

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:	2
姓名:	戴鹏辉、杨舒云	学号:	22344016、22344020
实验时间:	2024/6/19	教师签名:	

ET1-11 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)**

2. 每次完成实验后的一周内交实验报告 (特殊情况不能超过两周)。

3. 其它注意事项:

- (a) 请认真查看并理解实验讲义第一章内容;
- (b) 注意实验器材的合理使用;
- (c) 使用结束使用各种仪器之后需要将其放回原位。

【特别鸣谢及模板说明】

感谢 2019 级学长石寰宇为本实验报告提供 LATEX 模板。由于原实验报告模板缺少实验编号, 为方便在电脑上整理, 故添加自命名编号 ET1-11。

目录

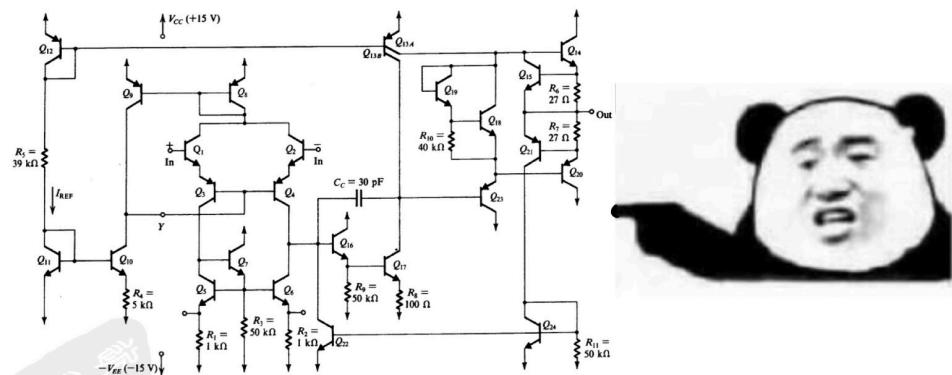
1 ET1-11 模拟运算放大电路 预习报告	3
1.1 实验目的	3
1.2 仪器用具	3
1.3 原理概述	4
2 ET1-11 模拟运算放大电路 实验记录	5
2.1 实验内容、步骤与结果	5
2.1.1 操作步骤记录	5
2.1.2 实验结果展示	7
2.2 原始数据记录	10
3 ET1-11 模拟运算放大电路 分析与讨论	11
3.1 实验数据分析	11
3.2 实验思考题	13
4 ET1-11 模拟运算放大电路 结语	14
4.1 参考文献	14
4.2 附件及实验相关的软硬件资料等	14

ET1-11 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 运放。

年轻人，你渴望力量吗？



这个集成运放能带给你100000000000倍的增益！

Figure 1: 741 运放内部结构展示

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	电路原理箱或板	1	
2	函数信号发生器	1	
3	交流毫伏表	1	
4	数字万用表	1	
5	双踪示波器	1	

