

模拟运算电路

微电子学院

2022.12.12

17号台

PB21061324 徐铭鸽

PB21081565 王蕴璇

一、实验题目

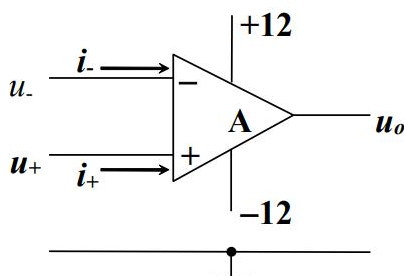
· 集成运算放大器的基本应用——模拟运算电路

实验目的

1. 了解集成运放的外形结构及各引脚功能；
2. 掌握集成运放的三种输入方式，研究由集成运放组成的比例、加法、减法、积分和微分等基本运算电路的功能；
3. 了解集成运放在实际应用时应考虑的一些问题。

二、实验原理

1. 集成运放的电路符号和特性：



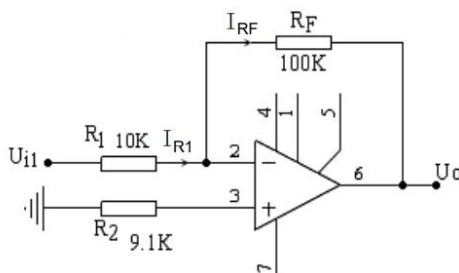
- 1) 输入阻抗 $Z_{in} \rightarrow \infty$
- 2) 输出阻抗 $Z_{out} \rightarrow 0$
- 3) $u_o = A_{od}(u_+ - u_-)$ $A_{od} \rightarrow \infty$
- 4) 模拟运算电路特征：深度电压负反馈
 - a. 虚假短路： $u_+ = u_-$
 - b. 虚断： $i_+ = i_- = 0$

2. 741集成运放的管脚图 and 主要性能参数：



差动增益	输入阻抗	CMRR	输出阻抗	输入失调电流	输入失调电压	特征频率
200000	大于 $2M\Omega$	90dB	75Ω	200nA	1至5mV	1MHz

