电磁感应

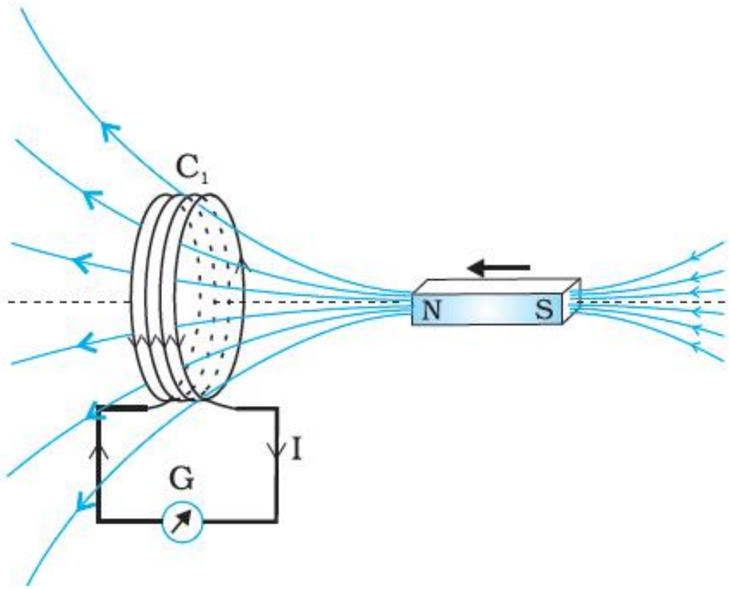
§1 法拉第电磁感应定律

§2 动生电动势与感生电动势

§3 自感与互感

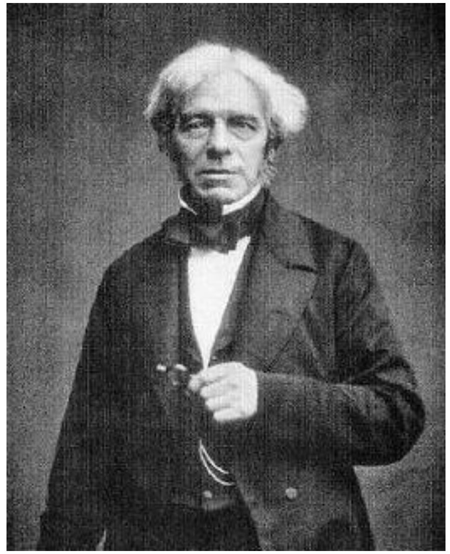
§4 磁场能量

§5 匀速运动点电荷的磁场

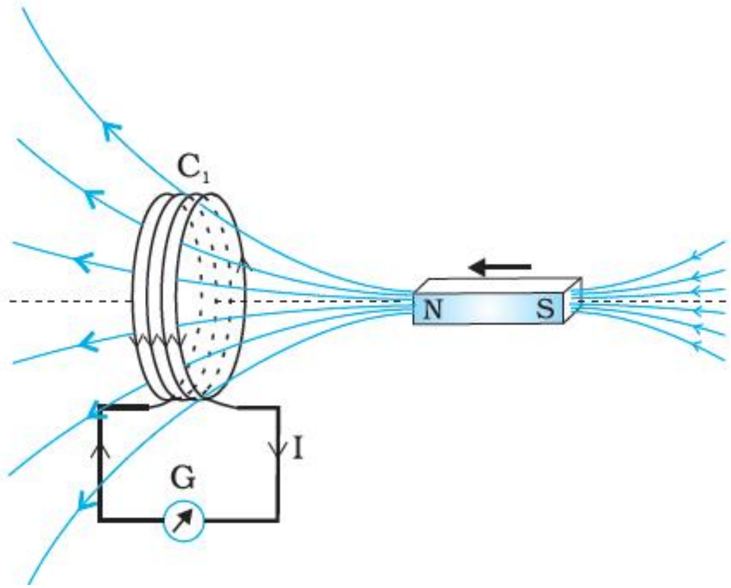


§1. 法拉第电磁感应定律

一、电磁感应现象



1831年, 法拉第:



