

第 3 章

集成功放与稳压电源

【学习目标】

本章介绍集成运算放大器、功率放大器与稳压电源。对于运算放大器的主要组成单元——差动放大电路,要求了解运算放大器的工作特性、规格参数、使用常识和基本应用电路;而功率放大器需要理解甲类、乙类、甲乙类功率放大器的工作特性和经常使用的 OTL 电路、OCL 电路使用常识;熟悉稳压电源组成结构及性能指标估算方法;了解稳压电源的工作原理及使用常识。

【引例】

运算放大器是一个高增益的多级直接耦合放大器,最初用于模拟计算机的数值运算,所以称为运算放大器。随着集成电路技术的发展,现在它已作为通用的电子器件广泛地应用于电子线路的各个领域。

例如一个常用于测量交直流电压、电阻、频率、毫伏、交直流电流、二极管等功能的 YHS787 校验仪表,如图 3-1 所示。它的整机电路设计由大规模专用集成电路芯片组成,在校验仪的内部含有高稳定精度的运算放大器。它的输出信号由数字键设定,操作非常精确方便。它的运算放大器功能可以输出源电流给变送器及其他设备,也可以仿真一个二线制变送器输出电流。校验仪的特点是功耗低、显示精度高、全自动量程,通过运算放大器的作用可减少操作,提高测量的安全性。



图 3-1 YHS787 校验仪表外形

3.1 集成运算放大器

3.1.1 差动放大电路

多级放大电路之间的耦合形式主要有阻容耦合、直接耦合、变压器耦合 3 种。对于频率较高的交流信号,多采用阻容耦合和变压器耦合,但在工业测量、自动控制等应用领域,

需要放大的信号往往是缓慢变化的信号或直流信号,对于这类信号不能用阻容耦合和变压器耦合,只能用直接耦合方式。集成电路的内部电路也因为电容和变压器体积太大,不便于制作而多采用直接耦合方式。

1. 直接耦合电路存在的问题

直接耦合放大电路如图 3-2 所示。

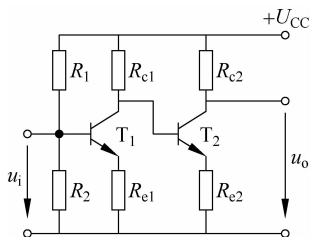


图 3-2 直接耦合放大电路

直接耦合电路存在的主要问题是级间互相影响问题和零点漂移情况。

缓慢变化的信号或直流信号不能采用阻容耦合和变压器耦合,其原因显而易见。但采用简单的直接耦合,各级电路的静态工作点会相互影响。如果前级的静态工作点发生偏移,其偏移量经过下一级的放大,使下一级的静态工作点发生更大的偏移。而且因下一级的基极电位就是前级的集电极电位,而放大电路中三极管的集电极电位必须高于基极电位(NPN 管)时才能正常放大。这样使后级的集电极电位逐级高于前级的集电极电位,经过几级耦合,末级的集电极电位便接近电源电压 U_{CC} ,从而限制了放大电路的级数。

多级直接耦合放大电路的另一常见问题是零点漂移。在放大电路输入端无信号输入时,常受温度等因素影响,电路同样出现放大过程,使输出端电压偏离原来的额定值而上下移动,这种现象称为零点漂移。一般在电路放大倍数越大时,零点漂移现象越严重。在漂移幅度大到接近正常信号放大范围时,它可能使输出端无法辨认是否输入端有信号输入,由此而丧失对信号放大的作用。

产生零点漂移的原因有温度变化、直流电源波动和器件老化等,其中晶体管对温度敏感是主要原因,故也称零漂为温漂。

【特别提示】

零点漂移的出现主要是因温度的变化影响管内载流子的运动,从而使反向电流 I_{CBO} 、发射极正向压降 U_{BE} 和电流放大系数 β 发生变化,相应引起 I_C 的变化。在电路级数很多时,初级电路毫伏级的电压变化信号都会在输出端产生上千倍的电压输出信号。因此需要对零点漂移现象采取控制措施,措施之一是采用温度补偿电路,如差动式放大电路。

