大学物理(下)

华 中 科 技 大 学
张智
zzhang@hust.edu.cn

第三篇

电磁学

3. 铁磁质的分类

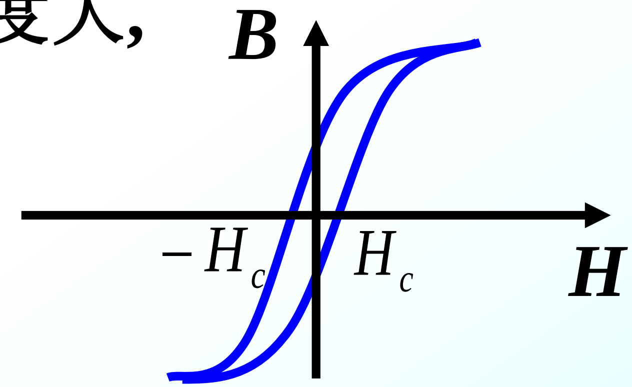
1. 软磁材料： 如 纯铁，坡莫合金(Fe，Ni)，硅钢，铁氧体等。

特点：

μ_r大，(起始磁化率大)饱和磁感应强度大，

矫顽力(H_c)小，磁滞回线的面积窄而长，损耗小(回线面积小)。

易磁化、易退磁

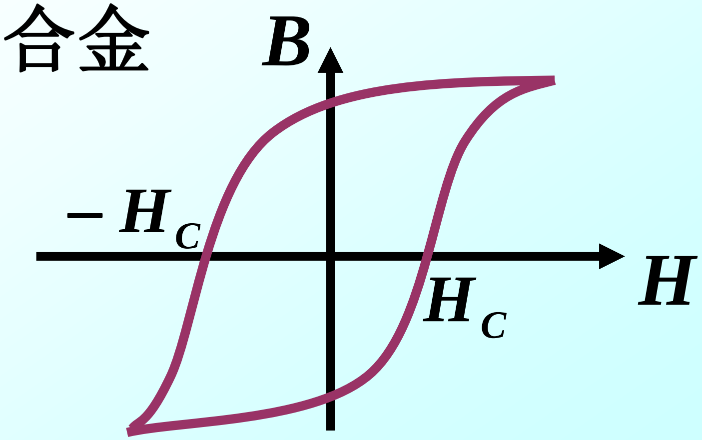


适用于变压器、继电器、电机、以及各种高频电磁元件的磁芯、磁棒。

2. 硬磁材料： 如: 钨钢，碳钢，铝镍钴合金

矫顽力(H_c)大，剩磁B_r大

磁滞回线的面积大，损耗大。



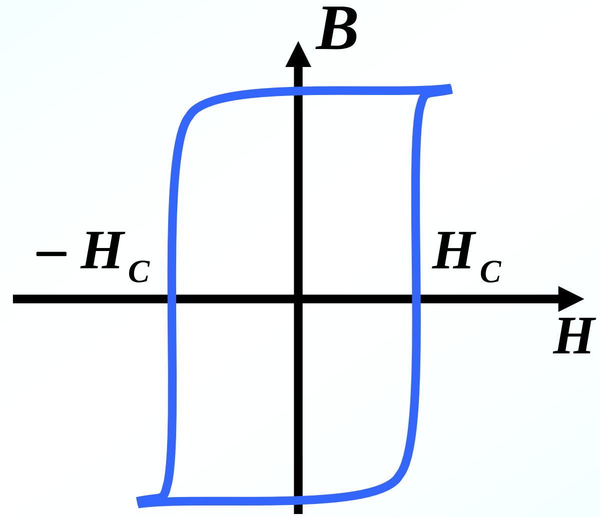
适用于做永磁铁。

耳机中的永久磁铁，永磁扬声器。

3. 矩磁材料

锰镁铁氧体，锂锰铁氧体

$B_r=B_S$ ，H_c不大，
磁滞回线是矩形。用于记忆元件，



当+脉冲产生$H>H_C$，使磁芯呈$+B$态，
则–脉冲产生$H<-H_C$使磁芯呈$-B$态，
可作为二进制的两个态。

六. 磁场对载流导线的作用

1. 安培定律

$$\boxed{\vec{F} = \int_0^l I\mathrm{d}\vec{l} \times \vec{B}}$$

非均匀磁场中：须利用积分。

