

仿真作业二

实验报告

姓名	刘雪洁
学号	2019011879
班级	自91

目录

1	实验目的	1
2	仿真内容	1
2.1	仿真题2-1	1
2.1.1	设置静态工作点	1
2.1.2	改善动态性能指标	2
2.1.3	波形失真分析	4
2.2	仿真题2-2	5
2.2.1	理论分析	5
2.2.2	测量静态工作点	8
2.2.3	测量动态参数	10
2.2.4	利用镜像电流源替代电流源元件	12
2.3	仿真题2-3	13
3	仿真小结	15

1. 实验目的

- 理解晶体管和场效应管放大电路以及集成运放的基本组成原则；
- 理解放大电路性能参数的调试和测试方法、静态工作点对动态参数的影响；
- 理解放大电路产生失真的原因和消除方法；
- 熟悉仿真软件的基本分析和测量方法。

2. 仿真内容

2.1 仿真题2-1

利用晶体管2N2222A或者MOS管2N7000G，设计一个单电源供电的单管共集、共基或者共源、共栅放大电路，电源电压为 $V_{CC} = +15V$ 。

2.1.1 设置静态工作点

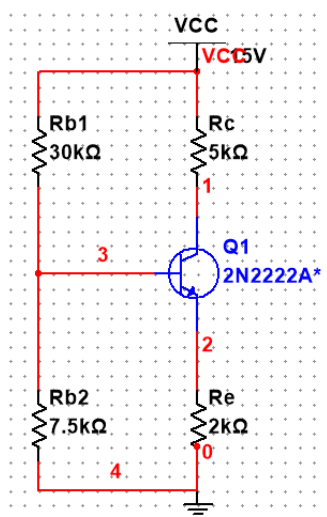


图 1: 直流通路

首先构建直流通路模型，设置的参数如图1所示，其中晶体管的放大倍数 $\beta = 235$ 。接下来进行静态工作点的估算：

$$\begin{cases} R_b = R_{b1} // R_{b2} \\ V_{BQ} = \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}} V_{CC} \\ V_{BQ} = U_{BEQ} + I_{EQ} R_e + I_{BQ} R_b \\ V_{CQ} = U_{CEQ} + I_{EQ} R_e + I_{CQ} R_c \\ I_{CQ} = \beta I_{BQ} \\ I_{EQ} = (1 + \beta) I_{BQ} \end{cases}$$

解得：

$$\begin{cases} V_{BQ} = 3V \\ I_{BQ} = 4.81\mu A \\ I_{CQ} = 1.131mA \\ U_{CEQ} = 7.08V \end{cases}$$

V(1)	9.17802
V(2)	2.33884
V(3)	2.96984
I(Q1[IB])	5.02595 u
I(Q1[IC])	1.16440 m

图 2: 静态工作点仿真结果

对图1电路进行静态工作点的仿真测量，仿真结果如图2所示：

$$\begin{cases} V_{BQ} = 2.97V \\ I_{BQ} = 5.03\mu A \\ I_{CQ} = 1.164mA \\ U_{CEQ} = 6.84V \end{cases}$$

可见仿真结果与理论估算值较好地符合，该参数设置下晶体管具有合适的静态工作点。

2.1.2 改善动态性能指标

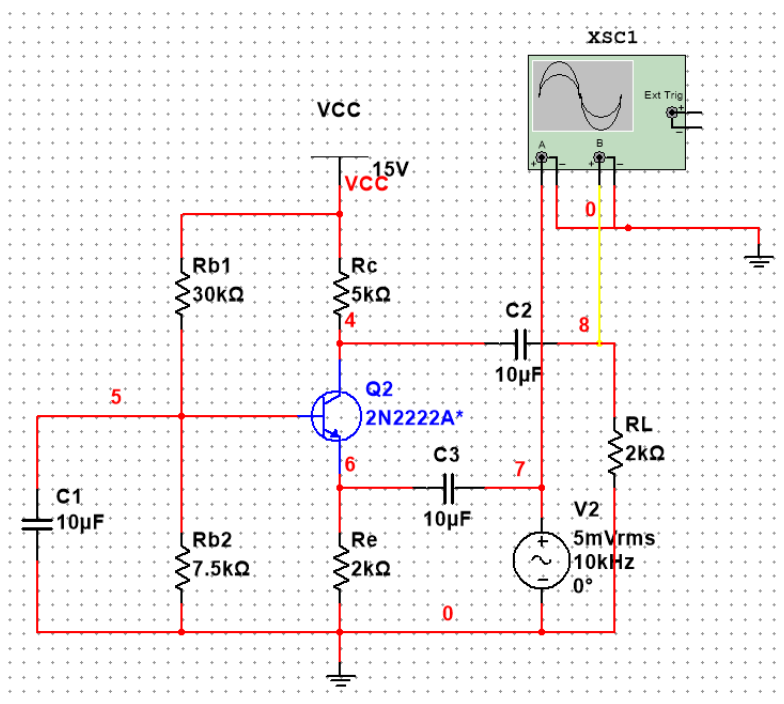


图 3: 单管共基放大电路

搭建的单管共基放大电路如图3所示。首先估算该电路模型的放大倍数：

$$r_{be} = r_{bb'} + \frac{U_T}{I_{BQ}} = 5.32k\Omega$$

$$A_u = \frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be} // (1 + \beta)R_e} = 63.82$$

