

第一章 电路模型及电路定律

重点

1. 电压、电流的参考方向
2. 电路元件特性
3. 基尔霍夫定律

1.1 电路和电路模型

- ❖ 电
- ❖ 电路
- ❖ 电路理论
- ❖ 电路理论基础

1.1 电路和电路模型

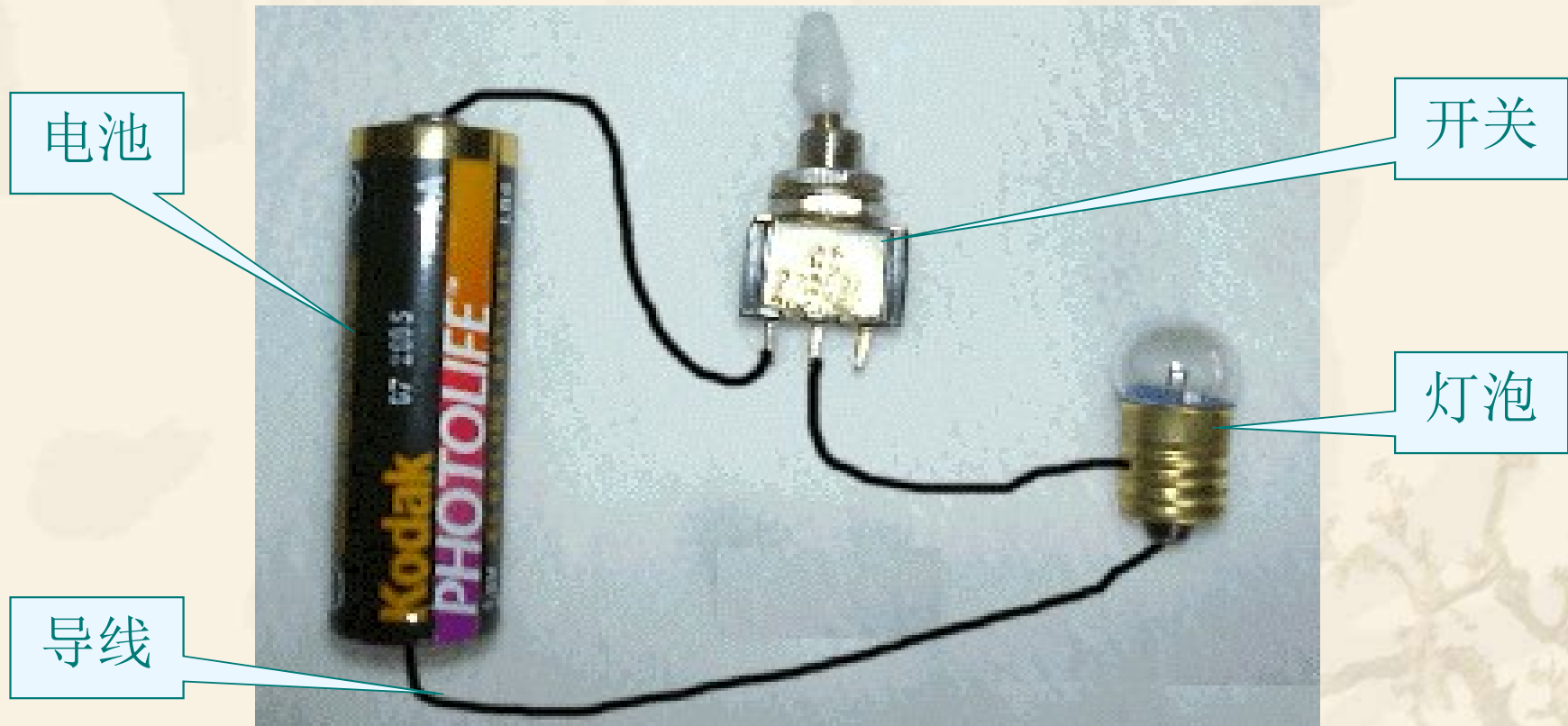
一、电

- ❖ 优越的能量形式（电能）和信息载体（电信号）
- ❖ 易于转换：电灯、电动机...
 - 传输：输电线、电话网、计算机网络...
 - 控制：开关、控制单元...
- ❖ 电技术应用广泛

1.1 电路和电路模型

二、电路

- ❖ 各种电器件相互联接构成的电流通路（也叫网络、系统）



1.1 电路和电路模型

❖ 电路的组成:

电源，能提供电能的器件，如：发电机、电池

负载，消耗电能的器件，如：电灯、电动机

传输、变换、控制等器件，如：导线、开关、变压器

❖ 电路的功能:

电能转换、传输：电力电路（系统），也叫强电电路

电信号处理、传递：电子电路，也叫弱电电路

1.1 电路和电路模型

三、电路理论：

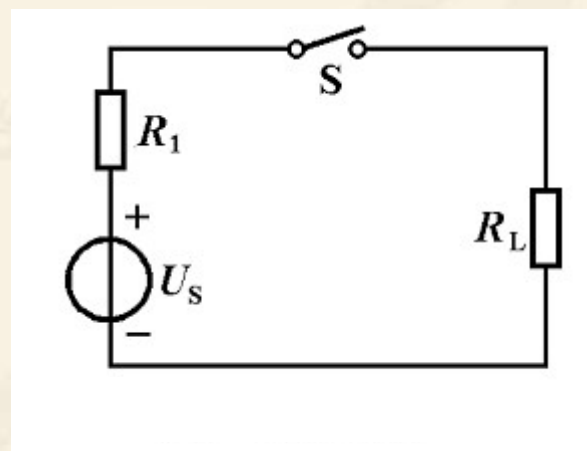
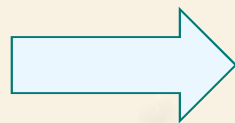
研究电路普遍规律的学科

1. 电路模型：

根据实际电路抽象，近似反映实际电路本质特征，用电路图表示



实际电路



电路模型

1.1 电路和电路模型

2. 电路元件：

组成电路模型的基本单元

理想化的元件

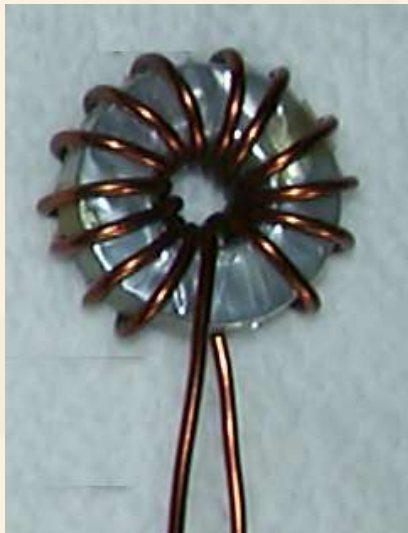
每种元件只表示一种电磁特性 ($u-i, u-q, i-\psi \dots$)。

实际电路 → 电路模型：

先将实际电路中各电器件用其模型表示（表示成相应电路元件或其组合），然后各元件之间用理想导线相联

1.1 电路和电路模型

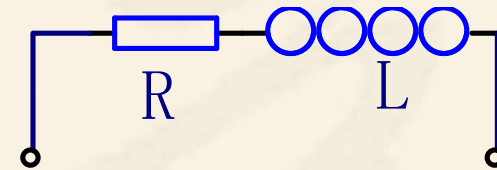
电路模型是实际电路的等效，近似反映实际电路本质特征
但是，当工作条件不同，或者精度要求不同的时候，相同的实际电路可能会有不同的电路模型



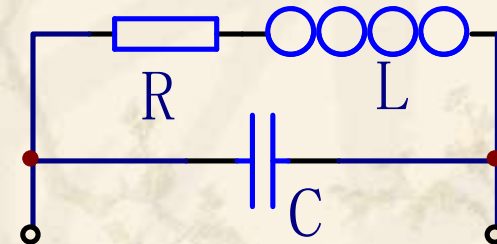
电感线圈



低频:



高频:



电路模型

1.1 电路和电路模型

3. 元件分类（电路分类）：

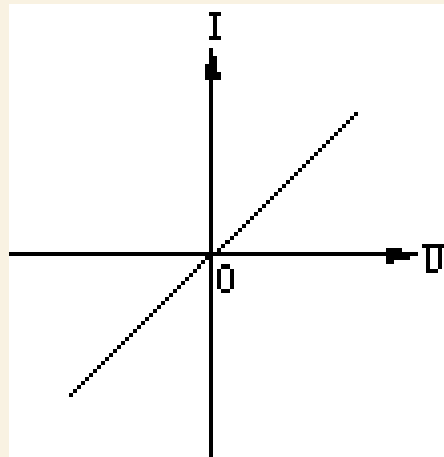
①元件参数与电磁量的变化关系

无关：线性元件，特性方程为线性方程。

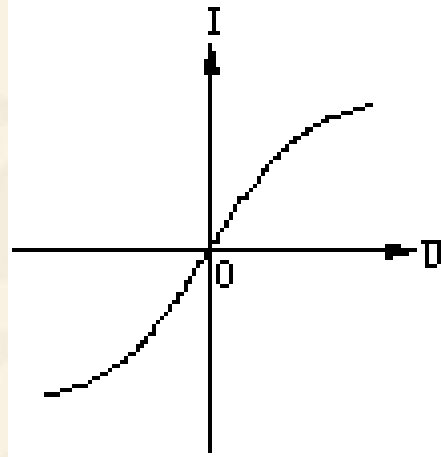
→ 线性电路（电源 + 线性元件）

有关：非线性元件，如：钨丝灯、二极管...

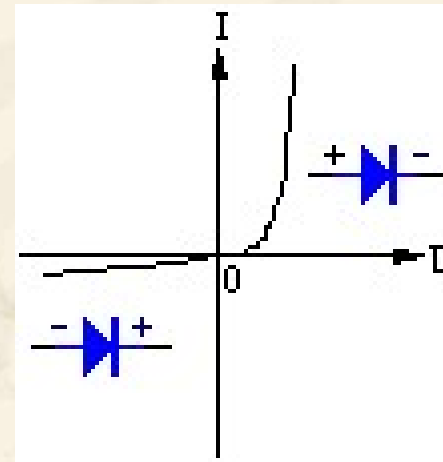
→ 非线性电路（含非线性元件）



(a) 线性电阻



(b) 钨丝灯



(c) 半导体二极管

1.1 电路和电路模型

② 元件参数随时间的变化性

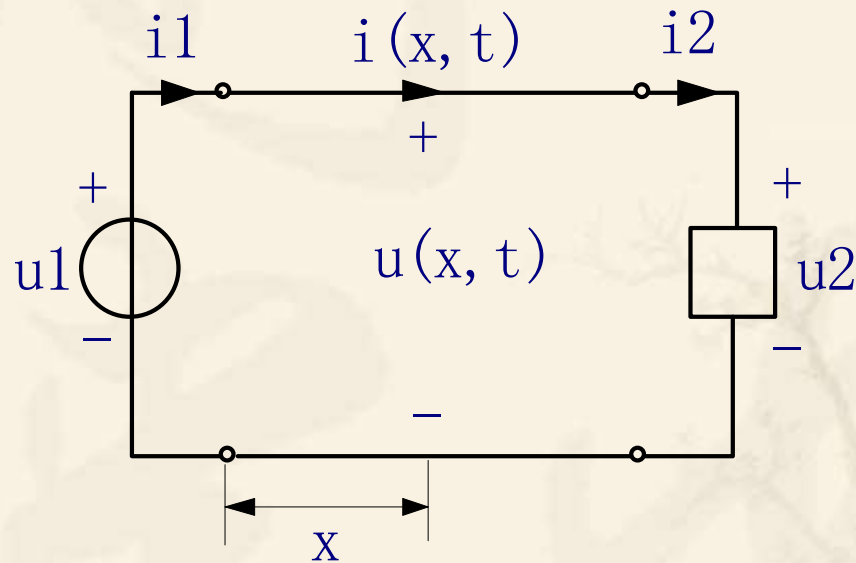
- 无关：非时变参数元件
 - 非时变参数电路（电源 + 非时变参数元件）
- 有关：时变参数元件（本书不涉及）
 - 时变参数电路（含时变参数元件）

③ 元件参数随电磁量的空间分布性

- 无关：集中参数元件，（元件尺寸远小于电磁波长）
 - 元件特性由端子上的电磁量确切表达，与空间位置无关
 - 集中参数电路
- 有关：分布参数元件，元件特性与空间位置有关。
 - 如：远距离输电线、天线...
 - 分布参数电路

