



北京理工大学
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY



第2讲 1-5~1-10 电压源 电流源 受控源 分压分流 两类约束 支路分析

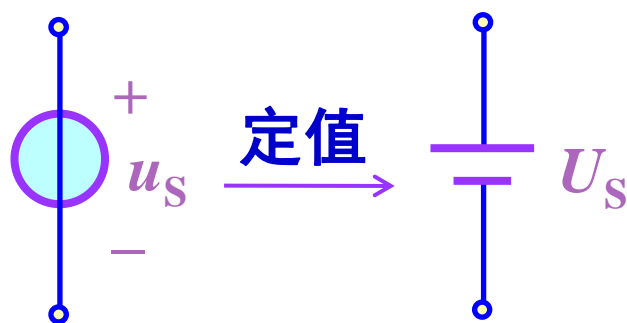


北京理工大学电工电子教学中心

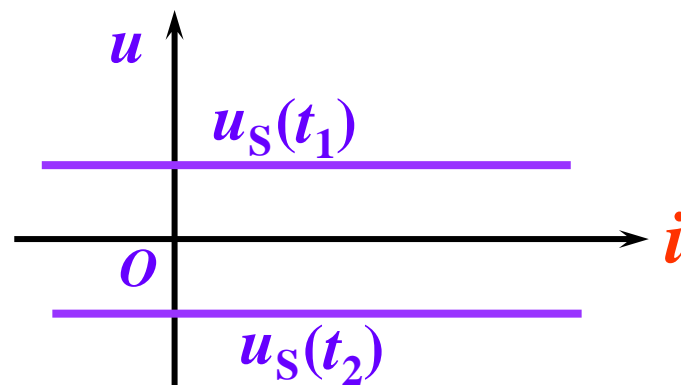
§ 1-5 电压源

1. 理想电压源（恒压源）

(1) 电路符号



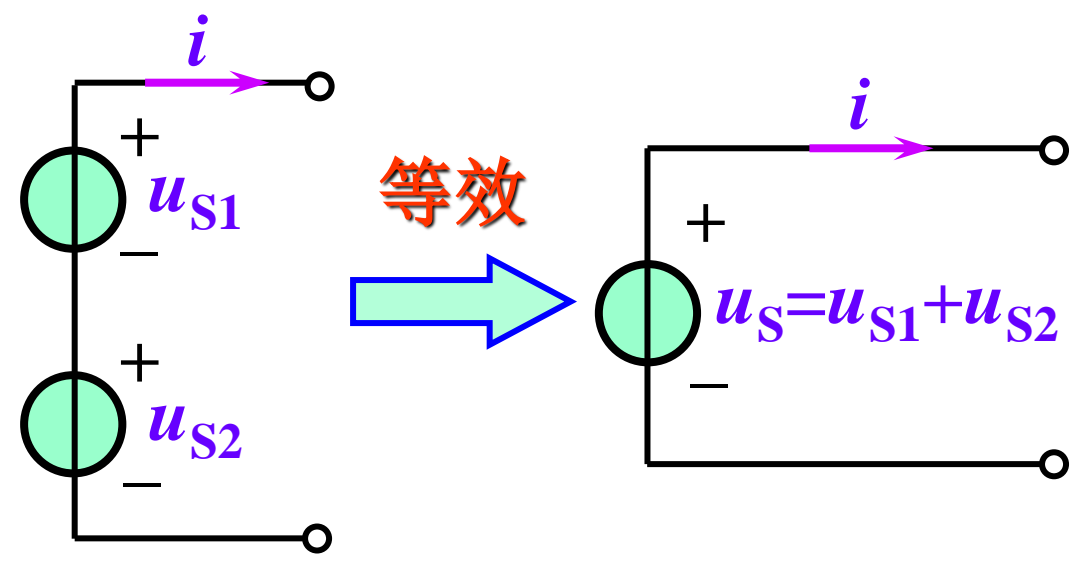
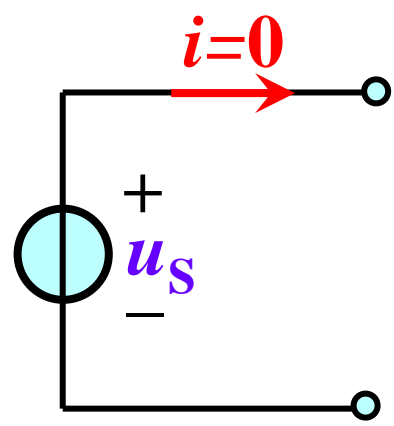
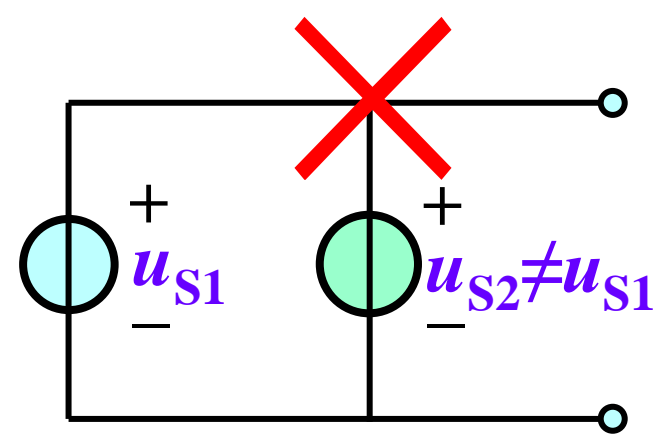
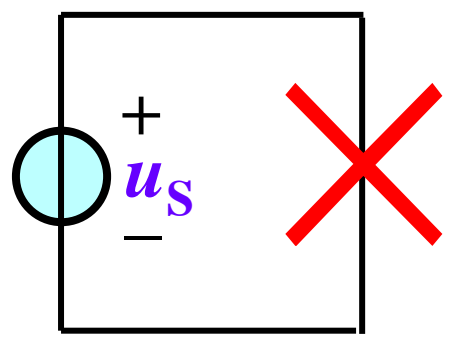
(3) 伏安特性曲线



(2) 特点

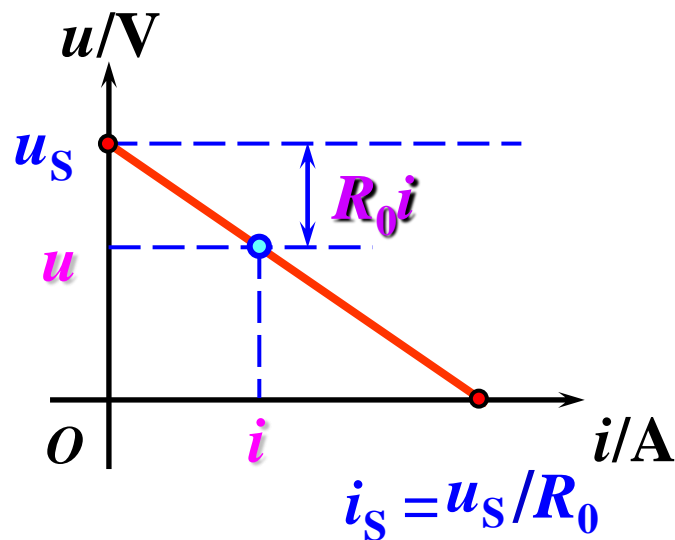
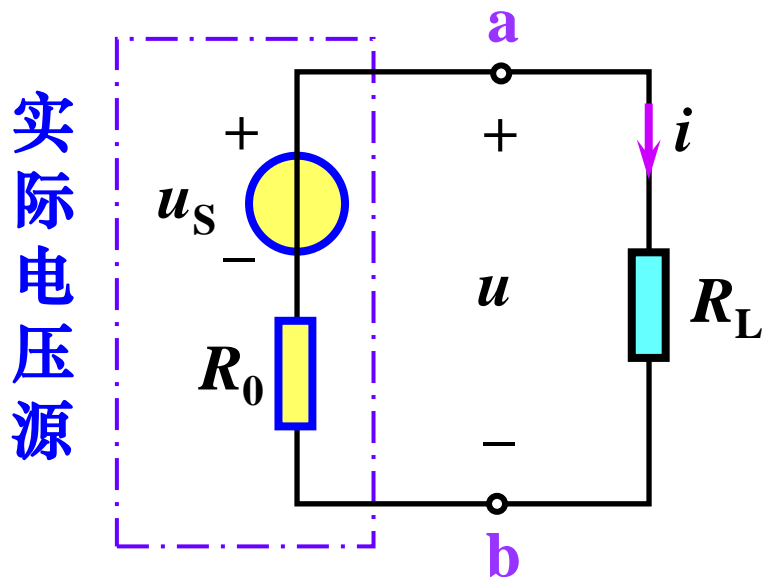
- 输出电压由电压源本身决定，为定值或一定的时间函数，与外电路无关；
- 输出电流 i 由外电路决定。





