

清华大学2022春季学期

电路原理C

第2讲

电阻电路的元件和基本分析方法

目录

CONTENTS

01 电阻

02 独立电源

03 受控元件

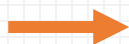
04 基尔霍夫定律

05 2b法求解电路

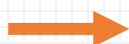
1. 电阻
2. 独立电源
3. 受控元件
 - 受控电阻
 - 受控电源

元件约束

难点



重点



4. 基尔霍夫定律
5. $2b$ 法求解电路

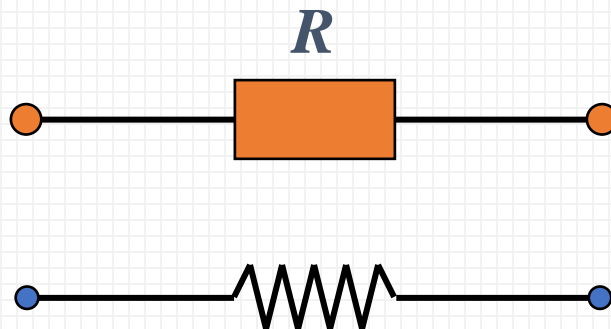


拓扑约束



一、电阻器 (Resistor)

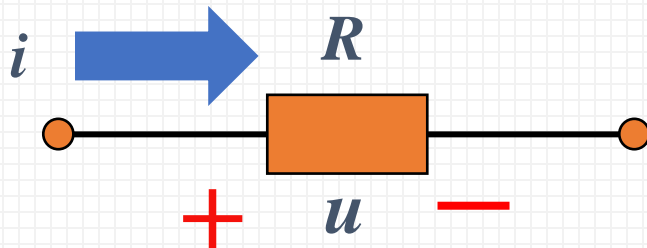
1、电路符号



2、欧姆定律

(1) 电压电流采用关联参考方向

$$u = R \cdot i$$



R 电阻(resistance)

Unit: Ω (欧姆)



$$\text{令 } G = 1/R$$

G **电导**(Conductance)

Unit: S (西) (Siemens, 西门子)

欧姆定律(关联参考方向下): $i = G \cdot u$

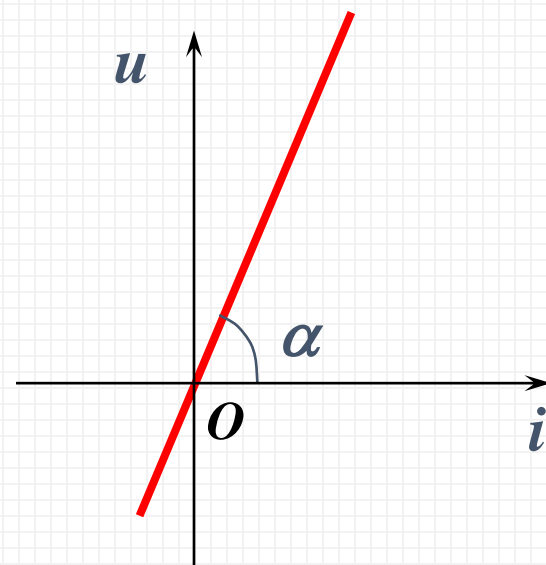
关联参考方向下线性电阻器的 u - i 关系:



$$u = R \cdot i$$

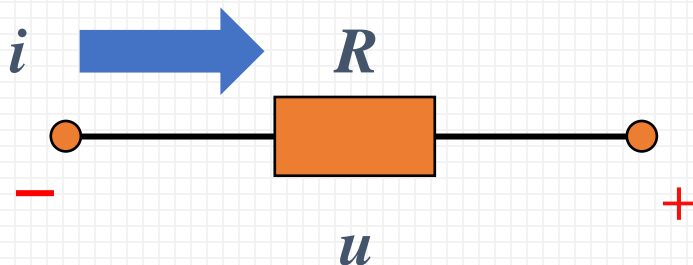
$$R = \tan \alpha$$

$\alpha=0^\circ$ 和 $\alpha=90^\circ$ 代表什么物理意义?





(2) 电压电流非关联参考方向

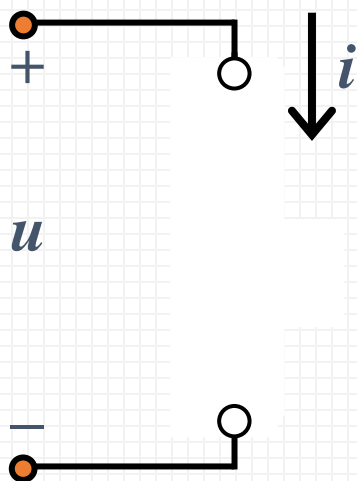


欧姆定律: $u = -R \cdot i$ or $i = -G \cdot u$



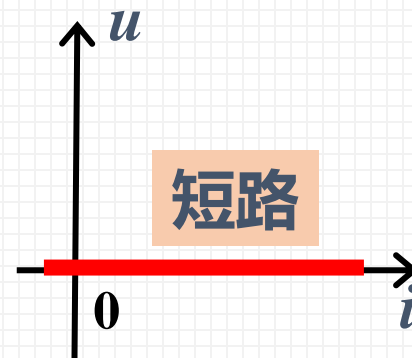
公式的列写必须根据参考方向!

