

# 第1章

## 电路的基本概念和基本定律

---

1.1 电路模型 Circuits Model

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

# 第1章

## 电路模型和基本定律

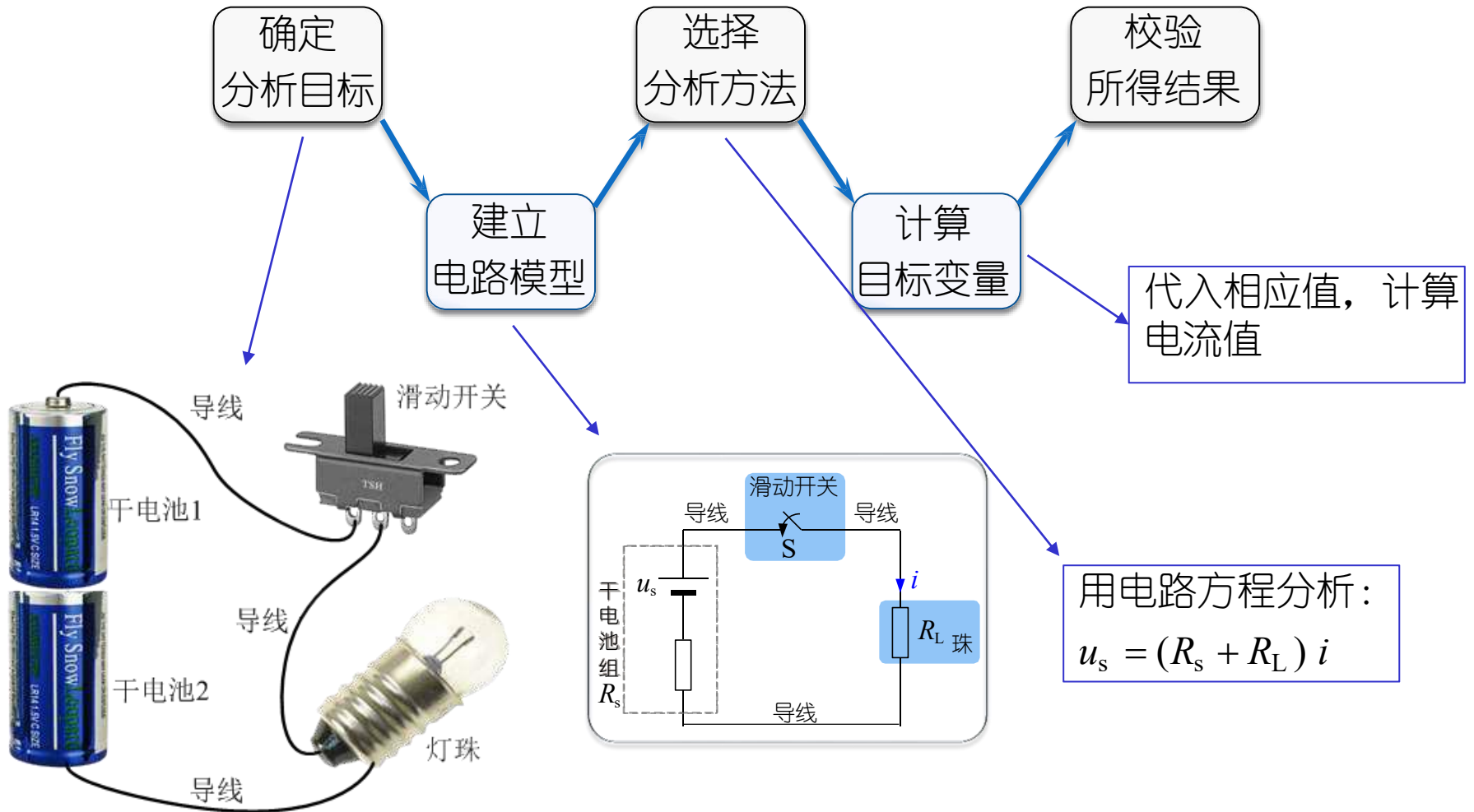
- 目标：**
1. 熟练掌握电路的电功率计算。
  2. 熟练掌握独立电源、受控电源的特性。
  3. 理解KCL、KVL方程的独立性，准确列写KCL、KVL方程。

- 难点：**
1. 理解独立电源的特点，即电压源的电流、电流源的电压由外部电路决定。
  2. 理解受控电源和独立电源特性的异同。
  3. 习惯使用参考方向、变量分析问题。
  4. 恰当、准确列写电路的KCL、KVL方程。

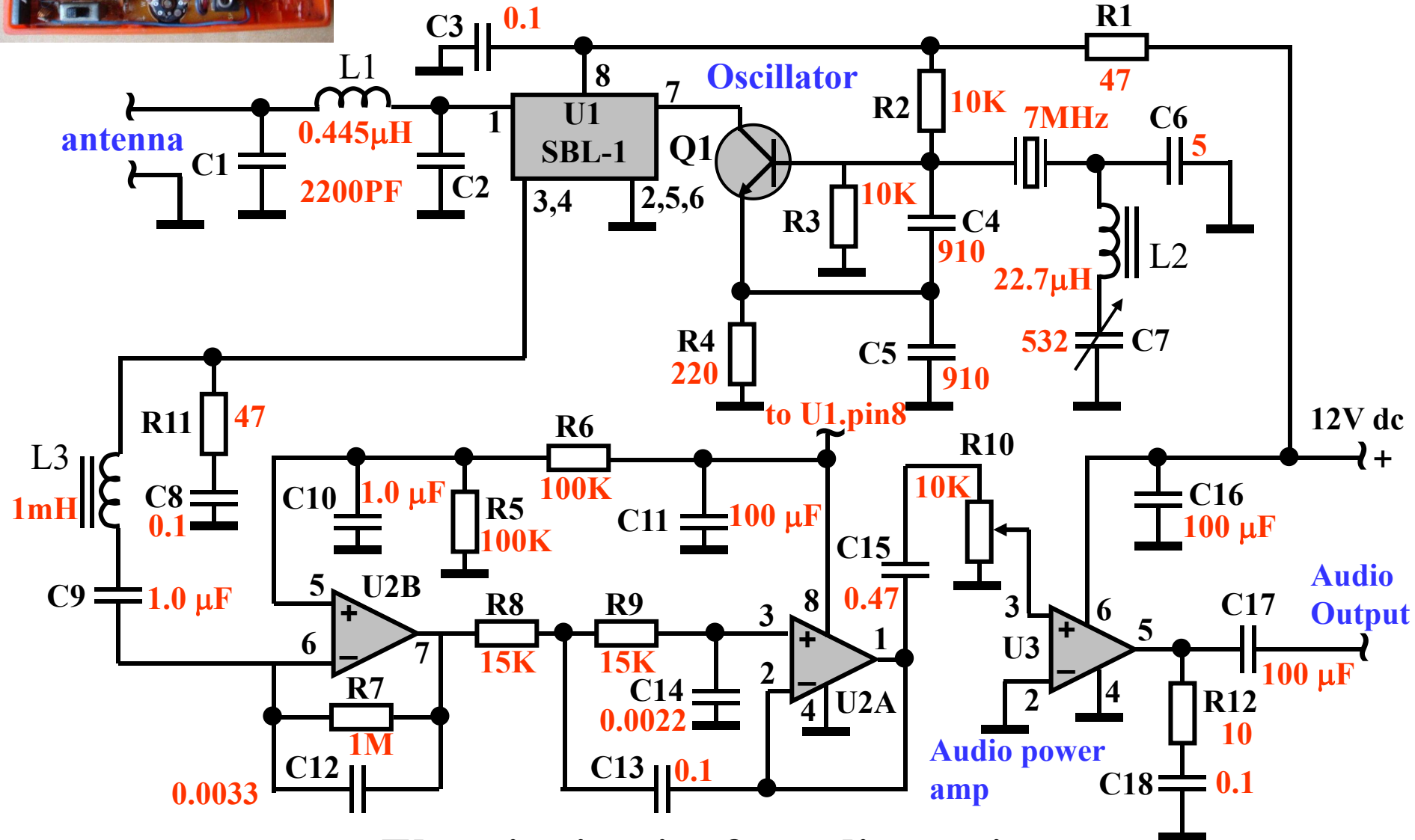
**讲授学时：** 4

# 1.1 电路模型 Circuits Model

## 电路分析的基本思路：



# 1.1 电路模型 Circuits Model



Electric circuit of a radio receiver

# 1.1 电路模型 Circuits Model

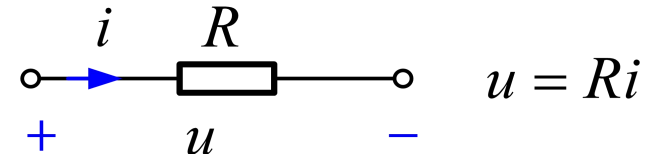
**电路建模** — 将实际电路中的电器件，用对应的电路模型表示的过程

**电路元件** Circuit Elements

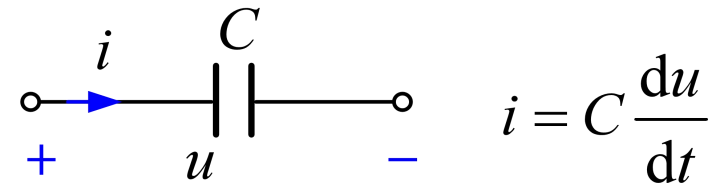
**定义理想元件**

- 没有空间大小
- 只呈现一种电磁现象
- 特性可以用严格的数学表达式描述  $f(u, i) = 0$

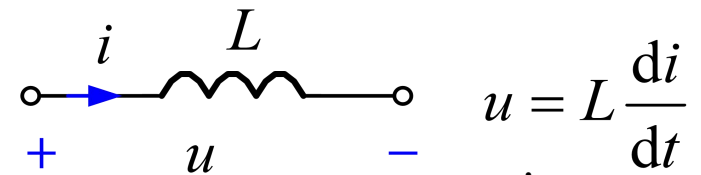
**电阻** Resistors: Consume electric energy



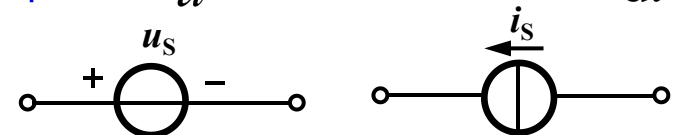
**电容** Capacitors: Establish electric field



**电感** Inductors : Establish magnetic field



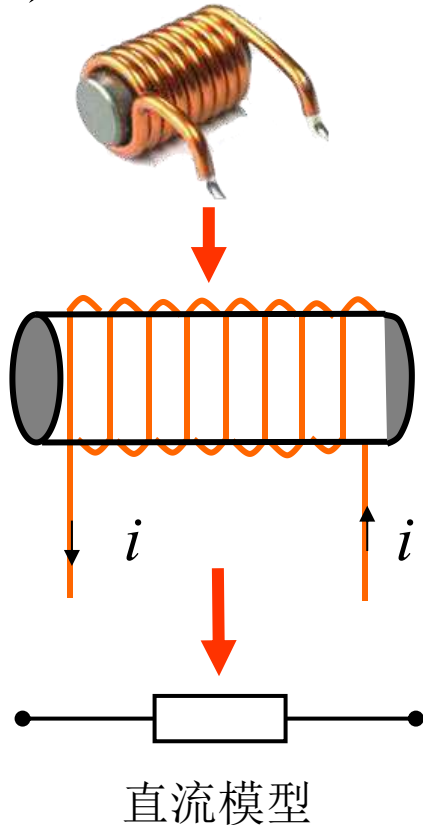
**电源** Source : Supply electric energy



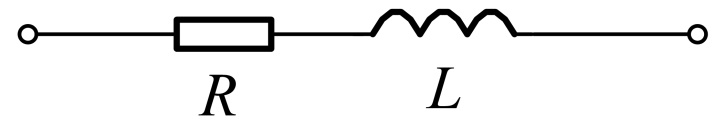
# 1.1 电路模型 Circuits Model

电路模型是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。

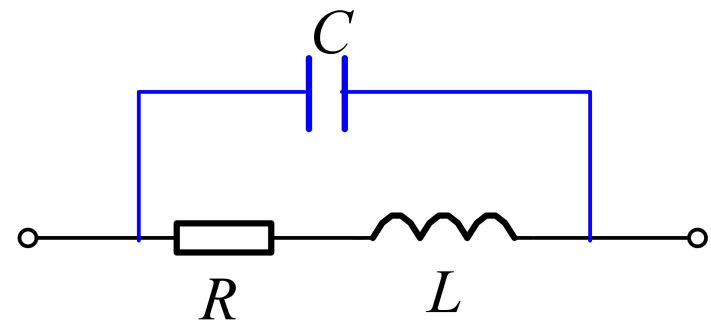
根据实际电路的不同工作条件以及对模型精确度的不同要求，应当用不同的电路模型模拟同一实际电路。



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

# 1.1 电路模型 Circuits Model

电磁问题



电路理论方法 (积分)

分包含完整的器件

电磁学方法

$$d \ll \lambda \quad \oint_s \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{dq}{dt} = 0 \quad \oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\phi}{dt} = 0$$

电磁波传播时间可忽略(瞬间传遍系统)  
器件外部磁场由自由电流产生。  
器件外部电场由自由电荷产生。 3点假设

抽象为电路模型  
集中参数电路

理想电路元件  
集中参数元件

基尔霍夫定律

元件特性方程

代数方程

麦克斯韦方程

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_s (\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}) \cdot d\mathbf{s}$$

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \left( \int_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} \right)$$

$$\oint_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0$$

$$\oint_s \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = \int_V \rho dV$$

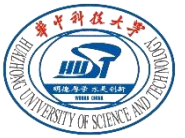
媒质特性

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad \mathbf{J} = \rho \mathbf{v}$$

边界衔接条件



## 集中参数Lumped Circuits和分布参数电路Distributed Circuits

- 当实际电路的尺寸远小于其使用时的最高工作频率所对应的波长时，可以无须考虑电磁量的空间分布，相应的电路元件称为**集中参数元件**。由集中参数元件组成的电路，称为实际电路的集中参数电路模型或简称为**集中参数电路**。
- 如果电路中的电磁量是时间和空间的函数，使得描述电路的方程是以时间和空间为自变量的代数方程或偏微分方程，则这样的电路模型称为**分布参数电路**。

