

# 第3章

## 集成运算放大电路

### 3.1 集成运算放大电路概述

集成运算放大电路是一种高电压放大倍数、高输入电阻和低输出电阻的多级直接耦合放大电路,因其最初多用于模拟信号的运算,所以被称之为集成运算放大电路,简称集成运放。随着集成电路技术的不断发展,集成运放的性能不断改善,种类也越来越多,现在集成运放的应用已远远超出了信号运算的范围,在电子技术的许多领域都有广泛的应用。

集成运放的电路结构特点如下。

- ① 硅片上不能制作大电容,所以集成运放均采用直接耦合方式。
- ② 集成电路内部相邻元件具有良好的对称性,受环境温度和其他干扰等影响时的变化趋势相同,所以集成运放中大量采用各种差动放大电路(作输入级)和恒流源电路(作偏置电路或有源负载)。
- ③ 硅片上不宜制作高阻值电阻,所以在集成运放中常用有源元件(晶体管或场效应管)取代高阻值电阻。
- ④ 集成晶体管和场效应管因制作工艺不同,性能上有较大差异,所以在集成运放中常采用复合管结构来改善性能。

#### 3.1.1 集成运放的电路组成及其各部分的作用

集成运放是一种高电压放大倍数的多级直接耦合放大电路,由4部分组成:输入级、中间级、输出级和偏置电路,原理框图如图3-1所示。它有两个输入端,一个输出端,图中标 $u_P$ 、 $u_N$ 、 $u_o$ 均以“地”为公共端。

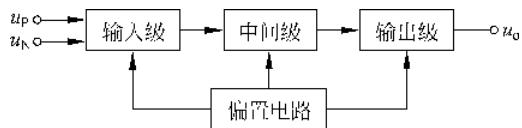


图 3-1 集成运放原理框图

#### 1. 输入级

输入级往往是一个高性能的双端输入差动放大电路。一般要求其输入电阻高,差模电

压放大倍数大,抑制共模信号的能力强,静态电流小。输入级的好坏直接影响集成运放的大多数性能参数,如输入电阻、共模抑制比等。

## 2. 中间级

中间级的作用是使集成运放具有较强的放大能力,多采用共射(或共源)放大电路。而且为了提高电压放大倍数,经常采用复合管做放大管,以恒流源做集电极负载。其电压放大倍数可达千倍以上。

## 3. 输出级

输出级应具有输出电压线性范围宽、输出电阻小(即带负载能力强)、非线性失真小等特点。集成运放的输出级多采用互补对称功率放大电路。

## 4. 偏置电路

偏置电路用于设置集成运放内部各级电路的静态工作点。与分立元件不同,集成运放通常采用电流源电路为各级提供合适的集电极(或发射极、漏极)静态工作电流,从而确定了合适的静态工作点。

### 3.1.2 集成运放的主要性能指标

在考察集成运放的性能时,常用下列参数来描述。

#### 1. 开环差模电压放大倍数 $A_{od}$

开环差模电压放大倍数  $A_{od}$  指的是运放在没有外接反馈时的差模电压放大倍数。即  $A_{od} = \Delta u_O / \Delta(u_P - u_N)$ , 常用分贝数(dB)表示,其分贝数为  $20\lg|A_{od}|$ , 通用型集成运放的  $A_{od}$  通常在  $10^5$  左右,即 100dB 左右。一般 F007 的  $A_{od} > 94\text{dB}$ 。理想条件下,可以认为  $A_{od} \approx \infty$ 。

#### 2. 共模抑制比 $K_{CMR}$

共模抑制比  $K_{CMR}$  等于差模放大倍数与共模放大倍数之比的绝对值,即  $K_{CMR} = |A_{od}/A_{oc}|$ , 也常用 dB 表示,其数值为  $20\lg K_{CMR}$ 。  $K_{CMR}$  值越大,集成运放抑制共模信号的能力越强。F007 的  $K_{CMR} > 80\text{dB}$ 。理想条件下,可以认为  $K_{CMR} \approx \infty$ 。

