

第二次仿真作业

仿 真 报 告

姓名： 李显昱

学号： 2018011498

班级： 自 83

日期： 2020.3.28

目录

1 实验目的	2
2 仿真题 2-1	2
2.1 设计并调整电路参数，使电路具有合适的静态工作点	2
2.2 调整电路参数，改善某一性能的指标	3
2.2.1 理论分析	3
2.2.2 实验验证	4
2.3 调整电路参数或者输入信号大小，使得输出波形产生失真，分析是何种失真，可采取哪些措施消除并进行实验验证	5
3 仿真题 2-2	7
3.1 理论分析	7
3.1.1 第一级：差分放大电路	7
3.1.2 第二级：有源负载共射放大电路	9
3.1.3 第三级：准互补输出级电路	9
3.2 静态工作点仿真	11
3.2.1 静态工作点总体仿真	11
3.2.2 各个放大管各个参数仿真	11
3.3 测量动态参数	11
3.4 利用镜像电流源代替电流源元件	15
4 仿真题 2-3	15
4.1 静态分析	15
4.2 动态分析	18
5 仿真中遇到的问题	18
6 收获与体会	18

1 实验目的

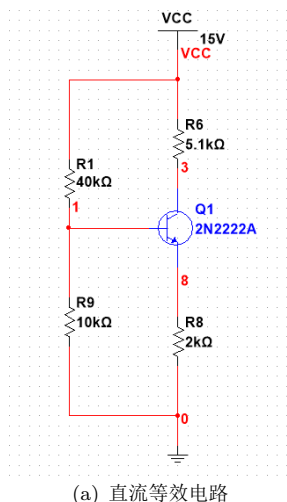
- (1) 理解晶体管和场效应管放大电路以及集成运放的基本组成原则；
- (2) 理解放大电路性能参数的调试和测试方法、静态工作点对动态参数的影响；
- (3) 理解放大电路产生失真的原因和消除方法；
- (4) 熟悉仿真软件的基本分析和测量方法。

2 仿真题 2-1

利用晶体管 2N2222A（请选择 Zetex 厂商的，模型参数中的 BF 即 β ，RB 即 r_{bb} ）或者 MOS 管 2N7000（请选择 Zetex 厂商的）设计一个单电源供电的单管放大电路，电源电压为 $V_{CC} = +15V$ 。

2.1 设计并调整电路参数，使电路具有合适的静态工作点

理论估算，首先构建直流通路模型，如下图 1(a)所示。其中 $\beta = 240$ 。



	Variable	Operating point value
1	V(1)	2.96069
2	V(3)	9.08224
3	V(8)	2.33052
4	I(Q1[IB])	4.91320 u
5	I(Q1[IC])	1.16035 m

(b) 静态工作点仿真结果

图 1: 直流等效电路以及仿真静态工作点

列写 BE 回路和 CE 回路方程，给定 $U_{BEQ} = 0.7V$ ，有：

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

从中解出直流工作点 Q 如下：

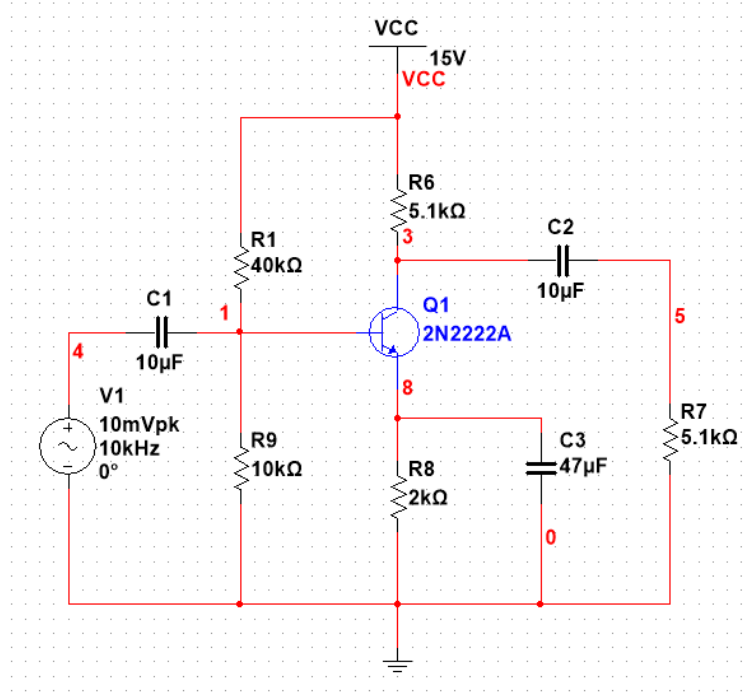


图 2: 仿真题 2-1 整体电路图

$$\begin{cases} V_{BQ} = 3V \\ I_{BQ} = 4.77\mu A \\ I_{CQ} = 1.145mA \\ U_{CEQ} = 6.86V \end{cases}$$

做完理论估算之后，对电路进行了静态工作点的仿真，仿真结果可见 1(b)， $V_{BEQ} = 0.63V$ ， $I_{BQ} = 4.91\mu A$ ， $I_{CQ} = 1.16mA$ ， $U_{CEQ} = 6.75V$ ，和理论估算结果近似。通过理论估算和仿真结果可以判断，此时该单管放大电路正处于较为合适的放大状态。

2.2 调整电路参数，改善某一性能的指标

整体电路如图 2。

2.2.1 理论分析

首先，先对这个模型的放大倍数 \dot{A}_u ，输入电阻 R_i ，输出电阻 R_o 进行理论计算。

利用已经计算出来的直流工作点 Q，计算交流通路模型的参数，其中取定常量 $U_T = 26mV$ ， $r_{bb'} = 220\Omega$ ，则 $r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{U_T}{I_{EQ}} = 5.67k\Omega$ 。根据图 2 写出输入输出的回路方程：

$$\begin{cases} \dot{U}_o = -\beta \dot{I}_b (R_c // R_L) \\ \dot{U}_i = \dot{I}_b r_{be} \end{cases}$$

进而可以计算得到放大倍数：

$$\dot{A}_u = -\frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be}} = -107.94$$

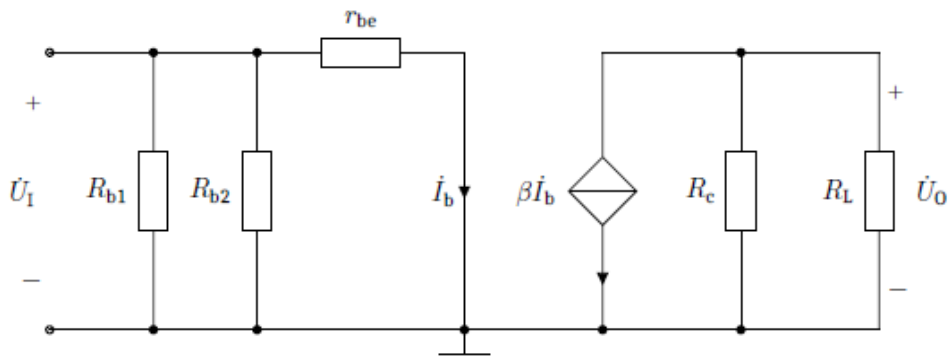


图 3: 仿真题 2-1 交流等效电路

根据图 2 分析输入输出电阻, 得到以下二式:

$$\begin{cases} R_i = r_{be} // R_{b1} // R_{b2} = 3.32k\Omega \\ R_o = R_c = 5.1k\Omega \end{cases}$$

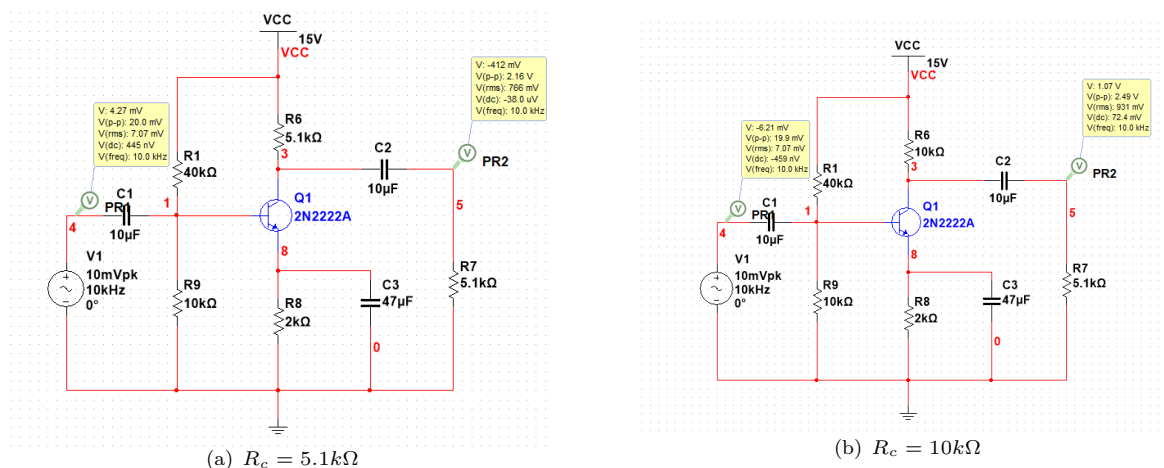
增大 \dot{A}_u 从上面理论计算中关于 \dot{A}_u 的表达式可以知道, 增大 R_c 可以增大 \dot{A}_u 。