2. 磁场作用于载流线圈的力和力矩

①载流线圈的磁矩

$$\boxed{\vec{p}_m = I\vec{S} = IS\vec{e}_\mathrm{n}}$$

②磁力矩

$$\vec{M} = \vec{p}_m \times \vec{B}$$

七. 磁介质

1. 磁介质的分类

2. 磁化面电流的特征

3. H的环路定理

$$\boxed{\oint_L \vec{H} \cdot \mathrm{d}\vec{l} = \sum I_i}$$

$$\boxed{\vec{B} = \mu \vec{H}}$$

4. 铁磁质的分类

法拉第（Michael Faraday,1791-1867）, 英国

第8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)

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

(对称性) ↓ ？

法拉第 → 磁的电效应 （磁生电）

(法拉第电磁感应定律)

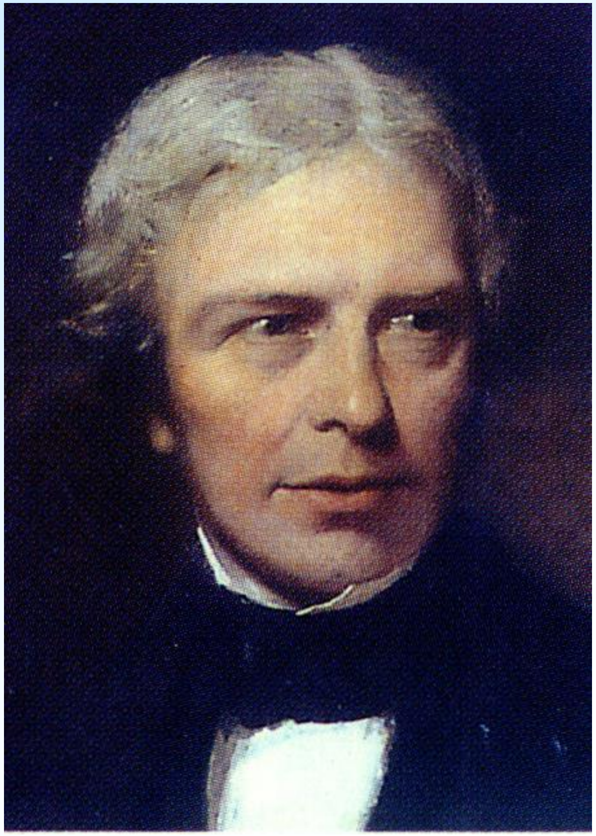
$$\varepsilon_i=-\frac{d\phi}{dt}$$

$$\varepsilon_i=\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$ (中 学)

