

模拟电子技术基础

仿真报告

(2020 - 2021 学年度 春季学期)

实验名称 第二次仿真作业

姓名	<u>刘祖炎</u>
学号	<u>2019010485</u>
院系	<u>自动化系</u>
教师	<u>叶朝辉</u>
时间	<u>2021 年 4 月 9 日</u>

目录

1	实验目的	1
2	仿真题 2-1	1
2.1	电路设计	1
2.2	静态工作点分析与测量	2
2.3	动态性能指标的改善	3
2.4	失真的产生与消除	5
3	仿真题 2-2	7
3.1	电路设计	7
3.1.1	输入级 (MOS 管差分放大电路)	8
3.1.2	中间级 (有源负载共射放大电路)	8
3.1.3	输出级 (准互补输出级电路)	9
3.2	静态工作点测量	10
3.2.1	输入级	10
3.2.2	中间级	11
3.2.3	输出级	12
3.3	动态参数测量	12
3.3.1	放大倍数 \dot{A}_u	12
3.3.2	频率特性 f_{bw}	14
3.3.3	输入失调电压 U_{IO}	15
3.3.4	转换速率 SR	15
3.4	镜像电流源替代探究	16
4	仿真题 2-3	18
4.1	电路设计	18
4.2	静态工作点分析与设置	19
4.3	工作特性	20
5	仿真中遇到的问题及解决方法	22
6	收获与体会	23

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。

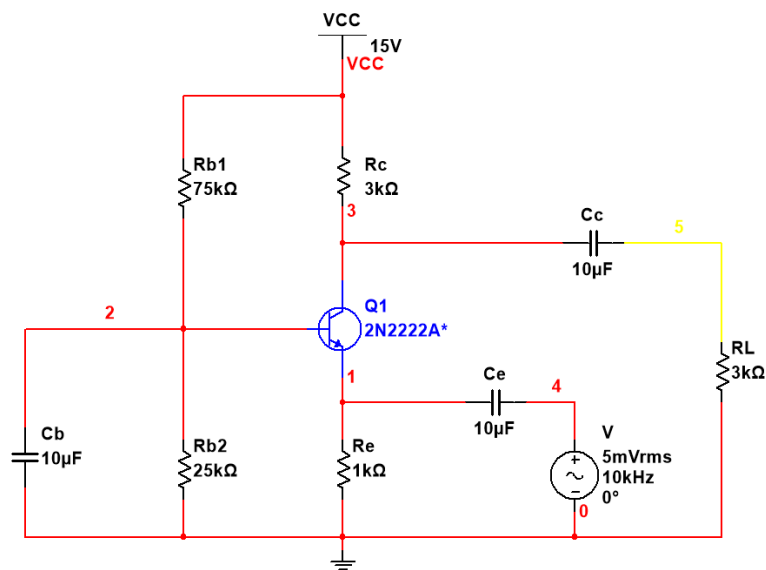
2. 仿真题 2-1

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 $V_{CC} = +15V$ 。

2.1 电路设计

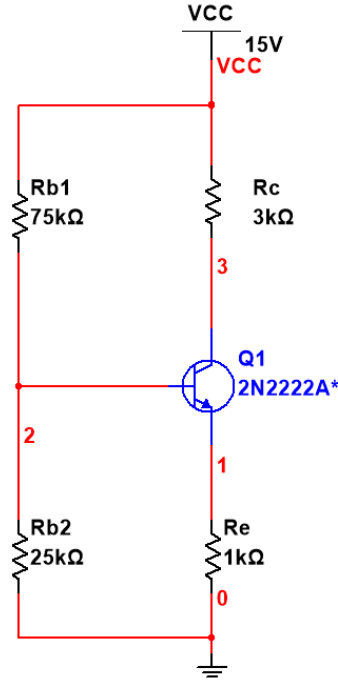
选用晶体管 2N2222A 搭建单管共基放大电路，电路图如图1所示。(设置晶体管 $\beta = 220$, $r_{bb'} = 220\Omega$)。

图 1: 单管共基放大电路



2.2 静态工作点分析与测量

图 2: 单管共基放大电路直流通路



进行理论计算，作出图1的直流通路，如图2所示。由电路图2进行理论计算可得：

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

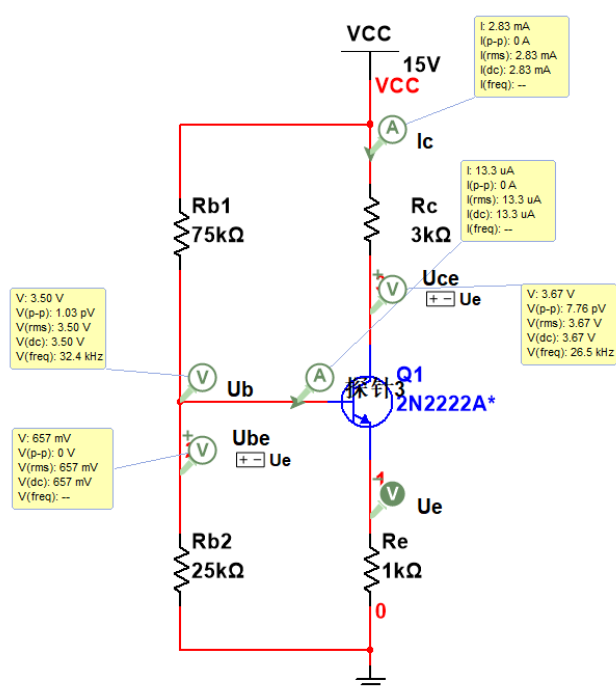
为使发射极正偏，集电极反偏，晶体管工作在放大状态，不妨取 $V_{CC} = 15V$, $R_{b1} = 75k\Omega$, $R_{b2} = 25k\Omega$, 从而 $U_{BQ} = 3.75V$ 。由此，取 $R_c = 3k\Omega$, $R_e = 1k\Omega$ ，设 $U_{BEQ} = 0.7V$ ，求解静态工作点，可得：

$$\begin{cases} U_{BQ} = 3.75V \\ I_{BQ} = 12.7\mu A \\ I_{CQ} = 2.80mA \\ U_{CEQ} = 3.79V \end{cases} \quad (2)$$

验证可知，发射极正偏，集电极反偏，电路工作在放大状态。

对电路进行仿真，仿真结果如图3所示。

图 3: 静态工作点仿真结果



$$\begin{cases} U_{BQ} = 3.50V \\ I_{BQ} = 13.3\mu A \\ I_{CQ} = 2.83mA \\ U_{CEQ} = 3.67V \\ U_{BEQ} = 0.657V \end{cases} \quad (3)$$

计算得 $\beta \approx 213$, 符合设定 $\beta = 220$, 且仿真结果与理论计算值相似, 故该参数取值合适。

2.3 动态性能指标的改善

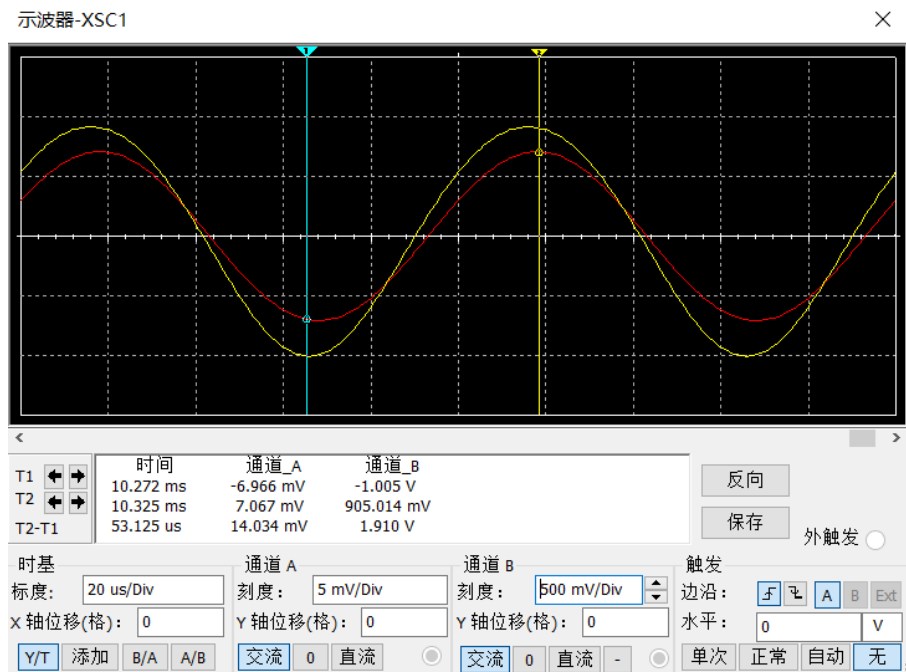
尝试改善电路的电压放大倍数 \dot{A}_u 。根据电路图1可计算电路的电压放大倍数:

$$r_{be} = r_{bb'} + \frac{U_T}{I_{BQ}} = 220\Omega + \frac{26mV}{13.3\mu A} = 2.175k\Omega$$

$$\dot{A}_u = \frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be}} = 151.72$$

