

电路与电子技术基础

路天航

课程性质、作用、教学目标

本课程分电路、模电、数电三大部分，是高等工科学校非电专业必修的一门技术基础课，是研究电路电子应用学科。通过本课程的学习，使学生获得电路与电子技术方面必要的基本理论、基本知识和基本技能，有助于提高学生的动手实践能力。了解电路与电子技术发展的概况，为学习后续课程及从事与本专业有关的工作打下一定的基础。

成绩考核

- * 1. 平时成绩 30% (作业, 答疑, 小测验)
- * 2. 期末成绩 70%

18~19世纪电磁理论与技术的发展

1785年 库仑建立著名的库仑定律。

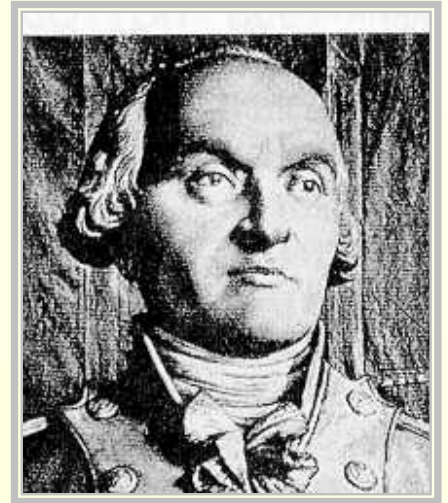
1820年 奥斯特及安培各自揭示电磁作用

1826年 发现欧姆定律

1831年 总结出电磁感应定律

1834年 制造了世界第一台电动机

1873年 麦克斯韦完善了电磁理论……



库仑（1736-1806）



安培（1775~1836）

第一章 电路分析基础

1.1 电路和电路模型

一 电路

电路(网络): 为了完成某种预期由某些电气设备或器件(例如电容器、电阻器)按一定方式连接组合起来, 构成电流的通路。简单的说, **电流流通的路径。**



二 电路的作用

- 实现电能的传输和转换（电力系统）
- 进行电信号的传递和处理（集成电路）

三 电路的组成

电源：将非电形态的能量转换为电能的供电设备。（发电机、蓄电池等）

负载：将电形态的能量转换为非电形态能量的用电设备。（电动机、电灯等）

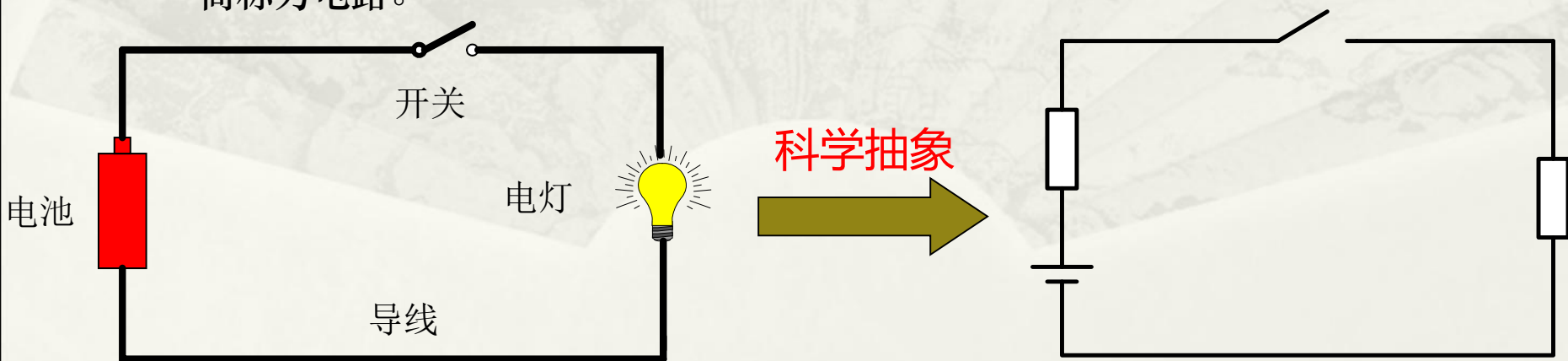
连接导线：沟通电路、输送电能的作用。

开关：控制电路通断。

四.理想电路

实际电路元件的电磁性质比较复杂，为了便于对实际电路进行分析，可将实际电路元件理想化(或称模型化)，忽略其次要因素，将其近似地看作**理想电路元件**。例如白炽灯主要作用是消耗电能，主要呈现电阻特性，其它特性很微弱，因而将其近似地看作纯电阻元件。

理想电路元件是对实际电路元件的科学抽象。理想电路元件中主要有**电阻元件、电容元件、电感元件和电源元件**等。由一些理想电路元件组成的电路，就是**实际电路的电路模型**。通常把理想电路元件称为元件，将电路模型简称为电路。



对实际电路进行模型化处理的前提是：假设电路中的基本电磁现象可以分别研究，并且相应的电磁过程都集中在各理想元件内部进行。即所谓的电路理论的集总化假设。满足集中化假设的理想元件称为集总（参数）元件。

集总参数电路是由集总参数元件组成的电路。集总参数元件的主要特点是：元件外形尺寸与其正常工作频率所对应的波长相较而言很小。同理，集总参数电路要求实际电路的几何尺寸必须远小于其工作电磁波的波长。

1.2 电路分析的基本变量

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。

1.2.1 电流及其参考方向

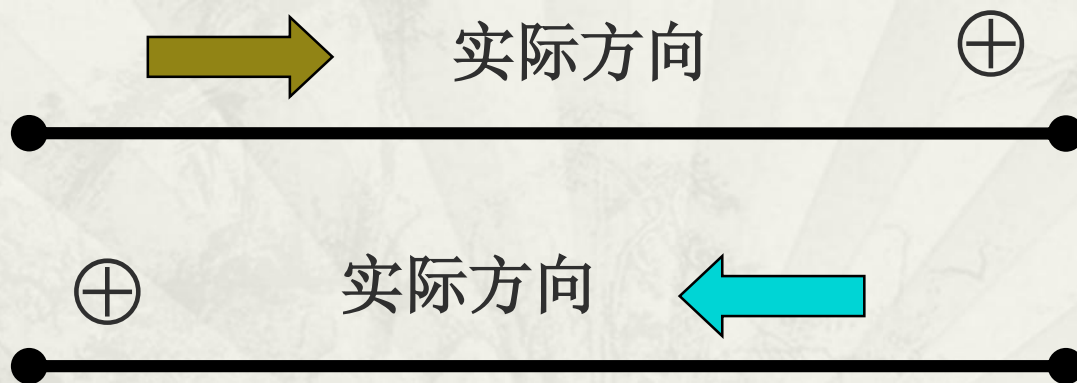
带电粒子有规则的定向运动形成电流，其大小用电流强度表示，定义为单位时间内通过导体截面的电荷量。

