

# 第1章

## 电路模型与基本定律

---

**1.1 电路 Circuits**

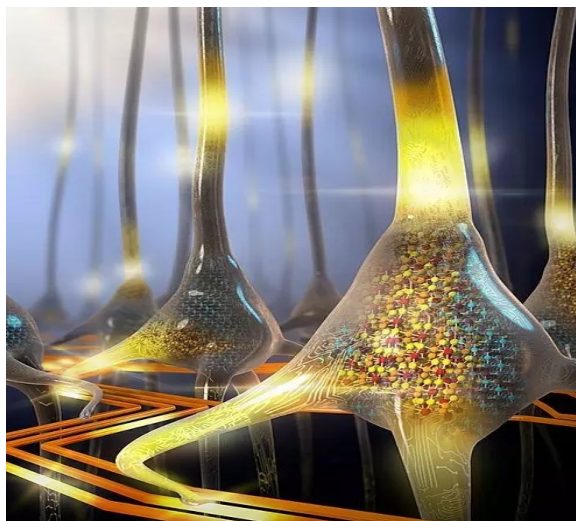
**1.2 基本变量 Basic Quantities**

**1.3 电路元件 Circuit Elements**

**1.4 基尔霍夫定律 Kirchhoff's Laws**

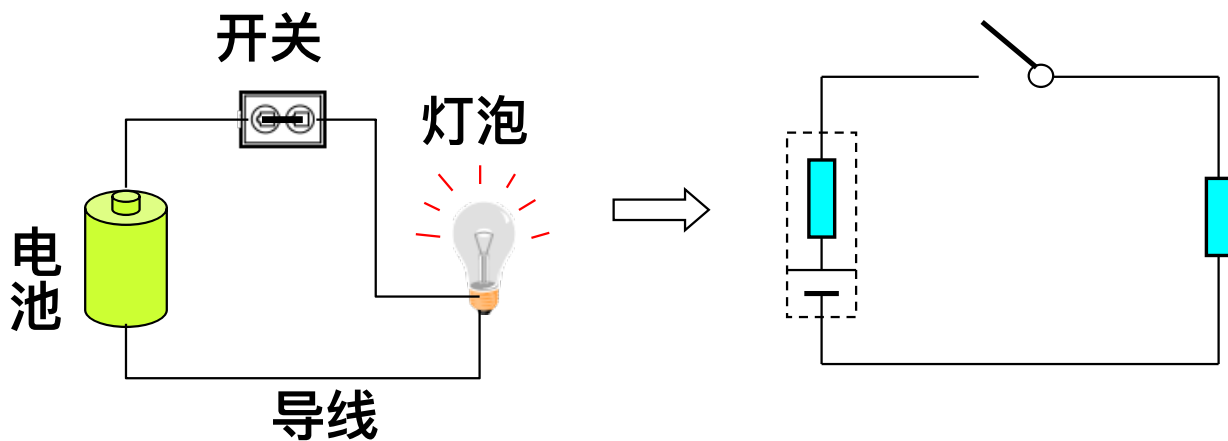
# Motivation

电路模型与基本定律是电路分析的**基础中的基础**



# Motivation

电路模型与基本定律是电路分析的**基础中的基础**



## §1-1 电路的基本概念

### 一、电路的组成

**电路**：电器件（元件）互相连接，能够实现电能转换的系统，它为电流的流通提供路径。

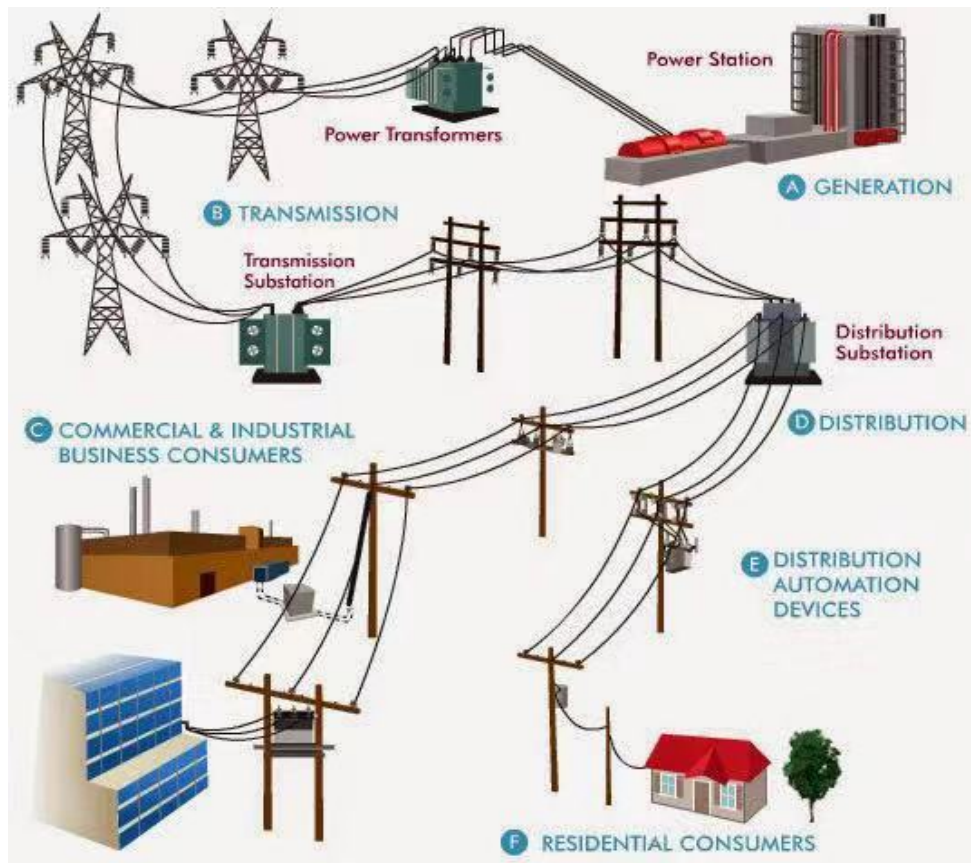
电路主要由**电源**、**负载**、**连接导线**及**开关**等元件构成。

**电源**(source)：提供能量或信号。

**负载**(load)：将电能转化为其它形式的能量，或对信号进行处理。

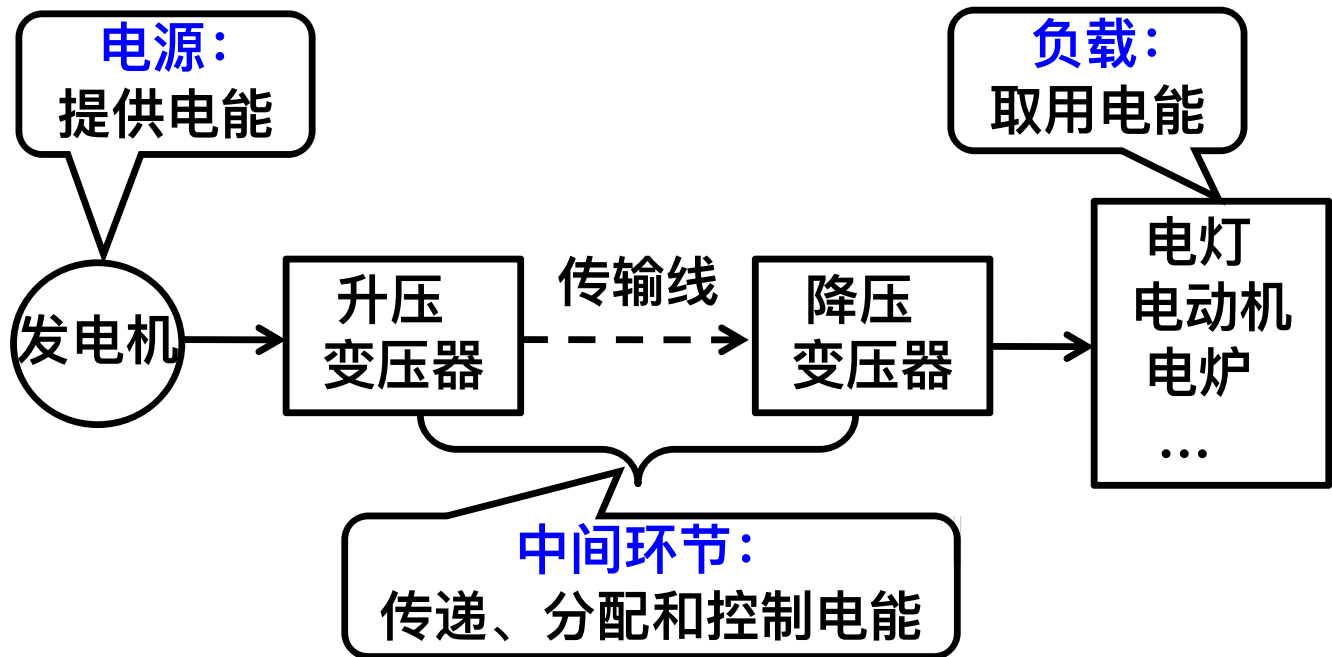
**导线**(line)、**开关** (switch)等：将电源与负载接成通路。

