

模电基础实验 1：运算放大器基本电路研究

姓名：

学号：

班级：

时间：2022.4

指导老师：谢楷 张宝

模电基础实验 1：运算放大器基本电路研究

实验目的：

- (1) 掌握运算放大器的基本电路的设计方法。
- (2) 掌握放大器指标（增益、带宽、输入阻抗）的测量方法。
- (3) 发现运算放大器的缺陷，理解其理想模型和实际之间的差异、原因，以及对电路性能的影响。

实验内容：

1、利用学过的知识，利用集成运放 LM324 设计并制作两个电压放大器电路。

- (1) 设计并制作一个同相放大器电路，要求增益为 32dB（40 倍）。
- (2) 设计并制作一个反相放大器电路，要求增益为 26dB（-20 倍）。
- (3) 增益误差 < 5%
- (4) 输入阻抗 > 1k Ω
- (5) 输出幅度：峰值 > 10V

要求：

- 1) 写出电路参数计算与分析过程；
- 2) 贴出电路图；
- 3) 附面包板实际搭接照片 + 自己的一卡通。

问题的解决：

- (1) (2)

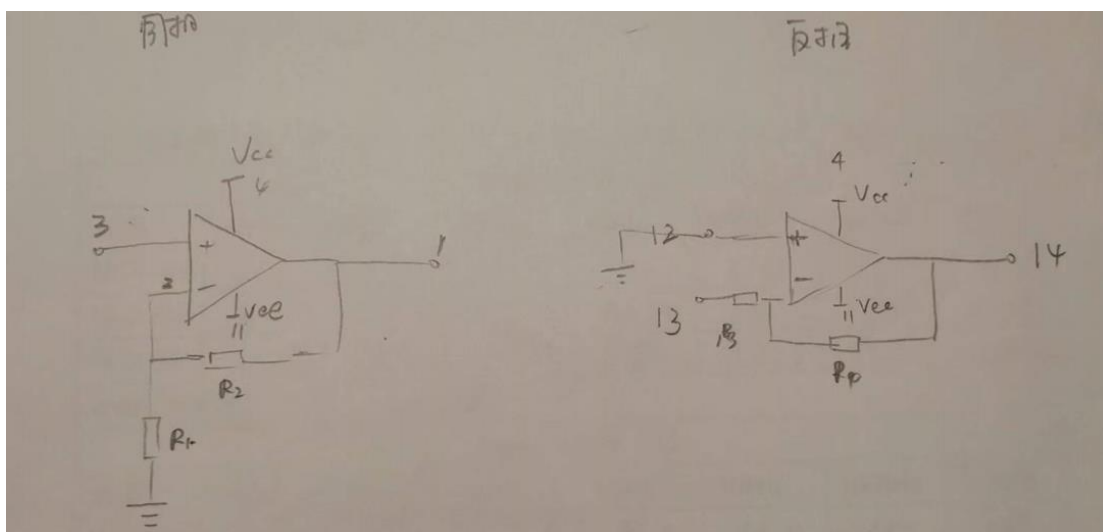


图 1 电路设计基本原理

依照本次实验要求，本次电路设计为 40 倍的同向比例放大器和-20 倍的反

向比例放大器这两个基本电路。具体设计如图，对应数字与实际运放芯片一一对应。

$$U_1 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot U_3$$

$R_2 = 39k \quad R_1 = 1k$

$$U_{14} = - \frac{R_4}{R_3} \cdot U_{13}$$

$R_4 = 20k \quad R_3 = 1k$

图 2 具体放大倍数的选择

按照题目倍数要求，选取电阻分别为 $R_1=1K\Omega$ ， $R_2=39K\Omega$ ， $R_3=1K\Omega$ ， $R_4=20K\Omega$ 。实际上， R_2 没有理想电阻，故分为 $12K\Omega$ 和 $27K\Omega$ 两个电阻串联进行替代。另外，输出幅度受运算放大器 V_{cc} 和 V_{ee} 两端电压的限制，所以外接电压源范围理论上不超过 $\pm 15V$ 。

