



电子科技大学

University of Electronic Science and Technology of China

# 电路电子学基础

**SMART**

SMART Hybrid Radio Lab.  
Since 2003

何松柏 教授

SMART数字射频混合集成电路实验室

# 本节要点：

## 1 电路基本应用理解

电子工程、通信、计算机、人工智能等领域

## 2 电路与数学基础（代数、矩阵、微分方程）

## 3 集总电路/分布电路

## 4 实际元件/理想元件（抽象建模）

导线、电阻、电池（电压源）、电流源

本节要点：

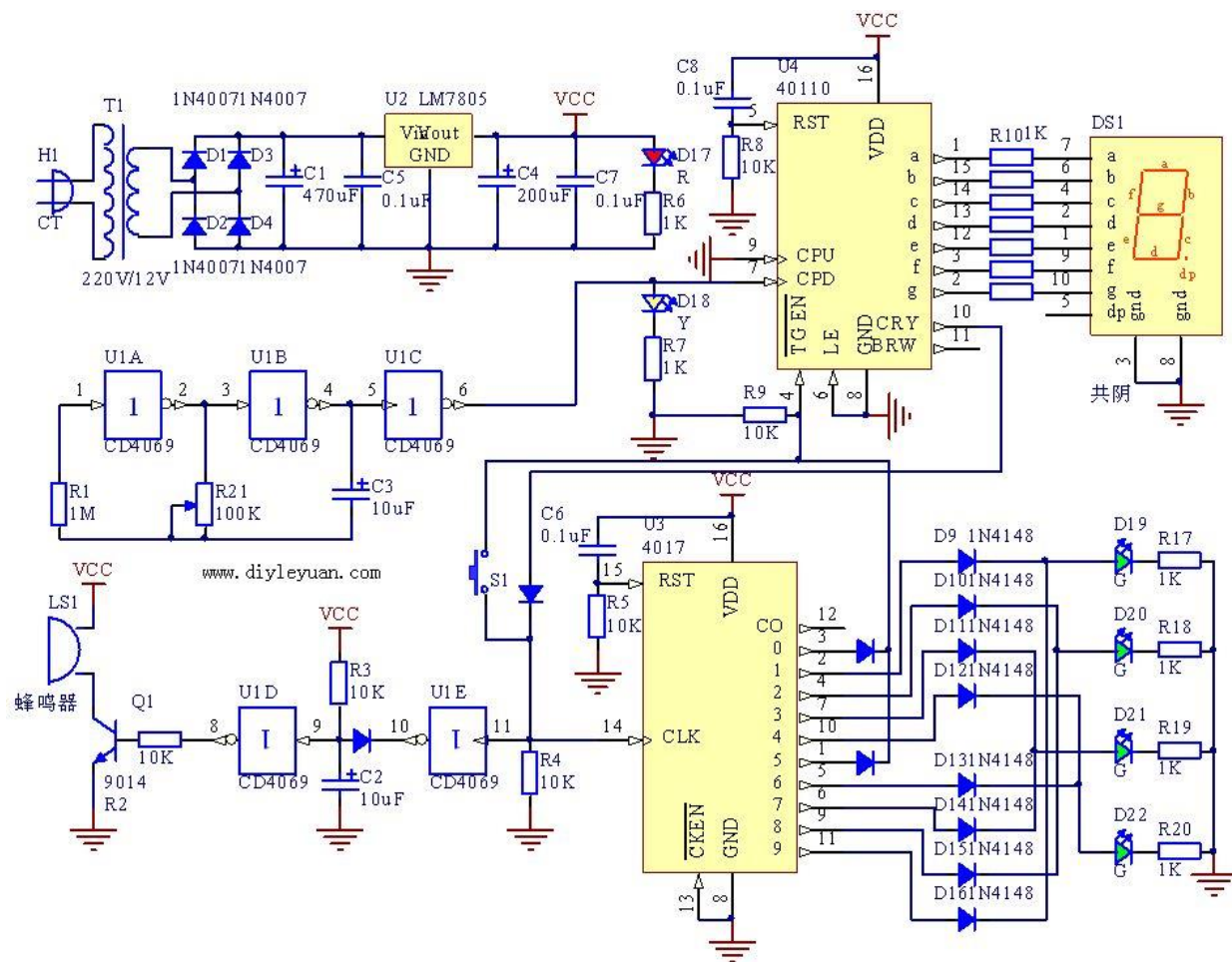
5 元件定律（约束）

6 信号表示（模拟/数字信号）

# 问题引入

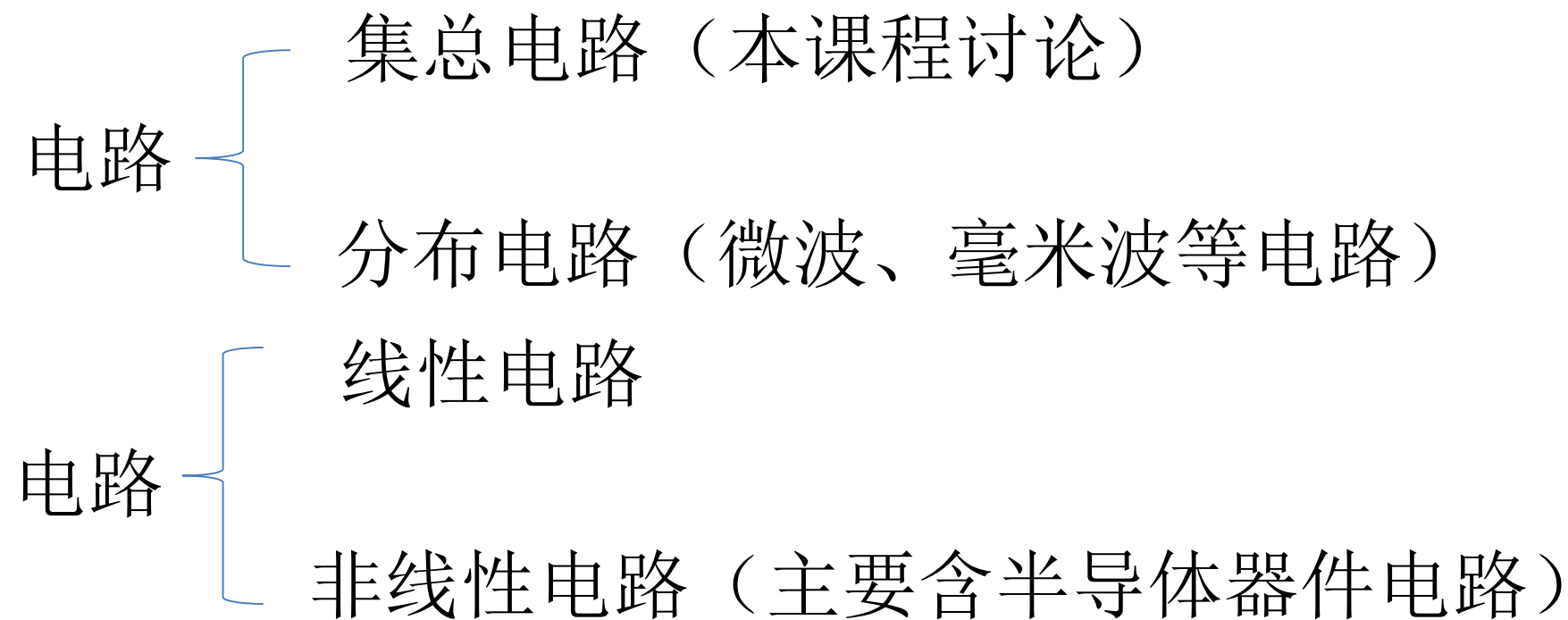
## 1 电路模型及电路网络

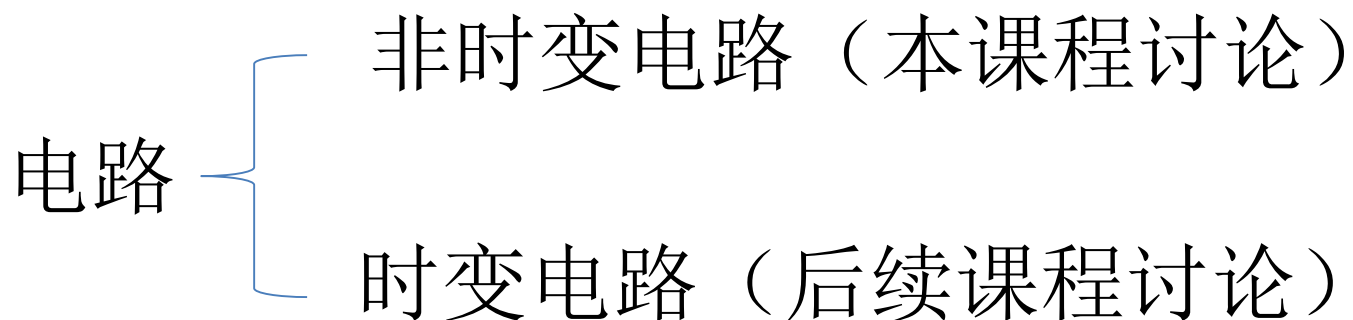
### ◆ 电路



## 基本概念：

- ◆电路：由理想导线连接各种电路元件的集合。
- ◆电子电路主要完成电子信息传输处理等功能。
- ◆电子电路主要对信号幅度（放大等）、频率（选择性）、相位（移相等）信息进行处理
- ◆电子电路对能量存储、变换





