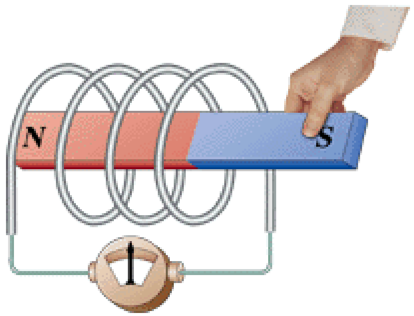
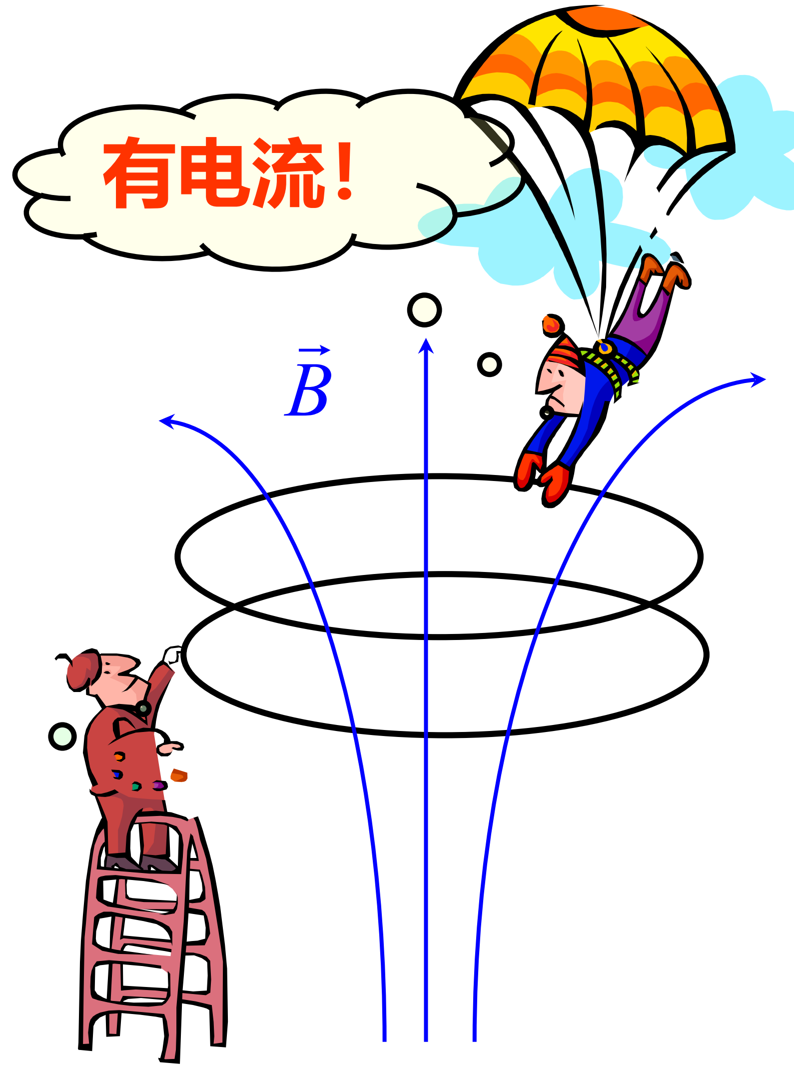
➢电磁感应现象



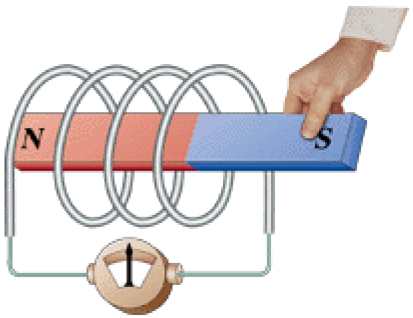


➢法拉第电磁感应定律

导体回路中产生的感应电动势 ε_i 的大小与穿过回路的磁通量 Φ 对时间的变化率成正比

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

➢电磁感应现象



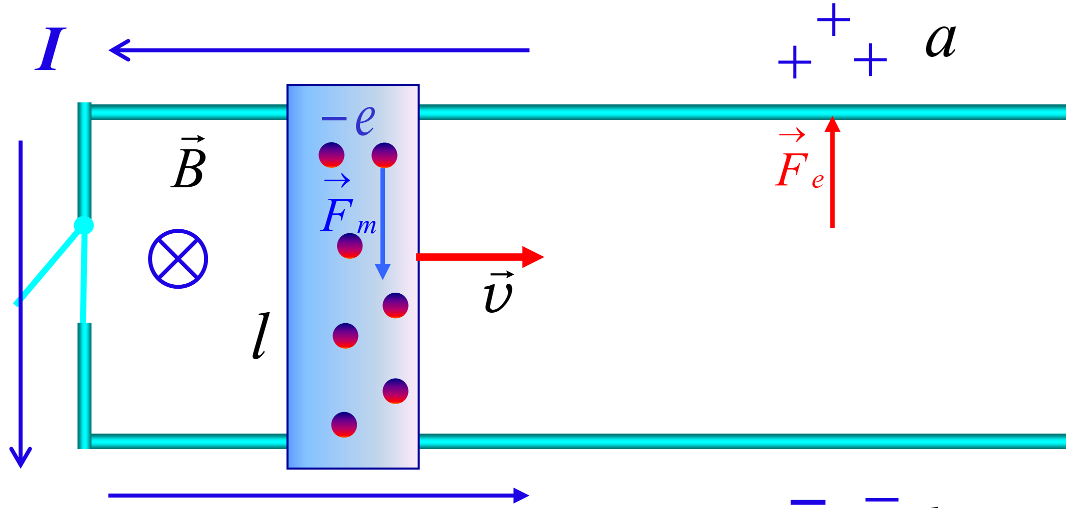
感生电动势

➢动生电动势

● 电子受洛伦兹力

$$\vec{F}_m = -e(\vec{\upsilon} \times \vec{B})$$

—— 非静电力 $\vec{F}_K$



● 非静电场

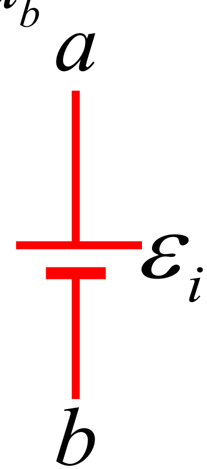
$$\vec{E}_K = \frac{\vec{F}_K}{-e} = \vec{\upsilon} \times \vec{B}$$

$u_a > u_b$

● 动生电动势

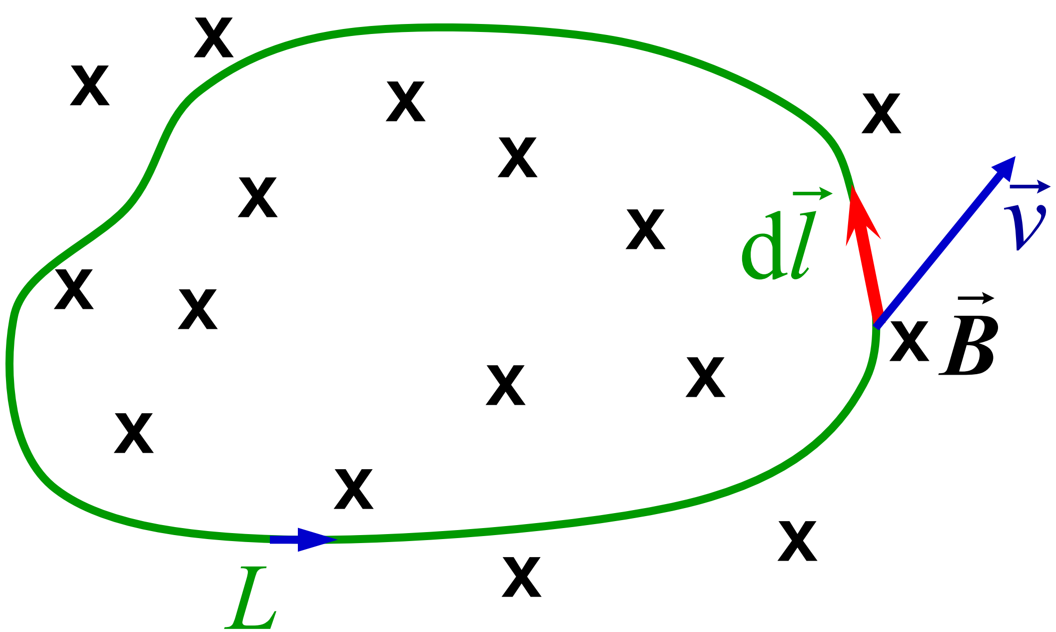
$$\varepsilon_i = \int_-^+ \vec{E}_K \cdot \mathrm{d}\vec{l} = \int_-^+ (\vec{\upsilon} \times \vec{B}) \cdot \mathrm{d}\vec{l}$$

$$= \int_b^a \upsilon B \mathrm{d}l = \upsilon B l$$



任意形状的导线回路L，在恒定磁场中运动或形变，回路中产生的动生电动势为：

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



动生电动势产生的条件：

①不要求回路闭合

②在磁场中运动的导体

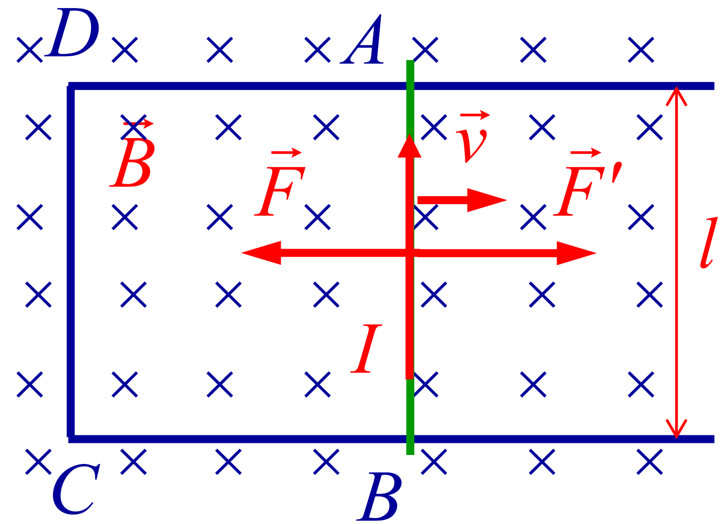
③导体运动必须切割磁力线

能量转换分析——电能从哪里转化而来?

