动生电动势
、感生电动势

§ 为什么要分别讨论动生、感生电动势

历史原因：

动生电动势和感生电动势都来源于法拉第电磁感应定律，只是电动势的产生的原因不同。

本讲基本要求

掌握动生电动势和感生电动势的相关计算

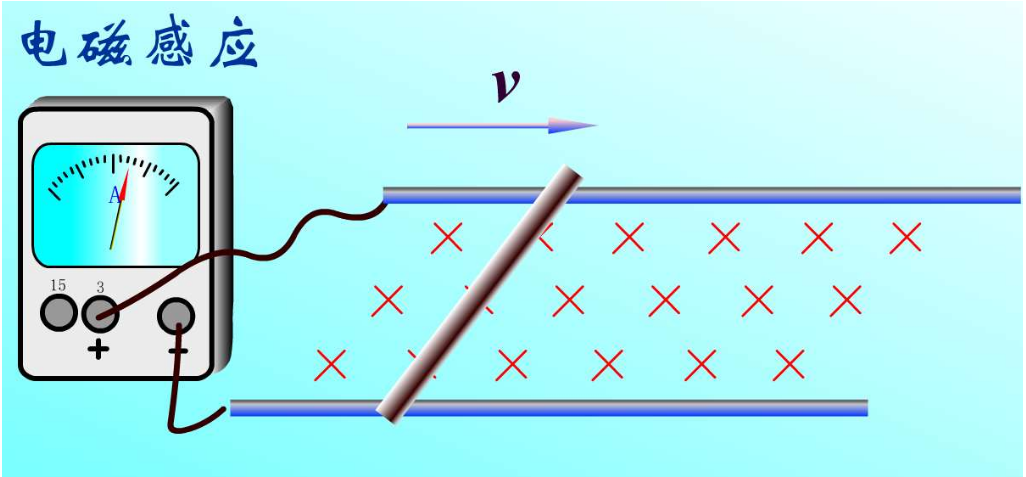
§15.3 动生电动势

主要内容：

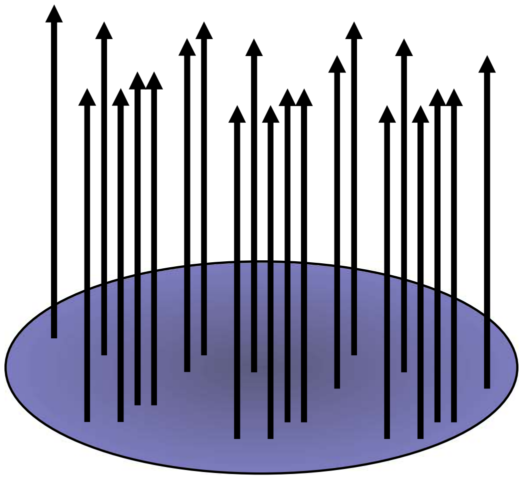
1. 动生电动势
2. 运动导体中的感应电动势
3. 转动线圈的感应电动势

§15.3　动生电动势

1.磁场不变，相对运动（动生电动势）



2.无相对运动，磁场变化（感生电动势）

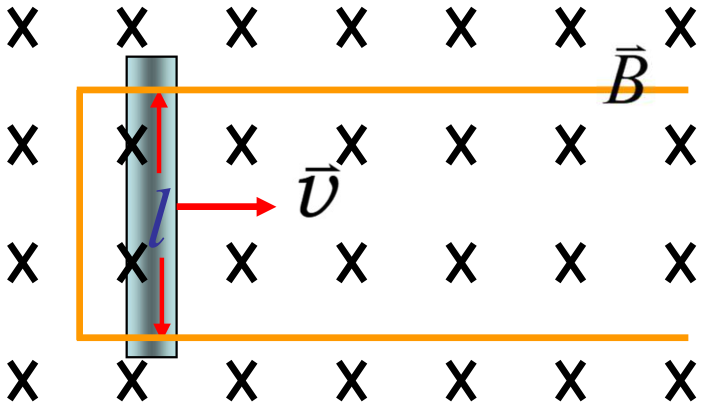


15.3.1 动生电动势及其非静电力

$$\varepsilon = \left| -\frac{\mathrm{d}\Phi_{\mathrm{m}}}{\mathrm{d}t} \right| = \left| -\frac{\mathrm{d}(BS)}{\mathrm{d}t} \right|$$

