

# 电子技术基础

信息工程学院 庞艳杰

# 第1章 电路模型和电路定律

## 本章重点

1.1 电路和电路模型

1.5 电阻元件

1.2 电流和电压的参考方向

1.6 电压源和电流源

1.3 电功率和能量

1.7 受控电源

1.4 电路元件

1.8 基尔霍夫定律

首页



● 重点：

1. 电压、电流的参考方向
2. 电阻元件和电源元件的特性
3. 基尔霍夫定律

# 1.1 电路和电路模型

1. 实际电路 → 由电工设备和电气器件按预期目的连接构成的电流的通路。

功能



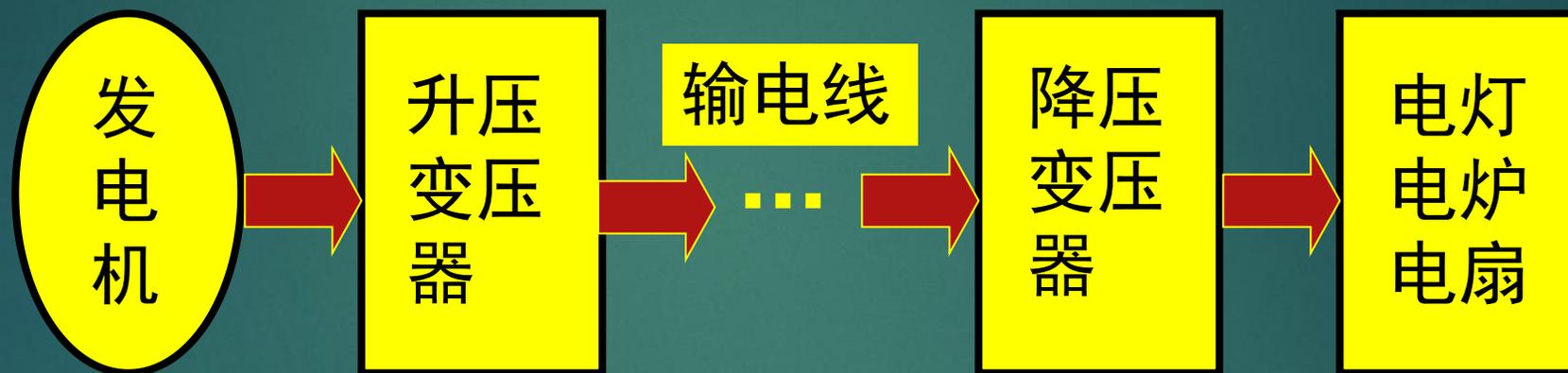
- a 能量的传输、分配与转换；
- b 信息的传递、控制与处理。

共性

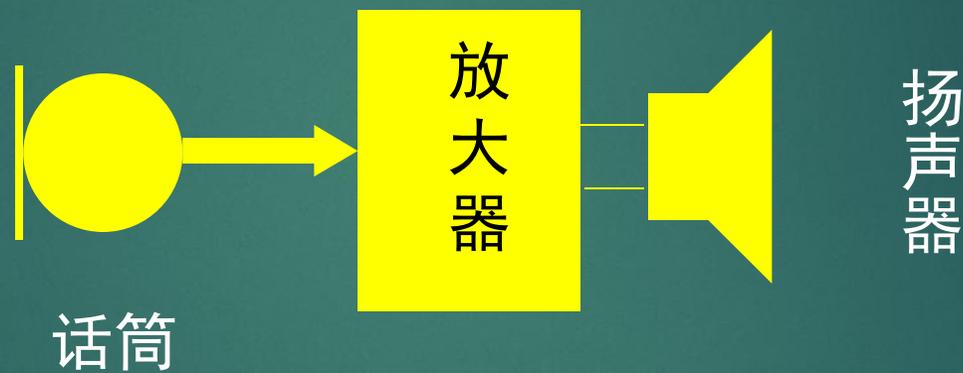


建立在同一电路理论基础。

a: 电力系统(涉及大规模电能的生产传输和转换)



b:扩音机(信息的传递、控制与处理)



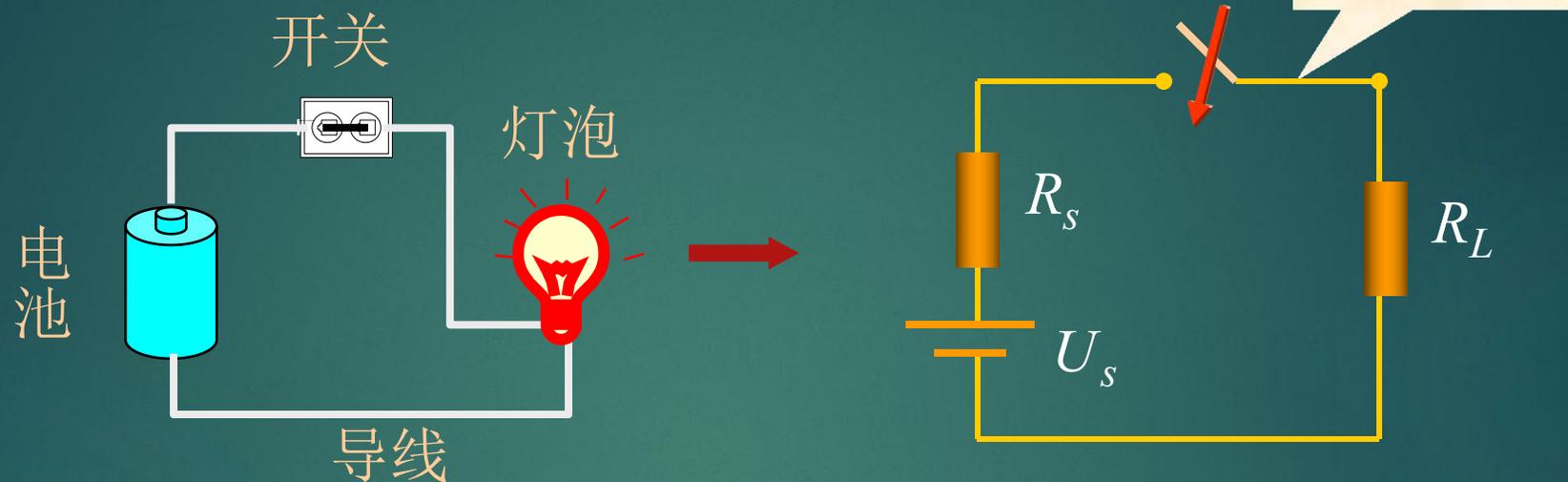
▶ 电路组成:

(1)电源或信号源: 发电机、电池。供应电能设备。

(2)负载: 如灯泡、扬声器。取用电能的设备。

(3)中间环节: 导线、开关、变压器、放大器等。

## 2. 电路模型



- 电路模型  $\rightarrow$  反映实际电路部件的主要电磁性质的理想电路元件及其组合。
- 理想电路元件  $\rightarrow$  有某种确定的电磁性能的理想元件。

## 5种基本的理想电路元件：

电阻元件：表示消耗电能的元件

电感元件：表示产生磁场，储存磁场能量的元件

电容元件：表示产生电场，储存电场能量的元件

电压源和电流源：表示将其它形式的能量转变成电能的元件。



①5种基本理想电路元件有三个特征：

(a) 只有两个端子；

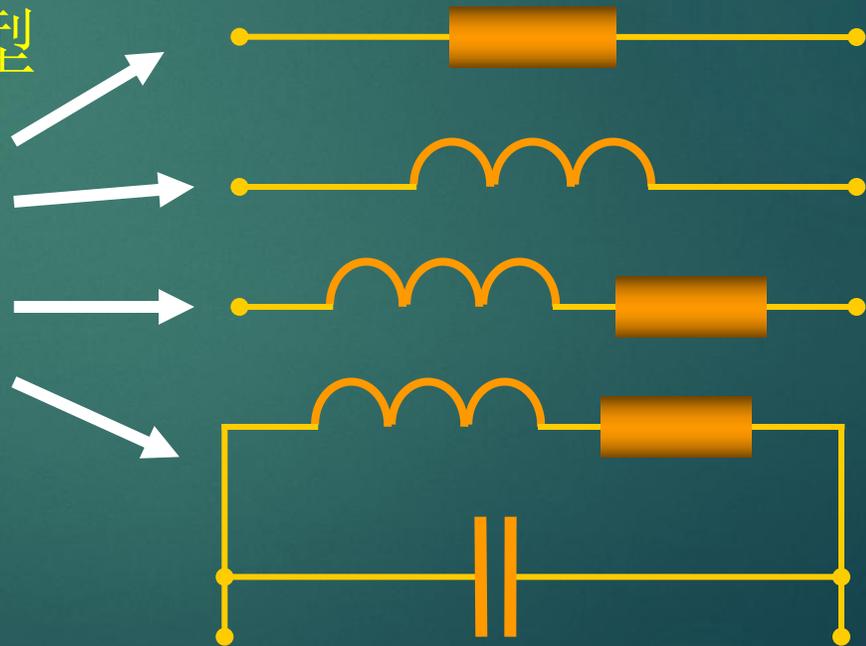
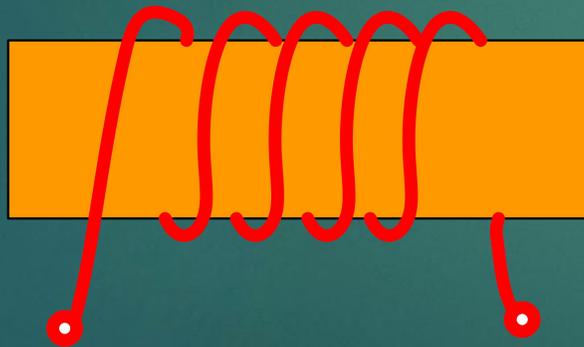
(b) 可以用电压或电流按数学方式描述；

(c) 不能被分解为其他元件。

## 注意

- ①具有相同的主要电磁性能的实际电路部件，在一定条件下可用同一电路模型表示；
- ②同一实际电路部件在不同的应用条件下，其电路模型可以有不同的形式。

例 电感线圈的电路模型



## 1.2 电流和电压的参考方向

电路中的主要物理量有电压、电流、电荷、磁链、能量、电功率等。在线性电路分析中人们主要关心的物理量是电流、电压和功率。

### 1. 电流的参考方向

● 电流

带电粒子有规则的定向运动

● 电流强度

单位时间内通过导体横截面的电荷量

$$i(t) \stackrel{\text{def}}{=} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt}$$

● 单位

● 方向

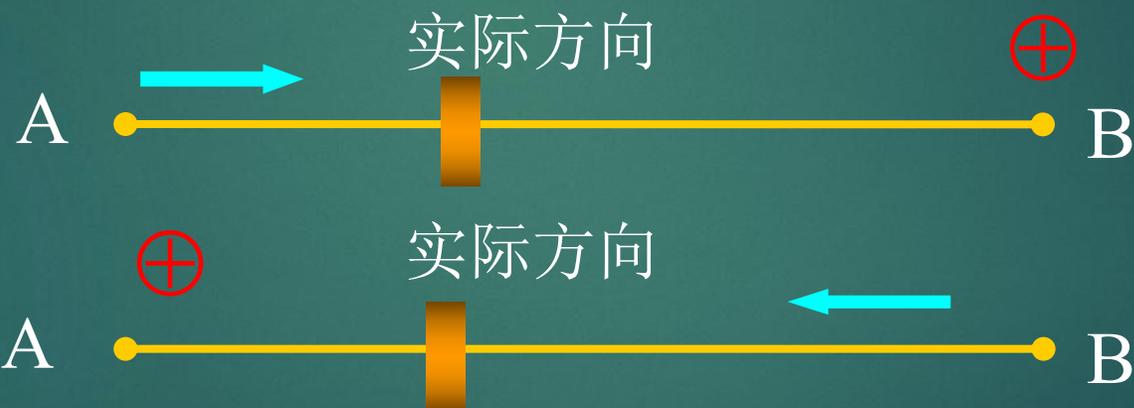
A (安培)、  
kA、mA、 $\mu$ A

$$1\text{kA}=10^3\text{A}$$

$$1\text{mA}=10^{-3}\text{A}$$

$$1\ \mu\text{A}=10^{-6}\text{A}$$

规定正电荷的运动方向为电流的实际方向  
元件(导线)中电流流动的实际方向只有两种可能:

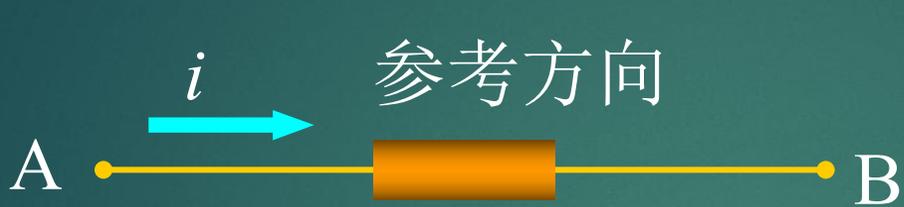


**问题** 对于复杂电路或电路中的电流随时间变化时, 电流的实际方向往往很难事先判断。

● 参考方向



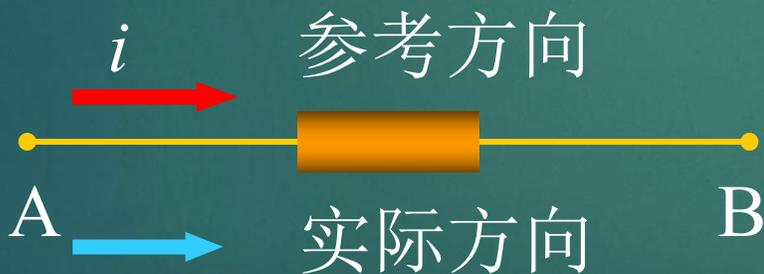
任意假定一个正电荷运动的方向即为电流的参考方向。



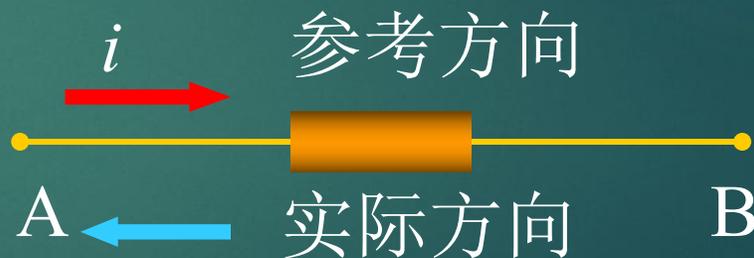
表明 电流(代数量)

{ 大小  
方向(正负)

电流的参考方向与实际方向的关系:



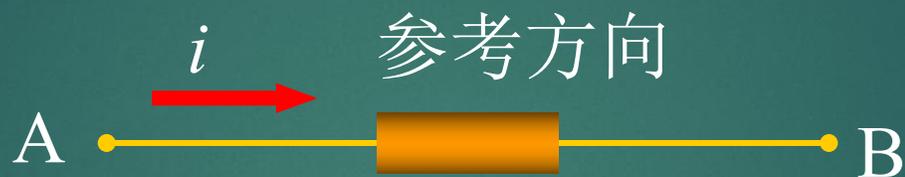
$i > 0$



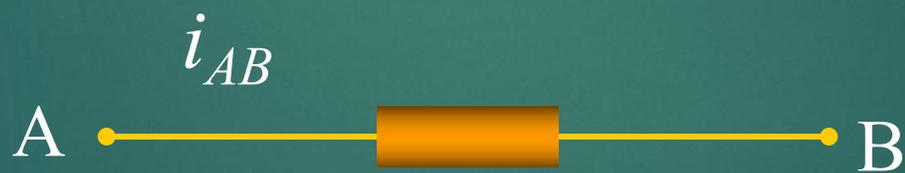
$i < 0$

电流参考方向的两种表示：

- 用箭头表示：箭头的指向为电流的参考方向。



- 用双下标表示：如  $i_{AB}$ ，电流的参考方向由A指向B。



## 2. 电压的参考方向

● 电位 $\varphi$

→ 单位正电荷 $q$  从电路中一点移至参考点 ( $\varphi=0$ ) 时电场力做功的大小。

● 电压 $U$

→ 单位正电荷 $q$  从电路中一点移至另一点时电场力做功 ( $W$ ) 的大小。

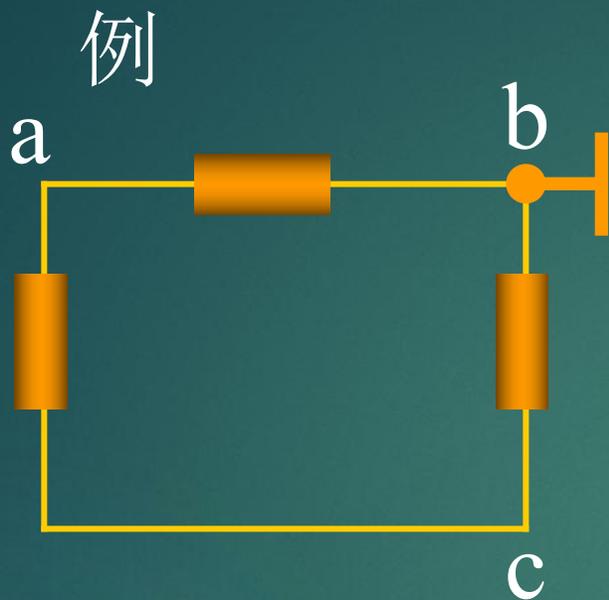
$$U \stackrel{\text{def}}{=} \frac{dW}{dq}$$

● 实际电压方向

→ 电位真正降低的方向。

● 单位

V (伏)、kV、mV、 $\mu$ V



已知：4C正电荷由a点均匀移动至b点电场力做功8J，  
由b点移动到c点电场力做功为12J，

- ① 若以b点为参考点，求a、b、c点的电位和电压  $U_{ab}$ 、 $U_{bc}$ ；
- ② 若以c点为参考点，再求以上各值。

解

(1)  $\varphi_b = 0$

$$\varphi_a = \frac{W_{ab}}{q} = \frac{8}{4} = 2 \text{ V}$$

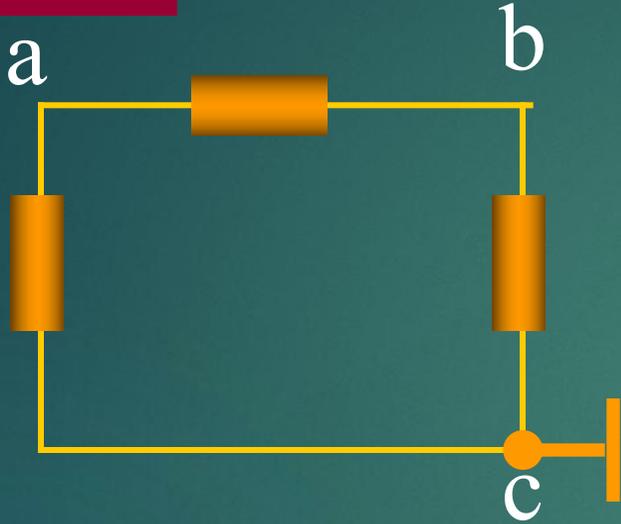
$$\varphi_c = \frac{W_{cb}}{q} = -\frac{W_{bc}}{q} = -\frac{12}{4} = -3 \text{ V}$$

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = 2 - 0 = 2 \text{ V}$$

$$U_{bc} = \varphi_b - \varphi_c = 0 - (-3) = 3 \text{ V}$$

解

$$(2) \varphi_c = 0$$



$$\varphi_a = \frac{W_{ac}}{q} = \frac{8+12}{4} = 5 \text{ V}$$

$$\varphi_b = \frac{W_{bc}}{q} = \frac{12}{4} = 3 \text{ V}$$

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = 5 - 3 = 2 \text{ V}$$

$$U_{bc} = \varphi_b - \varphi_c = 3 - 0 = 3 \text{ V}$$



结论

电路中电位参考点可任意选择；参考点一经选定，电路中各点的电位值就唯一确定；当选择不同的电位参考点时，电路中各点电位值将改变，但任意两点间电压保持不变。



**问题** 复杂电路或交变电路中，两点间电压的实际方向往往不易判别，给实际电路问题的分析计算带来困难。

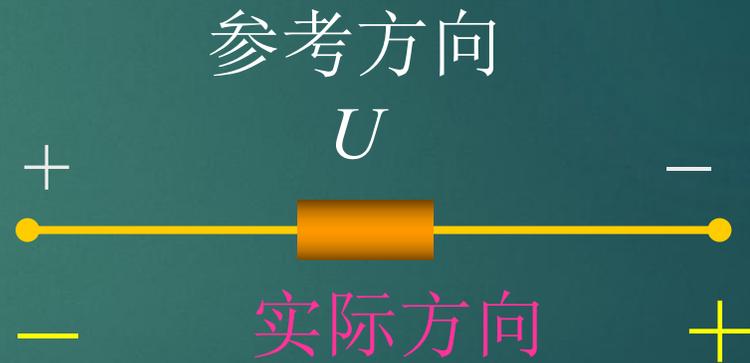
● 电压(降)的参考方向



假设高电位指向低电位的方向。



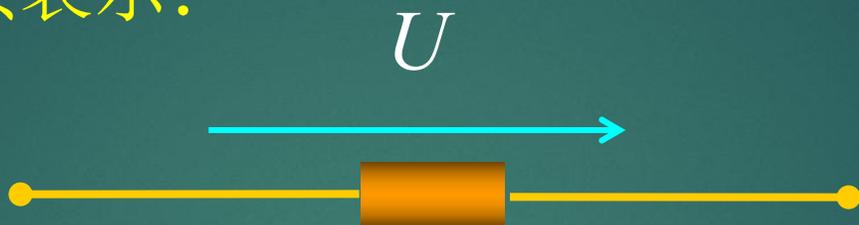
$$U > 0$$



$$U < 0$$

电压参考方向的三种表示方式:

(1) 用箭头表示:



(2) 用正负极性表示

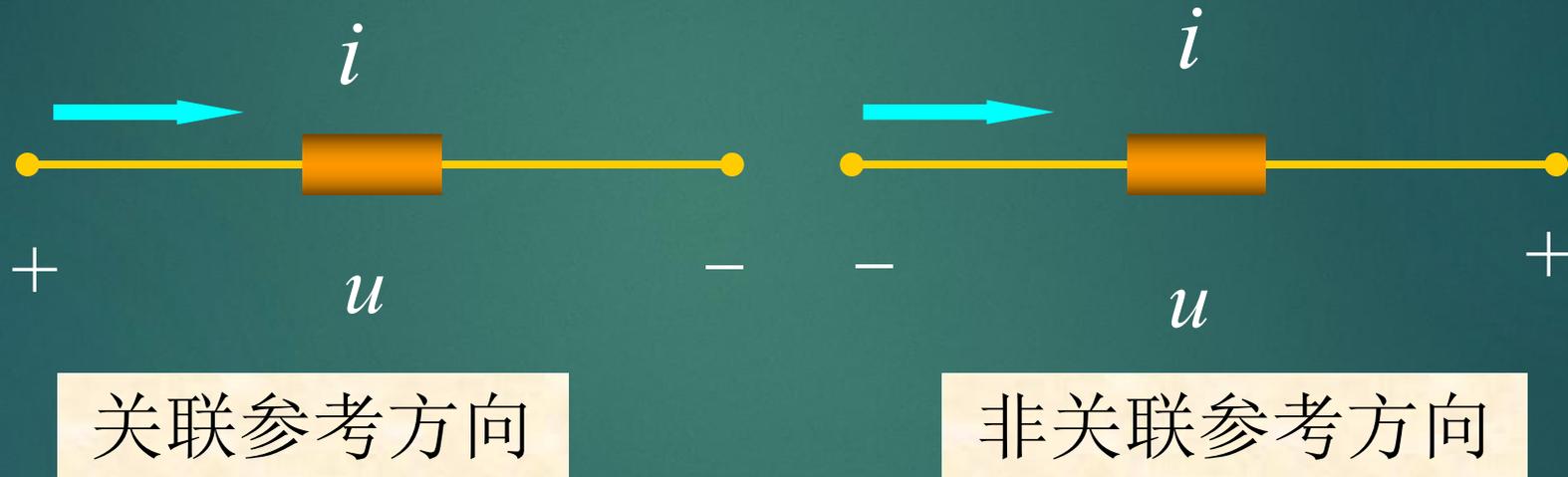


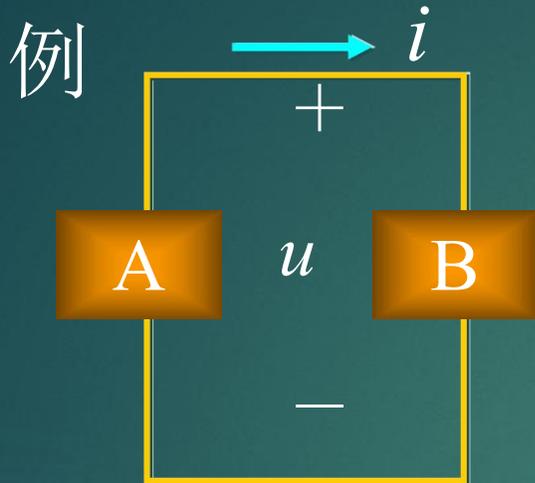
(3) 用双下标表示



### 3. 关联参考方向

元件或支路的 $u$ ,  $i$  采用相同的参考方向称之为关联参考方向。反之, 称为非关联参考方向。





电压电流参考方向如图中所标，  
问：对A、B两部分电路电压电  
流参考方向关联否？

答：A电压、电流参考方向非关联；  
B电压、电流参考方向关联。



- ① 分析电路前必须选定电压和电流的参考方向
- ② 参考方向一经选定，必须在图中相应位置标注  
(包括方向和符号)，在计算过程中不得任意改变
- ③ 参考方向不同时，其表达式相差一负号，但电压、  
电流的实际方向不变。

