

第一章 电路模型和电路定律

(Circuit Elements and Circuit Laws)

重点

1. 电压、电流的参考方向
2. 电路元件特性
3. 基尔霍夫定律

1.1 电路和电路模型 (Model)

1. 实际电路 → 由电工设备和电气元器件按预期目的连接，构成电流的通路。

功能

→ a 能量的传输、分配与转换；
b 信息的传递与处理。

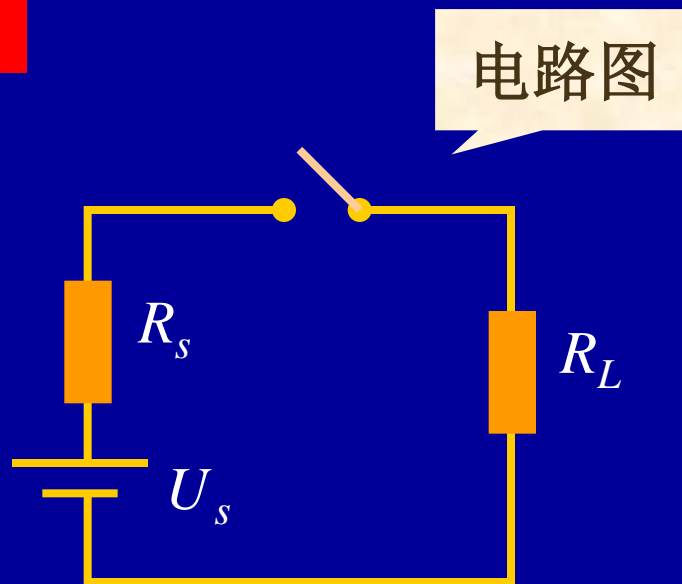
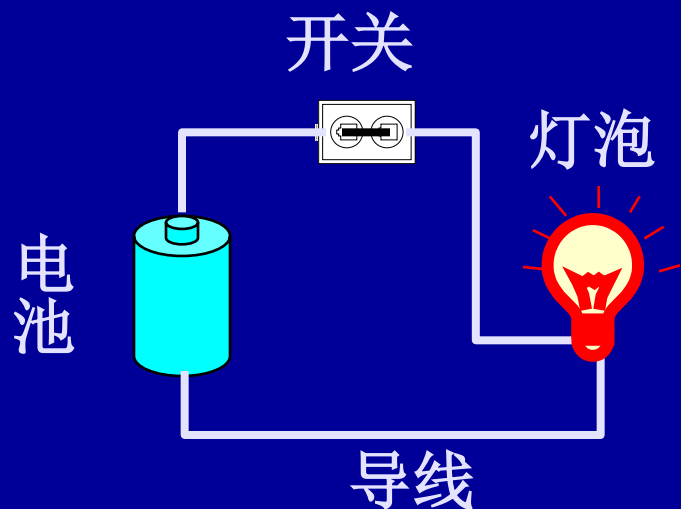
名词

→ 电源：提供电能或电信号的器件
也称之为“激励”

→ 负载：用电设备。消耗、存储能量

→ 响应：各支路的电压和电流

2. 电路模型 (Circuit Model)



电路模型 \longrightarrow 反映实际电路器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 \longrightarrow 具有某种确定的电磁性质
具有精确的数学定义。

几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

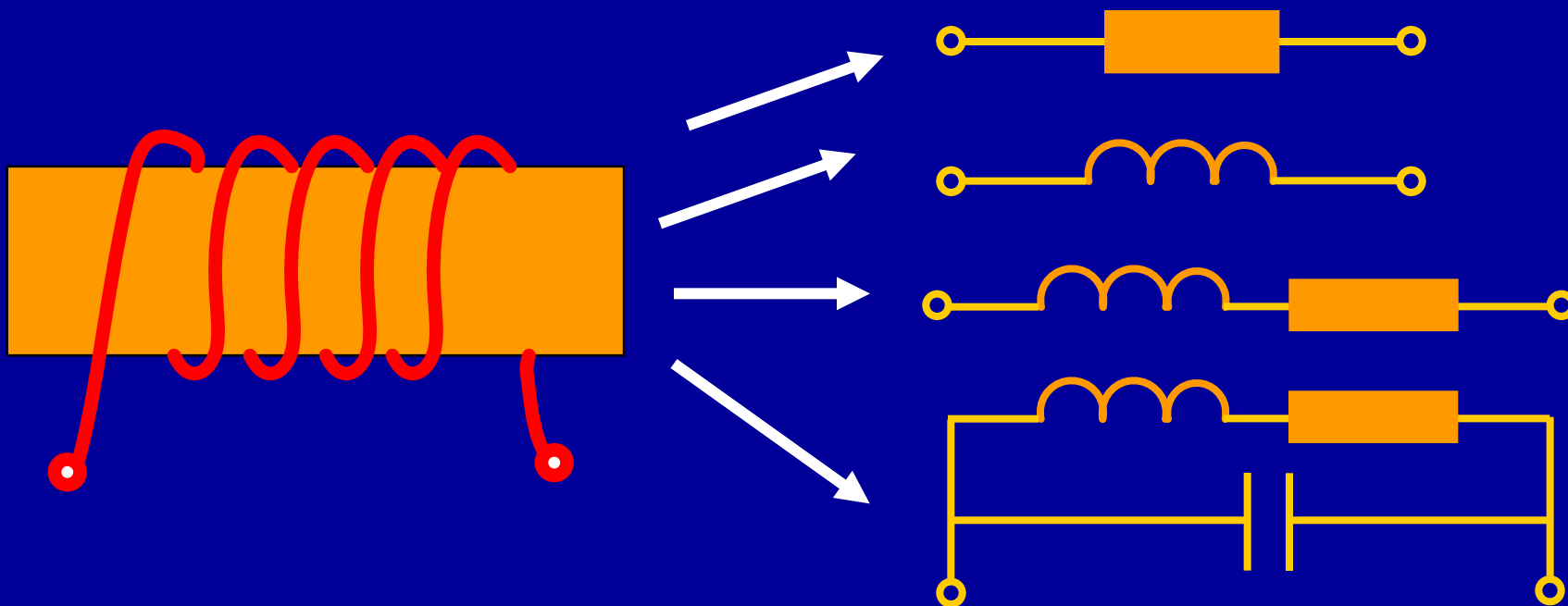
电容元件：表示产生电场，储存电场能量的元件

电源元件：表示各种将其它形式的能量转变成电能的元件

注

- (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模型表示；
- (2) 同一实际电路部件在不同的应用条件下，其模型可以有不同的形式。

例



1.2 电流和电压的参考方向 (Reference Direction)

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 (Current Reference Direction)

电流

→ 带电粒子有规则的定向运动，形成电流

电流强度

→ 单位时间内通过导体横截面的电荷量

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

单位



A (安培)

kA、mA、 μ A

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

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

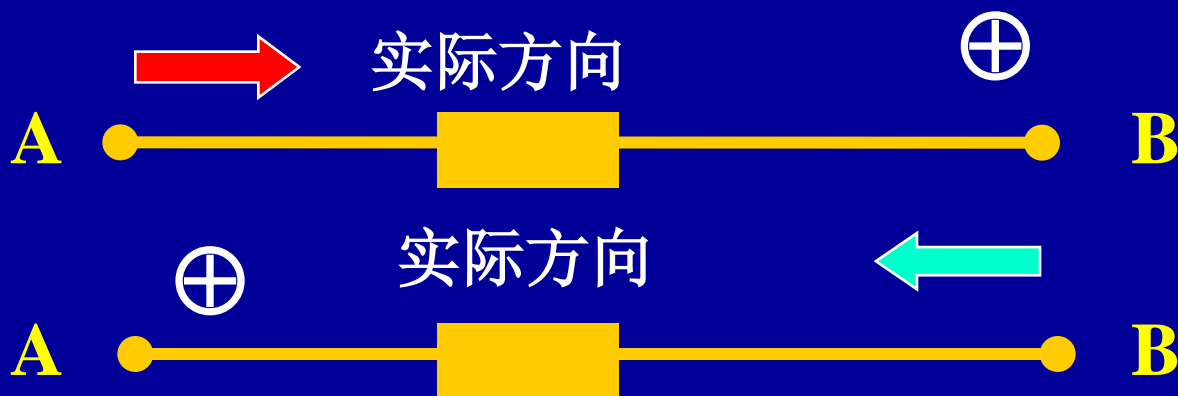
$$1\mu\text{A}=10^{-6}\text{A}$$

方向



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:

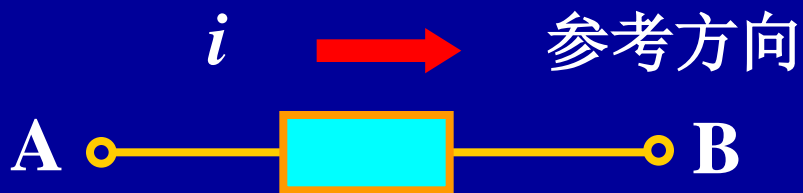


问题

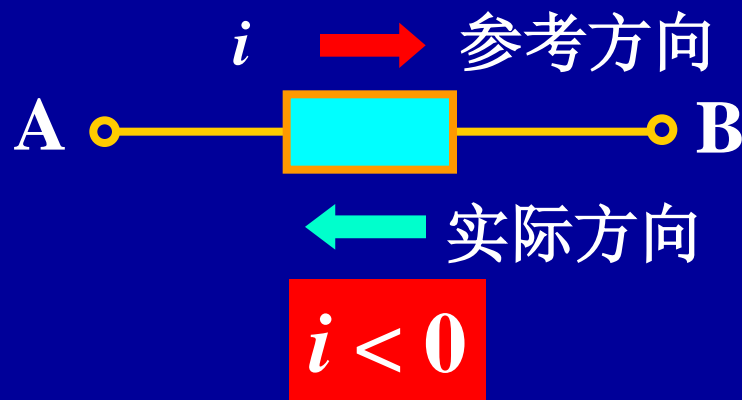
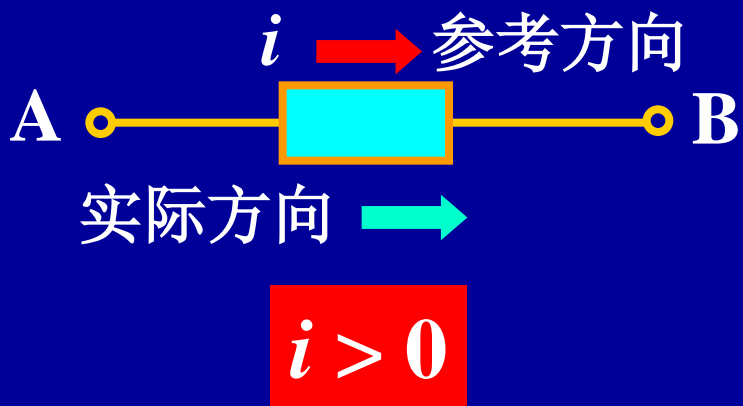
复杂电路或电路中的电流随时间变化时，
电流的实际方向往往很难事先判断。

