

## 实验 6 集成运算放大器的放大应用

### 一、实验目的

1. 了解集成运算放大器的管脚分布及其功能。
2. 进一步理解集成运放构成的比例放大器原理。
3. 掌握集成运放的正确使用方法及特点；掌握运放构成实际放大电路。

### 二、预习要求

1. 如何应用集成运放构成反相、同相比例放大器？
2. 了解待测运放器件的性能指标，查明各个管脚功能。
3. 若集成运放的偏置电源为 $\pm 12\text{V}$ ，则集成运放的最大输出电压为多少伏？

### 三、实验设备及元器件准备

1. UT330 型数字万用表一台。
2. YB1731 型直流稳压电源一台。
3. GDS1152A 型数字示波器一台。
4. EE1641B1 型函数发生器一台。
5. 通用面包板一个。
6. 运放 OP07 或者 741 一个、电阻、导线若干。

### 四、实验原理

集成运算放大器是一种高增益的直接耦合电路，当外部接入不同的元件时，可实现各种数学运算关系。在线性应用中，可实现比例、加法、减法、积分、微分等模拟运算电路。理想的集成运放具有以下特点： $R_i \rightarrow \infty$ ， $R_o \rightarrow 0$ ， $A \rightarrow \infty$ ， $K_{CMRR} \rightarrow \infty$ 。

集成运放大器电路符号如图 6-1（a）所示，实际的集成运算放大器“741”的管脚分布如图 6-1（b）所示。

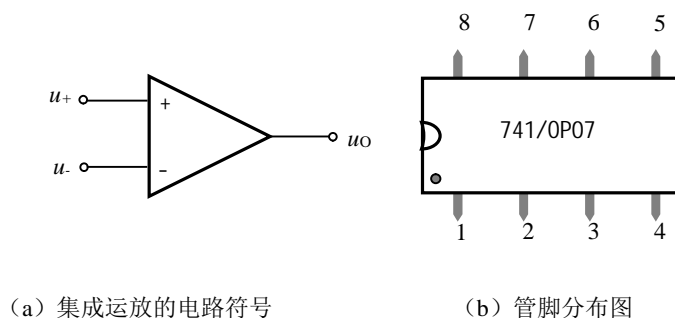


图 6-1 集成运放大器

其中：1 脚和 8 脚是一对调零端钮，目的是运放正负双电源供电时，通过这一对端钮外接调

零电路实现零输出；2 脚是反相输入端；3 脚是同相输入端；4 脚是负电源端；6 脚是输出端；7 脚是正电源端；5 脚空置。

集成运放有两个输入端，根据输入接入方式的不同，可构成 3 种基本的放大组态，即反相、同相和差动输入组态，它们是构成集成运放系统的基本单元。

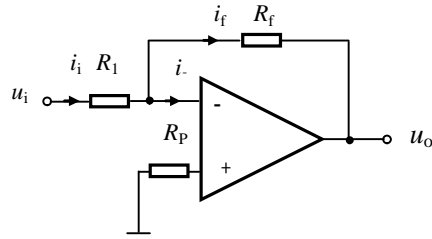


图 6-2 反比例放大器原理图

### 1. 反比例放大器

如图 6-2 是典型的反比例放大器原理图，输入信号经输入限流电阻送到反相输入端，同相输入端经平衡电阻接地。反馈电阻引入电压取样电流求和反馈，属于深度负反馈。根据运放工作在线性放大区的两个基本法则“虚短”和“虚断”有：

$$\begin{aligned} \uparrow V_+ = V_- = 0 \\ \uparrow i_i = i_f \end{aligned}$$

所以：
$$\frac{u_i}{R_1} = -\frac{u_o}{R_f} \Rightarrow A = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_f}{R_1}$$

由上式可以看出，该电路的增益和运放的性能指标无关，可以很方便地通过外围电阻的调节改变电路增益。

### 2. 同比例放大器

如图 6-3 所示电路，输入信号从同相端接入，反相端接地。同样依据两个基本原则“虚短”和“虚断”有：

$$i_i = 0 \quad u_- = u_+ = u_i$$

有：
$$i_i = i_f \Rightarrow \frac{u_i}{R_1} = \frac{u_o - u_i}{R_f}$$

所以：
$$A = \frac{u_o}{u_i} = R_f \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_f} \right) = \frac{R_f}{R_1} + 1 = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