非时变集总电路（本课程讨论）

# 1 电路模型及电路网络

基本概念：

◆非时变集总电路：

由理想导线连接各种  
集总元件的集合。

元件特性不随时间变化。

阅读材料：

集总事物原则，ANANT AGARWAL, 于歆杰等译，  
模拟和数字电路基础，清华大学出版社，2015年，PP1-9, P629--



## 阅读材料

### 阅读后需要解决的问题

#### 1 集总电路

元器件尺寸与电路处理信号波长关系是？

2 信号频率越高，电路呈现特点？

3 本课程讨论的电路处理信号频率高还是低？

正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

## 关联变量约定

### ◆ 在电子电路中主要关注的基本物理量

电压

电流

功率



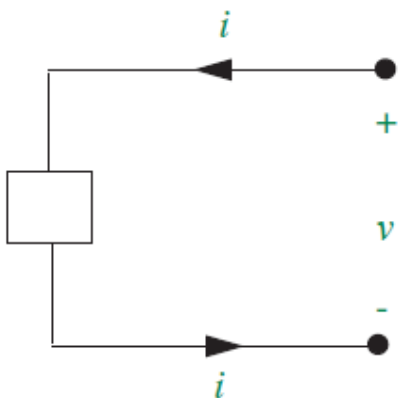
元器件V-I特性

网络约束

# 关联变量约定

## 1 电路模型及电路网络

定义电流流入元件电压的正接线端（接线端变量）

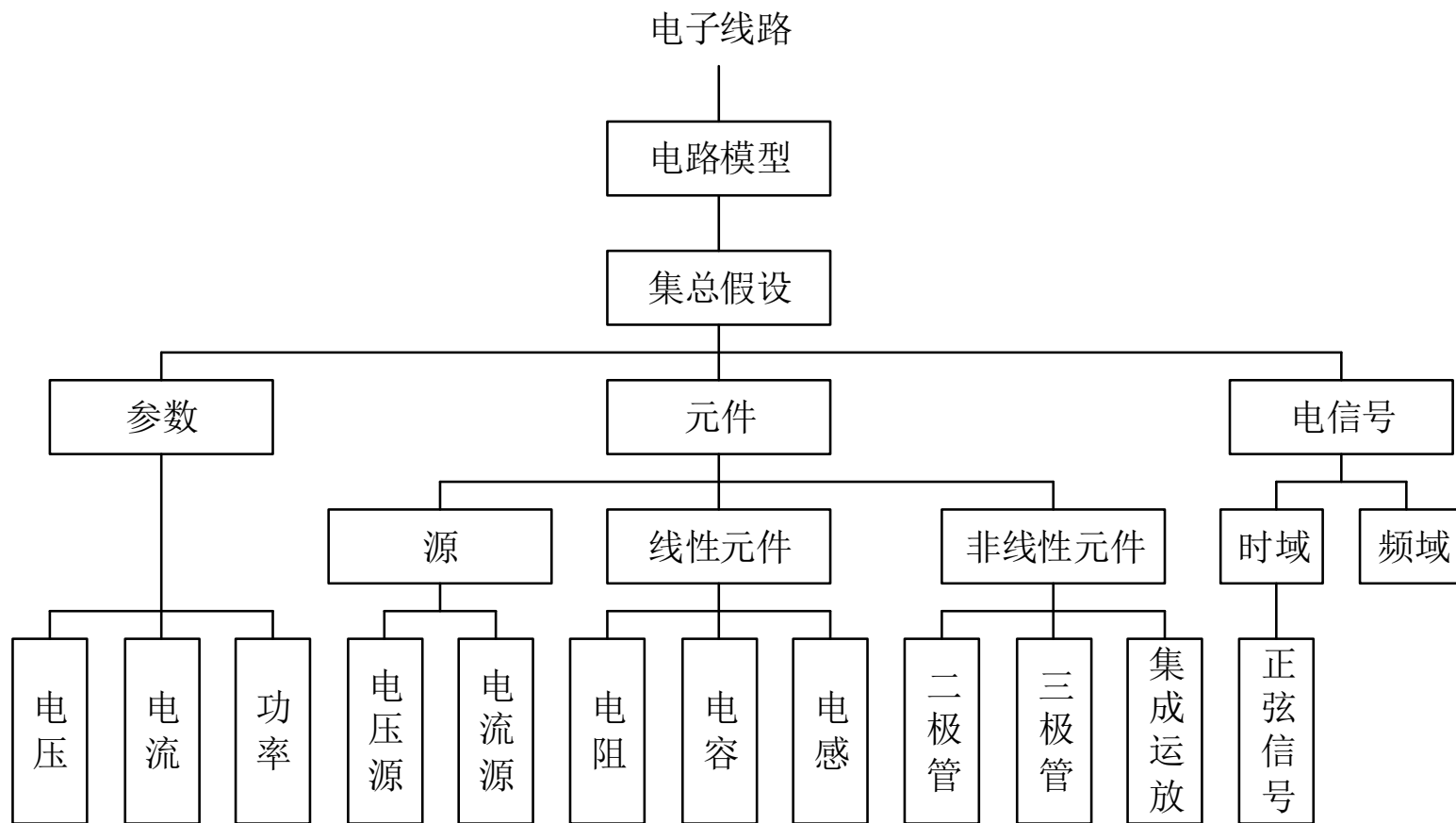


二端元件瞬时功率

$$p = vi$$

功率为正，表示元件消耗功率（如电阻等）；  
功率为负，表示元件提供功率（如电池等）；

# 1 电路模型及电路网络



本课程讨论的主要集总元件

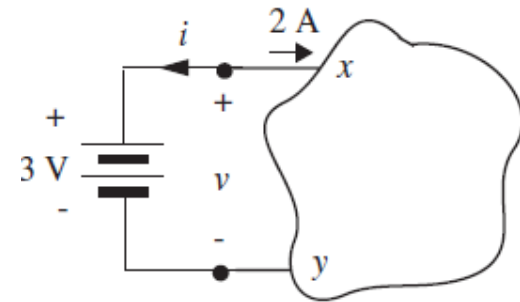
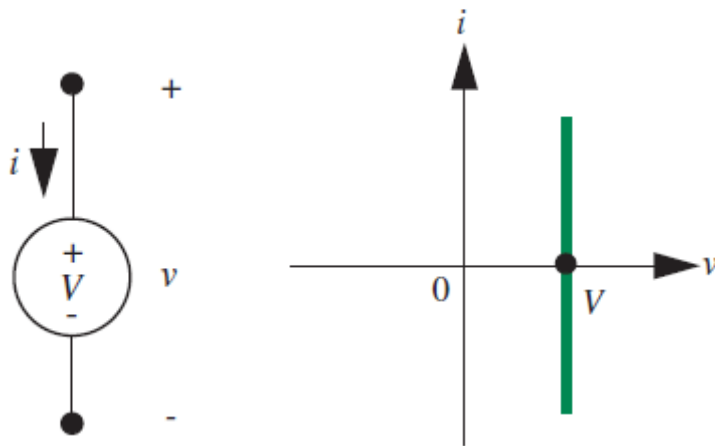
◆电压源、电流源

◆R、L、C

◆半导体器件（晶体管、运放、二极管等）

# 1 电路模型及电路网络

## 电压源

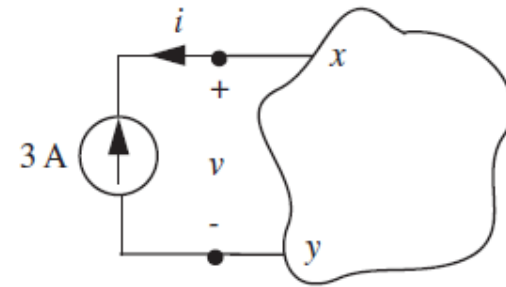
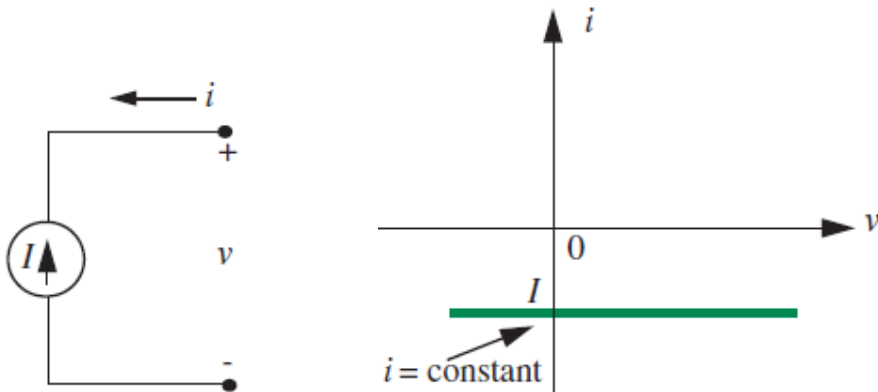


