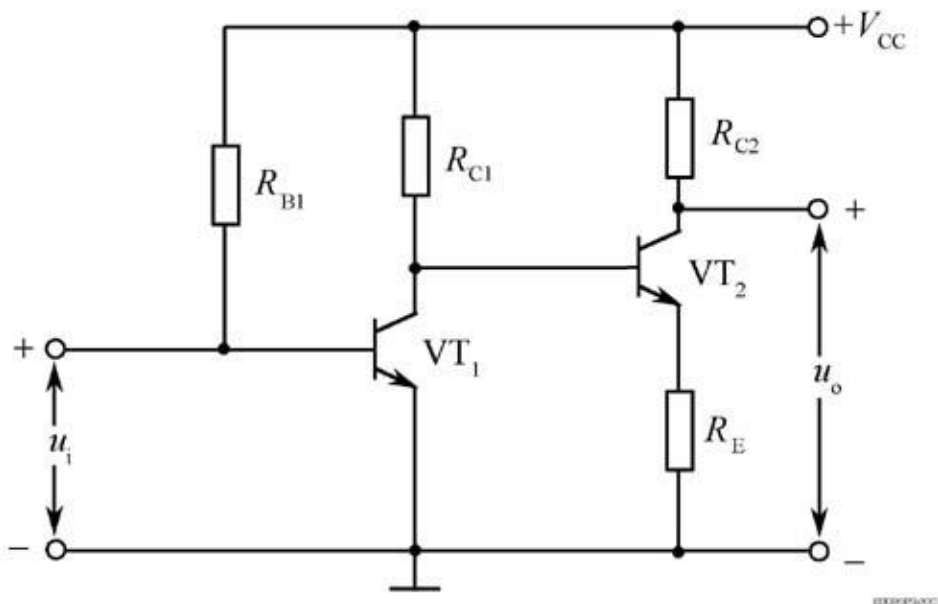
② 变压器耦合



优点：静态工作点相互独立；阻抗变换，级间可最佳匹配

缺点：频率特性差，体积大无法集成化

③ 直接耦合



- 优点：能放大交直流信号，易于集成化
- 缺点：各级工作点相互影响，产生零点漂移

2、多级放大电路的放大倍数

总电压放大倍数为每个单级放大电路放大倍数的乘积。用分贝表示：总的电压放大倍数（分贝值）等于每个单级放大倍数（分贝值）之和。注意：测量每个单级放大电路时不能把前后级断开，要级联在一起时测量。

3、多级放大电路的频率特性

多级放大电路的频率特性测量和单级放大电路频率特性测量方法类似，也有逐点测量法和扫频仪测量法，测量出上限截止频率 f_H 和下限截止频率 f_L ，则放大电路的频带宽度 $BW=f_H-f_L$ 。

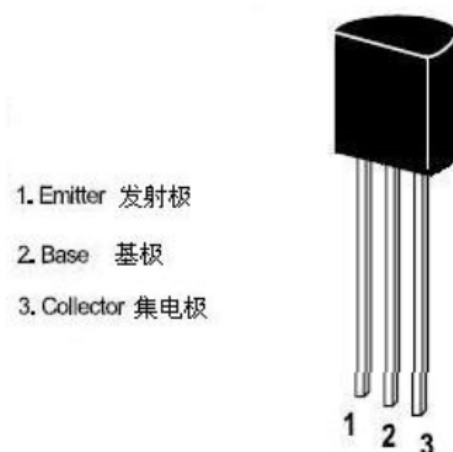
4、增益带宽积

放大器中频区放大倍数和放大电路频带宽度的乘积叫增益带宽积

三、 预习思考：

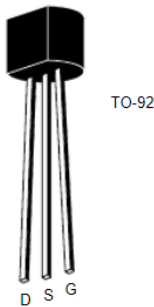
查阅 $\mu A741$ 运放的数据手册，自拟表格记录相关的直流参数、交流参数和极限参数，解释参数含义。

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}	Min 45V	集电极-基极击穿电压
V_{CEO}	Min 25V	集电极-发射极击穿电压
V_{EBO}	Min 5V	发射极-基极击穿电压
I_C	500mA	h_{FE} 下降一半时的集电极电流称作 ICM
I_E	500mA	发射极电流
h_{FE}	64---300	直流电压增益
$V_{CE(sat)}$	MAX 0.6V	集电极-发射极饱和压降
V_{BE}	MAX 1.4V	基极-发射极正向电压
f_T	Min 150MHZ	特征频率

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
I_{GSS}	-1nA (max)	栅极反向电流
$V_{GS(OFF)}$	-0.5V (min), -4V (max)	栅极截止电压，夹断电压
$V_{(BR)GSS}$	-25V	栅极击穿电压，不允许超过此值
I_G	10mA	正向栅极电流
P_D	350mW	漏极最大允许耗散功率，不允许超过此值
g_m	$\frac{dI_D}{dU_{GS}}$ ($U_{GS} = \text{常数}$)	低频跨导

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。

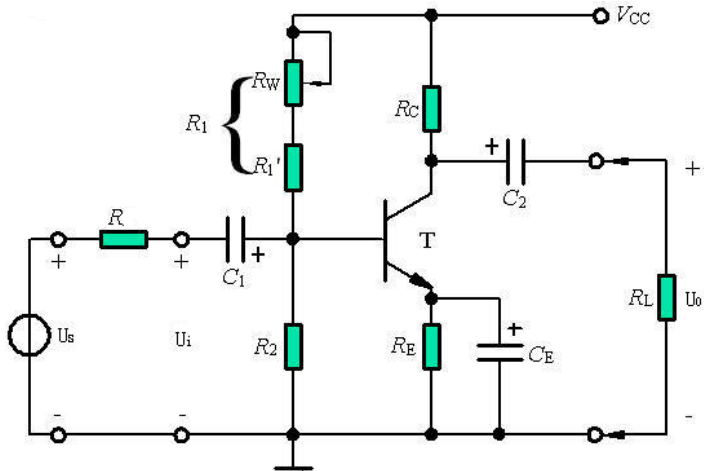


图 3.1 射级偏置电路

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： $V_{CC}=12\text{ V}$ ，

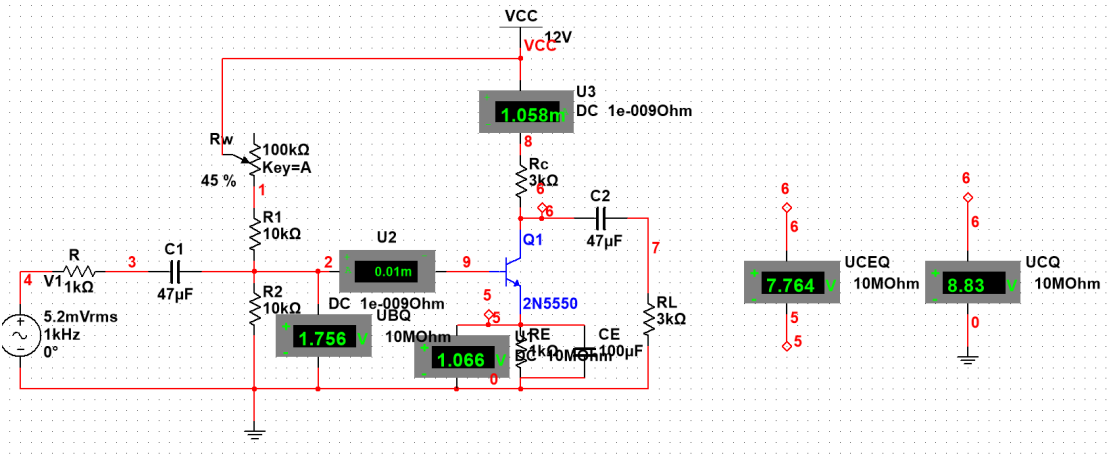
$U_i=5\text{ mV}$, $R_L=3\text{ k}\Omega$, $R=1\text{ k}\Omega$, 设计指标要求: $A_u>50$, $R_i>1\text{ k}\Omega$, $R_o<3\text{ k}\Omega$, $f_L<100\text{ Hz}$, $f_H>100\text{ kHz}$ 。理解三极管 9013 的数据手册, 掌握关键参数的意义并能正确使用; 完成仿真设计并正确连接电路; 调整合适的静态工作点; 测量放大电路放大倍数、输入电阻、输出电阻及最大输出幅度等; 其他性能测量 (如不同工作点对放大电路性能的影响、不同的电源电压对放大电路性能的影响。。。) 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:

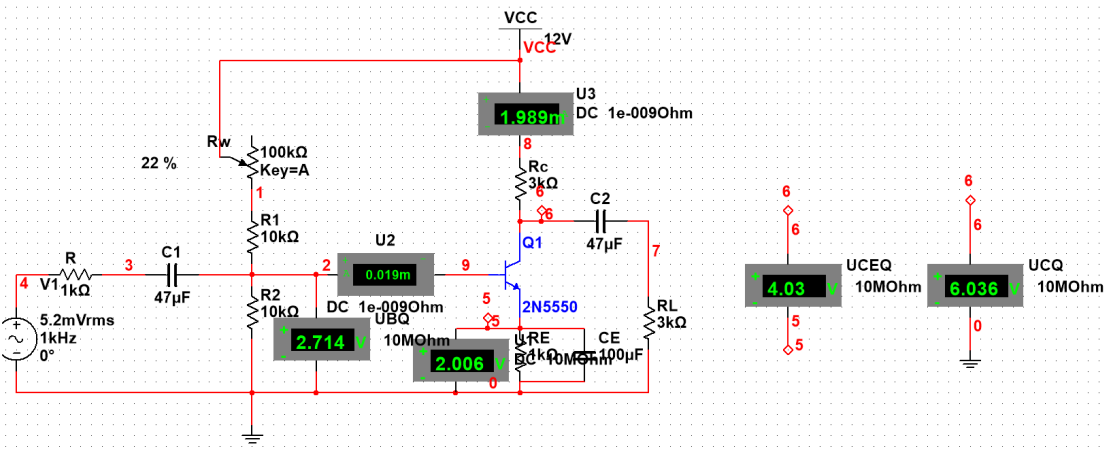
静态工作点电流 I_{CQ} (mA)		1	2
输入端 接地	U_{BQ} (V)	1.756	2.714
	U_{CQ} (V)	8.83	6.036
	U_{EQ} (V)	1.066	2.006
	U_{CEQ} (V)	7.764	4.03

实验结果分析:

Multism 电路图及测量数据:
静态集电极电流 $ICQ=1\text{mA}$:



静态集电极电流 $ICQ=2\text{mA}$:



调节 R_W 的大小, 可以改变静态工作点 Q 的大小。为了测量静态集电极电流 ICQ , 我们可以采用间接法, 利用万用表测量 RC 两端的电压, 通过计算可以得到

ICQ, 且 ICQ 为 1mA 和 2mA 分别对应 RC 两端电压为 3V 和 6V。当 RW 增大时, ICQ 减小; 当 RW 减小时, ICQ 增大。通过实验, 我们可以得出, 当 RW 最大阻值为 100kΩ 时, RW 调至 45%时对应 ICQ=1mA 的情况, RW 调至 22%时对应 ICQ=2mA 的情况。

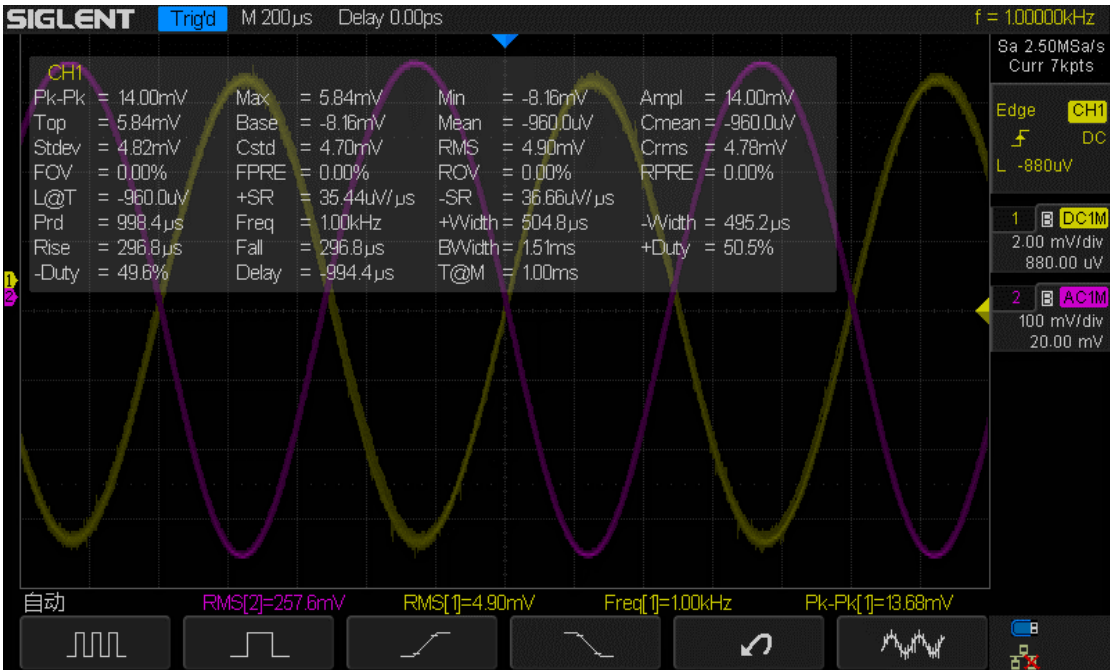
随着 ICQ 的增大, UBQ 与 UCQ 也会随之增大, 而 UEQ 和 UCEQ 则会随之减小。此外, UCEQ 通过直接测量得到的大小和 UCEQ=UCQ-UEQ 的方式间接求出的大小保持了一致。

(2) 放大性能的测量:

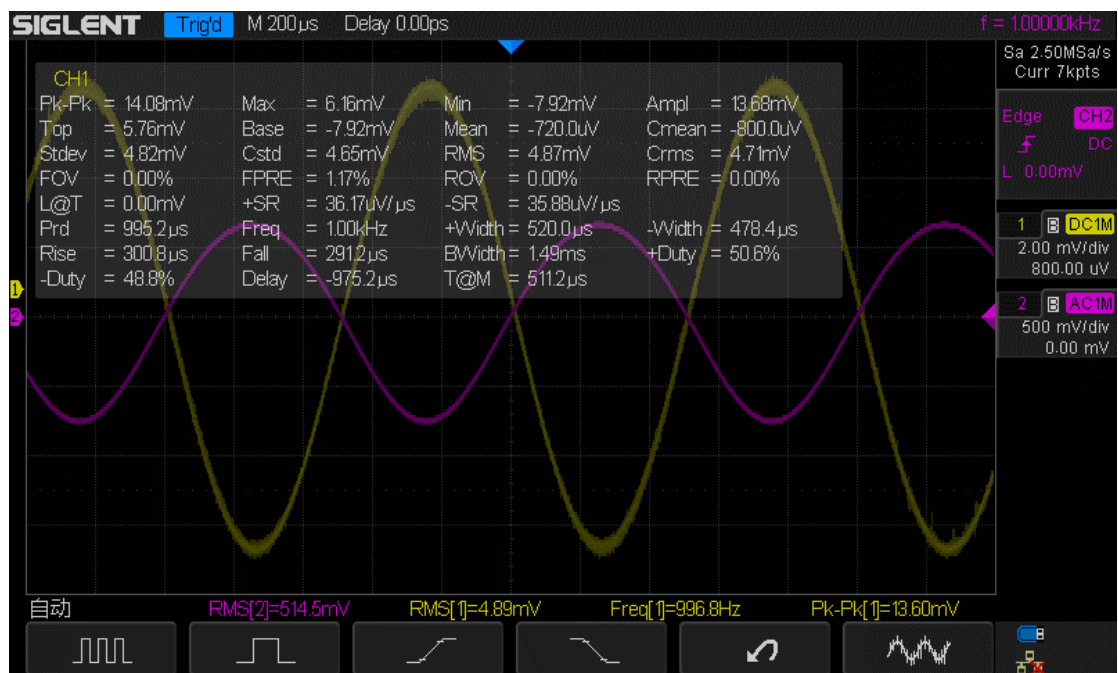
静态工作点电流 ICQ (mA)		1	2
输入信号 Ui=5mV	Us (mV)	6.3	7.1
	Uo (V)	0.264	0.498
	Uo' (V)	0.514	0.981
计算	AV	52.8	99.4