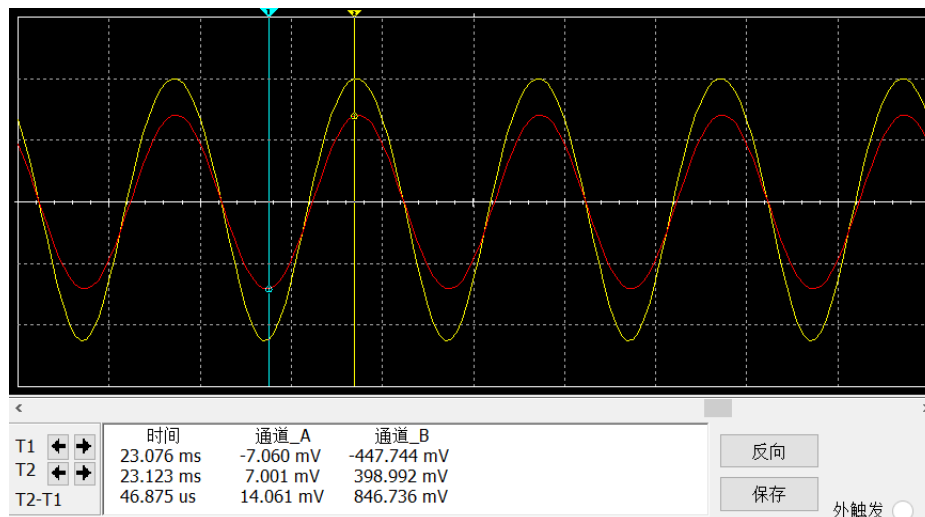


图 4: 测量 A_u 仿真波形图 ($R_c = 5k\Omega$)

接下来利用示波器观察输入输出波形，仿真结果如图4所示。由测量结果可计算得：

$$A_u = \frac{846.74}{14.06} = 60.22$$

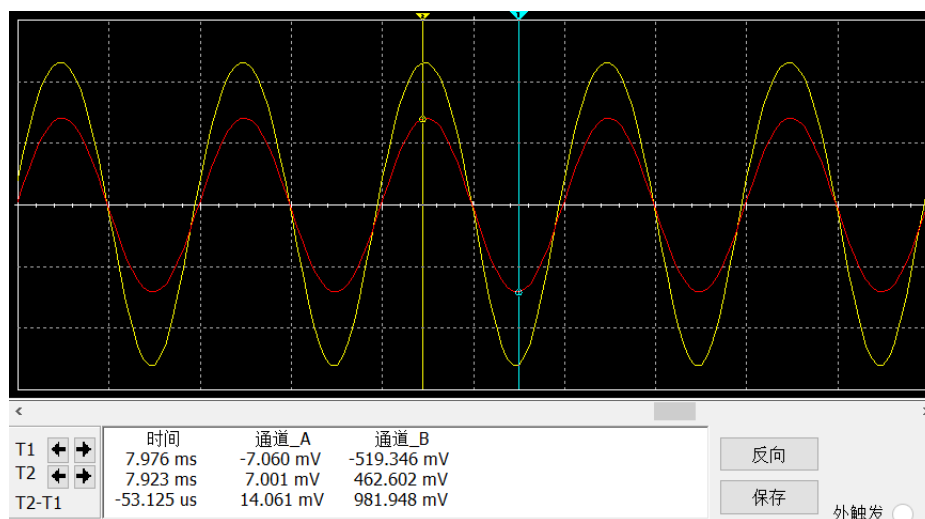


图 5: 测量 A_u 仿真波形图 ($R_c = 10k\Omega$)

由共基放大电路 A_u 的理论表达式可知，放大倍数与集电极电阻 R_c 的阻值成正比，因此增大 R_c 至 $10k\Omega$ ，得到的输入输出波形如图5所示，同理计算此时的放大倍数：

