

电 路

平时成绩: 30% (课堂提问、考勤, 作业, 实验)
考试成绩: 70% (期中测验和期末考试)

第一部分主要内容

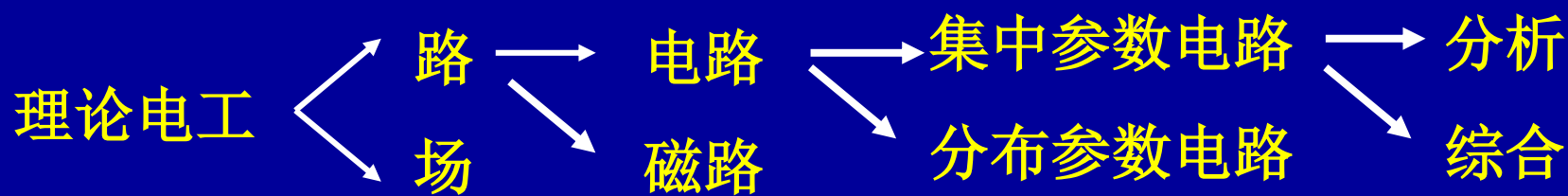
- 1.1 了解集中参数电路与实际电路模型的概念。
- 1.2 电路中的基本变量电压、电流及其参考方向。
- 1.3 电路基本元件电阻、电容、电感、电压源、电流源及受控源。
- 1.4 功率、KCL、KVL。



引 言

●课程的意义

→ 工程意义； 理论意义



●课程的性质和地位

→ 电类专业的技术基础课

- 学习内容
- 学习方法
- 参考书

第1章 电路元件和电路定律

(circuit elements) (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

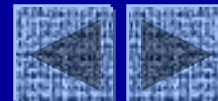


1.1 电路和电路模型 (model)

1. 实际电路 → 由电工设备和电气器件按预期目的的连接构成的电流的通路。

功能 → **a** 能量的传输、分配与转换;
b 信息的传递与处理。

共性 → 建立在同一电路理论上



1.1 电路和电路模型 (model)

一、 **电路**：电工设备构成的整体，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。

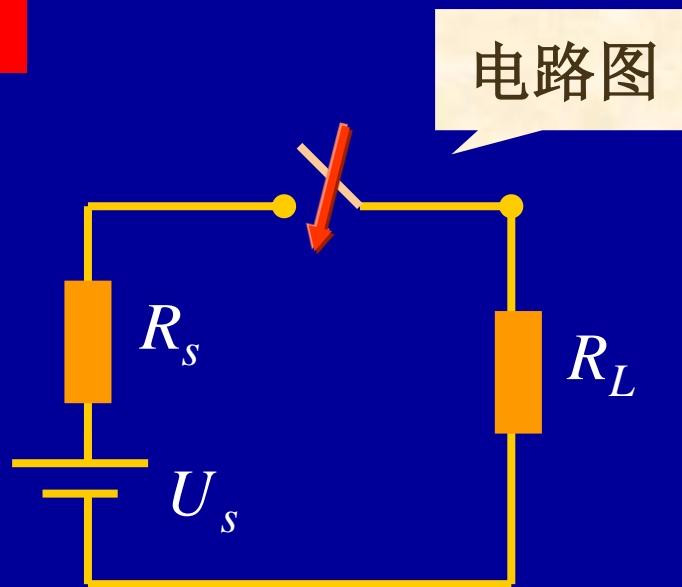
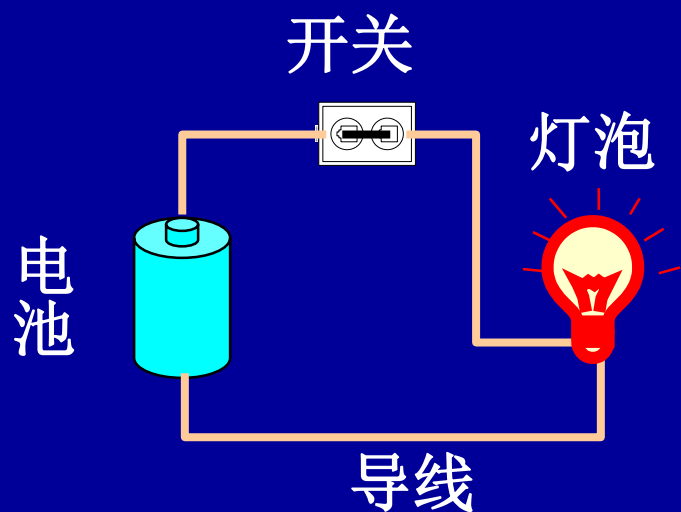
电源(source)：提供能量或信号。



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。



2. 电路模型 (circuit model)



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



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

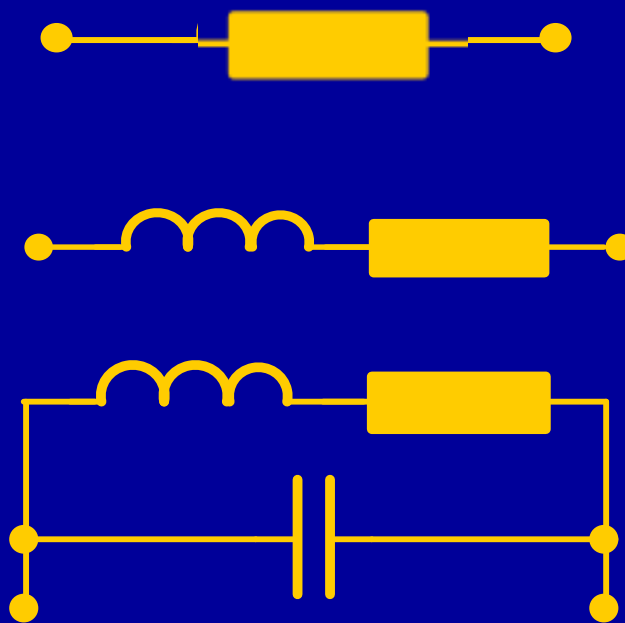
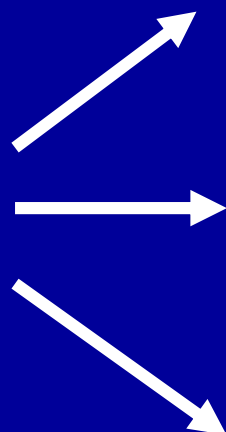
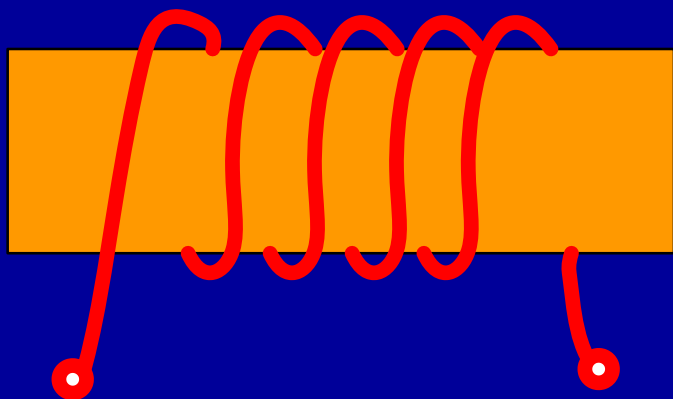
电源元件：表示各种将其它形式的能量转变成电能的元件

注

- 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；
- 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



3. 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

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

三. 集总参数元件与集总参数电路

集总参数元件：每一个具有两个端钮的元件中有确定的电流，端钮间有确定的电压。

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的波长。



已知电磁波的传播速度与光速相同，即

$$v=3 \times 10^5 \text{ km/s (千米/秒)}$$

(1) 若电路的工作频率为 $f=50 \text{ Hz}$ ，则

$$\text{周期 } T = 1/f = 1/50 = 0.02 \text{ s}$$

$$\text{波长 } \lambda = 3 \times 10^5 \times 0.02 = 6000 \text{ km}$$

一般电路尺寸远小于 λ 。

(2) 若电路的工作频率为 $f=50 \text{ MHz}$ ，则

$$\text{周期 } T = 1/f = 0.02 \times 10^{-6} \text{ s} = 0.02 \text{ ns}$$

$$\text{波长 } \lambda = 3 \times 10^5 \times 0.02 \times 10^{-6} = 6 \text{ m}$$

此时一般电路尺寸均与 λ 可比，所以电路不能视为集总参数电路。



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

● 电流强度



单位时间内通过导体横截面的电荷量

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



● 单位

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



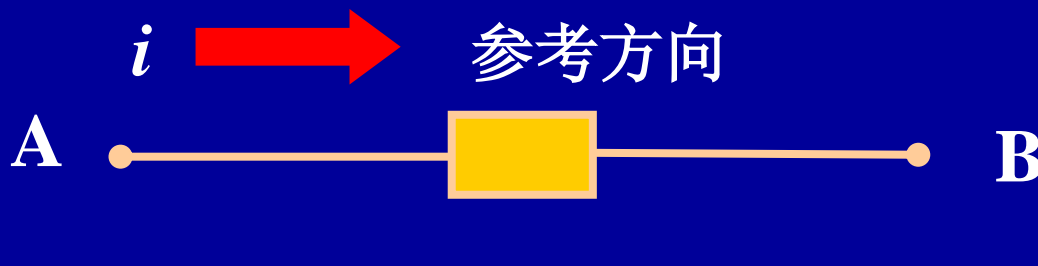
●参考方向



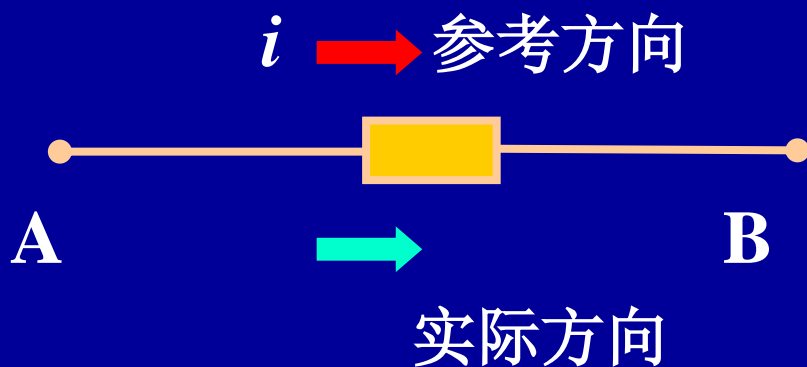
任意假定一个正电荷运动的方向即为电流的参考方向。

电流(代数量)

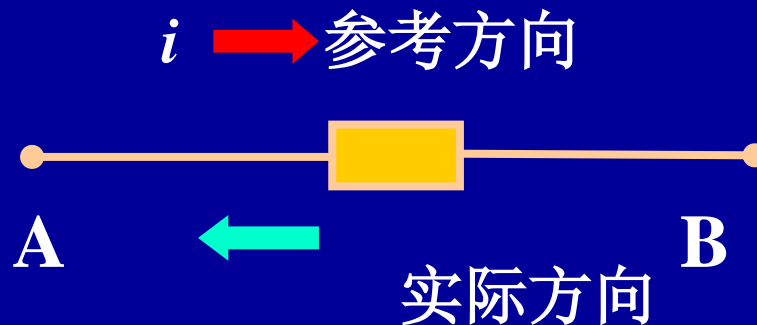
{ 大小
方向



电流的参考方向与实际方向的关系:



$$i > 0$$



$$i < 0$$



电流参考方向的两种表示：

- 用箭头表示：箭头的指向为电流的参考方向。
- 用双下标表示：如 i_{AB} ，电流的参考方向由A指向B。



2. 电压的参考方向 (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

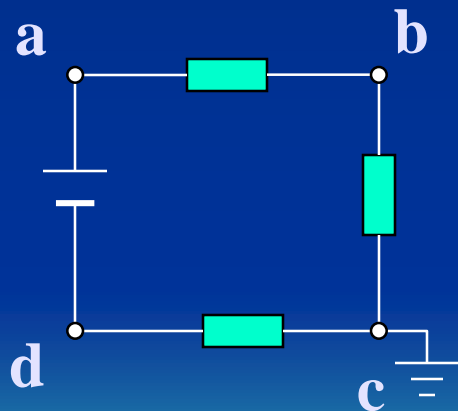
● 单位: V (伏)、kV、mV、 μ V



3. **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**, 所以, 参考点也称为零电位点。

电位用 φ 表示, 单位与电压相同, 也是**V(伏)**。



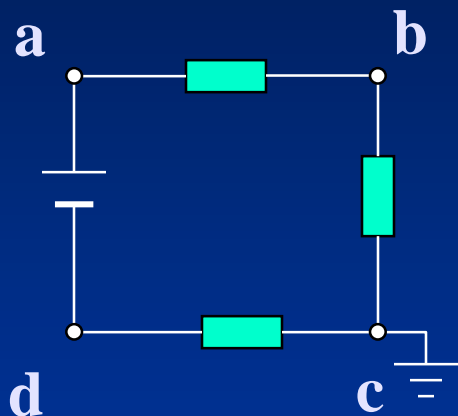
设c点为电位参考点, 则 $\varphi_c=0$

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



两点间电压与电位的关系：

前例



仍设c点为电位参考点, $\varphi_c=0$

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

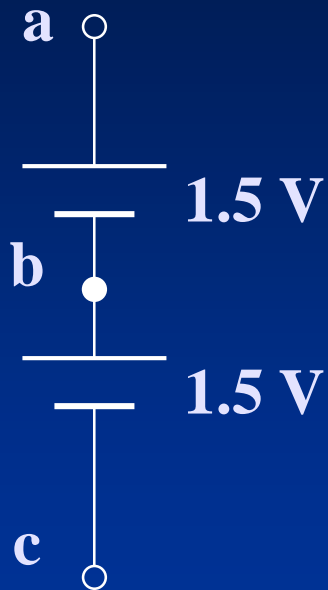
$$U_{ad} = U_{ac} - U_{dc} = \varphi_a - \varphi_d$$

结论： 电路中任意两点间的电压等于该两点间的电位之差。



例.