1.3 原理概述

根据运放得基本原理，我们对实验所用的几种电路得闭环增益（及相关量）得理论值进行了计算，结果如图所示。

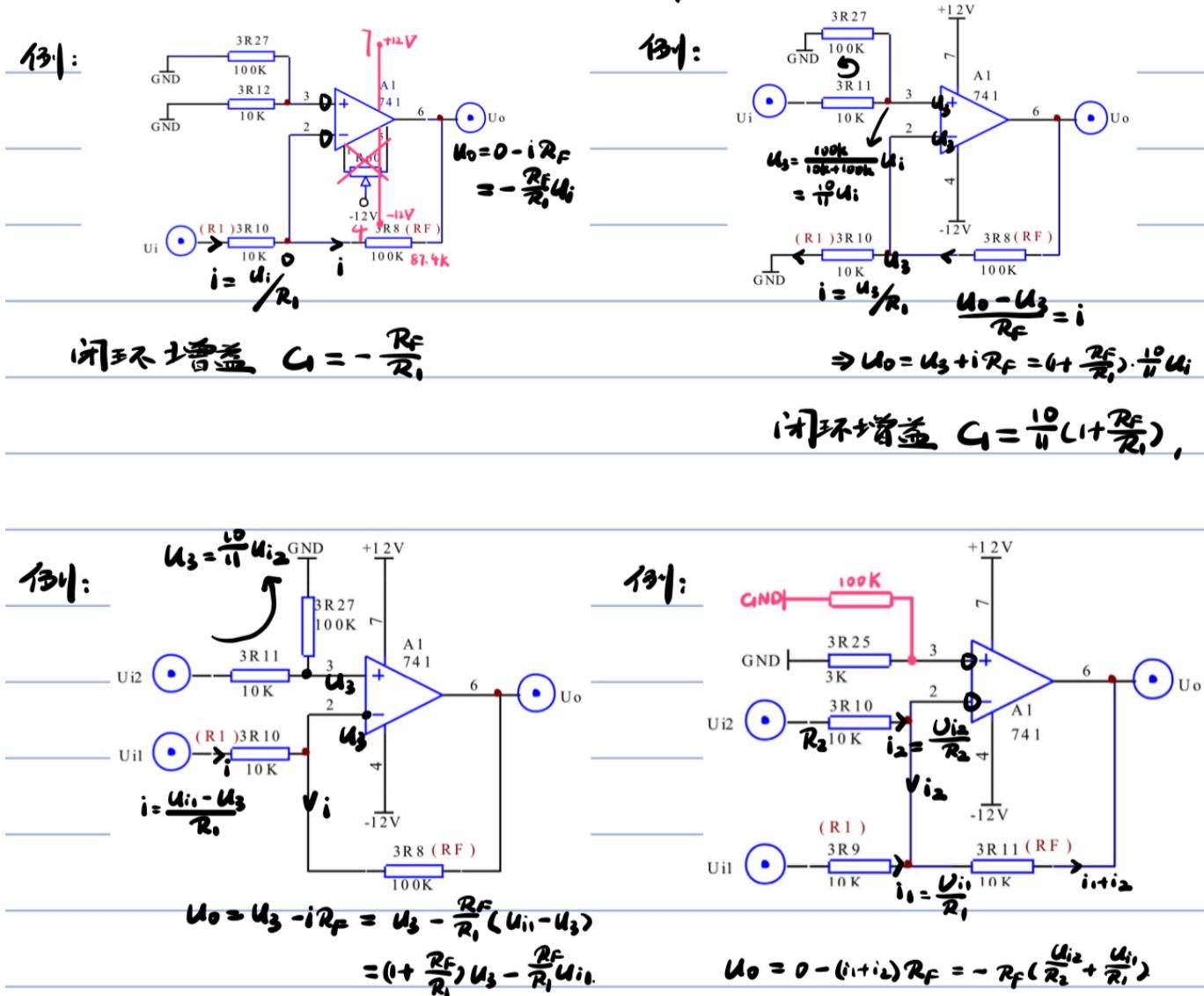


Figure 2: 原理概述

计算所得理论值详见实验结果展示部分。

专业:	物理学	年级:	2022 级
姓名:	戴鹏辉、杨舒云	学号:	22344016、22344020
室温:	26°C	实验地点:	A522
学生签名:	见附件部分	评分:	
实验时间:	2024/6/19	教师签名:	

ET1-11 模拟运算放大电路 实验记录

2.1 实验内容、步骤与结果

2.1.1 操作步骤记录

1. 反相比例放大器

如Figure 3所示连接电路，按给定直流输入信号，测量对应的输出电压，记录结果。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。