$$A_u = \frac{981.95}{14.06} = 69.84$$

比较调整前后的放大倍数可知，在一定范围内增大集电极电阻 R_c 的阻值，可以提高单管共基放大电路的动态性能指标 A_u ，与理论分析相符。

2.1.3 波形失真分析

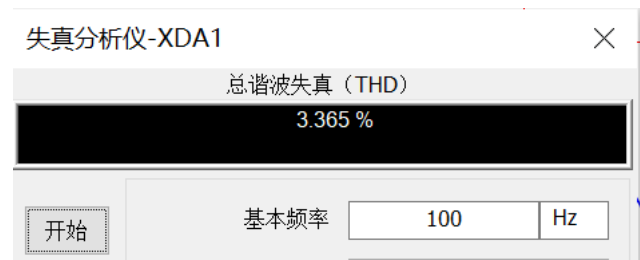


图 6: 测量失真率: $R_c = 5k\Omega$ 、 $u_i = 5mV_{rms}$

首先利用失真度仪测量原始电路的输出波形失真度，测量结果如图7所示。可见此时的失真度较小，说明参数设置基本合理。

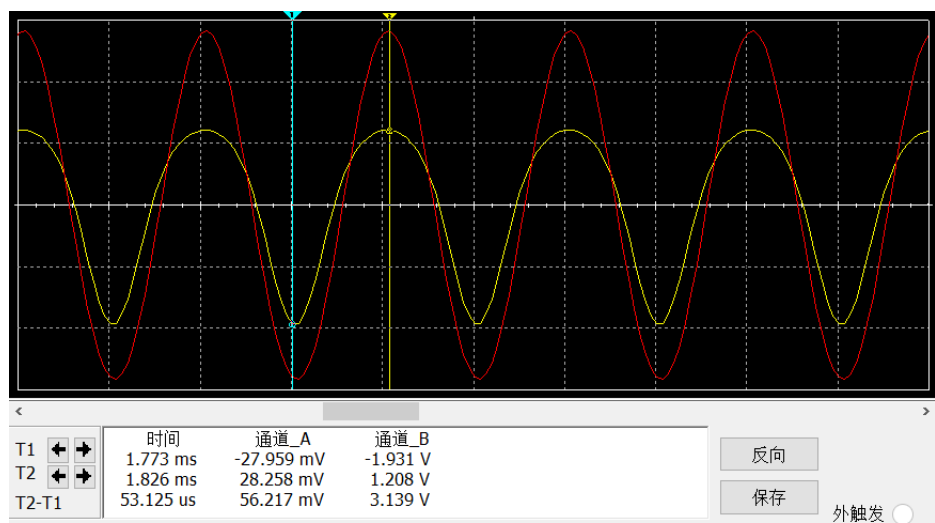


图 7: 截止失真波形图

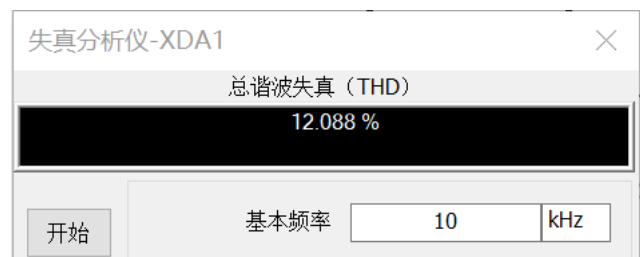


图 8: 测量失真率: $R_c = 5k\Omega$ 、 $u_i = 10mV_{rms}$

调整输入信号的大小，将 u_i 的有效值改为增大至 $10mV$ ，仿真结果如图7所示。观察可知输出波形出现了顶部失真，且失真度约为12%，又由于晶体管的集电极电流与输出电压反相，因此发生了截止失真。

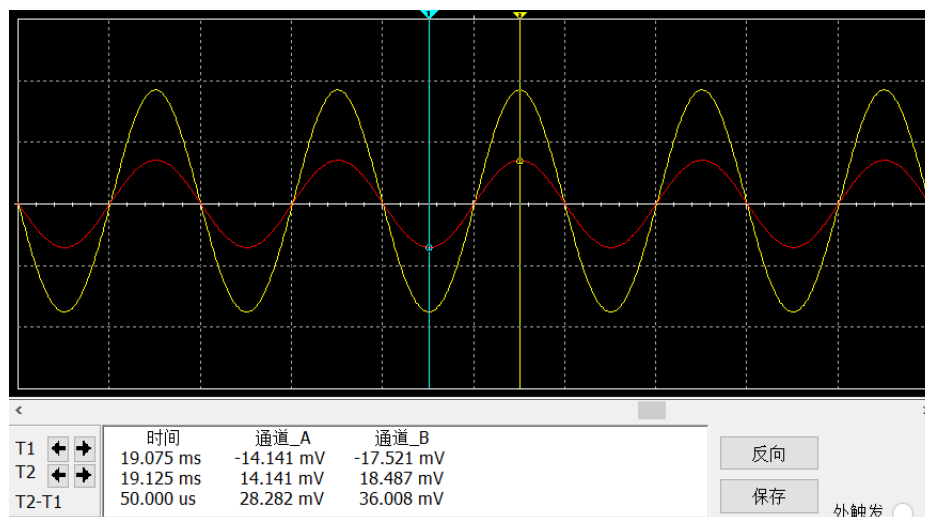


图 9: 失真补偿波形图



图 10: 测量失真率: $R_c = 50k\Omega$ 、 $u_i = 10mV_{rms}$

为了消除截止失真，可增大集电极电阻 R_c 的阻值。将其调整为 $50k\Omega$ 后的输入输出波形如图9所示，利用失真度仪测得的失真率低于2%，可见截止失真被有效改善。

2.2 仿真题2-2

利用晶体管和MOS管设计一个集成运放。晶体管可选用2N2222A和2N3702。MOS管可选用2N7000和BST100。电源电压可选 $\pm 15V$ 。

2.2.1 理论分析

- 输入级(MOS管差分放大电路):

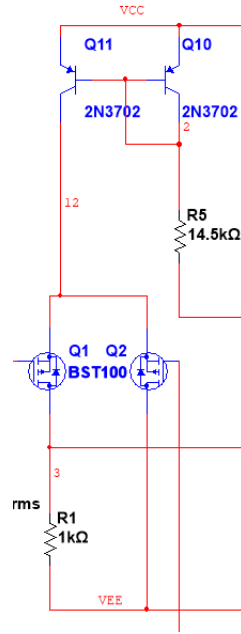


图 11: MOS管差分放大电路

由MOS管BST100构成的差分放大电路如图11所示。该差分放大电路采用双端输入、单端输出，并利用镜像电流源设置静态偏置电流。由镜像电流源的性质可知：

$$I_{C11} \approx I_{R5} = \frac{V_{CC} - V_{EE} - U_{BE}}{R_5} = 2.02mA$$

故而 I_{C11} 作为一个恒定电流源为输入级提供漏极电流，即：

$$I_{DQ1} = I_{DQ2} = 0.5I_{C11} = 1.01mA$$

经测量：

$$U_{GS(th)} =$$

$$I_{DO} =$$

进而可得输入级的动态特性：

$$g_m = \frac{2}{U_{GS(th)}} \sqrt{I_{DQ} I_{DO}} =$$

$$A_u = -\frac{1}{2} g_m R_1 =$$

- 中间级(有源负载共射放大电路):

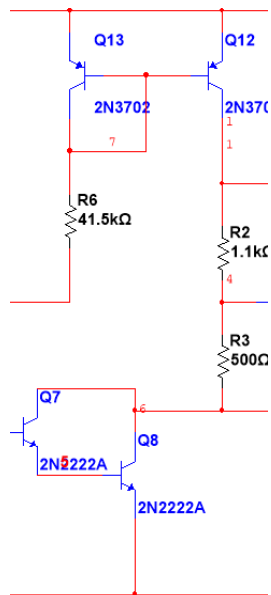


图 12: 有源负载共射放大电路

中间级的有源负载共射放大电路如图12所示。该共射放大电路采用两个 NPN 型晶体管2N2222A组成的复合管结构，并以镜像电流源作为其集电极电阻，大大提高了电压放大倍数。具体参数计算如下：

$$\beta \approx \beta_7 \beta_8 = 4.84 \times 10^4$$

$$I_{C11} \approx I_{R6} = \frac{V_{CC} - V_{EE} - U_{BE}}{R_6} = 706 \mu A$$

- 输出级(准互补输出级电路):

