



兴趣 认真 执著 创新

《电子线路分析与设计》

第二讲：线性电路分析基础

胡薇薇

2023. 9. 13



北京大学

第一章

第一节：线性电路分析导论

- ✎ 集总假设、基本方法、基本参数、基本术语、参考方向、基本定律（KVL、KCL、VCR）

第二节：常见电路元件及其约束方程

- ✎ 元件分类、电阻元件、独立源、受控源、动态元件

第三节：线性二端（单口）网络的等效

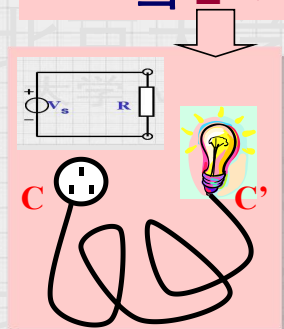
- ✎ 等效的概念、源的转移、戴维南定理、诺顿定理（源的等效）

第一节：线性电路分析导论

电信号的分析方法：电磁场理论、电路分析理论

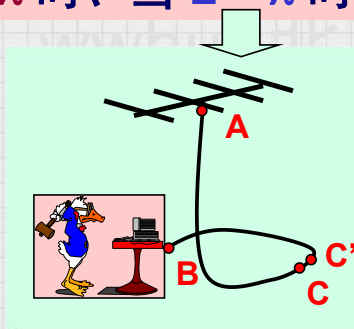
电信号的分析方法

当 $L \ll \lambda$ 时、当 $L \sim \lambda$ 时 是不一样的



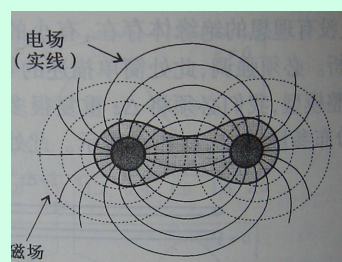
低频(长波长)
集总参数电路

$V(t), I(t)$



高频(短波长)
分布参数电路

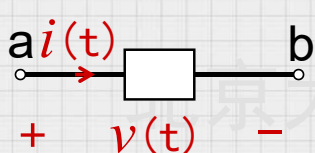
$E(t, z), H(t, z)$
 $V(t, z), I(t, z)$



高频(短波长)
电磁场理论(Maxwell)

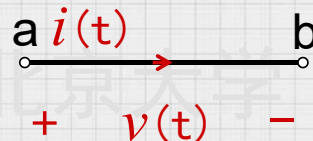
$E(t, x, y, z), H(t, x, y, z)$

第一节：线性电路分析导论



$I=1A, V=5V$

一致参考方向
(关联参考方向)



电路标注了参考方向（可以一致也可以不一致）
电路分析才有意义。

参考方向一旦确定，就不需要改变。

计算结果为正：表示标注与实际相同

计算结果为负：表示标注与实际相反

基本定律 (KVL、KCL定律)

复习

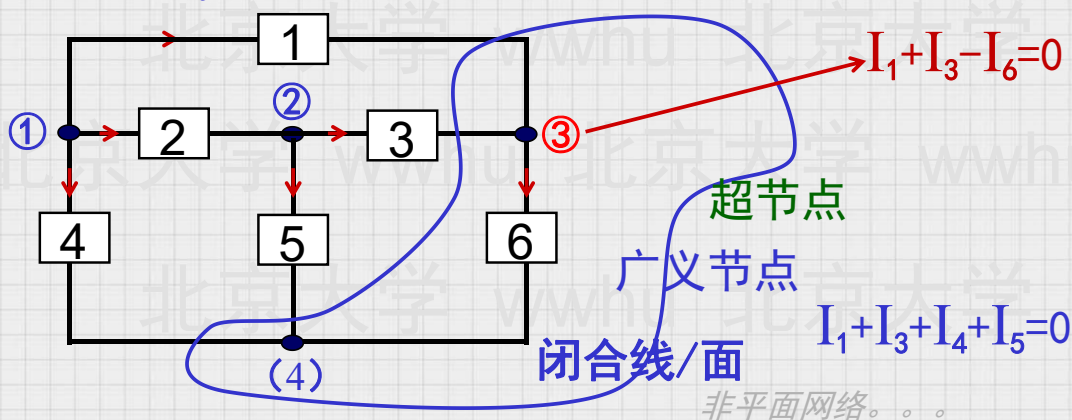
电荷守恒定律(高斯定理): $\oint \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = 0$

基尔霍夫第一定律: (电流定律、KCL定律)

任一集总参数电路中的任一节点, 在任一时刻, 流入 (或是流出) 该节点的电流的代数和为零。

记为: $\sum i_j(t_0) = 0$

假设以流入节点来建立方程:



基本定律 (KVL、KCL定律)

复习

电势守恒定律(环路定理): $\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = 0$

基尔霍夫第二定律: (电压定律、KVL定律)

任一集总参数电路中的任一回路, 在任一时刻, 沿该回路所有支路的电压升 (或电压降) 的代数和为零。

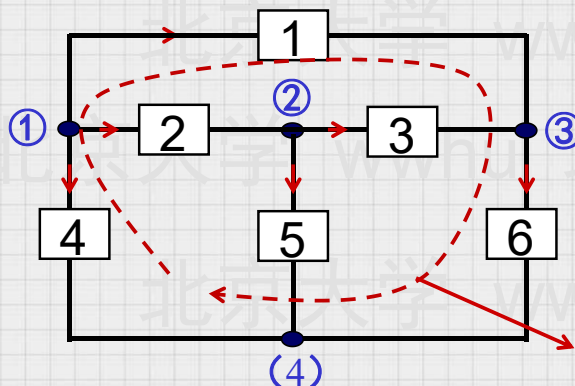
记为: $\sum v_j(t_0) = 0$

假设沿路电压升来建立方程:

$$V_4 - V_1 - V_6 = 0$$

假设沿路电压降来建立方程:
(回路方向)

$$-V_4 + V_1 + V_6 = 0$$

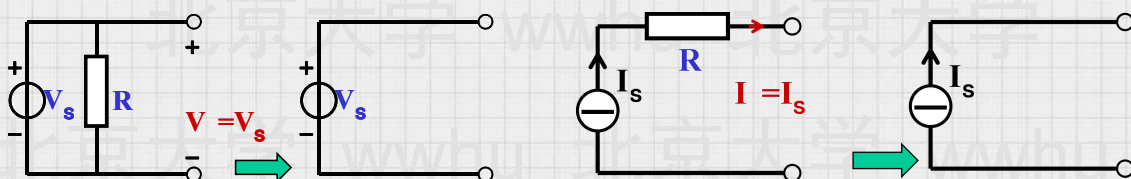


闭合路径

第二节：常见电路元件及其约束方程

复习

独立源



结论：与理想电压源并联的元件，对外电路不起作用。
无效

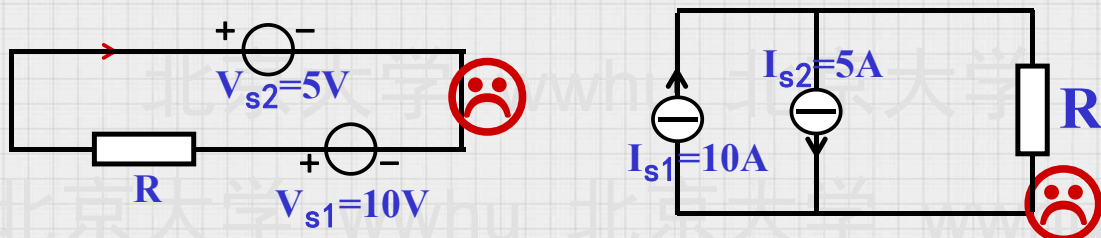
结论：与理想电流源串联的元件，对外电路不起作用。
无效

理想电压源：内阻为零、不可以短路、互并。

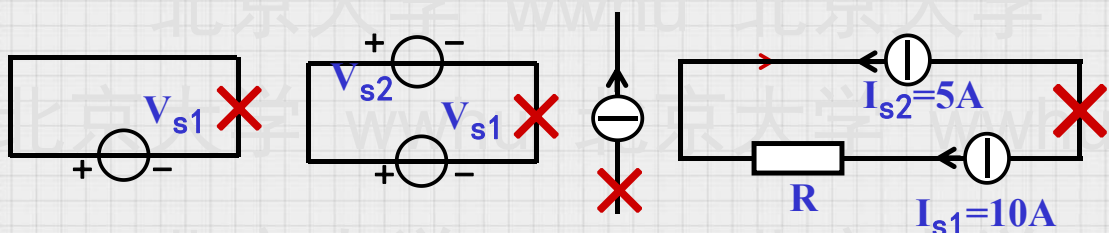
理想电流源：内阻为无穷大、不可以开路、互串。

第二节：常见电路元件及其约束方程

复习



卷吧卷吧，还。。。可以忍



不能忍，违反了基本定律：KVL、KCL

本讲主要内容

第一节：线性电路分析导论

✎ 集总假设、基本方法、基本参数、
基本术语、参考方向、
基本定律（KVL、KCL、VCR）

第二节：常见电路元件及其约束方程

✎ 元件分类、电阻元件、独立源、
受控源、动态元件

第三节：线性二端（单口）网络的等效

✎ **等效**的概念、源的转移、
戴维南定理、**诺顿定理**（源的等效）

内容重要而精彩,参与性很强

第一章：线性电路分析基础

第二节：常见电路元件及其约束方程



✎ 元件分类、电阻元件、独立源、
受控源、动态元件

运放、三极管、变压器、
耦合电感、回转器.....

