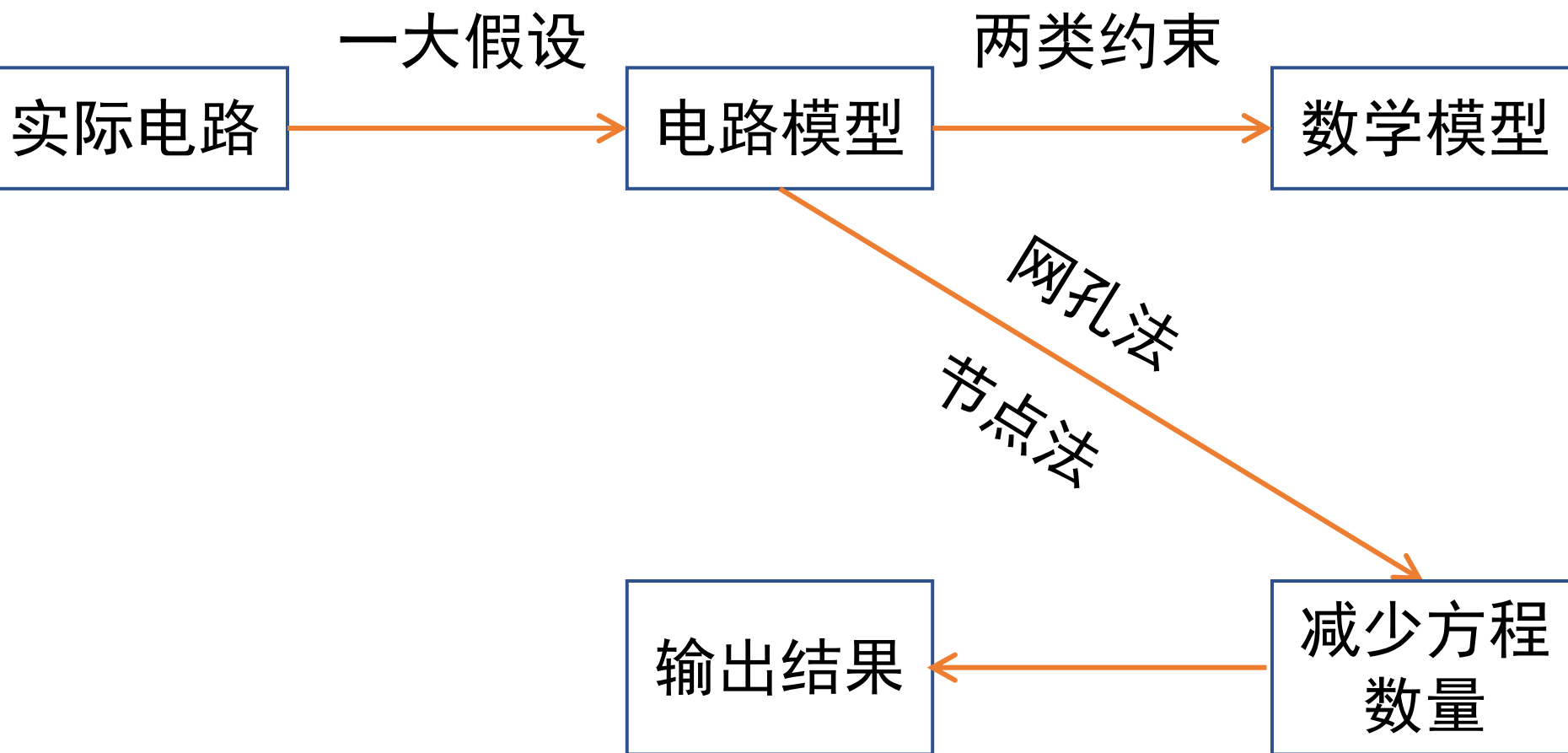




# 电路分析基础

一院四教 张帆  
15703565092

# 回顾



# 引入

## 前面所学电路分析方法的局限性：

- 1、没有反映电路的运行规律和电路特性；
- 2、不能对内部结构和参数都未知网络进行分析；
- 3、不利于求某一条支路上的电压或电流。

**电路的常用网络定理不但解决了以上问题，同时也为电路分析提供了另一种手段和方法。**



## 第四单元 电路定理

# 第四单元 电路定理

电路定理主要用于电路化简、电路设计及理论推导中。

- 本章重点：

- 叠加定理

- 置换定理

- 戴维南定理、诺顿定理

- 最大功率传输定理

# 第四单元 电路定理

§ 3-1 线性电路的比例性 网络函数

§ 3-2 叠加原理

§ 3-3 叠加方法与功率计算

§ 3-4 数模转换器的基本原理

§ 4-3 单口网络的置换——置换定理

§ 4-6 戴维南定理

§ 4-7 诺顿定理

§ 4-8 最大功率传递定理

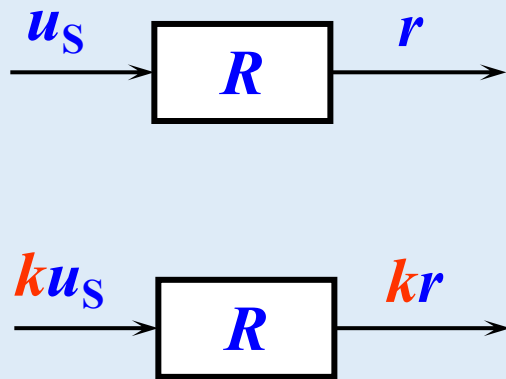
# 内容目录

- 一、线性电路的特性——齐次性和叠加性
- 二、叠加原理
- 三、叠加原理应用于分析电路
- 四、叠加原理与功率计算
- 五、数模转换器的基本原理
- 六、置换定理
- 七、置换定理分析电路举例
- 八、置换定理与等效的区别

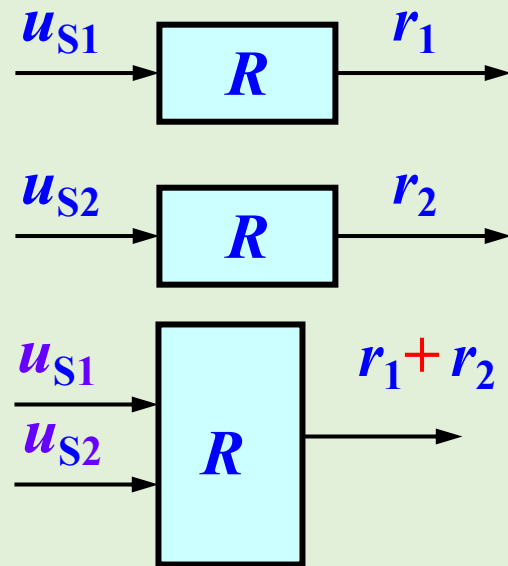
# 一、线性电路的特性——齐次性和叠加性

**线性电路：**只有**线性元件**和**独立源**构成的电路称为线性电路，独立源是电路的输入。

齐次性



可加性

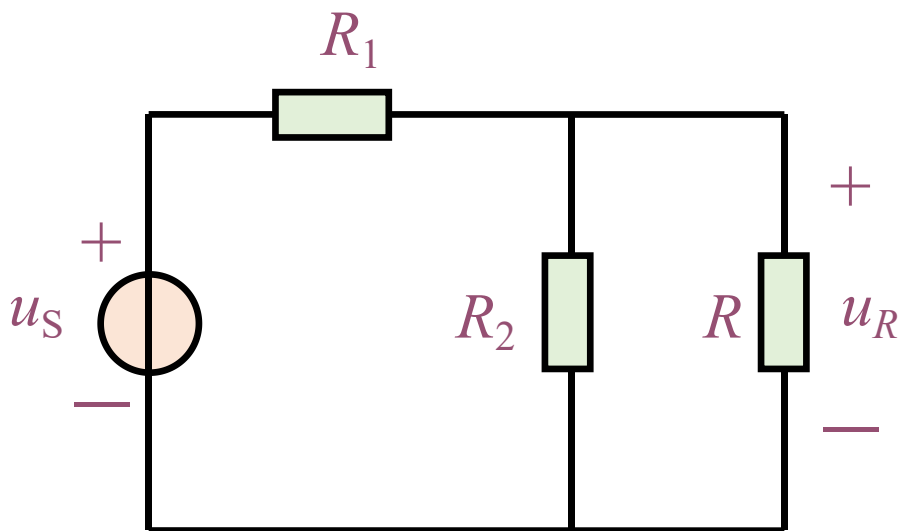




# 一、线性电路的特性——齐次性和叠加性

1、线性电路的齐次性（比例性）：线性电路中，输入增加 $m$ 倍，则输出也随之增加 $m$ 倍。

若  $f(t) \rightarrow y(t)$ ，则  $m f(t) \rightarrow m y(t)$



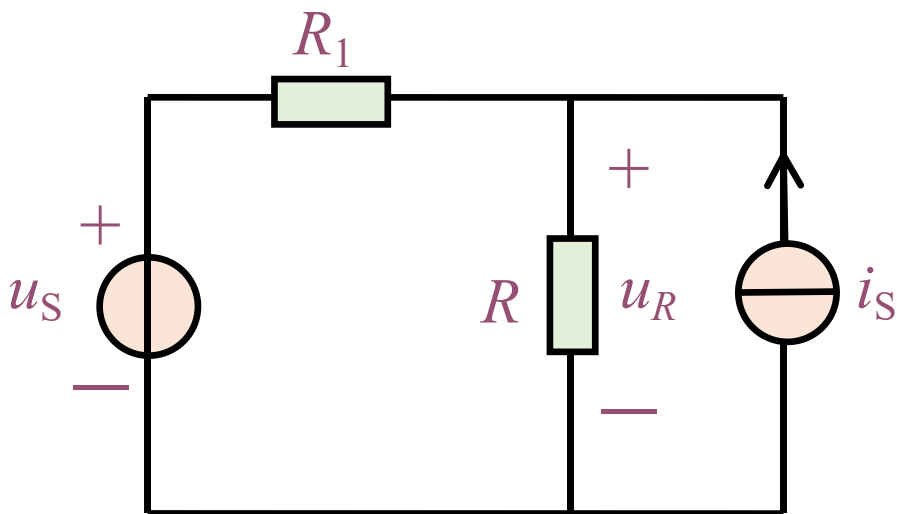
$$u_R = \frac{R_2 R}{R_1(R_2 + R) + R_2 R} u_S = K u_S$$

网络函数：

$$H = \frac{\text{响应}}{\text{激励}}$$

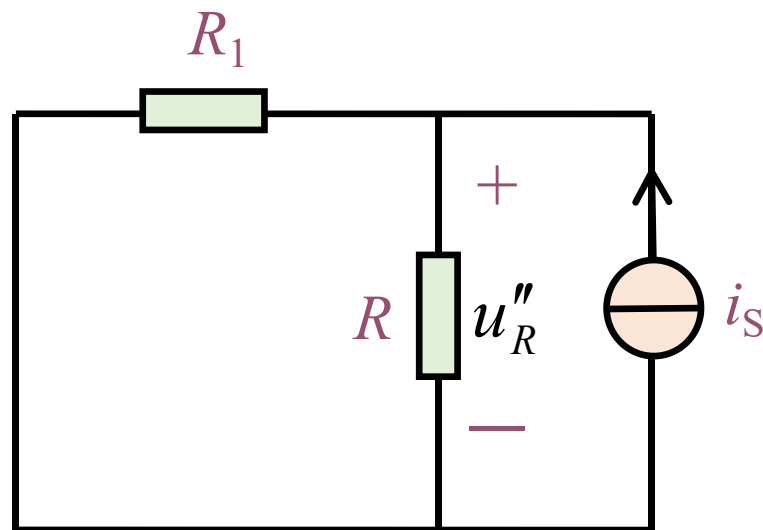
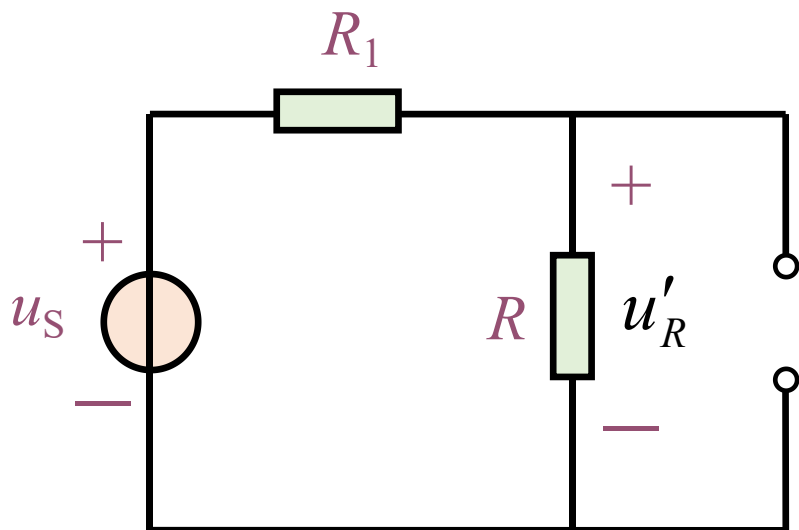
# 一、线性电路的特性——齐次性和叠加性

若线性电路中含有多个独立源呢？



$$u_R = \frac{R}{R_1 + R} u_S + \frac{R_1 R}{R_1 + R} i_S$$

# 一、线性电路的特性——齐次性和叠加性



$$u'_R = \frac{R}{R_1 + R} u_S$$

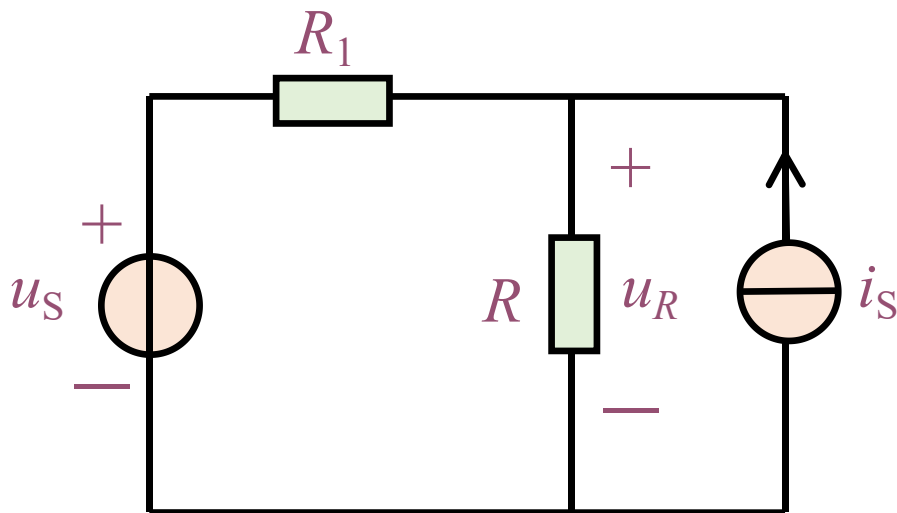
$$u_R = u'_R + u''_R$$

$$u''_R = \frac{R_1 R}{R_1 + R} i_S$$

# 一、线性电路的特性——齐次性和叠加性

**2、线性电路的叠加性：**由两个激励产生的响应为每一激励单独作用时产生的响应之和。

若  $f_1(t) \rightarrow y_1(t)$ , 则  $f_1(t) + f_2(t) \rightarrow y_1(t) + y_2(t)$   
 $f_2(t) \rightarrow y_2(t)$



$$u'_R = \frac{R}{R_1 + R} u_S$$



$$u_R = \frac{R}{R_1 + R} u_S + \frac{R_1 R}{R_1 + R} i_S$$



$$u''_R = \frac{R_1 R}{R_1 + R} i_S$$

## 二、叠加原理

**1、原理内容：**线性电路中，每一元件的电流或电压可以看成是**每一个独立源单独作用于电路时**，在该元件上产生的电流或电压的**代数和**。也就是说，在线性电路中，任一电流变量或电压变量，作为电路的响应  $y(t)$ ，与电路各个激励  $f_m(t)$  的关系可表示为：

$$y(t) = \sum_M H_m f_m(t)$$

不作用的 

电压源	$(u_S=0)$	短路
电流源	$(i_S=0)$	开路

★将个人前途命运融入国家发展大局，  
与时代同向同行！

## 二、叠加原理

### 2、在应用线性叠加原理时注意：

- ① 只用于线性电路；
- ② 只用于求支路电压和电流，不能用于求功率；
- ③ 受控源不能单独作用于电路，独立源作用时受控源不能置0；
- ④ 注意各响应分量的参考方向；
- ⑤ 当独立源个数较多时，可以分组作用。

## 二、叠加原理

### 3、叠加原理有重要的理论价值：

- (1) 它是推导其他一些电路定理的依据；
- (2) 它说明引起响应的原因；
- (3) 任一信号作为激励时，容易求响应。（将其分解为多个信号的叠加，可分别求每个信号作用时的响应）

周期信号的分解：周期信号过系统

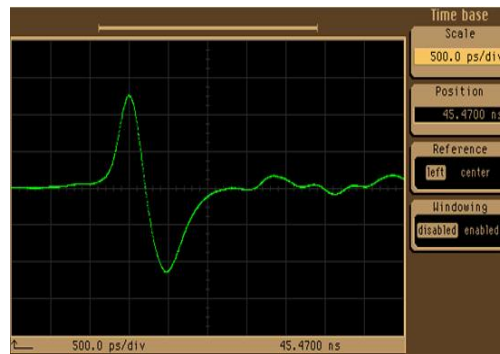
$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\Omega t + b_n \sin n\Omega t)$$

## 二、叠加原理

### 4、叠加原理有重要的实践价值：



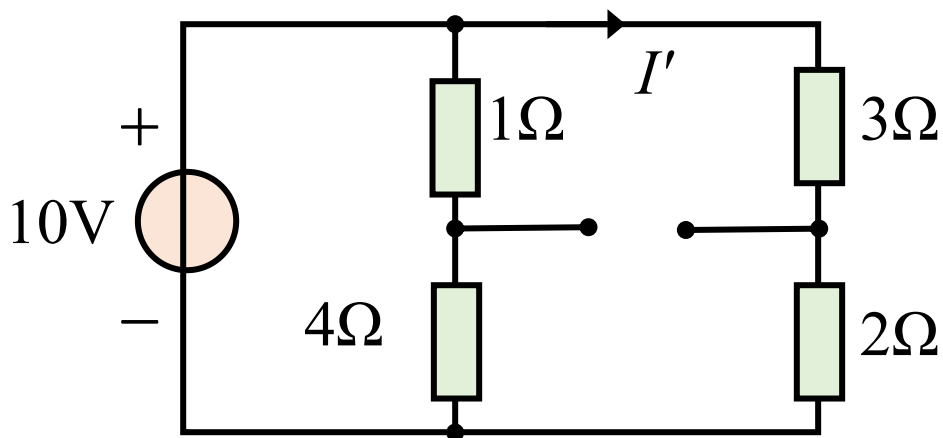
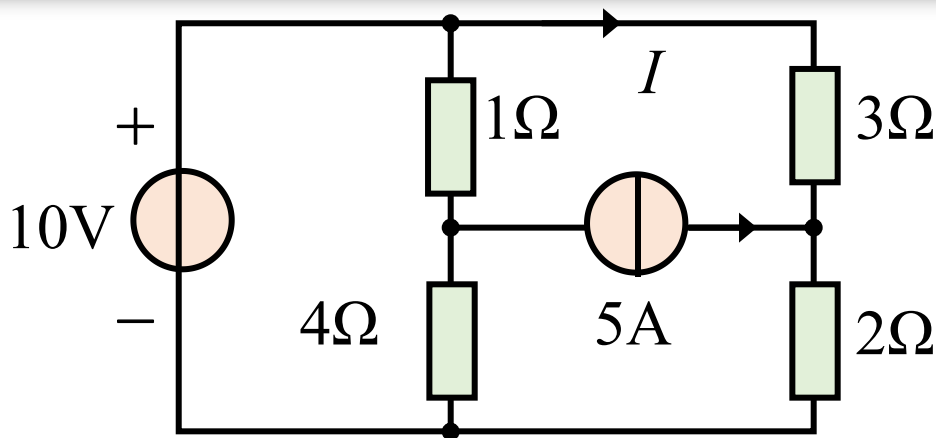
高功率微波武器



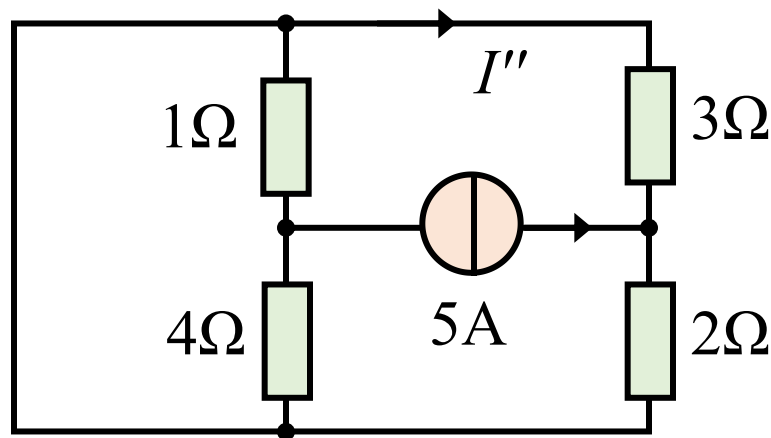


### 三、叠加原理应用于分析电路

例：求电流 $I$



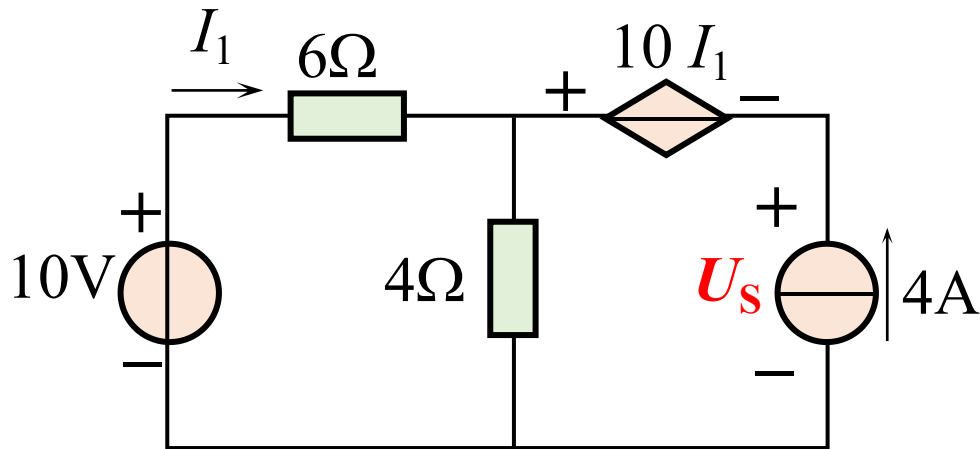
$$I' = 2A$$



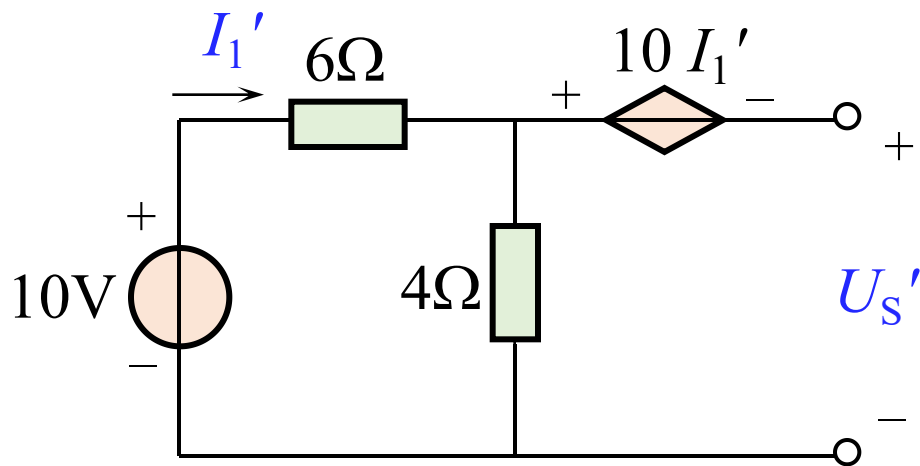
$$I'' = -2A$$

### 三、叠加原理应用于分析电路

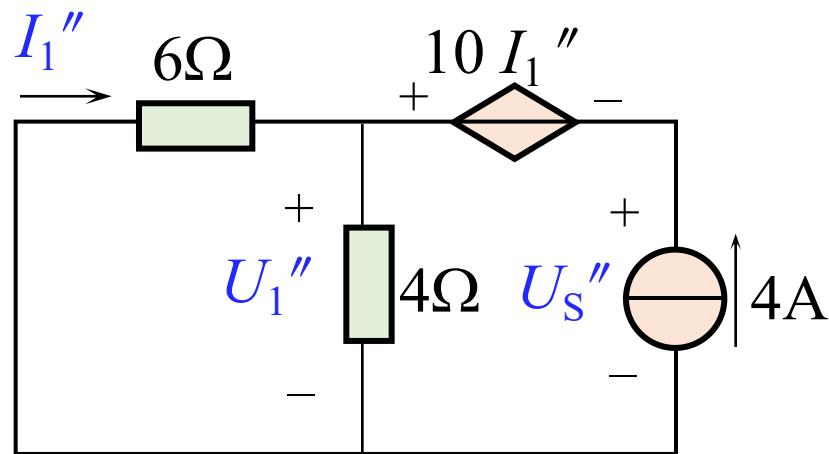
**例：**用叠加定理求电流源两端电压  $U_S$  。



应用叠加原理时，  
受控源不置零！



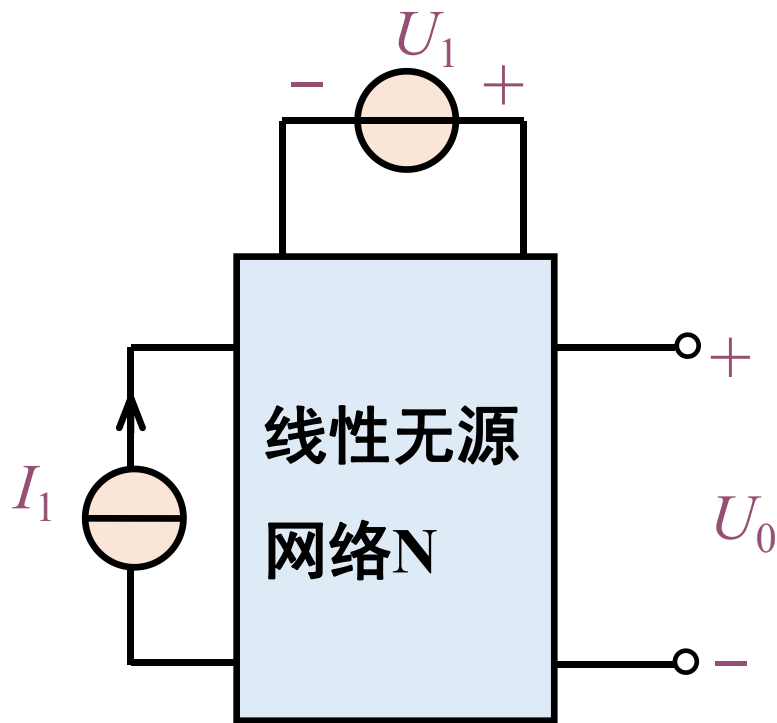
$$U_S' = -6V$$



$$U_S'' = 25.6V$$

## 三、叠加原理应用于分析电路

- 例： 1) 当  $I_1=1\text{A}$ ,  $U_1=1\text{V}$  时,  $U_0=0$ ;  
2) 当  $I_1=0\text{A}$ ,  $U_1=10\text{V}$  时,  $U_0=1\text{V}$ 。  
问：当  $I_1=10\text{A}$ ,  $U_1=0\text{V}$  时,  $U_0=?$