## §1-1 电路的基本概念

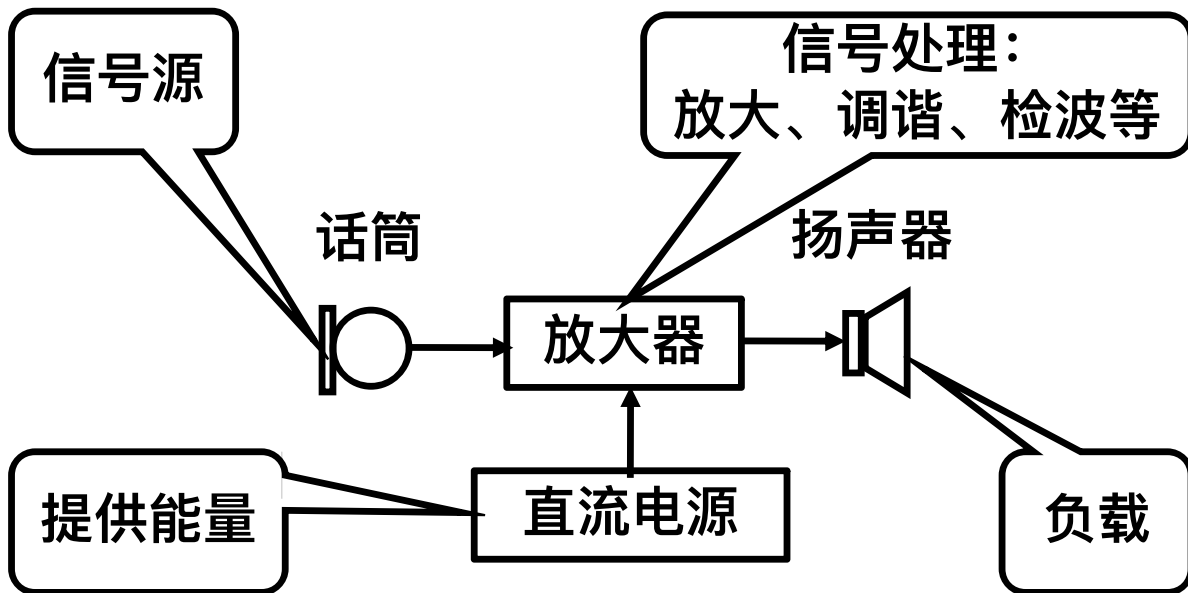


## 1. 电路的功能: 电能的传输和转换及电信号的传递和处理:

### (1). 实现电能的传输、分配与转换

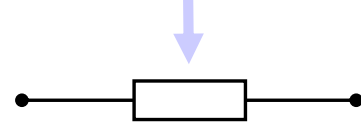
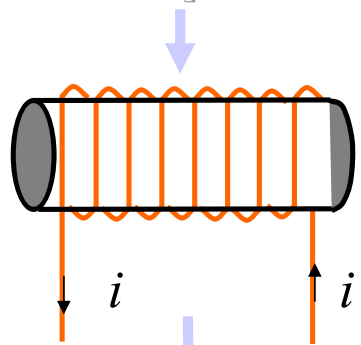
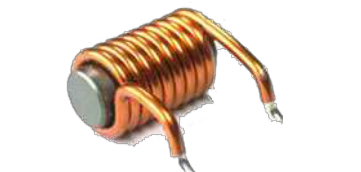


## (2).实现信号的传递与处理

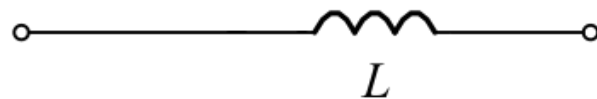


电源或信号源的电压或电流称为激励，它推动电路工作；由激励所产生的电压和电流称为响应。

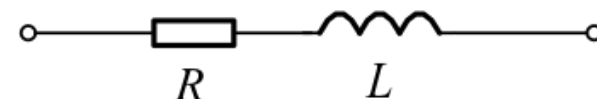
分析这些电路，需要用到模型。电路模型是在一定条件下，理想电路元件的相互连接近似地描述实际电路的电气特性。根据实际电路的不同工作条件以及对模型精确度的不同要求，应当用不同的电路模型模拟同一实际电路。



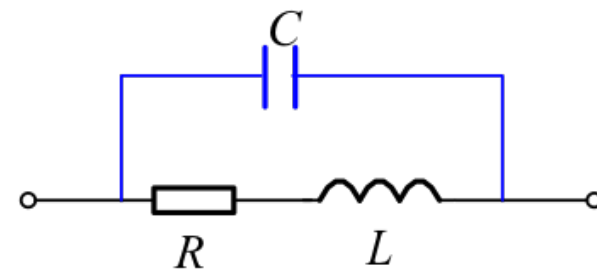
直流模型



线圈通过低频交流模型（忽略内阻）



线圈通过低频交流模型



线圈通过高频交流模型



## 二、电路模型

1. **理想电路元件**：根据实际电路元件所具备的电磁性质所设想的具有**某种单一电磁性质的元件**，**没有空间大小**，**其电压和电流关系可用简单的数学式子表示**。

几种基本的电路元件：

**电阻元件**：表示消耗电能的元件

**电感元件**：表示各种电感线圈**产生磁场，储存磁场能的作用**

**电容元件**：表示各种电容器产生电场，储存电能的作用

**电源元件**：表示各种将其它形式的能量转变成电能的元件

## 二、电路模型

### 2. 集总参数元件与集总参数电路

**集总参数元件：**理想元件

**集总参数电路：**由集总参数元件构成的电路。

一个实际电路要能用集总参数电路近似，要满足如下条件：即实际电路的尺寸必须远小于电路工作频率下的电磁波波长的1%。(6000000 m)

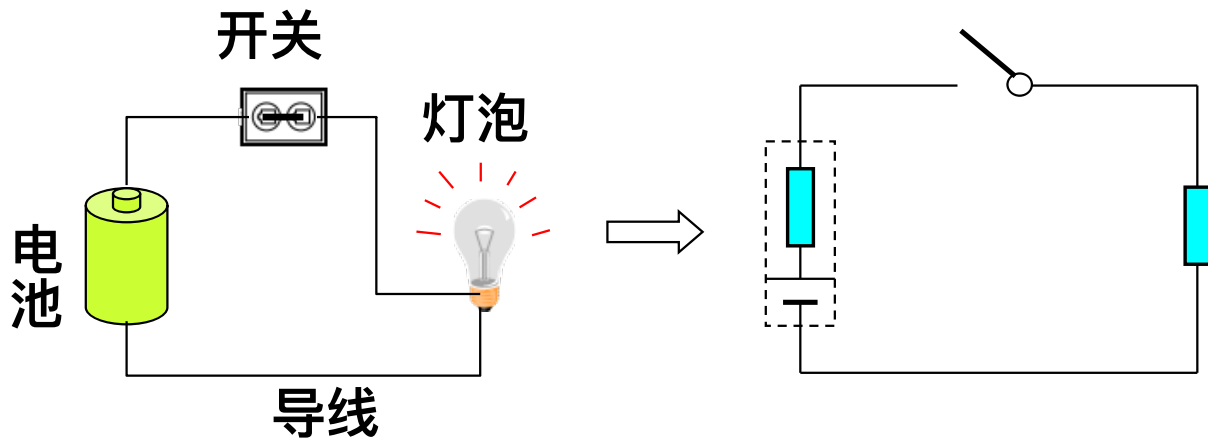
若实际电路的尺寸远大于电路工作频率下的电磁波的波长，则视为**分布参数电路**。

### 3.电路模型 (circuit model)的建立

**电路模型：**由理想元件及其组合代表实际电路元件，与实际电路具有**基本**相同的电磁性质，称其为电路模型。

电路模型由理想电路元件构成。

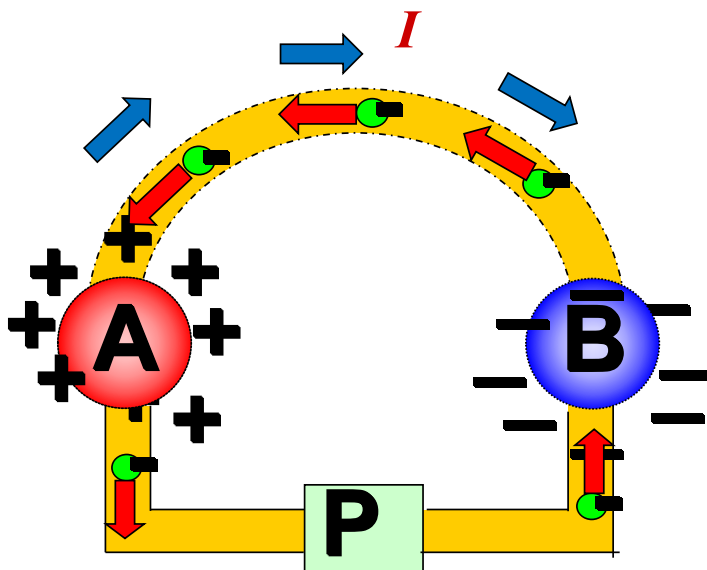
例：



## §1-2 电路变量

### 一、电流及其参考方向

1. **电流 (current):** 电荷（正，负）的定向运动形成电流。



**电流大小：单位时间里通过导体横截面的电量**

## §1-2 电路变量

### 一、电流及其参考方向

1. **电流 (current)**: 电荷（正，负）的定向运动形成电流。

电流大小用电流强度表示：单位时间内通过导体截面的电量。

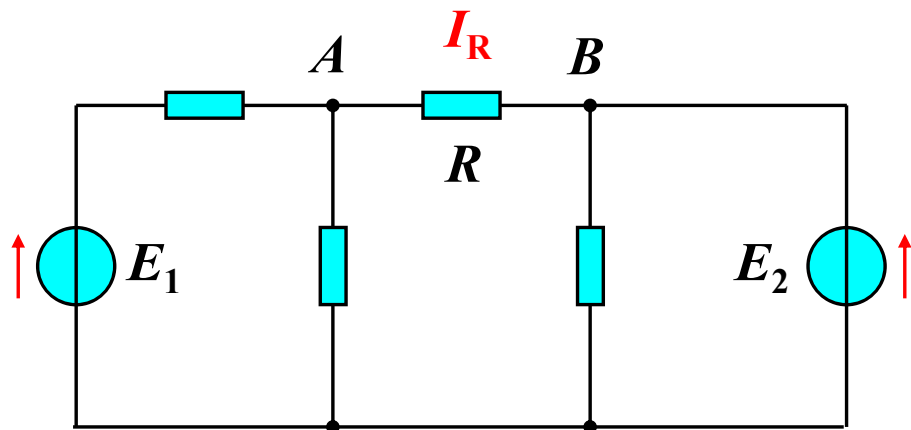
$$i(\mathbf{t}) \stackrel{\text{def}}{=} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt}$$

单位：A (安) (Ampere, 安培)

问题的提出:

电流方向  
 $A \Rightarrow B$ ?

