

# 电路基本理论

## 电路变量和电路元件

尹华锐

电子工程与信息科学系  
中国科学技术大学  
yhr@ustc.edu.cn

# 教学目标

- 电压, 电流, 电荷, 功率和能量等基本概念。
- 基本元件 电阻, 电容, 电感, 独立电源, 受控电源
- 基尔霍夫电流、电压方程 (KCL, KVL)
- 作业  
P26 1,2,3,4,6,7,8,9,10,11,15,17,18,19

# 电路变量-电流

■ 电流: 电荷的移动产生电流, 单位时间通过某横截面的电荷数目

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

■ 表达式中各符号单位:

电流 **A**mpere 安培

电荷 **C**oulombs 库仑

时间 **S**econd 秒

# 电路变量-电流

■ **电流**: 电荷的移动产生电流，单位时间通过某横截面的电荷数目

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

■ 表达式中各符号单位:

电流 **Ampere** 安培

电荷 **Coulombs** 库仑

时间 **Second** 秒

★ 电荷数目是一个整数（离散量）并不代表我们就认定电流是一个离散量，我们还是默认为连续量；

★ 电流传播速率采用电磁场的传播速率  $3 \times 10^8 m/s$  。  
这与电子学中电子移动速率不一致

# 电路变量-电流

■ 对任意一个电路，分析电路的响应之前需要知道电流的方向，不同的电流方向可能导致不同的分析结果。



# 电路变量-电流

■ 对任意一个电路，分析电路的响应之前需要知道电流的方向，不同的电流方向可能导致不同的分析结果。

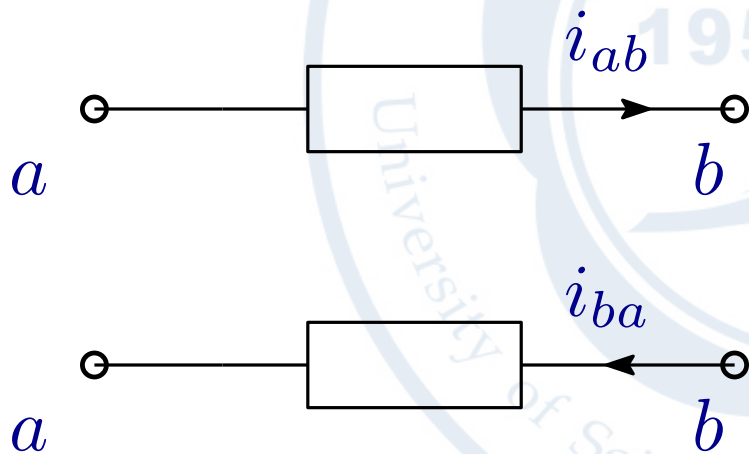


Fig. 1 实际电路中的电流方向

# 电路变量-电流

■ 对任意一个电路，分析电路的响应之前需要知道电流的方向，不同的电流方向可能导致不同的分析结果。

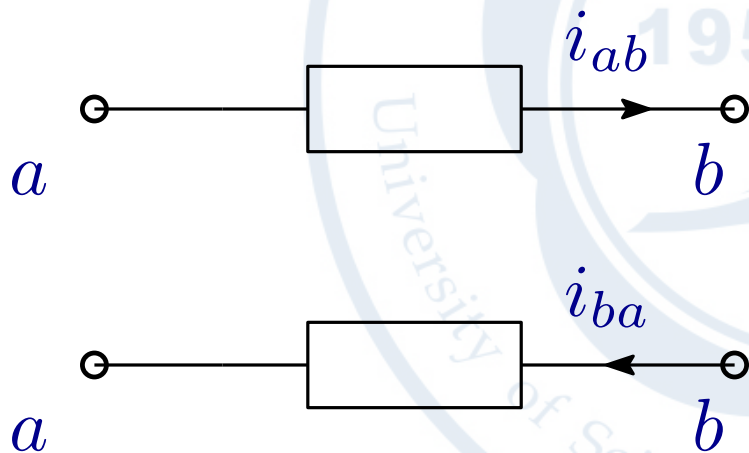


Fig. 1 实际电路中的电流方向

解决方案:

随机选择一个方向作为(参考方向, Reference Direction)。如果求出的结果为正, 参考方向就是真正的电流方向; 否则参考方向和实际电流方向相反。

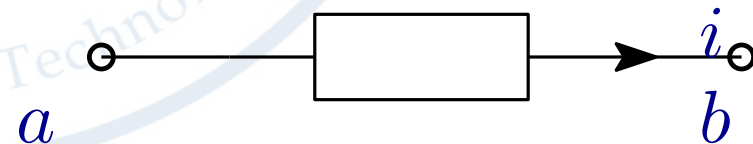


Fig. 2 参考方向

# 电路变量-电流





# 电路变量-电流

## ■ 电流分类

- ★ [直流 Direct Current, DC] 大小和方向都不改变的电流为直流
- ★ [交流 Alternating Current, AC] 电流大小和方向均呈周期性变化的电流，电流的平均值等于 0

## ■ 问题：

是否存在既不是交流 (AC)也不是直流 (DC)的电流？

# 电路变量-电压, Voltage

## ■ 电压:

分离单位电荷所需要的能量。电压的微分形式为:

$$u = \frac{dw}{dq}$$

# 电路变量-电压, Voltage

## ■ 电压:

分离单位电荷所需要的能量。电压的微分形式为:

$$u = \frac{dw}{dq}$$

★  $u$  电压 单位: 伏特 ( $V$ )

★  $w$  能量 单位: 焦耳 ( $J$ )

★  $q$  电荷 单位: 库伦 ( $C$ )

# 电路变量-电压, Voltage

## ■ 电压:

分离单位电荷所需要的能量。电压的微分形式为:

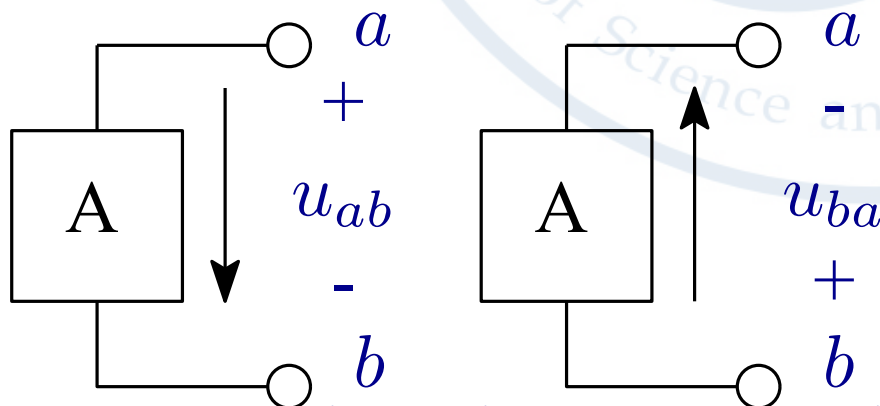
$$u = \frac{dw}{dq}$$

电压方向和电流方向面临  
类似的困局

★  $u$  电压 单位: 伏特 ( $V$ )

★  $w$  能量 单位: 焦耳 ( $J$ )

★  $q$  电荷 单位: 库伦 ( $C$ )



# 电路变量-电压, Voltage

## ■ 电压:

分离单位电荷所需要的能量。电压的微分形式为:

$$u = \frac{dw}{dq}$$

★  $u$  电压 单位: 伏特 ( $V$ )

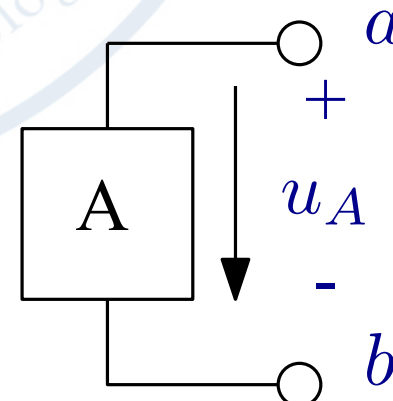
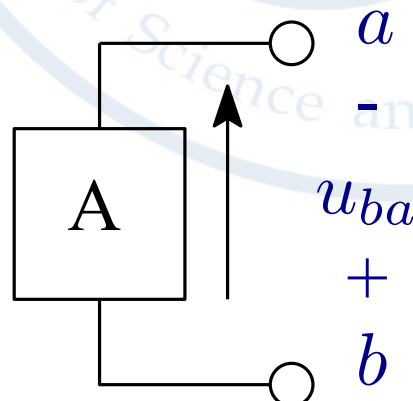
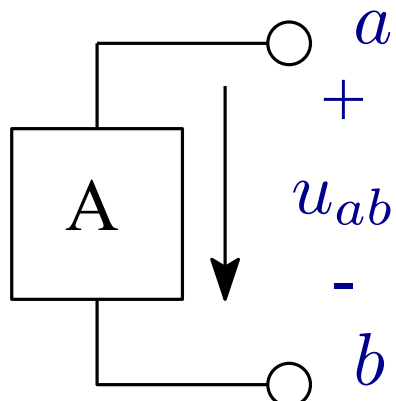
★  $w$  能量 单位: 焦耳 ( $J$ )

★  $q$  电荷 单位: 库伦 ( $C$ )

电压方向和电流方向面临类似的困局

解决方案:

随机选择一个方向作为参考方向, 如果计算出结果是“+”, 则真实电压方向和参考方向一致, 否则真是电压方向和实际电压方向相反。



# 电路变量，关联参考方向

- 直流电压: DC Voltage

- 交流电压: AC Voltage

- 关联参考方向 **Passive Sign Convention**

电流参考方向选择从电压参考方向的 '+' 端流向电压参考方向的 '-' 端。即把元件默认为**被动元件**选择电压电流方向，称为**关联参考方向 (Passive Sign Convention)**

# 电路变量，关联参考方向

■ 直流电压: DC Voltage

■ 交流电压: AC Voltage

■ 关联参考方向 **Passive Sign Convention**

电流参考方向选择从电压参考方向的 '+' 端流向电压参考方向的 '-' 端。即把元件默认为**被动元件**选择电压电流方向，称为**关联参考方向 (Passive Sign Convention)**

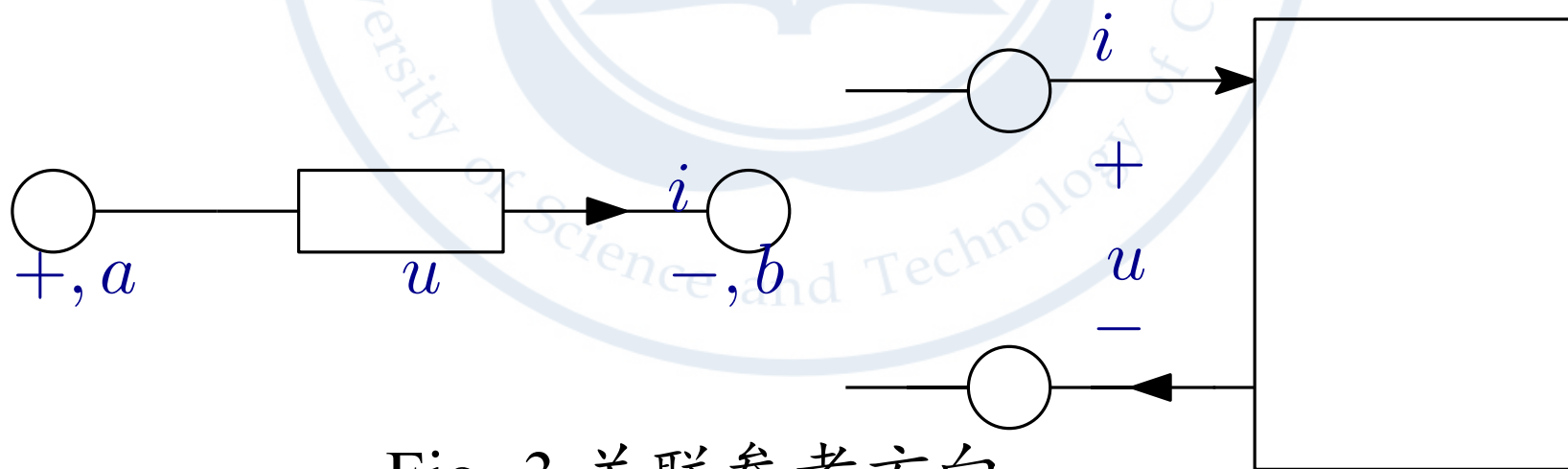


Fig. 3 关联参考方向



# 功率和能量-Power and Energy

★ 功率是电路中反映电路系统和元件的一个关键参数。





# 功率和能量-Power and Energy

- ★ 功率是电路中反映电路系统和元件的一个关键参数。
- ★ 功率 ( $P$ ) 反应从其他能源和电能之间相互转换的速率

$$p = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta w}{\Delta t} = \frac{dw}{dt} = ui$$

$$W = \int dW = \int u dq = \int_{t_0}^t u(\xi) i(\xi) d\xi$$

# 功率和能量-Power and Energy

- ★ 功率是电路中反映电路系统和元件的一个关键参数。
- ★ 功率 ( $P$ ) 反应从其他能源和电能之间相互转换的速率

$$p = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta w}{\Delta t} = \frac{udq}{dt} = ui$$

$$W = \int dW = \int udq = \int_{t_0}^t u(\xi)i(\xi)d\xi$$

- ★ 关联参考方向：如果  $p > 0$ , 元件吸收功率; 如果  $p < 0$ , 元件释放功率。

Power is delivered to the device

- ★ 非关联参考方向：如果  $p > 0$ , 元件释放功率; 如果  $p < 0$ , 元件吸收功率。

Power is extracted from the device

# 功率和能量举例

■ 在所示电路中电压是  $u$ , 电流是  $i$ 。  $u, i$  方向选择分为 (1)(2)。 则功率由  $p = dw/dt = ui$ 。 单位:  $W, 1W = 1V \times 1A$ 。



Fig. 4 功率和参考方向

# 功率和能量举例

■ 在所示电路中电压是  $u$ , 电流是  $i$ 。  $u, i$  方向选择分为 (1)(2)。 则功率由  $p = dw/dt = ui$ 。 单位:  $W, 1W = 1V \times 1A$ 。



Fig. 4 功率和参考方向

■ Case a:  $u = -10V, i = 2A, p = ui = -20W$ ; 发出功率

★ 关联参考方向:  $p < 0$ , 释放功率

# 功率和能量举例

■ 在所示电路中电压是  $u$ , 电流是  $i$ 。  $u, i$  方向选择分为 (1)(2)。 则功率由  $p = dw/dt = ui$ 。 单位:  $W, 1W = 1V \times 1A$ 。



Fig. 4 功率和参考方向

■ Case a:  $u = -10V, i = 2A, p = ui = -20W$ ; 发出功率

★ 关联参考方向:  $p < 0$ , 释放功率

■ Case b:  $u = 10V, i = 2A, p = ui = 20W$ ; 释放功率

★ 非关联参考方向:  $p > 0$ , 释放功率

# 功率和能量举例

■ 在所示电路中电压是  $u$ , 电流是  $i$ 。  $u, i$  方向选择分为 (1)(2)。 则功率由  $p = dw/dt = ui$ 。 单位:  $W, 1W = 1V \times 1A$ 。



Fig. 4 功率和参考方向

■ Case a:  $u = -10V, i = 2A, p = ui = -20W$ ; 发出功率

★ 关联参考方向:  $p < 0$ , 释放功率

■ Case b:  $u = 10V, i = 2A, p = ui = 20W$ ; 释放功率

★ 非关联参考方向:  $p > 0$ , 释放功率

# 电路元件





# 电路元件





# 电路元件

## ■ 五个基本元件

- Resistance 电阻
- Inductor 电感
- Capacitor 电容
- Current Source 电流源
- Voltage Source 电压源