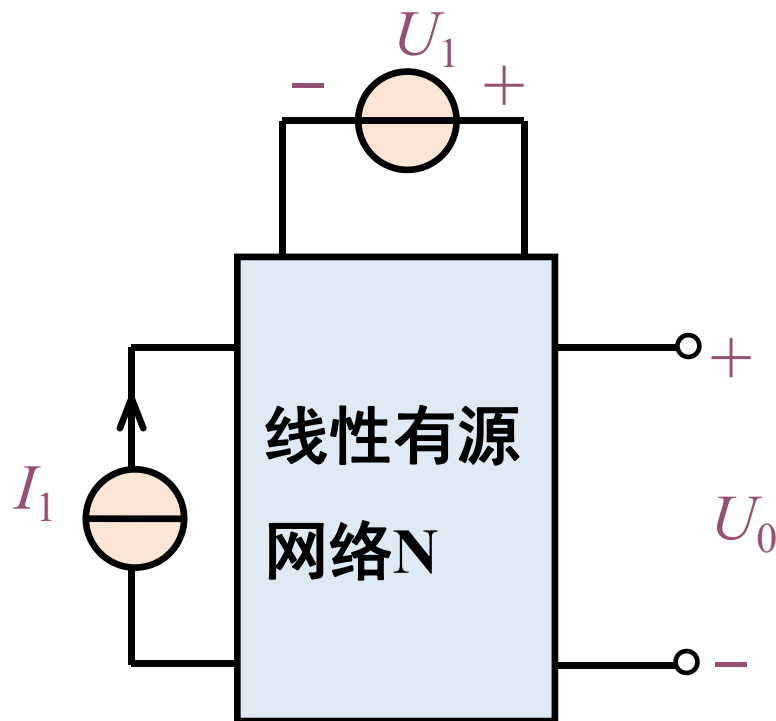
叠加原理应用于  
抽象电路网络

思考：

若网络N中含有独立源，如何分析？

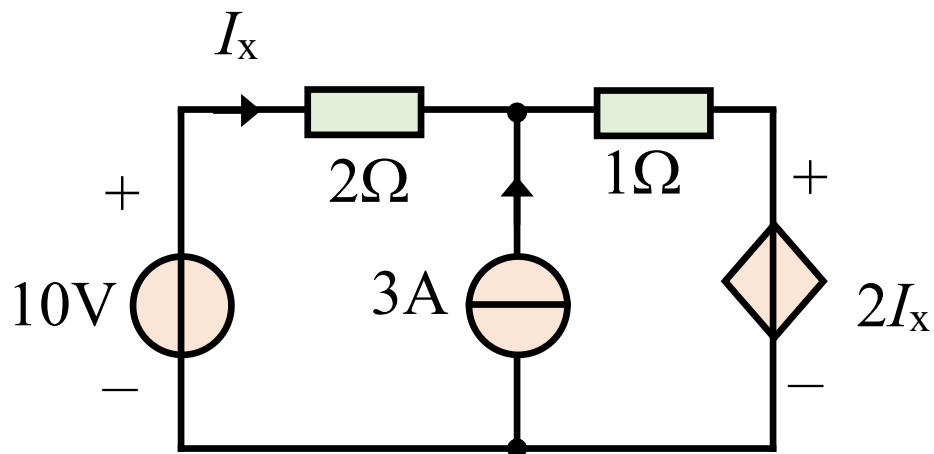
### 三、叠加原理应用于分析电路

- 例： 1) 当  $I_1=1\text{A}$ ,  $U_1=1\text{V}$  时,  $U_0=0$ ;
- 2) 当  $I_1=0\text{A}$ ,  $U_1=10\text{V}$  时,  $U_0=1\text{V}$ ;
- 3) 当  $I_1=2\text{A}$ ,  $U_1=2\text{V}$  时,  $U_0=5\text{V}$ 。
- 问：当  $I_1=10\text{A}$ ,  $U_1=0\text{V}$  时,  $U_0=?$

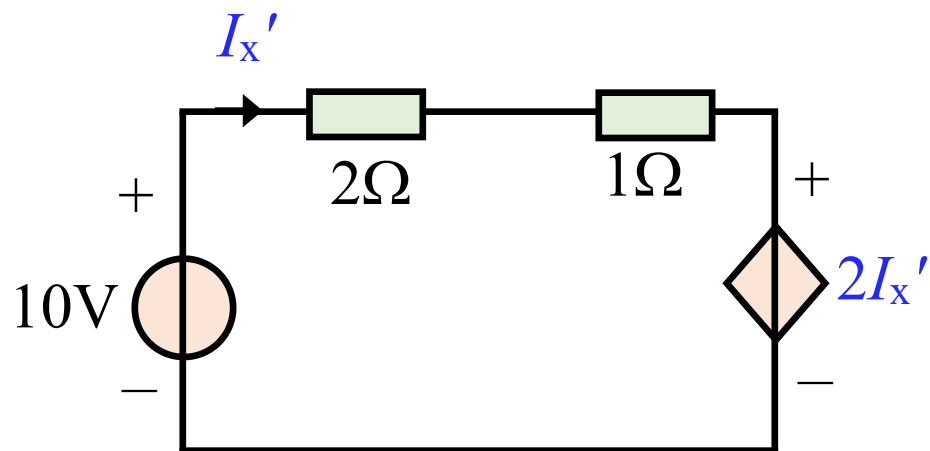


## 四、叠加原理与功率计算

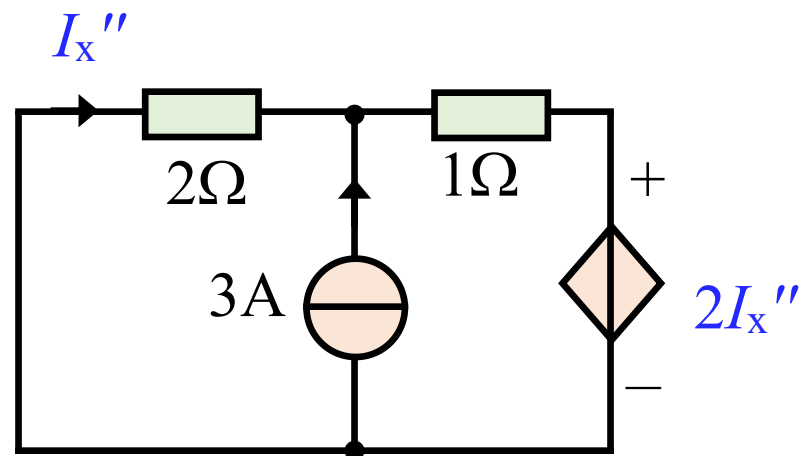
**例：** 求 $2\Omega$ 电阻上的功率



叠加原理不可以  
应用于求功率



$$I_x' = 2\text{A}$$



$$I_x'' = -0.6\text{A}$$

## 四、叠加原理与功率计算

### 思考讨论：

电路如图， $N_0$ 为线性无源电阻网络。当3A的电源断开时，2A的电源输出功率为28W，这时， $U_2 = 8\text{V}$ 。当2A的电源断开时，3A的电源输出功率为54W，这时， $U_1 = 12\text{V}$ 。试求两电源同时作用时每个电源的输出功率。



## §3-2 叠加原理

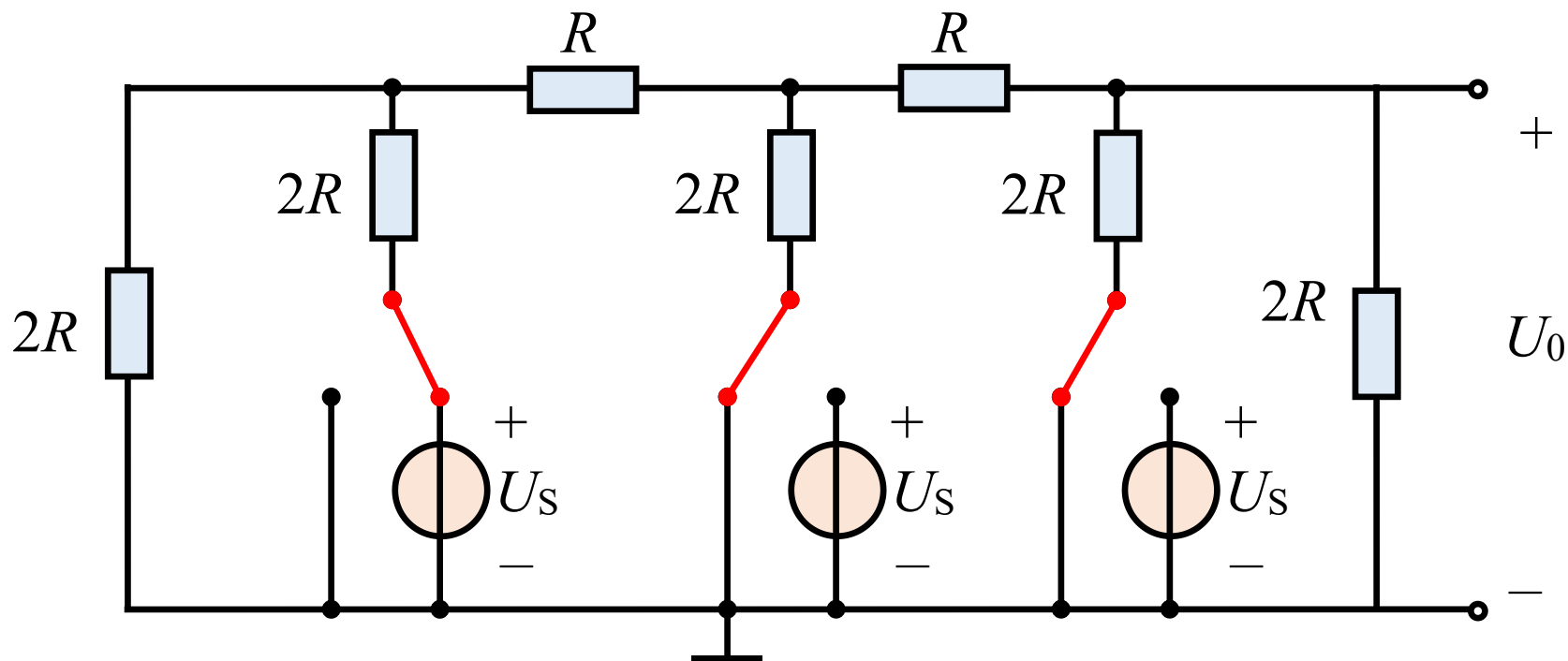
### 小结：

- 1、叠加原理只**适用于**线性电路**求电压和电流**；  
不能用叠加定理求功率（功率为电源的二次函数）。  
不适用于非线性电路。
- 2、应用时电路的结构参数必须**前后一致**。
- 3、不作用的电压源**短路**；不作用的电流源**开路**。
- 4、含受控源（线性）电路亦可用叠加，**受控源**应始终**保留**，受控源不能单独作用于电路。
- 5、叠加时注意**参考方向**下求**代数和**。