## 1.3 电功率和能量

1. 电功率  $\longrightarrow$  单位时间内电场力所做的功。

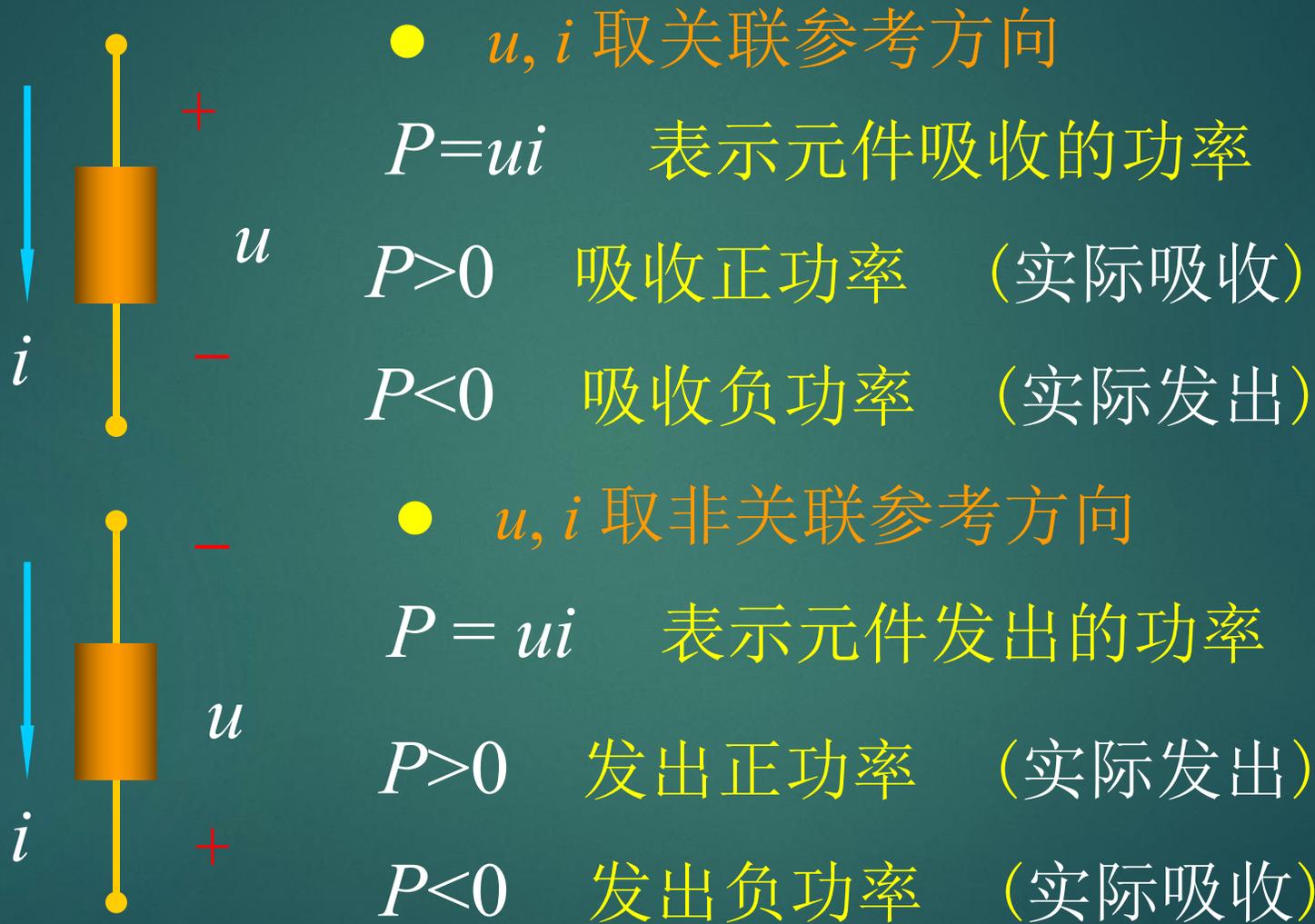
$$p = \frac{dw}{dt} \quad u = \frac{dw}{dq} \quad i = \frac{dq}{dt}$$

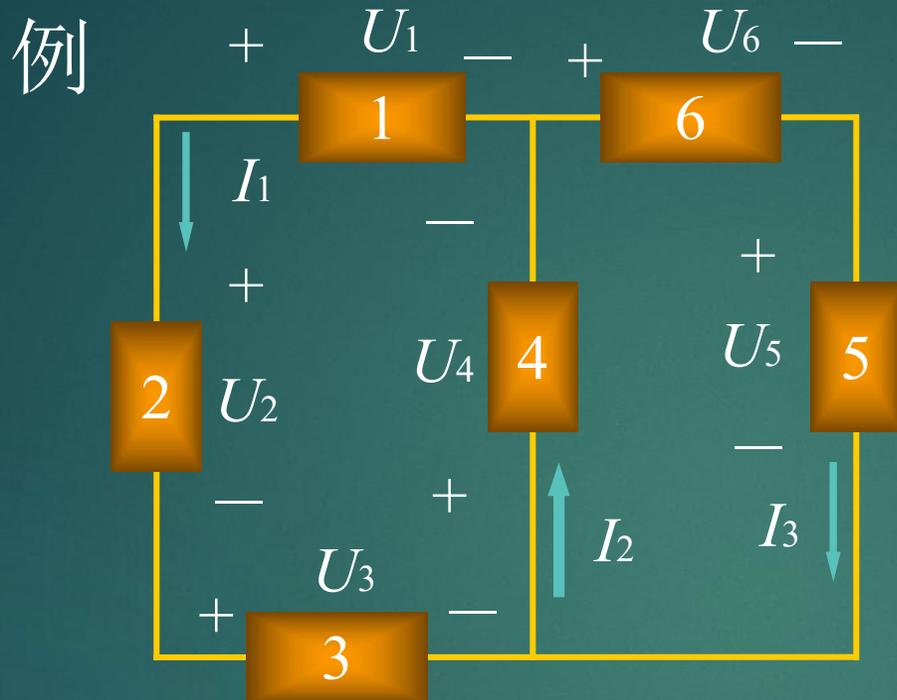
$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \frac{dq}{dt} = ui$$

功率的单位：W（瓦）（Watt，瓦特）

能量的单位：J（焦）（Joule，焦耳）

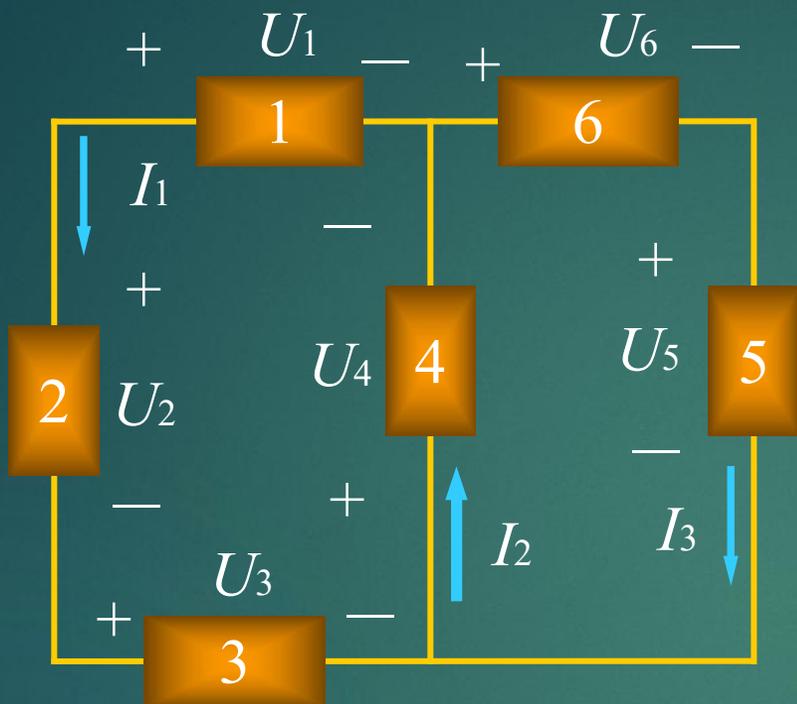
## 2. 电路吸收或发出功率的判断





求图示电路中各方框所代表的元件吸收或产生的功率。

已知：  $U_1=1\text{V}$ ,  $U_2=-3\text{V}$ ,  $U_3=8\text{V}$ ,  $U_4=-4\text{V}$ ,  
 $U_5=7\text{V}$ ,  $U_6=-3\text{V}$ ,  $I_1=2\text{A}$ ,  $I_2=1\text{A}$ ,  $I_3=-1\text{A}$



解

$$P_1 = U_1 I_1 = 1 \times 2 = 2\text{W} \text{ (发出)}$$

$$P_2 = U_2 I_1 = (-3) \times 2 = -6\text{W} \text{ (吸收)}$$

$$P_3 = U_3 I_1 = 8 \times 2 = 16\text{W} \text{ (吸收)}$$

$$P_4 = U_4 I_2 = (-4) \times 1 = -4\text{W} \text{ (吸收)}$$

$$P_5 = U_5 I_3 = 7 \times (-1) = -7\text{W} \text{ (吸收)}$$

$$P_6 = U_6 I_3 = (-3) \times (-1) = 3\text{W} \text{ (吸收)}$$



注意

对一完整的电路，满足：发出的功率 = 吸收的功率

## 1.4 电路元件

1. 电路元件 → 是电路中最基本的组成单元。

5种基本的理想电路元件：

电阻元件：表示消耗电能的元件

电感元件：表示产生磁场，储存磁场能量的元件

电容元件：表示产生电场，储存电场能量的元件

电压源和电流源：表示将其它形式的能量转变成电能的元件。



**注意**

如果表征元件端子特性的数学关系式是线性关系，该元件称为线性元件，否则称为非线性元件。

# 1.5 电阻元件

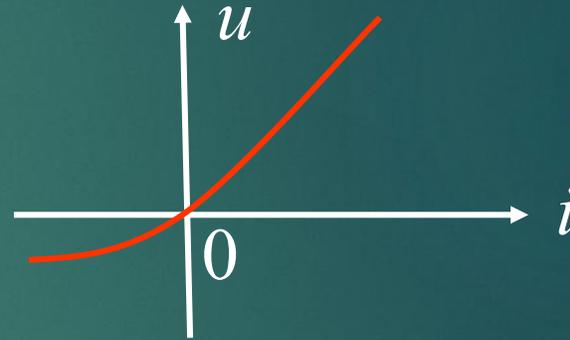
## 1. 定义

电阻元件

对电流呈现阻力的元件。其特性可用  $u \sim i$  平面上的一条曲线来描述：

$$f(u, i) = 0$$

伏安特性



## 2. 线性时不变电阻元件

任何时刻端电压与电流成正比的电阻元件。

$R$

● 电路符号



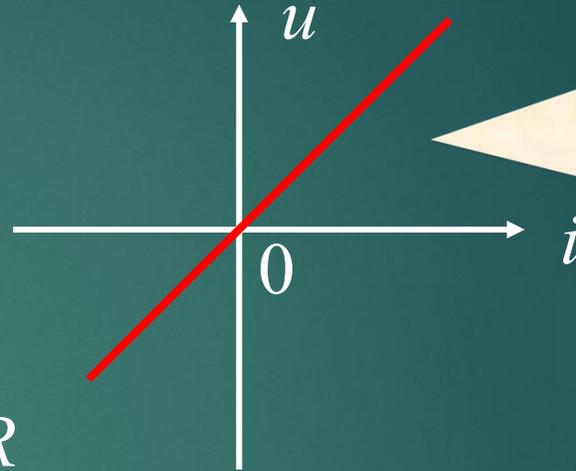
●  $u \sim i$  关系

满足欧姆定律

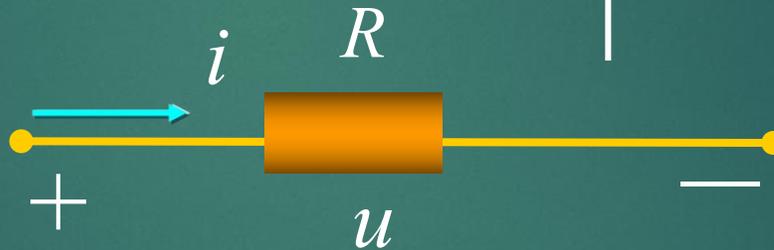
$$u = Ri \quad R = u/i$$

$$i = u/R = Gu$$

$u$ 、 $i$  取关联参考方向



伏安特性为一条过原点的直线



● 单位

$R$  称为电阻，单位： $\Omega$  (Ohm)

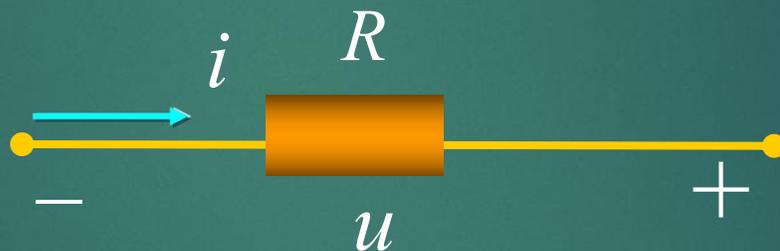
$G$  称为电导，单位： $S$  (Siemens)



注意

欧姆定律

- ①只适用于线性电阻( $R$ 为常数)；
- ②如电阻上的电压与电流参考方向非关联，公式中应冠以负号；
- ③说明线性电阻是无记忆、双向性的元件。

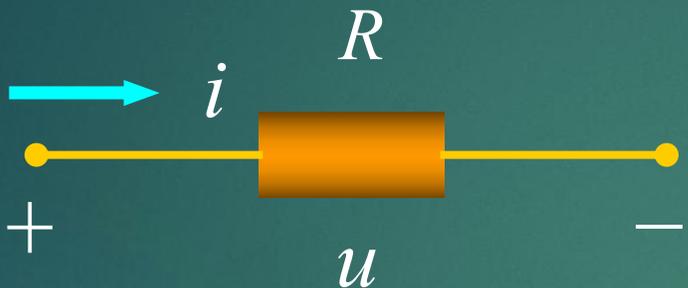


则欧姆定律写为  $u = -R i$       $i = -G u$

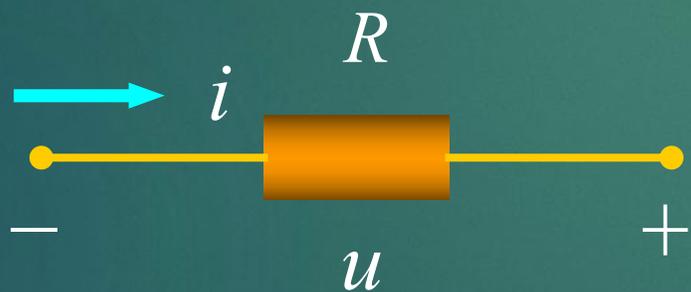
公式和参考方向必须配套使用！

### 3. 功率和能量

#### ● 功率



$$p = u i = i^2 R = u^2 / R$$



$$p = u i = (-R i) i \\ = -i^2 R = -u^2 / R$$



表明

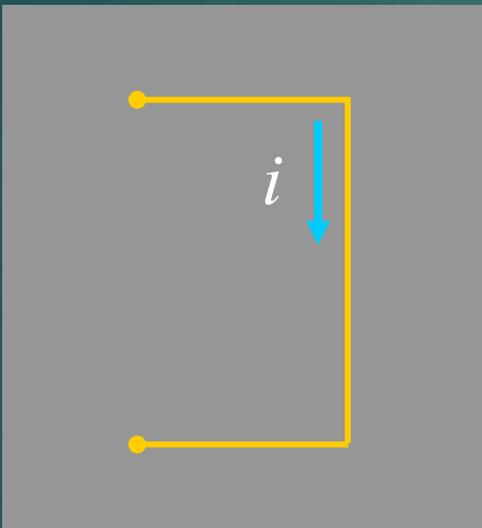
电阻元件在任何时刻总是消耗功率的。

● 能量

从  $t_0$  到  $t$  电阻消耗的能量:

$$W_R = \int_{t_0}^t p d\xi = \int_{t_0}^t u i d\xi$$

### 4. 电阻的开路与短路



● 开路

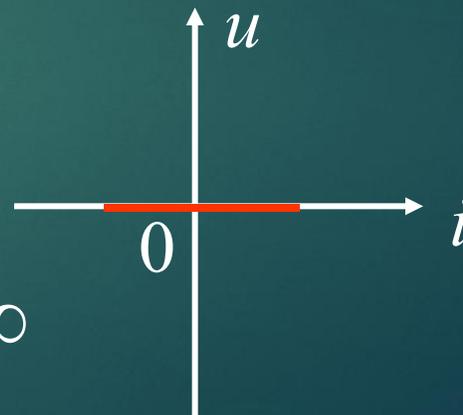
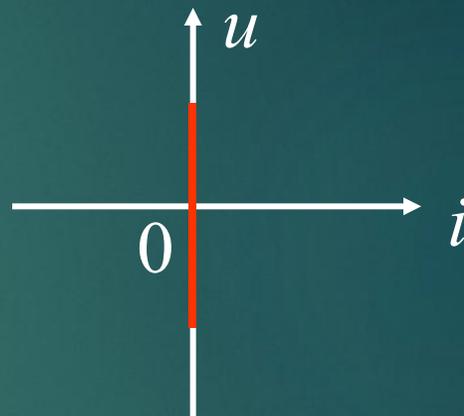
$$i = 0 \quad u \neq 0$$

→  $R = \infty$  or  $G = 0$

● 短路

$$i \neq 0 \quad u = 0$$

→  $R = 0$  or  $G = \infty$



# 1.6 电压源和电流源

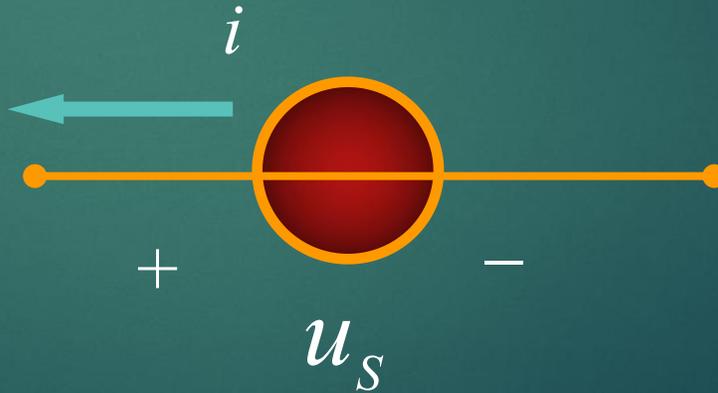
## 1. 理想电压源

● 定义



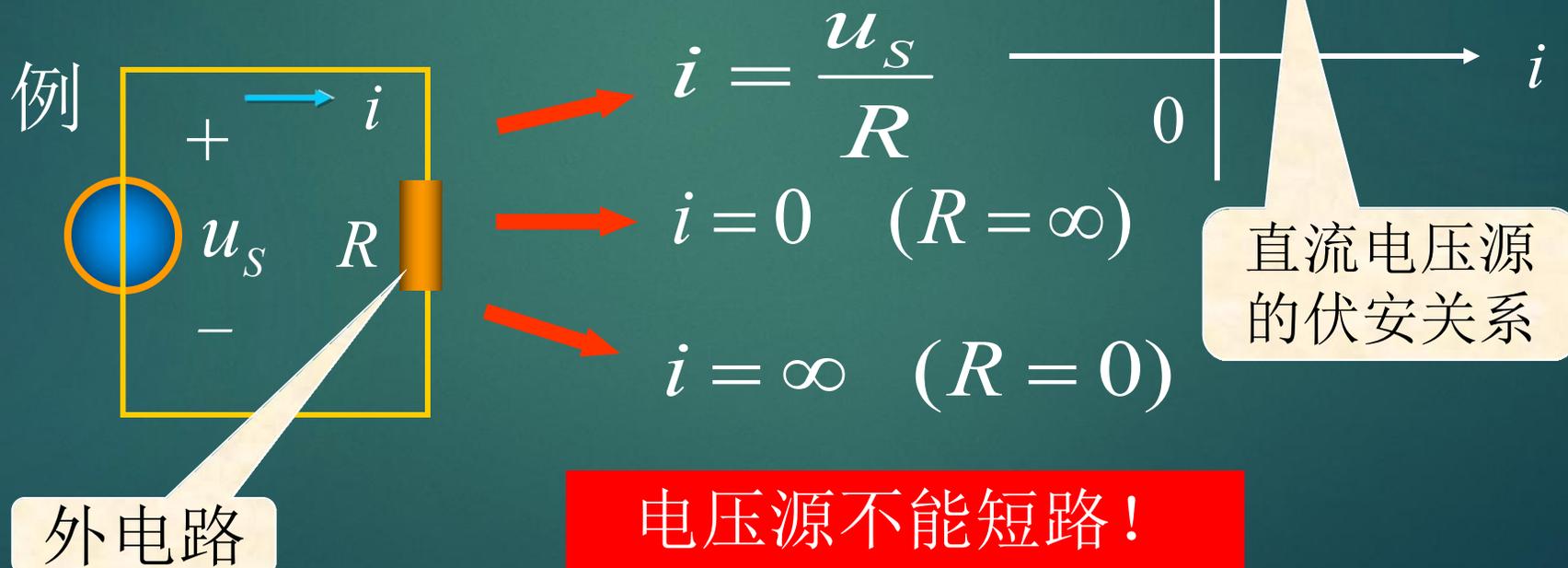
其两端电压总能保持定值或一定的时间函数，其值与流过它的电流  $i$  无关的元件叫理想电压源。

● 电路符号



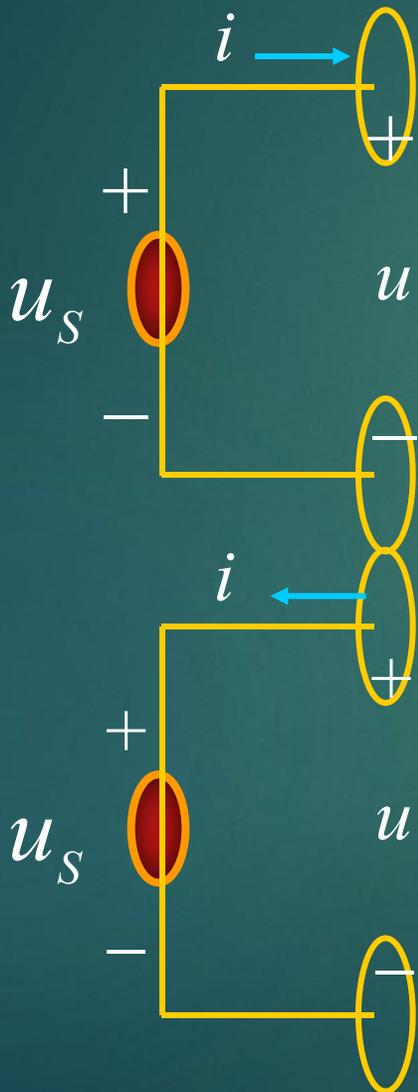
## ●理想电压源的电压、电流关系

- ①电源两端电压由电源本身决定，与外电路无关；  
与流经它的电流方向、大小无关。
- ②通过电压源的电流由电源及  
外电路共同决定。



● 电压源的功率

$$\longrightarrow P = u_S i$$



① 电压、电流参考方向非关联；

物理意义：

外力克服电场力作功，电源发出功率

$P = u_S i \longrightarrow$  发出功率，起电源作用

② 电压、电流参考方向关联；

物理意义：电场力做功，电源吸收功率

$P = u_S i \longrightarrow$  吸收功率，充当负载

例 计算图示电路各元件的功率

解

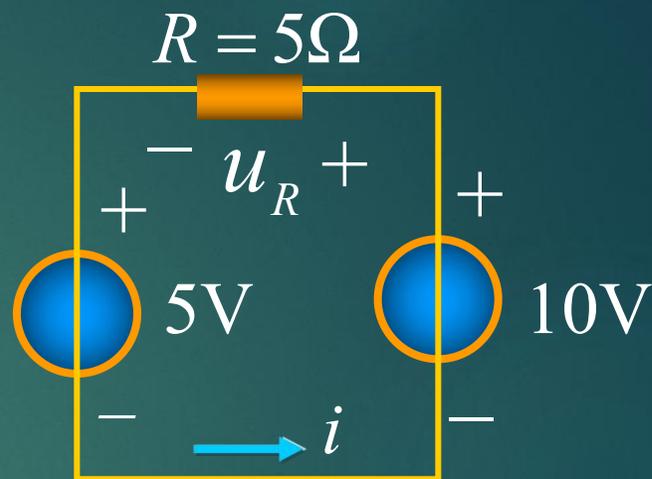
$$u_R = (10 - 5) = 5\text{V}$$

$$i = \frac{u_R}{R} = \frac{5}{5} = 1\text{A}$$

$$P_{10\text{V}} = u_S i = 10 \times 1 = 10\text{W}$$

$$P_{5\text{V}} = u_S i = 5 \times 1 = 5\text{W}$$

$$P_R = Ri^2 = 5 \times 1 = 5\text{W}$$



发出

吸收

吸收

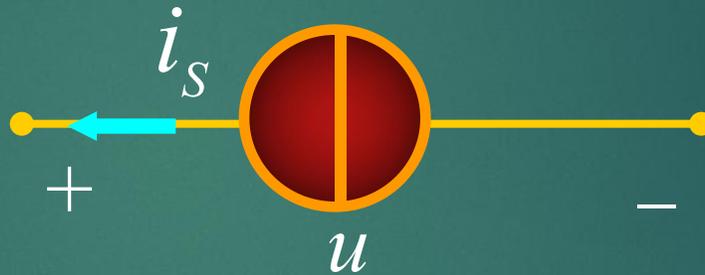
满足:  $P(\text{发}) = P(\text{吸})$

## 2. 理想电流源

### ● 定义

其输出电流总能保持定值或一定的时间函数，其值与它的两端电压 $u$ 无关的元件叫理想电流源。

### ● 电路符号

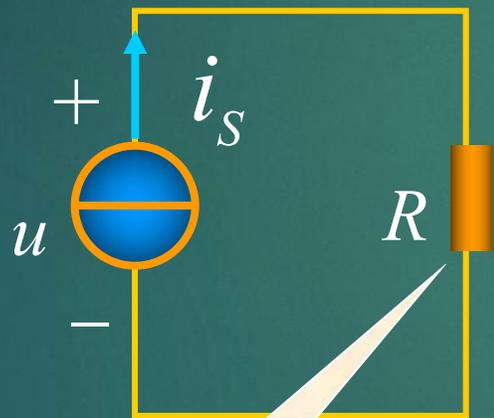


### ● 理想电流源的电压、电流关系

① 电流源的输出电流由电源本身决定，与外电路无关；与它两端电压方向、大小无关。

② 电流源两端的电压由电源及外电路共同决定。

例



直流电流源的伏安关系



$$u = Ri_s$$

$$u = 0 \quad (R = 0)$$

$$u = \infty \quad (R = \infty)$$

外电路

电流源不能开路!