已知 $U_{ab}=1.5\text{ V}$, $U_{bc}=1.5\text{ V}$



(1) 以a点为参考点, $\varphi_a=0$

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b \rightarrow \varphi_b = \varphi_a - U_{ab} = -1.5\text{ V}$$

$$U_{bc} = \varphi_b - \varphi_c \rightarrow \varphi_c = \varphi_b - U_{bc} = -1.5 - 1.5 = -3\text{ V}$$

$$U_{ac} = \varphi_a - \varphi_c = 0 - (-3) = 3\text{ V}$$

(2) 以b点为参考点, $\varphi_b=0$

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b \rightarrow \varphi_a = \varphi_b + U_{ab} = 1.5\text{ V}$$

$$U_{bc} = \varphi_b - \varphi_c \rightarrow \varphi_c = \varphi_b - U_{bc} = -1.5\text{ V}$$

$$U_{ac} = \varphi_a - \varphi_c = 1.5 - (-1.5) = 3\text{ V}$$

结论: 电路中电位参考点可任意选择; 当选择不同的电位参考时, 电路中各点电位均不同, 但任意两点间电压保持不变。

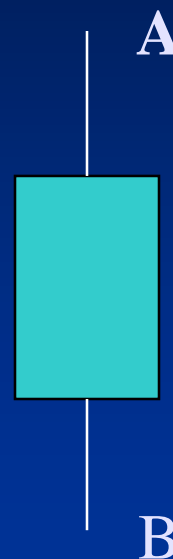


4. **电动势**(*electromotive force*): 局外力克服电场力把单位正电荷从负极经电源内部移到正极所作的功称为电源的电动势。

$$e \stackrel{\text{def}}{=} \frac{dA}{dq}$$

e 的单位与电压相同, 也是 V (伏)

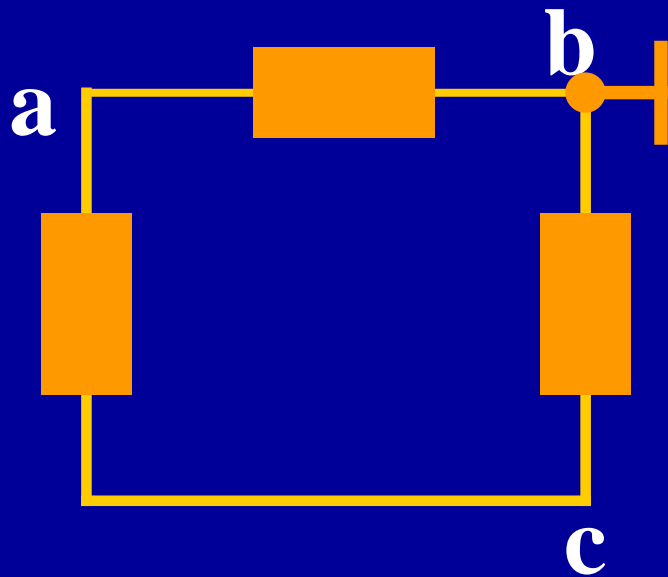
根据能量守恒: $U_{AB} = e_{BA}$ 。电压表示电位降, 电动势表示电位升, 即从A到B的电压, 数值上等于从B到A的电动势。



* 电场力把单位正电荷从A移到B所做的功(U_{AB}), 与外力克服电场力把相同的单位正电荷从B经电源内部移向A所做的功(e_{BA})是相同的, 所以 $U_{AB} = e_{BA}$ 。



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

$$\varphi_b = 0$$

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

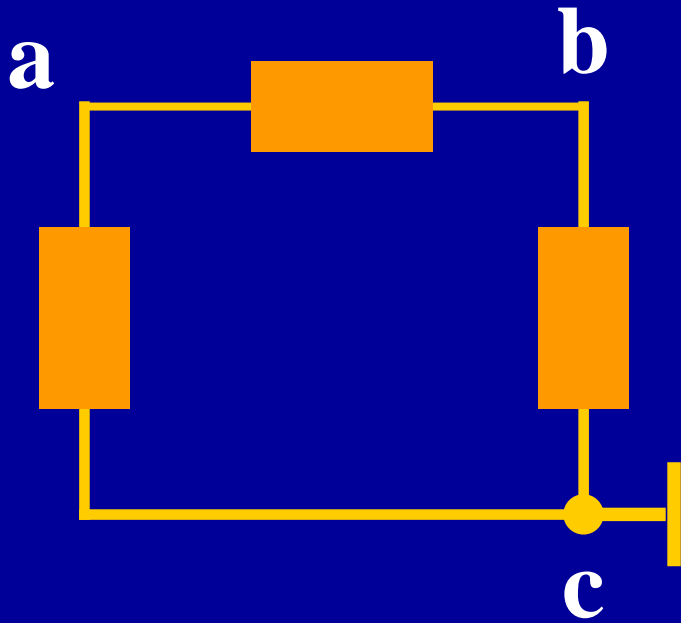
$$\varphi_c = \frac{W_{cb}}{q} = -\frac{W_{bc}}{q} = -\frac{12}{4} = -3V$$

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

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

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



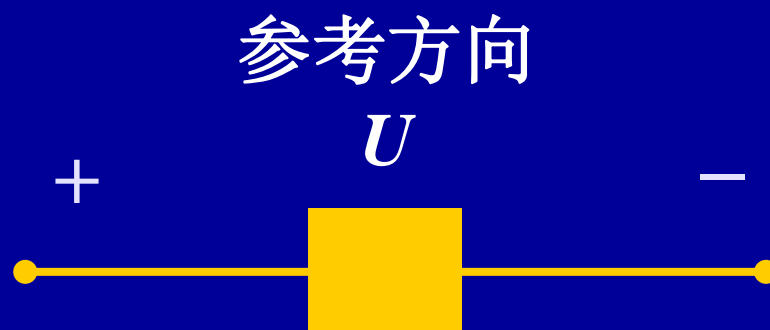
假设的电压降低方向



实际方向

— —

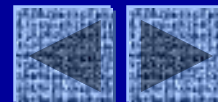
$$U > 0$$



实际方向

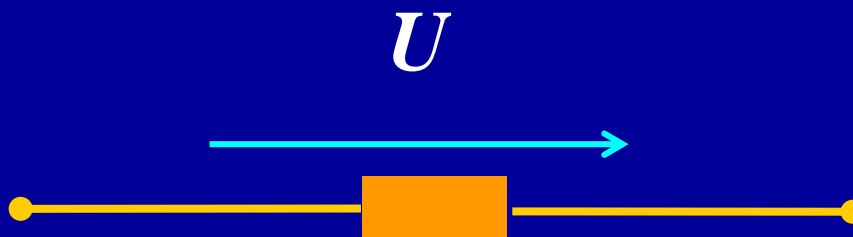
— —

$$U < 0$$



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



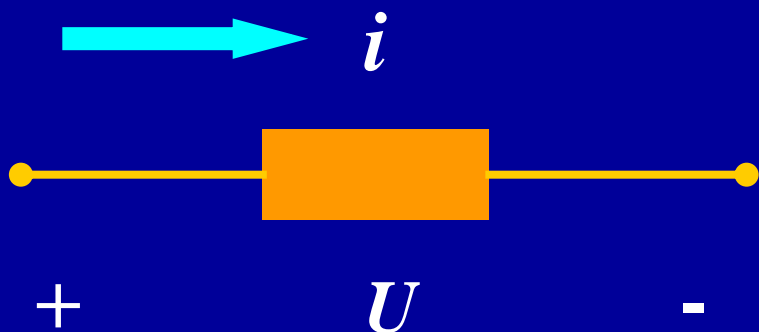
(3) 用双下标表示



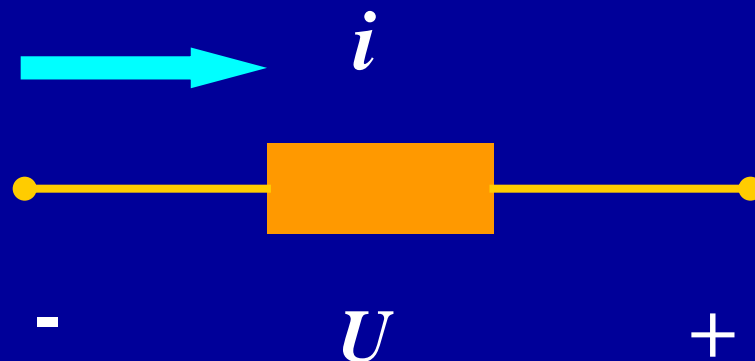
3. 关联参考方向



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。



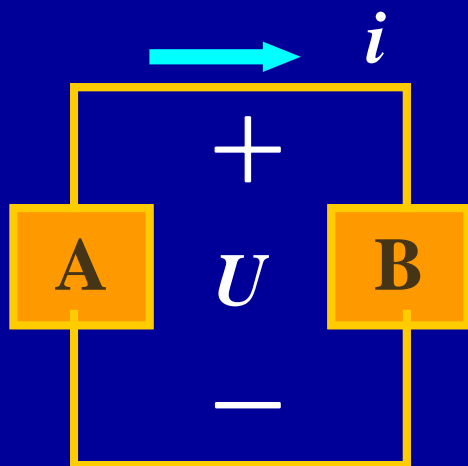
关联参考方向



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



单位时间内电场力所做的功。

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

$$u = \frac{dw}{dq}$$

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

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

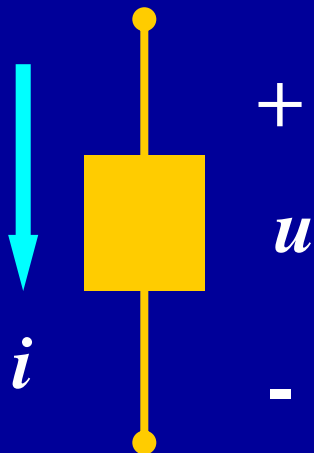
功率的单位：W (瓦) (Watt, 瓦特)

能量的单位：J (焦) (Joule, 焦耳)



2. 电路吸收或发出功率的判断

- u, i 取关联参考方向



+

u

-

$$P=ui$$

表示元件吸收的功率

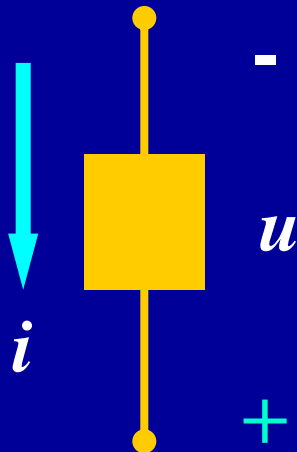
$$P>0$$

吸收正功率 (实际吸收)

$$P<0$$

吸收负功率 (实际发出)

- u, i 取非关联参考方向



-

u

+

$$p=ui$$

表示元件发出的功率

$$P>0$$

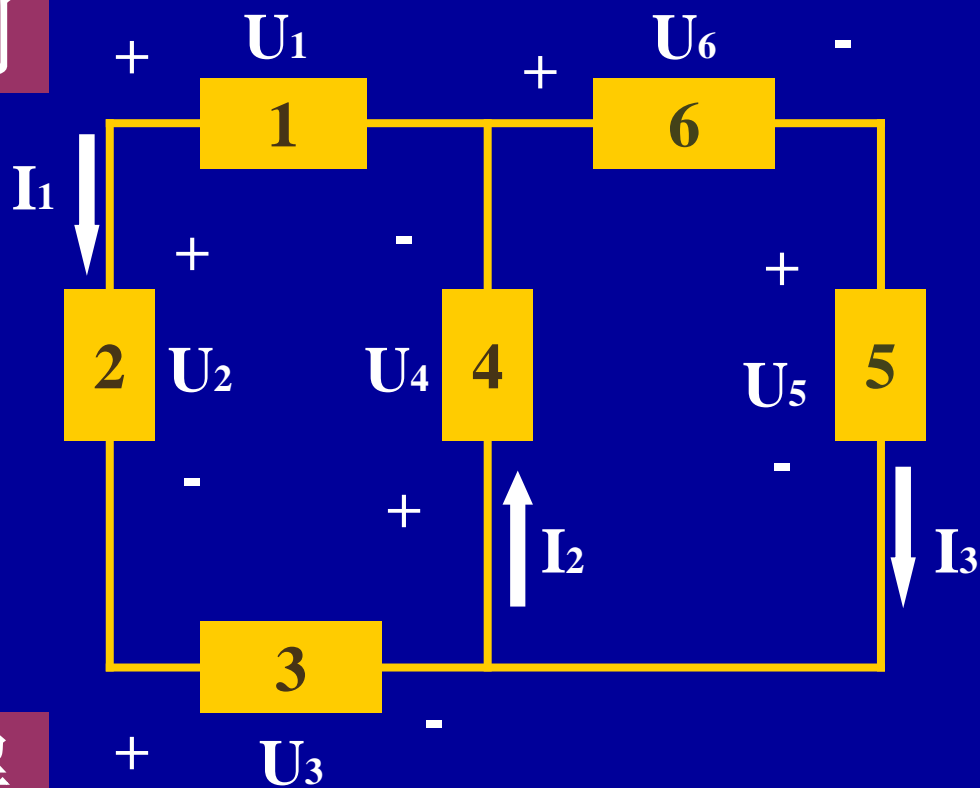
发出正功率 (实际发出)

$$P<0$$

发出负功率 (实际吸收)



例



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：

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

解

$$\begin{aligned} P_1 &= U_1 I_1 = 1 \times 2 = 2\text{W} \text{ (发出)} & P_4 &= U_4 I_2 = (-4) \times 1 = -4\text{W} \text{ (发出)} \\ P_2 &= U_2 I_1 = (-3) \times 2 = -6\text{W} \text{ (发出)} & P_5 &= U_5 I_3 = 7 \times (-1) = -7\text{W} \text{ (发出)} \\ P_3 &= U_3 I_1 = 8 \times 2 = 16\text{W} \text{ (消耗)} & P_6 &= U_6 I_3 = (-3) \times (-1) = 3\text{W} \text{ (消耗)} \end{aligned}$$

注

对一完整的电路，发出的功率 = 消耗的功率

1.4 电阻元件 (resistor)

