

5.1 学习要点

5.1.1 运算放大器及其特性

1. 实际运算放大器

实际运算放大器是一种多端集成电路器件,通常有8~14个端钮。从电路分析的角度看,它可视为一种具有四个端钮的元件。四个端钮分别是同相输入端、反相输入端、输出端和接地端。实际“运放”的主要技术参数有三个,分别是 A ——开环放大倍数, R_{in} ——输入电阻, R_{o} ——输出电阻。

在实际应用中,运放通常工作于“闭环”状态,且采用“负反馈”方式,即负反馈电路接于输出端与反相输入端之间。

2. 理想运算放大器

理想运放是实际运放的理想化。理想化的条件为:开环放大倍数 $A \rightarrow \infty$;输入电阻 $R_{\text{in}} \rightarrow \infty$;输出电阻 $R_{\text{o}} = 0$ 。

理想运放的基本特性有两个:①两输入端间的电压为零,或两输入端钮的对地电位相等,则同相输入端和反相输入端之间相当于短路,此称为“虚短路”特性。②流入两个输入端的电流为零,则两个输入端相当于断路,此称为“虚断路”特性。

5.1.2 含理想运放电路的分析

通常利用理想运放的“虚短路”和“虚断路”这两个基本特性及结合基氏定律和其他元件的特性对含理想运放的电路进行分析计算。当这种电路的结构形式较为复杂时,在计算时多采用“节点分析法”。

5.2 练习题题解

5-1 在图5-1(a)所示的电路中,运放的开环放大倍数 A 为有限值,求该电路的电压增益 $K = \frac{u_{\text{o}}}{u_{\text{i}}}$ 。

解 设运放工作在线性放大区,由此作出图5-1(a)所示电路对应的模型如图5-1(b)所

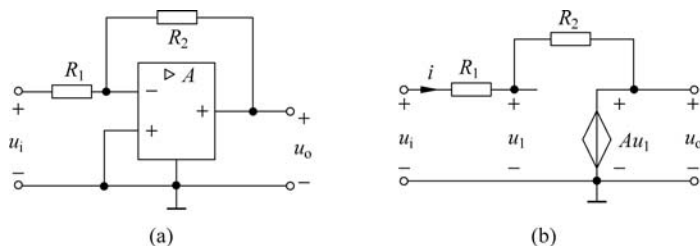


图 5-1 练习题 5-1 图

示。对此电路可列出如下两个 KVL 方程：

$$\begin{cases} (R_1 + R_2)i + Au_1 = u_i \\ u_1 = R_2 i + Au_1 \end{cases}$$

由上述方程可解得

$$u_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2 - R_1 A} u_i$$

而 $u_o = Au_1$, 于是

$$K = \frac{u_o}{u_i} = \frac{AR_2}{R_1 + R_2 - AR_1}$$

5-2 求图 5-2 所示理想运放电路的输出电压 u_o 。

解 由理想运放的“虚断路”特性, 有

$$i_1 = i_3 = 0$$

又由理想运放的“虚短路”特性, 有

$$u_1 = u_{s2}$$

于是得

$$i = \frac{u_{s1} - u_1}{R} = \frac{u_{s1} - u_{s2}}{R}$$

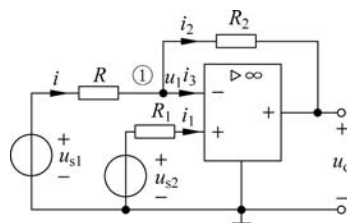


图 5-2 练习题 5-2 图

输出电压为

$$\begin{aligned} u_o &= -R_2 i_2 + u_1 = -R_2 i + u_1 = -R_2 \frac{u_{s1} - u_{s2}}{R} + u_{s2} \\ &= \frac{(R + R_2)u_{s2} - R_2 u_{s1}}{R} \end{aligned}$$

