

第1章

电路的基本概念和基本定律

1.1 电路 Circuits

1.2 基本变量 Basic Quantities

1.3 电路元件 Circuit Elements

1.4 基尔霍夫定律 Kirchhoff's Laws

第1章

电路的基本概念和基本定律

目标：

- 1.熟练掌握电路的电功率计算。
- 2.熟练掌握独立电源、受控电源的特性。
- 3.理解KCL、KVL方程的独立性，准确列写KCL、KVL方程。

难点：

- 1.理解独立电源的特点，即电压源的电流、电流源的电压由外部电路决定。
- 2.理解受控电源和独立电源特性的异同。
- 3.习惯使用参考方向、变量分析问题。
- 4.恰当、准确列写电路的KCL、KVL方程。

讲授学时： 6

1.1 电路的基本概念

- 电路理论主要解决的问题

- 电路分析：获得电路变量，本课程重点
- 电路综合：设计具体电路，选定元件参数
- 电路故障诊断：对运行不正常电路进行故障判断和定位

- 电路的概念：由电路元件和联接导线组合而成的电流通路。一般由电源或信号源、负载（用电设备）和中间环节组成。

- 电源（或信号源）：将其他形式的能量转化为电能，提供给电路。
- 负载(load)：将电能转化为其他形式的能量（消耗电能）。
- 中间环节：包括导线(line)、开关（switch）等，主要作用是输送、分配电能和对电信号进行处理。

1.2 电路模型

1.2.1 理想电路元件

在一定的条件下对实际器件加以理想化，忽略它的次要性质，用一个表征其主要性能模型表示。

实际电器件工作时，通常存在3种基本的电磁现象，即：消耗电能、磁场效应、电场效应，为了描述这三种基本的电磁现象，引入与之相对应的3个理想化电路元件。

几种基本的电路元件：

- 电阻元件：表示消耗电能的元件。
- 电感元件：表示各种电感线圈产生磁场，反映磁场效应
- 电容元件：表示各种电容器产生电场，反映电场效应
- 电源元件：表示各种将其它形式的能量转变成电能的元件

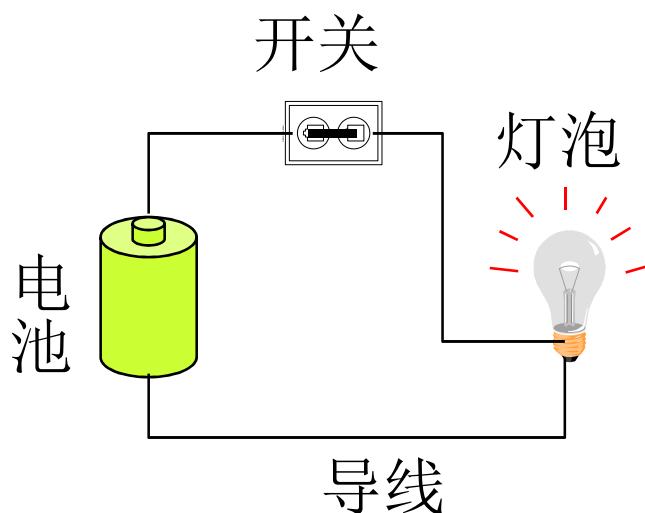
1.2.2 由电路到电路模型：

实际电器件虽然存在多种电磁现象，但在特定的条件下，某一电磁现象起主导作用，其他电磁现象可以忽略不计，可用理想电路元件来近似描述实际电器件。

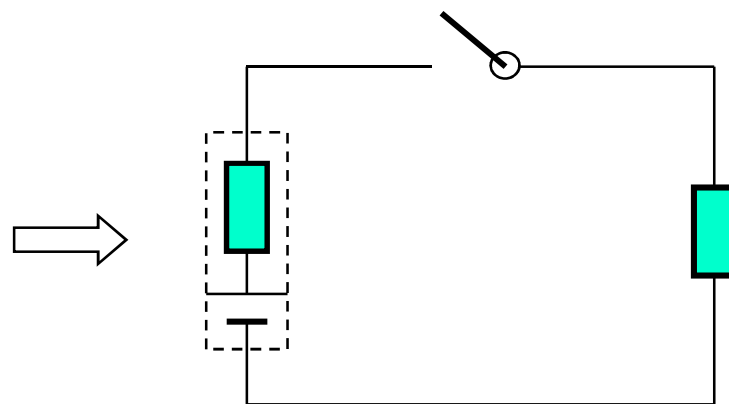
例如：白炽灯可用电阻元件来描述，低频下工作的螺线管线圈用电阻和电感元件串联模型来描述。

理想元件及其组合代表实际电路元件，与实际电路具有基本相同的电磁性质，称其为电路模型。[电路模型](#)为电路理论研究的对象。

例 . Real circuit



Circuit model



1.2.3 集中参数电路模型

电路按其几何尺寸与工作信号的波长划分为集中参数电路和分布参数电路。一个电路元件可以用一个或多个参数表征，而不用考虑它的尺寸，这种参数被称为集中参数电路。

(1)、集中参数电路

集中参数假设：假定电磁波的传播速度为无限大，即电磁波在电路中的传播不需要时间，这样，元件及电路的几何尺寸变得无关紧要。

工程上处理原则为 $\lambda > 100d$ ，用集中参数电路加以研究
其中 d 表示电路的最大几何尺寸， λ 表示电路的最高工作频率所对应的波长。

例： $\lambda = c/f$ ， $c = 3 \times 10^5 \text{ km/s}$ ，若 $f = 50 \text{ Hz}$ ，其波长为 6000 km ，一般元件远小于这个数值。

(2)、分布参数电路

当 $d \geq 0.01\lambda$ 时，就应该按分布参数电路加以分析研究。电路中的参数时按几何尺寸连续分布。

- 对于高压输电线路，其长度为几百公里甚至上千公里，与电路频率的波长在一个数量级，此时若采取集中假设就会产生错误结果；
- 高频电子线路中，信号波长为米，甚至是厘米数量级，与线路和电路器件的尺寸相当，这时也不能采用集中参数假设。

1.3 电路变量

1.3.1 电路中的主要物理量及国际单位制

主要有电压、电流、电荷、磁链、功率和能量等，这些物理量称为电路变量或网络变量。

电流、电压是线性电路分析中常用的两个基本物理量。

1.3.2 电荷与电流 (current):

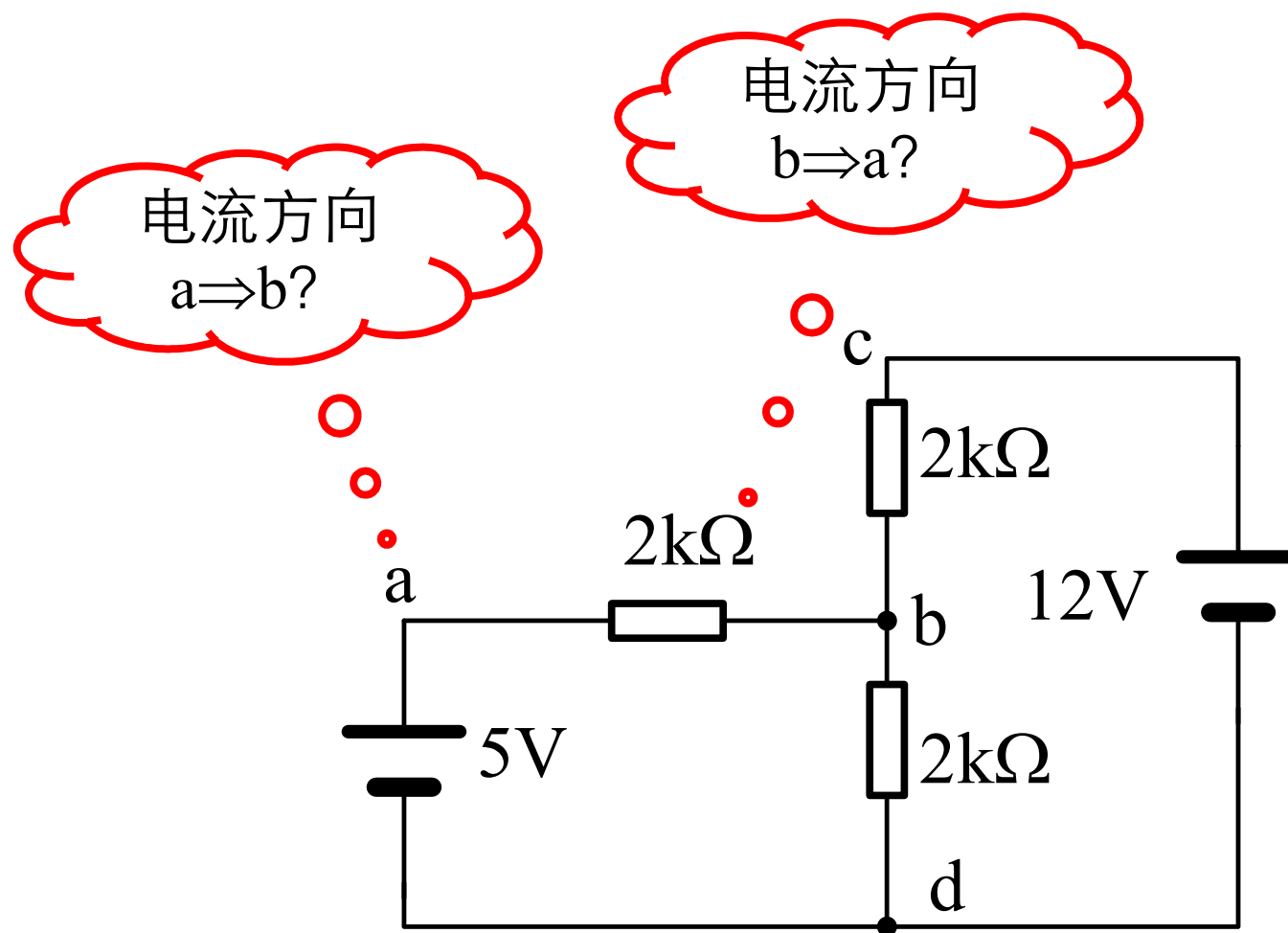
1 电流：电荷有规则的定向运动或电场的变化产生电流。

2 电流强度：表征电流大小的概念。它被定义为单位时间内通过导体横截面的电量，用符号*i*表示

$$i(t) \stackrel{def}{=} \frac{dq}{dt}$$

单位：A (安) (Ampere, 安培)

3 电流的参考方向

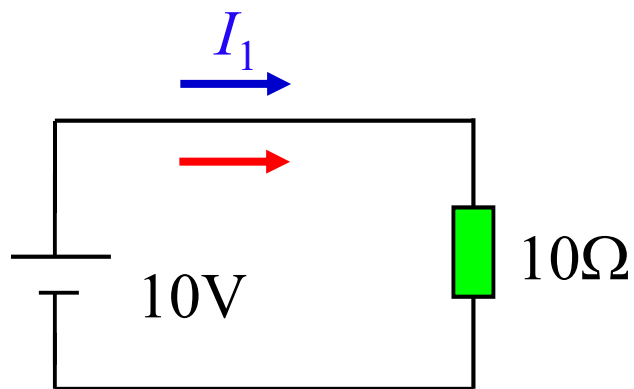


3 电流的参考方向

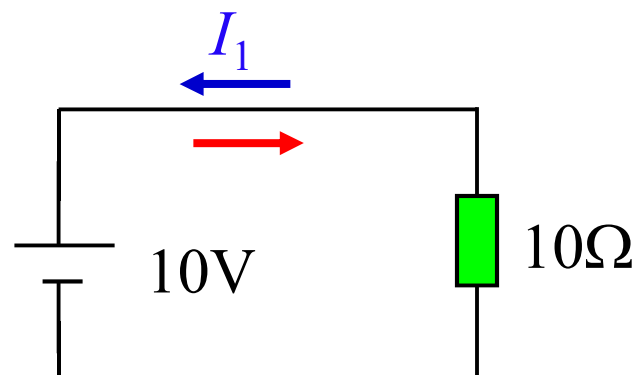
参考方向是一个假定的方向，它和电压、电流数值的正、负结合起来，便能确定电量的真实方向。

电流的实际方向为正电荷运动的方向，电流的参考方向为任意选定的一个方向。

例



$$I_1 = 1\text{A}$$



$$I_1 = -1\text{A}$$

1.3.3 电位与电压 (voltage):

1 电压: 在电场中, 电量为 dq 的电荷由A点被移动到B点时, 电场力所做的功为 dW , 则A、B两点间的电压为:

$$U_{AB} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{dW_{AB}}{dq} \quad \text{单位: V (伏) (Volt, 伏特)}$$

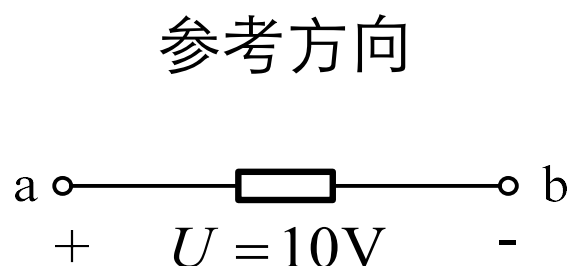
2 电位: 电路中为分析的方便, 常在电路中选某一点为参考点, 把任一点到参考点的电压称为该点的电位。

参考点的电位一般选为零, 单位与电压相同, 也是V(伏)。

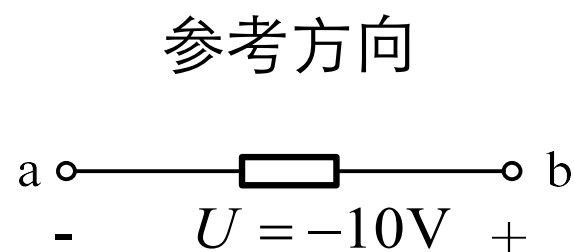
3 电压的参考方向

电压的实际方向是从高电位的一点指向低电位的一点，是正电荷在电场力作用下移动的方向。

电压的参考方向: 为电路的各部分电压假定一个方向。



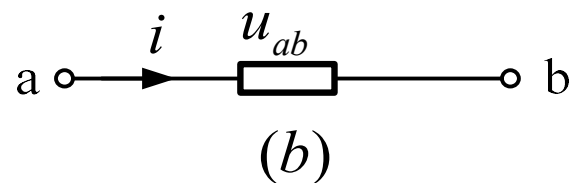
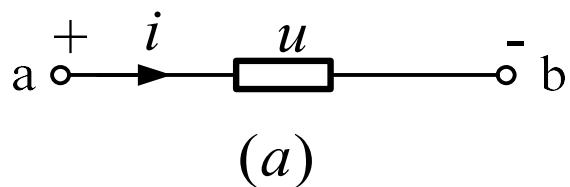
+ 实际方向 -



+ 实际方向 -

结论：电压参考方向的选择是任意的，它并不影响电压的实际方向。结合电压数值的正负，可确定电压的实际方向。

本书中电压的参考方向有两种表示方法:

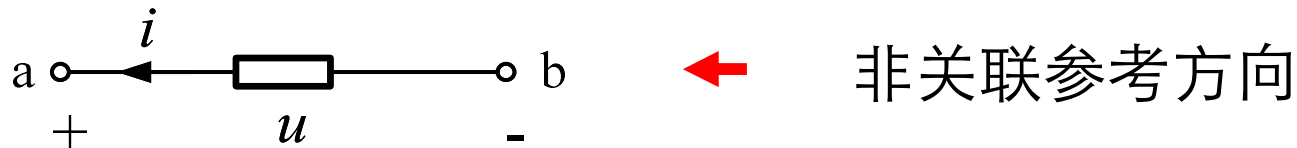
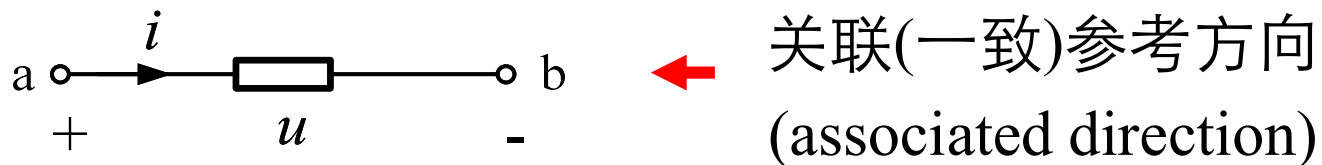


- 一种是用+、-符号表示，即高电位端标以符号+，低电位端标以符号-，如图（a）所示；
- 二是用双下标表示，如图（b）所示。

4、关联的参考方向

在分析电路时，电压和电流的参考方向选取是互相独立的。

为了方便起见，我们常采用关联的参考方向：电流参考方向与电压参考+到-极的方向一致，即电流与电压降的参考方向一致，也称为一致的参考方向或关联正向。



关于参考方向的说明：

- 参考方向也称为假定正方向，以后讨论均在参考方向下进行，不考虑实际方向。
- 分析电路前必须选定电压和电流的参考方向。
- 参考方向一经选定，必须在图中相应位置标注（包括方向和符号），在计算过程中不得任意改变。
- 为减少公式中负号，元件或支路的 u ， i 通常采用关联的参考方向。

1.3.4 功率和能量

1 功率Power：单位时间内电场力所做的功。

$$p = \frac{dw}{dt}, \quad u = \frac{dw}{dq}, \quad i = \frac{dq}{dt}$$

$$\boxed{p(t) = \frac{dw}{dt}} = \frac{dw}{dq} \cdot \frac{dq}{dt} = ui$$

2 能量 Energy

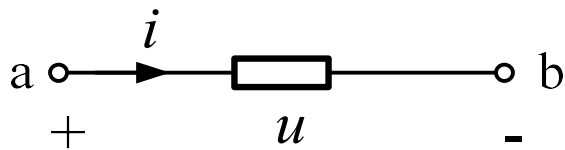
$$\Delta w(t) = \int_{t_0}^t p(t)dt \quad w(t) = \int_{-\infty}^t p(t)dt$$

功率的单位：W (瓦) (Watt, 瓦特)

能量的单位：J (焦) (Joule, 焦耳)

2 功率的计算

关联(一致)参考方向 (associated direction)



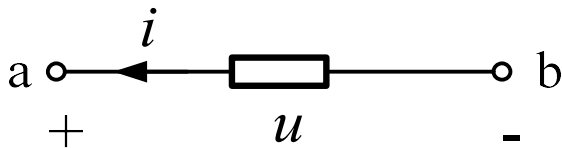
$$p = ui$$

← 吸收功率 absorbed power

$P > 0$ 吸收正功率 (吸收功率)

$P < 0$ 吸收负功率 (发出功率)

非关联参考方向



$$p = ui$$

← 发出功率 supplied power

$P > 0$ 发出正功率 (发出功率)

$P < 0$ 发出负功率 (吸收功率)

3 功率守恒

例 $U_1=10\text{V}$, $U_2=5\text{V}$ 。分别求电源、电阻的功率。

$$I=U_R/5=(U_1-U_2)/5=(10-5)/5=1\text{ A}$$

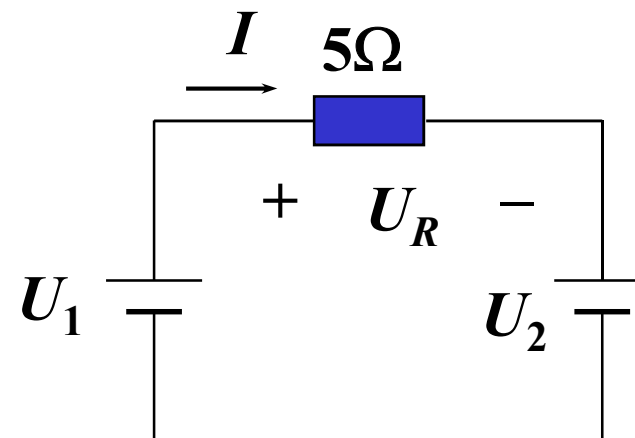
$$P_R=U_R I=5\times 1=5\text{ W}, \text{ 吸收功率}$$

$$P_{U_1}=U_1 I=10\times 1=10\text{ W}, \text{ 发出功率}$$

$$P_{U_2}=U_2 I=5\times 1=5\text{ W}, \text{ 吸收功率}$$

$$P_{\text{发出}}=10\text{ W}, \quad P_{\text{吸收}}=5+5=10\text{ W}$$

$$P_{\text{发出}}=P_{\text{吸收}} \quad (\text{功率守恒})$$



1.4 电路元件

1.4.1 电阻

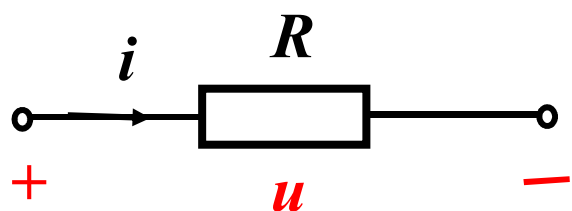
定义：任意二端元件，如果在任意时刻，其两端电压和通过元件的电流之间的关系可以在 u - i 平面上用 $u=f(i)$ 或 $i=f(u)$ 表示。

分类：

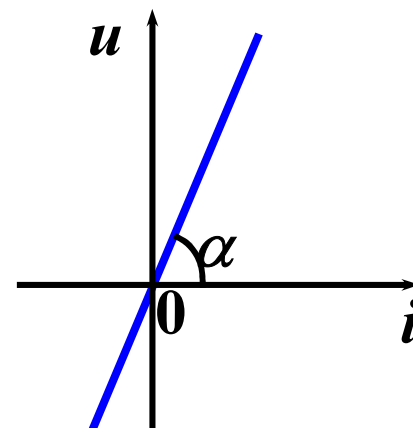
{ 线性
非线性

1 线性电阻元件与欧姆定律 (Ohm's Law)

(1) 电压与电流取关联参考方向



$$u = R i$$



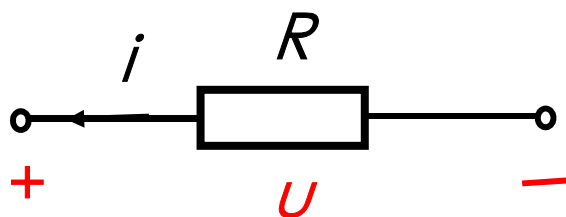
R 称为电阻 单位名称：欧(姆) 符号： Ω

线性电阻元件的伏安特性为一条过原点的直线

令 $G = 1/R$ 称为电导单位名称：西(门子) 符号：S

则 欧姆定律表示为 $i = G u$.

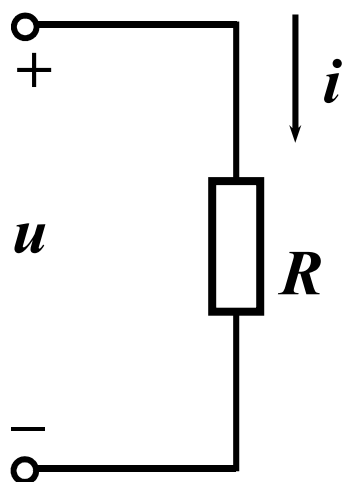
(2) 电阻的电压和电流的参考方向相反



则欧姆定律写为

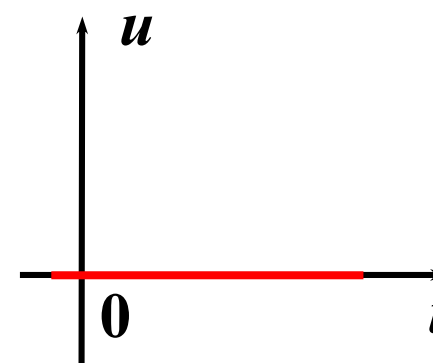
$$U = - Ri \quad \text{或} \quad i = - GU$$

(3) 开路与短路



当 $R = 0$ ($G = \infty$), 视其为短路。

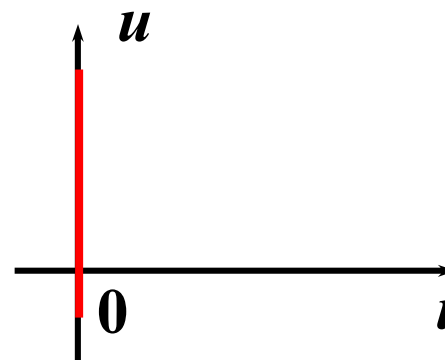
i 为有限值时, $u = 0$ 。



短路

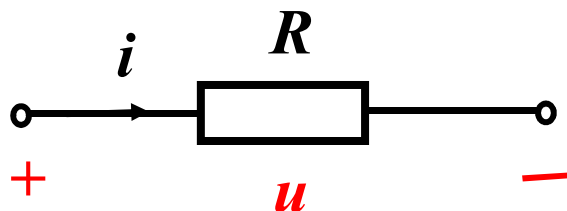
当 $R = \infty$ ($G = 0$), 视其为开路(断路)。

u 为有限值时, $i = 0$ 。

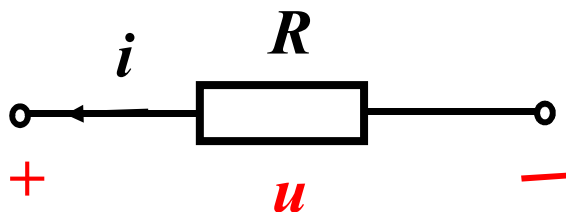


开路

(4) 电阻元件的功率和能量



$$\begin{aligned} p &= ui = (R i) i = i^2 R \\ &= u(u/R) = u^2/R \end{aligned}$$

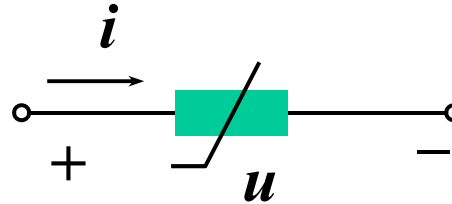


$$\begin{aligned} p &= -ui = -(-R i) i = i^2 R \\ &= -u(-u/R) = u^2/R \end{aligned}$$

由于 R 为正实常数，故功率 P 总是正值，这说明电阻 R 总是消耗电能的，因此电阻元件又称耗能元件。

3 非线性电阻元件

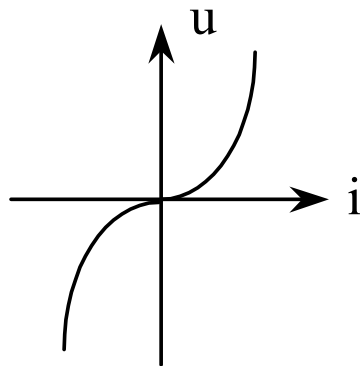
电路符号



特性方程:

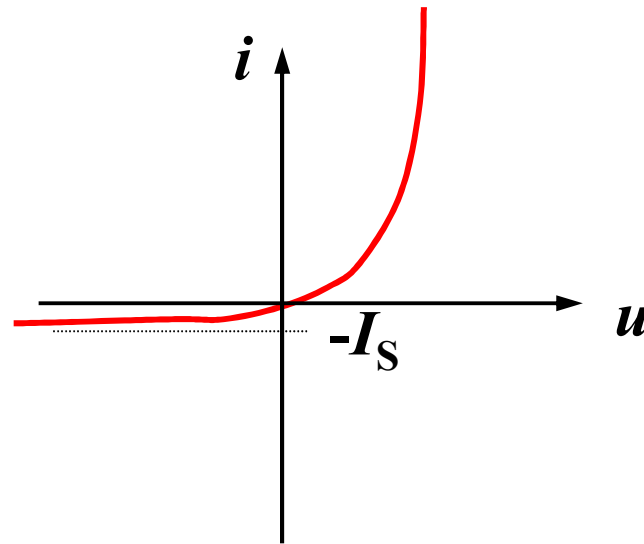
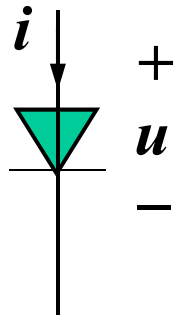
$$u = f(i)$$

$$i = g(u)$$



双向性元件(伏安特性对原点对称)

4 半导体二极管



非双向的(伏安特性
对原点不对称)

伏安特性

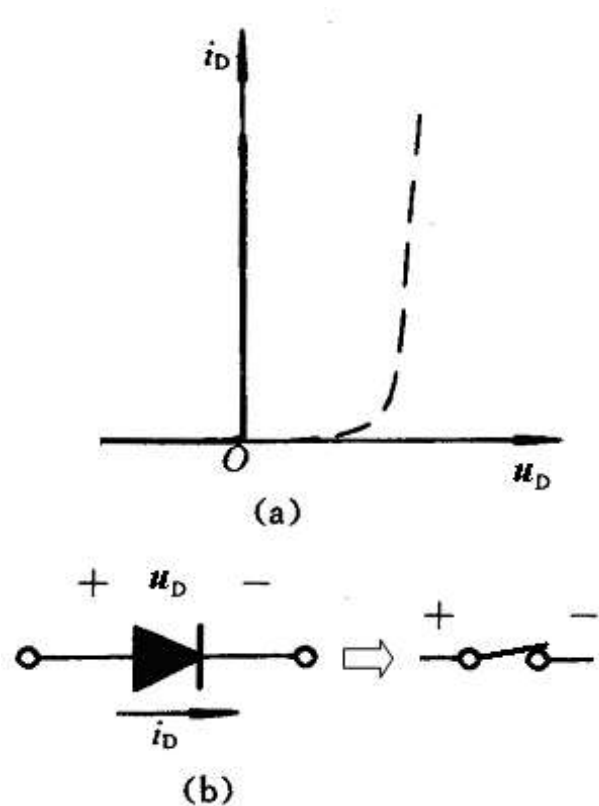
$$i = I_s (e^{bu} - 1)$$

$b > 0$ 与电荷、温度有关

$I_s > 0$ 反向饱和电流

二极管伏安特性的建模

1) 理想模型

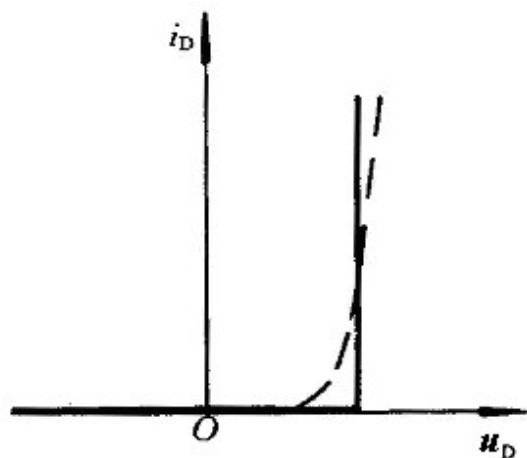


所谓理想模型，是指在正向偏置时，其管压降为零，相当于**开关的闭合**。

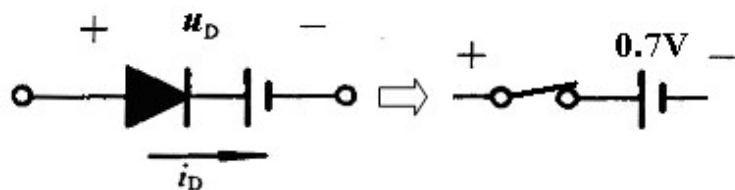
当反向偏置时，其电流为零，阻抗为无穷，相当于**开关的断开**。具有这种理想特性的二极管叫理想特性的二极管。

