



电路理论

——电路模型与基本定律

主讲人：刘旭

电气与电子工程学院

电阻电路

电路理论

电阻电路

暂态电路

正弦稳态电路

复杂电路

电路模型与基本定律

电阻电路等效变换

电路分析方程

电路定理

含运算放大器的电路

本章学习内容

1.1 概述

1.2 电路模型

1.3 电路变量

1.4 电路元件

1.5 基本定律

讲授学时：4

本章学习目标与难点

目标

1. 熟练掌握电路的电功率计算
2. 熟练掌握独立电源、受控电源的特性
3. 理解KCL、KVL的独立性，**准确列写KCL、KVL方程**

难点

1. 理解独立电源的特点：电压源的电流、电流源的电压由外部电路决定
2. 理解受控电源和独立电源特性的异同
3. 习惯使用**参考方向**、变量分析问题
4. 恰当、准确列写电路的KCL、KVL方程

1.1 概述

电路是由电器件互相连接、能够实现电能转换的系统，它为电流的流通提供路径。

主要器件：

电源：提供能量或信号

负载：将电能转化为其他形式的能量，或对信号进行处理

导线、开关等：将电源与负载接成通路

作用：

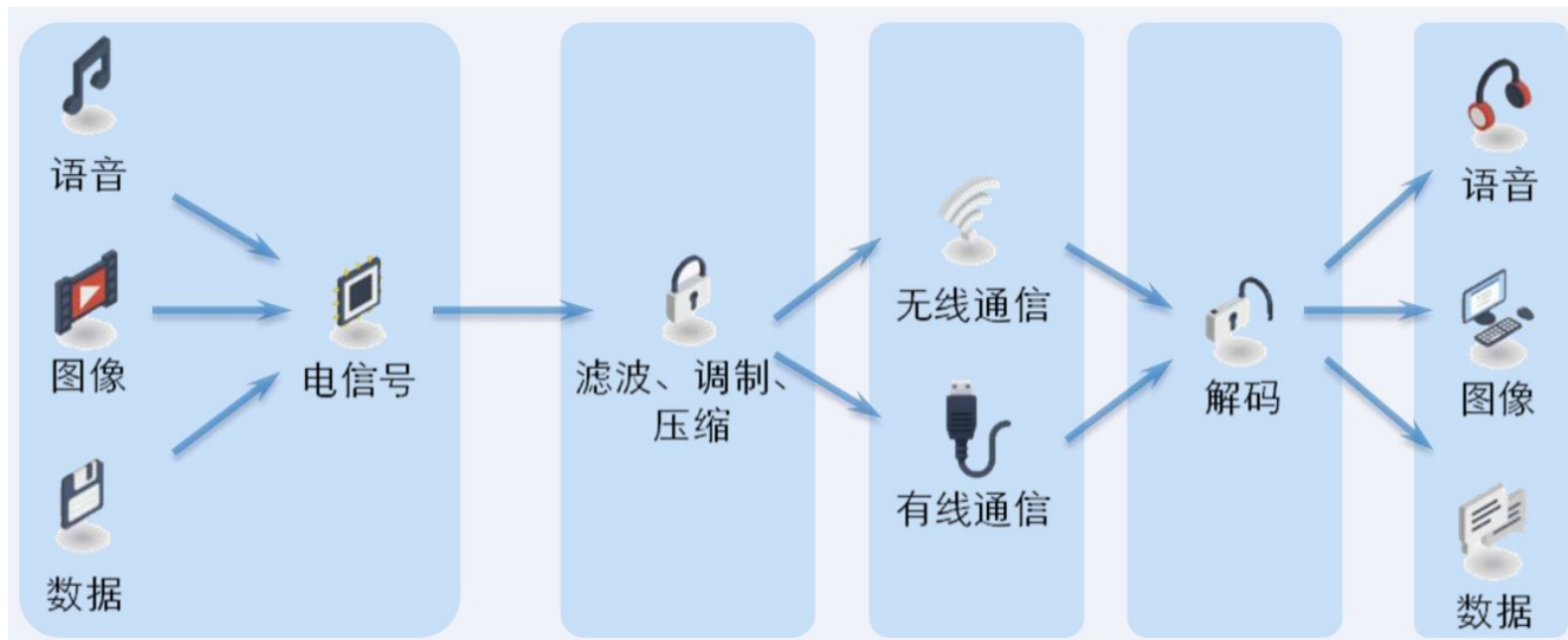
处理能量：电能的产生、传输、分配.....

处理信号：电信号的获得、变换、放大.....

1.1 概述

电路广泛存在于电力系统、通信系统、计算机系统、控制系统和信号处理系统中

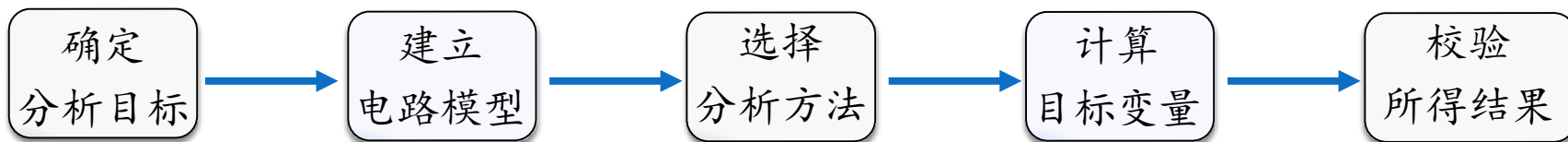
e.g. 通信系统中的电路



电压：几伏到几十伏 电流：微安级

1.2 电路模型

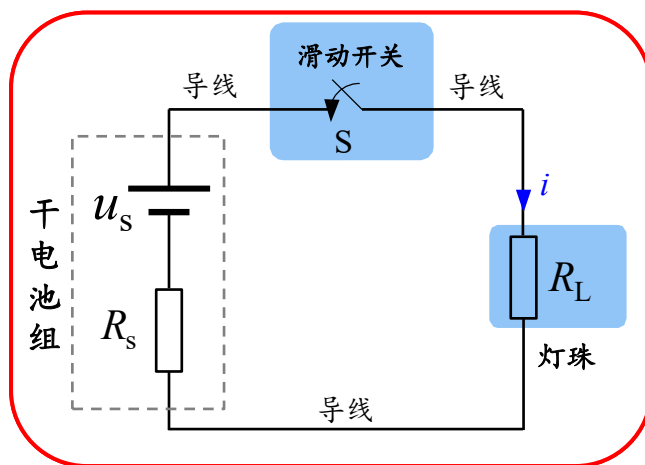
1.2.1 电路分析的基本思路



实际模型



电路模型



用电路方程分析:

$$u_s = (R_s + R_L) * i$$

代入相应值, 计算
电流值

接入电流表, 验证
计算电流值

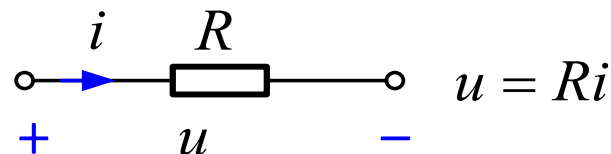
电路建模——将实际电路中的电器件, 表示为对应的电路模型

1.2 电路模型

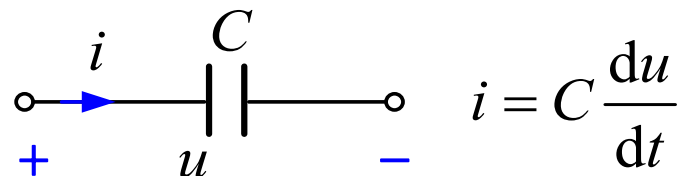
1.2.2 理想电路元件

- 没有空间大小
- 只呈现一种电磁现象
- 可以用严格的数学表达式描述特性 $f(u, i) = 0$

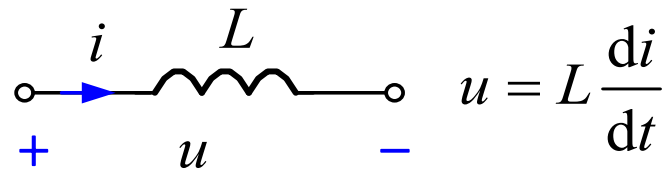
电阻元件：表示消耗电能的元件



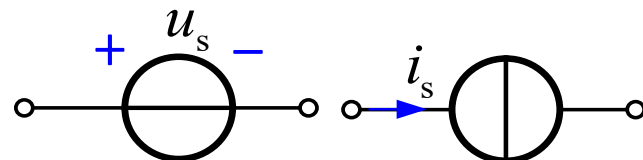
电容元件：表示各种电容器产生电场、储存能量的作用



电感元件：表示各种电感线圈产生磁场、储存能量的作用



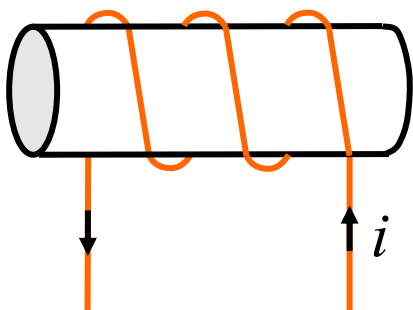
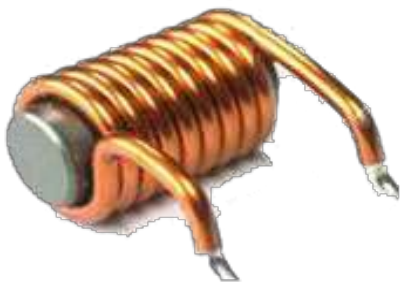
电源元件：表示各种将其它形式的能量转变成电能的元件



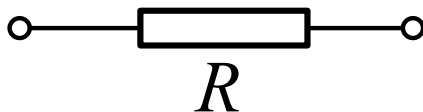
1.2 电路模型

注意

根据实际电路的不同工作条件以及对模型精确度的不同要求，应当用**不同的电路模型**模拟**同一实际电路**



Case1: 若频率 $f \rightarrow 0$



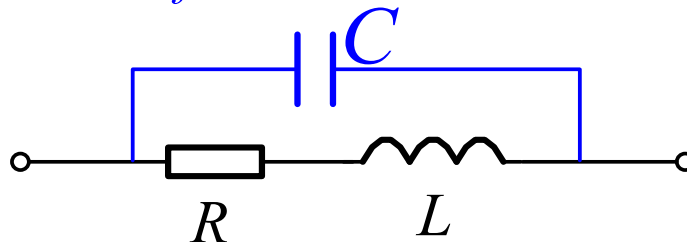
Case2: 若频率 f 较低，且内阻 R 远小于感抗



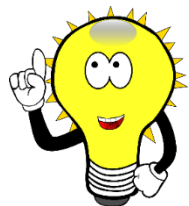
Case3: 若频率 f 较低，且内阻 R 较大



Case4: 若频率 f 较高，且内阻 R 较大



1.2 电路模型



任何实际电路是否在电路模型中都可以忽略其元件空间大小？在何情况下可近似处理？

乌鲁木齐市距南昌市直线距离3000km，从乌鲁木齐发电站发出的正弦电磁波需要多少时间才能传输到南昌？

电磁波传播时间： $3 \times 10^6 / 3 \times 10^8 = 0.01\text{s}$

发电机发出正弦交流电，工频50Hz

⇒ 正弦波周期为0.02s

在同一时刻，发出电压与接收电压正好反相！

这种情况下，不能忽略输电线路的空间大小!!!



