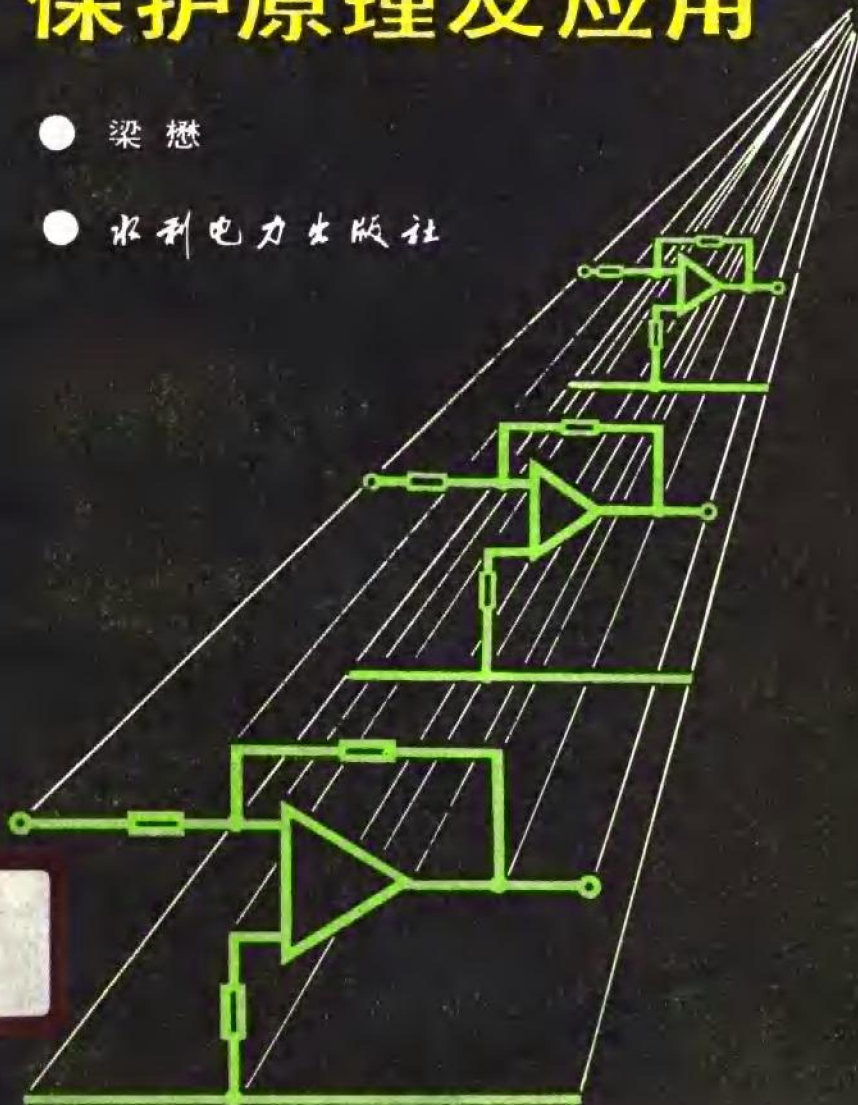


集成运算放大器型 保护原理及应用

● 梁 懋

● 水利电力出版社



内 容 提 要

本书共分八章，主要内容有：运算放大器的基本特性，继电保护的基本运算电路，由运算放大器构成的各种有源滤波器电路，对称分量滤序器电路，电平检测器电路，集成数字电路，时间电路，比较回路，整流和滤波电路，稳压电路，集成电路继电器实例，集成运算放大器的选型及提高集成运算放大器型保护可靠性的措施等。

