

## $\vec{E}$ 的计算

叠加法  $dq$  (各种典型带电体)  $\rightarrow d\vec{E} \rightarrow \vec{E}$   
 高斯定理 (对称性)  
 电势梯度  $\vec{E} = -\nabla U$

## 电通量 $\Phi_e$

$$\Phi_e = \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S}$$

## $U$ 的计算

叠加法  $dq$  (各种典型带电体)  $\rightarrow dU \rightarrow U$

场强积分

$$U_P = \int_P^{\text{零势点}} \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

零势点选取; 分段积分

## 典型带电体的电场分布

**$\vec{B}$  的计算**

叠加法

$$\begin{cases} Id\vec{l} \rightarrow d\vec{B} \text{ (毕---萨定律)} \rightarrow \vec{B} \\ dI \text{ (各种典型电流元)} \rightarrow d\vec{B} \rightarrow \vec{B} \\ \text{带电体旋转 } dI = dq \frac{\omega}{2\pi} \end{cases}$$

安培环路定理 (对称性)

**磁通量  $\Phi_m$**

$$\Phi_m = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

**磁矩  $\vec{P}_m$**

$$\begin{aligned} d\vec{P}_m &= dI S \vec{e}_n \\ \vec{P}_m &= \int d\vec{P}_m \end{aligned}$$

**磁力  $\vec{F}_m$ 、磁力矩  $\vec{M}$**

$$\begin{cases} \vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B} \\ d\vec{F}_m = Id\vec{l} \times \vec{B} \\ \vec{F}_m = \int d\vec{F}_m \\ \vec{M} = \vec{P}_m \times \vec{B} \end{cases}$$

**典型电流的磁场分布**

# 磁介质(magnetic medium)

在考虑物质与磁场的相互影响时，任何实物物质都是**磁介质**。



设外场磁感应强度 $\vec{B}_0$ ，介质磁化后附加磁场 $\vec{B}'$

$$\text{磁介质中磁场: } \vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$$

相对磁导率 (relative permeability)  $\mu_r = \frac{B}{B_0}$

- 反映磁介质对原场的影响程度。
- $\mu_r$  随磁介质的种类和状态的不同而不同。  
对真空,  $\mu_r = 1$ 。

# 磁介质(magnetic medium)的分类

在考虑物质与磁场的相互影响时，任何实物物质都是磁介质。

电介质放入外场  $\vec{E}_0 \longrightarrow \vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}' \longrightarrow |\vec{E}'| < |\vec{E}_0|$

磁介质放入外场  $\vec{B}_0 \longrightarrow B/B_0 = \mu_r$  相对磁导率

抗磁质  $\mu_r < 1 \longrightarrow B < B_0$  减弱原磁场  
如水、锌、铜、水银、铅、铋、硫等

顺磁质  $\mu_r > 1 \longrightarrow B > B_0$  增强原磁场  
如空气、氧、氮、铝、锰、铬、铂等

弱磁性物质  
 $\mu_r$  都非常接近于1。

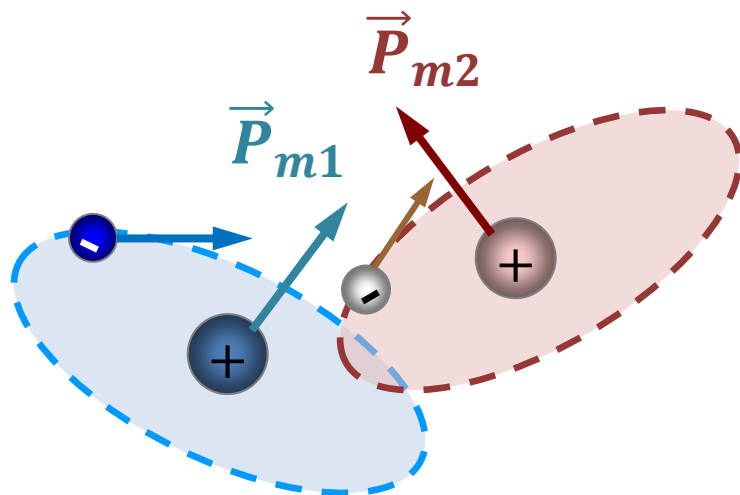
铁磁质  $\mu_r \gg 1$  ( $10^2 \sim 10^4$ ) 通常不是常数