# 电阻元件 (欧姆定律)

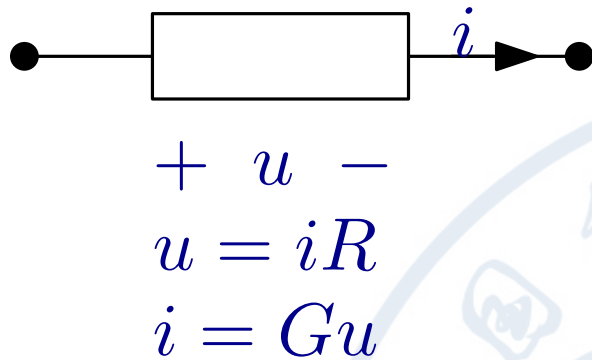


Fig. 6 电阻电压电流关系

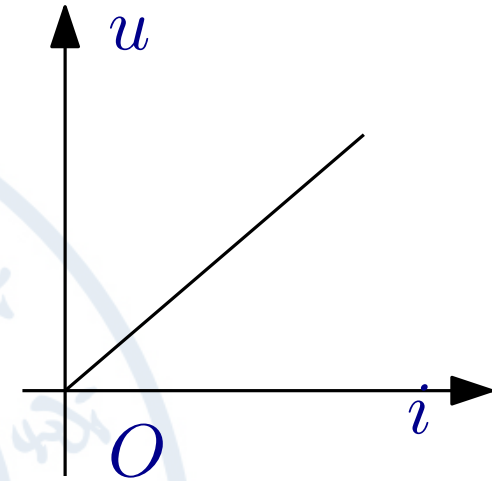


Fig. 7 电阻电压电流关系

★ 电阻 (R): 单位  $\Omega$

★ 电导 (G): 单位 Simense

$$RG = 1$$

★ 电阻: 电压和电流满足线性关系

功率和能量关系

$$p = ui = i^2 R$$

$$\begin{aligned} \blacksquare w &= \int_{-\infty}^t p(\xi) d\xi \\ &= R \int_{-\infty}^t i^2(\xi) d\xi \\ &= G \int_{-\infty}^t u^2(\xi) d\xi \end{aligned}$$

# 电阻元件-讨论

★ 被动元件

★ 对于一个元件，若  $u, i$  满足  $u = Ri$ ，我们定义为电阻元件，对  $R > 0$  or  $R < 0$  并无限定或者做出要求

# 电容器件-电压电流关系

■ 电容是一个在**电场**中储存能量的**无源元件**，它是在现实系统中具有广泛应用的**动态存储元件**。



# 电容器件-电压电流关系

■ 电容是一个在**电场**中储存能量的**无源元件**，它是在现实系统中具有广泛应用的**动态存储元件**。

★ 电容模型为由电介质隔离（包括真空）的两个导电板。



# 电容器件-电压电流关系

■ 电容是一个在**电场**中储存能量的**无源元件**，它是在现实系统中具有广泛应用的**动态存储元件**。

★ 电容模型为由电介质隔离（包括真空）的两个导电板。

◇ 电容容量  $C$  是电容的导电板所携带的电荷  $q$  与导电板电压  $u$  之比

$$C = \frac{\epsilon A}{d}$$

# 电容器件-电压电流关系

■ 电容是一个在电场中储存能量的无源元件，它是在现实系统中具有广泛应用的动态存储元件。

★ 电容模型为由电介质隔离（包括真空）的两个导电板。

◇ 电容容量  $C$  是电容的导电板所携带的电荷  $q$  与导电板电压  $u$  之比

$$C = \frac{\epsilon A}{d}$$

◇ 电容上电荷储存量  $q$ 、电容电压  $u$  和电容容值  $C$  之间的关系：

$$q = Cu$$

★ 电容电荷电流关系：

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

# 电容器件-电压电流关系

## ■ 电压电流关系

$$i = C \frac{du}{dt}$$
$$u(t) = \frac{q(t)}{C} = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\xi) d\xi = u(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\xi) d\xi$$



# 电容器件-电压电流关系

## ■ 电压电流关系

$$i = C \frac{du}{dt}$$
$$u(t) = \frac{q(t)}{C} = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\xi) d\xi = \boxed{u(t_0)} + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\xi) d\xi$$

反应  $t_0$  时刻之前全部电流对电压的影响  $\longrightarrow$  初始电压

# 电容器件-电压电流关系

## ■ 电压电流关系

$$i = C \frac{du}{dt}$$
$$u(t) = \frac{q(t)}{C} = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\xi) d\xi = \boxed{u(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\xi) d\xi}$$

反应  $t_0$  时刻之前全部电流对电压的影响  $\longrightarrow$  **初始电压**

## ■ 电容功率

$$p = ui = Cu \frac{du}{dt}$$

## ■ 电容储能

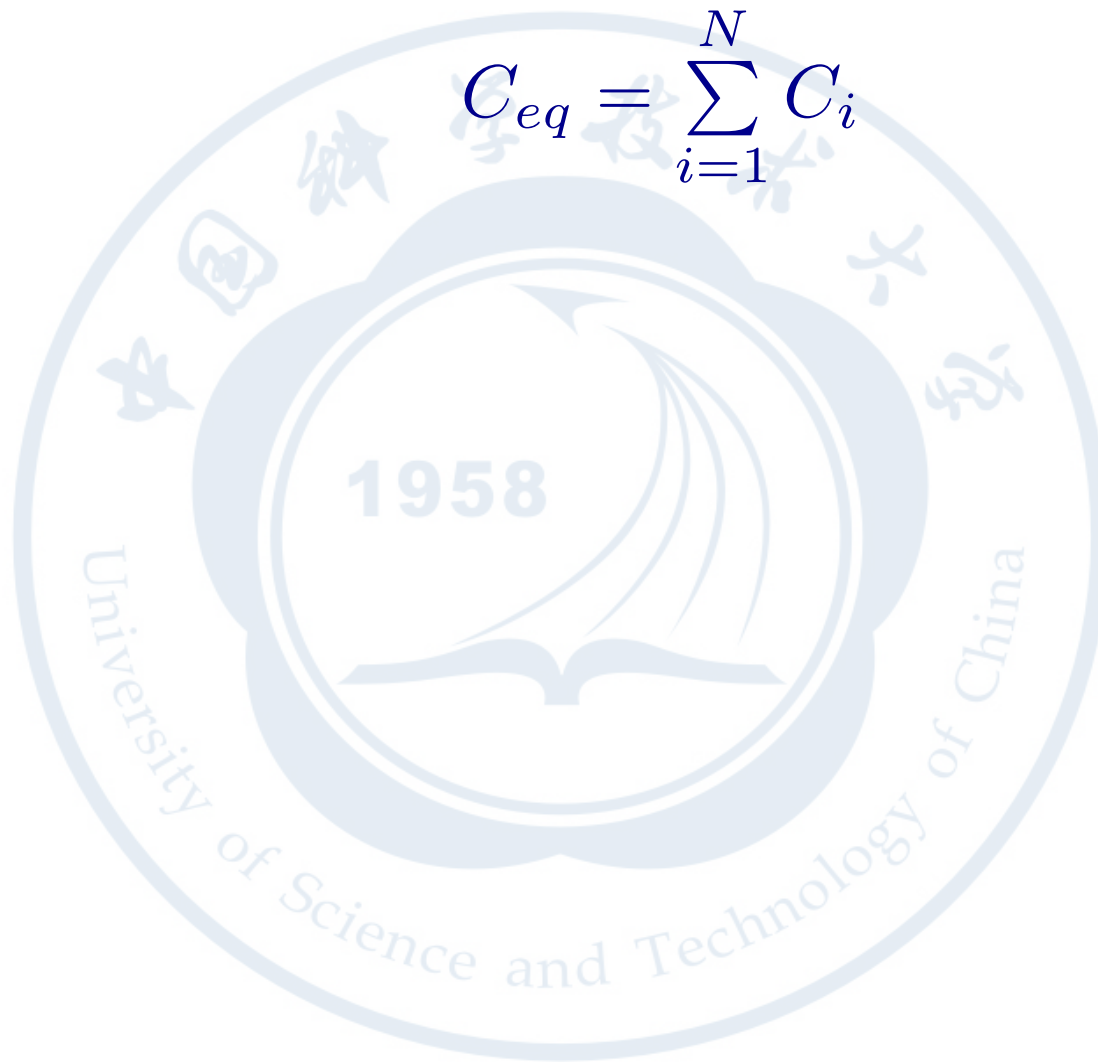
$$w_e(t) = \int_{\xi=-\infty}^t p(\xi) d\xi = \int_{\xi=-\infty}^t Cu \frac{du}{d\xi} d\xi = \int_{\xi=-\infty}^t C u du$$
$$= \frac{1}{2} C u^2 \Big|_{u(-\infty)}^{u(t)} = 0.5 C u^2$$

$i \longleftrightarrow q \longleftrightarrow u \longleftrightarrow w_e(t)$ , 电荷数目和电能可以通过充放电相互转化,  
**储能元件**, 转换过程无能量损耗  $\longrightarrow$  **无损元件**

