

第1章 电路模型和电路定律

- 1.1 电路与电路模型

- 1.实际电路

→为实现某一功能，由一些电子元器件或设备相互连接组成的总体

- 功能

- a.电能量的传输、分配和转换；
 - b.电信号的产生、变换和处理。

- 三部分

- a.电源
 - b.负载
 - c.导线

- 2.电路模型 (circuit model)

- 1) 理想电路元件：具有某种确定电磁性质的假想元件

实际电路元件抽象成理想电路元件

- 理想电路元件（二端）：

- 电阻 (resistance)：反应消耗电磁能的元件
 - 电容 (capacitance)：反应电场储能性质的元件
 - 电感 (inductance)：反应磁场储能性质的元件
 - 电源 (source)：能够将其他形式的能量转换为电能的元件

- 2) 电路模型：用理想的电路元件及其组合来代替实际的电路

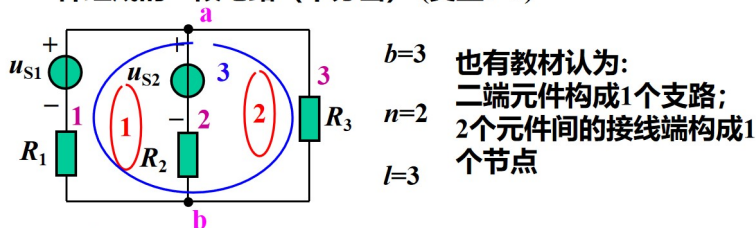
实际电路抽象成理想电路

- 3) 集中参数电路：当电路尺寸远远小于电路工作波长时，电路参数的分布性对电路性能影响不明显

- 3.概念和术语

3. 概念和术语

- **支路branch**: 网络中一个元件 (一个二端元件) 或多个元件组成的一段电路 (不分岔) (变量: b)



- **节点node**: 三条或三条以上的支路的连接点 (变量: n)
- **路径path**: 两个节点间包含的支路
- **回路loop**: 若干条支路组成的闭合路径 (变量: l)
- **网孔mesh**: 没有被支路穿过的回路 (变量: M)
- **平面网络planar network**: 将电路画在平面上, 如果能够做到除节点之外, 各支路都不相交

Fundamentals of Electric Circuits Harbin Engineering University 2024

18

1.2 电流与电压及其参考方向

基本要求: 熟练掌握电流、电压的定义和参考方向的概念。

1. 电流 (current)

电流一定是一条线上的

1) 定义:

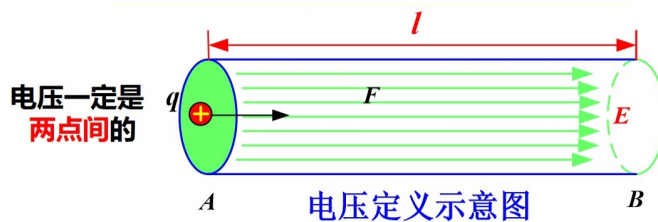
- 电荷的有序运动形成电流
- 在时间段 Δt 内, 通过载流体截面的电荷量 Δq
-

单位: 安[培] (A)
$$i \stackrel{\text{def}}{=} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt}$$
 单位: 库[伦](C)
单位: 秒 (s)

称为电流 (用符号 i 表示), 其方向规定为正电荷运动的方向。

2. 电压 (voltage)

- 1) 定义: 电场力将单位正电荷从A移动到B所做的功



单位: 伏[特] (V)
$$u_{AB} = \frac{dw_{AB}}{dq}$$
 单位: 焦[尔](J)
单位: 库[伦](C)

规定电场力作用正电荷移动的方向为电压方向

- 2) 电位 (potential): 单位正电荷在电路中某点所具有的电位能

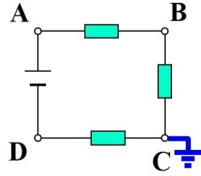
符号: v 单位: **V(伏)**

$$v_A = \frac{dw_A}{dq}$$



参考点 (reference point) 的电位是零。

电位一定是**某一点**的



(1) B为参考点, $v_B = 0$

$$v_A = v_A - v_B = u_{AB}$$

(2) C为参考点, $v_C = 0$

$$v_A = v_A - v_C = u_{AC}$$

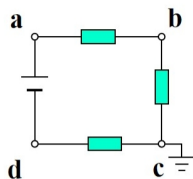
电位相对于选定的参考点具有**单值性**。(随参考点选取的不同而不同, 但参考点一旦确定, 电路中各点电位确定)

