

# 电路与电子技术基础

宋雪萌

[songxuемeng@sdu.edu.cn](mailto:songxuемeng@sdu.edu.cn)

# About Me



**Dr. SONG Xuemeng (宋雪萌)**

**Assistant Professor**

**Dept. of Computer Science & Technology**

**Office: N3-422**

**E-mail: [sxmustc@gmail.com](mailto:sxmustc@gmail.com)**

**Consultation: by appointment**

- **Ph.D., National University of Singapore (2012-2016)**
- **B.Eng., University of Science and Technology of China (2008-2012)**
- **Research Interests:**
  - **Information retrieval**
  - **Multimedia analysis**

# 助教



闫赧聪  
(理论助教)



孙畅畅  
(实验助教)



张将  
(实验助教)

# 作业与考试

- 课件将通过QQ群发布
- 作业每章收一次
- 理论课：
  - 期末考试(60%)，闭卷考试
  - 平时成绩(40%)，作业及平时随堂
- 实验课：
  - 平时成绩 (100%)，优、良、中、及格、不及格。

# 课程内容

- 第一章 直流电路
- 第二章 正弦交流电路
- 第三章 非正弦交流电路与电路中的过渡过程
- 第四章 半导体器件基础
- 第五章 基本交流放大电路
- 第六章 集成运算放大器

基本电路分析

模拟电路分析

# 课程内容

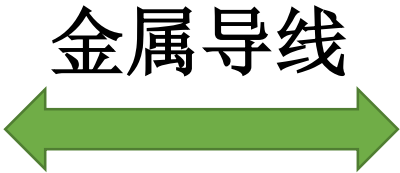
- 第一章 直流电路
- 第二章 正弦交流电路
- 第三章 非正弦交流电路与电路中的过渡过程
- 第四章 半导体器件基础
- 第五章 基本交流放大电路
- 第六章 集成运算放大器

基本电路分析

模拟电路分析

# 电路的基本概念：构成电流通路的一切设备总和。

提供电能或电信号的设备和器件称为**电源**。



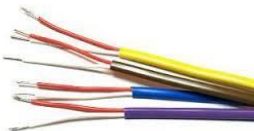
消耗电能或使用电信号的设备和器件称为**负载**。



稳压电源



蓄电池



金属导线



灯泡



冰箱



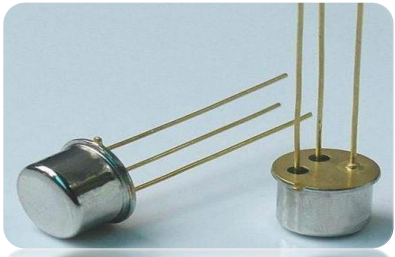
干电池



锂电池



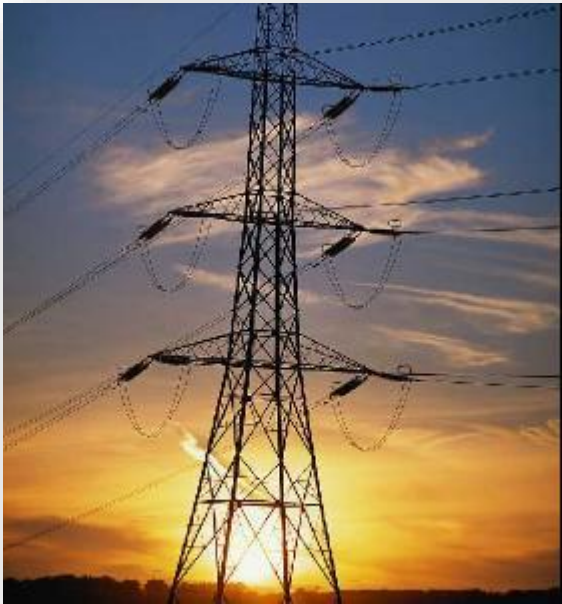
电视机



晶体管

# 电路的用途

1. 传送、分配和使用电能的电路，如照明电路、电力系统（强电）。
2. 变换、传送、处理信号的电路，如各种控制系统、计算机等（弱电）。



电力系统



计算机



# 电路的用途

1. 传送、分配和使用电能的电路，如照明电路、电力系统（强电）。
2. 变换、传送、处理信号的电路，如各种控制系统、计算机等（弱电）。

理论上讲，各种非电信号和参量都可以通过相应的装置转换成电信号，利用电路进行传递，处理，如声音、温度、压力、流量、味觉。



麦克风



声控开关



摄像头



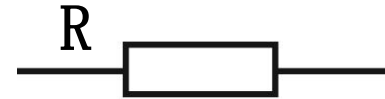
气敏陶瓷电阻

# 理想电路元件

电路分析是借助**抽象的、理想化**的模型来进行研究。

## 无源元件

- 电阻R: **热**效应, 消耗电能。



- 电感L: **磁场**效应, 存储或释放磁场能量。



- 电容C: **电场**效应, 存储或释放电场能量。

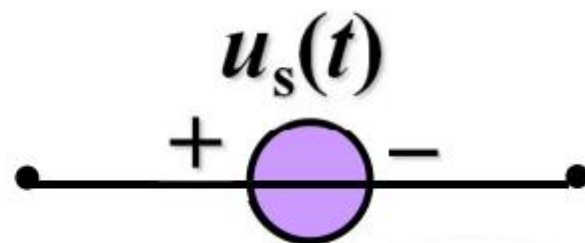
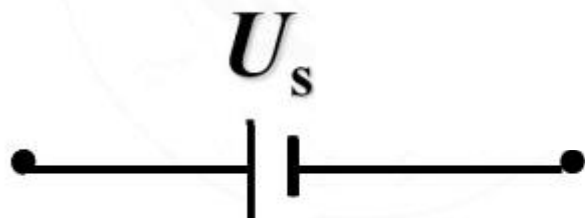


# 理想电路元件

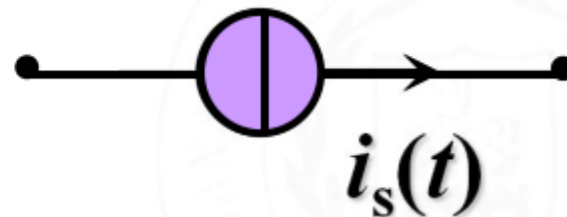
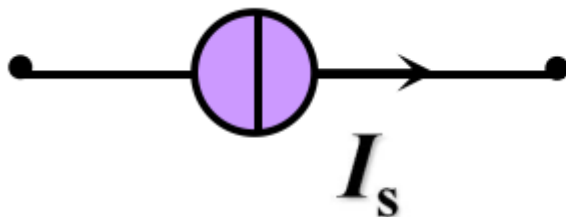
## 有源元件

- 独立电源（将其他形式的能量（机械能，化学能等）转换为电能）

- 电压源



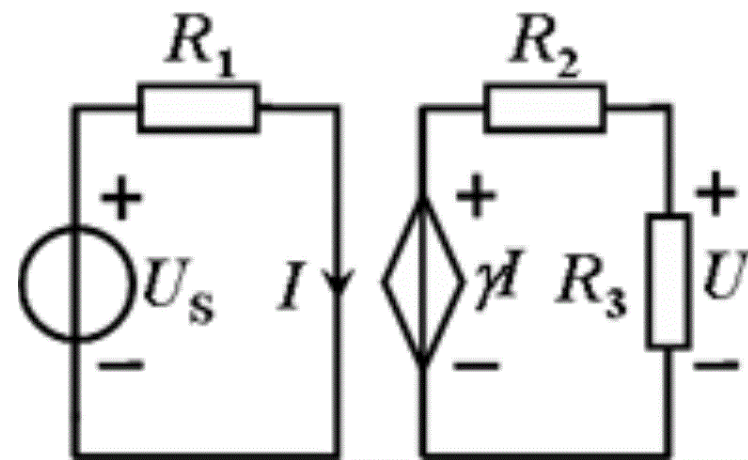
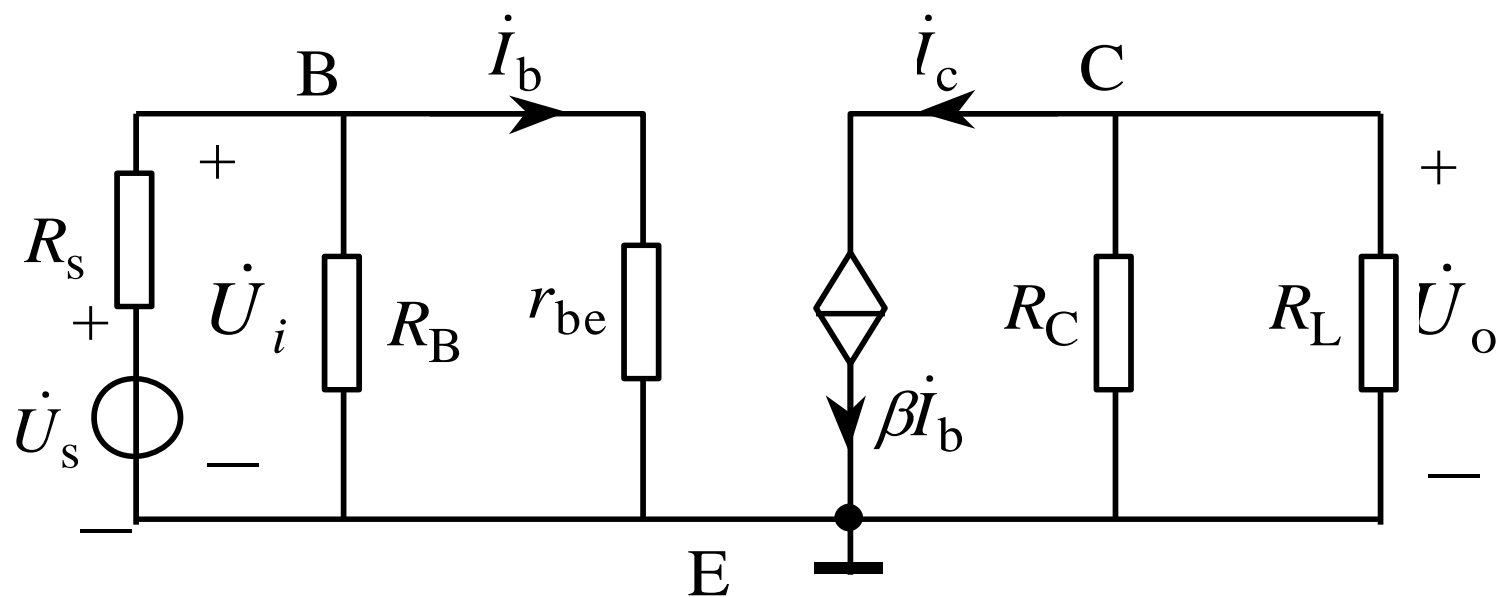
- 电流源



# 理想电路元件

## 有源元件

- 受控源（非独立源）
  - 一条支路的电压或电流受本支路以外的其它因素控制。



# 理想电路元件

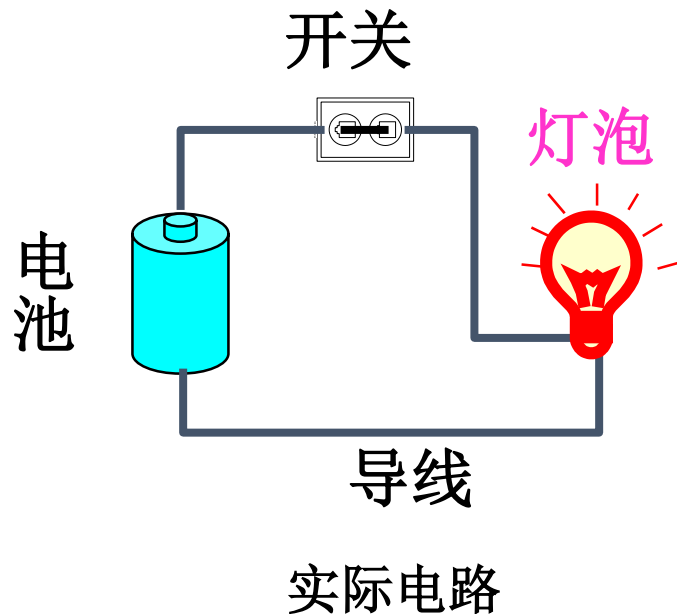
电路分析是借助**抽象的、理想化**的模型来进行研究。

理想导线：允许任意强度的电流通过而不消耗或存储任何形式的能量。  
长度随意改变。

# 理想电路元件

电路分析是借助**抽象的、理想化**的模型来进行研究。

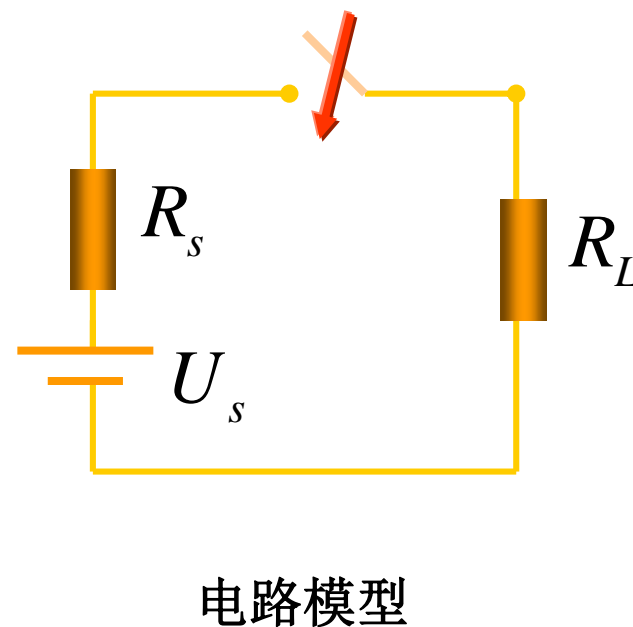
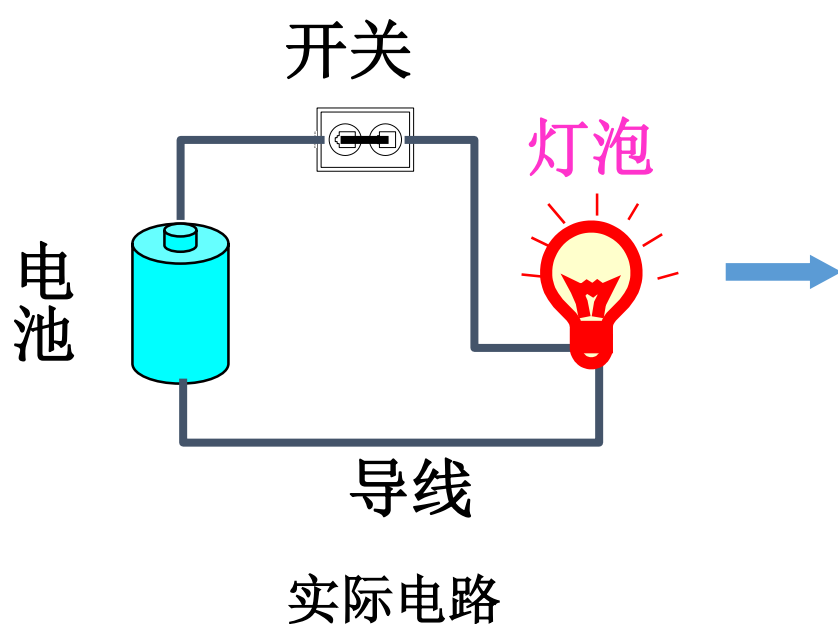
理想导线：允许任意强度的电流通过而不消耗或存储任何形式的能量。  
长度随意改变。



# 理想电路元件

电路分析是借助**抽象的、理想化**的模型来进行研究。

理想导线：允许任意强度的电流通过而不消耗或存储任何形式的能量。  
长度随意改变。



# 基本变量—电流

习惯上把**正电荷**运动的方向作为电流的方向。

电路中某处的电流的大小等于单位时间内通过该横截面的电荷量。

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

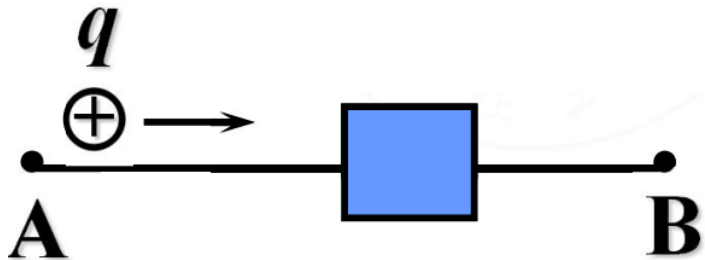
单位:**安培** (A)

$1\text{kA} = 10^3\text{A}$ ,  $1\text{mA} = 10^{-3}\text{A}$ ,  $1\mu\text{A} = 10^{-6}\text{A}$ .



# 基本变量—电压

正电荷在电路中某点所具有的能量，称为正电荷在该点具有的**电位能**。  
**AB**两点的**电压**（**端电压，电压降，电位差**），定义为单位正电荷因受电场力作用从**A**点移动到**B**点所做的功。



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

单位：**伏特**（V）

$1\text{kV} = 10^3\text{V}$ ,  $1\text{mV} = 10^{-3}\text{V}$ ,  $1\mu\text{V} = 10^{-6}\text{V}$ .

# 电路参考方向

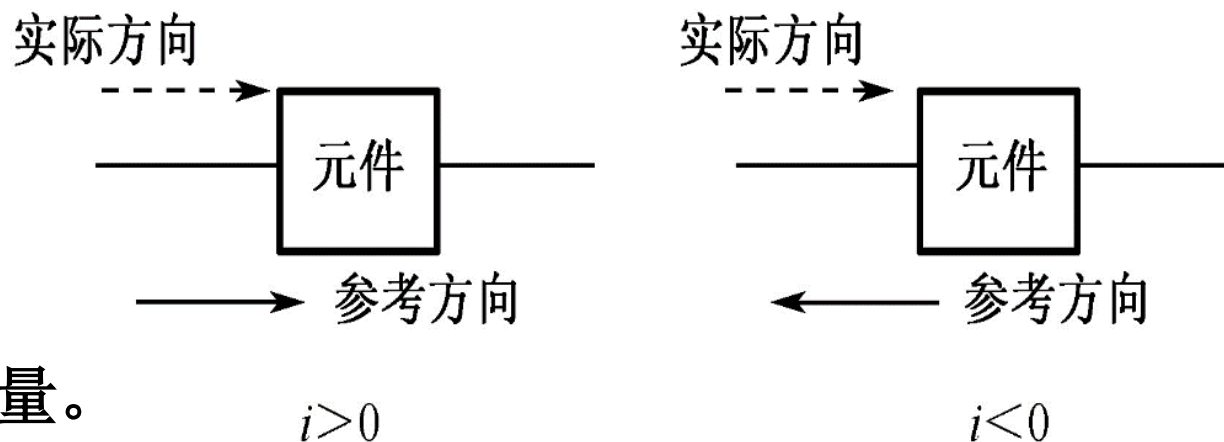
电流的**实际**方向是指单位正电荷的移动方向。

电流（电压）的**参考**方向，可以**任意选定**。

按参考方向进行分析计算，根据计算结果的**正负确定其实际方向**。

约定：当计算所得  $i(u)$  为**正**时，电流(电压)的实际方向与参考方向**一致**；

当计算所得  $i(u)$  为**负**时，电流(电压)的实际方向与参考方向**相反**。



**注意：**  $i(u)$  是代数量。

# 电流的参考方向表示

## (1) 用箭头表示

箭头的指向为电流的参考方向



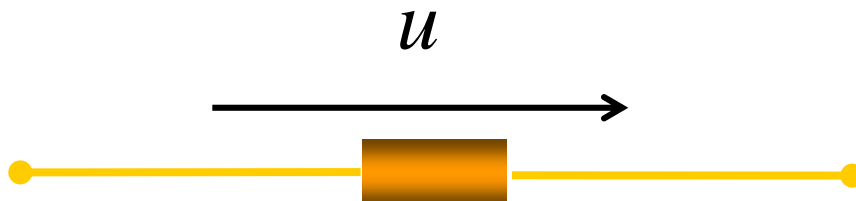
## (2) 用双下标表示

如  $i_{AB}$  , 电流的参考方向由A指向B

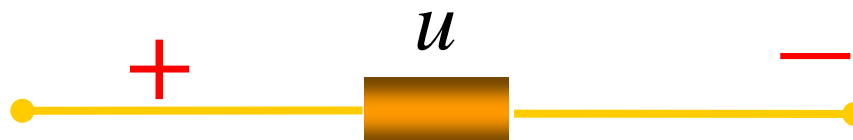


# 电压的参考方向表示

## (1) 用箭头表示



## (2) 用正负极性表示

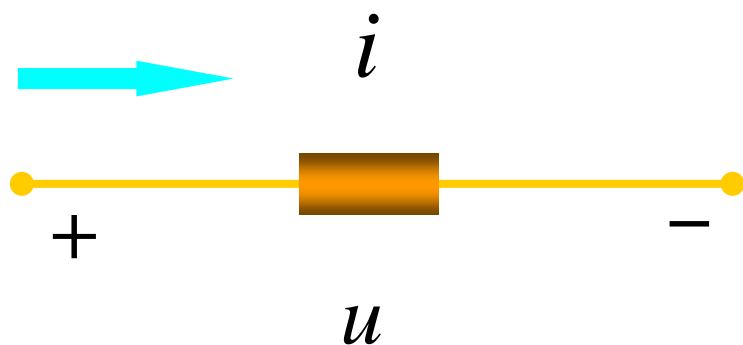


## (3) 用双下标表示

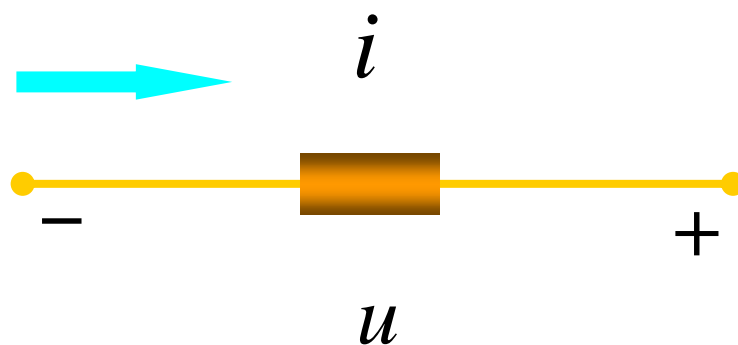


# 关联参考方向

元件或支路的 $u$ ， $i$ 采用**相同**的参考方向称之为**关联参考方向**。  
反之，称为**非关联参考方向**。



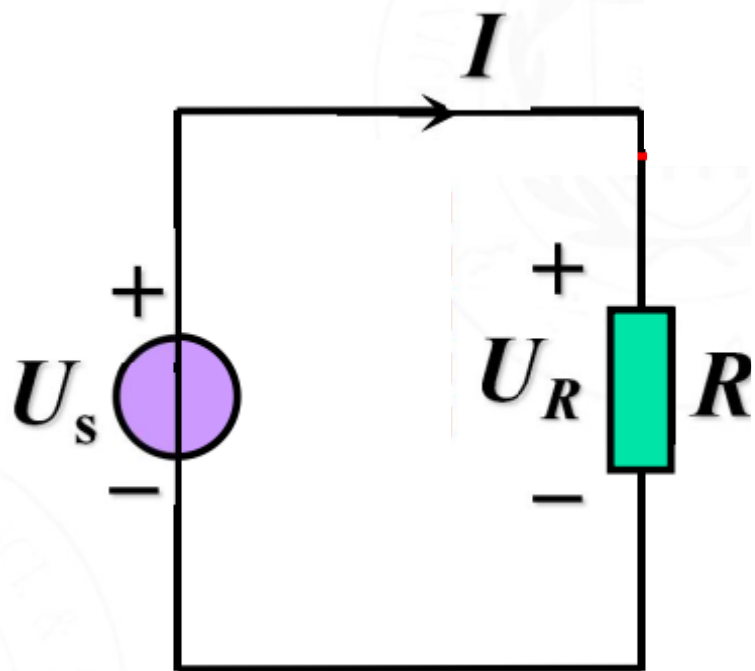
关联参考方向



非关联参考方向

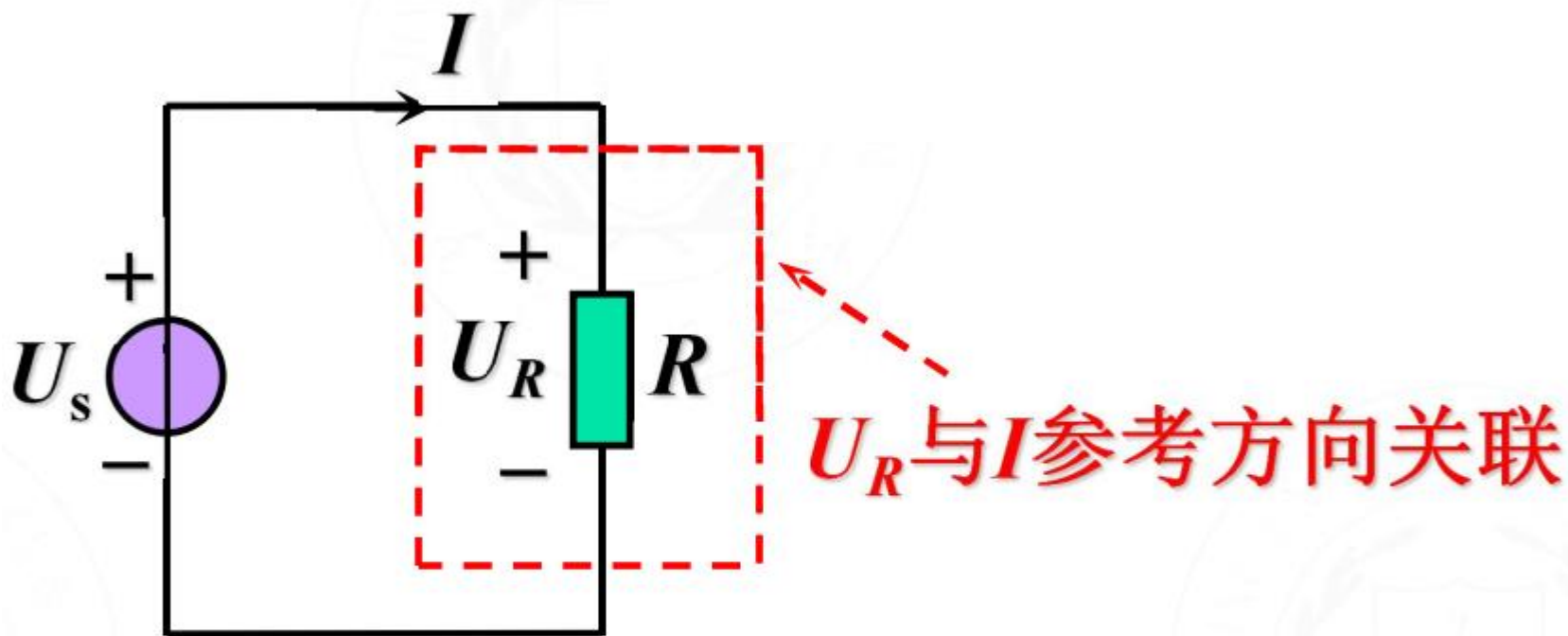
# 关联参考方向

关联参考方向一定是针对一段电路讨论。



# 关联参考方向

关联参考方向一定是针对一段电路讨论。

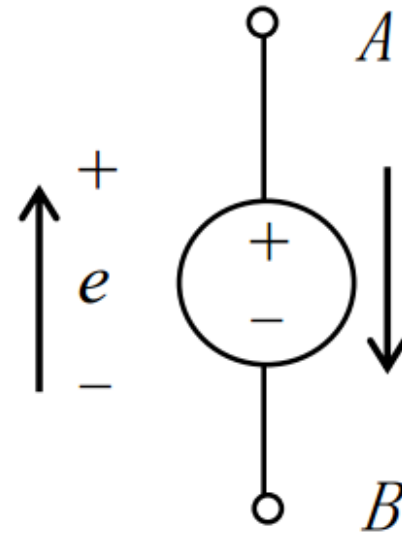


$U_s$ 与 $I$ 则为非关联参考方向。

# 基本变量—电动势

电源的两端具有电位差，具有把正电荷从低电位端（负端）移到高电位端（正端）的能力。电源在移动正电荷的过程中所作的功与正电荷的比值定义为电源的“电动势”。

- 交流电动势常用 $e(t)$ 或 $e$ 表示，直流电动势则用 $E$ 表示。
- 电动势的方向是从低电位端指向高电位端。
- 为避免混淆，一般只用正负号表示电动势的参考方向。