$$p = vi = (3V)(-2A) = -6 \text{ W}$$

◆ 注意：根据该关联变量，流入该电压源的电流一定是负值吗？

# 1 电路模型及电路网络

## 电流源

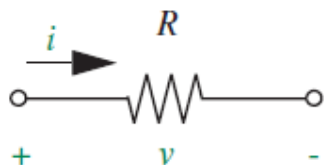


$$p = vi = (5\text{V})(-3\text{A}) = -15\text{ W}.$$

◆ 注意：根据该关联变量，该电流源两端的电压一定是负值吗？

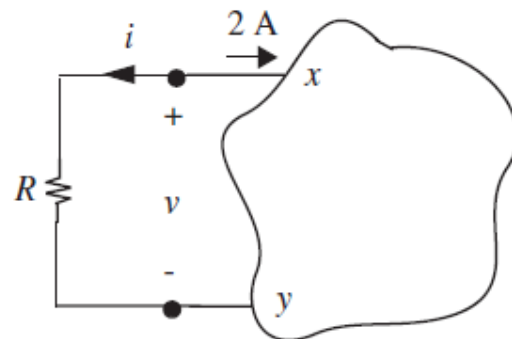
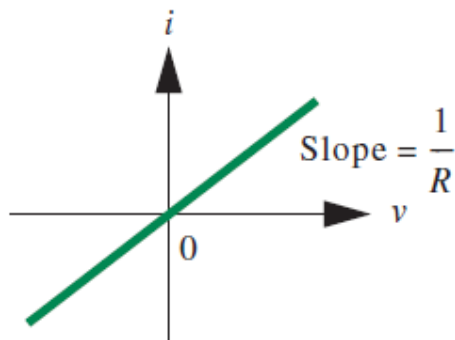
# 理想电阻

## 1 电路模型及电路网络



$$v = iR$$

欧姆定律



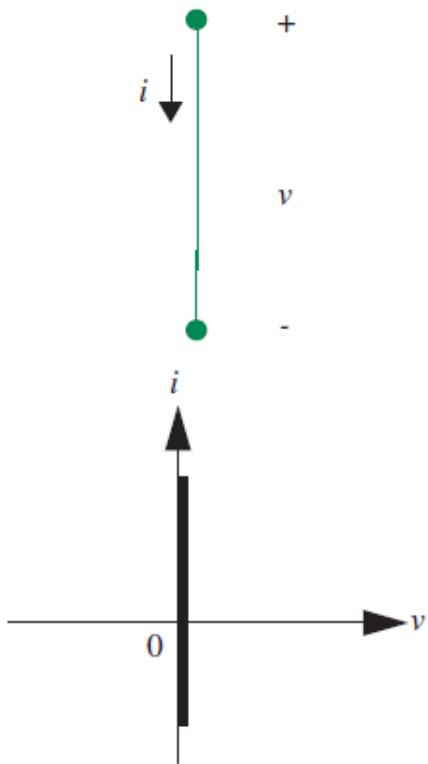
$$R = 10\ \hat{\Omega}\text{ms}$$

电阻上消耗的功率?



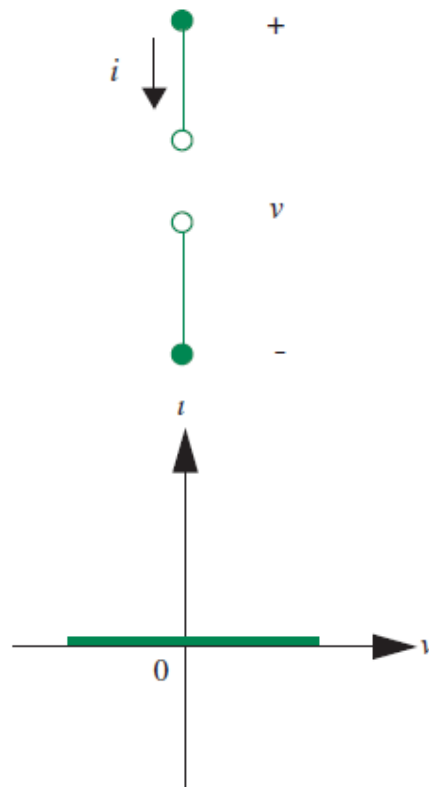
# 理想导线

## 1 电路模型及电路网络



短路

$R=?$



开路

$R=?$

## 阅读材料

### ◆ 实际二端元件

ANANT AGARWAL, 于歆杰等译,  
模拟和数字电路基础, 清华大学出版社,  
2015年, PP9-11

### ◆ 物理元件的建模

ANANT AGARWAL, 于歆杰等译,  
模拟和数字电路基础, 清华大学出版社,  
2015年, PP23-26

## 阅读材料

### 阅读后需要解决的问题

- 1 实际干电池与理想电压源关系？
- 2 实际电阻与电阻模型（理想电阻）关系？
- 3 本书分析用的是理想元件（模型）还是？

正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

## 阅读材料

### ◆ 信号表示

ANANT AGARWAL, 于歆杰等译, 模拟和数字电路基础, 清华大学出版社, 2015年, PP26-30

### ◆ 阅读后需要解决的问题

模拟信号与数字信号的区别, 对应的信号处理电路差异?

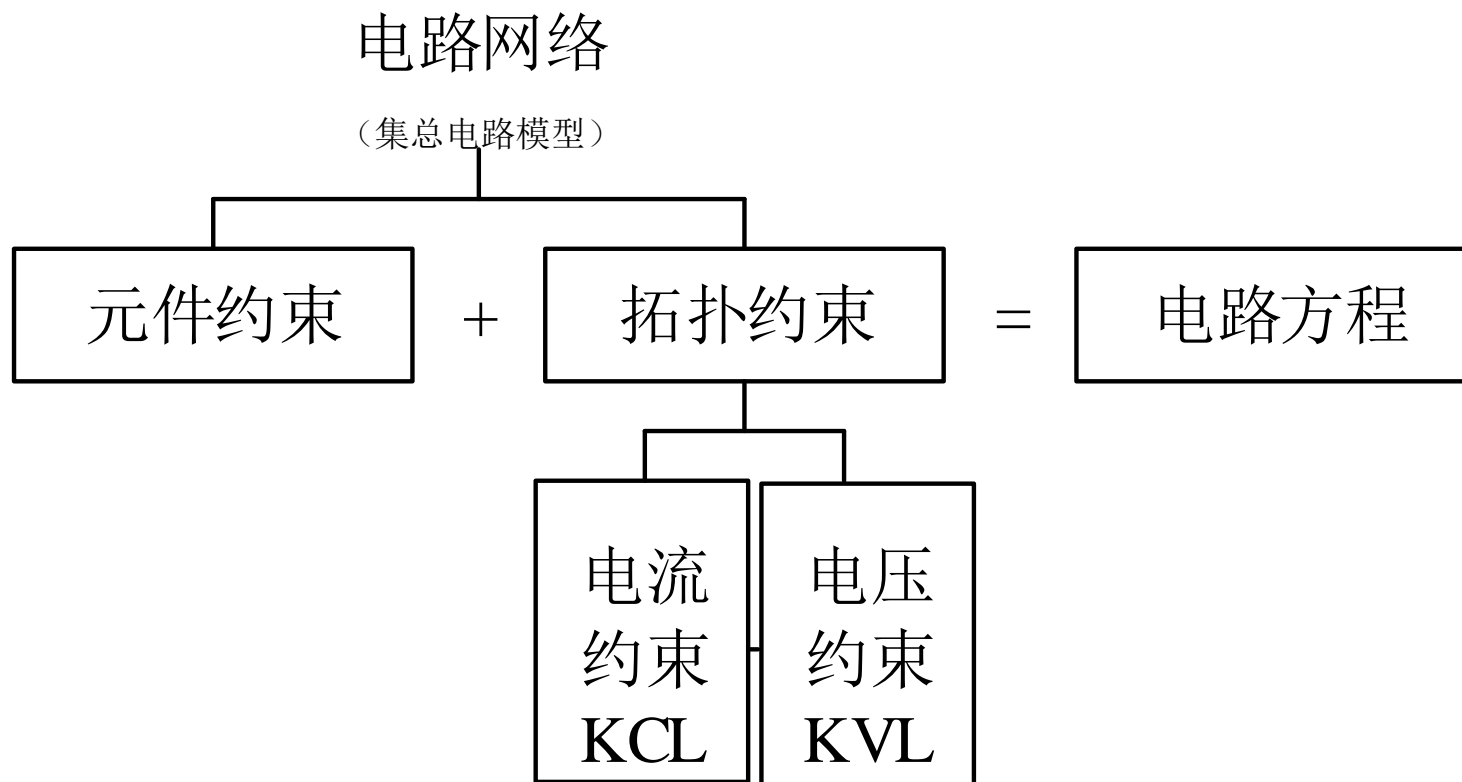
正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