本书可供从事电力系统继电保护的工程技术人员及大专院校有关专业的师生阅读和参考。

集成运算放大器型保护原理及应用

梁 懋

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 11印张 244千字

1990年9月第一版 1990年9月北京第一次印刷

印数0001—3100册

ISBN 7-120-01203-7/TM·334

定价7.10元

目 录

第一章 运算放大器型继电保护的基本电路及其数学运算依据.....	1
第一节 运算放大器的基本特性.....	1
第二节 继电保护基本运算电路及其运算方程.....	4
第三节 实际运算放大器的误差分析.....	30
第二章 继电保护装置中的有源滤波器.....	45
第一节 有源滤波器在继电保护装置中的作用及其优点.....	45
第二节 有源滤波器的基本特性.....	50
第三节 各种有源滤波器电路及其参数计算.....	67
第四节 滤波器的暂态输出特性.....	92
第五节 有源滤波器抑制谐波分量效果的分析实例	108
第三章 运算放大器型继电保护的交流测量回路.....	113
第一节 中间变换器	113
第二节 对称分量滤序器	122
第三节 功率方向元件的电压形成回路	140
第四节 方向阻抗元件的电压形成回路	144
第五节 整流和滤波电路	151
第四章 电平检测器、稳压及时间元件电路	166
第一节 电平检测器电路	166
第二节 稳压电路	183
第三节 时间电路	192
第五章 集成数字电路和时间元件	200
第一节 集成数字电路	200
第二节 集成电路时间元件	215
第六章 比较回路	226

第一节	单输入量比较回路	226
第二节	相位比较回路	237
第三节	绝对值比较回路	273
第七章	设计和研制集成运算放大器型保护应注意的 问题	279
第一节	集成运算放大器的选型问题	279
第二节	集成运算放大器使用中可能出现的问题 及保护措施	281
第三节	避免电路设计不合理引起运算误差	287
第四节	电压形成回路的合理选择	294
第五节	提高集成运算放大器型保护可靠性的措施	303
第八章	集成电路继电器实例	310
第一节	电流、电压继电器	310
第二节	幅值阶跃增量继电器和突变量继电器	315
第三节	方向继电器	329
第四节	方向阻抗继电器	340
参考文献		347

第一章 运算放大器型继电保护的基 本电路及其数学运算依据

集成运算放大器，以下简称运算放大器，是一种高增益直流放大器。运算放大器外接各种不同的反馈回路，可构成各种不同的继电保护运算电路。为了便于读者理解和应用运算放大器构成的继电保护电路，本章将从讨论理想运算放大器的基本概念入手，进而导出由运算放大器构成的继电保护电路的基本形式及其运算方程，最后分析实际运算放大器与理想运算放大器间的差异及其所产生的误差。

第一节 运算放大器的基本特性

(一) 理想运算放大器的基本概念

运算放大器实质上是一种具有高放大倍数、高输入电阻、低输出电阻的高性能直流放大器。运算放大器一般用图1-1所示的三角符号表示。

如图1-1所示，运算放大器有两个输入端，一个输出端。两个输入端中，一个为同相输入端，另一个为反相输入端，分别以符号“+”和“-”表示。信号从同相端输入时，输出信号与输入信号同相位；信号从反相端输入时，输出信号与输入信号相位相反。

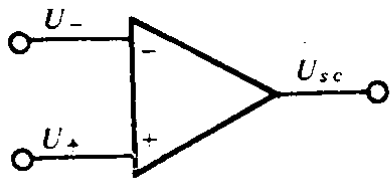


图 1-1 运算放大器的代表符号

为便于研究集成运算放大器的应用，引入理想运算放大器这一概念。具有以下主要特性的运算放大器称为理想运算

放大器。

(1) 运算放大器的开环增益(或称开环电压放大倍数) $K_o = \frac{U_o}{U_+ - U_-}$ 为无限大。实际运算放大器的 K_o 值都在80~120dB范围内,与其相应的直流开环电压放大倍数为 $10^4 \sim 10^6$,例如F007的 K_o 约为100dB, FC54的 K_o 约为110dB,因此可以认为 $K_o \approx \infty$ 。

(2) 输入电阻 r_{i1} 趋于无限大。实际上,运算放大器的开环输入电阻很大,例如FC54的差模输入电阻约为 $1\text{M}\Omega$ 。在一般应用中,信号源的输出电阻远小于 $1\text{M}\Omega$,因此可以近似地认为输入电阻为无限大。

(3) 输出电阻 r_{o1} 趋于无限小。一般集成运算放大器都采用互补射极跟随输出电路作为输出级,所以其输出阻抗在几十到几百欧姆范围内。个别运算放大器的输出电阻达千欧级,例如5G23集成运算放大器的输出电阻约为 $2\text{k}\Omega$ 。但是由于运算放大器一般工作在深度反馈条件下,闭环输出电阻要比上述数值小得多,通常可以假设运算放大器的输出电阻为零。