对电压放大倍数进行测量, 利用示波器显示电路的输入、输出波形, 波形如图4所示。

图 4: 测量 $\dot{A}_u(R_c = 3k\Omega)$



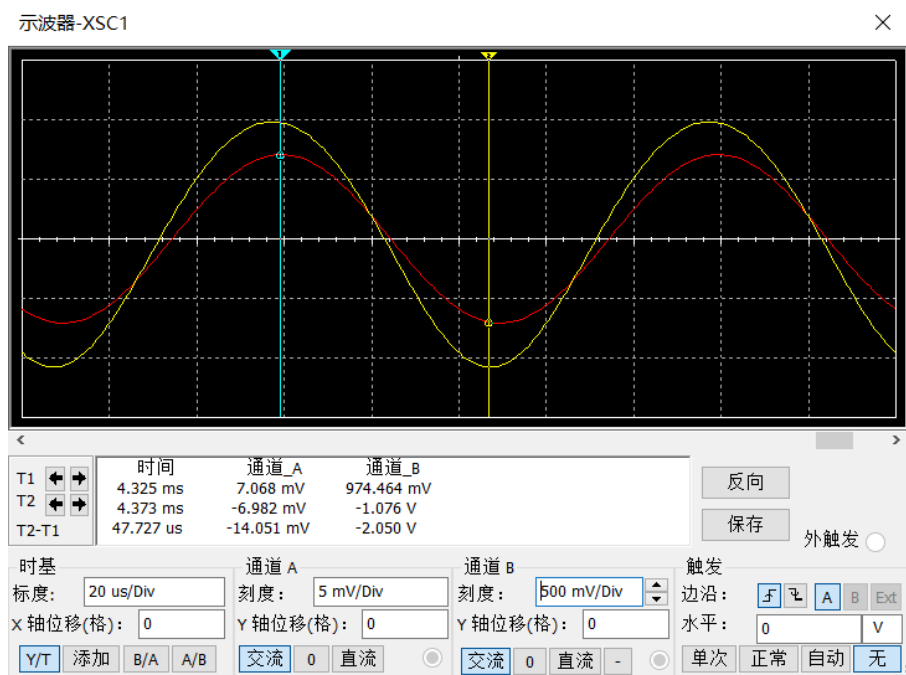
由图可知:

$$\dot{A}_u = \frac{U_o}{U_i} = \frac{1.005V}{7.067mV} = 142.21$$

仿真测得的放大倍数与理论计算相似, 故电路工作正常。

由理论表达式可知, 增大 R_c 的值可增大电压放大倍数 \dot{A}_u 的值。因此, 考虑将 R_c 增大为 $3.5k\Omega$, 再次进行仿真, 仿真波形如图5所示。

图 5: 测量 $\dot{A}_u(R_c = 3.5k\Omega)$



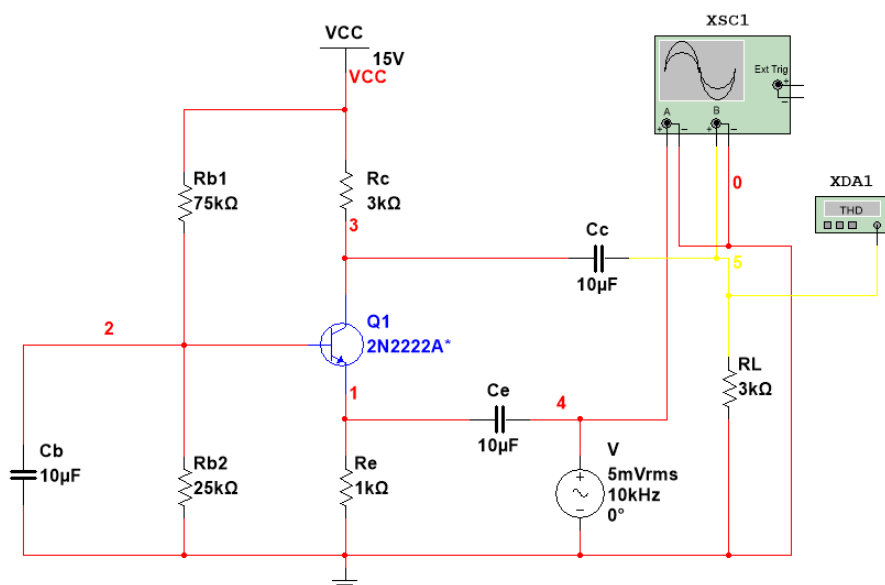
由图可知:

$$\dot{A}_u = \frac{U_o}{U_i} = \frac{1.076V}{7.068mV} = 152.23$$

比较可知，电压放大倍数增大，且由观察及失真分析仪可知电路失真未明显增大。因此，在一定范围内增大 R_c 的阻值，可增大共基放大电路的电压放大倍数。

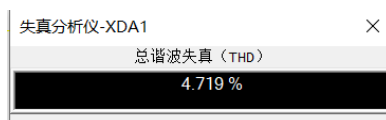
2.4 失真的产生与消除

图 6: 测量失真度电路图



当电路正常工作时，如图6所示接入失真分析仪，利用失真分析仪对电路进行分析，示数如图7所示，失真度为 $4.719\% < 15\%$ ，可以认为电路基本未发生失真。

图 7: 正常工作时失真度测量



增大输入信号 u_i 的有效值从 $5mV$ 至 $15mV$ ，此时示波器波形如图8所示。可以明显发现，输出波形发生了顶部失真。此时，失真分析仪示数如图9所示，失真度为 14.135% ，相比正常情况有明显增大。

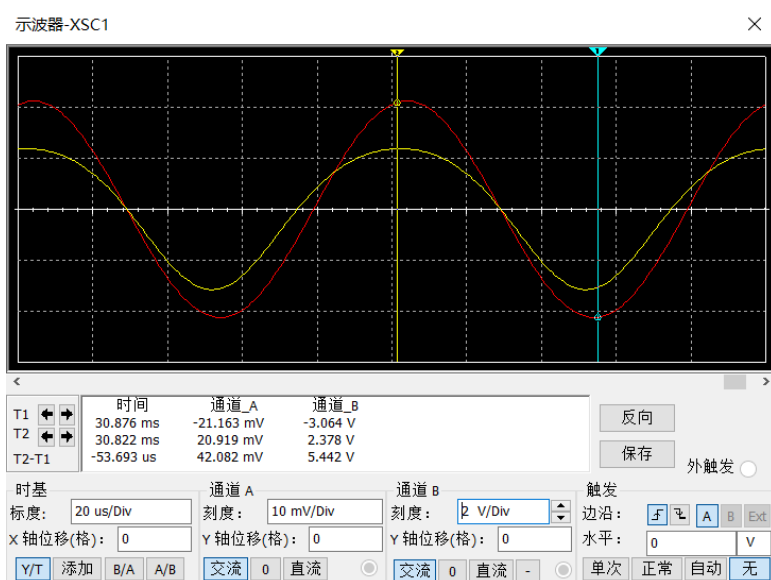


图 8: 失真波形图

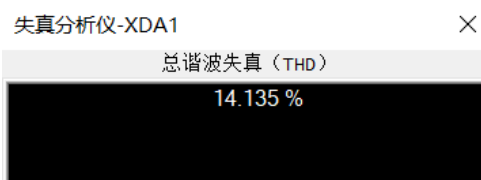


图 9: 失真分析仪示数

由于晶体管集电极电流与输出电压为反相关系, 故可知晶体管此时发生了截止失真。根据图解法对输入回路、输出回路进行理论分析, 可知增大 R_c 的阻值、减小基极电阻 R_b 以增大电流 I_c 可有效消除截止失真。当增大 $R_c = 50k\Omega$ 时, 观察到示波器波形如图10、失真分析仪示数如图11所示, 失真度为 4.726%, 可知失真得到了消除。减小基极电阻 $R_b = 20k\Omega$ 时, 观察到示波器波形如图12所示, 失真分析仪示数如图13所示, 失真度为 2.465%, 可知失真得到了消除。