3. 反相比例运算电路（如图1）



模拟运算电路

微电子学院

2022.12.12

17号台

PB21061324 徐铭鸽

PB21081565 王蕴璇

图1 反向比例运算电路

$$U_o = -\frac{R_F}{R_1} U_i$$

4. 反相加法电路（如图2）

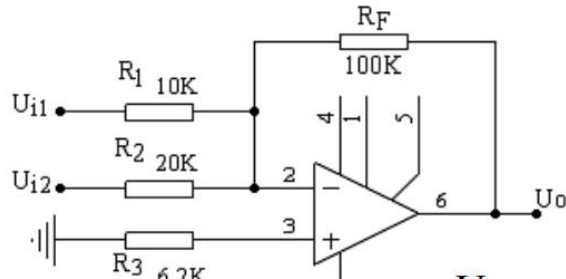


图2 反相加法运算电路

$$U_o = -\left(\frac{R_F}{R_1} U_{i1} + \frac{R_F}{R_2} U_{i2}\right)$$

5. 同相比例运算电路（如图3）

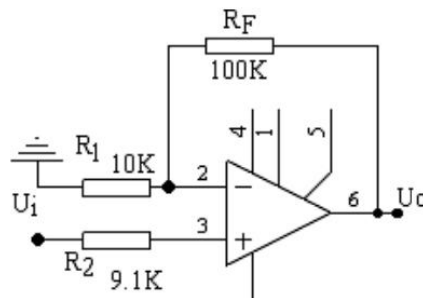


图3 同相比例运算电路

$$U_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) U_i$$

6. 差动放大电路（减法器）（如图4）

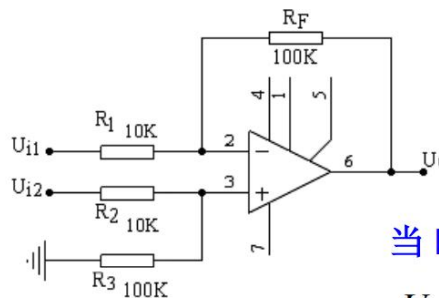


图4 差动放大电路

$$U_o = \frac{R_F}{R_1} (U_{i2} - U_{i1})$$

7. 积分运算电路（如图5）

模拟运算电路

微电子学院

2022.12.12

17号台

PB21061324 徐铭鸽

PB21081565 王蕴璇

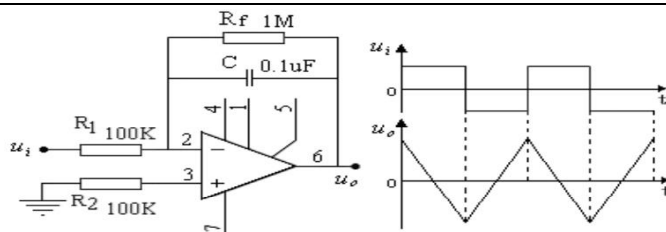


图5 反相积分运算电路

$$u_o(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t u_i dt + u_c(0)$$

8. 微分运算电路（如图6）

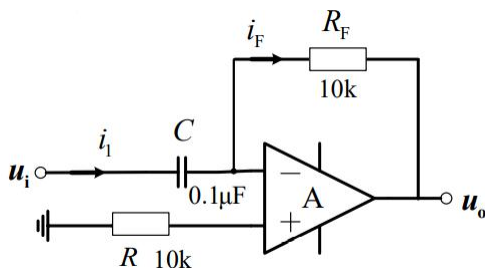


图6 反相微分运算电路

$$u_o(t) = -R_F C \frac{du_i}{dt}$$

三、实验内容

1.实验一：反相比例运算电路

按图1正确连线。输入 $f=500\text{Hz}$, $U_i=0.5\text{V}$ (有效值) 的正弦交流信号, 测量 U_i 、 U_o 有效值, 并观察 U_o 和 U_i 的相位关系, 记录结果。

2.实验二：反相加法运算电路

按图2接线, U_{i1} 和 U_{i2} 采用直流稳压电源输入, 用万用表DCV档测量 U_{i1} 和 U_{i2} 及输出电压 V_o , 记录结果。

3.实验三：同相比例运算电路

按图3正确连线。输入 $f=500\text{Hz}$, $U_i=0.5\text{V}$ (有效值) 的正弦交流信号, 测量 U_i 、 U_o 有效值, 并观察 U_o 和 U_i 的相位关系, 记录结果。

4.实验四：差动放大电路（减法器）

按图4正确连接实验电路, U_{i1} 和 U_{i2} 采用直流稳压电源输入, 用万用表测量 U_{i1} 和 U_{i2} 及输出电压 U_o , 注意 U_{i1} 和 U_{i2} 输入不能过大, 防止 U_o 进入饱和区, 记录结果。

5.实验五：积分运算电路

按积分电路如图5所示正确连接电路, 取频率 f 为 100Hz , 峰峰值为 2V 的方波作为输入信号 U_i , 用示波器测量并记录 U_i , U_o 波形, 计算理论的 U_{opp} , 进行误差计算和分析。

6.实验六：微分电路

模拟运算电路

微电子学院

2022.12.12

17号台

PB21061324 徐铭鸽

PB21081565 王蕴璇

按图7微分电路所示正确连接。输入三角波信号 U_i 的频率为 $f=1\text{kHz}$ 峰峰值为 2V ，用示波器观察并定量画出输入、输出波形。理论计算，误差计算和分析。

四、原始数据

1. 实验一：反相比例运算电路放大器动态指标测试
波形见原始数据

U_i	U_o	R_1	R_F
0.496V	5.37V	9.7555k Ω	105.36k Ω

2. 实验二：反相加法运算电路
波形见原始数据

U_{i1}	-0.1061V	0.3045V	-0.1036V	-0.3033V
U_{i2}	0.2036V	0.6028V	-0.2031V	-0.6027V
U_o	-2.1241V	-6.0253V	2.1108V	6.2216V

3. 实验三：同相比例运算电路
波形见原始数据

U_i	U_o	R_1	R_F
0.503V	5.37V	9.7344k Ω	100.88k Ω

4. 实验四：差动放大电路（减法器）
波形见原始数据

U_{i1}	1.0046V	2.0033V	-1.0031V	-2.0027V
U_{i2}	0.5029V	1.7022V	-0.5026V	-1.7021V
U_o	-5.2020V	-3.0851V	5.1407V	3.0007V

$R_1=9.7342\text{k}\Omega$ ， $R_2=9.7551\text{k}\Omega$ ， $R_3=105.27\text{k}\Omega$ ， $R_F=100.77\text{k}\Omega$

5. 实验五：积分运算电路
波形见原始数据

R_1	C	V_{op+}	V_{op-}	V_{opp}
99.517k Ω	0.105 μF	281.25mV	-262.5mV	543.75mV

6. 实验六：微分电路
波形见原始数据

R_F	C	V_{op+}	V_{op-}	V_{opp}
9.7755k Ω	0.1055 μF	3.79V	-4.03V	7.82V

五、数据处理与分析

1. 实验一：反相比例运算电路放大器动态指标测试

模拟运算电路

微电子学院

2022.12.12

17号台

PB21061324 徐铭鸽

PB21081565 王蕴璇

$$A_{u\text{理论}} = -\frac{R_F}{R_1} = -10.800$$

$$A_{u\text{实际}} = -\frac{U_o}{U_i} = -10.827$$

$$\left| \frac{A_{u\text{理论}} - A_{u\text{实际}}}{A_{u\text{理论}}} \right| \times 100\% = 0.25\%$$

2. 实验二：反相加法运算电路

$$U_{o\text{理论}} = -\left(\frac{R_F}{R_1}U_{i1} + \frac{R_F}{R_2}U_{i2}\right) = -(10.2U_{i1} + 5.04U_{i2})$$

U_{i1}	-0.1061V	0.3045V	-0.1036V	-0.3033V
U_{i2}	0.2036V	0.6028V	-0.2031V	-0.6027V
$U_{o\text{测量}}$	-2.1241V	-6.0253V	2.1108V	6.2216V
$U_{o\text{理论}}$	-2.1084V	-6.1440V	2.0803V	6.1313V
相对误差	0.74%	2.09%	1.47%	1.47%