1.1 电路和电路模型

分布参数电路，电能在其中的传输不是瞬间完成，
如：远距离输电线

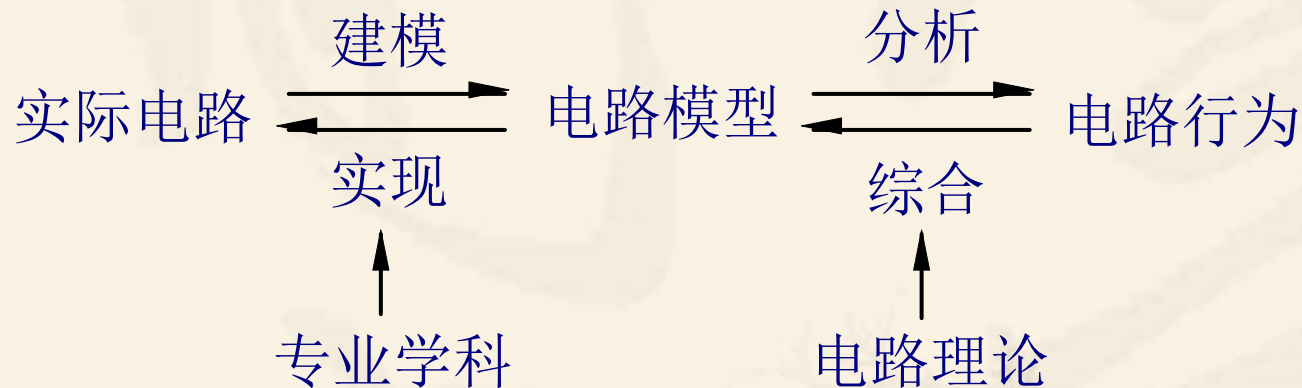


含均匀传输线电路

1.1 电路和电路模型

四、电路理论基础

1、研究对象：电路模型（简称电路）



2、主要研究内容

- 电路基本理论
- 电路计算方法
- 电工实验技能

1.2 电流、电压及其参考方向

主要电路变量：电流*i*、电压*u*、电荷*q*、磁链*ψ*。

一、电流

1、定义：荷电质点的有序运动形成电流
电流的大小用**电流强度**表示

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

单位：**A, mA, μA ...**

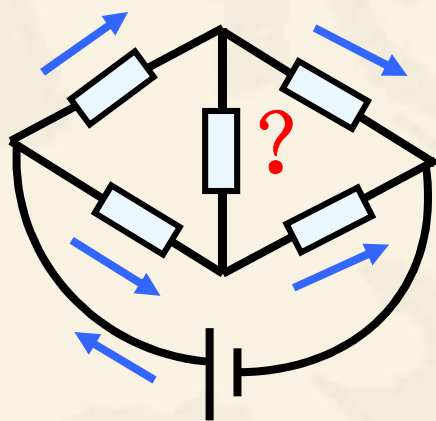
方向：正电荷运动的方向

1.2 电流、电压及其参考方向

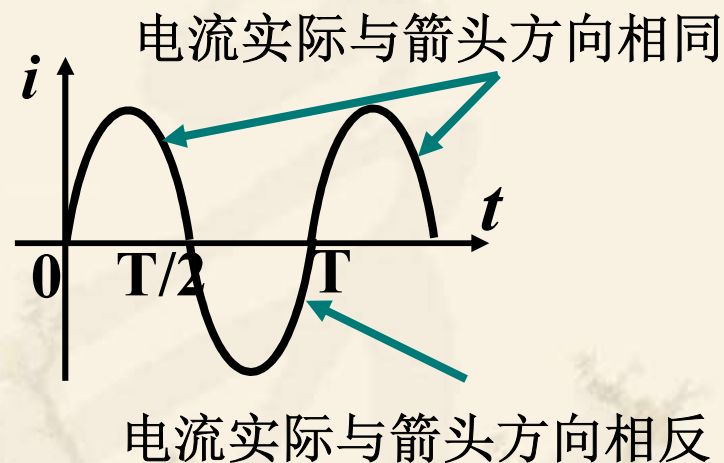
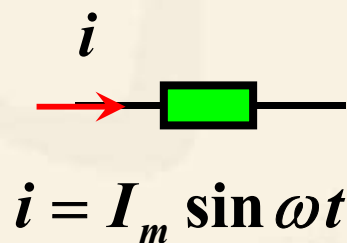
电流的（实际）方向：

元件(导线)中电流流动的实际方向有时很难判断：

(a) 复杂电路



(b) 交变电流电路

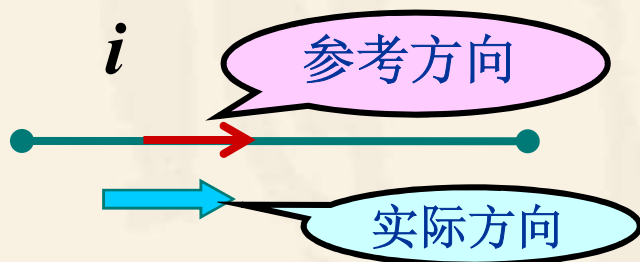


2、电流的参考方向：

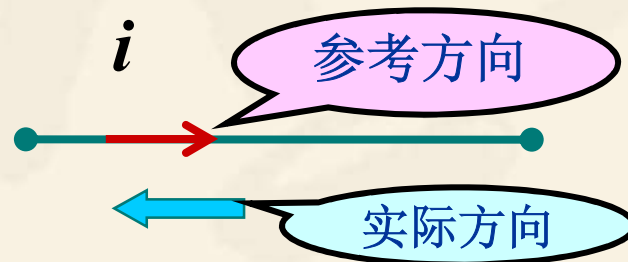
为分析方便，人为任意假定一个方向为电流的参考方向

1.2 电流、电压及其参考方向

实际与参考方向一致， i 取“+”，相反取“-”；

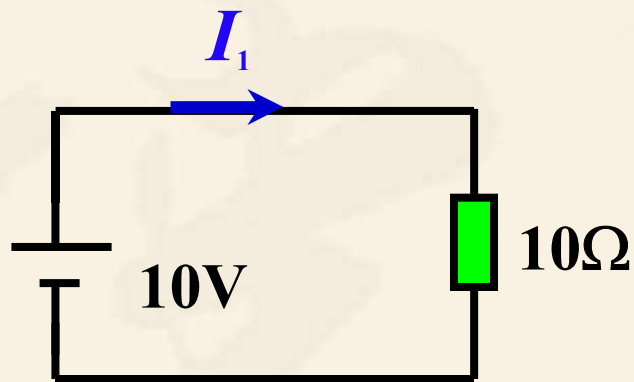


$$i > 0$$

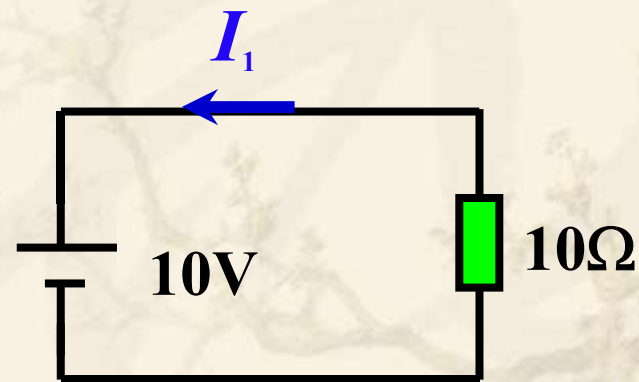


$$i < 0$$

例如：



$$I_1 = 1\text{A}$$

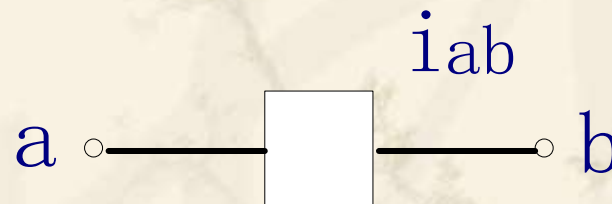
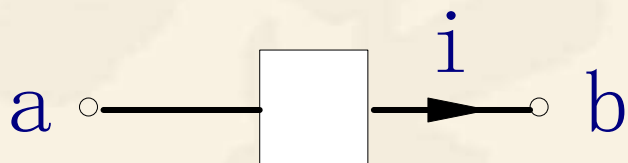


$$I_1 = -1\text{A}$$

1.2 电流、电压及其参考方向

电流参考方向的两种表示方法：

- 用**箭头**表示：箭头的指向为电流的参考方向。
(图中标出箭头)
- 用**双下标**表示：如 i_{ab} ，电流的参考方向由**A**指向**B**。
(图中标出**a**、**b**)



1.2 电流、电压及其参考方向

二、电压

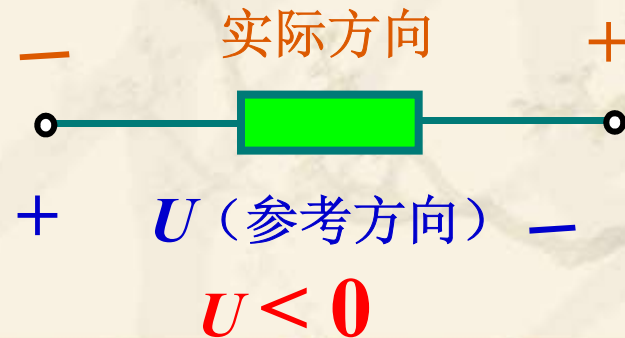
1. 定义：电场中某两点A、B间的电压 U_{AB} 等于将单位正电荷 q 从A点移至B点电场力所做的功 W_{AB} ，即

$$U_{AB} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{dW_{AB}}{dq}$$

单位：V, mV, μ V

电压的方向：电压降的方向

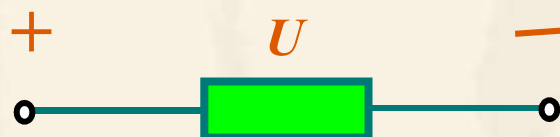
2. 电压的参考方向



1.2 电流、电压及其参考方向

3. 电压参考方向的表示方式:

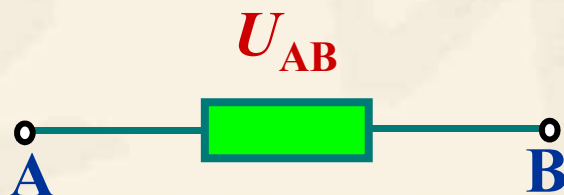
(1) 用正负极性表示: 由正极指向负极为电压降的方向



(2) 用箭头表示: 箭头指向为电压降的参考方向



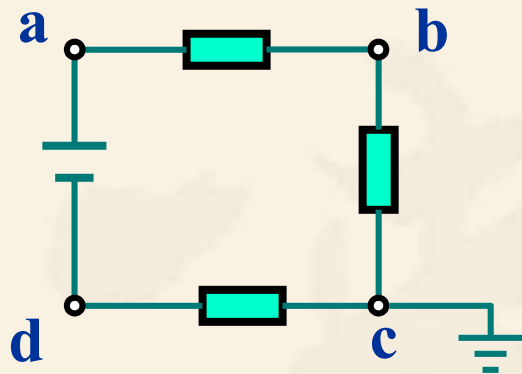
(3) 用双下标表示: 如 U_{AB} 表示由A指向B的方向为电压降



1.2 电流、电压及其参考方向

三. 电位

取恒定电场中的任意一点（O点）作参考点，设该点的电位为**零**，则电场中某点A到O点的电压 U_{AO} 称为A点的电位，记为 φ_A 。单位也是**V(伏)**。



设c点为电位参考点，则 $\varphi_c = 0$

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

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b \quad (\text{下节定律中可证明})$$

$$U_{ba} = \varphi_b - \varphi_a = -(\varphi_a - \varphi_b) = -U_{ab}$$

1.2 电流、电压及其参考方向

四、电动势：

衡量正电荷由低电位向高电位移动的能力（由局外电场和感应电场产生）。

方向：低电位指向高电位

电动势的参考方向：可以人为假定

★参考方向：①便于计算，人为事先假定。

②计算过程中不宜随便更改。

③ $\begin{cases} u, i \text{ 参考方向一致} & \text{---关联参考方向} \\ u, i \text{ 参考方向不一致} & \text{---非关联参考方向} \end{cases}$

1.3 电功率与电能

研究目的:

- ❖ 实际要知道知道电路中电源发出的电能及各负载消耗的电能情况
- ❖ 电气设备、元器件都有额定功率的限制（防止加速损耗甚至毁坏）
- ❖ 是电路分析的重要内容