设电路中感应电流为I，感应电动势做功的功率为

$$P = I_i \varepsilon_i = I_i Blv$$

导体棒AB受到安培力大小为$F_m = IlB$，方向向左。



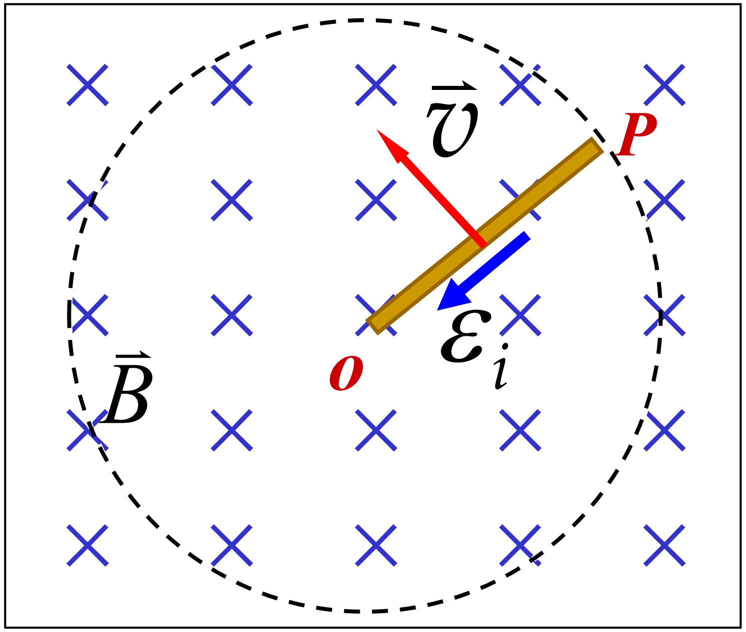
为了使导体棒匀速向右运动，必须有外力$F_{外}$与F_m平衡．外力的功率为

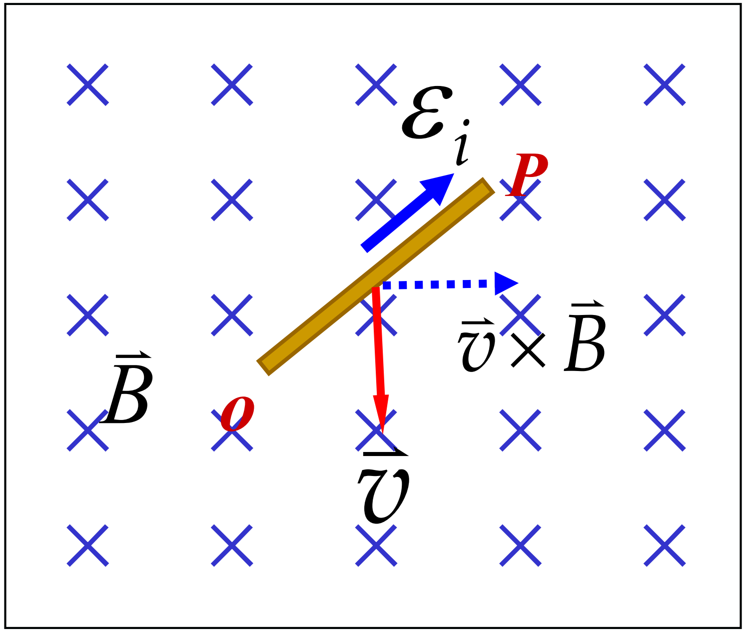
$$P = F'v = I_i lBv$$

电路中动生电动势提供的电能是由外力作功所消耗的机械能转换而来的

方向判断举例

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



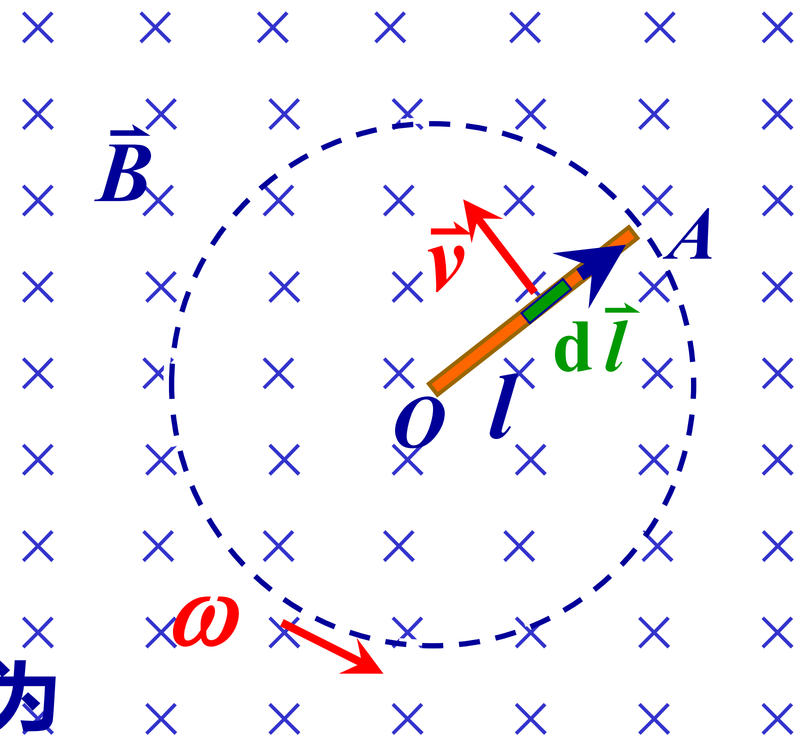


哪端电势高?

例： 长为L的铜棒在均匀磁场 $\vec{B}$中，在与磁场方向垂直的平面内以角速度ω 绕O轴逆时针匀速转动。

求：棒中的动生电动势。

$$\varepsilon_i = \int_L \vec{v}\times\vec{B}\cdot \mathrm{d}\vec{l}$$

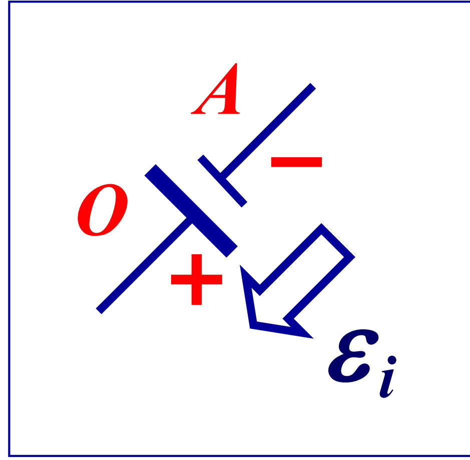


分析：铜棒上各点处$\vec{B}$ 相同，但是 $\vec{v}$不相同，因此有必要进行微元分割。

解：在距O点为 l处取线元$\mathrm{d}\vec{l}$，其方向沿O指向A，其速度大小为

$$v = \omega l,$$

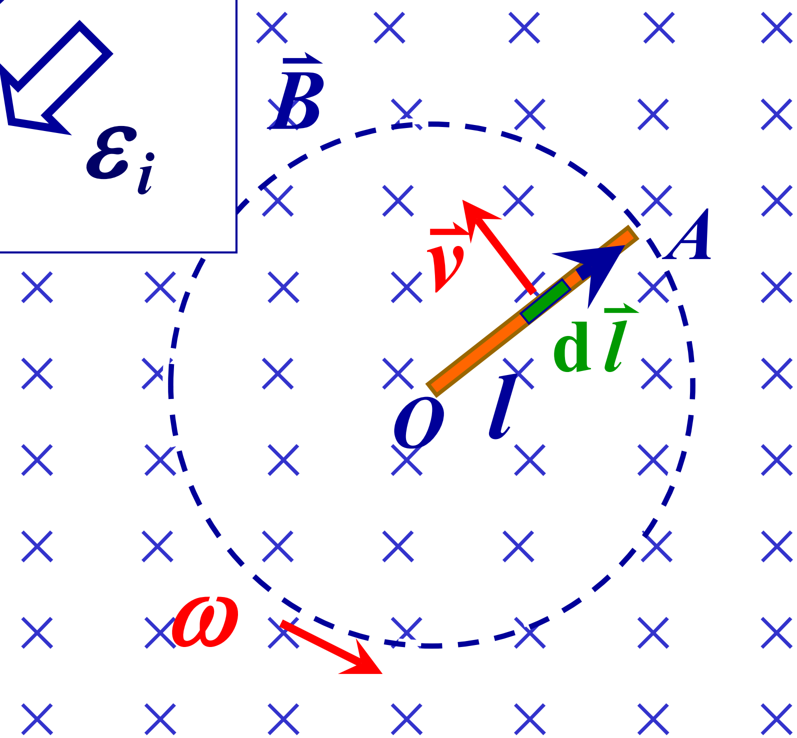
$$\varepsilon_i = \int_L \vec{v} \times \vec{B} \cdot \mathrm{d}\vec{l}$$



