

# 第1章

## 电路的基本概念和基本定律

---

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

# 第1章

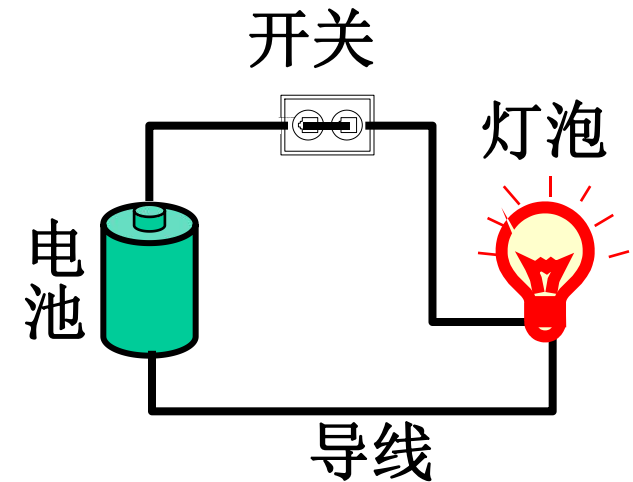
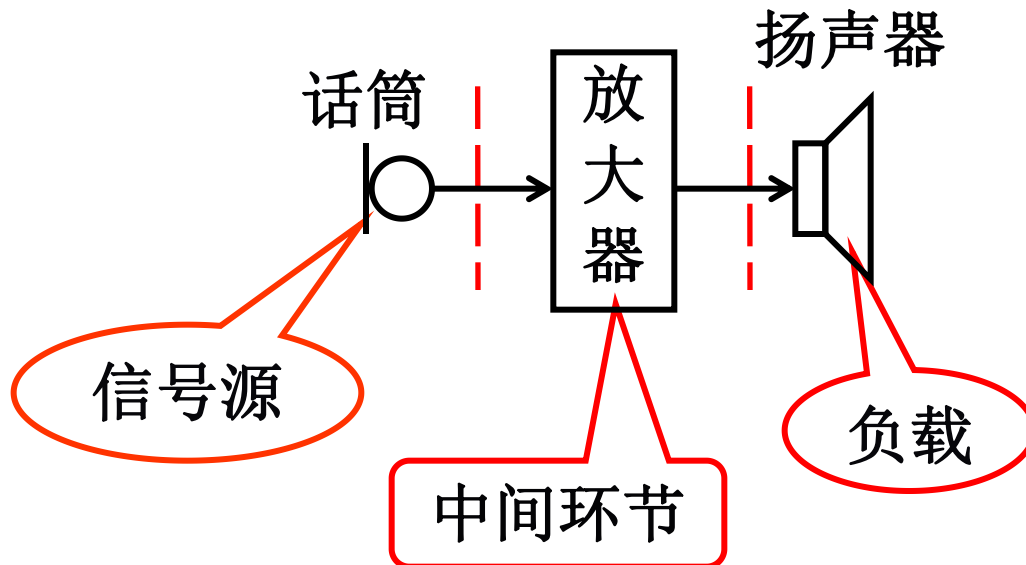
## 电路的基本概念和基本定律

- 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。

# 1.1 电路 Circuits

**电路**——由各种电气设备和器件按实际需要组合而成的电流的通路。



电路示意图

# 1.1 电路 Circuits

- **电路组成：** 电路是由电源、负载和中间环节三个基本部分组成。
- **电路作用：**
  - (1) 实现电能的传输、分配和转换（**电动力能**）；
  - (2) 实现电信号的传递和处理（**电子信息**）。
- **激励：** 将电源或信号源的电压或电流称为激励；
- **响应：** 激励在电路各部分产生的电压和电流称为响应。
- **电路分析：** 在已知电路的结构和元件参数的条件下，讨论电路的**激励**与**响应**之间的关系。

# 1.1 电路 Circuits

## 1. 电路器件 Electrical Devices

电阻 Resistor

电容 Capacitor

电感 Inductor

变压器 Transformer

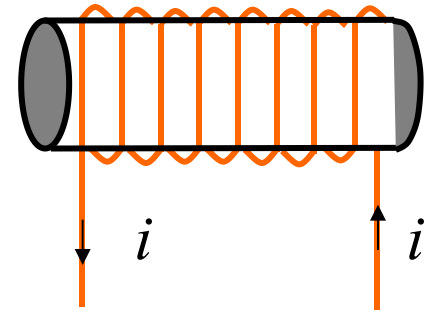
发电机 Generator

晶体管 Transistor ...



工作中的电路器件的电磁现象：

- 消耗电能 Consume electric energy
- 建立电场 Establish electric field
- 建立磁场 Establish magnetic field

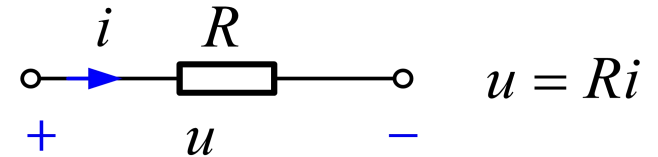


# 1.1 电路 Circuits

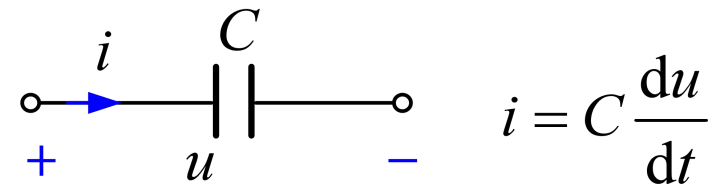
## 2. 电路元件 Circuit Elements 定义理想元件

- 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  $f(u, i) = 0$

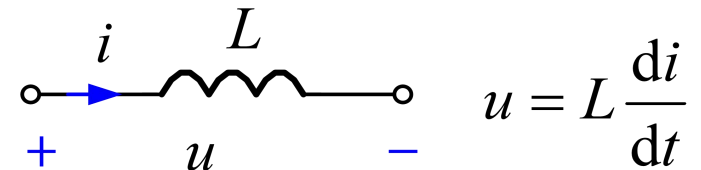
电阻Resistors: Consume electric energy



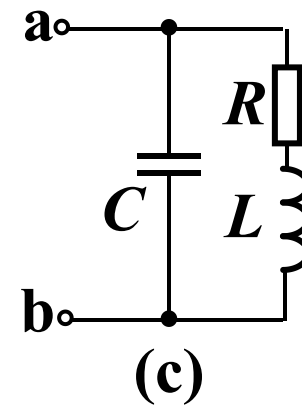
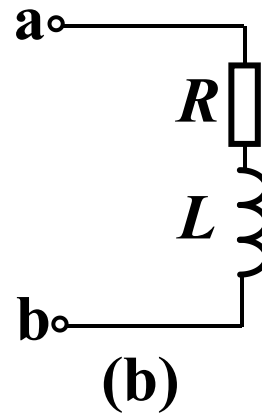
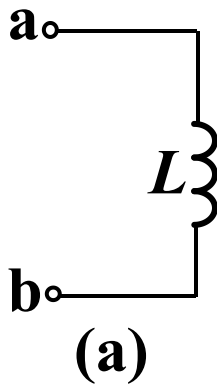
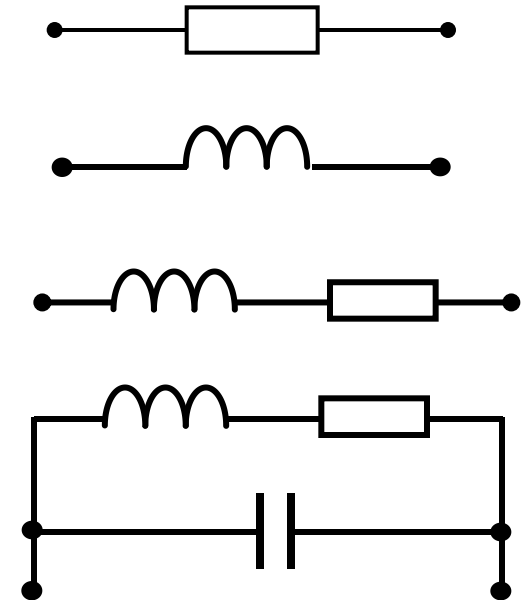
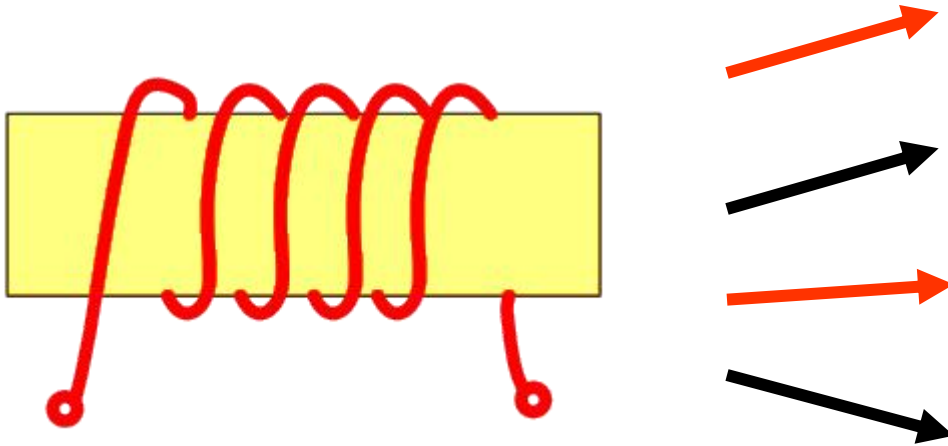
电容Capacitors: Establish electric field