3、开路与短路



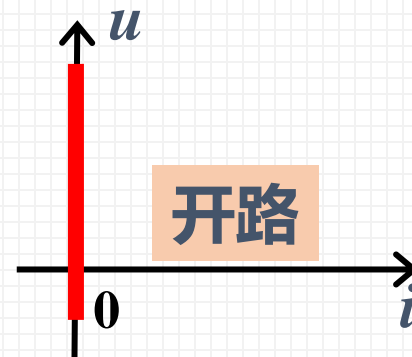
当 $R = 0$ ($G = \infty$), 定义其为**短路**。

$u = 0$, i 由外电路决定。



当 $R = \infty$ ($G = 0$), 定义其为**开路**。

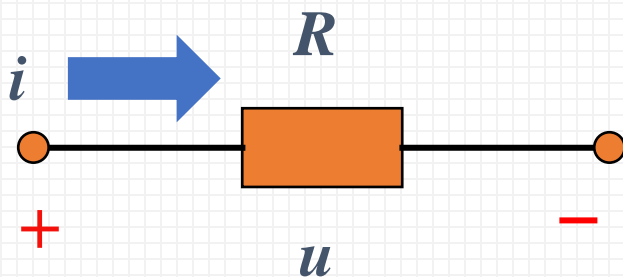
$i = 0$, u 由外电路决定。



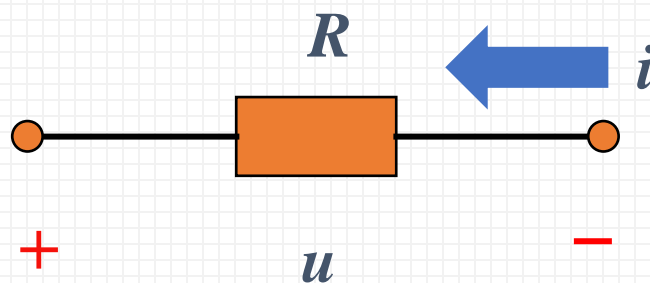


4、电阻消耗的功率

Power:



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



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

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



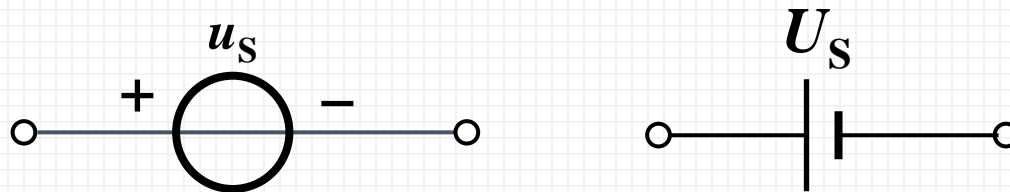
无论参考方向如何选取，电阻始终消耗电功率。



二、独立电源 (independent source)

1、理想独立电压源 (ideal independent voltage source)

电路符号:



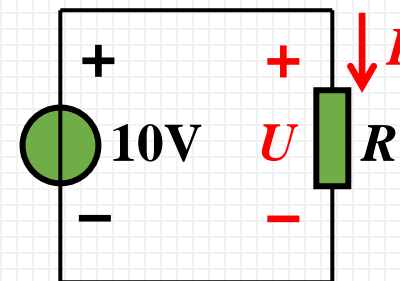
1) 特性

(a) 独立电压源两端的电压与电路其余部分无关

直流: U_S 为常数

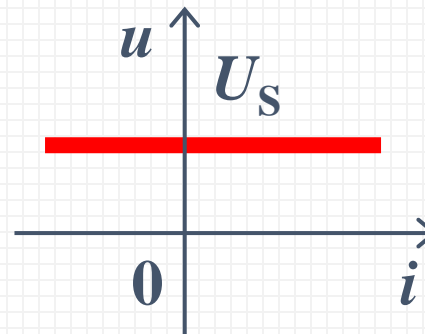
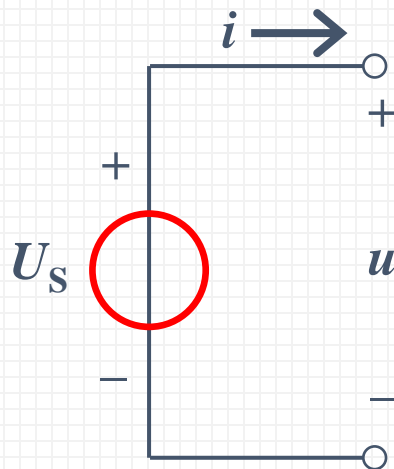
正弦交流: u_S 随时间变化, 可以表示为 $u_S = U_m \sin \omega t$

(b) 流经独立电压源的电流由外电路决定





2) u - i 特性

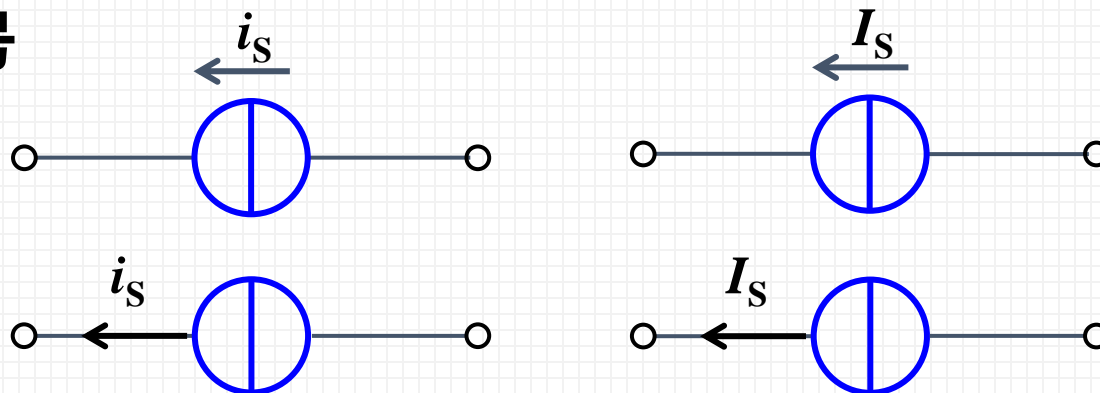


$U_s=0$ 和本节课前面提到的什么等效?



2、理想独立电流源 (independent current source)

电路符号



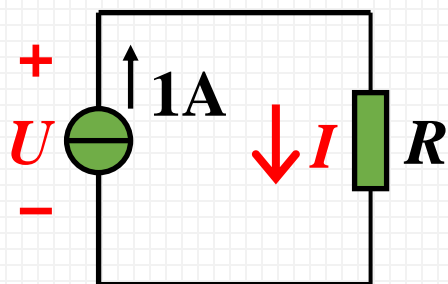
1) 特性:

(a) 流经独立电流源的电流与电路的其余部分无关

直流: I_S 是常数

正弦交流: i_s 随时间变化, 可以表示为 $i_s = I_m \sin \omega t$

(b) 电流源上的电压由外电路决定

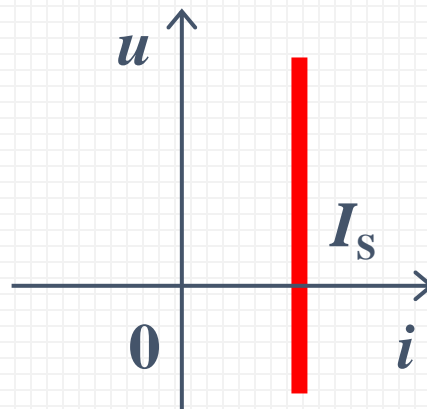
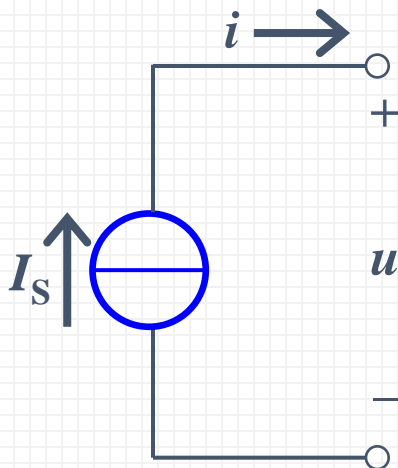


$$R = 1\Omega, I = 1A \quad \longrightarrow \quad U = 1V$$

$$R = 10\Omega, I = 1A \quad \longrightarrow \quad U = 10V$$

当有女生对你说 “*I will not change, no matter how U change*” 时.....

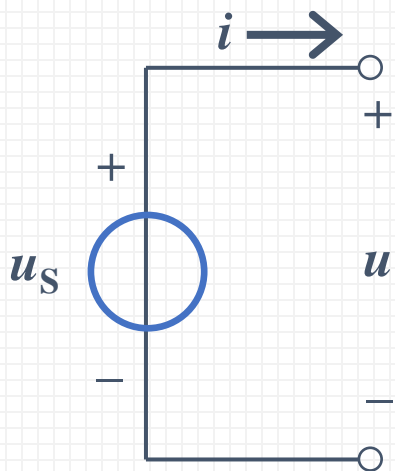
2) u - i 特性



$I_s=0$ 和本节课前面提到的什么等效?

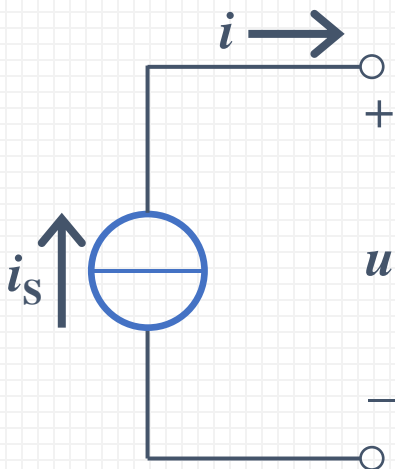


3、独立电源的功率



$$p_{\text{发}} = ui = u_S i$$

$$p_{\text{吸}} = -ui = -u_S i$$

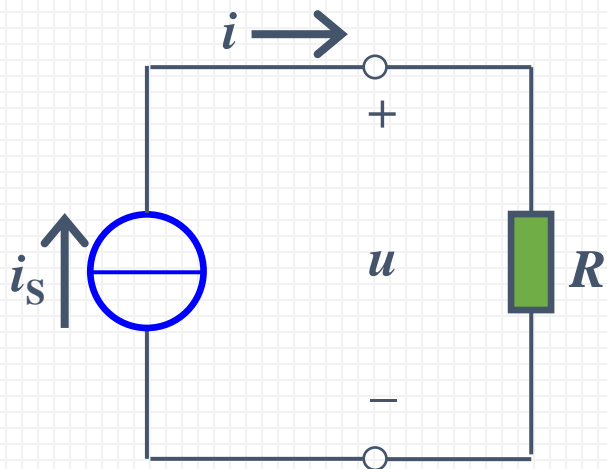


$$p_{\text{发}} = ui = u i_S$$

$$p_{\text{吸}} = -ui = -u i_S$$

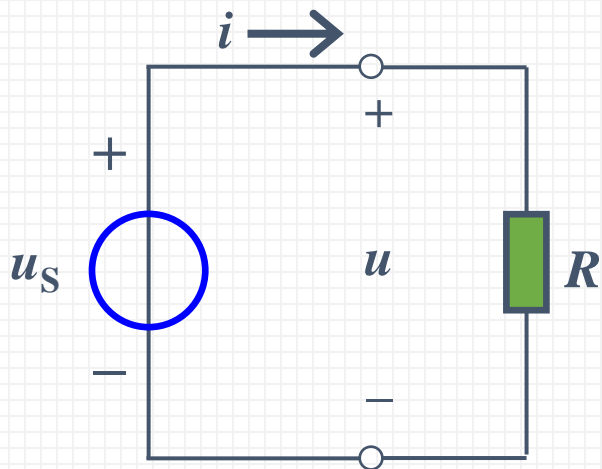


4、独立电源的短路与开路



开路会怎么样?

