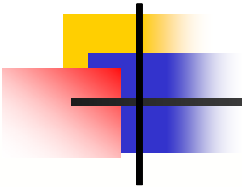


电子电路基础



主要参考书

- 电路分析（第2版），胡翔骏，高等教育出版社，2007年
- 模拟电子技术基础（第四版），童诗白等，高等教育出版社，2006年
- Foundations of Analog and Digital Electronic Circuits, Anant Agarwal and Jeffrey H. Lang, Morgan Kaufmann Publishers, 2005
- 电子学（第二版），Paul Horowitz and Winfield Hill，电子工业出版社，2005年



考核方式与成绩评定

- 平时考核，占总成绩20%
- 中期考核，开卷笔试，占总成绩20%
- 期末考核，开卷笔试，占总成绩60%

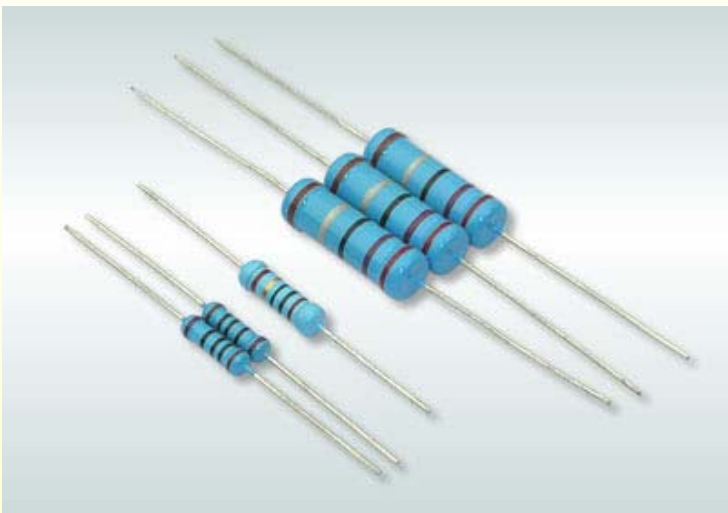


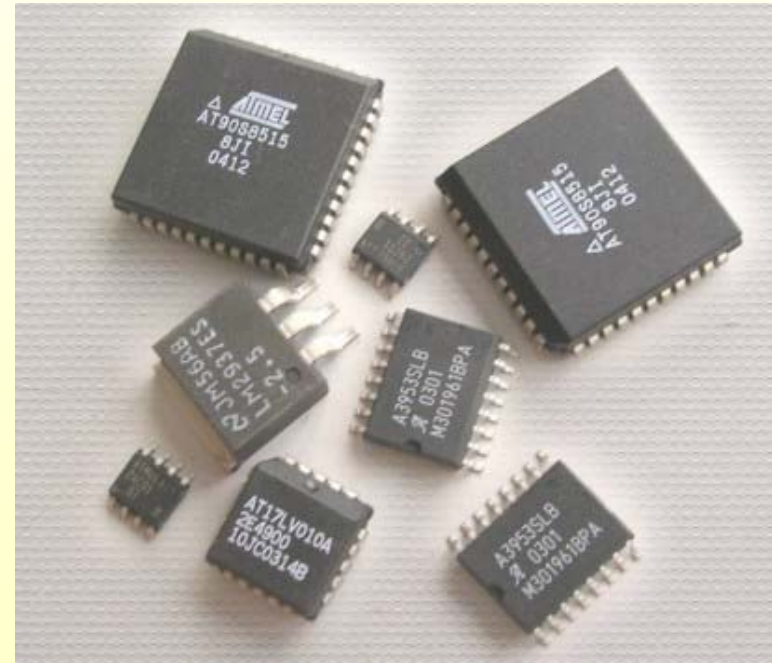
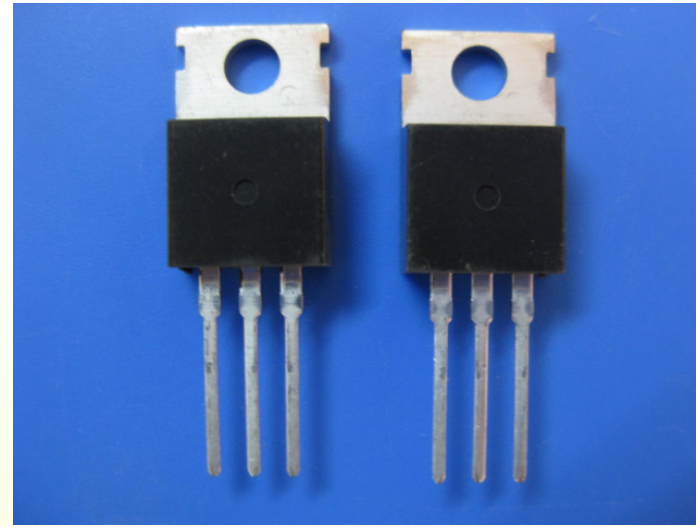
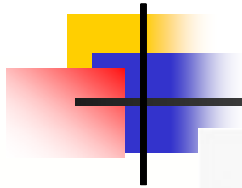
第一章 电路与电路模型

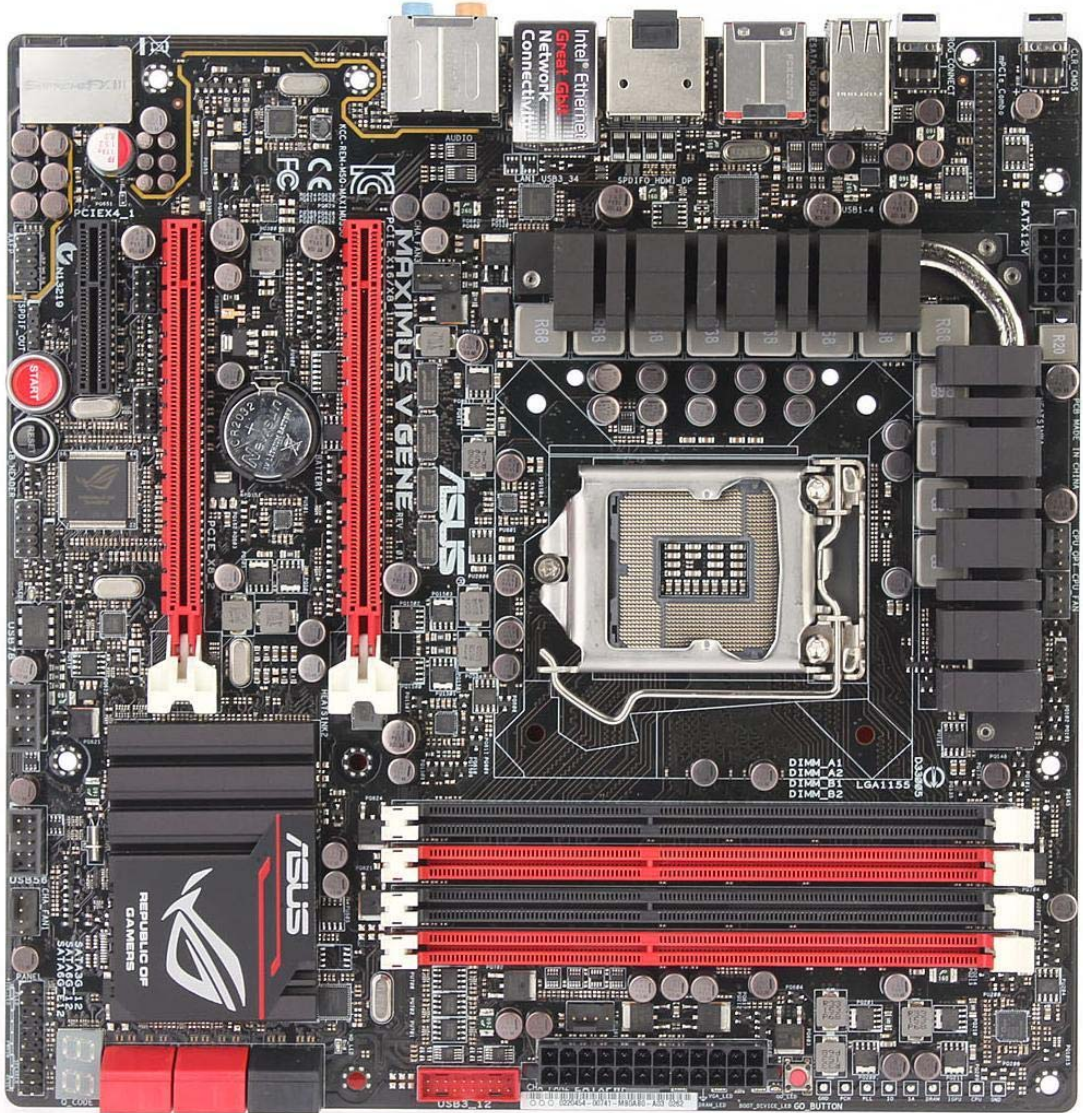
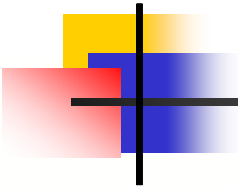
- 电路和电路模型
- 电路的基本物理量
- 基尔霍夫定律
- 电阻元件 电容元件 电感元件
- 独立电源和受控源
- 二极管、晶体管和场效应管
- 两类约束和电路方程

§ 1-1 电路的基本概念

□ 电路(实际电路)



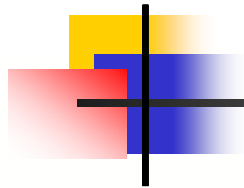






电路的作用：

- ◆ 提供能量；
- ◆ 传输和处理信号；
- ◆ 测量；
- ◆ 存储信息。



□ 电路模型

在一定的条件下,忽略器件的次要因素,用一个模型来表征其主要性质,该模型称为理想元件。

用理想元件构成的电路称为电路模型。



集总假设

集总元件 集总电路

条件：

器件尺寸 \ll 工作频率所对应的波长

某音频电路工作频率为25kHz，所对应的波长

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{25 \times 10^3} = 12 \times 10^3 \text{ (m)}$$

分布参数电路



3、电路分析的基本变量

描述电路特性的基本物理量——电流、电压和功率

一般情况下，用 $i(t)$ 、 $u(t)$ 和 $p(t)$ 表示，简记为 i 、 u 和 p

➤ 电源——激励——输入

➤ 电路中产生的电压和电流——响应——输出

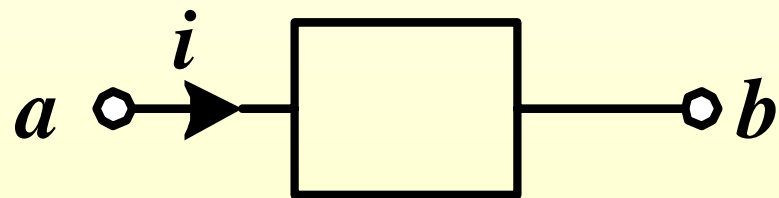
电路分析——已知电路结构和元件参数，在给定激励下，求电路响应



■ 电流

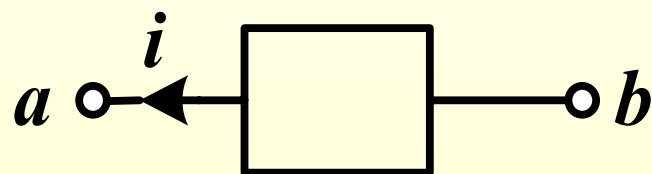
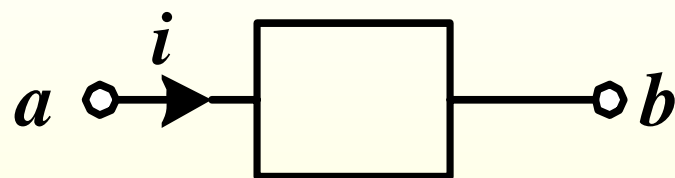
$$i(t) = \frac{dq}{dt}$$

单位：安培 (A)



电流的参考方向

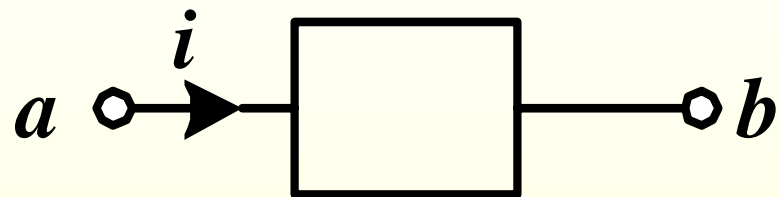
-----可任意假定，在电路图中用箭头表示。



- 若真实方向与参考方向一致, $i > 0$;
- 若真实方向与参考方向相反, $i < 0$;

➤ 未标注参考方向，电流的正负无意义

例



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

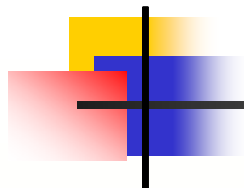
电流的真实方向？

$a \rightarrow b$

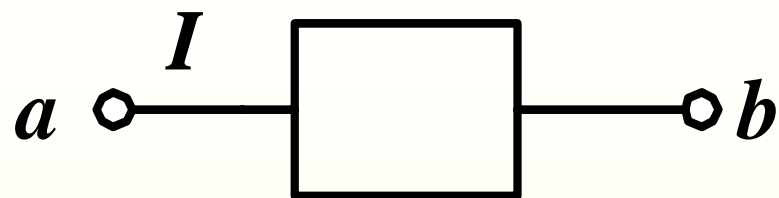
$$i = -1 \text{ A}$$

电流的真实方向？

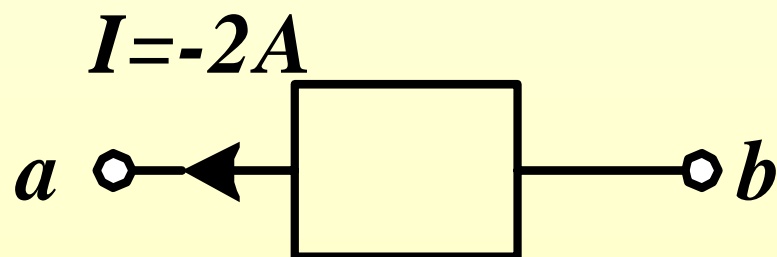
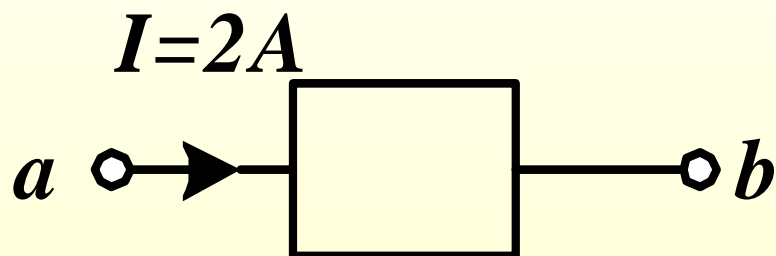
$b \rightarrow a$



例



直流电流 I 的方向 $a \rightarrow b$, 大小为 $2A$, 如何表示?

