

第一部分

模拟电子系统设计与实践

导读

虽然近 10 年来,由于数字电子技术的发展,许多传统上隶属于模拟电子学领域的应用,现在均可以用数字的形式加以实现,但模拟电路的重要性并没有降低。这是因为自然界存在的一些物理量,如温度、压力、声音等均属于模拟信号,需要模拟电路对其进行处理。

大多数复杂的电子系统既包含数字电子系统又包含模拟电子系统,两者相互配合、互为依托,其中模拟电子系统往往对整个电子系统的性能指标起到关键作用,因此,模拟电子系统设计在整个电子系统设计中是不可缺少的。

从事模拟电子系统设计的技术人员都有一些体会:模拟电子系统的设计要比数字电子系统的设计困难,并缺少规范化的设计方法与步骤;在进行模拟电子系统设计时,很少使用分立元件,而大量地使用各种功能的模拟集成电路。

考虑到放大电路和滤波器是构成模拟电子系统最重要的单元电路,本部分内容主要围绕放大电路和模拟滤波器设计方法展开。第 1 章主要介绍各种常见的由运算放大器构成的放大电路,分析了运算放大器主要参数的含义,以及如何正确选择和使用运算放大器。第 2 章介绍了模拟有源滤波器的设计和单片开关电容滤波器的应用。



第 1 章

基于集成运算放大器的放大电路设计

1.1 运算放大器的模型

运算放大器最早应用于模拟计算机中,它可以完成诸如加法、减法、微分、积分等数学运算。随着集成电路技术的不断发展,运算放大器的应用日益广泛,可以实现信号的产生、信号的变换、信号的处理等多种功能,已成为构成模拟系统的基本单元。

集成运算放大器是由多级基本放大电路直接耦合而组成的高增益放大器,通常由高阻输入级、中间放大级、低阻输出级和偏置电路组成,其构成框图如图 1-1-1 所示。

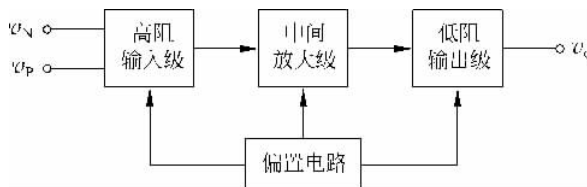


图 1-1-1 运算放大器的组成

当运算放大器与外部电路连接组成各种功能电路时,从系统角度看,无需关心复杂的运算放大器内部电路,而是应着重研究其外特性。具体地讲,人们利用厂商提供的运算放大器参数构成表征外特性的简化运算模型。常用的有理想运算放大器模型和实际运算放大器模型。

1. 理想运算放大器模型

理想运算放大器的模型如图 1-1-2 所示。

理想运算放大器具有以下特性:

- (1) 开环增益 $A_{od} = \infty$ 。
- (2) 输入电阻 $R_{id} = \infty$ 。
- (3) 输出电阻 $R_o = 0$ 。

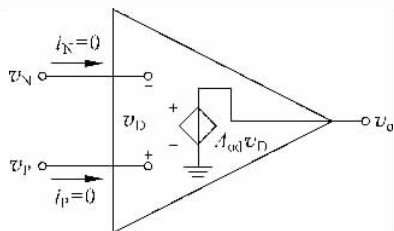


图 1-1-2 理想运算放大器模型

(4) 上限截止频率 $f_H = \infty$ 。

(5) 共模拟制比 $K_{CMR} = \infty$ 。

(6) 失调电压、失调电流和内部噪声均为零。

从理想运算放大器的这些条件可以导出理想运算放大器的线性运用时具有的两个重要特性：

(1) 理想运算放大器的同相输入端和反相输入端的电流近似为零，即 $i_N = i_P = 0$ ，这一结论是由理想运算放大器输入电阻 $R_{id} = \infty$ 而得到的。

(2) 理想运算放大器的两输入端电压差趋于零，即 $v_N = v_P$ ，这一结论是由理想运算放大器的电压增益 $A_{od} = \infty$ 时输出电压为有限值而得到的。

对于理想运算放大器的前三条特性，通用运算放大器一般可以近似满足，后三条特性一般通用运算放大器不易达到，但对某些功能电路非常重要，在实际使用时可选用专用运算放大器来近似满足。如可选用宽带运算放大器获得一定的频带宽度，选用精密运算放大器使失调漂移、内部噪声趋于零。