在实际电路中，当**电源电压远大于二极管的压降**时，利用此模型分析是可行的。

2) 恒压降模型



(a)

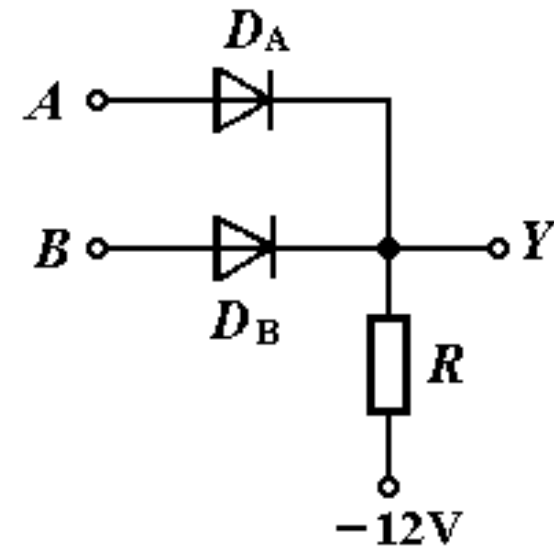


(b)

所谓恒压降模型，是指二极管在正向导通时，其管压降为恒定值，且不随电流变化而变化。硅管的管压降为 $0.7V$ 。

在实际电路中，此模型的应用非常广泛。

例：在数字电路中，常利用二极管单向导电性的开关作用，组成各种开关电路，实现相应的逻辑功能。分析这类电路的原则仍然是判断电路中的二极管是导通还是截止。



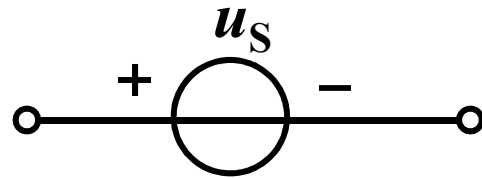
输 入		二极管状态		输 出
U_A	U_B	D_A	D_B	U_Y
0V	0V	导通	导通	0
0V	5V	截止	导通	5V
5V	0V	导通	截止	5V
5V	5V	导通	导通	5V

1.4.2 独立电源 (independent source)

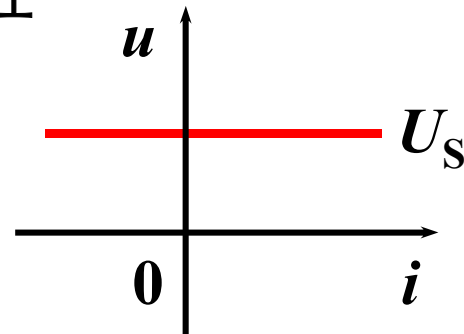
1 独立电压源 (Ideal Voltage Source)

(1) 定义：一个二端元件，如果在与任意电路联接时，能维持其两端电压为确定量值或波形，而与流过此元件的电流无关，则该二端元件称为独立电压源。

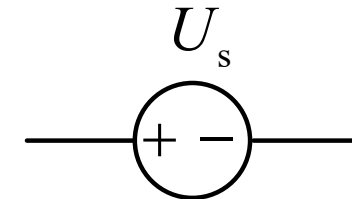
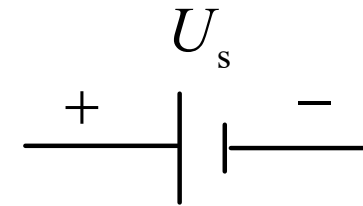
电路符号



伏安特性

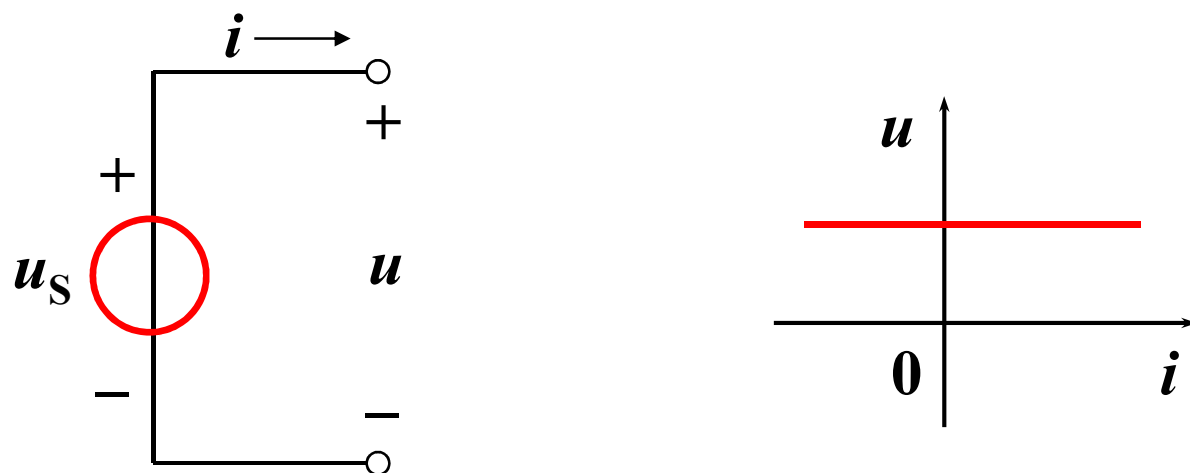


其他电路符号



(2) 特点:

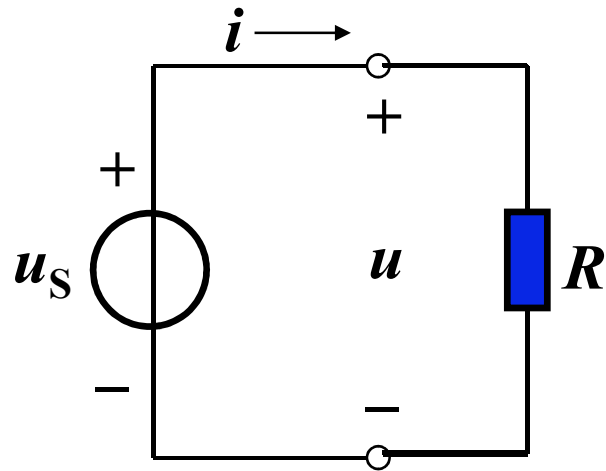
(a) 端电压由电源本身决定，与外电路无关； $u=u_s$



(b) 通过它的电流由外电路决定。

(c) $U=0$ ，伏安曲线与 i 轴重合,相当于短路元件。

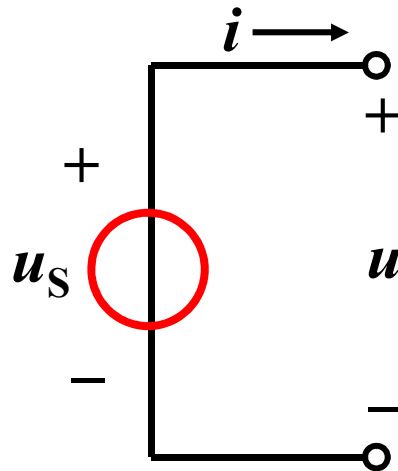
(3) 独立电压源的开路与短路



(1) 开路: $R \rightarrow \infty$, $i = 0$, $u = u_S$ 。

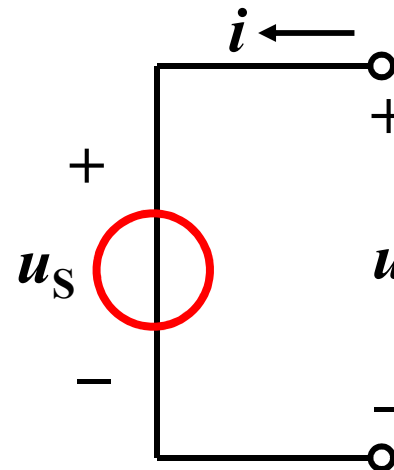
(2) 短路: $R = 0$, $i \rightarrow \infty$, 独立电源出现病态, 因此独立电压源不允许短路。

(4) 功率



i, u_S 非关联

$$p_{\text{发}} = u_S i \quad p_{\text{吸}} = -u_S i$$

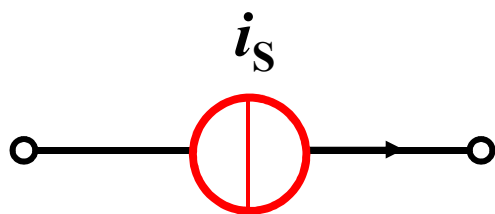


i, u_S 关联

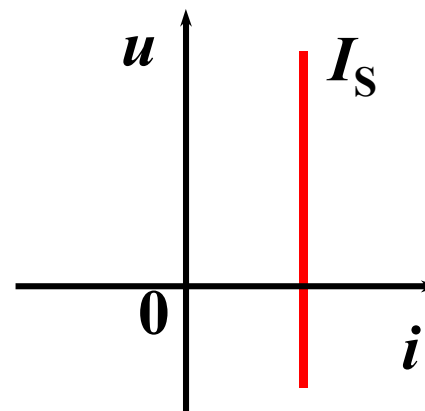
$$p_{\text{吸}} = u_S i \quad p_{\text{发}} = -u_S i$$

2 独立电流源

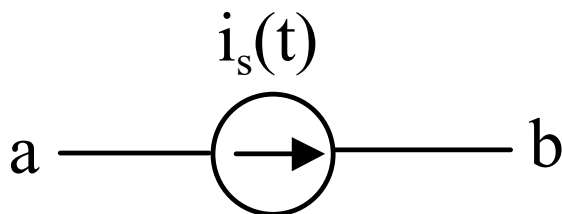
(1) 定义：一个二端元件，如果在与任意电路联接时，能维持通过此元件的电流为确定量值或波型，而与其两端间的电压无关，则该二端元件称为独立电流源。



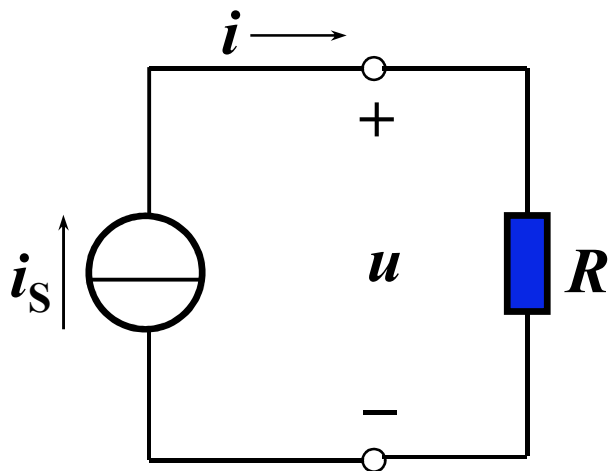
电路符号



伏安特性



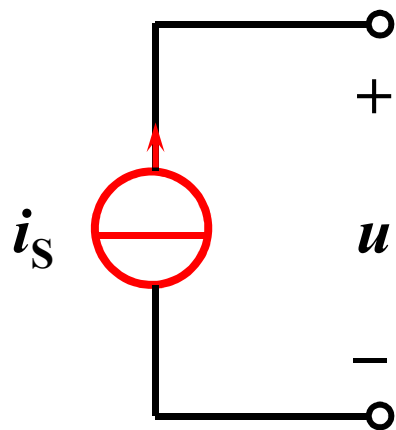
(2) 理想电流源的短路与开路



(1) 短路: $R=0$, $i=i_s$, $u=0$, 电流源被短路。

(2) 开路: $R\rightarrow\infty$, $i=i_s$, $u\rightarrow\infty$ 。若强迫断开电流源回路, 电路模型为病态, 理想电流源不允许开路。

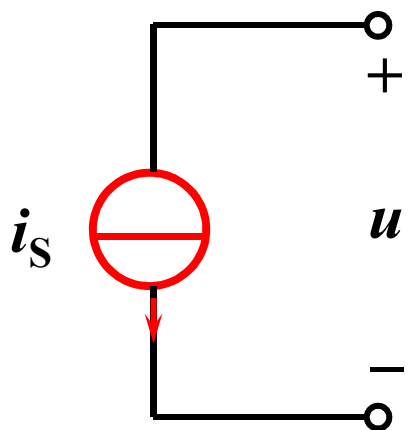
(3) 功率



u, i_s 非关联

$$p_{\text{发}} = u i_s$$

$$p_{\text{吸}} = -u i_s$$



u, i_s 关联

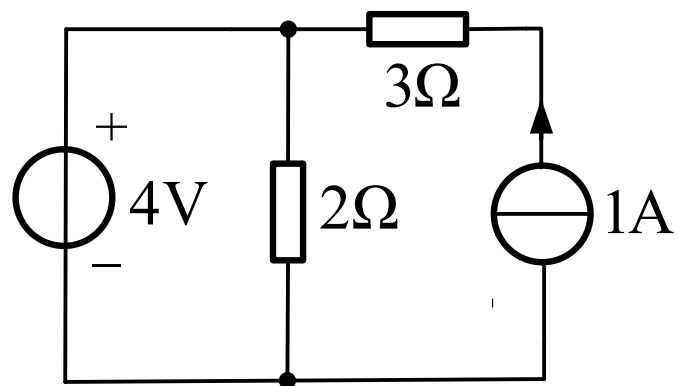
$$p_{\text{吸}} = u i_s$$

$$p_{\text{发}} = -u i_s$$

3 独立电源总结:

- 电压源的电压和电流源的电流，都不受所接外电路的影响；
- 它们作为电源或输入信号时，在电路中起激励作用，将在电路中产生电流和电压，这些电压和电流便是响应。这类电源叫做独立电源。

练习1：求电流源提供的功率

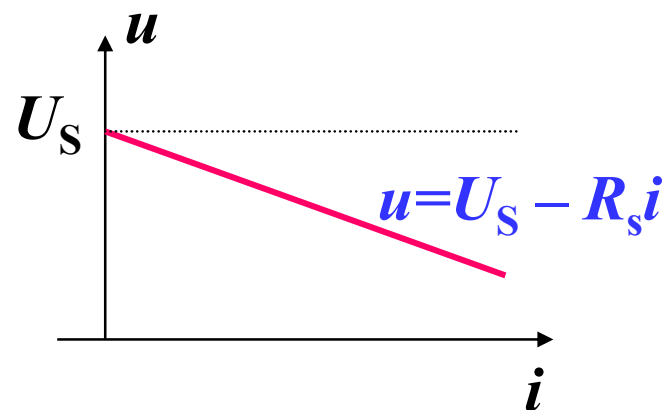
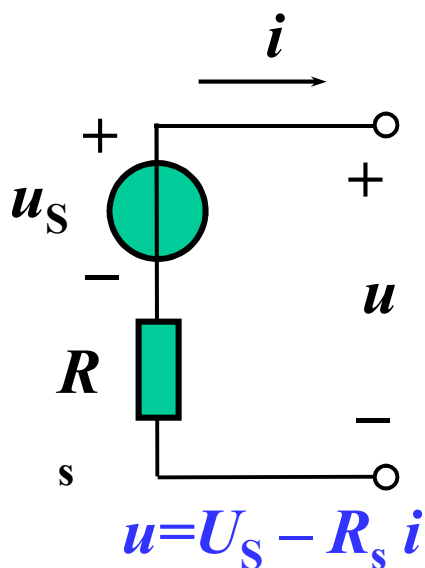


