

## 1 实验名称:集成运算放大电路的应用(二)

## 2 实验目的

- (1) 熟悉加法、减法、积分、微分电路的基本工作原理和电路组成形式.
- (2) 掌握运算电路的设计与实际测量方法.
- (3) 学会测试各运算电路的工作波形.

## 3 实验原理

### (1) 加法器

加法器的输出量反映出多个模拟输入量相加的结果. 用运算放大器实现加法运算时, 可以采用反相输入方式, 也可以采用同相输入方式. 如图 1 所示的反相输入加法器, 是将两个电压  $U_1$  和  $U_2$  同时加到集成运算放大器的反相输入端, 显然, 它属于多端输入的电压并联负反馈电路. 在理想情况下, 利用虚地的概念, 可得到输出电压与输入电压之间的关系为

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

式中, 负号是由于反相输入引起的. 若  $R_1 = R_2 = R_F$ , 则上式可变为

$$U_o = -(U_{i1} + U_{i2})$$

如果在输出端再接 1 级反相器, 则可消去式中的负号, 这样就可以实现完全符合常规的算术加法运算.

为了提高运算精度, 如图 1 所示的电路中, 同相输入端电阻  $R_3$ , 应满足  $R_3 = R_1 \parallel R_2 \parallel R_F$  或增加调零电路. 图 4-49 所示的电路可以扩展到多个输入电压相加的情况, 若有几个输入电压相加, 则输出电压与输入电压之间的关系为

$$U_o = -\sum_{k=1}^n \frac{R_F}{R_k} U_{ik}$$

而  $R_P = R_1 \parallel R_2 \parallel \dots \parallel R_k \parallel R_F$ , 扩展后的加法器称为比例加法器, 如果电路中取  $R_1 = R_2 = \dots = R_k = R_F$ , 则有  $U_o = -\sum_{k=1}^n U_{ik}$  加法器的输入信号也可以是直流信号.

(2) 减法器(差动放大器) 图 2 是用来实现两个电压  $U_{i1}, U_{i2}$  相减的电路图. 从结构上看, 它是一个反相输入和同相输入相结合的放大器, 信号电压  $U_{i1}, U_{i2}$  分别通过电阻  $R_1, R_2$  加在运算放大器的反相和同相输入端  $R_F$  和  $R_1$  构成反馈网络. 当电路参数一定时, 由于集成运算放大器的开环电压增益  $A$  很大, 不论  $(U_{i2} - U_{i1})$  的大小、极性如何, 都将引入很强的负反馈, 使  $U_- = U_+$ , 电路中存在“虚短”现象, 同时两输入端引入共模电压,  $U_- = U_+ = U_{i2} \frac{R_3}{R_3 + R_2}$ . 根据理想运放的两个基本法则, 由图 2 可列出下列方程

$$\begin{aligned} \frac{U_{i1} - U_-}{R_1} &= \frac{U_- - U_o}{R_F} \\ \frac{U_{i2} - U_+}{R_2} &= \frac{U_+}{R_3} \end{aligned}$$

从而可得输出电压

$$U_o = \left(\frac{R_1 + R_F}{R_1}\right)\left(\frac{R_3}{R_2 + R_3}\right)U_{i2} - \frac{R_F}{R_1}U_{i1}$$