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。



电流的参考方向与实际方向的关系

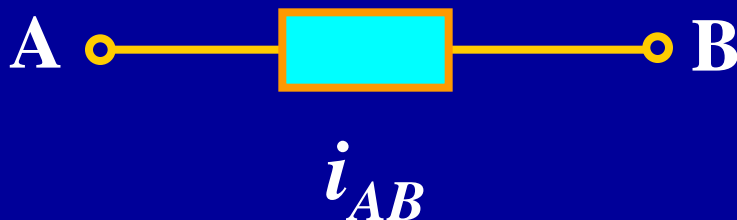


电流参考方向的两种表示：

- 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。



2. 电压的参考方向 (Voltage Reference Direction)

电位 φ

→ 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

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

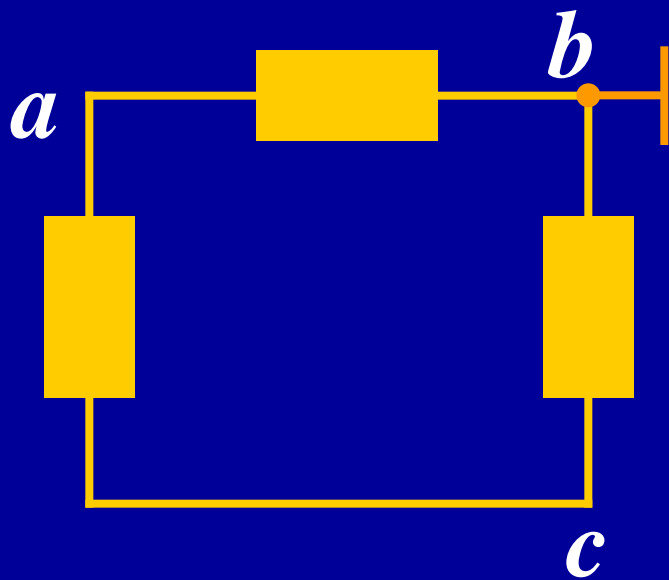
实际电压方向

→ 电位真正降低的方向

单位

V (伏)、kV、mV、 μ V

例



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) 以 b 点为电位参考点

$$\varphi_b = 0$$

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

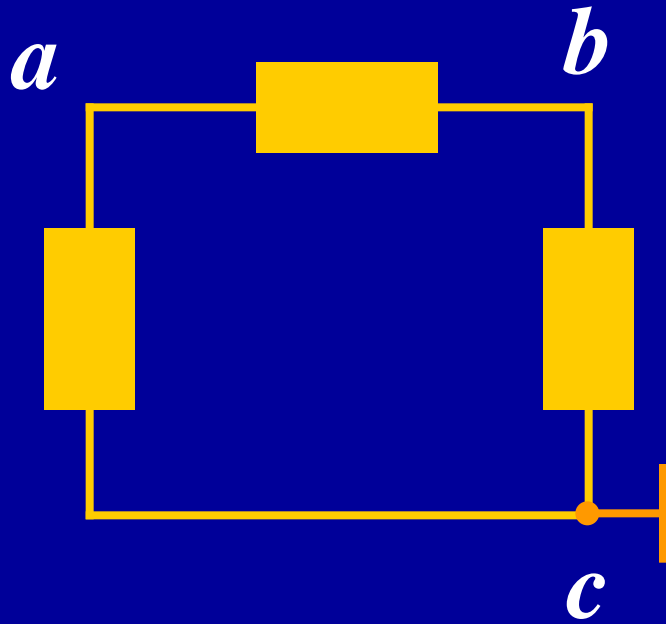
$$\varphi_c = \frac{W_{cb}}{q} = -\frac{W_{bc}}{q} = -\frac{12}{4} = -3V$$

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

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

解

(2) 以c点为电位参考点 $\varphi_c = 0$



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

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

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

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

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是唯一的；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。

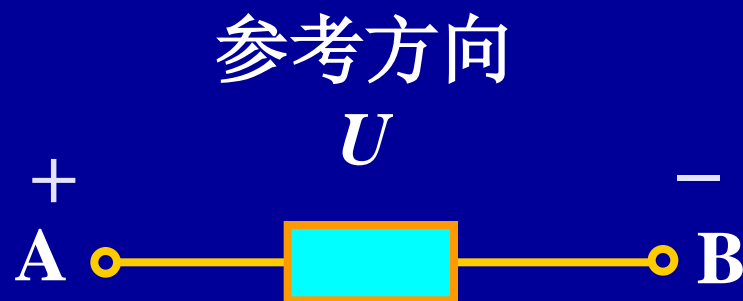
问题

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



假设的电压降方向

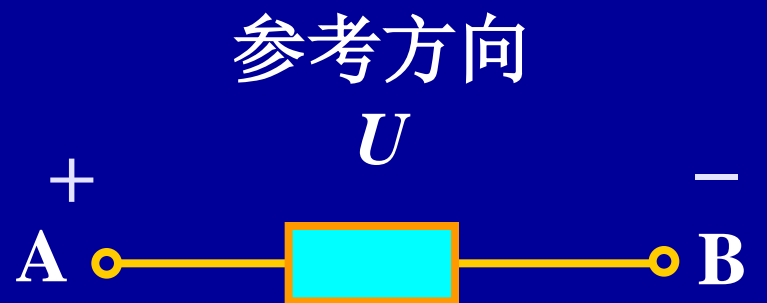


+

实际方向

—

$$U > 0$$



—

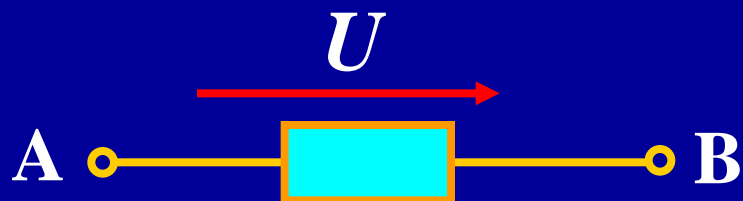
实际方向

+

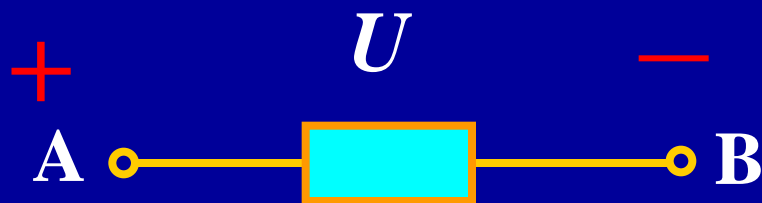
$$U < 0$$

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



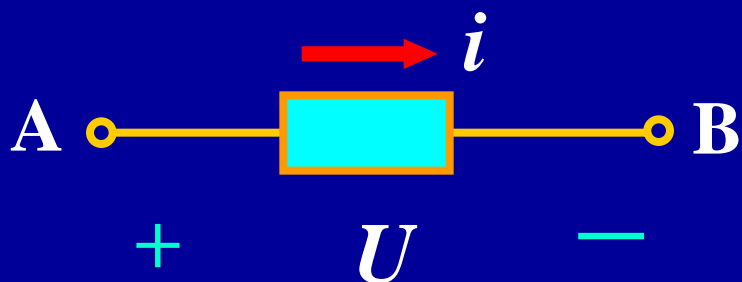
(3) 用双下标表示



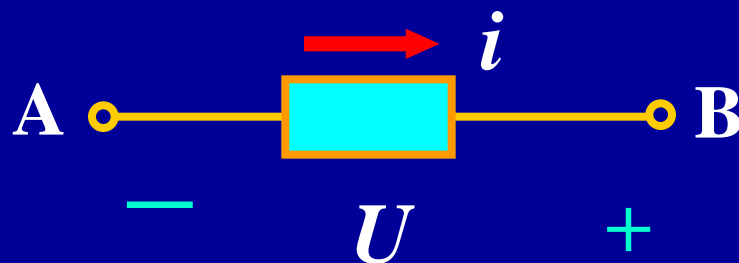
3. 关联参考方向



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**。

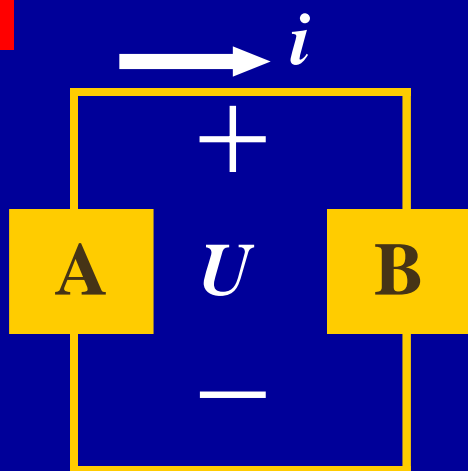


关联参考方向



非关联参考方向

例



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。

注

- (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，但实际方向不变。

1.3 电路元件的功率 (Power)

1. 电功率 \longrightarrow 单位时间内电场力所做的功。

$$P = \frac{dW}{dt}$$

$$U = \frac{dW}{dq}$$

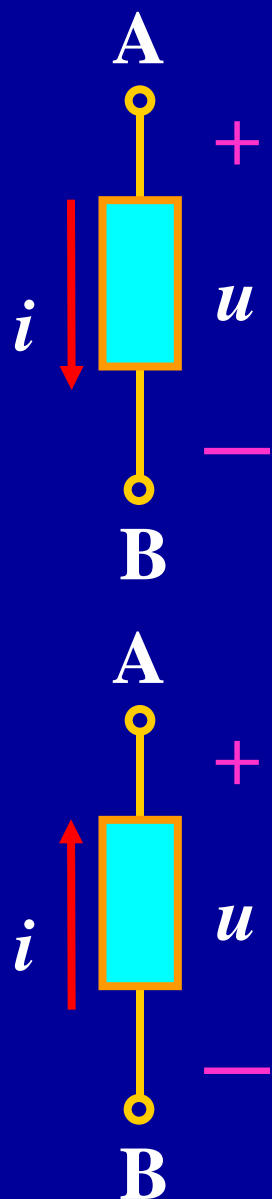
$$I = \frac{dq}{dt}$$

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{dW}{dq} \frac{dq}{dt} = UI$$

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



(1) u, i 取关联参考方向

$P = u i$ 表示元件吸收的功率

$P > 0$ 吸收正功率 (实际吸收)

$P < 0$ 吸收负功率 (实际发出)

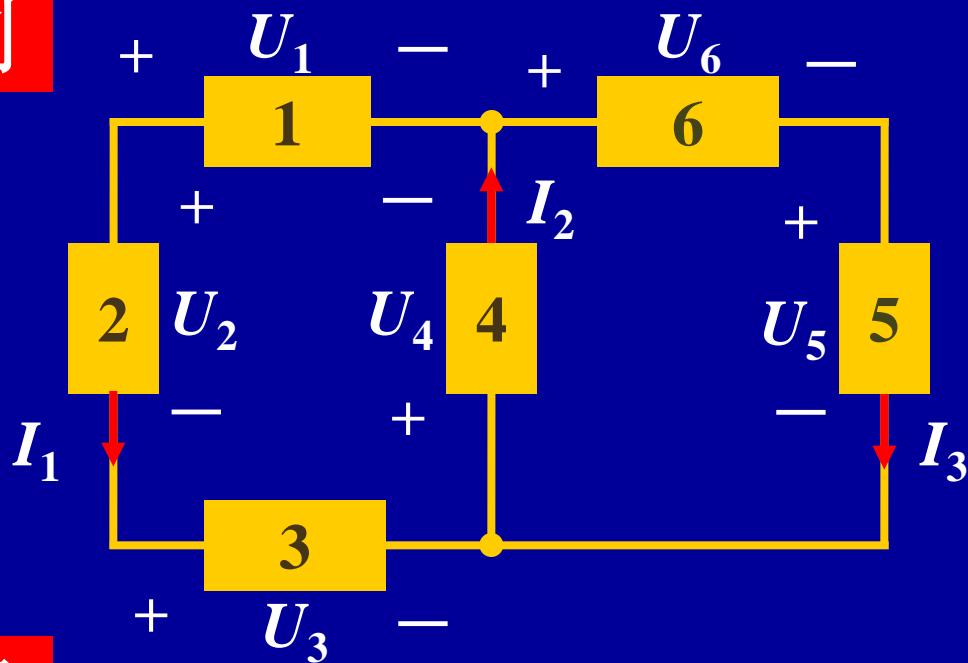
(2) u, i 取非关联参考方向

$P = u i$ 表示元件发出的功率

$P > 0$ 发出正功率 (实际发出)

