

高等学校试用教材

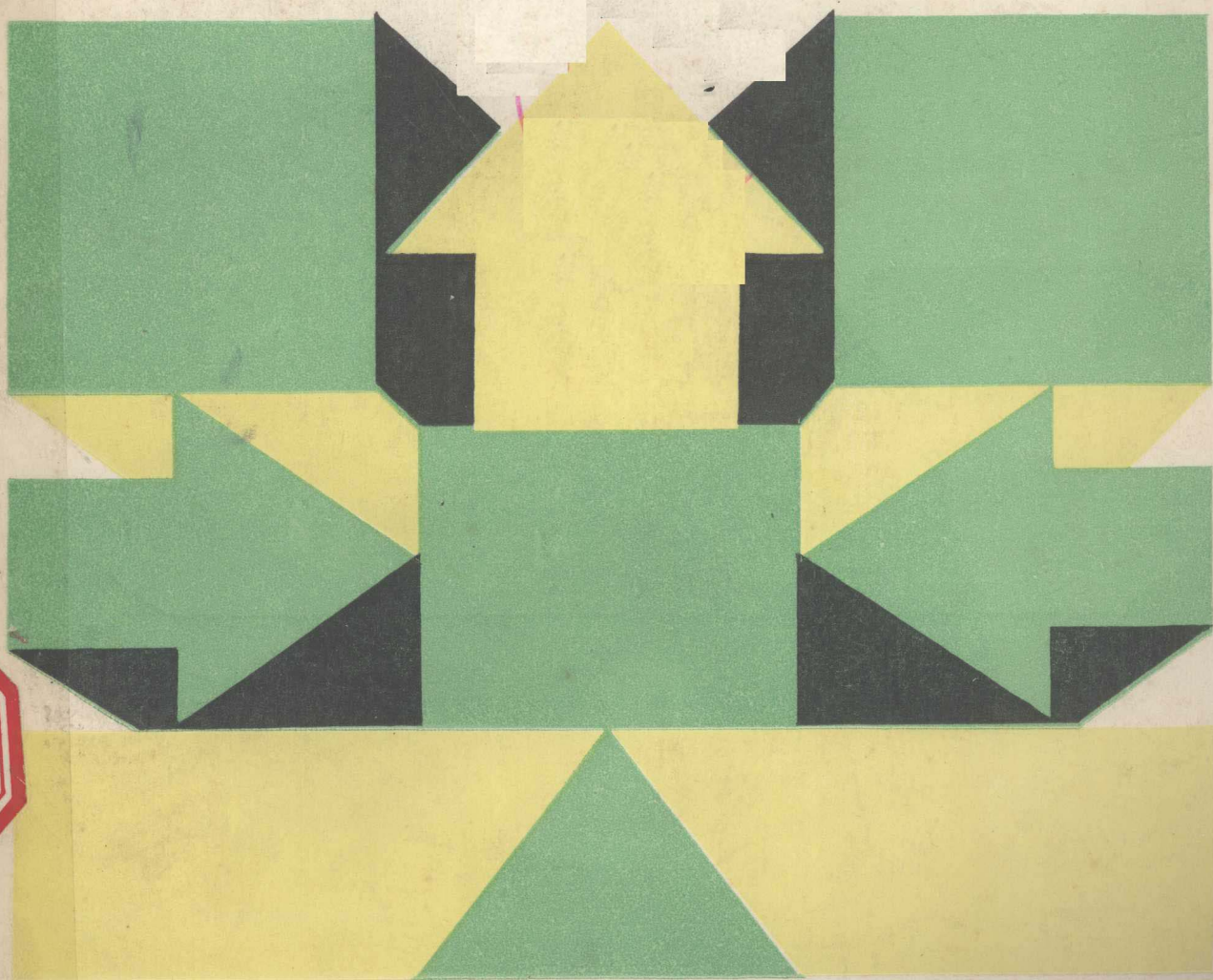
# 电子线路原理

器件、电路和系统

下 册

彭龙商 邓亚美 合编

高等教育出版社



高等学校试用教材

# 电子线路原理

器件、电路和系统

下 册

四川大学无线电系 彭龙商 邓亚美 合编

高等教育出版社

## 内 容 提 要

本书是根据高等学校理科无线电教材编审委员会 1983 年 11 月在成都会议上制定的无线电电子学和无线电物理专业的电子线路教学大纲,并参照理科和工科其他专业电子线路教学大纲编写而成。

本书为《电子线路原理》下册,内容包括:集成运算放大器的应用、正弦波振荡器和高频放大器、非线性变换及电路、逻辑代数、集成逻辑门电路、集成触发器、数字部件、半导体存储器、微处理器与微型计算机和脉冲波形的产生与整形。