具有显著的增强原磁场的性质 --- 强磁性物质

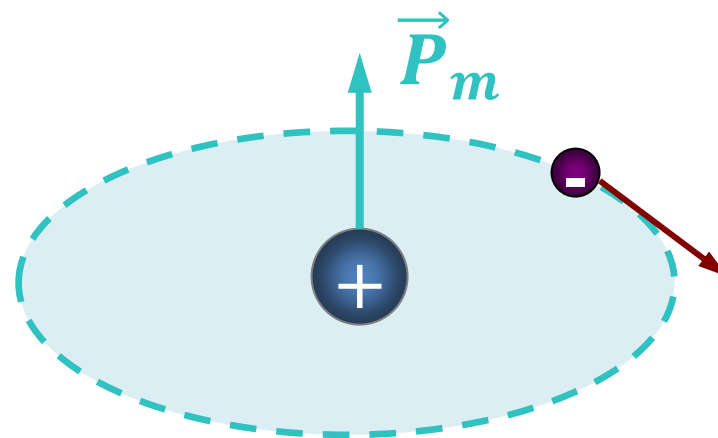
超导材料  $\mu_r = 0$  ( $B = 0$ ) 完全抗磁性

# 分子磁矩(molecular magnetic moment)

分子或原子中各电子绕核运动和自旋运动等效于“分子电流”；  
分子电流的磁矩称为“分子磁矩”，表示为 $\vec{P}_m$



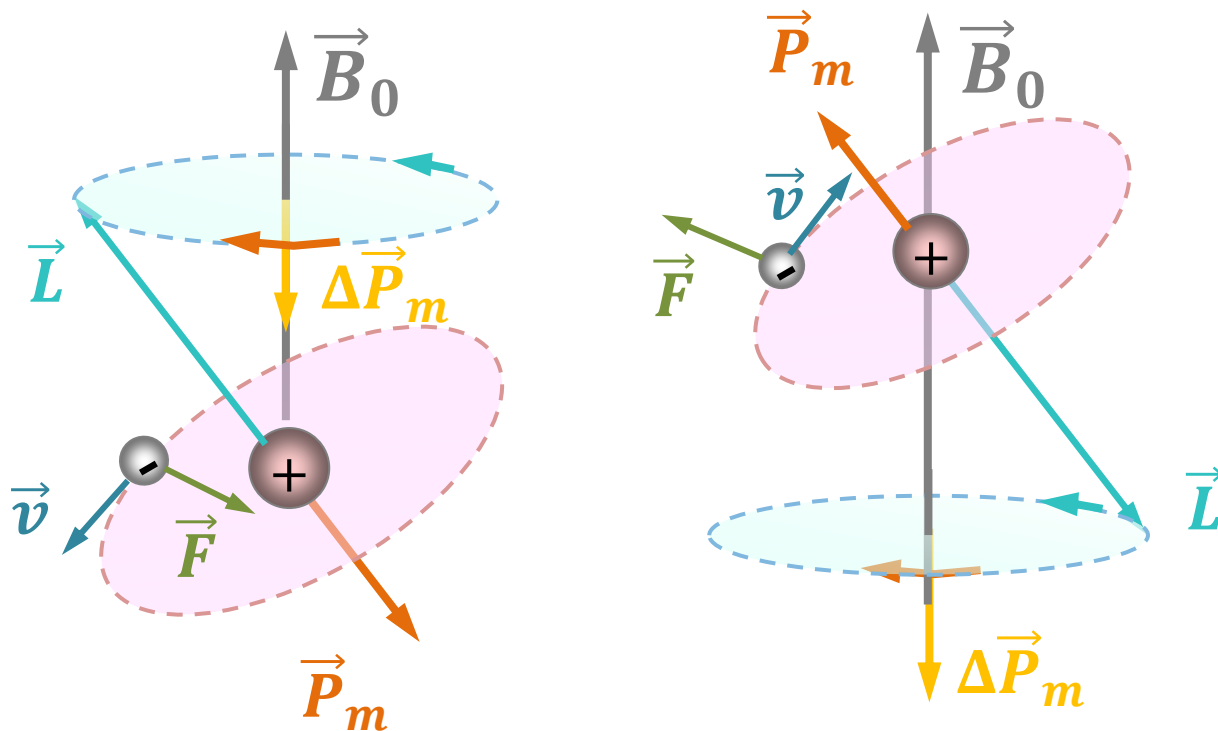
各原子磁矩



分子磁矩

# 分子磁矩(molecular magnetic moment)

电子在外磁场中的旋进产生与 $\vec{B}_0$ 方向相反的附加磁矩 $\Delta\vec{P}_m$



- 附加磁矩  $\Delta\vec{P}_m$  总是与外磁场  $\vec{B}_0$  反向

对于整个分子，附加磁矩  $\Delta\vec{P}_m$

磁化机理

■ 安培分子环流理论

原子中电子的轨道磁矩

$$\vec{P}_L = -\frac{e}{2m}\vec{L}$$

电子的自旋磁矩

$$\vec{P}_S = -\frac{e}{m}\vec{S}$$

}

电子自旋磁矩  
与轨道磁矩有  
相同的数量级

分子磁矩

---所有电子磁矩的总和

$$\vec{P}_m = \sum_i \vec{P}_{m_i}$$

抗磁质

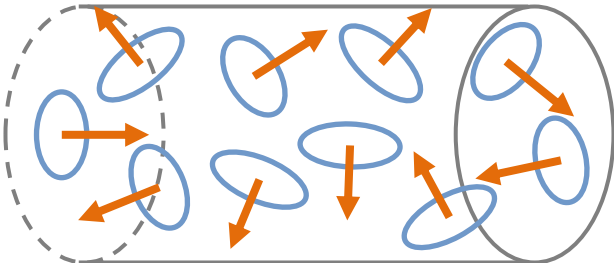
$$\vec{P}_m = 0$$

无外场作用时，对外不显磁性

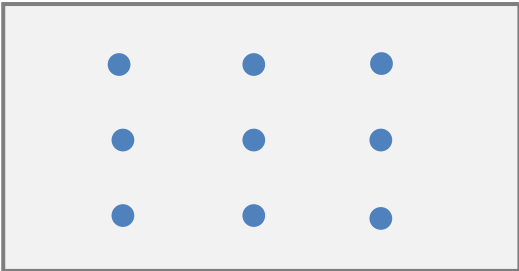
顺磁质

$$\vec{P}_m \neq 0$$

无外场作用时，由于热运动，  
对外也不显磁性



$$\sum \vec{P}_m = 0$$

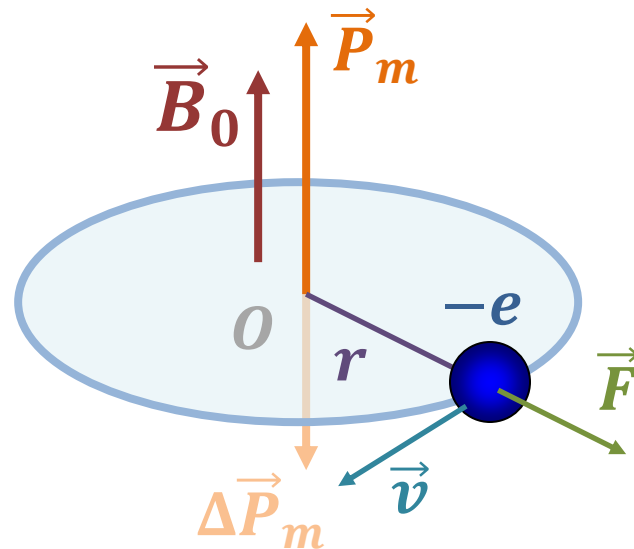


## 磁介质的磁化

- 外场方向与原子磁矩方向相同时

$$\vec{F} \longrightarrow \omega \downarrow \longrightarrow \vec{P}_m \downarrow (\Delta \vec{P}_m)$$

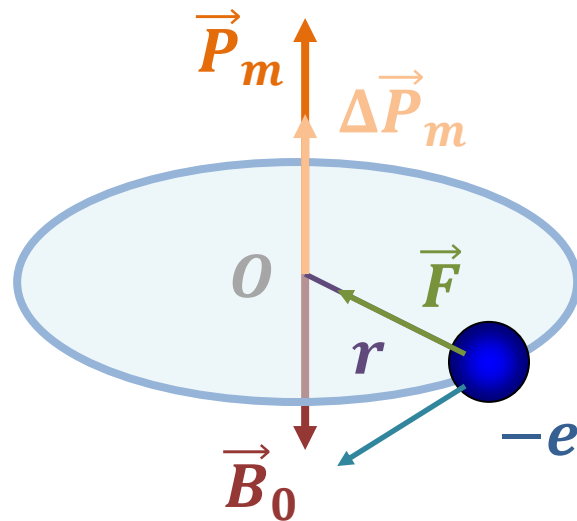
电子轨道半径不变



- 外场方向与原子磁矩反方向时

$$\vec{F} \longrightarrow \omega \uparrow \longrightarrow \vec{P}_m \uparrow (\Delta \vec{P}_m)$$

- ◆ 在外场作用下，电子产生附加的转动，从而形成附加的  $\Delta \vec{P}_m$ ，附加磁矩（也称感应磁矩）总是与外场方向  $\vec{B}_0$  相反，即产生与外场反向的附加磁  $\vec{B}'$ 。





# 磁介质的磁化

- 抗磁质磁化

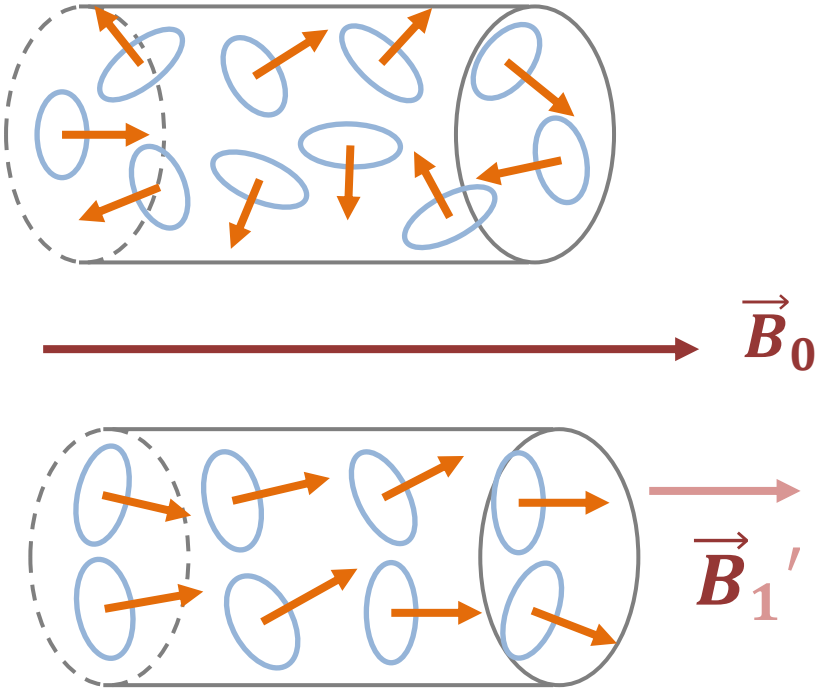
在外场作用下，每个分子中的所有电子都产生感应磁矩  $\Delta \vec{P}_m$

则磁介质产生附加磁场  $\vec{B}' = \sum \Delta \vec{B}' \longrightarrow$  与外场方向相反

- 顺磁质磁化

分子电流在外场作用下，产生取向转动，磁矩将转向外场方向---宏观上产生附加磁场 $\vec{B}'$

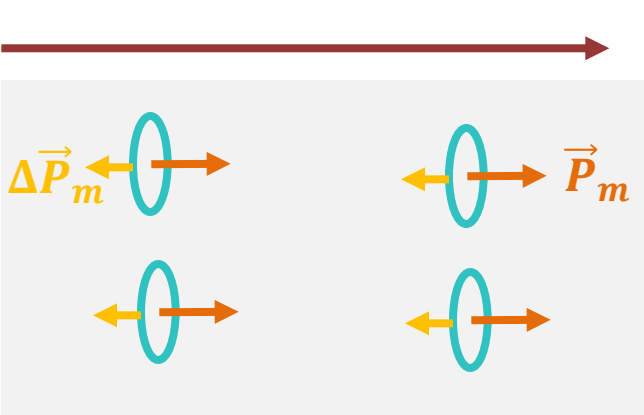
在外场作用下，分子磁矩要转向，同时每个分子中的所有电子也都产生感应磁矩。



磁介质产生附加磁场  $\longrightarrow$  与外磁场方向相同

磁介质的磁化

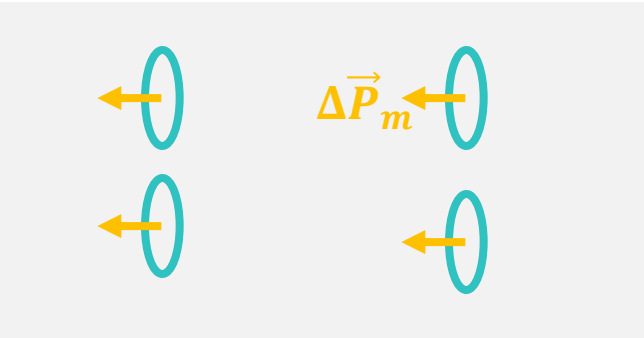
宏观效果：介质中总磁矩不为零



● 顺磁质

$$\sum \vec{p}_m + \sum \Delta \vec{p}_m \approx \sum \vec{p}_m \neq 0$$

与 $\vec{B}_0$ 同向



● 抗磁质

$$\sum \Delta \vec{p}_m \neq 0$$

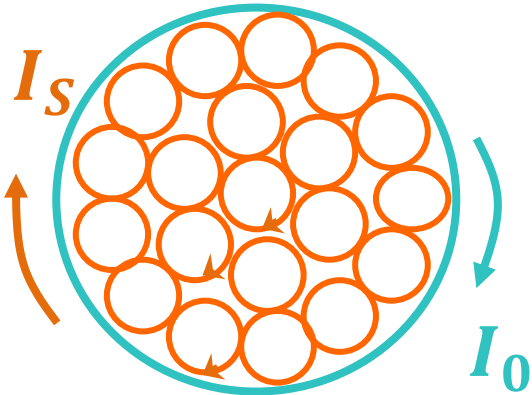
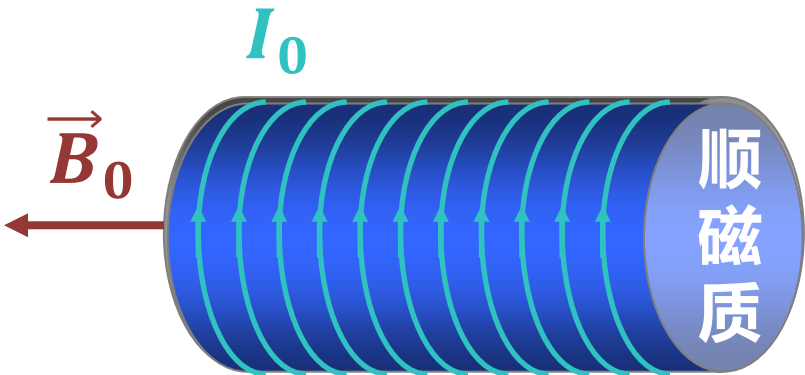
与 $\vec{B}_0$ 反向

