

5-1 设要求图示电路的输出 u_o 为

$$-u_o = 3u_1 + 0.2u_2$$

已知 $R_3 = 10\text{k}\Omega$, 求 R_1 和 R_2 .

解 应用理想运放的两条规则, 有

由规则 1, $i_- = 0$, 得 $i = i_1 + i_2$,

即

$$\frac{u_- - u_o}{R_3} = \frac{u_1 - u_-}{R_1} + \frac{u_2 - u_-}{R_2}$$

根据规则 2, $u_- = u_+ = 0$, 代入上式中, 得

$$-\frac{u_o}{R_3} = \frac{u_1}{R_1} + \frac{u_2}{R_2}$$

整理有

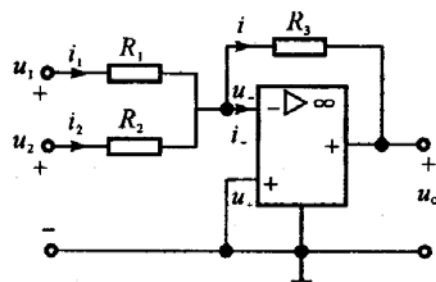
$$-u_o = \frac{R_3}{R_1}u_1 + \frac{R_3}{R_2}u_2$$

由已知条件, 有 $-u_o = 3u_1 + 0.2u_2$

比较上述两式可得到

$$R_1 = \frac{R_3}{3} = \frac{10}{3}\text{k}\Omega = 3.33\text{k}\Omega,$$

$$R_2 = \frac{R_3}{0.2} = \frac{10}{0.2}\text{k}\Omega = 50\text{k}\Omega.$$



题 5-1 图

5-2 图示电路起减法作用, 求输出电压 u_o 和输入电压 u_1, u_2 之间的关系.

解 由规则 1, $i_- = i_+ = 0$ 得 $i_3 = i_1, i_4 = i_2$, 故有

$$\begin{cases} \frac{u_- - u_o}{R_2} = \frac{u_1 - u_-}{R_1} & (1) \\ \frac{u_+}{R_2} = \frac{u_2 - u_+}{R_1} & (2) \end{cases}$$

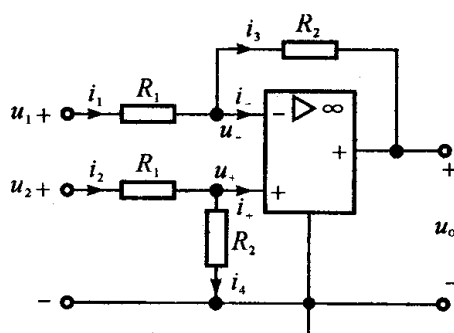
由(2)式可得

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

应用规则 2,

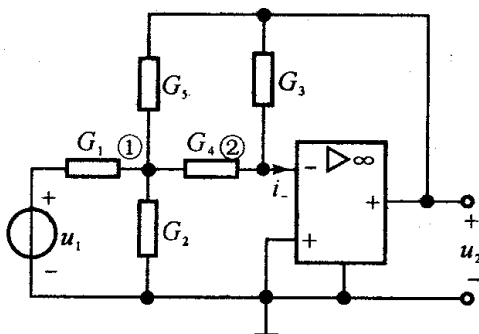
$$u_- = u_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_2$$

代入(1)式中, 有
$$u_o = -\frac{R_2}{R_1} (u_1 - u_-) + u_- = \frac{R_2}{R_1} (u_2 - u_1)$$



题 5-2 图

5-3 求图示电路的输出电压与输入电压比 $\frac{u_2}{u_1}$.



题 5-3 图

解 提示 利用结点电压法并合理运用理想运放的两条规则.

独立结点 ① 和 ② 的选取如图所示, 列出结点电压方程, 并注意到规则 1, $i_- = 0$, 可得

$$\begin{cases} (G_1 + G_2 + G_4 + G_5) u_{n1} - G_4 u_{n2} - G_5 u_2 = G_1 u_1 \\ -G_4 u_{n1} + (G_3 + G_4) u_{n2} - G_3 u_2 = 0 \end{cases}$$