通过一个闭合导体回路的磁通量发生变化时，回路中就有电流产生。（这电流称为感应电流）

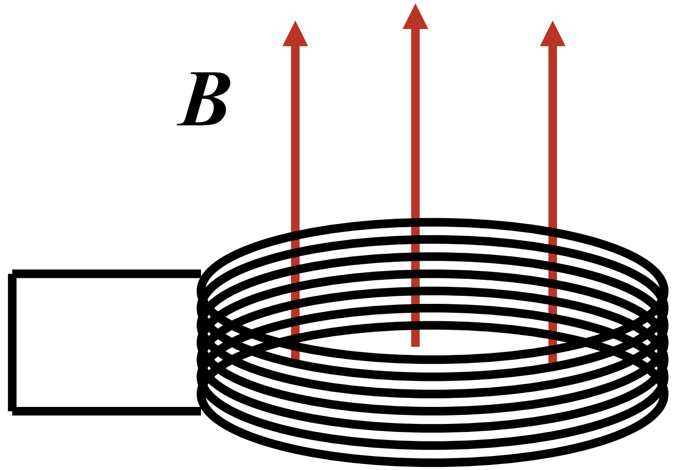
———该现象称为电磁感应现象

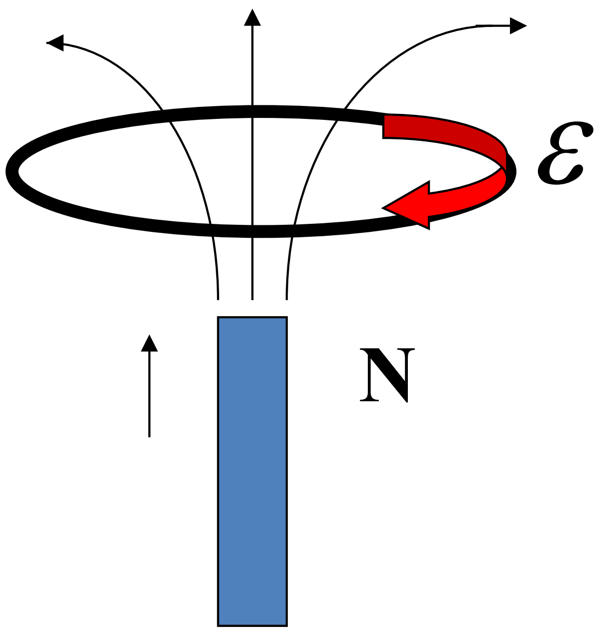
§ 1. 法拉第电磁感应定律

二、法拉第定律

N 匝相同的线圈组成回路

$$\varepsilon = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$$ 单位：伏特





$$\varepsilon = -N\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -\frac{\mathrm{d}\Psi}{\mathrm{d}t}$$

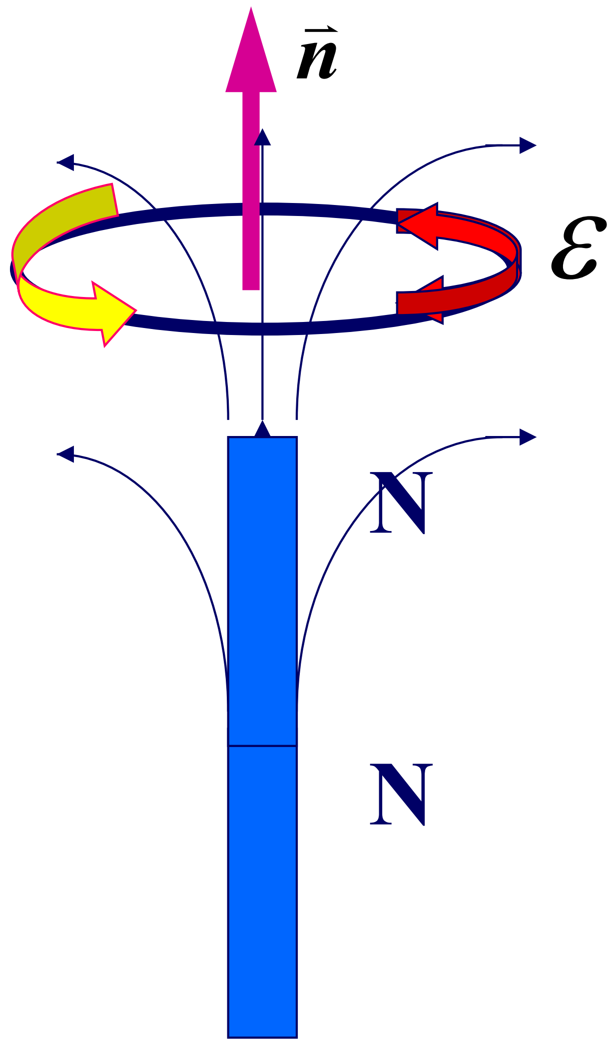
$\Psi = N\Phi$ 全磁通

§ 1. 法拉第电磁感应定律

二、法拉第定律

$$\varepsilon = -N\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -\frac{\mathrm{d}\Psi}{\mathrm{d}t}$$

方向的判定：



“–”表示感应电动势的方向, ε 和 Φ 都是标量，方向只是相对回路的绕行方向而言。

(1) $(\vec{B},\vec{n}) < \pi/2 \quad \Phi > 0$

$\Phi\uparrow \quad \dfrac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} > 0$ 则 $\varepsilon < 0$, 与绕行方向相反