(4) 输入失调电压、输入基极电流及输入失调电流为零。

(二) 运算放大器的等效电路

根据上述运算放大器的理想特性,可导出理想运算放大器的两点重要特征:

(1) 流入运算放大器内部的输入电流为零。当在运算放大器的输入端加电压($U_+ - U_-$)时,其输入电流 I_{i1} 为

$$I_{i1} = \frac{U_+ - U_-}{r_{i1}}$$

而 $U_+ - U_- = U_{ob}$ 为有限值, 故当 $r_{ir} \rightarrow \infty$ 时, $I_{ir} \rightarrow 0$ 。

(2) 同相端电压等于反相端电压。当在输入端加上电压 $U_{ob} = U_+ - U_-$ 时, 输出端电压 U_{sc} 为

$$U_{sc} = K_o U_{ob} = K_o (U_+ - U_-)$$

即

$$U_+ - U_- = \frac{U_{sc}}{K_o}$$

而 U_{sc} 为有限值, 故当 $K_o \rightarrow \infty$ 时, $(U_+ - U_-) \rightarrow 0$, 或表示成 $U_+ = U_-$ 。

根据上述两条结论, 可用图1-2所示“零子”和“任意子”的理想元件来表征理想运算放大器的等效电路。所谓“零子”是指流经“零子”的电流和加在零子两端的电压都始终为零, 与外界电路条件无关; 所谓“任意子”是指流经“任意子”的电流和加在任意子两端电压都可为任意值, 具体数值完全由外界电路条件决定。由此可知, “零子”和“任意子”是一种理想化的电路元件, 零子的性能与理想运算放大器的输入特性完全相同, 故对运算放大器从输入端看

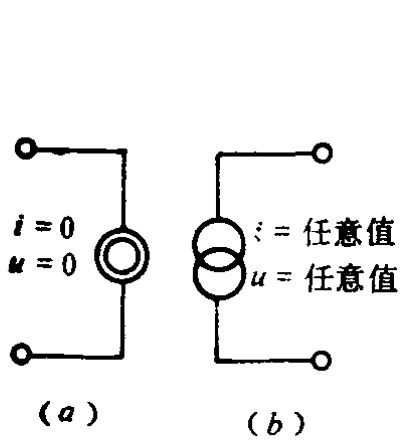


图 1-2 “零子”和“任意子”符号
(a)零子; (b)任意子

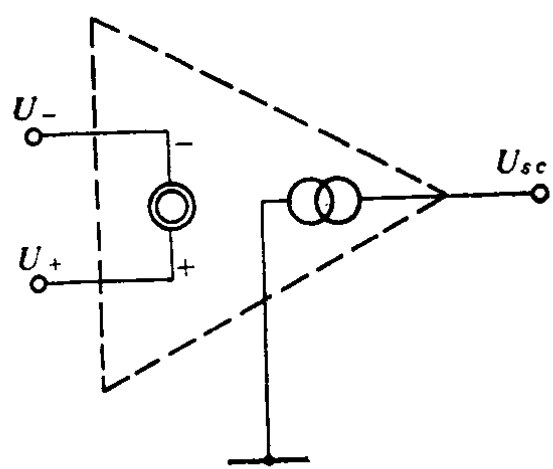


图 1-3 理想运算放大器的等效电路

进去，理想运算放大器相当于一个“零子”，而从输出端看进去，则相当于一个“任意子”。因此理想运算放大器的等效电路可用图1-3表示。利用这种等效电路，能简便地推导出由运算放大器构成的继电保护电路的基本形式及其运算方程。

第二节 继电保护基本运算电路及其运算方程

以运算放大器为主体，外接各种不同的反馈电路，可以构成继电保护电路中所需要的各种运算电路，例如加法、减法、微分及积分运算等等运算电路。为了使读者易于掌握这些电路的基本原理，进而能拟制其他所需要的各种电路，本节提出了继电保护基本运算电路及其运算方程这一概念。