$P < 0$ 发出负功率 (实际吸收)

例



解

$$P_{1\text{发}} = U_1 I_1 = 1 \times 2 = 2\text{W}$$

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

$$P_{3\text{吸}} = U_3 I_1 = 8 \times 2 = 16\text{W}$$

$$P_{4\text{吸}} = U_4 I_2 = (-4) \times 1 = -4\text{W}$$

$$P_{5\text{吸}} = U_5 I_3 = 7 \times (-1) = -7\text{W}$$

$$P_{6\text{吸}} = U_6 I_3 = (-3) \times (-1) = 3\text{W}$$

求图示电路中各方框所代表的元件消耗或产生的功率。已知：

$$\begin{aligned} U_1 &= 1\text{V}, \quad U_2 = -3\text{V}, \\ U_3 &= 8\text{V}, \quad U_4 = -4\text{V}, \\ U_5 &= 7\text{V}, \quad U_6 = -3\text{V} \\ I_1 &= 2\text{A}, \quad I_2 = 1\text{A}, \\ I_3 &= -1\text{A} \end{aligned}$$

注

对一完整的电路，发出的功率＝消耗的功率

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。

2. 集总参数电路

→ 由集总元件构成的电路

集总元件 → 假定发生的电磁过程都集中在元件内部进行。

集总条件 → $d \ll \lambda$



注意

集总参数电路中 u 、 i 可以是时间的函数，但与空间坐标无关。因此，任何时刻，流入两端元件一个端子的电流等于从另一端子流出的电流；端子间的电压为单值量。

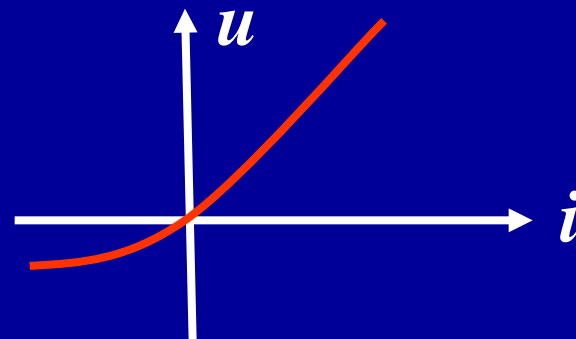
1.5 电阻元件 (Resistor)

1. 定义

电阻元件 → 对电流呈现阻力的元件。其伏安关系用 $u \sim i$ 平面的一条曲线来描述：

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

伏安
特性



2. 线性电阻元件

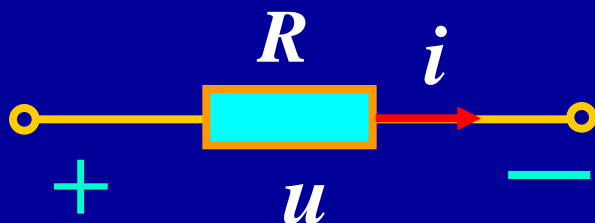
任何时刻端电压与其电流成正比的电阻元件。

电路符号



$u \sim i$ 关系

→ 满足欧姆定律 (Ohm's Law)

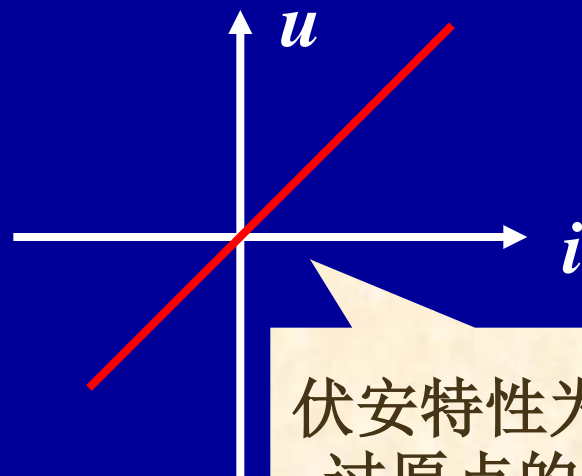


u 、 i 取关联
参考方向

$$u = Ri$$

$$R = u/i$$

$$i = u/R = Gu$$



伏安特性为一条
过原点的直线

单位

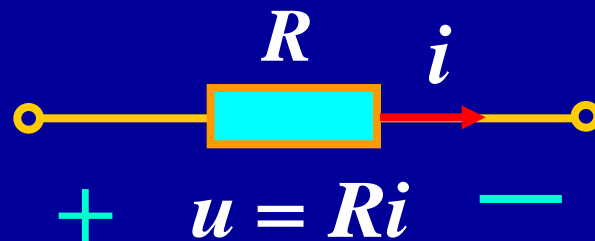
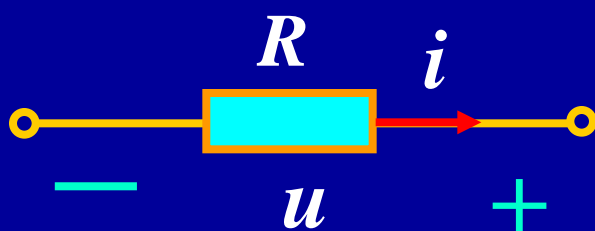
→ R 称为电阻, 单位: Ω (欧) (Ohm, 欧姆)

G 称为电导, 单位: S(西) (Siemens, 西门子)

注

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) 线性电阻是无记忆、双向性的元件

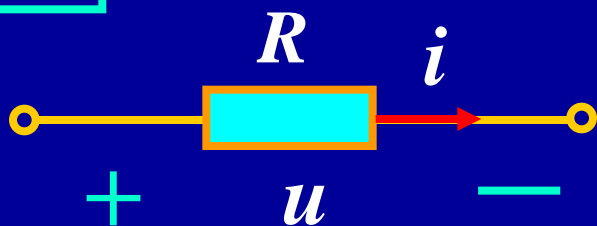


则欧姆定律写为: $u = -Ri$ $i = -Gu$

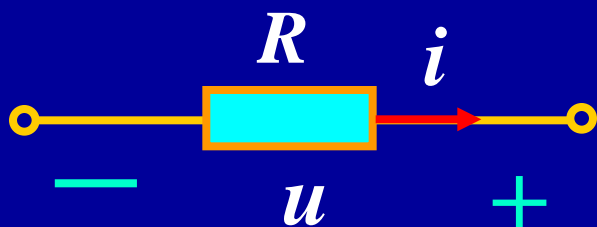
公式和参考方向必须配套使用!

