大学物理

College Physics

主讲

华 中 科 技 大 学

刘超飞

● 磁介质的磁效应

$\mu_r \geq 1$ → 顺磁质

$\mu_r < 1$ → 抗磁质

$\mu_r >> 1$ → 铁磁质

分子圆电流
分子磁矩 → 磁化的微观解释

$\vec{\mu}_{分子} \neq 0$ 分子磁矩取向排列

$\vec{\mu}_{分子} = 0$ 分子中电子轨道角动量进动

● 磁化强度矢量

$$\boxed{\vec{M} = \frac{\sum \vec{\mu}_i}{\Delta V}}$$

● 磁化强度矢量M与磁化面电流 I'的关系

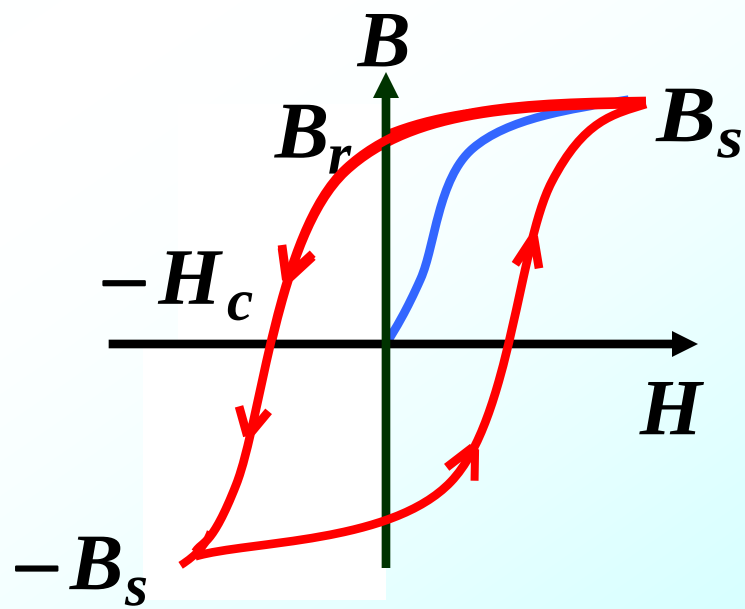
$$\boxed{\oint_L \vec{M} \cdot \mathrm{d}\vec{l} = \sum I'}$$

●有介质时的高斯定理和安培环路定理

$$\oint \vec{B} \cdot \mathrm{d}\vec{S} = 0 \qquad \oint \vec{H} \cdot \mathrm{d}\vec{l} = \sum I_i$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$$ ——磁场强度

●铁磁质的磁滞回线



第10章 电磁感应

重点：根据法拉第电磁感应定律讨论变化的磁场产生电场的规律（电磁感应的几种类型）

1、法拉第电磁感应定律

2、感应电动势

3、自感与互感

4、磁场的能量

问题的提出

奥斯特 → 电的磁效应 **(电生磁)**

(毕奥－萨伐尔定律)

$$\mathrm{d}\vec{B}=\frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I\mathrm{d}\vec{l}\times\vec{r}}{r^3}$$

(对称性) ？

法拉第 → 磁的电效应 **(磁生电)**

(法拉第电磁感应定律)

$$\varepsilon_i=-\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t}$$

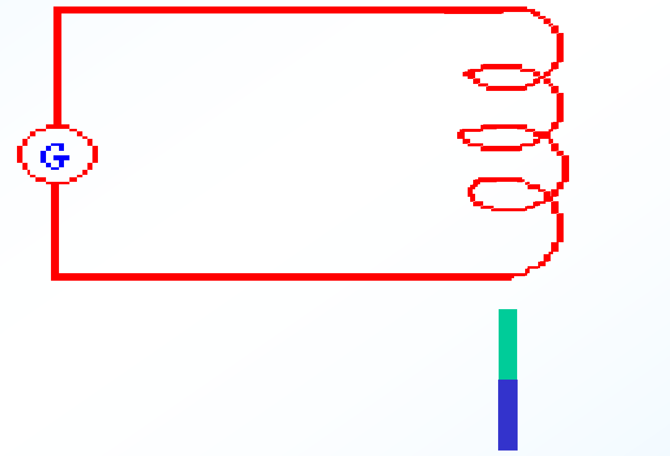
$$\varepsilon_i=\frac{\Delta\phi}{\Delta t}\text{(中学)}$$

