第十七章 电磁感应

自奥斯特发现电流磁效应后

许多物理学家致力于其逆效应的研究

在1831年，英国物理学家法拉第经

过研究终于发现了电磁感应现象。

时变的磁场激发电场

第十七章 电磁感应

熟练掌握：

17.1 法拉第实验；

17.2 电磁感应的基本定律；

17.3 动生电动势；

17.4 发电机和电动机的原理；

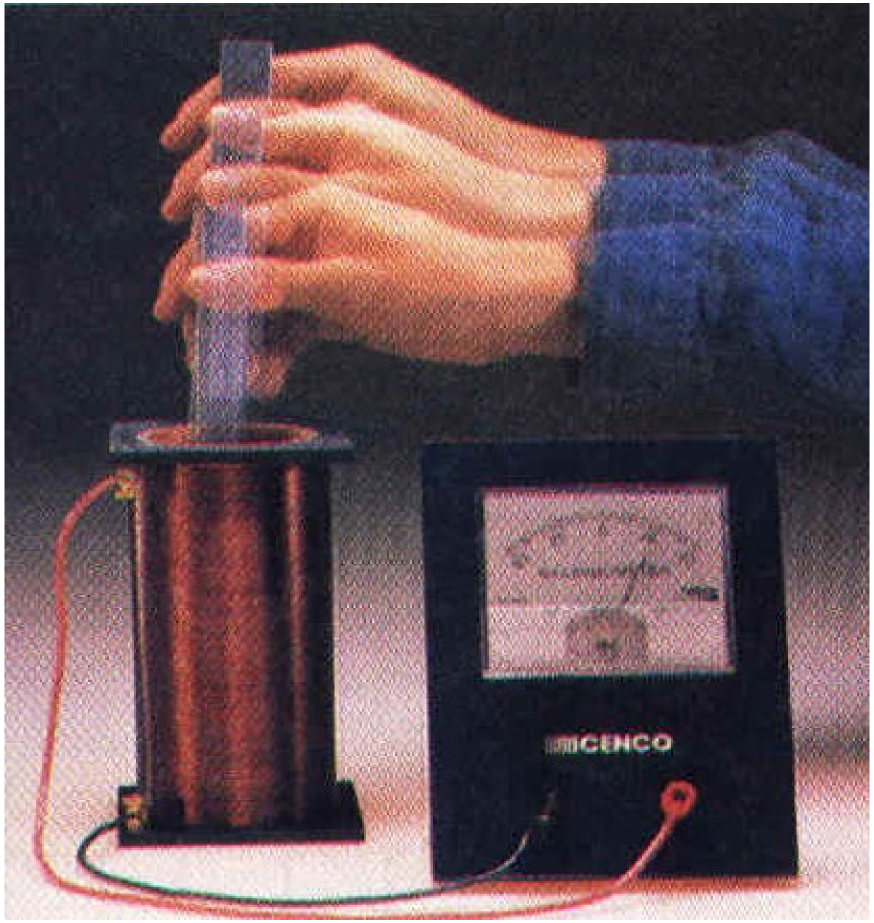
17.5 感生电动势；**17.7** 自感；

17.8 ***LR***电路； **17.10** 磁场的能量。

一般了解：17.5 涡电流； **17.9** 互感。

§17-1 法拉第实验

1.电磁感应现象

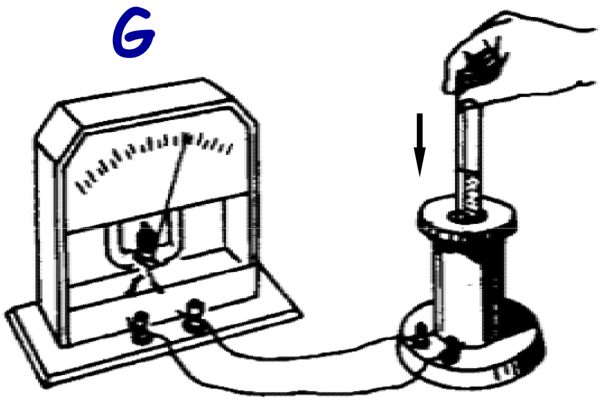


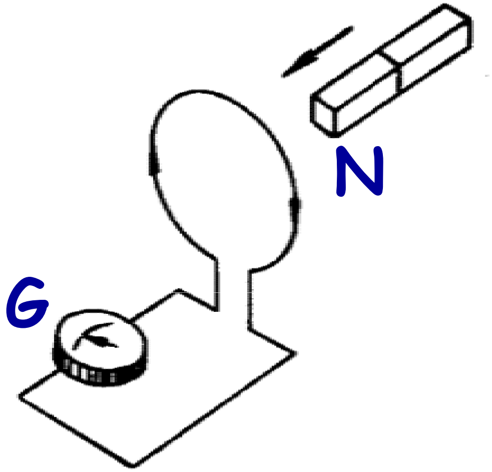
Michael Faraday

British Physicist and Chemist (1791–1867)

Faraday is often regarded as the greatest experimental scientist of the 1800s. His many contributions to the study of electricity include the invention of the electric motor, electric generator, and transformer, as well as the discovery of electromagnetic induction and the laws of electrolysis. Greatly influenced by religion, he refused to work on the development of poison gas for the British military. *(By kind permission of the President and Council of the Royal Society)*