可以作为理科无线电、计算机、自动控制及物理等专业电子线路课的教材或参考书。以及供从事电子技术及实验物理的工程技术人员参考。

责任编辑 郭玉凤

(京)112号

高等学校试用教材

电子线路原理

器件、电路和系统

下 册

四川大学无线电系 彭龙商 邓亚美 合编

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

开本 787×1092 1/16 印张 20.5 字数 467,000

1990年8月第1版 1992年8月第1次印刷

印数 0001—1895

ISBN 7-04-002945-6/TN·137

定价 6.15 元

# 目 录

第八章 集成运算放大器的应用 .....	1	三、振荡频率的确定 .....	61
第一节 集成运算放大器的闭环特性 .....	1	第二节 $LC$ 振荡器 .....	62
一、理想运放的零口-不定口模型 .....	2	一、互感耦合 $LC$ 振荡器 .....	62
二、反相输入方式 .....	3	二、三点式 $LC$ 振荡器 .....	66
三、同相输入方式 .....	7	三、 $LC$ 振荡器的频率稳定和石英晶体振荡器 .....	68
第二节 模拟运算电路 .....	9	第三节 $RC$ 振荡器 .....	71
一、比例器 .....	9	一、文氏电桥振荡器 .....	71
二、加法器 .....	11	二、 $RC$ 相移振荡器 .....	75
三、减法器 .....	13	三、集成运放 $RC$ 振荡器 .....	77
四、积分器 .....	15	第四节 高频放大器 .....	80
五、微分器 .....	17	一、单级单调谐放大器 .....	81
六、对数与反对数放大器 .....	19	二、多级同步单调谐放大器 .....	84
七、乘法器和除法器 .....	20	三、多级参差调谐放大器 .....	87
第三节 电压-电流和电流-电压变换 .....	22	习题 .....	89
一、电压-电流变换器 .....	22	第十章 非线性变换及电路 .....	95
二、电流-电压变换器 .....	25	第一节 非线性元件的近似表示法 .....	96
第四节 非线性变换电路 .....	26	一、幂级数近似表示法 .....	96
一、精密二极管整流电路 .....	26	二、折线近似法 .....	97
二、绝对值电路(全波整流电路) .....	28	第二节 调幅原理和电路 .....	101
三、限幅电路 .....	29	一、调幅波的基本性质 .....	101
四、比较器 .....	32	二、调幅电路 .....	104
第五节 直流稳压电源 .....	37	第三节 检波原理和电路 .....	109
一、利用集成运放构成的稳压电路 .....	37	一、二极管平方律检波器 .....	110
二、集成稳压电源 .....	38	二、二极管峰值检波器 .....	112
三、集成稳压电源常用接法 .....	41	第四节 调频和鉴频 .....	117
第六节 有源滤波器 .....	41	一、调频波的基本性质 .....	117
一、滤波器的概念及主要参数 .....	42	二、调频电路 .....	119
二、二阶无源 $RC$ 滤波网络 .....	43	三、调频波的解调——鉴频 .....	121
三、常用二阶有源滤波器 .....	45	习题 .....	127
习题 .....	48	第十一章 逻辑代数 .....	131
第九章 正弦波振荡器和高频放大器 .....	60	第一节 计数制简介 .....	131
第一节 正弦波振荡器的自激条件 .....	60	一、十进制 .....	131
一、反馈振荡器的自激条件 .....	60		
二、振荡幅度的建立和稳定 .....	61		

二、二进制 .....	132	第十三章 集成触发器 .....	187
三、八进制 .....	133	第一节 基本 RS 触发器 .....	187
四、十六进制 .....	133	一、基本 RS 触发器结构 .....	187
五、二十进制 .....	134	二、逻辑功能 .....	188
第二节 逻辑代数中的基本逻辑关系	135	三、逻辑功能的描述方式 .....	189
一、或逻辑 .....	136	四、或非门组成的基本 RS 触发器 .....	191
二、与逻辑 .....	137	第二节 具有时钟脉冲控制的 RS 触发器 .....	192
三、非逻辑 .....	138	一、同步 RS 触发器 .....	192
四、或非逻辑 .....	139	二、触发器的空翻现象 .....	194
五、与非逻辑 .....	139	三、主从 RS 触发器 .....	195
六、异或逻辑 .....	140	第三节 主从 JK 触发器 .....	196
第三节 逻辑代数的运算规则 .....	141	一、主从 JK 触发器结构 .....	196
一、逻辑代数的基本运算法则 .....	141	二、逻辑功能 .....	196
二、逻辑代数的基本定理 .....	142	三、逻辑功能的描述 .....	198
三、三个基本运算规则 .....	143	四、集成主从 JK 触发器(T1072JK 触发器) .....	199
四、逻辑代数中的常用公式 .....	144	第四节 维持阻塞型 D 触发器 .....	200
五、逻辑函数的最小项表达式 .....	145	一、维持阻塞型 D 触发器结构 .....	200
六、由真值表写出逻辑函数的最小项表达式 .....	145	二、维持阻塞型 D 触发器工作原理 .....	201
第四节 逻辑表达式的化简 .....	146	三、逻辑功能的描述 .....	201
一、代数法 .....	147	四、集成维持阻塞 D 触发器(T076D 触发器) .....	203
二、卡诺图法 .....	148	第五节 T 触发器和 T' 触发器 .....	203
三、各种基本逻辑之间的关系 .....	152	一、T 触发器 .....	203
习题 .....	153	二、T' 触发器 .....	204
第十二章 集成逻辑门电路 .....	158	三、各类触发器之间的相互转换 .....	205
第一节 晶体管-晶体管逻辑 (TTL) 与非门 .....	158	第六节 MOS 触发器 .....	206
一、简单的 TTL 与非门 .....	158	一、基本 RS 触发器 .....	206
二、TTL 与非门 .....	159	二、同步 RS 触发器 .....	207
三、TTL 与非门的电压传输特性 .....	161	三、主从 JK 触发器 .....	207
四、TTL 与非门的参数 .....	162	习题 .....	208
五、其他类型的 TTL 门电路 .....	166	第十四章 数字部件 .....	213
第二节 MOS 集成门 .....	169	第一节 组合逻辑电路 .....	213
一、MOS 反相器 .....	170	一、编码器 .....	213
二、MOS 门电路 .....	173	二、译码器 .....	216
三、MOS 门控管 .....	176	三、码转换器 .....	220
第三节 动态 MOS 电路 .....	177	四、二进制加法器 .....	223
一、动态 MOS 反相器 .....	177	第二节 时序逻辑电路 .....	226
二、动态 MOS 逻辑门 .....	179	一、寄存器 .....	227
习题 .....	181		

二、移位寄存器 .....	229	三、微处理器的功能 .....	274
三、二进制计数器 .....	231	四、微处理器的指令系统 .....	275
四、BCD 计数器 .....	236	五、微处理器的结构 .....	278
五、中规模集成计数器 .....	240	第二节 微处理器中指令的执行过程	280
第三节 数字显示电路 .....	242	一、指令执行的一般过程 .....	280
一、数码显示器 .....	242	二、几条指令的具体执行过程 .....	281
二、8421BCD 七段译码器 .....	243	第三节 微型计算机 .....	285
三、LED 数码管数字显示电路 .....	246	一、系统总线及其连接 .....	286
第四节 数/模(D/A)和模/数(A/D)转换		二、微型计算机的输入、输出与接口 .....	287
电路 .....	246	习题 .....	289
一、数/模转换电路(D/A 转换器) .....	247	第十七章 脉冲波形的产生与整形 .....	291
二、模/数转换电路(A/D 转换器) .....	248	第一节 脉冲及脉冲电路中的开关元件	
习题 .....	251	.....	291
第十五章 半导体存储器 .....	256	一、脉冲和脉冲参数 .....	291
第一节 读/写存储器(RAM) .....	256	二、脉冲电路中的开关元件 .....	292
一、RAM 的结构 .....	256	第二节 集成门构成的脉冲电路 .....	294
二、地址译码器 .....	257	一、脉冲整形 .....	295
三、存储单元 .....	259	二、脉冲延迟电路 .....	295
四、实际的读/写存储器 .....	260	三、脉冲产生电路——环形多谐振荡器 .....	296
第二节 只读存储器(ROM) .....	263	四、单稳态电路 .....	300
一、MOS-ROM .....	263	五、施密特电路 .....	303
二、其他类型的 ROM .....	265	第三节 由集成运放构成的脉冲电路	304
第三节 可编程序逻辑阵列(PLA) .....	267	一、方波发生器 .....	304
一、PLA 式的全加器 .....	268	二、三角波发生器 .....	307
二、PLA 式的三位循环码至二进制码的转		第四节 集成定时器构成的脉冲电路	309
换器 .....	269	一、集成定时器 .....	309
三、PLA 式的同步 8421BCD 加法计数器及		二、多谐振荡器 .....	311
七段译码器 .....	270	三、单稳态电路 .....	312
习题 .....	271	四、施密特电路 .....	313
第十六章 微处理器与微型计算机 .....	273	习题 .....	315
第一节 微处理器 .....	273	部分习题答案 .....	317
一、微处理器和微型计算机的结构 .....	273	参考书目 .....	320
二、微型计算机的工作过程 .....	274		