**电路集中化条件：**实际电路的各向尺寸 $d$ 远小于电路工作频率所对应的电磁波波长 $\lambda$ ，即  $d \ll \lambda$

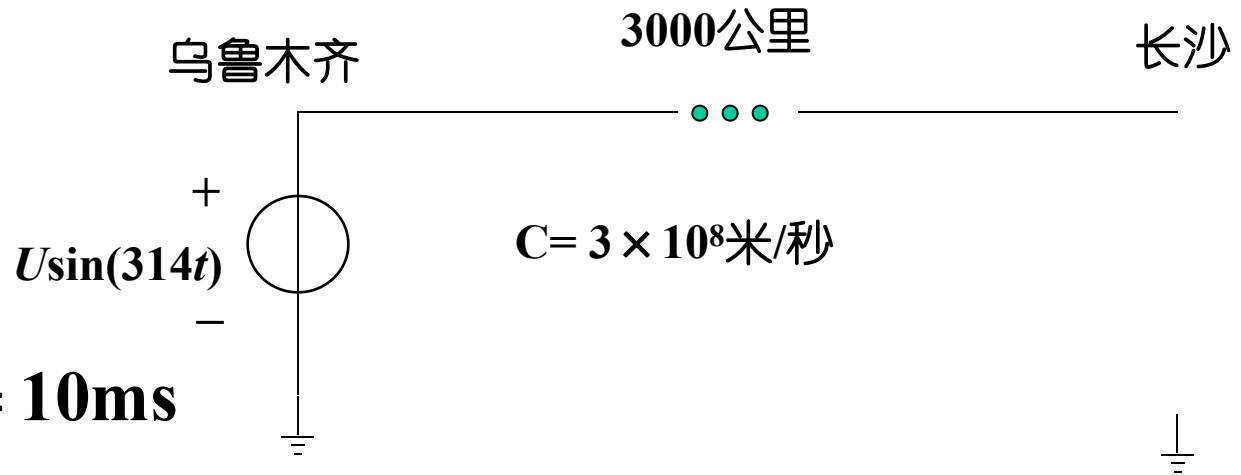
如果**电路尺寸的远小于**其工作电磁波的波长 $\lambda$ ，则可将该电路建模为**集中参数电路**。否则只能建模为**分布参数电路**。工程上集中参数电路的标准为 $d \leq 0.01 \lambda$



# 1.1 电路模型 Circuits Model

**例1** 乌鲁木齐发电站发出的正弦电磁波需要多少时间才能传输到长沙？

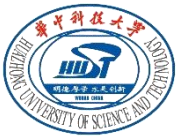
$$3 \times 10^6 / (3 \times 10^8) = 10\text{ms}$$



50Hz的正弦波周期为20ms。经过10ms以后，乌鲁木齐发出的电磁波刚刚到达长沙，而此时乌鲁木齐发电机的电压与长沙的电压正好**反相**！

关键在哪里？

50Hz电磁波的波长  $\lambda = 3 \times 10^8 / 50 = 6000 \text{ km}$



## 音频信号

$f$ : 20Hz~25kHz,  $\lambda=3 \times 10^8/25 \times 10^3=12000\text{m}$

对实验室仪器而言, 可不必考虑分布参数。

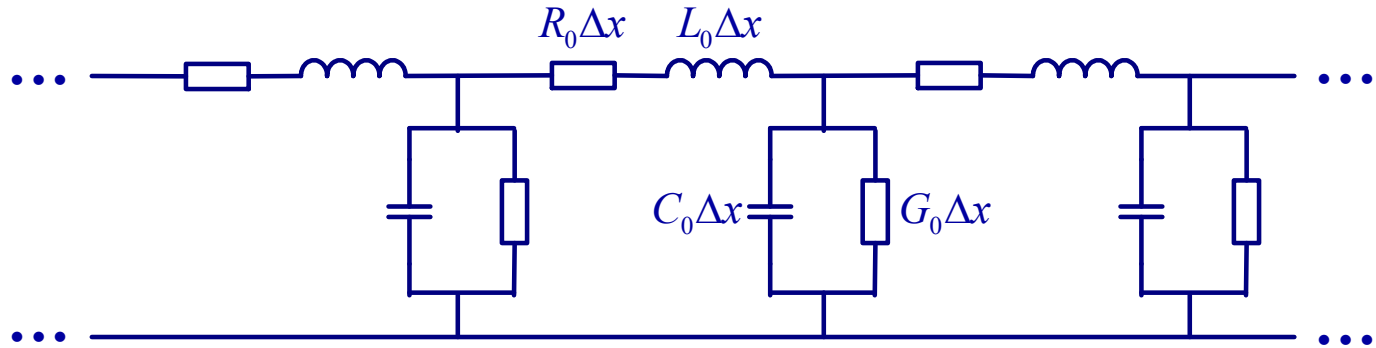
实验室电子仪器的尺寸  $l$ : 3~30cm, 允许信号波长  $\lambda=300\sim 3000\text{cm}$ , 则  $f=c/\lambda=3 \times 10^{10}/\lambda$

$\Rightarrow f$ :  $10^7\text{Hz}\sim 10^8\text{Hz}$  (10兆~100兆)

在实验室, 一般情况下50兆频率的信号, 可作集中参数电路来处理。

## 分布参数电路

在电路中电阻、电容、电感是连续分布的，即在电路的任何部分都既有电阻，又有电容，又有电感。如两根并行导线：



$\Delta x$ 分得愈小，就愈接近实际情况。

称这种连续分布的电路参数为**分布参数**，  
这样的电路为**分布参数电路**。

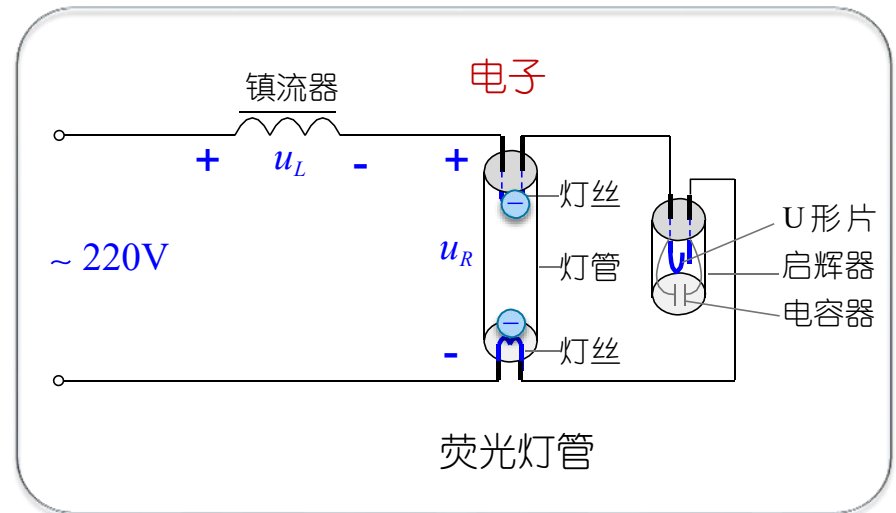
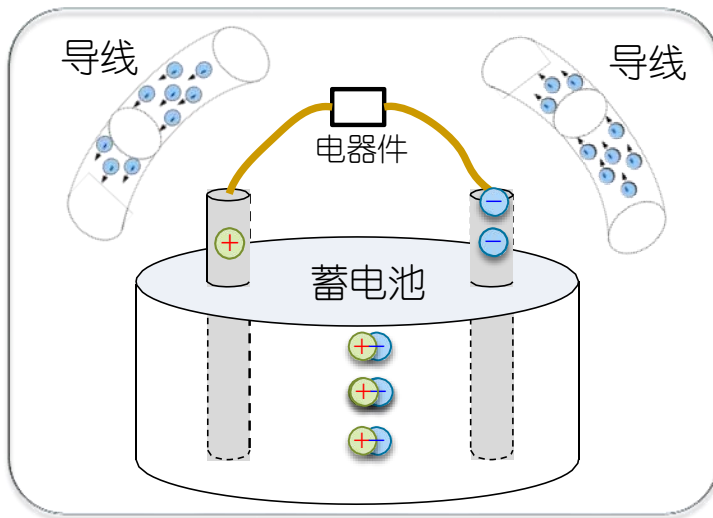
思考题：手机信号天线用集中参数还是分布参数电路的分析方法？

## 1.2 基本变量 Basic quantities

### 1. 电荷 (charge)

电荷及电荷的运动，是所有电磁现象的根源。电荷是最基本的物理量，单位为库伦 (C)。

自由电荷：{ 在导电物质中可以定向运动的自由电子或离子；  
在半导体中可以定向运动的电子与空穴；  
在真空或气体中可以迁移运动的带电粒子。



## 1.2 基本变量 Basic quantities

### 2. 电流 (*current*)

带电质点有规律的运动形成电流。

电流的大小用**电流强度**表示。

**电流强度**：单位时间内通过导体横截面的电量。

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

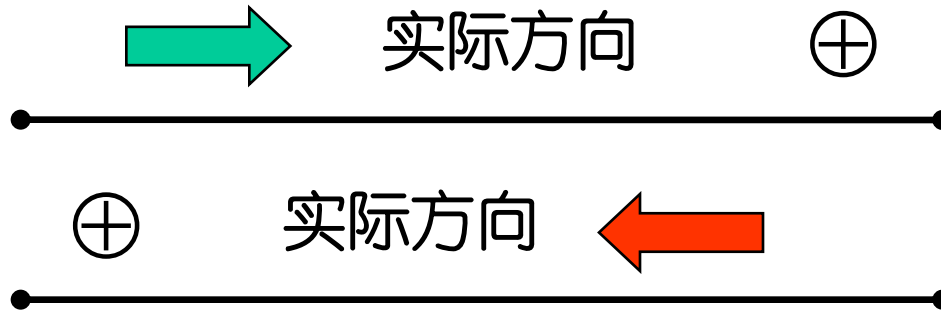
单位名称：安[培]

符号：A

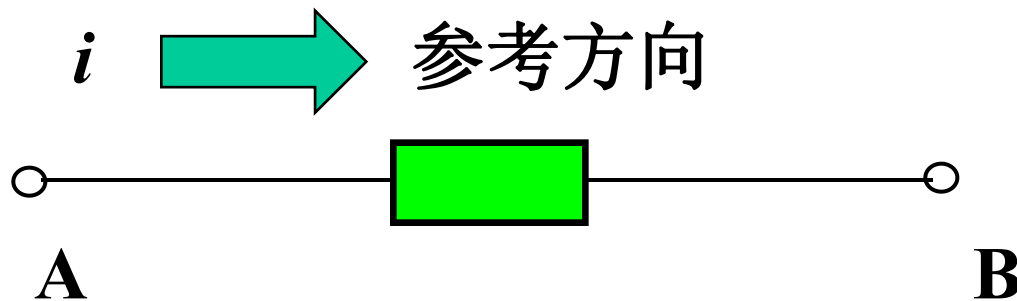
(Ampere, 安培; 1775 - 1836, France)

## 1.2 基本变量 Basic quantities

电流的实际方向: 净正电荷的流向

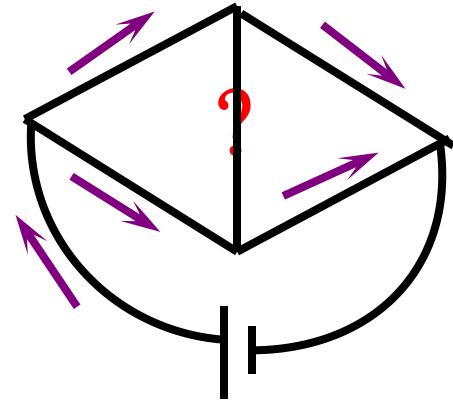


参考方向: 任意选定的一个方向即为电流的参考方向。

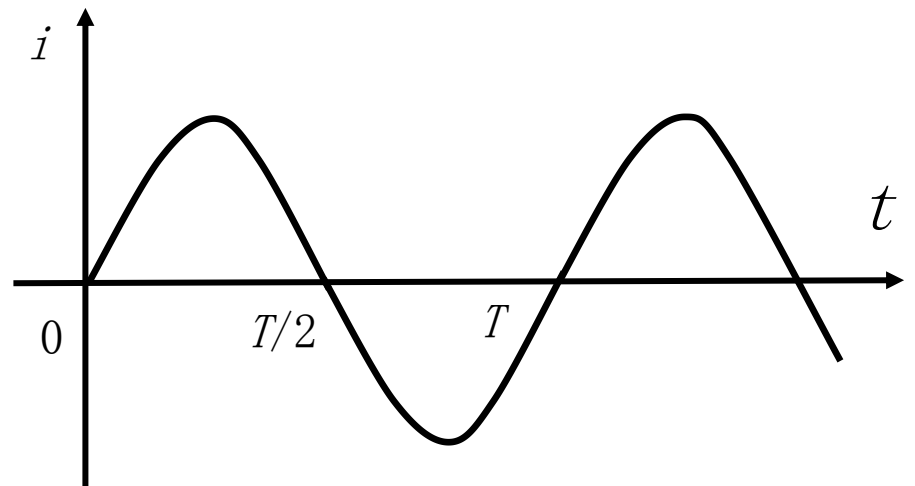
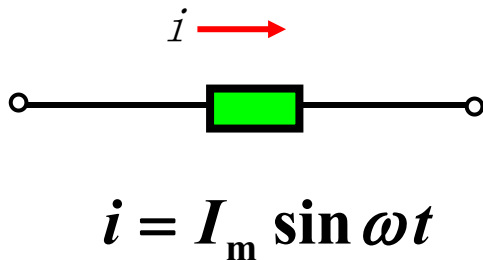


## 为什么要引入参考方向？

(a) 复杂电路的某些支路  
事先无法确定实际方向。



(b) 电流是交变的



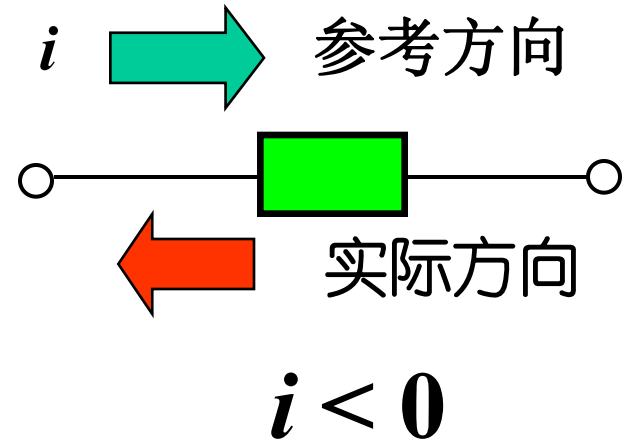
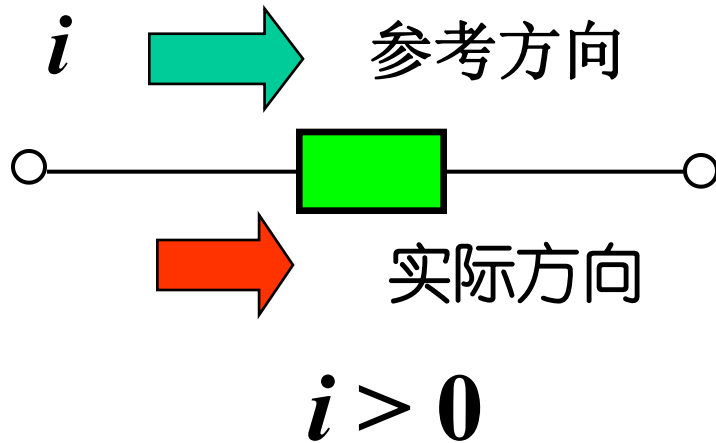
当  $0 < t < T/2$  ,  $i > 0$