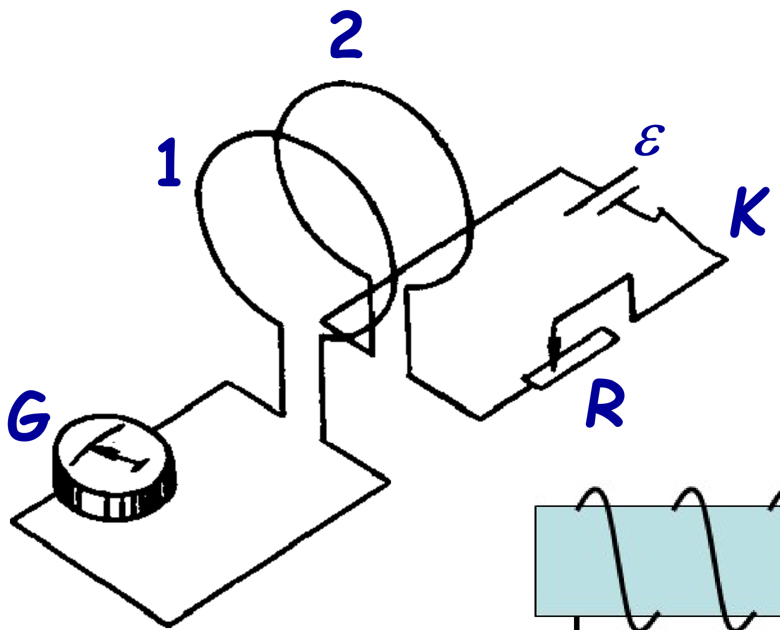
➢电磁感应实验

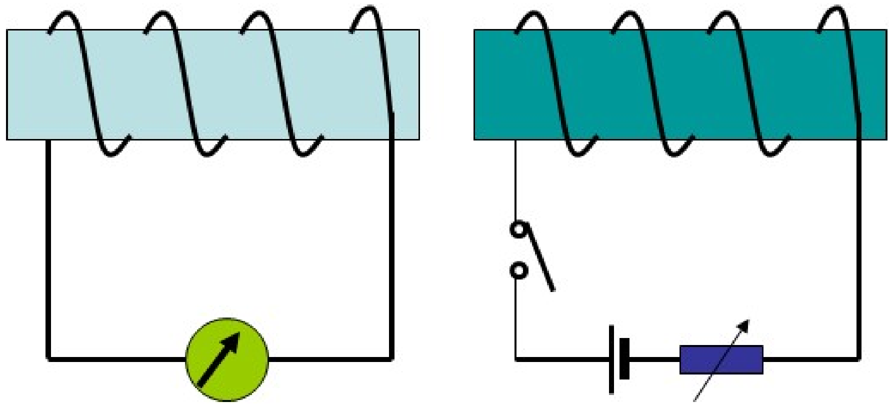




磁铁棒与线圈有相对运动时的电磁感应现象

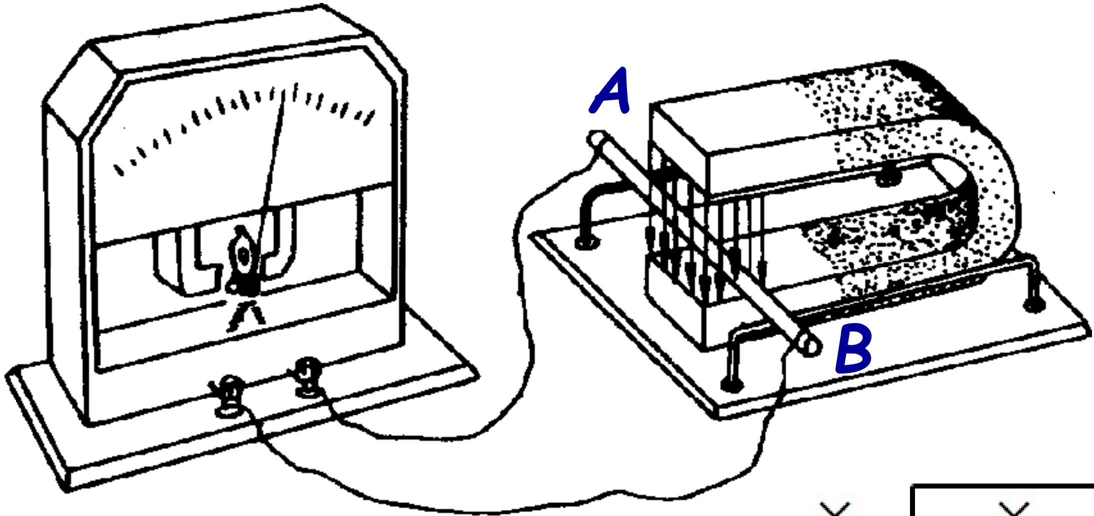
➢电磁感应实验

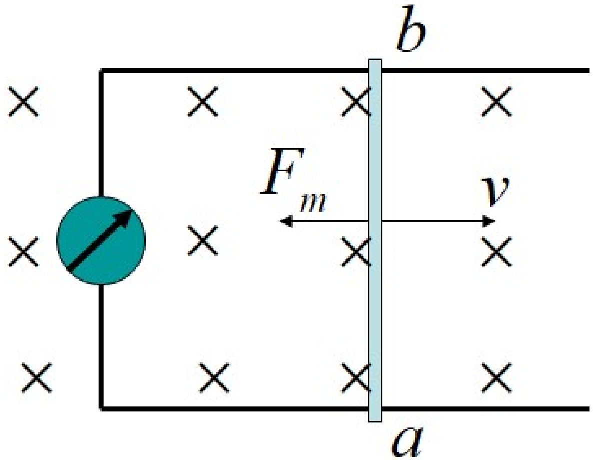




线圈中电流改变时的电磁感应现象

➢电磁感应实验





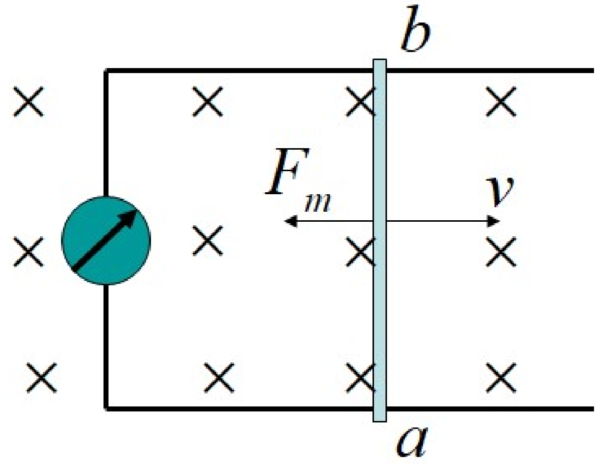
金属棒在磁场中运动时的电磁感应现象

➢电磁感应的实验现象

当穿过一个闭合导体回路内的磁通量发生变化时，无论这种变化是由什么原因引起的，在该导体回路中都会产生感应电流。

---这种现象称为电磁感应现象

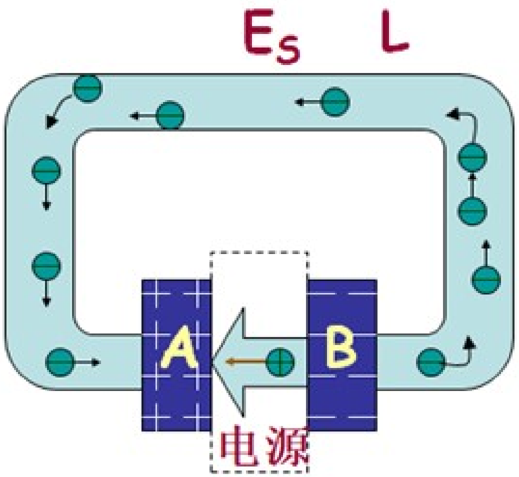
感应电流：导体回路中所产生的电流。



感应电动势：回路中或导体内产生的电动势。

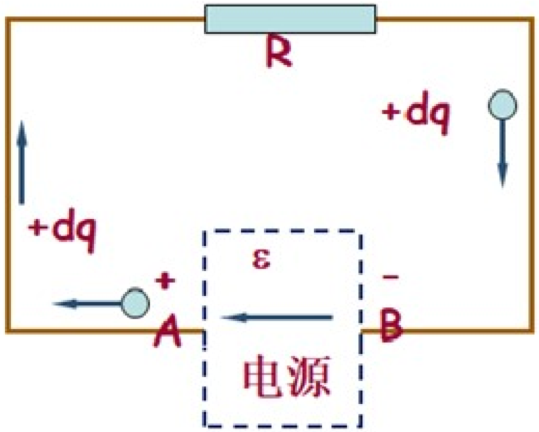
2.电动势

是指在电源内部，将单位正电荷从负极经电源内部移到正极时非静电力所作的功。



$$\varepsilon = \frac{A_K}{q}$$

$$\varepsilon = \frac{dA}{dq}$$



dA是正电荷**dq**从负极经电源内部到正极时电源克服静电场所做的功

设想非静电性力F_K由非静电性外场E_K引起，非静电性力移动正电荷从负极到正极所作的功：

$$A_K = q\int_{-}^{+} E_k \cdot dl$$

$$\boxed{E_k = F_k / q}$$

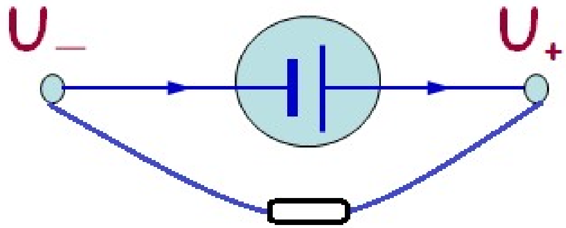
电动势：

$$\varepsilon = \int_{-}^{+} E_k \cdot dl$$

若非静电性外场E_K分布于整个回路，则：

$$\varepsilon = \oint_{-}^{+} E_k \cdot dl$$

路端电压：



$$U_{+} - U_{-} = \int_{+}^{-} E_k \cdot \mathrm{d}l$$

§17-2 电磁感应的基本定律

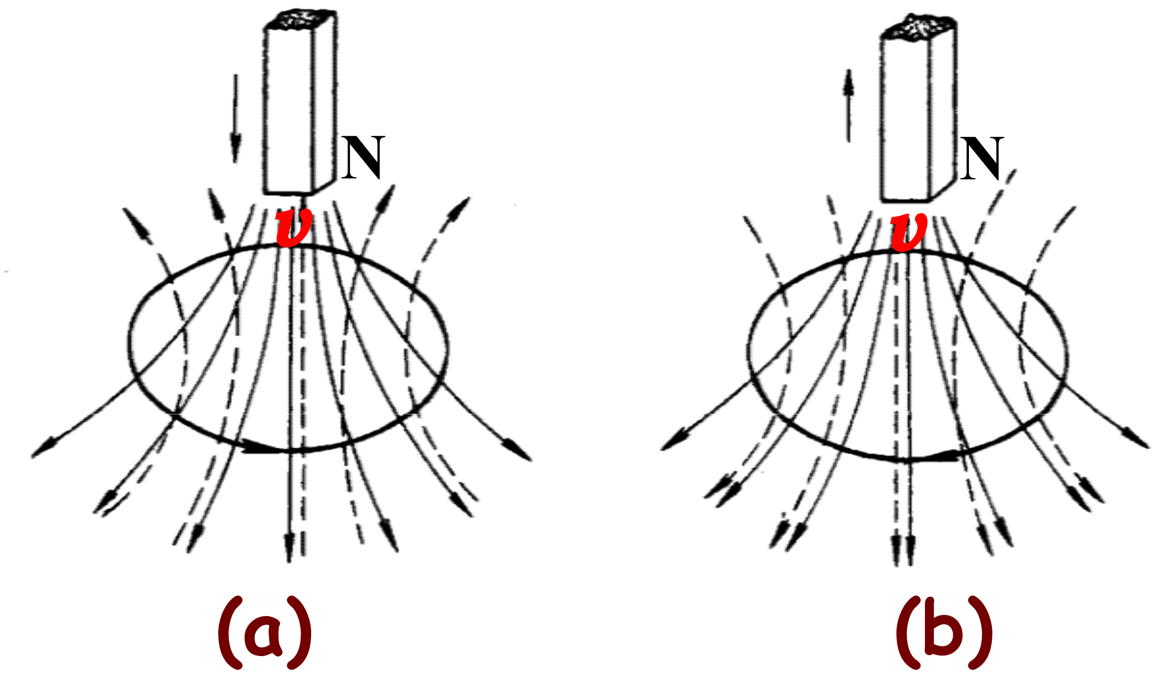
1.楞次定律

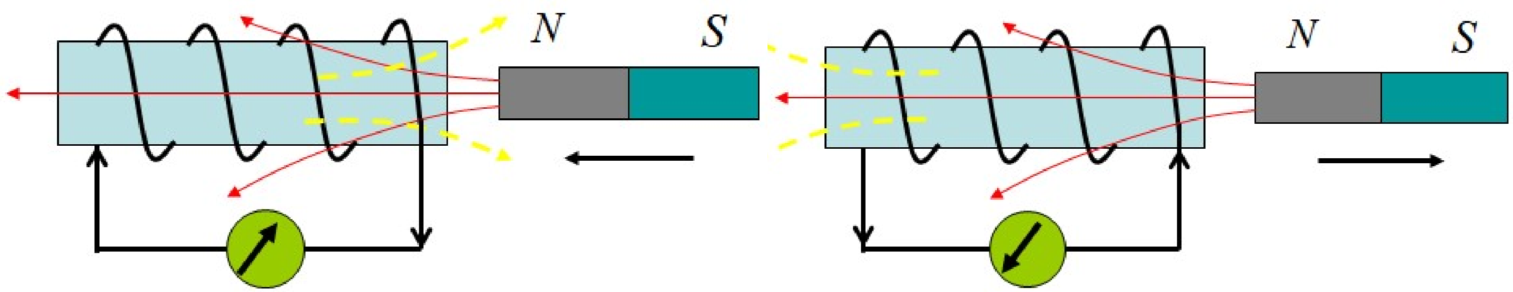
1833年，楞次(Lenz)得出了确定感应电流方向的法则，称为楞次定律：

闭合回路中的感应电流具有明确的方向，它*总是使感应电流所产生的通过回路面积的*磁通量*去补偿或反抗引起感应电流的*磁通量的变化。

---感应电流总是使感应电流所激发的磁场去阻止原磁通量的变化。

➢感应电流方向的判断

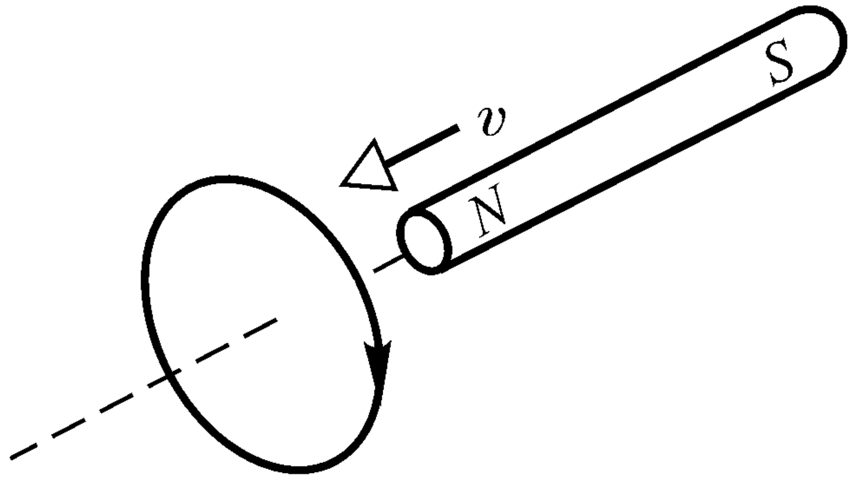




注意：

1)感应电流所产生的磁通量要阻碍的是磁通量的变化，而不是磁通量本身；

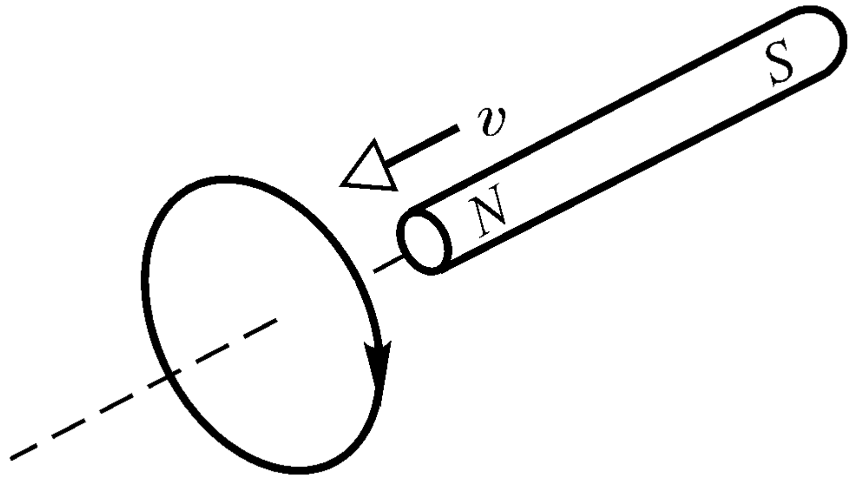
2)阻碍并不意味抵消。如果磁通量的变化完全被抵消了，则感应电流也就不存在了；



注意：

3)楞次定律是能量守恒的体现。当磁铁棒接近线圈时，线圈中的感应电流所产生的斥力将阻止铁棒运动，此时外力必须克服此斥力做功；

4)外力所做的功，只有部分转化为电能。



2.法拉第电磁感应定律

法拉第从实验总结出：通过回路所包围面积的磁通量发生变化时，导体回路中将产生感应电动势$\boldsymbol{\varepsilon_i}$，它正比于磁通量与时间的变化率。

