

# 1.1 电路定律、基本电量与数的基本设定、材料介绍

## core concepts:

- 1.基本电量：电流；电位，电压；电动势；电阻、电导；功率
- 2.直流电流、交流电流（以及直流分量、交流分量）
- 2.广义欧姆定律（GOL）：**描述端口电压电流关系的方程**又称为**元件约束方程**也被称为广义欧姆定律
- 3.基尔霍夫定律（KVL和KCL）：**描述系统、电路、器件、元件连接关系**（也就是电路的空间结构）
- 4.dB表示数（dBm、dBW、dBμV、dBV、dB（功率和电压两种计算方式，注意电压需要乘20，电压乘10））

## 基本电量

- 电流
  - 电动势
  - 电压
  - 功率
- 顺带说明电路基本定律（[基尔霍夫定律](#)+欧姆定律）

### 1.1.1 电流Current:

电动势（EMF, electromotive force）提供了一个电场，在电场力作用下带电粒子沿电场力方向定向移动，形成定向电流。通过某个截面的电流*I*等于单位时间Delta-t内流过这个截面的电荷量Delta-q的大小

- 电流真实方向为正电荷移动方向
  - 可人为定义电流方向，这个方向称为**参考方向**
  - 如果参考方向和实际电流方向相同，电流值则为正值
  - 如果参考方向和实际电流方向相反，电流值则为负值
- 如果电流方向**始终朝一个方向，且电流值恒定**，则称之为直流电流DC Current（DC = Direct Current）（DC Current是约定俗成的称呼）
- 如果**电流大小和方向随时间有变化，且电流平均值为零**，则称之为交流电流AC Current（Alternating Current） **注意平均值为0的要求**

真实电流信号可分解为直流分量与交流分量之和

$$i(t) = I_{DC} + i_{ac}(t)$$
$$I_{DC} = \overline{i(t)} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} i(t) dt$$
$$i_{ac}(t) = i(t) - \overline{i(t)}$$

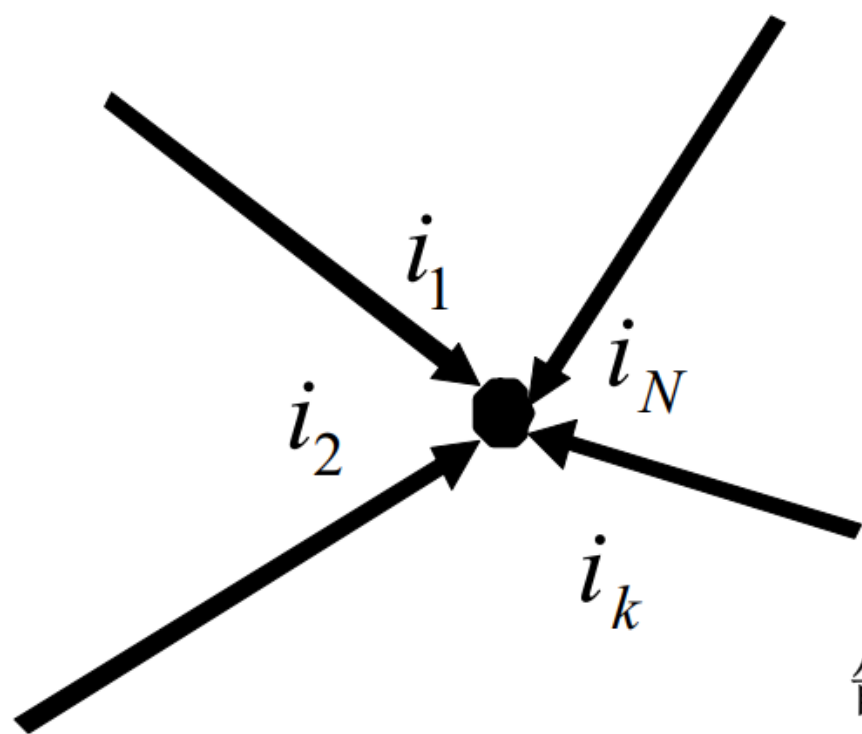
周期信号**T**取周期  
非周期信号**T**取无穷大

$$\overline{i_{ac}(t)} = \overline{i(t) - \overline{i(t)}} = \overline{i(t)} - \overline{\overline{i(t)}} = 0$$