实验结果分析: ch1 为输入, ch2 为输出

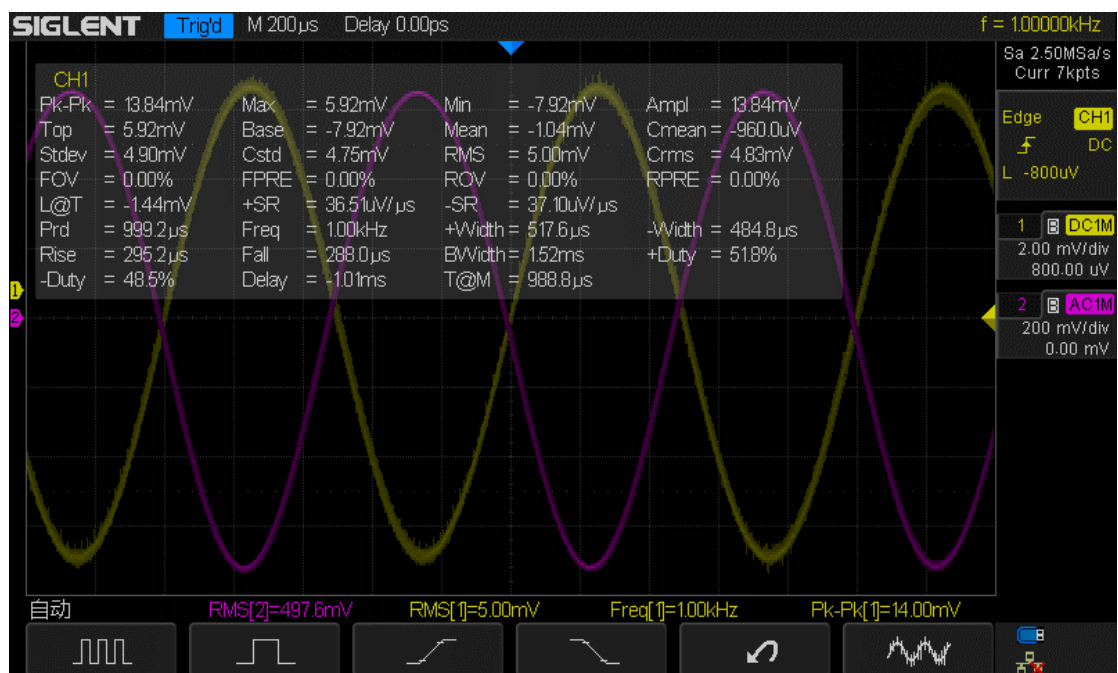
ICQ=1mA 时, Uo 的波形



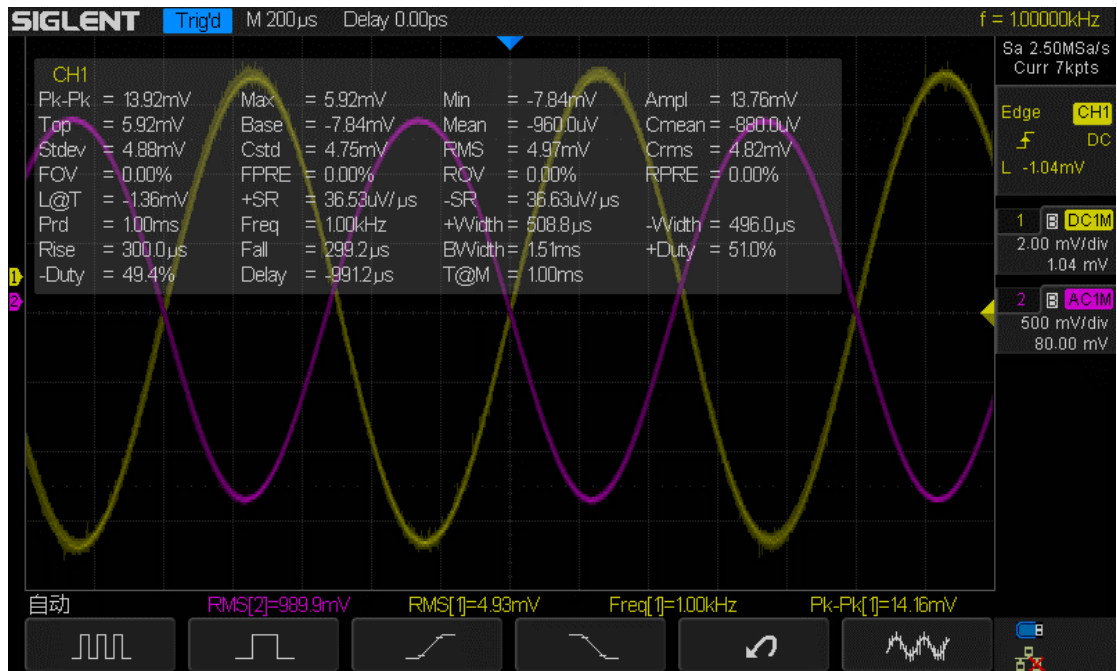
ICQ=1mA 时, Uo' 的波形



$I_{CQ}=2\text{mA}$ 时, U_o 的波形

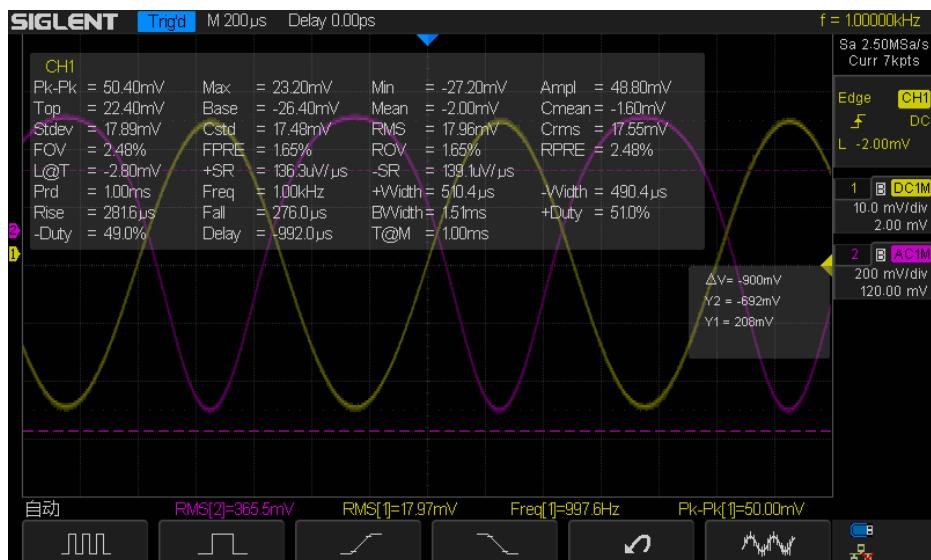


$I_{CQ}=2\text{mA}$ 时, U_o' 的波形

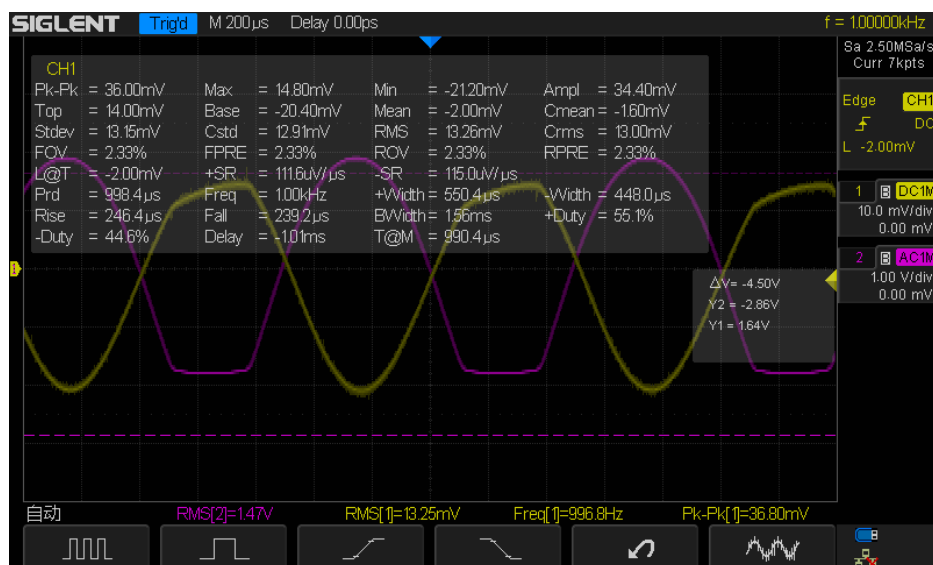


(3) 静态工作点对输出波形的影响：

		截止失真	饱和失真	R_w 变化对失真的影响
测量值	U_{BQ} (V)	1.1	2.7	R_w 增大，易出现截止失真； R_w 减小，易出现饱和失真；
	U_{CQ} (V)	10.9	4.5	
	U_{EQ} (V)	0.40	2.5	
	波形	见图①	见图②	



图①



图②

实验结果分析:

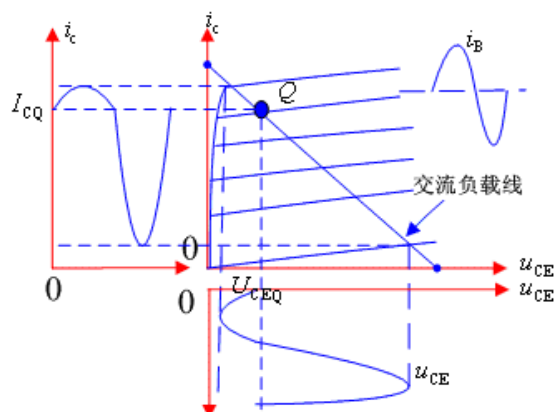
当 R_W 增大时, 由于分压电路的存在, 导致 U_{BQ} 将会减小, 从而导致 I_{CQ} 减小, U_{CEQ} 增大, 所以静态工作点将会向下移动, 所以很容易会出现截止失真的现象。

当 R_W 减小时, 由于分压电路的存在, 导致 U_{BQ} 将会增大, 从而导致 I_{CQ} 增大, U_{CEQ} 减小, 所以静态工作点将会向上移动, 所以很容易会出现饱和失真的现象。

通过实际实验测量, 我们可以发现实验结果与理论分析基本保持了一致。在 U_i 增大的情况下, 若减小 R_W , 则很容易看到饱和失真, 即输出曲线下部出现削平的现象; 若增大 R_W 则很容易看到截止失真, 即输出曲线上部出现削平的现象。

所以, 在设计放大电路时, 为了得到不失真的输出波形, 我们需要合理地设置静态工作点的大小, 并且增加输入的幅值大小, 尽量避免截止失真和饱和失真的出现。

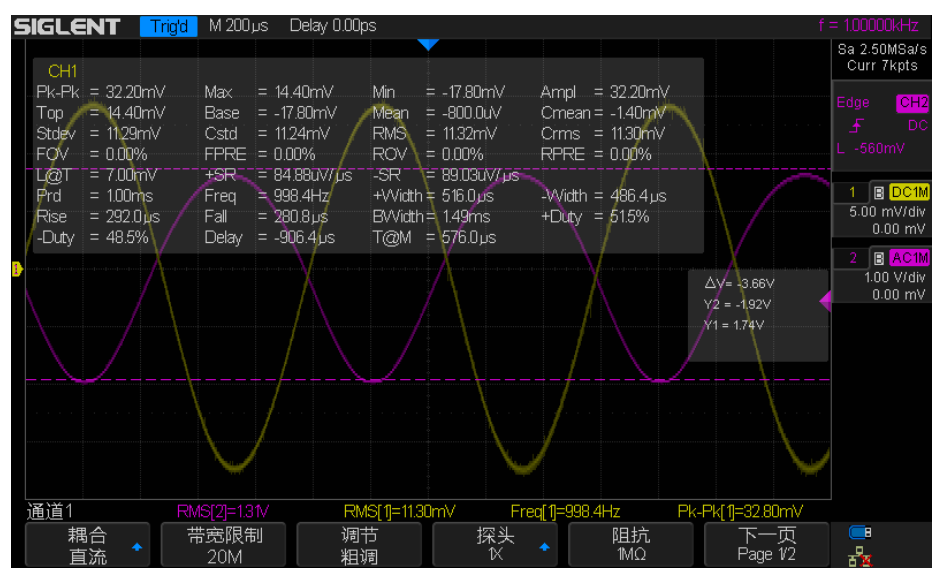