1.3 电功率与电能

一、电功率

1、定义：电能的转换或传输速率

$$p = \frac{dw}{dt} = \frac{udq}{dt} = \frac{uidt}{dt} = ui \quad \text{单位：W, mW, ...}$$

额定功率：实际电器件长期安全使用允许的最大功率

2、如何判断功率的吸收和发出

(1) 根据 u 、 i 的实际方向

相同时吸收电能（功率）；相反则发出电能（功率）

1.3 电功率与电能

(2) 根据计算结果:

$$p = ui$$

关联: 表示“吸收”的功率

$$\begin{cases} p > 0, & \text{实际吸收} \\ p < 0, & \text{实际发出} \end{cases}$$

非关联: 表示“发出”的功率

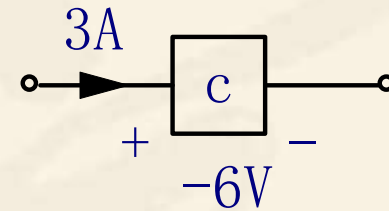
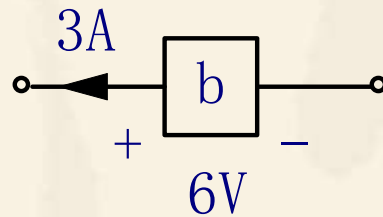
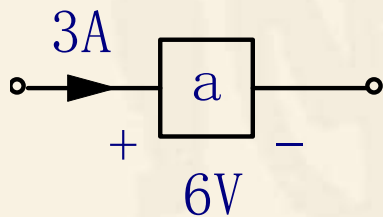
$$\begin{cases} p > 0, & \text{实际发出} \\ p < 0, & \text{实际吸收} \end{cases}$$

二、电能

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

1.3 电功率与电能

例1.1：求各元件发出或吸收的功率



a: 关联, $p=3A \times 6V=18W > 0$ 吸收功率**18W**

b: 非关联, $p=3A \times 6V=18W > 0$ 发出功率**18W**

c: 关联, $p=3A \times (-6V) = -18W < 0$
吸收功率**-18W**, 或者说发出功率**18W**

1.4 电路元件

元件分类（电路分类）：

线性元件，特性方程为线性方程。
→ 线性电路（电源 + 线性元件）
非线性元件，如：钨丝灯、二极管...
→ 非线性电路（含非线性元件）

{	两端元件	{	有源元件
	多端元件		无源元件

1.4 电路元件

非时变参数元件

→ 非时变参数电路（电源 + 非时变参数元件）

时变参数元件（本书不涉及）

→ 时变参数电路（含时变参数元件）

集中参数元件，

（元件尺寸远小于电磁波长）

元件特性由端子上的电磁量确切表达，与空间位置无关

分布参数元件，元件特性与空间位置有关。

→ 分布参数电路

1.5 电阻元件

一、基本概念

1、n端元件：n个端子的元件

2、端口：进、出同一电流的两个端子称为一端口。

二端元件也称为一端口元件

3、电阻元件 ← 电阻器



固定电阻器



可变电阻器

1.5 电阻元件

3、电阻元件：

元件电磁特性由电压、电流关系表征

二、线性二端电阻：

1、定义：端口电压与电流成正比的二端元件，
即符合欧姆定律（ VCR ）。

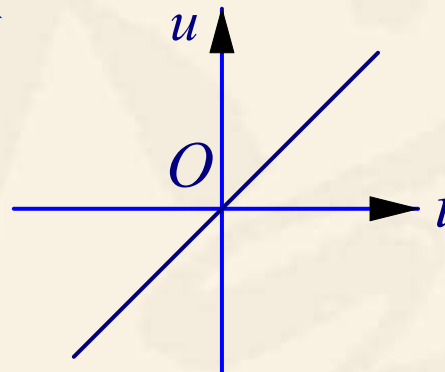
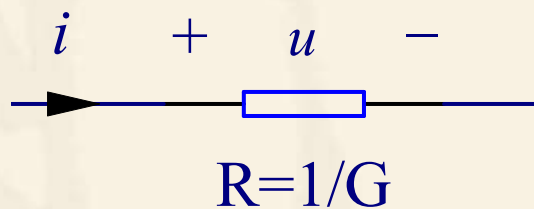
2、符号：

R



1.5 电阻元件

3、电磁特性：端口 $u - i$ 关系特性



关联，

端口特性方程： $u = Ri$ $i = Gu$

端口特性曲线：过原点直线，

$\left\{ \begin{array}{l} R > 0, \text{ 位于 I、III 象限} \\ R < 0, \text{ 位于 II、IV 象限} \end{array} \right.$

(非线性电阻的端口特性曲线不是过原点的直线)

1.5 电阻元件

4、功率与能量：

关联，

吸收功率： $p = ui = Ri^2 = Gu^2$

$\left\{ \begin{array}{l} R > 0, \text{ 则 } p > 0, \text{ 实际吸收, 无源元件, 耗能元件} \\ R < 0, \text{ 则 } p < 0, \text{ 实际发出, 有源元件} \end{array} \right.$

吸收能量：

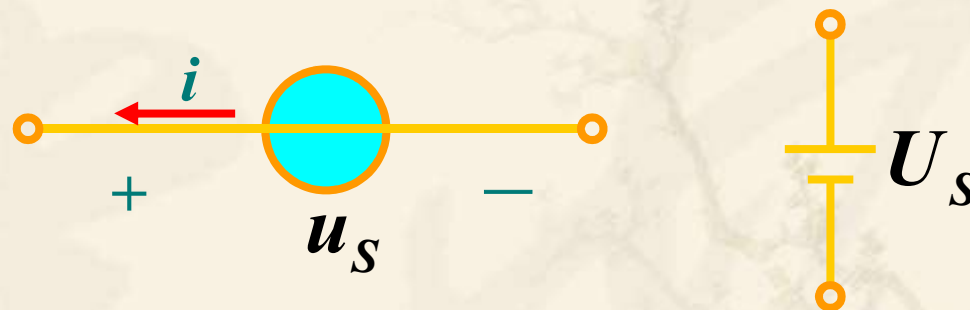
$$w = \int_{-\infty}^t p(\xi) d\xi$$

1.6 电压源和电流源

1. 理想电压源

定义 → 元件两端电压总能保持定值或是一定的时间函数，其电压值与流出的电流 i 无关，这样的元件叫做理想电压源。

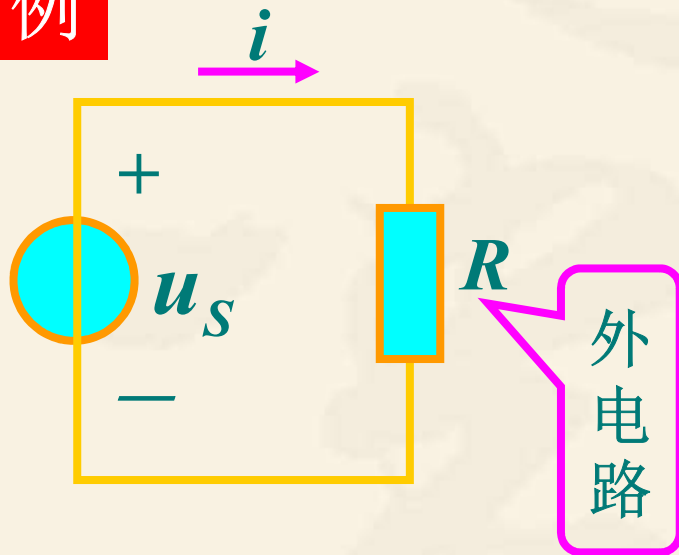
电路符号



理想电压源的电压、电流关系

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

例



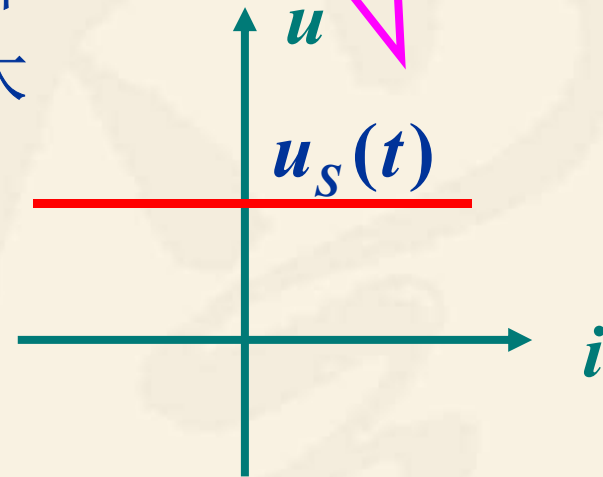
$$i = \frac{u_S}{R}$$

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

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

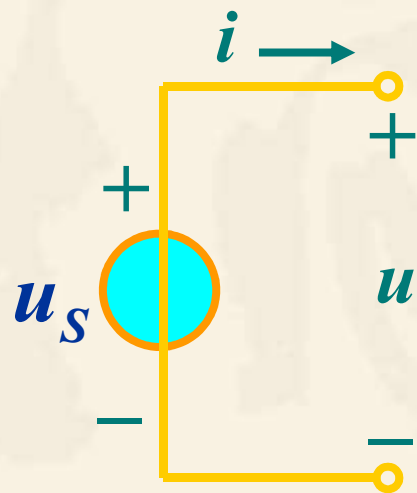
电压源不能短路！

伏安关系



电压源的功率

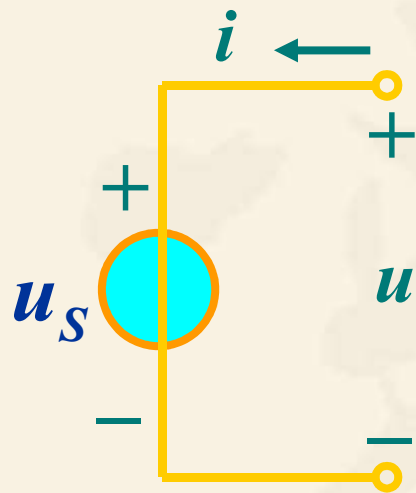
$$\rightarrow P = u_S i$$



(1) 电压、电流的参考方向非关联

电流（正电荷）由低电位向高电位移动，外力克服电场力作功，电源发出功率。

$$P_{\text{发}} = u_S i \rightarrow \text{发出功率，起电源作用}$$



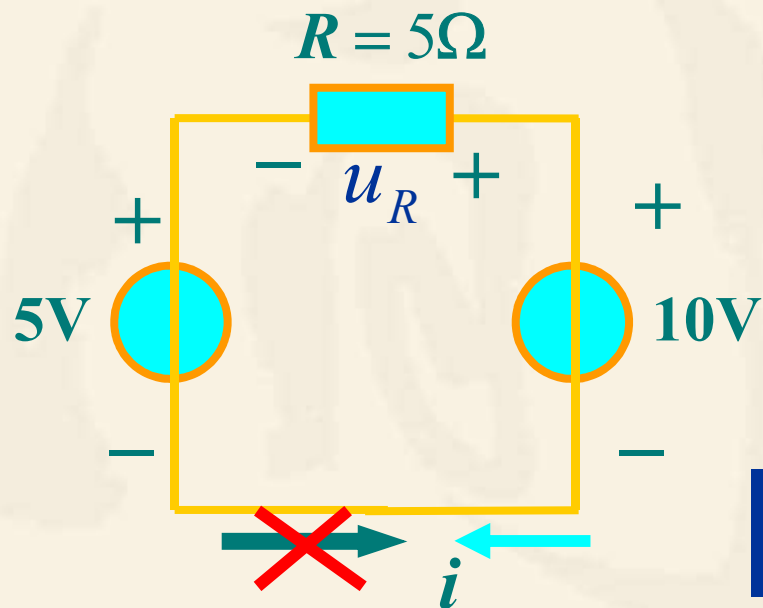
(2) 电压、电流的参考方向关联

电场力做功，电源吸收功率。

$$P_{\text{吸}} = u_S i \rightarrow \text{吸收功率，充当负载}$$

例

计算图示电路各元件的功率。



解

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

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

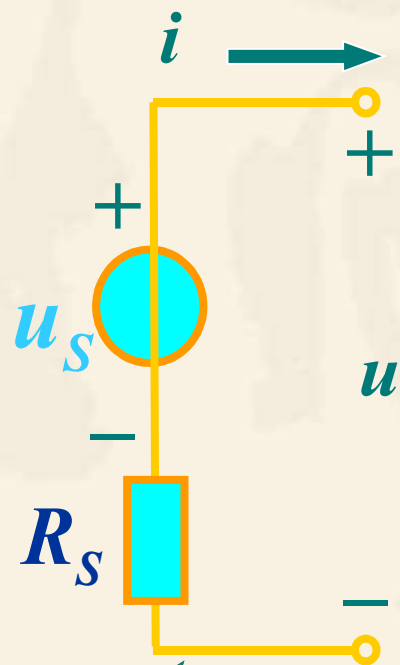
$$P_{10V\text{发}} = u_S i = 10 \times 1 = 10W$$