电动势的参考方向



# 基本变量—功率

功率是指一段电路在单位时间之内它所得到的或失去的能量。

在**关联**参考方向下，瞬时功率：

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

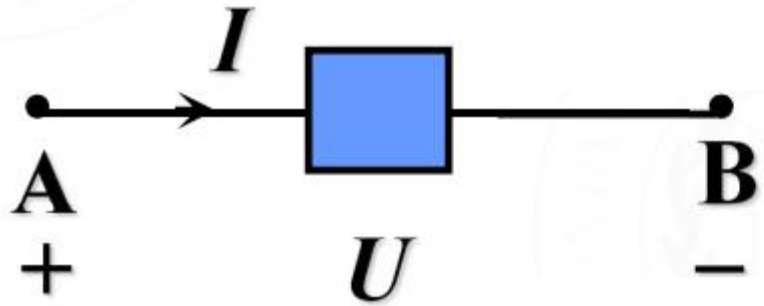
在**非关联**参考方向下，瞬时功率：

$$p(t) = -u(t)i(t)$$

单位：瓦特(W),  $1\text{kW} = 10^3\text{W}$

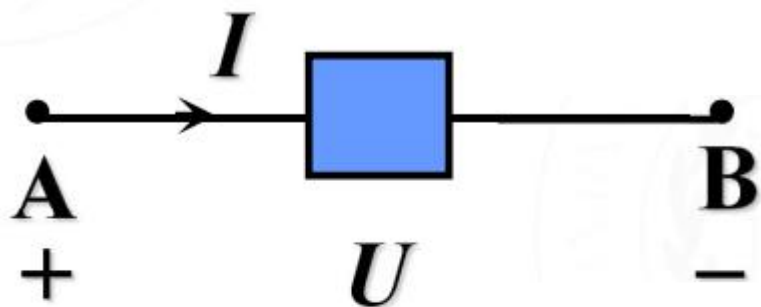
约定：当 $p>0$ 时，吸收功率。当 $p<0$ 时，发出功率。

# 基本变量—功率

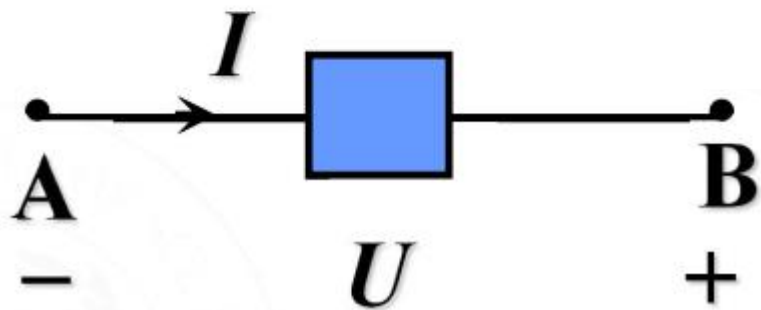


$$P = UI$$

# 基本变量—功率



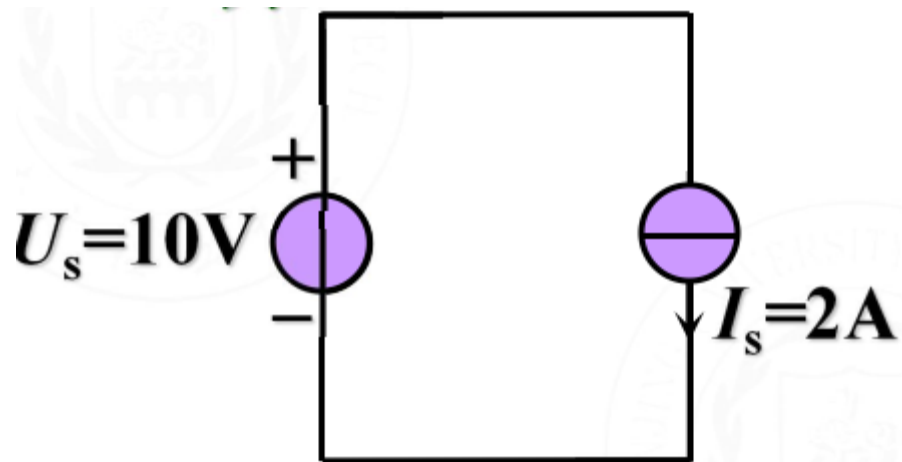
$$P = UI$$



$$P = -UI$$

当 $p > 0$ 时，吸收功率。当 $p < 0$ 时，发出功率。

# 例



求各电源功率，指明吸收或发出。

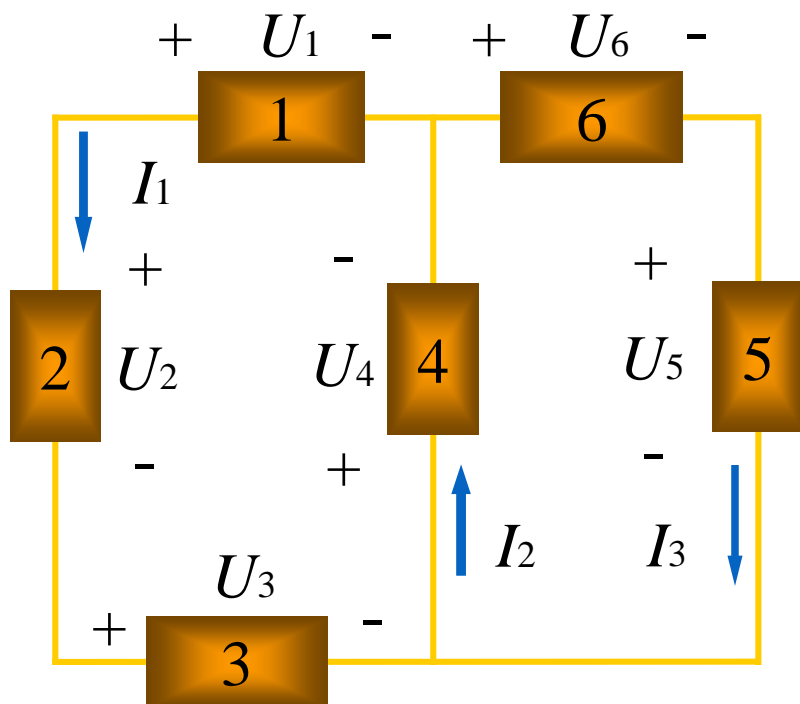
解

$$P_{U_s} = -U_s I_s = -10 \times 2 = -20 \text{ W} \quad (\text{发出功率})$$

$$P_{I_s} = U_s I_s = 10 \times 2 = 20 \text{ W} \quad (\text{吸收功率})$$

**注意：** 在多电源电路中有的电源会发出功率，有的电源会吸收功率。

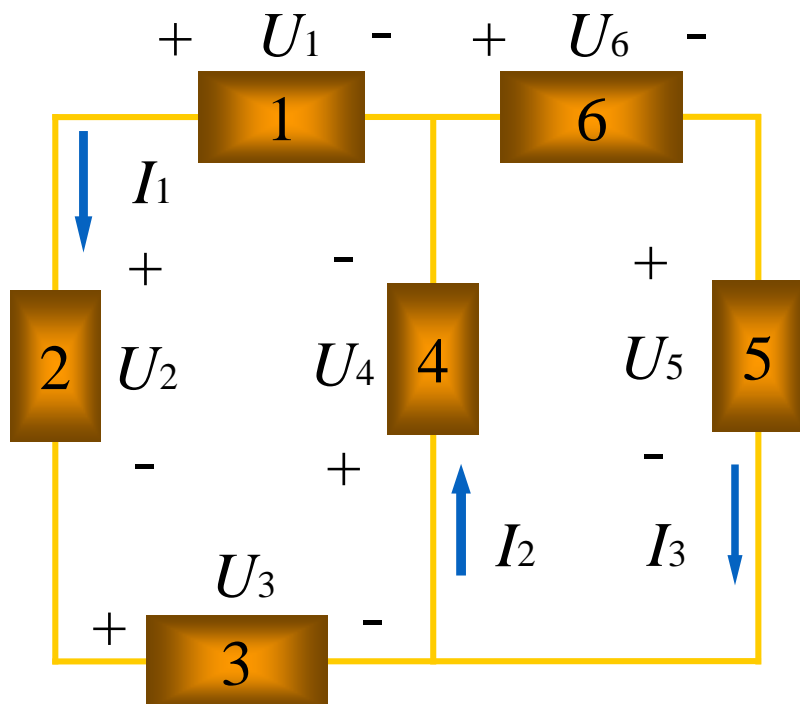
例



求图示电路中各方框所代表的  
元件吸收或产生的功率。

已知:  $U_1=1\text{V}$ ,  $U_2=-3\text{V}$ ,  $U_3=8\text{V}$ ,  $U_4=-4\text{V}$ ,  
 $U_5=7\text{V}$ ,  $U_6=-3\text{V}$ ,  $I_1=2\text{A}$ ,  $I_2=1\text{A}$ ,  $I_3=-1\text{A}$

解



$$P_1 = -U_1 I_1 = -2W \quad \text{发出}$$

$$P_2 = U_2 I_1 = -6W \quad \text{发出}$$

$$P_3 = U_3 I_1 = 16W \quad \text{吸收}$$

$$P_4 = U_4 I_2 = -4W \quad \text{发出}$$

$$P_5 = U_5 I_3 = -7W \quad \text{发出}$$

$$P_6 = U_6 I_3 = 3W \quad \text{吸收}$$

已知:  $U_1=1V$ ,  $U_2=-3V$ ,  $U_3=8V$ ,  $U_4=-4V$ ,  
 $U_5=7V$ ,  $U_6=-3V$ ,  $I_1=2A$ ,  $I_2=1A$ ,  $I_3=-1A$

**对一完整的电路, 满足: 发出的功率 = 吸收的功率**

# 基本变量—能量

电路在t1到t2的时间间隔内吸收/发出的电能量等于瞬时功率在该时间段内的积分。

$$w = \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} u(t)i(t) dt$$

**W是能量**（功），单位是焦耳（J），量纲是(瓦秒或伏安秒)。

常用“千瓦小时（ kWh ）”做单位，也叫“度”。

**1千瓦小时=1000瓦\*3600秒=3.6\*10^6焦耳。**

例： 功率为**100瓦**的照明灯，每天工作**4小时**，则一个月（**30天**）的耗电量是多少？

# 电阻元件

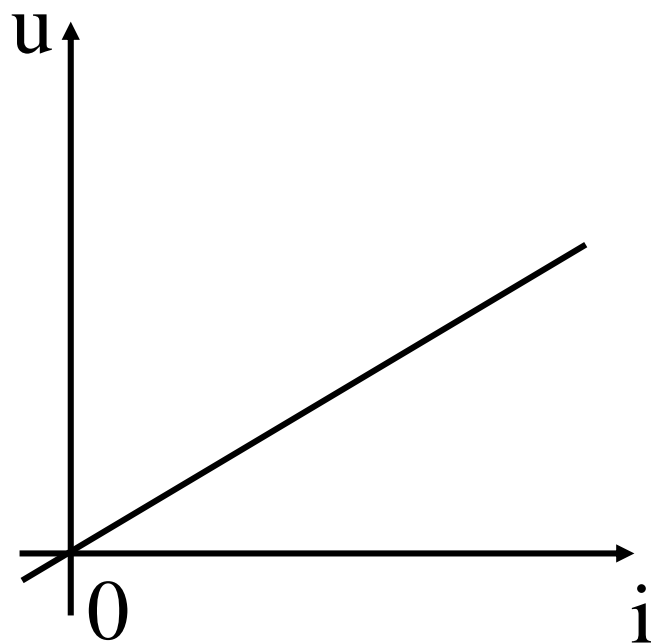
电阻表示导体对电流阻碍作用的大小。

电路元件的电压与电流的关系称为**伏安特性**。

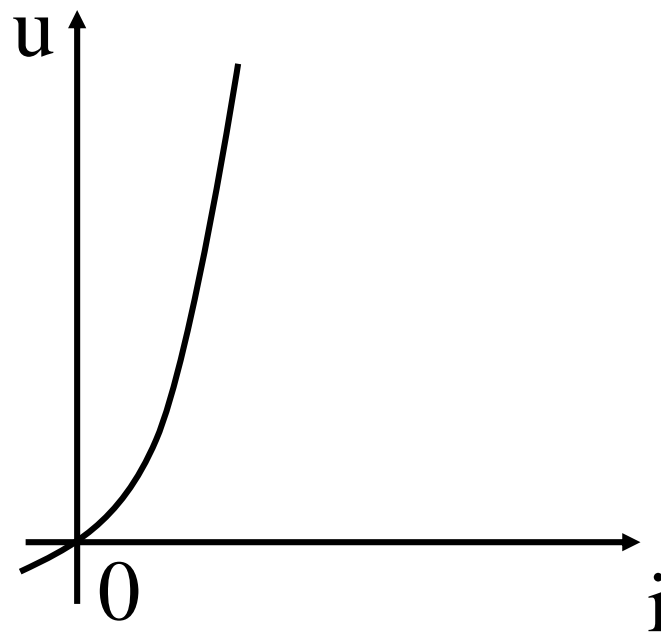
过原点的**直线**称之为  
**线性电阻**。关联参考  
方向下，定义为：

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

单位：欧姆( $\Omega$ )



线性电阻的伏安特性

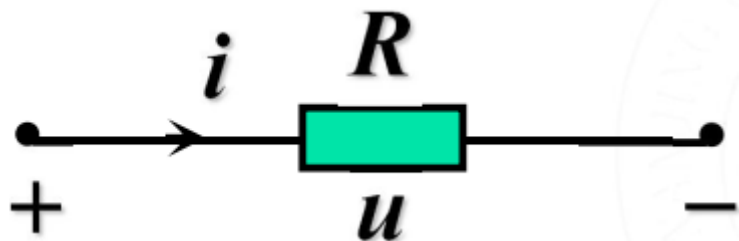


非线性电阻的伏安特性

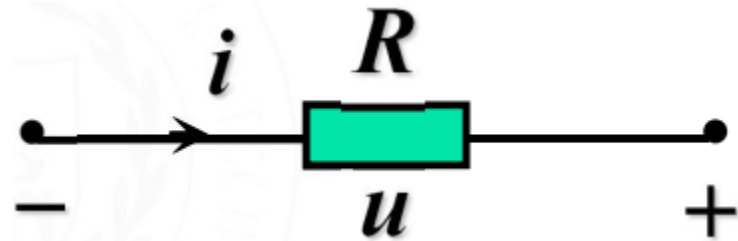


# 欧姆定律

对于**线性电阻**，在任意瞬间，电阻两端的电压与电阻中的电流成正比（**关联**参考方向）。



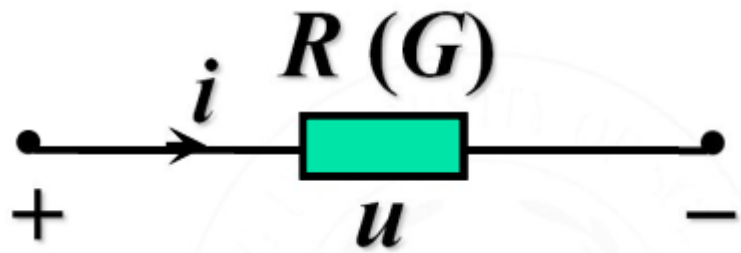
$$u = Ri$$



$$u = -Ri$$

**注意：**  $u = Ri$  仅适用于线性电阻，且电压电流参考方向关联。

# 欧姆定律的另一种形式

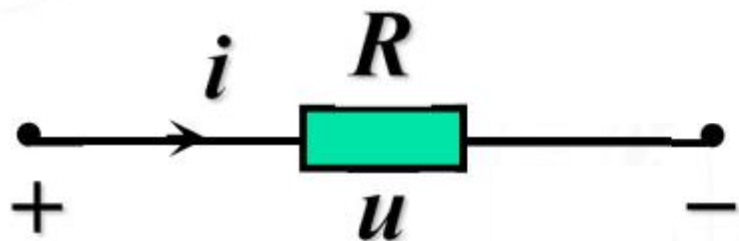


$$i = \frac{1}{R} u = Gu$$

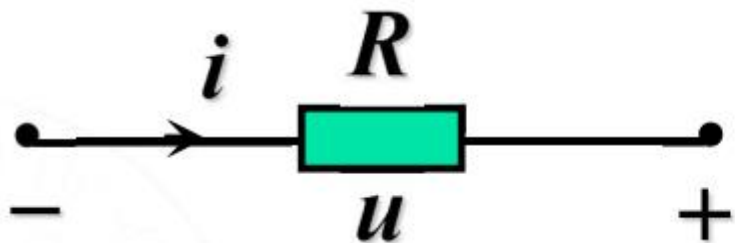
$$G = \frac{1}{R}; G: \text{电导}$$

单位：西门子(S)