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

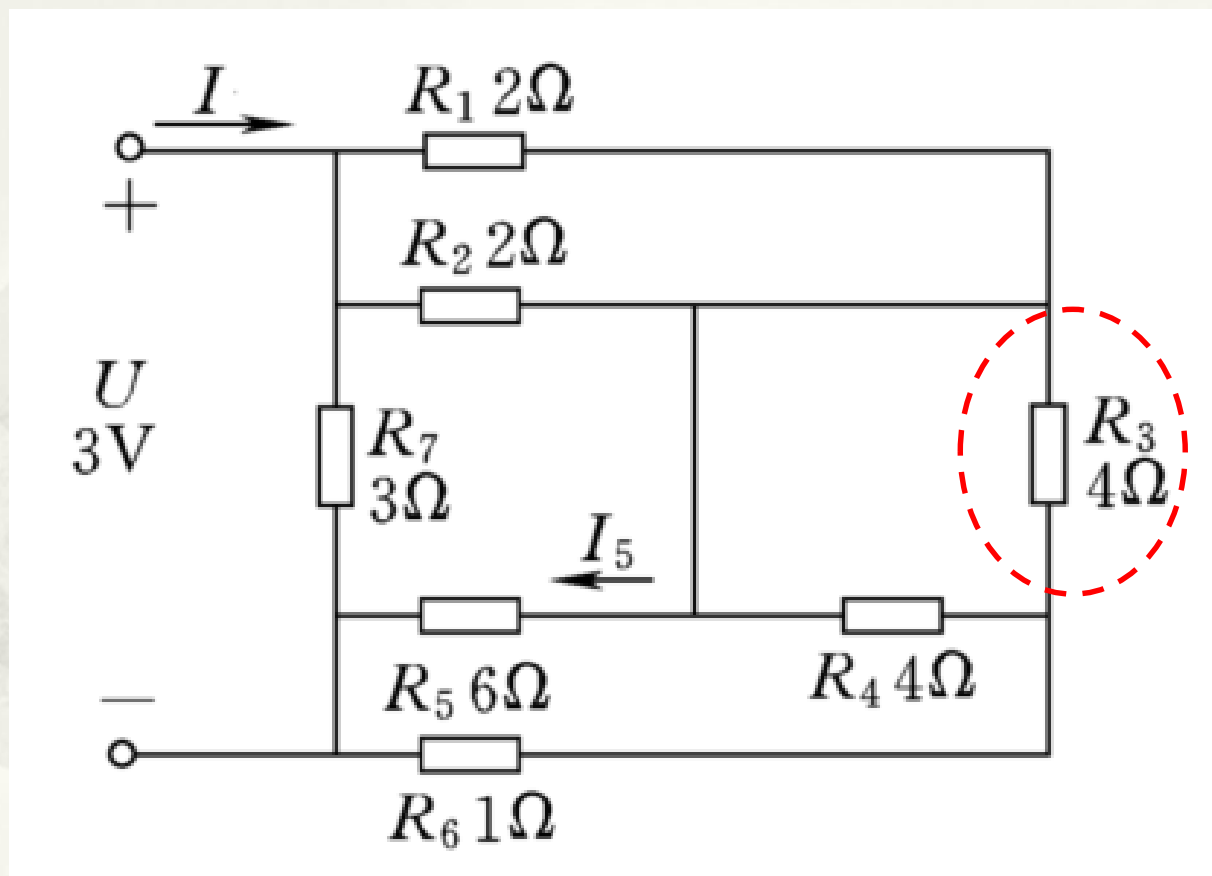
电流的单位为A（安培）、kA、mA、 μ A

电流实际方向

一般规定**正电荷的运动方向**为电流的实际方向，在元件(导线)中电流流动的实际方向只有两种可能：



但对于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。比如：



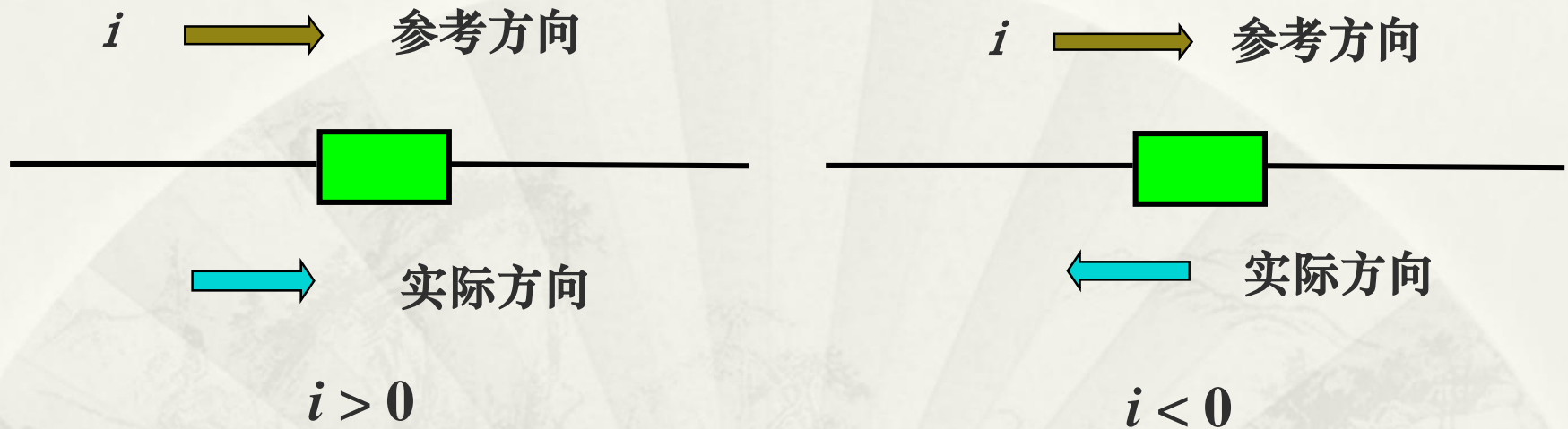
电流参考方向

进行电路分析之前，任意假定一个方向作为电流的参考方向。



此时的电流包含大小和方向两个含义。

电流的参考方向与实际方向的关系及表示方法：

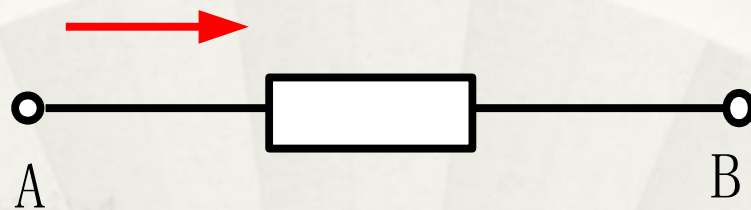


- 用箭头表示：箭头的指向为电流的参考方向。
- 用双下标表示：如 i_{AB} ，电流的参考方向由A指向B。

由于所选定电流的参考方向不一定与电流的实际方向一致，如果计算结果为正，则表示电流的实际方向与参考方向一致；如果计算结果为负，则表示电流的实际方向与参考方向相反。

注意：所有电路方程都是在标定了参考方向的基础上才能进行建立！

例：试指出下图所示电流的实际方向



$$I_{AB} = 3A$$



$$I_{AB} = -2A$$

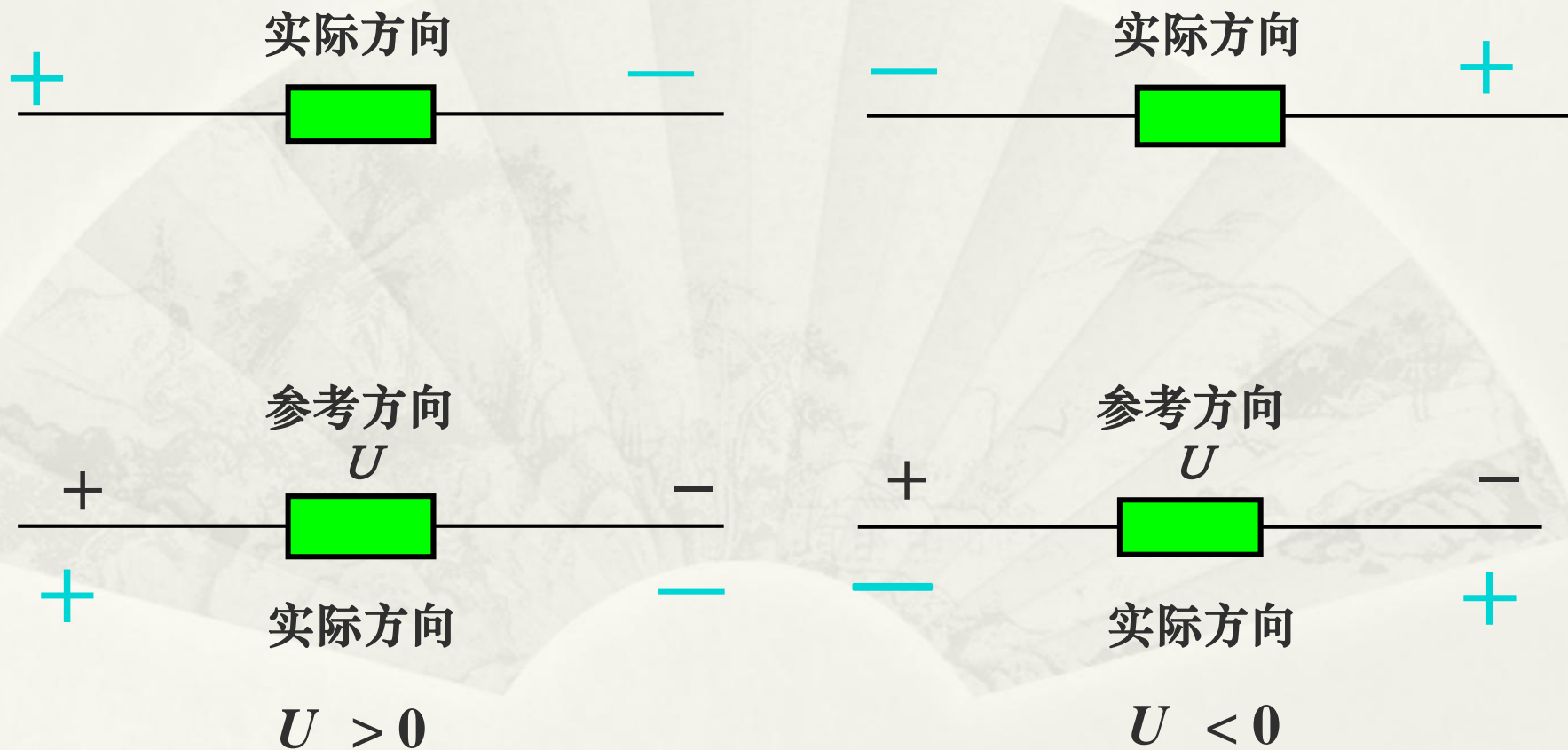
1.2.2 电压及其参考方向

电场中某两点A、B间的电压(降) U_{AB} 等于将点电荷 q 从A点移至B点电场力所做的功 W_{AB} 与该点电荷 q 的比值, 即

$$U_{AB} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{W_{AB}}{q}$$

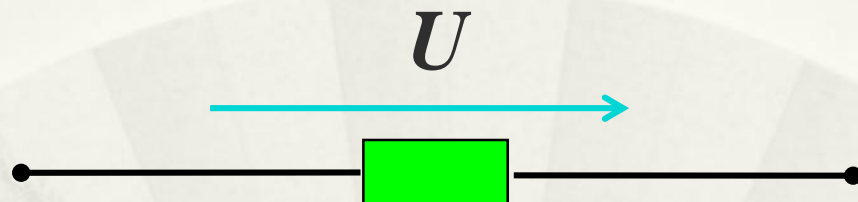
单位: V (伏)、kV、mV、 μ V

电压(降)的参考方向

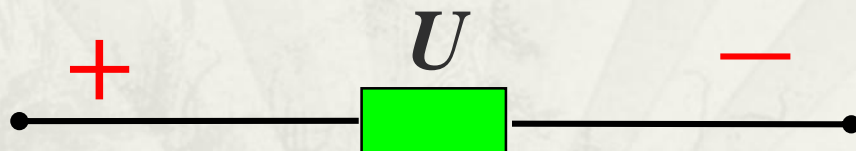


电压(降)参考方向的三种表示方式:

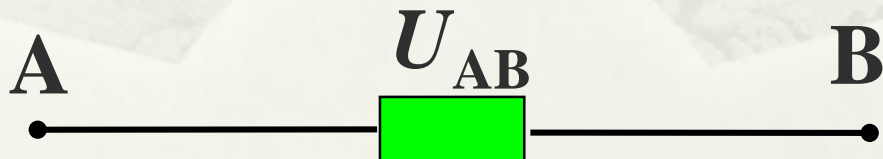
(1) 用箭头表示: 箭头指向为电压 (降) 的参考方向



(2) 用正负极性表示: 由正极指向负极的方向为电压 (降低)的参考方向



(3) 用双下标表示: 如 U_{AB} , 由A指向B的方向为电压 (降)的参考方向



电位的概念及与电压的区别

所谓电位是指单位正电荷 q 从电路中一点移至参考点 ($\varphi=0$) 时电场力做功的大小

而电压是指单位正电荷 q 从电路中一点移至另一点时电场力做功的大小

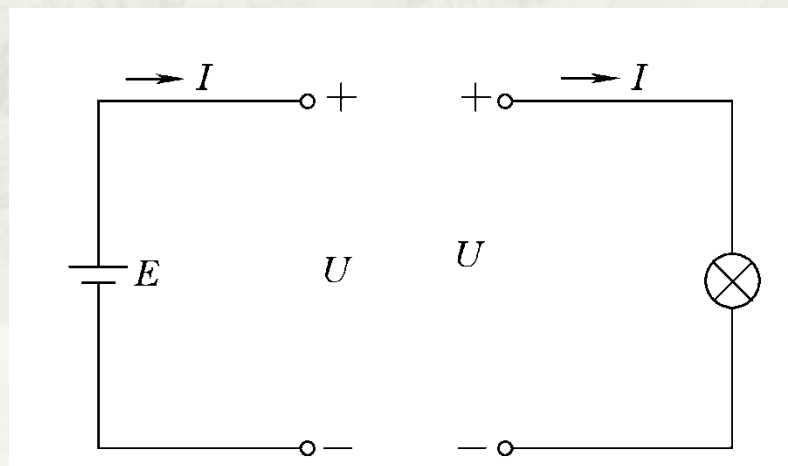
电路中电位参考点可任意选择；参考点一经选定，电路中各点的电位值就唯一确定；当选择不同的电位参考点时，电路中各点电位值将改变，但任意两点间电压保持不变。

注意：

- * 电流、电压的实际方向是客观存在的，但往往难于事先判定。参考方向是人为规定的电流、电压的方向，在分析问题时需要先规定参考方向，然后根据规定的参考方向列写方程。
- * 参考方向一经规定，在整个分析过程中就必须以此为准，不能变动。
- * 不标明参考方向而说某电流或电压的值为正或为负是没有意义的。
- * 参考方向可以任意规定而不影响计算结果，因为参考方向相反时，解出的电流、电压值也要改变正负号，最后得到的实际结果仍然相同。

★关联参考方向

一个元件或者一段电路中电流和电压的参考方向是可以任意设定的，二者可以一致，也可以不一致。当**电流和电压的参考方向一致时**，称为**关联参考方向**；两者相反时称为**非关联参考方向**。在电路中，负载上一般设定为关联参考方向。电源上设定为非关联参考方向，如图所示。



1.2.3 电路元件的功率 (power)

1. 功率

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



詹姆斯·瓦特
(James Watt,
1736-- 1819)
英国物理学家

功率的单位名称：**瓦**（特） 符号（W）

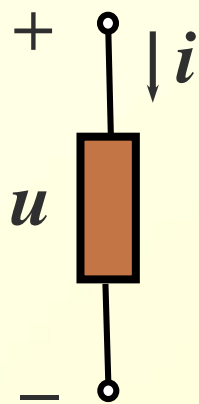
2. 能量：可用功表示。从 t_0 到 t 电阻消耗的能量

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

能量的单位名称：**焦**（耳） 符号（J）

3. 功率的计算定义

(1). u, i 取关联参考方向（图中元件为通用元件，非特指电阻）



$$p_{\text{吸}} = u i$$

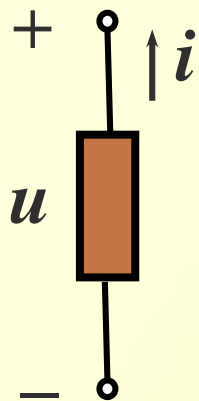
例 $U = 5\text{V}, I = -1\text{A}$

$$P_{\text{吸}} = UI = 5 \times (-1) = -5\text{ W}$$

$$p_{\text{吸}} < 0$$

实际发出5W

(2). u, i 取非关联参考方向（图中元件为通用元件，非特指电阻）



$$p_{\text{发}} = u i$$

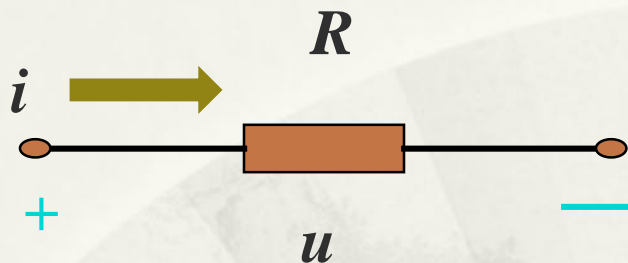
例 $U = 5\text{V}, I = -1\text{A}$

$$P_{\text{发}} = UI = 5 \times (-1) = -5\text{ W}$$

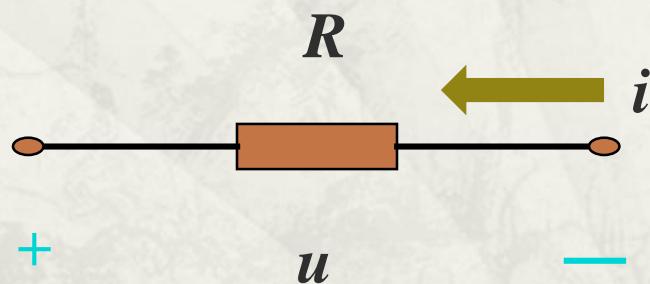
$$p_{\text{发}} < 0$$

实际吸收5W

功率（电阻元件）：



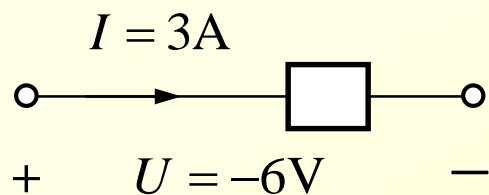
$$p_{\text{吸}} = ui = i^2 R = u^2 / R$$



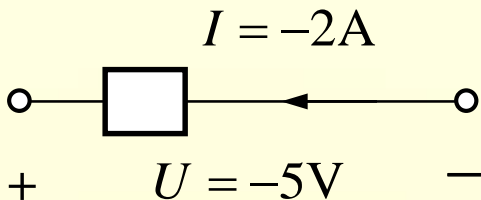
$$\begin{aligned} p_{\text{发}} &= ui = -Rii = -i^2 R \\ &= u(-u/R) = -u^2 / R \end{aligned}$$

上述结果说明电阻元件在任何时刻总是消耗功率的。

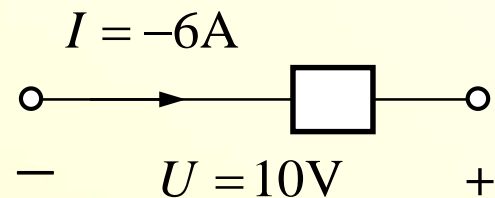
【例】 计算图中各元件的功率



(a)



