

预习报告		实验记录		分析讨论		总成绩	
25		25		30		80	

年级、专业:	2022 级物理学	组号:	D8
姓名:	黄罗琳、王显	学号:	22344001、22344002
实验时间:	2024/5/29	教师签名:	

ET11 模拟运算放大电路

【实验报告注意事项】

1. 实验报告由三部分组成:

- (a) 预习报告: 课前认真研读实验讲义, 弄清实验原理; 实验所需的仪器设备、用具及其使用、完成课前预习思考题; 了解实验需要测量的物理量, 并根据要求提前准备实验记录表格 (可以参考实验报告模板, 可以打印)。 **(20 分)**
- (b) 实验记录: 认真、客观记录实验条件、实验过程中的现象以及数据。实验记录请用珠笔或者钢笔书写并签名 (**用铅笔记录的被认为无效**)。保持原始记录, 包括写错删除部分, 如因误记需要修改记录, 必须按规范修改。(不得输入电脑打印, 但可扫描手记后打印扫描件); 离开前请实验教师检查记录并签名。 **(30 分)**
- (c) 数据处理及分析讨论: 处理实验原始数据 (学习仪器使用类型的实验除外), 对数据的可靠性和合理性进行分析; 按规范呈现数据和结果 (图、表), 包括数据、图表按顺序编号及其引用; 分析物理现象 (含回答实验思考题, 写出问题思考过程, 必要时按规范引用数据); 最后得出结论。 **(30 分)**

实验报告就是将预习报告、实验记录、和数据处理与分析合起来, 加上本页封面。 **(80 分)**

目录

1 ET11 模拟运算放大电路 预习报告	3
1.1 实验目的	3
1.2 仪器用具	3
1.3 原理概述	3
1.4 实验预习题	5
2 ET11 模拟运算放大电路 实验记录	8
2.1 反相比例放大器	8
2.2 同相比例放大器	9
2.3 减法器（差分比例运算）	9
2.4 反相加法器	9
2.5 加减法器	10
2.6 实验过程遇到问题及解决办法	10
3 ET11 模拟运算放大电路 分析与讨论	11
3.1 描述用示波器观察波形的情况	11
3.2 对比理论计算，分析误差	11
3.3 实验后思考题	12
4 ET11 运算放大器 结语	14
4.1 实验心得和体会、意见建议等	14
4.2 附件及实验相关的软硬件资料等	14

ET11 模拟运算放大电路 预习报告

1.1 实验目的

1. 了解运算放大器的基本使用方法。
2. 应用集成运放构成基本运算电路，并测定它们输出信号与输入信号间运算关系。
3. 学会使用线性组件 741。

1.2 仪器用具

编号	仪器用具名称	数量	主要参数（型号，测量范围，测量精度等）
1	模拟电路实验箱	1	
2	数字万用表	1	RIGOL DM3058E
3	函数信号发生器	1	RIGOL DG4162
4	双踪示波器	1	RIGOL DS1104Z PLUS
5	直流稳压电源	1	RIGOL DP831
6	导线	若干	无

1.3 原理概述

1. 反相比例放大器

电路如图所示，当运算放大器开环放大倍数足够大时（大于 10^4 以上），反相比例放大器的闭环电压放大倍数为：

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_I} = -\frac{R_F}{R_1}$$

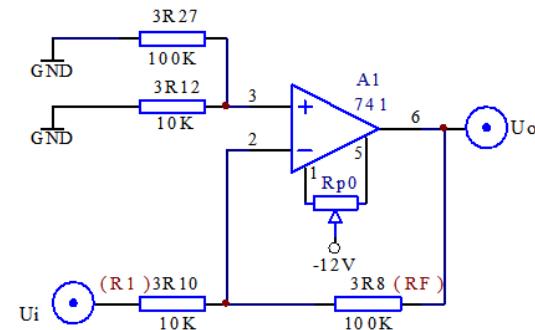


图 1：反相比例放大器电路图

由上式可知，选用不同的电阻比值， A_{uf} 可以大于 1，也可以小于 1，若取 $R_F = R_1$ ，则放大器的输出电压等于输入电压的负值，也称为反相跟随器。