电感Inductors : Establish magnetic field



### 3. 电感器的电路模型 Circuit model

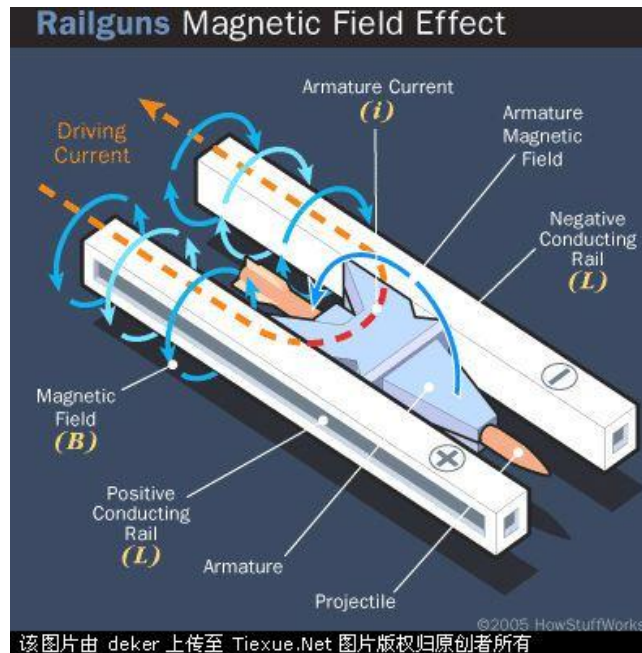




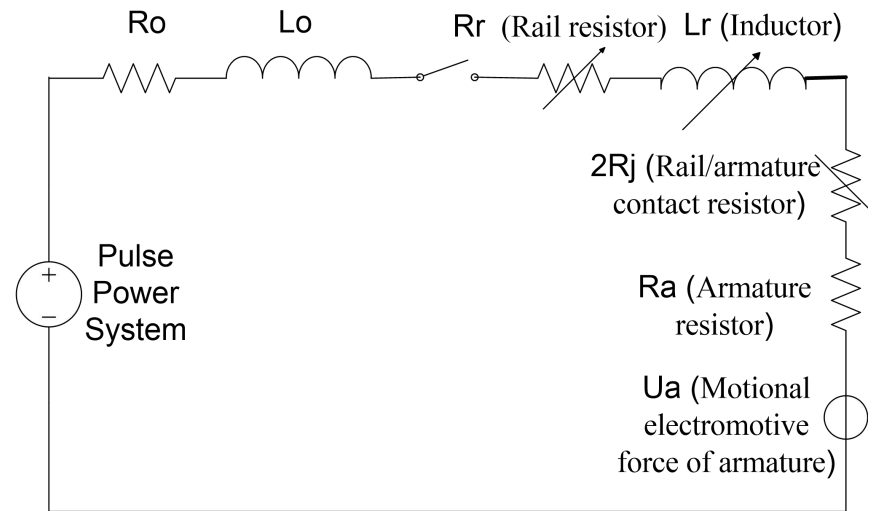
该图片由 fornok 上传至 Tiexue.Net 图片版权归原创者所有



该图片由 jiwuy 上传至 Tiexue.Net 图片版权归原创者所有



该图片由 deker 上传至 Tiexue.Net 图片版权归原创者所有





# 1.1 电路 Circuits

## 4. 集中参数电路 Lumped Circuits 和 分布参数 Distributed Circuits

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

$$d \quad \lambda \quad \int_s \mathbf{J} \, ds = -\frac{dq}{dt} = 0 \quad \int_l \mathbf{E} \, dl = -\frac{d\phi}{dt} = 0$$

电磁波传播时间可忽略 (瞬间传遍系统)  
每个电器件净电荷为零  
不同电器件之间不存在磁耦合 **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

实用标准

$$d_{\max} < 0.01\lambda_{\min}$$

基尔霍夫定律

元件特性方程

代数方程

麦克斯韦方程

$$\int_l \mathbf{H} \, dl = \int_s (\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}) \, ds$$

$$\int_l \mathbf{E} \, dl = -\frac{d}{dt} \left( \int_s \mathbf{B} \, ds \right)$$

$$\int_s \mathbf{B} \, ds = 0$$

$$\int_s \mathbf{D} \, ds = \int_V \rho \, dV$$

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

## 1.2 基本变量 Basic quantities

- 电流 Current ——  $i$  for AC (alternating current) 交流  
 $I$  for DC (direct current) 直流
- 电压 Voltage ——  $u$  or  $U$  ( $v$  or  $V$ )
- 功率 Power ——  $p$  or  $P$
- 电荷 Electric charge ——  $q$
- 磁通 Magnetic flux ——  $\phi$

## 1.2 基本变量 Basic quantities

### 1. 电流 Current

- 电流强度——单位时间内通过导体横截面的电荷量
- 表达式：


$$i(t) = \frac{dq}{dt} \quad \left\{ \begin{array}{ll} \text{直流} DC & \text{恒定电流 } I \\ \text{交流} AC & i \left\{ \begin{array}{l} \text{周期：正弦、非正弦} \\ \text{非周期} \end{array} \right. \end{array} \right.$$

单位：kA、A、mA、 $\mu$ A。

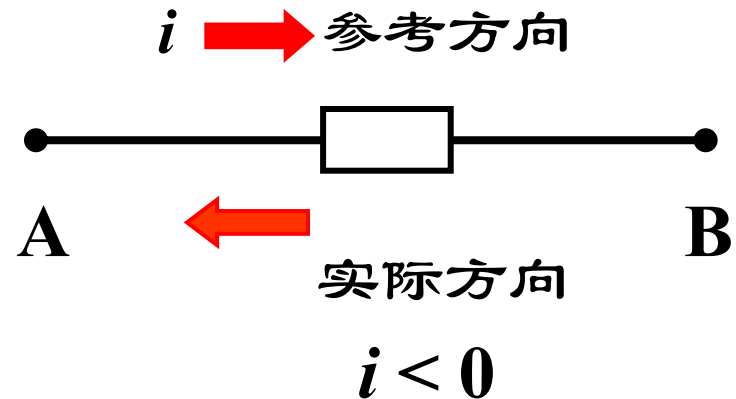
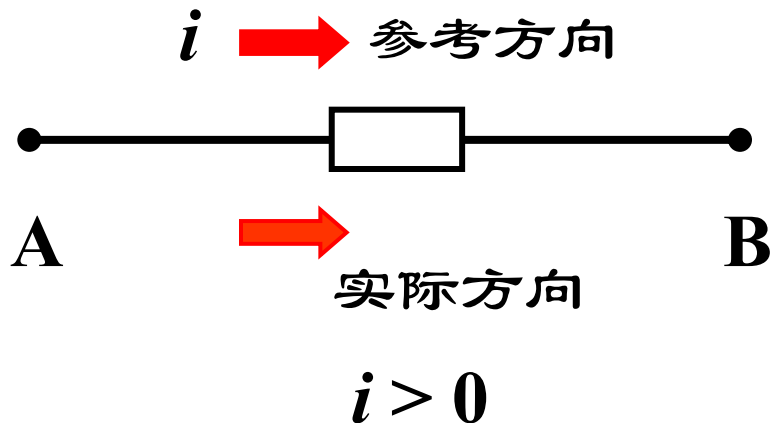
$$1\text{kA}=10^3\text{A}, \quad 1\text{mA}=10^{-3}\text{A}, \quad 1\mu\text{A}=10^{-6}\text{A}$$

## 1.2 基本变量 Basic quantities

● **方向**：规定正电荷的运动方向为电流的实际方向

● **参考方向**  任意假定的电流方向称为电流的参考方向

电流的参考方向与实际方向的关系：

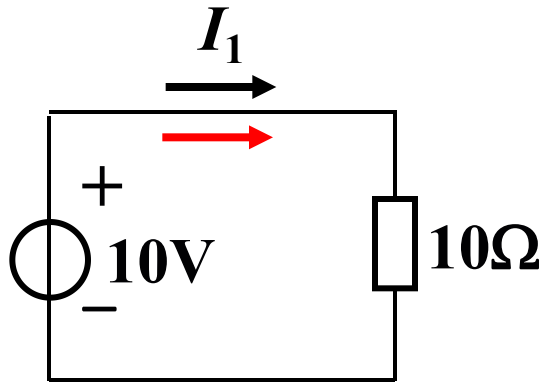


电流  $\left\{ \begin{array}{l} \text{大小} \\ \text{方向 (正负)} \end{array} \right.$

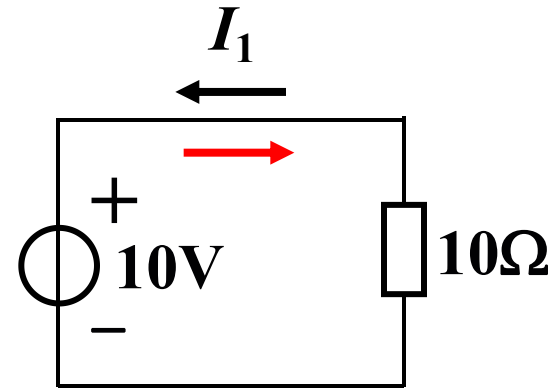
## 1.2 基本变量 Basic quantities

### 电流及其参考方向

例



$$I_1 = 1\text{A}$$



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

# 1.2 基本变量 Basic quantities

## 2.电压Voltage

- **电压**——库仑电场力移动单位正电荷由电场中的a点到为止b点所做的功，称为a、b两点间的电压

- **表达式：**

据定义 
$$u_{ab} = \frac{dw}{dq}$$

**单位：** kV、V、mV、 $\mu$ V。

$$1\text{kV}=10^3\text{V}、1\text{mV}=10^{-3}\text{V}、1\mu\text{V}=10^{-6}\text{V}$$

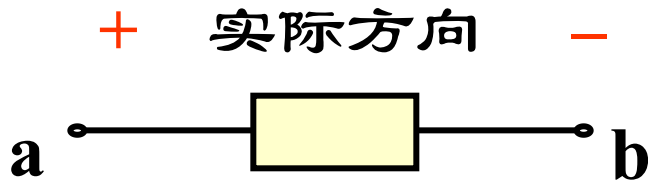
$$u_{ab} = \frac{dw}{dq} \left\{ \begin{array}{ll} \text{直流} DC & \text{恒定直流 } U_{ab} \\ \text{交流} AC & u_{ab} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \text{周期：正弦、非正弦} \\ \text{非周期} \end{array} \right.$$