(b)



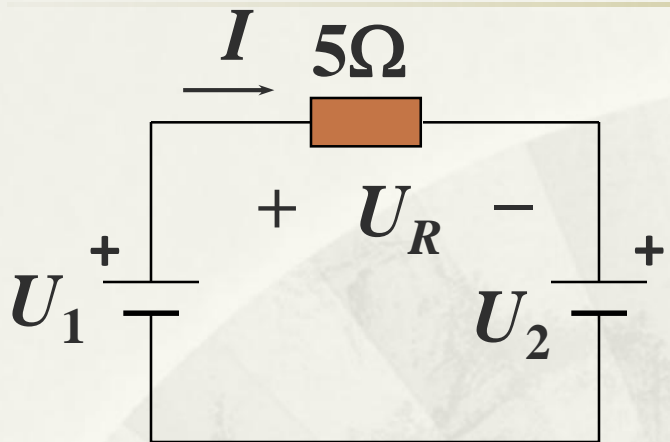
(c)

解 (a) $P_{\text{吸}} = UI = (-6) \times 3 = -18W$

(b) $P_{fa} = UI = (-5) \times (-2) = 10W$

(c) $P_{fa} = UI = 10 \times (-6) = -60W$

例 已知 $I=1\text{A}$, $U_1=10\text{V}$, $U_2=5\text{V}$ 。 分别求电源、电阻的功率。



$$P_{R\text{吸}} = U_R I = 5 \times 1 = 5 \text{ W}$$

$$P_{U_1\text{发}} = U_1 I = 10 \times 1 = 10 \text{ W}$$

$$P_{U_2\text{吸}} = U_2 I = 5 \times 1 = 5 \text{ W}$$

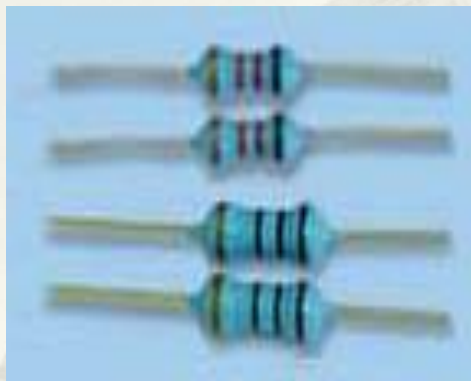
$$P_{\text{发}} = 10 \text{ W}, \quad P_{\text{吸}} = 5 + 5 = 10 \text{ W}$$

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

电源不一定消耗功率！

1.3 耗能元件—电阻元件

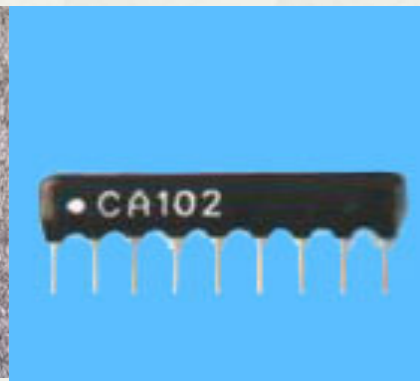
几种常见的电阻元件：



普通金属膜电阻



绕线电阻



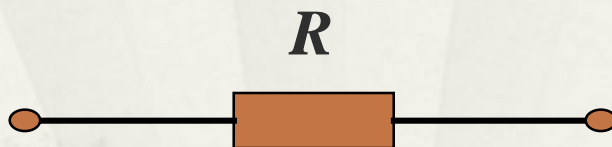
电阻排



热敏电阻

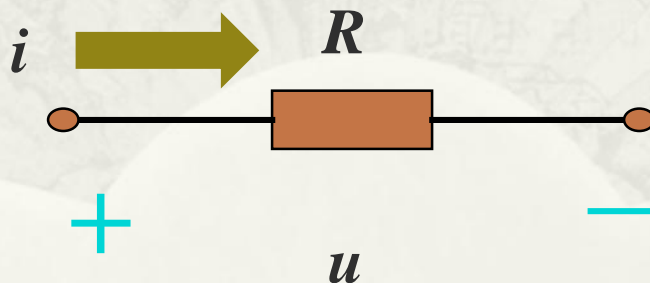
一．线性定常电阻元件：任何时刻端电压与其电流成正比的电阻元件。

1. 符号



2. 欧姆定律 (Ohm's Law)

(1) 电压与电流的参考方向设定为一致的方向



$$u = R i$$

其中 R 称为电阻， u 和 i 分别是电阻两端的电压和流过电阻的电流

电阻的单位： Ω (欧) (Ohm, 欧姆)

上式中若令 $G = 1/R$, G 称为电导

则 欧姆定律也可表示为 $i = G u$.

电导的单位： S (西) (Siemens, 西门子)

维尔纳·冯·西门子 (Ernst Werner von Siemens) (1816-1892)
德国工程学家，西门子集团的创始人。

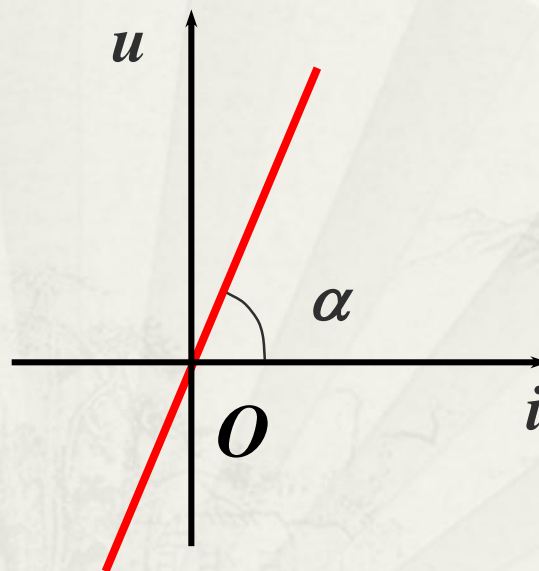


乔治·西蒙·欧姆
(Georg Simon Ohm,
1787~1854年)
德国物理学家

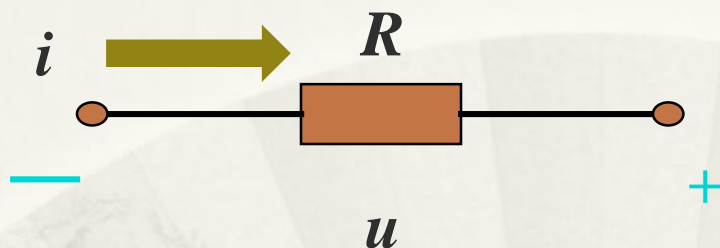
线性电阻 R 是一个与电压和电流无关的常数。

伏安特性曲线:

$$R \propto \operatorname{tg} \alpha$$



(2) 电阻的电压和电流的参考方向相反时

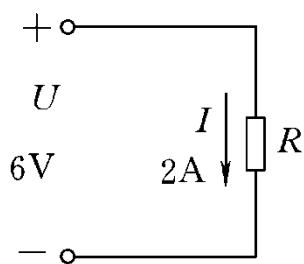


则欧姆定律写为

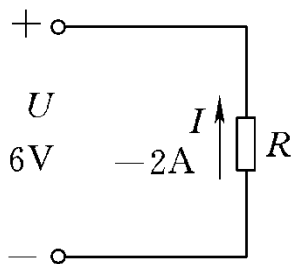
$$u = -Ri \quad \text{或} \quad i = -Gu$$

注意： 公式必须和参考方向配套使用！

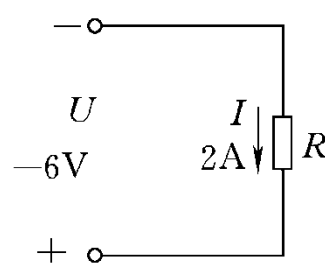
【例】应用欧姆定律对图的电路列出式子，并求电阻R。



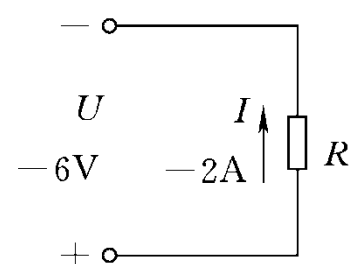
(a)



(b)



(c)



(d)

对于 (a)

$$R = \frac{U}{I} = \frac{6}{2} = 3\Omega$$

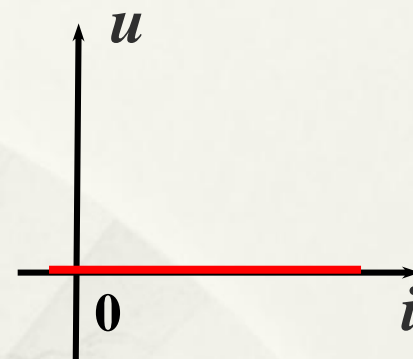
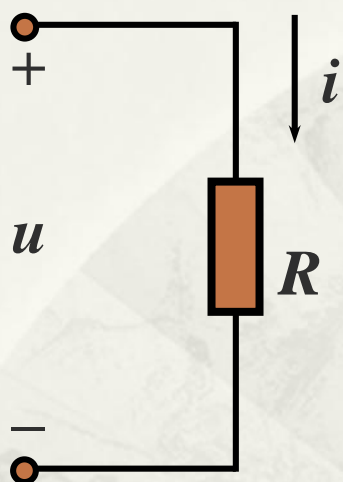
根据电压和电流的参考方向的不同，在欧姆定律的表示式中可带有正号或负号。当电压和电流的参考方向相关联时，则得 $U = RI$ ；当两者的参考方向非关联时，则 $U = -RI$ 。

电流通过电阻时产生电压降。电阻元件上电压和电流之间的关系称为**伏安特性**。如果电阻元件的伏安特性曲线在 $U-I$ 平面上是一条通过坐标原点的直线，则称为**线性电阻元件**；如果一个电阻元件的伏安特性不是通过原点的直线，则称为**非线性电阻元件**。如不特别说明，本书中所指的电阻元件均是线性电阻元件。

两种特殊情况： 开路与短路

当 $R = 0$ ($G = \infty$), 视其为短路。

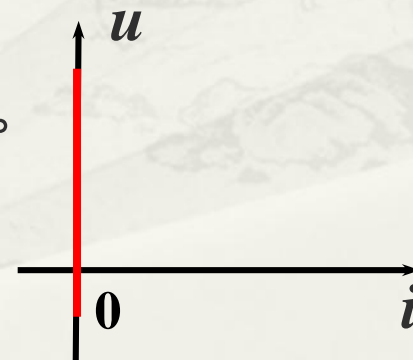
$$i \neq 0, u = 0。$$



短路

当 $R = \infty$ ($G = 0$), 视其为开路。

$$u \neq 0, i = 0。$$



开路

1.4 供能元件—独立电源

各种蓄电池和干电池由化学能转换成电能。





汽轮机及发电机外观

举世无双工程—三峡电厂

三峡工程具有防洪, 发电, 通航三大主要任务, 其中发电这一块左右岸电厂设计装机26台, 单机容量70万千瓦, 另外右岸地下电厂还设计有6台单机70万千瓦的机组, 年发电量达847亿千瓦时。



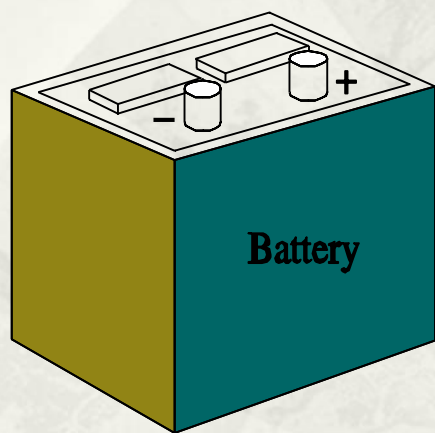
太阳能发电



海上风电场

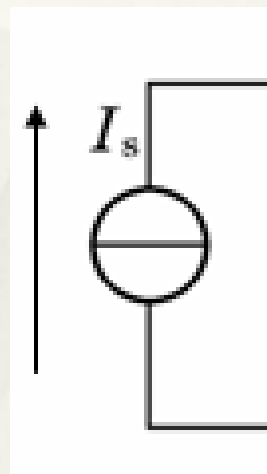


能够独立向外电路提供能量的电源称为**独立电源**。(相对于还有一部分电源为**受控电源**)理想电源是实际电源的理想化模型，忽略本身的功率损耗。理想电源分为**理想电压源**和**理想电流源**两种。

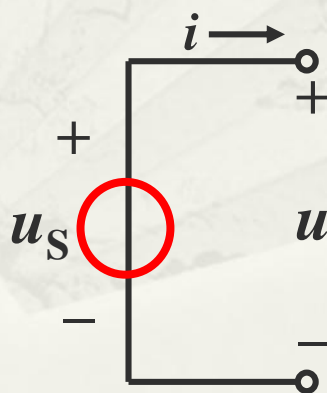


实际独立
电源电路

理想化



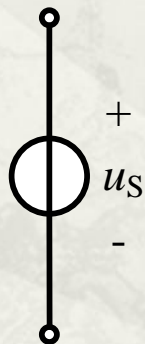
理想电流源



理想电压源

1.4.1 理想电压源

理想电压源两端的电压总能保持定值或一定的时间函数，而与流过电源的电流无关。理想电压源有两个重要特点：一是电压源两端的电压由电源本身决定，与外电路无关；二是电压源输出电流的大小取决于电压源所连接的外电路。