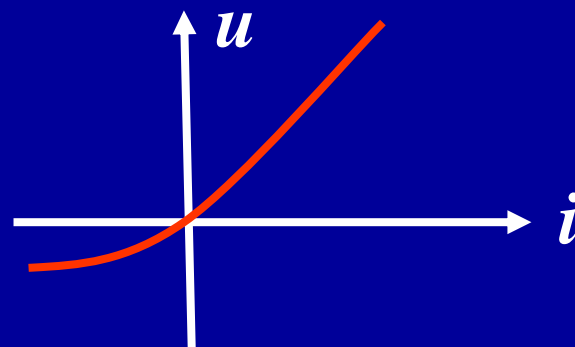
1. 定义

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：

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

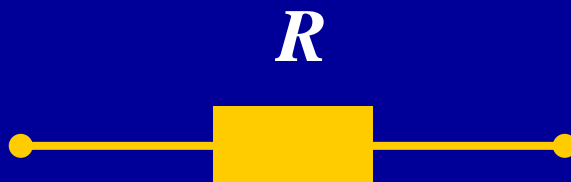
伏安特性



2. 线性定常电阻元件

任何时刻端电压与其电流成正比的电阻元件。

● 电路符号



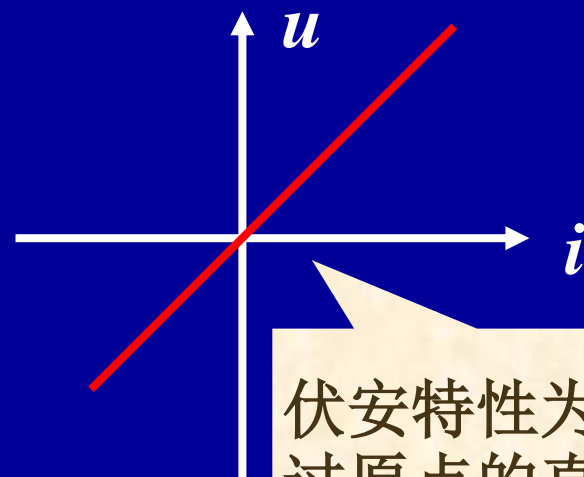
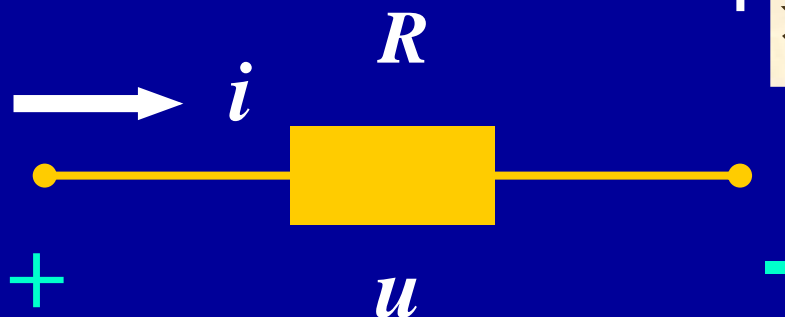
● $u \sim i$ 关系

→ 满足欧姆定律 (Ohm's Law)

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

$$i = u/R = Gu$$

u 、 i 取关联
参考方向



伏安特性为一条
过原点的直线

● 单位

→ R 称为电阻, 单位: Ω (欧) (Ohm, 欧姆)

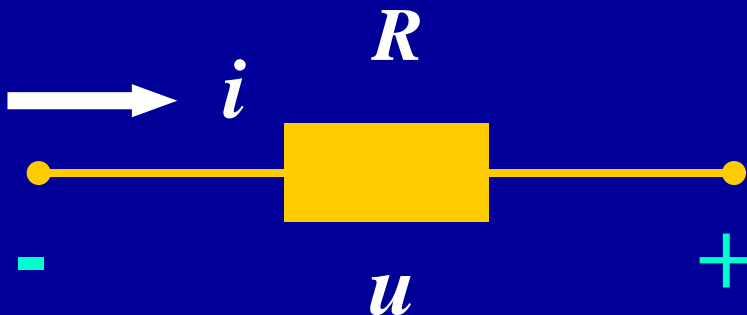
G 称为电导, 单位: S(西门子) (Siemens, 西门子)



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) 说明线性电阻是无记忆、双向性的元件



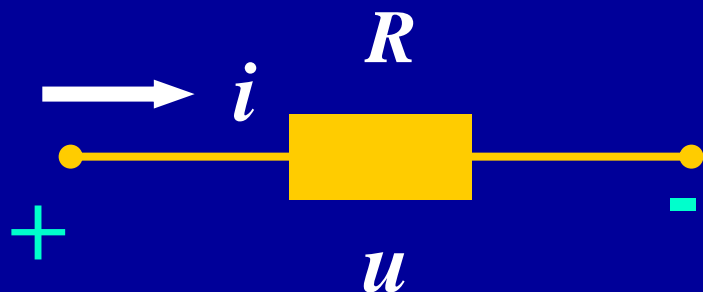
则欧姆定律写为

$$u = -R i \quad i = -G u$$

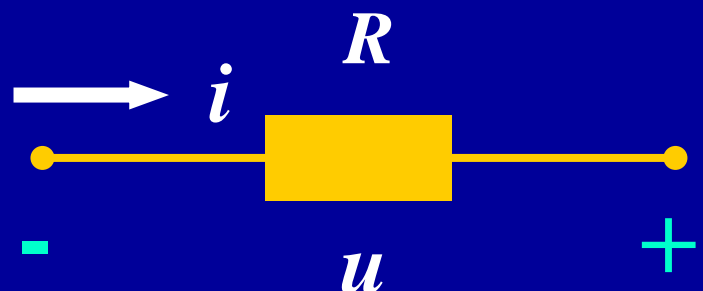
公式和参考方向必须配套使用!

3. 功率和能量

功率:



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



$$\begin{aligned} p &= -u i = -(-R i) i = i^2 R \\ &= -u(-u/R) = u^2 / R \end{aligned}$$

上述结果说明电阻元件在任何时刻总是消耗功率的。

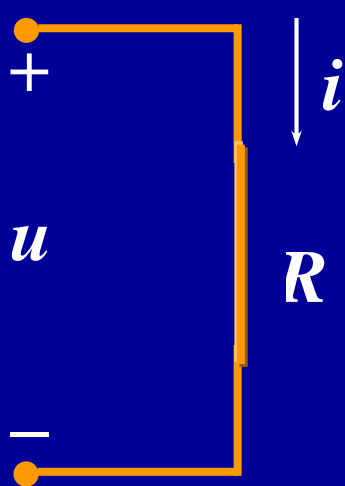


能量:

可用功率表示。从 t 到 t_0 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

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

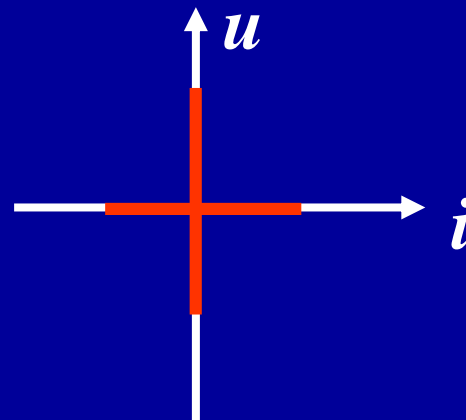
$$R \rightarrow R = 0 \quad or \quad G = \infty$$

● 开路

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



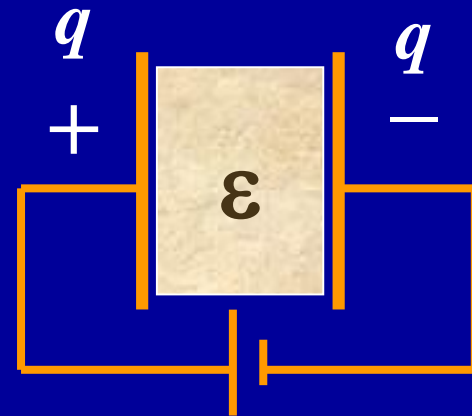
$$R = \infty \quad or \quad G = 0$$



1.6 电容元件 (capacitor)

电容器

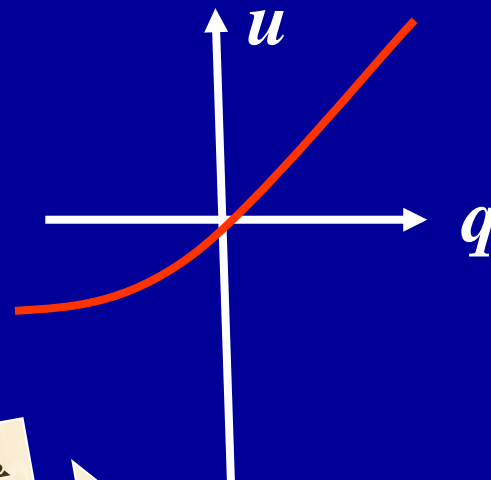
→ 在外电源作用下，
两极板上分别带上等量异号电荷，撤去
电源，板上电荷仍可长久地集聚下去，
是一种储存电能的部件。



1. 定义

电容元件

→ 储存电能的元件。其
特性可用 $u \sim q$ 平面
上的一条曲线来描述



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

库伏
特性

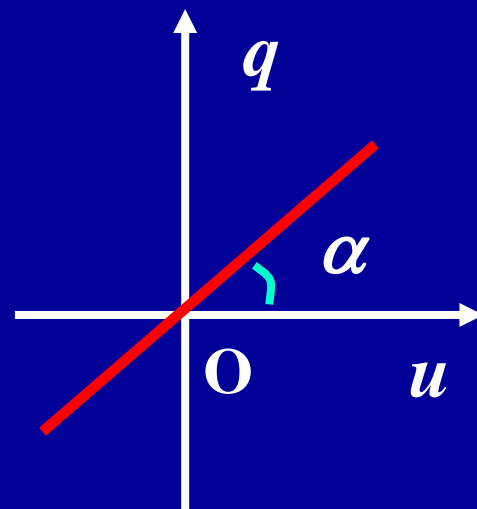


2. 线性定常电容元件

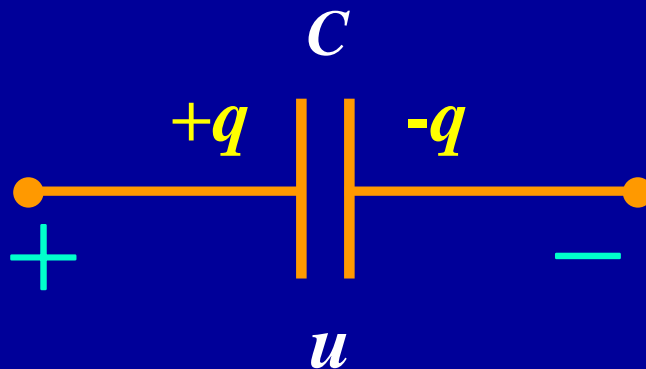
任何时刻，电容元件极板上的电荷 q 与电压 u 成正比。 $q \sim u$

特性是过原点的直线

$$q = Cu \quad \text{or} \quad C = \frac{q}{u} \propto \tan \alpha$$



● 电路符号

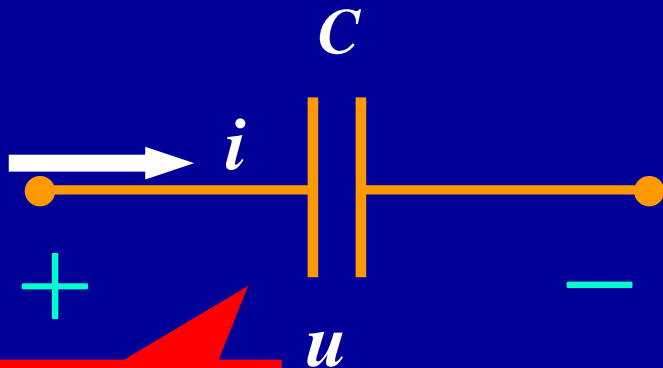


● 单位

C 称为电容器的电容, 单位: F (法) (Farad, 法拉), 常用 μF , pF 等表示。

● 线性电容的电压、电流关系

电容元件VCR
的微分关系



u 、 i 取关联参考方向

表明：

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt}$$

- (1) i 的大小取决于 u 的变化率, 与 u 的大小无关, 电容是动态元件;
- (2) 当 u 为常数(直流)时, $i=0$ 。电容相当于开路, 电容有隔断直流作用;
- (3) 实际电路中通过电容的电流 i 为有限值, 则电容电压 u 必定是时间的连续函数.

$$u(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i d\xi = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_0} i d\xi + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i d\xi$$

$$= u(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i d\xi$$

表明

电容元件VCR
的积分关系

电容元件有记忆电流的作用，故称电容为记忆元件

注

(1) 当 u , i 为非关联方向时，上述微分和积分表达式前要冠以负号；

(2) 上式中 $u(t_0)$ 称为电容电压的初始值，它反映电容初始时刻的储能状况，也称为初始状态。



3. 电容的功率和储能

● 功率

$$p = ui = u \cdot C \frac{du}{dt}$$

u 、 i 取关联参考方向

(1) 当电容充电, $u > 0$, $du/dt > 0$, 则 $i > 0$, $q \uparrow$, $p > 0$, 电容吸收功率。

(2) 当电容放电, $u > 0$, $du/dt < 0$, 则 $i < 0$, $q \downarrow$, $p < 0$, 电容发出功率。

表明

电容能在一段时间内吸收外部供给的能量转化为电场能量储存起来, 在另一段时间内又把能量释放回电路, 因此电容元件是无源元件、是储能元件, 它本身不消耗能量。



● 电容的储能

$$W_C = \int_{-\infty}^t C u \frac{du}{d\xi} d\xi = \frac{1}{2} C u^2(\xi) \Big|_{-\infty}^t = \frac{1}{2} C u^2(t) - \frac{1}{2} C u^2(-\infty)$$

$$\text{若 } u(-\infty)=0 \quad = \frac{1}{2} C u^2(t) = \frac{1}{2C} q^2(t) \geq 0$$

从 t_0 到 t 电容储能的变化量:

$$W_C = \frac{1}{2} C u^2(t) - \frac{1}{2} C u^2(t_0) = \frac{1}{2C} q^2(t) - \frac{1}{2C} q^2(t_0)$$