短路: $R=0 \rightarrow i=i_S, u=0$



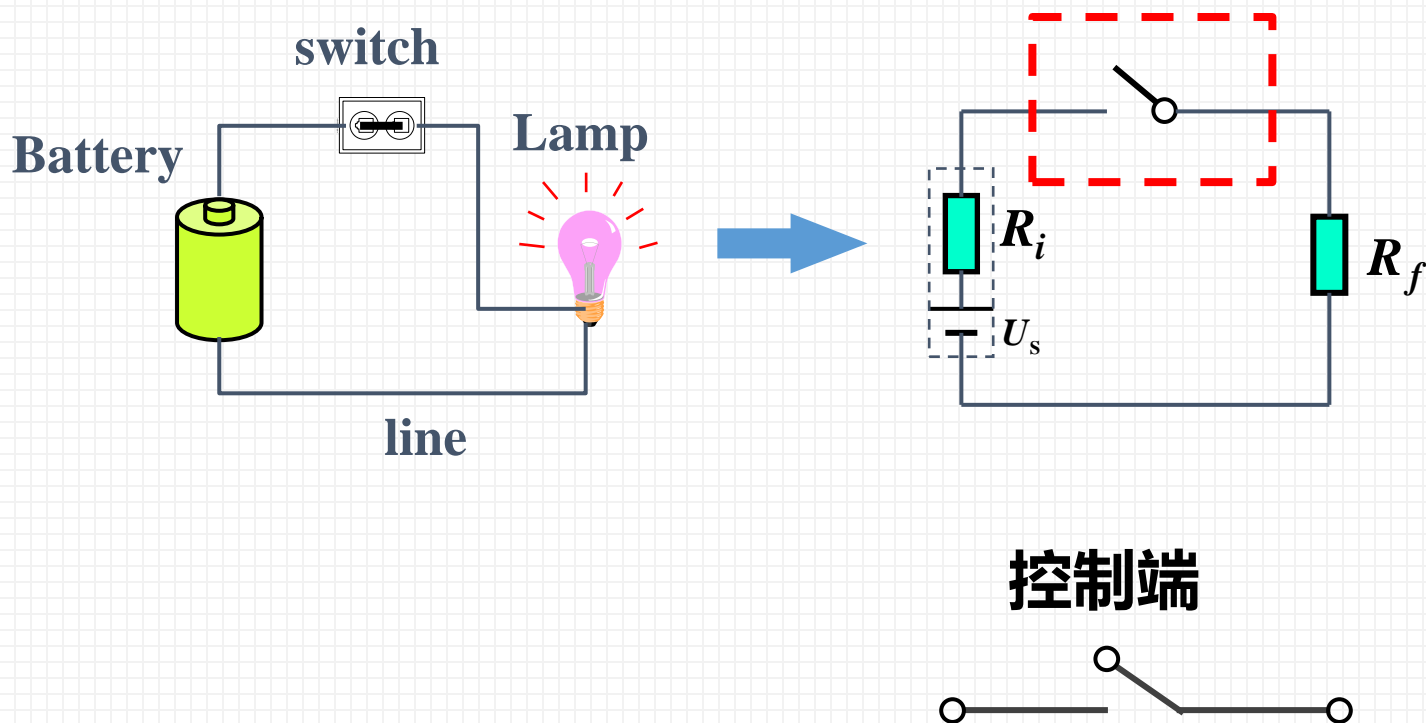
短路会怎么样?

开路: $R \rightarrow \infty \rightarrow i=0, u=u_S$



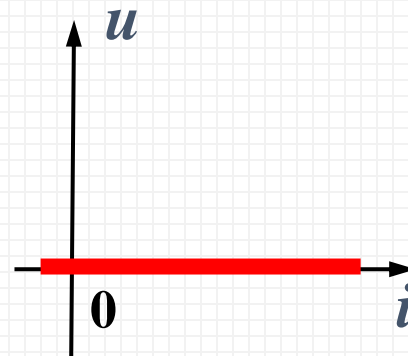
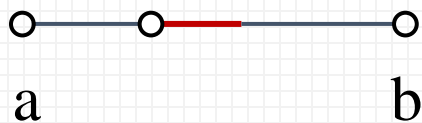
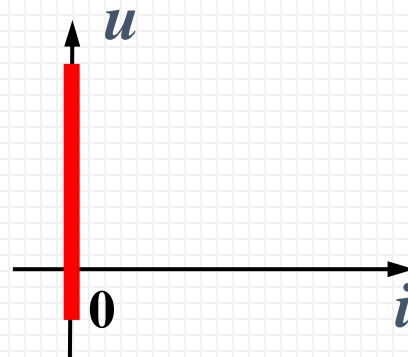
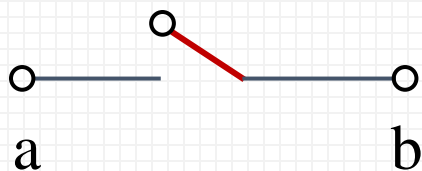
三、受控元件(dependent elements)

1、受控电阻 - 开关





理想开关的 $u-i$ 特性



非理想力控开关的 $u-i$ 特性?

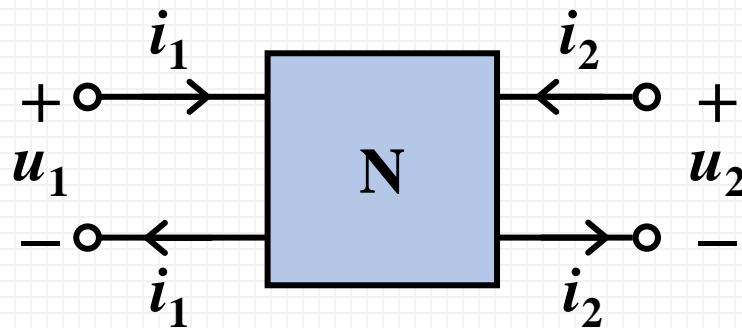
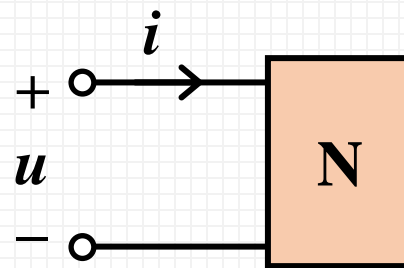
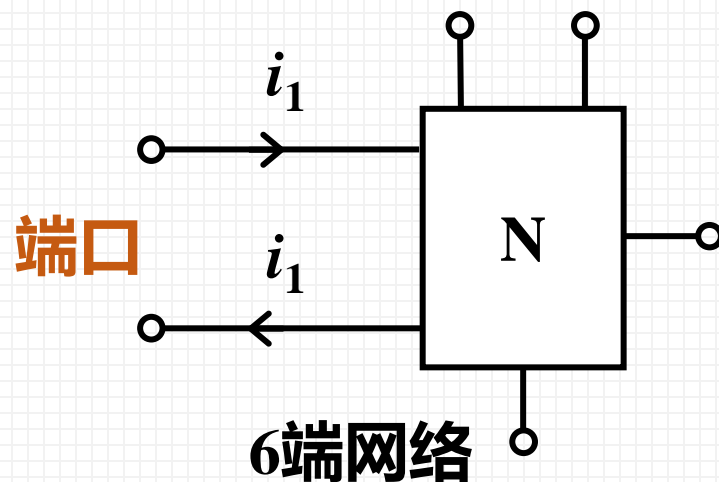
端口 (port)

端口由两个接线端构成，且满足如下条件：**从一个接线端流入的电流等于从另一个接线端流出的电流。**

端口条件

一端口网络：对外只有一个端口的网络，即**二端网络**

二端口网络：对外有二个端口的网络(L6)