# 电阻功率的计算



$$p = ui = Ri^2$$



$$p = -ui = -(-Ri)i = Ri^2$$

**注意：**  $p = Ri^2 \geq 0$ . 电阻元件始终不发出功率。

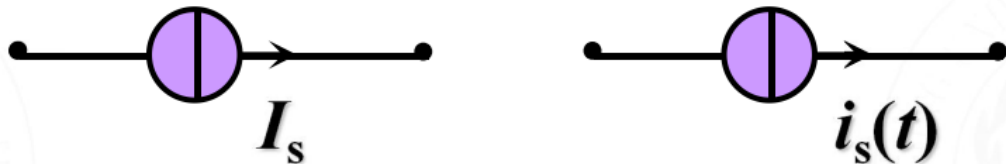
# 独立电源

指二端元件输出电压（电流）仅由其**本身性质**确定，与电路中其余部分的电压（电流）无关。

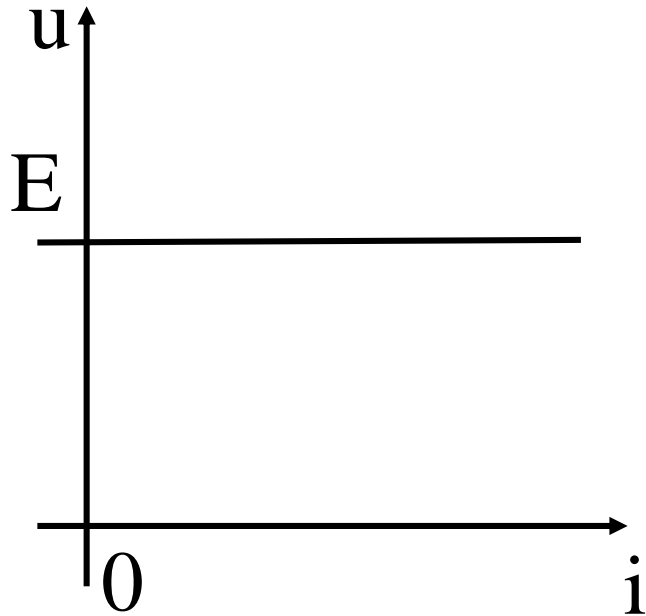
**（理想）电压源：**任何情况下都能提供**确定电压**的二端元件。



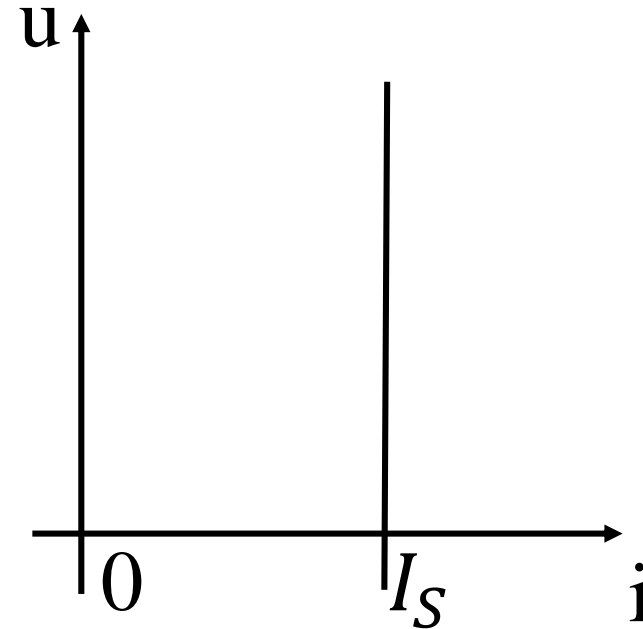
**（理想）电流源：**任何情况下都能提供**确定电流**的二端元件。



# 理想电压源与电流源



(理想) 电压源特性曲线



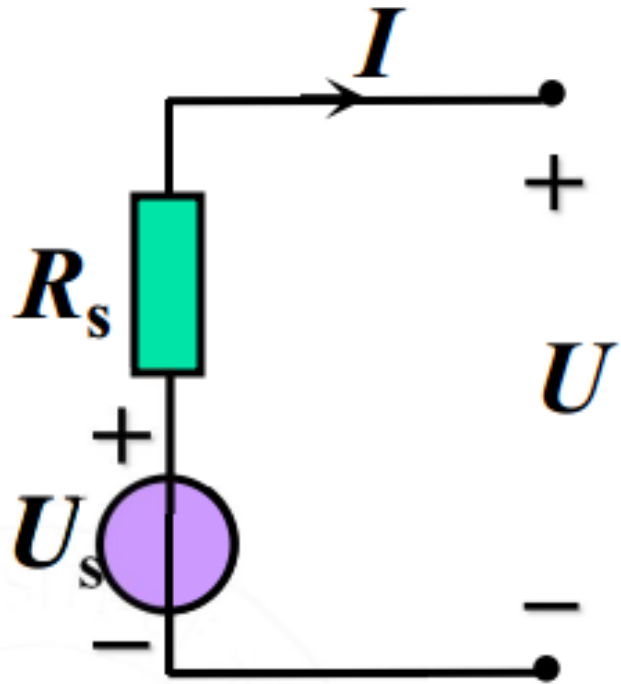
(理想) 电流源特性曲线

电压源的两端电压与流过电流无关，即电压源的外特性为  $U = E$

电流源的电源电流与其端电压无关，即电流源的外特性为  $I = I_S$

# 实际电压源

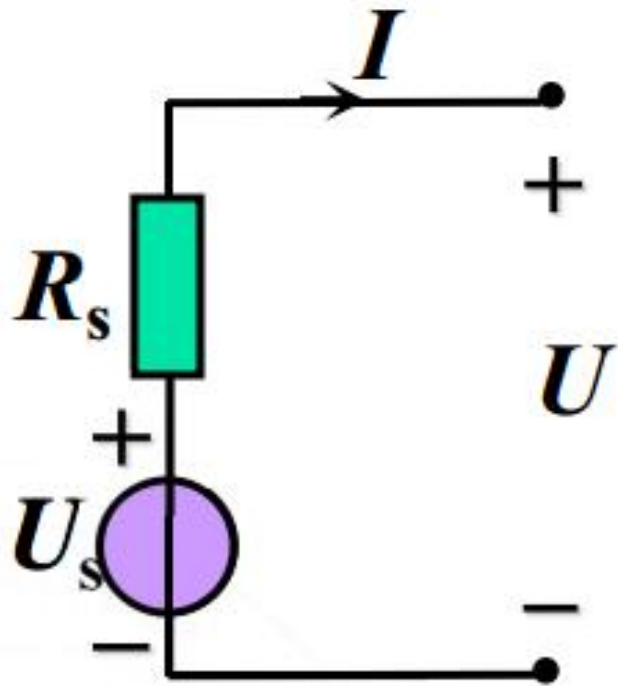
实际电压源可以用一个电阻（即电源内阻）和一个理想电压源串联表示，



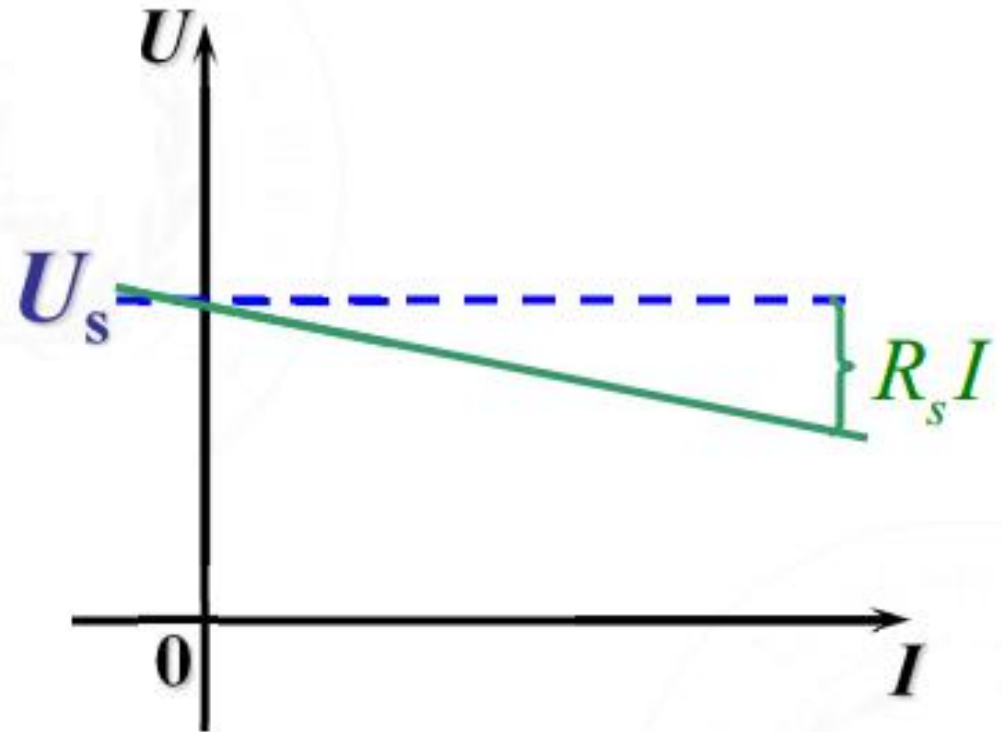
$$U = U_s - R_s I$$

# 实际电压源

实际电压源可以用一个电阻（即电源内阻）和一个理想电压源串联表示，



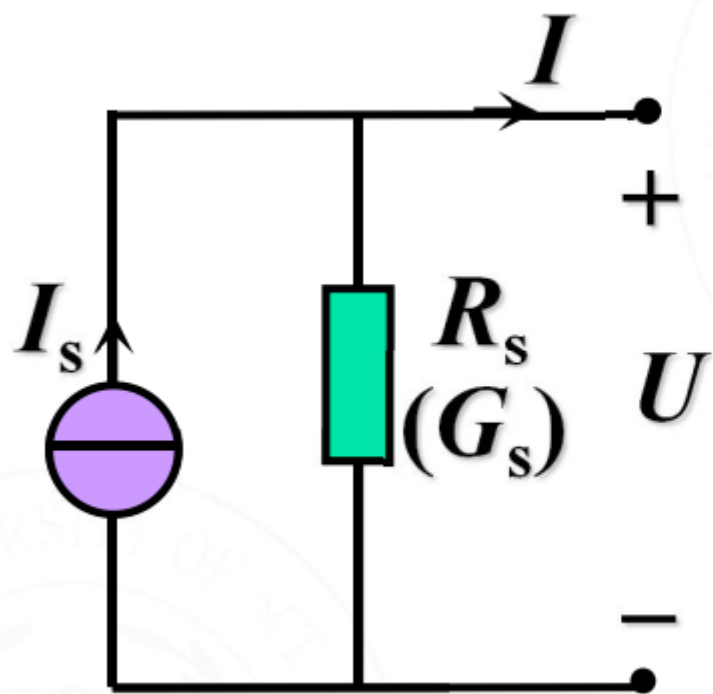
$$U = U_s - R_s I$$



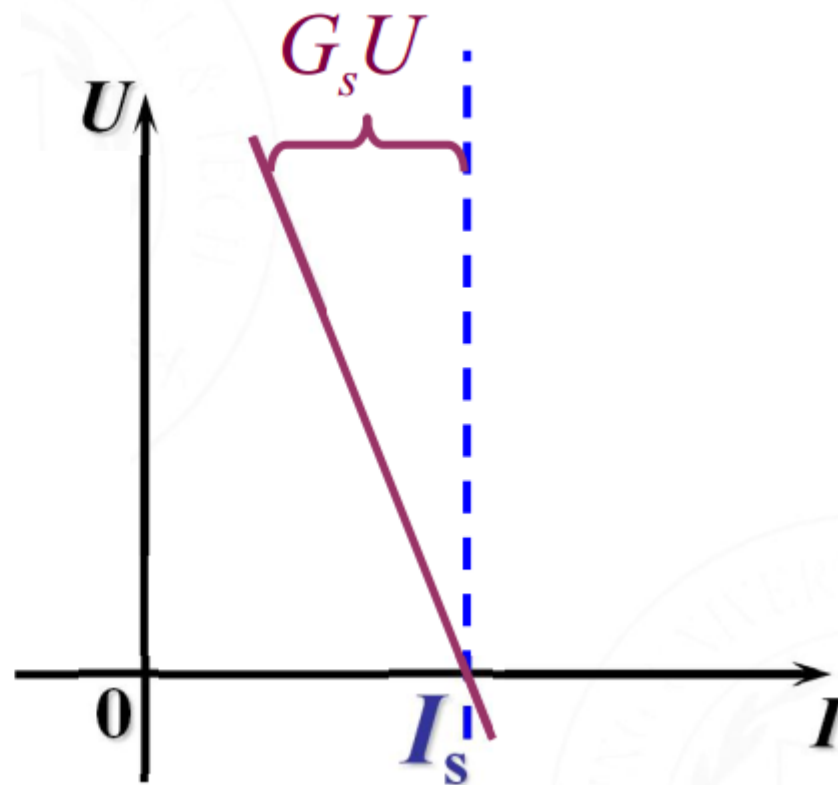
（实际）电压源特性曲线

# 实际电流源

实际电流源可以用一个电阻（或电导）和一个理想电流源并联表示。



$$I = I_s - G_s U$$



（实际）电流源特性曲线



# 基尔霍夫定律



古斯塔夫·罗伯特·基尔霍夫

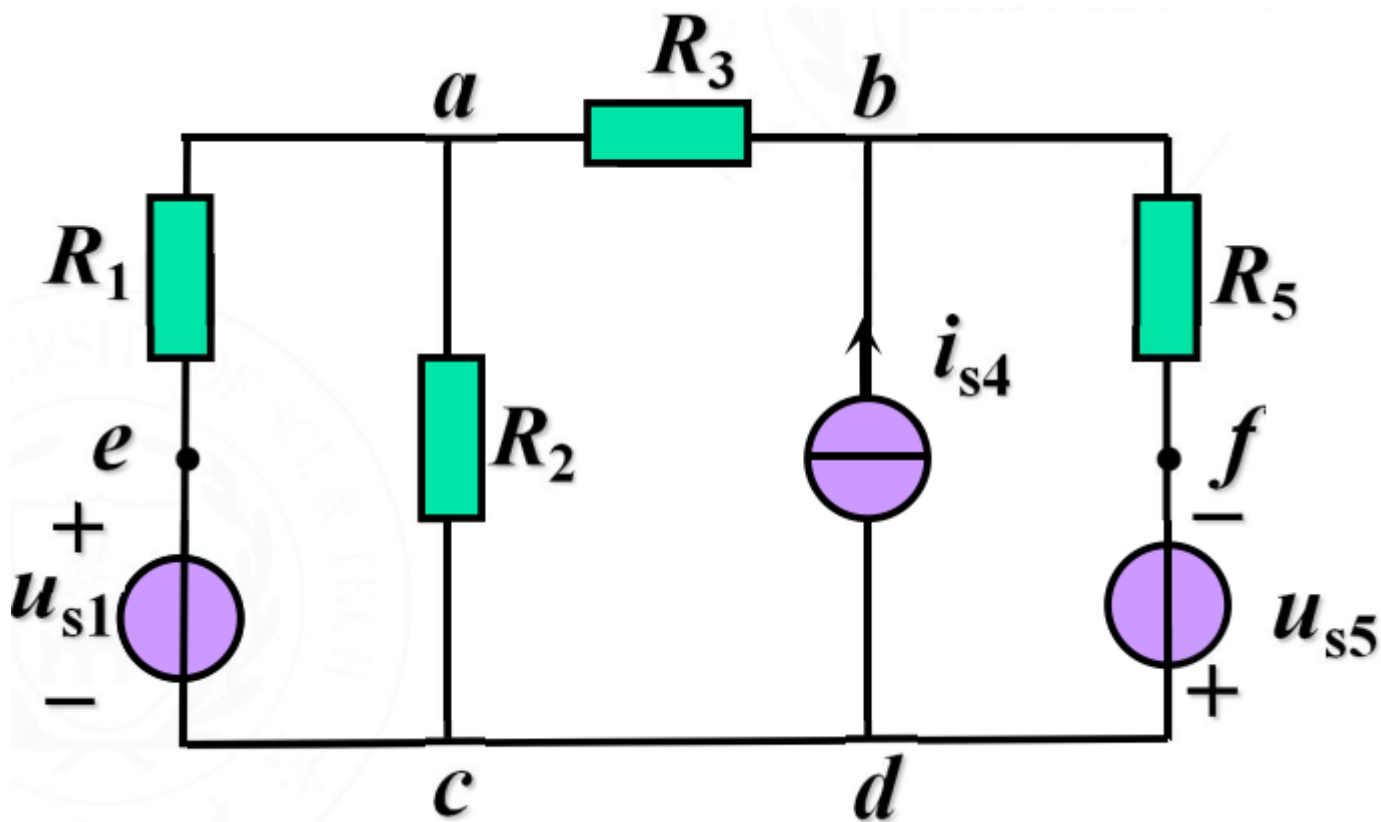
古斯塔夫·罗伯特·基尔霍夫（**Gustav Robert Kirchhoff**, 1824~1887），德国物理学家，出生于肯尼希斯堡。

他提出了稳恒电路网络中电流、电压、电阻关系的两条电路定律，即著名的**基尔霍夫电流定律（Kirchhoff's Current Law）**，**基尔霍夫电压定律（Kirchhoff's Voltage Law）**。

# 常用名词

**支路**：任意一个二端元件构成一个支路。

为减少支路个数，我们定义：任意一段无分支，且具有实有元件的电路构成一条支路。

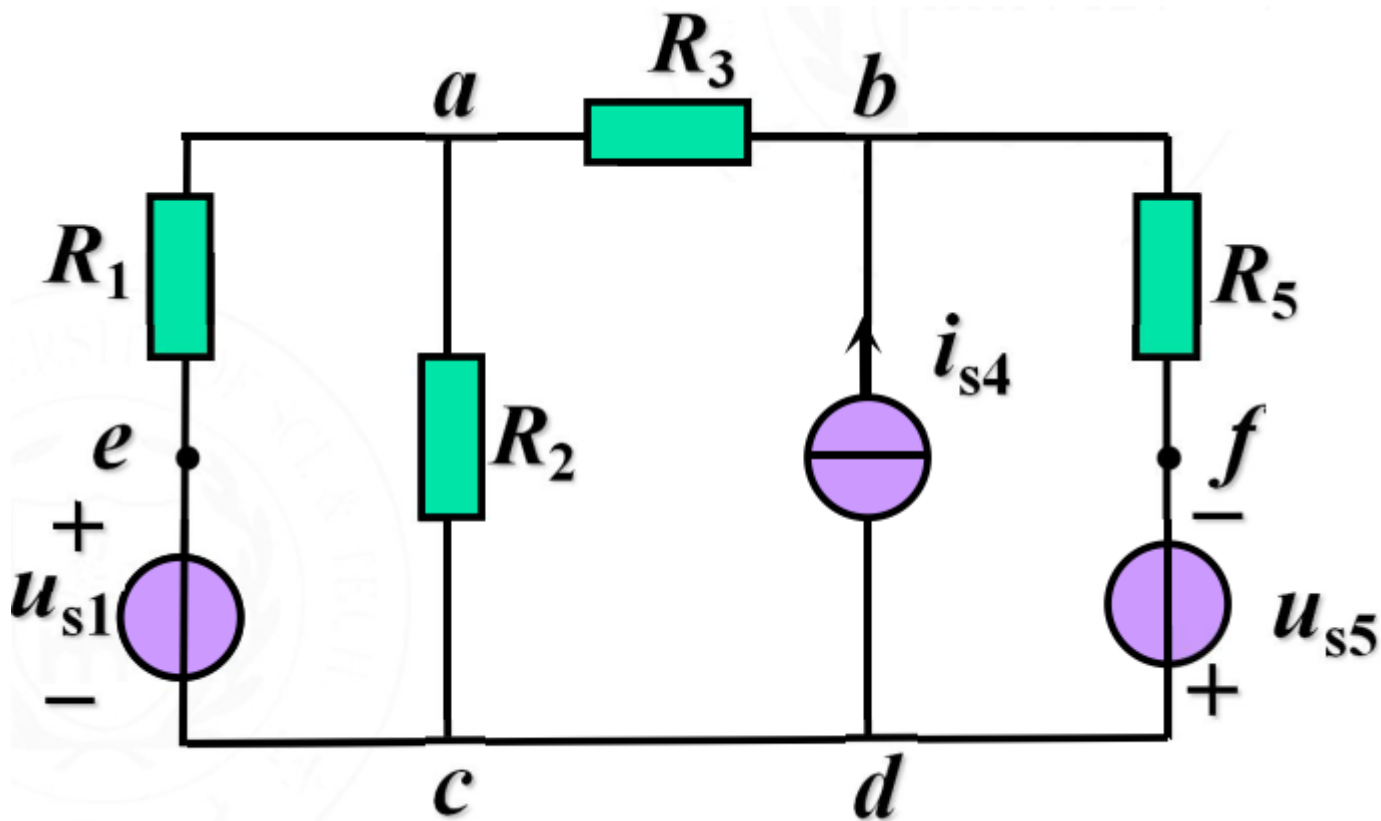


$ab$ ,  $ac$  为无源支路；  
 $aec$ ,  $bd$ ,  $bfd$  为有源支路。

# 常用名词

**节点**：两条及两条以上支路的连接点。

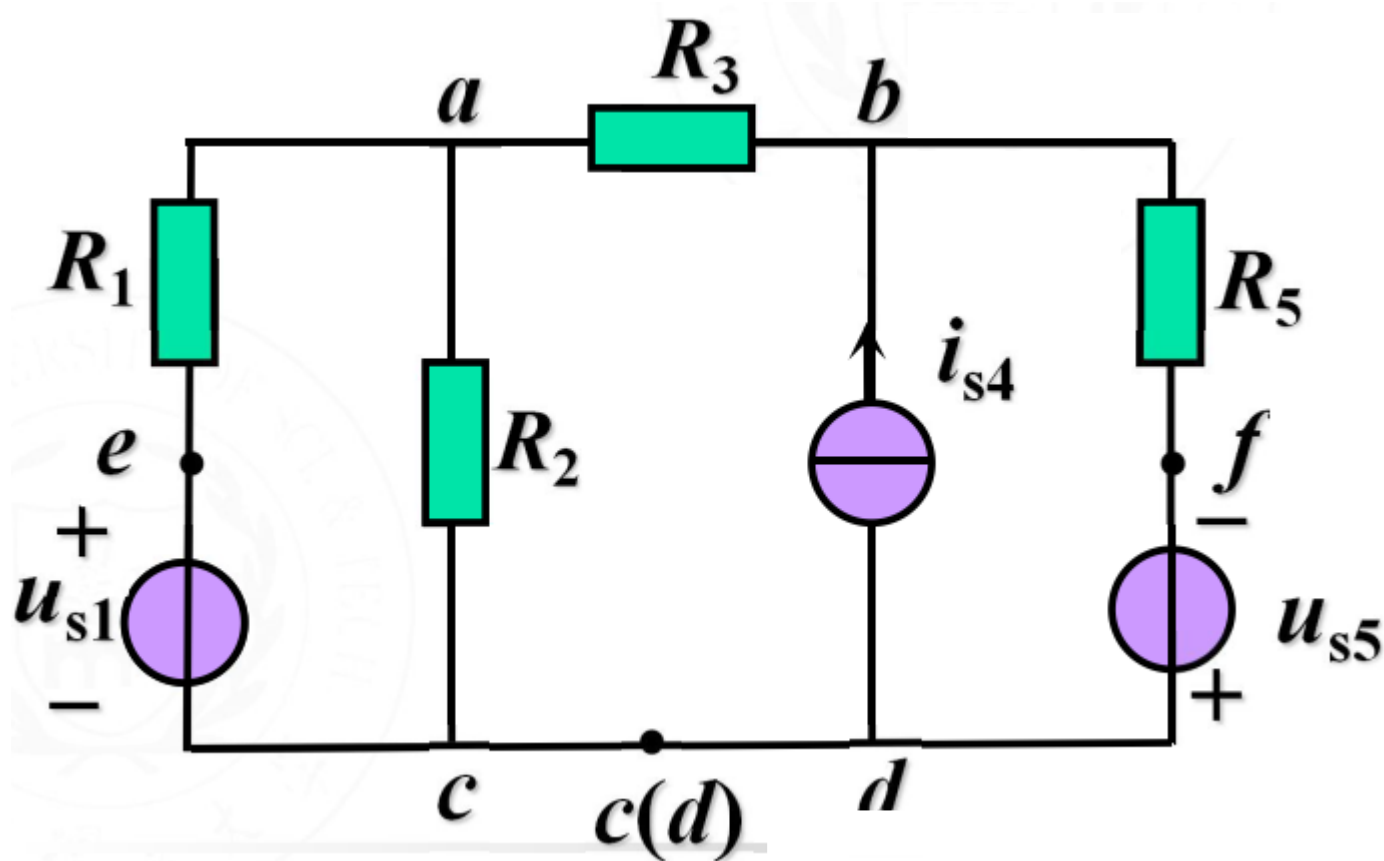
为减少节点个数，我们定义：三条及三条以上支路的连接点。



# 常用名词

**节点**：两条及两条以上支路的连接点。

为减少节点个数，我们定义：三条及三条以上支路的连接点。

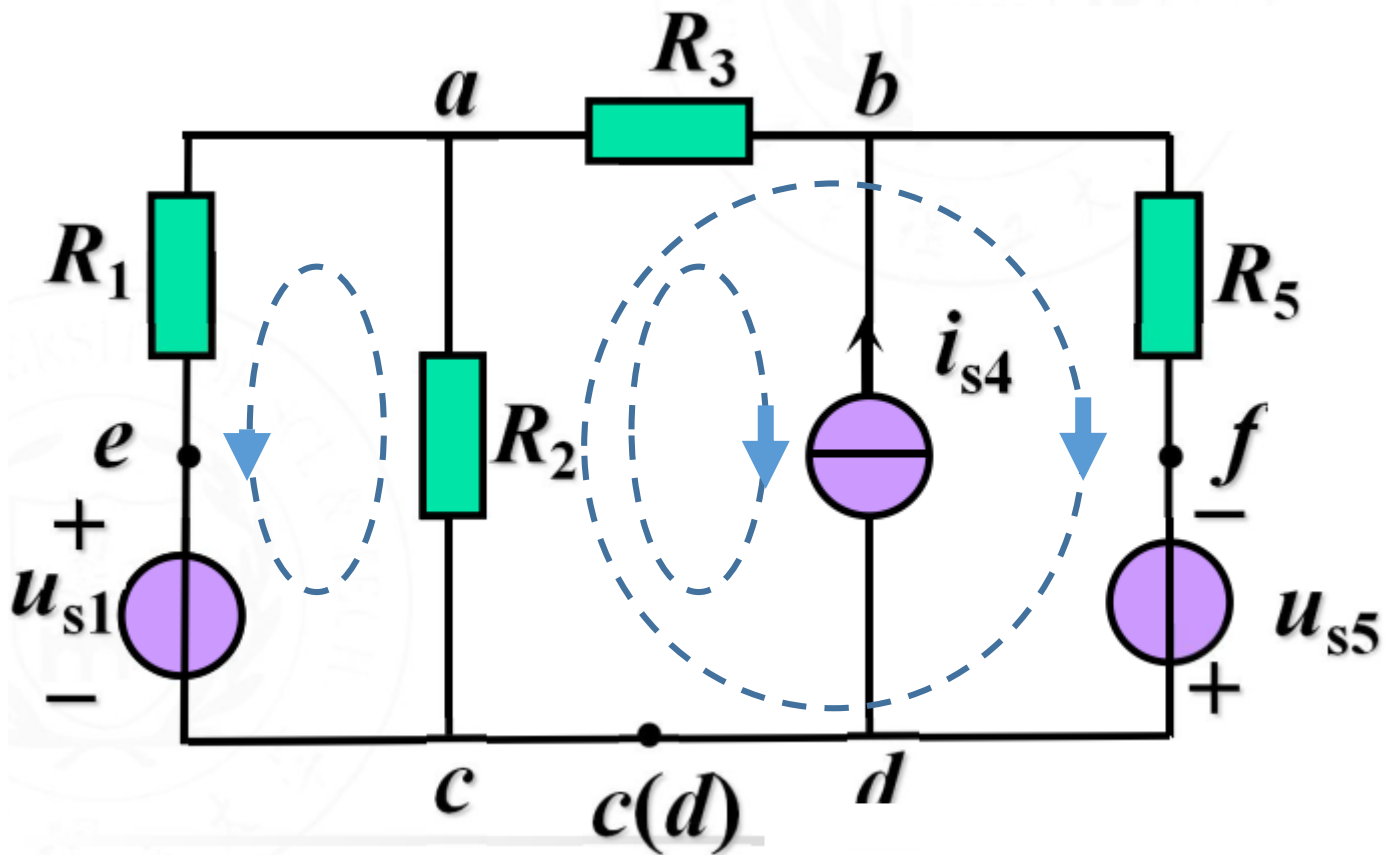


e和f不再是节点。  
c和d是同一节点。

# 常用名词

**回路：**电路中的任一闭合路径。

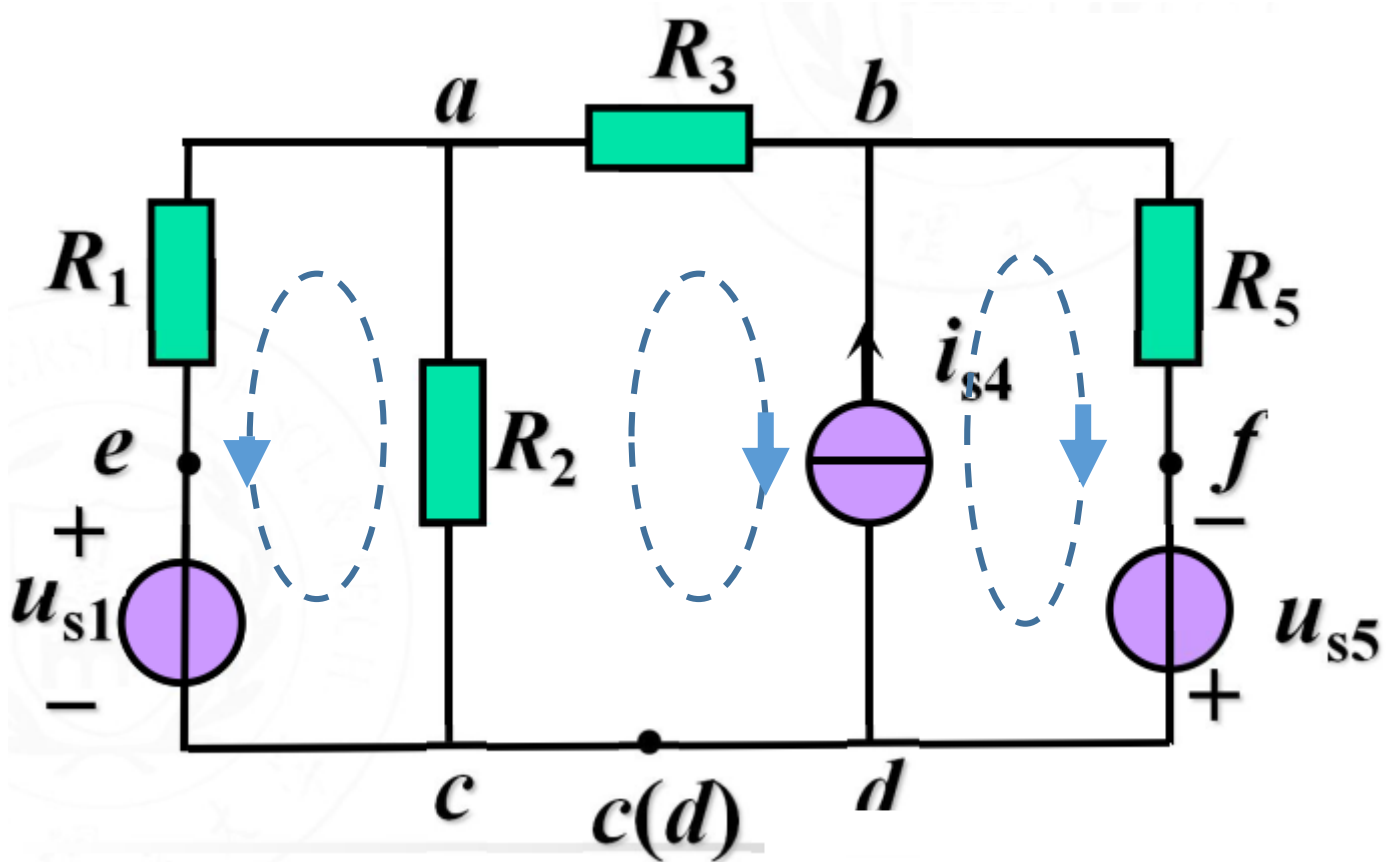
如aeca, abdca, abfdca.



# 常用名词

**网孔**：回路中不包含其他支路。

如aeca, abdca, bfdb.



# 基尔霍夫电流定律 (KCL) --- 应用于节点

在任一瞬间，流出电路中任一节点的电流的代数和恒等于零，即：

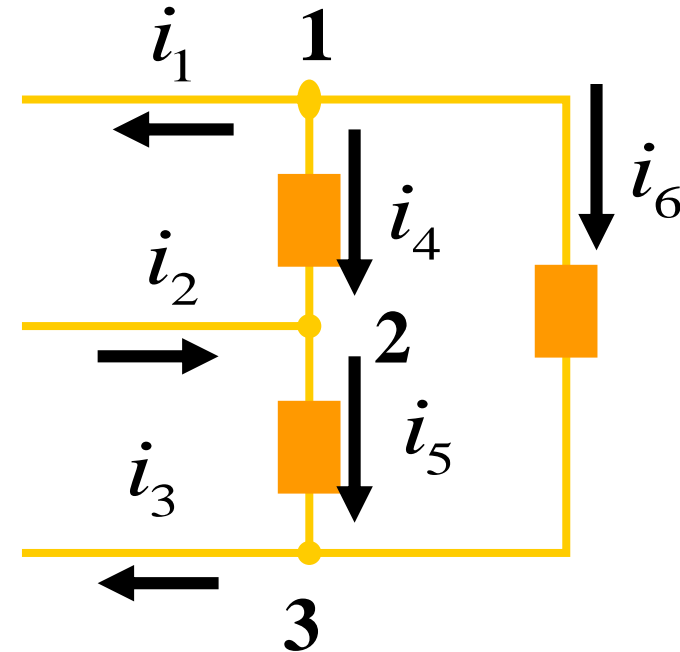
$$\sum I = 0$$

约定：流入取负，流出取正。

节点1  $i_1 + i_4 + i_6 = 0$

节点2  $-i_2 - i_4 + i_5 = 0$

节点3  $i_3 - i_5 - i_6 = 0$

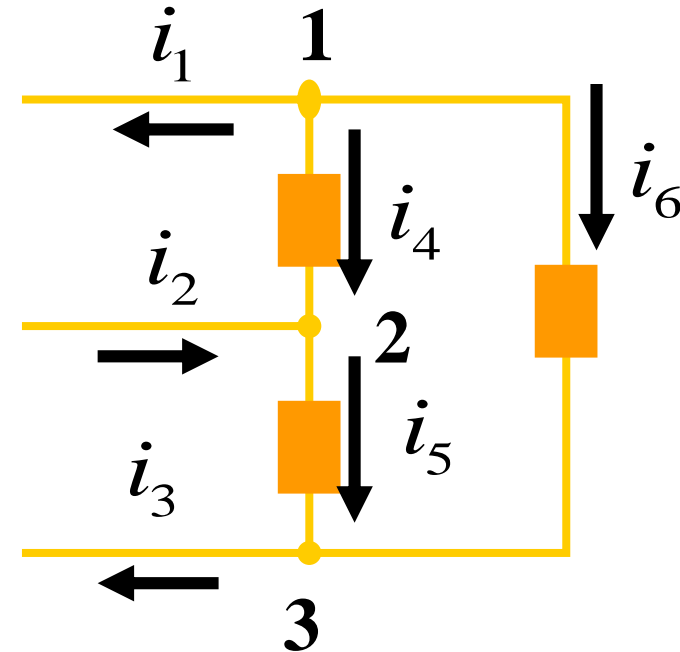


# 基尔霍夫电流定律 (KCL) --- 应用于节点

假设:  $i_2 = 2A, i_4 = -5A$ , 求  $i_5$

解: 节点2

$$-i_2 - i_4 + i_5 = 0$$
$$-2A - (-5A) + i_5 = 0$$
$$i_5 = -3A$$



**KCL涉及两套正负号，一个与参考方向有关，一个与物理量本身有关。切勿混淆！！！！**



# 基尔霍夫电流定律 (KCL) --- 应用于节点

在任一瞬间，流出电路中任一节点的电流的代数和恒等于零，即：

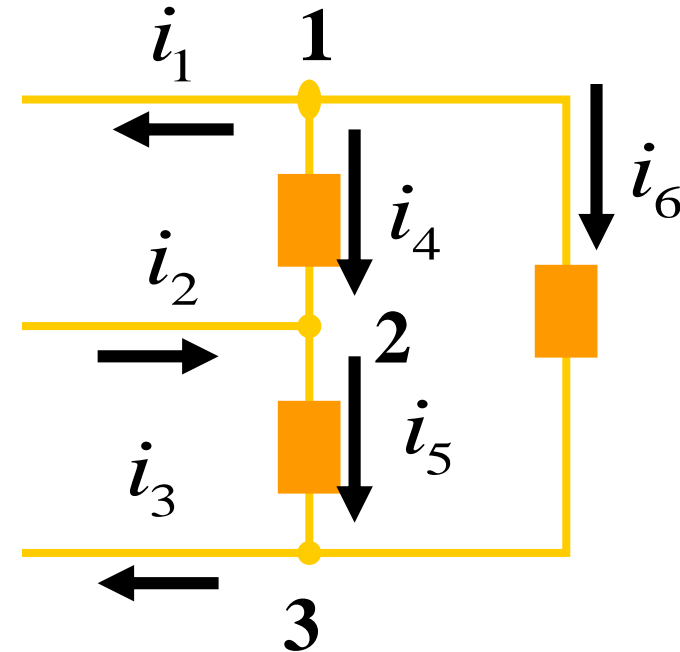
$$\sum I = 0$$

约定：流入取负，流出取正。

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

$$i_5 = i_2 + i_4$$

$$\sum i_{\text{出}} = \sum i_{\text{入}}$$



物理实质：电荷的连续性原理。

# 基尔霍夫电流定律 (KCL) --- 应用于节点

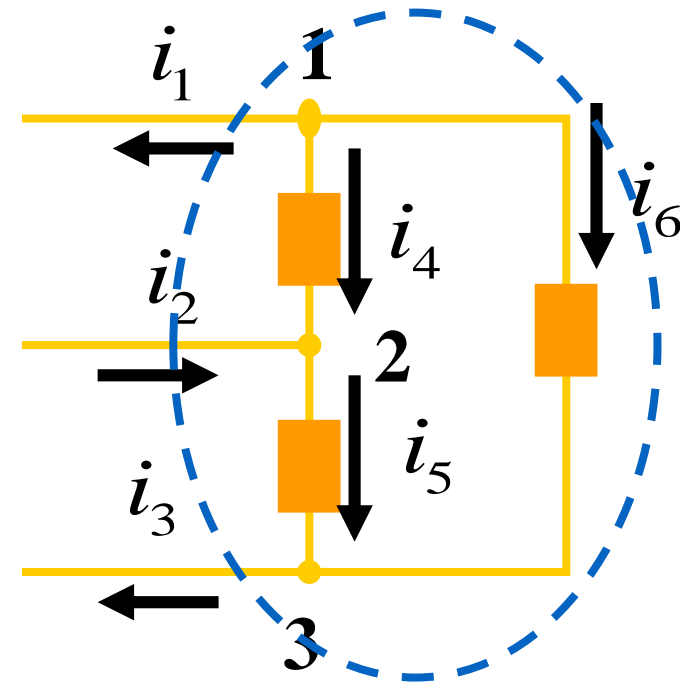
推广：节点  $\rightarrow$  封闭面（广义节点）

节点1  $i_1 + i_4 + i_6 = 0$

节点2  $-i_2 - i_4 + i_5 = 0$

节点3  $i_3 - i_5 - i_6 = 0$

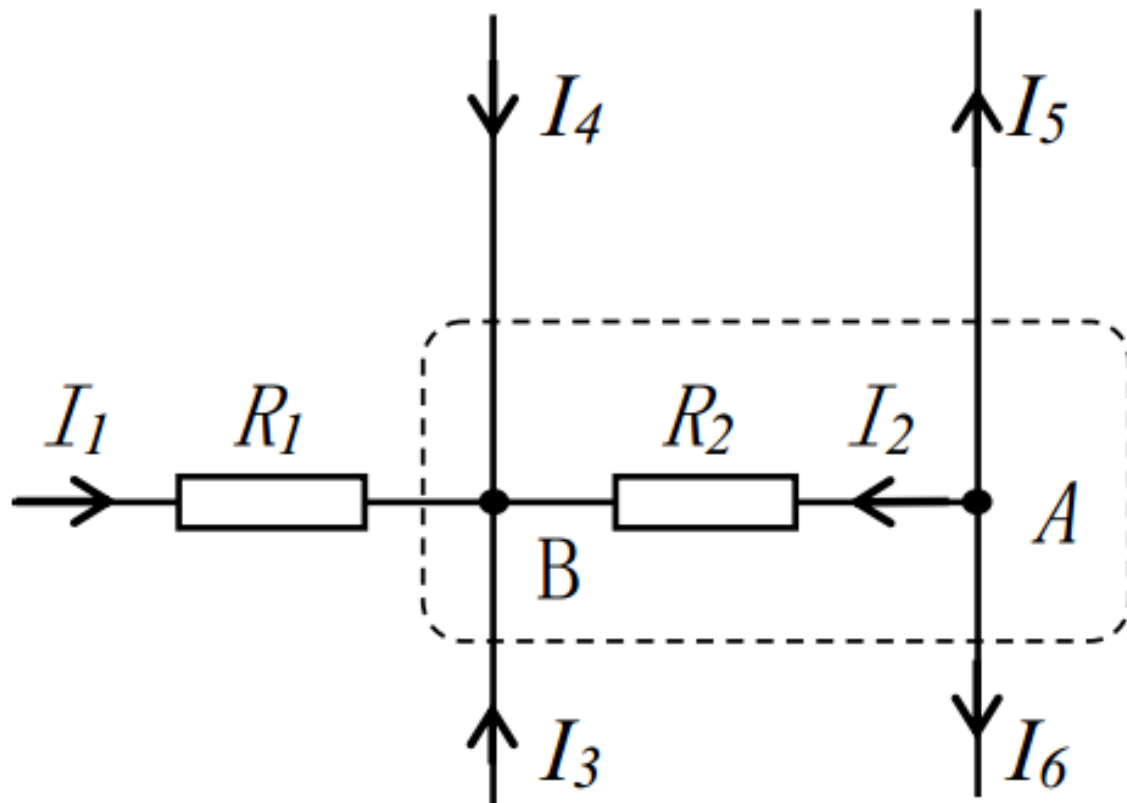
三式相加得广义节点：  $i_1 - i_2 + i_3 = 0$



表明KCL可推广应用于电路中包围多个结点的任一闭合面。

# 基尔霍夫电流定律 (KCL) --- 应用于节点

已知  $I_3 = 1\text{ A}$ ,  $I_4 = -2\text{ A}$ ,  $I_5 = -3\text{ A}$ ,  $I_6 = 4\text{ A}$ , 求电阻  $R_1$  中的电流  $I_1$ .