$$= Bl \left| -\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} \right|$$

$$= Blv$$

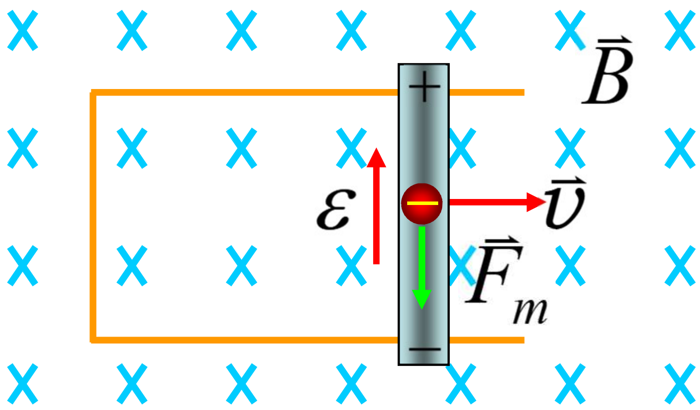


15.3.1 动生电动势及其非静电力

◆动生电动势的非静电力

非静电力 $\vec{F}_m = -e(\vec{v} \times \vec{B})$

非静电场强 $\vec{E}_K = \dfrac{\vec{F}_m}{-e} = \vec{v} \times \vec{B}$

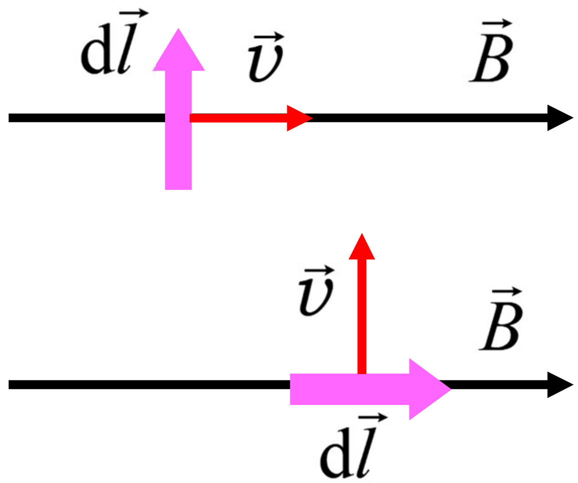


动生电动势

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

➢ 讨论

(1) 矢量关系

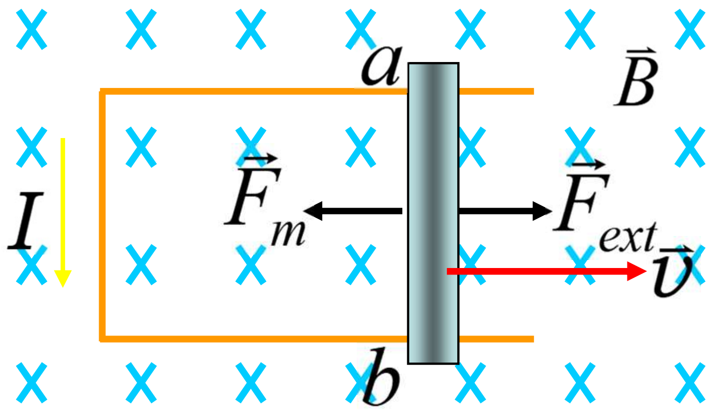


$$\varepsilon = 0 \begin{cases} \vec{v} \times \vec{B} = 0 \\ \vec{v} \times \vec{B} \neq 0 \quad (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} = 0 \end{cases}$$

(2) 导线回路

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

(3)电能是由外力做功所消耗的机械能转换而来

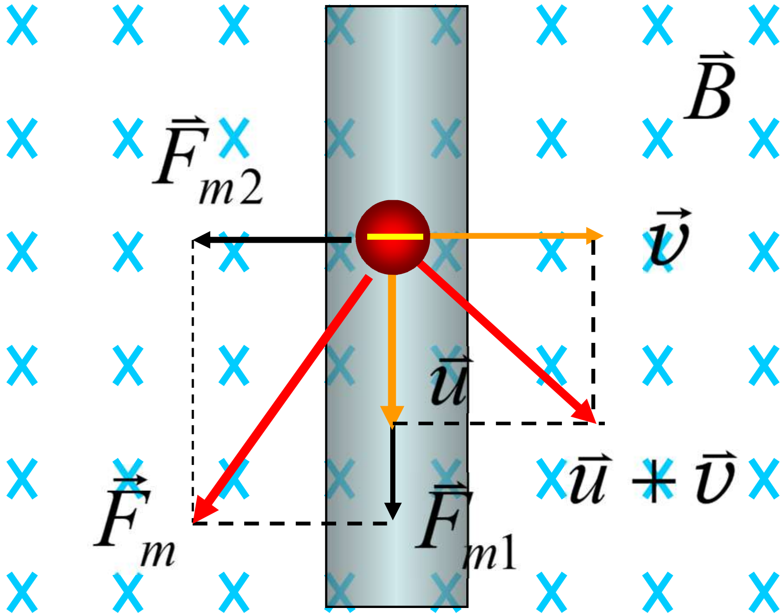


(4)动生电动势的非静电力是洛伦兹力，这与洛伦兹力不作功是否矛盾?

合速度： $u+v$

洛伦兹力： F_m

结论：洛伦兹力不做功
非静电力是其分力



$$\text{分力}\vec{F}_{m1}\text{的功率}:\vec{F}_{m1}\cdot(\vec{v}+\vec{u})=\vec{F}_{m1}\cdot\vec{u}=\left(-e\vec{v}\times\vec{B}\right)\cdot\vec{u}=evBu$$