上式是因为从数学上定义，**直流量定义为不随着时间变化而变化的平均值**，**交流量是扣除平均值后的随时间变化而变化的电流量**，**因此其平均值一定是0**

### 1.1.2 [基尔霍夫电流定律](#) Kirchhoff's Current Law:KCL

和某结点相连的所有支路上的电流之和为零（支路可以是电阻、电容、电感、电源...支路）  
KCL直接对应了电荷守恒定律。



$$\sum_{k=1}^N i_k = 0$$

意味着电荷守恒

箭头方向为参考方向，如果实际电流方向和参考方向同，则电流值为正，如果实际电流方向和参考方向反，则电流值为负

注意箭头朝向，必须是箭头全部指向该节点才能使用电流之和为0，否则要先转换箭头方向（对应电流值也要取相反数）

### 1.2.1 电动势：

移动单位电荷需要的能量大小，定义为电动势（大小）

$$\mathfrak{J} = \frac{\Delta E}{\Delta q}$$

电动势代表的是让单位电荷运动起来的电能量大小：这个能量可由化学反应产生，如电池；也可由发电机将机械能转换而来；或者以其他方式将某种形式的能量转换获得

1伏特的电动势意味着产生电动势的电源移动1库仑电荷会把1焦耳能量从其他能量转换为电能

### 1.2.2 电源：electric source

可产生电动势的电路器件被称为电源，凡是可将某种形式的能量转换为电能和设备或器件，均可建模为电源元件。

可产生直流电流的电源称为直流电源，可产生交流电流的电源称为交流电源

PS：如果我们仅仅利用的是电源提供的电能量，则称之为power supply，中文翻译仍然是电源；如果我们还利用其中电的变化所表征的信息，这种电源被称为signal generator, signal source，中文译文为信号源（信号源都是交流电源；为电路供能的多为直流电源）