# 基尔霍夫电流定律 (KCL) --- 应用于节点

在任一瞬间，流出电路中任一节点的电流的代数和恒等于零，即：  
 $\sum I = 0$ .

## 注意

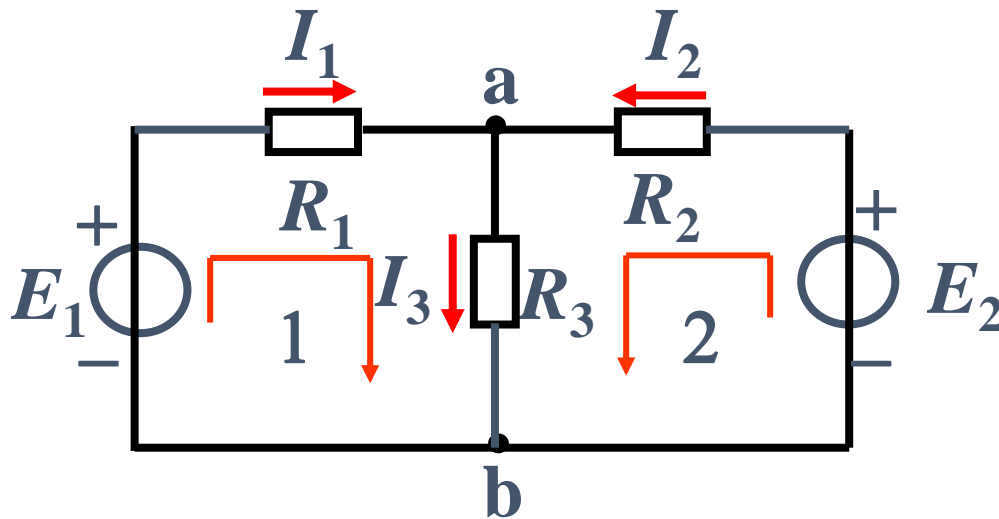
- (1) KCL是电荷守恒和电流连续性原理在节点处的反映；
- (2) KCL是对支路电流加的约束，与支路上接的元件无关，与电路是线性还是非线性无关；
- (3) KCL方程是按电流参考方向列写，与电流实际方向无关。

# 基尔霍夫电压定律 (KVL) --- 应用于回路

即:  $\sum U = 0$

在任一瞬间, 沿任一回路绕行一周, 各段电压降的代数和恒等于零。

约定: 电压降的与回路绕行方向一致取正, 反之取负。



回路1:

$$I_1 R_1 + I_3 R_3 - E_1 = 0$$

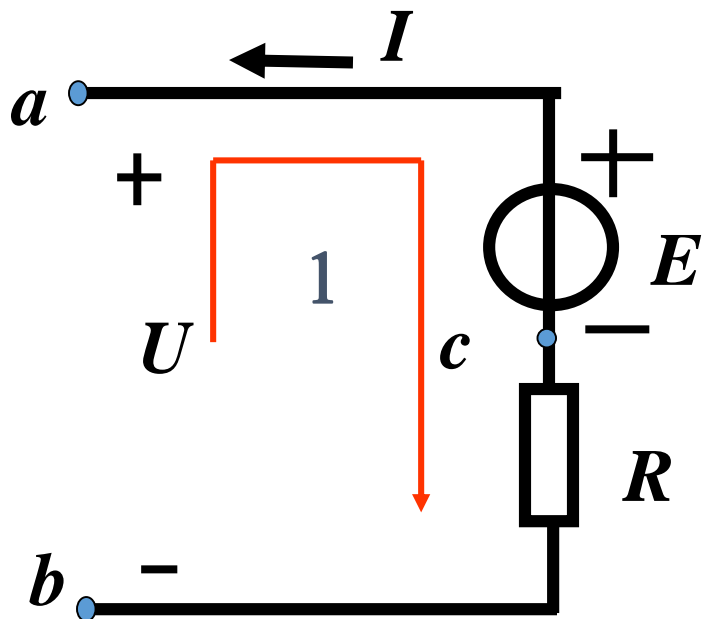
回路2:

$$I_2 R_2 + I_3 R_3 - E_2 = 0$$

**KVL涉及两套正负号, 一个与参考方向有关, 一个与物理量本身有关。切勿混淆!!!**

# 基尔霍夫电压定律 (KVL) --- 应用于一段开口电路

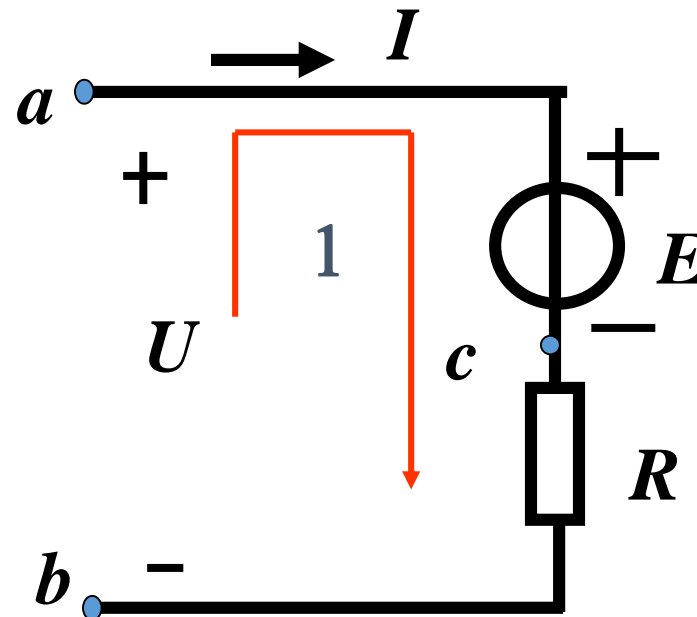
推广： 闭合回路  $\rightarrow$  开口电路



(a)

$$-U + E - IR = 0$$

即  $U = E - IR$



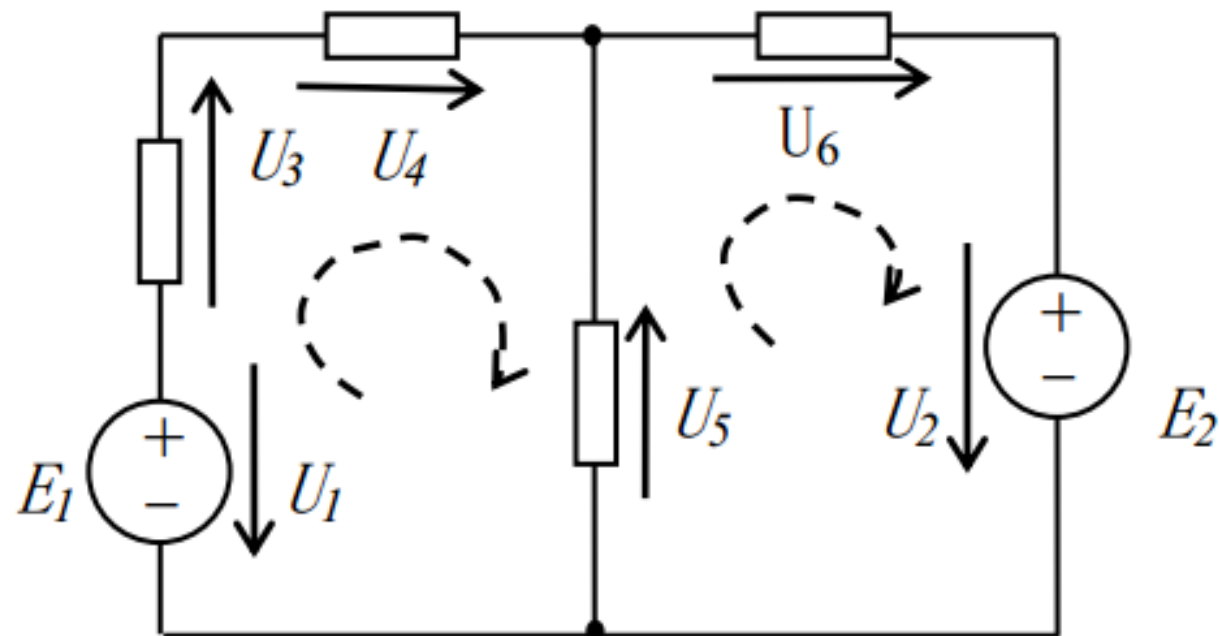
(b)

$$-U + E + IR = 0$$

即  $U = E + IR$

# 基尔霍夫电压定律 (KVL)

写出如图所示电路的网孔回路电压方程。



# 基尔霍夫定律

**KCL:** 在任一瞬间，流出电路中任一节点的电流的代数和恒等于零，即：  
 $\sum I = 0$

**KVL:** 在任一瞬间，沿任一回路绕行一周，各段电压降的代数和恒等于零，即：  
 $\sum U = 0$

## 注意

KCL和KVL只与电路的结构有关，与构成电路的元件性质和电路的工作状态无关。

不论是交流电路还是直流电路，各节点电流必受KCL约束，各回路的电压必受KVL约束。



# 习题

实际电压源供电线路如图所示，其中 $E$ 是电源的电动势， $R_0$ 是电源的内阻， $R_L$ 是用电负载。试计算电源的伏安特性、负载消耗的功率以及负载获得最大功率的条件。

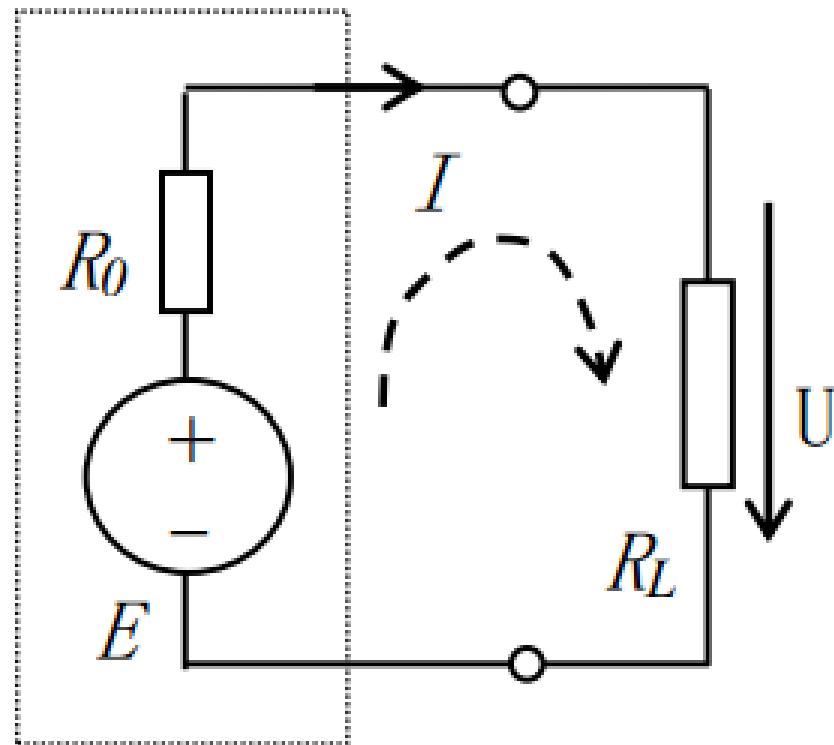
解：按图示参考方向，根据 KVL 有

$$R_0 I + R_L I = E$$

即

$$U = E - R_0 I$$

$R_L$  经过的电流 
$$I = \frac{E}{R_0 + R_L}$$



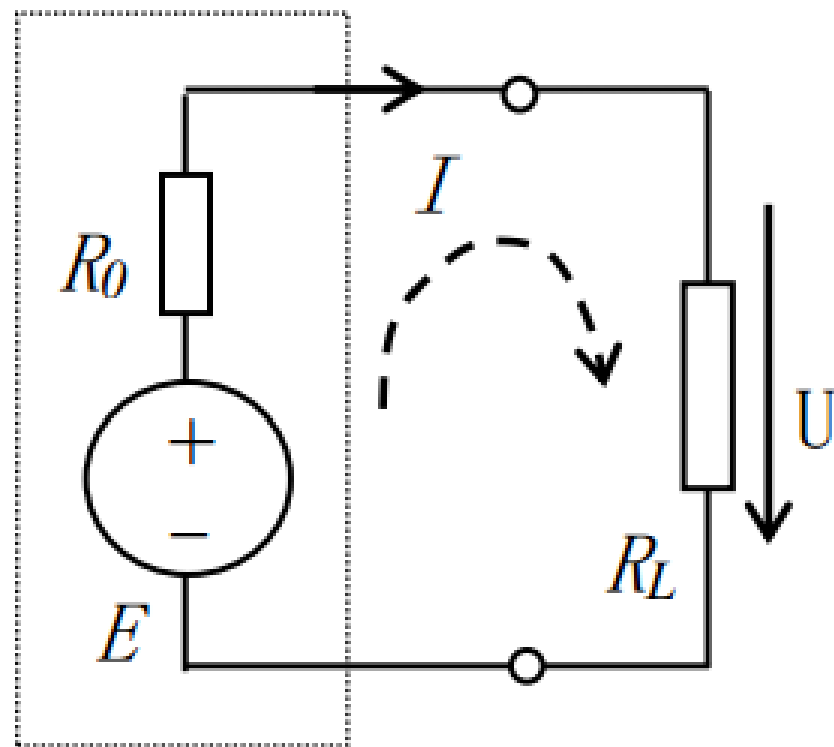
# 习题

实际电压源供电线路如图所示，其中 $E$ 是电源的电动势， $R_0$ 是电源的内阻， $R_L$ 是用电负载。试计算电源的伏安特性、负载消耗的功率以及负载获得最大功率的条件。

负载消耗的功率  $P_L = R_L I^2 = \frac{R_L E^2}{(R_0 + R_L)^2}$

求导得  $\frac{d P_L}{d R_L} = \frac{E^2 (R_0 - R_L)}{(R_0 + R_L)^3} = 0$

获得最大功率的条件  $R_L = R_0$



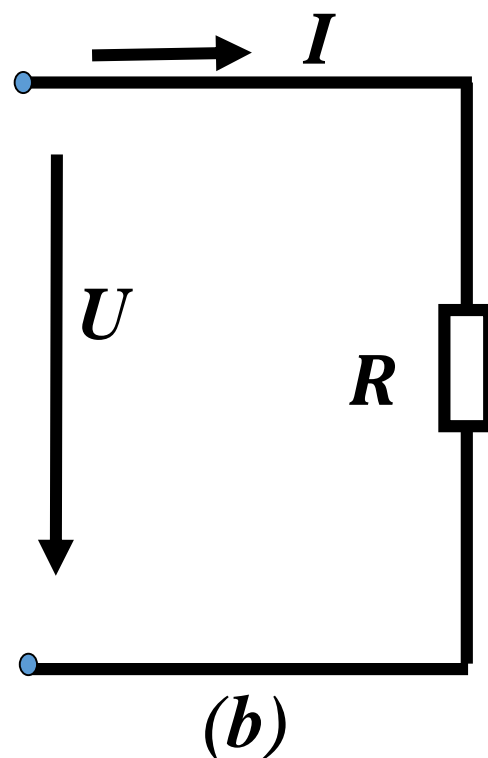
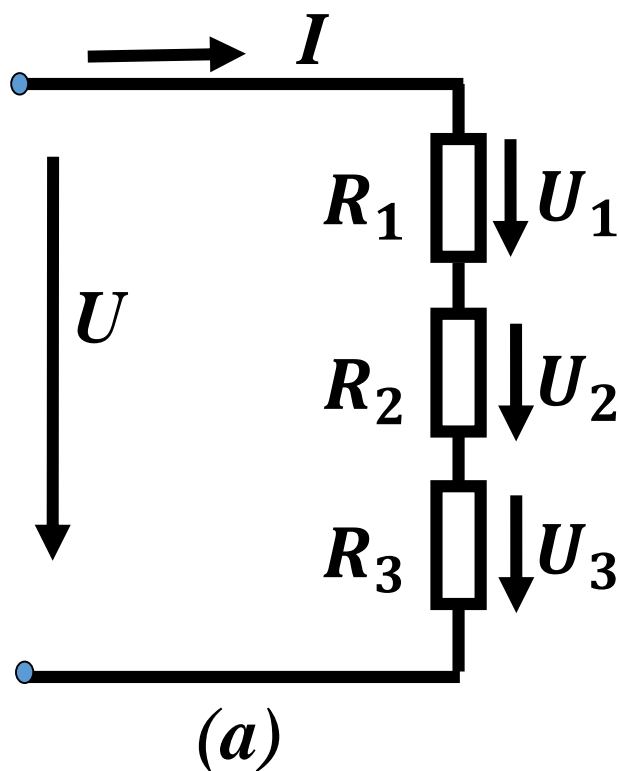
# 电阻的串联

串联电路中各元件的**电流相同**,

串联电路的总电压等于各元件**电压的代数和**。

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

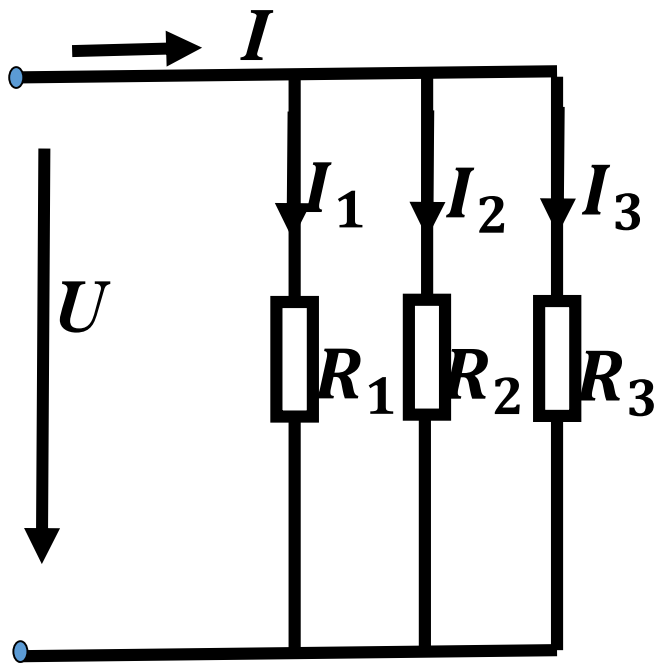


# 电阻的并联

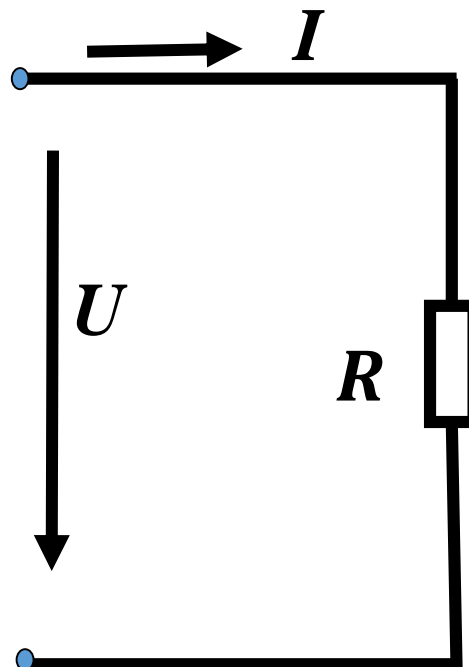
并联电路各元件的**电压相同**，  
并联电路的总电流等于各元件**电流的代数和**。

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$



(a)



(b)

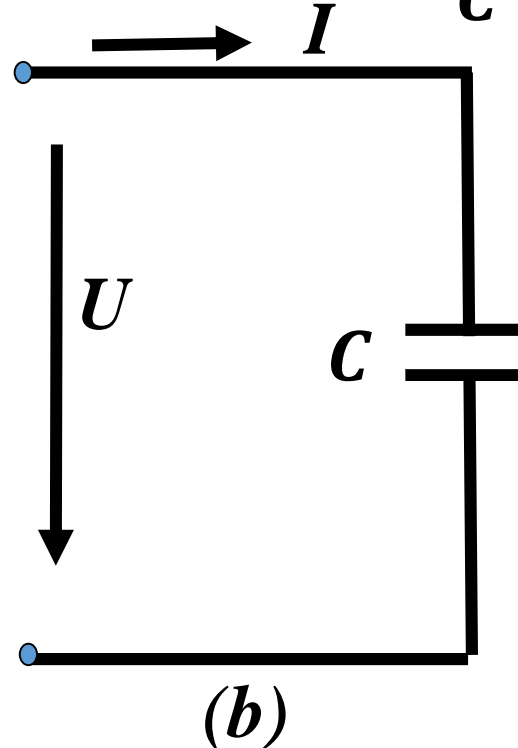
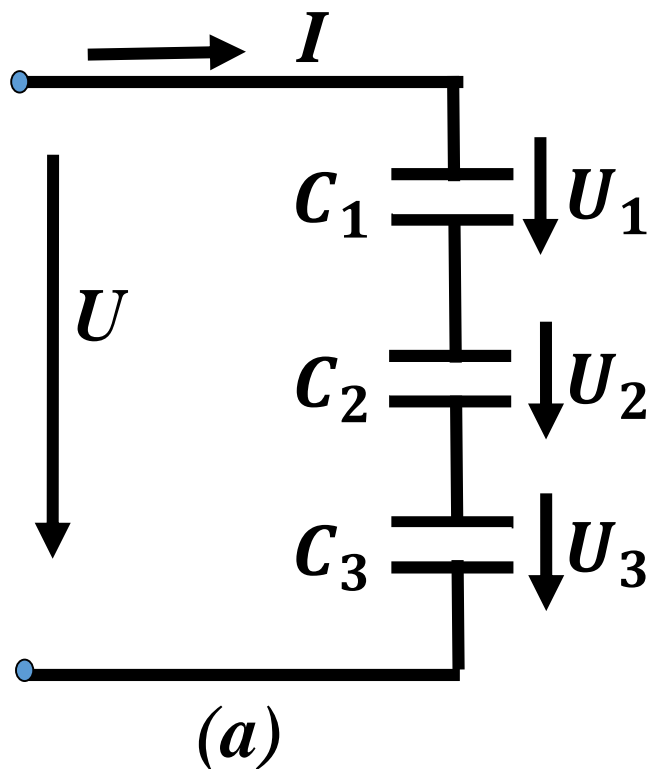
# 电容的串联

电容器所带电量 $Q$ 与电容器两极间的电压 $U$ 的比值，叫电容器的电容。

$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

$$\frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3}$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$



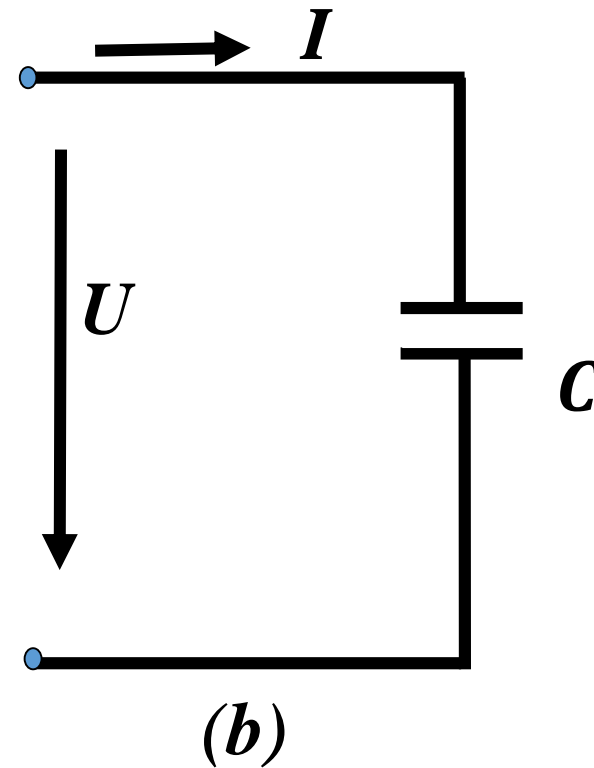
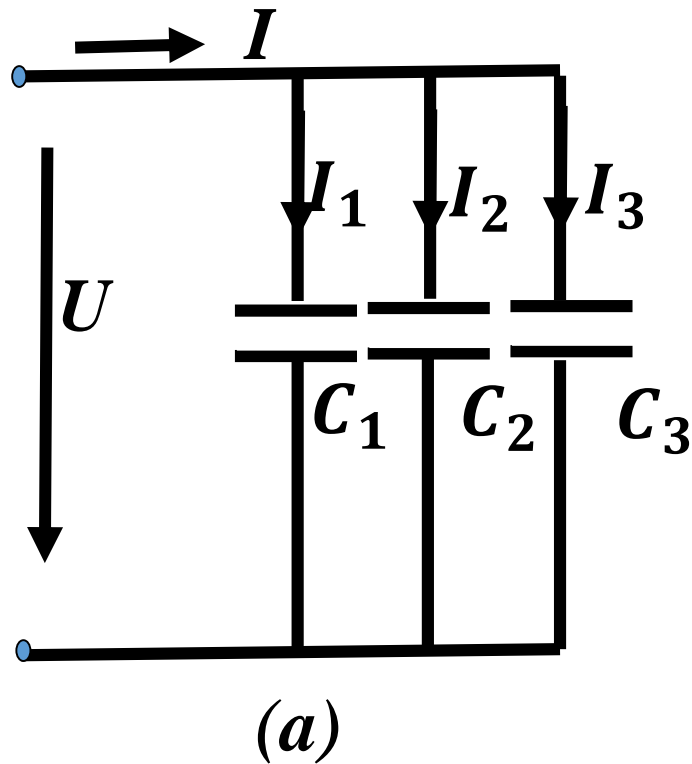
# 电容的并联