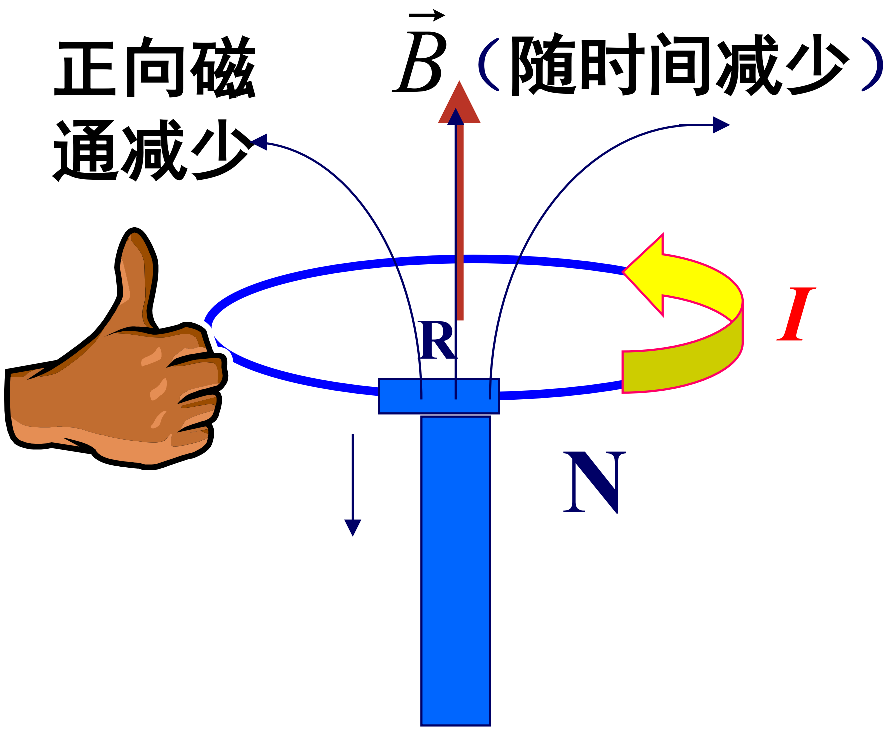
$\Phi\downarrow \quad \dfrac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} < 0$ 则 $\varepsilon > 0$, 与绕行方向相同

§ 1. 法拉第电磁感应定律

三、楞次定律

感应电流所激发的磁场总是**抵抗**回路中磁通量的变化.

能量守恒的体现



四、感应电流和感应电量

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = -\frac{1}{R}\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$$

$t_1 \sim t_2$ 时间内通过导线截面的电量：

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} I\mathrm{d}t = -\frac{1}{R}\int_{\Phi_1}^{\Phi_2} \mathrm{d}\Phi$$

$$Q = \frac{1}{R}(\Phi_1 - \Phi_2)$$

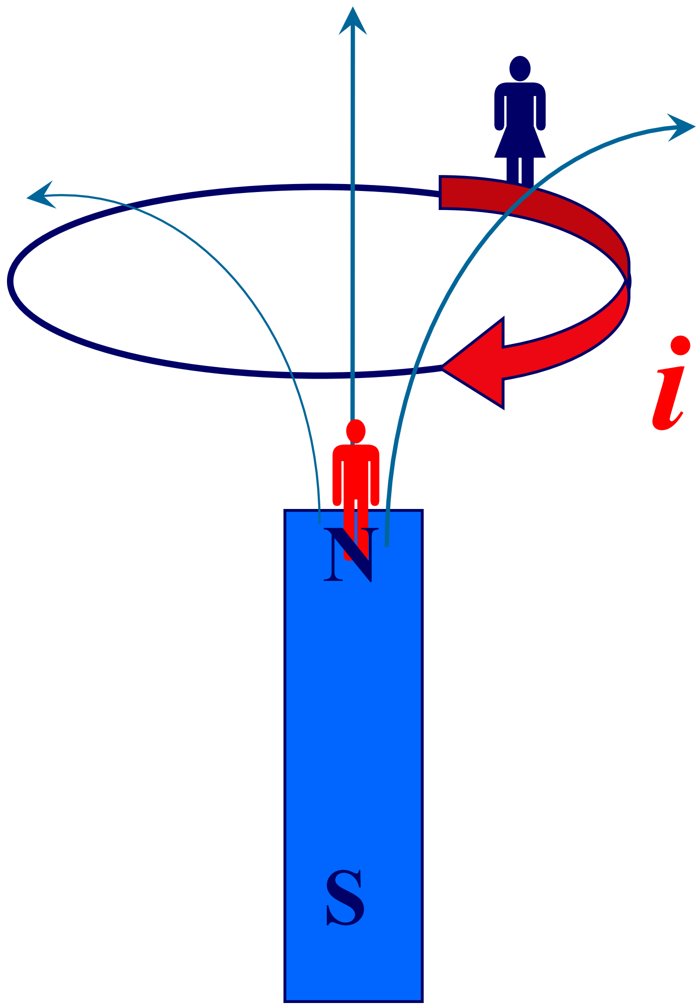
磁通计的设计原理

§ 1. 法拉第电磁感应定律

$$\varepsilon = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\iint_S \vec{B}\cdot\mathrm{d}\vec{S}\right)$$