## 第八章 集成运算放大器的应用

近十余年来, 半导体集成技术有了飞速的进展, 随着集成运算放大器产品数量的大幅度增加、质量的显著提高、品种的丰富多样以及售价的不断降低, 集成运算放大器已经在许多领域逐步取代了分立元件电路, 成为目前普遍流行的通用模拟集成电路。即利用集成运算放大器配合适当的外部反馈电路, 可以实现各种模拟信号的变换、产生、放大以及模拟信号与数字信号之间的相互转换。全面地介绍集成运放的各种应用不是本书力所能及的任务, 这里仅就它最主要的几个方面做一些概略性的分析和讨论。

### 第一节 集成运算放大器的闭环特性

集成运算放大器(简称集成运放)在实际运用时, 经常需要外接反馈电路, 以构成各种不同功能的应用电路, 根据反馈电路的接法和输入信号的不同方式, 可分为反相输入和同相输入两种形式; 根据反馈的极性又分为负反馈和正反馈两类电路。

在分析集成运放的各种应用电路时, 应当采用怎样的分析方法呢? 首先, 在大多数情况下, 可以把集成运放当作理想运放来处理, 即当作一个增益为无限大、输入阻抗为无限大、输出阻抗为零、绝对对称且无漂移的放大器。可以证明, 对于目前市售的大多数集成运放来说, 由此而引起的误差一般在百分之一以下, 低于普通元件的误差( $\pm 5\%$ )。

其次, 在分析具体电路时, 还必须弄清楚集成运放是工作在线性放大区呢, 还是工作在线性区域。判别的方法主要根据反馈的极性, 若为负反馈, 则闭环增益为有限值, 一般工作在线性区。若为正反馈或开环运用, 则闭环或开环增益极大, 在任何大小的输入信号作用下, 输出电压都将进入正、负极限值  $+V_o$  或  $-V_o$ 。

由于集成运放的工作状态不同, 能够采用的分析方法也不一样: 在线性区内, 采用理想运放的零口-不定口模型; 而在非线性区内, 由于输出电压进入限幅状态, 导致  $v_o \neq A_o v_i$ , 电压增益已失去确定的意义, 因此不能采用零口-不定口模型, 而应当把集成运放当作一个开关元件

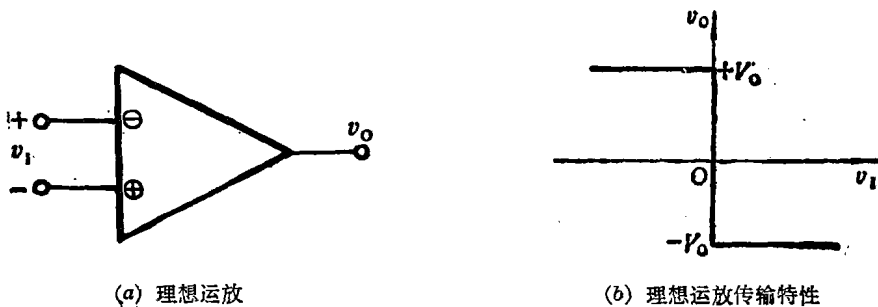


图 8-1 理想运放的传输特性

看待。即  $v_1 \geq 0$  时  $v_0 = -V_0$ ;  $v_1 < 0$  时  $v_0 = +V_0$ 。输出电压与输入电压之间关系用图 8-1(b) 所示的电压传输特性曲线表示。

本节先讨论线性运用状态下集成运放的传输特性。关于集成运放的非线性运用,将在第四节中介绍。

### 一、理想运放的零口-不定口模型

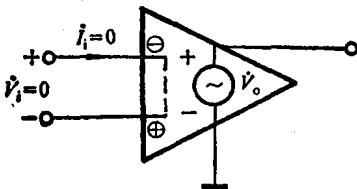
前已指出,由于目前一般的集成运放均具有高增益、高输入阻抗、低输出阻抗及低零点漂移等特性,因此为了简化集成运放的分析设计,根据上述特征,提出了理想运算放大器的模型。可以证明,理想运放模型所引起的误差很小,本书将全部用理想运放模型进行讨论。

理想运放的主要近似条件如下:

- (1) 开环电压增益  $A_0 \approx \infty$ 。
- (2) 开环差分输入电阻  $r_i \approx \infty$ 。
- (3) 开环输出电阻  $r_o \approx 0$ 。
- (4) 通频带  $BW \approx \infty$ 。
- (5) 当  $\dot{V}_1 = 0$  时,  $\dot{V}_o = 0$ 。

根据上述的理想运放特征,可得到下面两条基本性质:

(1) 根据  $r_i \approx \infty$ , 因此输入电流  $\dot{I}_1 \approx 0$ ; 再根据  $A_0 \approx \infty$ , 只要输出电压为有限值(在线性运用条件下,  $\dot{V}_o$  一定为有限值), 输入电压  $\dot{V}_1 \approx 0$ 。即理想运放的输入端具有  $\dot{V}_1 \approx 0$  及  $\dot{I}_1 \approx 0$  的特征, 这一特征也称为虚短或虚断现象。在电路中用虚线表示, 输入端口被称为零口。