3. 功率和能量

功率



$$\begin{aligned} p_{\text{吸}} &= ui \\ &= i^2 R = u^2 G \end{aligned}$$



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

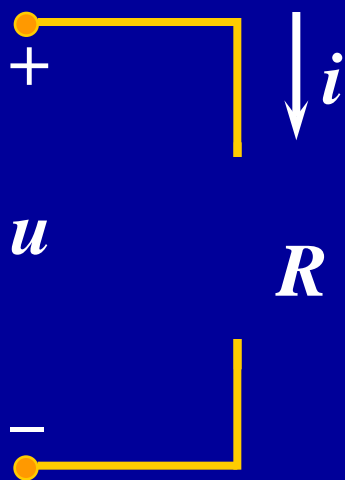
上述结果说明电阻元件在任何时刻总是消耗功率的。

能量

可用功表示。从 t_0 到 t 时刻电阻消耗的能量：

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

4. 电阻的开路与短路



短路

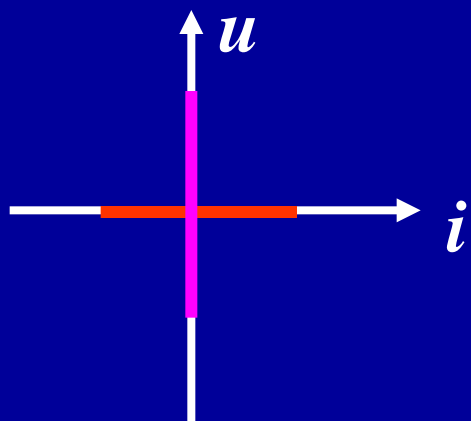
线性电阻元件的电流无论为何值时，其两端电压均为零。

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

→ $R = 0 \quad or \quad G = \infty$

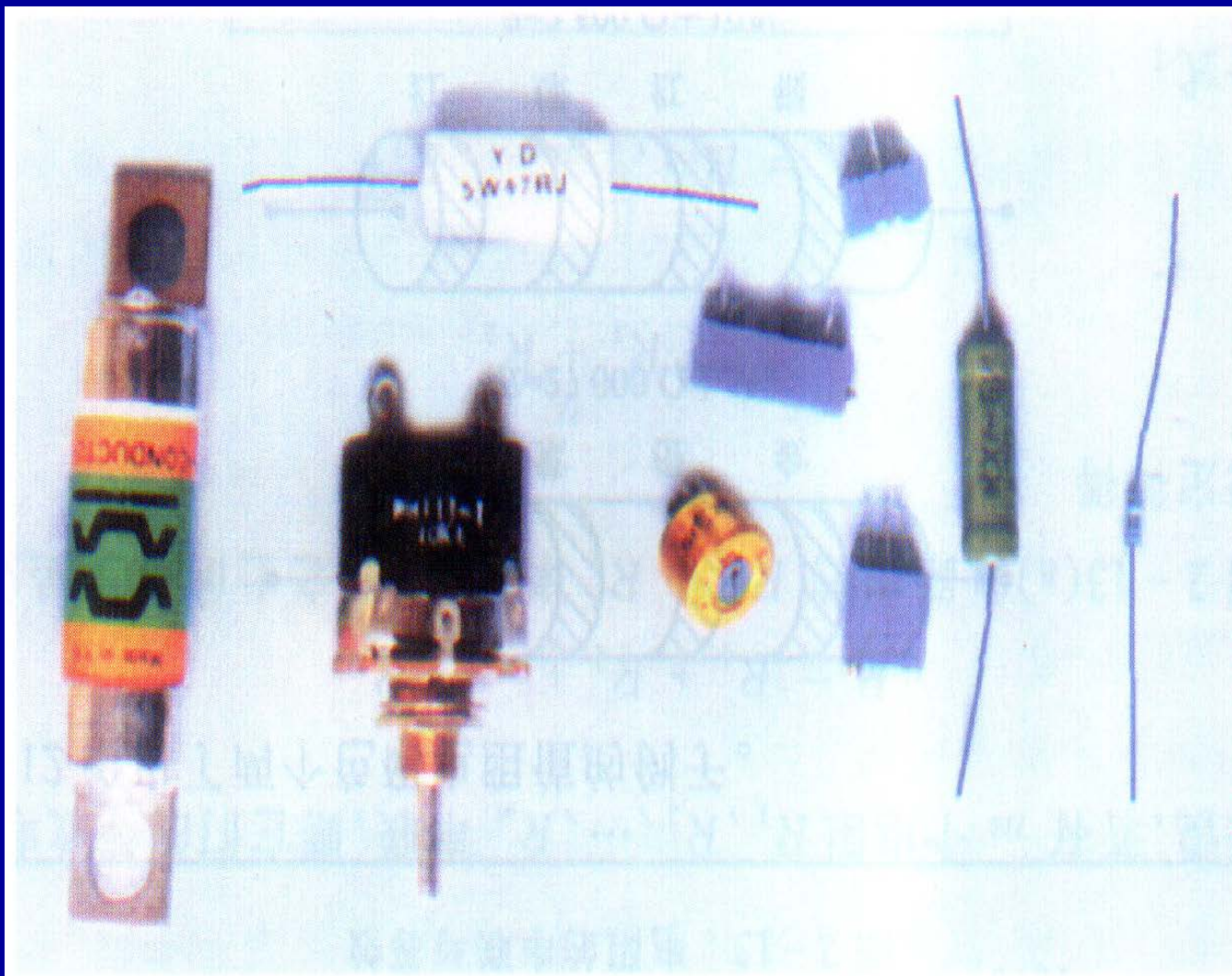
开（断）路

线性电阻元件的端电压无论为何值时，其电流均为零。



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

→ $R = \infty \quad or \quad G = 0$



实际电阻器

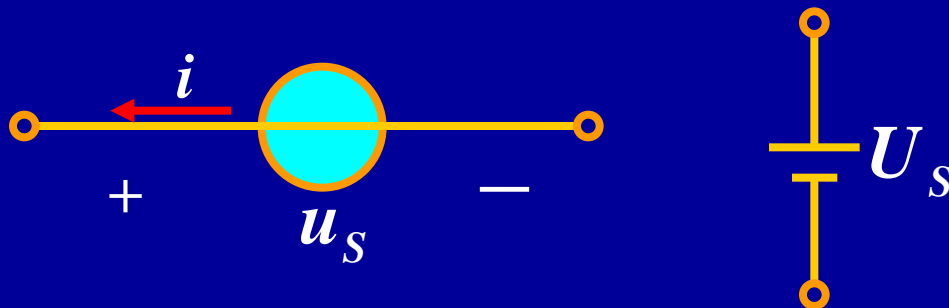
1.6 电压源和电流源

1. 理想电压源

定义

→ 元件两端电压总能保持定值或是一定的时间函数，其电压值与流出的电流 i 无关，这样的元件叫做理想电压源。

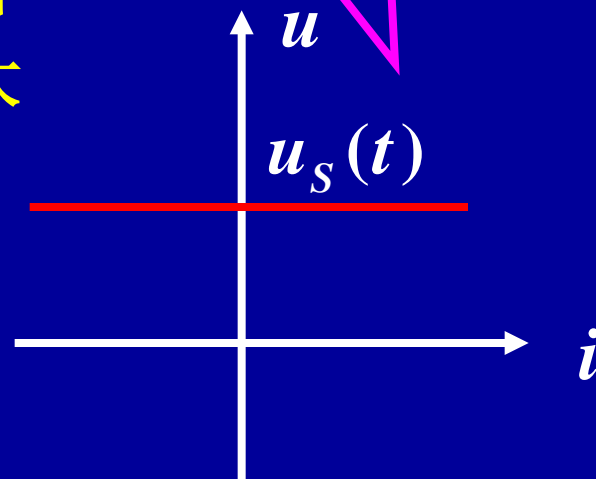
电路符号



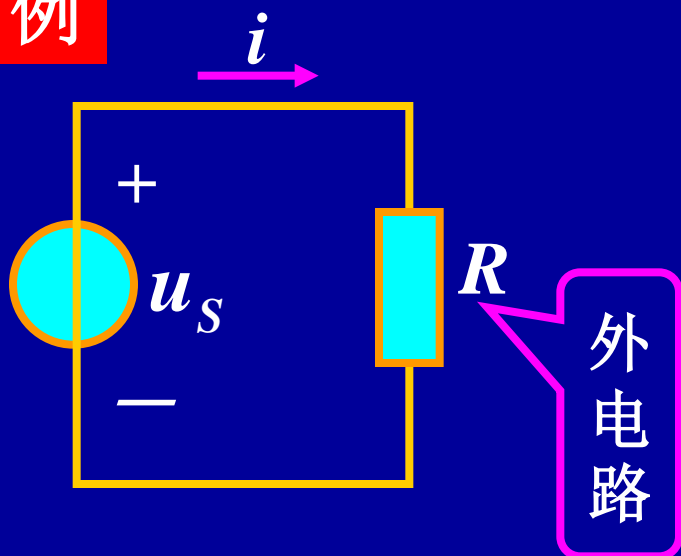
理想电压源的电压、电流关系

- (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。

伏安关系



例



$$i = \frac{u_s}{R}$$

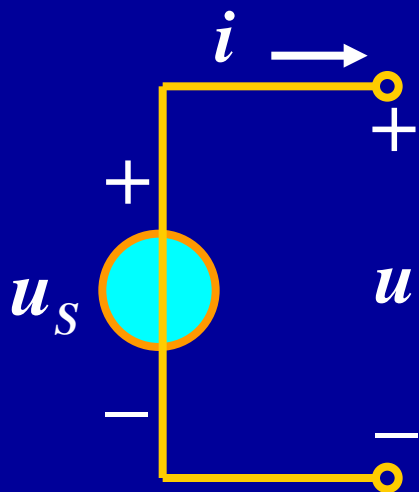
$$i = 0 \quad (R = \infty)$$

$$i = \infty \quad (R = 0)$$

电压源不能短路！

电压源的功率

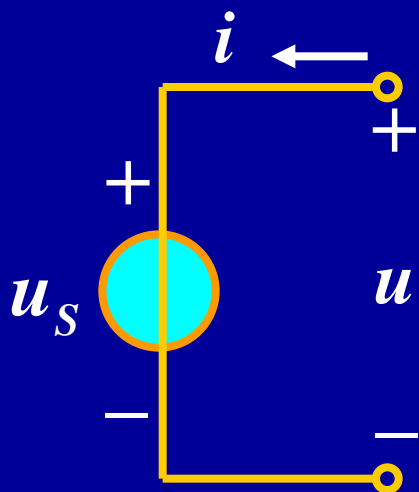
$$\longrightarrow P = u_S i$$



(1) 电压、电流的参考方向非关联

电流（正电荷）由低电位向高电位移动，外力克服电场力作功，电源发出功率。

$$P_{\text{发}} = u_S i \longrightarrow \text{发出功率，起电源作用}$$



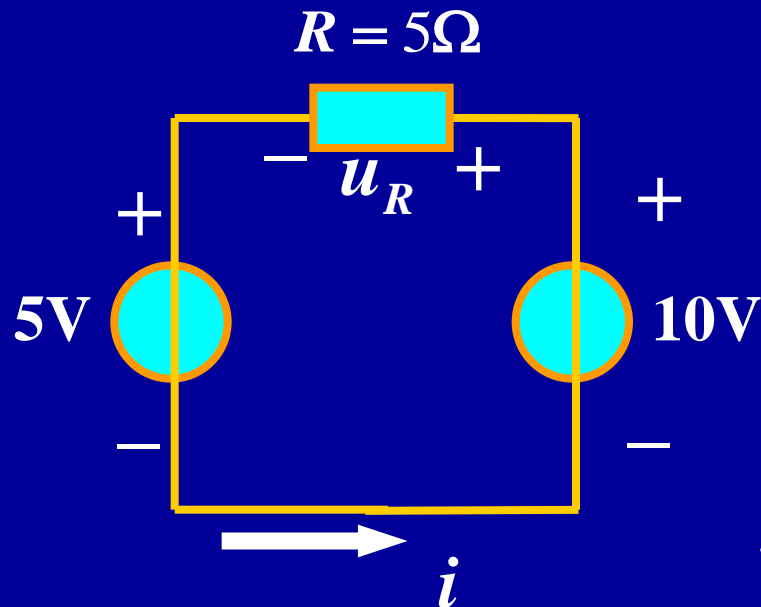
(2) 电压、电流的参考方向关联

电场力做功，电源吸收功率。

$$P_{\text{吸}} = u_S i \longrightarrow \text{吸收功率，充当负载}$$

例

计算图示电路各元件的功率。



解

$$u_R = (10 - 5) = 5V$$

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

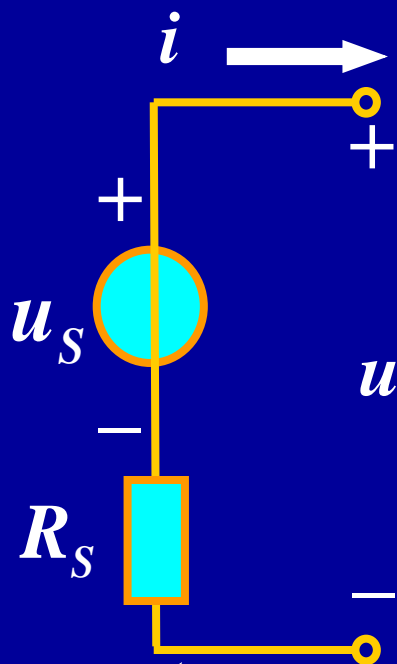
$$P_{10V\text{发}} = u_S i = 10 \times 1 = 10W$$

