

第五章 含有运算放大器的电阻电路

第一部分 要点、考点归纳

§ 5-1 运算放大器的电路模型

1. 集成运算放大器的组成

集成电路:将整个电路的各个元件做在同一个半导体芯片上, 组成一个不可分割的整体。

集成电路的优点: 工作稳定、使用方便、体积小、重量轻、功耗小。

集成电路的分类: 小、中、大、超大规模集成电路; 数字集成电路、模拟集成电路; ……

运算放大器是一种多端电子器件, 最早开始应用于 1940 年, 首先应用于模拟计算机上, 作为基本运算单元, 可以完成加减、积分和微分、乘除等数学运算。自 1960 年后, 随着半导体集成工艺的发展, 运算放大器逐步集成化, 大大降低了成本, 其应用远远超出了模拟计算机的界限, 在信号运算、信号处理、信号测量及波形产生等方面获得广泛应用。

集成运算放大器的电路组成如图 5.1.1 所示, 可分为输入级、中间级、输出级和偏置电路四个基本组成部分。

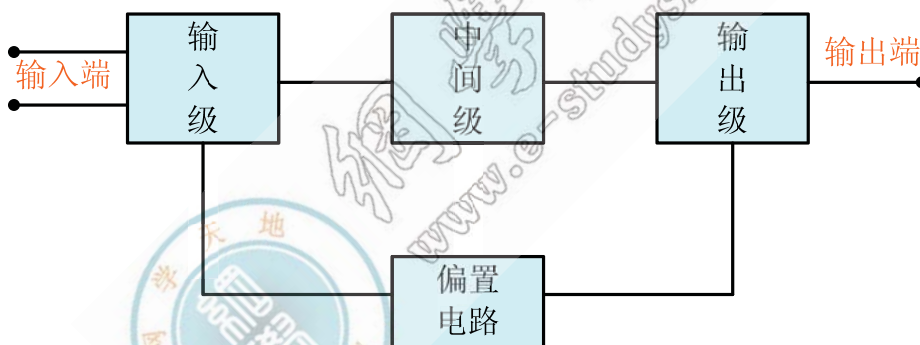


图 5.1.1 集成运算放大器的电路组成

输入级要求其输入电阻高, 能抑制干扰信号; 中间级主要进行电压放大, 要求其电压放大倍数高; 输出级与负载相接, 要求其输出电阻低, 带负载能力强。

2. 运算放大器的电路符号

应用运算放大器时感兴趣的是它的外部特性及管脚的用途, 图 5.1.2 (a) 为 F007 (5G24) 运算放大器的符号图, 图中的‘三角形’符号表示放大器, 其主要管脚的用途是: 2 号为反相输入端; 3 号为同相输入端; 4 和 7 号为电源端; 6 号为输出端; 1 和 5 号端子为外接调零电位器。

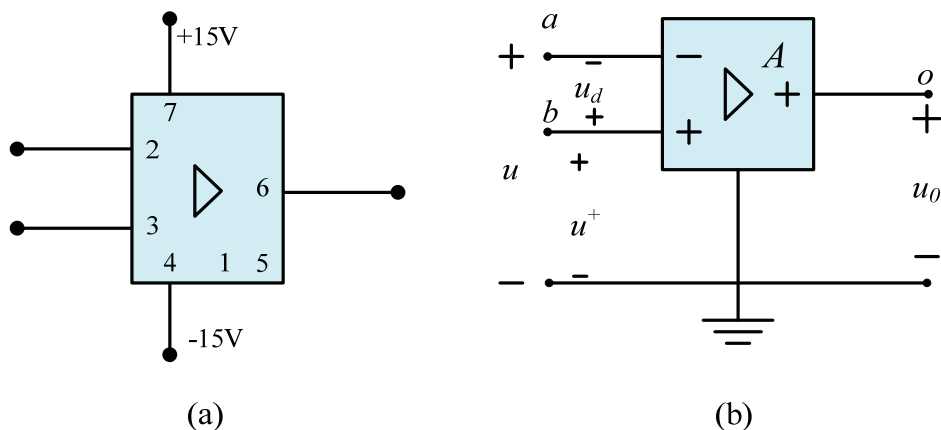


图 5.1.2 运算放大器的电路符号

在分析运算放大器的放大作用时，在电路符号图中一般不画出偏置电源端，采用图 5.1.2 (b) 所示的符号，其中：

- a 端：反向输入端。由此端输入电压 u^- ，则输出信号和输入信号是反向的。
- b 端：同向输入端。由此端输入电压 u^+ ，则输出信号和输入信号是同向的。
- o 端：输出端，输出电压 u_o 。