3) 电压与电位关系

已知 (1) 任意两点之间有**电压**。

(2) 某点的**电位**是该点到参考点的电压。

两点的电位和两点之间的电压有什么关系?



$$v_c = 0$$

$$u_{ac} = v_a, \quad u_{dc} = v_d$$

$$u_{ac} = u_{ad} + u_{dc} \quad \text{KVL}$$



$$u_{ad} = u_{ac} - u_{dc} = v_a - v_d$$



两点间的电压等于两点间的电位差(电位降)

电位降 \implies 电压 \implies 电压降

1. 电位何时等于电压, 何时不等于电压

$$U_{ab} = 1.5 \text{ V}, \quad U_{bc} = 1.5 \text{ V}, \quad \text{求 } v_a, v_b, v_c, U_{ac}$$

解: (1) **a为参考点**, $v_a = 0$

$$U_{ab} = v_a - v_b \rightarrow v_b = v_a - U_{ab} = -1.5 \text{ V}$$

$$U_{bc} = v_b - v_c \rightarrow v_c = v_b - U_{bc} = -1.5 - 1.5 = -3 \text{ V}$$

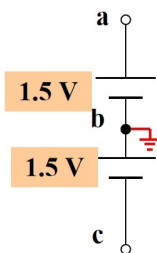
$$U_{ac} = v_a - v_c = 0 - (-3) = 3 \text{ V}$$

(2) **b为参考点**, $v_b = 0$

$$U_{ab} = v_a - v_b \rightarrow v_a = v_b + U_{ab} = 1.5 \text{ V}$$

$$U_{bc} = v_b - v_c \rightarrow v_c = v_b - U_{bc} = -1.5 \text{ V}$$

$$U_{ac} = v_a - v_c = 1.5 - (-1.5) = 3 \text{ V}$$



**电位由参考点决定, 是个相对值;
两点间的电压不随参考点的选择而变化;
在一定条件下二者相同**

4) 电动势 (electromotive force)

$$e_{AB} = \frac{dw_{BA}}{dq}$$

(电源中) 非电场力
将单位正电荷从B移动到A所作的功

单位: V (伏)

e_{AB} , 从B到A电位的升高, $e_{AB} = v_B - v_A$

u_{AB} , 从A到B电位的降低, $u_{AB} = v_A - v_B$

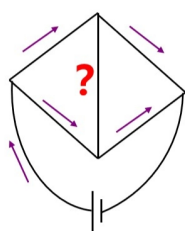
$\therefore e_{AB} = -u_{AB}$ 电动势一定是
两点间的



3. 电流和电压的参考方向

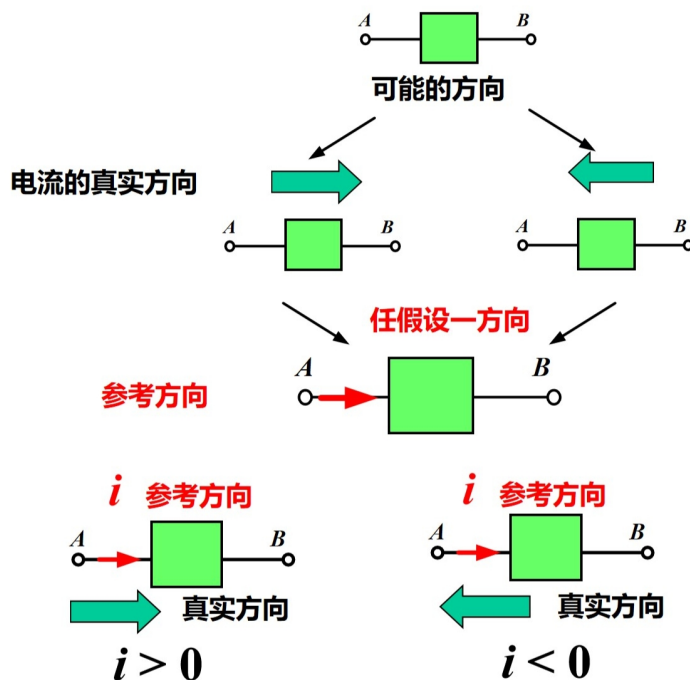
1) 为什么要引入参考方向?

