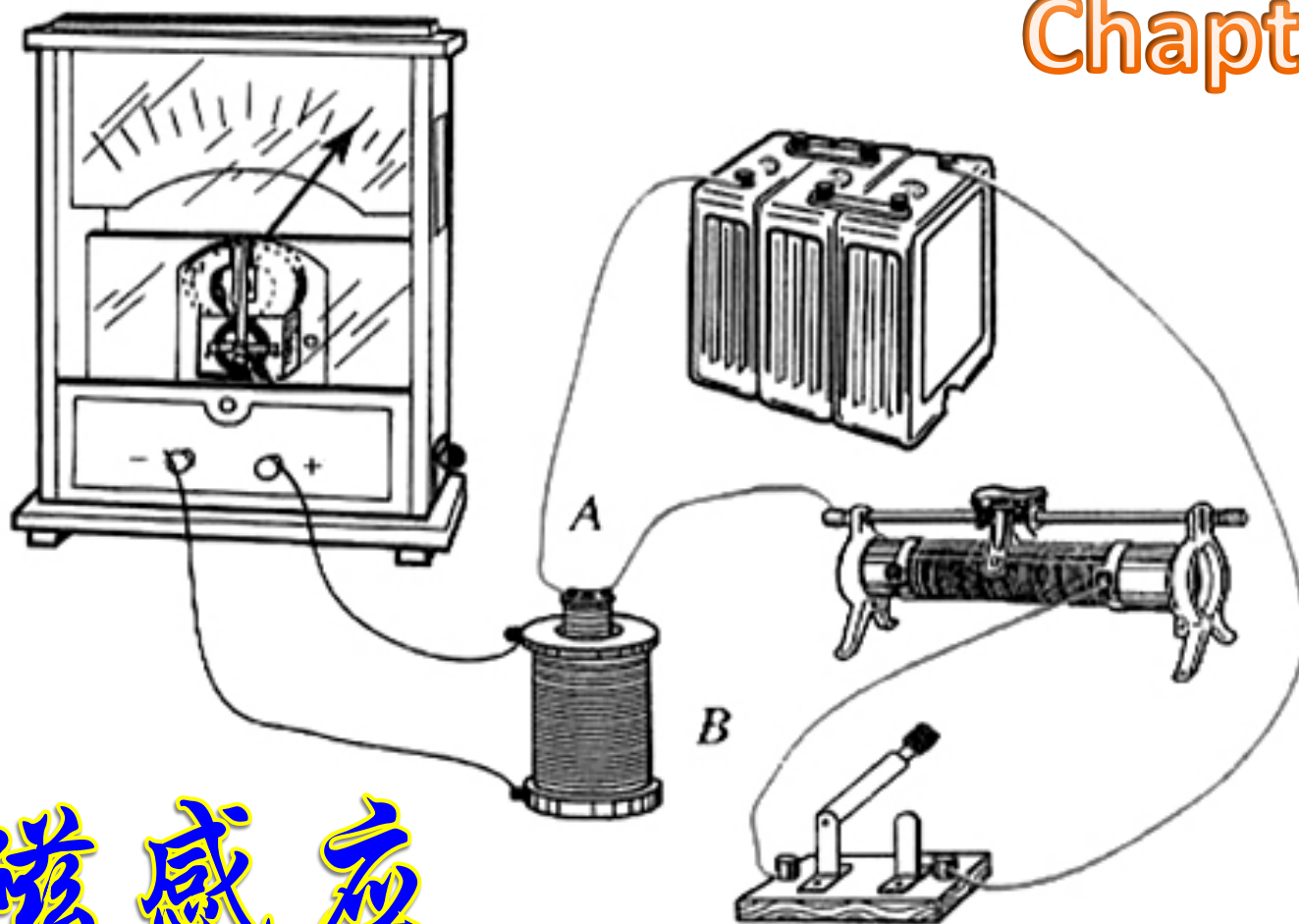


## Chapter 8



# 电磁感应 电磁场基本规律

# 主要内容

§ 1 法拉第电磁感应定律

§ 2 动生电动势 感生电动势 涡旋场

§ 3 自感与互感

§ 4 电感和电容的暂态过程

§ 5 磁场的能量

§ 6 麦克斯韦方程组

## § 8.1

# 法拉第电磁感应定律

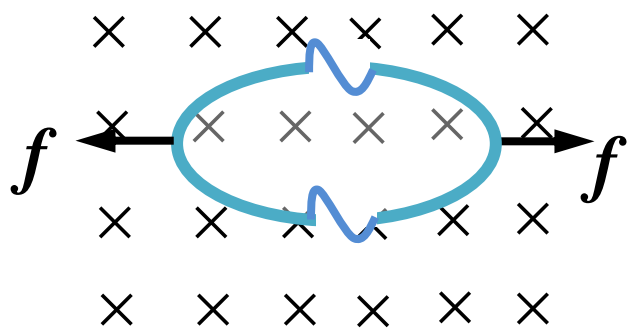