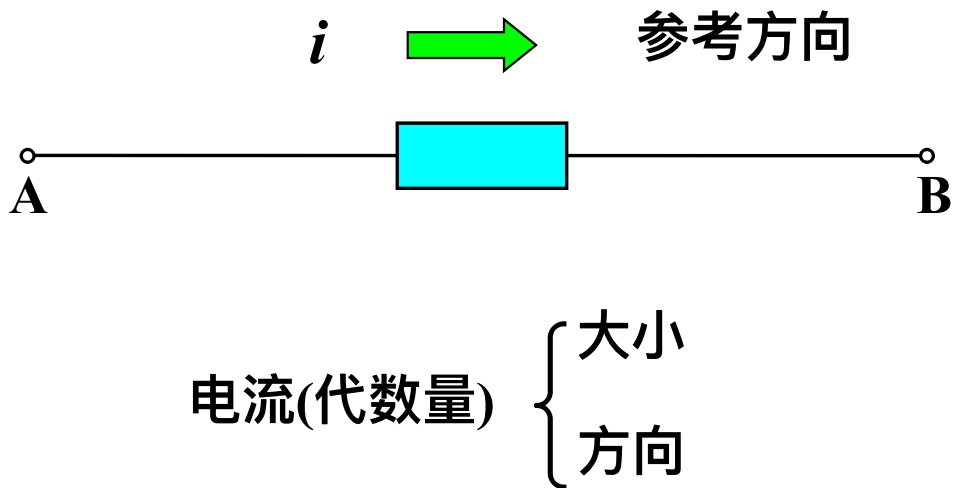
电流方向  
 $B \Rightarrow A$ ?

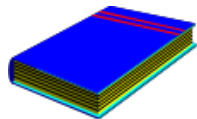


## 2. 电流的参考方向(reference direction)

元件(导线)中电流流动的实际方向有两种可能:

参考方向: 任意选定一个方向即为电流的参考方向。



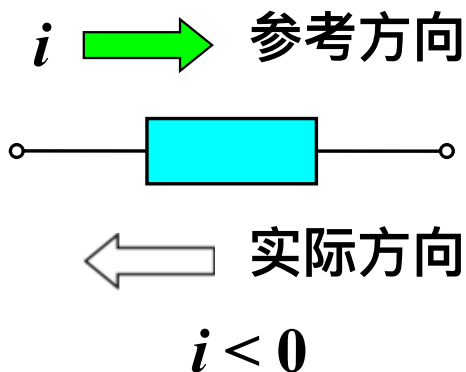
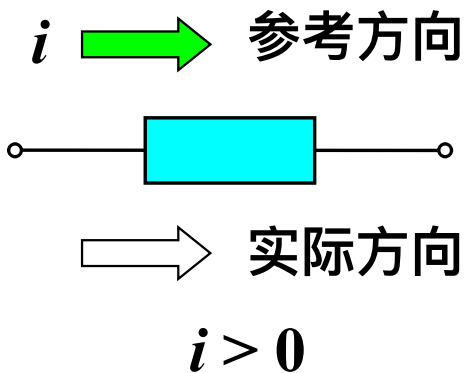


## 为什么要引入参考方向？

- (1). 有些复杂电路的某些支路事先**无法确定实际方向**。为分析方便，只能先任意标一方向（参考方向），根据计算结果，才能确定电流的实际方向。
- (2). 实际电路中有些**电压、电流是交变的**，无法标出实际方向。标出参考方向，再加上与之配合的表达式，才能表示出电流的大小和实际方向。



## 电流的参考方向与实际方向的关系：

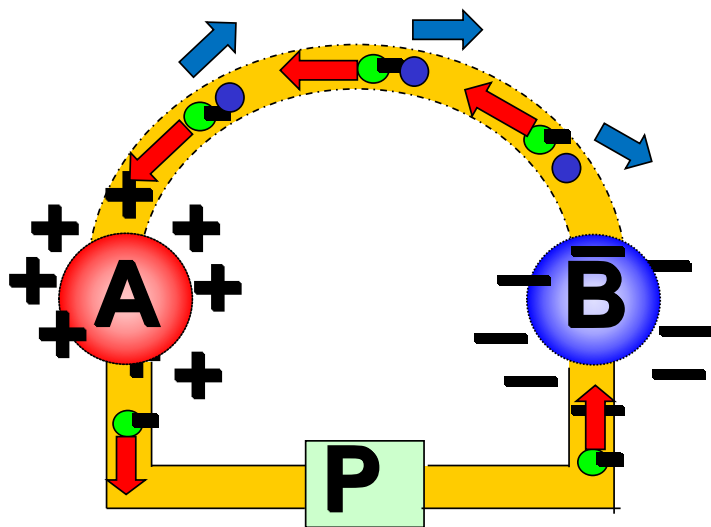
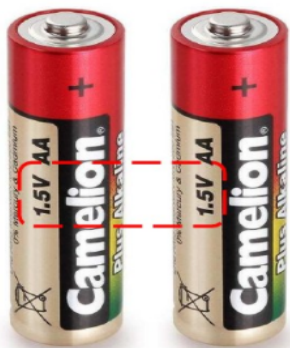


电流参考方向的两种表示：

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。

## 二、电压



**电压**：称作电势差或电位差，是形成电流的原因（电场力）。

**电压数值**是单位正电荷因受电场力作用从一点移动到另一点所做的功。



## 二、电压及其参考方向

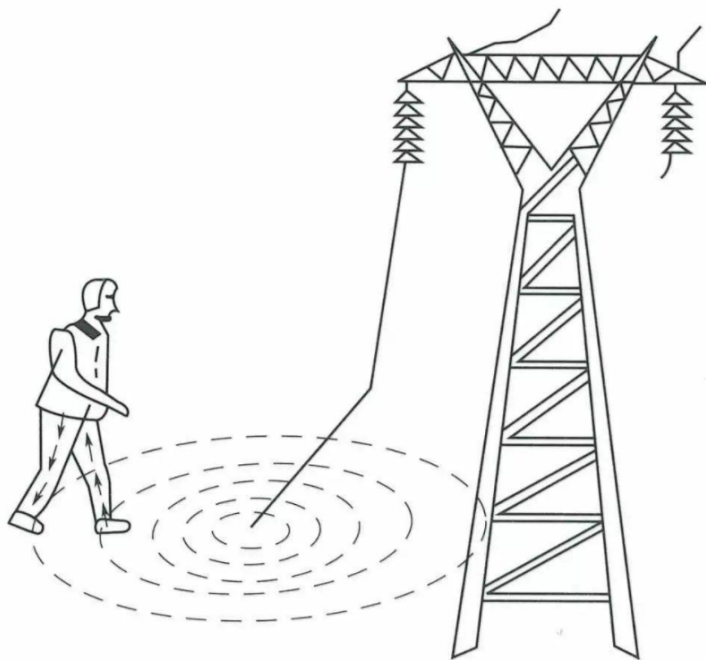
1. **电压(voltage)**: 电场中某两点A、B间的电压(降) $U_{AB}$ 等于将点电荷 $q$ 从A点移至B点电场力所做的功 $W_{AB}$ 与该点电荷 $q$ 的比值, 即:

$$U_{AB} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{dW_{AB}}{dq} \quad \begin{array}{l} \text{单位: V (伏)} \\ \text{(Volt, 伏特)} \end{array}$$

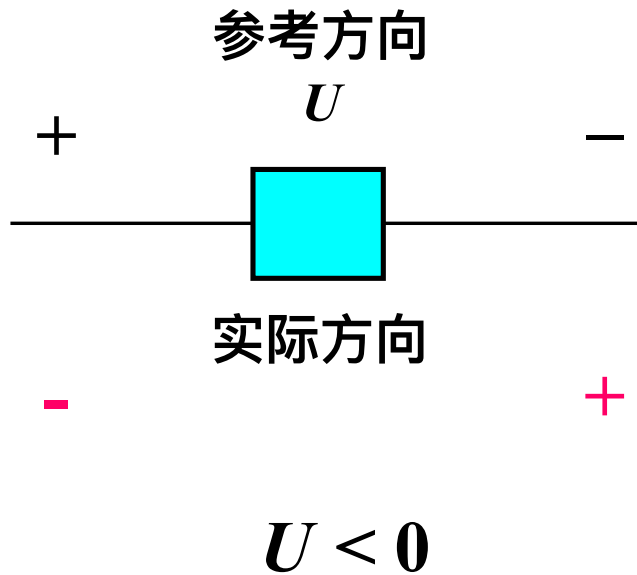
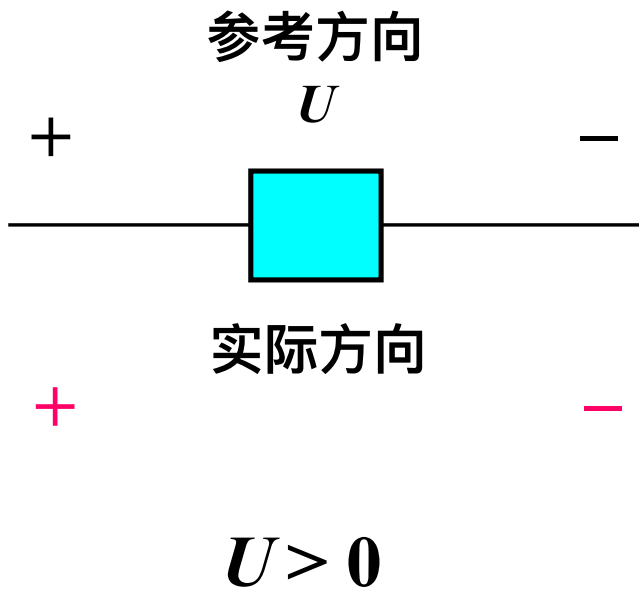
**电位**: 电路中为分析的方便, 常在电路中选某一点为参考点, 把任一点到参考点的电压称为该点的电位。

