

# 信息与电子工程导论

Introduction to Information Science and Electronic Engineering

## 3.1 电路模型和基本定律

章献民 主编

浙江大学出版社

2023年9月

# 知识图谱

- 2.1 时域和频域
- 2.2 模拟和数字
- 2.3 编码和调制
- 2.4 电磁场与波

## 2 信号与数据

场与波

信号

数据

信息

## 1 信息与信息技术概述

- 1.1 信息
- 1.2 信息科学技术概述
- 1.3 知识图谱

## 3 电子器件与电路

- 3.1 电路模型和基本定律
- 3.2 晶体管 and 集成电路
- 3.3 集成运算放大器

器件

电路

处理器

计算机

网络

## 4 逻辑与数字系统

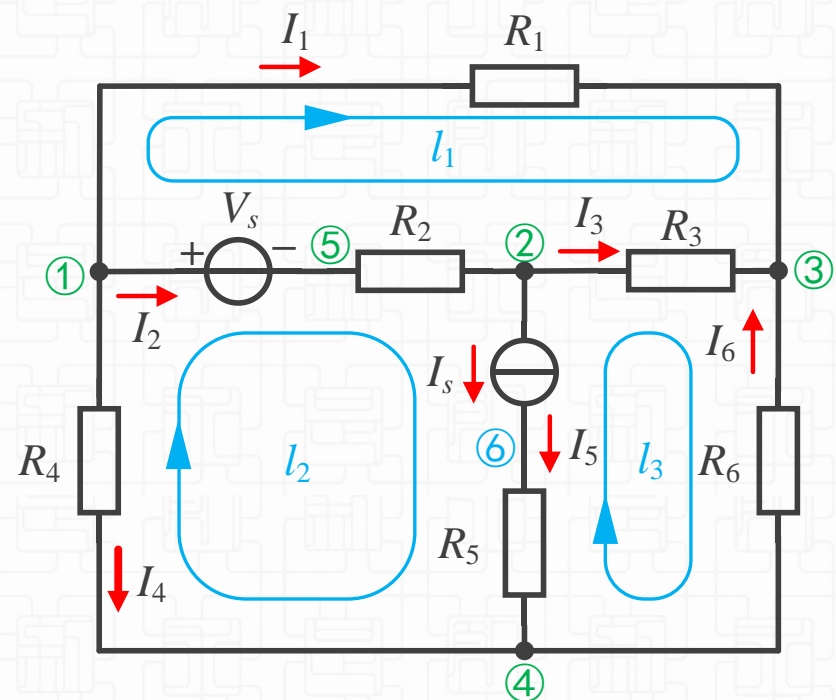
- 4.1 数字逻辑和电路
- 4.2 组合逻辑和时序逻辑
- 4.3 微处理器和计算机系统
- 4.4 嵌入式系统
- 4.5 EDA技术

## 5 互联与计算

- 5.1 通信与网络
- 5.2 物联与数联
- 5.3 计算与智能

## 内容提要

- ❖ 层次结构和分析模型
- ❖ 基本电路元件
- ❖ 基尔霍夫电路定律



## 手机及其主要部件

- ❖ 电路分析的锦囊妙计：**模块化分析**
- ❖ 电路主板是手机的组织核心，主板研究透了，手机也就研究得差不多了
- ❖ 关键是将电路主板**分解为多个可分析的电路模块的组合**

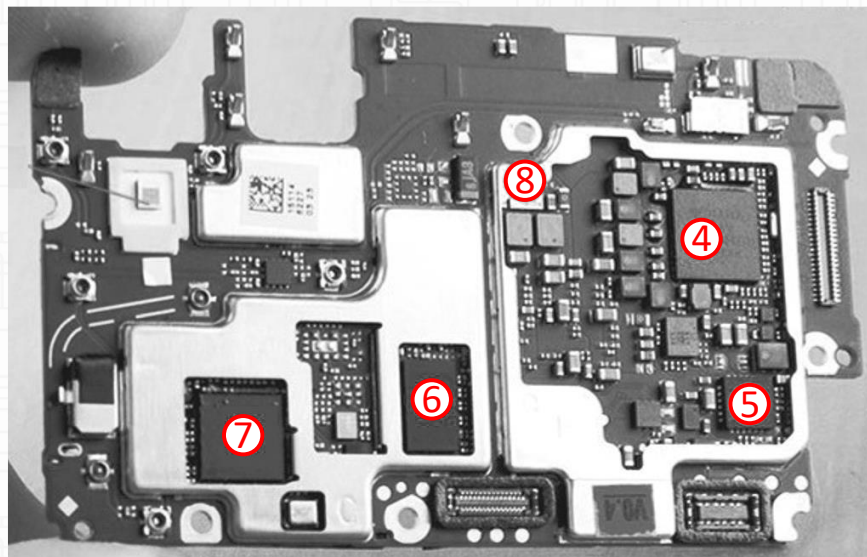
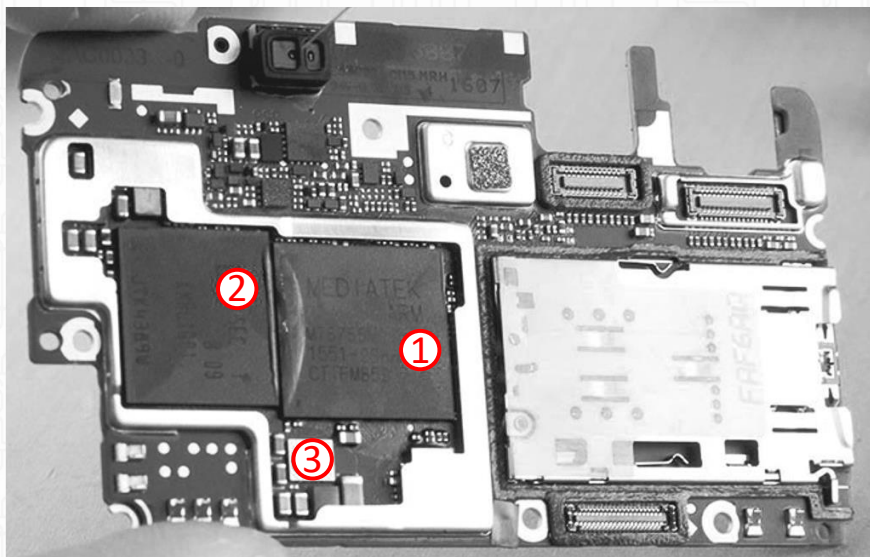


手机





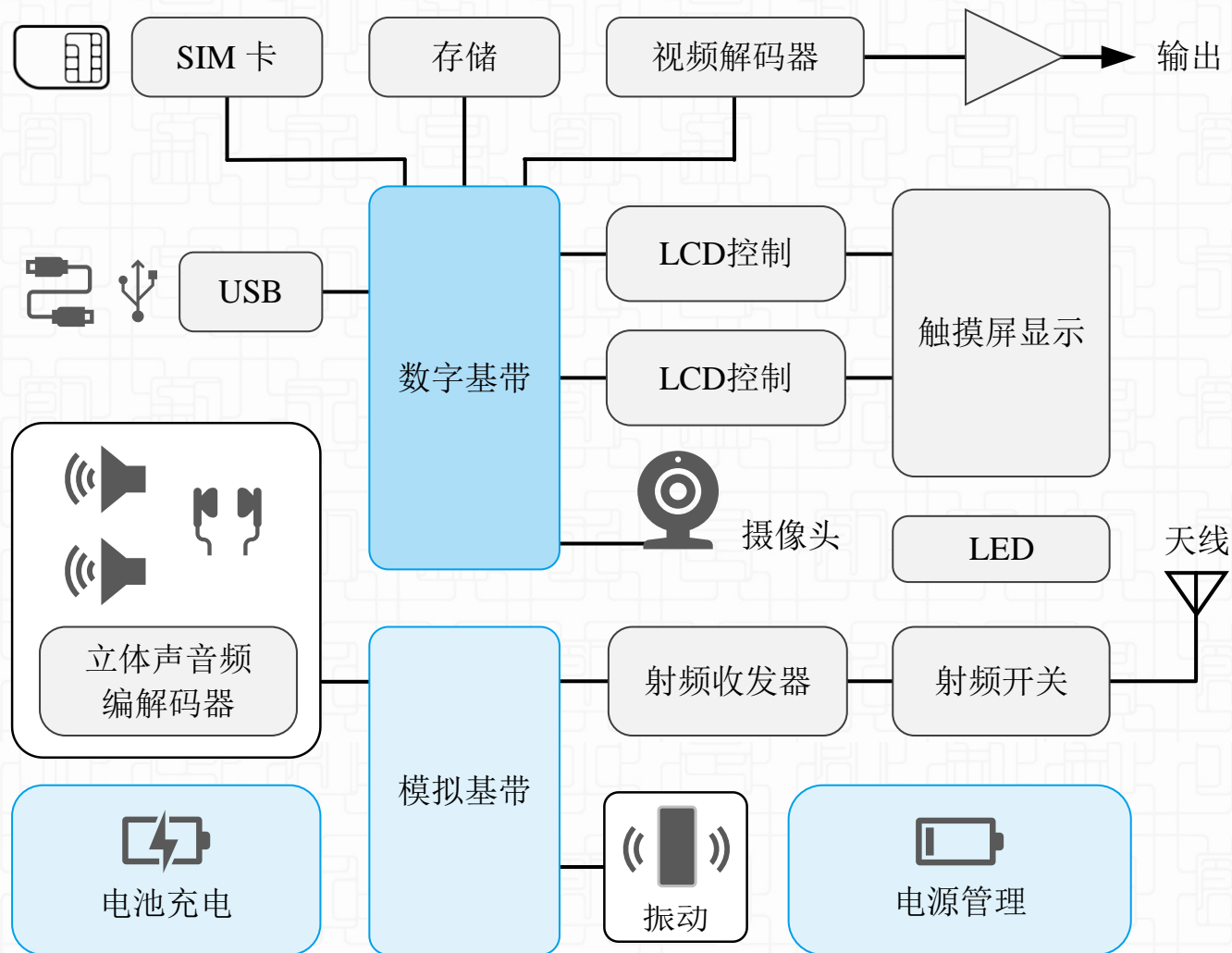
## 主板电路可分为板级、晶体管级、版图级三个层次



核心元件是芯片组，即图中①-⑦等多个芯片

- ❖ **积木级：**核心元件是芯片组（基于PCB平台的电路，简称板级电路）
- ❖ **晶体管与无源元件级：**芯片内的电路，制作在硅片上（简称晶体管级电路）
- ❖ **版图级：**将晶体管级电路转化为可生产的版图
- ❖ **每一层又分解成若干模块的组合，上层电路模块由下层电路构成**

## 构成手机板级电路的功能模块



❖ 板级电路的基础是一块多层印刷电路板 (PCB)

❖ 在它上面集成安装了组成手机的主要电气元件 (图中为19个功能模块)