感应电动势

电磁感应

第1节　法拉第电磁感应定律

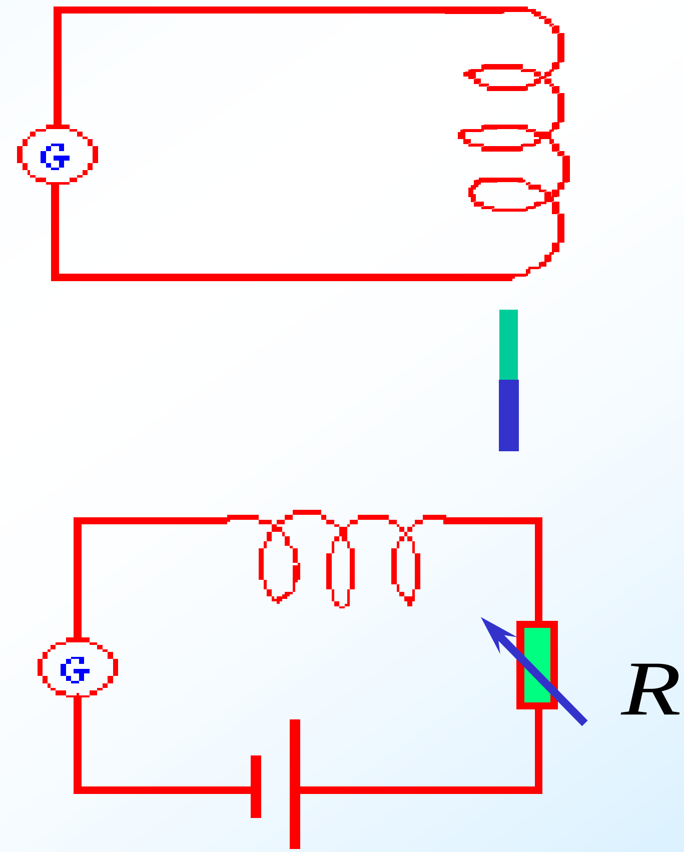


法拉第（Michael Faraday, 1791-1867），伟大的英国物理学家和化学家。他创造性地提出场的思想，磁场这一名称是法拉第最早引入的。他是电磁理论的创始人之一，于1831年发现电磁感应现象，后又相继发现电解定律，物质的抗磁性和顺磁性，以及光的偏振面在磁场中的旋转.

从1822年到1831年，法拉第经过了近十年的不懈努力，终于发现了电磁感应现象，这是电磁学领域中最伟大的成就之一。为人类广泛利用电能开辟了道路，成为第二次工业和技术革命的开端。

一、电磁感应现象

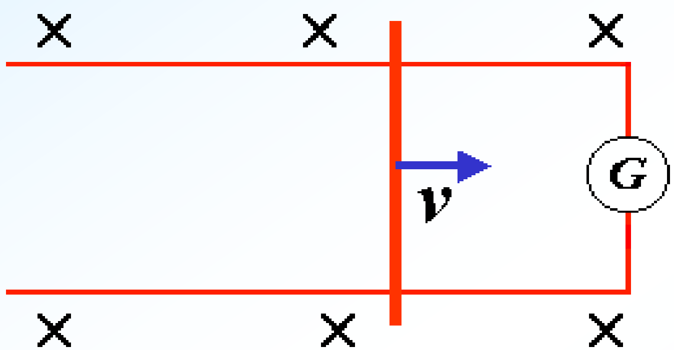
什么是电动势？



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

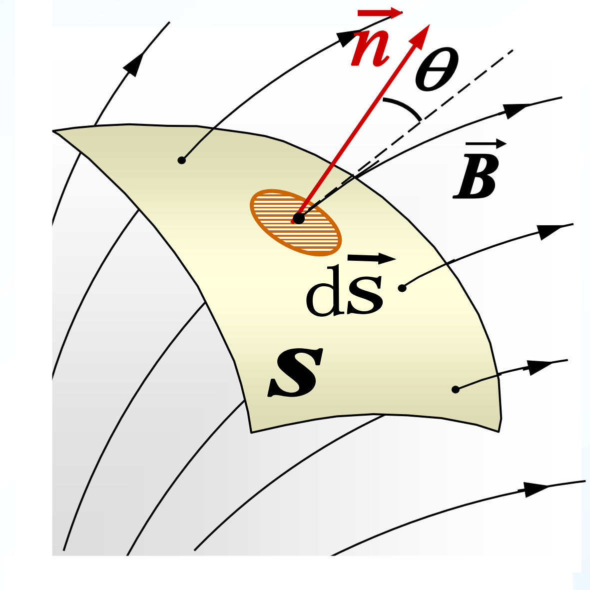
大小和方向？

感应电动势 → 感应电流

演示：跳环、磁铁穿铜管及铝环

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：$\varepsilon_i = -\dfrac{d\phi}{dt}$

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

$\vec{B}$、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： $\varepsilon_i = -\dfrac{\mathrm{d}\psi}{\mathrm{d}t}$

全磁通

其中 $\Psi = \phi_1 + \phi_2 + \cdots + \phi_N$，回路的<u>总磁通匝链数</u>

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

感应电动势的大小为 $\varepsilon_i = \left|\dfrac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}t}\right|$

$\varepsilon_i = \dfrac{\Delta\phi}{\Delta t}$(中 学)

◆ 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反抗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。

◆ 电磁感应定律的一般形式

全磁通

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

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 $\varepsilon_i = -N d\phi/dt$。