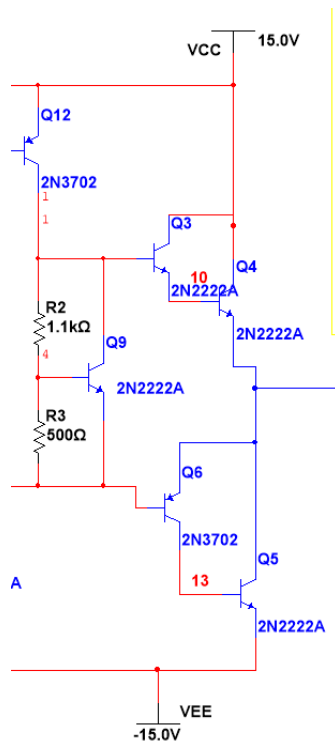


图 13: 准互补输出级电路

输出级的准互补输出级电路如图13所示。该互补输出级电路采用复合管的准互补结构，有效地增大

了电流放大倍数，同时减小了前级驱动电流，其中复合管中的 PNP 管采用2N3702。此外，输出级还采用了 U_{BE} 倍增电路，一方面可以消除交越失真，另一方面可以配合静态偏置电流设置射极输出器的基极电位：

$$U_{B3B6} = U_{BE}(1 + \frac{R_2}{R_3}) = 2.24V$$

2.2.2 测量静态工作点

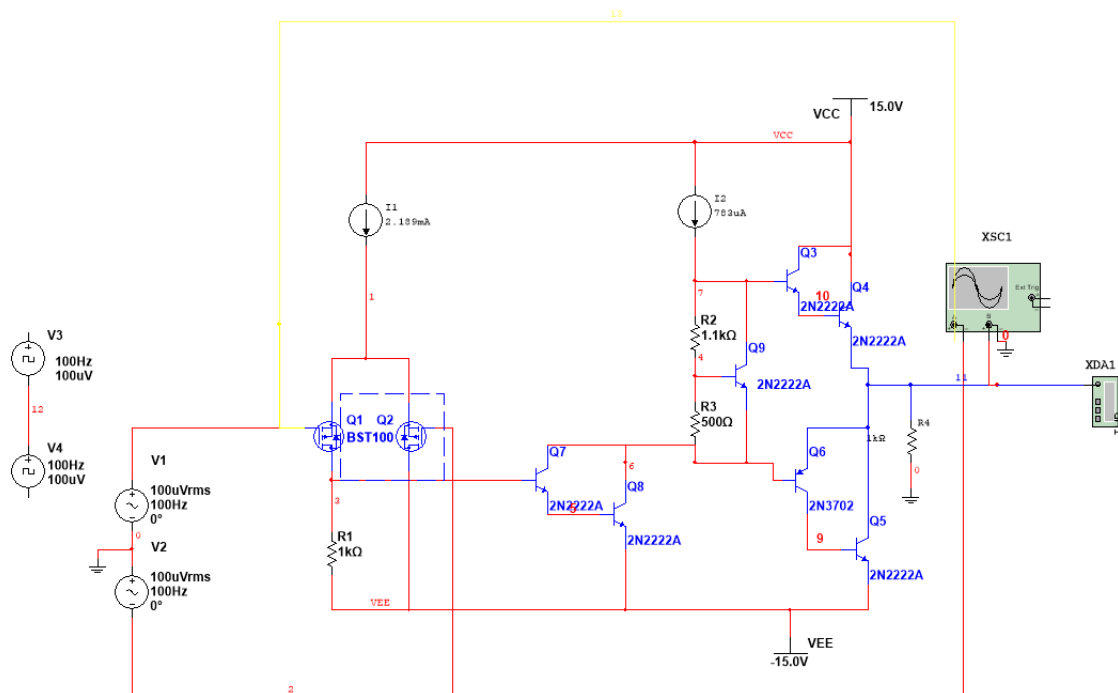


图 14: 集成运放电路图：电流源元件

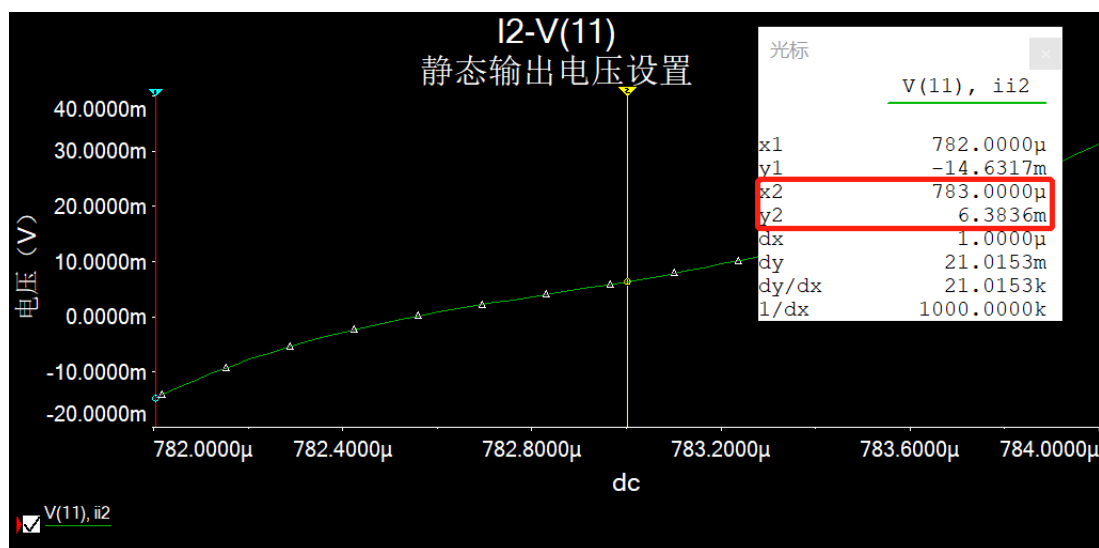


图 15: 设置静态输出电压参数扫描曲线

用电流源元件替代镜像电流源电路，搭建的集成运放仿真电路如图14所示。为保证静态输出电压不超过10mV，可利用multisim的参数扫描功能。固定 $I_1 = 2.189mA$ ，扫描得到不同 I_2 取值下的静态输出电压，由图15中的光标可知，取 $I_2 = 763\mu A$ 可满足要求。接下来测量各级放大电路中放大管的静态工作点：

