

浙江大学实验报告

专业：电气工程及自动化

姓名：

学号：

日期：4月21日

地点：东三-211

课程名称：电路与电子技术实验 II

指导老师：孙盾

成绩：

实验名称：集成运算放大器的指标测试

实验类型：模电实验

同组学生姓名：

一、实验目的和要求

- 1、加深对集成运算放大器特性和参数的理解；
- 2、学习集成运算放大器主要性能指标的测试方法。

二、实验内容和原理

内容：

- 1、测量输入失调电压 V_{IO} ；
- 2、测量输入失调电流 I_{IO} ；
- 3、测量输入偏置电流 I_{IB} ；
- 4、测量开环差模电压增益 A_{od} ；
- 5、测量最大不失真输出电压幅度 $V_{o(max)}$ ；
- 6、测量共模抑制比 K_{CMR} ；
- 7、测量转换速率 SR ；

原理：

1、在常温下，当输入信号为零时，集成运放的输出电压不为零，该输出电压称为输出失调电压。为了使输出电压回到零，需要在输入端加上反向补偿电压，该补偿电压称为输入失调电压 V_{IO} 。 V_{IO} 可能为正，也可能为负。高质量运放的 V_{IO} 一般在 $1mV$ 以下。测出输出电压 V_{O1} 的大小（实测值可能为正，也可能为负），输入失调电压为：
$$V_{IO} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{O1}。$$

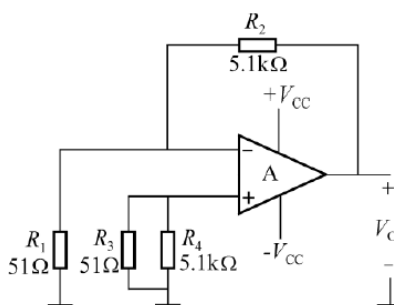


图 5.1 V_{IO} 测试电路

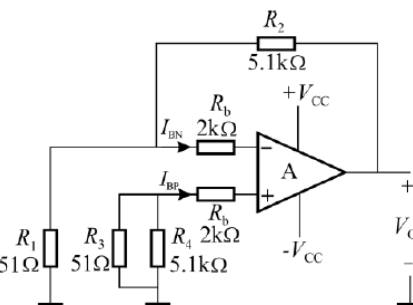


图 5.2 I_{IO} 测试电路

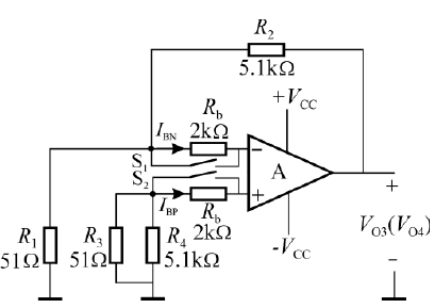


图 5.3 I_{IB} 测试电路

2、在常温下，当输入信号为零时，集成运算放大器两个输入端的输入电流之间的差值称为输入失调电流 I_{IO} ，设 I_{BP} 和 I_{BN} 分别是运放同相输入端和反相输入端的输入电流，则输入失调电流 $I_{IO} = |I_{BP} - I_{BN}|$ 。集成运放 I_{IO} 一般在 $100nA$ 以下。测得运放的输出电压 V_{O2} ，则输入失调电流为：

$$I_{IO} = |V_{O2} - V_{O1}| \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{R_b}。$$

3、输入偏置电流是指在常温下，且输入信号为零时，集成运算放大器两个输入端输入电流的平均值，即 $I_{IB} = \frac{1}{2} (I_{BP} + I_{BN})$ 。集成运放的 I_{IB} 一般在 $10nA \sim 1\mu A$ 范围内。当 $S1$ 断开、 $S2$ 闭合时，若测得运放输出电压为 V_{O3} ，当 $S1$ 闭合、 $S2$ 断开时，若测得运放输出电压为 V_{O4} ，则输入偏置电流为：

$$I_{IB} = \frac{1}{2} (I_{BN} + I_{BP}) = \frac{1}{2} (V_{O3} - V_{O4}) \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{R_b}。$$