继电保护基本运算电路示于图1-4。

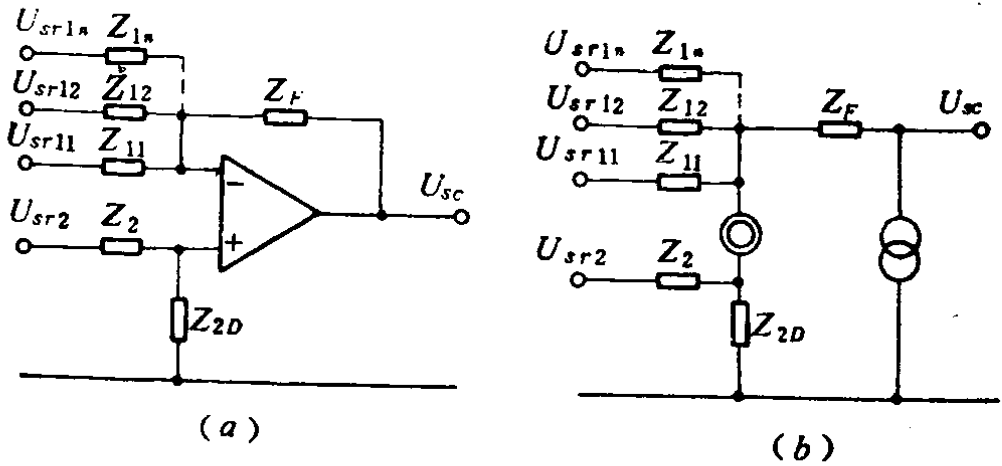


图 1-4 继电保护基本运算电路
(a)实际电路；(b)等效电路

图1-4(a)中， $U_{sr11} \sim U_{sr1n}$ 为输入到反相端的信号； U_{sr2} 为输入到同相端的信号。假设所有信号源内阻均等于零，如

果不等于零，也可归算到相应输入阻抗 Z_{11} 、 Z_{12} 、 $\dots$ 、 Z_{1n} 及 Z_2 中。根据图1-3所示理想运算放大器的等效电路，可将图1-4(a)简化成图1-4(b)所示等效电路。

对图1-4(b)，根据重叠原理可分别求出 U_+ 、 U_- 电压为

$$\begin{aligned} U_- &= \frac{1}{Z_F} (Z_F \parallel Z_{11} \parallel Z_{12} \cdots \parallel Z_{1n}) U_{sc} \\ &+ \frac{1}{Z_{11}} (Z_{11} \parallel Z_{12} \cdots \parallel Z_{1n} \parallel Z_F) U_{sr11} \\ &+ \frac{1}{Z_{12}} (Z_{11} \parallel Z_{12} \parallel \cdots \parallel Z_{1n} \parallel Z_F) U_{sr12} \\ &+ \cdots + \frac{1}{Z_{1n}} (Z_{11} \parallel Z_{12} \cdots \parallel Z_{1n} \parallel Z_F) U_{sr1n} \\ U_+ &= \frac{Z_{2D}}{Z_2 + Z_{2D}} U_{sr2} \end{aligned}$$

因 $U_- = U_+$ ，故将上面两式代入加以整理得

$$\begin{aligned} U_{sc} &= - \left[\left(\frac{Z_F}{Z_{11}} U_{sr11} + \frac{Z_F}{Z_{12}} U_{sr12} + \cdots + \frac{Z_F}{Z_{1n}} U_{sr1n} \right) \right. \\ &\quad \left. - \left(\frac{Z_F}{\mu} \times \frac{Z_{2D}}{Z_2 + Z_{2D}} \right) U_{sr2} \right] \\ &= - \left(\sum_{i=1}^n \frac{Z_F}{Z_{1i}} U_{sr1i} - \frac{Z_F}{\mu} \frac{Z_{2D}}{Z_2 + Z_{2D}} U_{sr2} \right) \end{aligned} \quad (1-1)$$

式中 $\mu = Z_F \parallel Z_{11} \parallel Z_{12} \cdots \parallel Z_{1n}$ 。

在各种继电保护运算电路中， Z_{11} 、 Z_{12} 、 $\dots$ 、 Z_{1n} 、 Z_F 、 Z_2 和 Z_{2D} ，不一定是纯电阻，根据需要，它们可能是容抗，甚至有可能是一个复杂的网络。因此为了便于进行分析，可将式(1-1)用拉氏变换表示成下面的形式：

$$U_{sc}(p) = - \left[\sum_{i=1}^n \frac{Z_F(p)}{Z_{1i}(p)} U_{sr1i}(p) - \frac{Z_F(p)}{\mu(p)} \frac{Z_{2D}}{Z_2 + Z_{2D}} U_{sr2} \right]$$