$$P_{5V\text{吸}} = u_S i = 5 \times 1 = 5W$$

$$P_{R\text{吸}} = Ri^2 = 5 \times 1 = 5W$$

满足： $P(\text{发}) = P(\text{吸})$

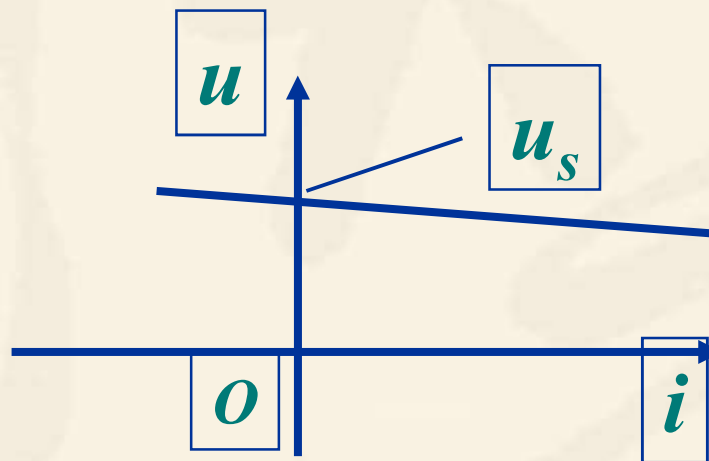
实际电压源



考虑内阻

伏安特性

$$u = u_s - R_s i$$



一个好的电压源要求

$$R_s \rightarrow 0$$

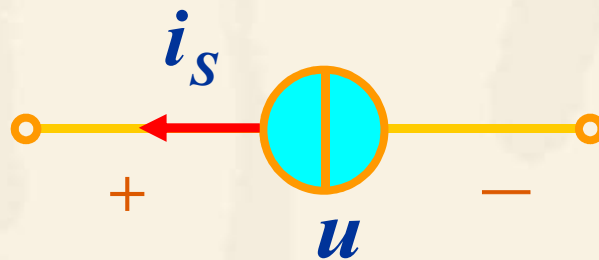
实际电压源也不允许短路。因其内阻小，若短路，电流很大，可能烧毁电源。

2. 理想电流源

定义

→ 输出电流总能保持定值或一定的时间函数，且电流大小与它的两端电压 u 无关。

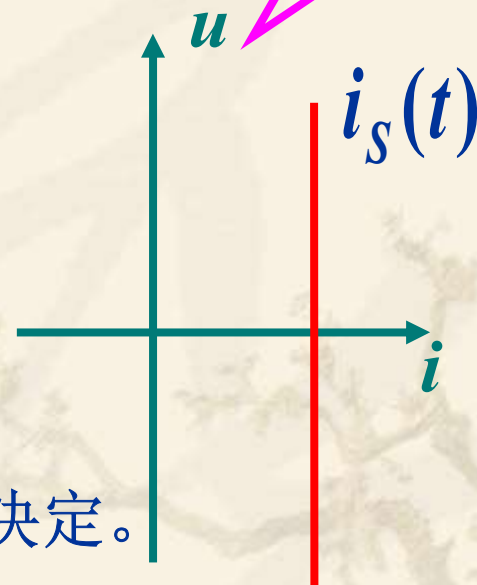
电路符号



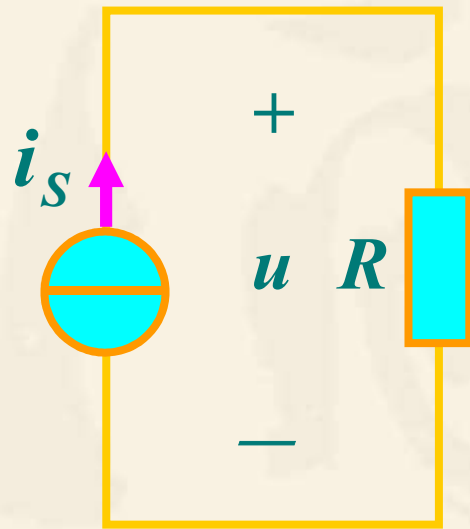
伏安关系

理想电流源的电压、电流关系

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



例



外电路

$$u = Ri_s$$

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

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

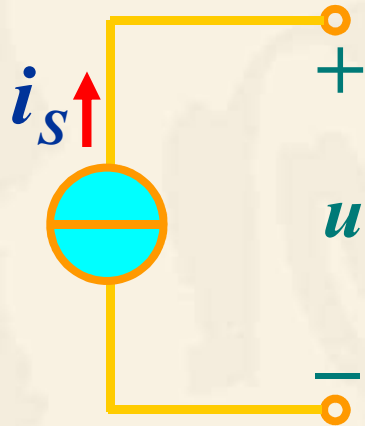
电流源不能开路!

实际电流源的产生

可由稳流电子设备产生，如晶体管的集电极电流与负载无关；光电池在一定光线照射下被激发产生定值的电流等。

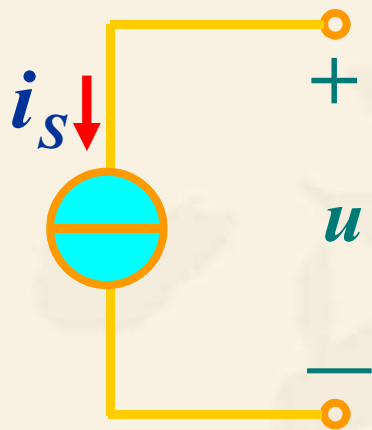
电流源的功率

$$\rightarrow P = ui_S$$



(1) 电压、电流的参考方向非关联

$$P_{\text{发}} = ui_S \rightarrow \text{发出功率, 起电源作用}$$

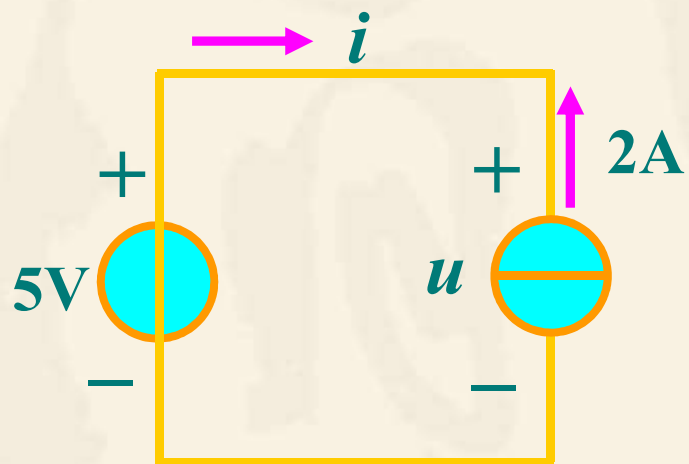


(2) 电压、电流的参考方向关联

$$P_{\text{吸}} = ui_S \rightarrow \text{吸收功率, 充当负载}$$

例

计算图示电路各元件的功率。



解

$$i_S = 2A$$

$$i = -i_S = -2A$$

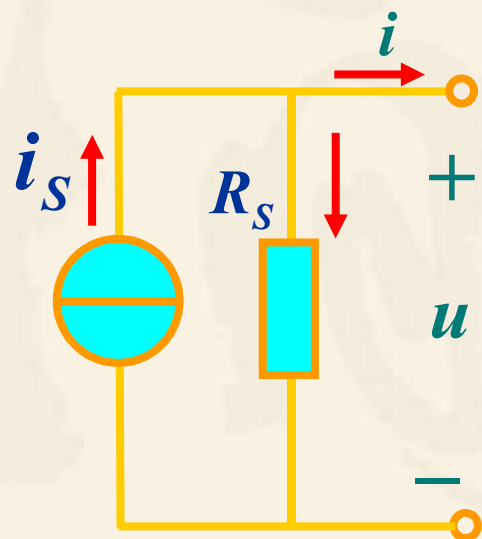
$$u = 5V$$

$$P_{5V\text{发}} = u_S i = 5 \times (-2) = -10W$$

$$P_{2A\text{发}} = i_S u = 2 \times 5 = 10W$$

满足： $P(\text{发}) = P(\text{吸})$

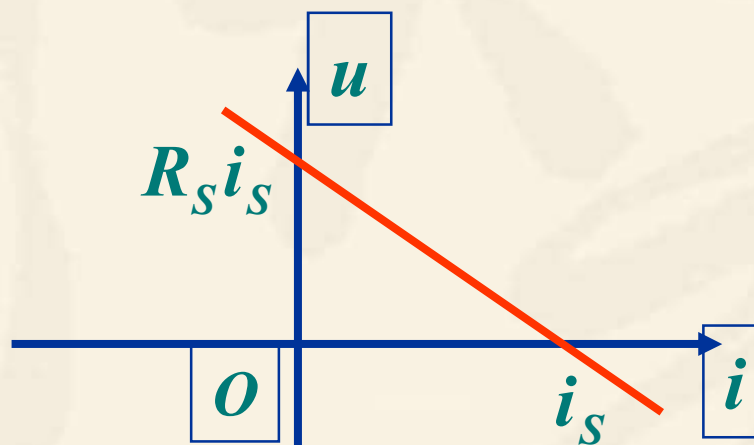
实际电流源



考虑内阻

伏安特性

$$i = i_s - \frac{u}{R_s}$$



一个好的电流源要求 $R_s \rightarrow \infty$

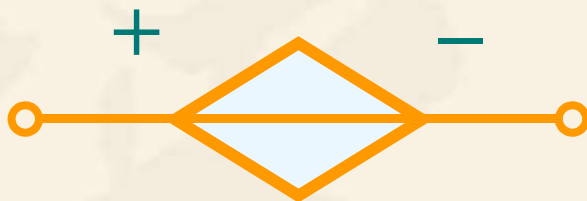
实际电流源也不允许开路。因其内阻大，若开路，电压很高，可能烧毁电源。

1.7 受控电源（非独立源）

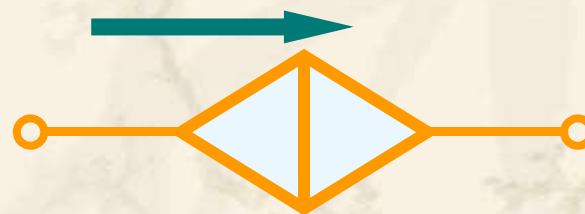
1. 定义

电压或电流的大小和方向不是给定的时间函数，是受电路中某条支路的电压(或电流)控制的电源，称受控源。

● 电路符号



受控电压源

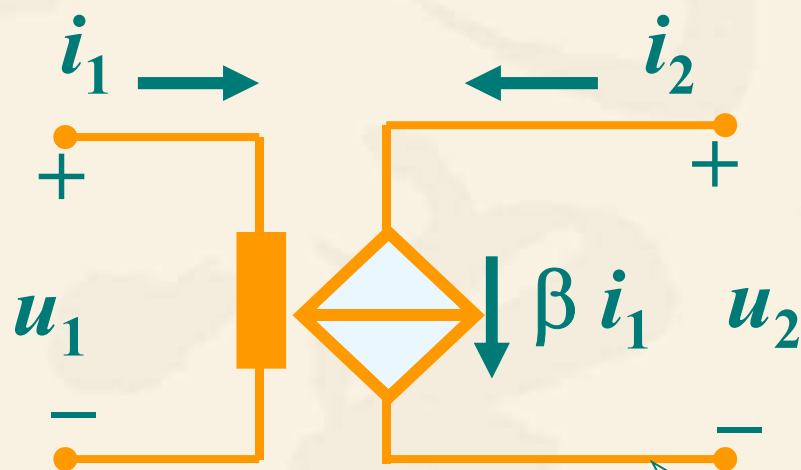


受控电流源

2. 分类

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

(1) 电流控制的电流源 (CCCS)