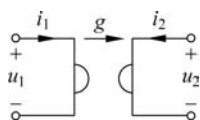


图 5-3 练习题 5-3 图

5-3 证明回转器是无源元件。

解 图 5-3 所示回转器的端口特性为

$$i_1 = g u_2$$

$$i_2 = -g u_1$$

该回转器的功率为

$$p = p_1 + p_2 = u_1 i_1 + u_2 i_2$$

将回转器的端口特性代入, 有

$$p = u_1 i_1 + u_2 i_2 = u_1 (g u_2) + u_2 (-g u_1) = 0$$

由此证明了回转器是无源元件。

5.3 习题题解

5-1 求图 5-4 所示含理想运放电路中的电压 u_o 。

解 给出电流 i_1 和 i_2 的参考方向如图中所示。由“虚短路”和“虚断路”特性,可知

$$u = u_s, \quad i_1 = 0, \quad i_2 = 0$$

于是可求得

$$u_o = \frac{u}{R_4} (R_3 + R_4) = \frac{R_3 + R_4}{R_4} u_s$$

5-2 电路如图 5-5 所示,求输出电压 u_o 。

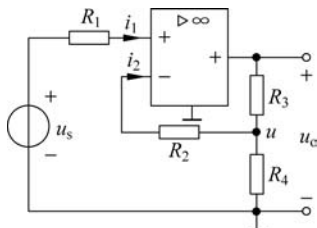


图 5-4 题 5-1 图

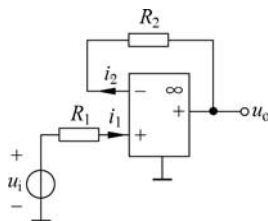


图 5-5 题 5-2 图

解 此电路实际是“电压跟随器”电路。由理想运放的“虚断”特性,知 $i_1 = 0, i_2 = 0$, 于是在 R_1 和 R_2 上无压降。又由理想运放的“虚短”特性,有