电流实际方向与参考方向相同

当  $T/2 < t < T$  ,  $i < 0$

电流实际方向与参考方向相反

## 电流的参考方向与实际方向的关系：

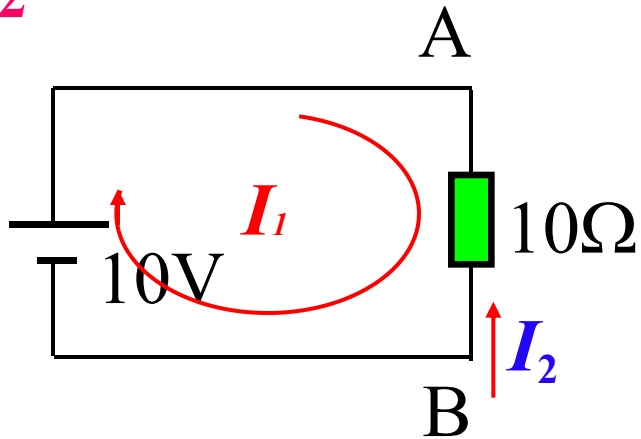


## 电流参考方向的两种表示：

- 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。



## 例2



电路中电流  $I$  的大小为1A,  
其方向为从A流向B。  
(此为电流的实际方向)

若参考方向如  $I_1$  所示, 则  $I_1=1\text{A}$

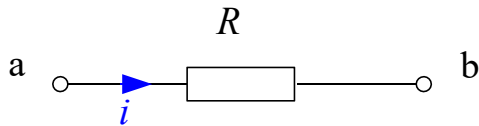
若参考方向如  $I_2$  所示, 则  $I_2=-1\text{A}$

因此, 同一支路的电流可用两种方法表示。

【例3】净正电荷流  $q(t) = 5 \sin \pi t$  mC 从 b 向 a 流动。

(1) 计算电流  $i$ 。

(2) 计算 1s 到 2s 之间流过电阻的电荷。



电流: 
$$i = -\frac{dq}{dt} = -\frac{d(5 \sin \pi t)}{dt} = -5\pi \cos \pi t \text{ mA}$$

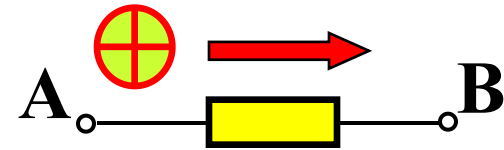
电荷: 
$$\Delta q = \int_1^2 i(t) dt = \int_1^2 -5\pi \cos \pi t dt = 0$$

## 1.2 基本变量 Basic quantities

### 3、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

$$u_{AB} = \frac{dW_{AB}}{dq}$$

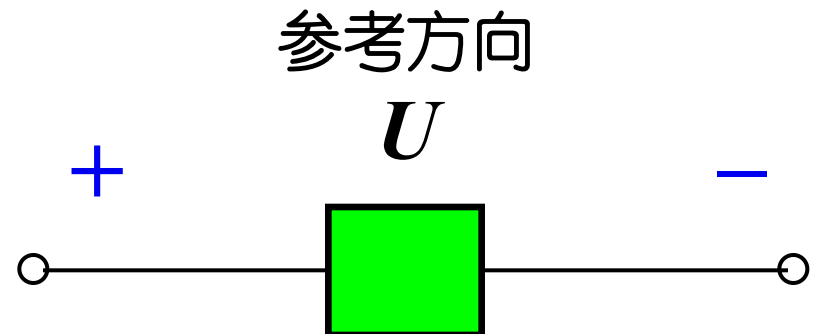
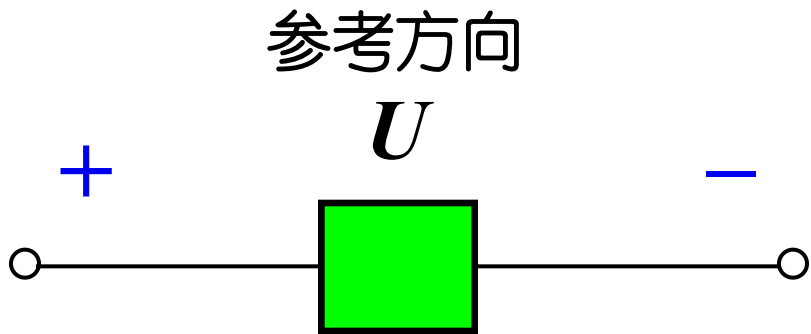
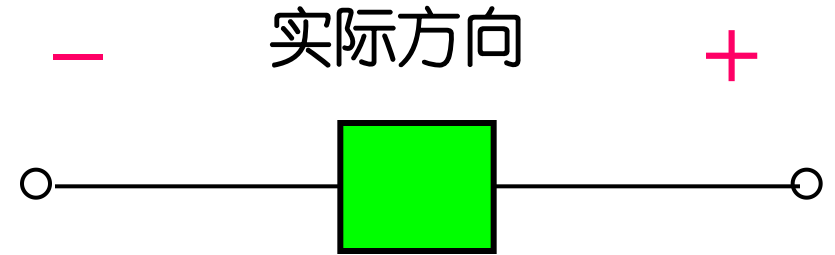
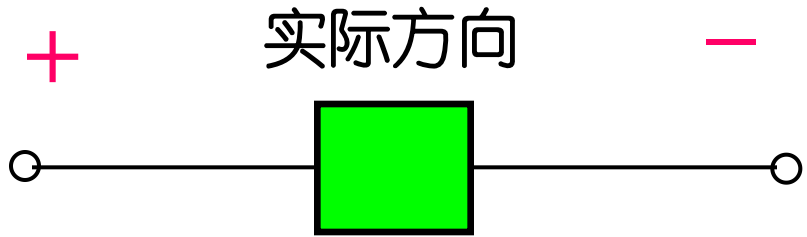


单位名称：伏[特] 符号：V

(Volt, 伏特; 1745 – 1827, Italian)

1800年，伏特发现用化学方法产生电流原理。

电压（降）的参考方向：



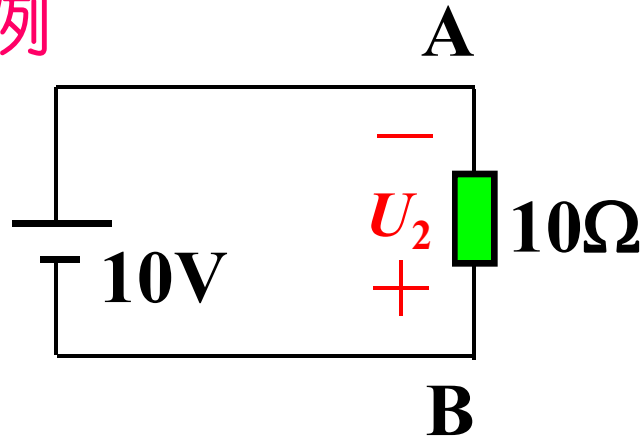
实际方向

实际方向

$$U > 0$$

$$U < 0$$

例



电路中电压  $U_{AB}=10\text{V}$ ，方向从A指向B（实际方向）。

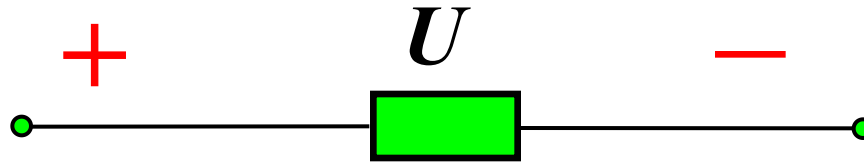
若电压参考方向如  $U_1$  所示，电压参考方向与实际方向相同，则  $U_1=10\text{V}$ 。

若电压参考方向如  $U_2$  所示，电压参考方向与实际方向相反，则  $U_2=-10\text{V}$ 。

## 电压参考方向的三种表示方式：

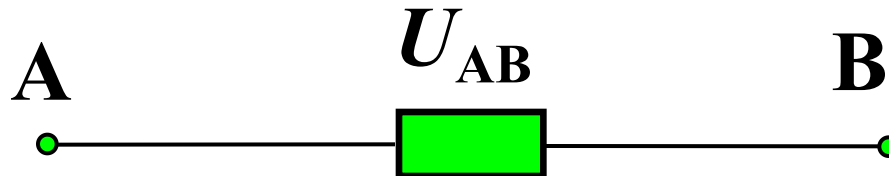
### (1) 用正负极性表示：

由正极指向负极的方向为电（降）的参考方向。



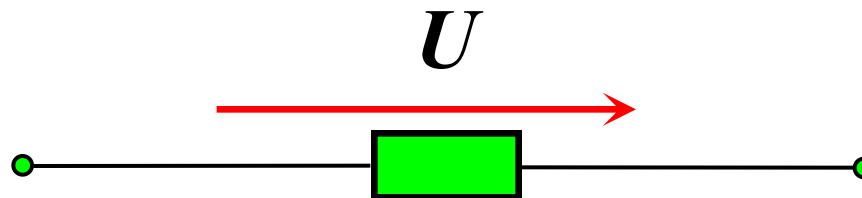
### (2) 用双下标表示：

如  $U_{AB}$ ，由A指向B的方向为电（降）的参考方向。



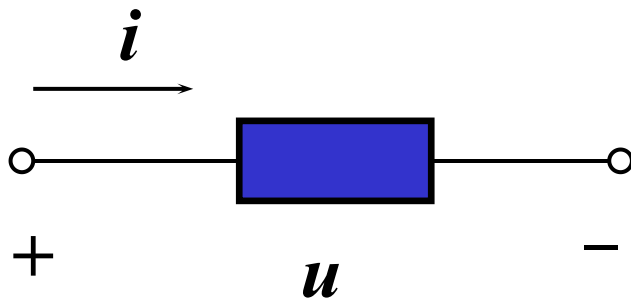
### (3) 用箭头表示：

箭头指向为电压（降）的参考方向。

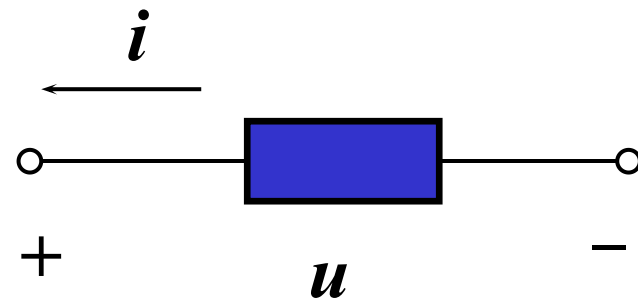


## 关于参考方向的小结：

- (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，其表达式符号也不同，但实际方向不变。
- (4) 元件或支路的 $u$ ， $i$ 通常采用相同的参考方向（以减少公式中负号）称之为**关联参考方向**。反之，称为**非关联参考方向**。



**关联参考方向**



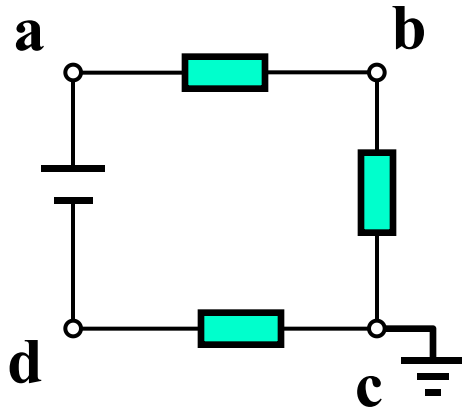
**非关联参考方向**

### 三、电位 (*potential*)

在分析电路问题时，常在电路中选一个点为参考点 (*reference point*)，把任一点到参考点的电压（降）称为该点的电位。

参考点的电位为**零**，参考点也称为零电位点。

电位用 $\varphi$ （或 $U$ ）表示，单位与电压相同，也是**V（伏）**。



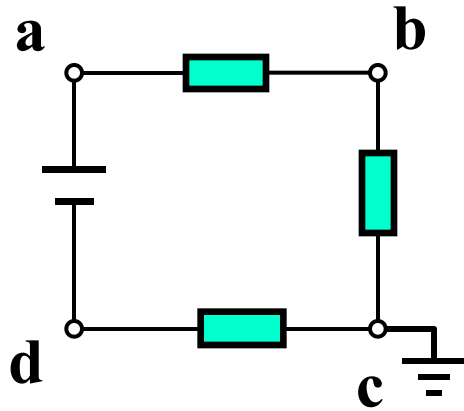
设c点为电位参考点，则  $\varphi_c = 0$

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



## 两点间电压与电位的关系：

### 前例



仍设c点为电位参考点,  $\varphi_c = 0$

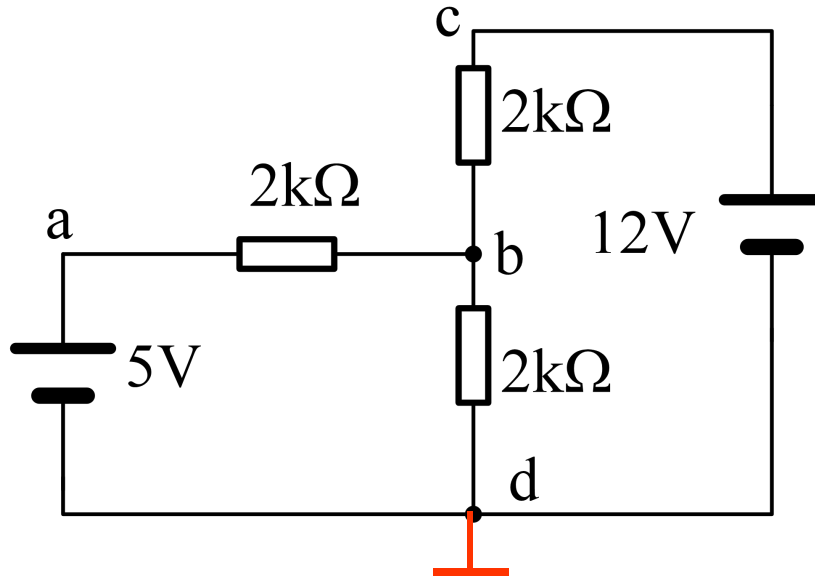
$$U_{ac} = \varphi_a, \quad U_{dc} = \varphi_d$$

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

**结论：** 电路中任意两点间的电压等于该两点间的电位差 (*potential difference*) 。

## 1.2 基本变量 Basic quantities

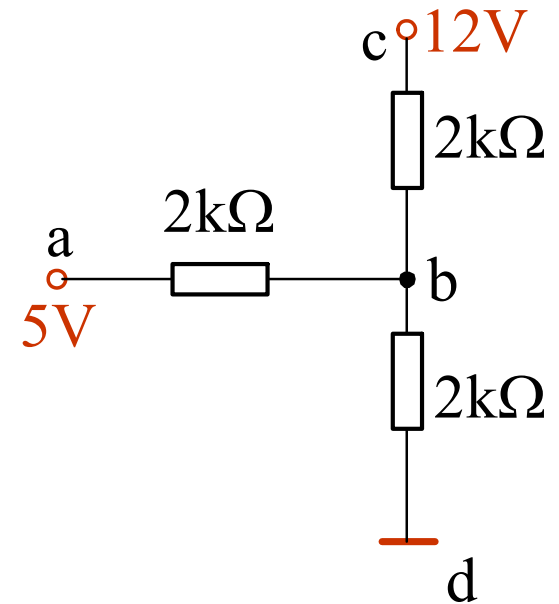
例4 求 $U_{ac}$



$$U_{ad} = 5V$$

$$U_{cd} = 12V$$

选择d点为电位参考点，电路可以画为：



$$U_a = 5V$$

$$U_c = 12V$$

$$U_{ac} = U_a - U_c$$

## 1.2 基本变量 Basic quantities

### 4、功率 (*power*)      单位时间内电场力所做的功。

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

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

功率的单位名称：瓦[特]      符号：W

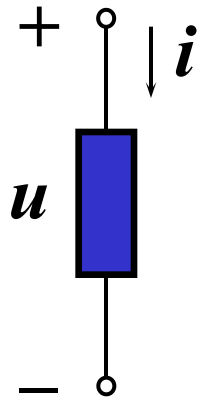
(Watt, 瓦特; 1736–1819, British, 于1776年发明实用蒸汽机)