3. 实验三：同相比例运算电路

$$A_{u\text{理论}} = 1 + \frac{R_F}{R_1} = 11.363$$

$$A_{u\text{实际}} = \frac{U_o}{U_i} = 11.391$$

$$\left| \frac{A_{u\text{理论}} - A_{u\text{实际}}}{A_{u\text{理论}}} \right| \times 100\% = 0.25\%$$

4. 实验四：差动放大电路（减法器）

$$V_+ = \frac{R_3}{R_2 + R_3}U_{i2}, V_- = \frac{R_F U_{i1} + R_1 U_o}{R_1 + R_F}, V_+ = V_-$$

$$U_{o\text{理论}} = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \left(\frac{R_3}{R_2 + R_3}U_{i2} - \frac{R_F}{R_1 + R_F}U_{i1}\right) \\ = 10.206U_{i2} - 10.215U_{i1}$$

U_{i1}	1.0046V	2.0033V	-1.0031V	-2.0027V
U_{i2}	0.5029V	1.7022V	-0.5026V	-1.7021V
$U_{o\text{测量}}$	-5.2020V	-3.0851V	5.1407V	3.0007V
$U_{o\text{理论}}$	-5.1293V	-3.0911V	5.1171V	3.0859V
相对误差	1.42%	0.19%	0.46%	2.76%

5. 实验五：积分运算电路

$$V_{opp\text{理论}} = \frac{1}{R_1 C} \int_0^T u_i dt = \frac{u_i T}{2R_1 C} = 473.7\text{mV}$$

$$\left| \frac{V_{opp\text{理论}} - V_{opp\text{实际}}}{V_{opp\text{理论}}} \right| \times 100\% = 12.8\%$$

6. 实验六：微分电路

模拟运算电路

微电子学院

2022.12.12

17号台

PB21061324 徐铭鸽

PB21081565 王蕴璇

$$V_{op+理论} = R_F C \frac{du_i}{dt} = R_F C \frac{2V_{ipp}}{T} = 4.2V, V_{op-理论} = -4.2V$$
$$\left| \frac{V_{op+理论} - V_{op+实际}}{V_{op+理论}} \right| \times 100\% = 9.76\%,$$
$$\left| \frac{V_{op-理论} - V_{op-实际}}{V_{op-理论}} \right| \times 100\% = 4.04\%$$

误差分析：

- 1) 电阻实际阻值与标称值有误差；
- 2) 运放与理想运放有误差；
- 3) 电源电压与标称值12V之间有误差；
- 4) 万用表测量误差；

六、思考题

1. 如何判断集成运算放大器的好坏?为了不损坏集成运算放大器，实验中应注意什么问题？

答：判断好坏的方法：

给集成运算放大器同时接正负直流电源，分别将同相输入端或反相输入端接地，检测输出电压 U_O 是否为 U_{om} 值（电源电压为 $\pm 12V$ 时），若是，则该器件基本良好，否则说明器件已损坏。

实验时应该注意：

- (1)不要接错电源的极性；
- (2)输入信号的幅值要在运算放大器允许的范围之内。

2. 在反相加法运算电路中，如果 U_{i1} 和 U_{i2} 均采用直流信号，并选定 $U_{i2} = -1V$ ，考虑到运算放大器的最大输出幅度为 $\pm 12V$ ， U_{i1} 的绝对值不应超过多少伏？

答：该运放电路输入和输出满足

$$V_O = -\left(\frac{R_F}{R_1}V_{i1} + \frac{R_F}{R_2}V_{i2}\right) = 10V_{i1} - 5$$

即有 $|10V_{i1} - 5| \leq 12$ ，得 $-0.7 \leq V_{i1} \leq 1.7V$

输入正电压时，绝对值不能超过1.7V，

输入负电压时，绝对值不能超过0.7V。

3. 在积分运算电路中，分析电阻 R_f 的作用，说明 R_f 的精度对积分电路的精度有何影响？

答：电路中 R_f 能有效抑制积分饱和（限制低频积分增益）和截止现象；但是会对总电流和电容的充放电电流起到分流作用，存在一个分流电流小量，从而会产生小误差，为了减小这个误差，通常 R_f 选择满足 $R_f \gg R_1$ ，即电路时间常数远小于电容C在和 R_f 构成回路中放电的时间常数。

模拟运算电路

微电子学院

2022.12.12

17号台

PB21061324 徐铭鸽

PB21081565 王蕴璇

-
4. 设计一个能够实现下列运算关系的运算电路（运放数 ≤ 2 ），已知条件如下：1) $U_0 = 2U_{11} + U_{12} - 3U_{13}$ ；2) $U_0 = 2U_{11} - 3U_{12}$

七、实验总结

1. 通过本次实验，掌握了集成运放的基本特性；
 2. 研究了集成运放中加法电路、减法电路、比例电路、微分电路和积分电路并进行了实验，达到了实验要求，完成了实验目的，加深了对理论知识的理解；
 3. 通过实验思考题，自主设计电路，对于运算电路有了更为深刻的理解。
-