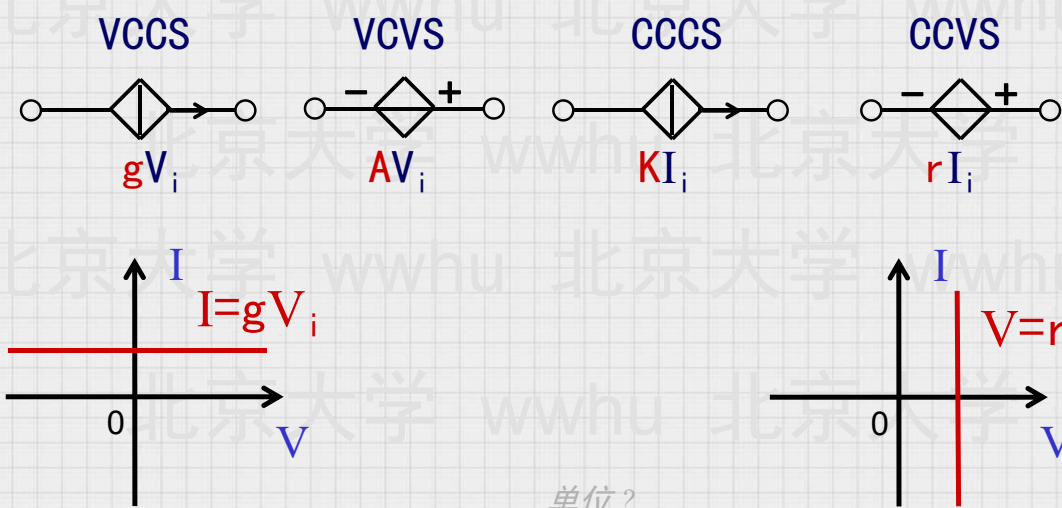
解释了源的转移 / 放大的物理现象

第二节：常见电路元件及其约束方程

受控源

符号：  

特征：源电压或电流受控于外支路的电压或电流

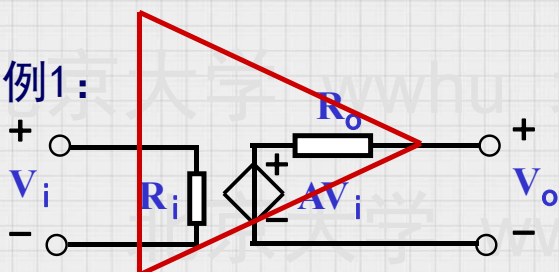


第二节：常见电路元件及其约束方程

受控源

1. 解释了不含独立源元件的有源特性；

例1：



$$V_o/V_i = AV_i/V_i = A$$

运算放大器的电路模型

有源元件

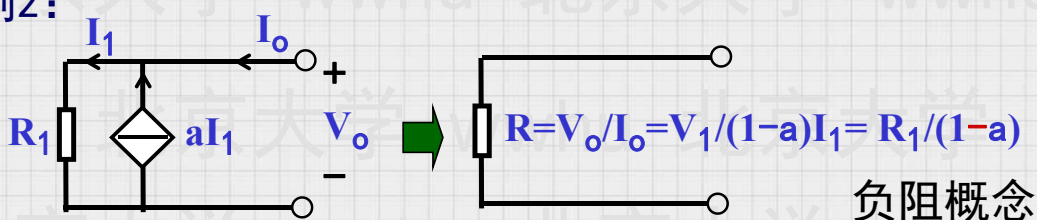
第二节：常见电路元件及其约束方程

魔术师

受控源

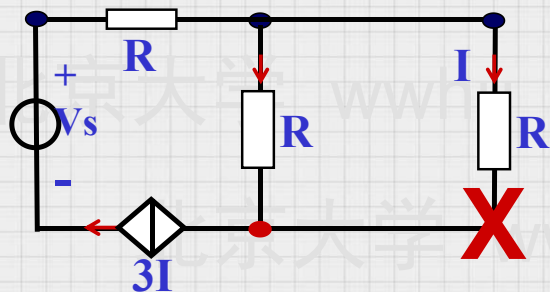
1. 解释了无(独立)源元件的有源特性；
2. 解释了阻抗变换、负阻的概念。

例2：



第二节：常见电路元件及其约束方程

电路举例(仔细看看)：



无理电路

不满足KCL定律

不可实现电路

第二节：常见电路元件及其约束方程

受控源

1. 解释了无(独立)源元件的有源特性;
 2. 解释了阻抗变换、负阻的概念。
-
1. 用菱形符号区别于独立源
 2. 一个貌似二端实为四端的元件
 3. 用来描述体现电压or电流“转移or放大”物理现象的一类电子器件

主要内容

第二节：常见电路元件及其约束方程

- 元件分类、电阻元件、**受控源、动态元件**

躁动分子

第三节：线性二端（单口）网络的等效

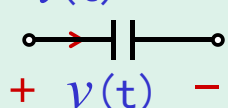
- 等效的概念、源的转移、戴维南定理、诺顿定理（源的等效）

第二节：常见电路元件及其约束方程

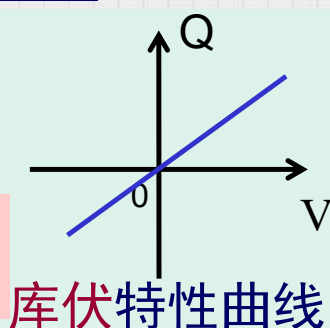
a. 线性定常电容：C

约束方程： $Q(t) = C v(t)$

符号： $i(t)$



$$i(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = C \frac{dv(t)}{dt}$$

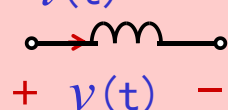


记忆元件？

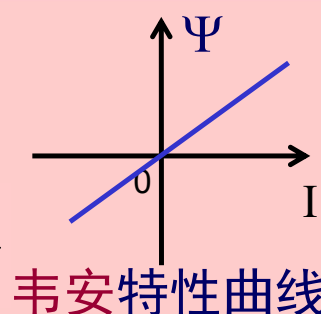
b. 线性定常电感：L

约束方程： $\Psi(t) = L i(t)$

符号： $i(t)$



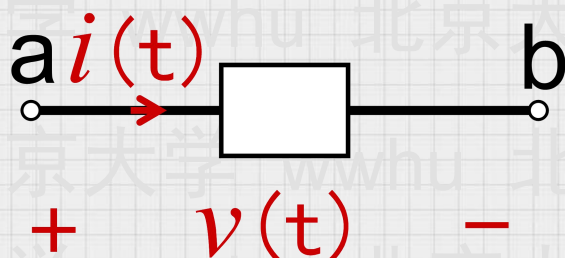
$$v(t) = \frac{d\Psi(t)}{dt} = L \frac{di(t)}{dt}$$