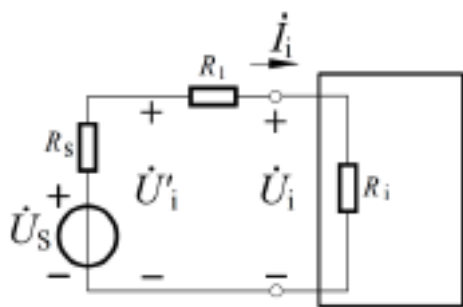
增大 R_i 从上面理论计算中关于 R_i 的表达式可以知道, 增大 R_{b1} 可以增大 R_i 。增大 R_{b1} 的前提是保证晶体管仍然处于放大状态。

减小 R_o 从上面理论计算中关于 R_o 的表达式可以知道, 减小 R_c 可以减小 R_o 。

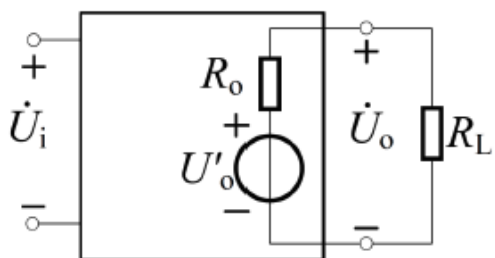
2.2.2 实验验证

增大 \dot{A}_u 根据上述理论分析, 我将 R_c 从原来的 $5.1k\Omega$ 增大到 $10k\Omega$ 。通过图 4(a)和图 4(b)可以发现, 增大 R_c 后, \dot{A}_u 由 -108.35 增大到 -133.80 。

图 4: 利用 R_c 增大 \dot{A}_u 前后实验验证图



(a) 输入电阻测量理论图

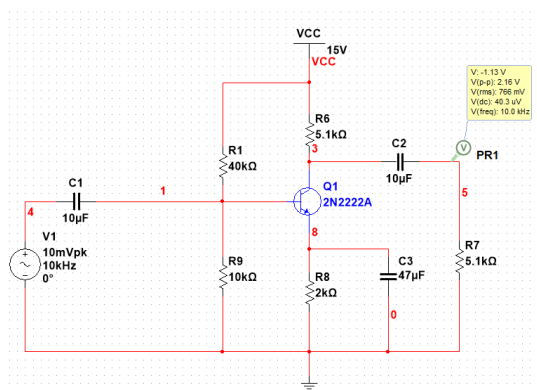


(b) 输出电阻测量理论图

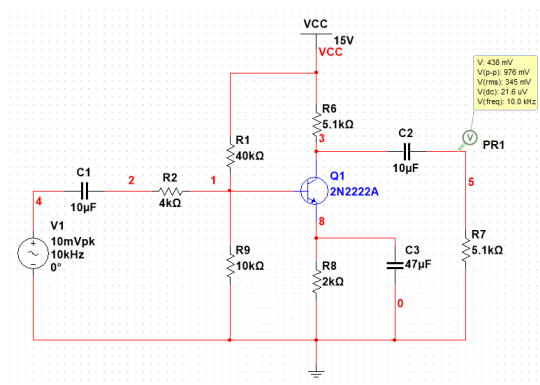
增大 R_i 从上面理论计算中关于 R_i 的表达式可以知道, 增大 R_{b1} 可以增大 R_i 。增大 R_{b1} 的前提是保证晶体管仍然处于放大状态。利用公式:

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

根据图 5, 可以计算得到, 增大 R_{b1} 之前 $R_i = 3.28k\Omega$, 将 R_{b1} 增大至 $45k\Omega$ 之后, $R_i = k\Omega$ 增大至 $3.58k\Omega$ 。可见增大 R_{b1} 确实可以将输入电阻增大。



(c)



(d)

图 5: 未增大 R_{b1} 时输入电阻测量

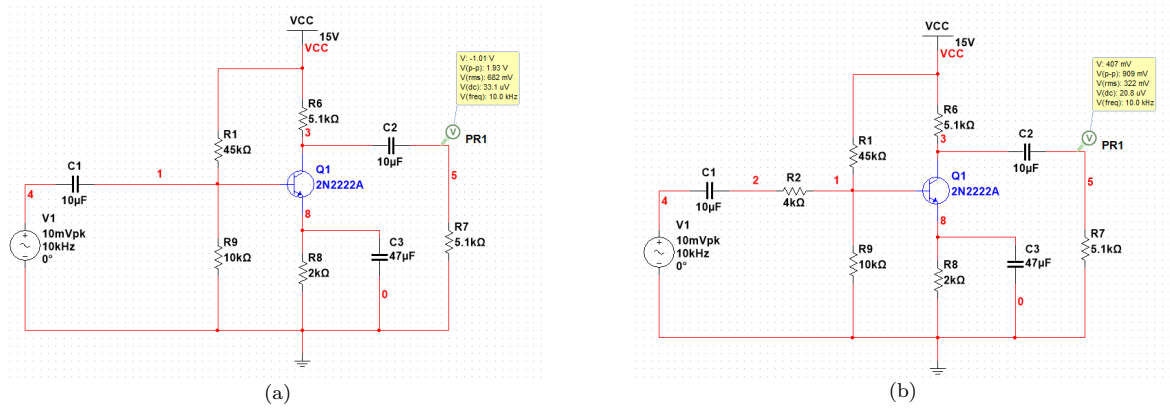
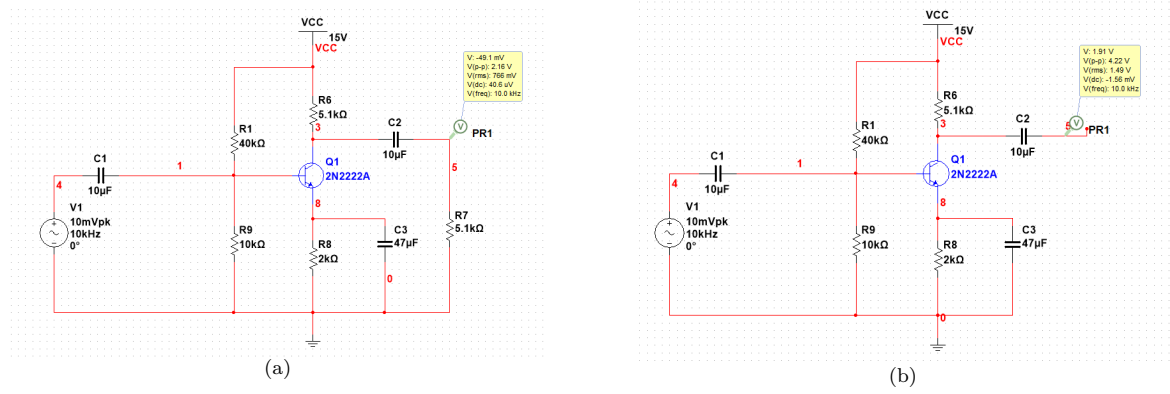
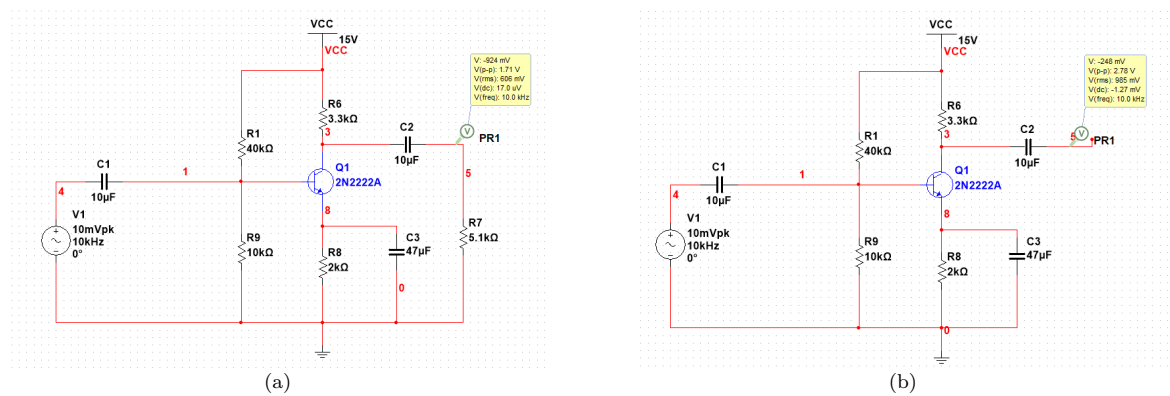
减小 R_o 从上面理论计算中关于 R_o 的表达式可以知道, 减小 R_c 可以减小 R_o 。利用公式:

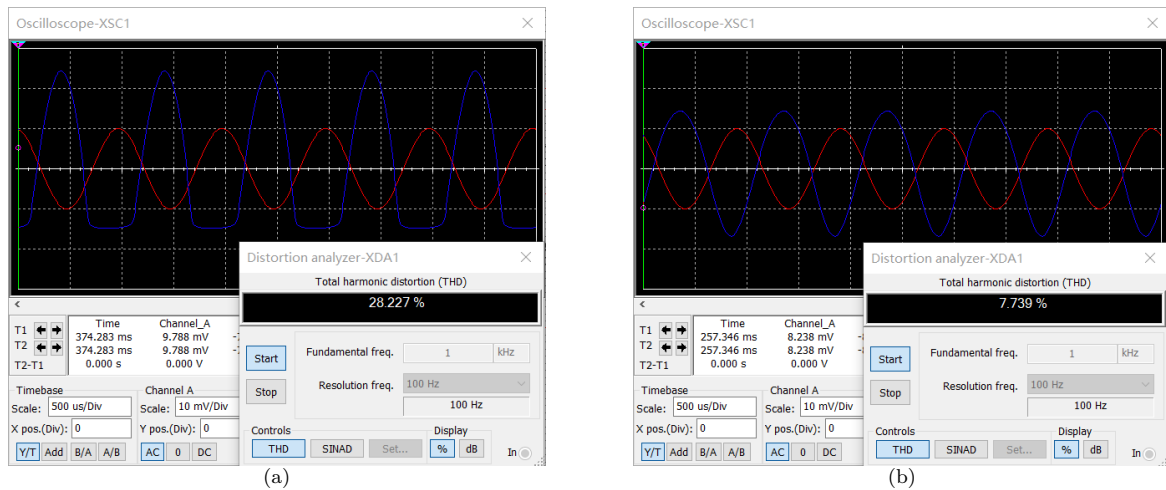
$$R_o = \left(\frac{U_{o1}}{U_{o2}} - 1 \right) R_L$$

根据图 7, 可以计算得到, 减小 R_c 之前 $R_o = 4.82k\Omega$, 将 R_c 减小至 $3.3k\Omega$ 之后, $R_o = k\Omega$ 减小至 $3.19k\Omega$ 。可见减小 R_c 确实可以将输出电阻减小。

2.3 调整电路参数或者输入信号大小, 使得输出波形产生失真, 分析是何种失真, 可采取哪些措施消除并进行实验验证

尝试一:

图 6: 增大了 R_{b1} 时输入电阻测量图 7: 未减小 R_c 时输出电阻测量图 8: 减小了 R_c 时输出电阻测量

图 9: 减小了 R_c 时输出电阻测量

将 R_{b2} 的阻值增加到 $30k\Omega$, 根据图 9(a), 可以发现他有十分严重的饱和失真, 因为 R_{b2} 较大, 会将三极管基极电位被抬高, I_B 增大, 从而变得容易出现饱和失真。首先, 我们可以从减小 R_{b2} , 但如果不减小 R_{b2} , 我们还可以通过减小 R_c 来增大 U_{CEQ} 来减小饱和失真, 将 R_c 减小到 $2.5k\Omega$ 可以得到图 9(b)。

尝试二:

将 U_i 的峰值增加到 $50mV$, 根据图 10, 可以发现他有十分严重的截止失真, 这时候我想到可以通过抬高基极电流来减小失真。首先, 我们可以从减小 R_{b1} , 如图 11(a), 可以发现虽然截止失真减小了, 但是由于相对抬高了基极电压, 导致也出现了饱和失真。然后, 我考虑到也可以通过减小 R_e 来减小截止失真, 如图 11(b), 可以发现和减小 R_{b1} 时出现了一样的问题, 这时候我考虑到因为输入信号峰值很大, 已经无法使得饱和失真和截止失真同样较小, 只能减小输入信号的峰值。

3 仿真题 2-2

利用晶体管或者 MOS 管设计一个集成运放。晶体管可选用 2N2222A 和 2N3702, 电源电压可选 $\pm 15V$ 。MOS 管可选用 2N7000 和 BST100, 电源电压可选 $\pm 5V$ 。

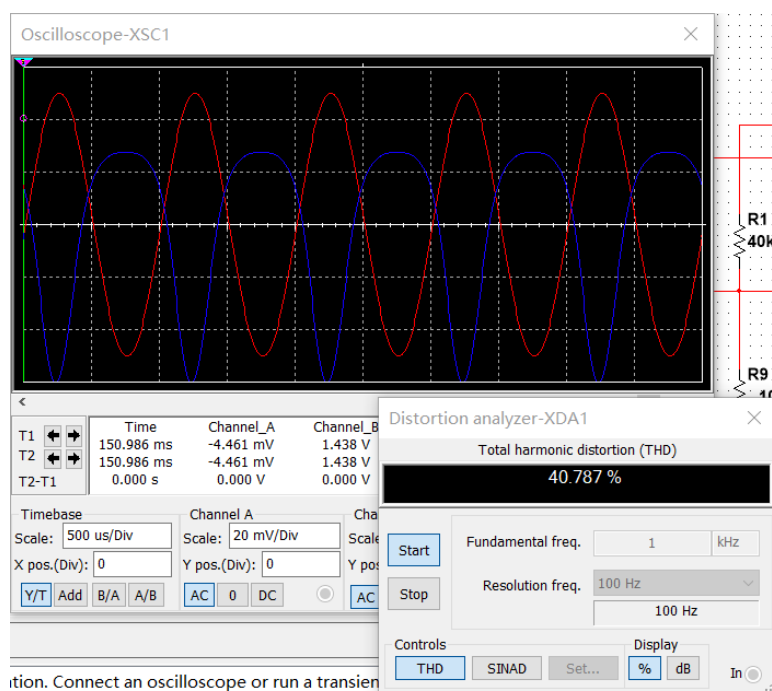
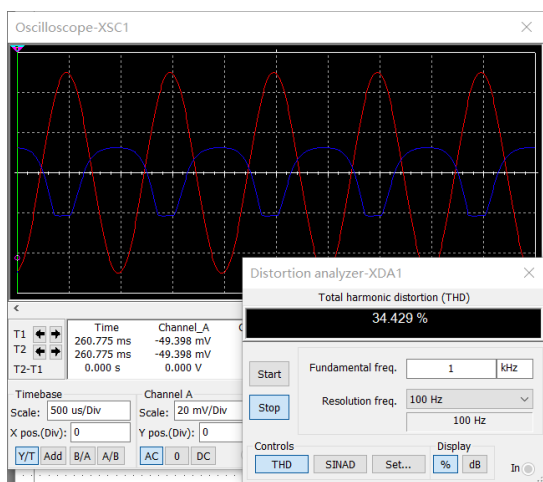
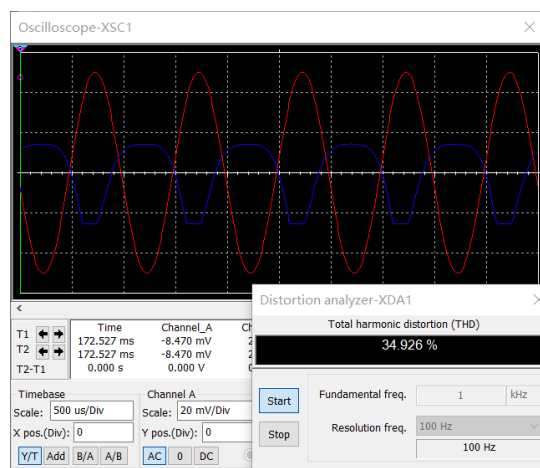
3.1 理论分析

3.1.1 第一级: 差分放大电路

根据图 11对第一级, 即输入级进行理论分析, 第一级采用恒流源式差分放大电路(双端输入, 单端输出)。其中利用镜像电流源为差分电路提供静态电流, 本级中所有晶体管均采用 PNP 型 (2N3702), 根据 multisim 中关于晶体管 2N3702 模型参数 $\beta = 133.8$, $U_{BE} = 0.75V$, $r_{bb'} = 10\Omega$ 。除此之外, $U_T = 26mV$ 利用镜像电流源的对称性可以得到, $I_{C8} \approx I_{C7}$, 又因为 $I_B \ll I_{C8}$, 可以得到:

$$I_{C8} \approx I_R = \frac{V_{CC} - V_{EE} - U_{BE}}{R_4} = \frac{15 - (-15) - 0.75}{28} = 1.045mA$$