# 1.2 基本变量Basic quantities

## 2.电压Voltage

**实际方向：** 规定为从高电位指向低电位；

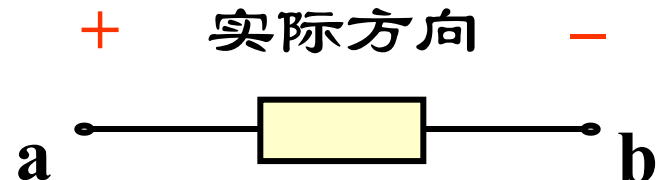
**参考方向：** 任意假设电位降低的方向，或称为**正方向**。



参考方向

$u_1$

$$u_1 > 0$$



参考方向

$u_2$

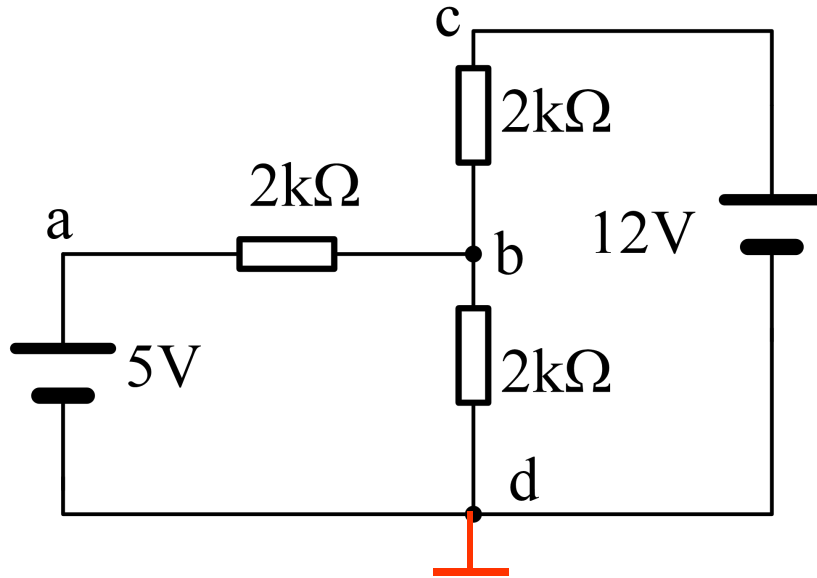
$$u_2 < 0$$

- 例：当  $u_a = 3V$   
 $u_1 = u_{ab} = 1V$

$u_b = 2V$  时  
 $u_2 = u_{ba} = -1V$

# 1.2 基本变量 Basic quantities

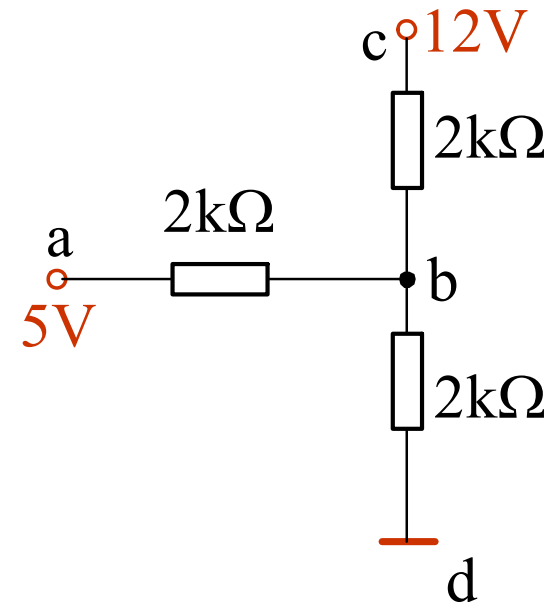
## 3. 电位 (势) Potential



$$U_{ad} = 5V$$

$$U_{cd} = 12V$$

选择d点为电位参考点，电路可以画为：



$$U_a = 5V$$

$$U_c = 12V$$

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

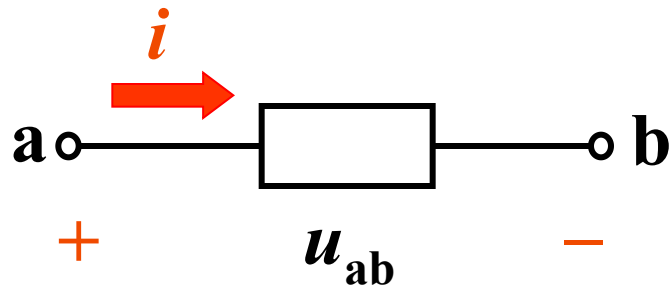


## 1.2 基本变量 Basic quantities

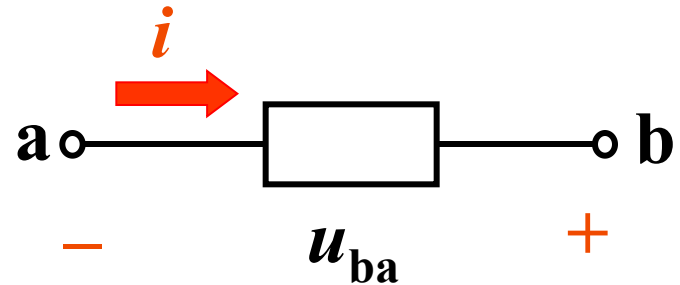
### 4. 电功率 Power

电流和电压的**关联参考方向**

元件或支路的  $u$ ,  $i$  其参考方向相同, 称之为**关联参考方向**。反之, 称为**非关联参考方向**。



$i$  与  $u_{ab}$  为关联参考方向



$i$  与  $u_{ba}$  为非关联参考方向

## 1.2 基本变量 Basic quantities

### 4. 电功率 Power

**功率** —— 单位时间内电场力所做的功

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

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

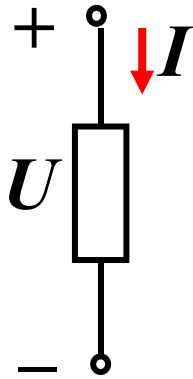
功率的单位：MW、kW、W、mW

对于直流电路： $P = U \cdot I$

## 1.2 基本变量 Basic quantities

### 4. 电功率 Power

(1)  $U$ 、 $I$  关联参考方向

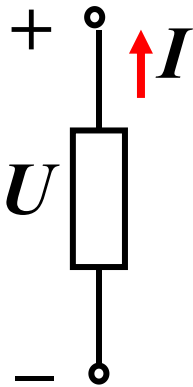


吸收的功率:  $P = UI$

$P > 0$  吸收正功率 (吸收功率)

$P < 0$  吸收负功率 (发出功率)

(2)  $U$ 、 $I$  非关联参考方向



吸收的功率:  $P = -UI$

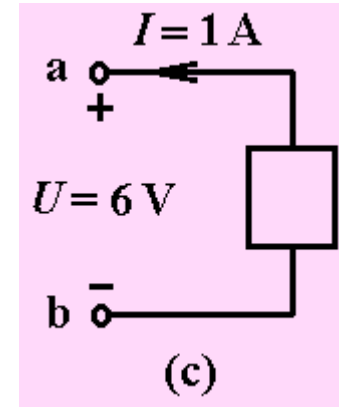
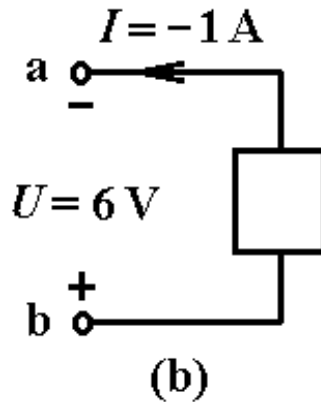
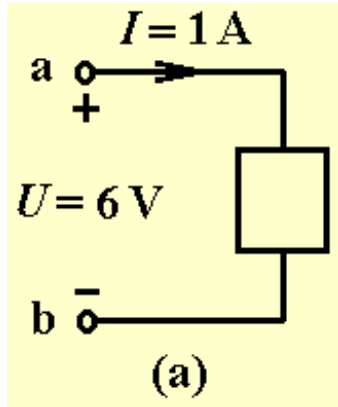
$P > 0$  吸收正功率 (吸收功率)

$P < 0$  吸收负功率 (发出功率)

## 1.2 基本变量 Basic quantities

### 4. 电功率 Power

- 例 计算图示电路各元件吸收或产生的功率。



解：(a)、(b) 电路中  $U$ 、 $I$  为关联方向，则

(a)  $P = UI = 6 \times 1 = 6\text{ W}$  (吸收功率)

(b)  $P = UI = 6 \times (-1) = -6\text{ W}$  (产生功率)

(c) 电路中  $U$ 、 $I$  为非关联方向，则

$P = -UI = -6 \times 1 = -6\text{ W}$  (产生功率)

## 1.2 基本变量 Basic quantities

### 4. 电功率 Power

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

$$I = U_R / 5 = (U_1 - U_2) / 5 = (10 - 5) / 5 = 1 \text{ A}$$

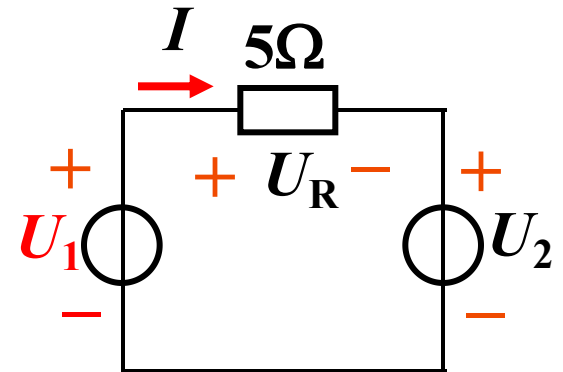
$$P_R = U_R I = 5 \times 1 = 5 \text{ W} \quad (\text{吸收功率})$$

$$P_{U_1} = -U_1 I = -10 \times 1 = -10 \text{ W} \quad (\text{发出功率})$$

$$P_{U_2} = U_2 I = 5 \times 1 = 5 \text{ W} \quad (\text{吸收功率})$$

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

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



## 1.2 基本变量 Basic quantities

### 5. 电能 Energy

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

- 电容的电场能量?
- 电感的磁场能量?
- 电阻消耗的能量?
- 电源发出/吸收的能量?

