

# 第一章 电路系统元件、信号和定律

1.1 电路及电路模型

1.2 电学中的基本物理量

1.3 电路系统中的信号

1.4 电路系统中的元件

1.5 基尔霍夫定律

1.6 电路网络及其等效规律

# 回顾

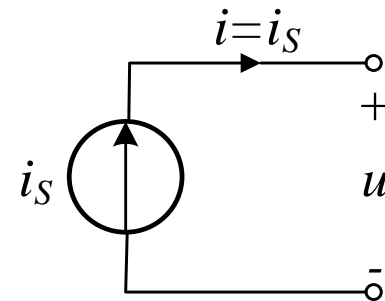
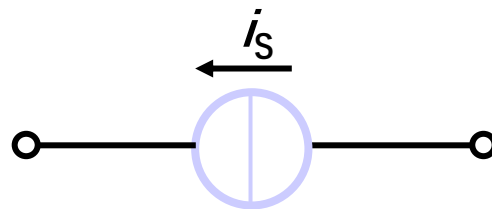
- 电路系统中的元件
  - 线性元件：电阻、电容、电感
  - 独立电源模型：理想电压源、理想电流源
- 点：
  - 熟悉各类元件的电路符号、伏安关系、基本特性以及功率、能量关系；
- 难点：
  - 电容和电感的伏安关系及基本特性

# 本次课学习内容

- 电路系统中的元件
  - 受控源
    - ①分类：VCVS、VCCS、CCVS、CCCS
    - ②伏安关系及理想模型
    - ③理想运放
- 基尔霍夫定律
  - KCL
  - KVL
- 电路网络等效
  - 电阻网络等效

## 二、理想电流源 对偶

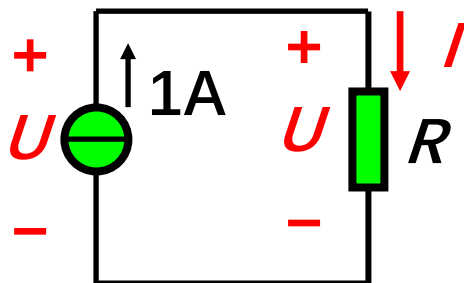
电路符号



### 1. 特点:

(a) 电源电流确定不变由电源本身决定的，与外电路无关；

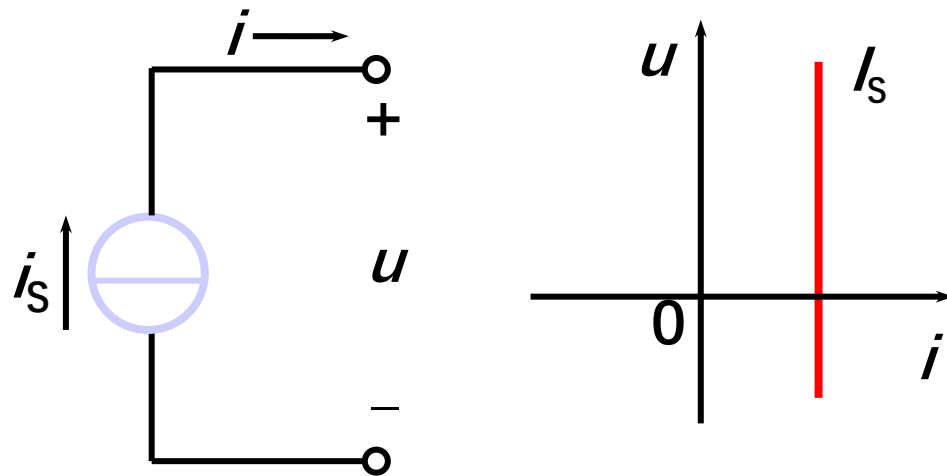
(b) 电流源两端电压是由外电路决定。



$$R = 1\Omega, I = 1A, U = 1V$$

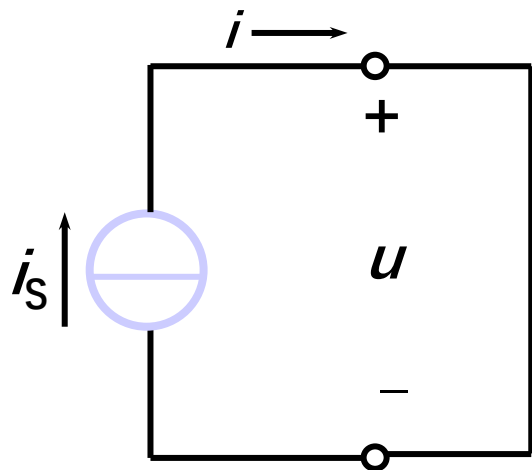
$$R = 10\Omega, I = 1A, U = 10V$$

## 2. 伏安特性(VAR)



- (1) 若  $i_s = I_s$ ，即直流电源。则其伏安特性曲线为平行于电压轴的直线，反映电流与端电压无关。
- (2) 若  $i_s$  为变化的电源，则某一时刻的伏安关系也是平行于电压轴的直线。
- (3) 若  $i_s = 0$ ，则VAR关系与什么情况相同？（开启弹幕）

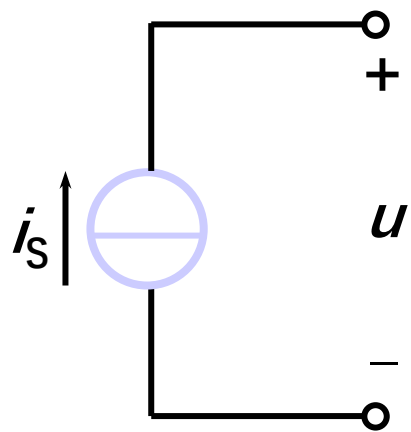
### 3. 理想电流源的短路与开路



(1) 短路:  $i = i_S$  ,  $u = 0$

(2) 开路: 理想电流源不允许开路。

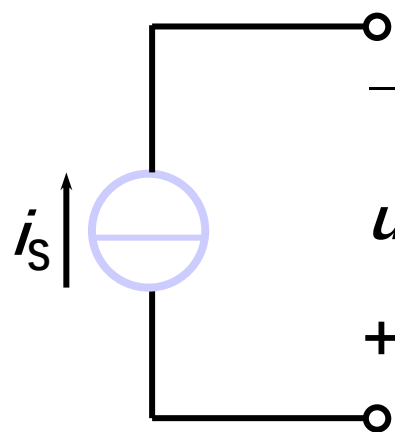
## 4. 功率



$u, i_s$  非关联

$$p_{\text{发}} = u i_s$$

$$p_{\text{吸}} = -u i_s$$

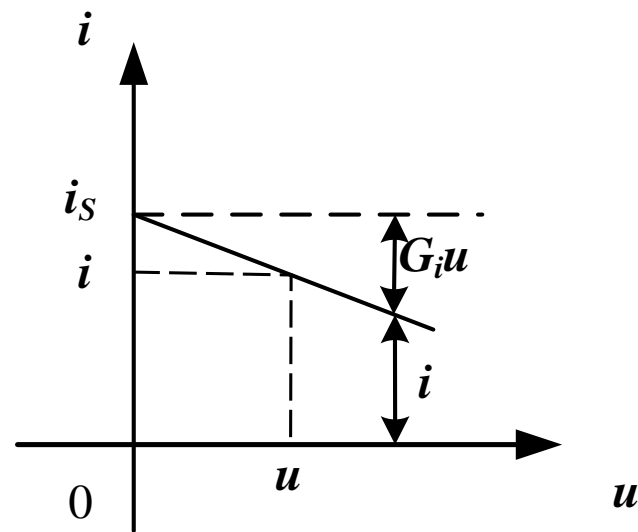
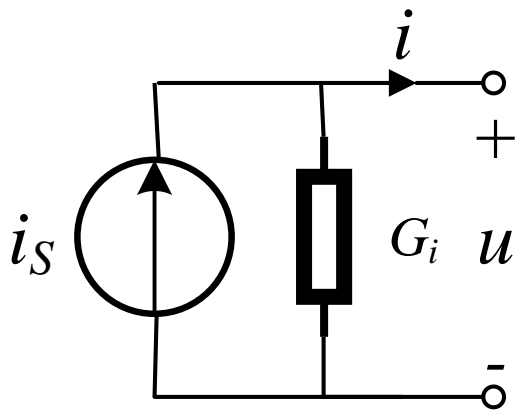


$u, i_s$  关联

$$p_{\text{吸}} = u i_s$$

$$p_{\text{发}} = -u i_s$$

## 5. 实际电流源



$$i = i_s - u G_i$$

# 受控电源 (非独立源) (controlled source or dependent source)

定义:

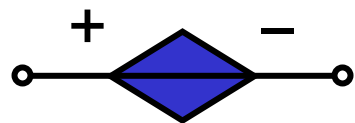
受控电压源:

该电压源的电压由电路中某电压或电流控制

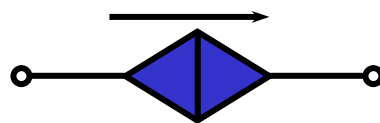
受控电流源

该电流源的电流由电路中某电压或电流控制

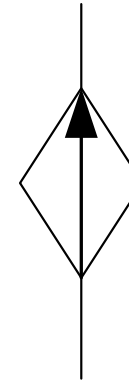
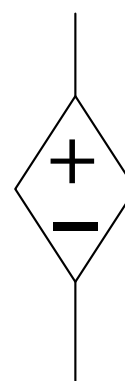
电路符号