由于 I_{C8} 可以看作一个恒定电流源, 提供发射极电流, 而 Q_7 和 Q_8 发射极正偏可以保证 Q_7 和 Q_8 都处于放大工作区, 由于 R_1 较小, 估算认为 $I_{E9} \approx I_{E10} = 0.5I_{C7} = 522\mu A$ 之后估算放大倍数, 其中认为两

图 10: 输入信号峰值为 50mV 输出波形(a) 减小了 R_{b1} 时输出波形(b) 减小了 R_c 时输出波形

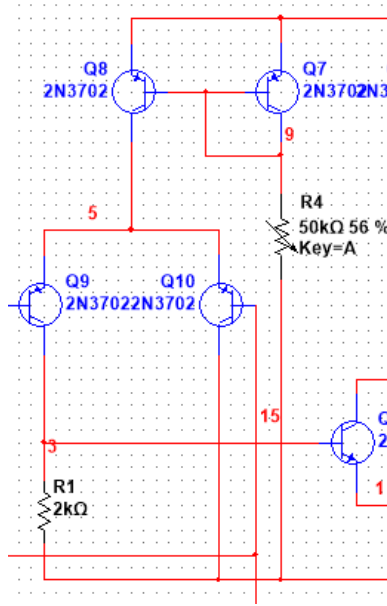


图 11: 差分放大电路

个晶体管对称，可以计算得到：

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{U_T}{I_{E1}} = 6.34k\Omega$$

进而根据 \dot{A}_u 计算公式：

$$\dot{A}_u = \frac{-\beta R_1}{2r_{be}} = -21.1$$

3.1.2 第二级：有源负载共射放大电路

根据图 12对第二级进行理论分析，第二级采用有源负载共射放大电路，根第一级电路一样，用镜像电流源代替基本共射放大电路中的 R_C ，在第二级中，利用镜像电流源设置集电极电流同时提高电压放大倍数。

图中管 Q_1 和 Q_2 均为 NPN 型晶体管 (2N2222A)， Q_1 和 Q_2 组成复合管，该复合管的电压放大倍数为 $\beta = \beta_1\beta_2 \approx 4.84 \times 10^4$ 。

其中通过镜像电流源可以计算得到集电极电流：

$$I_{C12} \approx I_{R5} = \frac{V_{CC} - V_{EE} - U_{BE}}{R_5} = 1.63mA$$

3.1.3 第三级：准互补输出级电路

根据图 13对第三级进行理论分析，第三级作为输出级，采用带复合管的准互补电路增大电流放大倍数，增大输出电流。 Q_3 和 Q_4 复合成 NPN 管，组成信号正半周期部分的射极输出器， Q_6 和 Q_{13} 复合成 PNP 管，组成信号负半周期部分的射极输出器。

为了消除互补输出电路的交越失真，采用 U_{BE} 倍增电路看作电压源，设置后输出器的基极电位，因为管 Q_5 的集电极和发射极两端电压为 $U_{B4B13} = (1 + \frac{R_2}{R_3})U_{BE} = 2.24V > 3U_{BE} = 2.1V$

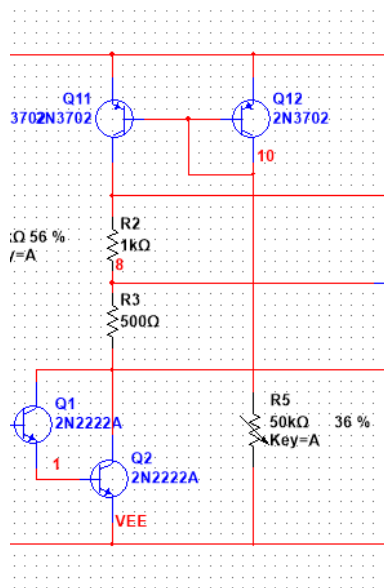


图 12: 有源负载共射放大电路

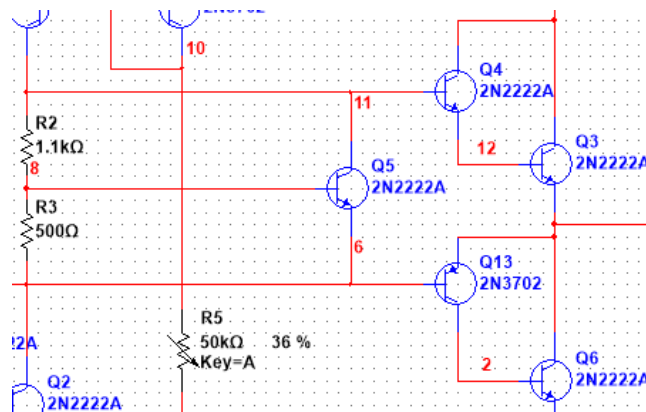


图 13: 准互补输出级电路

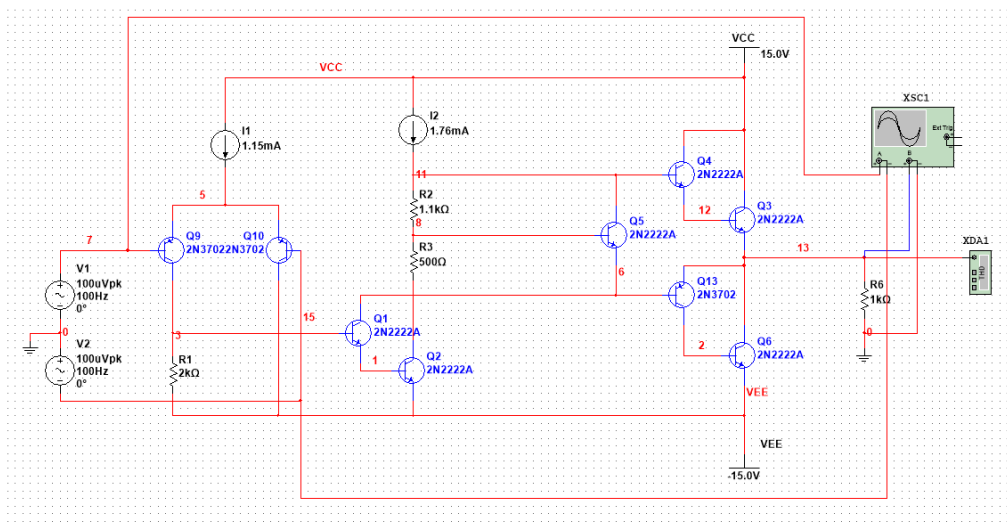


图 14: 集成运放电路图

3.2 静态工作点仿真

设计的集成运放电路图可参见图 14，其中两个电流源分别为 $1.15mA$ 和 $1.76mA$ 。

3.2.1 静态工作点总体仿真

利用 Multisim 中的 DC operating point 得到集成运放的静态工作点仿真，见图 15。其中 $V(5) = 0.708V$ 为管压降，即可认为是 U_{BE} ，同时 $U_{CE} = V(5) - V(3) = 14.57$ ，由这两个数据可以验证第一级差分放大电流确实工作在放大状态。针对第二级放大电路，其中 $V(3)$ 和 $V(1)$ 之间的差距与 $V(1)$ 和 V_{EE} 确实近似为 U_{BE} ，其中 $V(6) - (-V_{EE}) > V(6) - V(1)$ ，且两者都远远大于 $U_{CE(sat)}$ ，可以得到第二级共射放大电路中两个晶体管都处于放大状态。其中第三级放大电路针对 BE 倍增电路，其中 $V(11) - V(6) = 1.96V$ 近似为 $3U_{BE}$ 。而且由第三级输出处电压 $V(13) = -0.017V$ 可得，输出电压确实较小，可见该放大电路的静态功耗确实较小。

可以通过图 16 和 16 示波器观察和失真度仪发现波形失真几乎为 0，说明参数设计合理。

3.2.2 各个放大管各个参数仿真

将测量过的所有晶体管参数整理到表 1 中。

3.3 测量动态参数

· \dot{A}_u 测量 见图 21 可以看到示波器中显示的输入电压和输出电压幅值关系。

由图 21 可得， $U_i = 400\mu V$ ， $U_o = 13.014V$ ，可以计算得到：

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{13.014}{399.962 \times 10^{-6}} = 32538$$