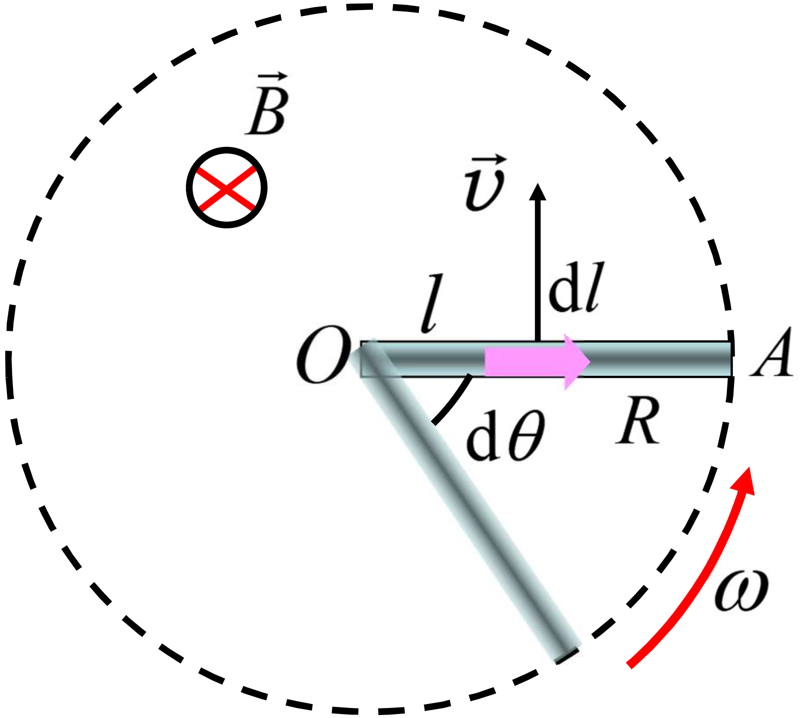
$$\text{分力}\vec{F}_{m2}\text{的功率}:\vec{F}_{m2}\cdot(\vec{v}+\vec{u})=\vec{F}_{m2}\cdot\vec{v}=\left(-e\vec{u}\times\vec{B}\right)\cdot\vec{v}=-euBv$$

洛伦兹力的功率： $\vec{F}_m\cdot(\vec{u}+\vec{v})=(\vec{F}_{m1}+\vec{F}_{m2})\cdot(\vec{u}+\vec{v})=0$

例 在匀强磁场B中，长R的铜棒绕其一端O在垂直于B的平面内转动，角速度为ω

求 棒上的电动势

解 方法一 (动生电动势)



$$\varepsilon=\int_O^A(\vec{v}\times\vec{B})\cdot\mathrm{d}\vec{l}$$

$$=-\int_O^R vB\mathrm{d}l=-\int_O^R l\omega B\mathrm{d}l=-\frac{BR^2}{2}\omega$$

结果为负值，表示与$\mathrm{d}l$方向相反

方法二(法拉第电磁感应定律)

在$\mathrm{d}t$时间内导体棒切割磁场线 $|\mathrm{d}\Phi|=\frac{1}{2}R^2\mathrm{d}\theta\, B$

$$\varepsilon=\left|\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}\right|=\frac{1}{2}BR^2\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{2}BR^2\omega$$

方向由楞次定律确定

例　在空间均匀的磁场中导线*ab*绕*oo'*轴以匀角速度*ω*旋转

求 导线*ab*中的电动势

解　$\left|\vec{v}\times\vec{B}\right| = vB = \omega lB\sin\alpha$

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

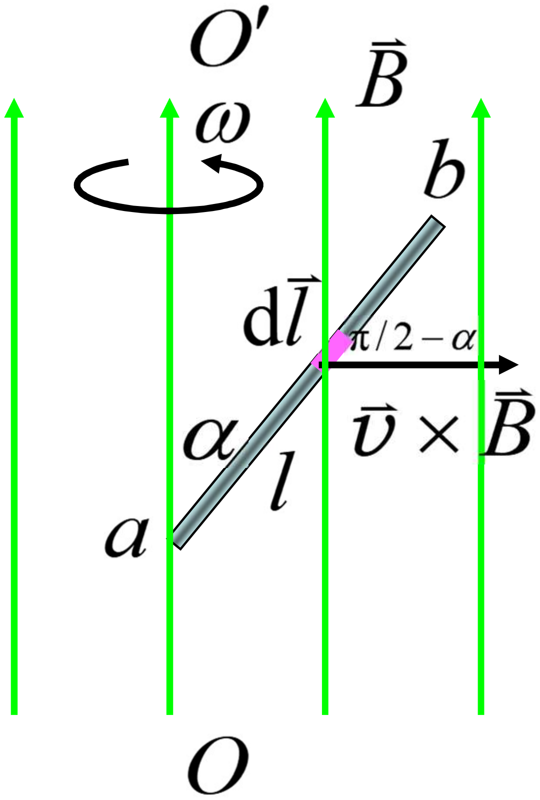
$$= vB\mathrm{d}l\cos(\frac{\pi}{2}-\alpha)$$

$$= B\omega\sin^2\alpha l\mathrm{d}l$$

$$\varepsilon = \int\mathrm{d}\varepsilon_i = B\omega\sin^2\alpha\int_0^L l\mathrm{d}l$$