电压源

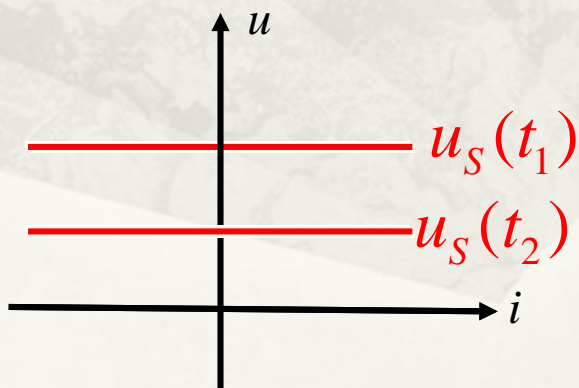
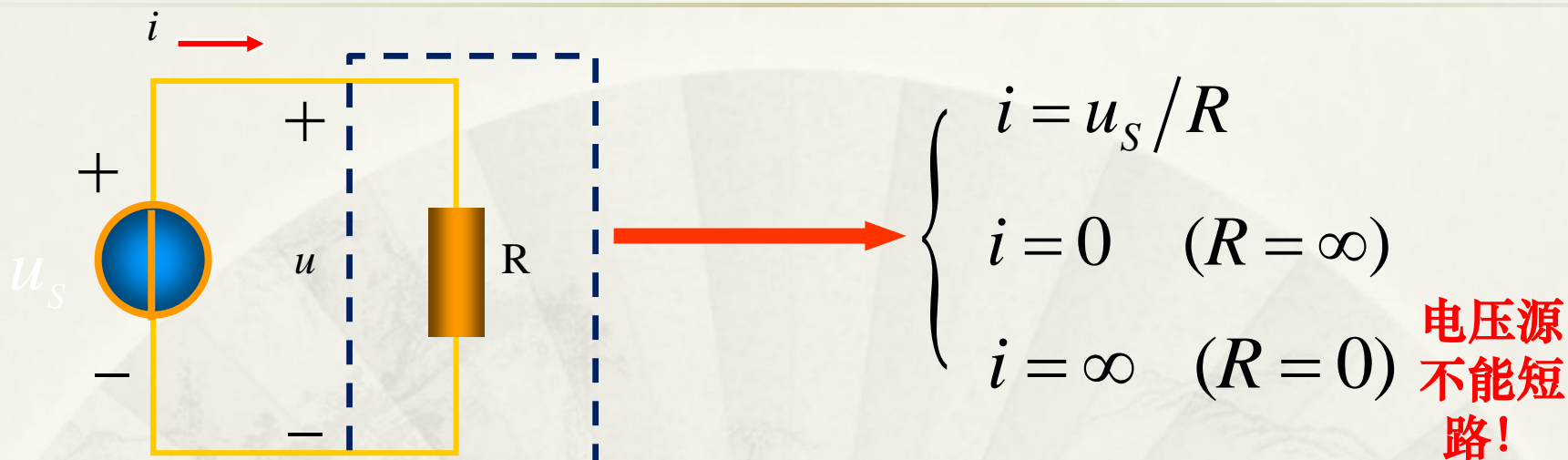


恒定电压源或
直流电压源

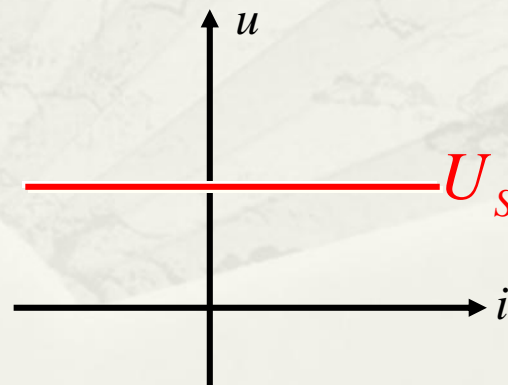


方向不变的电压、电流信号称为直流信号；方向改变且呈现周期变化的电压、电流信号称为交流信号。

电压源的参考方向及伏安特性



交流电压源的伏安关系



直流电压源的伏安关系

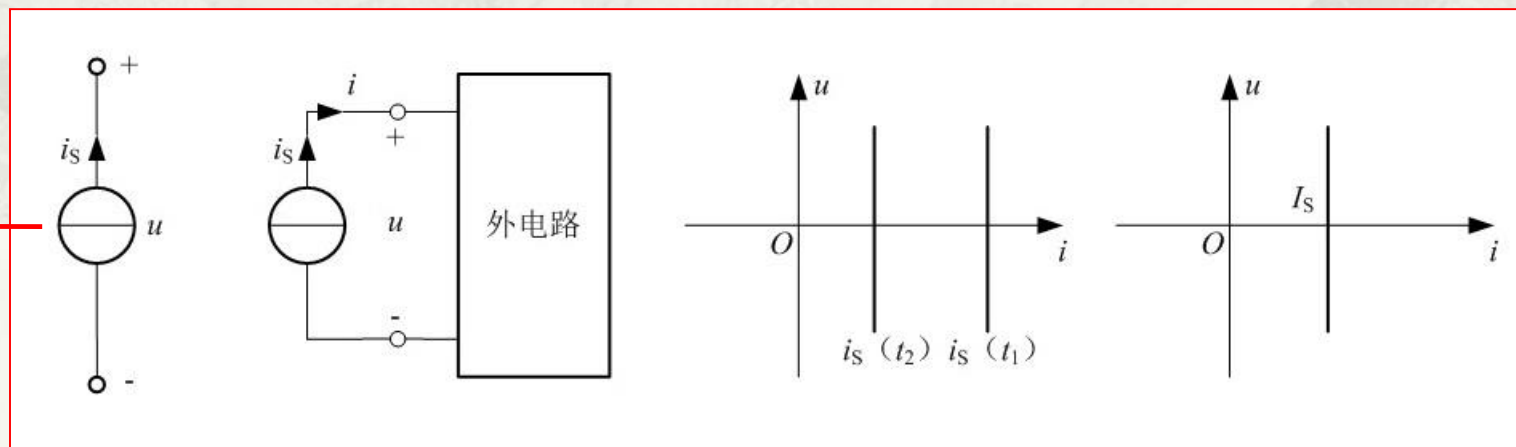


1.4.2 理想电流源

理想电流源输出电流总能保持定值或一定的时间函数，而与电流源的端电压无关。电流源有两个重要特点：**一是电源电流由电源本身决定，与外电路无关；二是电流源的端电压取决于与电流源相连接的外电路。**

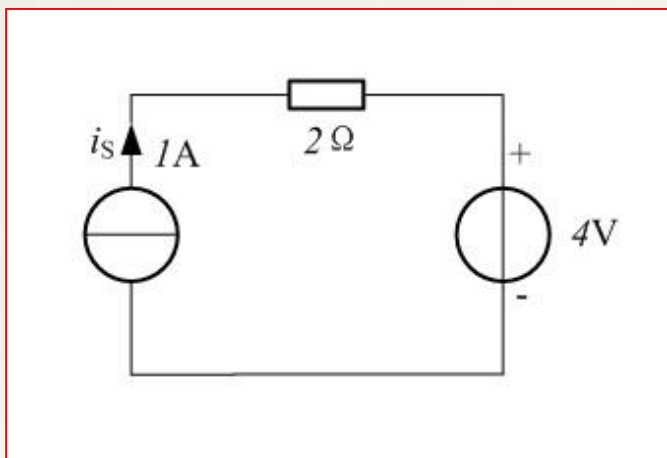
若外电路空载时， $U \rightarrow \infty$ ，**电流源不能开路**；短路时， $U = 0$ 。
接有电阻时， $U = IR$ 。

非关联参考方向



电流源及其伏安特性

例：求下图中电流源两端的电压，各元件功率



$$P_{E吸} = 1 \times 4 = 4W$$

$$P_{R吸} = 1^2 \times 2 = 2W$$

$$P_{IS发} = 1 \times 6 = 6W$$

功率守恒

电流源两端的电压由外电路决定！

电压源流过的电流由外电路决定！

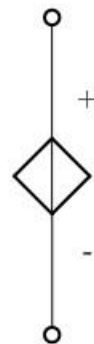
1.5 控能元件—受控电源 (非独立源) (controlled source)

一、受控源定义及符号

电压源电压或电流源电流不是给定函数，而是受电路中某个支路的电压(或电流)的控制，此种电源称为受控源。

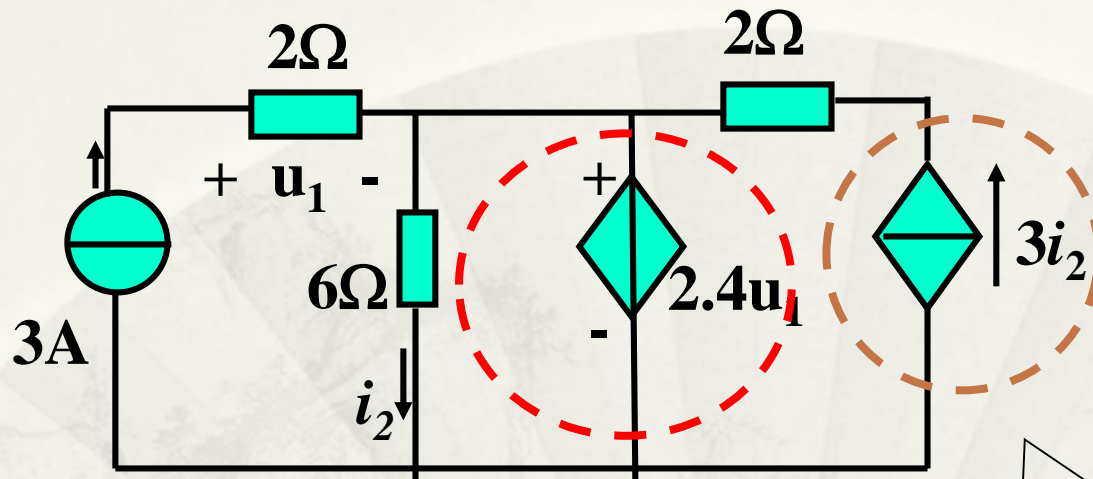


受控电流源



受控电压源

受控源举例：

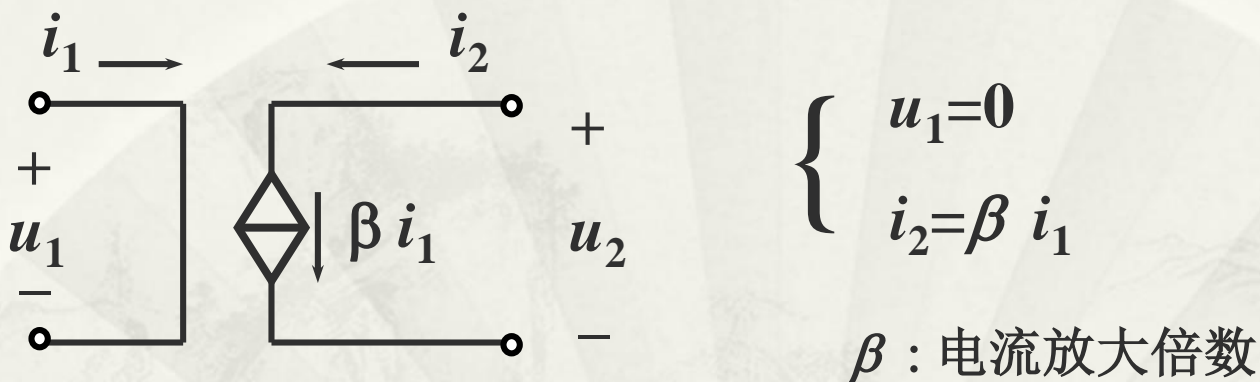


电源的电流或者电压不再独立，而是受某处电流或电压控制

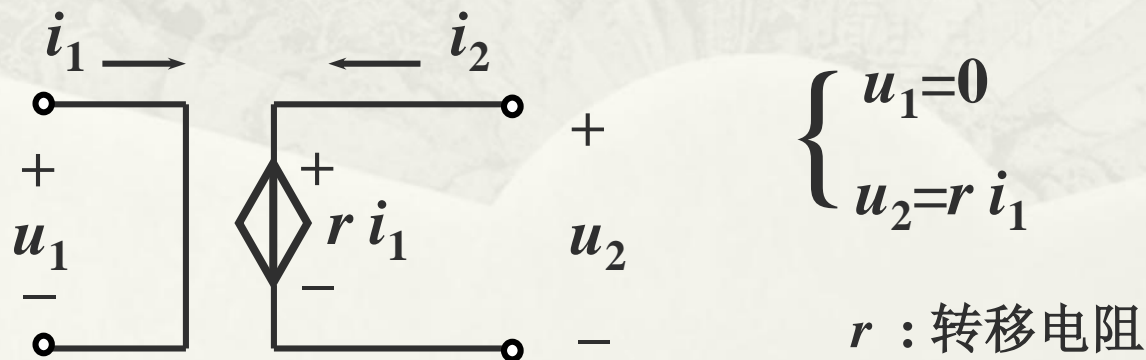
受控源有哪几种？

二. 四种受控源类型

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

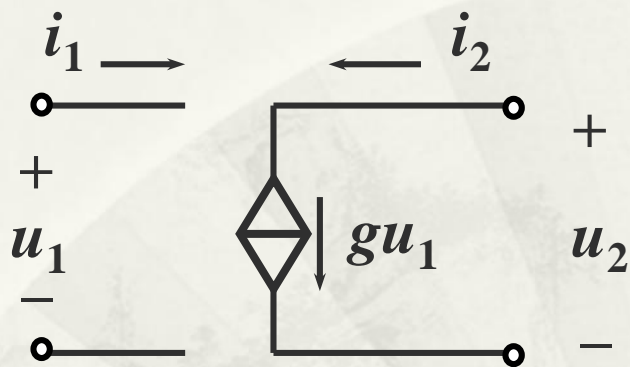


(2) 电流控制的电压源 (CCVS:Current Controlled Voltage Source)