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

k为比例系数，在国际单位制中***k*=1**

$$\varepsilon_i = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_S B\cdot\mathrm{d}S$$

负号反映了感应电动势的方向，是楞次定律的数学形式。

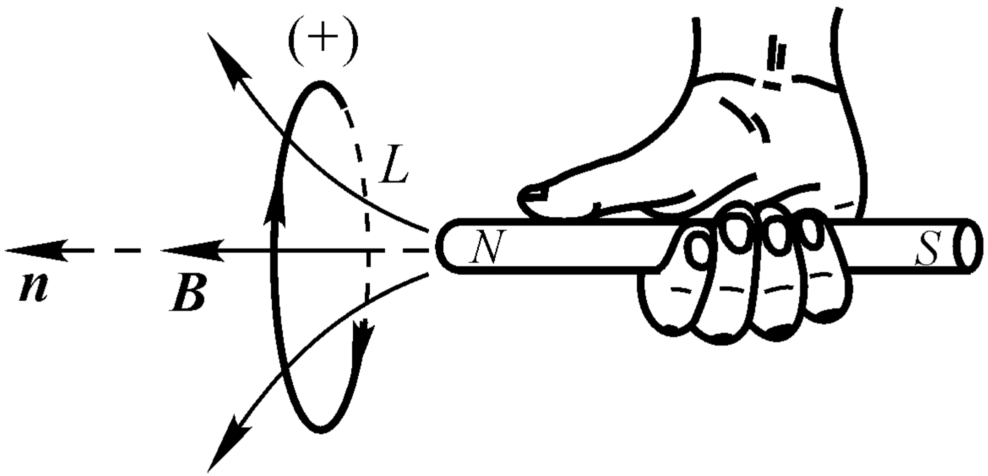
➢确定ε_i符号的规则

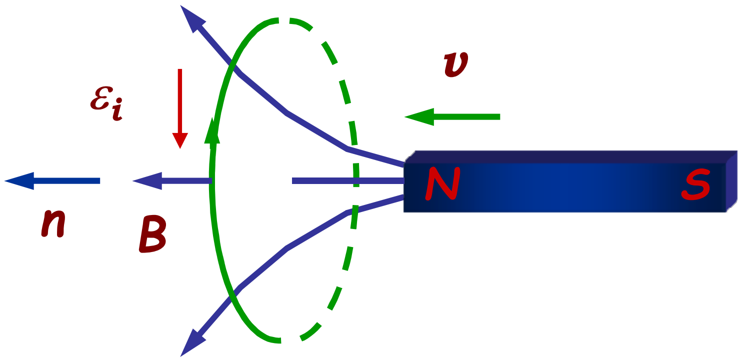
1)选定一绕行方向为正，用右手法则定n的方向；

2)依照n的方向来确定Φ的正负；

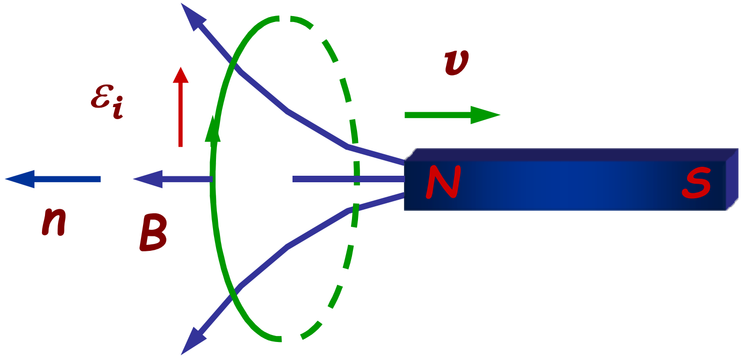
3)Φ的正负确定后，再确定$d\Phi/dt$的正负；

4)ε_i的正负(参考选定的绕行方向)由$-d\Phi/dt$决定。

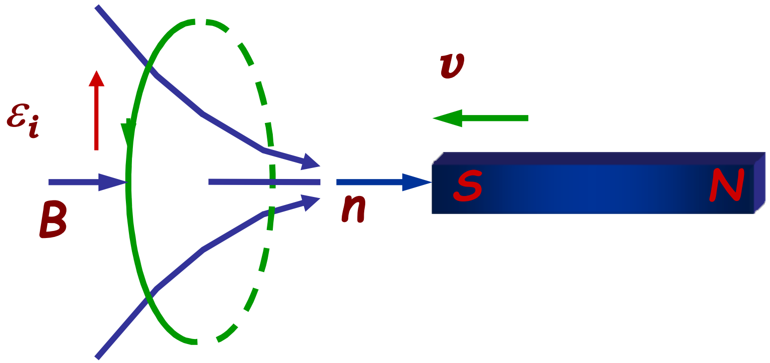




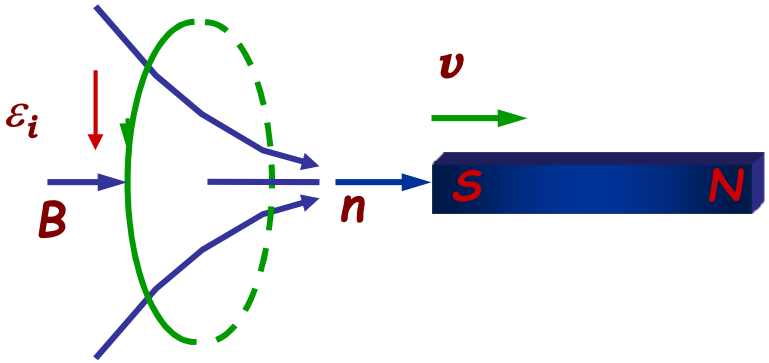
Φ (t)为正，$d\Phi/dt>0$，$\varepsilon_i<0$



Φ (t)为正，$d\Phi/dt<0$，$\varepsilon_i>0$



Φ (t)为正，$d\Phi/dt>0$，$\varepsilon_i<0$



Φ (t)为正，$d\Phi/dt<0$，$\varepsilon_i>0$

➢回路是N匝线圈串联时的感应电动势

通过各匝线圈的磁通量不等时：

$$\varepsilon_i = -\left(\frac{\mathrm{d}\Phi_1}{\mathrm{d}t} + \frac{\mathrm{d}\Phi_2}{\mathrm{d}t} + \cdots + \frac{\mathrm{d}\Phi_N}{\mathrm{d}t}\right) = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\sum_{i=1}^{N}\Phi_i\right) = -\frac{\mathrm{d}\Psi}{\mathrm{d}t}$$

通过各匝线圈的磁通量相等时：

$$\varepsilon_i = -N\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(N\Phi)}{dt} = -\frac{d\Psi}{dt}$$

$\Psi = \sum_{i=1}^{N}\Phi_i$ 称为线圈的全磁通，当磁通量相等时有 $\Psi = N\Phi$，称为线圈的磁通匝链数。

➢回路中的感应电流

若电阻为R的回路中的感应电动势为ε_i，则：

$$I_i = \frac{\varepsilon_i}{R} = -\frac{N}{R}\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$$

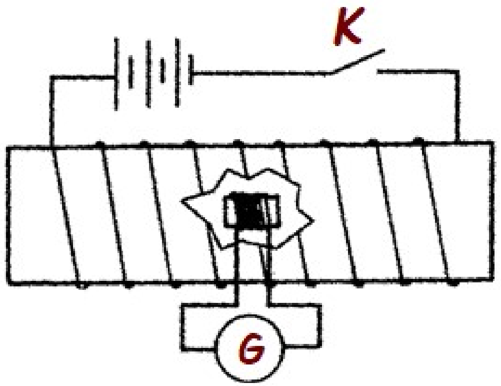
由于$I=dq/dt$，则有：

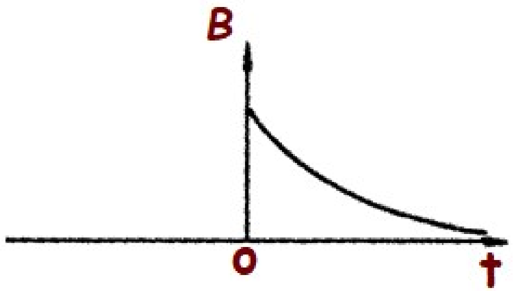
$$q = \int_{t_1}^{t_2} I_i \mathrm{d}t = -\frac{N}{R}\int_{\Phi_1}^{\Phi_2} \mathrm{d}\Phi = \frac{N}{R}(\Phi_1 - \Phi_2)$$

