

# ch2.7 含运算放大器 电路的分析

---

杨旭强

哈尔滨工业大学电气工程系

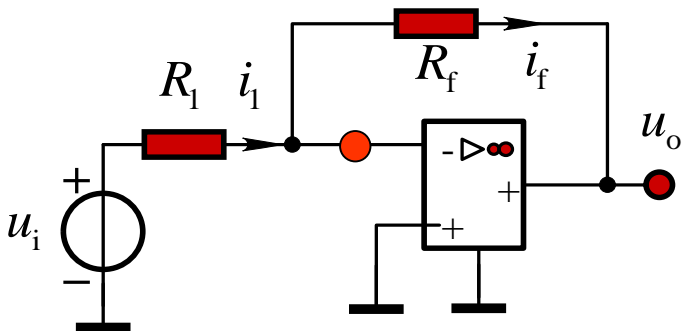


## 2.7 含运算放大器电路的分析

要求：了解典型的反相同相放大器、加法器和差动放大器，熟练掌握含理想运算放大器电路的分析方法。

### 1. 反相放大器

根据虚断-输入端口电流为零的特性



反相放大器图

根据虚短-差分输入电压为零的特性

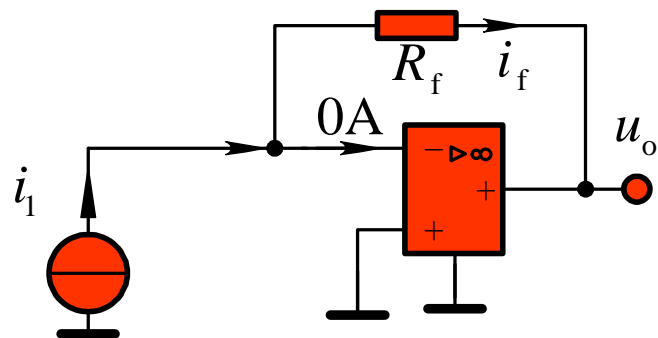
$$i_1 = \frac{u_i - 0}{R_1} \quad i_f = \frac{0 - u_o}{R_f}$$

输入、输出电压关系：
$$u_o = -\frac{R_f}{R_i} u_i$$

当  $R_1 = R_f$  时， $u_o = -u_i$  电路被称为反相器。

## 2.7 含运算放大器电路的分析

用反相放大器实现电流控制电压源



$$u_o = -R_f i_f = -R_f i_1$$

CCVS

### 2. 同相放大器

根据虚短和KVL

$$u_o = R_f i_f + u_i \quad i_1 = u_i / R_1$$

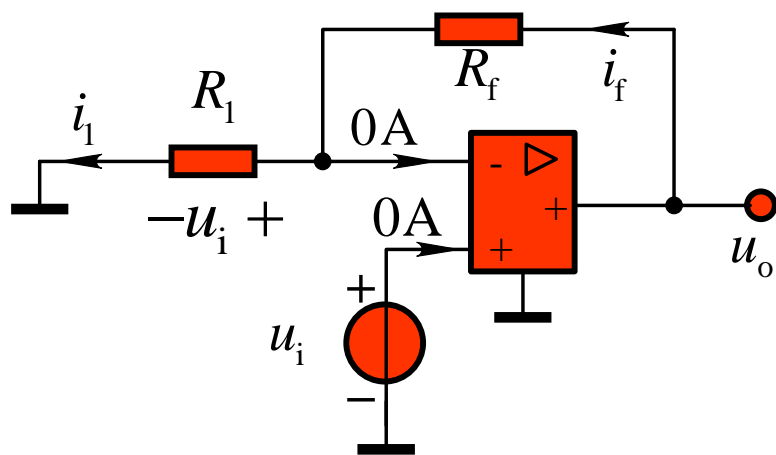
根据虚断  $i_f = i_1$

输出电压与输入电压的关系

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

VCVS

VCCS???

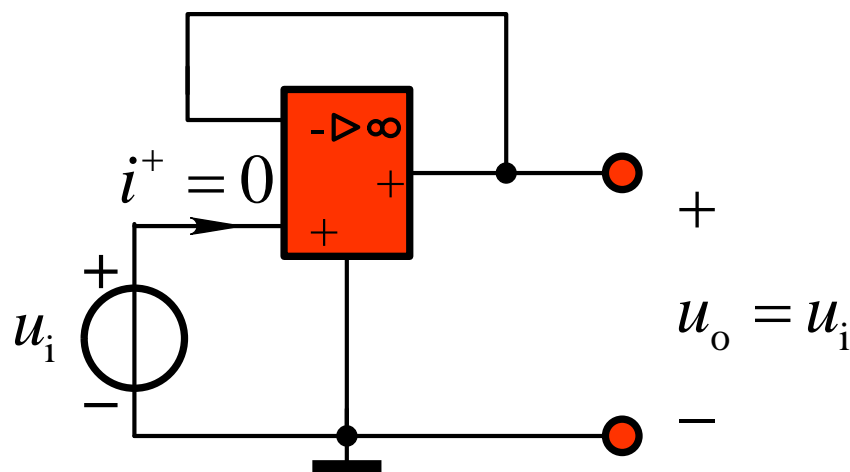


同相放大器

## 2.7 含运算放大器电路的分析

注：同相放大器是增益大于1的电压控制电压源,输出电压与输入电压极性相同。

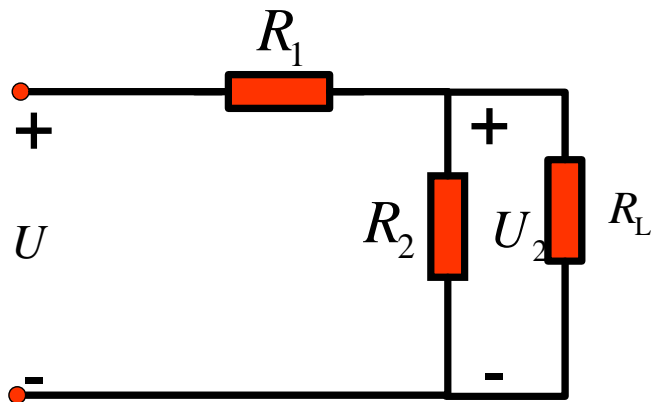
若令 $R_f=0$ ， $R_1=\infty$ ，此时电路变为电压跟随器。在电路起隔离作用，同时可以提高输入信号的带负载能力