波形与数据基本符合实验要求; 综上所述, 要使三极管放大电路得到不失真增益波形需要调节适当的静态工作点, 既不能过大也不能过小。



(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)	3.098
U_{CQ} (V)	4.765
U_{EQ} (V)	2.457
U_{OPP} (V)	3.7046

最大不失真输出波形：



实验结果分析：

通过反复调节 U_s 和 R_W 的大小，我们可以测得该电路的最大不失真输出电压大约为 3.7V。

(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)	6.3	7.1
	R_i (Ω)	3846	2381

实验结果分析：

通过实验，我们可以发现随着 I_{CQ} 的增大，输入电阻 R_i 的大小在不断减小。这也就解释了在放大性能测量实验和本实验中，随着 I_{CQ} 的增大，由于输入电阻 R_i 的减小，在输入回路中电源内阻 R 的分压增大，所以为了保持 U_i 不变， U_s 也必须随之增大。

(6) 输出电阻的测量：

静态工作点电流 I_{CQ} (mA)		1	2
输入信号 $U_i=5mV$	U_o (V)	0.264	0.497

	U_o' (V)	0.514	0.921
	$R_o(\Omega)$	2841	2553

实验结果分析:

在输出电阻的测量实验中，我们可以发现随着 ICQ 的增大，输出电阻 R_o 有略微的减小。

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:

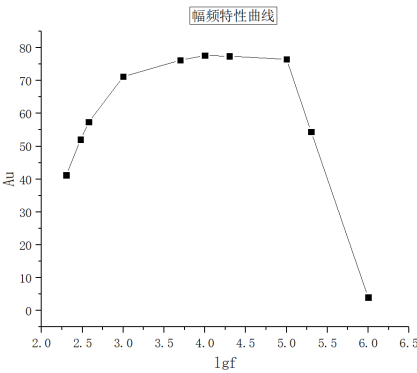
逐点法测量放大电路的频率记录表

f/KHz	$f_1=0.02$	$f_2=0.08$	$f_L=0.096$	$f_4=0.5$	$f_5=5$	$f_M=10$	$f_6=20$	$f_7=100$	$f_H=230$	$f_8=1M$
U_o/V	206	260	287	356	381	409	382	390	289	20
A_u	41.2	52	57.4	71.2	76.2	77.61	77.4	76.47	54.4	4