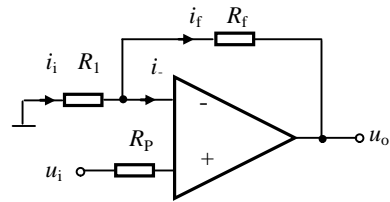


图 6-3 同比例放大器原理

### 3. 跟随器

在上式中，若令  $R_1 = \infty$ （实际电路中用开路来实现），则电路增益等于 1，构成电压跟随器，如图 6-4 所示。该电路的输入电阻  $R_i = \infty$ ，输出电阻  $R_o = 0$ ，具有非常好的隔离作用，因此在实际中可做缓冲器用。

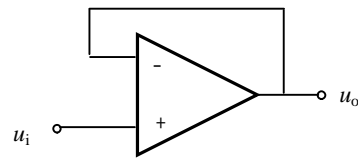


图 6-4 电压跟随器

## 五、测试方法

### 1. 交流增益的测试

将放大器的输入、输出电压分别测出后，在测试过程中，应注意公共端的选取，根据增益的定义：

$$A = \frac{U_o}{U_i}$$

确保放大器工作在线性放大状态，接入正弦激励后，在输出不失真的情况下，用晶体管毫伏表或示波器测量出其输入输出的大小，两者相除即可求出增益。若要测量出其相位关系，即要判断其是反相还是同相放大器，即可用示波器观测其波形，如图 6-5 所示。

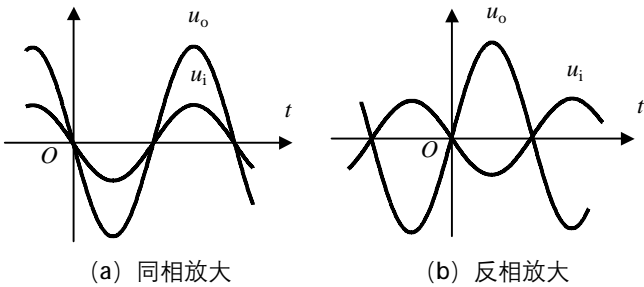


图 6-5 交流增益的测量示意图

### 2. 双电源的连接方法

集成运放工作在线性放大区的最基本条件为直流偏置电源需正确提供，741 和 OP07 的 4 脚接负电源、7 脚接正电源，该正负是对公共端而言的，在实现偏置电源时应注意。

双电源的连接原理如图 6-6 所示， $E_1$ 、 $E_2$  可提供两组独立等值的直流电压输出，为满足双电源供电，将  $E_1$  的负极与  $E_2$  的正极短接，并将短接端引出与放大器的公共端相连，这样  $E_1$  的正极对公共端而言可提供正电压， $E_2$  的负极对公共端而言可提供负电压，从而实现双电源供电。

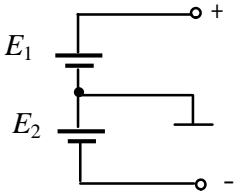


图 6-6 双电源的连接原理

实验室中型号为 YB1731C2A 直流稳压电源，在第一组和第二组输出的面板中间，有两个按键，上一个可选择组合或是独立工作状态，在组合状态时，下一组可选择并联或是串联方式。若选择组合串联，其工作原理即如图 6-6 所示，电源内部将第一组输出的负极与第二组输出的正极短路，若将第一组的负极（或第二组的正极）引出作为放大器的公共端，则可实现双电源连接。注意在组合串联工作状态时，第一组电源为主电源，可实现电压值的大小的调节，第二组是从电源，其电压调节不再改变第二组输出的大小。

### 3. 实验内容

#### 1. 反相比例放大器的设计与测试

根据元件包中所提供元件，应用集成运放设计并搭建一个反相放大器，完成表 6-1 的测试。

表 6-1 反相放大器的测试

测试条件		输出电压	实测放大倍数	所选电阻的大小	
$U_i$	A	$U_o$	A	$R_i$	$R_f$
$2\cos 1000\pi t$ V	-3	在同一坐标系下定量地绘出输入输出的波形			

## 2. 同相比例放大器的测量

根据元件包中所提供元件，应用集成运放设计并搭建一个同相放大器，并完成表 6-2 的测试。

表 6-2 反相放大器的测试

测试条件		输出电压	实测增益	所选电阻的大小	
$U_i$	$A$	$U_o$	$A$	$R_i$	$R_f$
$3\cos 1000\pi t$ V	2	在同一坐标系下定量地绘出输入输出的波形			