❖ 通过PCB上的金属导线有针对性地互连而构成一个系统

## 板级电路分析要解决的问题

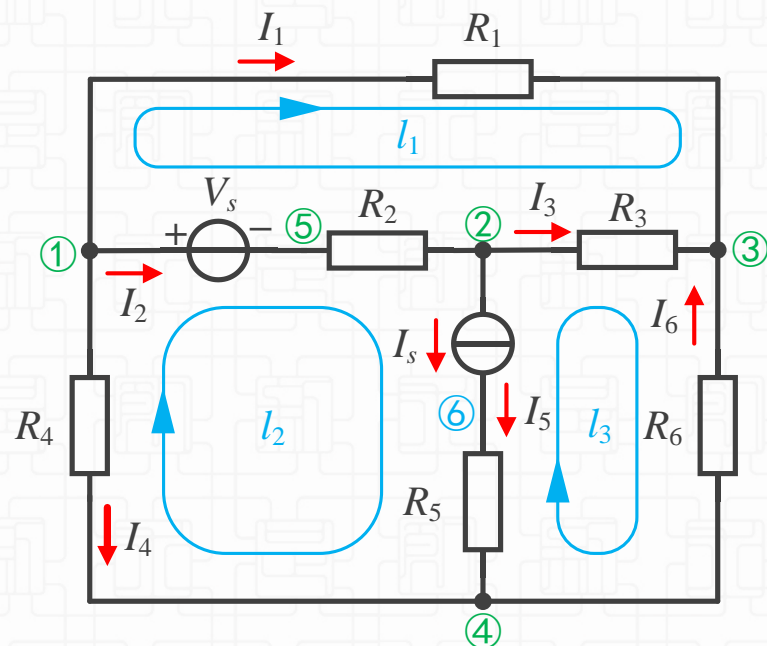
❖ 各功能模块是啥样的？实现什么功能？  
怎么互连起来？

❖ 各功能模块的符号表示

– 各功能模块的输入-输出关系，或模块作为一个电气元件的约束关系， $I=f(V)$ ， $Q=f(V)$

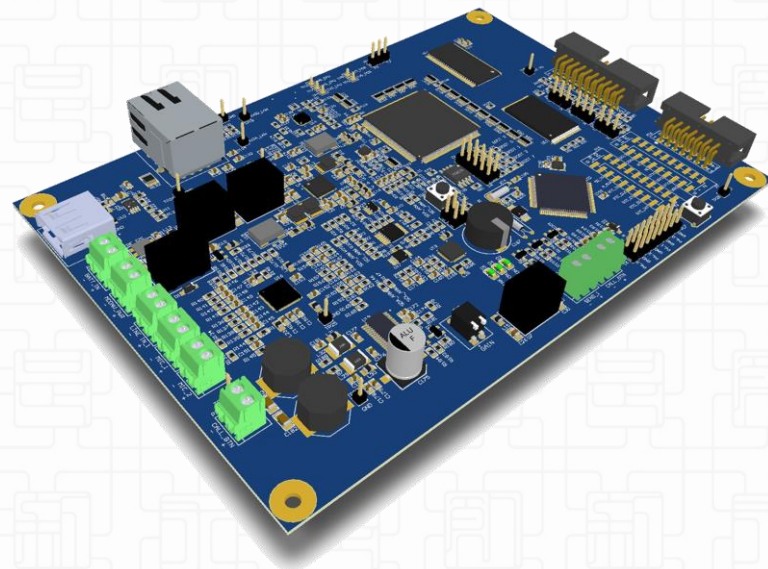
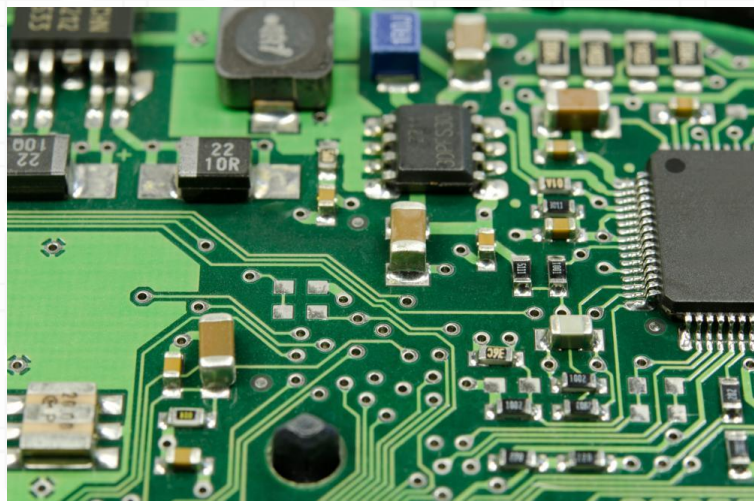
❖ 将符号表示的功能模块按实体电路拓扑结构互连起来，得出板级电路的电路模型

❖ 在基本物理原理（能量守恒、电流连续与电荷守恒等）约束下，建立表示板级电路输入-输出关系的电路方程，求解电路方程，预测板级电路的输入-输出关系。





## 板级电路描述



- ❖ 主板电路的基础是一块多层印刷电路板 (**Printed Circuit Board, PCB**)，在它上面集成安装了组成手机的主要电气元件，并通过PCB上的**金属导线和通孔**有针对性地互连。
- ❖ PCB上还有多个插槽与连接器，其它电气元件通过这些接插件连接到主板。
- ❖ 芯片组是主板电路的核心，它几乎决定了电路主板的功能，进而影响到整个手机系统性能的发挥。
- ❖ 主板电路研究时，芯片当作“**黑盒子**”处理。



## 电路分析和综合

### ❖ 电路分析：

- 核心是在**给定的电路结构及元件参数**的条件下，找出电路输入（激励）与输出（响应）的关系。即，已知输入求输出。

### ❖ 电路综合：

- 在**已知输入和输出**的条件下，设计电路的结构和参数。即，给定技术指标，选择适当的电路去实现它。

### ❖ 电路理论形成的初期在19世纪~20世纪40年代，是从物理学的电磁学理论中发展出来的一门创新概念和方法的学科。

## 电气元件约束关系—电气元件电路模型

❖ 电气元件约束关系数学表示：

$$I=f(V) \quad Q=f(V)$$

❖ 此关系可通过理论分析或实验测量得到

❖ 为此需要建立以下几个基本概念：

- 电荷、电流、电压、能量、功率的基本概念
- 理想基本电路元件的基本概念
- 怎么用理想基本电路元件构建等效电路模型

- ✓ 电荷  $q$  的概念是描述所有电现象的基础，电荷的单位是库仑 (C)
- ✓ 电荷  $q$  流动的速率称为**电流  $I$** ，电流的单位是安培 (A)
- ✓ 电荷的分离要作功，用**电压  $V$** 表示，电压的单位是伏特 (V)
- ✓ **功率  $P$**  等于电压乘电流， $P=VI$ ，单位是瓦 (W)
- ✓ 信号（或能量）以电压或电流方式表示的
- ✓ 电路用来产生、传输、检测、处理信号（或能量）的

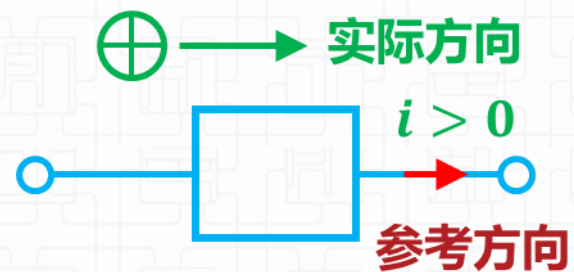
# 电流

- ❖ 带电粒子或电荷在电场力作用下的定向运动形成电流。
- ❖ 单位时间内通过某一截面的电荷量。
- ❖ 电流的单位：**A (安培)**、kA、mA、 $\mu$ A
- ❖ 电流的实际方向：**正电荷运动的方向或负电荷运动的反方向**
- ❖ 电流的**参考方向**：任意假定

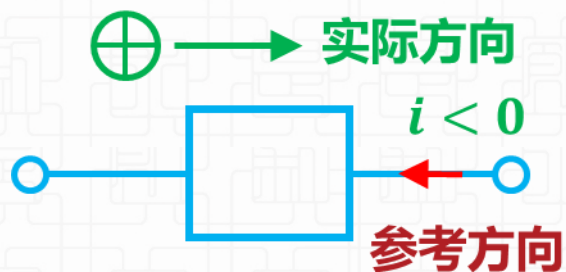
$$i = \frac{dq}{dt}$$



André-Marie Ampère  
Jan 20, 1775—Jun 10, 1836

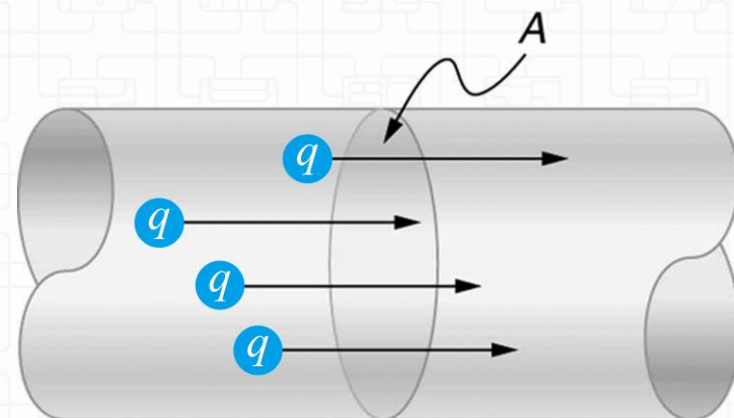


(参考方向与实际方向相同)



(参考方向与实际方向相反)

电流 = 电荷的流动



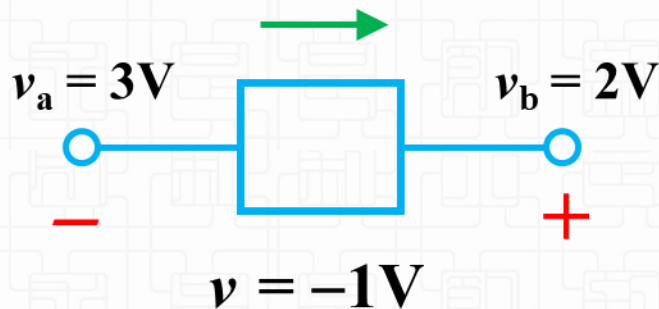
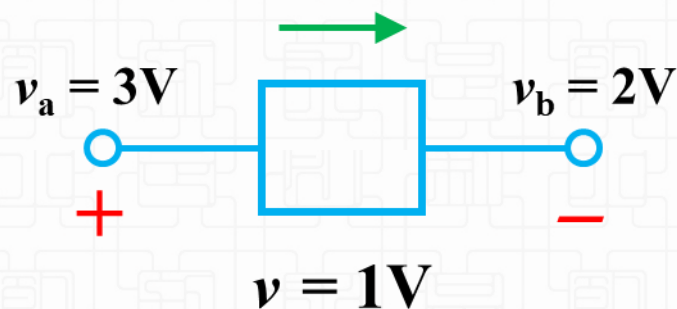
## 电压