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

$$P_{R\text{吸}} = Ri^2 = 5 \times 1 = 5W$$

满足: $P(\text{发}) = P(\text{吸})$

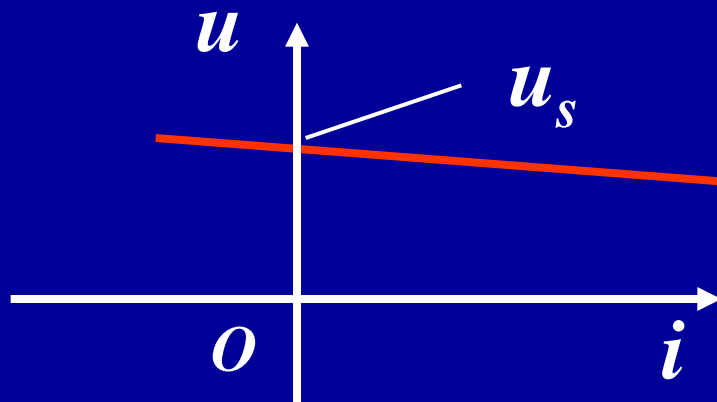
实际电压源



考虑内阻

伏安特性

$$u = u_s - R_s i$$



一个好的电压源要求

$$R_s \rightarrow 0$$

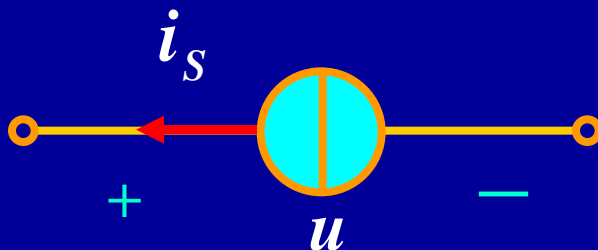
实际电压源也不允许短路。因其内阻小，若短路，电流很大，可能烧毁电源。

2. 理想电流源

定义

→ 输出电流总能保持定值或一定的时间函数，且电流大小与它的两端电压 u 无关。

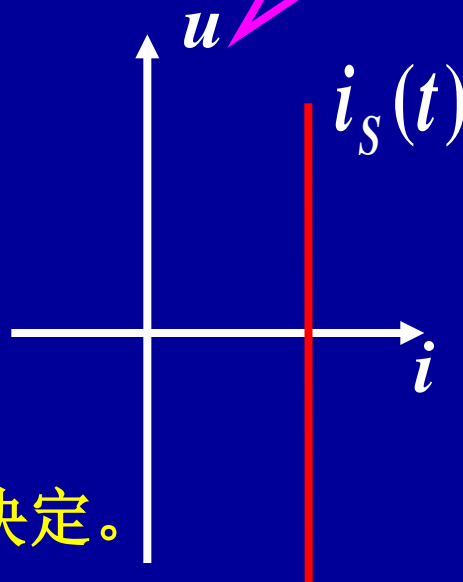
电路符号



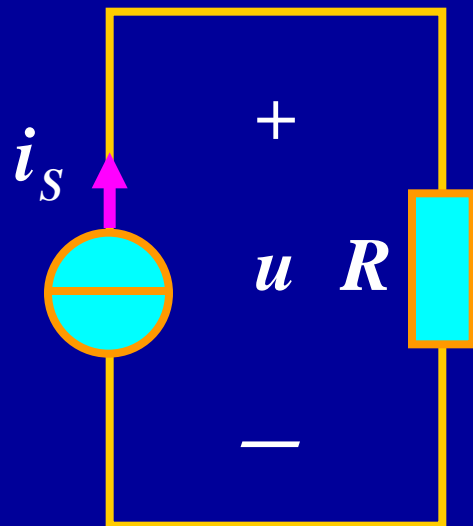
理想电流源的电压、电流关系

- (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流源及外电路共同决定。

伏安
关系



例



外
电
路

$$u = Ri_s$$

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

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

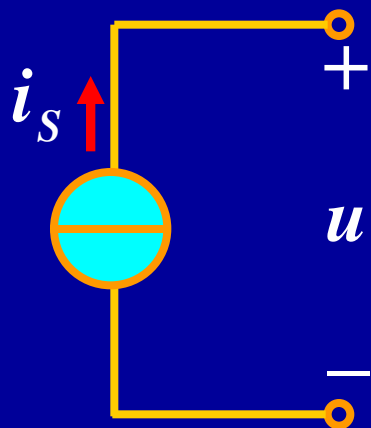
电流源不能开路！

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被激发产生定值的电流等。

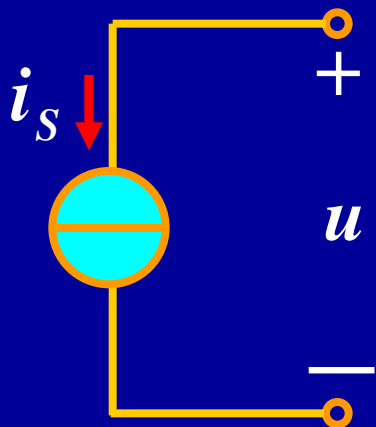
电流源的功率

$$\rightarrow P = ui_s$$



(1) 电压、电流的参考方向非关联

$$P_{\text{发}} = ui_s \rightarrow \text{发出功率, 起电源作用}$$



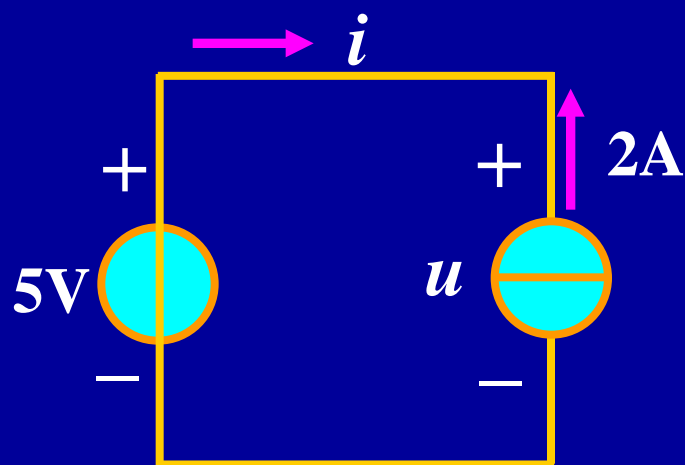
(2) 电压、电流的参考方向关联

$$P_{\text{吸}} = ui_s \rightarrow \text{吸收功率, 充当负载}$$

例

计算图示电路各元件的功率。

解



$$i_s = 2A$$

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

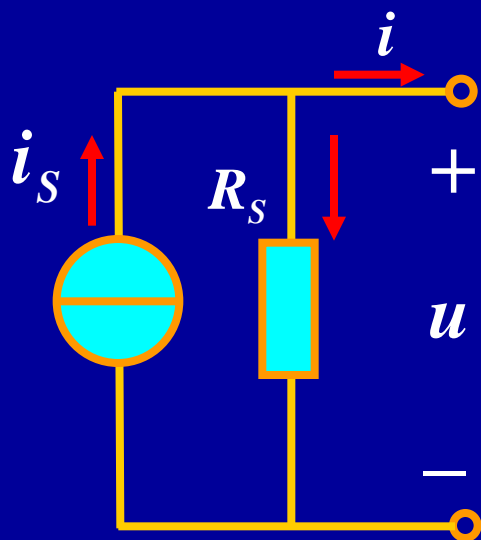
$$u = 5V$$

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

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

满足： $P(\text{发}) = P(\text{吸})$

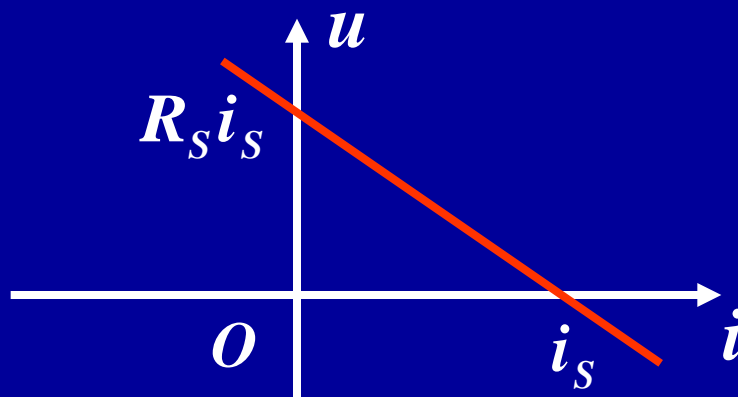
实际电流源



考虑内阻

伏安特性

$$i = i_s - \frac{u}{R_s}$$



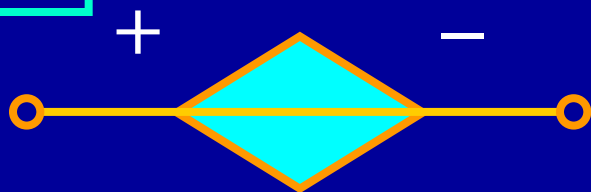
一个好的电流源要求 $R_s \rightarrow \infty$

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。

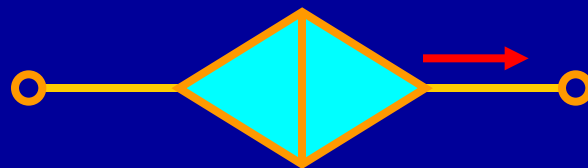
1.7 受控电源 (非独立源) (Controlled Source or Dependent Source)

1. 定义 → 电压源电压（或电流源电流）的大小和方向不是定值或给定的时间函数，而是受电路中某个支路的电压(或电流)控制，这类电源称之为受控源。

电路符号



受控电压源

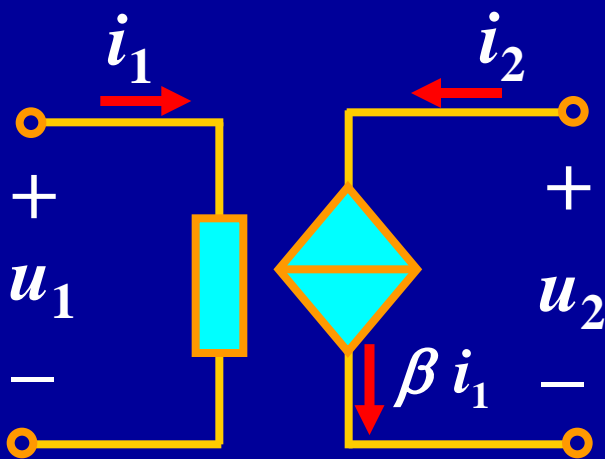


受控电流源

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)



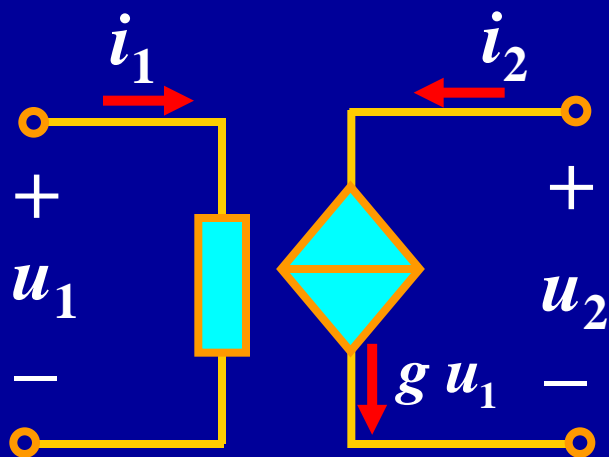
$$i_2 = \beta i_1$$

β : 电流放大倍数

输入：控制部分

输出：受控部分

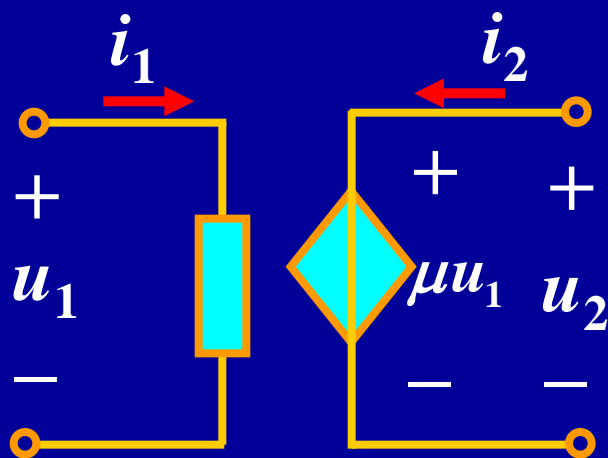
(2) 电压控制的电流源 (VCCS)