表格 1

手绘幅频特性曲线:

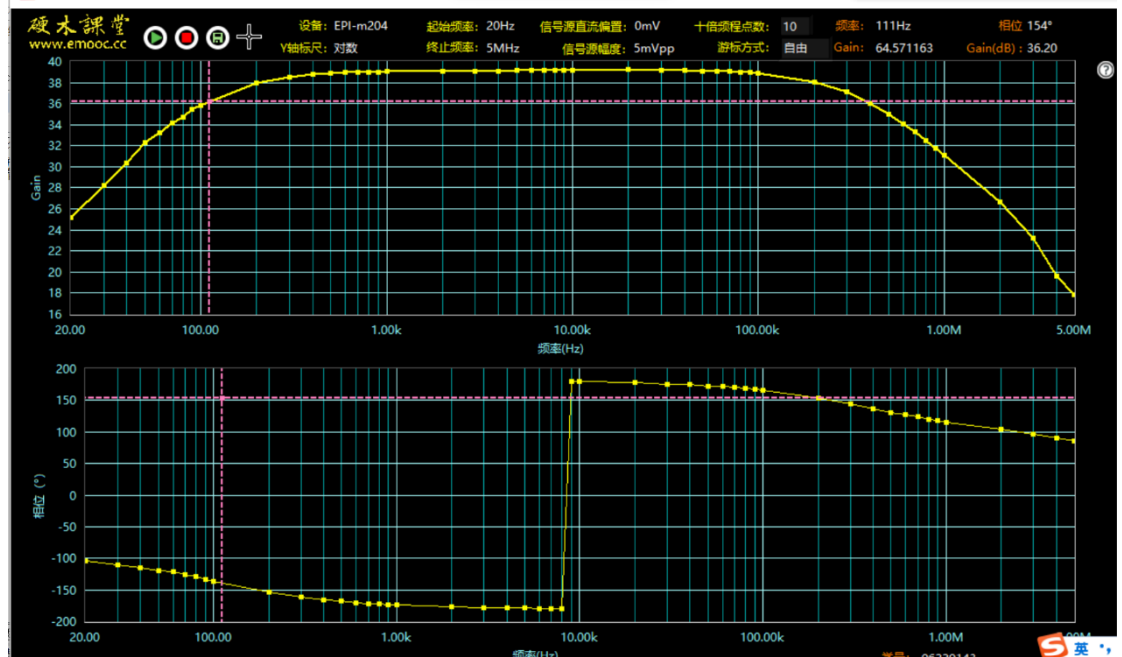
利用软件 MATLAB，绘制出幅频特性曲线如下图所示:



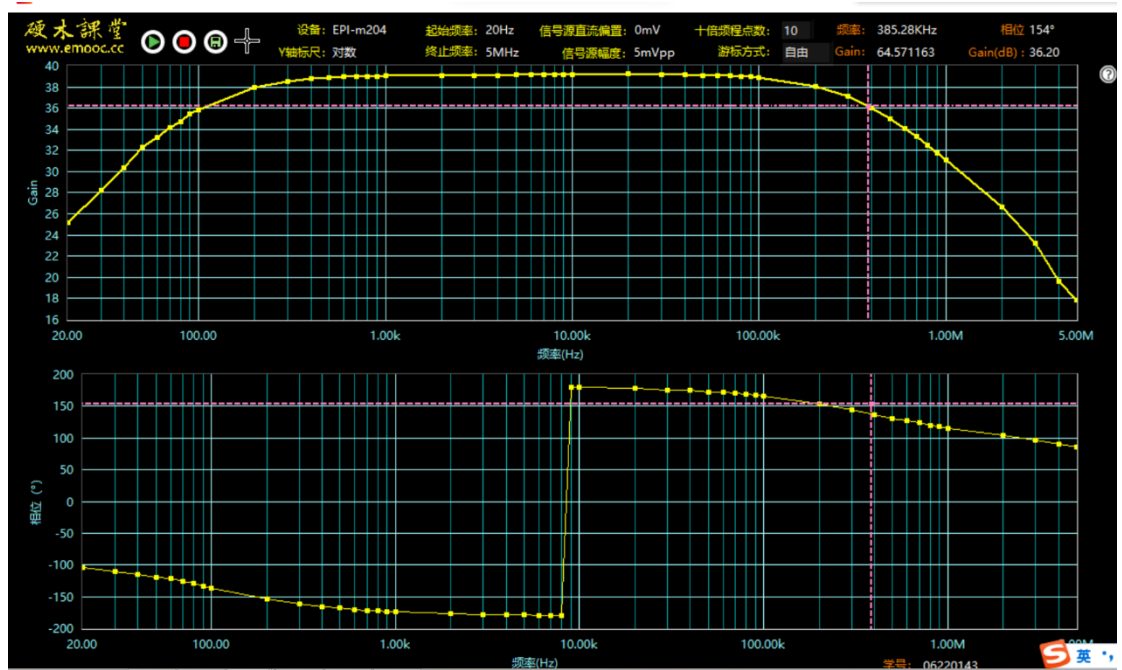
实验结果分析:

调整输入信号的频率，可见当 $f=15KHz\sim 30KHz$ 时，电路的放大倍数最大，可取中频段 $f_M=10KHz$ ，此时电路放大倍数为 $A_u=77.61$ ，可计算得截止频率对应的电路放大倍数约为 $A_u=54.88$ ，调整输入信号的频率，逐点测量即可得到上表。

使用易派扫频仪测量的幅频、相频特性曲线：



其下限截止频率约为 111Hz



其上限截止频率约为 385.28kHz

找到 $f_L = 111\text{Hz}$

$f_H = 385.28\text{kHz}$

实验结果分析：

通过对比扫频仪和示波器驻点测量的结果可以看出，下限截止频率测量数据误差较小，对于上限截止频率，扫频仪测得的数据为 385kHz，而逐点测量法测得了 230kHz，可以看到数据相差还是比较大，分析原因初步认为是易派的扫频仪在分析高频信号时误差较大。

(2) 电路参数对频率特性的影响（Multisim 仿真）:

电路参数对频率特性的影响记录表

$C_e=33\mu F$	$f_L=320.92Hz$	$f_M=57.797kHz$	$f_H=14.68MHz$
$C_1=100\ \mu F$	$f_L=106.26\ Hz$	$f_M=37.276kHz$	$f_H=14.68MHz$
$C_2=100\mu F$	$f_L=107.20\ Hz$	$f_M=33.405kHz$	$f_H=14.68MHz$

幅频特性曲线:

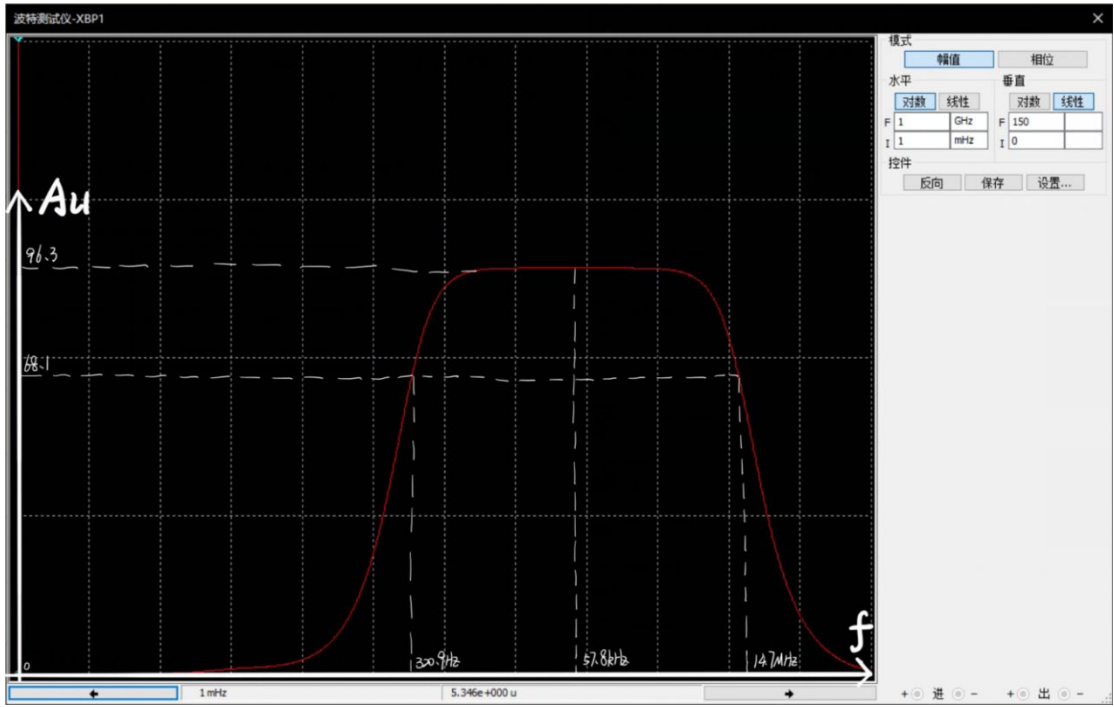


图 2-1 电阻 Ce 对数-线性坐标幅频特性曲线

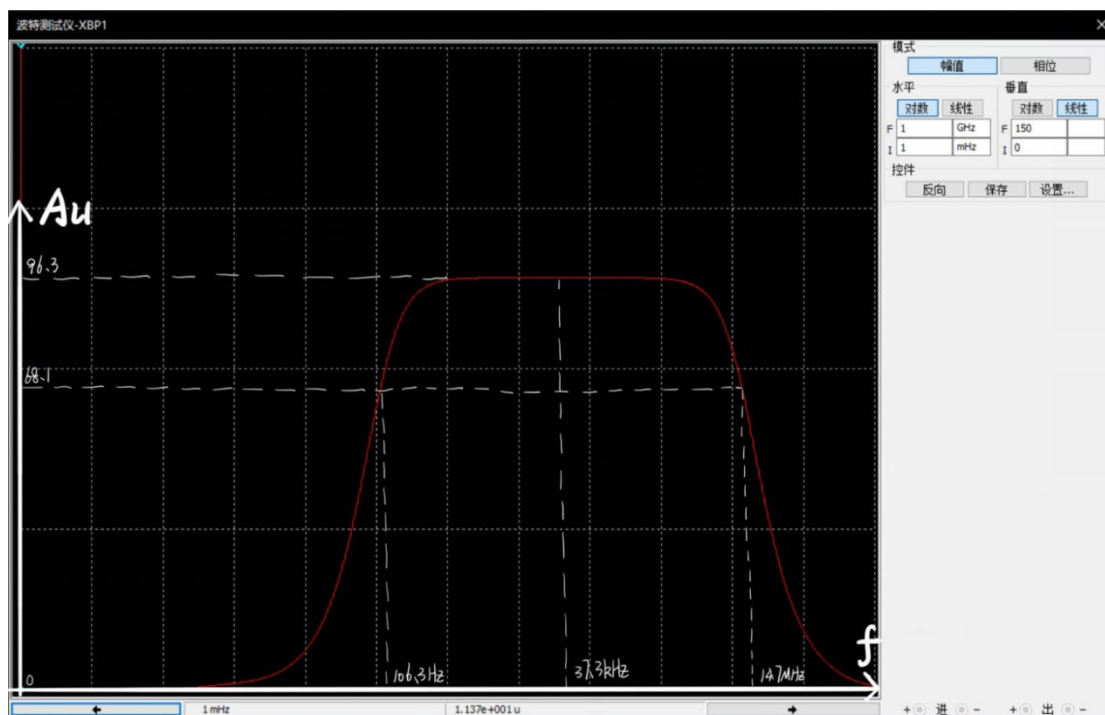


图 2-2 电阻 C1 对数-线性坐标幅频特性曲线

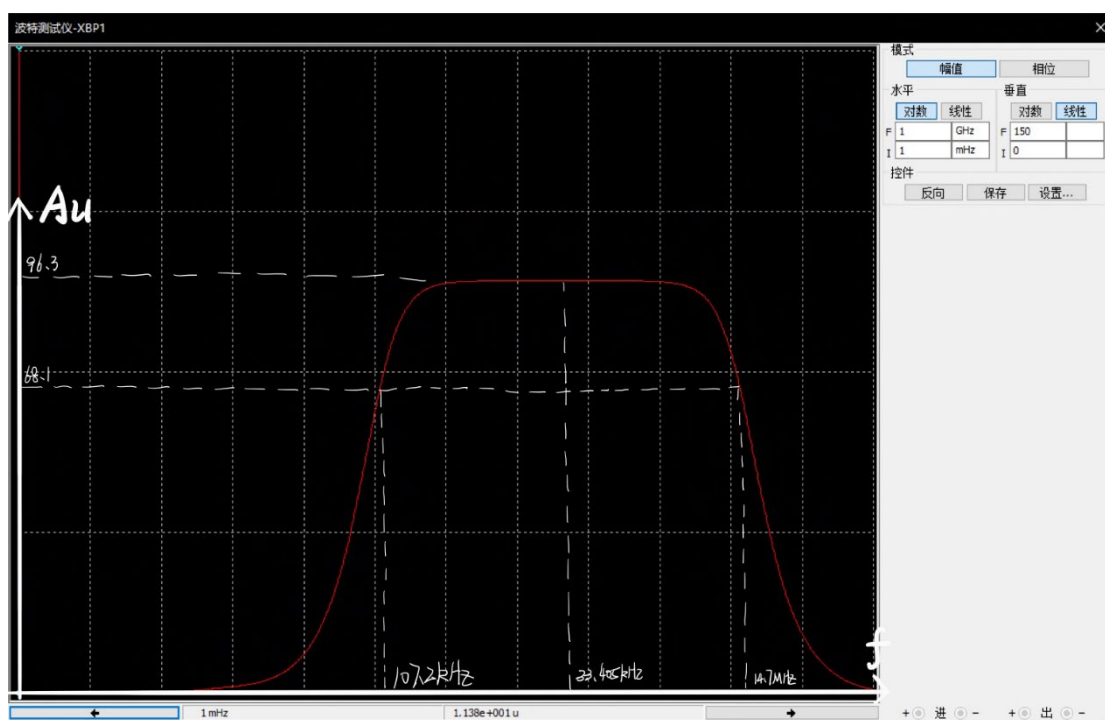


图 2-3 电阻 C2 对数-线性坐标幅频特性曲线

实验结果分析：

采用波特仪的方式对幅频特性曲线进行研究。在对数-线性坐标下，可以观察到旁路电容和耦合电容大小不改变幅频特性曲线整体变化趋势。通过比较两次实验的结果，我们可以发现旁路电容 C_e 由 $100\mu\text{F}$ 改为 $33\mu\text{F}$ 后， f_L 和 f_M 明显升高，由 107Hz 提高到 321Hz ， f_M 也由 30kHz 提高为 57.797kHz ，而 f_H 基本保持不变。由于带宽 BW 主要取决于 f_H ，故 BW

也基本保持不变。

分别将耦合电容 C_1 和 C_2 的大小从 $47\mu\text{F}$ 改为 $100\mu\text{F}$ 后, f_L 、 f_M 、 f_H 和 BW 均没有发生明显变化, 只是在原有频率附近略有变化。

综上所述, 我们可以发现, 旁路电容 C_e 的大小与电路的 f_L 和 f_M 成负相关, 即当旁路电容 C_e 减小时, 电路的 f_L 和 f_M 增大, 但对电路的 f_M 和 BW 没有太大影响; 耦合电容 C_1 和 C_2 的大小基本不影响电路的 f_L 、 f_M 、 f_H 和 BW 。同时, 还应该注意到, C_e 、 C_1 和 C_2 大小的改变对电路放大倍数 A_u 没有太大影响。