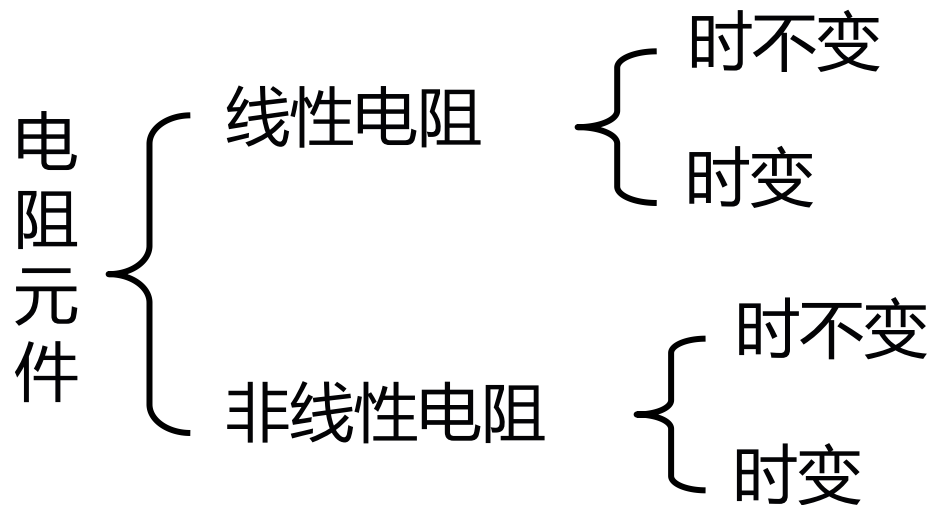
.....

# 1.3 电路元件 Circuit Elements

## 1.3.1 电阻元件

**1. 定义：** 一个二端元件，若在任一时刻  $t$ ，其两端电压和通过它的电流之间的关系可用  $u-i$  平面上的一条曲线来描述，则该二端元件称为电阻元件。

### 2. 分类：



# 1.3 电路元件 Circuit Elements

## 3. 线性时不变电阻元件

- **定义**：若电阻元件的特性曲线是  $u-i$  平面上的一条过原点且不随时间变化的直线，则该电阻元件称为线性时不变电阻元件。

- 伏安特性曲线

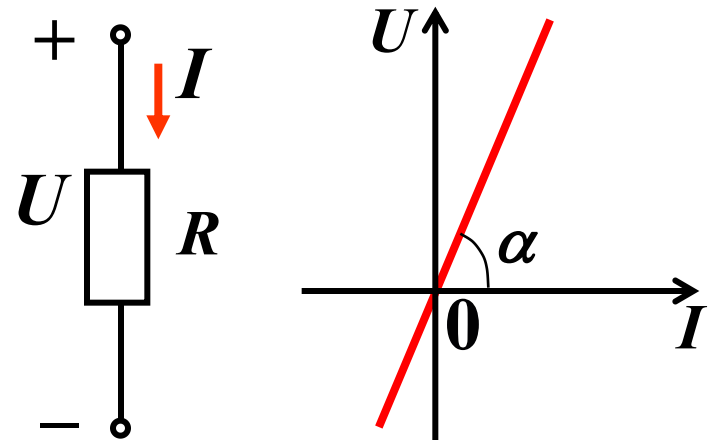
$$U = R \cdot I$$

$$R \propto \tan \alpha$$

$$G = 1/R \quad G \text{ 称为电导}$$

电阻的单位： $\Omega$ （欧）

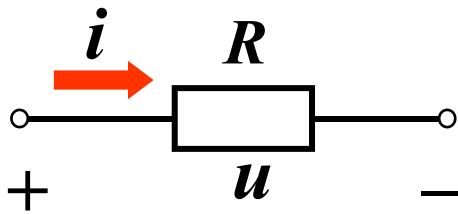
电导的单位：S（西）



线性时不变电阻元件



(1) 电压与电流为关联参考方向，即

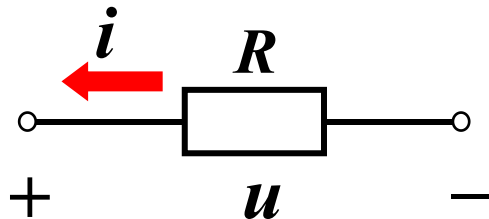


$$u(t) = Ri(t) \quad \text{或} \quad i(t) = Gu(t)$$

$$U = RI \quad \text{或} \quad I = GU$$

$$P_{\text{吸}} = UI = I^2 R = U^2 / R$$

(2) 电压与电流为非关联参考方向，即



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

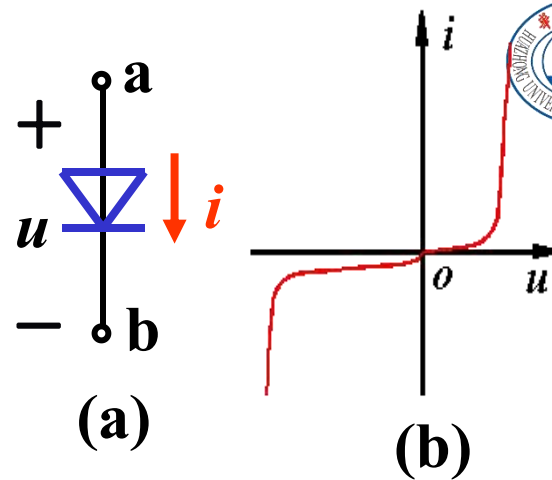
$$U = -RI \quad \text{或} \quad I = -GU$$

$$P_{\text{吸}} = -UI = -(-RI) I = I^2 R$$

$$= -U(-U/R) = U^2 / R$$

## 4.非线性电阻元件

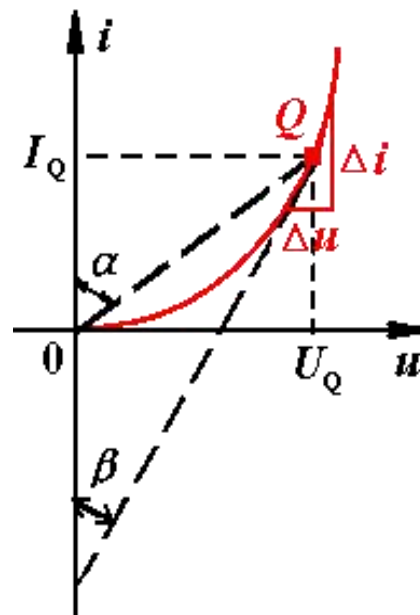
- (1) 普通二极管  $i = I_0(e^{au} - 1)$



(b)二极管的特性曲线

非线性电阻

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{静态电阻 (直流电阻)} \\ R = \frac{U_Q}{I_Q} = \tan \alpha \\ \text{动态电阻 (交流电阻)} \\ r = \lim_{\Delta i \rightarrow 0} \frac{\Delta u}{\Delta i} = \frac{du}{di} = \tan \beta \end{array} \right.$$

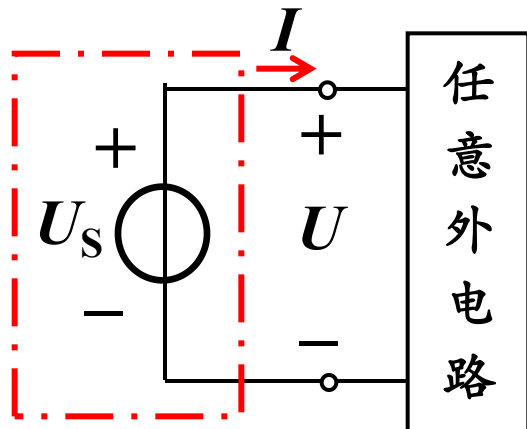


静态电阻与动态电阻

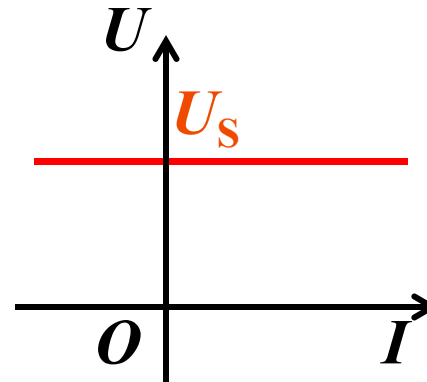
## 1.3.2 独立电源

### 一、理想电压源

- 1. **定义**：如果一个二端元件(一端口)接到任意电路后，该元件的端电压 $U$ 始终保持不变，则该二端元件称为理想电压源，简称“**恒压源**”。
- 2. 电路模型及伏安特性



(a) 电路模型



(b) 伏安特性曲线

$$U \equiv U_S$$

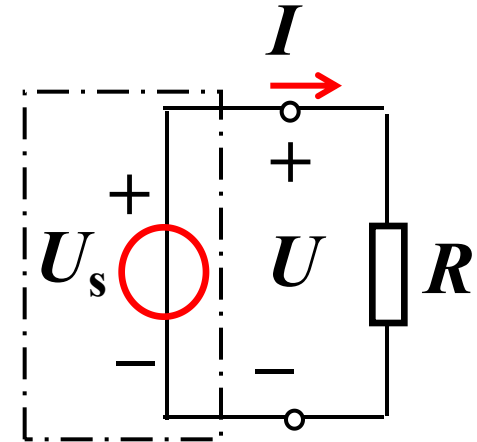
# 一、理想电压源

- 3. 理想电压源的开路与短路

(1) 若 $R \rightarrow \infty$ ,  $I = 0$ ,

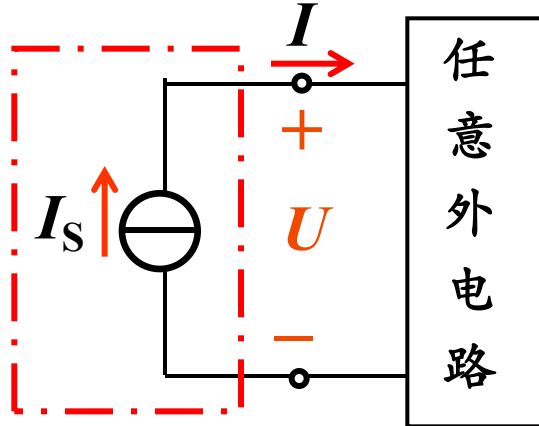
则称电路为**开路**状态

(2) 若 $R=0$ ,  $I \rightarrow \infty$ , 则称电路为**短路**状态; 理想电压源出现故障, 因此理想电压源不允许短路。

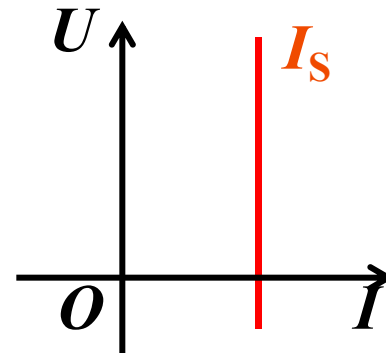


## 二、理想电流源

- 1. **定义**：如果一个二端元件（一端口）接到任意电路后，在任意所给定的时间内，流过它的电流与它两端的电压大小无关，则该二端元件称为理想电流源，简称“**恒流源**”。
- 2. 电路模型及伏安特性