实际电流源的产生：

可由稳流电子设备产生，如晶体管的集电极电流与负载无关；光电池在一定光线照射下光电子被激发产生一定值的电流等。

● 电流源的功率  $\longrightarrow P = ui_S$

①电压、电流的参考方向非关联；

$P = ui_S \longrightarrow$  发出功率，起电源作用

②电压、电流的参考方向关联；

$P = ui_S \longrightarrow$  吸收功率，充当负载

例 计算图示电路各元件的功率

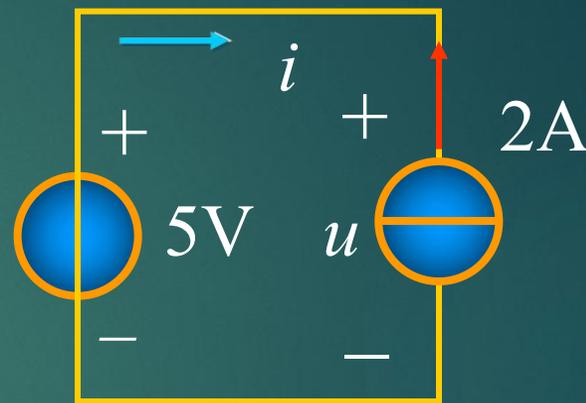
解

$$i = -i_s = -2A$$

$$u = 5V$$

$$P_{2A} = i_s u = 2 \times 5 = 10W \quad \text{发出}$$

$$P_{5V} = u_s i = 5 \times (-2) = -10W \quad \text{发出}$$



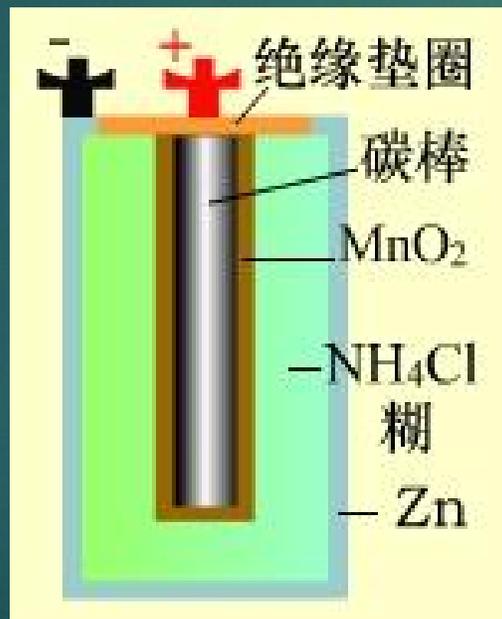
满足:  $P(\text{发}) = P(\text{吸})$

# 实际电源

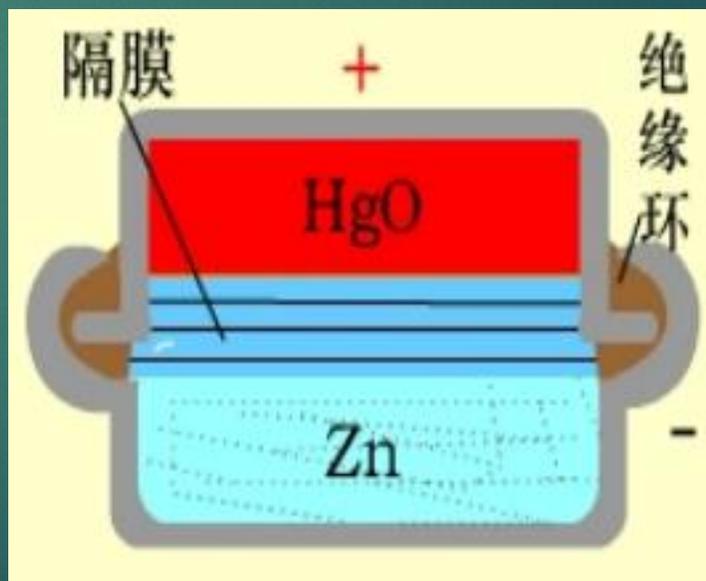
## 1. 干电池和钮扣电池（化学电源）

干电池电动势1.5V，仅取决于（糊状）化学材料，其大小决定储存的能量，化学反应不可逆。

钮扣电池电动势1.35V，用固体化学材料，化学反应不可逆。



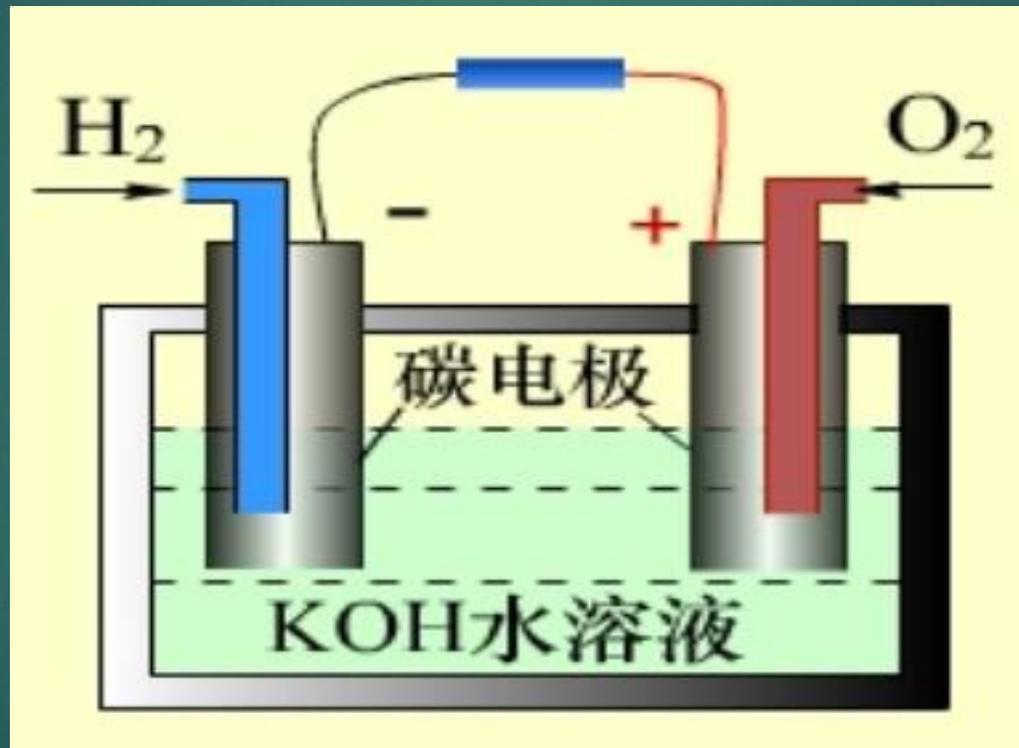
干电池



钮扣电池

## 2. 燃料电池（化学电源）

电池电动势1.23V。以氢、氧作为燃料。约40-45%的化学能转变为电能。实验阶段加燃料可继续工作。

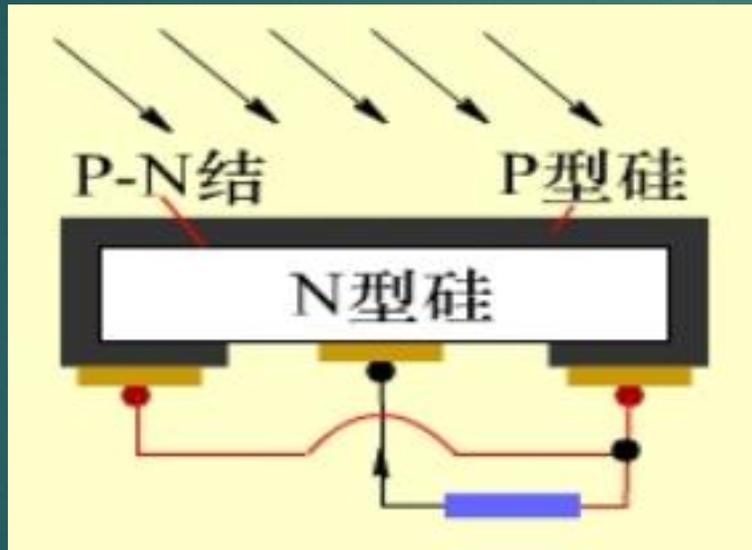


氢氧燃料电池示意图

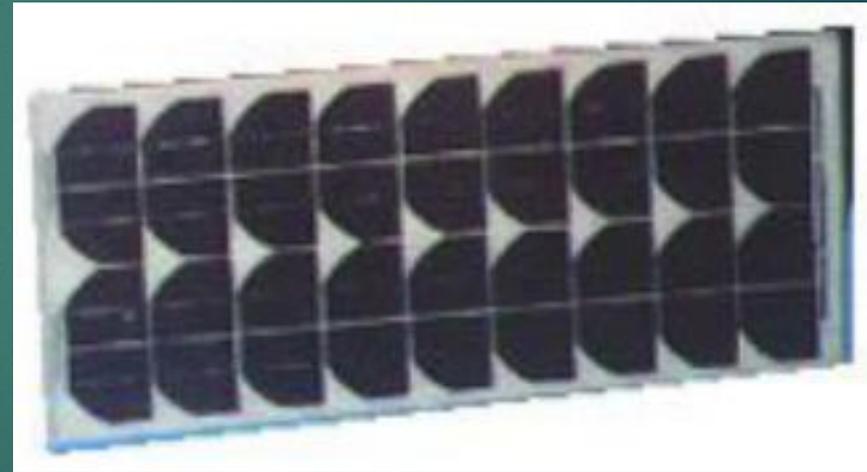
### 3. 太阳能电池（光能电源）

一块太阳能电池电动势0.6V。太阳光照射到P-N结上，形成一个从N区流向P区的电流。约 11%的光能转变为电能，故常用太阳能电池板。

一个 $50\text{cm}^2$ 太阳能电池的电动势0.6V,电流0.1A



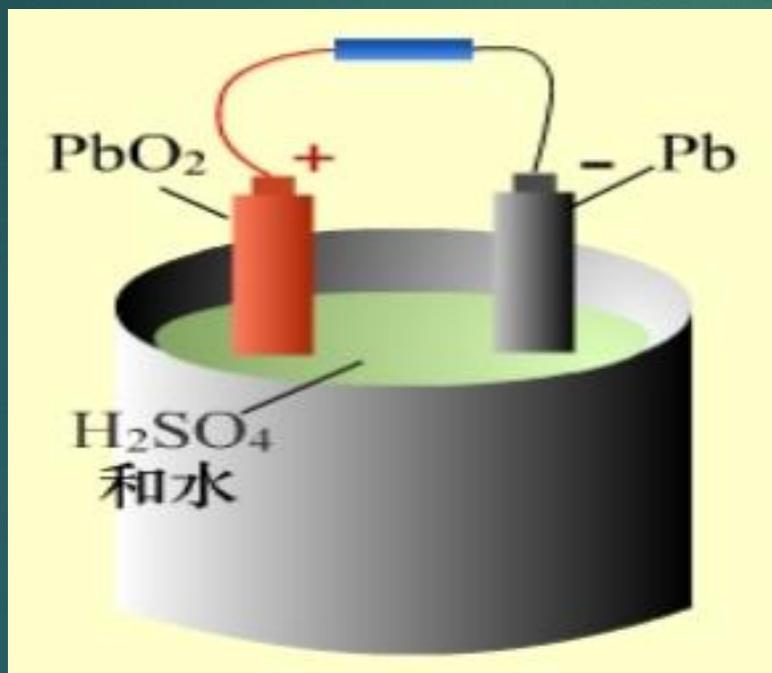
太阳能电池示意图



太阳能电池板

## 4. 蓄电池（化学电源）

电池电动势2V。使用时，电池放电，当电解液浓度小于一定值时，电动势低于2V，常要充电，化学反应可逆。



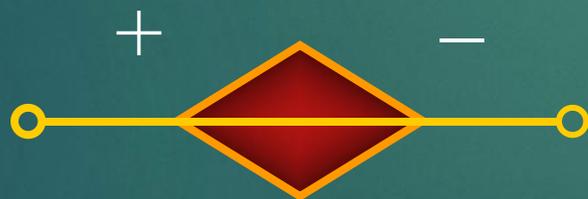
蓄电池示意图



# 1.7 受控电源(非独立源)

1. 定义  $\longrightarrow$  电压或电流的大小和方向不是给定的时间函数，而是受电路中某个地方的电压(或电流)控制的电源，称受控源。

- 电路符号



受控电压源

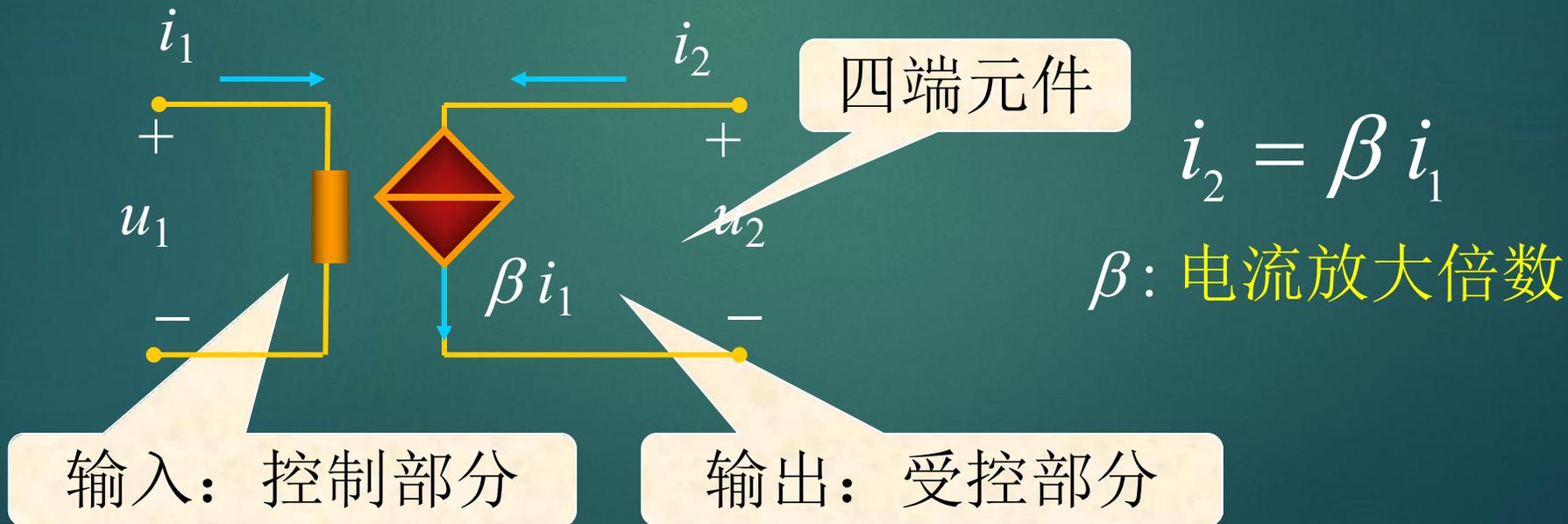


受控电流源

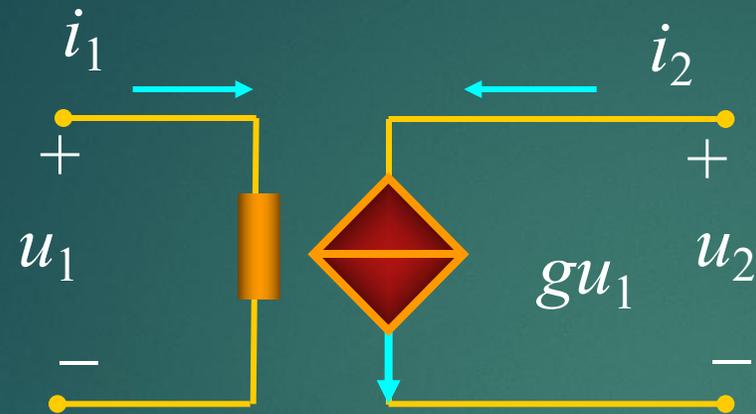
## 2. 分类

根据控制量和被控制量是电压 $u$  或电流 $i$ ，受控源可分四种类型：当被控制量是电压时，用受控电压源表示；当被控制量是电流时，用受控电流源表示。

### ① 电流控制的电流源 ( CCCS )



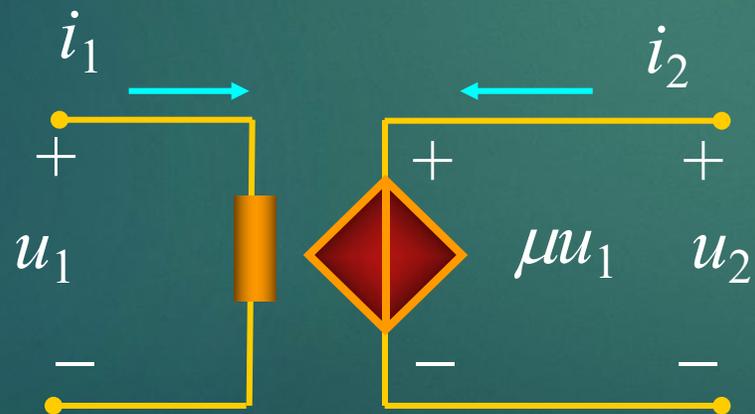
## ②电压控制的电流源 (VCCS)



$$i_2 = g u_1$$

$g$ : 转移电导

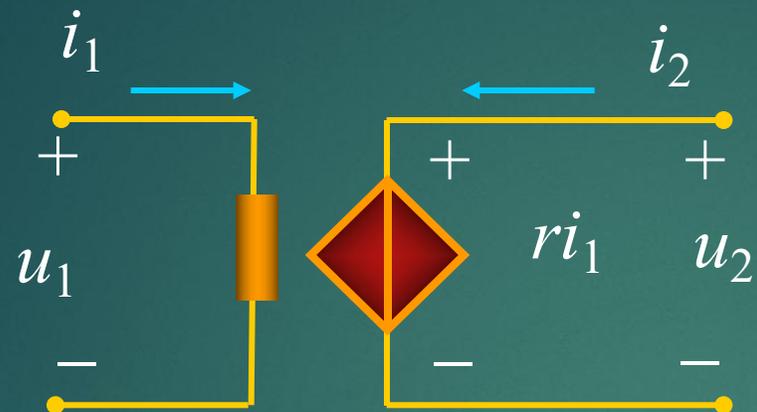
## ③电压控制的电压源 (VCVS)



$$u_2 = \mu u_1$$

$\mu$ : 电压放大倍数

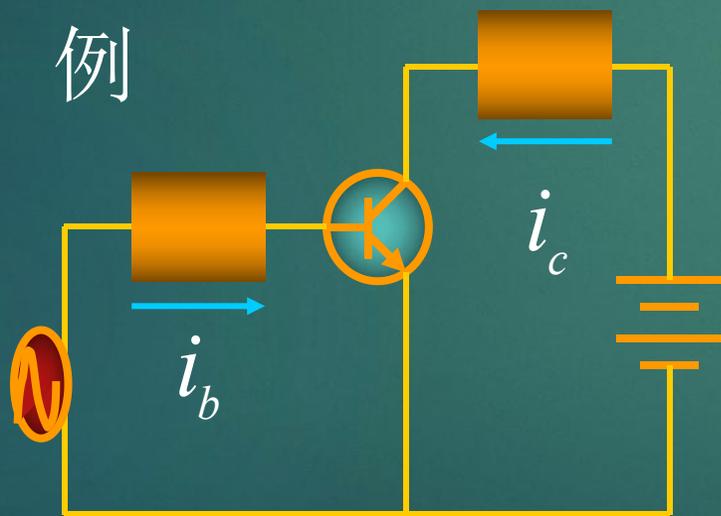
#### ④ 电流控制的电压源 (CCVS)



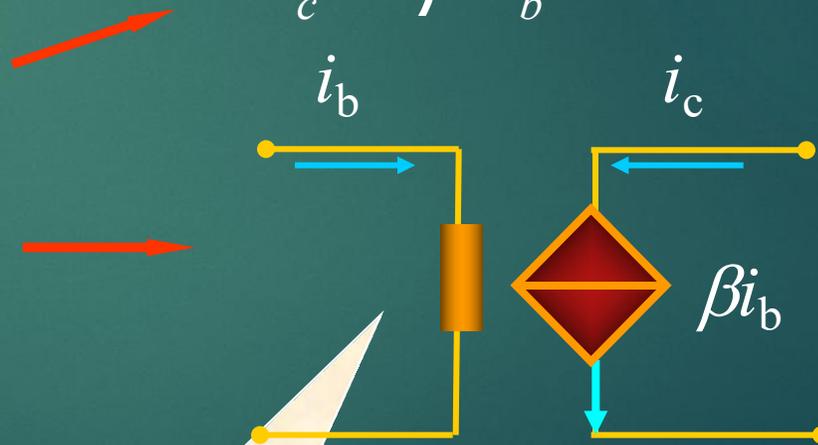
$$u_2 = ri_1$$

$r$ : 转移电阻

例



$$i_c = \beta i_b$$



电路模型

### 3. 受控源与独立源的比较

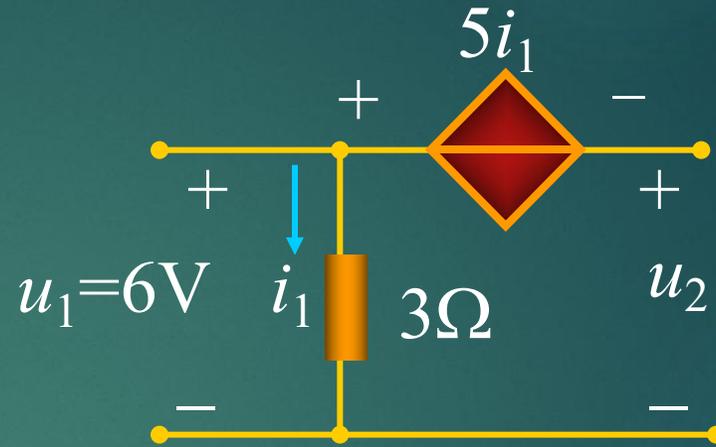
- ①独立源电压(或电流)由电源本身决定,与电路中其它电压、电流无关,而受控源电压(或电流)由控制量决定。
- ②独立源在电路中起“激励”作用,在电路中产生电压、电流,而受控源是反映电路中某处的电压或电流对另一处的电压或电流的控制关系,在电路中不能作为“激励”。