流过闭合回路的感生电荷量与磁通量的变化有关，而与磁通量变化的快慢无关。

课堂练习题17-1：

一长直螺线管，在管的中部放置一个与它同轴的面积$S=6cm^2$、共绕有$N=10$匝、总电阻$R=2\Omega$的小线圈。开始时螺线管内的磁场为$B_0=0.05T$为定值，切断电源后磁场按指数规律$B=B_0e^{-t/\tau}$下降到零，式中$\tau=0.01s$。求：1)在小线圈内产生的最大感应电动势ε_{max}，2)通过小线圈截面的感生电荷量q。





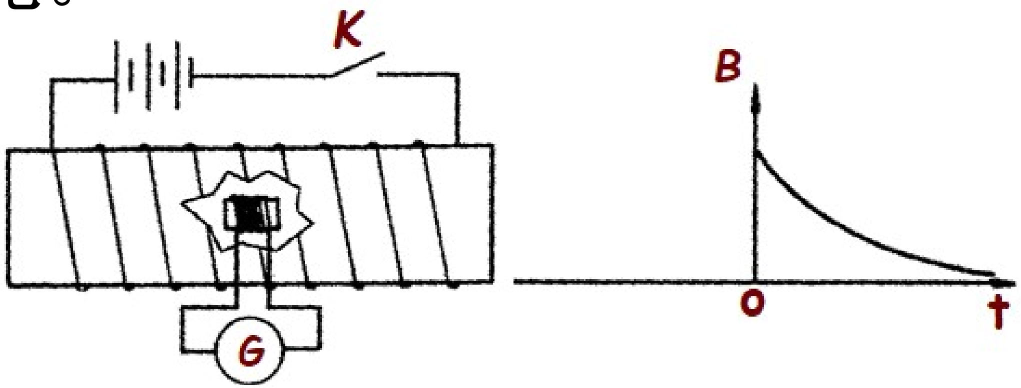
解：通过单匝小线圈的磁通量为：

$$\Phi = B \cdot S = B_0 S e^{-t/\tau}$$

在小线圈中产生的总磁感应电动势大小为：

$$\varepsilon_i = \left| N \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} \right| = \frac{N B_0 S}{\tau} e^{-t/\tau}$$

可见小线圈内的磁通按指数变化，感应电动势也按指数变化。



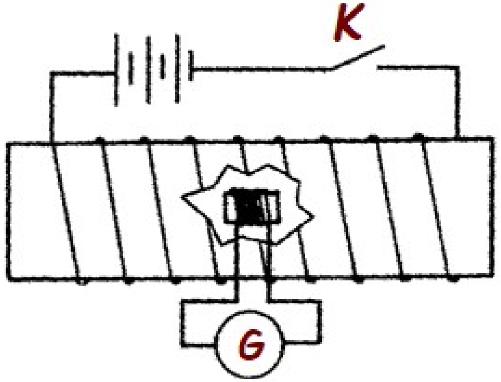
所以在t=0时，感应电动势最大：

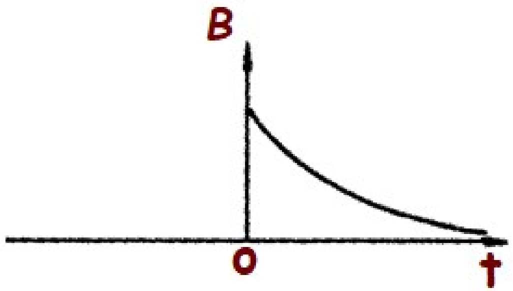
$$\varepsilon_{\max}=\frac{NB_0S}{\tau}=0.03V$$

在t=0～∞，通过小线圈的感生电荷量为：

$$q=\int_0^{\infty}\frac{\varepsilon_i}{R}\mathrm{d}t=\frac{N}{R}\int\left|\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}\right|\mathrm{d}t=\frac{N}{R}\int_{\Phi_0}^{0}\left|\mathrm{d}\Phi\right|$$

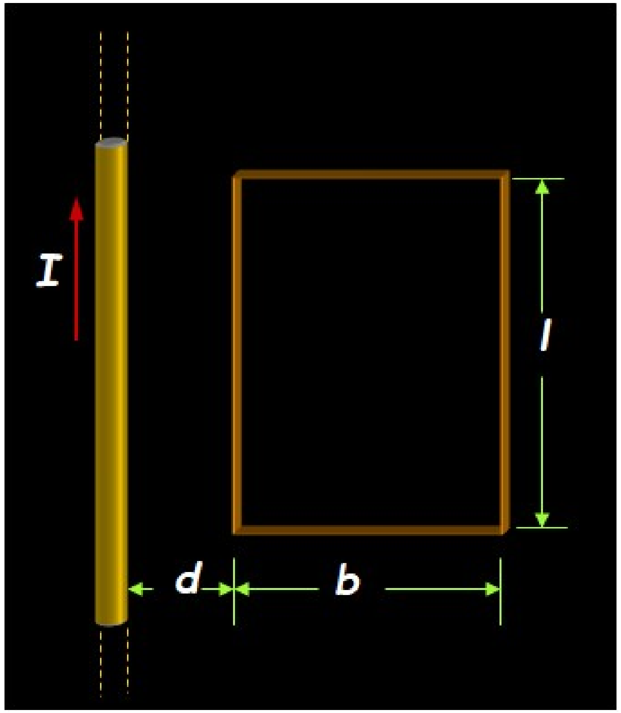
$$=\frac{N}{R}\Phi_0=\frac{N}{R}B_0S=1.5\times10^{-4}\mathrm{C}$$





课堂练习题17-2：

一长直导线中通有交变电流$I=I_0\sin\omega t$，式中I、I_0和ω分别是瞬时电流、电流振幅和角频率，I_0和ω都是常量。在长直导线旁边平行放置一个与其共面的矩形线圈，线圈形状参数如图，求：任一瞬时矩形线圈中的感应电动势。

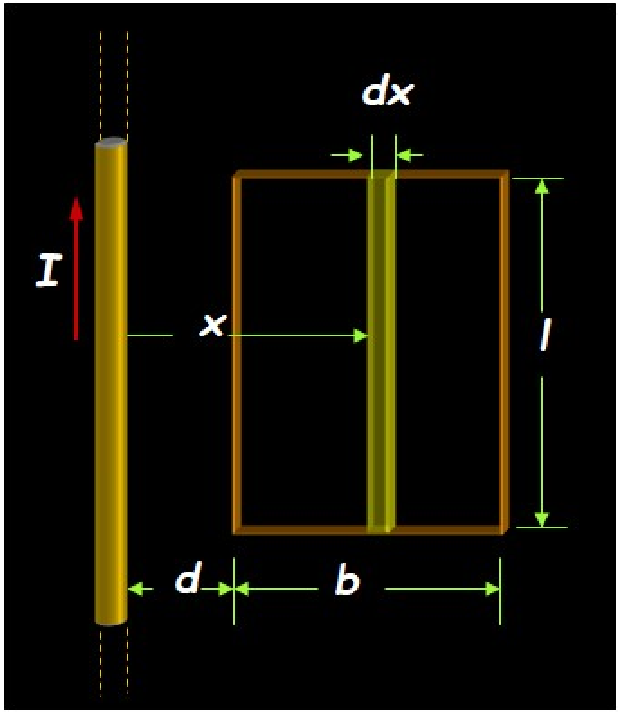


解： 某一瞬时，距直导线为***x***处的磁感应强度：

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I}{x}$$

选顺时针方向作为矩形线圈绕行的正向，则通过图中阴影面积***dS=l dx***的磁通量为：

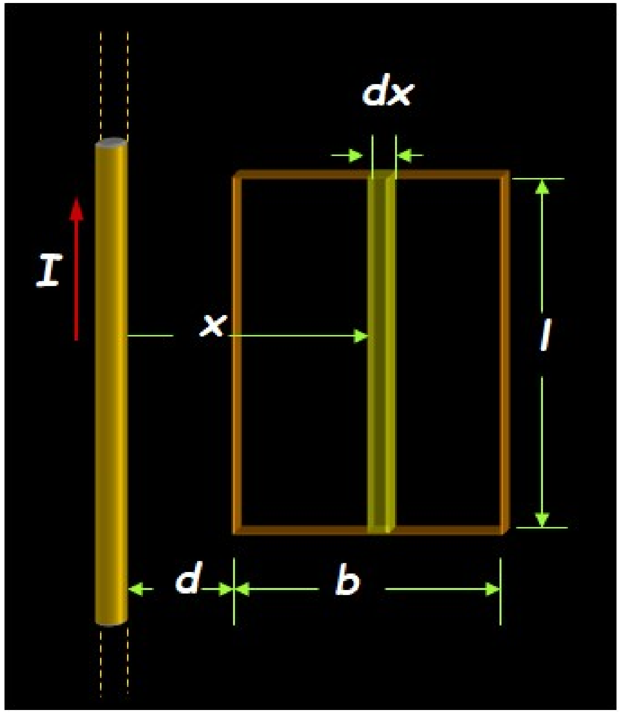
$$\mathrm{d}\Phi = B\cos 0^0 \mathrm{d}S = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I}{x} l\mathrm{d}x$$



在该瞬时***t***，通过整个线圈的磁通量为：

$$\Phi = \int \mathrm{d}\Phi = \int_d^{d+b} \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I}{x} l \mathrm{d}x = \frac{\mu_0 l I_0 \sin \omega t}{2\pi} \ln(\frac{d+b}{d})$$

因电流随时间变化，磁通量也会随时间变化，故线圈内的感应电动势为：



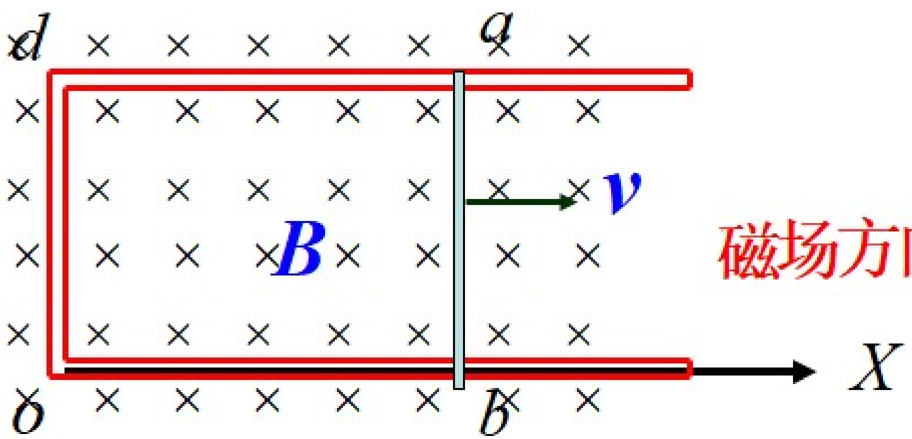
$$\varepsilon_i = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$$

$$= -\frac{\mu_0 l I_0 \omega}{2\pi} \ln(\frac{d+b}{d}) \cos \omega t$$

---负号表示电动势的方向沿逆时针

课堂练习题17-3：

矩形框导体的一边*ab*可以平行滑动，长为*l*。整个矩形回路放在磁感强度为*B*的均匀磁场中，*B*的方向如图所示。若导线*ab*以恒定的速率*v*向右运动，求：闭合回路的感应电动势。