电压跟随器

## 2.7 含运算放大器电路的分析

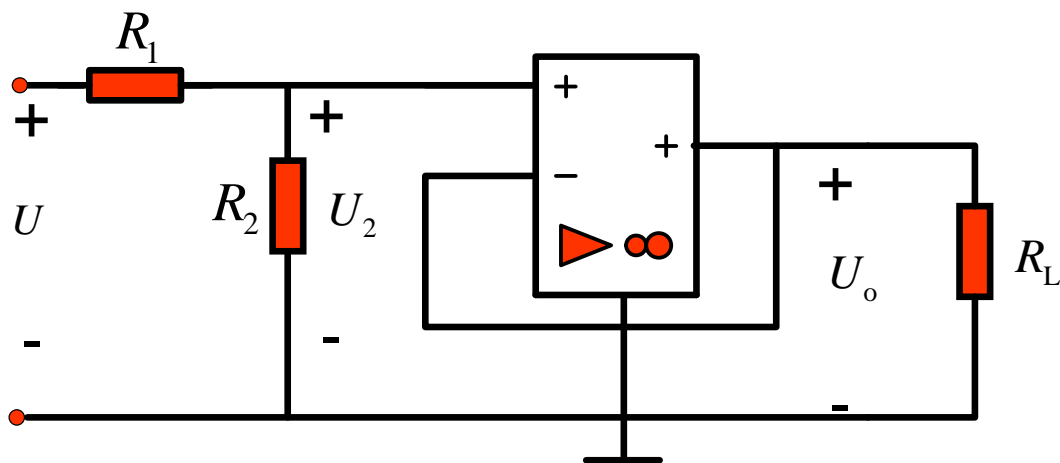
如：



图中由 $R_1$ 和 $R_2$ 构成的分压电路中，开路电压

$$U_{oc} = U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_1$$

接负载电阻 $R_L$ 后  $U_2 < U_{oc}$



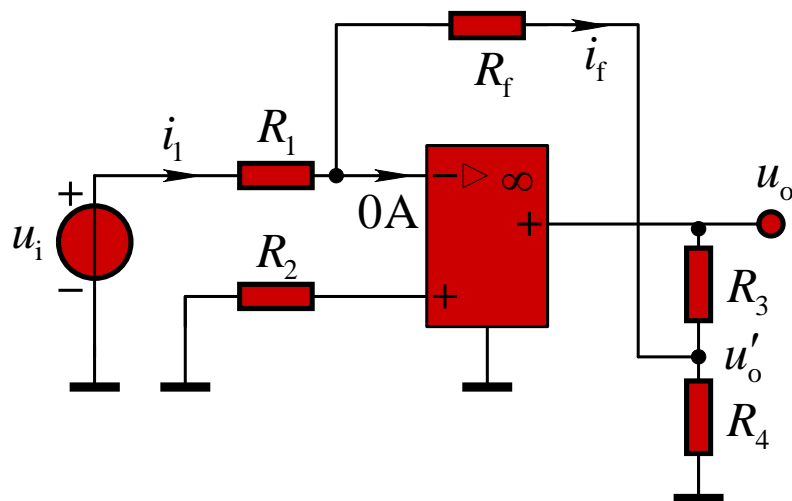
$$U_o = U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_1$$

电压跟随器在实际电路中起隔离和提高负载能力的作用

此外电压跟随器在实际电路中还可以起到保护后续电路作用

## 2.7 含运算放大器电路的分析

【例题2.17】 所示电路中，已知电阻 $R_f$ 远远大于 $R_4$ ， $R_f$ 支路对 $R_3$ 和 $R_4$ 电路的分流作用可忽略不计。求  $u_o/u_i$ 。



解：根据虚短得

$$i_1 = \frac{u_i - 0}{R_1} = \frac{u_i}{R_1} \quad i_f = \frac{0 - u'_o}{R_f} = -\frac{u'_o}{R_f}$$

再根据虚断及KCL得  $i_1 = i_f$

$$\text{整理得 } u'_o = -\frac{R_f}{R_1} u_i$$

因为忽略 $R_f$ 支路的分流作用  $u'_o = \frac{R_4}{R_4 + R_3} u_o$

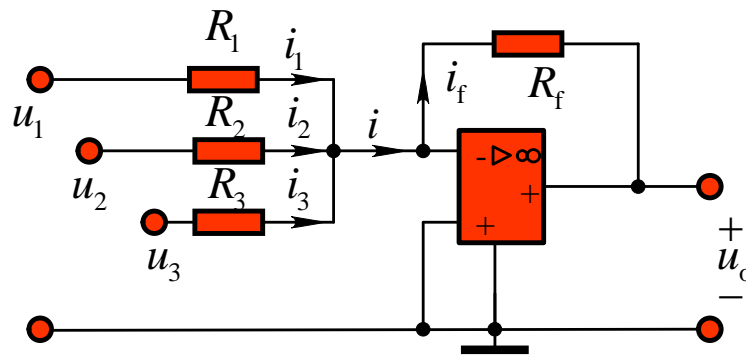
$$\text{求得 } \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_f}{R_1} \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right)$$

## 2.7 含运算放大器电路的分析

### 3. 加法器

根据虚短特性

$$i_1 = \frac{u_1}{R_1}, \quad i_2 = \frac{u_2}{R_2}, \quad i_3 = \frac{u_3}{R_3}$$



三输入加法器

根据虚断特性和KCL  $i_f = i = i_1 + i_2 + i_3$

根据欧姆定律和KVL求得输出电压和输入电压的关系

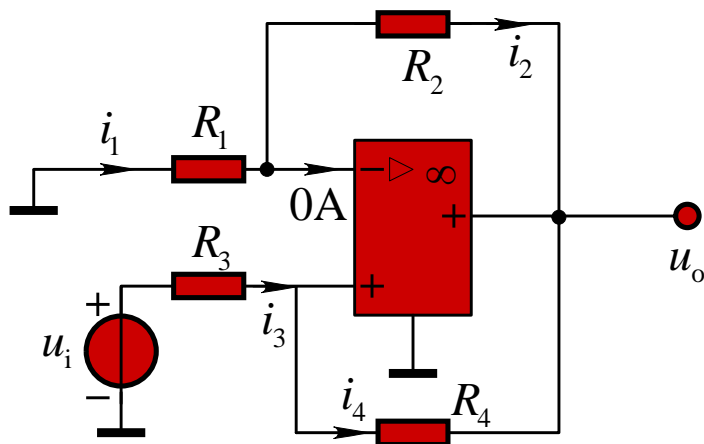
$$u_o = -R_f i_f = -\frac{R_f}{R_1} u_1 - \frac{R_f}{R_2} u_2 - \frac{R_f}{R_3} u_3 = k_1 u_1 + k_2 u_2 + k_3 u_3$$