1.2 电路模型

1.2.3 集中参数与分布参数电路

如果电路的尺寸远小于其工作电磁波的波长 λ ，则可将该电路建模为集中参数电路，否则只能建模为分布参数电路。

电路问题 $\xrightarrow{\text{(精确分析)}}$ Maxwell方程



满足三点基本假设：

- 电磁效应瞬间传遍全电路
- 每个电器件净电荷为零
- 不同电器件之间不存在磁耦合

$\xrightarrow{\text{(近似分析)}}$

抽象为集中参数电路

理想
电路
元件

元件
特性
方程

基尔
霍夫
定律

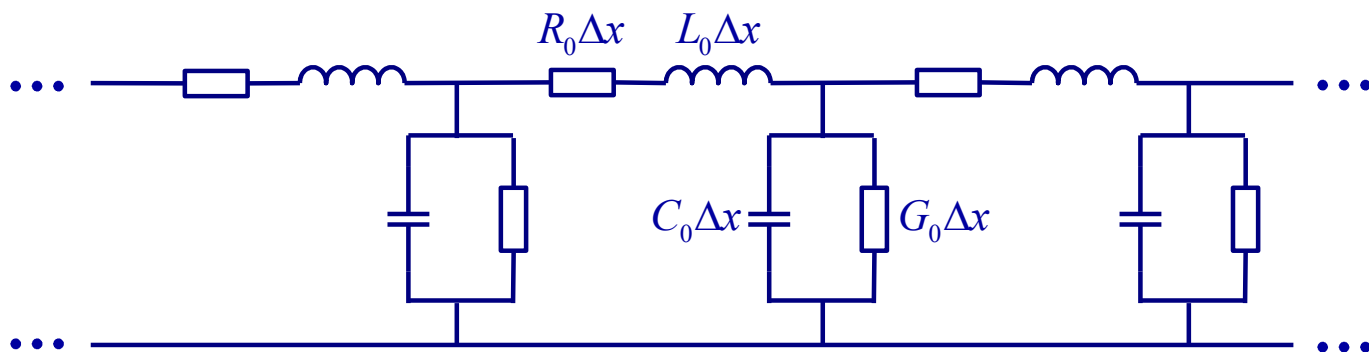
适用标准： $d_{\max} < 0.01\lambda_{\min}$

1.2 电路模型

如何处理分布参数电路呢？

在电路中电阻、电容、电感是连续分布的，即在电路的任何部分都既有电阻，又有电容，又有电感。

如两根并行导线：



Δx 分得愈小，就愈接近实际情况。称这种连续分布的电路参数为分布参数，这样的电路为分布参数电路。

1.3 电路变量

1.3.2 电荷与电流

□ **电荷**及电荷的运动，是所有电磁现象的根源，电荷是最基本的物理量，单位为库伦（C）

□ **电流**：电荷的**定向运动**

□ **电流强度**：单位时间内通过导体横截面的电量

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

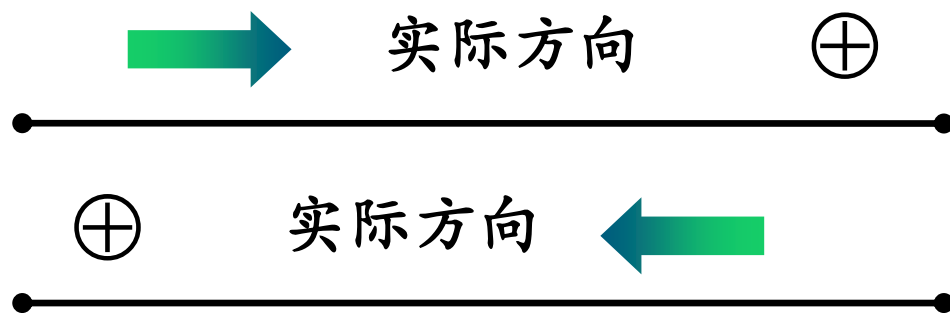
单位名称：安[培]

符号：A

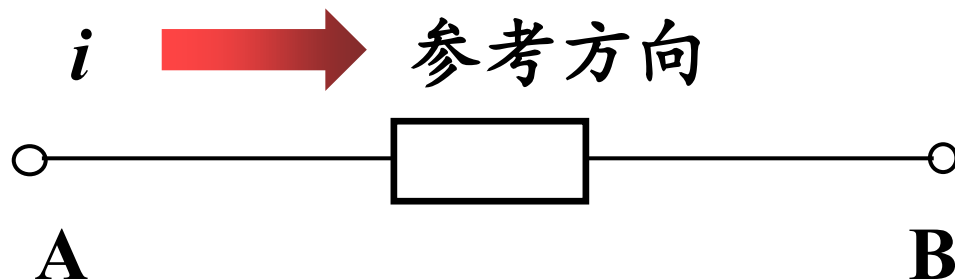
(Ampere, 安培; 1775–1836, France)

1.3 电路变量

电流的参考方向：



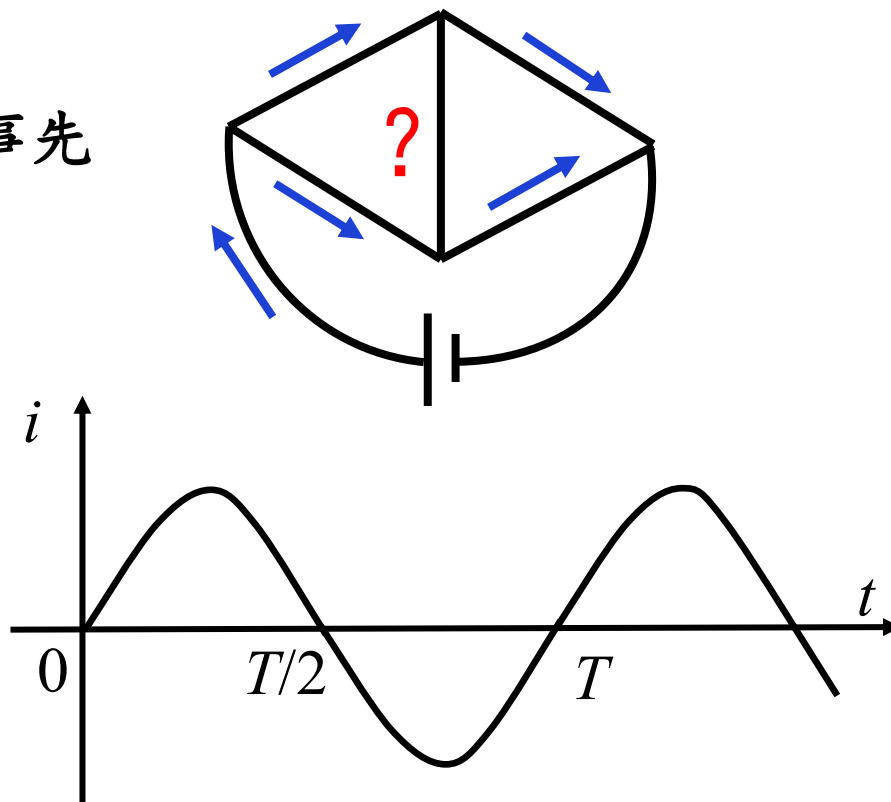
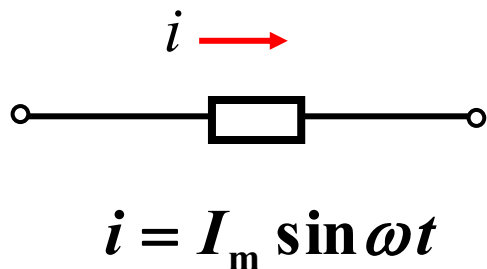
参考方向：任意选定的一个方向即为电流的参考方向。



1.3 电路变量

为什么要引入参考方向？

- 复杂电路的某些支路，事先无法确定实际方向。
- 电流是交变的

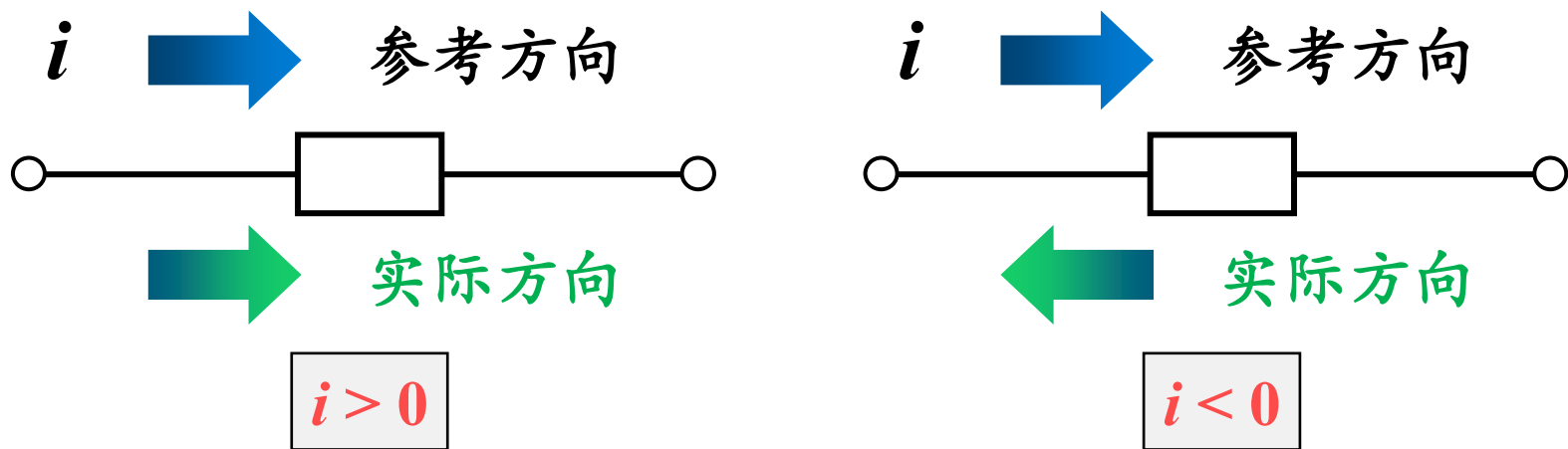


当 $0 < t < T/2$, $i > 0$ 电流实际方向与参考方向**相同**

当 $T/2 < t < T$, $i < 0$ 电流实际方向与参考方向**相反**

1.3 电路变量

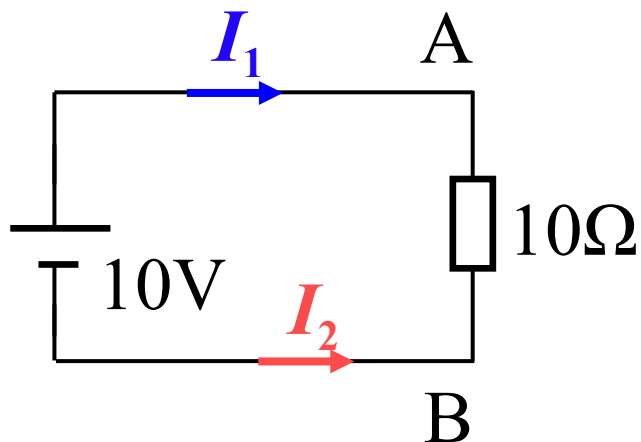
电流的参考方向与实际方向的关系：



电流参考方向的两种表示：

- 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。

1.3 电路变量



电路中电流 I 的大小为 1A ,
其方向为从 A 流向 B。
(此为电流的实际方向)