## 六、实验报告要求

1. 说明实验原理。
2. 整理测试数据和波形，分析测试数据与理论分析之间的误差。

## 七、思考题

1. 试分析同相比例放大器与反相比例放大器之间的优缺点。
2. 若要改变放大器的增益，试问须调节电路中的哪些参数？

# 第 1 部分 基础性实验

## 实验 1.1 集成运算放大器的运算应用

### 一、实验目的

1. 进一步理解集成运放的基本特性；
2. 熟练掌握集成运放的正确使用方法；
3. 理解集成运放构成的加法器、减法器原理及其实际应用；
4. 应用示波器测量技术对运放的运算关系进行研究。

### 二、预习要求

1. 复习有关集成运放构成运算电路的相关内容，简述各实验电路的工作原理；
2. 根据实验内容，推导个电路输出电压的表达式，并计算理论值；
3. 自拟电路测试和记录积分、微分运算电路的实验数据和波形。

### 三、实验设备及元器件准备

1. 直流稳压电源
2. 函数信号发生器
3. 数字示波器
4. 万用表
5. 面包板
6. OP07 运算放大器，电阻、电容若干

### 四、实验原理

#### 1. 加法运算电路

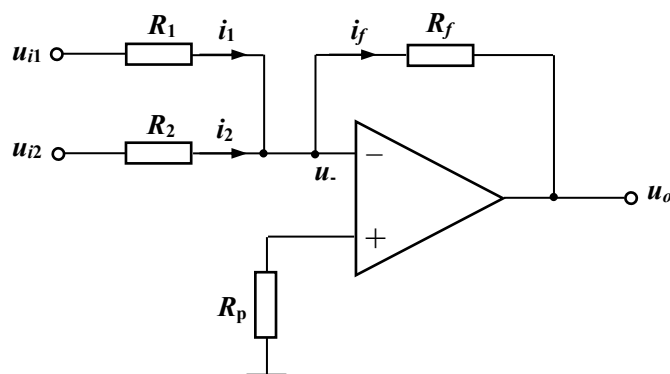


图 1.1.1 反相加法运算电路

实际电路中经常遇到对模拟新进行代数相加，完成这一运算有反相加法器和同相加法器电路。如图 1.1.1 所示，在反相比例放大电路的基础上，增加一个或多个输入支路，就构成

了反相输入求和电路，此时多个输入信号电压产生的电流都流向  $R_f$ ，所以输出是多个输入信号的和。

根据“虚短”和“虚断”的结论可得：

$$u_- = u_+ = 0 \quad i_1 + i_2 = i_f$$

因为

$$i_1 = \frac{u_{i1}}{R_1} \quad i_2 = \frac{u_{i2}}{R_2} \quad i_f = -\frac{u_o}{R_f}$$

则

$$\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} = -\frac{u_o}{R_f}$$

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

若取

$$R_1 = R_2 = R$$

则有

$$u_o = -\frac{R_f}{R} (u_{i1} + u_{i2}) \quad (1.1.1)$$

同相加法器是在同相比例放大电路的基础上，增加一个或多个输入支路来构成同相输入求和电路，因运放具有“虚断路”的特性，对运放同相输入端的电位可用叠加原理求得。这里不再赘述。

## 2. 减法运算电路

减法器实际上就是差动放大电路，是集成运放在两个输入端同时输入信号的情况下，在输出端得到的是两个模拟相减的运算结果。电路如图 1.1.2 所示，一路信号送入到反相输入端，另一个信号接到同相输入端。

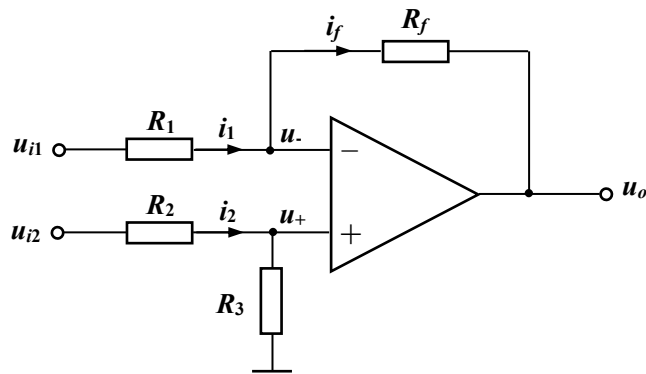


图 1.1.2 减法运算电路

根据“虚短”和“虚断”的结论可得：

$$u_- = u_+ = \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{i2} \quad i_1 = i_f$$

