

华中科技大学  
人工智能与自动化学院

# 集成运算放大器的基本应用

彭杨哲

U201914634

2021 年 4 月 21 日

## 1 实验目的

1. 掌握集成运算放大器的正确使用方法
2. 掌握用集成运算放大器构成各种基本运算电路的方法
3. 进一步学习正确使用示波器直流，交流输入方式观察波形的的方法，重点掌握积分器输入，输出波形的测量和描绘方法

## 2 实验元器件

集成运算放大器	LM324	1 片
电位器	1k $\Omega$	1 只
电容	0.01 $\mu$ F	1 只
电阻	100k $\Omega$	3 只
	10k $\Omega$	5 只
	5.1k $\Omega$	2 只
	9k $\Omega$	1 只

## 3 实验原理

### 3.1 反相比例运算

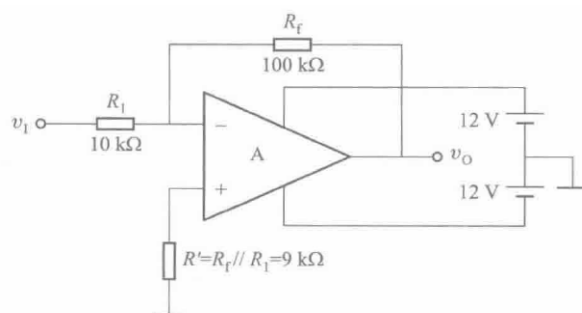


Figure 1: 反相比例运算电路

设组件 LM324 为理想器件，则

$$V_o = -\frac{R_f}{R_i} V_i$$

，其输入电阻  $R_i \approx R_1$ ，在选择电路参数时应考虑：

1. 根据增益，确定  $R_f$  与  $R_1$  的比值，若  $R_f$  太大，则  $R_1$  亦大。这样容易引起较大的失调温漂；若  $R_f$  太小，则输入电阻亦小，可能满足不了高输入阻抗的要求，故一般取  $R_f$  为几十千欧至几百千欧。若对放大器的  $R_i$  有要求，则先确定  $R_1 = R_i$ ，再求  $R_f$ 。
2. 运放的同相输入端外接的  $R'$  是直流补偿电阻，可减小运算放大器偏置电流产生的不良影响，一般取  $R' = R_f // R_1$ ，由于反比例运算电路属于电压并联负反馈，其输入输出阻抗均较低。

### 3.2 反比例加法运算

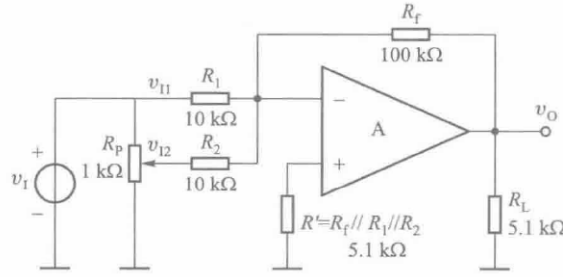


Figure 2: 反比例加法运算电路

当运算放大器的开环增益足够大时，其输入端为“虚地”， $V_{i1}$  和  $V_{i2}$  均可通过  $R_1, R_2$  转换成电流，实现代数相加，其输出  $V_o = -(\frac{R_f}{R_1} V_{i1} + \frac{R_f}{R_2} V_{i2})$ ，当  $R_1 = R_2 = R$  时，有

$$V_o = -\frac{R_f}{R}(V_{i1} + V_{i2})$$

### 3.3 减法运算

当  $R_1 = R_2 = R, R' = R_f$  时，其输出

$$V_o = \frac{R_f}{R}(V_{i2} - V_{i1})$$

，在电阻值严格匹配的情况下，本电路具有较高的共模抑制能力。

### 3.4 积分运算

当运算放大器开环增益足够大，且  $R_f$  开路时，可认为  $i_R = i_C$ ，其中  $i_R = \frac{V_i}{R_1}$ ， $i_C = -C \frac{dV_o(t)}{dt}$ ，将  $i_R, i_C$  代入，并设  $t=0$  时，电容两端初始电压