$\mathrm{d}\vec{l}$ **上的动生电动势为：**

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

$$= -vB\,\mathrm{d}l$$



金属棒上总电动势为：

$$\varepsilon_i = \int_L \mathrm{d}\varepsilon_i = \int_0^L -vB\,\mathrm{d}l$$

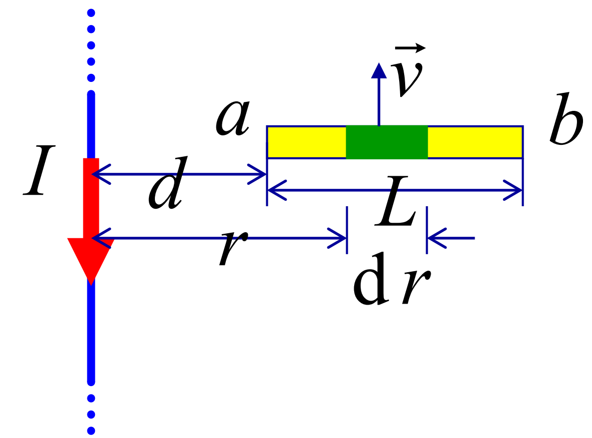
$$= -\int_0^L B\underline{\omega l}\,\mathrm{d}l$$

$$= -\frac{1}{2}B\omega L^2$$

因为 ε_i<0，所以 ε_i 的方向为 A (负极) →O(正极)，即 O 点电势较高.

例： 导线ab以速率 v 沿平行于长直载流导线的方向运动，ab与直导线共面，且与它垂直。导线中电流强度为I，ab长L，a端到直导线的距离为d，求ab中的动生电动势? 哪端电势较高?

解： (1) 应用$\varepsilon_i = \int_a^b (\vec{v}\times\vec{B})\cdot \mathrm{d}\vec{l}$ 求解



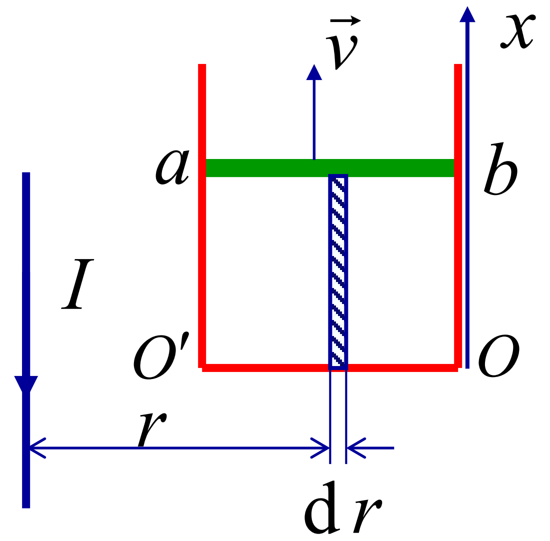
在导线ab所在直线上距长直载流导线r 处取一线元$\mathrm{d}r$，方向向右。

$$\mathrm{d}\,\varepsilon_i = (\vec{v}\times\vec{B})\cdot \mathrm{d}\,\vec{r} = \frac{\mu_0 I v}{2\pi r}\mathrm{d}\,r$$

$$\varepsilon_{ab} = \int_a^b \mathrm{d}\,\varepsilon = \int_d^{d+L} \frac{\mu_0 I v}{2\pi r}\mathrm{d}\,r = \frac{\mu_0 I v}{2\pi}\ln\frac{d+L}{d}$$

$\varepsilon_{ab} > 0$，电动势的方向由a 指向b，b 端电势较高。

（2）应用电磁感应定律求解



设某时刻导线ab到U形框底边距离为x，取顺时针方向为回路正方向，则该时刻通过回路$aboo'a$的磁通量为

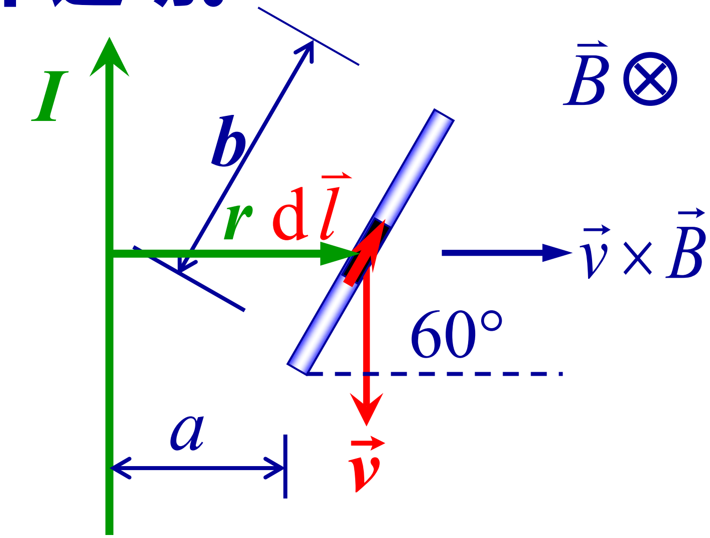
$$\Phi = \int \vec{B} \cdot \mathrm{d}\vec{S}$$

$$= \int_{d}^{d+L} -\frac{\mu_0 I}{2\pi r} x \,\mathrm{d}r = -\frac{\mu_0 I x}{2\pi} \ln \frac{d+L}{d}$$

$$\varepsilon_{ab} = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln(\frac{d+L}{d}) \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = \frac{\mu I v}{2\pi} \ln \frac{d+L}{d}$$

$\varepsilon_{ab} > 0$表示电动势的方向与所选回路正方向相同，即沿顺时针方向。因此在导线ab上，电动势由a指向b，b端电势较高。

例： 长直导线 I 附近的导体作向下运动。求其动生电动势。



解： $$\varepsilon_i = \int_L \vec{v}\times\vec{B}\cdot \underline{\underline{\mathrm{d}\vec{l}}}$$

$$= \int_L \underline{\underline{vB}}\cdot \underline{\underline{\mathrm{d}l}}\cdot\cos 60^\circ$$

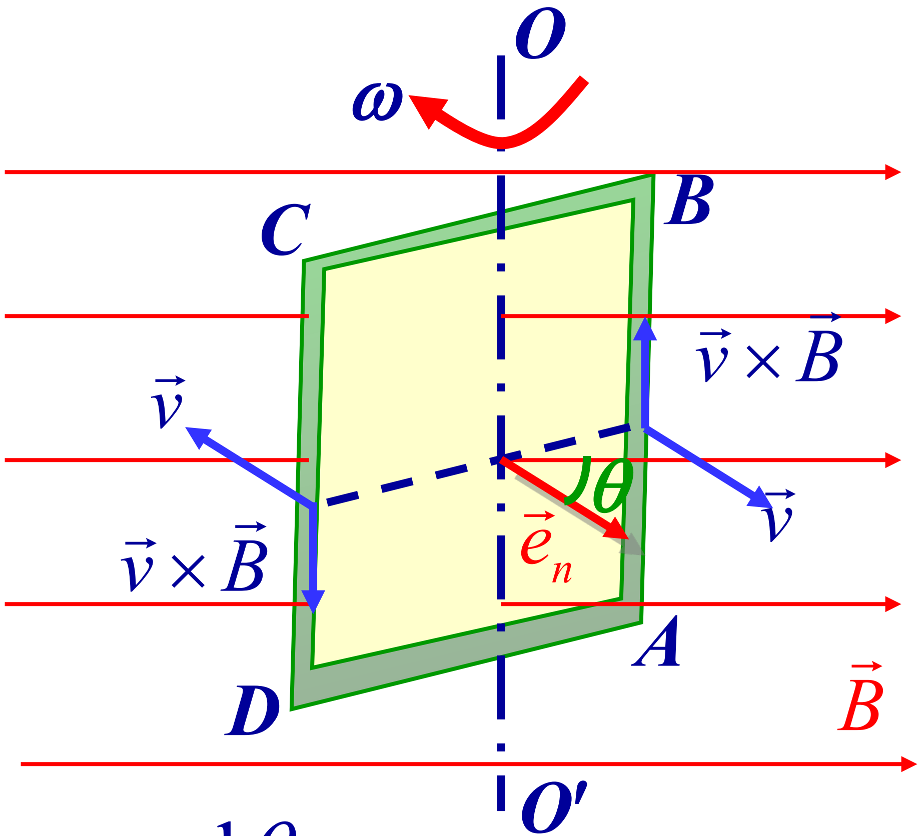
$$\boxed{(r = a + l * \cos 60^\circ),\quad \mathrm{d}l = \frac{\mathrm{d}r}{\cos 60^\circ},\quad B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}.}$$

$$= \frac{\mu_0 I v}{2\pi}\int_L \frac{1}{r}\cancel{\cos 60^\circ\cdot\frac{\mathrm{d}r}{\cos 60^\circ}} = \frac{\mu_0 I v}{2\pi}\ln\frac{a+(b/2)}{a}.$$