2. 同相比例放大器

电路如图所示，当运算放大器开环放大倍数足够大时（大于 10^4 以上），同相比例放大器的闭环电压放大倍数为：

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_I} = \frac{R_F}{R_1}$$

由上式可知，选用不同的电阻比值， A_{uf} 最小值为 1，若取 $R_F/R_1 = 0$ ，则放大器的输出电压等于输入电压，也称为跟随器。

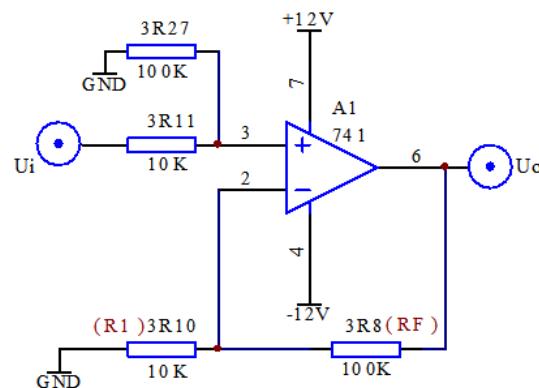


图 2: 同相比例放大器电路图

3. 减法器（差分比例运算）

电路如图所示，当运算放大器开环增益足够大时（大于 10^4 以上），输出电压 U_O 为：

$$u_o = -\frac{R_F}{R_1}(u_{I1} - u_{I2})$$

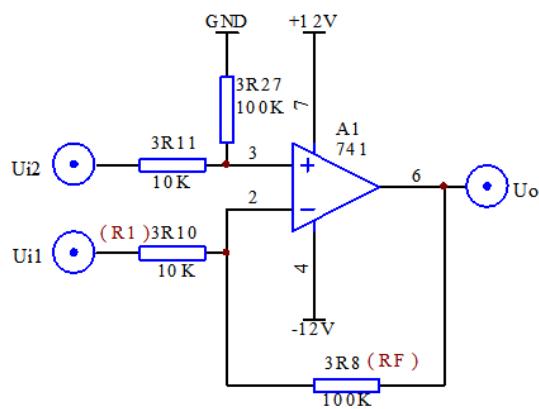


图 3: 减法器电路

4. 反相加法器

电路如图所示，当运算放大器开环增益足够大时（大于 10^4 以上），输出电压 U_o 为：

$$u_o = -\frac{R_F}{R_1}(u_{I1} + u_{I2})$$

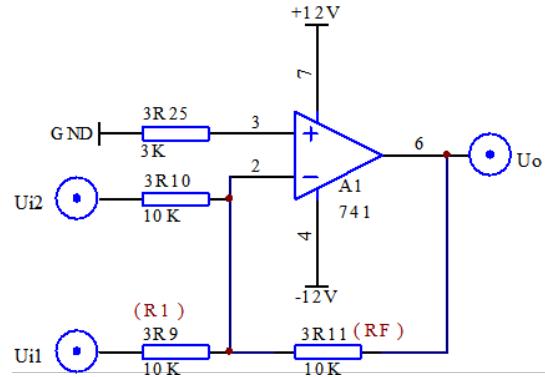


图 4: 反相加法器电路图

5. 加减法器

电路如图 12-5 所示，当运算放大器开环增益足够大时（大于 10^4 以上），输出电压 U_o 为：

$$u_o = R_{F2} \left(\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} - \frac{u_{i3}}{R_3} \right)$$