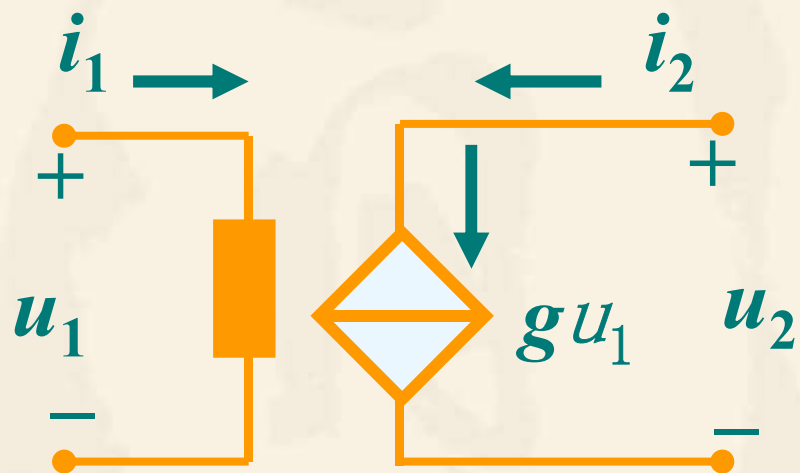
$$i_2 = \beta i_1$$

β : 电流放大倍数

输入：控制部分

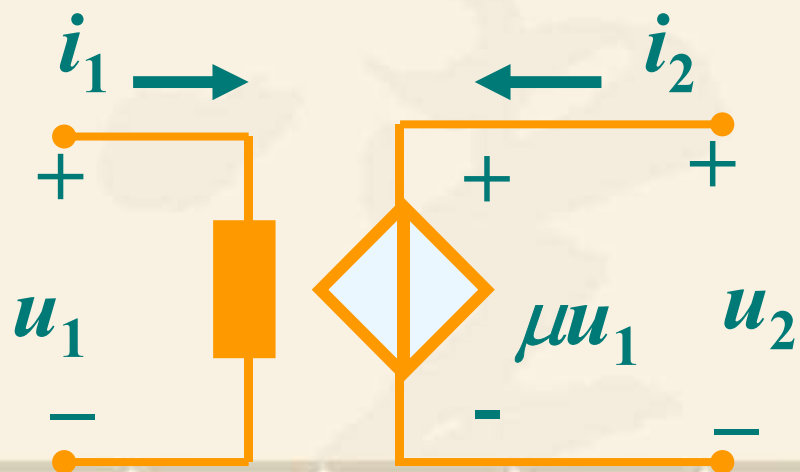
输出：受控部分

(2) 电压控制的电流源 (VCCS)



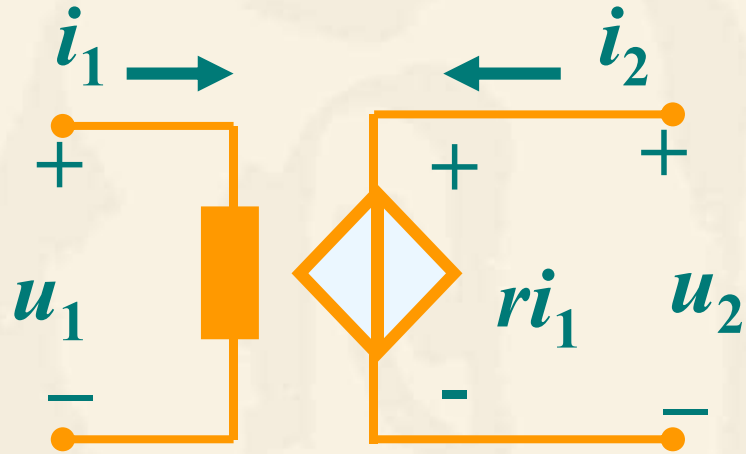
g : 转移电导

(3) 电压控制的电压源 (VCVS)



μ : 电压放大倍数

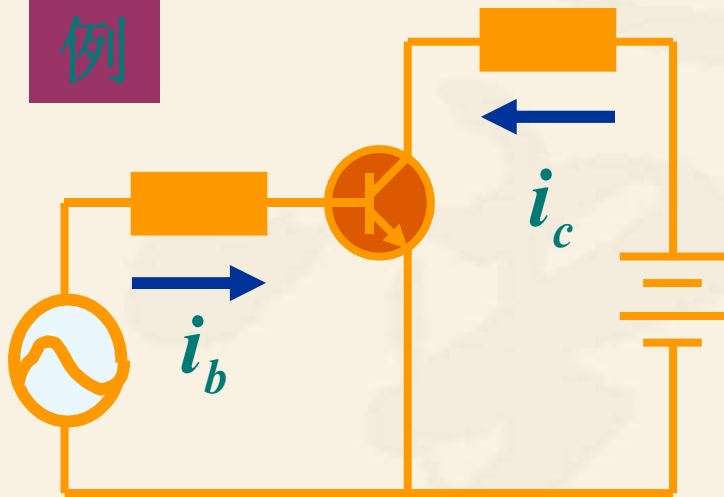
(4) 电流控制的电压源 (CCVS)



$$u_2 = ri_1$$

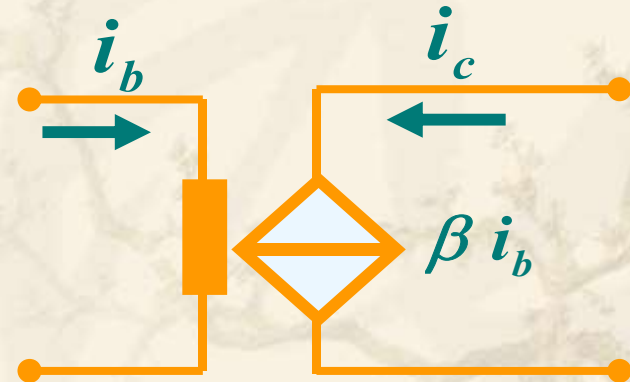
r : 转移电阻

例



电路模型

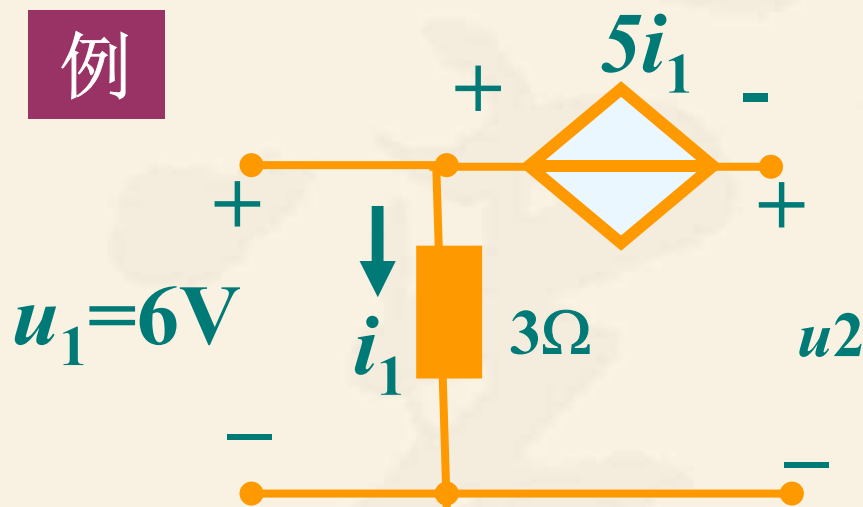
$$i_c = \beta i_b$$



3. 受控源与独立源的比较

- (1) 独立源电压(或电流)由电源本身决定, 与电路中其它电压、电流无关, 而受控源电压(或电流)由控制量决定。
- (2) 独立源在电路中起“激励”作用, 在电路中产生电压、电流, 而受控源只是反映输出端与输入端的受控关系, 在电路中不能作为“激励”。

例



求: 电压 u_2 。

解

$$i_1 = \frac{6}{3} = 2A$$
$$u_2 = -5i_1 + 6$$
$$= -10 + 6 = -4V$$

1.8 基尔霍夫电流定律 (KCL)

集中参数电路受2类约束:

- 结构约束: 由电路的连接性质决定——基尔霍夫定律
- 元件约束: 由元件性质决定

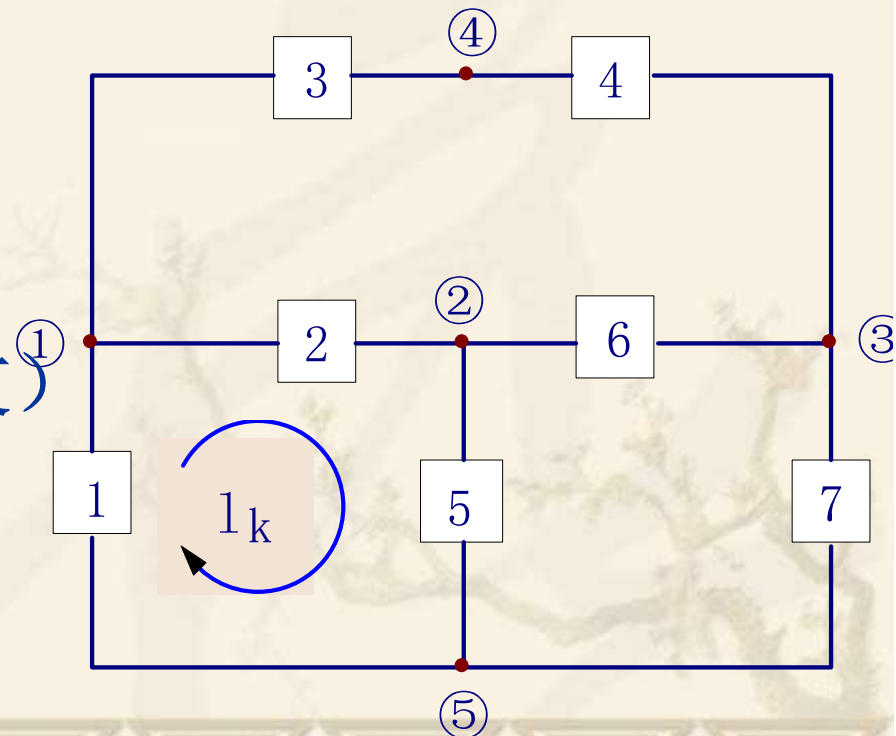
一、电路结构

1、支路: $b=7$ (6)

每个二端元件为一条支路
(或流过同一电流的电路分支)

2、节点: $n=5$ (4)

若干支路的联接点



1.8 基尔霍夫电流定律 (KCL)

3. **路径**: 依次由不同支路和节点构成的通路

4. **回路**: 闭合的路径 $l=7$

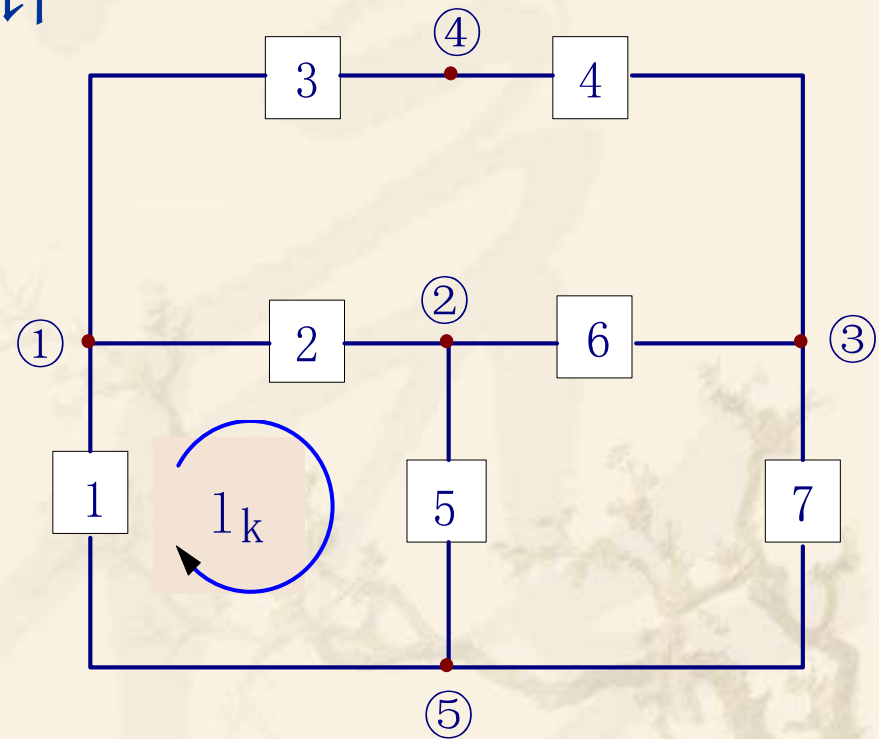
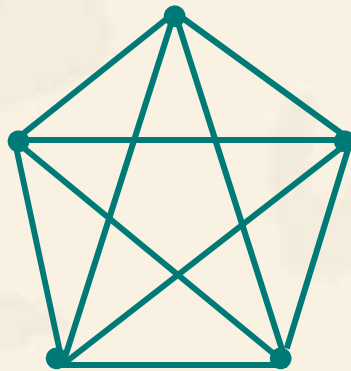
方向: 顺时针、逆时针

5. **平面电路**:

可画在同一个平面上,

且除节点外各支路都不相交

非平面电路: ...