$$i_2 = g u_1$$

g : 转移电导

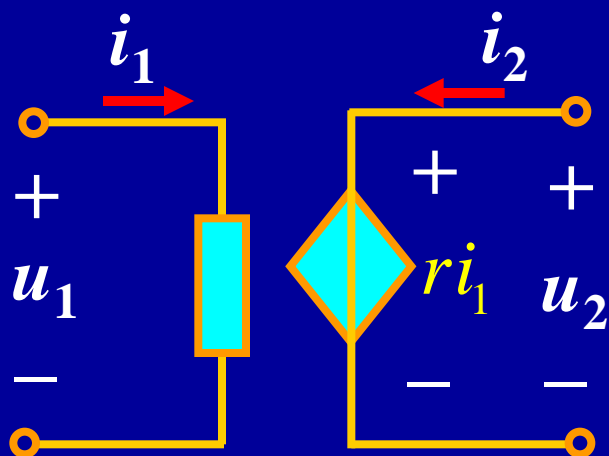
(3) 电压控制的电压源 (VCVS)



$$u_2 = \mu u_1$$

μ : 电压放大倍数

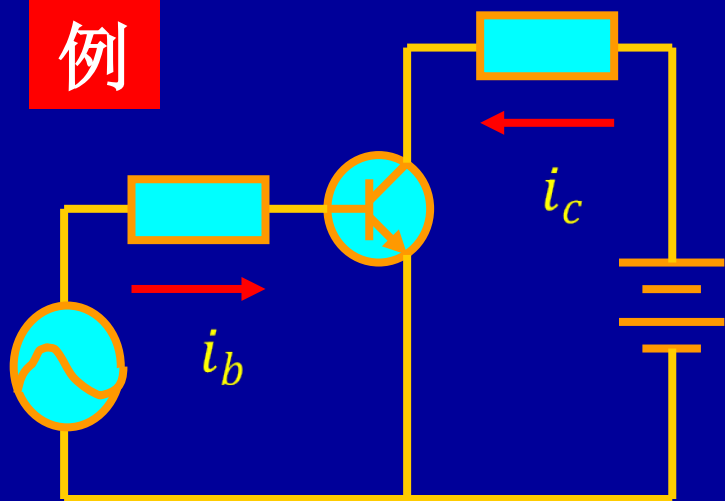
(4) 电流控制的电压源 (CCVS)



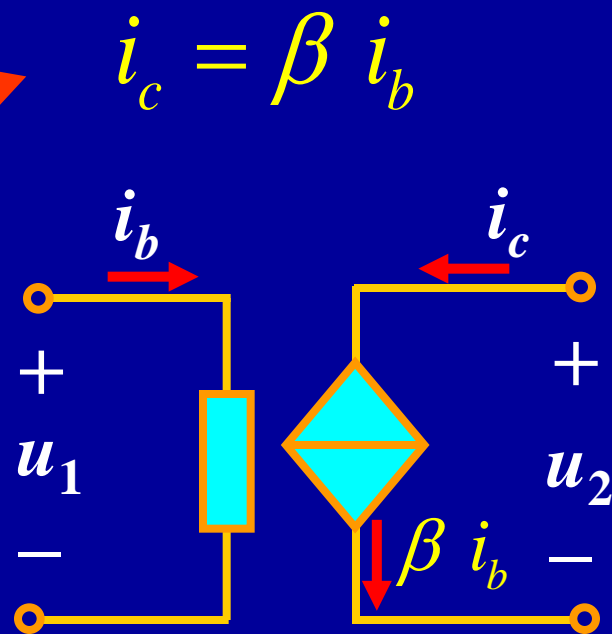
$$u_2 = ri_1$$

r : 转移电阻

例



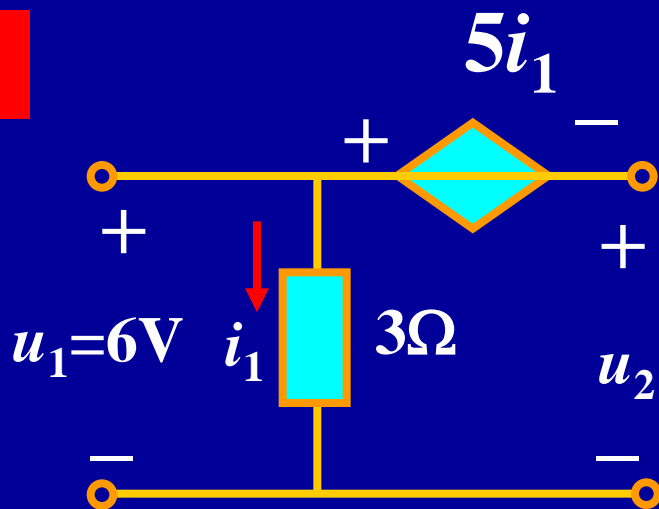
电路模型



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) 独立源在电路起“激励”作用，在电路中产生电压、电流，而受控源只是反映输出端与输入端的控制关系，在电路中不能作为“激励”。

例



求：电压 u_2 。

解

$$i_1 = 6/3 = 2A$$

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

1.8 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 (KCL) 和基尔霍夫电压定律 (KVL)。它反映了电路元件连接之后所有支路电压和电流应遵循的基本规律，是分析集总参数电路的基本定律。

电路电压和电流	{	VCR	元件特性
		KCL、KVL	连接结构

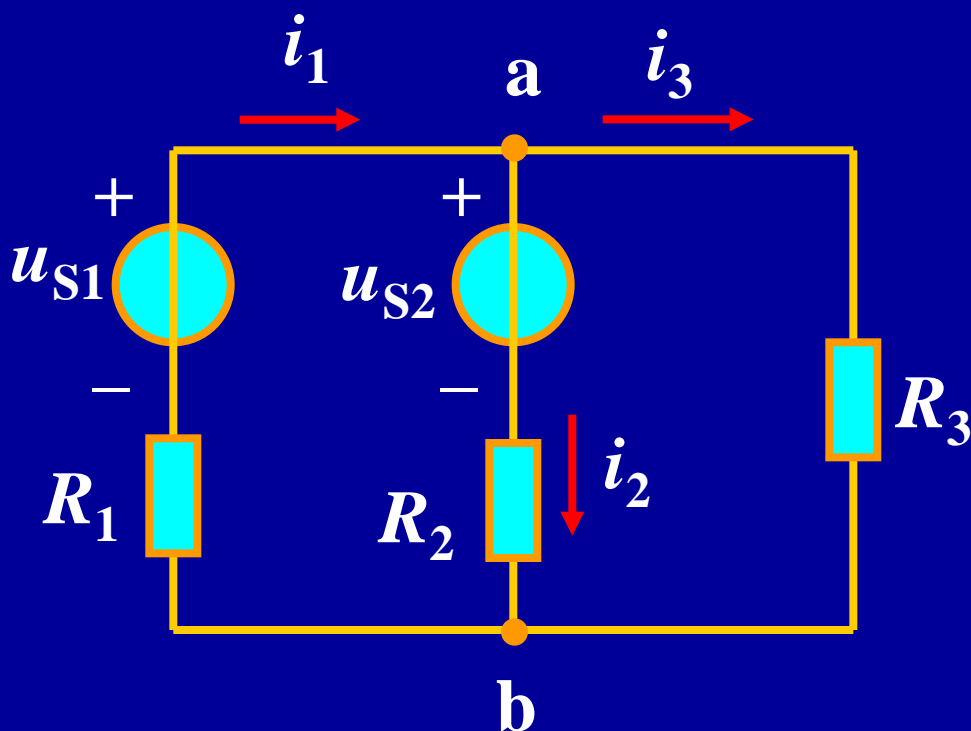
基尔霍夫定律与VCR 构成了电路分析的基础。

1. 几个名词

(1) 支路 (branch)

电路中每一个二端元件就叫一条支路

电路中通过同一电流的分支。(b)



$b=5$

$b=3$

$n=2$

(2) 结点 (node)

→ 三条或三条以上支路的连接点称为结点。

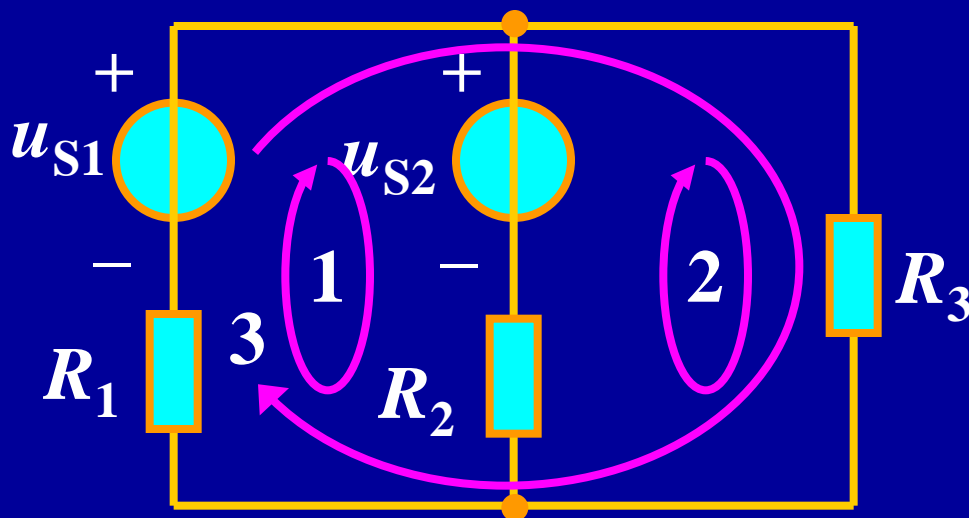
两个结点之间至少有一个电路元件。

(3) 路径(path)

→ 两结点间的一条通路。由支路构成。

(4) 回路(loop)

→ 由支路组成的闭合路径。(l)



(5) 网孔(mesh)