#### 3. 差模输入电阻 $r_{id}$

集成运放的差模输入电阻  $r_{id}$  是指集成运放在输入差模信号时的输入电阻。  $r_{id}$  值越大运放向信号源获取的电流越小。F007 的  $r_{id} > 2\text{M}\Omega$ 。理想条件下,可以认为  $r_{id} \approx \infty$ 。

#### 4. 输入失调电压 $U_{io}$

理想的集成运放在输入电压为零时,输出电压也应为零。但由于输入级电路参数不可能绝对对称等原因,实际的集成运放输入为零时输出并不为零。输入失调电压  $U_{io}$  的数值

等于为使输出为零在输入端所要加的补偿电压,其数值是 $u_1=0$ 时,输出电压折合到输入端电压的负值,即 $U_{10} = -\frac{u_o|_{u_1=0}}{A_{od}}$ 。 $U_{10}$ 反映了输出失调的程度,因而 $U_{10}$ 的值越小越好。F007的 $U_{10} < 2\text{mV}$ 。理想条件下,可以认为 $U_{10} \approx 0$ 。

### 5. 输入失调电流 $I_{10}$

输入失调电流  $I_{10}$  的值等于运放的输入级差动放大电路两个静态输入电流的差值,它反映了运放两个静态输入电流的不对称程度。 $I_{10}$  的存在会产生输出失调,因而  $I_{10}$  的值越小越好。理想条件下,可以认为  $I_{10} \approx 0$ 。

### 6. 最大共模输入电压 $U_{ic\max}$

集成运放对共模信号有抑制作用,但当共模输入电压超过一定极限数值时,运放将不能正常工作甚至损坏,共模输入电压的这一极限数值就是集成运放的最大共模输入电压  $U_{ic\max}$ 。

除上述主要参数外,集成运放的参数还有输入偏置电流  $I_{IB}$ 、最大差模输入电压  $U_{id\max}$  等。有关参数测试条件和性能指标可参考有关的电子产品手册。

## 3.1.3 集成运放的电压传输特性

集成运放的两个输入端分别为同相输入端  $u_P$  和反相输入端  $u_N$ , 这里的“同相”和“反相”是指运放的输入电压与输出电压之间的相位关系,集成运放的符号如图 3-2(a) 所示。从外部看,可以认为集成运放是一个双端输入、单端输出、具有高差模放大倍数、高输入电阻、低输出电阻、能较好地抑制温漂的差动放大电路。

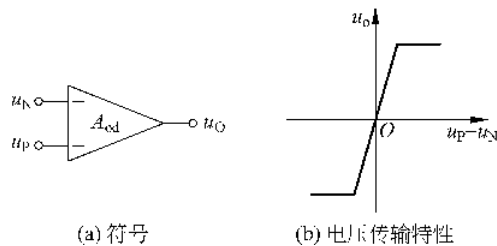


图 3-2 集成运放的符号和电压传输特性

集成运放的输出电压  $u_O$  与输入电压(即同相输入端与反相输入端之间的差值电压)之间的关系曲线称为电压传输特性,即

$$u_O = f(u_P - u_N)$$

对于正、负两路电源供电的集成运放,其电压传输特性如图 3-2(b) 所示。从图示曲线可以看出,集成运放有线性放大区域(称为线性区)和饱和区域(称为非线性区)两部分。在

线性区,曲线的斜率为电压放大倍数;在非线性区,输出电压只有两种可能的情况,即  $+U_{OM}$  或  $-U_{OM}$ 。

由于集成运放放大的对象是差模信号,而且没有通过外电路引入反馈,因而集成运放工作在线性区时  $u_O = A_{od}(u_P - u_N)$ 。通常  $A_{od}$  在  $10^5$  左右,因此集成运放的线性区非常狭窄。

### 3.1.4 理想集成运放

为便于分析,通常将集成运放看成理想集成运放。所谓的理想集成运放就是将实际的

集成运放性能指标理想化,以便于电路的分析计算。由于实际集成运放的性能指标与理想运放比较接近,所以用理想运放代替实际运放所引起的误差并不大,在工程计算中是允许的,而且可以使运放应用电路的分析简化。具体地说,这些理想化的性能指标为:

开环差模电压放大倍数  $A_{od} \approx \infty$ ;

差模输入电阻  $r_{id} \approx \infty$ ;

输出电阻  $r_o \approx 0$ ;

共模抑制比  $K_{CMR} \approx \infty$  等。

### 1. 理想集成运放在线性区的特点

设集成运放同相输入端和反相输入端的电位分别为  $u_P$  和  $u_N$ , 电流分别为  $i_P$  和  $i_N$ 。当集成运放工作在线性区时,输出电压应与输入差模电压呈线性关系,即应满足

$$u_O = A_{od}(u_P - u_N)$$

由于  $u_O$  为有限值,对于理想集成运放  $A_{od} \approx \infty$ ,因而净输入电压  $u_P - u_N = 0$ ,即  $u_P = u_N$ 。

这个结论称两个输入端“虚短路”。所谓“虚短路”是指集成运放的两个输入端电位无穷接近,但又不是真正短路的特点。

因为净输入电压为零,又因为理想集成运放的输入电阻为无穷大,所以两个输入端的输入电流也均为零,即  $i_P = i_N = 0$ 。

换句话说,即从集成运放输入端看进去相当于断路,称两个输入端“虚断路”。所谓“虚断路”是指集成运放两个输入端的电流趋于零,但又不是真正断路的特点。

应当特别指出,“虚短”和“虚断”是非常重要的概念。对于集成运放工作在线性区的应用电路,“虚短”和“虚断”是分析其输入信号和输出信号关系的两个基本出发点。

### 2. 集成运放工作在线性区的电路特征

对于理想集成运放,由于  $A_{od} \approx \infty$ ,因而若两个输入端之间加无穷小电压,则输出电压就将超出其线性范围,不是正向最大电压  $+U_{OM}$ ,就是负向最大电压  $-U_{OM}$ ;因此,只有电路引入负反馈,才能保证集成运放工作在线性区,集成运放工作在线性区的特征是电路引入了负反馈。

对于单个的集成运放,通过无源的反馈网络将集成运放的输出端与反相输入端连接起来,就表明电路引入了负反馈,如图 3-3 所示。因此,可以通过电路是否引入了负反馈,来判断电路是否工作在线性区。

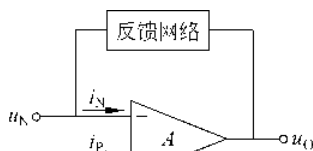


图 3-3 集成运放引入负反馈

### 3. 理想集成运放的非线性工作区

在电路中,若集成运放处于开环状态(即没有引入反馈),或是只引入了正反馈,则表明集成运放工作在线性区。

对于理想集成运放,由于差模增益无穷大,只要同相输入端与反相输入端之间有无穷小的差值电压,输出电压就将达到正的最大值或负的最大值,即输出电压  $u_O$  与输入电压  $(u_P - u_N)$  不再是线性关系,称集成运放工作在线性区,其电压传输特性如图 3-4 所示。

理想集成运放工作在线性区的两个特点如下。

① 输出电压  $u_o$  只有两种可能的情况,分别为  $+U_{OM}$  或  $-U_{OM}$ 。当  $u_p > u_n$  时,  $u_o = +U_{OM}$ ; 当  $u_p < u_n$  时,  $u_o = -U_{OM}$ 。

② 由于理想集成运放的差模输入电阻无穷大,故净输入电流为零,即  $i_p = i_n = 0$ 。

可见,理想集成运放仍具有“虚断”的特点,但其净输入电压不再为零,而取决于电路的输入信号。对于集成运放工作在线性区的应用电路,上述两个特点是分析其输入信号和输出信号关系的基本出发点。