图中 A 表示开环电压放大倍数，可达十几万倍。

注意：不要把图中 a 端和 b 端的“-”号和“+”号误认为电压参考方向的正负极性，如图所示，电压参考方要另外标出，均为对地的电压，当在接地端未画出时尤须注意。

3. 运算放大器的传输特性

在运算放大器的输入端 a 加电压 u^- ，输入端 b 加电压 u^+ ，如图 5.1.2 (b) 所示，可得输出 u_o 和输入电压的关系：

$$u_o = A(u^+ - u^-) = Au_d$$

u_o 和 u_d 之间的传输特性曲线如图 5.1.3 所示，也称为运算放大器的外特性。其传输特性可分三个区域：

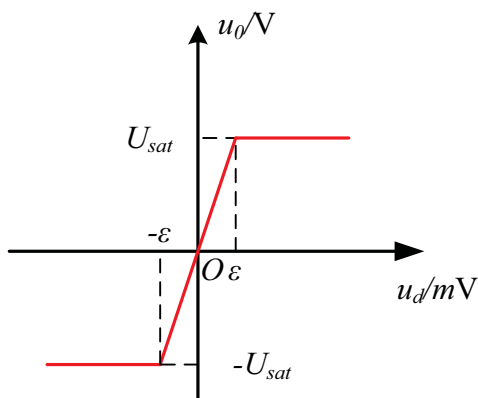


图 5.1.3 运算放大器的传输特性

①线性工作区:

$$|u_d| < \varepsilon \quad u_0 = Au_d$$

②正向饱和区:

$$u_d > \varepsilon \quad u_0 = U_{sat}$$

③反向饱和区:

$$u_d < -\varepsilon \quad u_0 = -U_{sat}$$

式中 ε 是一个数值很小的电压, 例如 $U_{sat}=13V, A=105$ 时, 则 $\varepsilon=0.13mV$ 。

注意: 运算放大器可工作在线性区, 也可工作在饱和区, 但分析的方法不一样。当运算放大器工作在线性区时是一个线性放大元件, 本章把运算放大器的工作范围限制在线性区。

4. 运算放大器的电路模型

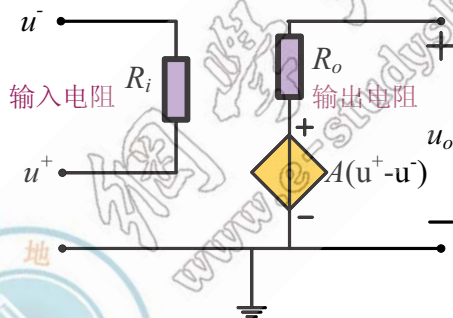


图 5.1.4 运算放大器的电路模型

图 5.1.4 给出了运算放大器的电路模型, 其输入电阻 R_i 远大于输出电阻 R_o , 输出电压 u_0 近似为受控电压源的电压, 即:

$$u_0 = A(u^+ - u^-) = Au_d$$

当同向输入端接地: $u^+ = 0$,

$$u_0 = -Au^-$$

当反向输入端接地: $u^- = 0$

$$u_0 = Au^+$$

5. 理想运算放大器

在线性放大区分析运算放大器时, 一般可将它看成是一个理想运算放大器, 把运放电路

作如下的理想化处理:

- (1) 放大倍数 $A \rightarrow \infty$
- (2) 若输出电压 u_o 为有限值, 则当放大倍数 $A \rightarrow \infty$ 时, 必须满足 $u_d=0$, 即输入电压 $u^+=u^-$, 两个输入端之间相当于短路 (虚短路);
- (3) 输入电阻 $R_i \rightarrow \infty$
- (4) 若输入电阻 $R_i \rightarrow \infty$, 则认为输入端电流 $i^+=0, i^-=0$ 。即从输入端看进去, 元件相当于开路 (虚断路)。
- (5) 输出电阻 $R_o \rightarrow 0$