$$\times \frac{Z_{2D}(p)}{Z_2(p) + Z_{2D}(p)} U_{r2}(p) \quad (1-2)$$

式中, $U_{sc}(p)$ 和 $U_{sr}(p)$ 分别是运算放大器的输出信号 $U_{sc}(t)$ 和输入信号 $U_{sr}(t)$ 的拉氏变换, 即

$$U_{sc}(p) = \int_0^{\infty} U_{sc}(t) e^{-pt} dt$$

$$U_{sr}(p) = \int_0^{\infty} U_{sr}(t) e^{-pt} dt$$

式 (1-2) 所示拉氏变换方程中, 电阻、电容和电感分别以 R 、 $\frac{1}{Cp}$ 、和 Lp 表示。即电路中, 电阻 R 的 $Z(p) = R$; 电容 C 的 $Z(p) = \frac{1}{Cp}$, 电感 L 的 $Z(p) = Lp$ 。因此, 根据图 1-4 (a) 所示基本运算电路, 采用实数无源元件组成所需要的继电保护电路时, 可用式 (1-1) 进行分析计算; 采用与频率有关的复数无源元件组成所需要的电路时, 用式 (1-2) 进行计算和分析是很方便的。式 (1-1) 和式 (1-2) 就是继电保护电路的基本运算方程, 根据图 1-4 (a) 和式 (1-1) 及式 (1-2) 可以拟制出各种所需要的继电保护运算电路, 下面进行简要介绍。

一、反相运算电路

在运算放大器的各种运算电路中, 如果同相输入端接 0 V 电位, 信号仅从反相端引入时, 便属于反相运算电路。这种运算电路在继电保护电路中使用得非常多。

令 $U_{r2} = 0$, 根据图 1-4 (a) 和式 (1-2), 可分别得出图 1-5 所示反相运算电路及式 (1-3) 所示反相运算方程

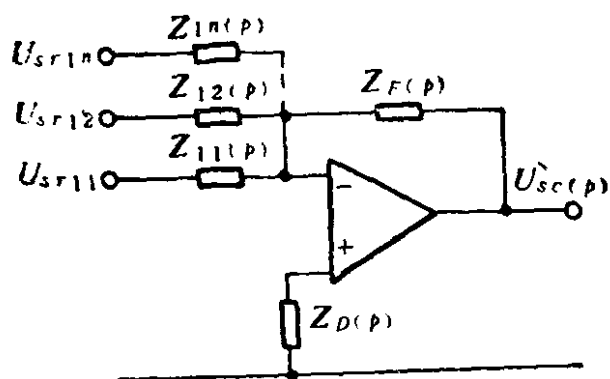


图 1-5 反相运算电路

$$U_{sc}(p) = - \left[\sum_{i=1}^n \frac{Z_F(p)}{Z_{1i}(p)} U_{sr1i}(p) \right] \quad (1-3)$$

对稳态情况，可用 $j\omega$ 代替式 (1-3) 中 p ，则式 (1-3) 变为

$$U_{sc}(j\omega) = - \left[\sum_{i=1}^n \frac{Z_F(j\omega)}{Z_{1i}(j\omega)} U_{sr1i}(j\omega) \right] \quad (1-4)$$

从式 (1-4) 可看出，在运算放大器具有理想特性时，图 1-5 所示反相运算电路的输出电压是输入电压的代数相加，各相加项的系数仅与外接电路阻抗有关，而与运算放大器本身参数无关。适当选择外接电路的阻抗，就可得到任意所需要的运算电路。由于式 (1-4) 等式右边为负号，因此一般将这种电路称为反相运算电路。反相运算电路体现各输入电流在反相端相加，故一般将反相端叫“相加点”或称为“ Σ ”点。同时，根据“零子”的概念（即反相端电压等于同相端电压），反相端电压应接近于 0 V，于是又可将反相端称之为虚地点。由于反相端为虚地点，故对每个输入信号来说，反相运算电路的输入阻抗分别为输入电路的阻抗 $Z_{1i}(p)$ ，

在图1-5中, 补偿阻抗 $Z_D(p)$, 用来保证运算放大器的外接电路对称, 使从反相输入端和从同相输入端向外部看到的等效阻抗相等, 因此补偿阻抗 $Z_D(p)$ 应按下式选择