2. 差动式放大电路

对称式差动放大电路如图 3-3 所示,它由两个完全对称的单管放大电路连接组成。在图 3-3 中, R_{b1} 是输入回路电阻, R_{b2} 是基极偏流电阻, R_c 是集电极电阻,两个三极管的特性相同,对应的元件参数也相同。输入信号由两个三极管的基极输入, u_{i1} 和 u_{i2} 分别为 V_1 和 V_2 的输入信号。输出端从两管的集电极引出,输入、输出电压的正方向如图 3-3 所示。

由于图 3-3 中的电路完全对称,因此无论是温度的变化还是电源电压的波动,对两管的影响都是相同的。如果把两管的零点漂移电压折合到输入端,就相当于给差动放大电路加了

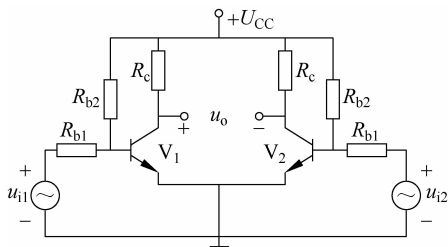


图 3-3 对称式差动放大电路

一对大小相等、方向相同的信号,经过两管放大后,两管的集电极电压变化相同,从集电极输出的漂移电压等于零,这样就达到抑制零点漂移的目的。因为差动放大电路能抑制零点漂移,所以对要求较高的直流放大电路,特别是多级直流放大电路的前置级,经常采用这种电路。

3. 互补电路

将 PNP 型和 NPN 型三极管配合连接,利用两管不同极性特点的电路,称为互补电路。互补电路较易实现直接耦合,同时可使输入信号为零时,输出信号也为零。

图 3-4(a)所示为用于输出级的互补电路。 V_1 的输入电压增加使其集电极电位低于地电位时, V_2 的发射结承受反向电压,使 V_2 处于截止状态;而 V_3 发射结承受正向电压,使 V_3 处于导通状态。输出电流经负载和 V_3 流入负电源、输出负电压。

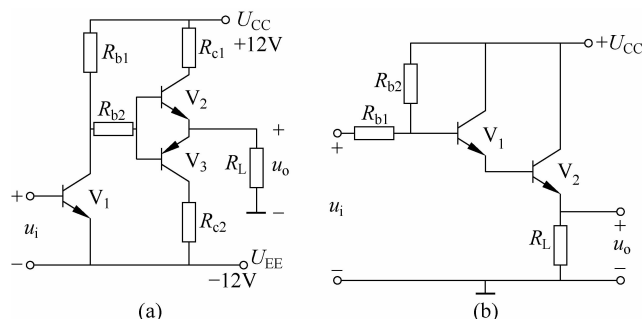


图 3-4 互补对称式电路和复合管电路

若 V_1 的输入电压减小使 V_1 的集电极电位升高并高于地电位时,则 V_2 的发射结承受正向电压, V_3 的发射结承受反向电压,工作过程与上述情况相反。结果是输出电流由正电源通过 V_2 流入负载,输出正电压。由于 PNP 型和 NPN 型两种三极管接成推挽输出形式,电路就称为对称式互补电路。

【特别提示】

对称式互补电路的特点是输入端对地电位为零时,负载电流为零,不消耗功率,提高了工作效率。有信号输入时,两管交替工作,得到对称的工作状态。若输入为交流信号,可使输出波形合成,提高输出功率。电路的连接形式与负载组成射极输出级电路,可起到变换阻抗的作用,有利于和负载配合,因此放大电路的输出级常采用这种电路。

4. 复合管电路

复合管电路也是一种射极输出电路,常用于放大电路的输出级,电路的结构如图 3-4(b)所示。 V_1 发射极和 V_2 基极直接耦合, V_2 的发射极作输出端。对 V_2 而言, R_L 是共射极负载;对 V_1 而言, V_2 和 R_L 也是共射极负载。因此电路具有射极输出器的特性。如电路的电压放大倍数小于 1,但总的电流放大倍数较大, $\beta = \beta_1 \beta_2$ (β_1 为 V_1 的放大倍数, β_2 为 V_2 的放大倍数)。实用中可用一个功率小而 β 值较大的三极管来推动一个功率大但 β 值较小的三极管以获得较大的电流输出,如用于直流稳压电源低电压、大电流的电路中。