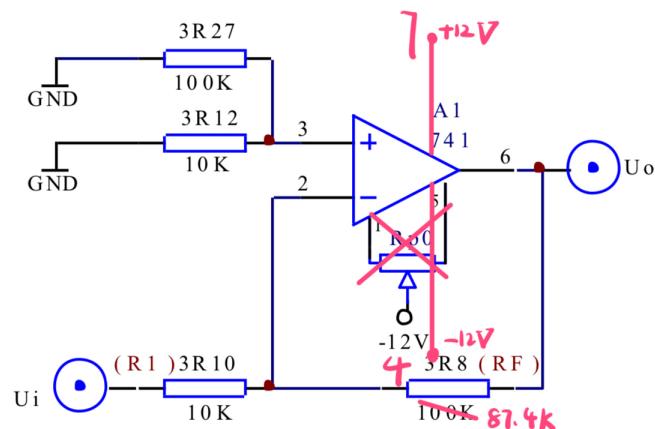


Figure 3: 反相比例放大器

2. 同相比例放大器

如Figure 4所示连接电路。按给定直流输入信号，测量对应的输出电压，记录结果。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。

3. 减法器（差分比例运算）

如Figure 5所示连接电路。按给定直流输入信号，测量对应的输出电压，记录结果。

4. 反相加法器

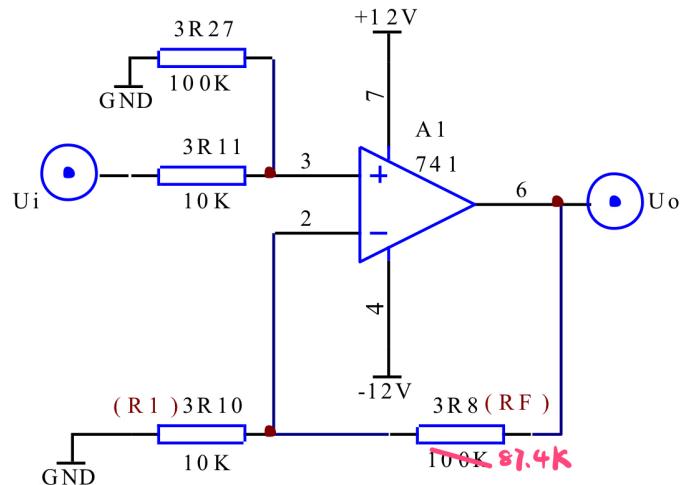


Figure 4: 同相比例放大器

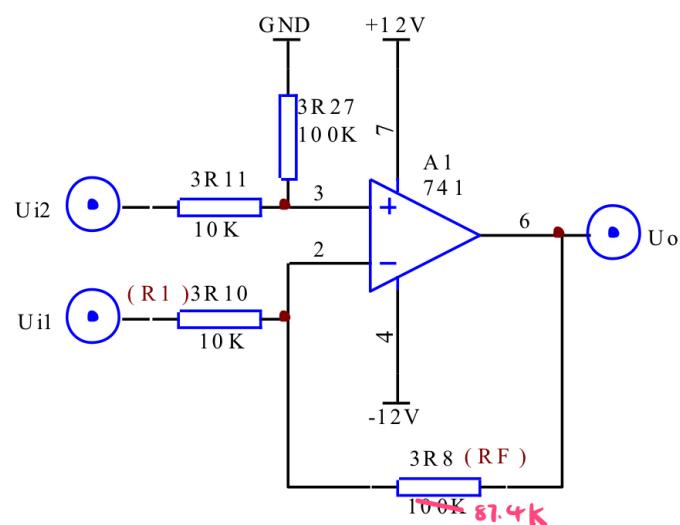


Figure 5: 减法器（差分比例运算）

如Figure 6所示连接电路。同时将 U_{i1} 与 U_{i2} 对地短路，接通电源后，调节调零电位器 $R_p(10K)$ ，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，记录结果。