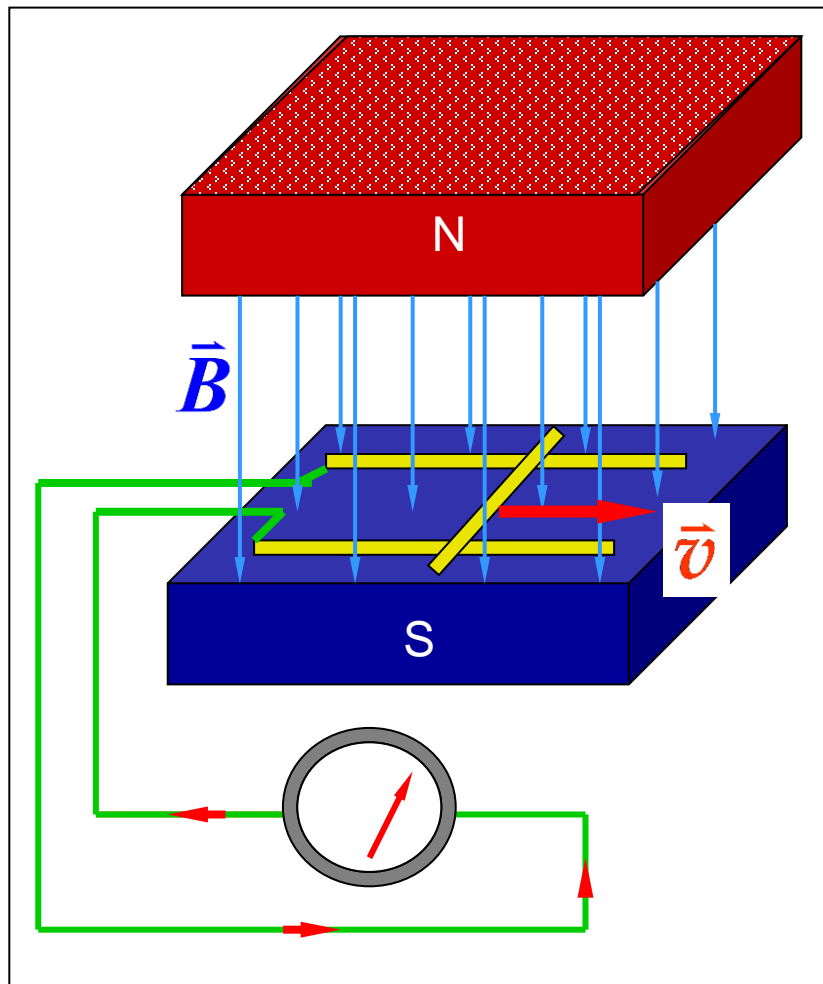
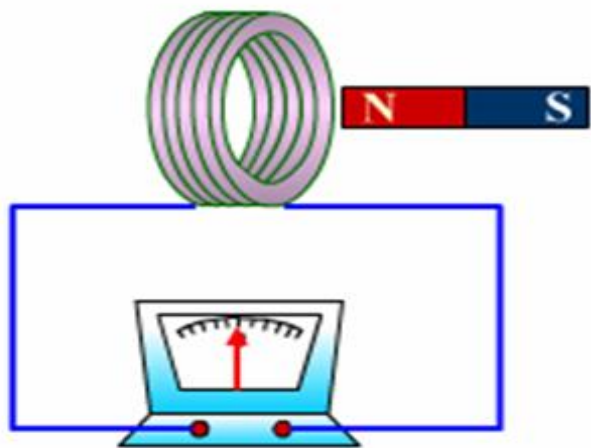
# 8.1.1 电磁感应现象

**法拉第** (Michael Faraday, 1791—1867)



英国物理学家和化学家，  
电磁理论的创始人之一。  
他创造性地提出场的思想，  
最早引入磁场这一名称。  
1831年发现电磁感应现象，  
后又相继发现电解定律，  
物质的抗磁性和顺磁性，  
及光的偏振面在磁场中的  
旋转。