## 问题探讨：

理想电池7.2V， 10000J， 供电阻为100欧姆灯泡。

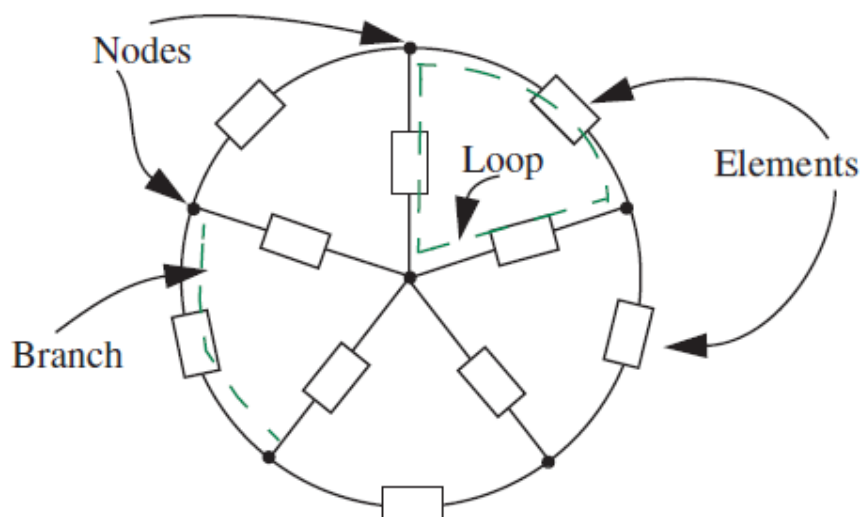
- (1) 画出电路图，根据关联变量标明V、I
- (2) 灯泡与电池吸收的功率
- (3) 电路能量是否守恒
- (4) 电池维持照明时间

正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂



# 1 电路模型及电路网络

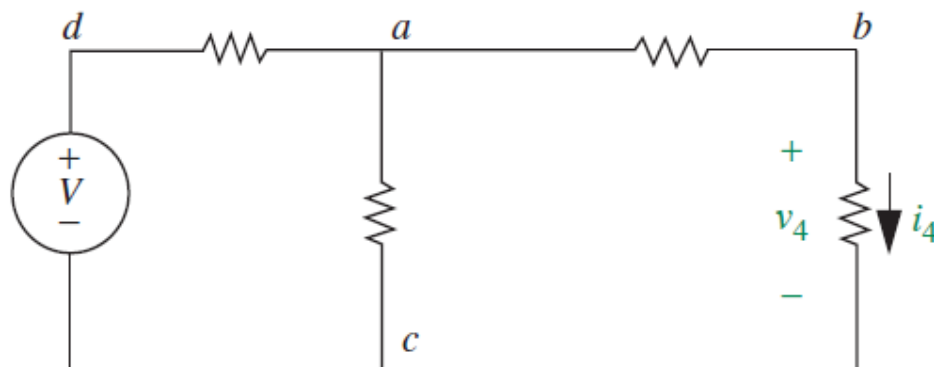
## 电阻网络



术语:

- ◆ 节点
- ◆ 支路 (电流, 电压)
- ◆ 回路

问题: 几个节点?  
几个支路?  
几个回路?



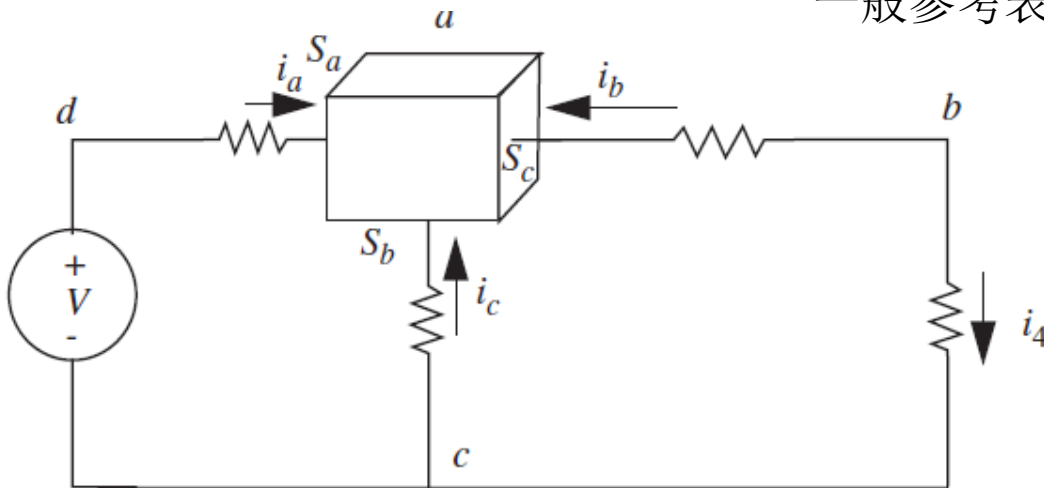
注意: 电路分析中, 通常会选择公共参考点 (节点)。

# 1 电路模型及电路网络

## 基尔霍夫定律

KCL: 电路中流入任意节点支路电流代数和为零。

一般参考表示: 电流流入节点为正, 流出为负。

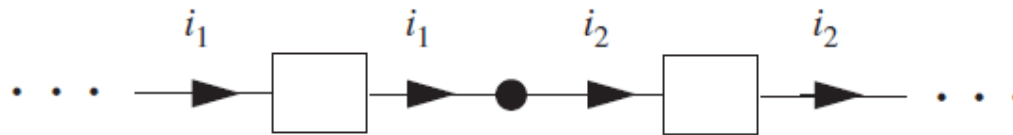


$$i_a + i_b + i_c = 0.$$

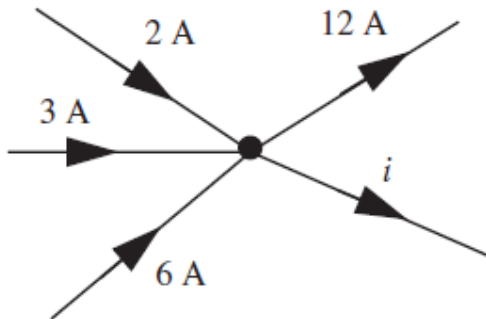
阅读材料: KCL是电荷守恒的一种简单表达。P634。



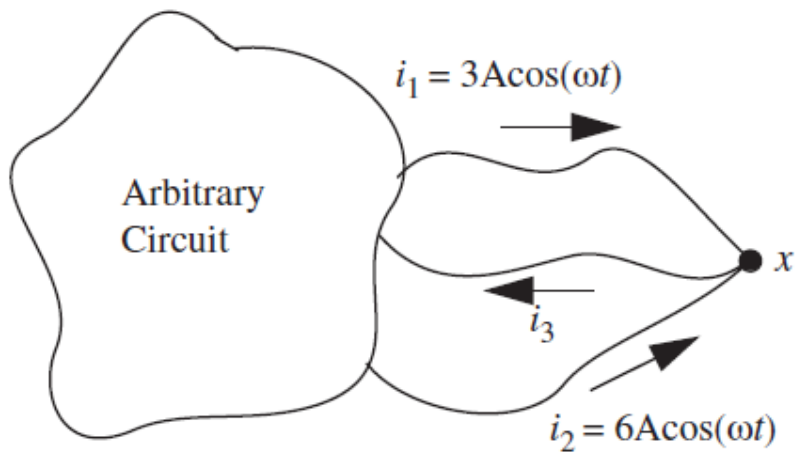
## KCL 理解讨论



$$i_1 - i_2 = 0 \Rightarrow i_1 = i_2.$$



求 $i$ =?