4、被测运放一方面通过 R_f 、 R_1 、 R_2 引入直流反馈，以抑制输出电压失调；另一方面，通过 R_f 引入交流反馈，输入回路中的电阻 R_1 和 R_2 同时又起到对输入交流信号进行分压衰减的作用。同相端接地电阻 R_3 应与反相端所接电阻相匹配，以减小输入偏置电流的影响。电容 C 是隔直电容。被测集成运算放大器的开环差模电压增益为：
$$A_{od} = \frac{V_o}{V_{id}} = \frac{V_o}{V_{id} \frac{R_2}{R_1 + R_2}}。$$

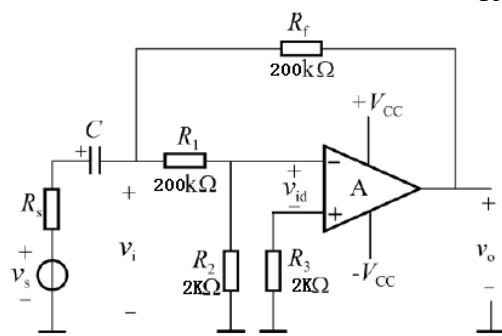


图 5.4 A_{od} 与 $V_{o(max)}$ 测试电路

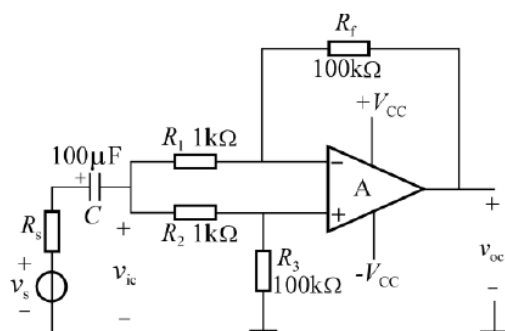


图 5.5 K_{CMR} 测试电路

5、 $V_{o(max)}$ 的测试如图5.4 所示，与 A_{od} 的测试电路相同。实验时，只需改变 v_s 幅度，并观察 v_o 是否开始出现削顶失真，从而确定运放在一定电源电压下的最大不失真输出电压幅度 $V_{o(max)}$ 。

6、集成运放的共模抑制比是其差模电压放大倍数 A_{od} 与共模电压放大倍数 A_{oc} 之比的绝对值，即 $K_{CMR} = \left| \frac{A_{od}}{A_{oc}} \right|$ 。此图中 $A_{oc} = \frac{v_{oc}}{v_{ic}}$ 。

7、转换速率 SR 反映了集成运放对信号变化速度的适应能力。在大信号条件下，集成运放的输出电压随时间的最大变化率称为转换速率，即 $SR = \left| \frac{dv_o}{dt} \right|_{\max}$ 。集成运算放大器一般在每微秒零点几伏以上，高速型运放的转换速率高达每微秒上百伏。

若输入信号是前沿陡峭的大幅度方波（峰峰值 $\geq 1V$ ），则由输出波形 v_o 的过渡区斜率（一般取 $0.9 V_{Om}^+ \sim 0.9 V_{Om}^-$ ），可得到被测运放的转换速率， $SR = \frac{0.9 V_{Om}^+}{\Delta t_2} = \frac{0.9 V_{Om}^-}{\Delta t_1}$ 。若测得正向与负向的转换速率不同，则应取其中数值较小者。

当采用正弦电压作为输入信号时，设正弦输出电压为 $v_o = V_{o(max)} \sin 2\pi f t$ ，式中 $V_{o(max)}$ 为集成运放的最大不失真输出电压。则转换速率为： $SR = \left| \frac{dv_o}{dt} \right|_{\max} = 2\pi f V_{o(max)}$ 。当输入正弦波 v_s 的频率太高时，由于受转换速率的限制，将出现输出电压的变化跟不上输入电压的变化，从而引起输出正弦波形严重失真，甚至使输出几乎成为三角波，而且幅度也将明显地减小。