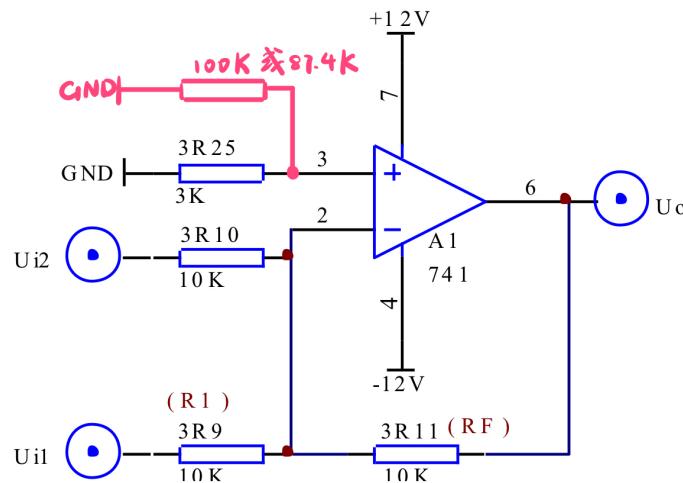


Figure 6: 反相加法器

5. 加减法器

如Figure 7所示连接电路。将 $3R10$ 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（ U_{i1} 和 U_{i2} 由同一信号源提供），测量对应的输出电压，记录结果。

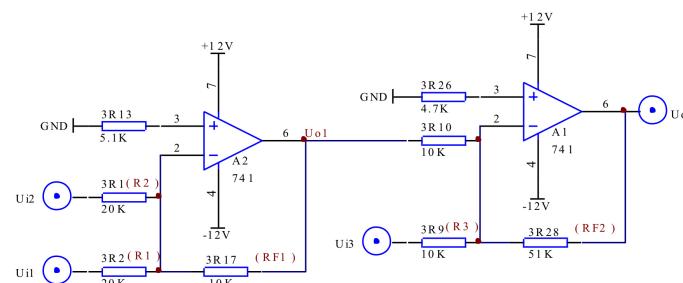


Figure 7: 反相加法器

2.1.2 实验结果展示

1. 反相比例放大器

实验结果如Table 1所示。波形图如Figure 8所示。

2. 同相比例放大器

实验结果如Table 2所示。波形图如Figure 9所示。

3. 减法器（差分比例运算）

实验结果如Table 3所示。

Table 1: 实验数据: 反相比例放大器

输入量 u_i/V	0.3	0.5	0.7	1.0	1.1	1.2
输出量理论值 $u_o^{(T)}/V$	-2.622	-4.37	-6.118	-8.74	-9.614	-10.488
输出量实验值 $u_o^{(E)}/V$	-2.603	-4.361	-6.123	-8.746	-9.620	-10.233
实测闭环增益 G	-8.68	-8.72	-8.75	-8.75	-8.75	-8.53
相对误差 η	-0.72%	-0.21%	0.08%	0.07%	0.06%	-2.43%



Figure 8: 波形图: 反相比例放大器

Table 2: 实验数据: 同相比例放大器

输入量 u_i/V	0.3	0.5	0.7	1.0	1.1	1.2
输出量理论值 $u_o^{(T)}/V$	2.655	4.425	6.195	8.850	9.735	10.620
输出量实验值 $u_o^{(E)}/V$	2.681	4.460	6.244	8.899	9.782	10.669
实测闭环增益 G	8.94	8.92	8.92	8.90	8.89	8.89
相对误差 η	0.98%	0.79%	0.79%	0.55%	0.48%	0.46%

Table 3: 实验数据: 减法器 (差分比例运算)

输入量 u_{i1}/V	0.2	0.2	-0.2
输入量 u_{i2}/V	-0.3	0.3	-0.3
输出量理论值 $u_o^{(T)}/V$	-4.370	0.874	-0.874
输出量实验值 $u_o^{(E)}/V$	-4.381	0.926	-0.878
相对误差 η	0.25%	5.95%	0.46%