# 束缚电流（磁化电流）

□ 以无限长螺线管为例

- 在磁介质内部的任一小区域：  
相邻的分子环流的方向相反
- 在磁介质表面处各点：  
分子环流未被抵消

形成沿表面流动的面电流（磁化电流）  
 $I_s$  --- 束缚电流



磁化强度

$$\vec{M} = \frac{\sum \vec{p}_m + \sum \Delta \vec{p}_m}{\Delta V}$$

磁化电流密度

$$j_s = M$$

◆ 介质中磁场由传导和束缚电流共同产生。



$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \oint_S \vec{B}_0 \cdot d\vec{S} + \oint_S \vec{B}' \cdot d\vec{S} = 0$$

- 磁介质存在时，磁感应线仍是一系列无头无尾的闭合曲线。

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

磁介质内，磁感应强度 $\vec{B}$ 沿任一闭合曲面的面积分等于零。  
---磁介质中的磁高斯定理

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum_{L\text{内}} I$$

$\vec{B}_0$   
传导电流  
磁感应强度

+

$\vec{B}'$   
磁化电流  
磁感应强度

=

$\vec{B}$   
总  
磁感应强度

$$= \mu_0 \sum_{L\text{内}} (I_0 + I_s) = \mu_0 \left( \sum_{L\text{内}} I_0 + \oint_L \vec{M} \cdot d\vec{l} \right)$$

传导  
电流

磁化  
电流

$$\oint_L \left( \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \right) \cdot d\vec{l} = \sum_{L\text{内}} I_0$$

定义：磁场强度  $\vec{H}$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$$

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_{L\text{内}} I_0$$

磁介质内，磁场强度 $\vec{H}$ 沿任一  
闭合回路的线积分等于穿过该  
回路的传导电流的代数和。

---磁介质中的安培环路定理

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_{L \text{ 内}} I_0$$

## 磁介质中的安培环路定理

磁介质存在时，磁感应线仍是一系列无头无尾的闭合曲线。

$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l}$  只与穿过  $L$  的传导电流代数和有关。

- 对各向同性磁介质，在外磁场不太强的情况下：

由  $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$

$\vec{M} = \chi_m \vec{H}$  磁化率

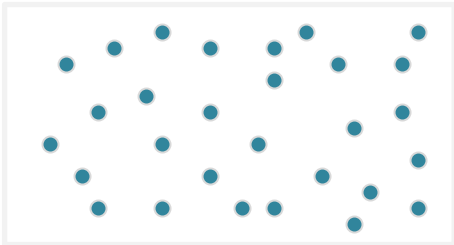
$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$   
 $= \mu_0(1 + \chi_m)\vec{H}$   
 $= \mu_0\mu_r\vec{H}$   
 $= \mu\vec{H}$

介质相对磁导率  $\mu_r = 1 + \chi_m$

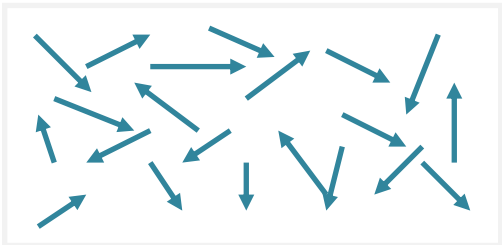
介质磁导率  $\mu = \mu_0\mu_r$

	电介质	磁介质
分子模型	电偶极子	分子电流 { 分子中所有电子, 原子核固有磁矩的等效电流
分类	<div><div>□ 无极分子电介质</div><div><math>\vec{p}_e \neq 0 \quad \sum \vec{p}_e = 0</math></div><div>□ 无极分子电介质</div><div><math>\vec{p}_e = 0 \quad \sum \vec{p}_e = 0</math></div></div>	<div><div>□ 顺磁质</div><div><math>\vec{p}_m \neq 0 \quad \sum \vec{p}_m = 0</math></div><div>□ 抗磁质</div><div><math>\vec{p}_m = 0 \quad \sum \vec{p}_m = 0</math></div></div>

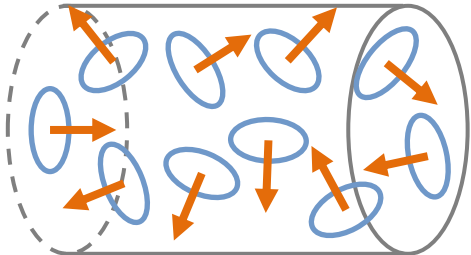
无外磁场:



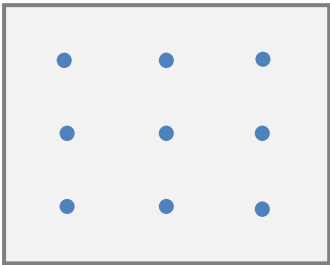
无极分子电介质



有极分子电介质



顺磁质



抗磁质<sup>5</sup>

	电介质	磁介质
与场相互作用机制	<p>转向极化 位移极化</p> $\sum \vec{p}_e \neq 0$	<p>均产生与<math>\vec{B}_0</math>反向的附加磁矩 <math>\Delta \vec{p}_m</math></p> <p>抗磁质：只有 <math>\sum \Delta \vec{p}_m</math></p> <p>顺磁质：转向 + 附加磁矩</p> $\sum \vec{p}_m + \sum \Delta \vec{p}_m \approx \sum \vec{p}_m$
描述	<p>极化强度 <math>\vec{P} = \frac{\sum \vec{p}_e}{\Delta V}</math></p> <p>极化电荷 <math>\sigma' = P_n</math></p> $\oint_s \vec{P} \cdot d\vec{S} = - \sum_{s内} q'$	<p>磁化强度 <math>\vec{M} = \frac{\sum \vec{p}_m + \sum \Delta \vec{p}_m}{\Delta V}</math></p> <p>抗： <math>\vec{M} = \frac{\sum \Delta \vec{p}_m}{\Delta V}</math> 与 <math>\vec{B}_0</math> 反向</p> <p>顺： <math>\vec{M} \approx \frac{\sum \vec{p}_m}{\Delta V}</math> 与 <math>\vec{B}_0</math> 同向</p> <p>磁化电流 <math>j_s = M</math></p> $\oint_L \vec{M} \cdot d\vec{l} = \sum_{穿过L} I_s$



		电介质	磁介质
比较磁介质与电介质	介质中的场	$\begin{array}{c} \vec{E}_0 \rightarrow \vec{P} \rightarrow q'(\sigma', \rho') \\ \uparrow \qquad \qquad \downarrow \\ \vec{E} \leftarrow \vec{E}' + \vec{E}_0 \end{array}$	$\begin{array}{c} \vec{B}_0 \rightarrow \vec{M} \rightarrow I_s(j_s) \\ \uparrow \qquad \qquad \downarrow \\ \vec{B} \leftarrow \vec{B}' + \vec{B}_0 \end{array}$
	基本规律	<p>电位移矢量</p> $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$ <p>电介质中的高斯定理</p> $\oint_s \vec{D} \cdot d\vec{S} = \sum_{s内} q_0$	<p>磁场强度</p> $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$ <p>磁介质中的安培环路定理</p> $\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_{穿过L} I_0$

	电介质	磁介质
其它对应关系	$\begin{aligned}\vec{P} &= \chi_e \epsilon_0 \vec{E} \\ \epsilon_r &= 1 + \chi_e \\ \vec{D} &= \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E}\end{aligned}$	$\begin{aligned}\vec{M} &= \chi_m \vec{H} \\ \mu_r &= 1 + \chi_m \\ \vec{B} &= \mu_0 \mu_r \vec{H}\end{aligned}$
求解思路	<p>◆ 对称性分析，选高斯面</p> $\oint_s \vec{D} \cdot d\vec{S} = \sum_{s内} q_0$ <p>求<math>\vec{D}</math> 由 <math>\vec{E} = \frac{\vec{D}}{\epsilon_0 \epsilon_r}</math>，求 <math>\vec{E}</math></p>	<p>◆ 对称性分析，选安培环路</p> $\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum_{穿过L} I_{内}$ <p>求<math>\vec{H}</math> 由 <math>\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}</math>，求 <math>\vec{B}</math></p>