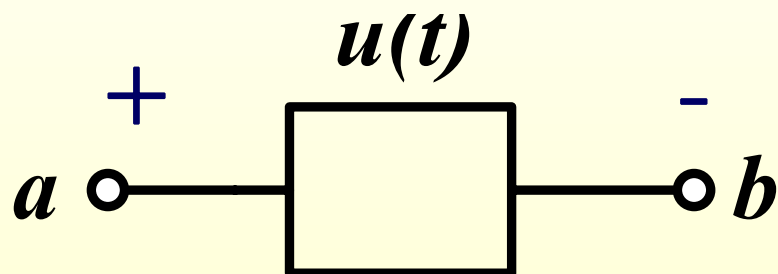




■ 电压

$$u(t) = \frac{dw}{dq}$$

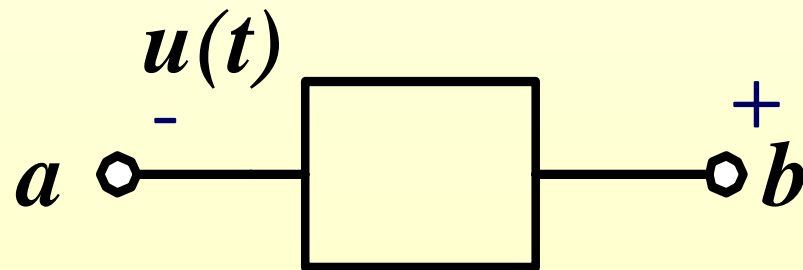
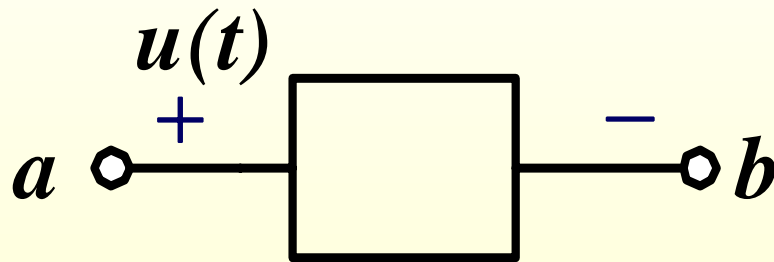
单位：伏特 (V)

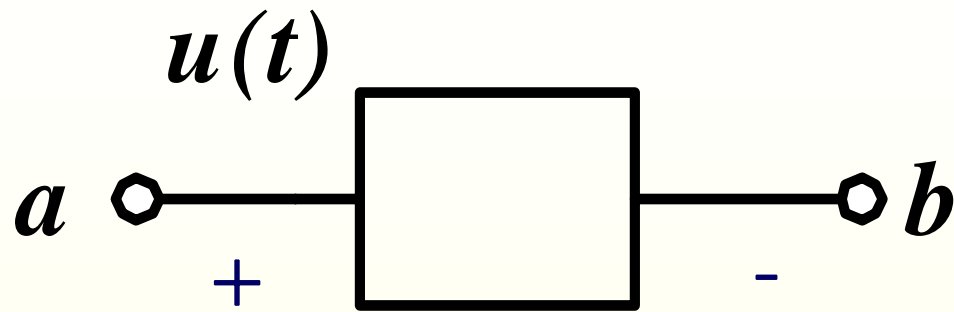


- ▶ 从高电位到低电位，称为“电压降”；
- ▶ 从低电位到高电位，称为“电压升”；

□ 电压的参考方向

- -----可任意假定，在电路图中用“+”，“-”号表示。

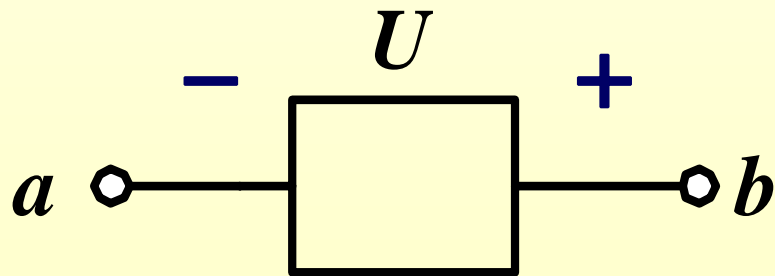
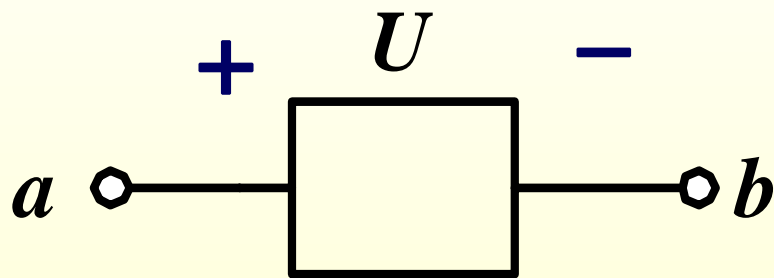
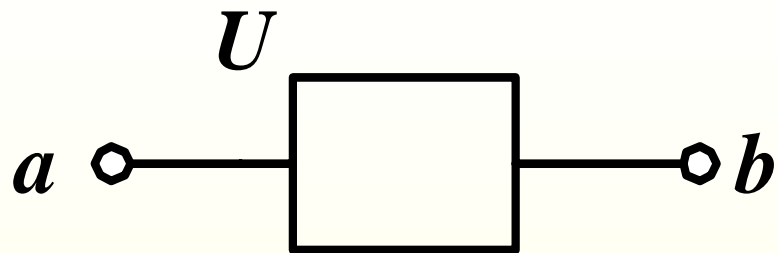




- 若真实方向与参考方向一致, $u > 0$;
 - 若真实方向与参考方向相反, $u < 0$;
- 电压参考方向的另一种表示法: u_{ab} 、 u_{ba}

未标注参考极性, 电压的正负无意义

例



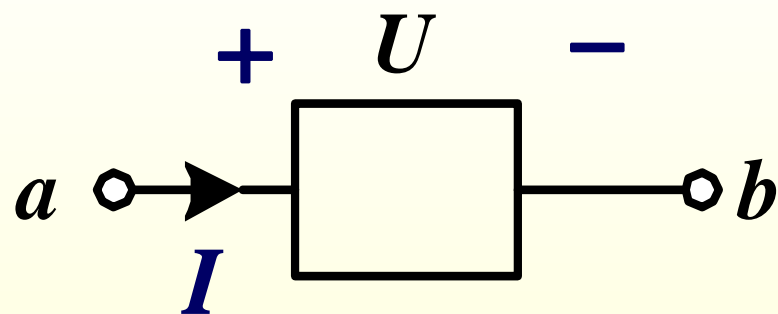
已知： $U_a = 3\text{V}$ ，
 $U_b = 1\text{V}$ ，求元件
两端的电压 $U = ?$

$$\begin{aligned} U &= U_a - U_b \\ &= U_{ab} = 2\text{V} \end{aligned}$$

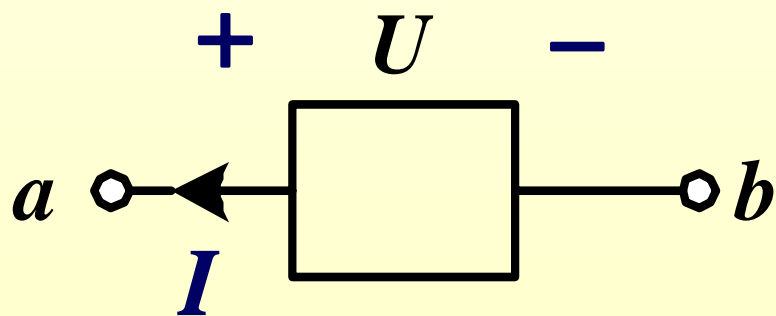
$$\begin{aligned} U &= U_b - U_a \\ &= U_{ba} = -2\text{V} \end{aligned}$$

关联参考方向

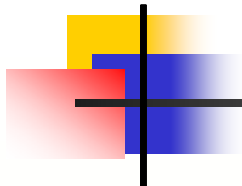
---- 电流方向指向电压降的方向



U 与 I 关联



U 与 I 非关联



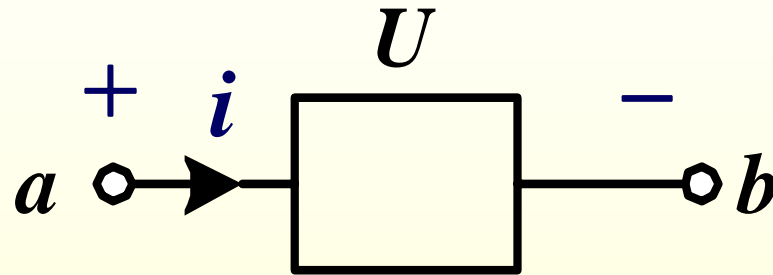
电路中某点的电位——单位正电荷由某点移动到参考点所失去的能量

参考点——接地点(虚地“ \perp ”)——电位为零

电压——电位差

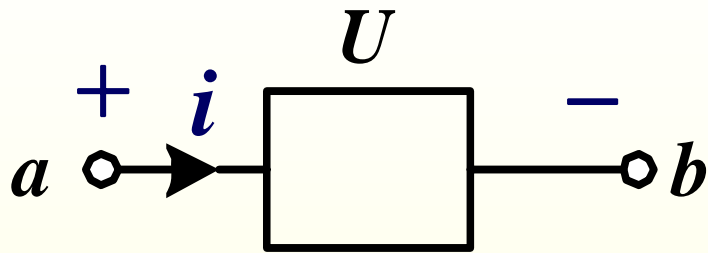
■ 功率

吸收功率——电路在单位时间内吸收的能量



关联参考方向条件下，在 dt 时间内由a点移动到b点的正电荷 $dq = idt$ ，正电荷由a点移动到b点所失去的能量 $dw = udq$ ——这些能量被电路吸收

■ 功率



$p > 0$ 吸收功率

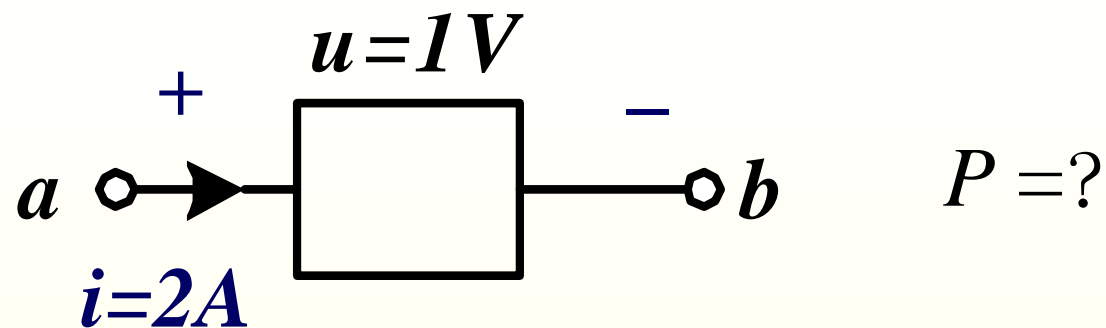
$p < 0$ 产生功率

$$p(t) = \frac{dw}{dt}$$

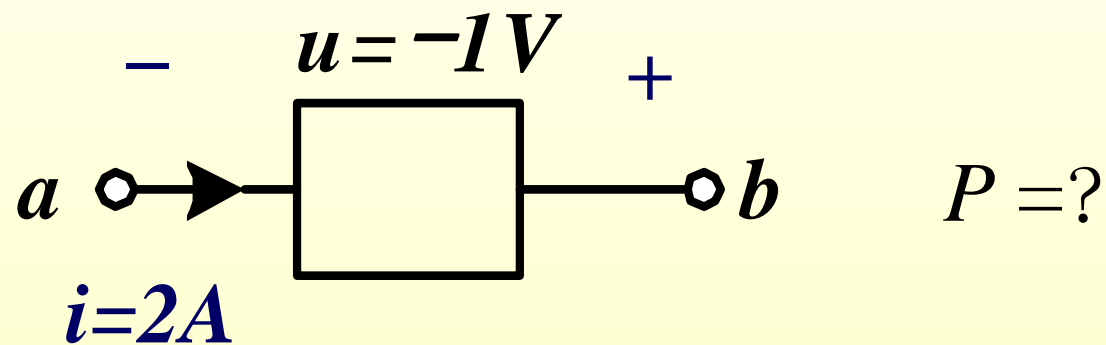
关联方向下
$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = u \cdot i$$

非关联方向下
$$p = -u \cdot i$$

例

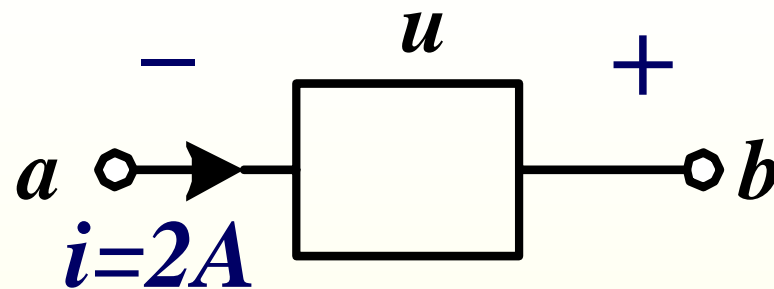


$$p = u \cdot i = 2W \quad (\text{吸收})$$



$$p = -u i = -(-1) \times 2 = 2W \quad (\text{吸收})$$

例



已知该元件产生4W功率，求 $u = ?$

解： $\because p = -u i = -4W$

$\therefore u = 4/2 = 2V$



□ 功率守恒

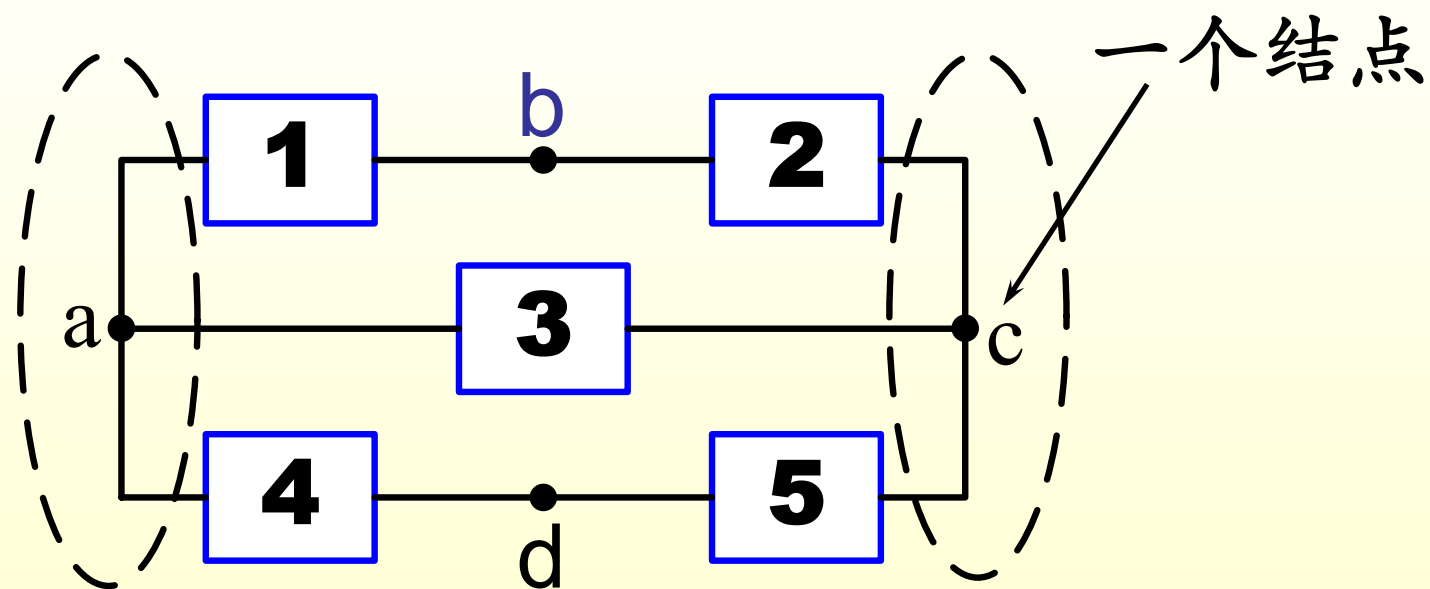
$$\sum P = 0$$

作业: p29, 1

补充: 各二端元件的电压、电流和吸收功率
如图所示, 求图中的未知量。

§ 1-3 基尔霍夫定律

■ 电路的几个名词



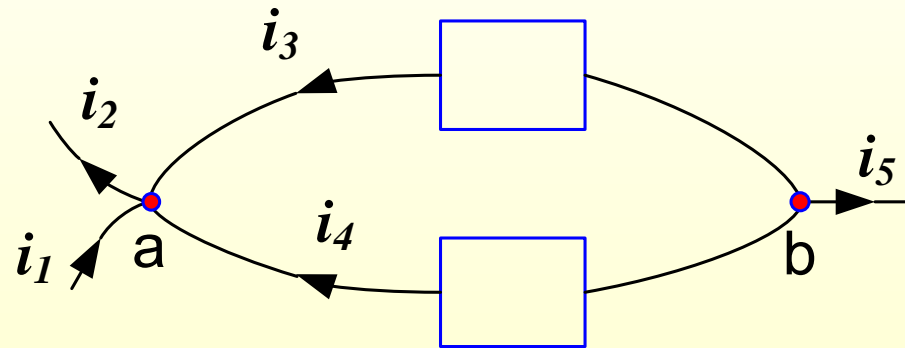
支路 结点 回路 网孔

网孔：平面电路内部不含支路的回路

■ 基尔霍夫电流定律 (KCL)

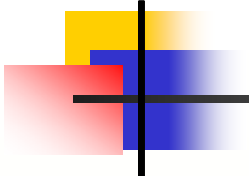
KCL——任一集总参数电路的任一结点，在任一时刻，流入(或流出)该结点的全部支路电流的代数和等于零。

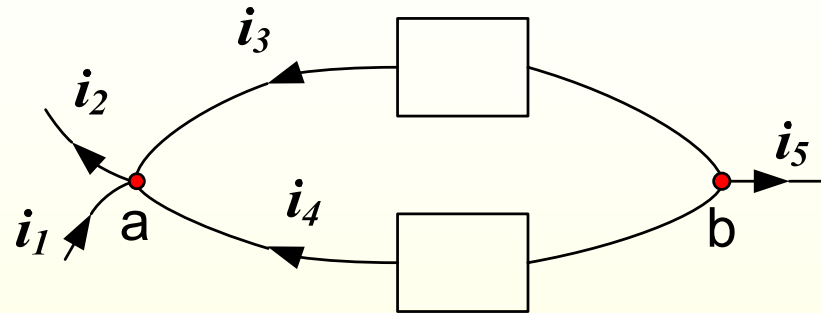
$$\sum_{j=1}^k i_j(t) = 0$$



节点a: $-i_1 + i_2 - i_3 - i_4 = 0$

节点b: $i_3 + i_4 + i_5 = 0$


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

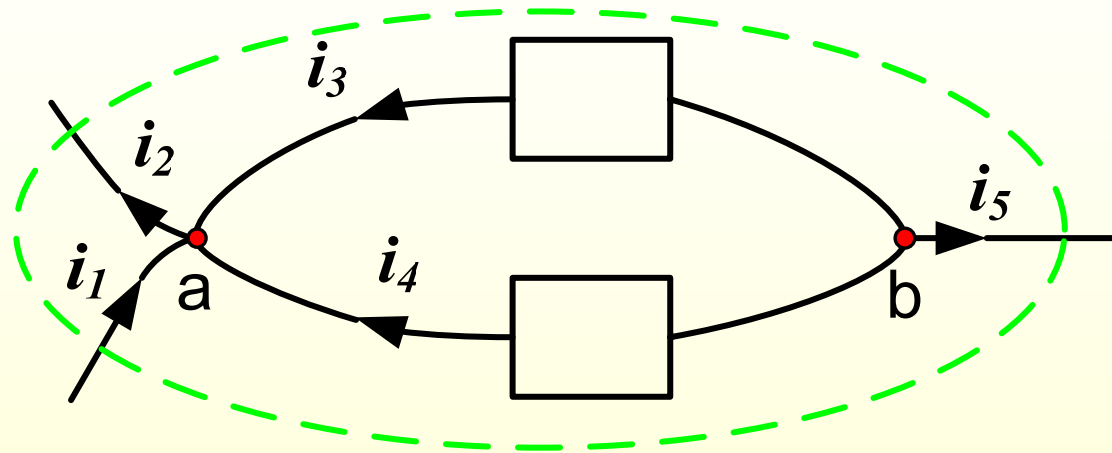


□ 几点说明:

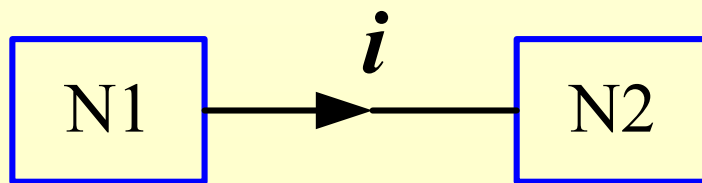
1. KCL的实质是电荷守恒;
2. 式中各项电流前的正、负号取决于各电流的参考方向相对于结点的关系;
3. KCL是对连于结点各支路电流的线性约束;
4. KCL与电路元件的性质无关;

- KCL可推广用于电路中任意假想封闭面

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



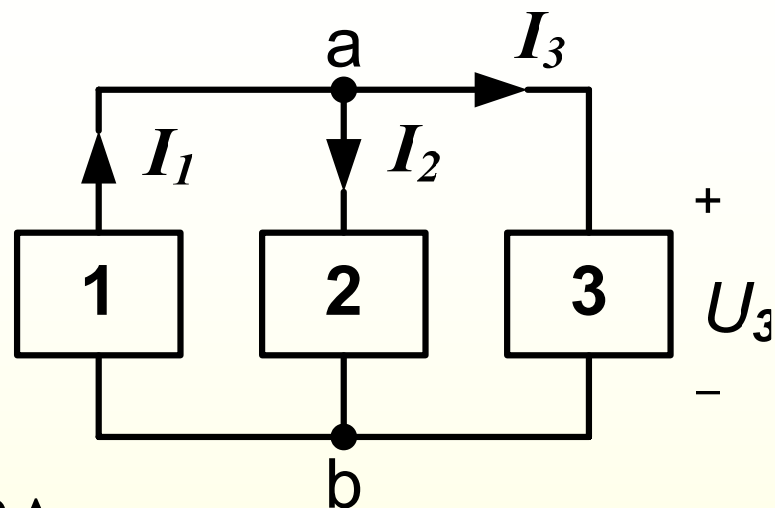
当两个单独的电路只用一条导线相连时,此导线中的电流必定为零。



$$i = 0$$

例 已知: $I_1=3\text{A}$, $U_3=2\text{V}$,
 $P_3=-4\text{W}$

求: I_2 和 P_1 。



解: $\because P_3=U_3 \times I_3=-4\text{W}$

$$\therefore I_3=P_3/U_3=-4/2=-2\text{A}$$

由节点a的KCL: $I_1-I_2-I_3=0$

$$3-I_2-(-2)=0 \quad \therefore I_2=5\text{A}$$

$$P_1=-U_3 I_1=-6\text{W} \quad (\text{产生}6\text{W})$$

顺便算出 $P_2=U_3 I_2=10\text{W}$ (吸收10W)

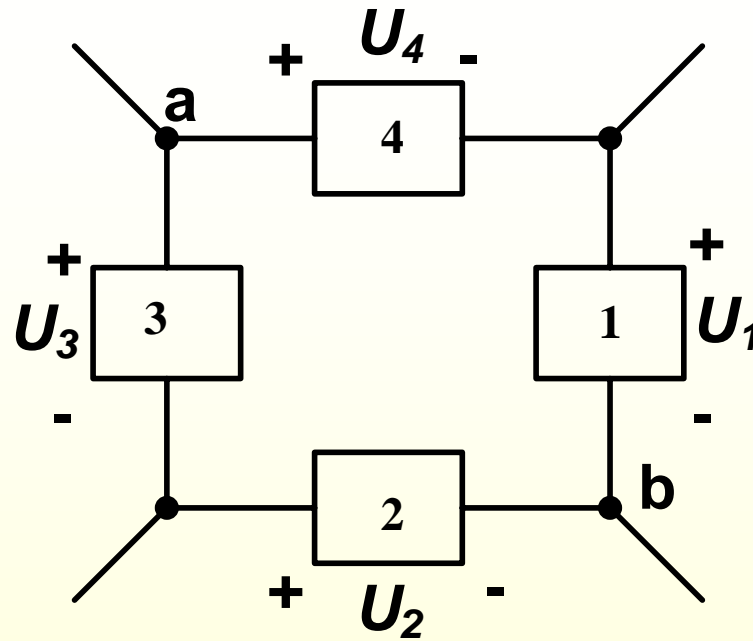
可见 $\sum P=0$ (功率守恒)



■ 基尔霍夫电压定律 (KVL)

KVL——任一集总参数电路中的任一回路，
在任一时刻，沿该回路全部支路电压的代数和等于零

$$\sum_{j=1}^k u_j(t) = 0$$

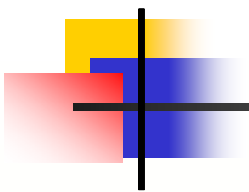


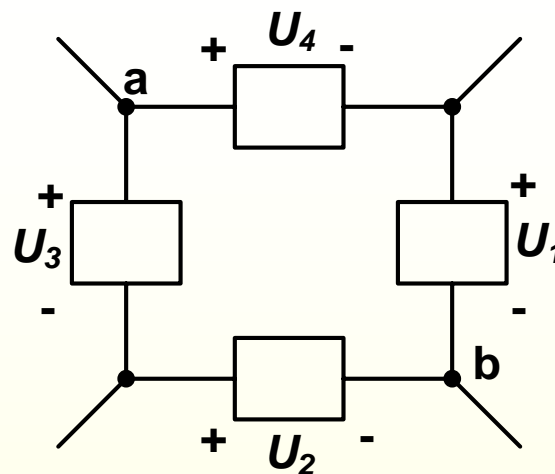
▶ 沿顺时针方向:

$$U_1 - U_2 - U_3 + U_4 = 0$$

▶ 沿逆时针方向:

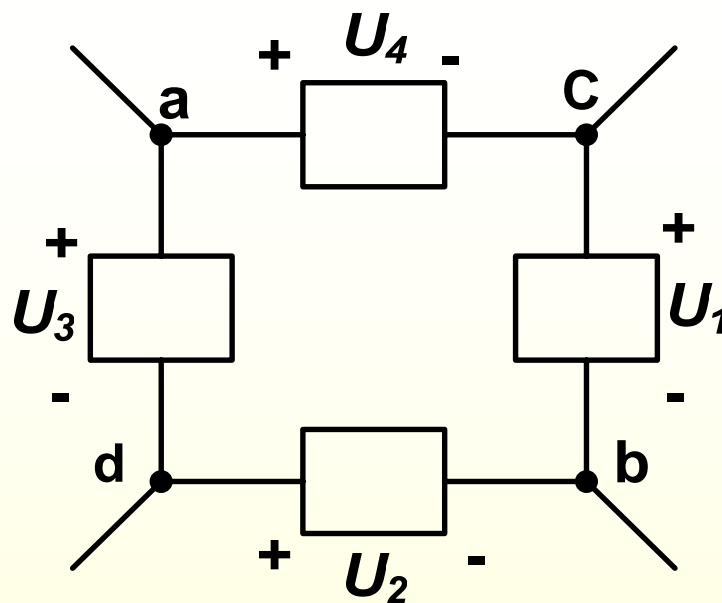
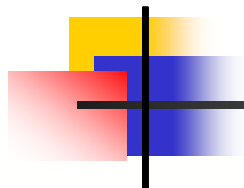
$$-U_4 + U_3 + U_2 - U_1 = 0$$


$$U_1 - U_2 - U_3 + U_4 = 0$$



□ 几点说明:

1. 式中每一项前的正、负号取决于绕行方向与电压极性的关系，凡绕行方向与电压降一致取正，否则取负；
2. KVL是对回路各支路电压的线性约束；
3. KVL的实质是能量守恒，且与元件的性质无关；
4. KVL可推广用于任一闭合结点序列。



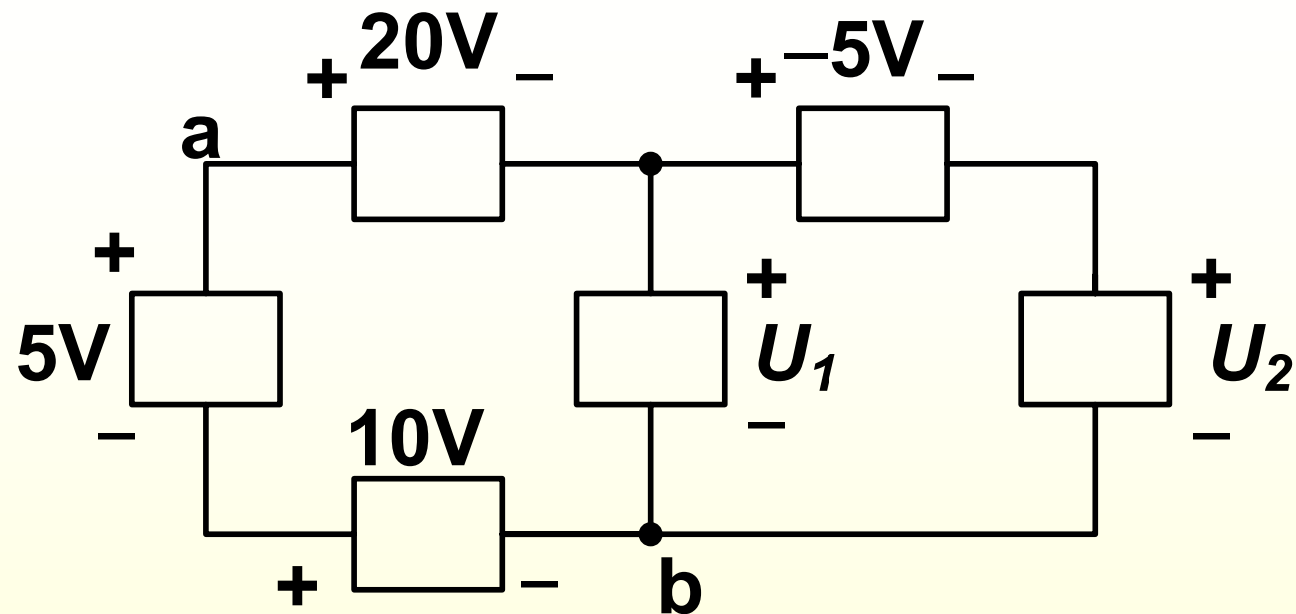
$$U_{ab} = U_4 + U_1$$

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

$$U_{ab} = U_4 + U_1 = U_3 + U_2$$

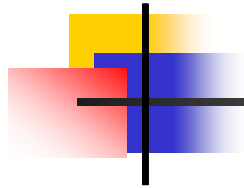
► 电路中任意两节点之间的电压 U_{ab} 等于从a点到b点的任一条路径上所有元件电压降的代数和。

例



求: U_1 和 U_2

解得: $U_1 = -5V$, $U_2 = 0V$



KCL
KVL } 结构约束, 拓扑约束

作业:(1)电路如图, 求支路电流 i_3, i_5, i_6

(2)已知 $i_1=2\text{A}, i_3=-3\text{A}, u_1=10\text{V}, u_4=5\text{V}$,
求各二端元件的吸收功率。



§ 1-4 电阻元件

◆ 元件或网络的 u 与 i 的关系——VCR

$$u = f(i) \quad \text{或} \quad i = f^{-1}(u)$$

对外提供能量与否——

➤ 有源元件

➤ 无源元件

对外引出端钮数目——

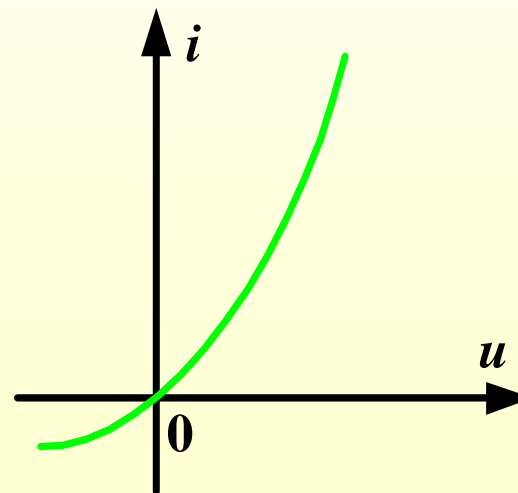
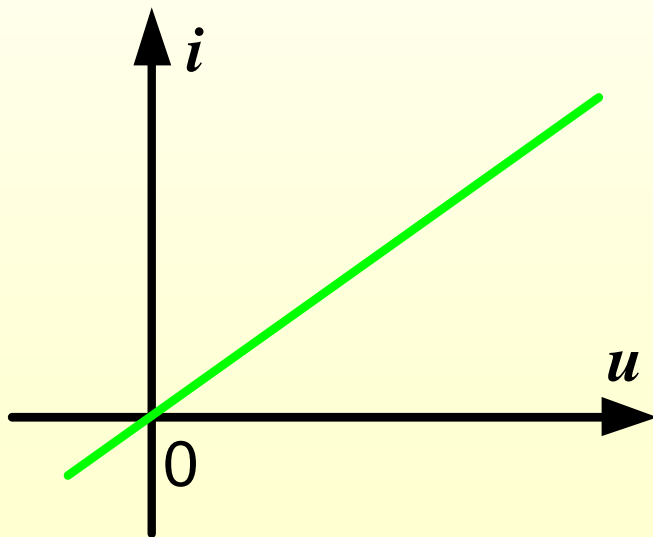
➤ 二端元件——电阻、电感、电容、独立电源等

➤ 多端元件——受控电源



◆ 电阻元件

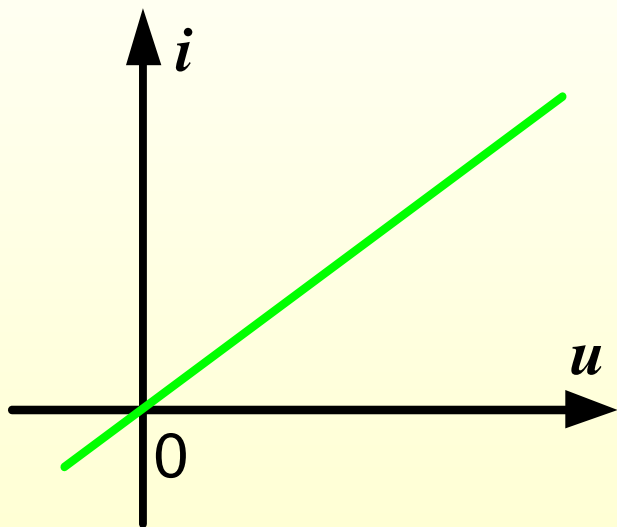
任一时刻，一个二端元件的 u 与 i 的关系由 $u-i$ 平面上过原点的一条曲线确定，这样的元件称为二端电阻元件。



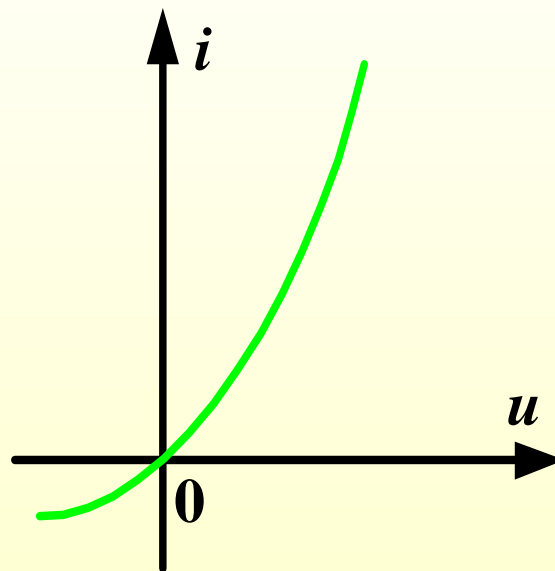
电阻元件的分类

1. 线性与非线性

2. 时变与非时变 (时不变)