$$= \frac{1}{2}\omega Bl^2\sin^2\alpha > 0$$

结果为正，表示电动势与*dl*方向一致



§15.4 感生电动势

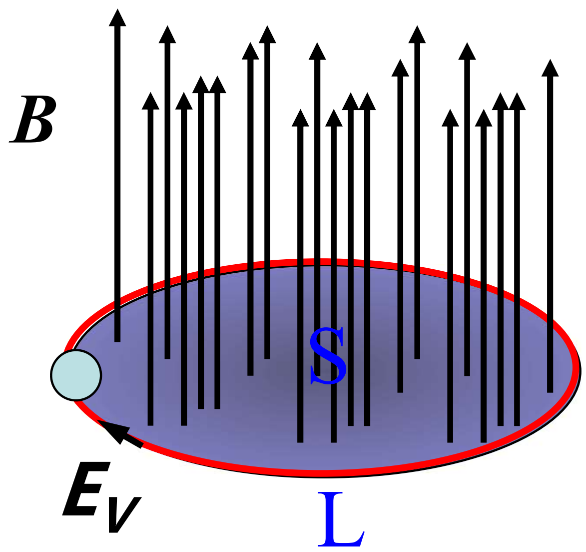
主要内容：

1. 感生电动势的非静电力 感生电场
2. 感生电场的性质
3. 感生电动势的计算
4. 导体在时变磁场里运动时的感应电动势

15.4.1感生电动势的非静电力 感生电场

变化的磁场-----驱动线圈中的电荷作定向运动

实验上：变化的磁场在其周围激发的一种电场——感生电场。



$$\oint_L \vec{E}_{\mathrm{V}} \cdot \mathrm{d}\vec{l} = -\frac{\mathrm{d}\psi}{\mathrm{d}t}$$

感生电场，会驱动电荷在导体中作定向运动，是感生电动势的非静电力。

15.4.1 感生电动势的非静电力 感生电场

理论上：**麦克斯韦假设**

变化的磁场 $\xrightarrow{\text{激发出}}$ **涡旋电场** $\xrightarrow{\text{作用于}}$ **自由电荷**

- **涡旋电场假设：麦克斯韦电磁理论中的第一条假设**
- **涡旋电场是非静电性质的场**

15.4.2 感生电场的性质

(1) 静电场与涡旋电场的性质对比

激发方式 $\begin{cases} \text{静止的电荷} \\ \text{变化的磁场} \end{cases}$

环路定理 $\begin{cases} \oint_L \vec{E}_{\text{静}} \cdot d\vec{l} = 0 \\ \oint_L \vec{E}_{\text{V}} \cdot d\vec{l} = -\dfrac{d\psi}{dt} \neq 0 \end{cases}$

电场性质 $\begin{cases} \text{保守场} \\ \text{非保守场} \end{cases}$

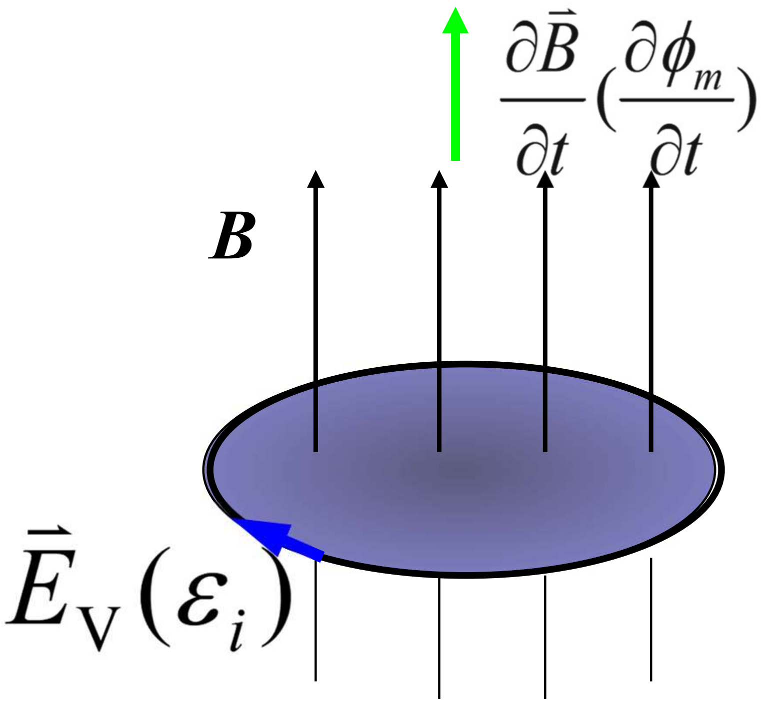
高斯定理 $\begin{cases} \oiint_S \vec{E}_{\text{静}} \cdot d\vec{S} = \dfrac{1}{\varepsilon_0} \sum_{\text{内}} q_i \\ \oiint_S \vec{E}_{\text{V}} \cdot d\vec{S} = 0 \end{cases}$

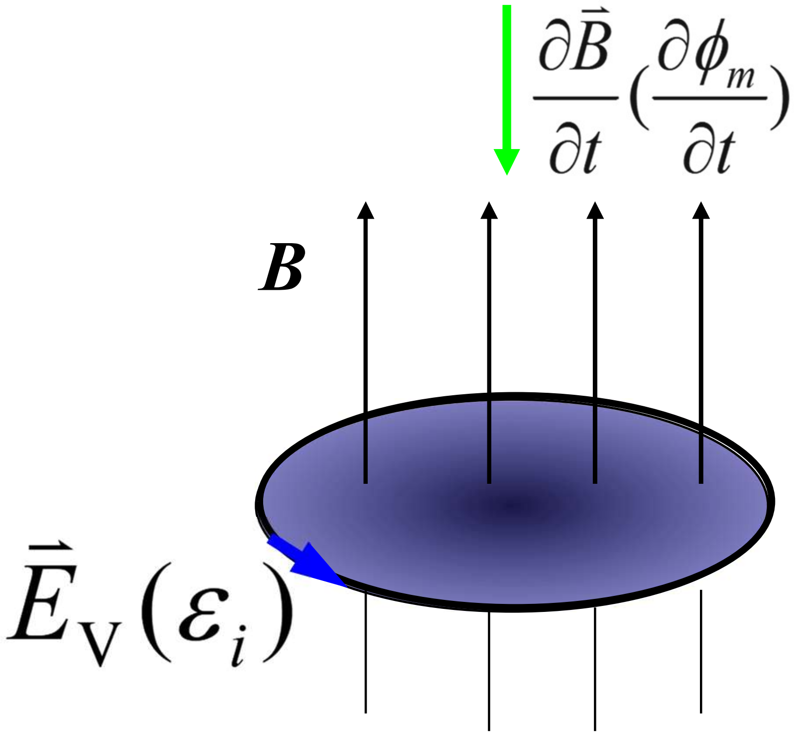
电场线形状 $\begin{cases} \text{不闭合} \\ \text{闭合} \end{cases}$