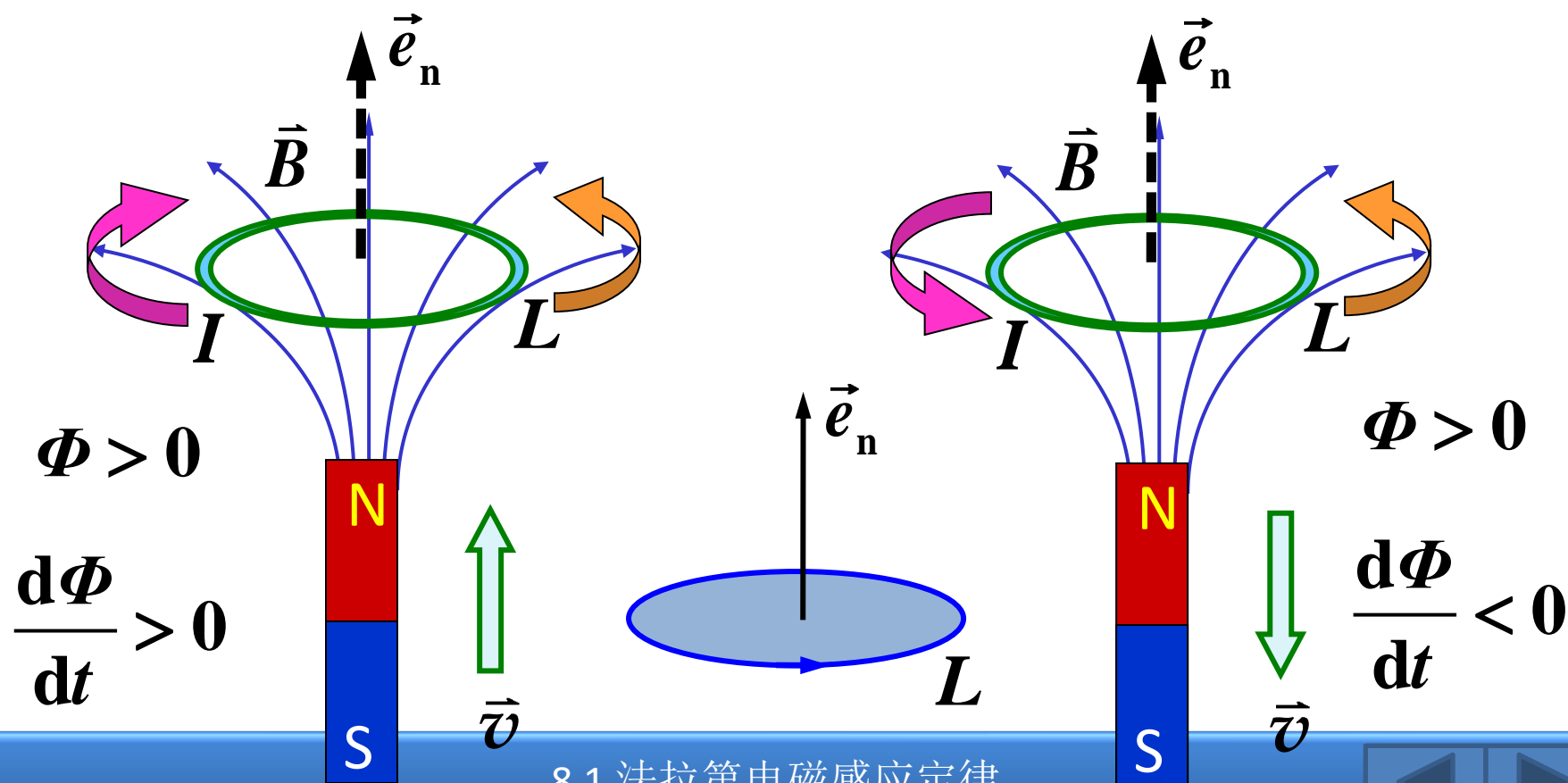
闭合线圈的面积改变

**小结：** 穿过线圈的**磁通量**发生了变化，从而在线圈中产生了感应电流。

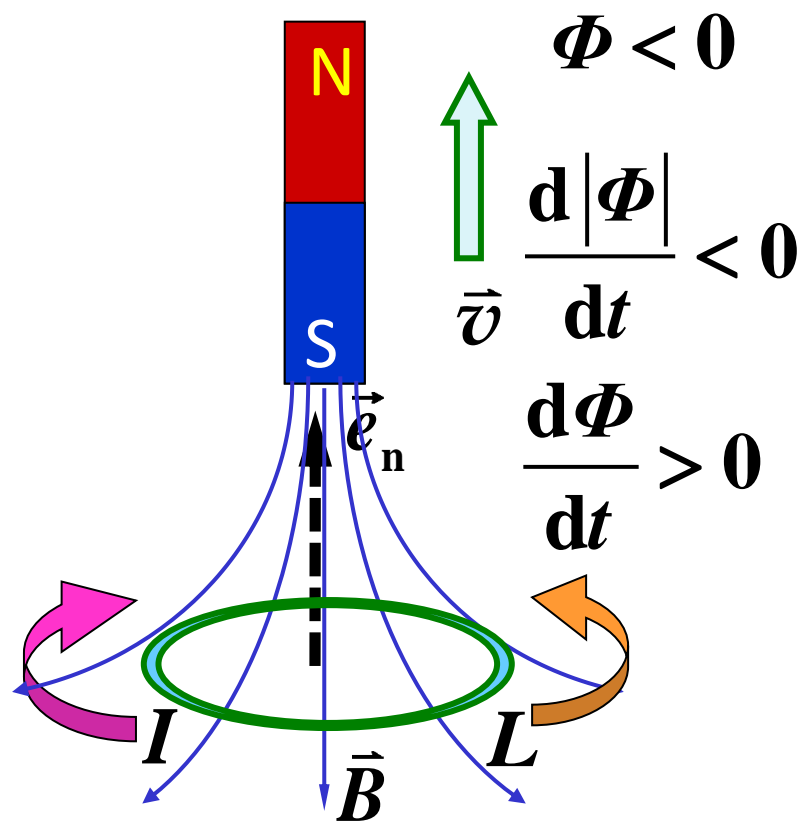
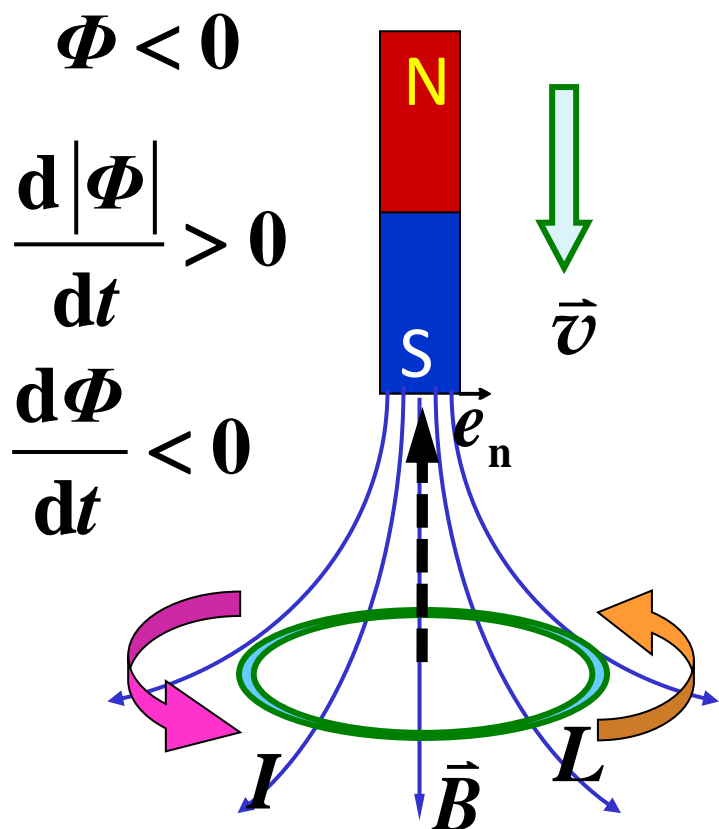