## 五、数模转换器的基本原理

**应用实例：** 数字量转换为模拟量的典型电路

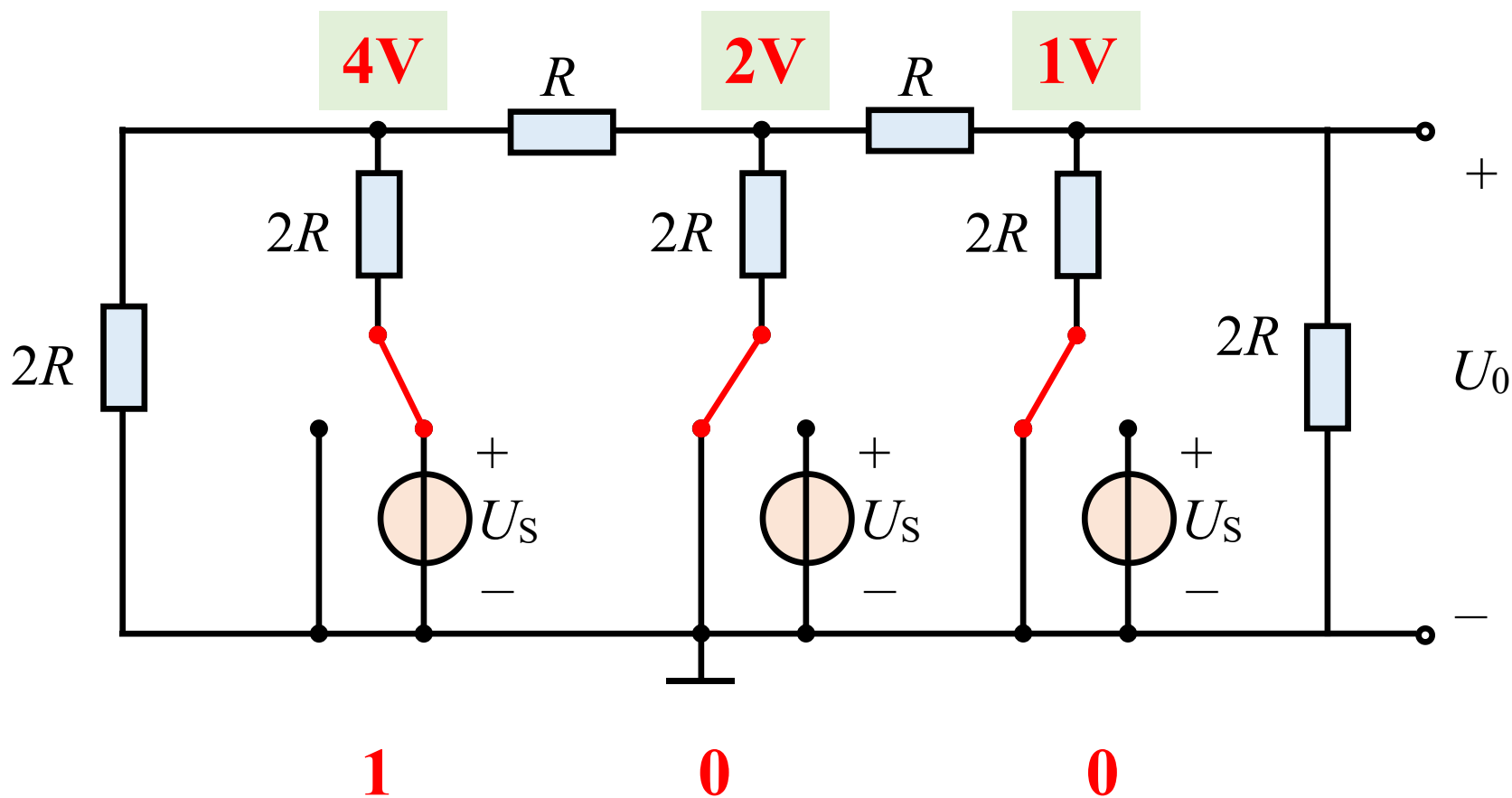
图中， $U_S=12V$ 。





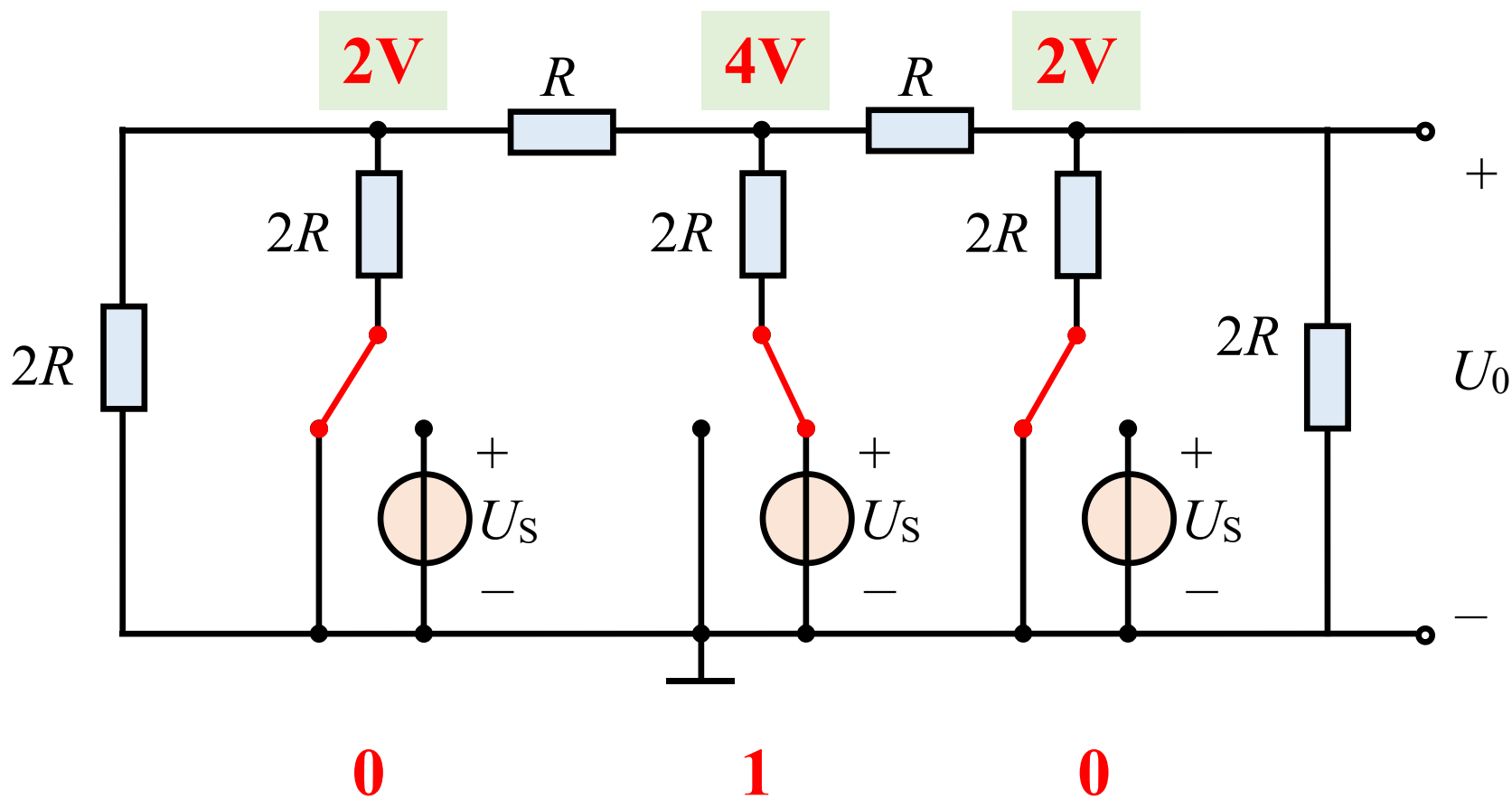
## 五、数模转换器的基本原理

1、开关位置对应001，其输出模拟量电压为1V。



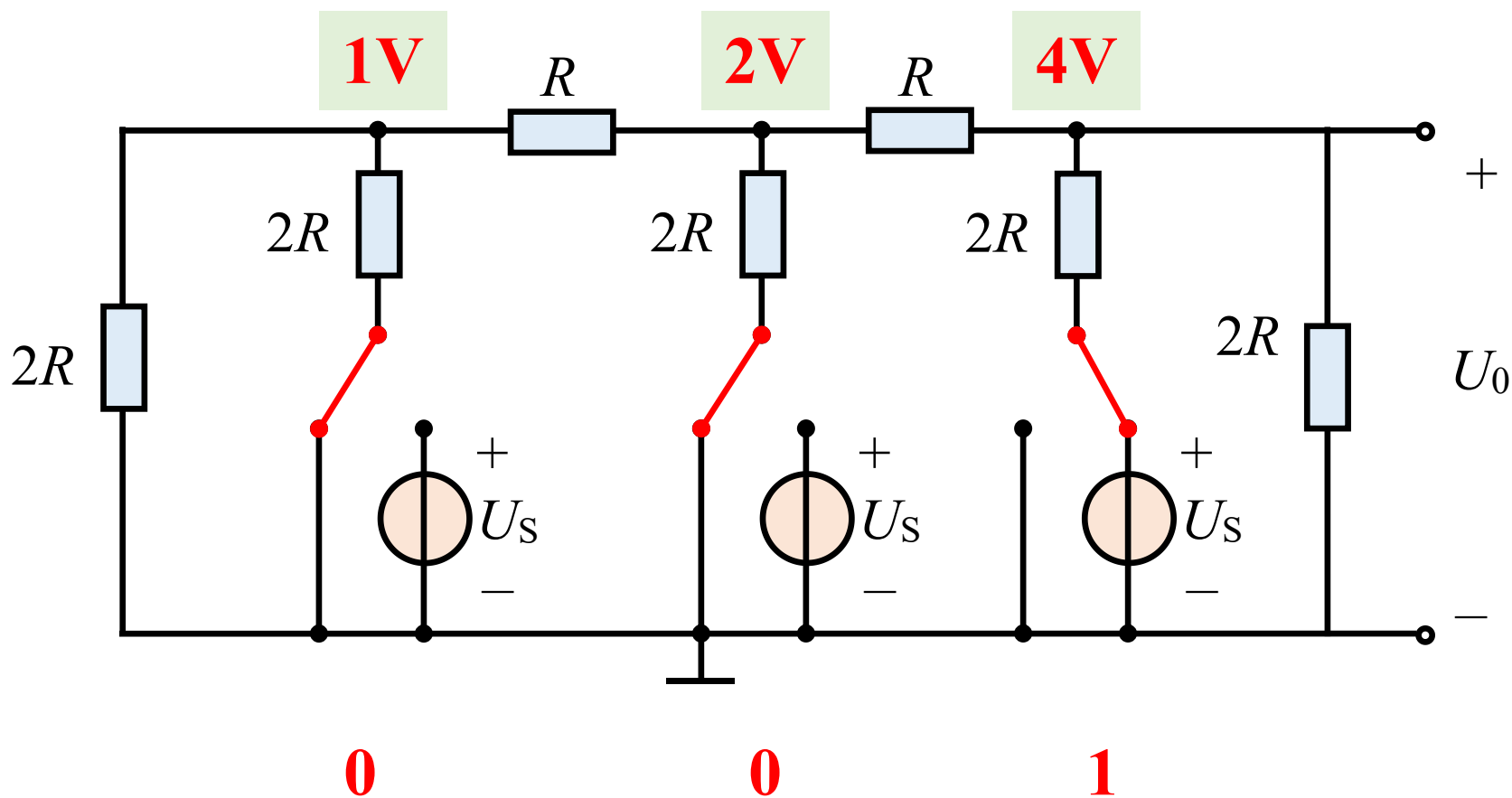
## 五、数模转换器的基本原理

2、开关位置对应010，其输出模拟量电压为2V。



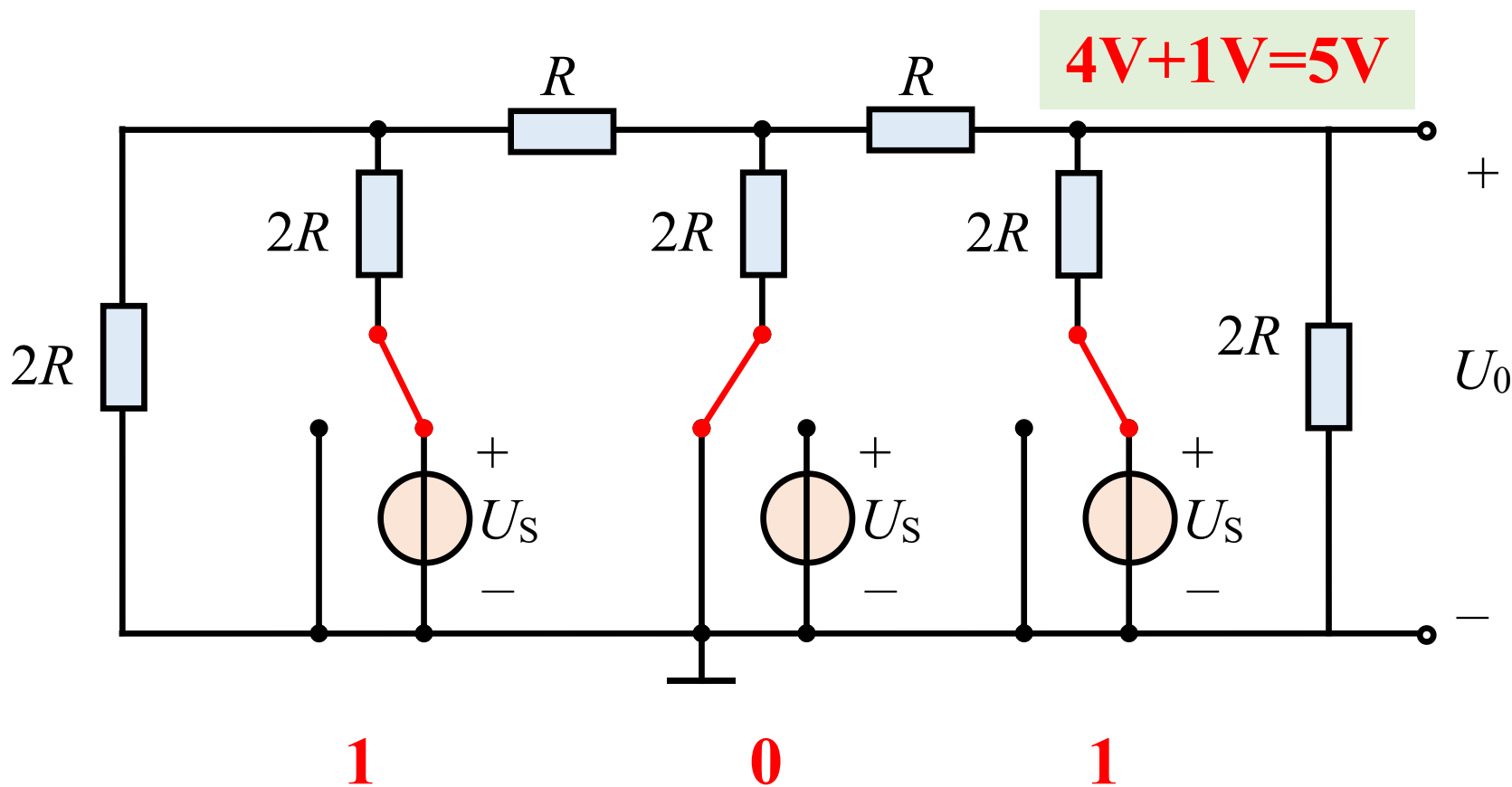
## 五、数模转换器的基本原理

3、开关位置对应100，其输出模拟量电压为4V。



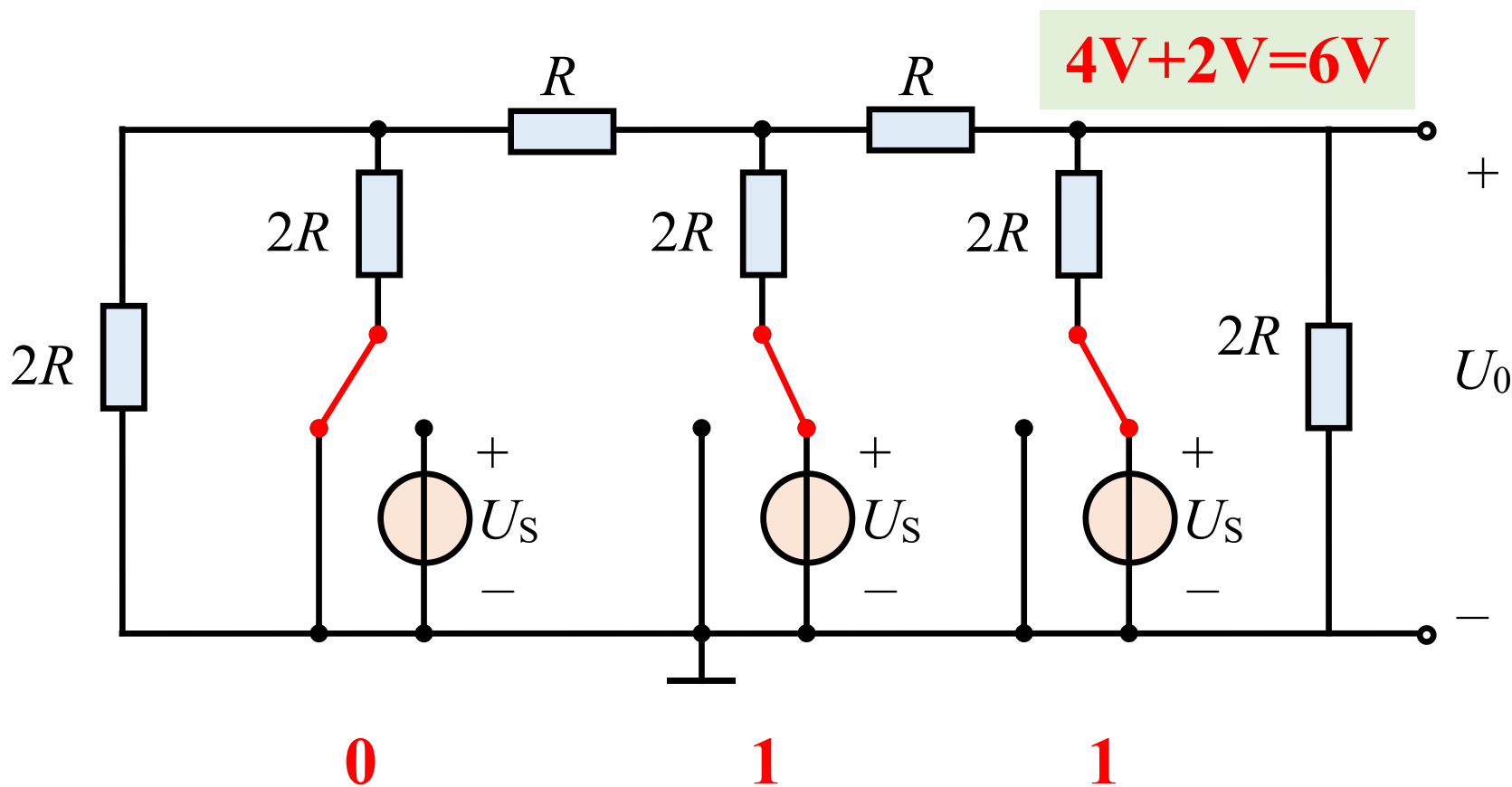
## 五、数模转换器的基本原理

开关位置对应101，用叠加定理可求得，其输出模拟量电压为5V。

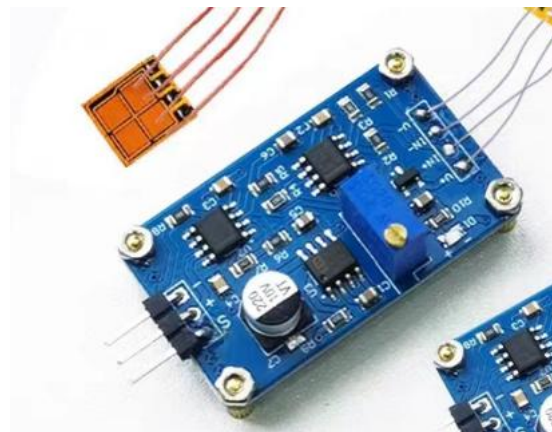
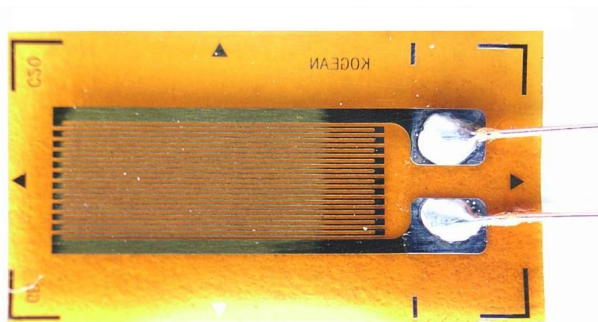


## 五、数模转换器的基本原理

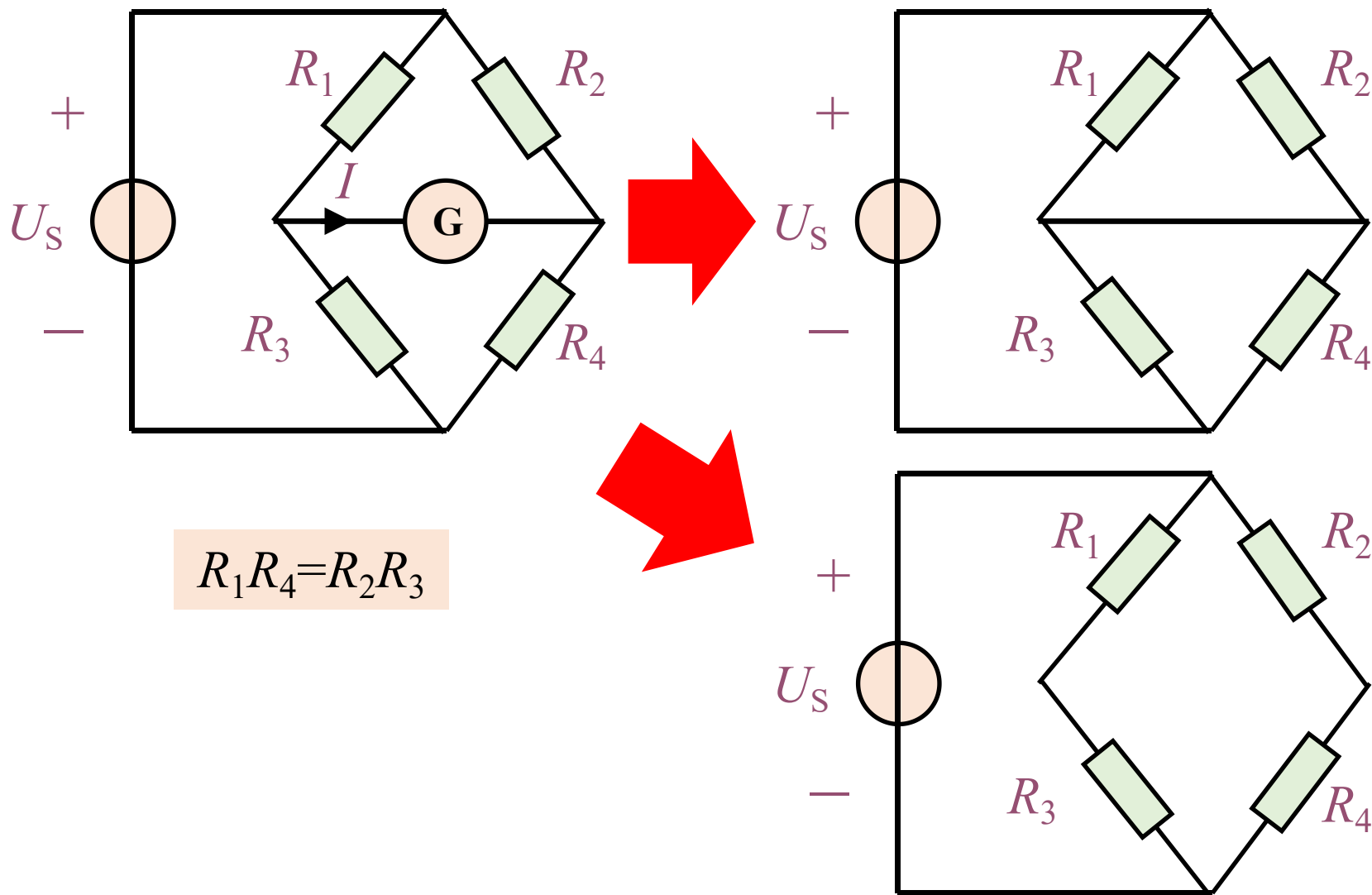
开关位置对应110，用叠加定理可求得，其输出模拟量电压为6V。



# 六、置换定理



## 六、置换定理

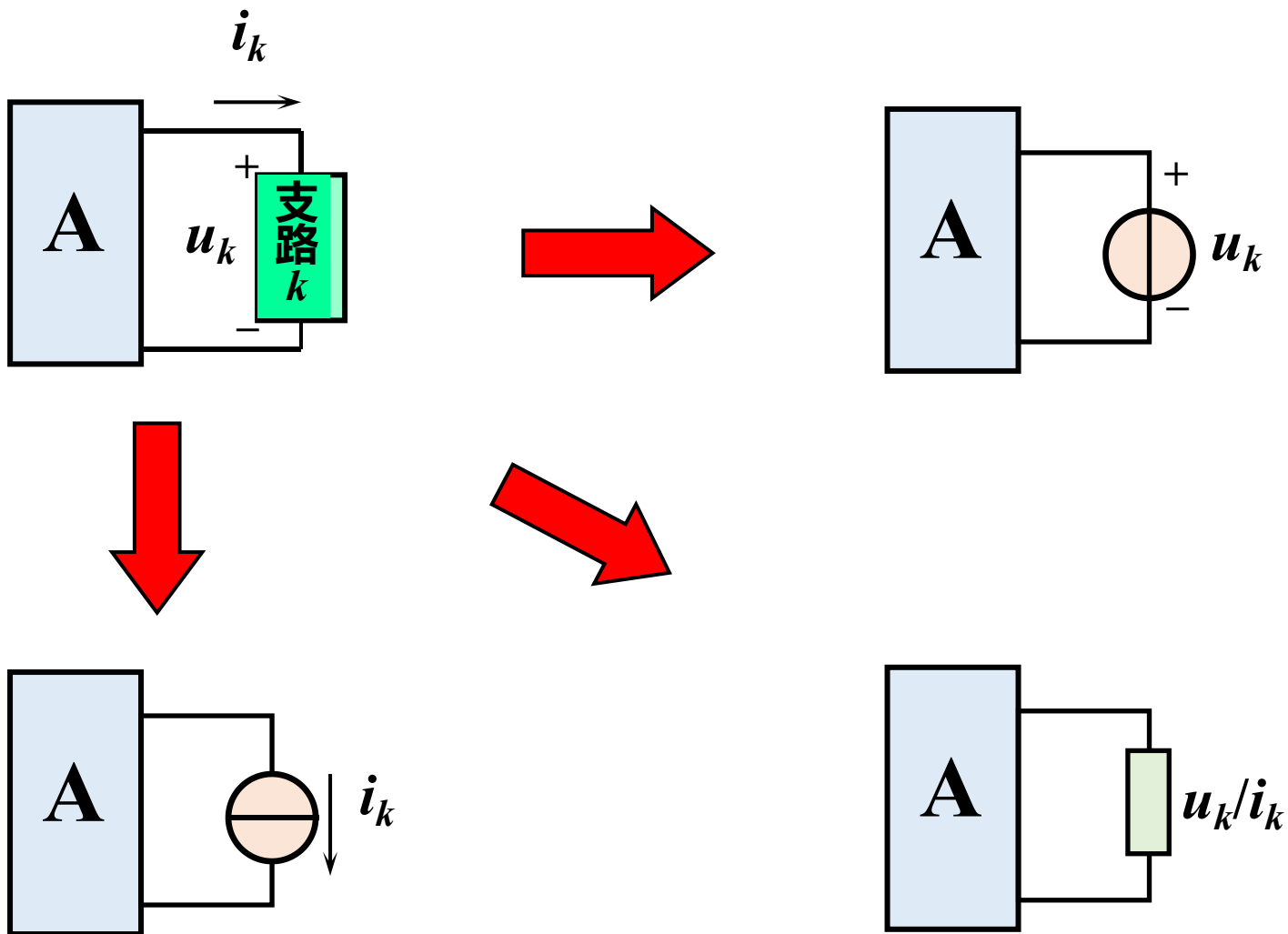


## 六、置换定理

1、定理内容：在给定的任一网络中（**线性与否、时变与否均可**），一个已知电压可用一个**理想电压源**去置换，一个已知电流可用一个**理想电流源**去置换，当某条支路电压 $u_k$ 与电流 $i_k$ 都已知时，可用一个**电阻** $R = u_k / i_k$ 去置换，无论哪一种置换，对网络中其余电压电流都不发生影响。

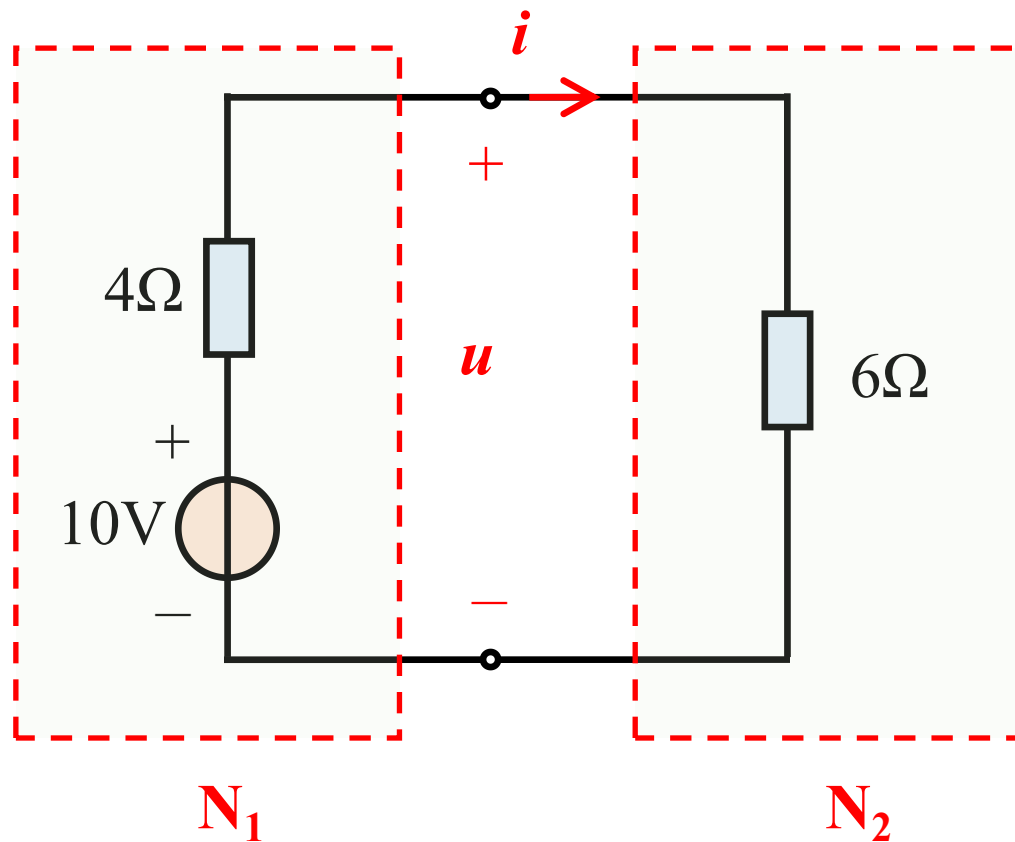


## 六、置换定理

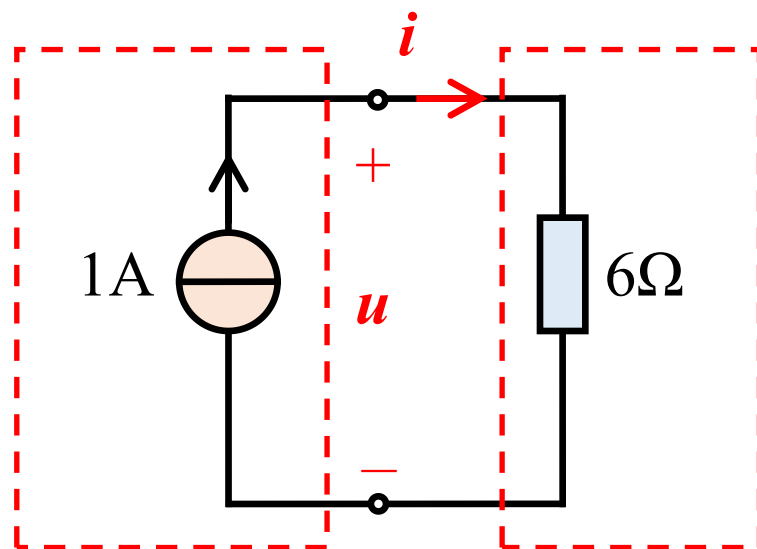
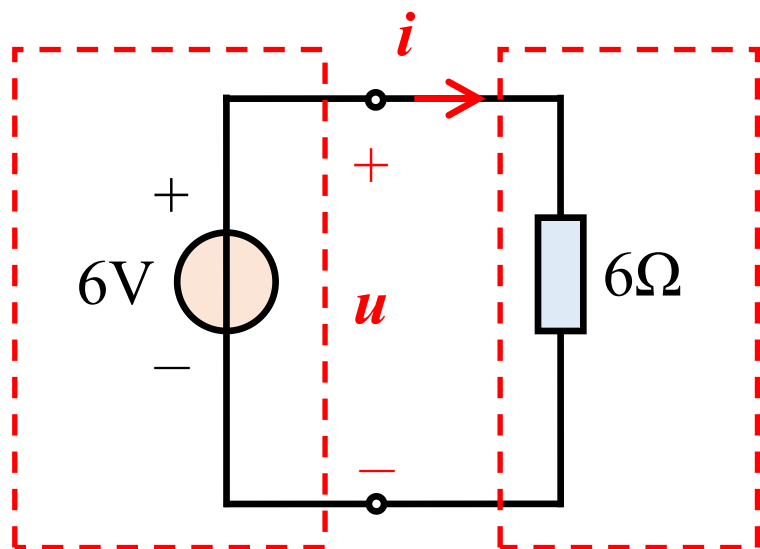


## 六、置换定理

电路结构如图所示，其中 $N_1$ 由10V电压源和 $4\Omega$ 电阻串联组成，试问 $N_1$ 能否用结构更为简单的电路代替而保持 $N_2$ 的电压、电流不变？



## 六、置换定理



对 $N_2$ 来说，外接 $N_1$ ， $N_1'$ ， $N_1''$ 并无差别。

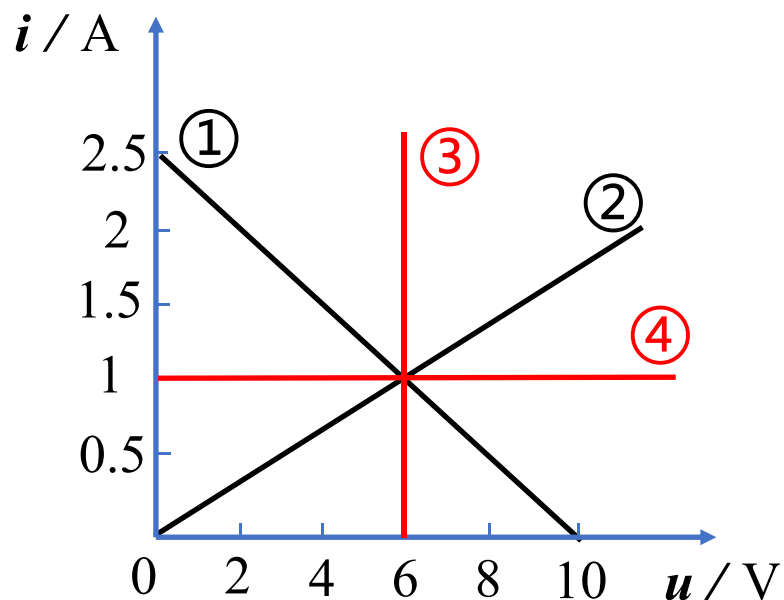
## 六、置换定理

$N_1$  的VCR:  $u = 10 - 4i$

$N_1'$  的VCR:  $u = 6$

$N_1''$  的VCR:  $i = 1$

$N_2$  的VCR:  $u = 6i$



基于“相同工作点”  
的等效替换

# 六、置换定理

## 2、置换定理的适用条件：

- 1) 替代定理适用于线性、非线性电路、定常和时变电路；
- 2) 被置换支路的电压、电流有唯一性，且被置换支路与外电路无耦合；
- 3) 未被替代支路的相互连接关系及参数不能改变；
- 4) 替代后，由于电路已经改变，不能进行等效转换求等效电阻等。

## 六、置换定理

### 3、置换定理应用步骤：

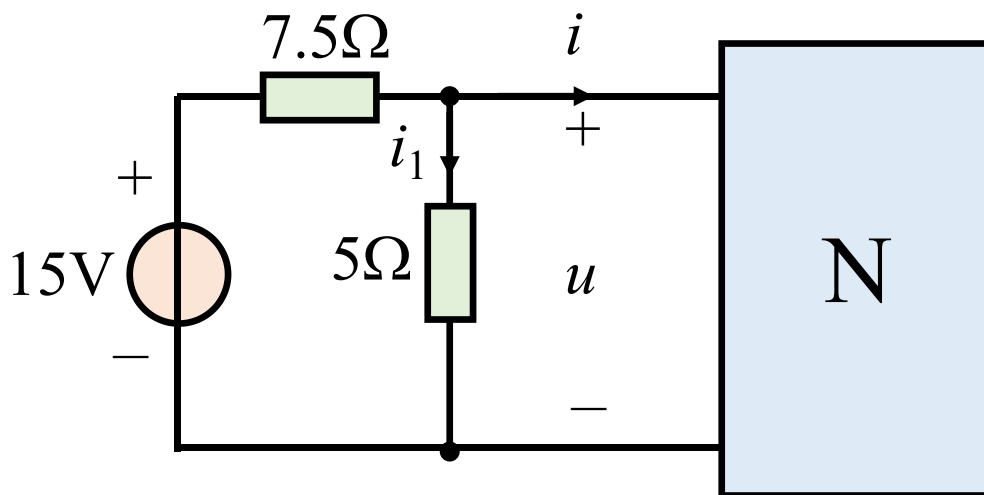
- ① 将给定大网络划分为两个单口网络 $N_1$ 和 $N_2$ ；
- ② 分别求出 $N_1$ 和 $N_2$ 的VCR；
- ③ 联立求解两者的VCR，可得 $N_1$ 和 $N_2$ 端口上的电压和电流；
- ④ 根据 $N_1$ 和 $N_2$ 端口上的电压和电流，用置换定理分别求解 $N_1$ 和 $N_2$ 内部各支路上的电压和电流。