15.4.2 感生电场的性质

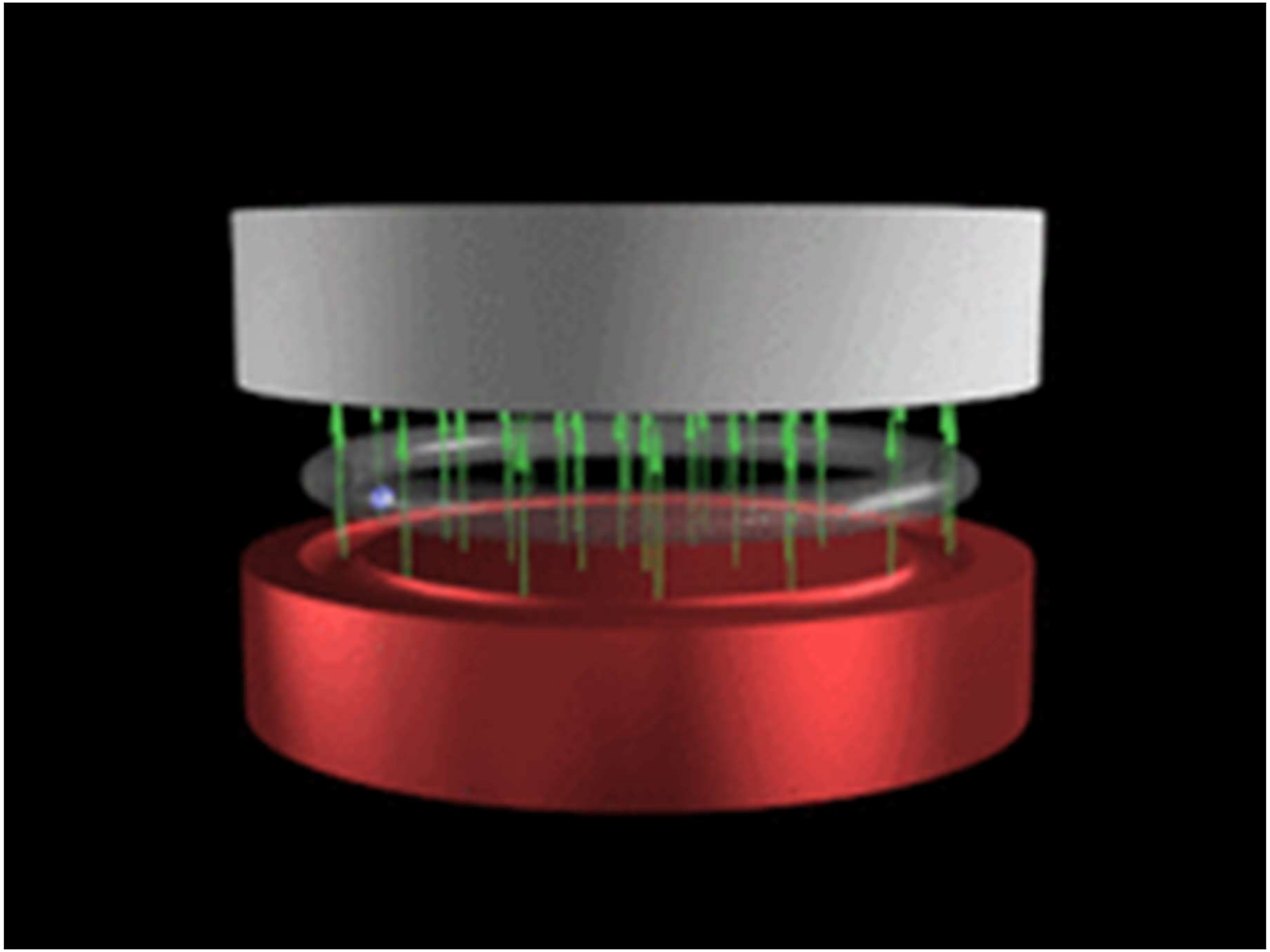
(2) 感生电场与磁场的变化率的方向

$$\varepsilon_i = \oint_L \vec{E}_\mathrm{V} \cdot \mathrm{d}\vec{l} = -\iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \mathrm{d}\vec{S}$$