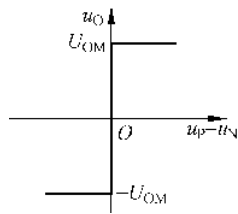


图 3-4 理想集成运放工作在线性区的电压传输特性

## 3.2 集成运放在信号运算方面的应用

### 3.2.1 比例运算电路

#### 1. 反相比例运算电路

在反相比例运算电路中,电路输入信号  $u_i$  总是经过一个电阻  $R_1$  接到反相输入端,输出信号  $u_o$  经过一个电阻如  $R_F$  反馈到反相输入端,如图 3-5(a)所示。由图可见,图中电路是一个用国产芯片 F741 接成的反相比例运算电路,图中同时给出了电源连接及调零电路,并在同相输入端对地串了一个电阻  $R_2 = R_1 // R_F$ ,目的是使两个输入端对地的等效电阻相同。需要强调的是,今后除特殊情况外,电源及调零等电路均为默认,不再画出,从而图 3-5(a)所示电路将简化为图 3-5(b)所示。

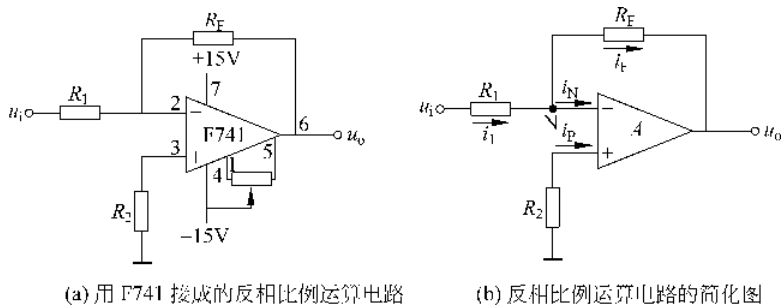


图 3-5 反相比例运算电路

对于图 3-5(b),由于理想运放的净输入电流为零,所以  $i_p = i_n = 0$ ,由于运放的同相和反相输入端“虚短路”,反相输入端(标注“N”处)电位近似为 0,所以  $u_p = u_n = 0$ 。

节点 N 的电流方程为  $i_1 = i_F$

$$\frac{u_i - u_N}{R_1} = \frac{u_N - u_o}{R_F}$$

则有

$$u_o = -\frac{R_F}{R_1} u_i$$

所以

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_F}{R_1}$$

上式表明,反比例放大电路的电压放大倍数仅仅取决于反馈电阻  $R_F$  与输入电阻  $R_1$  之比。式中负号“ $-$ ”表示输出电压的相位与输入电压相位相反,即“反相”。

反相放大器的输入电阻为  $R_i = \frac{u_i}{i_1} = R_1$ 。

## 2. 同比例放大电路

同比例放大电路如图 3-6 所示,输入信号  $u_i$  加在同相输入端,输出信号  $u_o$  仍经电阻  $R_F$  反馈到反相输入端,形成负反馈。

由于理想集成运放的净输入电流为零,所以  $i_P = i_N = 0$ ,所以  $u_P = u_i$ ,且  $i_1 = i_F$ ,即  $\frac{u_N - 0}{R_1} = \frac{u_o - u_N}{R_F}$ ,整理得

$$u_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) u_N \quad (3-1)$$

由于同相和反相输入端虚短路,反相输入端(标注 N 处)的电位与同相输入端相同,即

$$u_N = u_P = u_i \quad (3-2)$$

将式(3-2)代入式(3-1)得

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

所以

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = 1 + \frac{R_F}{R_1} \quad (3-4)$$

上式表明,输出电压与输入电压成比例运算关系而且同相。电阻  $R_2$  是平衡电阻, $R_2 = R_1 // R_F$ 。

由式(3-3),如果使  $R_1 = \infty$  或使  $R_1 = \infty$  且  $R_F = 0$ ,电路就变成了图 3-7 或图 3-8 所示的样子,这时的电压放大倍数  $A_{uf} = 1$ ,即  $u_o = u_i$ ,电路的输出电压和输入电压相同,这样的电路称为电压跟随器。