介质分布具有对称性；自由电荷、传导电流分布具有对称性；介质各向同性。

## 铁磁质

**主要特征** { 在外场中，铁磁质可使原磁场大大增强。  
撤去外磁场后，铁磁质仍能保留部分磁性。

### ● 磁畴---磁化微观机理

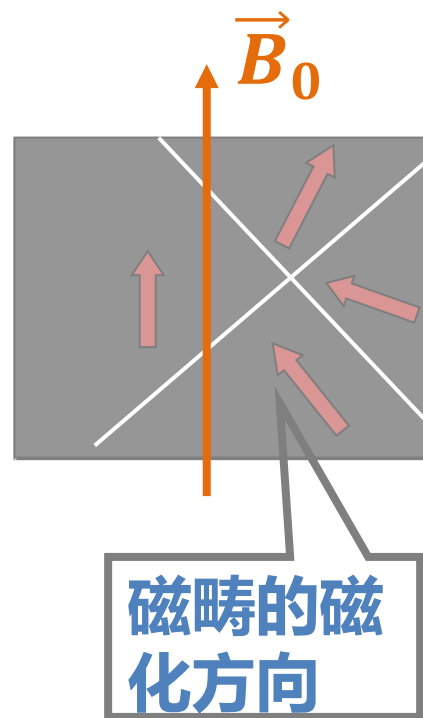
铁磁质中自发磁化的小区域叫**磁畴**，  
磁畴中电子的自旋磁矩整齐排列。

无  $\vec{B}_0$  --- 整个铁磁质的总磁矩为零

有  $\vec{B}_0$  磁化方向与 $\vec{B}_0$ 同向的磁畴扩大  
磁化方向转向 $\vec{B}_0$ 的方向

**→ 使磁场大大增强**

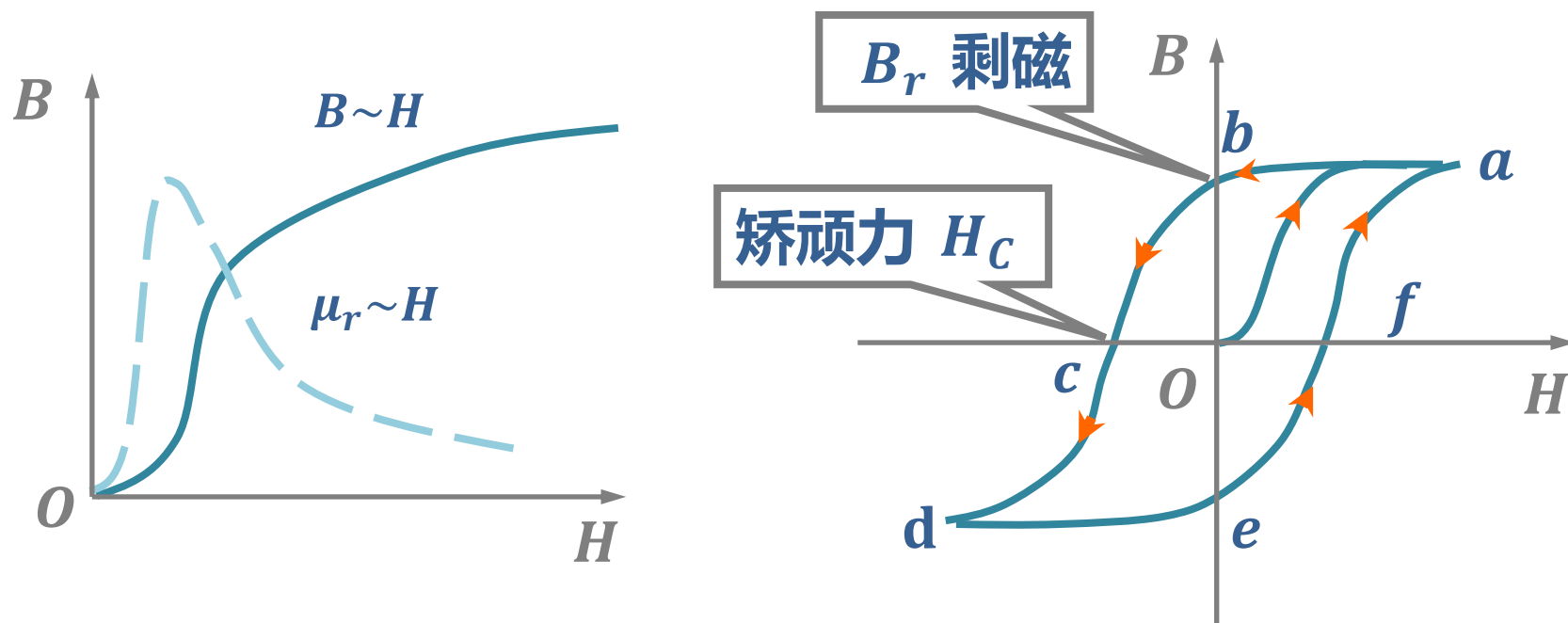
外场撤去，被磁化的铁磁质受体内杂质和  
内应力的阻碍，不能恢复磁化前的状态。



## 铁磁质

### ● 宏观磁化现象 --- 磁滞回线

铁磁质中  $B \Leftrightarrow H$  不是线性关系

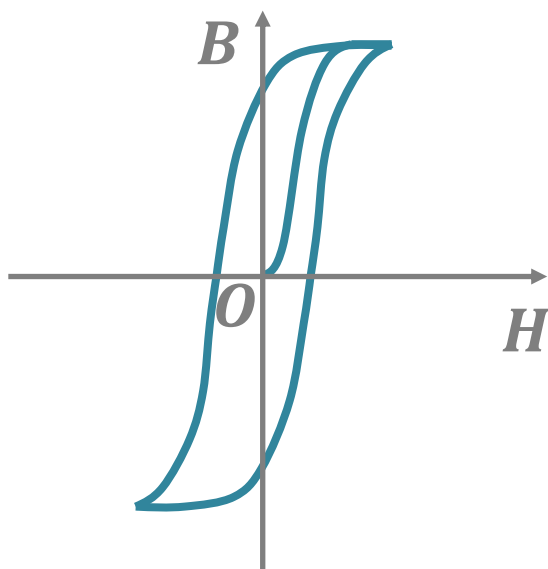


- ◆ 实验证明：各种铁磁质的磁化曲线都是“不可逆”的，具有磁滞现象。
- ◆ 不同材料，矫顽力不同。

## 铁磁质

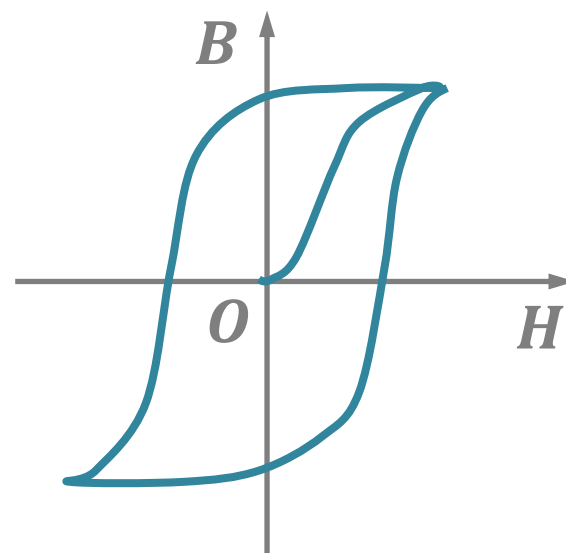
铁磁质温度高于某一温度 $T_c$ 时, 铁磁质转化为顺磁质, 此临界温度称为**居里点**。