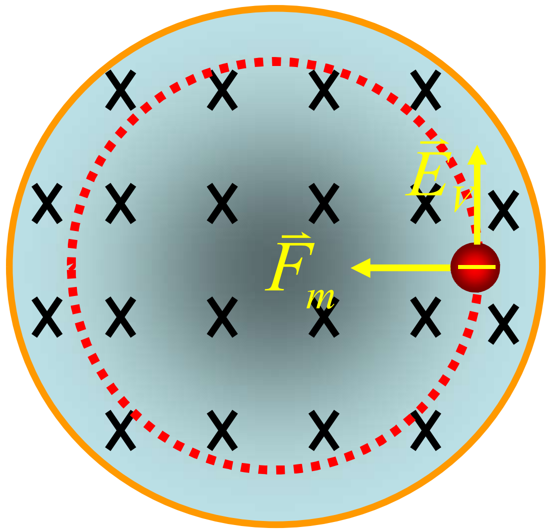


（3）感生电场的应用 电子感应加速器



15.3.2 电子感应加速器

有旋电场力(加速电子)
洛伦兹力(向心力)
} **加速圆周运动**



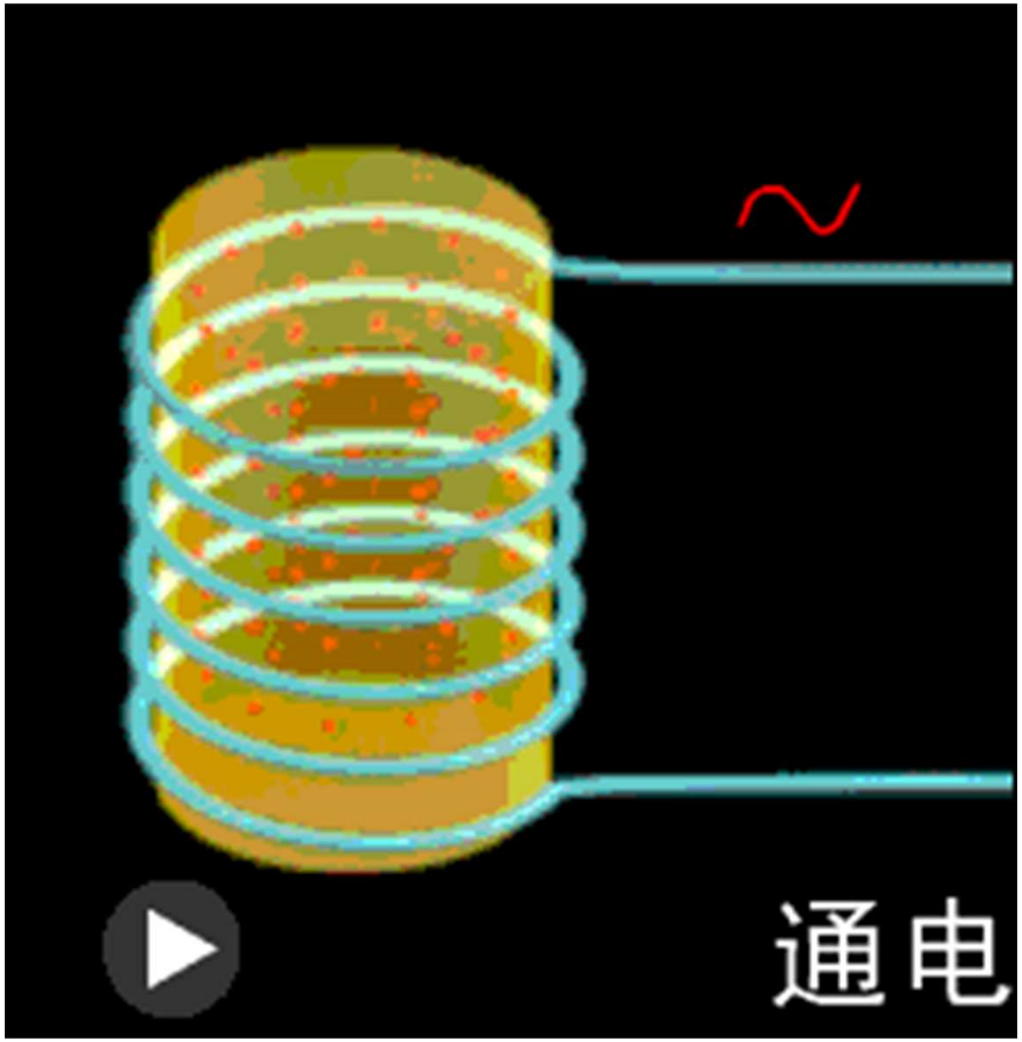
电子维持在不变的圆形轨道R上加速需要满足的条件：

$$B_R = \frac{1}{2}\overline{B}$$

提供洛伦兹力，改变电子的运动方向

轨道内磁场的平均值，提供涡旋电场力，加速电子

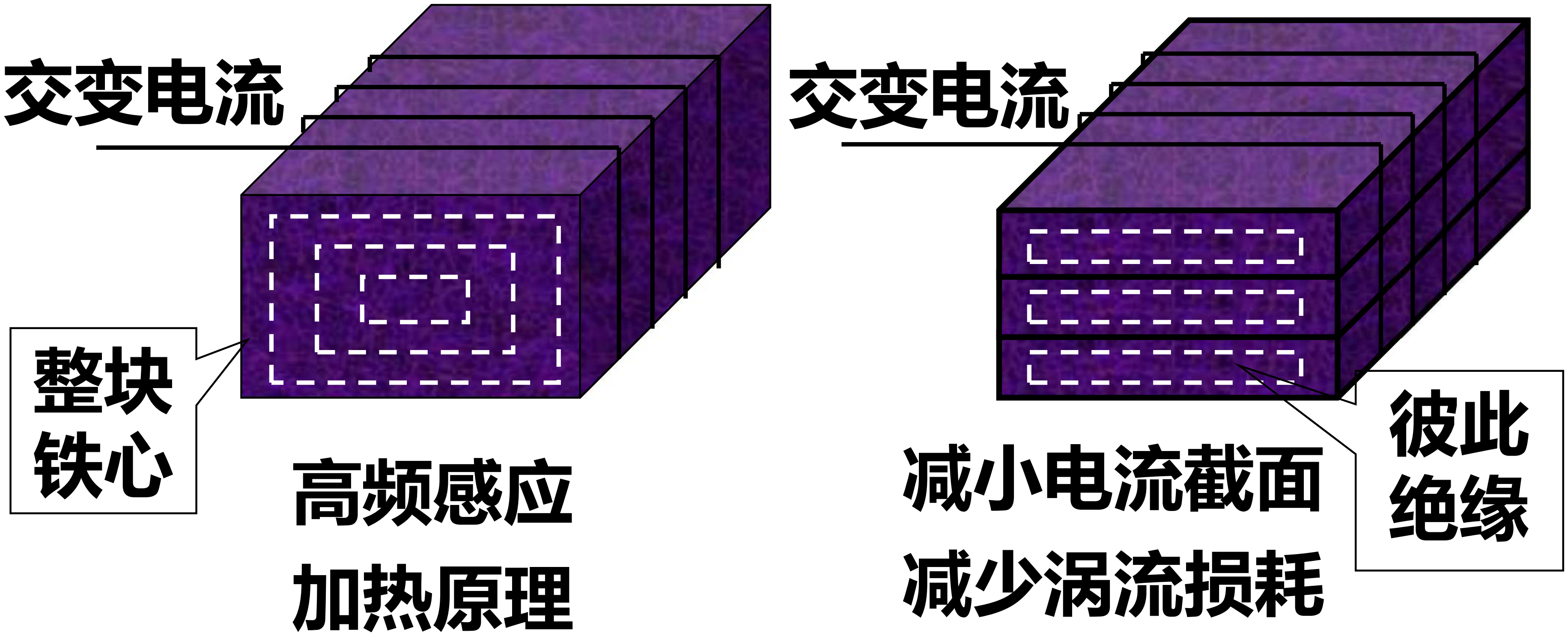
涡流



变化磁场产生涡旋电场，引起涡旋状电流（涡流）

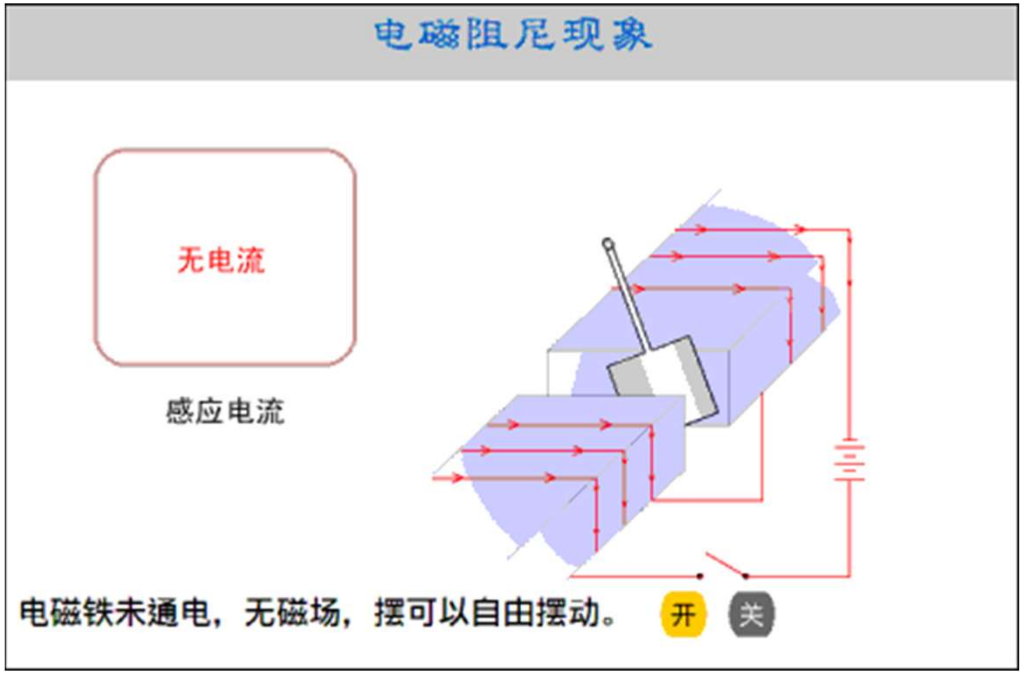
悬浮：涡流磁场和外磁场方向相反

涡流



电磁阻尼

电磁阻尼——涡流所产生的机械效应



电磁仪表中指针摆动的迅速稳定

火车中的电磁制动装置

15.4.3 感生电动势的计算

1. 由电动势的定义出发进行计算

$$\varepsilon = \int_L \vec{E}_i \cdot \mathrm{d}\vec{l}$$

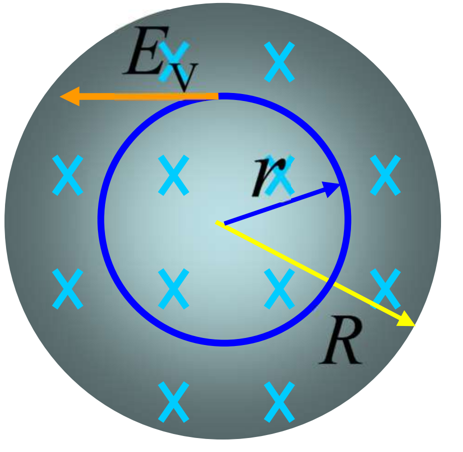
2. 用法拉第电磁感应定律计算

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

例 一半径为R的长直螺线管中载有变化电流，当磁感应强度的变化率 $\partial B/\partial t$ 以恒定的速率增加时，

求（1）管内外的 E_V

解 回路L：逆时针；S正方向：向外（正方向）