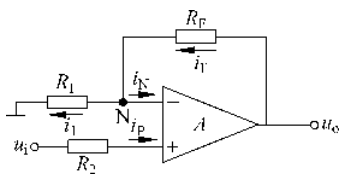


图 3-6 同比例运算电路

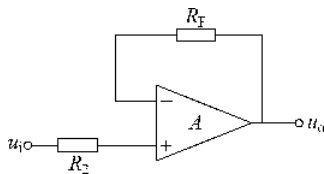


图 3-7 电压跟随器

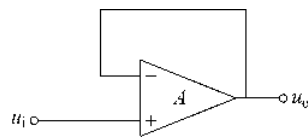


图 3-8 电压跟随器

## 3.2.2 加减运算电路

### 1. 反相加法运算电路

加法运算电路能够实现多个模拟量的求和运算。图 3-9 所示为一个 3 个输入信号的反相加法运算电路。

根据“虚短路”和“虚断路”的原则,  $u_P = u_N = 0$ 。

节点 N 的电流方程为  $i_{11} + i_{12} + i_{13} = i_F$

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

对上式整理得

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

当  $R_{11} = R_{12} = R_{13} = R_1$ ,  $u_o = -\frac{R_F}{R_1}(u_{i1} + u_{i2} + u_{i3})$

当  $R_{11} = R_{12} = R_{13} = R_F$ ,  $u_o = -(u_{i1} + u_{i2} + u_{i3})$

平衡电阻  $R_2 = R_{11} // R_{12} // R_{13} // R_F$ 。

## 2. 同相加法运算电路

加法运算电路也可采用同相输入的方式,图 3-10 是一个两个输入信号的同相加法运算电路。

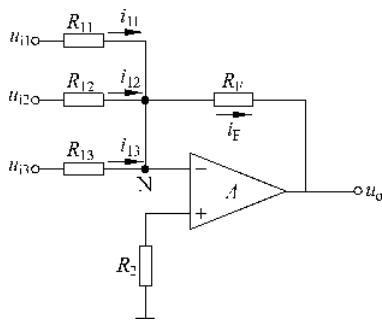


图 3-9 反相加法运算电路

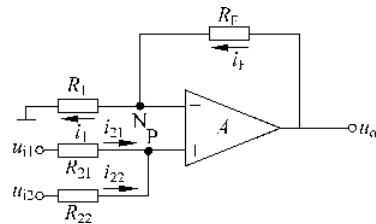


图 3-10 同相加法运算电路

根据“虚断路”的原则,  $i_1 = i_F$ , 即  $\frac{u_N - 0}{R_1} = \frac{u_o - u_N}{R_F}$ , 整理得

$$u_N = \frac{R_1}{R_1 + R_F} u_o \quad (3-5)$$

根据“虚断路”的原则, 节点 P 的电流方程为  $i_{21} + i_{22} = 0$ , 即  $\frac{u_{i1} - u_P}{R_{21}} + \frac{u_{i2} - u_P}{R_{22}} = 0$ , 整理得

$$u_P = (R_{21} // R_{22}) \left( \frac{u_{i1}}{R_{21}} + \frac{u_{i2}}{R_{22}} \right) \quad (3-6)$$

根据“虚短路”的原则, 并结合式(3-5)和式(3-6)得

$$(R_{21} // R_{22}) \left( \frac{u_{i1}}{R_{21}} + \frac{u_{i2}}{R_{22}} \right) = \frac{R_1}{R_1 + R_F} u_o$$

从而  $u_o = \left( 1 + \frac{R_F}{R_1} \right) (R_{21} // R_{22}) \left( \frac{u_{i1}}{R_{21}} + \frac{u_{i2}}{R_{22}} \right)$

若  $R_{21} = R_{22} = R_1 = R_F$ , 则  $u_o = u_{i1} + u_{i2}$ 。

为了提高电路的共模抑制比和减小零漂, 一般要求  $R_{21} // R_{22} = R_1 // R_F$ 。

### 3. 减法运算电路

减法运算电路如图 3-11 所示,同相和反相输入端都有信号输入,则称为差动输入运算电路。

分析减法运算电路用叠加原理比较简单,图 3-12(a)和图 3-12(b)分别是输入信号  $u_{i1}$  和  $u_{i2}$  单独作用时的电路。

由图 3-12(a)可知,  $u_{i1}$  单独作用时电路为反相比例运算电路,输出电压为  $u'_o = -\frac{R_F}{R_1}u_{i1}$ 。