$\varepsilon_i > 0$,电动势正方向与积分路径方向相同,上端电势高。

2．在磁场中转动的线圈内的感应电动势

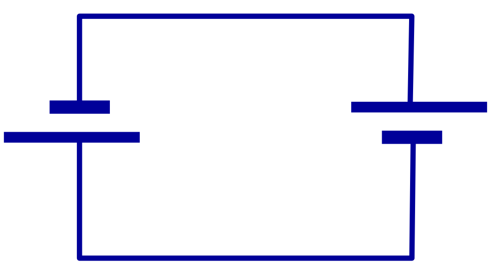
矩形线圈$ABCD$的匝数为N，面积为S，在匀强磁场中绕固定轴OO'转动。磁感应强度$\vec{B}$与OO'轴垂直。当$t=0$时，$\vec{B}$与$\vec{e}_n$之间的夹角为0，经过时间t，与$\vec{B}$之$\vec{e}_n$间的夹角为θ



$$\Phi = BS\cos\theta$$

$$\varepsilon_i = -N\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = NBS\sin\theta\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}$$

$$\because \theta = \omega t$$

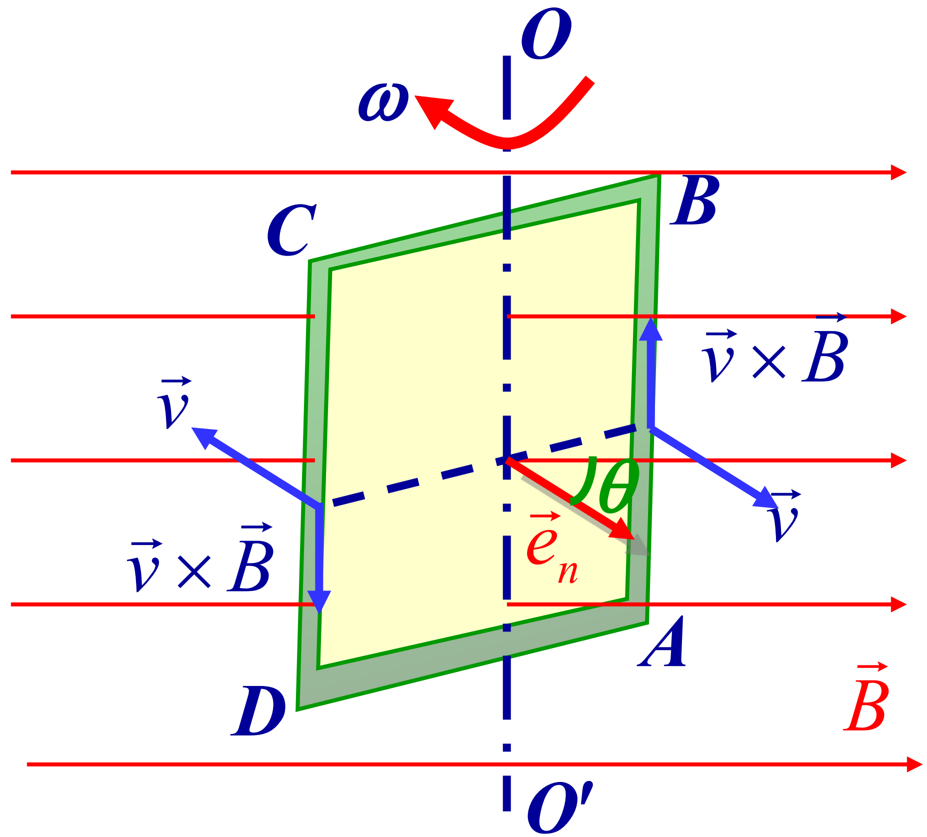


$\because \theta = \omega t$

$\therefore \varepsilon_i = NBS\omega \sin \omega t$

令$NBS\omega = \varepsilon_0$

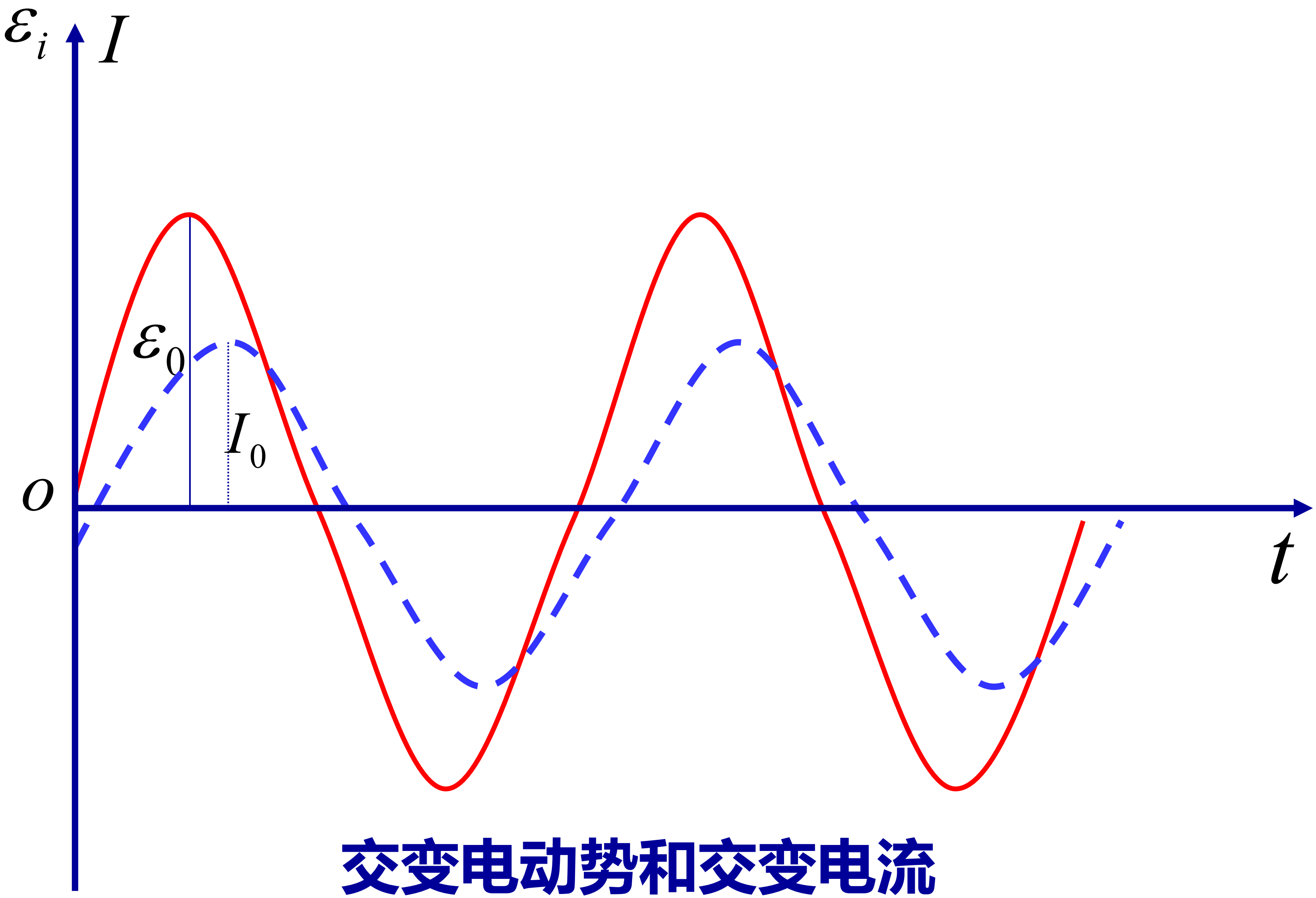
则$\varepsilon_i = \varepsilon_0 \sin \omega t$



由于线圈内自感应的存在，交变电流的变化要滞后于交变电动势的变化。

$$I = I_0 \sin(\omega t - \varphi)$$

在匀强磁场内转动的线圈中所产生的电动势是随时间作周期性变化的，这种电动势称为交变电动势。在交变电动势的作用下，线圈中的电流也是交变的，称为交变电流或交流。



交变电动势和交变电流

作业：第12章 1，2，3，4，5

感生电动势 有旋电场

感应电动势: $\varepsilon_i = -\dfrac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$ $\Phi = \iint_S \vec{B}\cdot d\vec{S}$