2. 实际电压源

实际电压源模型：理想电压源串联电阻元件



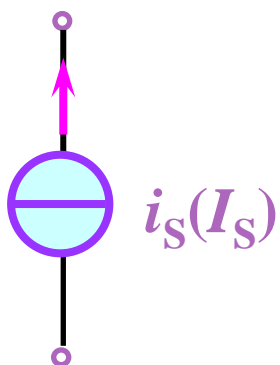
$$u = u_S - R_0 i$$



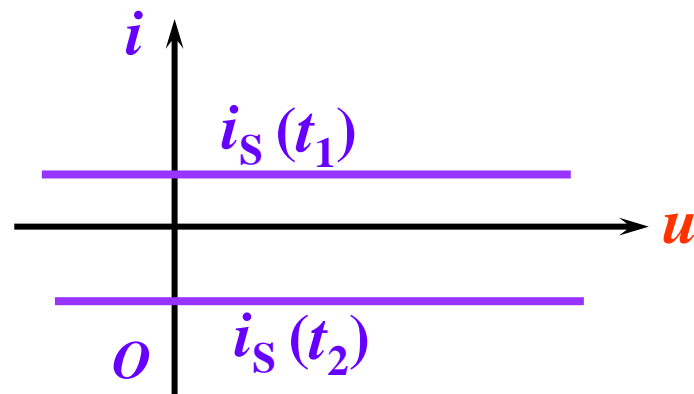
§ 1-6 电流源

1. 理想电流源（恒流源）

(1) 电路符号



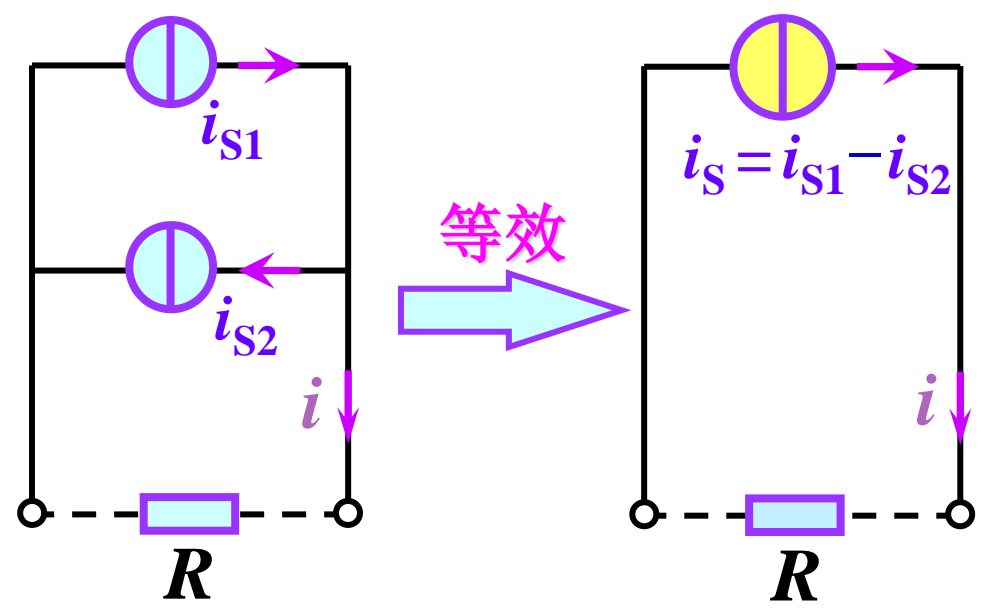
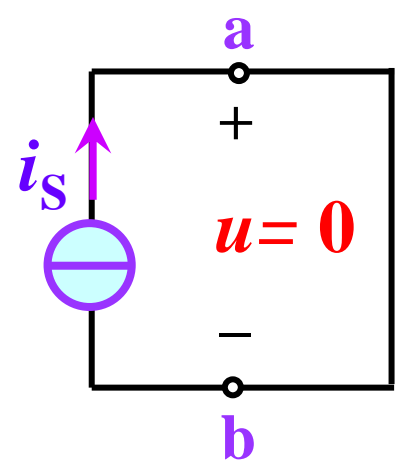
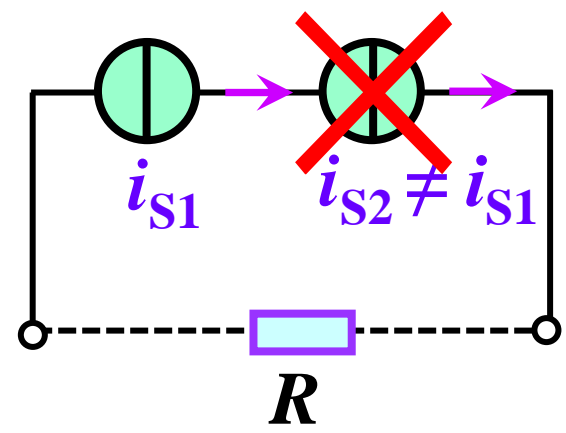
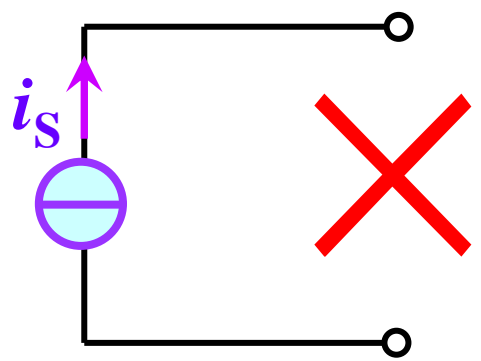
(3) 伏安特性曲线



(2) 特点

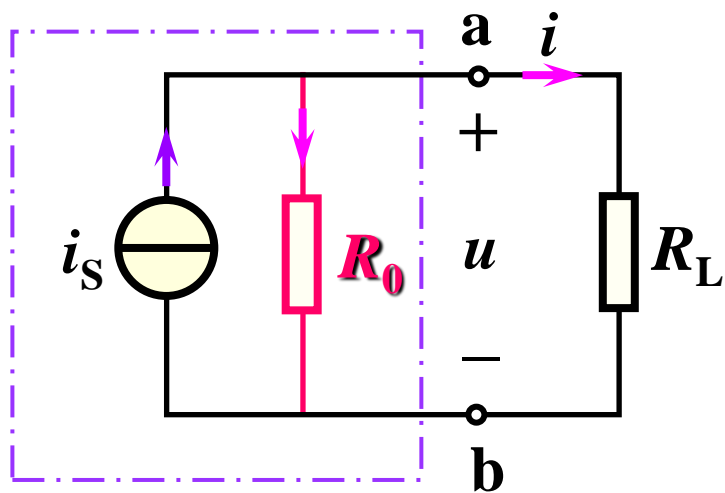
- 输出电流由电流源本身决定，为定值或一定的时间函数，与外电路无关；
- 输出电压由外电路决定。



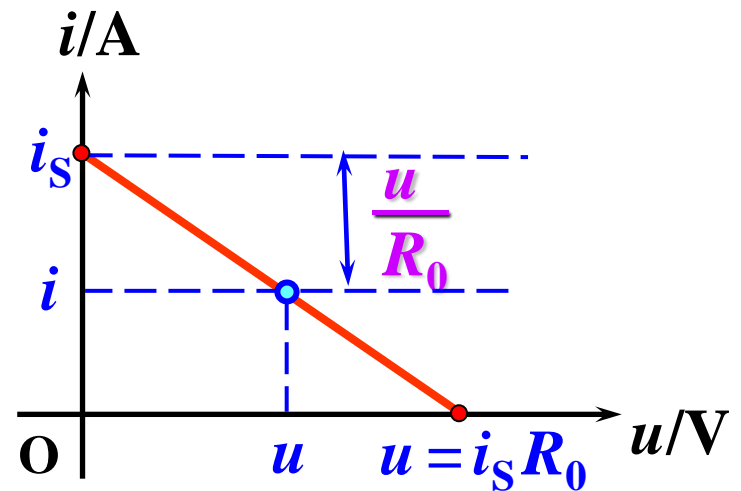


2. 实际电流源

实际电流源的模型：理想电流源和电阻元件并联



$$i = i_S - u/R_0$$



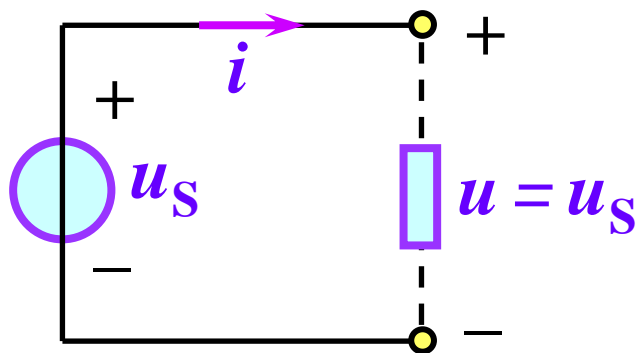
理想电源元件的两种工作状态

(1) 起电源作用

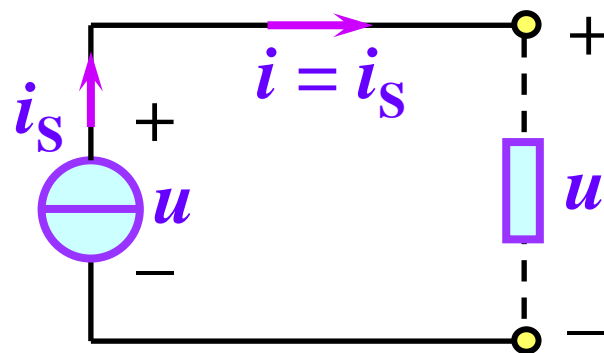
电压和电流的实际方向为非关联方向，则提供功率，起电源作用。

(2) 起负载作用

电压和电流的实际方向为关联方向，则吸收功率，起负载作用。



电压源



电流源

课堂练习

例1：电路如图

(1) 电阻 $R_1 = R_2 = 2\Omega$, $I_S = 1A$;

c

(2) 电阻 $R_1 = R_2 = 2\Omega$, $I_S = 2A$;

b

(3) 电阻 $R_1 = R_2 = 4\Omega$, $I_S = 2A$;

b

(4) 电阻 $R_1 = R_2 = 1\Omega$, $I_S = -2A$;