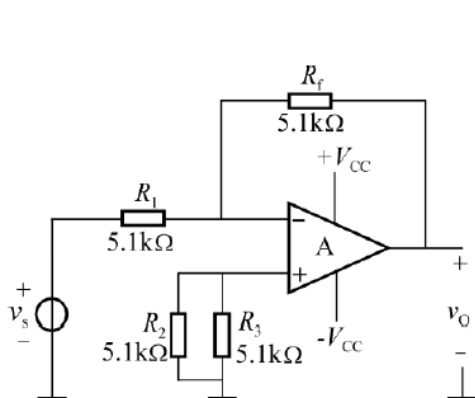


图 5.6 SR 测试电路

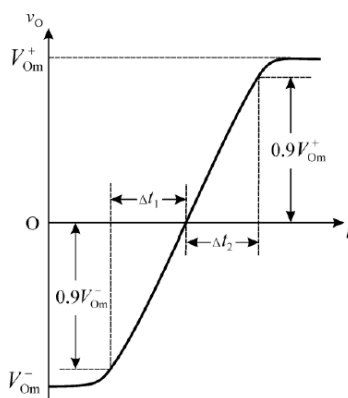


图 5.7 SR 测试波形

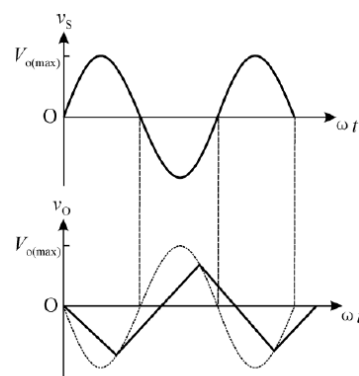


图 5.8 因 SR 引起的失真

三、主要仪器设备

实验箱、信号源、示波器、导线、LM358；

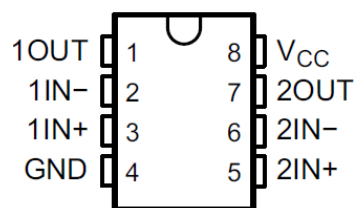
四、操作方法和实验步骤

实验任务 1-3, 按实验电路和 LM358 引脚排列图分别接线, 只加直流信号。用万用表测量输出 V_{O1} 、 V_{O2} 、 V_{O3} 、 V_{O4} 。其中实验任务 3 时, 开关的断开闭合直接用导线断开和短接代替。

实验任务 4 中电容采用 100 μ F, 信号源频率 50Hz, V_{pp} 100mV, 实验 6 因为要测共模输出, 所以要加大输入信号的幅值, V_{pp} 为 10-12V。实验任务 5 的测试电路与 4 相同, 实验时不断加大 V_s 的幅值, 观察 V_o 至刚开始出现削顶失真, 记下此时的 V_o 为该电源电压下的最大不失真输出电压 $V_{o(max)}$ 。

实验任务 7 中用方波输入信号测量, 其峰峰值 $\geq 1V$, 不断调小输出信号的测量周期至合适位置, 用示波器的 cursor 测量时间; 正弦波测量时, 因信号源输出 V_{pp} 最大只有 20V 而达不到 $V_{o(max)}$ 再用一个运算放大器构成同向比例放大器将信号源的信号放大, 用 $f = \frac{SR}{2\pi V_{o(max)}}$ 估算大概的频率, 然后将输入信号反向与输出信号对比, 不断加大输入频率, 记下输出从正弦波变至三角波时的临近频率。