## 8.1.2 楞次定律

闭合的导线回路中所出现的**感应电流**，总是使它自己所激发的**磁场**反抗任何引发电磁感应的原因（反抗相对运动、磁场变化或线圈变形等）



闭合的导线回路中所出现的感应电流，总是使它自己所激发的磁场反抗任何引发电磁感应的原因（反抗相对运动、磁场变化或线圈变形等）



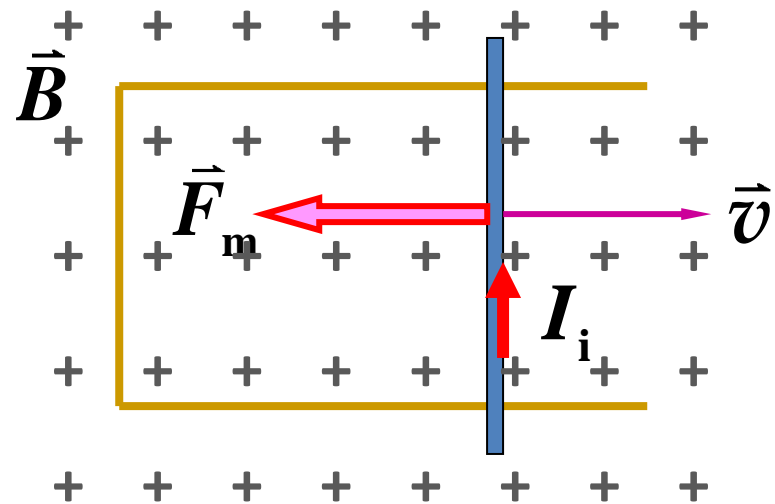
闭合的导线回路中所出现的**感应电流**，总是使它自己所激发的**磁场反抗任何引发电磁感应的原因**（反抗相对运动、磁场变化或线圈变形等）

楞次定律是**能量守恒**定律的一种表现

机械能



焦耳热



维持滑杆运动必须外加一力，此过程为外力克服安培力做功转化为焦耳热。



## 8.1.3 法拉第电磁感应定律

当穿过闭合回路所围面积的磁通量发生变化时，回路中会产生感应电动势，且**感应电动势正比于磁通量对时间变化率的负值**。

$$\mathbf{E} = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$$

其中：
$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot \mathrm{d}\mathbf{S} = \int_S B \cos \theta \mathrm{d}S$$

◆ 若是 $N$ 匝线圈 
$$\psi = \Phi_1 + \Phi_2 + \cdots + \Phi_N$$

$$\mathbf{E} = -\frac{\mathrm{d}\psi}{\mathrm{d}t} \quad \text{若 } \psi = N\Phi \text{ 则 } \mathbf{E} = -N \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$$



◆ 回路中的**感应电流**

$$i = \frac{\mathcal{E}}{R} = -\frac{1}{R} \frac{d\Phi}{dt}$$

◆ 回路中的**感应电荷**

$$i = \frac{dq}{dt} \Rightarrow q = \int i dt$$

$$q = \int_{t_1}^{t_2} i dt = -\frac{1}{R} \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} d\Phi = \frac{1}{R} (\Phi_1 - \Phi_2)$$