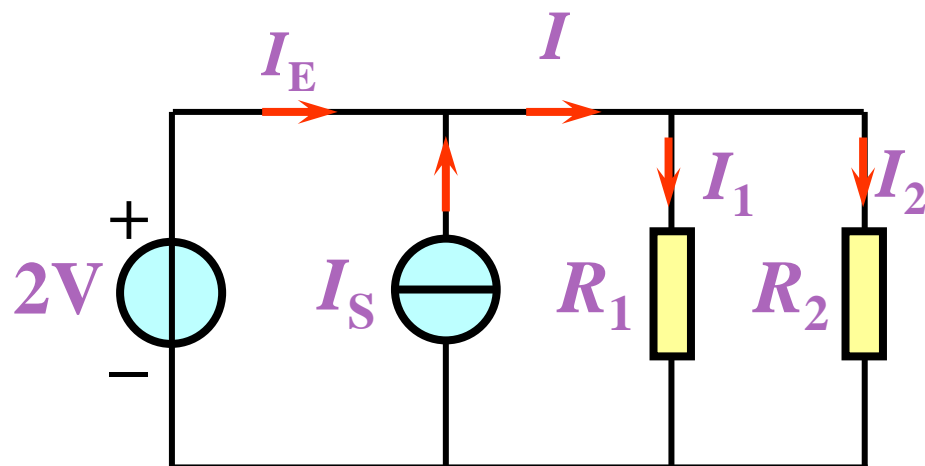
a

则电阻消耗的能量是由 () 提供的。

a. 电压源

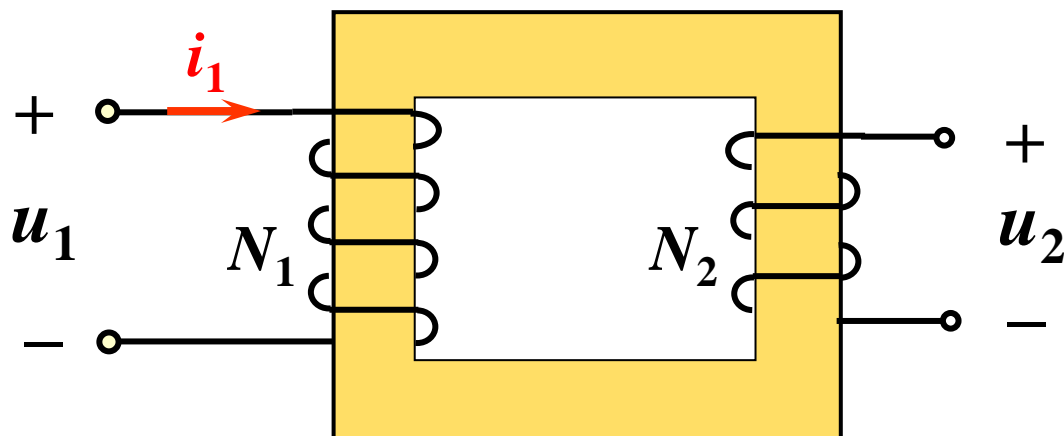
b. 电流源

c. 电压源和电流源



§ 1-7 受控源(controlled source)

引例1：变压器



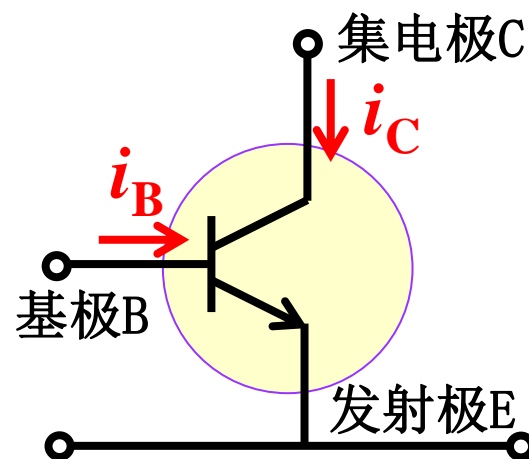
$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

变压器 \Leftrightarrow 电压控制电压源

{	控制支路(控制量):	u_1
	受控支路(受控量):	u_2



引例2：晶体三极管

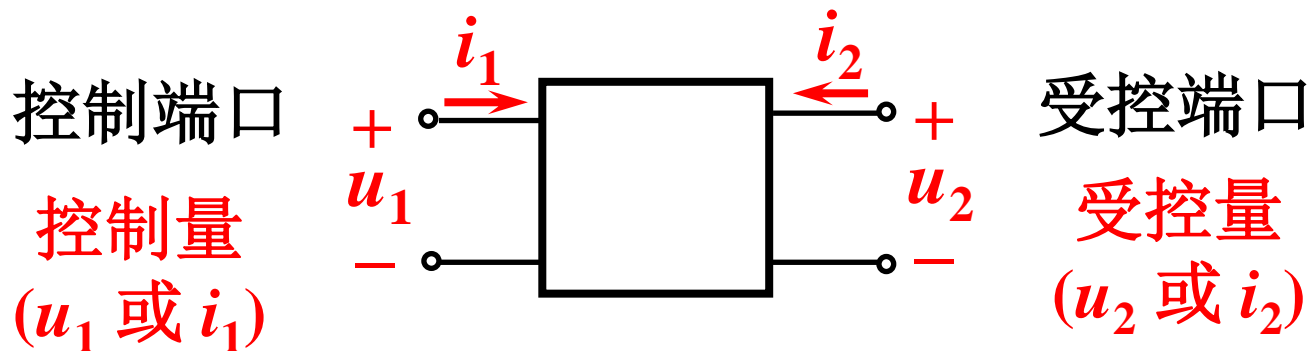


当三极管工作于放大状态时， $i_C = \beta i_B$

三极管 \Leftrightarrow 电流控制电流源 $\left\{ \begin{array}{l} \text{控制支路(控制量): } i_B \\ \text{受控支路(受控量): } i_C \end{array} \right.$

1. 受控源的定义

受控源又称为非独立电源，由于其内部物理作用使得电路中一个支路的电压或电流受另一个支路的电压或电流的控制。

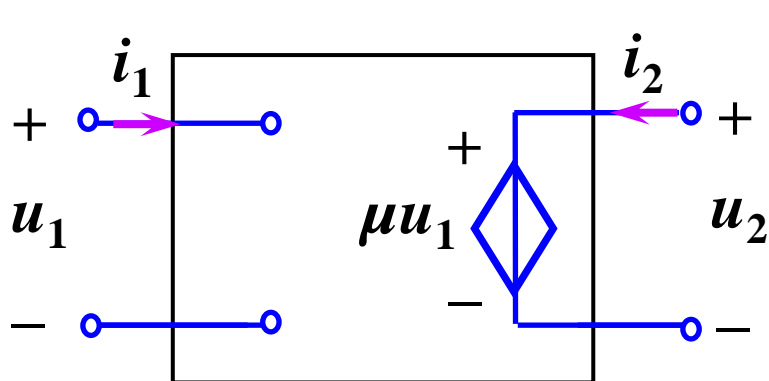


四端(双口)元件



2. 受控源的种类

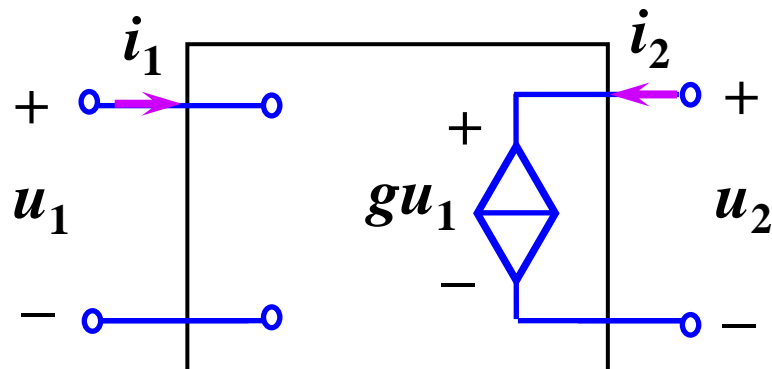
a) 控制量为电压 (理想情况: 控制支路开路)



压控电压源 (VCVS)

$$\text{VCR: } \begin{cases} i_1 = 0 \\ u_2 = \mu u_1 \end{cases}$$

(参数 μ : 转移电压比)



压控电流源 (VCCS)

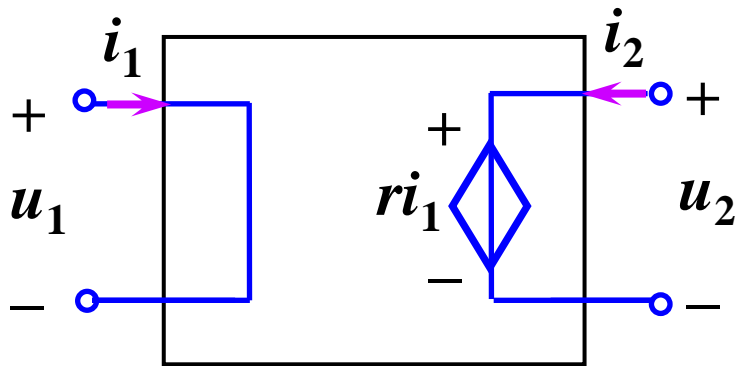
$$\begin{cases} i_1 = 0 \\ i_2 = g u_1 \end{cases}$$