(a) 电路模型



$$I \equiv I_S$$

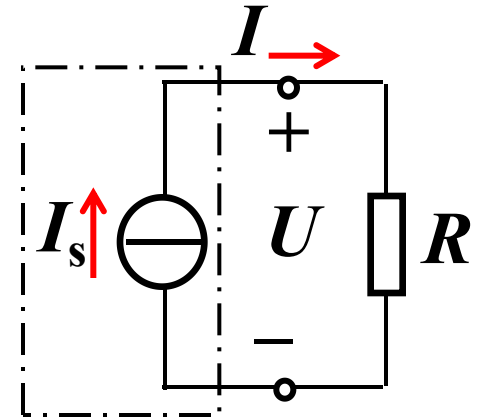
(b) 伏安特性曲线

## 二、理想电流源

- 3. 理想电流源的短路与开路

(1) 若  $R=0$ ,  $I=I_s$ ,

则  $U=0$ , 电流源为**短路状态**。



(2) 若  $R \rightarrow \infty$ ,  $U \rightarrow \infty$ , 理想电流源出现故障, 电路为**开路状态**。理想电流源不允许开路。

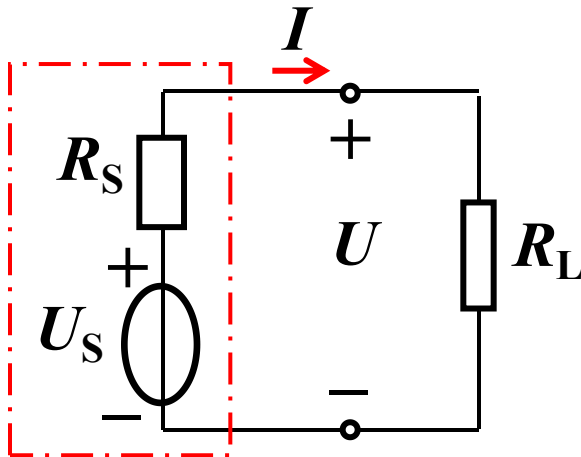
### 三、实际电压源

- 3. 理想电压源与实际电压源的关系

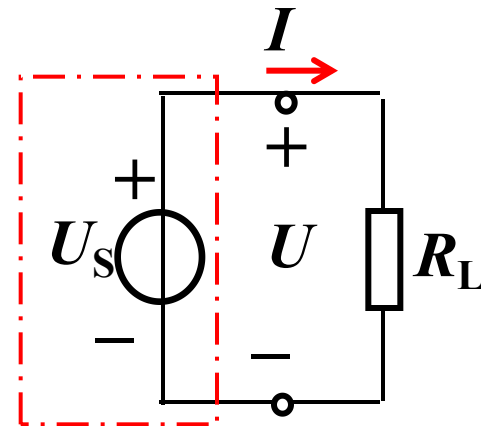
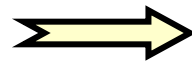
(1) 对实际电压源，当 $R_S \rightarrow 0$ ，

有 $U = U_S$ ，实际 $\rightarrow$ 理想。

(2) 当实际电压源的内阻 $R_S \ll R_L$ ，则 $U \approx U_S$ ，实际电压源可近似视为理想电压源。



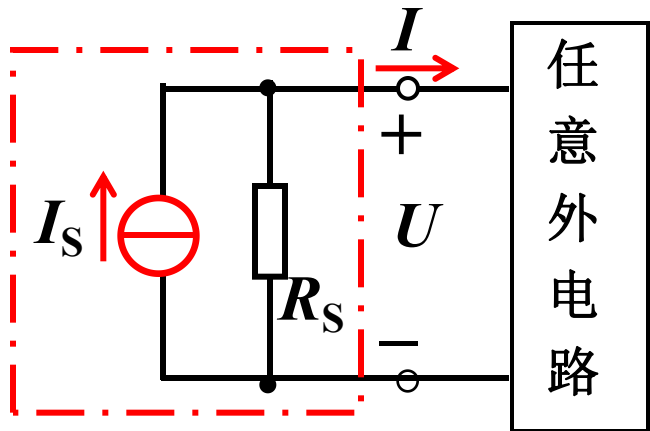
实际电压源模型



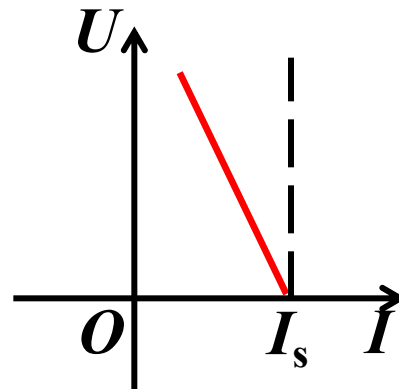
理想电压源模型

## 四、实际电流源

- 1. **定义**: 如果一个二端元件(一端口) 接到任意电路后, 该元件输出电流  $I$  随外电路负载电压的变化而变, 则该二端元件称为实际电流源, 简称“**电流源**”。
- 2. 电路模型及伏安特性



(a) 电路模型

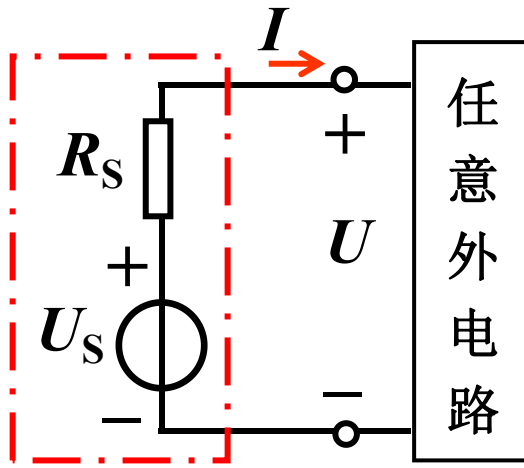


(b) 伏安特性曲线

$$I = I_S - U/R_S$$

$$P = P_{I_S} - P_S$$



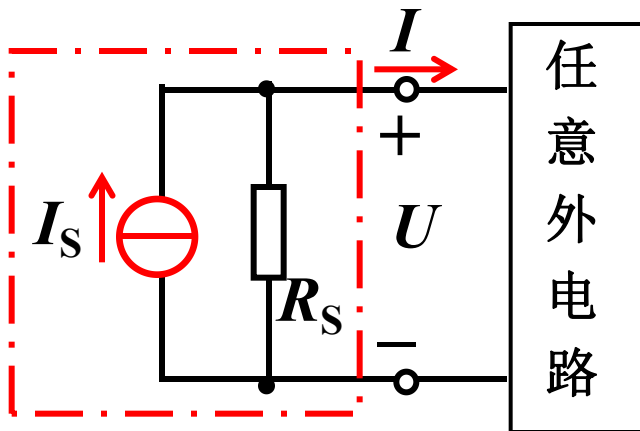


(a) 电压源电路模型



$$U = U_s - R_s I$$

$$\therefore \frac{U}{R_s} = \frac{U_s}{R_s} - I$$



(b) 电流源电路模型

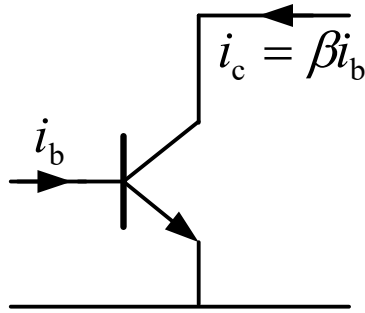


$$\frac{U}{R_s} = I_s - I$$

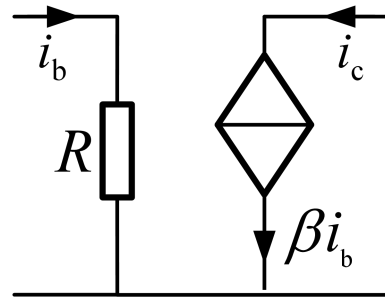
$$I = I_s - \frac{U}{R_s}$$

# 1.3 电路元件 Circuit Elements

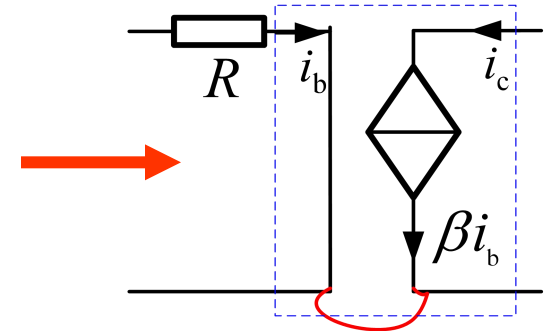
## 1.3.3.受控电源 Dependent Source (active elements)