受控电压源

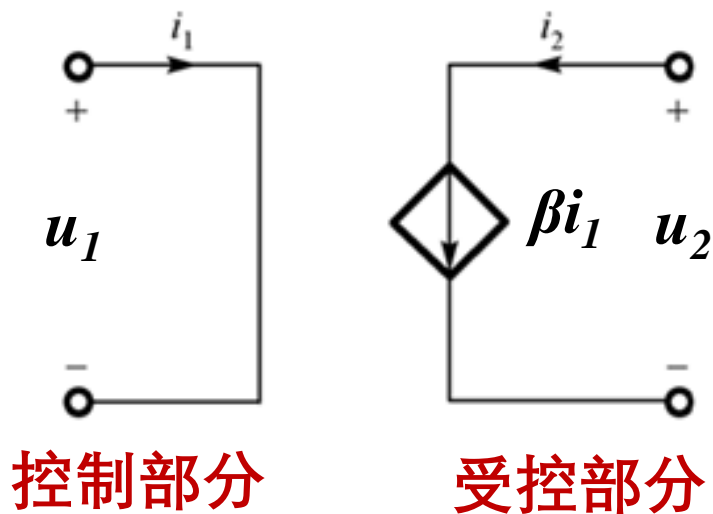


受控电流源





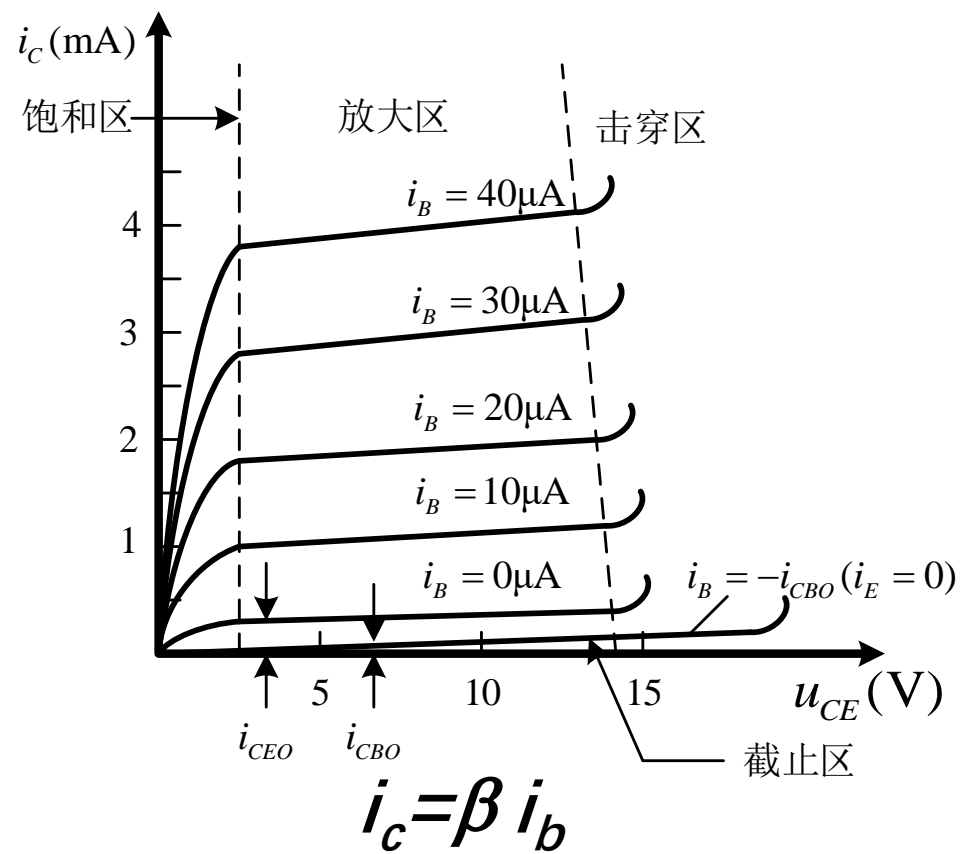
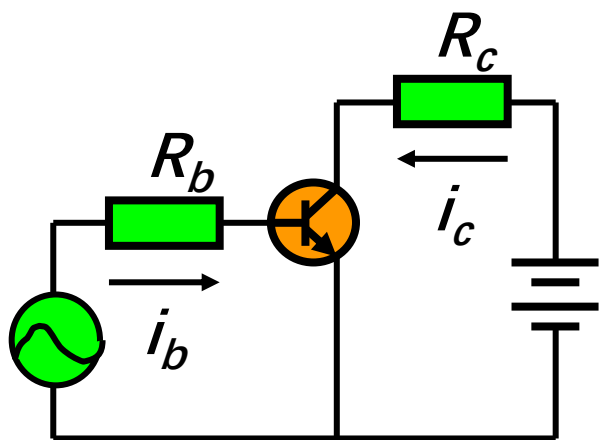
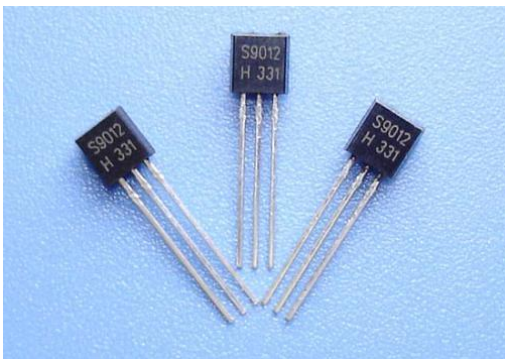
(1) 电流控制的电流源CCCS (Current Controlled Current Source)



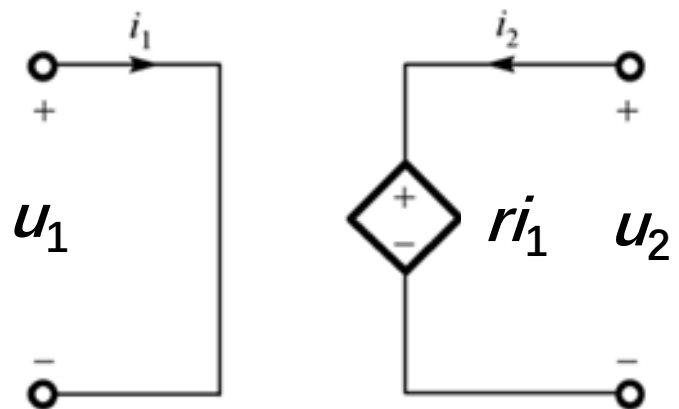
CCCS:  $\begin{cases} i_2 = \beta i_1 \\ v_1 = 0 \end{cases}$  其中  $\beta$  称为转移电流比, 无量纲。

若 $\beta$ 是常数, 则受控源为线性受控源。

## 例：晶体三极管



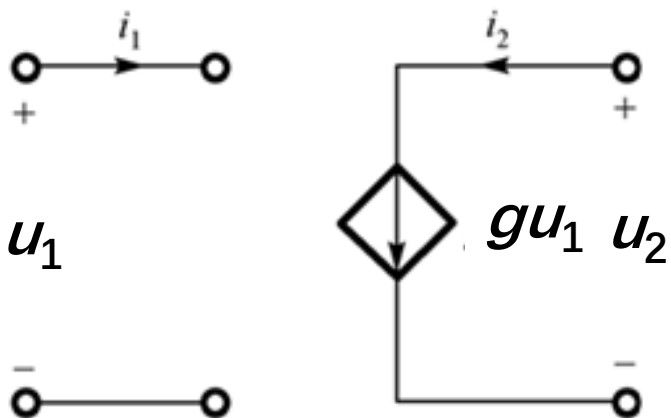
(2) CCVS (Current Controlled Voltage Source)



$$\begin{cases} u_1 = 0 \\ u_2 = r i_1 \end{cases}$$

$r$  : 转移电阻

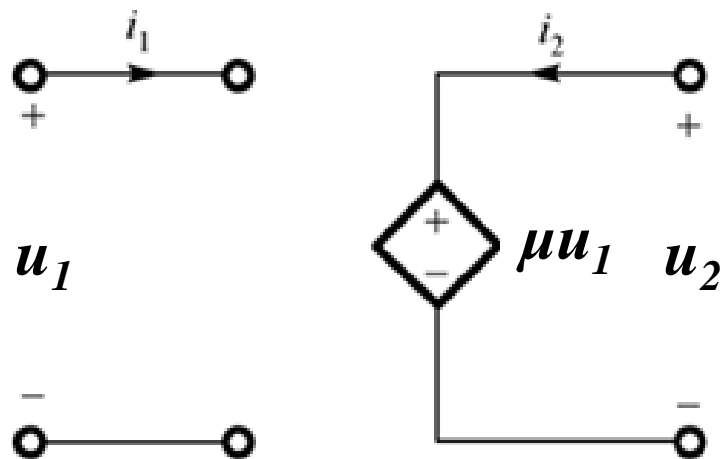
(3) VCCS (Voltage Controlled Current Source)