表明

- (1) 电容的储能只与当时的电压值有关, 电容电压不能跃变, 反映了储能不能跃变;
- (2) 电容储存的能量一定大于或等于零。



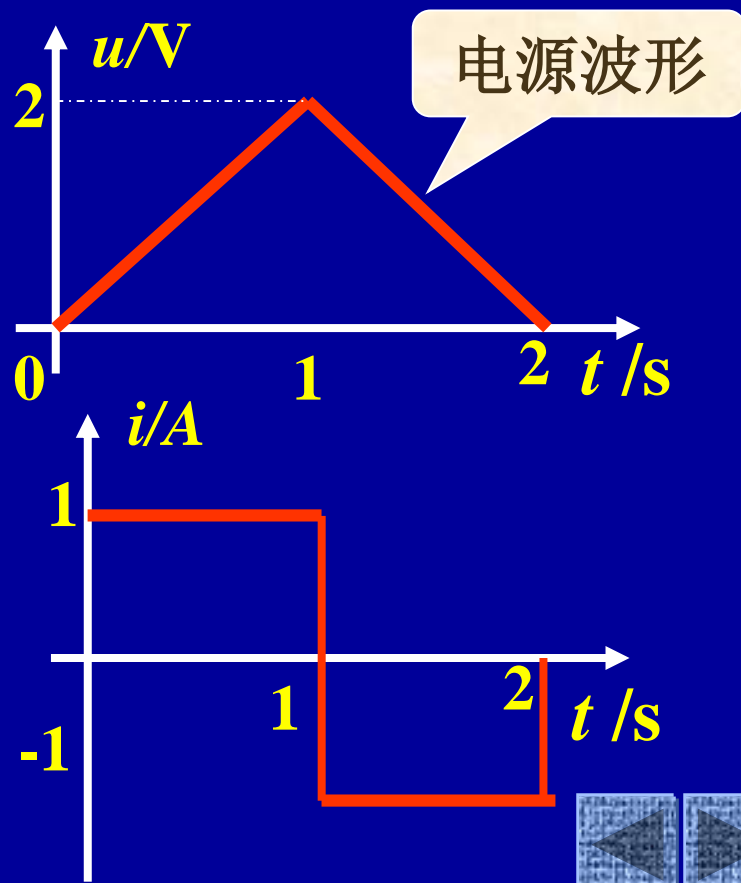
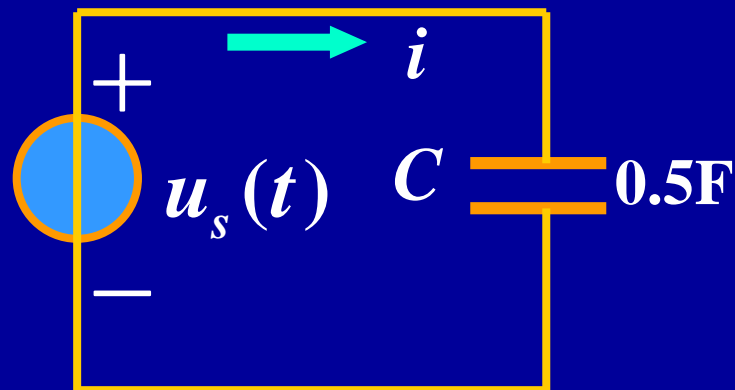
例 求电流*i*、功率*P*(*t*)和储能*W*(*t*)

解 $u_s(t)$ 的函数表示式为:

$$u_s(t) = \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ 2t & 0 \leq t \leq 1s \\ -2t + 4 & 1 \leq t \leq 2s \\ 0 & t \geq 2s \end{cases}$$

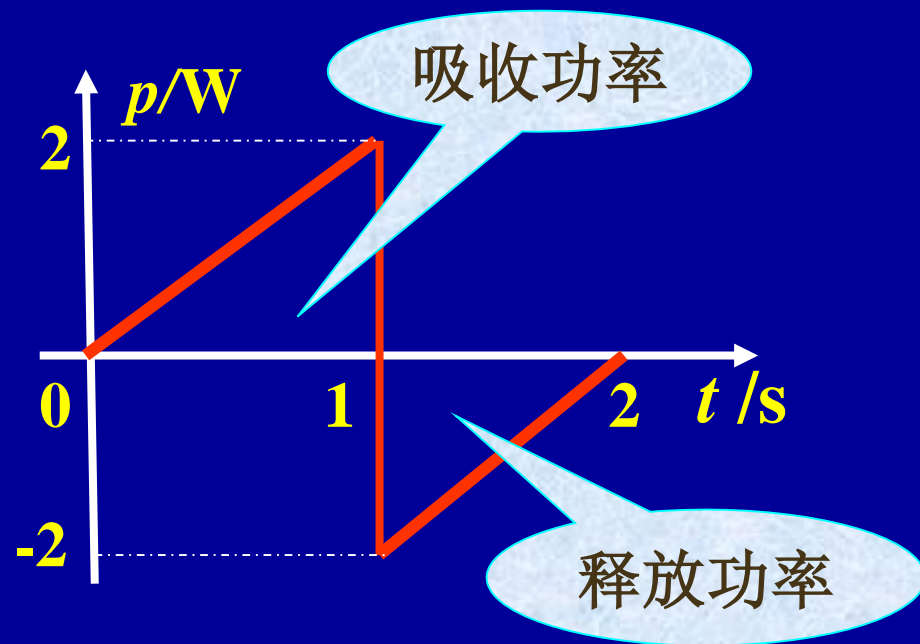
解得电流

$$i(t) = C \frac{du_s}{dt} = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & 0 \leq t < 1s \\ -1 & 1 \leq t < 2s \\ 0 & t \geq 2s \end{cases}$$



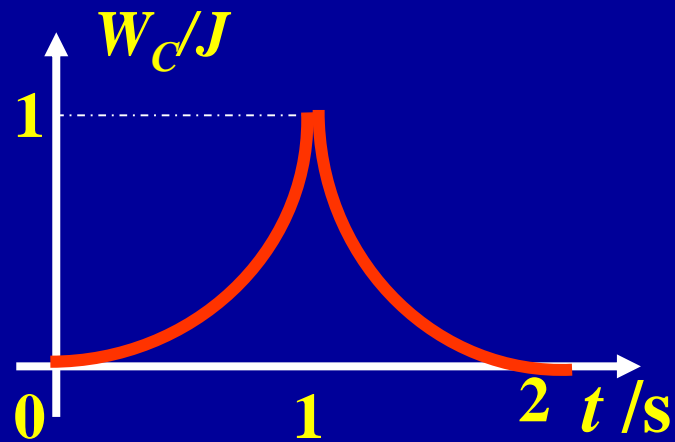
$$p(t) = u(t)i(t) =$$

$$= \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ 2t & 0 \leq t \leq 1s \\ 2t - 4 & 1 \leq t \leq 2s \\ 0 & t \geq 2s \end{cases}$$



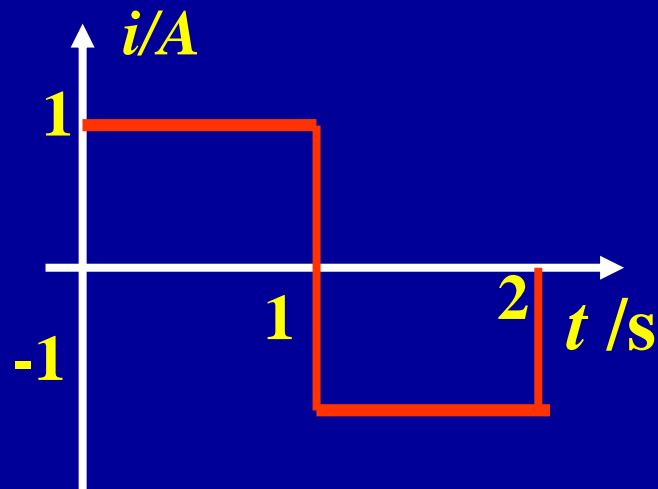
$$W_c(t) = \frac{1}{2}Cu^2(t) =$$

$$= \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ t^2 & 0 \leq t \leq 1s \\ (t-2)^2 & 1 \leq t \leq 2s \\ 0 & t \geq 2s \end{cases}$$



若已知电流求电容电压，有

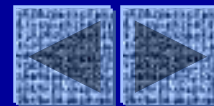
$$i(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1 & 0 \leq t < 1s \\ -1 & 1 \leq t < 2s \\ 0 & t \geq 2s \end{cases}$$



$$\text{当 } 0 \leq t \leq 1s \quad u_c(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^0 0 d\xi + \frac{1}{C} \int_0^t 1 d\xi = 0 + 2t = 2t$$

$$\text{当 } 1 \leq t \leq 2s \quad u_c(t) = u(1) + \frac{1}{0.5} \int_1^t (-1) d\xi = 4 - 2t$$

$$\text{当 } 2 \leq t \quad u_c(t) = u(2) + \frac{1}{0.5} \int_2^t 0 d\xi = 0$$

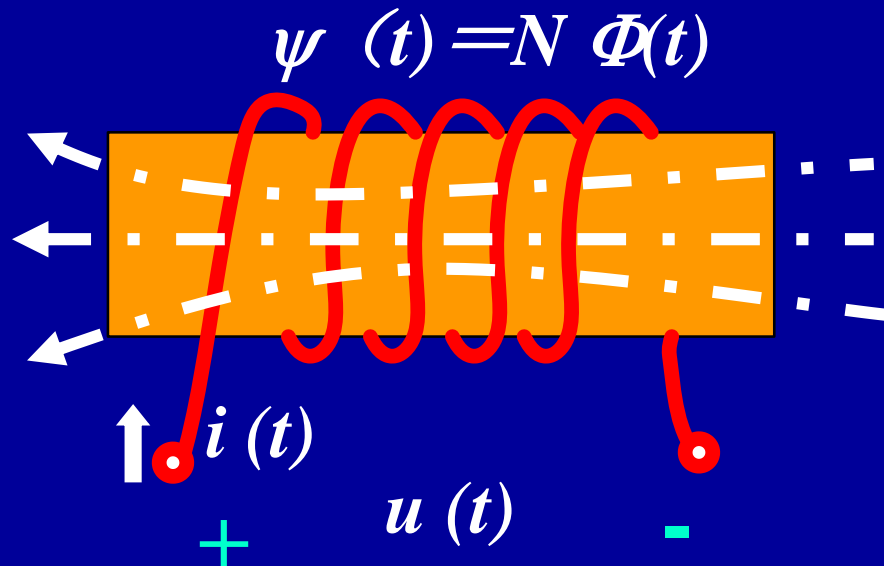


1.5 电感元件 (inductor)

电感器



把金属导线绕在一骨架上构成一实际电感器，当电流通过线圈时，将产生磁通，是一种储存磁能的部件

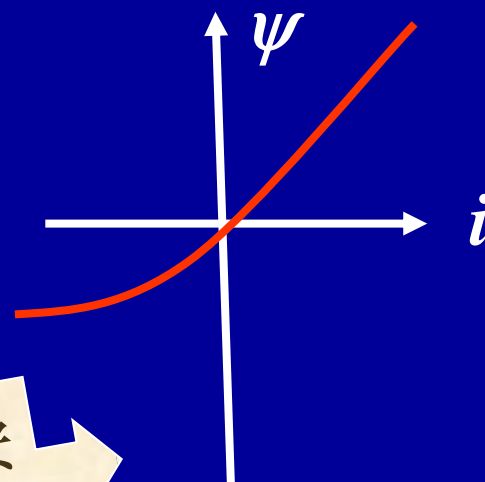


1. 定义

电感元件

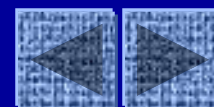


储存磁能的元件。其特性可用 $\psi \sim i$ 平面上的一条曲线来描述



$$f(\psi, i) = 0$$

韦安特性

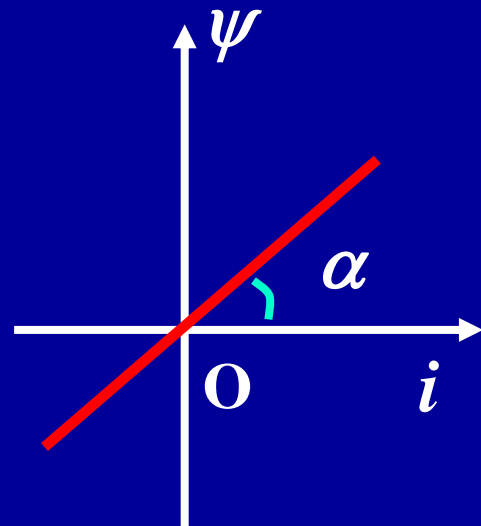


2. 线性定常电感元件

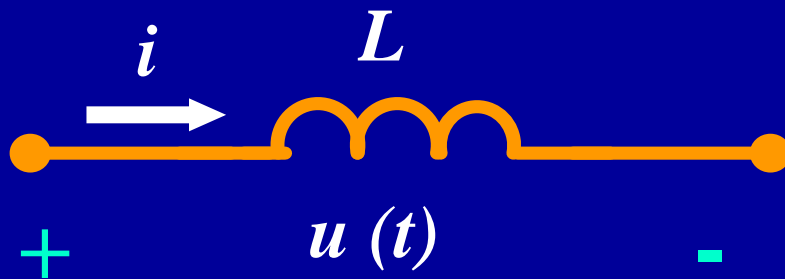
任何时刻，通过电感元件的电流*i*与其磁链 ψ 成正比。

$\psi \sim i$ 特性是过原点的直线

$$\psi(t) = Li(t) \quad \text{or} \quad L = \frac{\psi}{i} \propto \tan \alpha$$

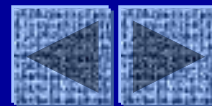


● 电路符号



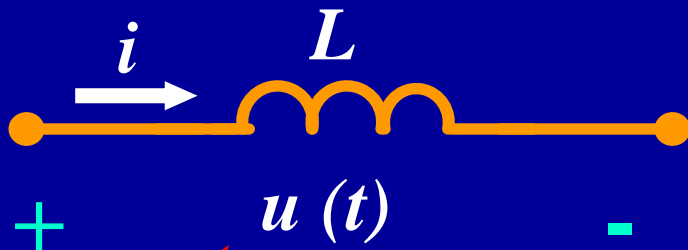
● 单位

L 称为电感器的自感系数, L 的单位: H (亨) (Henry, 亨利), 常用 μH , m H 表示。



● 线性电感的电压、电流关系

电感元件VCR
的微分关系



根据电磁感应定律与楞次定律

u 、 i 取关联参考方向

表明：

$$u(t) = \frac{d\psi}{dt} = L \frac{di(t)}{dt}$$



- (1) 电感电压 u 的大小取决于 i 的变化率，与 i 的大小无关，电感是动态元件；
- (2) 当 i 为常数(直流)时， $u = 0$ 。电感相当于短路；
- (3) 实际电路中电感的电压 u 为有限值，则电感电流 i 不能跃变，必定是时间的连续函数。

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u d\xi = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^{t_0} u d\xi + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u d\xi$$

$$= i(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u d\xi$$

表明

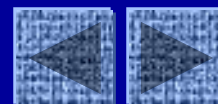
电感元件VCR
的积分关系

电感元件有记忆电压的作用，故称电感为记忆元件

注

(1) 当 u , i 为非关联方向时，上述微分和积分表达式前要冠以负号；

(2) 上式中 $i(t_0)$ 称为电感电流的初始值，它反映电感初始时刻的储能状况，也称为初始状态。



3. 电感的功率和储能

u 、 i 取关联参考方向

● 功率

$$p = ui = L \frac{di}{dt} \cdot i$$

(1) 当电流增大, $i > 0$, $di/dt > 0$, 则 $u > 0$, $\psi \uparrow$, $p > 0$, 电感吸收功率。

(2) 当电流减小, $i > 0$, $di/dt < 0$, 则 $u < 0$, $\psi \downarrow$, $p < 0$, 电感发出功率。

表明

电感能在一段时间内吸收外部供给的能量转化为磁场能量储存起来, 在另一段时间内又把能量释放回电路, 因此电感元件是无源元件、是储能元件, 它本身不消耗能量。



● 电感的储能

$$W_L = \int_{-\infty}^t Li \frac{di}{d\xi} d\xi = \frac{1}{2} Li^2(\xi) \Big|_{-\infty}^t = \frac{1}{2} Li^2(t) - \frac{1}{2} Li^2(-\infty)$$