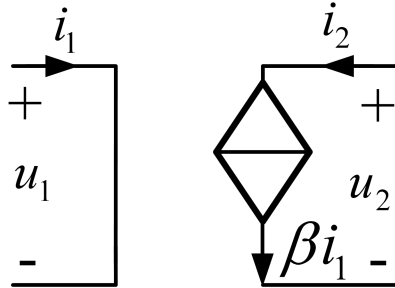
晶体管 transistor



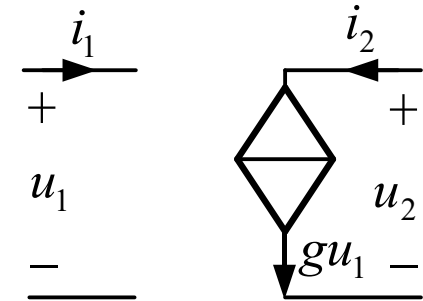
circuit model



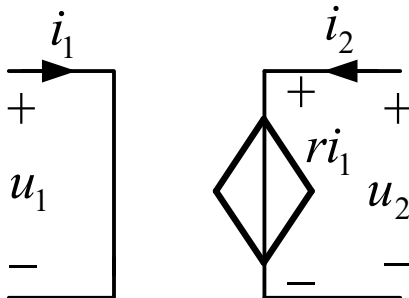
电流控制  
的电流源  
CCCS



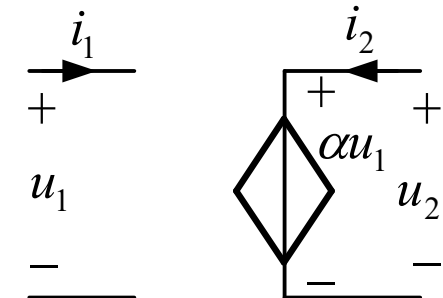
电压控制  
的电流源  
VCCS



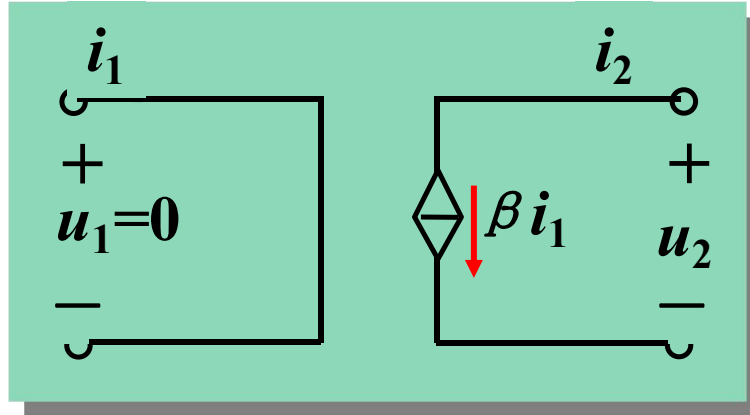
电流控制  
的电压源  
CCVS



电压控制  
的电压源  
VCVS



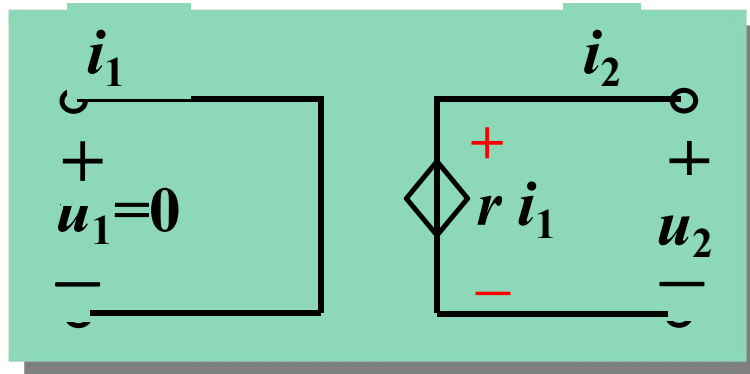
## (1) 电流控制的电流源 (Current Controlled Current Source)



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

$\beta$ : 电流放大倍数

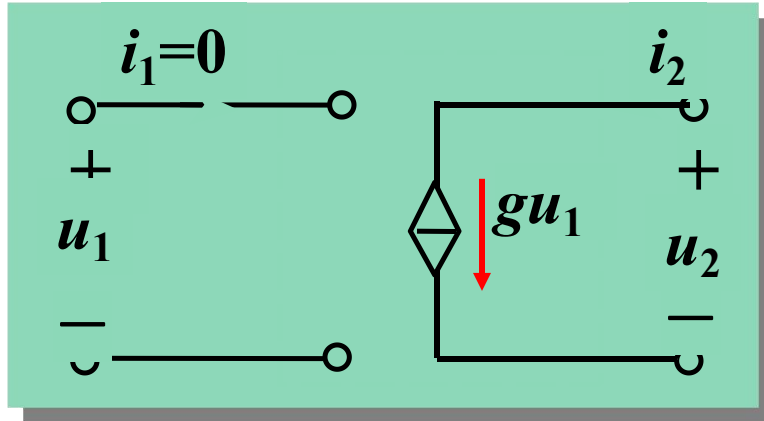
## (2) 电流控制的电压源 (Current Controlled Voltage Source)



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

$r$ : 转移电阻

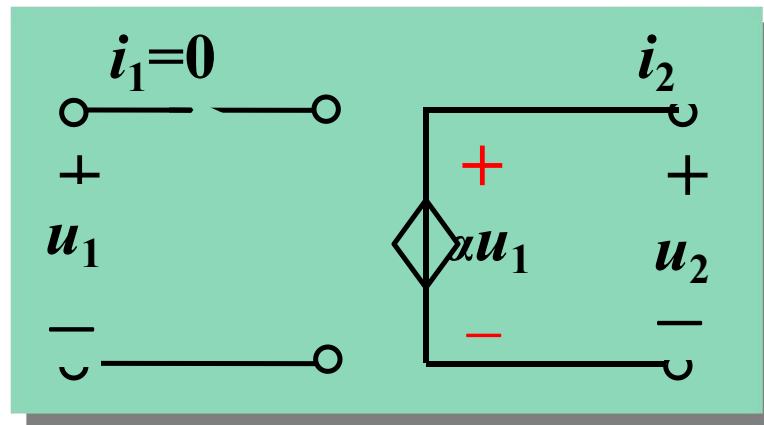
### (3) 电压控制的电流源 ( Voltage Controlled Current Source )



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

$g$ : 转移电导

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

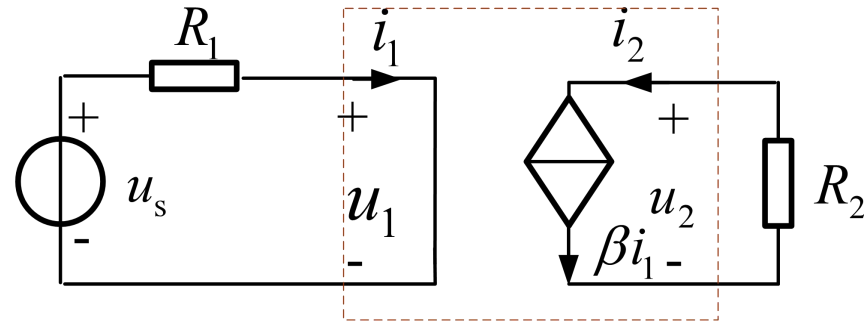


$$\text{VCVS} \begin{cases} i_1=0 \\ u_2=\alpha u_1 \end{cases}$$

$\alpha$ : 电压放大倍数

# 讨论 —— 元件特性

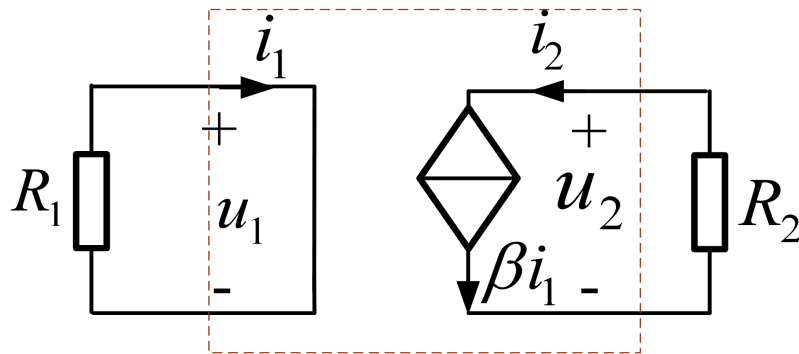
例. 计算线性受控源的功率。



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

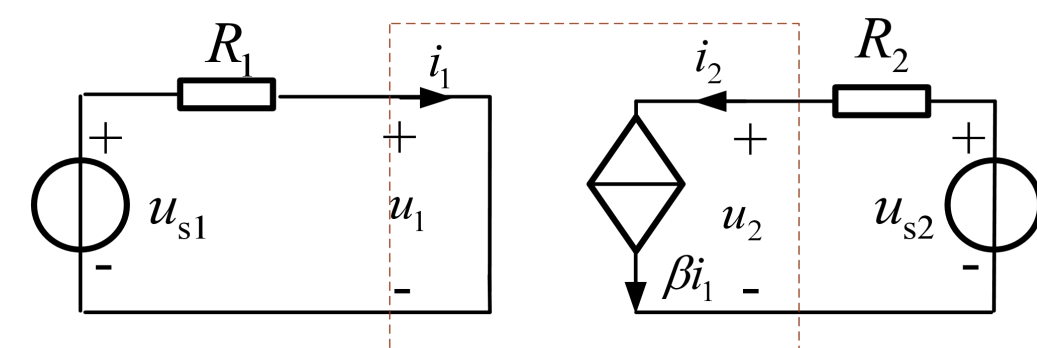
$$p = u_2 i_2 = (-\beta i_1 R_2) (\beta i_1) = -R_2 \beta^2 \frac{u_s^2}{R_1^2} < 0$$

提供功率



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

功率为零



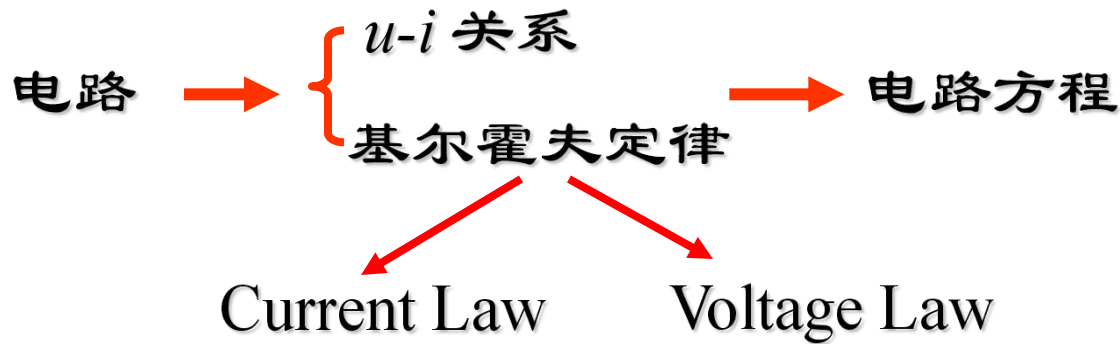
$$i_1 = \frac{u_{s1}}{R_1}$$

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

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

也可吸收功率

# 1.4 基尔霍夫定律 Kirchhoff's Laws



Gustav Robert Kirchhoff  
(1824-1887)