若参考方向如 I_1 所示, 则 $I_1 = 1\text{A}$

若参考方向如 I_2 所示, 则 $I_2 = -1\text{A}$

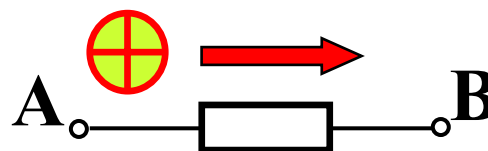
因此, 同一支路的电流可用两种方法表示。

1.3 电路变量

1.3.3 电压与电位

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

$$u_{AB} = \frac{dW_{AB}}{dq}$$

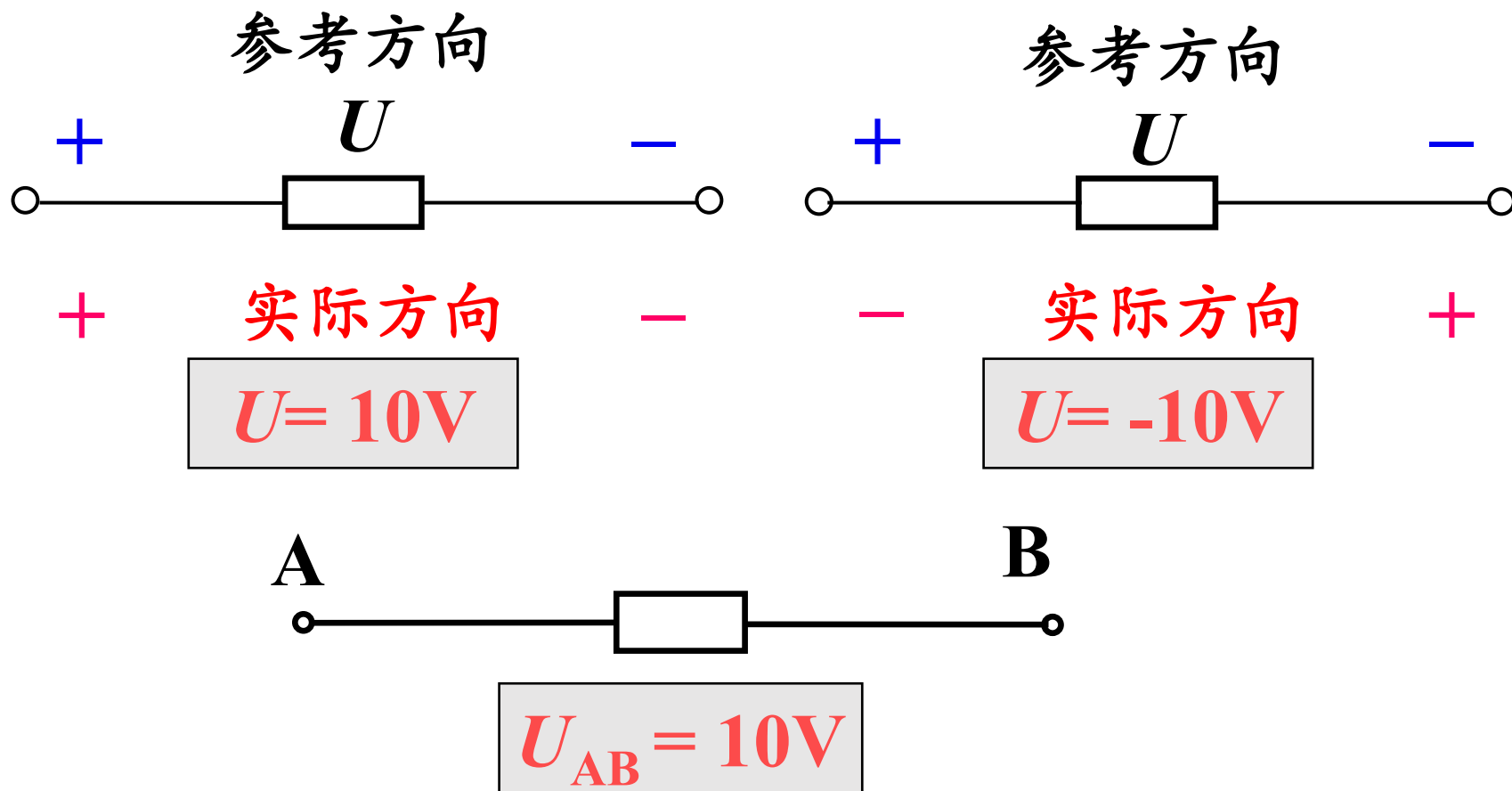


单位名称：伏[特] 符号：V

(Volt, 伏特; 1745 – 1827, Italian)

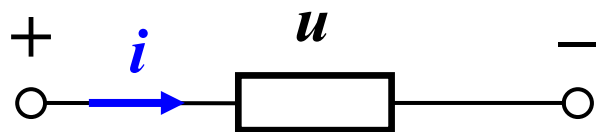
1.3 电路变量

电压（降）的参考方向：

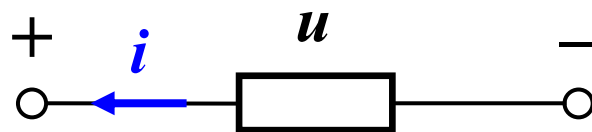


1.3 电路变量

- 分析电路前**必须选定**电压和电流的参考方向
- 参考方向选定后，**必须**在图中相应位置**标注**（包括方向和符号），在计算过程中**不得任意改变**
- 参考方向不同时，其表达式符号也不同，但**实际方向不变**
- 在**关联参考方向**上，流过元件的电流由高电位流向低电位；反之则为非关联参考方向。



关联参考方向



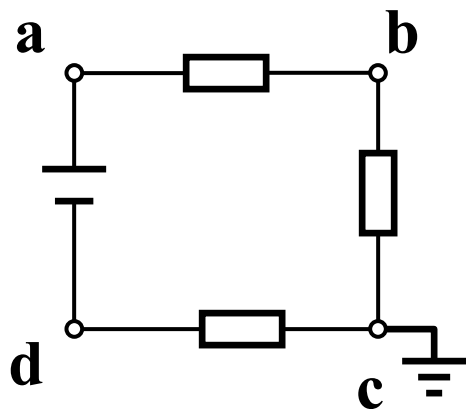
非关联参考方向

1.3 电路变量

在分析电路问题时，常在电路中选一个点为参考点，把任一点到参考点的电压（降）称为该点的**电位**。

参考点的电位为**零**，参考点也称为**零电位点**。

电位用 φ （或 U ）表示，单位与电压相同，也是**V（伏）**。

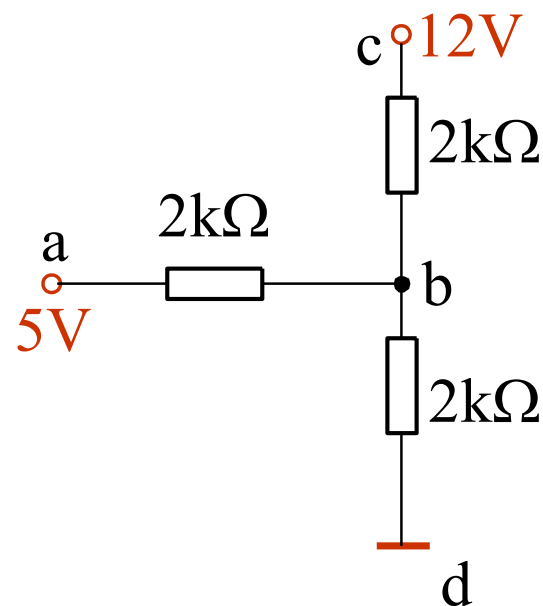
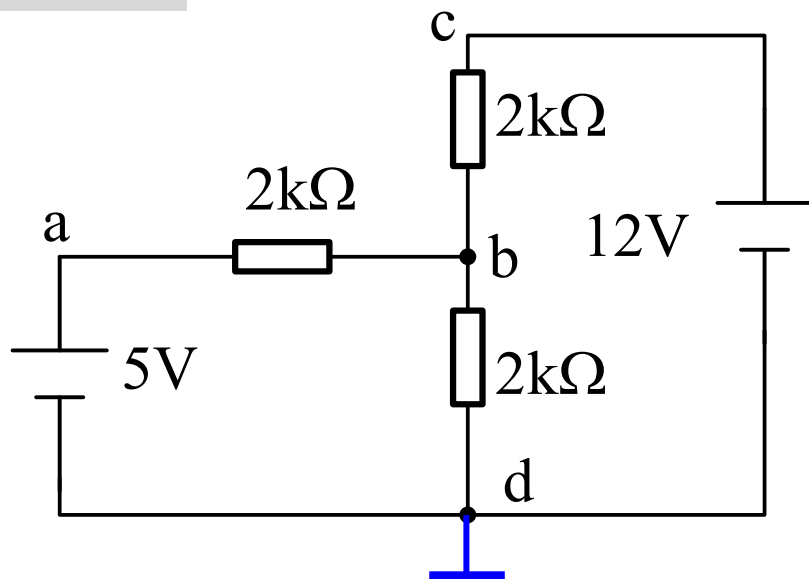


设c点为电位参考点，则 $U_c = 0$

$$U_a = U_{ac}, \quad U_b = U_{bc}, \quad U_d = U_{dc}$$

1.3 电路变量

例1-1 求 U_{ac}



解 $U_{ad} = 5V$ $U_{cd} = 12V$

$$U_a = 5V \quad U_c = 12V$$

选择d点为电位参考点较为合适

$$U_{ac} = U_a - U_c = -7V$$

1.3 电路变量

1.3.4 功率与能量

电功率：单位时间内电场力所做的功。

$$u = \frac{dw}{dq}, i = \frac{dq}{dt} \quad \longrightarrow \quad p = \frac{dw}{dt} = \frac{dw}{dq} \frac{dq}{dt} = ui$$

功率的单位名称：瓦[特] 符号：W

(Watt, 瓦特; 1736–1819, British)

电能： $\Delta w(t) = \int_{t_0}^t p(t)dt \quad \longrightarrow \quad w(t) = \int_{-\infty}^t p(t)dt$

能量的单位名称：焦[耳] 符号：J

(Joule, 焦耳; 1818–1889, British)

1.3 电路变量

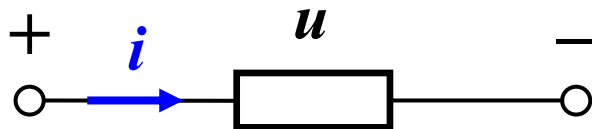
电功率计算：

1. u, i 关联参考方向

元件吸收的功率： $P_{\text{吸}} = ui$

$P > 0$ 吸收正功率 （实际吸收）

$P < 0$ 吸收负功率 （实际发出）

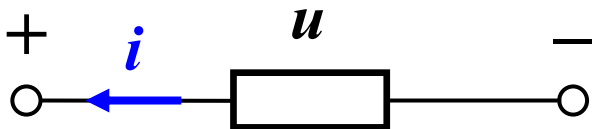


2. u, i 非关联参考方向

元件发出的功率： $P_{\text{发}} = ui$

$P > 0$ 发出正功率 （实际发出）

$P < 0$ 发出负功率 （实际吸收）



集中参数电路都满足功率守恒：
(conservation of power)

$$\sum_{k=1}^b p_k = 0$$

1.4 电路元件

电路元件是组成电路模型的基本单元，主要分为两类：

无源元件 (Passive elements) :

不能向电路提供电能的元件，即在任何工作状态下，一个变化周期内均有

$$w = \int_{t_1}^{t_1+T} p(t) dt \geq 0$$

有源元件 (Active elements) :

