



哈爾濱工業大學

第1章 基尔霍夫定律与电路元件

主讲教师 刘洪臣



提要

本章内容包括三部分：首先介绍常用电路变量即电流、电压的定义及电功率与能量的计算，重点是建立参考方向的概念；然后介绍基尔霍夫两个定律，包括它们的基本陈述和推广；最后介绍电阻、独立电源和受控电源等电路元件，重点是这些元件的端口方程。

本章目次

1 电压 电流及参考方向

2 电功率与电能

3 基尔霍夫电流定律

4 基尔霍夫电压定律

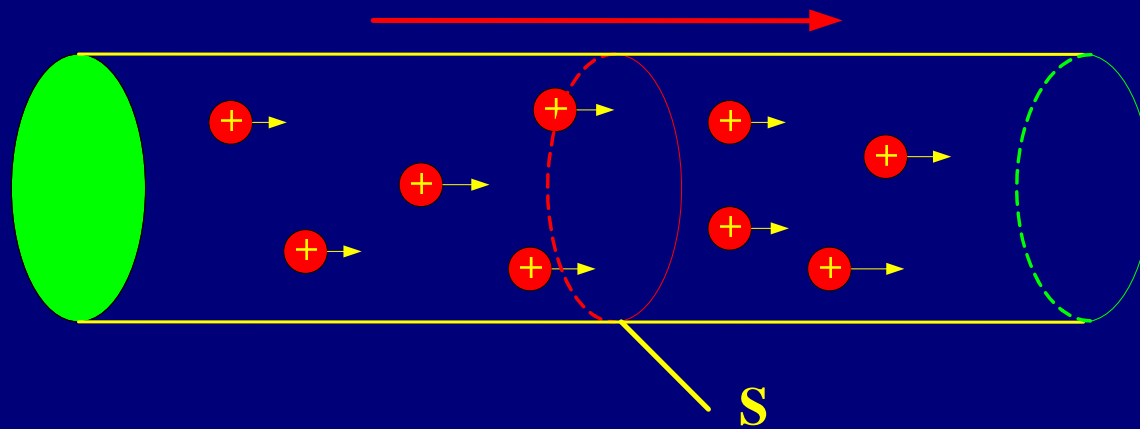
5 电阻元件

6 独立电源

7 受控电源

基本要求：熟练掌握电压、电流的定义和参考方向的概念。

● 1 电流



电流定义示意图

定义：{ 荷电质点的有序运动形成电流。
 设在时间段 Δt 内,通过某截面的电荷量的代数和为 Δq

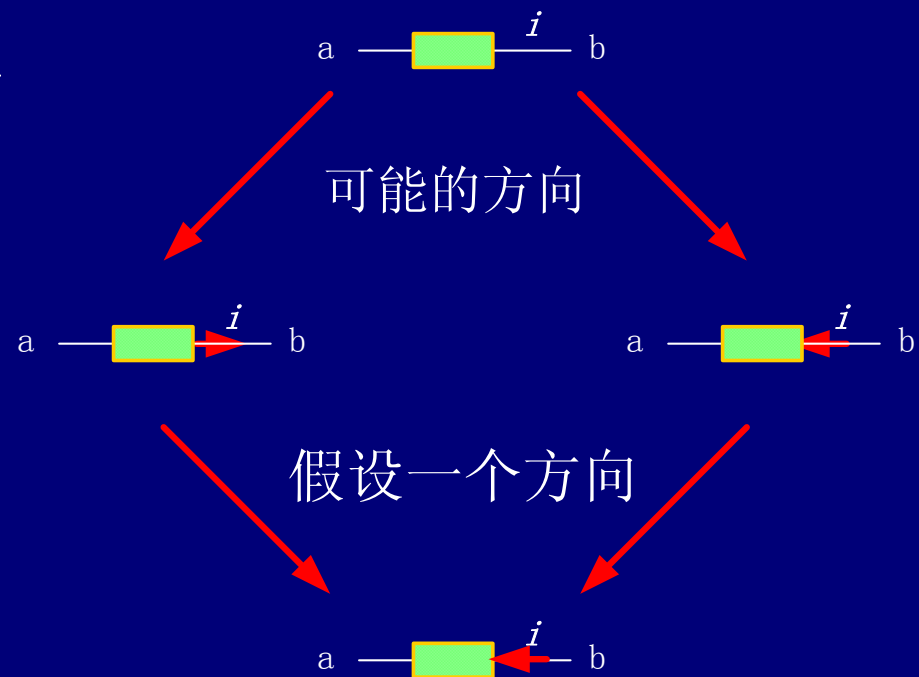
则定义 $i \stackrel{\text{def}}{=} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt}$ 单位：安培 (A)

称为电流（用符号 i 表示），其方向规定为正电荷运动的方向。

电流方向的表示方法：

参考方向：任意假设的电流的方向

参考方向及真实方向的关系



$i > 0$ 真实方向与参考方向一致；

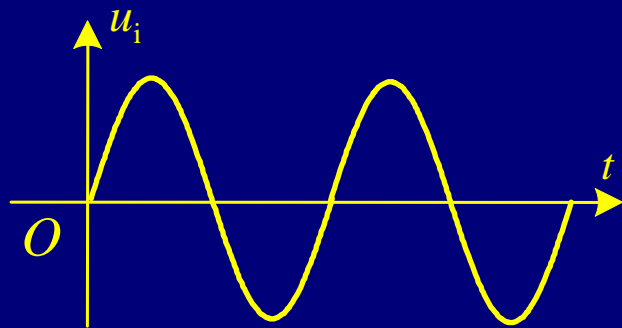
$i < 0$ 真实方向与参考方向相反。

注：参考方向标定之后就不能再改变

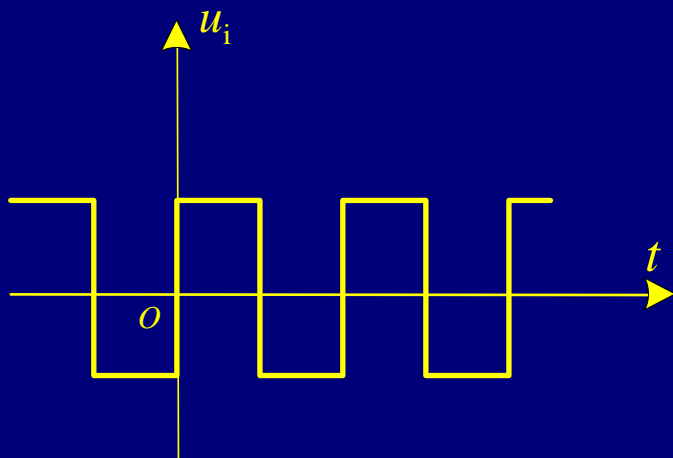
参考方向定义示意图

{ 直流： i 的量值和方向不随时间变化的电流称为直流
(DC)，用大写字母 I 表示
交流： i 随时间作周期性变化且平均值为零的电流称为交流
(AC)，用小写字母 i 或 $i(t)$ 表示

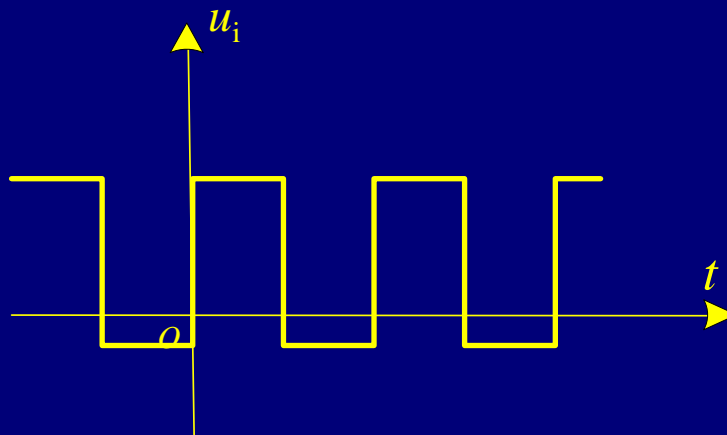
判断下列信号哪些是交流信号，哪些不是交流信号



(a)



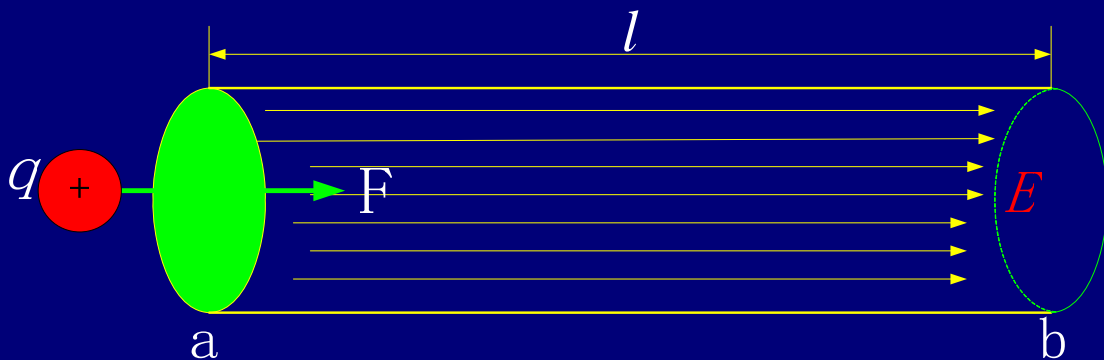
(b)



(c)

● 2 电压、电位和电动势

电压：



电压定义示意图

试探电荷 q 在电场中所受到的电场力为 $\vec{F} = q\vec{E}$

$\vec{E} = \vec{E}_c + \vec{E}_i + \vec{E}_e$ \vec{E}_c ——库仑电场强度； \vec{E}_i ——感应电场强度；
 \vec{E}_e ——局外电场强度

电场力 \vec{F} 将试探电荷 q 从 a 点沿路线 l 移动到 b 点所做的功为

$$A = \int_l \vec{F} \cdot d\vec{l} = q \int_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = q \int_l (\vec{E}_c + \vec{E}_i + \vec{E}_e) \cdot d\vec{l} = qu_{ab(l)}$$

$$u_{ab(l)} \stackrel{\text{def}}{=} \int_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_l (\vec{E}_c + \vec{E}_i + \vec{E}_e) \cdot d\vec{l}$$