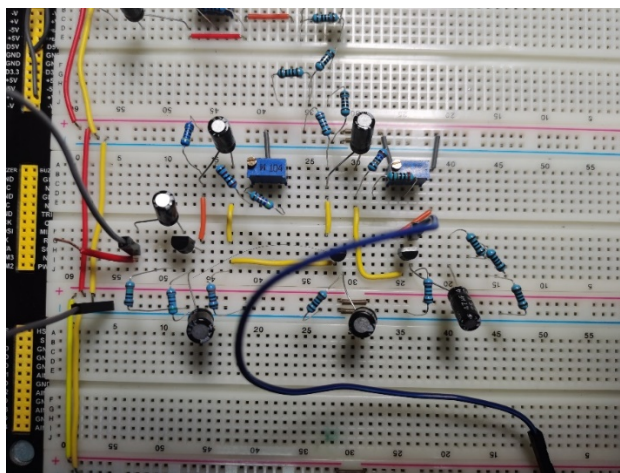
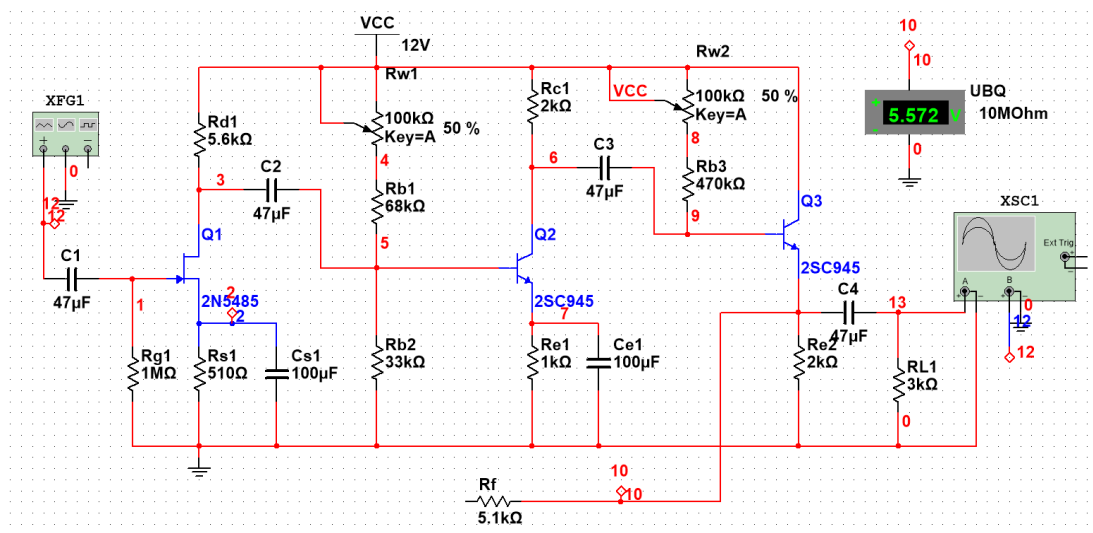
3. 实验内容三 (见在线实验 12):

- (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。

设计电路:



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	
	$I_{DQ}=0.45\text{ mA}$ (根据器件特性可调整)	$I_{CQ}=2\text{mA}$ (根据器件特性可调整)	$I_{EQ}=2\text{mA}$ (根据器件特性可调整)	
测量值	$U_{DQ}=9.71\text{ V}$	$U_{CQ}=7.86\text{ V}$	$U_{BQ}=6.40\text{ V}$	
	$U_{SQ}=0.223\text{ V}$	$U_{EQ}=2.020\text{ V}$	$U_{EQ}=5.80\text{ V}$	
	$I_{DQ}=0.41\text{ mA}$	$I_{CQ}=2.019\text{ mA}$	$I_{CQ}=2.90\text{ mA}$	

实验结果分析:

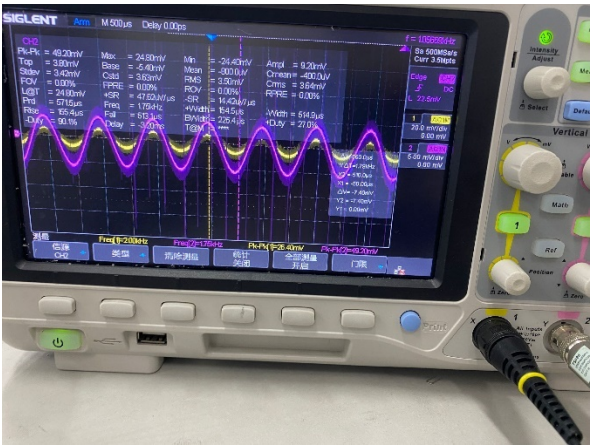
由实验数据我们不难看出,第一级是结型场效应管,工作在分压式共源电路中,其绝缘性较好,因而源极和漏极之间的电压差较一般的工作在分压式的共射电路中的三极管要大很多;而第三级的三极管是工作在分压式共集放大电路中,其集电极直接与 V_{cc} 相连,射极和集电极电压差很大。同时由于三极管工作时,射极和基极间属于正向导通,因而其电压降是一个特定的值,对于不同的类型的管子,其压降不同。

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。

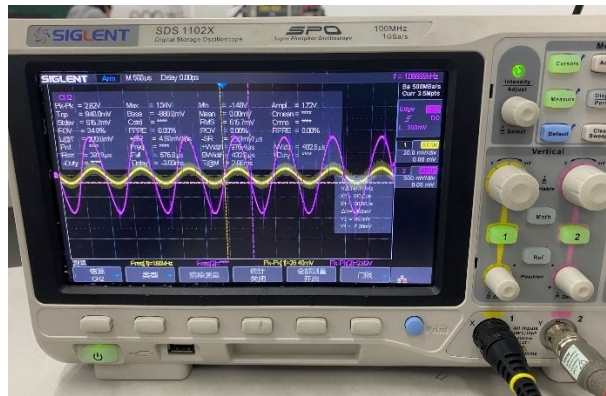
放大倍数测量记录表				
增益	第一级	第二级	第三级	总增益
A_u	$U_i=9.33\text{ mV}$	$U_{O1}=17.4\text{ mV}$	$U_{O2}=997\text{ mV}$	$U_i=9.33\text{ mV}$
	$U_{O1}=17.4\text{ mV}$	$U_{O2}=997\text{ mV}$	$U_{O3}=870\text{ mV}$	$U_{O3}=870\text{ mV}$
	$A_{u1}=1.9$	$A_{u2}=57.3$	$A_{u2}=0.89$	$A_u=97$
$A_u\text{ (dB)}$	$A_{u1}=5.58$	$A_{u2}=35.2$	$A_{u3}=-1.01$	$A_u=40$

示波器观察的输入及各级波形:

$U_{O1}=17.4\text{mV}$



$U_{O2}=997\text{mV}$



$U_{O3}=870\text{mV}$



实验结果分析:

由实验数据我们不难看出主要的放大级是在中间的那一级，放大增益达到了 35.2dB，而第一级的放大增益只有几个 dB，但是它起到的作用是提供一个较大的输入电阻，保证电路能够获取足够多的输入信号，而最后一级它的电压增益小于 1，起到的是一个射级跟随器的作用，主要作用是要提供一个较小的输出电阻，提高这个电路的输出能力。