(参数 g : 转移电导)

$$\text{受控源吸收功率: } p = u_1 i_1 + u_2 i_2 = u_2 i_2$$



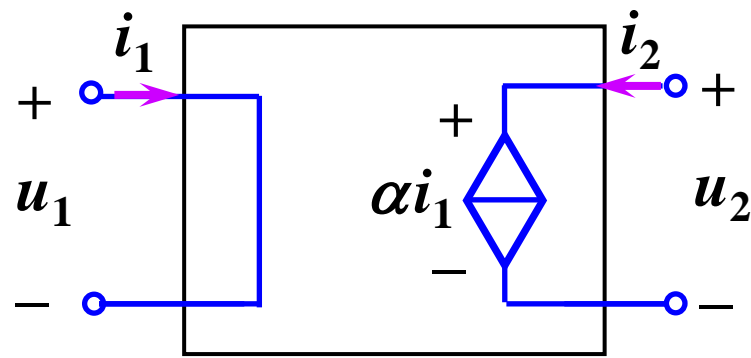
b) 控制量为电流 (理想情况: 控制支路短路)



流控电压源(CCVS)

$$\text{VCR: } \begin{cases} u_1 = 0 \\ u_2 = ri_1 \end{cases}$$

(参数 r : 转移电阻)



流控电流源 (CCCS)

$$\begin{cases} u_1 = 0 \\ i_2 = \alpha i_1 \end{cases}$$

(参数 α : 转移电流比)

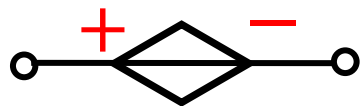
受控源吸收功率: $p = u_1 i_1 + u_2 i_2 = u_2 i_2$

◆ 若参数 μ , g , r , α 为常数, 则称为线性受控源.

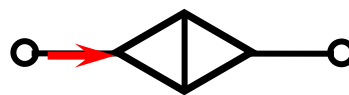


3. 受控源的符号

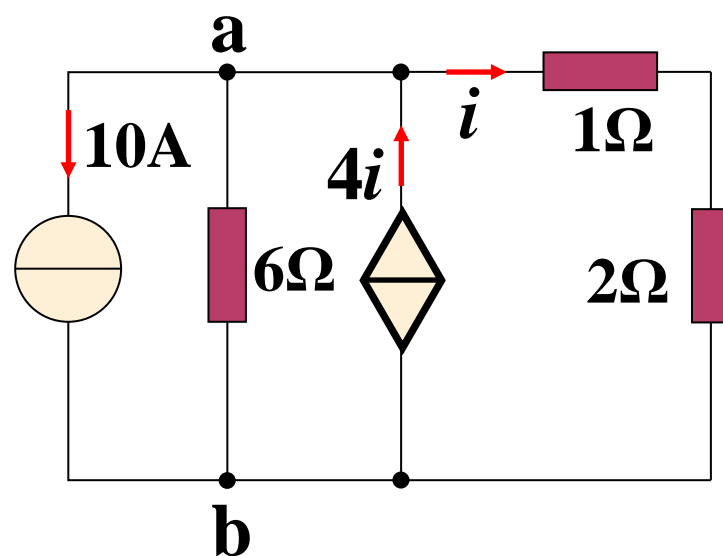
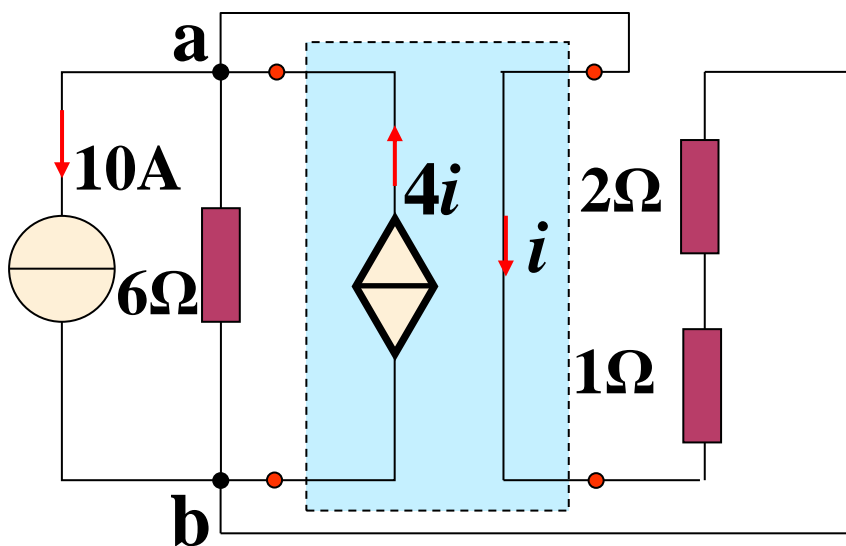
一般情况下，受控源通常是指**受控端**而言，控制端口可不标出，只要正确标示出控制量即可。