$u_{ab(l)}$ 是电场力将单位正电荷由 a 点沿路线 l 移动到 b 点所作的功，称为由 a 点到 b 点沿路线 l 的电压。

在集中参数电路中，可以选择不包括感应电场 和局外电场而只包含库仑电场的路径。在此条件下， a, b 两点之间的电压与计算路径无关，称为端电压，记作：

$$u_{ab} = \int_a^b \vec{E}_c \cdot d\vec{l} \quad \text{单位：伏特 (V)}$$

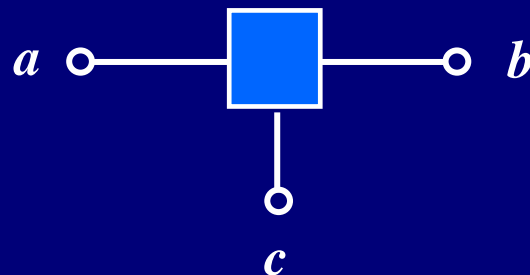
电位： 任选一点 p 作为电位参考点，电路中某点与参考点之间的电压称为该点的**电位**，用 φ 表示。有了电位的概念，两点之间的电压便等于这两点的电位之差。

例如在右图中，若选 c 点为参考点，则 a 、 b 两点的电位分别为：

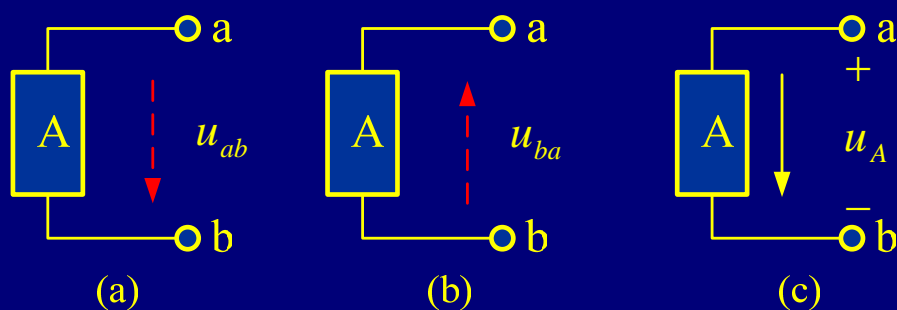
$$\varphi_a = u_{ac}$$

$$\varphi_b = u_{bc}$$

$$u_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$$



电压参考方向的表示法



电压参考方向的表示法

关联参考方向



非关联参考方向



电动势： 单位正电荷在局外电场和感应电场的作用下从 a 点沿路线 l 移动到 b 点这些力所作的功称为从 a 到 b 沿路线 l 的**电动势**，即

$$e_{ab} = \int_l (\vec{E}_i + \vec{E}_e) \cdot d\vec{l}$$

电压、电位、电动势具有相同的单位： V


基本要求：掌握电功率、电能的概念和计算方法。

电功率[常简称功率(power)]是用以衡量电能转换或传输速率的物理量。

定义：微段时间 Δt 内所转换或传输的电能 Δw 与 Δt 之比，当后者趋于零时的极限，即：

$$p = \frac{dw}{dt} = ui$$
$$p \stackrel{\text{def}}{=} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta w}{\Delta t} = \frac{dw}{dt}$$
$$dw = udq = uidt$$

电荷 dq 从 a 点移到 b 点时
电场力所做的功即电路
吸收的能量

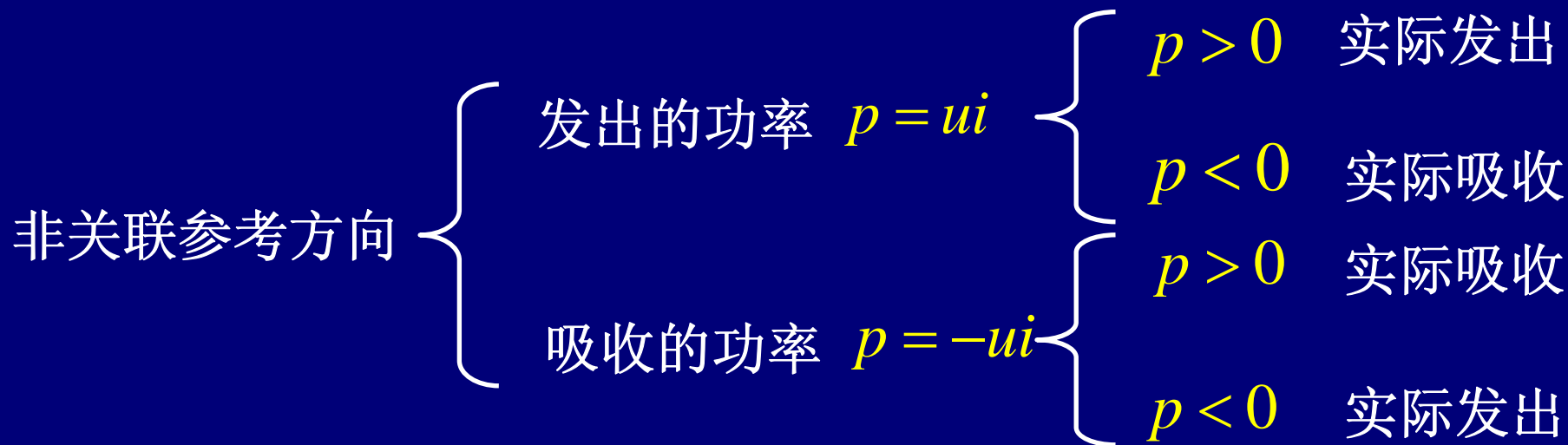
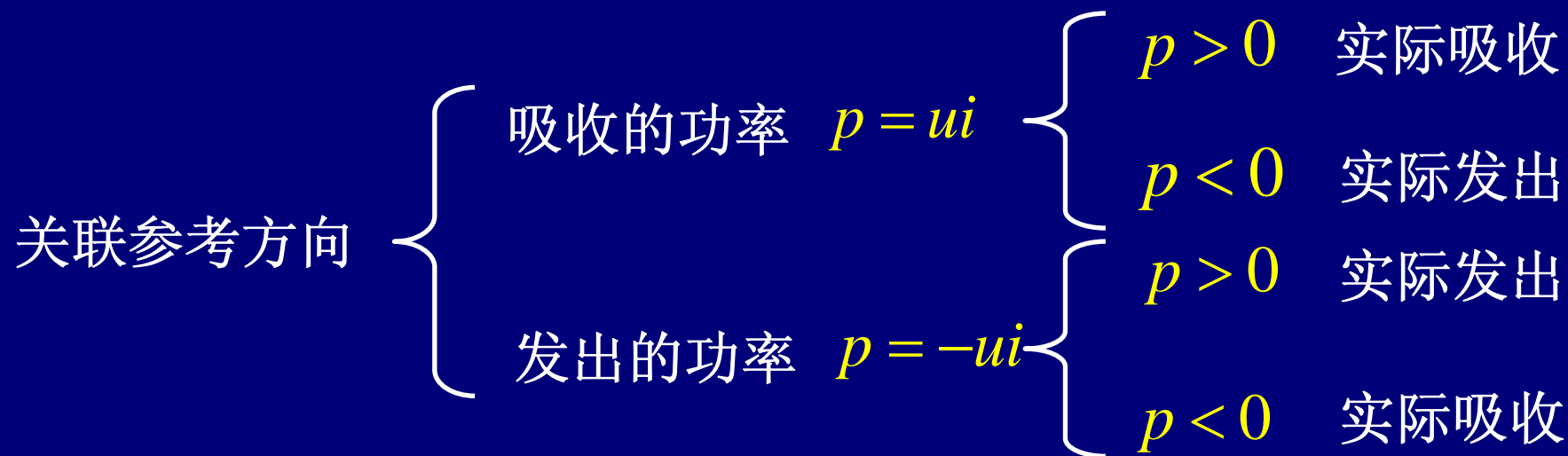


The diagram shows a horizontal circuit with a voltage source u and a current i flowing from point a to point b . The voltage source is represented by a blue rectangle with a '+' sign at a and a '-' sign at b . The current i is indicated by an arrow pointing from a to b .

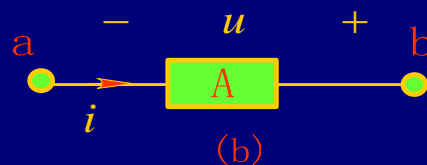
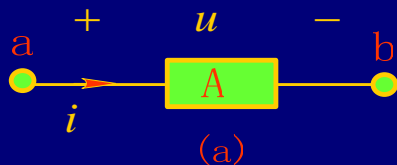
关联参考方向下，结果为正值，则表明该电路实际上是吸收功率；若结果为负值，则是发出功率。

单位：瓦特 (W)

功率与参考方向之间的关系



示例:



若 (a) 中的电压 $u = -10\text{V}$, $i = 2\text{A}$, 求 A 吸收的功率;