### ● 铁磁材料的应用



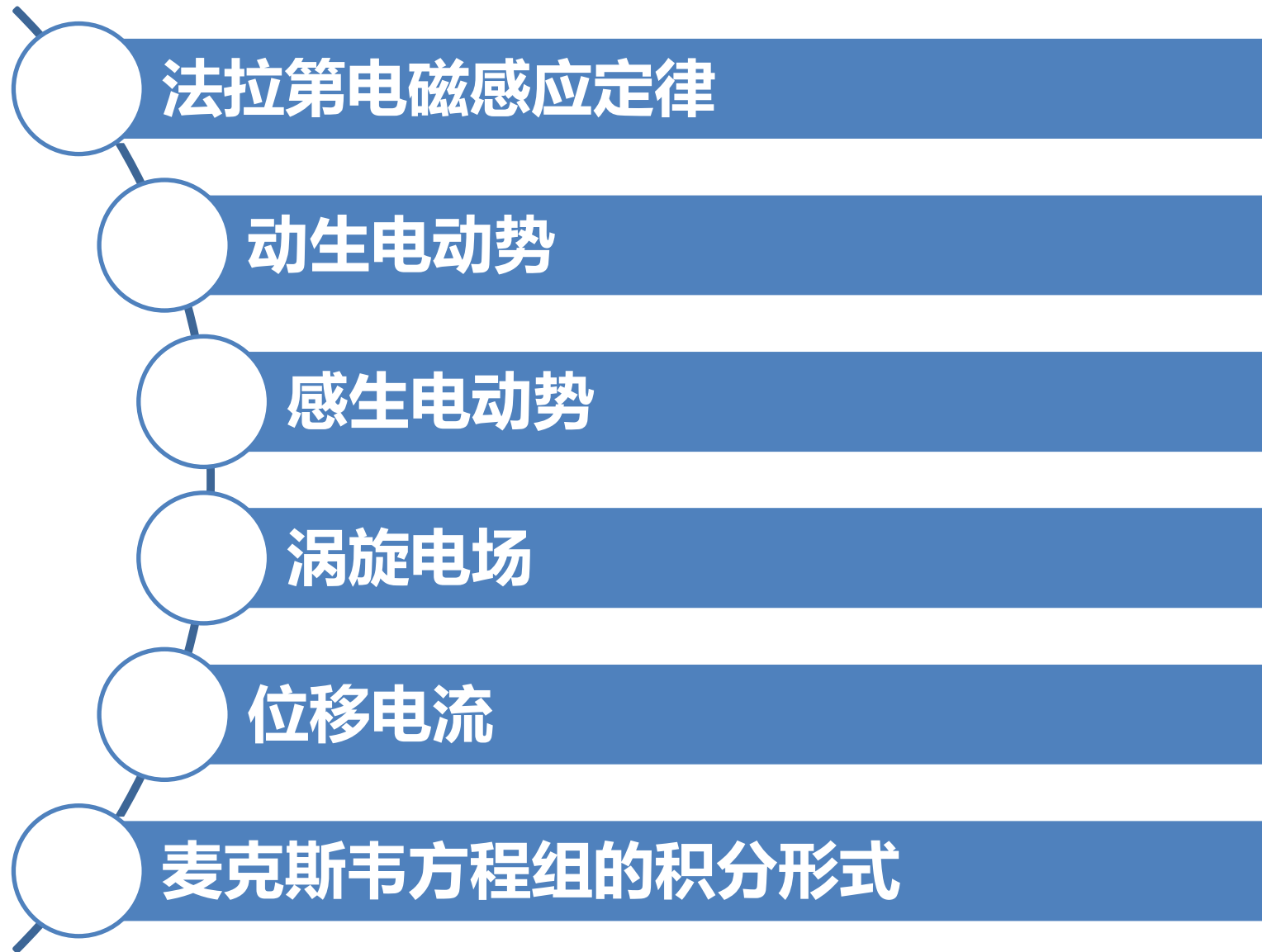
软磁材料  $H_C$ 较小

- ◆ 易磁化, 易退磁
- ◆ 可作变压器、电机、电磁铁的铁芯



硬磁材料  $H_C$ 较大

- ◆ 剩磁较强, 不易退磁
- ◆ 可作永久磁铁





电流的形成

单位时间内通过导体内某一面积的电荷量称为通过该面积的**电流**。

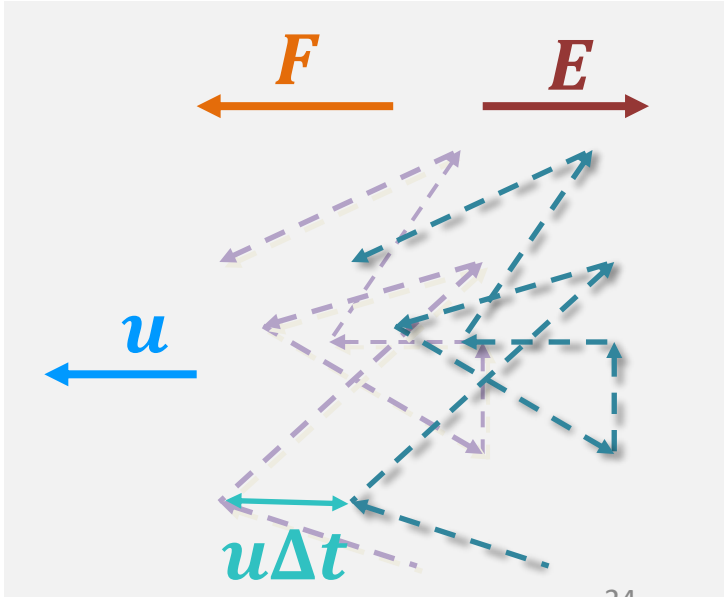
$$I = \frac{dq}{dt}$$

电  
流

- 传导电流
  - 载流子 自由电子、正负离子、电子---空穴对、库柏对、孤子...
  - 电场 ---维持电荷作定向移动
- 运流电流 电子或宏观带电体在空间的定向机械运动。
- 位移电流 变化的电场等价而来。

- 金属导电的经典解释：

电场中，自由电子除热运动外，叠加定向加速运动；频繁碰撞使加速运动间断进行，其平均效果为定向匀速运动 ---**漂移运动**。





电流强度

单位时间内通过导体任一截面的电量为电流强度, 简称**电流**。

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

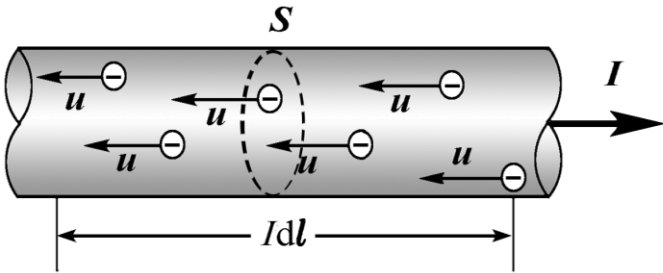
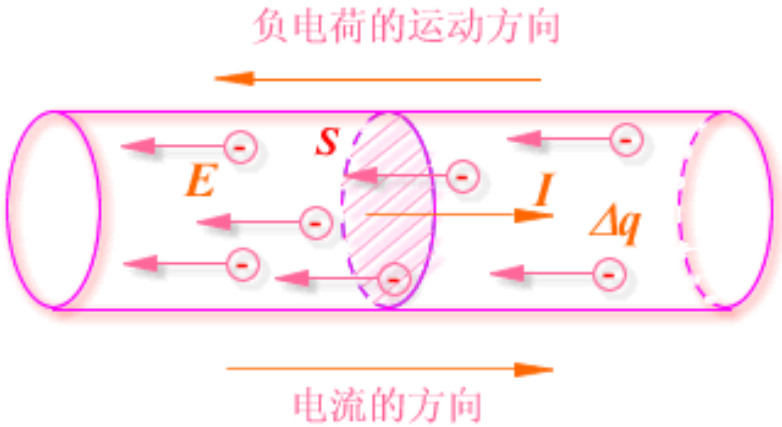
◆  $I$  标量

习惯上用正载流子的流动方向代表电流的方向。

◆ 单位: 安培(A)

在SI制中, 规定电流强度为基本量, 1s内通过导体任一截面的电荷为1C的电流强度称为1A, 即 $1\text{A} = 1\text{C}/1\text{s}$ 。

第26届国际计量大会通过“修订国际单位制”决议, 将1A定义为“1s内  $(1/1.602176634) \times 10^{19}$  个电子移动所产生的电流强度”。



$q$  载流子带电量  
 $n$  载流子数密度  
 $u$  定向移动的平均速率  
 $S$  横截面积  
则单位时间内通过该截面的电量为  
 $Q = qnuS$

电流密度矢量  $\vec{j}$

$$\vec{j} = \frac{dI}{dS_{\perp}} \vec{n}_0 = qn\vec{u}$$

**方向：**该点正电荷漂移运动 ( $\vec{E}$ ) 方向。  
**大小：**等于在单位时间内过该点附近垂直于正电荷运动方向的单位面积的电荷量。

$$dI = qn u dS_{\perp} = qn u dS \cos\theta$$

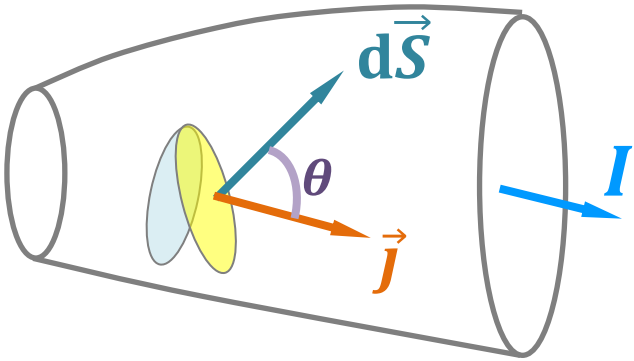
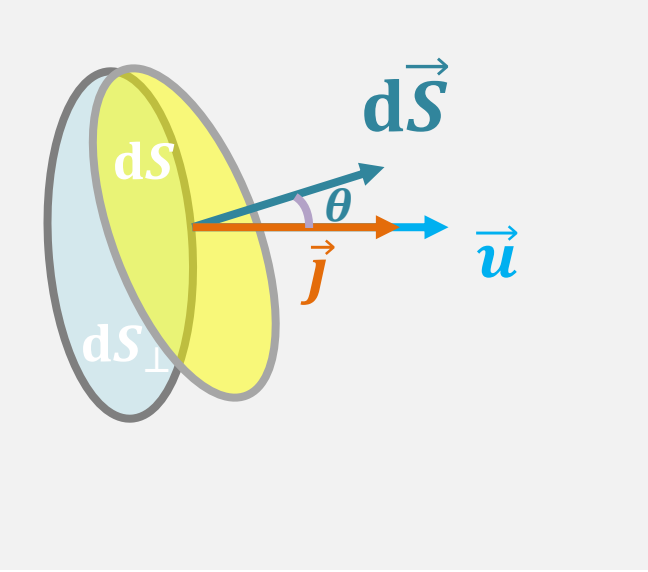
$$j = \frac{dI}{dS_{\perp}} = qnu$$

正电荷  $\vec{j}$ 、 $\vec{u}$  同向  
负电荷  $\vec{j}$ 、 $\vec{u}$  反向

➡  $dI = \vec{j} \cdot d\vec{S}$

$$I = \int_s \vec{j} \cdot d\vec{S}$$

- 通过某截面的电流强度等于电流密度矢量  $\vec{j}$  穿过该面积的通量。



电流密度矢量  $\vec{j}$

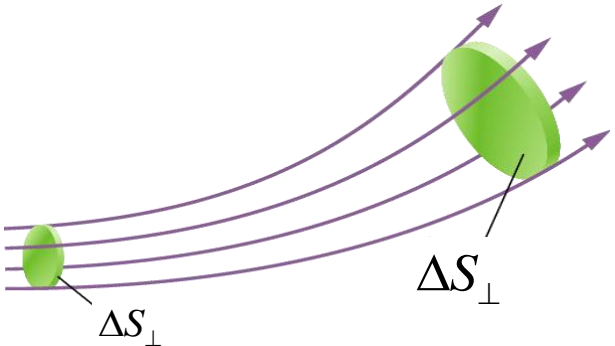
方向：该点正电荷漂移运动 ( $\vec{E}$ ) 方向。

$\vec{j} = \frac{dI}{dS_{\perp}} \vec{n}_0 = qn\vec{u}$  大小：等于在单位时间内过该点附近垂直于正电荷运动方向的单位面积的电荷量。

$j = \frac{dI}{dS_{\perp}} = \frac{dI}{dS \cos \theta} = qnu$  电流管：由电流线围成的管状区域。

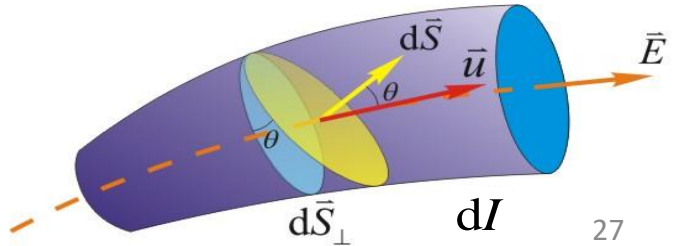
单位：安培·米<sup>-2</sup> (A·m<sup>-2</sup>)

电流密度矢量 构成 电流场 (矢量场)



电流线：为形象描述电流场中电流的分布，实际为电流密度矢量线。

分布：电流线 { 切向 即  $\vec{j}$  方向  
疏密  $\propto j$  大小



- (1) 若每个铜原子贡献一个自由电子，问铜导线中自由电子数密度为多少？
- (2) 家用线路电流最大值 15A，铜导线半径0.81mm，此时电子漂移速率多少？
- (3) 铜导线中电流密度均匀，电流密度值多少？

