

## 3.2 运算放大器电路

### 3.2.1 运算放大器基本特性

#### 1. 常用运算放大器类型

运算放大器一般可分为通用型、精密型、低噪声型、高速型、低电压低功率型、单电源型等几种。本节以美国 TI 公司的产品为例，说明其各类的主要特点。

(1)通用型运算放大器 通用型运算放大器的参数是按工业上的普通用途设定的，各方面性能都较差或中等，价格低廉，其典型代表是工业标准产品  $\mu$  A741、LM358、OP07、LM324、LF412 等。

(2)精密型运算放大器 要求运算放大器有很好的精确度，特别是对输入失调电压  $U_{i0}$ 、输入偏置电流  $I_{IB}$ 、温度漂移系数、共模抑制比  $K_{CMR}$  等参数有严格要求。如  $U_{i0}$  不大于 1mV，高精密型运算放大器的  $U_{i0}$  只有几十微伏，常用于需要精确测量的场合。其典型产品有 TLC4501 / TLC4502、TLE2027 / TLE2037、TLE2022、TLC2201、TLC2254 等。

(3)低噪声型运算放大器 也属于精密型运算放大器，要求器件产生的噪声低，即等效输入噪声电压密度  $\sigma V_n \leq 15\text{nV} / \sqrt{\text{Hz}}$ ，另外需要考虑电流噪声密度，它跟输入偏流有关。双极型运算放大器通常具有较低的电压噪声，但电流噪声较大，而 CMOS 运算放大器的电压噪声较大，但电流噪声很小。低噪声型运算放大器的产品有 TLE2027 / TLE2037、TLE2227 / TLE2237、TLC2201、TLV2362 / TLV2262 等。

(4)高速型运算放大器 要求运算放大器的运行速度快，即增益带宽乘积大、转换速率快，通常用于处理频带宽、变化速度快的信号。双极型运算放大器的输入级是 JFET 的运算放大器，通常具有较高的运行速度。典型产品有 TLE2037 / TLE2237、TLV2362、TLE2141 / TLE2142 / TLE2144、TLE2071、TLE2072 / TLE2074、TLC4501 等。

(5)低电压、低功率型运算放大器 用于低电压供电，如 3V 电源电压运行的系统或电池供电的系统。要求器件耗电小(500  $\mu$  A)，能低电压运行(3V)，最好具有轨对轨 (rail to rail) 性能，可扩大动态范围。主要产品有 TLV2211、TLV2262、TLV2264、TLE2021、TLC2254、TLV2442、TLV2341 等。

(6)单电源型运算放大器 单电源运算放大器要求用单个电源电压(典型电压为 5V)供电，其输入端和输出端的电压可低达 0V。多数单电源型运算放大器是用 CMOS 技术制造的。

单电源型运算放大器也可用于对称电源供电的电路，只要总电压不超过允许范围即可。另外，有些单电源型运算放大器的输出级不是推挽电路结构，当信号跨越电源中点电压时会产生交越失真。

## 2. 运算放大器的基本参数

表示运算放大器性能的参数有：单/双电源工作电压、电源电流、输入失调电压、输入失调电流、输入电阻、转换速率、差模输入电阻、失调电流温漂、输入偏置电流、偏置电流温漂、差模电压增益、共模电压增益、单位增益带宽、电源电压抑制、差模输入电压范围、共模输入电压范围、输入噪声电压、输入噪声电流、失调电压温漂、建立时间、长时间漂移等。

不同的运算放大器参数差别很大，使用运算放大器前需要对参数进行仔细的分析。

## 3. 运算放大器选用时注意事项

(1) 若无特殊要求，应尽量选用通用型运放。当一个电路中有多个运放时，建议选用双运放（如 LM358）或四运放（如 LM324 等）。

(2) 应正确认识、对待各种参数，不要盲目片面追求指标的先进，例如场效应管输入级的运放，其输入阻抗虽高，但失调电压也较大，低功耗运放的转换速率必然也较低；各种参数指标是在一定的测试条件下测出的，如果使用条件和测试条件不一致，则指标的数值也将会有差异。

(3) 当用运放作弱信号放大时，应特别致意选用失调以及噪声系数均很小的运放，如 ICL7650。同时应保持运放同相端与反相端对地的等效直流电阻等。此外，在高输入阻抗及低失调、低漂移的高精度运放的印刷底板布线方案中，其输入端应加保护环。