$$\iint \vec{B}\cdot\mathrm{d}\vec{S} = \iint B\cos\theta\,\mathrm{d}S$$

B*, *θ*, *S*任一量变化，回路中存在*ε



动生电动势

——磁场中的导线运动、形状变化而产生的电动势

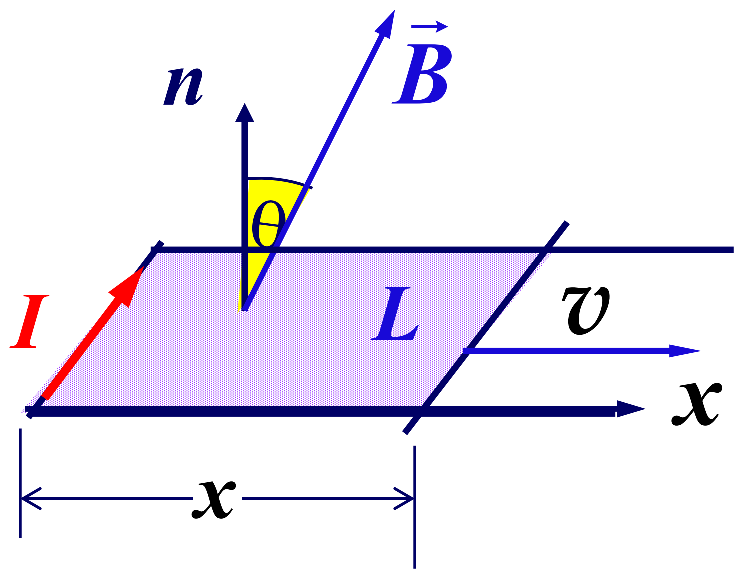
感生电动势

——磁场变化使导线中产生电动势

§ 2. 动生电动势和感生电动势

一、动生电动势

设直导线以 v 的速度沿 x 轴滑动，回路磁通量增加，产生动生电动势



$$|\varepsilon| = \left|\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}\right| = \vec{B}\cdot\frac{\mathrm{d}\vec{S}}{\mathrm{d}t}$$

$$= B\frac{\mathrm{d}(Lx\cos\theta)}{\mathrm{d}t}$$

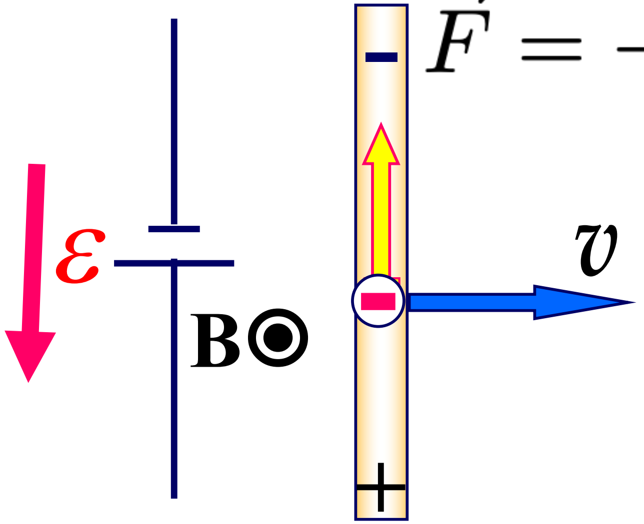
$$= BL\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\cos\theta$$

$$\varepsilon = BLv\cos\theta$$

方向？

§ 2. 动生电动势和感生电动势

动生电动势怎么产生的？



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

动生电动势的本质是
洛伦兹力作用的表现

洛伦兹力可以看作电子受的**非静电力**。

非静电场 $\vec{E}_k = \vec{v} \times \vec{B}$

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

$$\varepsilon = \int_{-}^{+} (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \mathrm{d}\vec{l}$$

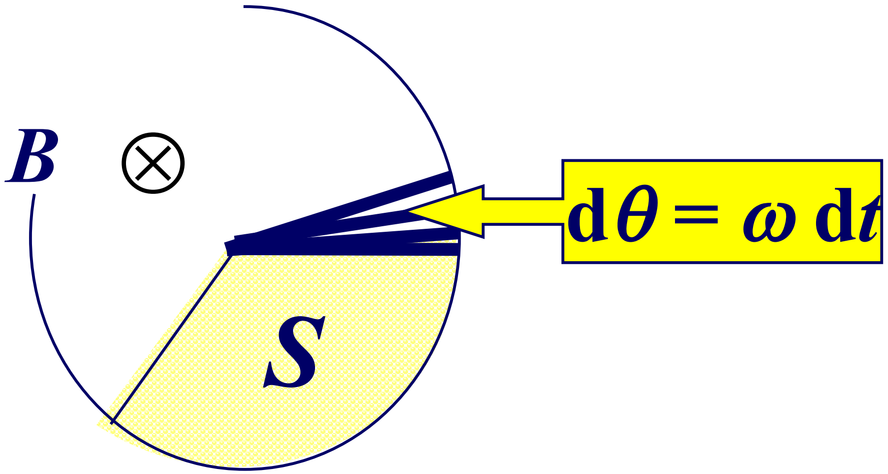
例： 长度为L的金属棒绕一端在垂直于均匀磁场的平面内以角速度 w 旋转。求：棒中的感应电动势。