电源的电动势就是电源的开路电压（整个电路断路，开路电压就是电动势）

### 1.3.1 电压Voltage：

电荷量为q的电荷在电场中受到电场力的作用而从A点移到B点时，电场对电荷做功为W。A点到B点的电压为电场对单位电荷移动所作的功的大小

电压反映了电场对电荷的做功能力。两点之间电压越大，移动相同电荷量的电荷做功越多。

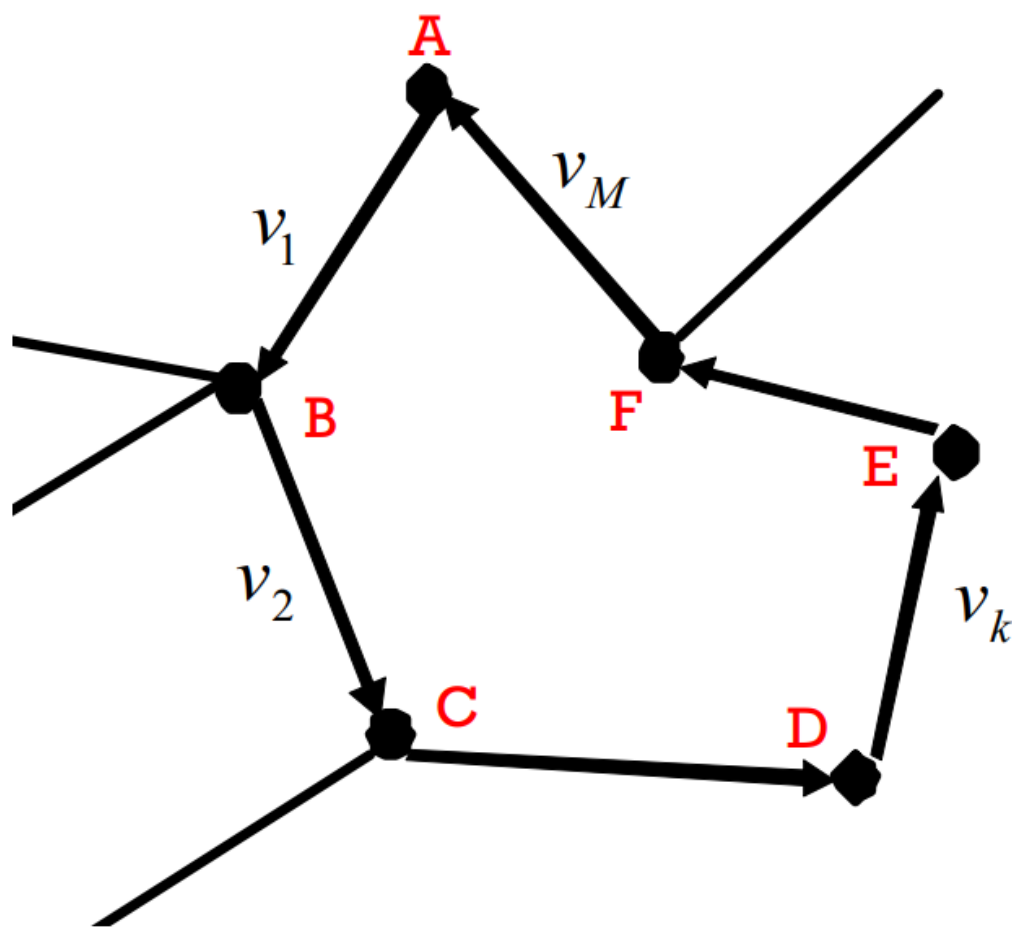
电场提供1焦耳的电能将1库仑的电荷从A点移到B点，A点到B点的电压则为1伏特

- 电压方向为电场移动正电荷运动的方向，也就是电场方向
- 可人为设定电压方向，称为电压的参考方向
- 如果参考方向和电压实际方向相同，电压记正值
- 如果参考方向和电压实际方向相反，电压记负值

### 1.3.2 基尔霍夫电压定律 Kirchhoff's Voltage Law:KVL

本定律可以表达为两点之间电压和路径无关，两点之间电压等于分电压之和，

规范表述为：一个闭合回路中的电压总和为零



$$\sum_{k=1}^M v_k = 0 \quad \text{意味着能量守恒}$$

箭头方向为参考方向，如果实际电压方向和参考方向同，则电压值为正，如果实际电压方向和参考方向反，则电压值为负

关于箭头指向要求，和KCL的类似。

## 2.4.1 电位与电压

电压是两个点之间的电位差，电位 (potential) 是某个点的对地电压大小

A到B点的电压记为 $v_{AB}$ ，是A点的电位 $\varphi_A$ 与B点的电位 $\varphi_B$ 之差，即  $v_{AB} = \varphi_A - \varphi_B$

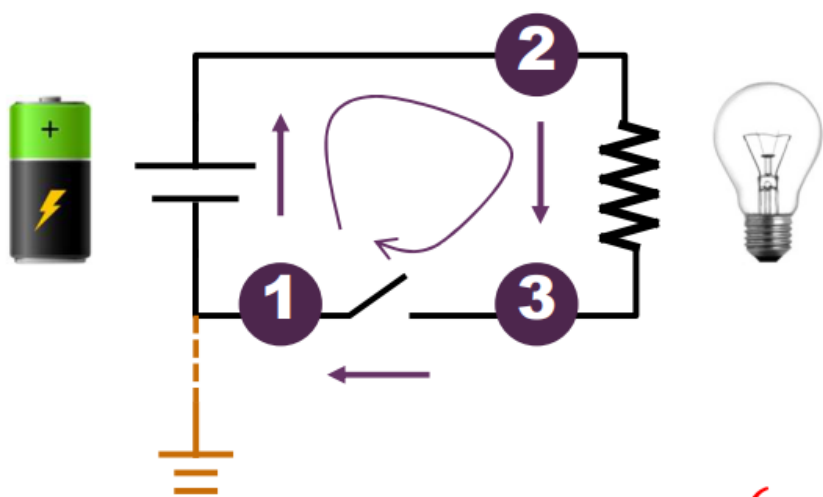
说到“电位”就必须要有个参考地G (Ground)，A点的电位就是A点到参考地的电压 $v_{AG}$