二. 四种受控源类型(续)

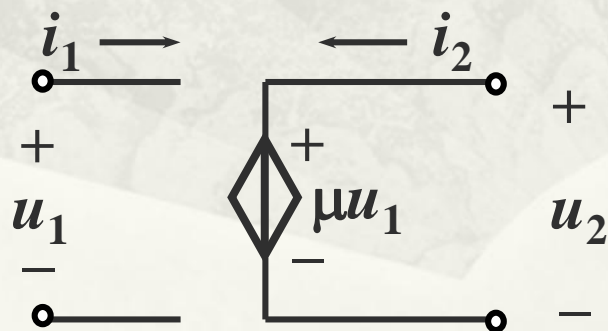
(3) 电压控制的电流源 (VCCS: Voltage Controlled Current Source)



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

g : 转移电导

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



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

μ : 电压放大倍数

* μ , g , β , r 为常数时, 被控制量与控制量满足线性关系, 称为线性受控源。

受控源与独立源的比较：

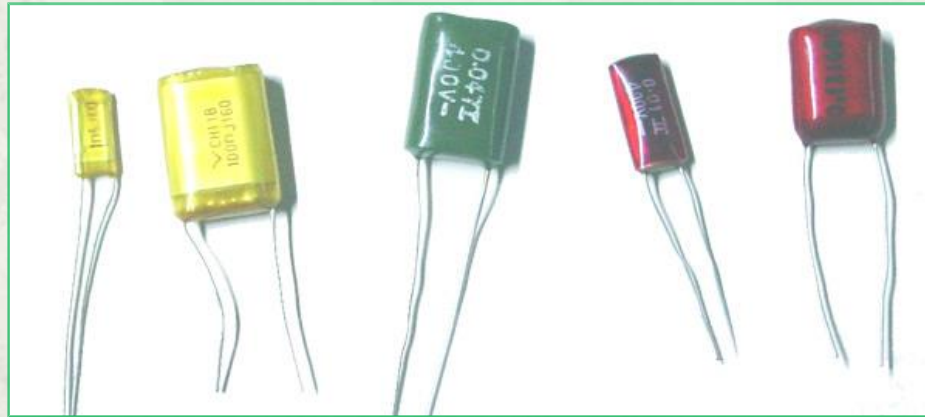
- (1) 独立源电压(或电流)由电源本身决定，与电路中其它电压、电流无关，而受控源电压(或电流)源由控制量决定。
- (2) 独立电源是电路的“输入”，电路中支路电流或电压是由于独立电源的“激励”作用产生的。而受控源表示的是某处的电流电压与另外一处电流电压之间的一种耦合关系。

1.6 储能元件—动态元件

1.6.1 电容元件

▲ 电容元件的感性认识

涤纶电容器

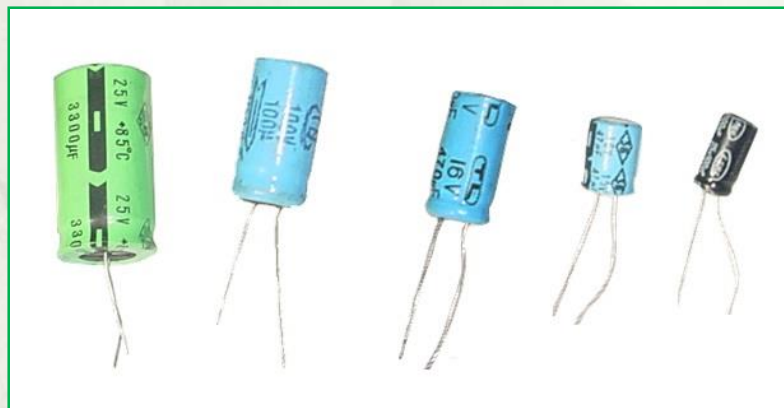


瓷介电容器



▲电容元件的感性认识（续）

铝电解电容器

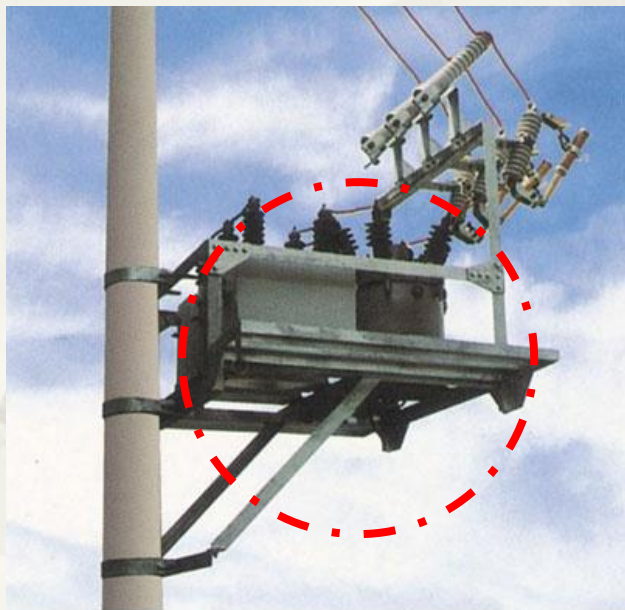


独石电容器



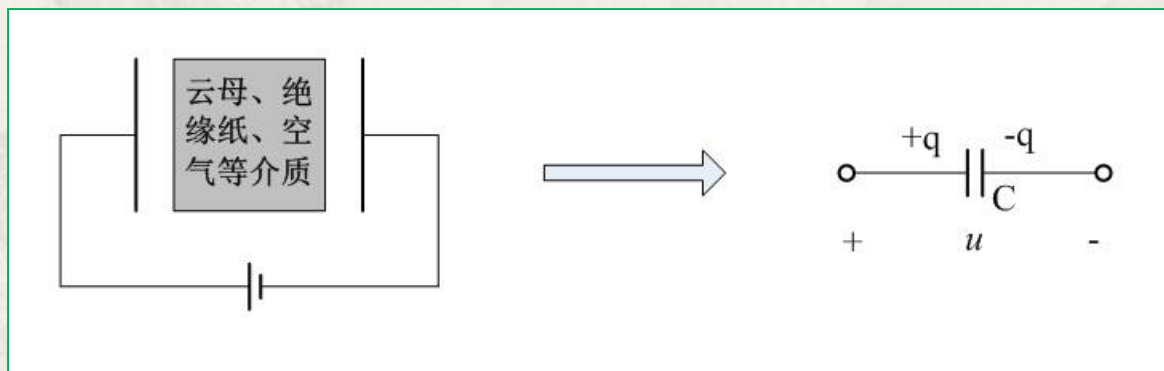
▲电容元件的感性认识（续）

电力电容器



1. 电容的概念

在外电源作用下，正负电极上分别带上等量异号电荷，撤去电源，电极上的电荷仍可长久地聚集下去，是一种**储存电能**的部件。



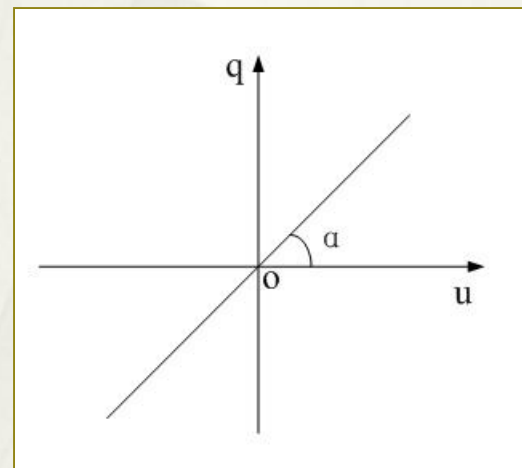
任何时刻其储存的电荷 q 与其两端的电压 u 满足一定的特性，该特性称之为电容的库伏特性。其逻辑符号如上图所示，单位为F（法拉）。

电导体由绝缘材料分开就可以产生电容。

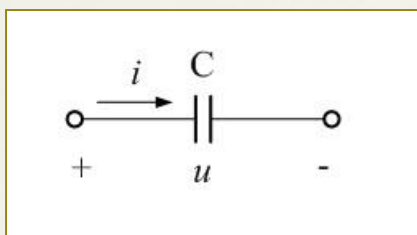
2.线性时不变电容元件

任何时刻，电容元件极板上的电荷 q 与电压 u 成正比。 q - u 特性曲线是过原点的直线。

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



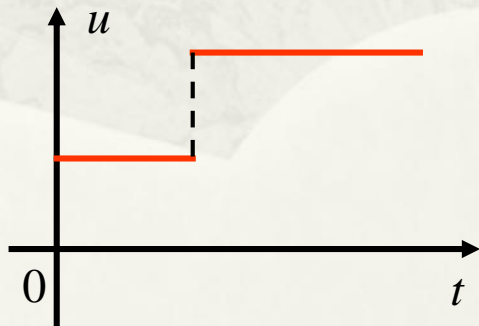
3. 电容的电压-电流关系



其中u和i参考方向为关联

电容元件VCR的微分形式 $i = \frac{dq}{dt} = \frac{dCu}{dt} = C \frac{du}{dt}$

- (1) 某一时刻电容电流 i 的大小取决于电容电压 u 的变化率,而与该时刻电压 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。



$$\frac{du}{dt} \rightarrow \infty \quad i \rightarrow \infty$$

电容元件VCR的积分形式

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

- (1) 某一时刻的电容电压值与 $-\infty$ 到该时刻的所有电流值有关，即电容元件有记忆电流的作用，故称电容元件为记忆元件。
- (2) 研究某一初始时刻 t_0 以后的电容电压，需要知道 t_0 时刻开始作用的电流 i 和 t_0 时刻的电压 $u(t_0)$ 。

注意：

- ① 当电容的 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；

$$i = -C \frac{du}{dt} \quad u(t) = -u(t_0) - \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(t) dt$$

- 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。

4. 电容的功率和储能

功率: $p = ui = u \cdot C \frac{du}{dt}$ (电容的电压电流参考方向关联时)

① 当电容充电, $p > 0$, 电容吸收功率。

② 当电容放电, $p < 0$, 电容发出功率。

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, 因此电容元件是储能元件, 它本身不消耗能量。

储能:

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

从 t_0 到 t 电容储能的变化量:

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

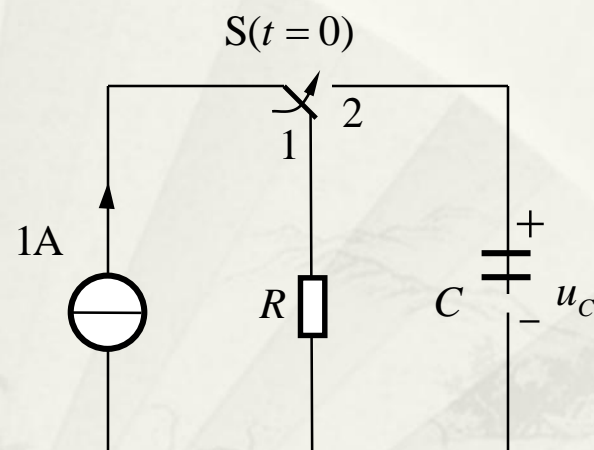
由于 $W_C = \frac{1}{2} C u^2(t) \geq 0$ 可看出:

- 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】已知 $C=1\text{F}$, $u_C(0)=6\text{V}$, 开关 S 在 $t=0$ 时由1位合到2位。求 $t=2\text{s}$ 时的电容电压 $u_C(2)$ 。