主要内容

第二节：常见电路元件及其约束方程

元件分类、电阻元件、独立源、受控源、动态元件



什么元件？ 代数关系？

主要内容

第二节：常见电路元件及其约束方程

元件分类、电阻元件、独立源、受控源、动态元件

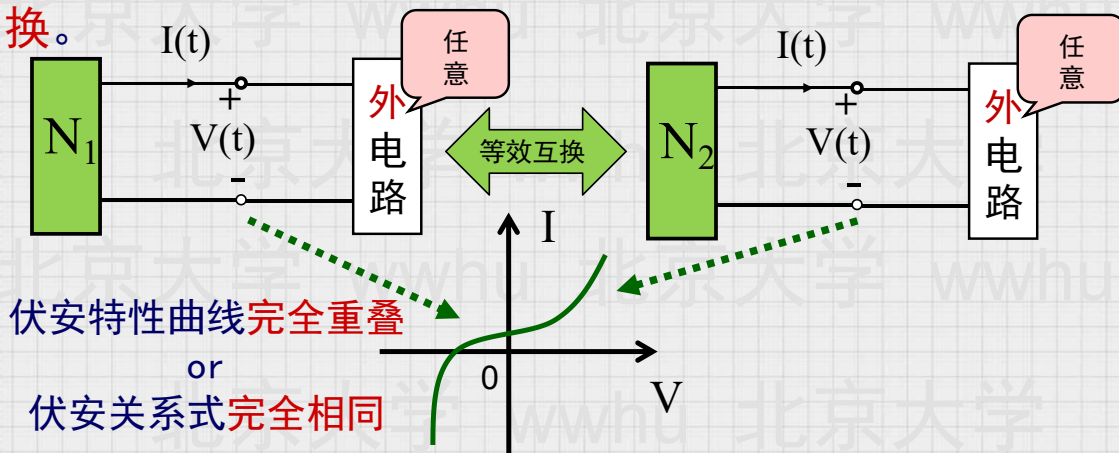
第三节：线性二端（单口）网络的等效

等效的概念、源的转移、戴维南定理、诺顿定理（源的等效）

第三节：线性二端（单口）网络的等效

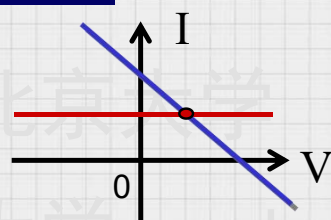
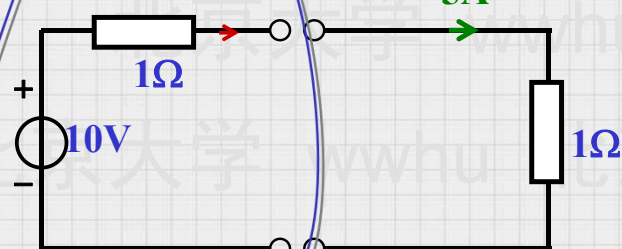
等效定义：

如果一个单口网络 N_1 的口特性（伏安特性曲线）和另一个单口网络 N_2 的口特性完全相同，则这两个单口网络互为等效，网络 N_1 和 N_2 对任意外电路可以等效互换。



第三节：线性二端（单口）网络的等效

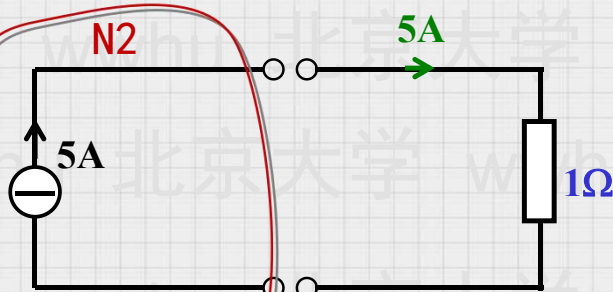
例：N1



一点重合不是等效

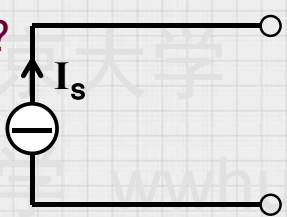
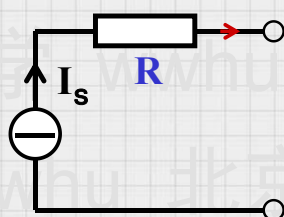
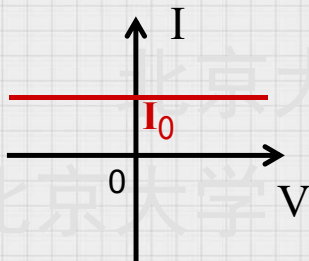
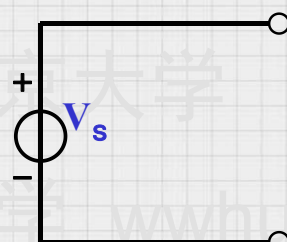
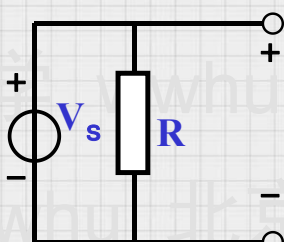
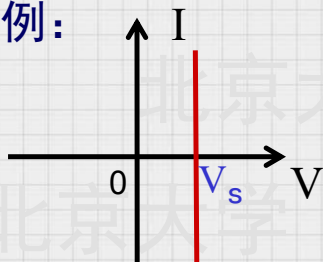
等效?
Why?

N2



第三节：线性二端（单口）网络的等效

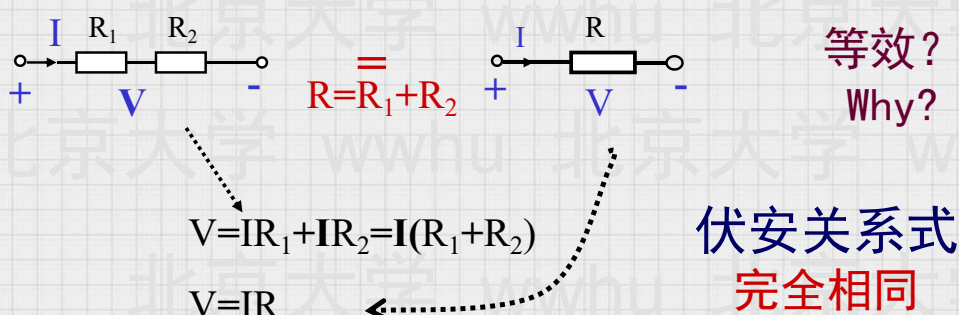
例：



等效?
Why?

第三节：线性二端（单口）网络的等效

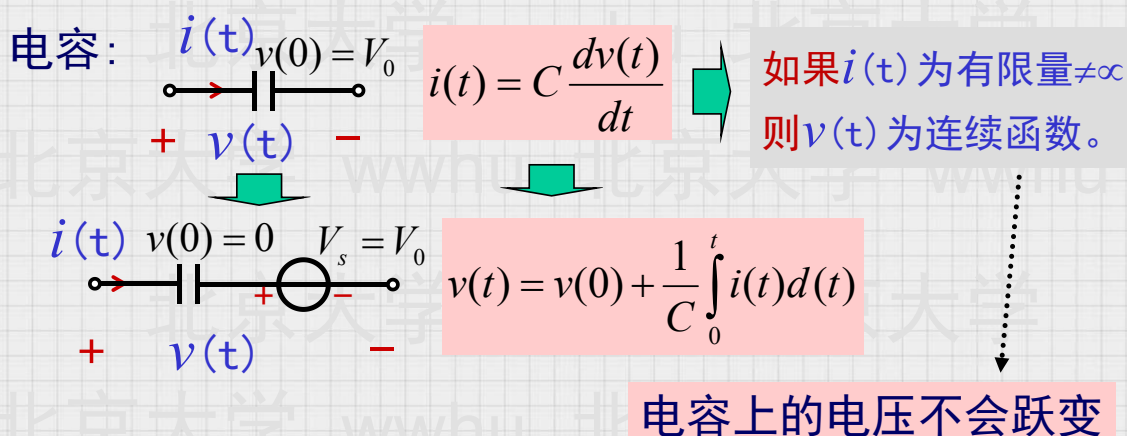
1. 电阻电路的等效：



同理，并联时： $G = G_1 + G_2$

第三节：线性二端（单口）网络的等效

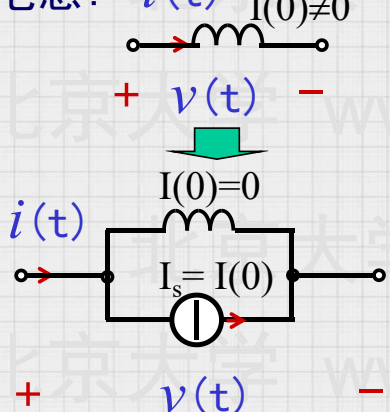
2. 动态元件的等效：



第三节：线性二端（单口）网络的等效

2. 动态元件的等效：

电感： $i(t)$



$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt}$$

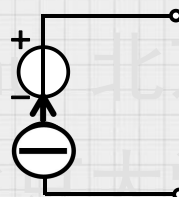
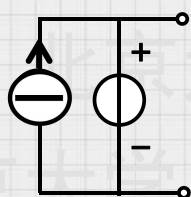
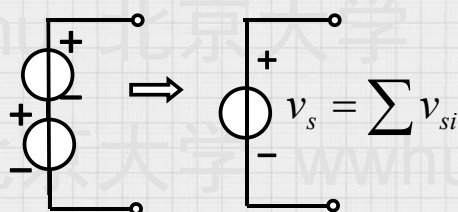
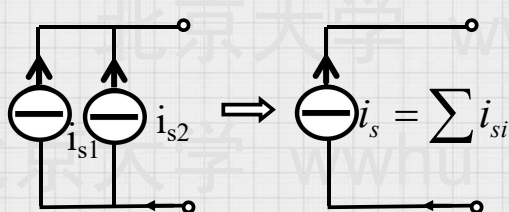
如果 $v(t)$ 为有限量 $\neq \infty$
则 $i(t)$ 为连续函数。