解：(1) 
$$n = \frac{N_A \rho}{M}$$
$$= 8.48 \times 10^{28} \text{个/m}^3$$

(2) 
$$v_d = \frac{I}{nSe}$$
$$= 5.36 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 2 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$$

(3) 
$$j = \frac{I}{S}$$
$$= \frac{15}{\pi \times (8.10 \times 10^{-4})^2} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2} = 7.28 \times 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$$

一段电路的欧姆定律  $U = IR$

焦耳定律  $Q = I^2 R \Delta t$

电阻定律  $R = \underbrace{\rho}_{\text{电阻率}} \frac{L}{S}$

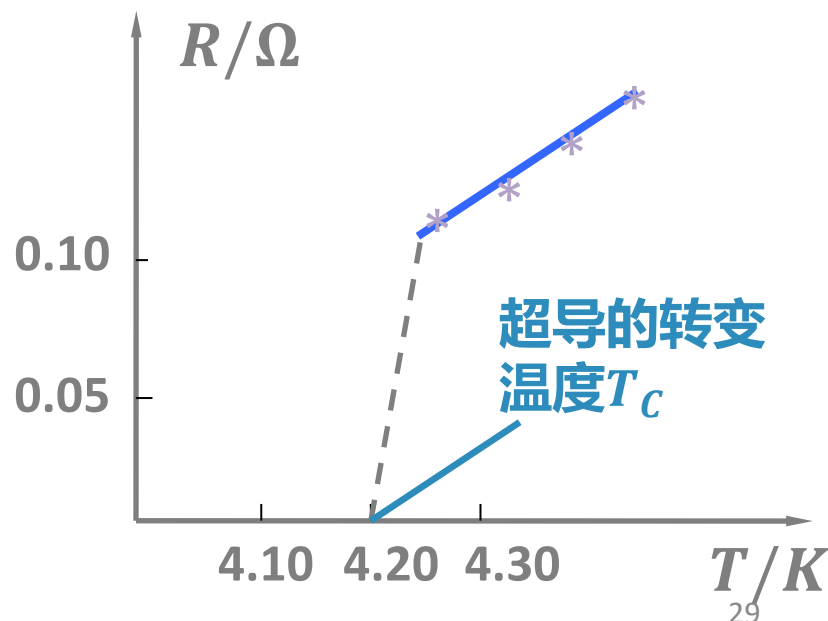
$R = \frac{L}{\underbrace{\gamma}_{\text{电导率}} S}$

电阻率（电导率）不但与材料的种类有关，而且还和温度有关，一般金属在温度不太低时

$$\rho_2 = \rho_1 [1 + \underbrace{\alpha}_{\text{电阻的温度系数}} (T_2 - T_1)]$$

## □ 超导体

有些金属和化合物在降到接近绝对零度时，它们的电阻率突然减小到零，这种现象叫**超导**。

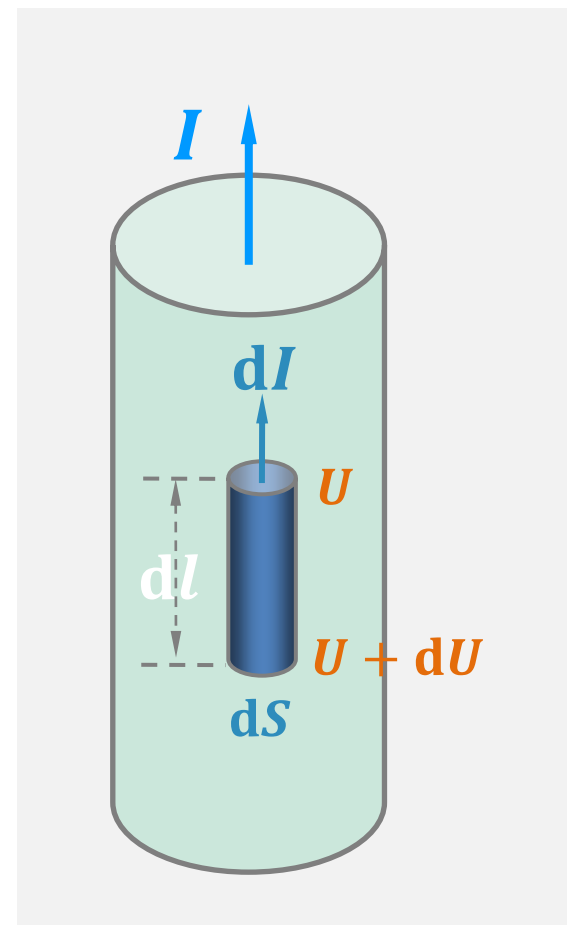


$$dI = \frac{dU}{R} \quad R = \frac{\rho dl}{dS}$$

$$\Rightarrow dI = \frac{1}{\rho} \frac{dU}{dl} dS$$

$$\Rightarrow \frac{dI}{dS} = \frac{1}{\rho} \frac{dU}{dl} = \frac{1}{\rho} E = \gamma E$$

- 表明任一点的电流密度 $\vec{j}$ 与电场强度 $\vec{E}$ 方向相同，大小成正比。



**欧姆定律 微分形式:**

$$\vec{j} = \gamma \vec{E}$$

- 一般金属或电解液，欧姆定律在相当大的电压范围内是成立的，但对于许多导体或半导体，欧姆定律不成立，这种非欧姆导电特性有很大的实际意义，在电子技术，电子计算机技术等现代技术中有重要作用。

欧姆定律 微分形式:  $\vec{j} = \gamma \vec{E}$

焦耳定律 微分形式:  $w = \gamma E^2$

{ 电流的形成及其热效应都是场作用的结果。  
电流密度  $\vec{j}$  , 电流的热功率密度  $w$  , 与场强  $\vec{E}$  点对点。

## 稳恒电流

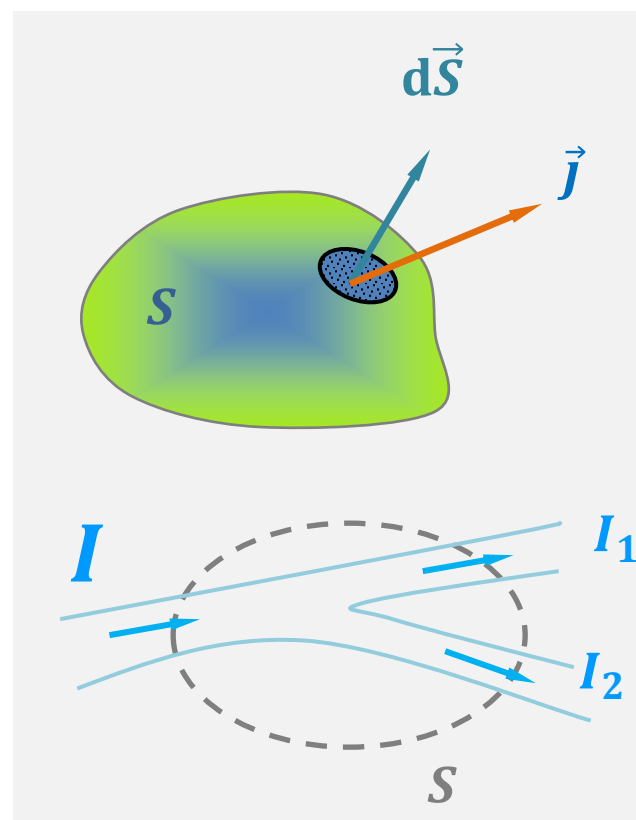
$$\oint_S \vec{j} \cdot d\vec{S} = 0$$

单位时间内通过闭合曲面向外流出的电荷，等于此时间内闭合曲面里电荷的减少量，即闭合曲面的电量保持不变。

$$\oint_S \vec{j} \cdot d\vec{S} = \frac{dQ}{dt} = -\frac{dQ_i}{dt}$$

若闭合曲面 $S$ 内的电荷不随时间而变化，则  $\frac{dQ_i}{dt} = 0$

- 在恒定电流情况下，导体中电荷分布不随时间变化形成恒定电场；
- 恒定电场与静电场具有相似性质（高斯定理和环路定理），恒定电场可引入电势的概念；
- 恒定电场的存在伴随能量的转换。



$$-I + I_1 + I_2 = 0$$



## □ 恒定电流

导体内各处电流密度 $\vec{j}$ 不随时间变化的电流。

$$\oint_S \vec{j} \cdot d\vec{S} = 0$$

在恒定条件下，通过同一电流管的任意横截面的电流相等，电流场不随时间变化。

条件：穿过封闭曲面 $S$ 的 $\vec{j}$ 通量为零。

- 恒定电流一定是闭合的，或两端通向无穷远。  
(在无穷远处闭合)

## □ 恒定电场

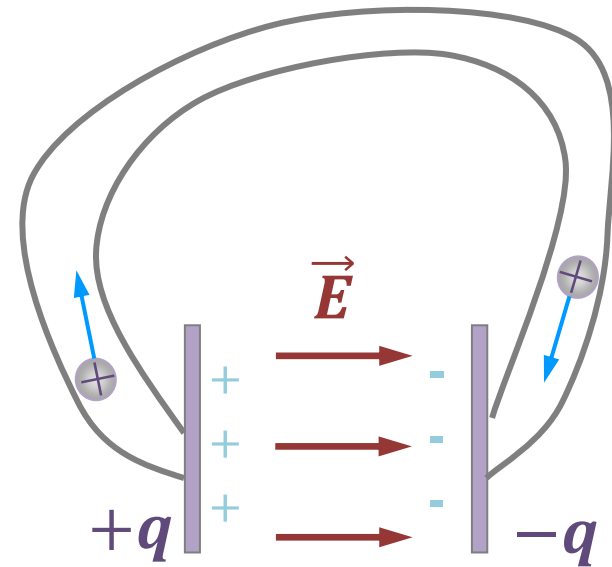
在恒定电流情况下，虽然存在电荷定向运动，但导体内电荷的分布和导体内、外的电场分布不随时间变化。

