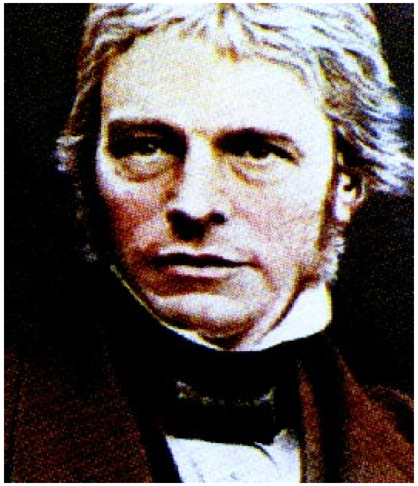
第十二章
电磁感应 电磁场理论

中国矿业大学北京理学院

法拉第简介

(Michael Faraday, 1791-1867)



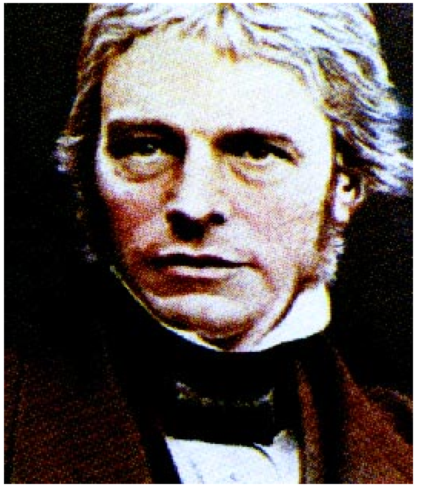
1. 生平

法拉第于1791年出生在英国伦敦附近的一个小村里，父亲是铁匠，自幼家境贫寒，无钱上学读书。13岁时到一家书店里当报童，次年转为装订学徒工。在学徒工期间，法拉第除工作外，利用书店的条件，在业余时间贪婪地阅读了许多科学著作，例如《化学对话》、《大英百科全书》的《电学》条目等，这些著作开拓了他的视野，激发了他对科学的浓厚兴趣。

1812年，学徒期满，法拉第打算专门从事科学研究。次年，经著名化学家戴维推荐，法拉第到皇家研究院实验室当助理研究员。这年底，作为助手和仆人，他随戴维到欧洲大陆考察漫游，结识了不少知名科学家。1815年春回到伦敦后，在戴维的支持和指导下作了好多化学方面的研究工作。1821年开始担任实验室主任。经过十年的实验研究（中间曾因研究合金和光学玻璃等而中断过），在1831年，他终于发现了电磁感应现象。 1867年8月25日，他坐在书房的椅子上安祥地离开了人世。遵照他的遗言，在他的墓碑上只刻了名字和生死年月。

电流→磁场，磁场→电流?

在恒定电流的磁场中，导线中无电流
—法拉第感到迷惑。



Michael Faraday, 1791-1867
乾隆56年---同治6年

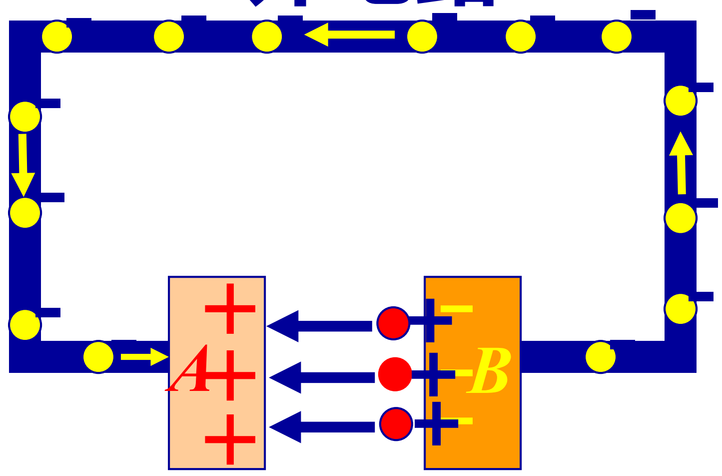
经过失败和挫折(1822—1831)，法拉第终于发现：感应电流与原电流的变化有关，而与原电流本身无关。