★凡治众如治寡，分数是也；斗众如斗寡，形名是也。

——《孙子兵法·兵势篇》

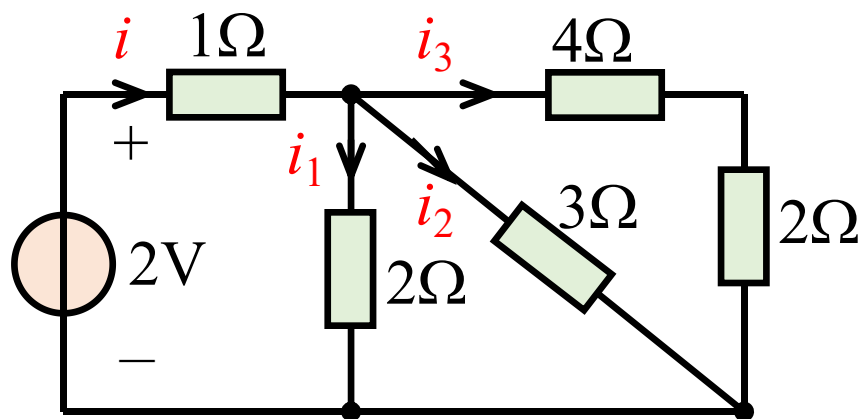
## 六、置换定理

**例：** 已知N的VCR为：  $u=i+2$ ，求  $i_1$ 。

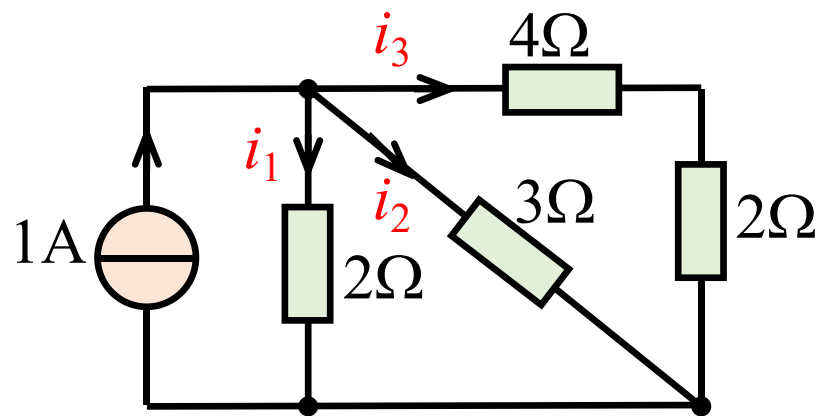


## 七、置换定理应用于分析电路

**例：** 求各支路上的电流。



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

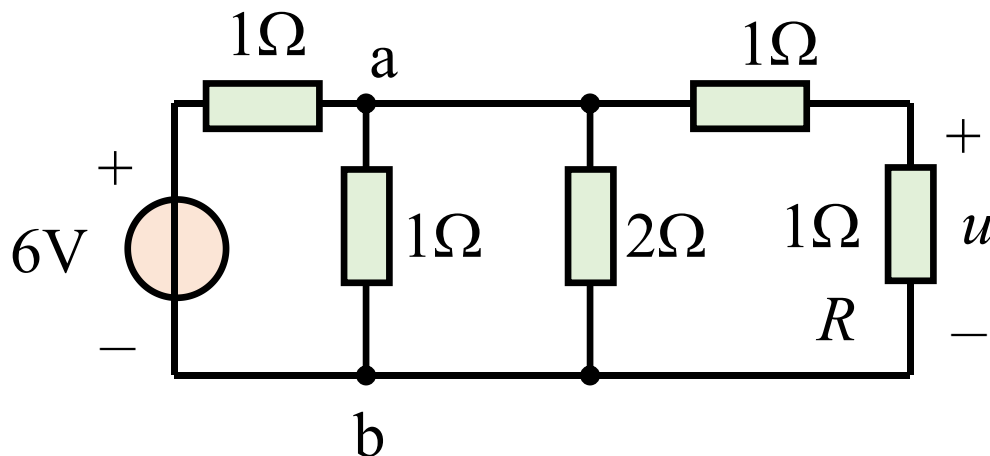


$$i_1=0.5\text{A}$$

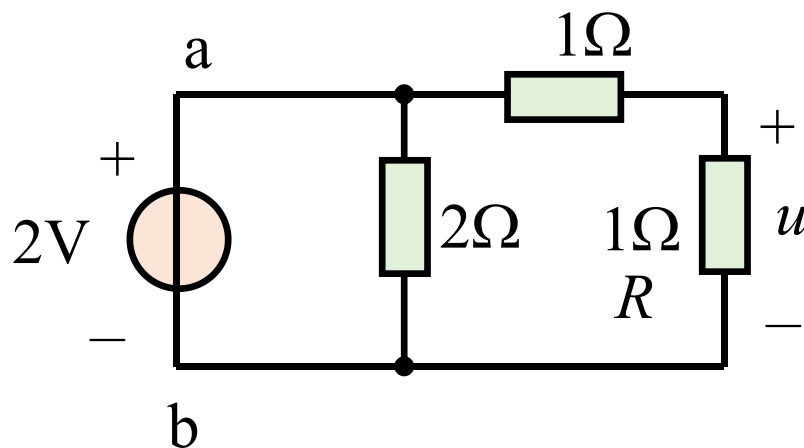


## 八、置换定理与等效的区别

例：求  $u$ 。

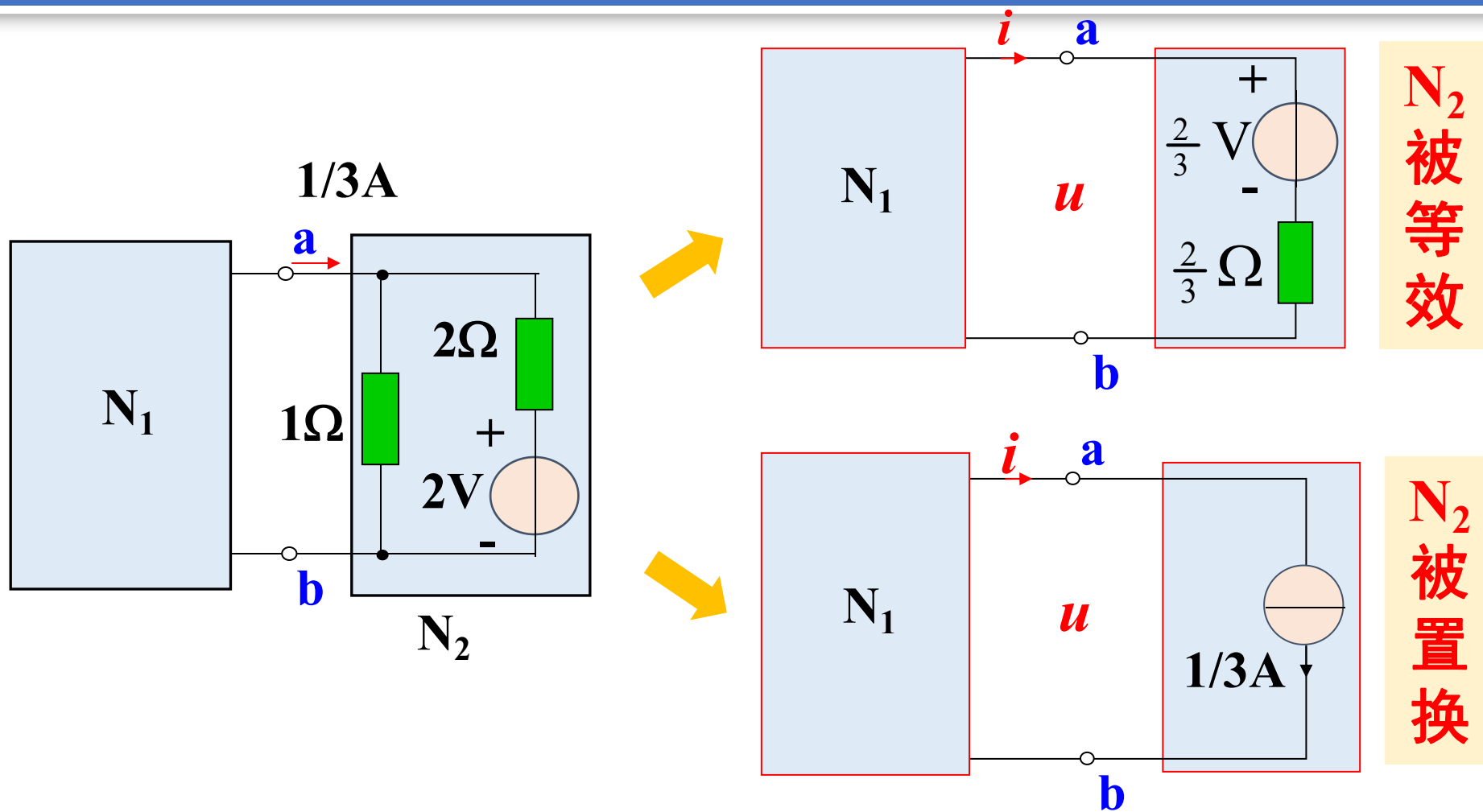


$$u_{ab} = 2V$$



$$u = 1V$$

# 八、置换定理与等效的区别



注意：置换不同于等效，它只适用于特定的电路，而等效具有一般性，与外电路无关。

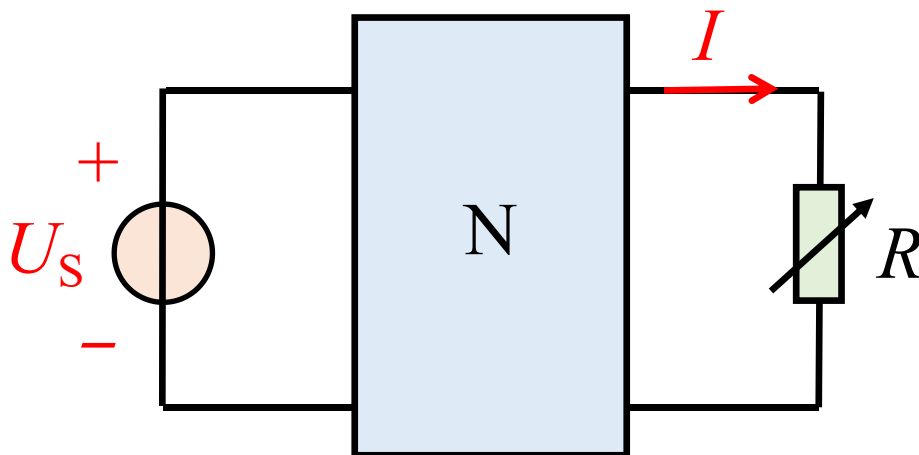
# 思考讨论

图中，N为无源线性电阻网络。已知：

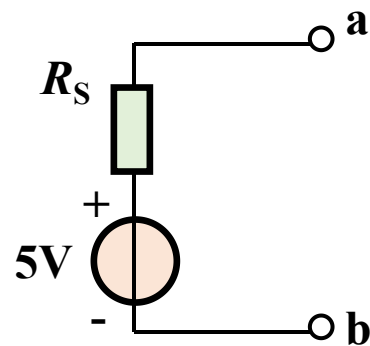
当 $U_S=10\text{V}$ 、 $R=0$ 时， $I=2\text{A}$ ；

当 $U_S=20\text{V}$ 、 $R=4\Omega$ 时， $I=1\text{A}$ 。

求 $U_S=20\text{V}$ 、 $R=6\Omega$ 时， $I=?$



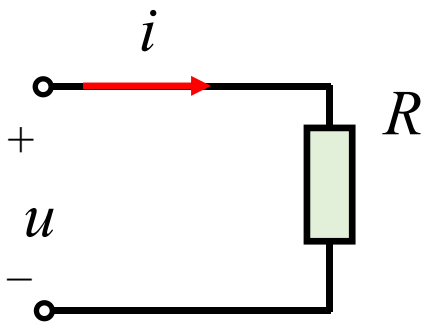
# 回顾&引入



# 回顾&引入

## 回顾——等效二端网络

不含独立源的二端网络（可含电阻和受控源）的VCR总可表示为 $u=Ri$ 的形式，等效为：



含独立源的二端网络的VCR可表示为 $u=Ri+u_{oc}$ 的形式，等效为：



# 第四单元 电路定理

§ 3-1 线性电路的比例性 网络函数

§ 3-2 叠加原理

§ 3-3 叠加方法与功率计算

§ 3-4 数模转换器的基本原理

§ 4-3 单口网络的置换——置换定理

§ 4-6 戴维南定理

§ 4-7 诺顿定理

§ 4-8 最大功率传递定理

# 内容目录

- 一、戴维南定理
- 二、用戴维南定理求等效电路
- 三、戴维南等效的应用
- 四、诺顿定理
- 五、诺顿定理举例
- 六、戴维南等效电路与诺顿等效电路的关系

# 一、戴维南定理

戴维南（1857-1926）法国**电报工**  
**程师**。

1878年他加入了电信工程军团，最初的任务为架设地底远距离的电报线。1882年成为综合高等学院的讲师，让他对电路测量问题有了**浓厚的兴趣**。在研究了基尔霍夫电路定律以及欧姆定律后，他发现了著名的戴维南定理，用于计算更为复杂电路上的电流，于1883年提出戴维南定理。



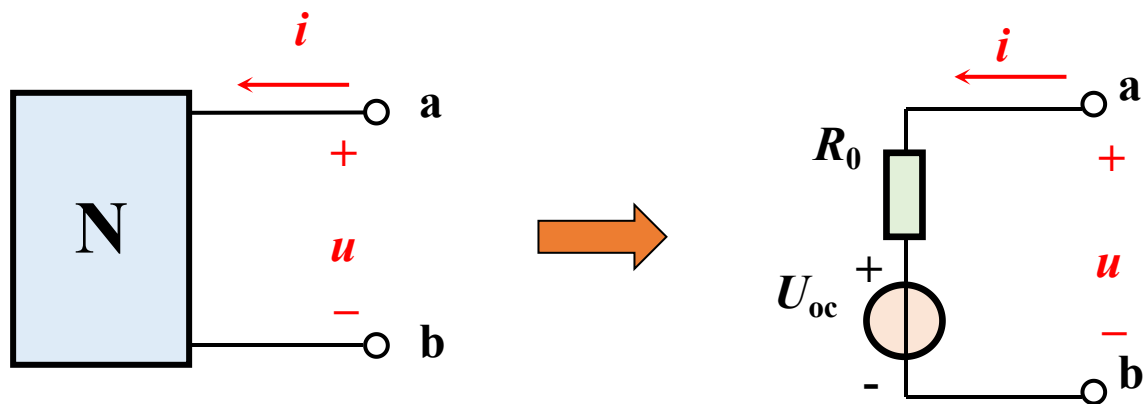
★我们推进理论创新是实践基础上的理论创新，而不是坐在象牙塔内的空想，必须坚持在实践中发现真理、发展真理，用实践来实现真理、检验真理。



# 一、戴维南定理

## 1、定理内容：

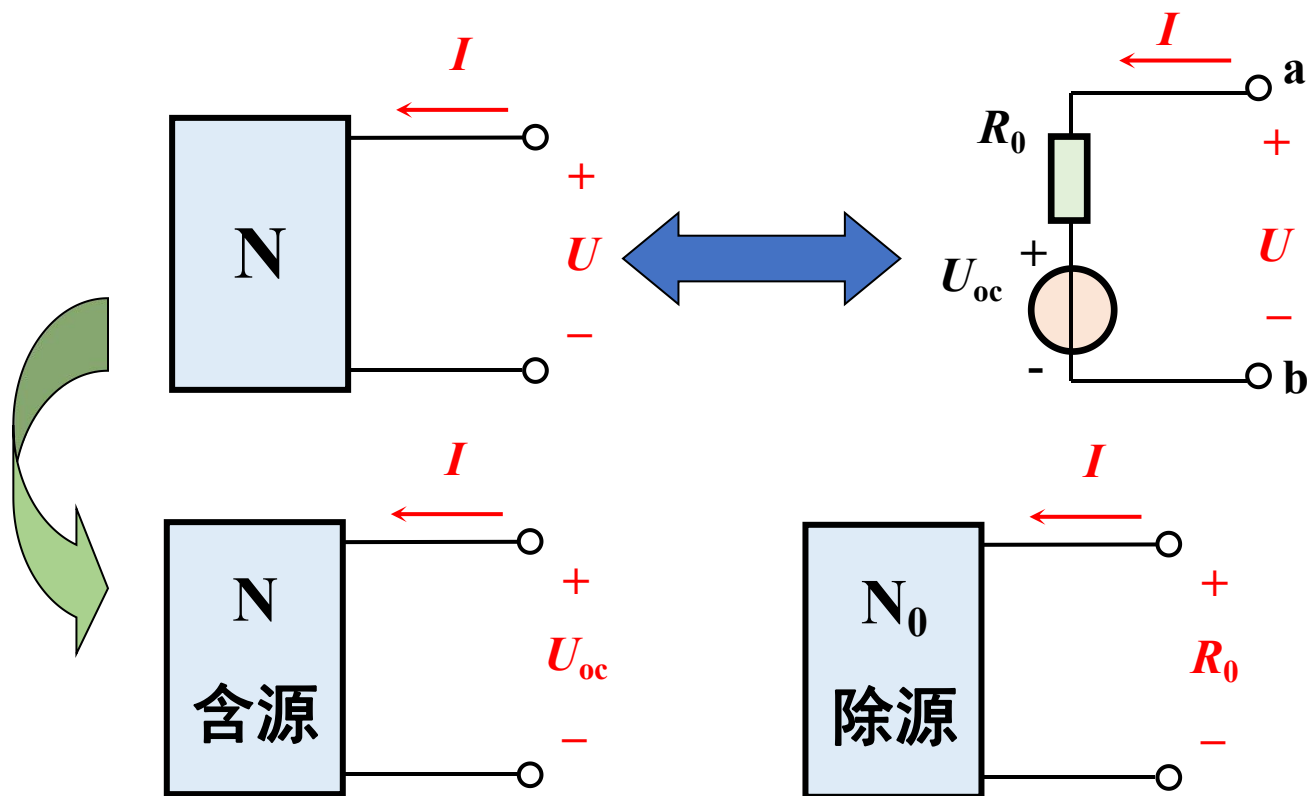
任何一个含有**独立电源**、**线性电阻**和**线性受控源**的单口网络，对外电路来说，可以用一个电压源 $U_{oc}$ 和电阻 $R_0$ 的串联组合来等效替代；此电压源的电压等于外电路断开时端口处的开路电压，而电阻等于单口网络中全部独立电源置零后的端口等效电阻。



# 一、戴维南定理

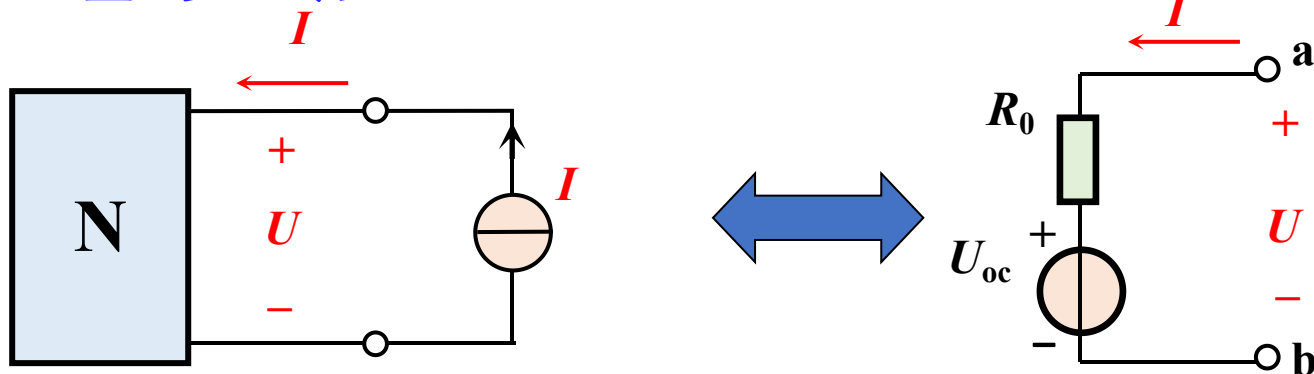
$U_{oc}$  为该网络的**开路电压**；

$R_0$  为该网络全部独立源置零（除源）后的**等效电阻**。



# 一、戴维南定理

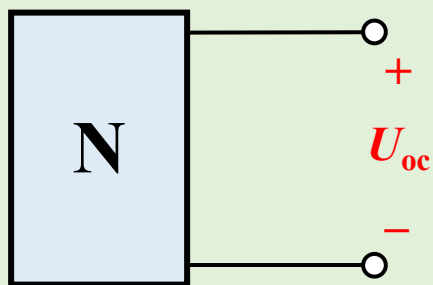
## 2、定理的证明：



叠加定理求  $U$

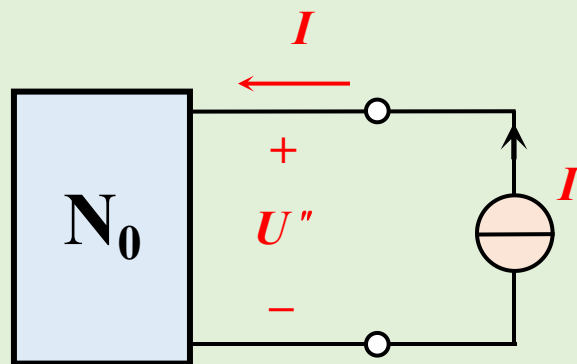
$$U = U' + U'' = U_{oc} + R_0 I$$

内部独立源单独作用



$$U' = U_{oc}$$

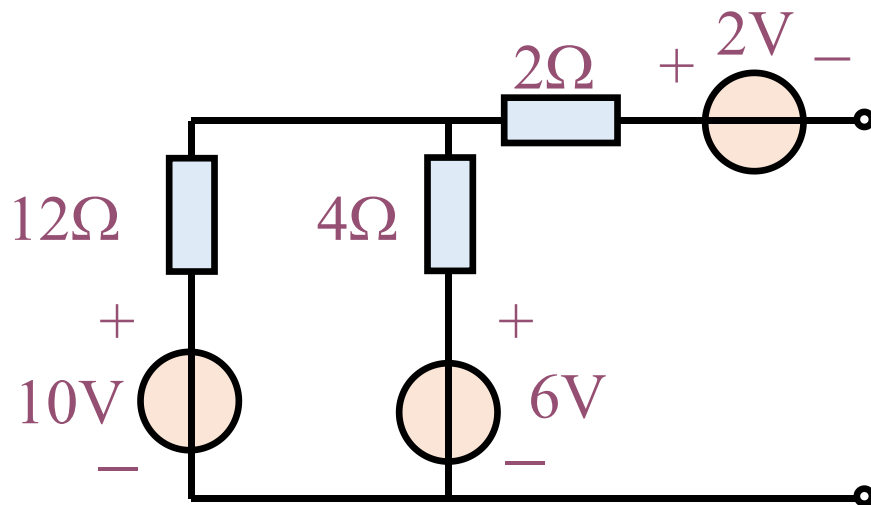
外部电流源单独作用



$$U'' = R_0 I$$

# 一、戴维南定理

**例：**求下面电路的戴维南等效电路。



# 一、戴维南定理

## 3、戴维南等效电路的求法：

①求VCR得等效电路，关键在于求VCR（外加电源法）；

②对N化简，得到戴维南等效电路（简单电路，不含受控源）；

③用戴维南定理求等效电路，关键在于求 $U_{oc}$ 和 $R_0$ ；

④实验测量。

# 一、戴维南定理

## 4、戴维南等效电路的实验测量：

(1) **开路电压：** 有源二端网络两端的开路电压。

(2) **等效电阻：**

①直接测量法： 把有源二端网络化成无源网络，端口的等效电阻。

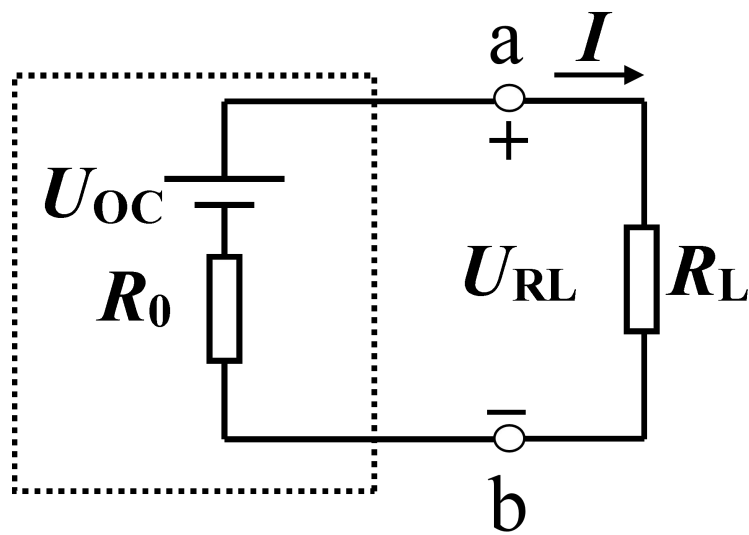
②开路电压、短路电流测量法： 在含源二端网络输出端开路时，用电压表直接测其输出端的开路电压  $U_{OC}$ ，然后再将其输出端短路，测其短路电流  $I_{SC}$ ，则等效电阻为： $R_0 = U_{OC} / I_{SC}$

③半电压测量法

# 一、戴维南定理

## 半电压测量法

如图所示，调节负载电阻 $R_L$ 的大小，当负载电压等于被测含源二端网络开路电压的一半时，负载电阻的值即为被测含源二端网络的等效电阻值，即 $R_0=R_L$ 。