在实验任务 3、4、6、7 时, 输出端上需用示波器监视, 被测运放始终工作在线性放大区内即不饱和, 且电路没有产生自激振荡。



五、实验数据记录和处理

1-3、万用表测得数据为

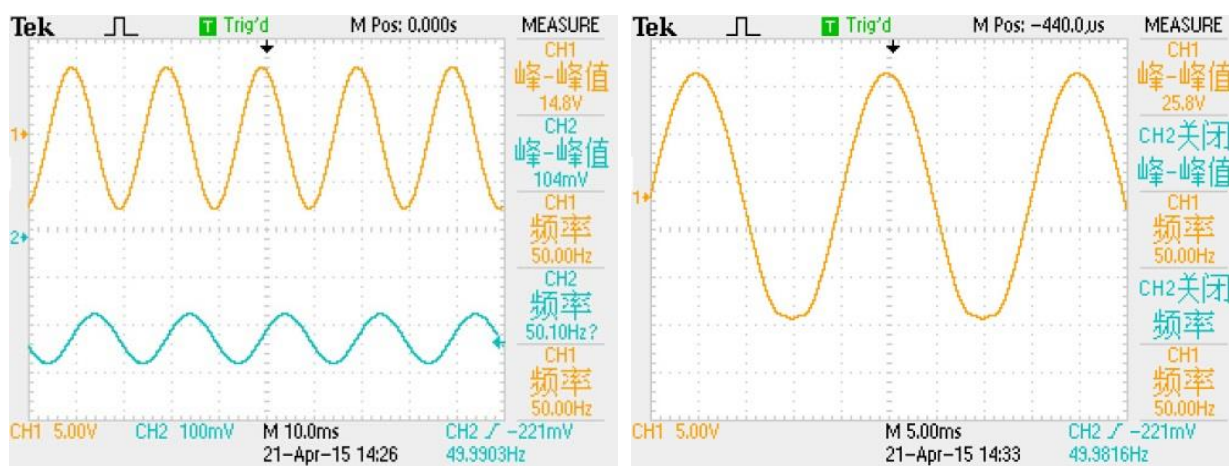
V_{O1}	V_{O2}	V_{O3}	V_{O4}
-0.218V	-0.220V	-0.221V	-0.213V

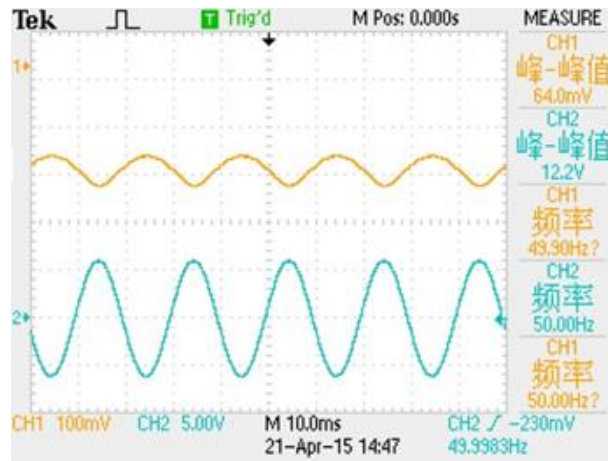
代入公式计算: 输入失调电压为 $V_{IO} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{O1} = -2.16mV$

输入失调电流为 $I_{IO} = |V_{O2} - V_{O1}| \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{R_b} = 9.90 \times 10^{-6} mA = 9.90nA$

则输入偏置电流为 $I_{IB} = \frac{1}{2} (I_{BN} + I_{BP}) = \frac{1}{2} (V_{O3} - V_{O4}) \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{R_b} = 1.98 \times 10^{-5} mA = -19.8nA$ 。

4-6 波形图:



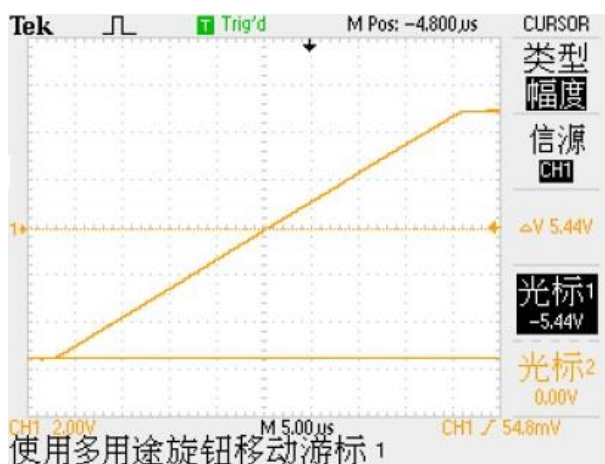


4、测得 $V_o=14.8V$, $V_i=104mV$, 得 $A_{od} = \frac{V_o}{V_{id}} = \frac{V_o}{V_{id} \frac{R_2}{R_1 + R_2}} = 14373$ 。