电压或电流的方向不确定



仅用大小描述电压、电流是不够的, 因为还有方向;
大电路分析需要一个共同的基准

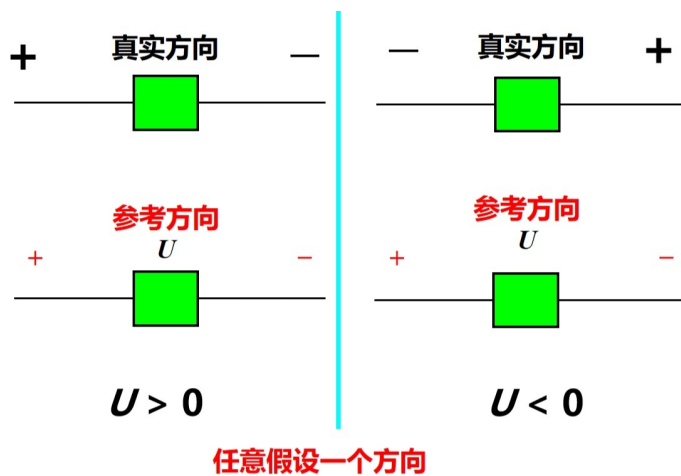
2) 电流的参考方向 (Reference direction)



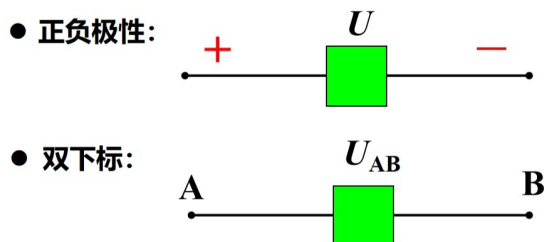
表示电流参考方向的两种方法:

- 箭头
- 双下标 (i_{AB}): 参考方向从 A 指向 B

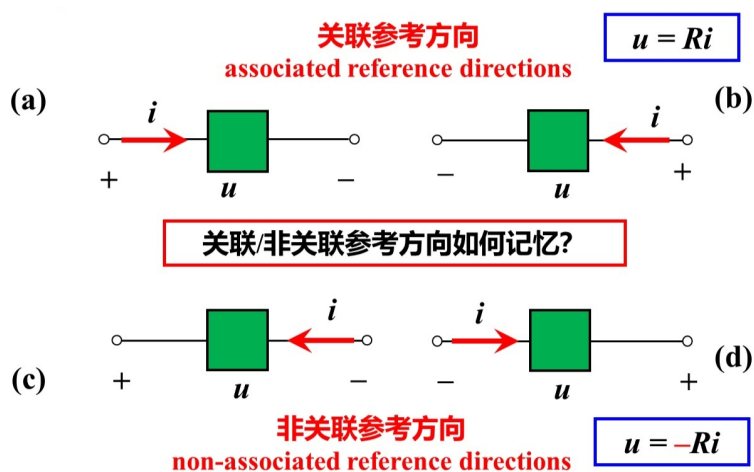
3) 电压的参考方向



表示电压参考方向的2种方法

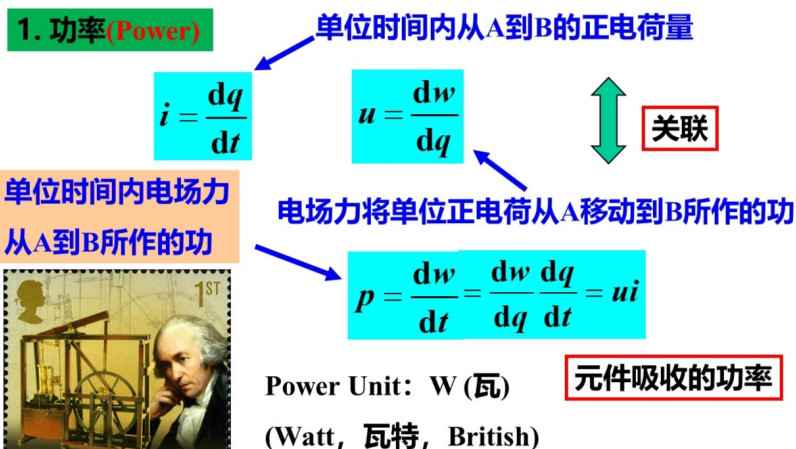


- 4) 二端元件上电压参考方向和电流参考方向之间的关系



1.3 电功率和能量

1. 功率 (Power)

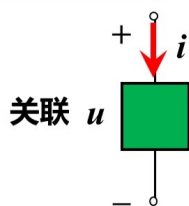


2. 功率的计算

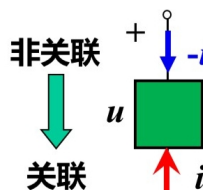
2. 功率的计算

永远用关联计算

$$p_{\text{吸}} = ui$$



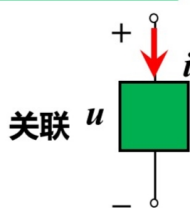
$$p_{\text{吸}} = ui, \text{ 元件吸收的功率}$$



$$p_{\text{吸}} = u(-i) = -ui, \text{ 元件吸收的功率}$$

$$p > 0 \text{ (元件真正吸收功率)}$$

$$p < 0 \text{ (元件真正发出功率)}$$



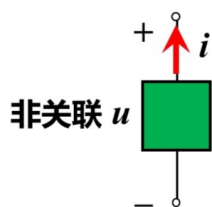
$$p_{\text{吸}} = ui, \text{ 元件吸收的功率}$$

$$p_{\text{吸}} > 0 \text{ (元件真正吸收功率)}$$

$$p_{\text{吸}} < 0 \text{ (元件真正发出功率)}$$

吸 \leftrightarrow 关联

发 \leftrightarrow 非关联



$$p_{\text{发}} = ui \text{ 元件发出的功率}$$

$$p_{\text{发}} > 0 \text{ (元件真正发出功率)}$$

$$p_{\text{发}} < 0 \text{ (元件真正吸收功率)}$$

$$P_{\text{发}} = P_{\text{吸}}$$

功率守恒

- 电阻总是吸收功率，电源可能吸收也可能发出功率。
- 电路中被吸收的功率之和一定等于发出的功率之和。
- 要想获得好成绩，就需要认真对待课程的学习。

3. 能量 (Energy)

$$w = \int_{t_0}^{t_1} p(\xi) d\xi = \int_{t_0}^{t_1} u(\xi) i(\xi) d\xi$$

$w > 0$, 则表明电路从外电路吸收能量, 即消耗电能

$w < 0$, 则表明电路向外电路提供能量, 即发出电能



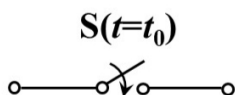
Energy Unit: J (焦)

(Joule, 焦耳, British)

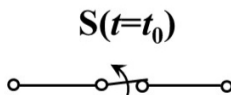
1.4 电路元件

1. 开关 (Switch)

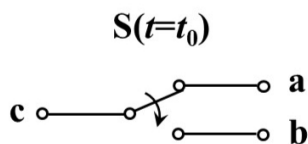
开关符号



初始断开的SPST开关



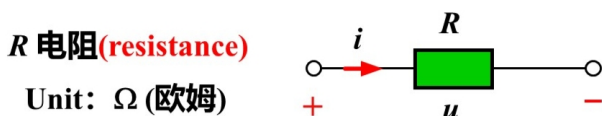
初始闭合的SPST开关



SPDT开关

2. 电阻 (Resistor)

- 1) 电阻符号: R 反映消耗电磁能的元件
- 2) 线性电阻: 电压、电流关系是过 u - i 平面原点的直线



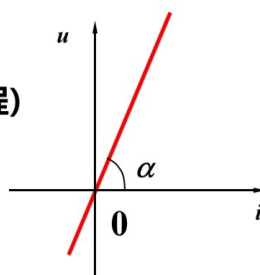
电压电流采用关联参考方向

$u = R i$ (电阻元件的VCR方程)

令 $G = 1/R$ G 电导(Conductance).