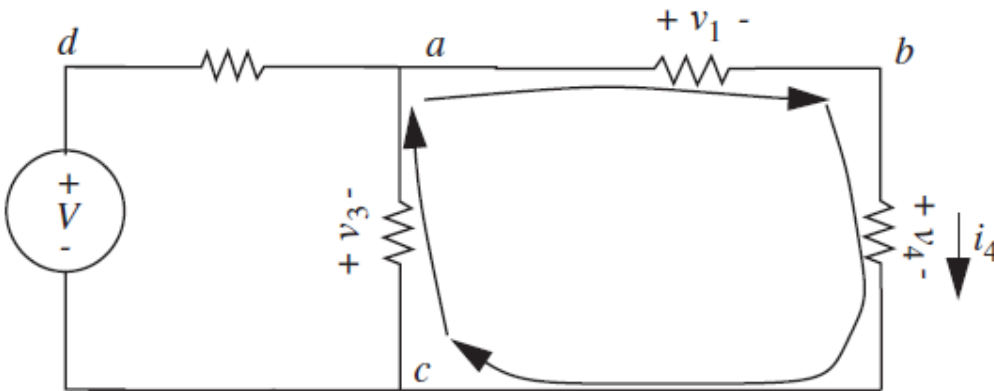


求 $i_3 = ?$

# 1 电路模型及电路网络

## 电阻网络

KVL: 网络中任何闭合路径上支路电压的代数和为零。



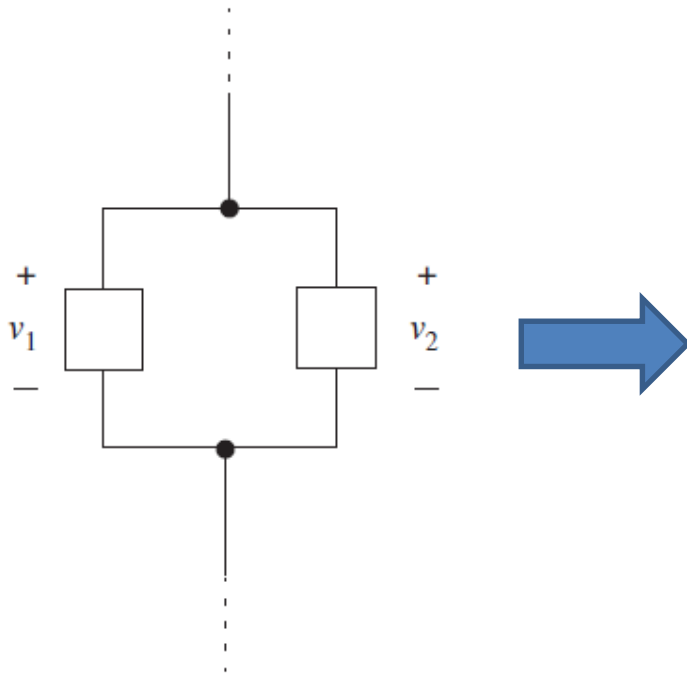
$$v_{ab} + v_{bc} + v_{ca} = 0$$

注意：回路方向与支路电压正负关系。

阅读材料：KVL是能量守恒的一种简单表达。P633。

# 1 电路模型及电路网络

## KVL 理解讨论



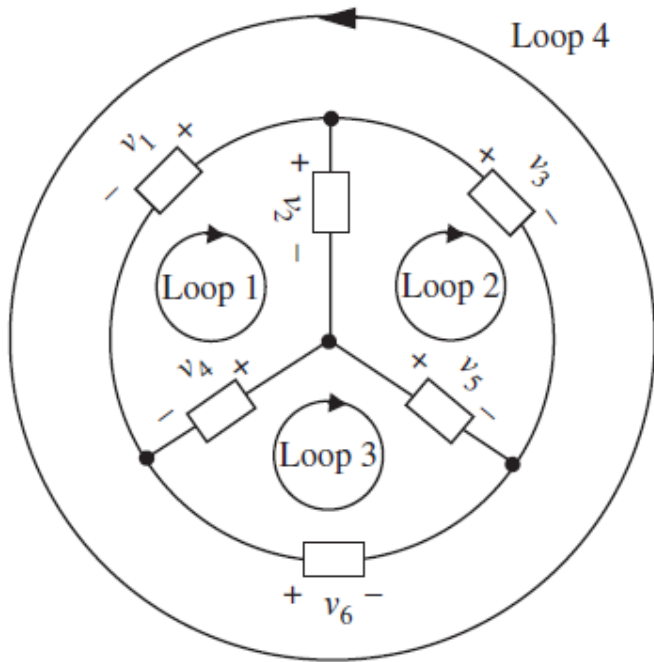
求 $i=?$

KCL理解，在实际电路分析，最重要的推论是什么？

正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

# 1 电路模型及电路网络

## KVL 理解讨论



节点个数？

支路个数？

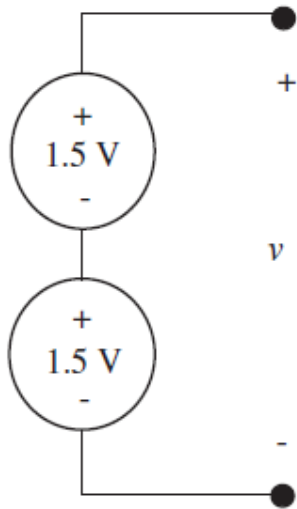
列出KVL方程？

可以列出独立方程回路个数？

拓展问题：N个节点，B条支路，利用KVL建立独立方程个数： $B - N + 1$

# 1 电路模型及电路网络

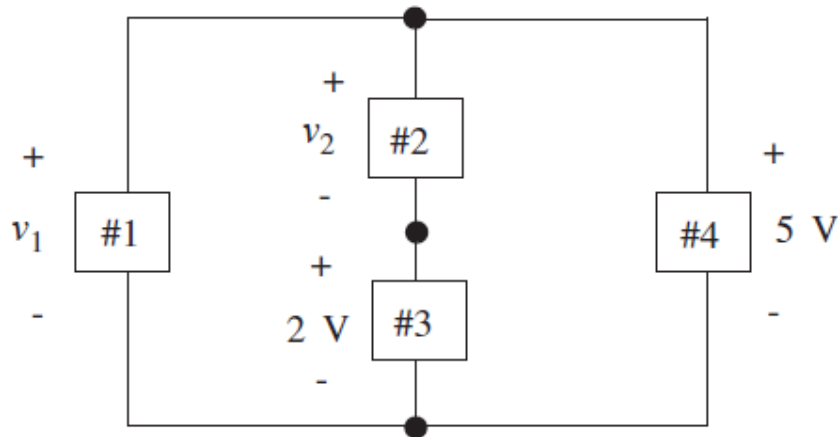
## KVL 理解讨论



求 $v$ ?

# 1 电路模型及电路网络

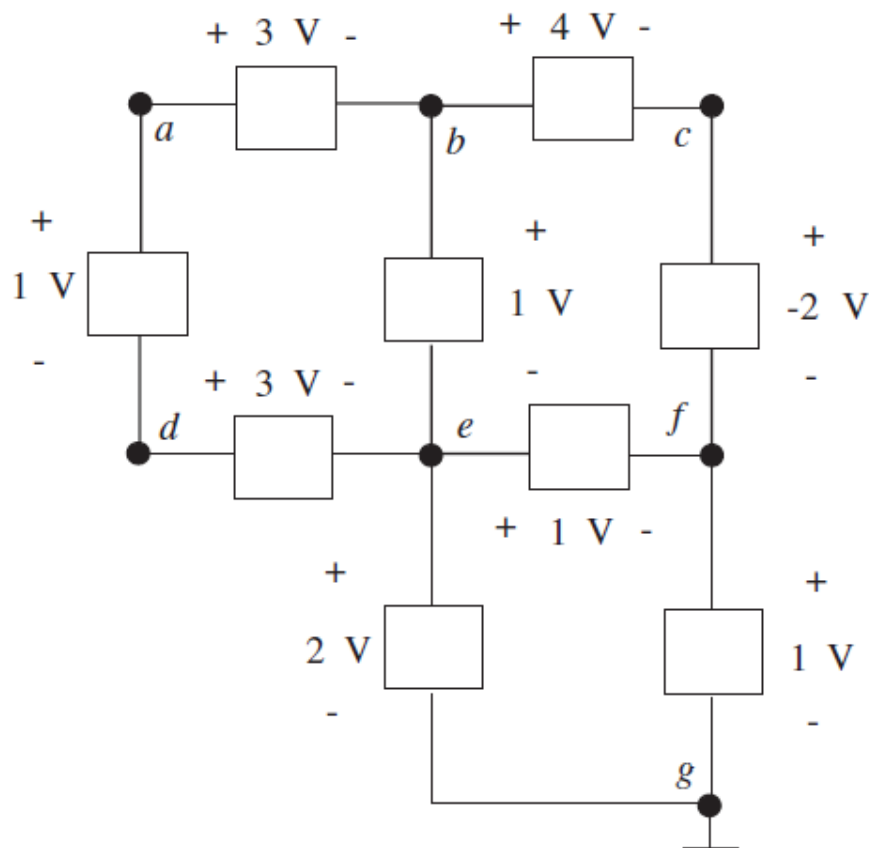
## KVL 理解讨论



求 $v_1$ 和 $v_2$ ?



# KVL 理解讨论



比较沿不同路径a与g点电压？

KVL得到最重要的推论是什么？

正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

## 电路分析基本方法

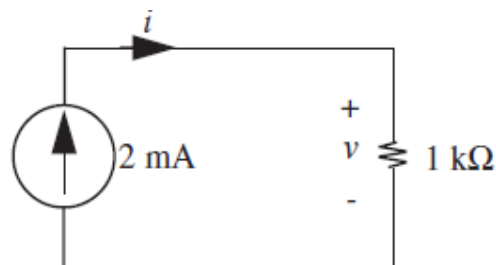
### 两类方程

◆ 元件定律（元件约束）

◆ KCL、KVL

# 1 电路模型及电路网络

## 电路基本分析方法



讨论:

$V=?$

支路

节点

回路

进一步讨论:

- ◆ 电流源上电压与外电路关系?
- ◆ 能量关系 (电流源与电阻上能量)

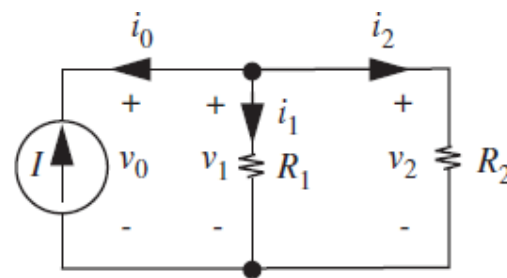
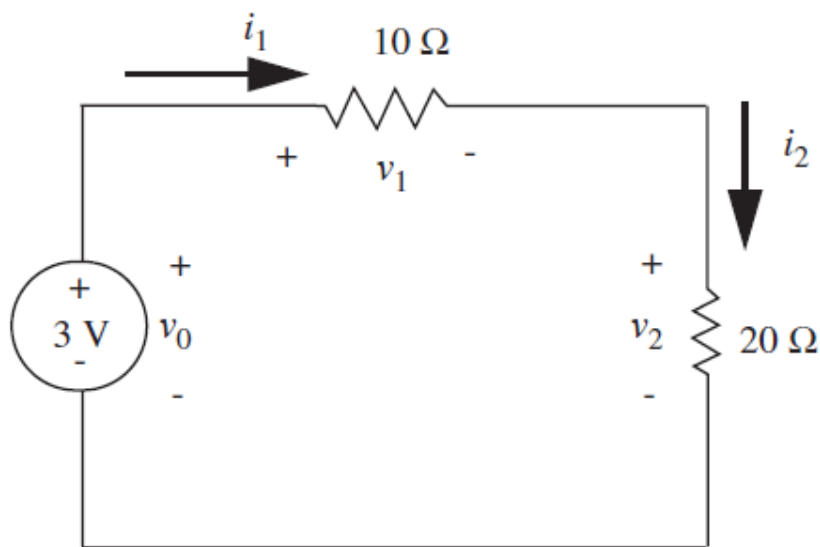
阅读材料

