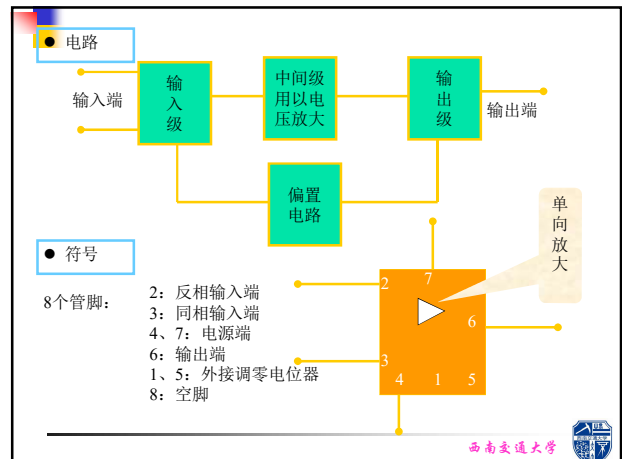


第五章 含有运算放大器的电路分析

● 运算放大器(operational amplifier)

是一种有着十分广泛用途的电子器件。最早开始应用于1940年,1960年后,随着集成电路技术的发展,运算放大器逐步集成化,大大降低了成本,获得了越来越广泛的应用。

- 应用 主要用于模拟计算机,可模拟加、减、积分等运算,对电路进行模拟分析。在信号处理、测量及波形产生方面也获得广泛应用。



§ 5-1 运算放大器的电路模型

多端元件、有源元件

一、运算放大器的电路符号

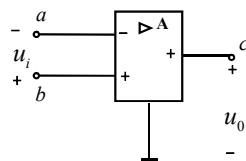
a、b为输入端, c为输出端

$$u_0 = Au_i = A(u_b - u_a)$$

A—放大倍数

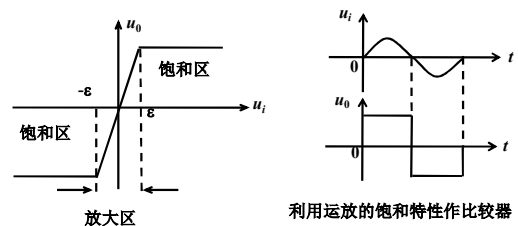
b端接地, 则 $u_0 = -Au_a$ a为倒向输入端。

a端接地, 则 $u_0 = Au_b$ b为非倒向输入端。

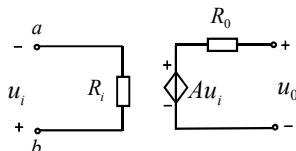


二、运放的特性

运放有两个工作区: 放大区和饱和区。



运放工作在放大区时: 其等效的电路模型为



运放为单方向的差动放大器。

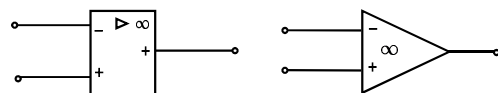
受控源为 $A(u_b - u_a) = Au_i$

R_i ——输入电阻, 很大

R_0 ——输出电阻, 较小

当 $A = \infty$ $R_i = \infty$ $R_0 = 0$ 时,

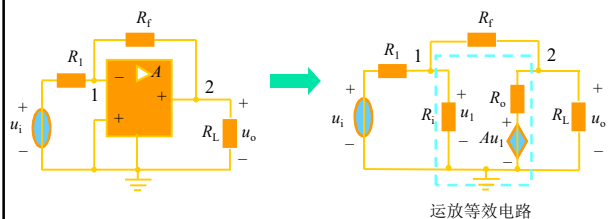
称为理想运放。



“开环”应用、“闭环”应用

§ 5-2 具有理想运放的电路分析

运放开环工作极不稳定，一般外部接若干元件(R 、 C 等)，使其工作在闭环状态。



西南交通大学

用结点法分析：(电阻用电导表示)

$$(G_1 + G_i + G_f)u_{n1} - G_f u_{n2} = G_1 u_i$$

$$-G_f u_{n1} + (G_f + G_o + G_L)u_{n2} = G_o A u_1$$

$$u_1 = u_{n1}$$

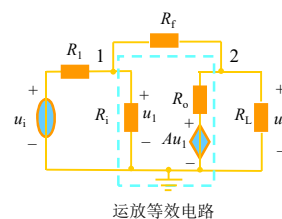
整理，得

$$(G_1 + G_i + G_f)u_{n1} - G_f u_{n2} = G_1 u_i$$

$$(-G_f + G_o A)u_{n1} + (G_f + G_o + G_L)u_{n2} = 0$$

解得

$$u_o = u_{n2} = -\frac{G_1}{G_f} \times \frac{G_f (AG_o - G_f)}{G_f (AG_o - G_f) + (G_1 + G_i + G_f)(G_f + G_o + G_L)} u_i$$



西南交通大学

$$u_o = u_{n2} = -\frac{G_1}{G_f} \frac{G_f (AG_o - G_f)}{G_f (AG_o - G_f) + (G_1 + G_i + G_f)(G_f + G_o + G_L)} u_i$$