此电路输入阻抗高而输出电阻小,因此对前级放大电路影响小,易于耦合,而又有利于带动负载,所以复合管电路的应用极为广泛。

3.1.2 集成运算放大器

1. 集成运算放大器概述

将半导体三极管、二极管、电阻等元件及连线全部集中制造在同一小块半导体基片上,成为一个完整的固体电路,通称为集成电路。相应的,将彼此独立的三极管、二极管、电阻、电容等用导线连接成的电路称为分立元件电路。

集成电路按功能不同,可分为模拟集成电路和数字集成电路。

在各种模拟集成电路中,集成运算放大器是应用最为广泛的器件。集成运算放大器(简称集成运放)是一种以晶体管为基础的多级直接耦合高电压放大倍数的差动放大器,在外部反馈网络的配合下,它的输出与输入电压(或电流)之间,可以灵活地实现加、减、乘、除、微分和积分等多种数学运算,其名称也由此而得。随着电子技术的飞速发展,集成运放的各项性能不断提高,因而应用领域日益扩大,已远远超过了数学运算领域。在控制、测量、仪表等诸多领域中,集成运放都发挥着重要作用。可以毫不夸张地说,集成运放已成为当前模拟电子技术领域中的核心器件。

集成运放的符号如图 3-5 所示。它有两个输入端,即一个为同相输入端,另一个为反相输入端,在符号图中分别用“+”、“-”表示,此外还有一个输出端。所谓同相输入端是指反相输入端接地,输入信号加到同相输入端,则输出信号和输入信号极性相同。反相输入端是指同相输入端接地,输入信号加到反相输入端,则输出信号和输入信号极性相反。集成运放的外引线排列因型号而异。

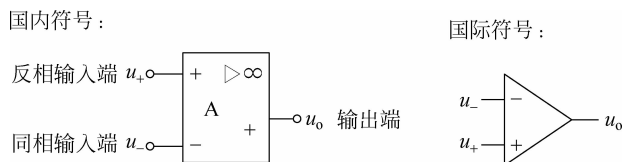


图 3-5 集成运放的符号

2. 集成运放的型号命名法

国标统一命名法规定,集成运放各个品牌的型号由字母和阿拉伯数字两部分组成。字母在首部,统一采用 CF 这两个字母。C 表示国标,F 表示线性放大器,其后的数字表示运放的类型。

3. 集成运放的内部电路组成

集成运放型号很多,性能各异,内部电路各不相同,但电路的基本结构大致相同。

集成运放的内部电路包括输入级、偏置级、中间级和输出级 4 部分,如图 3-6 所示。

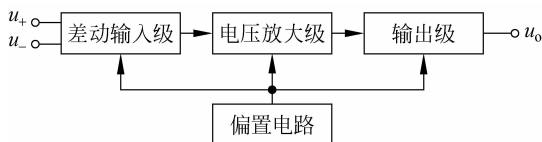


图 3-6 集成运放的内部电路组成

输入级由差分放大器组成,它的性能(如输入阻抗、共模抑制比、输入电压范围等)对整个集成电路的质量起决定性作用。

偏置电路向各放大级提供合适的工作电流,决定各级静态工作点。

中间级主要是提供足够的电压放大倍数。

输出级主要是给出足够的输出电流以满足负载的需要,同时起将放大级与负载隔离的作用。

【特别提示】

集成运放使用注意事项如下:

集成运放在使用前应进行下列检查:能否调零和消振,正负向的线性度和输出电压幅度;若数值偏差大或不能调零,则说明器件已损坏或质量不好。集成运放在使用时,因其管脚较多,必须注意管脚不能接错。当更换器件时,注意新器件的电源电压和原运放的电源电压是否一致。

4. 集成运放的主要技术指标

实用中各种型号集成运放的技术指标可以通过元器件手册查询。不过,并非一种运放的所有技术指标都是最优的,往往是各有侧重。而且,即使是同一型号的组件在性能上也存在一定的分散性,使用前经常需要亲自测试。所以,了解各项技术指标的含义,对于正确选择和使用各种集成运放是非常必要的。