值由外电路根据克希霍夫电压定律决定, 这样一个任意电压源称为不定口(或称为非口), 在电路中仍用电压源符号表示。

综合上述两方面性质, 理想运放可用零口和不定口构成的等效模型表示, 如图 8-2 所示, 利用此模型可以很方便地计算集成运放的各种典型电路。

[例题 8-1] 试计算图 8-3(a) 所示理想运放电路的输出电压  $\dot{V}_o$ 。

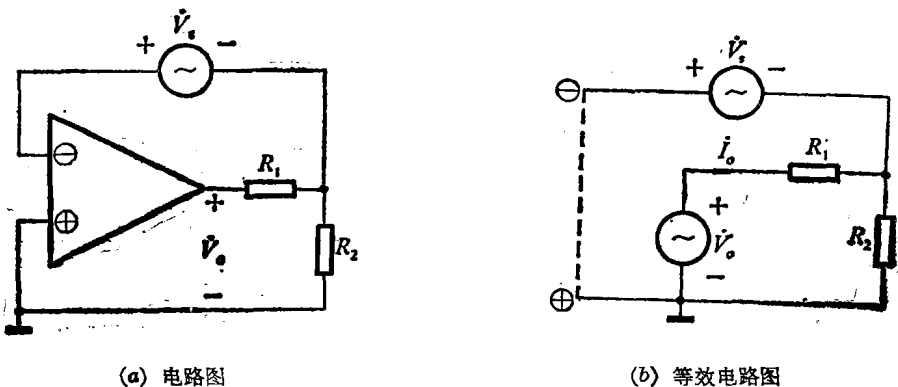


图 8-3 [例题 8-1] 电路图及等效电路图



【解】 根据理想运放的等效模型,可将图 8-3(a)所示电路等效如图(b)所示,由图中可得

$$\dot{V}_o = \dot{I}_o(R_1 + R_2)$$

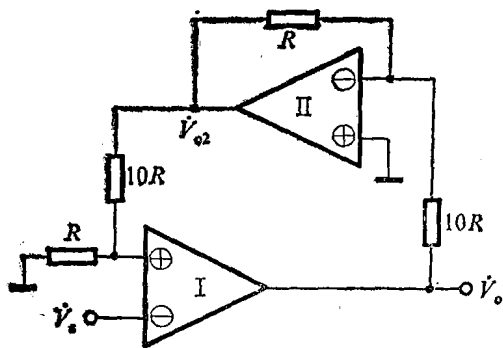
及

$$\dot{V}_s = -\dot{I}_o R_2$$

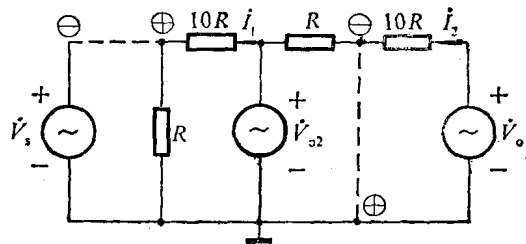
由第二式得  $\dot{I}_o = -\frac{\dot{V}_s}{R_2}$ , 代入第一式, 得

$$\dot{V}_o = -\frac{\dot{V}_s}{R_2} (R_1 + R_2) = -\left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \dot{V}_s$$

【例题 8-2】 试计算图 8-4(a)所示理想运放电路的输出电压  $\dot{V}_o$ 。



(a) 电路图



(b) 等效电路图

图 8-4 [例题 8-2] 电路图及等效电路图

【解】 根据理想运放的等效模型,可得等效电路如图(b)所示,由图中先求出  $\dot{V}_{o2}$  与  $\dot{V}_s$  的关系,根据

$$\dot{V}_{o2} = \dot{I}_1(10R + R) = 11R\dot{I}_1$$

及

$$\dot{V}_s = \dot{I}_1 R$$

由第二式解出  $\dot{I}_1 = \frac{\dot{V}_s}{R}$ , 代入第一式, 得

$$\dot{V}_{o2} = 11\dot{V}_s$$

再求出  $\dot{V}_o$  与  $\dot{V}_{o2}$  以及  $\dot{V}_s$  的关系, 根据

$$\dot{V}_o = 10R\dot{I}_2$$

及

$$\dot{V}_{o2} = -R\dot{I}_2$$

由第二式解出  $\dot{I}_2 = -\frac{\dot{V}_{o2}}{R}$ , 代入第一式, 得

$$\dot{V}_o = -10\dot{V}_{o2} = -110\dot{V}_s$$

## 二、反相输入方式

运算放大器反相输入运用的原理电路如图 8-5 所示。它的同相输入端直接接地, 输入信号通过电阻  $R_s$  加至反相输入端。输出信号通过反馈电阻  $R_f$  回送到  $\Sigma$ -点(称为相加点), 构成电压并联负反馈电路。下面分别讨论理想运放和实际运放的传输特性。

### (1) 理想运放的传输特性

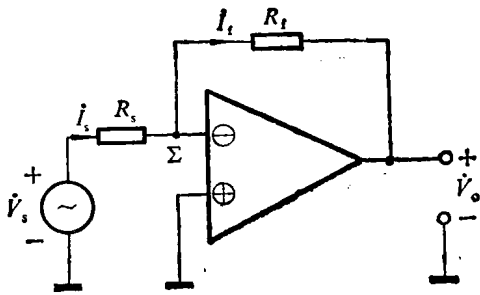


图 8-5 反相输入原理电路图

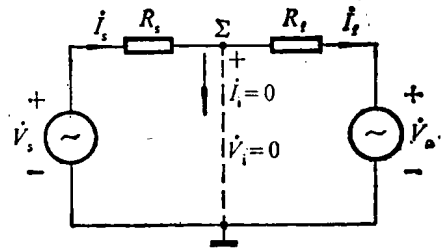


图 8-6 反相输入等效电路图

运用理想运放的线性等效模型——零口和不定口，可将反相输入电路等效成图 8-6 所示的等效电路图，由图可得：

$$\begin{aligned} \dot{V}_s &= \dot{I}_s R_s \\ \dot{V}_o &= -\dot{I}_f R_f \\ \dot{I}_s &= \dot{I}_f \end{aligned}$$

于是得电压传输系数  $\dot{A}_f$  为

$$\dot{A}_f = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_s} = \frac{-\dot{I}_f R_f}{\dot{I}_s R_s} = -\frac{R_f}{R_s} \quad (8-1)$$

上式表明：电压传输系数  $\dot{A}_f$  仅取决于反馈电阻  $R_f$  与输入回路中所接电阻  $R_s$  之比值，与放大器参数无关，因此有很高的稳定性，且易于计算。输出电压  $\dot{V}_o$  与输入电压  $\dot{V}_s$  之间具有简单的反比例关系：

$$\dot{V}_o = \dot{A}_f \dot{V}_s = -\frac{R_f}{R_s} \dot{V}_s \quad (8-2)$$

改变比值  $R_f/R_s$ ，可以实现  $\dot{V}_o$  与  $\dot{V}_s$  之间不同的比例关系，因此图 8-5 所示电路又称为反相比例运算电路。