参考资料: PP41—PP53

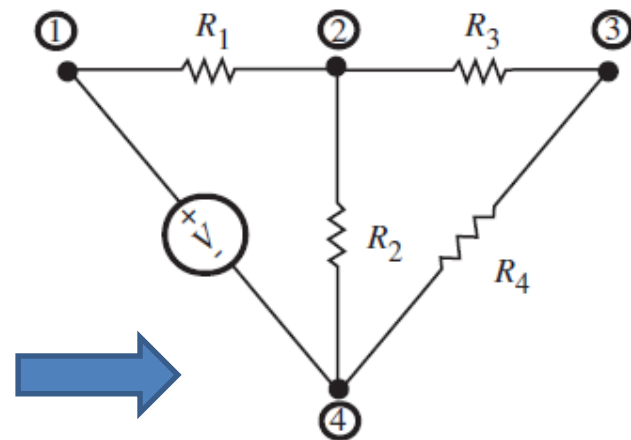
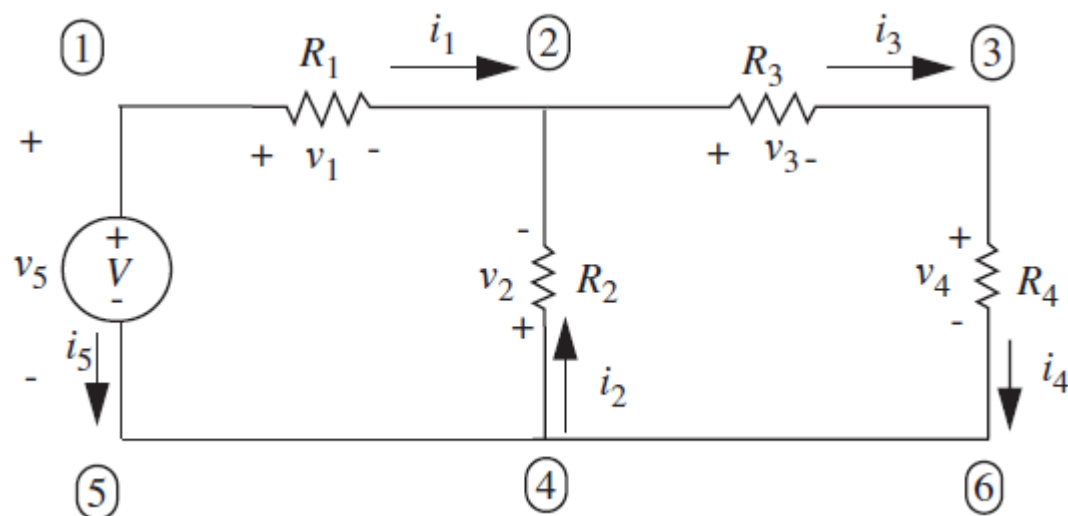
## 电路基本分析方法

阅读讨论：

分析如下两个电路利用什么特点？（串联，并联）



给出电路方程矩阵形式，及思考矩阵求解



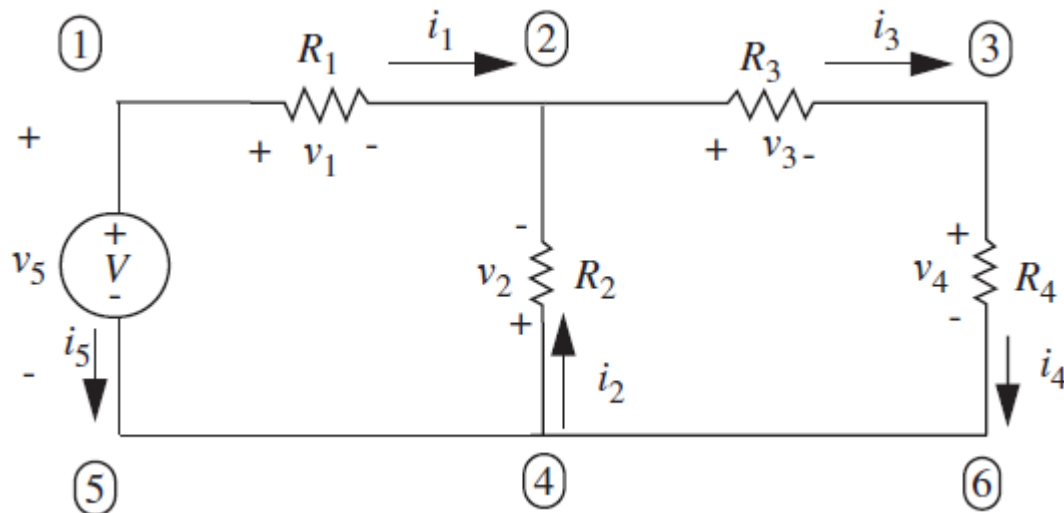
分析各个元件的电压电流？并验证是否能量守恒？

重点：理解根据两类约束列写方程。

正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

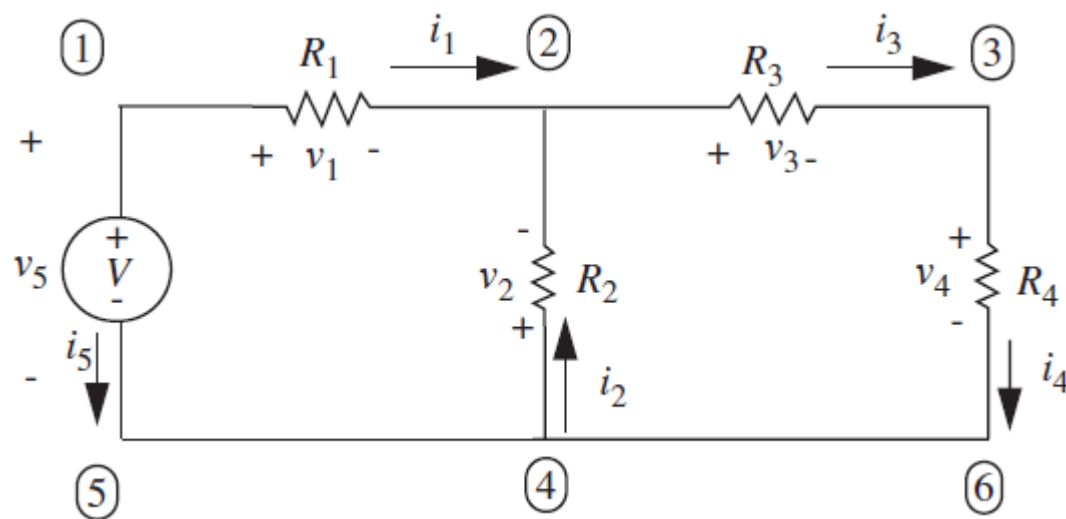
## 电路基本分析方法一步骤

(1) 根据关联变量约定指定支路变量 (随意)



## 电路基本分析方法

## (2) 器件约束—元件定理



$$v_1 = i_1 R_1$$

$$v_2 = i_2 R_2$$

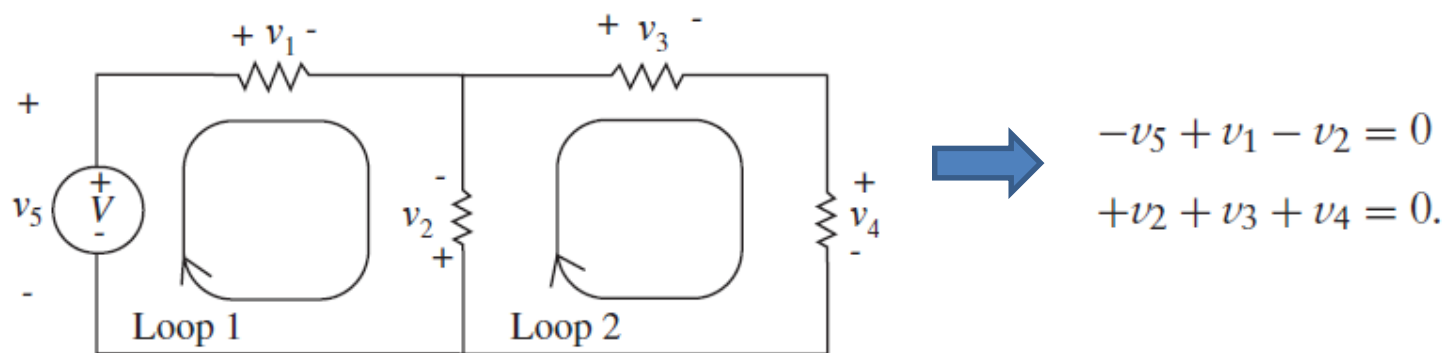
$$v_3 = i_3 R_3$$

$$v_4 = i_4 R_4$$

$$v_5 = V.$$

## 电路基本分析方法

### (3) KVL方程



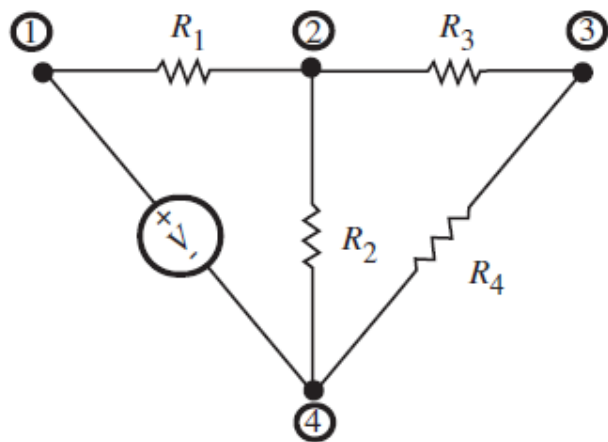
讨论：是否还能选取其它回路？结果有什么区别？



# 1 电路模型及电路网络

## 电路基本分析方法

### KCL方程



节点1  $-i_5 - i_1 = 0$

节点2  $+i_1 + i_2 - i_3 = 0$

节点3  $i_3 - i_4 = 0.$

注意 (1) 原图节点4, 5, 6 与合并成节点4;  
(2) 是否需要再列节点4方程?