解法1:

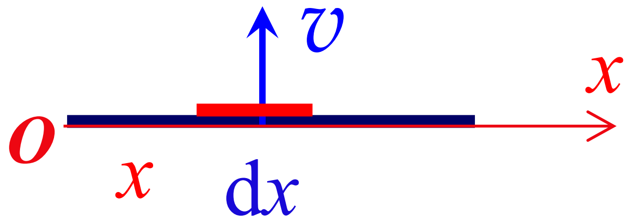
设想一个回路，金属棒的旋转使回路面积变化→磁通量变化

$$\varepsilon = B\frac{\mathrm{d}S}{\mathrm{d}t} = B\frac{\mathrm{d}(L^2\theta/2)}{\mathrm{d}t}$$

$$= \frac{1}{2}BL^2\omega$$



解法2:



棒上离端点 x处 $v = \omega x$

$$\mathrm{d}\varepsilon = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \mathrm{d}\vec{r}$$

$$\varepsilon = -\int_0^L vB\mathrm{d}x$$

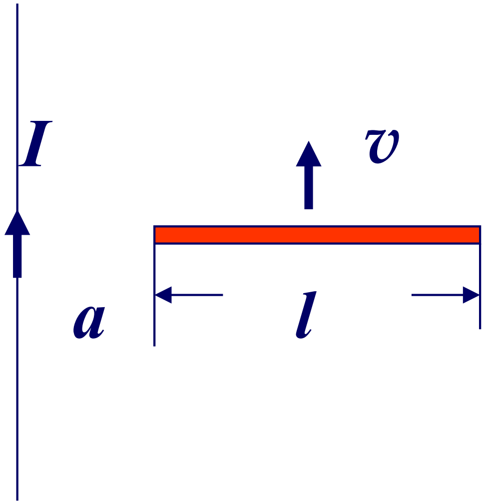
$$= -\int_0^L \omega x B\mathrm{d}x = -\frac{1}{2}\omega BL^2$$

例: 已知 $I\ \ l\ \ a\ \ v$。金属棒与直导线共面, 求：金属棒中 ε

$$\mathrm{d}\varepsilon = (\vec{v}\times\vec{B})\cdot\mathrm{d}\vec{r}$$

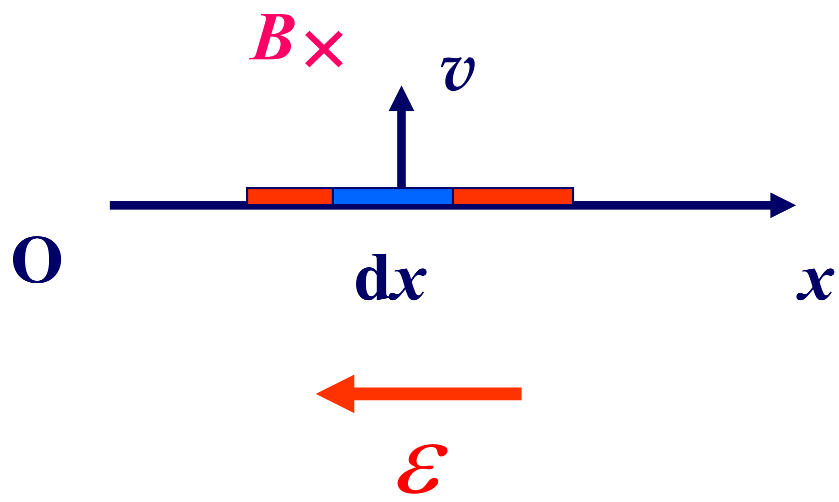
$$= -vB\mathrm{d}x \qquad B = \frac{\mu_0 I}{2\pi x}$$