(4) 当运放用于直流放大时，必须妥善进行调零。有调零端的运放应按标准推荐的调零电路进行调零；若没有调零端的运放，则可参考图 3.2.1 进行调零。

(5) 为了消除运放的高频自激，应参照推荐参数在规定的消振引脚之间接入适当电容消振，同时应尽量避免两级以上放大级级连，以减小消振困难。为了消除电源内阻引起的寄生振荡，可在运放电源端对地就近接去耦电容，考虑到去耦电解电容的电感效应，常常在其两端在并联一个容量为 0.01~0.1 $\mu$ F 的瓷片电容。

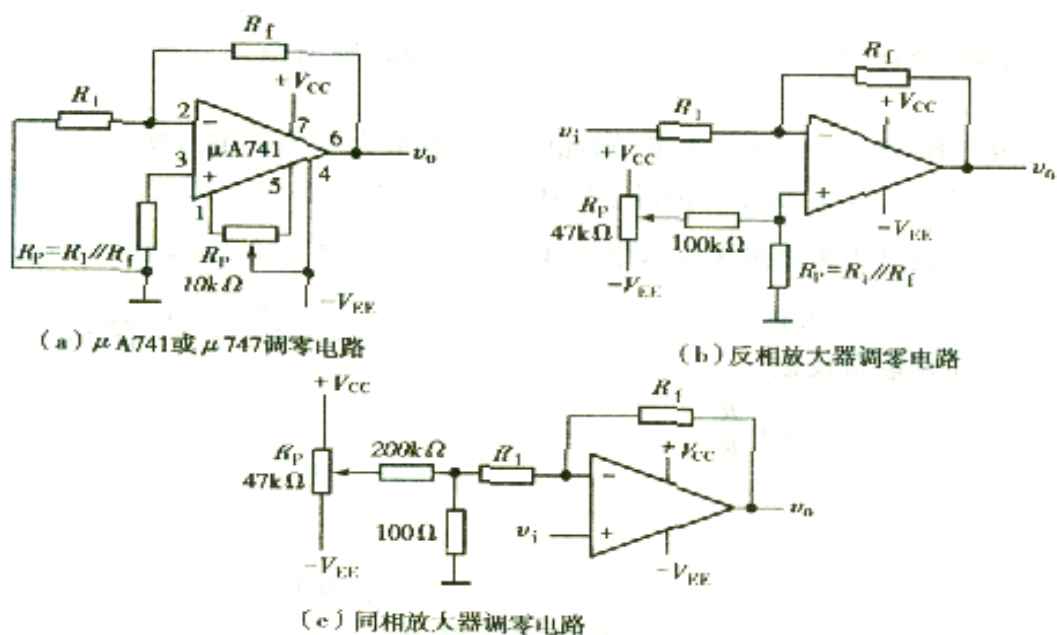


图 3.2.1 常见的调零电路

### 3. 2. 2 基本运放应用电路

#### 1. 反相输入比例运算电路

反相输入比例运算电路如图 3.2.2 所示，其电压放大倍数为

$$A_{uf} = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_f}{R_1};$$

为使输入电流引起的误差最小，应取平衡电阻  $R_p = R_f // R_1$ 。当  $R_f = R_1$  时， $A_{uf} = -1$ ，即  $v_o = -v_i$ ，电路为反相器。

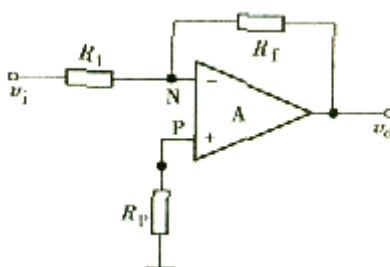


图 3.2.2 反相输入比例运算电路

实际应用时还应注意以下几点：

- (1) 本电路的电压放大倍数不宜过大。通常  $R_f$  宜小于  $1M\Omega$ ，因  $R_f$  过大会影响阻值的精度； $R_1$  不宜过小， $R_1$  过小将要从信号源或前级吸取较大的电流。

(2) 作为闭环负反馈工作的放大器，其小信号上限工作频率  $f_H$  受运放增益带宽积  $GWB=A_{vd} \cdot f_H$  的限制。以  $\mu A741$  为例，其开环差模电压放大倍数  $A_{ud}=10^5$  倍，开环  $f_H=10\text{Hz}$ ，故运放的单位增益上限频率  $f_1=1\text{MHz}$ ，即作为电压跟随器或反相器工作时的最高工作频率为  $1\text{MHz}$ 。若用  $\mu A741$  设计  $A_{uf}$  为  $20\text{dB}$  即便  $10$  倍的放大电路，则电路允许的上限频率为  $100\text{kHz}$ 。