- 输入级 Q_1 、 Q_2 :

I(Q1:S) I(IDQ1)	1.09450 m
I(Q2:S) I(IDQ2)	1.09450 m
V(1)	2.54739
V(3)	-13.90552
V(vee)	-15.00000

图 16: 测量 Q_1 、 Q_2 静态工作点

输入级 Q_1 、 Q_2 的静态工作点如图16所示。由图可知， $I_{DQ1} = I_{DQ2} = 1.095mA$ 、 $U_{DSQ1} = V(3) - V(1) = -16.45V$ 、 $U_{DSQ2} = V_{EE} - V(1) = -17.55V$ 、 $U_{GSQ1} = U_{GSQ2} = -V(1) = -2.55V$ 。

- 输入级 Q_7 、 Q_8 :

V(5)	-14.38206
V(6)	-393.12576 m
V(vee)	-15.00000
I(Q7[IB])	17.18963 n
I(Q7[IC])	3.34331 u
I(Q8[IB])	3.36054 u
I(Q8[IC])	779.65690 u

图 17: 测量 Q_7 、 Q_8 静态工作点

中间级 Q_7 、 Q_8 的静态工作点如图17所示。由图可知， $I_{BQ7} = 17.19nA$ 、 $I_{BQ8} = 3.36\mu A$ 、 $I_{CQ7} = 3.34\mu A$ 、 $I_{CQ8} = 0.78mA$ 、 $U_{CEQ7} = V(6) - V(5) = 13.99V$ 、 $U_{CEQ8} = V(6) - V_{EE} = 14.61V$ 。

- 输入级 Q_3Q_4 、 Q_5Q_6 :

V(11)	6.38356 m
V(vcc)	15.00000
V(vee)	-15.00000
I(Q3[IB])	259.76461 p
I(Q3[IC])	34.14492 n
I(Q4[IB])	34.40318 n
I(Q4[IC])	7.01881 u
I(Q5[IB])	3.79459 n
I(Q5[IC])	665.43698 n
I(Q6[IB])	466.83123 p
I(Q6[IC])	3.75091 n

图 18: 测量 Q_3Q_4 、 Q_5Q_6 静态工作点

输出级 Q_3Q_4 、 Q_5Q_6 的静态工作点如图18所示。由图可知， $I_{BQ3} = 259.76pA$ 、 $I_{BQ4} = 34.4nA$ 、 $I_{BQ6} = 466.8pA$ 、 $I_{BQ5} = 3.79nA$ 、 $I_{CQ3} = 34.14nA$ 、 $I_{CQ4} = 7.02\mu A$ 、 $I_{CQ6} = 3.75nA$ 、 $I_{CQ5} = 0.67\mu A$ 、 $U_{CEQ34} = V_{CC} - V(11) = 14.99V$ 、 $U_{CEQ56} = V_{EE} - V(11) = -15.01V$ 。

此外还可以知道静态输出电压 $V(11) = 6.38mV$ ，满足设计要求。

2.2.3 测量动态参数

- 放大倍数 A_u :

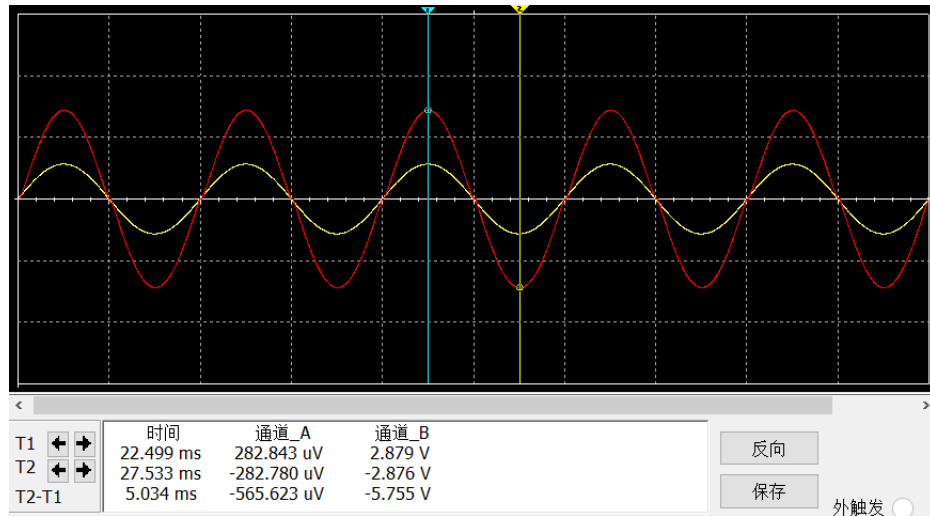


图 19: 测量集成运放放大倍数 A_u



图 20: 测量集成运放输出波形失真度

$$A_u = \frac{5.755}{565.6 \times 10^{-6}} = 10175$$

由图20可知，集成运放输出波形的失真度较低。

- 频率特性 f_{bw} :