参考点的电位一般选为零, **参考点也称为零电位点**。

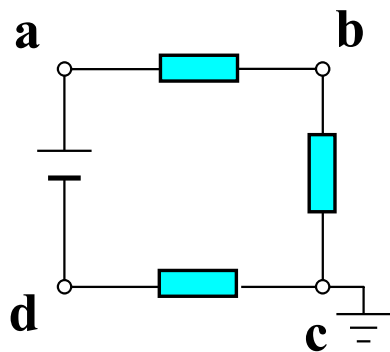
电位用 $\varphi$ 表示, 单位与电压相同, 也是V(伏)。



## 2.电压(降)的参考方向



### 3. 两点间电压与电位的关系：



设c点为电位参考点，则  $\varphi_c=0$

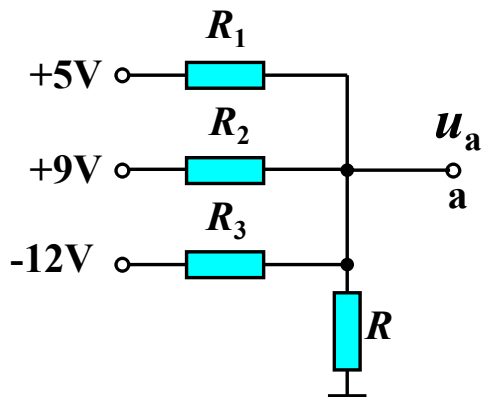
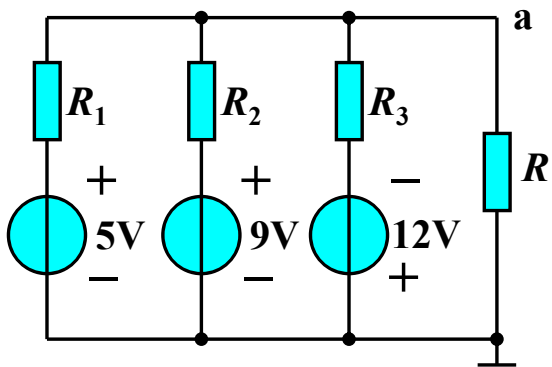
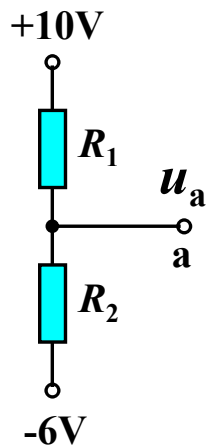
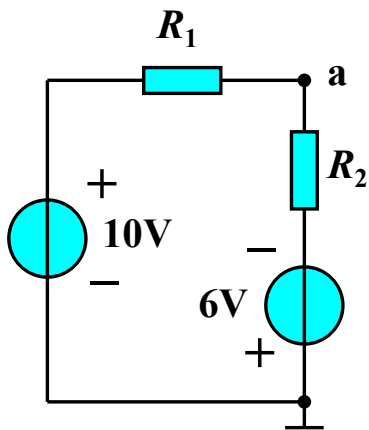
$$\varphi_a = U_{ac}, \quad \varphi_b = U_{bc}, \quad \varphi_d = U_{dc}$$

$$U_{ac} = \varphi_a, \quad U_{dc} = \varphi_d$$

$$U_{ad} = U_{ac} - U_{dc} = \varphi_a - \varphi_d$$

**结论：** 电路中任意两点间的电压等于该两点间的电位之差。

## 电路图的电位表示法



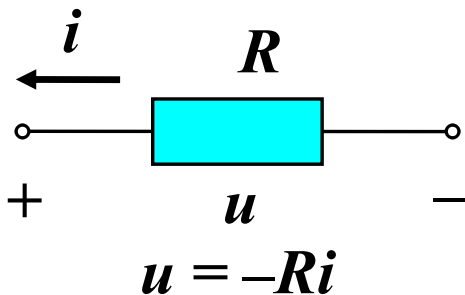
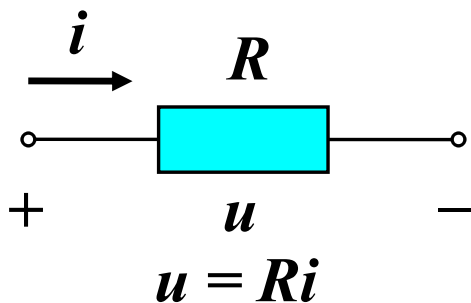
## 三、电功率及能量

### 1. 关联参考方向

(1) 电压电流参考方向是任意假定的，分析电路前必须标明。

(2) 元件或支路的 $u$ ， $i$ 参考方向相同时，称之为关联参考方向；反之，称为非关联参考方向。

(3) 参考方向不同时，其表达式符号也不同；



(4) 电路分析时，通常设置关联参考方向

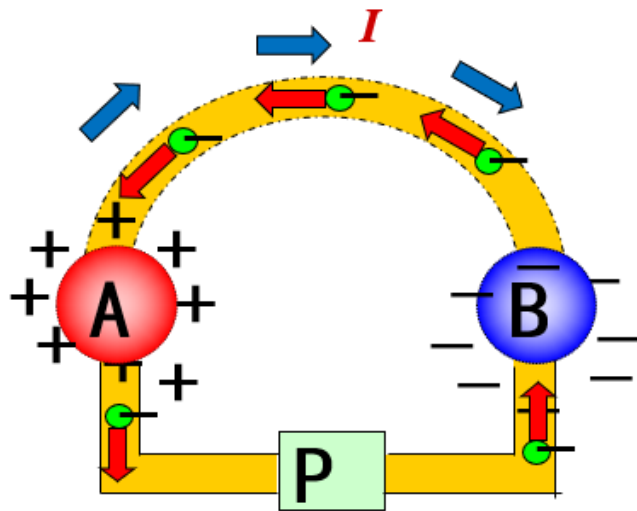


## 2.电功率

单位时间内电场力所做的功。

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

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



功率的单位：W (瓦) (Watt, 瓦特)

能量的单位：J (焦) (Joule, 焦耳)

当  $u, i$  的参考方向一致时， $p$  表示元件吸收的功率；

当  $u, i$  的参考方向相反时， $p$  表示元件发出的功率。

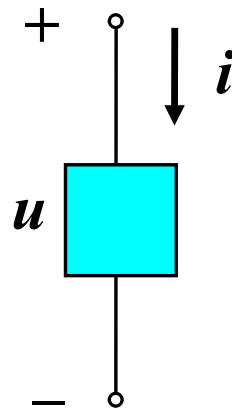
## 功率的计算和判断

### (1) $u, i$ 关联参考方向

$p = ui$  表示元件**吸收**的功率

$P > 0$  吸收正功率 (吸收)

$P < 0$  吸收负功率 (发出)

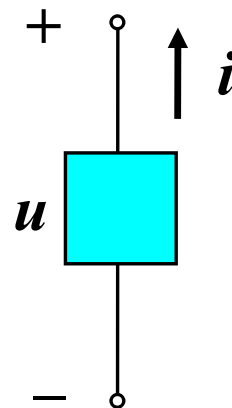


### (2) $u, i$ 非关联参考方向

$p = ui$  表示元件**发出**的功率

$P > 0$  发出正功率 (发出)

$P < 0$  发出负功率 (吸收)



例：  $U_1=10\text{V}$ ，  $U_2=5\text{V}$ ，  $I=1\text{A}$ ，  $R=5\Omega$ 。分别求电源、电阻的功率。

解：

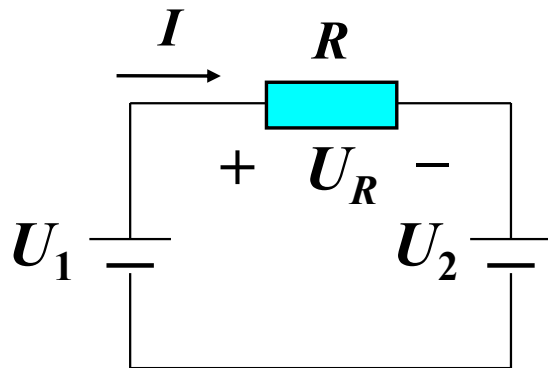
$$P_{R\text{吸}} = U_R I = 5 \times 1 = 5 \text{ W}$$

$$P_{U_1\text{发}} = U_1 I = 10 \times 1 = 10 \text{ W}$$

$$P_{U_2\text{吸}} = U_2 I = 5 \times 1 = 5 \text{ W}$$

$$P_{\text{发}} = 10 \text{ W}, \quad P_{\text{吸}} = 5 + 5 = 10 \text{ W}$$

$$P_{\text{发}} = P_{\text{吸}} \quad (\text{功率守恒})$$



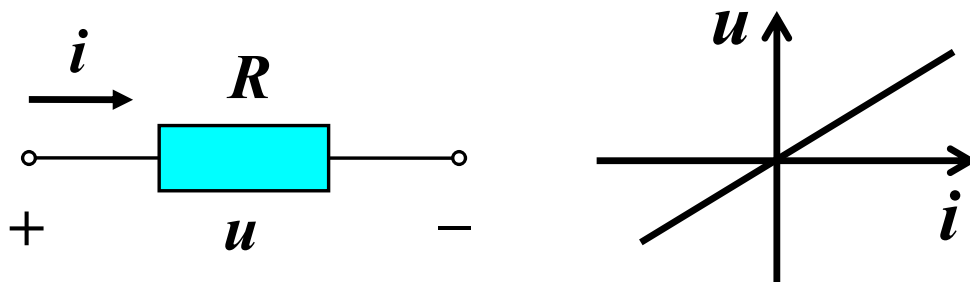
(1) 上述功率计算不仅适用于元件，也使用于任意二端网络。

(2) 电阻元件在电路中总是消耗(吸收)功率，而电源在电路中可能吸收，也可能发出功率。

## §1-3 电路元件

### 一、电阻

线性电阻：伏安特性曲线为过原点的一条直线。



电压与电流为关联参考方向时，欧姆定律(Ohm's Law) (OL)：

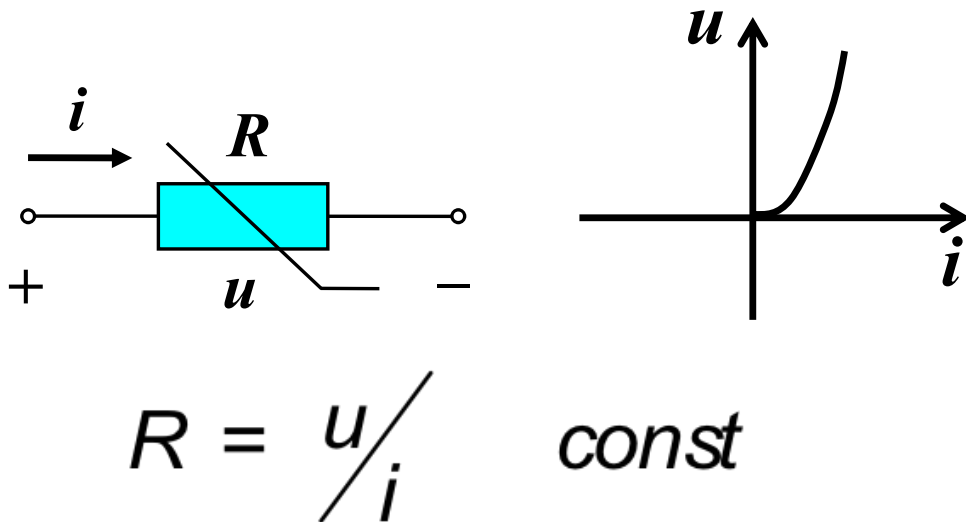
$$u = Ri \quad R = \frac{u}{i} = \text{const}$$