从示波器中 U_o 波形可以看到，其实输出还是有些失真，但是根据图 17 反馈得到失真为 0.000%，可能是由于精度不够所导致。

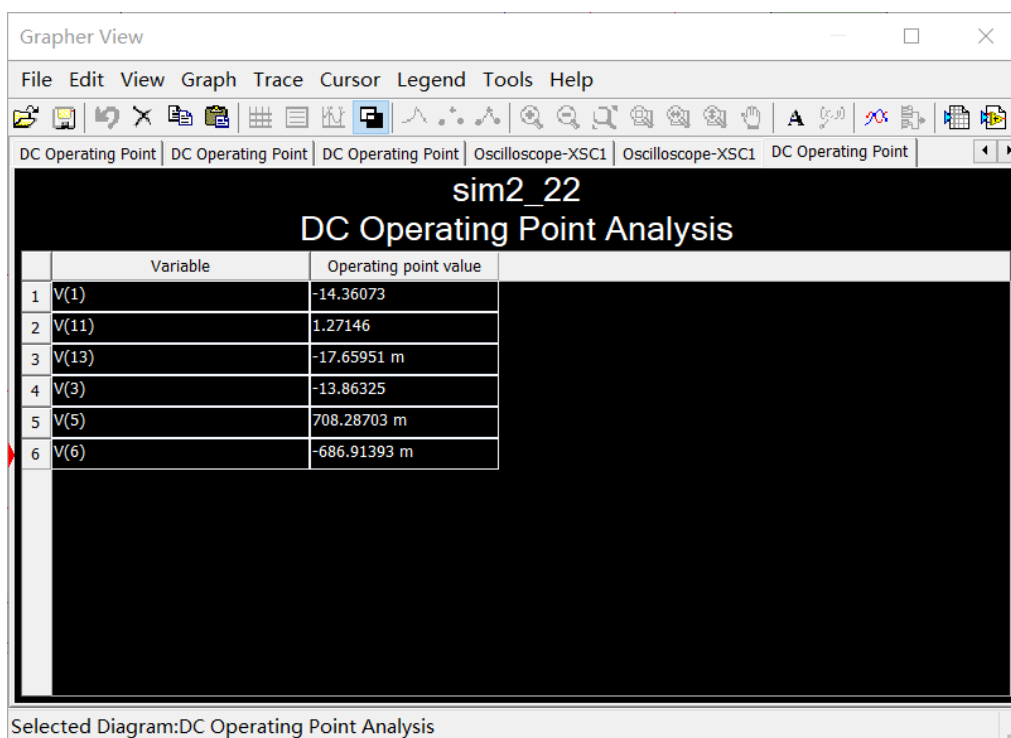


图 15: 集成运放静态工作点仿真

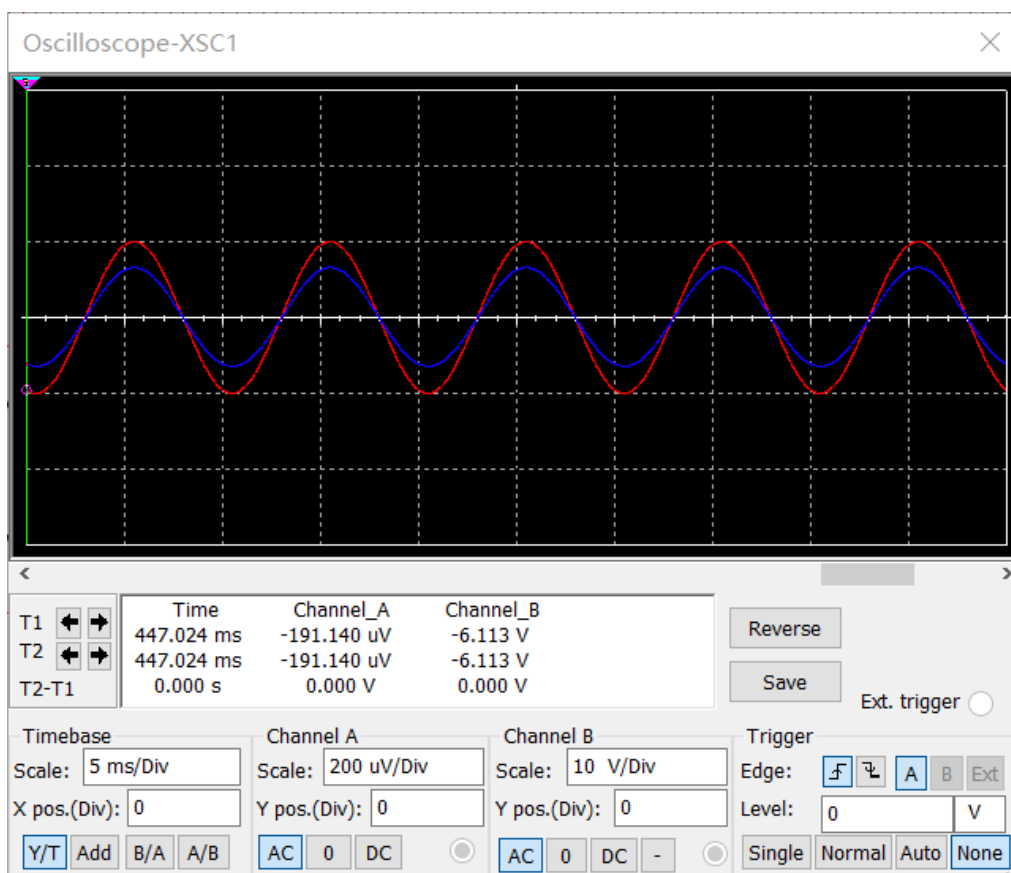


图 16: 集成运放输入输出波形图

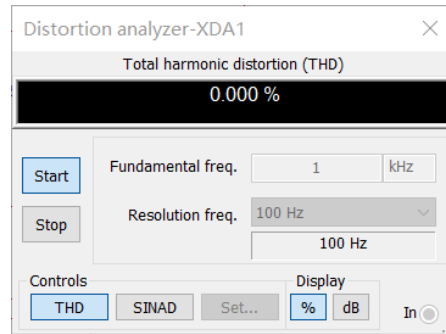


图 17: 集成运放输入输出失真分析

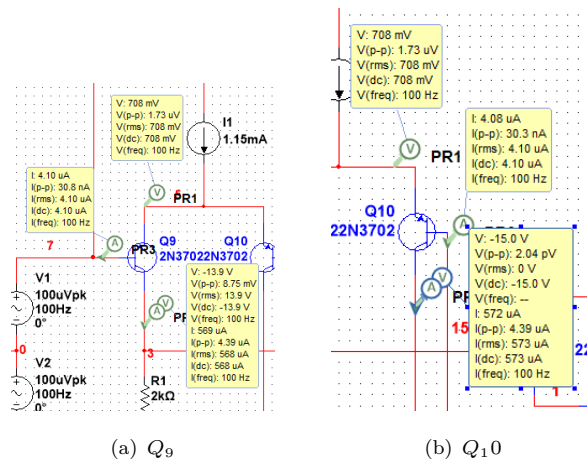
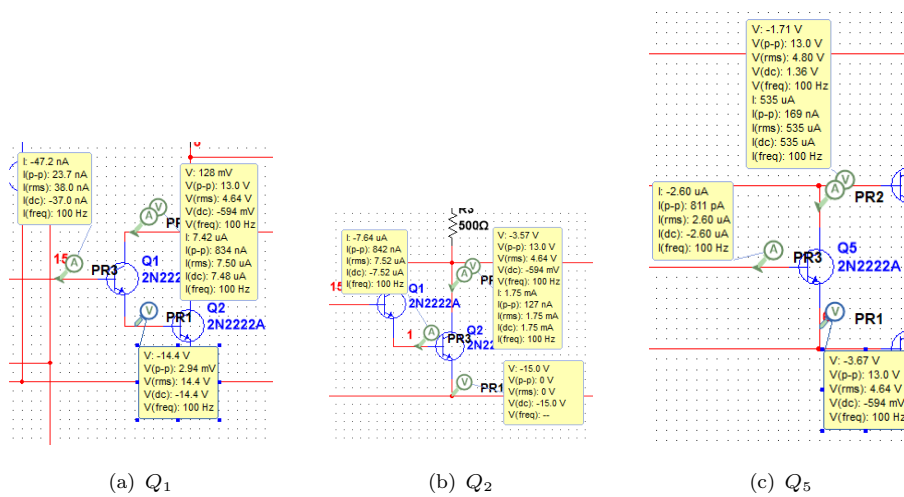