❖ 电场力把单位正电荷从一点移到另一点所做的功。

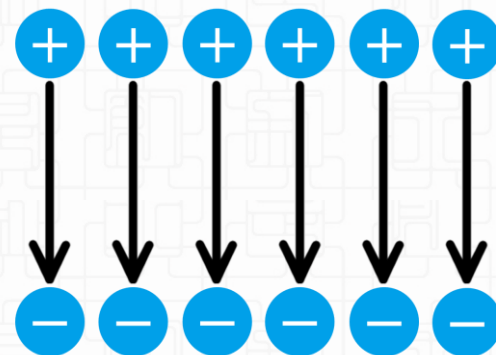
$$v_{ab} = \frac{dw}{dq} \quad V_{ab} = \frac{W_{ab}}{Q} \quad V_{ab} = V_a - V_b$$

❖ 电压的单位：V (伏特)、kV、mV、 $\mu$ V

❖ 电压的实际方向：高电位 → 低电位。 电压的参考方向：任意假定



Alessandro Giuseppe  
Antonio Anastasio Volta  
Feb 18, 1745—Mar 5, 1827

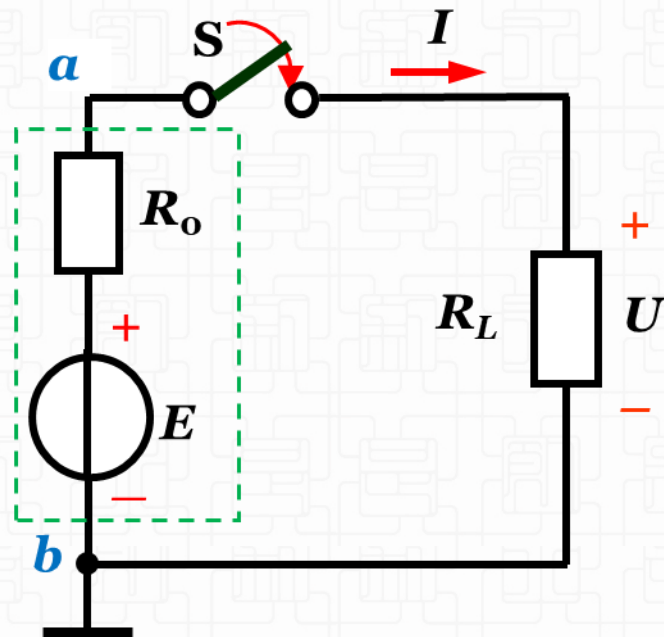




## 电压、电位和电动势

❖ 在电路中选定一个**参考点**（注意每次计算只能选一个相对的参考点），**取参考点的电位为零电位**，则电路中某一点与参考点之间的电压就被称为这一点的**电位**。

电动势 $E$ 只存在电源内部，其数值反映了电源力做功的本领，方向规定由电源负极指向电源正极。



电压 $U$ 的大小反映了电场力做功的本领；电压是产生电流的根本原因；其方向规定由“高”电位端指向“低”电位端。

参考点的电位:  $\varphi_b = 0$

$a$  点电位:  $\varphi_a = E - IR_0 = IR$

## 电能和电功率

❖ 电场力在单位时间内所做的功称为电功率，简称**功率**。

$$p = \frac{dw}{dt}$$

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

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

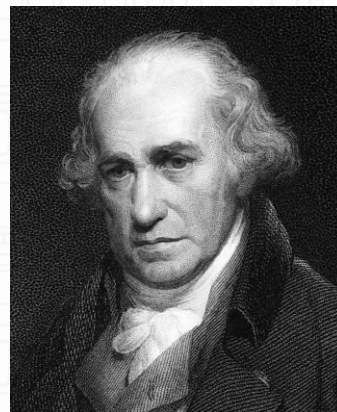
$$p = v \cdot i$$

❖ 功率的单位：W (瓦) (Watt, 瓦特)

❖ 能量的单位：J (焦) (Joule, 焦耳)

❖  $p > 0$  表明电路吸收或消耗能量

❖  $p < 0$  表明电路产生能量或提供能量



James Watt  
Jan 30, 1736—Aug 25, 1819



James Prescott Joule  
Dec 24, 1818—Oct 11, 1889

## dB、dBm、dBW

❖ dB是一个比值，是一个数值，是一个纯计数方法，没有任何单位标注。

$$10\lg (\text{功率比值})$$

❖ dBm (分贝毫瓦)，是功率单位

$$10\lg (\text{功率值}/1\text{mW})$$

–  $1\text{mW}=0\text{dBm}$ ,  $10\text{mW}=10\text{dBm}$ ,  $100\text{mW}=20\text{dBm}$

❖ dBW (分贝瓦)，是功率单位

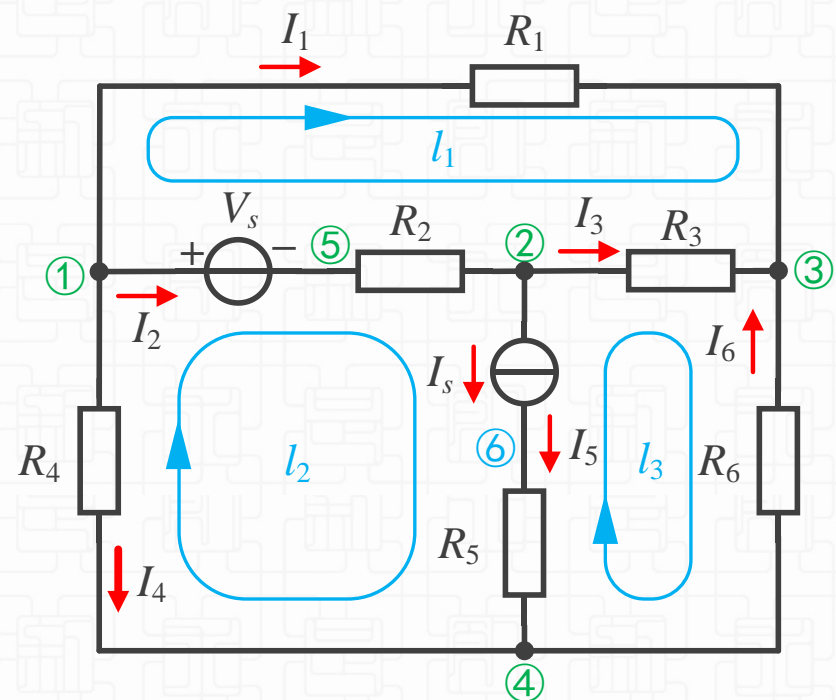
$$10\lg (\text{功率值}/1\text{W})$$

–  $1\text{W}=0\text{dBW}$ ,  $10\text{W}=10\text{dBW}$ ,  $100\text{W}=20\text{dBW}$

❖  $10\lg(P \text{ (单位为瓦特)}) = 30 + 10\lg P \text{ (P单位毫瓦)}$

## 内容提要

- ❖ 层次结构和分析模型
- ❖ 基本电路元件
- ❖ 基尔霍夫电路定律

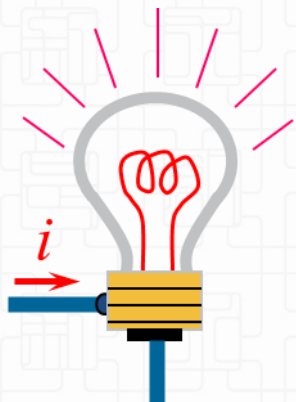




## 电路模块（或电气元件）的符号表示与电路模型

- ❖ 电气元件的输入-输出关系都可用**5个理想基本电路元件**互连而成的电路模型等效；
- ❖ “**等效**”是指：在基本物理原理约束下由电路模型得出的**输入-输出关系**可十分逼近实体电气元件的输入-输出关系；
- ❖ 这5个理想基本电路元件，如同化学元素周期表中的元素，但只有**5个**；
- ❖ **实体电气元件电路模型的构建可分两步**：
  - 第1步得出5个理想基本电路元件的电路模型；
  - 第2步根据实体电气元件的输入-输出关系，基于理想基本电路元件构建实体电气元件的等效电路模型。

# 手电筒电路模型

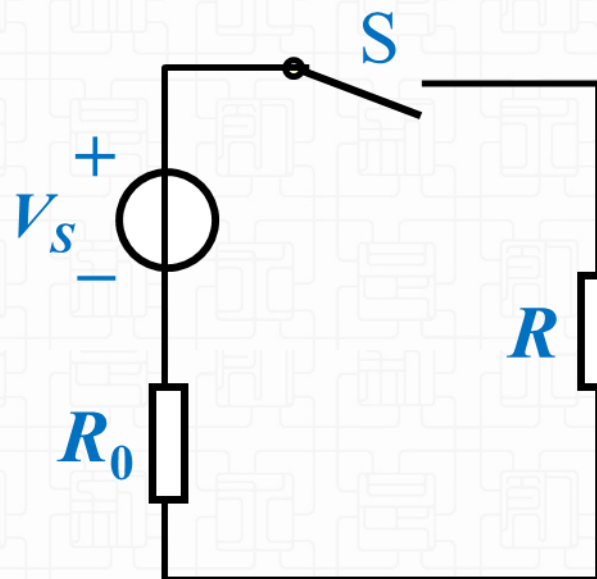
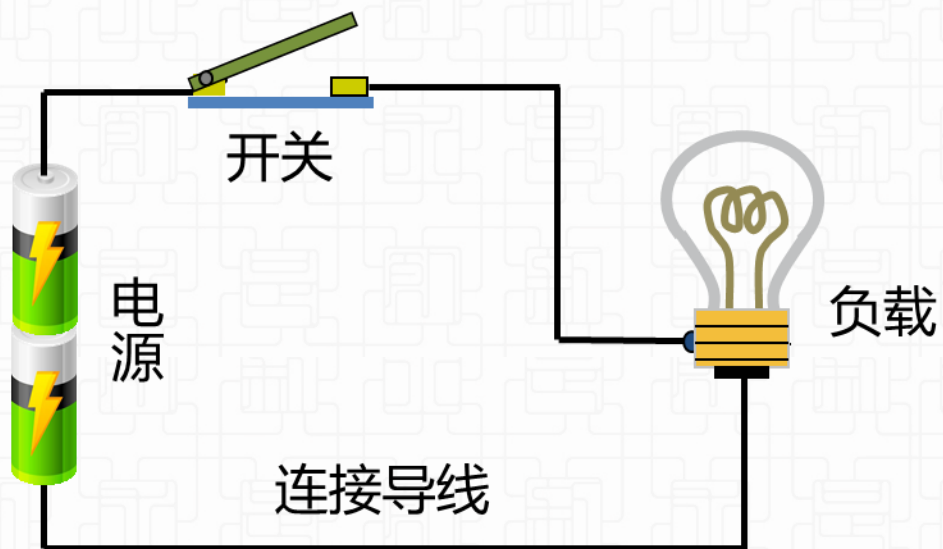
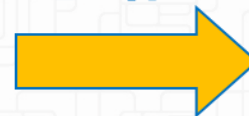