若 $i(-\infty)=0$

$$= \frac{1}{2} Li^2(t) = \frac{1}{2L} \psi^2(t) \geq 0$$

从 t_0 到 t 电感储能的变化量:

$$W_L = \frac{1}{2} Li^2(t) - \frac{1}{2} Li^2(t_0) = \frac{1}{2L} \psi^2(t) - \frac{1}{2L} \psi^2(t_0)$$

表明

- (1) 电感的储能只与当时的电流值有关，电感电流不能跃变，反映了储能不能跃变；
- (2) 电感储存的能量一定大于或等于零。



电容元件与电感元件的比较:

	电容 C	电感 L
变量	电压 u 电荷 q	电流 i 磁链 ψ
关系式	$q = Cu$ $i = C \frac{du}{dt}$ $W_C = \frac{1}{2}Cu^2 = \frac{1}{2C}q^2$	$\psi = Li$ $u = L \frac{di}{dt}$ $W_L = \frac{1}{2}Li^2 = \frac{1}{2L}\psi^2$

结论

- (1) 元件方程的形式是相似的;
- (2) 若把 $u-i$, $q-\psi$, $C-L$, $i-u$ 互换, 可由电容元件的方程得到电感元件的方程;
- (3) C 和 L 称为对偶元件, ψ 、 q 等称为对偶元素。

* 显然, R 、 G 也是一对对偶元素:

$$U=RI \Leftrightarrow I=GU$$

$$I=U/R \Leftrightarrow U=I/G$$


1.7 电源元件 (independent source)

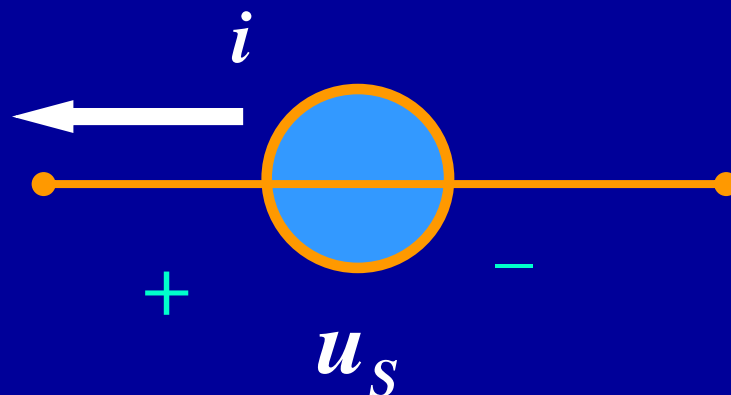
1. 理想电压源

● 定义



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

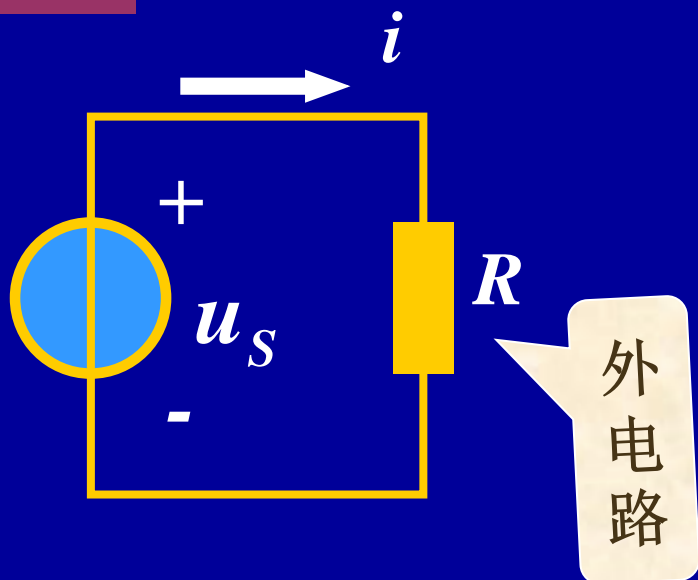
● 电路符号



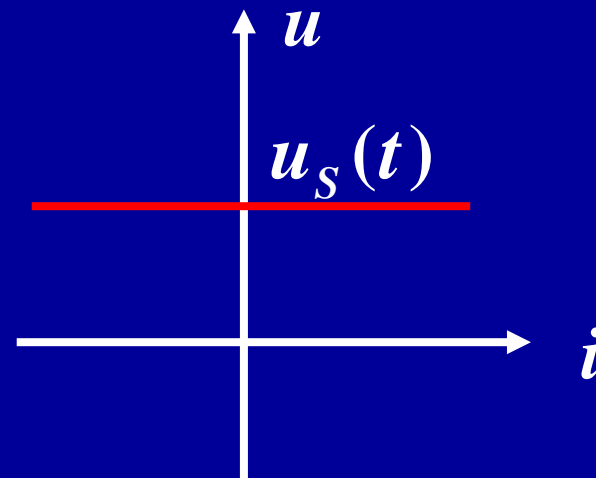
● 理想电压源的电压、电流关系

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

例



伏安关系

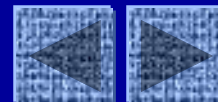


$$i = \frac{u_s}{R}$$

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

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

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;

物理意义:

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。

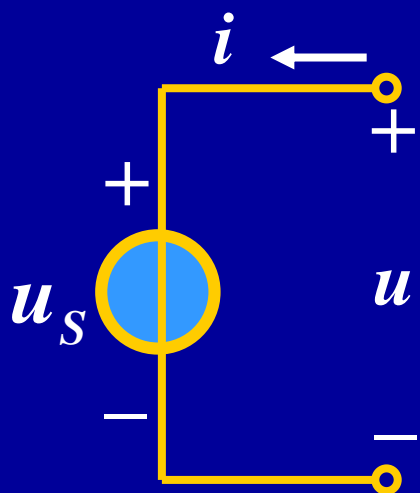
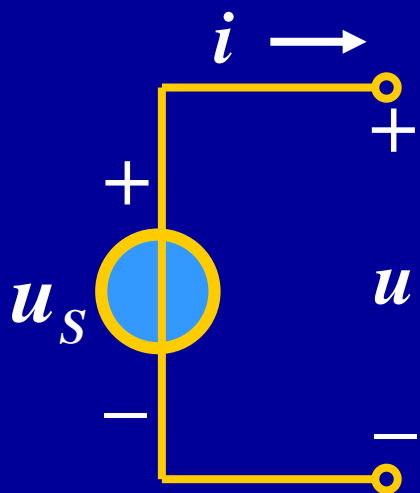
$P = u_S i \longrightarrow$ 发出功率，起电源作用

(2) 电压、电流的参考方向关联;

物理意义: 电场力做功，电源吸收功率。

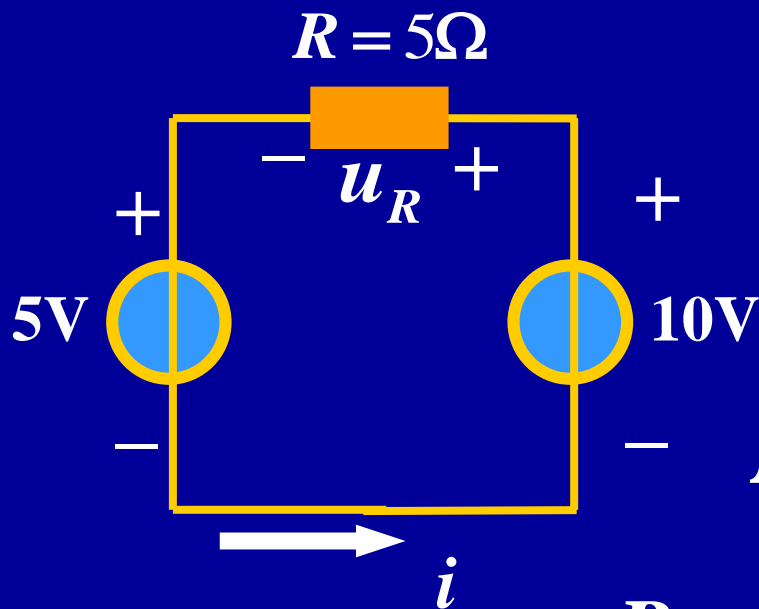
$P = u_S i \longrightarrow$ 吸收功率，充当负载

或: $P = -u_S i \longrightarrow$ 发出负功



例

计算图示电路各元件的功率。



解

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

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

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

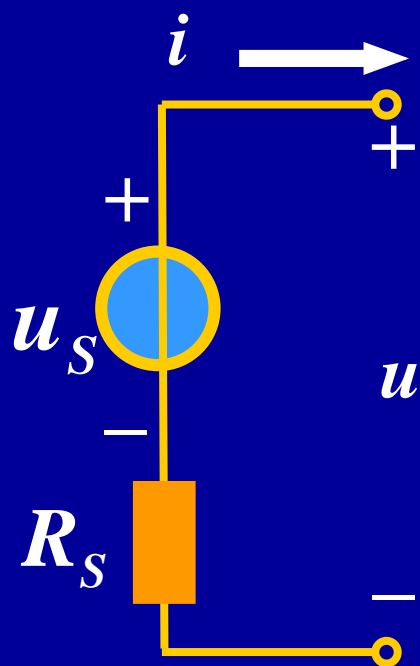
$$P_{5V} = u_S i = 5 \times (-1) = -5W \quad \text{发出}$$

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

满足: $P(\text{发}) = P(\text{吸})$

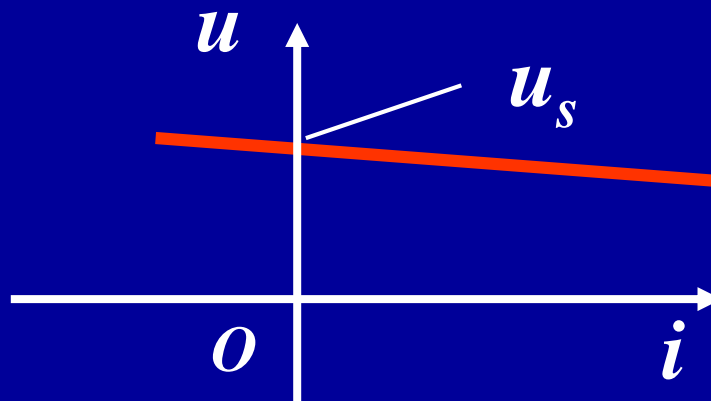


● 实际电压源



伏安特性

$$u = u_s - R_s i$$



一个好的电压源要求

$$R_s \rightarrow 0$$

考虑内阻

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。

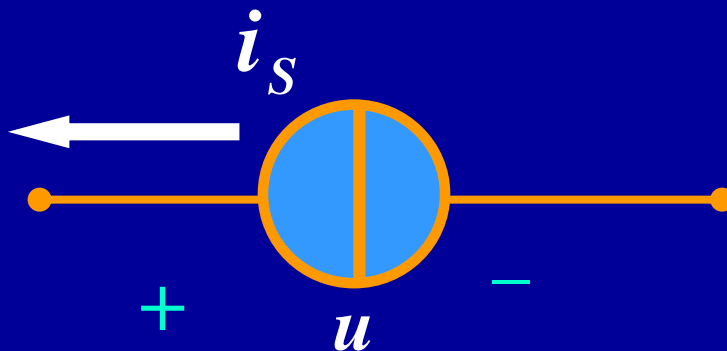


2. 理想电流源

● 定义

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

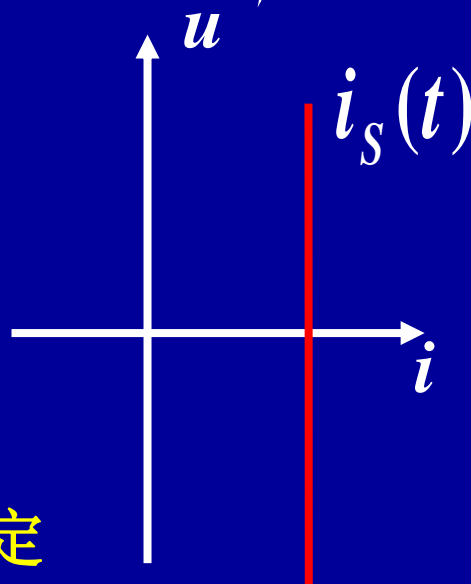
● 电路符号



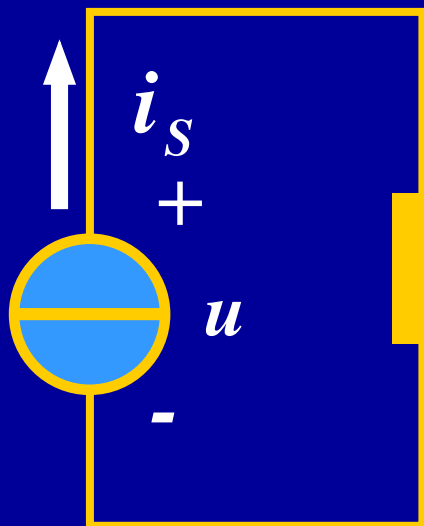
伏安
关系

● 理想电流源的电压、电流关系

- (1) 电流源的输出电流由电源本身决定，与外电路无关；与它两端电压方向、大小无关
- (2) 电流源两端的电压由电源及外电路共同决定



例



R

外
电
路

$$u = Ri_s$$

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

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

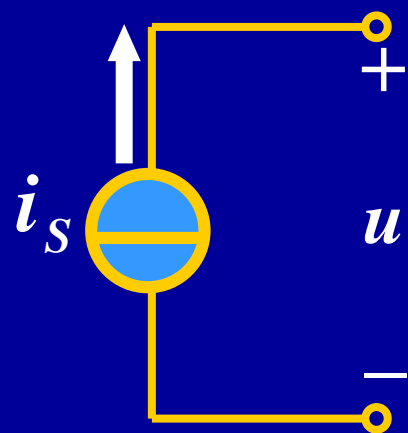
电流源不能开路！

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光电池被激发产生一定值的电流等。



● 电流源的功率

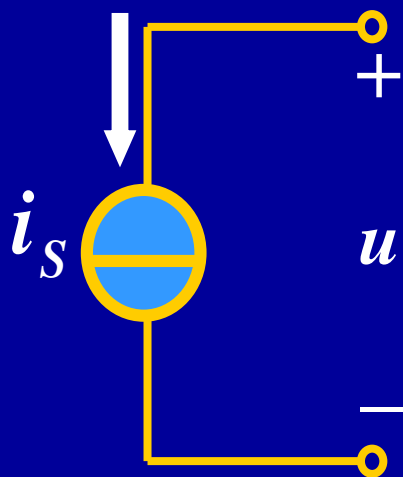


$$\longrightarrow P = ui_s$$

(1) 电压、电流的参考方向非关联;