磁通Φ可按不同方式变化

Lorentz力

磁场恒定、回路运动：动生电动势

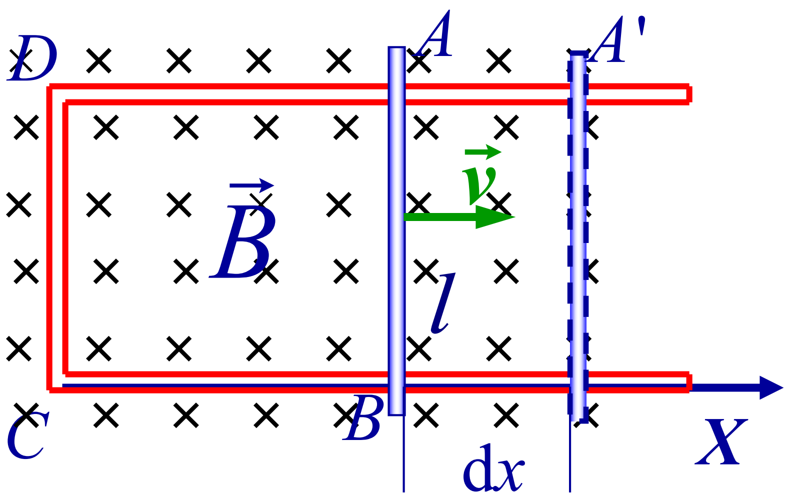
感应电动势

磁场变化、回路静止：感生电动势

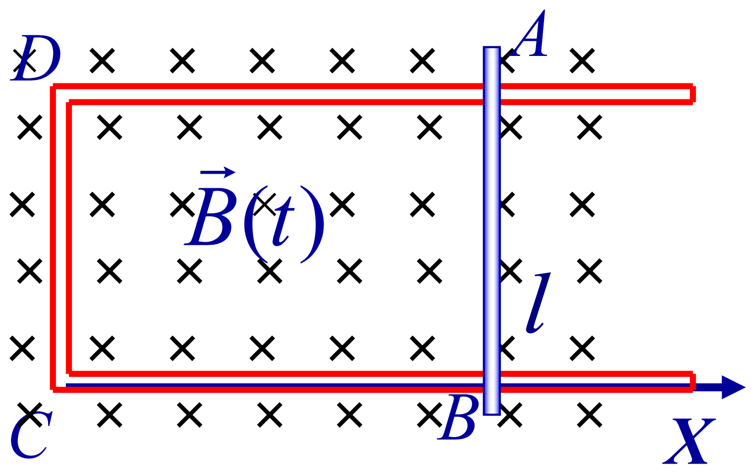
??非静电力是什么?

1. 感生电场

当导体回路不动，由于磁场变化引起磁通量改变而产生的感应电动势，叫做感生电动势。



动生电动势



感生电动势

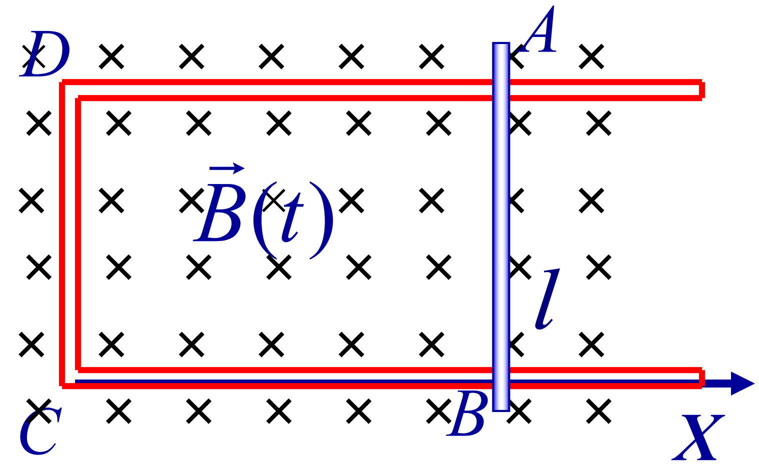
为什么导体棒中产生电流

电荷的宏观定向移动

受力

电场

变化的磁场激发



Maxwell提出：变化的磁场在其周围激发了一种电场，这种电场称为感生电场.

变化的磁场在其周围激发了一种电场，这种电场称为感生电场。

以$\vec{E}$表示感生电场的场强，根据电源电动势的定义及电磁感应定律，则有

$$\varepsilon_i = \oint_L \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l} \qquad \varepsilon_i = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\iint_S \vec{B} \cdot \mathrm{d}\vec{S}$$

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

在磁场变化、回路静止的情况下

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

说明：

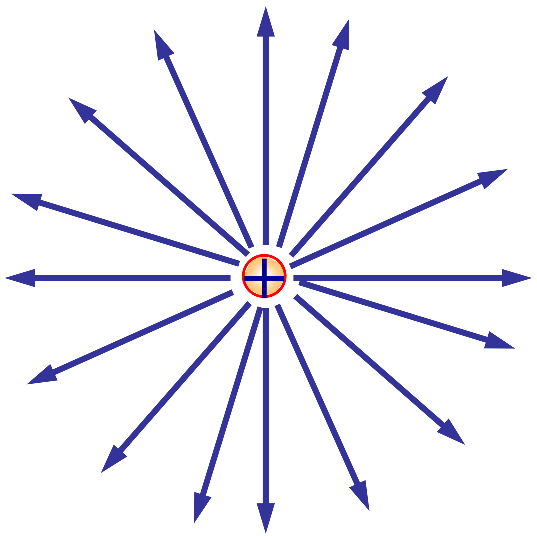
（1）自然界中存在着两种以不同方式激发的电场，电场的性质也截然不同。

A，静止电荷→<u>静电场</u>

保守力场：

$$\oint \vec{E}_s \cdot \mathrm{d}\vec{l} = 0$$

电场线不闭合！ （无旋场）



B，变化磁场→<u>感生电场</u>

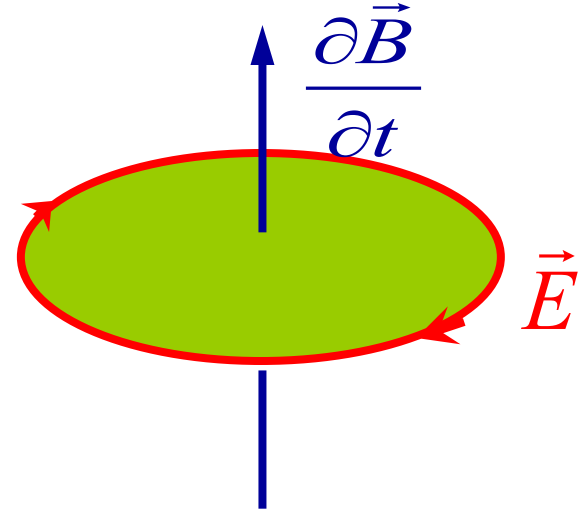
非保守力场：

$$\oint \vec{E}_{感生} \cdot \mathrm{d}\vec{l} = -\iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \mathrm{d}\vec{S} \neq 0$$

电场线是无头无尾的闭合曲线！ （有旋场）

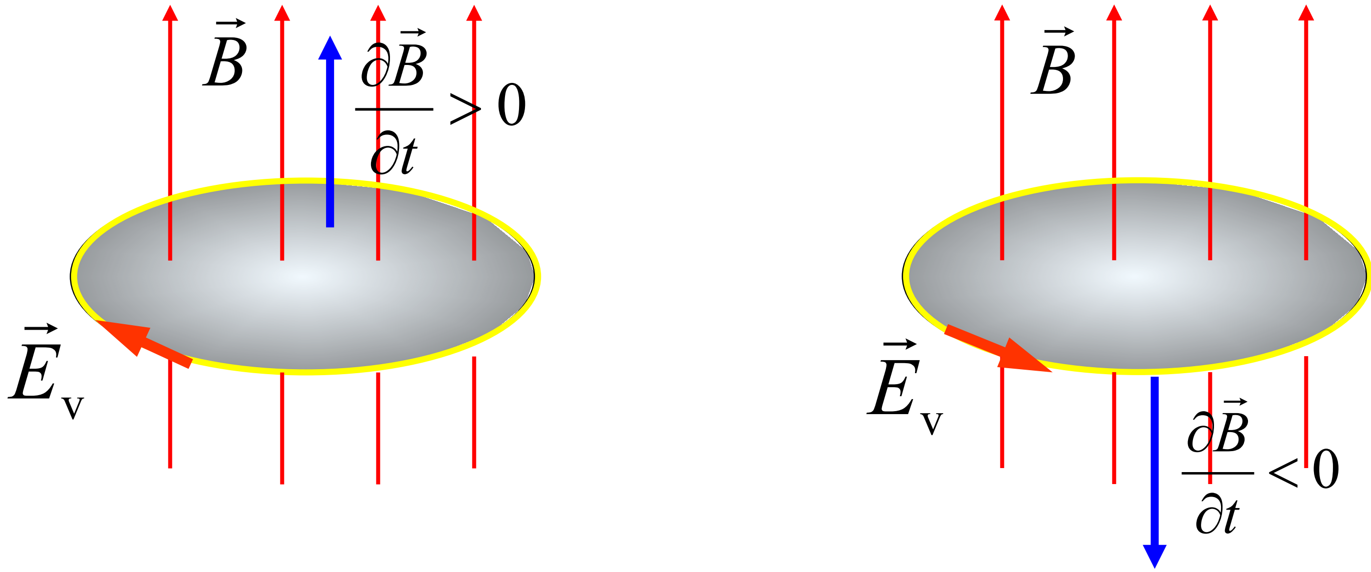
（2）感生电场 $\vec{E}$ 的电场线的绕行方向，与所围的 $\dfrac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ 的方向构成左螺旋关系。

$$\oint \vec{E}_{\text{感生}} \cdot \mathrm{d}\vec{l} = -\iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \mathrm{d}\vec{S}.$$