电磁感应现象揭示了电与磁之间的联系和转化，为人类获取电能开辟了道路，引起了一场重大的工业和技术革命。

§ 12-1　电磁感应的基本规律

1. 电源的电动势

（1）非静电力

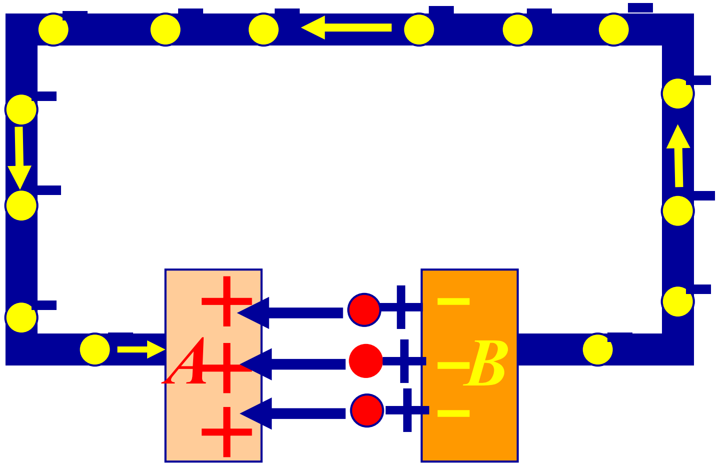


电源——提供非静电力的一种装置。

它把其他形式的能量转化成电能。

（2）电源电动势

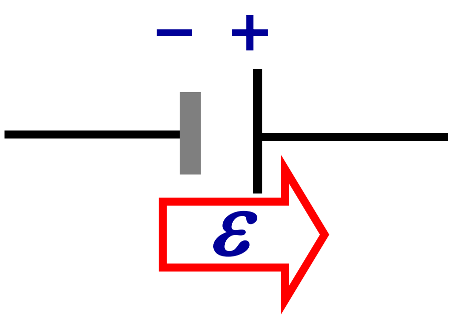
电源迫使正电荷dq从负极经电源内部移动到正极所做的功为dA，电源的**电动势**为：



$$\varepsilon = \frac{\mathrm{d}A}{\mathrm{d}q}$$

等于把单位正电荷从负极经内电路移动到正极时所做的功，单位为伏特。单位：J / C，即V

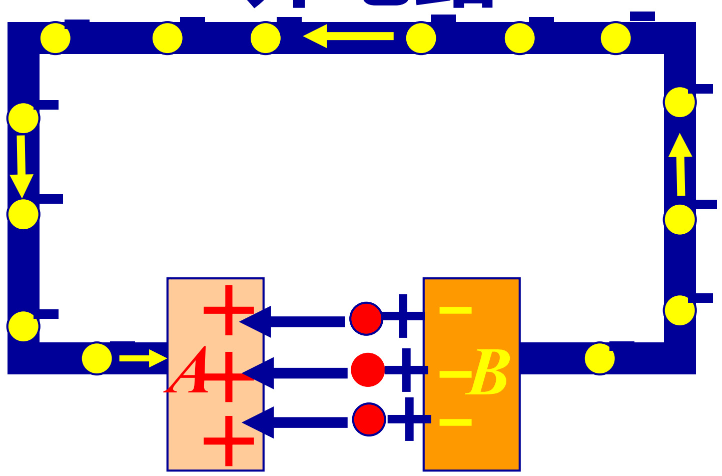
★正方向规定：**自负极经内电路指向正极。**



哪一端电势高?