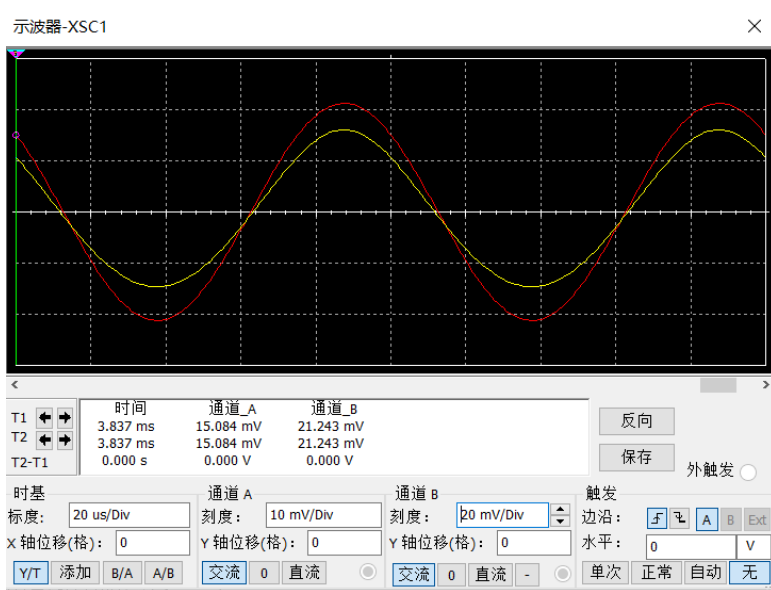


图 10: 通过调节 R_c 改善失真波形图

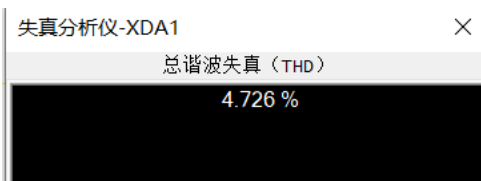


图 11: 通过调节 R_c 改善失真失真分析仪示数

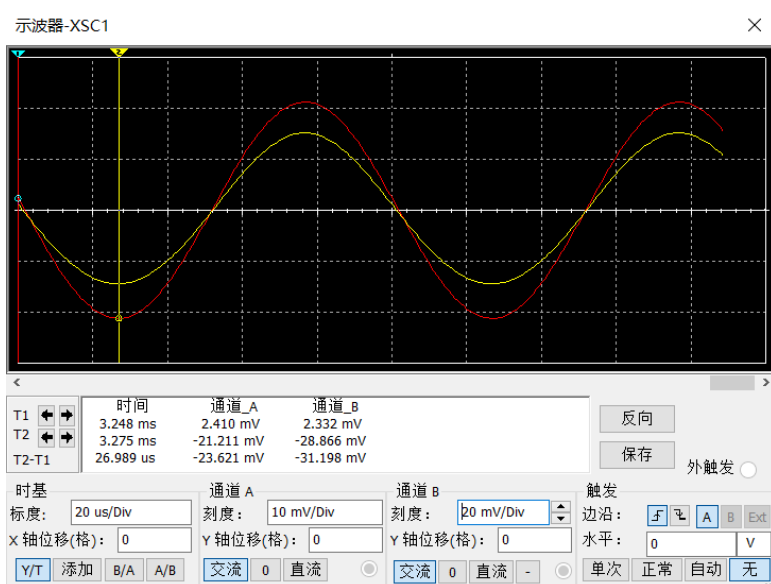


图 12: 通过调节 R_b 改善失真波形图

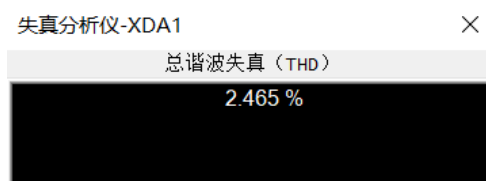


图 13: 通过调节 R_b 改善失真失真分析仪示数

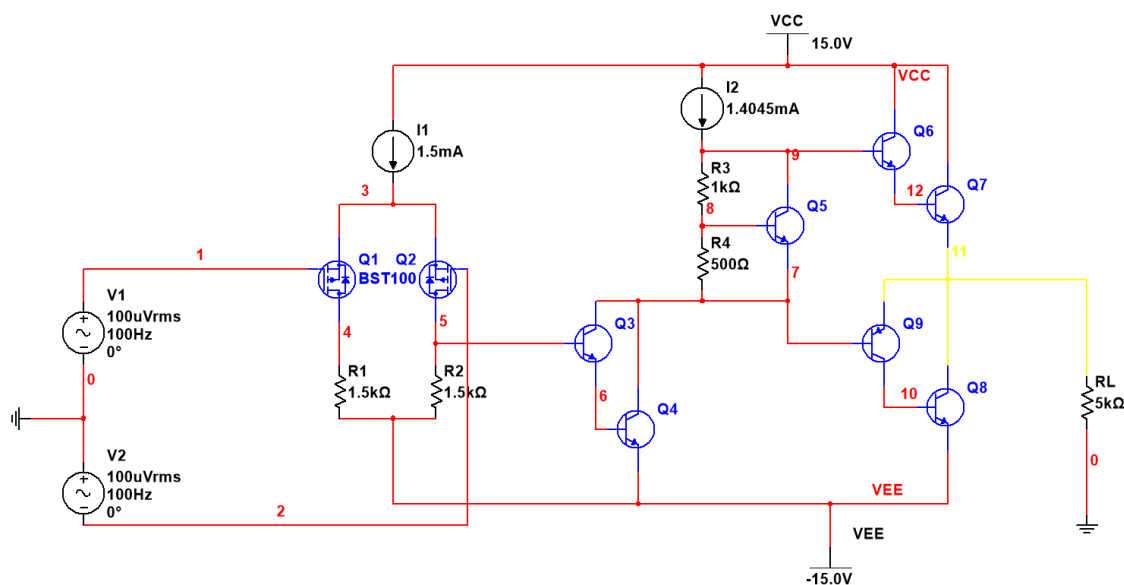
3. 仿真题 2-2

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 $\pm 15V$

3.1 电路设计

总设计电路图如图14所示。该集成运放可分为输入级、中间级、输出级三部分，下分别进行说明。

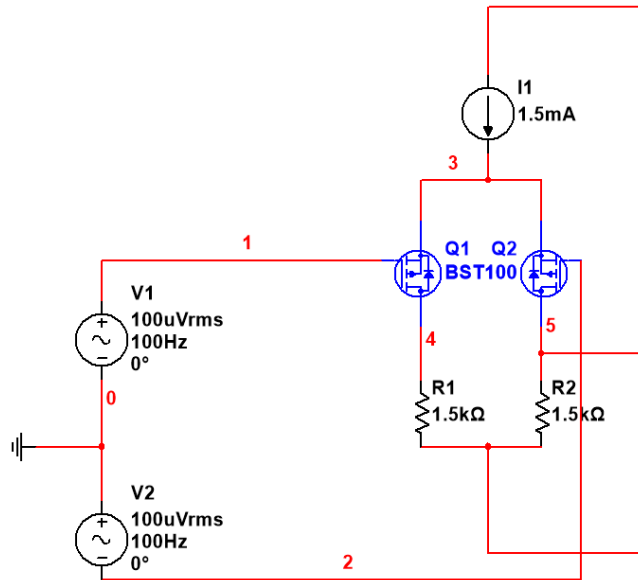
图 14: 集成运放设计电路图



3.1.1 输入级 (MOS 管差分放大电路)

输入级设计 MOS 管差分放大电路，如图15所示。该电路采用双端输入、单端输出设计，并利用恒流源 I_1 为 MOS 管提供静态工作电流，提高电路对共模信号的抑制能力。设置信号源大小为 $100\mu V$ ，频率为 $100Hz$ 。

图 15: 输入级电路图



由 MOS 正常工作时 DS 极的电流范围，不妨令恒流源 $I_1 = 1.5mA$ 。由电路的对称性，流过 MOS 管 Q1、Q2 的电流均为 $I_{DQ} = 750\mu A$ 。根据电路设计，MOS 管 Q2 的漏极连接下一级共射放大电路，故需要考虑中间级对输入级电位的要求。中间级由复合管组成的共射放大电路组成，由于复合管集电极电流约为 mA 量级，因而复合管基极电流应为 nA 量级。分析可知，考虑输入级与中间级连接的 MOS 管 Q2，其漏极电位应略低于复合管基极电位。

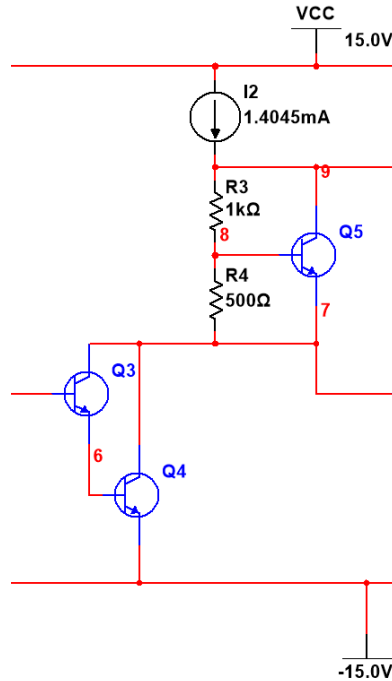
当复合管发射极正偏时，根据仿真题 2-1 中测量得 $U_{BEQ} \approx 0.657V$ ，可得 $U_{DQ2} = -15 + 0.657 \times 2 = -13.686V$ 。因此，可得电阻 R_2 的阻值约为 $\frac{1.314V}{750\mu A} = 1.75k\Omega$ 。考虑漏极电位略低于复合管基极电位，并由对称性，可取 $R_2 = R_1 = 1.5k\Omega$ 。

由于中间级复合管基极电流约为 nA 级别，其对输入级的静态工作点几乎无影响。

3.1.2 中间级 (有源负载共射放大电路)

中间级设计有源负载共射放大电路，如图16所示。该电路采用两个 2N2222A 晶体管接成复合管以增大集成运放的电压放大倍数，构成共射放大电路，由电流源 I_2 为复合管集电极提供电流。

图 16: 中间级电路图



理论上，中间级复合管的 $\beta \approx \beta_{Q3}\beta_{Q4} = 4.84 \times 10^4$ 。

由于复合管基极电流约为 nA 量级，故其集电极电流约为 mA 量级。实际调节时，可根据基极电流的实际大小，根据晶体管的放大倍数计算晶体管处于放大状态时的集电极电流。由于集电极电流由电流源 I_2 提供，故根据计算结果调节电流源 I_2 的值即可。实验中，根据题目对静态输出电压的要求，经过调节可得 $I_2 = 1.4045mA$ 时，可为集电极提供适当的电流，复合管工作在放大状态，且满足静态输出电压不大于 $10mV$ 。