$R$  称为电阻，电阻的单位： $\Omega$ (欧)(Ohm, 欧姆)

$G=1/R$ 称为电导，电导的单位： $S$ (西)(Siemens, 西门子)

## 非线性电阻

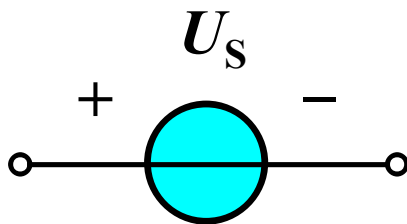
伏安特性曲线为过原点的一条曲线。



如热敏电阻器、光敏电阻器、压敏电阻器以及半导体二极管等。

## 二、理想电压源

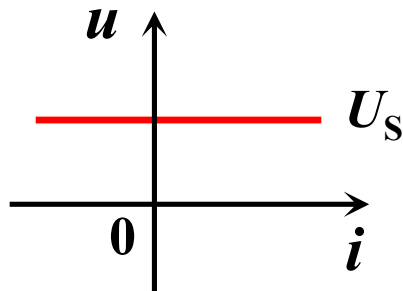
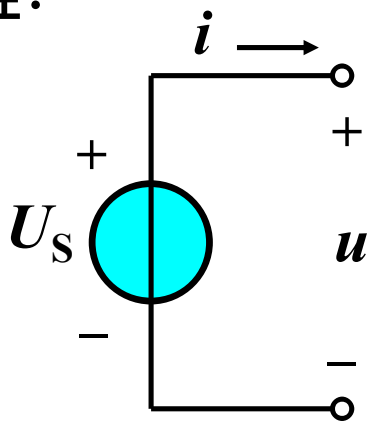
### 1. 电路符号



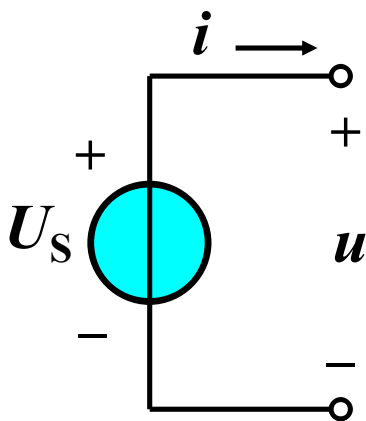
(a) 端电压由电源本身决定，与外电路无关；

(b) 通过它的电流是任意的，由外电路决定。

### 2. 伏安特性：



### 3. 理想电压源的开路与短路



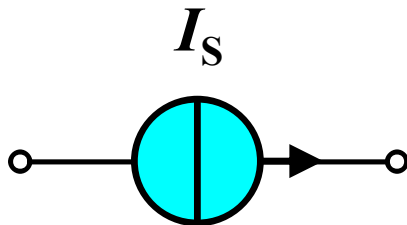
(1) 开路：  $i=0$

(2) 短路：理想电压源出现病态(这种模型在电路中不存在)。

\* 实际电压源不允许短路。因其内阻小，若短路，电流很大，可能烧毁电源。

## 三、理想电流源

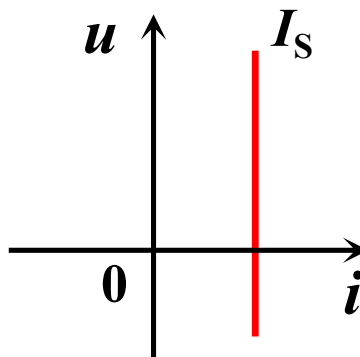
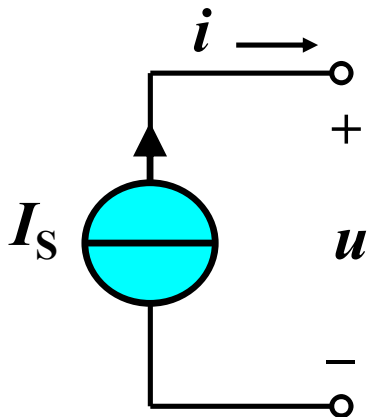
### 1. 电路符号



(a) 电源电流由电源本身决定，与外电路无关；

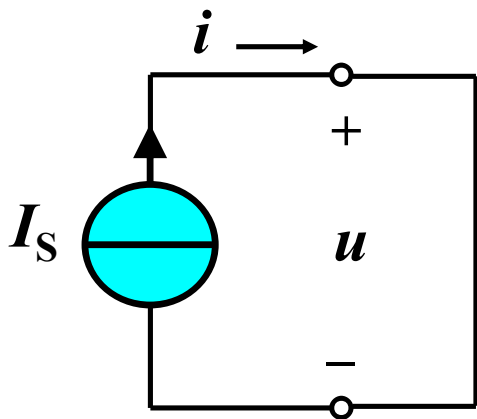
(b) 电源两端电压是由外电路决定。

### 2. 伏安特性：





### 3. 理想电流源的短路与开路



(1) 短路:  $i = i_S$ ,  $u = 0$

(2) 开路: 理想电流源出现病态(这种模型在电路中不存在)。

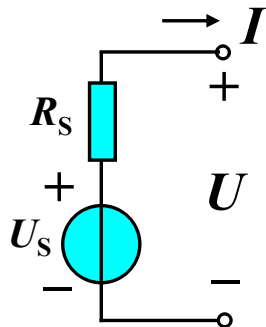
### 4. 实际电流源的产生:

稳流电子设备, 光电池, 晶体三极管

## 四、实际电压源

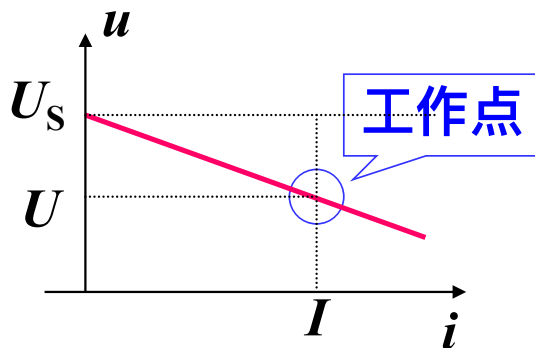
一个实际电压源，可用一个理想电压源 $U_S$ 与一个电阻 $R_S$ 串联的支路模型来表征其特性。当它向外电路提供电流时，它的端电压 $U$ 总是小于 $U_S$ ，电流越大端电压 $U$ 越小。

实际电压源模型



$$U = U_S - R_S I$$

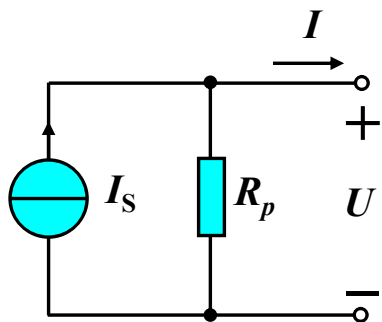
其外特性曲线如下：



## 五、实际电流源

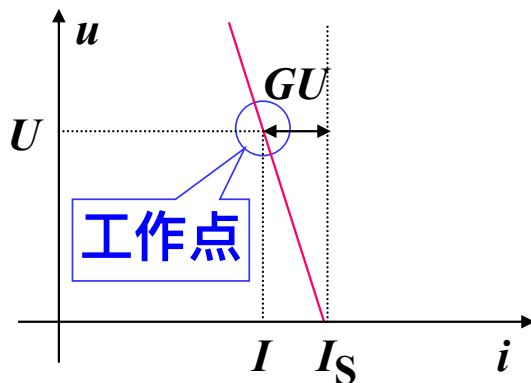
一个实际电流源，可用一个电流为  $I_S$  的理想电流源和一个电阻  $R_p$  并联的模型来表征其特性。当它向外电路供给电流时，并不是全部流出，其中一部分将在内部流动，随着端电压的增加，输出电流减小。

实际电流源模型



$$I = I_S - U/R_p$$

其外特性曲线如下：



实际电压源、实际电流源都可以看着是实际电源的一种等效模型，伏安关系都是 $UI$ 平面的一条直线。

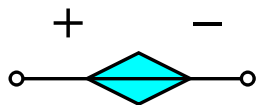
从数学角度来看，这两条直线完全有可能重合，因此实际电压源、实际电流源有可能等效。这是我们下一章的内容。

## 六、受控电源

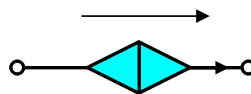
### 受控电源 (controlled source)

1.定义：电压源电压或电流源电流受电路中某个支路的电压(或电流)的控制。

电路符号

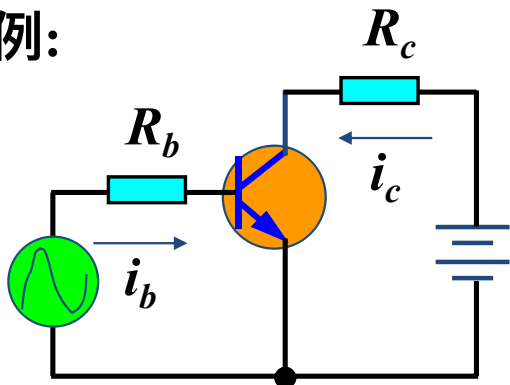


受控电压源



受控电流源

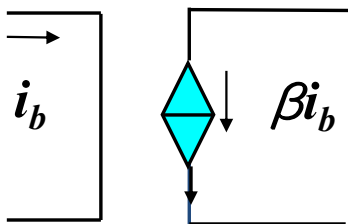
例:



$$i_c = \beta i_b$$

用以前讲过的元件无法表示此  
电流关系,为此引出新的电路模  
型——**电流控制的电流源**。

一个三极管可以用CCCS模型来表示  
CCCS可以用一个三极管来实现。



控制部分

受控部分

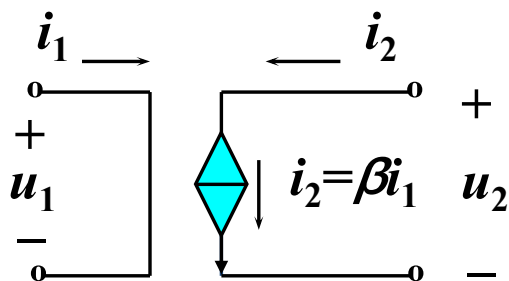
受控源是一个四端元件:

输入端口是控制支路,

输出端口是受控支路.