感应电动势

电磁感应

一、电磁感应现象

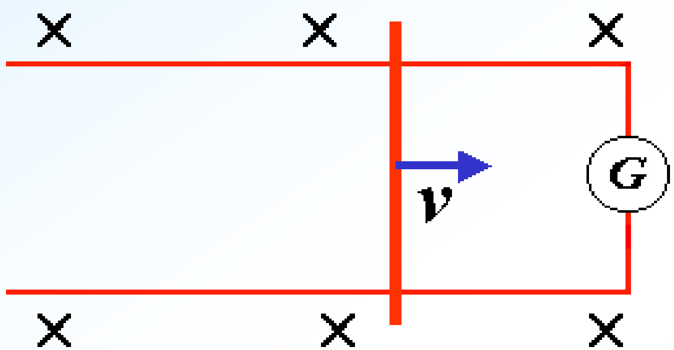
什么是电动势?

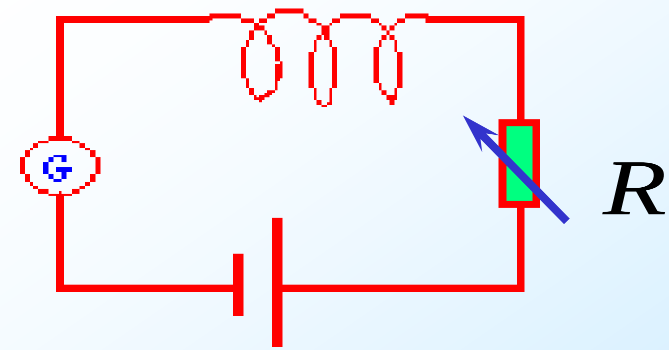


电磁感应的产生：

只要穿过闭合导体回路的磁通量发生变化回路中就产生感应电流。

条件





- 电磁感应的实质是产生感应电动势

大小和方向?

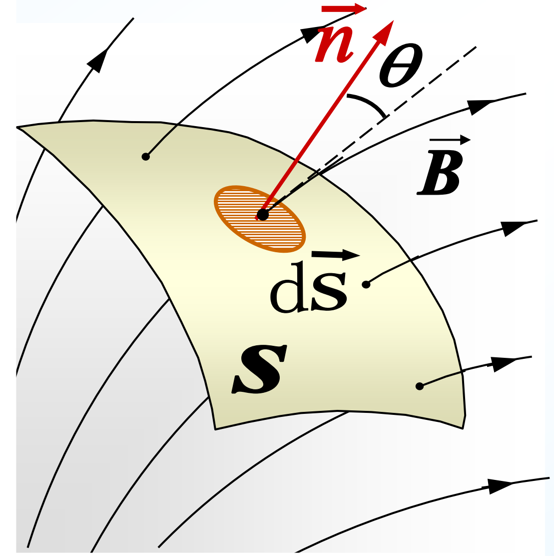
感应电动势

↓

感应电流

二. 电磁感应的规律

1. 法拉第电磁感应定律



（回路中的）感应电动势：$\varepsilon_i = -\dfrac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t}$

任一回路中磁通量： $\phi = \int \vec{B} \cdot \mathrm{d}\vec{s} = \int B\cos\theta \, \mathrm{d}s$

$\vec{B}$、θ、s 中有一个量发生变化，回路中就有ε_i的存在。

由此可把感应电动势分为两类：

- 动生电动势 ← **回路 (S,θ)变，$\vec{B}$不变**
- 感生电动势 ← **$\vec{B}$变，回路(S,θ)不变**

2. 电磁感应定律的一般形式

若回路由N匝线圈组成： $\varepsilon_i = -\dfrac{d\psi}{dt}$

全磁通

$\boxed{\varepsilon_i = -\dfrac{d\phi}{dt}}$

其中 $\Psi = \phi_1 + \phi_2 + \cdots + \phi_N$，回路的总磁通匝链数

若 $\phi_1 = \phi_2 = \cdots = \phi_N$，则感应电动势 $\varepsilon_i = -N d\phi/dt$。

回路中相应的感应电流： $I_i = \dfrac{\varepsilon_i}{R} = -\dfrac{1}{R} N \dfrac{d\phi}{dt}$

从 $t_1 \rightarrow t_2$ 时间内，通过回路导线任一横截面的电量：

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

磁通计原理

若已知N、R、q，便可知$\Delta\Phi$=？

若将Φ_1定标，则Φ_2为t_2时回路的磁通量

$\boxed{I = \dfrac{dq}{dt}}$ $\boxed{dq = I dt}$

感应电动势，感应电流的方向如何?