$$P = ui_s \longrightarrow \text{发出功率, 起电源作用}$$

(2) 电压、电流的参考方向关联;



$$P = ui_s \longrightarrow \text{吸收功率, 充当负载}$$

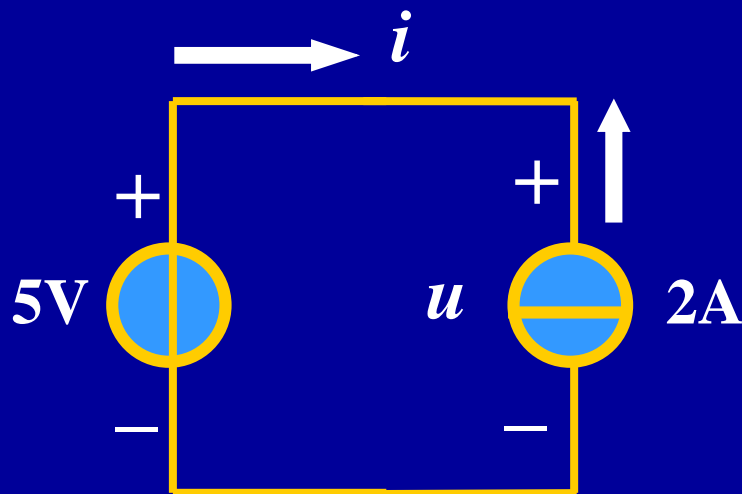
或:

$$P = -i_s u \longrightarrow \text{发出负功}$$



例

计算图示电路各元件的功率。



解

$$i = -2A$$

$$u = 5V$$

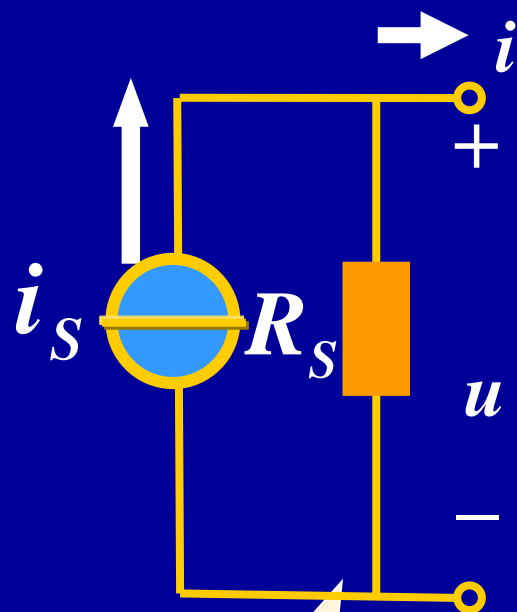
$$P_{2A} = i_s u = 2 \times 5 = 10W \quad \text{发出}$$

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

满足: $P(\text{发}) = P(\text{吸})$



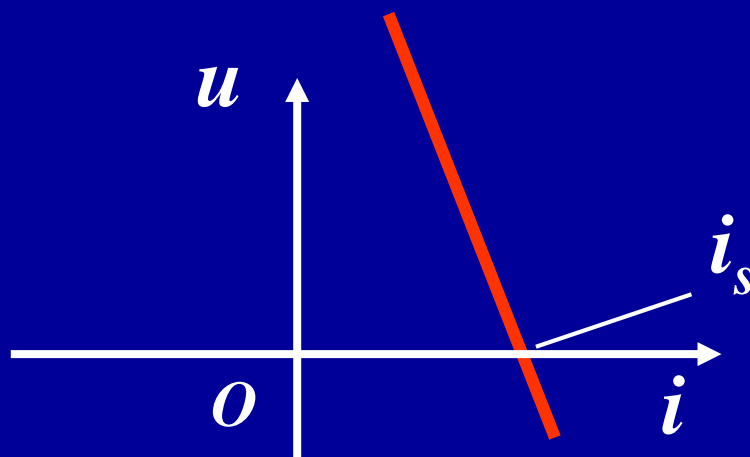
● 实际电流源



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。



1.8 受控电源 (非独立源)

(controlled sources or dependent sources)

1. 定义

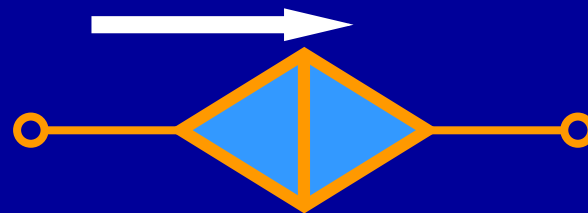


电压或电流的大小和方向不是给定的时间函数，而是受电路中某个地方的电压(或电流)控制的电源，称受控源

● 电路符号



受控电压源



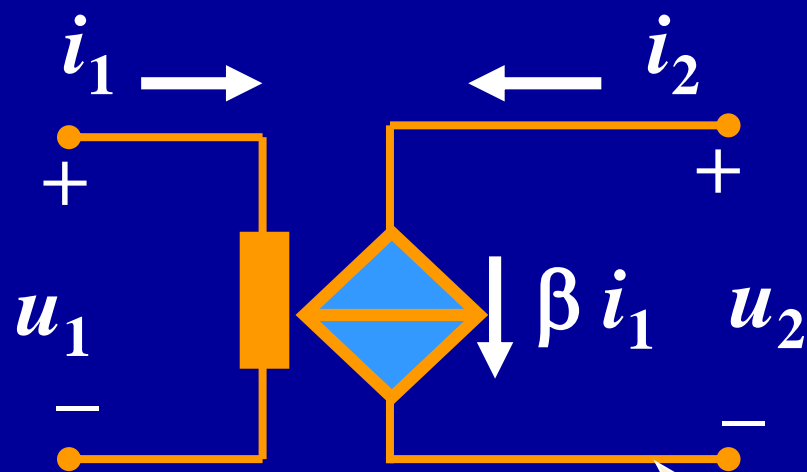
受控电流源



2. 分类

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

(1) 电流控制的电流源 (CCCS)



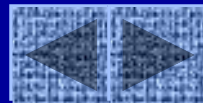
四端元件

$$i_2 = \beta i_1$$

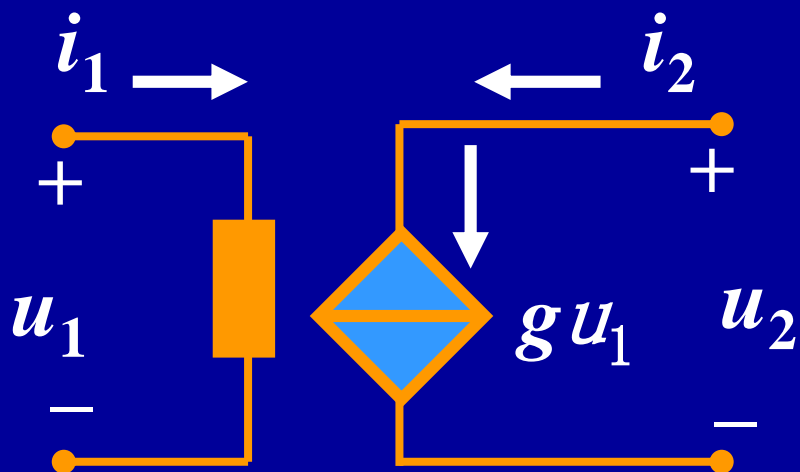
β : 电流放大倍数

输入：控制部分

输出：受控部分



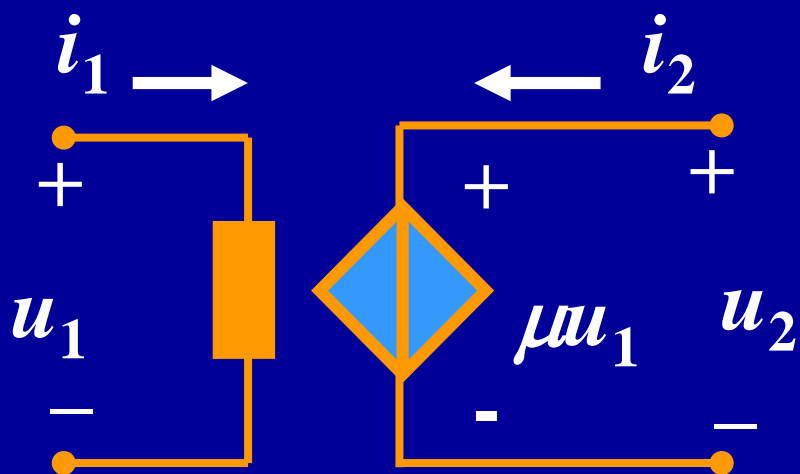
(2) 电压控制的电流源 (VCCS)



$$i_2 = g u_1$$

g : 转移电导

(3) 电压控制的电压源 (VCVS)

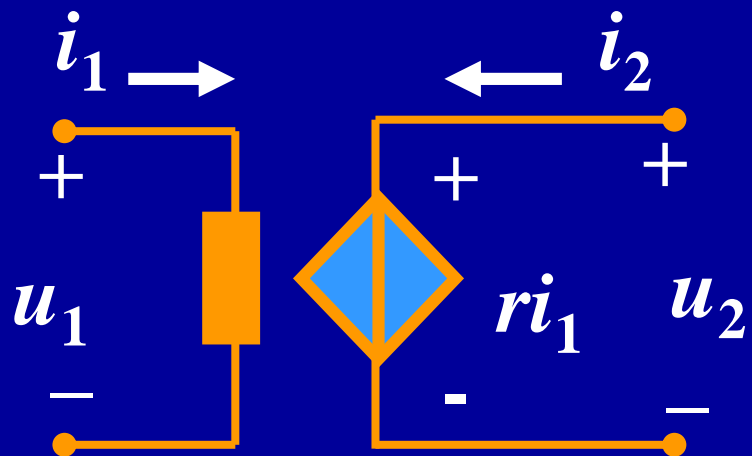


$$u_2 = \mu u_1$$

μ : 电压放大倍数



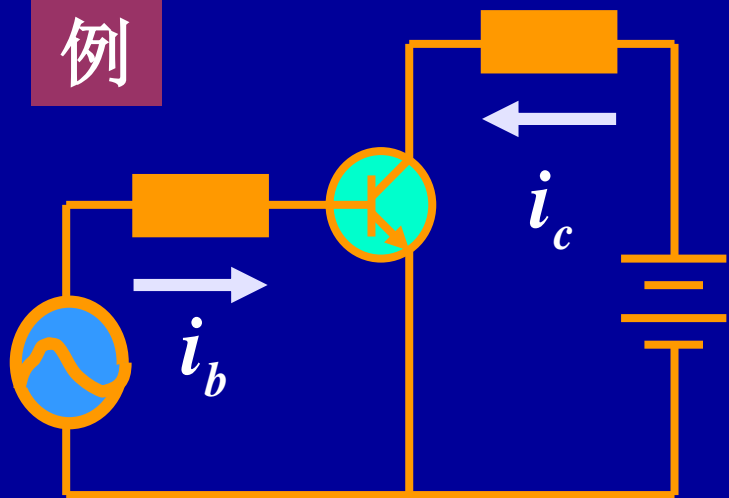
(4) 电流控制的电压源 (CCVS)



$$u_2 = ri_1$$

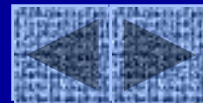
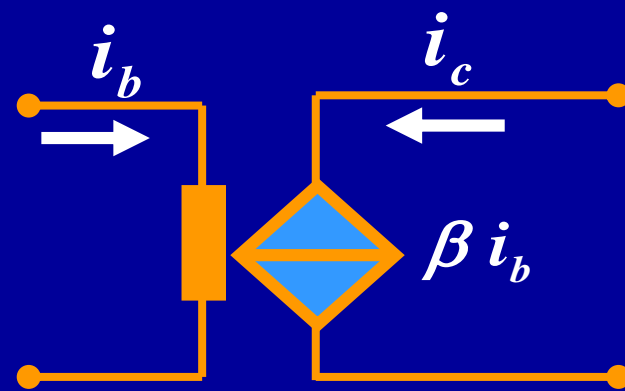
r : 转移电阻