5、 $V_{o(max)}=25.8V/2=12.9V$ 。

6、测得 $V_{ic}=12.2V$, $V_{oc}=64.0mV$, 得 $A_{oc} = \frac{V_{oc}}{V_{ic}} = 5.246 \times 10^{-3}$, $K_{CMR} = \left| \frac{A_{od}}{A_{oc}} \right| = 2.74 \times 10^6 = 128.8dB$ 。

7、①方波测量：

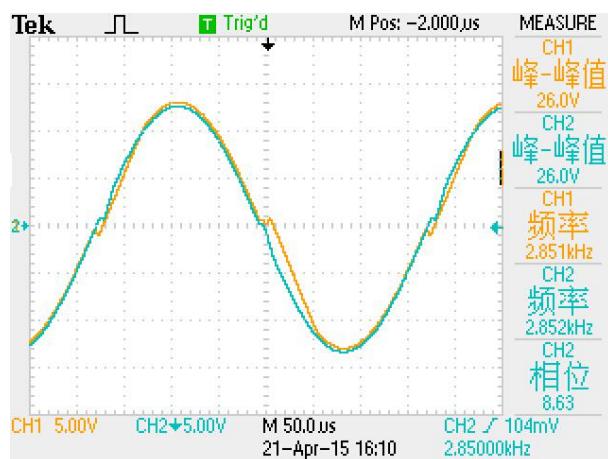


测量得 $V_{Om}^- = 5.44V$, $V_{Om}^+ = 4.88V$, $\Delta t_1 = 18.40\mu s$, $\Delta t_2 = 18.40\mu s$,

计算得 $SR_1 = \frac{0.9V_{Om}^+}{\Delta t_2} = 0.239V/\mu s$, $SR_2 = \frac{0.9V_{Om}^-}{\Delta t_1} = 0.245V/\mu s$,

所以 $SR = \min(SR_1, SR_2) = 0.239V/\mu s$ 。

②正弦波测量:



频率不断加大到 2850Hz 时开始产生三角形失真, $SR = \left. \frac{dv_o}{dt} \right|_{\max} = 2\pi fV_{o(\max)} = 2.31 \times 10^5 V/s$ 。

六、实验结果与分析

1、将所测得的数据与典型指标值进行比较:

集成运算放大器的指标	实测值	说明书里的参考值(Operating Conditions, $T_A = 25^\circ C$)
输入失调电压(Input offset voltage) V_{IO}	-2.16mV	3mV
输入失调电流(Input offset current) I_{IO}	9.90nA	2nA
输入偏置电流(Input bias current) I_{IB}	-19.8nA	-20nA
开环差模电压增益 A_{od}	14373	10000
最大不失真输出电压幅度 $V_{o(\max)}$	12.9V	13.5V
共模抑制比 K_{CMR}	128.8dB	120dB
转换速率(Slew rate at unity gain)SR	0.239 V/ μs	0.3 V/ μs