2. 实际运算放大器模型

实际运算放大器的模型如图 1-1-3 所示。实际运算放大器的模型包括以下主要参数：

(1) 差分输入电阻 R_{id} 。

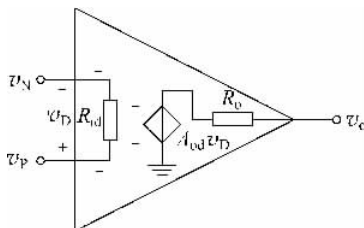
(2) 电压增益 A_{od} 。

(3) 输出电阻 R_o 。

(4) 差分输入电压 $v_D = v_P - v_N$ 。

其中，增益 A_{od} 也称为开环差模增益，因为在输出不加负载时有

$$v_o = A_{od} v_D = A_{od} (v_P - v_N) \quad (1.1.1) \quad \text{图 1-1-3 实际运算放大器的模型}$$



$$v_D = \frac{v_o}{A_{od}} \quad (1.1.2)$$

实际运算放大器的主要参数一般在器件的数据手册中给出，如 741 运算放大器的 R_{id} 是 $2M\Omega$ ， A_{od} 是 $200V/mV$ ， R_o 是 75Ω 。由于运算放大器的增益都非常大，对于一个有限的输出，只需要非常小的差分输入电压。例如，要维持 $v_o = 6V$ ，一个空载 741 运算放大器需要 $v_D = 6/200\,000V = 30\mu V$ ，是非常小的电压。一个空载 OP77 运算放大器只需 $v_D = 6/(12 \times 10^6)V = 0.5\mu V$ 。

1.2 用集成运算放大器构成的典型放大电路

1. 比例运算放大电路

比例运算放大电路分反相放大器 and 同相放大器。反相放大器的基本电路结构如图 1-2-1 所示。

闭环电压放大倍数

$$A_{vf} = v_o/v_i = -R_2/R_1 \quad (1.2.1)$$

用上述反相放大器就可以轻而易举地实现各种增益的放大电路,而且要想改变放大电路的电压增益,也无需改变运算放大器本身,只需调整电路中 R_1 和 R_2 的比值即可。如将一个幅值较小的电信号(假设 $v_i = 0.1\text{V}$)放大为幅值较大的信号(假设 $v_o = 3\text{V}$),这就要求反相放大器具有 30 倍的电压增益,上述放大器中 R_1 取 $1\text{k}\Omega$ 、 R_2 取 $30\text{k}\Omega$ 就可实现。按照理想运算放大器的条件,反相放大器的输入电阻约等于 R_1 。在实际使用时, R_1 既不能取得太小,也不能取得太大。 R_1 取得太小,会使放大电路的输入电阻太小,不能满足设计要求; R_1 取得太大,则在相同电压增益时,势必 R_2 也要增加,引起放大电路工作不可靠。

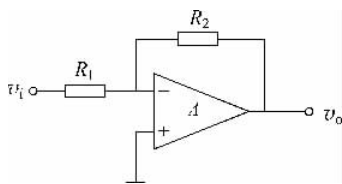


图 1-2-1 反相放大器原理图

如果要求放大电路有较大的输入电阻,就应采用同相放大器的结构。同相放大器的电路如图 1-2-2 所示。在同相放大电路中,输入信号 v_i 直接加到运算放大器的“+”端,输出电压 v_o 通过 R_2 送回“—”端,形成电压串联负反馈。同相电压放大器的闭环电压放大倍数为

$$A_{vf} = \frac{v_o}{v_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (1.2.2)$$

同相放大电路的重要特点是输入电阻大,根据理想运算放大器的重要特性有 $i_p = 0$, 所以其输入电阻 $r_i = v_i/i_p = \infty$ 。同相放大器的一个特例是电压跟随器。在模拟放大电路中,电压跟随器常用作缓冲级。

2. 加法电路

加法电路的原理图如图 1-2-3 所示。

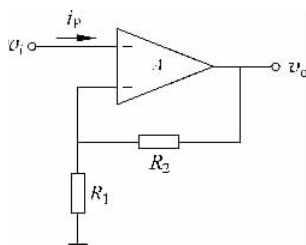


图 1-2-2 同相放大器原理图

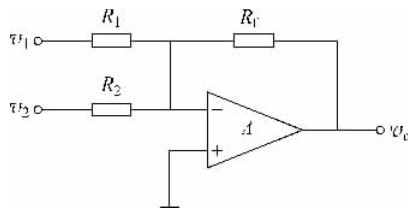


图 1-2-3 加法电路原理图

加法电路的输出表达式为

$$v_o = -\left(\frac{v_1}{R_1} + \frac{v_2}{R_2}\right) \times R_f \quad (1.2.3)$$

