

第十章

电磁感应

Electromagnetic Induction

电 磁 场

Electromagnetic Field

10.2

电磁感应定律

Fundamental Law of Electromagnetic Induction

第十章

电磁感应 电 磁 场

Electromagnetic Induction

Electromagnetic Field

电磁感应现象是电磁学中最重大的发现之一。它揭示了电与磁相互联系和转化的重要规律。电磁感应现象的发现在科学上和技术上都具有划时代的意义，丰富了人类对电磁现象本质的认识，推动了电磁学理论的发展，在实践上开拓了广泛的应用前途。

一、电磁感应现象

奥斯特在1820年发现的电流磁效应，使整个科学界受到了极大的震动，它证实电现象与磁现象是有联系的。

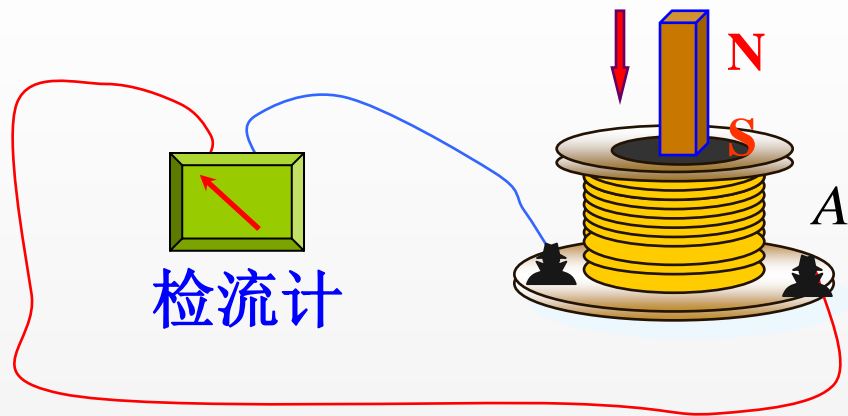
- 1) 既然**电能生磁**，那么，磁是否能生电呢？
- 2) 如果**磁能生电**，那么，怎样才能实现呢？

法拉第经过十年的不懈努力终于在**1831年**发现了
—— **电磁感应现象**。



法拉第 (Michael Faraday)

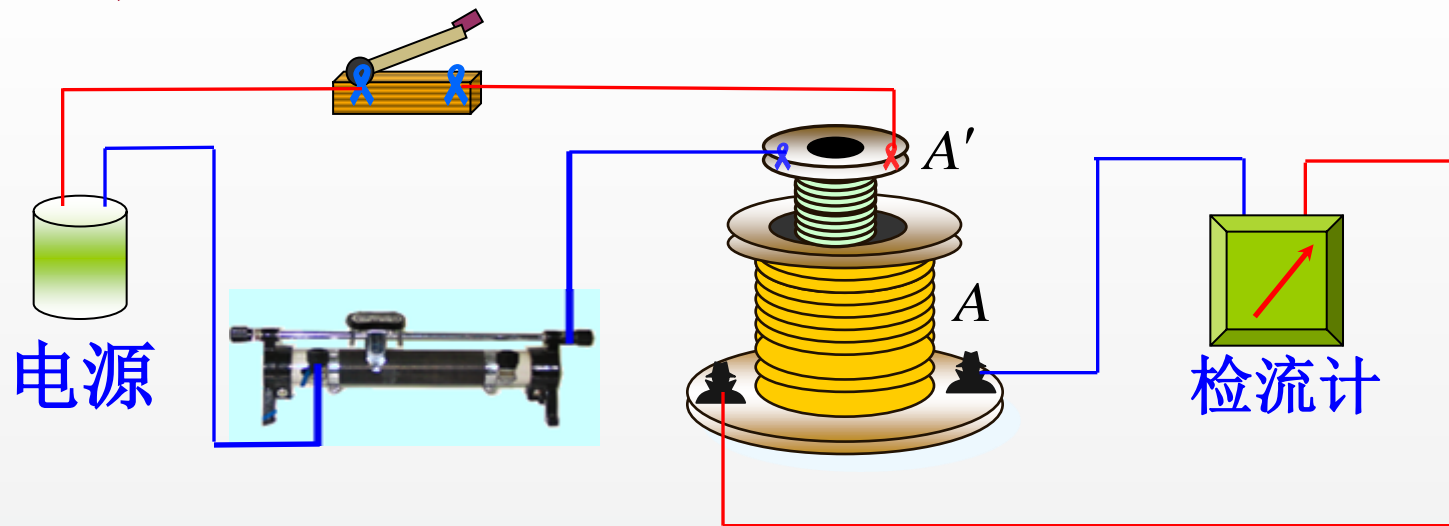
实验与探究 1



现象:

- 1) 当条形磁铁插入螺线管或从螺线管中抽出时，灵敏检流计的**指针偏转**，说明闭合回路中**产生了电流**。
- 2) 当条形磁铁与螺线管保持相对静止时，灵敏检流计的**指针不偏转**，说明闭合回路中**没有电流**。

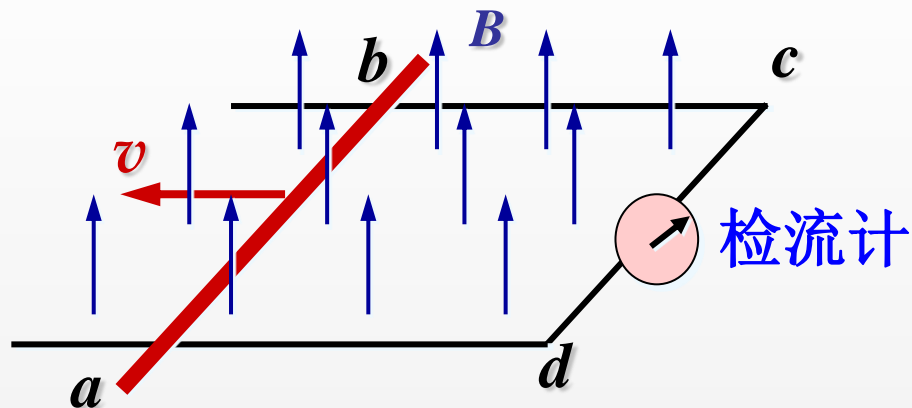
实验与探究 2



现象: 1) 开关接通或断开瞬间,
2) 开关接通, 变阻器滑片不动,
3) 开关接通, 变阻器滑片移动,

偏 转	产生电流
不偏转	无电流
偏 转	产生电流

实验与探究 3



现象： 将闭合导体回路($abcd$)置于恒定磁场中，当导体棒在导体轨道上**切割磁感应线**滑行时，回路内**出现了电流**。

结论： 当通过**闭合导体回路**所包围的面积**的磁通量发生变化**时，不管这种变化是由于什么原因所引起的，回路中就会产生电流。

这一现象被称为：

电磁感应现象 Electromagnetic induction

电磁感应现象中产生的电流称为：

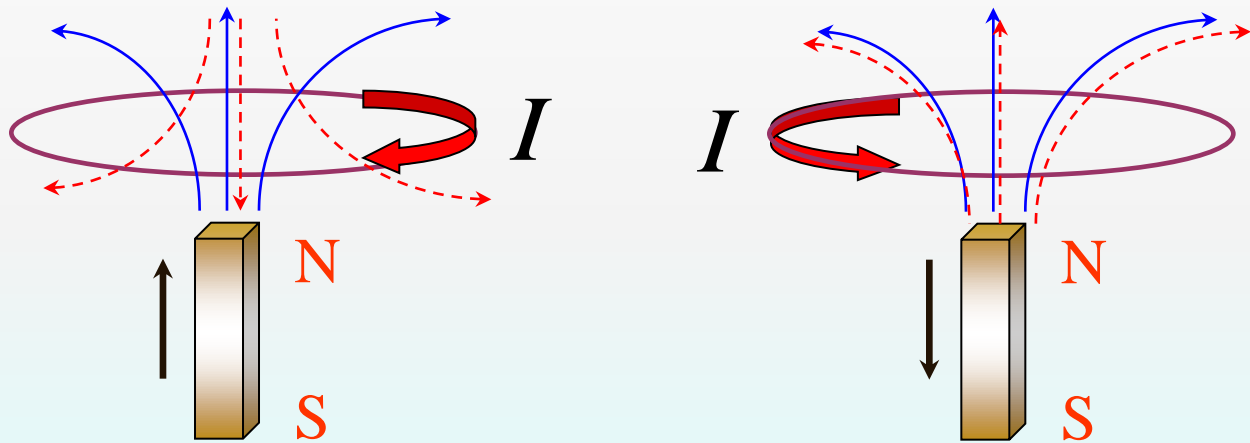
感应电流 Induction current ，

相应的电动势称为：

感应电动势 Induction Electromotive Force 。

二、楞次定律

回路中**感应电流的方向**，总是使它**自己所激发的磁场**去**阻碍或抵偿**引起感应电流的磁通量的改变。



楞次定律是**能量守恒定律**在电磁感应中的体现

三、法拉第电磁感应定律

1、电磁感应定律

感应电动势的大小与穿过回路的磁通量随时间的变化率成正比。

$$\varepsilon_i \propto \frac{d\Phi_m}{dt} \longrightarrow \varepsilon_i = -k \frac{d\Phi_m}{dt},$$