例



电路模型

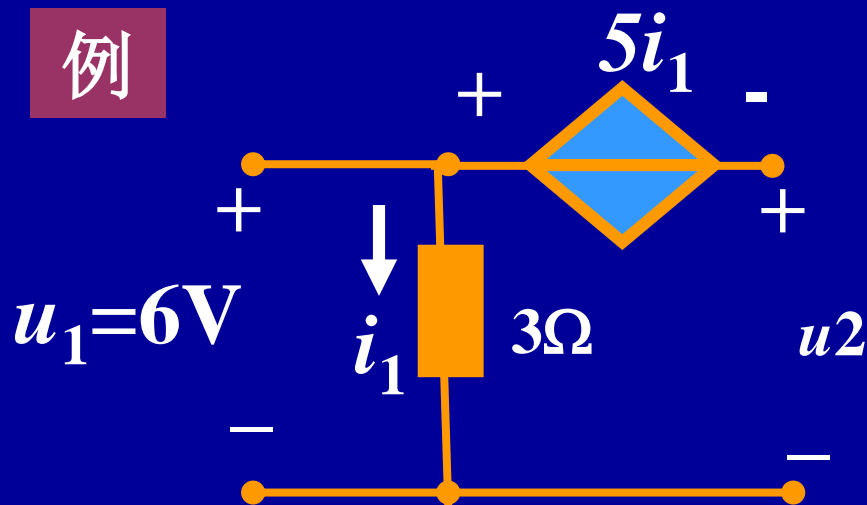
$$i_c = \beta i_b$$



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受控关系, 在电路中不能作为“激励”。

例



求: 电压 u_2 。

解

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

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



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

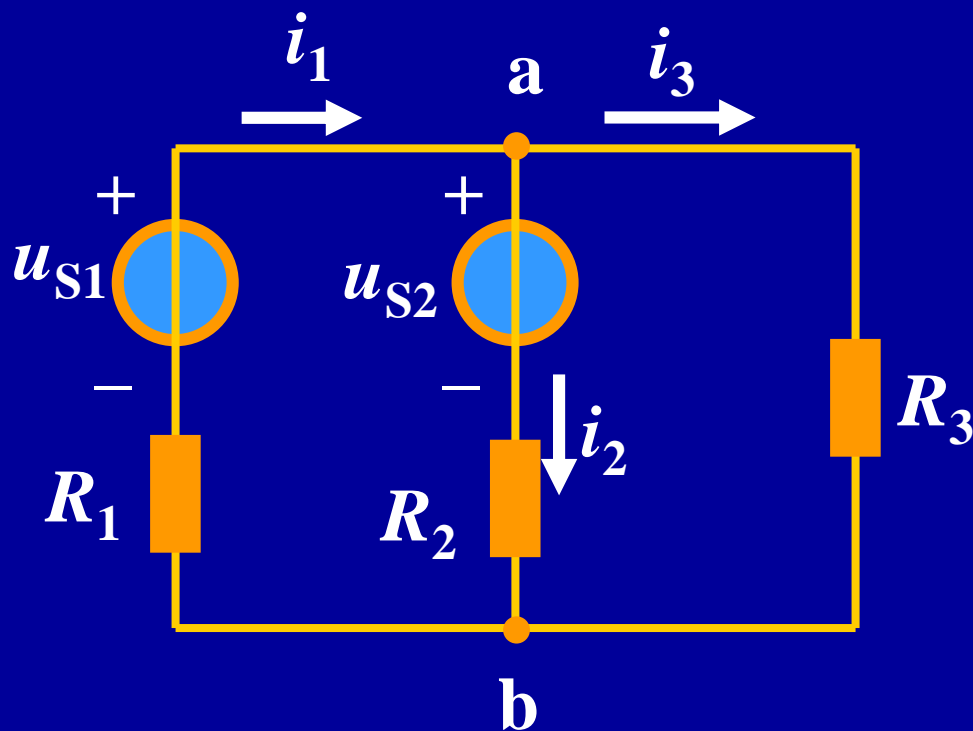


1. 几个名词

(1) 支路 (branch)

电路中每一个两端元件就叫一条支路

电路中通过同一电流的分支。(b)



$b=5$

$b=3$

$n=2$

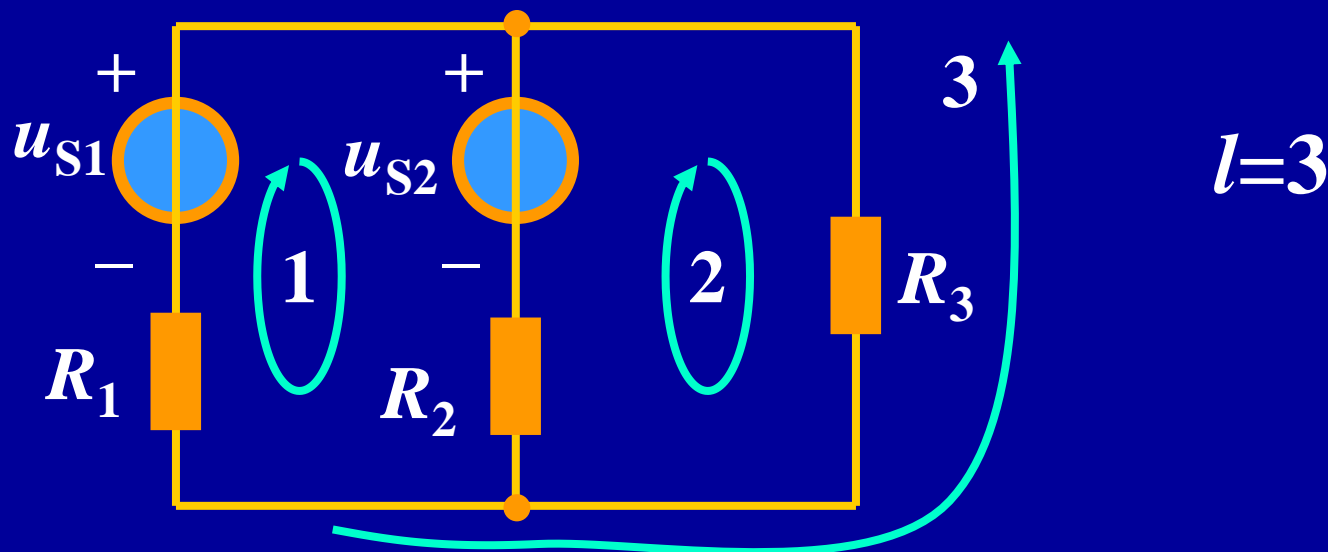
(2) 节点 (node)

三条或三条以上支路的连接点称为节点。(n)



(3) 路径(path) \longrightarrow 两节点间的一条通路。由支路构成。

(4) 回路(loop) \longrightarrow 由支路组成的闭合路径。(l)



(5) 网孔(mesh) \longrightarrow

对平面电路，其内部不含任何支路的回路称网孔。

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 $\sum i_{\text{入}} = i_{\text{出}}$

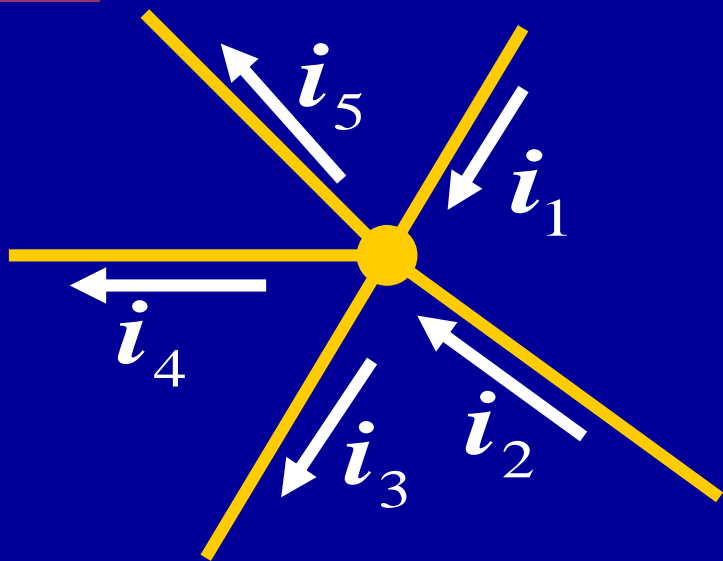
流进的电流等于流出的电流

例

令流出为“+”，有：

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

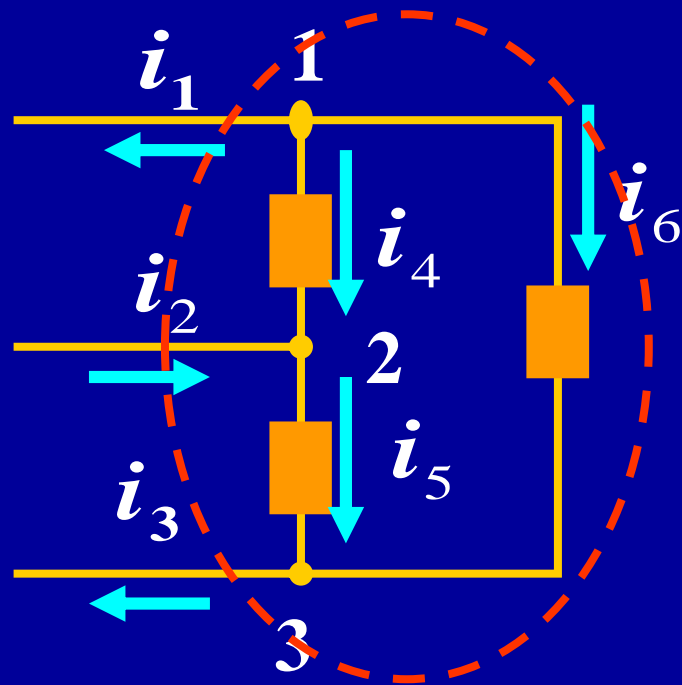
$$i_1 + i_2 = i_3 + i_4 + i_5$$



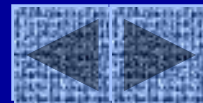
例
$$i_1 + i_4 + i_6 = 0$$
$$-i_2 - i_4 + i_5 = 0$$
$$i_3 - i_5 - i_6 = 0$$

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是对支路电流加的约束, 与支路上接的是什麼元件无关, 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。

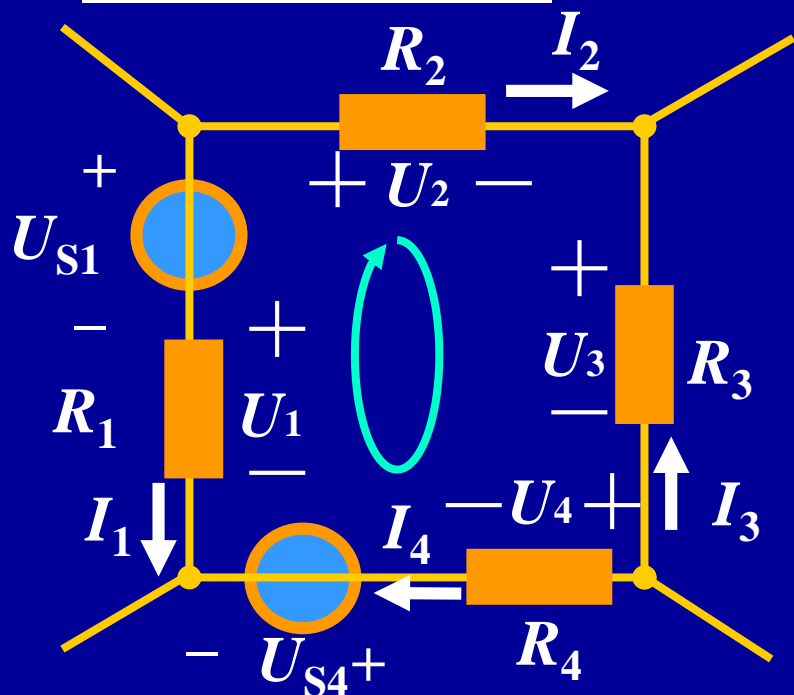


3. 基尔霍夫电压定律 (KVL)

在集总参数电路中，任一时刻，沿任一闭合路径绕行，各支路电压的代数和等于零。

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

or $\sum u_{\text{降}} = u_{\text{升}}$

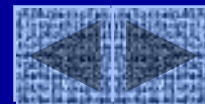


- (1) 标定各元件电压参考方向
- (2) 选定回路绕行方向，
顺时针或逆时针。

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

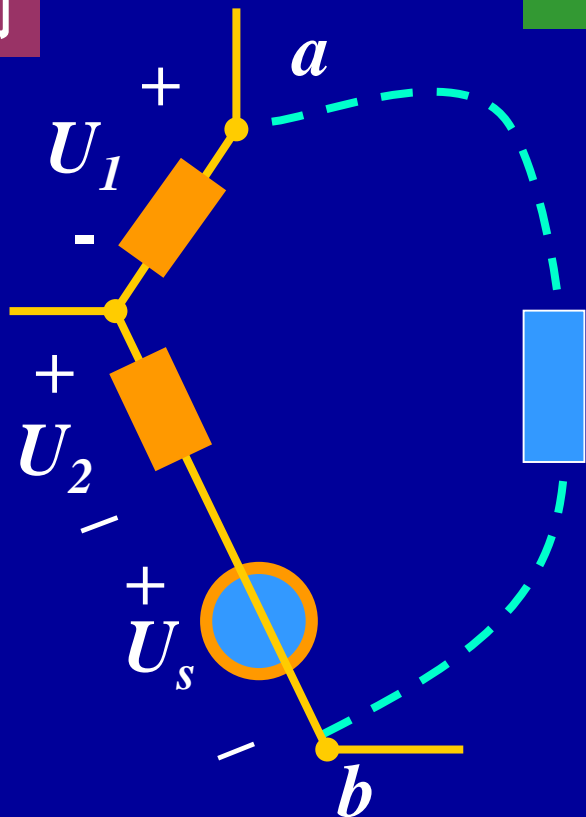
或: $U_2 + U_3 + U_4 + U_{S4} = U_1 + U_{S1}$

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



例

KVL也适用于电路中任一假想的回路



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

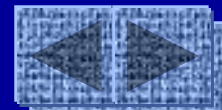
明确

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



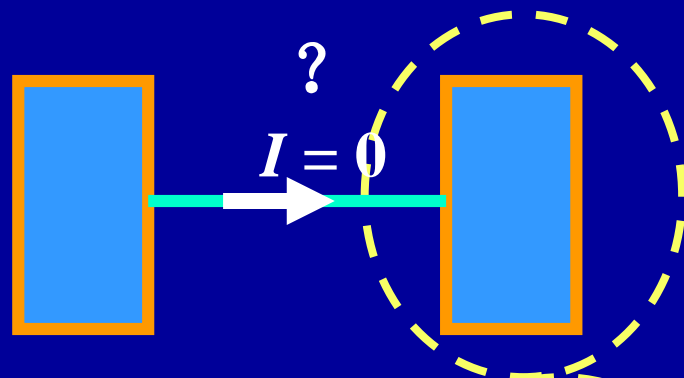
4. KCL、KVL小结:

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

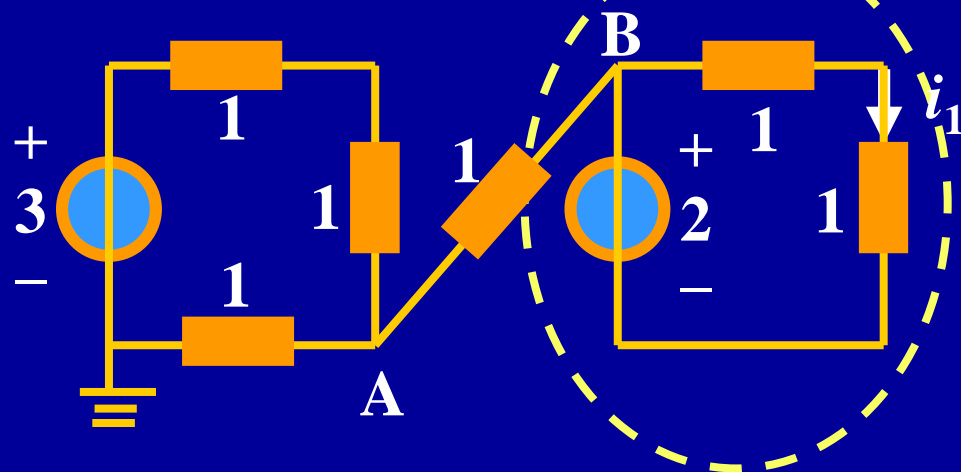


思考:

1.