# 电容器件-电压电流关系

★ 并联等效电容等于各电容之和：

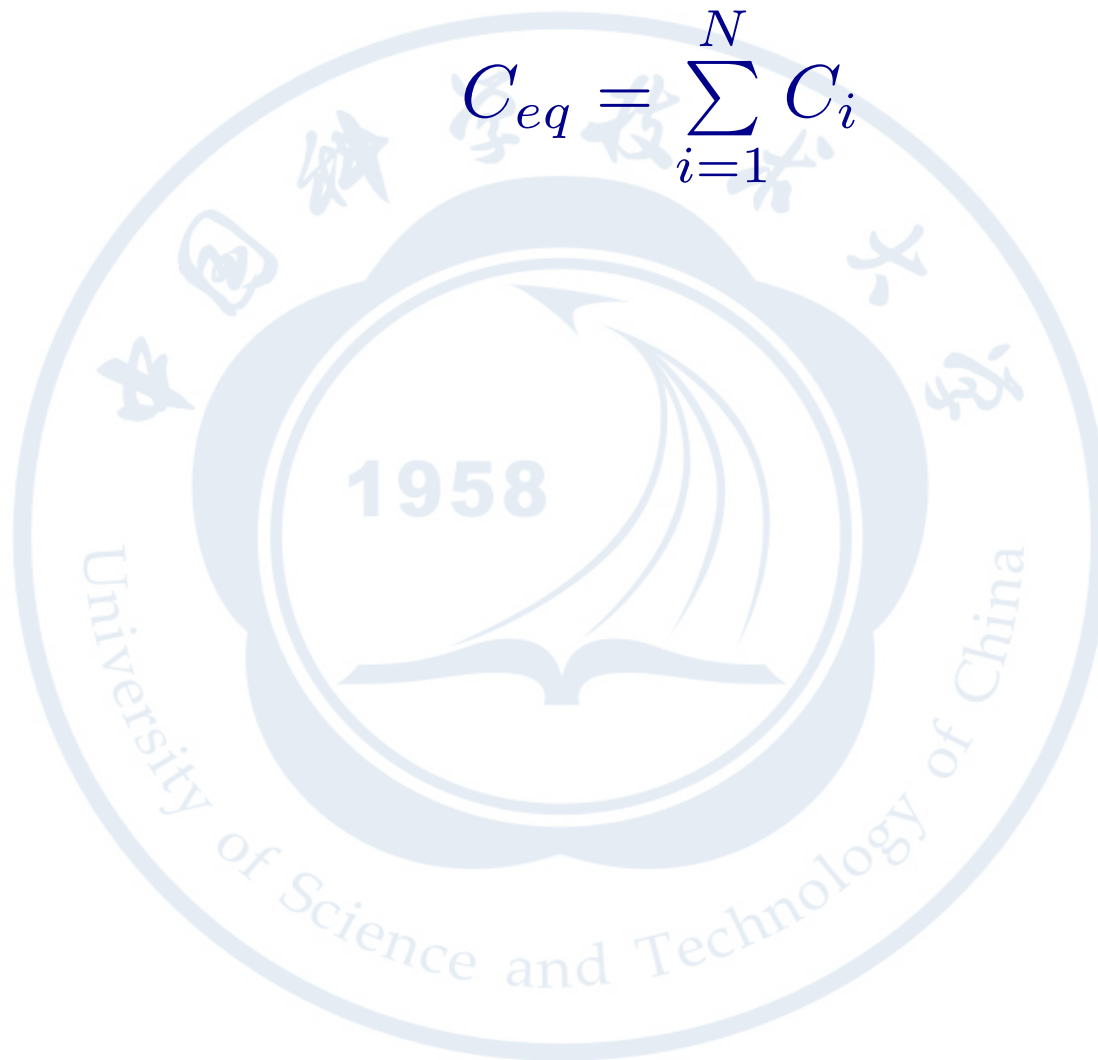
$$C_{eq} = \sum_{i=1}^N C_i$$



# 电容器件-电压电流关系

★ 并联等效电容等于各电容之和：

$$C_{eq} = \sum_{i=1}^N C_i$$



# 电容器件-电压电流关系

★ 并联等效电容等于各电容之和：

$$C_{eq} = \sum_{i=1}^N C_i$$

★ 串联等效电容的倒数等于各电容倒数之和：

$$\frac{1}{C_{eq}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{C_i}$$

# 电容器件-电压电流关系

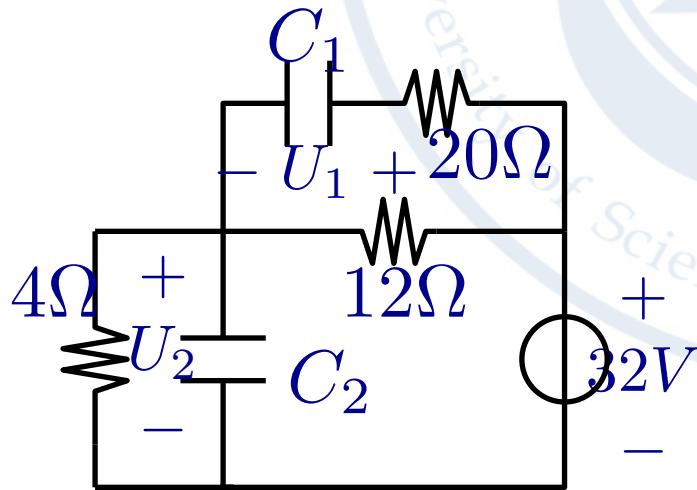
★ 并联等效电容等于各电容之和：

$$C_{eq} = \sum_{i=1}^N C_i$$

★ 串联等效电容的倒数等于各电容倒数之和：

$$\frac{1}{C_{eq}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{C_i}$$

■ 已知  $C_1 = 0.5F, C_2 = 0.25F$ 。计算电容储能



$$U_1 = \frac{12\Omega}{12\Omega + 4\Omega} \times 32V = 24V$$

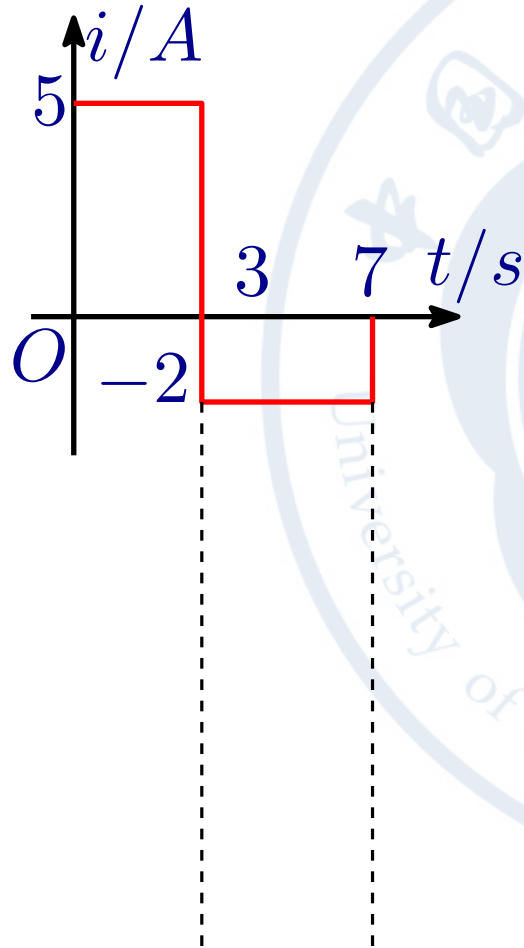
$$U_2 = 32V - U_1 = 8V$$

$$W_1 = 0.5C_1U_1^2 = 144J$$

$$W_2 = 0.5C_2U_2^2 = 8J$$

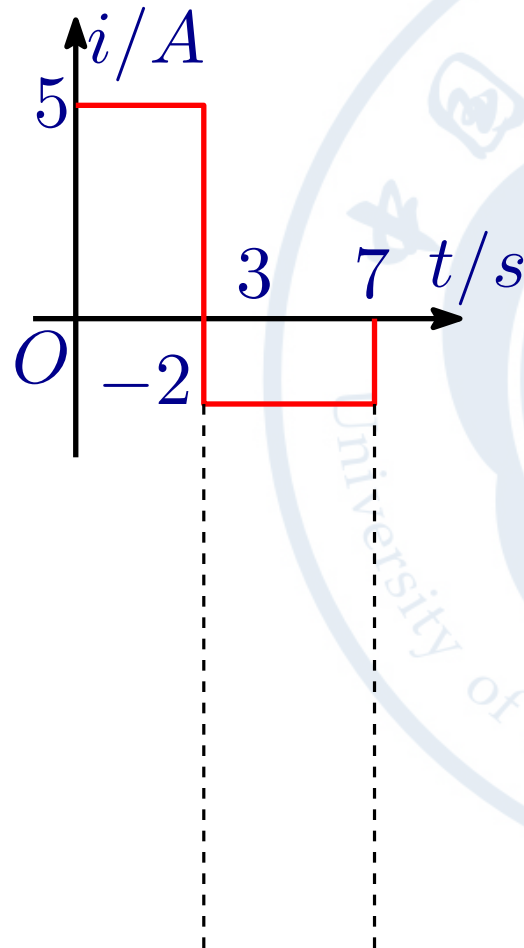
# 电容器件-电压电流关系

设  $0.2F$  电容流过的电流波形如图所示，已知  $u(0) = 30V$ 。计算电容电压变化规律并画出波形



# 电容器件-电压电流关系

设  $0.2F$  电容流过的电流波形如图所示，已知  $u(0) = 30V$ 。计算电容电压变化规律并画出波形

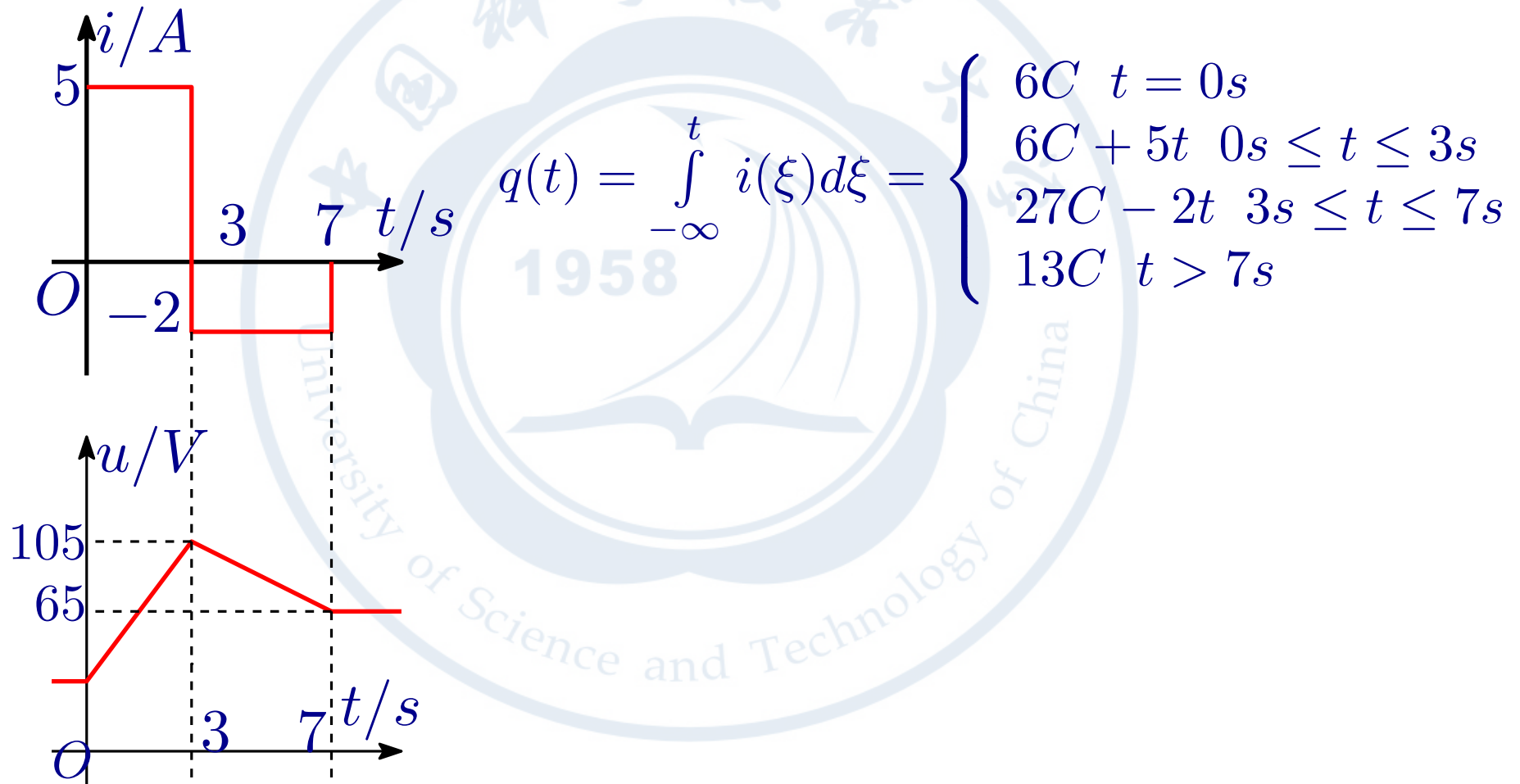


$$q(t) = \int_{-\infty}^t i(\xi) d\xi = \begin{cases} 6C & t = 0s \\ 6C + 5t & 0s \leq t \leq 3s \\ 27C - 2t & 3s \leq t \leq 7s \\ 13C & t > 7s \end{cases}$$



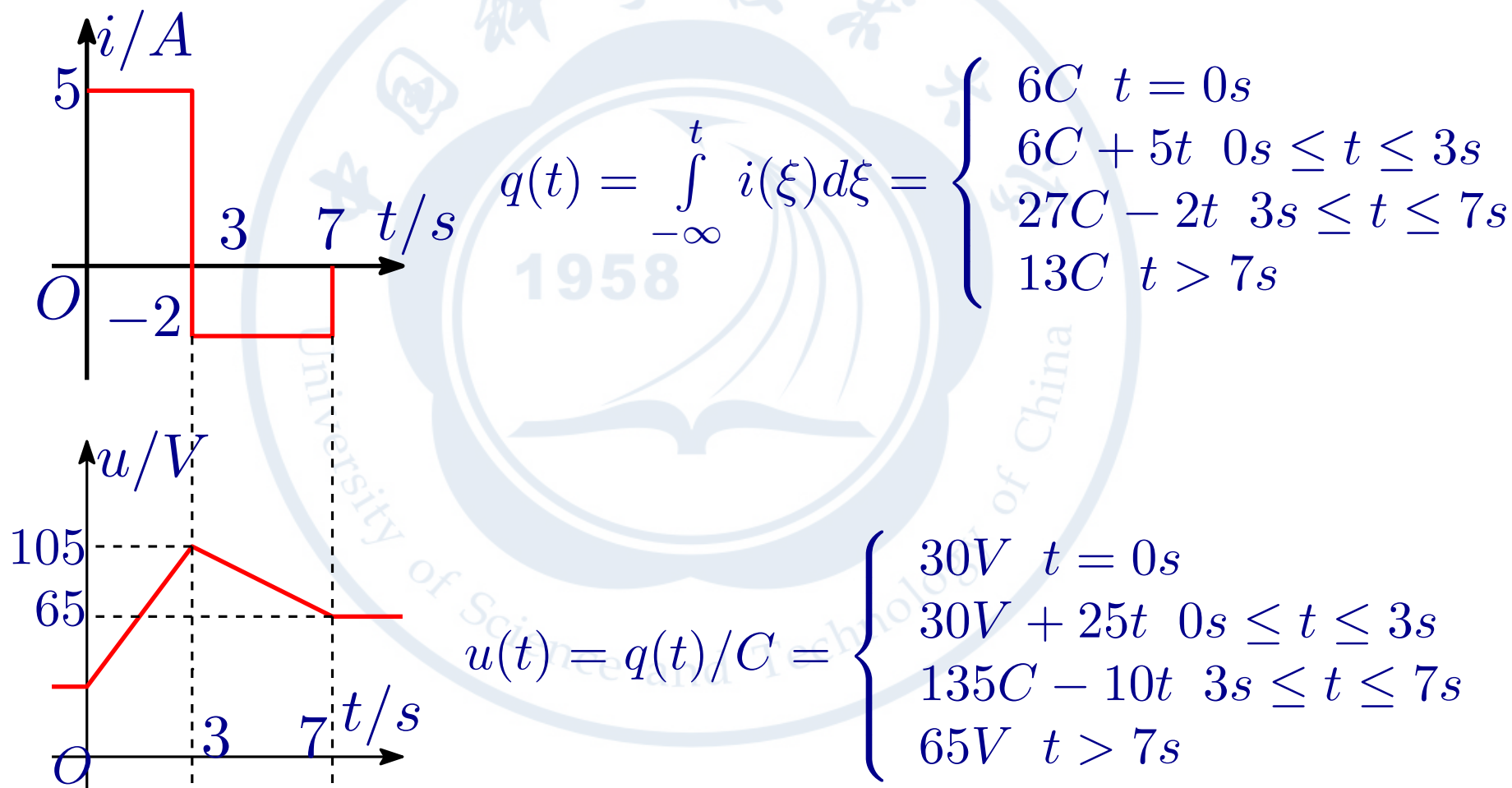
# 电容器件-电压电流关系

设  $0.2F$  电容流过的电流波形如图所示，已知  $u(0) = 30V$ 。计算电容电压变化规律并画出波形



# 电容器件-电压电流关系

设  $0.2F$  电容流过的电流波形如图所示，已知  $u(0) = 30V$ 。计算电容电压变化规律并画出波形



# 电感元件

■ 利用**磁场储能**的无源元件，称为**电感元件**。如果线圈的磁场介质是**线性介质**，则磁链与电流成正比，此时电感称为**线性电感**。



# 电感元件

■ 利用**磁场储能**的无源元件，称为**电感元件**。如果线圈的磁场介质是**线性介质**，则磁链与电流成正比，此时电感称为**线性电感**。

★ 磁链和电流关系： $\Psi = Li$

# 电感元件

■ 利用**磁场储能**的无源元件，称为**电感元件**。如果线圈的磁场介质是**线性介质**，则磁链与电流成正比，此时电感称为**线性电感**。

★ 磁链和电流关系： $\Psi = Li$

★ 感生电动势  $u$  和磁链  $\Psi$  关系： $u = \frac{d\Psi}{dt}$

# 电感元件

■ 利用**磁场储能**的无源元件，称为**电感元件**。如果线圈的磁场介质是**线性介质**，则磁链与电流成正比，此时电感称为**线性电感**。

★ 磁链和电流关系： $\Psi = Li$

★ 感生电动势  $u$  和磁链  $\Psi$  关系： $u = \frac{d\Psi}{dt}$

■ 电感的电压电流关系可以表示为：

$$u = L \frac{di}{dt}$$

# 电感元件

■ 利用**磁场储能**的无源元件，称为**电感元件**。如果线圈的磁场介质是**线性介质**，则磁链与电流成正比，此时电感称为**线性电感**。

★ 磁链和电流关系： $\Psi = Li$

★ 感生电动势  $u$  和磁链  $\Psi$  关系： $u = \frac{d\Psi}{dt}$

■ 电感的电压电流关系可以表示为：

$$u = L \frac{di}{dt}$$

■ 磁链  $\Psi$  和电压关系： $\Psi(t) = \Psi(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u(\xi) d\xi$

■ 电感功率： $p(t) = Li \frac{di}{dt}$



# 电感元件

■ 利用**磁场储能**的无源元件，称为**电感元件**。如果线圈的磁场介质是**线性介质**，则磁链与电流成正比，此时电感称为**线性电感**。

★ 磁链和电流关系： $\Psi = Li$

★ 感生电动势  $u$  和磁链  $\Psi$  关系： $u = \frac{d\Psi}{dt}$

■ 电感的电压电流关系可以表示为：

$$u = L \frac{di}{dt}$$

■ 磁链  $\Psi$  和电压关系： $\Psi(t) = \Psi(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u(\xi) d\xi$

■ 电感功率： $p(t) = Li \frac{di}{dt}$

■ 电感储能： $w_e(t) = 0.5Li^2 = 0.5\Psi^2 L^{-1}$



# 电感元件

## ■ 若干电感串联后的等效电感：

$$L_{eq} = \sum_{i=1}^N L_i$$

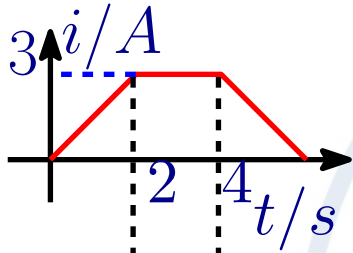
## ■ 若干电感并联后的等效电感：

$$\frac{1}{L_{eq}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{L_i}$$

电荷	磁链
电容电压	电感电流
电容	电感
电场能量	磁场能量

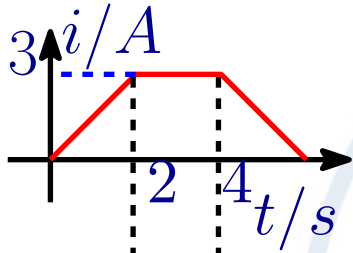
# 电感元件

■  $0.1H$ 的电感通过的电流如图，已知电压电流为关联参考方向。求  $t > 0$  电感电压，吸收功率和储存能量的示意图。



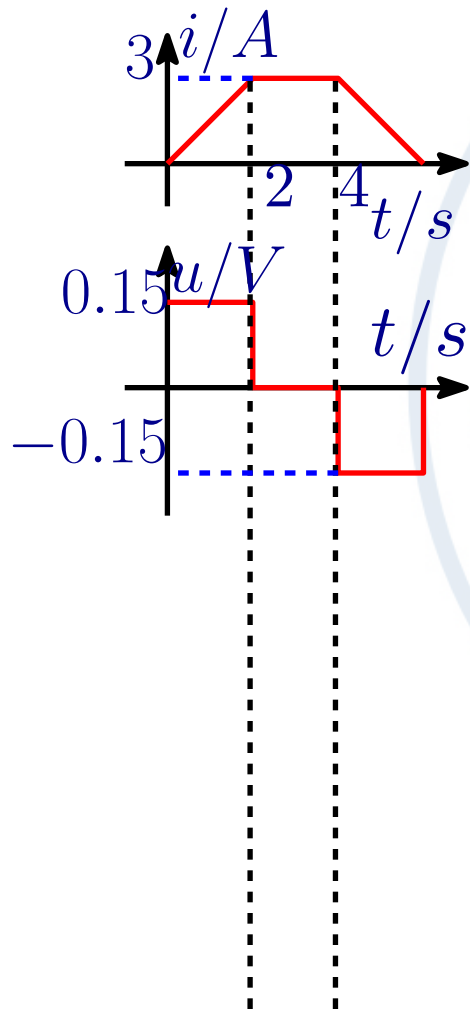
# 电感元件

■  $0.1H$ 的电感通过的电流如图，已知电压电流为关联参考方向。求  $t > 0$  电感电压，吸收功率和储存能量的示意图。



# 电感元件

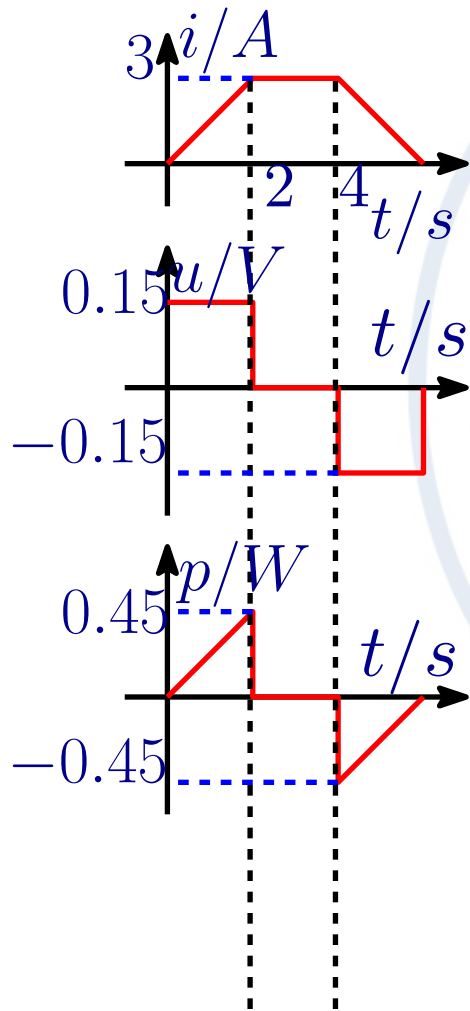
■  $0.1H$ 的电感通过的电流如图，已知电压电流为关联参考方向。求  $t > 0$  电感电压，吸收功率和储存能量的示意图。