$$i(t) = I(0) + \frac{1}{L} \int_0^t v(t) dt$$

电感上的电流不会跃变

第三节：线性二端（单口）网络的等效

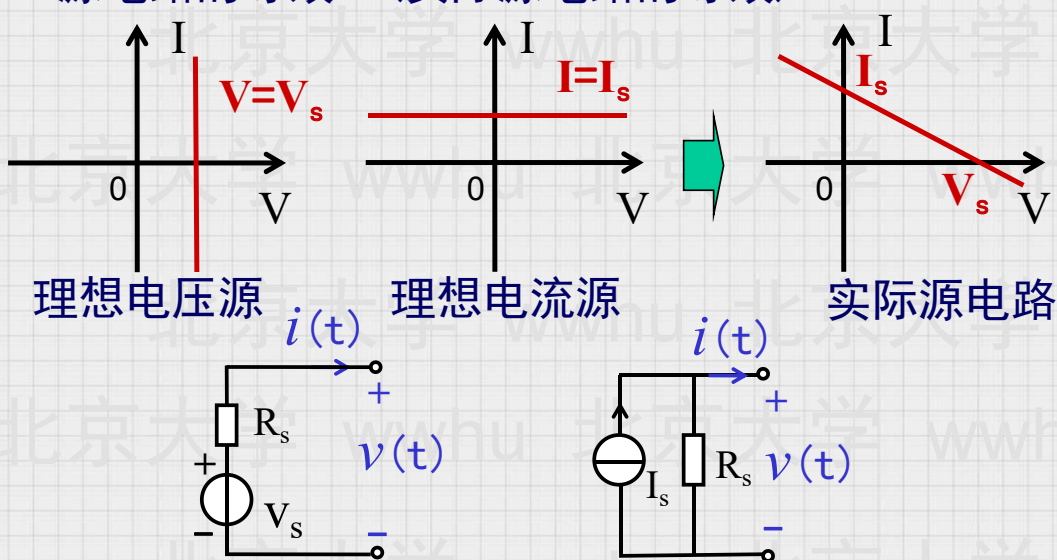
3. 源电路的等效：



{ 与电压源并联的元件对外电路不起作用
 与电流源串联的元件对外电路不起作用

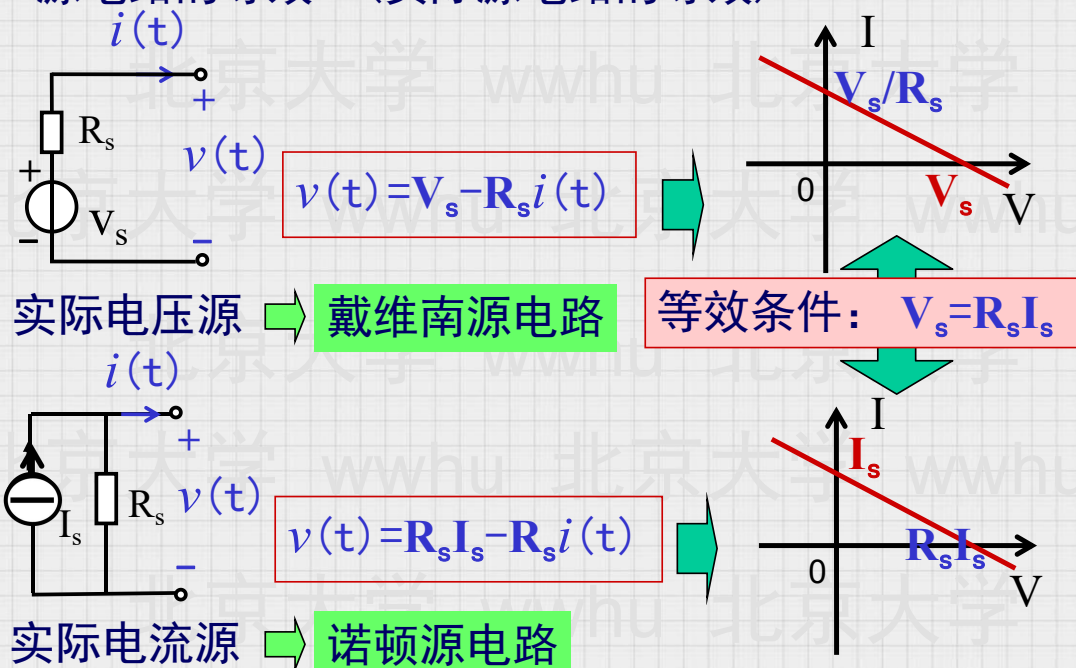
第三节：线性二端（单口）网络的等效

3. 源电路的等效：（实际源电路的等效）



第三节：线性二端（单口）网络的等效

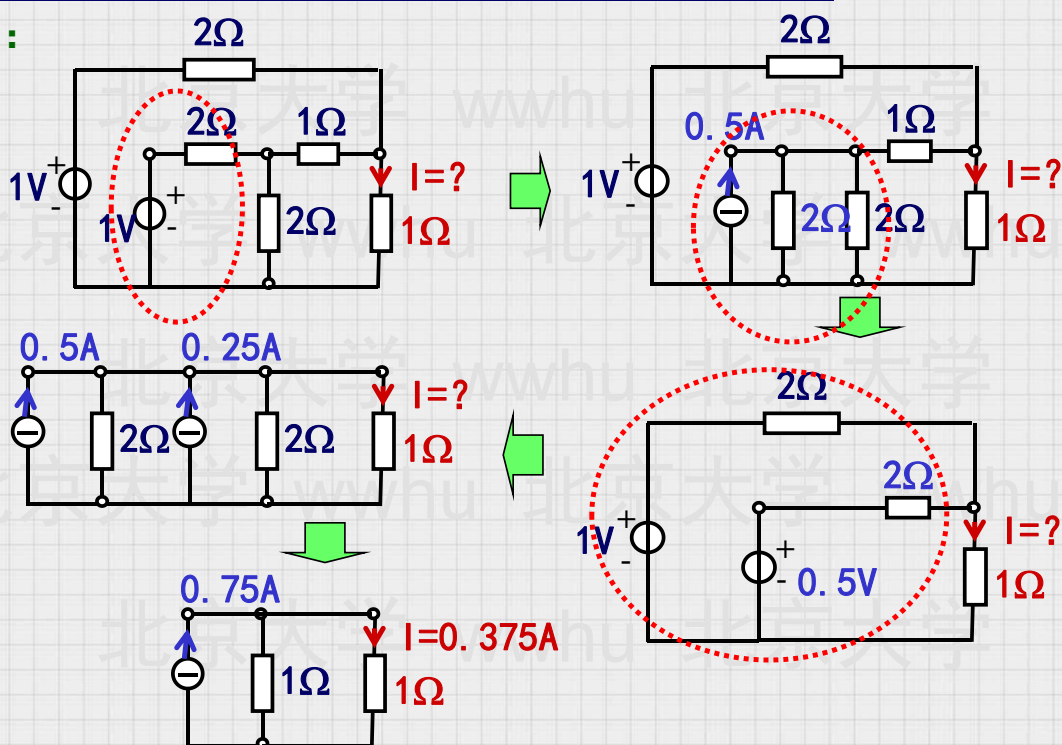
3. 源电路的等效：（实际源电路的等效）



观察一下两个电路的特征。。。 (Observe the characteristics of the two circuits...)

第三节：线性二端（单口）网络的等效

例：



Tea break!