能量的单位名称：焦[耳]      符号：J

(Joule, 焦耳; 1818–1889, British, 于1841年发现焦耳定律)

# 电压、电流采用参考方向时功率的计算和判断：

## 1. $u, i$ 取关联参考方向

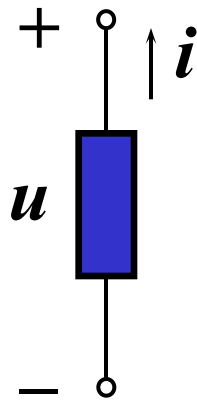


元件吸收的功率  $P_{\text{吸}} = ui$

$P > 0$  吸收正功率 (实际吸收)

$P < 0$  吸收负功率 (实际发出)

## 2. $u, i$ 取非关联参考方向



元件吸收的功率  $P_{\text{吸}} = -ui$

$P > 0$  吸收正功率 (实际吸收)

$P < 0$  吸收负功率 (实际发出)

## 1.2 基本变量 Basic quantities

### 4. 功率守恒 (conservation of power)

集中参数电路都满足功率守恒：

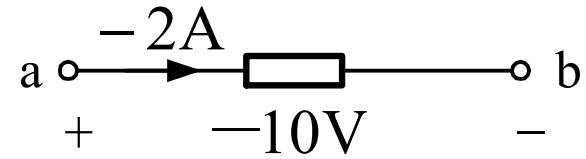
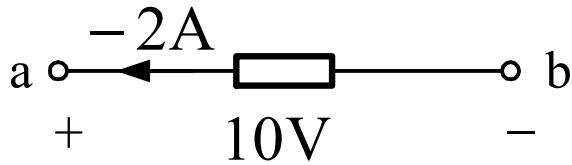
$$\sum_{k=1}^b p_k = 0$$

### 4. 电能 Energy

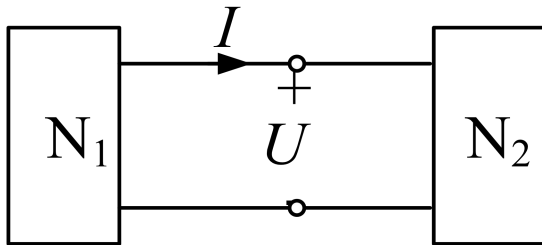
$$\Delta w(t) = \int_{t_0}^t p(t) dt \quad w(t) = \int_{-\infty}^t p(t) dt$$

## 讨论——目标1：电功率

例5. The power of each circuit ?



例6. The power of each network ?



$$I = -2A$$

$$U = 10V$$

# 1.3 电路元件 Circuit Elements

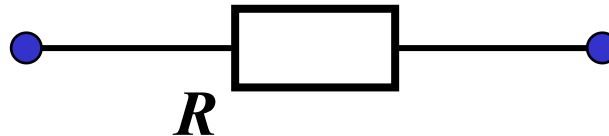
**无源元件 (Passive elements)** : 不能向电路提供电能的元件, 即在任何工作状态下, 一个变化周期内均有

$$w = \int_{t_1}^{t_1+T} p(t) dt \geq 0$$

**有源元件 (Active elements)** : 可以向电路提供电能的元件, 即在任意变化周期内有:

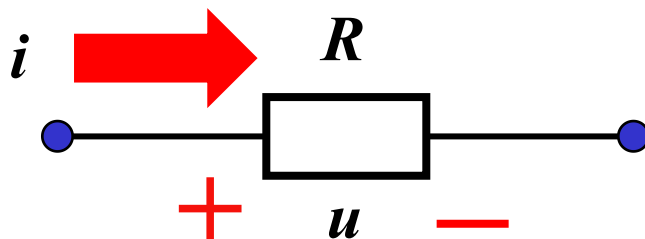
$$w = \int_{t_1}^{t_1+T} p(t) dt \leq 0$$

## 1、电阻(resistor)



欧姆定律 (Ohm's Law)

(1) 电压电流采用关联参考方向



$$u = R i$$

$R$  电阻 (*resistance*) 单位:  $\Omega$  (欧)

令  $G = 1/R$        $G$  电导 (*conductance*)

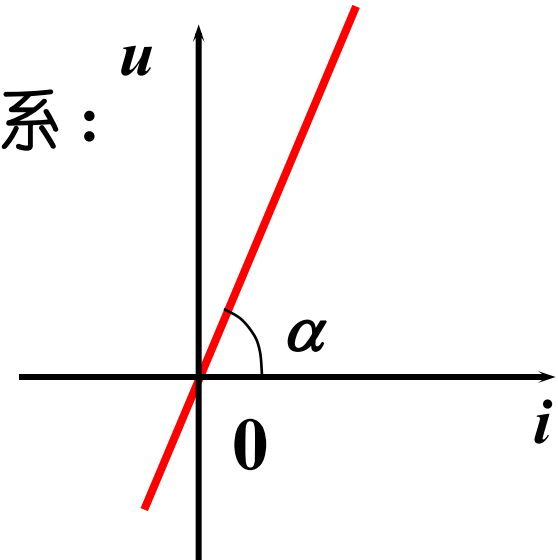
单位: S (西)    (Siemens, 西门子)

欧姆定律(关联参考方向下):  $i = G u$

关联参考方向下线性电阻器的  $u$ - $i$  关系:

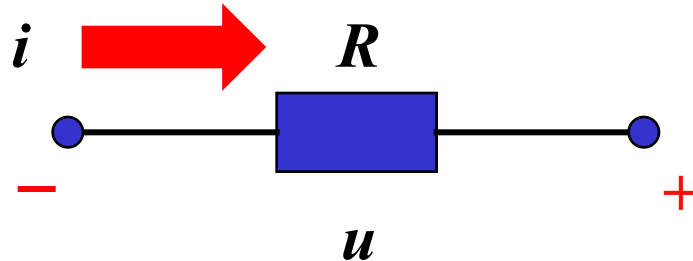
$$u = R i$$

$$R = \tan \alpha$$





## (2) 电压电流非关联参考方向



欧姆定律:

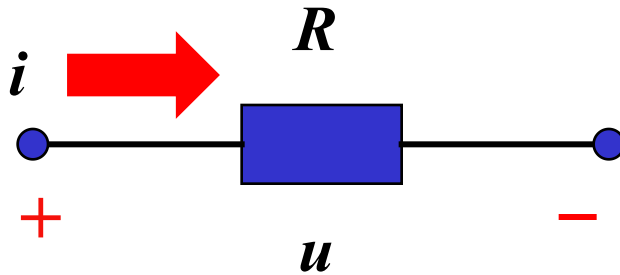
$$u = -Ri \quad \text{或} \quad i = -Gu$$



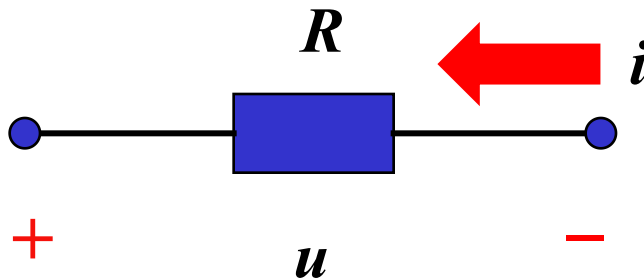
公式的列写必须根据参考方向!!

## 四、电阻消耗的功率

功率：



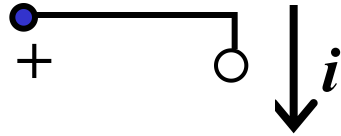
$$p_{\text{吸}} = ui = i^2 R = u^2 / R$$



$$\begin{aligned} p_{\text{吸}} &= u(-i) = (-Ri)(-i) \\ &= i^2 R = u^2 / R \end{aligned}$$

无论参考方向如何选取，电阻始终消耗电功率。

## 开路与短路

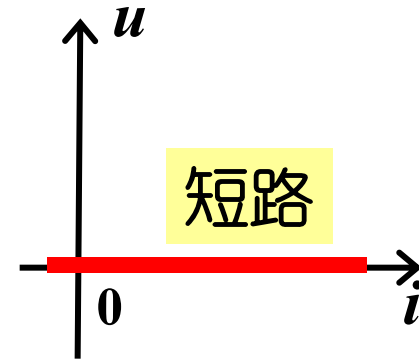


$u$



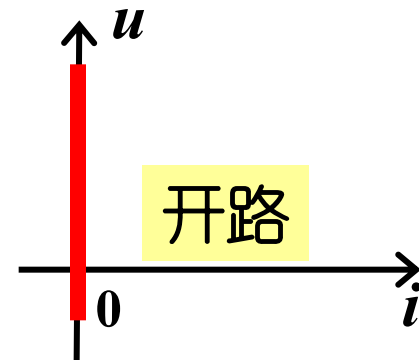
当  $R = 0$  ( $G = \infty$ ), 视其为短路。

$u = 0$ ,  $i$  由外电路决定。



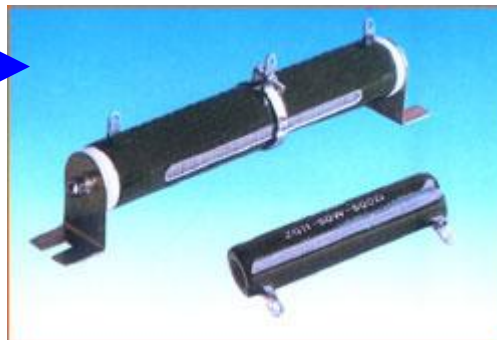
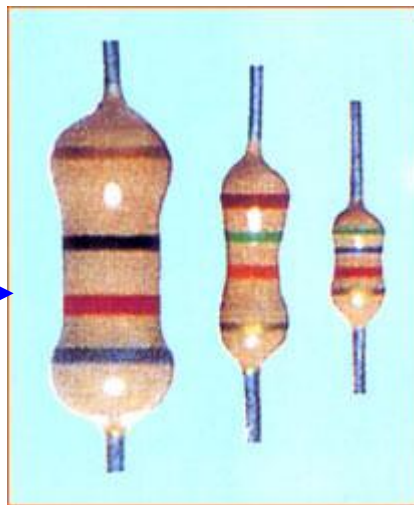
当  $R = \infty$  ( $G = 0$ ), 视其为开路。

$i = 0$ ,  $u$  由外电路决定。

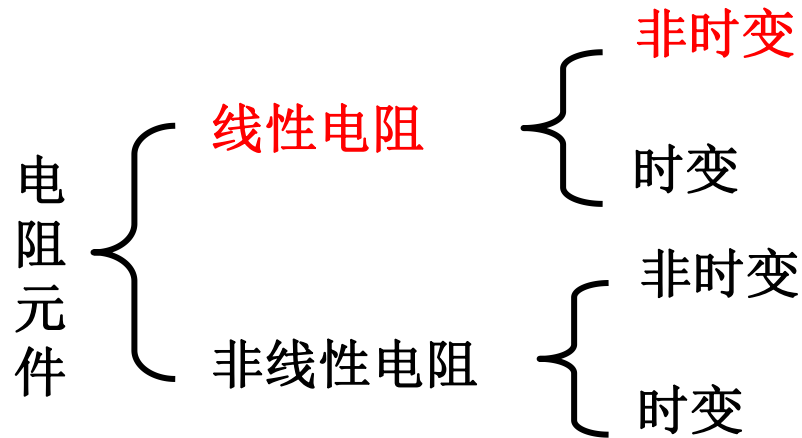


# 电阻器

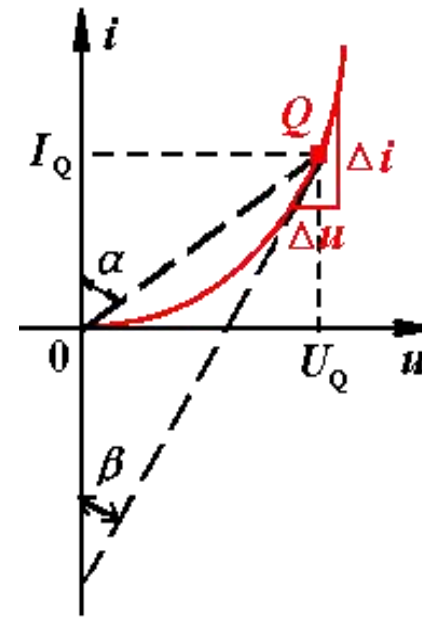
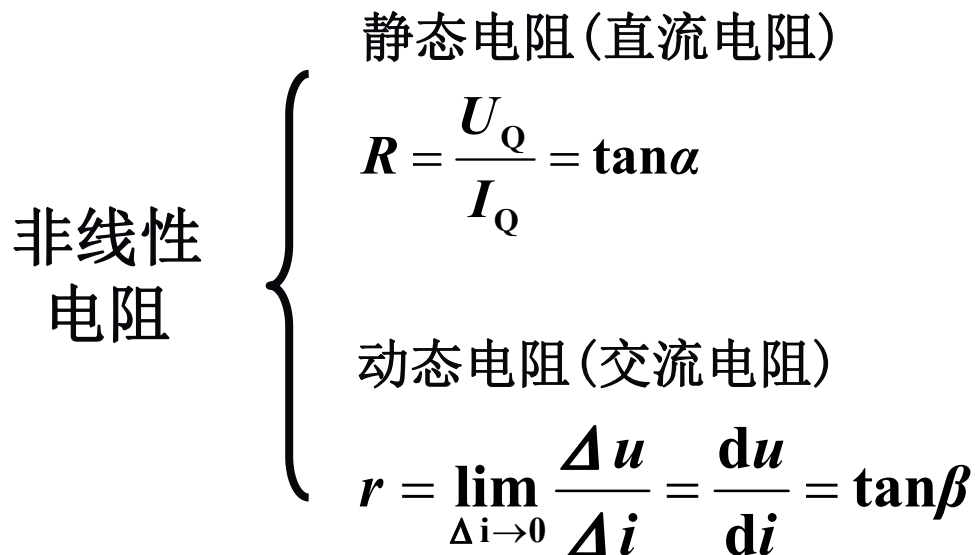
贴片电阻	体积小 重量轻 可靠性高
碳膜电阻	阻值范围宽 价格低廉
金属膜电阻	稳定性高 精度高
线绕电阻	功率大