若 (b) 中的电压 $u = 10\text{V}$, $i = 2\text{A}$, 求 A 吸收的功率。

解: (a) 中电压、电流取为关联参考方向, 吸收功率为

$$p = ui = -10\text{V} \times 2\text{A} = -20\text{W}$$

(b) 中电压、电流取为非关联参考方向, 吸收功率为

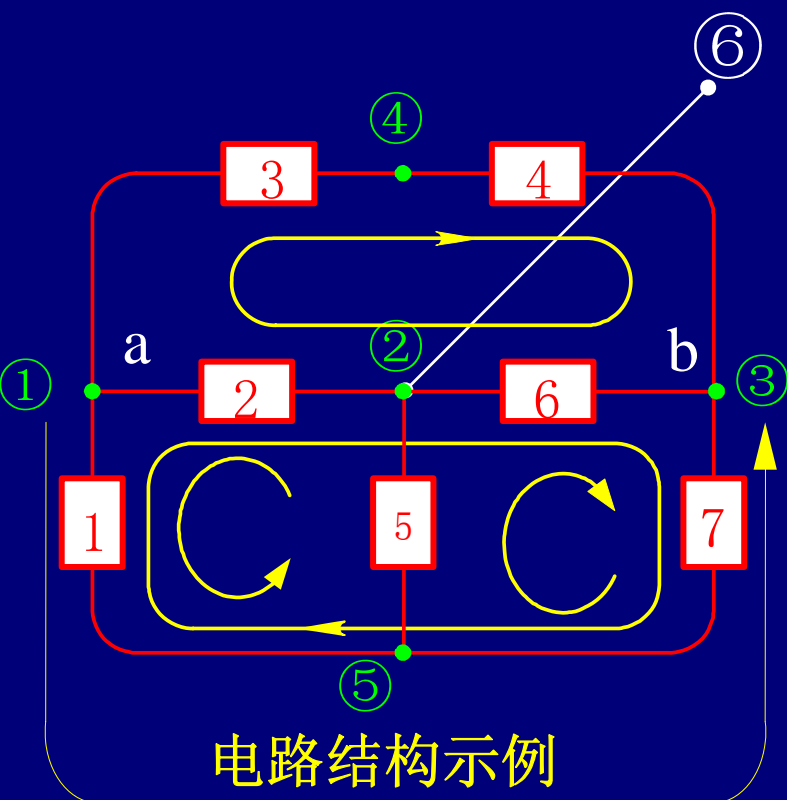
$$p = -ui = -10\text{V} \times 2\text{A} = -20\text{W}$$

能量: 在 t_0 到 t 的时间内, 电路吸收(电压、电流为关联参考方向时)或发出(电压、电流为非关联参考方向时)的能量为

$$w(t) = \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi \quad \text{单位: 焦耳 (J)}$$

基本要求：掌握表述电路结构的基本术语，透彻理解基尔霍夫电流定律的内容。

● 1 电路结构



支路：每个二端元件称为一条支路

节点：若干支路的联接点

路径：在两节点a, b之间, 由m 条不同的支路和m-1个不同的节点(不含a和b)依次联接成的一条通路称为a到b的路径

回路：闭合的路径

网孔：内部或外部不包含任何支路的回路

短路：一条支路, 不管其电流是任何有限值, 电压恒等于零

断路：一条支路, 不管其电压是任何有限值, 电流恒等于零

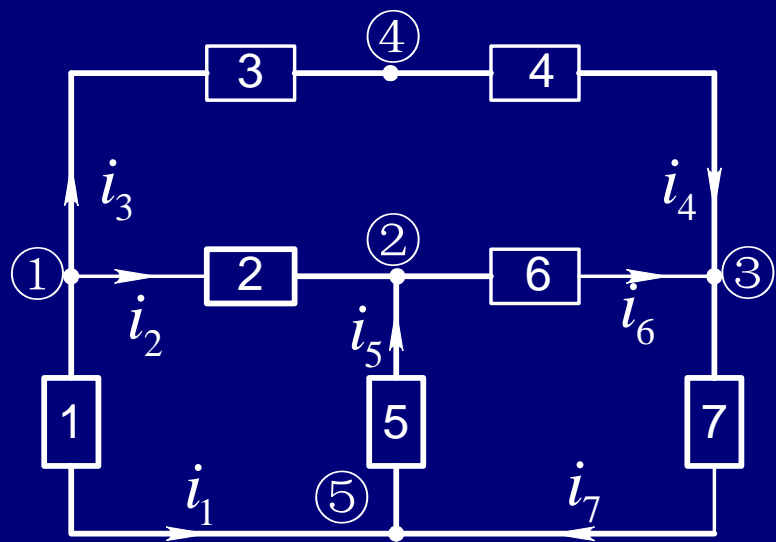
平面电路和非平面电路

● 2 基尔霍夫电流定律

基尔霍夫电流定律(Kirchhoff's Current Law, 简称KCL) 表述为: 在集中参数电路中, 任一时刻流出(或流入)任一节点的支路电流代数 and 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。



基尔霍夫电流定律示例

根据左图, 列写KCL方程

1) 基本表述方式——对节点

节点①: $i_1 + i_2 + i_3 = 0$

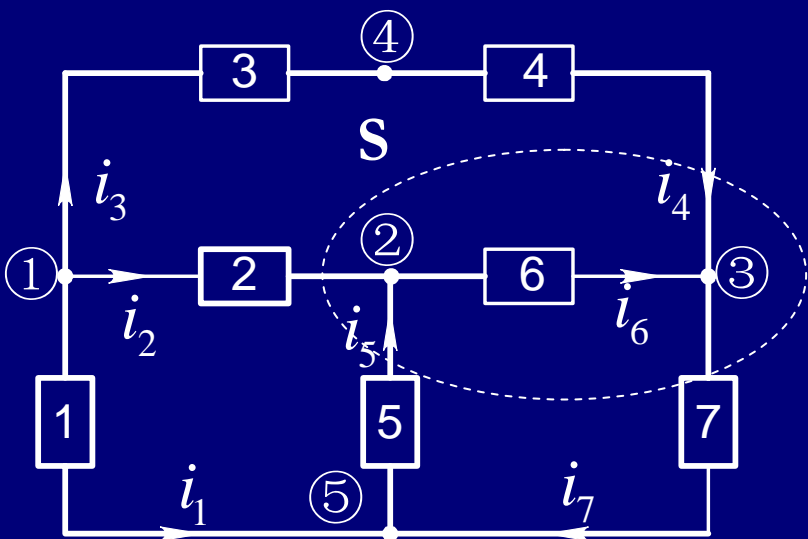
节点②: $-i_2 - i_5 + i_6 = 0$

节点③: $-i_4 - i_6 + i_7 = 0$

节点④: $-i_3 + i_4 = 0$

节点⑤: $-i_1 + i_5 - i_7 = 0$

2) 对闭合边界:



基尔霍夫电流定律示例

1、在集中参数电路中，任一时刻流出(或流入)任一闭合边界 S 的支路电流代数数和等于零，即

$$\sum i_k = 0 \quad (i_k \text{ 表示与闭合边界相切割的各支路电流})$$

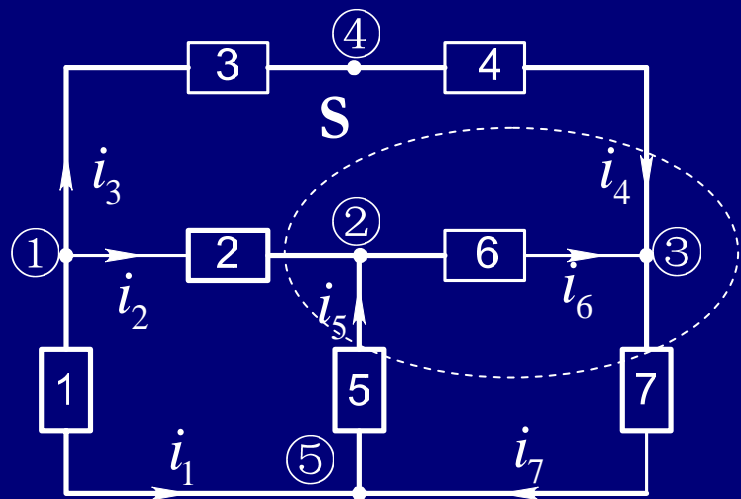
规定: i_k 参考方向为流出闭合边界时, i_k 前面取“+”号; 流入闭合边界时, i_k 前面取“-”号。

对闭合边界列写KCL方程: $-i_2 - i_4 - i_5 + i_7 = 0$ 广义KCL方程

$$\left. \begin{array}{l} \text{节点②: } -i_2 - i_5 + i_6 = 0 \\ \text{节点③: } -i_4 - i_6 + i_7 = 0 \end{array} \right\} + \Longrightarrow -i_2 - i_4 - i_5 + i_7 = 0$$

因此, 广义KCL方程是其内部所含节点上的KCL方程之和

3) 推论:



$$\begin{aligned}
 \text{节点②: } & -i_2 - i_5 + i_6 = 0 \\
 \text{节点③: } & -i_4 - i_6 + i_7 = 0 \\
 \text{节点⑤: } & -i_1 + i_5 - i_7 = 0 \\
 \text{节点②: } & i_6 = i_2 + i_5 \\
 \text{节点③: } & i_7 = i_4 + i_6 \\
 \text{节点⑤: } & i_5 = i_7 + i_1
 \end{aligned}$$

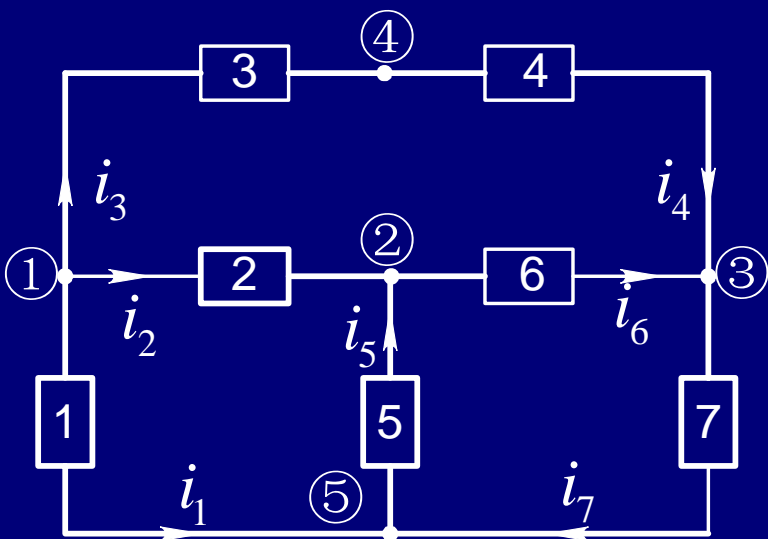
基尔霍夫电流定律示例

任一时刻，流出任一节点(或闭合边界)电流的代数总和等于流入该节点(或闭合边界)电流的代数总和，即

$$\sum i_{\text{流入}} = \sum i_{\text{流出}}$$

闭合边界上KCL: $i_7 = i_2 + i_4 + i_5$

4) 方程的独立性:



$$\left. \begin{aligned} \text{节点①: } & i_1 + \cancel{i_2} + \cancel{i_3} = 0 \\ \text{节点②: } & \cancel{i_2} - i_5 + \cancel{i_6} = 0 \\ \text{节点③: } & \cancel{i_4} - \cancel{i_6} + i_7 = 0 \\ \text{节点④: } & \cancel{i_3} + \cancel{i_4} = 0 \\ \text{节点⑤: } & -i_1 + i_5 - i_7 = 0 \end{aligned} \right\}$$