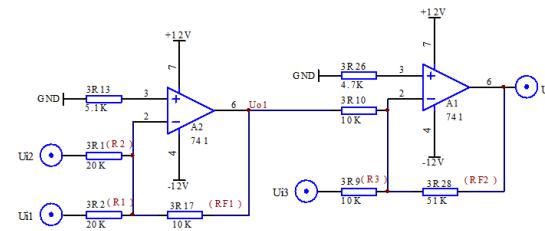


图 5: 加减法器电路图

1.4 实验预习题

思考题 1.1: 写出本实验中同相比例放大器的闭环电压增益公式的推导过程。

同相比例运算电路如实验原理中所示。输入信号从同相端输入，反馈电阻 R_f 接在输出端与反向输入端之间形成深度负反馈。补偿电阻 R_p 用于保证集成运放输入级的对称性，其值为 $R_p = R_1 \parallel R_f$ 。

1. 理想运放特性：

- **虚短：** 同相端和反相端的电压相等，即 $u_- = u_+ = u_i$ 。
- **虚断：** 输入端的电流为零，即 $i_- = i_+ = 0$ 。

2. 节点电压分析：

- 根据虚短特性，反相输入端的电压 $u_- = u_+ = u_i$ 。

3. 反馈网络分析：

- 由于反相输入端的电流为零，流过 R_1 和 R_f 的电流相等。
- 应用节点电压法，可以得到反相输入端电压 u_- 与输出电压 u_o 之间的关系：

$$u_- = u_i = \frac{R_1}{R_1 + R_f} u_o \quad (1)$$

4. 闭环增益公式推导：

- 由上述反馈网络的分析，得到输出电压与输入电压的关系式：

$$u_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) u_- \quad (2)$$

- 由于 $u_- = u_i$ ，代入后得到：

$$u_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) u_i \quad (3)$$

5. 闭环电压增益：

- 闭环电压增益 A_{uf} 定义为输出电压与输入电压的比值：

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = 1 + \frac{R_f}{R_1} \quad (4)$$

完整公式：

同相比例放大器的闭环电压增益公式为：

$$A_{uf} = 1 + \frac{R_f}{R_1} \quad (5)$$

这个公式表明，闭环电压增益由反馈电阻 R_f 和输入电阻 R_1 决定，且增益总是大于等于 1。

思考题 1.2：写出本实验中加减法器输出电压公式的推导过程。

加减法运算电路由两级运算放大器构成。第一级为同相加法器，第二级为反相放大器。

1. 第一级电路（同相加法器）：

- 输入信号 u_{i1} 和 u_{i2} 通过电阻 R_1 和 R_2 加到运算放大器的同相输入端。
- 由叠加原理和运放的虚短特性，输出电压 u_{o1} 为：

$$u_{o1} = R_{f1} \left(\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} \right) \quad (6)$$

2. 第二级电路（反相放大器）：

- 第三级输入信号 u_{i3} 通过电阻 R_3 加到运算放大器的反相输入端。

- 同时，第一级的输出 u_{o1} 通过反馈电阻 R_{f1} 加到反相输入端。
- 根据虚短和虚断特性，第二级的输出电压 u_o 为：

$$u_o = -\frac{R_{f2}}{R_3}u_{i3} + \frac{R_{f2}}{R_{f1}}u_{o1} \quad (7)$$

3. 代入第一级的输出电压公式：

- 将第一级输出电压 u_{o1} 的表达式代入到第二级输出电压公式中：

$$u_o = -\frac{R_{f2}}{R_3}u_{i3} + \frac{R_{f2}}{R_{f1}} \left(R_{f1} \left(\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} \right) \right) \quad (8)$$

- 简化得到：

$$u_o = -\frac{R_{f2}}{R_3}u_{i3} + R_{f2} \left(\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} \right) \quad (9)$$

4. 最终公式：

- 整理后得到加减法器的输出电压公式：

$$u_o = R_{f2} \left(\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} - \frac{u_{i3}}{R_3} \right) \quad (10)$$

完整公式：

加减法器的输出电压公式为：

$$u_o = R_{f2} \left(\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} - \frac{u_{i3}}{R_3} \right) \quad (11)$$