管内：$$\oint_L \vec{E}_\mathrm{V}\cdot \mathrm{d}\vec{l} = -\iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\cdot \mathrm{d}\vec{S}$$

$$E_\mathrm{V}\cdot 2\pi r = \frac{\partial B}{\partial t}\pi r^2$$

$$E_\mathrm{V} = \frac{r}{2}\frac{\partial B}{\partial t}$$

管外：$$E_\mathrm{V}\cdot 2\pi r = \frac{\partial B}{\partial t}\pi R^2$$

$$E_\mathrm{V} = \frac{R^2}{2r}\frac{\partial B}{\partial t}$$

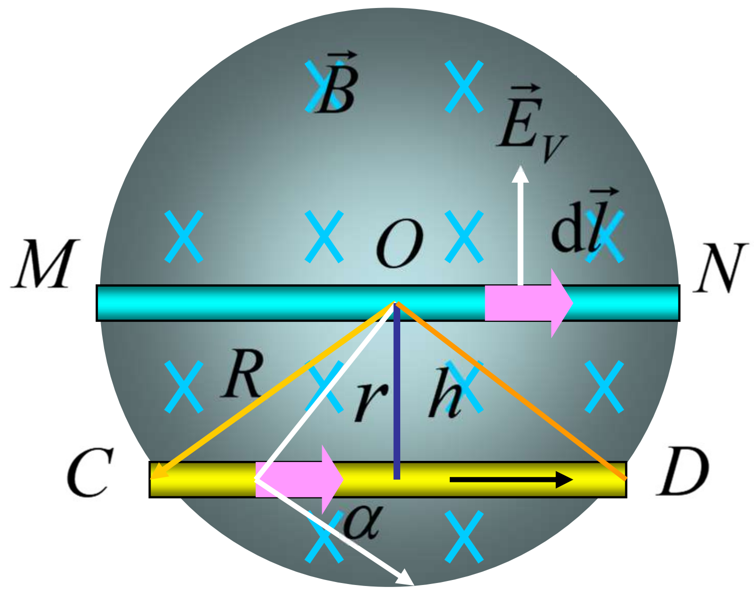
求（2）导体棒*MN*、*CD*的感生电动势

解 方法一 $E_V = \dfrac{r}{2}\dfrac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t}(r<R)$

$$\varepsilon_{MN} = \int_M^N \vec{E}_V \cdot \mathrm{d}\vec{l} = 0$$

$$\varepsilon_{CD} = \int_C^D \vec{E}_V \cdot \mathrm{d}\vec{l} = \int_C^D E_V \cos\alpha \mathrm{d}l$$