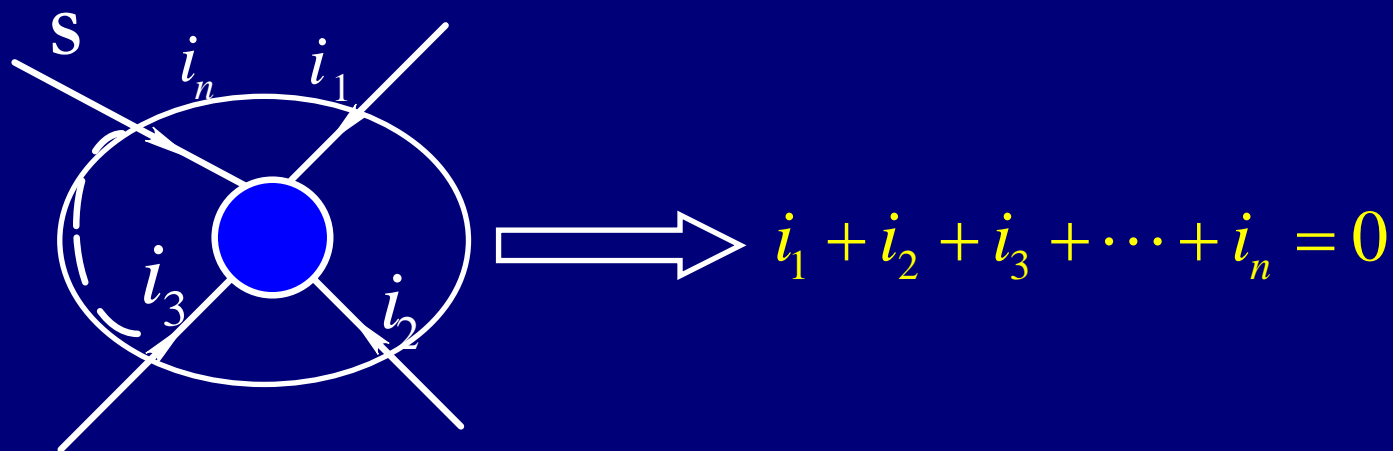
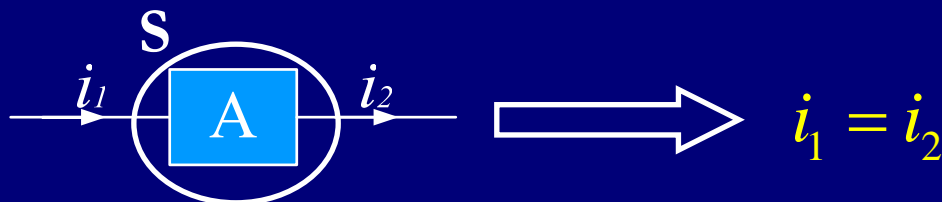
基尔霍夫电流定律示例

$$i_1 - i_5 + i_7 = 0$$

不难验证：图中任一节点的**KCL**方程都是其余4个节点**KCL**方程的代数和，任一闭合边界的**KCL**方程都是闭合边界内节点**KCL**方程的代数和。但是，如果略去任一节点的**KCL**方程，其余4个节点的**KCL**方程便是一组独立方程。

结论：在含有 n 个节点的电路中，任一 $n-1$ 个节点的**KCL**方程是一组独立方程，这些节点称为独立节点。

5) 二端元件流入一个端子的电流等于流出另一个端子的电流，二端元件只有一个电流。



6) 任一时刻，流入或流出一个多端元件的端子电流之和为零

例题 1.1

电路如图所示。根据已知支路电流求出其它支路电流。

解

节点①: $i_1 = 1\text{A} + 2\text{A} = 3\text{A}$

节点②: $i_2 = i_1 - (-5)\text{A} - (-4)\text{A} = 12\text{A}$

节点③: $i_3 = 11\text{A} + (-5)\text{A} = 6\text{A}$

节点④: $i_4 = i_2 + 6\text{A} - 3\text{A} = 15\text{A}$

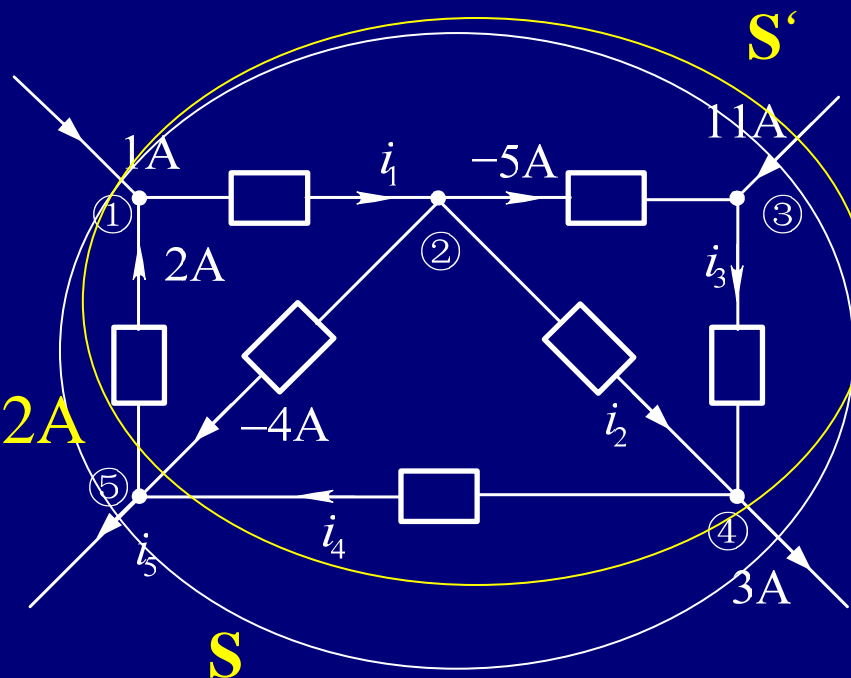
节点⑤: $i_5 = i_4 + (-4)\text{A} - 2\text{A} = 9\text{A}$

若此题只求电流 i_5 ，对闭合边界 S 列写 KCL 方程，一步便得

$$i_5 = 1\text{A} + 11\text{A} - 3\text{A} = 9\text{A}$$

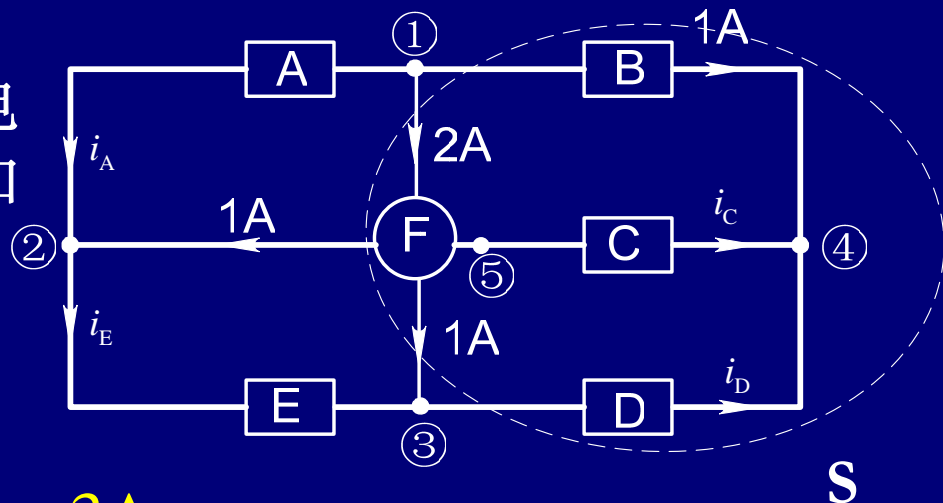
若此题只求电流 i_4 ，对闭合边界 S 列写 KCL 方程，一步便得

$$i_4 = 2\text{A} + 1\text{A} + 11\text{A} - 3\text{A} + 4\text{A} = 15\text{A}$$



[补充1.1]

电路如图所示。已知部分支路电流，求出其它未知支路电流。如果只求 i_D ，能否一步求得？



[解]

节点①: $i_A = -1A - 2A = -3A$

节点⑤: $i_C = 2A - 1A - 1A = 0A$

节点④: $i_D = -1A - i_C = -1A$

节点③: $i_E = i_D - 1A = -2A$

若此题只求电流 i_D ，可以一步求得。

$$i_D + 1A + 2A = 1A + 1A \Rightarrow i_D = -1A$$

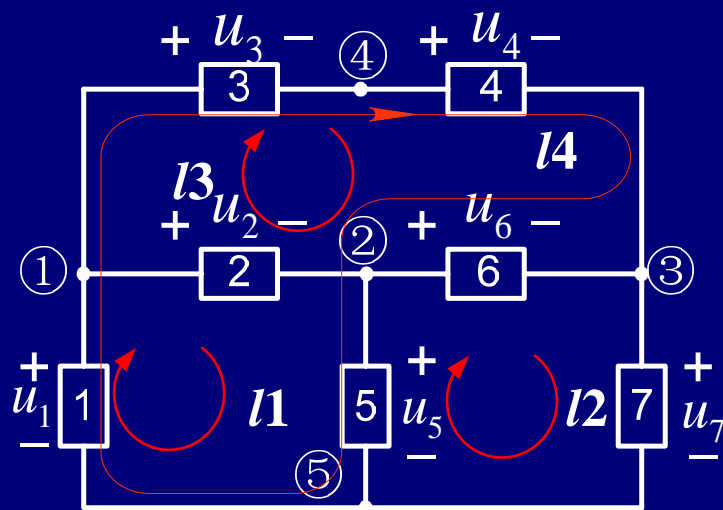
基本要求：掌握基尔霍夫电压定律的内容，并深刻理解其含义。

1 基尔霍夫电压定律

基尔霍夫电压定律(Kirchhoff's Voltage Law, 简称KVL)表述为：在集中参数电路中，任一时刻沿任一回路各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。