$$u(t) = L \frac{di}{dt}, p(t) = L i \frac{di}{dt}, w_e(t) = \int p(\xi) d\xi$$

# 电感元件

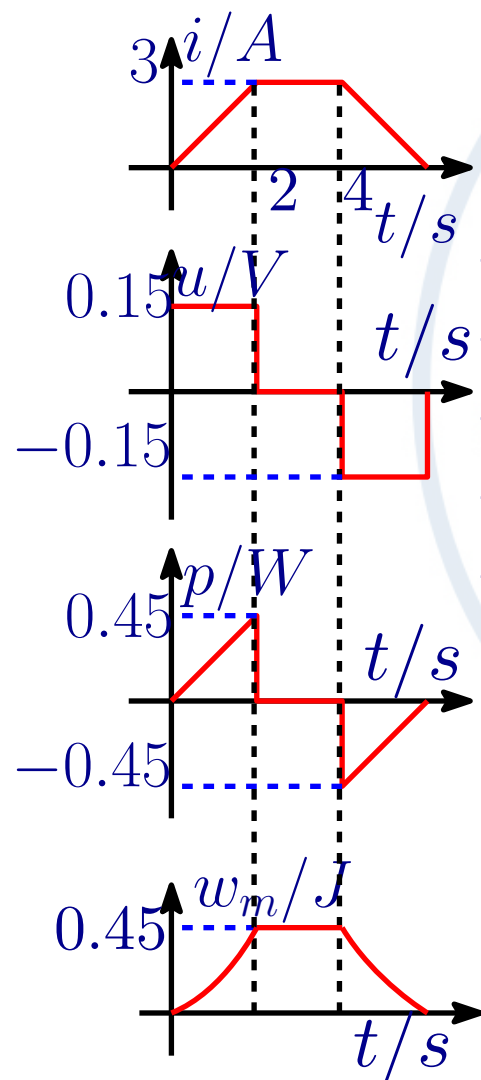
■  $0.1H$ 的电感通过的电流如图，已知电压电流为关联参考方向。求  $t > 0$  电感电压，吸收功率和储存能量的示意图。



$$u(t) = L \frac{di}{dt}, p(t) = L i \frac{di}{dt}, w_e(t) = \int p(\xi) d\xi$$

# 电感元件

■  $0.1H$ 的电感通过的电流如图，已知电压电流为关联参考方向。求  $t > 0$  电感电压，吸收功率和储存能量的示意图。



$$u(t) = L \frac{di}{dt}, p(t) = L i \frac{di}{dt}, w_e(t) = \int p(\xi) d\xi$$

$t$	$i(t)$	$u(t)$	$p(t)$	$w_e(t)$
$0 < t < 2s$	$3tA$	$0.15V$	$0.225tW$	$0.1125t^2J$
$2s < t < 4s$	$3A$	$0V$	$0W$	$0.45J$
$4s < t < 6s$	$i_3(t)$	$-0.15V$	$p_3(t)$	$w_{e3}(t)$

$i_3(t)$	$(-1.5t + 9)V$
$p_3(t)$	$(0.225t - 1.35)W$
$w_{e3}(t)$	$(0.1125t^2 - 1.35t + 4.05)J$

# 理想电源

- ★ 电源: 一个可以将其他形式的能源转换为电能的元件。
- ★ 理想电压 (流) 源: 无论端口上电流 (电压) 如何变化, 端口上均维持预置的电压 (电流)。





# 理想电源

- ★ 电源: 一个可以将其他形式的能源转换为电能的元件。
- ★ 理想电压 (流) 源: 无论端口上电流 (电压) 如何变化, 端口上均维持预置的电压 (电流)。

Ideal Voltage Source

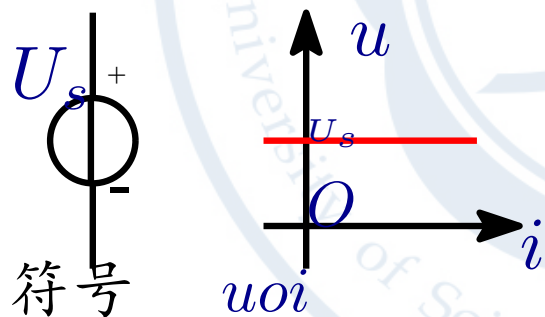


Fig. 8 理想电压源

Ideal Current Source

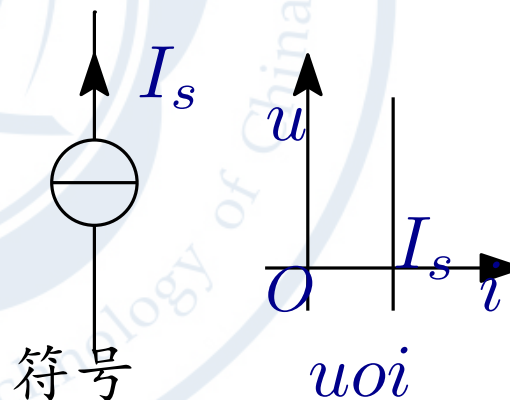


Fig. 9 理想电流源



# 独立源 or 受控源

■ 电压源（电流源）强制电路的电压（电流）为电源电压（电流）值。我们将电源 (Source) 看作激励 (Excitation)，将相应的输出电压（电流）看作响应 (Response)。