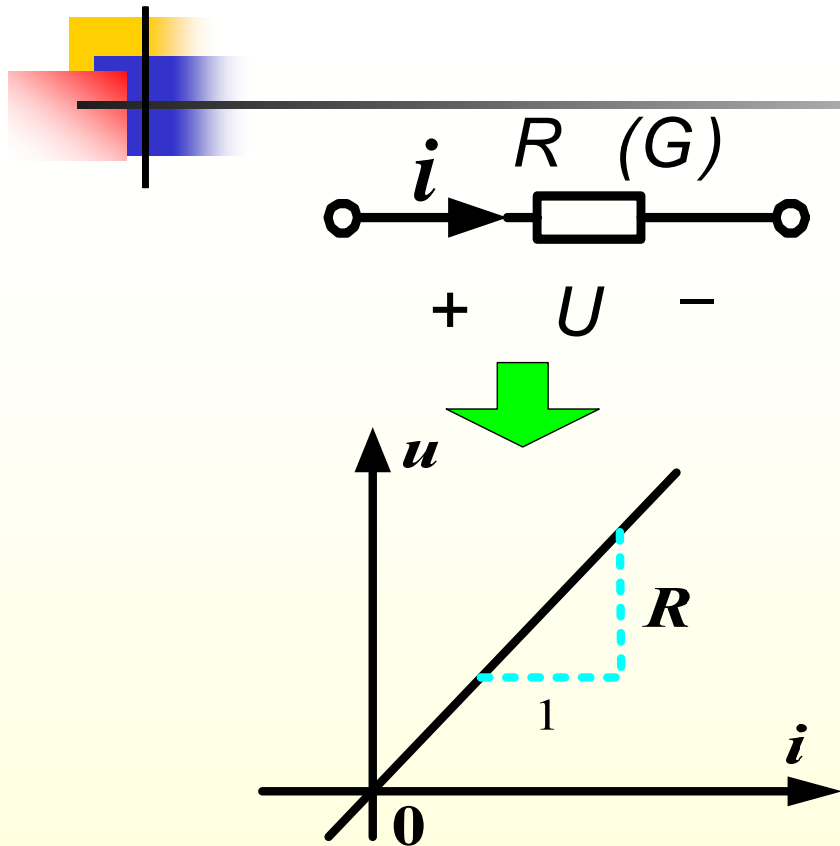


(线性时不变电阻)



(非线性时不变电阻)



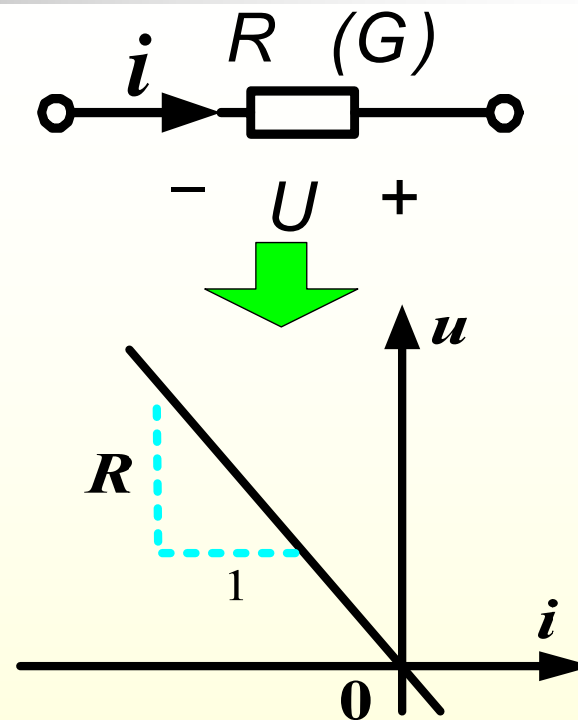


$$u = Ri = i/G$$

$$i = Gu = u/R$$

$$p = u \times i = Ri^2 = Gu^2$$

电导 $G = 1/R$



$$u = -Ri = -i/G$$

$$i = -Gu = -u/R$$

$$p = -u \times i = Ri^2 = Gu^2$$

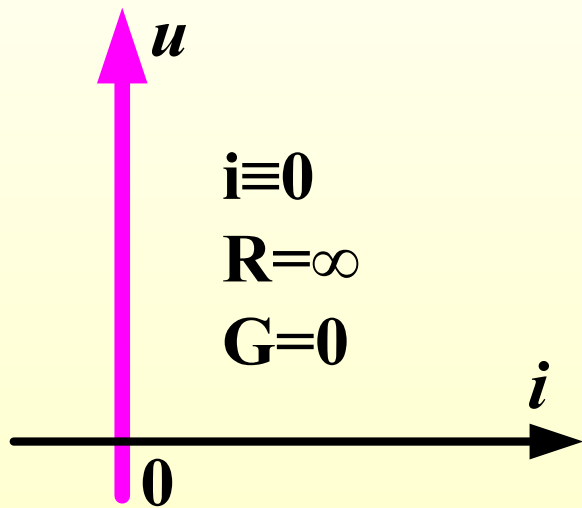
单位：(西门子), (S)



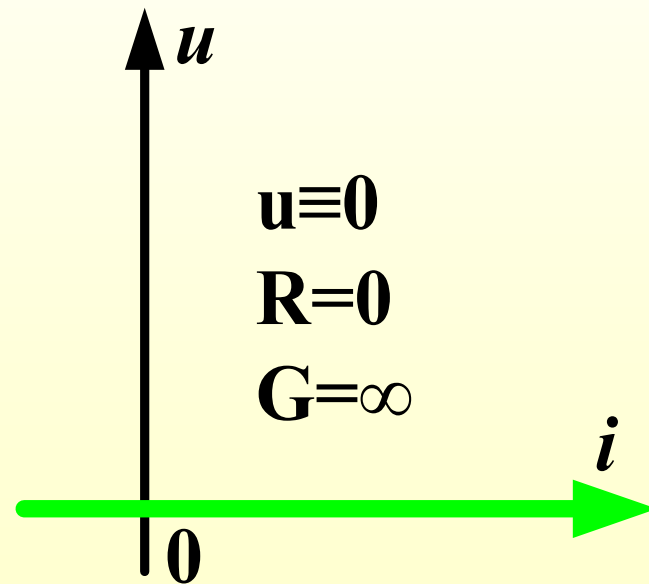
$R > 0, P \geq 0,$

正电阻始终吸收（消耗）功率。

特例：开路与短路



开路

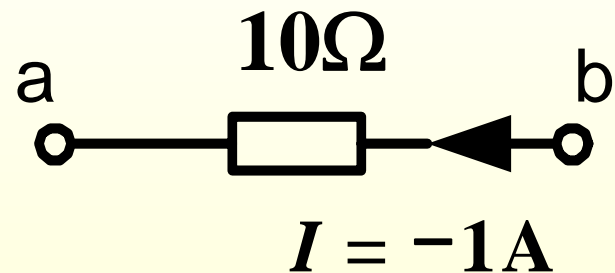


短路

负电阻 ($R < 0$)

-----产生功率，向外提供能量。

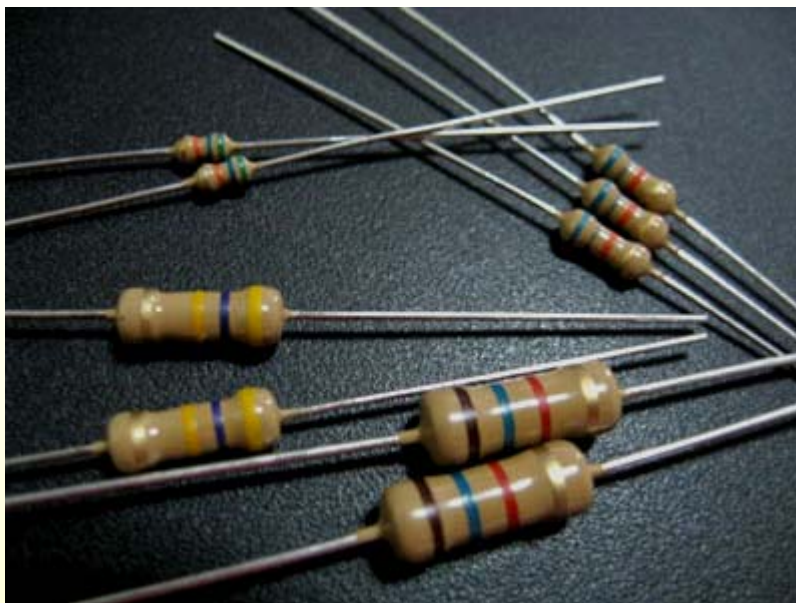
例：求电阻两端的电压。



$$\text{解： } U_{ab} = -RI = -(10) \times (-1) = 10\text{V}$$

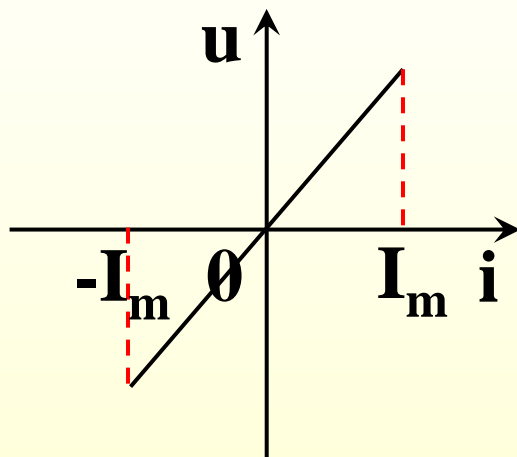
$$U_{ba} = RI = (10) \times (-1) = -10\text{V}$$

■ 线性电阻元件与电阻器

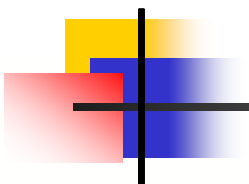


电阻器有二端或三端（例如电位器），在使用时，注意其额定功率、电压、电流的限制等。

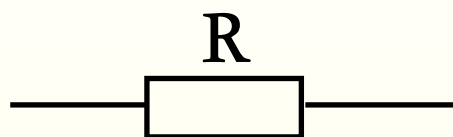
通过实验测出的电阻器关联参考方向下的VCR曲线



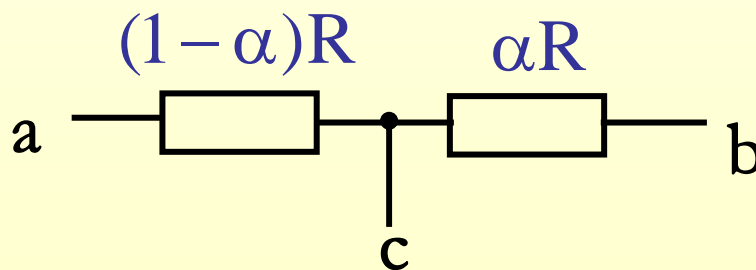
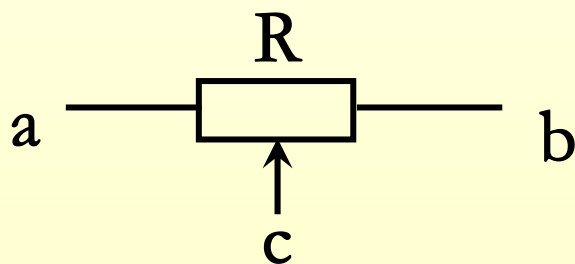
如果 $i \in (-I_m, I_m)$ ，电阻器的VCR曲线与电阻的VCR曲线基本吻合

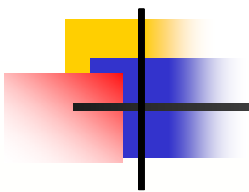


在功率允许条件下，可以将电阻器抽象为电阻，
电阻——电阻器模型



在功率允许条件下，电位器抽象为两个电阻的组合，
两个电阻的组合——电位器模型





例: $100\ \Omega$ 电阻器, 额定功率为 1W , 问电流和电压的使用范围?

解:
$$I_N = \sqrt{\frac{P}{R}} = \frac{1}{10}\ \text{A} \quad (\text{额定电流值})$$

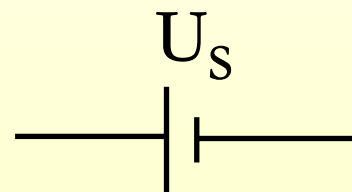
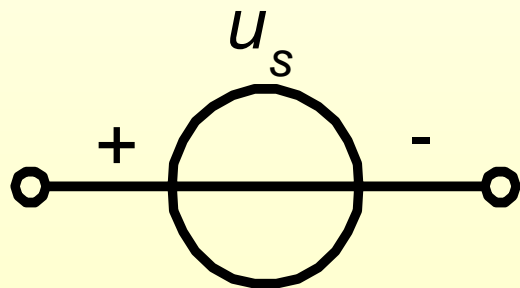
$$U_N = RI_N = 10\text{V} \quad (\text{额定电压值})$$

作业: 各线性电阻的电压、电流和电阻如图, 求图中的未知量。

§ 1-5 独立电压源和独立电流源

■ 电压源

一种理想二端元件两端总能保持一定的电压而不论流过的电流是多少。

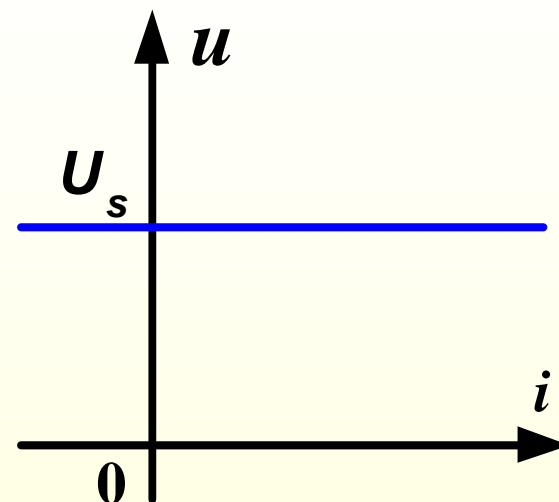




➤ 电压特性:

恒值电压

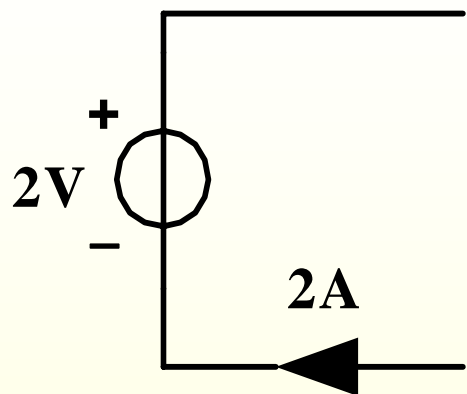
$i: -\infty \rightarrow +\infty$



➤ 电流特性:

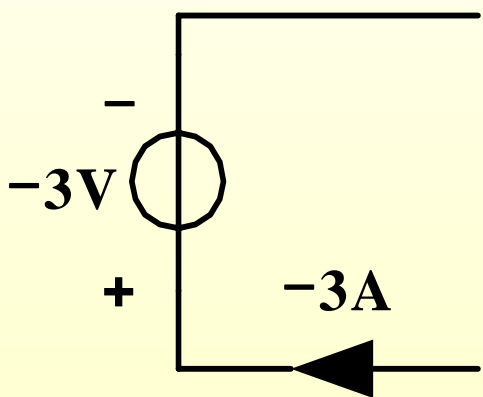
其电流由外电路决定。

例 求下两图电压源的功率P



$$P = -2 \times 2 = -4 \text{ W}$$

(产生功率)

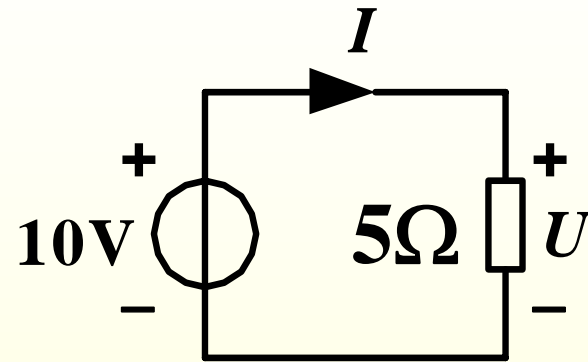


$$P = (-3) \times (-3) = 9 \text{ W}$$

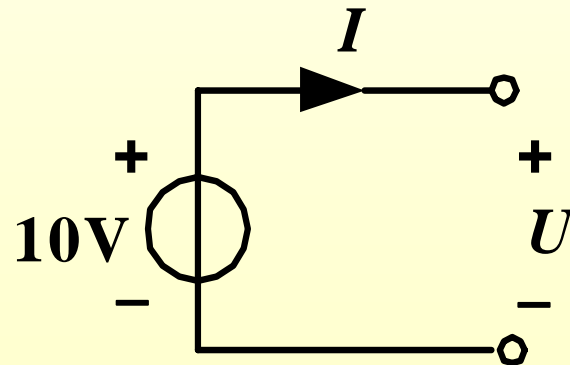
(吸收功率)