由于实际运算放大器的上述指标接近理想化的条件, 因此在分析使用理想运算放大器代替实际运算放大器所引起的误差并不严重, 在工程上是允许的, 但这样却使分析过程大为简化。

运算放大器开环工作极不稳定, 一般外部接若干元件 (R 、 C 等), 将输出的一部分接回 (反馈) 到输入中去, 使其工作在闭环状态。

§ 5-2 比例电路的分析

如果输入信号从运算放大器的反向输入端引入, 便是反向运算。图 5.2.1 (a) 是反向比例运算电路, 称为倒向比例器或倒向放大器。输入信号 u_i 经电阻 R_1 送到反向输入端, 而同向输入端接地, 输出电压通过电阻 R_f 反馈到输入电路中。应用运算放大器电路模型, 图 5.2.1 (a) 电路可用图 5.2.1 (b) 表示。

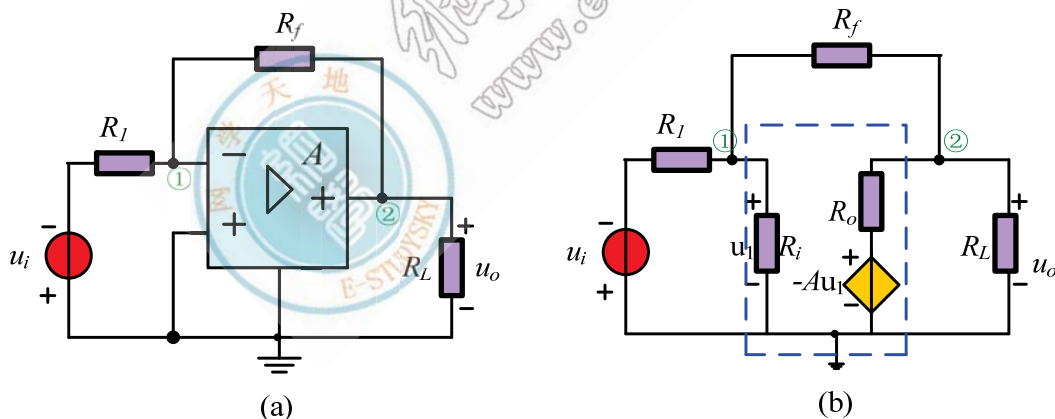


图 5.2.1 反相比例器

(1) 应用结点法分析

(电阻用电导表示) 得结点①和②的结点方程:

$$\begin{aligned} (G_1 + G_i + G_f)u_{n1} - G_f u_{n2} &= G_1 u_i \\ -G_f u_{n1} + (G_L + G_o + G_f)u_{n2} &= G_o A u_1 \\ u_1 &= u_{n1} \end{aligned}$$

从中解得:

$$u_0 = u_{n2} = -\frac{G_1}{G_2} \times \frac{G_f(AG_o - G_f)}{G_f(AG_o - G_f) + (G_1 + G_i + G_f)(G_f + G_o + G_L)} u_i \quad (5-2-1)$$

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

$$u_0 \approx -\frac{G_1}{G_f} u_i = -\frac{R_f}{R_1} u_i$$

表明 u_o/u_i 只取决于反馈电阻 R_f 与 R_1 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 (反比例器)。

(2) 根据理想运放的特性分析

以上近似结果可以通过将运放看作理想运算放大器而得到。根据理想运算放大器的特点, 则由于 $A=\infty$, $R_{in}=\infty$, $R_O=0$, 从式 (5-2-1) 可直接求得:

$$\frac{u_o}{u_{in}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

§ 5-3 含有理想运算放大器的电路的分析

分析时遵循以下两条规则:

- (1) 放大器的反向端和同向端的输入电流均为零, 称之为“虚断路”;
- (2) 放大器的反向端和同向端的输入电压相等, 称之为“虚短路”;