而

$$i_1 = \frac{u_{i1} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{i2}}{R_1} \quad i_f = \frac{\frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{i2} - u_o}{R_f}$$

所以

$$u_o = \frac{R_3}{R_1} \cdot \frac{R_1 + R_f}{R_2 + R_3} u_{i2} - \frac{R_f}{R_1} u_{i1}$$

若取

$$R_1 = R_2 \quad R_3 = R_f$$

则有

$$u_o = \frac{R_f}{R_1} (u_{i2} - u_{i1}) \quad (1.1.2)$$

### 3. 积分运算电路

积分电路在波形产生、波形变换、电压-时间变换、延时、滤波等各方面应用很广，且形式多样。反相积分器又称基本积分器，电路原理如图 1.1.3 (a) 所示。

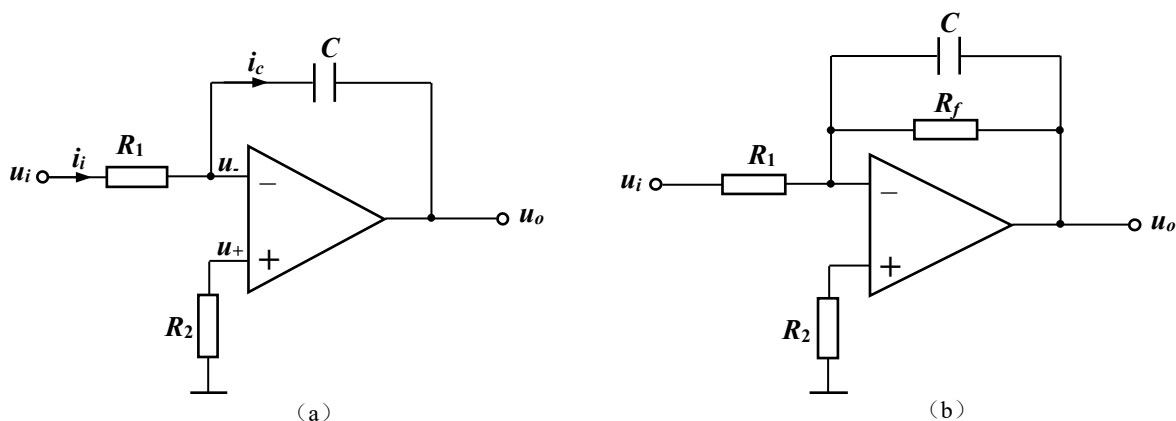


图 1.1.3 积分运算电路

根据“虚短”和“虚断”的结论可得：

$$u_- = u_+ = 0 \quad i_i = i_c$$

而

$$i_i = \frac{u_i(t)}{R_1} \quad i_c = -C \frac{du_o(t)}{dt}$$

则

$$u_o(t) = -C \int i_c dt = -\frac{1}{RC} \int u_i(t) dt \quad (1.1.3)$$

可见输出电压与输入电压的积分成正比。但是该电路由于输出到反相输入端反馈的是一个电容，所以静态时，运放实际上处于开环状态，运放的失调和漂移可能造成输出饱和而无法对输入积分。因此在实际电路中往往都要在电容上并联一个大电阻。前提是该电阻不能破坏原有的积分关系，但可适当降低运放的开环增益，避免运放饱和。图 1.1.3 (b) 为常用的比例积分器电路，在电容两端并联电阻  $R_f$ ，使得积分关系依然成立的条件是容抗远小于该电阻。