例 求：电压 $u_2$

解

$$i_1 = \frac{6}{3} = 2A$$

$$\begin{aligned} u_2 &= -5i_1 + 6 \\ &= -10 + 6 = -4V \end{aligned}$$



# 1.8 基尔霍夫定律

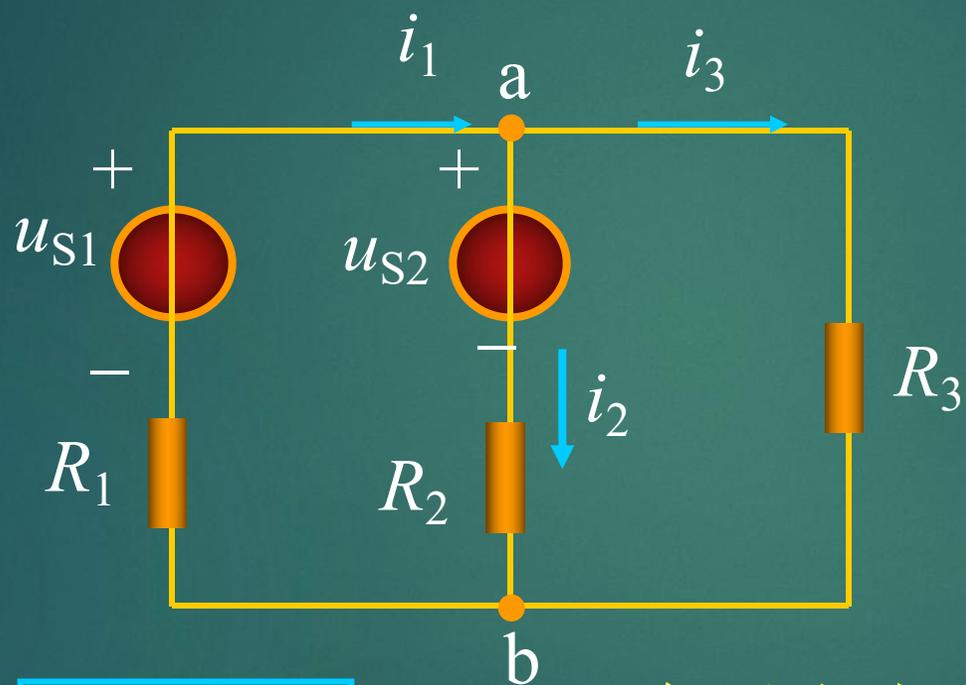
基尔霍夫定律包括基尔霍夫电流定律 (KCL) 和基尔霍夫电压定律(KVL)。它反映了电路中所有支路电压和电流所遵循的基本规律，是分析集总参数电路的基本定律。基尔霍夫定律与元件特性构成了电路分析的基础。

# 1. 几个名词

①支路

→ 电路中通过同一电流的分支。

$b=3$

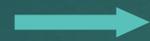


②结点

→ 三条以上支路的连接点称为结点。

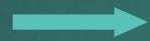
$n=2$

③路径

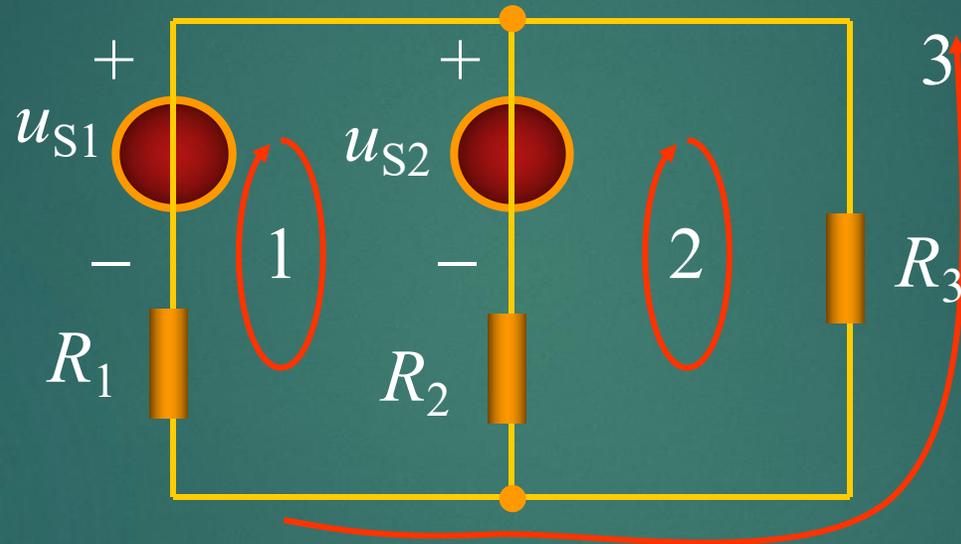


两结点间的一条通路。由支路构成

④回路



由支路组成的闭合路径。  $l=3$



⑤网孔



对平面电路，其内部不含任何支路的回路称网孔。



注意

网孔是回路，但回路不一定是网孔。

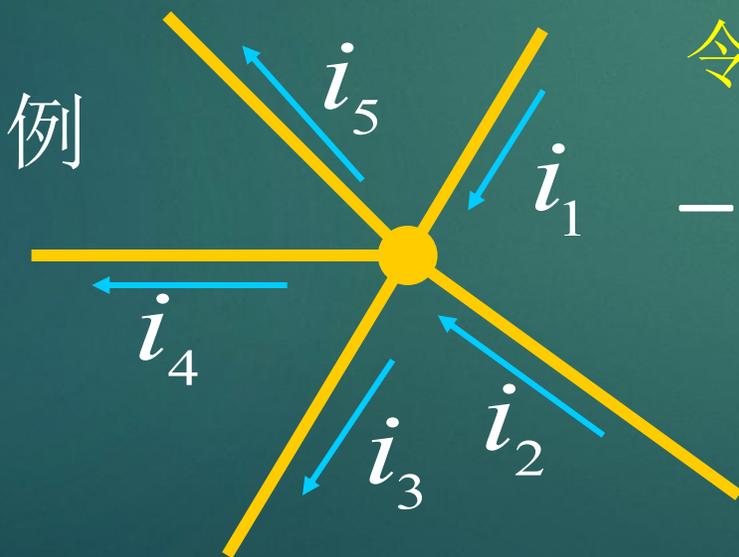
## 2. 基尔霍夫电流定律 (KCL)

在集总参数电路中，任意时刻，对任意结点流出（或流入）该结点电流的代数和等于零。

$$\sum_{b=1}^m i(t) = 0$$

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

流进的电流等于流出的电流



令流出为“+”，有：

$$-i_1 - i_2 + i_3 + i_4 + i_5 = 0$$

$$i_1 + i_2 = i_3 + i_4 + i_5$$

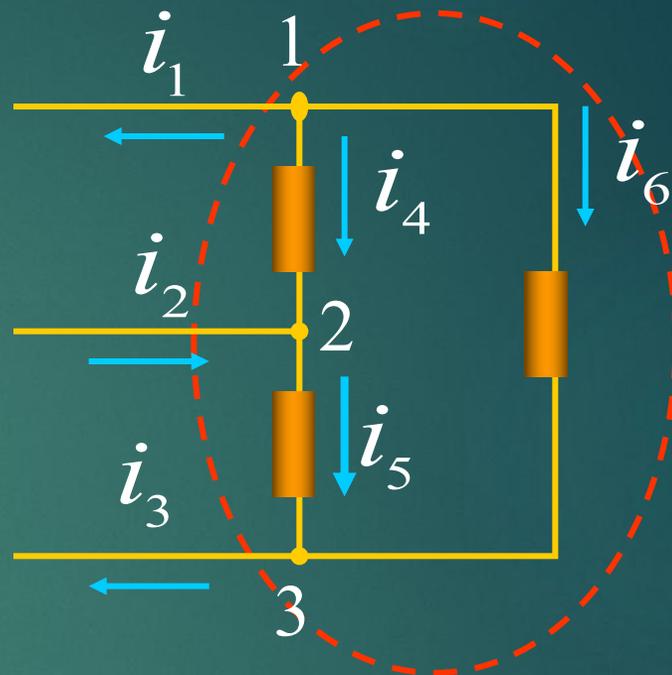
例  $i_1 + i_4 + i_6 = 0$

$$-i_2 - i_4 + i_5 = 0$$

$$i_3 - i_5 - i_6 = 0$$

三式相加得：

$$i_1 - i_2 + i_3 = 0$$



**表明**

KCL可推广应用于电路中包围多个结点的任一闭合面。



## 明确

- ① KCL是电荷守恒和电流连续性原理在电路中任意结点处的反映；
- ② KCL是对结点处支路电流加的约束，与支路上接的是何种元件无关，与电路是线性还是非线性无关；
- ③ KCL方程是按电流参考方向列写的，与电流实际方向无关。

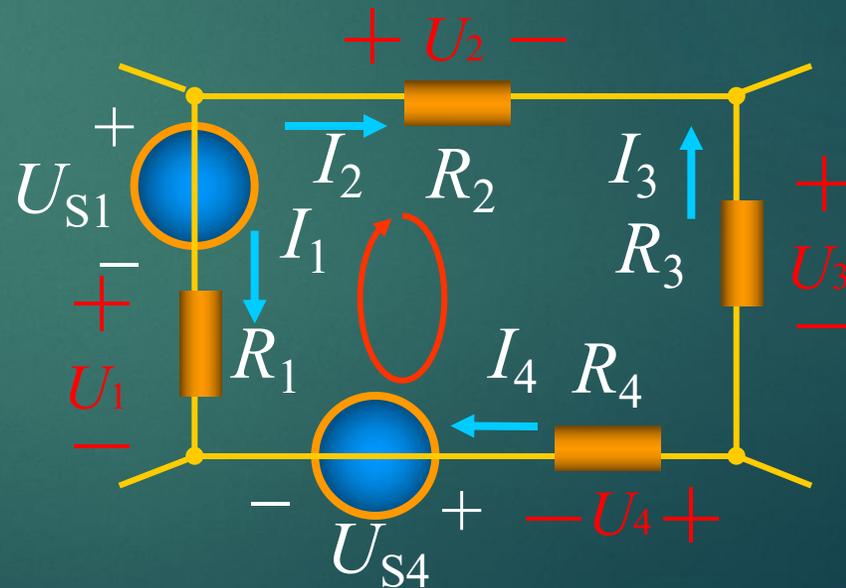
### 3. 基尔霍夫电压定律 (KVL)

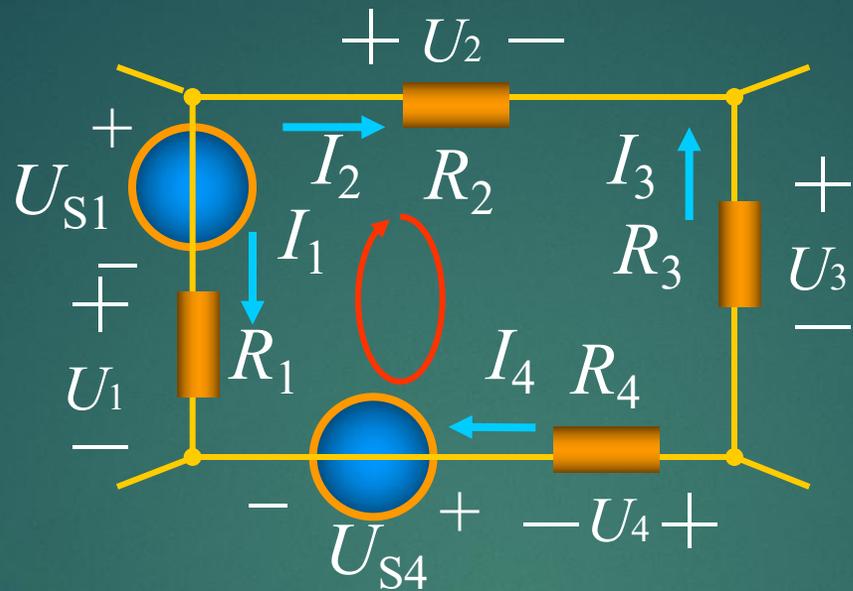
在集总参数电路中，任一时刻，沿任一回路，所有支路电压的代数和恒等于零。

$$\sum_{b=1}^m u(t) = 0$$

$$or \sum u_{降} = \sum u_{升}$$

- ① 标定各元件电压参考方向
- ② 选定回路绕行方向，顺时针或逆时针。





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

或:

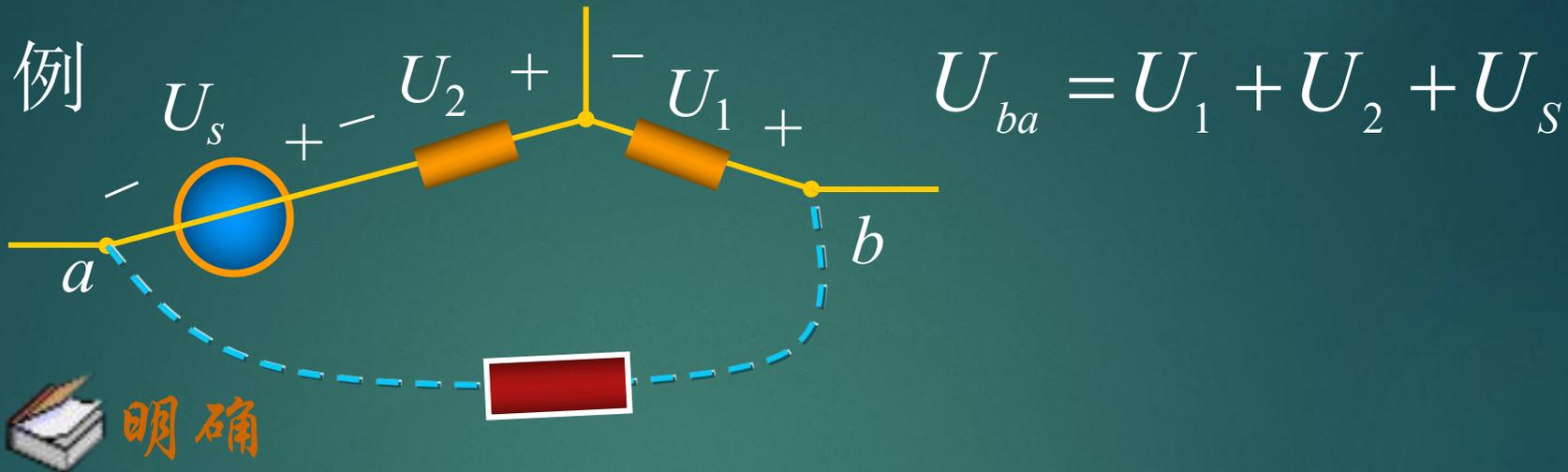
$$U_2 + U_3 + U_4 + U_{S4} = U_1 + U_{S1}$$

$$-R_1 I_1 + R_2 I_2 - R_3 I_3 + R_4 I_4 = U_{S1} - U_{S4}$$



**注意**

KVL也适用于电路中任一假想的回路。



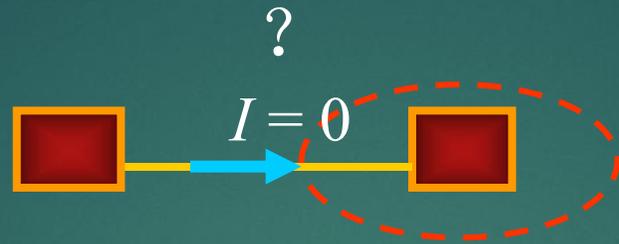
- ① KVL的实质反映了电路遵从能量守恒定律；
- ② KVL是对回路中的支路电压加的约束，与回路各支路上接的是什么元件无关，与电路是线性还是非线性无关；
- ③ KVL方程是按电压参考方向列写，与电压实际方向无关。

## 4. KCL、KVL小结:

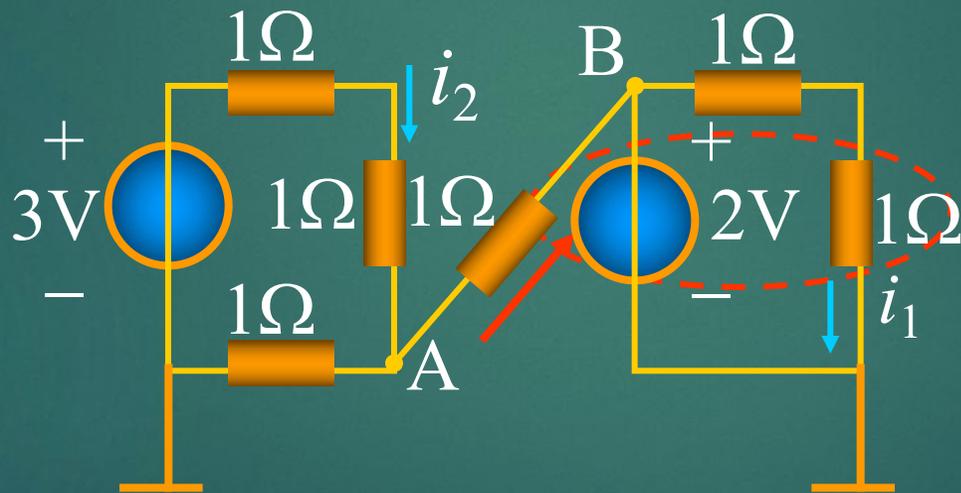
- ① KCL是对支路电流的线性约束，KVL是对回路电压的线性约束。
- ② KCL、KVL与组成支路的元件性质及参数无关。
- ③ KCL表明在每一节点上电荷是守恒的；KVL是能量守恒的具体体现(电压与路径无关)。
- ④ KCL、KVL只适用于集总参数的电路。

 思考

1.



2.



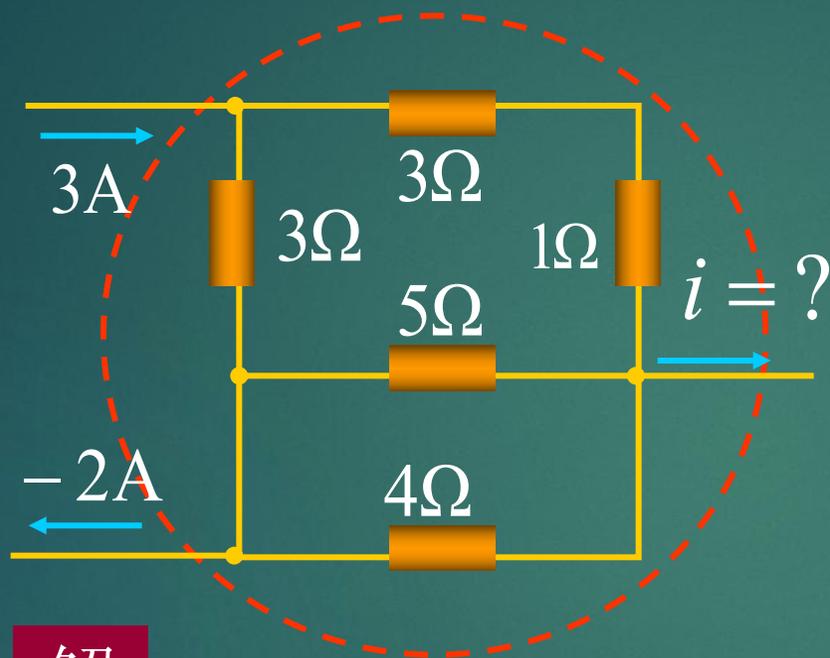
?

$$U_A = U_B$$

?