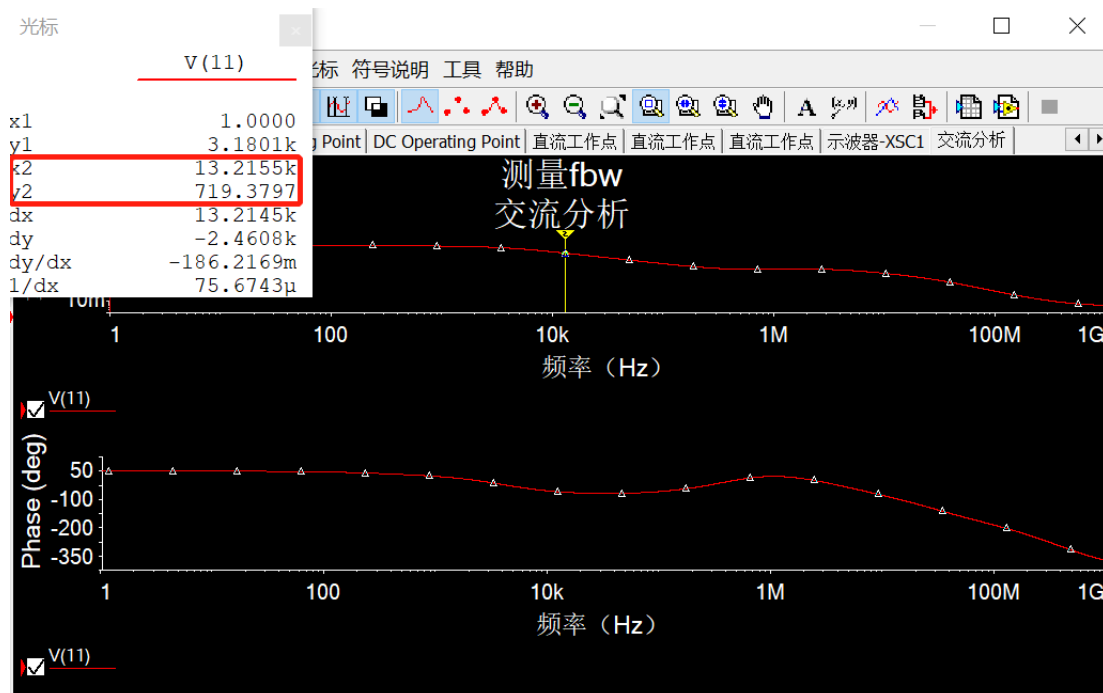


图 21: 集成运放频率特性曲线

利用交流分析得到集成运放的频率特性曲线如图21所示。由图可知，当放大倍数为 $0.707A_u = 7193.8$ 时，可得：

$$f_{bw} = 13.2kHz$$

- 输入失调电压 U_{IO} ：利用静态工作点的测量数据可得输入失调电压：

$$U_{IO} = -\frac{U_O|_{u_I=0}}{A_{od}} = -\frac{6.38mV}{10175} = -6.27 \times 10^{-7}V$$

- 转换速率 SR ：

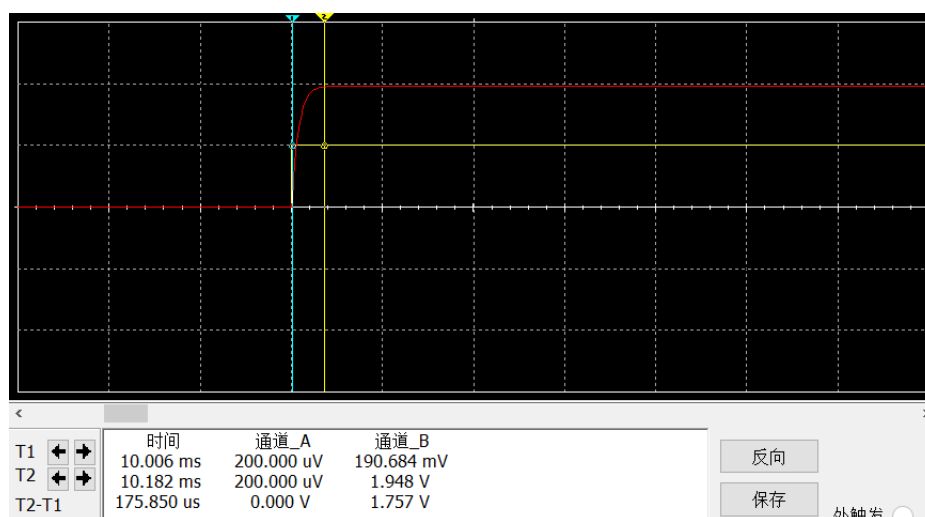


图 22: 测量转换速率波形图

$$SR = \left| \frac{du_o}{dt} \right|_{max} = \frac{1.757V}{175.85\mu s} = 9991.47V/s$$