基尔霍夫电压定律示例

根据左图，列写KVL方程

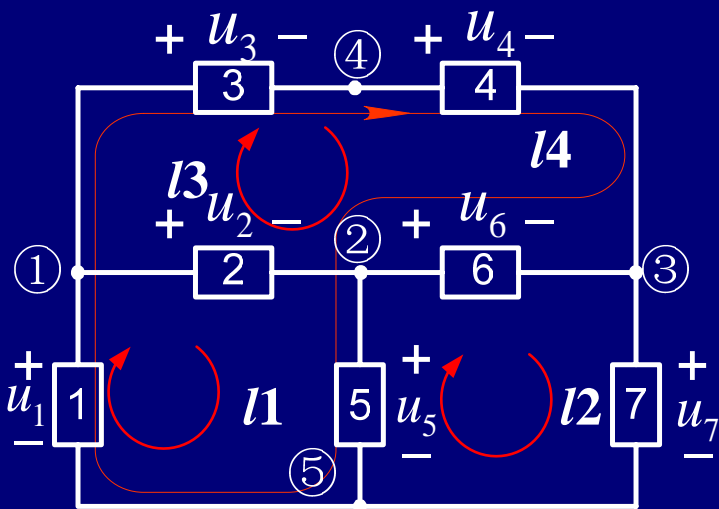
回路 $l1$: $-u_1 + u_2 + u_5 = 0$

回路 $l2$: $-u_5 + u_6 + u_7 = 0$

回路 $l3$: $u_3 + u_4 - u_6 - u_2 = 0$

回路 $l4$: $-u_1 + u_3 + u_4 - u_6 + u_5 = 0$

2 基尔霍夫电压定律的推论



基尔霍夫电压定律示例

回路 $l1$: $-u_1 + u_2 + u_5 = 0$

回路 $l2$: $-u_5 + u_6 + u_7 = 0$

回路 $l3$: $u_3 + u_4 - u_6 - u_2 = 0$

回路 $l4$: $-u_1 + u_3 + u_4 - u_6 + u_5 = 0$

回路 $l1$: $u_2 + u_5 = u_1$

回路 $l2$: $u_6 + u_7 = u_5$

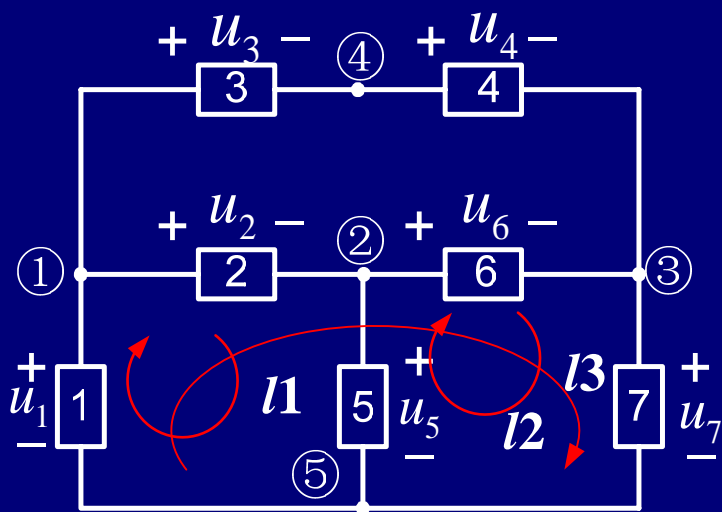
回路 $l3$: $u_3 + u_4 = u_6 + u_2$

回路 $l4$: $u_3 + u_4 + u_5 = -u_1 + u_6$

推论：沿任一回路，各支路电压降(voltage drop)的代数和等于电压升(voltage rise)的代数和，即

$$\sum u_{\text{电压降}} = \sum u_{\text{电压升}}$$

3 在集中参数电路中，任意两点之间的电压具有确定值，与计算路径无关



基尔霍夫电压定律示例

$$u_{15} = u_1$$

$$u_{15} = u_2 + u_5$$

$$u_{15} = u_2 + u_6 + u_7$$

回路 l_1 : $u_1 = u_2 + u_5$

回路 l_2 : $u_1 = u_2 + u_6 + u_7$

$$u_{25} = u_5$$

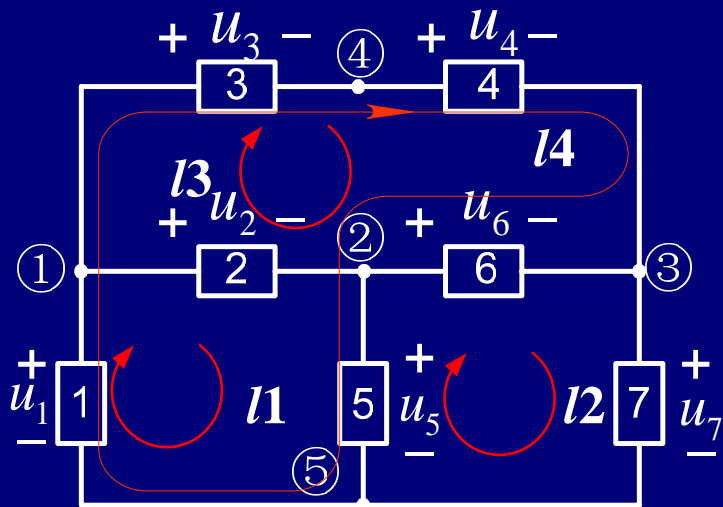
$$u_{25} = u_1 - u_2$$

$$u_{23} = u_6 + u_7$$

回路 l_1 : $u_1 - u_2 = u_5$

回路 l_3 : $u_5 = u_6 + u_7$

4 KVL方程独立性的讨论



基尔霍夫电压定律示例

$$\text{回路} l1: -u_1 + \cancel{u_2} + u_5 = 0$$

$$\text{回路} l3: u_3 + u_4 - u_6 - \cancel{u_2} = 0$$

$$\text{回路} l2: -u_5 + u_6 + u_7 = 0$$

$$\text{回路} l4: -u_1 + u_3 + u_4 - u_6 + u_5 = 0$$

$$-u_1 + u_3 + u_4 - u_6 + u_5 = 0$$

可以验证：任一回路的KVL方程均是组成该回路的各个网孔上KVL方程的代数和。但是每个网孔的KVL方程却不能表示成其余网孔KVL方程的代数和或其它线性组合。由此可见，平面电路网孔上的KVL方程是一组独立方程。

可以证明：平面电路的网孔数即独立KVL方程的个数等于 $b-(n-1)$ 。

选取独立回路的方法：

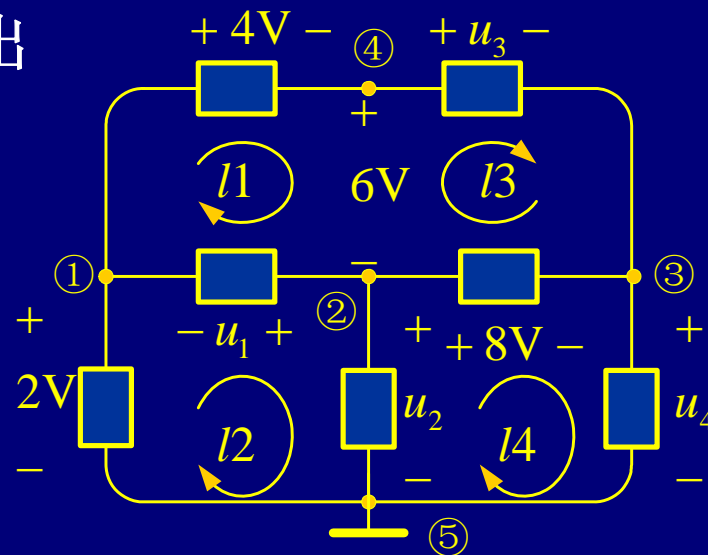
1) 选网孔

2) 新选的路径中要包含已选的路径中没有的支路，那么，新选的路径相对于已选的路径而言是独立的

例题 1.2

电路如图所示。已知部分支路电压，求出其它支路电压。

解 分别对包含待求电压的回路列写KVL方程，并将待求电压写在等号左边得



例题1.2

回路 $l1$: $4V + 6V + u_1 = 0 \Rightarrow u_1 = -4V - 6V = -10V$

回路 $l2$: $-u_1 + u_2 - 2V = 0 \Rightarrow u_2 = u_1 + 2V = -8V$

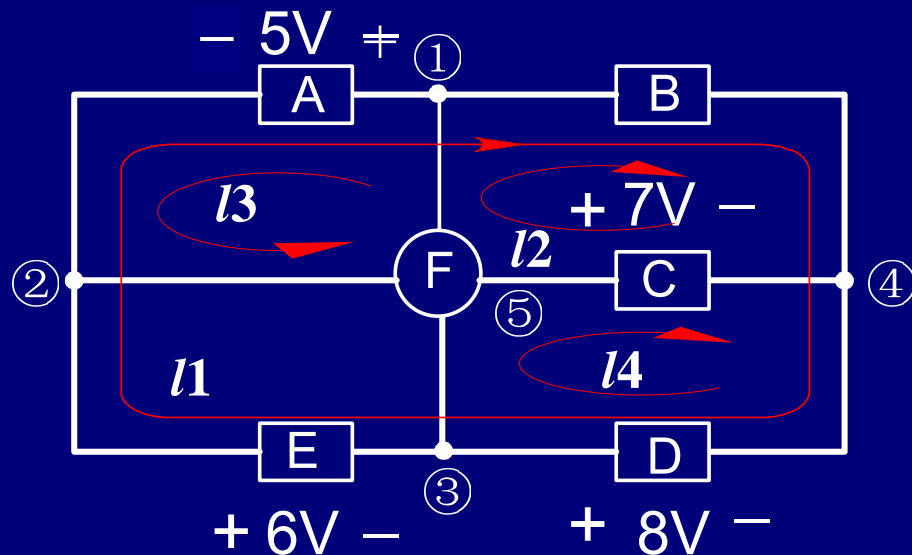
回路 $l3$: $u_3 - 6V - 8V = 0 \Rightarrow u_3 = 6V + 8V = 14V$