## ★ 独立电源 (Independent Source):

电源输出电压（电流）和电路其他部分无关，独立源多采用圆形符号来表示

## ★ 受控源 (Controlled Source):

电源输出电压（电流）取决于电路其他元件的电压（电流），受控源多采用方形符号来表示。

# 线性受控源

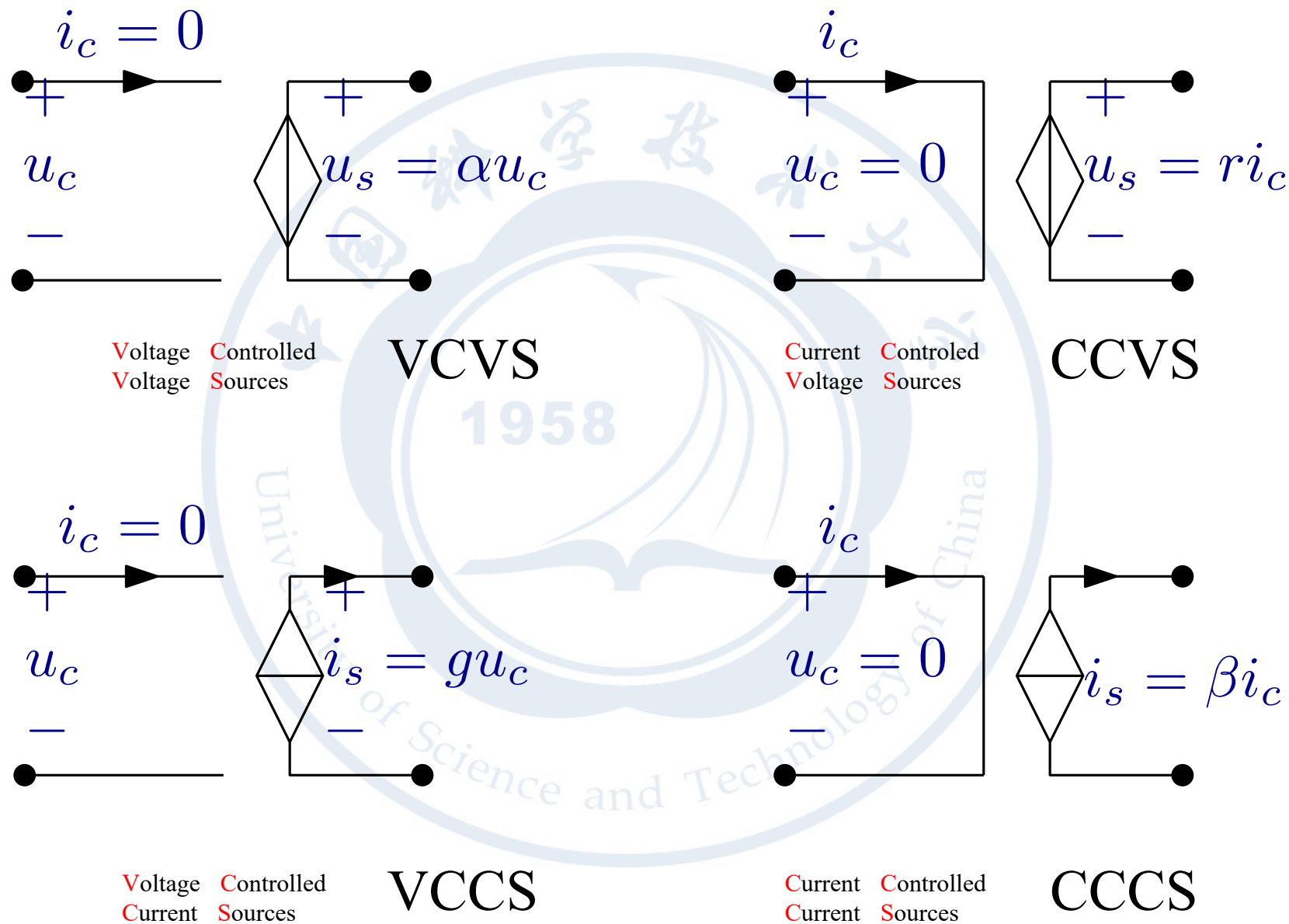


Fig. 10 受控源示意图

# 线性受控源

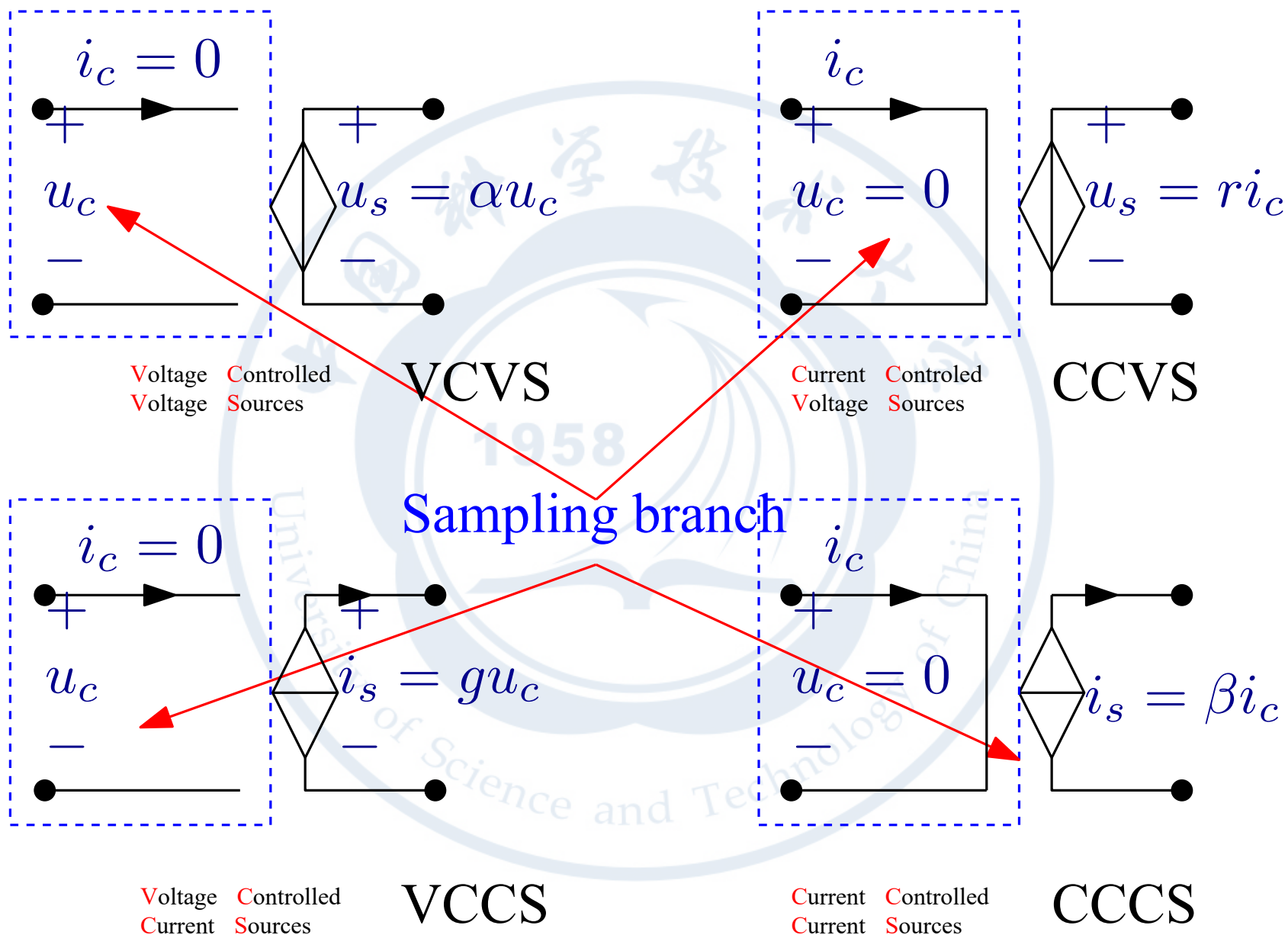


Fig. 10 受控源示意图

# 线性受控源

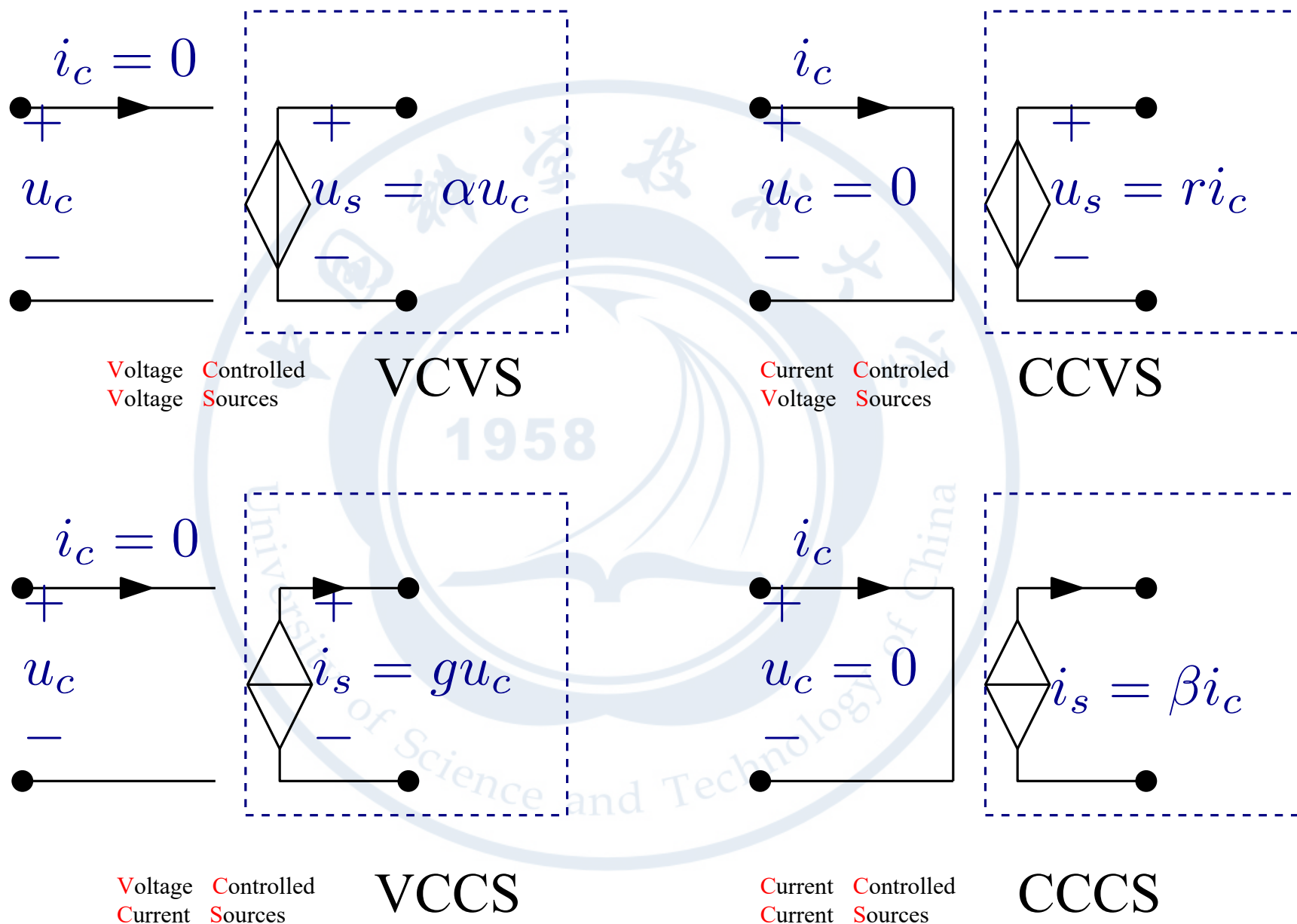


Fig. 10 受控源示意图

# 受控源

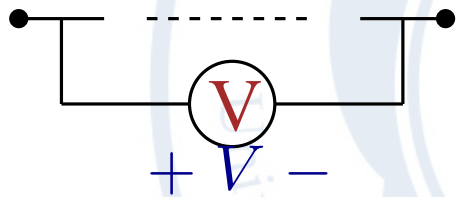
★ 我们假定采样电路不会对被采样支路发生影响！



# 受控源

- ★ 我们假定采样电路不会对被采样支路产生影响！
- ★ 电压控制受控源，采样电路的**内阻无穷大**，并联采样时不会对该支路电阻产生任何影响

Voltage Sensing in parallel



# 受控源

- ★ 我们假定采样电路不会对被采样支路产生影响！
- ★ 电压控制受控源，采样电路的**内阻无穷大**，并联采样时不会对该支路电阻产生任何影响

Voltage Sensing in parallel

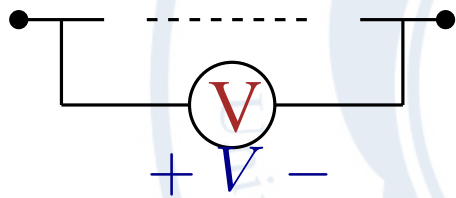


Fig. 10 并联电压取样

Current Sensing in Series

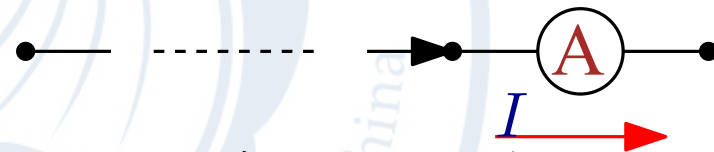


Fig. 11 串联电流取样

- ★ 电流控制受控源，采样电路的**内阻无穷小**，串联采样时不会对该支路电路产生任何影响



# 受控源

- ★ 我们假定采样电路不会对被采样支路产生影响！
- ★ 电压控制受控源，采样电路的**内阻无穷大**，并联采样时不会对该支路电阻产生任何影响

Voltage Sensing in parallel

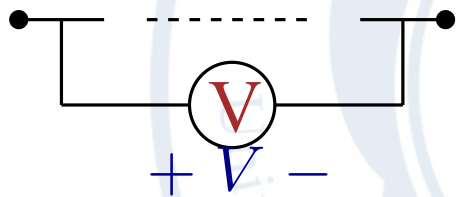


Fig. 10 并联电压取样

Current Sensing in Series

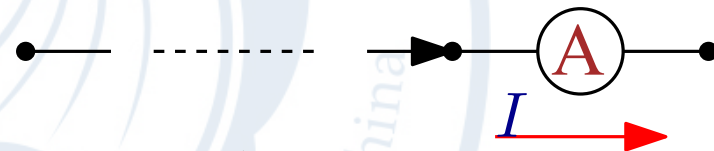


Fig. 11 串联电流取样

- ★ 电流控制受控源，采样电路的**内阻无穷小**，串联采样时不会对该支路电路产生任何影响
- ◇ 在上述假设前提下，所有的受控源不再单独画出取样电路，仅画出电源部分电路。



# 受控源

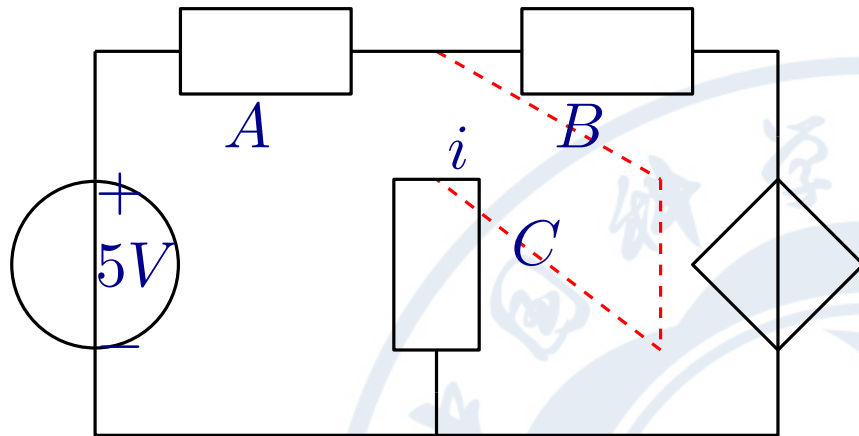


Fig. 12 CCVS 简化示意图

# 受控源

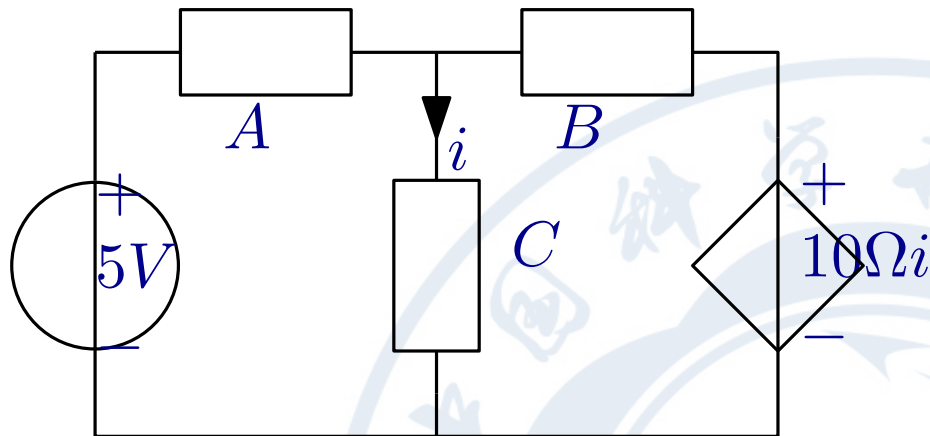
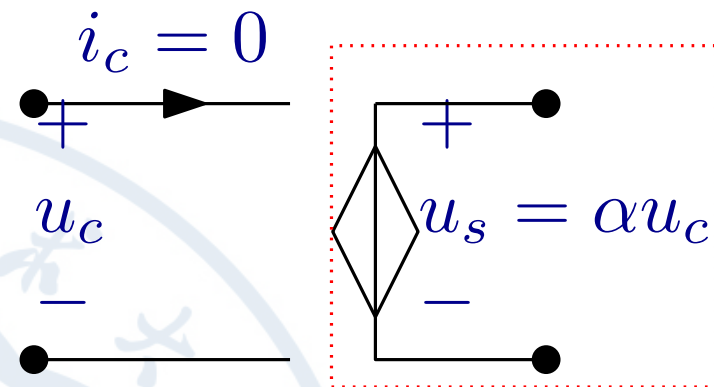


Fig. 12 CCVS 简化示意图

CCVS 中控制支路（电流取样电路）不再特别画出，仅仅在电源端将输出电压表征为控制支路电流的函数  $u = 10\Omega \cdot i$



Voltage Controlled  
Voltage Sources

VCVS

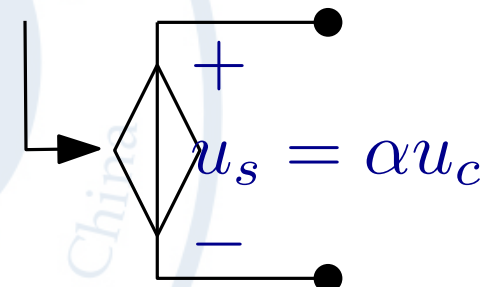


Fig. 11 VCVS 符号简化示意图

# 受控源

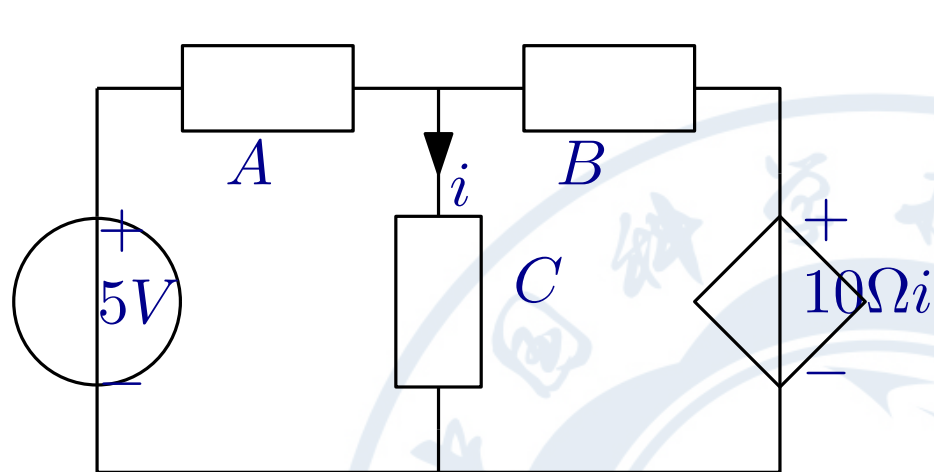
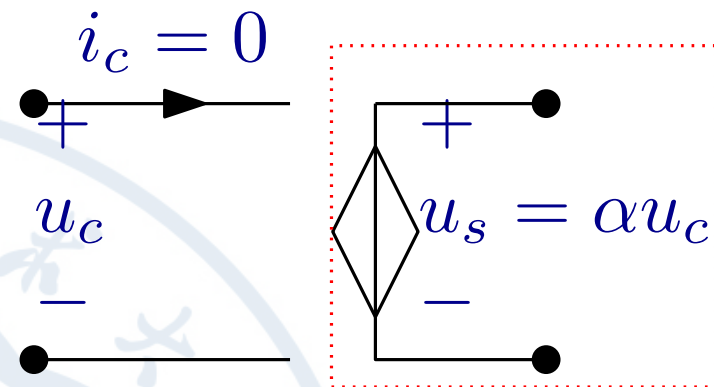


Fig. 12 CCVS 简化示意图

CCVS 中控制支路（电流取样电路）不再特别画出，仅仅在电源端将输出电压表征为控制支路电流的函数  $u = 10\Omega \cdot i$



Voltage Controlled  
Voltage Sources

VCVS

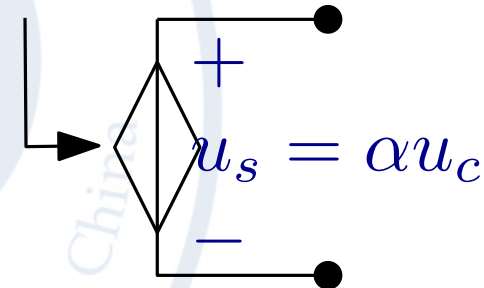


Fig. 11 VCVS 符号简化示意图

# 受控源

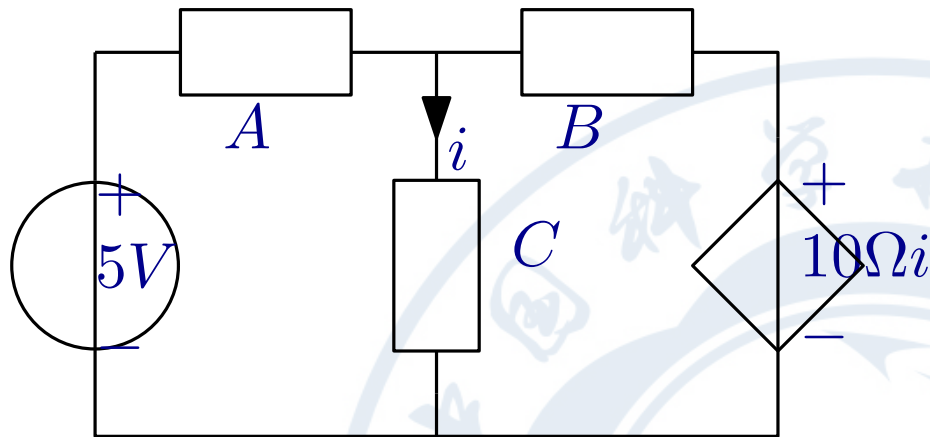
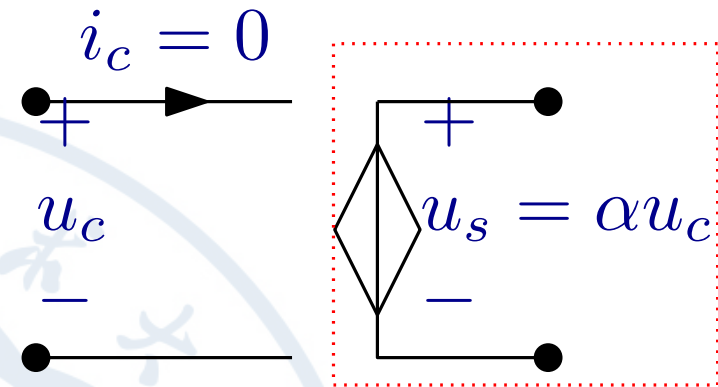