3. 楞次定律 ← 判断感应电流方向的定律。

闭合回路中感应电流的方向，总是使它所激发的磁场来阻止引起感应电流的磁通量的变化。

楞次定律是能量守恒定律在电磁感应现象上的具体体现。

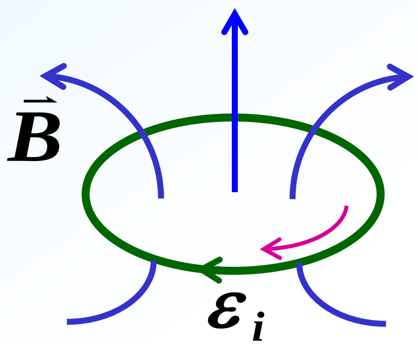
● 也可以直接根据法拉第电磁感应定律判断感应电动势的方向

说明:

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

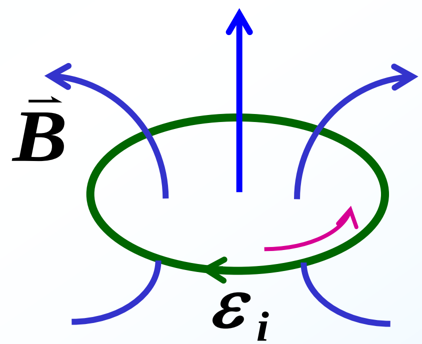
1）任一回路中： $\phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{s} = \int B\cos\theta\, ds$

2） "–"表示感应电动势的方向， ε_i和ϕ都是标量，感应电动势的方向只是相对于约定的回路绕行方向而言。如下所示：



与回路的绕行方向相同

$\varepsilon_i > 0$

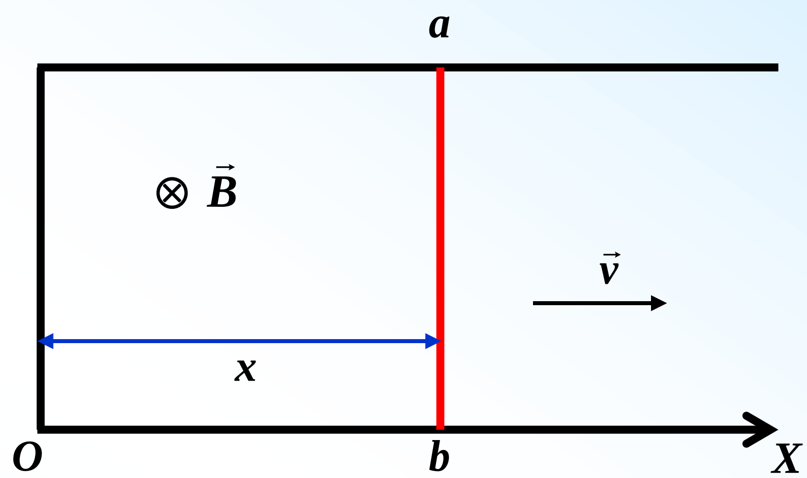


与回路的绕行方向相反

$\varepsilon_i < 0$

据此可直接由法拉第电磁感应定律判断感应电动势的方向

例： 如图所示，均匀磁场$\vec{B}$中有一与之垂直的矩形导体回路．B随时间线性增加，即$B=kt$（$k>0$），ab边长为L且以速度$\vec{v}$向右滑动，另三边不动．以下有两种解法求任意时刻回路中的感应电动势的大小（$t=0$时，$x=0$）．哪个解法正确？为什么？



解一：

$$\phi=\int_S \vec{B}\cdot \mathrm{d}\vec{S}=B\int_S \mathrm{d}S=B\cdot Lx=kt\cdot Lvt=kvLt^2$$

$$\therefore \varepsilon=-\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t}=-2kvLt$$

解二：

$$\phi=\int_S \vec{B}\cdot \mathrm{d}\vec{S}=\int_0^x kt\cdot L\,\mathrm{d}x \cancel{=} \int_0^t ktL\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\mathrm{d}t$$