▶ 电压源既可产生功率，也可吸收功率。

例 求下列各图中的I和U。

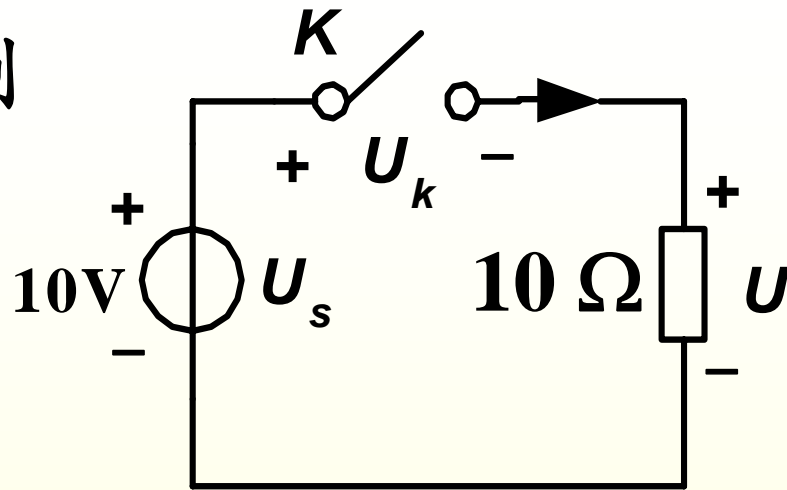


$$U = 10V$$
$$I = 2A$$



$$U = 10V$$
$$I = 0$$

例



求 K 断开和闭合时的 U_K 和 U 。

解：当 K 断开时，

$$U = 0, U_K = U_s - U = 10V$$

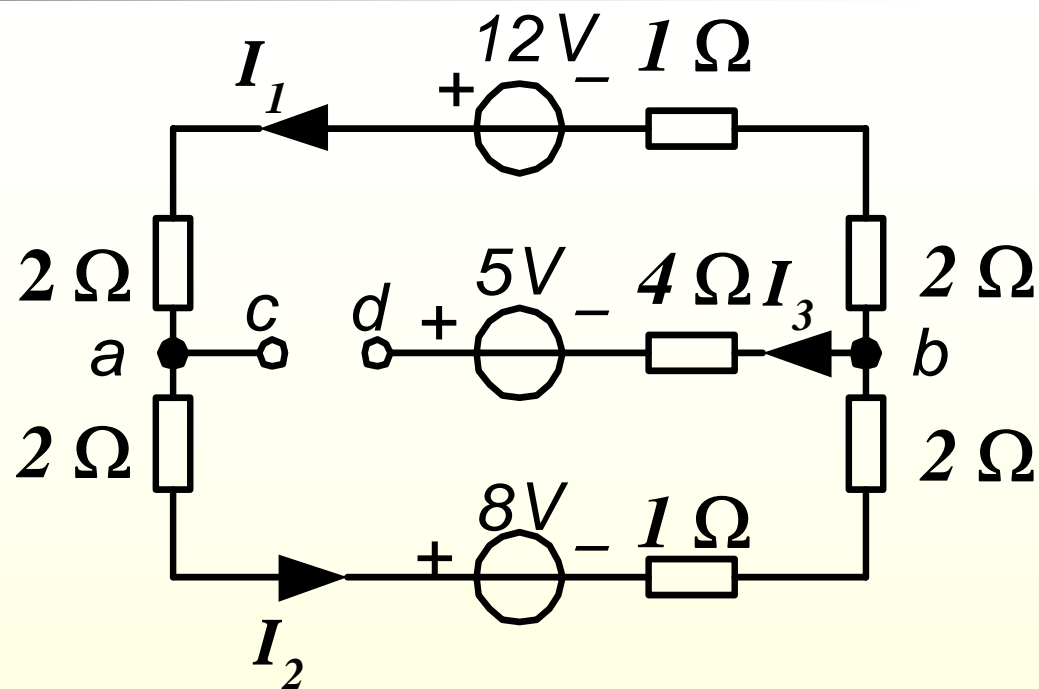
当 K 闭合时，

$$U_K = 0, U = U_s = 10V$$

例

1. 求 I_1, I_2, I_3

2. 求 U_{ab}, U_{cd}

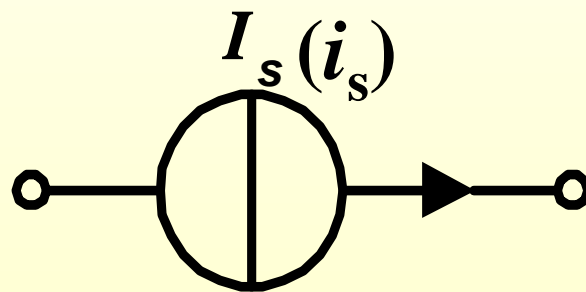


解： (1) $I_3 = 0 \rightarrow I_1 = I_2 = I;$
 $10I + 8 - 12 = 0$
 $\rightarrow I = (12 - 8) / 10 = 0.4 \text{ A}$

(2) $U_{ab} = 5I + 8 = 10 \text{ V},$
 $U_{cd} = U_{ab} - 5 = 5 \text{ V}$

■ 电流源

从一种理想二端元件的端钮上总能向外提供**一定的电流**而不论其两端的电压为多少。



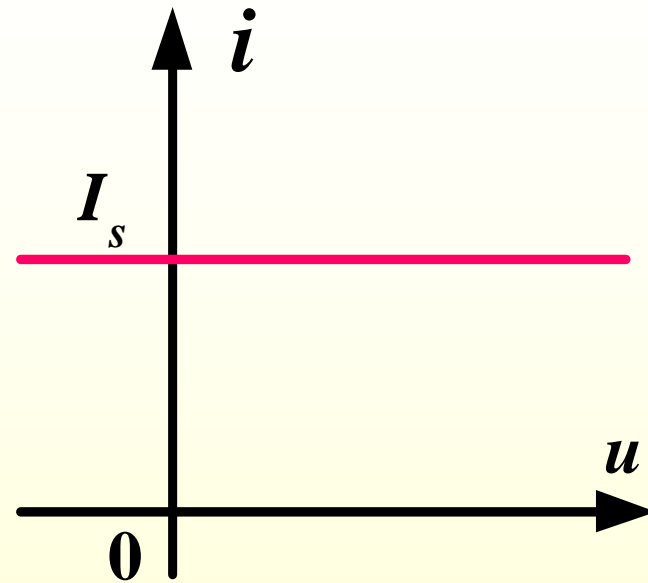
➤ 电流特性：

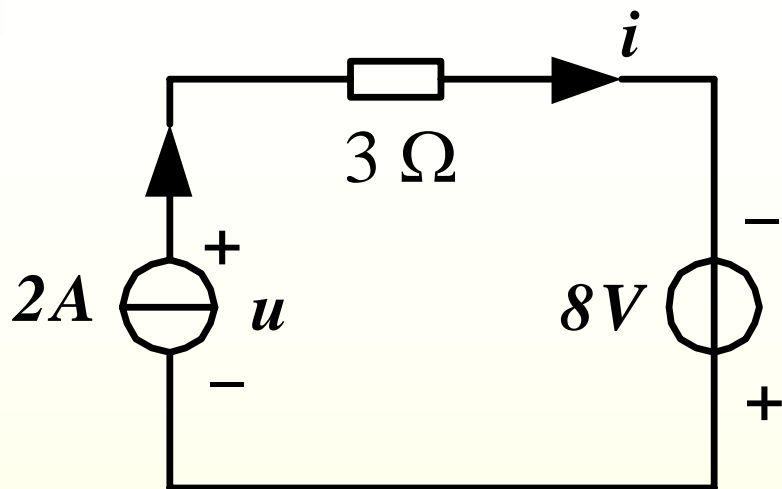
恒值电流

$u : -\infty \rightarrow +\infty$

➤ 电压特性：

其电压由外电路决定。





例：

求 i 、 u 和三个元件的功率 P 。

解： $i = 2 \text{ A}$ ， $u = 3i - 8 = -2 \text{ V}$

$$P_I = -ui = 4 \text{ W}$$

$$P_U = -8i = -16 \text{ W}$$

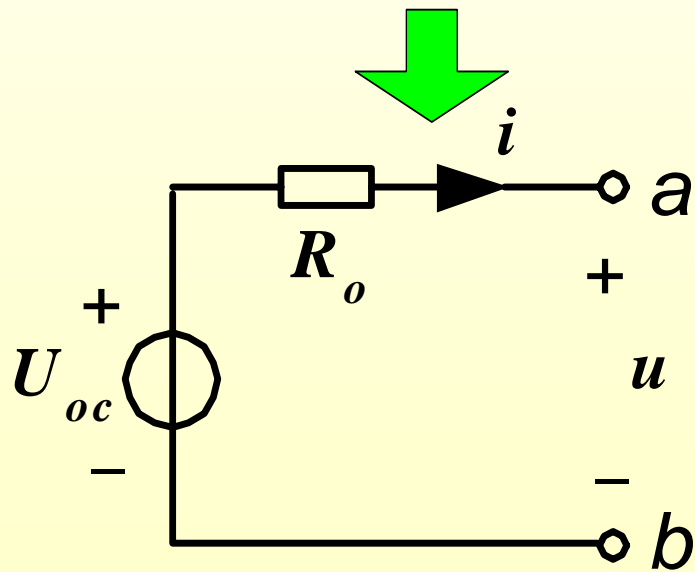
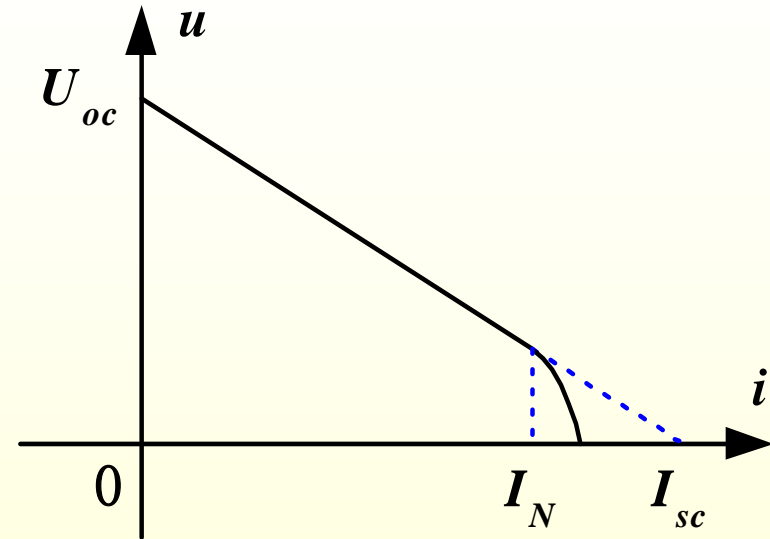
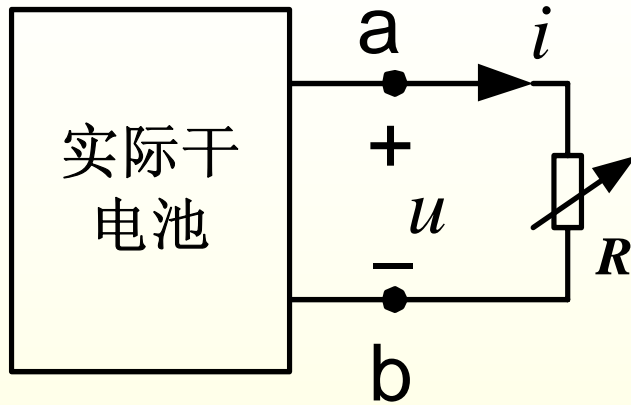
$$P_R = Ri^2 = 12 \text{ W}$$

即满足 $\sum P = 0$

3. 发电机、电池和光电池



实际电源的电路模型

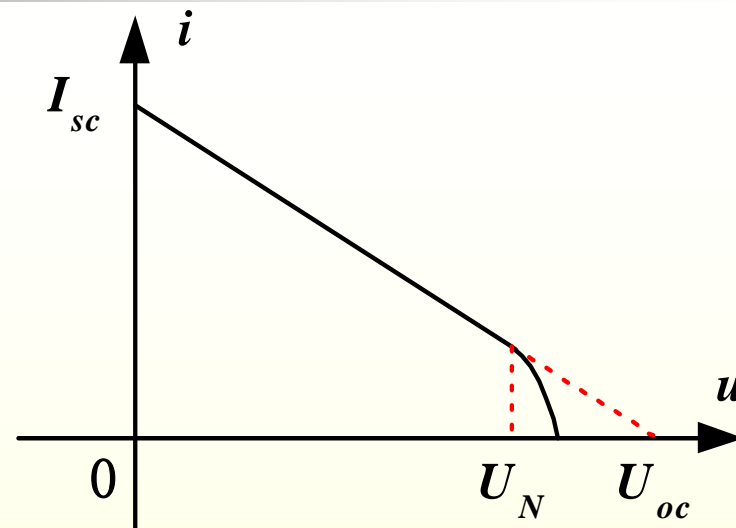
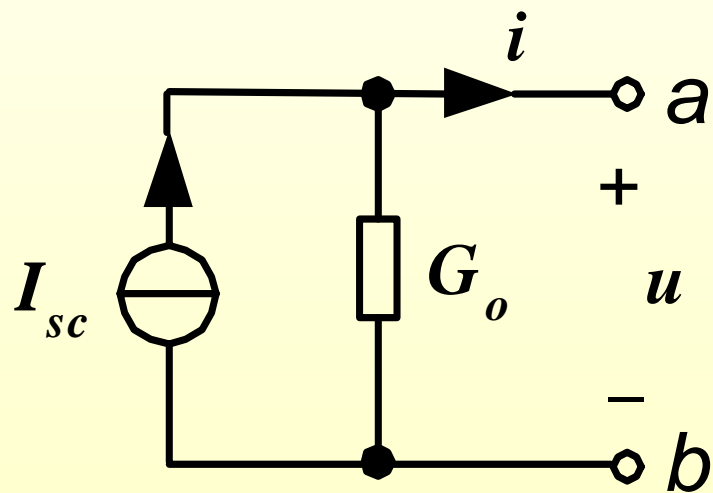
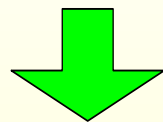
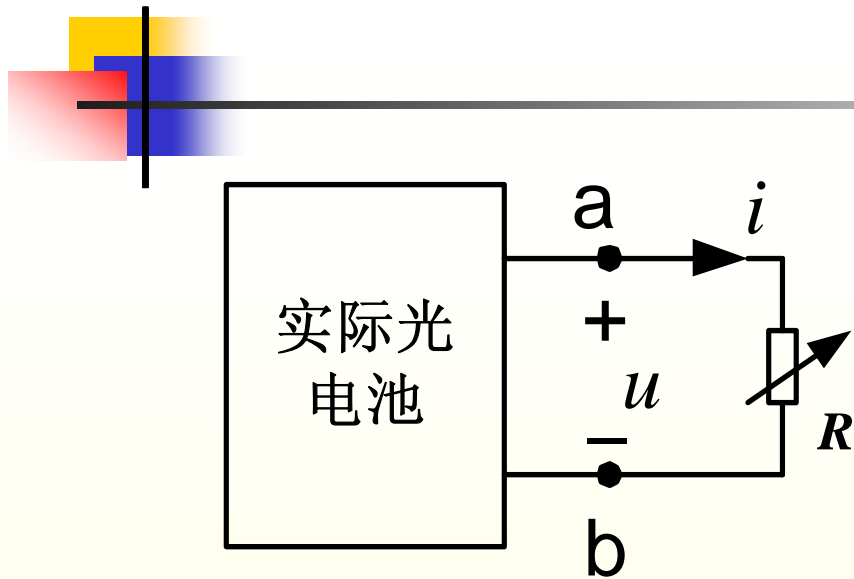


$$u = U_{oc} - R_o i$$

$$R_o = U_{oc} / I_{sc}$$

❖ 内电阻

❖ 电压源模型

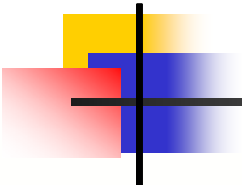


$$i = I_{sc} - G_0 u$$

$$G_0 = I_{sc} / U_{oc}$$

❖ 内电导

❖ 电流源模型



当电源内阻不能忽略时，可采用这两种电路模型表征实际的电压源和实际的电流源

作业：求图示各电路的电压 u 和电流 i



§ 1 - 6 电容元件

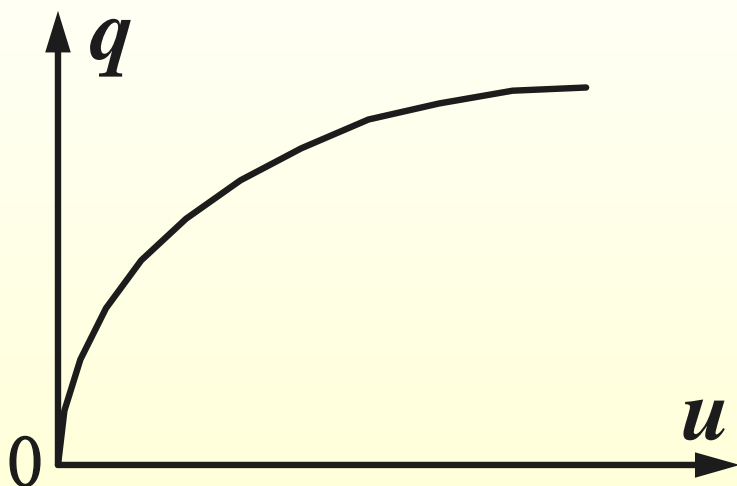
动态元件

---- 电容元件和电感元件的VCR都涉及微分或积分关系。

动态电路

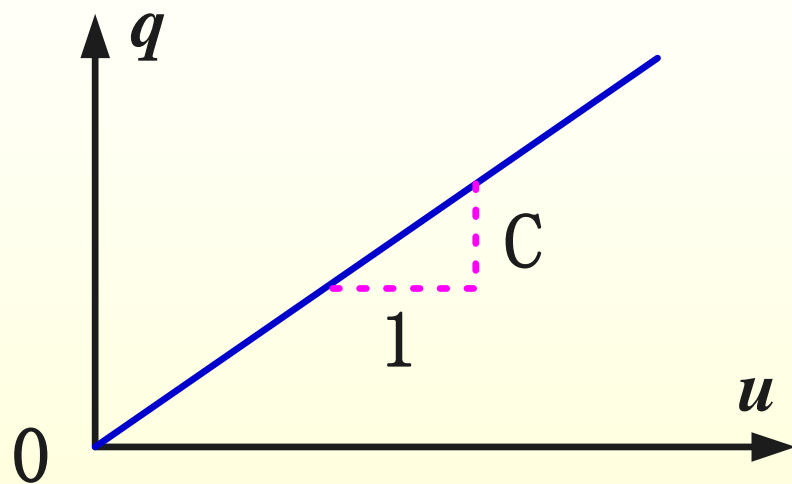
---- 含有动态元件的电路称为动态电路

□ 电容元件的定义



在 $u-q$ 平面上由一条过原点曲线所确定的二端元件称为电容元件。（即由电荷和电压相约束的元件）

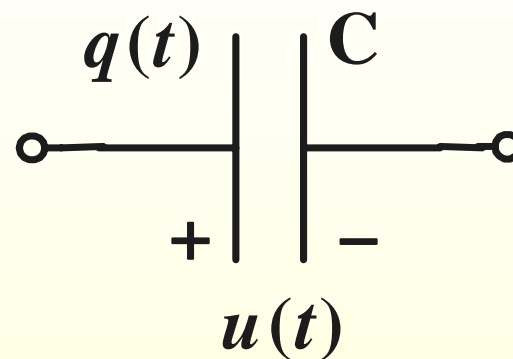
线性时不变电容元件:



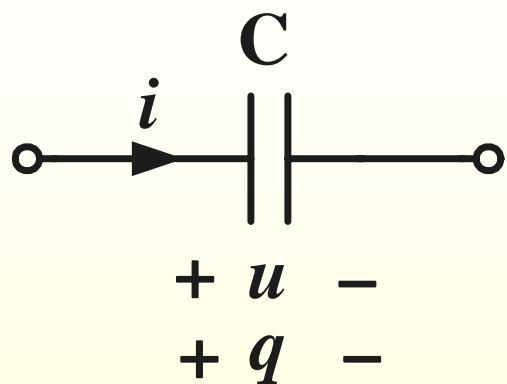
$$q = Cu$$

C ---- 电容 (正值常数)

单位: 法拉 (F)



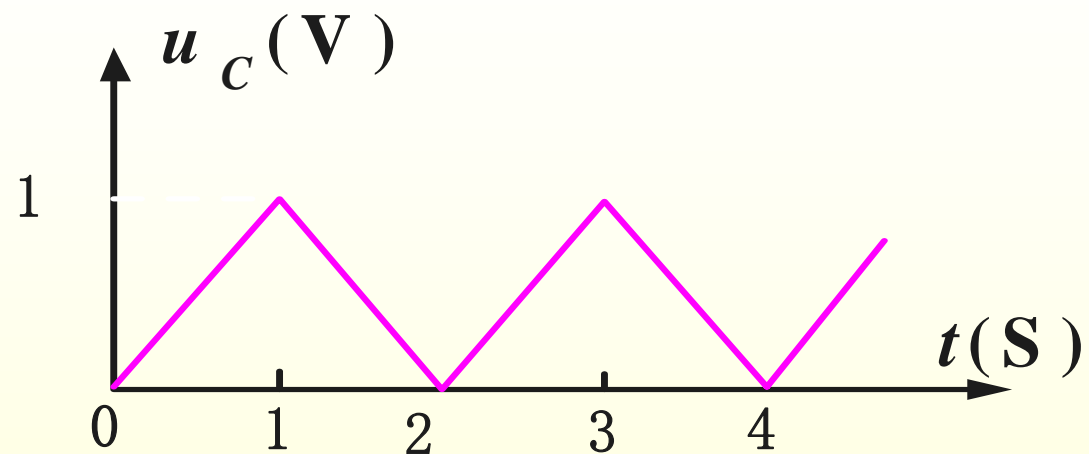
□ 电容元件的电压和电流约束关系



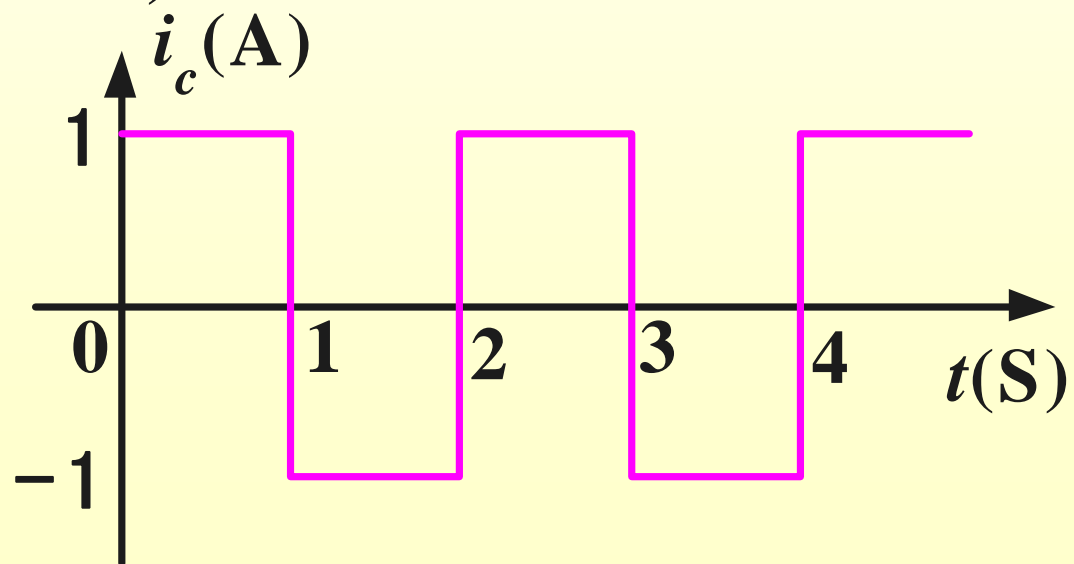
$$i(t) = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt}$$

❖ i_c 的大小与 u_c 的大小无关，而是取决于 u_c 的变化率，若 $u(t) = \text{常数}$ (直流)，则 C 相当于开路；

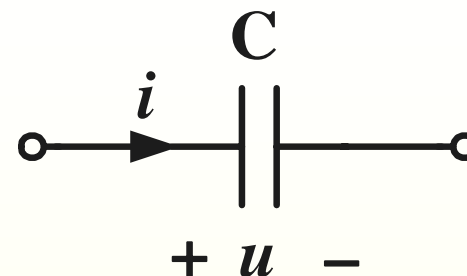
❖ i_c 与 u_c 的波形不同



则 (设 $C=1F$)



电容元件的VCR还可写成:



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

式中 $u(0) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^0 i(\xi) d\xi$ 称为电容电压的初始值。

$u(0)$ 也称为电路的初始状态。

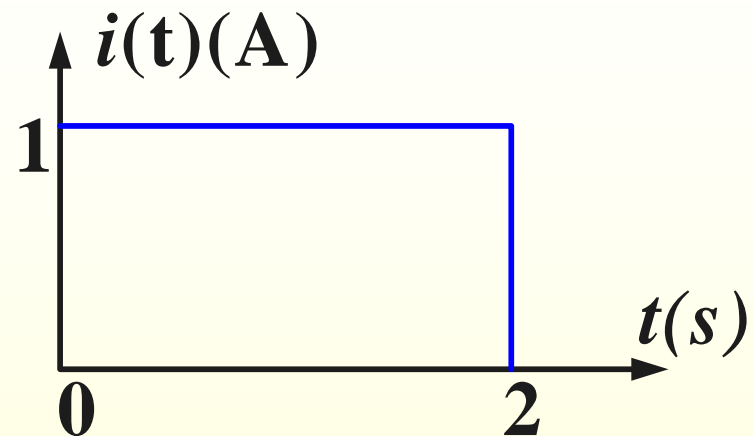
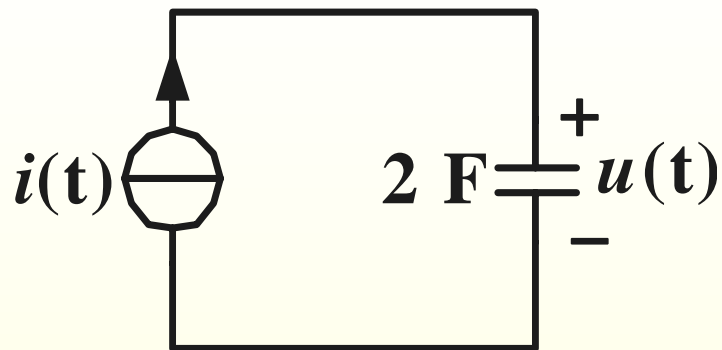


❖ 说明:

电容元件还有一个重要性质——电容电压的记忆性。即某一时刻 t 的电容电压，并不取决于该时刻的电流，而是取决于从 $-\infty$ 到 t 所有时刻的电流值。所以，电容电压有“记忆”电流的作用，电容是记忆元件。

如果不知道 $-\infty$ 到 0 时刻的电流，但给出 $u(0)$ 和 $(0, t)$ 区间的电流，也可求出 $u(t)$ 。

例 已知 $u(0)=2\text{V}$, 求 $u(t), t \geq 0$, 并画出 $u(t)$ 的波形



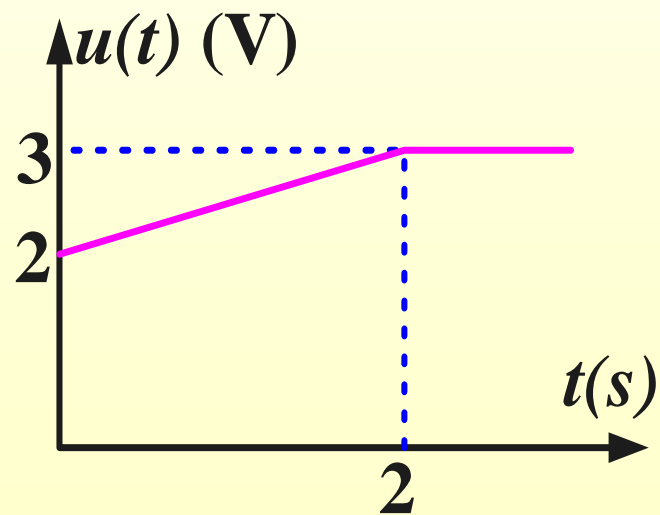
解: (1) $0 \leq t \leq 2\text{S}$

$$u(t) = u(0) + \frac{1}{2} \int_0^t d\xi = 2 + \frac{t}{2}$$

$$u(2) = 3\text{V}$$

(2) $t > 2\text{S}$

$$u(t) = u(2) + \frac{1}{2} \int_2^t 0 \cdot d\xi = 3\text{V}$$





□ 电容的贮能

求任意时刻 t 电容的贮能 $W_C(t)$

设 $t=0$ 时, $u_c(0)=0$, 则

$$\begin{aligned}W_C(t) &= \int_0^t p(\xi) d\xi = \int_0^t u(\xi) i(\xi) d\xi \\ &= \int_0^t C u(\xi) \frac{du}{d\xi} d\xi = C \int_0^{u(t)} u du = \frac{1}{2} C u^2(t)\end{aligned}$$

由于电容电压确定了电容的储能状态, 所以称电容电压为状态变量。



➤ 关于电容储能的说明:

(1) $W_C(t)$ 只与该时刻 t 的电容电压值有关, 与电容的电流值无关。由于电压与电场有关, 所以电容是一种储藏电场能量的元件。

(2) $W_C(t) \geq 0$, 但有时增长, 有时减少

$$\therefore p(t) = dW / dt$$

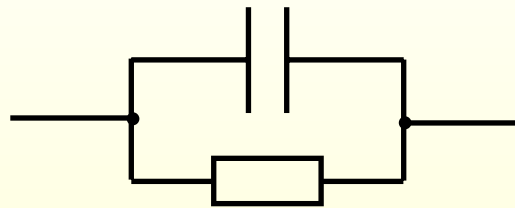
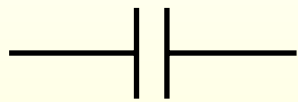
\therefore 当 $W_C(t) \uparrow$ 时, $p(t) > 0$; (吸收能量)

当 $W_C(t) \downarrow$ 时, $p(t) < 0$; (放出能量)



电容元件与电容器

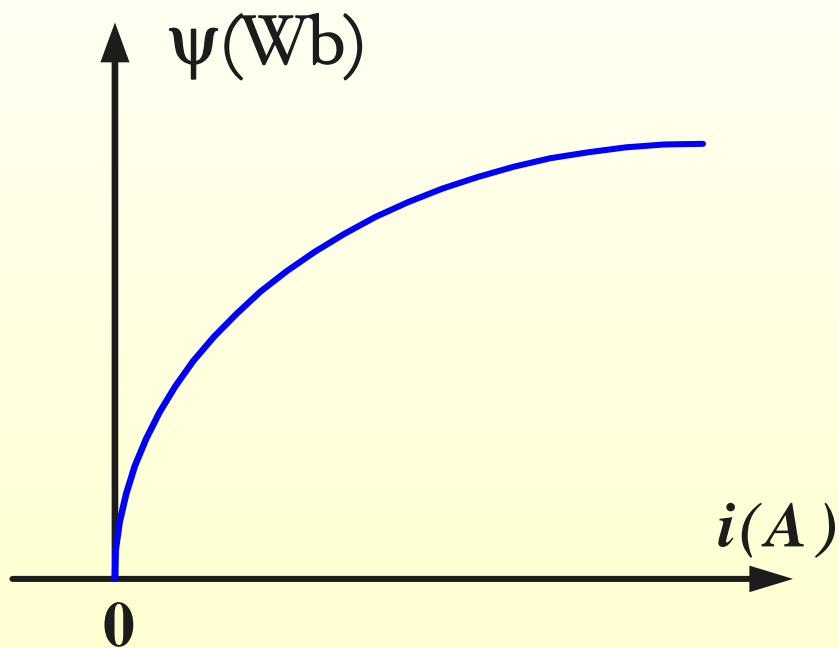
电容器的电路模型：



作业：（242页） 7-1

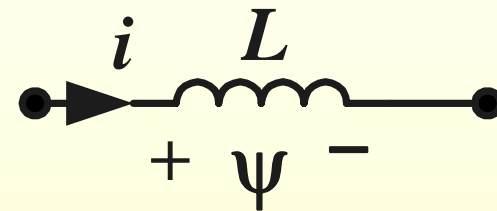
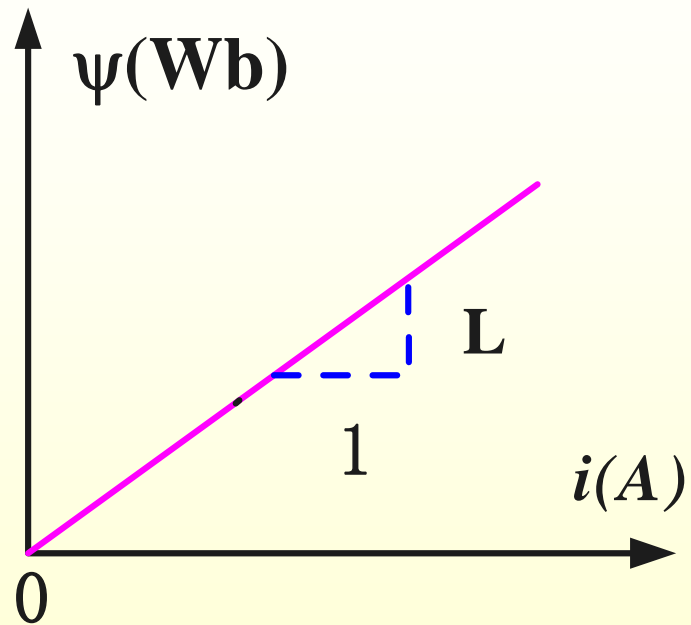
§ 1-7 电感元件

□ 电感元件的定义



在电流 i 与磁链 ψ 所在的平面上由一条曲线所确定的二端元件称为电感元件。

线性时不变电感元件：

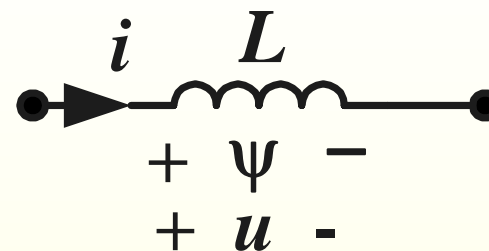


$$\psi = Li$$

L —电感量，单位：亨利(H)

□ 电感的电压电流关系

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



说明:

- (1) u_L 的大小取决于 i_L 的变化率, 而与 i_L 的大小无关。若 $i(t) = \text{常数}$ (直流), 则 L 相当于短路。
- (2) u_L 与 i_L 的波形不同;



电感电压电流关系还可以写成

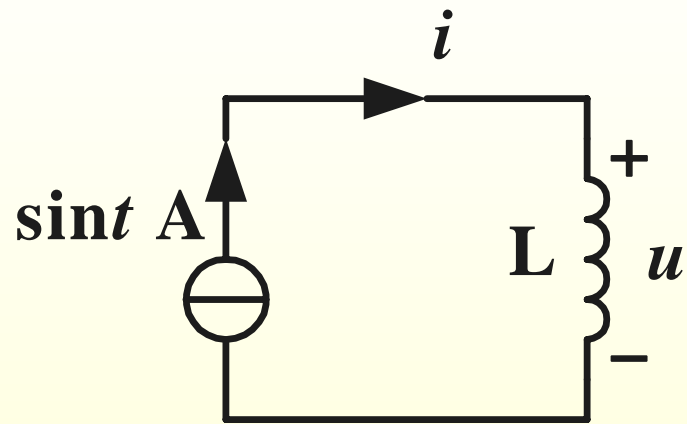
$$\begin{aligned}i_L(t) &= \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t u_L(\xi) d\xi \\ &= i_L(0) + \frac{1}{L} \int_0^t u_L(\xi) d\xi\end{aligned}$$