电容器所带电量 $Q$ 与电容器两极间的电压 $U$ 的比值，叫电容器的电容。

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$UC = UC_1 + UC_2 + UC_3$$

$$C = C_1 + C_2 + C_3$$

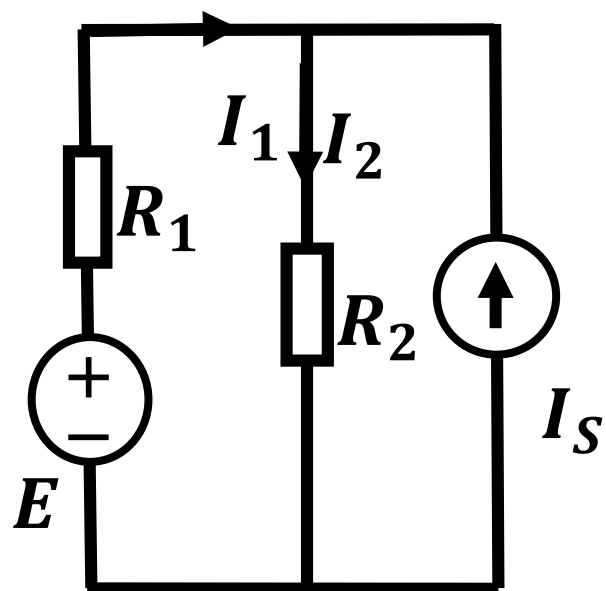


# 迭加原理

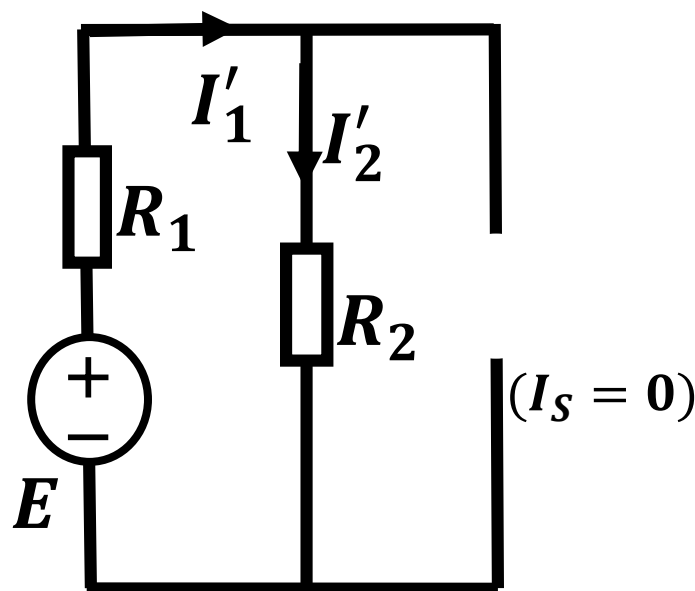
- **线性电路**是指完全由**线性元件、独立源或线性受控源**构成的电路。
- 电路元件的元件特性有两个物理量表征。如果表征元件特性的代数关系是一个线性关系，则该元件为**线性元件**。
  - 线性电阻：电压和电流成正比，即 $u= Ri$ 。
  - 线性电感：磁链 $\Psi$ 与电流 $i$ 成正比，即 $\Psi= Li$ 。
  - 线性电容：电荷量 $q$ 与电压 $u$ 成正比，即 $q= Cu$ 。
- 典型的**非线性元件**是二极管、三极管。

# 迭加原理

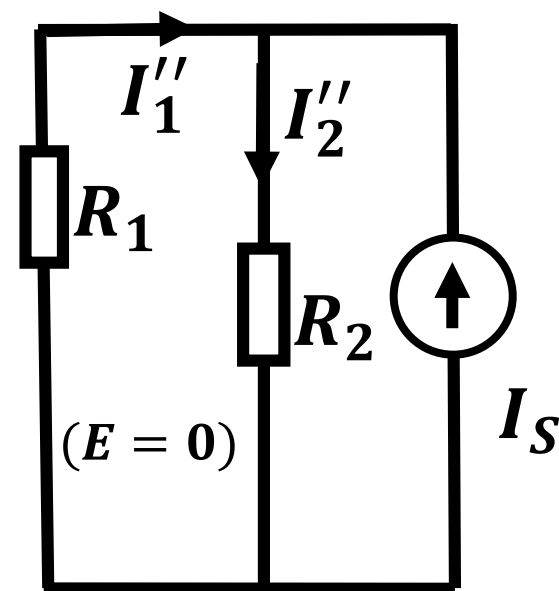
- 在**线性电路**中，**多个**电源在某一支路产生的电流（或电压），等于各个电源**单独作用**时在该支路产生的电流（或电压）的**代数和**。
- 与总量**同向**的分量取**正**，与总量**反向**的分量取**负**。



a) 多电源电路



b) 电压源单独作用

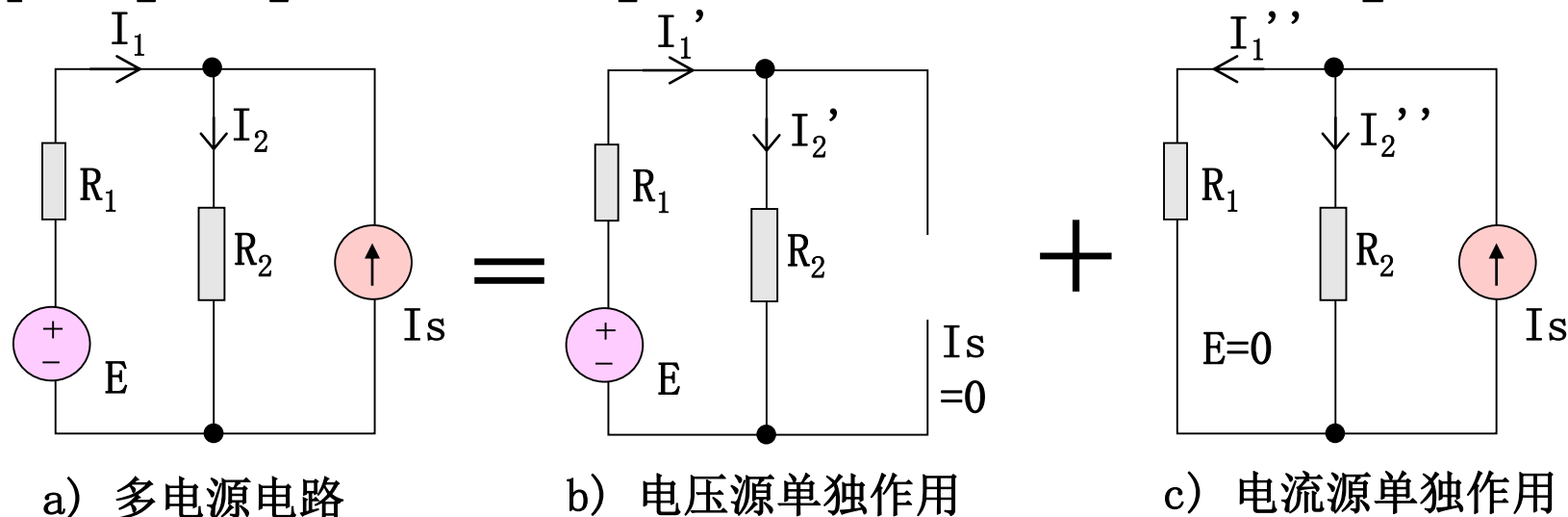


c) 电流源单独作用

迭加原理示意



例 图a所示电路中，已知  $R_1=2\Omega$ ， $R_2=10\Omega$ ， $E=12\text{V}$ ， $I_s=2\text{A}$ 。  
求电流  $I_1$ 、 $I_2$  和  $R_2$  消耗功率  $P_2$  及电压源  $E$  发出的功率  $P_E$ 。

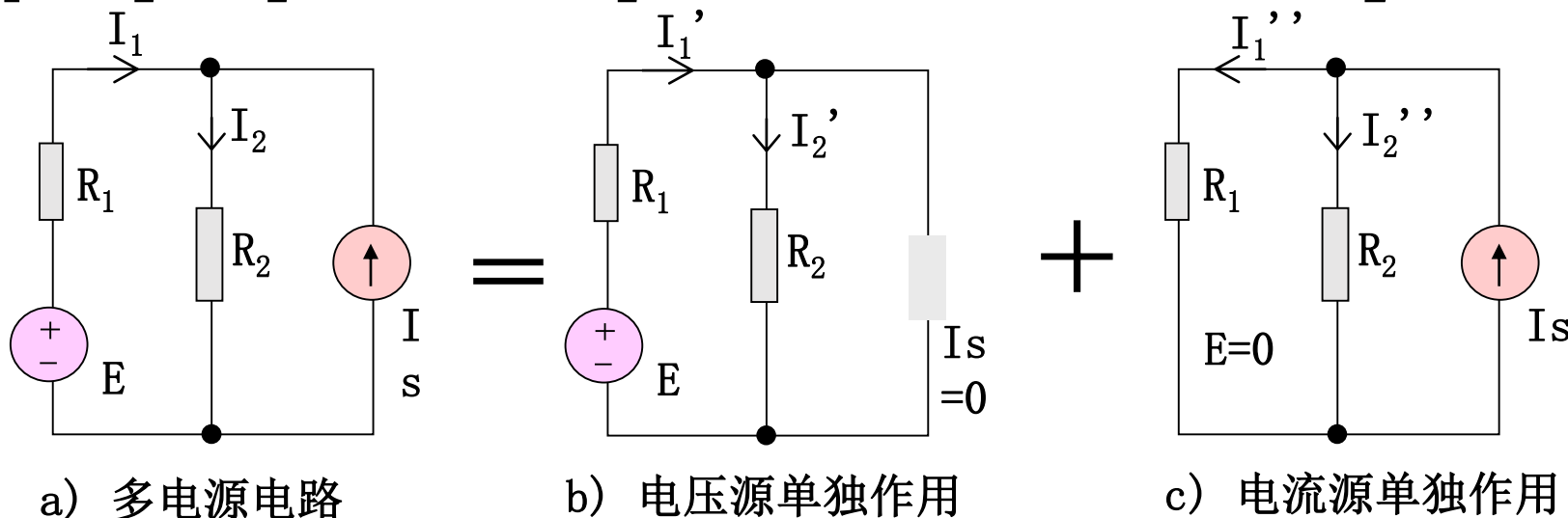


解：由图b可得 (E单独作用) 
$$I_1' = I_2' = \frac{E}{R_1 + R_2} = \frac{12}{2 + 10} = 1(\text{A})$$

由图c可得 ( $I_s$ 单独作用) 
$$I_1'' = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot I_s = 1.67(\text{A}) \quad I_2'' = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot I_s = 0.33(\text{A})$$

共同作用 
$$I_1 = I_1' - I_1'' = 1 - 1.67 = -0.67(\text{A}) \quad I_2 = I_2' + I_2'' = 1 + 0.33 = 1.33(\text{A})$$

例 图a所示电路中，已知  $R_1=2\Omega$ ， $R_2=10\Omega$ ， $E=12\text{V}$ ， $I_s=2\text{A}$ 。  
求电流 $I_1$ 、 $I_2$ 和 $R_2$ 消耗功率 $P_2$ 及电压源 $E$ 发出的功率 $P_E$ 。



解：共同作用       $I_1 = I_1' - I_1'' = 1 - 1.67 = -0.67(\text{A})$        $I_2 = I_2' + I_2'' = 1 + 0.33 = 1.33(\text{A})$

$R_2$ 消耗功率       $P_2 = I_2^2 R_2 = 17.69(\text{W})$

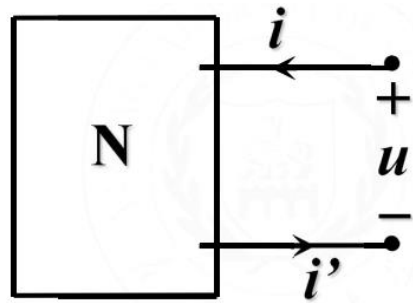
E发出功率       $P_E = -(-E \cdot I_1) = E \cdot I_1 = -8.04(\text{W})$

非关联方向下，吸收的功率

发出的功率

# 等效变换概念

具有两个外接端点的电路常称为“二端电路”。

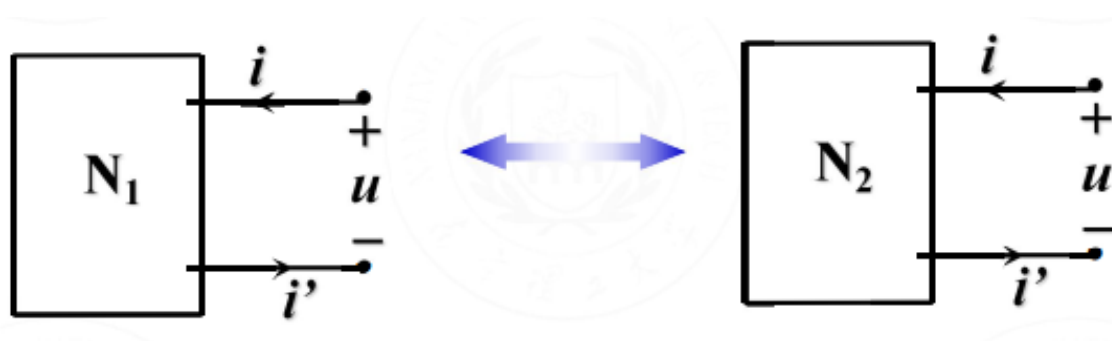


$$i = i'$$

若二端电路中含独立源，则称为有源二端网络( $N_S$ )，否则为无源二端网络( $N_0$ )。

# 等效变换概念

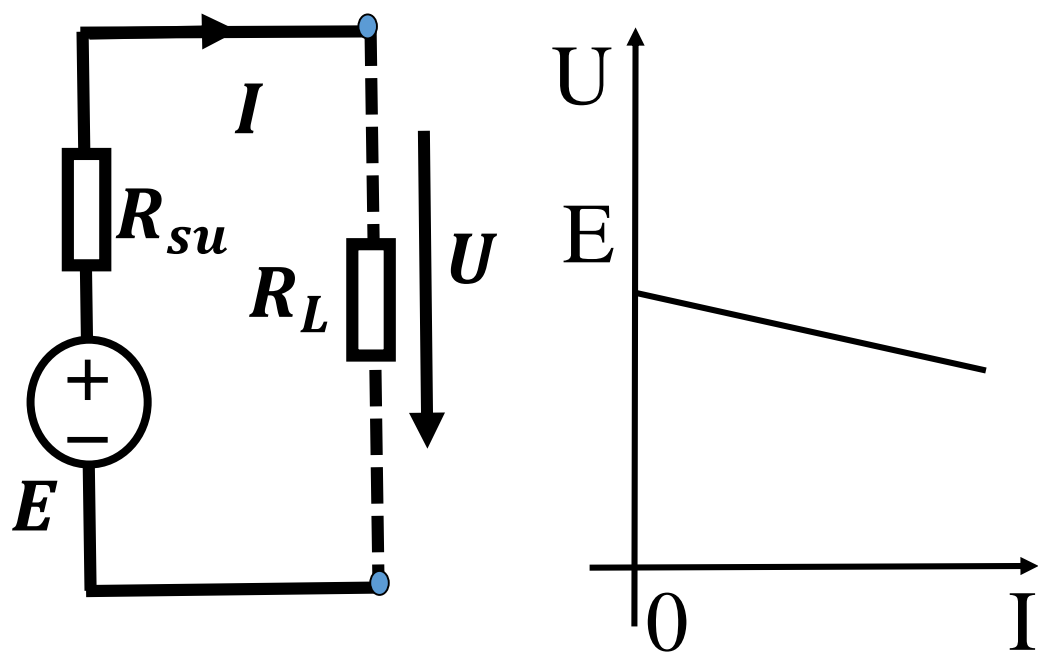
若两个二端网络 $N_1$ 和 $N_2$ ，当它们与同一个外部电路相接，在相接端点处的电压、电流关系完全相同，则称 $N_1$ 和 $N_2$ 为相互等效的二端网络。



等效的二端网络可以相互替代，这种替代叫做**等效变换**。

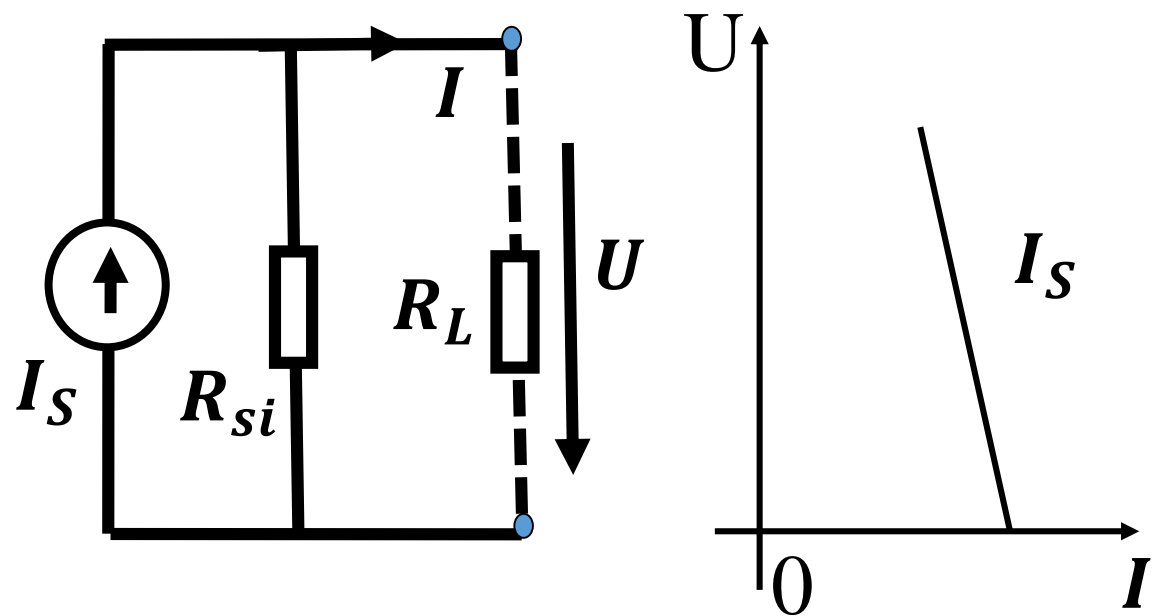
# 等效电源定理

实际电源具有一定内阻，其特性可用一个理想电源和一个电阻元件的组合来表示。



a) 有内阻的电压源及其外特性

$$U = E - R_{su}I$$

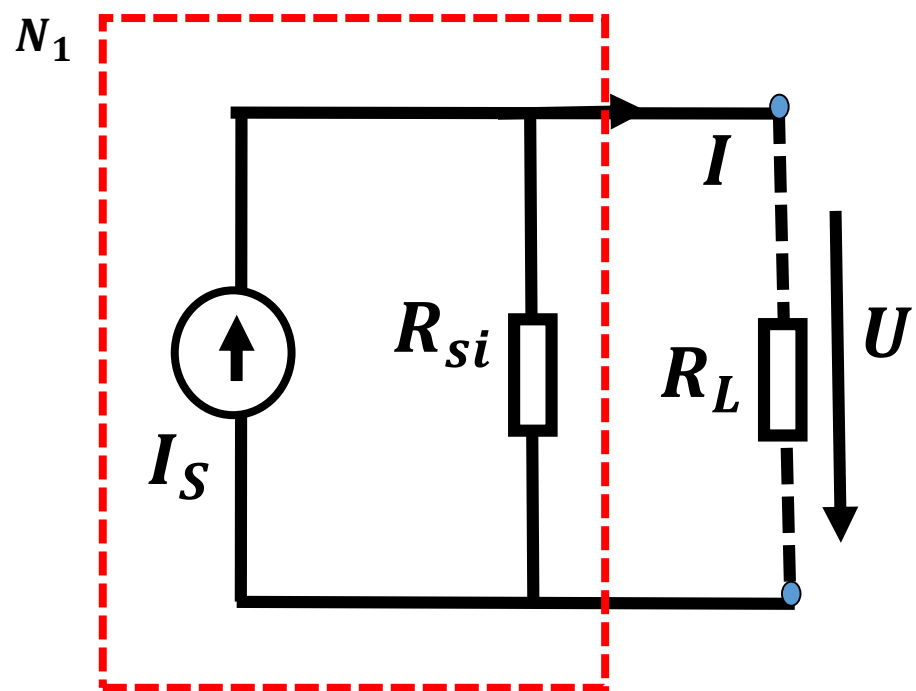


b) 有内阻的电流源及其外特性

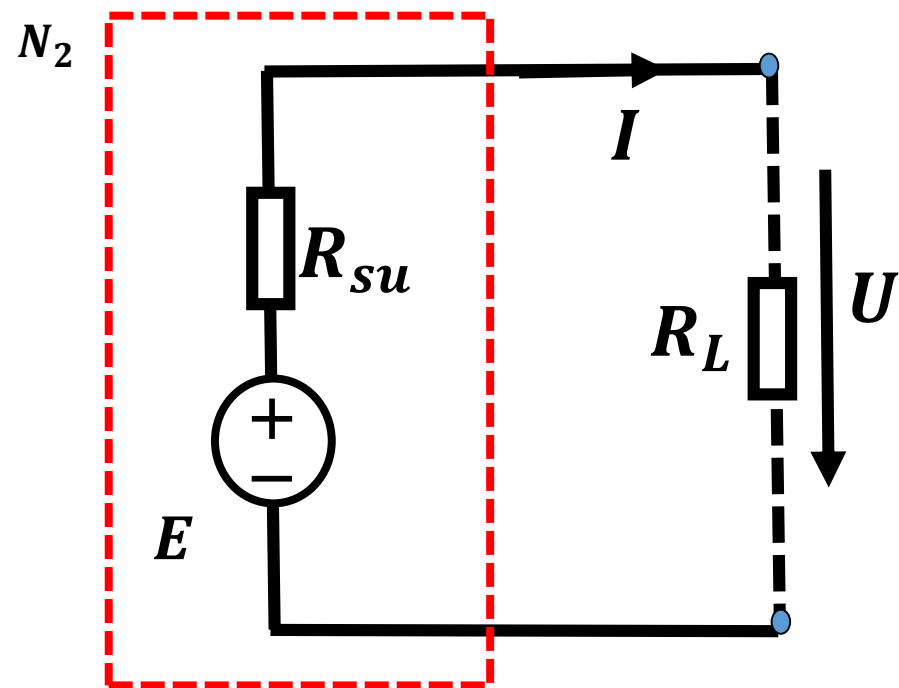
$$I = I_S - \frac{1}{R_{si}}U$$

# 等效电源定理

有阻电压源和有阻电流源的等效互换



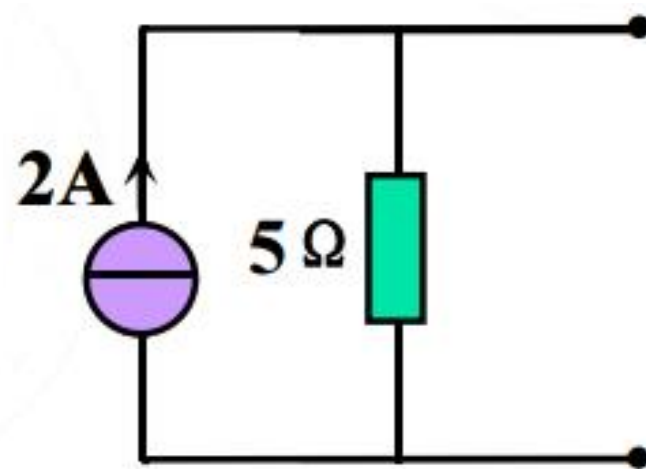
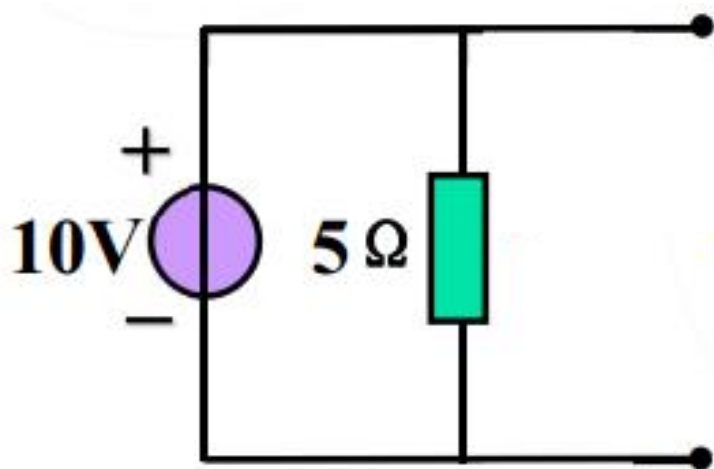
$$I = I_S - \frac{1}{R_{si}} U$$
$$U = I_S R_{si} - R_{si} I$$



$$U = E - R_{su} I$$
$$I = \frac{E}{R_{su}} - \frac{1}{R_{su}} U$$
$$\Rightarrow R_{su} = R_{si} = R_s$$
$$E = I_S R_s$$