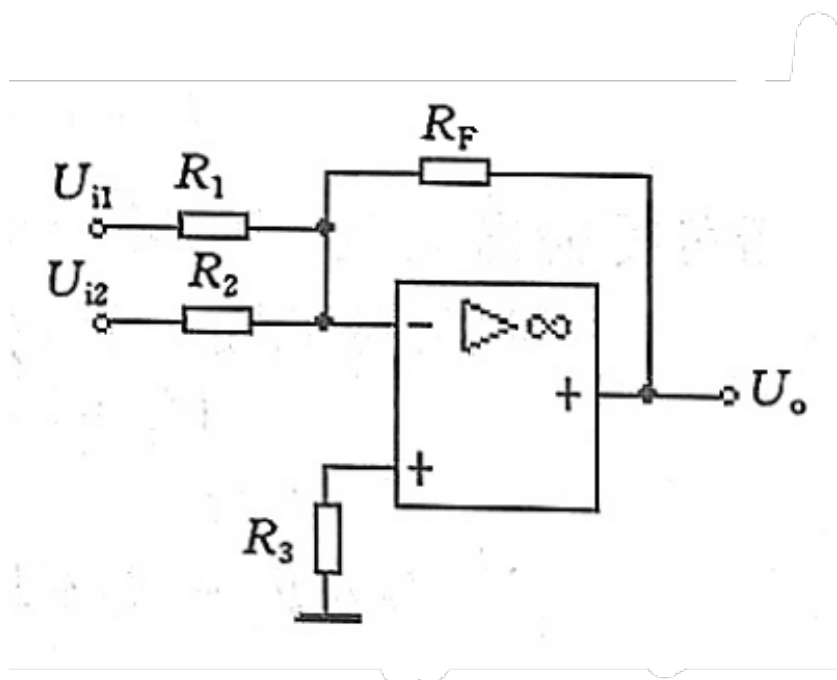


图 1: 反相加法器

当电阻值满足  $R_F \parallel R_1 = R_2 \parallel R_3$  的关系时, 输出电压可简化为

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

输入电阻为

$$R_1 = R_1 + R_2 = 2R_1$$

差模增益为

$$A_{ud} = \frac{U_o}{U_{i2} - U_{i1}} = \frac{R_F}{R_1} = \frac{R_3}{R_2}$$

即输出电压  $U_o$  与两个输入电压之差  $U_{i2} - U_{i1}$  成比例. 当取  $R_F = R_1$  时  $U_o = U_{i2} - U_{i1}$  可实现减法运算. 这种电路常用于将差动输出转换为单端输出, 放大具有强烈共模干扰的微弱信号, 或用于传感器、测量仪器的前置放大. 要提高运算精度, 一方面要严格选配电阻, 另一方面要采用高共模抑制比的集成运算放大器.

(3) 积分器积分电路是模拟计算机中的基本单元, 利用它可以实现微分方程的模拟, 它同时也是控制和测量系统中的重要单元, 利用它的充放电过程可以实现延时、定时以及产生各种波形. 集成运算放大器的基本积分电路如图 3 所示. 它和反相比例放大器的不同之处在于它是用电容  $C$  来代替反馈电阻  $R$ . 利用集成运算放大器, 电容  $C$  两端电压增长时流过它的电流基本维持稳定, 从而可以实现比较理想的积分运算. 由于  $i_1 = \frac{u_i}{R_1} = -i_c$