答案：7W，提供功率

3 电池的特性及其电路模型

1. 实际电压源模型

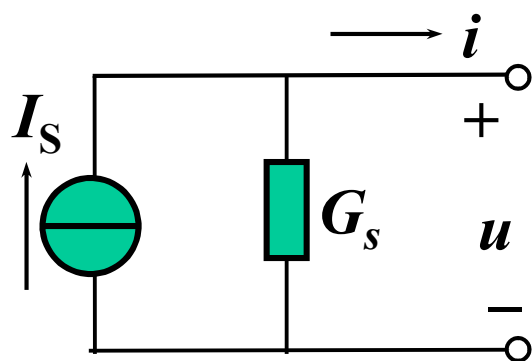
一个实际电压源，可用一个理想电压源 U_S 与一个电阻 R_s 串联的支路模型来表征其特性。由电压源与线性电阻串联组成的二端电路称为戴维宁电路。



R_s : 电源内阻, 一般很小。

2. 实际电流源模型

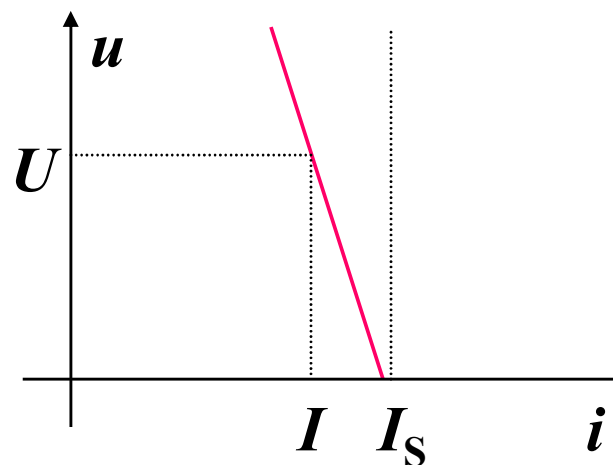
一个实际电流源，可用一个电流为 I_S 的理想电流源和一个内电阻 G_s 并联的模型来表征其特性。由电流源与线性电阻并联组成的二端电路称为诺顿电路。



$$i = I_S - uG_s$$

G_s : 电源内电导, 一般很小。

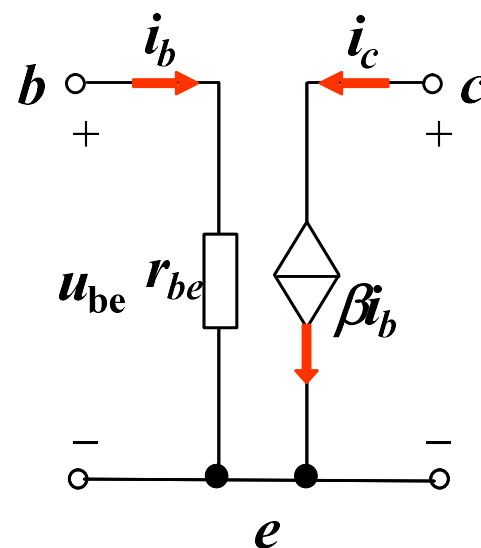
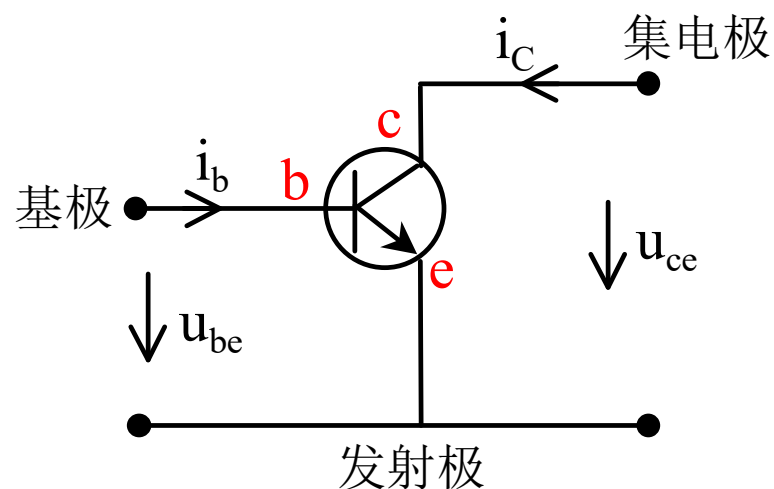
$I_S = I_S$ 时, 其外特性曲线如下:



1.4.3 受控电源(controlled source)

1.定义:

受控源是一种双口元件，它含有两条支路，其一为控制支路；另一为受控支路，这支路或为一电压源或为一个电流源。

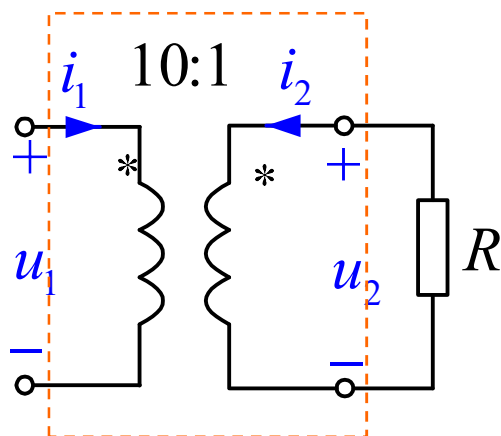


晶体管工作在放大区时，集电极电流 i_c 的大小受基极电流 i_b 的控制，基本上与集电极电压无关。

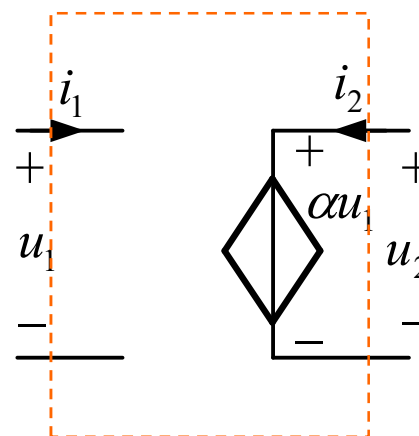
1.4.3 受控电源(controlled source)

1.定义:

受控源是一种双口元件，它含有两条支路，其一为控制支路；另一为受控支路，这支路或为一电压源或为一个电流源。



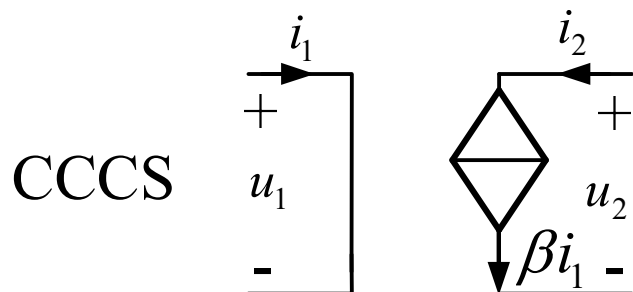
VCVS



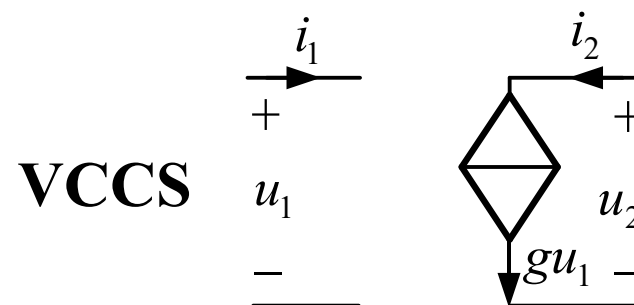
2.分类:

根据控制支路是电压还是电流，受控支路是电压源还是电流源受控源可以分为四种基本类型。

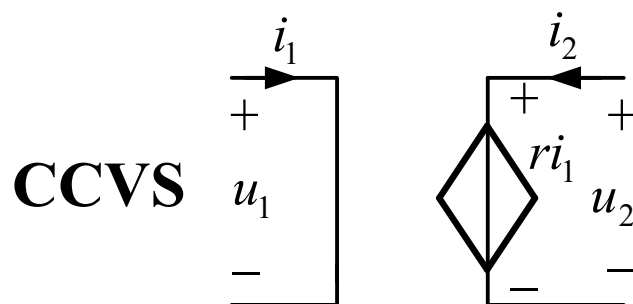
(CCCS: Current Controlled Current Source)



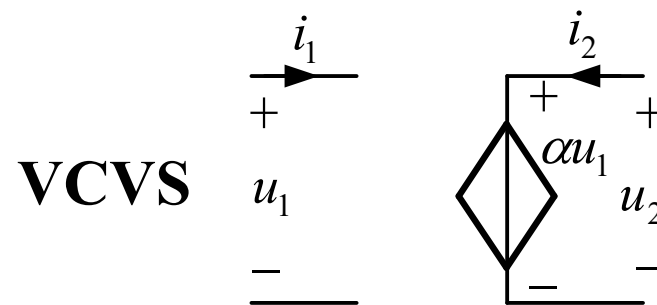
$$u_1 = 0, \quad i_2 = \beta i_1$$



$$i_1 = 0, \quad i_2 = g u_1$$



$$u_1 = 0, \quad u_2 = r i_1$$

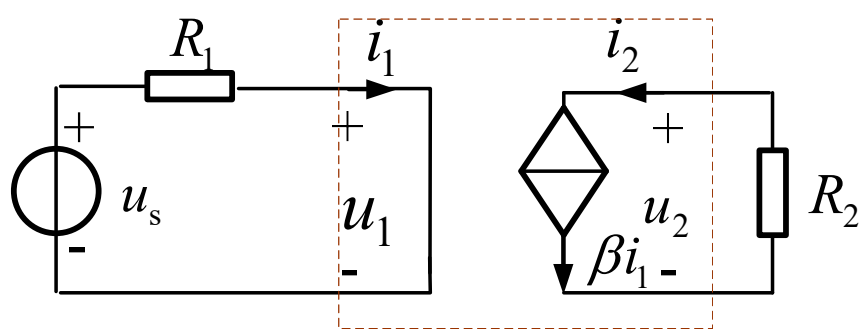


$$i_1 = 0, \quad u_2 = \alpha u_1$$

3、功率：受控源是有源元件（Active elements）

$$p = u_1 i_1 + u_2 i_2 = u_2 i_2$$

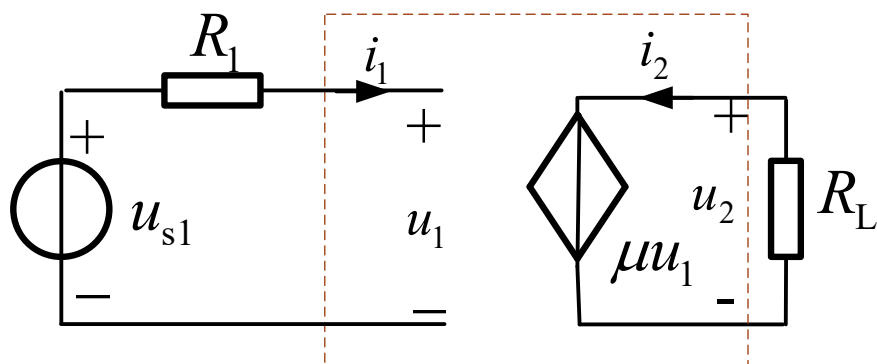
例. 计算线性受控源的功率。



$$i_1 = \frac{u_s}{R_1}$$

$$p = u_2 i_2 = (-\beta i_1 R_2) (\beta i_1) \\ = -R_2 \beta^2 \frac{u_s^2}{R_1^2} < 0$$

提供功率



$$p = u_2 i_2 = u_2 (-u_2 / R) \\ = -\frac{u_2^2}{R} = -\frac{(\mu u_1)^2}{R} < 0$$

提供功率

4.受控源与独立源的比较

- (1) 独立源电压(或电流)由电源本身决定，与电路中其它电压、电流无关；而受控源电压(或电流)直接由控制量决定，一般该值是未知的。
- (2) 独立源在电路中产生电压、电流，是电路能量的来源；而受控源只是某一电路中反映输出端与输入端的关系，在电路中不能单独的作为“电源”。