2、受控电源 (Dependent source)

1) 定义:

受控电压源:

端口

对外表现为**电压源**，其电压由电路中**某电压或电流**控制

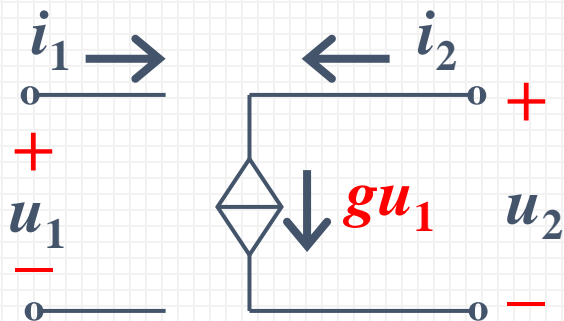
受控电流源

对外表现为**电流源**，其电流由电路中**某电压或电流**控制



2) 线性受控源的分类

(a) **压控电流源** Voltage Controlled Current Source (**VCCS**)



VCCS

$$\begin{cases} i_1 = 0 \\ i_2 = gu_1 \end{cases}$$

g : 转移电导

为什么要有一个**开路的控制端口**?

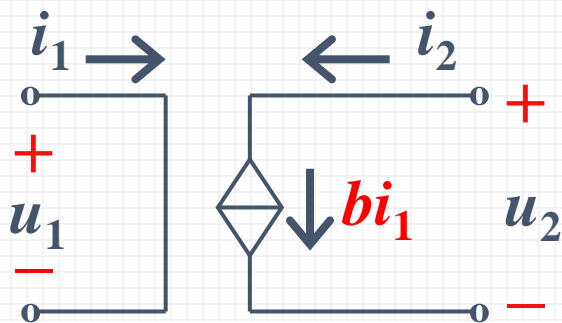
希望对电路进行无损的电压采样! L3等效变换讨论

怎么才能有一个**开路的控制端口**?

A1 MOSFET、L7 运算放大器



(b) **流控电流源** Current Controlled Current Source (**CCCS**)



CCCS

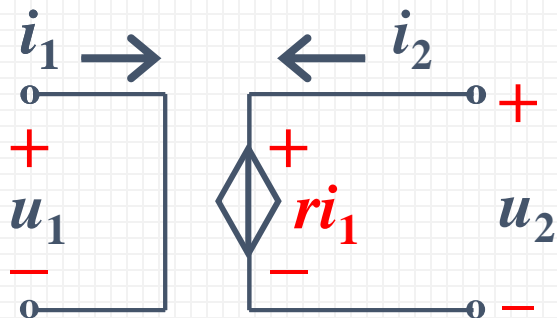
$$\begin{cases} u_1=0 \\ i_2=bi_1 \end{cases}$$

b : 转移电流比

短路的原因: **无损的电流采样!** L3讨论



(c) **流控电压源** Current Controlled Voltage Source (**CCVS**)

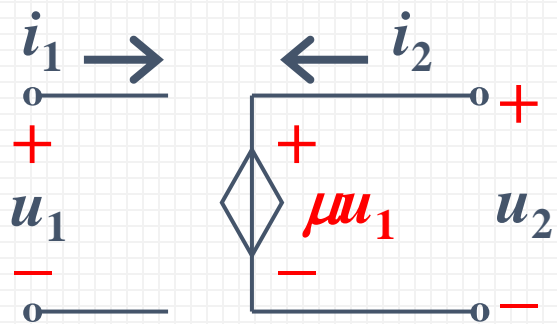


CCVS

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

r : 转移电阻

(d) **压控电压源** Voltage Controlled Voltage Source (**VCVS**)



VCVS

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

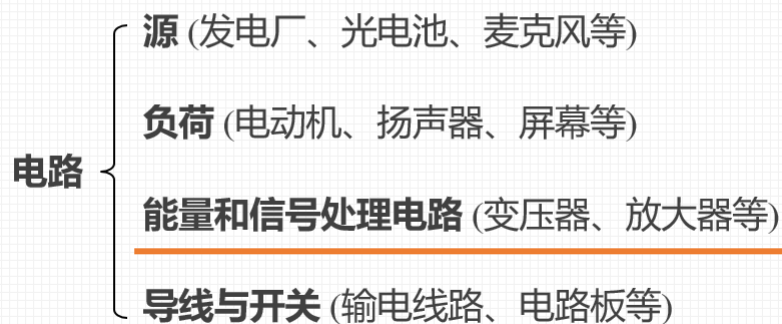
μ : 转移电压比



受控源与独立源的比较

- (a) **独立源**电压(或电流)由**电源本身**决定，而**受控源**电压(或电流)直接由**控制量**决定。
- (b) **独立源**是真正电路中的“**源**”，**受控源**在电路中是**能量或信号处理元件**。