$$u_o(t) = -\frac{1}{C} \int_0^t i_c dt = -\frac{1}{R_1 C} \int_0^t u_i dt$$

上式表明输出电压与输入电压成积分关系, 式中负号表示输出电压与输入电压在相位上是相反的. 为了减小

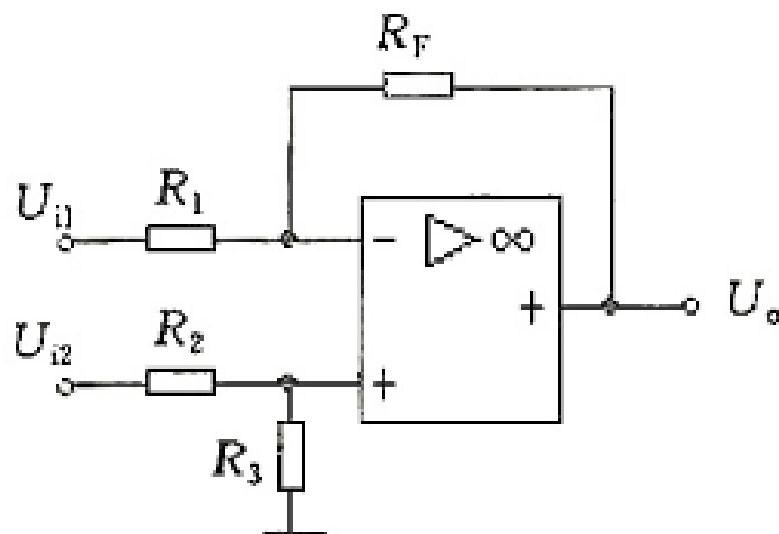


图 2: 反相加法器

输入偏置电流的影响, 同相端平衡电阻  $R_p = R_1$ . 当输入信号是幅度为  $U_m$  的阶跃电压时,

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

上式说明, 输出电压与输入电压相位相反, 且输出电压 ( $u_o$ ) 随着时间的增长线性下降, 直到放大器出现饱和. 当  $t=RC$  时,  $u_o(t) = -U_m$ . 若输入是方波, 则输出电压为锯齿波, 且两者相位相反. 实际中, 为了限制电路的低频增益, 减小失调电压的影响, 电路如图 4 所示

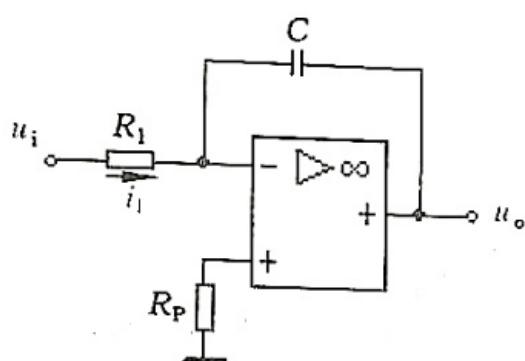


图 3: 积分器原理

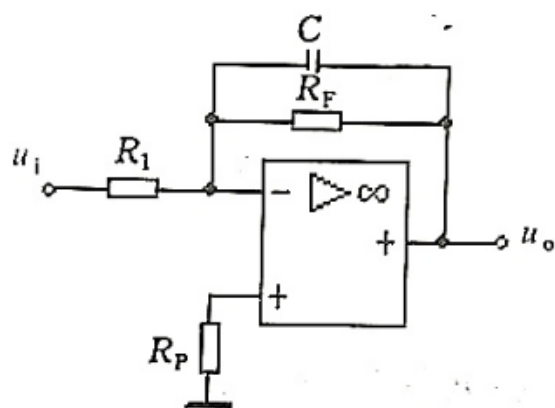


图 4: 积分器实验

#### (4) 微分器

微分运算是积分运算的逆运算. 从电路形式上看, 将图 3 中电阻与电容的位置对调一下, 即可得到图 5 所示的微分电路. 由于

$$i_i = C \frac{du_i}{dt}$$

$$i_1 = i_C$$

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

即输出电压是输入电压的微分,  $R_P = R_F$  从而可实现微分运算.  
 利用微分电路可以实现波形变换, 如将矩形波变换成为尖脉冲, 若输入信号为对称三角波, 则输出电压为对称的方波.