$$= -\frac{\mu_0 I v}{2\pi x}\mathrm{d}x$$



$$\varepsilon = -\int_a^{a+l}\frac{\mu_0 I v}{2\pi x}\mathrm{d}x$$

$$= -\frac{\mu_0 I v}{2\pi}\ln\frac{a+l}{a}$$

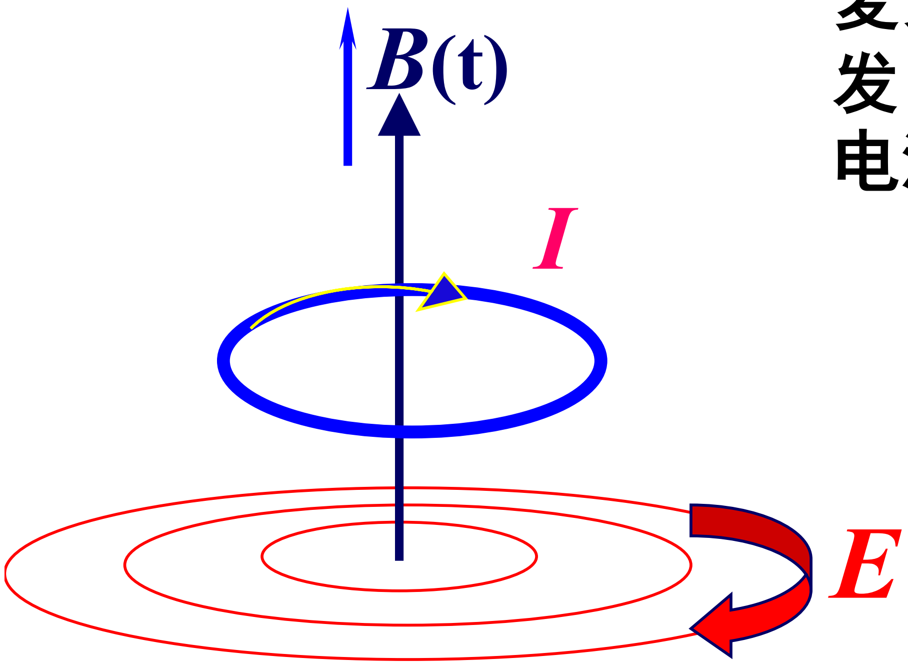


§ 2. 动生电动势和感生电动势

二、感生电动势与感生电场

静止的导线圈，只要磁场变化，其中就会有电流。

有电流产生，必存在电动势，非静电力是什么？



麦克斯韦假设：变化的磁场在周围激发了感生电场（涡旋电场），推动了电流。导线圈只起探测器作用。

电场线闭合

§ 2. 动生电动势和感生电动势

$$\varepsilon=-\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}=-\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\iint_S \vec{B}\cdot\mathrm{d}\vec{S}\right)\quad=-\iint_S \frac{\partial\vec{B}}{\partial t}\cdot\mathrm{d}\vec{S}$$

电动势定义： $\varepsilon=\oint_L \vec{E}\cdot\mathrm{d}\vec{l}$

$$\oint_L \vec{E}\cdot\mathrm{d}\vec{l}=-\iint_S \frac{\partial\vec{B}}{\partial t}\cdot\mathrm{d}\vec{S} \Rightarrow \nabla\times\vec{E}=-\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}$$

涡旋电场是有旋场

涡旋电场是非保守场，所以不再有电势的概念了。一段导线在涡旋电场中，两端的感应电动势不仅与两端位置有关，而且与导线的形状有关。

§ 2. 动生电动势和感生电动势

静电场与涡旋电场比较

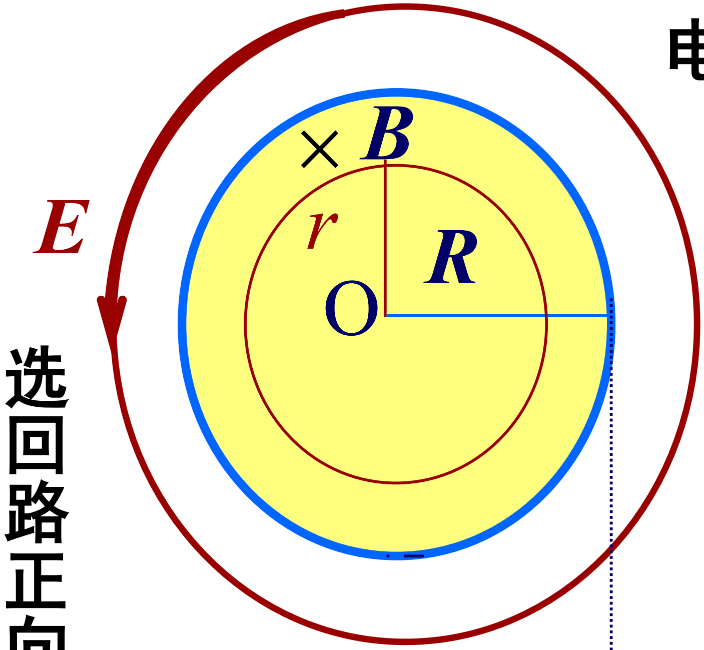
相同点： 对电荷有作用力

不同点：	静电场	涡旋电场
起源	静止电荷	变化磁场
性质	$\oint_L \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = 0$	$\oint_L \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{l} \neq 0$
	保守场	非保守场

例：空间均匀磁场被限制在半径为R的圆柱形空间 $\dfrac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t}>0$