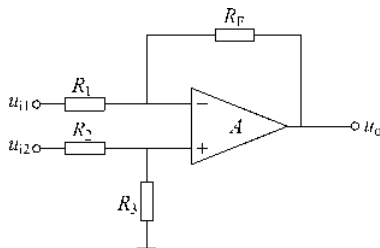


图 3-11 减法运算电路

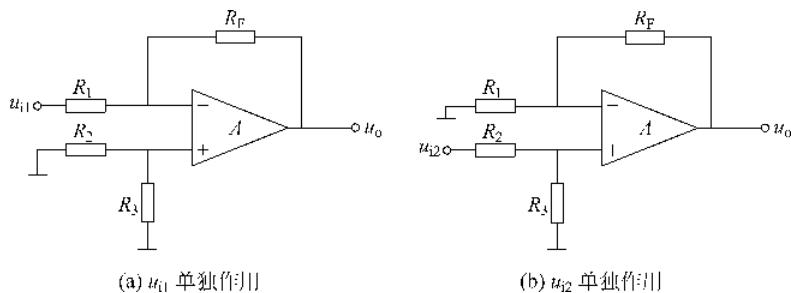


图 3-12 减法运算电路

由图 3-12(b)可知,  $u_{i2}$  单独作用时电路为同相比例运算电路,由于电阻  $R_3$  的分压作用,使同相输入端电位  $u_P = \frac{R_3}{R_2 + R_3}u_{i2}$ ,所以输出电压为

$$u''_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right)u_P = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right)\frac{R_3}{R_2 + R_3}u_{i2}$$

因此,  $u_{i1}$  和  $u_{i2}$  同时作用的输出电压为

$$u_o = u'_o + u''_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right)u_P = -\frac{R_F}{R_1}u_{i1} + \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right)\frac{R_3}{R_2 + R_3}u_{i2}$$

当  $R_1 = R_2, R_3 = R_F$  时,  $u_o = \frac{R_F}{R_1}(u_{i2} - u_{i1})$ 。

当  $R_1 = R_2 = R_3 = R_F$ ,  $u_o = u_{i2} - u_{i1}$ 。

### 3.2.3 微分、积分运算电路

#### 1. 积分运算电路

将反相比例运算电路的反馈电阻  $R_F$  换成电容  $C$  而得到积分运算电路,如图 3-13 所示。

根据“虚短路”和“虚断路”的原则,  $u_P = u_N = 0$ 。

节点 N 的电流方程为  $i_1 = i_F$ , 其中  $i_1 = \frac{u_i - u_N}{R_1} = \frac{u_i}{R_1}$ ,  $i_F = C \frac{du_C}{dt} = -C \frac{du_o}{dt}$ , 所以  $\frac{u_i}{R_1} = -C \frac{du_o}{dt}$ , 则有



$$u_o = -\frac{1}{R_1 C} \int u_i dt$$

上式表明,输出电压  $u_o$  与输入电压  $u_i$  之间为积分运算关系。其中,  $\tau = R_1 C$  为积分时间常数。在求解  $t_1 \sim t_2$  时间段的积分值时,有

$$u_o = -\frac{1}{R_1 C} \int_{t_1}^{t_2} u_i dt + u_o(t_1)$$

式中,  $u_o(t_1)$  为积分起始时刻  $t_1$  的输出电压,积分的终值是  $t_2$  时刻的输出电压。

当输入为阶跃信号  $U$  时,若  $t_0$  时刻电容上的电压为零,则输出电压波形如图 3-14 所示。当输入波形为正弦波和方波时,输出电压波形如图 3-15 和图 3-16 所示。