合理运用这两条规则, 将使分析简化。

对图 5.3.1 所示的反向比例电路应用以上两条规则有:

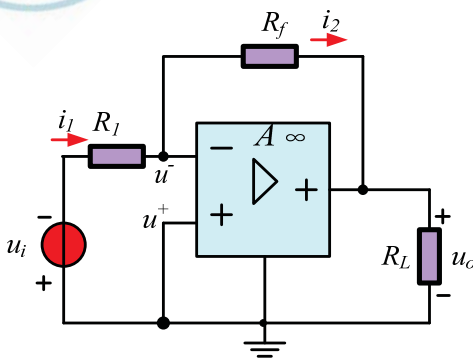


图 5.3.1 反比例电路

(a) 根据“虚短”:

$$i_1 = \frac{u_i}{R_1} \quad i_2 = \frac{u_o}{R_f}$$

(b) 根据“虚断”: $u^- = u^+ = 0$

所以电流 $i^- = i^+ = 0 \quad i_1 = i_2$

$$\therefore u_o = -\frac{R_f}{R_1} u_i$$

1. 正相（同向）比例器

如果输入信号从同向输入端输入电路，如图 5.3.2 所示，就构成同向比例运算。

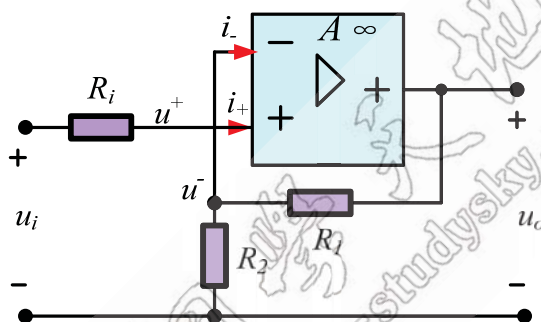


图 5.3.2 正向比例器

分析过程如下:

(a) 根据“虚短”: $u^- = u^+ = u_i$

(b) 根据“虚断”: $i^- = i^+ = 0$

所以有

$$\frac{u_o - u_i}{R_1} = \frac{u_i}{R_2}$$

$$\therefore u_o = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) u_i$$

以上结果说明:

- (1) 输出电压 u_o 与输入电压 u_i 同相;
- (2) 当 $R_2 = \infty$, $R_1 = 0$ 时, $u_o = u_i$, 构成电压跟随器;
- (3) 输入、输出关系取决外接电阻, 而与运放本身参数无关。

2. 加法运算

如果在反向输入端增加若干输入电路，如图 5.3.1 所示，就构成反向加法运算电路。分析过程如下:

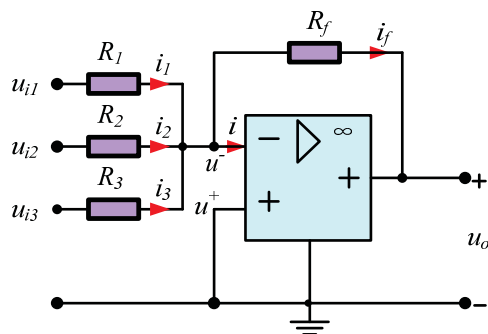


图 5.3.1 加法运算电路

(a) 根据“虚短”： $u^- = u^+ = 0$

$$i_1 = \frac{u_{i1}}{R_1} \quad i_2 = \frac{u_{i2}}{R_2}$$

所以电流

$$i_3 = \frac{u_{i3}}{R_3} \quad i_f = \frac{u_o}{R_f}$$

$$i^- = i^+ = 0$$

(b) 根据“虚断”：

$$i_1 + i_2 + i_3 = i_f$$

$$u_o = -\left(\frac{R_f}{R_1}u_{i1} + \frac{R_f}{R_2}u_{i2} + \frac{R_f}{R_3}u_{i3}\right)$$