# 一、戴维南定理

## 思考讨论：

实验测量戴维南等效电路等效电阻时，直接测量法、开路电压短路电流法和半电压法各有什么适用场景？



## 二、用戴维南定理求等效电路

**开路电压：** 可用网络分析中的任何一种方法

**等效电阻：**

✓ ① 对 $N_0$ 化简，即进行电阻串并联。

✓ ② 用外加电源法求VCR得 $u= Ri$ ,

则 $R = u/i = \text{端口电压} / \text{端口电流}$

关键：  
N内部  
电源置  
零

✓ ③ 开路电压短路电流法：

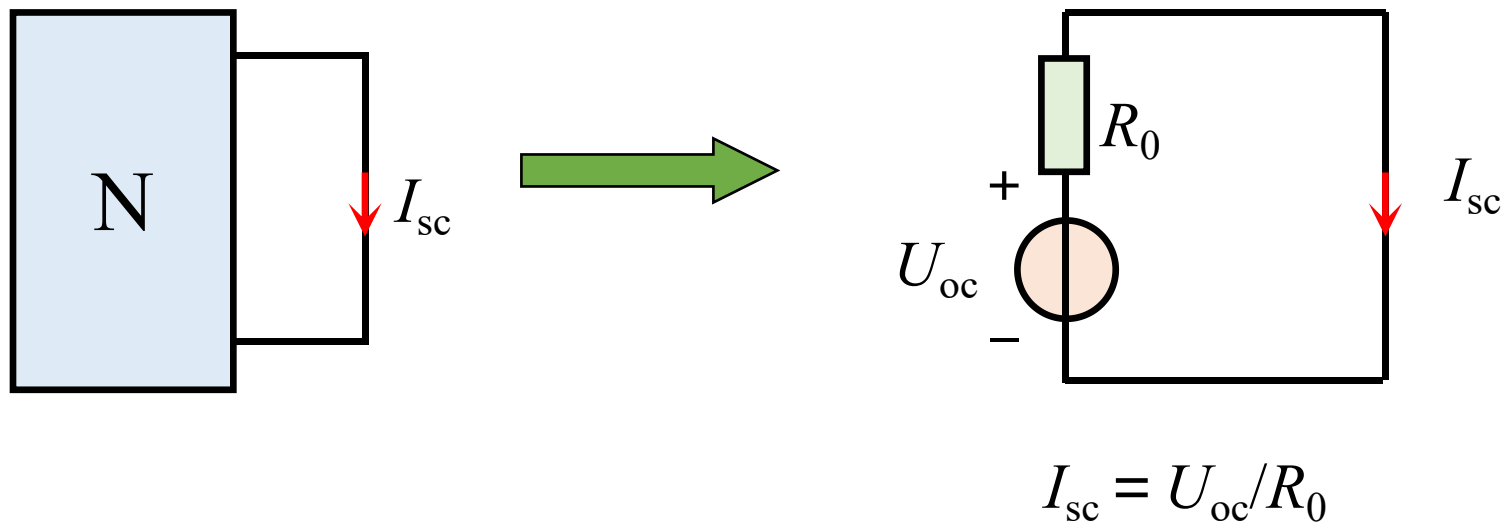
$R_0 = U_{oc} / I_{sc}$  ,  $I_{sc}$  为短路电流

关键：  
N内部  
电源不  
置零

## 二、用戴维南定理求等效电路

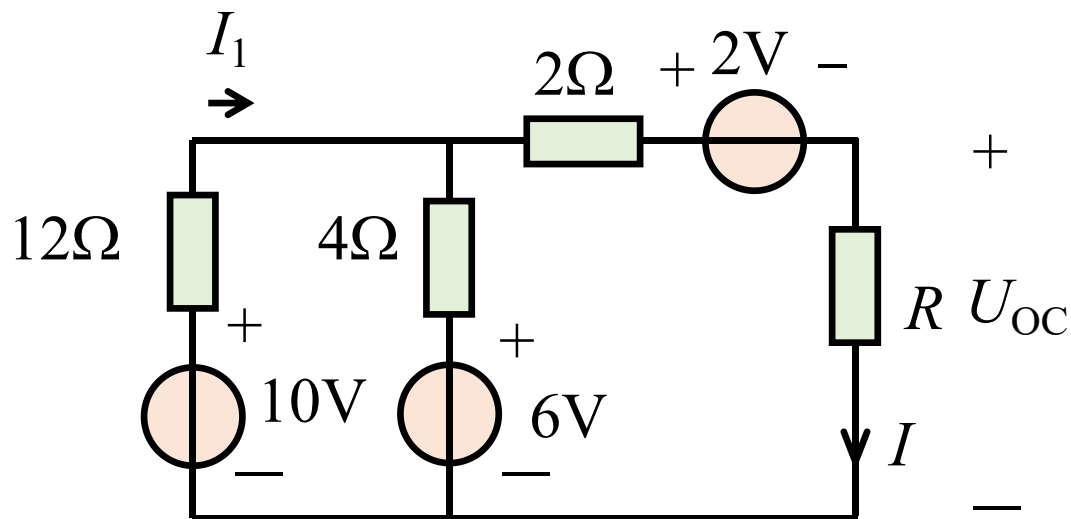
思考：

用开路电压短路电流法求等效电阻时，开路电压和短路电流的参考方向如何设定？



## 二、用戴维南定理求等效电路

**例：**当 $R=5\Omega$ 时，求电流 $I$ ；  
当 $R=10\Omega$ ，求 $I$ 。

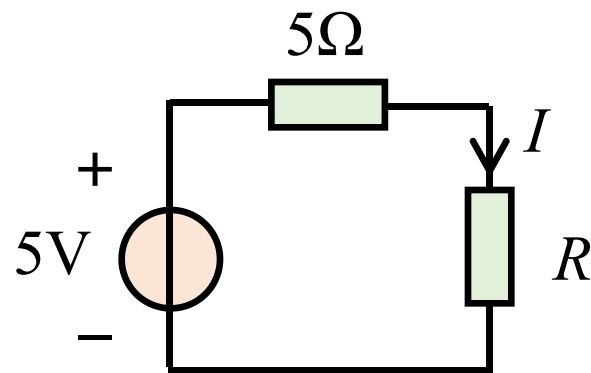


**解：**

$$16I_1 + 6 - 10 = 0 \Rightarrow I_1 = \frac{1}{4} \text{ A}$$

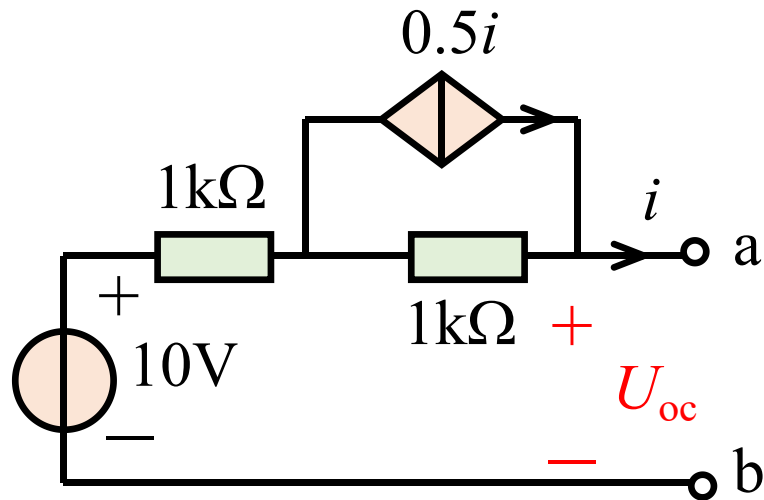
$$U_{oc} = -2 + 4I_1 + 6 \Rightarrow U_{oc} = 5 \text{ V}$$

$$R_0 = 2 + (12 // 4) = 5 \Omega$$

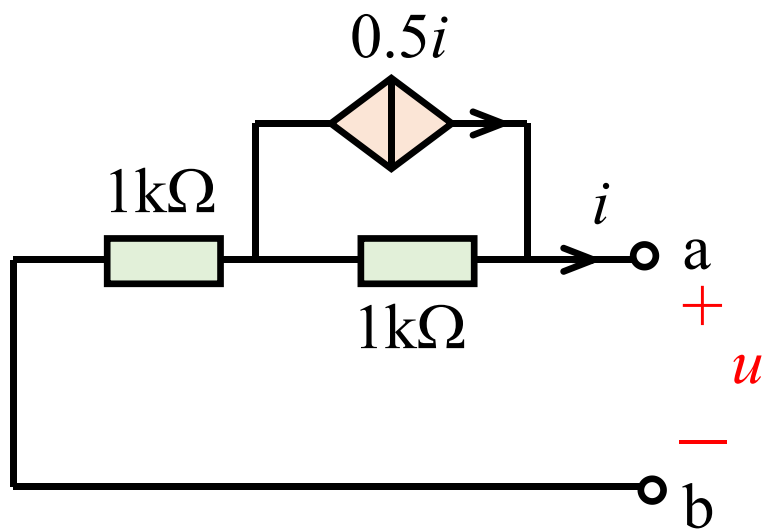


## 二、用戴维南定理求等效电路

例：求下图的戴维南等效电路



$$U_{oc} = 10V$$

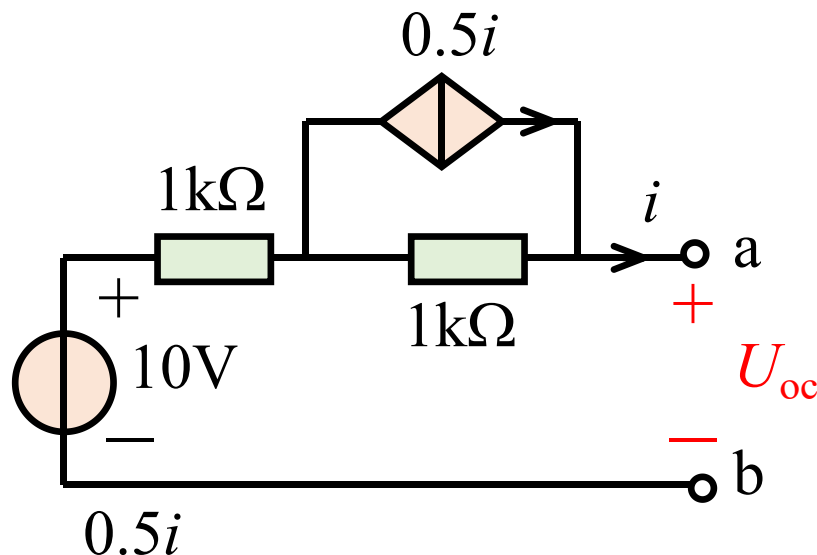


$$\begin{aligned} u &= -0.5i \times 1000 - i \times 1000 \\ &= -1500i \end{aligned}$$

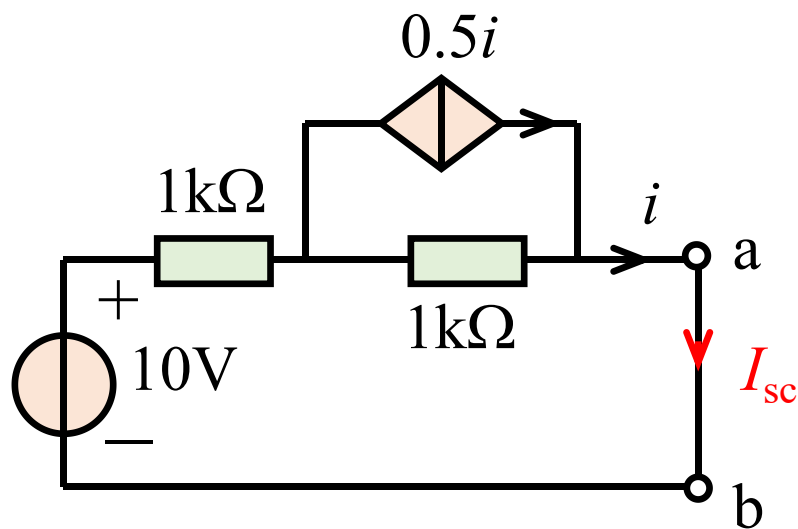
$$R_0 = 1.5k\Omega$$

## 二、用戴维南定理求等效电路

**例：**求下图的戴维南等效电路。



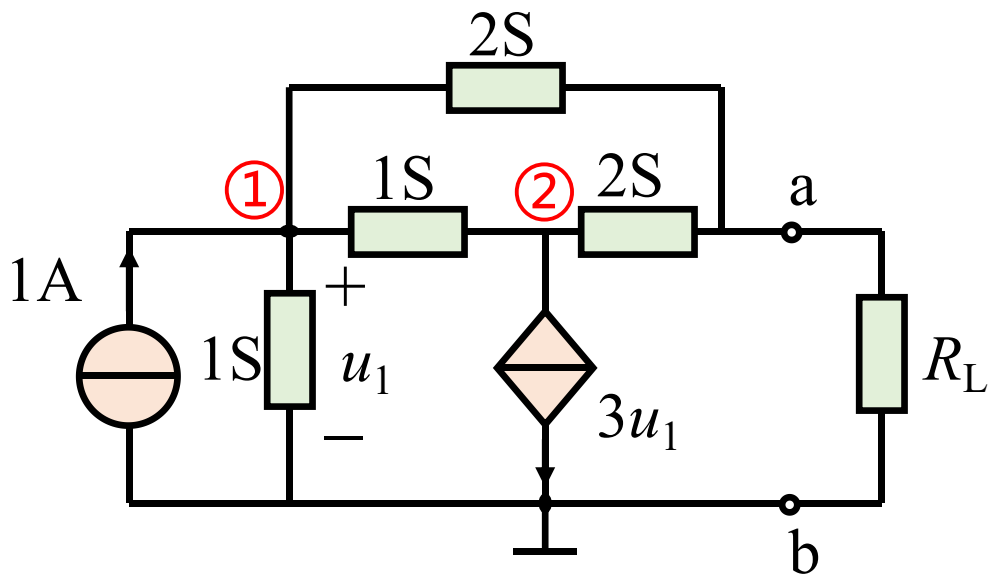
$$U_{oc} = 10V$$



用戴维南定理时，控制量与被控制量必须放在同一个单口网络内（控制量可是端口上的电压或电流）。

## 二、用戴维南定理求等效电路

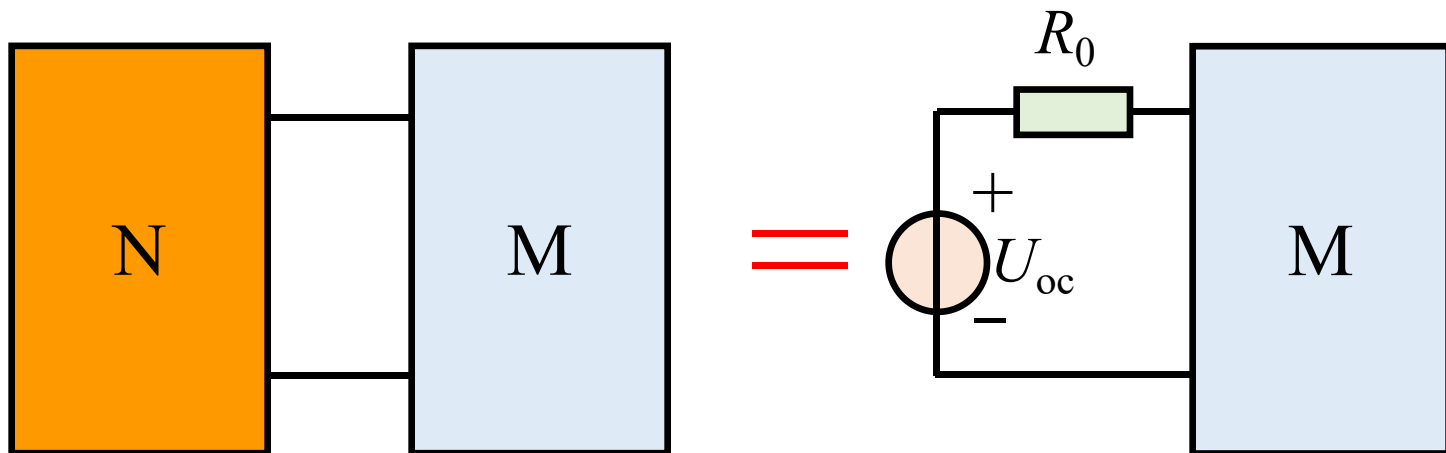
**思考讨论：**求ab左端的戴维南等效电路，用哪种方法简单。



用戴维南定理求等效肯定比用求VCR的方法求等效更快捷有效！  
不同电路不同对待！

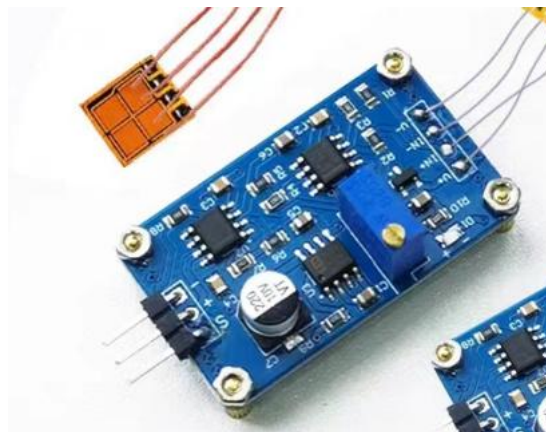
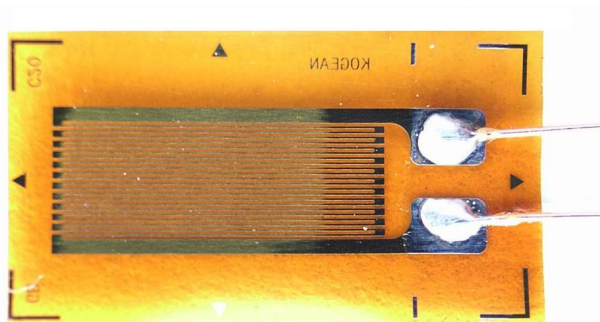
## 三、戴维南等效电路的应用

### (一) 用于简化电路的分析



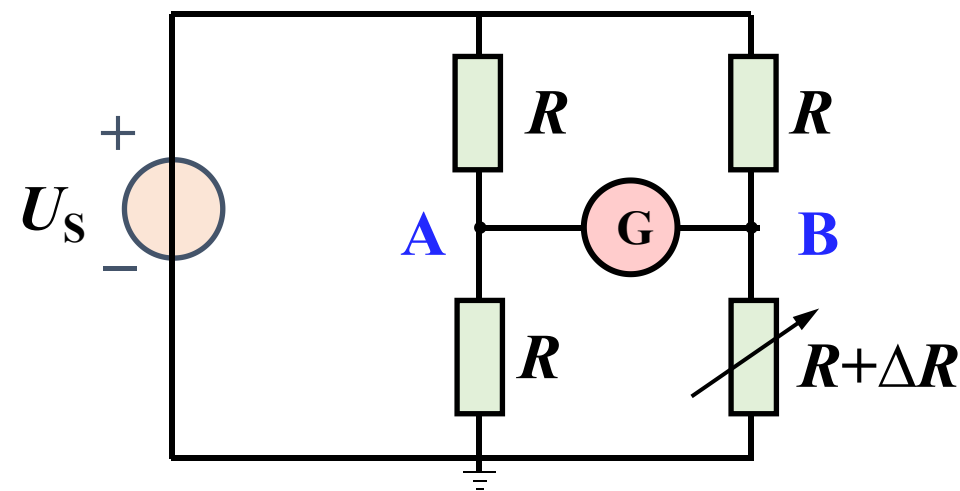
1. 等效隔离了负载对它的影响，负载变时，等效电路不变；
2. 单独求开路电压和等效电阻，有时为分析电路带来很大便利；
3. 求某一条支路电流或电压。

# 三、戴维南等效电路的应用

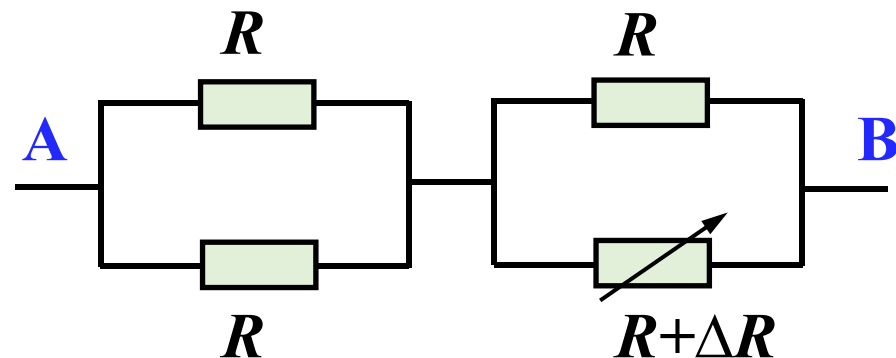




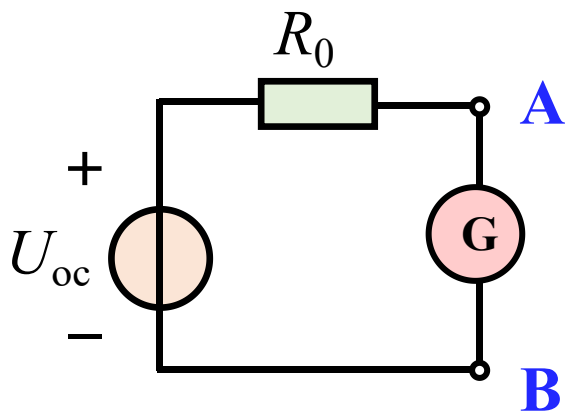
### 三、戴维南定理的应用



$$U_{oc} = \frac{U_s R}{2(2R + \Delta R)}$$

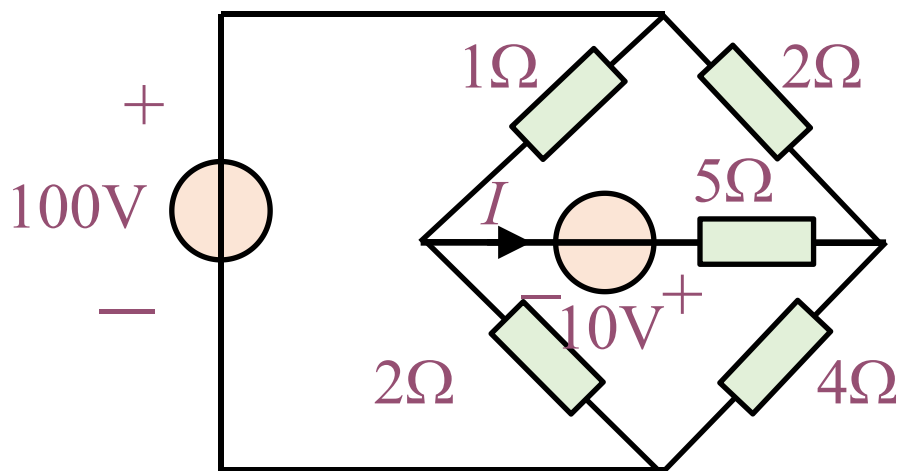
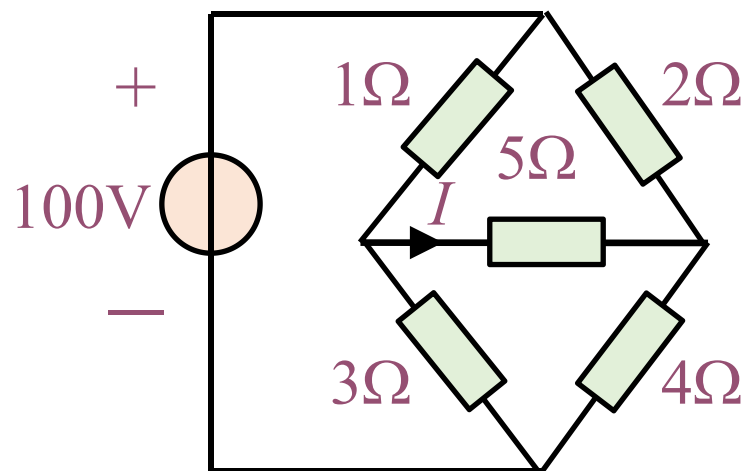
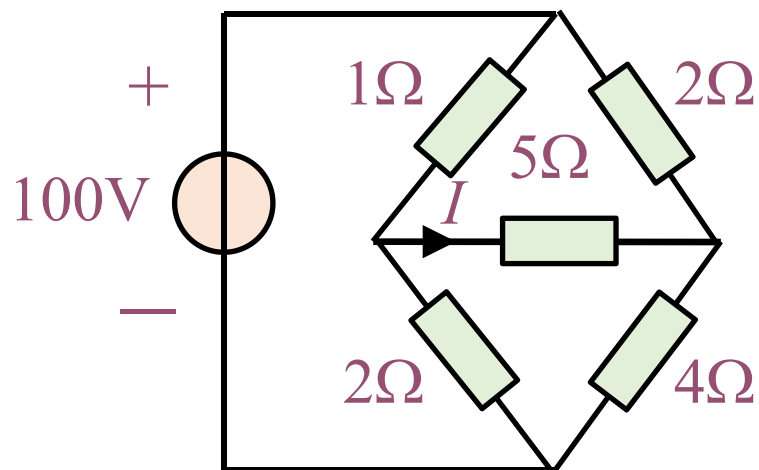


$$\begin{aligned} R_0 &= R // R + R // (R + \Delta R) \\ &= R + \frac{\Delta R}{2\left(2R + \frac{\Delta R}{R}\right)} \end{aligned}$$



$$I_G = \frac{U_{oc}}{R_0} = \frac{U_s}{4R + 3\Delta R}$$

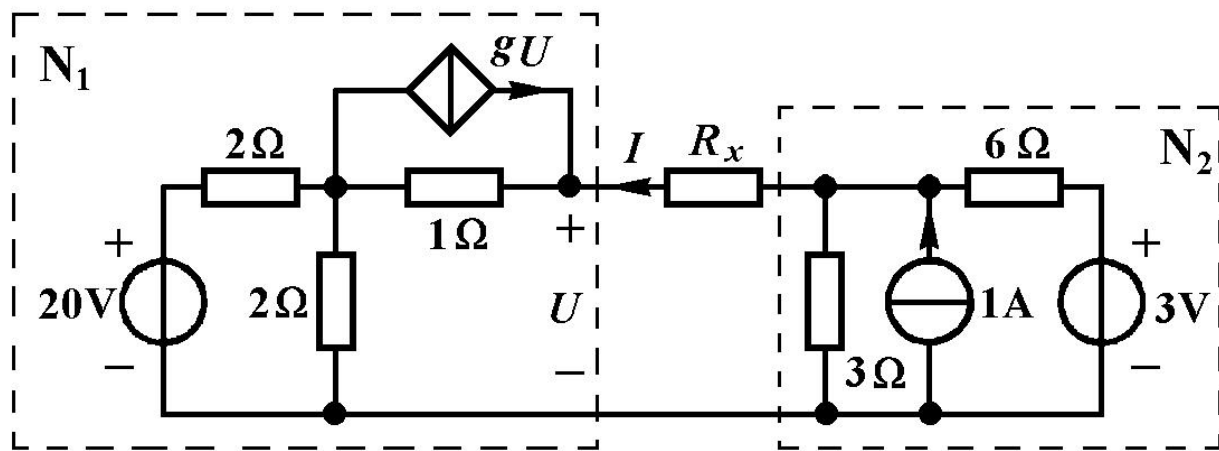
### 三、戴维南定理的应用



## 三、戴维南定理的应用

### (二) 有利于逐级分析

**例：**电路如图(a)所示，其中 $g=3\text{S}$ 。试求 $R_x$ 为何值时电流 $I=2\text{A}$ ，此时电压 $U$ 为何值？



凡治众如治寡，分数是也；斗众如斗寡，形名是也。

——《孙子兵法·兵势篇》

## 三、戴维南定理的应用

（三）当网络内部结构未知时，容易用实验方法得其等效电路，连接到其它电路时，不影响其它电路的分析

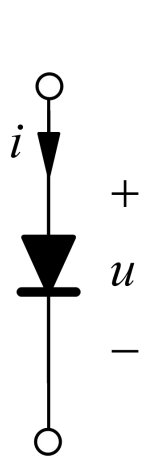
（四）求负载的最大功率（功率匹配问题）

——最大功率传输定理

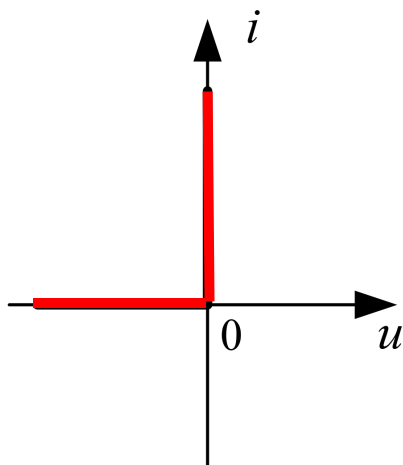
# 三、戴维南定理的应用

## (五) 分析含有非线性元件的电路

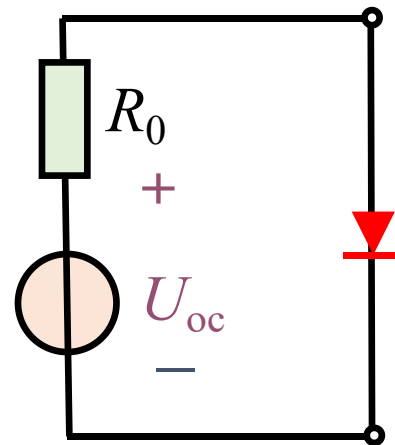
### 理想二极管——非线性电阻元件



(a)