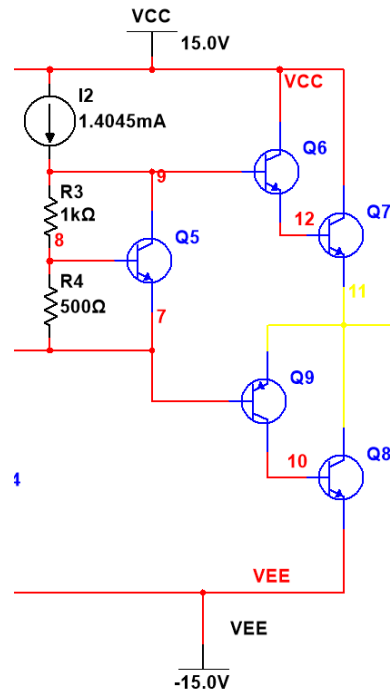
需要说明的是，经过分析可知，输出级与中间级相连部分的电流均为 μA 量级，故准互补电路对中间级电流几乎无影响。

考虑到输出级 U_{BE} 倍增电路的要求，可取 $R_3 = 1k\Omega$ ， $R_4 = 500\Omega$ 。

3.1.3 输出级 (准互补输出级电路)

输出级设计准互补输出级电路，设计 U_{BE} 倍增电路消除交越失真，电路图如图17所示。

图 17: 输出级电路图

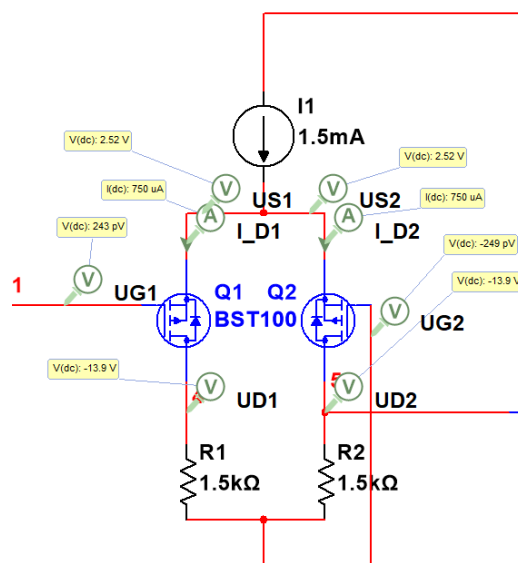


3.2 静态工作点测量

根据设计电路时对电路参数的分析和估算，对电路实际仿真时的静态工作点进行测量，并根据测量结果进一步微调电路各元件的参数值。

3.2.1 输入级

图 18: 输入级静态工作点仿真结果



输入级静态工作点仿真结果如图18所示。

对仿真结果进行整理，可得表1：

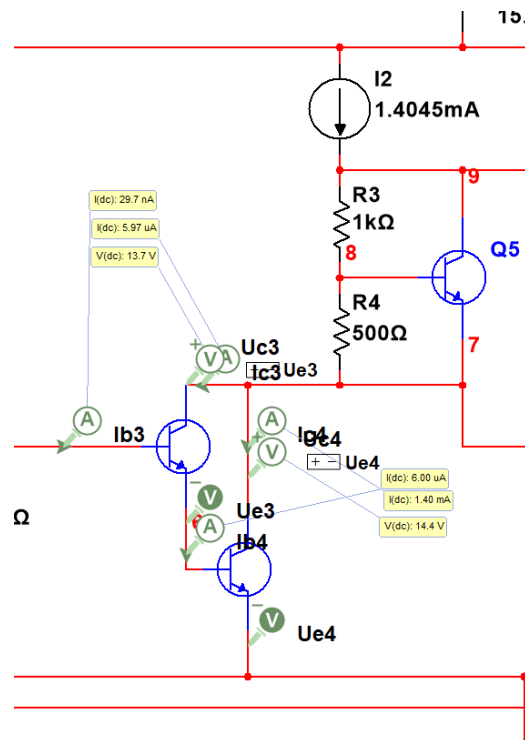
表 1: 输入级静态工作点仿真结果

晶体管	I_{DQ}	U_S	U_D	U_G	U_{DS}	U_{GS}
Q_1	$750\mu A$	$2.52V$	$-13.9V$	$0V$	$-16.4V$	$-2.52V$
Q_2	$750\mu A$	$2.52V$	$-13.9V$	$0V$	$-16.4V$	$-2.52V$

由仿真结果可知，输入级差分放大电路对称，MOS 管 BST100 工作在恒流区，漏极电位与理论估算接近。

3.2.2 中间级

图 19: 中间级静态工作点仿真结果



中间级静态工作点仿真结果如图19所示，对仿真结果进行整理，可得表2:

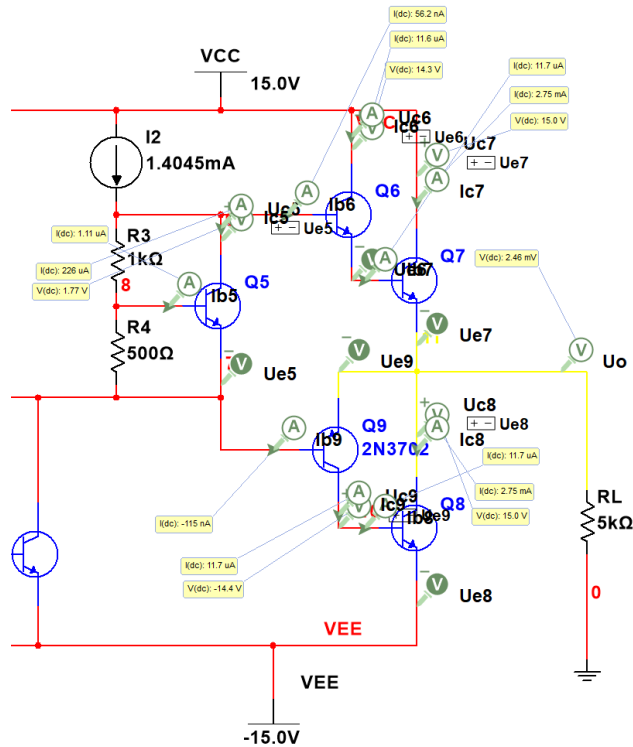
表 2: 中间级静态工作点仿真结果

晶体管	I_{BQ}	I_{CQ}	U_{CEQ}
Q_3	$29.7nA$	$5.97\mu A$	$13.7V$
Q_4	$6.00\mu A$	$1.40mA$	$14.4V$

由仿真结果可知，复合管电流关系合理，两管均工作在放大状态。

3.2.3 输出级

图 20: 输出级静态工作点仿真结果



输出级静态工作点仿真结果如图20所示，对仿真结果进行整理，可得表3：

表 3: 输出级静态工作点仿真结果

晶体管	I_{BQ}	I_{CQ}	U_{CEQ}
Q_5	$1.11\mu A$	$226\mu A$	$1.77V$
Q_6	$56.2nA$	$11.6\mu A$	$14.3V$
Q_7	$11.7\mu A$	$2.75mA$	$15.0V$
Q_8	$11.7\mu A$	$2.75mA$	$15.0V$
Q_9	$115nA$	$11.7\mu A$	$-14.4V$

由仿真结果可知，各晶体管电流关系合理，均工作在发射极正偏，集电极反偏的放大状态。此外，由仿真结果可知静态输出电压 $U_O = 2.59mV < 10mV$ ，电路静态功耗接近 0，满足仿真要求。