$Z_D(p) = Z_{11}(p) \parallel Z_{12}(p) \parallel \cdots \parallel Z_{1n}(p) = Z_F(p)$
或表示成下式

$$Z_D(p) = \frac{1}{\frac{1}{Z_F(p)} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_{1i}(p)}} \quad (1-5)$$

利用式(1-3)、式(1-4)和图1-5可以构成继电保护电路中所需要的各种运算电路, 下面举几种例子。

(一) 反相加法运算电路

当图1-5中的输入回路及反馈回路元件都是纯电阻时, 可构成反相加法运算电路, 其输出电压为

$$U_{sc} = - \sum_{i=1}^n \frac{R_F}{R_{1i}} U_{r1i} \quad (1-6)$$

如令 $\frac{R_F}{R_{1i}} = k_{1i}$, 则式(1-6)可写成

$$U_{sc} = - \sum_{i=1}^n k_{1i} U_{r1i} \quad (1-7)$$

式中 k_{1i} ——对输入电压 U_{r1i} 的比例放大系数, 为正实数。

反相加法运算电路又称全加运算电路, 这种电路在继电保护电压形成回路中用得较多。例如令式(1-6)中 $i=3$ 、 $\frac{R_F}{R_{11}} = \frac{R_F}{R_{12}} = \frac{R_F}{R_{13}} = \frac{R_F}{R_1}$ 、 $\dot{U}_{r11} = \dot{U}_A = \dot{I}_A R$ 、 $\dot{U}_{r12} = \dot{U}_B = \dot{I}_B R$ 、 $\dot{U}_{r13} = \dot{U}_C = \dot{I}_C R$, 即可形成图1-6所示零序电流滤序器, 其运算方程为

$$\dot{U}_{sc} = - \frac{R_F}{R_1} (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C)$$

$$= -\frac{RR_F}{R_1} (\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C) = -\frac{3R_F}{R_1} \dot{I}_0 R$$

式中 R —— 每相中间电流变换器二次侧所接电阻。

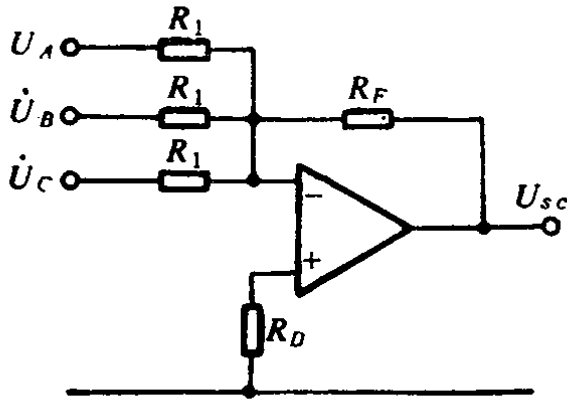


图 1-6 零序电流滤序器

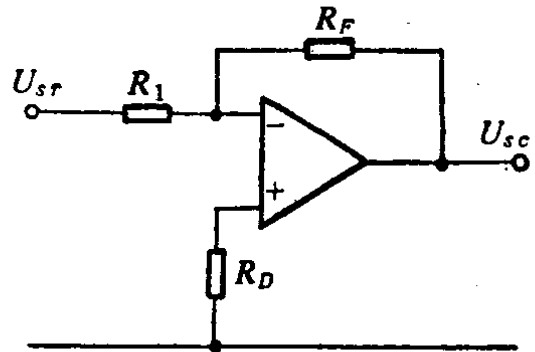


图 1-7 反相放大运算电路

由于电阻的精度和稳定性很高，因此用这种电路构成的零序电流滤序器的精度和稳定性也很高。

(二) 反相放大运算电路

对图 1-5 及式(1-3)，令 $n=1$ 、 $Z_{1i}(p)=R_1$ 、 $Z_F(p)=R_F$ 、 $U_{sr}(p)=U_{sr}$ ，即可构成图 1-7 所示反相放大运算电路及式(1-8)所示运算方程