专业:	物理学	年级:	2022 级
姓名:	黄罗琳、王显	学号:	22344001、22344002
室温:	23°C	实验地点:	A522
学生签名:	黄罗琳 王显	评分:	
实验时间:	2024/5/29	教师签名:	

ET11 模拟运算放大电路 实验记录

2.1 反相比例放大器

按图 1 所示连接电路，按给定直流输入信号，测量对应的输出电压，把结果记入表中。

Ui(V)		0.3	0.5	0.7	1.0	1.1	1.2
理论计算值	Uo(V)	-3.00	-5.00	-7.00	-10.00	-11.00	-12.00
实际测量值	Uo(V)	-3.054	-5.076	-7.093	-9.990	-10.043	-10.051
实际放大倍数	Auf	-10.18	-10.152	-10.133	-9.990	-9.13	-8.375

在该比例放大器的输入端加入 1KHz，有效值为 0.5V 的交流信号，用示波器观察输出波形，并与输入波形相比较。

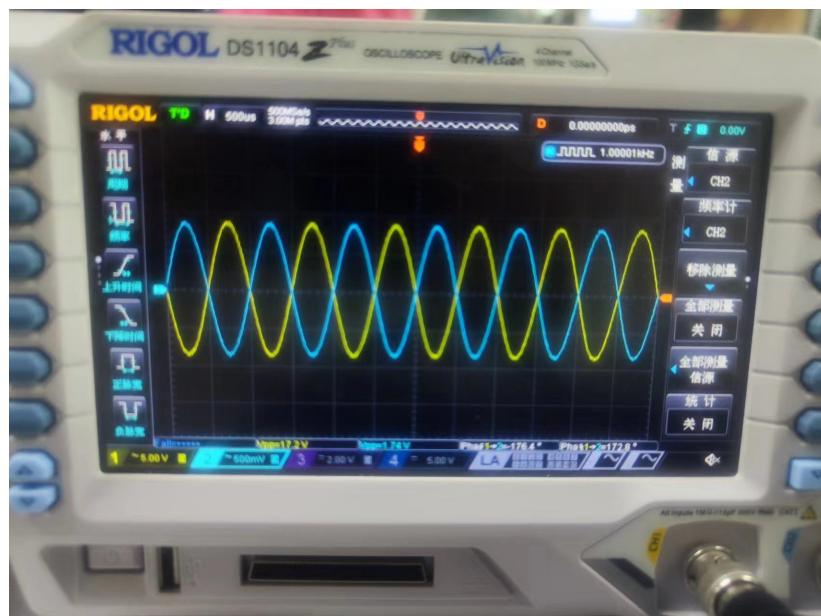


图 6: 反相输出和输入波形

2.2 同相比例放大器

按图所示连接电路，按给定直流输入信号，测量对应的输出电压，把结果记入表中。

Ui(V)		0.3	0.5	0.7	1.0	1.1	1.2
理论计算值	Uo(V)	3.30	5.50	7.70	11.00	12.10	13.20
实际测量值	Uo(V)	3.069	5.092	7.110	10.138	11.151	12.165
实际放大倍数	Auf	10.23	10.184	10.157	10.138	10.137	10.1375