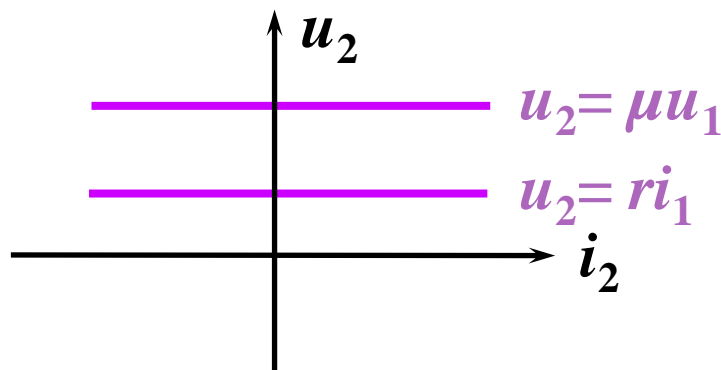
受控电压源



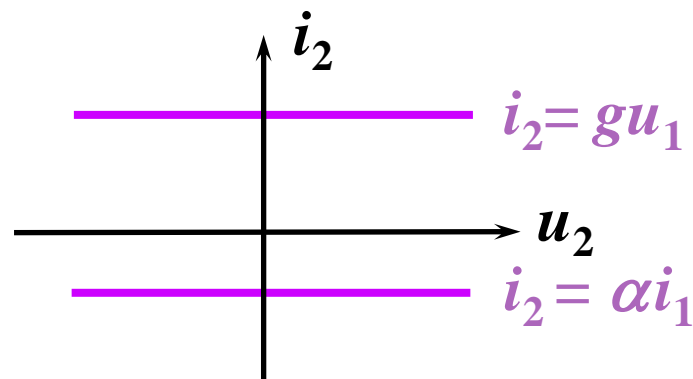
受控电流源



4. 受控源的伏安特性



受控电压源伏安特性曲线



受控电流源伏安特性曲线

与独立源
类似之处

- 受控电压源的电压与流经电流无关
- 受控电流源的电流与两端电压无关

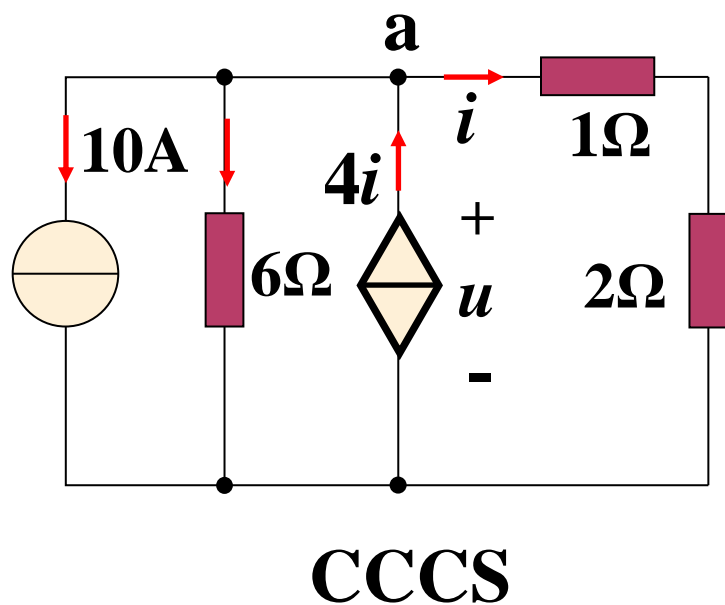
分析含受
控源电路

- 把受控源当做独立源列电路方程
- 需增列含控制量的关系方程



例1：求图中受控源的电流和其两端电压 u 。

解：



(1) 将受控源暂时看作独立源
列a点KCL方程

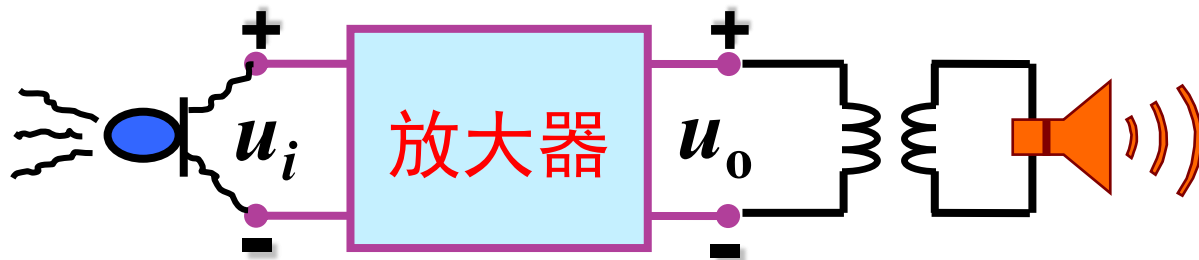
$$10 + \frac{u}{6} + i = 4i$$

(2) 增列控制量与求解量间方程

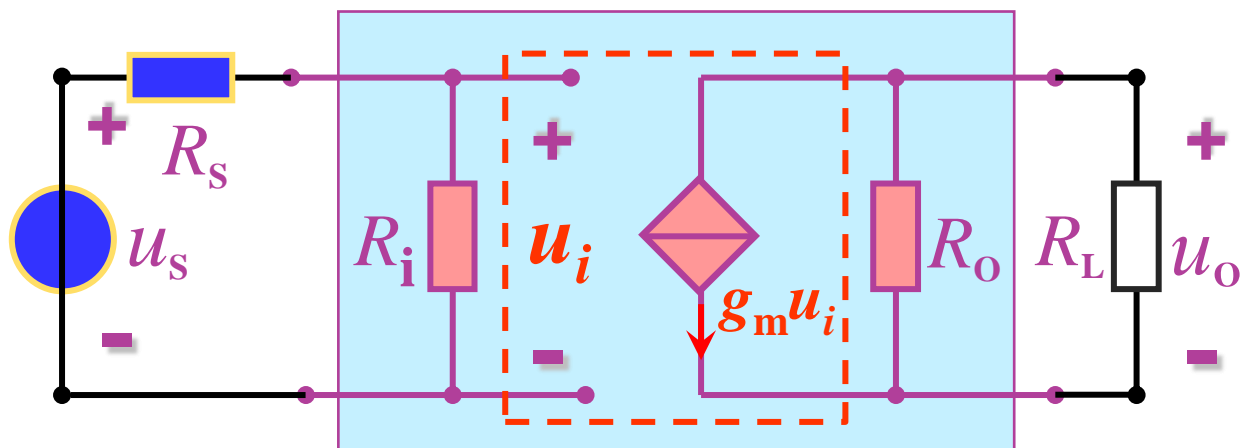
$$i = \frac{u}{1+2}$$

解得所求为： $u = 12\text{V}$ ， $4i = 16\text{A}$

扩音电路



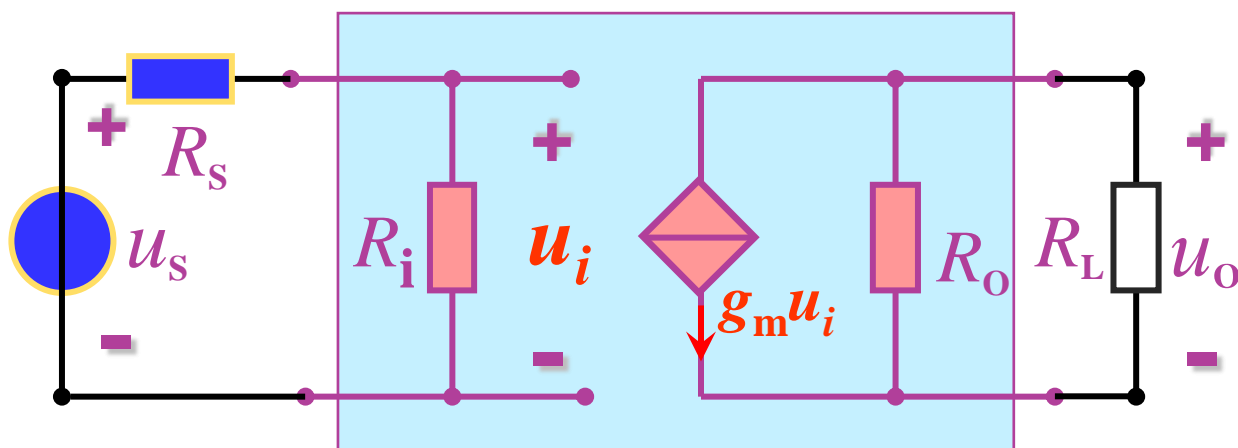
音响前置放大器电路模型



核心部分为VCCS, R_i 和 R_o 分别为放大器的输入电阻和输出电阻, 信源模型由电压源 u_s 和电阻 R_s 组成, 负载 R_L 代表下一级.



例2：求放大器增益 u_o/u_s 。



$$\begin{aligned} g_m &= 30\text{mS} \\ R_i &= 2\text{k}\Omega \\ R_o &= 75\text{k}\Omega \\ R_s &= 500\Omega \\ R_L &= 10\text{k}\Omega \end{aligned}$$

解： $u_o = -g_m u_i (R_o // R_L)$, $u_i = \left(\frac{u_s}{R_s + R_i} \right) R_i$

则电压增益： $\frac{u_o}{u_s} = -g_m \left(\frac{R_i}{R_s + R_i} \right) (R_o // R_L)$
 $= -211.8$ （负号表示反向）



5. 独立源与受控源的区别

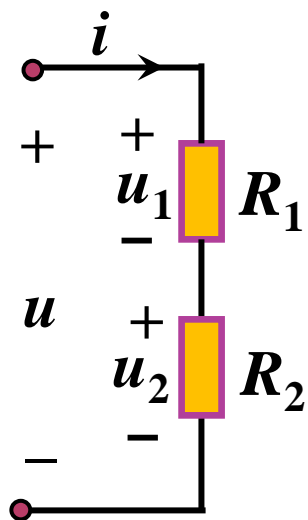
独立源	受控源
二端（单口）元件	四端（双口）元件
电压源电压或电流源电流由电源本身决定，与外电路无关	受控电压或受控电流由控制支路决定
在电路中起激励作用，为电路提供电压或电流	不能作为激励，仅描述器件内部支路间约束关系，没有独立源受控源无法工作



§ 1-8 分压公式和分流公式

1. 电阻串联： 多个电阻顺序相联，通过同一电流

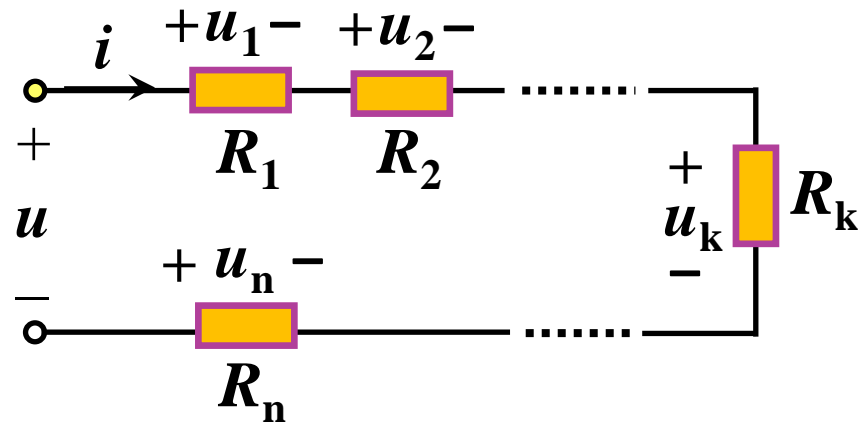
分压作用： 分压大小与阻值成正比



$$u_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} u$$

$$u_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u$$

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

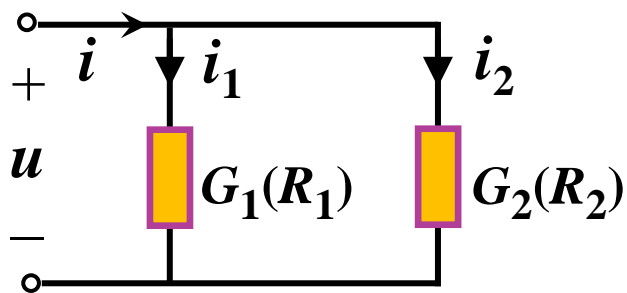


分压公式：
$$u_k = \frac{R_k}{\sum_{i=1}^n R_i} u$$



2. 电阻并联： 多个电阻并列联接在两个公共节点之间，
每个电阻承受相同的电压

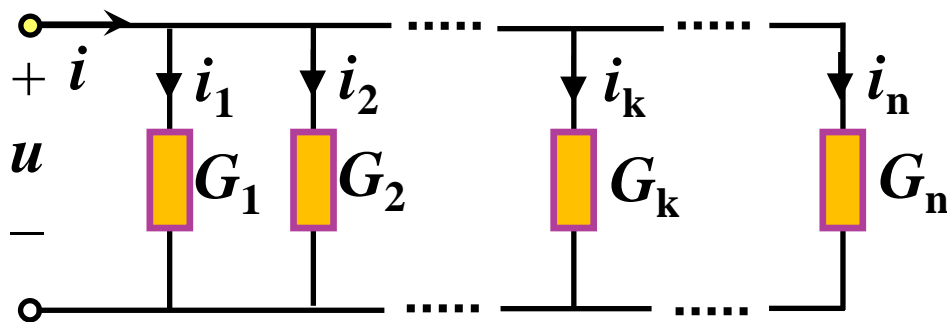
分流作用： 分流大小与电导值成正比



$$i_1 = \frac{G_1}{G_1 + G_2} i = \frac{R_2}{R_1 + R_2} i$$

$$i_2 = \frac{G_2}{G_1 + G_2} i = \frac{R_1}{R_1 + R_2} i$$

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{G_1}{G_2} = \frac{R_2}{R_1}$$