# 电阻元件的分类



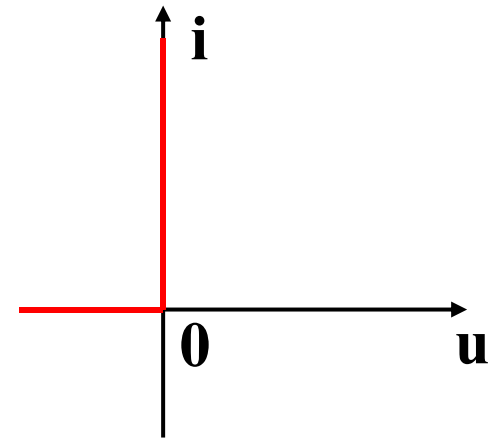
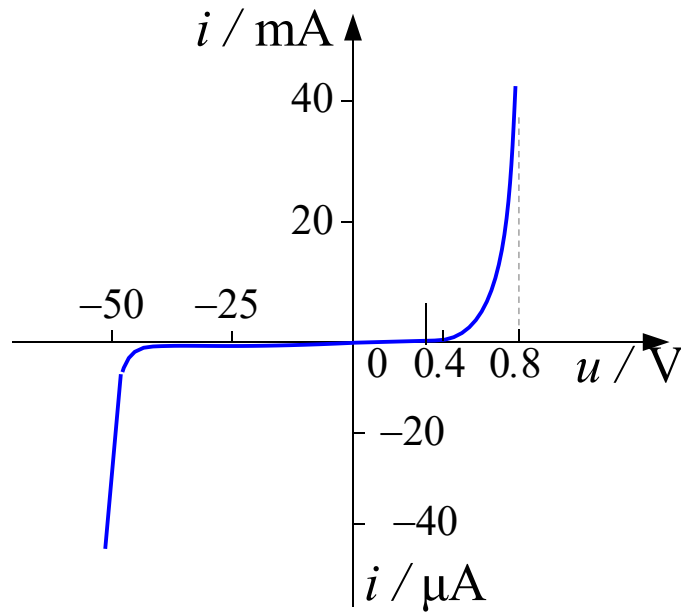
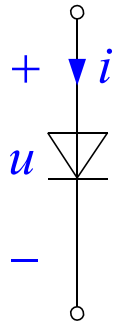
## 非线性电阻



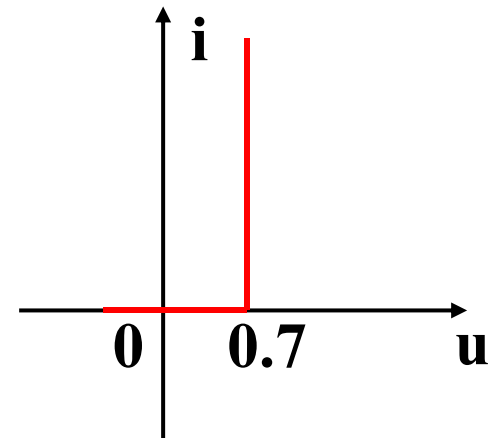
静态电阻与动态电阻

# 半导体二极管

典型非线性非时变电阻  
二极管



理想二极管特性



二极管近似u-i特性

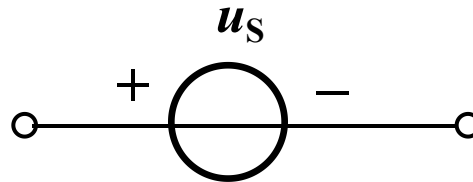
# 1.3 电路元件 Circuit Elements

## 2、电源

### 一、独立电源 (*independent source*)

#### 1. 理想电压源 (*ideal voltage source*)

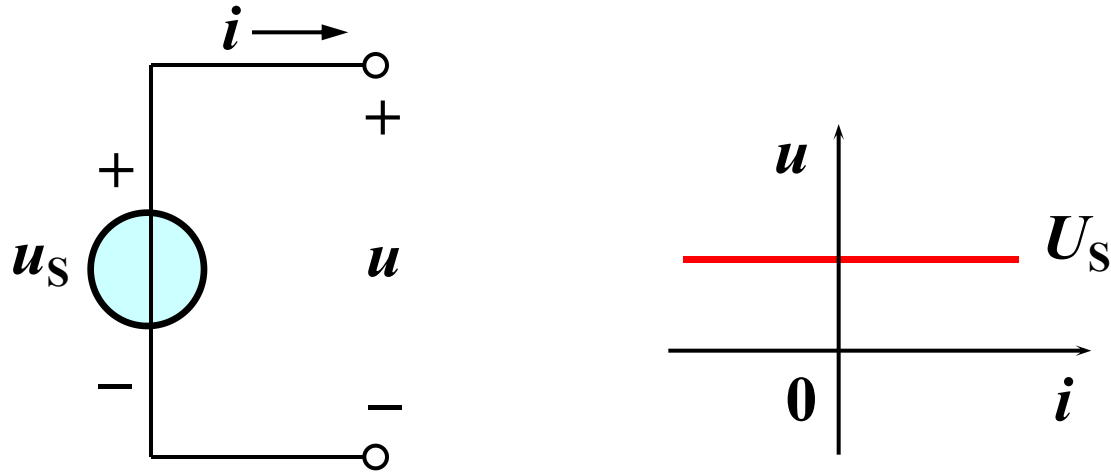
电路符号



#### (1) 特点

- (a) 电源两端电压由电源本身决定，与外电路无关；
- (b) 通过它的电流由外电路决定。

## (2) 伏安特性



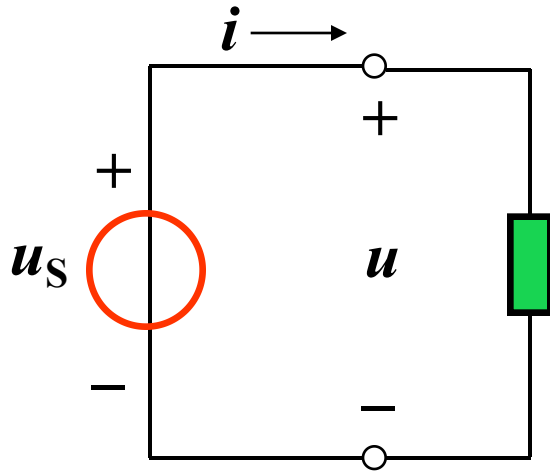
(a) 若  $u_S = U_S$ ，即直流电源，则其伏安特性为平行于电流轴的直线，反映电压与电源中的电流无关。

(b) 若  $u_S$  为变化的电源，则某一时刻的伏安关系特性为平行于电流轴的直线。

(c) 电压为零的电压源，伏安曲线与  $i$  轴重合，相当于短路状态。



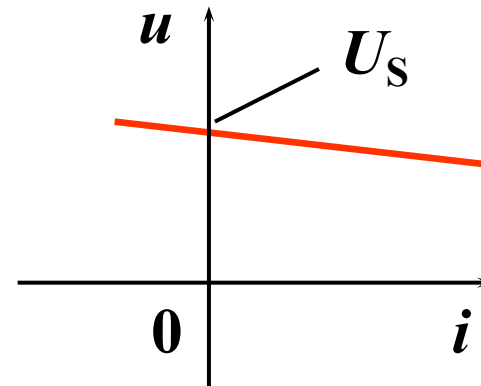
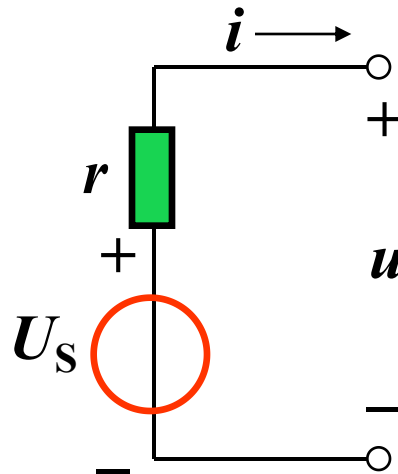
### (3) 理想电压源的开路与短路



(a) 开路:  $R \rightarrow \infty$ ,  $i=0$ ,  $u=u_S$

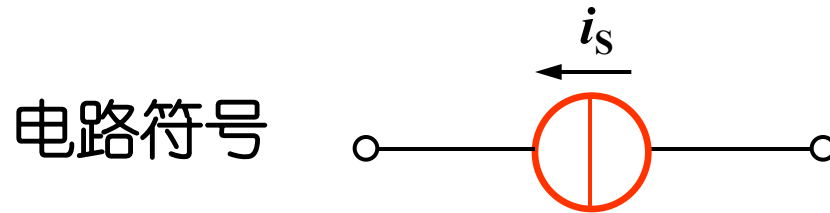
(b) 理想电压源不允许短路（此时电路模型（*circuit model*）不再存在）。

实际电压源  
(*physical source*)



$$u = U_S - r i$$

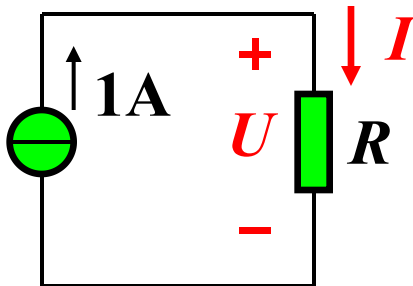
## 2. 理想电流源 (*ideal current source*)



### (1) 特点

- (a) 电源电流由电源本身决定，与外电路无关；
- (b) 电源两端电压由外电路决定。

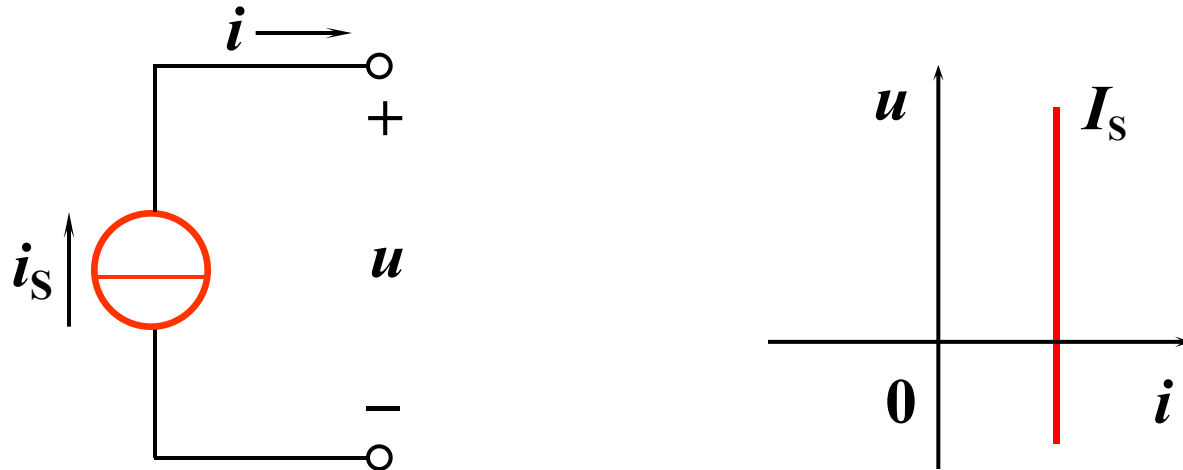
例



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

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

## (2) 伏安特性

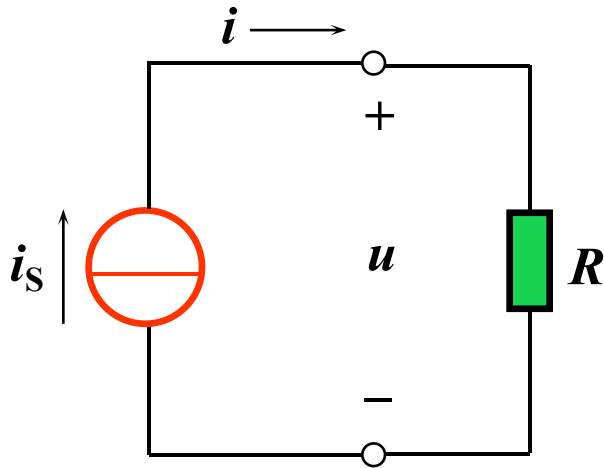


(a) 若  $i_s = I_s$ ，即直流电源，则其伏安特性为平行于电压轴的直线，反映电流与端电压无关。

(b) 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。

(c) 电流为零的电流源，伏安特性曲线与  $u$  轴重合，相当于开路状态。

### (3) 理想电流源的短路与开路

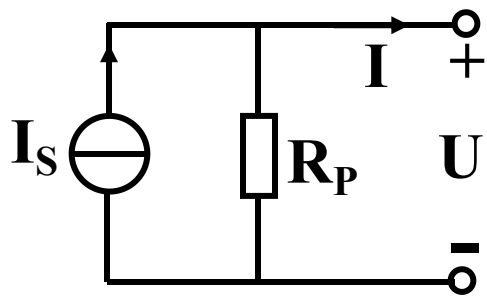


(1) 短路:  $R=0$ ,  $i=i_s$ ,  $u=0$ ,  
电流源被短路。

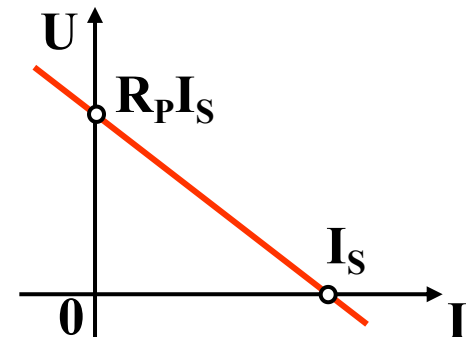
(2) 理想电流源不允许开路 (此时  
电路模型不再存在)。

### (4) 实际电流源的产生

可由稳流电子设备产生, 有些电子器件输出具备电流源特性, 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池被激发产生一定值的电流等。