（3）引入非静电场强：

$$\vec{E}_k = \frac{\vec{F}_K}{q}$$



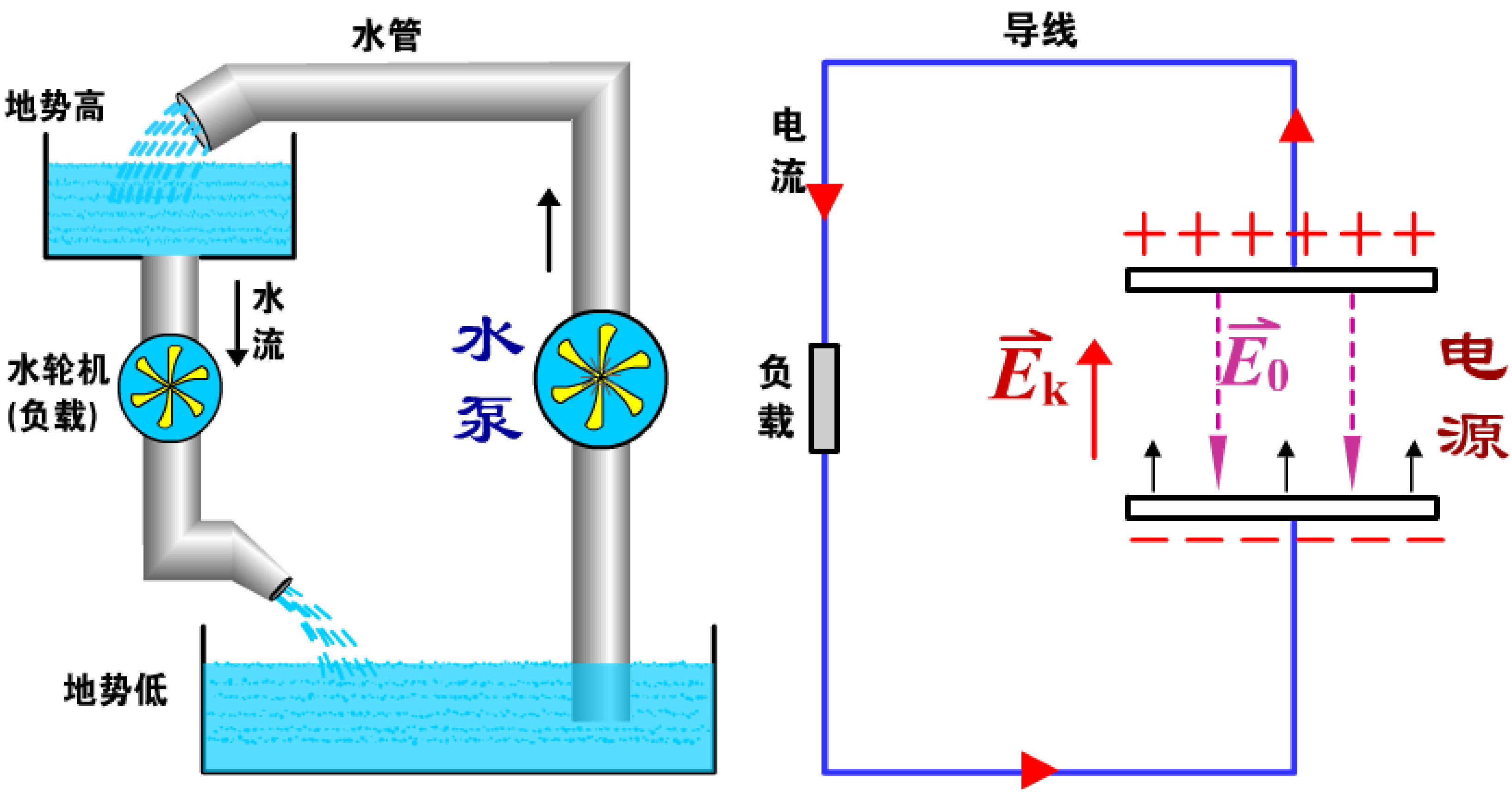
由电源电动势定义，得：

$$\varepsilon = \frac{A}{q} = \frac{\int_B^A \vec{F}_K \cdot d\vec{l}}{q}$$

$$= \frac{q\int_B^A \vec{E}_k \cdot \mathrm{d}\vec{l}}{q} = \int_B^A \vec{E}_k \cdot \mathrm{d}\vec{l}$$