分流公式：

$$i_k = \frac{G_k}{\sum_{i=1}^n G_i} i$$



3. 电路中电位的概念

■ 参考点

可以选取电路中任意一个节点作为参考点，设为零电位，用“ \perp ”表示。

工程上，一般选机壳、大地或元件的公共端作参考点，也称为“地”或“零点”。

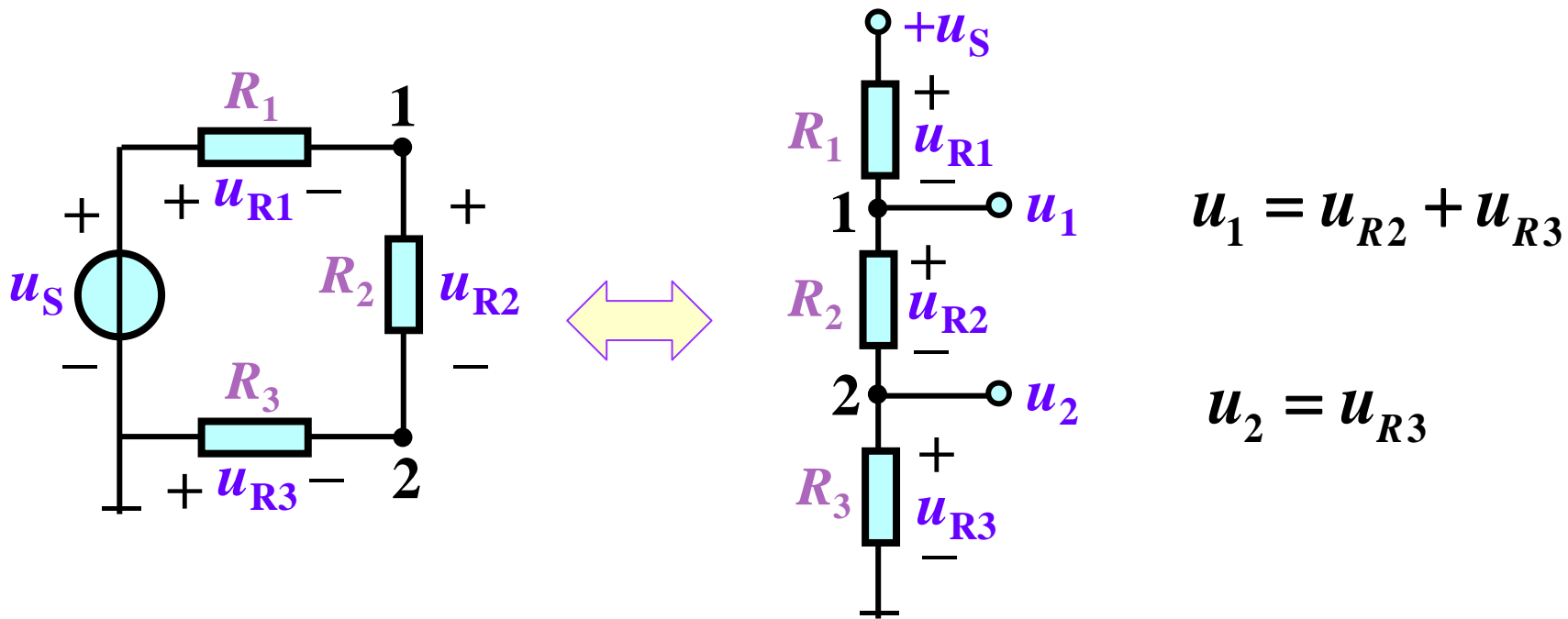
■ 电位(节点电压)

指节点相对于参考点之间的电压降。

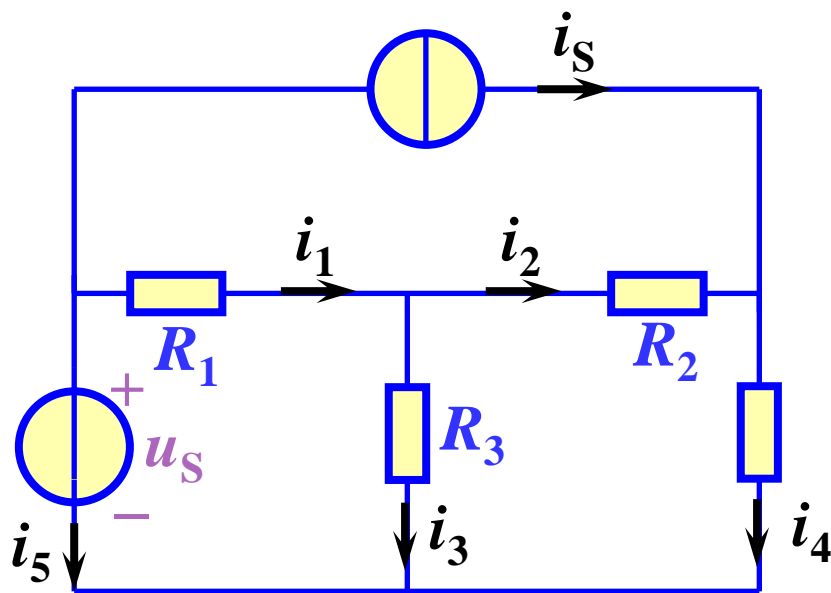


4. 电路的简化画法

电源不用图形符号表示而只标出其极性和电压值，未给出的另一极接地（参考点）。



电路分析在分析什么？



§ 1-9 两类约束 KCL与KVL方程的独立性

1. 两类约束 → 分析电路的依据

$$\begin{array}{l}
 \text{KCL: } \sum_{k=1}^n i_k = 0, \text{ 节点电流约束} \\
 \text{KVL: } \sum_{k=1}^m u_k = 0, \text{ 回路电压约束}
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} \text{KCL: } \sum_{k=1}^n i_k = 0, \text{ 节点电流约束} \\ \text{KVL: } \sum_{k=1}^m u_k = 0, \text{ 回路电压约束} \end{array}} \right\} \begin{array}{l} \text{拓扑约束} \\ \text{(topological} \\ \text{constraints)} \end{array}$$

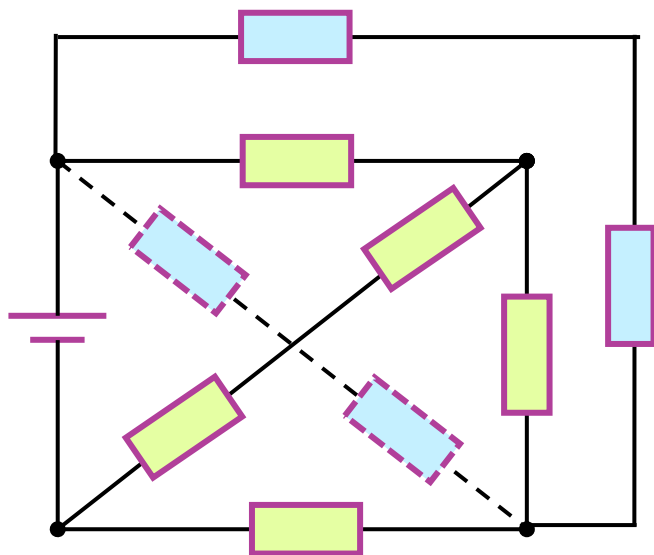
VCR: 元件的伏安特性 → 元件约束
(element constraints)

所有集总电路都满足这两类约束。

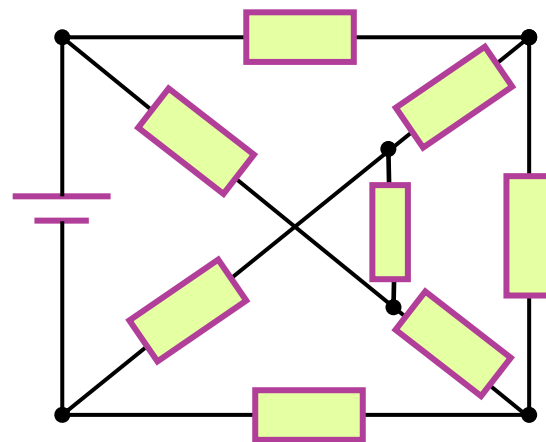


2. 平面电路 (planar circuit)

可以画在一个平面上 而不使任何两支路交叠的电路.