（3）感生电场是客观存在的，并不取决于空间有无导体回路存在。变化的磁场总是在空间激发电场。

判定$\vec{E}_v$的方向



注意 $\vec{E}_\text{v}$ 是与 $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$,而不是与 $\vec{B}$ 组成左螺旋。

（4）计算感生电动势的两种方法：

a 通量法则——法拉第电磁感应定律

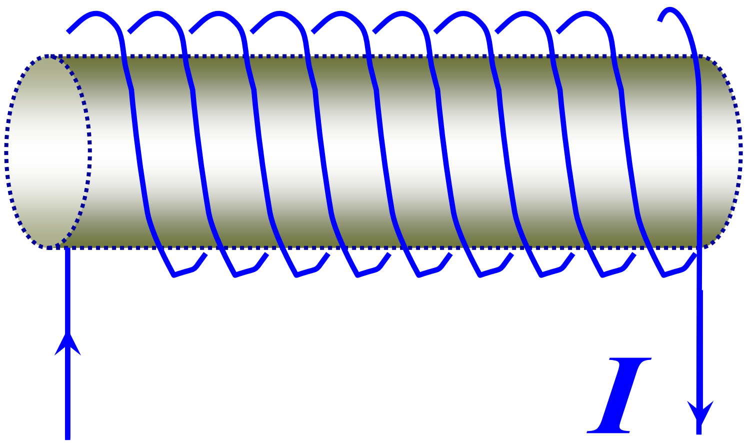
$$\boxed{\varepsilon_i = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\iint_S \vec{B}\cdot\mathrm{d}\vec{S}}$$

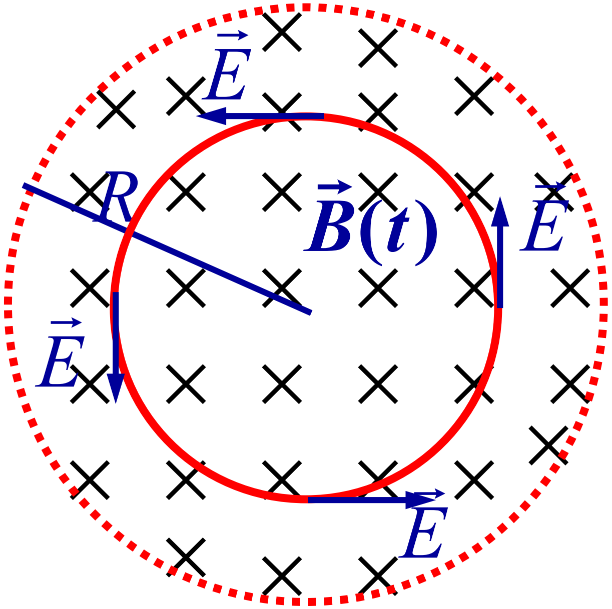
b 磁场在空间分布具有对称

$$\boxed{\oint_L \vec{E}_v \cdot \mathrm{d}\vec{l} = -\iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\cdot\mathrm{d}\vec{S}}$$

$$\varepsilon_i = \int_L \vec{E}_v \cdot \mathrm{d}\vec{l}$$

例： 在半径为 R 的无限长螺线管内部的磁场 $\vec{B}$ 随时间作线性变化（$\dfrac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t}=$ 常量）时，求管内外的感生电场 $\vec{E}_{感生}$。





解：由场的对称性可知，变化磁场所激发的感生电场的电场线在管内外都是与螺线管同轴的同心圆。

同一电场线（同心圆）上不同位置处E的大小相同。

$$\oint \vec{E}_{感生} \cdot \mathrm{d}\vec{l} = -\iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \mathrm{d}\vec{S}$$

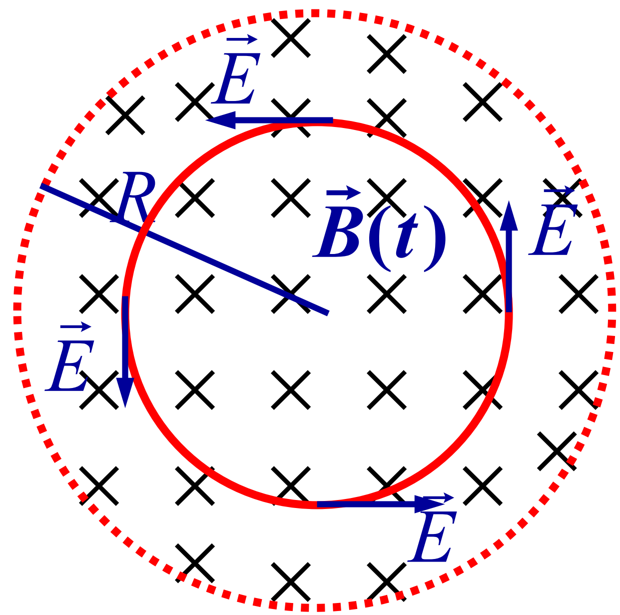
任取一电场线作为闭合回路，取逆时针为绕行方向。

$$\oint_L \vec{E}_{感生} \cdot \mathrm{d}\vec{l} = \oint_L E_{感生}\,\mathrm{d}l$$

$$= 2\pi r E_{感生}$$

$$= -\iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \mathrm{d}\vec{S}$$

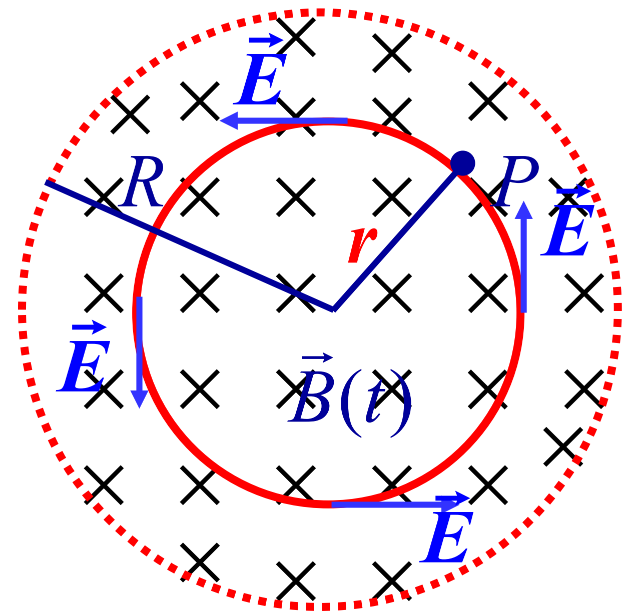
$$\therefore E_{感生} = -\frac{1}{2\pi r}\iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \mathrm{d}\vec{S}$$



$$E_{感生} = -\frac{1}{2\pi r}\iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\cdot \mathrm{d}\vec{S}$$

1) $r < R$

取积分面为半径为*r*的圆面，



$$\iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\cdot \mathrm{d}\vec{S} = -\iint_S \frac{\partial B}{\partial t}\mathrm{d}S$$

$$\left(\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t} = 常量\right) \quad = -\pi r^2 \frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t}$$

$$\therefore E_{感生} = -\frac{1}{2\pi r}\iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\cdot \mathrm{d}\vec{S} = \frac{r}{2}\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t}$$

$\vec{E}$ **的方向沿圆周切线，指向与圆周内的** $\frac{\mathrm{d}\vec{B}}{\mathrm{d}t}$ **成左旋关系。**

$$E_{感生} = -\frac{1}{2\pi r}\iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\cdot \mathrm{d}\vec{S}$$