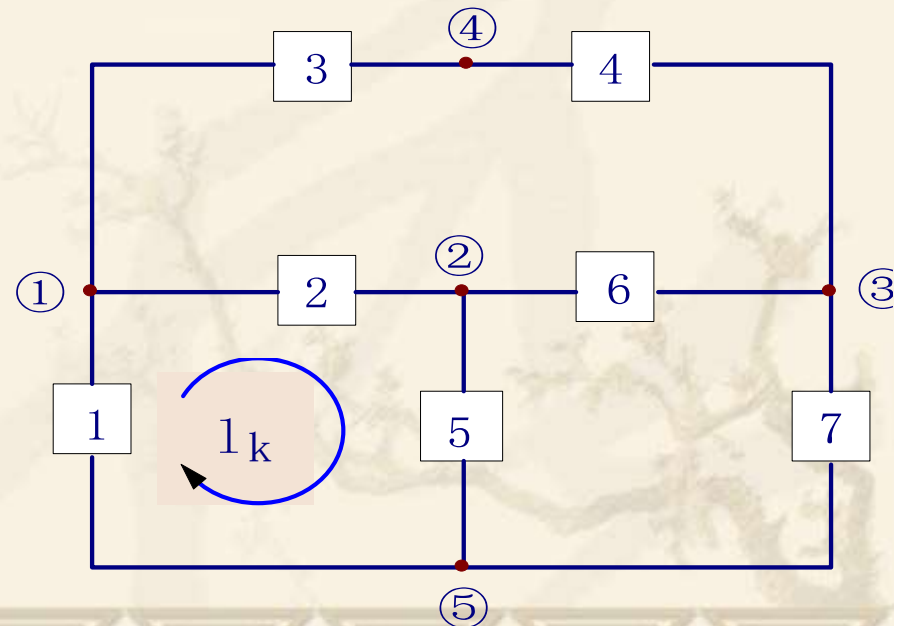
1.8 基尔霍夫电流定律 (KCL)

6. **网孔**: 平面电路的单孔回路 $m=3$

(即内部或外部不含任何支路), 多指内网孔

7. **短路**: 支路电压恒等于零 (不管电流为任何有限值)

8. **开路**: 支路电流恒等于零 (不管电压为任何有限值)
也称断路



1.8 基尔霍夫电流定律 (KCL)

二、基尔霍夫电流定律KCL

1、 定律:

在集中参数电路中，任一时刻流出（或流入）任一节点的电流代数和等于零。

公式：
$$\sum i_k = 0$$

通常规定：若 i_k 参考方向流出节点，前面取“+”号；
若流入节点则取“-”号

1.8 基尔霍夫电流定律 (KCL)

$$n1: i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

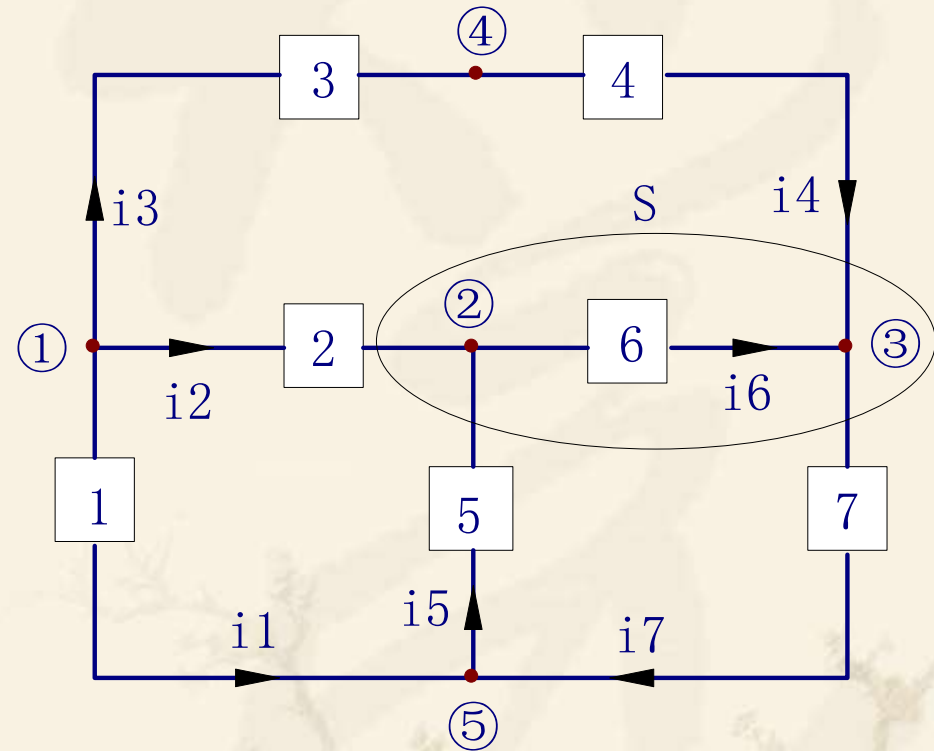
$$n2: -i_2 - i_5 + i_6 = 0$$

$$\text{或: } i_2 + i_5 = i_6$$

$$n3: -i_4 - i_6 + i_7 = 0$$

$$n4: -i_3 + i_4 = 0$$

$$n5: -i_1 + i_5 - i_7 = 0$$



2. 表述形式2: $\sum i_{\text{出}} = \sum i_{\text{入}}$

1.8 基尔霍夫电流定律 (KCL)

3、表述形式3:

推广, 节点 \rightarrow 广义节点
(...假想的闭合边界...)

❖ 对于闭合边界S:

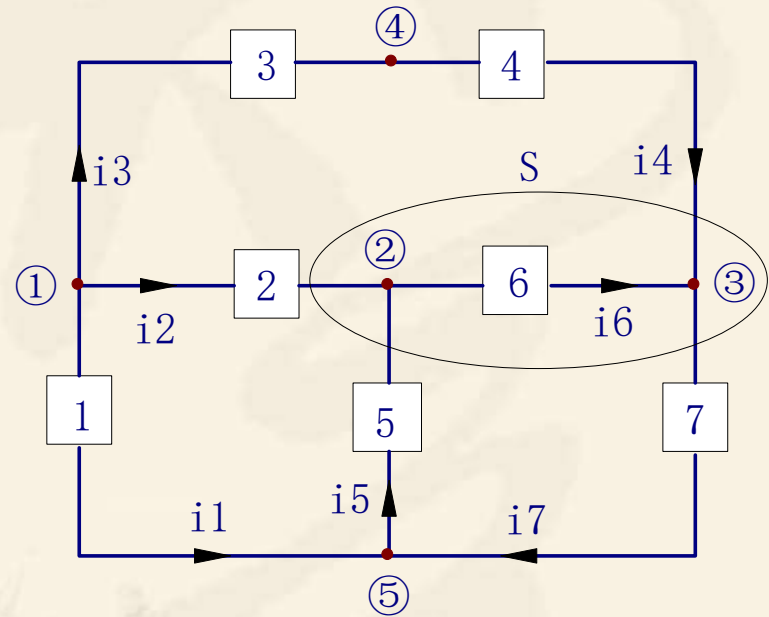
$$-i_2 - i_4 - i_5 + i_7 = 0$$

❖ 验证:

闭合边界内各节点的KCL方程相加: $(n_{\text{②}} + n_{\text{③}})$

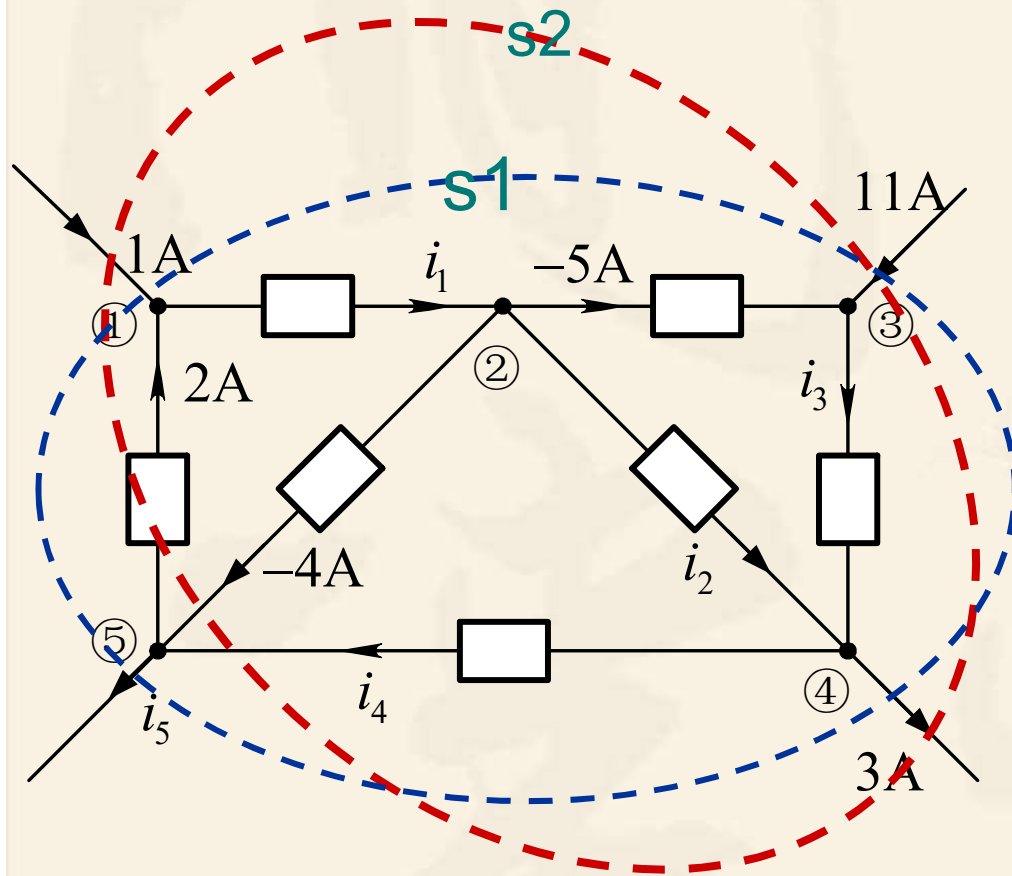
4、说明:

- ❖ 1) KCL定律适用于集中参数电路, 与元件性质无关
- ❖ 2) 对含n个节点电路, 任意n-1个节点KCL方程独立



1.8 基尔霍夫电流定律 (KCL)

例1.2：求未知支路电流；若只求 i_4 和 i_5 有何简便方法。



$$n1: i_1 = 1A + 2A = 3A$$

$$n2: i_2 = i_1 - (-5)A - (-4)A = 12A$$

$$n3: i_3 = 11A + (-5)A = 6A$$

$$n4: i_4 = i_2 + 6A - 3A = 15A$$

$$n5: i_5 = i_4 + (-4)A - 2A = 9A$$

$$s1: i_5 = 1A + 11A - 3A = 9A$$

$$s2: i_4 = 1 + 2 + 11 - (-4) - 3 = 15A$$

1.8 基尔霍夫电压定律 (KVL)

1、定律内容:

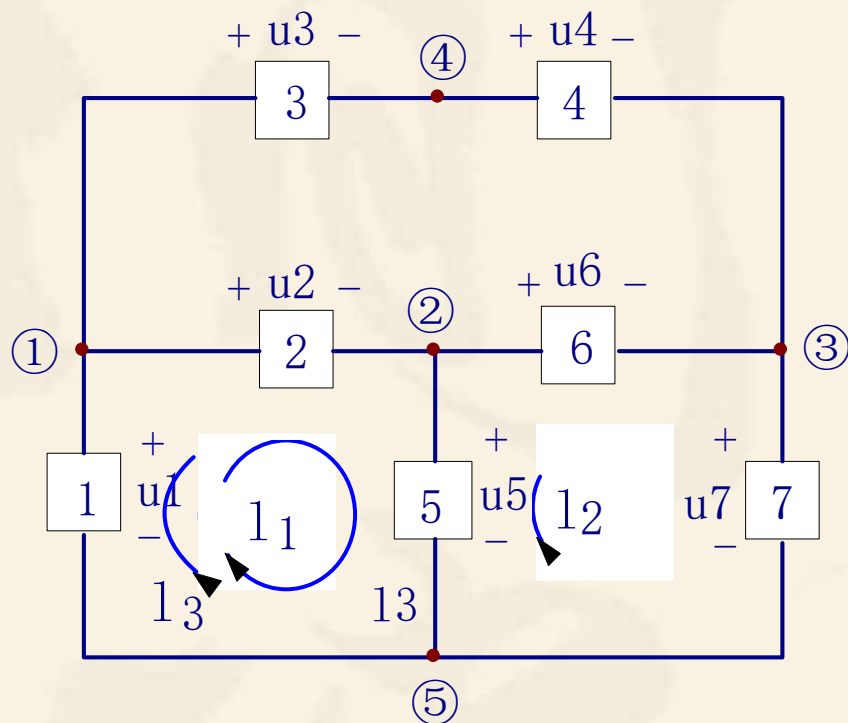
集中参数电路中，任一时刻、沿任一回路各支路电压的代数和为零。

公式:
$$\sum u_k = 0$$

通常规定:

若 u_k 参考方向与回路方向相同，前面取“+”号；
若相反则取“-”号

1.8 基尔霍夫电压定律(KVL)



$$l_1: -u_1 + u_2 + u_5 = 0$$

或 $u_1 = u_2 + u_5$

$$l_2: -u_5 + u_6 + u_7 = 0$$

$$l_3: -u_1 + u_2 + u_6 + u_7 = 0$$

2、表述形式2: ...

$$\sum u_{\text{降}} = \sum u_{\text{升}} \dots$$

1.8 基尔霍夫电压定律(KVL)

3、表述形式3:

推广: 回路 \rightarrow 广义回路
(跨越空间的假想回路)

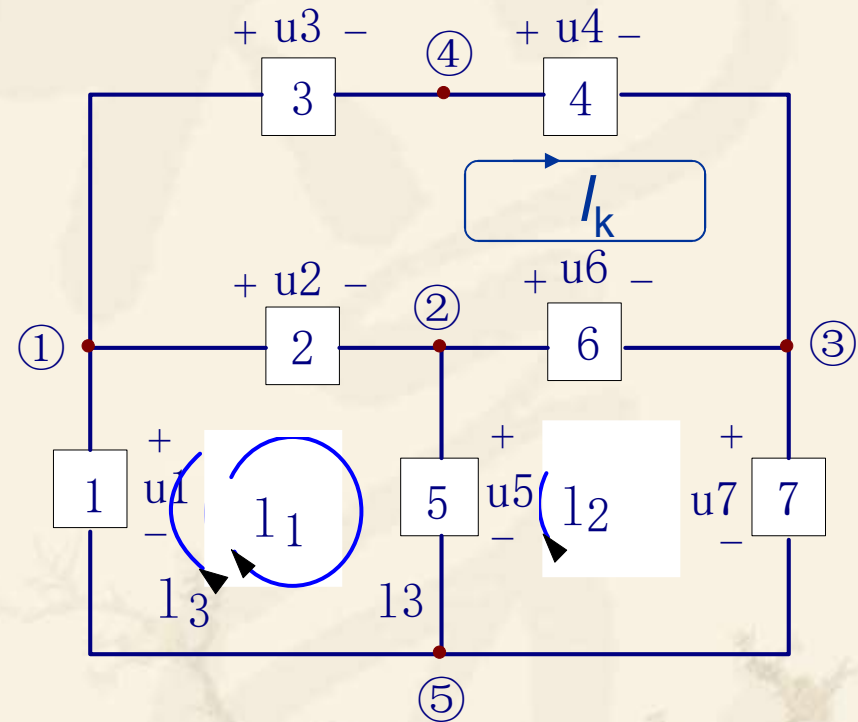
❖ 对于广义回路 l_k

$$u_4 - u_6 + u_2 = 0$$

❖ 验证: 端电压与路径无关,

$$l_1: u_1 = u_2 + u_5$$

$$l_3: u_1 = u_2 + u_6 + u_7$$



1.8 基尔霍夫电压定律(KVL)

4、说明：

(1) KVL定律适用于集中参数电路，与元件性质无关

(2) 对于含 b 个支路、 n 个节点的平面电路，其全部网孔的KVL方程 $b-n+1$ 个是独立的。

(共有 $b-n+1$ 个独立回路)

❖ 独立回路的选取：

a) 每个回路至少有一条其它回路没有的支路

→ 充分非必要条件

b) 全部网孔 → 充分非必要条件

.....

1.8 基尔霍夫电压定律(KVL)

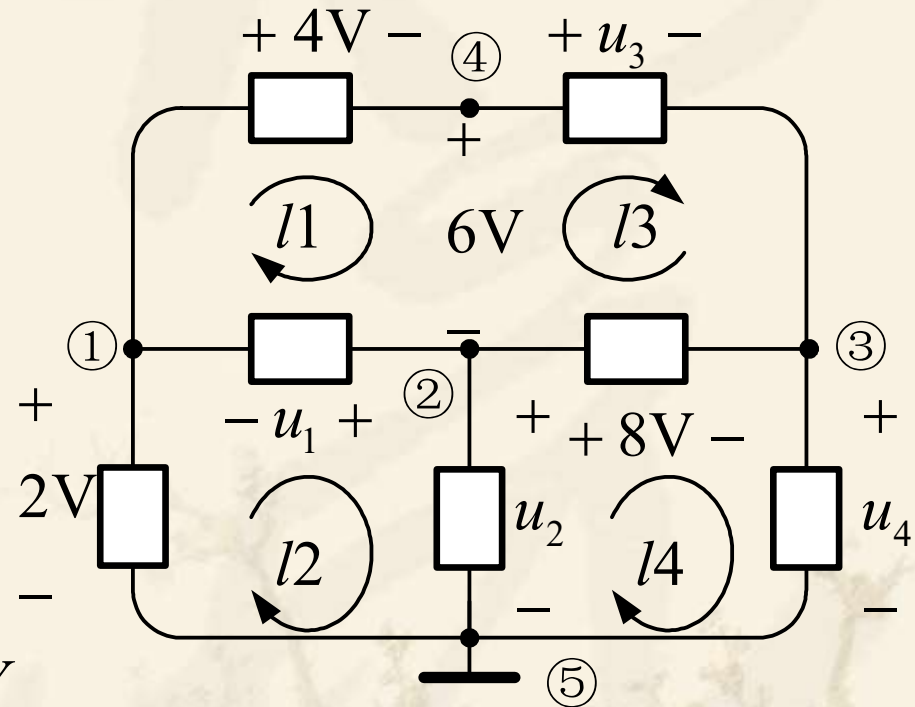
例1.3: 求未知支路电压。

$$l1: u_1 = -6 - 4 = -10V$$

$$l2: u_2 = u_1 + 2 = -10 + 2 = -8V$$

$$l3: u_3 = 6 + 8 = 14V$$

$$l4: u_4 = -8 + u_2 = -8 - 8 = -16V$$



1.8 基尔霍夫电压定律(KVL)