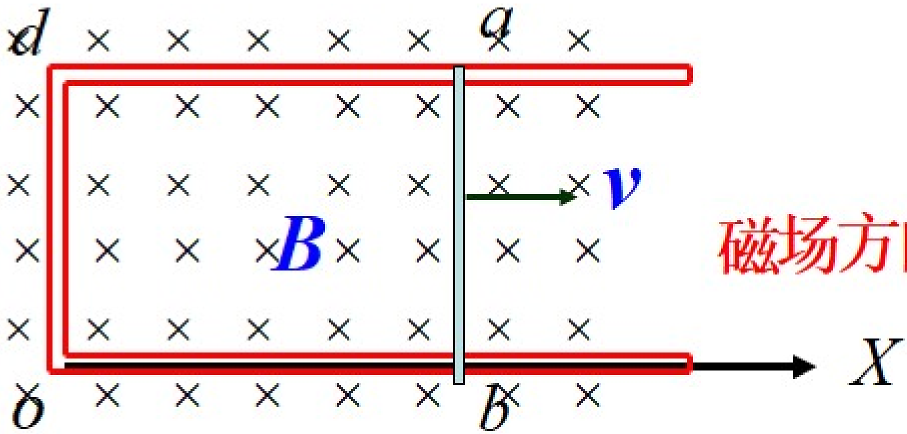
磁场方向：垂直向内

解： 设顺时针方向为回路正向，则 $\Phi = BS = Blx$

当导线匀速向右移动时，回路产生的感应电动势为：

$$\varepsilon_i = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -Bl\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = -Blv$$

负号表示感应电动势的方向与回路选定的正方向相反，即沿回路的逆时针方向



磁场方向：垂直向内

1)试用楞次定律判断方向？	2)其它求解方法？

§ 17-3 动生电动势

感应电动势是由磁通量的变化产生。

$$\varepsilon_i = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_S \boldsymbol{B}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{S}$$

磁通量的变化可以分为由磁感应强度的变化引起，和由导体在磁场中运动或回路形状、位置的变动引起两种不同的情形。

---前者称感生电动势(B变化)

---后者称动生电动势(S变化)

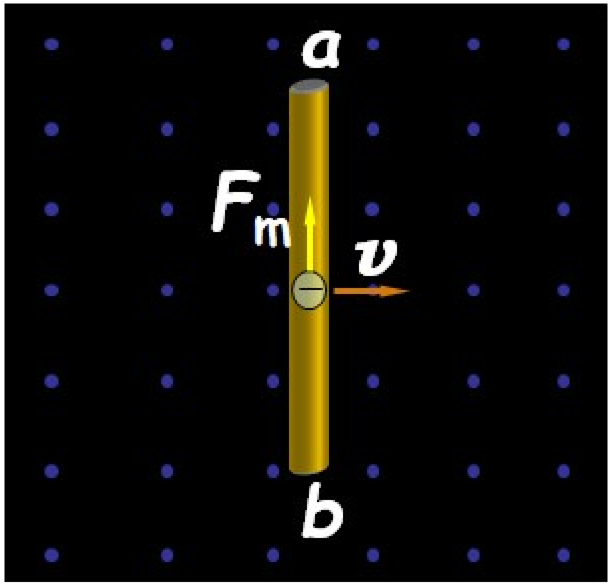
1.动生电动势(S变化)

是指由于导体运动而产生的感应电动势。

感应导体棒在磁场中运动时，棒内电子也随之运动，电子受洛仑兹力：

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

运动电子在此洛仑兹力的作用下会向a端聚集，从而形成b→a方向的电场。

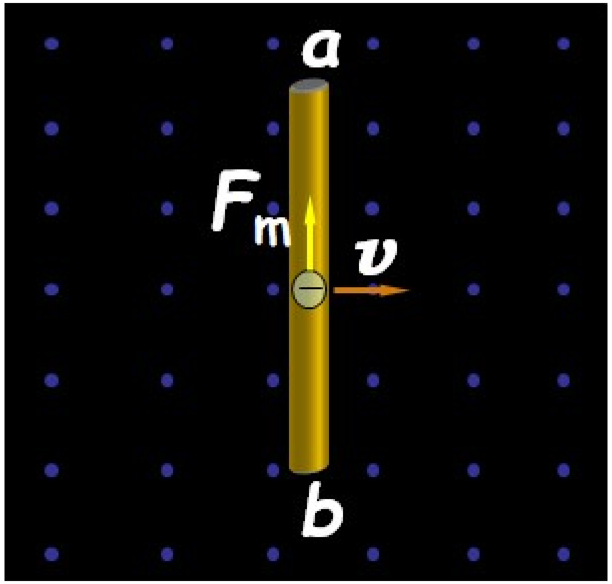


当电子受此电场力作用与洛仑兹力作用达到平衡时，棒内电子不再发生宏观流动。引入非静电场：

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

---在量值上E_K为单位正电荷所受的非静电力

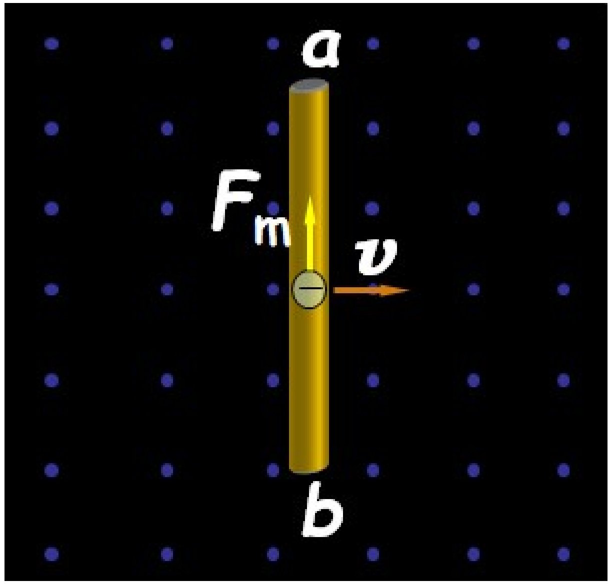
由于导体在磁场中运动时，导体棒相当于一电源，此电源中的非静电力为洛仑兹力，其非静电场强用E_K表示。



由电动势定义，导体棒上的动生电动势为：

$$\varepsilon_i = \int_{-}^{+} E_K \cdot dl = \int_{a}^{b} (\upsilon \times B) \cdot dl = B\upsilon l$$

一般情况下，磁场可不均匀、导体各线元速度可不同、磁场与运动速度可以不垂直等，因而动生电动势可表示为：



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

整个导体中的电动势：

$$\varepsilon_i = \int \mathrm{d}\varepsilon_i = \int_L (\upsilon \times B) \cdot \mathrm{d}l$$

若导体构成回路，且整个回路均有运动，则：

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

需要强调：

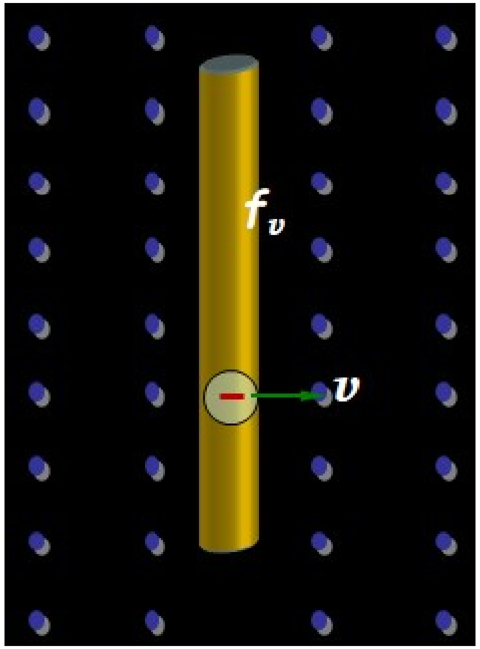
1)动生电动势只存在于运动的导线上，不动的导线上没有电动势，它只提供电流流动的通道；

2)若只有一段导线在磁场中运动而无回路，则该段导线中没有感应电流，但可能有动生电动势。

2.洛仑兹力做功问题的讨论

一方面，由于洛仑兹力始终与电荷的运动方向相互垂直，因而洛仑兹力是不作功的；

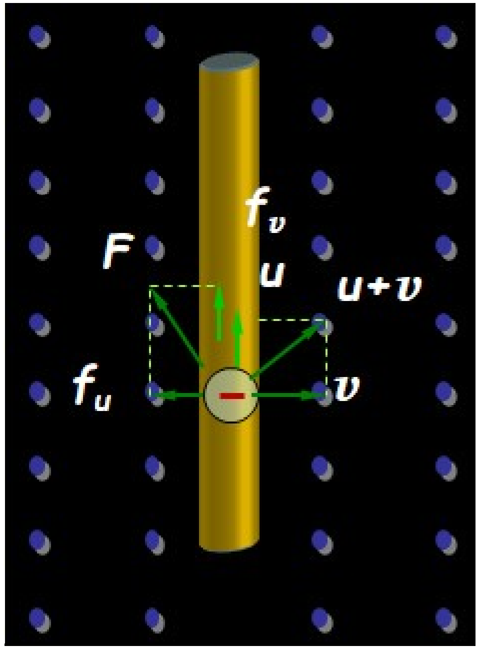
另一方面，根据动生电动势的定义可知，动生电动势是由于洛仑兹力移动单位正电荷产生的，由此来看洛伦兹力似乎又是作功的。