在该比例放大器的输入端加入 1KHz，有效值为 0.5V 的交流信号，用示波器观察输出波形，并与输入波形相比较。

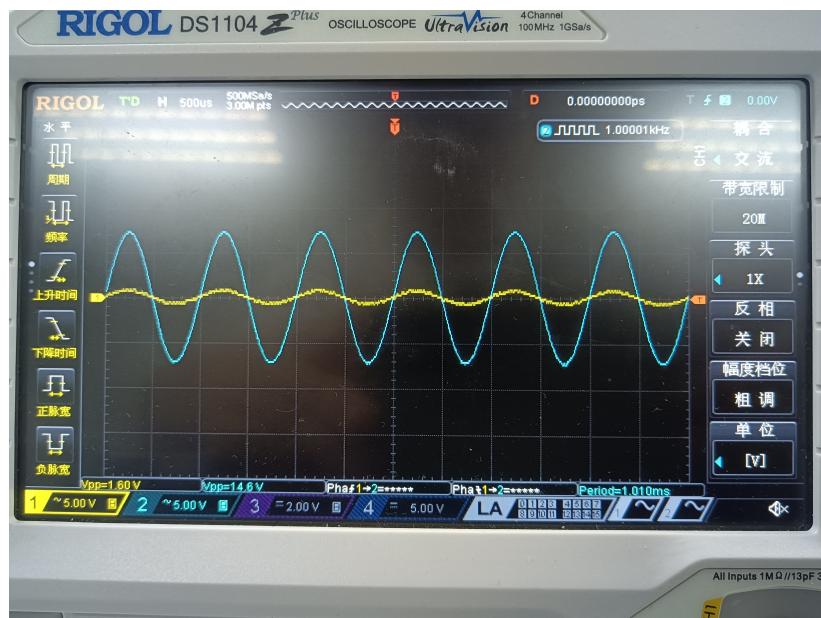


图 7: 同相输出和输入波形

2.3 减法器（差分比例运算）

按图 3 连接电路。按给定直流输入信号，测量对应的输出电压，把结果记入表中。

输入信号 $Ui_1(V)$	0.2	0.2	-0.2
输入信号 $Ui_2 (V)$	-0.3	0.3	-0.3
计算值 $U_o (V)$	- 5.00	1.00	-1.00
实际测量值 $U_o(V)$	-5.054	1.049	-1.035

2.4 反相加法器

按图 4 连接电路。同时将 Ui_1 与 Ui_2 对地短路，接通电源后，调节调零电位器 $R_{p0}(10K)$ ，使输出 $U_o=0$ 。然后将短路线去掉，按给定直流输入信号，测量对应的输出电压，把结果记入表中。

输入信号 $Ui_1(V)$	1.0	1.5	-0.2
输入信号 $Ui_2(V)$	0.4	-0.4	1.2
计算值 $U_o(V)$	-1.4	-1.1	-1
实际测量值 $U_o(V)$	-1.411	-1.102	-1.013

2.5 加减法器

按图 5 连接电路。将 $3R_{10}$ 与第一级运放的联接断开，按前述方法对两级分别进行调零。然后将短路线去掉，接好电路，按给定直流输入信号（ Ui_1 和 Ui_2 由同一信号源提供），测量对应的输出电压，把结果记入表中。

$Ui_1(V)$	$Ui_2(V)$	$Ui_3(V)$	计算值 $U_o(V)$	实际测量值 $U_o(V)$
0.4	0.8	0.4	1.02	1.075

2.6 实验过程遇到问题及解决办法

1. 实验中出现了由于错误的连接电路，导致了实验所用芯片烧毁，更换芯片之后，出现了需要调零的问题，所以实验数据是通过手动调零的方式进行记录的。
2. 实验的信号发生器的输出的线存在问题，在进行线路排查，数据对比之后，最终确定了信号发生器因为线路没有输出任何信号，在更换输出线之后示波器得到了稳定且正确的图像。
3. 在检查实验数据时，老师提出了对于同相放大器的理论值计算问题，这一部分我在实验误差分析部分进行了初步讨论。

专业:	物理学	年级:	2022 级
姓名:	黄罗琳、王显	学号:	22344001、22344002
日期:	2024/5/29	评分:	