加法电路常用作电平平移电路,如在 D/A 转换电路中,将单极性输出的模拟信号转换为双极性输出的模拟信号。图 1-2-4 所示为 D/A 转换器双极性输出的原理图。

将图中参数代入式(1.2.3)得

$$v_o = -5\text{V} - 2 \times v_2 \quad (1.2.4)$$

当 D/A 转换器输出为正弦信号时, v_o 和 v_2 对应的关系曲线如图 1-2-5 所示。

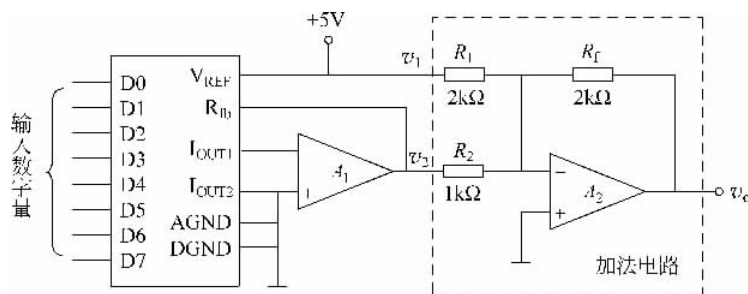
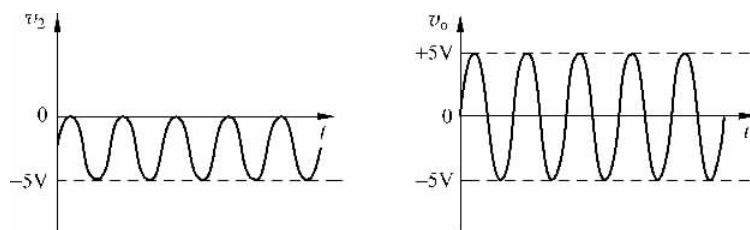


图 1-2-4 D/A 转换器双极性输出的原理图

图 1-2-5 v_0 和 v_2 对应的关系曲线

3. 基本差分放大电路

基本差分放大电路的电路结构如图 1-2-6 所示。基本差分放大电路实际上是减法电路的特例。

由于差分放大电路工作在线性状态,对其分析可以采用叠加原理。

令 $v_2=0$, 只有 v_1 作用时的电路输出电压

$$v_{o1} = -\frac{R_f}{R_1} \times v_1 \quad (1.2.5)$$

令 $v_1=0$, 只有 v_2 作用时的电路输出电压

$$v_{o2} = \frac{R_f}{R_2 + R_f} \left(1 + \frac{R_f}{R_1} \right) v_2 \quad (1.2.6)$$

总输出电压

$$v_o = v_{o1} + v_{o2} = -\frac{R_f}{R_1} v_1 + \frac{R_f}{R_2 + R_f} \left(1 + \frac{R_f}{R_1} \right) v_2 \quad (1.2.7)$$

实际使用时,往往使得 $R_f=R_f, R_1=R_2$, 所以,上式可简化为

$$v_o = -\frac{R_f}{R_1} (v_1 - v_2) = -A_{vf} (v_1 - v_2) \quad (1.2.8)$$

差分放大电路的重要特点是能抑制输入信号中的共模信号,但在实际使用中会由于电阻参数很难完全匹配而导致共模抑制能力下降。

为了获得良好的共模抑制比,可采用专用的差分放大器。专用差分放大器将运算放大器和电阻网络制作在同一硅衬底上,它们所处的温度环境是一致的,并且其内部的电阻是用

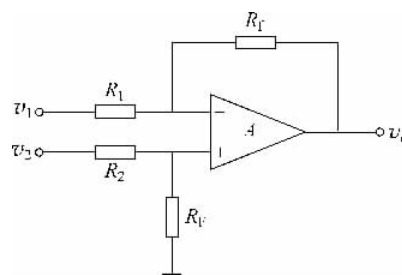


图 1-2-6 基本差分放大电路的电路结构

激光调整技术而制成,电阻间的比例误差可减少至 0.01%。专用差分放大器有多种型号,图 1-2-7 所示就是 TI 公司推出的一款专用差分放大器 INA132 的引脚排列和内部电路。