$$i_1 = i_2$$

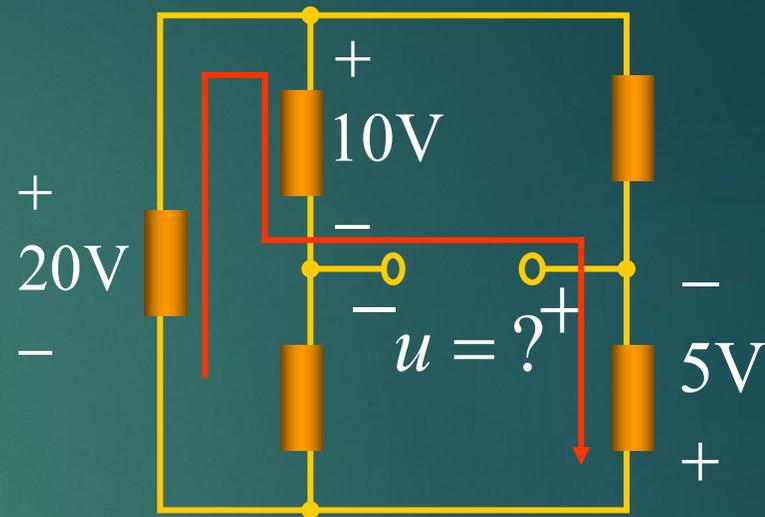
### 例1 求电流 $i$



解

$$i = 3 - (-2) = 5A$$

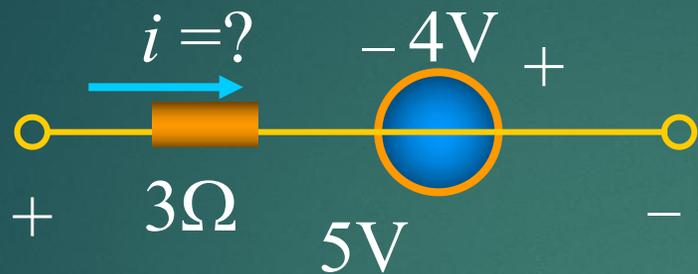
### 例2 求电压 $u$



解

$$u = 10 - 20 - 5 = -15V$$

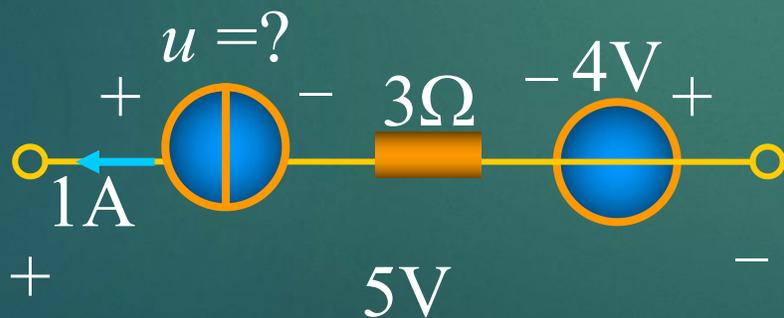
### 例3 求电流 $i$



解

$$3i - 4 = 5 \Rightarrow i = 3\text{A}$$

### 例4 求电压 $u$



解

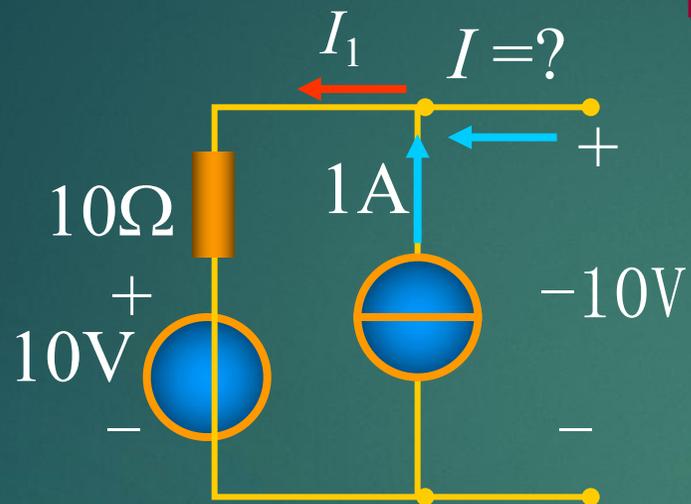
$$u = 5 + 7 = 12\text{V}$$



要求

能熟练求解含源支路的电压和电流。

### 例5 求电流 $I$



解

$$I = 10 - 3 = 7\text{A}$$

$$4 + U - 2I = 0$$

$$U = 2I - 4 = 14 - 4 = 10\text{V}$$

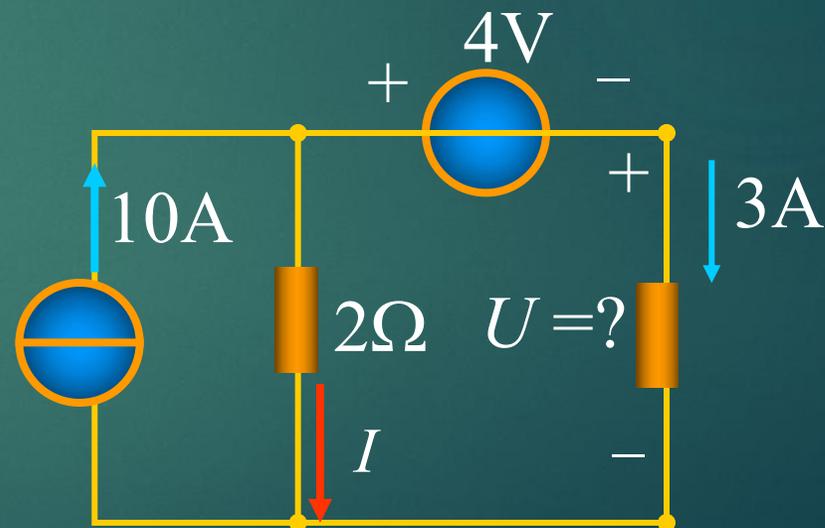
解

$$10I_1 + 10 - (-10) = 0$$

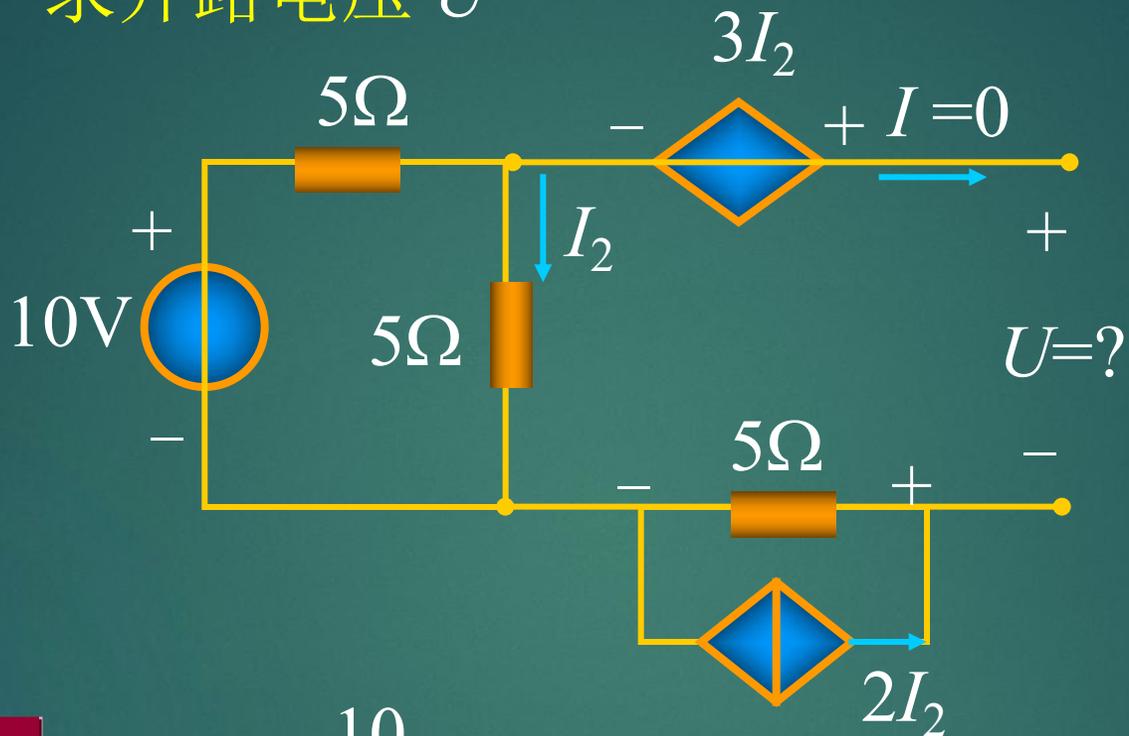
$$I_1 = -2\text{A}$$

$$I = I_1 - 1 = -2 - 1 = -3\text{A}$$

### 例6 求电压 $U$



例7 求开路电压  $U$

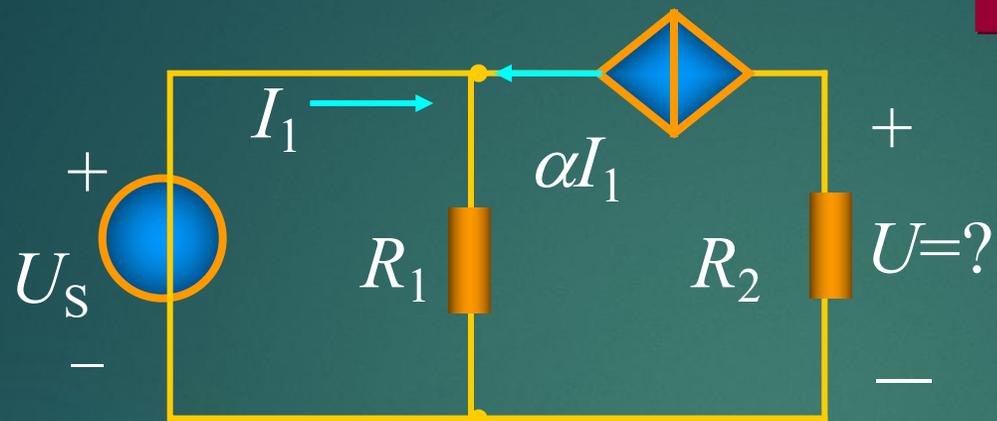


解

$$I_2 = \frac{10}{5+5} = 1\text{A}$$

$$U = 3I_2 + 5I_2 - 5 \times 2I_2 = -2I_2 = -2\text{V}$$

例8 求输出电压  $U$



解

$$U = -R_2 \alpha I_1$$

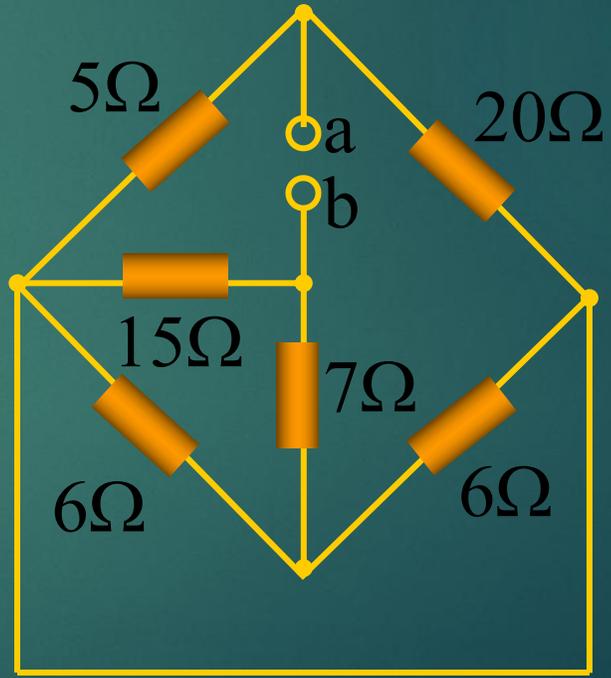
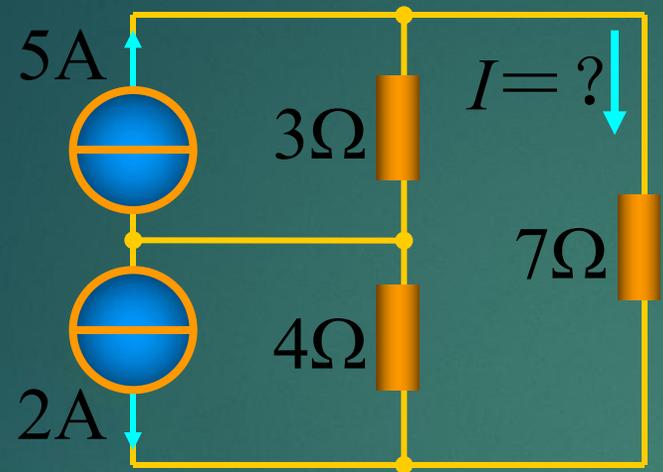
$$I_1 + \alpha I_1 = U_s / R_1$$

$$I_1 = \frac{U_s}{R_1(1 + \alpha)}$$

$$\rightarrow U = -\frac{\alpha R_2 U_s}{R_1(1 + \alpha)}$$

# 第2章 电路的一般分析方法和电 路定理

# 问题引入



# 2.1 电阻电路的等效变换

## 本节重点

1	引言
2	电路的等效变换
3	电阻的串联和并联
4	电压源、电流源的串联和并联
5	实际电源的两种模型及其等效变换
6	输入电阻

## ● 重点:

1. 电路等效的概念;
2. 电阻的串、并联;
3. 电压源和电流源的等效变换;

# 1 引言

●电阻电路



仅由电源和线性电阻构成的电路

●分析方法



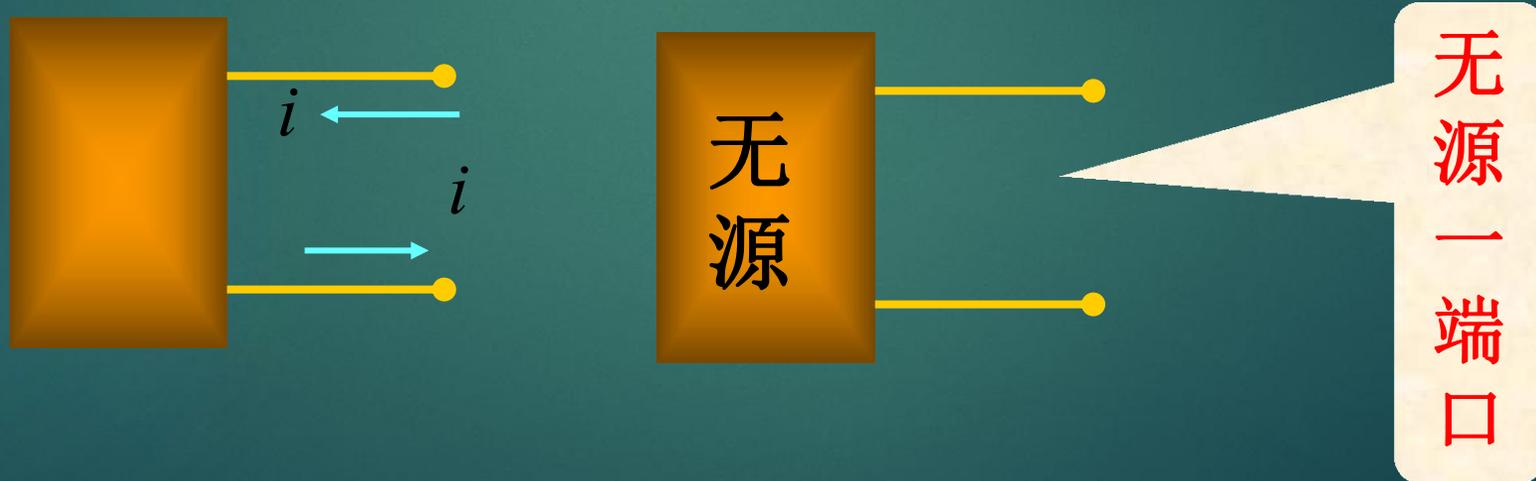
①欧姆定律和基尔霍夫定律是分析电阻电路的依据；

②等效变换的方法,也称化简的方法。

## 2 电路的等效变换

### 1. 两端电路（网络）

任何一个复杂的电路，向外引出两个端钮，且从一个端子流入的电流等于从另一端子流出的电流，则称这一电路为二端网络（或一端口网络）。

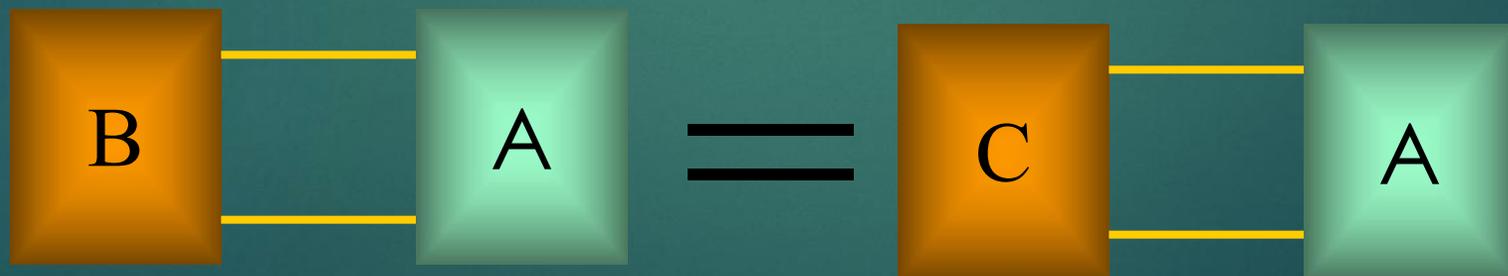


## 2. 两端电路等效的概念

两个两端电路，端口具有相同的电压、电流关系，则称它们是等效的电路。



对A电路中的电流、电压和功率而言，满足：





①电路等效变换的条件:

→ 两电路具有相同的VCR;

②电路等效变换的对象:

→ 未变化的外电路A中的电压、电流和功率;  
(即对外等效, 对内不等效)

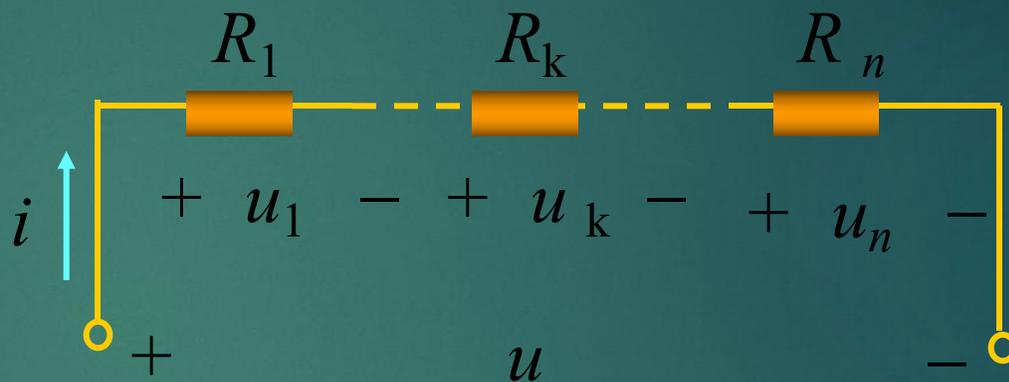
③电路等效变换的目的:

→ 化简电路, 方便计算。

# 3 电阻的串联和并联

## 1. 电阻串联

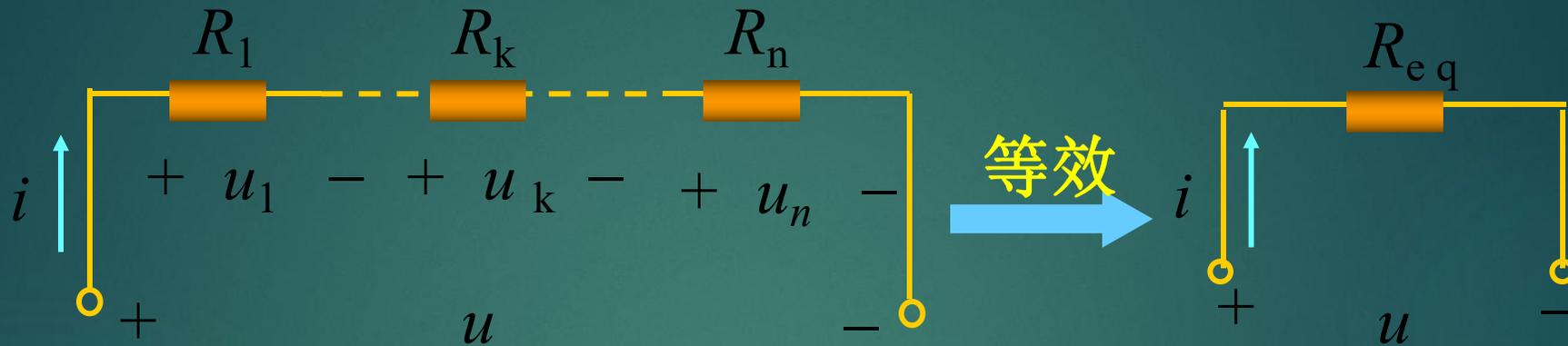
### ① 电路特点



- (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)。

$$u = u_1 + \cdots + u_k + \cdots + u_n$$

## ②等效电阻



由欧姆定律

$$u = R_1 i + \cdots + R_k i + \cdots + R_n i = (R_1 + \cdots + R_n) i = R_{eq} i$$

$$R_{eq} = R_1 + \cdots + R_k + \cdots + R_n = \sum_{k=1}^n R_k > R_k$$



**结论** 串联电路的总电阻等于各分电阻之和。

### ③ 串联电阻的分压

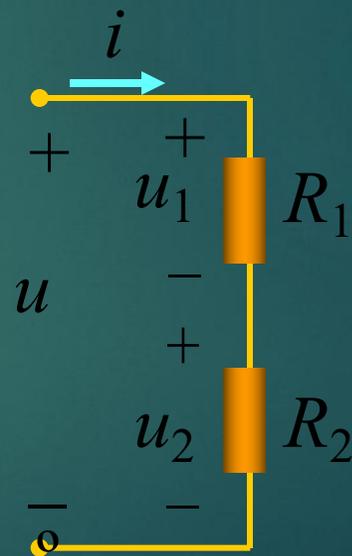
$$u_k = R_k i = R_k \frac{u}{R_{eq}} = \frac{R_k}{R_{eq}} u < u$$



**表明** 电压与电阻成正比，因此串联电阻电路可作分压电路。

例 两个电阻的分压：

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



#### ④功率

$$p_1=R_1i^2, \quad p_2=R_2i^2, \quad \dots, \quad p_n=R_ni^2$$

$$p_1:p_2:\dots:p_n=R_1:R_2:\dots:R_n$$

总功率

$$p=R_{\text{eq}}i^2=(R_1+R_2+\dots+R_n)i^2$$

$$=R_1i^2+R_2i^2+\dots+R_ni^2$$



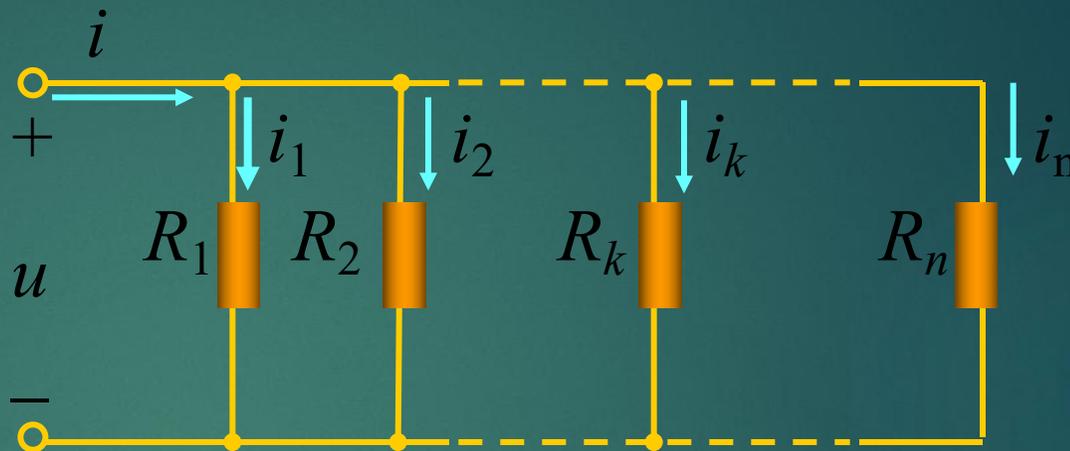
表明

$$=p_1+p_2+\dots+p_n$$

- ①电阻串联时，各电阻消耗的功率与电阻大小成正比；
- ②等效电阻消耗的功率等于各串联电阻消耗功率的总和。

## 2. 电阻并联

### ① 电路特点

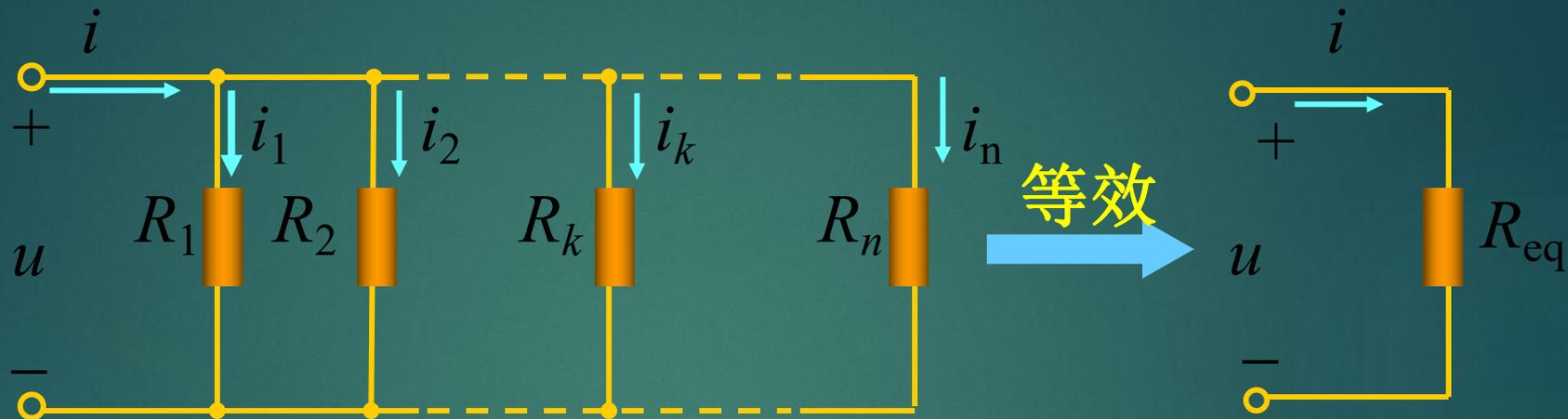


(a) 各电阻两端为同一电压 (KVL);

(b) 总电流等于流过各并联电阻的电流之和(KCL)。

$$i = i_1 + i_2 + \dots + i_k + \dots + i_n$$

## ②等效电阻



由KCL:

$$i = i_1 + i_2 + \dots + i_k + \dots + i_n$$
$$= u/R_1 + u/R_2 + \dots + u/R_n$$
$$= u(1/R_1 + 1/R_2 + \dots + 1/R_n) = uG_{eq}$$
$$G_{eq} = G_1 + G_2 + \dots + G_n = \sum_{k=1}^n G_k > G_k$$



**结论** 等效电导等于并联的各电导之和。

$$\frac{1}{R_{eq}} = G_{eq} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n} \quad \text{即} \quad R_{eq} < R_k$$

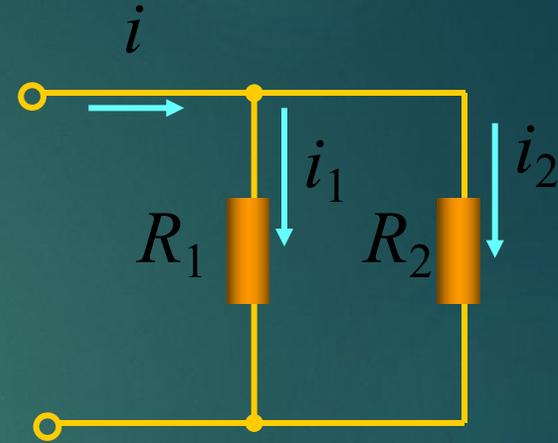
### ③ 并联电阻的分流

电流分配与  
电导成正比

$$\frac{i_k}{i} = \frac{u/R_k}{u/R_{eq}} = \frac{G_k}{G_{eq}} \quad \longrightarrow \quad i_k = \frac{G_k}{G_{eq}} i$$

例 两电阻的分流:

$$R_{eq} = \frac{1/R_1 \cdot 1/R_2}{1/R_1 + 1/R_2} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$