ET11 模拟运算放大电路 分析与讨论

3.1 描述用示波器观察波形的情况



图 8: 反相和同相输出和输入波形

反相比例放大器的输出波形与输入波形相比，幅值增大 10 倍（左下角相差 10 倍，为 5v 和 500mv），相位相差 $\frac{\pi}{2}$ ；

同相比例放大器的输出波形与输入波形相比，幅值增大 10 倍，相位相同。

3.2 对比理论计算，分析误差

理论计算的重点在于，对于同相放大器中对于电压增益的计算。

根据实验数据

$U_i(V)$		0.3	0.5	0.7	1.0	1.1	1.2
理论计算值	$U_o(V)$	3.30	5.50	7.70	11.00	12.10	13.20
实际测量值	$U_o(V)$	3.069	5.092	7.110	10.138	11.151	12.165
实际放大倍数	A_{uf}	10.23	10.184	10.157	10.138	10.137	10.1375

其理论计算值来源于公式

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

其主要问题在于，实际上，电路存在电阻分压的问题，故对其放大倍数进行修正，根据实际测量值，其修正公式初步为：

$$A_{uf} = \frac{u_o}{\frac{10}{11}u_i}$$

所以修改后的表格为

Ui(V)		0.3	0.5	0.7	1.0	1.1	1.2
理论计算值	Uo(V)	3.00	5.00	7.00	10.00	12.00	13.00
实际测量值	Uo(V)	3.069	5.092	7.110	10.138	11.151	12.165
实际放大倍数	A _{uf}	10.23	10.184	10.157	10.138	10.137	10.1375

相比于之前的实验数据的误差较小。

除此之外，实验的数据基本上都误差较小，其误差主要来源可能是，实验电路中引入的电阻导致的实验误差，以及输入电压也可能存在波动，这些都会导致实验最后结果出现误差，但是根据对于理论值和实验值对比发现，这个误差并不是很大，处于可以接受的范围，故认定此次实验较为成功。

3.3 实验后思考题

思考题 3.1：运算放大器作比例放大时，R₁ 与 R_F 的阻值误差为 ±10%，试问如何分析和计算电压增益的误差？

在运算放大器作比例放大时，电压增益 A_{uf} 通常表示为：

$$A_{uf} = -\frac{R_F}{R_1}$$

假设电阻 R_F 和 R₁ 的阻值存在 ±10% 的误差。

电压增益最大值和最小值

1. 电阻值的误差范围：

- R_F 的取值范围为：R'_F = R_F ± 0.1R_F，即 R'_F 可以取 1.1R_F 和 0.9R_F。
- R₁ 的取值范围为：R'₁ = R₁ ± 0.1R₁，即 R'₁ 可以取 1.1R₁ 和 0.9R₁。

2. 最大电压增益：电压增益最大值发生在 R_F 取最大值和 R₁ 取最小值时：

$$A_{uf}^{\max} = -\frac{1.1R_F}{0.9R_1}$$

对于相对误差：

$$\text{相对误差} = \frac{A_{uf}^{\max} - A_{uf}}{A_{uf}} \times 100\% = \frac{\frac{1.1}{0.9} - 1}{1} \times 100\% = \left(\frac{11}{9} - 1\right) \times 100\% = \frac{2}{9} \times 100\% \approx 22.2\%$$

3. 最小电压增益：电压增益最小值发生在 R_F 取最小值和 R_1 取最大值时：

$$A_{uf}^{\min} = -\frac{0.9R_F}{1.1R_1}$$

对于相对误差：

$$\text{相对误差} = \frac{A_{uf}^{\min} - A_{uf}}{A_{uf}} \times 100\% = \frac{\frac{0.9}{1.1} - 1}{1} \times 100\% = \left(\frac{9}{11} - 1\right) \times 100\% = \frac{-2}{11} \times 100\% \approx -18.2\%$$