(1) 开环差模电压放大倍数 A_{od}

A_{od} 是集成运放在开环时(无外加反馈时)输出电压与输入差模信号电压之比,常用分贝(dB)表示。这个值越大越好,目前最高的可达140dB以上。

(2) 输入失调电压 U_{os} 及其温漂 dU_{os}/dt

理想情况下,集成运放的差分输入级完全对称,能够达到输入电压为零时输出电压也为零。然而实际上并非如此理想,当输入电压为零时输出电压并不为零,若在输入端外加一个适当的补偿电压使输出电压为零,则外加的这个补偿电压称为输入失调电压 U_{os} 。 U_{os} 越小越好。高质量的集成运放可达1mV以下。

另外, U_{os} 的大小还受到温度的影响。为此,将输入失调电压对温度的变化率 dU_{os}/dt 称为输入失调电压温漂(或温度系数),用来表征 U_{os} 受温度变化的影响程度,单位为 $\mu V/^{\circ}C$,一般集成运放值为 $1\sim 50\mu V/^{\circ}C$,高质量的可达 $0.5\mu V/^{\circ}C$ 以下。显然,这项指标值越小越好。

(3) 输入失调电流 I_{os} 及其温漂 dI_{os}/dt

I_{os} 用来表征输入级差分对管的电流不对称所造成的影响,一般为 $1nA\sim 5\mu A$,好的可小于 $1nA$ 。

另外, I_{os} 也随温度而变。规定输入失调电流对温度的变化率 dI_{os}/dt 为输入失调电流温漂(或温度系数),用来表征 I_{os} 受温度变化的影响程度,单位为 $nA/^{\circ}C$,一般为 $1\sim 5nA/^{\circ}C$,质量高的可达 $pA/^{\circ}C$ 数量级。

(4) 输入偏置电流 I_B

I_B 为常温下输入信号为零时两输入端静态电流的平均值,它是衡量差分对管输入电

流绝对值大小的标志。 I_B 太大,不仅在不同信号源内阻的情况下对静态工作点有较大影响,而且也影响温漂和运算精度,一般为几百纳安,好的为几个纳安。

(5) 差模输入电阻 R_{id}

R_{id} 是集成运放两输入端之间的动态电阻,它是衡量差分对管从差模输入信号源索取电流大小的标志。一般为 $M\Omega$ 数量级。以场效应管为输入级的可达 $10^6 M\Omega$ 。

(6) 输出电阻 R_o

R_o 是集成运放开环工作时,从输出端向里看进去的等效电阻,其值越小,说明集成运放带负载的能力越强。

(7) 共模抑制比 K_{CMR}

K_{CMR} 是差模电压放大倍数与共模电压放大倍数之比。该值越大,说明输入差分级各参数对称程度越好。一般为 100dB 左右,好的可达 160dB。

(8) 最大差模输入电压 U_{Idm}

U_{Idm} 是指同相输入端和反相输入端之间所能承受的最大电压值。所加电压若超过 U_{Idm} 则可能使输入级的三极管反向击穿而损坏。

(9) 最大共模输入电压 U_{ICm}

U_{ICm} 是集成运放在线性工作范围内所能承受的最大共模输入电压。若超过这个值,则集成运放会出现 K_{CMR} 下降、失去差模放大能力等问题。高质量的集成运放的 U_{ICm} 可达正负十几伏。

除了以上介绍的指标外,还有最大输出电压幅值、带宽、转换速率、电源电压抑制比等。从集成运放的指标看,集成运放的主要参数都优于分立元件的放大电路。在分析电路时,为了简化计算,常把集成运算放大器理想化,即认为集成运算放大器的主要指标如下:

① 开环差模电压放大倍数 A_{od} 为无限大。

② 差模输入电阻 R_{id} 为无限大。

③ 输出电阻 R_o 为零。

它们共同组成集成运算放大器的理想特性。

【例 3-1】 一个差动放大器的差模信号放大倍数 $A_{UD} = 5000$, 共模信号放大倍数 $A_{UC} = 0.1$, 试求共模抑制比 K_{CMR} 。