求：涡旋电场

解：对称的磁场➔对称的涡旋电场➔
电场线是一系列同心圆、方向逆时针。



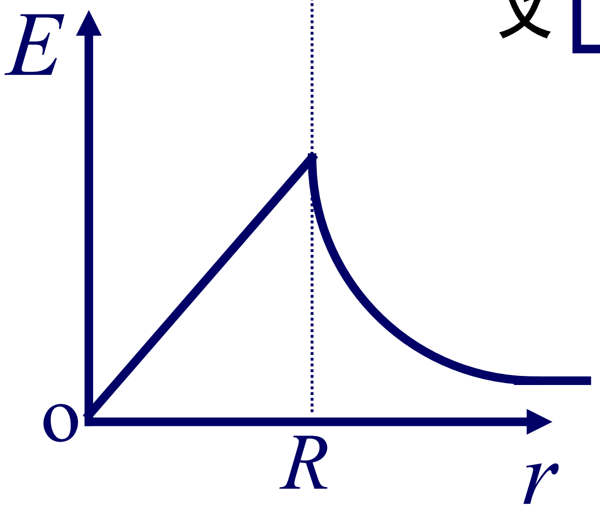
选回路正向沿逆时针方向

半径 r 的圆周上感应电动势

$$\varepsilon=\left|\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}\right| = \begin{cases} \pi r^2\dfrac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t} & (r<R) \\ \pi R^2\dfrac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t} & (r>R) \end{cases}$$

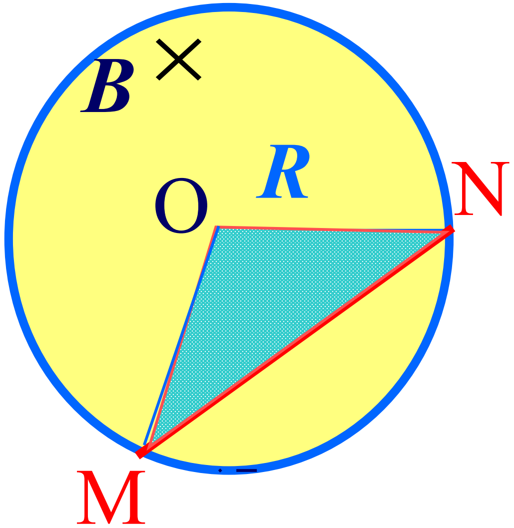
由定义

$$\oint \vec{E}\cdot\mathrm{d}\vec{l}=E\oint \mathrm{d}l=2\pi r E$$



$$E=\begin{cases} \dfrac{r}{2}\dfrac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t} & (r<R) \\ \dfrac{R^2}{2r}\dfrac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t} & (r>R) \end{cases}$$

分别求**直**导线MN及**弧形**导线MN两端 ε？

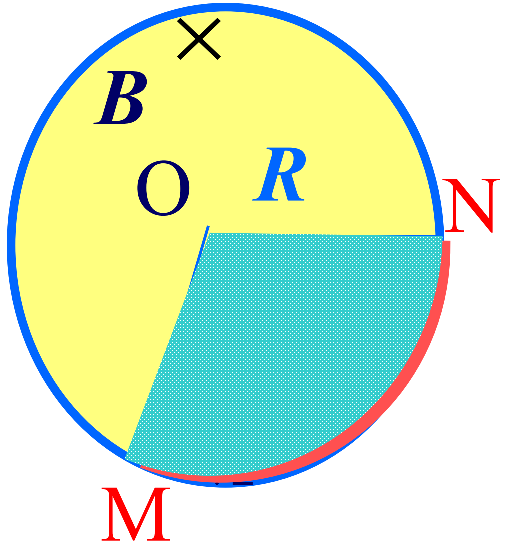


注意：电场线与半径处处正交，所以

$$\varepsilon_{NO} = \int_N^O \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{r} = 0$$

$$\varepsilon_{OM} = 0$$

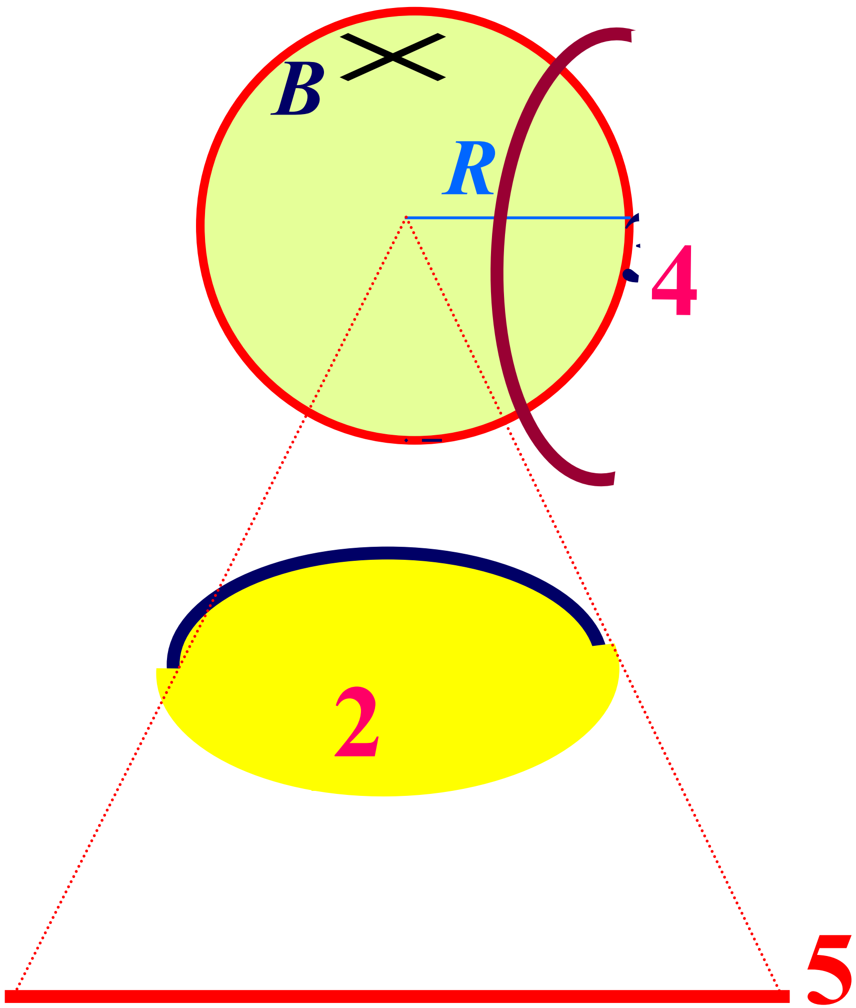
$$\varepsilon_1 + \varepsilon_{NO} + \varepsilon_{OM} = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$$