若  $R_1 = R_2 = R_3 = R_f$  则  $u_o = -u_1 - u_2 - u_3$

是不是很方便，如何一步得到输入输出关系？？？

## 2.7 含运算放大器电路的分析

【例题2.18】求图示电路输出电压 $u_o$ 与输入电压 $u_i$ 的关系。



解：根据虚断的概念得

$$u^- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_o$$

再根据虚断、虚短得

$$i_3 = i_4 = \frac{u_i - u^-}{R_3}$$

由KVL得  $(R_3 + R_4)i_3 = u_i - u_o$

$$\text{联立得 } u_o = \frac{R_1 R_4 + R_2 R_4}{R_1 R_4 - R_2 R_3} u_i$$



## 2.7 含运算放大器电路的分析

### 4. 差分放大器

根据虚短和虚断的性质得：

$$u_{n1} = u_{n2} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} u_2$$

进一步求得电流  $i_1$  和  $i_2$

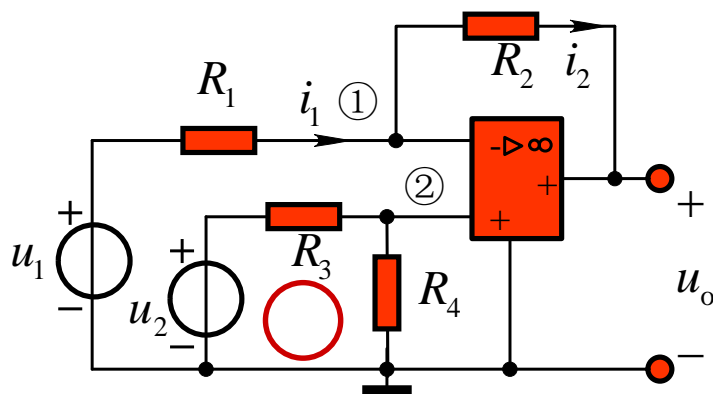
$$i_2 = i_1 = \frac{u_1 - u_{n1}}{R_1} = \frac{u_1 - u_{n2}}{R_1}$$

应用KVL求得输出电压与输入电压的关系

$$u_o = -R_2 i_2 + u_{n2} = \frac{R_2}{R_1} \frac{(1 + R_1 / R_2)}{(1 + R_3 / R_4)} u_2 - \frac{R_2}{R_1} u_1$$

特别的：  $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3} = A$

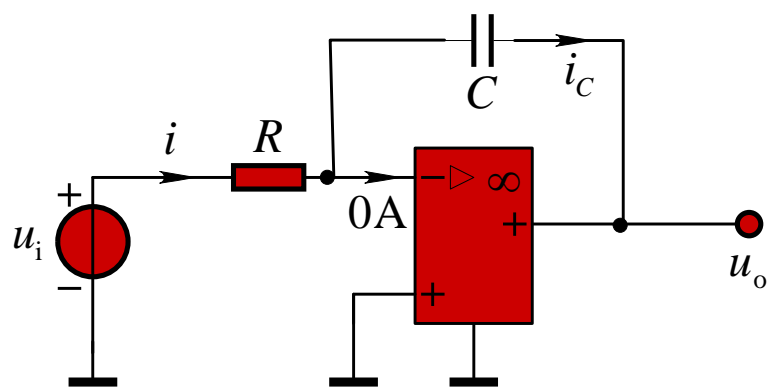
输出电压与两输入电压之差成正比  $u_o = A(u_2 - u_1)$



差分放大器电路

## 2.7 含运算放大器电路的分析

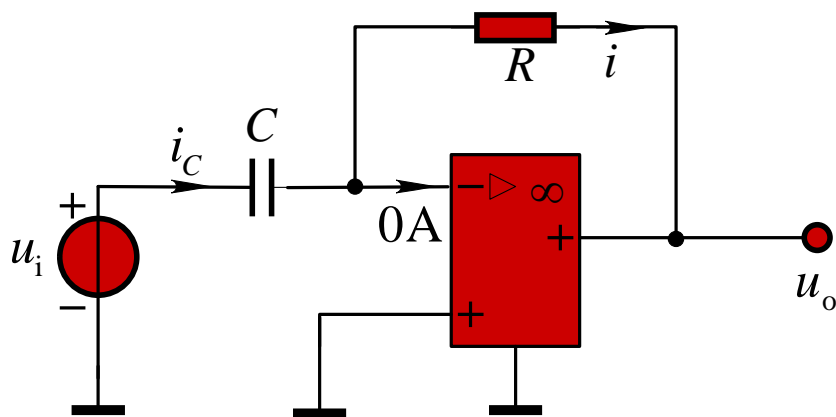
### 5. 积分运算电路



根据虚断和虚短  $i = i_C = \frac{u_i}{R}$

$$u_o = -u_C = -\frac{1}{C} \int i_C dt = -\frac{1}{RC} \int u_i dt$$

### 6. 微分运算电路



$$i_C = i = C \frac{du_i}{dt}$$

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

## 2.7 含运算放大器电路的分析

【例题2.11】 求出图示电路的输入电阻  $R_{eq}$

【解】 端口等效电阻与电压、电流的关系为

$$R_{eq} = \frac{u}{i}$$

由KVL得端口电压  $u = R_1 i_1 + R_2 i_2 + R i_3$

由运放的虚断特性有  $i = i_1$  ,  $i_2 = i_3$

由运放的虚短特性有  $R_1 i_1 + R_2 i_2 = 0$

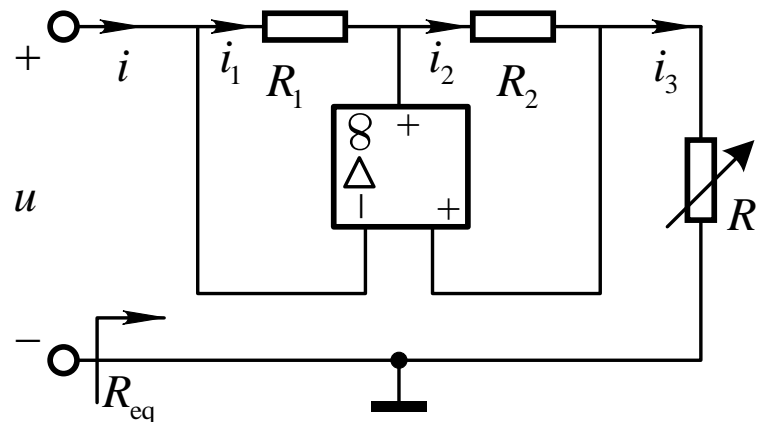
解得  $u = R i_3 = R i_2 = -\frac{R_1}{R_2} R i_1 = -\frac{R_1}{R_2} R i$