**表明：**在一段时间内通过导线截面的感生电荷量与这段时间内导线回路所包围的磁通量的**变化值成正比**，**与磁通量变化的快慢无关**。



## § 8.2

动生电动势 感生电动势  
涡旋场

# 8.2.1 动生电动势

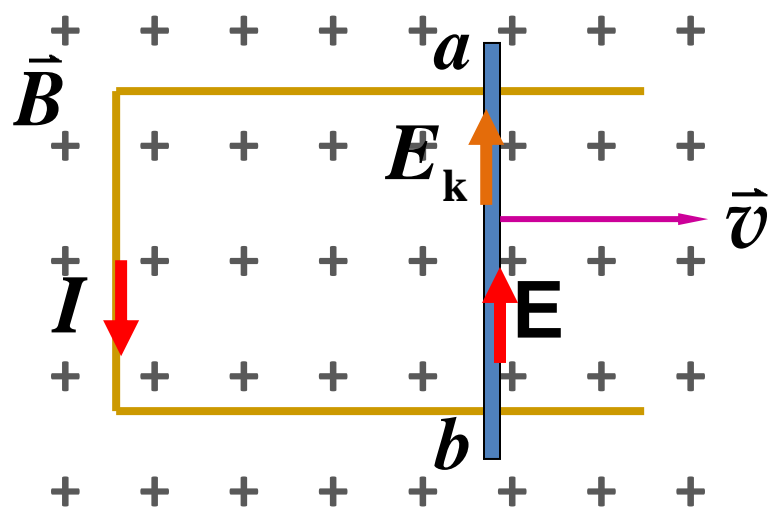
## 一、动生电动势

动生电动势的**非**静电力场来源  $\longrightarrow$  洛伦兹力

$$\vec{F} = -e\vec{v} \times \vec{B}$$

$$\vec{E}_k = \frac{\vec{F}}{-e} = \vec{v} \times \vec{B} \quad \text{非静电性场强}$$

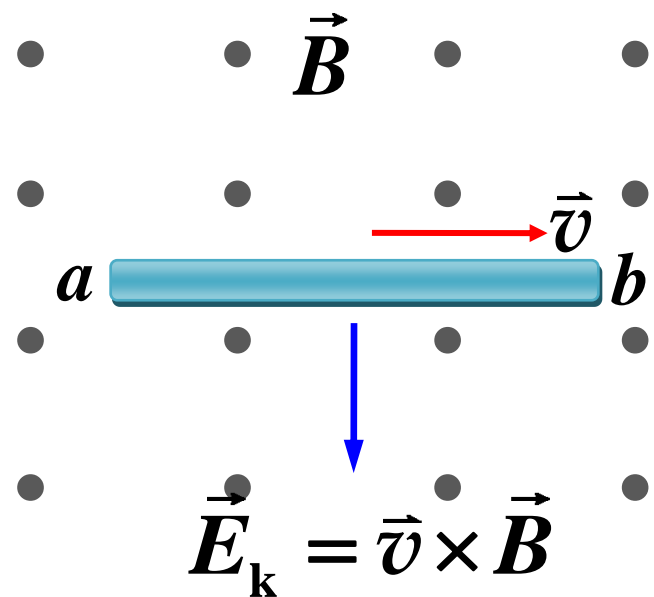
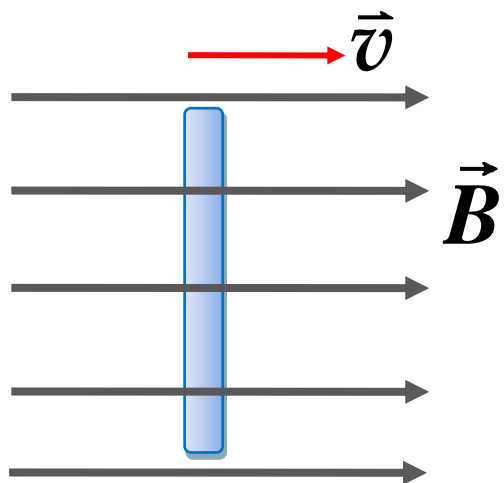
$$\mathcal{E}_1 = \oint \vec{E}_k \cdot d\vec{l} = \oint (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}$$



**非静电性场强**只存在于运动的导体**ab**段中

$$\mathcal{E}_1 = \int_a^b \vec{E}_k \cdot d\vec{l} = \int_a^b (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}$$

# 讨论1



**注意：**只有当导线横切磁感线时，才会产生动生电动势。

◆在任意的稳恒磁场中，任意形状的导线因运动或形变任一线元  $d\vec{l}$  的速度为  $\vec{v}$ ，

$$d\mathcal{E} = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}$$

整个导体或回路  $L$  中产生的动生电动势为

$$\mathcal{E} = \int_L (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}$$

$$\mathcal{E} = \oint_L (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}$$



## § 8.3

# 自感与互感

# 8.3.1 自感现象与自感系数

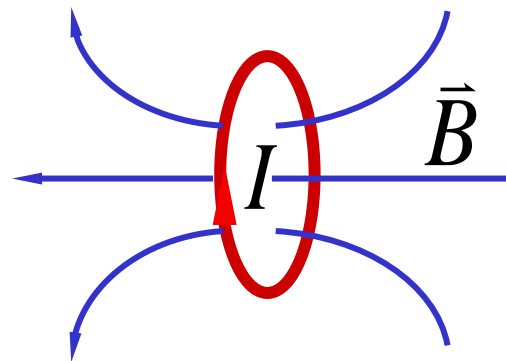
穿过闭合电流回路的磁通量  $\Phi = LI$

1. 自感定义  $L = \Phi / I$

若线圈有  $N$  匝

磁通匝数  $\psi = N\Phi$

自感  $L = \psi / I$



注意

无铁磁质时, 自感仅与线圈形状、磁介质及  $N$  有关.