即当  $\omega R_f C \ll 1$  时, 电路实现比例放大; 当  $\omega R_f C \gg 1$  时, 电路实现积分运算, 积分时间常数为  $R_f C$ 。可见, 被积分信号的频率应满足:

$$f \gg \frac{1}{2\pi R_f C} \quad (1.1.4)$$

#### 4. 微分运算电路

微分运算是积分运算的逆运算, 将基本积分电路的电阻和电容位置互换就可以得到基本微分器, 其电路如图 1.1.4 (a) 所示。

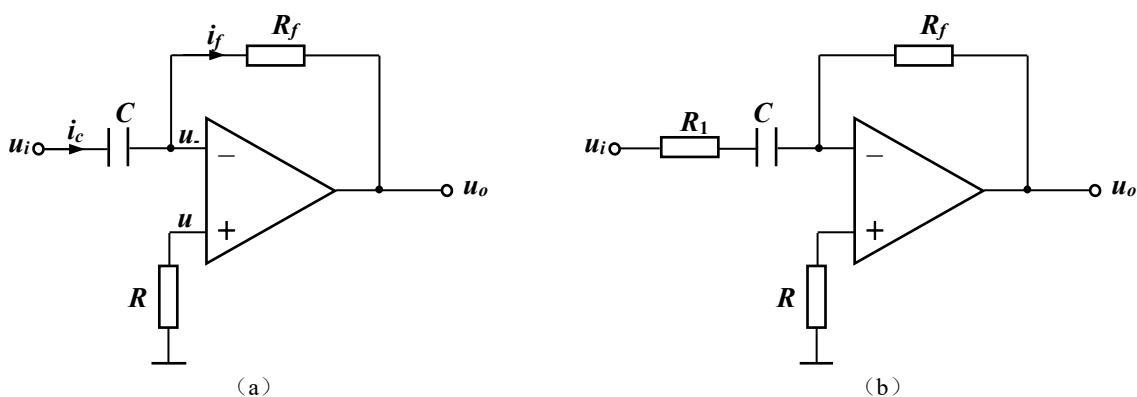


图 1.1.4 微分运算电路

根据“虚短”和“虚断”的结论

$$u_- = u_+ = 0 \quad i_i = i_c$$

而

$$i_c = C \frac{du_i(t)}{dt} \quad i_f = -\frac{u_o(t)}{R_f}$$

则

$$u_o(t) = -RC \frac{du_i(t)}{dt} \quad (1.1.5)$$

上式表明, 输入幅值与激励频率成正比, 频率越高则输出越大。因此高频噪声和干扰的影响严重, 高频增益大也使得该电路容易自激, 所以实用微分电路往往在电容端串联一个小电阻  $R_1$  来克服这一缺点, 以减小高频增益。电路如图 1.1.4 (b) 所示, 这种电路为比例微分器。

## 五、实验内容

### 1. 反相加法器的设计与测试

根据所给元件包选择相应元件, 用集成运放设计并搭建一个两路信号输入的加法器, 其中  $u_{i1}$  为正弦交流信号,  $u_{i2}$  为直流信号。要求实现  $u_o = -3(u_{i1} + u_{i2})$  的运算, 完成表 1.1.1



的测试。

表 1.1.1 反相加法器的测试

测试条件		输出电压（写出表达式并定量绘出输出波形）	所选电阻大小	
$u_{i1}/V$	$u_{i2}/V$	$u_o/V$	$R_1/\Omega$	$R_f/\Omega$
$\cos 1000\pi t$	0.7			

## 2. 减法运算电路的设计与测试

根据所给元件包选择相应元件，用集成运放设计并搭建一个两路信号输入的减法器，其中  $u_{i1}$  为正弦交流信号， $u_{i2}$  为直流信号。要求实现  $u_o=3(u_{i2}-u_{i1})$  的运算，完成表 1.1.2 的测试。表格中输出电压请写出表达式并定量绘出输出波形。

表 1.1.2 减法器的测试

测试条件		输出电压（写出表达式并定量绘出输出波形）	所选电阻大小	
$u_{i1}/V$	$u_{i2}/V$	$u_o/V$	$R_1/\Omega$	$R_f/\Omega$
$\cos 1000\pi t$	0.7			

## 3. 积分运算电路和微分运算电路

自拟电路，进行积分运算电路和微分运算电路的研究。

## 六、实验报告要求

1. 简述各级别运算电路的工作原理。
2. 整理测试数据，并把实验数据与理论计算值比较，分析产生误差的原因。
3. 分析实验过程中出现的故障及其解决方法。

## 七、思考题

1. 减法运算电路中，若将输入信号  $u_{i2}$ 、 $u_{i1}$  的输入端位置交换，输出将是什么样的？请画出波形。
2. 若要将方波信号变成三角波信号，可选用哪一种运算电路？