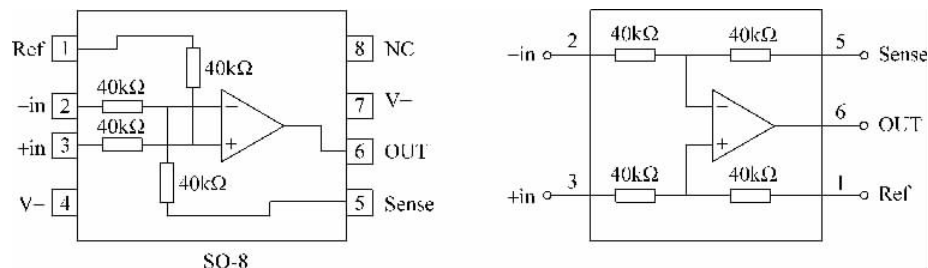


图 1-2-7 INA132 引脚排列和内部电路

4. 仪表放大器

不少传感器本身是电桥电路(如压力传感器)或接成电桥测量电路(如应变片传感器、温度传感器、气敏传感器),如图 1-2-8 所示。接成电桥测量电路可消除传感器的温度误差,而温度传感器接成电桥电路则是为了在测量温度最低值时,使输出为零。

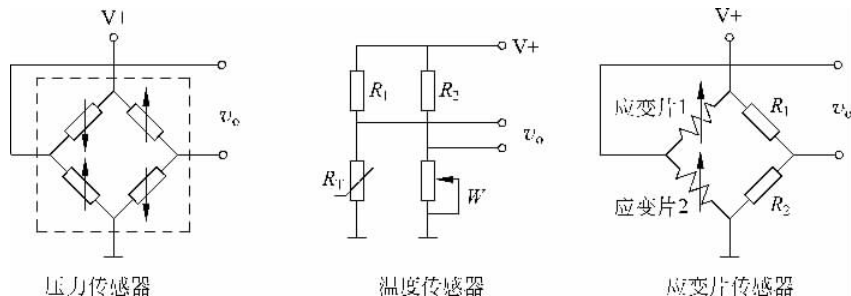


图 1-2-8 传感器电桥测量电路

电桥测量电路输出信号的特点是有较小的差模信号(微伏级到毫伏级)而有较大(几伏)的共模信号。如图 1-2-6 所示的基本差分电路虽然可以达到放大差模信号并抑制共模信号的目的,但存在输入电阻较低、增益调节不便的缺点,所以在要求更高的场合,一般采用仪表放大器。

采用 INA132 构成的仪表放大器如图 1-2-9 所示。该仪表放大器的倍数为

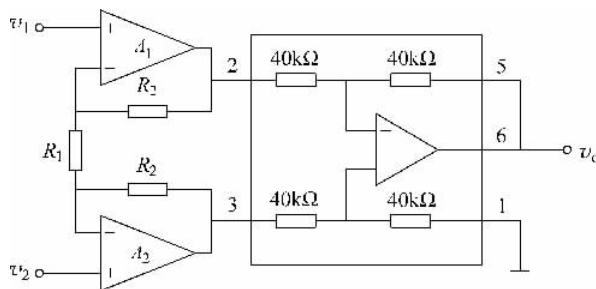


图 1-2-9 采用 INA132 构成的仪表放大器

$$v_o = \left(1 + 2 \times \frac{R_2}{R_1}\right)(v_2 - v_1) \quad (1.2.9)$$

抑制共模分量是使用仪表放大器的唯一原因。理想的仪表放大器应该放大输入端两信号的差值,任何共模分量必须被抑制。高共模抑制比的关键是电阻网络,因此,电阻比和相对应的漂移都要很好地匹配,而电阻的绝对值和绝对漂移并不重要。采用专用的差分放大器可有效地提高共模抑制比。

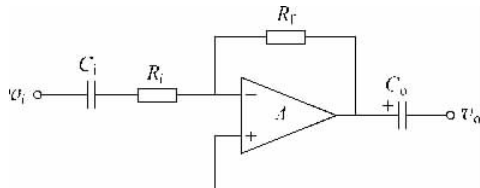


图 1-2-10 反相交流放大器原理图

5. 反相交流放大器

当放大交流信号时,反相交流放大器的输入端和输出端应接入隔直电容,典型的交流放大器如图 1-2-10 所示。电容器 C_i 起隔离交流信号源直流成分的作用,能将输出交流信号的失真减至最小。此放大器电路可代替晶体管进行交流放大,如用于扩音机前置放大等。