Fig. 12 CCVS 简化示意图

CCVS 中控制支路（电流取样电路）不再特别画出，仅仅在电源端将输出电压表征为控制支路电流的函数  $u = 10\Omega \cdot i$



Voltage Controlled  
Voltage Sources

VCVS

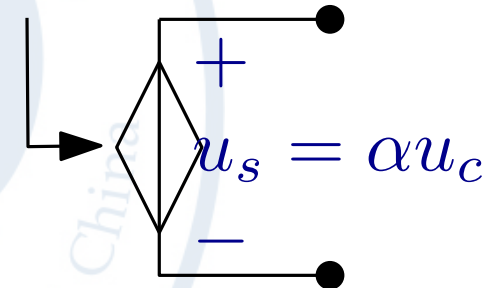


Fig. 11 VCVS 符号简化示意图

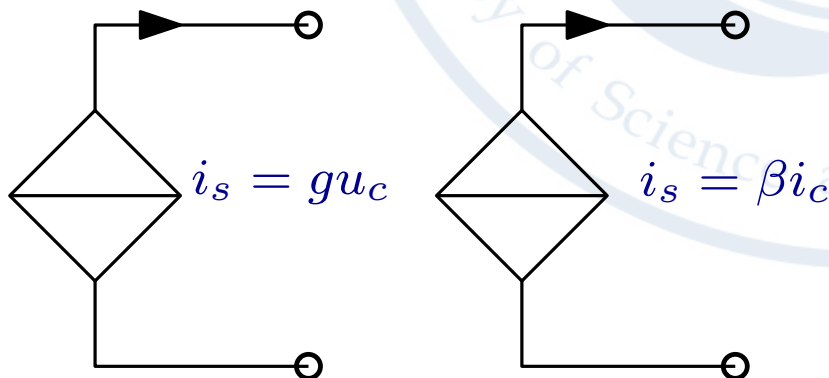


Fig. 12 受控电流源符号简化示意图

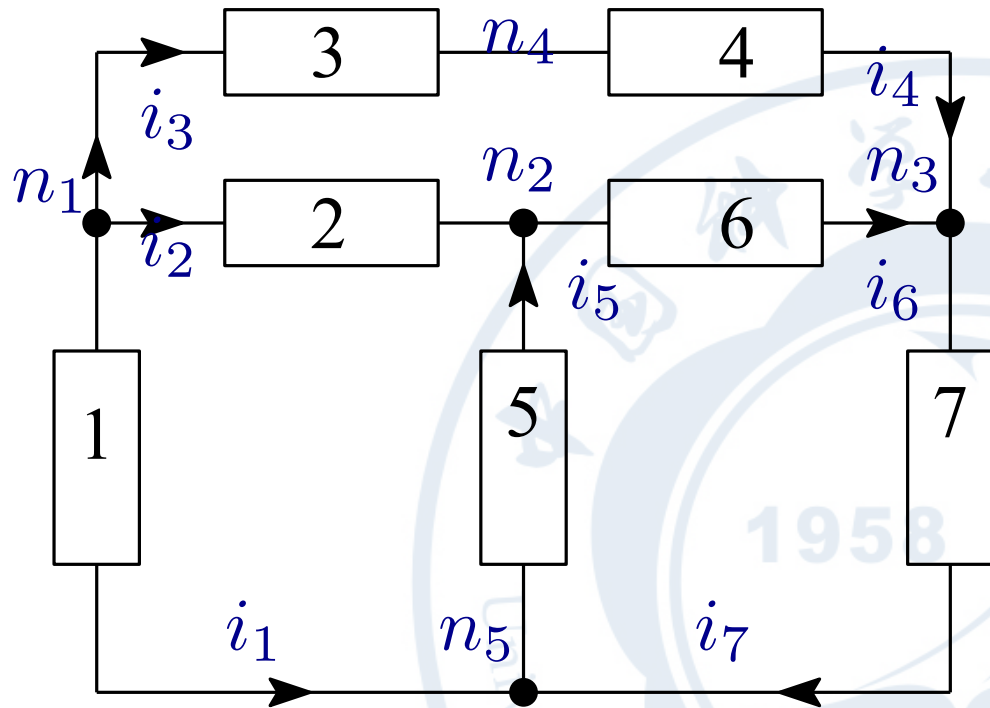
简化表示方法：

仅仅保留电源（电压源，电流源）部分，输出电压值（电流值）利用控制信号的**线性函数**表示

# 电路结构



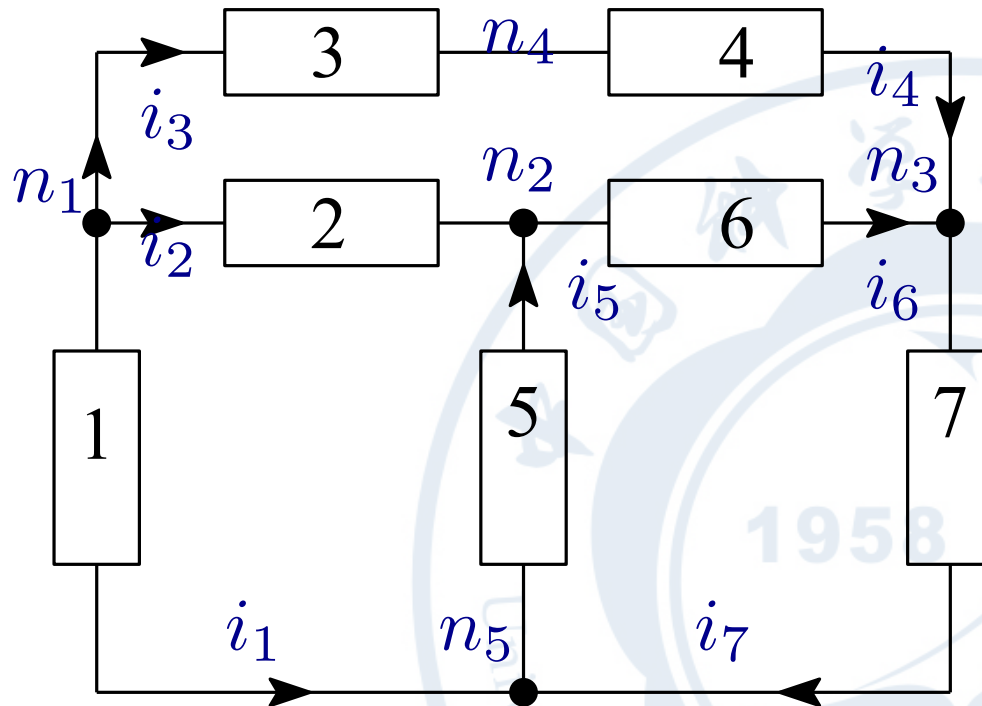
# 电路结构



■ 回路 (Loop): 起点和终点都是同一个节点的电路

Fig. 5 电路结构示例

# 电路结构



■ 回路 (Loop): 起点和终点都是同一个节点的电路

■ 网孔 (Mesh): 回路中不包含其他任何一个回路

Fig. 5 电路结构示例

# 电路结构

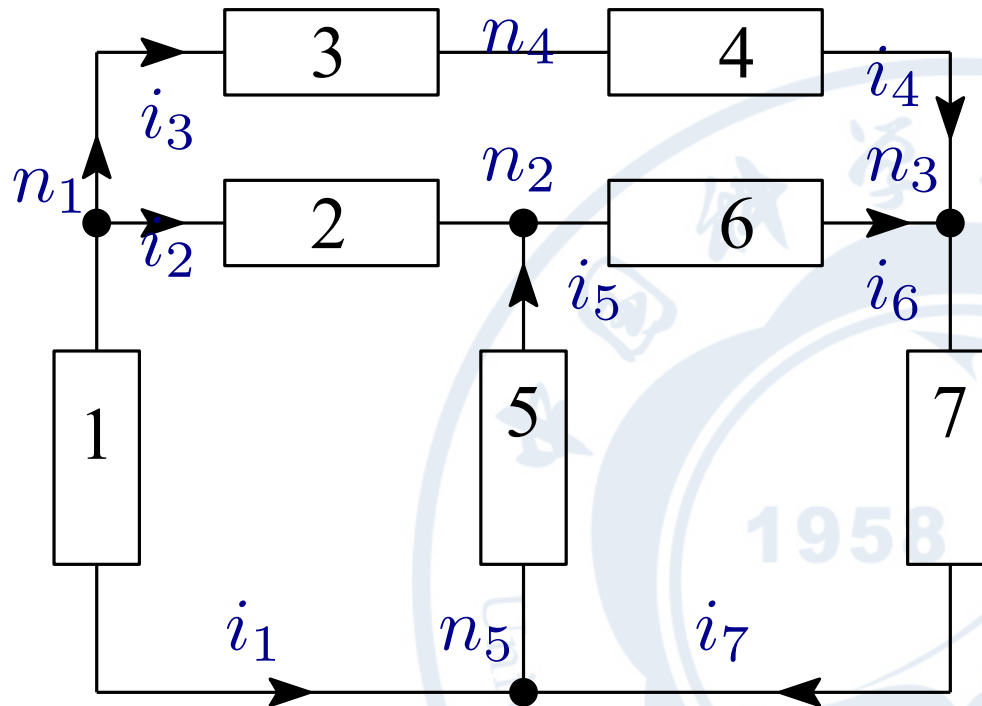


Fig. 5 电路结构示例

■ 回路 (Loop): 起点和终点都是同一个节点的电路

■ 网孔 (Mesh): 回路中不包含其他任何一个回路

■ 平面电路 (Planar Circuit): 一个电路可以在一个平面上绘出而不存在交叉支路



# 电路结构

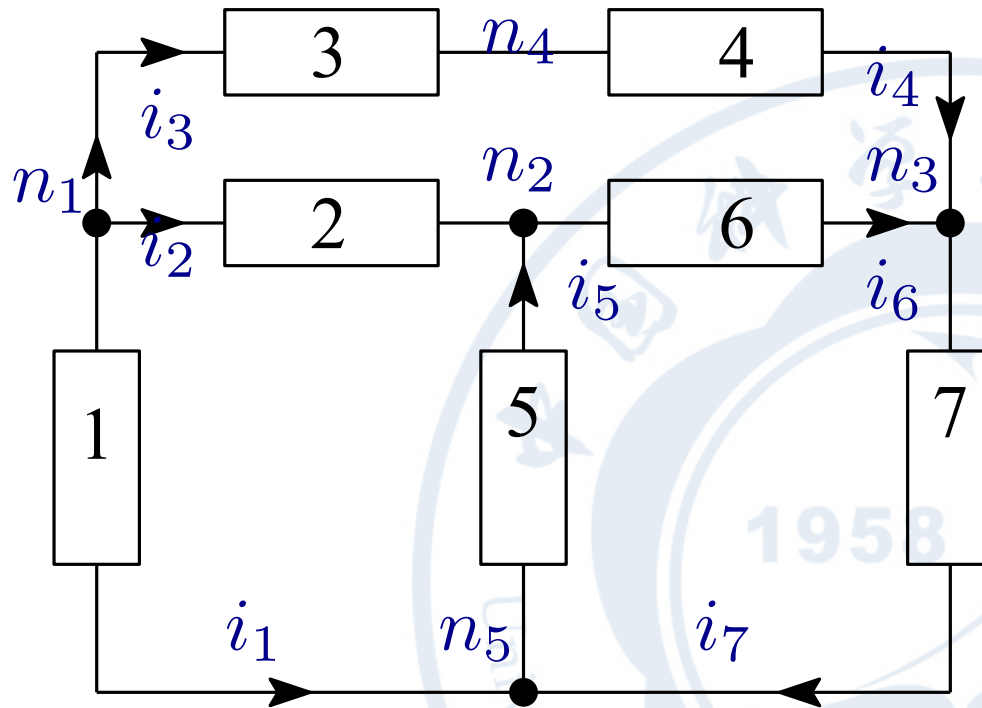


Fig. 5 电路结构示例

■ 回路 (Loop): 起点和终点都是同一个节点的电路

■ 网孔 (Mesh): 回路中不包含其他任何一个回路

■ 平面电路 (Planar Circuit): 一个电路可以在一个平面上绘出而不存在交叉支路

■ 节点, 基本节点, 路径, 基本路径, 支路, 回路, 网孔, 平面电路  
node, essential node, path, essential path, branch, loop, mesh, planar circuit

# 基尔霍夫电流定律-Kirchhoff's Current Law, KCL

- ★ 对于集总参数电路, 任何时刻流入一个节点的电流的代数和为 0:

$\sum i_k = 0$ , 这里  $i_k$  是第  $k^{th}$  支路的电流

# 基尔霍夫电流定律-Kirchhoff's Current Law, KCL

- ★ 对于集总参数电路,任何时刻流入一个节点的电流的代数和为 0:

$$\sum i_k = 0, \text{ 这里 } i_k \text{ 是第 } k^{th} \text{ 支路的电流}$$

- ★ **KCL** 成立的前提条件:  
集总参数电路,除了元件以外,其他地方不存在电荷。

# 基尔霍夫电流定律-Kirchhoff's Current Law, KCL

★ 对于**集总参数电路**, 流入一个**封闭边界**的电流代数和等于 0:

$$\sum i_k = 0$$

# 基尔霍夫电流定律-Kirchhoff's Current Law, KCL

- ★ 对于**集总参数电路**, 流入一个**封闭边界**的电流代数和等于 0:

$$\sum i_k = 0$$

- ★ 对于**集总参数电路**, 流入一个**封闭边界**的电流代数和等于流出的电流代数和:

$$\sum i_{out} = \sum i_{in}$$

# 基尔霍夫电流定律-Kirchhoff's Current Law, KCL

- ★ 对于**集总参数电路**, 流入一个**封闭边界**的电流代数和等于 0:

$$\sum i_k = 0$$

- ★ 对于**集总参数电路**, 流入一个**封闭边界**的电流代数和等于流出的电流代数和:

$$\sum i_{out} = \sum i_{in}$$

- 对一个有  $n$  个节点的电路, 可写出  $n$  个节点 KCL 方程。
- (1) 任意  $n - 1$  个方程构成一个独立方程集合, 彼此独立
  - (2) 任何一个方程均可以由其他的  $n - 1$  方程的某个线性组合给出