(3) 具体附一卡通的实物电路结果为：

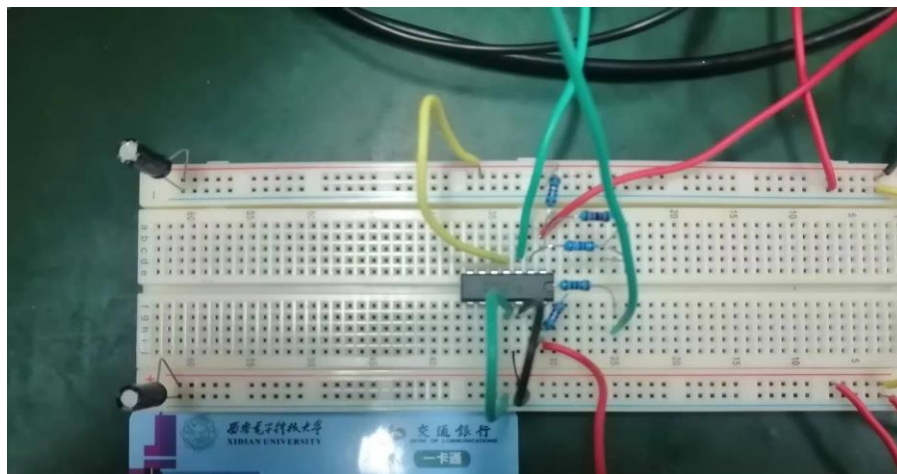


图 3 制作实物和一卡通

在实物电路中，最外侧上端输入为 V_{cc} ，最下端输入为 V_{ee} ，中间一圈为 GND 。 V_{cc} 、 V_{ee} 和 GND 之间连接电容，去除杂波。最中间以 LM324 运算放大器为核心，上侧为同相比例放大器，下侧为反相比例放大器。