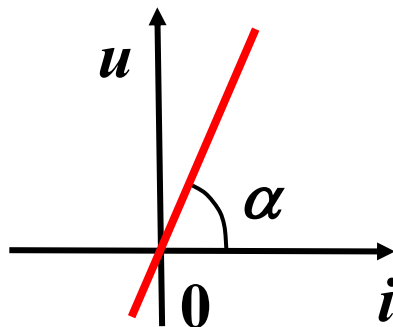
可以向电路提供电能的元件，即在任意变化周期内有：

$$w = \int_{t_1}^{t_1+T} p(t) dt \leq 0$$

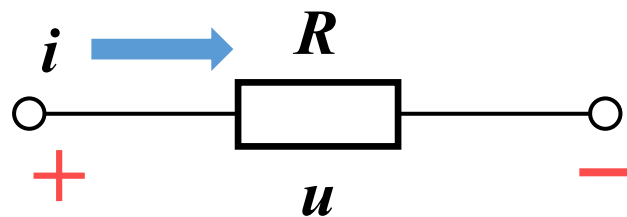
1.4 电路元件

1.4.1 电阻

(1) 电阻的 u - i 关系



$$R = \tan \alpha$$

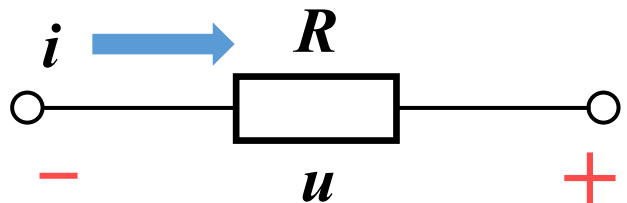


$$u = Ri$$

欧姆定理

电导 $G = 1/R$

$$i = Gu$$



$$u = -Ri$$

$$i = -Gu$$

单位名称：欧[姆] 符号： Ω

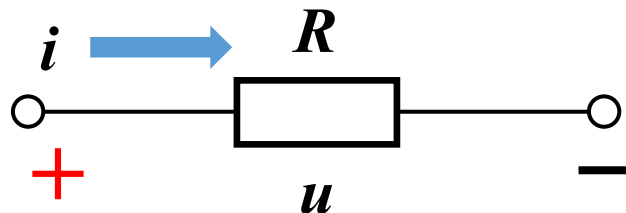
单位：S (西)

(Ohm, 欧姆; 1787–1854, Germany)

(Siemens, 西门子)

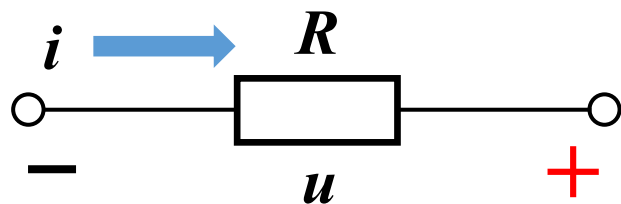
1.4 电路元件

(2) 电阻的功率



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

无论参考方向如何选取，
电阻始终消耗电功率。

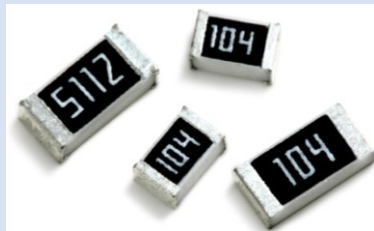





$$\begin{aligned} p_{\text{吸}} &= -ui = -(-Ri)i = i^2 R \\ &= -u(-u/R) = u^2 / R \end{aligned}$$

(3) 电阻的类型

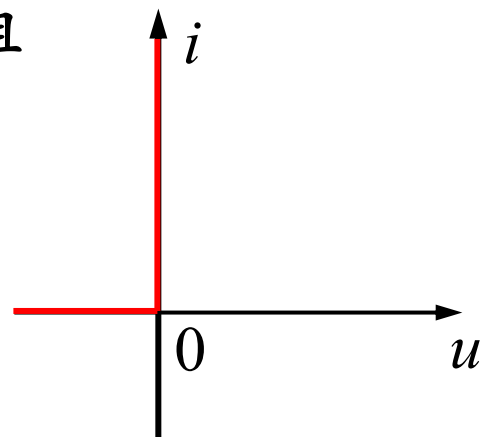
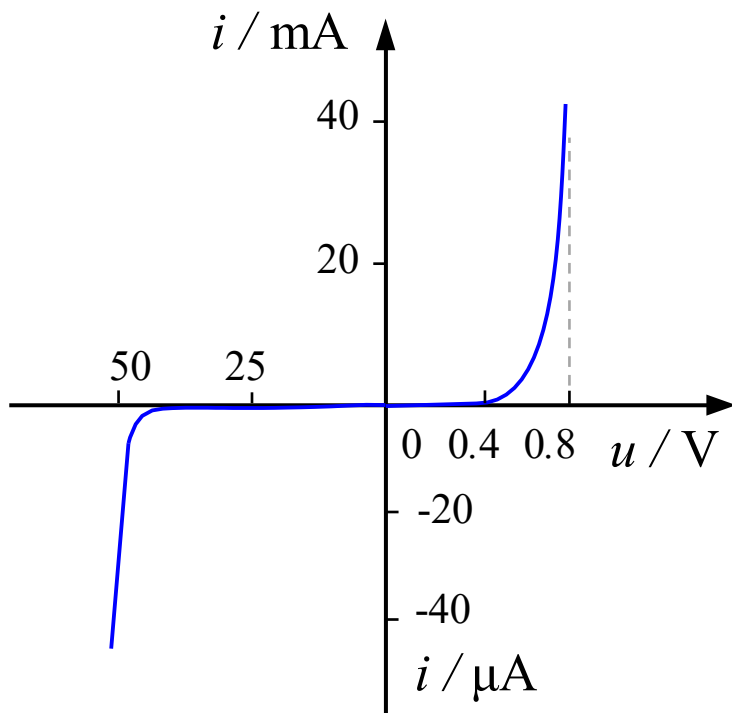
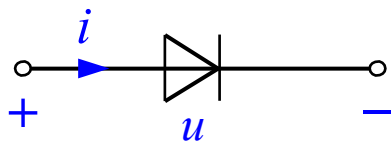
	时不变电阻	时变电阻
线性电阻	$u = Ri$	$u = R(t)i$
非线性电阻	$f(u, i) = 0$	$f(u, i, t) = 0$

1.4 电路元件

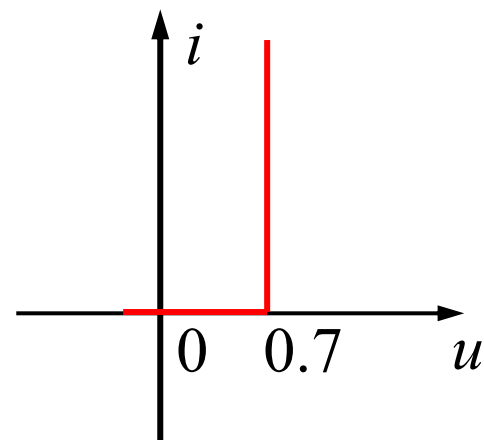
类型	特点	图片
贴片电阻	体积小 重量轻 可靠性高	
碳膜电阻	阻值范围宽 价格低廉	
金属膜电阻	稳定性高 精度高	
线绕电阻	功率大	

1.4 电路元件

半导体二极管：典型非线性非时变电阻



理想二极管特性



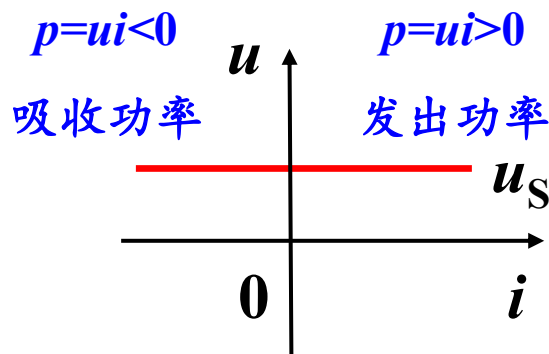
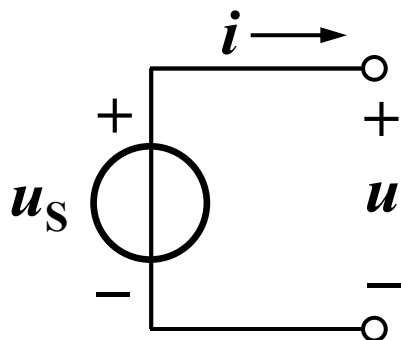
二极管近似 u - i 特性

1.4 电路元件

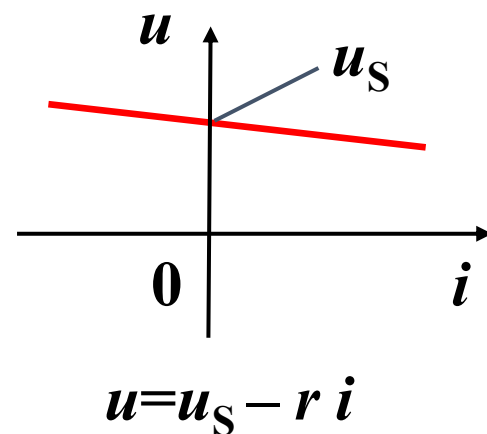
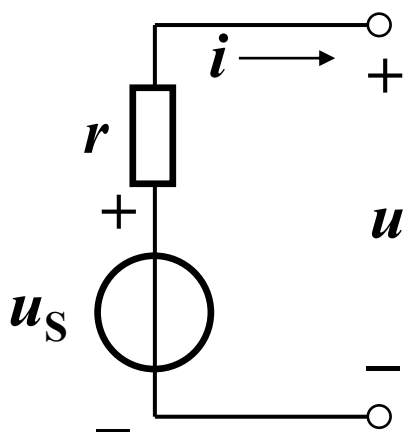
1.4.2 独立电源

- 电压源** (a) 电源两端电压由电源本身决定，与外电路无关；
(b) 通过它的电流由外电路决定。

理想电压源



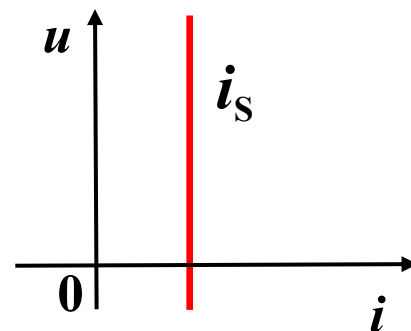
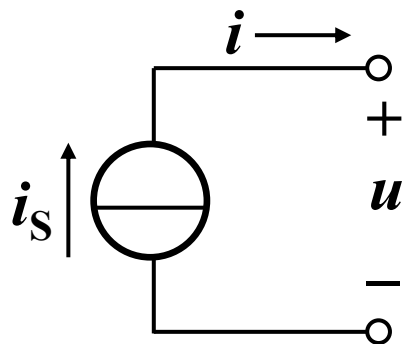
实际电压源



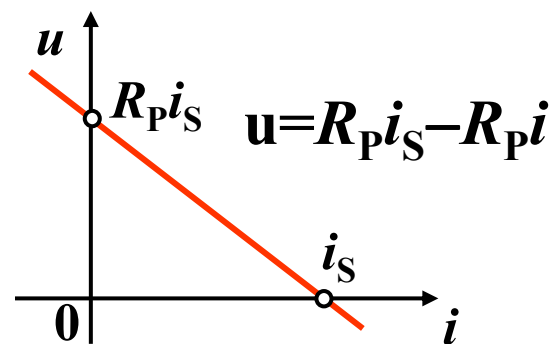
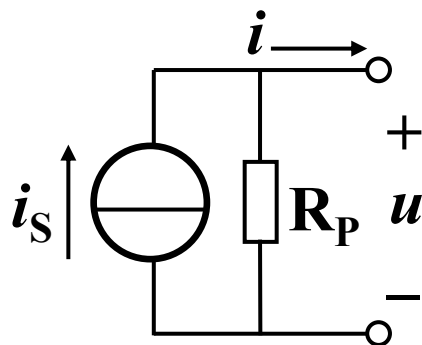
1.4 电路元件

- 电流源** (a) 电源电流由电源本身决定，与外电路无关；
(b) 电源两端电压由外电路决定。

理想电流源



实际电流源



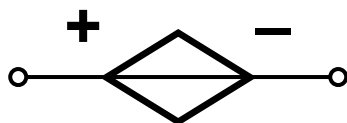
理想电压源不允许短路，开路时： $R \rightarrow \infty$, $i = 0$, $u = u_S$