如何解释这一矛盾？

如图所示，洛仑兹力使电子获得速度**u**，因此实际电子的运动速度为**(v+u)**，而电子所受的总洛仑兹力为：

$$\vec{F} = -e(\vec{v} + \vec{u}) \times \vec{B} \qquad (1)$$



上式表明洛仑兹力与**(v+u)**垂直，对电子不做功。但其中第一项分力：

$$\vec{f}_v = -e(\vec{v} \times \vec{B})$$

可知f_v对电子做正功，形成动生电动势。

而公式(1)中的另一项分力：

$$\vec{f}_u = -e(\vec{u} \times \vec{B})$$

可知$\boldsymbol{f_u}$对电子做负功。即：$\boldsymbol{f_u}$的方向与棒的运动方向相反，所以此力会阻碍导体运动。

因此，要维持导体运动，就必须提供外力，此外力正是另一分力$\boldsymbol{f_v}$的来源。

洛仑兹力总体上不做功，它只是通过一个分力做负功迫使外界提供能量，而通过另一个分力做正功，将部分外界提供的能量转化为电能。

3.动生电动势的计算

I. 按动生电动势的定义计算：

$$\varepsilon_i = \int_a^b \mathrm{d}\varepsilon_i = \int_a^b (\upsilon \times B) \cdot \mathrm{d}l$$

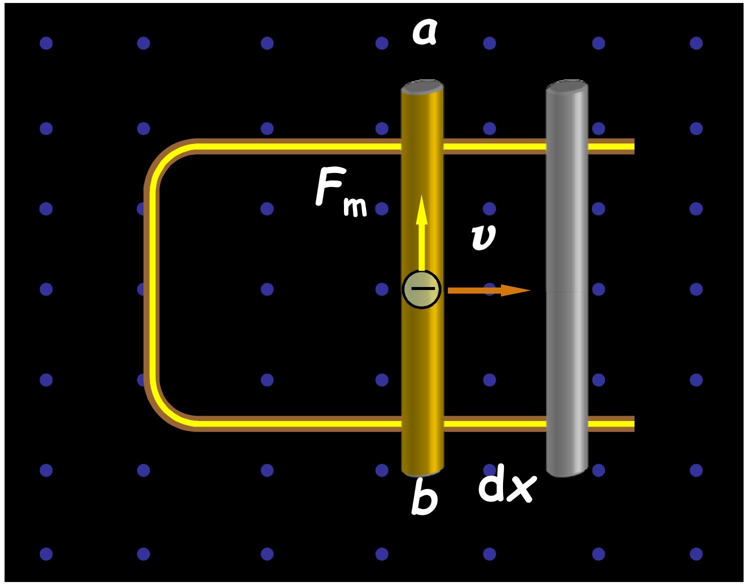
方向：$\varepsilon_i > 0$，$a \to b$

$\varepsilon_i < 0$，$b \to a$

II. 按按法拉第电磁感应定律计算：

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

此式一般用于闭合回路，若对导体棒运动这样的不闭合回路，需做辅助线构成假想回路。



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

➢计算动生电动势的具体步骤：

1)首先沿运动导线，假定一个电动势的指向；

2)沿电动势指向，在导线上任取一线元矢量d$\boldsymbol{l}$；

3)根据线元d$\boldsymbol{l}$的速度$\boldsymbol{v}$和d$\boldsymbol{l}$处的磁感强度$\boldsymbol{B}$以及两者间小于180°的夹角θ，按矢积的定义求$(\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B})$；

注意：$(\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B})$仍是一个矢量，

大小为$vB\sin\theta$，方向按右手螺旋法则确定

4)设矢量$(\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B})$与d$\boldsymbol{l}$之间小于180°的夹角为$\beta$，按标积的定义求$(\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B})\cdot d\boldsymbol{l}$，其值即为所取线元d$\boldsymbol{l}$上的动生电动势(注意：$(\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B})\cdot d\boldsymbol{l}$是一个标量)，即：

$$d\varepsilon_i = (\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B})\cdot d\boldsymbol{l} = (vB\sin\theta)dl\cos\beta \qquad (1)$$

5)最后，按电动势的指向对上式(1)进行积分，得整个运动导线上的动生电动势，即：

$$\varepsilon_i = \int_a^b vB\sin\theta\cos\beta dl \qquad (2)$$

6)根据上式(2)求出的动生电动势ε_i的正、负来判定动生电动势的指向。

若$\varepsilon_i>0$，其指向与事先假定的指向相一致；

若$\varepsilon_i<0$，其指向则与假定的指向相反。

课堂练习题17-4：

在匀强磁场B=1.0×10^{-2}T中，有*L*=0.5m的铜棒逆时针方向绕O轴转动，转速50转/秒。求：铜棒中的感应电动势、以及OA间的电势差。

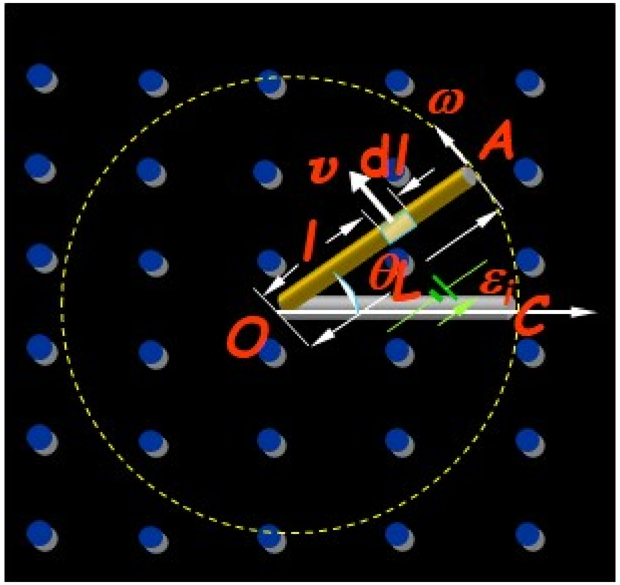
解法一：按电动势的定义计算。

选OA方向为电动势的指向，取线元d*l*，则速度：

$$\upsilon = l\omega$$

故d*l*中的动生电动势为：

$$d\varepsilon_i = (\vec{\upsilon} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} = \upsilon B dl$$

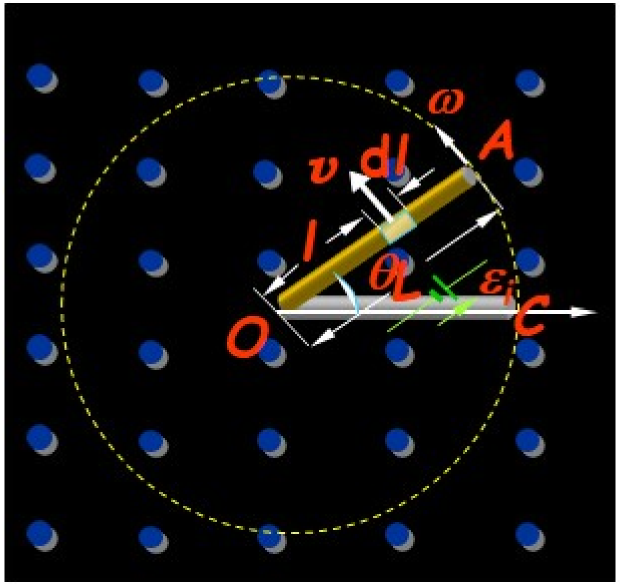


整个铜棒上的电动势为：

$$\varepsilon_i=\int_O^A d\varepsilon_i=\int_0^L B\omega l dl=\frac{1}{2}\omega BL^2$$

$$=\frac{2\pi\times50\times0.01\times(0.5)^2}{2}=0.39(V)$$

由于$\varepsilon_i>0$，所以铜棒中电动势的方向为$O\rightarrow A$。



断路时电源两端的电势差就是铜棒的电动势，故：

$$U_{OA}=U_O-U_A=-\varepsilon_i=-0.39(V)$$

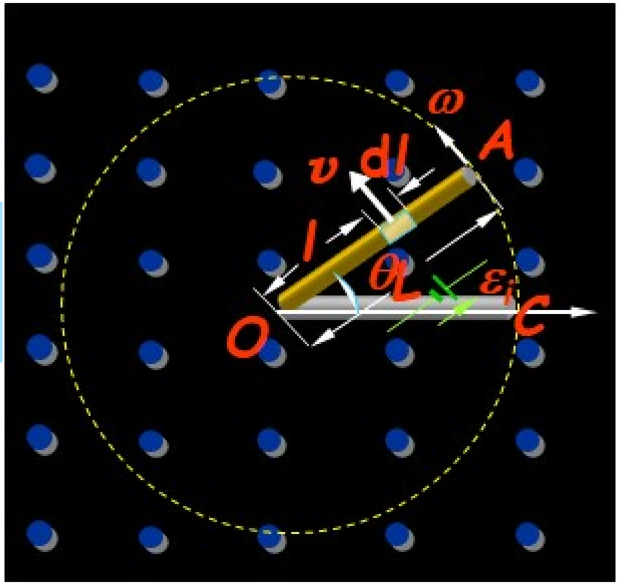
解法二： 按法拉第电磁感应定律计算。

设棒从OC运动至OA的位置，该扇形闭合回路OCA的面积$S=\pi L^2\cdot\theta/(2\pi) = L^2/2\cdot\theta$，在$t$时刻穿过回路所围面积的磁通量：