参考地的电位被人为规定为0V，因此A点的电位大小=A点的电压 (相对G) 大小

一般电压都是两点之间的电压，因此说某一个点的电压一定隐含了参考地

参考地的选择是人为规定的，地是人为规定的基准参考点，其电位被规定为0

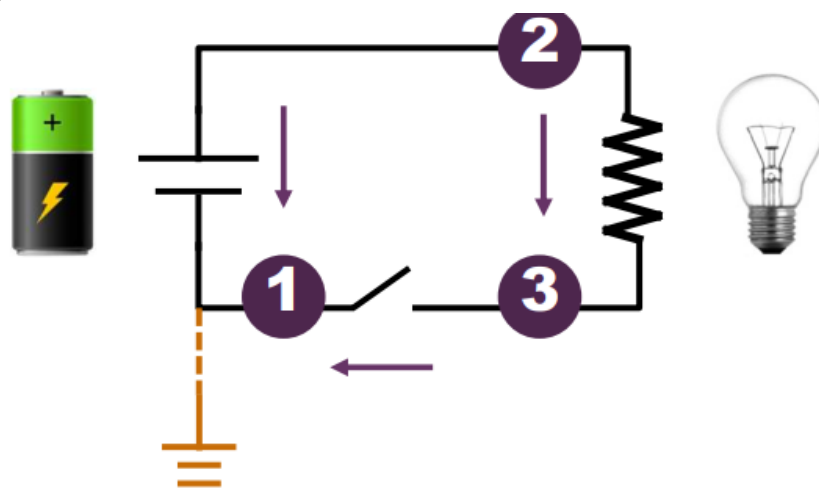
### KVL的不同说法



环路一周总电压为0

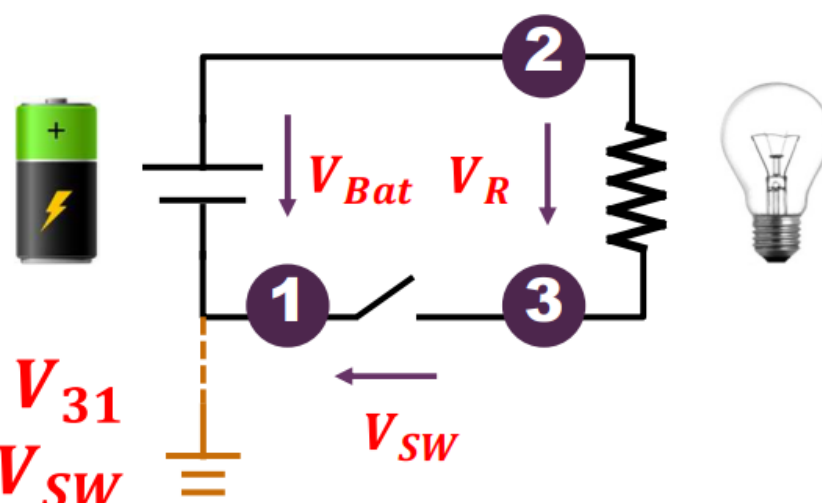
$$\begin{aligned} V_{12} + V_{23} + V_{31} &= 0 \\ &= (\varphi_1 - \varphi_2) + (\varphi_2 - \varphi_3) + (\varphi_3 - \varphi_1) \end{aligned}$$

电路中规定一个零电压地，各个结点电压均为对地电压，**KVL**方程则自动满足，电路分析无需再列写**KVL**方程



两点间电压和路径无关

$$\begin{aligned} V_{21} &= V_{23} + V_{31} \\ (\varphi_2 - \varphi_1) &= (\varphi_2 - \varphi_3) + (\varphi_3 - \varphi_1) \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} V_{21} &= V_{23} + V_{31} \\ V_{Bat} &= V_R + V_{SW} \end{aligned}$$