国际单位制

$k=1$

$\varepsilon_i \longrightarrow$

伏 特

$\Phi_m \longrightarrow$

韦 伯

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

三、法拉第电磁感应定律

感应电动势的大小与穿过回路的磁通量随时间的变化率成正比。

$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Phi_m}{dt}$$

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

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

- 1) 只要磁通量发生变化就会产生感应电动势；
- 2) 要形成感应电流，除磁通量发生变化外，还要有闭合导体回路；
- 3) 负号是楞次定律的数学表达。

N 匝线圈串联时的法拉第电磁感应定律

$$\Phi_{m1}, \Phi_{m2}, \dots, \Phi_{mi}, \dots, \Phi_{mN}$$

$$\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \dots, \mathcal{E}_i, \dots, \mathcal{E}_N$$

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \dots + \mathcal{E}_i + \dots + \mathcal{E}_N$$

$$= \left(-\frac{d\Phi_{m1}}{dt}\right) + \left(-\frac{d\Phi_{m2}}{dt}\right) + \dots + \left(-\frac{d\Phi_{mi}}{dt}\right) + \dots + \left(-\frac{d\Phi_{mN}}{dt}\right)$$

$$= -\frac{d}{dt} \left(\sum_{i=1}^N \Phi_{mi} \right) = -\frac{d\Psi}{dt},$$

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Psi}{dt}$$

$$\Psi = \sum_{i=1}^N \Phi_{mi}$$

磁通链数

N 匝线圈串联时的法拉第电磁感应定律

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Psi}{dt}$$

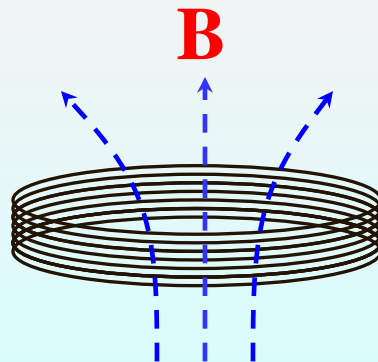
磁通链数:

$$\Psi = \sum_{i=1}^N \Phi_{mi}$$

N 匝密绕相同线圈串联组成回路

$$\Psi = N\Phi_m$$

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



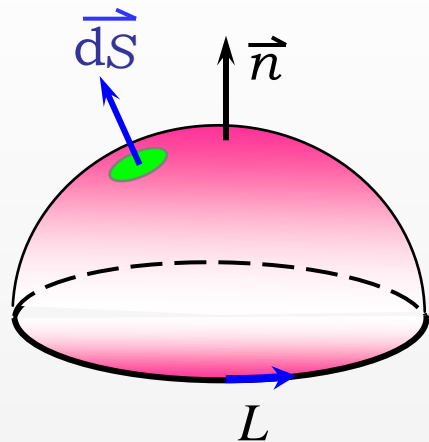
2、感应电动势的计算

步骤:

- 1) 确定回路所在空间的磁场的分布;
- 2) 选择回路的绕行方向, 所围曲面的正法向方向与回路绕行方向满足右手螺旋法则;
- 3) 计算回路所围曲面的磁通量 Φ_m ;
- 4) 根据电磁感应定律: $\varepsilon_i = -\frac{d\Phi_m}{dt}$, 计算感应电动势。

$\varepsilon_i > 0$ 时, 电动势的方向与回路绕行方向相同。

$\varepsilon_i < 0$ 时, 电动势的方向与回路绕行方向相反;



例10-1: 一长直导线通以电流 $i = I_0 \sin \omega t$ (ω 、 I_0 为常数),
 近旁共面有一个边长分别为 l_1 和 l_2 的单匝矩形线圈 $abcd$,
 ab 边距直导线的距离为 r , 求矩形线圈中的感应电动势。

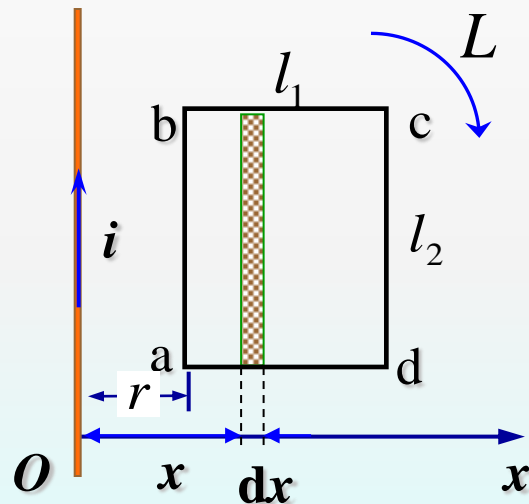
解: 当 $i > 0$ 时, 设电流方向如图

建立坐标系 Ox 如图,

x 处的磁感应强度为: $B = \frac{\mu_0 i}{2\pi x}$, 方向 \otimes

设回路 L 绕行方向为**顺时针方向**,

如图取: $dS = l_2 dx$, 方向 \otimes



$$\Phi_m = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int_r^{r+l_1} \frac{\mu_0 i}{2\pi x} l_2 dx = \frac{\mu_0 I_0 l_2}{2\pi} (\sin \omega t) \ln \frac{r+l_1}{r}$$