解 依据公式

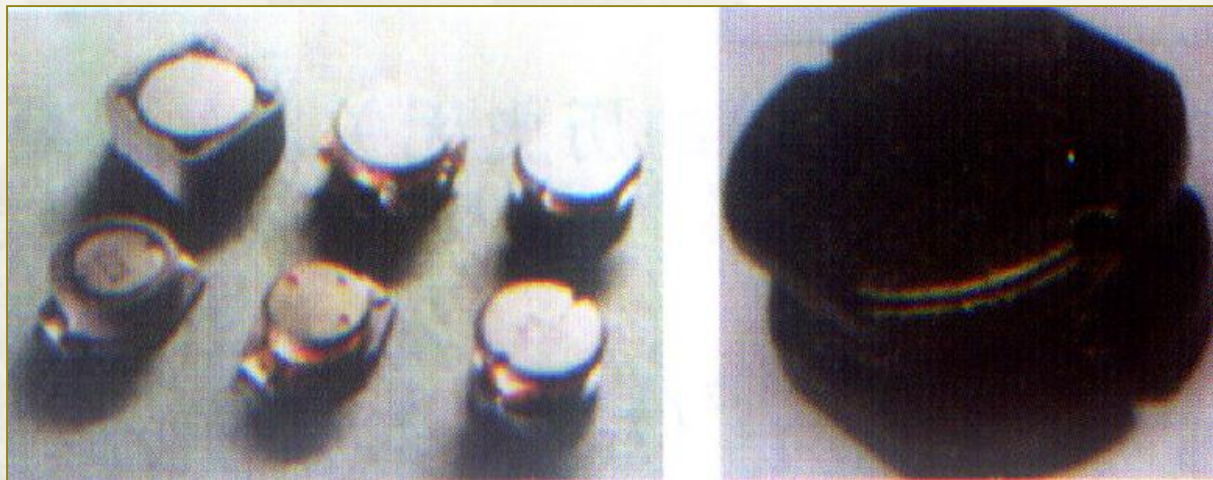
$$\begin{aligned} u_C(2) &= u_C(0) + \frac{1}{C} \int_0^2 i(\xi) d\xi \\ &= 6 + \int_0^2 d\xi = 8\text{V} \end{aligned}$$



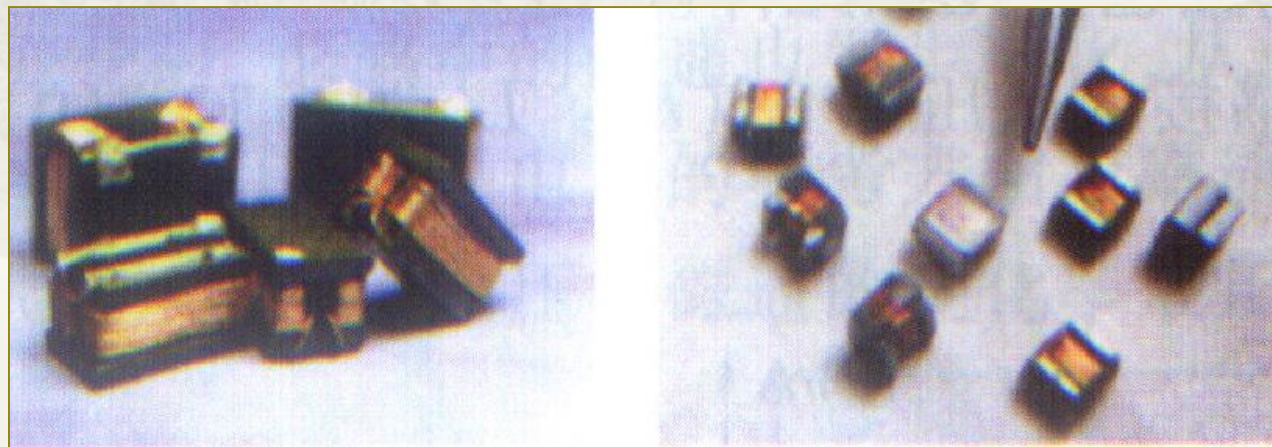
1.6.2 电感元件

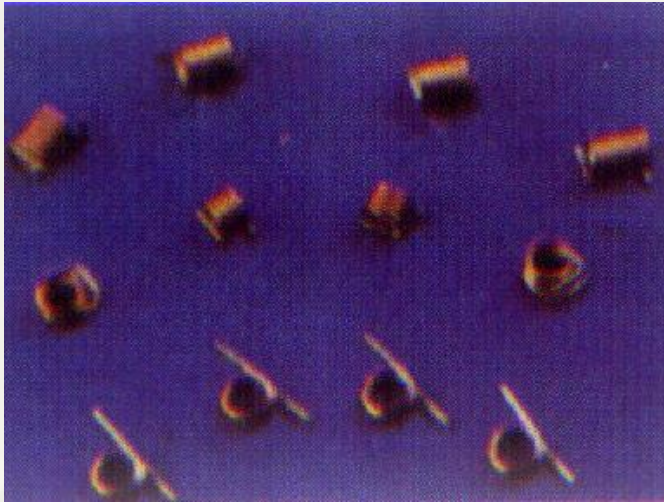
▲电感元件的感性认识

贴片型功率电感



贴片电感

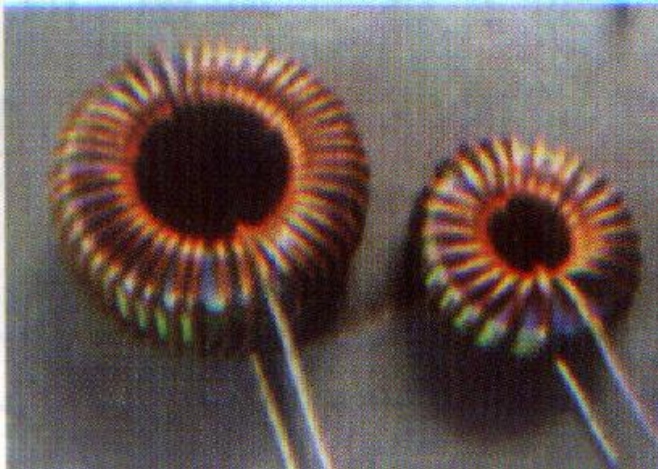




贴片型空心线圈



可调式电感



环形线圈



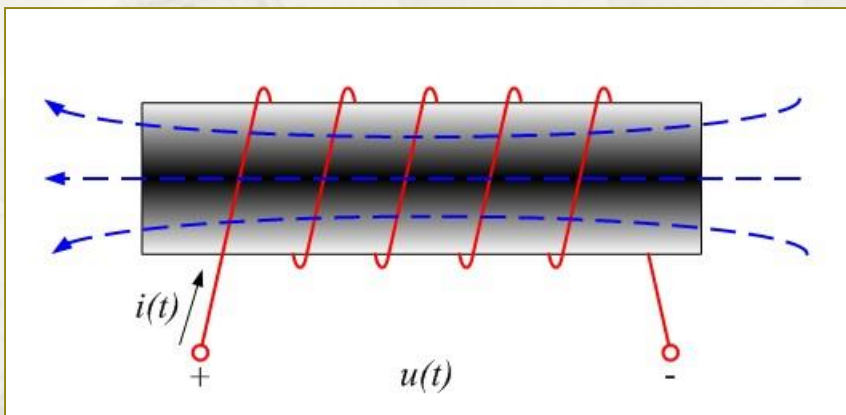
立式功率型电感



电抗器

1.电感的概念

电感线圈是把金属导线绕在一骨架上构成一实际线圈，当电流通过线圈时，将产生磁通，是一种**抵抗电流变化、储存磁能**的部件。



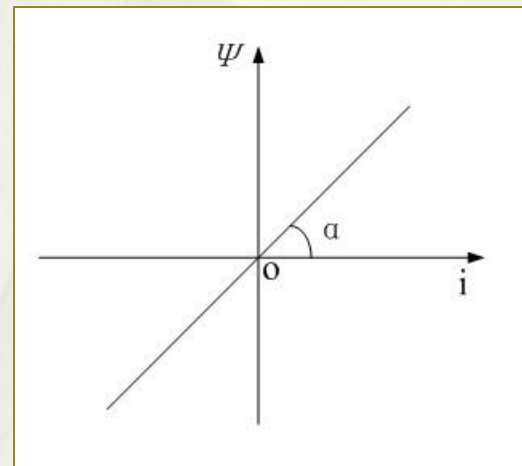
$$\psi(t) = N \Phi(t)$$

任何时刻，电感的特性可用 $\psi \sim i$ 平面上的一条曲线来描述，该特性称之为电感的韦安特性。

2.线性时不变电感元件

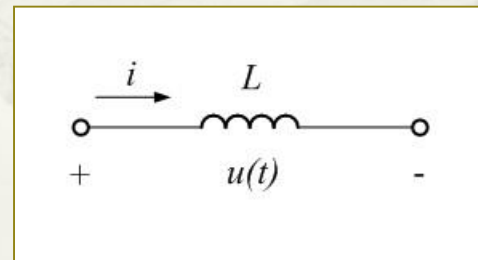
任何时刻，通过电感元件的电流 i 与其磁链 ψ 成正比。 $\psi \sim i$ 特性为过原点的直线。

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

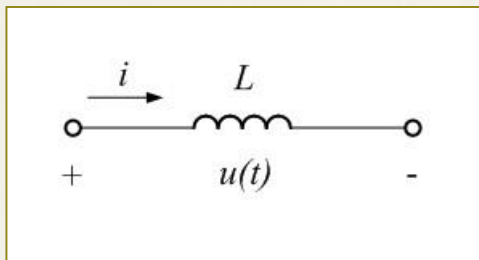


电感的电路符号：

其中 L 表示电感线圈的自感，单位为H (亨利)，常用 μH ， mH 表示。



3. 电感的电压-电流关系



其中 u 和 i 参考方向为关联

电感元件VCR的微分形式 $u(t) = \frac{d\psi}{dt} = \frac{dLi(t)}{dt} = L \frac{di(t)}{dt}$

- (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。

电感元件VCR的积分形式

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

- (1) 某一时刻的电感电流值与 $-\infty$ 到该时刻的所有电压值有关，即电感元件有记忆电压的作用，电感元件也是记忆元件。
- (2) 研究某一初始时刻 t_0 以后的电感电流，不需要了解 t_0 以前的电流，只需知道 t_0 时刻开始作用的电压 u 和 t_0 时刻的电流 $i(t_0)$ 。

注意：

- ① 当电感的 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。

$$u = -L \frac{di}{dt} \qquad i(t) = -i(t_0) - \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u(t) dt$$

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

4. 电感的功率和储能

功率: $p = ui = L \frac{di}{dt} \cdot i$ (电容的电压电流参考方向关联时)

① 当电流增大, $p > 0$, 电感吸收功率。

② 当电流减小, $p < 0$, 电感发出功率。

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。

储能:

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

从 t_0 到 t 电感储能的变化量:

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

由于 $W_L = \frac{1}{2} Li^2(t) \geq 0$ 可看出:

- 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。

1.7 基尔霍夫定律

古斯塔夫·罗伯特·基尔霍夫
(1824~1887)

Kirchhoff, Gustav Robert

德国物理学家。



基尔霍夫, G. R.

1845年, 21岁时他发表了第一篇论文, 提出了稳恒电路网络中电流、电压、电阻关系的两条电路定律, 即著名的基尔霍夫第一电路定律和基尔霍夫第二电路定律, 解决了电器设计中电路方面的难题。后来又研究了电路中电的流动和分布, 从而阐明了电路中两点间的电势差和静电学的电势这两个物理量在量纲和单位上的一致。使基尔霍夫电路定律具有更广泛的意义。直到现在, 基尔霍夫电路定律仍旧是解决复杂电路问题的重要工具。基尔霍夫被称为“电路求解大师”。

几个相关概念：

结点：三个或三个以上电路元件的联结点。

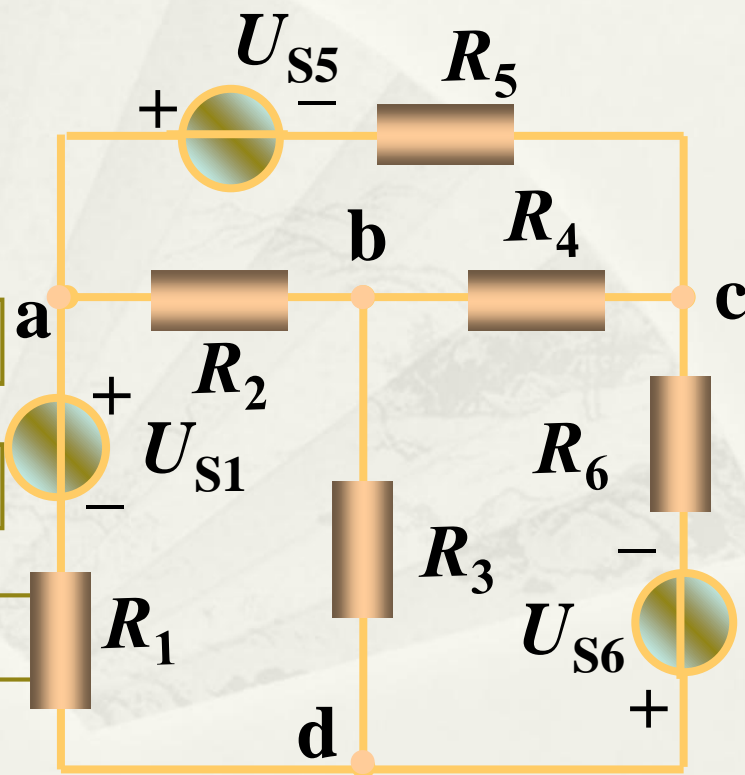
支路：连接两个结点之间电路。同一支路流过电流相同。

回路：电路中支路构成的任何闭合路径称为回路。

结点： a, b, ... ($n=4$)