结果分析：

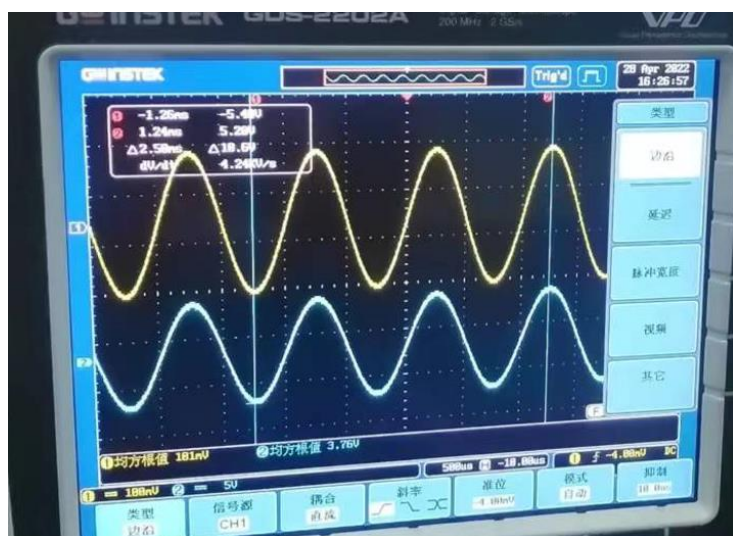


图 4 同相比例放大器输出结果

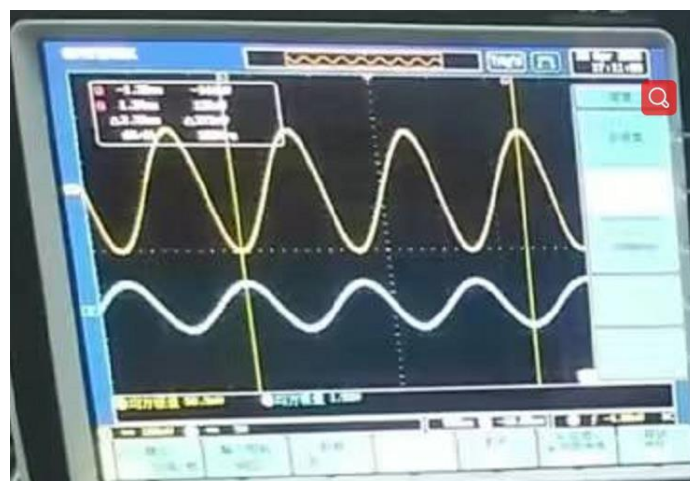


图 5 反相比例放大器输出结果

总体看来，其输出结果符合同向比例放大器和反相比例放大器的基本特征，其误差在 5%边缘。其误差可能来源于电阻值并不完全标准等原因。在实际电路应用中，可以考虑使用电位器等装置进行调试，使得输出的精度更高。

2、完成对放大器指标的测量。

(1) 设计一种测量输入阻抗的实验方法，并分别测量两个放大器的输入阻抗要求：

- 1) 画出测量方法的示意图；
- 2) 写出输入阻抗测量值表达式；
- 3) 附原始数据和结果；
- 4) 简要分析两种放大器输入阻抗差异及其原因。

问题的解决：

- 1) 示意图

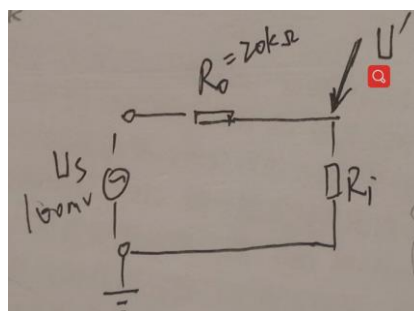
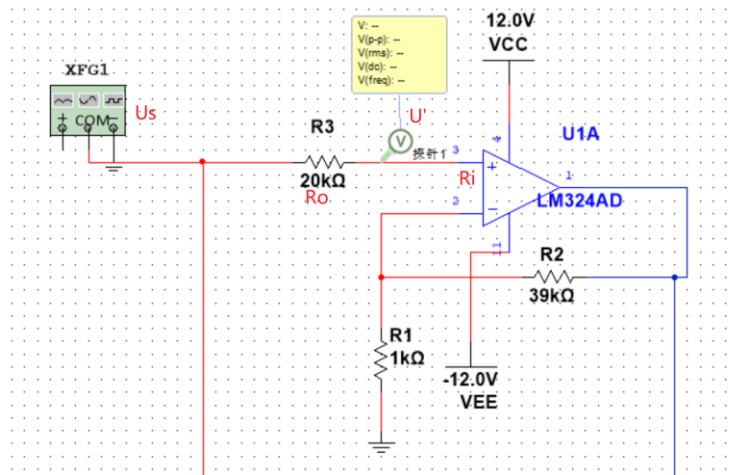


图 6 两种设计图表现

注：图中探针部分为示波器直接测量。两种放大器测量方式类似。

2) 表达式

$$R_i + R_o = U_s / ((U_s - U') / R_o)$$

即：

$$R_i = U_s R_o / (U_s - U') - R_o$$

3) 已知 $U_s = 100\text{mV}$ 。

当电路为同相比例放大器时， $R_o = 60\text{k}\Omega$ ， $U' = 24\text{mV}$ ，计算 R_i 为 $18.9\text{k}\Omega$ 。

当电路为反相比例放大器时， $R_o = 20\text{k}\Omega$ ， $U' = 24\text{mV}$ ，计算 R_i 为 $2.22\text{k}\Omega$ 。

4) 两种阻抗差异：

反相比例放大器的输入阻抗为**输入比例电阻值**，正常情况都被视为几 $\text{K}\sim$ 几十 K ，比较低；同相比例放大器的输入阻抗，为**运放本身的输入阻抗**，跟运放有关，一般大于几 M 甚至几百 M 。