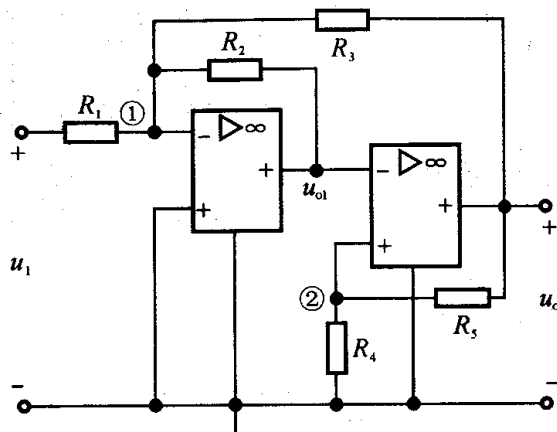
应用规则 2, 得 $u_{n2} = 0$, 代入上述两式中, 有

$$\begin{cases} (G_1 + G_2 + G_4 + G_5) u_{n1} - G_5 u_2 = G_1 u_1 \\ -G_4 u_{n1} - G_3 u_2 = 0 \end{cases}$$

整理得

$$\frac{u_2}{u_1} = -\frac{G_1 G_4}{(G_1 + G_2 + G_4 + G_5) G_3 + G_4 G_5}$$

5-4 求图示电路的电压比值 $\frac{u_o}{u_1}$.



题 5-4 图

解 采用结点电压法求解, 独立结点 ① 和 ② 选取如图所示. u_{o1} 是第一个运放的输出量, 只是一个中间变量, 由于它在第一个运放的输出端, 因此无需对它列写结点电压方程. 对结点 ① 和 ② 列写结点电压方程, 并注意规则 1, 可得

$$\begin{cases} (\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3})u_{n1} - \frac{1}{R_2}u_{o1} - \frac{1}{R_3}u_o = \frac{u_1}{R_1} & (1) \\ (\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5})u_{n2} - \frac{1}{R_5}u_o = 0 & (2) \end{cases}$$

应用规则 2, 得 $u_{n1} = 0, u_{o1} = u_{n2}$, 又由方程 (2) 式得

$$u_{n2} = \frac{R_4}{R_4 + R_5}u_o$$

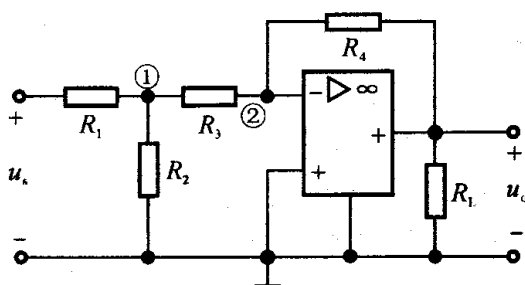
将以上关系式均代入到方程 (1) 式中, 有

$$-\frac{1}{R_2} \times \frac{R_4}{(R_4 + R_5)}u_o - \frac{1}{R_3}u_o = \frac{u_1}{R_1}$$

所以
$$\frac{u_o}{u_1} = -\frac{R_2 R_3 (R_4 + R_5)}{R_1 (R_2 R_4 + R_2 R_5 + R_3 R_4)}$$

5-5 求图示电路的电压比 $\frac{u_o}{u_s}$.

解 方法一 利用结点电压法, 独立结点 ① 和 ② 选取如图所示, 列结点电压方程, 并注意到规则 1, 有



题 5-5 图

$$\begin{cases} (\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3})u_{n1} - \frac{1}{R_3}u_{n2} = \frac{u_s}{R_1} & (1) \\ -\frac{1}{R_3}u_{n1} + (\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4})u_{n2} - \frac{1}{R_4}u_o = 0 & (2) \end{cases}$$

应用规则 2, 得 $u_{n2} = 0$, 代入上述方程(2) 式中得

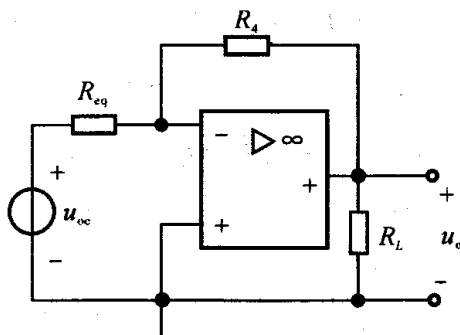
$$u_{n1} = -\frac{R_3}{R_4}u_o$$

代入方程(1) 式中, 故有

$$(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3})(-\frac{R_3}{R_4})u_o = \frac{u_s}{R_1}$$

整理得到
$$\frac{u_o}{u_s} = -\frac{R_2 R_4}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}$$

方法二 将题 5-5 图中的结点 ② 左边的含源一端口电路等效为戴维宁等效电路, 如题解 5-5 图所示, 其中 $u_{oc} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}u_s$, $R_{eq} = (R_1 // R_2) + R_3$, 此电路为一个倒相比例器, 故有



题解 5-5 图

$$\begin{aligned} u_o &= -\frac{R_4}{R_{eq}} \cdot u_{oc} \\ &= -\frac{R_4}{(R_1 // R_2) + R_3} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_s \end{aligned}$$

故

$$\frac{u_o}{u_s} = -\frac{R_2 R_4}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1}$$

5-6 试证明图示电路若满足 $R_1 R_4 = R_2 R_3$, 则电流 i_L 仅决定于 u_1

而与负载电阻 R_L 无关.