## 电路基本分析方法

经过整理可以得到方程组（支路电流变量）

$$i_1 R_1 - i_2 R_2 = V$$

$$i_2 R_2 + i_3 R_3 + i_4 R_4 = 0$$

$$i_1 + i_5 = 0$$

$$i_1 + i_2 - i_3 = 0$$

$$i_3 - i_4 = 0$$



$$\begin{bmatrix} R_1 & -R_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & R_3 & R_4 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

讨论：以支路电压变量列出方程组？

# 电路基本分析方法

## 1 电路模型及电路网络

矩阵求解MATLAB实现

参考资料：附录D

## 1 电路模型及电路网络

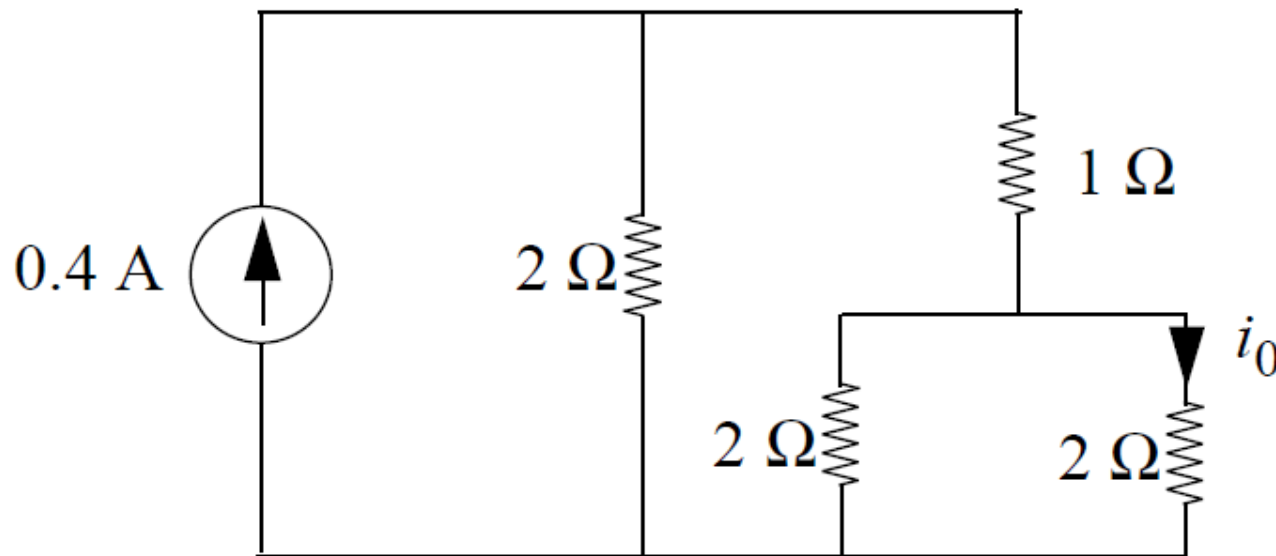
# 电路基本分析方法

阅读材料：电路分析的简化（串联、并联）

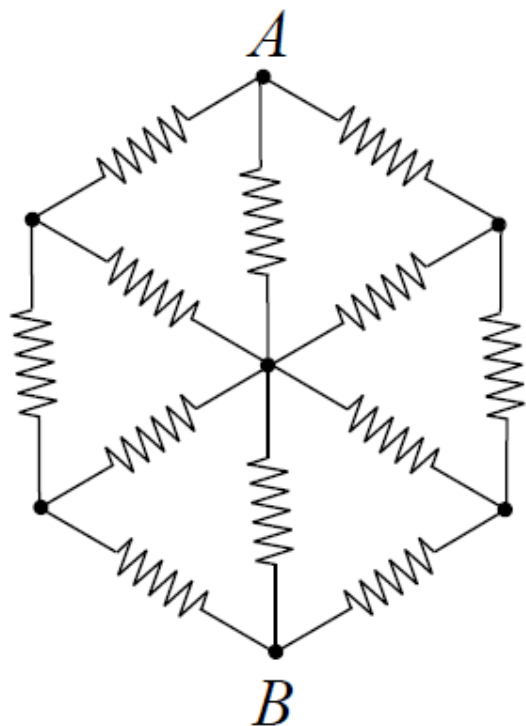
参考资料：PP57-61

## 1 电路模型及电路网络

# 电路基本分析方法



快速求出 $i_0$  ?



求A、B节点间等效电阻，所有电阻为1欧姆。

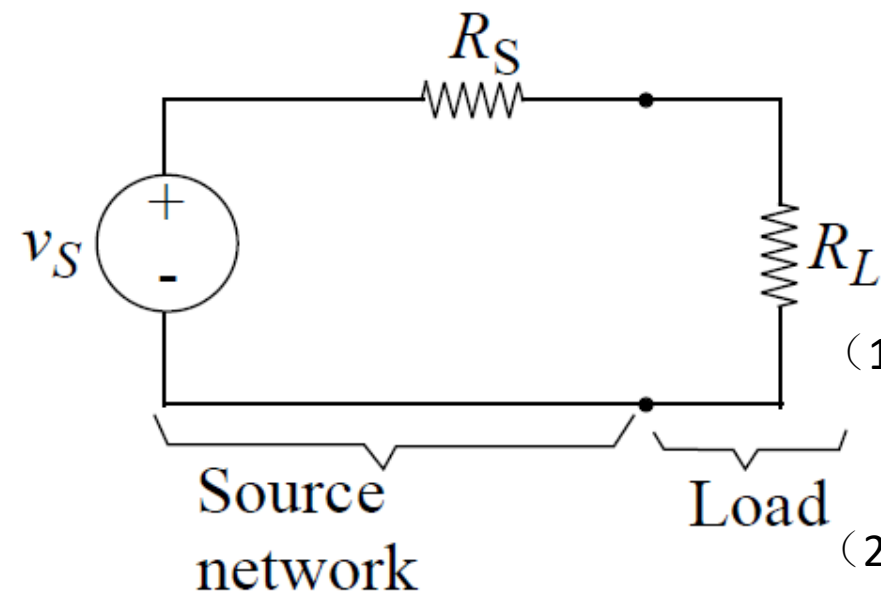
正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

## 1 电路模型及电路网络

# 电路基本分析方法

例2. 21 (P53) VLSI平面电阻

阅读：给出自己认识。



有关功率传输的证明

(1) 如果  $R_L$  固定,  $R_S$  改变, 负载消耗最大功率条件

(2) 如果  $R_S$  固定,  $R_L$  改变, 负载消耗最大功率条件

(3) (2) 问题中,  $R_S$  和  $R_L$  消耗功率相等吗?