(2) 设计一个实验，测量放大器的增益和带宽。

给定仪器：信号源（固纬 AFG-2225）、示波器（固纬 GDS-2202）

要求与问题的解决：

1) 画出测量实验的连接图，写出主要步骤。

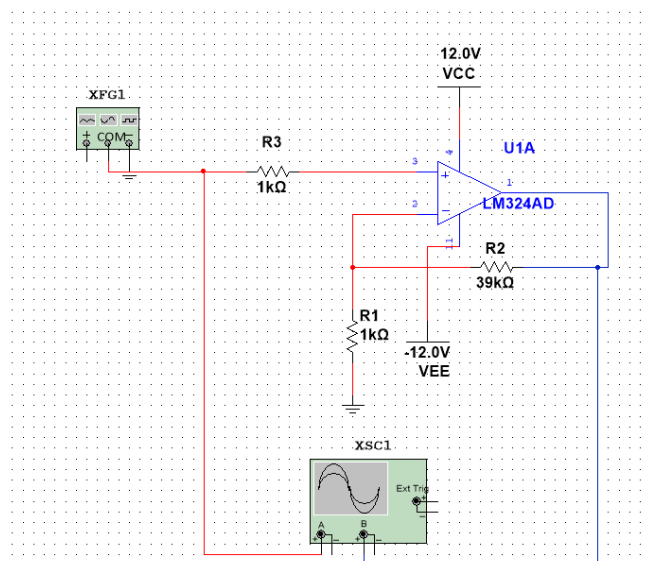


图 7 增益和带宽测量电路（以一个放大器为例）

主要步骤：

- （1）检查电路连接是否正常。
- （2）调节信号源输入信号的频率，以符合实验要求的频率。
- （3）观察并记录示波器双通道信号稳定时的输入和输出电压。
- （4）重复（2）（3）直至实验结束。

2）测量两个放大器电路在不同频率正弦波下的增益，填入下表(电压为有效值)

表 1 两种放大器增益

32dB 同相放大器							
频率	300Hz	1kHz	3kHz	10kHz	30kHz	100kHz	300kHz
输 入 mV	101	101	101	101	102	102	130
输 出 mV	3780	3760	3750	3520	2470	1010	569
增益 dB	31.46	31.42	31.39	27.81	27.68	19.91	12.82
-3dB 点(带宽)		23 kHz					
26dB 反相放大器							
频率	300Hz	1kHz	3kHz	10kHz	30kHz	100kHz	300kHz
输 入 mV	96.6	96.3	96.3	96.7	96.4	100	139
输 出 mV	1890	1910	1910	1870	1630	893	489
增益 dB	25.83	25.92	25.95	25.73	25.56	19.02	11.57
-3dB 点(带宽)		46 kHz					