$$U = R_p I_s - R_p I$$



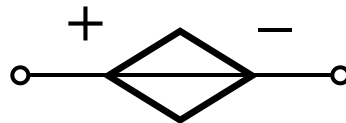
## 二、受控电源（非独立源）

*(controlled source or dependent source)*

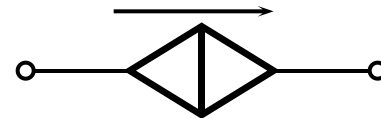
### 1. 定义

电压源电压或电流源电流不是给定的时间函数，而是受电路中某个支路（或元件）的电压（或电流）的控制。

电路符号



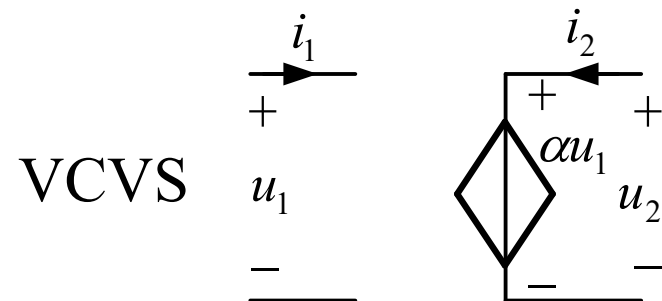
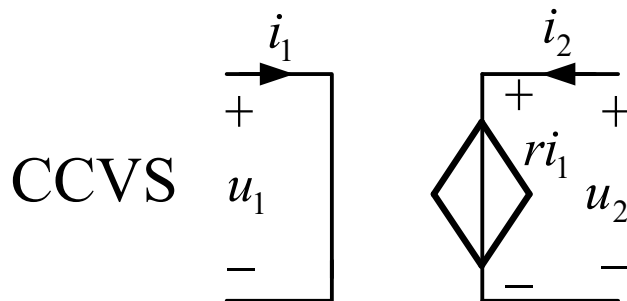
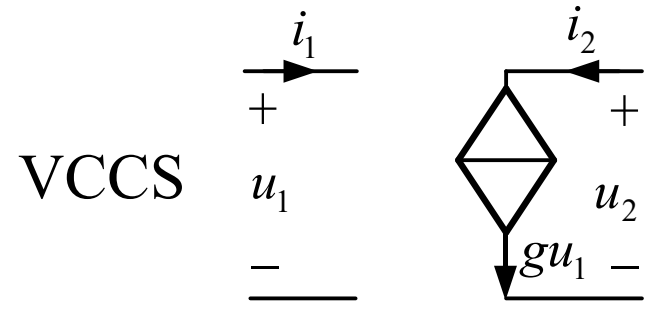
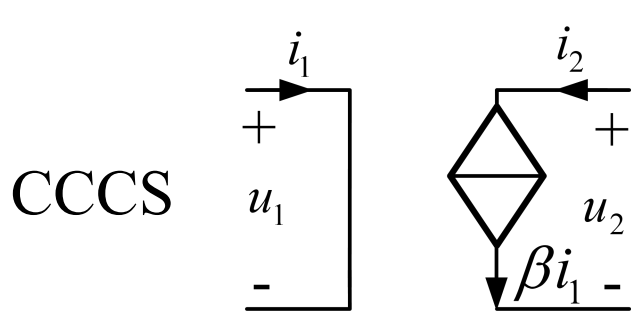
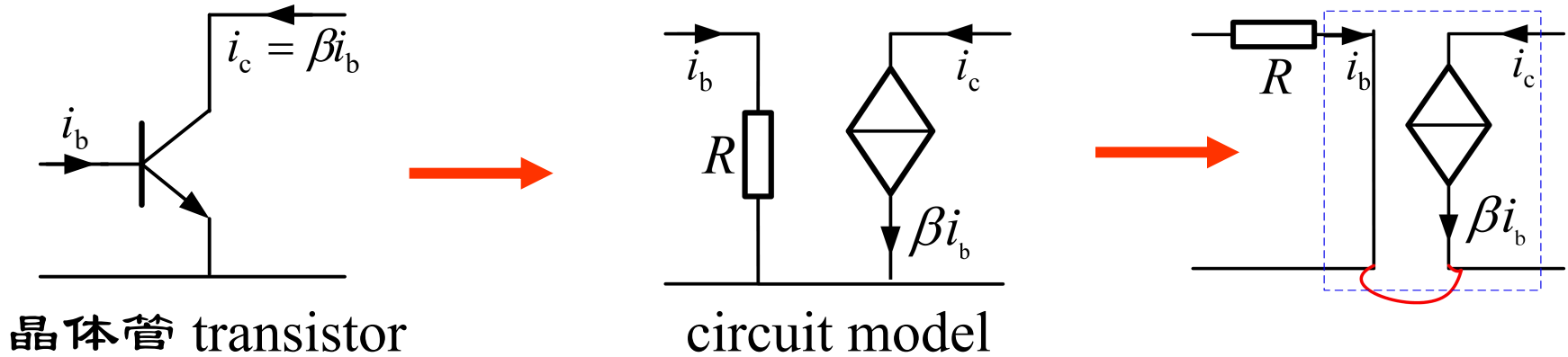
受控电压源



受控电流源

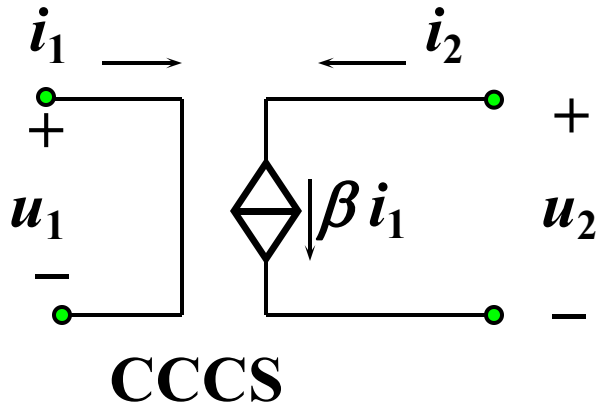
# 1.3 电路元件 Circuit Elements

## 2. 受控电源 Dependent Source (active elements)



## 2. 分类

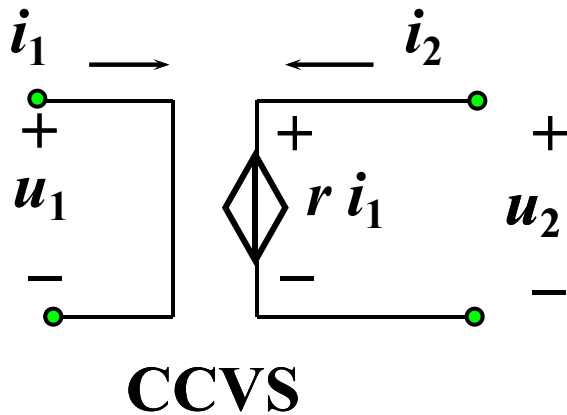
### (1) 电流控制的电流源 (Current Controlled Current Source)



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

$\beta$ : 电流放大倍数

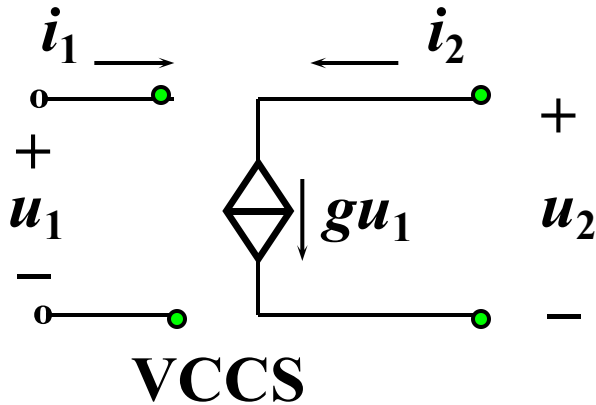
### (2) 电流控制的电压源 (Current Controlled Voltage Source)



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

$r$ : 转移电阻

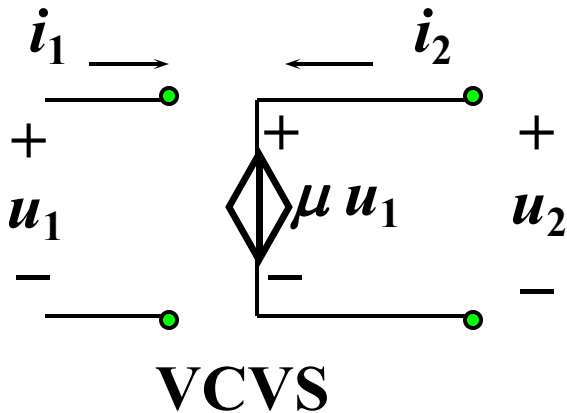
### (3) 电压控制的电流源 (Voltage Controlled Current Source)



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

$g$ : 转移电导

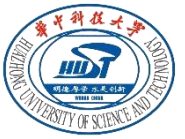
### (4) 电压控制的电压源 (Voltage Controlled Voltage Source)



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

$\mu$ : 电压放大倍数





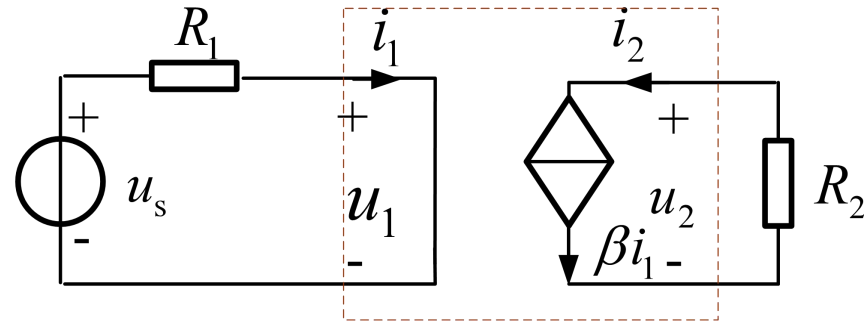
### 3. 受控源与独立源的比较

(1) 独立源电压（或电流）由电源本身决定，与电路中其他电压、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 (*excitation*)”，在电路中产生电压、电流，而受控源只是反映电压、电流之间的控制关系，在电路中不能作为“激励”。

## 讨论 —— 目标2：元件特性

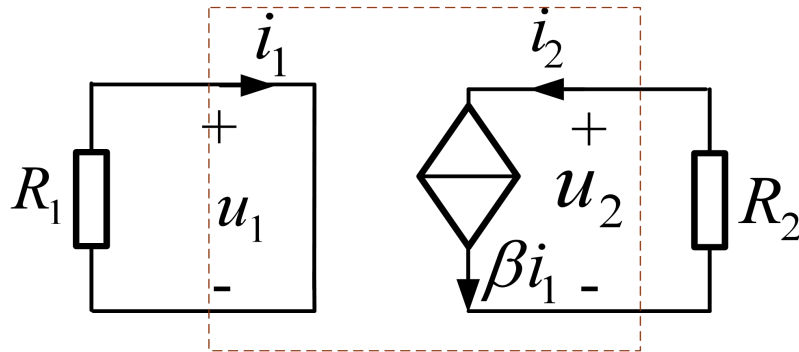
例7. 计算线性受控源的功率。



$$i_1 = \frac{u_s}{R_1}$$

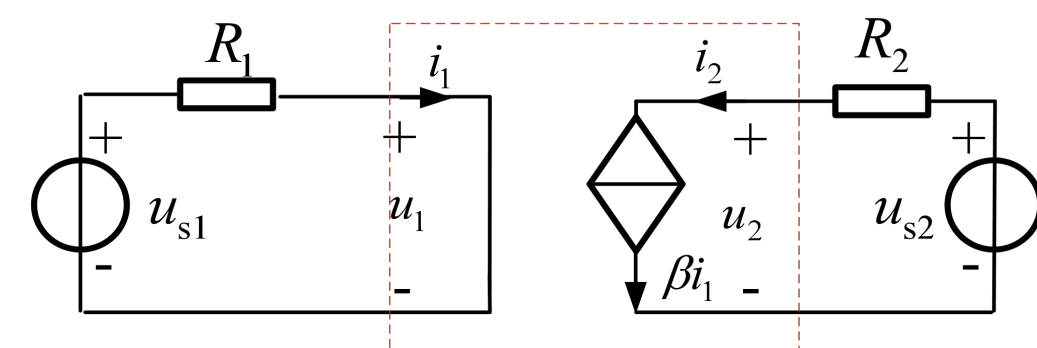
$$\begin{aligned} p &= u_2 i_2 = (-\beta i_1 R_2) (\beta i_1) \\ &= -R_2 \beta^2 \frac{u_s^2}{R_1^2} < 0 \end{aligned}$$

提供功率



$$p = u_2 i_2 = -R_2 \beta i_1 i_2 = 0$$

功率为零



$$i_1 = \frac{u_{s1}}{R_1}$$

$$u_2 = u_{s2} - R_2 \beta i_1$$

$$p = u_2 i_2 = (u_{s2} - R_2 \beta \frac{u_{s1}}{R_1}) \beta \frac{u_{s1}}{R_1}$$

也可吸收功率

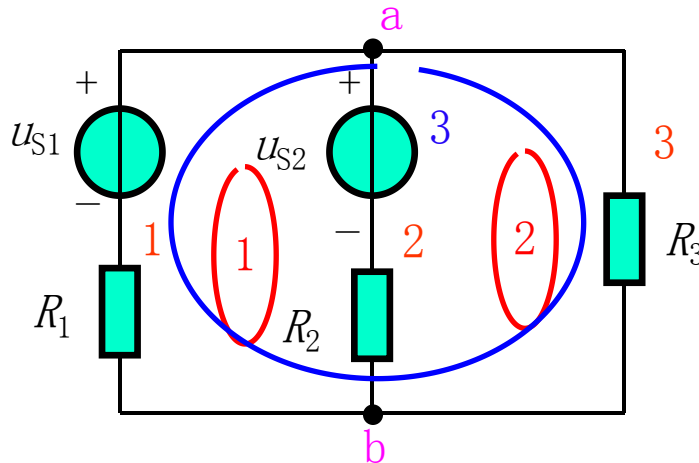
# 1.4 基尔霍夫定律 Kirchhoff's Laws

(Kirchhoff, 基尔霍夫; 1824 -1887, Germany)



## 一、几个名词

1. 支路 (branch): 电路中通过同一电流的每个分支。



$$b=3$$

$$n=2$$

$$l=3$$

$$m=2$$

2. 节点 (node): 三条或三条以上支路的连接点称为节点。

3. 回路 (loop): 由支路组成的闭合路径。

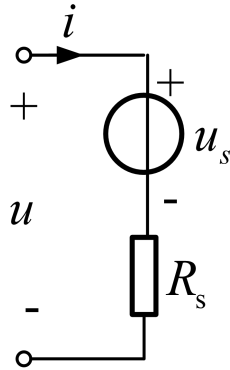
4. 网孔 (mesh): 对平面电路, 包围的平面内没有支路的回路即为网孔。网孔是回路, 但回路不一定是网孔。

5. 平面电路: 能够画在平面上, 没有支路在空间交叉的电路。

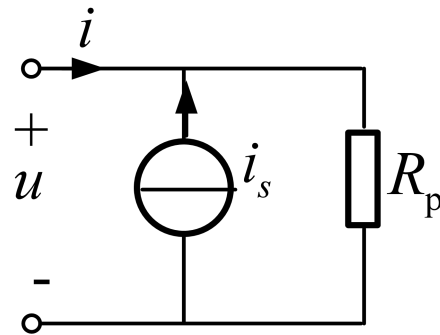
$$\text{平面电路网孔个数} = \text{支路数} - \text{节点数} + 1 \quad (m = b - n + 1)$$

# §1.2 基尔霍夫定律

注意1：两条特殊的支路：

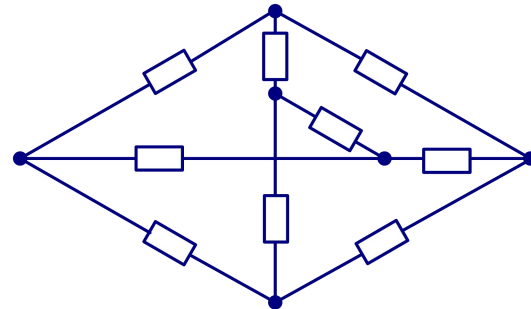
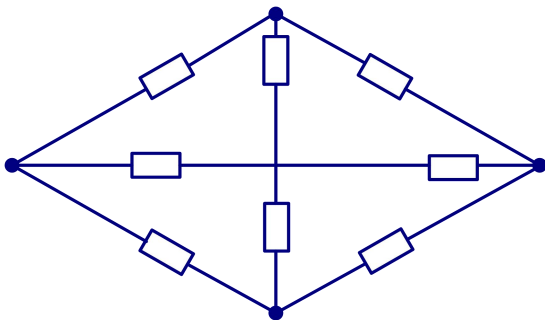