$$u_o = u_i$$

由此可见,此电路有消除电源内阻 R_1 的作用,从而将实际含有内阻的电压源变为无内阻的理想电压源。

5-3 求图 5-6 所示含理想运放电路中的输出电压 u_o 。

解 给出电流 i_1 和 i_2 的参考方向如图中所示。由理想运放的“虚短路”和“虚断路”特性,有

$$u_1 = 0$$

$$i_1 = i_2$$

$$i_1 = \frac{u_i}{R_1}$$

$$u_o = -R_4 i_2$$

可求得

$$u_o = -R_4 i_2 = -R_4 i_1 = -\frac{R_4}{R_1} u_i$$

5-4 电路如图 5-7 所示,求输出电压与输入电压之比 u_o/u_i 。

解 由理想运放的“虚断”及“虚短”特性,知 $u_a = u_i$, 又由 KCL, 有

$$\frac{u_o - u_a}{R_3} = \frac{u_a}{R_3}$$

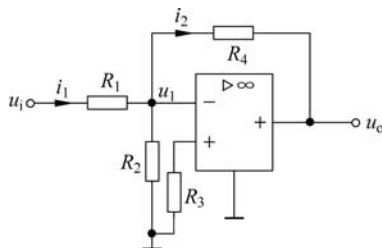


图 5-6 题 5-3 图

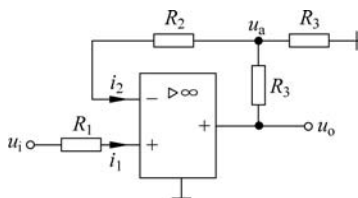


图 5-7 题 5-4 图

将 $u_a = u_i$ 代入上式, 可得

$$\frac{u_o}{u_i} = 2$$

5-5 求图 5-8(a)所示电路中 a、b 两点间的戴维南等效电路。

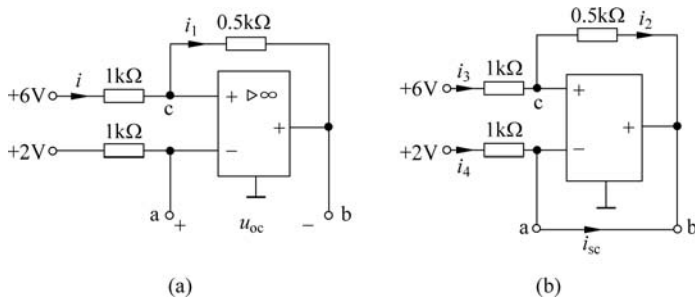


图 5-8 题 5-5 图

解 (1) 先求开路电压 u_{oc} , 由图 5-8(a)所示电路, 有 $u_c = u_a = 2V$, 则

$$i_1 = i = \frac{6 - u_c}{1000} = \frac{6 - 2}{1000} = 4\text{mA}$$

$$u_b = -0.5 \times 1000 i_1 + u_c = -2 + 2 = 0$$

于是开路电压为

$$u_{oc} = u_a - u_b = u_a = 2V$$

(2) 求短路电流 i_{sc} 。由图 5-8(b)所示电路, 有 $u_b = u_a$, 则 $i_2 = i_3 = 0$, 则有

$$u_a = u_c = 6V$$

$$i_{sc} = i_4 = \frac{2 - u_a}{1000} = \frac{2 - 6}{1000} = -4\text{mA}$$

(3) 求等效电阻 R_0

$$R_0 = \frac{u_{oc}}{i_{sc}} = \frac{2}{-4 \times 10^{-3}} = -500\Omega$$

5-6 求图 5-9 所示电路中的输出电压 u_o 。

解 由“虚断”特性, 求得

$$u_b = 10^{-3} \times 2 \times 10^3 = 2V$$

又由“虚短”特性, 知 $u_a = u_b = 2V$ 。又由 KCL, 有

$$i = \frac{8 - u_a}{2000} - \frac{u_a}{1000} = \frac{8 - 2}{2000} - \frac{2}{1000} = 1 \text{ mA}$$

再由“虚断”特性及 KVL, 得

$$u_o = -5000i_1 + u_b = -5 + 2 = -3 \text{ V}$$

5-7 求图 5-10 所示电路中的输出电压 u_o 和电流 i 。

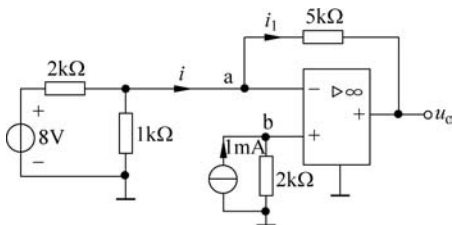


图 5-9 题 5-6 图

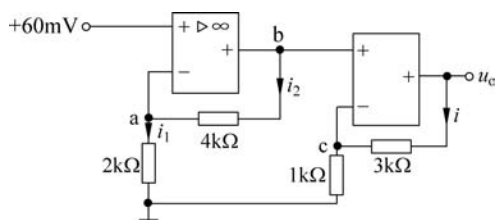


图 5-10 题 5-7 图

解 由“虚短”特性, 知 $u_a = 60 \text{ mV}$, 则

$$i_2 = i_1 = \frac{u_a}{2 \times 10^3} = \frac{60 \times 10^{-3}}{2 \times 10^3} = 30 \times 10^{-6} \text{ A}$$

$$u_b = 4000i_2 + u_a = 120 + 60 = 180 \text{ mV}$$

又由“虚短”“虚断”特性, 有

$$i = \frac{u_c}{1000} = \frac{u_b}{1000} = \frac{180 \times 10^{-3}}{1000} = 180 \times 10^{-6} \text{ A}$$