$$U_{sc} = -\frac{R_F}{R_1} U_{sr} \quad (1-8)$$

由式(1-8)可知，输出电压是输入电压的 $\frac{R_F}{R_1}$ 倍，相位相反，故称反相放大运算电路。式(1-8)也可写成下面的形式

$$K_F = \frac{U_{sc}}{U_{sr}} = -\frac{R_F}{R_1} \quad (1-9)$$

K_F 叫反相放大运算电路的理想闭环增益。从上式可知，闭环增益仅与外部电路的电阻 R_1 和 R_F 有关，而与运算放大

器本身参数无关。选用不同的 R_F/R_1 比值,就可得到不同的增益 K_F 。如电阻精度和稳定性很高,则闭环增益 K_F 的精度和稳定性就很高。

考虑到反相端为“虚地”,其电位接近于0V,所以反相放大运算电路的输入电阻 r_{ir} 约等于输入回路电阻 R_1 ,即

$$r_{ir} = \frac{U_{ir}}{I_1} \approx R_1 \quad (1-10)$$

如取 $R_1 = R_F$,则由式(1-8)得

$$U_{sc} = -U_{ir}$$

即输出电压与输入电压的幅值相等,相位相反,此时电路变成了反相运算电路。

应指出,为使电路对称,图1-7所示反相放大运算电路中补偿电阻 R_D 应按下式选择

$$R_D = R_1 \parallel R_F$$

(三) 信号综合运算电路

对图1-5及式(1-3),取 $n=2$, $Z_{11}(p) = R_1$, $Z_{12}(p) = R_1 + \frac{1}{pC}$, $Z_F(p) = R_F$,则可得到图1-8所示信号综合运算电路及式(1-11)所示信号综合运算电路的运算方程。

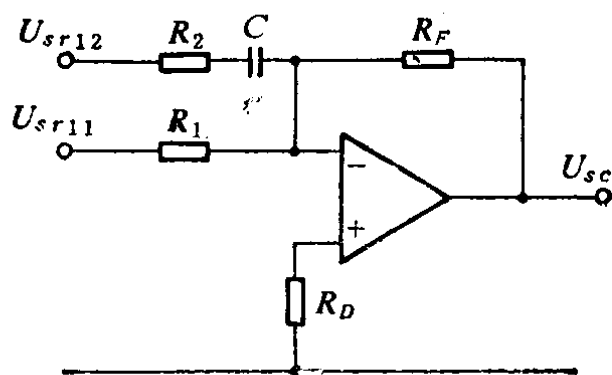


图 1-8 信号综合运算电路

$$U_{sc}(p) = - \left[\frac{R_F}{R_1} U_{sr1}(p) + \frac{pCR_F}{1+R_2pC} U_{sr12}(p) \right] \quad (1-11)$$

上式也可写成

$$U_{sc}(p) = - [K_1(p)U_{sr1}(p) + K_2(p)U_{sr12}(p)]$$

$$\text{式中 } K_1(p) = \frac{R_F}{R_1}, \quad K_2(p) = \frac{pCR_F}{1+R_2pC} \quad (1-12)$$

如果输入信号为正弦电压，则可用 $Z_{12}(j\omega)$ 代替 $Z_{12}(p)$ ，即用 $j\omega$ 代替 $Z_{12}(p)$ 中 p ，于是(1-11)式可写成

$$U_{sc} = - \left[\frac{R_F}{R_1} U_{sr1} + \frac{R_F}{R_2} \left(\frac{1}{1 - j \frac{1}{\omega CR_2}} \right) U_{sr12} \right] \quad (1-13)$$

从式(1-13)可以看出，信号综合运算电路可以将任一输入信号的相位转移一定的角度后，再按给定比例与其他信号进行几何相加，输出信号则与输入信号的几何和成正比，但相位相反。信号综合运算电路可用于继电保护的电压形成回路中。

(四) 积分运算电路

在图1-5及式(1-3)中，如令 $n=1$ ， $U_{sr1}=U_{sr}$ ， $Z_{11}(p)=R$ ， $Z_F(p)=\frac{1}{pC}$ ，则