2.分类：根据控制量和被控制量是电压 $u$ 或电流 $i$ ，受控源可分为四种基本类型：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 (Current Controlled Current Source)

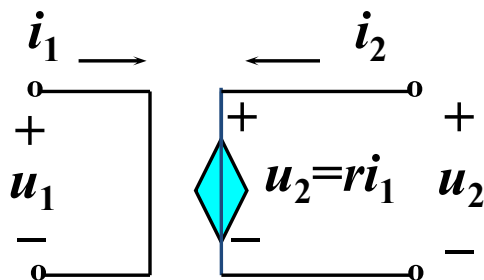


CCCS

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

$\beta$ : 电流放大倍数

### (2) 电流控制的电压源 (Current Controlled Voltage Source)

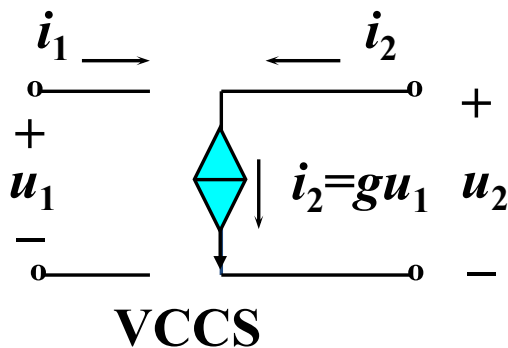


CCVS

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

$r$ : 转移电阻

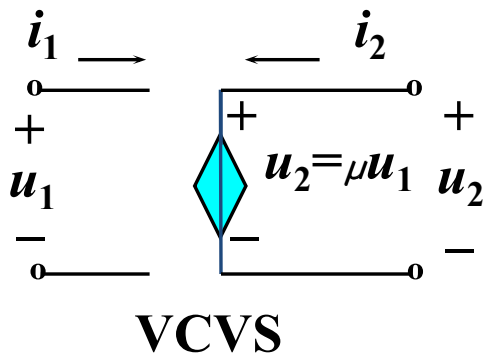
### (3) 电压控制的电流源 ( Voltage Controlled Current Source )



$$\begin{cases} i_1 = 0 \\ i_2 = gu_1 \end{cases}$$

$g$ : 转移电导

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



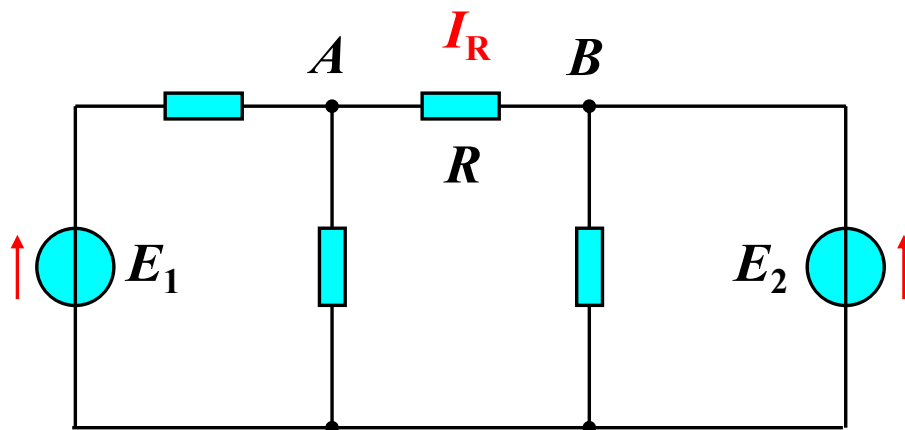
$$\begin{cases} i_1 = 0 \\ u_2 = \mu u_1 \end{cases}$$

$\mu$ : 电压放大倍数



# Motivation

学习了电路元件及特性，那么究竟怎么分析电路呢？以求解每条支路的电压，电流



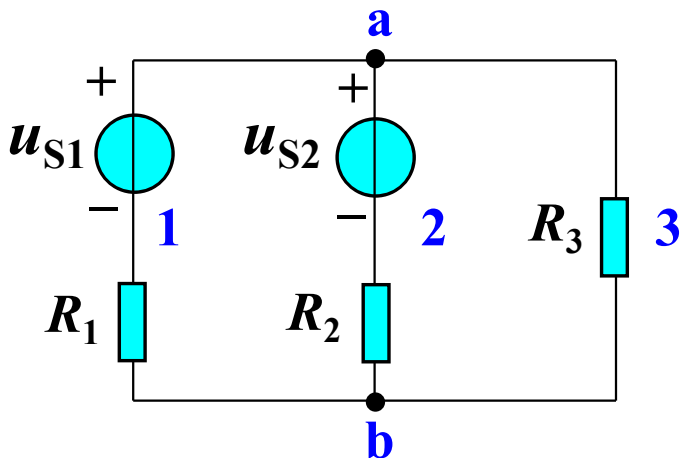
## §1-4 基尔霍夫定律 ( Kirchhoff's Laws )

基尔霍夫定律包括基尔霍夫**电流定律**(Kirchhoff's Current Law—**KCL**)和基尔霍夫**电压定律**(Kirchhoff's Voltage Law—**KVL**)。它反映了电路中所有支路电压和电流的约束关系，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。**

## 一、几个名词：(定义)

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



$$b=3$$

$$n=2$$

$$l=3$$

2. 节点 (node): 三条或三条以上支路的连接点称为节点。 ( $n$ )

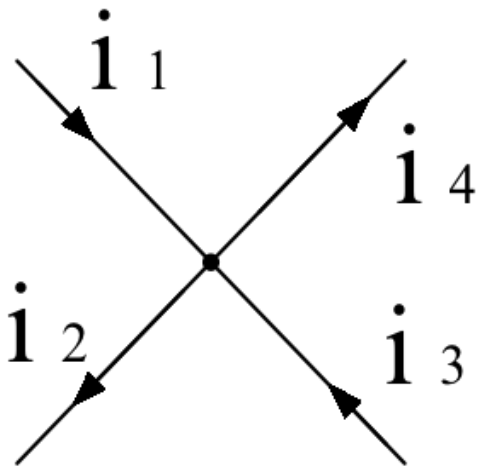
3. 回路(loop): 由支路组成的闭合路径。 ( $l$ )

4. 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。

## 二、基尔霍夫电流定律) (KCL) (Kirchhoff's Current Law):

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

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



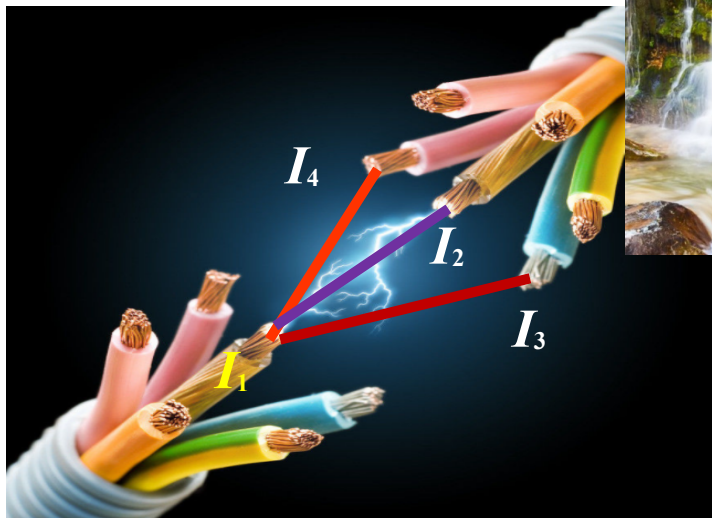
令流入为“+”(支路电流背离节点)

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

$$i_1 + i_3 = i_2 + i_4$$

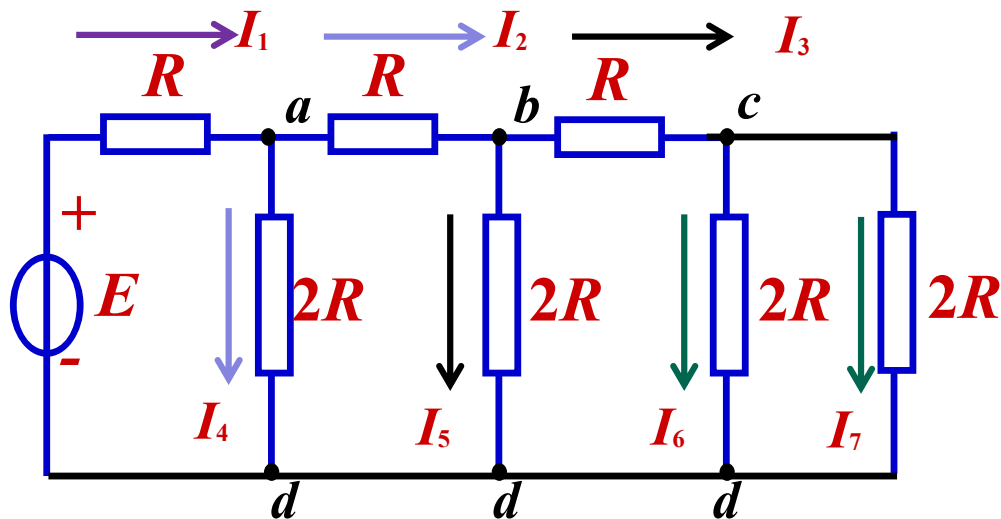
$$\text{即 } \sum i_{\text{入}} = \sum i_{\text{出}}$$