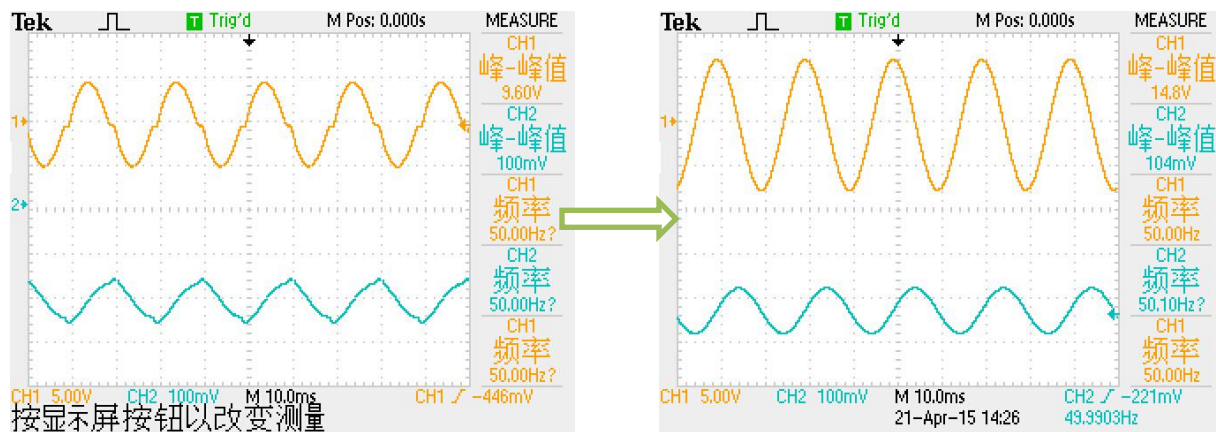
发现测量值与参考值基本相近, 说明测量方法和过程应该正确。

2、在测试运放的开环差模电压增益时, 为什么必须引入负反馈?

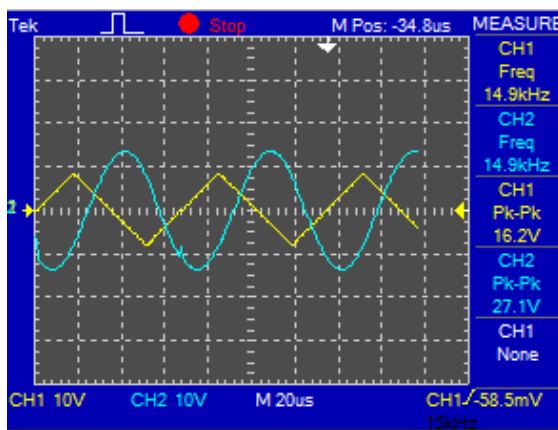
被测运放一方面通过 R_f 、 R_1 、 R_2 引入直流反馈, 以抑制输出电压失调, 同时因为运放的线性工作区非常小, 输出电压很容易达到饱和, 引入负反馈才能正常测出电压增益; 另一方面, 通过 R_f 引入交流反馈, 输入回路中的电阻 R_1 和 R_2 同时又起到对输入交流信号进行分压衰减的作用。同相端接地电阻 R_3 应与反相端所接电阻相匹配, 以减小输入偏置电流的影响。

3、分析实验中遇到的现象:

①在实验任务 4 中开始电阻选择的参数为 510Ω 和 $5.1k\Omega$, 输出和输入波形都产生了严重的畸变, 后来将其改为 $2k\Omega$ 和 $200k\Omega$, 波形恢复正常, 这是由于开始时 510Ω 太小, 而隔直电容较大而产生了畸变。



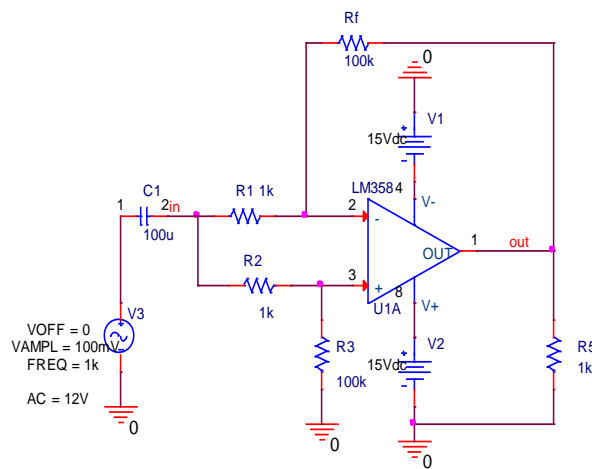
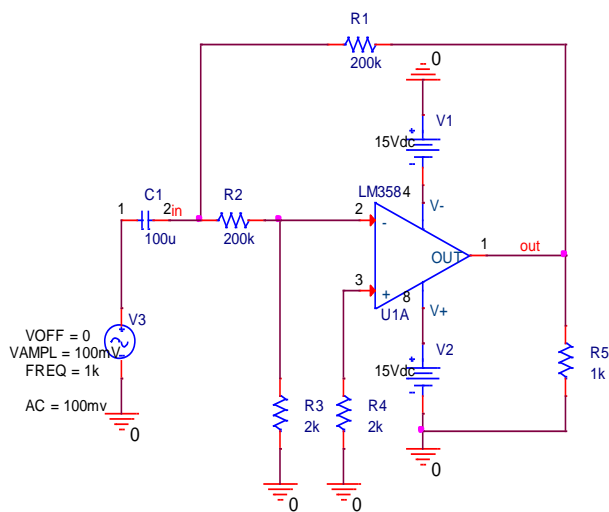
②正弦波测压摆率时，当输入正弦波 v_s 的频率太高时，由于受转换速率的限制，将出现输出电压的变化跟不上输入电压的变化，从而引起输出正弦波形严重失真，甚至使输出几乎成为三角波，而且幅度也将明显地减小。