3.3 动态参数测量

3.3.1 放大倍数 \dot{A}_u

设置信号源大小为 $100\mu V$ ，频率为 $100Hz$ 。如图21所示连接示波器测量，示波器显示波形如图22所示。

图 21: 放大倍数测量电路

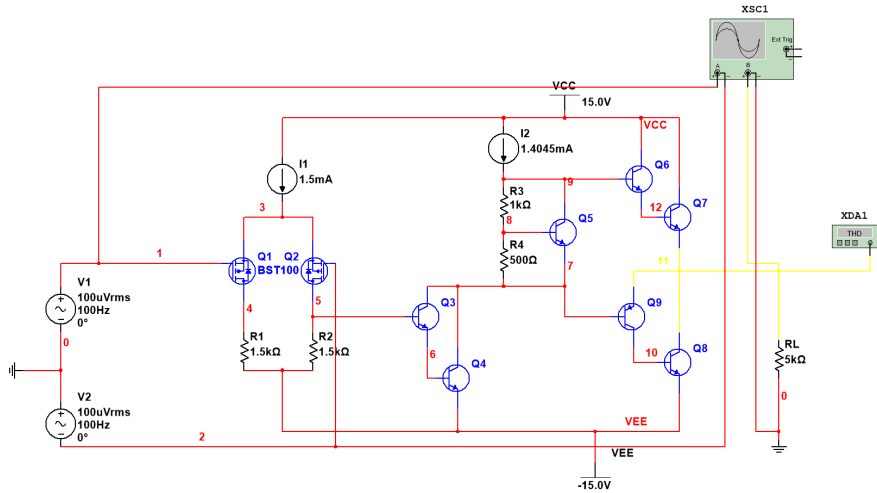
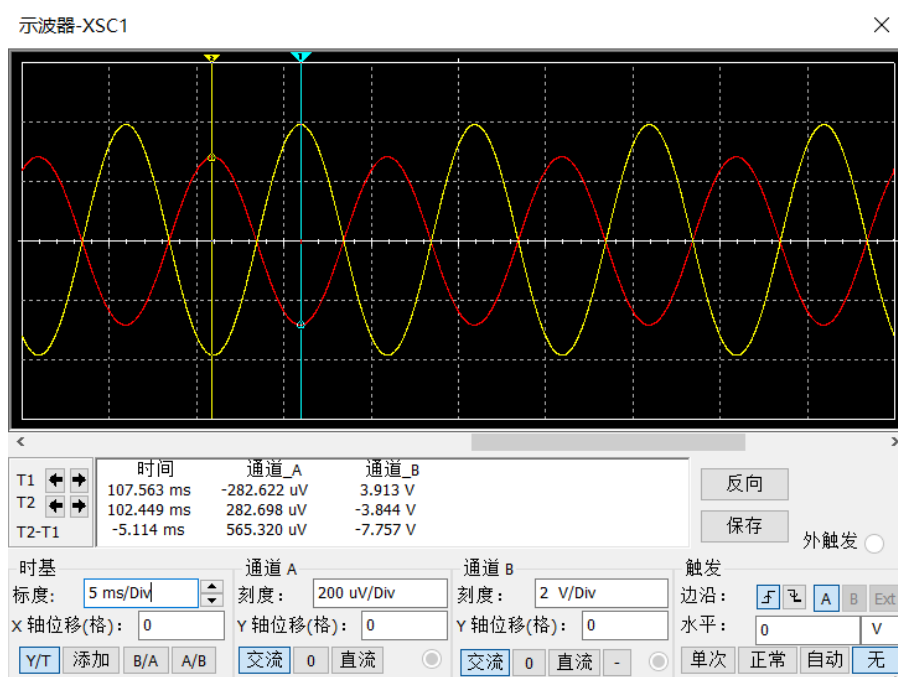


图 22: 电压放大倍数 \dot{A}_u 测量波形



根据测量波形，可计算电压放大倍数

$$\dot{A}_u = \frac{U_o}{U_i} = \frac{-3.913V}{282.698\mu V} = -13841$$

满足 $|\dot{A}_u| > 5000$ 的要求，符合题意。

此时，如图23所示，利用失真分析仪可测得失真度为 0.844%，说明波形几乎不发生失真，质量较高。

图 23: 失真分析仪测量结果



3.3.2 频率特性 f_{bw}

如图24所示，正确连接波特仪，波特仪测量结果如图25所示。

图 24: 频率特性测量电路

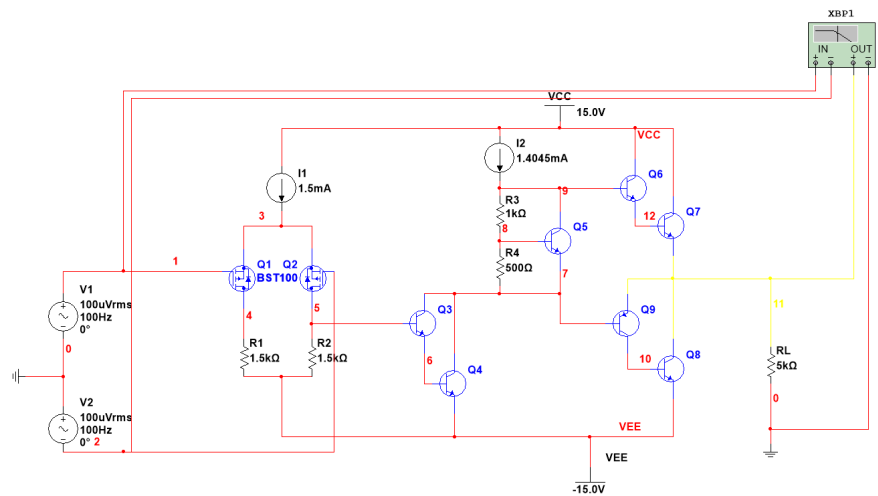
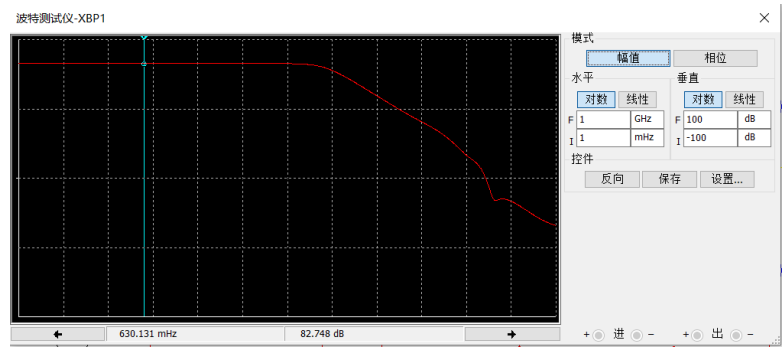


图 25: 集成运放频率特性



根据频率特性，可得电路最大幅频为 82.748dB ，由此，取幅频为 79.748dB 的点，可测量得上限截止频率 f_H 、下限截止频率 f_L ，测量结果如图26、27所示。

图 26: 集成运放上限截止频率

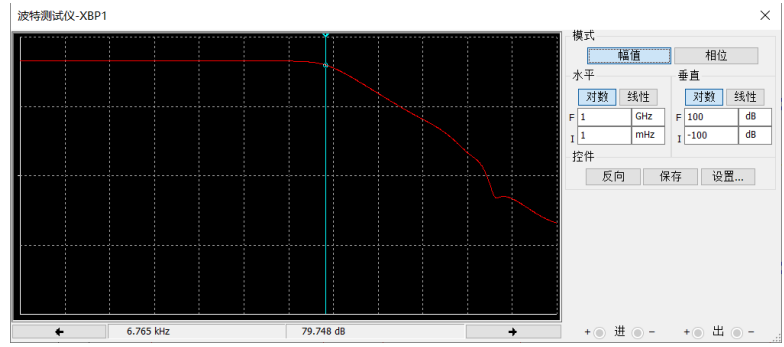
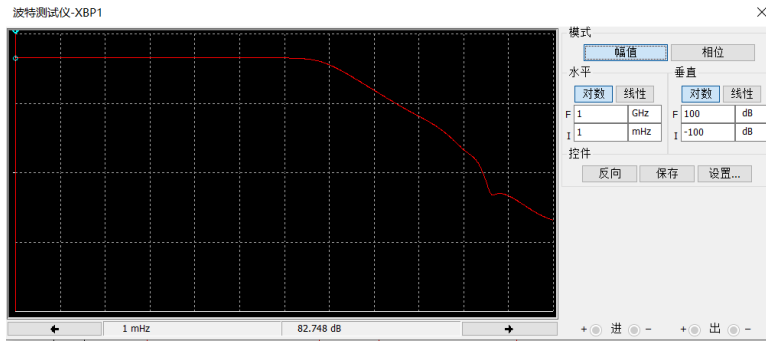


图 27: 集成运放下限截止频率



由测量结果可知，集成运放的上限截止频率 $f_H = 6.765kHz$ ；当 $f_L = 1mHz$ 时，电路幅频仍未减小 ($1mHz$ 为波特仪所支持的最低频率)。因此，集成运放带宽窄，不可用于放大高频信号，但低频特性好，可用于放大直流信号。

3.3.3 输入失调电压 U_{IO}

由静态工作点部分测得的静态输出电压 $U_O = 2.59mV$ ，可计算集成运放的输入失调电压：

$$U_{IO} = -\frac{U_O|_{U_I=0}}{\dot{A}_u} = \frac{2.59mV}{-13841} = 0.187\mu V$$

其值满足题目设计要求。

3.3.4 转换速率 SR

将输入信号改为幅值较大的方波信号以测量集成运放的转换速率。取频率 $f = 100Hz$ ，幅值 $U = 300\mu V$ 的方波信号，测量电路图如图28所示，测量结果如图29所示。