即  $R_{eq} = \frac{u}{i} = -\frac{R_1}{R_2} R$

当  $R_1 = R_2$  时, 可得

$$R_{eq} = -R$$

\*\*\* $i_1 \neq i_3$ \*\*\*\*



## 2.7 含运算放大器电路的分析

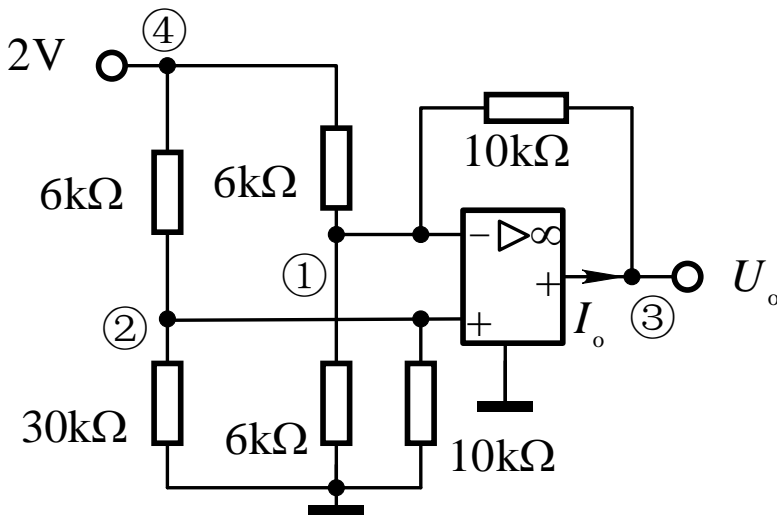
【例题2.12】 求出图示电路的输出电压  $U_o$ 。

【解】 图示电路共有4个独立节点，其中节点④的电压为2V。现对节点①、②、③列节点方程如下

$$\text{节点①} \quad \left(\frac{1}{6\text{k}\Omega} + \frac{1}{6\text{k}\Omega} + \frac{1}{10\text{k}\Omega}\right)U_{n1} - \frac{1}{10\text{k}\Omega}U_{n3} = \frac{2\text{V}}{6\text{k}\Omega}$$

$$\text{节点②} \quad \left(\frac{1}{6\text{k}\Omega} + \frac{1}{30\text{k}\Omega} + \frac{1}{10\text{k}\Omega}\right)U_{n2} = \frac{2\text{V}}{6\text{k}\Omega}$$

~~$$\text{节点③} \quad \frac{1}{10\text{k}\Omega}U_{n1} + \frac{1}{10\text{k}\Omega}U_{n3} - I_o = 0$$~~