回忆负反馈放大器中关于深度负反馈条件下闭环增益的结论，看出(8-1)式就是电压并联负反馈放大器在深度负反馈时闭环全电压增益的近似表示式。

闭环输入电阻定义为

$$r_{if} = \frac{\dot{V}_s}{\dot{I}_s} = \frac{\dot{I}_s R_s + \dot{V}_1}{\dot{I}_s} = R_s + R_2$$

其中  $R_2 = \frac{\dot{V}_1}{\dot{I}_s}$ ，表示从  $\Sigma$  点所得的等效输入电阻，对于理想运放，由于  $\dot{V}_1 = 0$ ，因而

$$R_2 = 0$$

及

$$r_{if} = R_s$$

即反相输入方式下的闭环输入电阻较低，这是由于电压并联负反馈所产生的效果。由于理想运放的输出电阻  $r_o$  为零，所以在引入了电压负反馈之后的闭环输出电阻  $r_{of}$  也为零。

## (2) 实际运放的传输特性

考虑一个增益为  $\dot{A}_o$ 、输入电阻为  $r_i$ 、输出电阻为  $r_o$  的实际运放，接成反相输入方式，为简便计，暂不接负载 ( $R_L = \infty$ )。这时不能采用理想运放的零口-不定口模型，只能用图 8-7 所示的等效电路进行传输特性的分析。

### 1. 闭环输入电阻 $r_{if}$

根据定义, 闭环输入电阻  $r_{if}$  仍为

$$r_{if} = R_s + R_2$$

其中  $R_2$  的定义同前, 但对非理想运放, 由于  $\dot{V}_1 \neq 0$  和  $\dot{I}_1 \neq 0$ , 因此

$$R_2 = \frac{\dot{V}_1}{\dot{I}_r + \dot{I}_1} = \left( \frac{\dot{V}_1}{\dot{I}_1} \right) \parallel \left( \frac{\dot{V}_1}{\dot{I}_r} \right)$$

其中:  $\frac{\dot{V}_1}{\dot{I}_1} = r_i$  —— 实际运放的输入电阻。

$\frac{\dot{V}_1}{\dot{I}_r}$  —— 反馈支路对输入端呈现的等效阻抗。

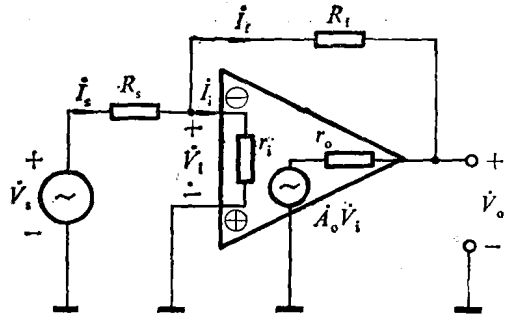


图 8-7 实际运放构成反相输入方式的等效电路

根据

$$\dot{I}_r = \frac{\dot{V}_1 - \dot{V}_o}{R_f} = \frac{(1 - \dot{A}_o)\dot{V}_1}{R_f}$$

得出

$$\frac{\dot{V}_1}{\dot{I}_r} = \frac{R_f}{1 - \dot{A}_o} = \frac{R_f}{1 + |\dot{A}_o|}$$

因此得到闭环输入电阻为

$$R_2 = r_i \parallel \left( \frac{R_f}{1 + |\dot{A}_o|} \right) \quad (8-3)$$

及

$$r_{if} = R_s + \left[ r_i \parallel \left( \frac{R_f}{1 + |\dot{A}_o|} \right) \right] \quad (8-4)$$

(8-4)式再次表明反相输入方式的闭环输入电阻不高, 这和电压并联负反馈电路具有低输入电阻的结论吻合, 因此在使用中要注意输入电阻的影响。

### 2. 电压传输系数 $\dot{A}'_f$

图 8-7 所示实际运放的电压传输系数用  $\dot{A}'_f$  表示, 根据定义可表示为

$$\dot{A}'_f = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_s} = \frac{\dot{A}_o \dot{V}_1}{\dot{V}_s} = \dot{A}_o \frac{R_2}{R_s + R_2}$$

根据(8-3)式,  $R_2$  为

$$R_2 = r_i \parallel \left( \frac{R_f}{1 - \dot{A}_o} \right) = \frac{r_i R_f}{r_i (1 - \dot{A}_o) + R_f}$$

代入  $\dot{A}'_f$  的表示式中, 得到

$$\begin{aligned} \dot{A}'_f &= \dot{A}_o \frac{\frac{r_i R_f}{r_i (1 - \dot{A}_o) + R_f}}{R_s + \frac{r_i R_f}{r_i (1 - \dot{A}_o) + R_f}} = \frac{\dot{A}_o r_i R_f}{R_s [r_i (1 - \dot{A}_o) + R_f] + r_i R_f} \\ &= \frac{-R_f}{R_s} \frac{|\dot{A}_o| r_i}{r_i (1 + |\dot{A}_o|) + R_f + r_i \frac{R_f}{R_s}} = -\frac{R_f}{R_s} \frac{|\dot{A}_o|}{1 + |\dot{A}_o|} \end{aligned}$$

即

$$\dot{A}'_f = \dot{A}_f \frac{|\dot{A}_o|}{1 + |\dot{A}_o|} \quad (8-5)$$

其中:

$$\dot{A}_f = \frac{-R_f}{R_s}, \quad \dot{A}_o = \frac{R'_s}{R_f + R_s}, \quad R'_s = R_s \parallel r_i = \frac{R_s r_i}{R_s + r_i}$$

(8-5)式表明,实际运放的闭环增益  $\dot{A}'_t$  不同于理想运放条件下的闭环增益  $\dot{A}_t$ , 它们的绝对误差为

$$\Delta A_t = |\dot{A}'_t - \dot{A}_t| = |\dot{A}_t| \frac{1}{1 + |\dot{F}\dot{A}_o|} \approx \frac{|\dot{A}_t|}{|\dot{F}\dot{A}_o|}$$

相对误差为

$$\delta = \frac{\Delta A_t}{|\dot{A}_t|} \approx \frac{1}{|\dot{F}\dot{A}_o|} \quad (8-6)$$

$\delta$  又称为运算精度。(8-6)式表明,只要反馈深度足够大,实际运放与理想运放之间的相对误差很小,运算精度可达很高的要求。

**【例题 8-3】** 有一运算放大器,  $A_o = 10^5$ ,  $r_1 = 100 \text{ k}\Omega$ ,  $R_s = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_t = 10 \text{ k}\Omega$ , 试计算其运算精度如何?