消耗电能  
(电阻性)

产生磁场  
储存磁场能量  
(电感性)



忽略 $L$



## 理想基本电路元件与实体元件的关系

❖ 理想电阻，理想电容，理想电感，理想电压源与理想电流源

❖ 它们用数学关系定义的，是实体电阻、电容、电感、电压源与电流源的抽象

❖ 理想基本电路元件与相应实体元件的联系与差别是：

- 在频率较低且在某一局部电压、电流范围内，实体元件电压-电流特性与理想基本电路元件端口电压-电流特性与几乎相同；
- 但在其它情况下有差别，不过仍然可以用理想基本电路元件构成的电路去等效相应实体元件的特性。这一等效电路称为实体元件的电路模型。

# 理想电阻元件

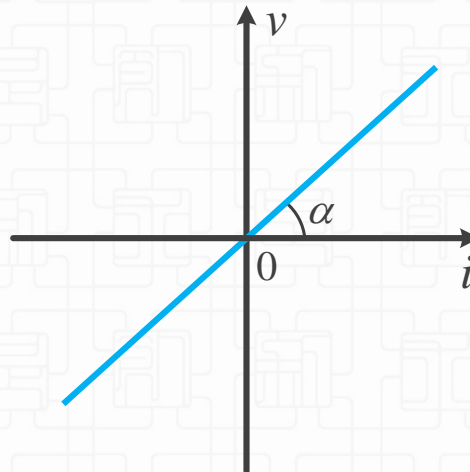
数学关系

$$v = R \cdot i$$

符号



V-I 特性曲线

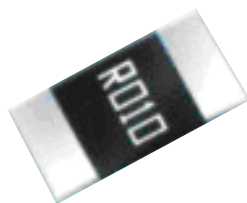


Georg Simon Ohm  
Mar 16, 1787—July 6, 1854

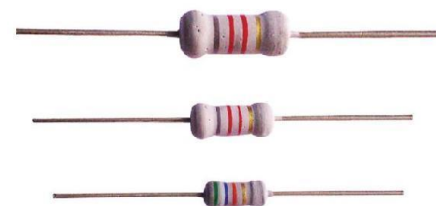
❖ 单位：欧姆 ( $\Omega$ )

❖ 特点：

- 消耗能量
- 无记忆效应



贴片电阻



分立式电阻

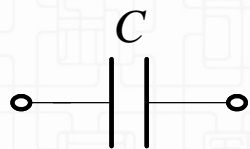


# 理想电容元件

## 数学关系

$$i = C \frac{dv}{dt}$$

## 电路符号



## 电容 $C$ 的单位:

F (法) (Farad, 法拉)

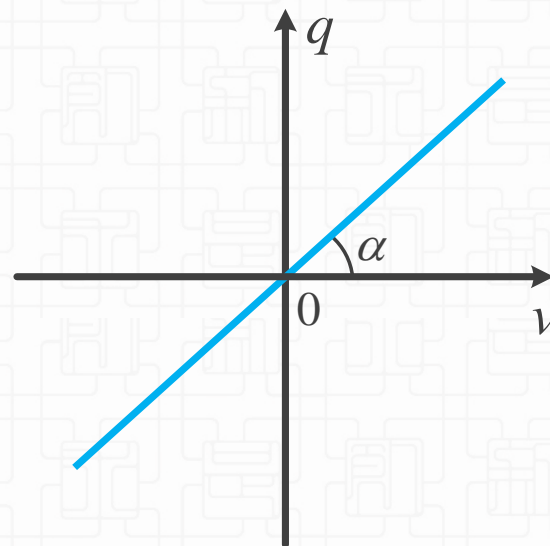
常用  $\mu\text{F}$ ,  $\text{nF}$ ,  $\text{pF}$  等。



Michael Faraday

Sep 22, 1791—Aug 25, 1867

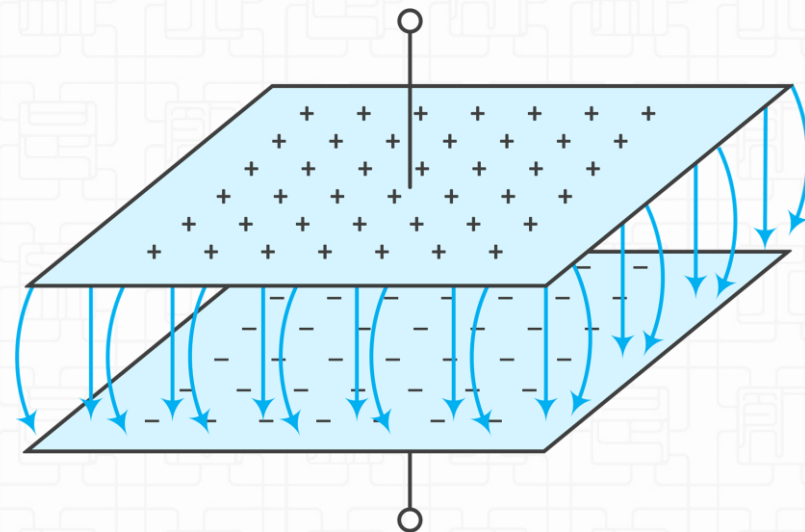
$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{dv}{dt} = \frac{d(Cv)}{dt} \Rightarrow q = Cv$$



## 电容具有记忆功能

$$i = C \frac{dv}{dt} \Rightarrow v(t) = v(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\xi) d\xi$$

### 电容两端电压不能突变



- ❖ 表明电容电压除了与充电电流有关外，还与  $t_0$  时刻的电压有关，故电容具有记忆性。因此电容亦被称为**记忆元件**。
- ❖ 源提供的功率可按电压与电流乘积的定义计算：

$$W = \int_0^{t \rightarrow \infty} p dt = \int_0^{t \rightarrow \infty} i v dt = \int_0^{t \rightarrow \infty} v C \frac{dv}{dt} dt = \int_0^{t \rightarrow \infty} C v dv = \frac{C}{2} V^2 = \frac{q}{2} V = \frac{q^2}{2C}$$

- ❖ 电源提供的能量  $W = \frac{C}{2} V^2$  转变为电容器储能。所以电容是**储能元件**。

# 理想电感元件

## 数学关系

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

## 电路符号



## 电感 $L$ 的单位

H (亨) (Henry, 亨利)

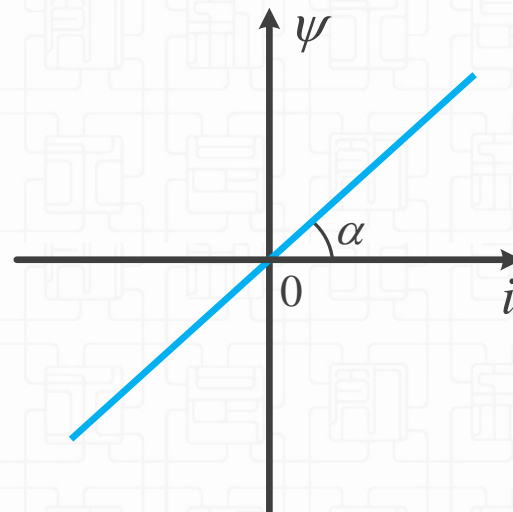
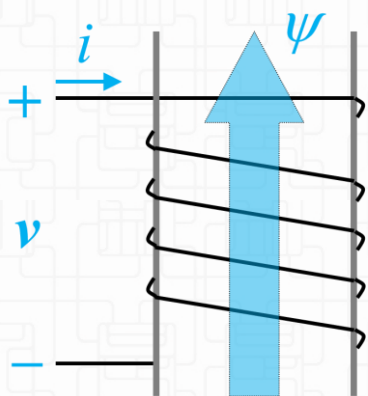
常用  $\mu\text{H}$ ,  $\text{mH}$  表示



Joseph Henry  
Dec 17, 1797—May 13, 1878



$$v = \frac{d\psi}{dt} = L \frac{di}{dt} = \frac{d(Li)}{dt} \Rightarrow \psi = Li$$



## 理想电感具有记忆功能

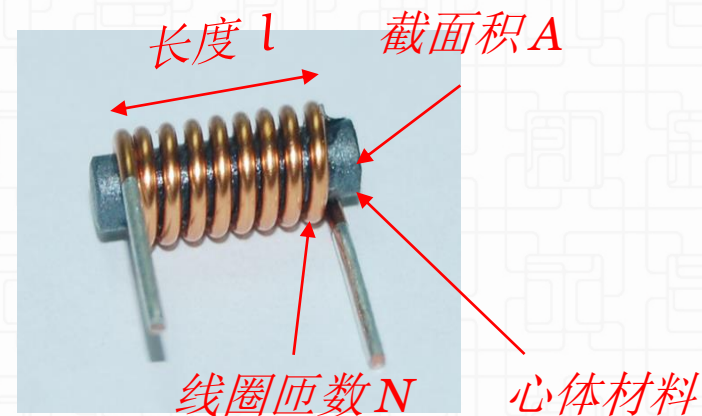
$$v = L \frac{di}{dt} \Rightarrow i(t) = i(t_0) + \frac{1}{L} \int_{t_0}^t v(\xi) d\xi$$

### 流过电感的电流不能突变

- ❖ 表明电感电流除了与电压有关外，还与  $t_0$  时刻的电流有关，故电感具有记忆性。因此电感亦被称为**记忆元件**。
- ❖ 与恒定电流源连接时，电流由初始时刻 ( $t=0$ ) 的零，到  $t$  趋于无穷大时增加到稳定值  $I$ ，电压  $v$  由最大降到零。这过程中电源作的功为

$$W = \int_0^{t \rightarrow \infty} p dt = \int_0^{t \rightarrow \infty} i v dt = \int_0^{t \rightarrow \infty} L \frac{di}{dt} i dt = \int_0^I L i di = \frac{L}{2} I^2 = \frac{\psi I}{2} = \frac{\psi^2}{2L}$$

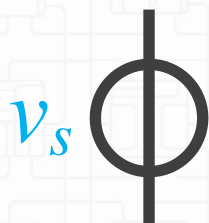
- ❖ 这个功转变为电感线圈中储存的**磁场能**，所以电感是一个**储能元件**。