对平面电路，其内部不含任何支路的回路称为网孔。

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。

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

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

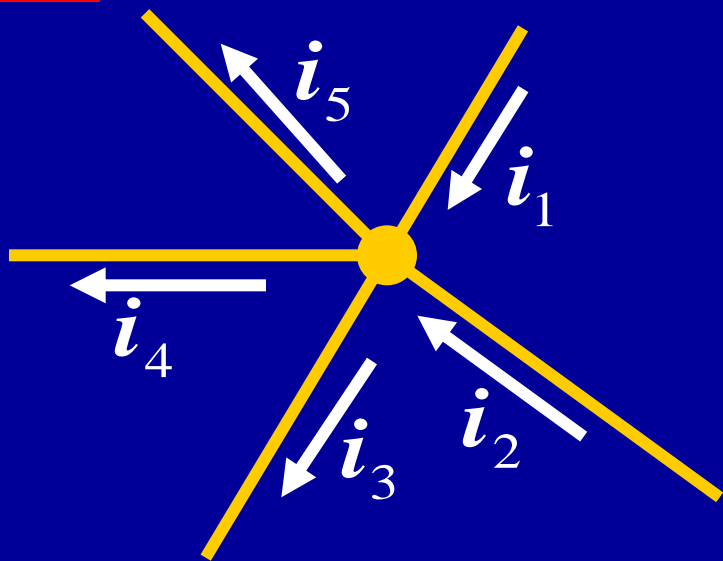
流进的电流等于流出的电流

例

令流出为“+”，有：

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

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

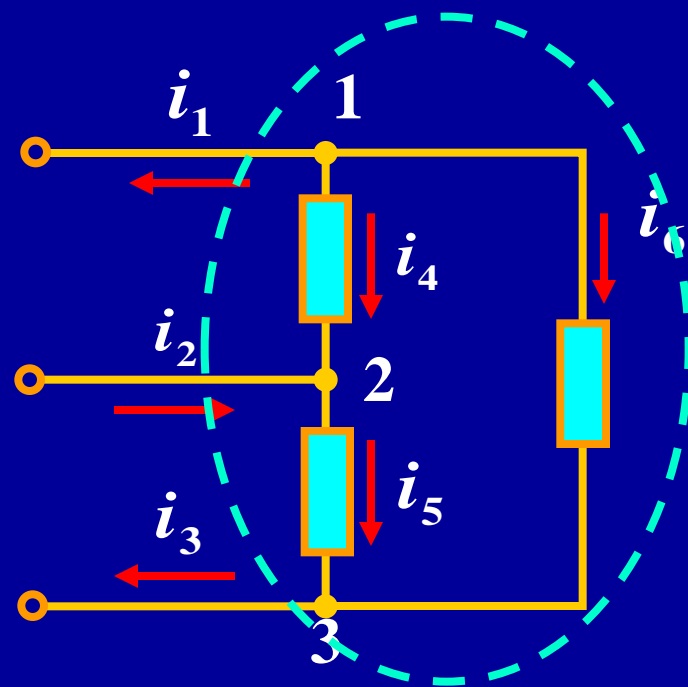


例

$$i_1 + i_4 + i_6 = 0$$
$$-i_2 - i_4 + i_5 = 0$$
$$i_3 - i_5 - i_6 = 0$$

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是对支路电流施加的约束, 与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) KCL方程是按电流参考方向列写, 与电流实际方向无关。

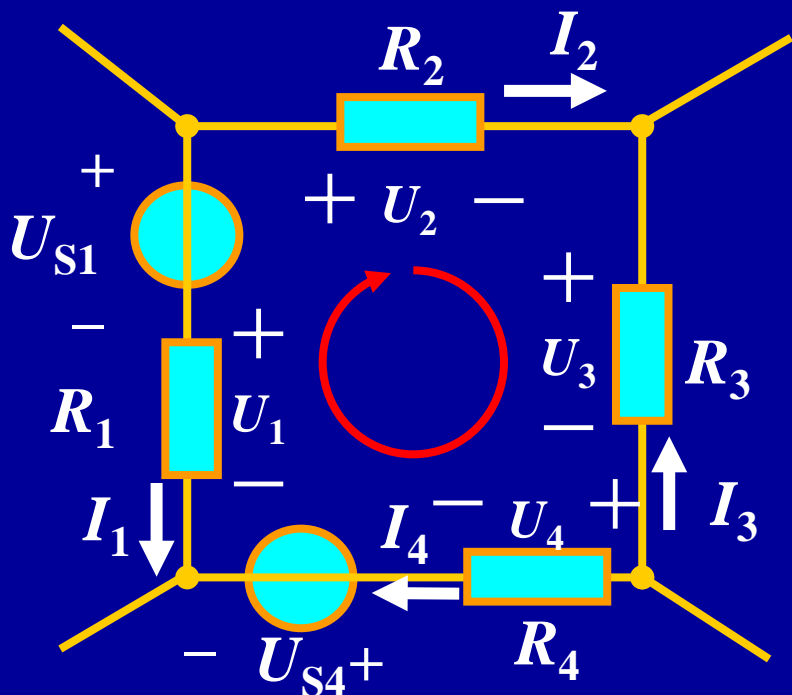
3. 基尔霍夫电压定律 (KVL)

在集总参数电路中，任一时刻，沿任一闭合路径绕行，各元件电压的代数和等于零。

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

or

$$\sum u_{\text{降}} = \sum u_{\text{升}}$$



(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。

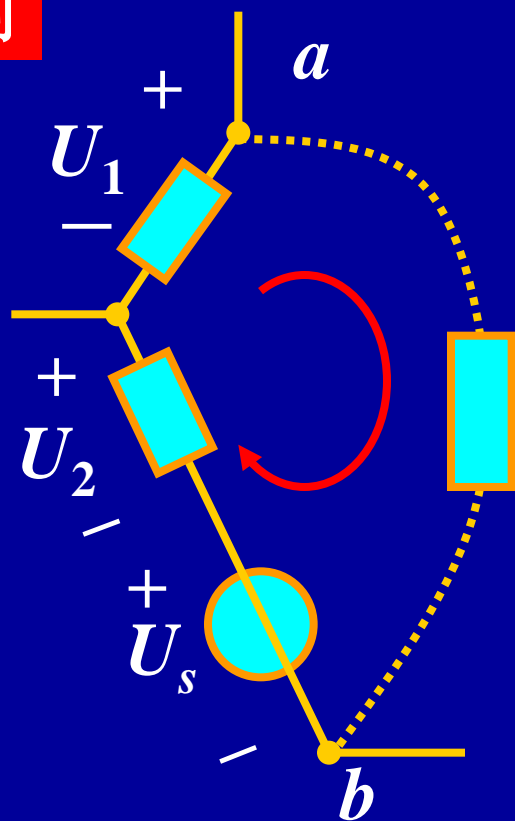
$$-U_1 - U_{S1} + U_2 + U_3 + U_4 + U_{S4} = 0$$

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

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

KVL也适用于电路中任一假想的回路

例



$$U_{ab} = U_1 + U_2 + U_s$$

明确

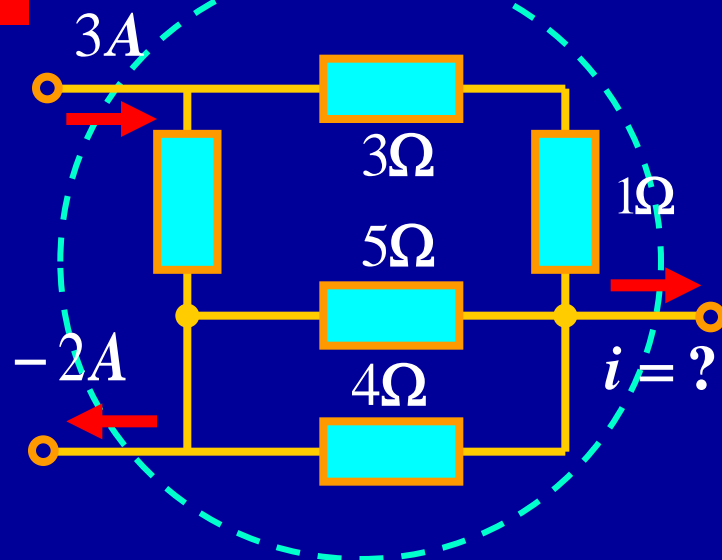
- (1) KVL的实质反映了电路遵从能量守恒定律;
- (2) KVL是对回路电压施加的约束，与回路各支路上接的是什么元件无关，与电路是线性还是非线性无关;
- (3) KVL方程是按电压参考方向列写，与电压实际方向无关。

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。

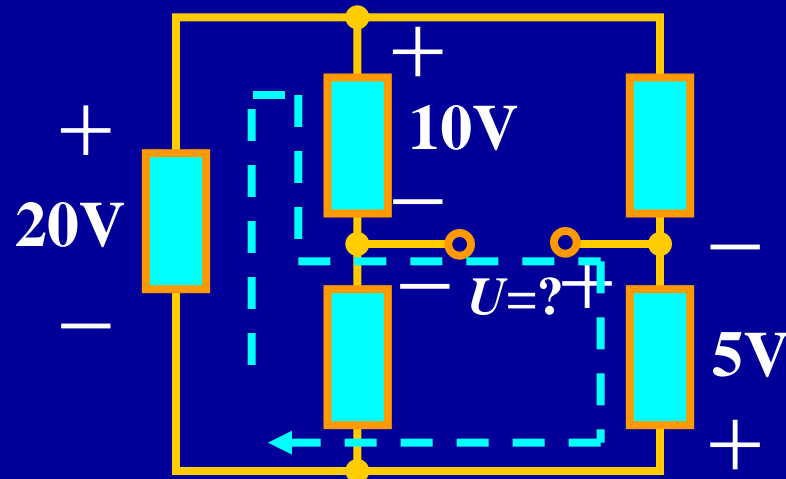
思考

1.



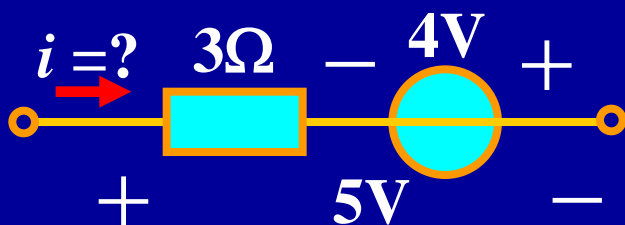
$$i = 3 - (-2) = 5A$$

2.



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

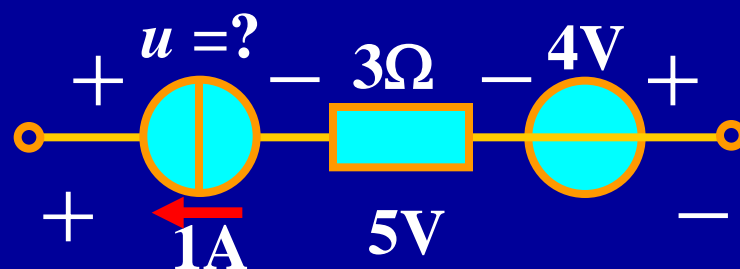
3.