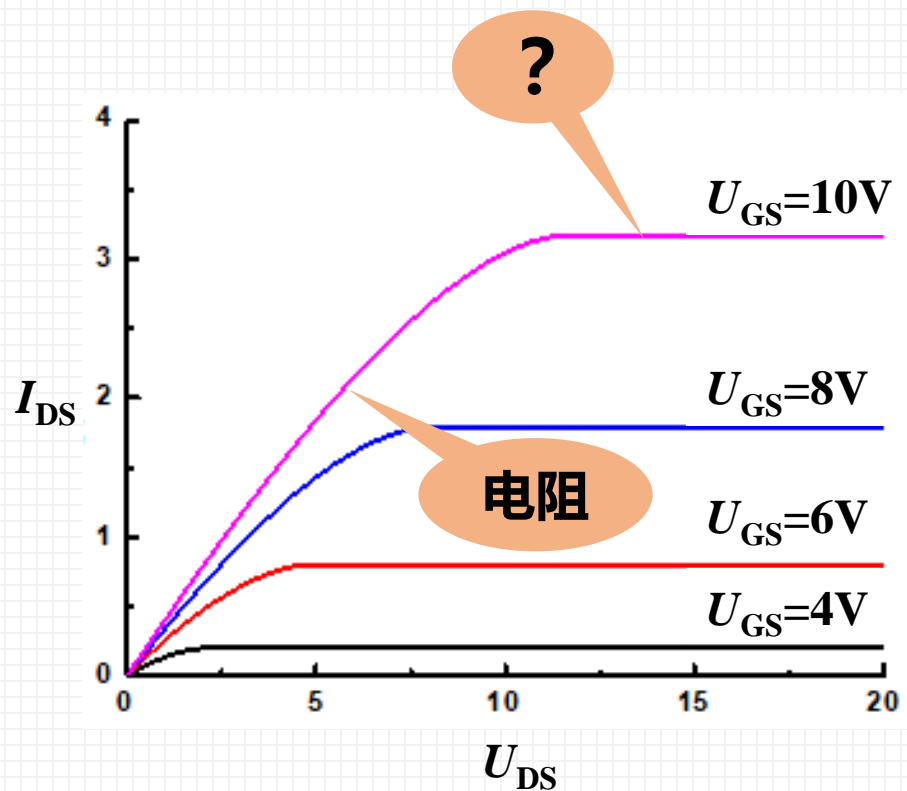
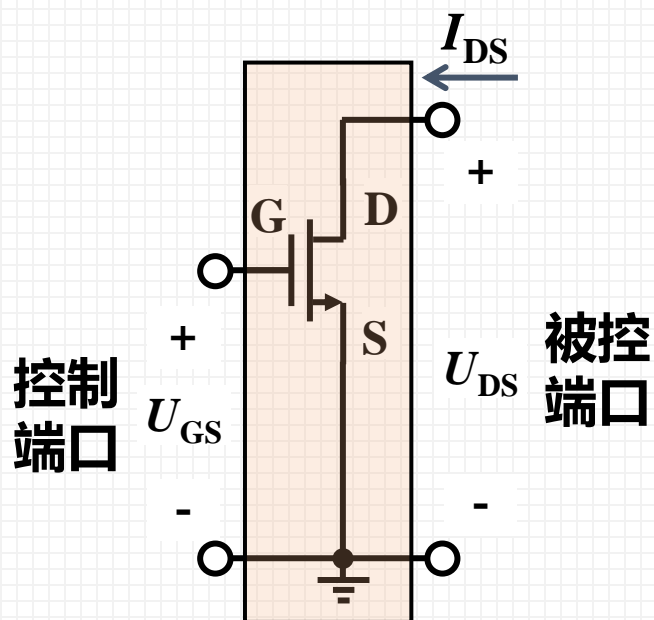
1. 电路的组成



一个压控电流源的实例：MOSFET

MOSFET (**M**etal-**O**xide-**S**emiconductor **F**ield-**E**ffect **T**ransistor)

Gate 栅极； **D**rain 漏极； **S**ource 源极

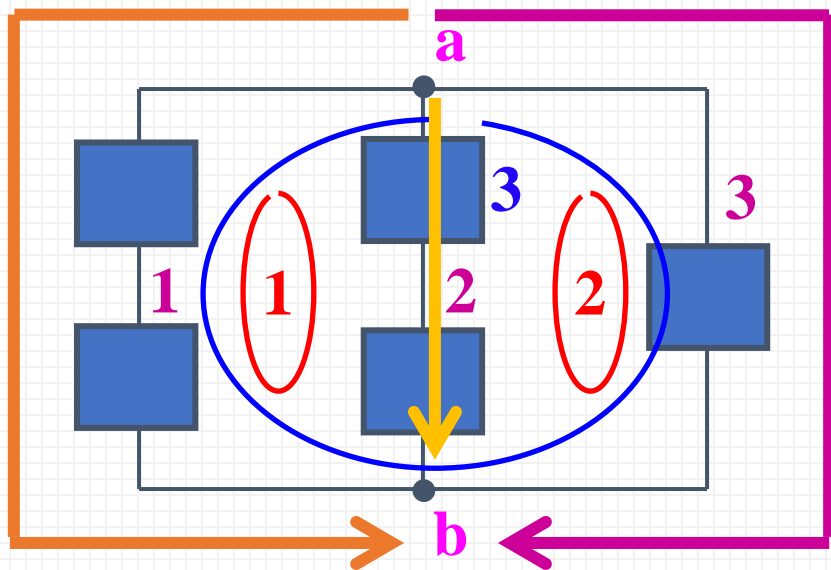




四、基尔霍夫定律 (Kirchhoff's Laws)

I. 术语

1. 支路branch: 若干元件无分叉地首尾相连构成一个支路 (b)



$$b=3$$

$$n=2$$

$$l=3$$

也有教材认为

- 每个二端元件构成1条支路
- 每两个元件间的接线端构成1个节点

2. 节点node: 3个或更多支路的连接点 (n)

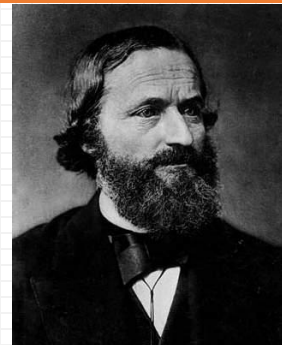
3. 路径path: 两个节点间包含的支路

4. 回路loop: 由支路组成的闭合路径 (l)

5. 网孔mesh: 平面电路中不与其他支路相交的回路 (“网中的孔”)

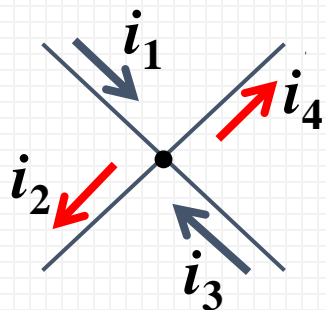


Gustav Robert Kirchhoff 1845年提出



II. Kirchhoff's Current Laws **KCL**:

$$\sum i(t) = 0$$



$$-i_1 + i_2 - i_3 + i_4 = 0$$

$$i_1 + i_3 = i_2 + i_4$$

流出节点的电流的**代数和**为零

“**代数和**”：

流出节点电流的符号为+

流入节点电流的符号为-

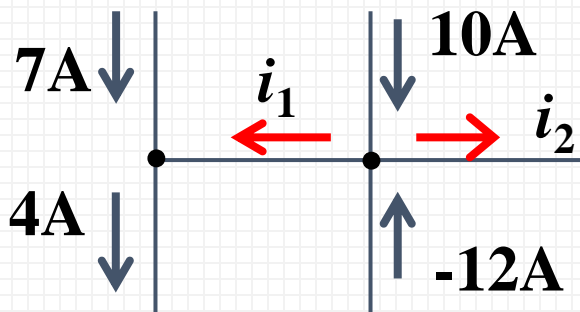
$$\sum i_{\text{in}}(t) = \sum i_{\text{out}}(t)$$