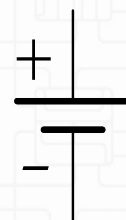


## 理想电压源

电路符号



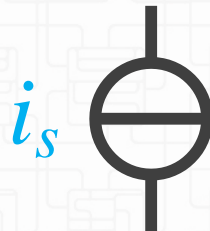
电池



- ❖ 理想电压源的电压可以是**直流**电压，也可以是**交流**电压。根据理想电压源的特性，两端电压的幅值必须是**恒定的**，不随流过电压源的电流的大小而变化。
- ❖ 电流的实际大小，取决于与理想电压源连接的**外部电路**的情况。
- ❖ 需要指出，非零值的理想电压源在电路中**不可以短路**。因为如果短路，短接导线要理想电压源两端电压为零，这与理想电压源两端电压不为零这一定义矛盾。

## 理想电流源

电路符号



- ❖ 根据理想电流源的特性，提供的电流的幅值必须是恒定的，不随两端电压的实际大小而变化。
- ❖ 两端电压的大小，取决于与理想电流源连接的外部电路的情况。
- ❖ 理想电流源的电流可以是直流电流，也可以是交流电流。
- ❖ 非零值的电流源不可以开路。开路意味着电流为零，而已假定理想电流源电流不为零。

## 从能量角度看 “理想基本电路元件”

(1) 消耗能量的元件：理想电阻

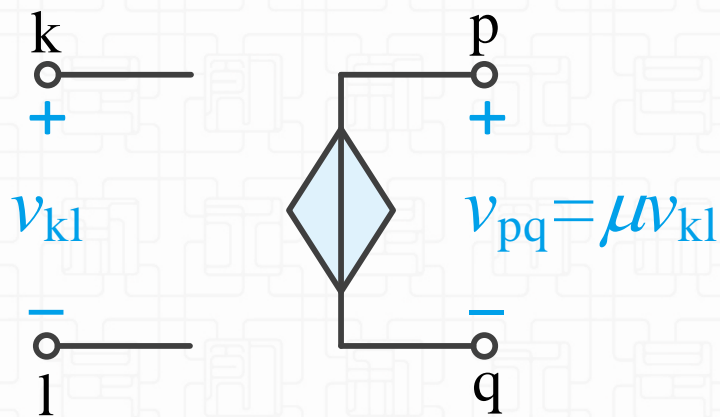
(2) 储存能量的元件：理想电容与理想电感

(3) 提供能量的元件：理想电压源与理想电流源

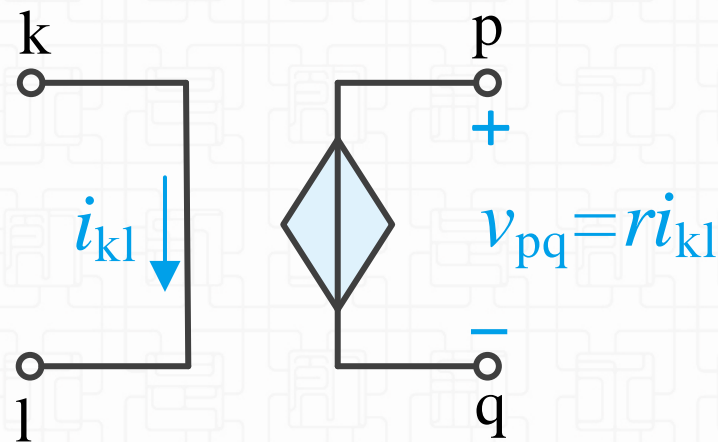
- ❖ 所以从能量角度看，理想基本电路元件**不能再分解**，这就是“基本”的涵义。说它理想，是因为它是用数学关系定义的，任何情况下都成立，故是理想的。
- ❖ 从能量角度看理想基本电路元件又是**完备的**，可用来模拟其它实体电路元件，是构成电路模型“大厦”的“砖瓦”。
- ❖ **凡储能元件都有记忆效应**，因为能量不能突变，故电感电容具有记忆效应。

## 用理想电路元件表示受控电压源

电压控制电压源  
VCVS



电流控制电压源  
CCVS

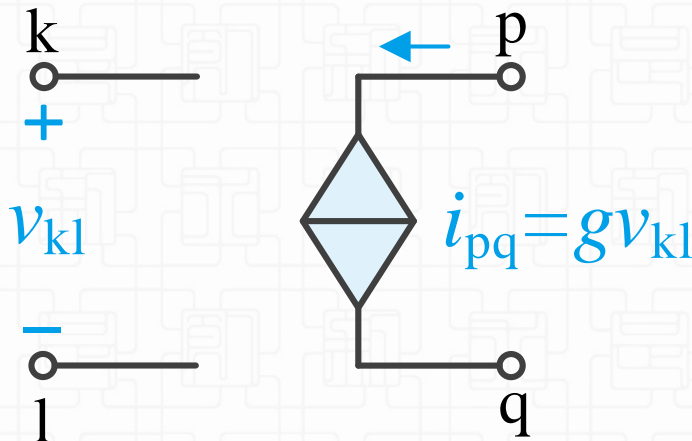


- ❖ 受控电压源与独立电压源一样也具有输出恒定电压的特性。
- ❖ 与独立电压源的差别是，**受控电压源的输出电压受另一支路电压或电流控制。**
- ❖ 独立电压源用两个端子的电路模型表示。
- ❖ 为将控制支路表示出来，受控电压源要用4个端子的电路模型表示。

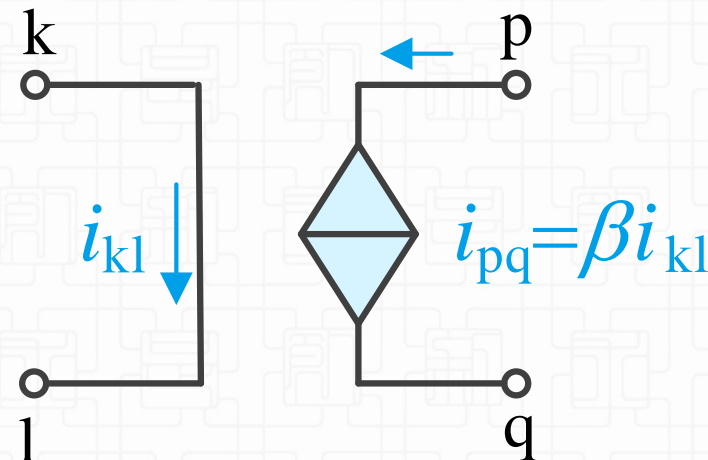


## 用理想电路元件表示受控电流源

电压控制电流源  
VCCS



电流控制电流源  
CCCS



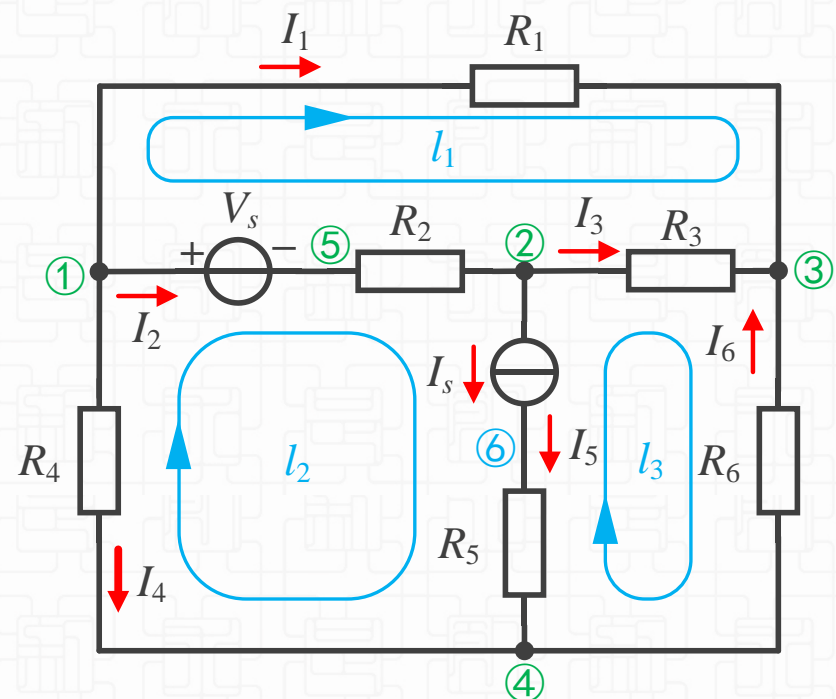
- ❖ 受控电流源与独立电流源一样，其释放的电流在一定的电压变化范围内为恒定值
- ❖ 但与独立电流源相比，**受控电流源的输出电流为另一支路电压或电流所控制**
- ❖ 与受控电压源一样，为将控制支路反映出来，受控电流源也要用4个端子的电路模型表示

## 关于实体电气元件的电路模型

- ❖ 实体电气元件的电路模型反映模型的外特性，即**输出-输入关系**，用  $I=f(V)$ 、 $Q=f(V)$  这样的函数关系表示。
- ❖ 如果用理想基本电路元件构建一个电路，其输出-输入关系**十分逼近**实体电气元件的输出-输入关系，该理想基本电路元件构成的电路也称为实体电气元件的电路模型。
- ❖ 注意，用理想基本电路元件构建的实体电气元件的电路模型，实现方案不至一个。**用最少的理想基本电路元件、构建的电路形式又最简单，其输出-输入关系又最逼近实体电气元件的输出-输入关系，这样的电路模型才是理想的。**
- ❖ 实际应用时，如果只要反映实体电气元件的近似特性，可选用简单的模型，以简化分析。如果要得到精确的特性，则需用精确（一般较为复杂）的模型。