思考题 3.2： 运算放大器作精密放大时，同相输入端对地的直流电阻要与反相输入端对地的直流电阻相等，如果不相等，会引起什么现象？

在运算放大器中，同相输入端对地的直流电阻 R_{in+} 和反相输入端对地的直流电阻 R_{in-} 如果不相等，会导致以下现象：

1. 偏置电流不同

运算放大器的同相输入端和反相输入端都存在一个偏置电流 I_B ，它们通过对地的直流电阻 R_{in+} 和 R_{in-} 进行偏置。

假设偏置电流分别为 I_{B+} 和 I_{B-} ，则输入端产生的偏置电压分别为：

$$V_{in+} = I_{B+} \cdot R_{in+}$$

$$V_{in-} = I_{B-} \cdot R_{in-}$$

2. 输出信号偏移

输出信号 V_{out} 受到输入差模电压 $V_{in+} - V_{in-}$ 的影响，其表达式为：

$$V_{out} = A \cdot (V_{in+} - V_{in-})$$

其中， A 是运算放大器的开环增益。

如果 $R_{in+} \neq R_{in-}$ ，则 V_{in+} 和 V_{in-} 之间的差异会引起非零的输入差模电压 $V_{in+} - V_{in-}$ ，从而导致输出电压 V_{out} 的偏移。

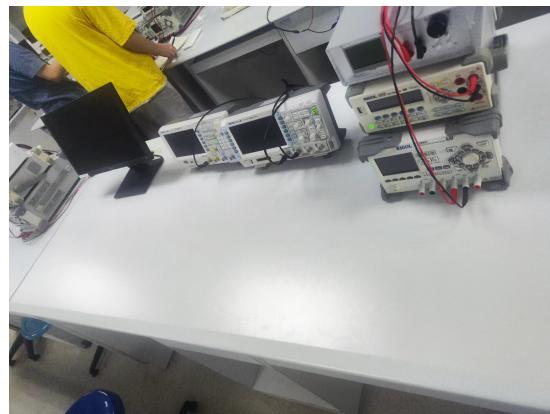
即使偏置电流 I_B 很小，输出端的偏移量仍然可以显著影响系统的性能和准确性。为了避免这种偏移，需要确保同相输入端对地的直流电阻 R_{in+} 和反相输入端对地的直流电阻 R_{in-} 相等。

ET11 运算放大器 结语

4.1 实验心得和体会、意见建议等

1. 实验总体难度不大，但是在实验过程中我们通过控制变量法排查出了线路问题，从而获得了正确的实验图像。
2. 本实验报告采用 LATEX 编辑，实验分工为黄罗琳同学负责记录数据、编辑报告、数据分析，王显同学负责实验操作、误差分析。

4.2 附件及实验相关的软硬件资料等



DATE:	PAGE:
<u>反相比例放大器</u>	
$V_i(V)$ 0.3 0.5 0.7 1.0 1.1 1.2	
$V_o(V)$ -3.00 -8.00 -7.00 -12.00 -11.00 -12.00	
$V_o(V)$ -3.054 -5.076 -7.043 -9.990 -10.043 -10.051	
实 A_{v1}	
<u>同相比例放大器</u>	
$V_i(V)$ 0.3 0.5 0.7 1.0 1.1 1.2	
$V_o(V)$ 3.305.30 7.70 10.02 12.00 13.80	
$V_o(V)$ 3.0695.0927.11010.1384.151/2.165	
实 A_{v1}	
<u>减法器</u>	
输入 $V_1(V)$ 0.2 0.2 -0.2	
$V_2(V)$ -0.3 0.3 -0.3	
输出 $V_o(V)$ -5 1 -1	
实际 $V_o(V)$ -5.054 1.049 -1.035	
<u>反相加法器</u>	
$V_{11}(V)$ 1.0 1.5 2.0	
$V_{12}(V)$ 0.4 -0.4 1.2	
计 $V_1(V)$ 1.4 -1.1 -1	
实 $V_o(V)$ -7.411 -1.102 -1.013 <u>数据有误</u>	
224.05.19	
<u>同相加法器</u>	
$V_{11}(V)$ 0.4 0.8 0.4	
$V_{12}(V)$ 0.4 0.4 0.2	
计 $V_1(V)$ 1.02 1.02 1.02	
实 $V_o(V)$ 1.075	

图 9: 实验数据