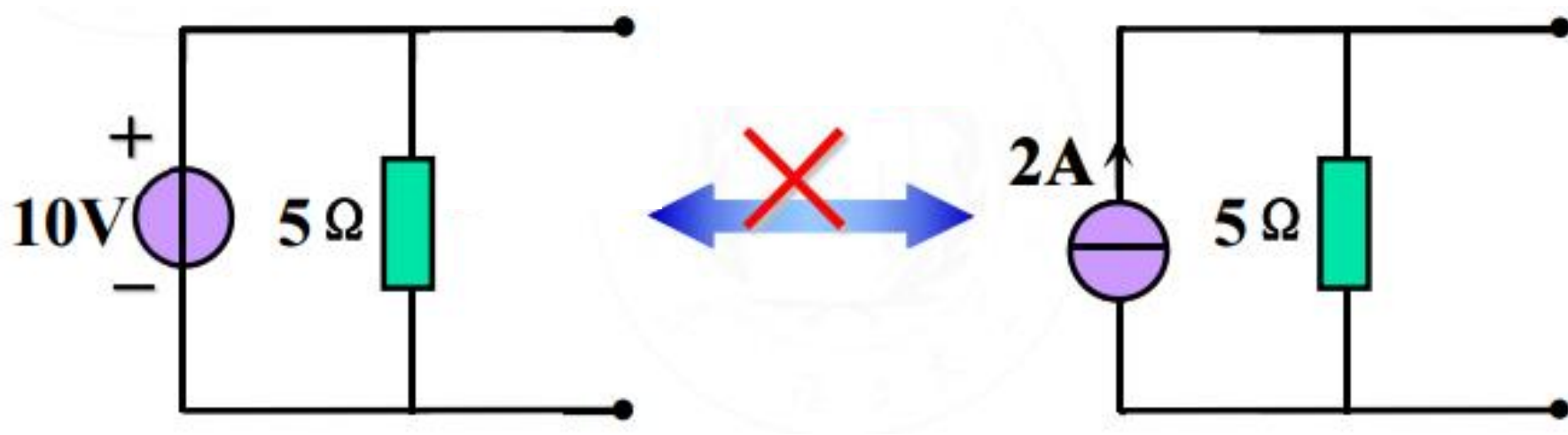
# 等效电源定理

有阻电压源和有阻电流源的等效互换



# 等效电源定理

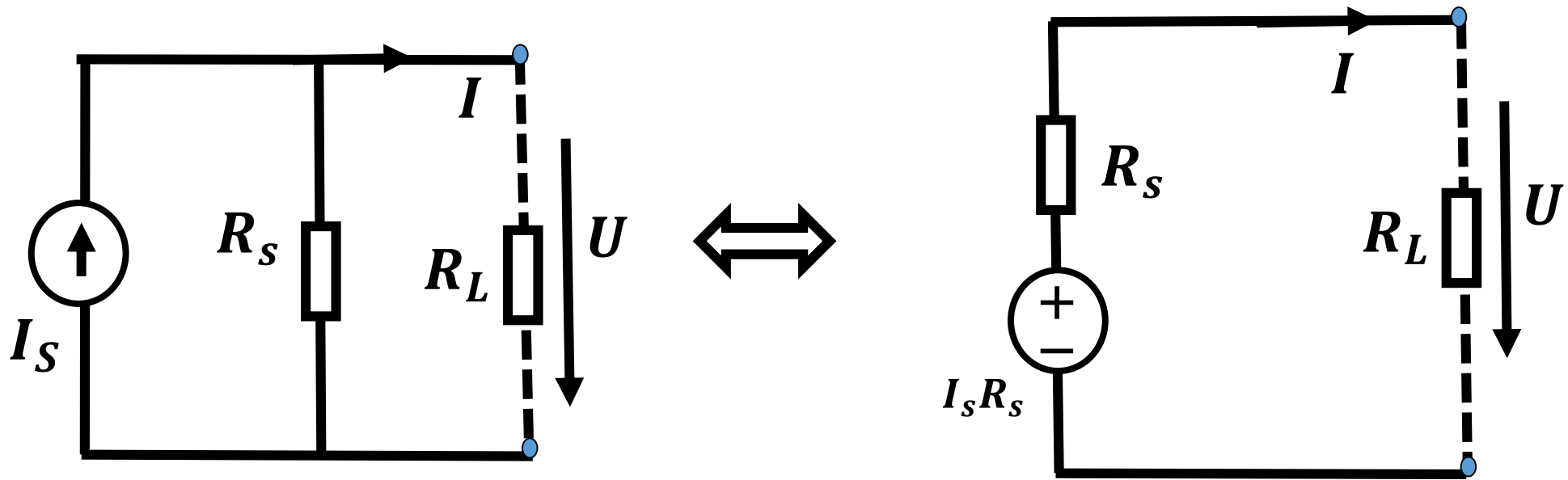
有阻电压源和有阻电流源的等效互换





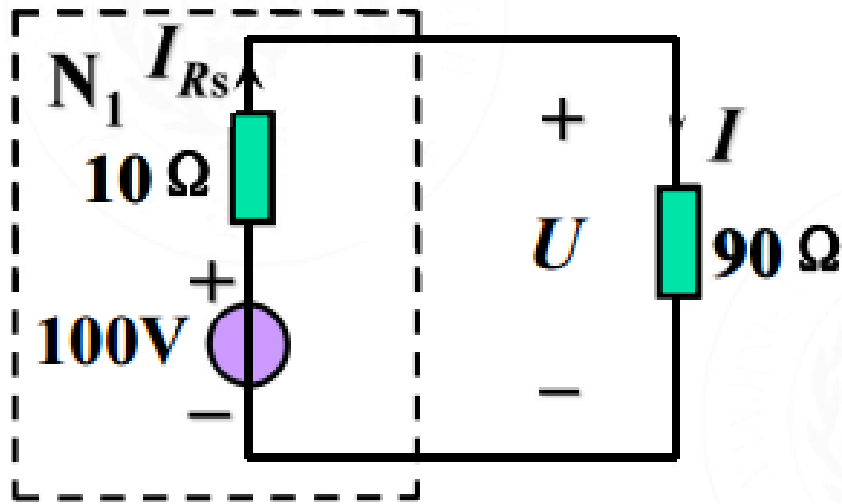
# 等效电源定理

**注意：**等效变换前后要**保持电源方向一致**，即电流源的电流方向是由电压源的 - **经内部**指向 +！

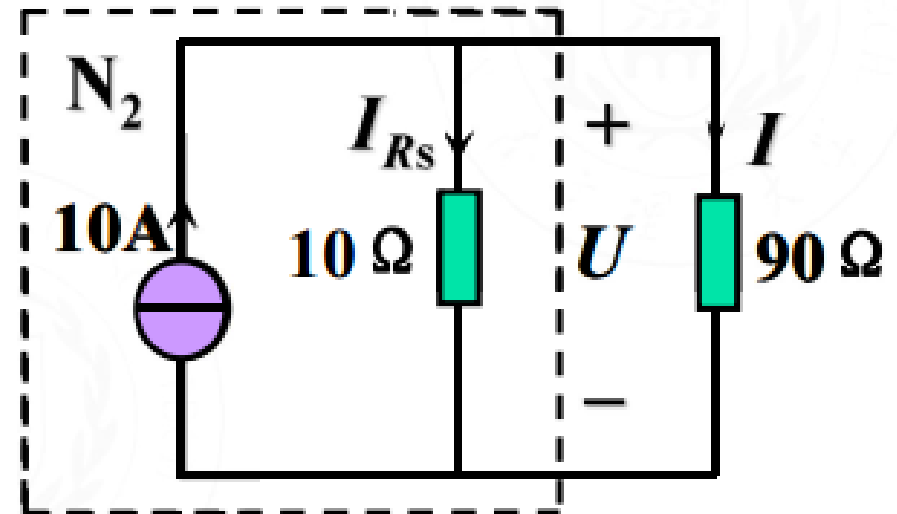


# 等效电源定理

**注意：**等效是**对外特性**而言，这种变换在电源**内部是不等效**的（如电源内阻所消耗的功率）。

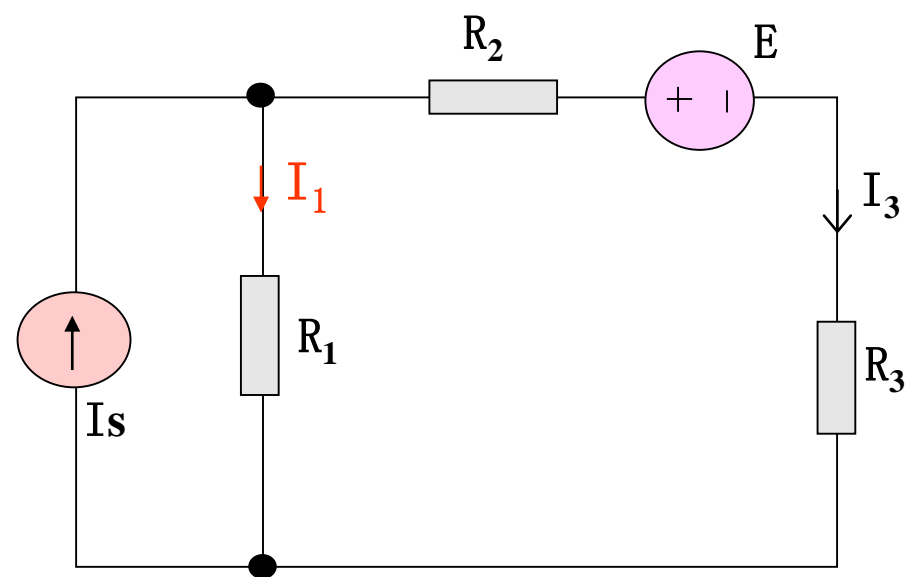


$$I = 1A, \quad U = 90V$$
$$I_{Rs} = 1A, \quad P_{Rs} = 10W$$



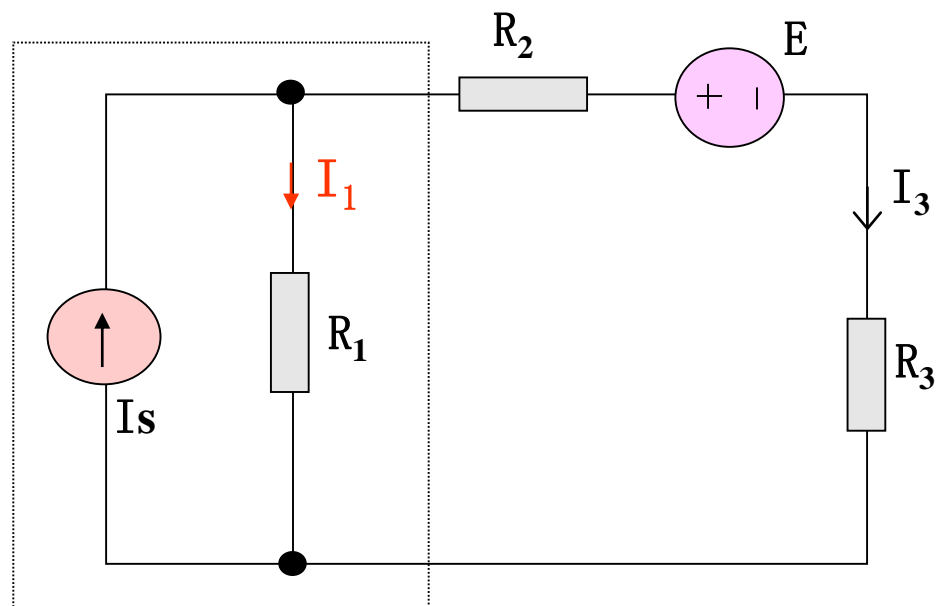
$$I = 1A, \quad U = 90V$$
$$I_{Rs} = 9A, \quad P_{Rs} = 810W$$

例 用电源变换解题示意, 求电流 $I_3$ 。



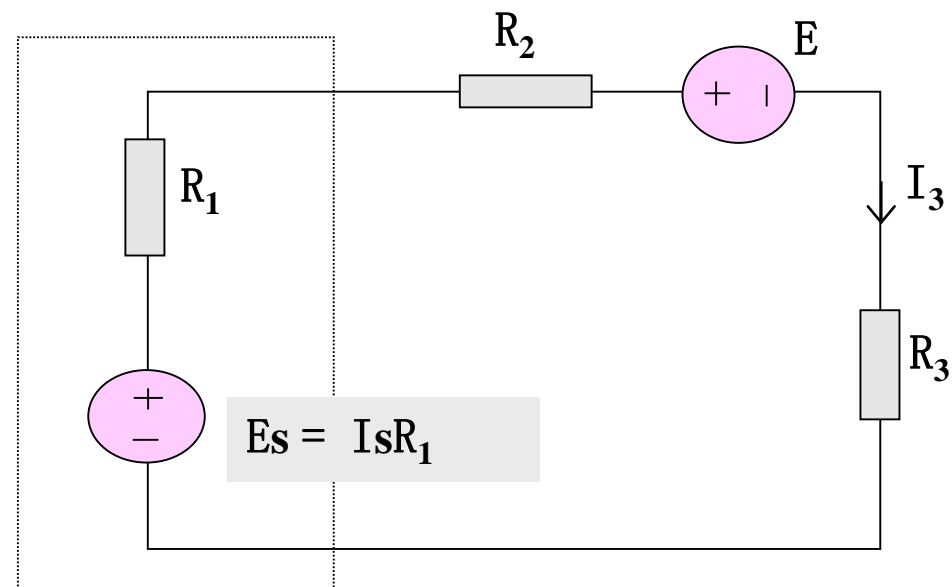
a) 原电路

例 用电源变换解题示意, 求电流 $I_3$ 。



a) 原电路

电源变换

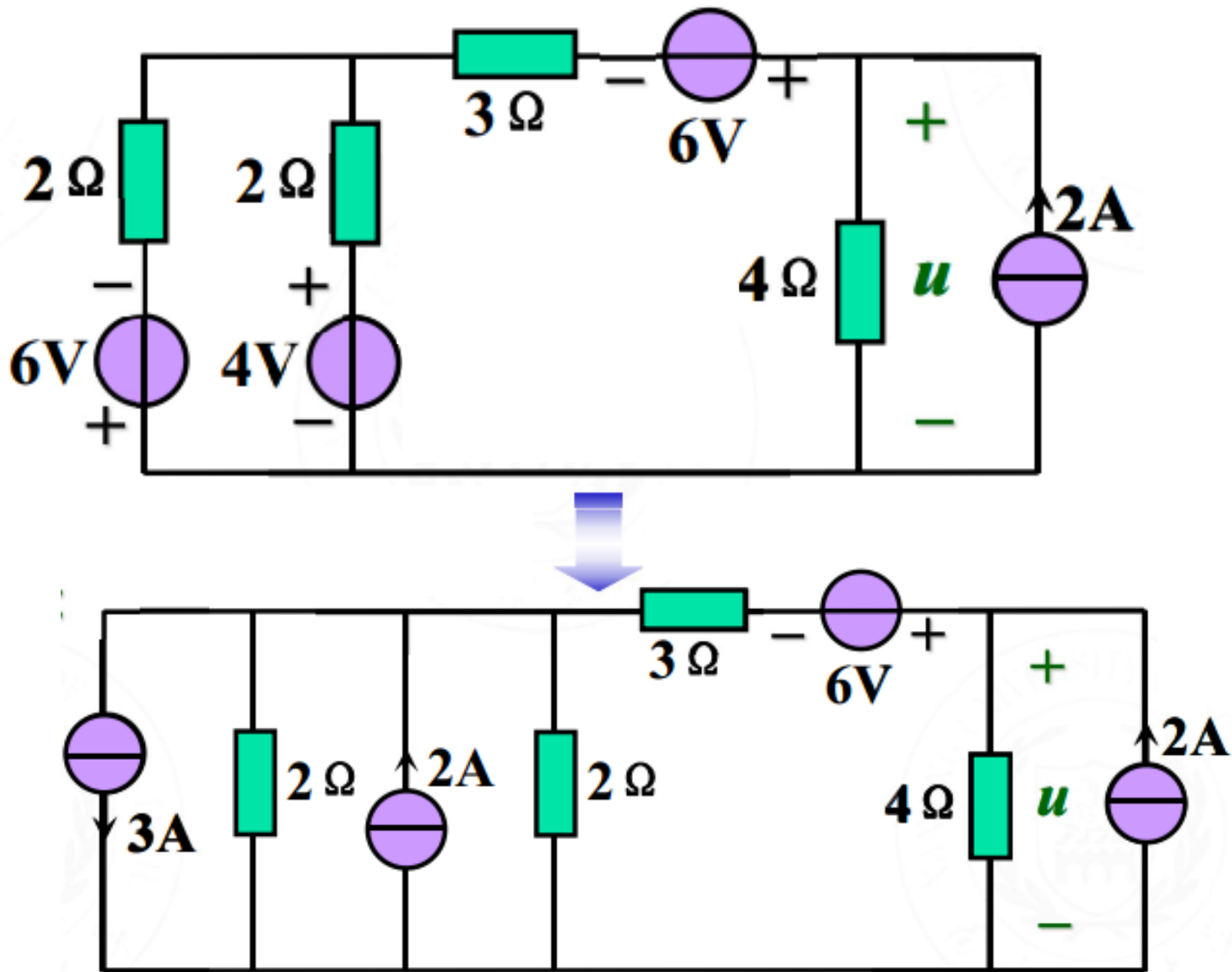


b) 变换电路

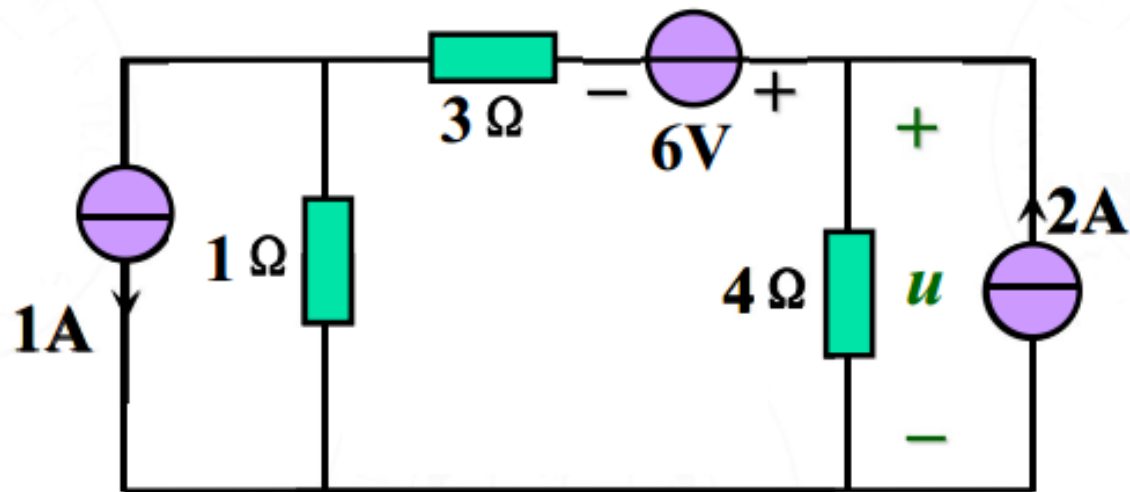
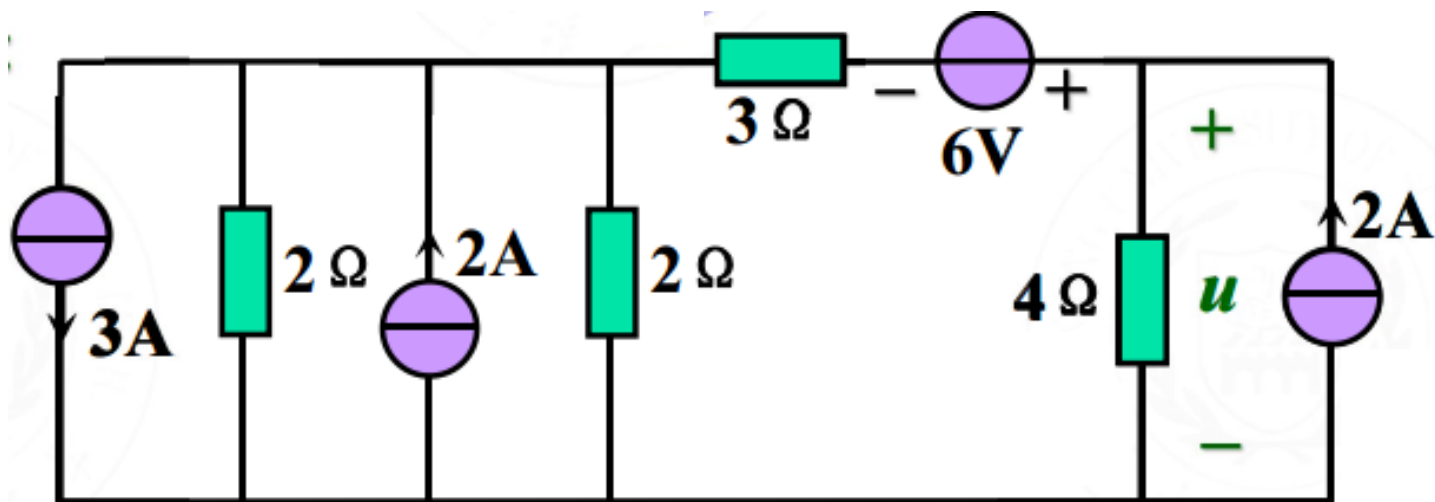
由变换电路 可得

$$I_3 = \frac{I_s R_1 - E}{R_1 + R_2 + R_3}$$

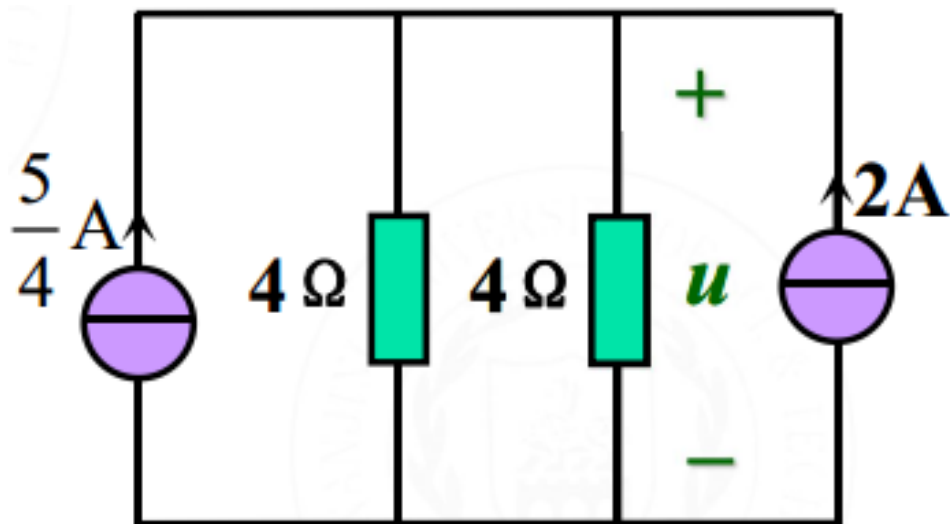
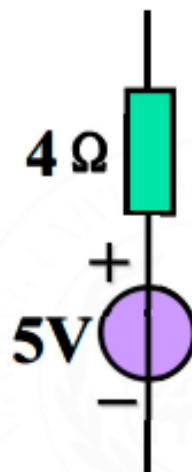
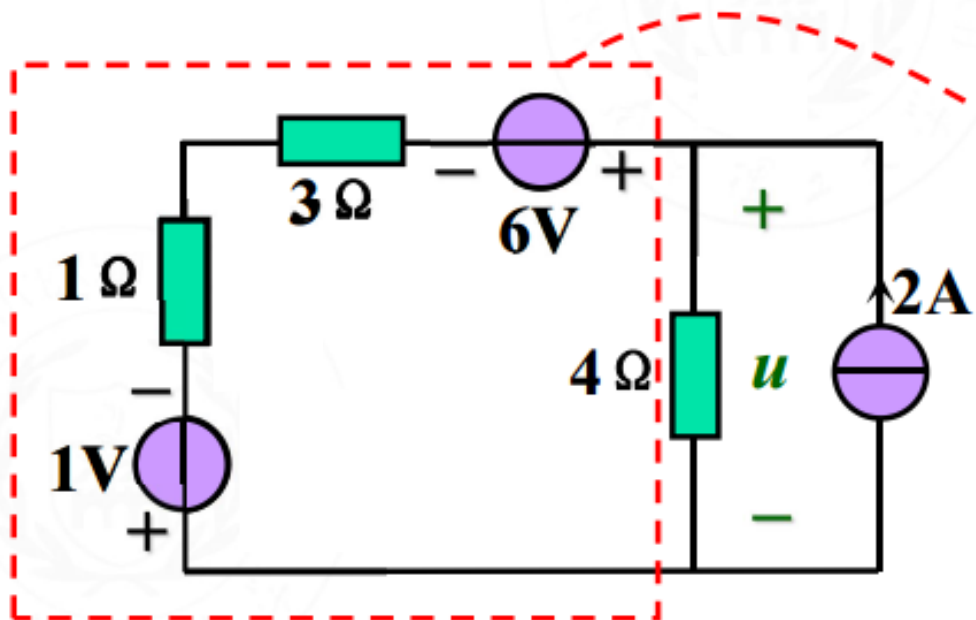
例 用电源变换方法求电压 $u$ 。



例 用电源变换方法求电压 $u$ 。



例 用电源变换方法求电压 $u$ 。



$$u = 4 \times \frac{2 + \frac{5}{4}}{2} = 6.5V$$

# 戴维南定理



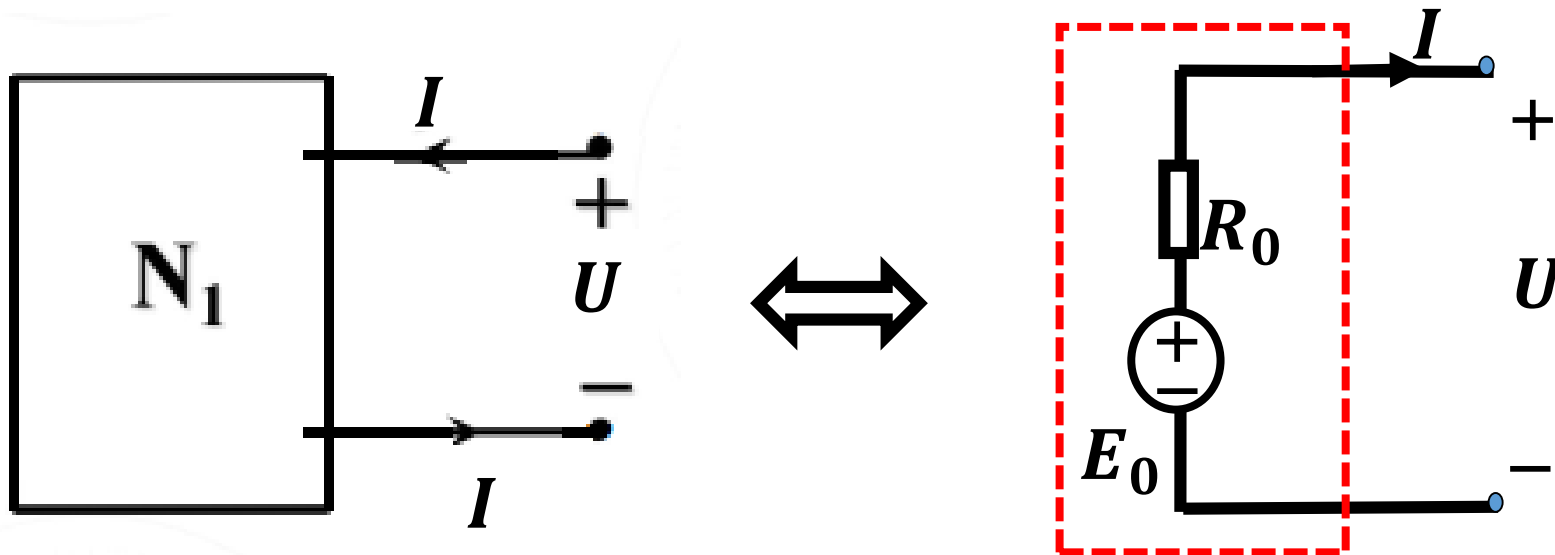
莱昂·夏尔·戴维南（**Léon Charles Thévenin**，1857年3月30日—1926年9月21日）是法国的电信工程师。也叫戴维宁。

**1883**年提出。



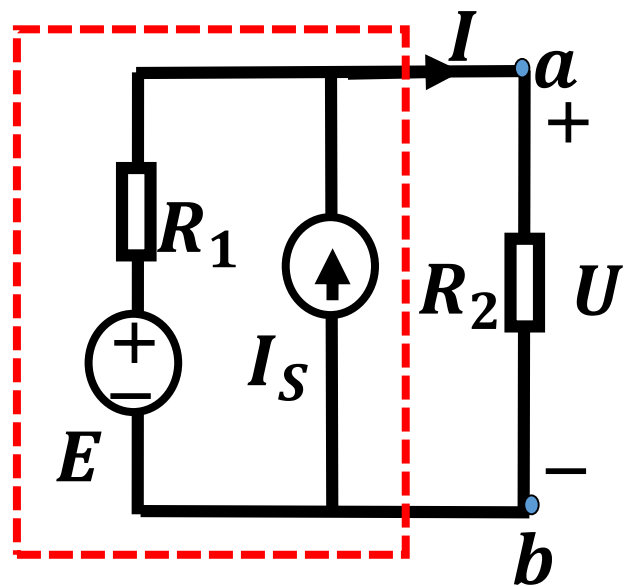
# 戴维南定理

- 由线性元件构成的任意有源二端网络均可等效为一个有阻电压源。
- 等效有阻电压源的电动势 $E_0$ 等于二端网路的开路电压，内阻 $R_0$ 等于网络内的独立电源均为零时网络的等效电阻。
- 使电源为零就是使电压源短路，电流源开路。