$$\Phi = B\cdot S = B\frac{L^2}{2}\theta$$

则动生电动势：

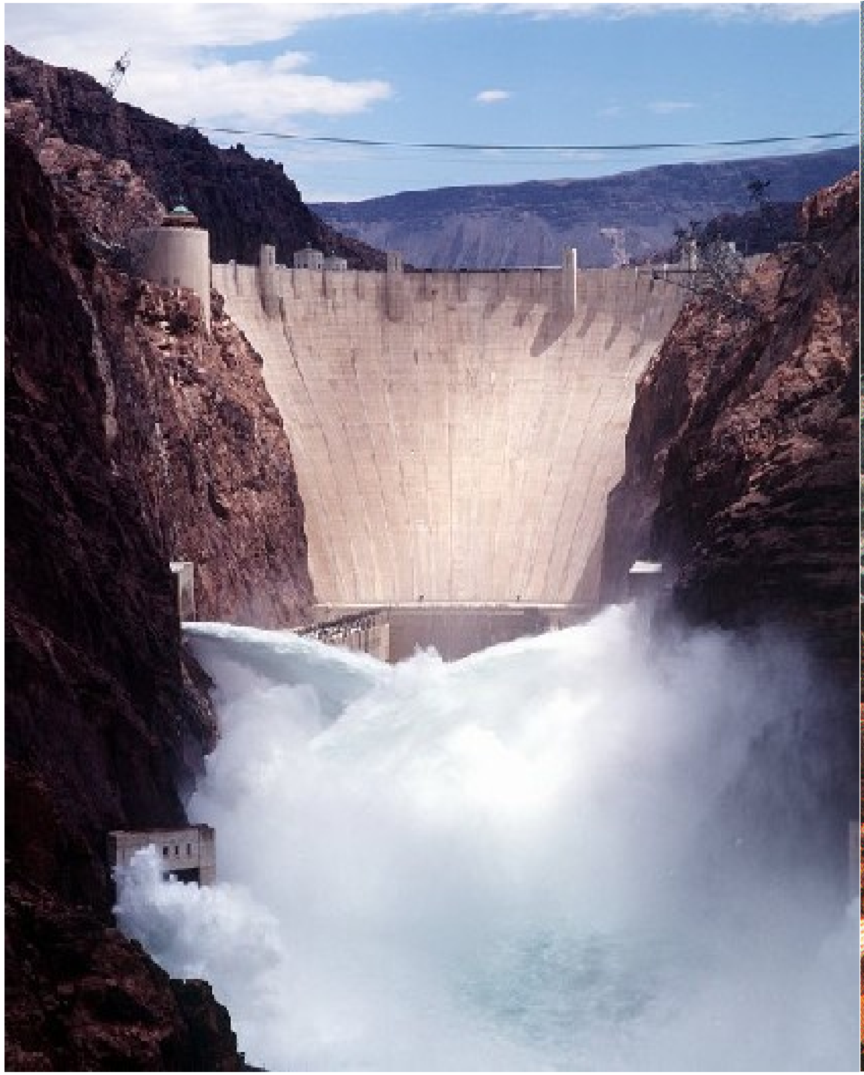
$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}[B\cdot\frac{L^2}{2}\theta] = -\frac{1}{2}\omega BL^2$$

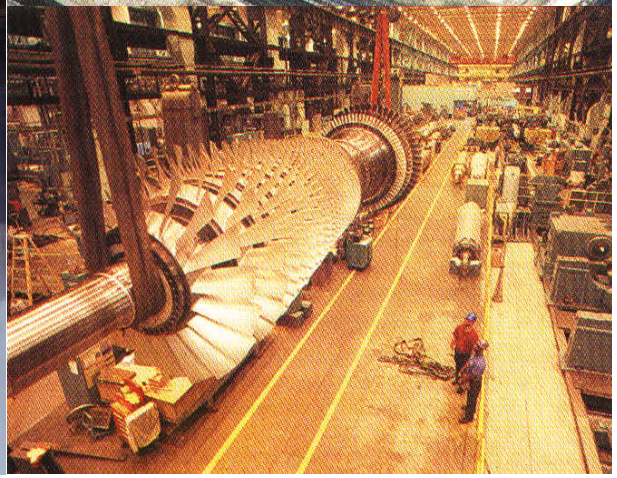


方向为顺时针，即O→A，

此结果与法一的结果相同。

§17-4 发电机和电动机的原理

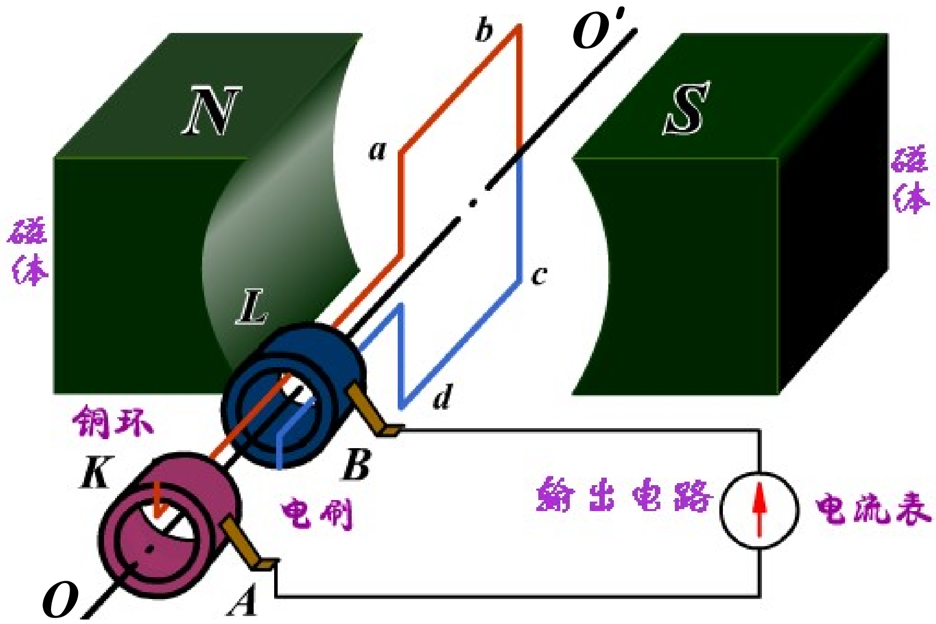




1.交流发电机的构造与作用

磁场中的线圈两端各连一个分别跟电刷*A*和*B*接触的铜环*K*和*L*，再与电流表组成闭合电路。

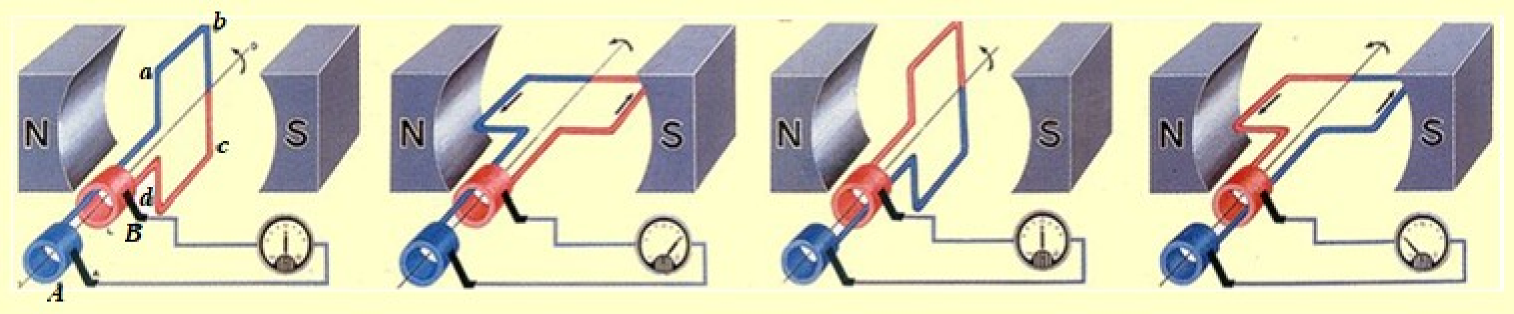
当线圈转动时，只有*ab*边和*cd*边能切割磁感线产生感应电流，而*da*边和*bc*边不切割磁感应线，不产生感应电流。



2.交流电的产生

线圈从图甲经图乙向图丙转半周的过程中，*ab*边向下运动，*cd*边向上运动，*ab*边向下切割磁感应线，*ab*边中的电流由*b*向*a*；*cd*边向上切割磁感应线，*cd*边中的电流由*d*向*c*。

所以外部电路中电流方向一直是从*A*流向*B*。

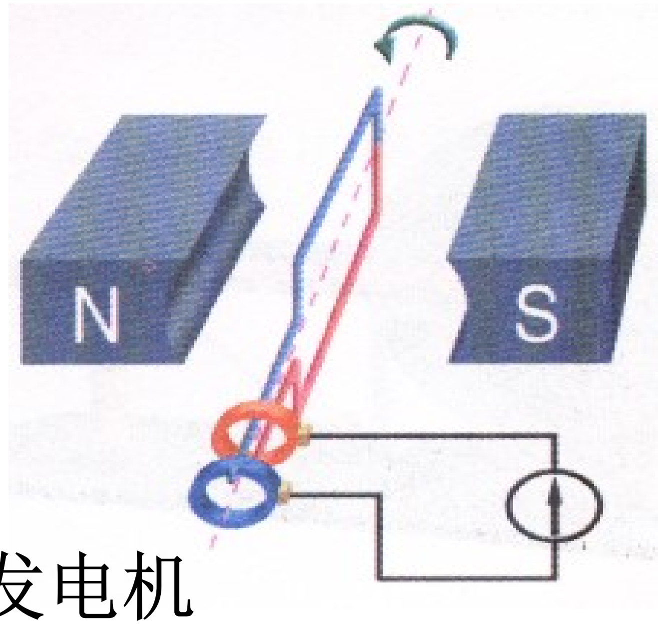


(甲) (乙) (丙) (丁)

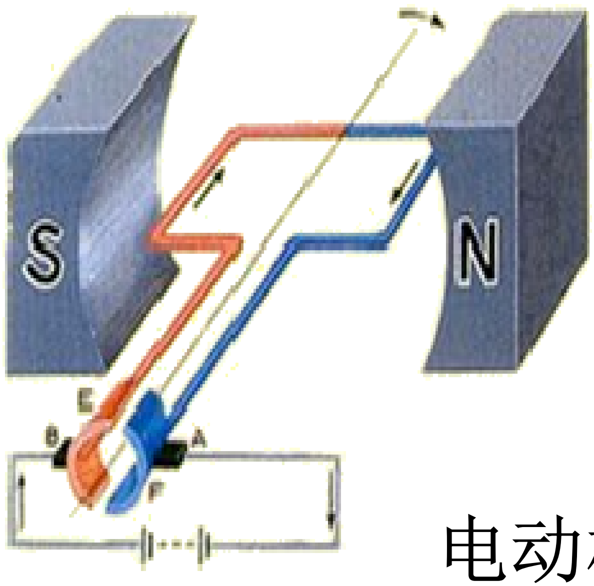
3.交流发电机的原理

是利用电磁感应把机械能转化为电能的装置。

我国交流电频率为**50Hz**，即：**1S**内线圈转动**50**圈，周期为**0.02S**，电流方向改变**100**次。

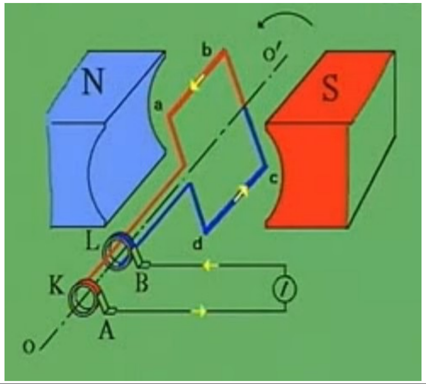
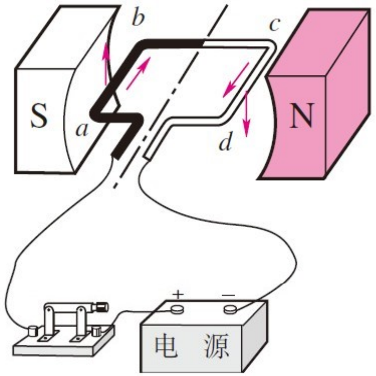