$$\begin{cases} i_1 = 0 \\ i_2 = g u_1 \end{cases}$$

$g$  : 转移电导

#### (4) 电压控制的电压源VCVS (Voltage Controlled Voltage Source)

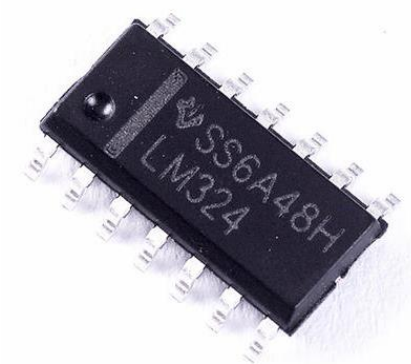
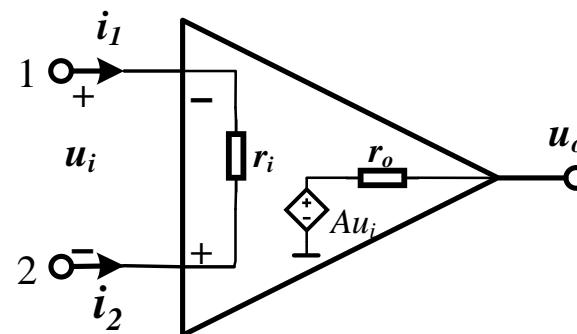
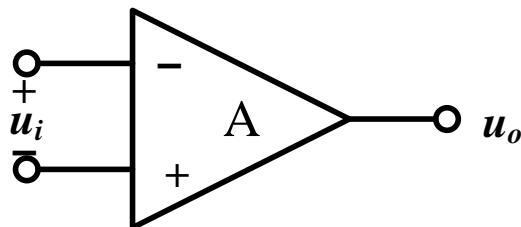


$$\text{VCVS : } \begin{cases} u_2 = \mu u_1 \\ i_1 = 0 \end{cases}$$

$\mu$ 称为转移电压比, 无量纲;

## 例：理想运算放大器

$$A = |u_o / u_i|$$

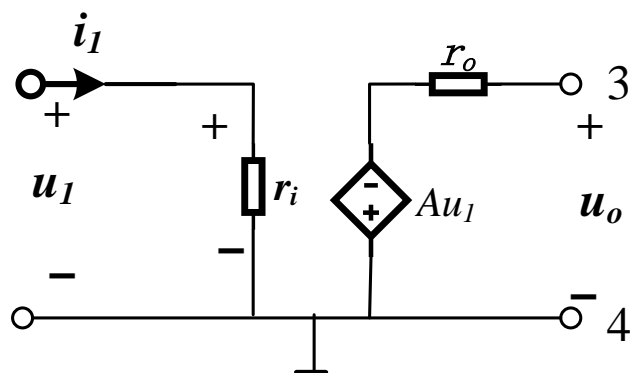


理想化条件：

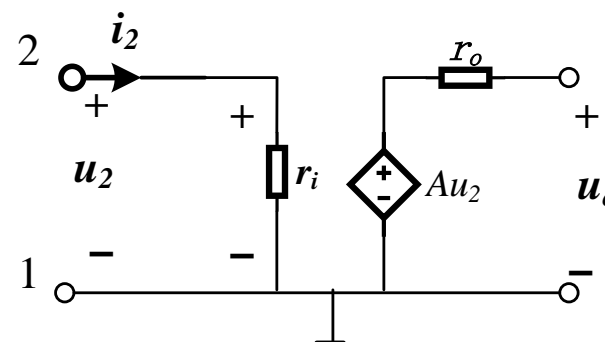
(1) 开环电阻  $r_i \rightarrow \infty$ ，则  $i_1 \rightarrow 0$ ， $i_2 \rightarrow 0$  **虚断**

(2) 输出电阻  $r_o \rightarrow 0$ ，运放的输出直接施加于负载之上

(3) 开环放大倍数  $A \rightarrow \infty$ ， $u_i = u_1 - u_2 = -u_o / A \rightarrow 0$  **虚短**



**反相：**  
 $u_o = -Au_1$



**同相：**  
 $u_o = Au_2$

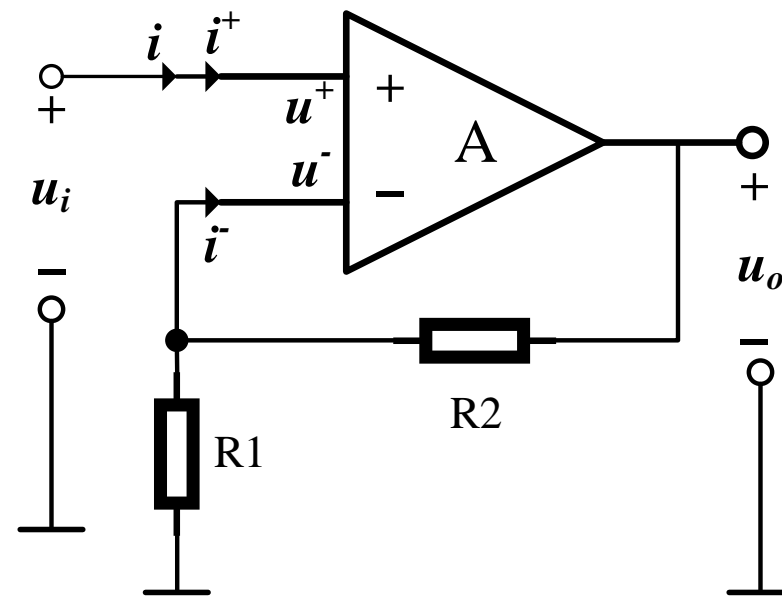
### 例：由理想运算放大器构成的比例放大电路

同相端的输入电流 $i^+$ 等于输入信号电流 $i$ ，即 $i^+ = i$

根据虚断原理有： $i^+ \rightarrow 0$ ，故 $i = i^+ \rightarrow 0$

根据虚断原理有： $i^- \rightarrow 0$ ，则 $u^- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_o$

根据虚短原理，有： $u_i = u^+ = u^- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u_o$ ，即 $u_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) u_i$



### 三. 受控源与独立源的比较

- (1) 独立源电压(或电流)由电源本身决定，与电路中其它电压、电流无关，而受控源电压(或电流)直接由控制量决定。
- (2) 独立源作为电路中“激励”，在电路中产生电压、电流，而受控源在电路中不能作为“激励”。

作业：1-6, 1-7, 1-8

提交截止时间：下周五（3月26日）早上上课前

# 基尔霍夫定律和电路等效变换

基尔霍夫定律

简单电阻电路

电阻 Y- $\Delta$ 变换

理想电压源和理想电流源的串并联

电压源和电流源的等效变换



## 基尔霍夫定律 ( Kirchhoff's Laws )

基尔霍夫**电流定律** (Kirchhoff's **c**urrent **l**aw—**KCL** )

基尔霍夫**电压定律**(Kirchhoff's **v**oltage **l**aw—**KVL** )

基尔霍夫定律与元件特性是电路分析的基础。

## 一、几个名词



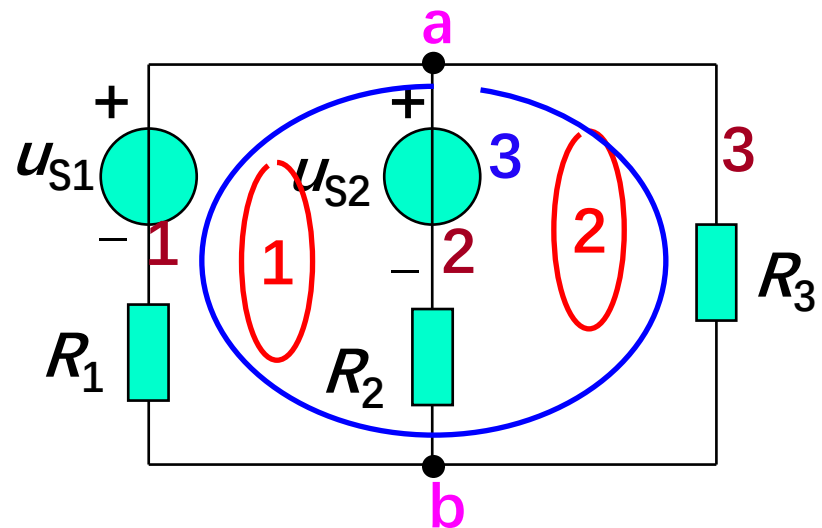
1. 支路 (branch): 电路中流过同一电流的每个分支。 ( $b$ )

2. 节点 (node): 支路的连接点称为节点。 ( $n$ )

3. 路径(path): 两节点间的一条通路。路径由支路构成。

4. 回路(loop): 由支路组成的闭合路径。 ( $l$ )