戴维南支路

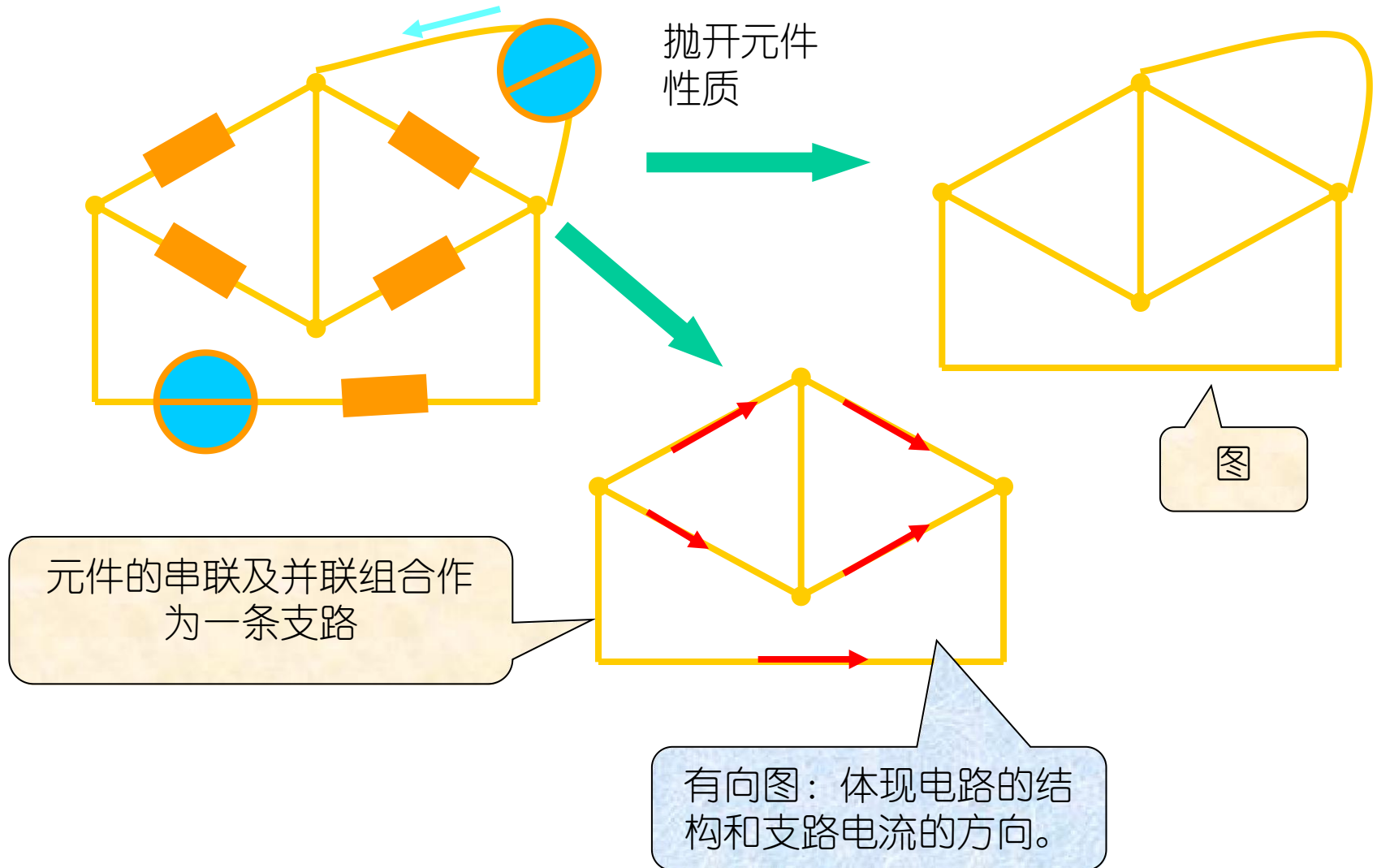


诺顿支路

注意2：网孔的概念仅适用于平面电路。平面电路是指支路间没有交叉点的电路。左图为平面电路，右图为非平面电路。



有向图：抛开元件性质，将节点用点表示，支路用线段表示，支路电流方向用箭头表示的图

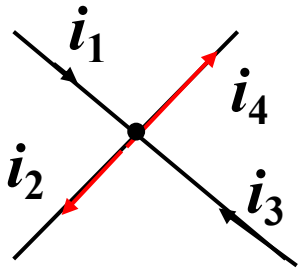


## 二、基尔霍夫电流定律 (KCL)

在任何集中参数 (*lumped parameter*) 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

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

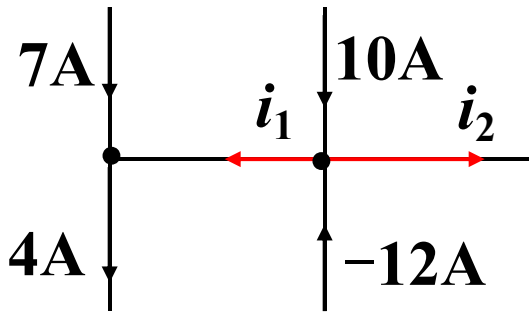
例



令电流流出为 “+”

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

$$i_1 + i_3 = i_2 + i_4$$



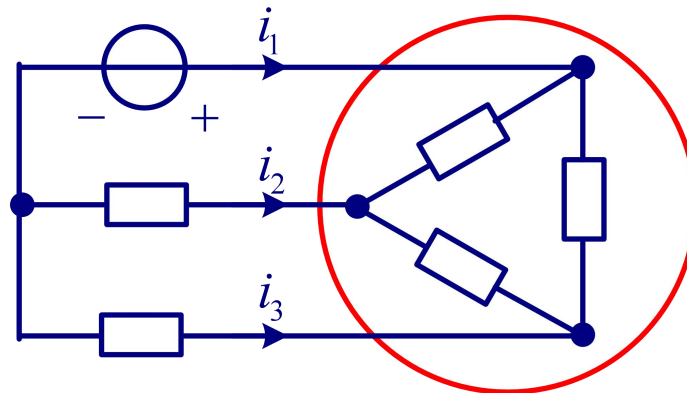
$$4 - 7 - i_1 = 0 \rightarrow i_1 = -3\text{A}$$

$$i_1 + i_2 - 10 - (-12) = 0 \rightarrow i_2 = 1\text{A}$$

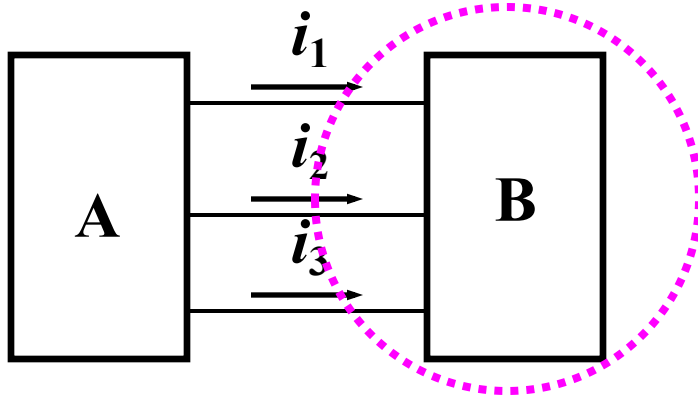
独立KCL方程数 =  $n - 1$

- **KCL**的物理实质是电流连续性原理在集中参数电路中的表现。所谓电流连续性：在任何一个无限小的时间间隔里，流入节点和流出节点的电流必然是相等的，或在节点上不可能有电荷的积累，即每个节点上电荷守恒。
- **KCL**的重要性和普遍性还体现在该定律与电路中元件的性质无关，即不管电路中的元件是R、L、C、M、受控源、电源，也不管这些元件是线性、时变、定常、…
- KCL也适用于广义节点（super node），即适合于一个闭合面。右图所示电路，根据KCL设流入节点的电流为负，则：

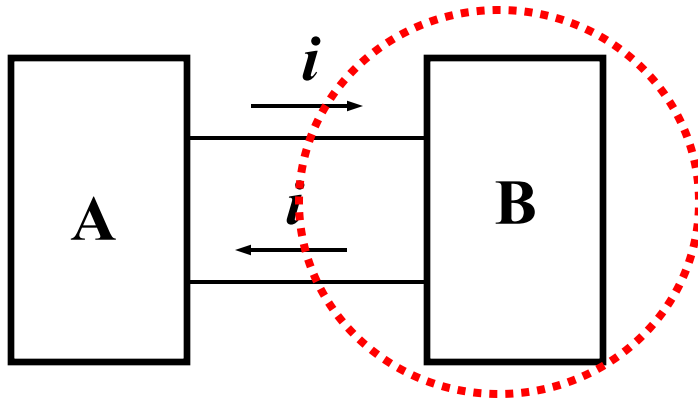
$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$



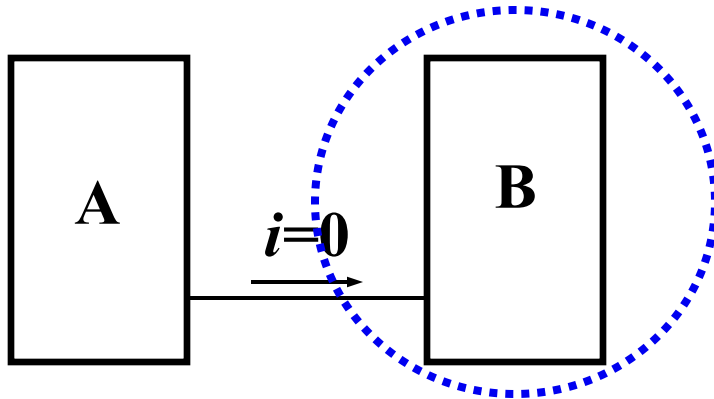
## KCL的推广



$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$



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  $i=0$ 。

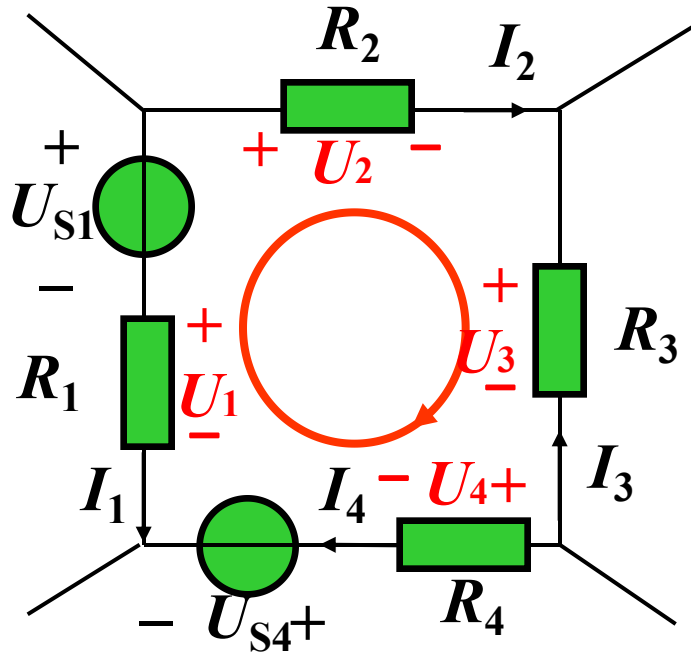


### 三、基尔霍夫电压定律 (KVL)

在任何集中参数 (*lumped parameter*) 电路中, 在任一时刻, 沿任一闭合路径 (按固定绕向), 各支路电压的代数和为零。  
即

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

例 选定一个绕行方向: 顺时针或逆时针。



取顺时针方向绕行:  $\sum U = 0$

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

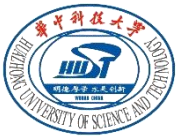
$$-U_1 + U_2 + U_3 + U_4 = U_{S1} - U_{S4}$$

即  $\sum U_R = \sum U_S$   
电阻压降      电源压升

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

独立KVL方程数 = 网孔数 =  $b - n + 1$

- **KVL**实质上是能量守恒定律在集中参数电路中的反映。单位正电荷在电场作用下，由任一点出发，沿任意路经绕行一周又回到原出发点，它获得的能量（即电位升）必然等于在同一过程中所失去的能量（即电位降）。
- **KVL**的重要性和普遍性也体现在该定律与回路中元件的性质无关。

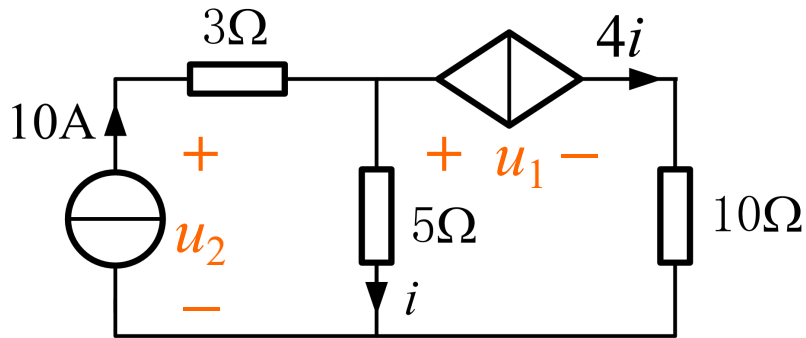


## KCL, KVL小结:

- (1) KCL是对连到节点的支路电流的线性约束, KVL是对回路中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)。
- (4) KCL、KVL只适用于集中参数的电路。
- (5) 有 $n$ 个结点、 $b$ 条支路的电路, 可列写 $n-1$ 个独立的KCL方程,  $b-n+1$ 个独立的KVL方程。