图 28: 转换速率测量电路

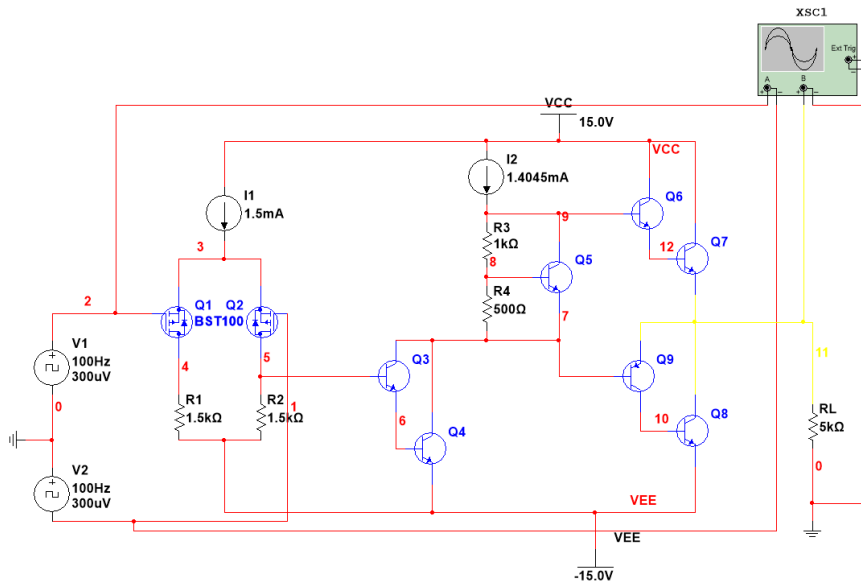
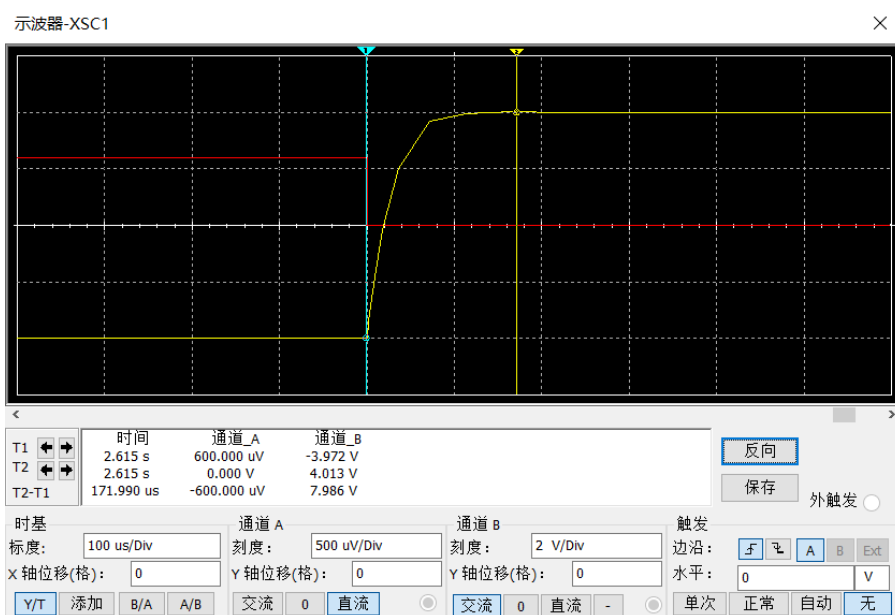


图 29: 转换速率测量结果

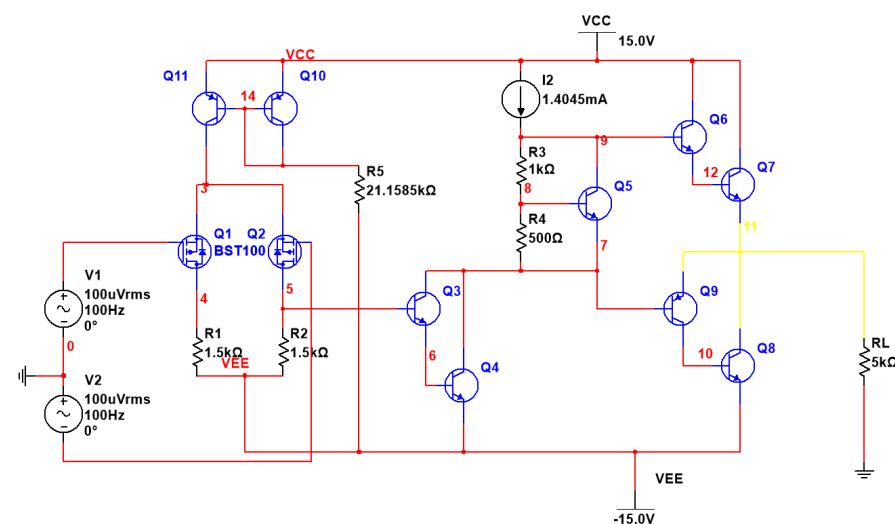


观察测量结果可知，当方波信号变化后，输出信号呈积分特性变化。读取图中光标数据可知，从输入信号变化至输出信号变化完成共间隔 $171.990\mu s$ ，且输出电压变化值为 $7.986V$ ，故可求得转换速率 SR ：

$$SR = \frac{7.986V}{171.990\mu s} = 46.43V/ms$$

3.4 镜像电流源替代探究

图 30: 镜像电流源电路图



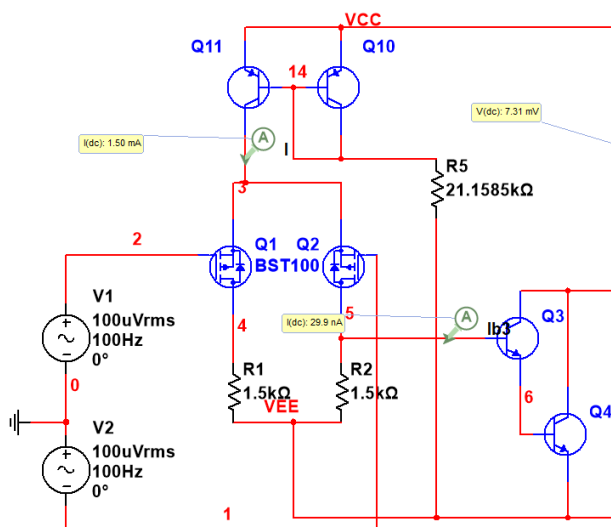
镜像电流源电路图如图30所示。将电流源 I_1 用 2N3702 晶体管 Q10、Q11 代替，并结合电阻 R_5 构成镜像电流源。对相关参数进行理论估算，根据此前电路进行替代，镜像电流源提供的电流 $I_{C(Q11)}$ 应为 $1.5mA$ ，因而

$$I_{C(Q11)} \approx I_{R5} = \frac{V_{CC} - V_{EE} - U_{BEQ}}{R_5} = 1.5mA$$

由此解得 R_5 的阻值大约为 $19.53k\Omega$ 。

通过电流探针监测 $I_{C(Q11)}$ 支路的电流，不断调节 R_5 的阻值直至电流值为 $1.5mA$ 。实际实验中，调节 $R_5 = 21.1585k\Omega$ 时，满足 $I = 1.5mA$ ，且中间级基极电流 $I_{b(Q3)} = 29.8nA$ 不变，静态输出电压 $U_O = 7.31mV < 10mV$ ，测量结果如图31所示，此时电流源满足设计要求。

图 31: 镜像电流源测量图



此时，利用示波器测量电路的电压放大倍数，测量结果如图32所示；利用失真分析仪测量电路的失真程度，测量结果如图33所示。

图 32: 镜像电流源电压放大倍数波形

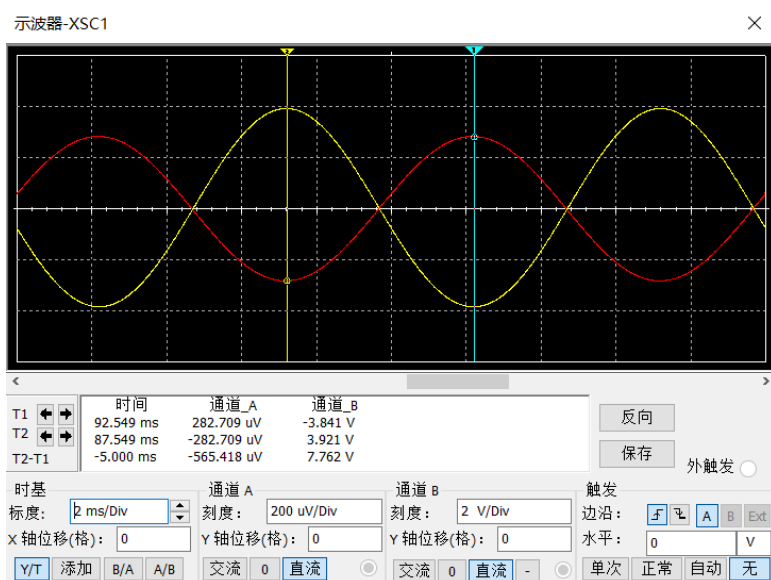
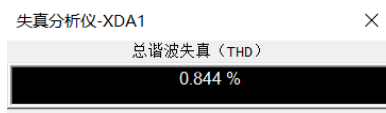


图 33: 镜像电流源失真测量



根据测量结果，计算得：

$$\dot{A}_u = \frac{U_o}{U_i} = \frac{-3.921V}{282.709\mu V} = -13869$$

与接入电流源情况相比较，可知电压放大倍数基本不变，且失真分析仪示数仍为 0.844% 不变，表示集成运放仍正常工作，且基本未发生失真。由此可知，镜像电流源可代替电流源元件为电路提供恒定电流。

4. 仿真题 2-3

设计一个电路将幅值为 $10mV$ 左右、频率为 $20Hz \sim 20kHz$ 、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。