3) 在对数坐标上画出两个放大器的幅-频特性曲线

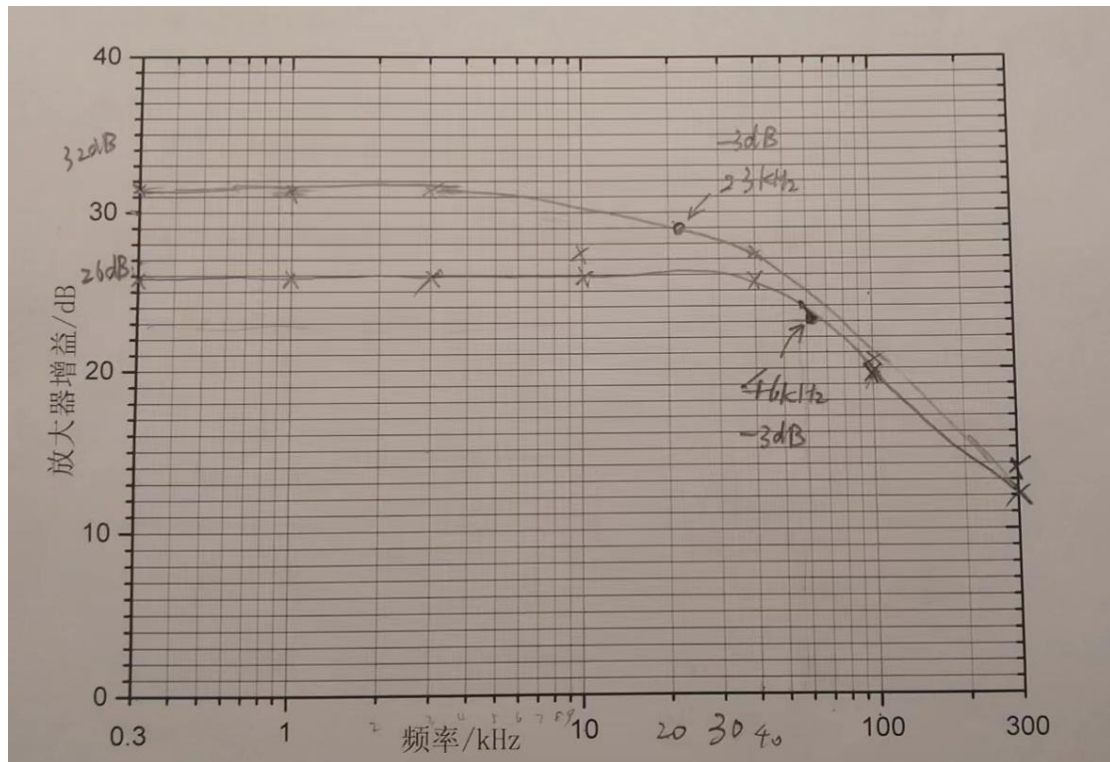


图 8 幅-频特性曲线

4) 你发现（通带增益和带宽之间）存在有什么规律么？

通带增益越高，带宽越窄。

3、观察并探索放大器电路的非理想特性

问题的解决：

(1) 放大器输入 0V（将输入对地短路），测量两个放大电路的输出电压值。

输出电压是否为零？请解释可能是什么原因引起的？

不为零，两种放大器多次测量输出电压均为 140~160mV 之间。可能原因为运算放大器本身结构不对称，将内部失调电压输出得到。

(2) 增大输入正弦信号幅度，观察当输出幅度接近（或理论上试图超过）电源电压时的波形。

请拍一张波形的照片，并解释这一现象。

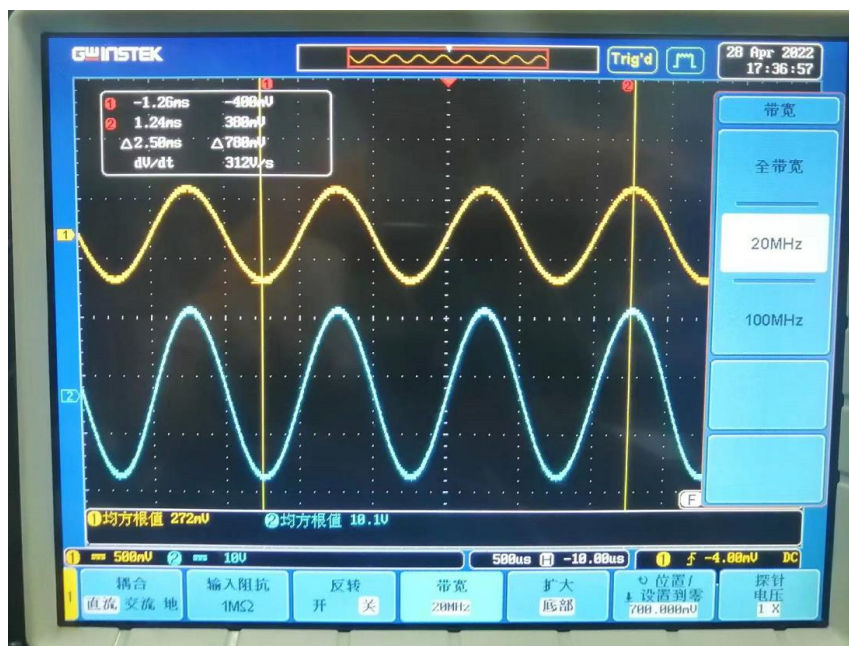


图 9 临近限度时的放大波形

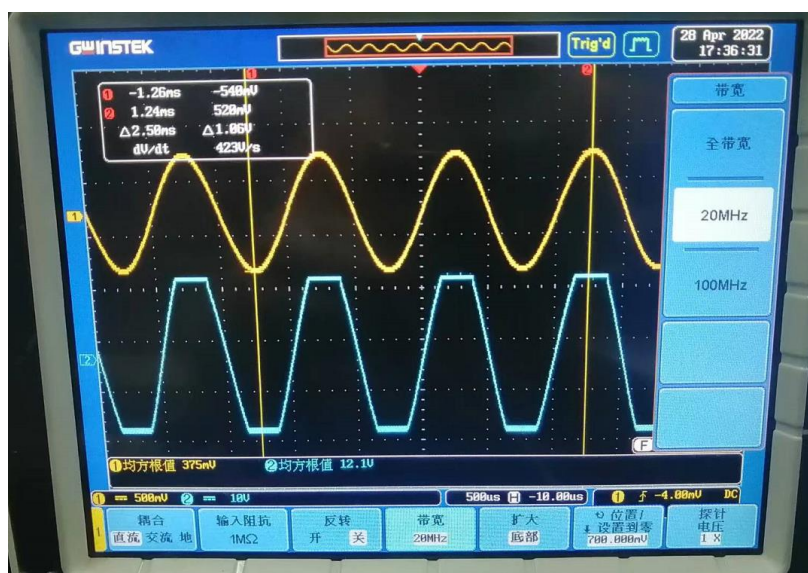


图 10 达到限度时的放大波形

运算放大器实际工作中会受到 V_{cc} 和 V_{ee} 幅度的限制，放大后的信号只能在一定范围内放大。所以，在选用运算放大器时，要注意对应参数，以选用最合适的运算放大器。

- (3) 输入 100mV 方波信号。时间轴放大，观察输出上升沿（或下降沿）波形请拍一张波形的照片，并解释这一现象。



图 11 放大时间轴后的图像

由图可见，输入电压是突变的阶跃信号，输出电压是逐渐攀升得到的结果。其可能原因为，运放其本质还是模拟，在变化过程中不满足虚断的条件，所以存在一定的压摆率，输出信号需要一定时间才能达到所期待的电压信号。