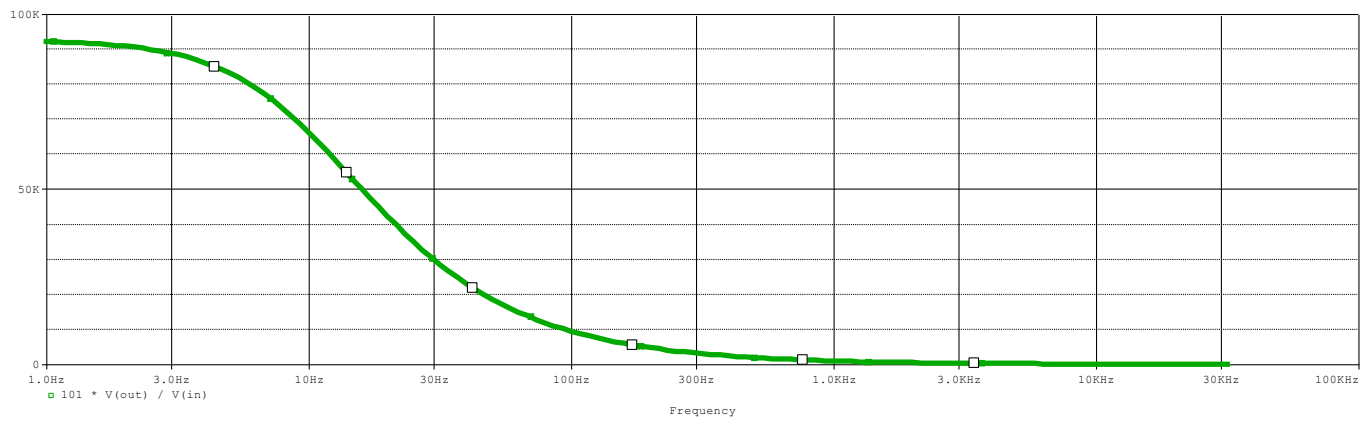
七、讨论、心得

讨论：

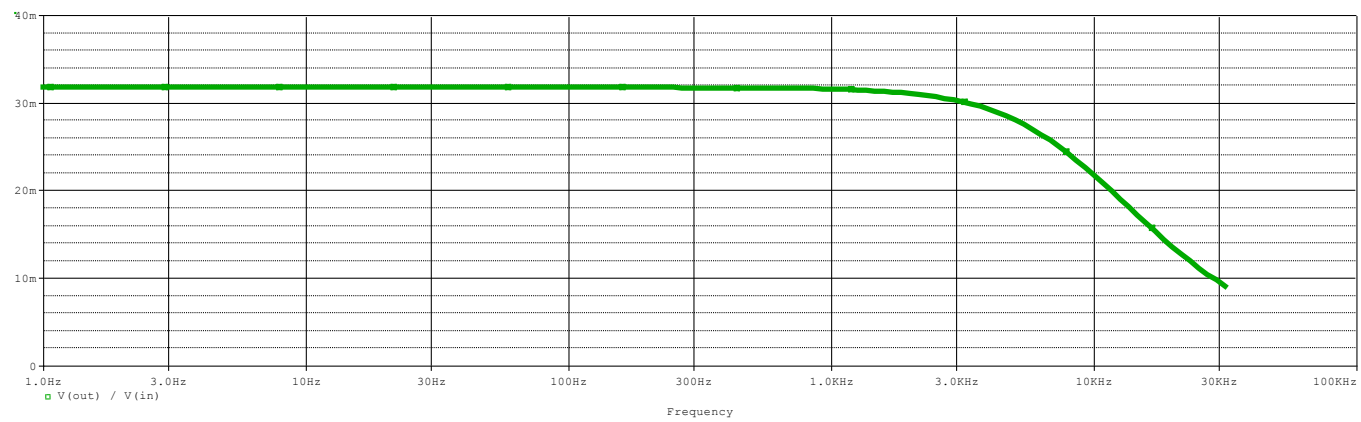
①测量开环增益、最大不失真输出、共模抑止比实验中信号的频率不一样是否对实验的结果有影响？