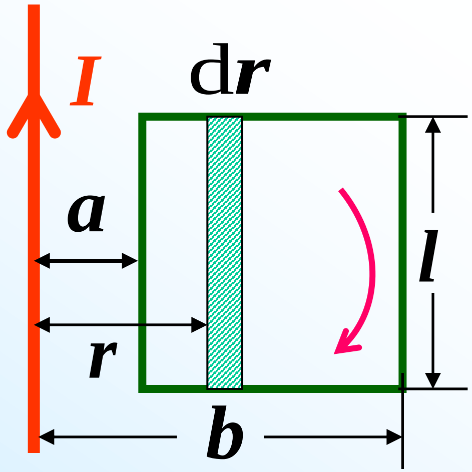
$$=\int_0^t ktLv\,\mathrm{d}t=\frac{1}{2}kvLt^2$$

$$\therefore \varepsilon=-\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t}=-kvLt$$

ϕ应为t时刻的磁通量

$$\varepsilon_i=-\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t}$$

例: 长直导线通有电流I，在它附近放有一 矩形导体回路. 求 1）穿过回路中的ϕ;　2）若$I=kt$（k=常数），回路中ε_i=？　3）若I=常数，回路以v向右运动，ε_i=？　4）若$I=kt$，且回路又以v向右运动时，求ε_i=？



解: 设回路绕行方向为顺时针，

1）$\phi=\int_a^b B\cdot l\mathrm{d}r=\int_a^b \frac{\mu_0 I}{2\pi r} l\mathrm{d}r=\frac{\mu_0 I l}{2\pi}\ln\frac{b}{a}$

2）$I=kt$时，在t时刻，$\phi=\frac{\mu_0 lk}{2\pi}t\ln\frac{b}{a}$

$$\varepsilon_i=-\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t}=-\frac{\mu_0 lk}{2\pi}\ln\frac{b}{a}<0$$ 逆时针方向

$$\varepsilon_i=-\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t}$$

3）I=常数，t时刻，此时回路的磁通：

$$\phi=\int_{a+vt}^{b+vt}\frac{\mu_0 Il}{2\pi r}\mathrm{d}r=\frac{\mu_0 Il}{2\pi}\ln\frac{b+vt}{a+vt}$$

$$\phi=\int\vec{B}\cdot\mathrm{d}\vec{s}=\int B\cos\theta\,\mathrm{d}s$$

$$\varepsilon_i=-\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t}=-\frac{\mu_0 Il}{2\pi}\frac{(a-b)v}{(a+vt)(b+vt)}>0.$$ 顺时针方向

$$\boxed{2)\ \varepsilon_i = -\frac{\mu_0 lk}{2\pi}\ln\frac{b}{a}}\quad \boxed{3)\ \varepsilon_i = -\frac{\mu_0 ll}{2\pi}\frac{(a-b)v}{(a+vt)(b+vt)}}$$

4）综合2）、3），t时刻回路的磁通：$\phi=\frac{\mu_0 ktl}{2\pi}\ln\frac{b+vt}{a+vt}$

$$\varepsilon_i=-\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t}=\frac{\mu_0 kl}{2\pi}\left(\frac{(b-a)vt}{(a+vt)(b+vt)}-\ln\frac{b+vt}{a+vt}\right)$$

此题若这样考虑：$\varepsilon_i=-\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t}$ 而：$\mathrm{d}\phi=\vec{B}\cdot\mathrm{d}\vec{s}=\frac{\mu_0 I}{2\pi r}l\mathrm{d}r$

全微分

微小量

含义不同

则：$\varepsilon_i=-\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t}=-\frac{\mu_0 I}{2\pi r}l\cancel{\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}t}}=-\frac{\mu_0 I}{2\pi r}l\cdot v.$

这样就有：

$$\left.\begin{array}{l} 2)\ v=0,\ \therefore \varepsilon_i=0 \\ 3)\ \varepsilon_i=-\frac{\mu_0 I}{2\pi r}l\cdot v \\ 4)\ \varepsilon_i=-\frac{\mu_0 kt}{2\pi r}l\cdot v \end{array}\right\}$$