图 18: 第一级差分放大电路晶体管参数

图 19: 第二级共射放大电路以及 U_{BE} 倍增电路晶体管参数

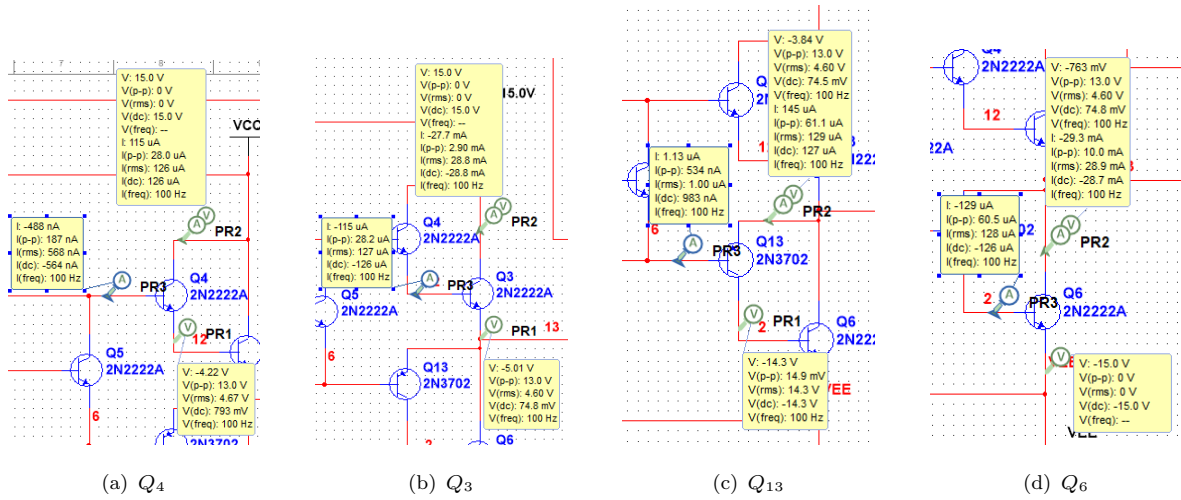


图 20: 第三级准互补输出级各晶体管参数

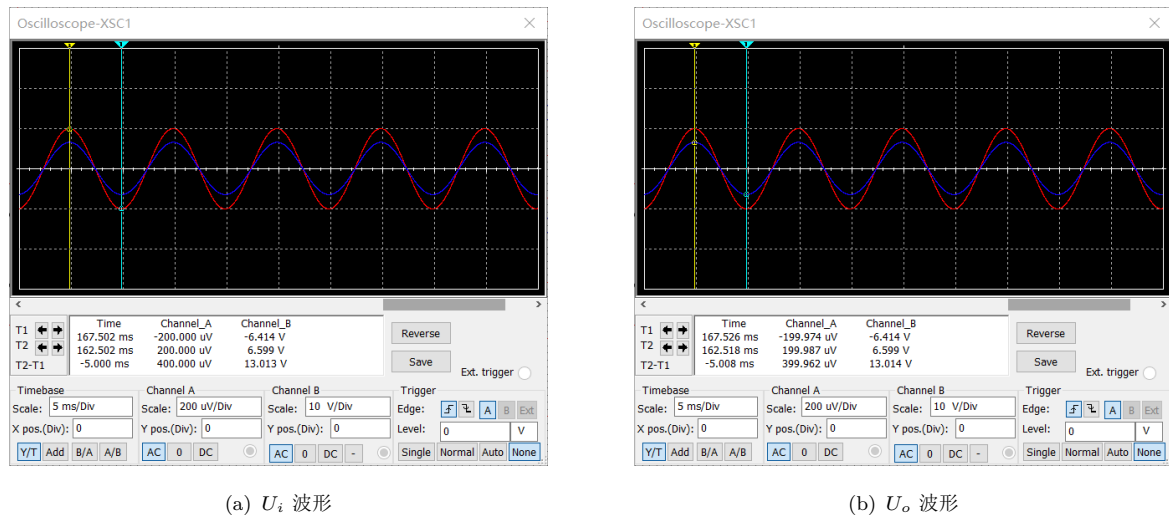
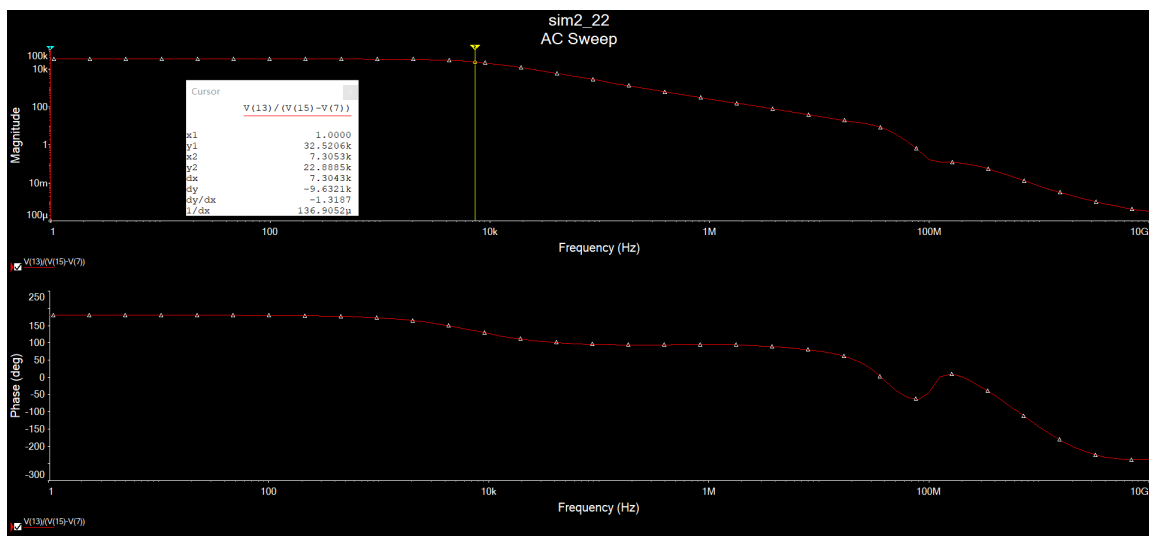
图 21: \dot{A}_u 测量图 22: f_{bw} 测量

表 1: 所有晶体管参数测量表 (rms)

晶体管编号	I_{BQ}	I_{CQ}	U_{CEQ}/V
Q_9	$4.10\mu A$	$568\mu A$	-14.608
Q_{10}	$4.10\mu A$	$573\mu A$	-15.708
Q_1	$38nA$	$7.50\mu A$	19.04
Q_2	$7.52\mu A$	$1.75mA$	19.64
Q_5	$2.60\mu A$	$535\mu A$	1.954
Q_4	$568nA$	$126\mu A$	14.207
Q_3	$127\mu A$	$28.8mA$	14.925
Q_{13}	$1.00\mu A$	$127\mu A$	-14.375
Q_6	$128\mu A$	$28.9mA$	-15.075

· f_{bw} 测量 见图 22 可以得到, 经过交流分析可以得到此集成运放 $f_{bw} \approx 7.3053kHz$

· U_{IO} 测量 通过之前关于静态工作点的测量可以得到输入失调电压的值。

$$U_{IO} = -\frac{U_O|_{u_I=0}}{A_{od}} = -\frac{-17.660}{32538} = 543nV$$

· SR 测量 将输入的正弦信号变成方波信号, 并测量输出波形, 如图 23, 可以得到:

$$SR = \left| \frac{du_o}{dt} \right|_{max} = \frac{4.001V}{58.710\mu s} = 68148.53V/s$$

3.4 利用镜像电流源代替电流源元件

仿真题 2-2 中第 (4) 小问要求的使用镜像电流源代替电流源元件的运放电路如图 24, 其中根据原本使用的 $1.15mA$ 和 $1.76mA$ 电流源来分别计算得到对应镜像电流源中的 R , 具体电路如图 24, 其中 $R_4 = 28k\Omega$, $R_5 = 18.25k\Omega$ 。而此时静态工作点

和图 15 相比, 25 各个参数差不多, 通过同样的分析, 可以发现其处于合适的静态工作点。

4 仿真题 2-3

此选做中, 我基于作业补充题 7 进行讨论, 在补充题 7 的理论计算基础上, 结合课程中叶老师在讲解差分电路时, 留下的思考题: 关于 MOSFET 组成的恒流源式差分放大电路, 若差分电路参数不对称时, 将对静态和动态产生何影响。图 26 为作业补充题七的电路图。参数: $V_+ = 10V$, $V_- = -10V$, $R_D = 50k\Omega$, $\Delta R = 500\Omega$, $R_S = 75k\Omega$ 。其中 MOS 管的参数没有采用补充题 7 中的参数, 而是使用 2N7000 的参数。

4.1 静态分析

从图 27 中, 可以发现在参数对称时, 对应参数均相同, 即输出两点 $V(1)=V(3)$, 且两个 MOS 管的 I_D 基本相同。但是在参数不对称时, 漏极处电阻较大的漏极电压较低, 且漏极电流较小。