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

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

感应电流 → 回路中有感应电动势

$$\boxed{\varepsilon_i = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}}$$ → 法拉第电磁感应定律

单位：1V=1Wb/s

说明:

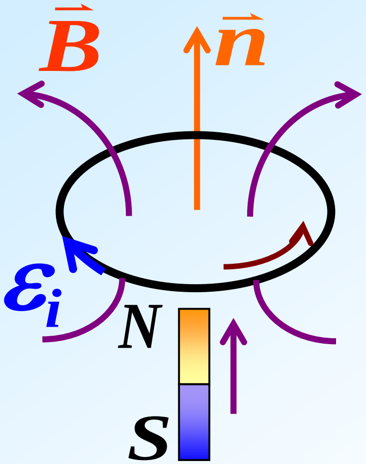
1. 感应电动势比感应电流更能反映电磁感应现象的本质。

2. 任一回路中： $\Phi = \int_S \vec{B}\cdot\mathrm{d}\vec{S} = \int_S B\cos\theta\,\mathrm{d}S$

其中B、θ、S 有一个量发生变化，回路中就有ε_i存在。

3. "–"表示感应电动势的方向，ε_i 是标量，方向是相对回路的绕行方向而言。

$$\boxed{\varepsilon_i = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}}$$

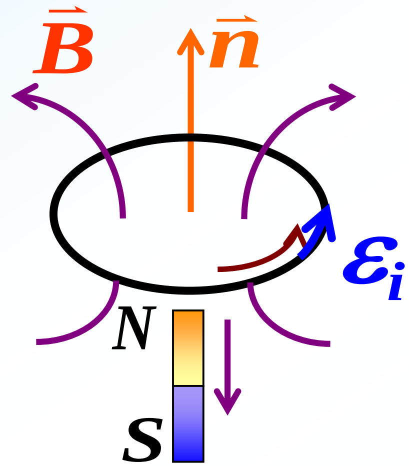


$$\Phi = \int B\cos\theta \,\mathrm{d}S > 0$$

若 $\Phi\uparrow$， $\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} > 0$

$\varepsilon_i < 0$

与绕行正方向相反



$\Phi > 0$

$\Phi\downarrow$， $\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} < 0$

$\varepsilon_i > 0$

与正方向相同

电磁感应定律判断感应电动势的方向：

① 依磁场的(正)方向确定回路法线的正方向；

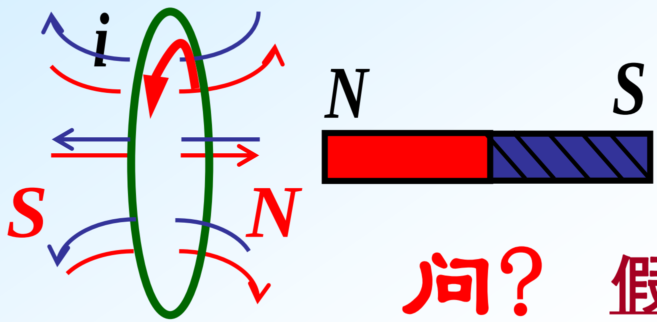
② 由右手螺旋法则确定回路L绕行的正方向；

③若 $\varepsilon > 0$，则 ε 的方向与L 的方向相同。 反之则相反。

讨论 楞次定律中“反抗”与法拉第定律中“–”号对应。

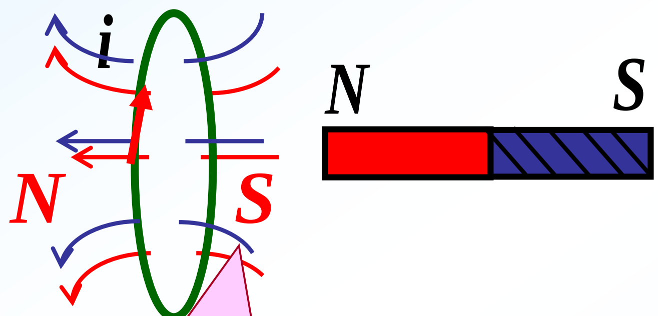