$$U_{sc}(p) = - \frac{1}{RCp} U_{sr}(p) \quad (1-14)$$

上式的逆变换为

$$U_{sc}(t) = - \frac{1}{RC} \int_0^t U_{sr}(t) dt \quad (1-15)$$

式(1-15)表明，图1-9所示积分电路的输出电压是输入电

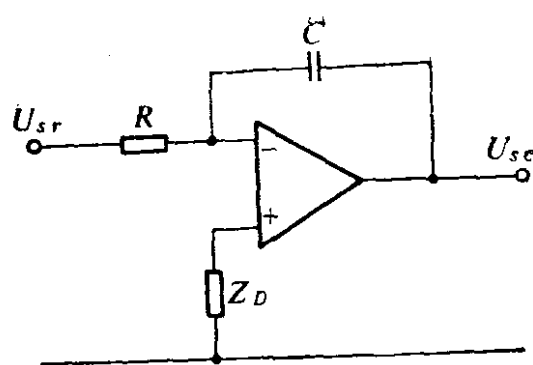


图 1-9 积分运算电路

压的积分。

在图1-9所示积分运算电路中，令 $RC = \tau$ ，习惯上称 τ 为积分时间常数，此时式 (1-15) 可表示为

$$U_{sc}(t) = -\frac{1}{\tau} \int_0^t U_{sr}(t) dt \quad (1-16)$$

积分运算电路的输出—输入关系也可表示成传递函数的形式，即

$$K_F(p) = \frac{U_{sc}(p)}{U_{sr}(p)} = -\frac{1}{RCp} \quad (1-17)$$

对于稳态特性，可以用 $j\omega$ 代替式 (1-17) 中 p ，即

$$K_F(j\omega) = -\frac{1}{j\omega RC} = j \frac{1}{\omega/\omega_0} \quad (1-18)$$

上式为复数，它的模为图1-9所示积分电路的幅频特性

$$K_F(\omega) = |K_F(j\omega)| = \frac{1}{\omega/\omega_0}$$

它的相角则为图1-9所示积分电路的相频特性

$$\varphi(\omega) = \angle K_F(j\omega) = 90^\circ$$

从上式可知，理想积分运算电路的相频特性为一常数，即与频率大小无关。

图1-9所示积分运算电路的输入电阻约为 R 。为使积分

运算电路的外接电路对称，同相端一般应经电阻 R 与电容 C 的并联回路接到 $0V$ 电位。这样，偏置电流产生的影响可以得到全部补偿，但在实际电路中，为了简化电路，一般可取 $R_D = R$ ，这时，偏置电流的影响也可大大降低。

设输入信号是直流电压（或称阶跃电压） E ，即 $U_{sr}(p) = \frac{E}{p}$ 时，则代入式（1-14）后的逆变换为

$$U_{sc}(t) = -\frac{E}{RC} t \quad (1-19)$$

即输出电压的相位与输入电压相反，而幅值随时间呈线性增长。图1-10(a)为积分运算电路在输入阶跃电压时的输出电压波形。显然，用图1-9所示积分运算电路可构成继电保护电路中的时间元件。

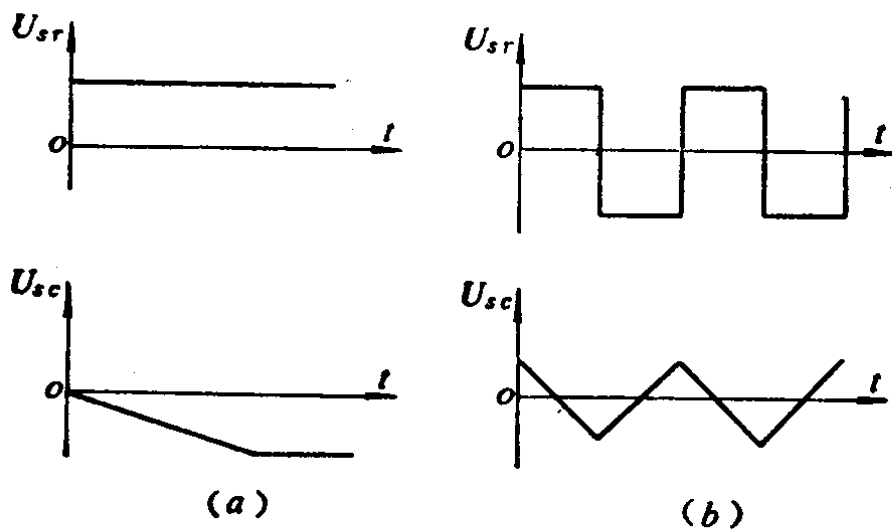


图 1-10 积分运算电路的输出特性
(a) 输入阶跃电压；(b) 输入方波电压

当输入信号为方波电压时，则输出电压波形为三角波，如图1-10(b)所示。三角波的波形和正方波宽度与负方波宽度的比值有关。