1.5 基本定律

1.5.1 电路术语：

支路Branch：电路中通过同一电流的每个分支。

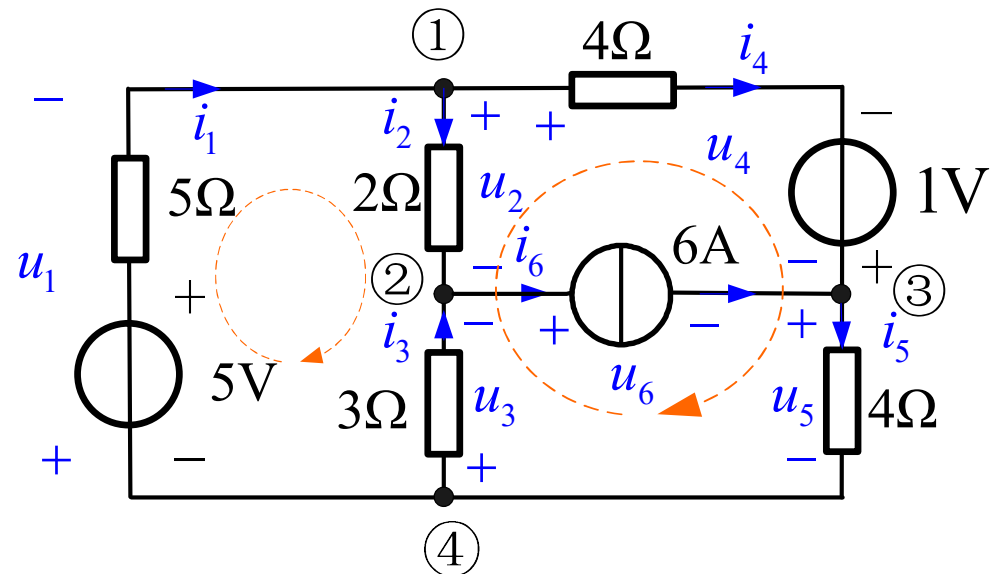
支路电流Branch current，支路电压Branch voltage

结点Node和广义结点Super node

回路Loop和网孔Mesh

平面电路和非平面电路

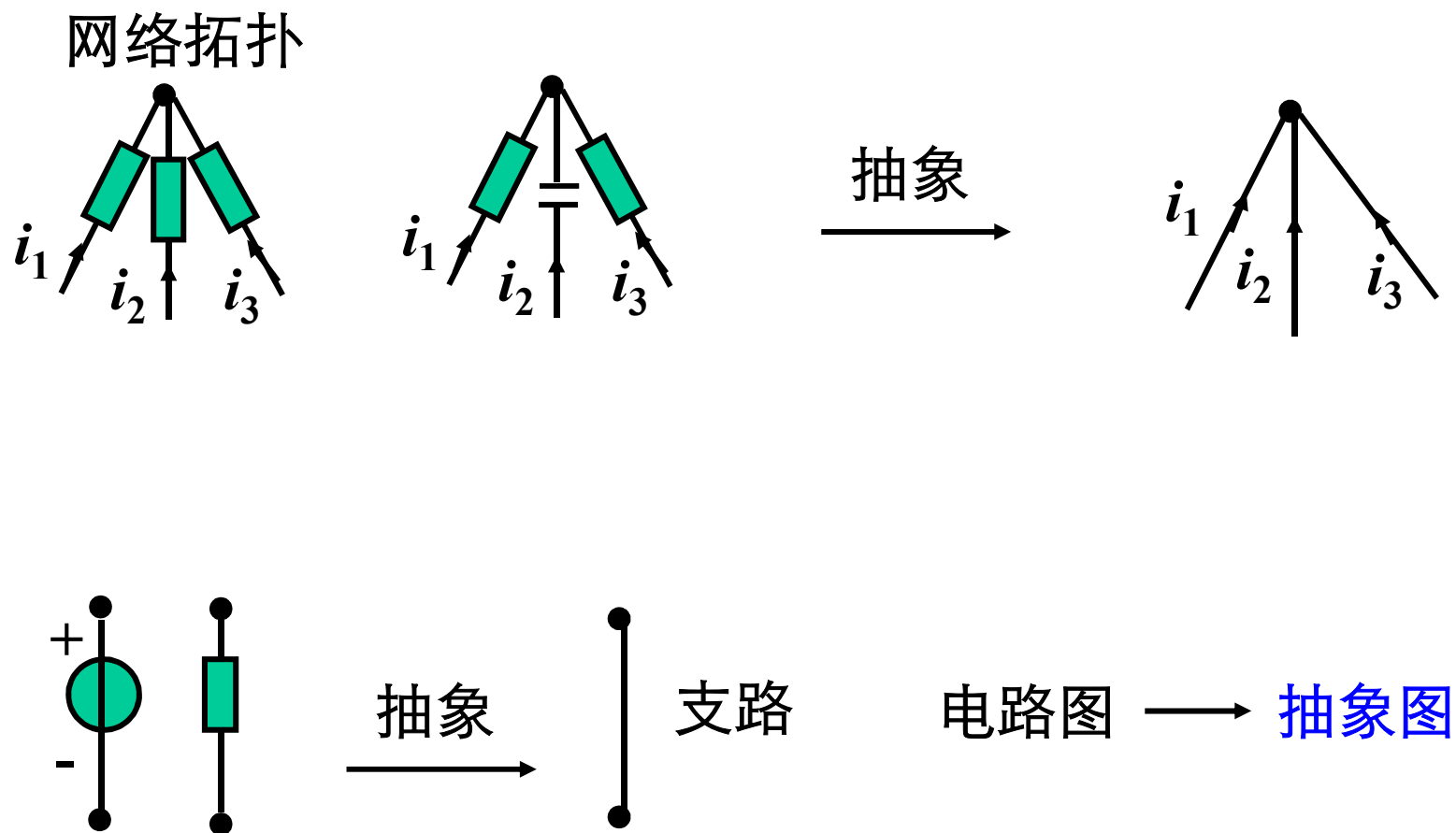
有向图



1.5 基本定律

1.5.1 电路术语:

网络图论的基本概念(补充知识点, 具体内容见下册19章)

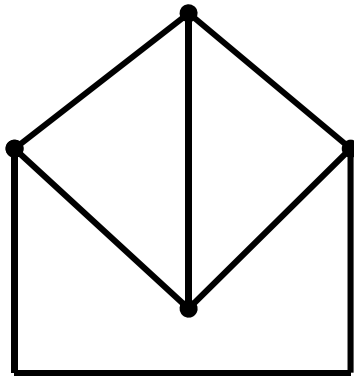


1.5 基本定律

1.5.1 电路术语：

网络图论的基本概念(补充知识点，具体内容见下册19章)

1. 图、边和顶点



将电路中的每一个支路均用一线段表示，每一支路的端点称为结点，这样得到的由点和线表示的图形称为网络的拓扑图，简称为图或线图。

- 图中每一个线段对应电路图中的一条支路。
- 在图中常提到移去某一支路，这一支路被移去后，其两个端点应予保留。即图允许孤立结点存在。
- 图仅反映电路图中各支路及结点的连接方式，并不能反映它们之间的电气特性。

1.5 基本定律

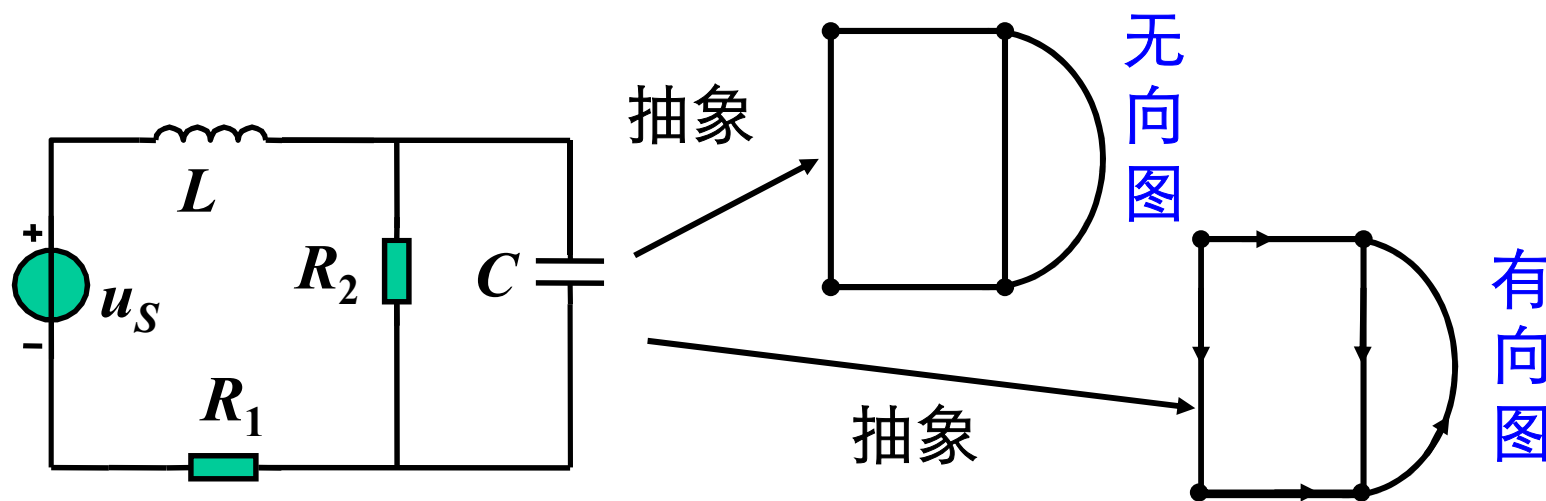
1.5.1 电路术语:

网络图论的基本概念(补充知识点, 具体内容见下册19章)

2.有向图

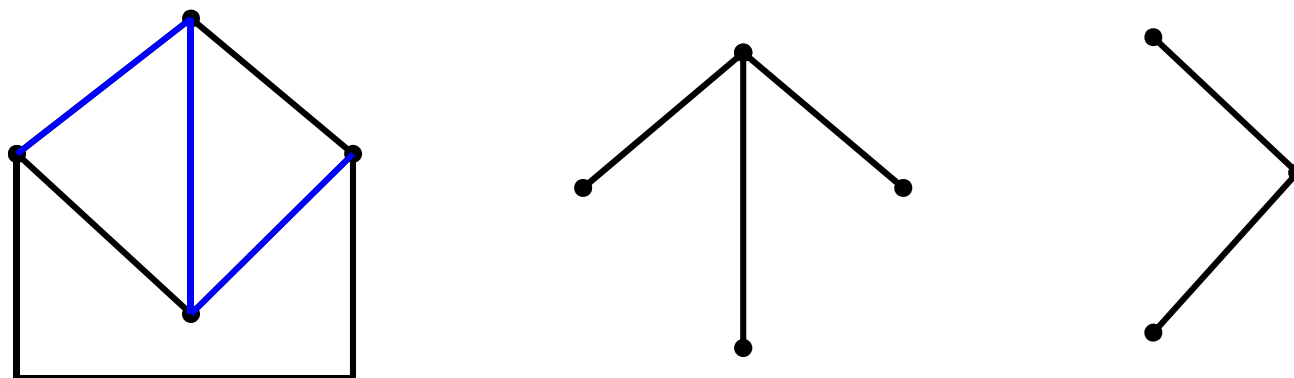
不考虑支路是何元件, 而将支路抽象成带方向、有电压与电流的线段, 电路抽象成有向线段和点构成的几何图形, 称为电路的有向图。

图中的方向表示原电路中支路电压和电流**关联参考方向**。



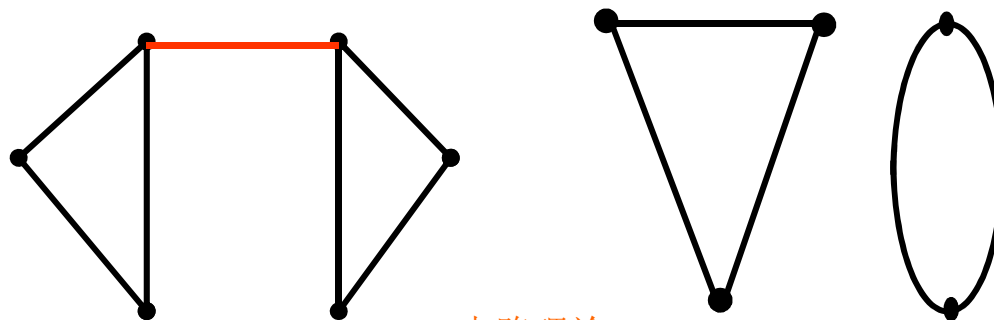
3.子图

后2个图所有结点与支路属于有向图 G ，则称后2个图为有向图 G 的子图



4. 连通图与非连通图

任意两个结点之间至少有一条由一条支路或多条支路构成的通路，称为连通图

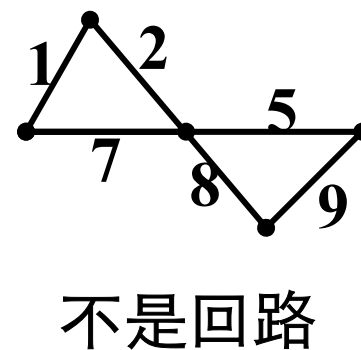
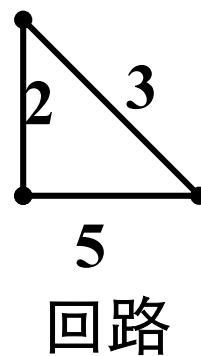
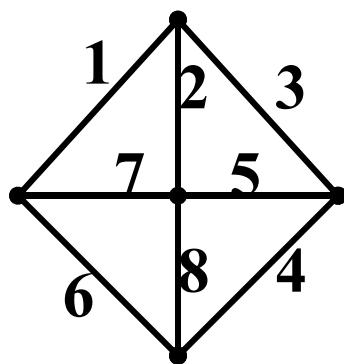


5. 回路

回路L是连通图G的一个子图。具有下述性质

- (1) 连通;
- (2) 每个结点关联支路数恰好为2。

回路的本质是由支路组成的闭合路径。若一组回路中，每一个回路都至少有一条支路不属于其他任何回路，则这组回路为独立回路。



1.5 基本定律

1.5.1 电路术语:

网络图论的基本概念(补充知识点, 具体内容见下册19章)

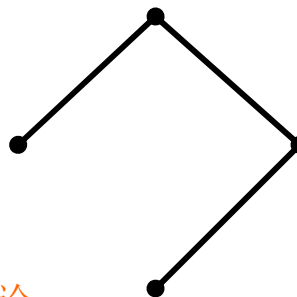
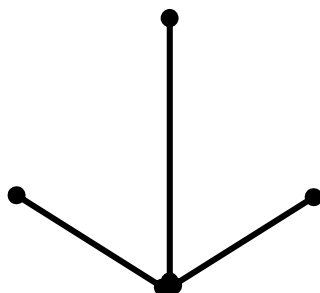
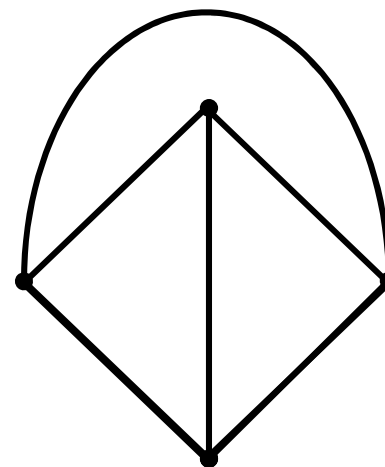
6. 树 (Tree)

树 T 是连通图 G 的一个子图, 具有下述性质:

- (1) 连通;
- (2) 包含 G 的所有结点;
- (3) 不包含回路。

树枝: 属于树的支路

连支: 属于 G 而不属于 T 的支路

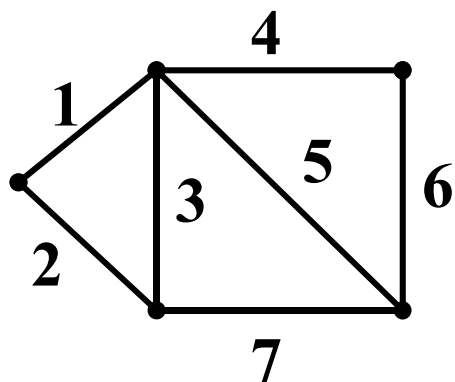


树不唯一

树枝数 $b_t = n - 1$

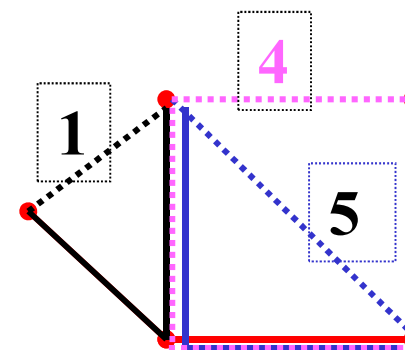
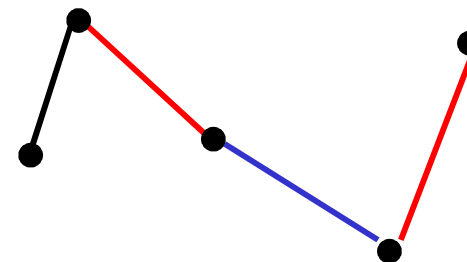
连支数 $b_l = b - (n - 1)$

单连支回路（基本回路）



树枝数 4

连支数 3



单连支回路 $\xrightarrow{\checkmark}$ 独立回路
单连支回路 $\xleftarrow{\times}$ 独立回路

选择仅含一条连支的回路，称为单连支回路。这组回路每一个都有自己特有的一条支路（连支），是一组独立回路。**单连支回路也称基本回路。**

7、平面图与非平面图，网孔 (mesh)