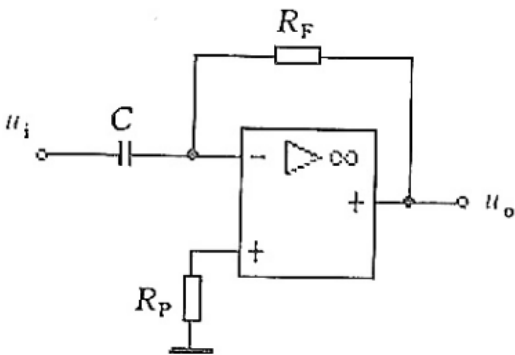


图 5: 微分器原理

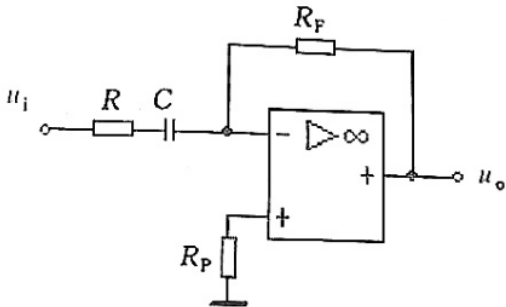


图 6: 微分器实验

### 4 实验电路

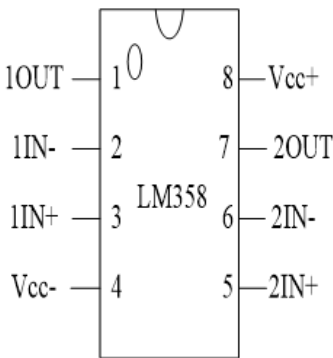


图 7: 加法器

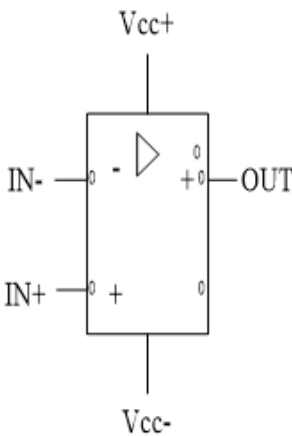


图 8: 减法器

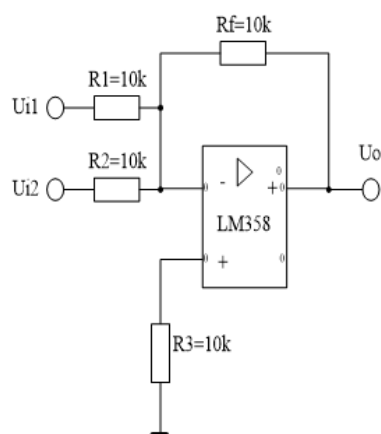


图 9: 加法器

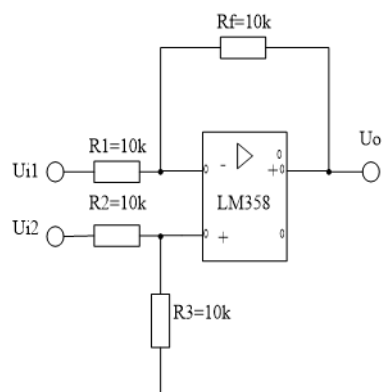


图 10: 减法器

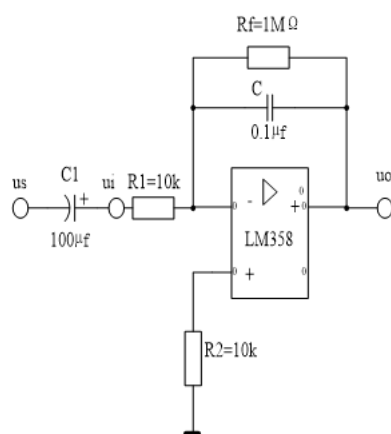


图 11: 积分器

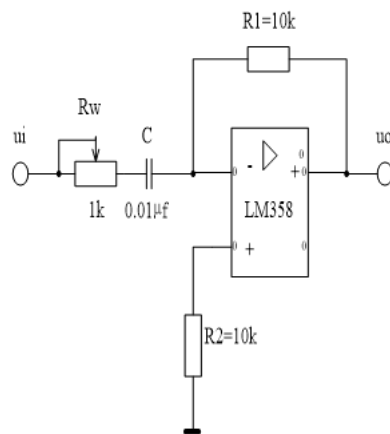


图 12: 微分器

## 5 实验内容及步骤

### 5.1 加法器

- (1) 按图 9 连接好线路, 检查无误后接入士 12V 电源.
- (2) 在输入端输入不同数值的直流信号, 当  $R_1, R_2$  为不同值时, 测出所对应的输出电压. 记录数据, 根据电路元件参数值进行理论计算, 将计算结果填入同一表中, 并与测量值相比较。

### 5.2 减法器

- (1) 按图 10 连接好线路, 检查无误后接入士 12V 电源。
- (2) 在输入端输入不同数值的直流信号, 当和为不同值时, 测出所对应的输出电压. 记录数据, 根据电路元件参数值进行理论计算, 将计算结果填入同一表中, 并与测量值相比较。

### 5.3 积分器

(1) 参照图 11 接好线路, 检查无误后通电。

(2) 分别输入频率  $f=1\text{kHz}$ ,  $U_{ip-p}=1.5\text{V}$  的方波信号、正弦波信号, 三角波信号, 用示波器同时观测和记录、的波形、幅度及相位。