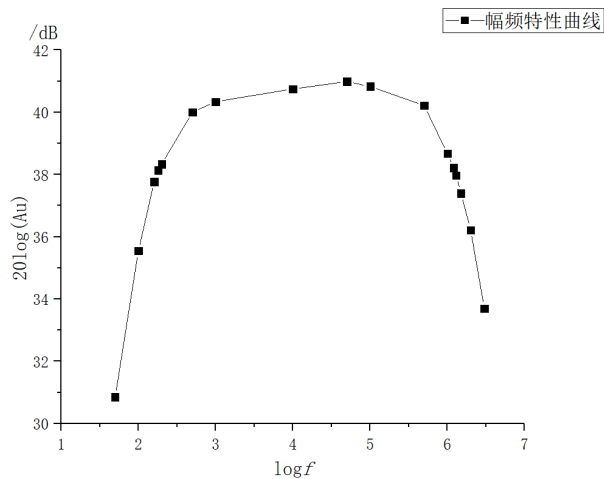
3) 利用逐点测量法或扫频仪测量法，测量多级放大电路的频率特性，参数记录于频率特性测量记录表中，可以画出放大电路的频率特性图。

幅频特性曲线:

我们用点频法逐点测量多级放大电路的频率

f/KHz	0.05	0.1	0.16	$f_L=0.18$	0.2	0.5	1	10	$f_M=50$	100	500	1000	1200	$f_H=1300$	1500	2000	3000
U_O/V	0.463	0.794	1	1.06	0.189	1.32	1.35	1.39	1.4	1.39	1.28	1.15	1.07	1.03	0.963	0.813	0.580
A_u	34.9	59.9	77.3	80.7	82.5	100	104	109	112	110	102.5	85.8	81.4	79.2	74.1	64.7	48.4

幅频特性曲线:



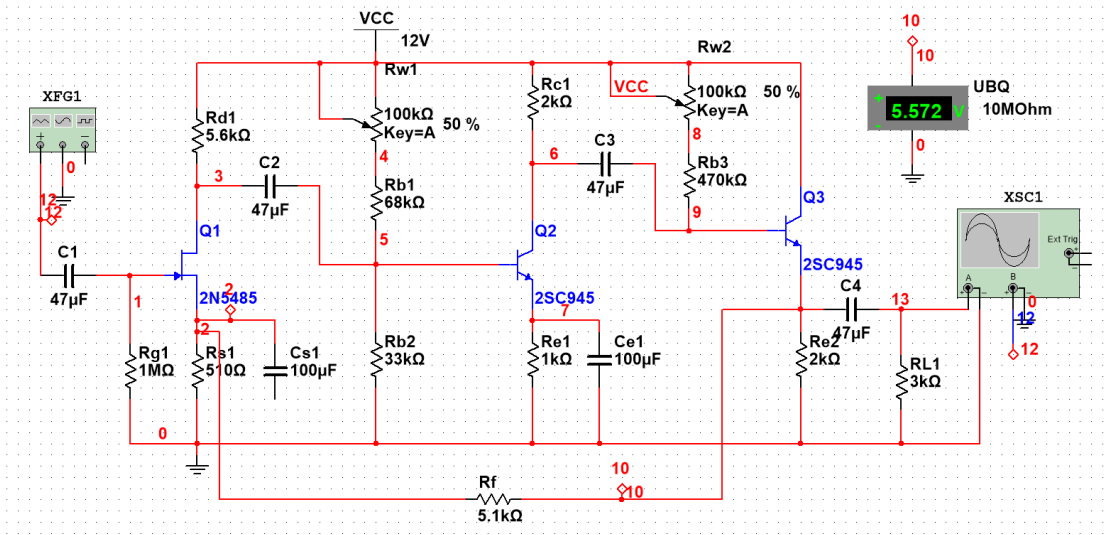
找到 $f_L=180\text{Hz}$ $f_H=1.3\text{MHz}$

实验结果分析:

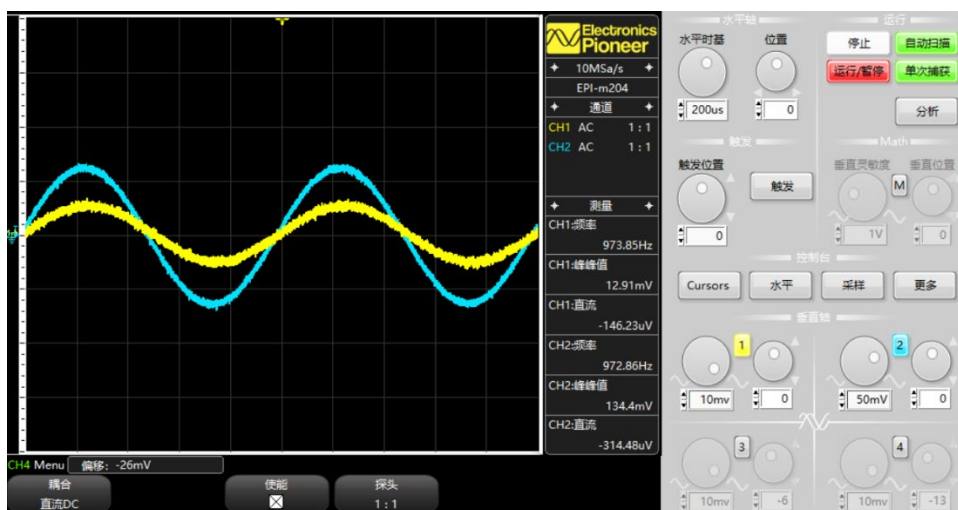
该放大电路的工作频宽还算可以，在工作频率内，其增益稳定，约为 110 左右，也即 40.8dB；但是该放大电路存在上限截止频率约为 1.3MHz，也有下限截止频率约为 180Hz，通带宽度约为 1.3MHz，增益带宽积 GBP 约为 5.304×10^6 。

4) 在多级放大电路的基础上，引入电压串联负反馈，要求总放大倍数为 11 倍。测量负反馈对输入电阻、输出电阻及放大倍数的影响。

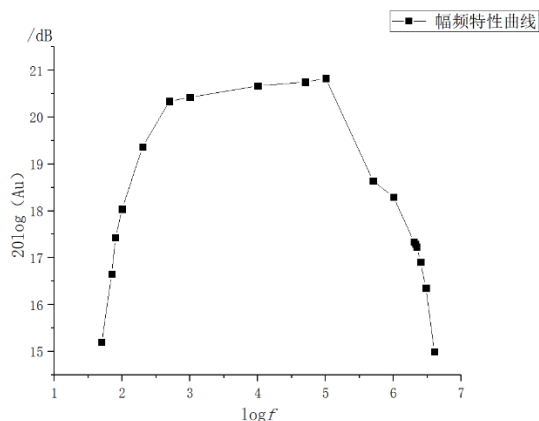
设计电路:



引入负反馈后对放大倍数影响测量记录表		
无负反馈	引入负反馈	分析对比 A_u 与 A_{uf}
$U_i=9.3\text{ mV}$	$U_i=12.9\text{ mV}$	引入负反馈之后增益 A_{uf} 会变小，及 $A_{uf} < A_u$
$U_{O3}=870\text{ mV}$	$U_{O3}=134\text{ mV}$	
$A_u=97$	$A_{uf}=10.4$	



幅频特性曲线:



实验结果分析:

根据我们得到的幅频特性曲线，我们当引入了电压串联负反馈以后，该放大电路的下限截止频率减小了，上限截止频率增加了，整个通带宽度也增加到了约为 2.1MHz；在通带范围内，其放大增益稳定，约为 20.8dB。增益带宽积和前面没有引入负反馈时，电路的增益带宽积的值差不多。

五、 实验总结

本实验的输入信号为 5mV 左右的交流小信号，测量数据的精度很大程度上受到仪器的影响，信号发生器、示波器、电路板、接线等硬件因素都会对测量过程及测量结果造成较大的干扰。实验过程中，示波器上显示的部分数据波动较大，难以记录，而本实验某些测量数据与理论数据相比，相差悬殊，且实验室缺少仪器扫频仪，在测量电路频率特性时缺乏有用的参考数据。希望以后的测量方案能够得到相应的改进与提升。

六、 实验建议（欢迎大家提出宝贵意见）

希望能有合适的器材可以测量高频小信号，用易派根本做不成，跑来跑去太麻烦了