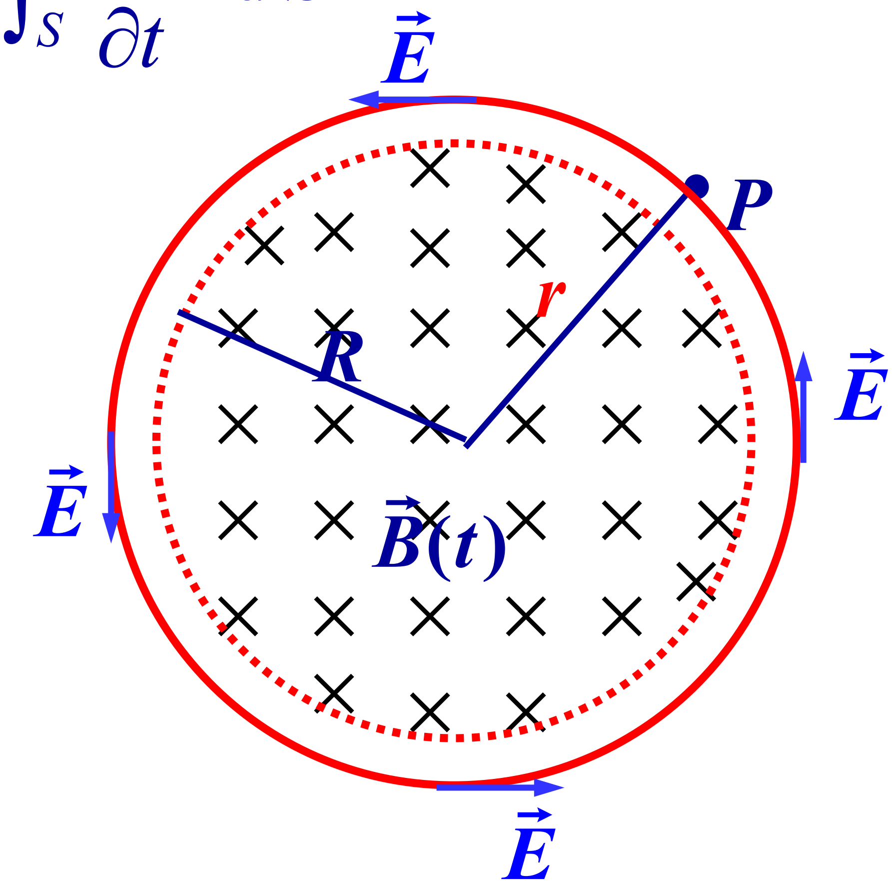
2) $r > R$

取积分面为半径为r的圆面，

$$\iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\cdot \mathrm{d}\vec{S} = -\iint_S \frac{\partial B}{\partial t}\mathrm{d}S$$

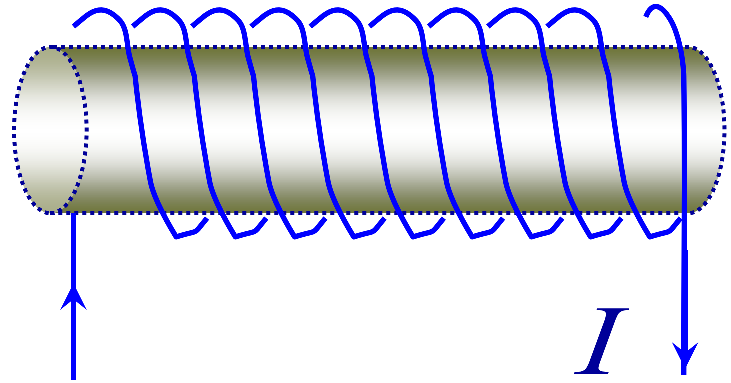
$$= -\pi R^2 \frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t}$$

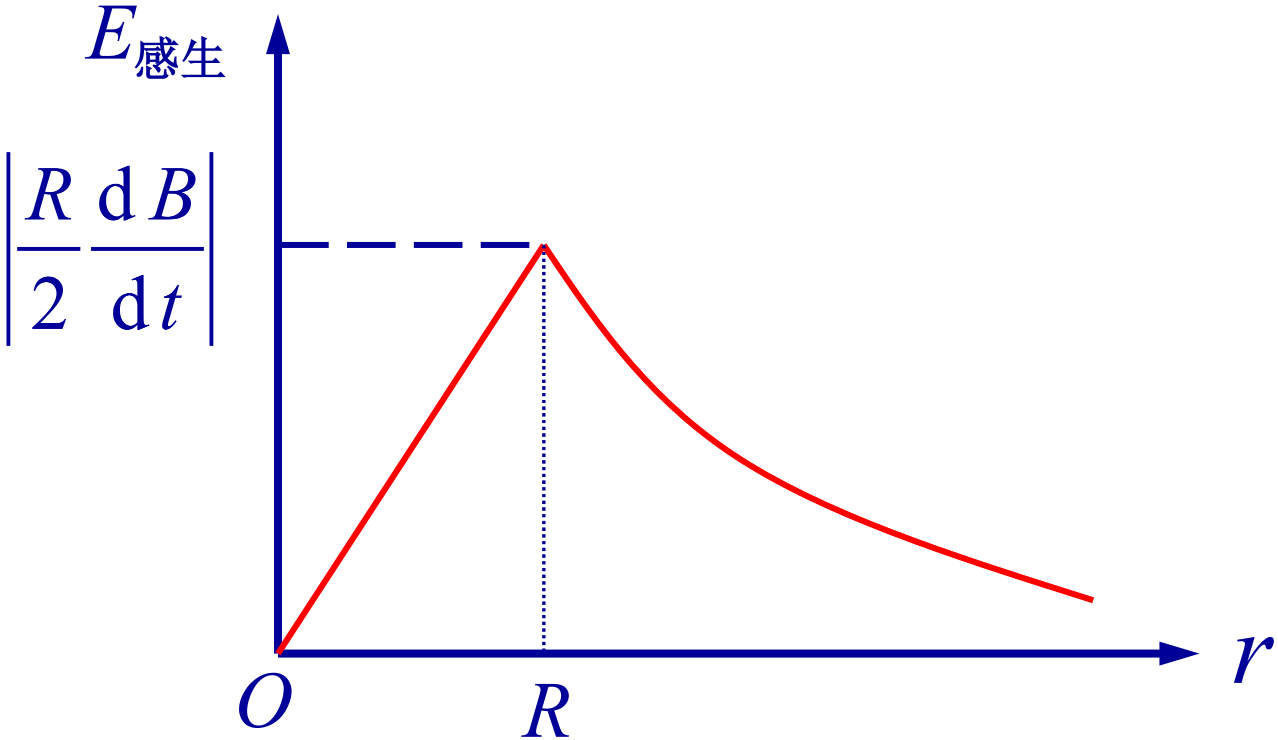
$$\therefore E_{感生} = \frac{R^2}{2r}\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t}$$



$\vec{E}$ **的方向沿圆周切线，指向与圆周内的** $\frac{\mathrm{d}\vec{B}}{\mathrm{d}t}$ **成左旋关系。**

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

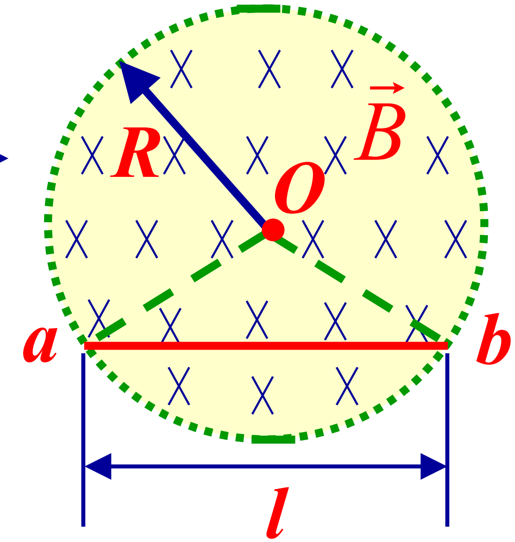




螺线管内外感生电场 vs 离轴线距离

例题：　如图，半径为R的圆柱形体积内充满磁感应强度为 $B(t)$的均匀磁场，有一长为 l 的金属棒放在磁场中，设$\mathrm{d}B/\mathrm{d}t$为已知，求棒两端的感生电动势。

解法1：选闭合回路Oab，方向为逆时针



$$\varepsilon_i = \oint_L \vec{E}_i \cdot \mathrm{d}\vec{l} = \left(\int_O^a + \int_a^b + \int_b^O\right) \vec{E}_i \cdot \mathrm{d}\vec{l}$$

$$= 0 + \int_a^b \vec{E}_i \cdot \mathrm{d}\vec{l} + 0 = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$$

$$= \iint_S \frac{\partial B}{\partial t} \mathrm{d}S = \frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t} \iint_S \mathrm{d}S = \frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t} \frac{1}{2} l \sqrt{R^2 - \frac{l^2}{4}} = \varepsilon_{\mathrm{ab}}$$

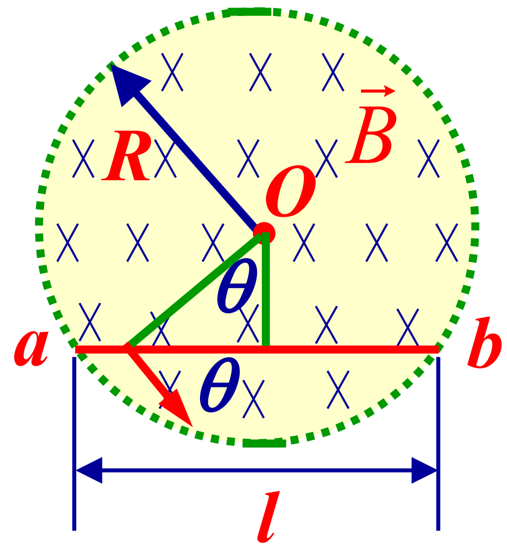
方向为$a \to b$

解法2：直接对感应电场积分，方向为$a \to b$

$$\varepsilon_i = \int_a^b \vec{E}_i \cdot \mathrm{d}\vec{l} = \int_a^b E_i \cos\theta \mathrm{d}l = \int_a^b \frac{r\cos\theta}{2}\frac{\partial B}{\partial t}\mathrm{d}l$$