$$= \int_o^L \frac{r}{2}\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t}\frac{h}{r}\mathrm{d}l = \frac{hL}{2}\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t}$$



方法二(用法拉第电磁感应定律)(补逆时针回路 *OCDO*)

$$\varepsilon = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}(BLh/2)}{\mathrm{d}t} = \varepsilon_{OC} + \varepsilon_{CD} + \varepsilon_{DO} = \varepsilon_{CD} = \frac{hL}{2}\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t}$$

小结

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

$$\varepsilon_i = \oint_L \vec{E}_{\mathrm{v}} \cdot \mathrm{d}\vec{l} = -\iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \mathrm{d}\vec{S}$$

思考题

1. 如图所示，显然图1为动生电动势，图2为感生电动势。然而图1和图2只不过是同一运动在不同参考系中的结果。是否可以这样理解：动生电动势和感生电动势是等价的，其区别只是来源于不同的参考系。

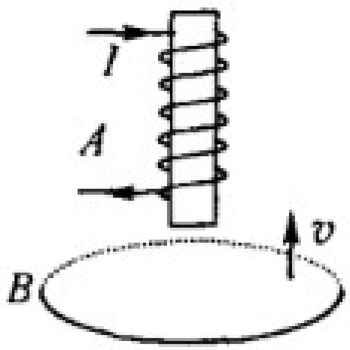


图 1

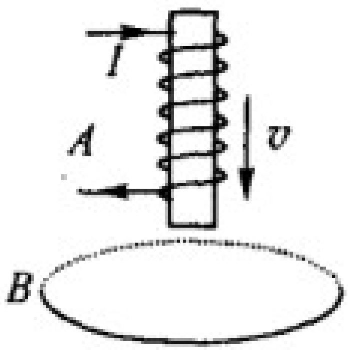


图 2