Figure 9: 波形图：同相比例放大器

4. 反相加法器

实验结果如Table 4所示。

Table 4: 实验数据：反相加法器

输入量 u_{i1}/V	1.0	1.5	-0.2
输入量 u_{i2}/V	0.4	-0.4	1.2
输出量理论值 $u_o^{(T)}/V$	-1.400	-1.100	-1.000
输出量实验值 $u_o^{(E)}/V$	-1.382	-1.089	-0.981
相对误差 η	-1.29%	-1.00%	-1.90%

5. 加减法器

实验结果如Table 5所示。除此以外，计算得到相对误差 $\eta = -1.80\%$ 。

Table 5: 实验数据：加减法器

u_{i1}/V	u_{i2}/V	u_{i3}/V
0.398	0.775	0.401
$R_1/k\Omega$	$R_2/k\Omega$	$R_3/k\Omega$
20	20	10
$R_F/k\Omega$	$u_o^{(T)}/V$	$u_o^{(E)}/V$
51	0.946	0.929

2.2 原始数据记录

实验记录本上的原始数据见Figure 10与Figure 11 (签字)。

模拟运算放大器						
1. 反相比例放大器						
$R_F = 87.4 \text{ k}\Omega$	$R_i = 10\text{k}\Omega$	DATE: 2024.5.29 PAGE: 8				
U_{in}/V	0.3	0.5	0.7	1.0	1.1	1.2
理论计算值 U_o/V	-2.622	-4.37	-6.118	-8.74	-9.614	-10.988
实测值 U_o/V	-2.63	-4.361	-6.123	-8.746	-9.620	-10.233
电压放大倍数 A_v/V						
2. 同相比例放大器						
$R_F = 87.4 \text{ k}\Omega$	$R_i = 10\text{k}\Omega$					
U_{in}/V	0.3	0.5	0.7	1.0	1.1	1.2
理论计算值 U_o/V	2.681	4.46	6.244	8.899	9.782	10.669
实测值 U_o/V	2.681	4.46	6.244	8.899	9.782	10.669
电压放大倍数 A_v/V						
3. 差分器						
输入信号 U_{in1}/V	0.2	0.2	0.2	-0.2		
输入信号 U_{in2}/V	-0.3	0.3	0.3	-0.3		
输出信号 U_o/V						
实测值 U_o/V	-4.381	0.926	-0.878			

Figure 10: 原始数据记录 1

4. 反相加法器						
U_{in1}/V	1.0	1.5	-0.2			
U_{in2}/V	0.4	0.4	1.2			
计算 U_{in3}/V						
实测 U_{in3}/V	-1.382	-1.089	-1.0	-0.981		
5. 加减法器						
U_{in1}/V	U_{in2}/V	U_{in3}/V	计算值 U_o/V	实测值 U_o/V		
0.4	0.8	0.4	1.02	0.929		
5.1	1.1	0.1	5.0	2.0		
$R_1 = 2\text{k}\Omega$	$R_2 = 20\text{k}\Omega$	$R_3 = 10\text{k}\Omega$	实测值 U_o/V	$U_{in1} = 0.398$		
$R_4 = 5\text{k}\Omega$	$R_5 = 20\text{k}\Omega$	$R_6 = 10\text{k}\Omega$	$U_{in2} = 0.775$	$U_{in3} = 0.451$		
$R_7 = 5\text{k}\Omega$	$R_8 = 20\text{k}\Omega$	$R_9 = 10\text{k}\Omega$	$U_o = 0.946$			

Figure 11: 原始数据记录 2

专业:	物理学	年级:	2022 级
姓名:	戴鹏辉、杨舒云	学号:	22344016、22344020
日期:	2024/6/19	评分:	

ET1-11 模拟运算放大电路 分析与讨论

3.1 实验数据分析

数据分析这个一部分主要讨论关于实验值与理论值得误差来源。我们可以作如下考虑。

1. 有限开环增益的影响

由于我们计算理论值时假定了开环增益时无穷大，然而实际运放的开环增益只是非常大，并不是无限的，这可能会带来一些误差。具体计算细节如Figure 12与Figure 13所示，参考了文献 [3]。