平面电路



非平面电路
(立体电路)

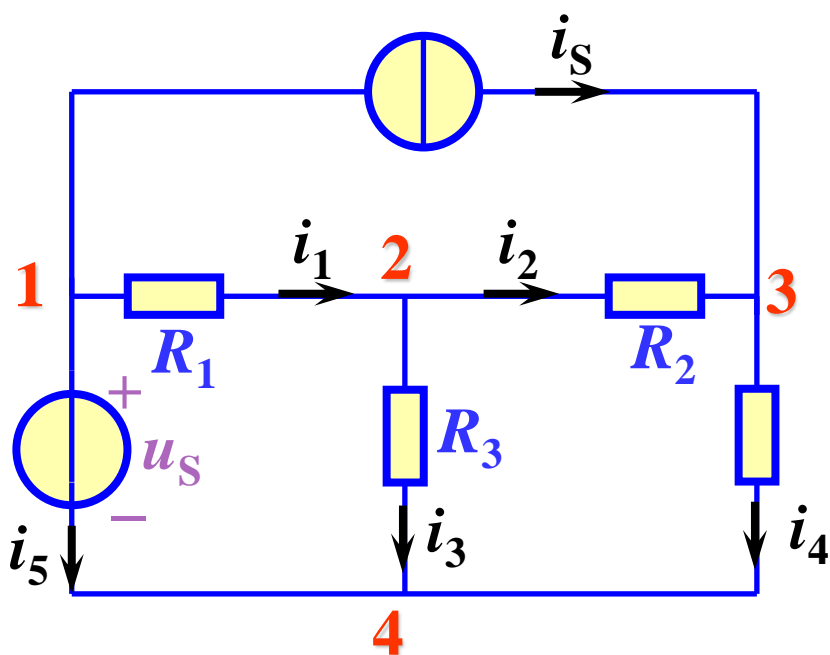
注意：网孔的概念只适合于平面电路

3. 独立方程

设一个电路有 b 条支路， n 个节点，则可以证明：

(1) 独立的KCL方程为 $(n-1)$ 个

(2) 独立的KVL方程为 $b-(n-1)$ 个



$$\left. \begin{array}{l} \text{节点1: } i_s + i_1 + i_5 = 0 \\ \text{节点2: } i_2 - i_1 + i_3 = 0 \\ \text{节点3: } i_4 - i_2 - i_s = 0 \end{array} \right\} i_3 + i_4 + i_5 = 0$$

$$\text{节点4: } -i_3 - i_4 - i_5 = 0$$

列独立的KCL方程：

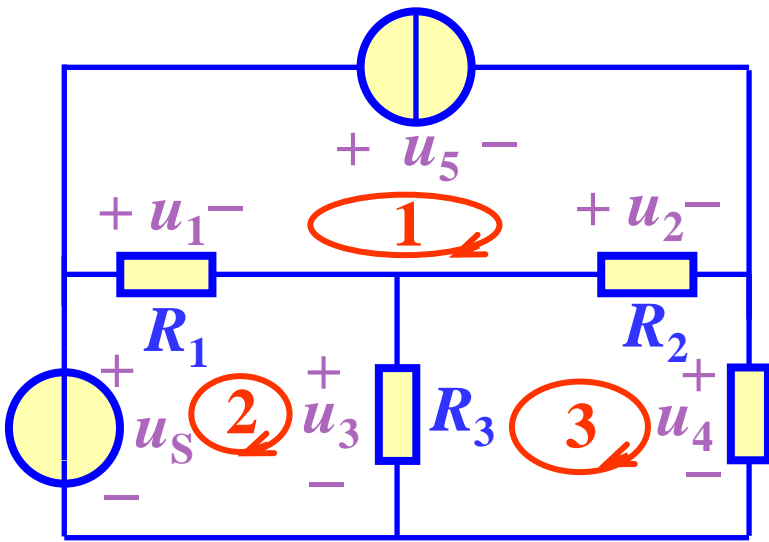
可选任意 $(n-1)$ 个节点



(2) b 条支路, n 个节点, 则独立的KVL方程为 $b-(n-1)$ 个

推论：若电路为平面电路，则网孔数 $m = b - (n - 1)$ ，且这 m 个网孔的KVL方程是独立的。

独立的KVL方程列法： 1.找网孔法 2.新支路法



$$\begin{cases} \text{网孔1: } u_5 - u_2 - u_1 = 0 \\ \text{网孔2: } u_1 + u_3 - u_S = 0 \\ \text{网孔3: } u_2 + u_4 - u_3 = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \text{回路2: } u_1 + u_3 - u_S = 0 \\ \text{回路2+3: } u_1 + u_2 + u_4 - u_S = 0 \\ \text{回路1+2+3: } u_5 + u_4 - u_S = 0 \end{cases}$$

4. 2b 分析法

设一个电路有 b 条支路， n 个节点，若以所有支路电流和支路电压为待求解变量，则需要列 $2b$ 个方程，其中：

独立KCL方程为 $(n-1)$ 个	} $2b$ 个方程， 称为 $2b$ 法。
独立KVL方程为 $b-(n-1)$ 个	
b 条支路的VCR方程为 b 个	

$2b$ 法具有易于形成方程式的优点，适于计算机辅助电路分析。



§ 1-10 支路分析 (1b法)

设电路有 b 条支路, n 个节点

1. 支路电流法

- 求解对象: b 个支路电流
- 方程: b 个
 - 直接用支路电流表示的 $(n-1)$ 个KCL方程;
 - 用支路电流结合各支路VCR表示的 $b-(n-1)$ 个KVL方程。
- 解得各支路电流后, 根据VCR求各支路电压。



例：用支路电流法求图中 i_1, i_2, i_3, i_4

解：

节点A： $i_2 + i_3 - i_1 = 0$

节点B： $i_S - i_3 - i_4 = 0$

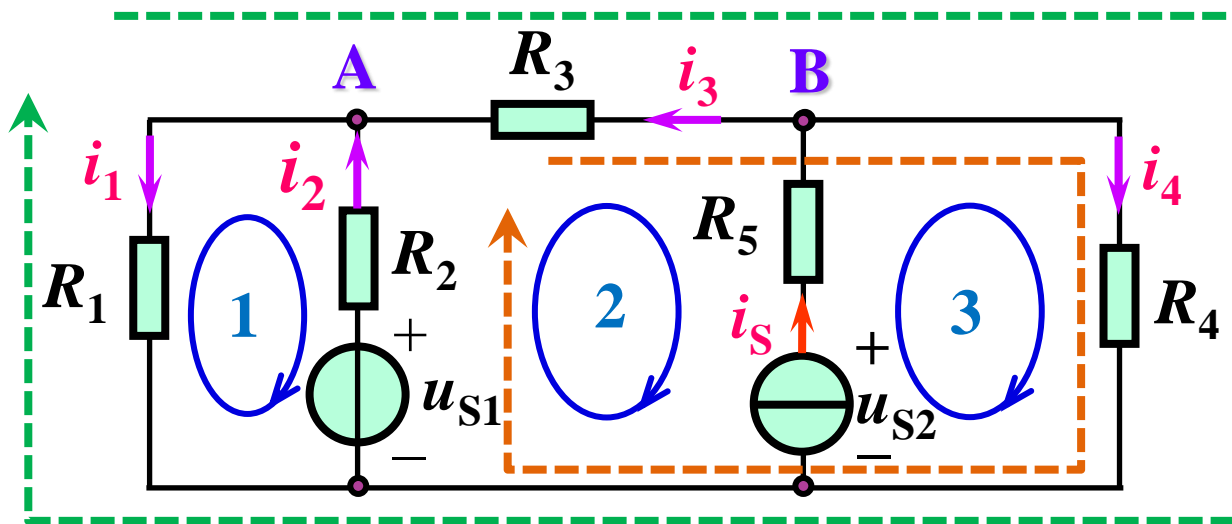
网孔1：

$$-i_1 R_1 - i_2 R_2 + u_{S1} = 0$$

网孔2： $-i_3 R_3 - i_S R_5 + u_{S2} - u_{S1} + i_2 R_2 = 0$

网孔3： $i_4 R_4 + i_S R_5 - u_{S2} = 0$

$$\left. \begin{array}{l} \text{网孔2: } -i_3 R_3 - i_S R_5 + u_{S2} - u_{S1} + i_2 R_2 = 0 \\ \text{网孔3: } i_4 R_4 + i_S R_5 - u_{S2} = 0 \end{array} \right\} i_4 R_4 - u_{S1} + i_2 R_2 - i_3 R_3 = 0$$