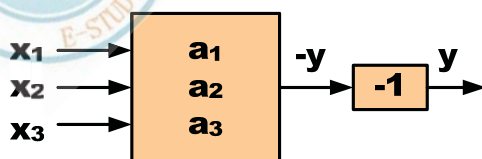


图 5.3.2 比例加法运算

图 5.3.2 为比例加法器运算流程，可表示为：

$$y = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3$$

3. 电压跟随器

如果同向比例电路中的电阻 $R_2 = \infty$, $R_1 = 0$, 就构成图 5.3.3 所示的电压跟随器。其特点为

输出电压等于输入电压。根据电路图不难得出： $u_o = u_{in}$ ，同时有 $i_{in} = 0$ ，就是说输入电阻 R_{in} 为无限大，所以它又起隔离作用。在电路中电压跟随器起隔离前后两级电路的作用。

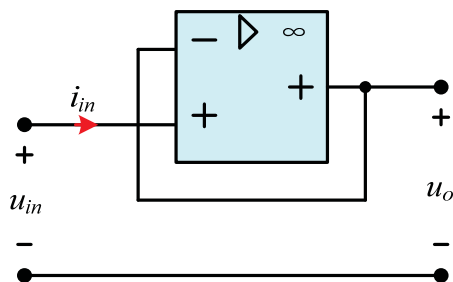


图 5.3.3 电压跟随器

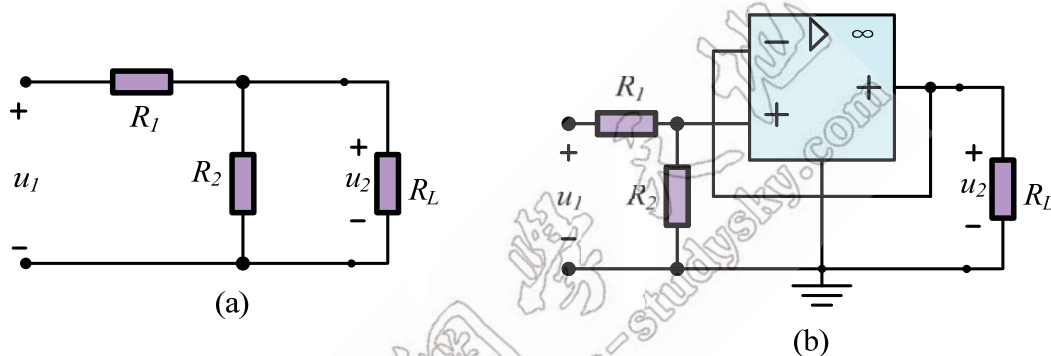


图 5.3.4 电压跟随器的隔离作用

例如图 5.3.4 (a) 由电阻 R_1 和 R_2 构成的分压电路，输出电压

$$u_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_1$$

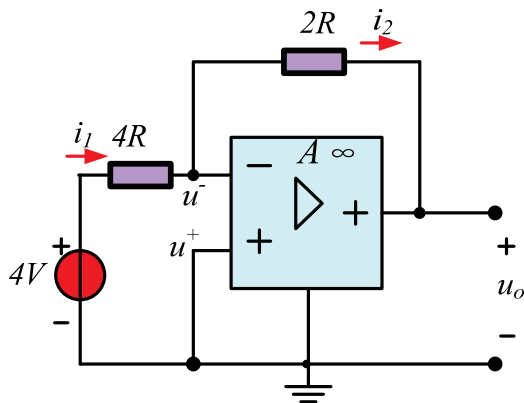
如果接入负载电阻 R_L ，输出电压变为

$$u_2 = \frac{R_2 // R_L}{R_1 + R_2 // R_L} u_1 \neq \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_1$$