4.1 电路设计

设计思路

- 由于设计要求的电压放大倍数 $\dot{A}_u = 50$ 较大，故输入级考虑采用共射放大电路作为电路的主要部分。
- 由于设计要求负载上静态功耗约为零，故采用互补输出结构；另一方面，由于设计要求电路尽可能简单，采用二极管偏置电路消除互补输出结构产生的交越失真。
- 由于输入信号频率在 $20Hz \sim 20kHz$ 范围内，显然共射放大电路能够满足上限截止频率大于 $20kHz$ 的要求。故电容阻值应较大，以降低电路的下限截止频率。
- 输入信号的内阻 $R_1 = 1k\Omega$ 较小，故放大电路的 R_i 应尽可能大。因而考虑增加发射极电阻以增大输入电阻，并对共射放大电路的放大倍数进行调节。

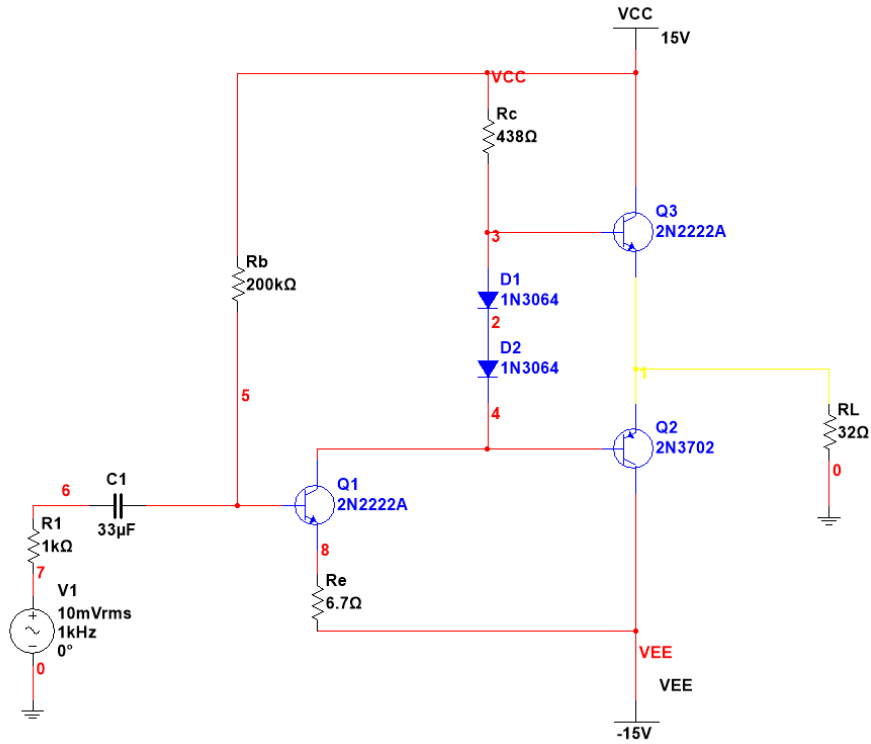
这是由于，在共射放大电路中：

$$\begin{cases} A_u = -\frac{\beta(R_C // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)R_{e1}} \\ R_i = R_{b1} // (r_{be} + (1 + \beta)R_{e1}) \\ R_O = R_C \end{cases} \quad (4)$$

故： R_e 增大时，放大倍数 A_u 绝对值减小，等效输入电阻增大，等效输出电阻不变，恰好满足题目要求。

根据设计思路，可设计满足要求的电路图如图34所示，其由输入部分、共射放大电路、互补输出电路构成。

图 34: 音频信号放大电路电路图



4.2 静态工作点分析与设置

对电路参数进行估算。由于该电路涉及二极管、互补输出级等部分，故对静态参数进行估算时只对参数的大致量级进行估算，剩余部分由实际仿真时进行调节。由静态输出电压 U_O 约为 0，且晶体管 Q2、Q3 均处于放大状态，可知晶体管上的管压降约为 0.7V，二极管上的压降共约 1.4V，二极管处于开启状态。故流过二极管上的电流约为数十毫安。由于 Q2 管的基极电流较小，故可认为流入共射放大电路晶体管 Q1 的集电极电流约为数十毫安，此时，即可根据公式对 R_b 、 R_e 的阻值进行估算。

$$\begin{cases} I_{CQ} = \beta I_{BQ} \\ A_u = \frac{-\beta R_L}{r_{be} + (1 + \beta) R_e} \\ V_{CC} - V_{EE} = U_{BEQ} + I_{BQ} R_b + (1 + \beta) I_{BQ} R_e \end{cases} \quad (5)$$

其中，可分析得互补输出级的电压放大倍数约为 1，故共射放大电路的电压放大倍数 $\dot{A}_u \approx 50$ 。且由于 I_{BQ} 约为数百 μA ，可计算得 r_{be} 约为 $k\Omega$ 量级，由公式计算可知， $R_e \approx 10\Omega$ ， $R_b \approx 500k\Omega$ 符合公式。此外，由二极管电流大小，可得 $R_c \approx 1k\Omega$

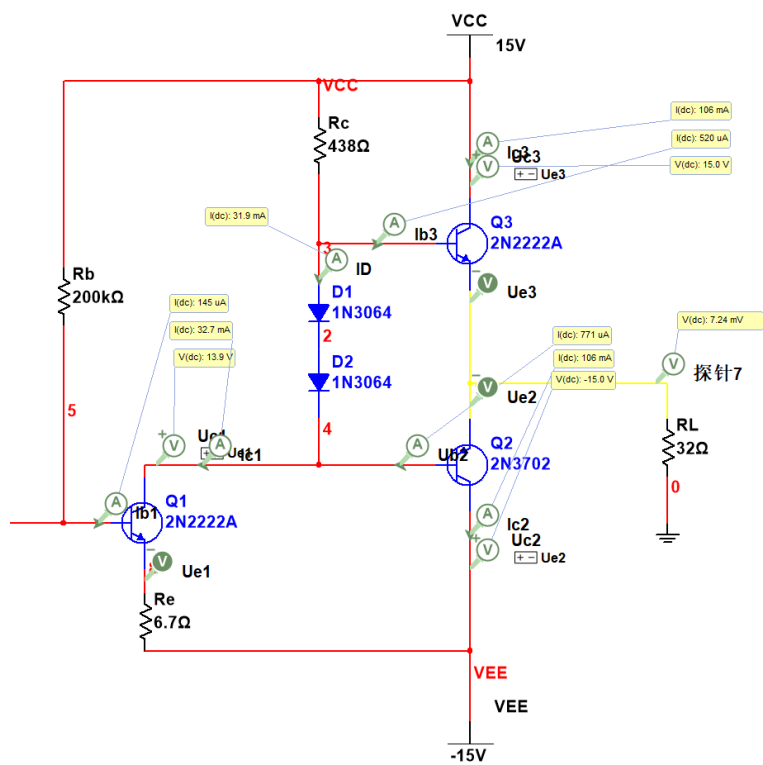
根据估算所得结果进行仿真，并调整电路参数至合适值，其中，在使三晶体管均工作在放大状态的基础上，还需要使得电路的电压放大倍数 \dot{A}_u 约为 50，且静态输出电压 $U_O < 10mV$ 。

事实上，通过调节 R_c 的阻值即可调节电路的静态输出电压，通过调节 R_e 的阻值即可调节电路的电压放大倍数。根据实际测量结果调节电阻值，可得当：

$$R_b = 200k\Omega, R_e = 6.7\Omega, R_c = 438\Omega, C1 = 33\mu F$$

时，电路能够正确放大输入信号，满足设计要求。此时，对电路的静态工作点进行测量，如图35所示。

图 35: 音频信号放大电路静态工作点测量



对测量结果进行整理，可得表4:

表 4: 音频放大电路静态工作点仿真结果

晶体管	I_{BQ}	I_{CQ}	U_{CEQ}
Q_1	$145\mu A$	$32.7\mu A$	$13.9V$
Q_2	$771\mu A$	$106mA$	$-15.0V$
Q_3	$520\mu A$	$106mA$	$15.0V$

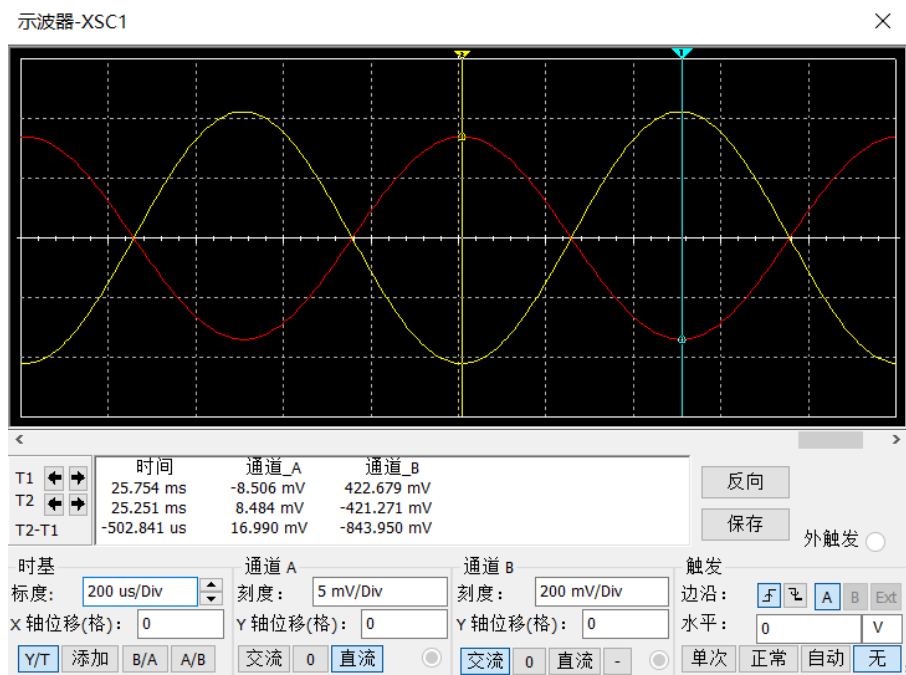
此外，测得 $I_D = 31.9mA$, $U_O = 7.24mV$ ， I_D 与估计值相似，且 U_O 满足静态功耗约为 0 的要求。