恒定电流与恒定电场

	相 同	不 同
静 电 场	$Q$ 、 $\vec{E}$ 分布不随时间化 高斯定理适用 环路定理适用	$I = 0$ 导体内 $\vec{E} = 0$ 一经建立，不需能量维持。
恒 定 电 场	$\oint_s \vec{D} \cdot d\vec{S} = \sum_{s\text{内}} q_0$ 有源场 $\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$ 保守场	$I = \text{恒量}$ 导体内 $\left\{ \begin{array}{l} \vec{E} \neq 0 \\ \vec{E} \text{分布不变} \end{array} \right.$ 其存在一定伴随能量转换。

- 在恒定电流情况下, 导体中电荷分布不随时间变化形成恒定电场;
- 恒定电场与静电场具有相似性质 (高斯定理和环路定理), 恒定电场可引入电势的概念;
- 恒定电场的存在伴随能量的转换。

图示为电容器放电产生的电流。  
这种随时间减少的电荷分布不可能产生稳恒电场，也不可能形成稳恒电流。



非静电力  $\rightarrow$  维持稳定电荷分布  $\rightarrow$  稳恒电场  $\rightarrow$  稳恒电流

□ 非静电力  $\vec{F}_k$

能不断分离正负电荷，使正电荷逆静电场力方向运动。

## □ 电源

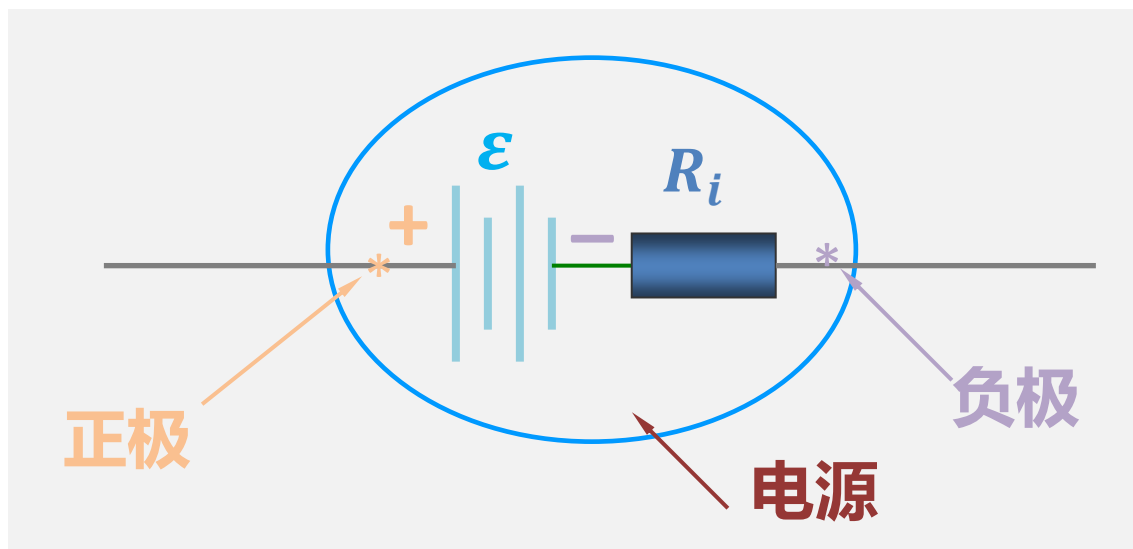
提供非静电力 $\vec{F}_k$ ，将其他形式能量转变为电能的装置。

作用： $\vec{F}_k$ 反抗 $\vec{F}_e$ 做功，将正电荷由负极经电源内部移向正极，保持两极间电势差，以形成持续的电流。

## □ 电源电动势 $\varepsilon$

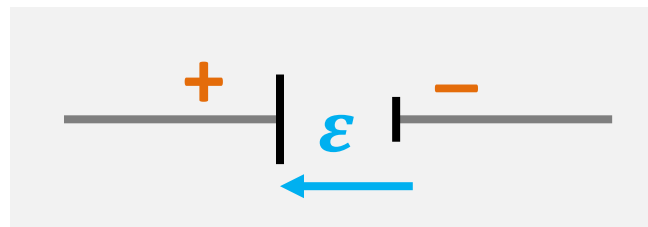
等于将单位正电荷由负极经**电源内部**移到正极时非静电力所做的功。

可量度电源将其他形式能转变为电能的能力大小。



电源的电动势 $\varepsilon$  和内阻  $R_i$

规定指向:

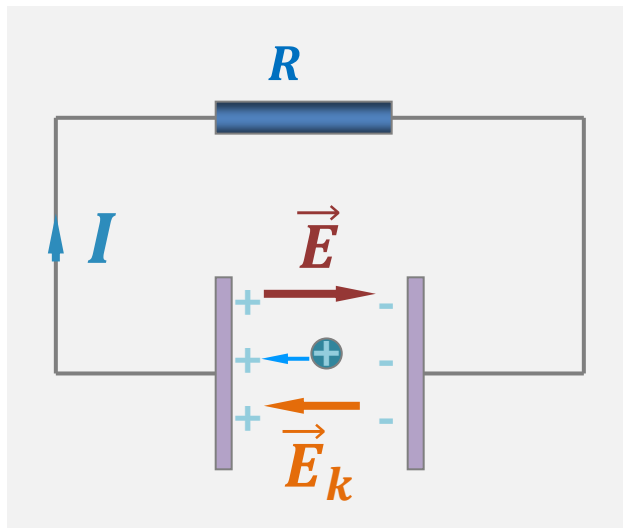
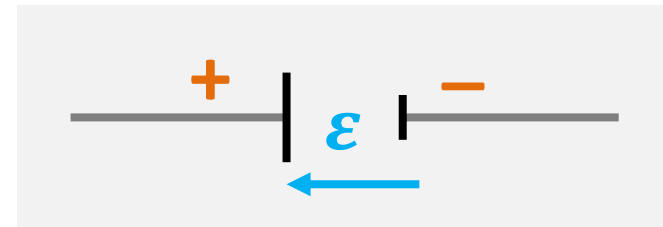


# □ 电源电动势 (electromotive force, EMF) $\varepsilon$

等于将单位正电荷由负极经电源内部移到正极时非静电力所做的功。 单位：伏特(V)

规定指向：

$$\varepsilon = \frac{A_k}{q} = \int_{-}^{+} \vec{E}_k \cdot d\vec{l}$$



## □ 非静电场强 $\vec{E}_k$

为单位正电荷所受的非静电力。

$$\vec{E}_k = \frac{\vec{F}_k}{q}$$

- $\vec{E}_k$  只在内电路存在。

□ 静电力和非静电力搬运单位正电荷绕闭合回路一周做功：

$$A = \oint_L (q\vec{E}_k + q\vec{E}) \cdot d\vec{l}$$

$$= q \oint_L \vec{E}_k \cdot d\vec{l} + q \oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$$

● 稳恒电场是保守场

→  $A = q \oint_L \vec{E}_k \cdot d\vec{l}$  →  $\varepsilon = \frac{A_k}{q} = \oint_L \vec{E}_k \cdot d\vec{l}$

◆ 电动势在量值上等于非静电力移动单位正电荷绕闭合回路运动一周所作的功。

或者说等于非静电场强在闭合回路上的环流。

□ 若  $\vec{E}_k$  只存在于内电路 (电源内部) , 则  $\varepsilon = \int_{-}^{+} \vec{E}_k \cdot d\vec{l}$

$$\varepsilon = \oint_L \vec{E}_k \cdot d\vec{l} = \int_{\text{外}} \vec{E}_k \cdot d\vec{l} + \int_{\text{内}} \vec{E}_k \cdot d\vec{l}$$

$$\because \int_{\text{外}} \vec{E}_k \cdot d\vec{l} = 0 \rightarrow \varepsilon = \int_{\text{内}} \vec{E}_k \cdot d\vec{l} = \int_{-}^{+} \vec{E}_k \cdot d\vec{l}$$

## □ 电源电动势 $\varepsilon$ 更普遍的定义

单位正电荷绕闭合回路运动一周，非静电力所做的功。

$$\varepsilon = \frac{A_k}{q} = \oint_L \vec{E}_k \cdot d\vec{l}$$

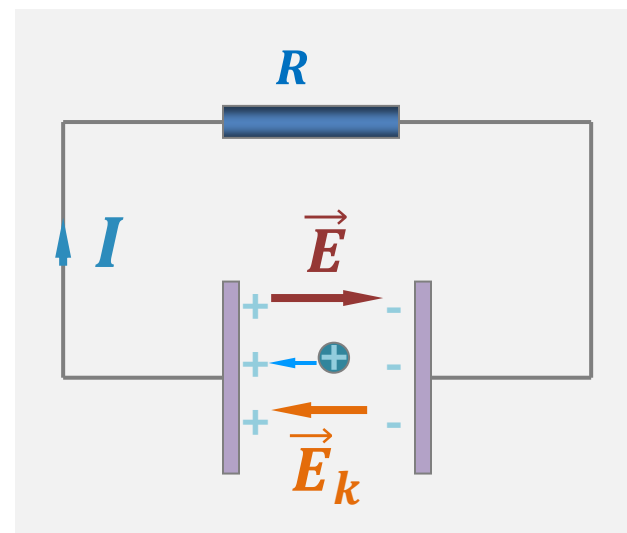
◆ 非静电力存在于整个闭合回路中的情况。

通路中：

**外电路：** 静电力作用，将  $+q$  由正极→负极。

**内电路：** 静电力和非静电力  $\vec{E}_k$  共同作用，  
非静电力作用较大，将  $+q$  由负极→正极。

} 形成  
稳恒  
电流



- $\varepsilon$  反映电源做功本领，与外电路闭合否无关。
- $\varepsilon$  是标量，遵循代数运算法则。

□ 电动势

--- 将单位正电荷从电源负极推向电源正极的过程中，非静电力所作的功。

$$\varepsilon = \frac{A_k}{q} \longleftrightarrow \varepsilon = \frac{dA_k}{dq}$$