# KCL 举例

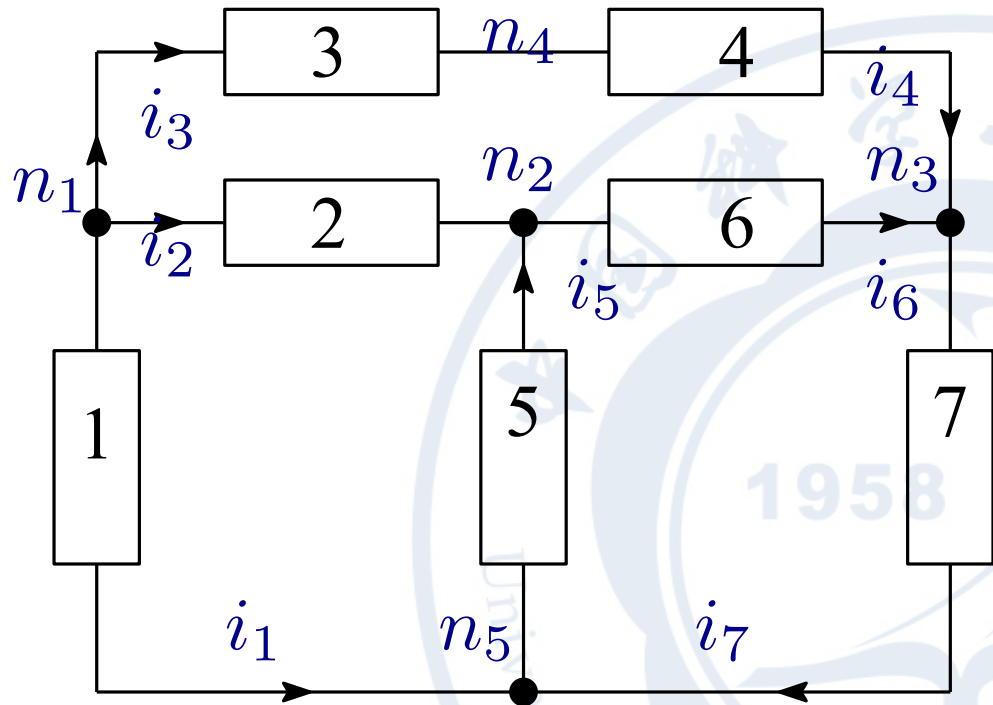


Fig.5 电路结构示例



# KCL 举例

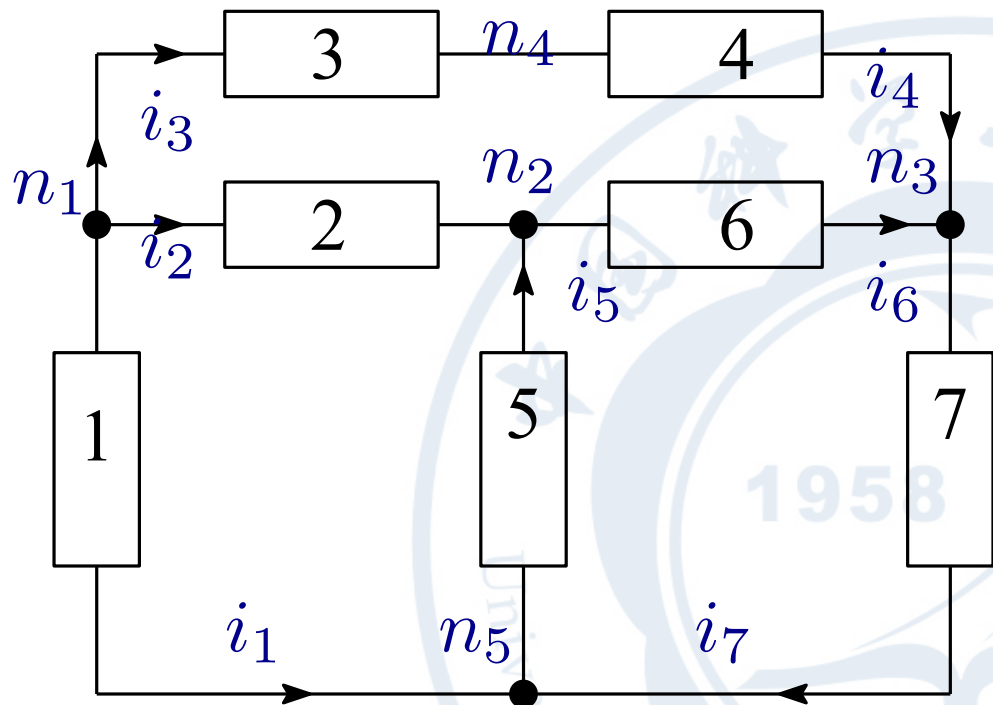


Fig.5 电路结构示例

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0 @ n_1$$

$$-i_2 - i_5 + i_6 = 0 @ n_2$$

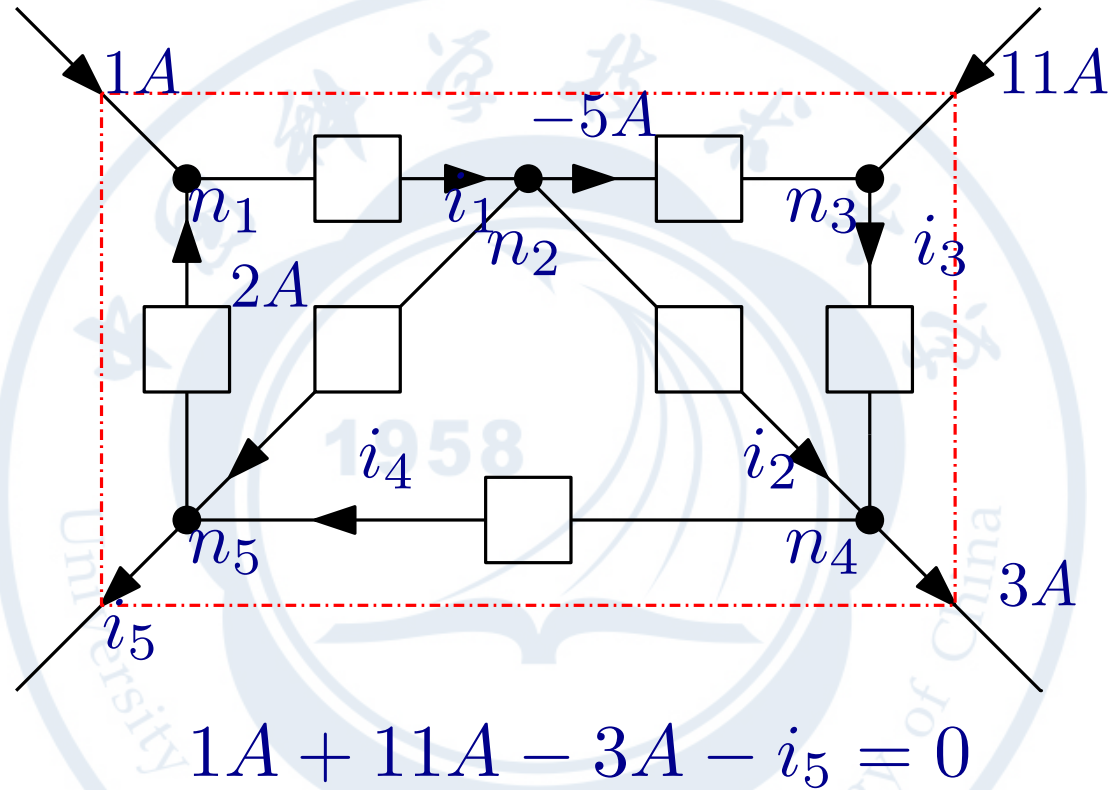
$$i_7 - i_4 - i_6 = 0 @ n_3$$

$$-i_3 + i_4 = 0 @ n_4$$

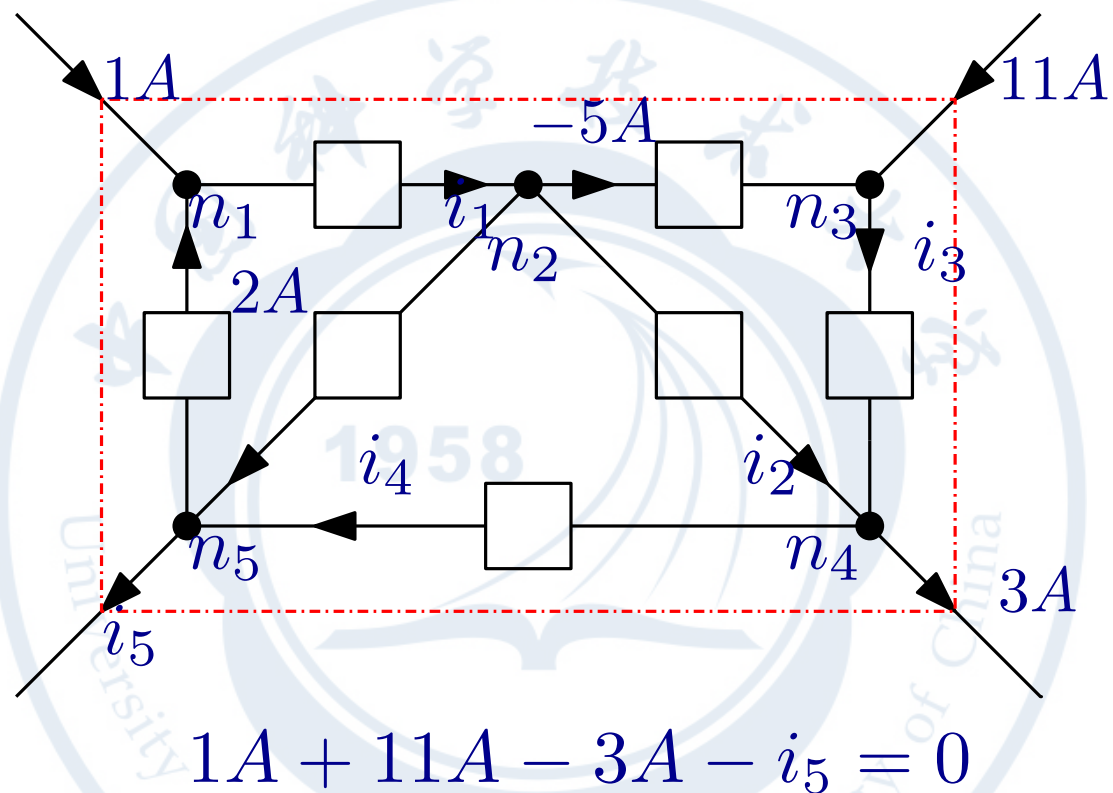
$$-i_1 + i_5 - i_7 = 0 @ n_5$$

■ 选择任意

# KCL 举例



# KCL 举例



# 基尔霍夫电压定律- Kirchhoff's Voltage Law

- ★ 对于**集总参数电路**,任意时刻对于**封闭边界**所有支路的电压降代数 sum 等于 0

$$\sum u_k = 0$$

- ★  $u_k$  是第  $k^{th}$  支路电压, 我们通常将**电压参考方向**选择与**回路方向**相同。

- ★ 当沿着回路方向电压升我们记电压为  $+$ , 否则为  $-$

# 基尔霍夫电压定律-KVL



# 基尔霍夫电压定律-KVL

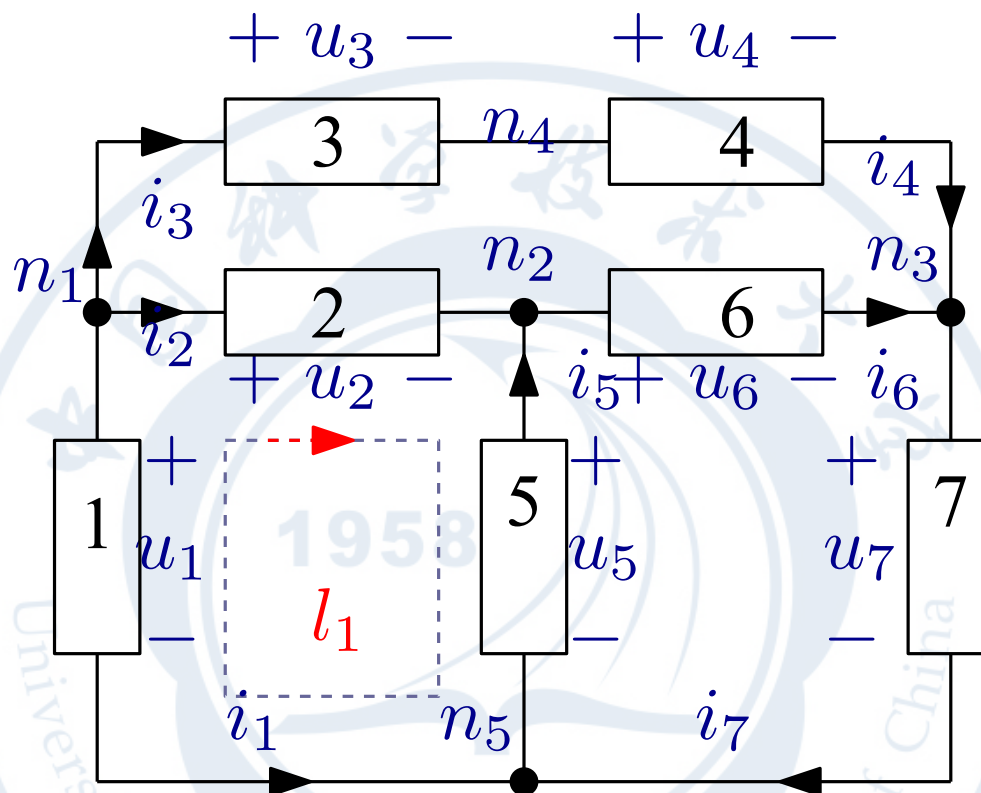


Fig. 5 电路结构举例

$$l_1 : -u_1 + u_2 + u_5 = 0$$

# 基尔霍夫电压定律-KVL

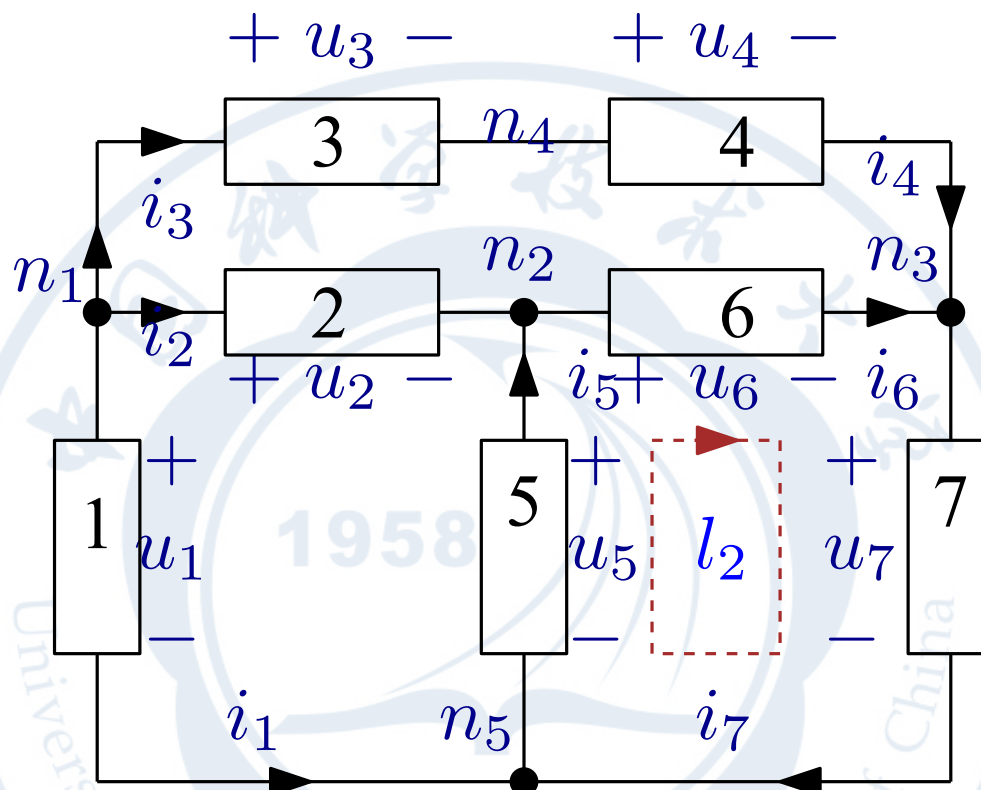


Fig. 5 电路结构举例

$$l_2 : -u_5 + u_6 + u_7 = 0$$



# 基尔霍夫电压定律-KVL

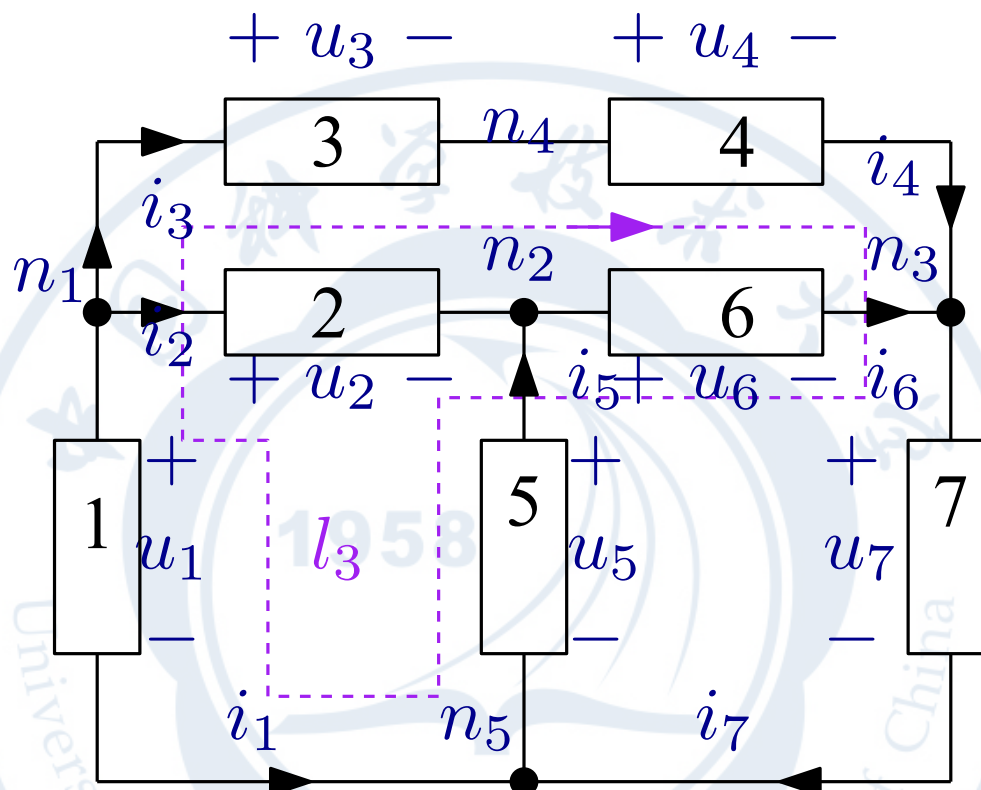


Fig. 5 电路结构举例

$$l_3 : -u_1 + u_3 + u_4 - u_6 + u_5 = 0$$

# 基尔霍夫电压定律-KVL

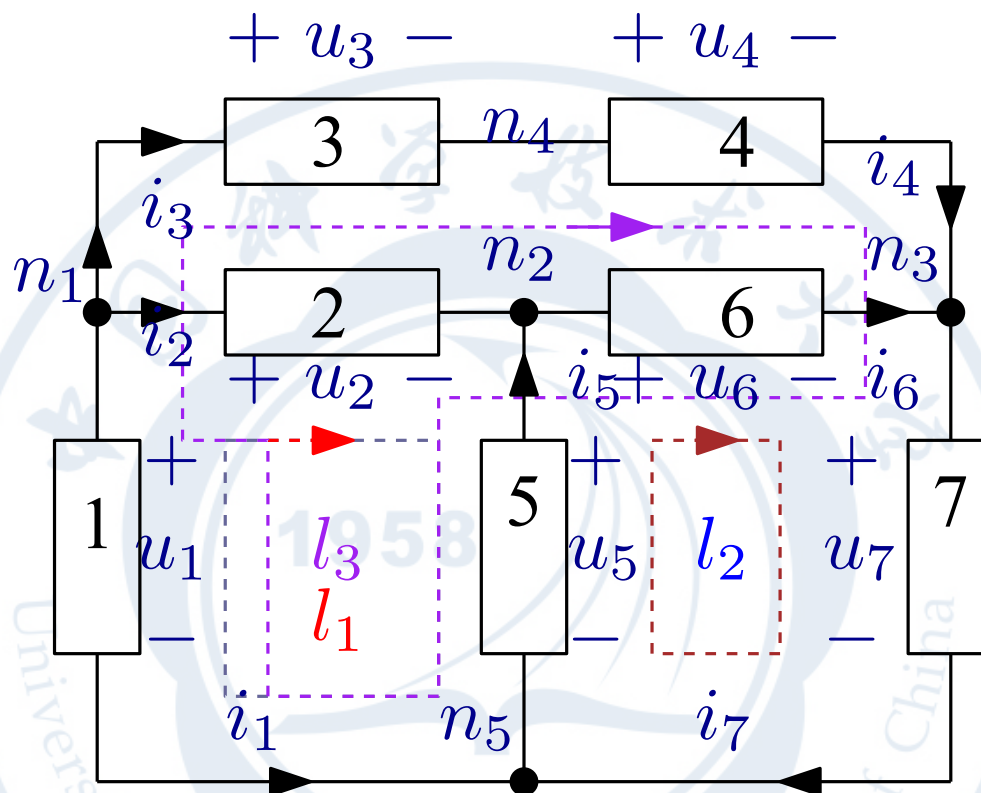


Fig. 5 电路结构举例

$$l_1 : -u_1 + u_2 + u_5 = 0$$

$$l_2 : -u_5 + u_6 + u_7 = 0$$

$$l_3 : -u_1 + u_3 + u_4 - u_6 + u_5 = 0$$

# 基尔霍夫电压定律-KVL

- ★ 对于**集总参数电路**，回路电压升的代数和等于回路电压降的代数和

$$\sum u_{drop} = \sum u_{rise}$$

- ★ 集总参数电路，任意两点间的电压和路径无关
- ★ 对于一个给定的  $b$  条支路， $n$  节点的**平面电路**，可以确定  $b - n + 1$  个独立的 KVL 方程。网孔 KVL 方程组是一个特例

# 基尔霍夫定律总结

- ★ 基尔霍夫电压定律：集中参数电路两点间电压和路径无关
  - ★ 基尔霍夫电流定律：给定电路的电荷守恒
  - ★ KVL 和 KCL 仅仅取决于电路的**连接关系**
  - ★ KCL 和 KVL 方程和**电路元件无关**
- 对于一个有  $b$  条支路  $n$  个节点的平面电路, 我们可以写出  $n - 1$  个独立的 KCL 方程和  $b - n + 1$  独立的 KVL 方程

## 受控源-举例

■ 求 Fig. 14 所示电路两个受控电源的各自发出的功率

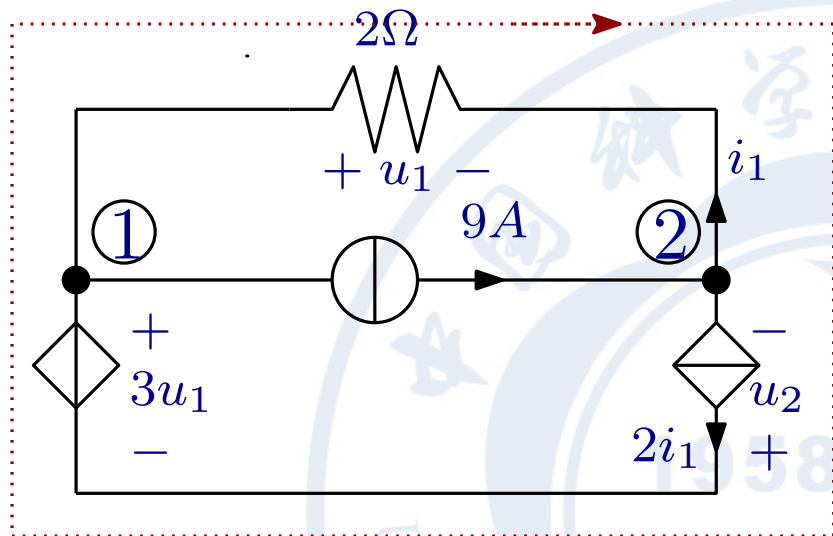


Fig. 14

## 受控源-举例

■ 求 Fig. 14 所示电路两个受控电源的各自发出的功率