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

$$i_2 = \frac{1/R_2}{1/R_1 + 1/R_2} i = \frac{R_1 i}{R_1 + R_2} = (i - i_1)$$

#### ④功率

$$p_1=G_1u^2, \quad p_2=G_2u^2, \quad \dots, \quad p_n=G_nu^2$$

$$p_1:p_2:\dots:p_n=G_1:G_2:\dots:G_n$$

总功率

$$p=G_{\text{eq}}u^2=(G_1+G_2+\dots+G_n)u^2$$

$$=G_1u^2+G_2u^2+\dots+G_nu^2$$

$$=p_1+p_2+\dots+p_n$$



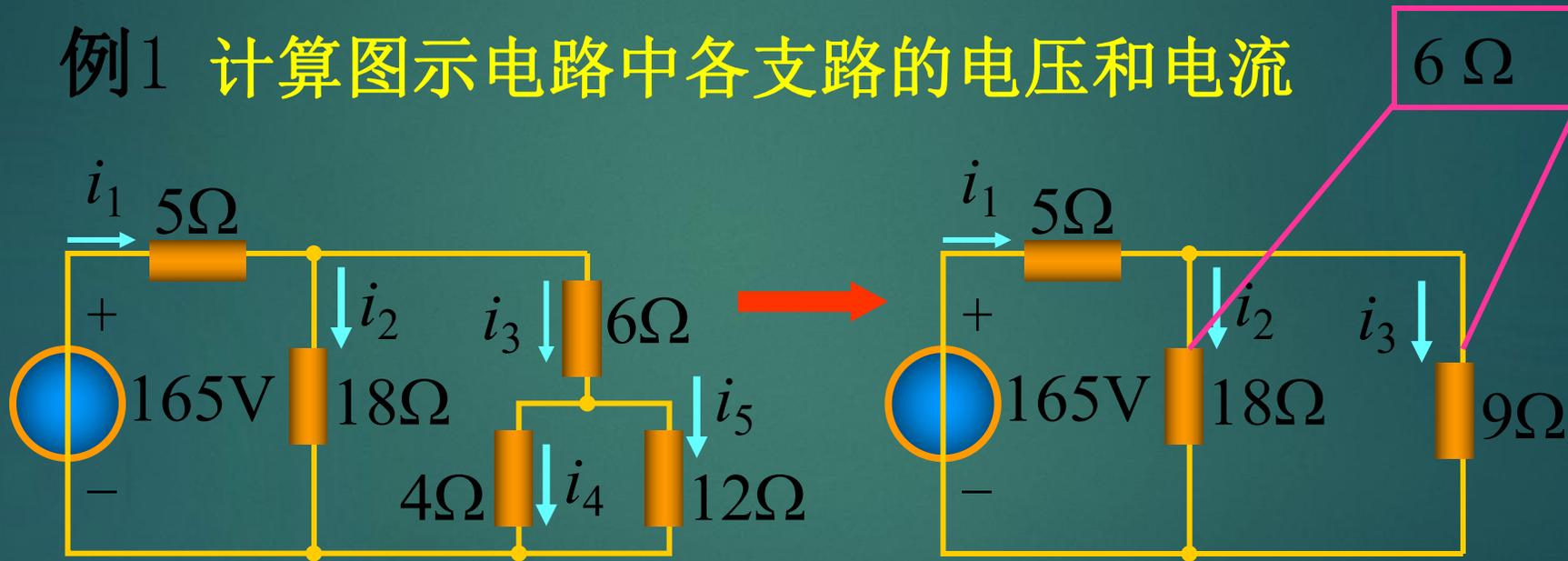
**表明** ①电阻并联时，各电阻消耗的功率与电阻大小成反比；

②等效电阻消耗的功率等于各并联电阻消耗功率的总和

### 3. 电阻的串并联

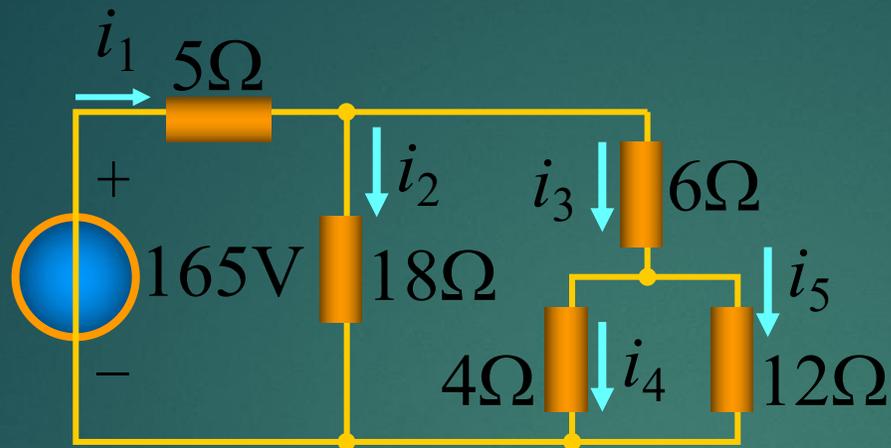
电路中有电阻的串联，又有电阻的并联，这种连接方式称电阻的串并联。

例1 计算图示电路中各支路的电压和电流



$$i_1 = 165/11 = 15\text{A}$$

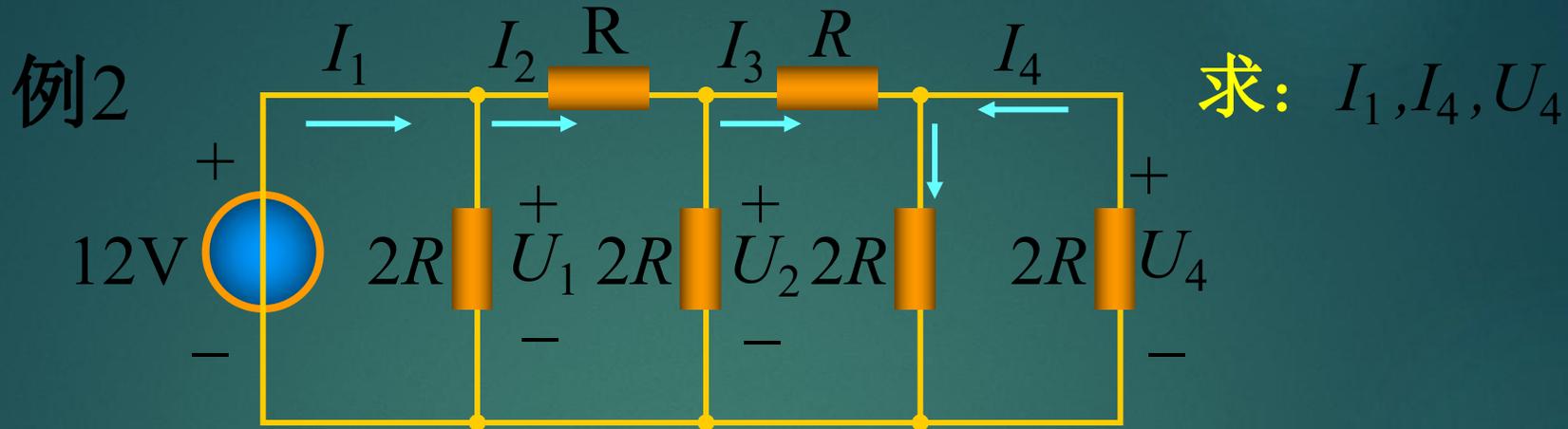
$$u_2 = 6i_1 = 6 \times 15 = 90\text{V}$$



$$i_2 = 90/18 = 5\text{A} \quad u_3 = 6i_3 = 6 \times 10 = 60\text{V}$$

$$i_3 = 15 - 5 = 10\text{A} \quad u_4 = 3i_3 = 30\text{V}$$

$$i_4 = 30/4 = 7.5\text{A} \quad i_5 = 10 - 7.5 = 2.5\text{A}$$



解

①用分流方法做

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

$$U_4 = -I_4 \times 2R = 3V \quad I_1 = \frac{12}{R}$$

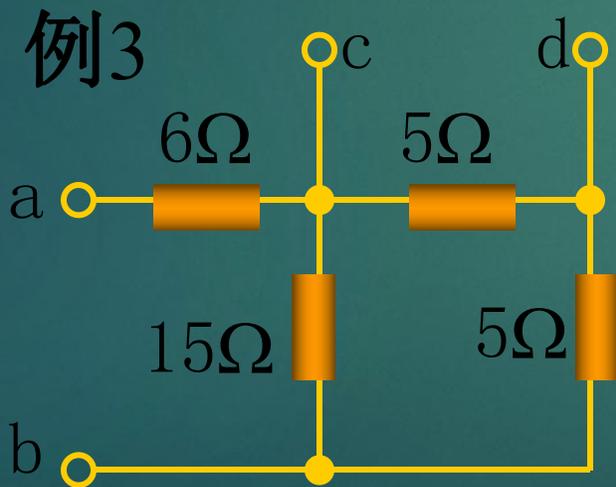
②用分压方法做

$$U_4 = \frac{U_2}{2} = \frac{1}{4}U_1 = 3V \quad I_4 = -\frac{3}{2R}$$

从以上例题可得求解串、并联电路的一般步骤：

- ① 求出等效电阻或等效电导；
- ② 应用欧姆定律求出总电压或总电流；
- ③ 应用欧姆定律或分压、分流公式求各电阻上的电流和电压。

以上的关键在于识别各电阻的串联、并联关系！



求：  $R_{ab}$  ,  $R_{cd}$

$$R_{ab} = (5 + 5) // 15 + 6 = 12\Omega$$

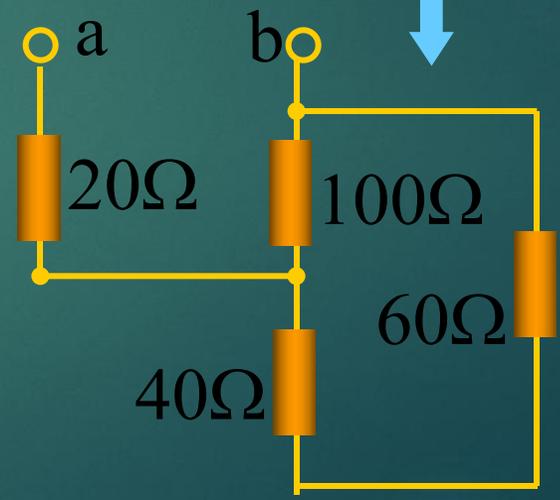
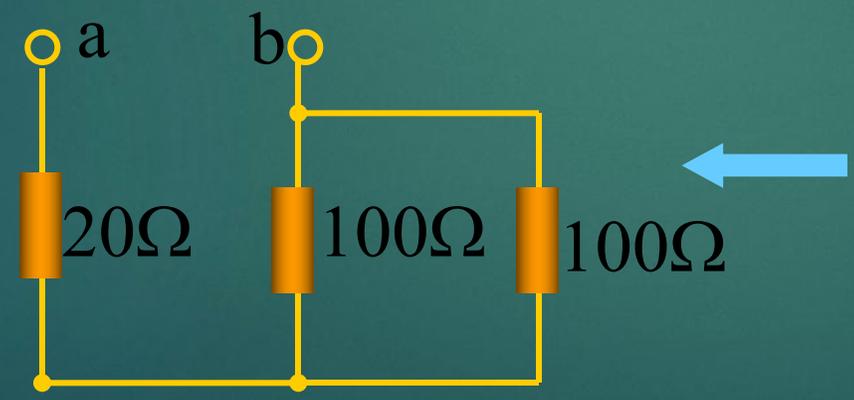
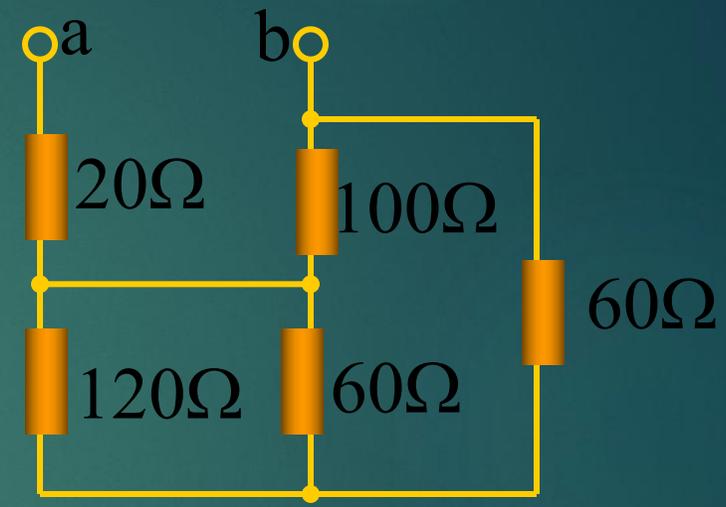
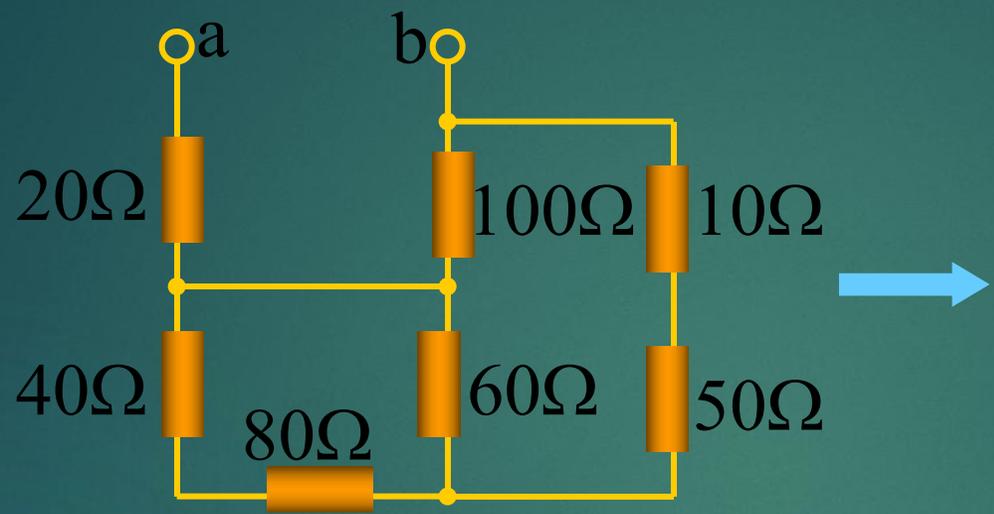
$$R_{cd} = (15 + 5) // 5 = 4\Omega$$



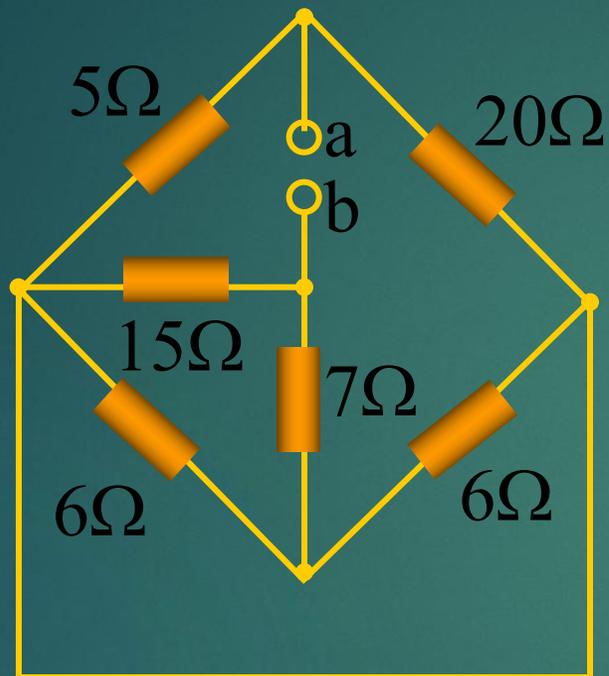
**注意** 等效电阻针对端口而言

例4 求:  $R_{ab}$

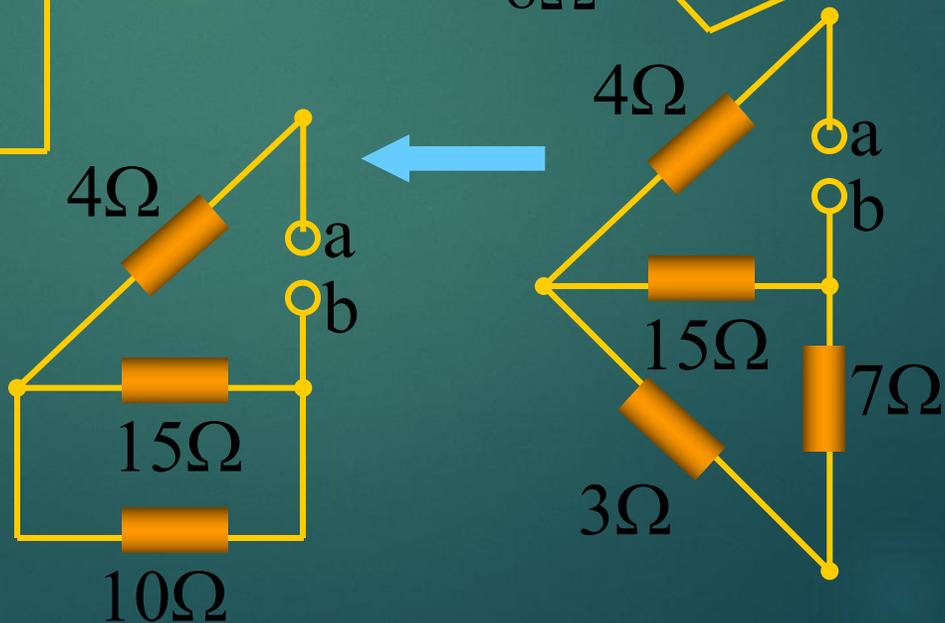
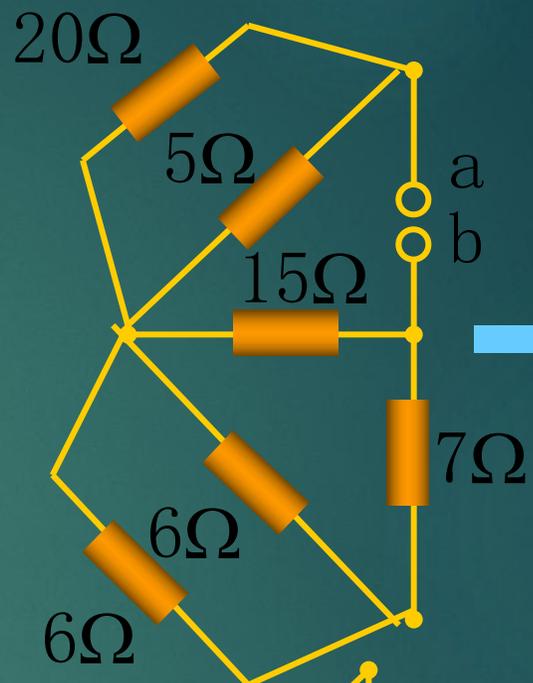
$R_{ab} = 70\Omega$



例5 求:  $R_{ab}$



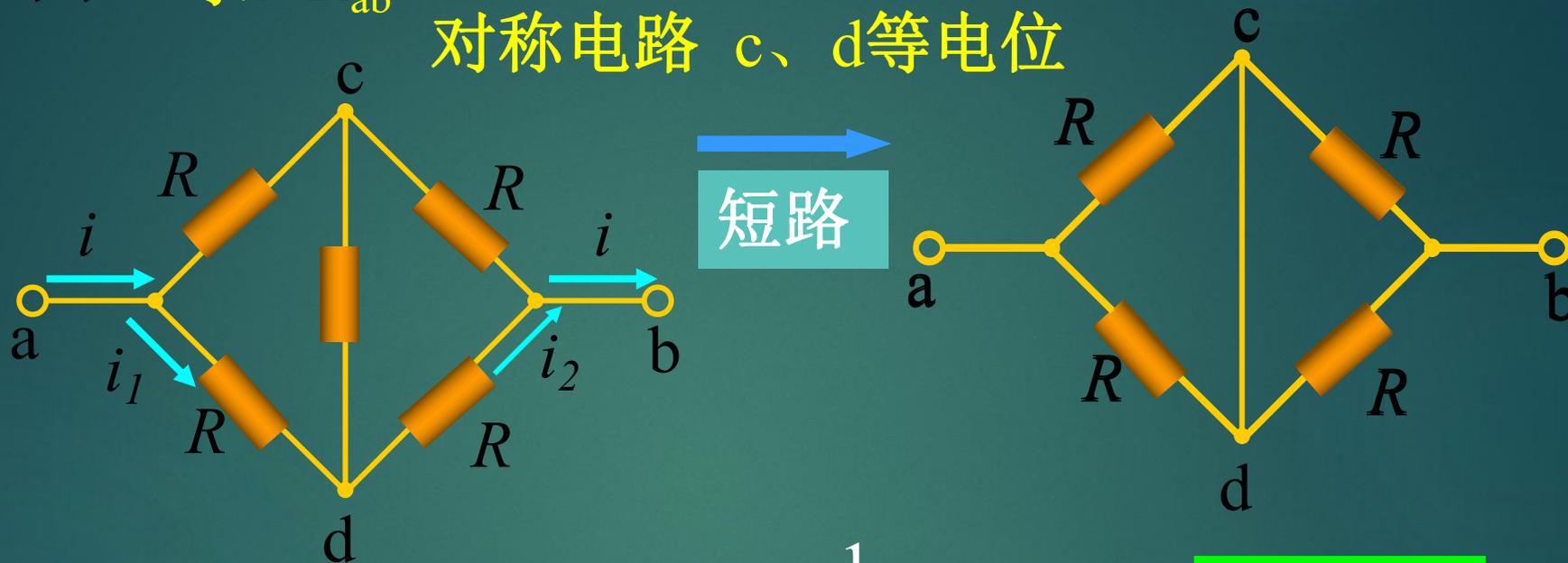
缩短无电阻支路



$R_{ab} = 10\Omega$

例6 求:  $R_{ab}$

对称电路 c、d等电位



根据电流分配

$$\longrightarrow i_1 = \frac{1}{2}i = i_2$$

$$R_{ab} = R$$

$$u_{ab} = i_1 R + i_2 R = \left(\frac{1}{2}i + \frac{1}{2}i\right)R = iR$$

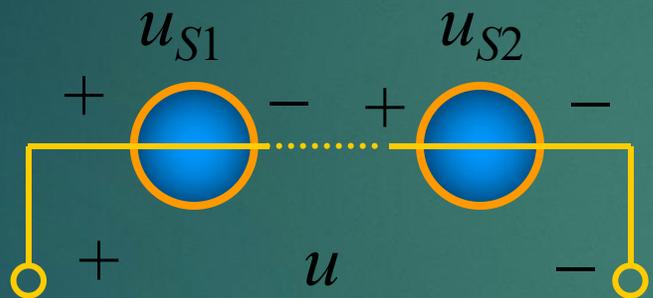
$$R_{ab} = \frac{u_{ab}}{i} = R$$

# 4 电压源、电流源的串联和并联

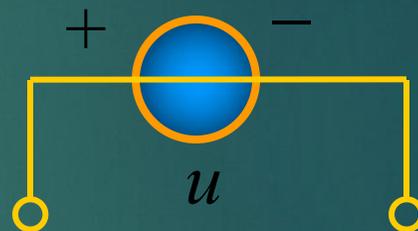
## 1. 理想电压源的串联和并联

注意参考方向

① 串联  $u = u_{s1} + u_{s2} = \sum u_{sk}$



等效电路

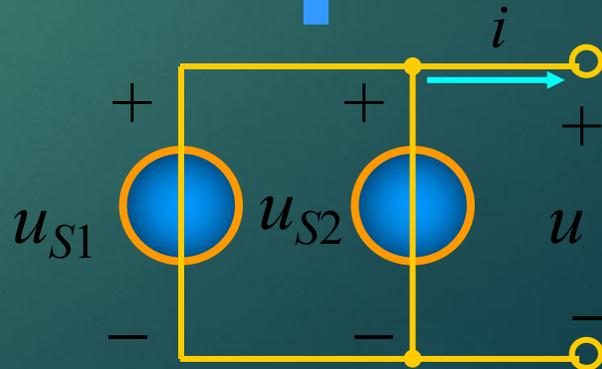


② 并联  $u = u_{s1} = u_{s2}$

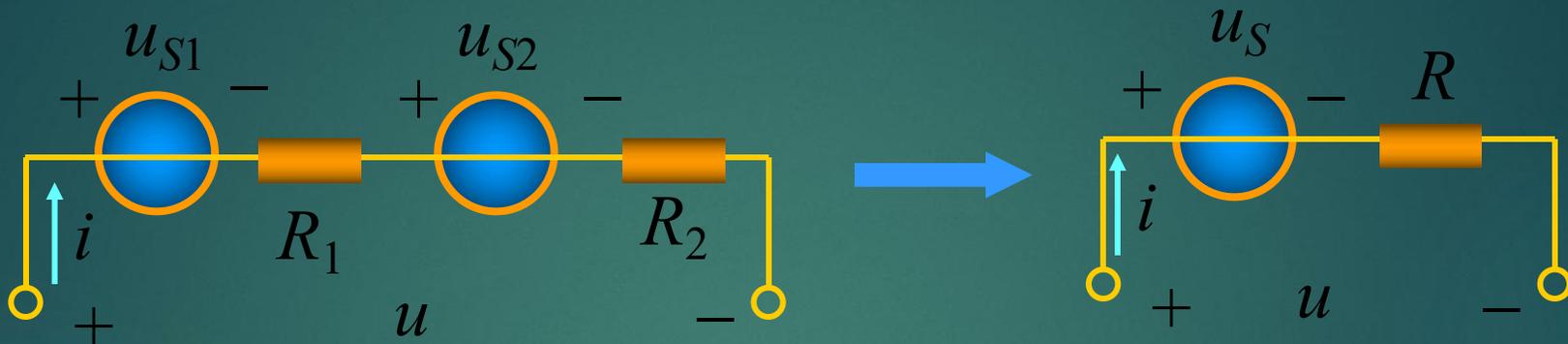


注意 相同电压源才能并联, 电源中的电流不确定。

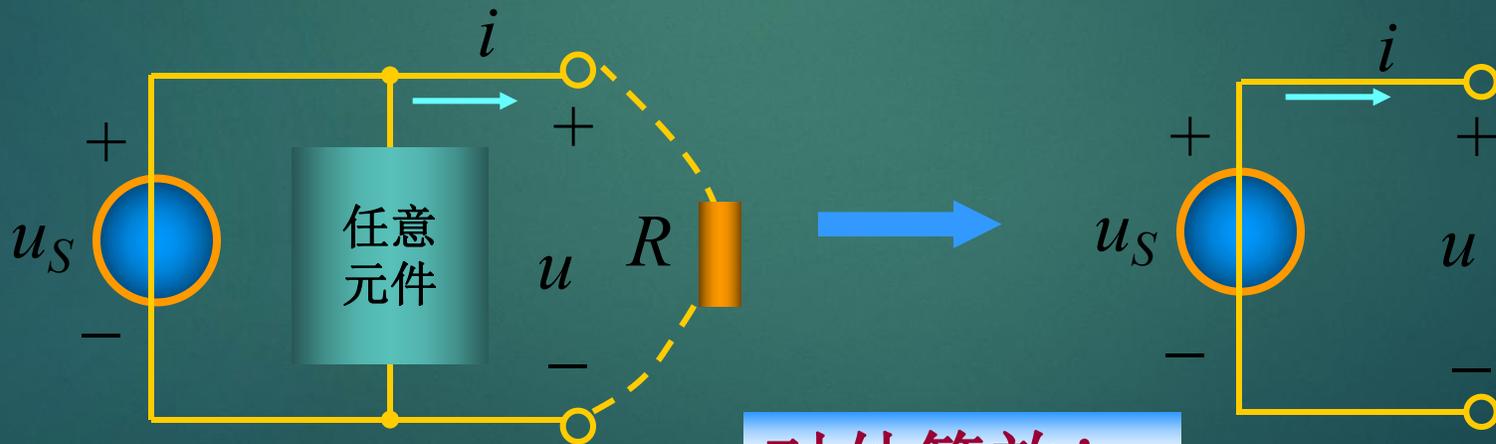
等效电路



### ③电压源与支路的串、并联等效



$$u = u_{s_1} + R_1 i + u_{s_2} + R_2 i = (u_{s_1} + u_{s_2}) + (R_1 + R_2) i = u_S + Ri$$



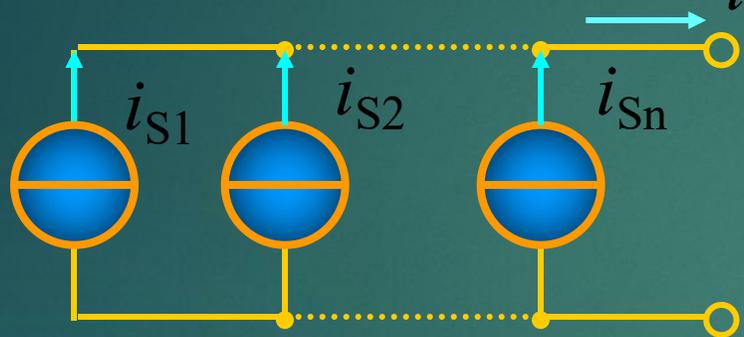
对外等效!