**【解】** 若假设为理想运放,则闭环增益

$$\dot{A}_t = -\frac{R_t}{R_s} = -10$$

在实际运放条件下,根据(8-5)式其闭环增益为

$$\dot{A}'_t = \dot{A}_t \frac{|\dot{F}\dot{A}_o|}{1 + |\dot{F}\dot{A}_o|} = -10 \times \frac{\frac{1}{11} \times 10^5}{1 + \frac{1}{11} \times 10^5}$$

根据(8-6)式,其运算精度(相对误差)为

$$\delta = \frac{1}{|\dot{F}\dot{A}_o|} = \frac{1}{\frac{1}{11} \times 10^5} = \frac{11}{10^5} \approx 0.01\%$$

结果表明,相对误差仅为万分之一左右。

**【例题 8-4】** 有一运算放大器,其  $r_1 = 1 \text{ M}\Omega$ , 外接电阻  $R_s = 100 \text{ k}\Omega$ ,  $R_t = 1 \text{ M}\Omega$ , 要求运算精度在 0.1% 以下,问开环增益  $A_o$  应选择多大?

**【解】** 根据(8-6)式,开环增益应由下式决定:

$$|\dot{F}\dot{A}_o| = \frac{1}{\delta}$$

即

$$A_o = \frac{1}{F\delta}$$

其中:  $F = \frac{R'_s}{R_t + R'_s} \approx \frac{100}{1000 + 100} = \frac{1}{11}$ ,  $\delta = 0.1\%$ , 于是  $A_o$  为

$$A_o = \frac{11}{0.1\%} = 11 \times 10^3$$

### 3. 闭环输出电阻 $r_{or}$

对于图 8-7 所示电路的输出电阻,可用图 8-8 所示的等效电路计算,根据输出电阻的定义:

$$r_{or} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_o} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{I}'_o + \dot{I}_t} = \left( \frac{\dot{V}_o}{\dot{I}'_o} \right) // \left( \frac{\dot{V}_o}{\dot{I}_t} \right)$$

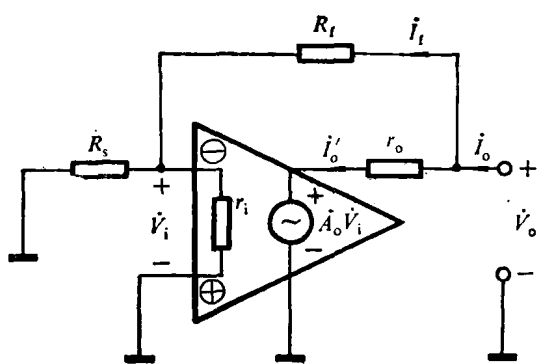


图 8-8 讨论反相方式输出电阻时的等效电路

其中:  $\left(\frac{\dot{V}_o}{\dot{I}'_o}\right)$ ——反馈放大器不考虑反馈支路分流时的等效输出电阻。

$\left(\frac{\dot{V}_o}{\dot{I}'_f}\right)$ ——反馈支路在输出端呈现的等效输出电阻。

由图 8-8 看出:

$$\frac{\dot{V}_o}{\dot{I}'_o} = r_o + \dot{A}_o \frac{\dot{V}_1}{\dot{I}'_o}$$

又根据  $\dot{V}_1 = \dot{V}_o \frac{(R_s // r_1)}{R_f + (R_s // r_1)} = \dot{V}_o \frac{R'_s}{R_f + R'_s}$  代入上式

$$\frac{\dot{V}_o}{\dot{I}'_o} = r_o + \dot{A}_o \frac{R'_s}{R_f + R'_s} \frac{\dot{V}_o}{\dot{I}'_o}$$

移项得

$$\frac{\dot{V}_o}{\dot{I}'_o} = \frac{r_o}{1 - F\dot{A}_o} = \frac{r_o}{1 + F|\dot{A}_o|}$$

其中

$$F = \frac{R'_s}{R_f + R'_s}$$

此外

$$\frac{\dot{V}_o}{\dot{I}'_f} = R_f + (R_s // r_1) = R_f + R'_s$$

因此, 输出电阻  $r_{of}$  为

$$r_{of} = \left( \frac{r_o}{1 + F|\dot{A}_o|} \right) // (R_f + R'_s) \quad (8-7)$$

$$\approx \frac{r_o}{1 + F|\dot{A}_o|} \quad (8-8)$$

(8-8)式再次表明: 反相输入方式的输出电阻很低, 这与电压负反馈电路降低输出电阻的结论一致。由于集成运放开环输出电阻  $r_o$  本来就很小, 因此在反相输入方式下工作时, 闭环输出电阻极低, 输出端可近似看作理想电压源。

### 三、同相输入方式

运算放大器同相输入方式的原理电路如图 8-9 所示, 输入信号由同相输入端输入, 反馈信号由输出端经过电阻  $R_f$  与  $R_s$  分压引至反相输入端, 不难看出, 此电路的反馈组态为电压串联负反馈。下面重点讨论理想运放的传输特性, 对于实际运放的讨论与反相输入方式类似, 这里不再赘述。

根据理想运放的线性模型, 可作出同相输入方式下的等效电路如图 8-10 所示, 从图中得

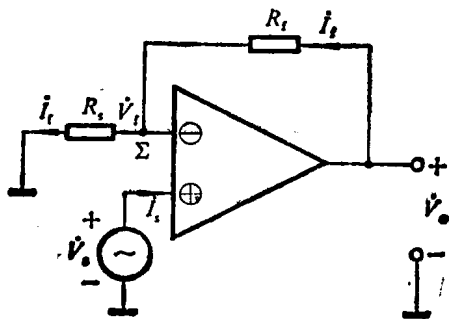


图 8-9 同相输入方式原理电路图

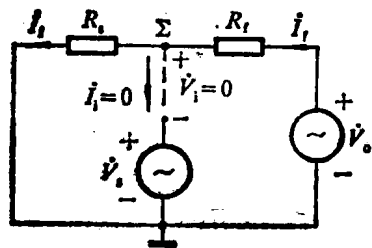


图 8-10 理想运放同相输入方式等效电路图

到

$$\dot{V}_o = \dot{I}_t (R_t + R_s)$$

$$\dot{I}_t = \frac{\dot{V}_s}{R_s}$$

于是可得

$$\dot{V}_o = \frac{\dot{V}_s}{R_s} (R_s + R_t) = \left(1 + \frac{R_t}{R_s}\right) \dot{V}_s \quad (8-9)$$

闭环电压传输系数为

$$\dot{A}_t = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_s} = 1 + \frac{R_t}{R_s} \quad (8-10)$$