$$3i - 4 = 5$$

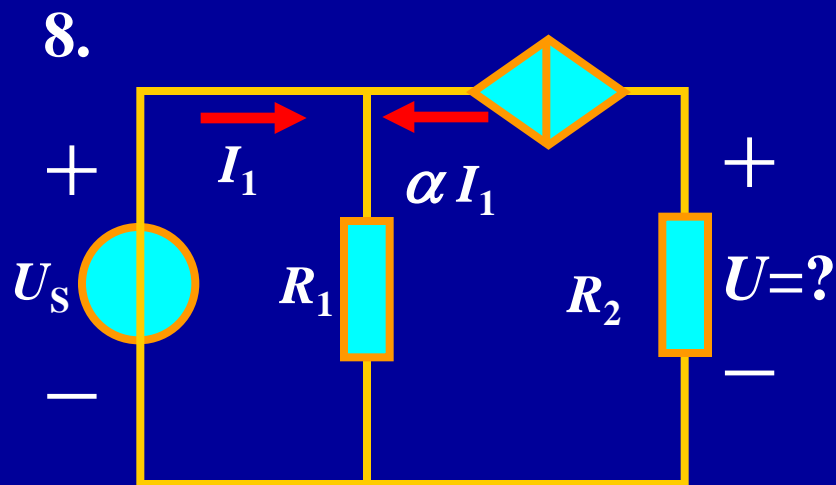
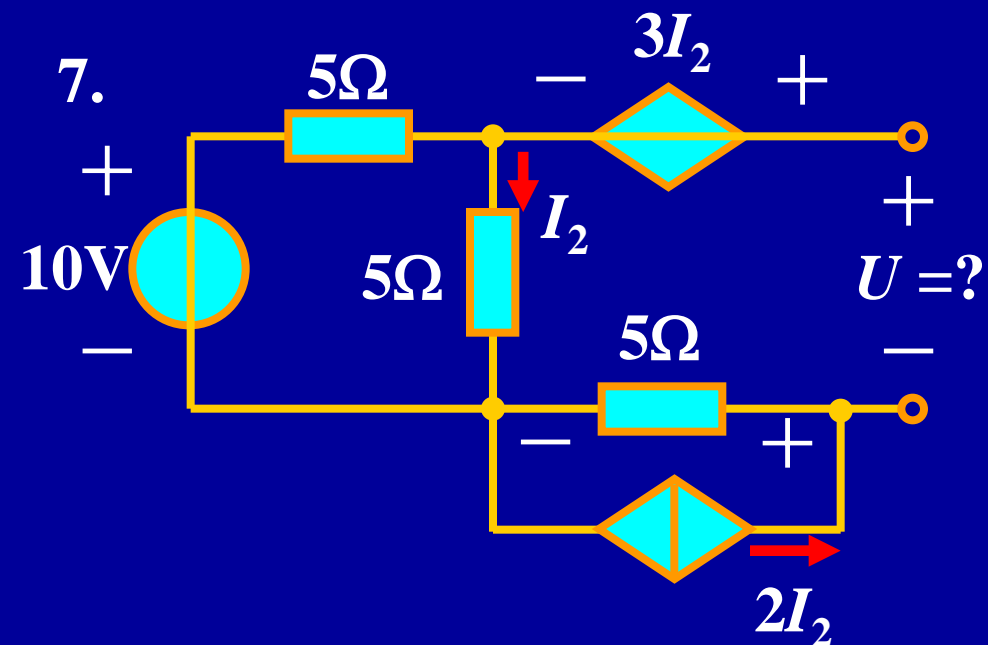
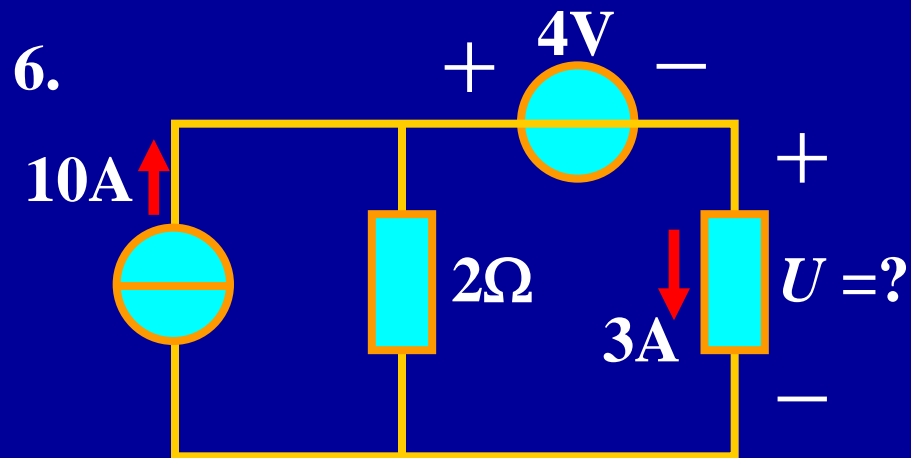
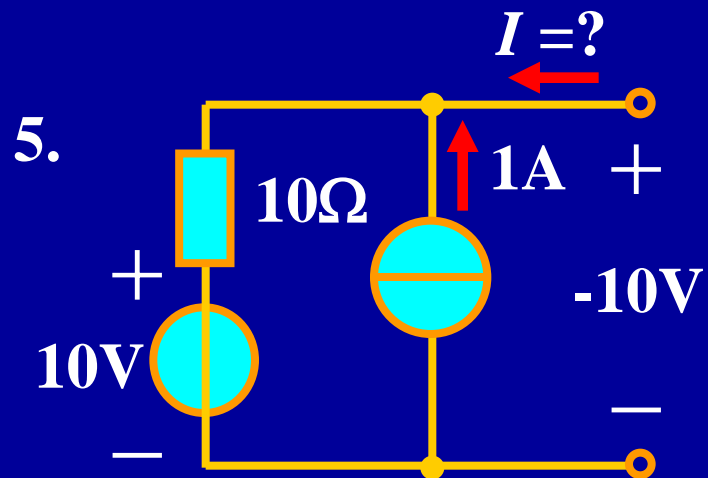
$$i = 3A$$

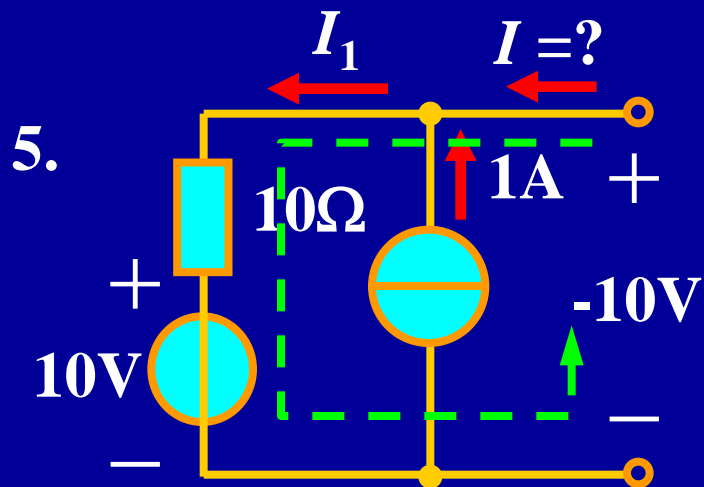
4.



$$4 + 3 - u + 5 = 0$$

$$u = 12V$$



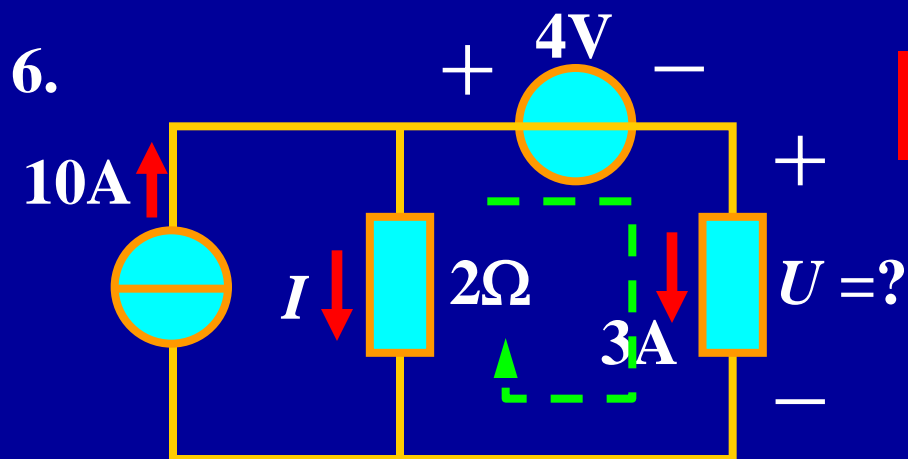


解

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

$$I_1 = -2A$$

$$I = I_1 - 1 = -2 - 1 = -3A$$

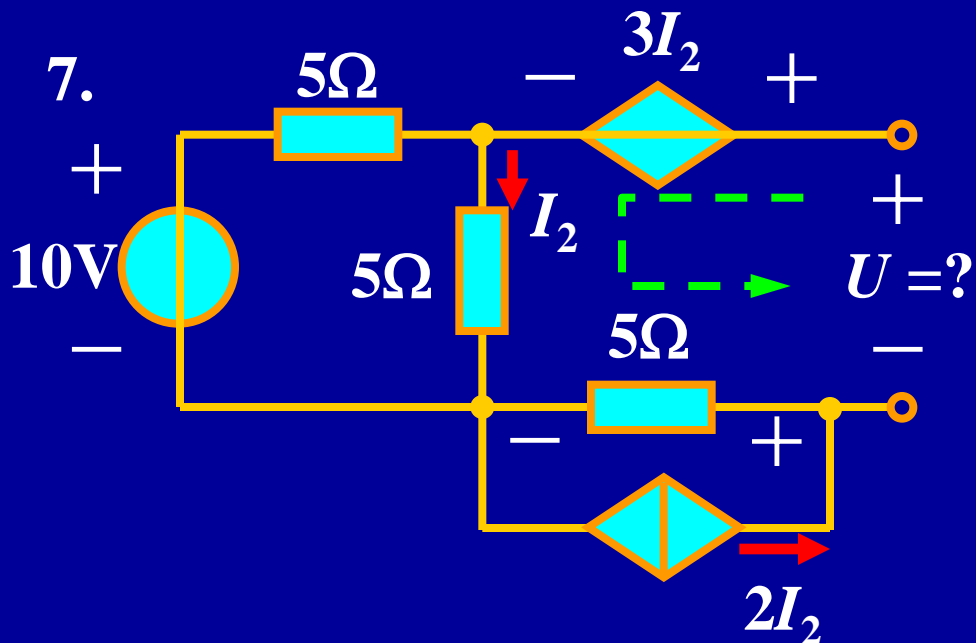


解

$$I = 10 - 3 = 7A$$

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

$$U = 2I - 4 = 14 - 4 = 10V$$



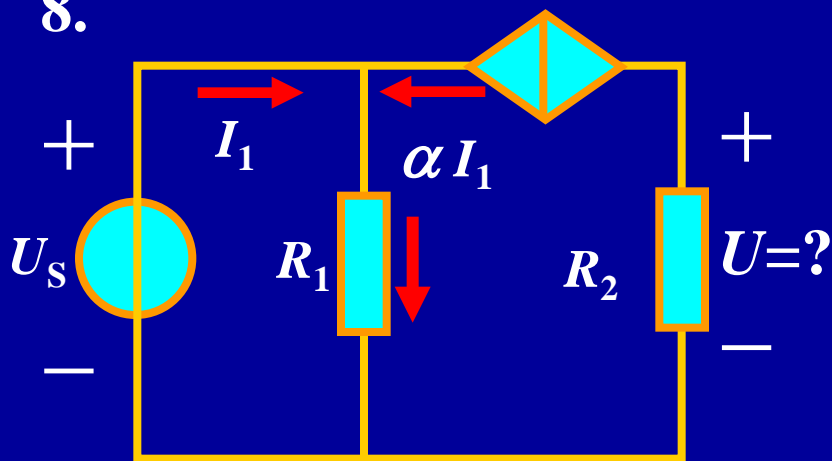
解

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

$$U = 3I_2 + 5I_2 - 5 \times 2I_2$$

$$= -2I_2 = -2\text{V}$$

8.



解

$$U = -R_2 \alpha I_1$$

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

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

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

$$P_s = U_s I_1 = \frac{U_s^2}{R_1(1+\alpha)}$$

$$P_{R2} = R_2 \left[\frac{\alpha U_s}{R_1(1+\alpha)} \right]^2$$

$$\left| \frac{U}{U_s} \right| = \frac{R_2}{R_1} \frac{\alpha}{(1+\alpha)}$$

$$\left| \frac{P_{R2}}{P_s} \right| = \frac{R_2}{R_1} \frac{\alpha^2}{(1+\alpha)}$$

选择参数可以得到
电压和功率放大。