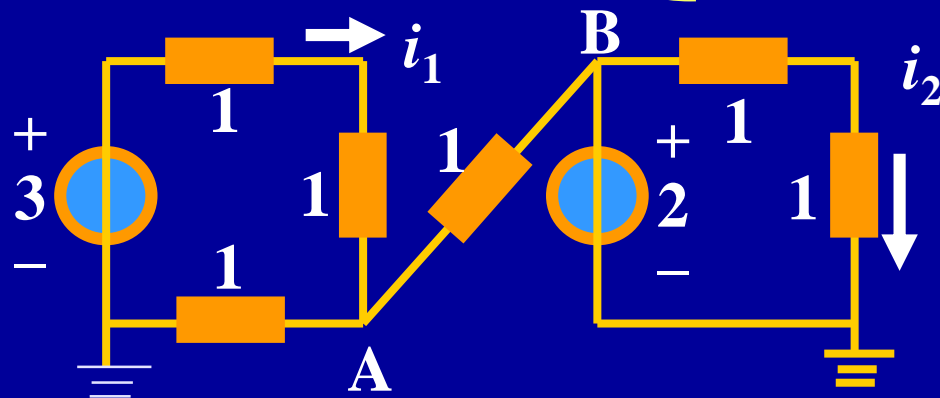


2.

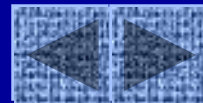


$$U_A = U_B$$

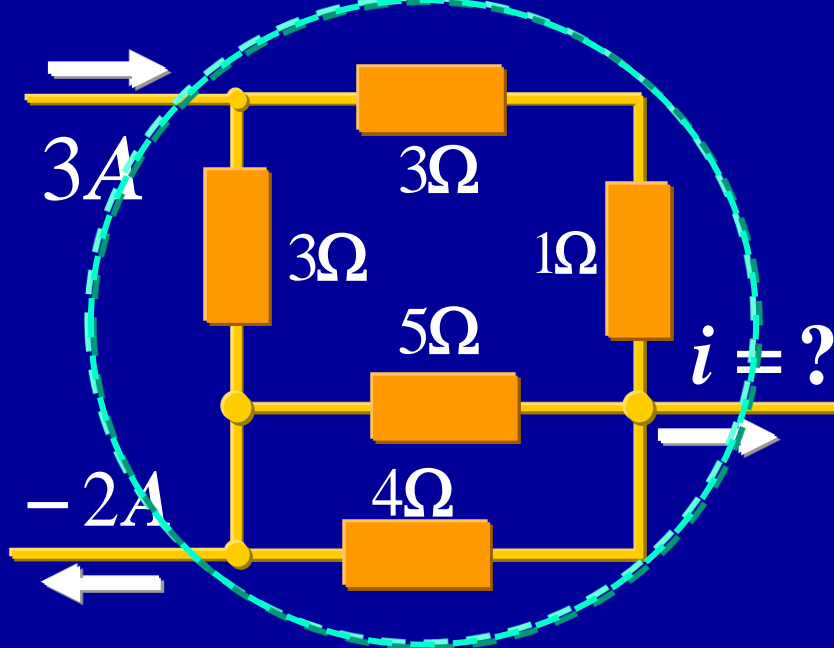
3.



$$i_1 = i_2$$

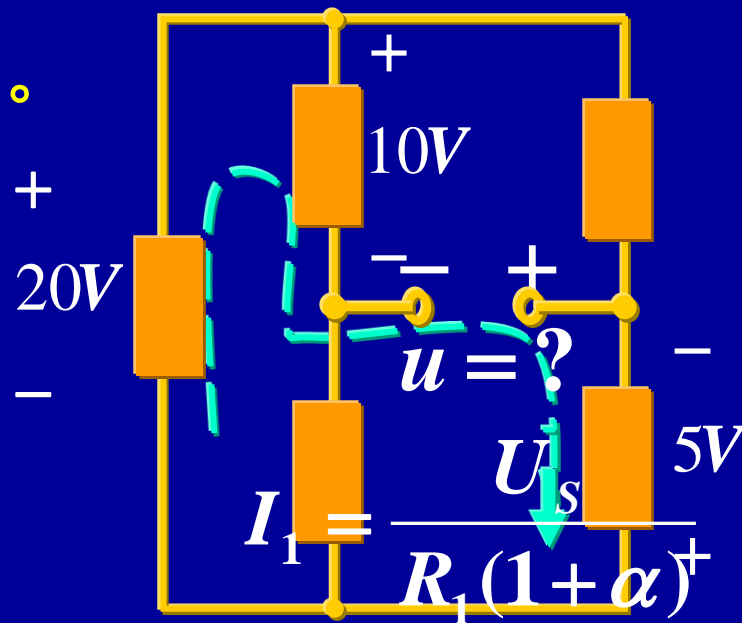


1.



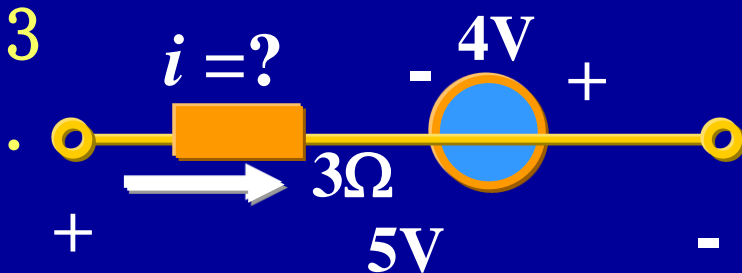
$$i = 3 - (-2) = 5A$$

2.



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

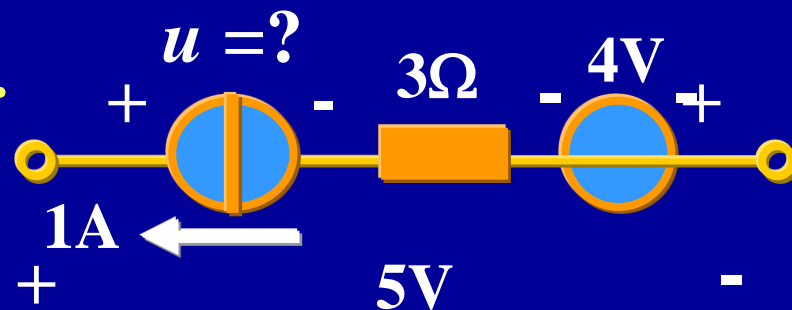
3.



$$3i - 4 = 5$$

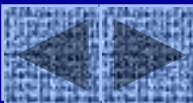
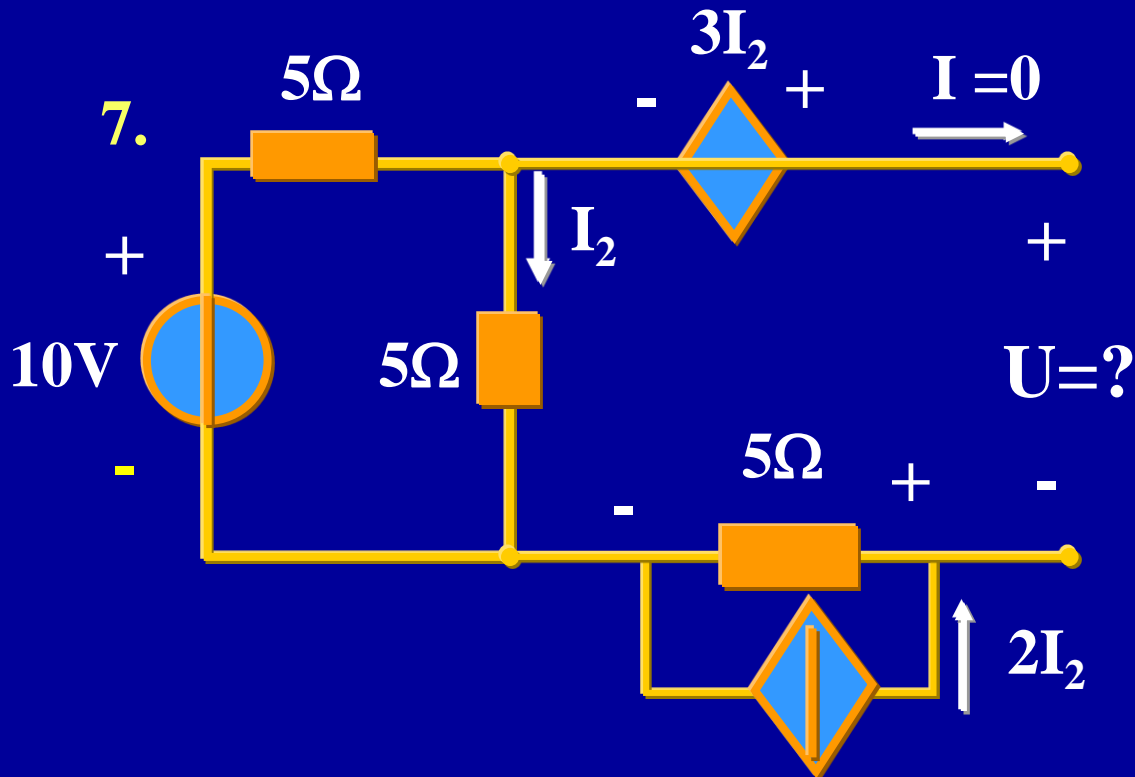
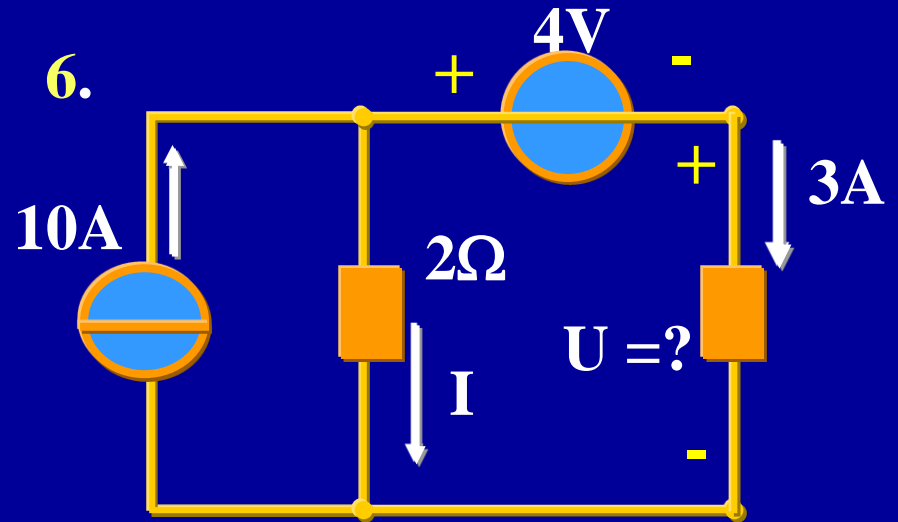
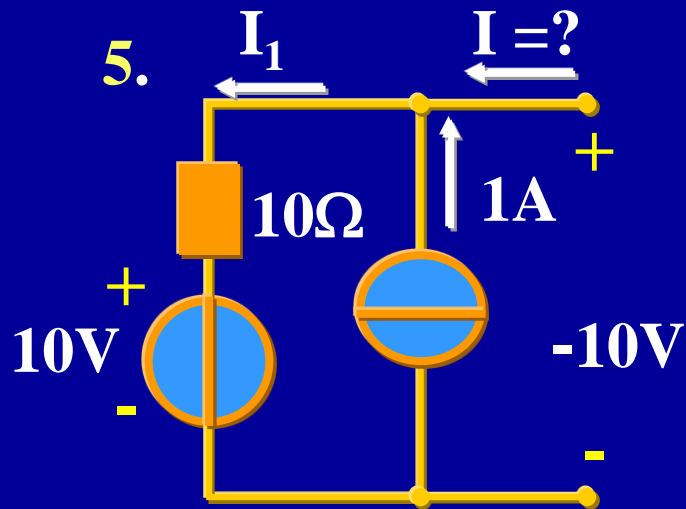
$$i = 3A$$

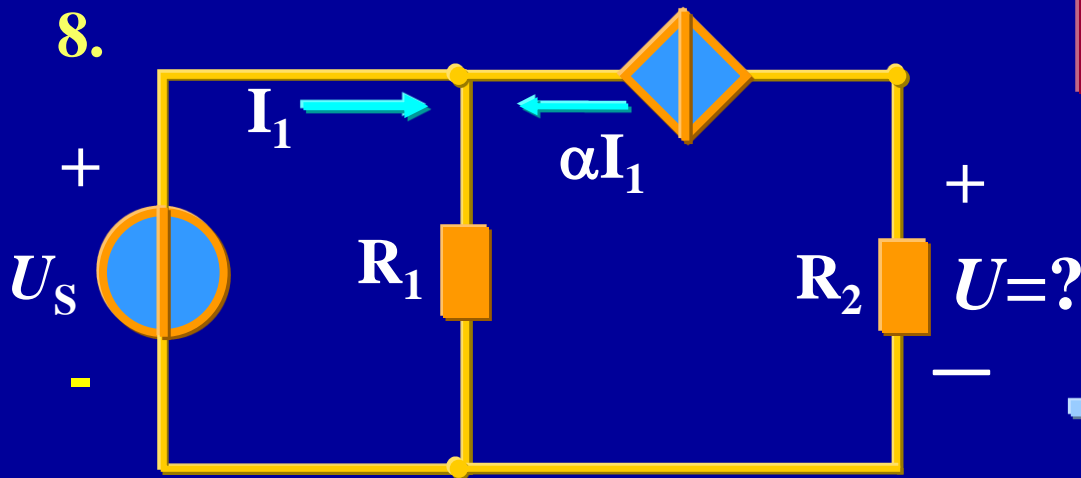
4.



$$u = 5 + 7 = 12V$$







解

$$U = -R_2 \alpha I_1$$

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

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

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

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

$$P_o = R_2 \alpha^2 \frac{U_s^2}{R_1^2(1 + \alpha)^2}$$

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

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

选择参数可以得到
电压和功率放大。



回顾第一部分主要内容

- 1.1 了解集中参数电路与实际电路模型的概念。
- 1.2 电路中的基本变量电压、电流及其参考方向。
- 1.3 电路基本元件电阻、电容、电感、电压源、电流源及受控源。
- 1.4 功率、KCL、KVL。