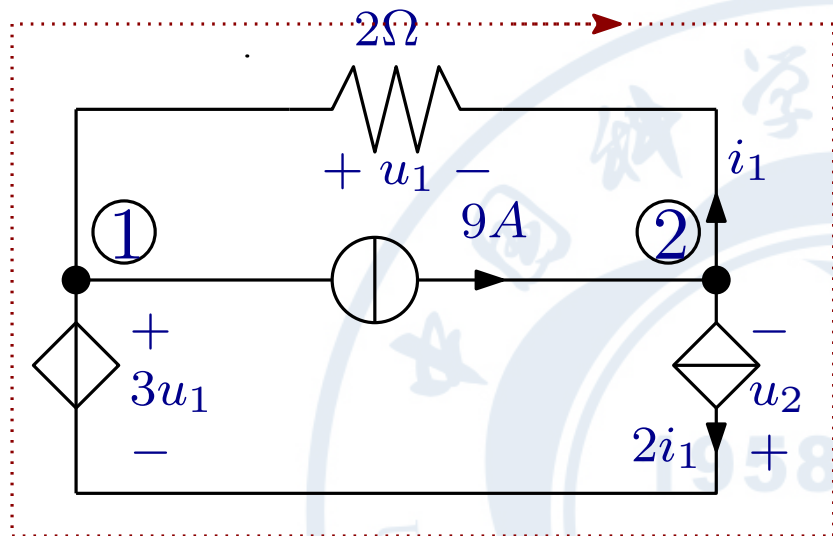


Fig. 14

$$\text{KCL@n2: } 9A = i_1 + 2i_1 \\ \Rightarrow i_1 = 3A$$

$$u_1 = -i_1 \times 2\Omega = -6V$$

## 受控源-举例

■ 求 Fig. 14 所示电路两个受控电源的各自发出的功率

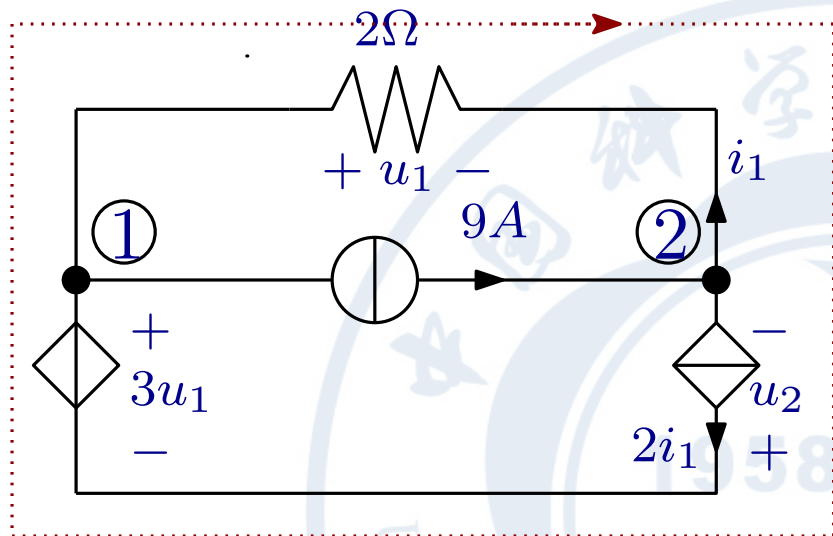


Fig. 14

$$\text{KCL@n2: } 9A = i_1 + 2i_1 \\ \Rightarrow i_1 = 3A$$

$$u_1 = -i_1 \times 2\Omega = -6V$$

外网孔 KVL:

$$3u_1 - u_1 + u_2 = 0 \\ \Rightarrow u_2 = -2u_1 = 12V$$



## 受控源-举例

■ 求 Fig. 14 所示电路两个受控电源的各自发出的功率

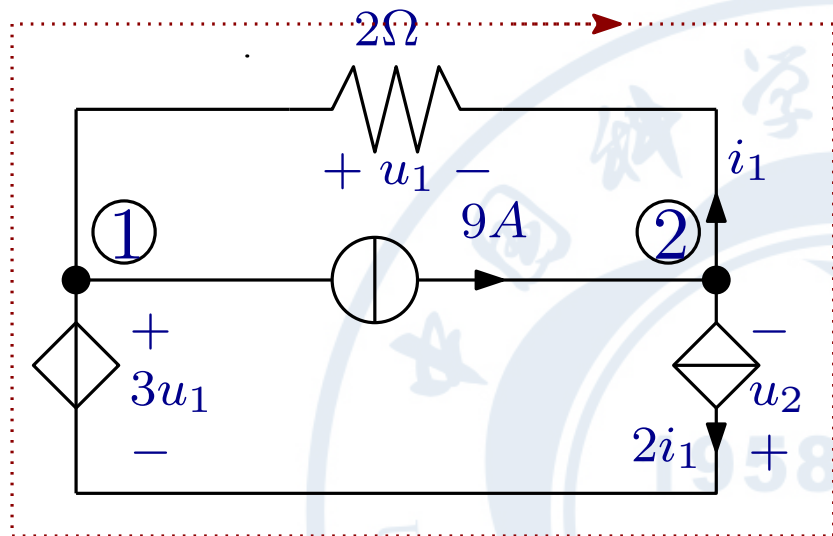


Fig. 14

$$\text{KCL}@n2: 9A = i_1 + 2i_1 \\ \Rightarrow i_1 = 3A$$

$$u_1 = -i_1 \times 2\Omega = -6V$$

外网孔 KVL:

$$3u_1 - u_1 + u_2 = 0 \\ \Rightarrow u_2 = -2u_1 = 12V$$

VCVS 功率, 非关联参考方向

$$p_{\text{VCVS}} = 3u_1 \times 2i_1 = -108W < 0, \text{ 吸收功率}$$

## 受控源-举例

■ 求 Fig. 14 所示电路两个受控电源的各自发出的功率

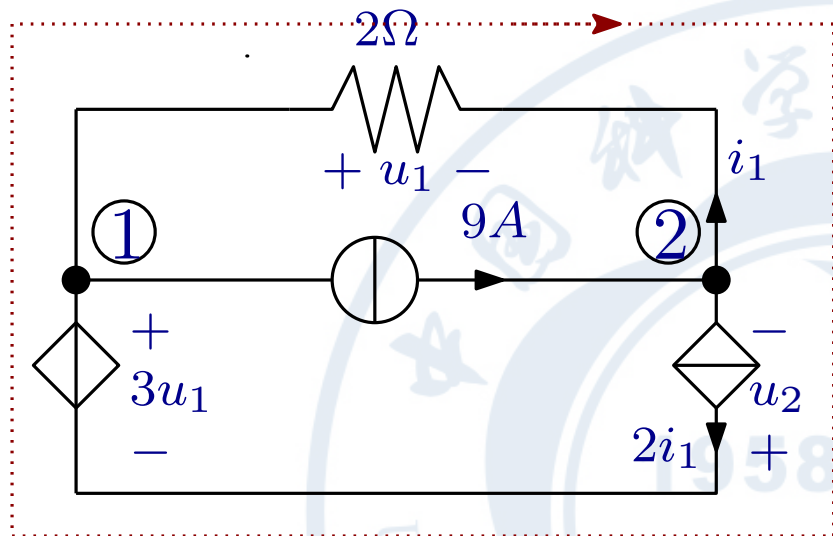


Fig. 14

$$\text{KCL}@n2: 9A = i_1 + 2i_1 \\ \Rightarrow i_1 = 3A$$

$$u_1 = -i_1 \times 2\Omega = -6V$$

外网孔 KVL:

$$3u_1 - u_1 + u_2 = 0 \\ \Rightarrow u_2 = -2u_1 = 12V$$

VCVS 功率, 非关联参考方向

$$p_{\text{VCVS}} = 3u_1 \times 2i_1 = -108W < 0, \text{吸收功率}$$

CCCS 功率, 非关联参考方向

$$p_{\text{CCCS}} = u_2 \times (2i_1) = 72W > 0, \text{发出功率}$$

## 受控源-举例

■ 求 Fig. 14 所示电路两个受控电源的各自发出的功率

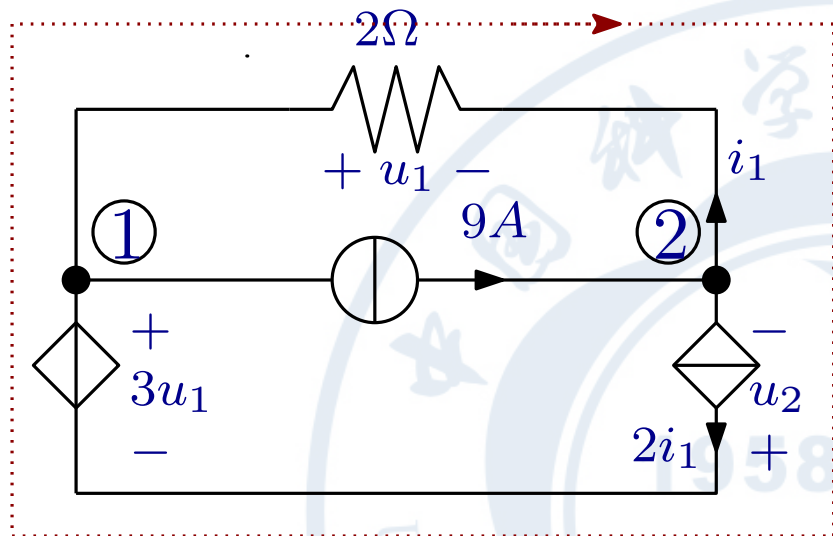


Fig. 14

$$\text{KCL@n2: } 9A = i_1 + 2i_1 \\ \Rightarrow i_1 = 3A$$

$$u_1 = -i_1 \times 2\Omega = -6V$$

外网孔 KVL:

$$3u_1 - u_1 + u_2 = 0 \\ \Rightarrow u_2 = -2u_1 = 12V$$

VCVS 功率, 关联参考方向

$$p_{\text{VCVS}} = 3u_1 \times (-2i_1) = 108W > 0, \text{ 吸收功率}$$

CCCS 功率, 关联参考方向

$$p_{\text{CCCS}} = u_2 \times (-2i_1) = -72W < 0, \text{ 发出功率}$$

# Summary

- ★ 电压，电流及参考方向，关联参考方向
- ★ 基尔霍夫电压定律，基尔霍夫电流定律
- ★ 功率，能量以及与关联参考方向的关系
- ★ 电压源，电流源及电阻元件
- ★ 受控电压（电流源）