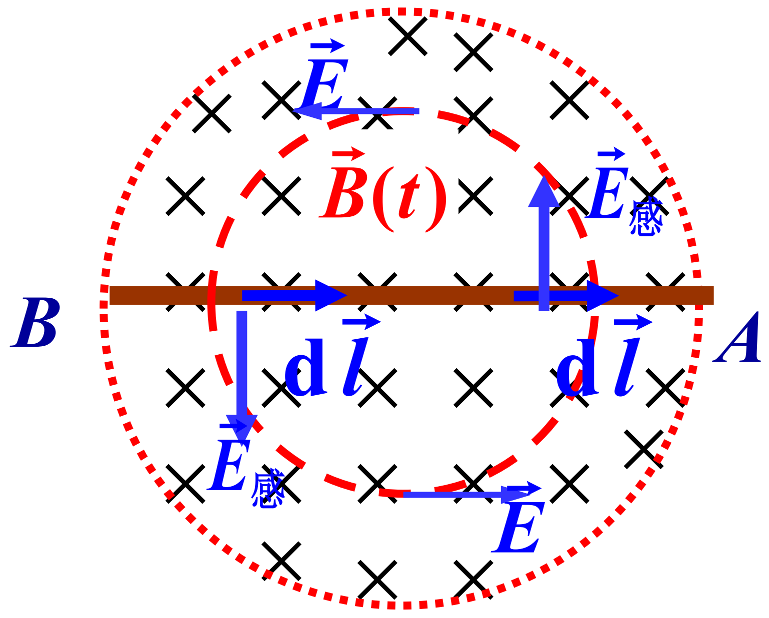
$$= \int_a^b \frac{h}{2}\frac{\partial B}{\partial t}\mathrm{d}l = \frac{h}{2}\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t}\int_a^b \mathrm{d}l$$

$$= \frac{h}{2}\frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t} l = \frac{\mathrm{d}B}{\mathrm{d}t}\frac{1}{2} l\sqrt{R^2 - \frac{l^2}{4}}$$



再思考如下情况：

金属棒AB如图所示。



3．涡电流

当大块导体，特别是金属导体处在变化的磁场中时，由于通过金属块的磁通量发生变化，因此在金属块中产生感应电动势。而且由于大块金属电阻特别小，所以往往可以产生极强的电流，这些电流在金属内部形成一个个闭合回路，所以称作涡电流，又叫涡流。

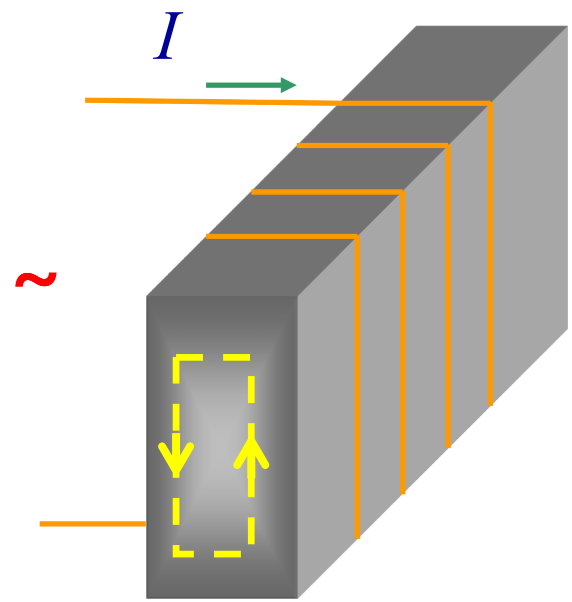
应用：

1) 涡流冶炼金属

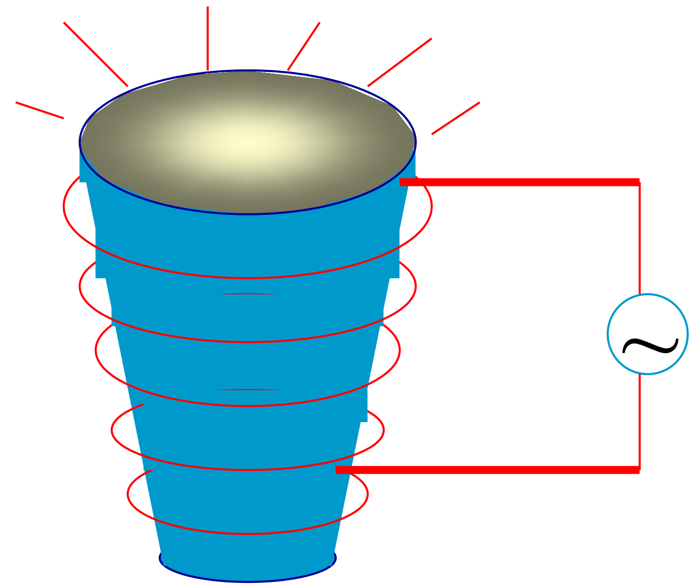
2) 电动阻尼器

3) 电磁灶

4) 电磁感应加热抽真空

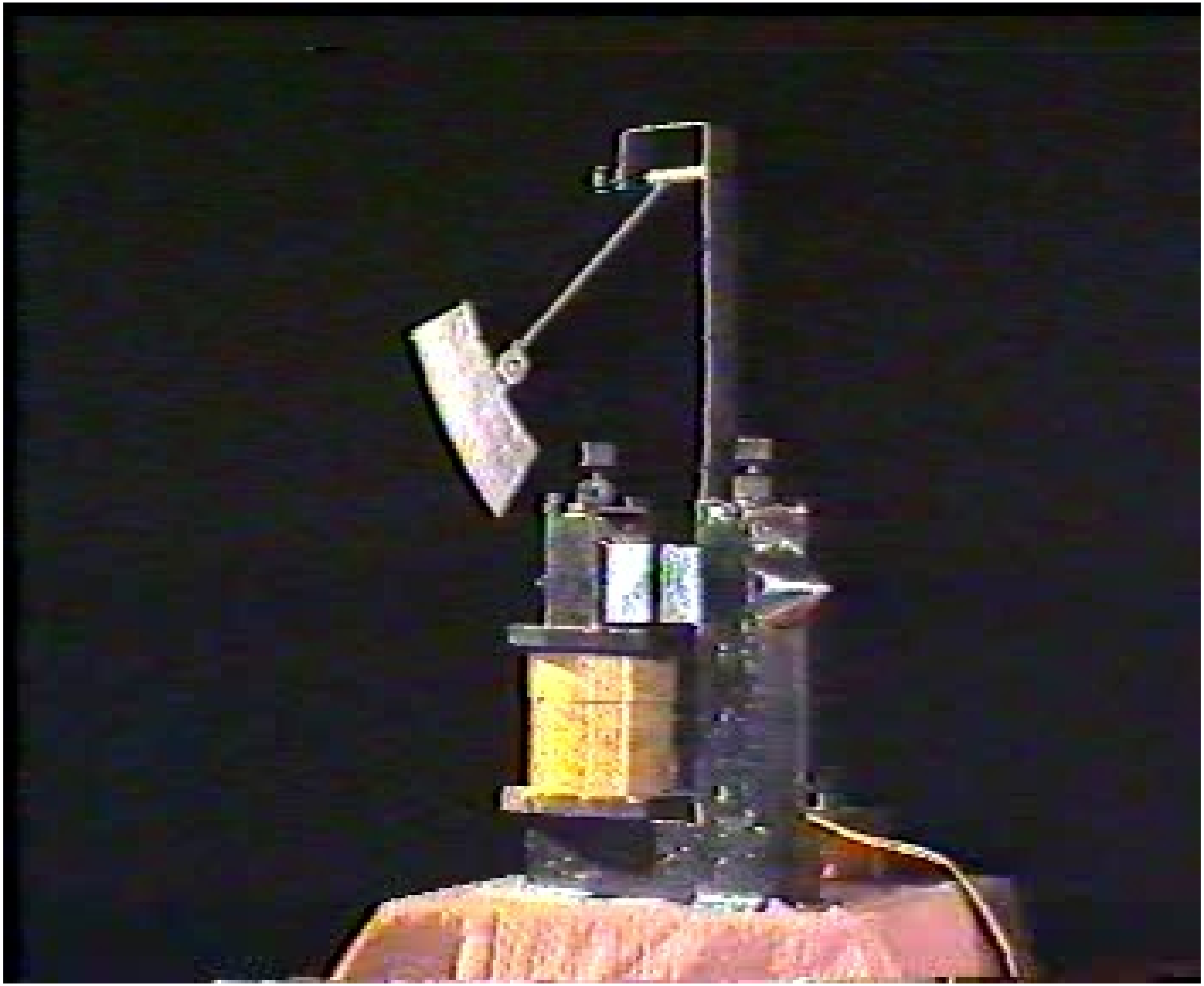


高频感应炉：利用金属块中产生的涡流所发出的热量使金属块熔化。具有加热速度快、温度均匀、易控制、材料不受污染等优点。



电磁感应的一些其他应用

阻尼摆：在一些电磁仪表中，常利用电磁阻尼使摆动的指针迅速地停止在平衡位置上。电镀表中的制动铝盘，也利用了电磁阻尼效应。



电磁阻尼

感应淬火