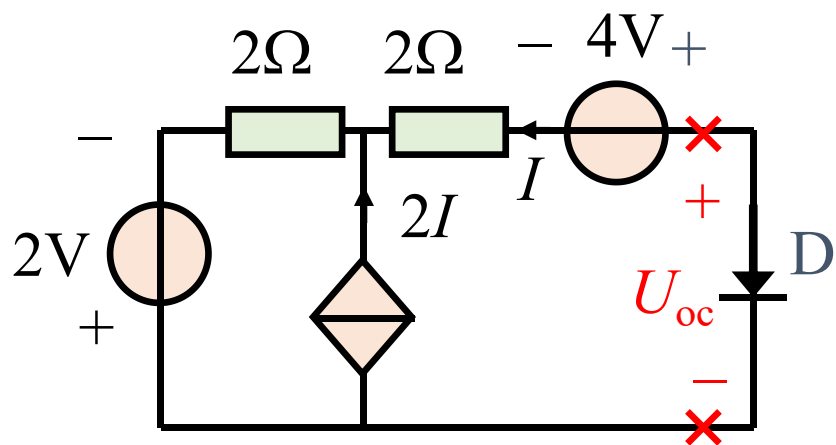
(b)



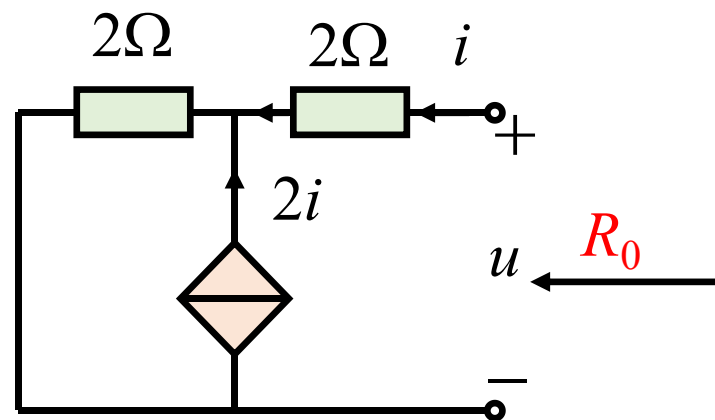
理想二极管具有**单向导电性**，正向偏置时，起短路作用，类似开关闭合，反向偏置时起开路作用，好比一个打开的开关。

### 三、戴维南定理的应用

例：求电流  $I$



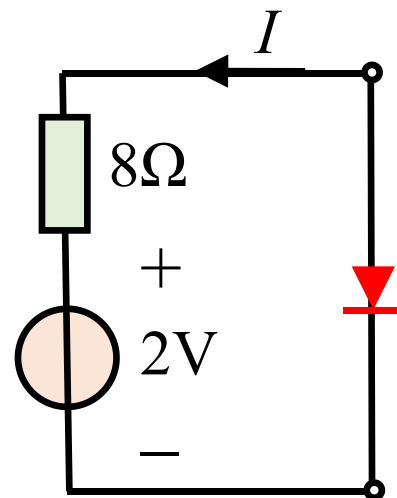
$$U_{oc} = 2V$$



$$R_0 = 8\Omega$$

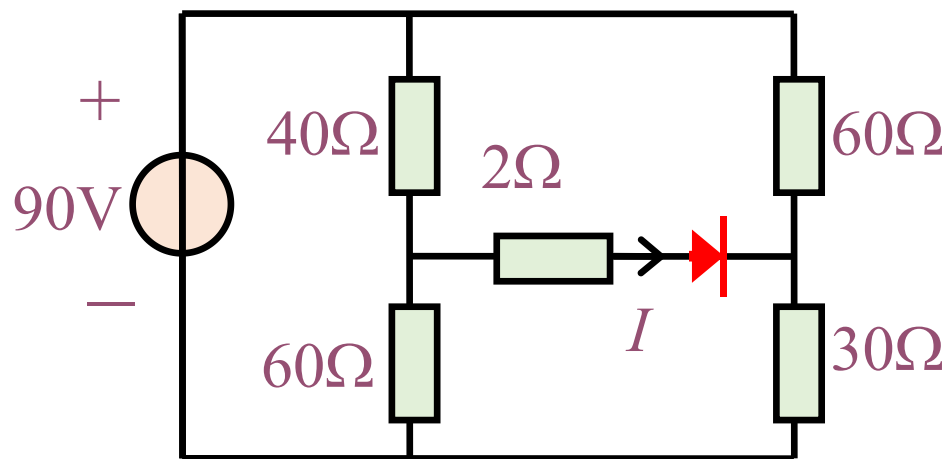
等效电路为：

$$I = -0.25A$$

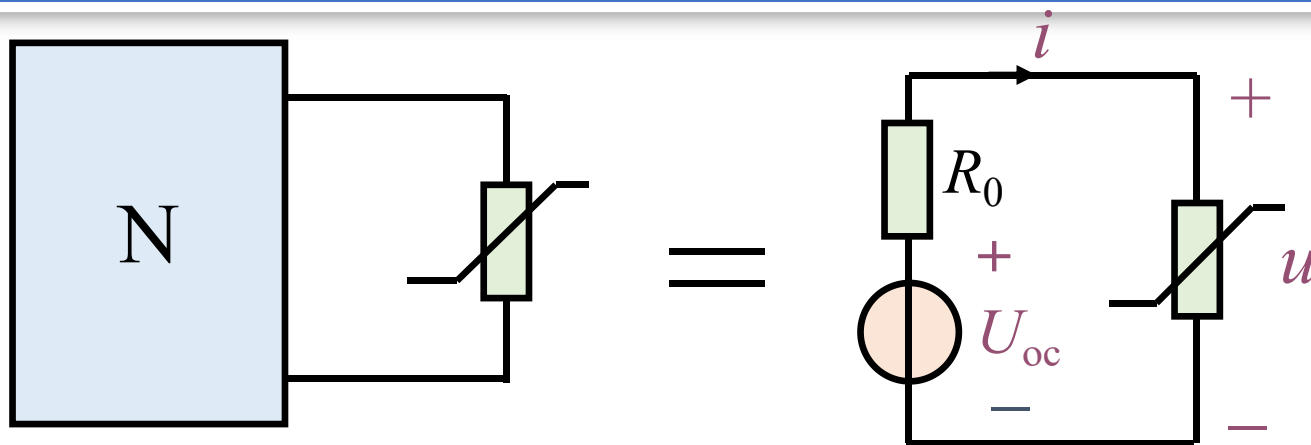


### 三、戴维南定理的应用

练习：求电流  $I$



### 三、戴维南定理的应用



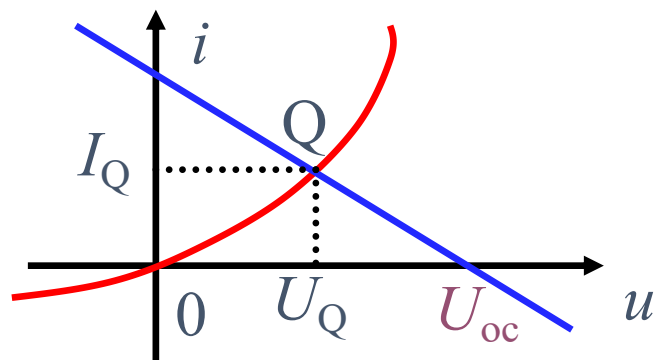
非线性电阻的VCR:  $u = f(i)$

$$\begin{cases} u = -R_0 I + U_{oc} \\ u = f(i) \end{cases}$$

联立求解得  $u$ 、 $i$

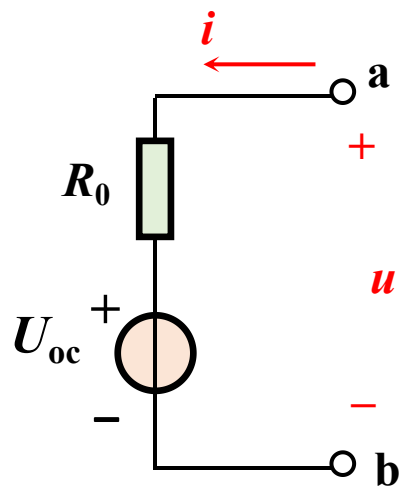
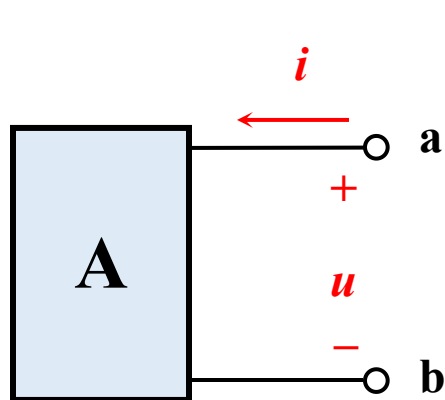
或用图像法:

$I_Q$  和  $U_Q$  即为非线性电阻  
上的电压和电流

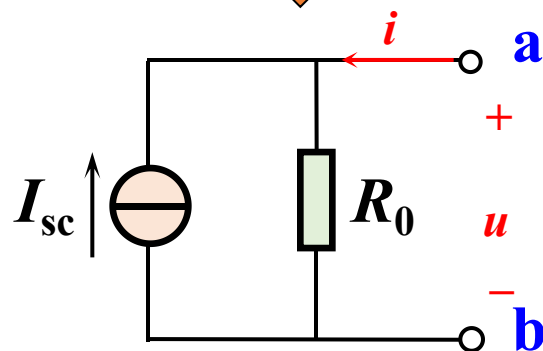




# 四、诺顿定理



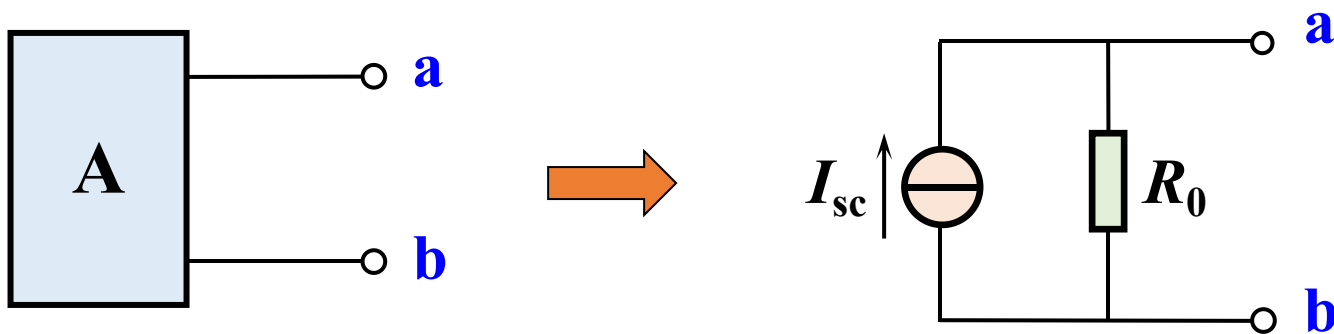
实际电源模型  
的相互转换



诺顿定理

## 四、诺顿定理

**定理内容：**任何**线性含源**单口网络N，对**外电路**而言，均可用一个**电流源并联电阻**来等效。其中，电流源的电流为N端口上的**短路电流**，并联电阻为二端网络的**除源等效电阻**。



诺顿等效电路可由戴维南等效电路经电源等效变换得到。但须指出，诺顿等效电路可独立进行证明。

## 四、诺顿定理



戴维南（1857-1926）  
1883年提出戴维南定理。



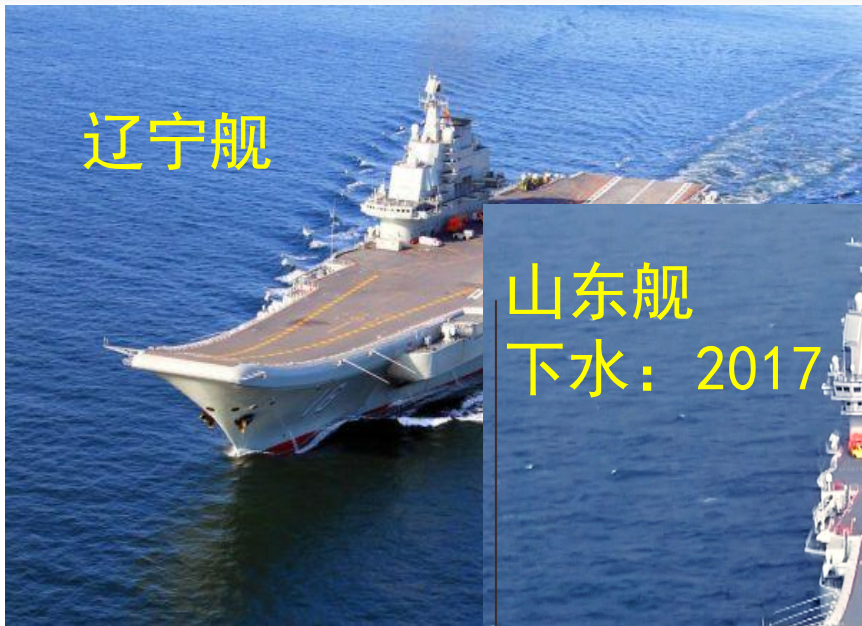
诺顿（1898-1983）于1926年贝尔实验室的一个技术报告中提出了戴维南定理的对偶定理——诺顿定理

两个定理的提出时间相隔43年之久（1883-1926）

★在科学上没有平坦的大道，只有不畏劳苦沿着陡峭山路攀登的人，才有希望达到光辉的顶点。

## 四、诺顿定理

辽宁舰



山东舰  
下水：2017



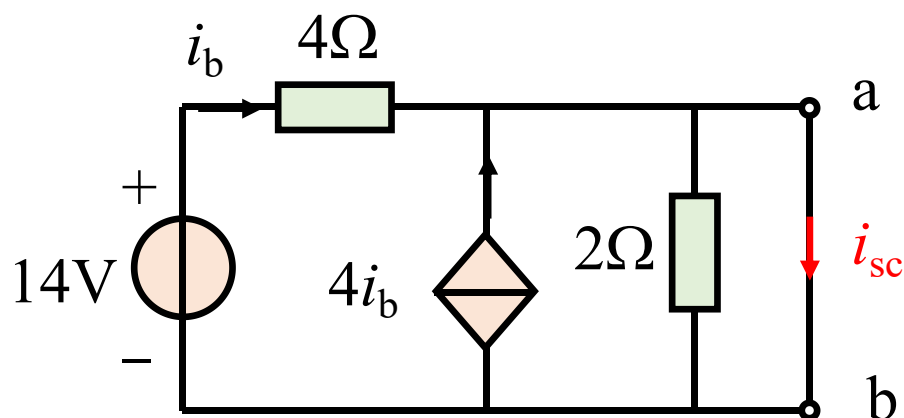
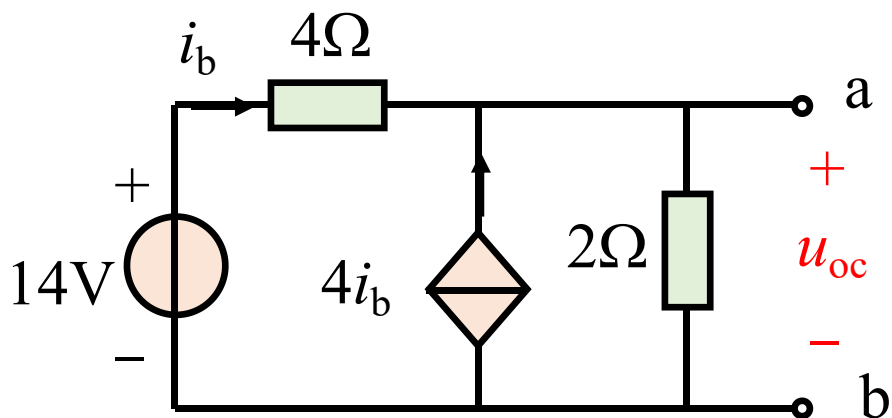
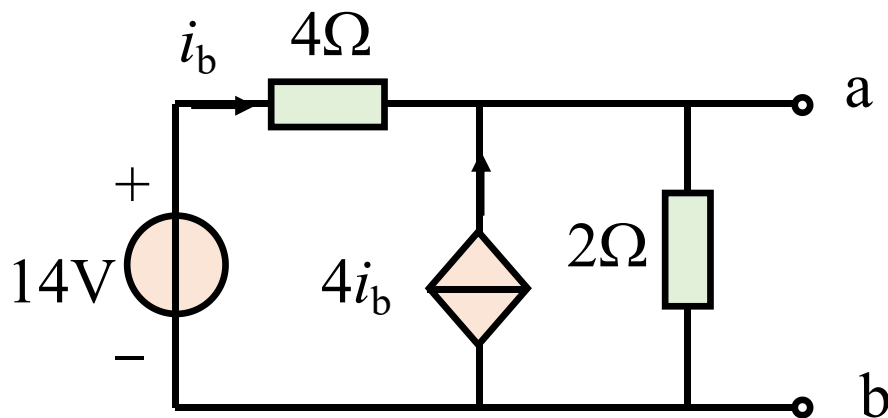
福建舰  
下水：2022



★很多科学研究要着眼长远，不能急功近利，欲速则不达。

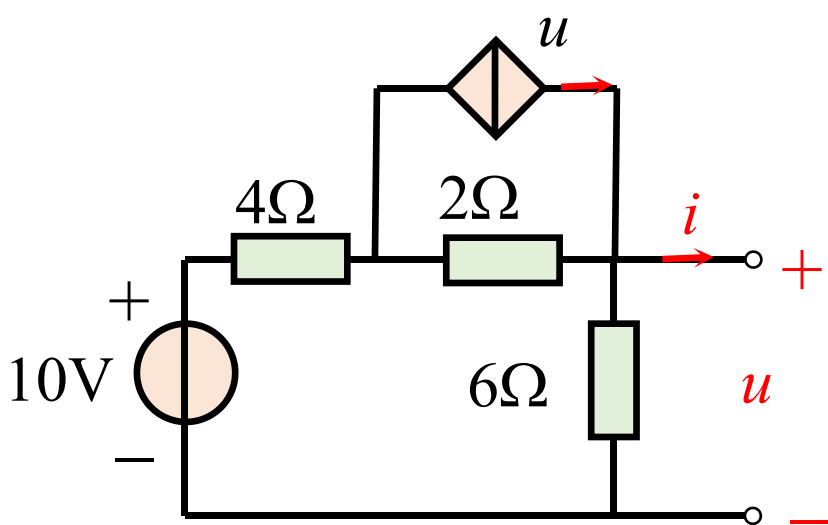
## 五、诺顿定理举例

**例：**求诺顿等效电路。

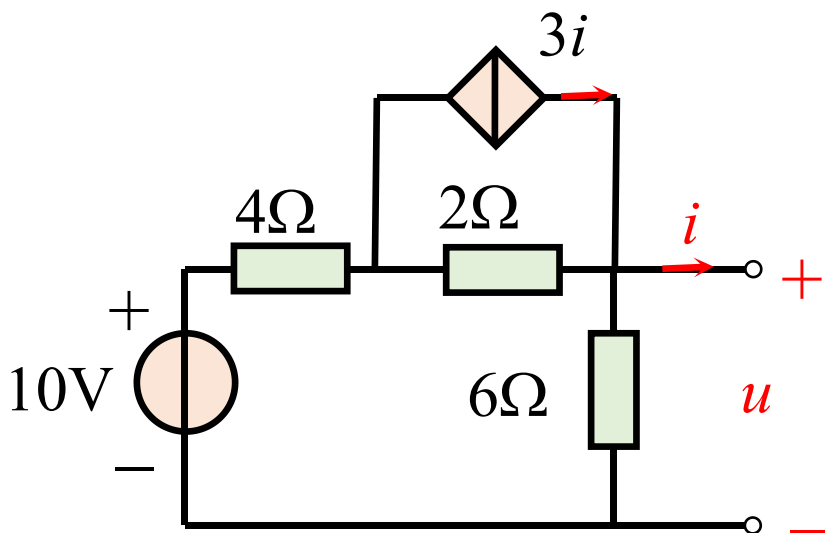


## 六、戴维南等效电路与诺顿等效电路的关系

**思考：**是不是任何电路都存在戴维南等效电路和诺顿等效电路？两者可以画等号吗？



$$i = \frac{5}{3} \text{ A}$$



$$u = 5 \text{ V}$$

等效电路为一个理想电流源的电路没有戴维南等效电路；  
等效电路为一个理想电压源的电路没有诺顿等效电路。

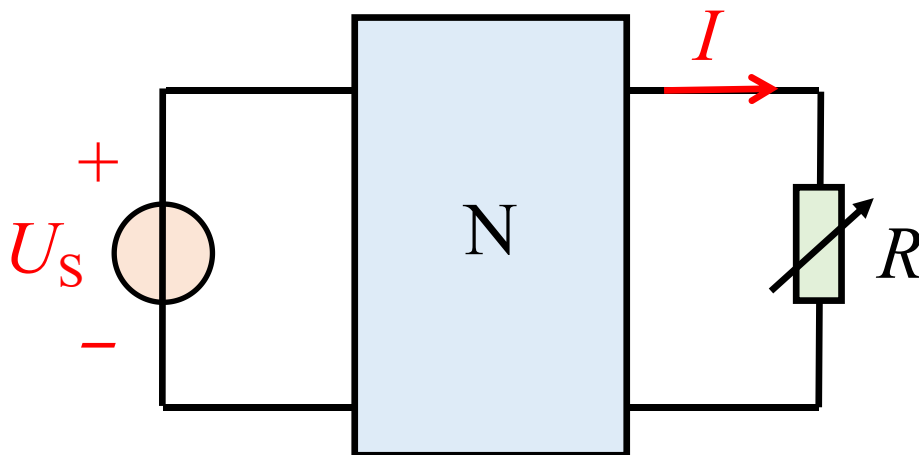
# 思考讨论

图中，N为无源线性电阻网络。已知：

当 $U_S=10\text{V}$ 、 $R=0$ 时， $I=2\text{A}$ ；

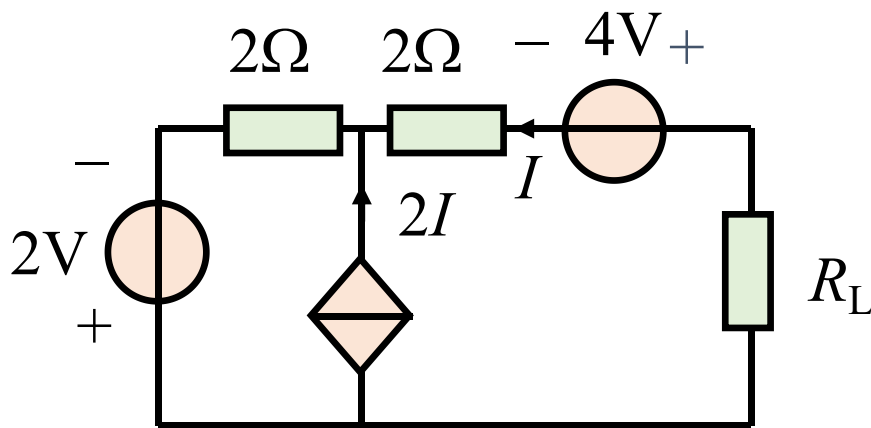
当 $U_S=20\text{V}$ 、 $R=4\Omega$ 时， $I=1\text{A}$ 。