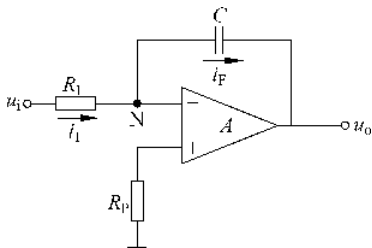


图 3-13 积分运算电路

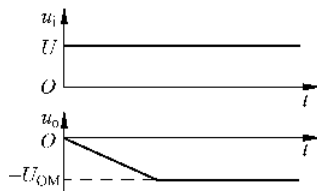


图 3-14 输入为阶跃信号时输出电压波形

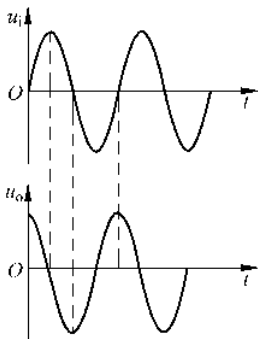


图 3-15 输入为正弦波时输出电压波形

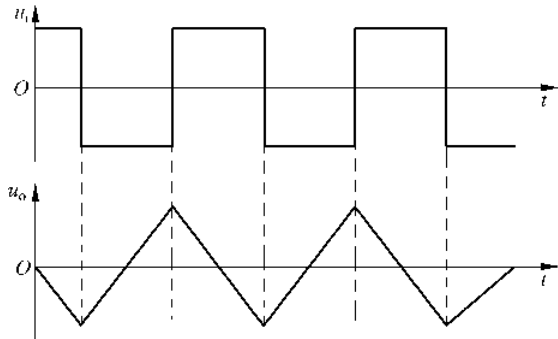


图 3-16 输入为方波时输出电压波形

## 2. 微分运算电路

将反比例运算电路的电阻  $R$  和电容  $C$  的位置互换,就得到了微分运算电路,如图 3-17 所示。

根据“虚短路”和“虚断路”的原则,  $u_p = u_n = 0$ 。

节点  $N$  的电流方程为  $i_c = i_f$ , 其中,  $i_c = C \frac{du_c}{dt} = C \frac{du_i}{dt}$ ,  $i_f = \frac{u_n - u_o}{R_1} = -\frac{u_o}{R_1}$ 。所以有

$$u_o = -R_1 C \frac{du_i}{dt}$$

上式表明,输出电压  $u_o$  与输入电压  $u_i$  对时间的一次微分成正比。

当  $u_i$  为矩形波信号时,则输出电压为正、负相间的尖脉冲,波形如图 3-18 所示,可见,仅在  $u_i$  发生跃变时,才有尖峰电压输出;而当输入电压不变时,输出将为零。说明微分运

算电路的输出信号对输入信号的突然变化比较敏感,常用于自动控制中,以提高系统的状态灵敏度。

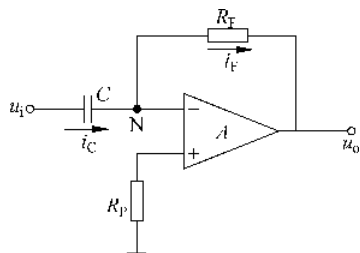


图 3-17 微分运算电路

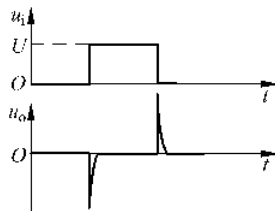


图 3-18 微分电路波形

### 3.2.4 对数和指数运算电路

#### 1. 对数运算电路

由于 PN 结的伏安特性具有指数规律,因而可以利用二极管或晶体管来实现对数和指数运算。利用二极管的运算电路如图 3-19 所示。为使二极管导通,输入电压  $u_i$  应大于零。

二极管在正向偏置的情况下,二极管内的电流和电压的关系为

$$i_D \approx I_S e^{\frac{u_D}{U_T}}$$

上式整理得

$$u_D = U_T \ln \frac{i_D}{I_S}$$

根据“虚短路”和“虚断路”的原则,  $u_P = u_N = 0$ , 且  $i_R = i_D$ , 所以  $i_D = i_R = \frac{u_i - u_N}{R} = \frac{u_i}{R}$ , 进而得输出电压为