## 2. 理想电流源的串联并联

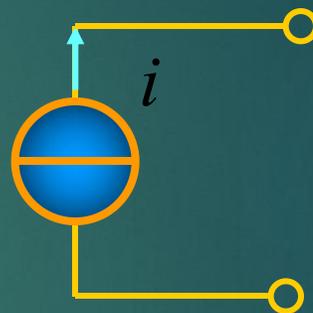
注意参考方向

① 并联

$$i = i_{s1} + i_{s2} + \cdots + i_{sn} = \sum i_{sk}$$



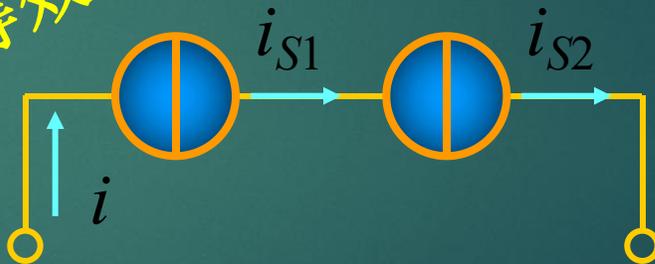
等效电路



② 串联

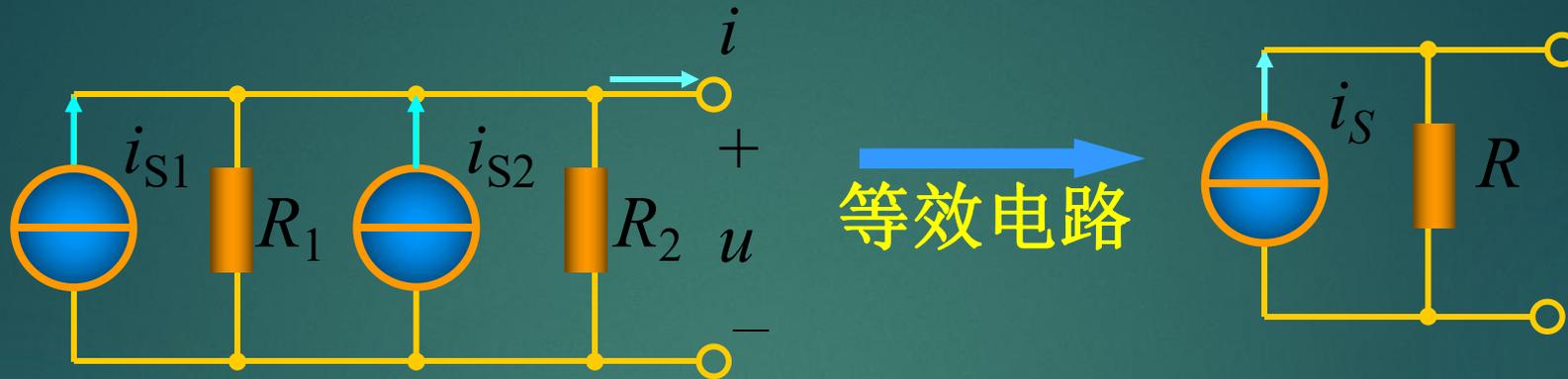
$$i = i_{s1} = i_{s2}$$

等效电路

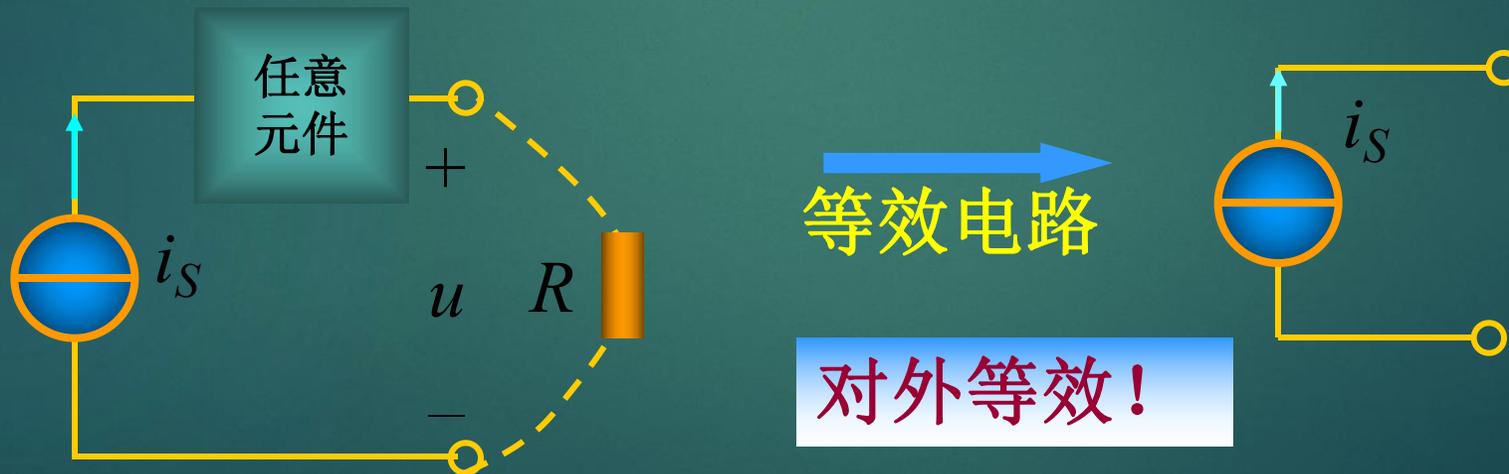


**注意** 相同的理想电流源才能串联，每个电流源的端电压不能确定。

### 3. 电流源与支路的串、并联等效

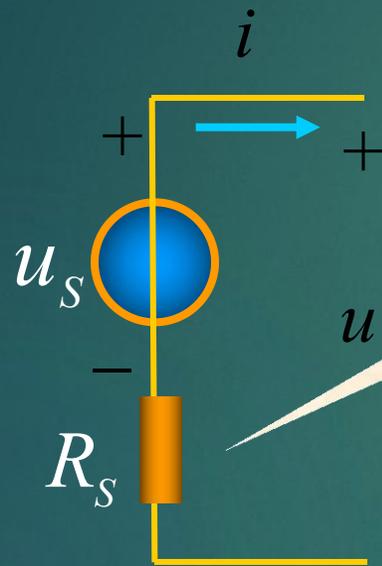


$$i = i_{s1} - u/R_1 + i_{s2} - u/R_2 = i_{s1} + i_{s2} - (1/R_1 + 1/R_2)u = i_s - u/R$$

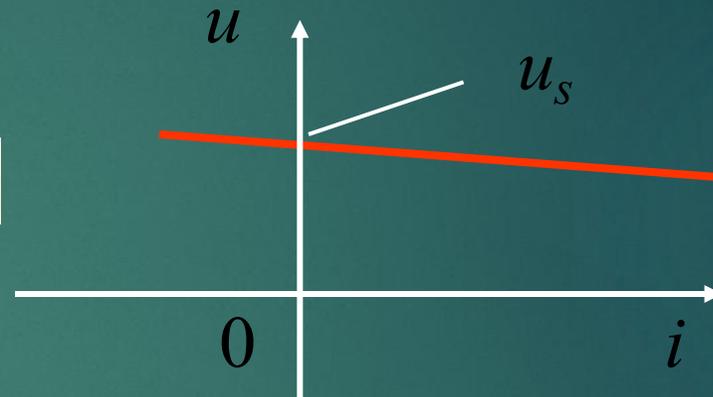


## 5 实际电源的两种模型及其等效变换

1. 实际电压源 伏安特性:  $u = u_S - R_S i$



考虑内阻



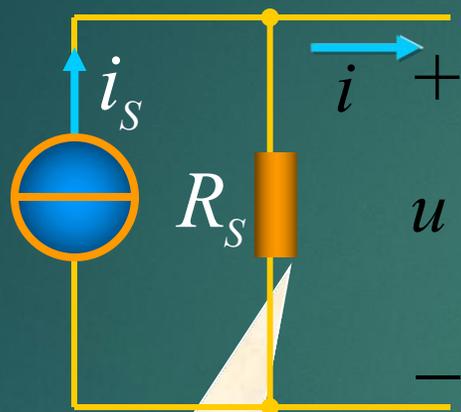
一个好的电压源要求  $R_S \rightarrow 0$



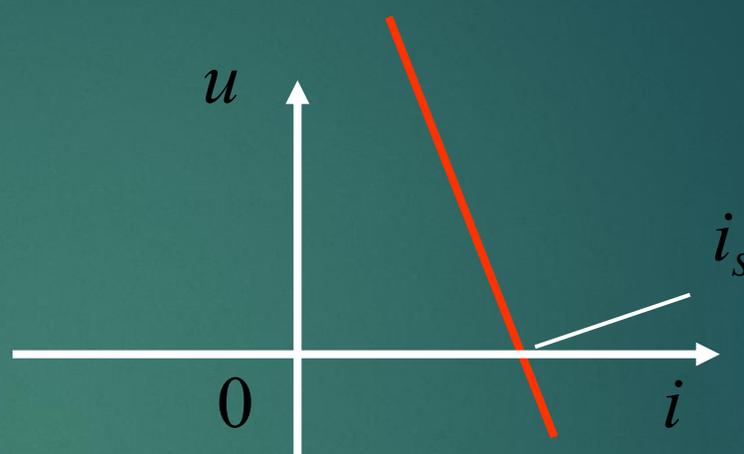
**注意** 实际电压源也不允许短路。因其内阻小，若短路，电流很大，可能烧毁电源。

## 2. 实际电流源

伏安特性: 
$$i = i_S - \frac{u}{R_S}$$



考虑内阻



一个好的电流源要求  $R_S \rightarrow \infty$

 **注意** 实际电流源也不允许开路。因其内阻大，若开路，电压很高，可能烧毁电源。

### 3. 电压源和电流源的等效变换

实际电压源、实际电流源两种模型可以进行等效变换，所谓的等效是指端口的电压、电流在转换过程中保持不变。



端口特性  $i = i_S - G_S u$

$$u = u_S - R_S i$$

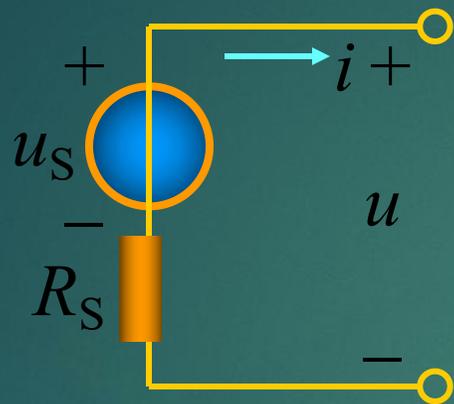
$$i = u_S / R_S - u / R_S$$

$$i_S = u_S / R_S$$
$$G_S = 1 / R_S$$

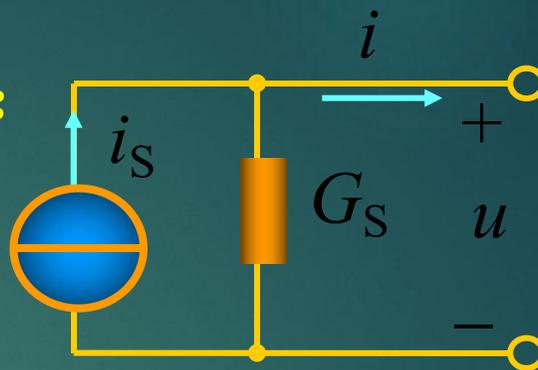
比较可得等效条件



## 小结 电压源变换为电流源:

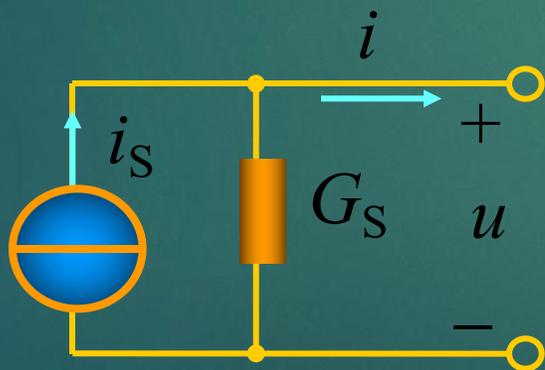


转换

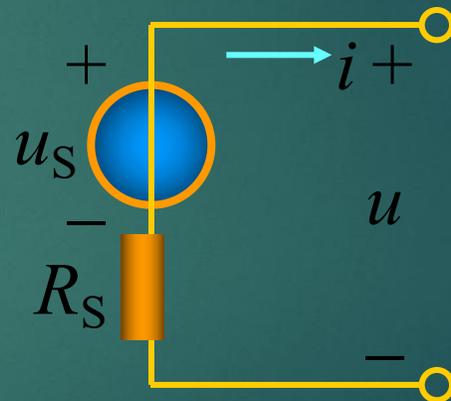


$$i_s = \frac{u_s}{R_s}, \quad G_s = \frac{1}{R_s}$$

## 电流源变换为电压源:



转换



$$u_s = \frac{i_s}{G_s}, \quad R_s = \frac{1}{G_s}$$



注意

### ①变换关系

数值关系

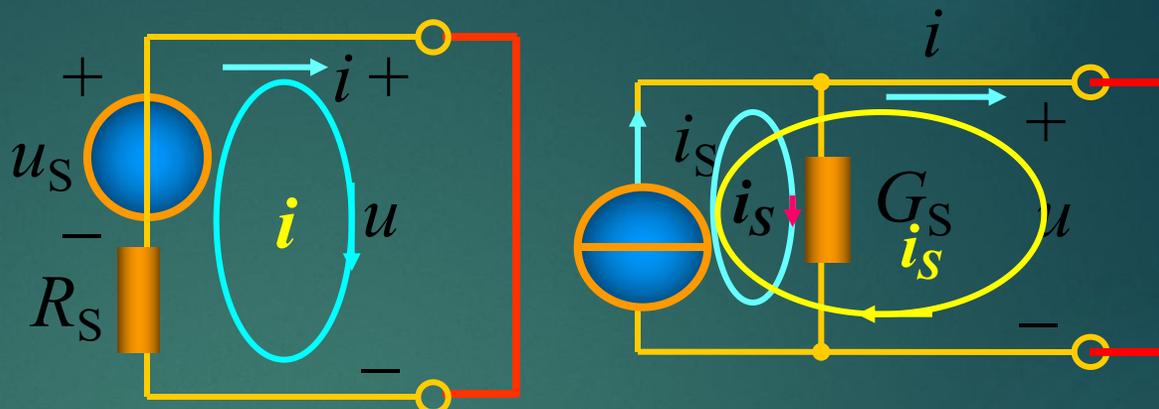
方向：电流源电流方向与电压源电压方向相反。

②等效是对外部电路等效，对内部电路是不等效的。

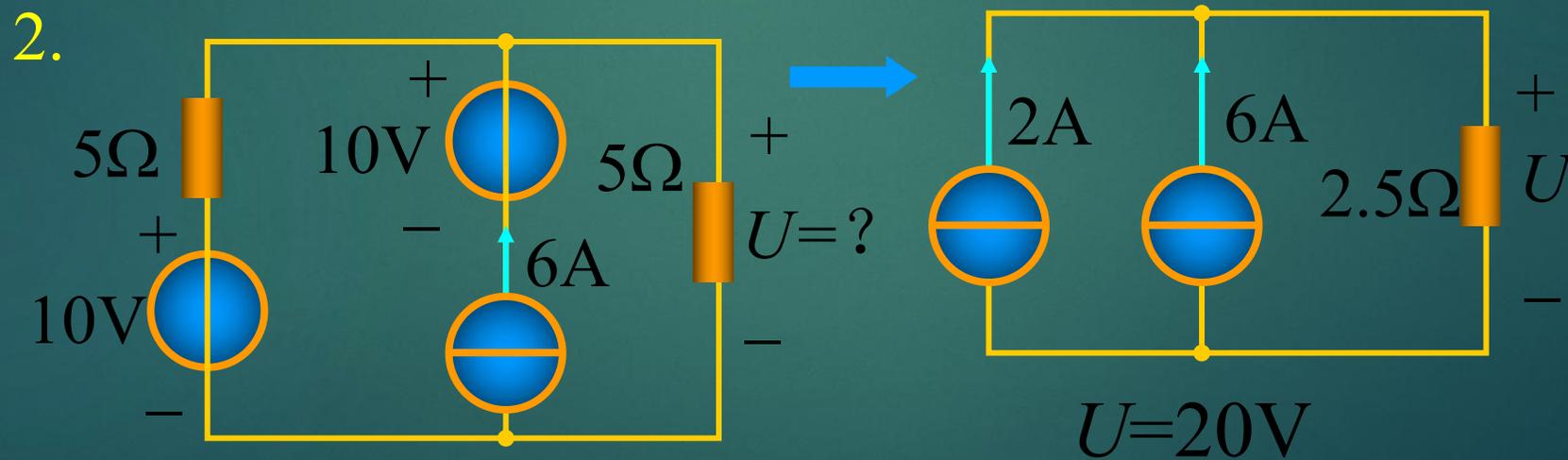
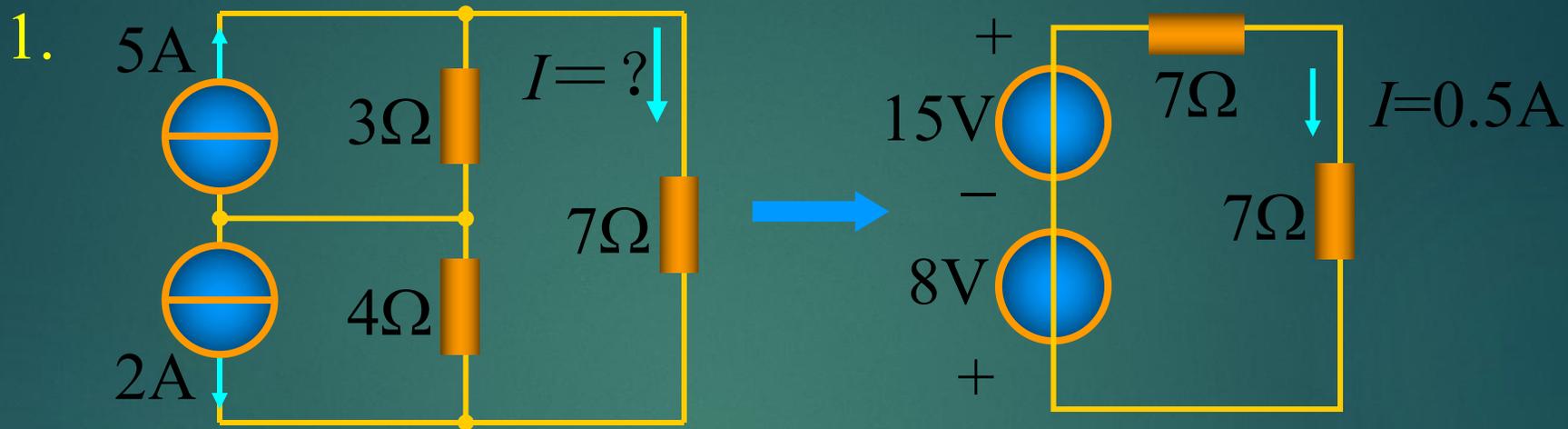
表现在

- 电压源开路， $R_S$ 上无电流流过
- 电压源短路， $R_S$ 上有电流；
- 电流源开路， $G_S$ 上有电流流过。
- 电流源短路， $G_S$ 上无电流。

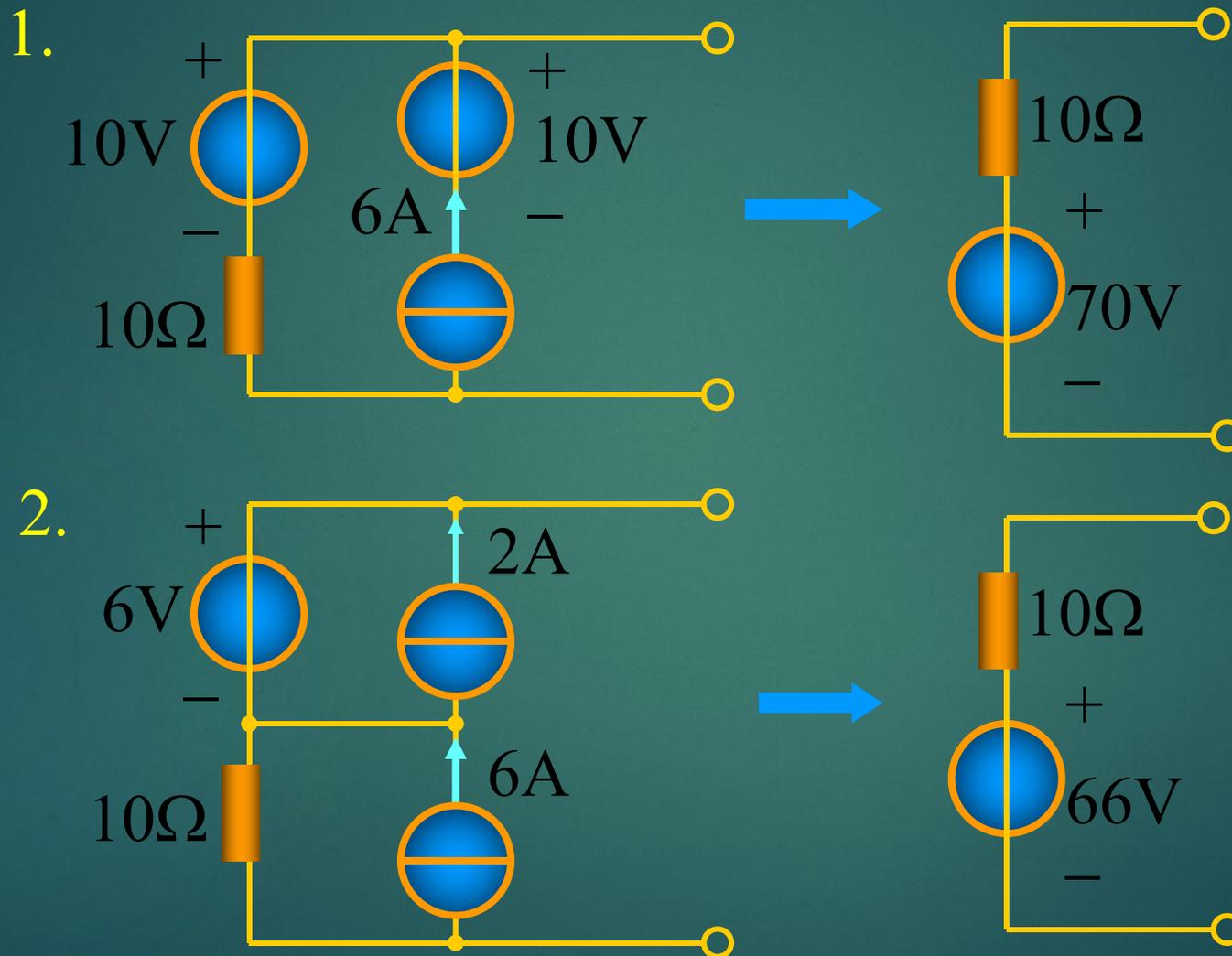
③理想电压源与理想电流源不能相互转换。



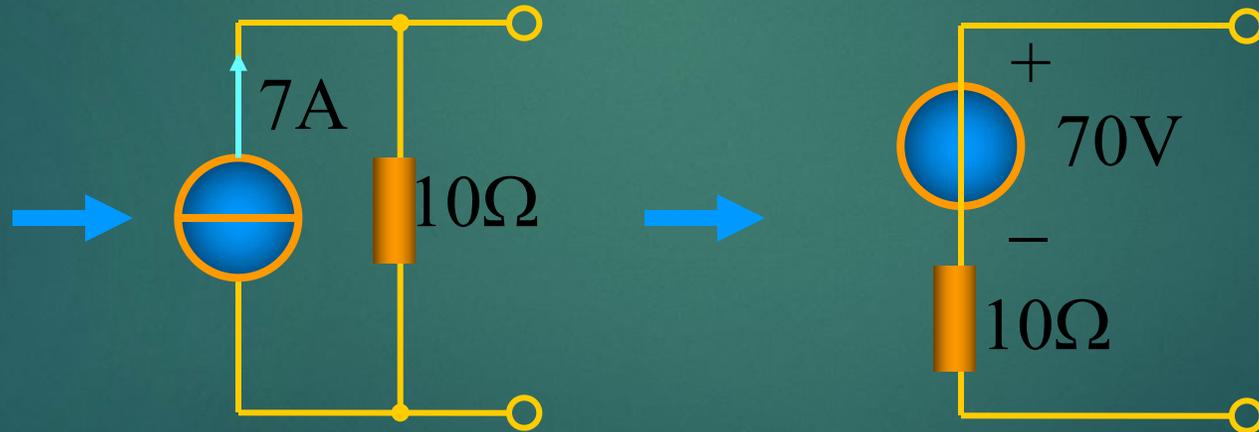
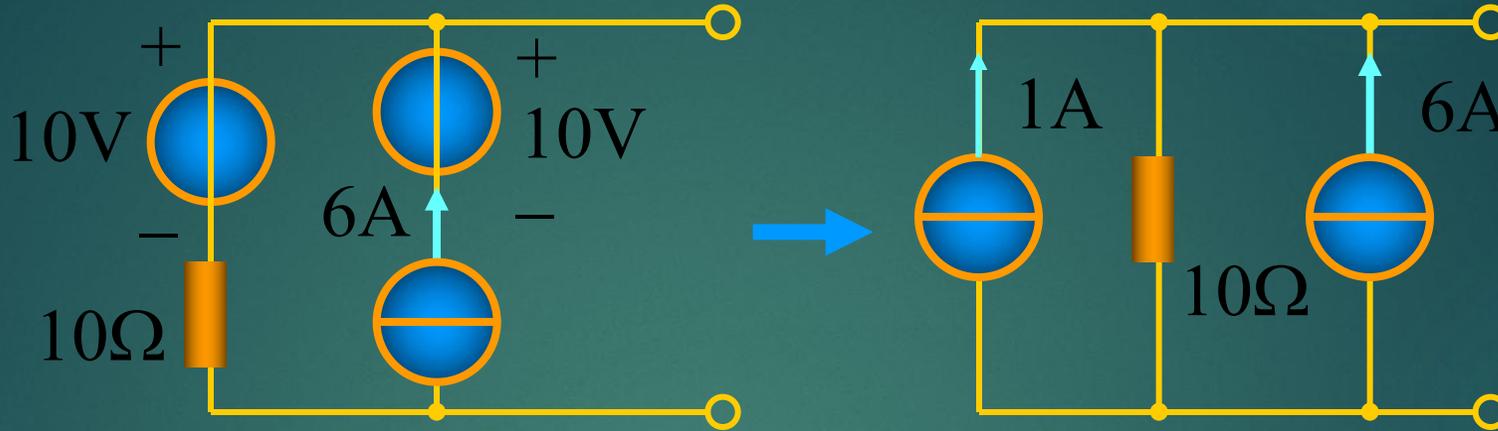
# 例1 利用电源转换简化电路计算