(3) 如果运放工作于大信号输入状态，则此时电路的最大不失真输入幅度  $V_{im}$  及信号频率将受运放转换速率  $SR$  的制约。仍以  $\mu A741$  为例，其  $SR=0.5\text{V}/\mu\text{s}$ ，若输入信号的最高频率为  $100\text{kHz}$ ，则其不失真最大输入电压  $V_{im} \leq (SR)/(2\pi f_{\max}) = 0.5 \times 10^6 / 2\pi \times 10^5 = 0.8\text{V}$ 。

## 2. 同相输入比例运算电路

同相输入比例运算电路如图 3.2.3 所示电路，其电压放大倍数为：

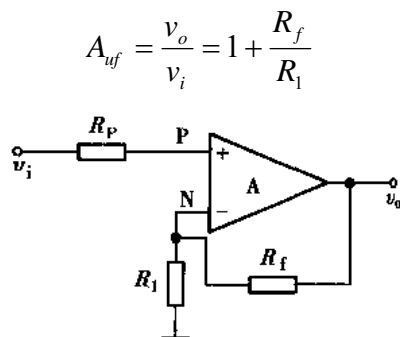


图 3.2.3 同相输入比例运算电路

为使输入电流引起的误差最小，应取平衡电阻  $R_p=R_f//R_1$ 。当  $R_f//R_1=0$  时，即使用一根导线替代  $R_f$ ， $A_{uf}=1$ ，电路演变成为电压跟随器。

## 3. 反相输入比例求和电路

反相输入比例求和电路如图 3.2.4 所示电路，其输出电压为：

$$v_o = -R_f(v_1/R_1 + v_2/R_2 + v_3/R_3)$$

平衡电阻  $R_p = R_f // R_1 // R_2 // R_3$ 。

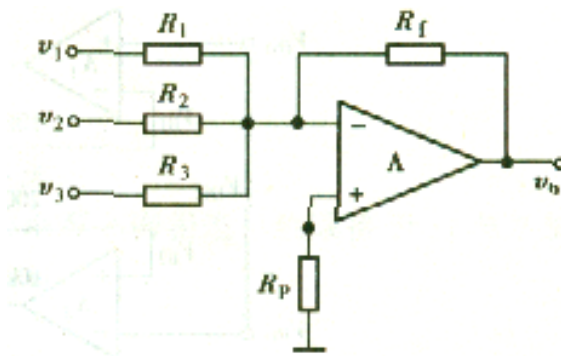


图 3.2.4 反相输入比例求和电路

#### 4. 差动放大电路

差动放大电路如图 3.2.5 所示电路，其输出电压为：

$$V_o = -(R_f / R_1) \cdot V_1 + (1 + R_f / R_1) \cdot (1 + R_3 / (R_2 + R_3)) \cdot V_2$$

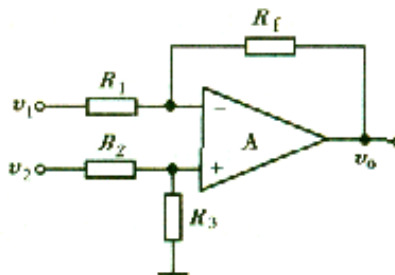


图 3.2.5 差动放大电路

#### 5. 积分运算电路

积分运算电路如图 3.2.6 所示电路，其输出电压为：

$$v_o = -\frac{1}{R_1 C} \int_0^t v_i dt$$

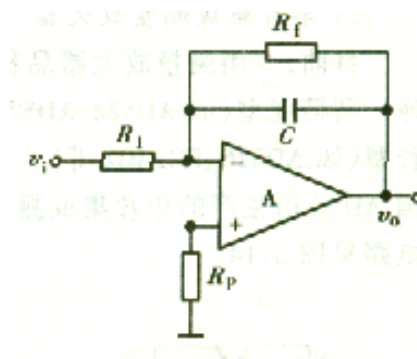


图 3.2.6 积分运算电路

通常，为限制低频电压增益，在积分电容  $C$  两端并联一个阻值较大的电阻  $R_f$ 。当输入信号的频率  $f_i > 1/(2\pi R_f C)$  时，电路为积分器；若  $f_i \ll 1/(2\pi R_f C)$ ，则电路近似于反比例运算器，其低频电压放大倍数  $A_{vf} \approx -R_f / R_1$ 。当  $R_f = 100k\Omega$ 、 $C = 0.022\mu F$  时，积分与比例运算的分界频率约为  $1/(2\pi R_f C) = 1/(2\pi \times 100 \times 10^3 \times 0.022 \times 10^{-6}) = 72Hz$ 。