### 5.4 微分器

(1) 参照图 12 接好线路, 检查无误后通电。(2) 输入频率  $f=500\text{Hz}$ ,  $U_{ip-p}=1.5\text{V}$  的三角波信号, 调节使输出的方波不出现过冲和塌顶现象(临界补偿), 观测和记录、的波形、幅度及相位。再分别输入同频同幅的方波信号、正弦波信号用示波器同时观测和记录、的波形、幅度及相位。最后记录的实际阻值。

## 6 数据及误差处理

### 6.1 加法器

$U_{i1}(V)$	1	2	3
$U_{i2}(V)$	3	2	1
$U_0(V)$ (理论值)	-4	-4	-4
$U_0(V)$ (实验值)	-4.01	-4.02	-4.02
$\delta(u_o)$	0.2%	0.4%	0.4%

表 1: 加法器数据表

### 6.2 减法器

$U_{i1}(V)$	1	2	3
$U_{i2}(V)$	3	2	1
$U_0(V)$ (理论值)	2	0	-2
$U_0(V)$ (实验值)	2.00	0.01	-2.00
$\delta(u_o)$	0	0	0

表 2: 减法器数据表

6.3 积分器

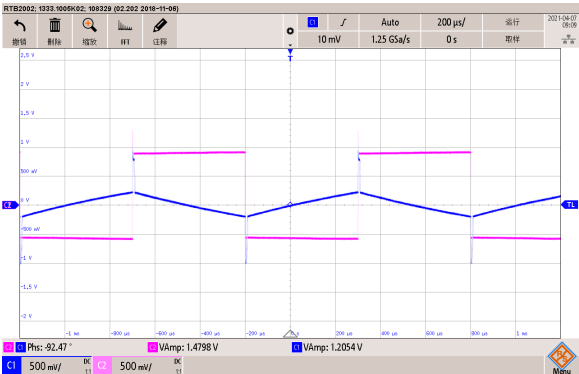


图 13: 方波输出

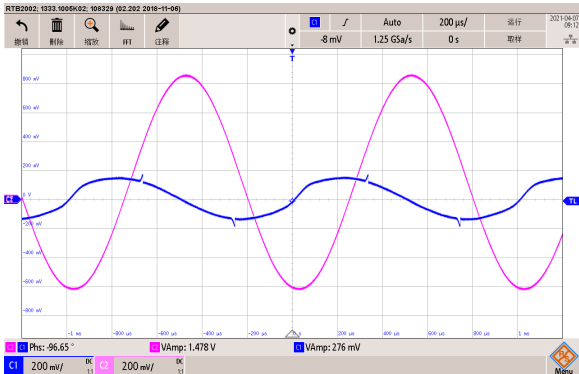


图 14: 正弦波输入

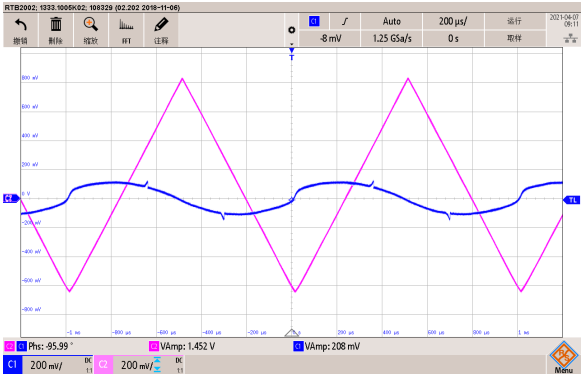


图 15: 三角波输入

幅度	1.205V	0.276V	0.208V
相位 (理论值)	-90.0	-90.0	-90.0
相位 (实验值)	-92.5	-96.7	-97.0
$\delta(Phase)$	2.7%	7.4%	7.8%