5. 网孔(mesh): 对平面电路, 每个网眼即为网孔。  
网孔是回路, 但回路不一定是网孔。



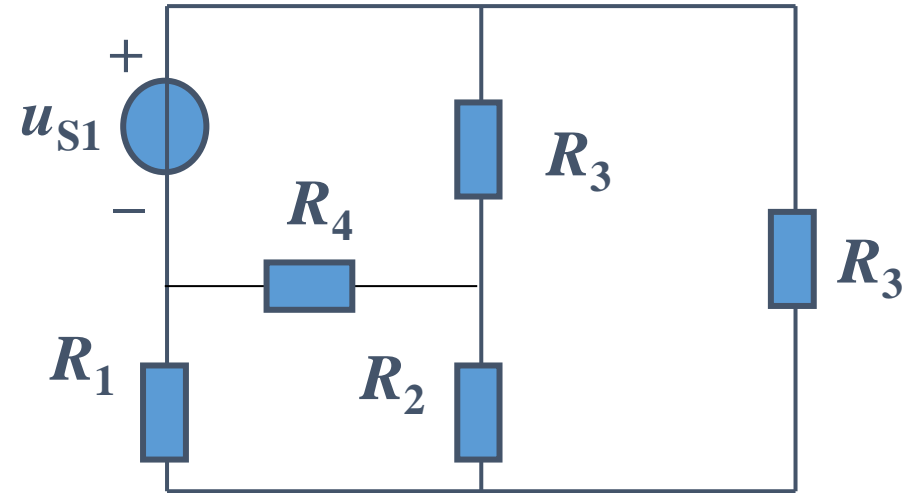
$$b=3$$

$$n=2$$

$$l=3$$

图中电路有多少个节点？

- ☐ A 1
- ☐ B 2
- ☐ C 3
- ☒ D 4



提交

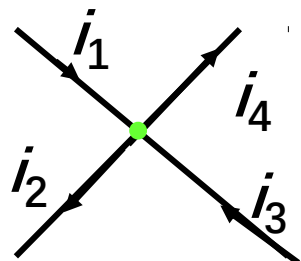
## 二、基尔霍夫电流定律 (KCL)

在集总参数电路中，任一时刻流出(流入)任一节点的各支路电流的代数和为零。 即

$$\sum i(t) = 0$$

满足 $d$ （电路器件尺寸） $\ll \lambda$ （工作信号波长）条件的电路称为**集总参数电路**。其特点是电路中任意两个端点间的电压和流入任一器件端钮的电流完全确定，与器件的几何尺寸和空间位置无关

例



$$-i_1 + i_2 - i_3 + i_4 = 0$$

$$i_1 + i_3 = i_2 + i_4$$

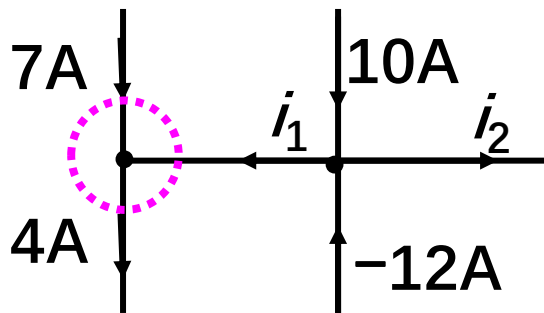
即  $\sum i_{\text{入}} = \sum i_{\text{出}}$