发电机



电动机

➢发电机与电动机的区别

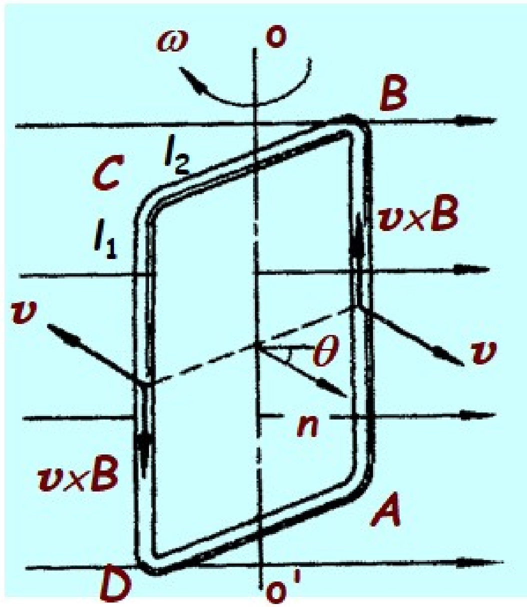
	发电机	电动机
原理图		
发明人		
原理		
能量转化		

课堂练习题17-5：

一矩形线圈在匀强磁场中绕**OO'**轴转动，各参数如图所示，求：转动线圈产生的感应电动势。

解： 设矩形线圈*ABCD*的匝数为*N*,面积为*S*，使线圈在匀强磁场中绕固定的轴线*OO'*转动，磁感应强度*B*与*OO'*轴垂直。

为方便起见，设*t*=0时，线圈平面的法向*n*与*B*之间的夹角为零，经过时间*t*，*n*与*B*之间的夹角变为θ。



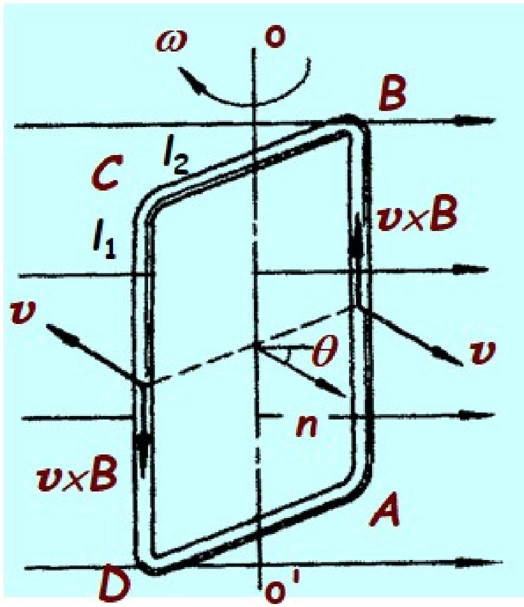
1)按电动势的定义计算。

当n与B的夹角为θ 时：$\theta = \omega t$

对于AB段和CD段有：

$$(\vec{E}_K = \vec{v} \times \vec{B})$$

$$E_{K_{AB}} = vB\sin\theta$$
$$= vB\sin(\pi-\theta)$$
$$= E_{K_{CD}}$$



设 $AB=CD=l_1$，

$BC=DA=l_2$，

则E_K沿ABCD的线积分为：

$$\varepsilon_i = N\oint E_K \cdot dl = 2Nl_1E_K = 2Nl_1 vB\sin\theta$$

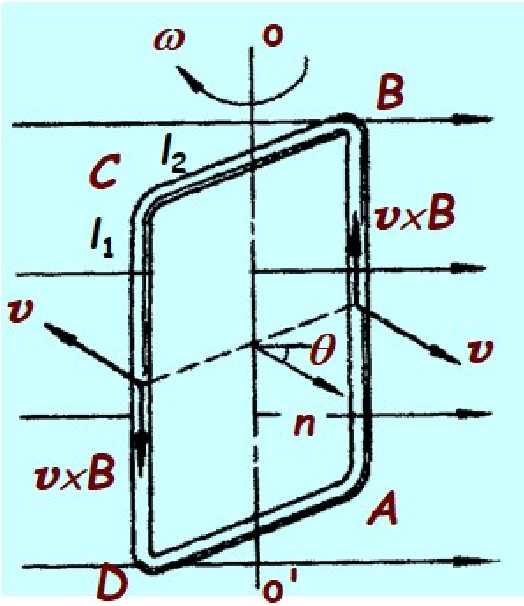
问：BC及DA段电动势？

又AB、CD段的线速度为 $v = 1/2 \cdot l_2 \omega$

令： $\varepsilon_0 = NBS\omega$

代入上式得：

$$\varepsilon_i = Nl_1 l_2 \omega B\sin\omega t$$
$$= NSB\omega\sin\omega t$$
$$= \varepsilon_0 \sin\omega t$$



2)按法拉第电磁感应定律计算。

线圈法向***n***与***B***之间的夹角为***θ***时的磁通量为：

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

则： $\varepsilon_i = -N\dfrac{d\Phi}{dt} \quad = NBS\sin\theta\dfrac{d\theta}{dt}$

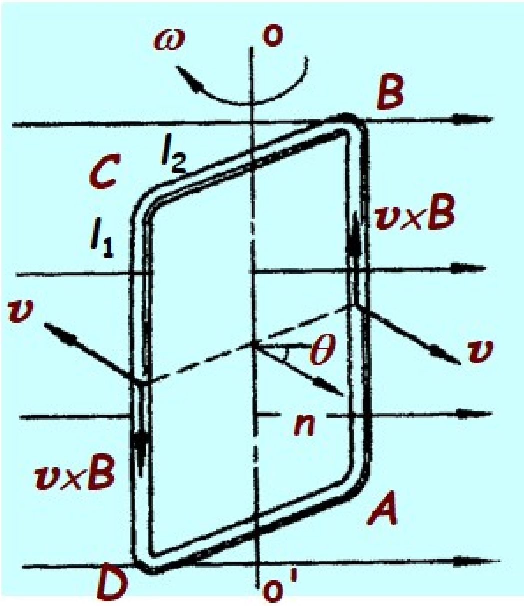
式中：$\theta = \omega t, \quad d\theta/dt = \omega$

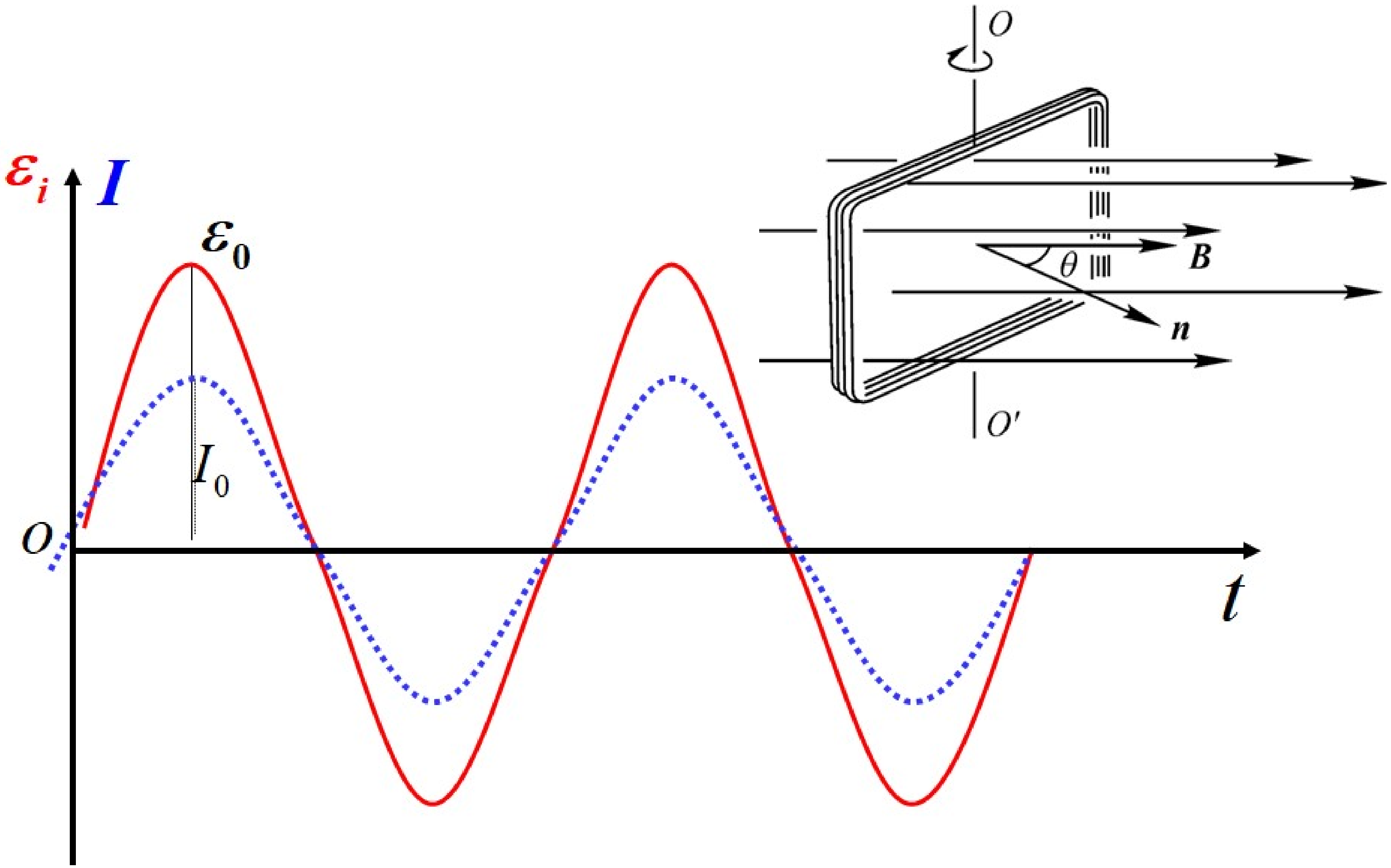
$$\varepsilon_i = NBS\omega\sin\omega t$$

令： $\varepsilon_0 = NBS\omega$

则： $\boxed{\varepsilon_i = \varepsilon_0 \sin\omega t}$

---得到同样的结果





交变电动势和交变电流

第六次作业 电磁感应上

P324-325:

17-1

17-2

17-6

17-7

17-8

17-9