保证了电磁现象中的能量守恒与转换定律的正确,并且

也确定了电磁“永动机”是不可能的。



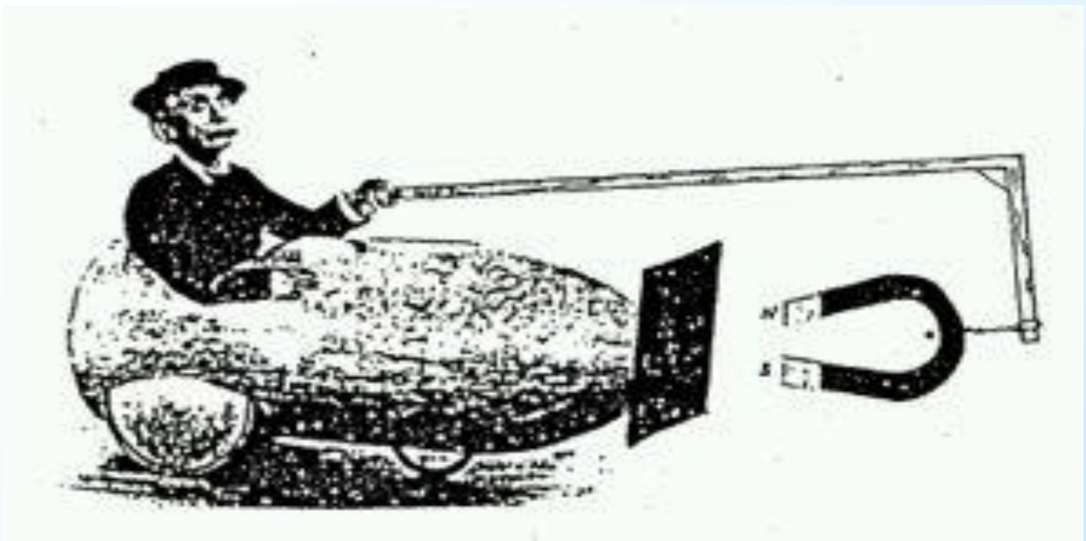
外力作功，并将它转换成回路中的电能。

问？ 假如没有 “–”或不是反抗将是什么情形？



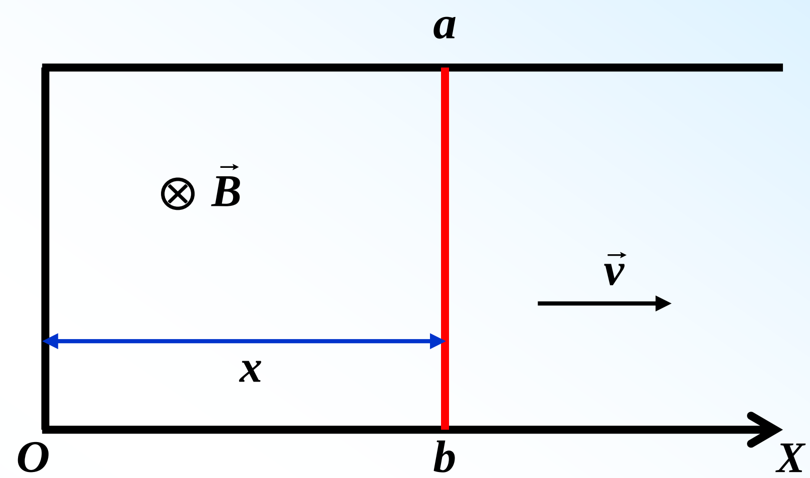
过程将自动进行，磁铁靠近线圈

导致$\Phi\uparrow \rightarrow i\uparrow$...同时B↑，导致磁铁靠近线圈，因此不须外界提供任何能量。



电磁永动机

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：

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

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

解二：

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

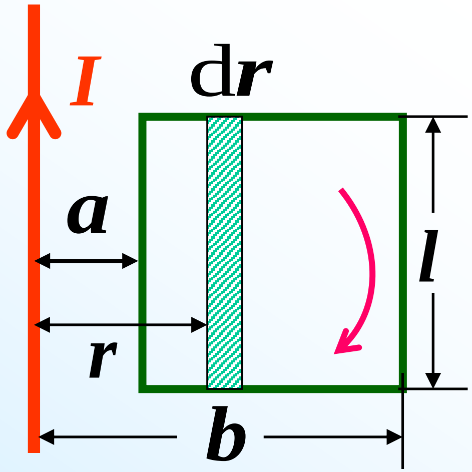
$$=\int_0^t ktLv dt=\frac{1}{2}kvLt^2$$

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

ϕ应为t时刻的磁通量

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

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

$$2)\ \varepsilon_i = -\frac{\mu_0 lk}{2\pi}\ln\frac{b}{a}$$

$$3)\ \varepsilon_i = -\frac{\mu_0 lI}{2\pi}\frac{(a-b)v}{(a+vt)(b+vt)}$$

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

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

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

全微分

微小量

含义不同