Unit: S (西) (Siemens, 西门子)

欧姆定律: $i = G u$



- 非线性电阻: 电压、电流关系是过 u - i 平面原点的一条曲线, 称为非线性电阻 (nonlinear resistance)
- 3) 开路与短路



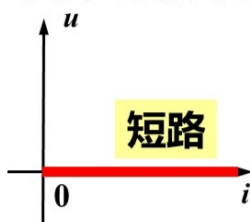
当 $R = 0$ ($G = \infty$), 视其为短路。

$u = 0$, i 由外电路决定。

u

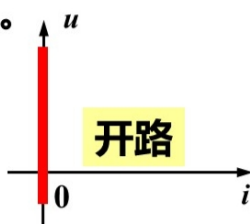


$-$



当 $R = \infty$ ($G = 0$), 视其为开路。

$i = 0$, u 由外电路决定。



电阻吸收的功率和能量:

$$p = ui = Ri^2 = Gu^2 \geq 0$$

无记忆元件

瞬时元件

耗能元件

$$w = \int_{-\infty}^t p d\xi = \int_{-\infty}^t u(\xi)i(\xi)d\xi = R \int_{-\infty}^t i^2(\xi)d\xi = G \int_{-\infty}^t u^2(\xi)d\xi \geq 0$$

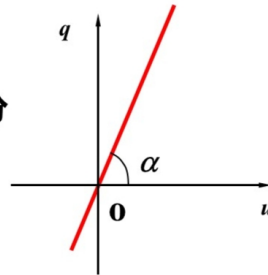
3. 电容 (Capacitors)

- 1) 电容符号: C 反映电场储能性质的元件
- 2) 线性电容: 电量q(t)与电压u(t)是过q-u平面原点的直线

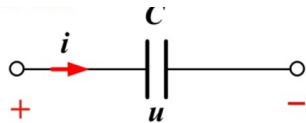
C 电容(capacitors) Unit: F (法拉)

常用单位有 μF (微法)及 pF (皮法), 分别表示为 10^{-6}F 及 10^{-12}F 。

$$q = Cu$$



- 非线性电容: 电量q(t)与电压u(t)是过q-u平面原点的曲线, 称为非线性电容 (nonlinear capacitors)
- 3) 电压与电流关系



电压电流采用关联参考方向

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

(电容元件的VCR方程)
动态元件

$$u(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\xi) d\xi = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^0 i(\xi) d\xi + \frac{1}{C} \int_0^t i(\xi) d\xi$$

$$\text{令 } u(0) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^0 i(\xi) d\xi$$

$$\therefore u(t) = u(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i(\xi) d\xi$$

所以某一时刻的电荷量不能由该瞬间时刻的电流值来确定, 而须考虑此刻以前的全部电流的“历史”, 所以电容也属于记忆元件。

非关联加负号

- 4) 电功率与能量

在关联参考方向下，输入线性电容端口的功率

$$p = ui = Cu \frac{du}{dt}$$

$$w_c(t) = \int_{-\infty}^t p d\xi = \int_{-\infty}^t Cu \frac{du}{d\xi} d\xi = \frac{1}{2} C [u^2(t) - u^2(-\infty)]$$

由于 $u(-\infty)=0$ ，所以 $w_c(t) = \frac{1}{2} Cu^2(t) \geq 0$ \Rightarrow 储能元件

电容存储的电场能

当 $u(t) \uparrow \rightarrow$ 储能 \uparrow ，即吸收能量 \rightarrow 充电

当 $u(t) \downarrow \rightarrow$ 储能 \downarrow ，即释放能量 \rightarrow 放电

综上所述，电容是一种动态、记忆、储能元件。

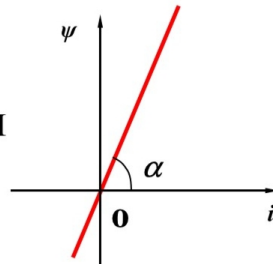
• 4. 电感 (Inductors)