电源电动势，等于非静电场强沿着从负极经内电路到正极的 路径积分。

电源的电动势



电源和水泵作用的类比

关于电动势的说明：

(1)反映电源作功能力，与外电路无关。

(2)有方向的标量，规定其方向为电源内部负极指向正极。

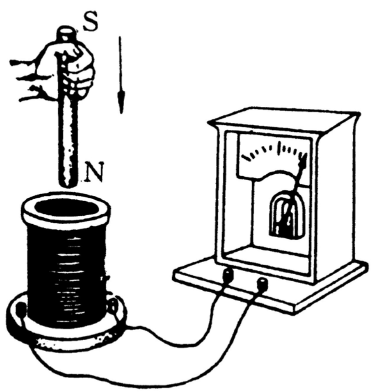
从场的观点来看：非静电力对应非静电场E_{k}。非静电场把单位正电荷从负极B经电源内部移到正极A作功为

$$\varepsilon = \int_B^A \vec{E}_{\mathrm{k}} \cdot \mathrm{d}\vec{l}$$

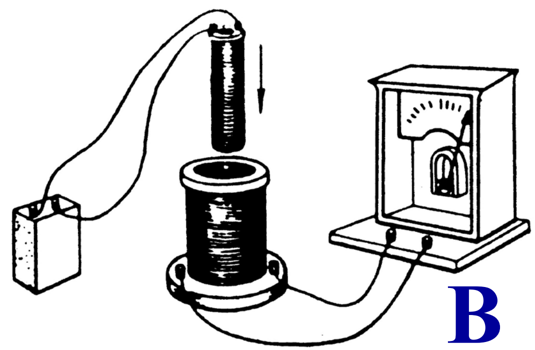
电源外部回路$E_{\mathrm{k}} = 0$，非静电场场强沿整个闭合回路的环流等于电源电动势，即

$$\varepsilon = \oint \vec{E}_{\mathrm{k}} \cdot \mathrm{d}\vec{l}$$

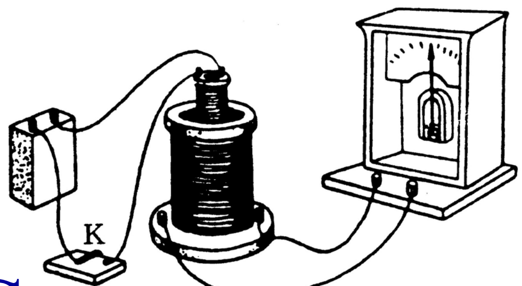
1831年法拉第总结出以下五种情况都可产生感应电流：在磁场中运动着的导体（D），变化着的电流（C），运动着的恒定电流（B），变化着的磁场（A），运动着的磁铁（A）。