注意电流方向：

流入流出正负相反

物理基础： 电荷守恒，电流连续性。

例

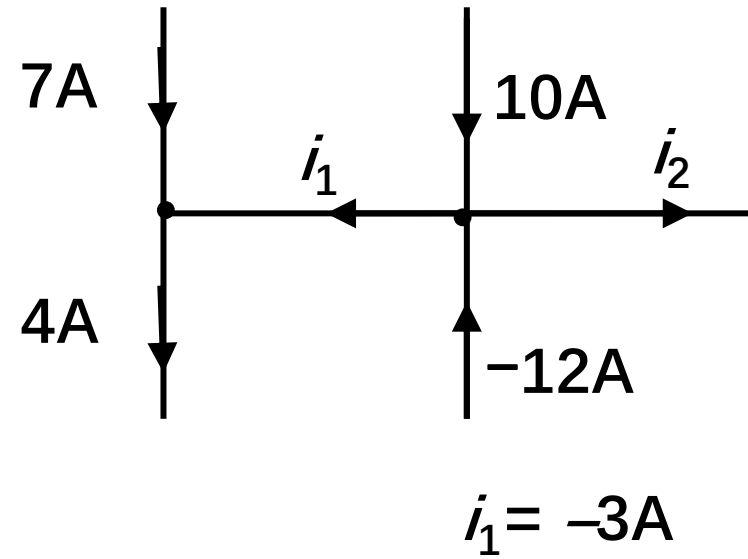


$$i_1 = 4 - 7 = -3A$$



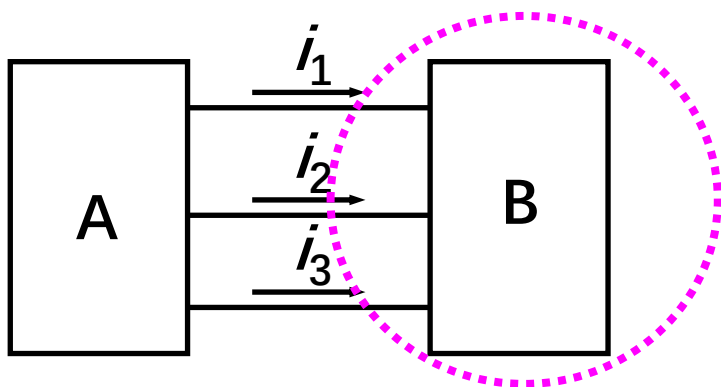
$$i_2 = ( ) A$$

- ☐ A -1
- ☒ B 1
- ☐ C 2
- ☐ D 5

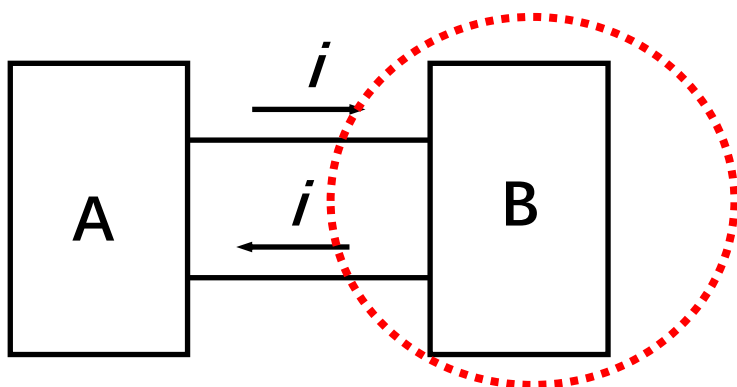


提交

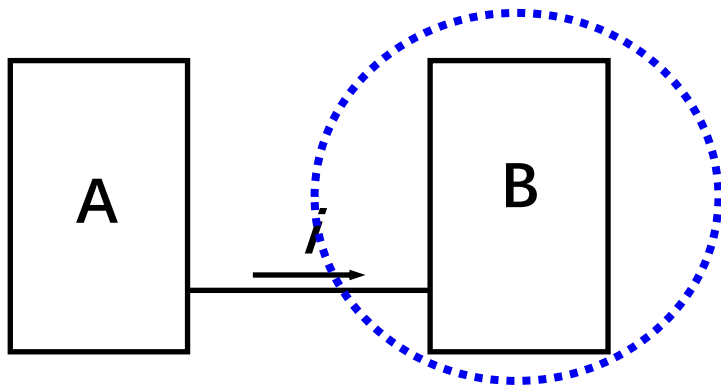
## KCL的推广：



$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

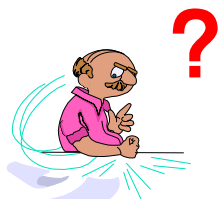


两条支路电流大小相等，  
一个流入，一个流出。

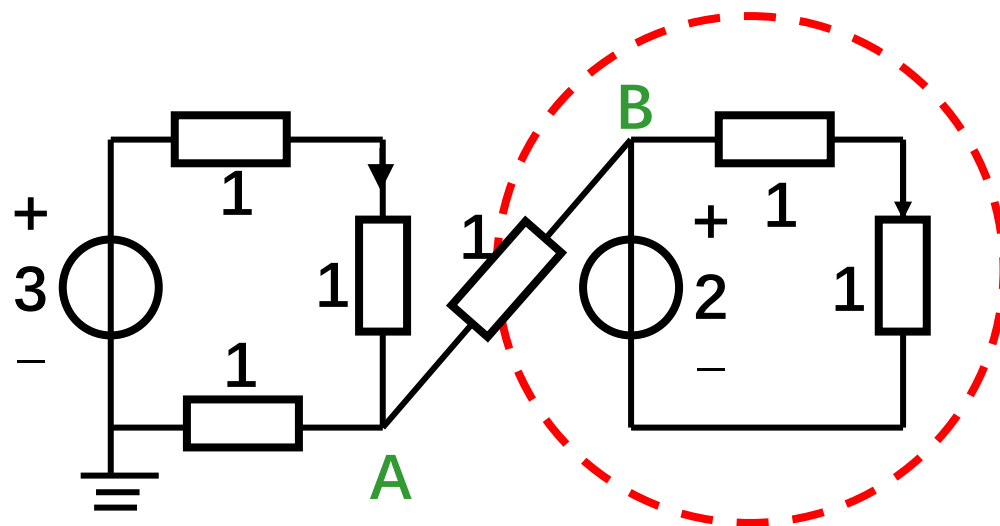


只有一条支路相连，则  $i=0$ 。

弹幕开启



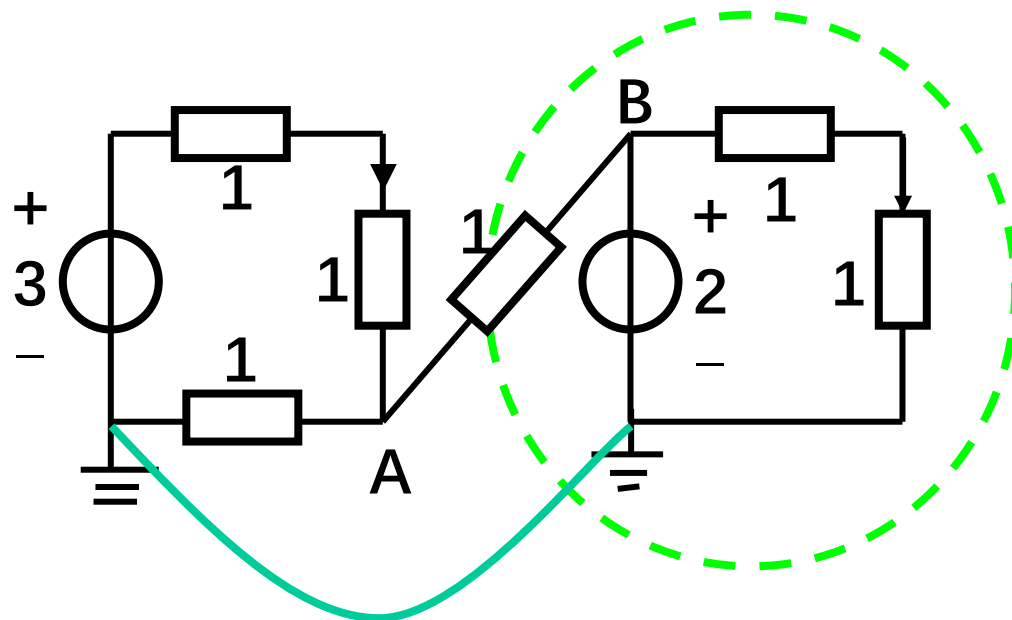
1.



$$U_A \stackrel{?}{=} U_B$$

$$U_A = U_B$$

2.

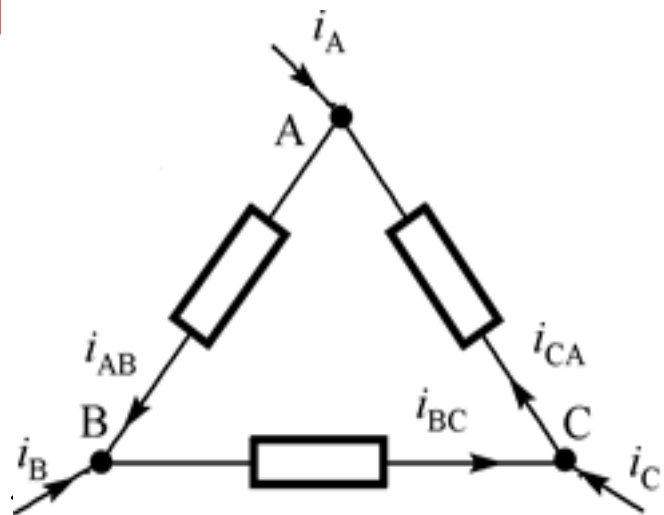


$$U_A \stackrel{?}{=} U_B$$

$$U_A \neq U_B$$



例



$$i_A - i_{AB} + i_{CA} = 0$$

$$i_B - i_{BC} + i_{AB} = 0$$

$$i_C - i_{CA} + i_{BC} = 0$$

$$\rightarrow i_A + i_B + i_C = 0$$

该闭合面**S**可视为一个节点，称为“**超节点**”



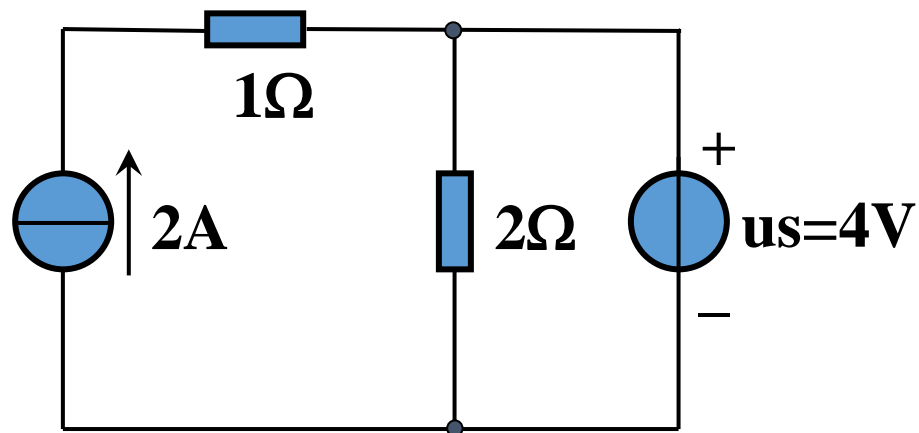
$$P_{us发} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ W}$$

☒ A 0

☐ B 1

☐ C 2

☐ D 4



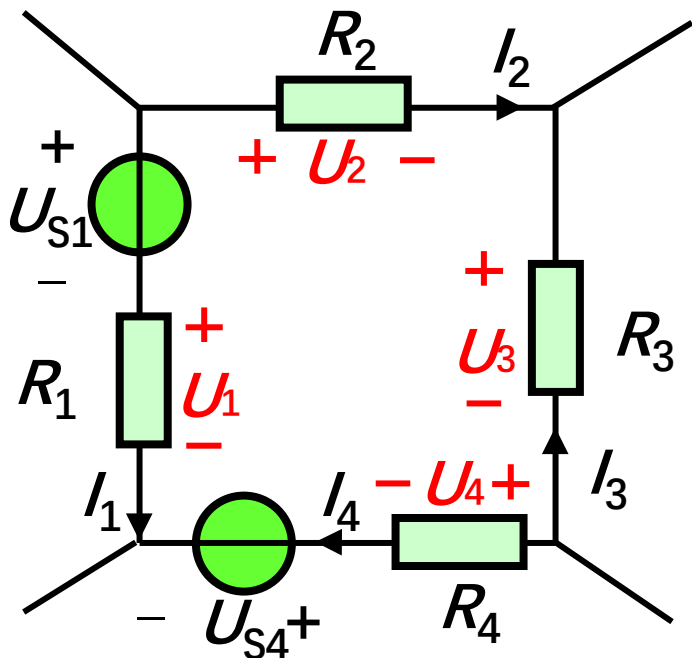
提交

### 三、基尔霍夫电压定律 (KVL)

集总参数电路中，任一时刻沿任一闭合路径( 按固定绕向 )，各支路电压代数和为零。 即

$$\sum u = 0$$

例



顺时针方向绕行:  $\sum U = 0$

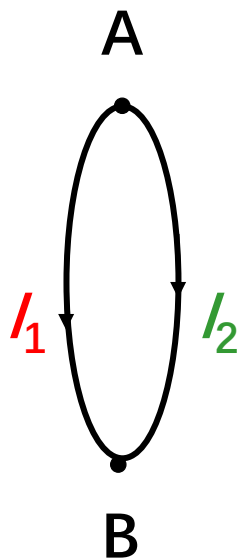
注意电压参考方向: 如升压为负, 降压为正

$$-U_1 - U_{S1} + U_2 + U_3 + U_4 + U_{S4} = 0$$

$$+U_2 + U_3 + U_4 + U_{S4} = U_1 + U_{S1}$$

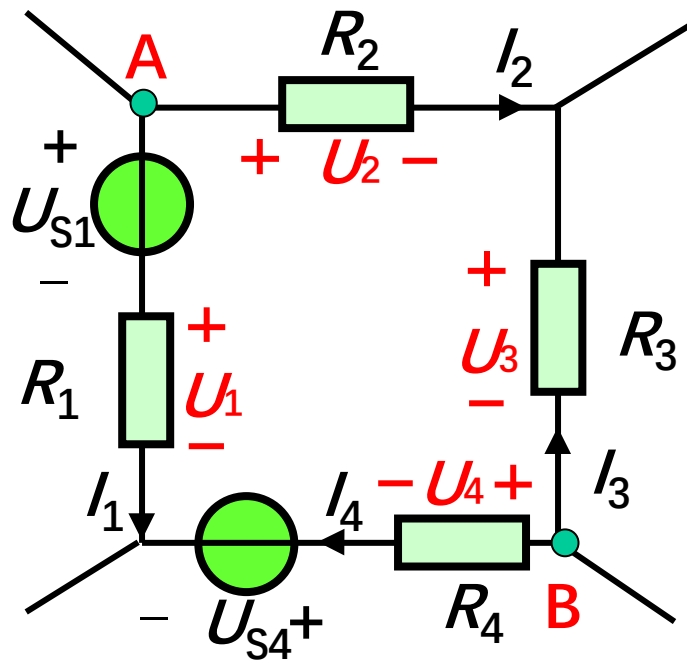
$$\sum u_{\text{drop}}(t) = \sum u_{\text{rise}}(t)$$