大部分运算放大器要求双电源(正负电源)供电,但有少部分运算放大器可以在单电源供电的条件下工作。采用单电源供电的交流放大器如图 1-2-11 所示。

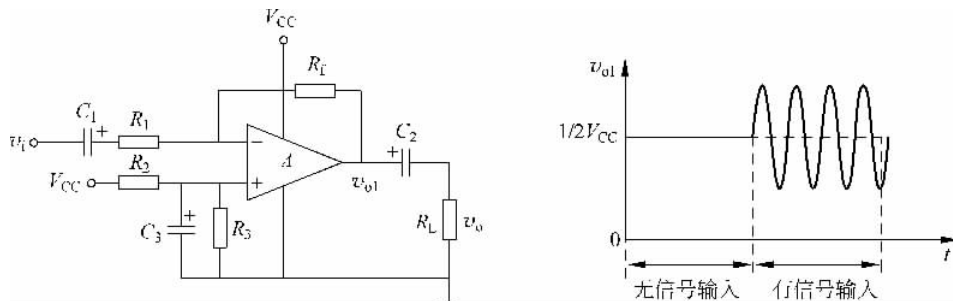


图 1-2-11 单电源供电的交流放大器

放大器采用单电源供电,由 R_2 、 R_3 组成直流偏置, C_3 是消振电容。当 $R_2 = R_3$ 时,使静态直流输出电压为电源电压一半: $v_{o1(DC)} = 1/2 V_{CC}$ 。该电路的增益 $A_{vf} = -R_f/R_1$ 。 C_1 和 C_2 为耦合电容,其值由所需的低频响应和电路的输入阻抗(对于 C_1)或负载(对于 C_2)来确定。 C_1 和 C_2 可由下式来确定:

$$C_1 = 1000/2\pi f_0 R_1 (\mu F) \quad (1.2.10)$$

$$C_2 = 1000/2\pi f_0 R_L (\mu F) \quad (1.2.11)$$

式中, f_0 是所要求最低输入频率。若 R_1 、 R_L 单位用 $k\Omega$, f_0 单位用 Hz ,则求得的 C_1 、 C_2 单位为 μF 。一般来说, $R_2 = R_3 = 2R_f$ 。

放大器电压放大倍数 A_{vf} 仅由外接电阻 R_1 、 R_f 决定: $A_{vf} = -R_f/R_1$ 。负号表示输出信号与输入信号相位相反。此电路输入电阻为 R_1 。一般情况下先取 R_1 与信号源内阻相等,然后根据要求的放大倍数再选定 R_f 。

6. 同相交流放大器

同相交流放大器的原理图如图 1-2-12 所示。其中 R_1 、 R_2 组成 $1/2 V_{CC}$ 分压电路,通

过 R_3 对运算放大器进行偏置。电路的电压放大倍数 A_{vf} 也仅由外接电阻决定： $A_{vf} = 1 + R_f/R_4$ ，电路输入电阻为 R_3 。 R_4 的阻值范围为几千欧姆到几十千欧姆。同相交流放大器的特点是输入阻抗高。

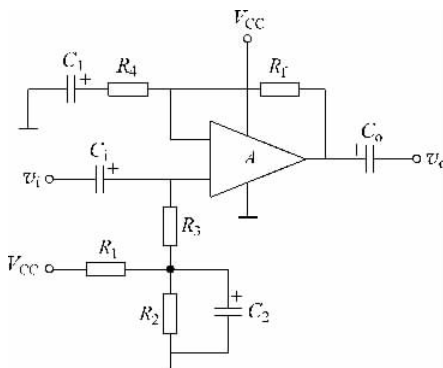


图 1-2-12 同相放大器原理图

1.3 集成运算放大器的主要参数

运算放大器只有工作在恰当的频段和适度的直流增益下，其工作特性才能与理想运算放大器的模型特性相当地一致。随着频率或增益增长，特性会逐渐变差。评价运算放大器特性的参数很多，其中最常用的几种参数是输入偏置电流 I_B 、输入失调电流 I_{OS} 、输入失调电压 V_{OS} 、开环带宽 BW、单位增益带宽 GBW 和转换速率 SR 等。