表 3: 积分器数据表

6.4 微分器

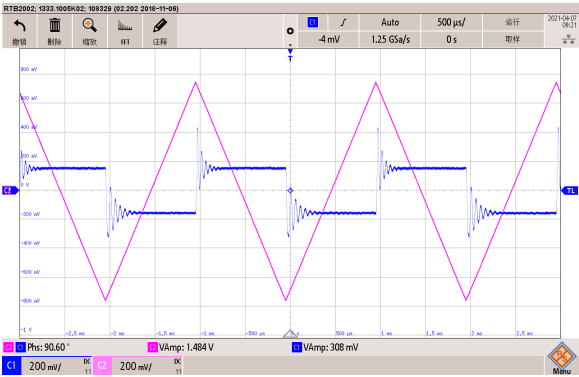


图 16: 过冲现象

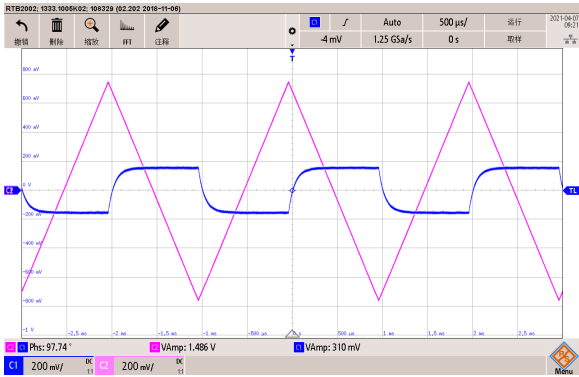


图 17: 塌陷现象

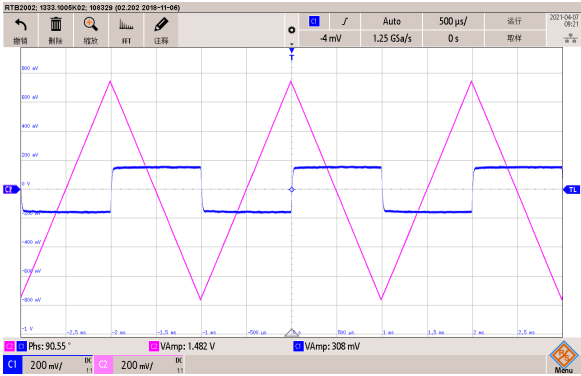


图 18: 实验值

幅度	激冲电压	0.482V	0.308V
相位 (理论值)	-180.0	90.0	90.0
相位 (实验值)	-179.6	94.1	90.6
$\delta(Phase)$	0.2%	4.5%	0.6%