解:

$$K_{CMR} = \frac{A_{UD}}{A_{UC}} = \frac{5000}{0.1} = 5 \times 10^4$$

【特别提示】

近年来,集成运放的各项指标不断改进,除上述通用型集成运算放大器外,还开发了各种专用型集成运放,如高速型(过渡时间短、转换率高)、高阻型(具有高输入电阻)、高压型(有较高的输出电压)、大功率型(输出功率高达十几瓦)、低功耗型(静态功耗甚低,如 $1 \sim 2V, 10 \sim 100\mu A$)、低漂移型(温漂较小)等。在实用中,考虑到便宜与采购方便,一般应选择通用型集成运放,特殊需要时,则应选择专用型。

3.1.3 集成运算放大器的应用

运算放大器最早用于模拟电子计算机中,完成对信号的数学运算。随着近代集成运放的发展,其适用范围已远远超出运算范畴,在各种模拟信号和脉冲信号的测量、处理、产生、变换等方面也都获得了广泛的应用。

在分析集成运放组成的各种电路时,将实际集成运放作为理想运放来处理,并分清它的工作状态是线性区还是非线性区,是十分重要的。根据运算放大器的理想特性,可得出在线性放大区内的两个重要特点。

(1) 理想运算放大器两个输入端的输入电流为零。由于认为运算放大器的 R_i 为无限大,它不需要从信号源索取任何电流。即 $i_+ = i_- = 0$,称为“虚断”。

(2) 理想运算放大器的两个输入端之间的电压为零。由于在理想条件下,当运算放大器在线工作时,它的输出 u_o 总是有限值,又因为 $A_{od} \rightarrow \infty$,所以 $u_+ - u_- = u_o / A_{od} = 0$,故可认为 $u_+ = u_-$,称为“虚短”。

1. 集成运放基本线性运算电路

集成运放外加不同的反馈网络,可以实现比例、加法、减法、积分、微分、对数、指数等多种基本运算。这里主要介绍比例、加法、减法以及积分、微分运算。由于对模拟量进行上述运算时求输出信号反映输入信号的某种运算结果,这就要求输出电压在一定范围内变化,故集成运放工作在线性区,为此在电路中必须引入深度负反馈(负反馈的概念见 2.5 节)。

(1) 反相比例运算

反相比例运算电路(又称反相输入放大器)的基本形式如图 3-7(a)所示。反馈支路由 R_f 构成, R_f 称为反馈电阻,将输出电压 U_o 反馈至反相输入端。 R_i 称为输入电阻, R_p 为平衡电阻,为保证两个输入端在直流状态下的平衡工作,一般取 $R_p = R_f // R_i$ 。输入信号 u_i 由反相端加入。

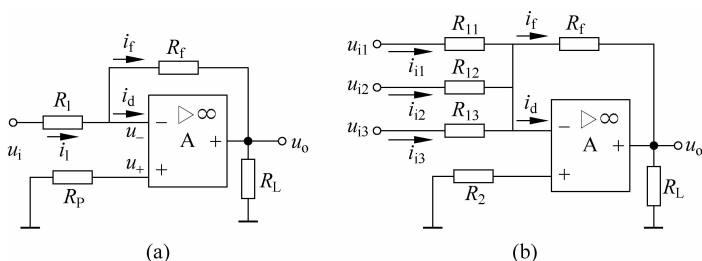


图 3-7 反相比例运算和反相加法运算电路

(a) 反相比例运算电路; (b) 反相加法运算电路

“虚地”是反相比例运算的重要特征,根据理想运算放大器在线性区的特点,有

$$i_1 = i_f; u_+ = u_- = 0$$

即运放反相端没有接地,但电位等于(接近于)“地”电位,故也称为“虚地”。

因此有

$$i_1 = \frac{u_i - 0}{R_1} = \frac{u_i}{R_1}, \quad i_f = \frac{0 - u_o}{R_f} = -\frac{u_o}{R_f}$$

所以

$$A_{Uf} = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_f}{R_1} \quad (3-1)$$

【特别提示】

式(3-1)表明,集成运放的输出电压 u_o 与输入电压 u_i 成比例关系,且相位相反(用负号表示),其比例系数(即电压放大倍数) A_{Uf} 仅与外接电阻 R_f 及 R_1 有关,而与运算放大器本身的参数无关。当选用不同的 R_f 及 R_1 电阻值时,就可以方便地改变这个电路的电压放大倍数。如果保证电阻阻值有较高的精度,则 A_{Uf} 的精度和稳定性也很高。