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

这样就有：

~~2）$v=0,\quad \therefore \varepsilon_i = 0$~~

~~3）$\varepsilon_i = -\dfrac{\mu_0 I}{2\pi r} l\cdot v$~~

~~4）$\varepsilon_i = -\dfrac{\mu_0 kt}{2\pi r} l\cdot v$~~

错在何处？

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

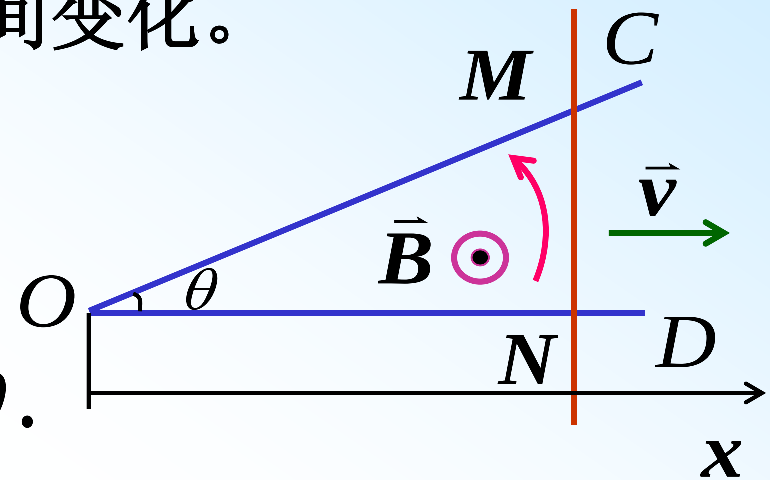
$\mathrm{d}\phi = \vec{B}\cdot \mathrm{d}\vec{S} + \vec{S}\cdot \mathrm{d}\vec{B}$

考虑特例，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，$x=vt$

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

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

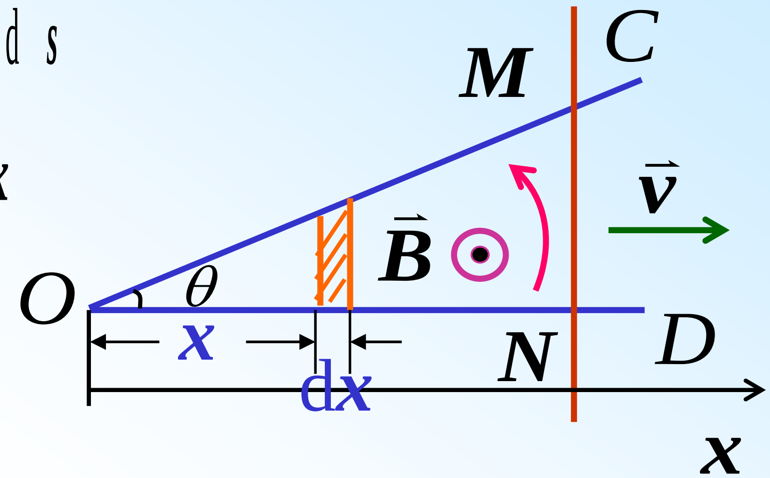
方向与绕向相反，只出现在MN上。

此处可直接利用对均匀场的公式：

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

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

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



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

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

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

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

若 $\varepsilon_i > 0$，　与绕向相同。

若 $\varepsilon_i < 0$，　与绕向相反。