总电压等于分电压之和

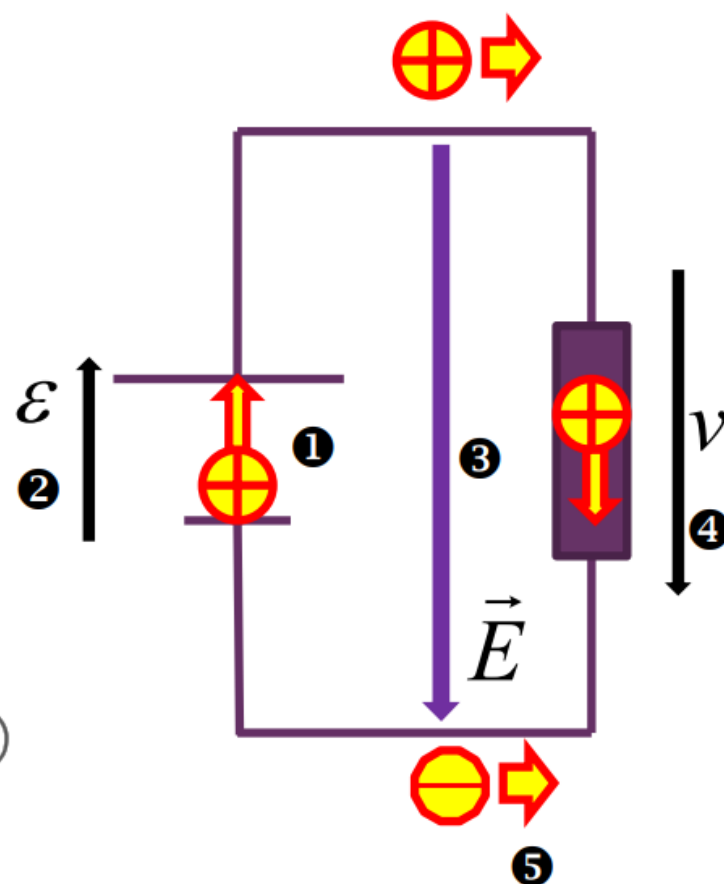


$$V_{AB} = \varphi_A - \varphi_B = (\varphi_A - \varphi_G) - (\varphi_B - \varphi_G) = V_A - V_B, \text{ 也就是 } V_{AB} + V_{GA} + V_{BG} = 0 \rightarrow KVL$$

### 2.4.2 电动势与电压:

■ 化学反应、机械运动等能量形式做功，移动正电荷从电源负端到正端①，正负电荷在正负极的积累可理解为在电动势作用下正电荷从电源负极移动到正极② 负极留下负电荷，正负电荷在正负极的积累使得电源对外形成从正端到负端的外部电场③，该外部电场可对电池外部电荷做功，对外提供电能

- 电动势移动电荷后，在电池外部形成电场（电压）④，它可对电荷做功，从而电荷移动起来⑤
- 电能形式被转换为电荷运动能量形式，在电阻中，这个能量被进一步转换为热能



某种能量形式 → (电动势) → 电场 (电能) → (电压) → 其他能量形式

### 2.4.1 功率Power

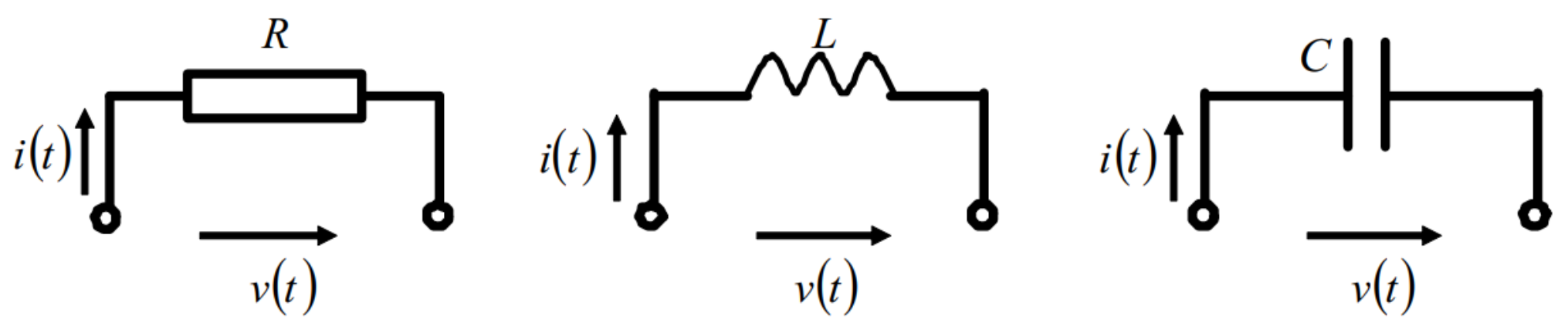
- 电路器件在电路中可能消耗或者吸收能量，这些能量可视为电场力对该器件所作的功
  - 电路器件消耗或吸收的功率为单位时间内电场对该器件所作的功
  - 电场做功是通过电荷移动实现的：电场对电荷做功以电压形式体现，电荷因而移动以电流形式体现，故而

$$p = \frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{\Delta W}{\Delta q} \cdot \frac{\Delta q}{\Delta t} = v \cdot i$$