理想电流源不允许开路，短路时： $R = 0$, $i = i_S$, $u = 0$

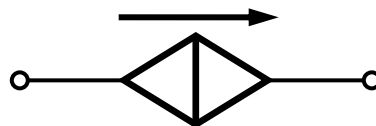
1.4 电路元件

1.4.3 受控电源

电压源电压或电流源电流不是给定的时间函数，而是受电路中某个支路（或元件）的电压（或电流）的控制。

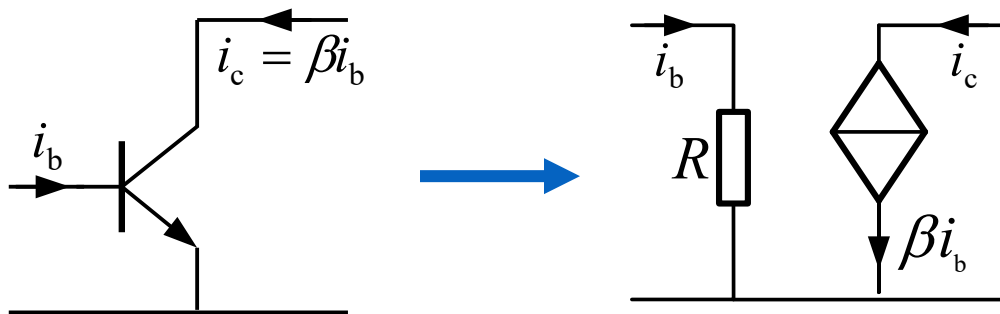


受控电压源

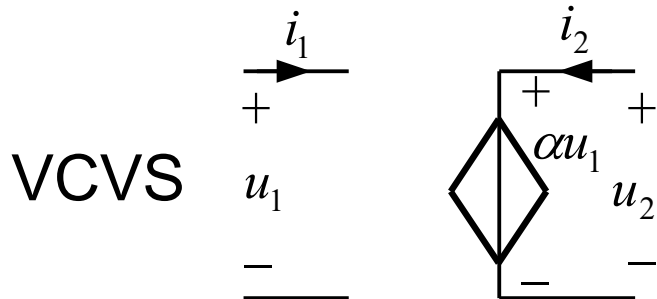


受控电流源

典型受控源：晶体管



电压控制的电压源

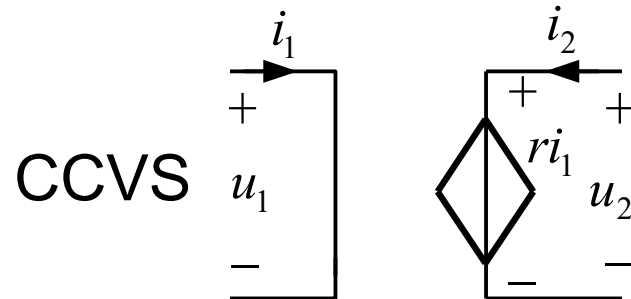


$$i_1 = 0$$

$$\alpha: \text{电压放大倍数}$$

$$u_2 = \alpha u_1$$

电流控制的电压源

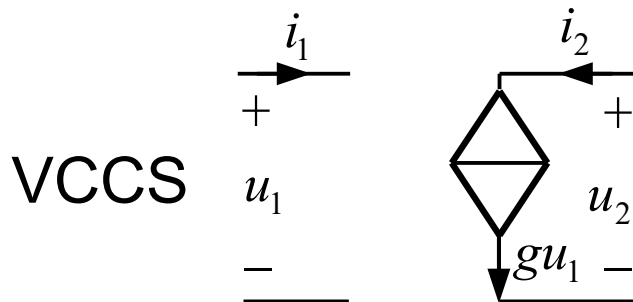


$$u_1 = 0$$

$$r: \text{转移电阻}$$

$$u_2 = r i_1$$

电压控制的电流源

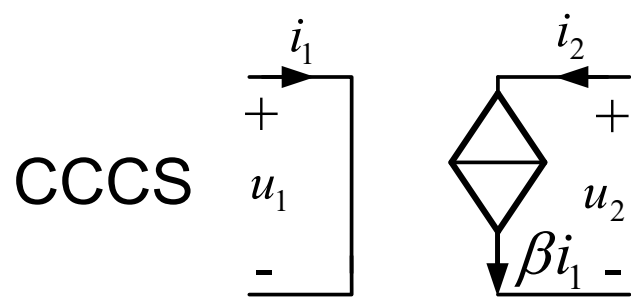


$$i_1 = 0$$

$$g: \text{转移电导}$$

$$i_2 = g u_1$$

电流控制的电流源



$$u_1 = 0$$

$$\beta: \text{电流放大倍数}$$

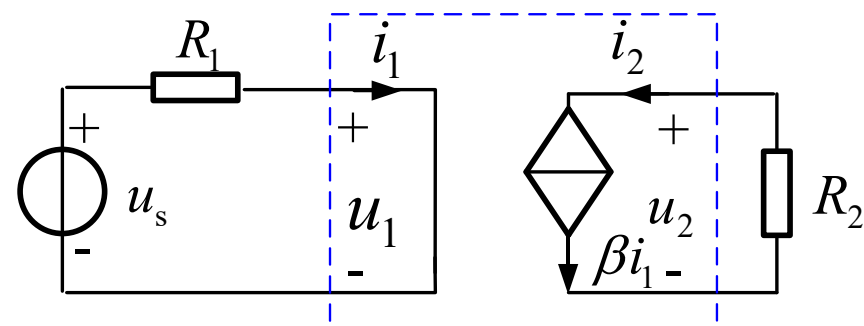
$$i_2 = \beta i_1$$

1.4 电路元件

受控源与独立源的对比：

1. 独立源电压（或电流）由电源本身决定，与电路中其他电压、电流无关，而受控源电压（或电流）直接由控制量决定。
2. 独立源作为电路中“激励（*excitation*）”，在电路中产生电压、电流，而受控源只是反映电压、电流之间的控制关系，在电路中不能作为“激励”。

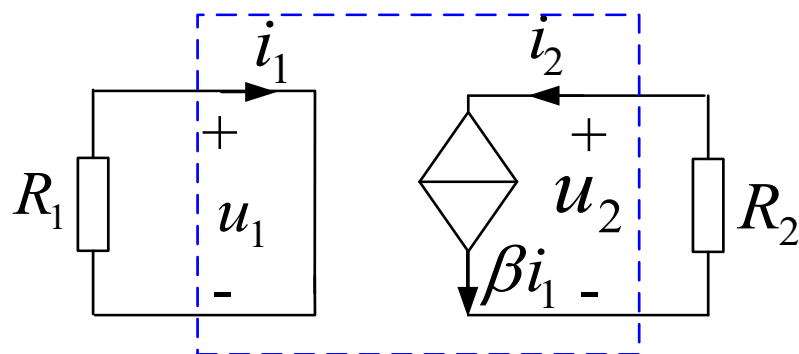
例1-2 计算线性受控源的功率。



$$i_1 = \frac{u_s}{R_1} \quad p = u_2 i_2 = (-\beta i_1 R_2)(\beta i_1)$$

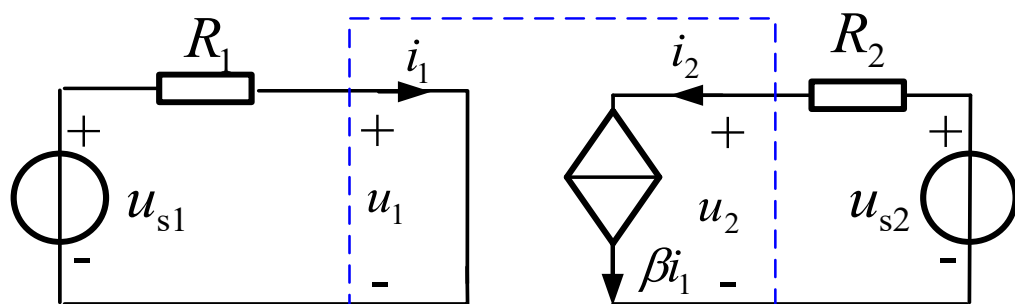
$$= -R_2 \beta^2 \frac{u_s^2}{R_1^2} < 0$$

发出功率



$$p = u_2 i_2 = -R_2 \beta i_1 i_2 = 0$$

功率为零



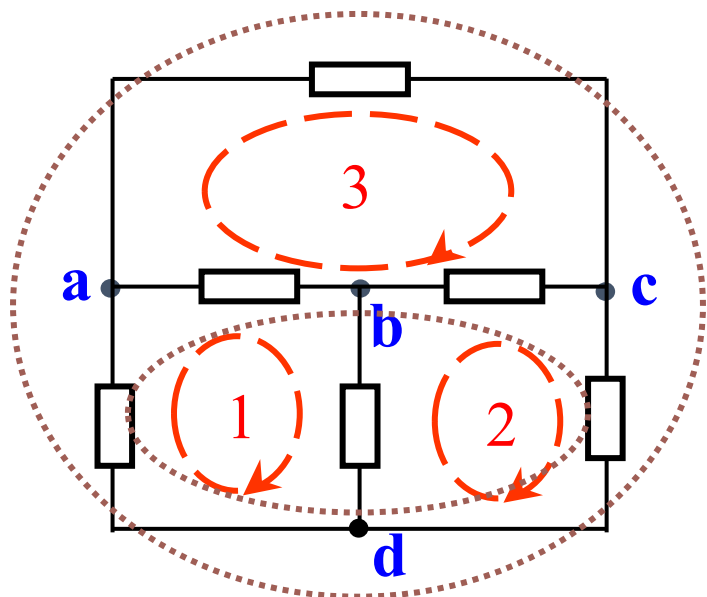
$$i_1 = \frac{u_{s1}}{R_1} \quad u_2 = u_{s2} - R_2 \beta i_1$$

$$p = u_2 i_2 = (u_{s2} - R_2 \beta \frac{u_{s1}}{R_1}) \beta \frac{u_{s1}}{R_1}$$

也可吸收功率

1.5 基尔霍夫定律

1.5.1 电路术语



$$b = 6 \quad n = 4$$

$$l = 5 \quad m = 3$$

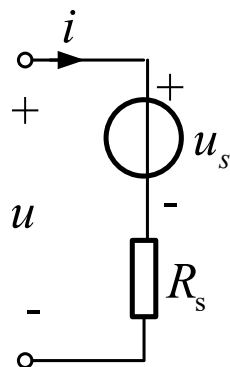
$$\text{平面电路网孔个数} = \text{支路数} - \text{节点数} + 1 \\ (m = b - n + 1)$$

1. **支路 (branch)**: 一个二端元件或串并联组合。(支路数 b)
2. **结点 (node)**: 支路与支路之间的连接点。(结点数 n)
3. **回路 (loop)**: 由支路组成的闭合路径。(回路数 l)
4. **网孔 (mesh)**: 电路内部不含任何分支的回路。(网孔数 m)