此式表明电感电流有记忆性。电感也是记忆元件。

$$i_L(0) = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^0 u_L(\xi) d\xi \quad \text{称为电感电流的初始值。}$$

$i_L(0)$ 也称为电路的初始状态。

例：电路如图，问图中 $i=?$, $u=?$



(a)

$$i = \sin t \text{ A}$$

$$u = L \cos t \text{ V}$$



□ 电感的贮能

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

1. $W_L(t)$ 只与该时刻的 i_L 值有关，由于电流与磁场紧密相关， \therefore 电感是一种贮藏磁场能量的元件。
2. $W_L(t) \geq 0$ ，而 $P_L(t)$ 可正可负，当 $W_L \uparrow$ 时， $P_L > 0$ ，当 $W_L \downarrow$ 时， $P_L < 0$ 。



电感元件与电感器

电感器的电路模型：

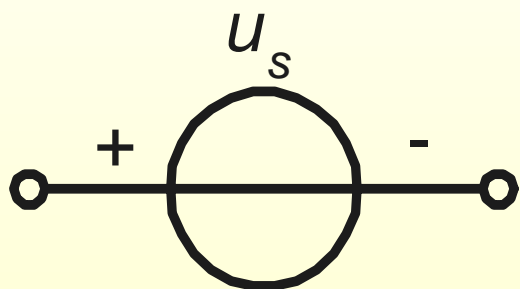


作业：1-5（29页）

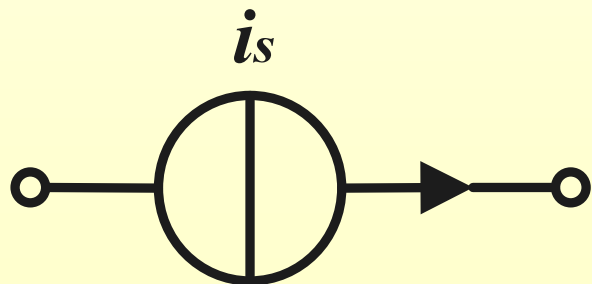
§ 1-8 受控源

□ 独立电源

电压源和电流源是独立电源。其独立的含义是：



定值电压 u_s 与流过其中的电流以及其他支路的电流、电压无关；

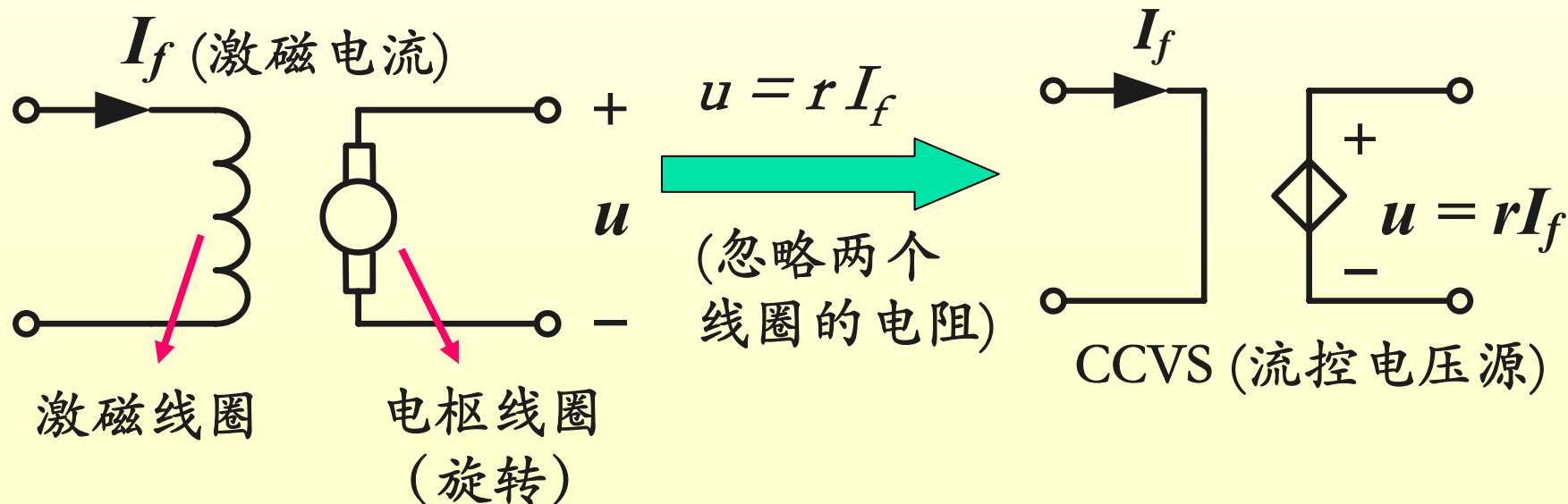


定值电流 i_s 与两端电压以及其他支路的电流、电压无关。

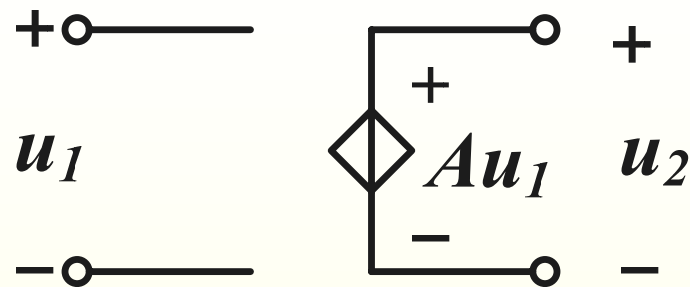
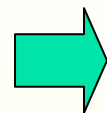
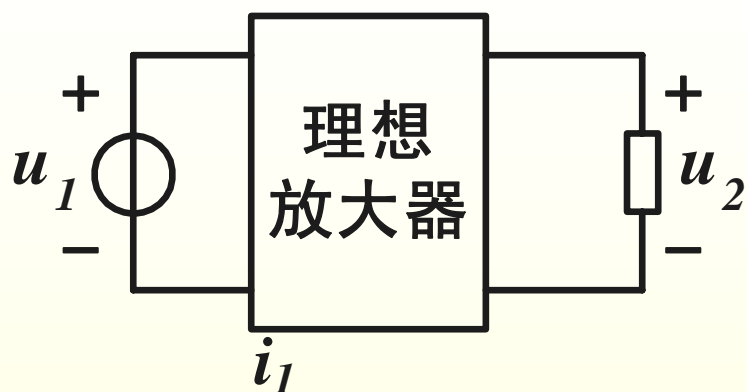
受控源—非独立电源

受控源（非独立电源），虽然也输出电压或电流，但其输出的电压或电流受某一支路的电压或电流控制，故名受控源。

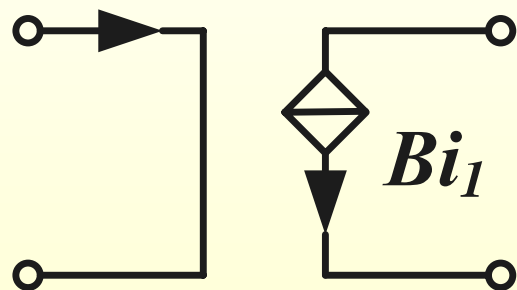
例如直流发电机：



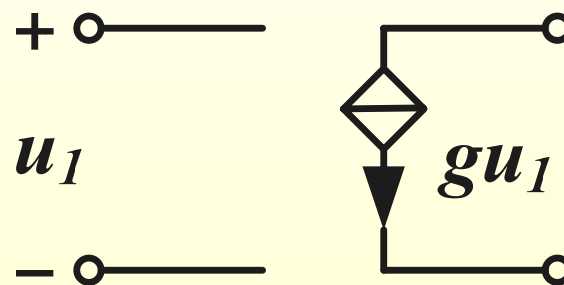
其它类型受控源:



VCVS (压控电压源)

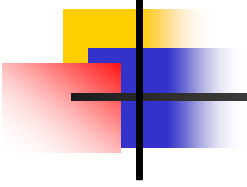


CCCS (流控电流源)



VCCS (压控电流源)

❖ 注意: 受控源的参考方向应与控制量的参考方向一起标出。没有控制量的参考方向, 受控源的参考方向将无意义。



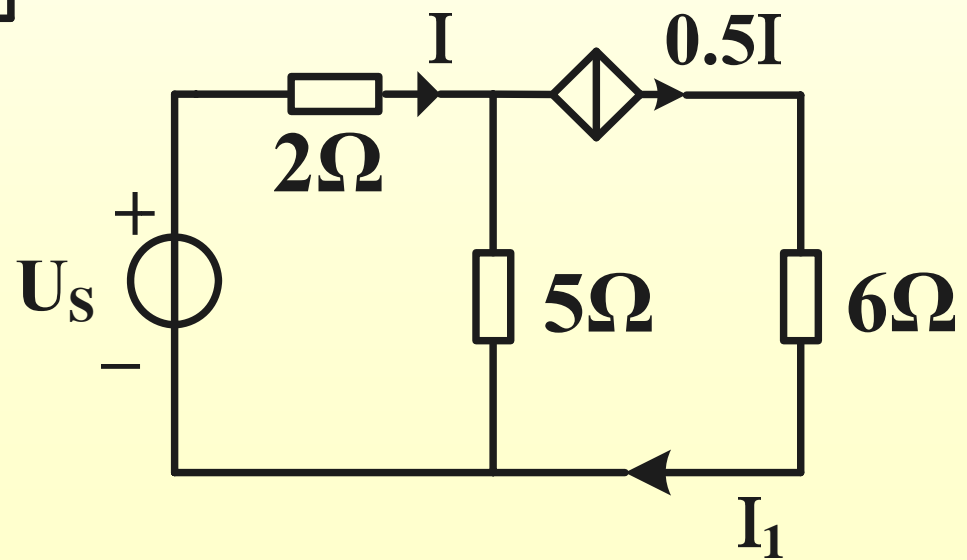
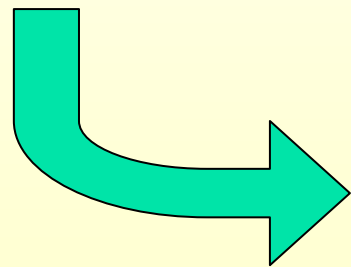
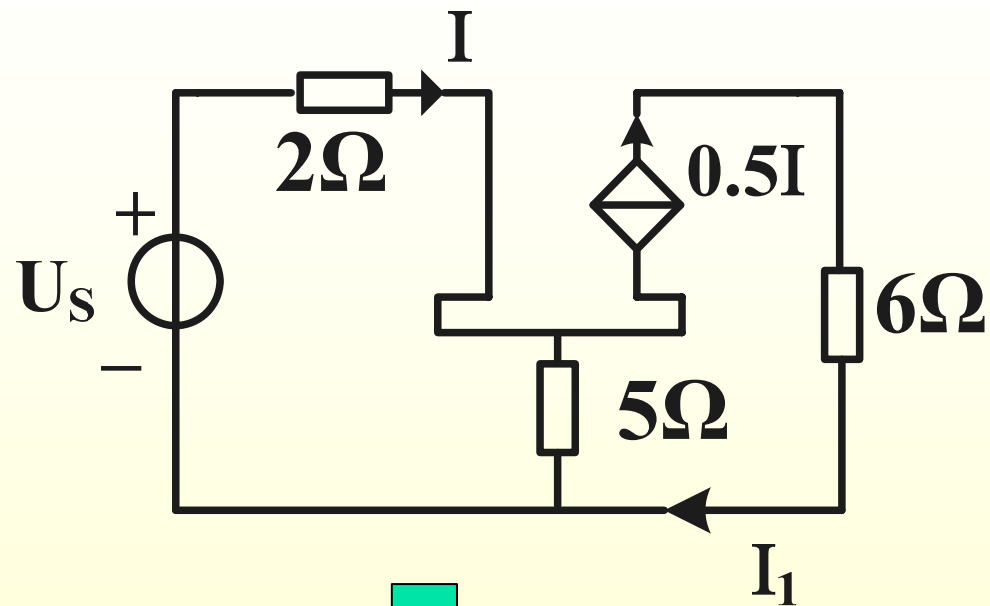
➤ 独立源是二端元件，而受控源是四端元件。它有两条支路，一条是控制支路(开路或短路)，另一条是输出支路，输出支路的输出量受控制支路的控制。



几点说明：

- ◆ 受控源不是真实的电源，它只表示某些电子器件中电压、电流的约束关系
- ◆ 受控源是双口电阻元件
- ◆ 当控制量的大小、方向改变时，受控量的大小、方向也要相应改变
- ◆ 受控源的吸收功率

例：已知 $I=4\text{A}$ ，求 I_1 、 U_S 和受控源的功率？



例：已知 $I=4\text{A}$ ，求 I_1, U_S 和受控源的功率？

解：

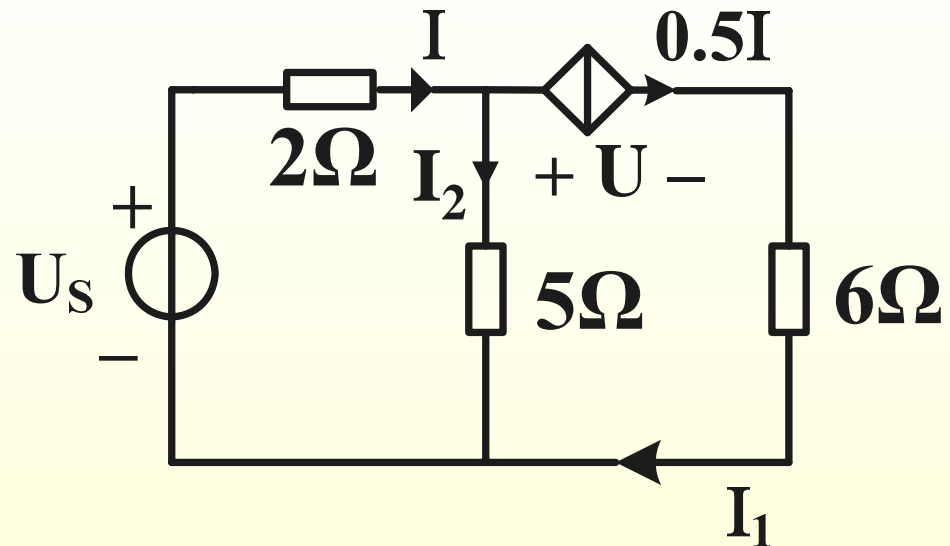
$$I_1 = 0.5I = 0.5 \times 4 = 2\text{A}$$

$$I_2 = I - I_1 = 4 - 2 = 2\text{A}$$

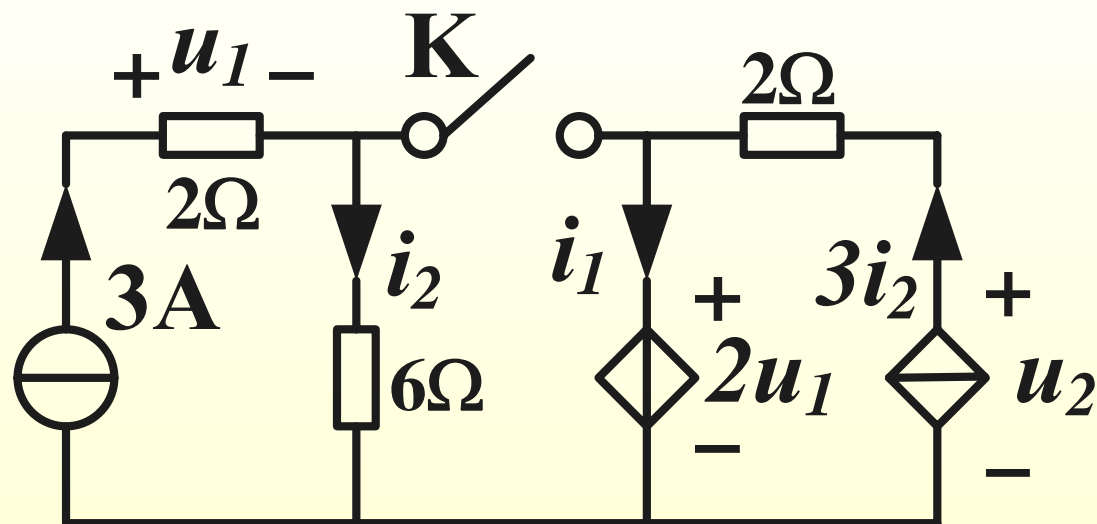
$$U_S = 2I + 5I_2 = 2 \times 4 + 5 \times 2 = 18\text{V}$$

$$U = 5I_2 - 6I_1 = 5 \times 2 - 6 \times 2 = -2\text{V}$$

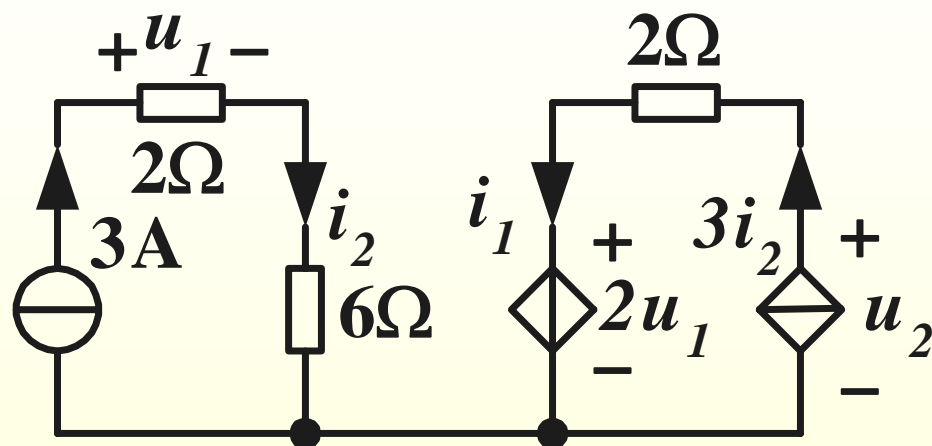
$$P_{\text{受}} = U \times 0.5I = (-2) \times 0.5 \times 4 = -4\text{W} \quad (\text{产生})$$