于是求得

$$u_o = 3000i + u_c = 540 + 180 = 720 \text{ mV}$$

5-8 电路如图 5-11 所示, 试求其入端电阻 R_{in} 。

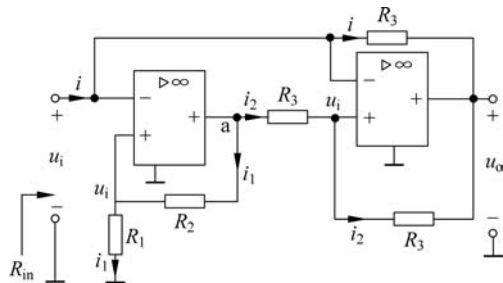


图 5-11 题 5-8 图

解 依据“虚短”“虚断”特性, 在电路中标示各节点电位及各支路电流如图 5-11 所示。可得

$$u_a = R_2 i_1 + u_i = R_2 \cdot \frac{u_i}{R_1} + u_i = \frac{R_1 + R_2}{R_1} u_i$$

$$i_2 = \frac{u_a - u_i}{R_3} = \frac{\left(\frac{R_1 + R_2}{R_1} - 1\right) u_i}{R_3} = \frac{R_2}{R_1 R_3} u_i$$

又由 KVL, 有

$$R_3 i - R_3 i_2 = 0$$

即

$$i = i_2 = \frac{R_2}{R_1 R_3}$$

则所求为

$$R_{\text{in}} = \frac{u_i}{i} = \frac{R_1 R_3}{R_2}$$

5-9 试求图 5-12 所示电路的输出电压 u_o 。

解 给各节点编号及标示各支路电流如图 5-12 所示。由理想运放特性,有

$$u_a = u_{s1}, \quad u_c = u_{s2}$$

$$i = \frac{u_a}{R_1} = \frac{u_{s1}}{R_1} = -i_1$$

$$u_b = u_a - R_1 i_1 = u_{s1} + u_{s1} = 2u_{s1}$$

$$i_2 = \frac{u_b - u_c}{R_1} = \frac{2u_{s1} - u_{s2}}{R_1}$$

则所求为

$$u_o = -R_1 i_2 + u_{s2} = u_{s2} - 2u_{s1} + u_{s2} = 2(u_{s2} - u_{s1})$$

5-10 电路如图 5-13 所示,试求输出电压 u_o 。

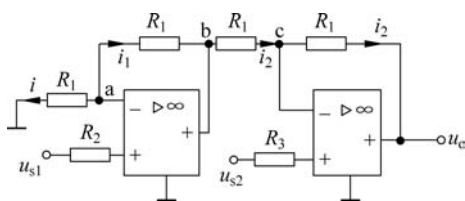


图 5-12 题 5-9 图

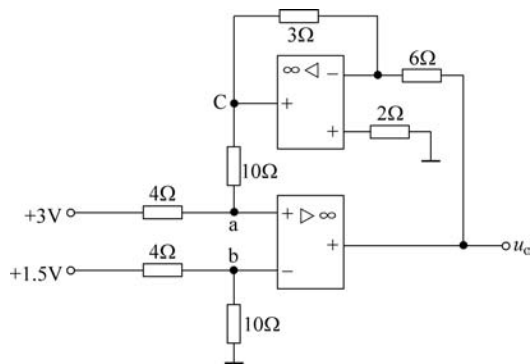


图 5-13 题 5-10 图

解 电路上方的运算放大器电路为一反相放大器,其输入为 u_o ,输出为 u_c ,求得

$$u_c = -\frac{3}{6}u_o = -0.5u_o \quad (1)$$

又有

$$u_a = u_b \quad (2)$$

对节点 a 列写 KCL 方程为

$$\frac{u_c - u_a}{10} = \frac{u_a - 3}{4} \quad (3)$$

对节点 b 列写 KCL 方程为

$$\frac{u_b}{10} = \frac{1.5 - u_b}{4} \quad (4)$$

上述四式联立求解,解得

$$u_a = u_b = \frac{15}{14}\text{V}, \quad u_c = -\frac{15}{4}\text{V}, \quad u_o = -\frac{15}{2} = 7.5\text{V}$$