注意列KVL方程时：

1. 电流源电压会引入新的待求变量。
2. 尽量不选含有电流源的回路。

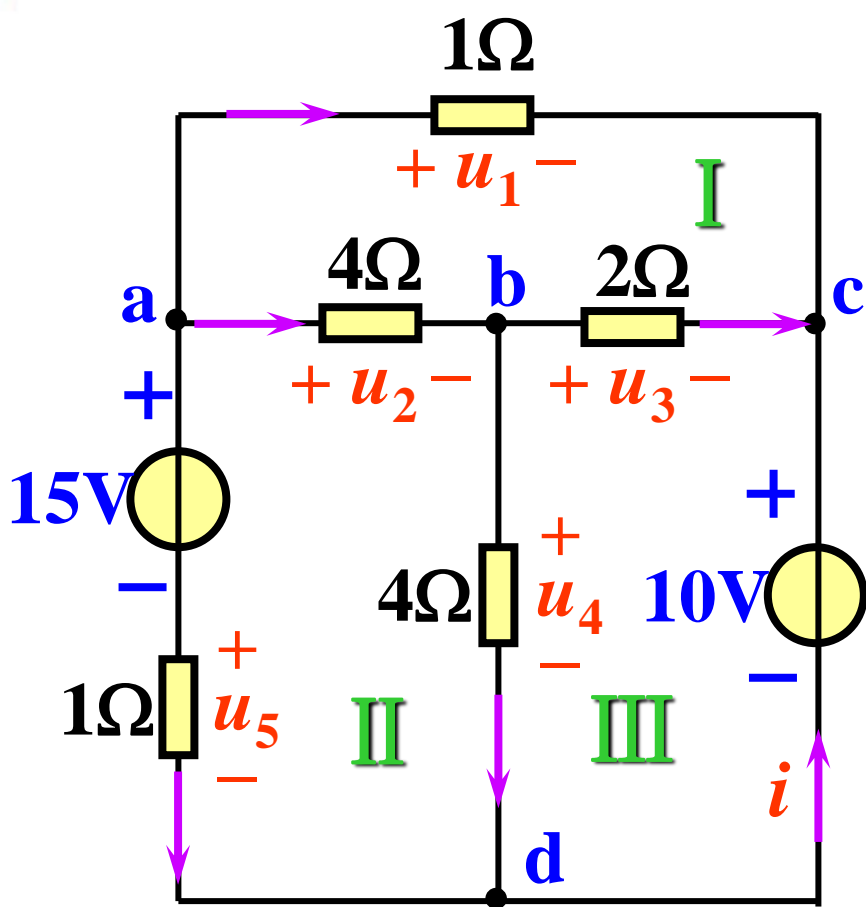


2. 支路电压法

- 求解对象： b 个支路电压
- 方程： b 个
 - 直接用支路电压表示的 $b-(n-1)$ 个KVL方程；
 - 用支路电压结合各支路VCR表示的 $(n-1)$ 个KCL方程。
- 解得支路电压后，根据VCR求各支路电流。



例：用支路电压法求 $u_1 \sim u_5$



解：

$$\begin{cases} \text{I: } u_1 - u_3 - u_2 = 0 \\ \text{II: } u_2 + u_4 - u_5 - 15 = 0 \\ \text{III: } u_3 + 10 - u_4 = 0 \\ \text{a: } \frac{u_1}{1} + \frac{u_2}{4} + \frac{u_5}{1} = 0 \\ \text{b: } \frac{u_3}{2} - \frac{u_2}{4} + \frac{u_4}{4} = 0 \end{cases}$$

注意列KCL方程时：

1. 电压源电流会引入新的待求变量。
2. 尽量不选含有电压源的节点。



第2讲 小结

1. 理想电压源，实际电压源
2. 理想电流源，实际电流源
3. 受控源，控制量，与独立电源的区别 ✓
4. 串联分压，并联分流 ✓
5. 拓扑约束：KCL ($n-1$), KVL ($b-n+1$) ✓
元件约束：VCR
6. 支路分析法：2b法，1b法



第一章 小结

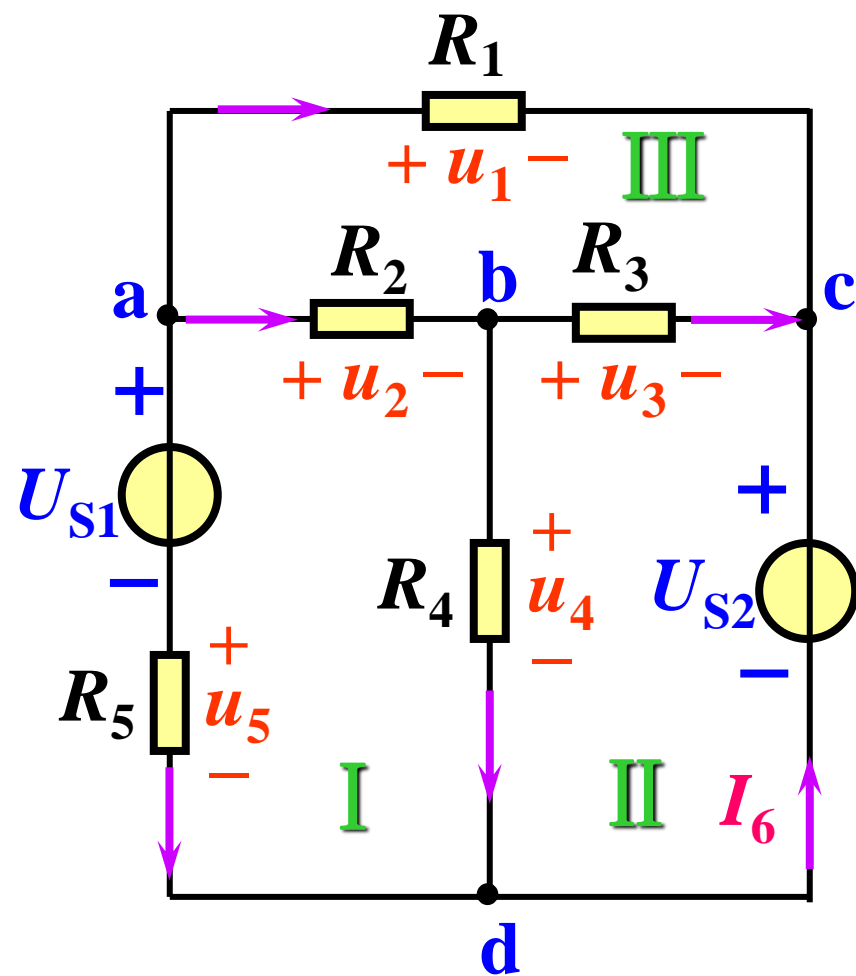
重点掌握

- 基尔霍夫定律(KCL、KVL)
- 独立源, 受控源和电阻的VCR
- 功率的计算与性质判别

重点理解

- 集总电路模型
- 参考方向与真实方向
- 支路分析法

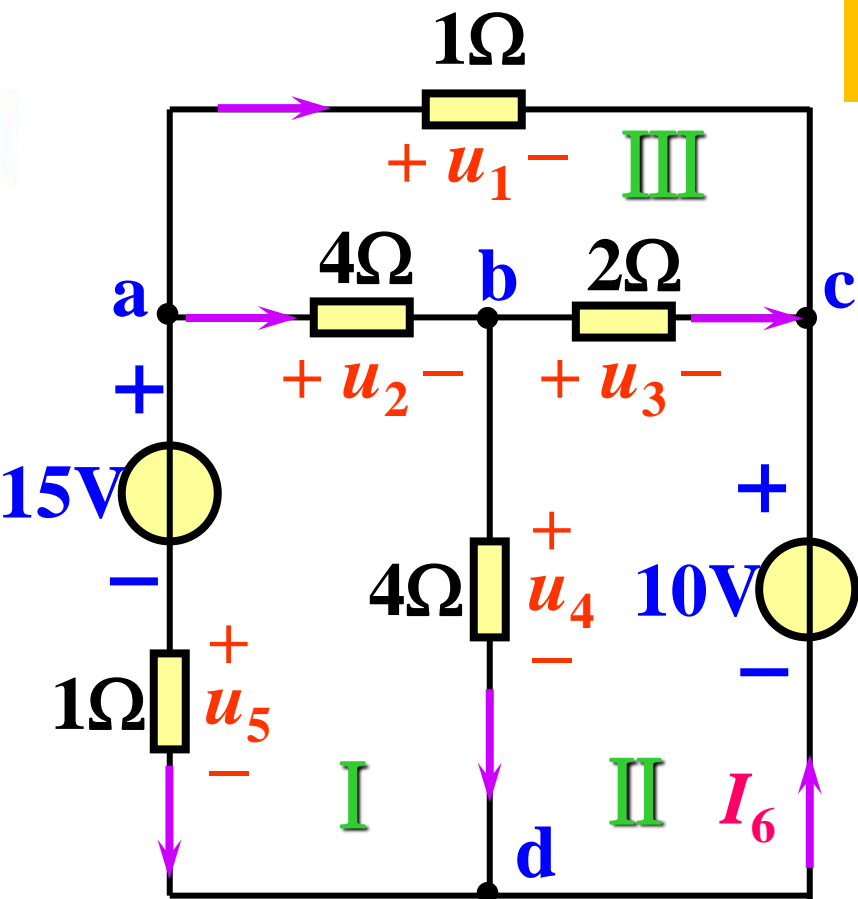




若 $U_{S1} = 15\text{V}$,
 $U_{S2} = 10\text{V}$,
 $R_1 = 1\Omega$,
 $R_2 = 4\Omega$,
 $R_3 = 2\Omega$,
 $R_4 = 4\Omega$,
 $R_5 = 1\Omega$,
 验证功率守恒。



验证功率守恒



$$\begin{cases} \text{III: } u_1 - u_3 - u_2 = 0 \\ \text{I: } u_2 + u_4 - u_5 - 15 = 0 \\ \text{II: } u_3 + 10 - u_4 = 0 \\ \text{a: } \frac{u_1}{1} + \frac{u_2}{4} + \frac{u_5}{1} = 0 \\ \text{b: } \frac{u_3}{2} - \frac{u_2}{4} + \frac{u_4}{4} = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} u_1 = 2\text{V} \\ u_2 = 4\text{V} \\ u_3 = -2\text{V} \\ u_4 = 8\text{V} \\ u_5 = -3\text{V} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} P_{\text{吸收}} &= \frac{2^2}{1} + \frac{4^2}{4} + \frac{(-2)^2}{2} + 15 \times \frac{-3}{1} + \frac{(-3)^2}{1} + \frac{8^2}{4} - 10 \times \left(\frac{-3}{1} + \frac{8}{4} \right) \\ &= 4 + 4 + 2 - 45 + 9 + 16 + 10 = 0\text{W} \quad \therefore \text{功率守恒。} \end{aligned}$$