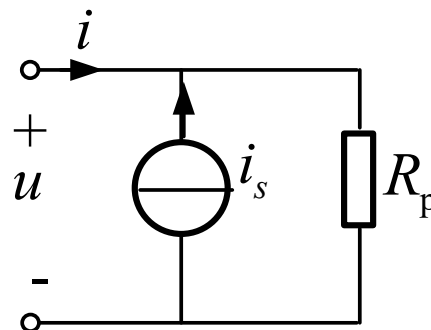
1.5 基尔霍夫定律

注意1：两条特殊的支路：

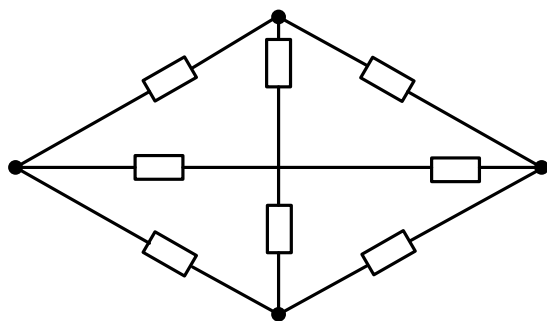
戴维南支路



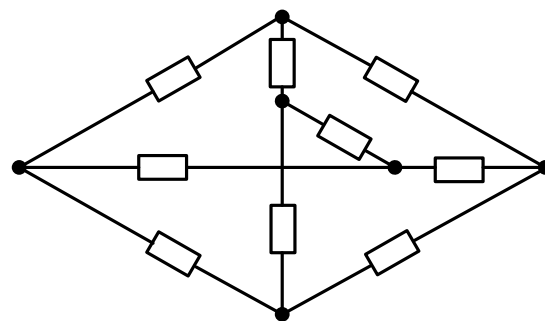
诺顿支路



注意2：网孔的概念仅适用于平面电路。平面电路是指支路间没有交叉点的电路。



平面电路

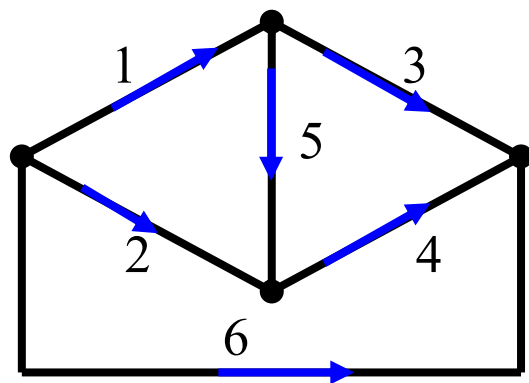
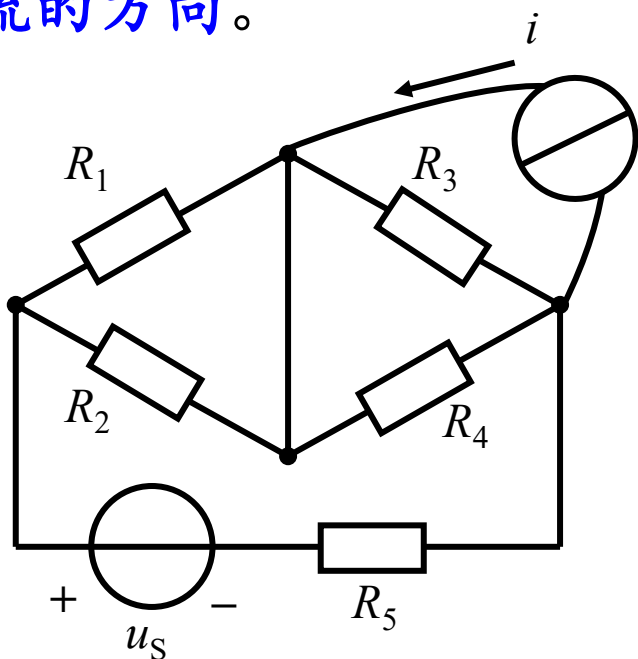


非平面电路

1.5 基尔霍夫定律

有向图

抛开元件性质，将**结点用点表示**，**支路用线段表示**，**支路电流方向用箭头表示**的图。体现**电路的结构**和**支路电流的方向**。

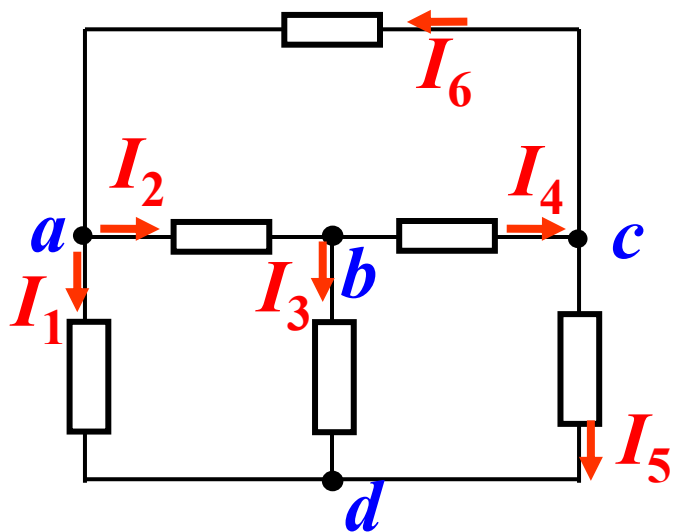


1.5 基尔霍夫定律

1.5.2 基尔霍夫电流定律 (KCL)

在任何集中参数 (*lumped parameter*) 电路中, 在任一时刻, 流出 (流入) 任一节点各支路电流的代数和为零。

$$\sum I_k = 0$$



结点a: $I_1 + I_2 - I_6 = 0$

结点b: $-I_2 + I_3 + I_4 = 0$

结点c: $-I_4 + I_5 + I_6 = 0$

结点d: $-I_1 - I_3 - I_5 = 0$

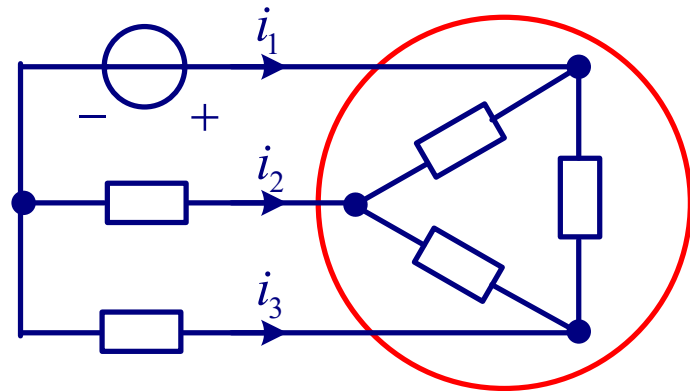
仅有三个
独立方程

结论: 对于n个结点的电路, 有且仅有n-1个独立的KCL方程。

1.5 基尔霍夫定律

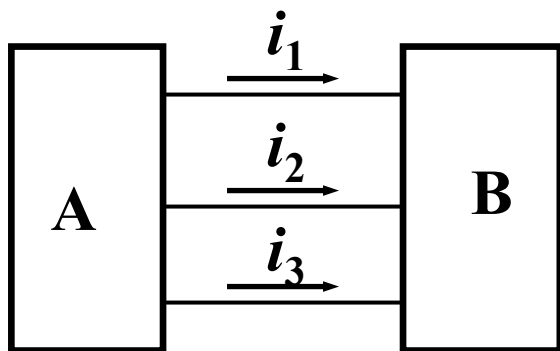
- KCL的物理实质是**电流连续性原理**在集中参数电路中的表现。所谓电流连续性：在任何一个无限小的时间间隔里，流入节点和流出节点的电流必然是相等的，或在节点上不可能有电荷的积累，即每个节点上电荷守恒。
- KCL的重要性和普遍性还体现在该定律**与电路中元件的性质无关**，即不管电路中的元件是 R 、 L 、 C 、 M 、受控源、电源，也不管这些元件是线性、时变、定常、...
- KCL也**适用于广义结点**，即适合于一个闭合面。右图所示电路，根据KCL设流入结点的电流为负，则：

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

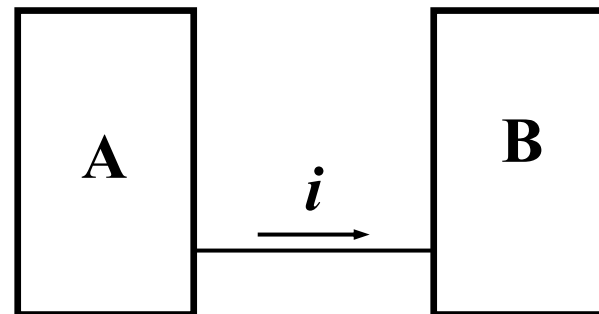


1.5 基尔霍夫定律

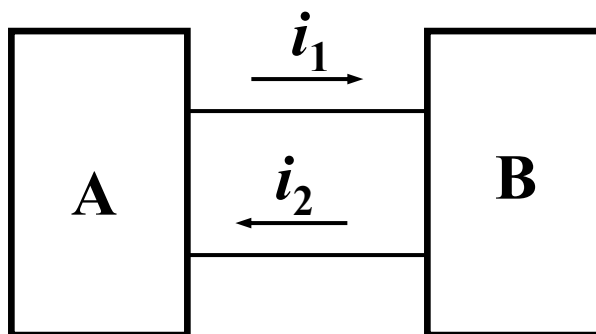
KCL推广应用举例



$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$



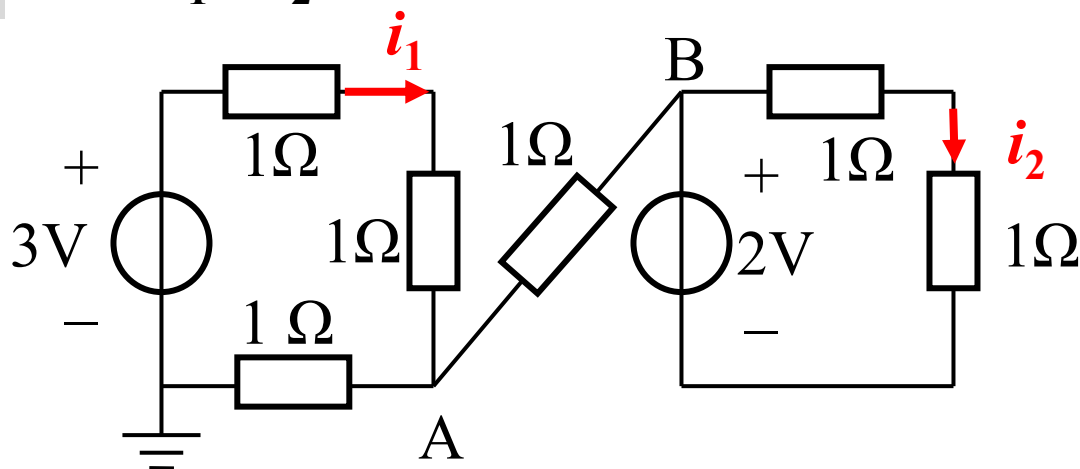
$$i = 0$$



$$i_1 = i_2$$

1.5 基尔霍夫定律

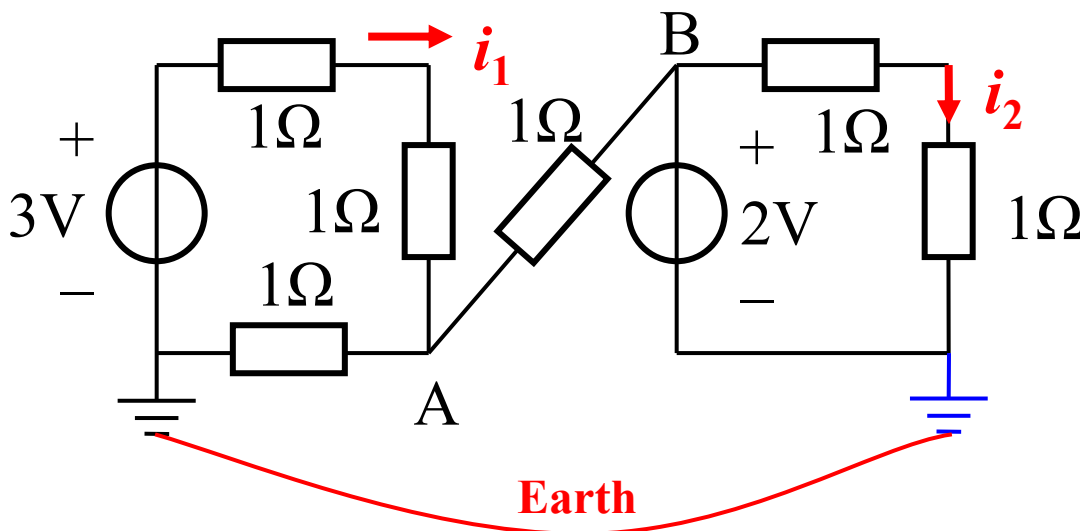
例1-3 计算 i_1 、 i_2



$$U_A = U_B?$$

$$U_A = U_B$$

$$i_1 = i_2 = 1.0\text{A}$$



$$U_A \neq U_B?$$

$$i_1 = 0.8\text{A}$$

$$i_{BA} = 0.6\text{A}$$

$$i_2 = 1.0\text{A}$$

1.5 基尔霍夫定律

1.5.3 基尔霍夫电压定律 (KVL)