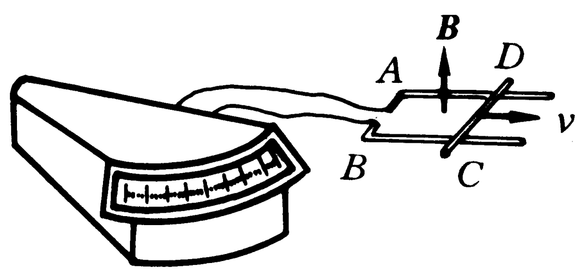
A



B



C



D

当穿过一个闭合导体回路所包围的面积内的磁通量发生变化时（不论这种变化是由什么原因引起的），在导体回路中就有电流产生。这种现象称为**电磁感应现象**。

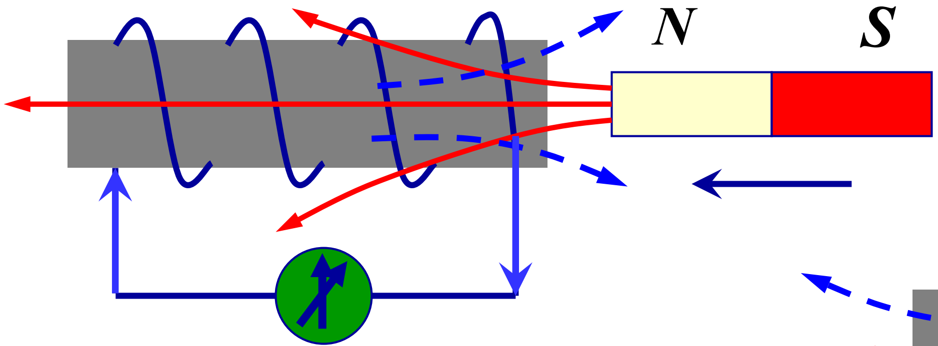
回路中所产生的电流称为**感应电流**。

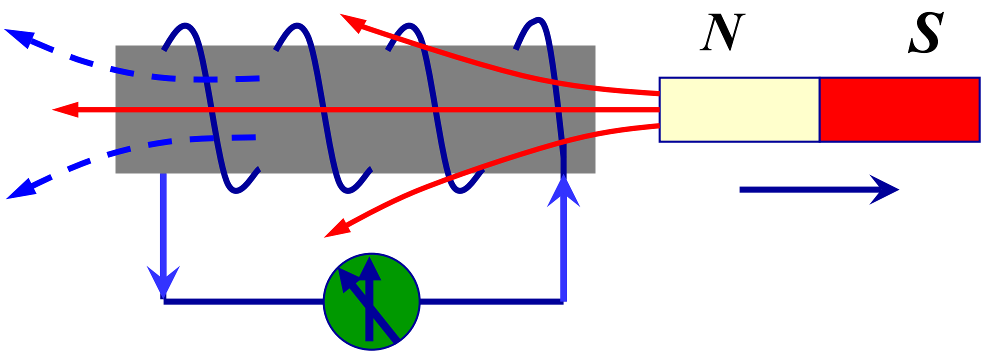
相应的电动势则称为**感应电动势**。

楞次定律