## 1. 术语

支路 Branch

戴维宁支路 Thevenin branch

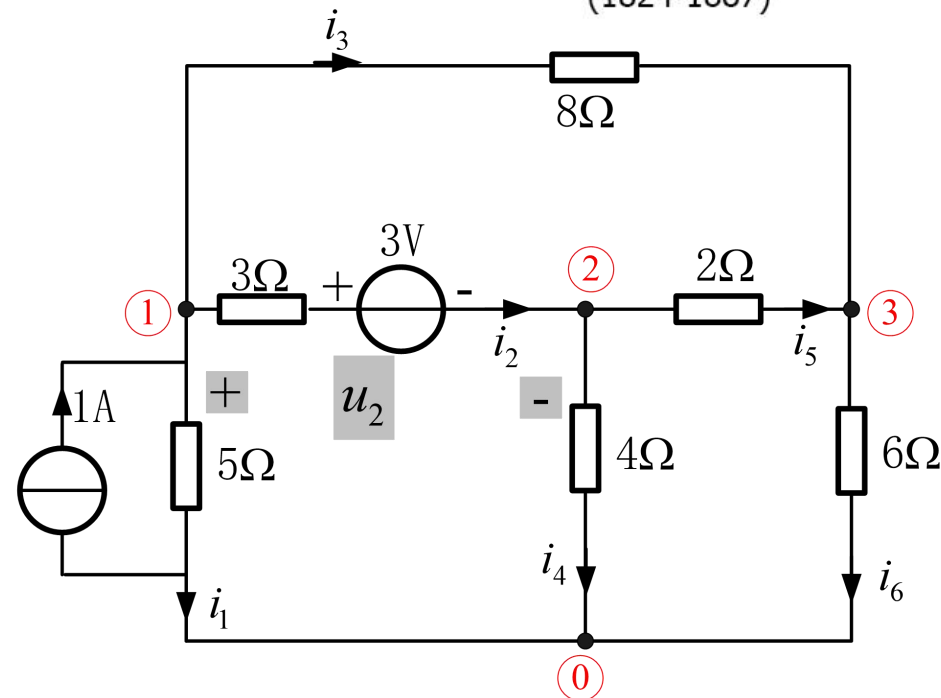
诺顿支路 Norton branch

支路电流 Branch current

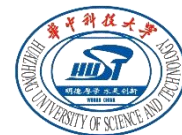
支路电压 Branch voltage

结点 Node    广义结点 Super node

回路 Loop    网孔 Mesh



# 1.4 基尔霍夫定律 Kirchhoff's Laws



## 2. Kirchhoff's Current Law——KCL

1. **表述**：对于电路中的任一节点，在任一时刻，流入节点电流之和恒等于流出节点电流之和。或该节点的所有支路电流的代数之和等于零。

2. **表达式**：

$$\sum I_{\text{入}} = \sum I_{\text{出}} \quad \text{或：} \quad \sum_{k=1}^m I = 0$$

$$\sum i_{\text{入}} = \sum i_{\text{出}} \quad \text{或：} \quad \sum_{k=1}^m i_k(t) = 0$$

# 1.4 基尔霍夫定律 Kirchhoff's Laws

## 2. Kirchhoff's Current Law——KCL

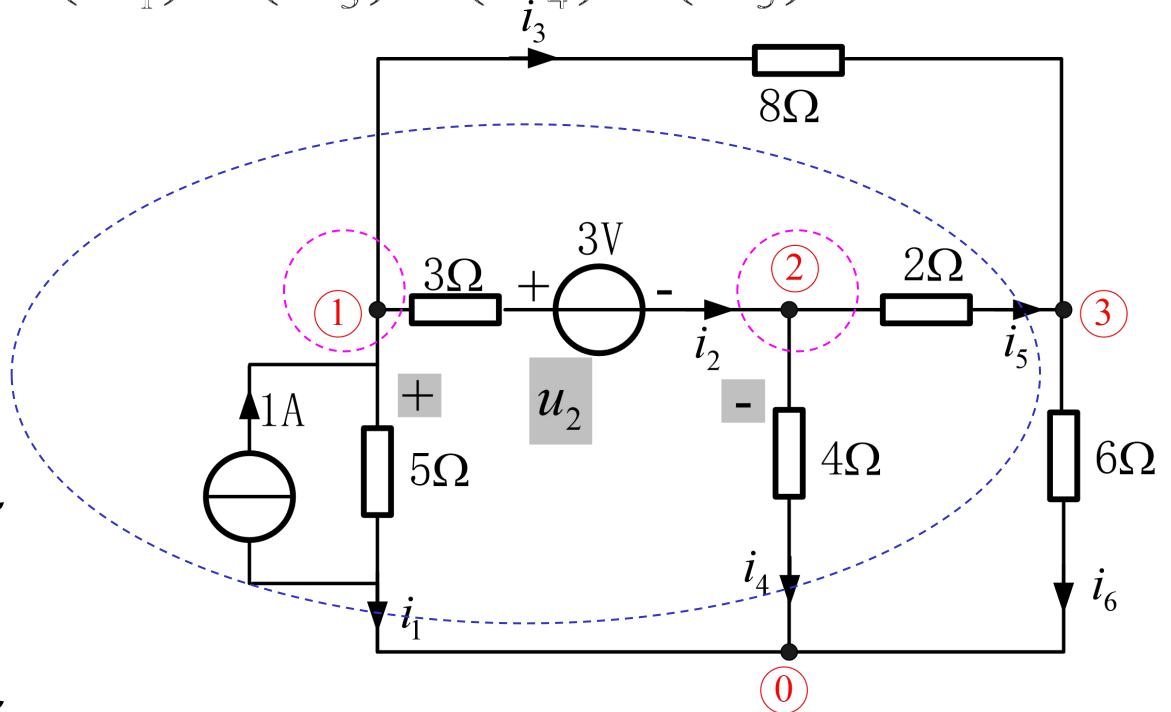
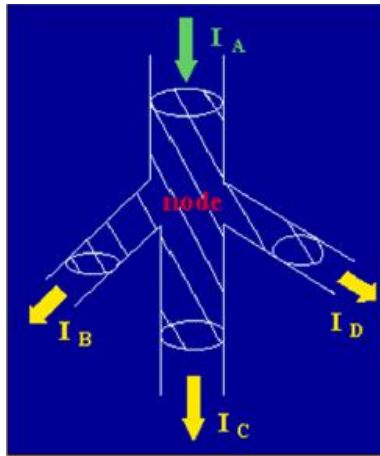
$$\sum_{k=1}^m i_k(t) = 0$$



$$\text{Node1: } (-i_1) + (-i_2) + (-i_3) = 0$$

$$\text{Node2: } (-i_4) + (i_2) + (-i_5) = 0$$

$$\text{Super node (1-2): } (-i_1) + (-i_3) + (-i_4) + (-i_5) = 0$$



- 方程列写方法
- 方程的意义
- 方程的独立性

?



## 1.4 基尔霍夫定律 Kirchhoff's Laws

- 例：电路如图所示， 求出图中未知支路的电流

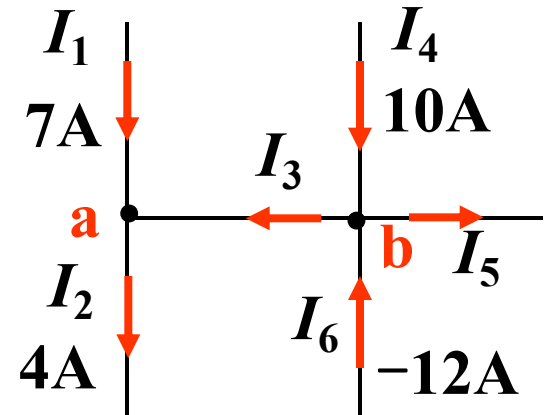
解：据KCL有

节点a：  $I_1 - I_2 + I_3 = 0$

节点b：  $-I_3 + I_4 - I_5 + I_6 = 0$

$$\therefore 7 - 4 + I_3 = 0 \rightarrow I_3 = -3\text{A}$$

$$-I_3 + 10 - I_5 + (-12) = 0 \rightarrow I_5 = 1\text{A}$$



## 1.4 基尔霍夫定律 Kirchhoff's Laws

### KCL的推广应用

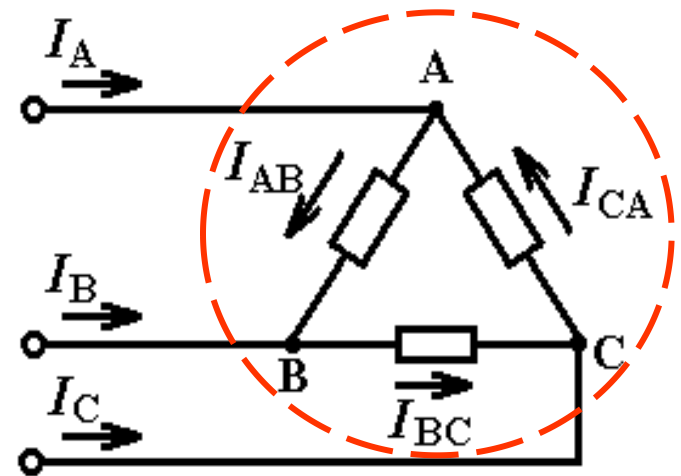
- 对任何一个闭合曲面，在任意时刻 *KCL* 仍成立。电路如图所示，闭合曲面内有三个节点。据 *KCL* 可列出三个节点电流方程：