例：求K断开及闭合时两个受控源的吸收功率？



解：(1) 当K断开时



$$i_2 = 3 \text{ A}$$

$$u_1 = 2 \times 3 = 6 \text{ V}$$

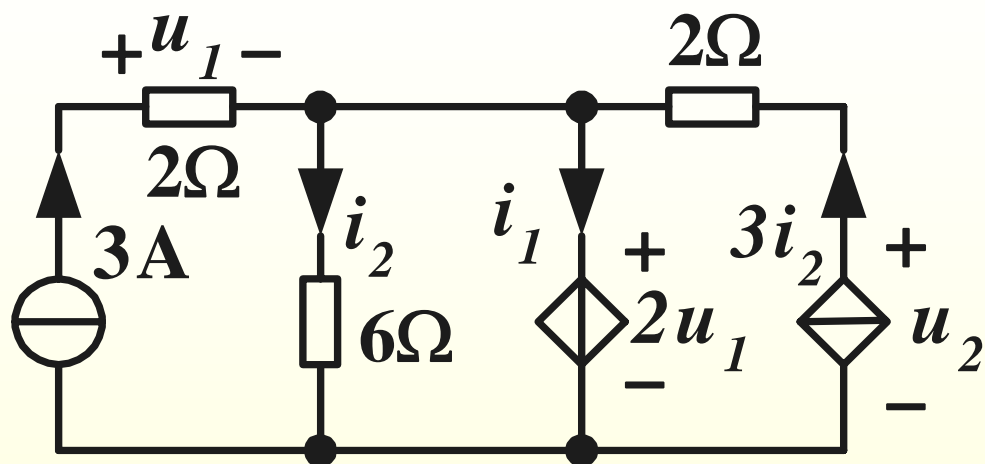
$$i_1 = 3i_2 = 9 \text{ A}$$

$$u_2 = 2 \times 3i_2 + 2u_1 = 30 \text{ V}$$

$$\therefore P_{2u_1} = 2u_1 \cdot i_1 = 108 \text{ W}$$

$$P_{3i_2} = -u_2 \cdot 3i_2 = -270 \text{ W}$$

(2) 当K闭合时



$$\therefore u_1 = 6\text{V}$$

$$i_2 = 2u_1 / 6 = 2\text{A}$$

$$i_1 = 3\text{A} + 3i_2 - i_2 = 7\text{A}$$

$$u_2 = 2 \times 3i_2 + 2u_1 = 24\text{V}$$

$$\therefore P_{2u_1} = 2u_1 \cdot i_1 = 84\text{W}$$

$$P_{3i_2} = -u_2 \cdot 3i_2 = -144\text{W}$$

➤ 此例说明：是受控电压源时，其电流由外电路确定；是受控电流源时，其电压由外电路确定。



§ 1-12 两类约束和电路方程

■ 两类约束

▶ 结构约束 (拓扑约束)

KCL 节点 $\sum i = 0$

KVL 回路 $\sum u = 0$

▶ 元件约束 (元件VCR)

例如电阻元件: $u = R i$

两类约束是分析集总电路的基本依据。

两类约束方程独立性的讨论

(1) 元件VCR的独立性

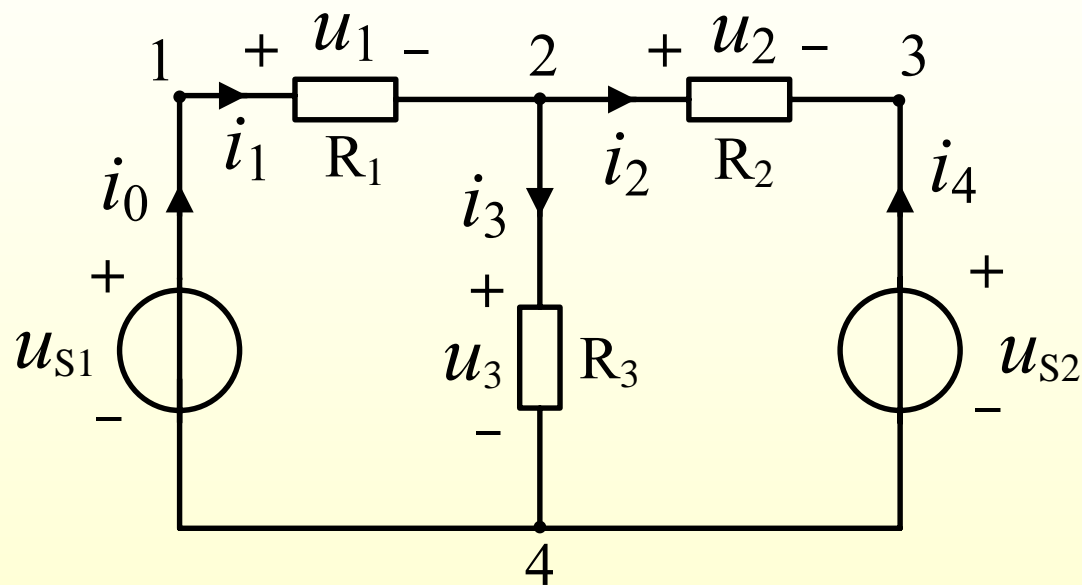
$$u_1 = R_1 i_1$$

$$u_2 = R_2 i_2$$

$$u_3 = R_3 i_3$$

$$u_{14} = u_{s1}$$

$$u_{34} = u_{s2}$$



VCR方程彼此独立

(2) KCL的独立性

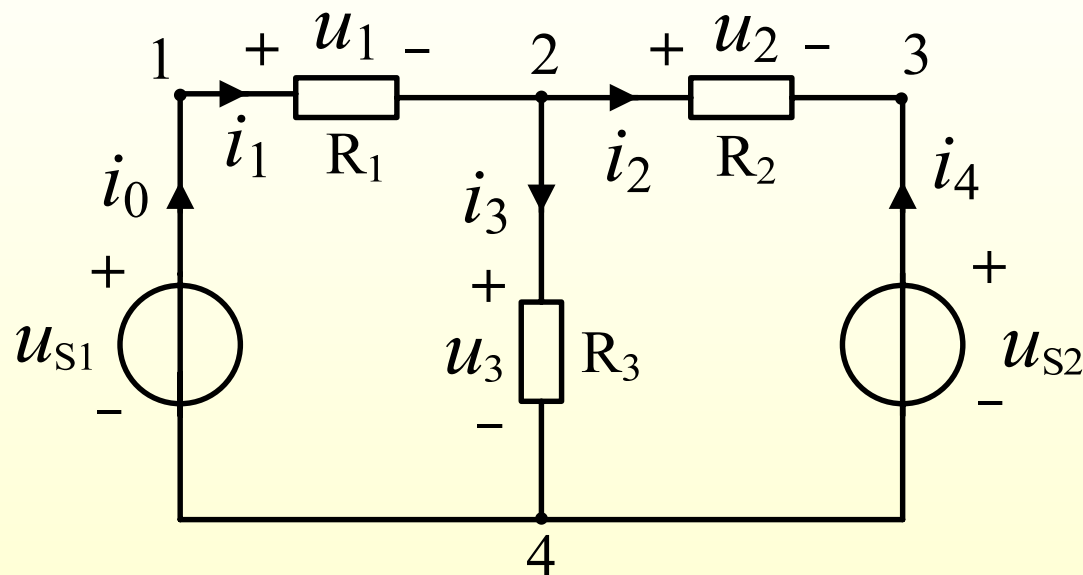
假设流入为正，结点1, 2, 3, 4的KCL方程：

$$i_0 - i_1 = 0$$

$$i_1 - i_2 - i_3 = 0$$

$$i_2 + i_4 = 0$$

$$-i_0 + i_3 - i_4 = 0$$



4个方程中只有3个是独立的，且为任意的3个。

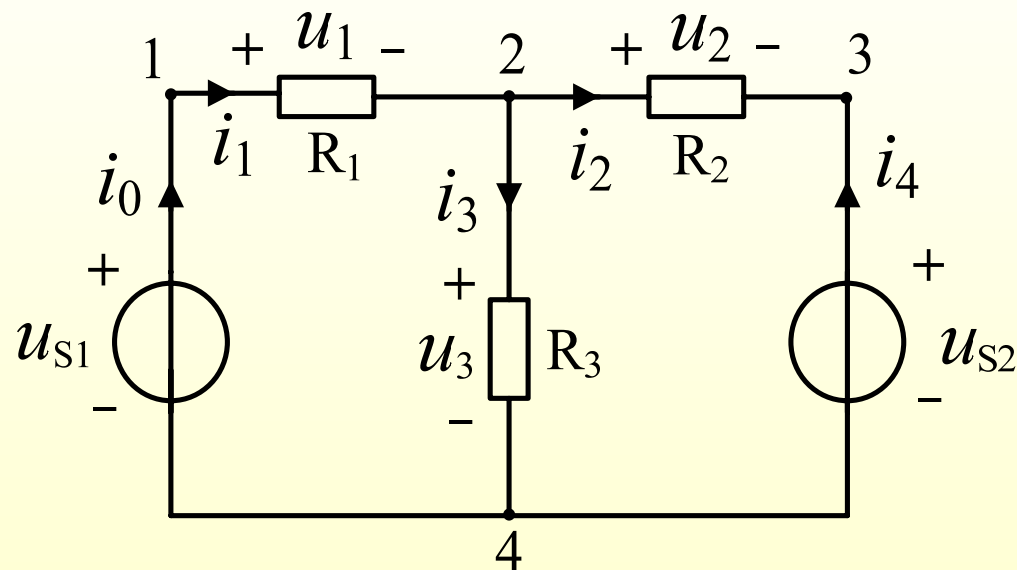
(3) KVL的独立性

顺时针绕行，则3个回路的KVL方程为：

$$u_1 + u_3 - u_{s1} = 0$$

$$u_2 - u_3 + u_{s2} = 0$$

$$u_1 + u_2 + u_{s2} - u_{s1} = 0$$



3个方程中只有2个是独立的，且为任意的2个。



■ 关于两类约束方程独立性的结论

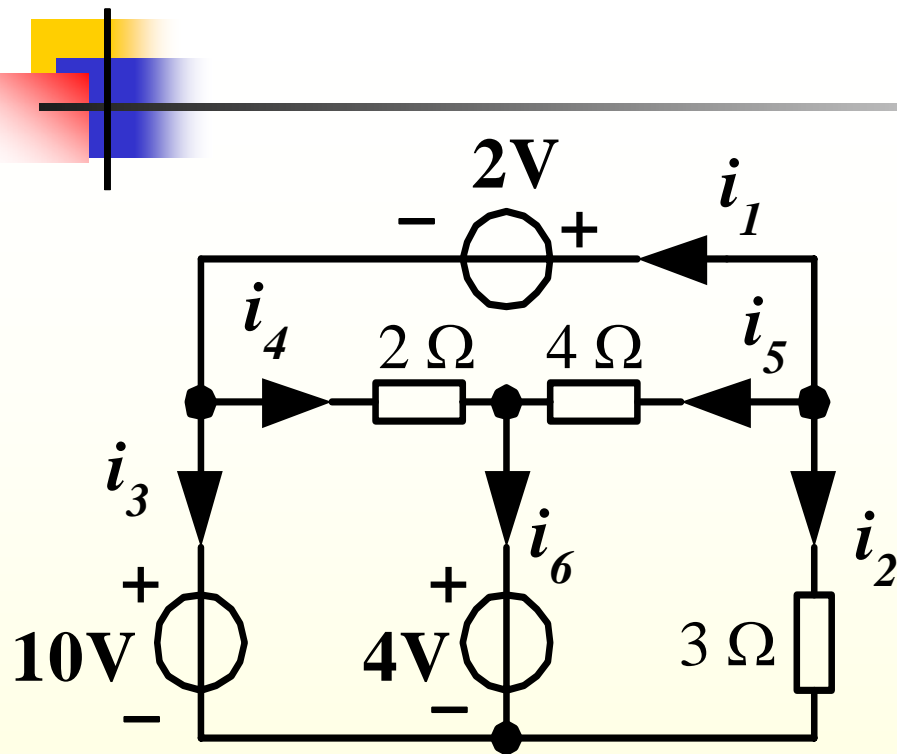
设电路有 b 条支路， n 个节点，则

1. b 条支路的VCR方程彼此独立；

2. 任意的 $n-1$ 个节点的KCL彼此独立，这 $n-1$ 个节点称为独立节点。

3. 该电路有 $(b-n+1)$ 个独立回路，其KVL方程彼此独立，且独立回路数=网孔数。

❖ 以上共计 $2b$ 个方程，可同时解出 b 条支路的电压、电流共 $2b$ 个变量。



例：求各支路电压和支路电流。
(图中电压和电流均为关联参考方向)

解：

KVL:

$$u_2 = 2V + 10V = 12V$$

$$u_4 = 10V - 4V = 6V$$

$$u_5 = u_2 - 4V = 8V$$

VCR:

$$i_2 = u_2 / 3\Omega = 4A$$

$$i_4 = u_4 / 2\Omega = 3A$$

$$i_5 = u_5 / 4\Omega = 2A$$

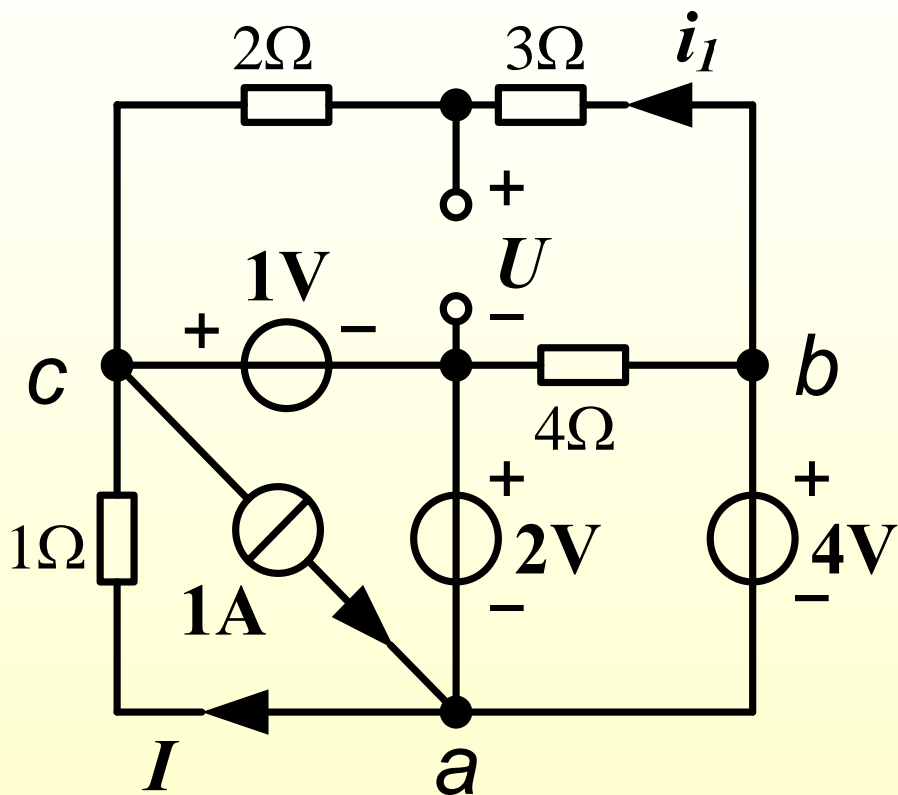
KCL:

$$i_1 = -i_2 - i_5 = -6A$$

$$i_3 = i_1 - i_4 = -9A$$

$$i_6 = i_4 + i_5 = 5A$$

例：求 U 和 I 。



解：设 a, b, c 及 i_1 如图

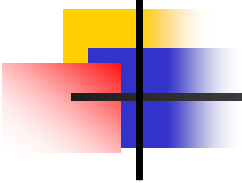
$$\because U_{ac} = -2 - 1 = -3\text{V}$$

$$\therefore I = U_{ac} / 1\Omega = -3\text{A}$$

$$\because U_{bc} = 4 - 2 - 1 = 1\text{V}$$

$$i_1 = U_{bc} / 5\Omega = 0.2\text{A}$$

$$\text{则 } U = 2i_1 + 1\text{V} = 1.4\text{V}$$



作业: (1) 图示电路中电流 $i_0=1\text{A}$, 求
电流源 i_s 发出的功率。

1-16 (p31页)