- 1) 电感符号：L 反映磁场储能性质的元件
- 2) 线性电感：磁链 $\psi(t)$ 与电流 $i(t)$ 是过 ψ - i 平面原点的直线

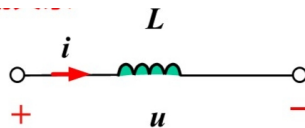
L 电感(inductors) Unit: H (亨利)

常用单位有 mH(毫亨)，表示为 $10^{-3}H$

$$\psi = Li$$



- 非线性电感：磁链 $\psi(t)$ 与电流 $i(t)$ 是过 ψ - i 平面原点的曲线，被称为非线性电感 (nonlinear indicators)
- 3) 电压与电流关系



电压电流采用关联参考方向

$$u = \frac{d\psi}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad \Rightarrow \quad \text{(电感元件的VCR方程)} \\ \text{动态元件}$$

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u(\xi) d\xi = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^0 u(\xi) d\xi + \frac{1}{L} \int_0^t u(\xi) d\xi$$

$$\text{令 } i(0) = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^0 u(\xi) d\xi$$

$$\therefore i(t) = i(0) + \frac{1}{L} \int_0^t u(\xi) d\xi$$

电感中某一瞬间的磁链和电流决定于此瞬间以前的全过程的电压，因此电感也属于记忆元件。

• 4) 电功率与能量

在关联参考方向下，输入线性电感端口的功率

$$p = ui = Li \frac{di}{dt}$$

$$w_L(t) = \int_{-\infty}^t p d\xi = \int_{-\infty}^t Li \frac{di}{d\xi} d\xi = \frac{1}{2} L[i^2(t) - i^2(-\infty)]$$

由于 $i(-\infty)=0$ ，所以 $w_L(t) = \frac{1}{2} Li^2(t) \geq 0$ \rightarrow 储能元件

电感存储的磁场能

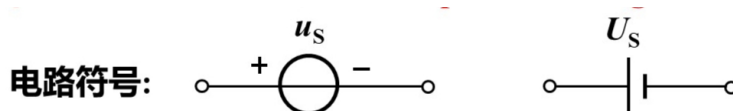
当 $i(t) \uparrow \rightarrow$ 储能 \uparrow ，即吸收能量 \rightarrow 充电

当 $i(t) \downarrow \rightarrow$ 储能 \downarrow ，即释放能量 \rightarrow 放电

综上所述，电感是一种动态、记忆、储能元件。

• 5. 独立电源 (independent source)

• 1) 理想独立电压源 (Ideal independent voltage source)



• 特性

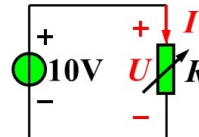
(a) 独立电压源两端的电压 **不受** 电路其余部分影响

直流: u_S 为常数 U_S

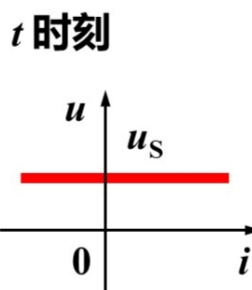
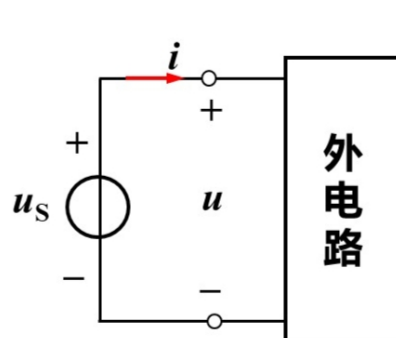
正弦交流: u_S 随时间变化，可以表示为 $u_S = U_m \cos \omega t$