能画在平面上不出现支路交叉的图称为平面图。反之，如果出现支路交叉，则称为非平面图。

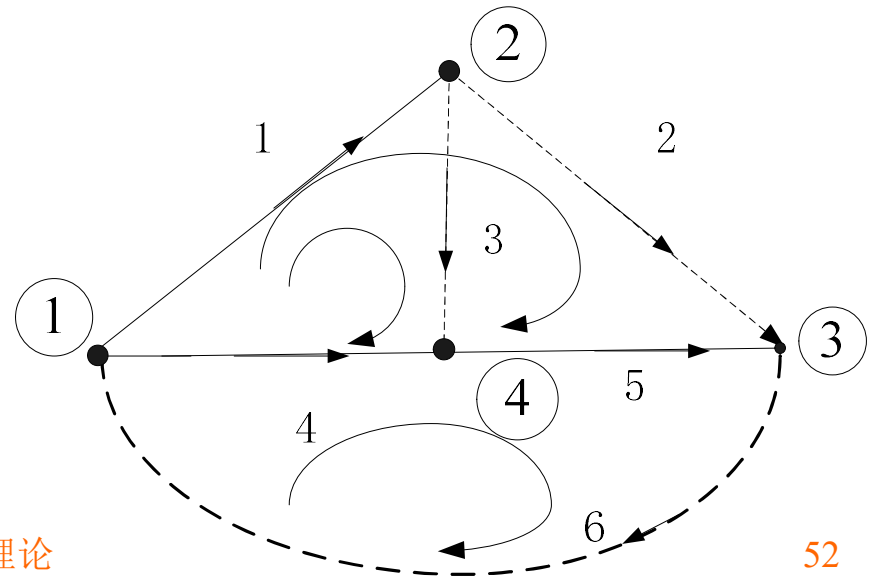
网孔的概念：对平面图来说，内部不含其他支路的回路称为网孔，网孔是回路的特例。

内网孔：回路的限定面内不含另外的支路，称为内网孔。

外网孔：回路的限定面外不含另外的支路，称为外网孔。
一般电路中的网孔指内网孔。

内网孔数目

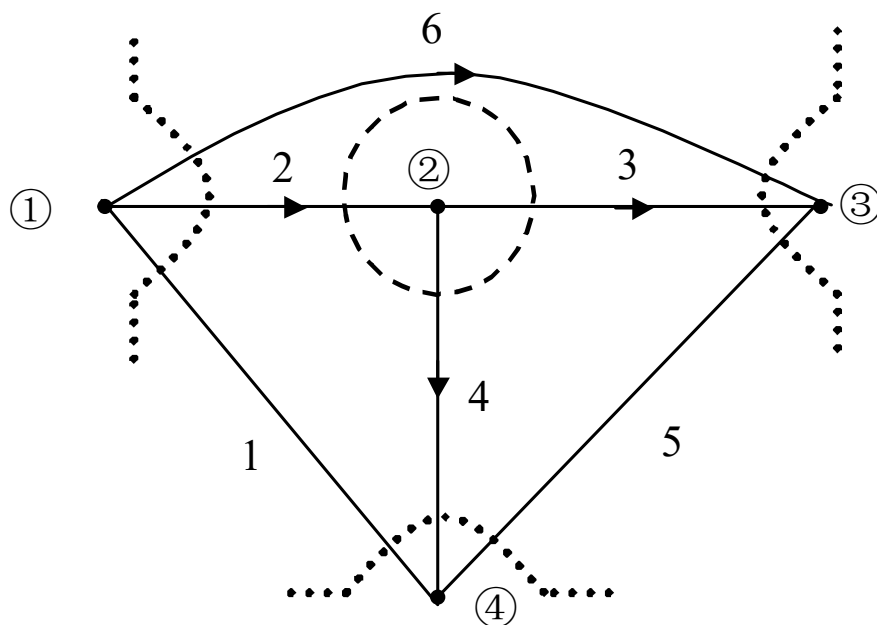
$$b - n + 1$$



8. 割集

割集 Q 是连通图 G 中一个支路的集合，具有下述性质：

- (1) 把割集 Q 中全部支路移去，将图分成两个分离部分；
- (2) 保留割集 Q 中的一条支路，其于都移去， G 还是连通的。



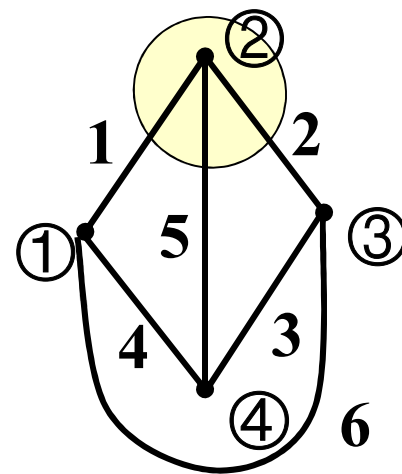
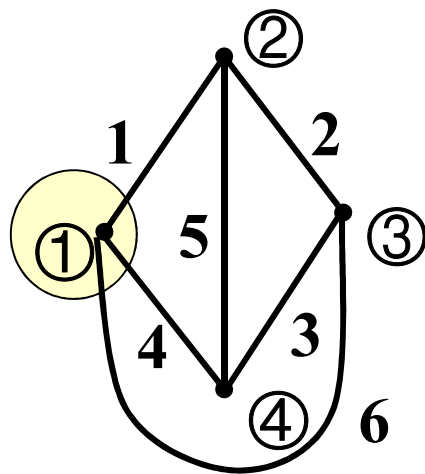
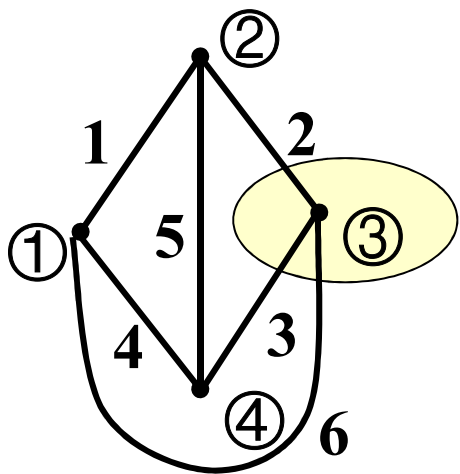
练习：判断

$\{1, 2, 3\}$ 、

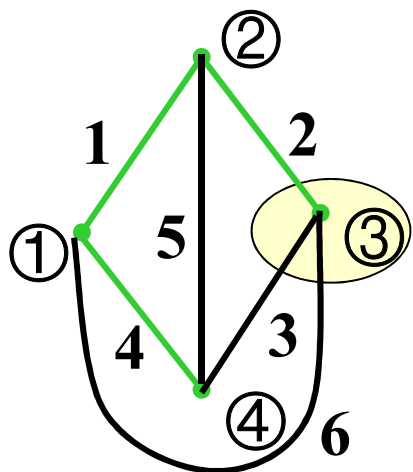
$\{1, 3, 4, 6\}$

$\{1, 3, 5, 6\}$

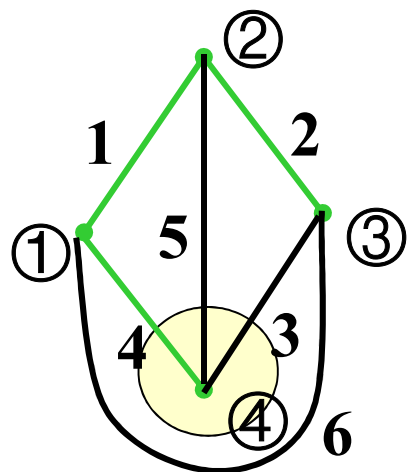
是否割集？



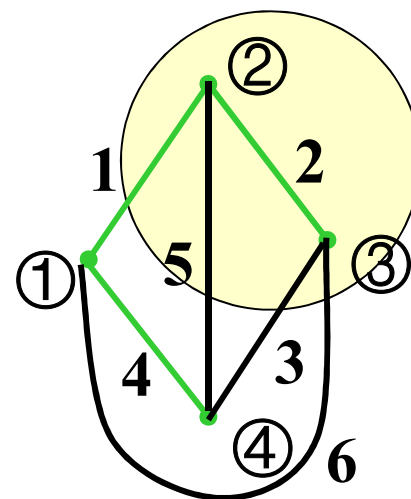
单树支割集（基本割集）



$Q_1: \{2, 3, 6\}$

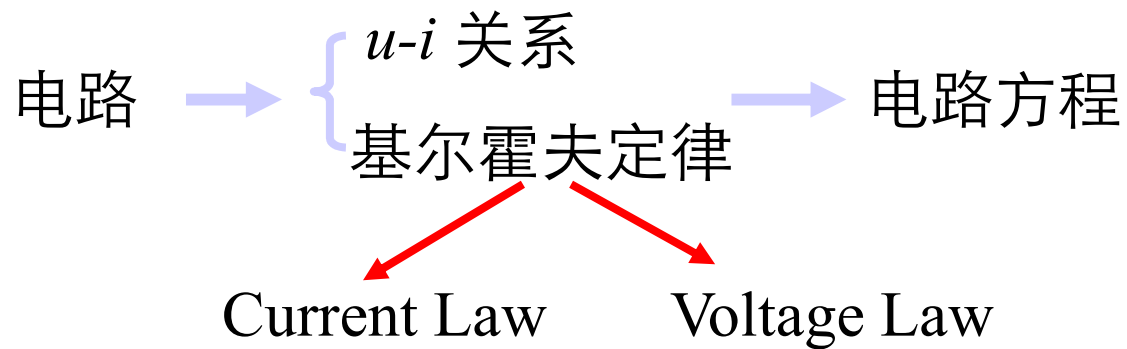


$Q_2: \{3, 5, 4\}$



$Q_3: \{1, 5, 3, 6\}$

基尔霍夫定律 (Kirchhoff's Laws)



Gustav Robert Kirchhoff
(1824-1887)

- 基尔霍夫定律包括基尔霍夫电流定律和基尔霍夫电压定律。
- 它反映了电路中所有支路电压和电流的约束关系，是分析集中参数电路的基本定律。
- 基尔霍夫定律与元件 $u-i$ 关系构成了电路分析的基础。

1.5.2 基尔霍夫电流定律 Kirchhoff's Current Law——KCL

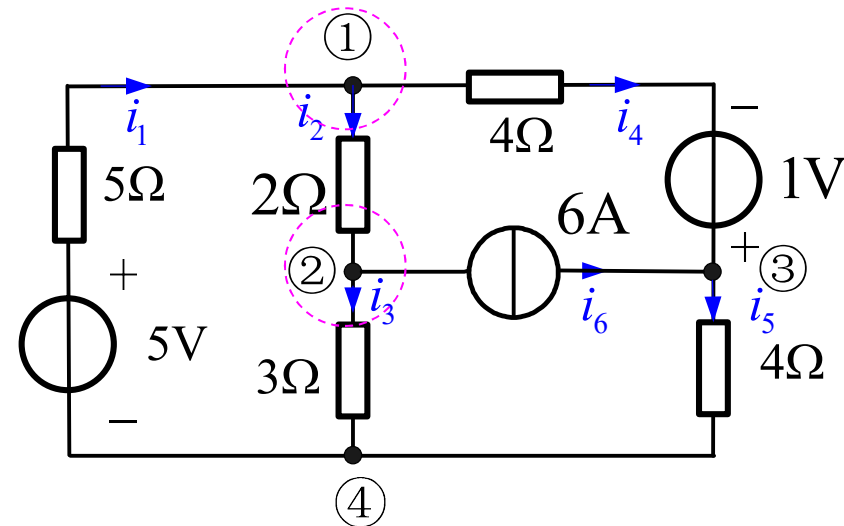
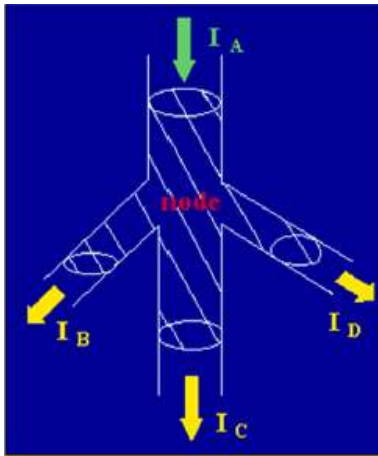
在集中参数电路中，流出(流入)结点的支路电流的代数和为零。

$$\sum_{k=1}^m i_k(t) = 0$$



$$\text{Node1: } (-i_1) + i_2 + i_4 = 0$$

$$\text{Node2: } (-i_2) + i_3 + i_6 = 0$$



KCL的列写规则：

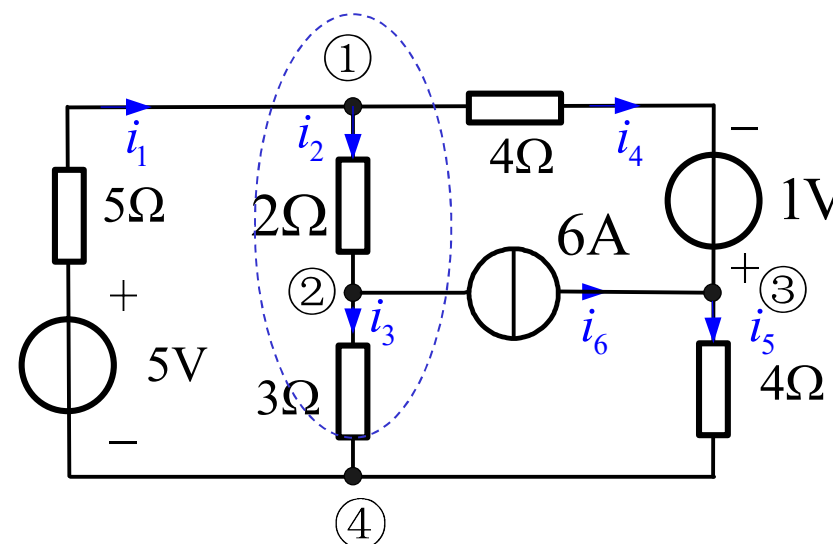
- 指定各支路的电流参考方向；
- 按照参考方向离开结点的取正号，进入结点的取负号列写方程。

2、广义结点的KCL:

- 在任一时刻，流出（或流进）闭合曲面的各支路电流的代数和等于零。
- 针对结点的表述方式可以认为是它的特殊情况。

$$\text{Node 1: } (-i_1) + i_2 + i_4 = 0$$

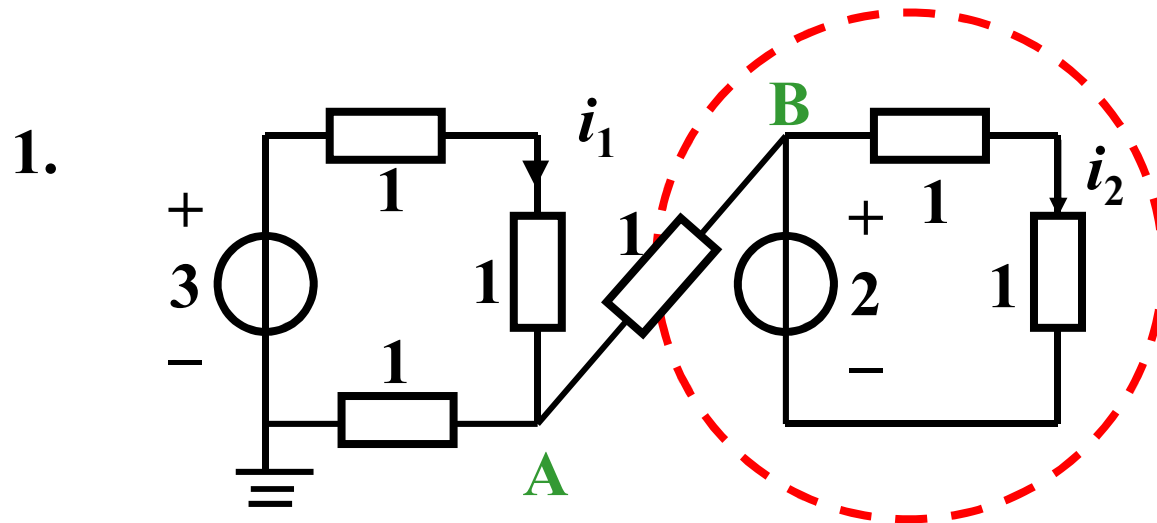
$$\text{Node 2: } (-i_2) + i_3 + i_6 = 0$$



$$\text{Super node (1-2): } (-i_1) + i_3 + i_4 + i_6 = 0$$

独立的KCL方程有 **3 个**

思考：

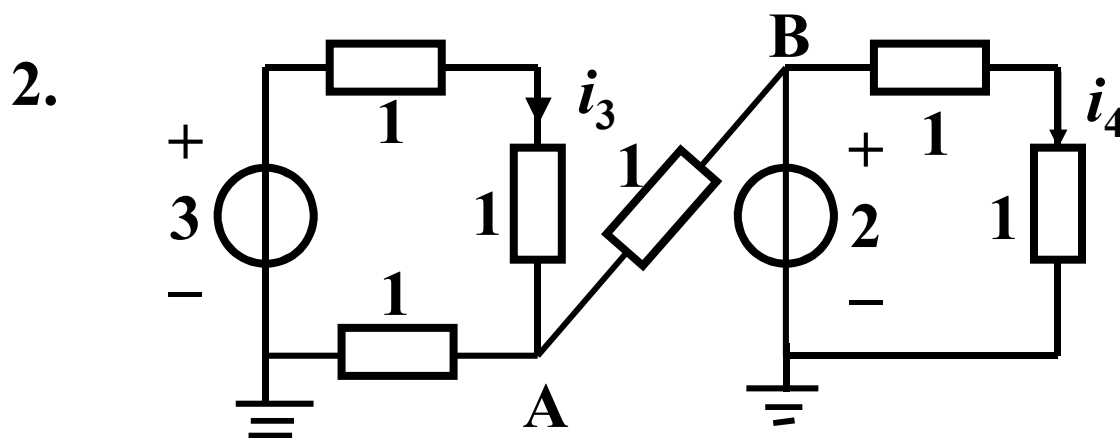


$$\varphi_A \stackrel{?}{=} \varphi_B$$

$$i_1 \stackrel{?}{=} i_2$$

$$\varphi_A = \varphi_B$$

$$i_1 = i_2$$



$$\varphi_A \stackrel{?}{=} \varphi_B$$

$$i_3 \stackrel{?}{=} i_4$$

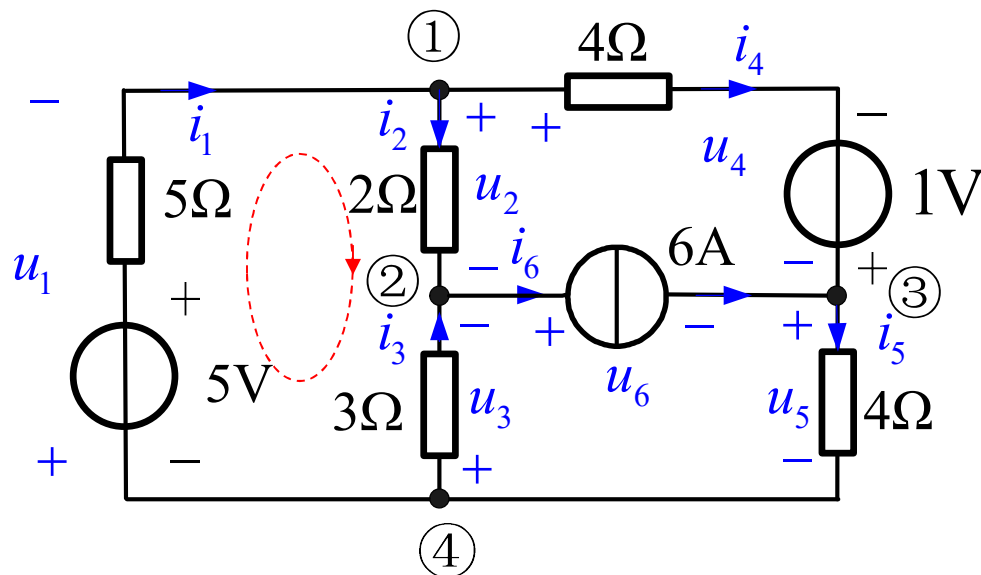
~~$$\varphi_A = \varphi_B$$~~

~~$$i_3 = i_4$$~~

两部分电路仅通过一条导线连接，则连接线不会有电流。

1.5.3 基尔霍夫电压定律： Kirchhoff's Voltage Law——KVL

1、定律内容：在集中参数电路中，沿闭合路径(按固定绕向)，各支路电压的代数和为零。即



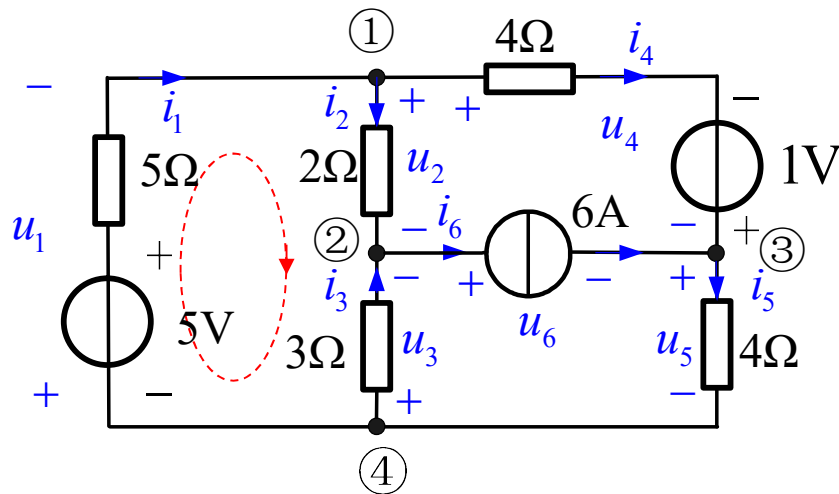
$$\sum u_k(t) = 0$$

选择顺时针为绕行方向：
 $u_1 + u_2 - u_3 = 0$

2、KVL的实质：单位正电荷在任一回路中移动一周，电场力做功的代数和为0。

1.5.3 基尔霍夫电压定律： Kirchhoff's Voltage Law——KVL

1、定律内容：在集中参数电路中，沿闭合路径(按固定绕向)，各支路电压的代数和为零。即



$$\sum u_k(t) = 0$$

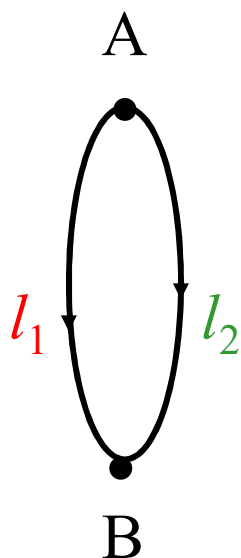
选择顺时针为绕行方向：

$$u_1 + u_2 - u_3 = 0$$

2、KVL方程的列写步骤：

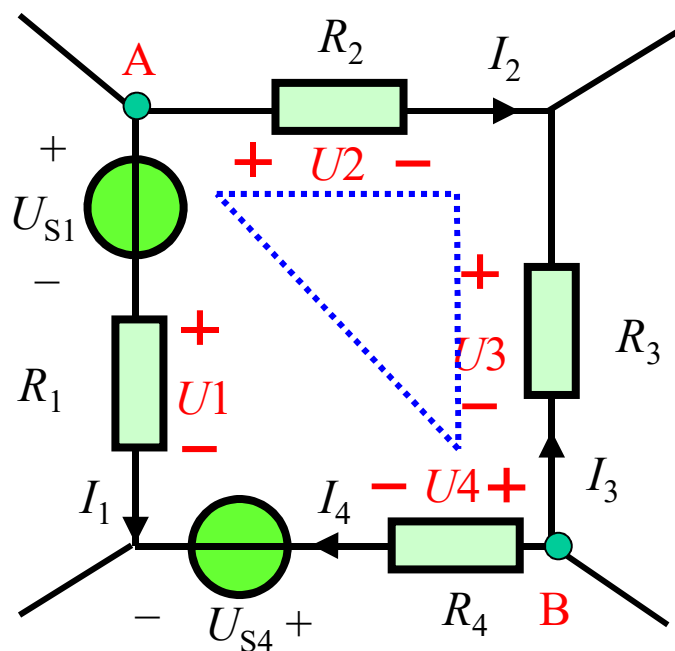
- 确定各支路电压的参考方向；
- 指定回路（或网孔）的参考方向；
- 支路电压的参考方向与回路的参考方向一致的电压在代数和中取正号，相反的电压在代数和中取负号列写方程

推论：电路中任意两点间的电压等于两点间任一条路径经过的各元件电压的代数和。



$$U_{AB} (\text{沿} l_1) = U_{AB} (\text{沿} l_2)$$

电位的单值性



$$U_{AB} = U_2 + U_3$$

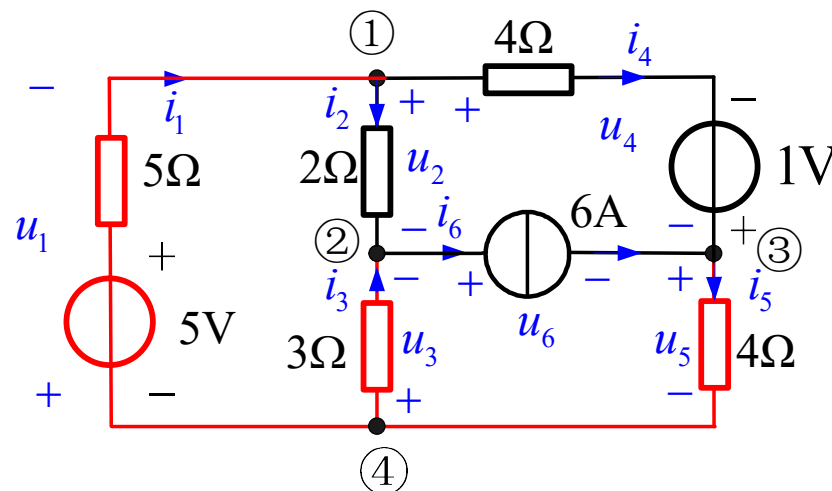
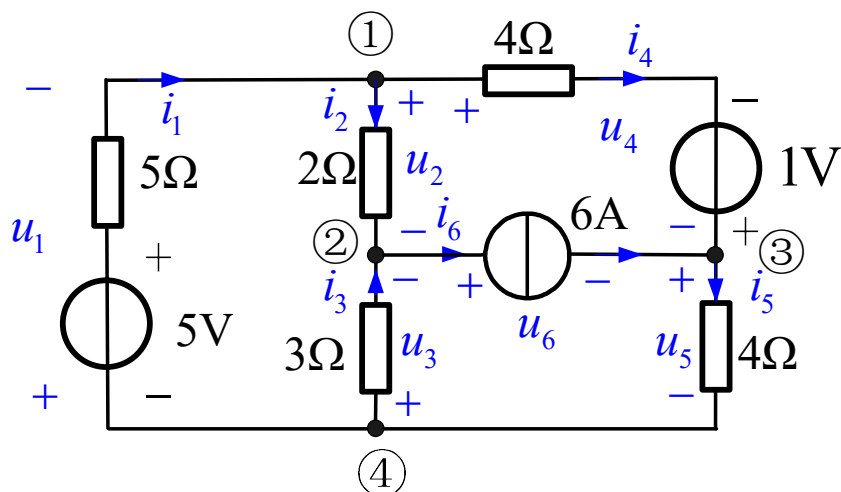
$$U_{AB} = U_{S1} + U_1 - U_{S4} - U_4$$

KCL、KVL小结:

- KCL表明在每一结点上电荷是守恒的；KVL是电位单值性的具体体现（电压与路径无关）；
- KCL、KVL取决于网络的具体结构，与组成支路的元件性质及参数无关；
- 对任一网络，对所有结点列写KCL方程，但这些方程中有不独立方程。如果有 n 个结点， b 条支路，则独立的KCL方程数量 $n-1$ ，独立的KVL方程数量 $b-(n-1)$ 。