判断感应电流方向的楞次定律：闭合回路中产生的感应电流具有确定的方向，它总是使感应电流所产生的通过回路面积的磁通量，去补偿或者反抗引起感应电流的磁通量的变化。

楞 次



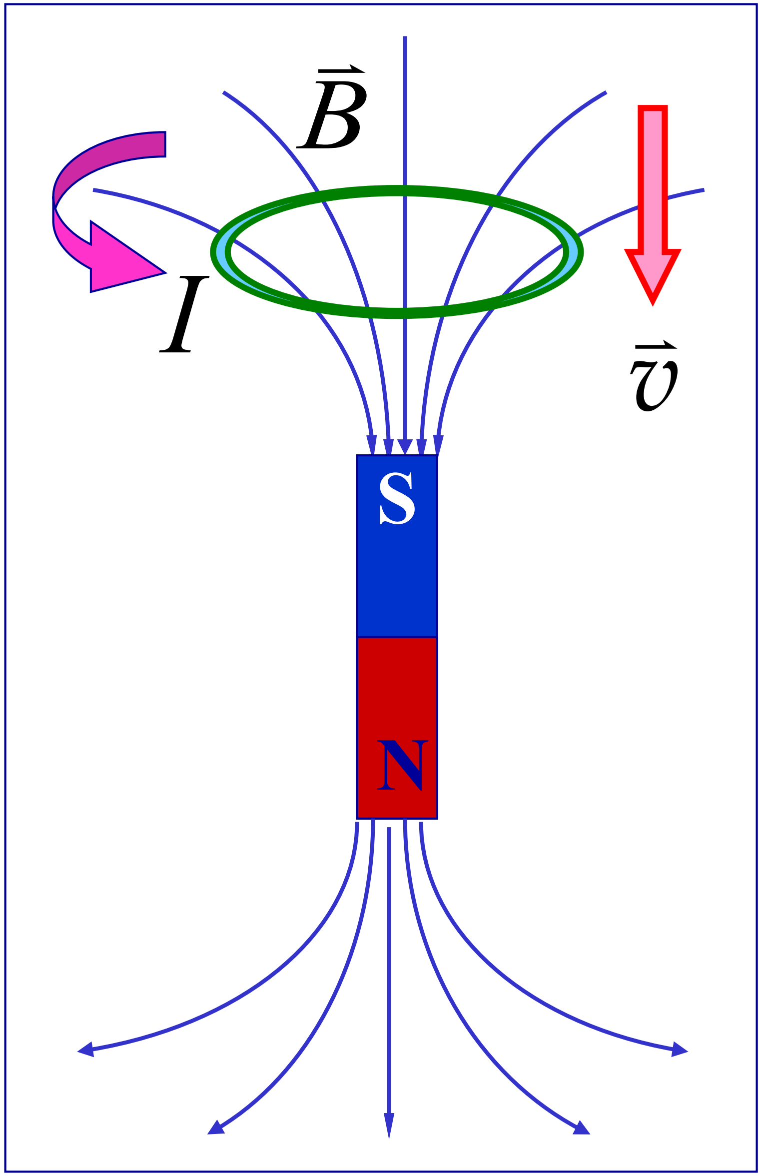


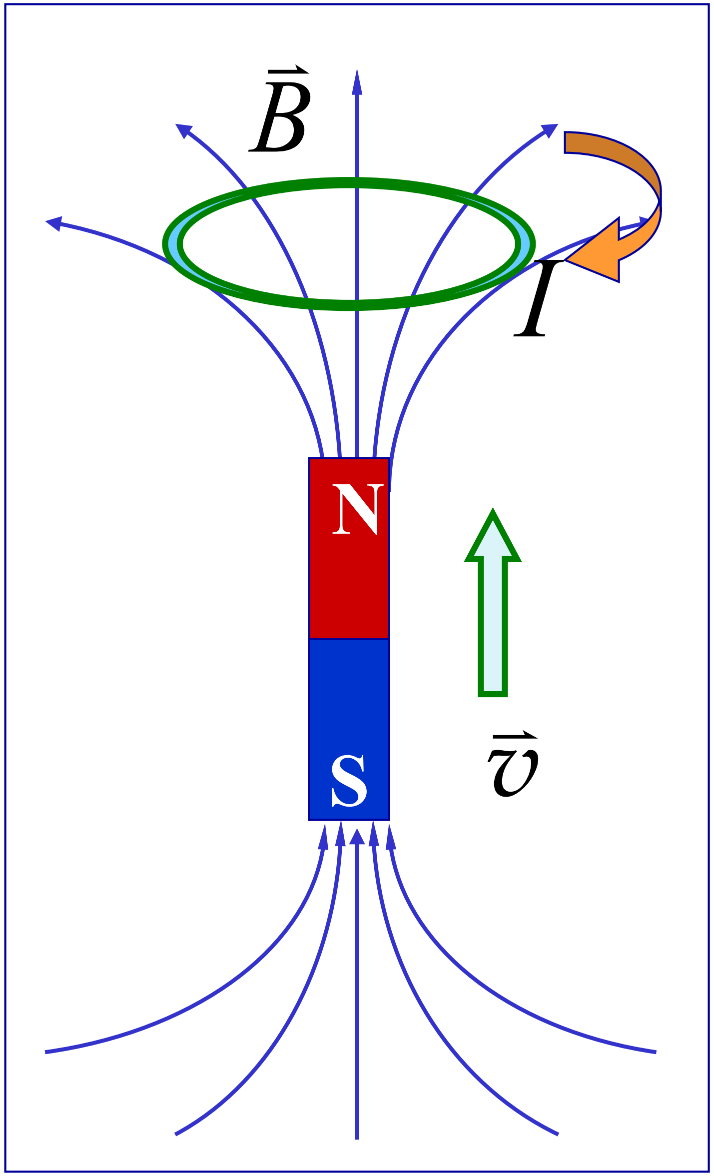
注意:

（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。

用楞次定律判断感应电流方向





2. 法拉第电磁感应定律

通过回路所包围面积的磁通量发生变化时，回路中产生的感应电动势 ε_i 与磁通量Φ对时间的变化率成正比.