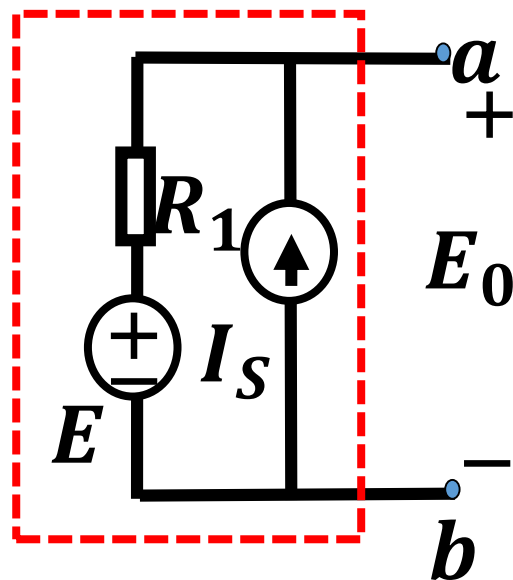


# 戴维南定理应用示意

如图电路，求 $R_2$ 中电流 $I_2$

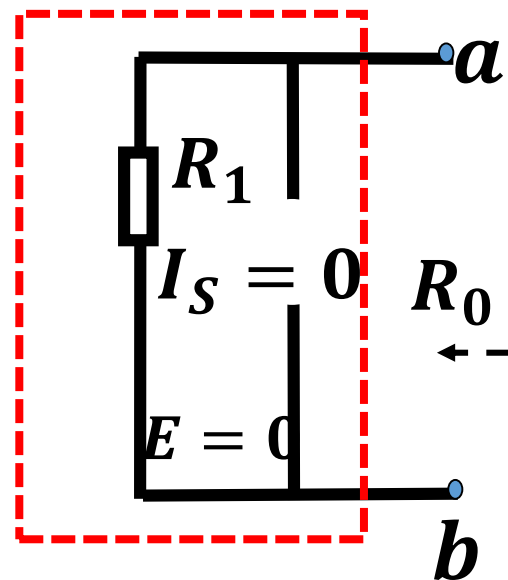


a) 有源二端网络



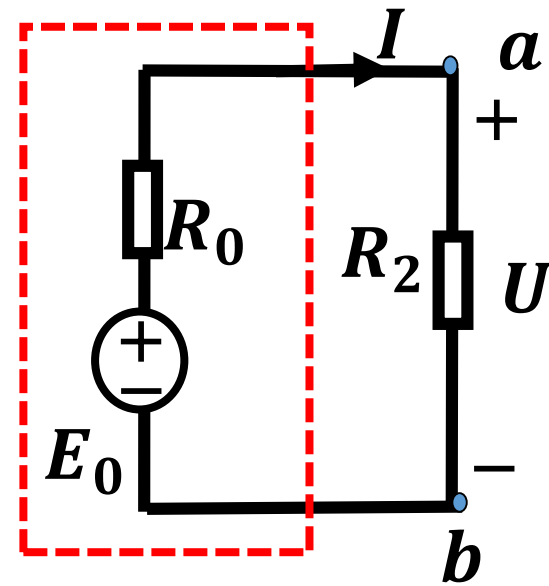
b) 开路电压

$$E_0 = E + R_1 I_S$$



c) 等效电阻

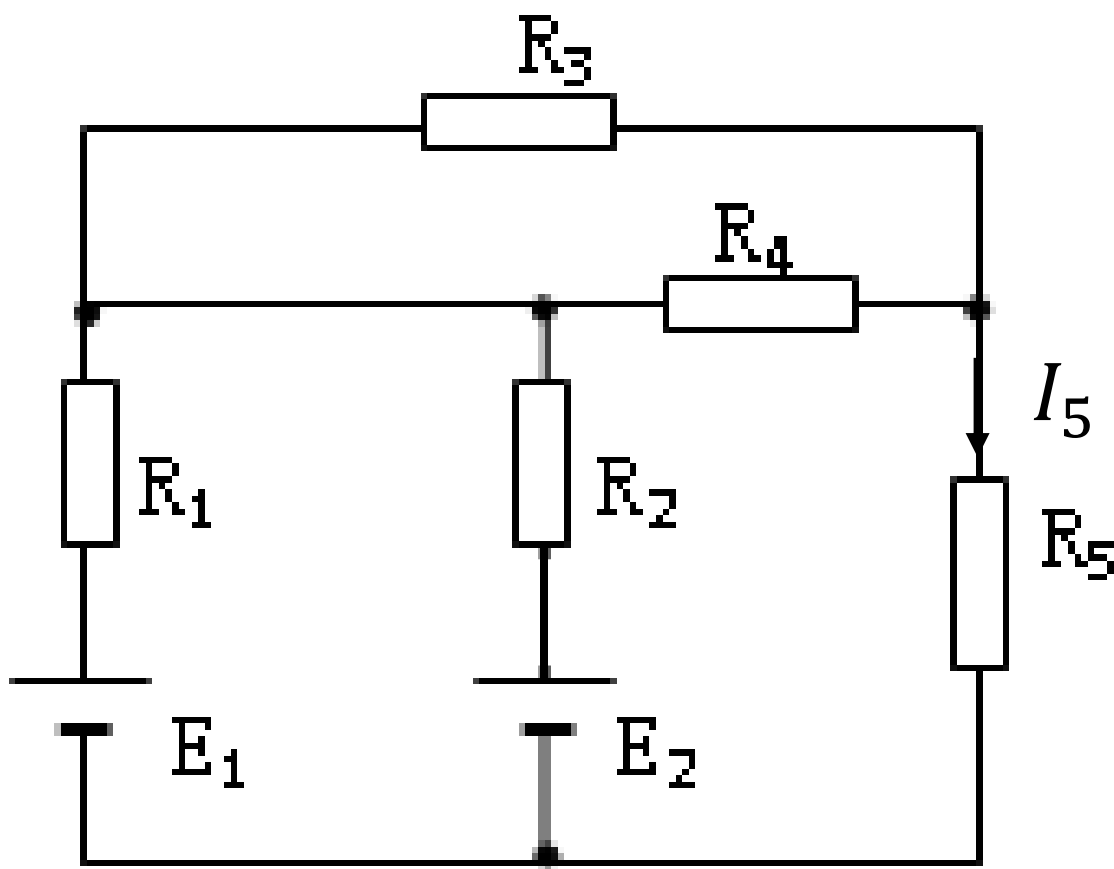
$$R_0 = R_1$$



d) 等效电源示意

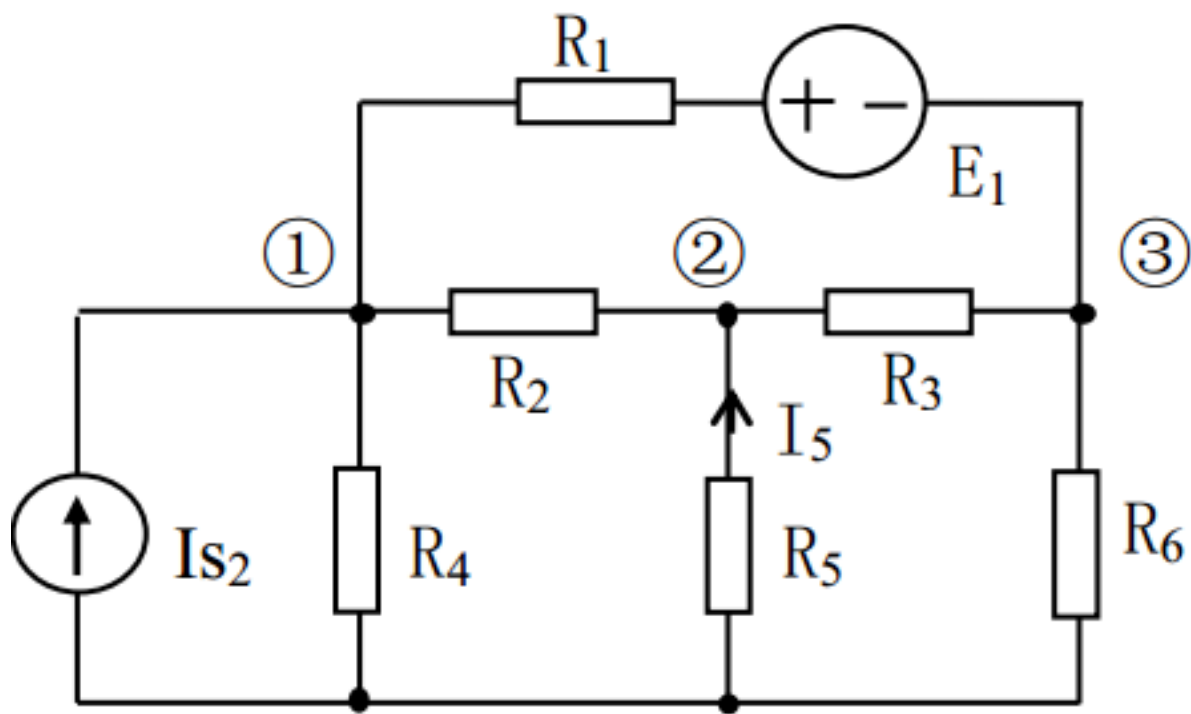
$$I_2 = \frac{E_0}{R_0 + R_2}$$

教材33页16题：如图所示， $E_1=70$ 伏， $E_2=25$ 伏， $R_1=30$ 欧， $R_2=15$ 欧， $R_3=60$ 欧， $R_4=30$ 欧， $R_5=10$ 欧。用戴维南定理计算电流 $I_5$ 和 $R_5$ 消耗的功率。



$$E_0 = 40V, R_0 = 30\Omega.$$
$$I_5 = 1A, P_5 = 10W.$$

如图所示,  $E_1 = 50V$ ,  $I_{S2} = 2A$ ,  $R_1 = 10\Omega$ ,  $R_2 = 20\Omega$ ,  $R_3 = 20\Omega$ ,  $R_4 = 40\Omega$ ,  $R_5 = 40\Omega$ ,  $R_6 = 40\Omega$ 。用戴维南定理计算电流  $I_5$ 。



$$E_0 = 40V, R_0 = 30\Omega.$$

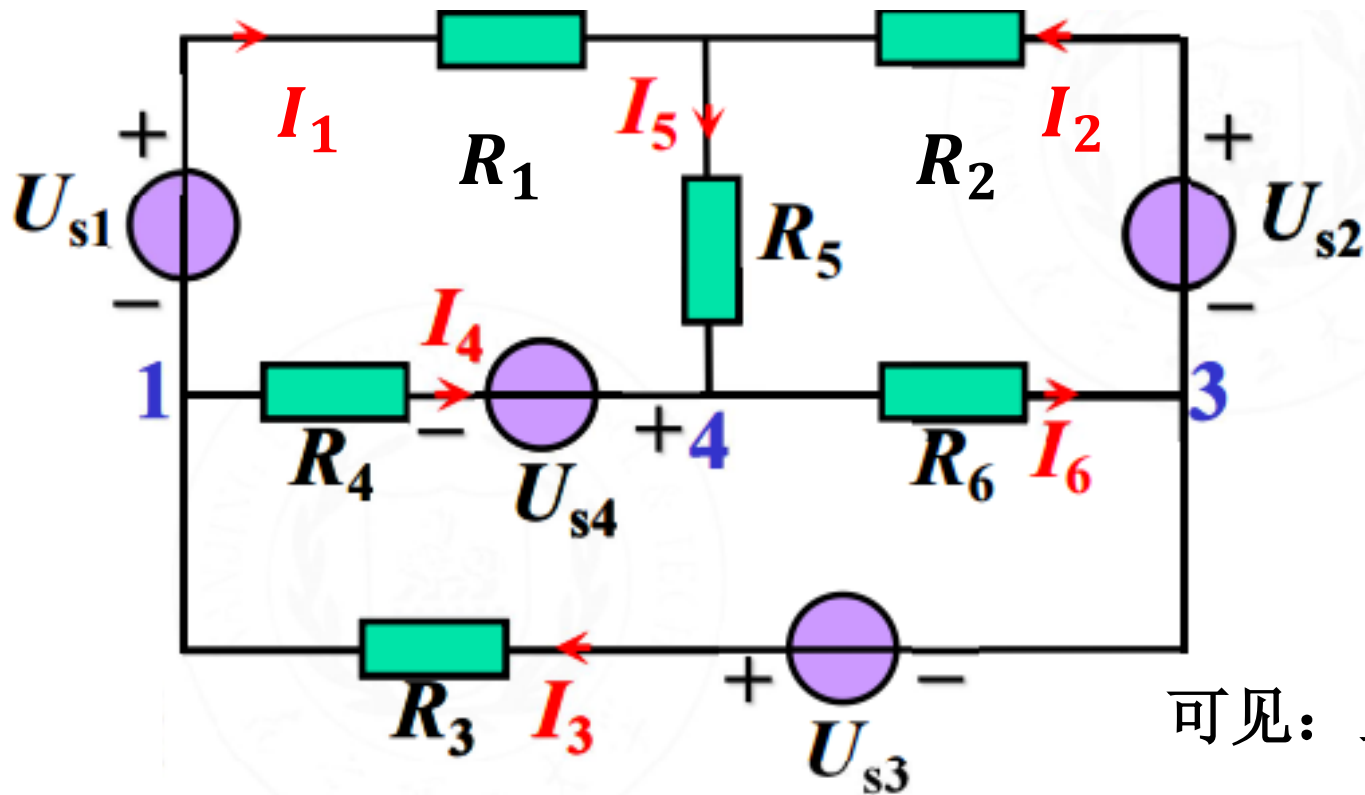
$$I_5 = 0.57A.$$

# 电路分析的一般方法

- 支路电流法
  - 以支路电流为变量，根据基尔霍夫定律KCL、KVL, 列电路方程组求解
- 回路电流法
  - 以回路电流为变量，根据基尔霍夫定律KVL，列出电路方程组求解
- 节点电压法
  - 选定一个节点为参考点，通常选取连接支路较多的节点为参考点。  
然后对非参考点，按KCL列节点电流方程求解

# 支路电流法

- 以支路电流为变量，根据基尔霍夫定律KCL、KVL, 列电路方程组求解



1. 选定参考方向，根据KCL列写各节点电流方程（ $n$ 个节点， $m$ 条支路）

节点 1:  $I_1 - I_3 + I_4 = 0$

节点 2:  $-I_1 - I_2 + I_5 = 0$

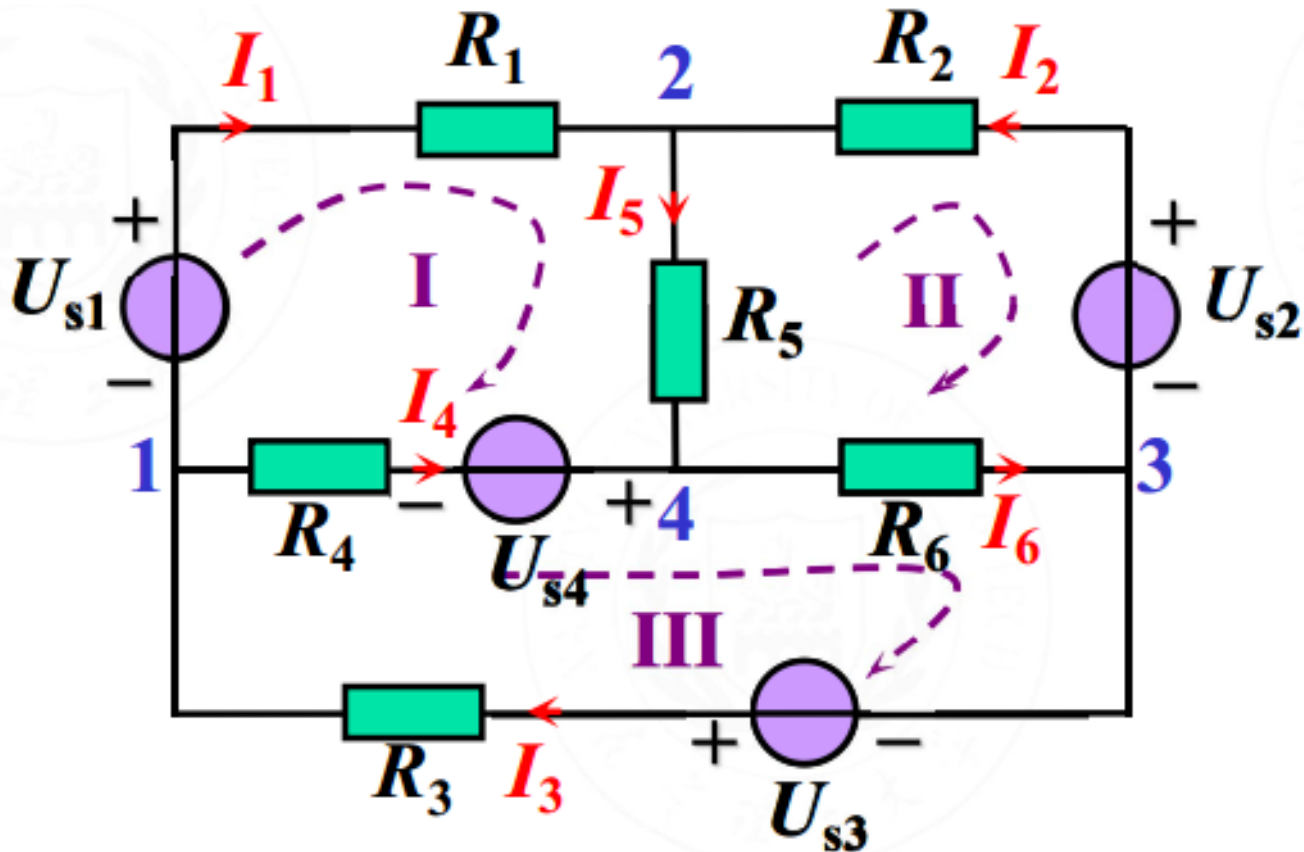
节点 3:  $I_2 + I_3 - I_6 = 0$

节点 4:  $-I_4 - I_5 + I_6 = 0$

可见：上述四个KCL方程并不是相互独立的。  
 $n$ 个节点，根据KCL, 可以列出 $n-1$ 个独立方程。

# 支路电流法

- 对于平面电路，**独立回路数=网孔数**。
- 通常取电路的网孔作为独立回路，规定顺时针方向为回路方向。



2. 根据KVL，列写 $m-n+1$ 个独立回路方程。（ $n$ 个节点， $m$ 条支路）

$$\text{I: } R_1 I_1 + R_5 I_5 + U_{s4} - R_4 I_4 - U_{s1} = 0$$

$$\text{II: } -R_2 I_2 + U_{s2} - R_6 I_6 - R_5 I_5 = 0$$

$$\text{III: } R_4 I_4 - U_{s4} + R_6 I_6 - U_{s3} + R_3 I_3 = 0$$

# 支路电流法

- 以支路电流为变量，根据基尔霍夫定律KCL、KVL, 列电路方程组求解。

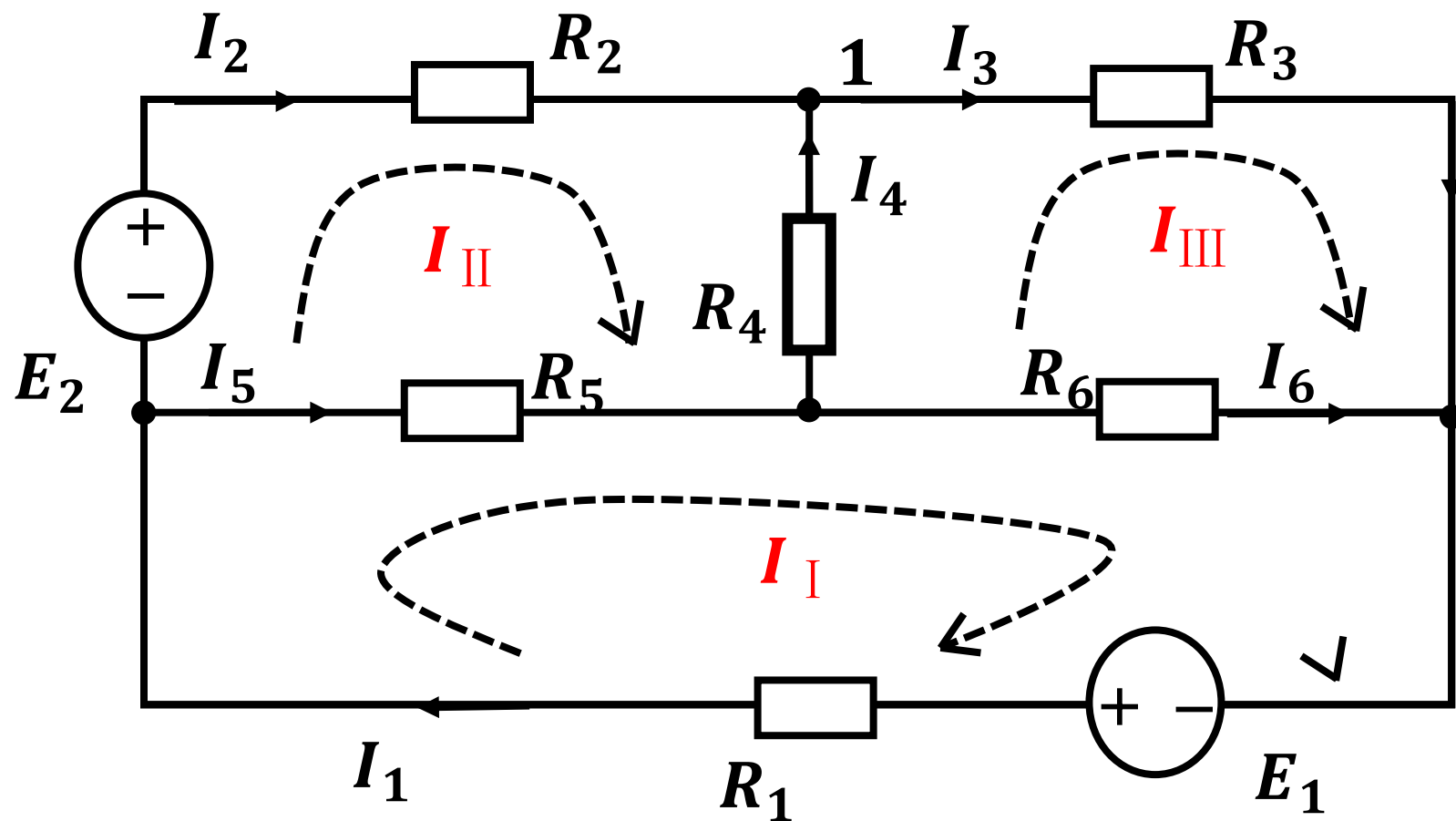
支路电流法的解题步骤如下：

- 1) 规定各支路电流的参考方向；
- 2) 任选 $n-1$ 个独立节点，按KCL写出节点电流方程；
- 3) 选取 $m-n+1$ 个独立回路并规定回路方向（通常取网孔为独立回路，顺时针方向为回路方向），按KVL写出回路电压方程；
- 4) 联立求解上述方程，就可得到各支路电流。



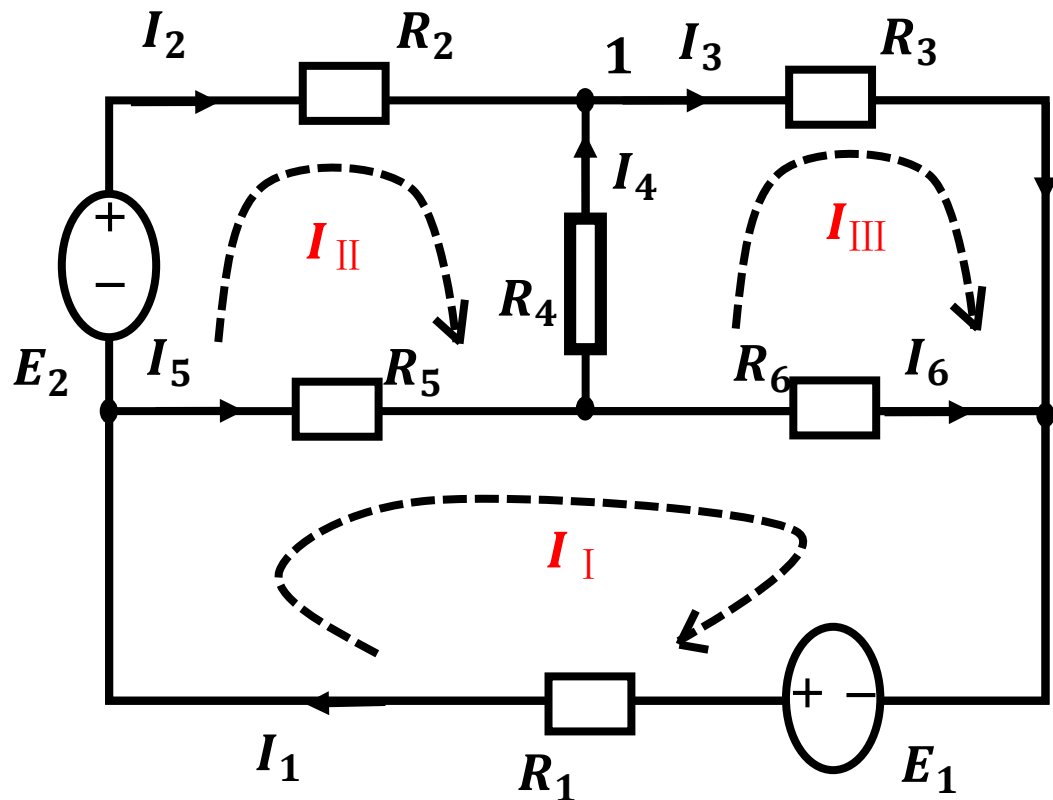
# 回路电流法

- 以回路电流为变量，根据基尔霍夫定律KVL，列出电路方程组求解。
- 回路电流：假设每个独立回路都有一个沿回路流动的电流。



# 回路电流法

- **完备性：** 电路中的所有支路电流都可以用回路电流表示。



$$I_1 = I_{\text{I}}$$

$$I_2 = I_{\text{II}}$$

$$I_3 = I_{\text{III}}$$

$$I_4 = I_{\text{III}} - I_{\text{II}}$$

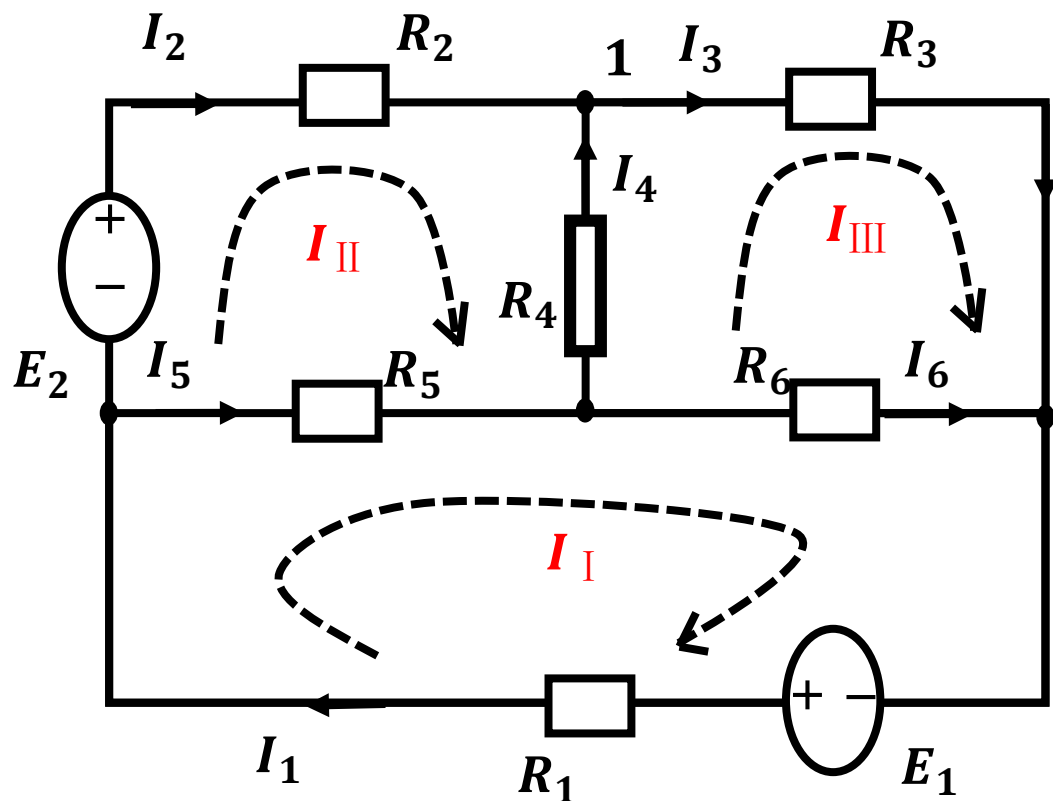
$$I_5 = I_{\text{I}} - I_{\text{II}}$$

$$I_6 = I_{\text{I}} - I_{\text{III}}$$

# 回路电流法

- 首先，选定独立回路并规定回路电流。
  - 通常取网孔为独立回路，顺时针方向为回路电流方向。
- 然后，对各独立回路，按KVL写出回路电压方程。

注意：支路电流： $I_1, I_2, \dots, I_6$   
回路电流： $I_I, I_{II}, I_{III}$



回路  $I_I$  :  $R_1 I_1 + R_5 I_5 + R_6 I_6 = E_1$

$$R_1 I_I + R_5 (I_I - I_{II}) + R_6 (I_I - I_{III}) = E_1$$

回路  $I_{II}$  :  $R_2 I_2 - R_4 I_4 - R_5 I_5 = E_2$

$$R_5 (I_{II} - I_I) + R_2 I_{II} + R_4 (I_{II} - I_{III}) = E_2$$

回路  $I_{III}$  :  $-R_6 I_6 + R_4 I_4 + R_3 I_3 = 0$

$$R_6 (I_{III} - I_I) + R_4 (I_{III} - I_{II}) + R_3 I_{III} = 0$$

# 回路电流法

整理得： 回路  $I_I$  :  $(R_1+R_5+R_6) I_I - R_5 I_{II} - R_6 I_{III} = E_1$

回路  $I_{II}$  :  $-R_5 I_I + (R_2+R_4+R_5) I_{II} - R_4 I_{III} = E_2$

回路  $I_{III}$  :  $-R_6 I_I - R_4 I_{II} + (R_3+R_4+R_6) I_{III} = 0$

$$\begin{bmatrix} R_1+R_5+R_6 & -R_5 & -R_6 \\ -R_5 & R_2+R_4+R_5 & -R_4 \\ -R_6 & -R_4 & R_3+R_4+R_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_I \\ I_{II} \\ I_{III} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$R_{ij}(i=j)$ : 自阻。第*i*条回路的所有电阻之和，恒为正。

$$\begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_I \\ I_{II} \\ I_{III} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