## 2. 自感电动势

$$\mathbf{E}_L = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -\left(L\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t} + I\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}t}\right)$$

$$\text{当 } \frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}t} = 0 \text{ 时, } \mathbf{E}_L = -L\frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}$$

**自感定义2**  $L = -\mathbf{E}_L / \frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}t}$  (条件 $L$ 不变)

单位: 1 亨利 (H) = 1 韦伯 / 安培 (1 Wb / A)

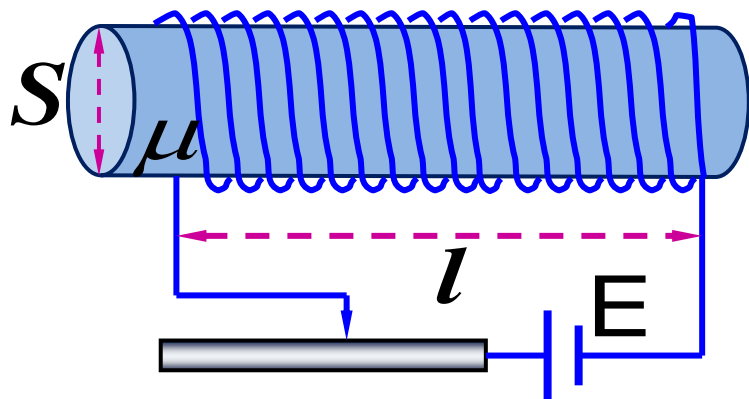
$$1\text{mH} = 10^{-3}\text{H}, \quad 1\mu\text{H} = 10^{-6}\text{H}$$