(4) 将放大器的输入端开路悬空，观察并记录输出电压，解释该现象。



图 12 放大器输入端悬空时的输出电压（主要关注频率）

和同学交流，不同输入端输出电压不尽相同，但是频率都是相似的。其原因分析为我们生活的空间中存在 50Hz 的交流电磁波，经过放大器放大输出，检测到对应频率。所以，可以把输入端悬空看作一个简易的天线，我们生活中很多信号就可以通过悬空输入端获取，也可以看出我们生活在一个遍布电磁波的世界中。

注意事项:

(1) 信号源的负载阻抗, 要设为高阻 (Hi-Z) 状态。因为信号源的输出电压是默认按照 50 欧匹配来设计的, 如果它的负载不是 50 欧, 而是开路或接高阻电路, 则信号幅度会变为设定值的 2 倍。只有在信号源菜单里将负载设为 Hi-Z 后, 则负载为高阻状态时, 信号幅度与设定值才是一致的。

(2) 实验要使用双路电源 (+Vcc 和 -Vee)。可以将双路电源设定为串联模式, 它会自动开启跟踪模式保持正负压相等。实验中电源电压不要超过 $\pm 15\text{V}$, 因为 LM324 最高耐压为 32V。

(3) 正负电源输入至面包板处, 应对地加 2 只退偶电容 (10uF), 注意极性, 接反会炸裂。

(4) 先测量电源电压正常, 再将正负电源接入面包板。注意所有的元件、导线拔插之前都必须断电操作。断电不要使用总电源开关, 而要用 ON/OFF 按钮。

(5) 插接线不排除断线 (极少数) 的可能, 使用前应测量导通电阻。

(6) 实验完毕, 所有元件从面包板上拆卸、分类并归还实验室。