分析各管工作状态可知，各管均工作在放大状态，电路静态工作点设置合理，互补输出级放大管参数基本对称。

4.3 工作特性

测量电压放大倍数时，与仿真题 2-2 类似，设置信号源大小为 $10mV$ ，频率为 $1kHz$ 。正确连接示波器测量输入、输出波形，示数如图36所示。

图 36: 电压放大倍数 \dot{A}_u 测量波形



根据测量波形，可计算电压放大倍数

$$\dot{A}_u = \frac{U_o}{U_i} = \frac{-422.679mV}{8.506mV} = -49.69$$

满足 $|\dot{A}_u| \approx 50$ 的要求，符合题意。

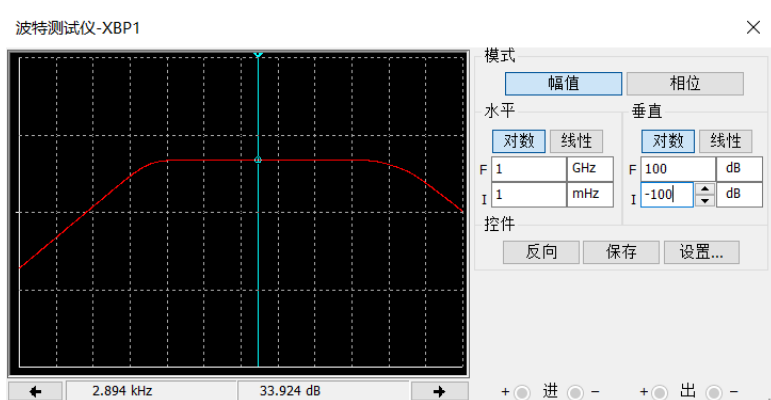
此时，如图37所示，利用失真分析仪可测得失真度为 0.187%，说明波形几乎不发生失真，质量较高。

图 37: 失真分析仪测量结果



测量幅频特性时，正确连接波特仪，波特仪测量结果如图38所示。

图 38: 音频放大电路频率特性



根据频率特性，可得电路最大幅频为 $33.924dB$ ，由此，取幅频为 $30.924dB$ 的点，可测量得上限截止频率 f_H 、下限截止频率 f_L ，测量结果如图39、40所示。

图 39: 音频放大电路上限截止频率

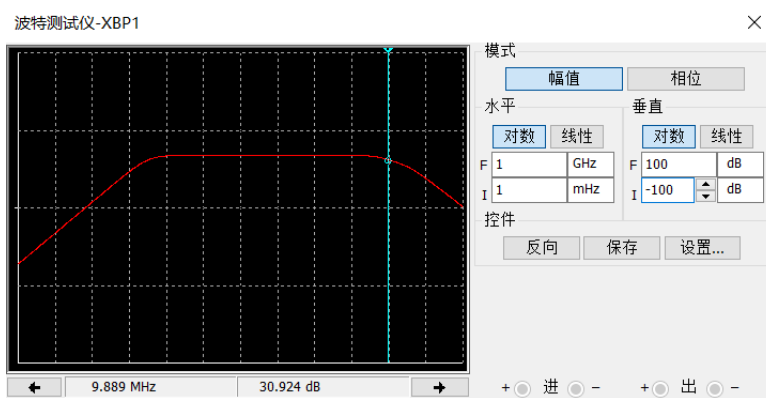
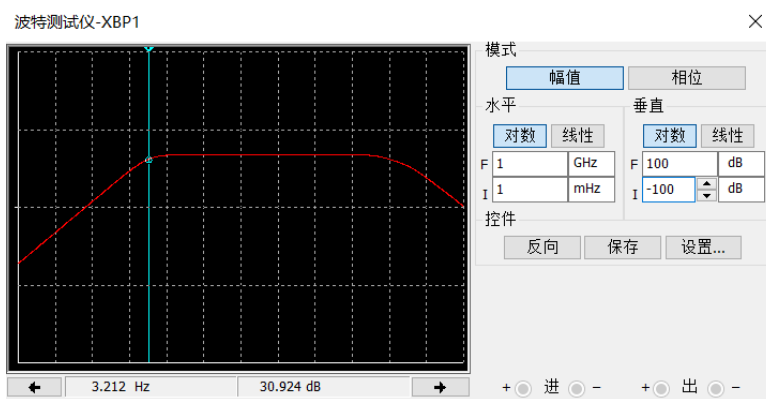


图 40: 音频放大电路下限截止频率



由测量结果可知，集成运放的上限截止频率 $f_H = 9.889\text{MHz}$ ；下限截止频率 $f_L = 3.212\text{Hz}$ 。输入信号频率范围 $f = 20\text{Hz} \sim 20\text{kHz}$ 包含于电路的正常工作频率内，故该电路的频率特性满足设计要求。

5. 仿真中遇到的问题及解决方法

• 集成运放的参数调节

集成运放的参数调节是本次仿真实验中最难的部分之一。起初，在调节参数时，我无论如何调节电阻 R_1 、 R_2 的阻值，均无法使得共射放大电路的复合管均工作在放大状态。此后，我意识到应当从理论出发进行分析，借助讲义上的提示，即复合管基极电流约为 nA 量级，我意识到电流源 I_2 应当向复合管的集电极提供合适大小的电流，并使得 MOS 管的漏极电位略低于复合管 U_{BE} ，以确保流过复合管基极的电流很小。在此基础上，复合管成功进入放大状态，集成运放的工作基本正常。

• 集成运放的静态工作点测试

由于晶体管较多，故集成运放的静态工作点较难进行测试。在此次仿真中我利用 Multisim 的 PNode 功能进行测试，使得测试画面较为混乱。事实上，也可以利用 Multisim 的扫描功能进行测试，这样可以使得结果展现更为清晰。

• 集成运放镜像电流源参数调节

在将电流源 I_1 更换为镜像电流源后，尽管调节电阻阻值使得流过 I_1 的电流不变，但电路的电压放大倍数发生了较大的变化。探究发现，由于精度原因，尽管显示的电流值不变，但事实上有较大变化，会对电流有较大影响。于是，我增加了复合管基极电流、静态输出电压作为监测点，仔细调节电

阻阻值使得上述量也基本保持不变。在此基础上，镜像电流源成功实现了和替换前完全一样的功能，电路的放大倍数基本未发生变化。

- 音频放大电路参数调节

由于音频放大电路的设计因素，其电路参数并不方便进行理论计算。然而，我们可以考虑对电阻大致应处的数量级进行估算，在此基础上再对电阻阻值进行微调以使得参数满足要求。事实证明，这一方法的调节效率较高，较为实用。

- 音频放大电路通频带的调整

由于输入信号范围为 $20Hz \sim 20kHz$ ，其低频信号频率较低。此前我采用的是大小为 $10\mu F$ 的电容，其下限截止频率略小于 $20Hz$ ，可能无法满足设计要求。因此，考虑到其上限截止频率远大于要求，我将电容值改为 $33\mu F$ ，问题得到解决。

6. 收获与体会

- 电路参数调节的方法

电路参数的调节是本次仿真中最重要的部分。在摸索与试错中，我逐渐掌握了效率较高的参数调节方法。若可以对电路进行理论计算，则应当优先进行理论计算，但由于实际仿真电路与理论电路存在差异，故理论计算时，为节省时间，不需要对参数计算特别精确。若无法对电路进行理论计算，则需要对参数值估算大致的数量级，再在实际仿真中进行调节。调节过程中，应当首先在理论分析的基础上尝试调整各个参数，观察调整后对监测的关键数据的影响情况，由此对参数进行调整。事实上，可以采用参数扫描的方法得到合适的参数值，但本次仿真中，由于参数调整本身并不复杂，未采用该方法。

- 电路设计的方法

在本次仿真中，我实践并进一步熟练了对电路进行设计的方法。电路设计中，应从实际需求出发，在所学内容中寻找可能符合条件的电路组件，并将其结合以达成设计要求。考虑到不同的实际需求，应对电路进行适当的微调。

- 对课程所学的进一步验证

本次仿真中，通过对单管放大电路、集成运放等进行搭建与设计，我对课程所学的理论知识有了更深的理解，对集成运放等较为复杂的器件中的电流、电压关系有了直观的认识，对电路失真的产生与消除方法进行了实际的验证。此外，我也通过设计电路增强了对所学知识的应用能力。这也启示我们要将理论与实际相联系，这是掌握知识最有效的方法之一。