### 3. 自感的计算方法

**例1** 如图的**长直密绕**螺线管，已知  $l, S, N, \mu$ ，  
**求**其自感  $L$ 。（忽略边缘效应）

**解：** 设电流  $I \rightarrow$  根据安培环路定理求得  $H \rightarrow B$   
 $\rightarrow \Phi \rightarrow L$



$$n = N/l$$

$$B = \mu H = \mu n I$$

$$\psi = N\Phi = NBS$$

$$= N \mu \frac{N}{l} I S$$

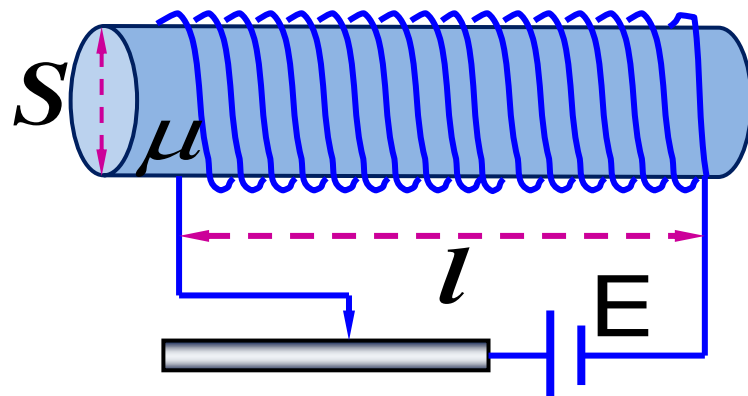


$$\psi = N \mu \frac{N}{l} IS$$

$$L = \frac{\psi}{I} = \mu \frac{N^2}{l} S$$

$$n = N/l \quad V = lS$$

$$\therefore L = \mu n^2 V$$



一般情况可用下式  
测量自感

$$E_L = -L \frac{dI}{dt}$$

4. 自感的应用 稳流， $LC$  谐振电路，滤波电路，感应圈等。

**例 2** 有两个同轴圆筒形导体，其半径分别为 $R_1$ 和 $R_2$ ，通过它们的电流均为 $I$ ，但电流的流向相反。设在两圆筒间充满磁导率为 $\mu$ 的均匀磁介质，求其自感 $L$ 。

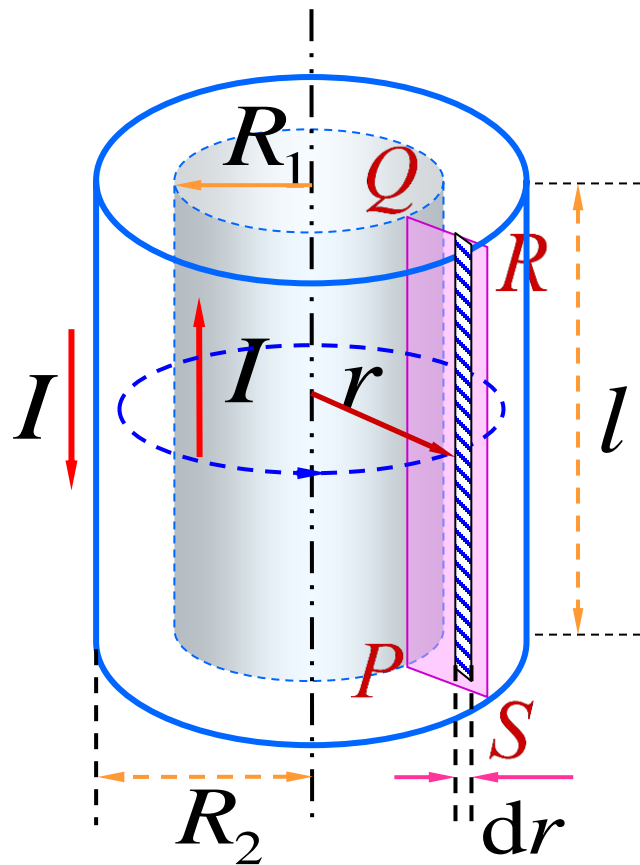
**解：** 两圆筒之间

$$B = \frac{\mu I}{2\pi r}$$

如图在两圆筒间取一长为 $l$ 的面 $PQRS$ ，并将其分成许多小面元。

$$\text{则 } d\Phi = \vec{B} \cdot d\vec{S} = B l dr$$

$$\Phi = \int d\Phi = \int_{R_1}^{R_2} \frac{\mu I}{2\pi r} l dr$$



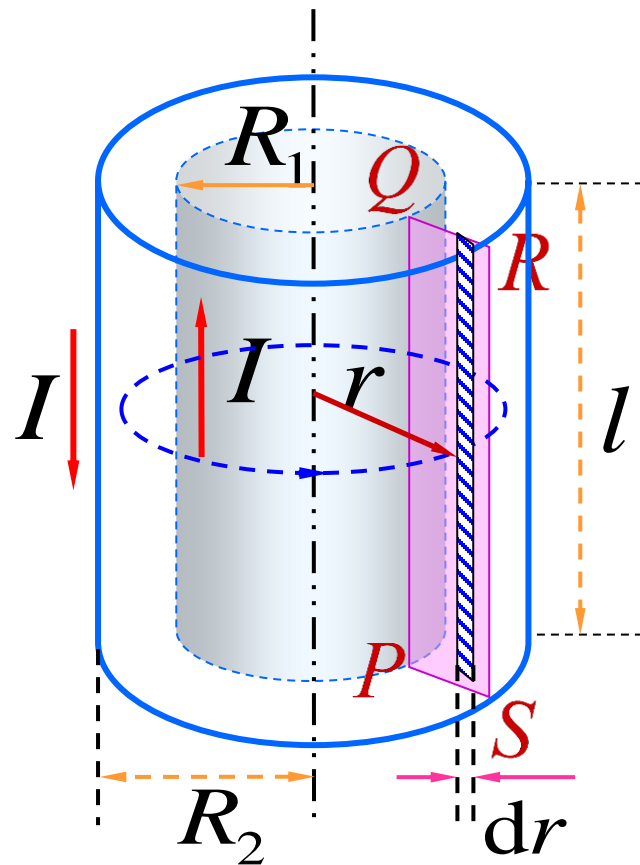
$$\Phi = \int d\Phi = \int_{R_1}^{R_2} \frac{\mu I}{2\pi r} l dr$$

即 
$$\Phi = \frac{\mu I l}{2\pi} \ln \frac{R_2}{R_1}$$

由自感定义可求出

$$L = \frac{\Phi}{I} = \frac{\mu l}{2\pi} \ln \frac{R_2}{R_1}$$

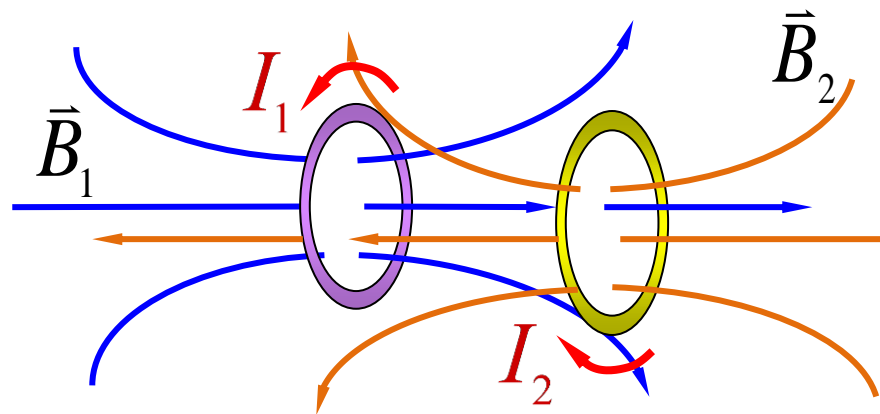
单位长度的自感为 
$$\frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{R_2}{R_1}$$



## 8.3.2 互感现象与互感系数

$I_1$  在  $I_2$  电流回路中所产生的磁通量

$$\Phi_{21} = M_{21} I_1$$



$I_2$  在  $I_1$  电流回路中所产生的磁通量  $\Phi_{12} = M_{12} I_2$

1. **互感系数**定义1  
(理论可证明)

$$M_{12} = M_{21} = M = \frac{\Phi_{21}}{I_1} = \frac{\Phi_{12}}{I_2}$$

**注意**

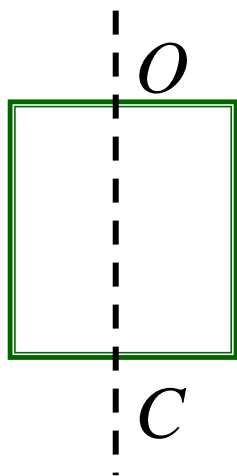
互感仅与两个线圈形状、大小、匝数、相对位置以及周围的磁介质有关 (无铁磁质时为常量)