例10-1: 一长直导线通以电流 $i = I_0 \sin \omega t$ (ω 、 I_0 为常数),
近旁共面有一个边长分别为 l_1 和 l_2 的单匝矩形线圈 $abcd$,
 ab 边距直导线的距离为 r , 求矩形线圈中的感应电动势。

解: 根据法拉第电磁感应定律:

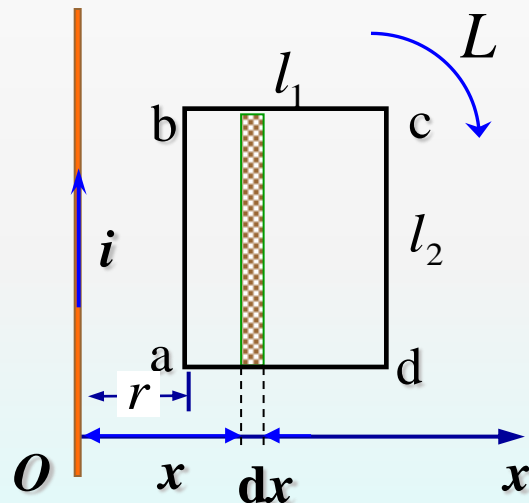
$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi_m}{dt} = -\frac{\mu_0 I_0}{2\pi} l_2 \omega (\cos \omega t) \ln \frac{r+l_1}{r}$$

1) 当 $\cos \omega t > 0$ 时, $\varepsilon_i < 0$

感应电动势方向为**逆时针方向**

2) 当 $\cos \omega t < 0$ 时, $\varepsilon_i > 0$

感应电动势方向为**顺时针方向**



例10-2: 一长直导线通以恒定电流 I ，近旁共面有一个边长分别为 l_1 和 l_2 的单匝矩形线圈 $abcd$ ，若线圈垂直于导线以速度 \vec{v} 向右匀速平移，当 ab 边与长直导线的距离为 r 时，求矩形线圈中的感应电动势。

解: 建立坐标系 Ox 如图，
 t 时刻，

设 ab 边与长直导线的距离为 x_0 ，

x 处的磁感应强度为： $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi x}$

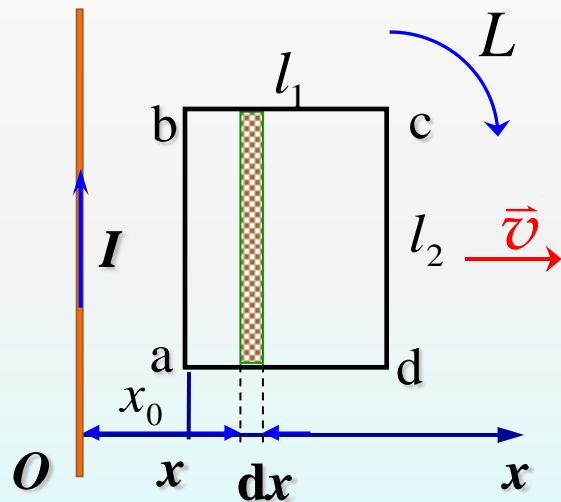
$$v = \frac{dx_0}{dt}$$

方向 \otimes

取 **顺时针方向** 为回路的绕行方向，

如图取： $dS = l_2 dx$ 方向 \otimes

$$\Phi_m = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int_{x_0}^{x_0+l_1} \frac{\mu_0 I}{2\pi x} l_2 dx = \frac{\mu_0 I}{2\pi} l_2 \ln \frac{x_0 + l_1}{x_0}$$



例10-2: 一长直导线通以恒定电流 I ，近旁共面有一个边长分别为 l_1 和 l_2 的单匝矩形线圈 $abcd$ ，若线圈垂直于导线以速度 \vec{v} 向右匀速平移，当 ab 边与长直导线的距离为 r 时，求矩形线圈中的感应电动势。

解: 根据法拉第电磁感应定律:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi_m}{dt} = \frac{\mu_0 I l_1 l_2}{2\pi x_0(x_0 + l_1)} \frac{dx_0}{dt} = \frac{\mu_0 I l_1 l_2 v}{2\pi x_0(x_0 + l_1)}$$

$$\text{当 } x_0 = r \text{ 时, } \varepsilon_i = \frac{\mu_0 I l_1 l_2 v}{2\pi r(r + l_1)}$$

$\varepsilon_i > 0$, 感应电动势方向为顺时针方向