# 回路电流法

等号右边为回路电动势之和（与回路同向为**负**，反向为**正**。）

整理得： 回路  $I_I$  :  $(R_1+R_5+R_6) I_I - R_5 I_{II} - R_6 I_{III} = E_1$

回路  $I_{II}$  :  $-R_5 I_I + (R_2+R_4+R_5) I_{II} - R_4 I_{III} = E_2$

回路  $I_{III}$  :  $-R_6 I_I - R_4 I_{II} + (R_3+R_4+R_6) I_{III} = 0$

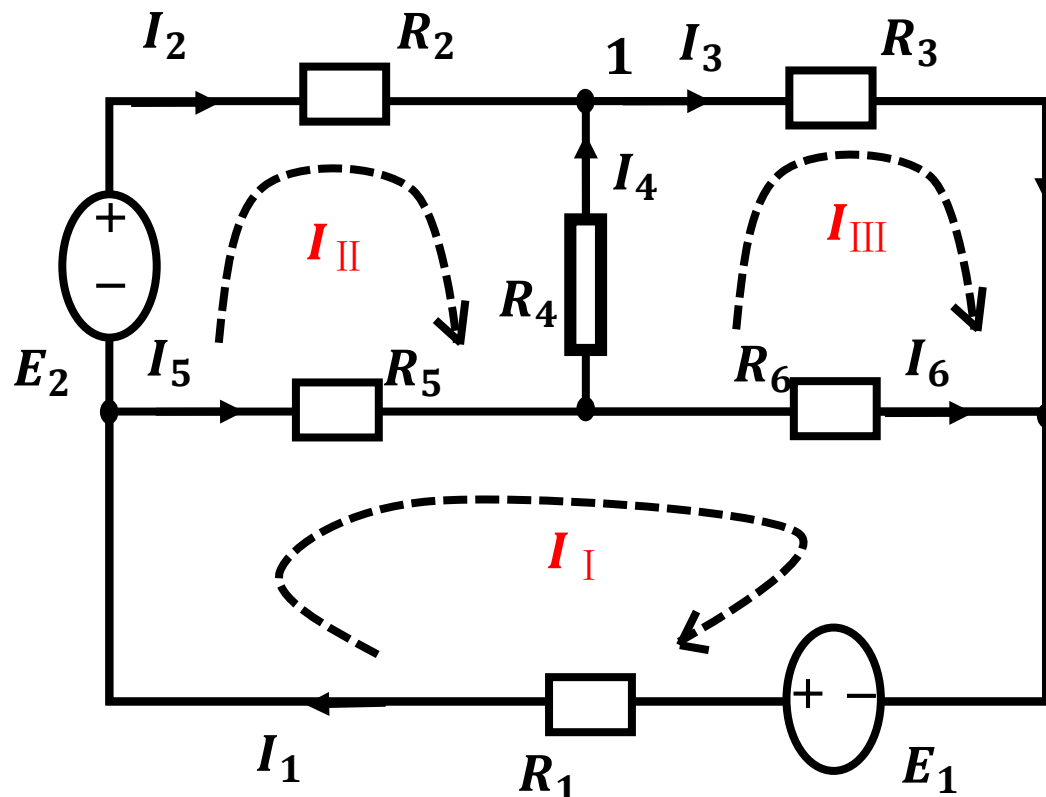
$$\begin{bmatrix} R_1+R_5+R_6 & -R_5 & -R_6 \\ -R_5 & R_2+R_4+R_5 & -R_4 \\ -R_6 & -R_4 & R_3+R_4+R_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_I \\ I_{II} \\ I_{III} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$R_{ij}(i \neq j)$ : **互阻**。第*i*条回路与第*j*条回路公共支路的电阻之和。在各回路电流方向都一致的情况下互阻总是负值。

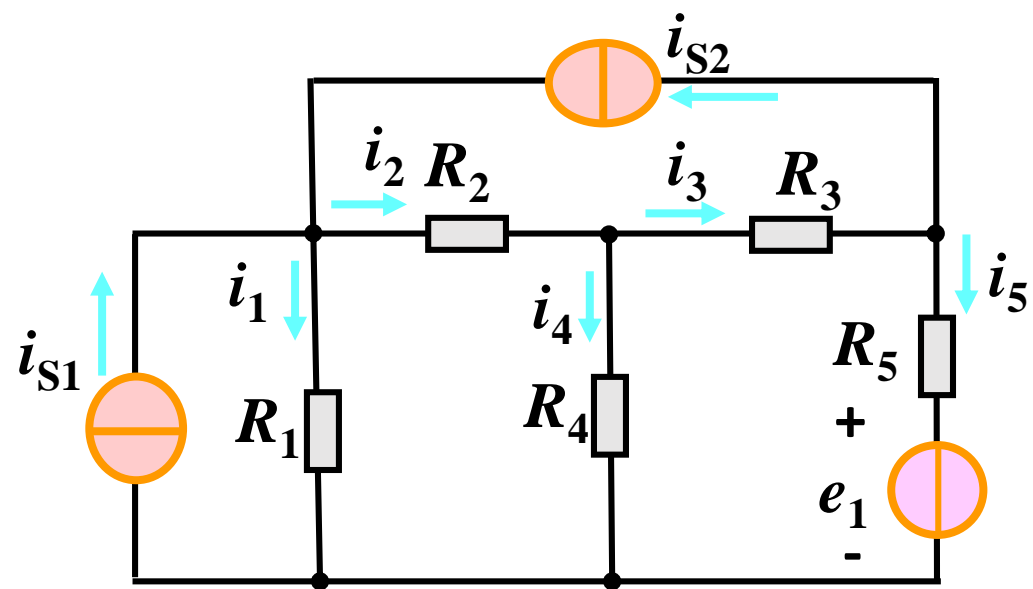
$$\begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_I \\ I_{II} \\ I_{III} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

# 回路电流法

- 首先，选定独立回路并规定回路电流。
  - 通常取网孔为独立回路，顺时针方向为回路电流方向。
- 然后，对各独立回路，按KVL写出回路电压方程。
- 求解。

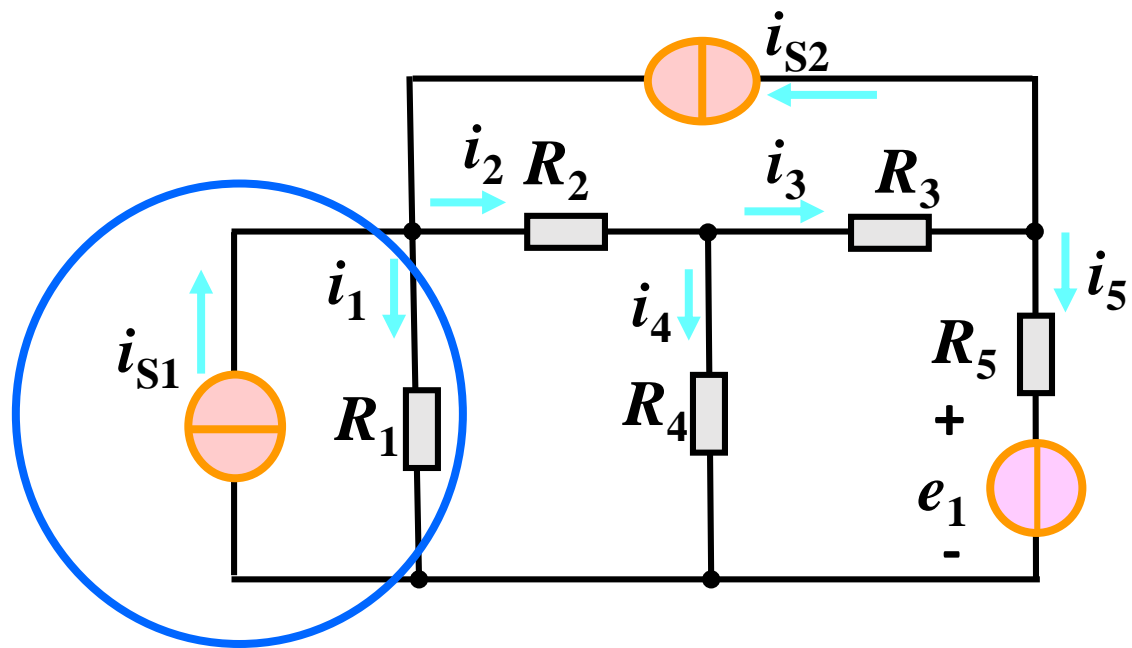


# 回路电流法（含电流源）

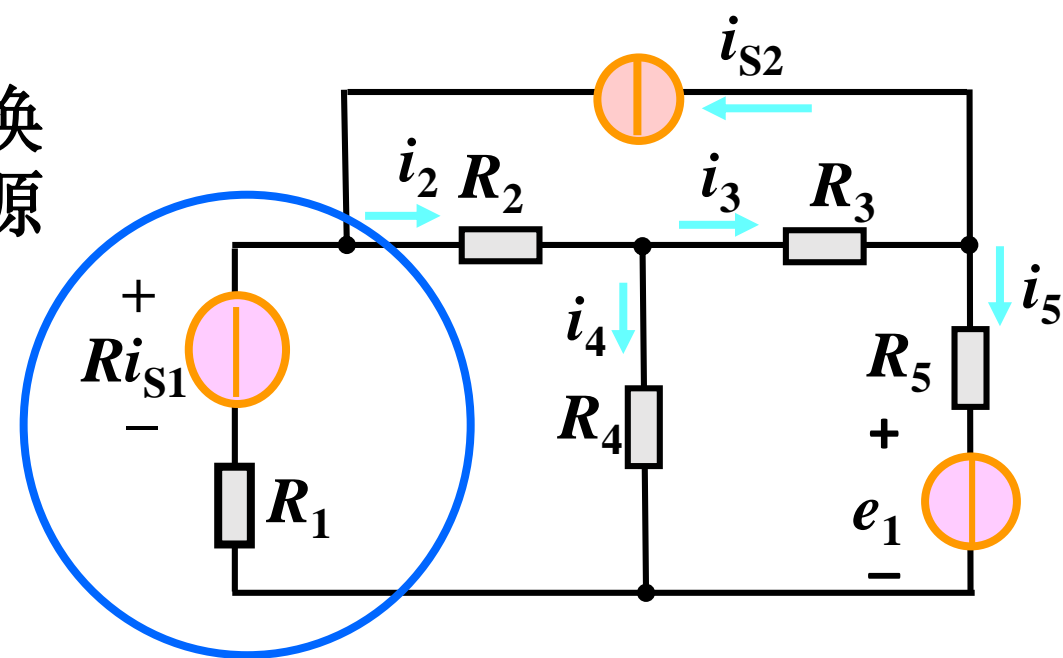


# 回路电流法（含电流源）

- 方法一、等效变换



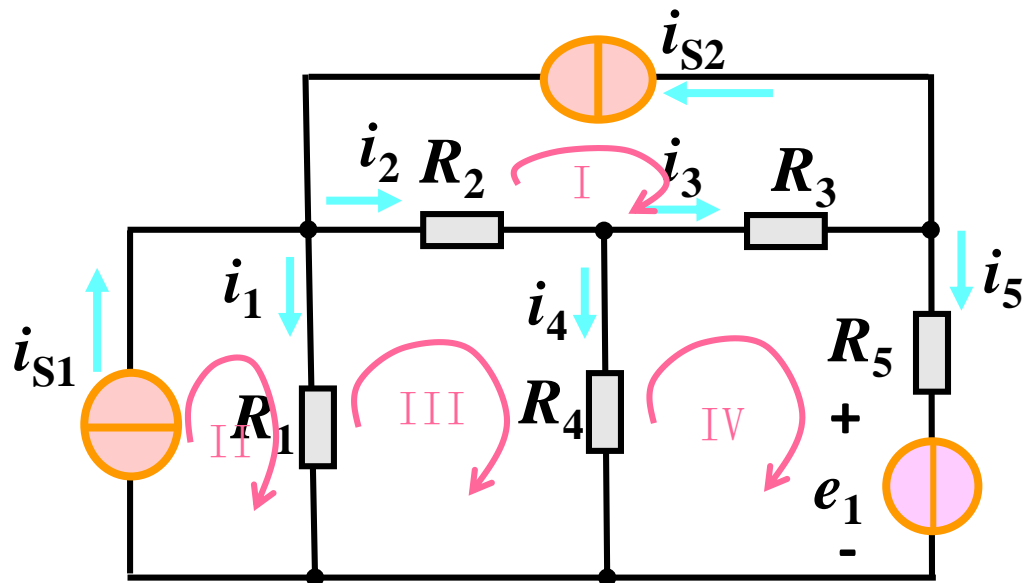
等效变换  
为电压源





# 回路电流法（含电流源）

- 方法二、不做等效变换
  - 电流源两端电压未知，可以当做变量，同时**附加电流约束**。
  - 0r 只选择**独立电路**（不选取电流源所在回路），同时**附加电流约束**。

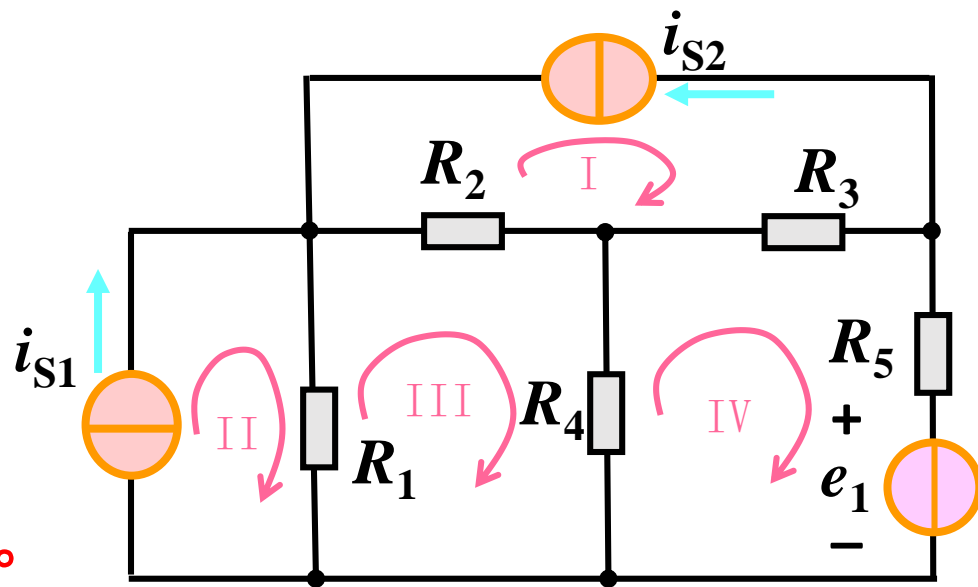


电流约束：

$$\begin{cases} I_I = -i_{S2} \\ I_{II} = i_{S1} \end{cases}$$

## 回路电流法（含电流源）

- 方法二、不做等效变换
- 情况1：电流源限制一个回路（边沿支路）
  - 可不写电流源所在回路的方程。



回路Ⅲ：  $-R_2 I_I - R_1 I_{II} + (R_1 + R_2 + R_4) I_{III} - R_4 I_{IV} = 0$

回路Ⅳ：  $-R_3 I_I - R_4 I_{III} + (R_3 + R_4 + R_5) I_{IV} = -e_1$

附加方程：  $I_I = -i_{S2}$   
 $I_{II} = i_{S1}$

# 回路电流法（含电流源）

- 方法二、不做等效变换
- 情况2：电流源限制多个回路（公共支路）
  - 增设电流源所在支路的电压，并考虑电流源对回路电流的约束。

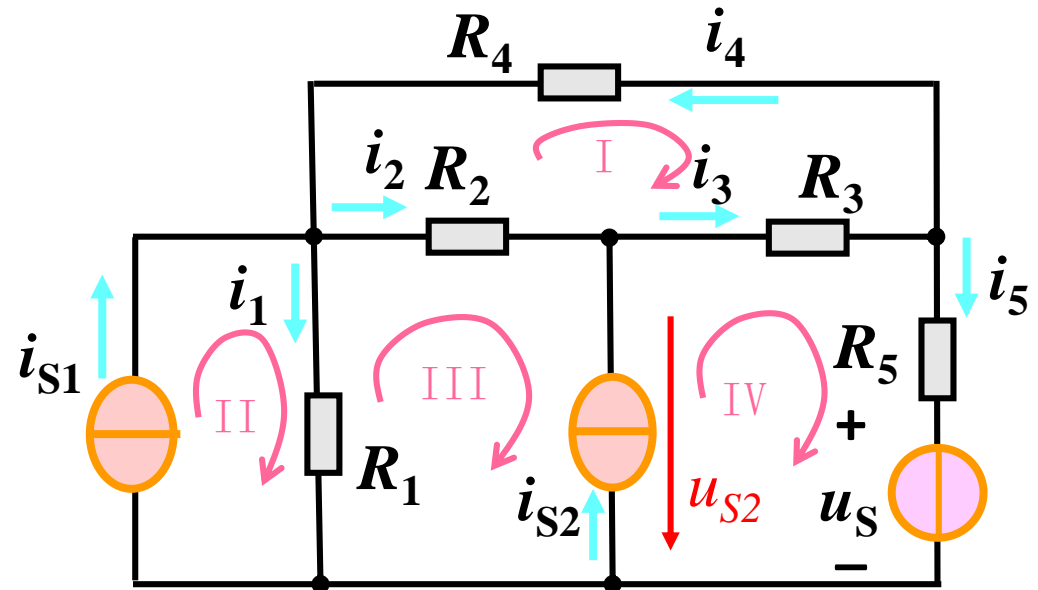
回路I:  $(R_2+R_3+R_4) I_I - R_2 I_{III} - R_3 I_{IV} = 0$

回路III:  $-R_2 I_I - R_1 I_{II} + (R_1+R_2) I_{III} + \mathbf{u_{S2}} = 0$

回路IV:  $-R_3 I_I - \mathbf{u_{S2}} + (R_3+R_5) I_{IV} = -u_s$

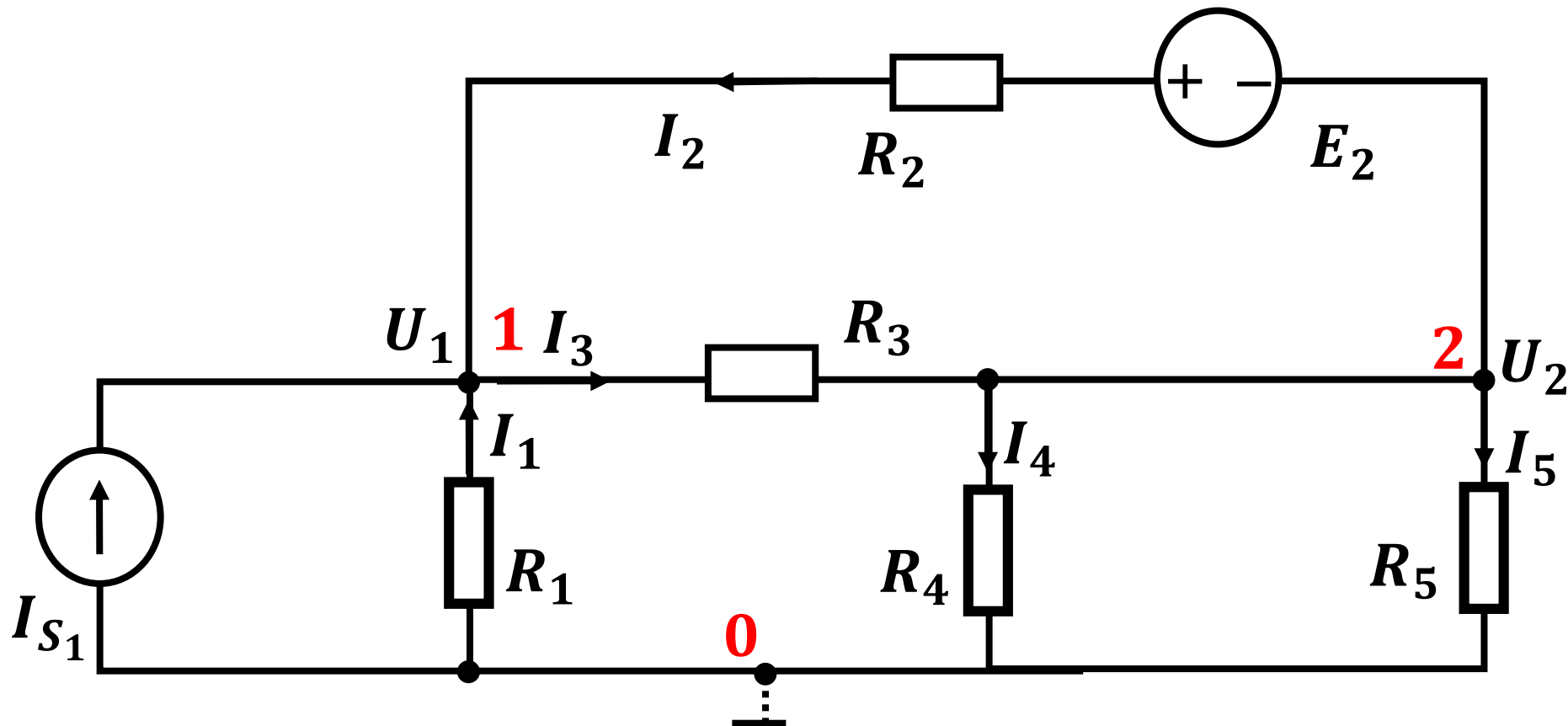
附加方程:  $I_{II} = i_{S1}$

$$I_{IV} - I_{III} = i_{S2}$$



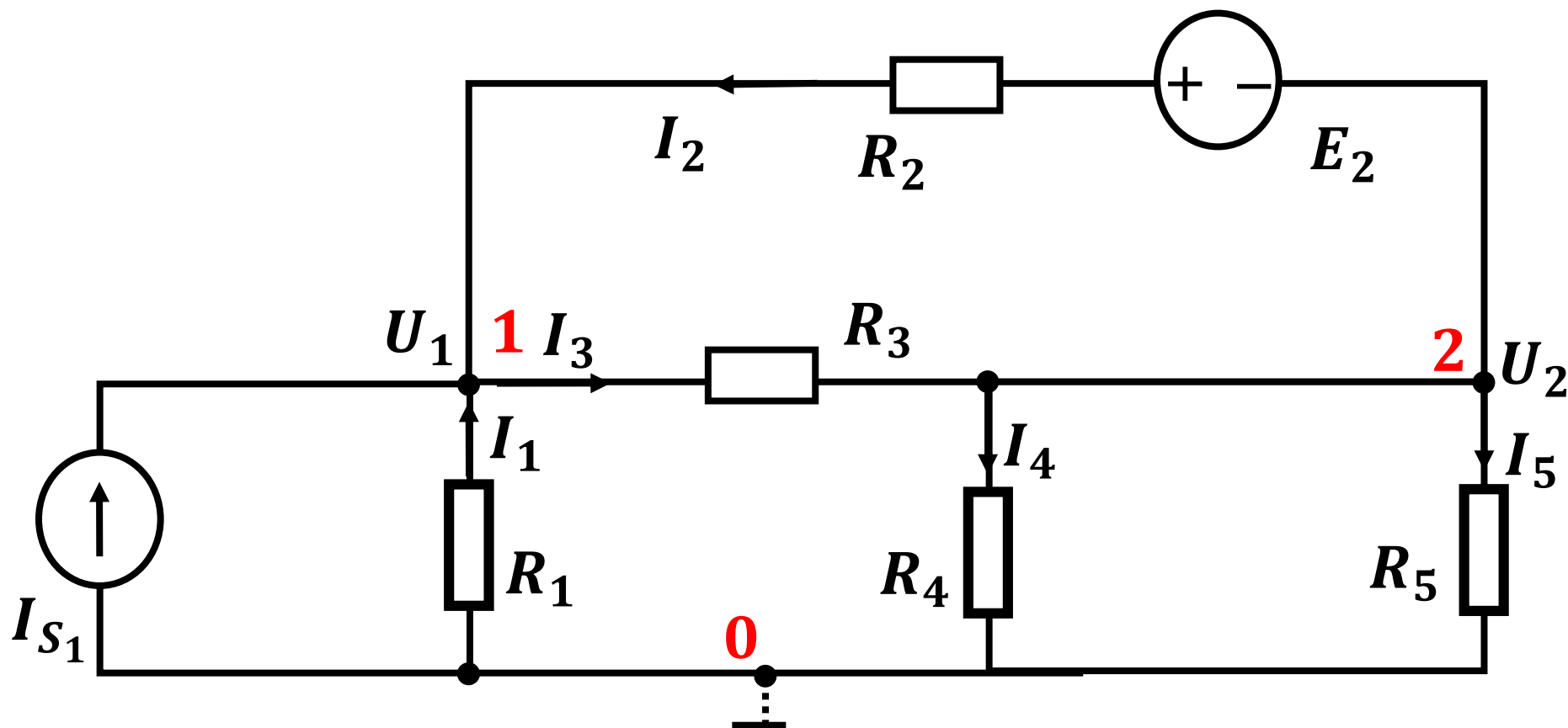
# 节点电压法

- 选定参考点（通常选取连接支路较多的节点）。其余节点为独立节点。
- 各独立节点与参考节点间的电压分别称为对应节点电压。
- 节点电压的参考极性均以参考节点为负极性端，独立节点为正极性端。

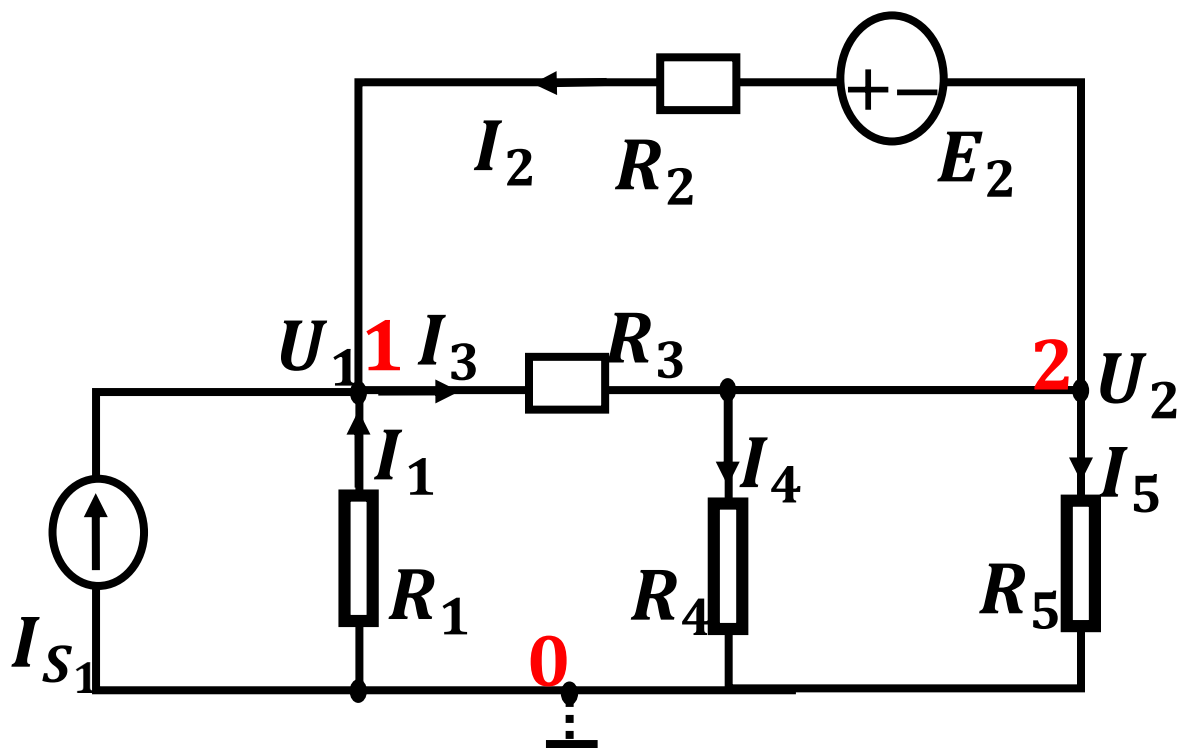


# 节点电压法

- **完备性:** 电路中的所有支路电压都可以用节点电压表示。



# 节点电压法



节点1: 
$$-I_{s_1} + \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_1 - (U_2 + E_2)}{R_2} + \frac{U_1 - U_2}{R_3} = 0$$

节点2: 
$$\frac{U_2 + E_2 - U_1}{R_2} - \frac{U_1 - U_2}{R_3} + \frac{U_2}{R_4} + \frac{U_2}{R_5} = 0$$

整理得:

自导

互导

流入节点的  
源电流之和。

$$\left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) U_1 - \left( \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) U_2 = I_{s_1} + \frac{E_2}{R_2}$$

$$- \left( \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) U_1 + \left( \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} \right) U_2 = -\frac{E_2}{R_2}$$

# 小结

- 参考方向

- 任意选定

- 基尔霍夫定律

- 在任一瞬间，流出电路中任一节点的电流的代数和恒等于零， $\sum I = 0$
  - 在任一瞬间，沿任一回路绕行一周，各段电压降的代数和恒等于零， $\sum U = 0$

- 叠加定理

- 在线性电路中，多个电源在某一支路产生的电流（或电压），等于各个电源单独作用时在该支路产生的电流（或电压）的代数和。

- 戴维南定理

- 由线性元件构成的任意有源二端网络均可等效为一个有阻电压源。
  - 等效有阻电压源的电动势 $E_0$ 等于二端网路的开路电压，内阻 $R_0$ 等于网络内的独立电源均为零时网络的等效电阻。

# 小结

- 电路分析一般方法

- 支路电流法

- 支路电流为变量，根据**KCL, KVL**列方程求解

- 回路电流法

- 回路电流为变量，根据**KVL**列方程求解

- 一般取**网孔**为独立回路

- 若含有电流源

- **等效变换**

- 不等效变换，加**电流约束**，尽量不选电流源支路的回路列方程，可能还需要引入新变量：**电流源两端电压**。

- 节点电压法

- 节点电压（电位）为变量，根据**KCL**列方程求解



# 作业

分析计算题 1, 3, 4, 5, 7, 10 (a, b) , 13, 15, 17, 19, 22