面刚刚得到的结论。图 2.7 给出了分析过程。如果输出电压记为 v_o ，那么在运算放大器的两个输入端之间的电压为 v_o/A 。因为正输入端接地，那么负输入端的电压必定是 $-v_o/A$ 。流过 R_1 的电流 i_1 为

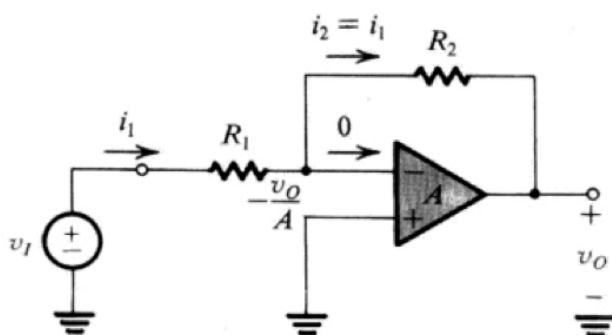
$$i_1 = \frac{v_I - (-v_o/A)}{R_1} = \frac{v_I + v_o/A}{R_1}$$

运算放大器的无穷输入阻抗迫使电流 i_1 完全流过 R_2 ，因此输出电压 v_o 为

$$\begin{aligned} v_o &= -\frac{v_o}{A} - i_1 R_2 \\ &= -\frac{v_o}{A} - \left(\frac{v_I + v_o/A}{R_1} \right) R_2 \end{aligned}$$

这样闭环增益 G 为

$$G \equiv \frac{v_o}{v_I} = \frac{-R_2/R_1}{1 + (1 + R_2/R_1)/A} \quad (2.5)$$



当 A 趋向于 ∞ 时， G 就趋向于理想值 $-R_2/R_1$ 。同样，从图 2.7 可以看出当 A 趋向于 ∞ 时，反相输入端的电压就趋向于 0。这就是前面把运算放大器作为理想情况分析时所用的虚地假设。最后，式 (2.5) 实际上指出了为使闭环增益 G 不依赖于开环增益 A 的条件，即

$$1 + \frac{R_2}{R_1} \ll A$$

图 2.7 考虑了有限开环增益影响的反相组态运算放大器的分析

Figure 12: 有限开环增益的影响：反相组态

2.3.3 有限开环增益的影响

如同对反相组态的分析，现在考虑运算放大器有限开环增益 A 对同相组态增益的影响。假定运算放大器除了开环增益 A 有限之外，其他特性都理想，可以得到图 2.12 所示的同相放大器电路的闭环增益如下：

$$G \equiv \frac{v_o}{v_i} = \frac{1 + (R_2/R_1)}{1 + \frac{1 + (R_2/R_1)}{A}} \quad (2.11)$$

可以看出该分母等于反相组态的情况 [见式 (2.5)]。这不是一个巧合，因为反相组态和同相组态具有相同的反馈环，如果消除输入信号源（短路）就可以看出该反馈环。但是它们的分子不同，因为分子给出了理想或标称闭环增益（反相组态为 $-R_2/R_1$ ，同相组态为 $1+R_2/R_1$ ）。最后，可以看出当 $A=\infty$ 时，式 (2.11) 的增益表达式就变为理想值。实际上，它近似为理想值，因为

$$A \gg 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (2.12)$$

这里除了右边的量是标称闭环增益以外，该条件与反相组态的条件相同。

Figure 13: 有限开环增益的影响：同相组态

2. 电源实际输出电压

事实上，我们将直流电源设定为实验要求值之后，事实上的输出电压并不真的是该值，甚至有着较大差异，这一点在加减法器实验中表现得尤为明显，具体可以参见测量结果。

3. 其它因素

元件公差： 电路中使用的电阻和其他元件都有自己的公差值，这可能导致电路实际参数与设计参数有所不同，从而影响输出结果。

运算放大器的非理想特性： 例如，741 运算放大器的输入偏置电流、输入偏置电压、增益带宽积等非理想特性都可能影响电路的性能。这些特性在高频或高负载条件下可能更加明显。