- 表征了电源非静电力做功本领的大小。
- 反映电源将其它形式的能量转化为电能本领的大小。

非静电场强

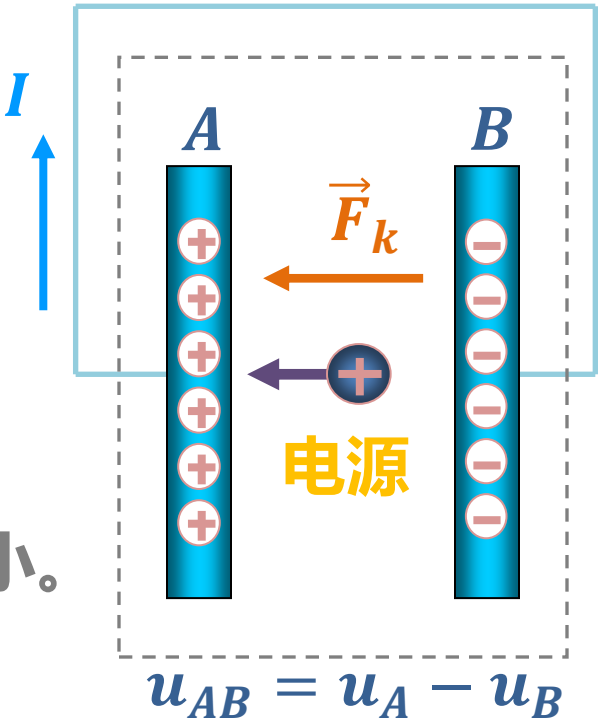
$$\vec{E}_k = \vec{F}_k / q$$

$$A_k = \int_B^A \vec{F}_k \cdot d\vec{l} = q \int_B^A \vec{E}_k \cdot d\vec{l} \longrightarrow$$

$$\varepsilon = \int_B^A \vec{E}_k \cdot d\vec{l}$$

对闭合电路

$$\varepsilon = \oint \vec{E}_k \cdot d\vec{l}$$



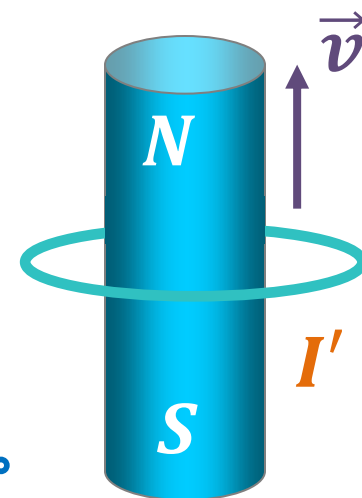


电流的磁效应  $\longrightarrow$  电生磁  $\longrightarrow$  磁的电效应？

变化的电流、变化的磁场  
运动的稳恒电流、运动的磁铁  
磁场中运动的导体

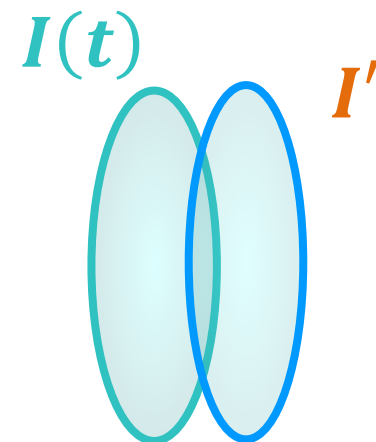
法拉第实验：

- ◆ 磁铁与线圈有相对运动，线圈中产生电流。
- ◆ 一线圈电流变化，在附近其它线圈中产生电流。



电磁感应实验的结论

当穿过一个闭合导体回路所限定的面积的磁通量发生变化时，回路中就出现感应电流。



$$\Phi_m = \int \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int B \cos \theta dS$$

$B$ 、 $S$ 、 $\theta$  变  $\longrightarrow$   $\Phi_m$  变  $\longrightarrow$  产生电磁感应

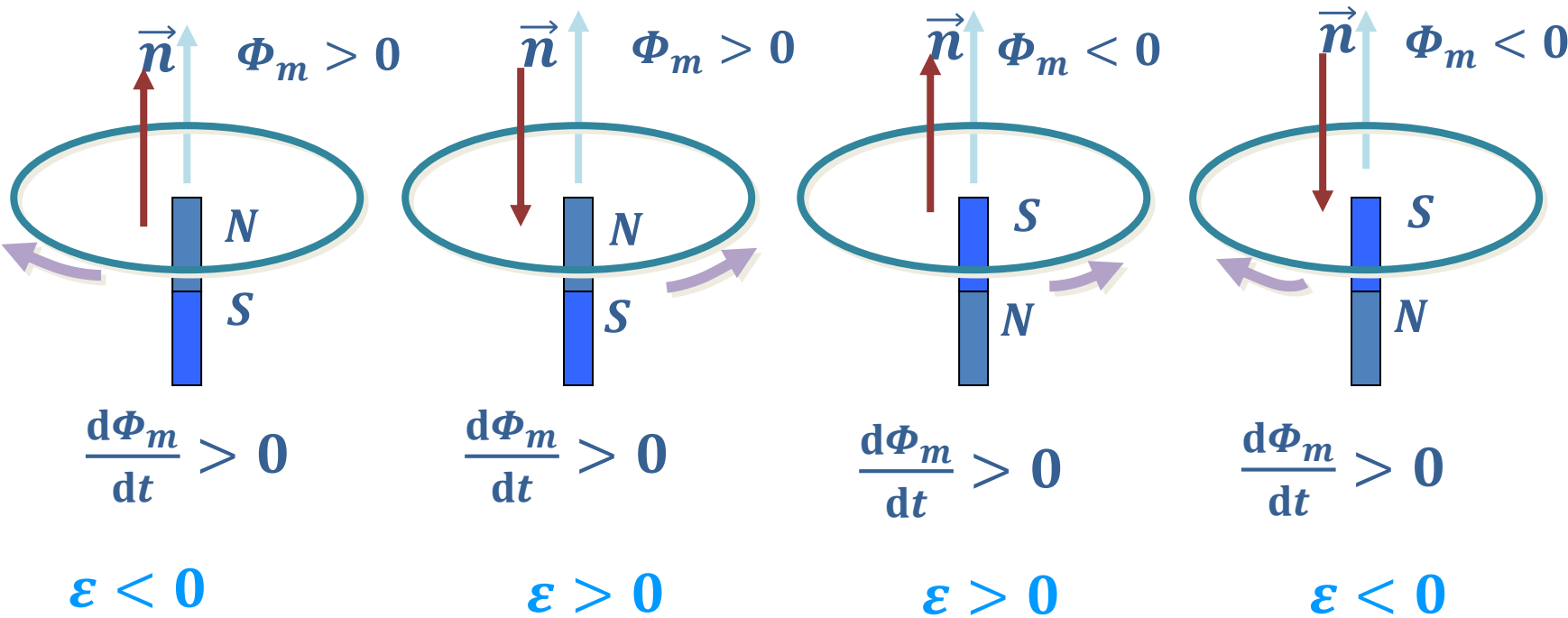
□ 法拉第实验规律

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi_m}{dt}$$

感应电动势的大小与通过导体回路的磁通量的变化率成正比。

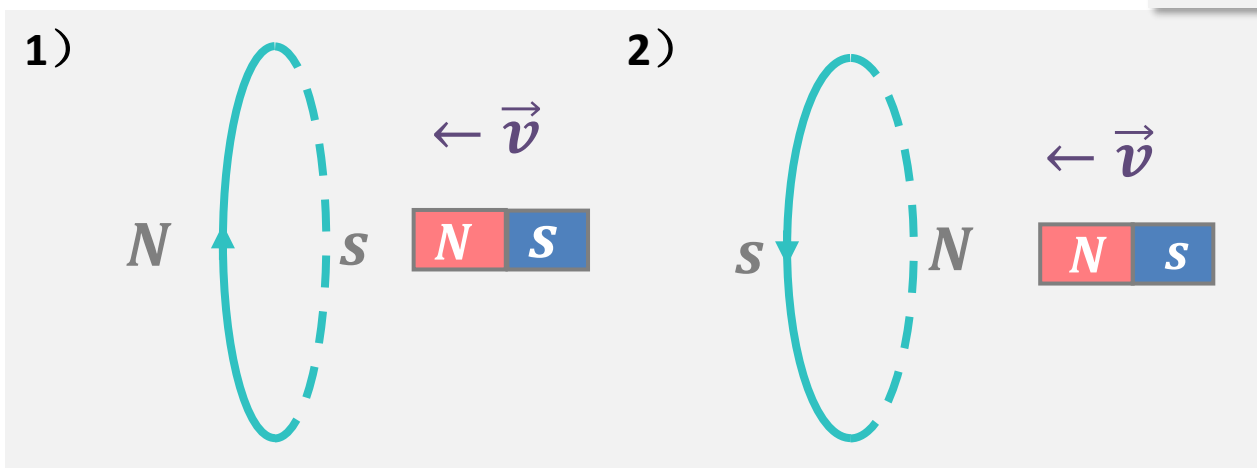
负号表示感应电流的效果总是反抗引起感应电流的原因。

---楞次定律



# 楞次定律的本质是什么？

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi_m}{dt}$$



□ 线圈中感应电流磁场与磁铁互相吸引，磁铁加速运动和感应电流能量从何而来？

□ 违反能量守恒定律，故不能成立。

□ 线圈中感应电流磁场与磁铁互相排斥，磁铁减速运动，其动能转变为感应电流能量。

□ 不违反能量守恒定律。

**楞次定律的本质是能量守恒。**