物理基础:电荷恒定 (不损失)，电流连续性。



节点: 
$$I_1 = I_2 + I_3 + I_4$$

**KCL方程的精髓**



节点 $a$ :  $I_1 = I_2 + I_4$

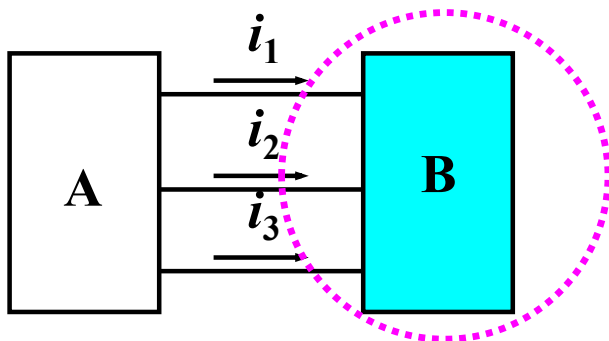
节点 $b$ :  $I_2 = I_3 + I_5$

节点 $c$ :  $I_3 = I_6 + I_7$

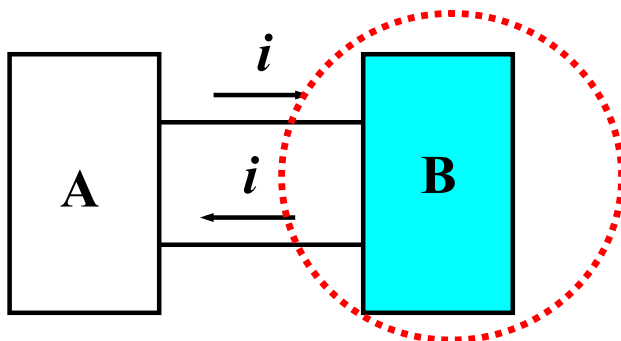
节点 $d$ :  $I_1 = I_4 + I_5 + I_6 + I_7$

对于 $N$ 个节点的  
电路, KCL独立  
(有效) 方程数  
为 $N-1$

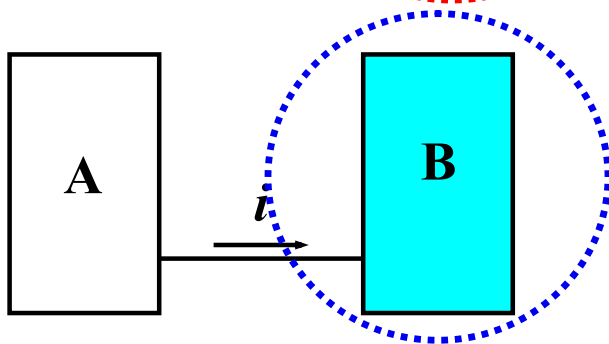
## KCL的推广：



$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$



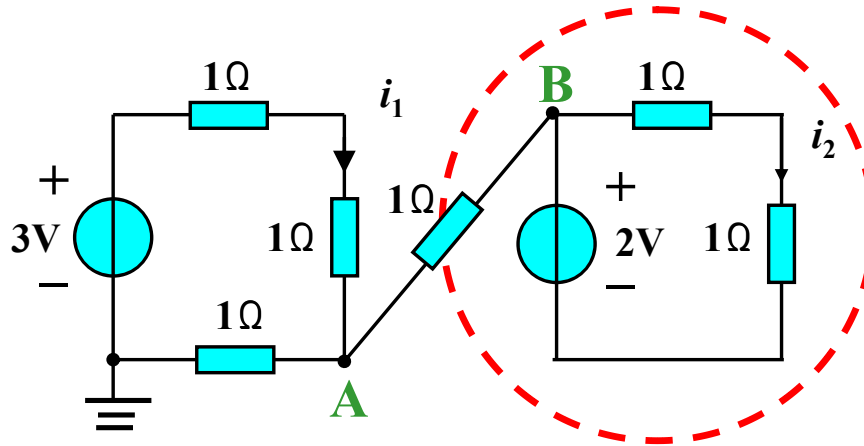
两条支路电流大小相等，  
一个流入，一个流出。



只有一条支路相连，则  $i=0$ 。



1.



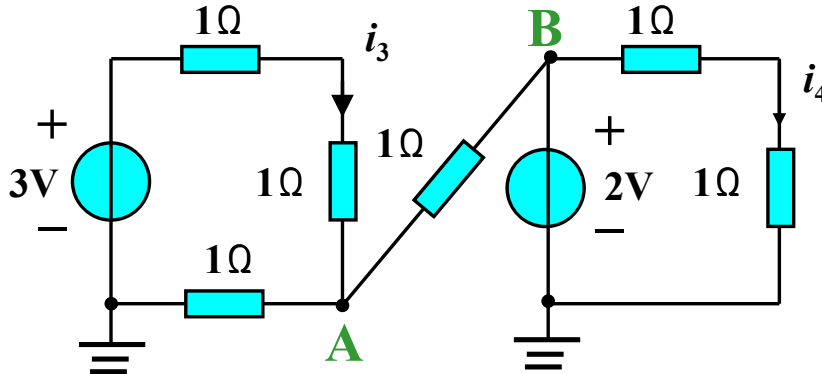
$$\varphi_A \stackrel{?}{=} \varphi_B$$

$$i_1 \stackrel{?}{=} i_2$$

$$\varphi_A = \varphi_B$$

$$i_1 = i_2$$

2.