进一步拓展 (1) 绘出负载消耗功率曲线 (  $R_S$  固定 ); (2) 如复数阻抗, 探讨上述问题

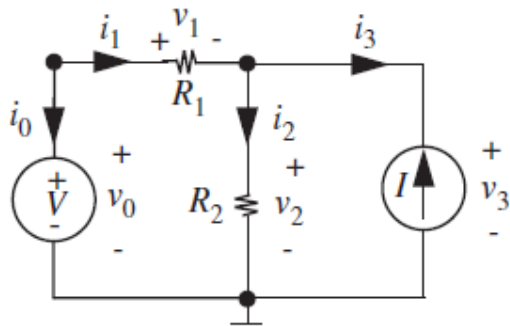
正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂



# 1 电路模型及电路网络

## 电路基本分析方法

例



KVL  $V_1 + V_2 = V$

KCL  $i_2 - i_1 = I$

VCR  $V_1 = i_1 R_1$

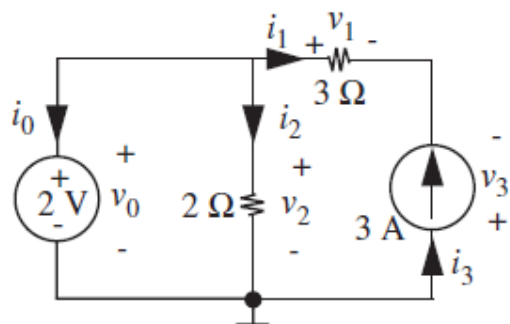
$$V_2 = i_2 R_2$$

重点观察电路，快速理解

# 1 电路模型及电路网络

## 电路基本分析方法

例



KVL  $V_2 = V_1 - V_3$

KCL  $i_2 + i_0 = i_3$

VCR  $V_1 = -9V$

$$i_2 = 1A$$

重点观察电路，快速理解



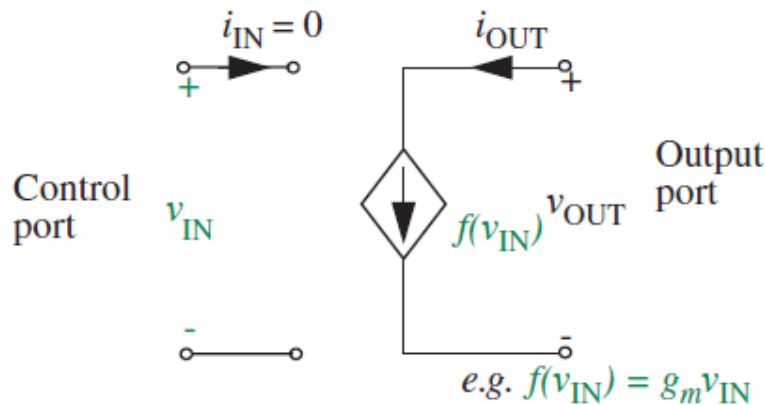
$$i_0 = 2A$$

能量是否守恒？ 电阻功率？ 电源功率？

问题：电压源消耗功率还是提供功率？

## 电路基本分析方法

### 受控源和控制的的概念



$$i_{OUT} = f(v_{IN}).$$

VCCS

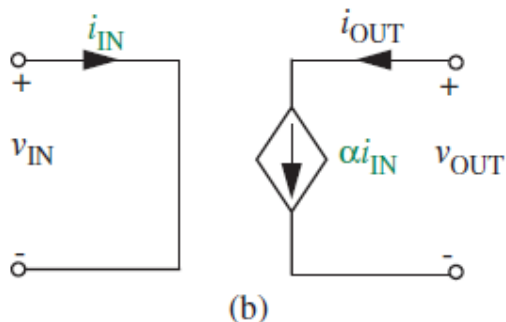
$$i_{OUT} = g v_{IN}$$

注意单位，符号

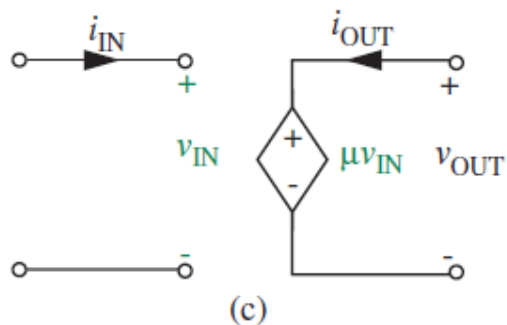
# 电路基本分析方法

## 1 电路模型及电路网络

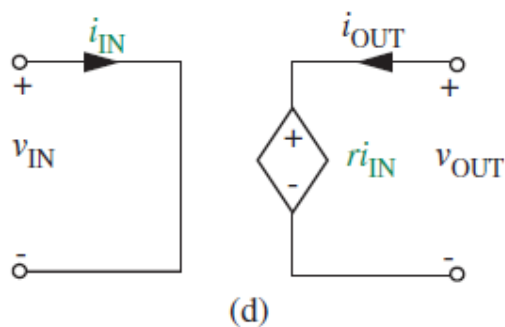
### 4种受控源模型



CCCS



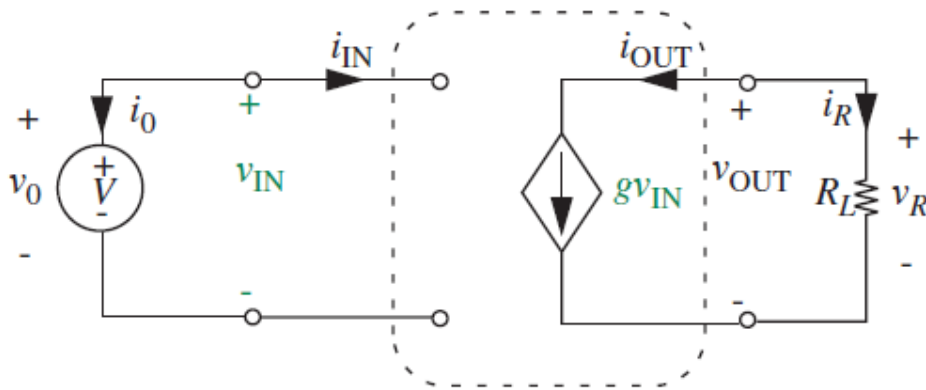
VCVS



CCVS

## 电路基本分析方法

### 带受控源电路分析



$$i_{OUT} = g v_{IN}.$$

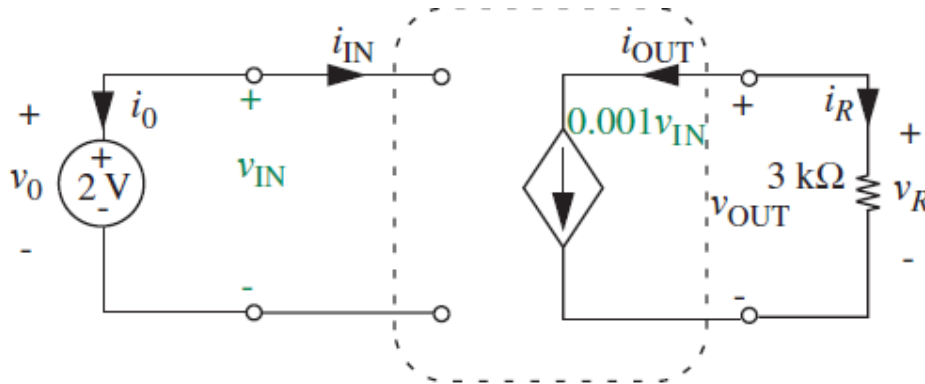
$$v_{out} = -g v_0 R_L$$

求 $R_L$ 电阻上的电压和电流？

# 1 电路模型及电路网络

## 电路基本分析方法

探讨能量守恒



$$i_{OUT} = 0.002\text{ A}$$

$$i_R = -0.002\text{ A.}$$

$$v_R = 3 \times 10^3 i_R = -6\text{ V}$$

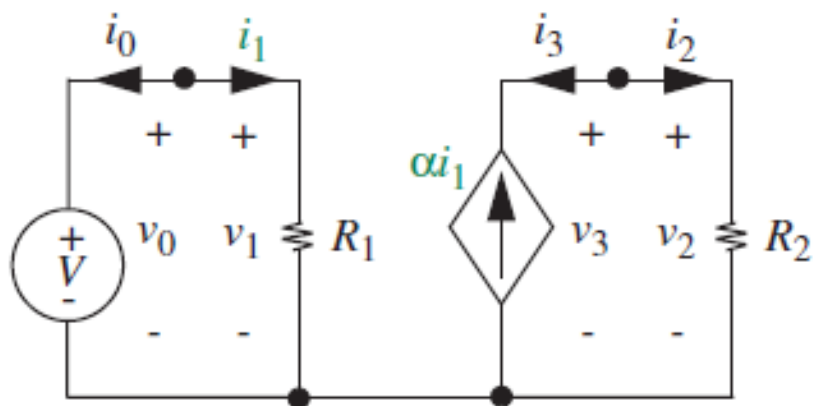
$$\text{电阻消耗能量: } 3\text{ k}\Omega \times i_R^2 = 0.012\text{ W.}$$

受控源提供能量:

$$v_{OUT} \times i_{OUT} = -6 \times 0.002 = -0.012\text{ W.}$$

问题：受控源能量从哪里提供？

分析V2与V的关系



正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

# 1 电路模型及电路网络

基尔霍夫（**Gustav Robert Kirchhoff**, 1824~1887），德国物理学家。

1824年3月12日生于普鲁士的柯尼斯堡（今为俄罗斯加里宁格勒），1887年10月17日卒于柏林。基尔霍夫在柯尼斯堡大学读物理，1847年毕业后去柏林大学任教，3年后去布雷斯劳作临时教授。1854年由化学家本生推荐任海德堡大学教授。1875年到柏林大学作理论物理教授，直到逝世。



1845年，21岁。他发表了第一篇论文，著名的基尔霍夫电流定律（**KCL**）和基尔霍夫电压定律（**KVL**），解决了电器设计中电路方面的难题。基尔霍夫电路定律具有更广泛的意义。直到现在，基尔霍夫电路定律仍旧是解决复杂电路问题的重要工具。基尔霍夫被称为“电路求解大师”。



# 1 电路模型及电路网络

## 例子探讨

### 问题2.16

# 电路基本分析方法

## 1 电路模型及电路网络

练习1.2, 1.4, 问题1.2, 1.4, 练习2.2, 2.5, 2.9, 问题2.6, 2.17,

# 电路基本分析方法

## 1 电路模型及电路网络

欢迎大家讨论交流！