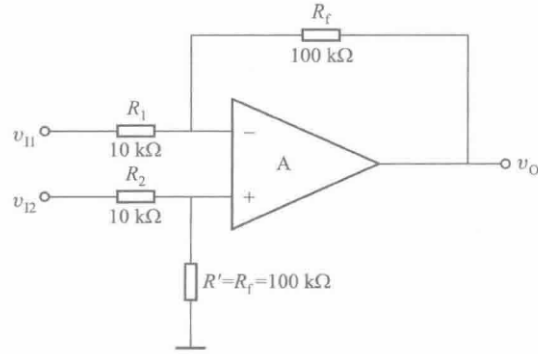


Figure 3: 减法加法运算电路

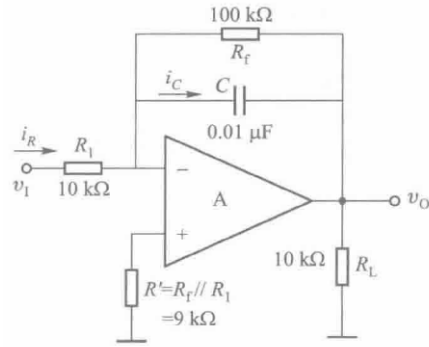


Figure 4: 积分运算电路

为  $V_o(0)$  则

$$V_o(t) = -\frac{1}{R_1 C} \int_0^t V_i(t) + V_o(0)$$

，当输入信号  $V_i(t)$  为正方形波时，其输出为  $V_o(t)$  的稳态波形如图7(a)：

实际电路中，通常在积分电容两端并联反馈电阻  $R_f$ ，用于直流负反馈，其目的是减少集成运算放大器输出端的直流漂移，其阻值必须取的大一些，否则电路将变成一阶低通滤波器。同时  $R_f$  的加入将对电容  $C$  产生分流作用，从而产生积分误差。为克服误差，一般需要满足  $R_f C \gg R_1 C$ 。 $C$  太小，会加剧积分漂移，但  $C$  增大，电容漏电流也随之增大。通常取  $R_f > 10R_1, C < 1\mu F$ 。

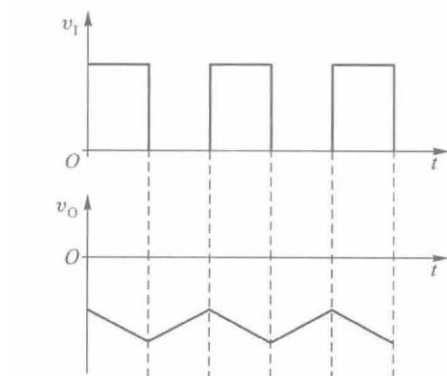


Figure 5: 输入为正方形时，积分器输出的稳态波形

## 4 实验内容

### 4.1 反相比例加减法运算

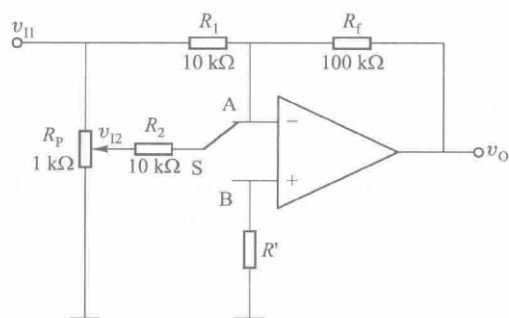


Figure 6: 反相比例加减法运算电路

如图6，接入  $f = 1\text{kHz}$  正弦波，调节电位器  $R_p$ ，用示波器测量  $V_{i1}$  和  $V_{i2}$  电压的大小，然后再测  $V_o$  的大小。调节  $R_p$ ，改变  $V_{i2}$  的值，分别记录相应  $V_{i1}$ ,  $V_{i2}$ ,  $V_o$  的数值，填入自拟表格中，并将理论值填入表格，测试数据不少于 3 组。

$S$  接  $A$  时，为加法电路， $R' = R_f // R_1 // R_2 = 5.1\text{k}\Omega$ ,

$$V_o = -\frac{R_f}{R'}(V_{i1} + V_{i2})$$

当  $R_1 = R_2 = R$  时,  $S$  接  $B$  时, 为减法电路,  $R' = R_f = 100k\Omega$ ,

$$V_o = \frac{R_f}{R}(V_{i2} - V_{i1})$$

## 4.2 比例积分运算

如图4, 假设电容  $C$  两端的初始电压为零, 电路的输出为

$$V_o(t) = -\frac{1}{R_1 C} \int_0^t V_i(t) dt$$

, 输入  $f = 1kHz$ , 幅值为  $1V$  的正方波, 用示波器 DC 档测试  $V_i$  和  $V_o$ , 画出其波形, 标出幅值和周期。