2.2.4 利用镜像电流源替代电流源元件

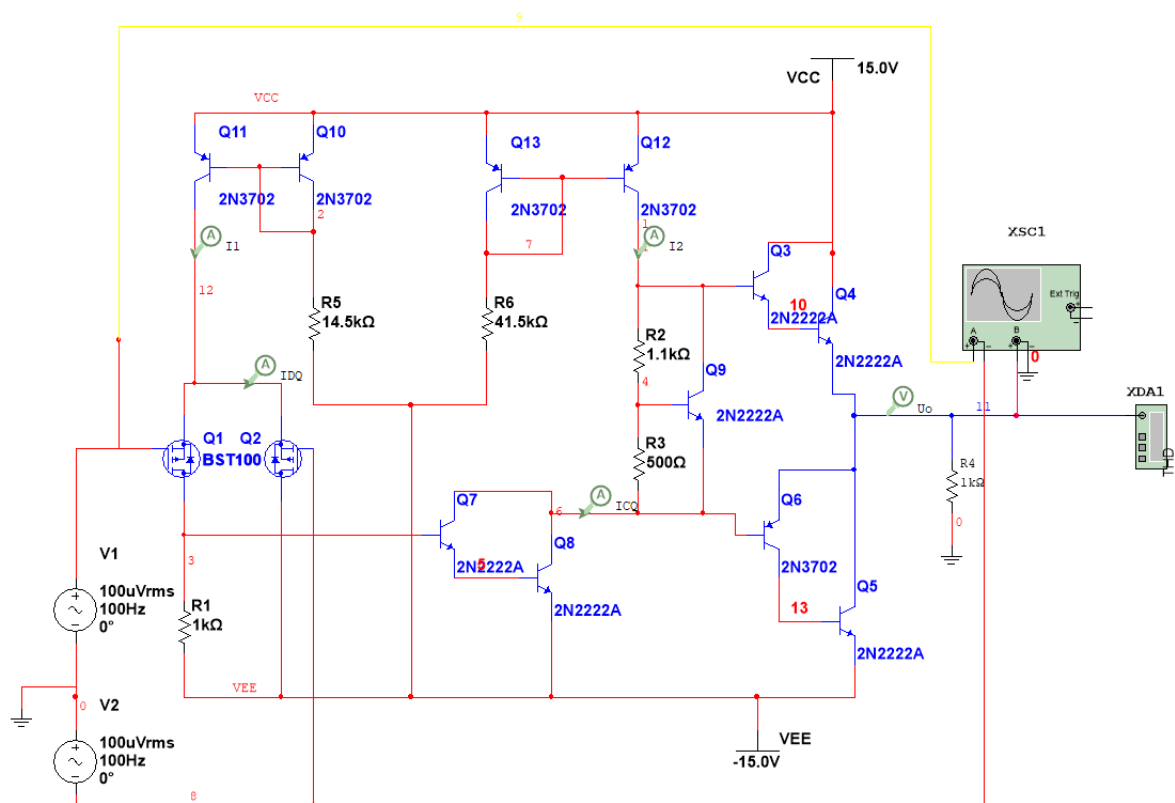


图 23: 集成运放电路图 (镜像电流源)

-I(Q11:C) I(I1)	2.18770 m
-I(Q12:C) I(I2)	774.46340 u
-I(Q8:C)-I(Q7:C) I(ICQ)	-774.46245 u
I(Q2:S) I(IDQ)	1.09385 m
V(11) V(Uo)	33.86267 m
V(1)	966.79031 m
V(6)	-272.19748 m

图 24: 测量静态工作点



图 25: 测量失真度

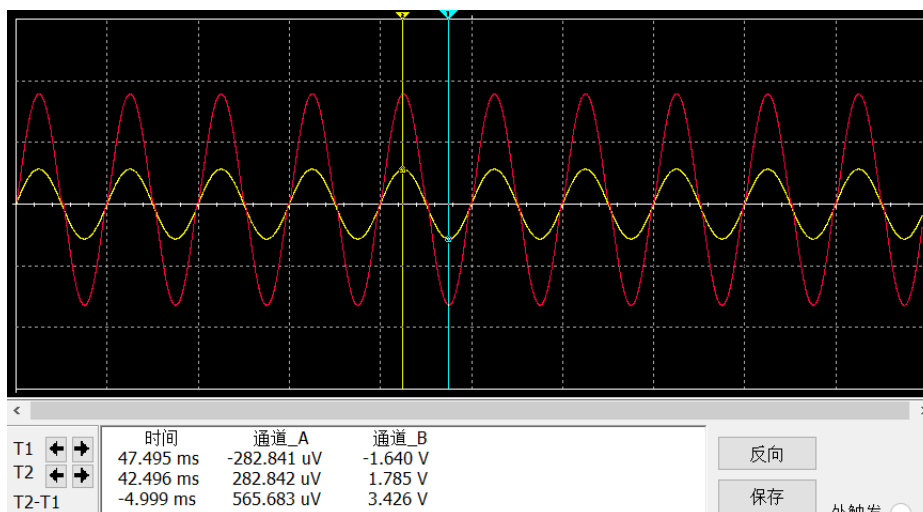


图 26: 测量放大倍数

利用镜像电流源替代电流源元件后，利用参数扫描等功能调节电路参数如图23所示，相关理论计算见前。经测量，整体电路的静态工作点如图24所示，易知静态工作点的设置合理。接下来分别利用失真度分析仪和示波器测量该集成运放的输入输出波形及输出的失真度，可知：

$$A_u = \frac{3.426}{565.7 \times 10^{-6}} = 6056$$

且失真度 $\approx 5\%$ ，故而该参数设置下，电路能正常放大输入信号。

2.3 仿真题2-3

设计一个电路将幅值为 $10mV$ 左右、频率为 $20Hz$ 至 $20kHz$ 、内阻为 $1k\Omega$ 的语音信号放大 50 倍，作用在负载扬声器(32Ω ，用电阻代替)上。