1. 输入偏置电流和输入失调电流

实际运算放大器在它们的输入引脚都会吸收少量的电流，同相输入端吸收的电流用 I_P 表示，反相输入端吸收的电流用 I_N 表示。一般来说，若输入晶体管是 NPN BJT 或 P 沟道 JEFT 时， I_P 和 I_N 流入运算放大器，而对输入晶体管是 PNP BJT 或 N 沟道 JEFT 时， I_P 和 I_N 流出运算放大器。 I_P 和 I_N 的平均值称为输入偏置电流，即

$$I_B = \frac{I_P + I_N}{2} \quad (1.3.1)$$

将 I_P 和 I_N 的差称为输入失调电流，即

$$I_{OS} = I_P - I_N \quad (1.3.2)$$

I_{OS} 的幅度量级通常比 I_B 小。 I_B 的极性取决于输入晶体管类型，而 I_{OS} 极性则取决于失配方向。有些运算放大器 $I_{OS} > 0$ ，有些运算放大器 $I_{OS} < 0$ 。

运算放大器的芯片数据清单中一般给出 I_B 的典型值和最大值。对于不同的运算放大器， I_B 值的范围是毫微安 (10^{-9} A, nA) 到毫微微安 (10^{-15} A) 之间。如 NE5532 室温下的参数为： I_B 的典型值为 200nA，最大值为 800nA； I_{OS} 的典型值为 10nA，最大值为 150nA。

为了分析输入偏置电流和失调电流对放大电路的影响,采用了如图 1-3-1 所示的电路模型,即将放大电路所有输入信号置零。

假设运算放大器除了存在 I_P 和 I_N 之外都是理想的,利用电路知识分析如下:

$$V_P = -I_P R_P \quad (1.3.3)$$

$$I_1 = \frac{V_P}{R_1} = -\frac{I_P R_P}{R_1} \quad (1.3.4)$$

$$I_2 = I_1 + I_N = -\frac{I_P R_P}{R_1} + I_N \quad (1.3.5)$$

$$\begin{aligned} v_o &= I_2 R_2 - I_P R_P = \left(-\frac{I_P R_P}{R_1} + I_N\right) R_2 - I_P R_P \\ &= (-I_P R_P + I_N R_1) \frac{R_2}{R_1} - I_P R_P = -\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) R_P I_P + R_2 I_N \end{aligned} \quad (1.3.6)$$

v_o 是由于输入偏置电流和失调电流产生的误差信号,因此用 E_0 表示,上式可转化为

$$E_0 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) [(R_1 // R_2) I_N - R_P I_P] \quad (1.3.7)$$

通过以上分析可知,尽管电路没有任何输入信号,仍能产生某个输出 E_0 ,这个由输入偏置电流和失调电流产生的输出常称为输出直流噪声。在实际设计放大电路时,应尽可能地减少输出直流噪声。那么,如何有效地减少输出直流噪声呢? 将式(1.3.7)表示为

$$E_0 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \{[(R_1 // R_2) - R_P] I_B - [(R_1 // R_2) + R_P] I_{OS}/2\} \quad (1.3.8)$$

只要令 $R_P = R_1 // R_2$, 就可以消去含有 I_B 的项,上式变为

$$E_0 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) (-R_1 // R_2) I_{OS} \quad (1.3.9)$$

通过减小所有的电阻或者选择一款具有更低 I_{OS} 值的运算放大器,可以进一步降低 E_0 。

2. 输入失调电压

对于理想运算放大器,将同相输入端和反相输入端短接,可得

$$v_o = A_{od}(v_P - v_N) = A_{od} \times 0 = 0V \quad (1.3.10)$$

但是,对于实际运算放大器来说,由于输入级电路参数的固有失配,其输出电压 $v_o \neq 0$ 。为使运算放大器输出电压为零,必须在两输入端之间加一补偿电压,该电压称为输入失调电压 V_{OS} 。具有输入失调电压 V_{OS} 的运算放大器的传输特性和电路模型如图 1-3-2 所示。

下面分析 V_{OS} 对如图 1-3-3 所示的电阻反馈运算放大器电路的影响。

在图 1-3-3 所示电路中,无失调运算放大器对于 V_{OS} 来说相当于一个同相放大器,其输出误差

$$E_0 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_{OS} \quad (1.3.11)$$

$(1 + R_2/R_1)$ 为直流噪声增益,噪声增益越大,误差也就越大。

如果同时考虑 I_{OS} 和 V_{OS} 的影响,总的输出误差

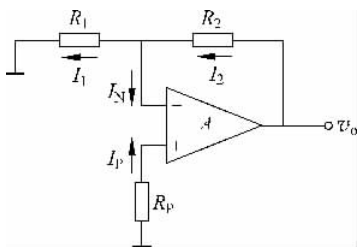


图 1-3-1 由输入偏置电流引起的输出误差