当 $R_f = R_1$ 时,则有 $A_{Uf} = -1$,即输出电压 U_o 与输入电压 U_i 数值相等,相位相反,这种电路称为反相器。这时,运算放大器仅作一次变号运算。

(2) 反相加法运算电路

用运算放大器能方便地实现多信号的组合运算,图 3-7(b)所示为反相加法运算电路。它是反相输入端有 3 个输入信号(代表三个输入量)的加法电路。与图 3-7(a)所示的反比例运算相比,这个反相加法电路只是增加了两个输入支路。如图 3-7(b)所示,有 3 个输入信号 u_{i1} 、 u_{i2} 、 u_{i3} 分别加到反相输入端,不难看出,这个电路实际上是 3 个输入信号同时进行比例运算。平衡电阻 $R_2 = R_f // R_{11} // R_{12} // R_{13}$ 。

根据“虚地”的概念,有

$$i_{i1} = \frac{u_{i1}}{R_{11}}, \quad i_{i2} = \frac{u_{i2}}{R_{12}}, \quad i_{i3} = \frac{u_{i3}}{R_{13}}, \quad i_f = -\frac{u_o}{R_f}$$

由于

$$i_f = i_{i1} + i_{i2} + i_{i3}$$

所以

$$\frac{u_{i1}}{R_{11}} + \frac{u_{i2}}{R_{12}} + \frac{u_{i3}}{R_{13}} = -\frac{u_o}{R_f}$$

得

$$u_o = -\left(\frac{R_f}{R_{11}}u_{i1} + \frac{R_f}{R_{12}}u_{i2} + \frac{R_f}{R_{13}}u_{i3}\right)$$

当

$$R_{11} = R_{12} = R_{13} = R_1$$

时,则有

$$u_o = -\frac{R_f}{R_1}(u_{i1} + u_{i2} + u_{i3}) \quad (3-2)$$

若 $R_1 = R_f$ 时,则有

$$u_o = -(u_{i1} + u_{i2} + u_{i3}) \quad (3-3)$$

从而实现了加法运算。式(3-2)中 R_1 与 R_f 的比,即加法器的比例系数,仅取决于外部电阻,与运算放大器内部参数无关。

【例 3-2】 图 3-8(a)所示的反相运算放大器, $R_1 = 50\text{k}\Omega$, $R_f = 300\text{k}\Omega$, 其放大倍数为

多大? 若输入电压 $u_i = 2\text{V}$, 则输出电压为多少?

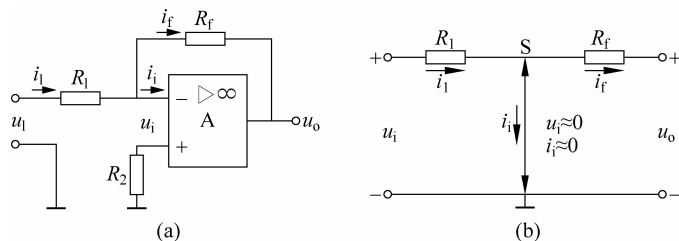


图 3-8 反相运算放大器

(a) 电路; (b) “虚地”等效电路

解:

$$A_{\text{Uf}} = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_f}{R_1} = -\frac{300}{50} = -6$$

$$u_o = -\frac{R_f}{R_1} u_i = -\frac{300}{50} \times 2 = -12(\text{V})$$

(3) 同相比例运算电路

同相比例运算电路(又称同相输入放大器)的基本形式如图 3-9(a)所示, 输入信号 u_i 加至集成运放同相输入端。反馈电阻 R_f 仍接在输出端和反相输入端之间, 输出电压通过反馈电阻 R_f 及 R_1 组成的分压电路, 取 R_1 上的分压作为反馈信号加到反相输入端。 R_2 为平衡电阻, 要求 $R_2 = R_f \parallel R_1$ 。