补充理想运算放大器输入端口电压方程，即  $U_{n1} = U_{n2}$

解得  $U_{n1} = U_{n2} = (10/9)\text{V}$ ， $U_{n3} = (40/27)\text{V}$

## 2.7 含运算放大器电路的分析-小结

---

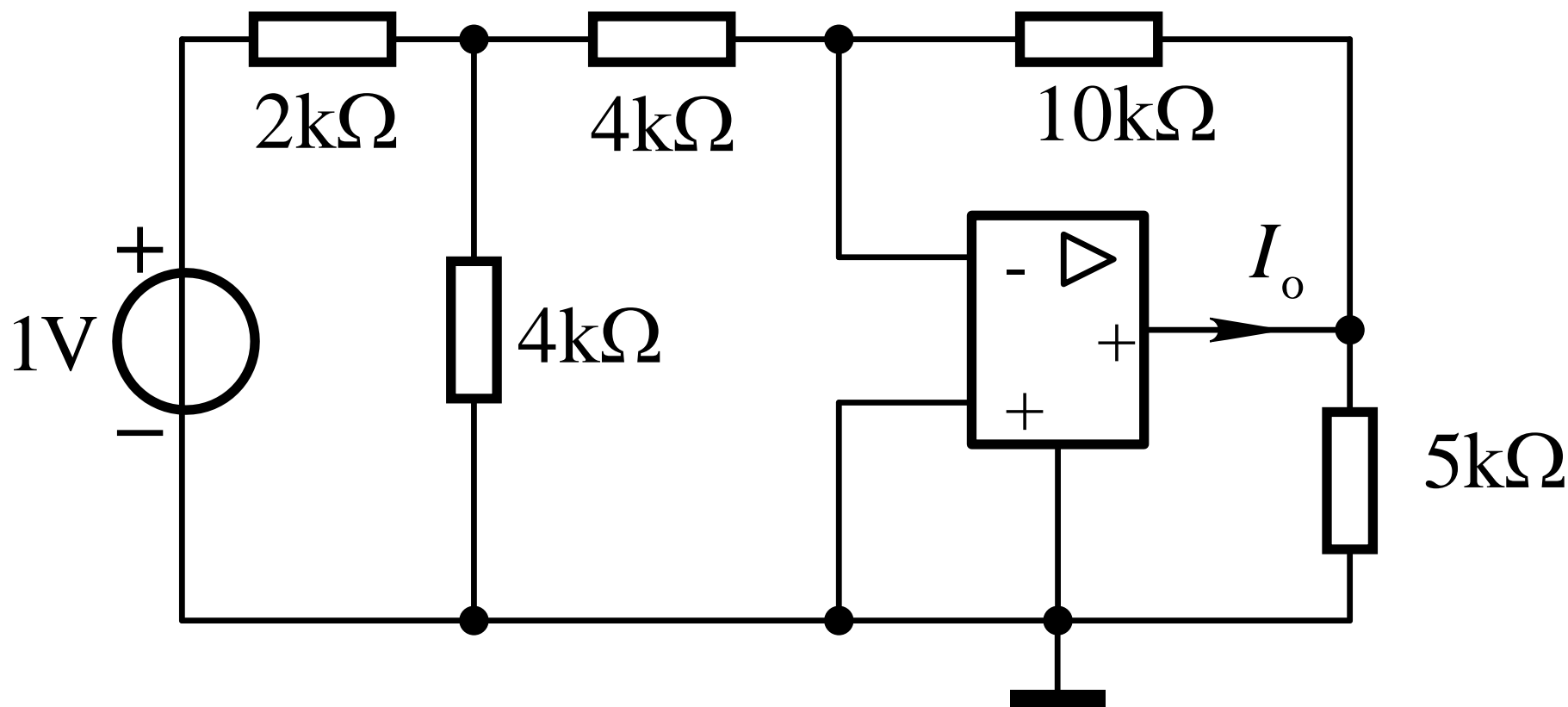
简单电路处理方法：利用虚短、虚断特性求解

复杂电路求解方法：采用节点法

- 要点：
- 1、不求输出电流时不对输出节点列KCL
  - 2、输入端即便电压已知为零也要列写其KCL
  - 3、必要时补充虚短特性方程

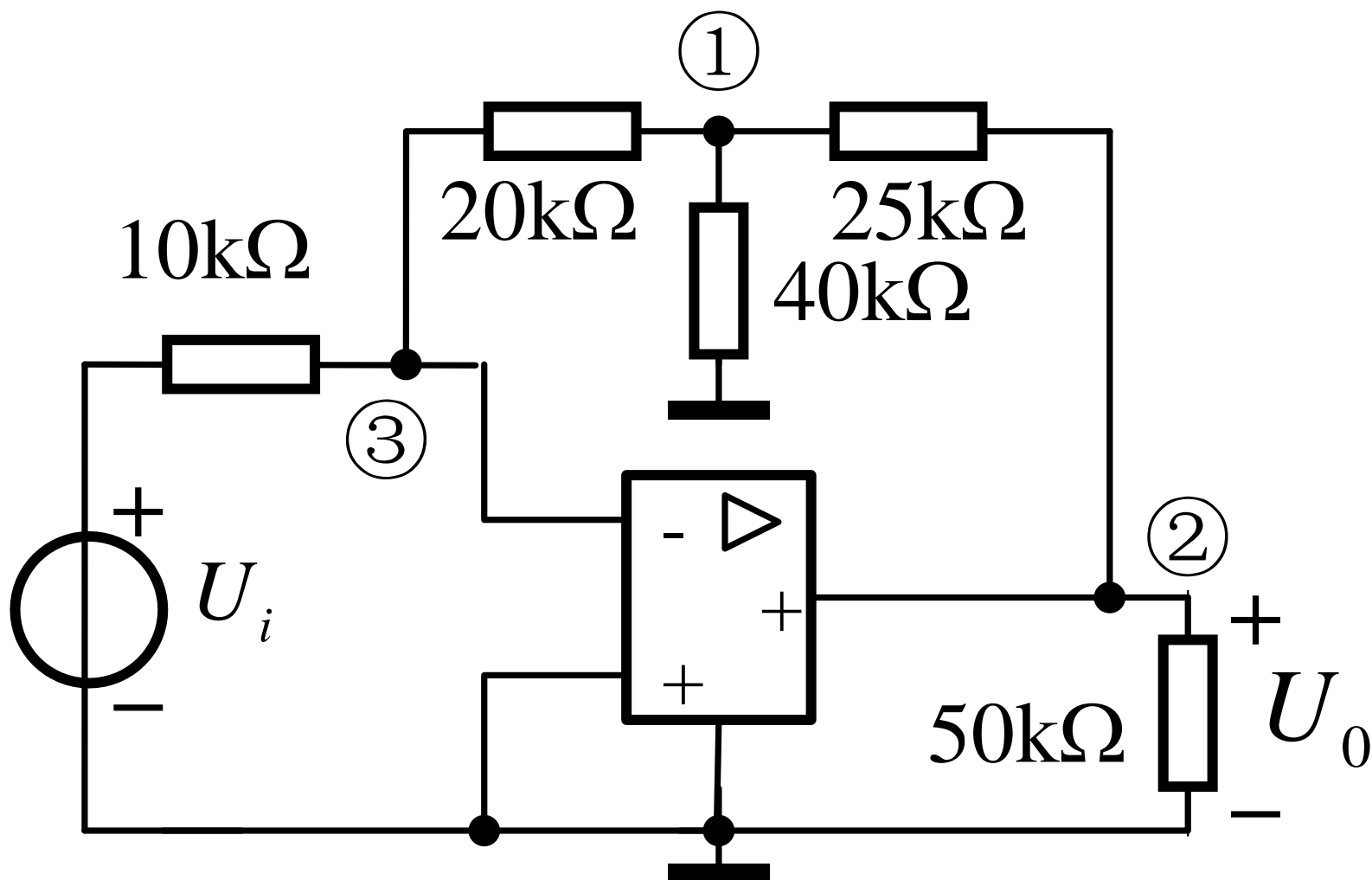