(b) 流经独立电压源的电流由外电路 **决定**

(c) 理想情况下，可以提供 **足够大** 的功率



• u-i特性

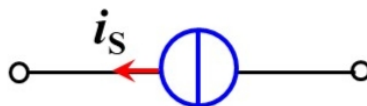


当 $u_S=0$ 时，和本节课前面提到的什么等效？

短路

• 2) 理想独立电流源 (Ideal independent current source)

电流符号



特性

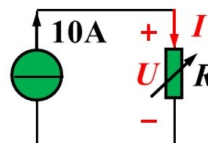
(a) 流经独立电流源的电流**不受**电路的其余部分影响

直流: i_s 是常数 (I_s)

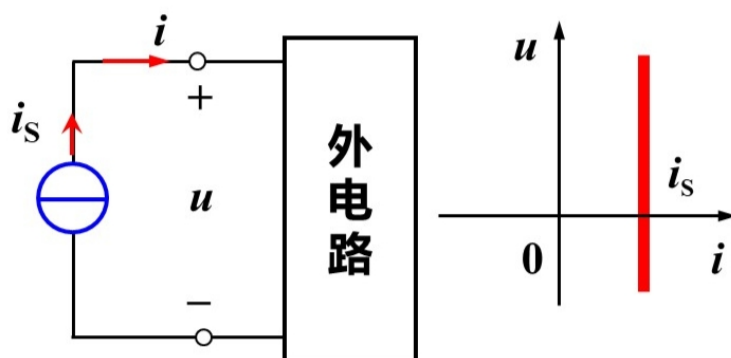
正弦交流: i_s 随时间变化, 可以表示为 $i_s = I_m \cos \omega t$

(b) 电流源上的电压由外电路**决定**

(c) 理想情况下, 可以提供**足够大**的功率

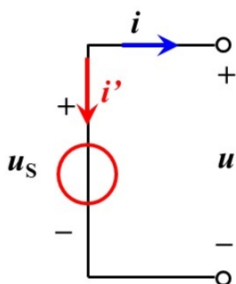


u-i特性



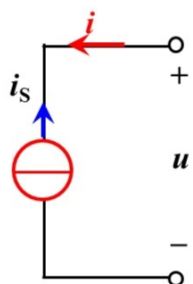
$I_s = 0$ 和开路等效

3) 独立电源的功率



非关联: $p = u_s i$ (发出)

关 联: $p = u i' = -u_s i$ (吸收)



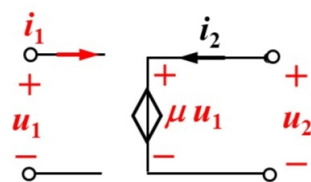
非关联: $p = u i_s$ (发出)

关 联: $p = u i = -u i_s$ (吸收)

6. 受控元件 (dependent source)

线性受控源的分类

(a) 压控电压源 Voltage controlled voltage source (VCVS)

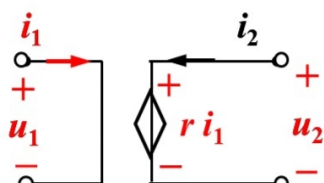


VCVS

控制系数 μ :转移电压比

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

- (b) 流控电压源Current controlled voltage source (CCVS)

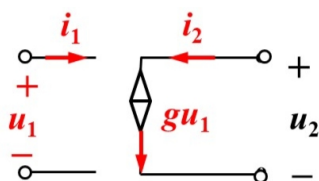


CCVS

控制系数 r :转移电阻

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

- (c) 压控电流源Voltage controlled current source (VCCS)

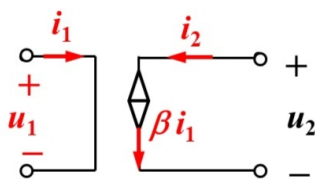


VCCS

控制系数 g :转移电导

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

- (d) 流控电流源Current controlled current source (CCCS)



CCCS

控制系数 β :转移电流比

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

- 受控源与独立源的比较

独立源电压(或电流)的电压(或电流)由电源本身决定, 而受控源电压(或电流)的电压(或电流)由控制量决定。

独立源是真正电路中的“源”, 受控源在电路中是能量或信号处理元件。

受控源具有独立源全部的特点 (共性), 受控源的控制支路和受控支路密不可分, 受控电源随着控制量的变化而变化, 随控制量的消失而消失 (不同)。

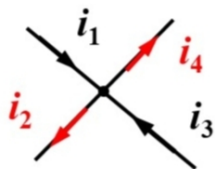
- 1.5 基尔霍夫定律

- 1.基尔霍夫电流定律 (Kirchhoff's Current Law, KCL)