求 $U_S=20\text{V}$ 、 $R=6\Omega$ 时， $I=?$



# 回顾

**例：**用戴维南定理求 $R_L$ 两端的电压。



$$U_{oc} = 2V$$

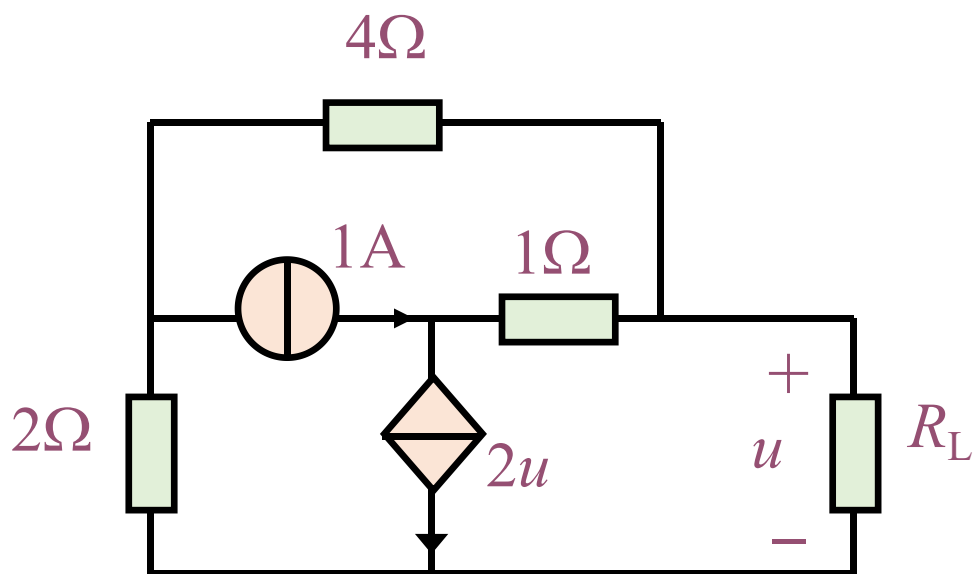
$$R_0 = 8\Omega$$

当 $R_L$ 为何值时， $R_L$ 可得最大功率？且最大功率为多少？



# 回顾

**例：**用戴维南定理求 $R_L$ 两端的电压。



当 $R_L$ 为何值时， $R_L$ 可得最大功率？且最大功率为多少？

# 第四单元 电路定理

§ 3-1 线性电路的比例性 网络函数

§ 3-2 叠加原理

§ 3-3 叠加方法与功率计算

§ 3-4 数模转换器的基本原理

§ 4-3 单口网络的置换——置换定理

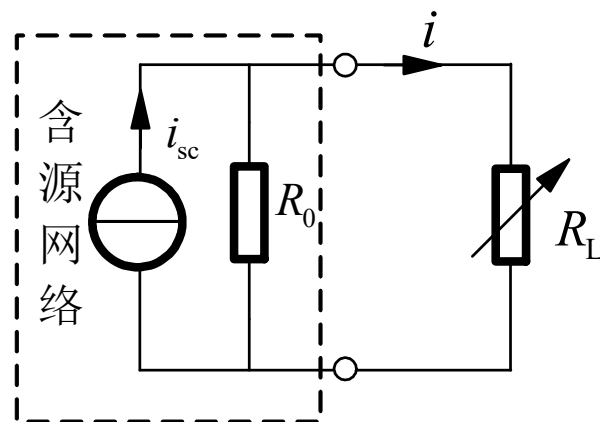
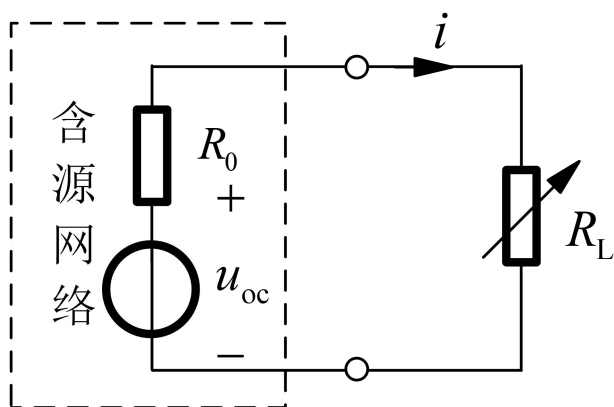
§ 4-6 戴维南定理

§ 4-7 诺顿定理

§ 4-8 最大功率传递定理

## §4-8 最大功率传递定理

讨论的是一个给定的实际电源满足什么条件时向负载提供最大功率（或能量）的问题。



**定理内容:**如图所示电路,  $R_L$ 为负载电阻,  $R_0$ 为电源内阻, 若 $R_L$ 可变, 则**当 $R_L=R_0$ 时**负载  $R_L$ 可从电源中获得最大功率, 且最大功率值为:

$$p_{\max} = \frac{u_{oc}^2}{4R_0}$$

$$p_{\max} = \frac{i_{sc}^2}{4} R_0$$

## §4-8 最大功率传递定理



太阳能电池功率和照到太阳能板上的日照量有关，也和负载的电子特性有关

如何实现在各种情形下都可以得到最大的功率输出？

# §4-8 最大功率传递定理

**MPPT**

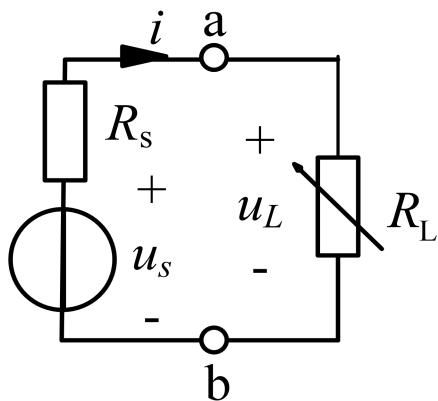
Maximum Power Point Tracking

最大功率点跟踪技术



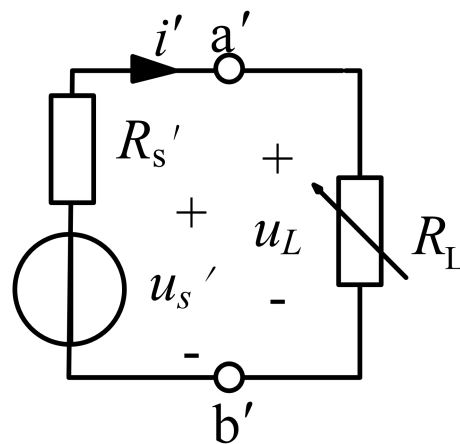
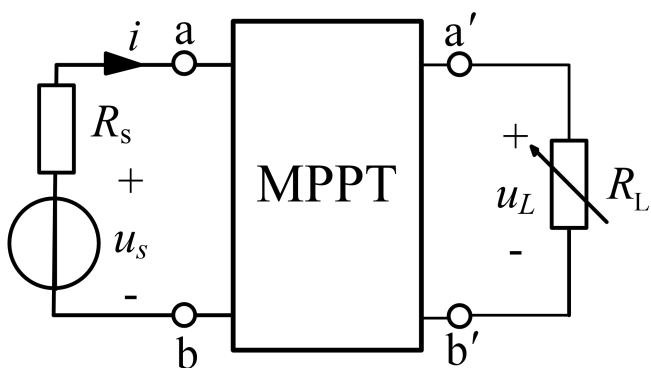
## §4-8 最大功率传递定理

### □ MPPT是怎么实现的？



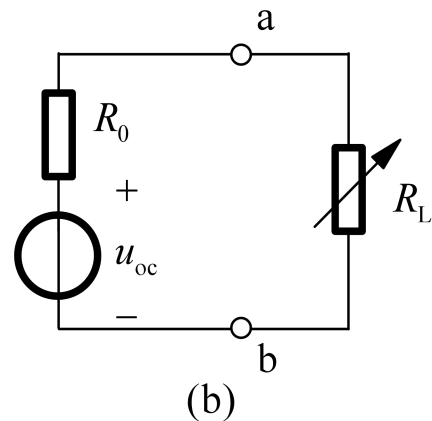
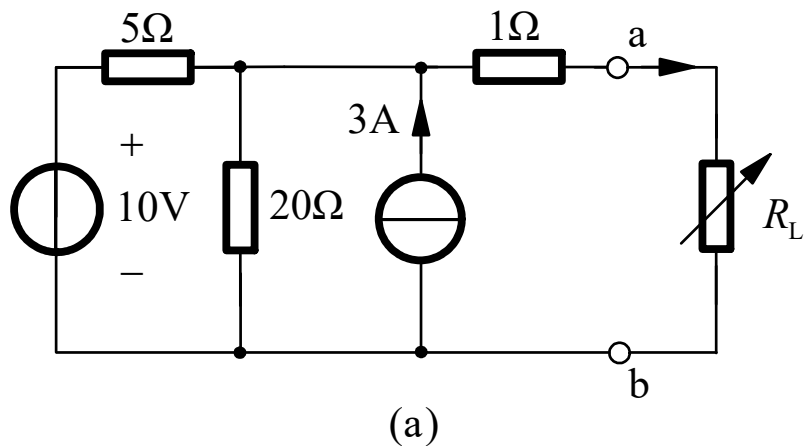
#### 思考题

如果负载不是纯电阻，何时获得最大功率？



## §4-8 最大功率传递定理

**例：**图 (a) 所示电路中， $R_L$  为何值时可获得最大功率？求此最大功率。



$$u_{oc} = 20V \quad R_0 = 5\Omega \quad R_L = R_0 = 5\Omega$$

$$p_{\max} = \frac{u_{oc}^2}{4R_0} = \frac{20^2}{4 \times 5} = 20W$$

## §4-8 最大功率传递定理

注意：

- $R_L = R_0$  时电路的工作状态称为匹配状态或称为功率匹配。
- 在功率匹配时，负载上获得最大功率，但不一定是最佳状态，因为等效电路的效率只有50%。



## §4-8 最大功率传递定理

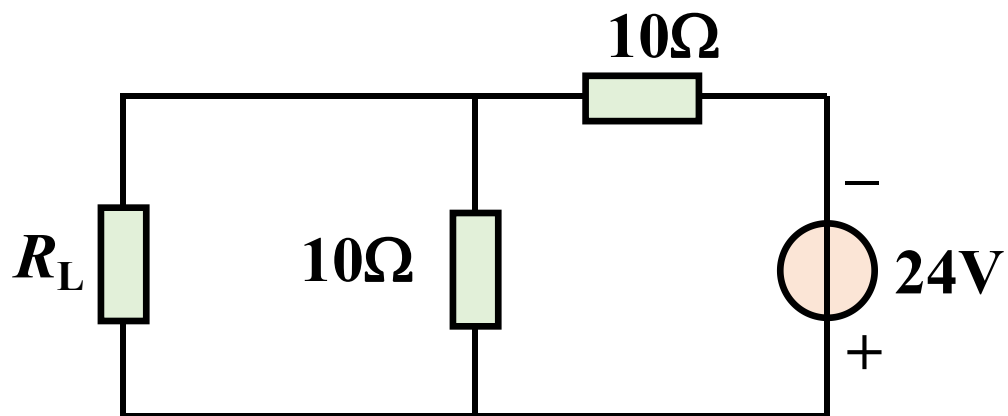
### 思考题

在最大功率状态，实际电路效率一定是

50%吗？

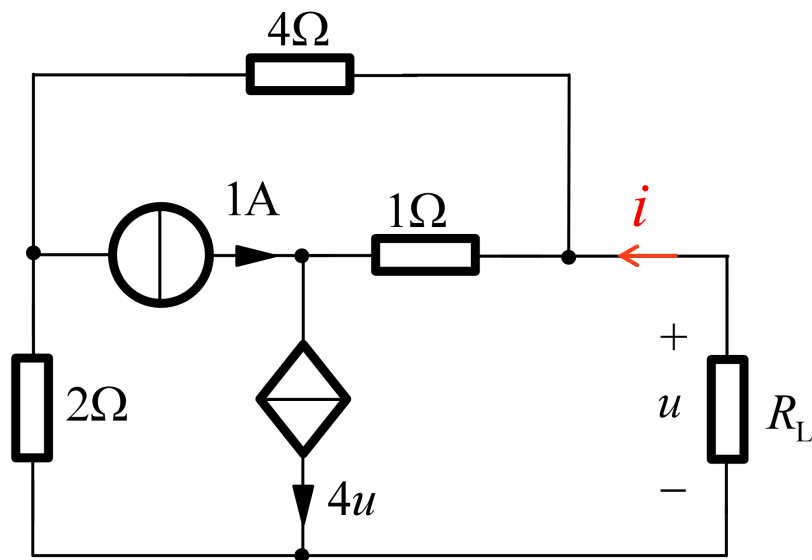
## §4-8 最大功率传递定理

**例：**图示电路中， $R_L$ 为何值时可获得最大功率？此时实际电路效率是多少？

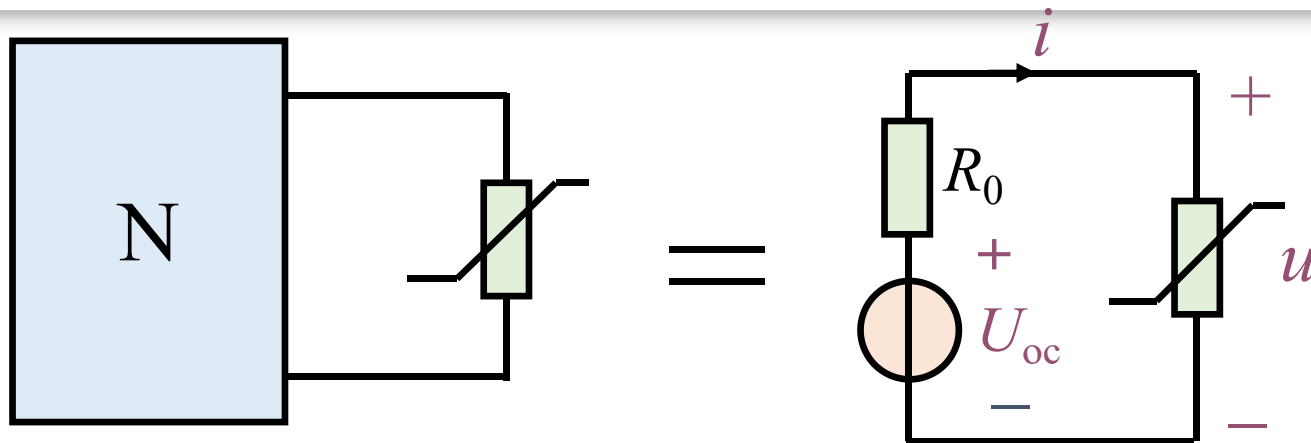


## §4-8 最大功率传递定理

**练习** 当 $R_L=?$  时可得最大功率？最大功率是多少？



# 含非线性元件电路分析



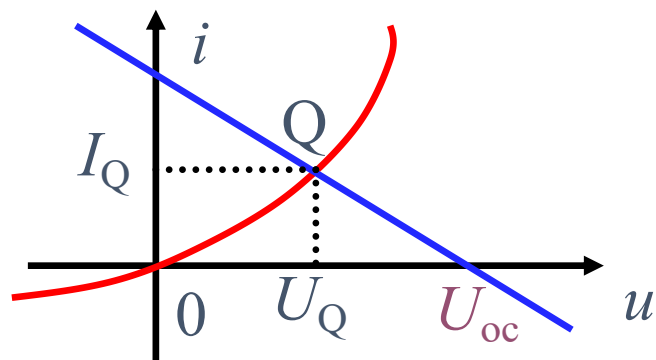
非线性电阻的VCR:  $u = f(i)$

$$\begin{cases} u = -R_0 I + U_{oc} \\ u = f(i) \end{cases}$$

联立求解得  $u$ 、 $i$

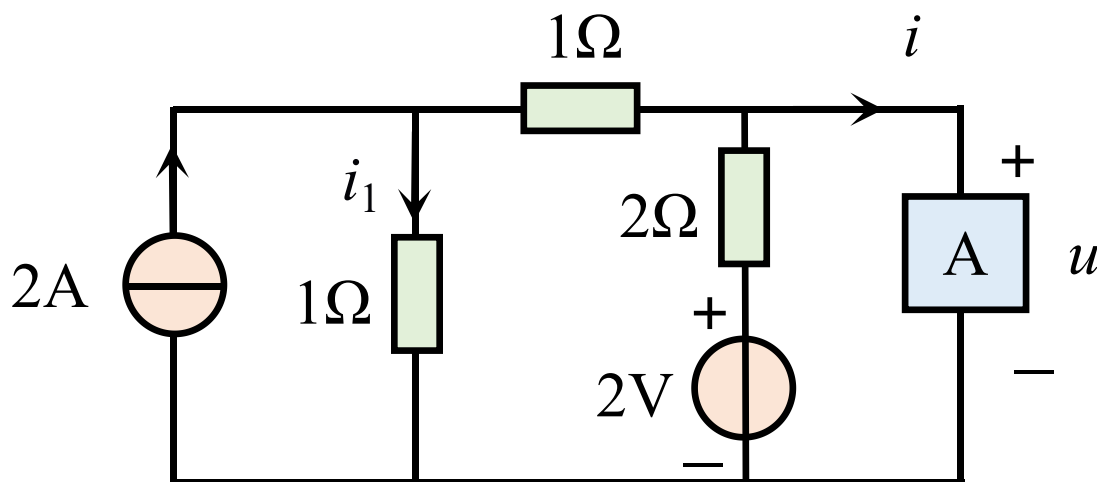
或用图像法:

$I_Q$  和  $U_Q$  即为非线性电阻  
上的电压和电流



# 含非线性元件电路分析

电路如图，已知非线性元件A的VCR为 $u=i^2$ ，试求 $u$ 、 $i$ 和 $i_1$ 。





# 电阻电路部分知识串讲

# 一大假设——集总假设

**成立条件：**工作波长远大于元件尺寸

**假设内容：**

- 元件没有体积大小，特性集中在一个点上；
- 从一端流入的瞬时电流等于从另一端流出的瞬时电流，元件不积累电荷；
- 电阻只耗能；
- 电场只与电容元件有关；
- 磁场只与电感元件有关；
- 电场与磁场之间无相互作用。

# 研究对象

## 电路变量——电流、电压、功率

- ◆ 实际方向、参考方向、关联参考方向
- ◆ 功率的正负

$p > 0$ 时，吸收功率（消耗电能）

$p < 0$ 时，发出功率（产生电能）

当 $u$ 、 $i$ 为关联参考方向时  $p = ui$

当 $u$ 、 $i$ 为非关联参考方向时  $p = -ui$



## 判断题

(3) 无论电阻的电压和电流是否为关联参考方向, 其功率和电流关系均为 $P=I^2R$ 。( )

# 基本依据——两类约束

## ➤ 拓扑约束

□ KCL: 节点对电流的约束

□ KVL: 回路对电压的约束

## ➤ 元件约束

□ 电阻: 欧姆定律

□ 理想电压源:  $u=U_S$ ,  $i$ 由外电路决定

□ 理想电流源:  $i=I_S$ ,  $u$ 由外电路决定

□ 受控源: CCCS、VCCS、CCVS、VCVS

## 判断题

(6) 对一个具有 $n$ 个节点的电路，其不同的 $(n-1)$ 个节点列出的KCL方程是独立的。( )

——KCL

(9) 电路中任意两点的电压等于所取路径中各个元件电压降的代数和，并且与所取路径无关。( )

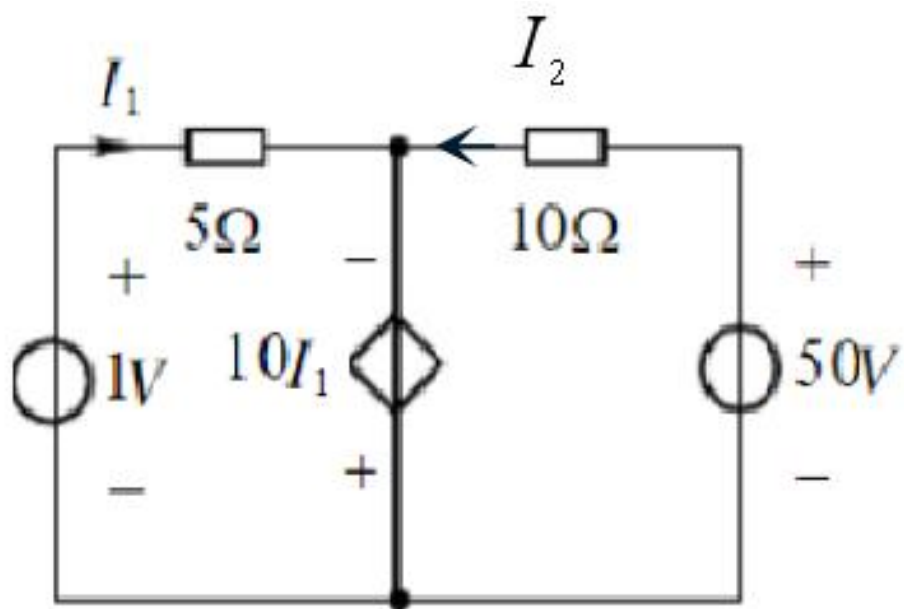
——KVL

(8) 理想电流源对外电路作用时，其端电压始终不变。( )

——元件约束

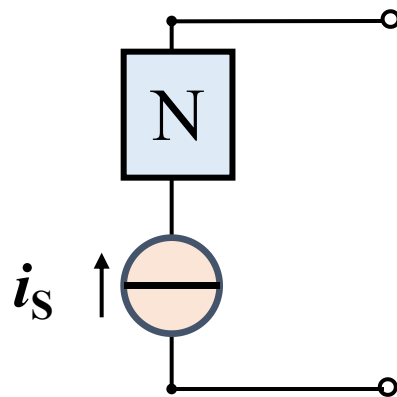
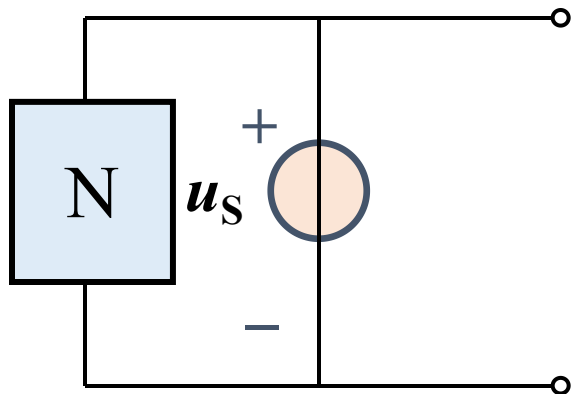
## 计算题

(2) 如图2所示求支路电流 $I_1$ 、 $I_2$ 并计算受控源的功率。

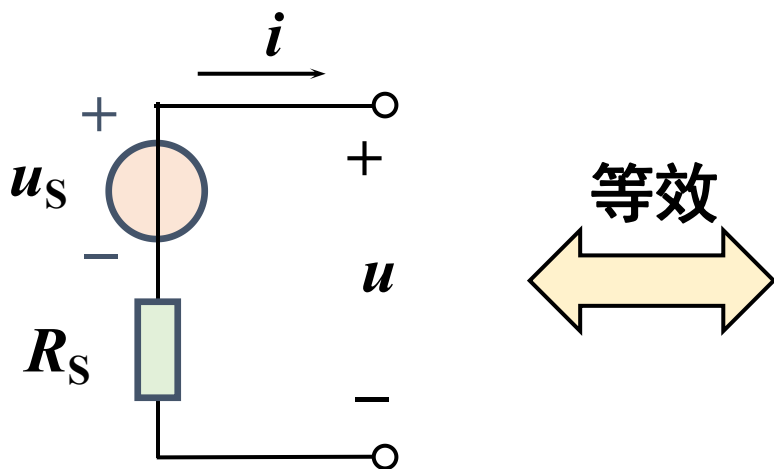


# 方法手段1——等效

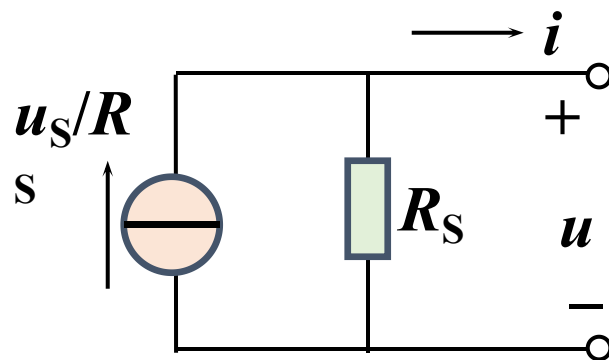
## 常用等效模型（去冗余）



## 常用等效模型（实际电源的相互转换）



等效



# 方法手段1——等效

## ➤ 等效电路

- 不含独立源的单口网络（可含电阻和受控源）→ 电阻
- 含独立源的单口网络→ 戴维南、诺顿等效电路

## ➤ 等效电路的求法：

- 直接化简（简单电路）
- 求端口VCR（外加电源法）
- 戴维南定理、诺顿定理

# 方法手段1——等效

## ➤ 利用戴维南、诺顿定理求等效电路的步骤：

- 断开要等效的部分；
- 求开路电压 $u_{oc}$ /短路电流 $i_{sc}$ ；
- 求等效电阻 $R_0$ ；
- 画出等效电路。

## ➤ 等效电阻的求法：

- 直接化简（独立源置0）
- 外加电源法（独立源置0）
- 开路电压-短路电流法（独立源不置0）

## 选择题

下面几个电路元件中，\_\_\_\_\_是等效的，\_\_\_\_\_是等效的。

- (A)  $R=\infty$ 的电阻
- (B) 零值电阻
- (C)  $U_S=0$ 的理想独立电压源
- (D)  $I_S=0$ 的理想独立电流源
- (E) 开路
- (F) 短路