回路 $l4$: $8V + u_4 - u_2 = 0 \Rightarrow u_4 = -8V + u_2 = -16V$

[补充1.2]

电路如图所示。已知部分支路电压，求出其它未知支路电压， u_{14} ， u_{15} ， u_{52} ， u_{53} 。

[解]



补充1.2

回路 $l1$: $u_{14} = 5V + 6V + 8V = 19V$

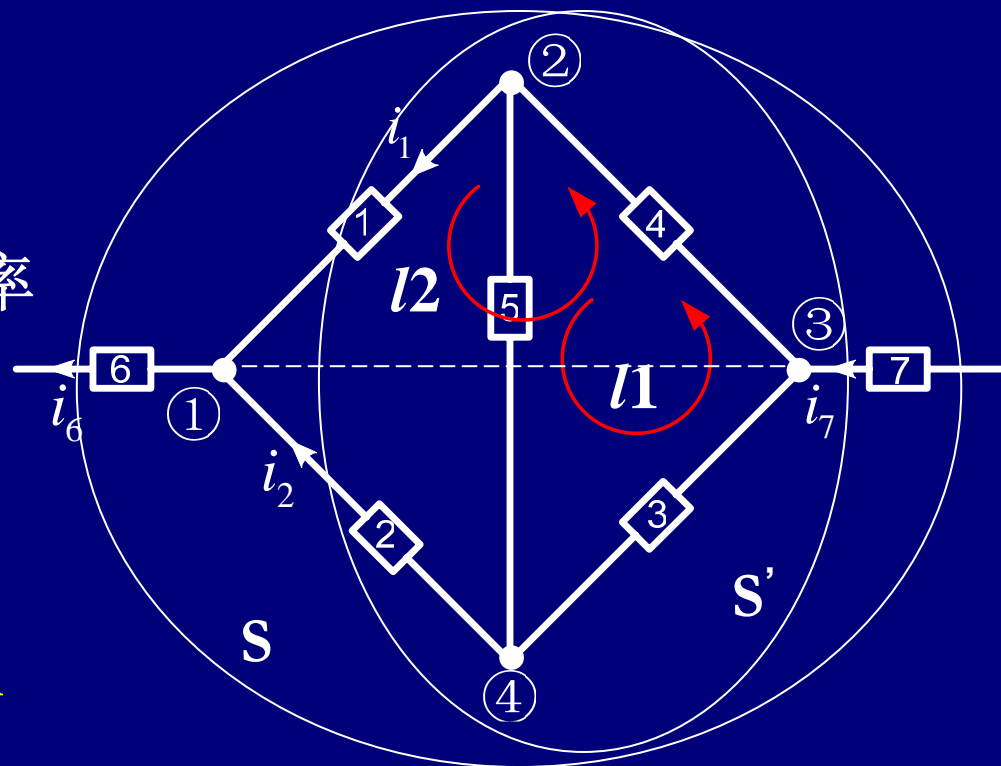
回路 $l2$: $u_{15} = u_{14} + u_{45} = 19V - 7V = 12V$

回路 $l3$: $u_{52} = u_{51} + u_{12} = -12V + 5V = -7V$

回路 $l4$: $u_{53} = u_{54} + u_{43} = 7V - 8V = -1V$

[补充1.3]

电路如图所示。已知 $i_2=1\text{A}$ ， $i_7=2\text{A}$ ， $u_{13}=-3\text{V}$ ， $u_{24}=5\text{V}$ ， $u_{34}=2\text{V}$ 。求支路1发出的功率



[解]

对闭合边界 S' 列KCL方程

$$i_1 = i_7 - i_2 = 2\text{A} - 1\text{A} = 1\text{A}$$

对回路 $l1$ 列KCL方程

$$u_{24} + u_{43} + u_{32} = 0 \Rightarrow u_{32} = -u_{24} + u_{34} = -5\text{V} + 2\text{V} = -3\text{V}$$

对回路 $l2$ 列KCL方程

$$u_{32} + u_{21} + u_{13} = 0 \Rightarrow u_{21} = -u_{32} - u_{13} = 3\text{V} + 3\text{V} = 6\text{V}$$

支路1发出的功率为 $p = -u_{21} \times i_1 = -6\text{V} \times 1\text{A} = -6\text{W}$

补充1.3

基本要求：了解电阻元件的种类，重点掌握线性电阻的欧姆定律及功率的计算。

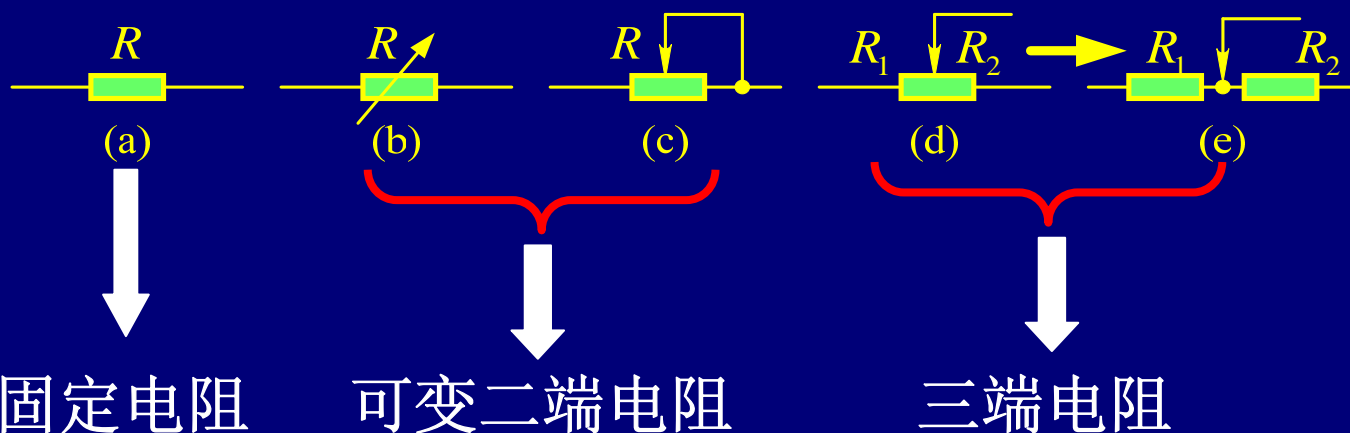


实际电阻器示例



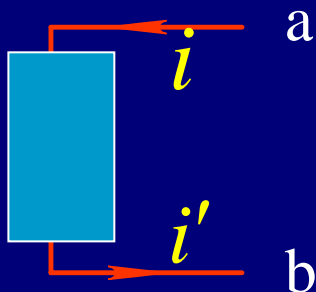
实际电阻器示例

1 电阻的符号



可变电阻

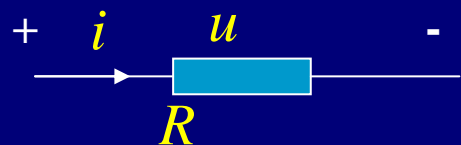
将流过相同电流的两个端子称为一个端口(port)。



如果 $i = i'$ 则称a, b之间为一个端口

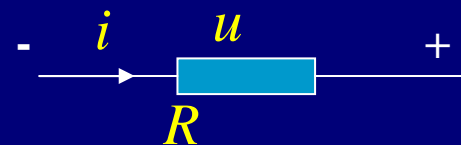
2 欧姆定律(Ohm's Law): 对于线性二端电阻, 其端口电压与电流之间成正比关系。

1) u 、 i 取关联参考方向时



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

2) u 、 i 取非关联参考方向时



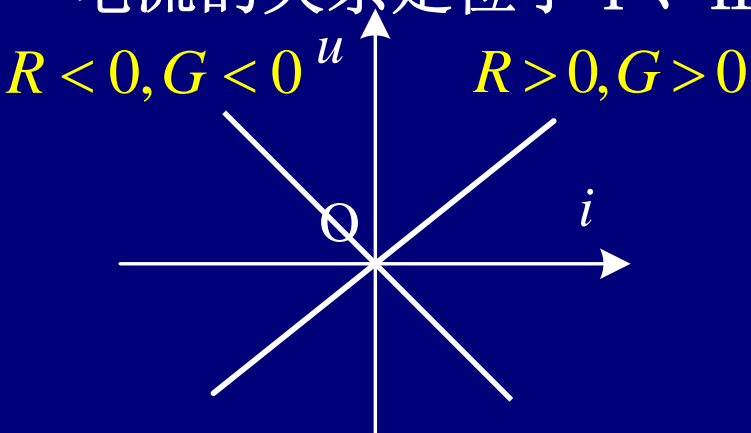
$$u = -Ri \quad \text{或} \quad i = -Gu$$

参数 R : 电阻, 单位:欧姆, 符号 Ω

参数 G : 电导, 单位: 西门子, 符号 S

对同一电阻 $R = \frac{1}{G}$ 或 $RG = 1$ 即: 电阻与电导互为倒数

在关联参考方向下，且 R 和 G 都是正值时，在 u 、 i 平面内，电压与电流的关系是位于 I、III 象限内的一条直线



负电阻: (negative resistance), 在 u 、 i 取关联参考方向时，负电阻的电压、电流关系位于 II、IV 象限，即 $R < 0$ ， $G < 0$ 。负电阻为有源元件