$$\varepsilon_1 = S_\Delta \frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t}$$

$$\varepsilon_1 = S_{\smile} \frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t}$$

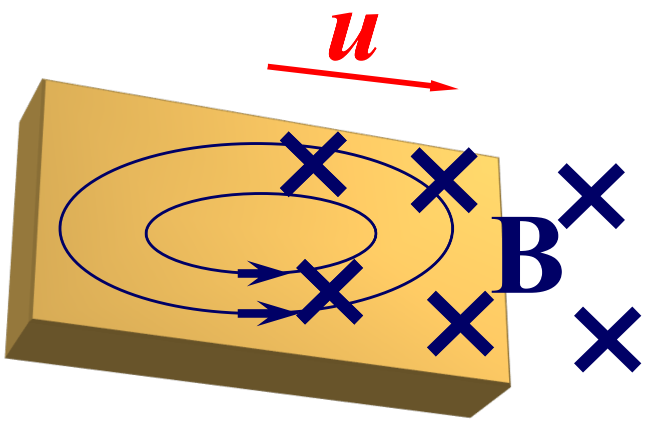
限制在圆柱形空间的磁场随时间变化，讨论：以下各导线中的感应电动势和感应电流

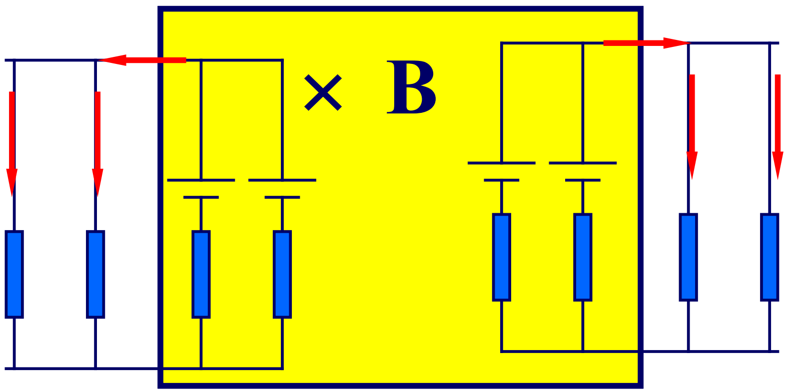


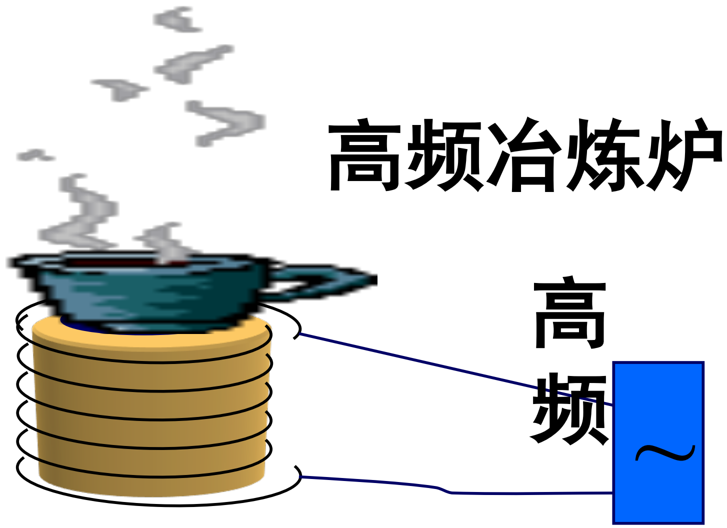
	ε	I
1	×	×
2	✓	×
3	✓	✓
4	✓	×
5	✓	×

涡旋电流

产生的原因：块状导体在
- 1、涡旋电场作用下
- 2、在磁场中运动







高频冶炼炉

电磁阻尼：<u>阻尼摆</u>