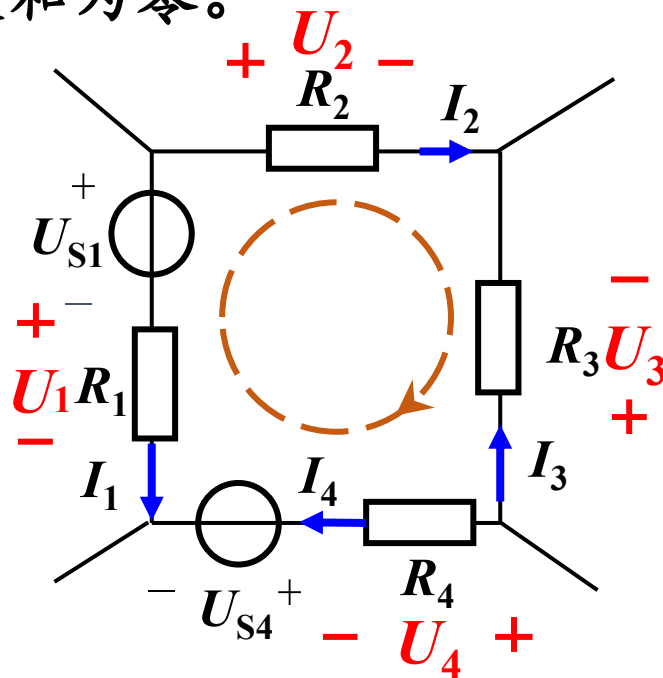
在任何集中参数电路中，在任一时刻，沿任一闭合路径（按固定绕向），各支路电压的代数和为零。

$$\sum U_k = 0$$

$$-R_1 I_1 - U_{S1} + R_2 I_2 - R_3 I_3 + R_4 I_4 + U_{S4} = 0$$

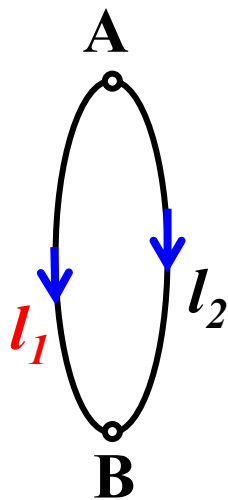
$$-R_1 I_1 + R_2 I_2 - R_3 I_3 + R_4 I_4 = U_{S1} - U_{S4}$$

$\sum U_R$	=	$\sum U_S$
电阻压降		电源压升



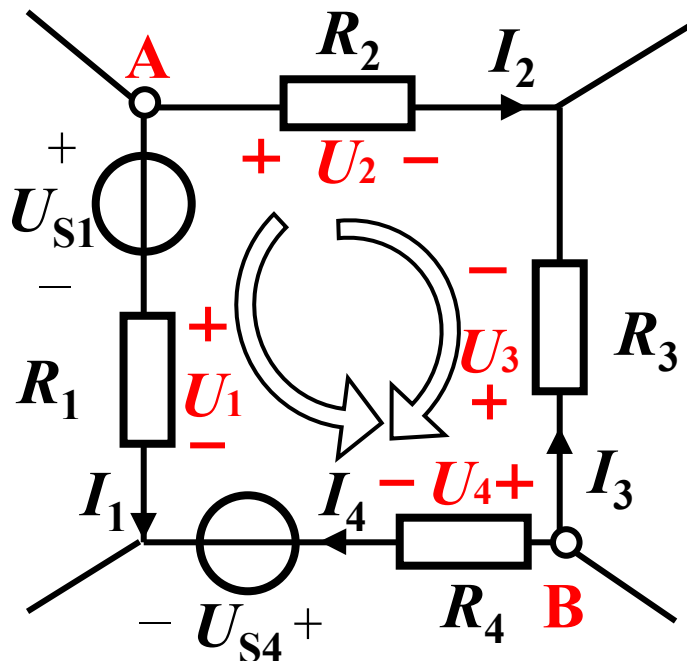
1.5 基尔霍夫定律

推论：电路中任意两点间的电压等于两点间任一条路径经过的各元件电压的代数和。



$$U_{AB} (\text{沿 } l_1) = U_{AB} (\text{沿 } l_2)$$

电位的单值性



$$U_{AB} = U_2 - U_3$$

$$U_{AB} = U_{S1} + U_1 - U_{S4} - U_4$$

1.5 基尔霍夫定律

- KVL实质上是**能量守恒定律在集中参数电路中的反映**。单位正电荷在电场作用下，由任一点出发，沿任意路经绕行一周又回到原出发点，它获得的能量（即电位升）必然等于在同一过程中所失去的能量（即电位降）。
- KVL的重要性的普遍性也体现在该定律与回路中元件的性质无关。

1.5 基尔霍夫定律

例1-4 列出电路所有回路的电压方程

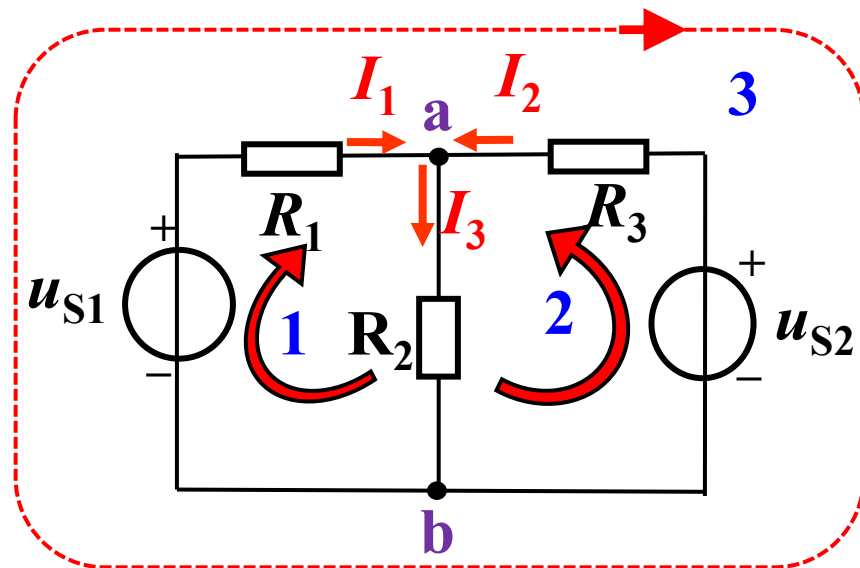
解: $b=3, n=2, l=3, m=2$

各支路电流如图所示

回路1: $R_1 I_1 + R_2 I_3 - U_{S1} = 0$

回路2: $R_3 I_2 + R_2 I_3 - U_{S2} = 0$

回路3: $R_1 I_1 - R_3 I_2 + U_{S2} - U_{S1} = 0$



结论: 对于 n 个结点、 b 条支路的电路, 可以列写 $b-n+1$ 个独立的KVL方程, 方程数等于网孔数量

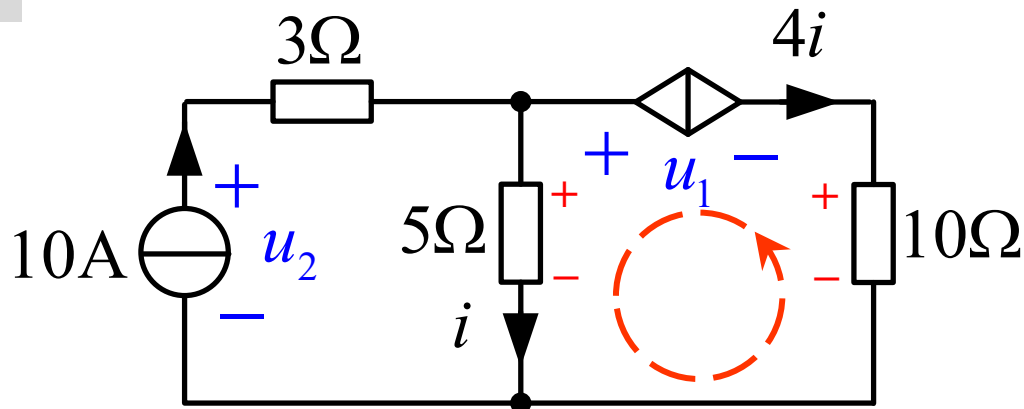
1.5 基尔霍夫定律

KCL, KVL小结:

1. KCL是对连到结点的支路电流的线性约束, KVL是对回路中支路电压的线性约束。
2. KCL、KVL与组成支路的元件性质及参数无关。
3. KCL表明在每一结点上电荷是守恒的; KVL是电位单值性的具体体现(电压与路径无关)。
4. KCL、KVL只适用于集中参数的电路。
5. 有 n 个结点、 b 条支路的电路, 可列写 $n-1$ 个独立的KCL方程, $b-n+1$ 个独立的KVL方程。

习题练习

例1-5 计算受控电源、独立电流源的功率



解 KCL: $-10 + 4i + i = 0 \implies i = 2\text{A}$

KVL: $-u_1 + 5i - 10 \times 4i = 0 \implies u_1 = -70\text{V}$

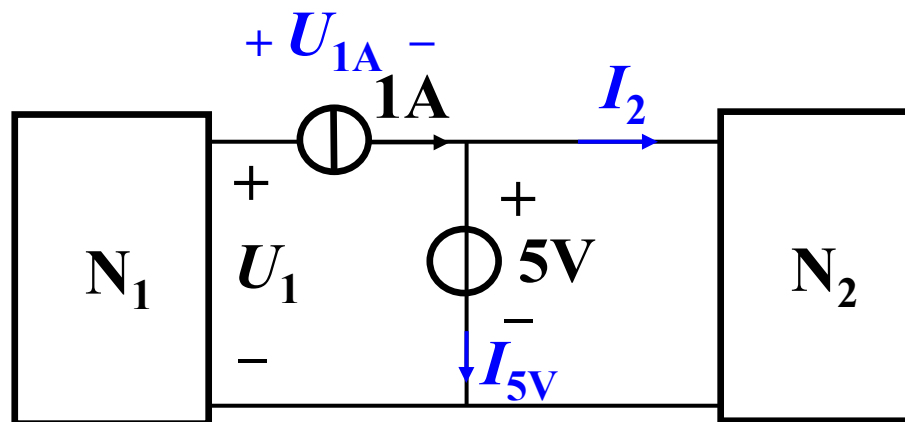
$p_1 = 4i \times u_1 = -560\text{W}$ 发出560W