(8-10)式表明: 同相输入运用时, 输出电压与输入电压相位相同, 其比值仍与放大器的参数无关, 仅取决于反馈网络的参数  $R_s$  和  $R_t$  之比值, 因此有很高的稳定性, 这一结论与深度负反馈条件下的电压串联负反馈电路的闭环电压增益吻合, 此电路又称为同相比率电路。

[例题 8-5] 试推导图 8-11 所示同相比率电路的输出电压与输入电压的关系。

[解] 根据同相输入时输出电压与输入电压的关系式

$$\dot{V}_o = \left(1 + \frac{R_t}{R_s}\right) \dot{V}'_s$$

又由于理想运放的  $\dot{I}_1 = 0$ , 故

$$\dot{V}'_s = \frac{R'_t}{R'_s + R'_t} \dot{V}_s$$

代入上式, 得

$$\dot{V}_o = \left(1 + \frac{R_t}{R_s}\right) \frac{R'_t}{R'_s + R'_t} \dot{V}_s$$

若  $R_s = R'_s$ ,  $R_t = R'_t$ , 则

$$\dot{V}_o = \frac{R_t}{R_s} \dot{V}_s$$

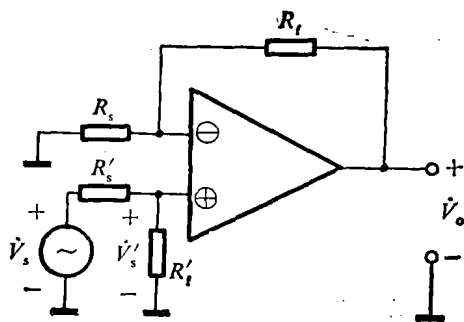


图 8-11 [例题 8-5] 电路图

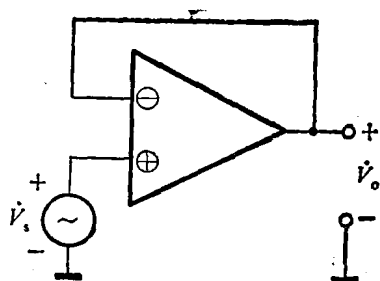


图 8-12 [例题 8-6] 电路图

[例题 8-6] 如果在图 8-9 中, 取  $R_t = 0$  (输出端与反相输入端短接),  $R_s = \infty$  ( $R_s$  开路), 如图 8-12 所示, 试求输出电压  $\dot{V}_o$ 。

[解] 根据(8-9)式,

$$\dot{V}_o = \left(1 + \frac{R_t}{R_s}\right) \dot{V}_s$$

当  $R_n = \infty$ ,  $R_f = 0$  时, 有

$$\dot{V}_o = \dot{V}_s$$

结果表明, 此电路之输出电压等于输入电压, 同时具有高输入电阻和低输出电阻特性, 故称为电压跟随器。

闭环输入电阻  $r_{if}$  由下式定义

$$r_{if} = \frac{\dot{V}_s}{\dot{I}_s} = \frac{\dot{V}_s}{-\dot{I}_1}$$

由于理想运放中  $\dot{I}_1 = 0$ , 因而

$$r_{if} = \infty$$

即同相输入方式下, 闭环输入电阻极高, 这与电压串联负反馈电路增高输入电阻的结论吻合。

由于同相输入方式中的反馈仍为电压负反馈, 所以闭环输出电阻的关系与反相输入方式相同, 仍然很低, 在理想运放的条件下,  $r_{of} = 0$ 。

综上所述, 当实际运放的增益和输入电阻较高、输出电阻较低时, 用理想运放的等效模型来代替它进行分析, 所引起的误差很低, 因此在本书中都采用理想运放模型。最后, 将反相输入方式和同相输入方式的主要特征比较如下:

- ① 同相输入时, 输出电压与输入电压同相; 反相输入时, 二者反相。
- ② 同相输入时, 闭环增益总是大于或等于 1; 反相输入时, 闭环增益可大于 1, 也可小于 1。
- ③ 同相输入时, 输入电阻很高, 数量级在  $10\text{M}\Omega \sim 100\text{M}\Omega$  左右; 反相输入时, 输入电阻约等于输入回路电阻  $R_s$ , 一般不超过  $1\text{M}\Omega$ 。
- ④ 同相输入时, 同相端和反相端都同时加有数量近似相等的输入电压, 即加有共模输入电压。因此输入电压不得超出放大器允许的共模输入电压范围, 同时要求同相运用的集成运放应具有良好的共模抑制能力和较大的共模电压工作范围。
- ⑤ 反相输入时, 同相端和反相端电压都几乎为零, 无共模输入电压。因此, 输入电压的范围不受限制, 同时共模干扰也较小。

## 第二节 模拟运算电路

运算放大器的名称表明了它具有实现数学运算的功能, 按照外接反馈电路的不同方式, 集成运放可以实现模拟量之间的四则运算、微积分运算、对数或反对数运算以及其他一些运算。由于输入和输出量均为模拟量, 所以这类运算电路统称为模拟运算电路, 它是集成运放的一个重要应用方面。

### 一、比例器

比例器是指电路的输出量与输入量之间具有线性比例关系, 即

$$Y = kX$$

式中:  $Y$ ——输出量;  $X$ ——输入量;  $k$ ——比例系数, 它可以是任何整数或分数。

用集成运放构成的比例器电路分为两类, 即反相比例器和同相比例器。它们的典型电路分别如图 8-13 所示。图中两个比例电路就是前节介绍的反相输入和同相输入两种运用方式, 电阻  $R_p$  ( $R_p = R_s // R_f$ ), 称为直流平衡电阻, 在理想运放条件下,  $R_p$  对交流信号的传输无影响, 它的作用是消除集成运放内部输入级的静态基极偏置电流在外电路中所产生的运算误差。