布线和接地问题： 电路的布线长度、布线方式以及接地的质量都会影响电路的性能。例如，长的布线可能引入额外的电感和电容效应，而接地不良可能引起信号干扰和噪声问题。

温度和环境因素： 电阻和运算放大器的参数可能会随环境温度变化而变化，这种变化可能没有在理论计算中考虑。

除此以外，思考题中也提供了一部分误差来源的分析，详见思考题。

3.2 实验思考题

思考题 3.1: 运算放大器作比例放大时, R_1 与 R_F 的阻值误差为 $\pm 10\%$, 试问如何分析和计算电压增益的误差?

1. 为了分析增益的变化范围, 我们需要计算出在阻值误差范围内可能出现的最大和最小增益值。这可以通过分别代入 R_F 和 R_1 的最大和最小可能值来计算:

R_F 的最大值为 $1.1R_F$, 最小值为 $0.9R_F$; R_1 的最大值为 $1.1R_1$, 最小值为 $0.9R_1$ 。

因此, 最大和最小增益可以分别计算为:

$$A_{v,\max} = -\frac{0.9R_F}{1.1R_1}$$

$$A_{v,\min} = -\frac{1.1R_F}{0.9R_1}$$

通过上述计算得到的最大和最小增益值, 可以得到增益的误差范围。

增益的相对误差可以通过比较最大增益和最小增益与理论增益的差异来估计:

$$\text{相对误差} = \frac{A_{v,\max} - A_v}{A_v} \times 100\%$$

$$\text{相对误差} = \frac{A_{v,\min} - A_v}{A_v} \times 100\%$$

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 (Op-Amp) 的应用中, 尤其是在精密放大器设计时, 确保同相输入端 (非反相端, + 端) 和反相输入端 (-端) 对地的直流电阻相等是非常重要的。这种匹配主要是为了减少和消除两种潜在问题:

1. 输入偏置电流产生的电压偏移: 运算放大器的两个输入端都有小的输入偏置电流。当同相端和反相端的电阻匹配时, 由于这两个电流通过相等的电阻流过, 它们在两端产生的电压降是相同的, 这有助于抵消电流产生的电压偏移。如果这两个电阻不匹配, 每个端子的电压降将不同, 导致输入端出现一个额外的电压偏差, 这个偏差将被放大器放大, 从而影响输出精度。
2. 共模噪声抑制的降低: 在理想情况下, 运算放大器能够完美地抑制两个输入端上相同的共模信号 (即同时出现在同相端和反相端的信号)。但如果两端对地的直流电阻不同, 共模噪声抑制比 (Common-Mode Rejection Ratio, CMRR) 会降低。这是因为不平衡的电阻会导致运算放大器在处理共模信号时的不对称响应, 增强了共模噪声在输出中的影响。

因此, 如果同相端和反相端对地的直流电阻不相等, 最主要的影响是增加了输出信号中的偏差和噪声, 这对于需要高精度的应用 (如精密测量、音频处理等) 是不可接受的。这就需要设计时仔细选择和匹配这些电阻, 以确保高性能和准确性。

ET1-11 模拟运算放大电路 结语

4.1 参考文献

- [1] 维基百科 <https://zh.wikipedia.org>
- [2] 电子技术实验讲义
- [3] 微电子电路

4.2 附件及实验相关的软硬件资料等

实验报告个人签名如Figure 14。



A handwritten signature in black ink followed by a red square seal impression. The seal contains the characters '楊舒印' (Yang Shuyun's seal) in a stylized font.

(a)



A handwritten signature in black ink.

(b)

Figure 14: 个人签名

相关代码已上传至 Github。