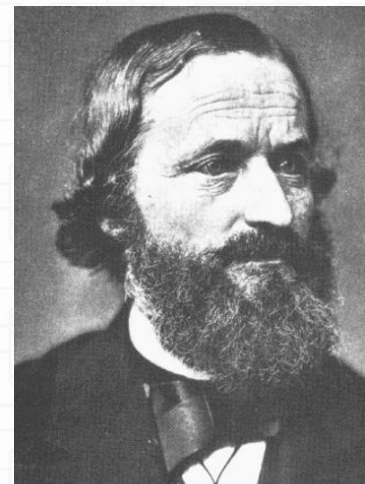
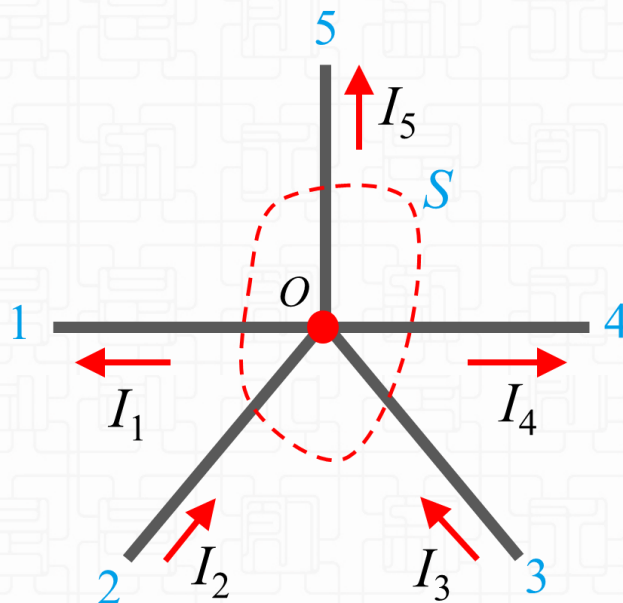
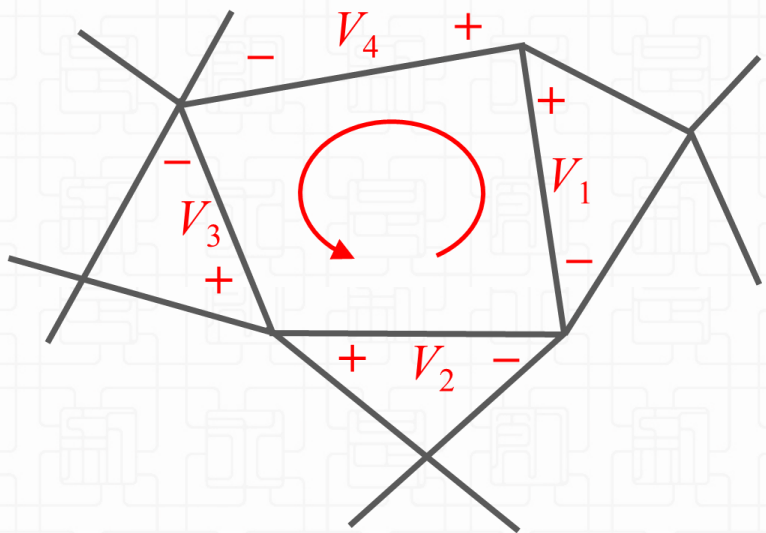
## 内容提要

- ❖ 层次结构和分析模型
- ❖ 基本电路元件
- ❖ 基尔霍夫电路定律



## 电路拓扑结构约束——基尔霍夫电路定律

- ❖ 基尔霍夫电压定律 (KVL)、基尔霍夫电流定律 (KCL) 是描述电路的基本方程
- ❖ 基于KVL、KCL，加上元件约束条件，即可建立电路方程
- ❖ 解此方程即可预测电路性能。

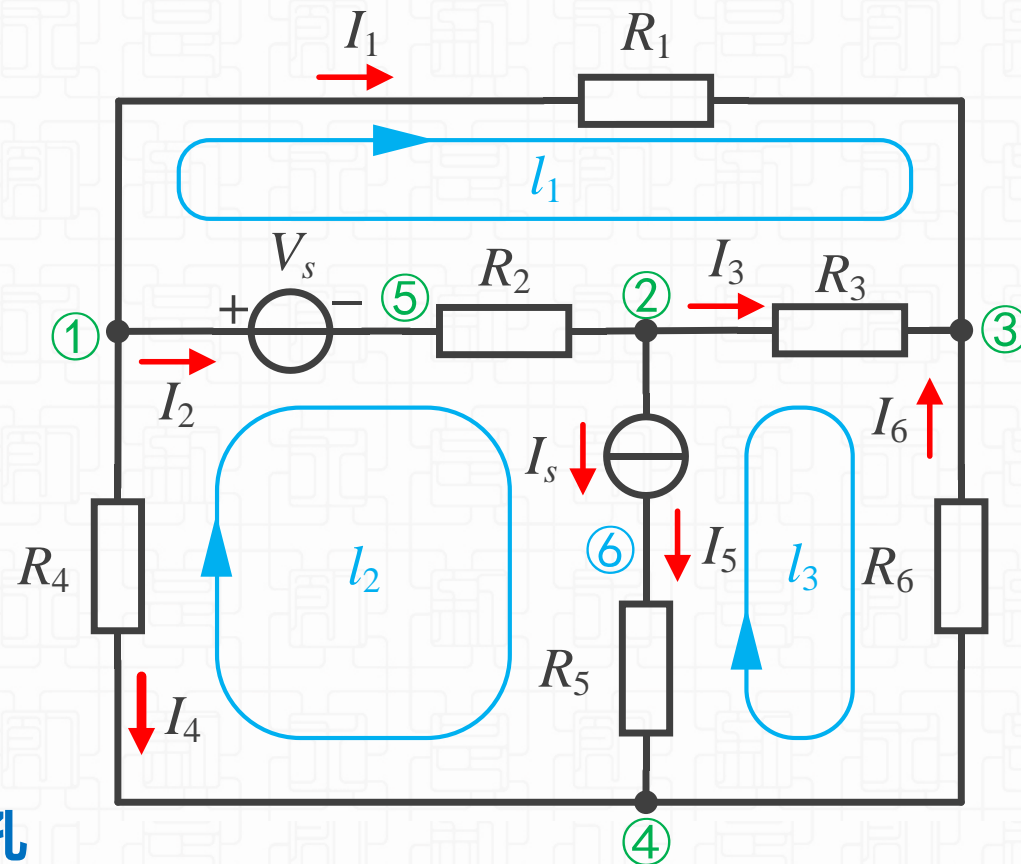


Gustav Robert Kirchhoff  
Mar 12, 1824—Oct 17, 1887



## 表述电路结构的若干名词—支路、节点与回路

- ❖ 单个或若干个元件串联成的分支称为**支路**。
- ❖ 两个或更多电路元件的连接点称为**节点**
- ❖ 三个或更多个电路元件的连接点称为**基本节点**
- ❖ 由若干支路组成的闭合路径称为**回路**
- ❖ 对于平面结构电路，没有包围其它回路的回路称为**网孔**

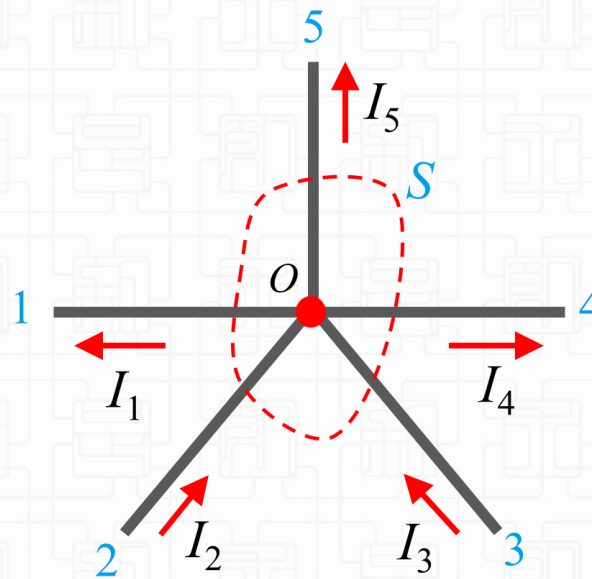


## 基尔霍夫电流定律 (KCL)

❖ 对于图示的一个电路节点O

$$\sum_{i=1}^N I_i = 0 \quad \left( \text{当 } \frac{\partial}{\partial t} \rightarrow 0 \right)$$

$$I_1 - I_2 - I_3 + I_4 + I_5 = 0$$



流出任一节点的各支路电流的代数和为零，这就是基尔霍夫电流定律

❖ 体积V内包含电荷数不随时间变化时，流出曲面S包围的净电流为零。

❖ 基尔霍夫电流定律是实践经验的总结。它是麦克斯方程电荷守恒与电流连续原理当  $\frac{\partial}{\partial t} \rightarrow 0$  的特例。

## 基尔霍夫电压定律 (KVL)

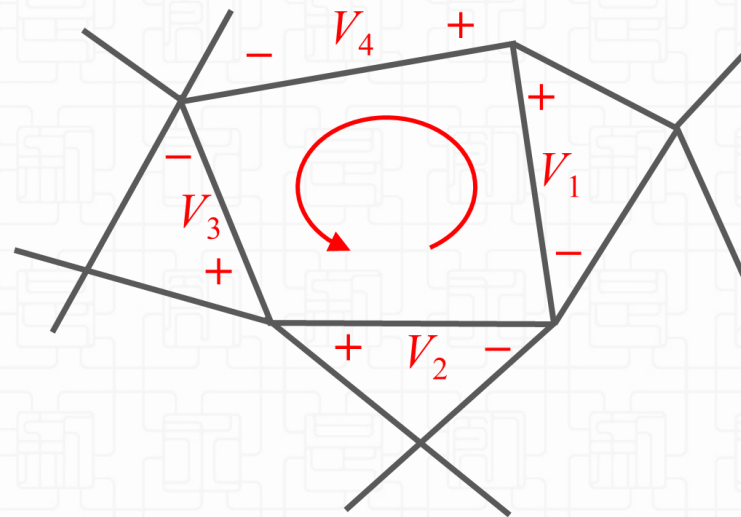
❖ 对于图示的一个回路

$$\sum_{i=1}^N V_i = 0 \quad (\text{当 } \frac{d}{dt} \rightarrow 0 \text{ 时})$$

❖ 沿任一回路一周的电压降总和为零

❖ 基尔霍夫电压定律 (KVL) 是实践经验的总结, 它是麦克斯韦方程组中法拉第定律当  $\partial / \partial t \rightarrow 0$  的特例。