$$\varphi_A \stackrel{?}{=} \varphi_B$$

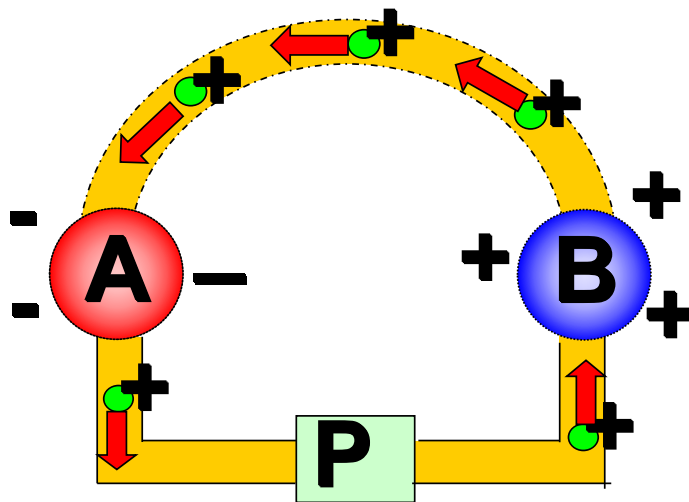
$$i_3 \stackrel{?}{=} i_4$$

~~$$\varphi_A = \varphi_B$$~~

~~$$i_3 = i_4$$~~



### 三、基尔霍夫电压定律 (KVL)



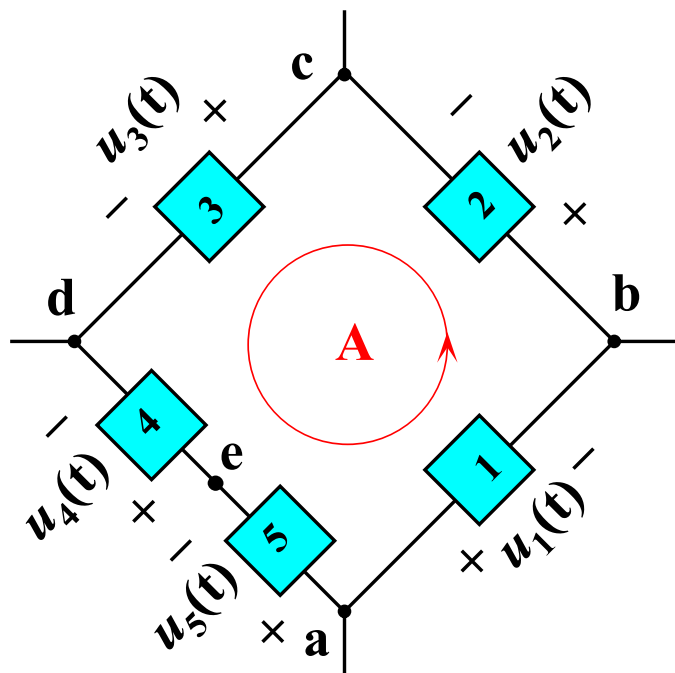
静电场电荷做功与路径无关

闭合回路的电压降为0

### 三、基尔霍夫电压定律 (KVL)

#### 静电场电荷做功与路径无关

在任何集总参数电路中，在任一时刻，沿任一闭合路径（按固定绕向），各支路的电压降之和为零。即：



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

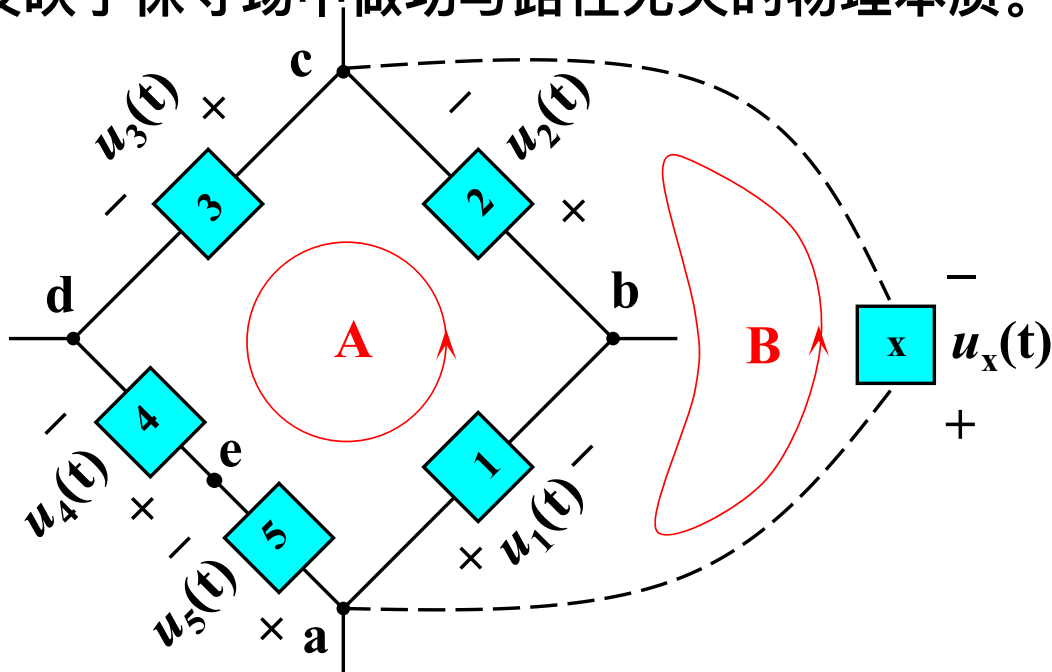
任意选定一个绕行方向：  
为电压降的参考方向。

如图所示，对回路A列写  
KVL方程得：



$$u_1(t) + u_2(t) + u_3(t) - u_4(t) - u_5(t) = 0$$

**KVL的实质：**反映了集总参数电路遵从能量守恒定律，或者说，它反映了保守场中做功与路径无关的物理本质。



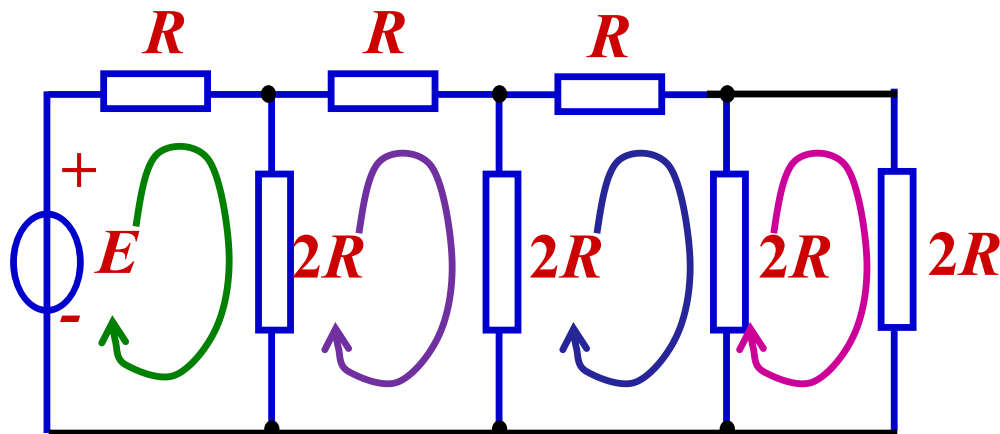
**KVL对于任意虚拟回路也成立。例如对回路B：**

$$-u_2(t) - u_1(t) + u_x(t) = 0$$

式中 $u_x(t)$ 为假想元件上的电压，得：

$$u_x(t) = u_2(t) + u_1(t)$$

## KVL方程



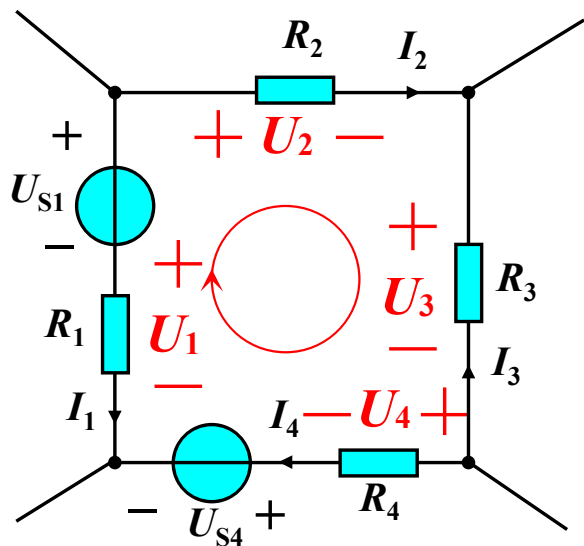
回路 $i$ :  $\Delta U_i = 0$

注意，独立方程  
的个数为网孔个  
数

KVL方程的精  
髓

## 具体电路KVL方程的列写

假定电路元件的参考方向，对回路任意选定一个绕行方向。



顺时针方向绕行:  $\sum U = 0$

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

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

$$\text{即 } \sum U_R = \sum U_S$$

电阻压降    电源压升

$$-R_1 I_1 - U_{S1} + R_2 I_2 - R_3 I_3 + R_4 I_4 + U_{S4} = 0$$

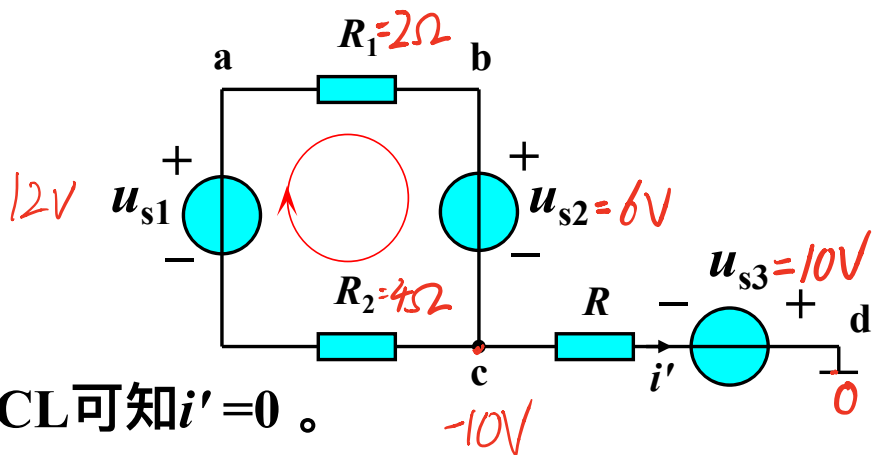
$$-R_1 I_1 + R_2 I_2 - R_3 I_3 + R_4 I_4 = U_{S1} - U_{S4}$$

对于电阻元件，需要注意：

**$UI$ 关联时:  $U=RI$**

**当 $UI$ 非关联时:  $U=-RI$**

例：如图电路，已知 $R_1=2\Omega$ ， $R_2=4\Omega$ ， $u_{s1}=12V$ ， $u_{s2}=6V$ ， $u_{s3}=10V$ ，求a点电位 $u_a$ 。



解：由KCL可知 $i'=0$ 。

设如图回路绕行方向，由KVL方程：

$$R_1 i + u_{s2} + R_2 i - u_{s1} = 0 \quad 2i + 6 + 4i - 12 = 0$$

$$\xrightarrow{\text{green arrow}} i = 1(\text{A})$$

求电位 $u_a$ ，就是求a点到参考点的电压，它是自a点到地的电压代数之和。

$$u_a = u_{ab} + u_{bc} + u_{cd} = 2i + 6 - 10 = -2(\text{V})$$

例：如图所示电路，已知 $I=0.3\text{A}$ ，求电阻 $R$ 。

解：可通过计算电阻两端的电压和流过的电流来计算电阻大小。

由KVL方程：  $-12+15I_1+20I=0$   
 $I_1=0.4(\text{A})$

由KCL方程：  $I_2=I_1-I=0.1(\text{A})$

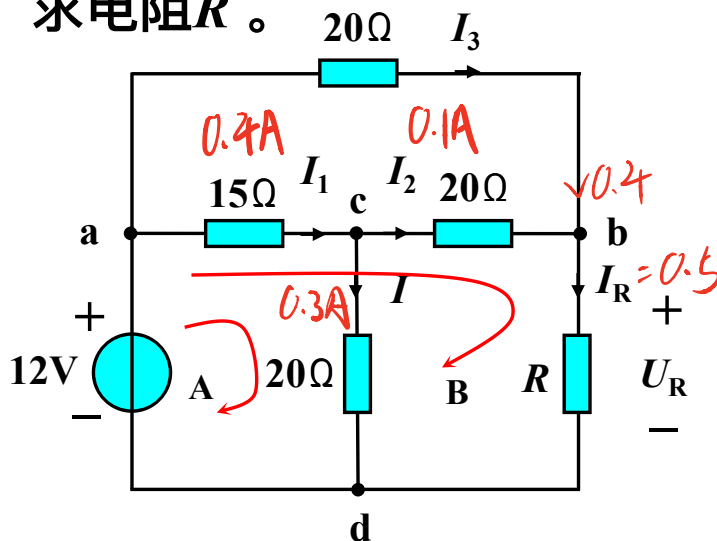
由KVL方程：  $-12+15I_1+20I_2+U_R=0$        $U_R=4(\text{V})$

由KVL方程：  $U_{ab}=U_{ac}+U_{cb}=15I_1+20I_2=6+2=8(\text{V})$

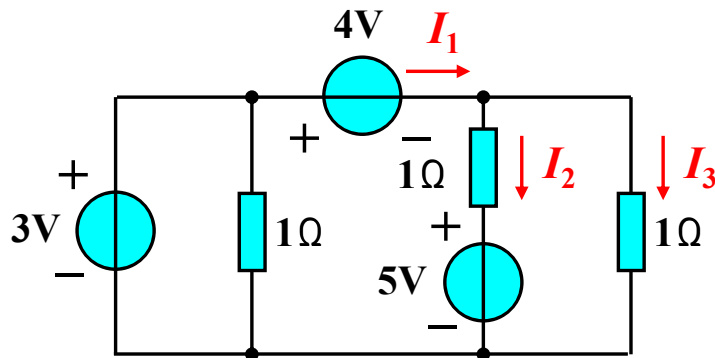
由OL得：  $I_3=U_{ab}/20=0.4(\text{A})$

由KCL方程：  $I_R=I_2+I_3=0.1+0.4=0.5(\text{A})$

由OL得：  $R=U_R/I_R=4/0.5=8(\Omega)$



## 讨论题



求:  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$

能否很快说出结果



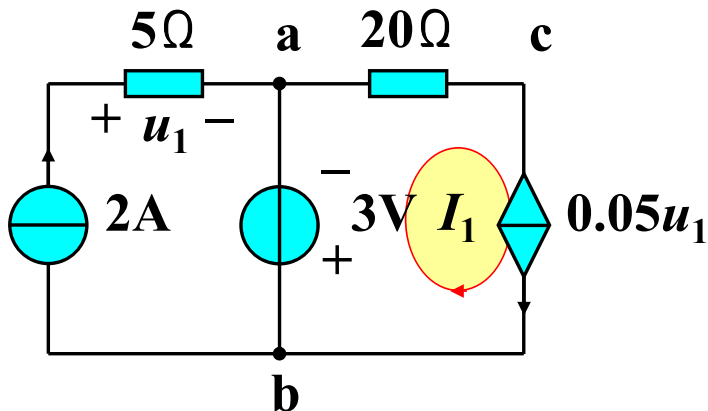
$$I_3 = \frac{3 - 4}{1} = -1 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{3 - 4 - 5}{1} = -6 \text{ A}$$

$$I_1 = I_2 + I_3 = -7 \text{ A}$$



例：如图所示电路，试求电压 $u_{cb}$ 。



解： 因为 $u_1 = 2 \times 5 = 10\text{V}$  故受控源电流为：

→  $0.05u_1 = 0.05 \times 10 = 0.5\text{A}$

而  $u_{ac} = 20 \times i = 20 \times 0.5 = 10\text{V}$

由KVL方程：  $u_{cb} + u_{ba} + u_{ac} = 0$

→  $u_{cb} = u_{ab} - u_{ac} = -3 - 10 = -13\text{V}$

## KCL、KVL小结：

- (1). KCL是对支路电流的线性约束，KVL是对支路电压的线性约束。
- (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是电位单值性的具体体现(电压与路径无关)。

——End

**作业：**

**1.3节： 1-8, 1-10**

**1.4节： 1-14**

**1.5节： 1-19**

**综合： 1-27, 1-30**

**要求把题目写在作业本上！**

**——End**