表 4: 微分器数据表

测得  $R_W = 1.24k\Omega$



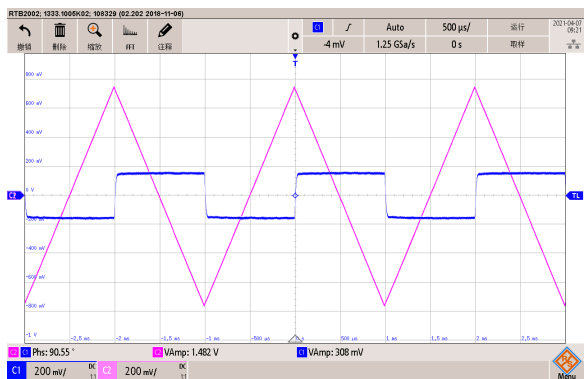


图 19: 方波输出

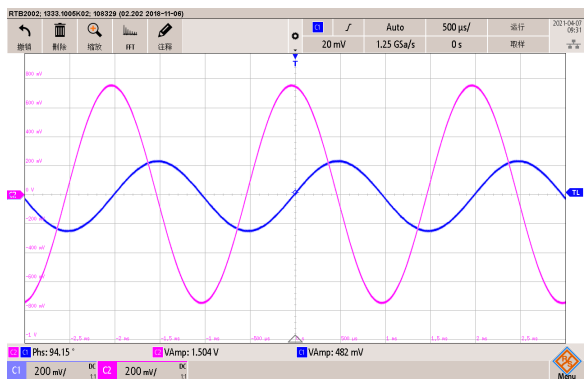


图 20: 正弦波输入

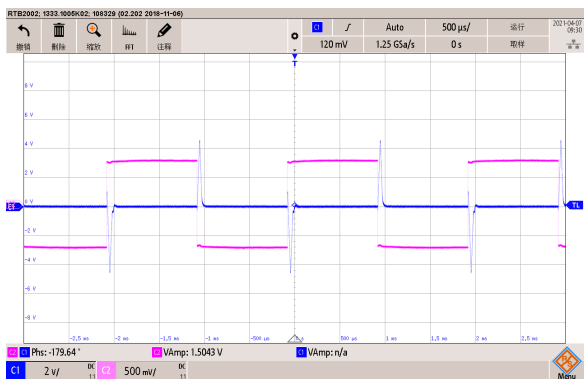


图 21: 三角波输入

7 实验设备和器材

- (1) 双踪示波器
- (2) 函数信号发生器
- (3) 直流稳压电源
- (4) 模拟电路实验箱
- (5) 万用表
- (6) 集成芯片 LM358、电阻器、电容器
- 1 台
- 1 台
- 1 台
- 1 台
- 1 只
- 若干

8 结论

(1) 加法器

加法器，是将两个电压  $U_1$  和  $U_2$  同时加到集成运算放大器的反相输入端，显然，它属于多端输入的电压并联负反馈电路。在理想情况下，利用虚地的概念，可得到输出电压与输入电压之间的关系为

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

(2) 减法器(差动放大器)减法器用来实现两个电压相减的电路图。从结构上看,它是一个反相输入和同相输入相结合的放大器,信号电压和分别通过电阻,加在运算放大器的反相和同相输入端,电阻,构成反馈网络。当电路参数一定时,由于集成运算放大器的开环电压增益很大,电路中也存在“虚短”现象,同时两输入端引入共模电压,最终得到输出电压:当电阻值满足  $R_F \parallel R_1 = R_2 \parallel R_3$  的关系时,输出电压可简化为

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

即输出电压与两个输入电压之差  $U_{i2} - U_{i1}$  成比例。当取  $R_F = R_1$  时  $U_o = U_{i2} - U_{i1}$  可实现减法运算。

### (3) 积分器

积分电路是模拟计算机中的基本单元,利用它可以实现微分方程的模拟,它同时也是控制和测量系统中的重要单元,利用它的充放电过程可以实现延时、定时以及产生各种波形。它和反相比例放大器的不同之处在于它是用电容 C 来代替反馈电阻,利用集成运算放大器,电容 C 两端电压增长时流过它的电流基本维持稳定,从而可以实现比较理想的积分运算。当输入不同种类的信号时,输出信号也有所不同;输入方波信号:输出线性信号,相位差为-90 输入正弦波信号:输出余弦波信号,相位差为-90 输入三角波信号:输出类二次函数信号,相位差为-90

### (4) 微分器

微分运算是积分运算的逆运算。从电路形式上看,将积分电路中电阻与电容 C 的位置对调一下,即可得到微分电路。当输入不同种类的信号时,输出信号也有所不同;输入方波信号:输出脉冲信号,相位差为-180 输入正弦波信号:输出余弦波信号,相位差为 90 输入对称三角波信号:输出对称方波信号,相位差为 90

## 9 思考题

(1) 在积分电路中,电阻起什么作用?

电阻保证电路中放大器输入两端电阻大小基本相同,保证电路输入电压可控。

(2) 在反相加法器的输出电压中,各相加项的比例系数仅与和输入回路的输入电阻之比有关,而与其他输入端的电阻及运算放大器的参数无关,以上结论在什么条件下才成立?为什么?反相加法器能否实现减法运算?如何实现?

以上条件是理想假设,只有输入端电流完全虚短,电压完全虚断时可以实现。反相加法器可以实现减法运算,即在加法器的基础上加上可控反相器。

(3) 如果实际运算放大器不符合理想运算放大器条件,会出现什么问题?如要求

各元件参数应如何确定?

答:如果实际运算放大器不符合理想运算放大器条件,则通过“虚短”“虚断”得到的理论数值会与实验数据不相符。如要求,则可以通过公式:  $U_o = \frac{R_F}{R_1}U_{i1} - \frac{R_F}{R_2}U_{i2}$  来确定各项的数值

(4) 为了不损坏集成块,实验中应注意什么问题?

为了不损坏集成块,集成运算放大器实验中必须注意以下三个问题,不要接错电源的正负极;输入信号的幅值要在运算放大器允许的范围之内。