**推论：** 电路中任意两点间的电压等于两点间任一条路径经过的各元件电压的代数和。



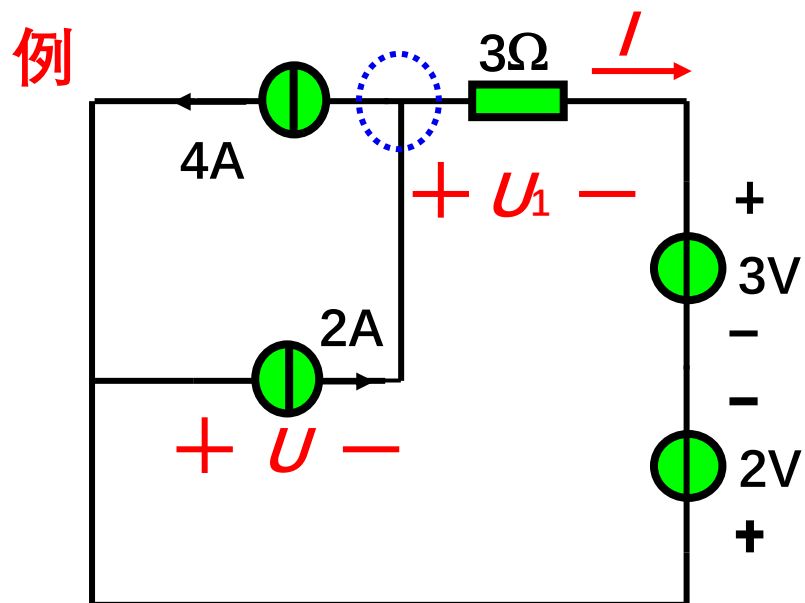
$$U_{AB} (\text{沿 } I_1) = U_{AB} (\text{沿 } I_2)$$

电位的单值性



$$U_{AB} = U_2 + U_3$$

$$U_{AB} = U_{S1} + U_1 - U_{S4} - U_4$$



图示电路：求  $U$  和  $I$ 。

解：  $I = 2 - 4 = -2\text{A}$

$$U_1 = 3I = -6\text{V}$$

$$U + U_1 + 3 - 2 = 0, \quad U = 5\text{V}$$

或

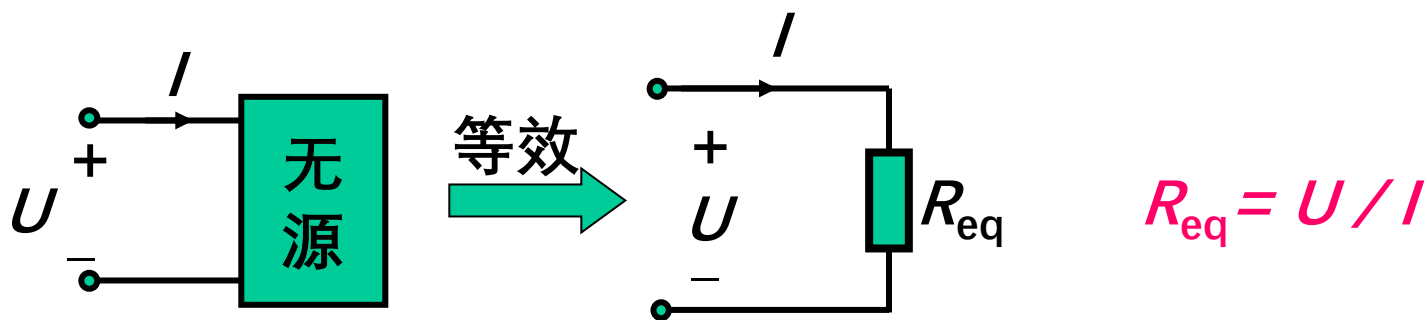
$$U = 2 - 3 - U_1 = 5\text{V}$$

基尔霍夫定律适用于所有集总参数电路分析

## 二、电路等效

定义: 任何复杂的网络,引出两个端钮称为二端网络,内部没有独立源的二端网络,称为二端无源网络。

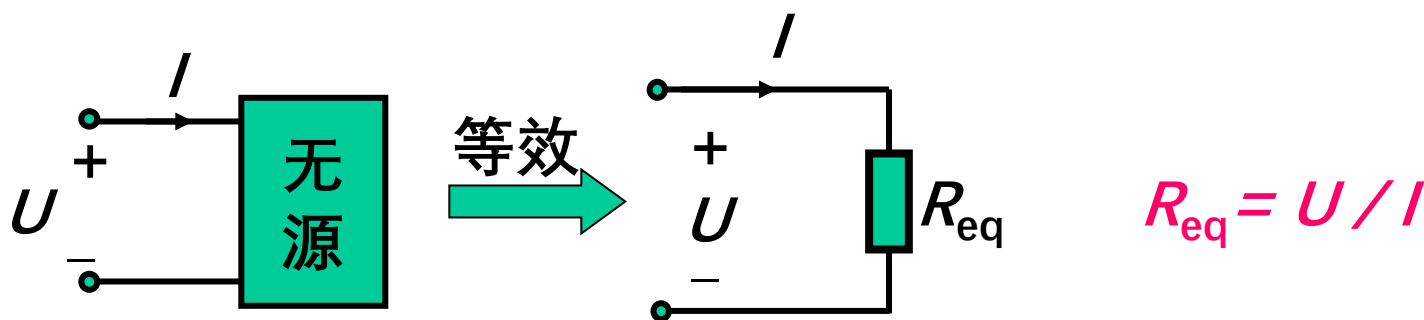
任何一个无源二端网络可以用一个电阻等效,称之为入端等效电阻,简写为 $R_{eq}$ 。



两个(子)电路等效: (从外边看进来)两个(子)电路 $u$ - $i$ 关系的形式和参数均一样

## 二端网络(单口网络)

- 当二端网络内部仅包含电阻时  
——利用电阻的串并联/Y- $\Delta$ 等效规律。
- 当二端网络的内部包含受控源时  
——利用外加电源法。



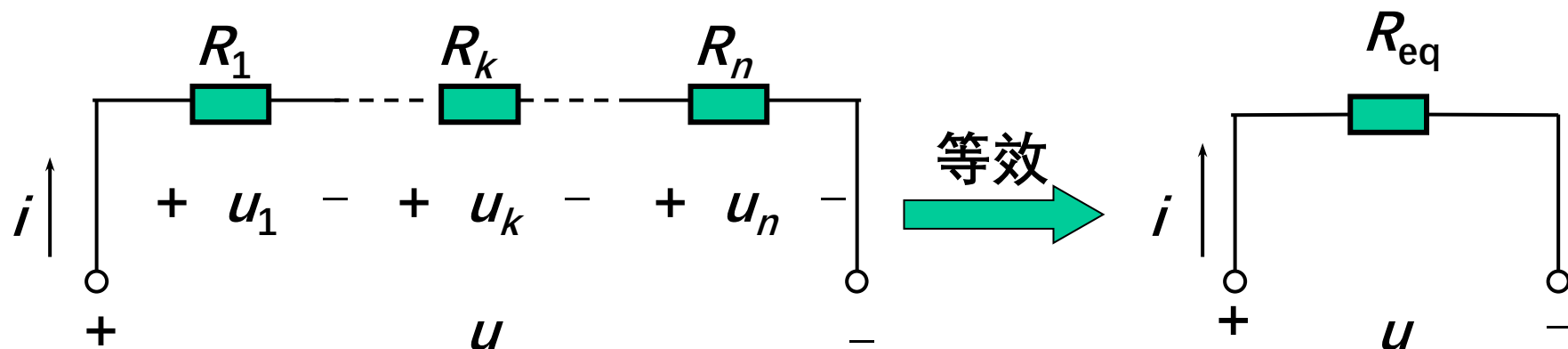
# 电阻的串联、并联和串并联

## 1、电阻串联 ( Series Connection of Resistors )

### (1) 电路特点:

(a) 各电阻顺序连接，流过同一电流 (KCL);

(b) 总电压等于各串联电阻的电压之和 (KVL)。

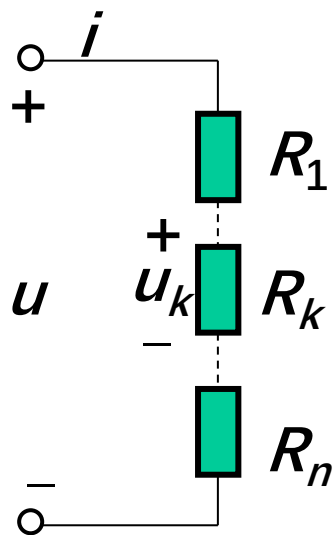


$$R_{eq} = \frac{u}{i} = \frac{\sum u_k}{i} = \sum R_k$$

串联电路的总电阻  
等于各分电阻之和。



## (2) 电压的分配公式

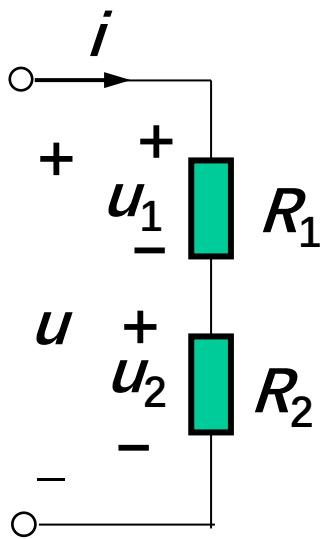


$$\frac{u_k}{u} = \frac{R_k i}{\sum R_k i} = \frac{R_k}{\sum R_k}$$

电压与电阻成正比

$$u_k = \frac{R_k}{\sum R_k} u = \frac{R_k}{R_{eq}} u$$

例 两个电阻分压



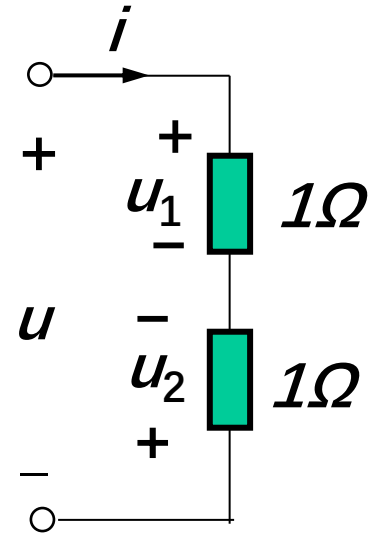
$$u_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u$$