### 3. 2. 3 测量放大电路

测量放大器又称数据放大器、仪表放大器。其主要特点是：输入阻抗高、输出阻抗低，失调及零漂很小，放大倍数精度可调，具有差动输入、单端输出，共模抑制比很高。适用于大的共模电压背景下对缓变微弱的差值信号进行放大，常用于热电偶、应变电桥、生物信号等的放大。

## 1. 三运放测量放大器

三运放测量放大器电路如图 3.2.7 所示。其电压放大倍数为： $A_{uf} = 1 + 2 R_1 / R_G$ 。

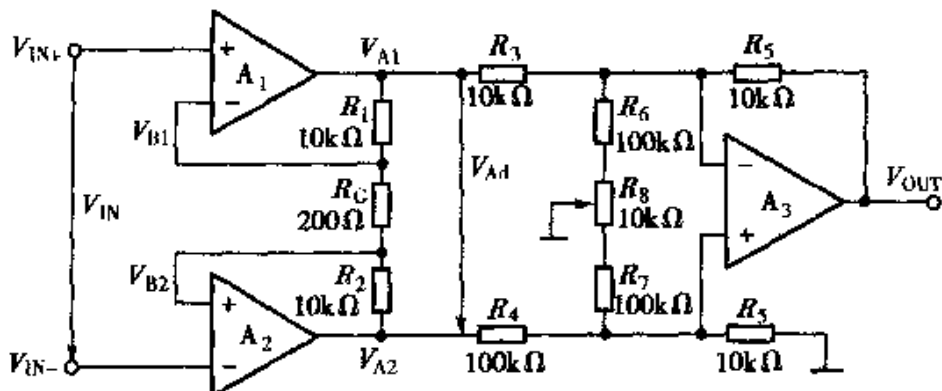


图 3.2.7 三运放测量放大电路

## 2. 单片集成测量放大器

市场上测量放大器品种繁多，有通用型如 INA110、INA114 / 115、INA131 等；有高精度型如 AD522、AD524、AD624 等；有低噪声低功耗型如 INA102、INA103 等及可编程型如 AD526。下面介绍高精度型单片集成测量放大器 AD522。

AD522 是美国 AD 公司生产的单片集成测量放大器。图 3.2.8 给出了它的引脚图，用它接成的电桥放大电路见图 3.2.9。

其引脚说明如下：

- 1、3 脚：信号的同相及反相输入端；
- 2、14 脚：接增益调节电阻；
- 7 脚：放大器输出端；
- 8、5、9 脚：分别为  $V_+$ 、 $V_-$  及地端；
- 4、6 脚：接调零电位器；
- 11 脚：参考电位端，一般接地；
- 12 脚：用于检测；

13 脚：接输入信号引线的屏蔽网，以减小外电场的干扰。为提供放大器偏置电流的通路，信号地必须与电源地端 9 脚相连。负载接于 11 与 7 脚之间，同时 11 脚必须与 9 脚相连，以使负载电流流至地端。

放大器的放大倍数为  $U_{vf} = 1 + 2 \frac{100}{R_G}$ ， $R_G$  单位为  $K\Omega$ 。

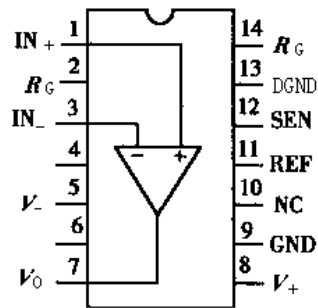


图 3.2.8 AD522 内部及引脚图

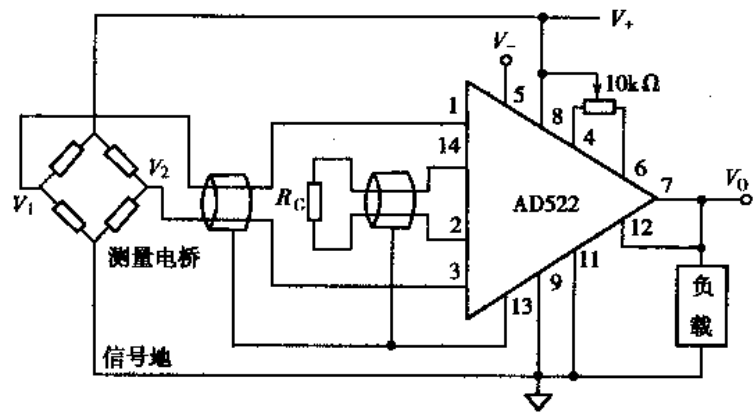


图 3.2.9 采用 AD522 电桥放大电路