因 A 一般很大，上式中分母中 $G_f(AG_o - G_f)$ 一项的值比 $(G_1 + G_i + G_f)(G_f + G_o + G_L)$ 要大得多。所以，后一项可忽略，得

$$u_o \approx -\frac{G_1}{G_f} u_i = -\frac{R_f}{R_i} u_i$$

表明 u_o / u_i 只取决于反馈电阻 R_f 与 R_i 比值，而与放大器本身的参数无关。负号表明 u_o 和 u_i 总是符号相反(反相比例器)。

近似结果可将运放看作理想情况而得到。

西南交通大学

根据理想运放的特性分析：

(1) 根据“虚短”：

$$u^+ = u^- = 0, \quad i_1 = u_i / R_i$$

$$i_2 = -u_o / R_f$$

(2) 根据“虚断”：

$$i_- = 0, \quad i_2 = i_1$$

$$\therefore u_o = -\frac{R_f}{R_i} u_i$$

注意

(1) 当 R_i 和 R_f 确定后，为使 u_o 不超过饱和电压(即保证工作在线性区)，对 u_i 有一定限制。

(2) 运放工作在开环状态极不稳定，振荡在饱和区；工作在闭环状态，输出电压由外电路决定。(R_f 接在输出端和反相输入端，称为负反馈)。

西南交通大学

理想运放的特征：

① 倒向端和非倒向端的输入电流均为零，称为“虚断”。

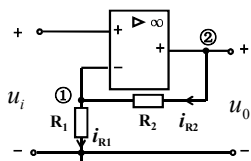
② 倒向端和非倒向端为等位点，称为“虚短”。

例5-1 求 u_o 与 u_i 之间的关系

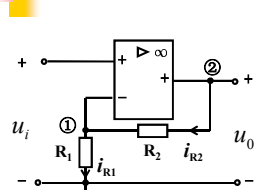
$$\text{解： } u_o = R_2 i_{R2} + R_1 i_{R1}$$

$$\text{结点①处 } i_{R2} = i_{R1}$$

$$u_o = (R_1 + R_2) i_{R1}$$



西南交通大学



$$u_i = u_1 = R_1 i_{R1}$$

$$\text{得 } i_{R1} = \frac{1}{R_1} u_i$$

$$\therefore u_o = \frac{R_1 + R_2}{R_1} u_i$$

$$\frac{R_1 + R_2}{R_1} \geq 1,$$

为非倒向放大器(又称比例器)。

西南交通大学

相当于右图中 $R_2 = 0$ $R_1 = \infty$

得 $u_0 = u_i$

称电压跟随器。前后段的隔离作用。

比较下列两图：

例5-2

$$u_0 = -\left(\frac{R_f}{R_1}u_1 + \frac{R_f}{R_2}u_2 + \frac{R_f}{R_3}u_3\right)$$

加法器

减法器

$$u_0 = R_2(-i_1) + R_2(i_2) = -R_2\left(\frac{u_1 - u_-}{R_1}\right) + R_2\left(\frac{u_2 - u_+}{R_1}\right)$$

$$= \frac{R_2}{R_1}(-u_1 + u_- + u_2 - u_+) = \frac{R_2}{R_1}(u_2 - u_1)$$

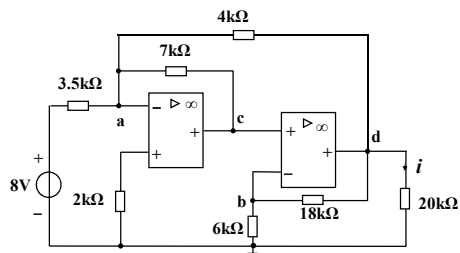
$$u_0 = -Ri = -RC \frac{du_i}{dt}$$

微分电路

积分电路

$$u_0 = -\frac{1}{C} \int i dt = -\frac{1}{RC} \int u_i dt$$

例：求图示电路的电流 i



解：结点电压法。但运放的输出端不列KCL方程。

结点电压 $u_a \ u_b \ u_c \ u_d$

$$\text{结点a: } \frac{u_a - 8}{3.5} + \frac{u_a - u_c}{7} + \frac{u_a - u_d}{4} = 0$$

$$\text{结点b: } \frac{u_b}{6} + \frac{u_b - u_d}{18} = 0$$

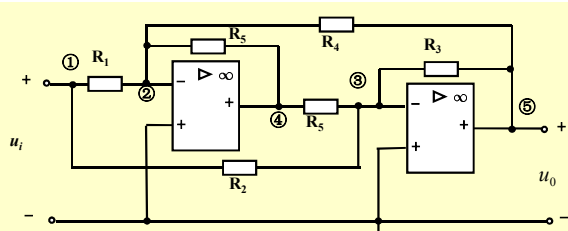
$$\text{虚短: } u_a = 0$$

$$u_c = u_b$$

$$\text{解得: } u_d = -8V$$

$$i = \frac{u_d}{20} = -0.4mA$$

例：求 $\frac{u_0}{u_i}$



解：结点① $u_1 = u_i$

$$\text{结点② } \frac{u_2 - u_1}{R_1} + \frac{u_2 - u_4}{R_5} + \frac{u_2 - u_0}{R_4} = 0$$

$$\text{结点③ } \frac{u_3 - u_4}{R_5} + \frac{u_3 - u_1}{R_2} + \frac{u_3 - u_0}{R_3} = 0$$

利用“虚短”： $u_2 = 0 \quad u_3 = 0$

$$u_0 \left(\frac{1}{R_4} - \frac{1}{R_3} \right) = \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) u_i$$

$$\frac{u_0}{u_i} = \frac{G_2 - G_1}{G_4 - G_3}$$