## 2.7 含运算放大器电路的分析

【习题2.28】 求出图示电路的输出电流  $I_o$ 。



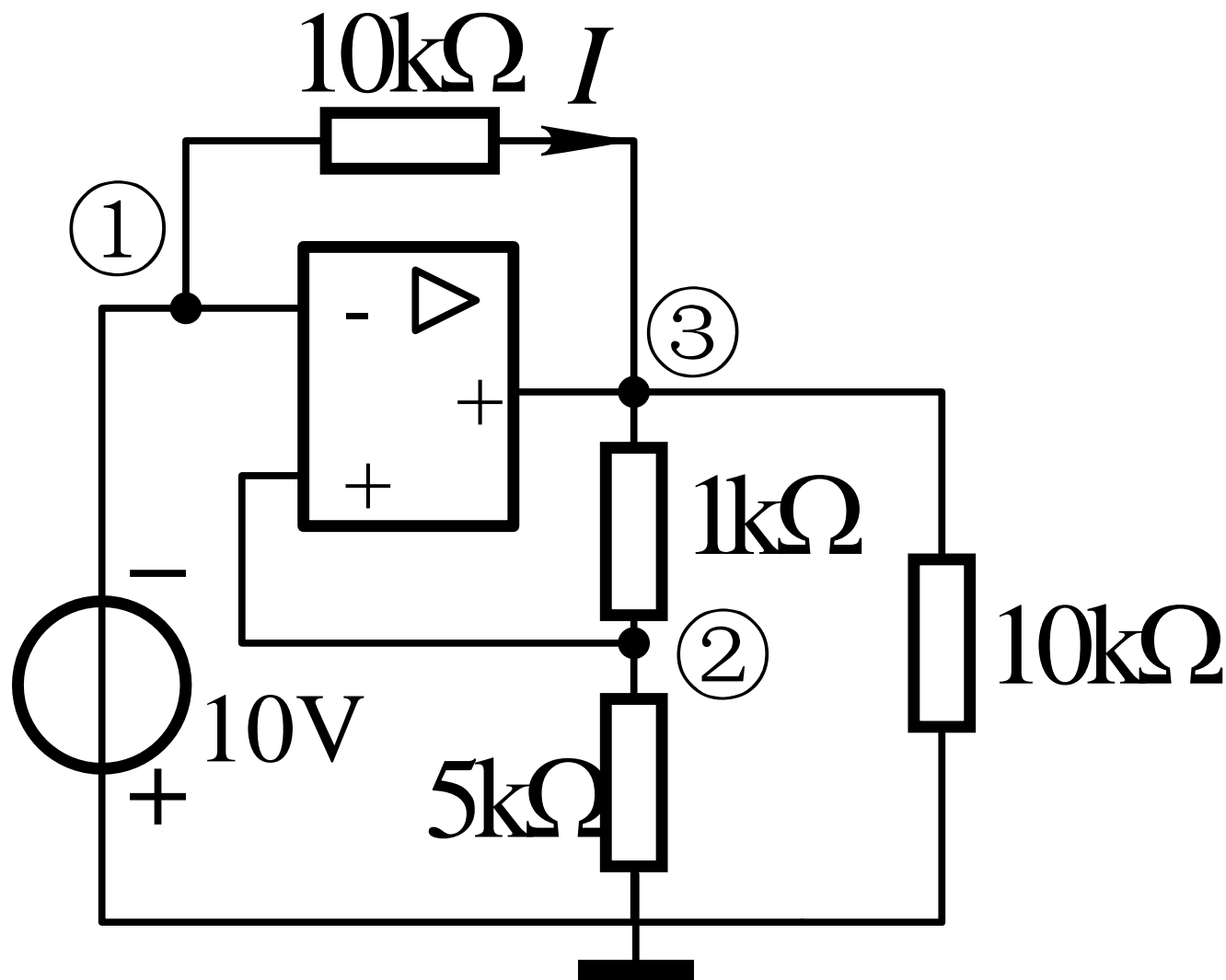
## 2.7 含运算放大器电路的分析

【习题2.29】 求出图示电路的输出电压  $U_0$ 。



## 2.7 含运算放大器电路的分析

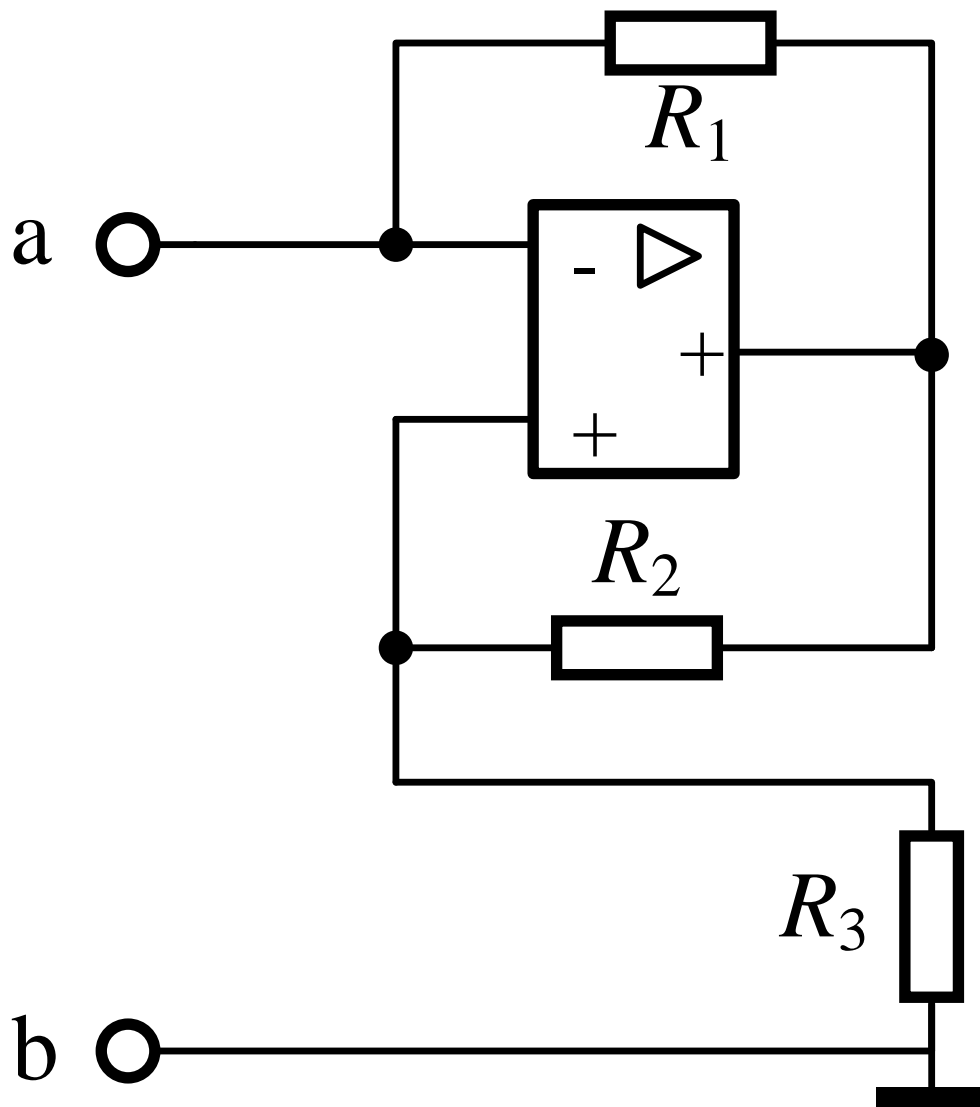
【习题2.30】 求出图示电路的电流  $I$





## 2.7 含运算放大器电路的分析

【习题2.31】 求出图示电路的输入电阻  $R_{ab}$



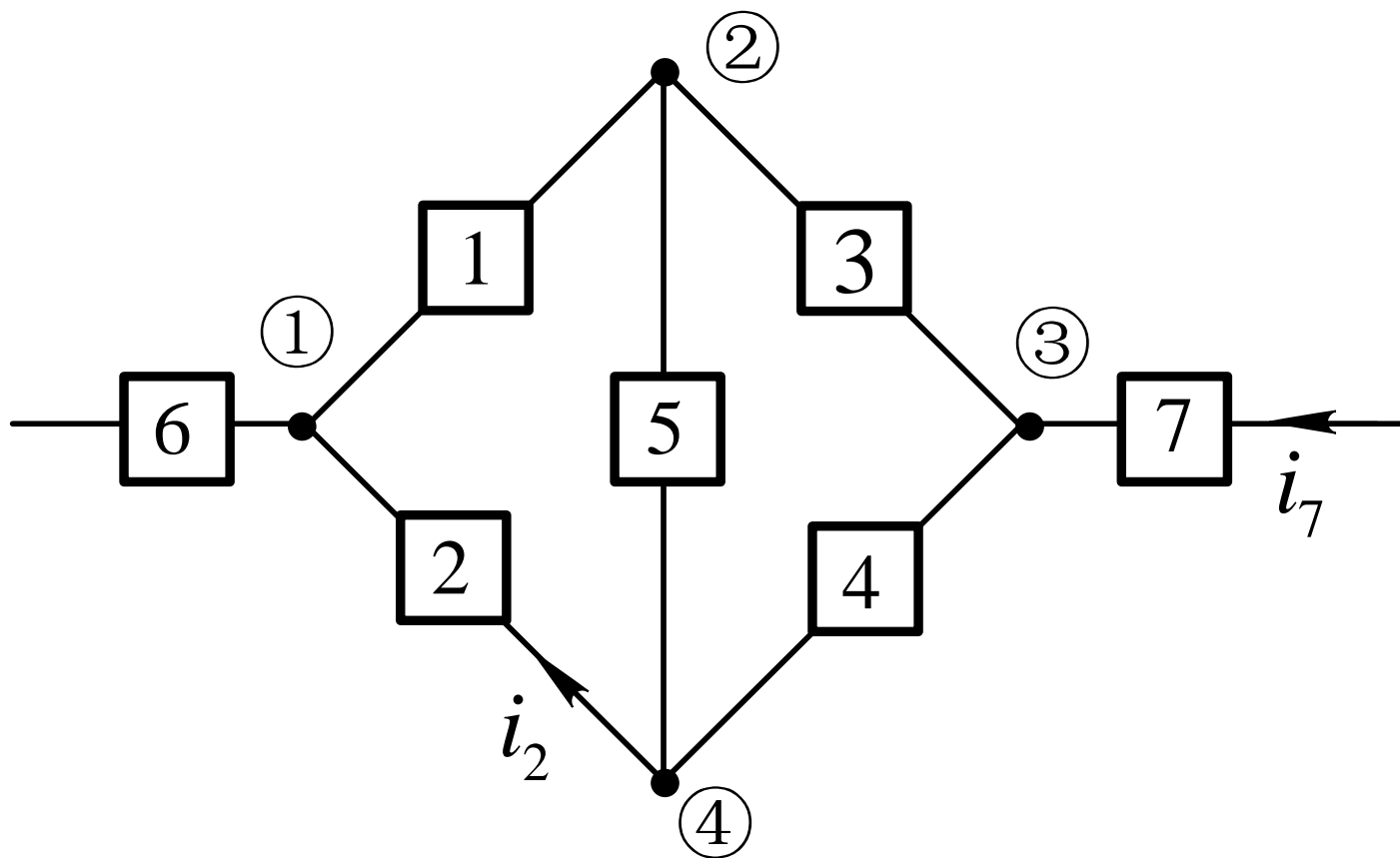