## 4.3 EDA 仿真实验内容

在计算机上, 使用仿真软件 PSpice (或者 Multisim) 设计一个反向比例加法运算电路, 要求实现  $v_o = -(15v_{i1} + 30v_{i2})$ 。对每一路输入信号电路的输入电阻不小于  $10k\Omega$ 。设计一个分压电路, 将信号原输出的  $v_{i1}$  进行分压得到  $v_{i2}$ 。输入  $1kHz$  正弦波, 仿真输入, 输出波形, 记录他们的幅值, 并与理论值比较。

# 5 实验结果及分析

## 5.1 反向比例加减法运算

### 实验结果及误差计算分析

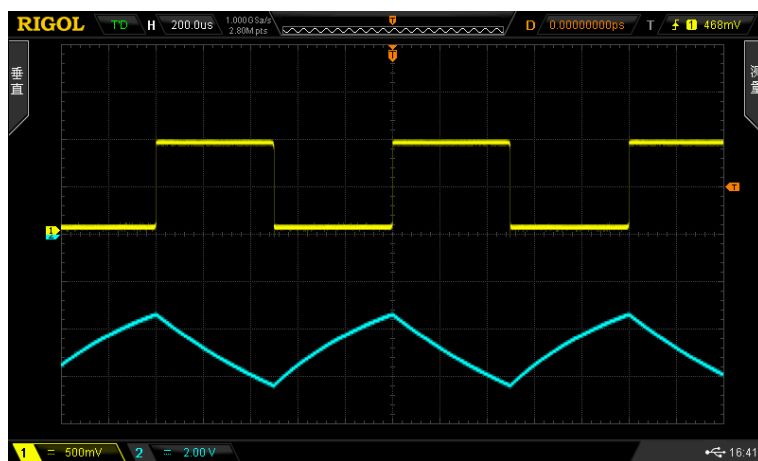
	$V_{i2}/mV$	$V_o /V$	$V_o /V$	绝对误差	相对误差
加法电路	26.8	1.233	1.268	0.035V	2.8%
	20.0	1.164	1.208	0.044V	3.7%
	$V_{i1} = 100.8mV$	37.6	1.334	1.384	0.05V
减法电路	28.0	1.724	1.72	0.004V	0.23%
	60.0	1.403	1.4	0.003V	0.21%
	$V_{i1} = 200.0mV$	88.0	1.14	1.12	0.02V

Table 1: 结果表格

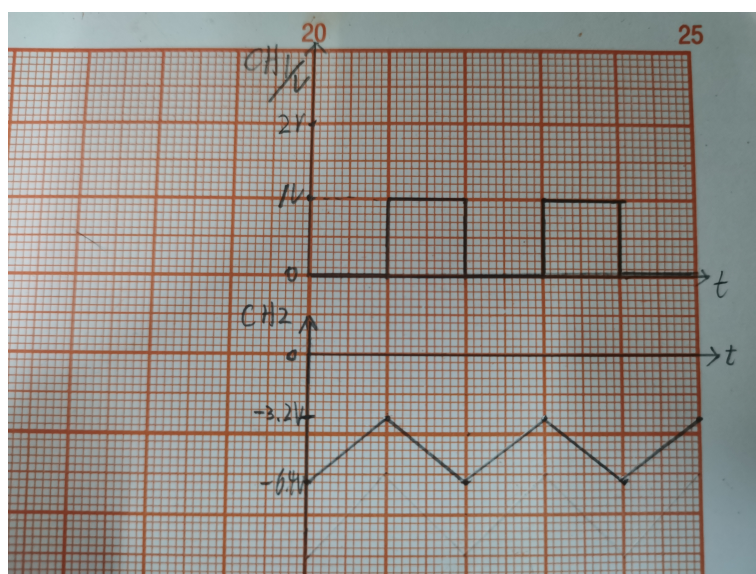
### 实验结果分析结论

由结果计算出相对误差, 实验结果在误差允许范围内, 实验结果有效。

## 5.2 比例积分运算



(a)



(b)