- 即，器件吸收的功率等于该器件两端电压和流过该器件电流的乘积
- 功率单位：瓦特：W：  $1\text{W}=1\text{J/s}=1\text{V}\cdot\text{A}$

NOTICE: 这里的 $v$ 和 $i$ 的参考方向必须都是沿电场方向或者都是逆电场方向, 这被称为[关联参考方向](#) (associated reference directions) 此时正功率表示器件从外部吸收功率 (消耗电能), 负功率表示器件向外部释放功率 (释放电能)

三个基本元件的功率分析（电阻、电感、电容）：



元件约束条件

$$v(t) = R \cdot i(t)$$

欧姆定律

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

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

广义欧姆定律

1 电阻元件：

$$p(t) = v(t) \times i(t) = R \cdot i^2(t) \geq 0$$

恒大于等于0，纯消耗电能

$$\Delta E_R(\Delta t) = \int_{t_0}^t p_R(t) dt = R \cdot \int_{t_0}^t i^2(t) dt \geq 0$$

只要这段时间内有不为零的电流，电阻就一定是消耗电能的，进而转化为热能、光能等形式散发出去，电阻是耗能元件。

2 电容元件

$$p_C(t) = v(t) \cdot i(t) = C \cdot v(t) \cdot \frac{dv(t)}{dt}$$

电容功率正负不定：是吸收还是释放？

$$\begin{aligned} \Delta E_C(\Delta t_1) &= \int_{t_0}^{t_1} p_C(t) dt = C \cdot \int_{t_0}^{t_1} v(t) \cdot \frac{dv(t)}{dt} dt = C \cdot \int_{t_0}^{t_1} v(t) \cdot dv(t) \\ &= \frac{1}{2} C v^2(t) \Big|_{t_0}^{t_1} = \frac{1}{2} C v^2(t_1) - \frac{1}{2} C v^2(t_0) \end{aligned}$$

- 如果电容初始电压 $v(t_0) = 0$ ，则电容吸收能量  $\Delta E_C(\Delta t_1) = \frac{1}{2} C v^2(t_1)$
- 否则 $\Delta E_C(\Delta t) = \int_{t_1}^{t_2} p_C(t) dt = \dots = \frac{1}{2} C v^2(t_2) - \frac{1}{2} C v^2(t_1)$
- 假设电容电压 $v(t_2) = 0$ ，则电容吸收能量为 $\Delta E_C(\Delta t_2) = -\frac{1}{2} C v^2(t_1)$  此时吸收能量为负，说明电容在释放能量，而且释放电能刚好等于之前吸收的电能，说明电容可以将吸收的电能全部释放出去，故电容是无损元件，是储能元件。
- 进而可以定义电容储能为 $E_C(t) = \frac{1}{2} C v^2(t)$