KVL: $-u_2 + 3 \times 10 + 5i = 0 \implies u_2 = 40\text{V}$

$p_2 = 10 \times u_2 = 400\text{W}$ 发出400W

习题练习

例1-6 N_1 提供10W, N_2 吸收15W, 计算各独立电源的功率



解 N_1 为**非关联**参考方向: $U_1 = 10/1 = 10V$

N_2 为**关联**参考方向: $I_2 = 15/5 = 3A$

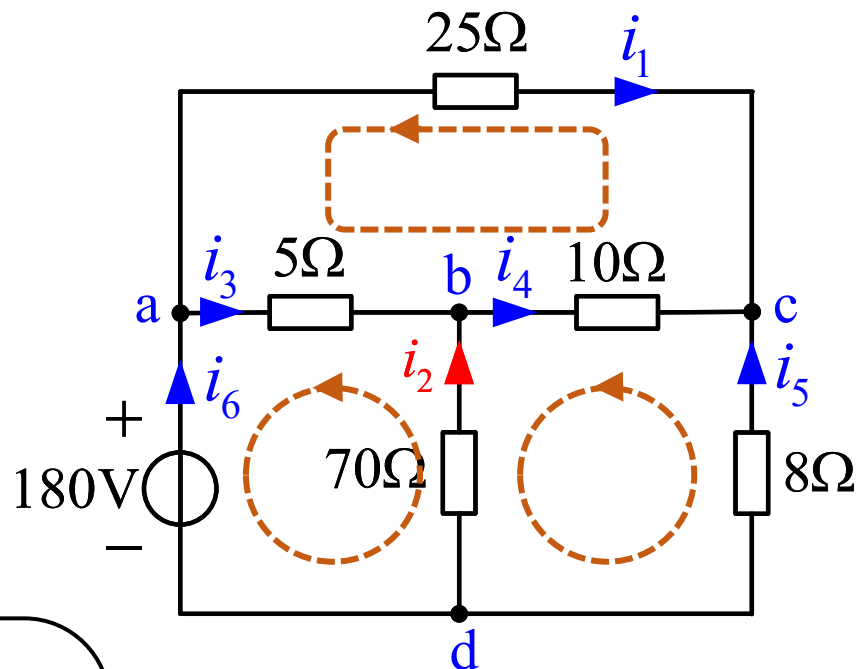
$$P_{1A} = 1 \times (U_1 - 5) = 5W \quad \text{实际吸收5W}$$

$$P_{5V} = 5 \times (1 - I_2) = -10W \quad \text{实际发出10W}$$

习题练习

例1-7 计算支路电路电流 i_2

解 1) 标记各支路结点和电流,
各电阻电压为关联参考方向
2) 列写独立的KCL方程
3) 标明回路绕行方向, 列写
KVL方程



KCL:

$$i_6 - i_1 - i_3 = 0$$

$$i_2 + i_3 - i_4 = 0$$

$$i_1 + i_4 + i_5 = 0$$

KVL:

$$70i_2 - 5i_3 + 180 = 0$$

$$5i_3 + 10i_4 - 25i_1 = 0$$

$$8i_5 - 10i_4 - 70i_2 = 0$$

$$i_1 = 4\text{A} \quad i_2 = -2\text{A}$$

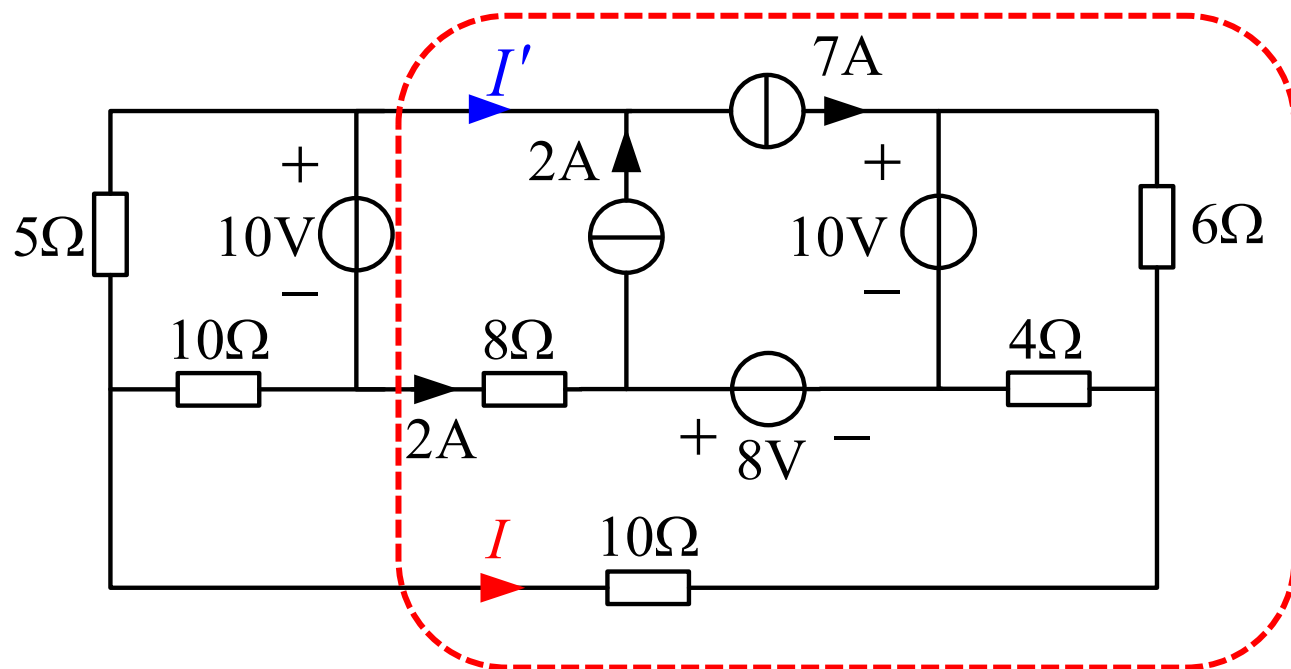
$$i_3 = 8\text{A} \quad i_4 = 6\text{A}$$

$$i_5 = -10\text{A} \quad i_6 = 12\text{A}$$

习题练习

例1-8 求图示电路中的电流 I

广义结点



$$b = 12$$

$$n = 8$$

$$m = 5$$

KCL: 7个

KVL: 5个

解 $I' + 2 + I = 0$

$$I' + 2 - 7 = 0 \Rightarrow I = -7\text{A}$$

习题练习

例1-9 计算 u_8 支路电压

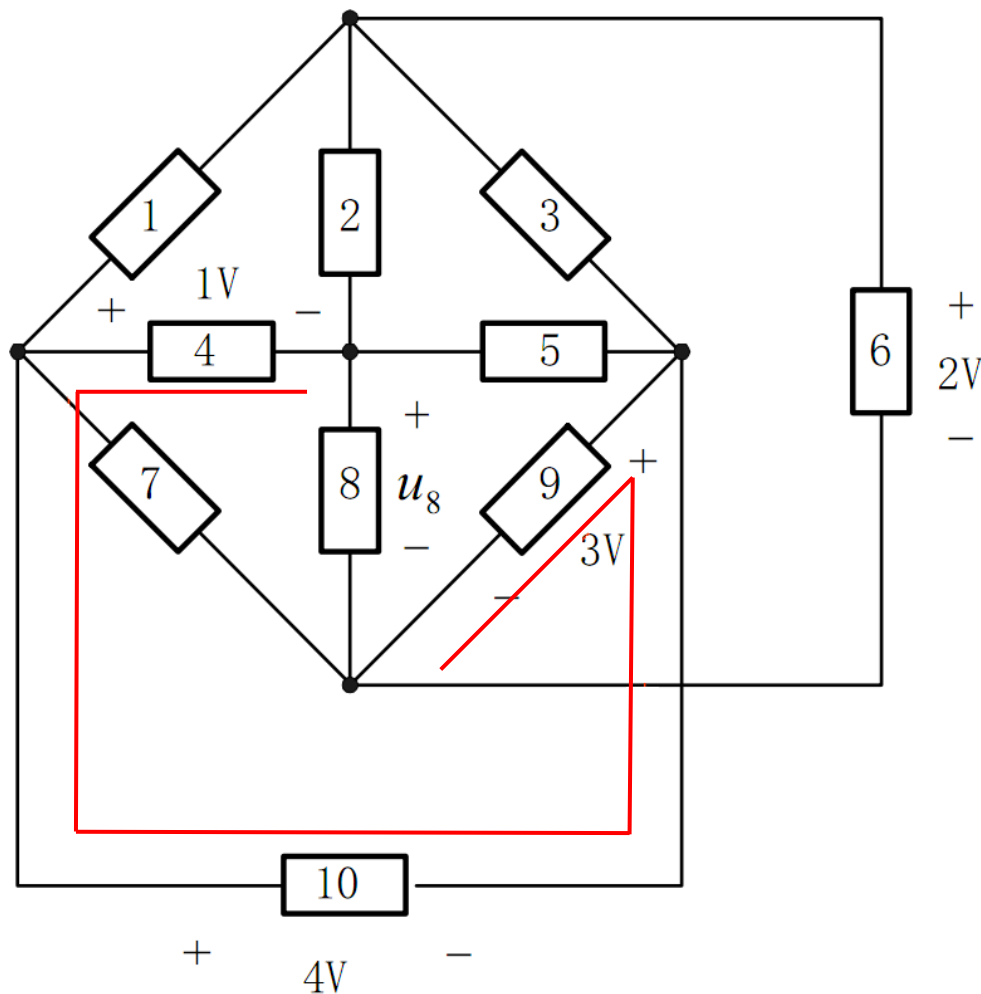
解 $u_8 - 3 - 4 + 1 = 0$
 $\Rightarrow u_8 = 6V$



思考：

1) 已知哪些支路电压，就可以求出所有支路电压？

2) 已知哪些支路电流，就可以求出所有支路电流？



习题练习

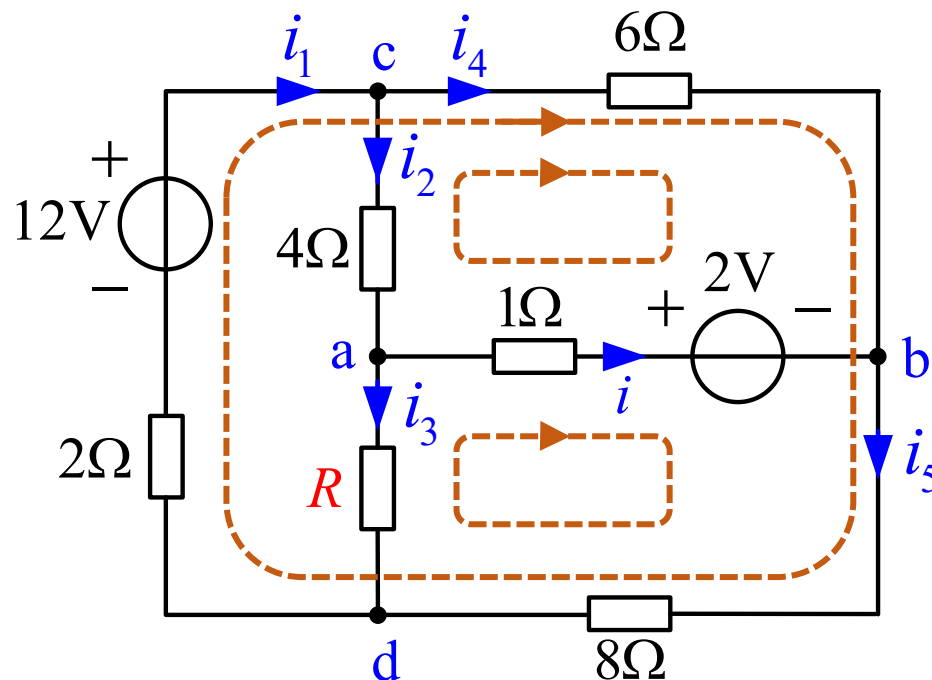
例1-10 已知2V电压源的功率为0，求电阻R。

解 $P_{2V} = ui = 0$

$$\Rightarrow i = 0 \quad U_{ab} = 2V$$

$$\text{KCL} \begin{cases} i_2 = i_3 + i = i_3 \\ i_4 = i_5 + i = i_5 \\ i_1 = i_2 + i_4 \end{cases}$$

$$\text{KVL} \begin{cases} -4i_2 + 6i_4 = 2 \\ 8i_5 + i_3R + 2 = 0 \\ 6i_4 + 8i_5 + 2i_1 = 12 \end{cases}$$



$$\begin{aligned} i_1 &= 1.21\text{A} & i_2 &= i_3 = 0.53\text{A} \\ i_4 &= i_5 = 0.68\text{A} & R &= 14.2\Omega \end{aligned}$$

课后作业

- 1.3节：1-8, 1-10
 - 1.4节：1-14
 - 1.5节：1-22
 - 综合：1-27
- 准备两本作业本（普通软抄本即可）！！！！
 - 不允许将作业写在单独的纸张上！



谢谢聆听！！

刘旭 2023/2/22