如把分压电路和负载之间加入跟随器如图 5.3.4 (b) 所示，则输出电压 u_2 不受负载电阻的影响，即负载电阻的作用被“隔离”了。

第二部分 例题

例 1 求图示含理想运算放大器电路的输出电压 u_o 。



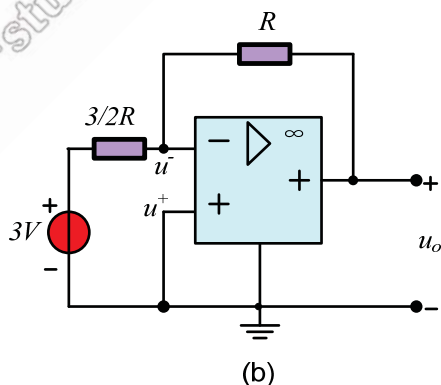
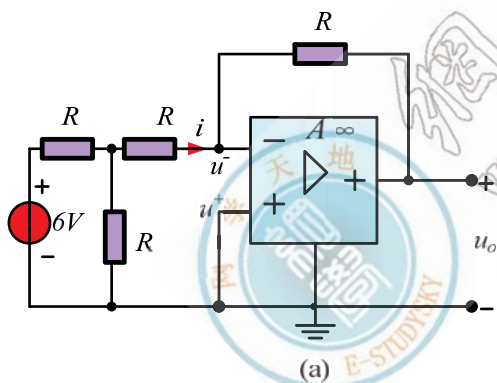
解：这是一个反向比例电路，根据“虚短”和“虚断”的规则有：

$$u^- = u^+ = 0 \quad i^- = i^+ = 0 \quad i_1 = i_2$$

$$\frac{4}{4R} = -\frac{u_o}{2R}$$

所以有： $u_o = -2V$

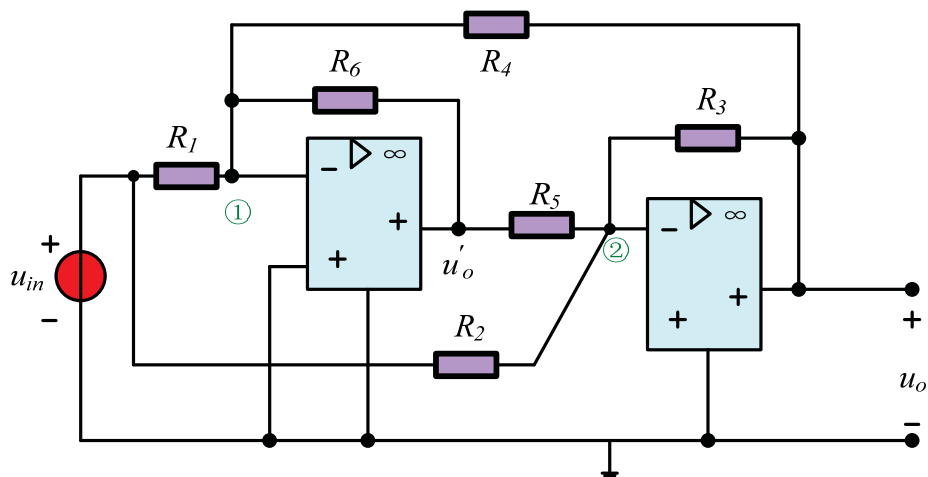
例 2 求 (a) 图所示含理想运算放大器电路的输出电压 u_o 。



解：首先应用戴维宁定理把理想运算放大器输入端的电路化简，如图 (b) 所示，这是一个反向比例电路，根据“虚短”和“虚断”的规则有：

$$\frac{3}{1.5R} = -\frac{u_o}{R} \quad \text{所以} \quad u_o = -2V$$

例 3 图示电路中含有两个运放，设 $R_5 = R_6$ 。试求 u_{in} 。



解: 对结点①和结点②列出结点电压方程, 并注意到规则(1)和规则(2) ($u_{n1} = u_{n2} = 0$)

可得:

$$\begin{aligned} -\frac{u_{in}}{R_1} - \frac{u'_o}{R_6} - \frac{u_o}{R_4} &= 0 \\ -\frac{u_{in}}{R_2} - \frac{u'_o}{R_5} - \frac{u_o}{R_3} &= 0 \end{aligned}$$

从以上两个方程中消去 u'_o , 得

$$\frac{u_{in}}{R_1} - \frac{u_{in}}{R_2} = \frac{u_o}{R_3} - \frac{u_o}{R_4}$$

所以

$$\frac{u_o}{u_{in}} = \frac{G_1 - G_2}{G_3 - G_4}$$

在应用以上方法时, 由于运放输出端的电流事先无法确定, 因此不宜对该结点列方程, 可以认为这是把运放理想化处理所带有的特点。