3.电感器件

类似于电容，可以定义电感储能  $E_L(t) = \frac{1}{2} L i^2$

PS：导体电阻吸收能量被转换为热能耗散，电容吸收的电能则转化为电荷累计于导体节点的形式储存，电感吸收的电能以磁通量 $\Phi$ 累计于导线回路的形式储存

$$Q(t) = C v(t); \Phi(t) = L i(t)$$

电荷Q累积代表电能储存，磁通 $\Phi$ 累积代表磁能储存

$$E_C(t) = \frac{1}{2} Q(t) v(t) = \frac{Q^2(t)}{2C}$$

$$E_L(t) = \frac{1}{2}\Phi(t)i(t) = \frac{\Phi^2(t)}{2L}$$

小结：

电路系统由单元电路的链接构造，单元电路由电路器件的连接构造，电路器件可以等效为电路元件和电路器件的连接，电路基本元件有四个：电源、电阻、电容和电感。

电路系统、单元电路、电路器件、电路元件的功能由其端口电压电流关系描述

- 描述端口电压电流关系的方程又称为元件约束方程：广义欧姆定律
- 描述系统、电路、器件、元件连接关系的是KVL和KCL方程：基尔霍夫定律

PS：电压是电场的空间离散化抽象，电流是磁场的空间离散化抽象，因而电路问题是电磁场问题的一种特殊形态

2.数的基本设定

常用电量的符号和单位

科学计数法

工程计数法

SI词头

dB数表述

1.2.1 常用电量的符号和单位

3.1 常用电量的符号和单位

| 电量中文 | 电量英文           | 符号     | SI单位  | 单位符号 | 源于      |
|------|----------------|--------|-------|------|---------|
| 电压   | voltage        | V, U   | 伏【特】  | V    | Volt    |
| 电流   | current        | I      | 安【培】  | A    | Ampere  |
| 电阻   | resistance     | R      | 欧【姆】  | Ω    | Ohm     |
| 电导   | conductance    | G      | 西【门子】 | S    | Siemens |
| 能量   | Energy<br>Work | E<br>W | 焦【耳】  | J    | Joule   |
| 功率   | Power          | P      | 瓦【特】  | W    | Watt    |
| 电荷   | charge         | Q      | 库【仑】  | C    | Coulomb |
| 电容   | capacitance    | C      | 法【拉】  | F    | Farad   |
| 电感   | inductance     | L      | 亨【利】  | H    | Henry   |

1.2.2 工程计数法（Engineering Notation）

- 和工程计数法密切相关的一种前缀表示称为SI词头表示法，是日常生活和电子工程中被实际采用的方便的表述方法

| 10的幂方             | 词头符号 | 词头名称  | 中文称呼 |
|-------------------|------|-------|------|
| 10 <sup>-15</sup> | f    | femto | 飞    |
| 10 <sup>-12</sup> | p    | pico  | 皮    |
| 10 <sup>-9</sup>  | n    | nano  | 纳    |
| 10 <sup>-6</sup>  | μ    | micro | 微（缪） |
| 10 <sup>-3</sup>  | m    | milli | 毫    |
| 10 <sup>-2</sup>  | c    | centi | 厘    |
| 1                 |      |       |      |
| 10 <sup>2</sup>   | h    | hecto | 百    |
| 10 <sup>3</sup>   | k    | kilo  | 千（剋） |
| 10 <sup>6</sup>   | M    | mega  | 兆    |
| 10 <sup>9</sup>   | G    | giga  | 吉    |
| 10 <sup>12</sup>  | T    | tera  | 太    |

### 1.2.3 dB数表述

在比较数的相对大小时，dB数表述可以解决数值在多个数量级上变化难以分明的问题：其采用对数方法压缩数值的相对表达范围。以功率表达为例：

- 设线性表示的功率值为a，对数表示的功率值为b
- a如果为1W，则等量dB数表述为30dBm

$$b = 10 \log_{10} \frac{a}{1 \text{单位功率}} \left( dB \text{功率单位} \right)$$
$$a = 10^{\frac{b}{10}} \times 1 \text{单位功率}$$

常用表述：dBm dBW dBμV dB



$$\text{功率: } P \Rightarrow 10 \log_{10} \frac{P}{1mW}: dBm$$

$$\log_{10} 2 = 0.3$$

$$\text{功率: } P \Rightarrow 10 \log_{10} \frac{P}{1W}: dBW$$

$$10 \log_{10} 2 = 3dB$$

$$\text{电压: } U \Rightarrow 20 \log_{10} \frac{U}{1\mu V}: dB\mu V$$

3dB代表2倍的功率比值关系

$$\text{功率相对值: } \frac{P_o}{P_i} \Rightarrow 10 \log_{10} \frac{P_o}{P_i}: dB$$

■ dB数表示中，求对数的值一定是相对比值（无量纲数）

$$\text{电压相对值: } \frac{V_o}{V_i} \Rightarrow 20 \log_{10} \frac{V_o}{V_i}: dB$$

注意电压前面乘的是20，20正好是电压平方提取出来（ $10 \times 2$ ）。

这是因为我们在dB数表述中更加关注的是功率之比：

功率是一个标量（只有大小，没有方向），而电压和电流是矢量（既有大小，又有方向）。在比较和测量信号强度时，我们通常更关心功率的大小，而不是电压或电流的方向。因此，将电压或电流的dB数转换为功率的dB数可以简化问题，使我们更容易理解和比较不同信号的强度。

## 1.2.4 有效位数

例题和作业中的数值计算，一般取三位/四位有效位数就足够了。

## 3. 器件基础

- 材料分类
- 半导体基础
- PN结