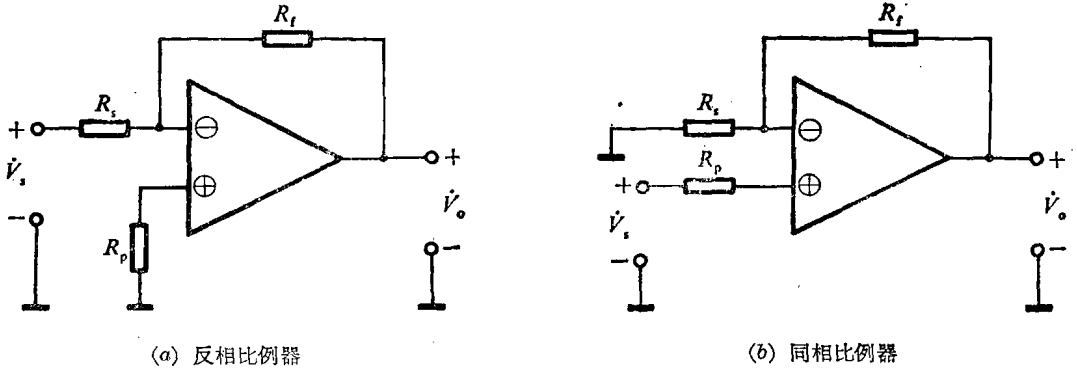


图 8-13 比例运算电路

根据前节的讨论, 在理想运放条件下, 反相比例和同相比例的输出电压分别为反相比例器:

$$\dot{V}_o = -\frac{R_f}{R_s} \dot{V}_s$$

同相比例器:

$$\dot{V}_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_s}\right) \dot{V}_s$$

改变电阻  $R_s$  与  $R_f$  的比值, 可得任意比例关系。

作为两个特殊的例子, 在图 8-14(a) 所示电路中, 取  $R_s = R_f = R$  及  $R_p = R/2$ , 可得

$$\dot{V}_o = -\dot{V}_s$$

因此称为符号变换器(倒相器)。

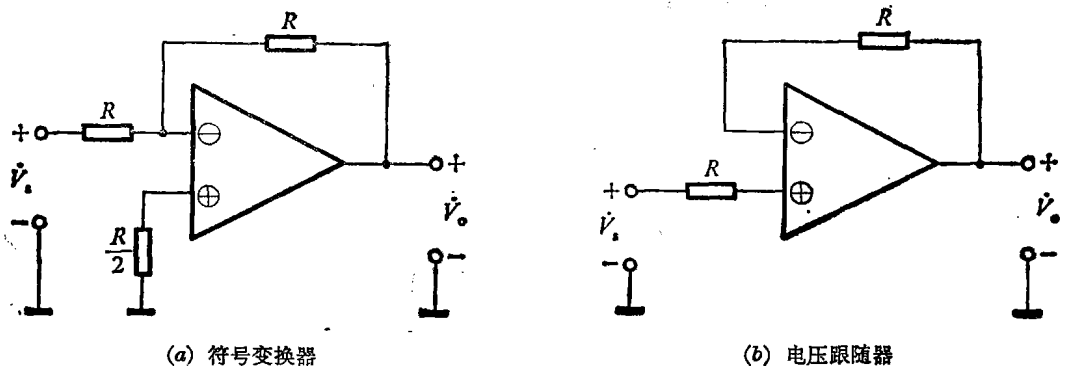


图 8-14 符号变换器和电压跟随器

在图 8-14(b) 所示电路中, 取  $R_f = R_p = R$  及  $R_s = \infty$ , 可得

$$\dot{V}_o = \dot{V}_s$$



称为电压跟随器,由于跟随器的输入电阻很高和输出电阻很低,能够有效地隔离输出负载对输入信号源的影响,因此获得广泛的应用。

## 二、加法器

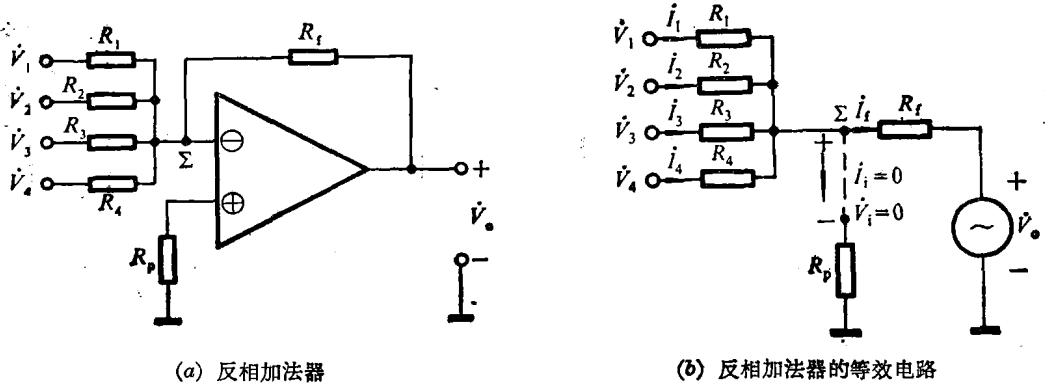
加法器是指电路的输出量等于  $n$  个输入量的代数和,即

$$Y = k(X_1 + X_2 + \dots + X_n)$$

其中  $Y$ ——输出量;  $X_1, X_2, \dots, X_n$ —— $n$  个输入量;  $k$ ——比例关系。

### (1) 反相加法器

利用集成运放构成的反相加法电路如图 8-15(a) 所示,其理想运放条件下的等效电路如图 8-15(b) 所示。



(a) 反相加法器

(b) 反相加法器的等效电路

图 8-15 反相加法运算电路

图中直流平衡电阻  $R_p = (R_1 \parallel R_2 \parallel R_3 \parallel R_4 \parallel R_f)$ , 根据图(b)的等效电路, 可得

$$\begin{cases} \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 + \dot{I}_4 = \dot{I}_f \\ \dot{V}_o = -\dot{I}_f R_f \\ \dot{V}_1 = \dot{I}_1 R_1 \\ \dot{V}_2 = \dot{I}_2 R_2 \\ \dot{V}_3 = \dot{I}_3 R_3 \\ \dot{V}_4 = \dot{I}_4 R_4 \end{cases}$$

将上面各式相互代入, 得

$$\frac{\dot{V}_1}{R_1} + \frac{\dot{V}_2}{R_2} + \frac{\dot{V}_3}{R_3} + \frac{\dot{V}_4}{R_4} = -\frac{\dot{V}_o}{R_f}$$

输出电压  $\dot{V}_o$  为

$$\dot{V}_o = -\left(\frac{R_f}{R_1} \dot{V}_1 + \frac{R_f}{R_2} \dot{V}_2 + \frac{R_f}{R_3} \dot{V}_3 + \frac{R_f}{R_4} \dot{V}_4\right) \quad (8-11)$$

如果取  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_s$ , 则(8-11)式简化为

$$\dot{V}_o = -\frac{R_f}{R_s} (\dot{V}_1 + \dot{V}_2 + \dot{V}_3 + \dot{V}_4) \quad (8-12)$$

(8-12)式表明该电路输出电压与各个输入电压之和成比例, 又由于输出与输入反相, 所以称为反比例加法器。加法器的输入端数目可为任意个, 但一般不超过 6 个。