线性二端电阻的特性曲线

3 电阻的功率和能量

功率：关联 $p = ui = Ri^2 = Gu^2 \geq 0$

非关联 $p = -ui = Ri^2 = Gu^2 \geq 0$

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

正电阻可称为：
耗能元件
无源元件

4 非线性电阻：电压、电流关系不是过 $u-i$ 平面原点的直线，称为非线性电阻(nonlinear resistance)。

基本要求：掌握电压源和电流源的基本特性。

1 电压源



电池示例

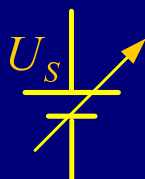


稳压电源示例

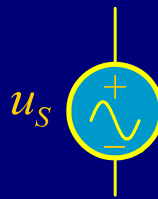
1) 电压源的符号



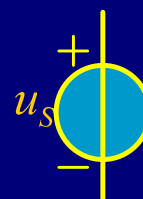
(a)



(b)



(c)



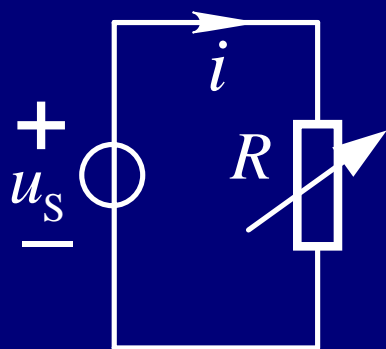
(d)

(a) 直流电压源 (b) 输出电压可调的直流电压源

(c) 交流电压源 (d) 按任意规律变化的电压源

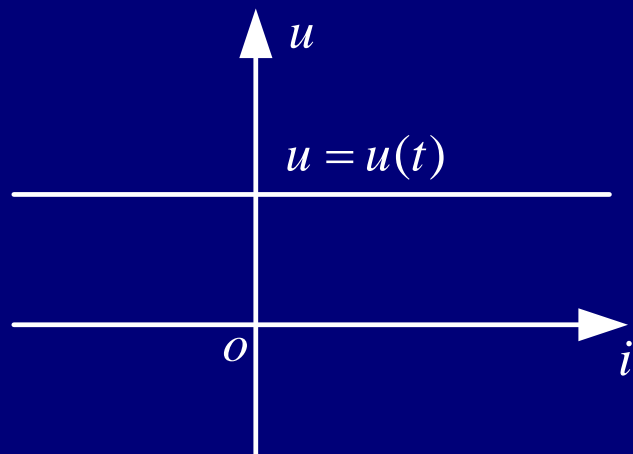
$$\begin{cases} u_s = U_s & \text{直流电压源} \\ u_s = u_s(t) & \text{时变电压源} \end{cases}$$

2) 电压源的端口特性

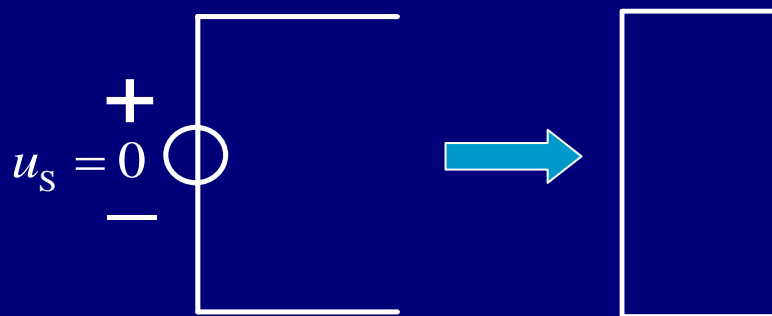


当电流在一定范围内时，它们提供的电压与电流大小无关，或为常量（如直流电源）或为随时间按确定规律变化（正弦交流电源）

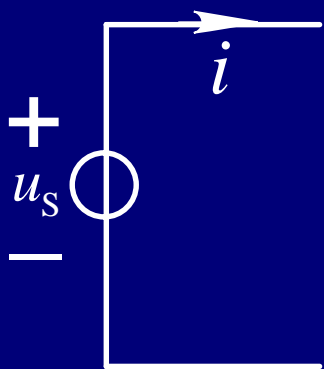
特性： 电压源能够提供确定的电源电压 u_s （称为源电压）。所谓“确定”是指源电压 u_s 与流过电压源的电流无关，电压源的电流将由与其相联的外电路来确定。



注：源电压置零时，电压源的作用相当于短路。

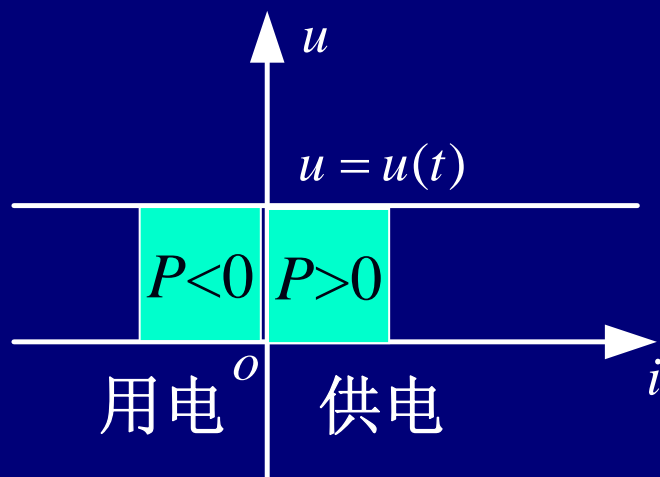


3) 电压源的功率



电压源的功率 $p = u_s i$ 发出的功率

- 当 $p > 0$ ，即电压源工作在 $i-u$ 平面的一、三象限时，电压源实际发出功率，电压源处在供电状态。



- 当 $p < 0$ ，即电压源工作在 $i-u$ 平面的二、四象限时，电压源实际吸收功率，电压源处在用电状态，此情况下，电压源已成为负载。

- 也就是说，随着电压源工作状态的不同，它既可发出功率，也可吸收功率。

例题 1.3

求图示电路中每个电压源发出的功率。

解

1 根据KVL求得各电阻电压

$$u_1 = 4V + 6V = 10V$$

$$u_2 = 8V + 6V = 14V$$

$$u_3 = 8V - 4V = 4V$$

2 由欧姆定律求出各电阻电流

$$i_1 = \frac{u_1}{20\Omega} = 0.5A \quad i_2 = \frac{u_2}{40\Omega} = 0.35A \quad i_3 = \frac{u_3}{80\Omega} = 0.05A$$

3 对各节点列写KCL方程，求得各电压源电流

$$\text{节点①: } i_4 = i_1 - i_3 = 0.45A$$

$$\text{节点②: } i_5 = i_1 + i_2 = 0.85A$$

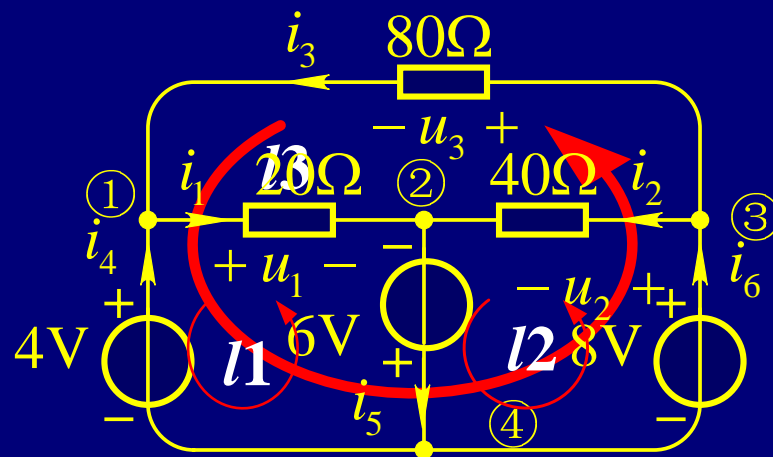
$$\text{节点③: } i_6 = i_2 + i_3 = 0.4A$$

4 计算各电压源发出的功率

$$p_4 = 4V \times i_4 = 1.8W$$

$$p_6 = 6V \times i_5 = 5.1W$$

$$p_8 = 8V \times i_6 = 3.2W$$



例题1.3

2 电流源

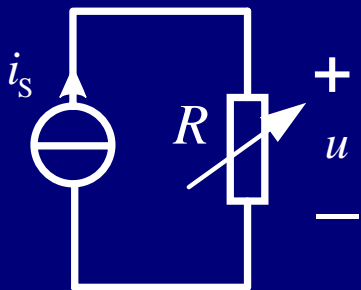


实际电流源示例

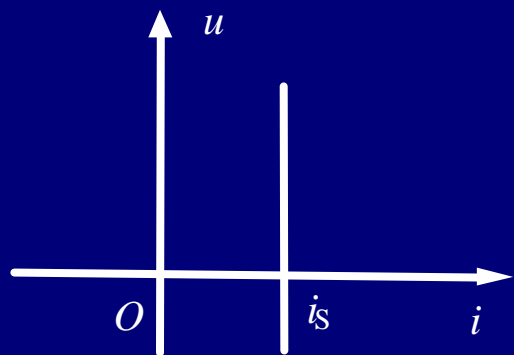


符号

1) 电流源的端口特性



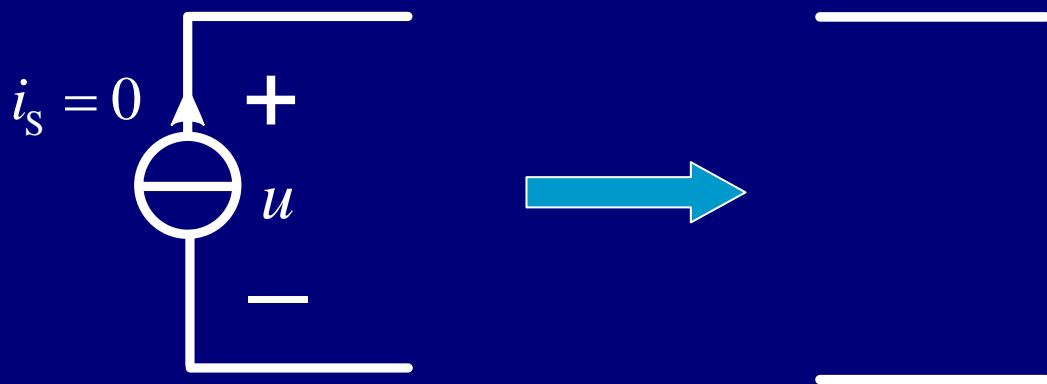
特性：能够提供确定的端口电流 i_S ，称为源电流(source current)。这里“确定”是指 i_S 与电流源端口电压无关，电流源的端口电压决定于它所接的外电路。