根据理想运算放大器的特点, 有

$$u_+ = u_- = u_i$$

得

$$u_- = \frac{R_1}{R_1 + R_f} u_o = u_i$$

所以

$$A_{\text{Uf}} = \frac{u_o}{u_i} = \frac{R_f + R_1}{R_1} = 1 + \frac{R_f}{R_1} \quad (3-4)$$

或

$$u_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) u_i \quad (3-5)$$

式(3-5)表明, 集成运放的输出电压与输入电压之间仍成比例关系, 比例系数(即电压放大倍数)仅取决于反馈网络的电阻值 R_1 和 R_f , 而与运放本身的参数无关。 A_{Uf} 为正值表明输出电压与输入电压同相。当 $R_f = 0$ (反馈电阻短路) 和(或) $R_1 \rightarrow \infty$ (反相输入端电阻开路) 时, 则有 $u_o = u_i$, 说明输出电压跟随输入电压变化, 所以把这种运放电路称为电压跟随器, 它是同相输入放大器的特例。

【特别提示】

由集成运放构成的电压跟随器与基本放大电路中介绍的三极管射极输出器(也是电压跟随器)相比, 质量上要强很多。同相比例运算电路能提高输入电阻、减少输出电阻。它的输入电阻很高, 几乎不向前级电路取用电流, 而它的输出电阻很低, 向后级电路提供电流时, 几乎不存在内阻, 所以在电子线路中常用作隔离器。

(4) 差动运算电路

电路如图 3-9(b)所示, u_{i1} 、 u_{i2} 分别经 R_1 和 R_2 加到集成运算放大器的两个输入端, 为保持输入平衡, 应取 $R_1 = R_2$, $R_3 = R_f$ 。

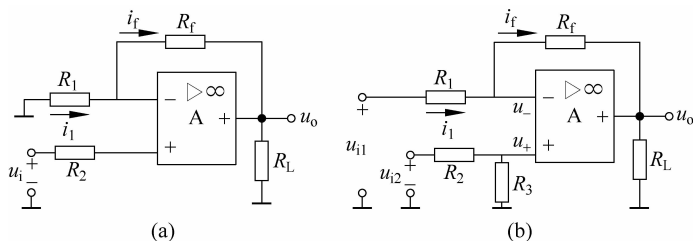


图 3-9 同相放大电路和差动放大电路

(a) 同相放大电路; (b) 差动放大电路

利用“虚断”的概念, 有

$$i_f = i_1 = \frac{u_{i1} - u_o}{R_1 + R_f}$$

$$u_- = u_{i1} - i_1 R_1 = u_{i1} - \frac{R_1}{R_1 + R_f} (u_{i1} - u_o)$$

$$u_+ = \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{i2}$$

利用“虚短”的概念, 有 $u_+ = u_-$, 可得到

$$u_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{i2} - \frac{R_f}{R_1} u_{i1} \quad (3-6)$$

当 $R_1 = R_2$, $R_3 = R_f$ 时, 则式(3-6)为

$$u_o = \frac{R_f}{R_1} (u_{i2} - u_{i1}) \quad (3-7)$$

可见, 输出电压 u_o 与两个输入电压的差值成正比, 比例系数也只与外接元件有关。当 $R_1 = R_f$ 时, 则有

$$u_o = u_{i2} - u_{i1}$$

从而实现了减法运算。但必须注意若电路中的电阻不对称, 则上式不成立。

(5) 积分运算电路

若在反比例运算电路中, 用电容 C_f 代替反馈电阻 R_f , 就构成了积分运算电路, 如图 3-10(a)所示。

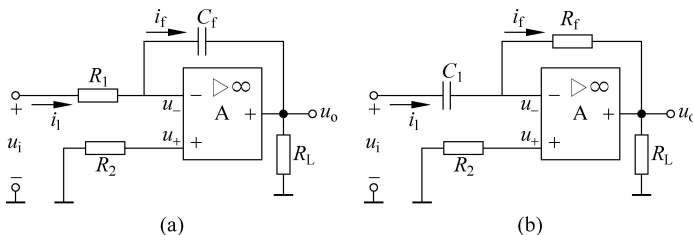


图 3-10 积分运算电路和微分运算电路

(a) 积分运算电路; (b) 微分运算电路