证明 利用结点电压法分析.

列图中所示的结点 ① 和 ② 的结点电压方程, 并应用理想运放的规则 1, 得

$$\begin{cases} (\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2})u_{n1} - \frac{1}{R_2}u_o = \frac{u_1}{R_1} \\ (\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_L})u_{n2} - \frac{1}{R_4}u_o = 0 \end{cases}$$

应用规则 2, 有 $u_{n1} = u_{n2}$ 代入上述方程组中, 整理得

$$u_o = R_4 (\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_L})u_{n2}$$

$$(\frac{1}{R_1} - \frac{R_4}{R_2 R_3} - \frac{R_4}{R_2 R_L})u_{n2} = \frac{u_1}{R_1}$$

所以有
$$u_{n2} = \frac{R_2 R_3 R_L}{(R_2 R_3 - R_1 R_4) R_L - R_1 R_3 R_4} \times u_1$$

又因为
$$i_L = \frac{u_{n2}}{R_L} = \frac{R_2 R_3}{(R_2 R_3 - R_1 R_4) R_L - R_1 R_3 R_4} \times u_1$$

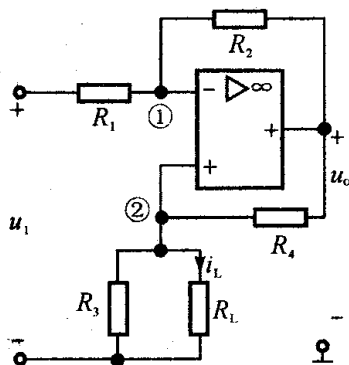
当 $R_2 R_3 = R_1 R_4$ 时,
$$i_L = \frac{R_2 R_3 u_1}{-R_1 R_3 R_4} = -\frac{R_2 u_1}{R_1 R_4}$$

即电流 i_L 应与负载电阻 R_L 无关, 只与电压 u_1 有关.

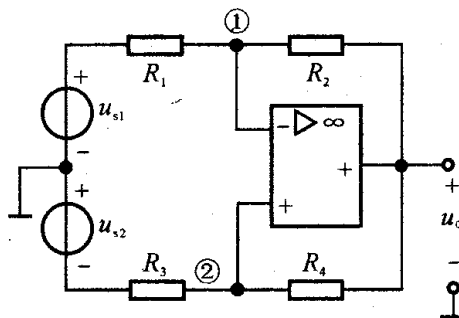
5-7 求图示电路的 u_o 与 u_{s1}, u_{s2} 之间的关系.

解 采用结点电压法进行分析. 对图中所选取的结点 ① 和 ② 列结点电压方程, 并应用理想运放规则 1, 得

$$\begin{cases} (\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2})u_{n1} - \frac{1}{R_2}u_o = \frac{u_{s1}}{R_1} \\ (\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4})u_{n2} - \frac{1}{R_4}u_o = -\frac{u_{s2}}{R_3} \end{cases}$$



题 5-6 图



题 5-7 图

应用规则 2, 有 $u_{n1} = u_{n2}$, 代入上述方程中, 解得 u_o 为

$$u_o = \frac{R_2(R_3 + R_4)u_{s1} + R_4(R_1 + R_2)u_{s2}}{R_2R_3 - R_1R_4}$$

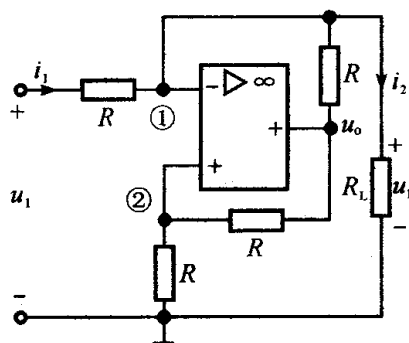
如果用电导表示 u_o , 则

$$u_o = \frac{G_1(G_3 + G_4)u_{s1} + G_3(G_1 + G_2)u_{s2}}{G_1G_4 - G_2G_3}$$

5-8 用运放可实现受控源, 试将图示电路以一个受控源形式表示, 并求其控制系数。

解 采用结点电压法分析. 列结点 ① 和 ② 的结点电压方程, 并注意到理想运放规则 1, 得

$$\begin{cases} (\frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R_L})u_{n1} - \frac{1}{R}u_o = \frac{u_1}{R} & (1) \\ (\frac{1}{R} + \frac{1}{R})u_{n2} - \frac{1}{R}u_o = 0 & (2) \end{cases}$$