## 2. 互感电动势

$$\mathcal{E}_{12} = -M \frac{dI_2}{dt}$$

$$\mathcal{E}_{21} = -M \frac{dI_1}{dt}$$

**互感系数定义2**  $M = -\frac{\mathcal{E}_{21}}{dI_1/dt} = -\frac{\mathcal{E}_{12}}{dI_2/dt}$



**问：**下列几种情况互感是否变化？

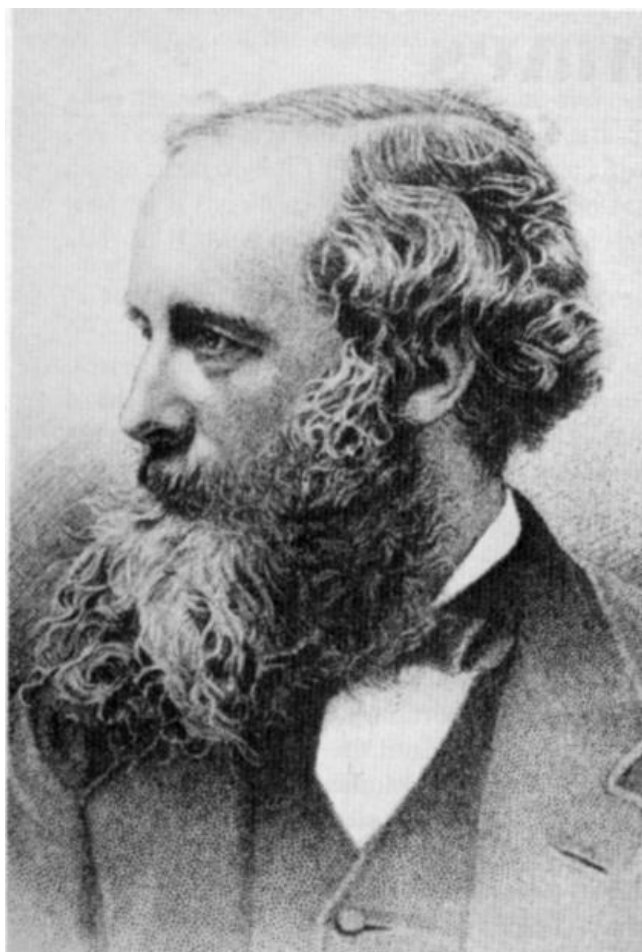
- 1) 线框平行直导线移动；
- 2) 线框垂直于直导线移动；
- 3) 线框绕  $OC$  轴转动；
- 4) 直导线中电流变化.



## § 8.6

# 麦克斯韦方程组





**麦克斯韦 (1831-1879)**  
英国物理学家。经典电磁理论  
的奠基人，气体动理论创  
始人之一。他提出了有旋场  
和位移电流的概念，建立了  
经典电磁理论，并预言了以  
光速传播的电磁波的存在。  
在气体动理论方面，他还提  
出了气体分子按速率分布的  
统计规律。



1865 年麦克斯韦在总结前人工作的基础上，提出完整的电磁场理论，他的主要贡献是提出了“**涡旋电场**”和“**位移电流**”两个假设，从而预言了电磁波的存在，并计算出电磁波的速度（即**光速**）。

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (\text{真空中})$$

1888 年赫兹的实验证实了他的预言，麦克斯韦理论奠定了经典动力学的基础，为无线电技术和现代电子通讯技术发展开辟了广阔前景。



# 麦克斯韦电磁场方程的积分形式

- ◆ 静电场高斯定理  $\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{s} = \int_V \rho dV = \sum q_{\text{int}}$
- ◆ 静电场环流定理  $\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$
- ◆ 磁场高斯定理  $\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$
- ◆ 安培环路定理  $\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I_c + \int_S \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \cdot d\vec{S}$
- ◆ 物态方程  $\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} \quad \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu_r} \quad \vec{j} = \gamma \vec{E}$



## 8.2.2 感生电动势 感应电场的性质

产生感生电动势的非静电场  感生电场

**麦克斯韦假设** 变化的磁场在其周围空间激发一种电场，这个电场叫**感生电场**  $\vec{E}_k$ 。

闭合回路中的感生电动势  $\mathcal{E}_i = \oint_L \vec{E}_k \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt}$

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad \oint_L \vec{E}_k \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

$$\mathcal{E}_i = \oint_L \vec{E}_k \cdot d\vec{l} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S}$$



## 感生电场和静电场的对比

◆  $\vec{E}$  和  $\vec{E}_k$  均对电荷有力的作用。

◆ 静电场是保守场  $\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$

◆ 感生电场是非保守场  $\oint_L \vec{E}_k \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt} \neq 0$

◆ 静电场由电荷产生；

感生电场是由变化的磁场产生。

有旋场  $\oint_S \vec{E}_k \cdot d\vec{S} = 0$