Figure 7: 反向积分电路实验波形图

### 实验结果分析结论

在误差允许的范围内，实验结果有效。

## 5.3 EDA 仿真实验

### 实验电路图

实验电路图如图8所示

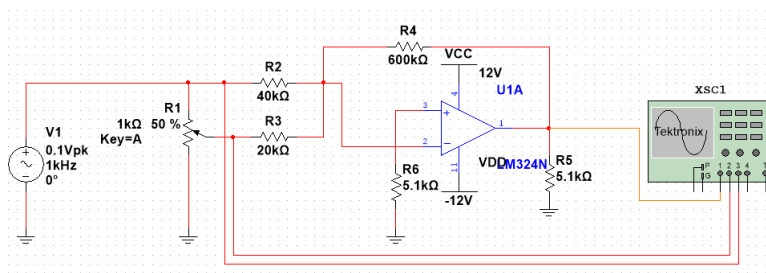


Figure 8: 仿真电路

## 仿真结果

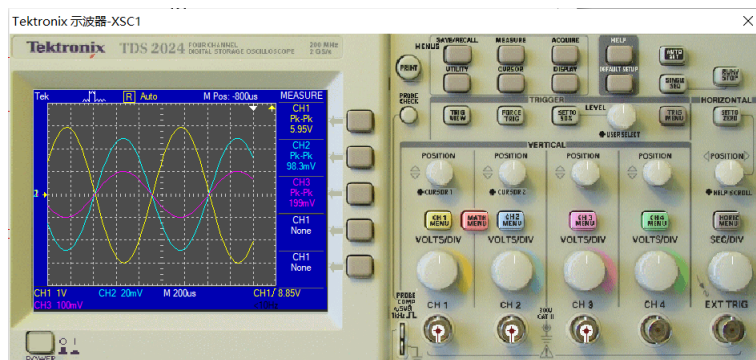


Figure 9: 仿真结果

从仿真结果9可以看出，所设计电路满足了  $v_o = -(15v_{i1} + 30v_{i2})$  的要求。

## 5.4 思考题

1. 在反比例加法运算电路中（开关 S 置 A 点）。R' 值应怎样确定？若  $R_1=R_2=10k\Omega$ ， $R'=5.1k\Omega$ ，试问：取  $R_1=10k\Omega$  和  $R_1=100k\Omega$  两种情况下，哪一种运算精度高？为什么？对照实验结果分析。

答：

- $R' = R_f // R_1 // R_2$
- $R_1=100k\Omega$  精度高，因为当  $R_1$  越小，信号的放大越明显，则精度越高。

2. 若输入信号与放大器的同相端相连，当信号正向增大时，运算放大器的输出时正还是负？

答：因为放大器同相端与输出端同相，所以输出应为正



3. 若输入信号与放大器的同相端相连，当信号反向增大时，运算放大器的输出时正还是负？

答：放大器反相端与输出端反相，当信号负向增大，输出应为正

4. 在函数发生器设计中，往往需要一种带有直流偏置的放大器，以便能对信号源的信号  $v_s$  进行直流偏置后再输出，图10中所示为一种实现方案，试推导输出电压  $v_o$  的表达式

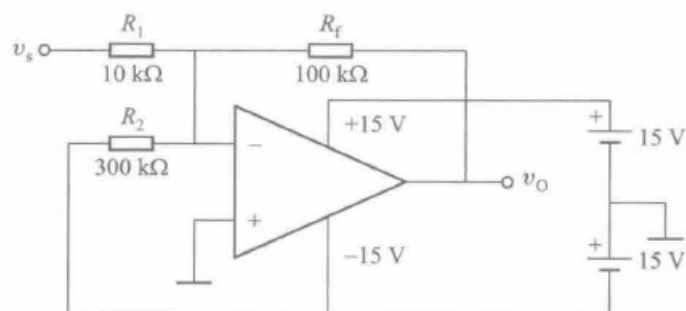


Figure 10: 一种带有直流偏置的放大器

答：由理想运算放大器的“虚短虚断”可以推出  $v_o = -10v_s + 5$

## 6 小结

通过本次实验，我第一次尝试了面包板的使用，学会了直流电流源，信号源的使用，更重要的是学会了示波器这一电路实验必备工具的使用，可谓收获颇多。而且，在面包板上的插板连线操作也很好的锻炼了我的动手能力。

## 7 实验中出现的問題，分析及解决方案

在本次实验过程中，我收集了一些常見的問題，小结如下：

- 在实验开始前，一定要认真检查自己的仪器是否正常，尤其是示波器，使用示波器前应将测试夹加到测试点处检测示波器是否可以正常显示出方波波形，确保示波器工作正常。
- 对于需要双电源供电的电路，直流稳压源的电线应当是：中间两按钮均处于弹起状态，用导线将中间两接线柱连接起来，分别从另外两个

接线柱引出正负电源。尤其需要注意的是，中间两个接线柱也应引出一根导线连接至面包板上的公共地上，不然得到的电源大小便会出现问题。

- 当将线路连接完毕且检查无误后，要记得打开直流电源对运算放大器供电，不然其无法正常工作，显示出的波形必然会出现问题。