题 5-8 图

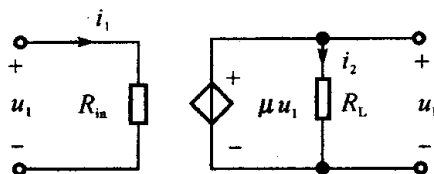
应用规则 2, 有 $u_{n1} = u_{n2} = u_L$, 从方程(2) 式得 $u_o = 2u_{n2}$. 代入到方程(1) 式中, 得

$$(\frac{2}{R} + \frac{1}{R_L})u_L - \frac{1}{R} \times 2u_L = \frac{u_1}{R}$$

$$u_L = \frac{R_L}{R}u_1$$

又因为

$$u_1 = Ri_1 + u_L = Ri_1 + \frac{R_L}{R}u_1$$



题解 5-8 图

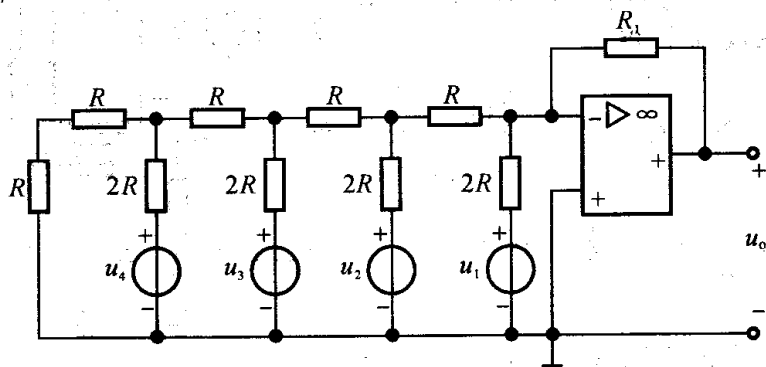
故
$$u_1 = \frac{R^2}{R - R_L}i_1 = R_{in}i_1$$

其中, $R_{in} = \frac{R^2}{R - R_L}$ 为受控源的输入电阻, 而 $u_L = \frac{R_L}{R}u_1 = \mu u_1$ 为输出电路端电压, 所以题 5-8 图所示电路可用一个电压控制电压源

(VCCS) 的受控源形式表示, 其控制系数 $\mu = \frac{R_1}{R}$, 等效电路如题解 5-8 图所示.

5-9 电路如图所示, 设 $R_f = 16R$, 验证该电路的输出 u_o 与输入 $u_1 \sim u_4$ 之间的关系为 $u_o = -(8u_1 + 4u_2 + 2u_3 + u_4)$.

[注: 该电路为 4 位数字—模拟转换器, 常用于信息处理、自动控制领域. 该电路可将一 4 位二进制数字信号转换成模拟信号, 例如当数字信号为 1101 时, 令 $u_1 = u_2 = u_4 = 1, u_3 = 0$, 则由关系 $u_o = -(8u_1 + 4u_2 + 2u_3 + u_4)$ 得模拟信号 $u_o = -(8 + 4 + 0 + 1) = -13$]



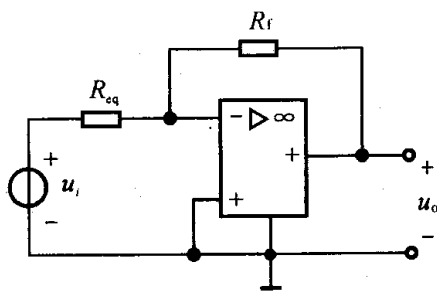
题 5-9 图

解 应用电源等效变换把题 5-9 图所示电路等效变换为题解 5-9 图所示电路, 其中等效电路的参数为

$$\begin{cases} R_{eq} = R \\ u_i = \frac{u_4}{16} + \frac{u_3}{8} + \frac{u_2}{4} + \frac{u_1}{2} \end{cases}$$

对应题解 5-9 图所示电路是一个倒向比例器, 且已知 $R_f = 16R$, 所以有

$$\begin{aligned} u_o &= -\frac{R_f}{R_{eq}} u_i = -16u_i \\ &= -(8u_1 + 4u_2 + 2u_3 + u_4) \end{aligned}$$



题解 5-9 图