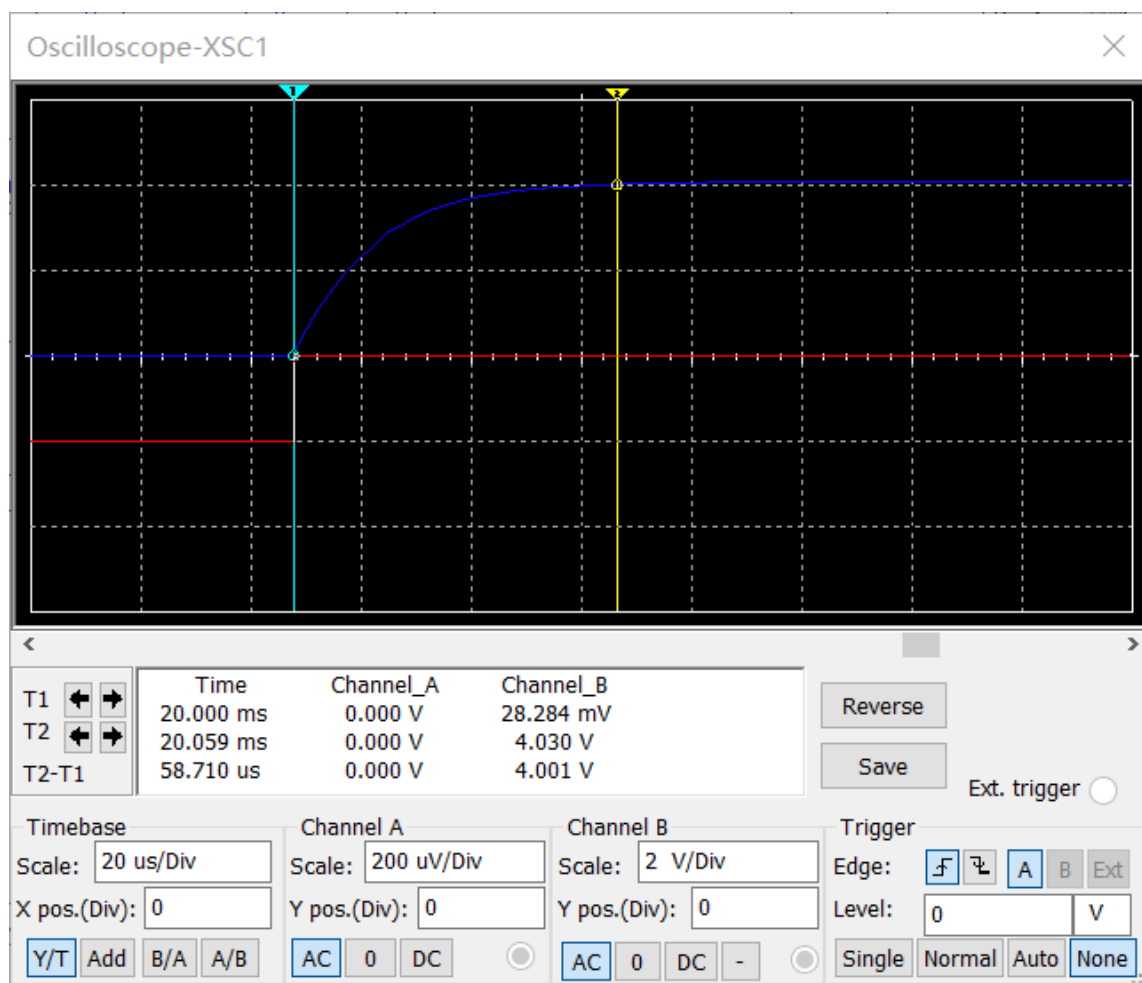


图 23: SR 测量

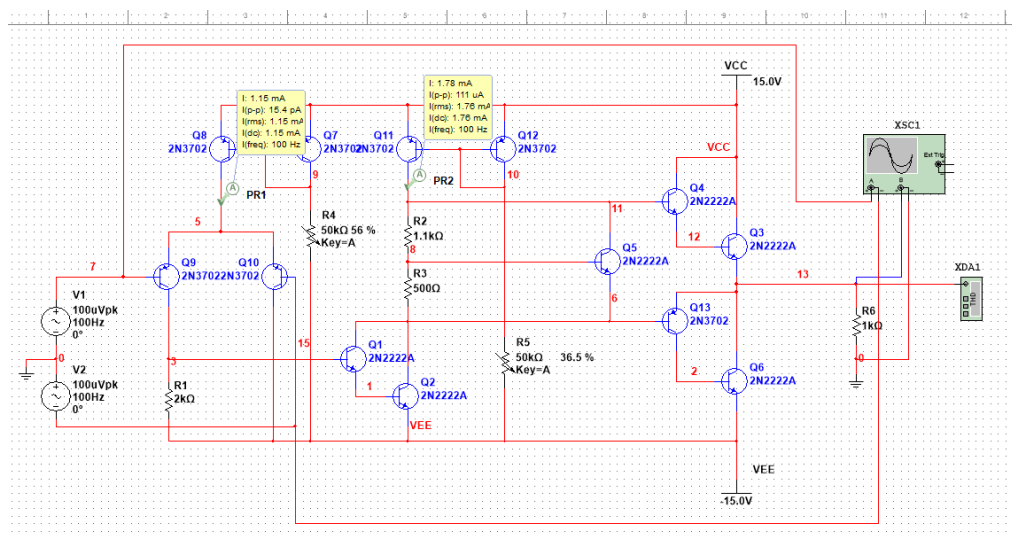


图 24: 集成运放电路图

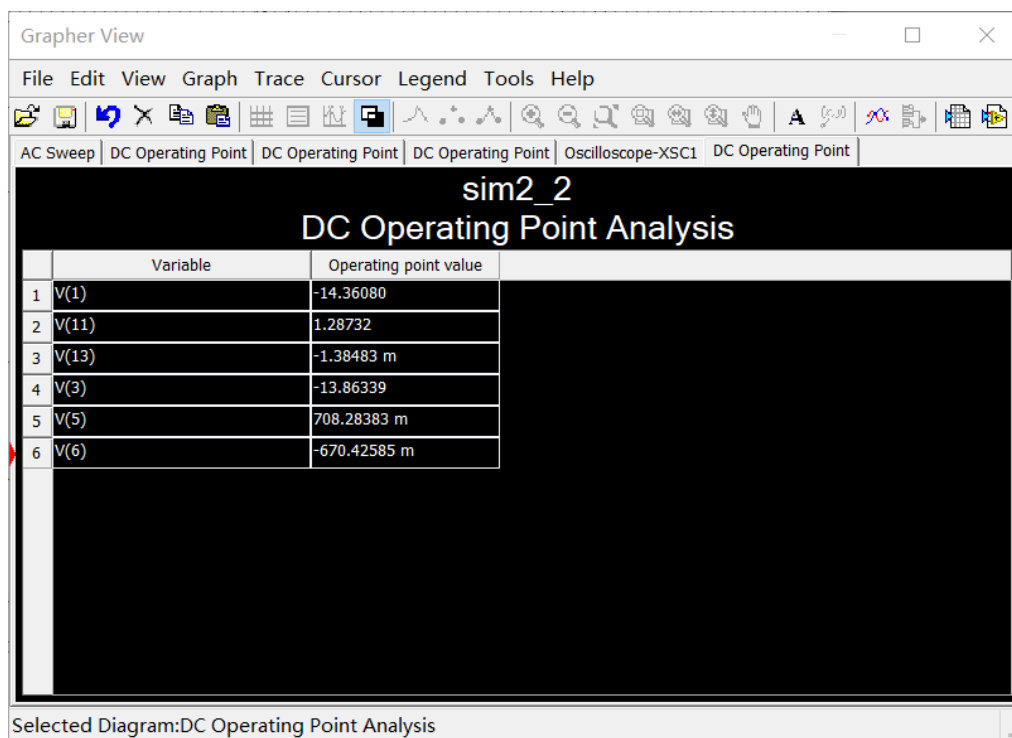


图 25: 集成运放静态工作点仿真

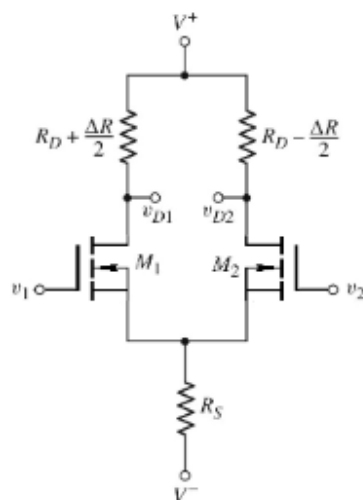
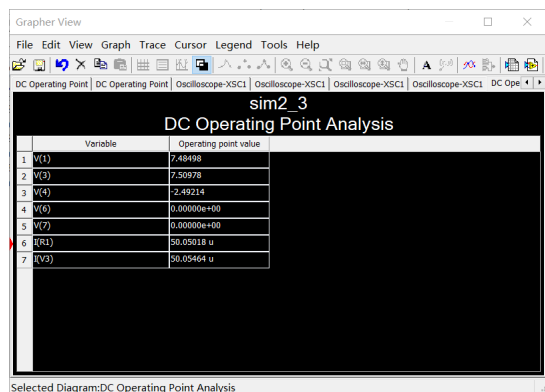
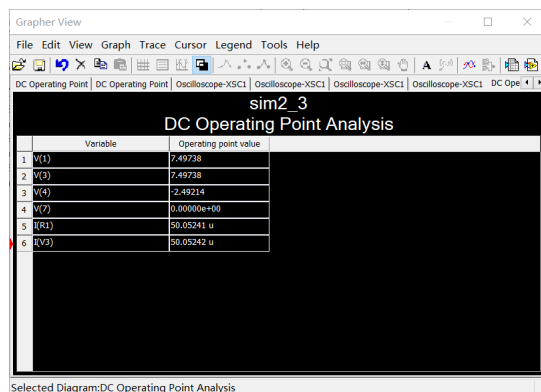