若 i_S 是常量，称为直流电流源，记作 $i_S = I_S$

若 i_S 是时变量，记作 $i_S = i_S(t)$ 。

2) 电流源的源电流置零时，电流源的作用相当于断路。



3) 电流源的功率

$p = ui_s$ 发出的功率

- 当 $p > 0$ ，即电流源工作在 $i-u$ 平面的二、四象限时，电流源实际发出功率，电流源处在供电状态。
- 当 $p < 0$ ，即电流源工作在 $i-u$ 平面的一、三象限时，电流源实际吸收功率，电流源处在用电状态，此情况下，电流源已成为负载。
- 也就是说，随着电流源工作状态的不同，它既可发出功率，也可吸收功率。

电压源和电流源特性的总结：

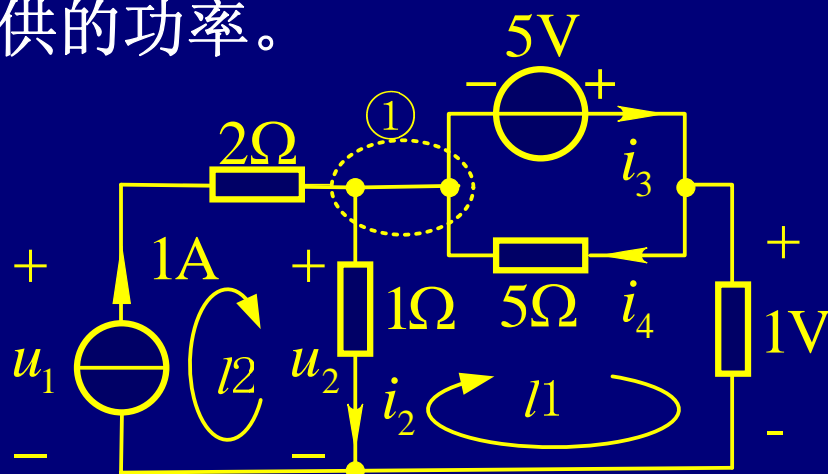
- 1) 电压源能提供一个确定的原电压，电流源能提供一个确定的原电流，故又称其为独立电源。
- 2) 电压源提供的电流和功率由外电路决定，电流源提供的电压和功率由外电路决定
- 3) 电压源和电流源在电路中能够激发电压和电流，故称为激励，将电路中被激发的电压和电流称为〔是对激励的〕响应。
- 4) 电压源和电流源作为元件模型，能无限地对外提供电能，它们属于有源元件。
- 5) 电压源的源电压置零时，电压源的作用相当于短路。电流源源电流置零时，电流源的作用相当于断路。

例题 1.4

求图示电路中电压源与电流源各自提供的功率。

解

分析：为获得电压源和电流源各自提供的功率，就必须利用KCL和KVL求得流过电压源的电流和电流源两端的电压。



例题1.4

1 由回路 l_1 , l_2 的KVL方程分别求得

$$u_2 = -5V + 1V = -4V$$

$$u_1 = 2\Omega \times 1A + u_2 = -2V$$

2 由欧姆定律求得电阻电流

$$i_2 = \frac{u_2}{1\Omega} = -4A$$

$$i_4 = \frac{5V}{5\Omega} = 1A$$

3 由节点①的KCL方程求得流过电压源的电流

$$i_3 = 1A - i_2 + i_4 = 6A$$

4 电压源和电流源发出功率

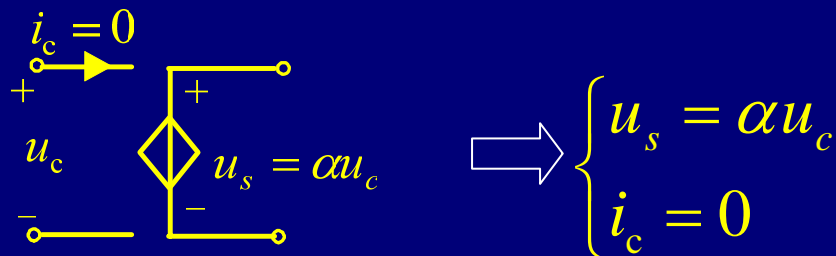
$$p_{5V} = 5V \times i_3 = 30W$$

$$p_{1A} = u_1 \times 1A = -2W$$

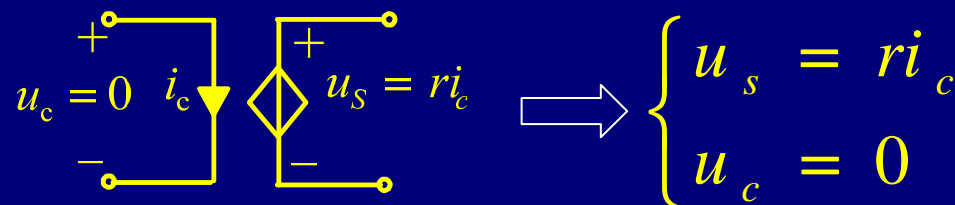
思考：电流源功率的负号说明什么？

基本要求：掌握受控电源的概念、种类和它们的特性。

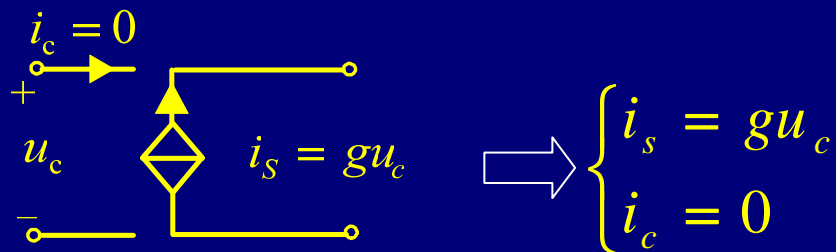
定义：源电压或源电流受电路中另一处的电压或电流控制，这类电源称为受控电源。若源电压(流)与控制电压(流)成正比关系。则此类受控源称为线性受控源。



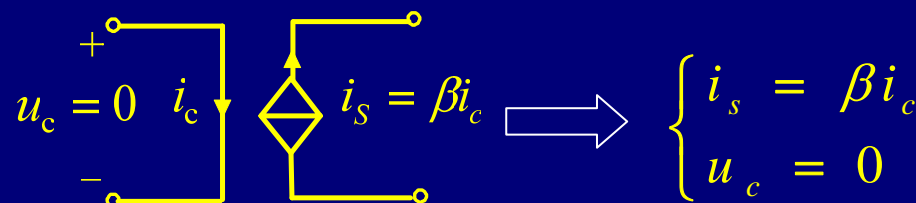
(a) 电压控制电压源 **VCVS**



(b) 电流控制电压源 **CCVS**



c 电压控制电流源 **VCCS**



电流控制电流源 **CCCS**

注：各个控制系数都是常量，具有不同的量纲；同时，受控源属于有源元件，它有两个端口，又属二端口元件。

例题 1.5

求图示电路中两个受控电源各自发出的功率。

解

1 对节点②列KCL方程求得 i_1

$$i_1 + 2i_1 = 9\text{A} \Rightarrow i_1 = 3\text{A}$$

2 电阻电压

$$u_1 = -(2\Omega \times i_1) = -6\text{V}$$

3 利用KVL方程求得受控电流源端口电压

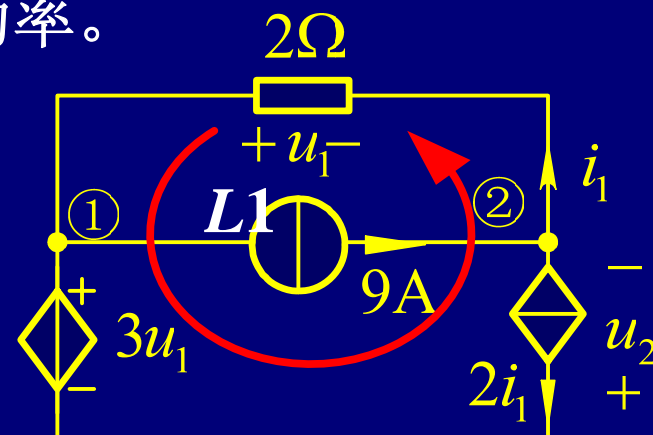
$$u_2 = -3u_1 + u_1 = 12\text{V}$$

4 受控电流源发出的功率为

$$p_{\text{CCCS}} = u_2 \times 2i_1 = 72\text{W}$$

5 受控电压源发出的功率为

$$p_{\text{VCVS}} = 3u_1 \times 2i_2 = -108\text{W}$$



例题1.5

本章小结

基本物理量

1 电流 $i = \frac{dq}{dt}$ 单位：安培 (A)

2 电压 $u_{ab} = \int_a^b \vec{E}_c \cdot d\vec{l}$ 单位：伏特 (V)

3 电功率 $p = \frac{dw}{dt} = ui$ 单位：瓦特 (W)

4 能量 $w(t) = \int_{t_0}^t p(\xi) d\xi = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi$ 单位：焦耳 (J)

基本定律

1 基尔霍夫电流定律 $\sum i_k = 0$

2 基尔霍夫电压定律 $\sum u_k = 0$

基本元器件

1 电阻元件 $u = Ri$ 或 $i = Gu$

2 电压源元件 3 电流源元件 4 受控源元件