错在何处？

$\mathrm{d}\phi\neq\vec{B}\cdot\mathrm{d}\vec{S}$

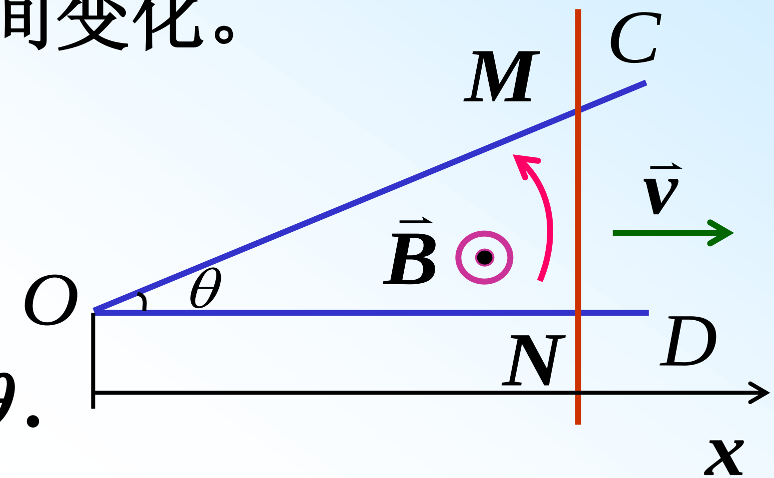
$\mathrm{d}\phi=\vec{B}\cdot\mathrm{d}\vec{S}+\vec{S}\cdot\mathrm{d}\vec{B}$

考虑非均匀磁场中的平面回路。则 $\phi=\vec{B}\cdot\vec{S}$

例: 弯成θ角的金属架COD，导体棒MN垂直OD以恒定速度v在金属架上向右滑动，且$t=0$, $x=0$，已知磁场的方向垂直纸面向外，求下列情况中金属架内的ε_i .

1）磁场分布均匀，且磁场不随时间变化。

2）非均匀时变磁场，$B=kx\cos\omega t$。



解: 设回路绕向为逆时针

1） t 时刻，$x=vt$

$$\phi=\vec{B}\cdot\vec{S}=B\cdot\frac{1}{2}x\cdot x\,tg\,\theta=\frac{1}{2}Bv^2t^2tg\,\theta.$$

$$\varepsilon_i=-\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t}=-Bv^2t\cdot tg\,\theta<0$$

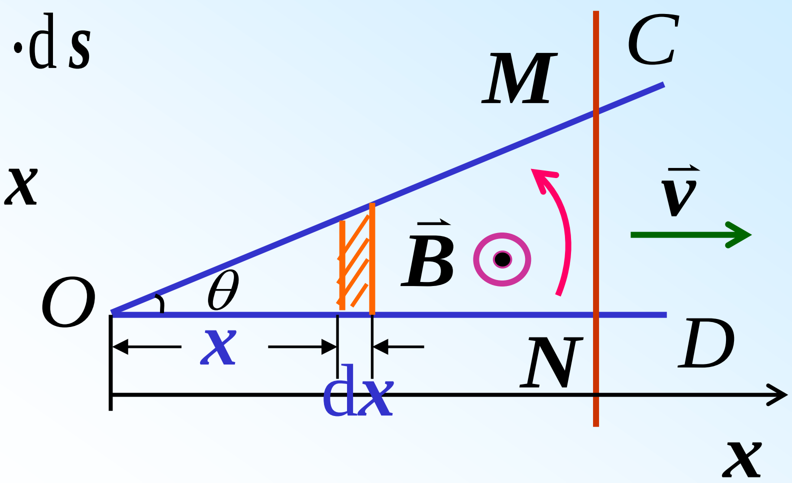
方向与绕向相反，只出现在MN上。

此处可直接利用对均匀场的公式：

$$\phi=\vec{B}\cdot\vec{S}\qquad \mathrm{d}\phi=\vec{B}\cdot\mathrm{d}\vec{S}+\vec{S}\cdot\mathrm{d}\vec{B}$$

$$\varepsilon_i=-\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t}=-B\frac{\mathrm{d}S}{\mathrm{d}t}=-B\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{1}{2}x^2tg\,\theta\right)=-Bv^2t\cdot tg\,\theta$$

2）B不均匀，$\phi \neq \vec{B}\cdot\vec{S}$ $\quad \mathrm{d}\phi = B\cdot\mathrm{d}s$



$$\phi = \int \vec{B}\cdot\mathrm{d}\vec{s} = \int_0^x kx\cos\omega t\cdot x\,\mathrm{tg}\,\theta\cdot\mathrm{d}x$$

$$= \frac{1}{3}kx^3\cos\omega t\cdot\mathrm{tg}\,\theta .$$

$$\phi(t) = \frac{1}{3}k\,\mathrm{tg}\,\theta\, v^3 t^3 \cos\omega t .$$

$$\varepsilon_i = -\frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{3}k\omega\,\mathrm{tg}\,\theta \sin\omega t\cdot v^3 t^3 - k\,\mathrm{tg}\,\theta\cos\omega t\cdot v^3 t^2$$

若 $\varepsilon_i > 0$， 与绕向相同。

若 $\varepsilon_i < 0$， 与绕向相反。