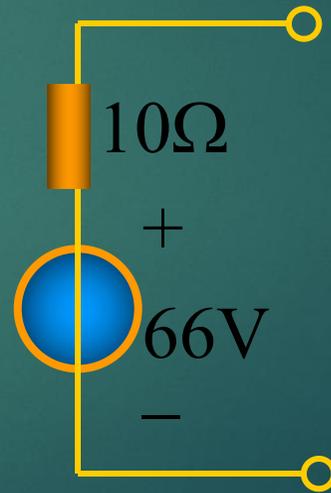
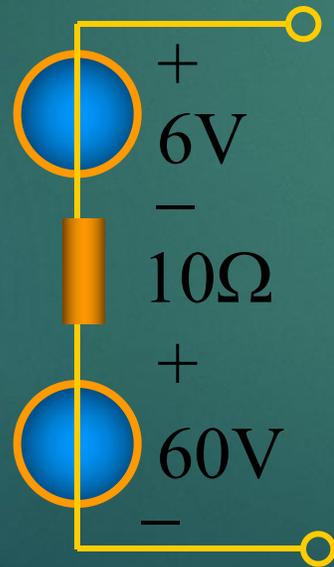
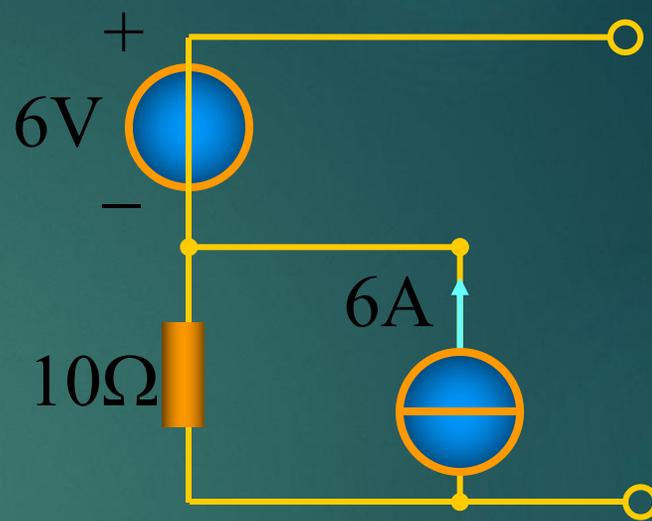
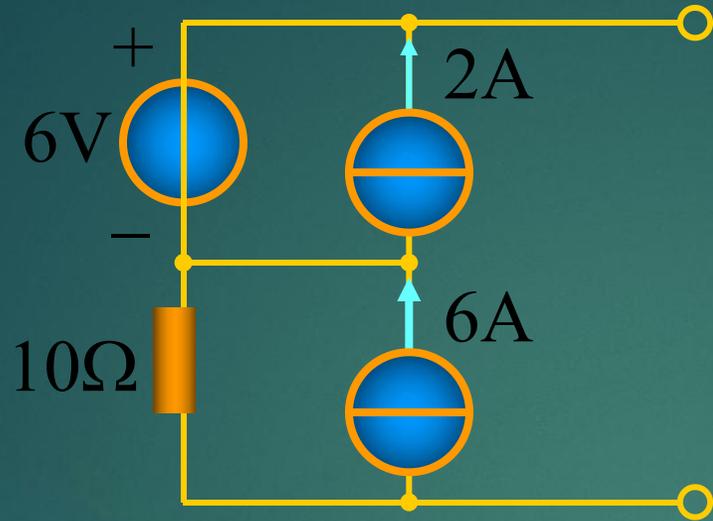
## 例2 把电路转换成一个电压源和一个电阻的串联



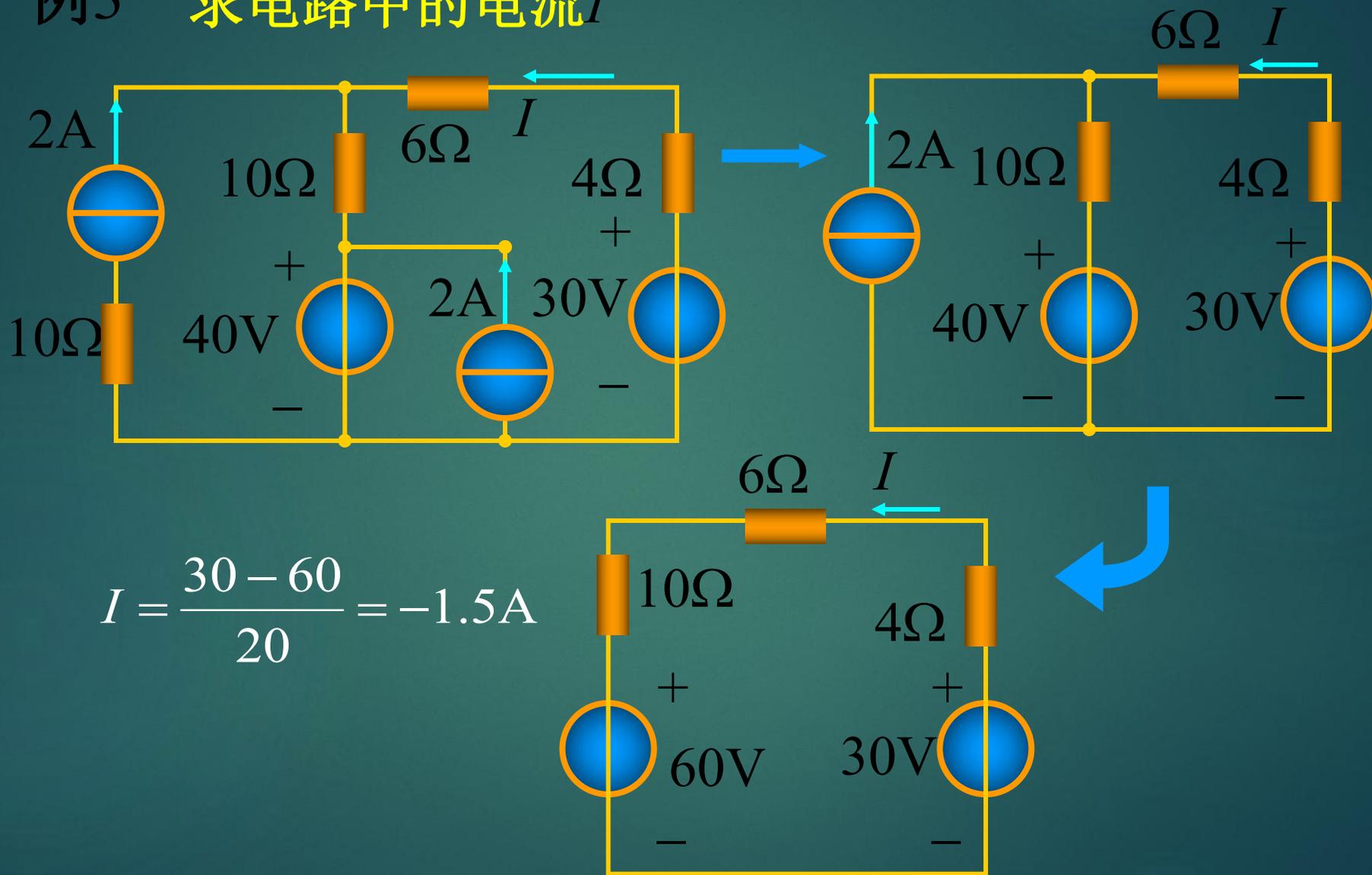
1.



2.



### 例3 求电路中的电流 $I$

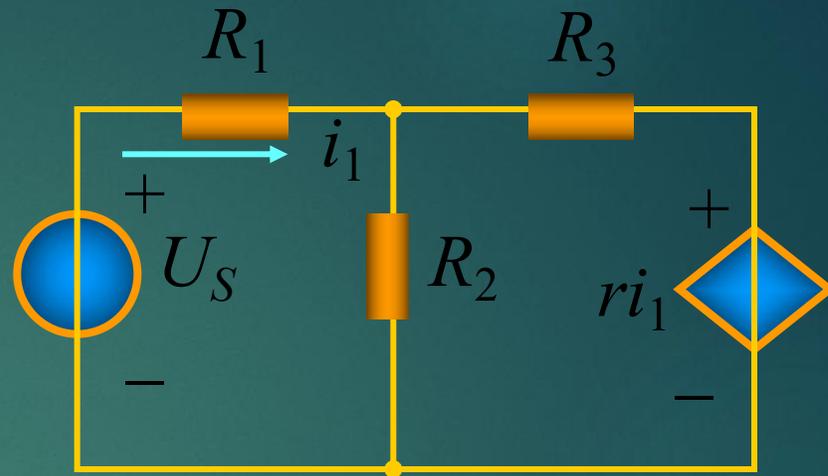


#### 例4 求电流 $i_1$

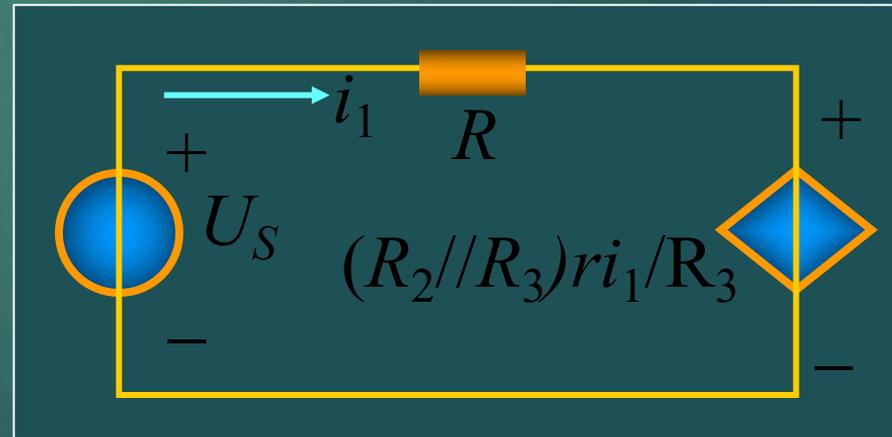
$$R = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$$

$$R i_1 + (R_2 // R_3) r i_1 / R_3 = U_S$$

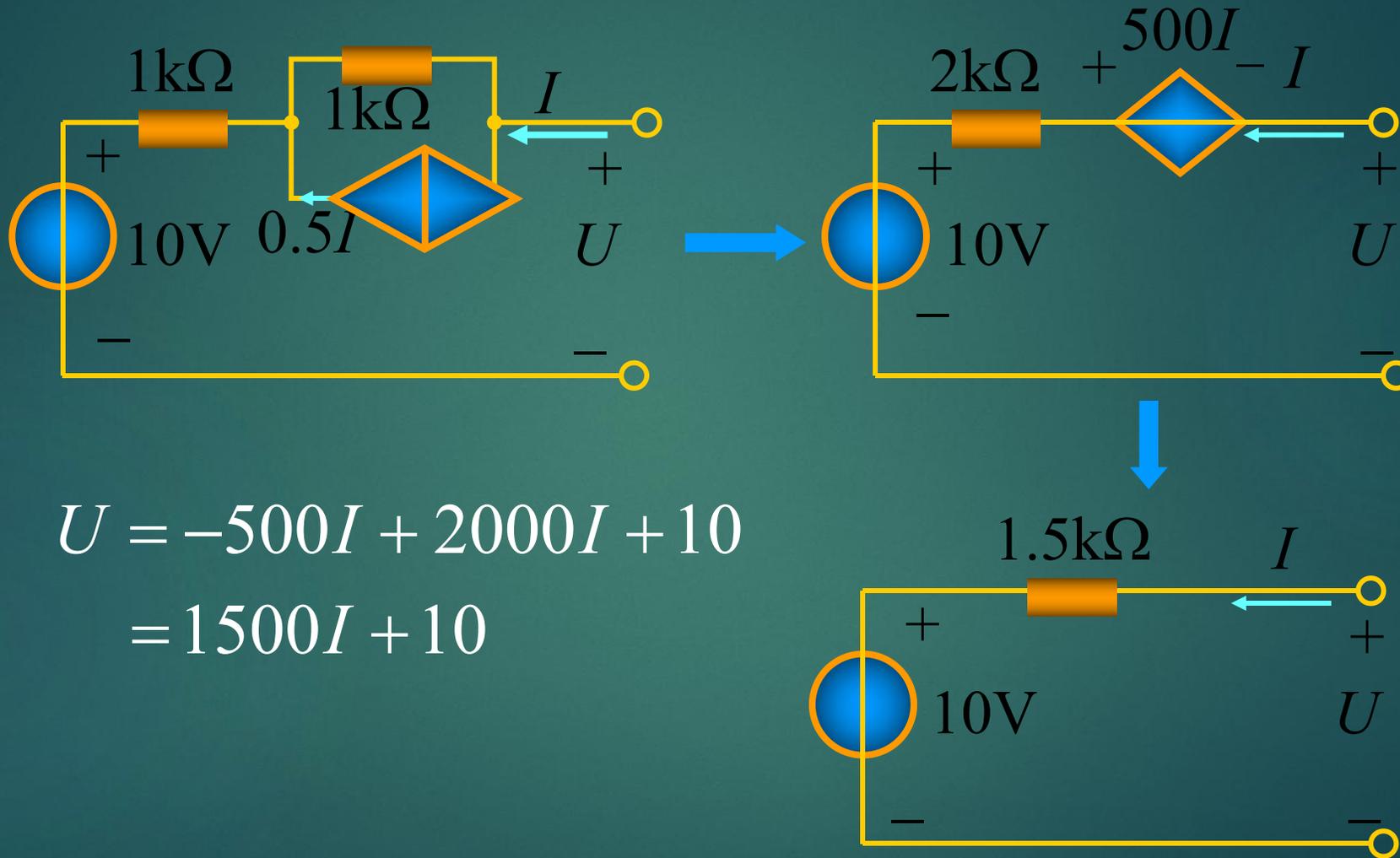
$$i_1 = \frac{U_S}{R + (R_2 // R_3) r / R_3}$$



 **注意** 受控源和独立源一样可以进行电源转换；转换过程中注意不要丢失控制量。



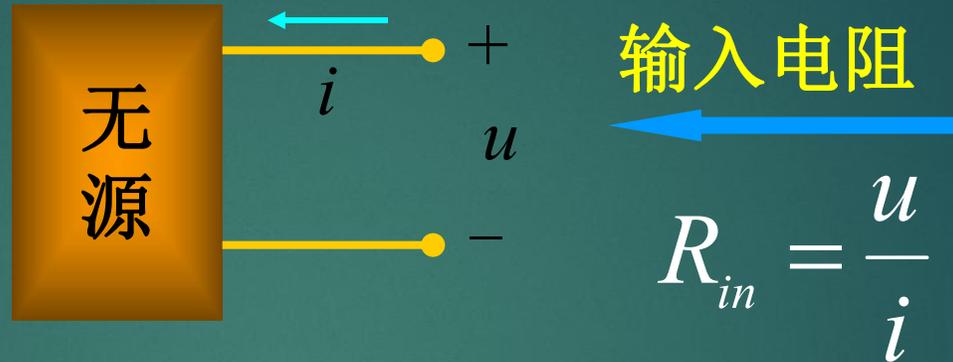
## 例5 把电路转换成一个电压源和一个电阻的串联



$$\begin{aligned}
 U &= -500I + 2000I + 10 \\
 &= 1500I + 10
 \end{aligned}$$

# 6 输入电阻

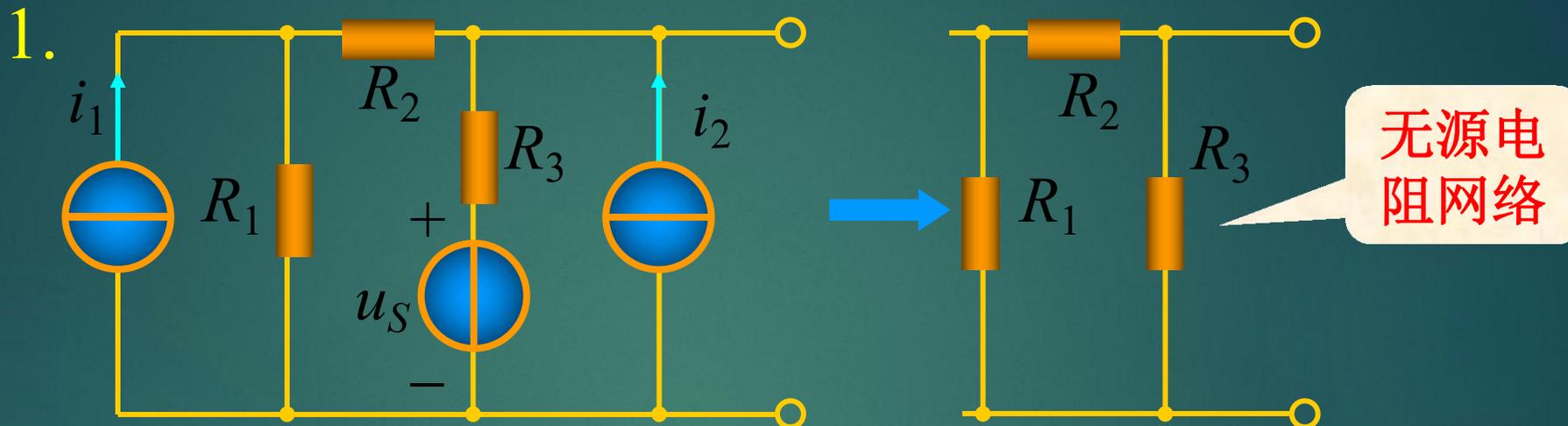
## 1. 定义



## 2. 计算方法

- ①如果一端口内部仅含电阻，则应用电阻的串、并联和 $\Delta$ —Y变换等方法求它的等效电阻；
- ②对含有受控源和电阻的两端电路，用电压、电流法求输入电阻，即在端口加电压源，求得电流，或在端口加电流源，求得电压，得其比值。

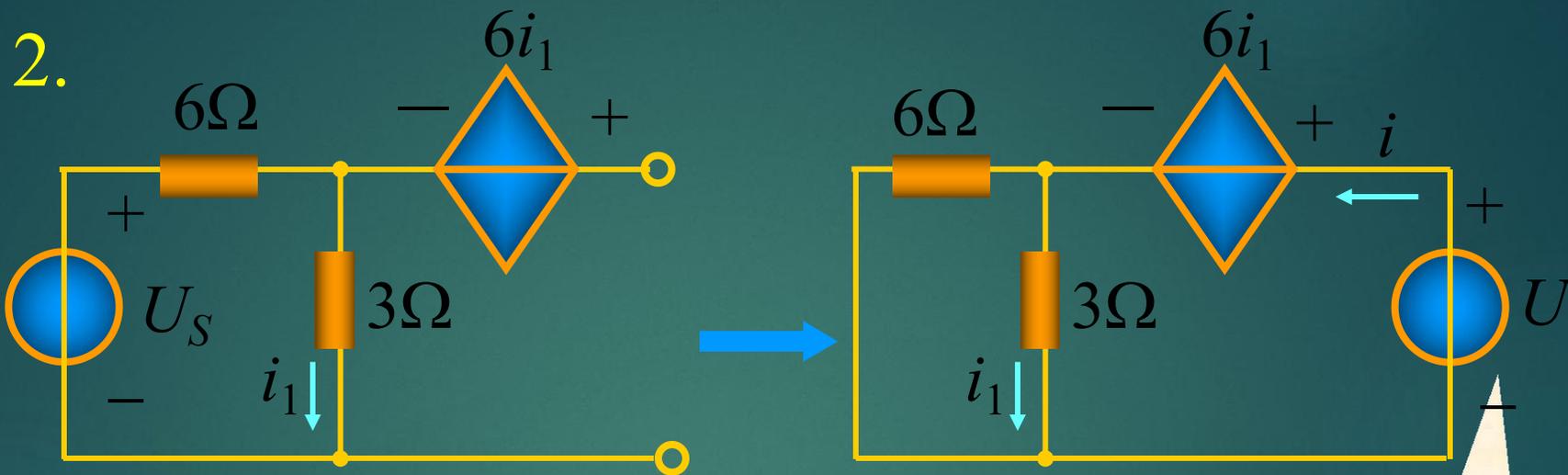
## 例 计算下列一端口电路的输入电阻



**解**

先把有源网络的独立源置零：电压源短路；  
电流源开路，再求输入电阻。

$$R_{in} = (R_1 + R_2) // R_3$$

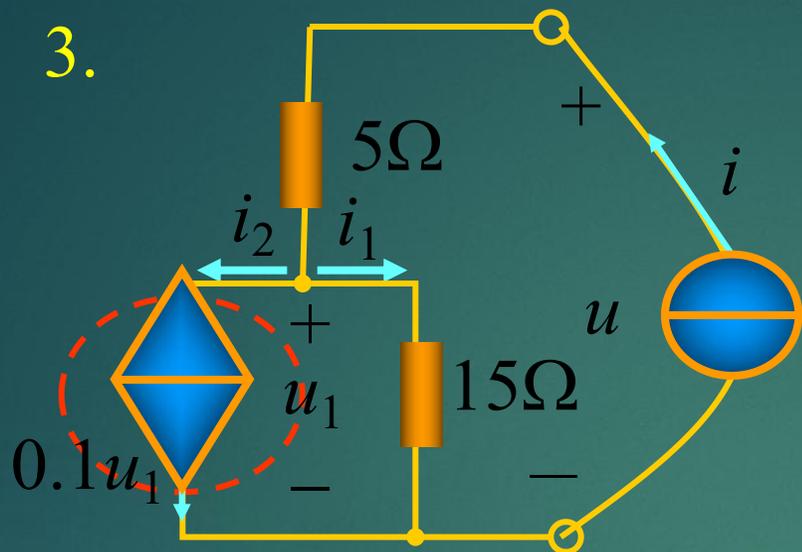


$$i = i_1 + \frac{3i_1}{6} = 1.5i_1$$

$$U = 6i_1 + 3i_1 = 9i_1$$

$$R_{in} = \frac{U}{i} = \frac{9i_1}{1.5i_1} = 6\Omega$$

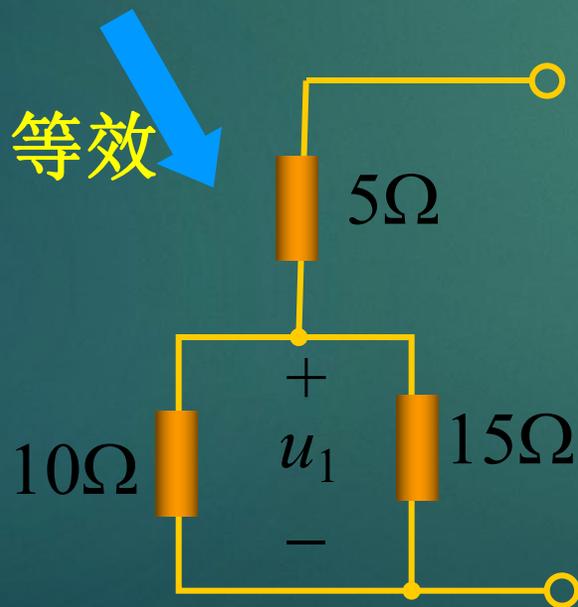
外加电  
压源



$$u_1 = 15i_1 \quad i_2 = 0.1u_1 = 1.5i_1$$

$$i = i_1 + i_2 = 2.5i_1$$

$$u = 5i + u_1 = 5 \times 2.5i_1 + 15i_1 = 27.5i_1$$



$$R_{in} = \frac{u}{i} = \frac{27.5i_1}{2.5i_1} = 11\Omega$$

$$R_{in} = 5 + \frac{10 \times 15}{10 + 15} = 11\Omega$$