❖ 电荷沿回路一周做功等于零。  $\sum qv_i = 0 \rightarrow \sum v_i = 0$



当各元件电压、各电压源电动势的参考方向与回路绕行方向一致时取正号, 相反时取负号

# 用基尔霍夫电路定律分析惠斯通电桥

## 元件约束关系

$$V_s = 3V$$

$$V_{Rs} = R_s I_s$$

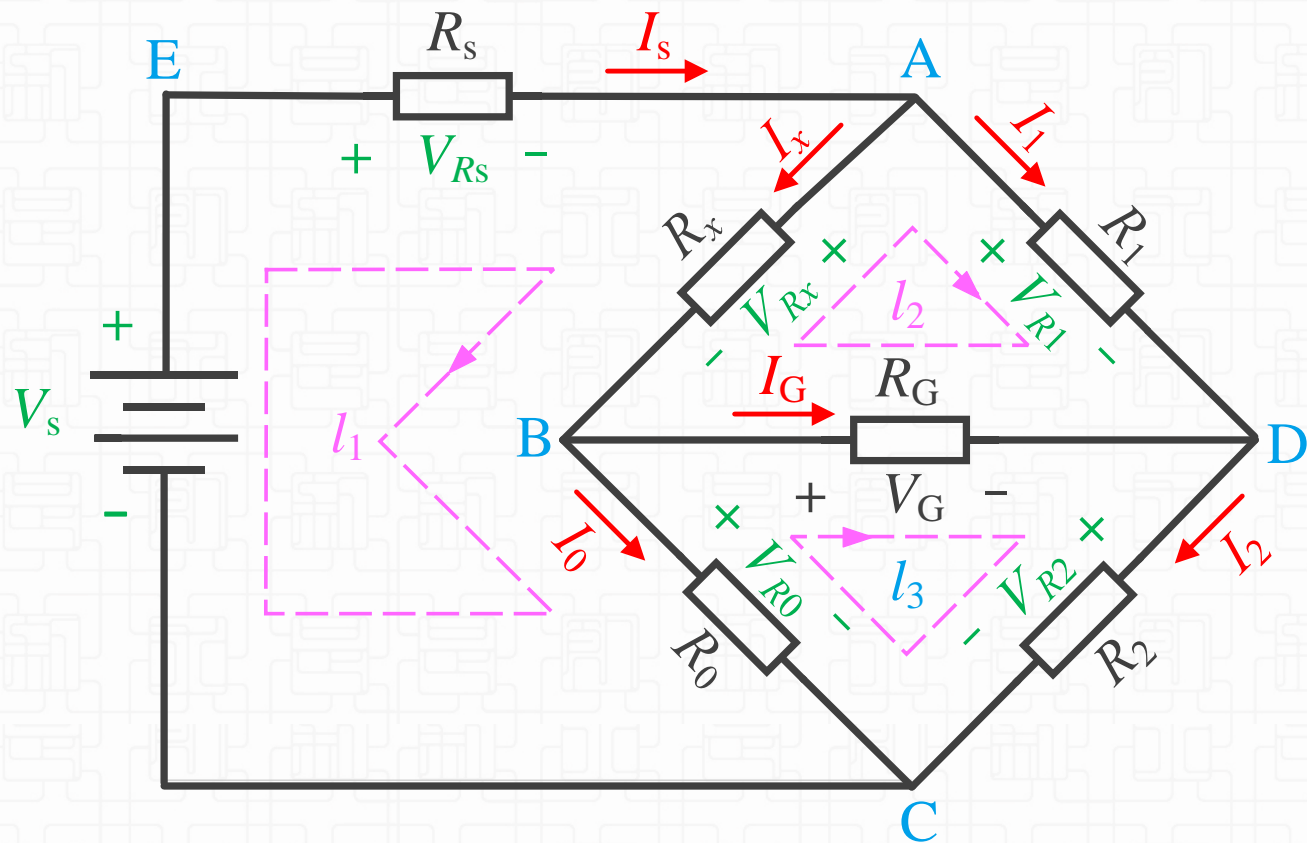
$$V_{Rx} = R_x I_x$$

$$V_{R1} = R_1 I_1$$

$$V_{R2} = R_2 I_2$$

$$V_{R0} = R_0 I_0$$

$$V_{RG} = R_G I_G$$





## 电路可以列写的独立方程数目与支路电流法

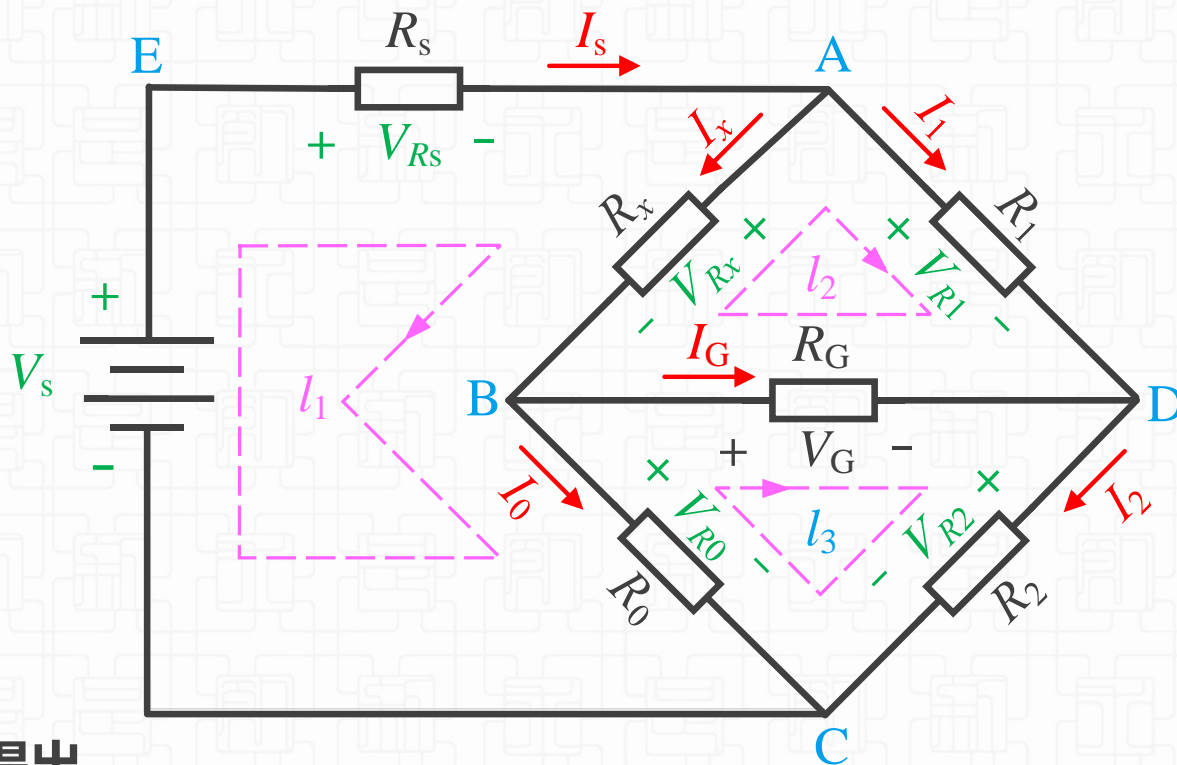
❖ 按节点A、B、C与D列写的KCL方程为

节点A  $-I_s + I_x + I_1 = 0$

节点B  $-I_x + I_G + I_0 = 0$

节点C  $-I_0 - I_2 + I_s = 0$

节点D  $-I_G - I_1 + I_2 = 0$



❖ 以上4式相加为零，其中任一式可由其它3式得出

❖ 4个方程中只有3个独立

❖ 具有  $n$  个节点  $b$  条支路的电路可以围绕  $(n-1)$  个节点列写  $(n-1)$  个独立的 KCL 方程

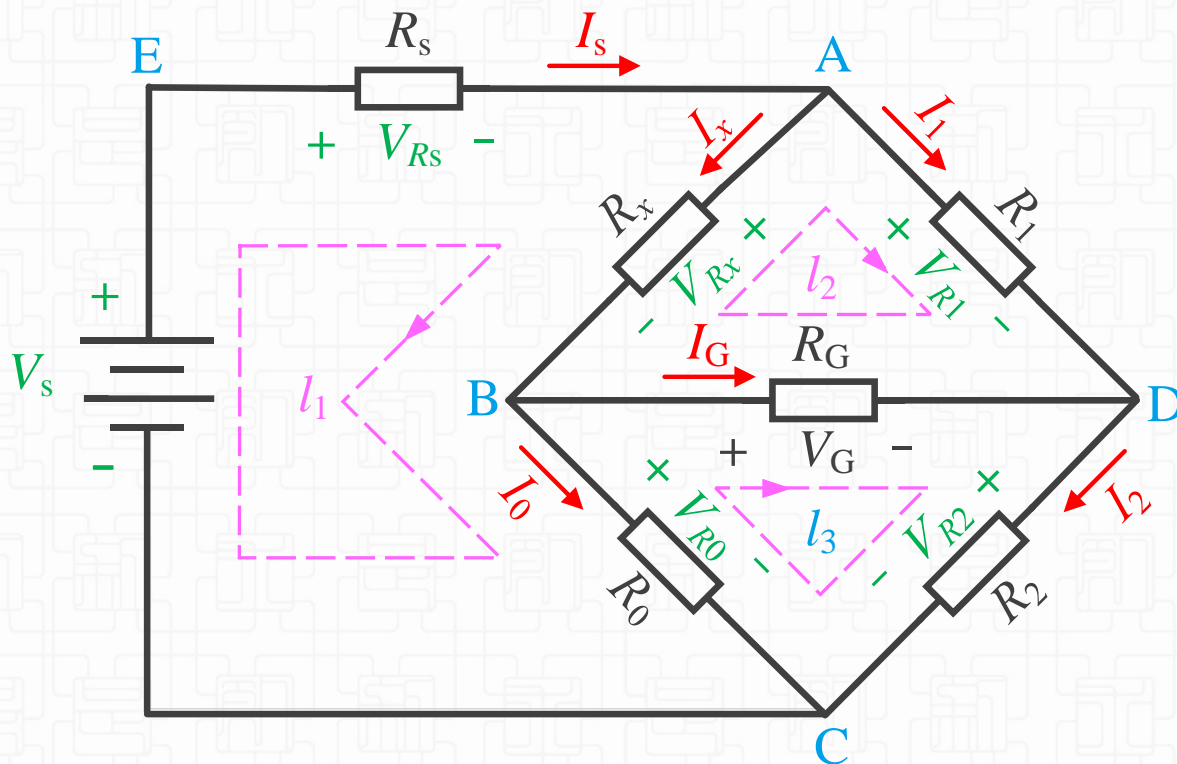
## 电路可以列写的独立方程数目与支路电流法

❖  $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$  是网孔，按网孔列写KVL方程：

$$l_1: V_{Rs} + V_{Rx} + V_{R0} - V_s = 0$$

$$l_2: V_{R1} - V_{RG} - V_{Rx} = 0$$

$$l_3: V_{RG} + V_{R2} - V_{R0} = 0$$



❖ 按网孔列写的方程是独立的

❖ 对于  $n$  个节点  $b$  条支路的电路，存在  $(b-n+1)$  个网孔，可以写出  $(b-n+1)$  个独立的回路方程

## 电路可以列写的独立方程数目与支路电流法

❖ 3个独立KCL方程:

**节点A**  $-I_s + I_x + I_1 = 0$

**节点B**  $-I_x + I_G + I_0 = 0$

**节点D**  $-I_1 + I_2 - I_G = 0$

❖ 按3个网孔列写的KVL方程:

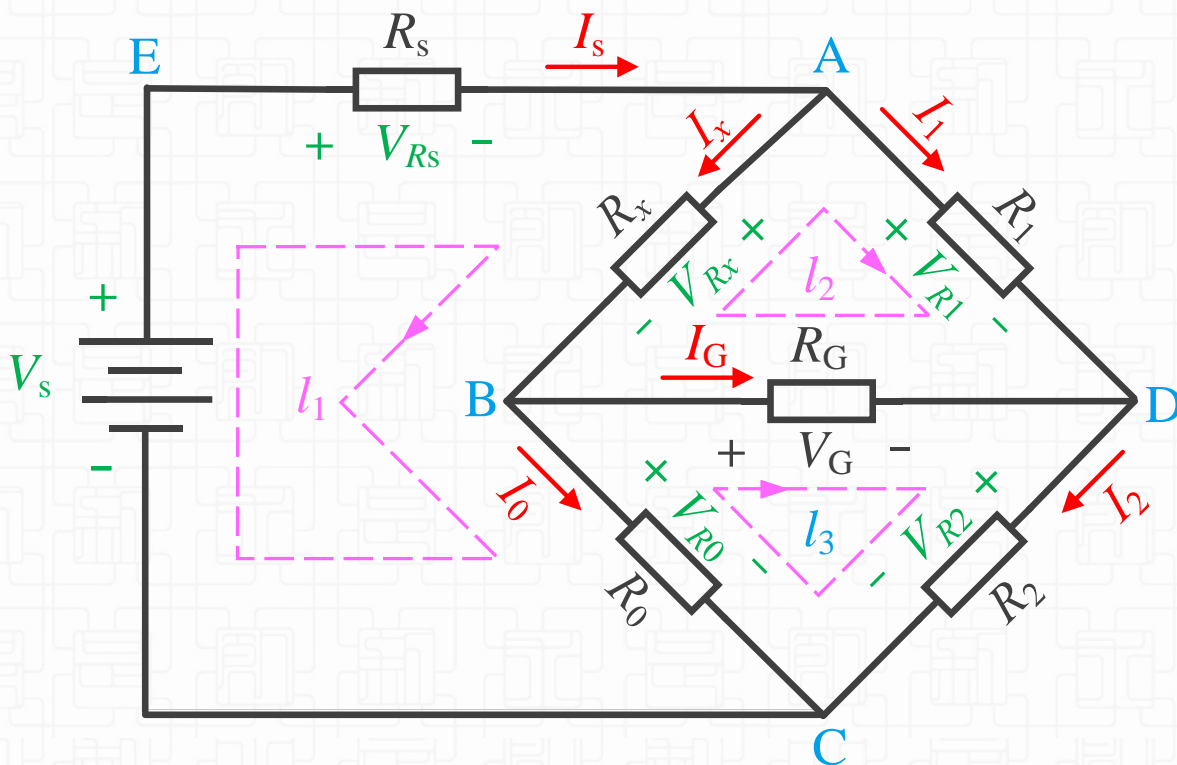
**网孔 $l_1$ :**  $R_s I_s + R_x I_x + R_0 I_0 - 3 = 0$

**网孔 $l_2$ :**  $R_1 I_1 - R_G I_G - R_x I_x = 0$

**网孔 $l_3$ :**  $R_G I_G + R_2 I_2 - I_0 R_0 = 0$

❖ 6个独立的电路方程用以求解6个支路电流变量

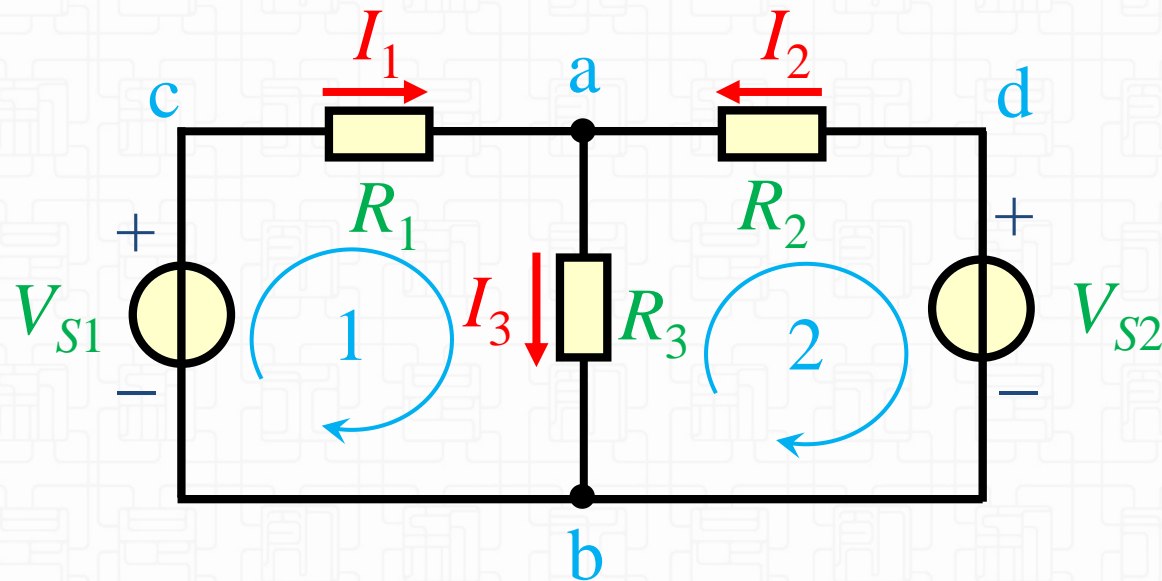
❖ 当 $I_G=0$ 时, 解方程可得  $R_x = \frac{R_1}{R_2} R_0$



# 例1

❖ 求图中各支路的电流。

已知  $V_{S1} = 10\text{V}$ ,  $V_{S2} = 20\text{V}$ ,  
 $R_1 = 5\Omega$ ,  $R_2 = 10\Omega$ ,  $R_3 = 2\Omega$



解:

$$\begin{cases} \text{节点a, KCL: } I_1 + I_2 - I_3 = 0 \\ \text{回路1, KVL: } R_1 I_1 + R_3 I_3 = V_{S1} \\ \text{回路2, KVL: } R_2 I_2 + R_3 I_3 = V_{S2} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} &\Rightarrow \begin{cases} I_1 + I_2 - I_3 = 0 \\ 5I_1 + 2I_3 = 10 \\ 10I_2 + 2I_3 = 20 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_1 = 1\text{A} \\ I_2 = 1.5\text{A} \\ I_3 = 2.5\text{A} \end{cases} \end{aligned}$$

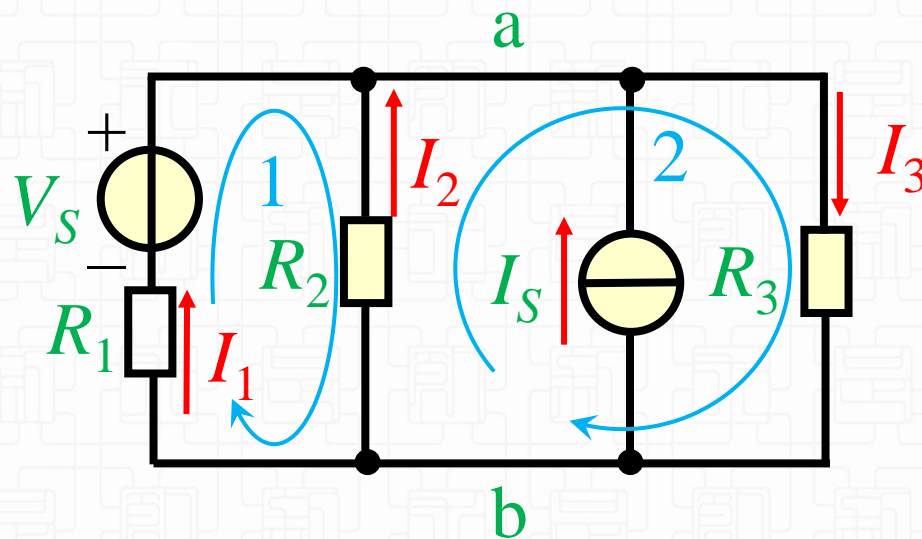


## 例2

❖ 求图中各支路的电流。

已知  $V_s = 42\text{V}$ ,  $I_s = 7\text{A}$ ,  
 $R_1 = 12\Omega$ ,  $R_2 = 6\Omega$ ,  $R_3 = 3\Omega$

解:



$$\begin{cases} \text{节点a, KCL:} & I_1 + I_2 + I_s = I_3 \\ \text{回路1, KVL:} & R_1 I_1 - R_2 I_2 = V_s \\ \text{回路2, KVL:} & R_2 I_2 + R_3 I_3 = 0 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} I_1 + I_2 - I_3 = -7 \\ 12I_1 - 6I_2 = 42 \\ 6I_2 + 3I_3 = 0 \end{cases} \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} I_1 = 2\text{A} \\ I_2 = -3\text{A} \\ I_3 = 6\text{A} \end{cases}$$

### 例3

❖ 求图中a、b点的电压  $V_a$  和  $V_b$

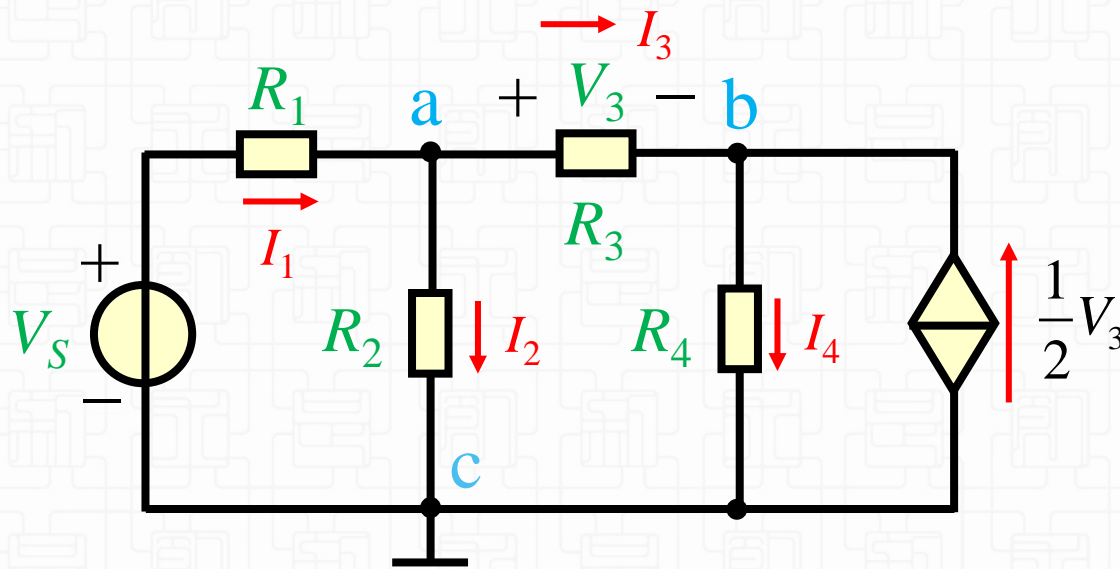
已知  $V_S = 8V$ ,

$$R_1 = R_2 = R_3 = 1\Omega, R_4 = \frac{1}{3}\Omega$$

解:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{节点a, KCL: } -\frac{V_S - V_a}{R_1} + \frac{V_a}{R_2} + \frac{V_a - V_b}{R_3} = 0 \\ \text{节点b, KCL: } -\frac{V_a - V_b}{R_3} + \frac{V_b}{R_4} - \frac{1}{2}V_3 = 0 \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} 3V_a - V_b = 8 \\ -V_a + 3V_b = 0 \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} V_a = 3V \\ V_b = 1V \end{array} \right.$$

$V_3 = V_a - V_b$



# The End.



中国大学MOOC

章献民

zhangxm@zju.edu.cn