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



$$u_2 = \underline{\hspace{1cm}} u。$$

- ☐ A 1
- ☐ B -1
- ☐ C 0.5
- ☒ D -0.5



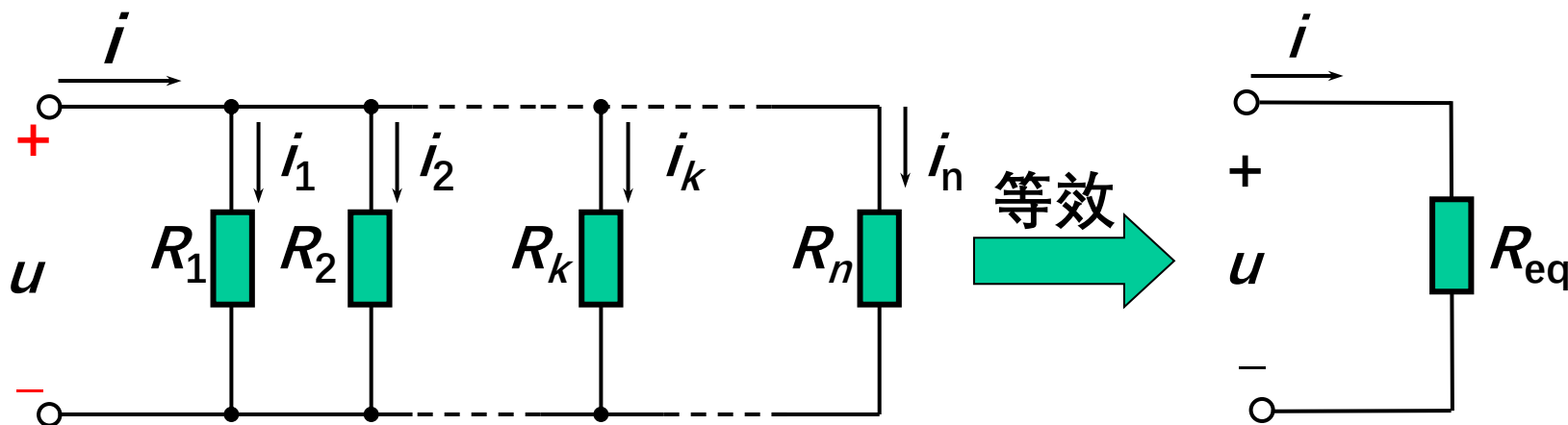
提交

## 2、电阻并联 (Parallel Connection)

### (1) 电路特点:

(a) 各电阻两端分别接在一起，两端为同一电压 (KVL);

(b) 总电流等于流过各并联电阻的电流之和 (KCL)。

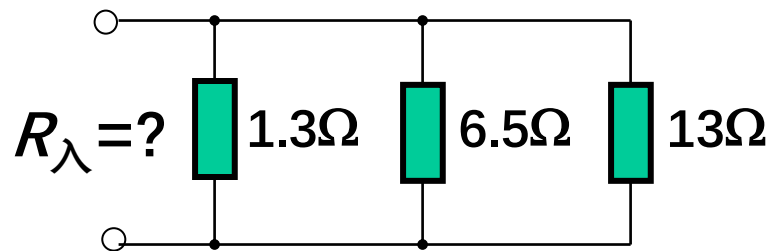


由KCL: 
$$i = i_1 + i_2 + \dots + i_k + \dots + i_n = u /$$

$$u / R_{eq} = i = u / R_1 + u / R_2 + \dots + u / R_n = u (1 / R_1 + 1 / R_2 + \dots + 1 / R_n)$$

即 
$$1 / R_{eq} = 1 / R_1 + 1 / R_2 + \dots + 1 / R_n \quad G_{eq} = G_1 + G_2 + \dots + G_k + \dots + G_n = \sum G_k = \sum 1 / R_k$$

等效电导等于并联的各电导之和

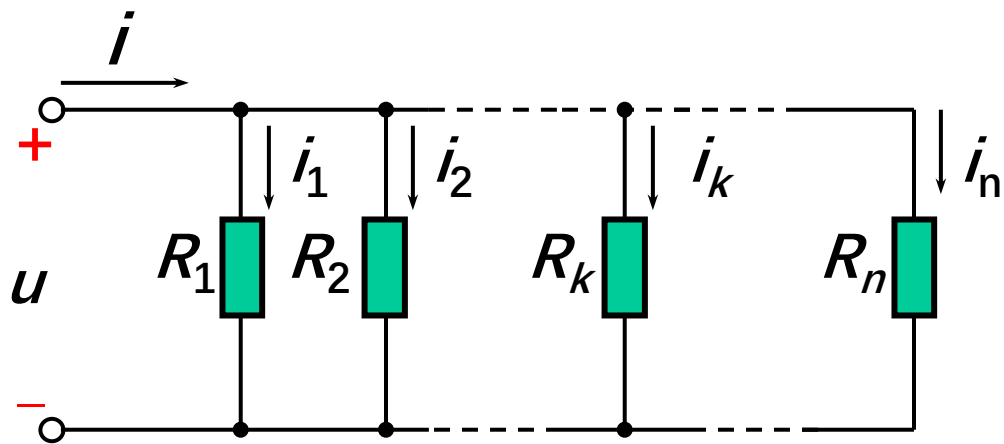


弹幕开启

$$R_{\lambda}=1.3 // 6.5 // 13$$

由  $G=1/1.3+1/6.5+1/13=1 \text{ S}$

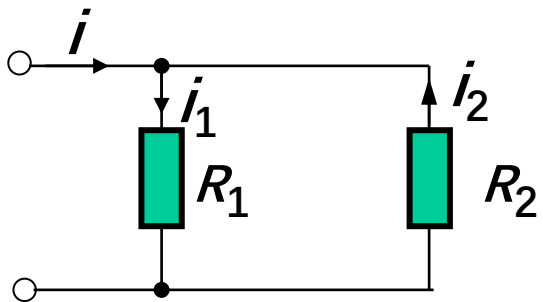
故  $R=1/G=1 \Omega$



## (2) 并联电阻的分流公式

$$\frac{i_k}{i} = \frac{u/R_k}{u/R_{eq}} = \frac{G_k}{G_{eq}} \quad i_k = \frac{G_k}{\sum G_k} i \quad \text{电流分配与电导成正比}$$

对于两电阻并联



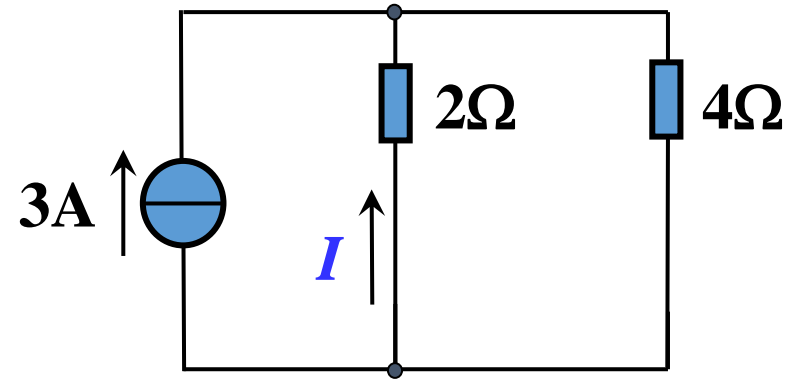
$$i_1 = \frac{1/R_1}{1/R_1 + 1/R_2} i = \frac{R_2}{R_1 + R_2} i$$