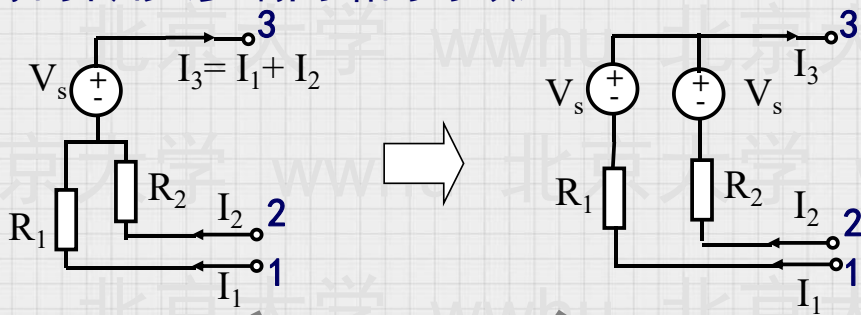


作业：1-4, 6, 9, 23



第三节：线性二端（单口）网络的等效

4. 源的转移（多端网络的等效）：



$$\begin{aligned} V_{32} &= V_s - I_2 R_2 \\ V_{31} &= V_s - I_1 R_1 \\ V_{12} &= I_1 R_1 - I_2 R_2 \end{aligned}$$

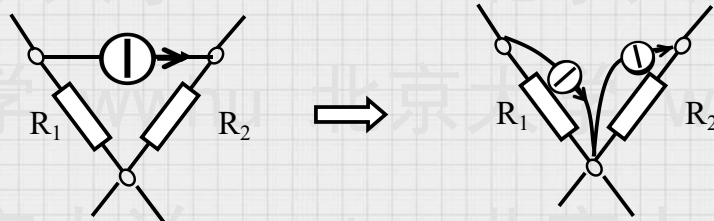
满足口特性完全相同
(伏安关系式相等)

推广到多端情况，三角转换，

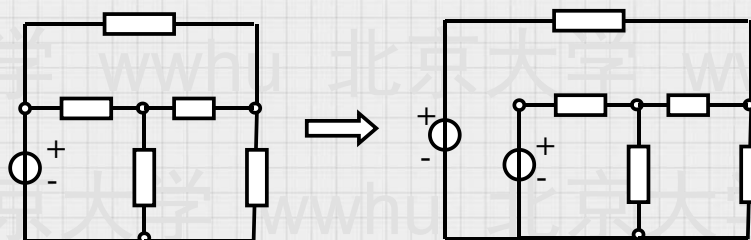
第三节：线性二端（单口）网络的等效

4. 源的转移（多端网络的等效）：

电流源的转移：



例：（转移的好处）



推广到多端情况...

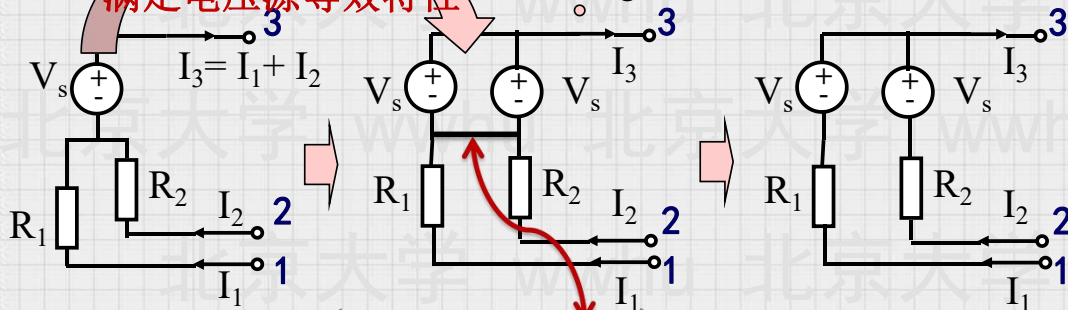
第三节：线性二端（单口）

Learning from students...

09G孙宇翔

用电路的语言证明源的转移：

满足电压源等效特性



电位相同则没有电流
故连线可以断开

$$V_{32} = V_s - I_2 R_2$$

$$V_{31} = V_s - I_1 R_1$$

$$V_{12} = I_1 R_1 - I_2 R_2$$

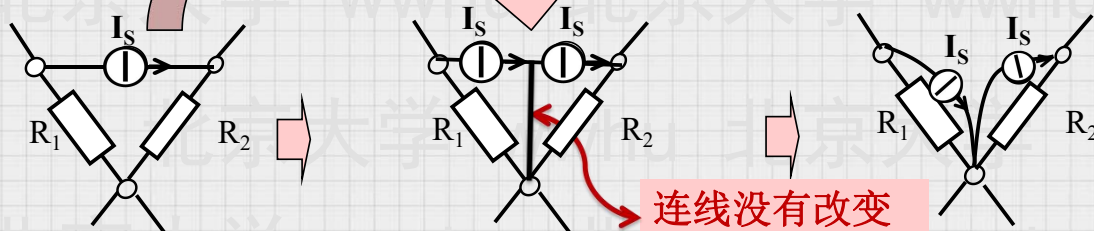
满足口特性完全相同
(伏安关系式相等)

第三节：线性二端（单口）网络的等效

用电路的语言证明源的转移：

电流源的转移：

满足电流源等效特性

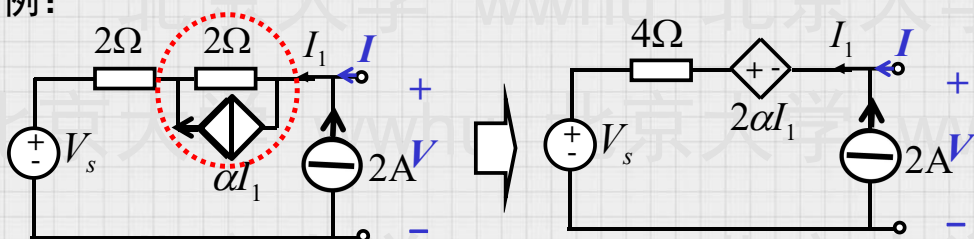


连线没有改变
各节点的KCL关系, 并且串接的
电流源的电压
是可以被定义的, 故可连.

第三节：线性二端（单口）网络的等效

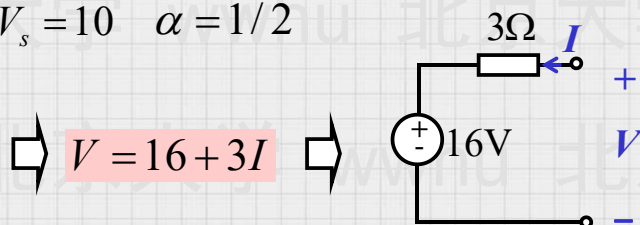
5. 含受控源单口网络的等效：

例：



$$\begin{aligned} V &= V_s + 4I_1 - 2\alpha I_1 \\ &= V_s + 4(2 - \alpha) + (4 - 2\alpha)I \end{aligned}$$

(1) 取 $V_s = 10$ $\alpha = 1/2$



穷推到无语...

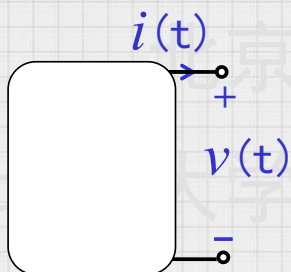
第三节：线性二端（单口）网络的等效

5. 含受控源单口网络的等效：

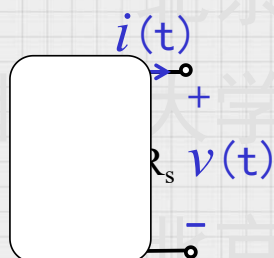
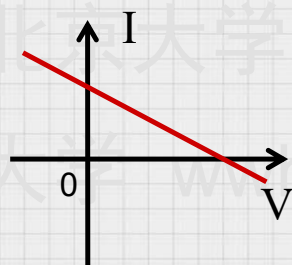
- 1) 源：当控制量在被等效的网络之外，则受控源具有源的特性，处理方法和独立源的相同。
- 2) 非源：当控制量在被等效的电路之内时，只能利用基尔霍夫定律（KCL KVL）通过写方程的形式，获得端口电压与电流的伏安关系。