讨论——目标：基尔霍夫定律

例1：列出全部KCL，KVL方程。

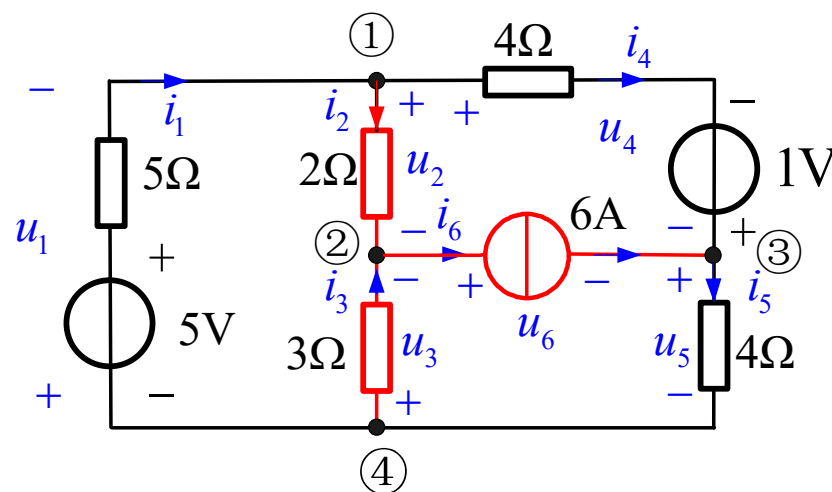


KCL、KVL独立方程数目？

电路中有4个节点，6个支路

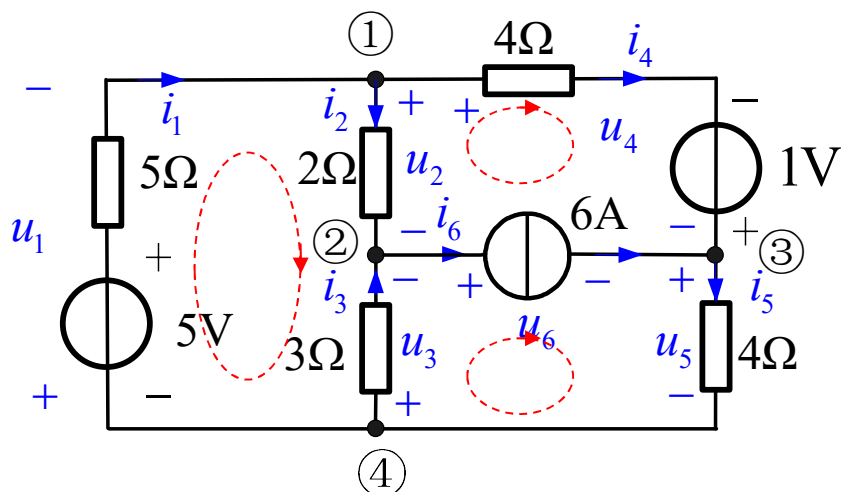
KCL：3个，独立结点

KVL：3个，网孔



讨论——目标：基尔霍夫定律

例1：列出全部KCL，KVL方程。



$$\text{Node1: } -i_1 + i_2 + i_4 = 0$$

$$\text{Node2: } -i_2 - i_3 + i_6 = 0$$

$$\text{Node3: } -i_4 + i_5 - i_6 = 0$$

KCL、KVL独立方程数目？

电路中有4个节点，6个支路

KCL：3个独立结点

KVL：3个网孔

$$\text{Mesh1: } u_1 + u_2 - u_3 = 0$$

$$\text{Mesh2: } -u_2 + u_4 - u_6 = 0$$

$$\text{Mesh3: } u_3 + u_6 + u_5 = 0$$

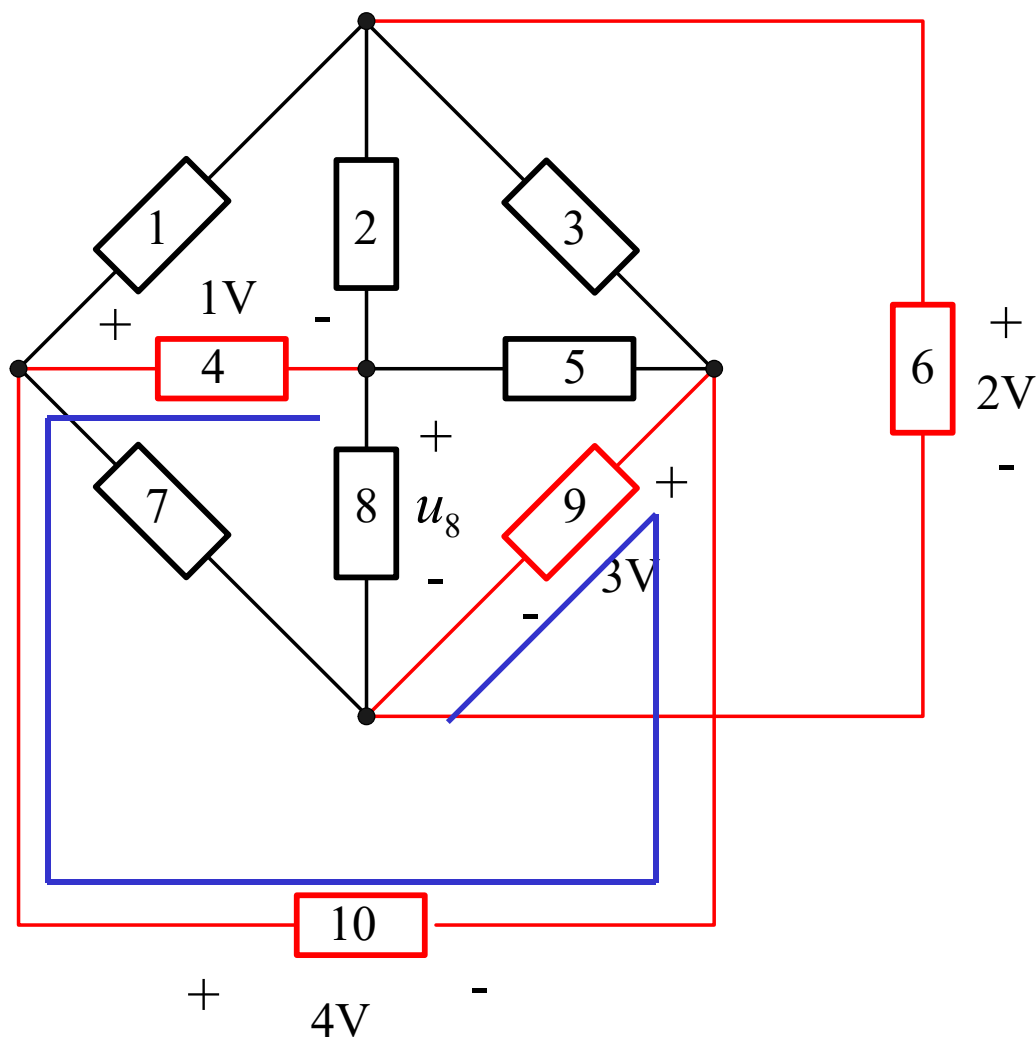
讨论——目标：基尔霍夫定律

例2: 计算 u_8 支路电压。

$$u_8 = -1 + 4 + 3 = 6V$$

? 已知哪些支路电压，就可以求出所有支路电压？

? 已知哪些支路电流，就可以求出所有支路电流？



讨论——目标：基尔霍夫定律

例3: 计算各独立电源的功率。

$$I_1 = 1 - 2 + 2 = 1\text{A}$$

$$P_1 = 2\text{W}(\text{suppling})$$

$$I_2 = 2 + 2 - 1 = 3\text{A}$$

$$P_2 = 6\text{W}(\text{absorbing})$$

$$I_6 = 0, \quad I_7 = -4\text{A}, \quad I_8 = 4\text{A}$$

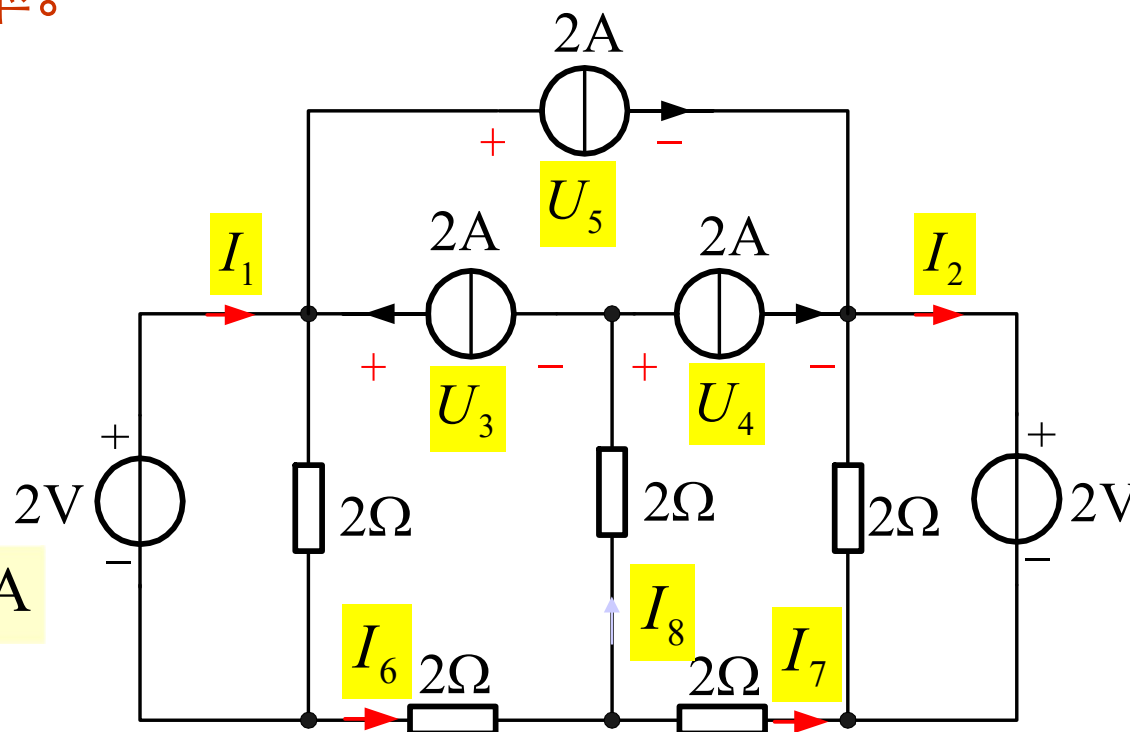
$$U_3 = 2 \times 1 + 4 \times 2 = 10\text{V}$$

$$P_3 = 20\text{W}(\text{suppling})$$

$$U_4 = -2 \times 4 - 2 \times 4 - 2 \times 1 = -18\text{V}$$

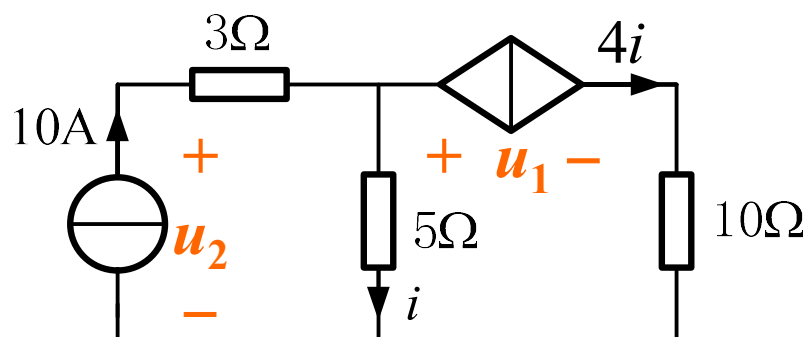
$$P_4 = -36\text{W}(\text{suppling})$$

$$U_5 = U_3 + U_4 = -8\text{V}, \quad P_5 = -16\text{W}(\text{suppling})$$



讨论——目标：基尔霍夫定律

例4：计算受控电源、独立电流源的功率。



$$\text{KCL: } 10 = 4i + i \Rightarrow i = 2\text{A}$$

$$\text{KVL: } u_1 = 5i - 10 \times 4i = -70\text{V}$$

$$p_1 = 4i \times u_1 = -560\text{W}$$

发出560W

$$\text{KVL: } u_2 = 3 \times 10 + 5i = 40\text{V}$$

$$p_2 = 10 \times u_2 = 400\text{W}$$

发出400W

发出还是吸收功率？

讨论——目标：基尔霍夫定律

例5. 计算独立电源的功率。（课后复习）

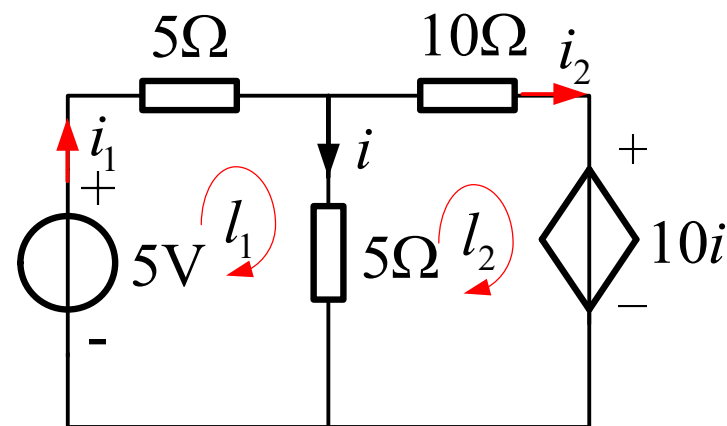
$$\text{KCL: } -i_1 + i + i_2 = 0$$

$$\text{KVL: } -5 + 5i_1 + 5i = 0$$

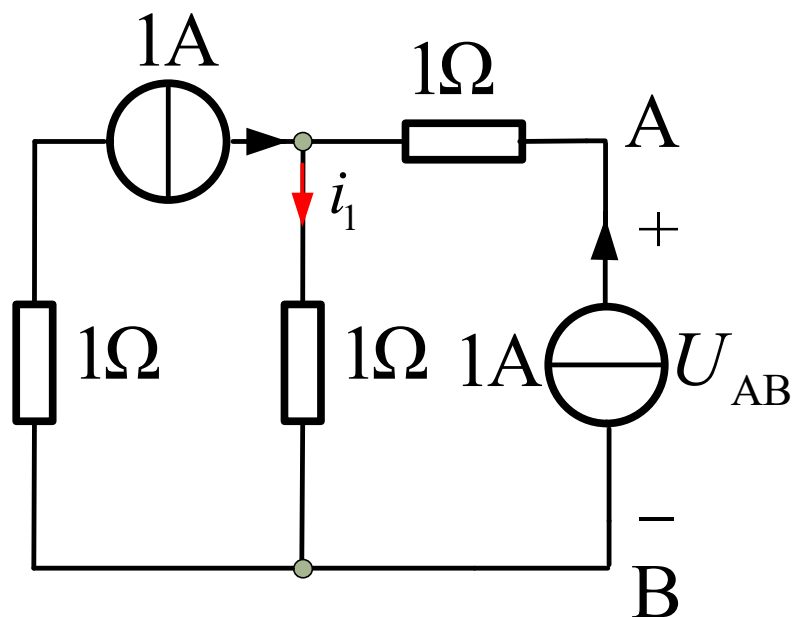
$$-5i + 10i_2 + 10i = 0$$

$$i = \frac{2}{3} \text{ A}, \quad i_1 = \frac{1}{3} \text{ A}, \quad i_2 = -\frac{1}{3} \text{ A}$$

$$\text{Supplied power: } p_1 = 5i_1 = \frac{5}{3} \text{ W}$$



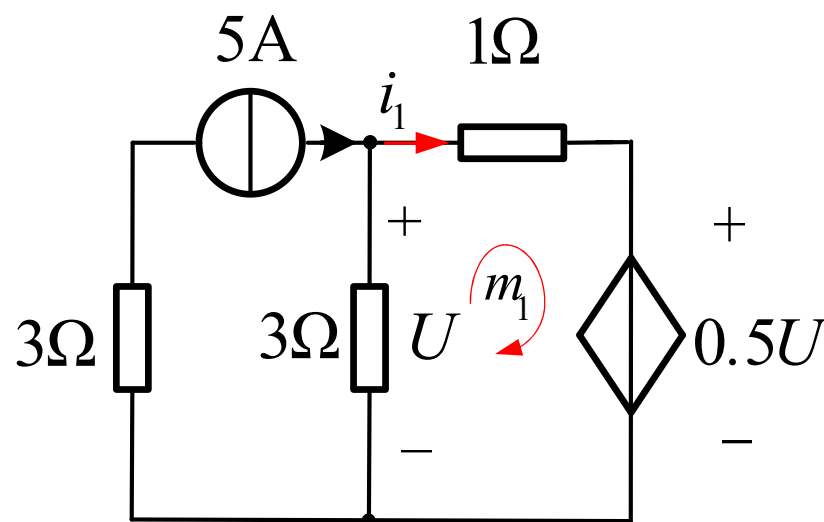
练习1：求 U_{AB}



KCL: $i_1 = 2A$

KVL: $U_{AB} = 1 \times 1 + 2 \times 1 = 3V$

练习2：求 U 及受控源的功率.



$$\text{KVL: } i_1 = 0.5U$$

$$\text{KCL: } \frac{U}{3} + 0.5U - 5 = 0$$

$$U = 6\text{V}$$

$$P = 0.5U \times 0.5U = 9\text{W}$$

吸收 9W

计划学时：6学时；课后学习18学时

作业：

1-8， 1-10 电路变量

1-14 功率

1-19 KCL\KVL

1-27， 1-30 综合应用

课时计划:

6课时

➤ 1.1~ 1.2

➤ 1.3~1.4

➤ 1.5