- 在集中参数电路中, 对于任一电路的任一节点, 在任一时刻, 流出 (或流入) 该节点的所有支路电流的代数和等于零, 即

$$\sum i_k = 0 \quad (i_k \text{ 表示第 } k \text{ 条支路电流})$$

规定： i_k 参考方向为流出节点时， i_k 前面取 “+” 号
流入节点时， i_k 前面取 “-” 号



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

$$i_1 + i_3 = i_2 + i_4$$

$$\sum i_{\text{in}}(t) = \sum i_{\text{out}}(t)$$

根据右图，列写KCL方程

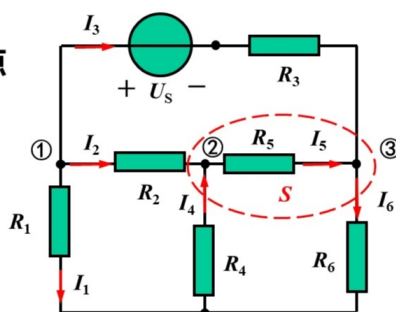
(1) 基本表述方式——对节点

节点①： $I_1 + I_2 + I_3 = 0$

节点②： $-I_2 - I_4 + I_5 = 0$

节点③： $-I_3 - I_5 + I_6 = 0$

(2) **广义KCL**——对闭合面S



穿过一个闭合面的各支路电流的代数和总是等于零

$$-I_2 - I_3 - I_4 + I_6 = 0$$

(3) 若上述四个表达式的负号项移到方程的右端则变成了第三种表达方式，如上式变为

$$I_6 = I_2 + I_3 + I_4$$

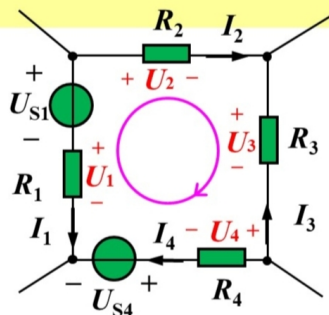
2. 基尔霍夫电压定律 (Kirchhoff's Voltage Law, KVL)

- 在集中参数电路中，对于任一电路的任一回路，在任一时刻，沿该回路绕行一周途径各元件或支路电压的代数和等于零，即

$$\sum u_k = 0 \quad (u_k \text{ 表示第 } k \text{ 条支路电压})$$

规定： u_k 参考方向与回路方向相同时， u_k 的前面取 “+” 号
否则取 “-” 号

例



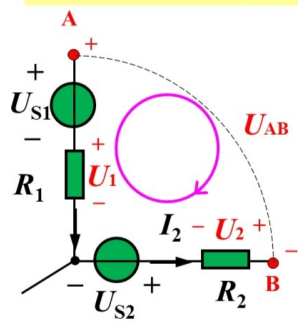
$$-U_1 - U_{S1} + U_2 + U_3 + U_4 + U_{S4} = 0$$

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

$$\sum u_{\text{drop}}(t) = \sum u_{\text{rise}}(t)$$

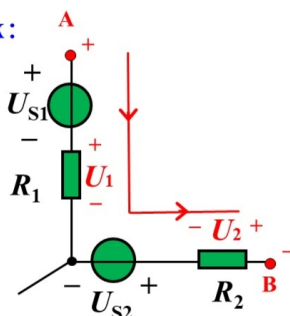
广义KVL——开路

电路中任意两点间的电压等于由起点到终点沿途各电压的代数和。



$$U_{AB} + U_2 + U_{S2} - U_1 - U_{S1} = 0$$

Ex:



$$U_{AB} = U_{S1} + U_1 - U_{S2} - U_2$$

当电压参考方向与路径方向相同，其前面符号取“+”号；
当电压参考方向与路径方向相反，其前面符号取“-”号，