第三节：线性二端（单口）网络的等效

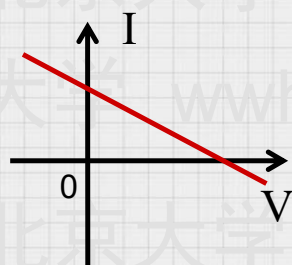
3. 源电路的等效：（实际源电路的等效）



$$v(t) = a i(t) + b$$



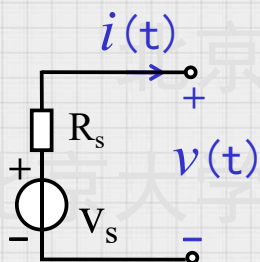
$$i(t) = a v(t) + b$$



代数关系？

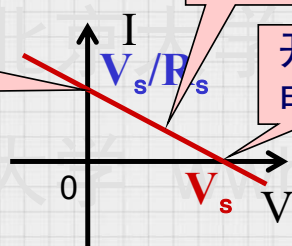
第三节：线性二端（单口）网络的等效

3. 源电路的等效：（实际源电路的等效）



$$v(t) = V_s - R_s i(t)$$

短路
电流

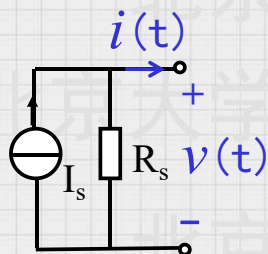


(斜率)
等效
电阻

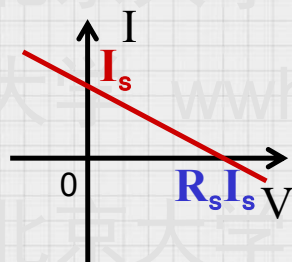
开路
电压

实际电压源 \Rightarrow 戴维南源电路

$$\text{等效条件: } V_s = R_s I_s$$



$$v(t) = R_s I_s - R_s i(t)$$



实际电流源 \Rightarrow 诺顿源电路

第三节：线性二端（单口）网络的等效

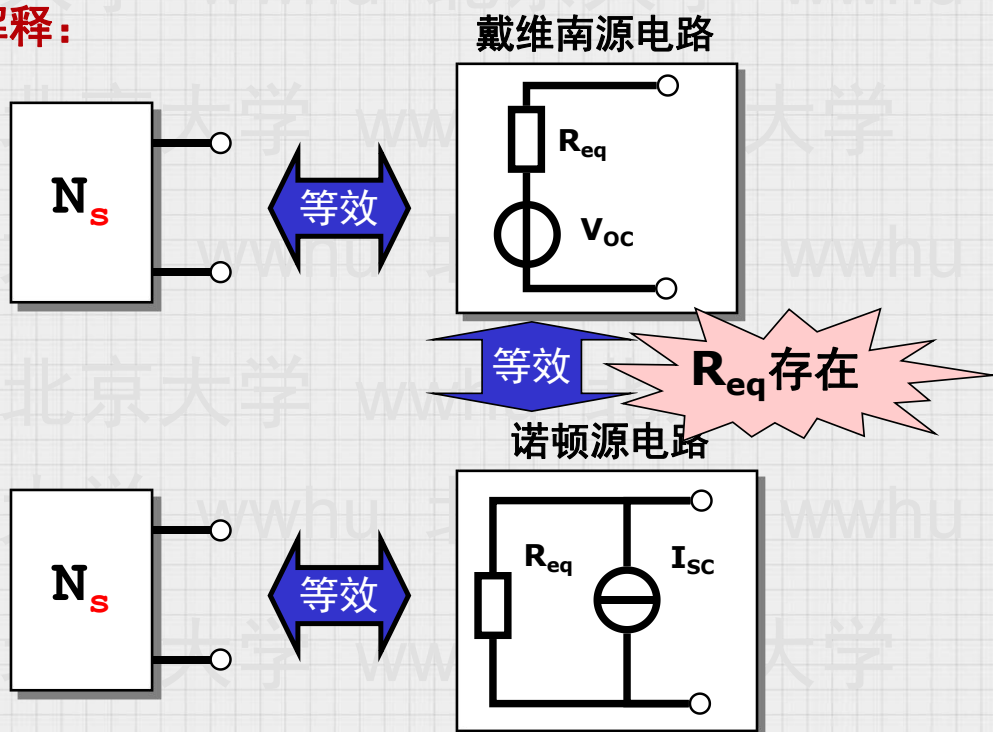
戴维南定理和诺顿定理

描述：任何一个线性含源二端网络，如果已知其端口上的开路电压 V_{OC} 短路电流 I_{SC} 和等效电阻 R_{eq} ，则：

- ▲ 该网络可以用一个电压源为 V_{OC} 和电阻为 R_{eq} 的串联来等效替换（戴维南定理）；
- ▲ 也可以用一个电流源为 I_{SC} 和电阻为 R_{eq} 的并联来等效替换（诺顿定理）；
- ▲ 并且有： $V_{OC} = I_{SC} R_{eq}$

第三节：线性二端（单口）网络的等效

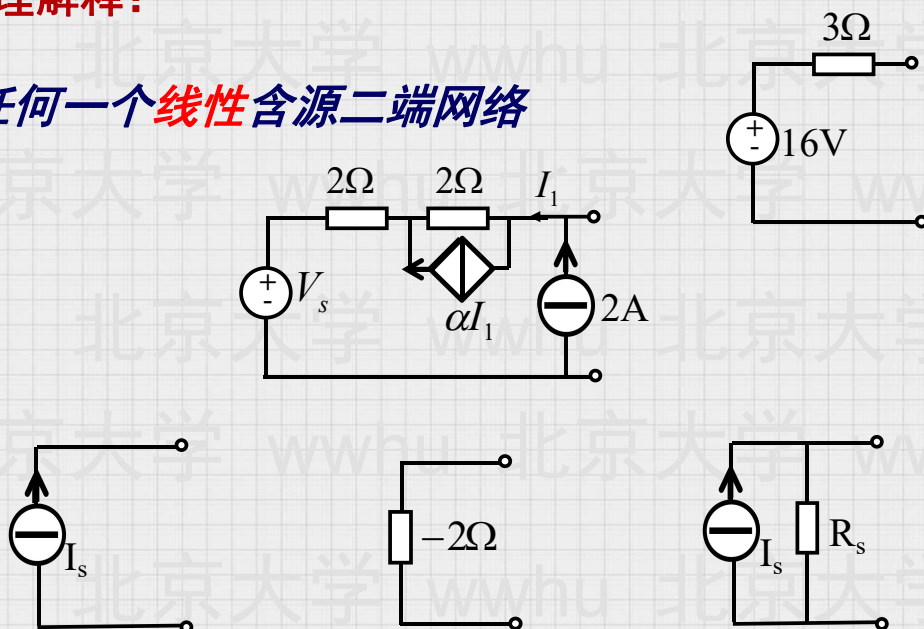
定理解释：



第三节：线性二端（单口）网络的等效

定理解释：

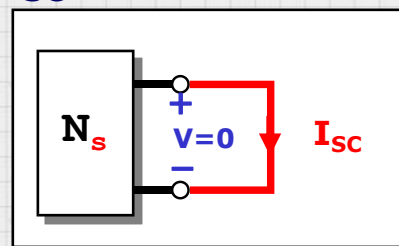
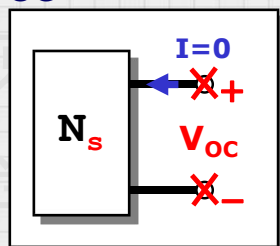
任何一个线性含源二端网络