节点A:  $I_A - I_{AB} + I_{CA} = 0$

节点B:  $I_B - I_{BC} + I_{AB} = 0$

节点C:  $I_C - I_{CA} + I_{BC} = 0$

有:  $I_A + I_B + I_C = 0$

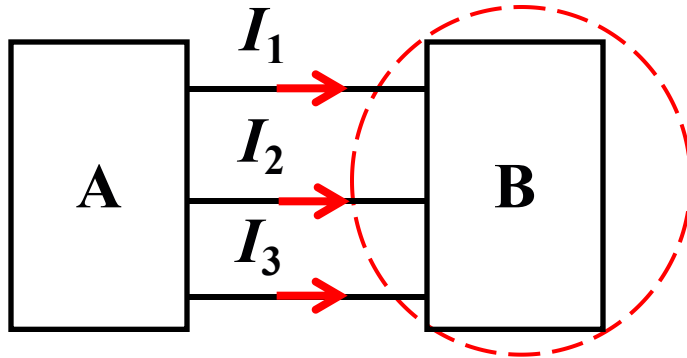


*KCL*的推广应用

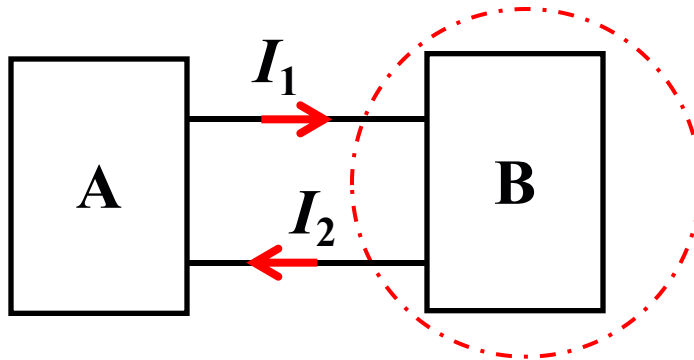
● **结论：** 在任一时刻，通过任一闭合曲面的电流的代数和恒等于零。

# 1.4基尔霍夫定律 Kirchhoff's Laws

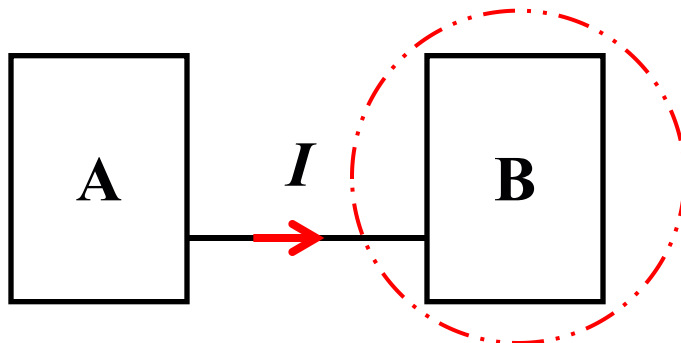
## KCL的推广应用



$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$



$$I_1 - I_2 = 0$$



$$I = 0$$

# 1.4 基尔霍夫定律 Kirchhoff's Laws

## 3. Kirchhoff's Voltage Law——KVL

- 1. 表述：对于在任何集中参数电路中的任一回路，在任一时刻，沿任一闭合路径（按固定绕向）的**所有支路电压的代数和等于零**。
- 2. 表达式：

$$\sum_{k=1}^m u_k(t) = 0 \quad \text{或：} \quad \sum_{k=1}^m U = 0$$

规定：

支路电压参考方向与回路绕行方向**一致**的取正，  
支路电压参考方向与回路绕行方向**相反**的取负。

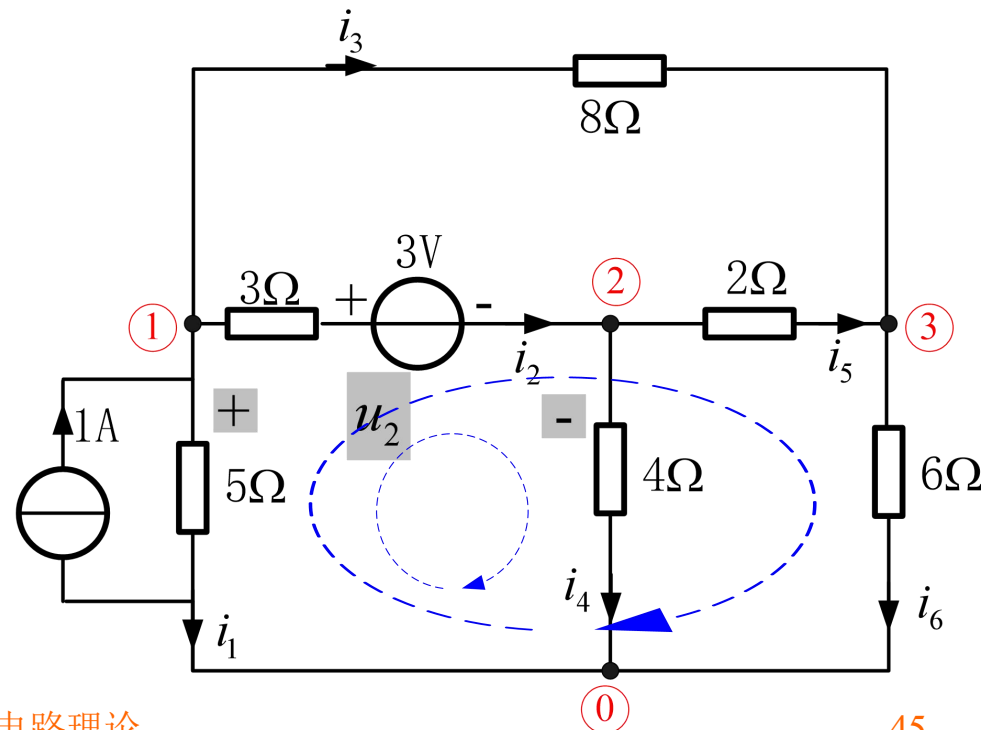
# 1.4 基尔霍夫定律 Kirchhoff's Laws

## 3. Kirchhoff's Voltage Law——KVL

$$\sum_{k=1}^m u_k(t) = 0 \longrightarrow \text{Mesh: } (-u_1) + (u_2) + (u_4) = 0$$

$$\text{Loop1: } (-u_1) + (u_2) + (u_5) + (u_6) = 0$$

- 方程列写方法
- 方程的意义—约束条件
- 方程的独立性

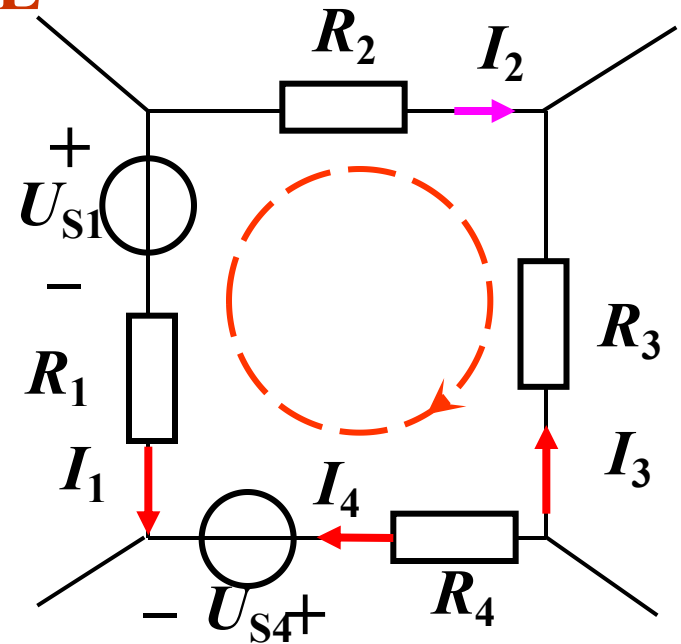


# 1.4 基尔霍夫定律 Kirchhoff's Laws

## 3. Kirchhoff's Voltage Law——KVL

例：首先考虑（选定一个）绕行方向：顺时针或逆时针。

顺时针方向绕行： $\sum_{k=1}^m U = 0$



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

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

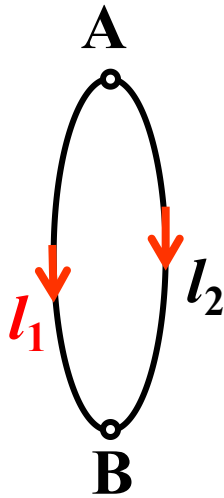
即： $\sum U_R = \sum U_S$

电阻压降      电源压升

# 1.4 基尔霍夫定律 Kirchhoff's Laws

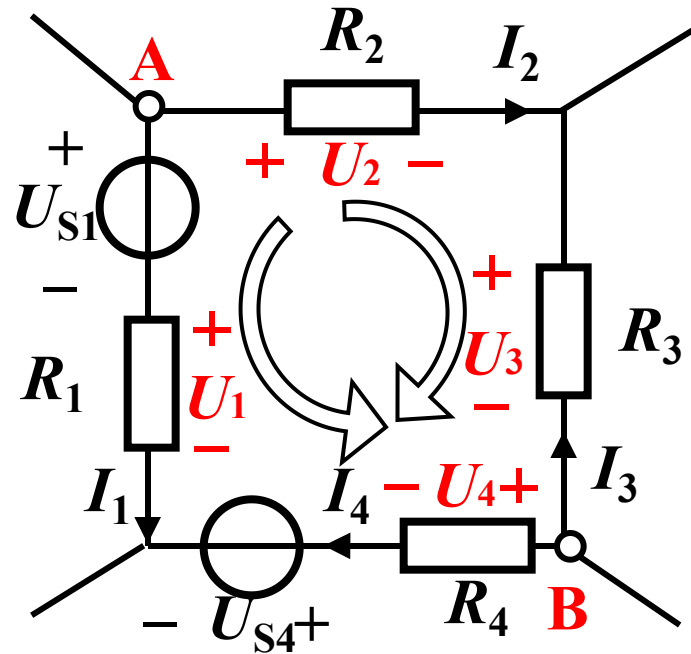
## 3. Kirchhoff's Voltage Law——KVL

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



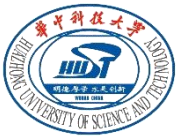
$$U_{AB} (\text{沿 } l_1) = U_{AB} (\text{沿 } l_2)$$

电位的单值性



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

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

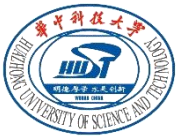


# 第1章

## 电路的基本概念和基本定律

- (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表明在每一节点或闭合区域上电流代数和为0（**本质是电荷守恒**）；KVL表明在每一个回路电压代数和为0（**本质是能量守恒**）。





# 第一章作业

1.12, 1.13, 1.14, 1.18, 1.24, 1.27