(a) 只适用于**集总参数**电路(阅读教材1.6节)

(b) 对于用参考方向表示的电流依然有效



例



$$4 - 7 - i_1 = 0$$

$$4 = 7 + i_1$$

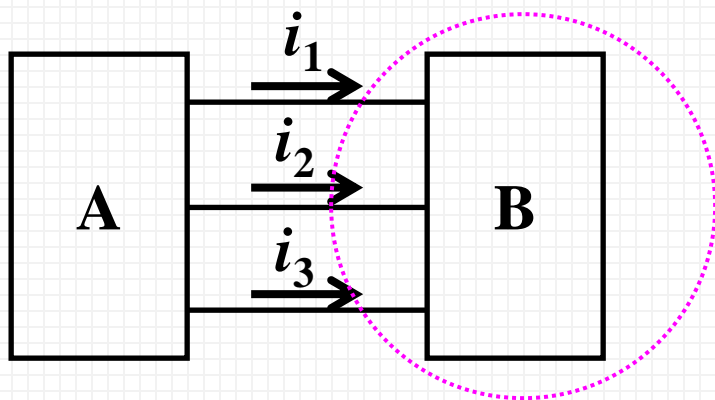


$$i_1 = -3A$$



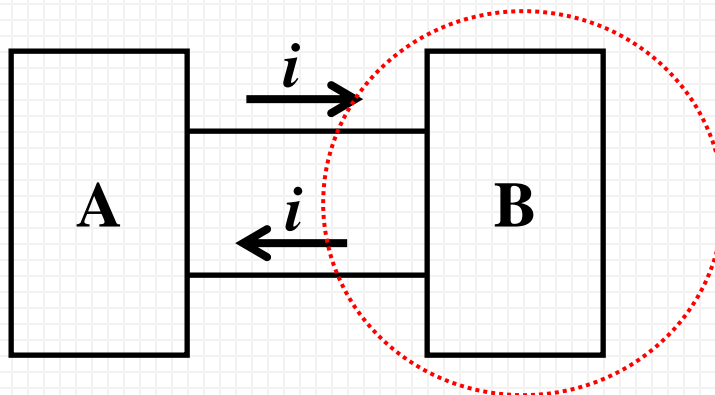
广义 KCL

3端网络

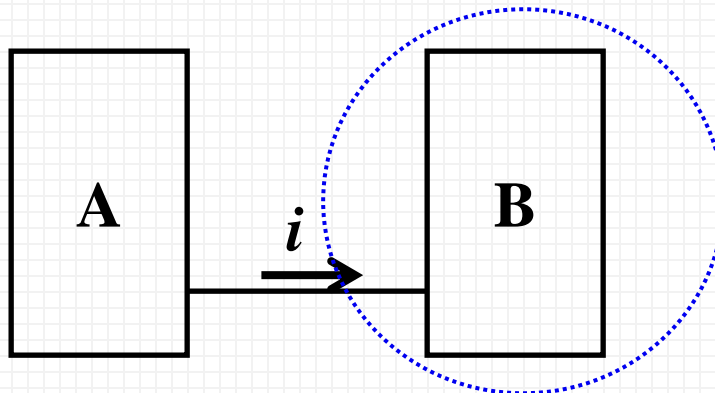


$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

2端网络



1端网络

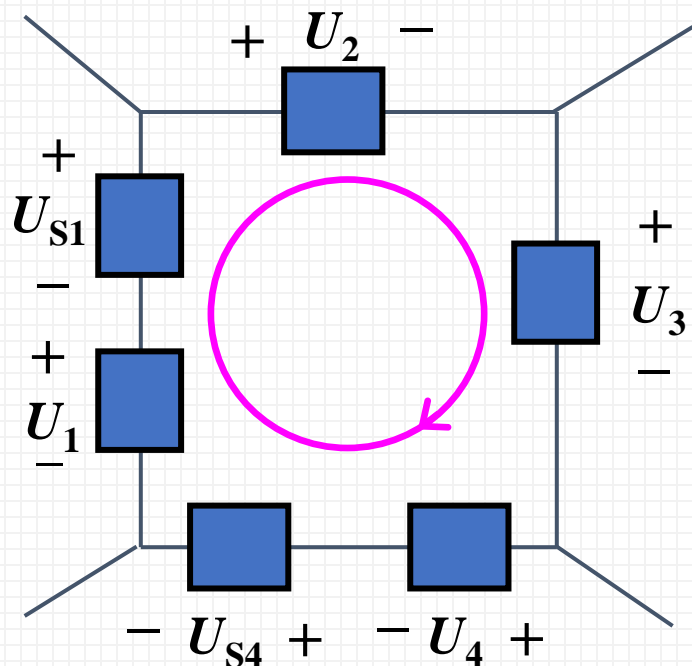


$$i = 0$$

III. Kirchhoff's Voltage Laws **KVL**: 回路中所有电压(降)的**代数和**为零。

$$\sum u(t) = 0$$

例



“代数和”：

沿着某方向(顺/逆时针)走,

先遇到 **+** 号则该电压为 **+**

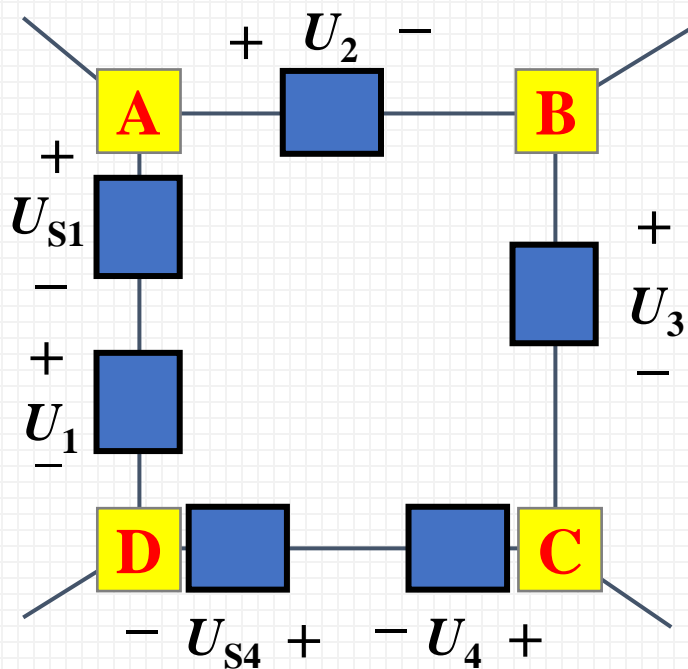
先遇到 **-** 号则该电压为 **-**

从 U_1 开始**顺时针**:

$$-U_1 - U_{S1} + U_2 + U_3 + U_4 + U_{S4} = 0$$

$$+U_2 + U_3 + U_4 + U_{S4} = U_1 + U_{S1}$$

$$\sum u_{\text{drop}}(t) = \sum u_{\text{rise}}(t)$$



$$-U_1 - U_{S1} + U_2 + U_3 + U_4 + U_{S4} = 0$$

$$+U_2 + U_3 + U_4 + U_{S4} = U_1 + U_{S1}$$

考虑某**两点之间的电压降**

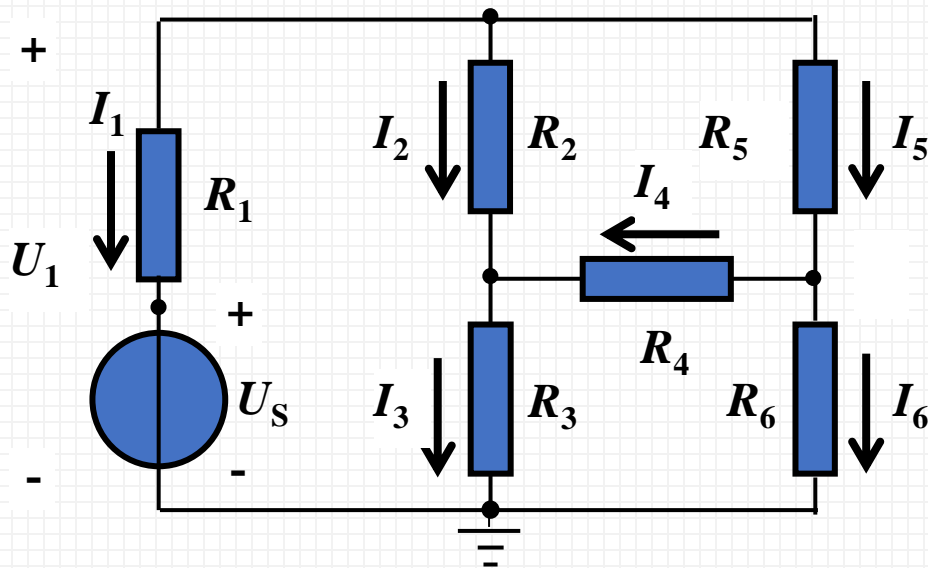
$$U_{ABCD} = +U_2 + U_3 + U_4 + U_{S4} = U_1 + U_{S1} = U_{AD}$$

广义KVL：电路中任意两点间的电压等于两点间**任意一条路径**经过的各元件电压的代数和。



五、2b法求解电路

所有支路电压与电流采用**关联**参考方向。求电流 $I_1 \sim I_6$ 。



$$b = 6$$

$$U_1 = R_1 I_1 + U_s$$

$$U_2 = R_2 I_2$$

$$U_3 = R_3 I_3$$

$$U_4 = R_4 I_4$$

$$U_5 = R_5 I_5$$

$$U_6 = R_6 I_6$$

原则上12个变量

待求解(每个支路的电压电流)

元件约束有6个方程

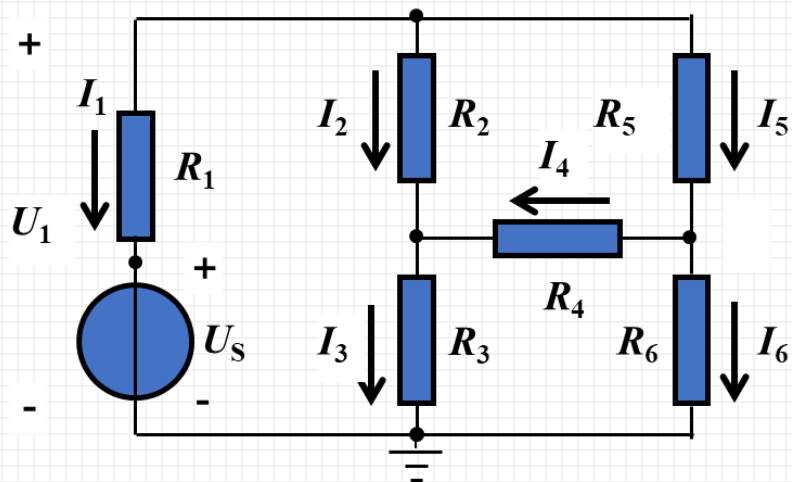


原则上需要12个独立方程

$$n=4$$

$$b=6$$

$$l=7$$



n 节点 b 支路电路

$2b$ 个未知量

$2b$ 个方程

b 个独立元件约束

$n-1$ 个独立KCL

$b-n+1$ 个独立KVL

$2b$ 法

$$I_1 + I_2 + I_5 = 0$$

$$-I_2 + I_3 - I_4 = 0$$

$$I_4 - I_5 + I_6 = 0$$

$$U_1 - U_2 - U_3 = 0$$

$$U_2 - U_4 - U_5 = 0$$

$$U_3 + U_4 - U_6 = 0$$

$$U_1 = R_1 I_1 + U_s$$

$$U_2 = R_2 I_2$$

$$U_3 = R_3 I_3$$

$$U_4 = R_4 I_4$$

$$U_5 = R_5 I_5$$

$$U_6 = R_6 I_6$$

元件约束6个方程



讨论一下2b法

- 这是一颗定心丸
- 看起来很low
- 其实并不那么low
 - 计算机的存储计算能力在飞速提升
- 后面内容的必要性
 - 手算
 - 若干对电路的认识和理解