## 讨论——目标3：基尔霍夫定律

例8：计算受控电源、独立电流源的功率。



$$\text{KCL: } 10 = 4i + i \Rightarrow i = 2\text{A}$$

$$\text{KVL: } u_1 = 5i - 10 \times 4i = -70\text{V}$$

$$p_1 = 4i \times u_1 = -560\text{W}$$

发出560W

$$\text{KVL: } u_2 = 3 \times 10 + 5i = 40\text{V}$$

$$p_2 = -10 \times u_2 = -400\text{W}$$

发出400W

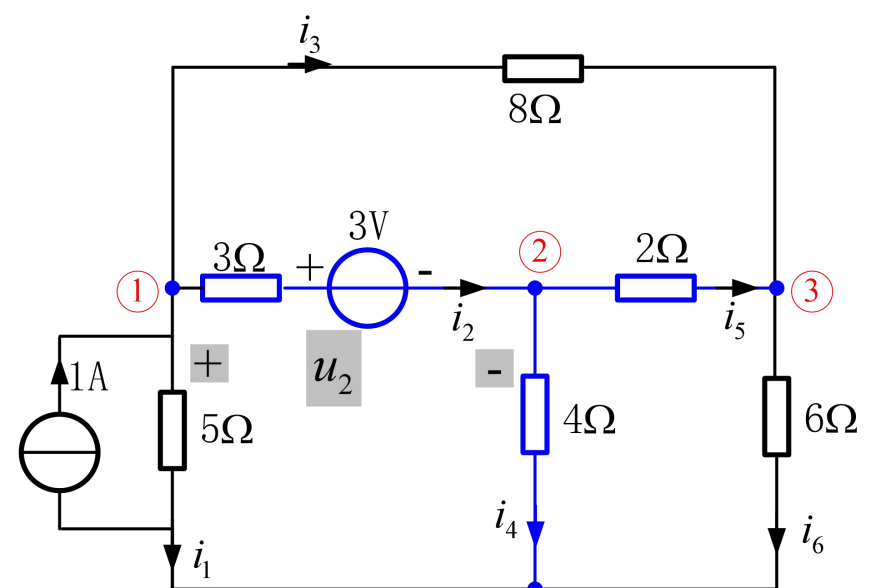
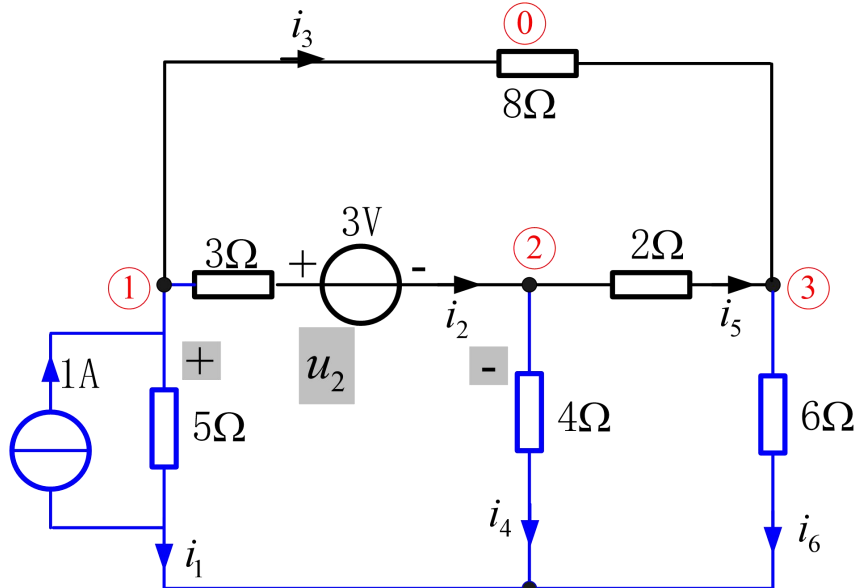
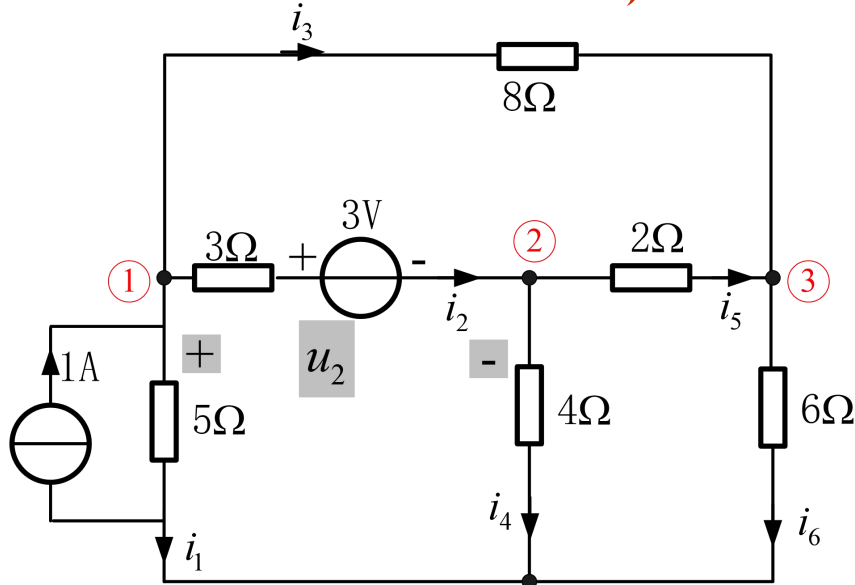
# 讨论——目标3：基尔霍夫定律

例9：列出全部KCL，KVL方程。 数目？

如何保证独立性？  
列写方法？

KCL:  $n-1$ 个，独立结点

KVL: 基本回路、网孔（平面电路）



# 讨论——目标3：基尔霍夫定律

例10: 计算各独立电源的功率。

$$I_1 = 1 - 2 + 2 = 1\text{A}$$

$$P_1 = -2\text{W}(\text{suppling})$$

$$I_2 = 2 + 2 - 1 = 3\text{A}$$

$$P_2 = 6\text{W}(\text{absorbing})$$

$$I_6 = 0, \quad I_7 = -4\text{A}, \quad I_8 = 4\text{A}$$

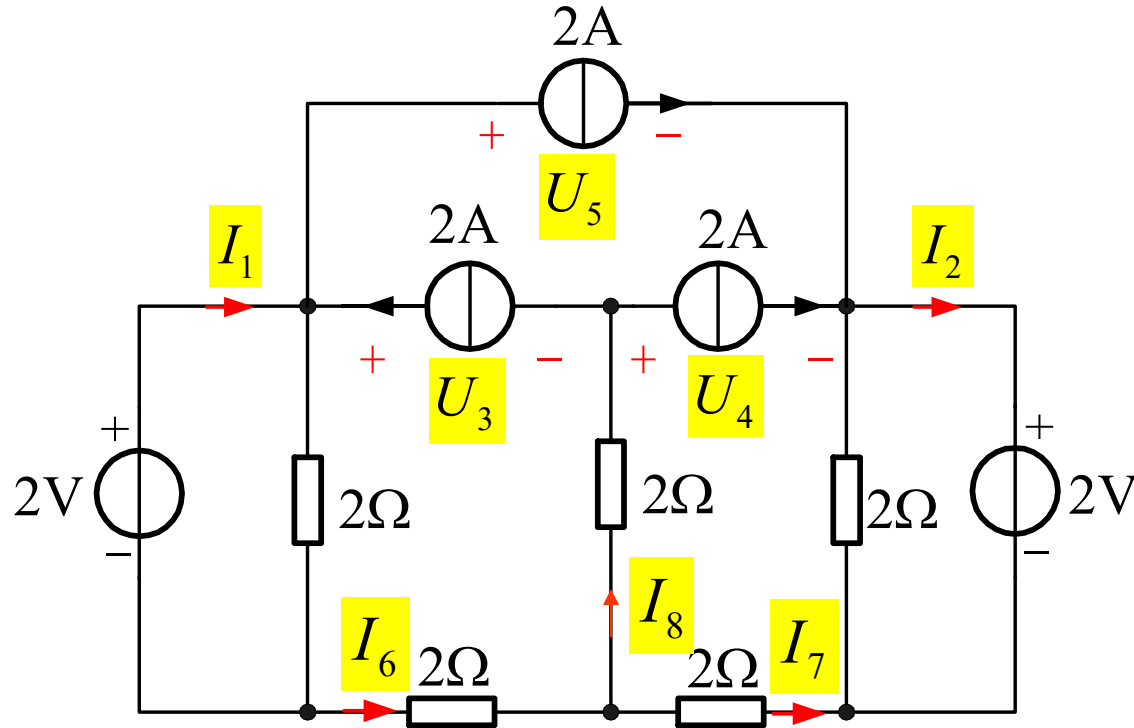
$$U_3 = 2 \times 1 + 4 \times 2 = 10\text{V}$$

$$P_3 = -20\text{W}(\text{suppling})$$

$$U_4 = -2 \times 4 - 2 \times 4 - 2 \times 1 = -18\text{V}$$

$$P_4 = -36\text{W}(\text{suppling})$$

$$U_5 = U_3 + U_4 = -8\text{V}, \quad P_5 = -16\text{W}(\text{suppling})$$



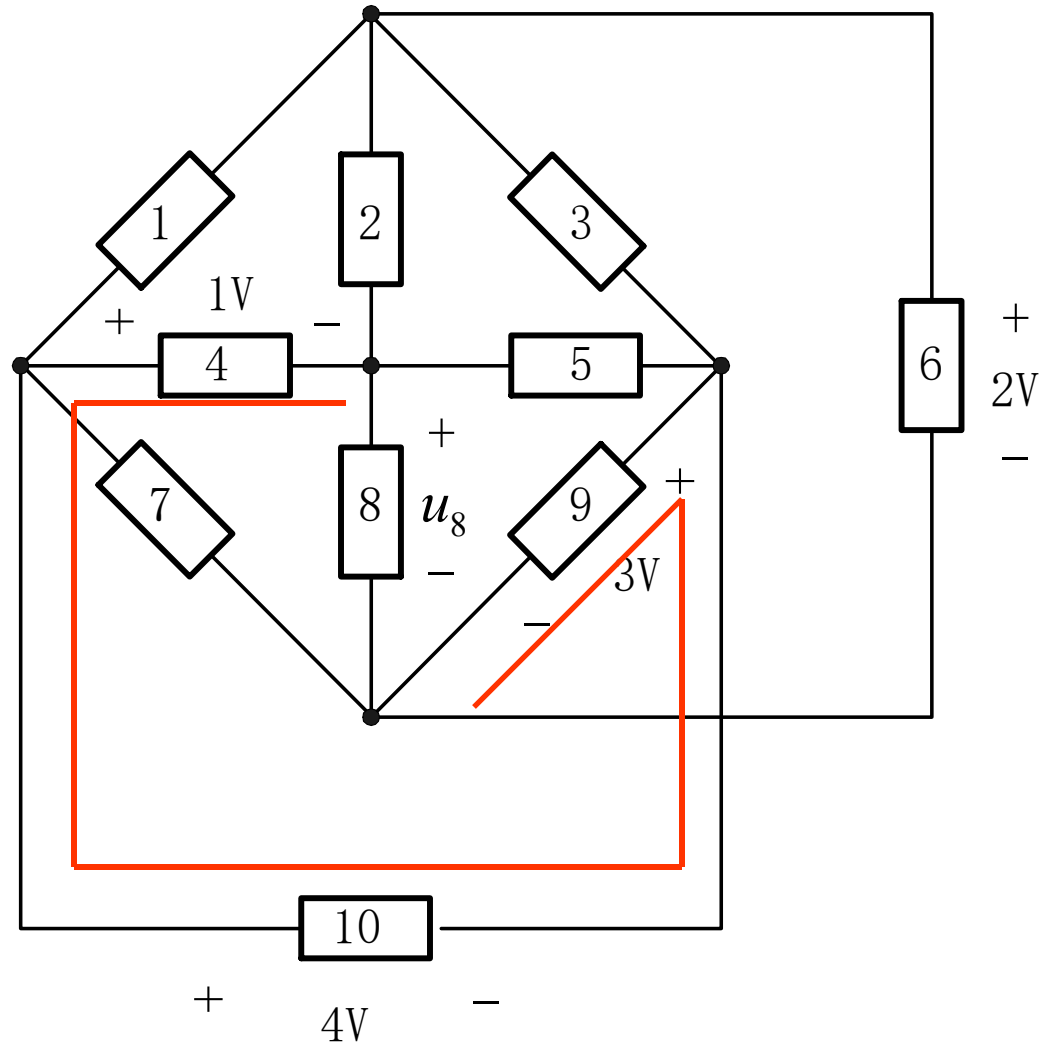
# 讨论——目标3：基尔霍夫定律

例11：计算 $u_8$  支路电压。

$$u_8 = -1 + 4 + 3 = 6V$$

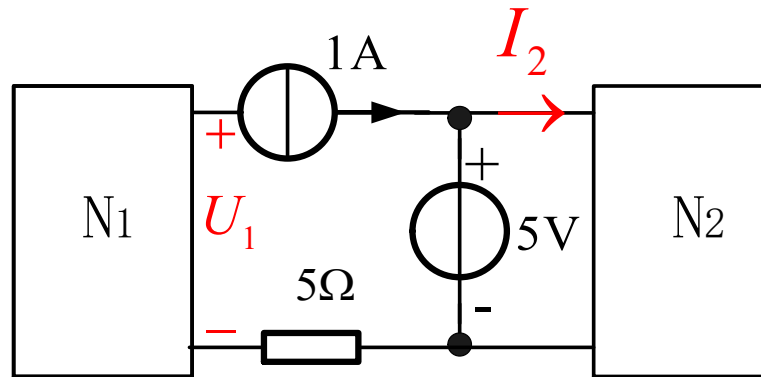
? 已知哪些支路电压，  
就可以求出所有支路  
电压？

? 已知哪些支路电流，  
就可以求出所有支路  
电流？



# 讨论——目标3：基尔霍夫定律

例12: N1 提供 10W, N2 吸收 15W, 计算各独立电源的功率。



$$U_1 = 10V$$

$$I_2 = 3A$$

$$P_{1A} = 1 \times (U_1 - 1 \times 5 - 5) = 0$$

$$P_{5V} = 5 \times (1 - I_2) = -10W$$

1A current source: 0W

5V voltage source: supplies 10W



## 讨论——目标3：基尔霍夫定律

例13. 计算独立电源的功率。

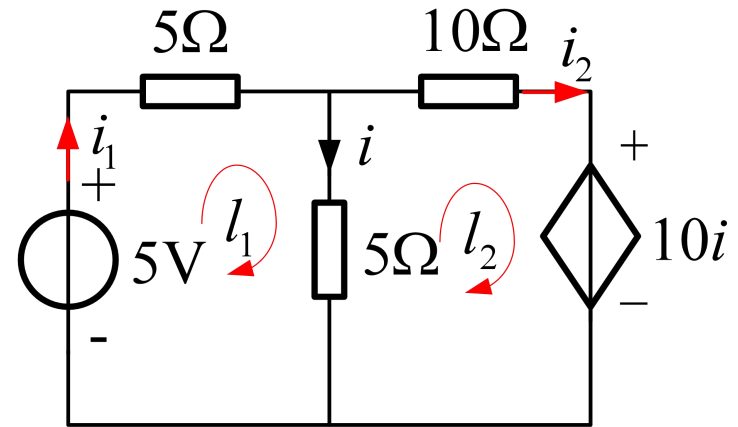
$$\text{KCL: } i_1 = i + i_2$$

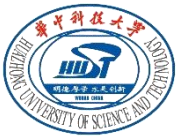
$$\text{KVL: } 5 = 5i_1 + 5i$$

$$5i = 10i_2 + 10i$$

$$i = \frac{2}{3} \text{ A}, \quad i_1 = \frac{1}{3} \text{ A}, \quad i_2 = -\frac{1}{3} \text{ A}$$

$$\text{Supplied power: } p_1 = -5i_1 = -\frac{5}{3} \text{ W}$$





# 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
- 作业要求：抄题，画电路图，标明参考方向，给出具体计算过程