支路： ab, ad, ... ($b=6$)

回路： abda, bcdb ... ($L=7$)



1.7.1 基尔霍夫电流定律 (KCL)

基尔霍夫电流定律又称基尔霍夫第一定律，简记为KCL，它描述了电路中节点处各支路电流之间的约束关系，对任一节点，在任一时刻，流出该节点的电流之和等于流入该节点的电流之和或者定义为对任一节点，任一时刻流出（或流入）电路中任意结点的电流的代数和等于零。电流定律体现的是电流的连续性。

$$\sum I_{entering} = \sum I_{leaving}$$

或

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

应用步骤：（以结点a为例）：

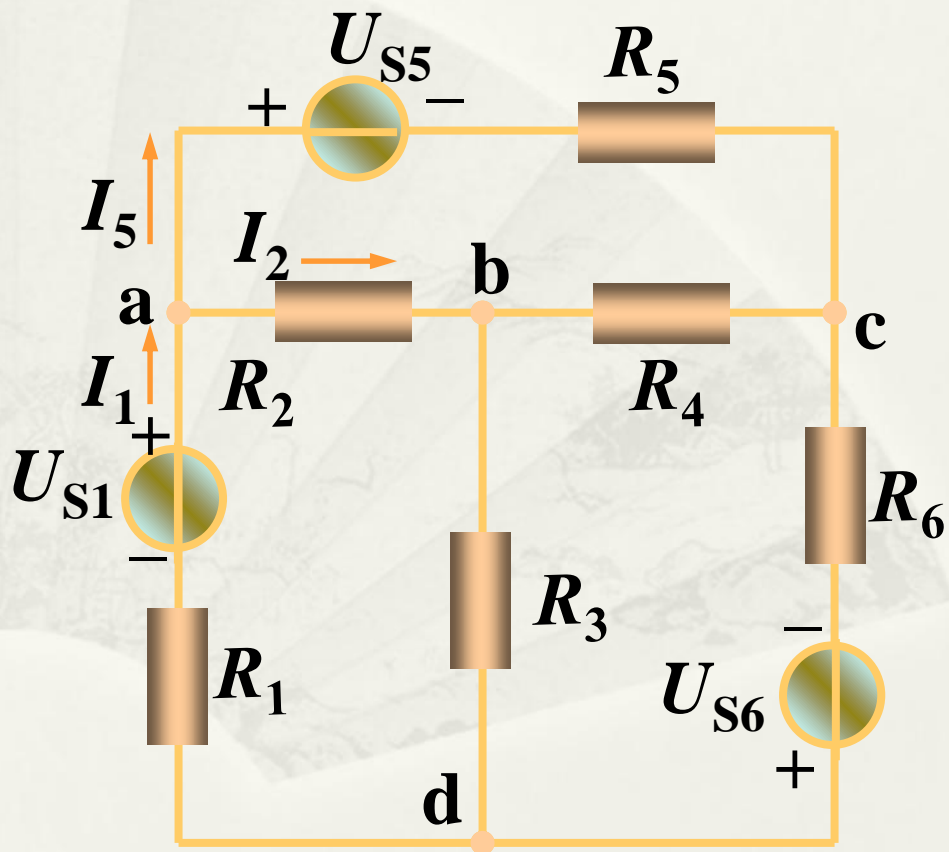
- (1) 在电路图上标出各支路电流的参考方向。
- (2) 根据 KCL列方程，求解。

对于结点a，若利用流入电流=流出电流的方式

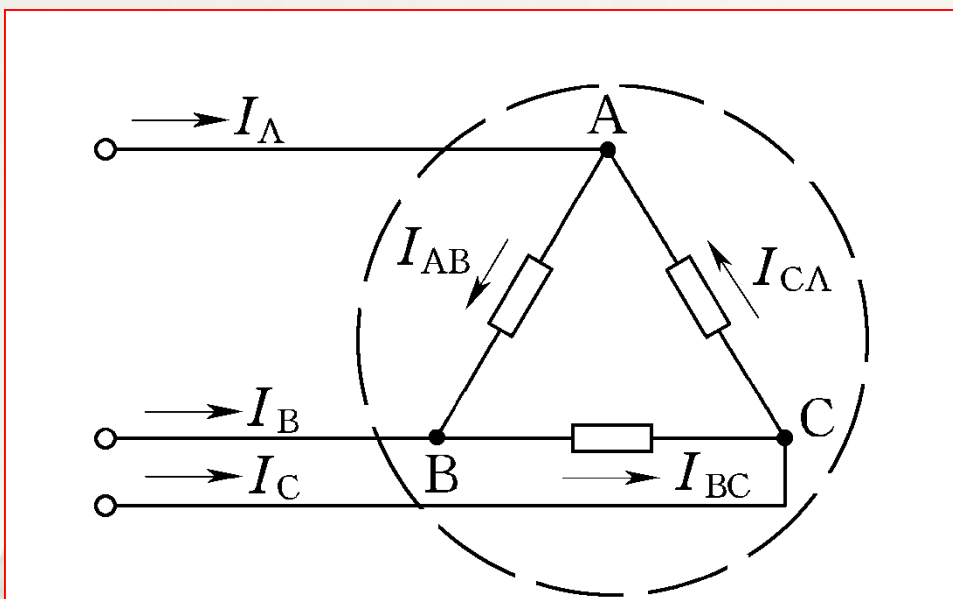
$$I_1 = I_2 + I_5$$

若利用流入或流出电流代数和=0的方式，令电流流出方向为“+”

$$-I_1 + I_2 + I_5 = 0$$



KCL的扩展应用



$$I_A = I_{AB} - I_{CA}$$

$$I_B = I_{BC} - I_{AB}$$

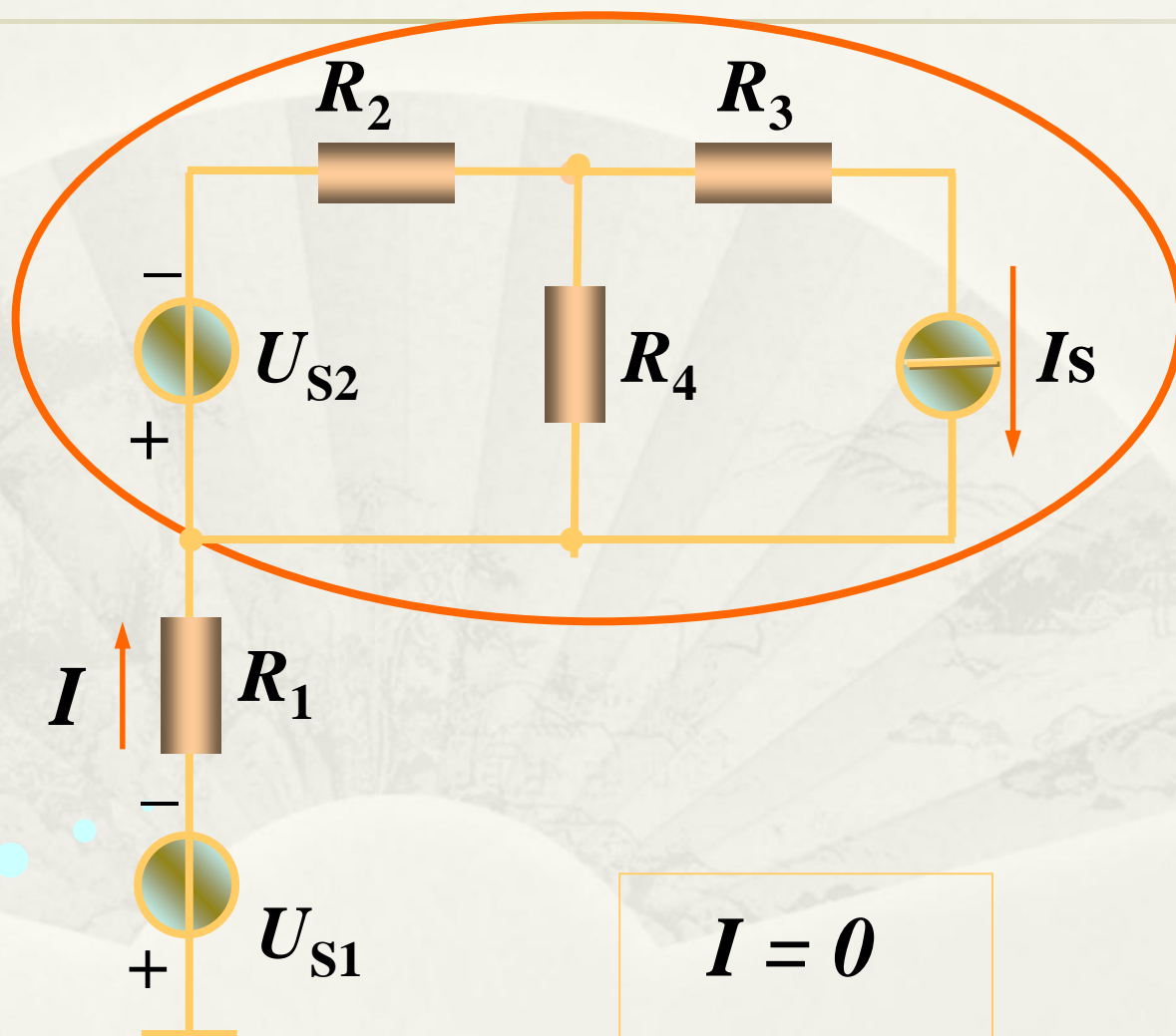
$$I_C = I_{CA} - I_{BC}$$



$$I_A + I_B + I_C = 0$$

对任一闭合面，在任一时刻，流出闭合面的电流之和等于流入该闭合面的电流之和。

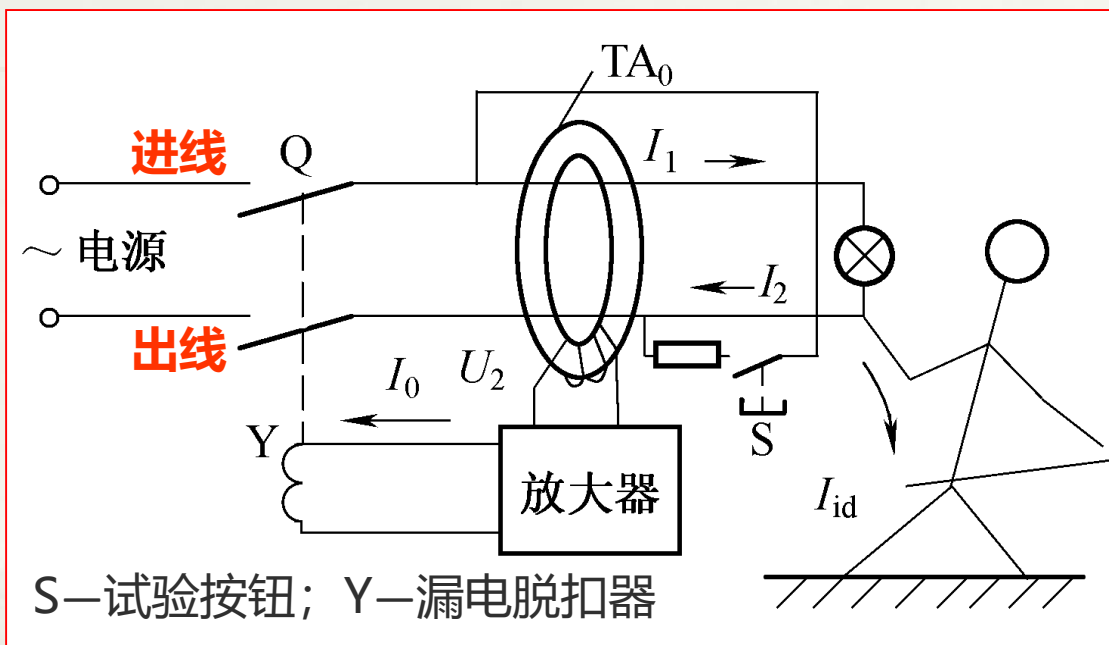
例：



$I = ?$

$I = 0$

KCL应用-----漏电保护器



触电指的是电流通过人体而引起的伤害。当人手触摸电线并形成一個电流回路的时候，人身上就有电流通过；当电流足够大的时候，就能够被人感觉到以至于形成危害。为了保证人身安全，额定漏电动作电流应不大于人体安全电流值，国际上公认30mA为人体安全电流值。为此，国标GB6829—86《漏电电流动作保护器》的要求，漏电保护的行业标准：**额定漏电动作电流应不大于30mA，额定漏电动作时间应小于0.1s。**

原理依据是：每户流进和流出开关的电流必须相等，否则就判定为漏电。当漏电流达到和超过一定的阈值时，产生保护动作——跳闸。

使用KCL时需明确：

- 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是对结点处支路电流加的约束，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的，与电流实际方向无关。

1.7.2基尔霍夫电压定律 (KVL)