$$u_o = -u_D \approx -U_T \ln \frac{u_i}{I_S R}$$

晶体管的对数运算电路如图 3-20 所示。

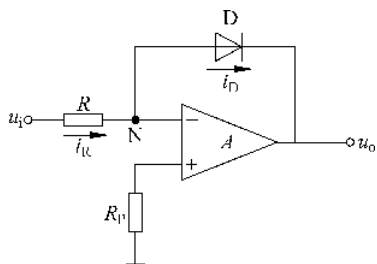


图 3-19 二极管对数运算电路

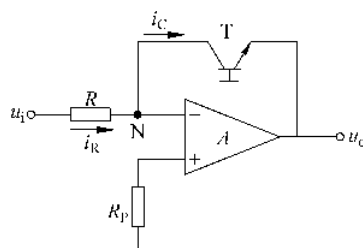


图 3-20 晶体管对数运算电路

根据“虚短路”和“虚断路”的原则,  $u_P = u_N = 0$ 。

节点 N 的电流方程为  $i_R = i_C$ , 其中:  $i_R = \frac{u_i - u_N}{R} = \frac{u_i}{R}$ 。

根据半导体的基础知识可知,工作在放大区的晶体管电流和电压的关系为  $i_C \approx i_E \approx$

$I_S e^{\frac{u_{BE}}{U_T}}$ , 可得  $u_{BE} \approx U_T \ln \frac{i_C}{I_S}$ , 所以, 输出电压为

$$u_o = -u_{BE} \approx -U_T \ln \frac{i_C}{I_S} = -U_T \ln \frac{u_i}{I_S R}$$

## 2. 指数运算电路

指数运算和对数运算互为反函数。采用二极管的指数运算电路如图 3-21 所示。根据“虚短路”和“虚断路”的原则,  $u_P = u_N = 0$ , 且  $i_R = i_D$ , 所以  $u_D = u_i$ 。

由电路可得:  $i_D \approx I_S e^{\frac{u_D}{U_T}} = I_S e^{\frac{u_i}{U_T}}$  和  $i_R = \frac{u_N - u_o}{R} = -\frac{u_o}{R}$ , 进而得电路的输出电压为

$$u_o = -i_R R \approx -R I_S e^{\frac{u_i}{U_T}}$$

图 3-22 是采用晶体管的指数运算电路。

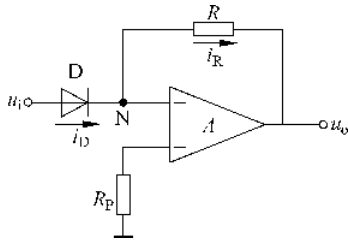


图 3-21 二极管指数运算电路

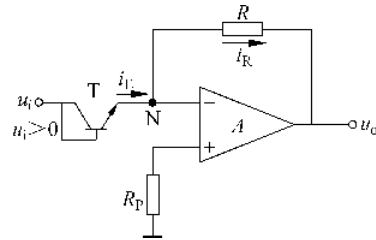


图 3-22 晶体管指数运算电路

根据“虚短路”和“虚断路”的原则,  $u_P = u_N = 0$ , 且  $i_R = i_E$ , 所以  $u_{BE} = u_i$ 。

由电路可得:  $i_E \approx I_S e^{\frac{u_{BE}}{U_T}} = I_S e^{\frac{u_i}{U_T}}$  和  $i_R = \frac{u_N - u_o}{R} = -\frac{u_o}{R}$ , 进而得电路的输出电压为

$$u_o = -i_R R \approx -R I_S e^{\frac{u_i}{U_T}}$$

## 3.2.5 乘法和除法运算电路

实现两个输入信号的乘法运算, 可以先把这两个信号分别取对数, 再进行加法运算, 然后将得到的和进行指数运算。图 3-23 是利用对数运算电路和指数运算电路实现乘法运算的方框图。具体的电路如图 3-24 所示。

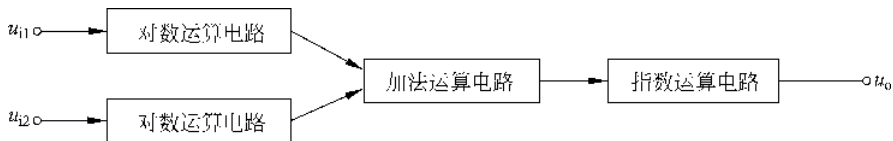


图 3-23 利用指数和对数运算电路实现乘法运算的电路框图

$$u_{o1} \approx -U_T \ln \frac{u_{i1}}{I_S R}$$

$$u_{o2} \approx -U_T \ln \frac{u_{i2}}{I_S R}$$