戴维南和诺顿定理

开路电压 $V_{oc}=?$

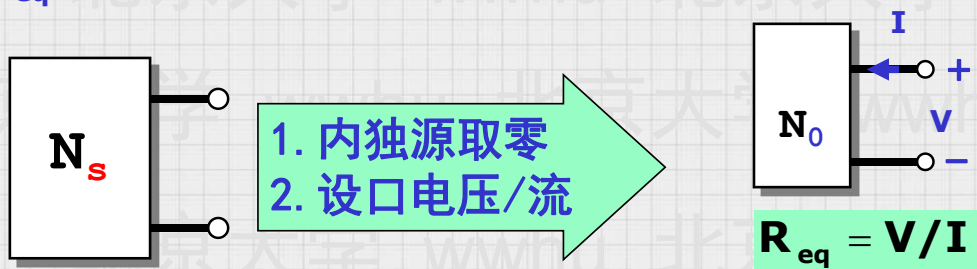
短路电流 $I_{sc}=?$



戴维南和诺顿定理

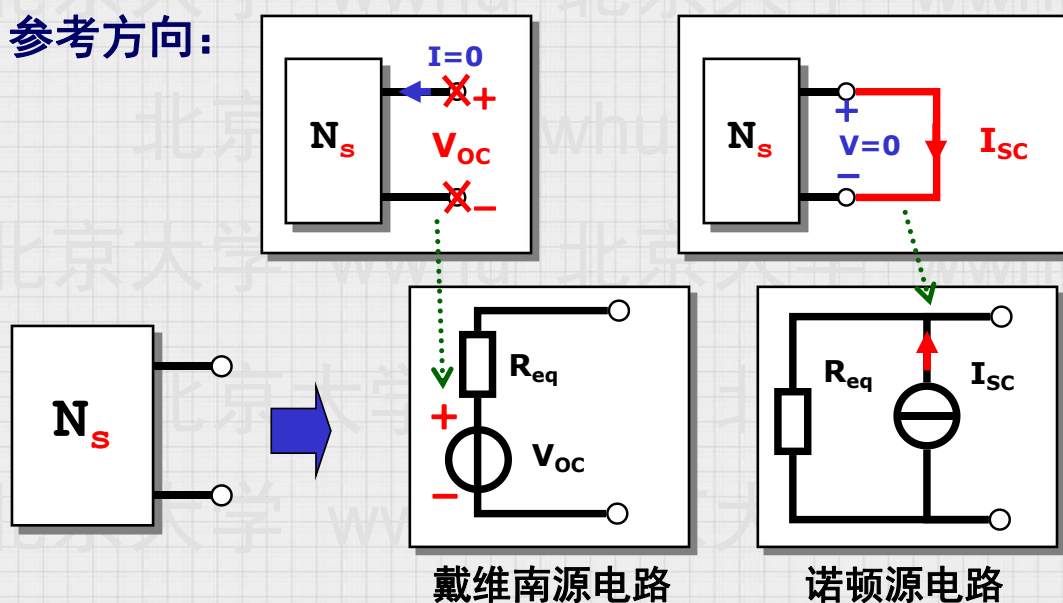
等效电阻 $R_{eq} = ?$

R_{eq} 是在网络内独立源都取零时的等效输入电阻。



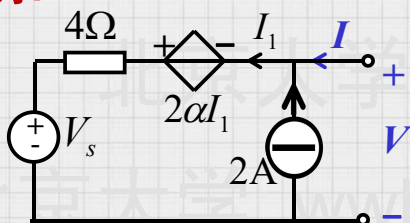
戴维南和诺顿定理

参考方向:

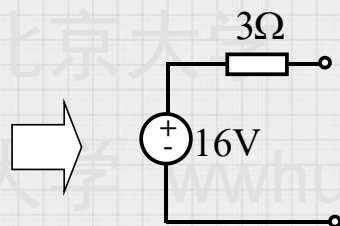


戴维南和诺顿定理

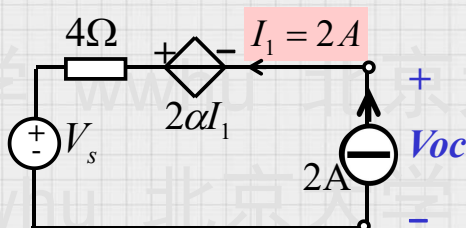
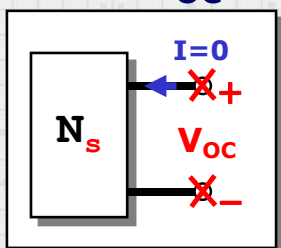
例:



已知: $V_s = 10$ $\alpha = 1/2$



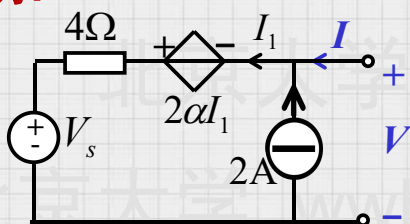
开路电压 $V_{oc} = ?$



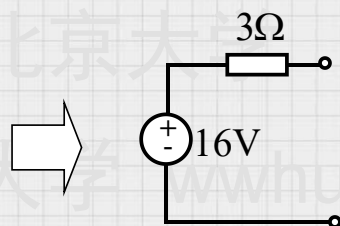
$$V_{oc} = V_s + 4I_1 - 2\alpha I_1 = 10 + 8 - 2 = 16$$

戴维南和诺顿定理

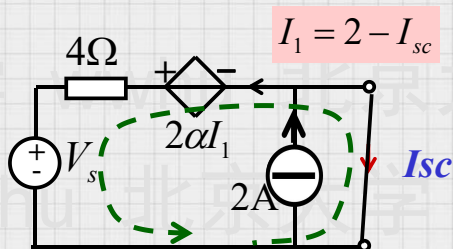
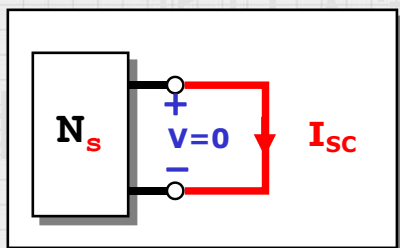
例:



已知: $V_s = 10$ $\alpha = 1/2$



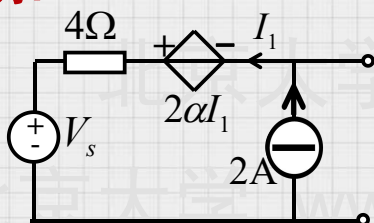
短路电流 $I_{sc} = ?$



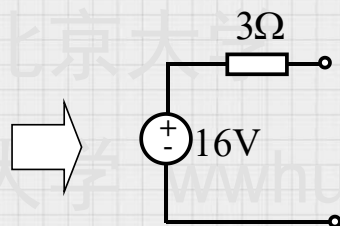
$$-2\alpha I_1 + V_s + 4I_1 = 0 \Rightarrow I_{sc} = 16/3$$

戴维南和诺顿定理

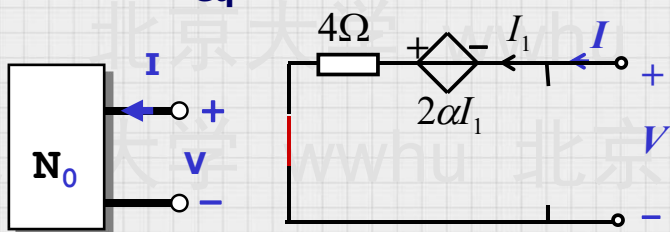
例:



已知: $V_s = 10$ $\alpha = 1/2$



等效电阻 $R_{eq} = ?$



$$I_1 = I$$

$$V = -2\alpha I + 4I$$

$$R_{eq} = \frac{V}{I} = -2\alpha + 4 = 3$$

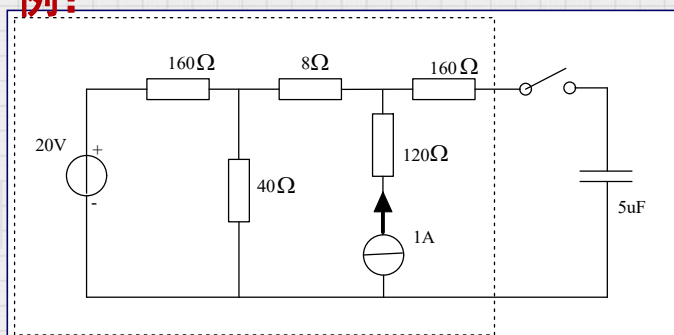
$$R_{eq} = V/I$$

$$\text{验证: } V_{OC} = I_{SC} R_{eq}$$

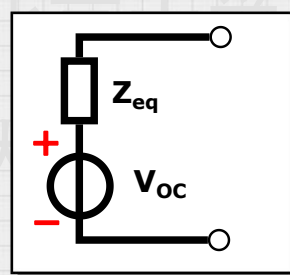
$$\rightarrow 16 = 16/3 \times 3$$

第三节：线性二端（单口）网络的等效

例:

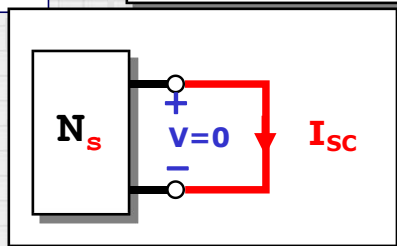
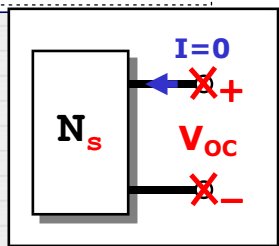


求：戴维南源电路



解法1:

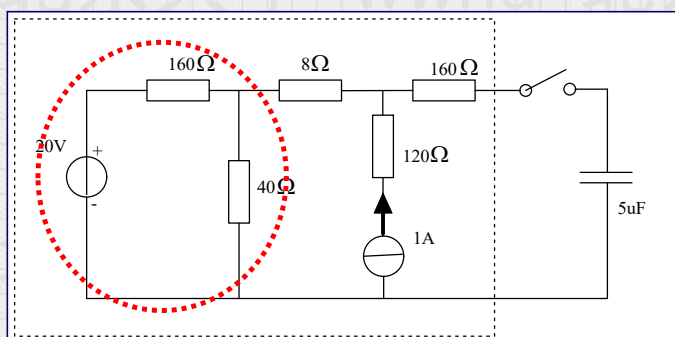
利用戴维南或诺顿定理



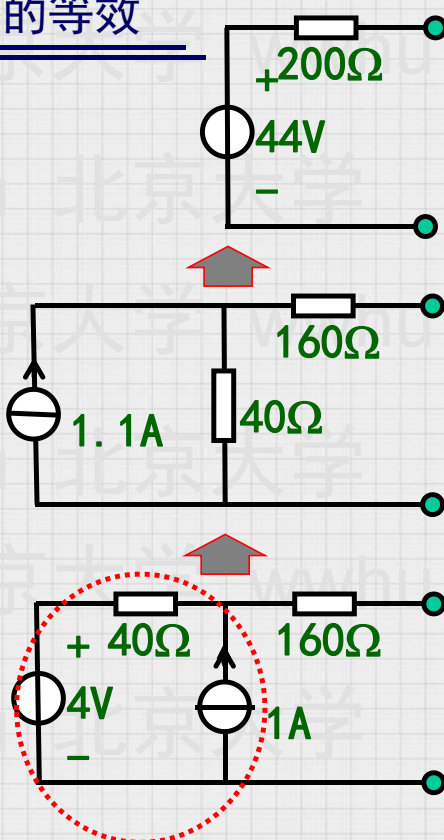
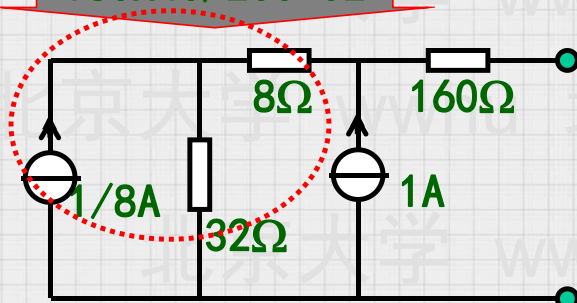
解法2:

利用戴维南和诺顿源电路的等效转换，直接简化电路。

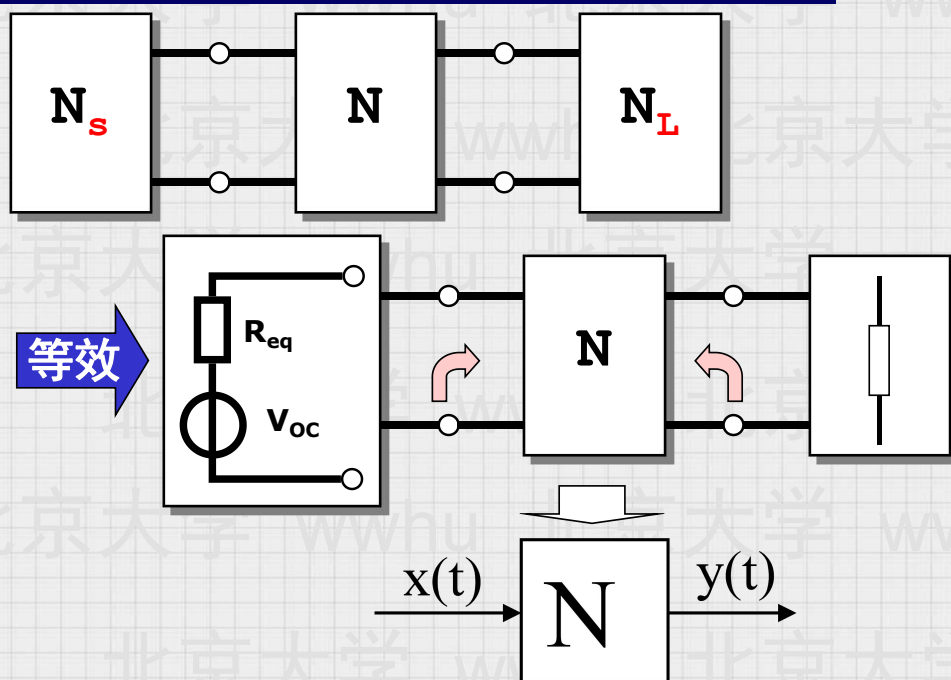
第三节：线性二端（单口）网络的等效



$$160 \times 40 / 200 = 32$$

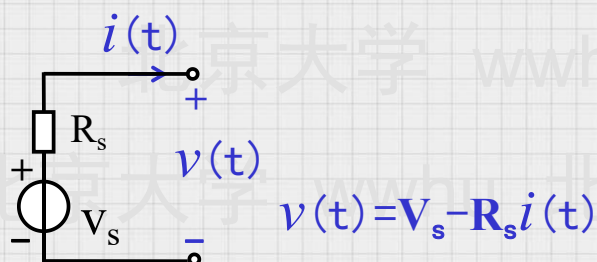


戴维南和诺顿定理



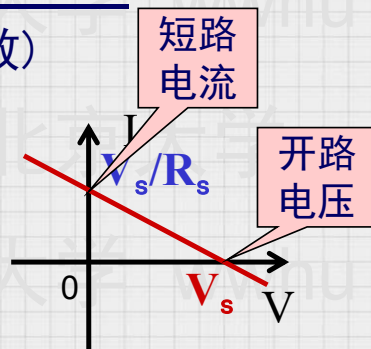
这个定理你怎么看？

3. 源电路的等效：（实际源电路的等效）

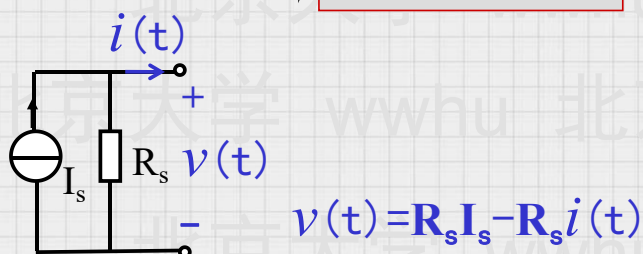


$$v(t) = V_s - R_s i(t)$$

实际电压源 \Rightarrow 戴维南源电路

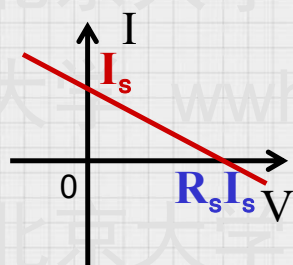


等效条件： $V_s = R_s I_s$



$$v(t) = R_s I_s - R_s i(t)$$

实际电流源 \Rightarrow 诺顿源电路

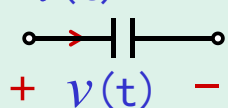


电路中的对偶关系：举一反三

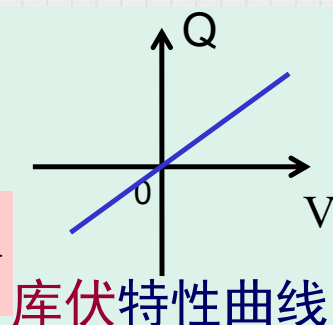
a. 线性定常电容：C

约束方程： $Q(t) = C v(t)$

符号： $i(t)$



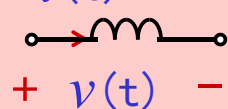
$$i(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = C \frac{dv(t)}{dt}$$



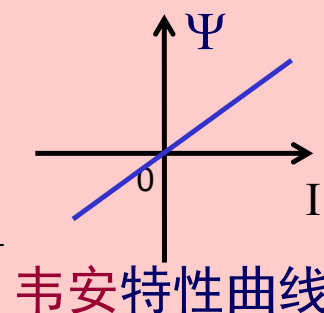
b. 线性定常电感：L

约束方程： $\Psi(t) = L i(t)$

符号： $i(t)$



$$v(t) = \frac{d\Psi(t)}{dt} = L \frac{di(t)}{dt}$$



关于线性。。。

第一节：线性电路分析导论

✎ 集总假设、基本方法、基本参数、
基本术语、参考方向、
基本定律（KVL、KCL、VCR）

第二节：常见电路元件及其约束方程

✎ 元件分类、电阻元件、独立源、
受控源、动态元件

第三节：线性二端（单口）网络的等效

✎ 等效的概念、源的转移、
戴维南定理、诺顿定理（源的等效）

第一章：线性电路分析基础

第一节：线性电路分析导论

✎ 集总假设、基本方法、基本参数、
基本方程 基本术语、参考方向、
基本定律（KCL、KVL、VCR定律）

第二节：常见线性电路元件及其约束方程

✎ 元件分类、电阻元件、独立源、
基本元件 受控源、动态元件

第三节：线性二端（单口）网络的等效

✎ 等效的概念、戴维南定理、诺顿定理
基本等效