基尔霍夫电压定律又称基尔霍夫第二定律。简记为KVL。它描述了一个回路中各支路电压或元件电压之间的约束关系。在在集总参数电路中，任一时刻，沿任一回路绕行一周，所有支路中的电压升等于电压降或所有支路电压的代数和恒等于零。

$$\sum U_{rise} = \sum U_{drop}$$

或

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

电压升降判断当然首先离不开电压参考方向的设定！

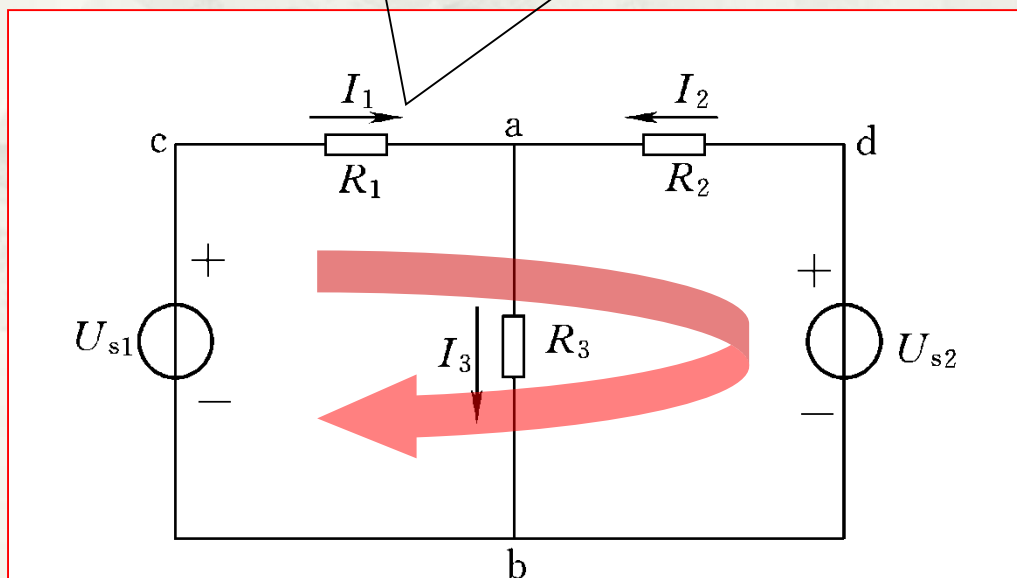
KVL应用举例：

对下图所示电路中adbca回路使用KVL进行分析

首先设定各元件的电压, 电流的参考方向

对adbca回路以顺时针方向为循行方向，应用KVL，可以得出

只标明电流的电阻，默认电流电压为关联参考方向



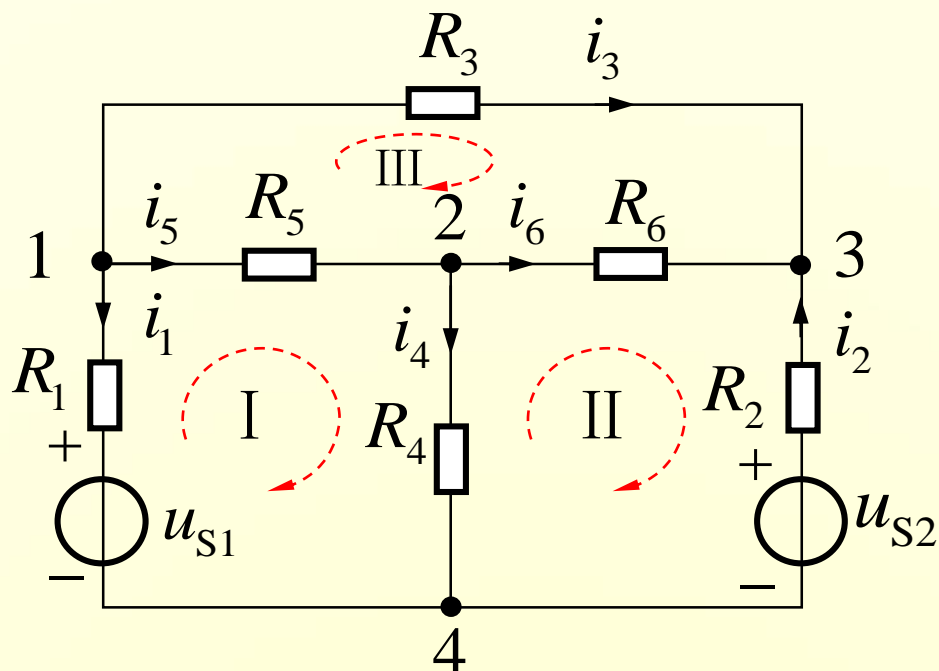
$$U_2 + U_{s1} = U_{s2} + U_1$$

或

$$-U_{s1} + U_1 - U_2 + U_{s2} = 0$$

约定：参考方向与回路绕行方向一致，取“+”

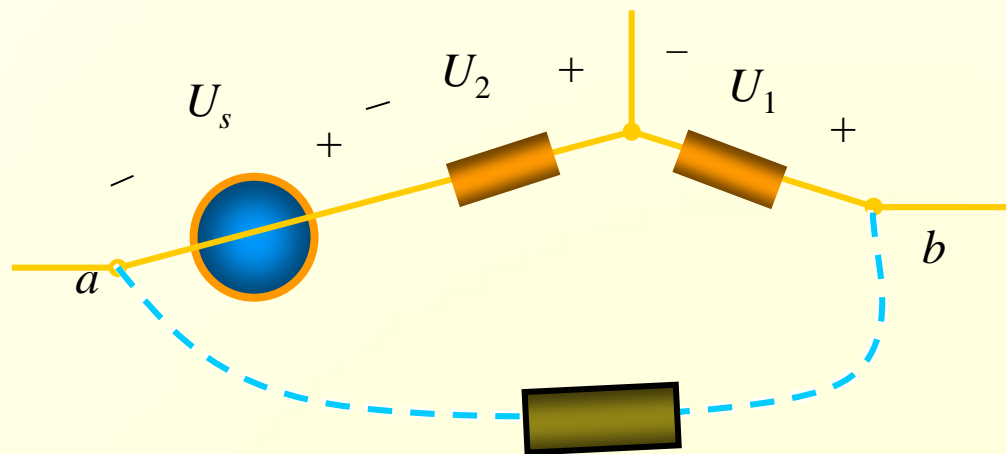
例：



$$\left. \begin{array}{l} \text{I} \quad -R_1 i_1 + R_4 i_4 + R_5 i_5 = u_{S1} \\ \text{II} \quad -R_2 i_2 - R_4 i_4 + R_6 i_6 = -u_{S2} \\ \text{III} \quad R_3 i_3 - R_5 i_5 - R_6 i_6 = 0 \end{array} \right\}$$

列写KVL方程时，有时会把电阻电压降之和与电源电压分别放于等式两侧

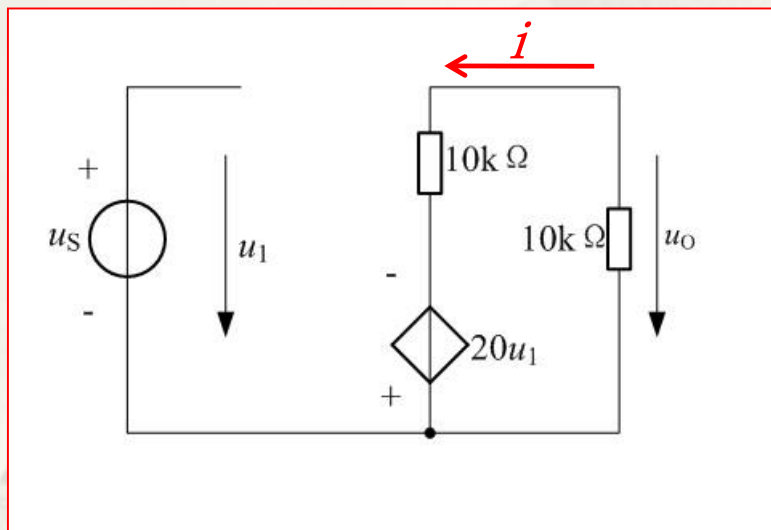
例：



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

KVL也适用于电路中任一假想的回路。

例：对下图所示电路， $u_S=2V$ ，求 u_O/u_1 和各元件的功率。



$$i = \frac{20u_1}{10 + 10} = 2mA$$

$$\frac{u_O}{u_1} = -\frac{20}{2} = -10$$

$$P_{us} = 0$$

$$P_{R吸} = 2^2 \times 10 = 40mW$$

$$P_{受发} = 2 \times 40 = 80mW$$

在求解具有受控源的电路时，可以把受控电流（压）源作为电流（压）源处理，但是必须注意其电流（压）值取决于控制量！

使用KVL时需明确：

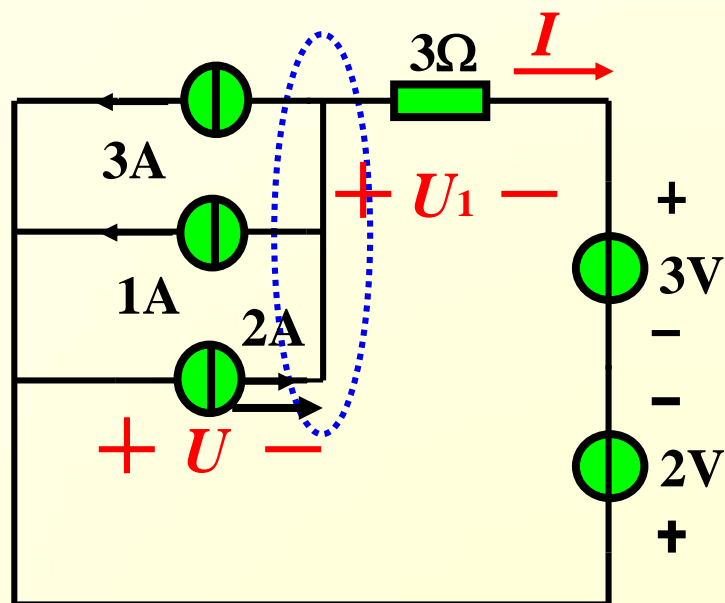
- ① KVL的实质反映了电路遵从能量守恒定律；
- ② KVL是对回路中的支路电压加的约束，与回路各支路上接的是什么元件无关，与电路是线性还是非线性无关；
- ③ KVL方程是按电压参考方向列写，与电压实际方向无关。

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。

KCL、KVL的综合应用

例：对于下图所示电路，求 U 和 I 。



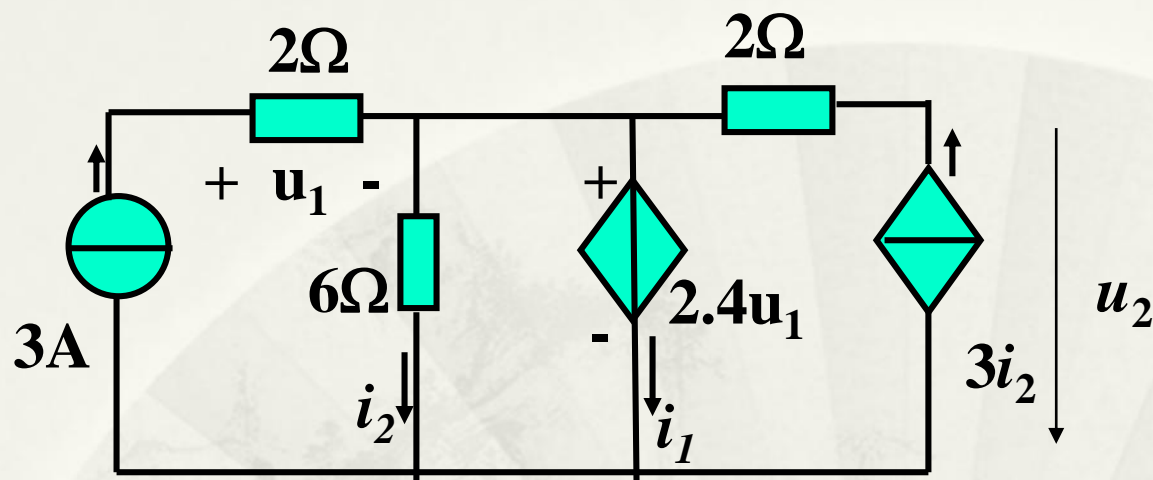
解：

$$3+1-2+I=0, \quad I=-2 \text{ (A)}$$

$$U_1=3I=-6 \text{ (V)}$$

$$U+U_1+3-2=0, \quad U=5 \text{ (V)}$$

例：求下图所示电路中的 i_1, u_2



$$u_1 = 6V$$

$$i_2 = \frac{2.4u_1}{6} = 2.4A$$

$$\text{KCL: } i_1 + i_2 = 3i_2 + 3 \quad i_1 = 3 + 2i_2 = 7.8A$$

$$u_2 = 2.4u_1 + 2 \times 3i_2 = 28.8V$$

受控电流源的两端的电压如何确定? 受控电压源的流过的电流如何确定?

小 结

- * 1. 电流、电压参考方向的概念和作用
- * 2. 关联参考方向和非关联参考方向
- * 3. 欧姆定理
- * 4. 功率计算定义
- * 5. 理想电流源与电压源特性
- * 6. 受控电源理解
- * 7. 基尔霍夫定律及其应用

附 求下图电路开关S打开和闭合时的 i_1 和 i_2 。