图 26: 作业补充题 7 电路图



(a) 参数不对称时



(b) 参数对称时

图 27: 静态分析

4.2 动态分析

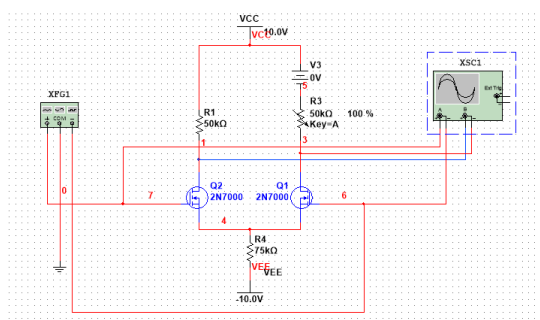
通过图 29 和 28 两者波形图的对比, 我们可以发现其实在参数不对称时, 对于差模电压放大倍数的大小影响不大, 无论是参数对称还是参数不对称, $\Delta U_O = 105.150mV$, 而由于输入电压没有变化, 所以差模电压放大倍数大小无影响, 但是通过示波器波形我们可以清楚的看到输出电压有一定偏移, 这会影响共模时放大倍数, 使其增大, 原来共模时 ΔU_O 为 μV 级, 可以近似认为 $\Delta U_O \approx 0V$, 但此时因为 ΔU_O 数量级大大增大, 所以会导致共模电压放大倍数显著增加, 进而影响 K_{CMR} 。

5 仿真中遇到的问题

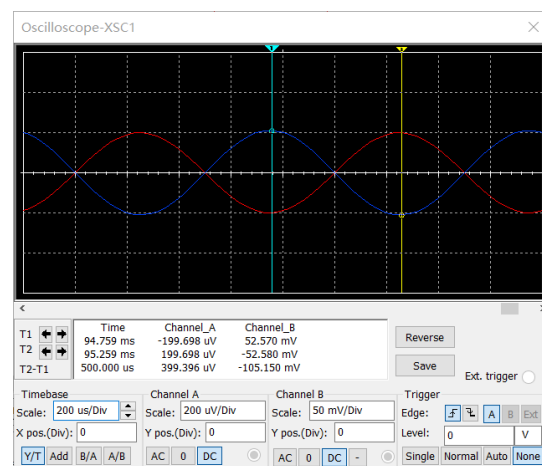
- (1) 放大电路静态工作点难调节。仿真 1 中的放大电路的工作点调节的过程比较复杂, 需要在保证波形不失真的情况下尽量增加放大倍数。在实际过程中, 理论估算和仿真测量结合的方式更有效。
- (2) 运放静态工作点的调节花了较多时间, 电流源的值的调节较为繁琐。

6 收获与体会

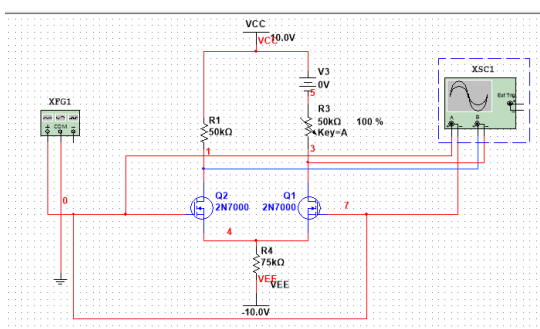
- (1) 对放大电路的搭建以及各个参数的测量更加熟练, 在实验中做过与本次仿真类似的实验, 但是在初次实验的过程中, 因为不熟练导致经常返工, 没有很高的效率, 但这次仿真我感觉自己熟练了一些。
- (2) 本次仿真有关于集成运放的仿真, 这对于调节参数有了很好的训练, 在这次调节电流源的过程中, 我主要是通过先将两个电流源随机设为 $1mA$ 开始, 然后进行静态仿真, 不断根据输出情况来判断静态工作的调节情况, 这一块还不太熟练, 可能还需要继续巩固。
- (3) 第一次使用失真度仪和信号发生器。失真度仪可以定量地检测波形的失真, 在前两个仿真任务中失真的调节很有帮助。信号发生器是选做实验中使用的, 我发现使用信号发生器会比使用元件来的方便。
- (4) 对 MOSFET 的差分放大电路有了更深的了解, 对作业和课上思考的一种仿真验证, 同时也是一种探究精神的培养。



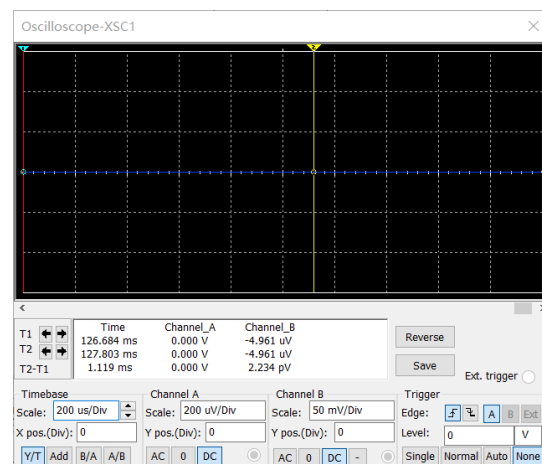
(a) 参数对称时仿真电路图（差模）



(b) 参数对称时仿真波形图（差模）

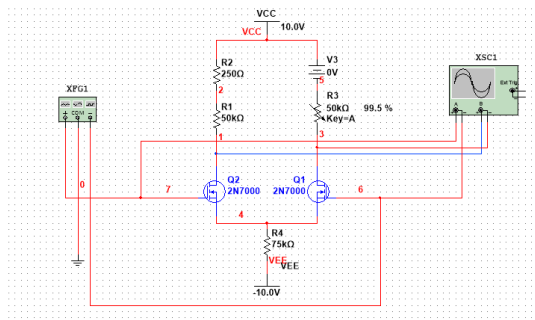


(c) 参数对称时仿真电路图（共模）

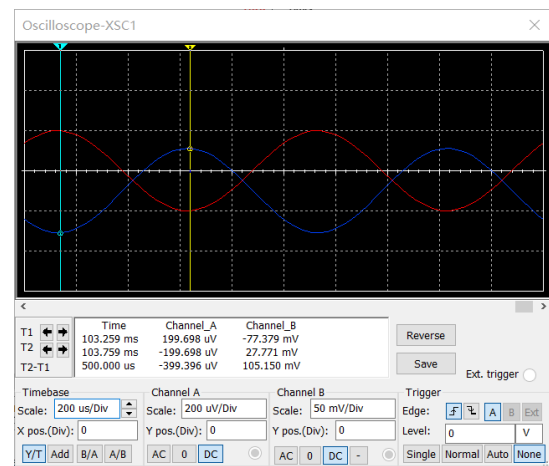


(d) 参数对称时仿真波形图（共模）

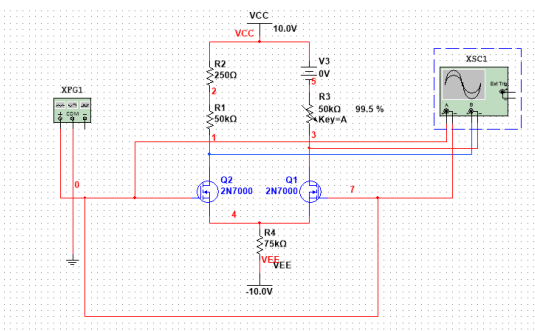
图 28: 参数对称时动态分析



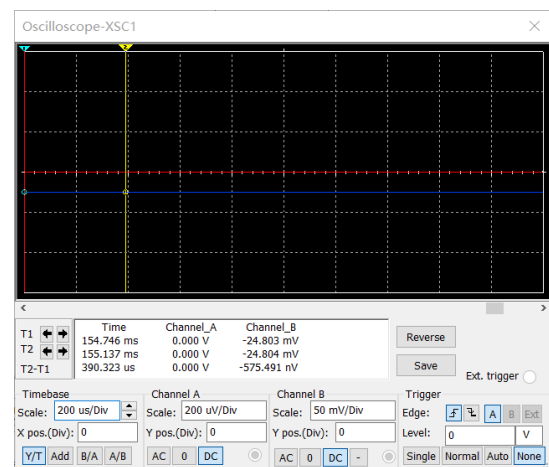
(a) 参数不对称时仿真电路图（差模）



(b) 参数不对称时仿真波形图（差模）



(c) 参数不对称时仿真电路图（共模）



(d) 参数不对称时仿真波形图（共模）

图 29: 参数不对称时动态分析