## 判断题

(4) 二端网络的VCR由网络内部参数结构以及外电路共同决定。 ( )

### ——端口VCR的概念

(5) 一个不含独立源的单口电阻网络可以等效成为一个电阻。 ( )

(10) 任意一个元件与理想电压源串联，等效依然为该理想电压源。 ( )

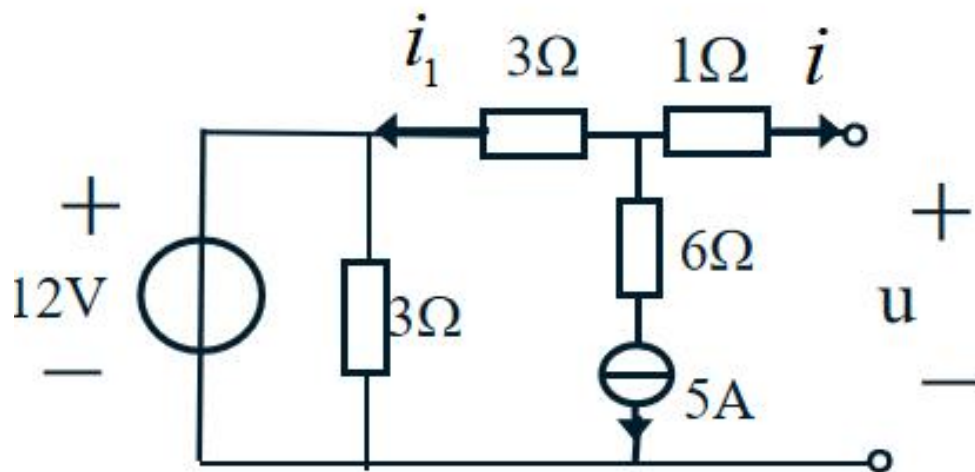
(1) 对电路进行等效变换时如果一条支路电流为0，可按照短路处理。 ( )

### ——常用等效模型

(2) 理想电压源和理想电流源可以等效互换。 ( )

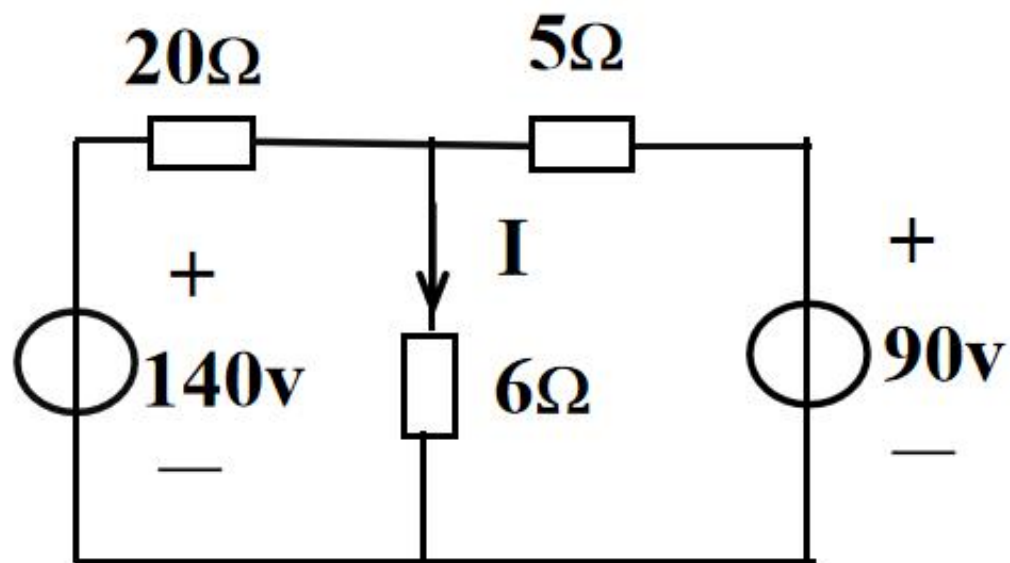
## 计算题

(5) 电路如图5所示，计算电路的VCR，并画出其等效电路。



## 计算题

(1) 用戴维南定理计算图1所示支路电流 $I$ 。



# 方法手段2——电路定理

## ➤ 叠加定理

- 线性电路的齐次性和可加性
- 适用于线性电路求电压、电流，不可用于求功率

$$y(t) = k_1 u_{s1} + k_2 u_{s2} + \dots + k_n u_{sn} + h_1 i_{s1} + h_2 i_{s2} + \dots + h_m i_{sm}$$

## ➤ 替代定理

- 替代定理适用于线性、非线性电路、时不变和时变电路
- 替代不同于等效，它只适用于特定的电路，而等效具有一般性，与外电路无关。

## 判断题

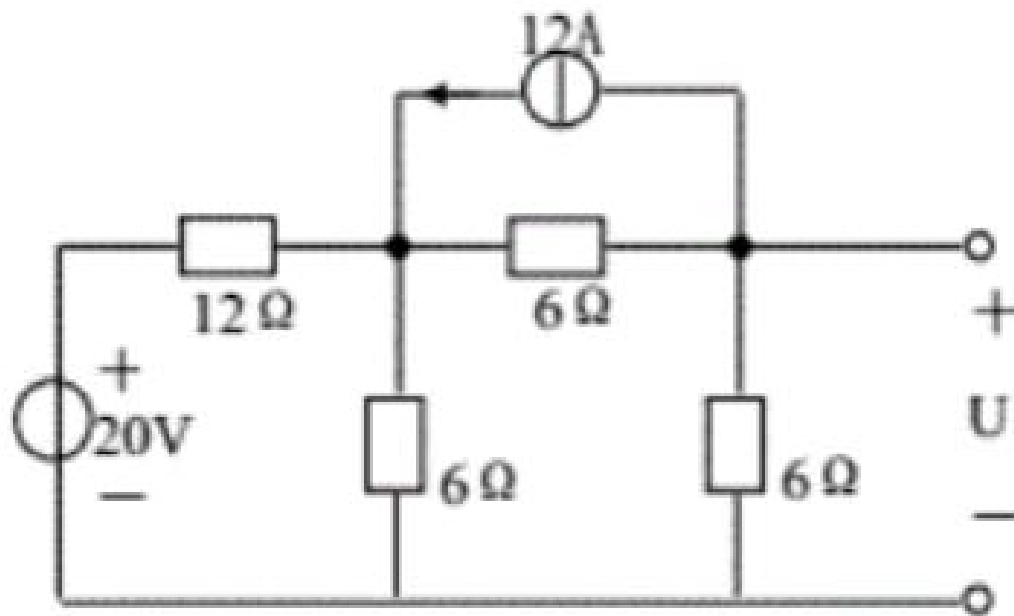
(7) 叠加定理只在线性电路中成立。 ( )

——叠加定理适用场景

(改) 置换定理只在线性电路中成立。 ( )

## 计算题

(4) 电路图如图4所示，试用叠加定理计算 $U$ 。

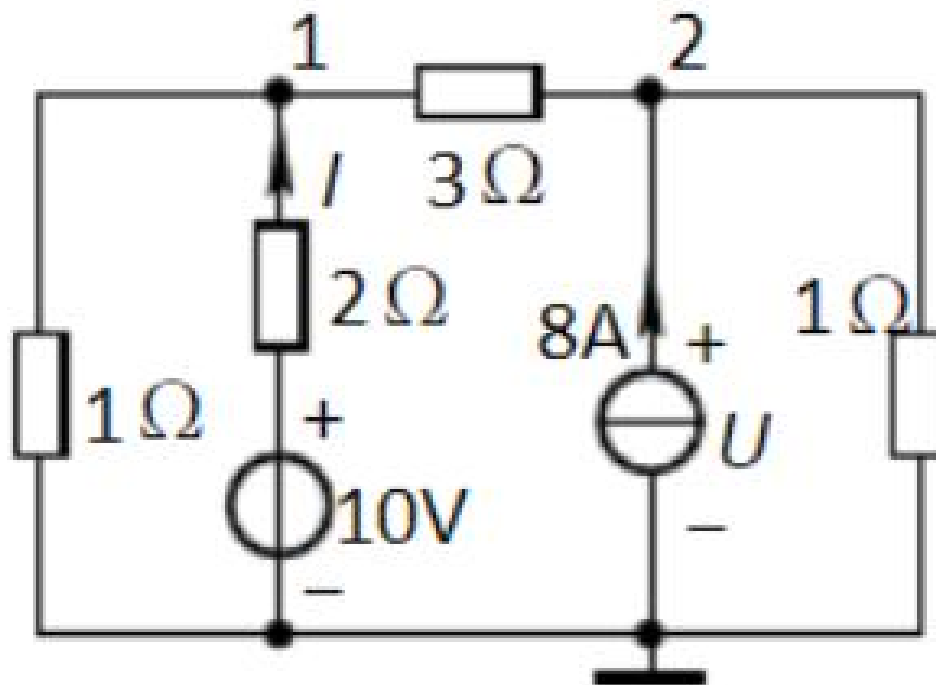


# 方法手段3——一般分析方法

方法	变量	本质	方程个数	特殊情况	适用非平面电路
节点分析法	$n-1$ 个节点电压变量	KCL	$n-1$	<ul style="list-style-type: none"><li>✓ 电流源支路上串电阻;</li><li>✓ 有伴电压源、无伴电压源;</li><li>✓ 有受控源;</li></ul>	是
网孔分析法	$m$ 个独立网孔电流变量	KVL	$m(b-n+1)$	<ul style="list-style-type: none"><li>✓ 有独立电流源;</li><li>✓ 有受控源;</li></ul>	否

## 计算题

(3) 使用节点分析法计算图示电路的 $U$ 和 $I$ 。





# 复杂电路

## 等效

常用等效模型

去冗余

实际电源模型

不含独立源  
(电阻+受控源)

直接化简

(电阻串并联)

外加电源法

(含受控源)

含独立源  
(戴维南、诺顿)

直接化简

(常用等效模型)

求VCR

(外加电源法)

定理

(求 $u_{oc}/i_{sc}$ 、 $R_0$ )

## 电路定理

叠加定理

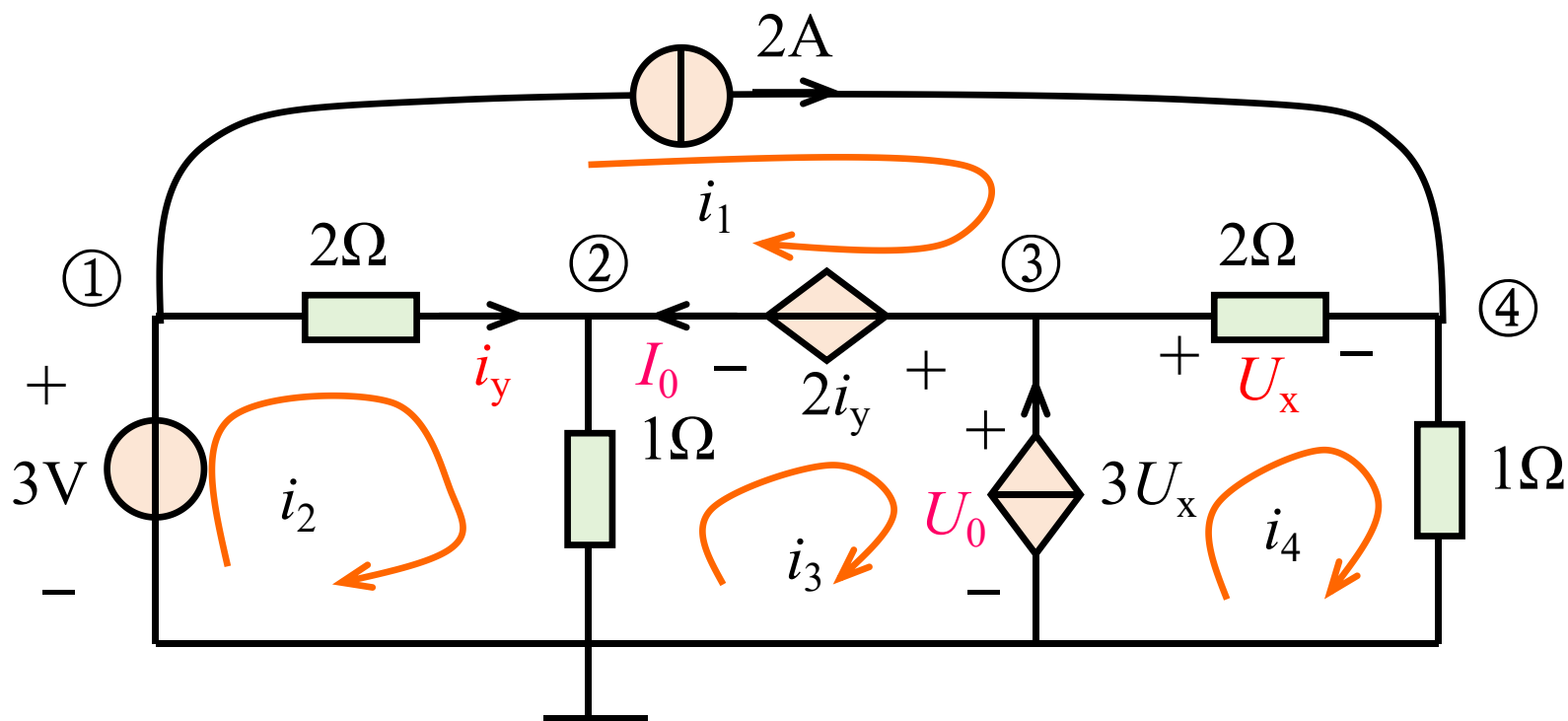
替代定理

## 一般分析方法

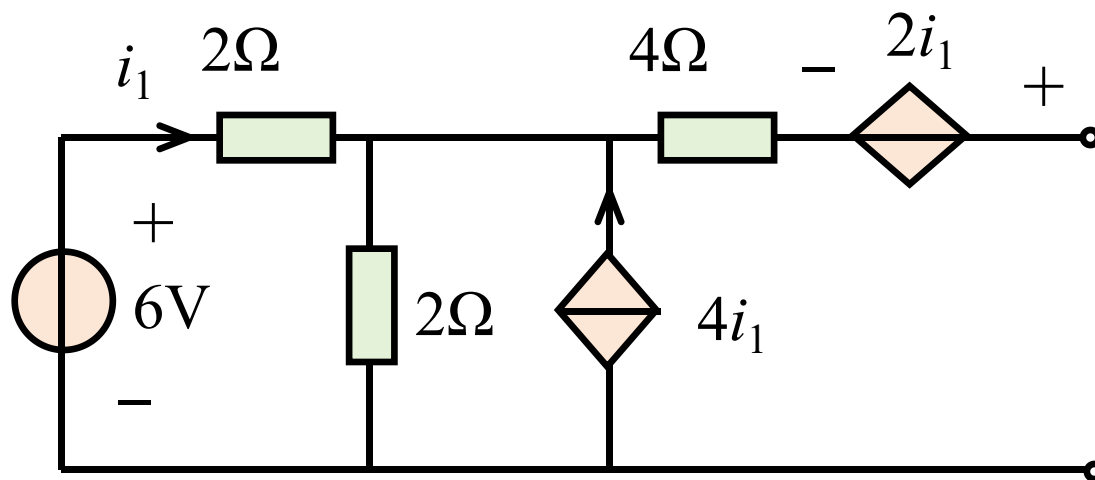
节点分析法

网孔分析法

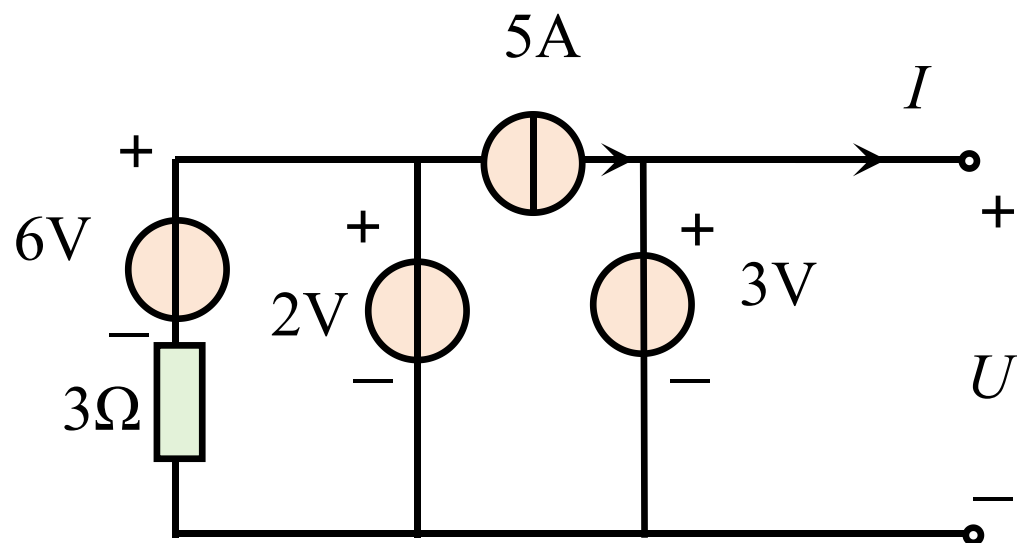
## 练习1：列节点方程和网孔方程



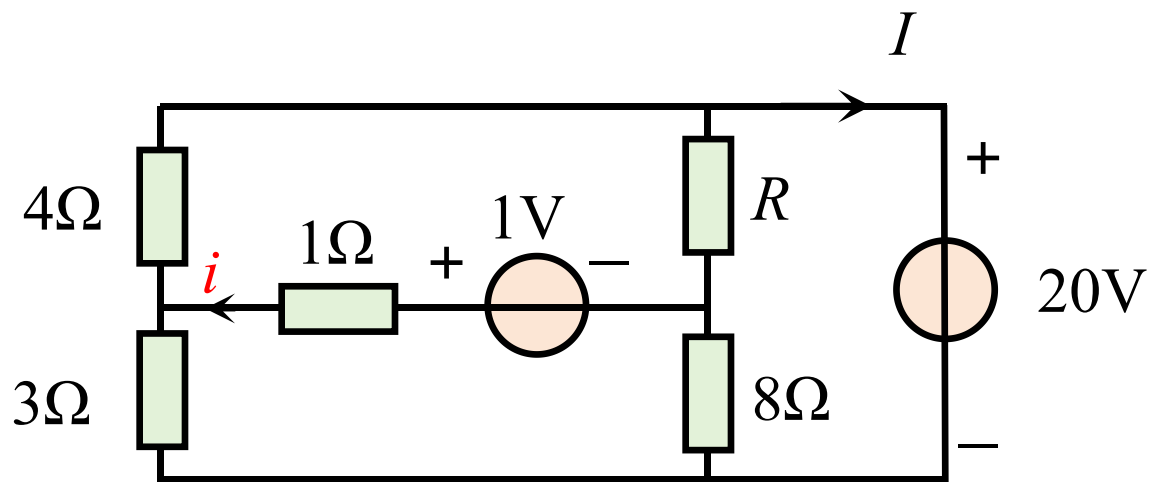
## 练习2：求诺顿等效电路



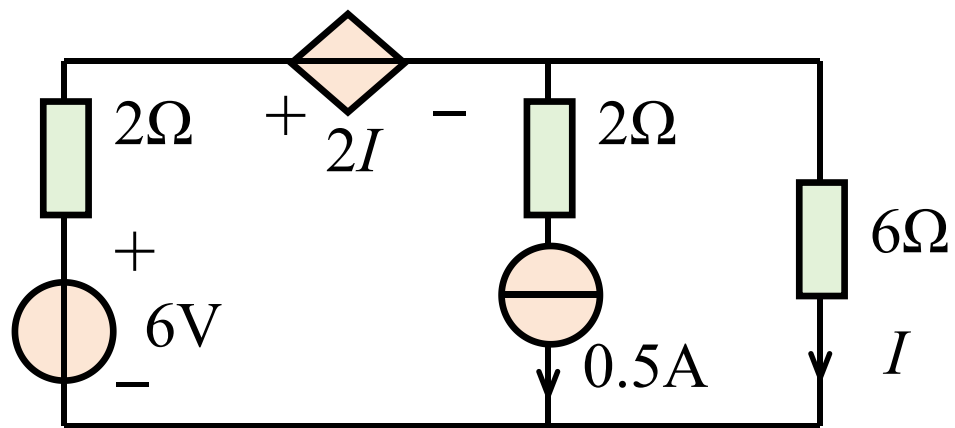
练习3：求VCR并画出特性曲线



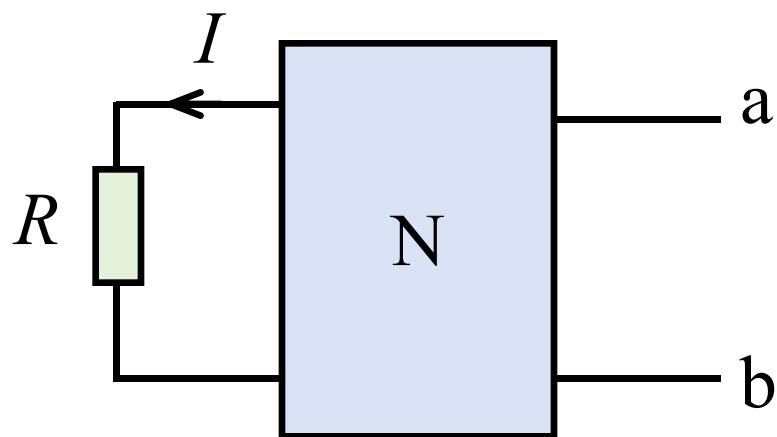
练习4：已知电流 $i=1\text{A}$ ，用置换定理求电阻 $R$



练习5：用叠加定理求 $I$ 。



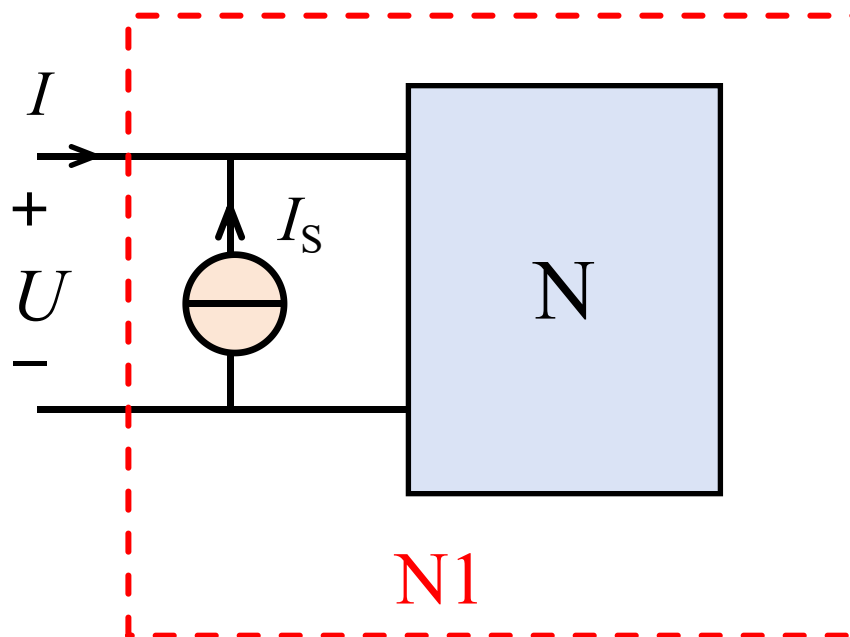
**练习6：** N为含独立源和线性电阻的子网络。当端口ab短接时，电阻 $R$ 支路电流 $I=I_{S1}$ 。当端口ab开路时，电阻 $R$ 支路电流 $I=I_{S2}$ 。当端口ab接电阻 $R_i$ 时， $R_i$ 获得最大功率。求端口接电阻 $R_i$ 时，电阻 $R$ 支路电流 $I$ 。



练习7：已知 $N_1$ 的VCR为：

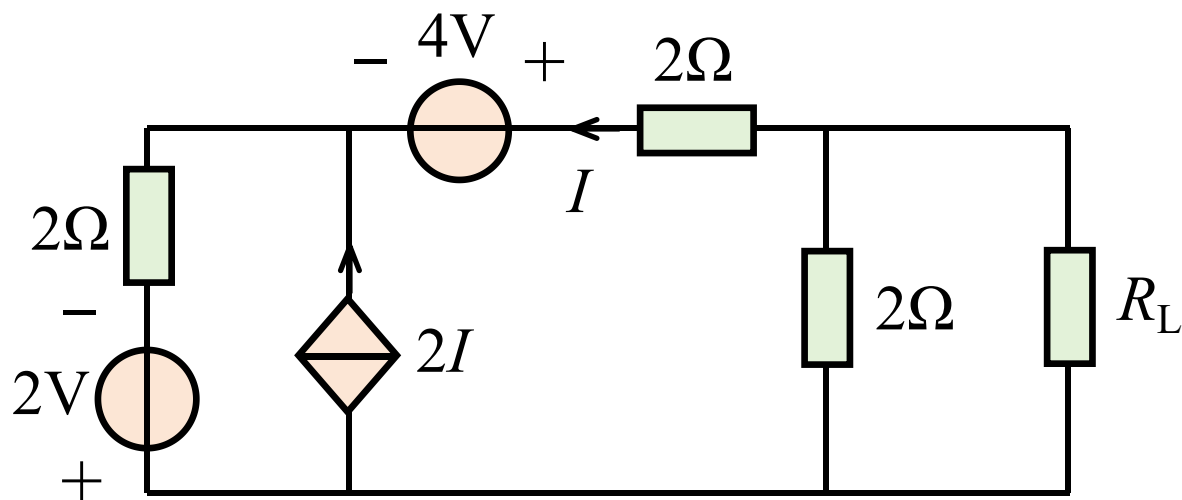
$$U = 2I + 10 \quad (U \text{ 的单位为 V, } I \text{ 的单位为 mA}),$$

$I_S = 2\text{mA}$ ，求 $N$ 的等效电路。





**练习8:** 当 $R_L=?$ 时,  $R_L$ 可得最大功率? 最大功率是多少?



练习9：列节点电压方程，求图示电路的 $U_X$ 。