# 第一章作业总结

---

- 1、1.11和1.18答案有错误，分别应该为-6W和-4W。
- 2、1.19中c图的分析错误比较多，原因应该是对全是代数的电路不熟悉。
- 3、对于功率的正负不熟悉，混淆发出功率和吸收功率的概念，所以计算功率时经常忘写负号或多写负号。

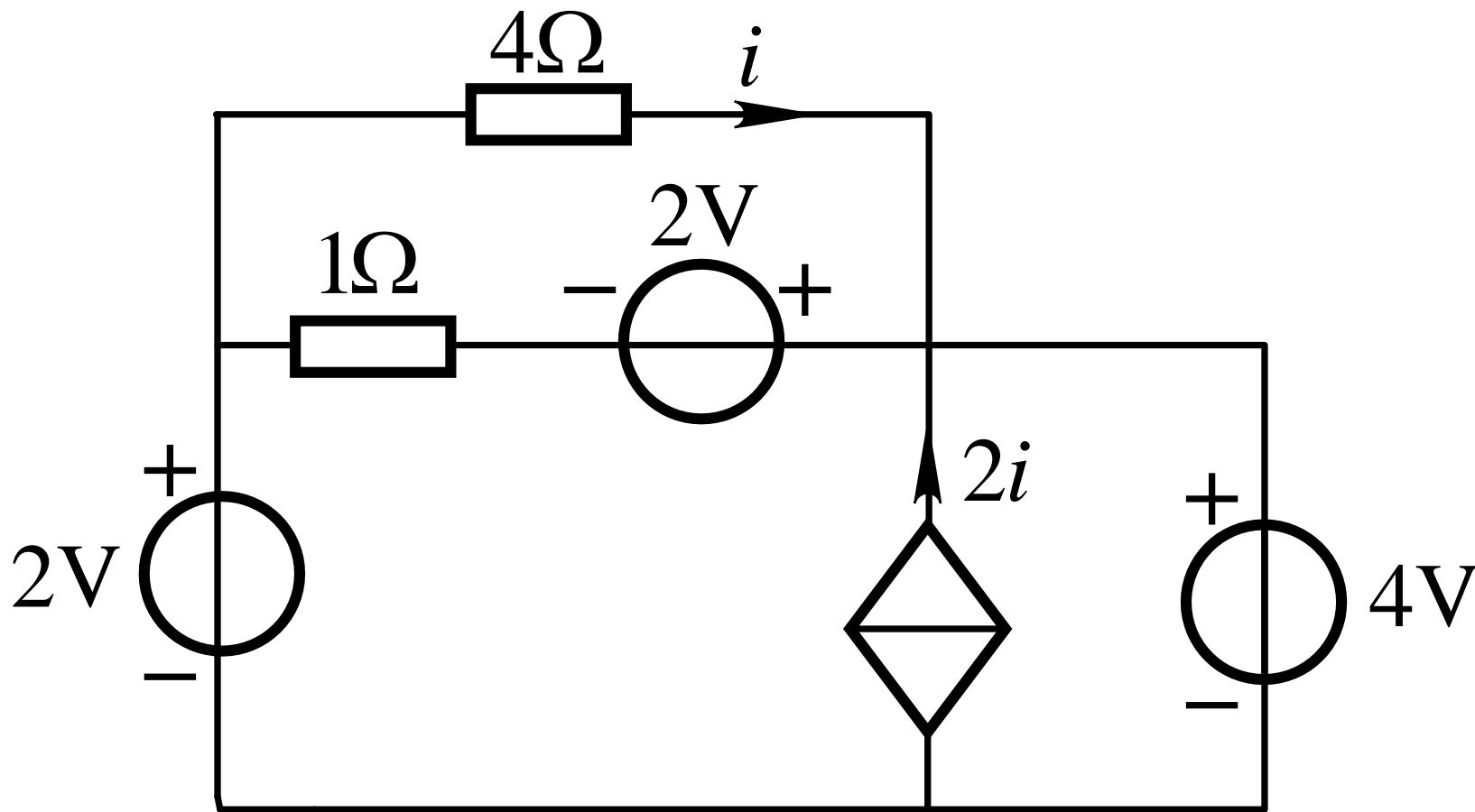
# 第一章作业总结

1.11 已知  $I_2 = 1\text{A}$ ,  $I_7 = 2\text{A}$ ,  $U_{13} = -3\text{V}$ ,  $U_{24} = 5\text{V}$ ,  $U_{34} = 2\text{V}$   
求支路1发出的功率。