Aod 与 f 的关系仿真图



Aoc 与 f 的关系仿真图

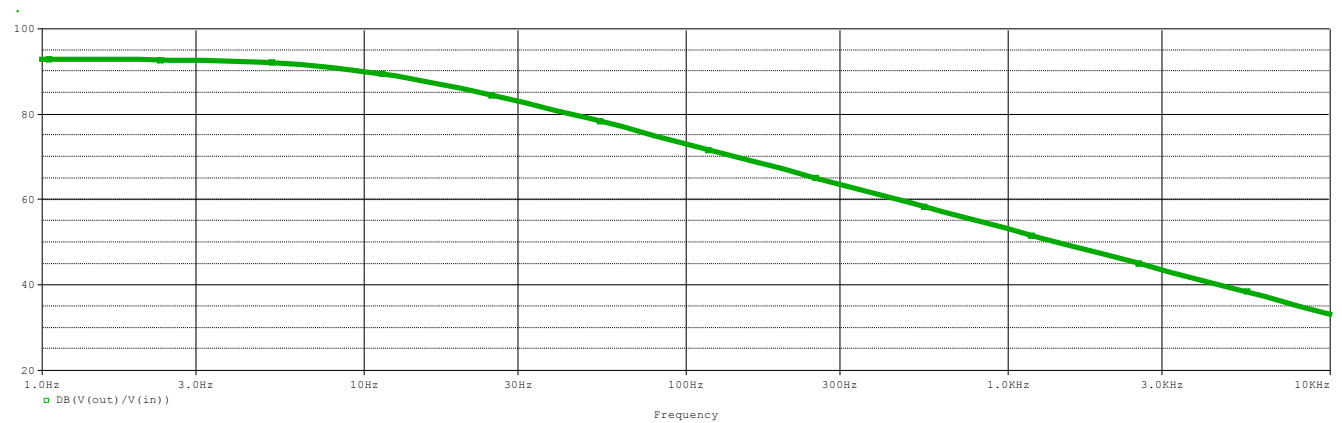


由上述仿真结果可知，测量出的差模电压放大倍数 A_{od} 和共模电压放大倍数 A_{oc} 会随着频率的改变而发生改变，而由 $V_{o(max)} = \frac{SR}{2\pi f}$ 可见集成运放的最大不失真输出电压幅度受运放工作频率的限制。

在实验测量中，低频段 V_{oc} 随频率的变化不明显，而测量出的 A_{od} 和 $V_{o(max)}$ 随频率变化显著，所以测量开环增益、最大不失真输出、共模抑止比实验中信号的频率应保证相同。

②集成运放还有许多其它的指标，也可以进行测量，如：-3dB 带宽 f_H 、单位增益带宽 f_c 、最大共模输入电压 V_{Icmax} 等。

差模增益频率特性



心得：

本次的实验仍以测量为主，也比较简单，但实验中需要耐心、仔细、发现并解决问题的能力。在实验中如遇到实验结果如波形不符合理论，要及时分析原因并对实验设计进行调整使得实验结果更加完善。

通过这个实验，我对理论课上所讲的集成运算放大器一些指标有了更具体可观的了解，并知晓其大概的数值以及测量方法。特别是压摆率的两种测量方法扩充了理论课上只用一句话带过的知识点，让我了解了其与最大不失真输出电压和频率竟然还有奇妙的关系。