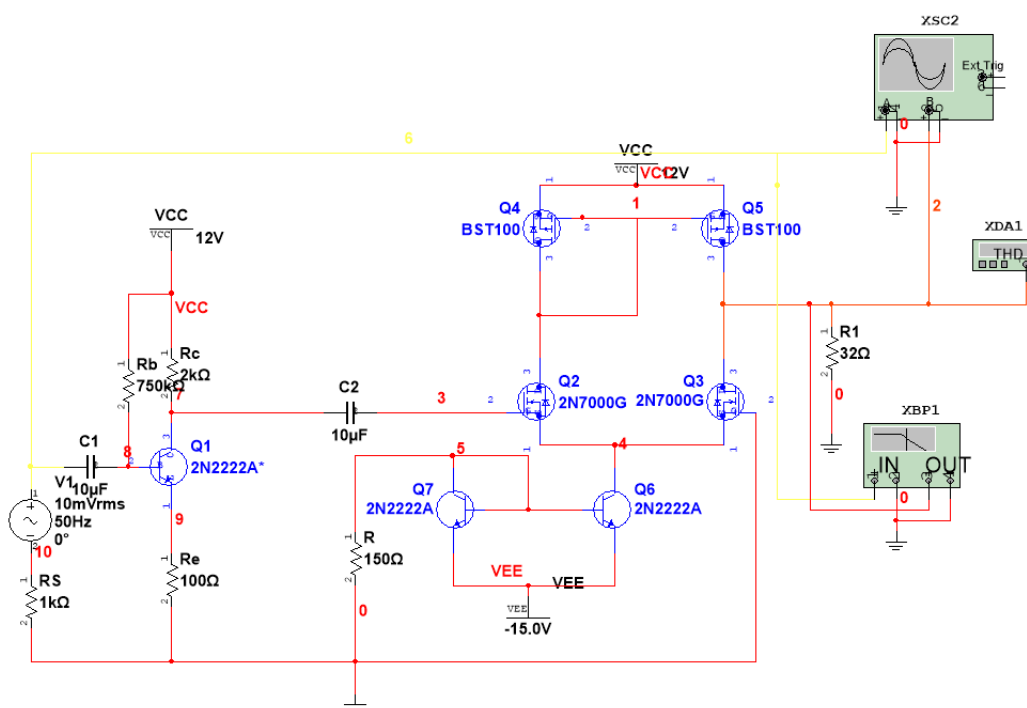


图 27: 选做电路图

选做电路如图27所示，设计采用两级放大电路。第一级为共射放大电路，承担主要的电压放大工作。第二级为场效应管构成的差分放大电路，采用场效应管构成的镜像电流源作为其有源负载，一方面能将单端输出的放大倍数增大为原来的两倍，另一方面保证输出的静态电流 ≈ 0 ，从而实现负载静态功耗约为零。此外，该级电路还利用镜像电流源电路设置静态电流。两级电路采用阻容耦合的方式，使得静态工作点相互影响的程度较小。

接下来对设计电路的静态工作点和动态参数进行测量验证：

• 静态工作点 Q ：

I(Q2:D) I(IDQ)	50.00639 m
I(XBP1:3)+I(RL:1)+I(XSC2:2)+I(XDA1:1) I(IQ)	121.08589 p
V(3)-V(4)	2.59108
V(7)-V(9)	5.01512
I(Q1[IB])	14.67374 u
I(Q1[IC])	3.32544 m
I(Q6[IC])	100.01278 m

图 28: 测量静态工作点

$$\begin{cases} I_{BQ1} = 14.67\mu A \\ I_{CQ1} = 3.33mA \\ U_{CEQ1} = 5.02V \\ I_{DQ} = \frac{1}{2}I_{CQ6} = 50mA \\ U_{GSQ} = 2.59V \end{cases} \quad (1)$$

此外，由测量结果知静态负载电流 $I_{RL} = 121pA$ ，因此可认为负载静态功耗约为零。

• 放大倍数 A_u ：

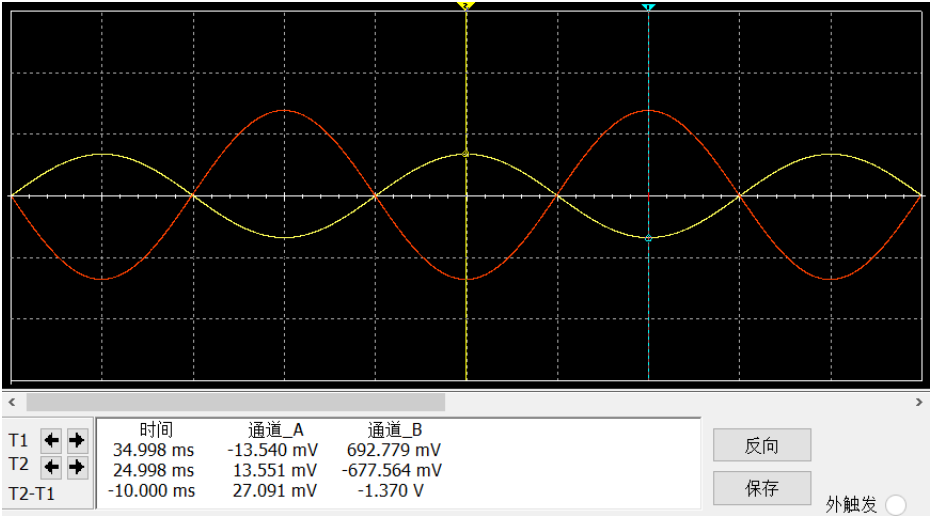


图 29: 测量放大倍数

$$A_u = \frac{1.370}{27.091 \times 10^{-3}} = 50.57$$

- 失真度:



图 30: 测量失真度

测得输出波形的失真度小于0.2%，可见电路参数设置较为合理。

- 频率特性 f_{bw} :

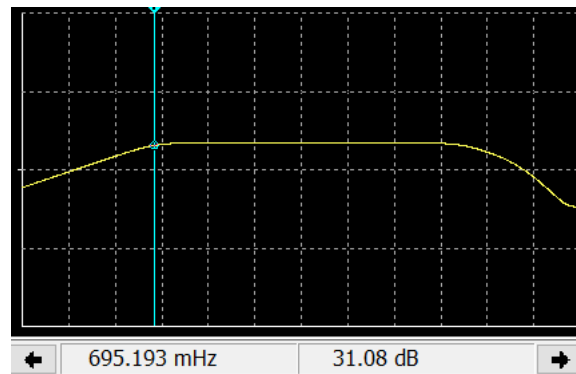


图 31: 下限截止频率 f_L

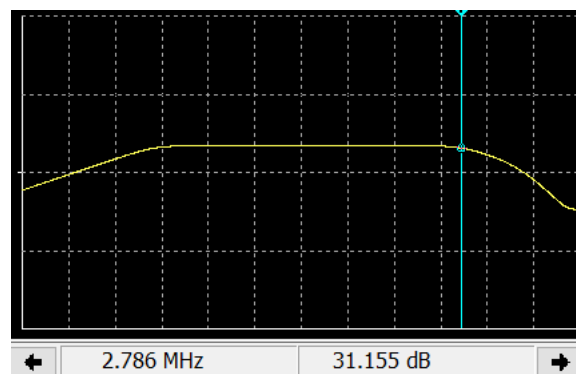


图 32: 上限截止频率 f_H

$$f_{bw} = f_H - f_L = 2.786MHz - 695.2mHz \approx 2.786MHz$$

因此，对于频率为 $20Hz - 20kHz$ 频率范围内的输入信号，电路均处于合适的放大状态。

3. 仿真小结