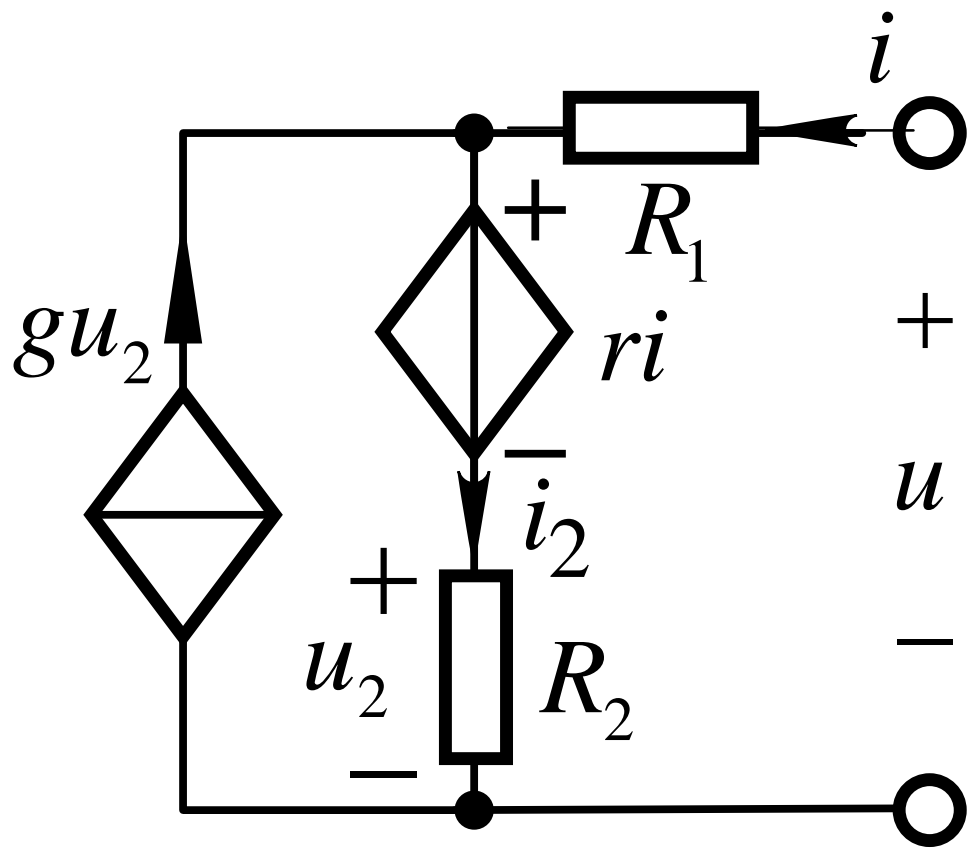
# 第一章作业总结

1.18 求图示电路受控源发出的功率。



# 第一章作业总结

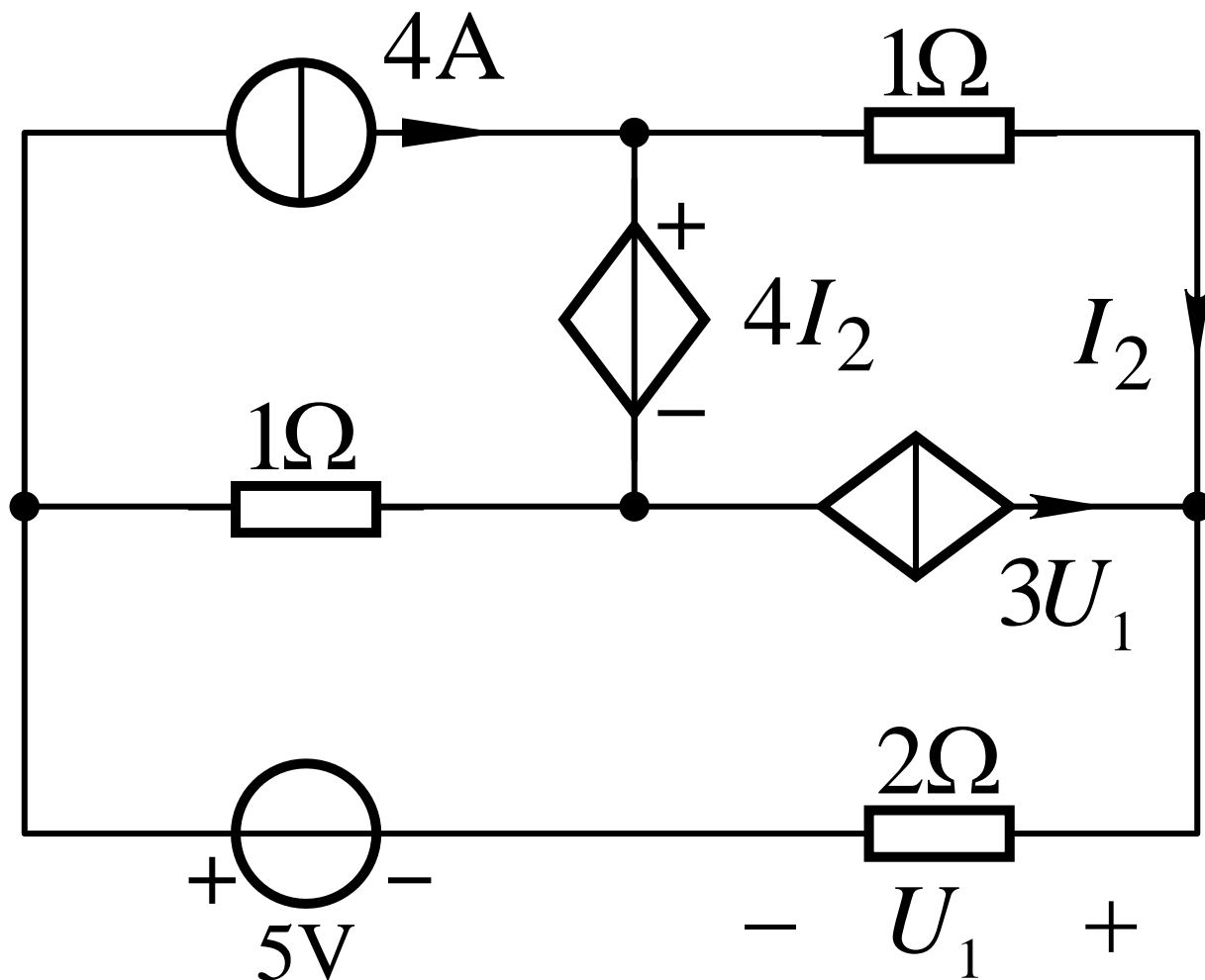
1.19中c图求端口电压电流关系



(c)

# 第一章作业总结

补充：图示电路列节点法和回路法最少各需几个方程



# 第一章作业总结

---

补充二：若已知某网络的节点法方程，试构造该网络

节点①： $1.6S U_{n1} - 0.5S U_{n2} - 1S U_{n3} = 1A$

节点②： $-0.5S U_{n1} + 1.6S U_{n2} - 0.1S U_{n3} = 0$

节点③： $-1S U_{n1} - 0.1S U_{n2} + 3.1S U_{n3} = 0$

节点①： $3S U_{n1} - 1S U_{n2} - 1S U_{n3} = 1A$

节点②： $-1S U_{n1} + 4S U_{n2} - 2S U_{n3} = -1A$

节点③： $-1S U_{n1} - 2S U_{n2} + 5S U_{n3} = -1A$