$$i_2 = -\frac{1/R_2}{1/R_1 + 1/R_2} i = -\frac{R_1}{R_1 + R_2} i$$



$I = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A}$

- ☐ A -1
- ☐ B 2
- ☒ C -2
- ☐ D 1



提交

$I = \underline{\hspace{2cm}} \text{ A}$

A

0

B

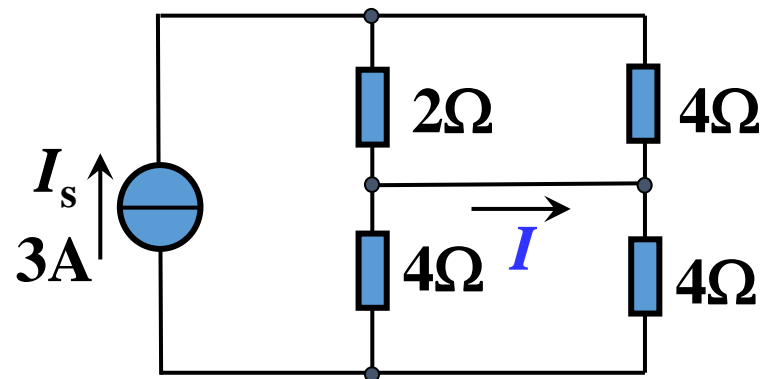
0.5

C

-0.5

D

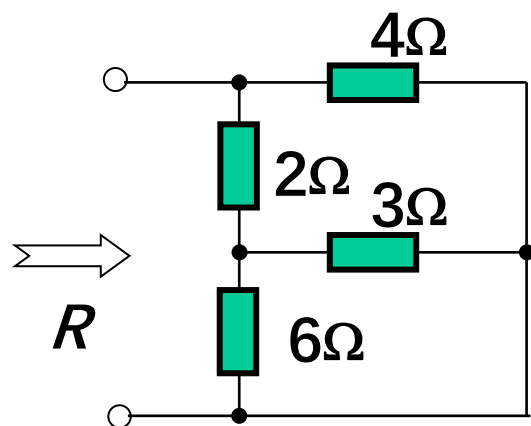
1



提交

### 3、电阻的串并联

例1

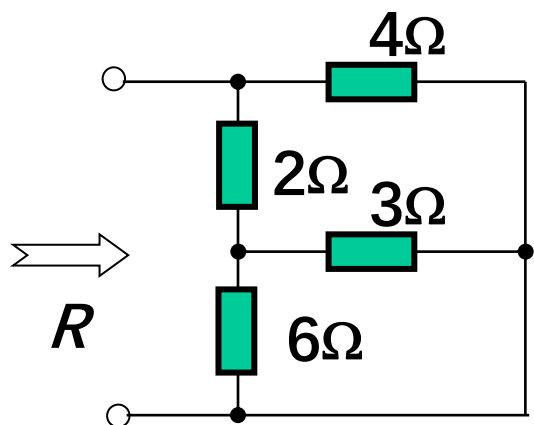


请在草稿纸上完成后投稿



### 3、电阻的串并联

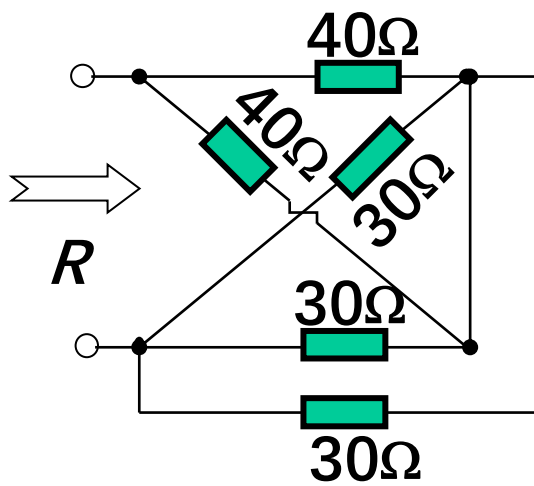
例1



$$R = 4 // (2 + (3 // 6)) = 2 \Omega$$

### 3、电阻的串并联

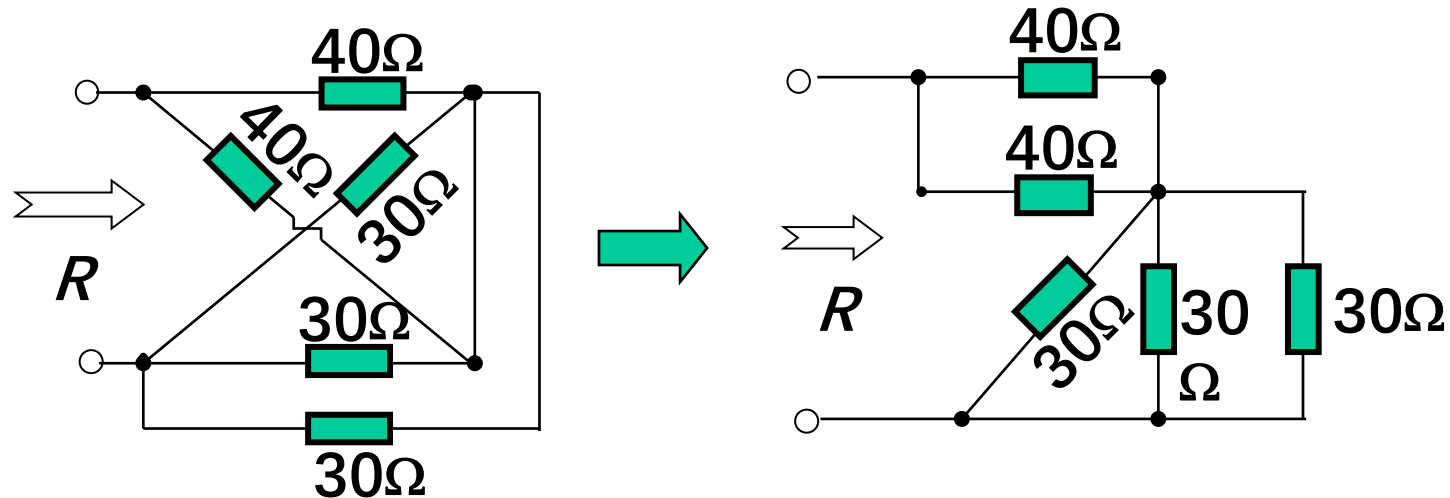
例2



请在草稿纸上完成后投稿

### 3、电阻的串并联

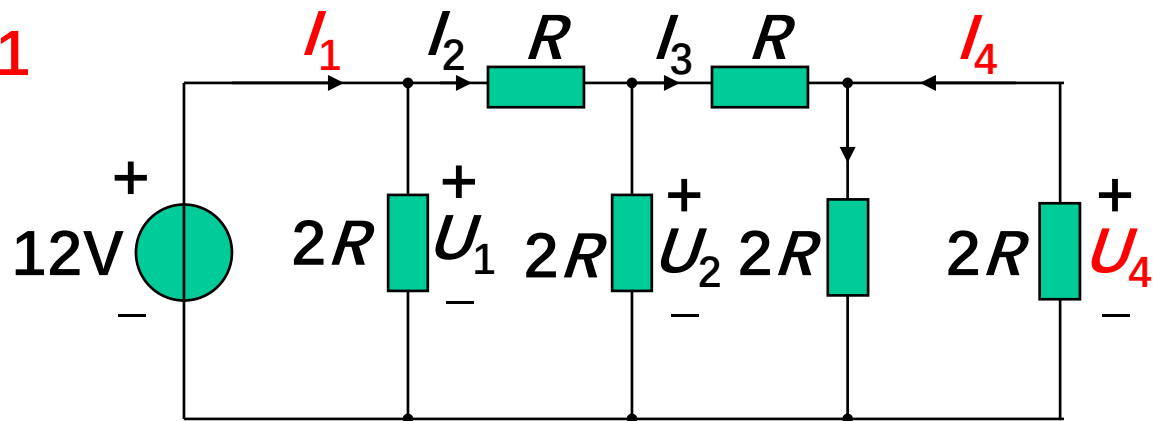
例2



$$R = (40 // 40) + (30 // 30 // 30) = 30\Omega$$

#### 4、计算举例

例1

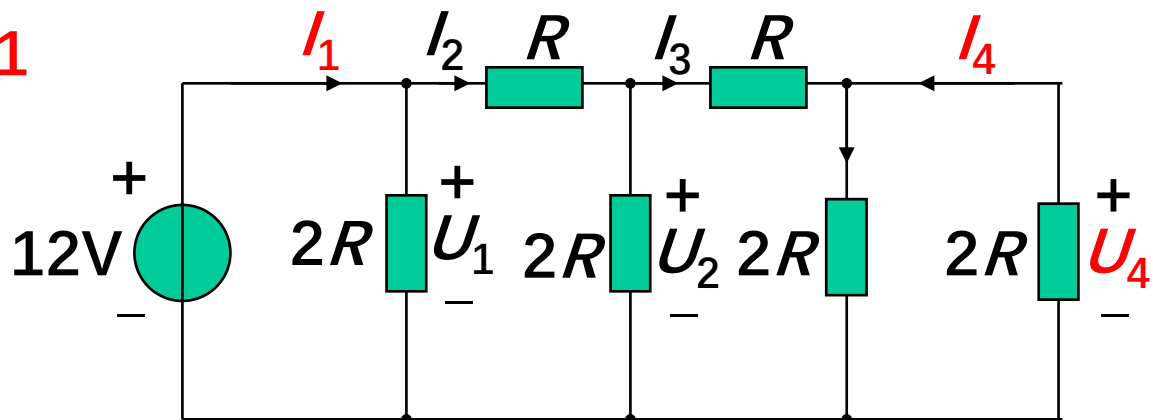


求:  $I_1, I_4, U_4$

观察电路，电阻网络等效电阻为多少？

## 4、计算举例

### 例1



求:  $I_1, I_4, U_4$

观察电路, 电阻网络等效电阻为R

解: ① 用分流方法做

$$I_1 = \frac{12}{R}$$

$$I_4 = -\frac{1}{2}I_3 = -\frac{1}{4}I_2 = -\frac{1}{8}I_1 = -\frac{1}{8}\frac{12}{R} = -\frac{3}{2R}$$

$$U_4 = -I_4 \times 2R = 3 \text{ V}$$

② 用分压方法做

$$U_4 = \frac{U_2}{2} = \frac{1}{4}U_1 = 3 \text{ V}$$

$$I_4 = -\frac{3}{2R} \quad I_1 = \frac{12}{R}$$