❖ 基尔霍夫定律

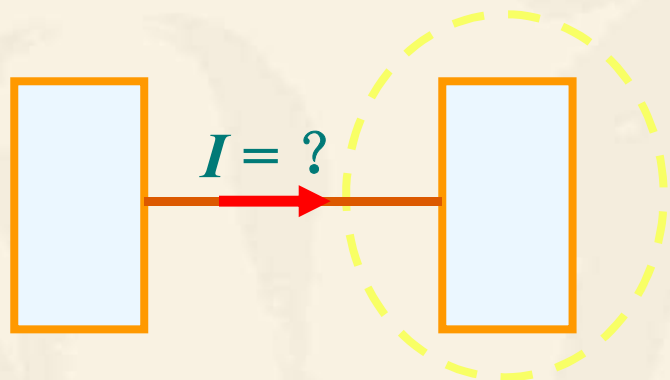
是对于集中参数电路的结构约束，与电路元件性质无关。

KCL是对与节点相连的支路电流的约束；

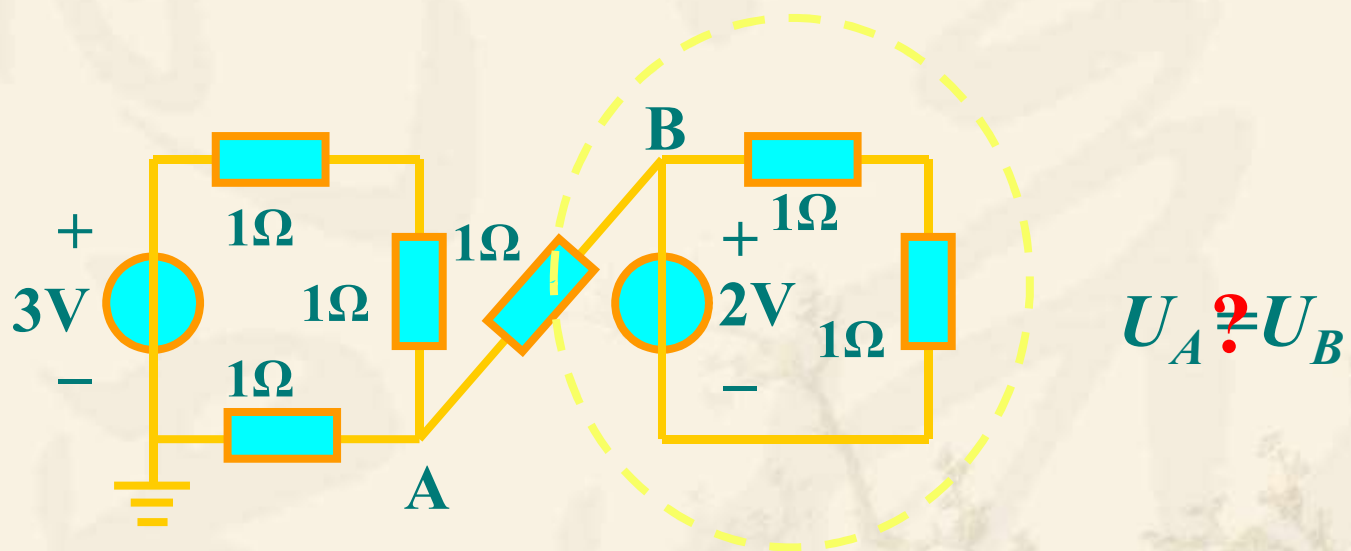
KVL是对回路中所包含的电压的约束

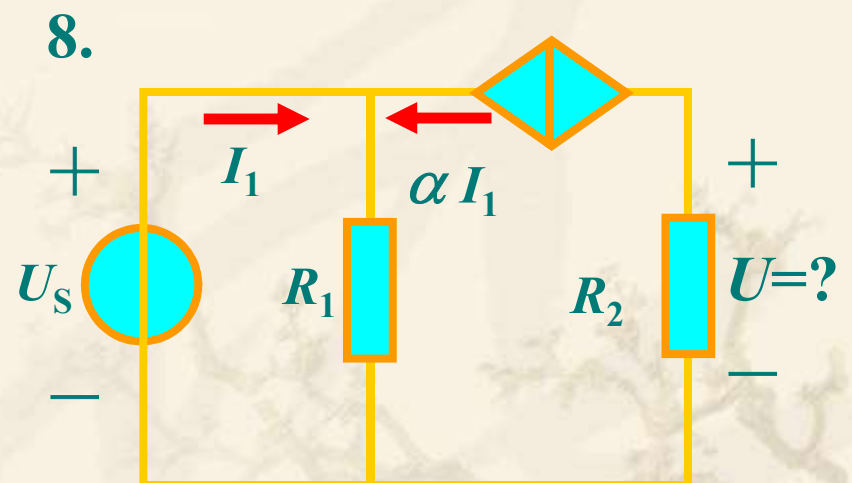
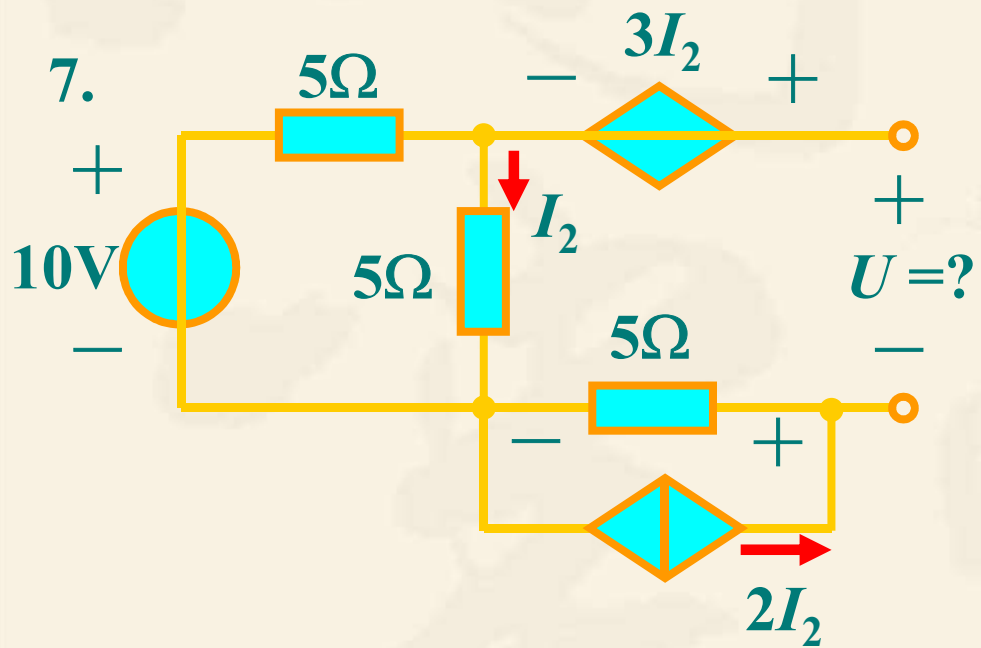
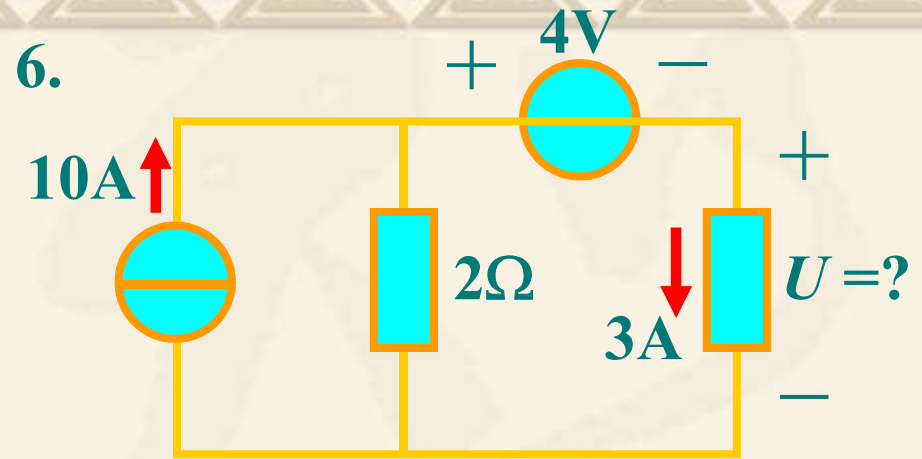
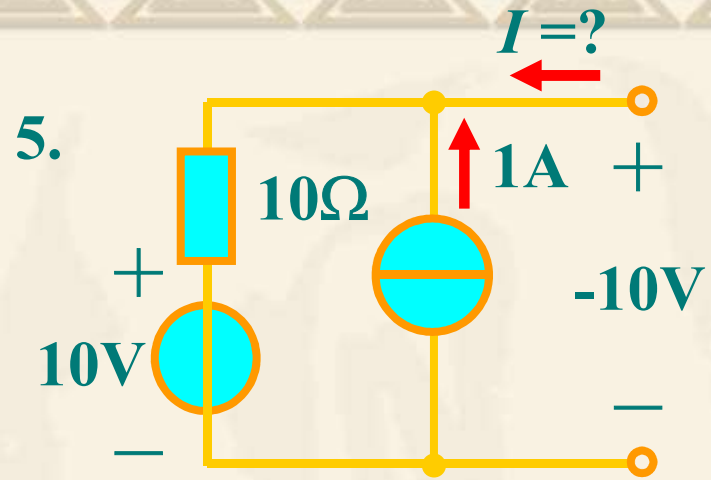
思考

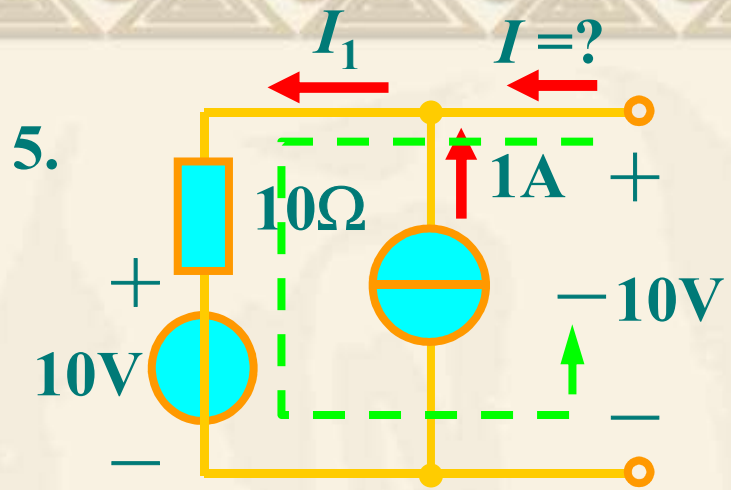
1.



2.





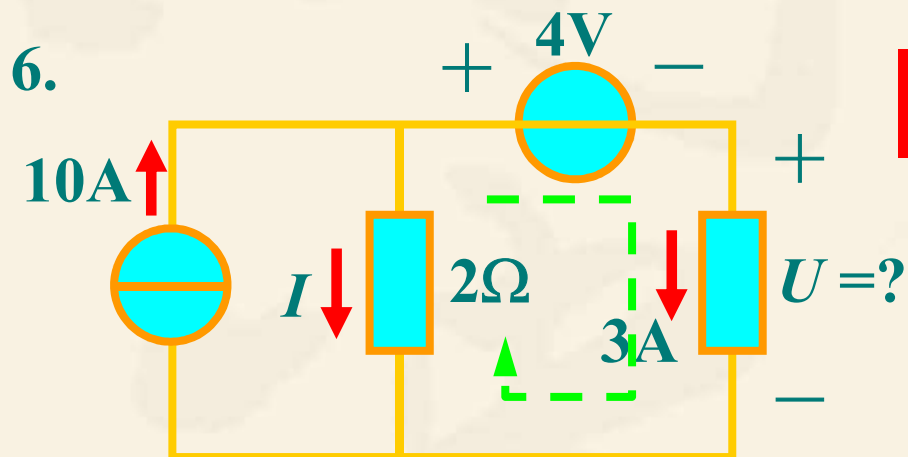


解

$$10I_1 + 10 - (-10) = 0$$

$$I_1 = -2A$$

$$I = I_1 - 1 = -2 - 1 = -3A$$

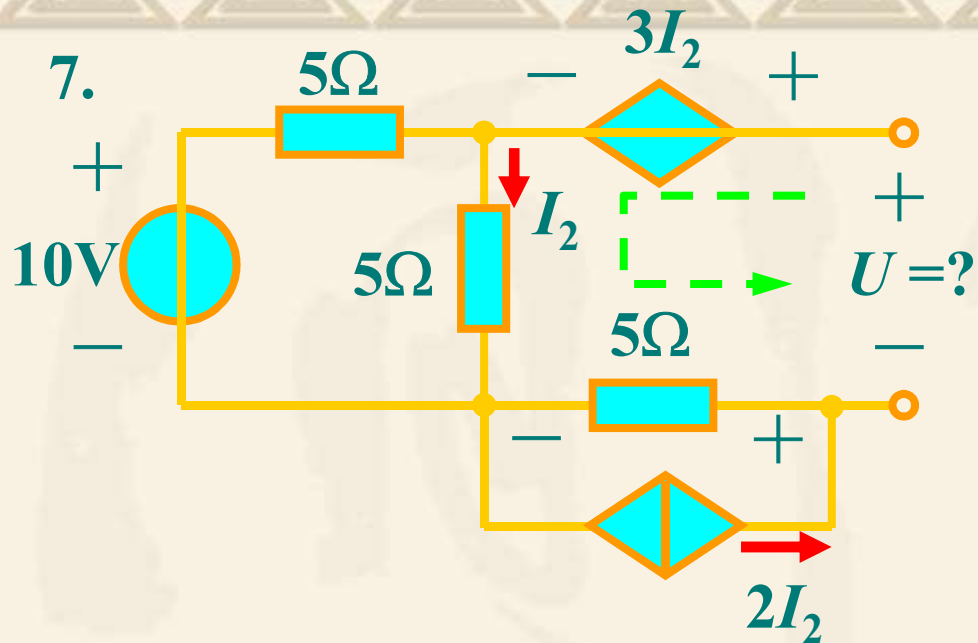


解

$$I = 10 - 3 = 7A$$

$$4 + U - 2I = 0$$

$$U = 2I - 4 = 14 - 4 = 10V$$

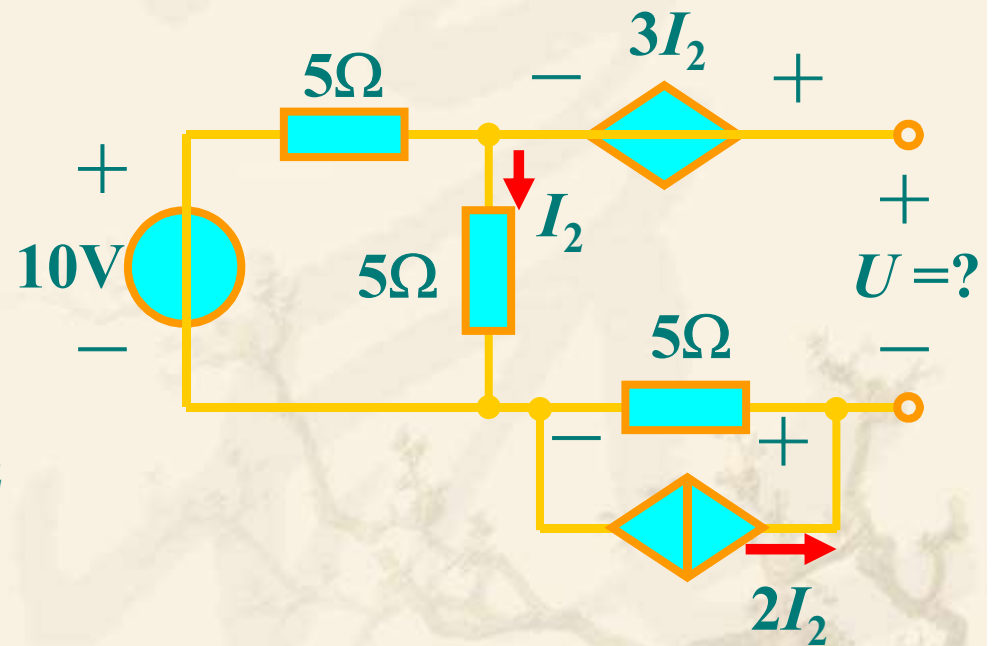


解

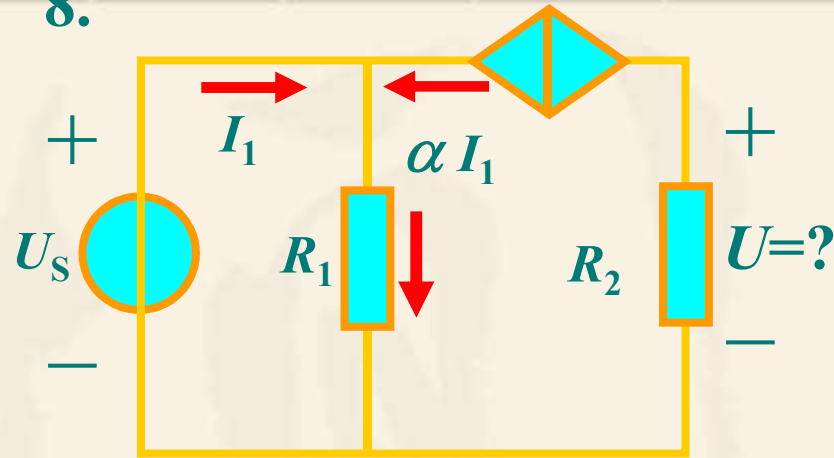
$$I_2 = \frac{10}{5+5} = 1A$$

$$U = 3I_2 + 5I_2 - 5 \times 2I_2$$

$$= -2I_2 = -2V$$



8.



解

$$U = -R_2 \alpha I_1$$

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

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

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

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

$$P_{R_2} = R_2 \left[\frac{\alpha U_s}{R_1(1 + \alpha)} \right]^2$$

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

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

选择参数可以得到
电压和功率放大。