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

负号“ - ”：

反映感应电动势的方向；与楞次定律一致。

$\mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}t$: ε_i **正比于磁通量变化快慢。**

讨论：A，利用定律判定电动势方向：

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

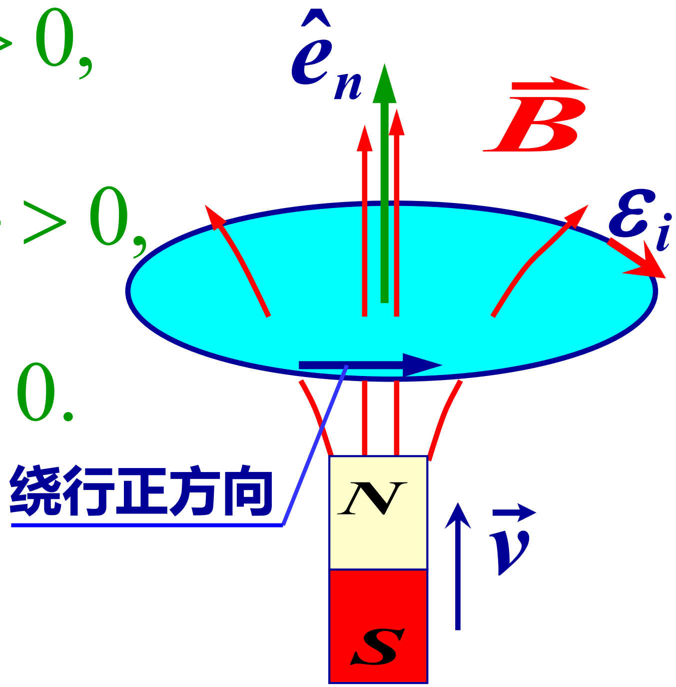
(1)首先确定一个正绕行方向和正法线方向 $\hat{e}_n$；

(2)确定磁通量的正负；

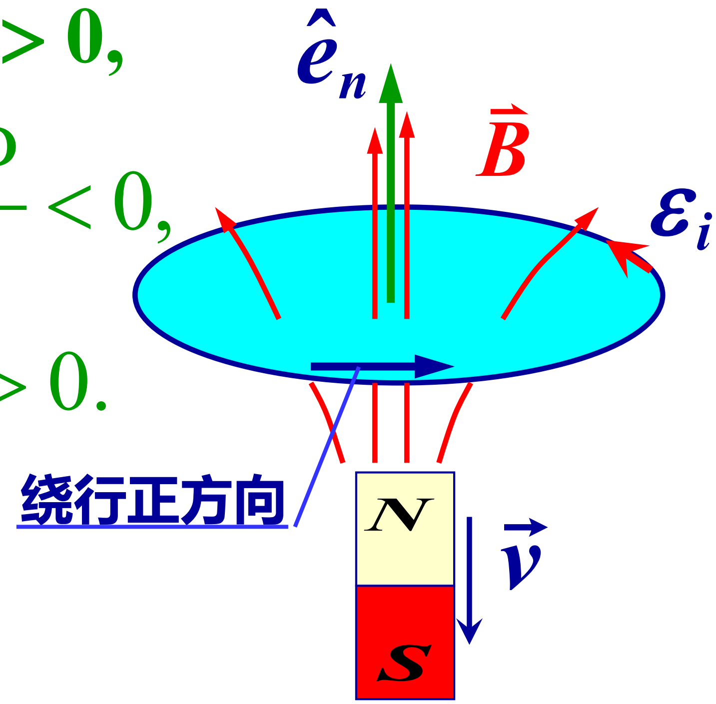
(3)确定 dΦ/dt 的正负；

(4)确定电动势ε_i 的方向。

$\Phi > 0,\quad \dfrac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} > 0,\quad \varepsilon_i < 0.$



$\Phi > 0,\quad \dfrac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} < 0,\quad \varepsilon_i > 0.$



B，若回路由N匝导线串联而成:

感应电动势为:

$$\varepsilon_i = -\underline{\underline{N}}\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -\frac{\mathrm{d}(N\Phi)}{\mathrm{d}t} = -\frac{\mathrm{d}\Psi}{\mathrm{d}t}.$$

其中，$\Psi = N\Phi$, **磁链数（或全磁通）**

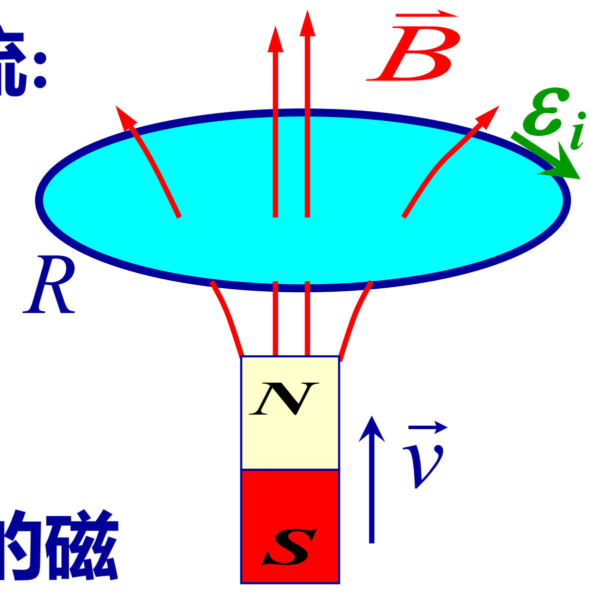
表示通过N 匝线圈的总磁通量。

C，通过回路导体任一截面的感应电量：

设闭合导体回路的总电阻为R，

由全电路欧姆定律，回路中的感应电流：

$$I_i=\frac{\varepsilon_i}{R}=-\frac{1}{R}\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$$



$$\therefore \mathrm{d}q_i=I_i\mathrm{d}t=-\frac{1}{R}\mathrm{d}\Phi.$$

设在t_1到t_2时间内，通过闭合导体回路的磁通量由Φ_1变到Φ_2，

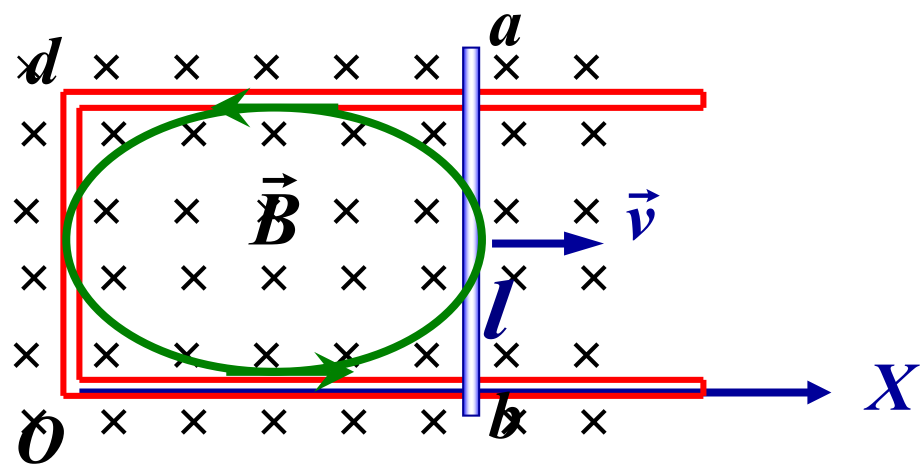
$$\therefore \underline{q_i}=\int_{t_1}^{t_2}I_i\mathrm{d}t=-\frac{1}{R}\int_{\Phi_1}^{\Phi_2}\mathrm{d}\Phi=\frac{1}{R}\underline{(\Phi_1-\Phi_2)}.$$

感应电流与回路中磁通量随时间的变化率有关；

感应电荷只与回路中磁通量的变化量有关。

例题：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、方向与其平面垂直的均匀磁场中，如图。

若导线ab以恒定速率 v 向右运动，求闭合回路的感应电动势。



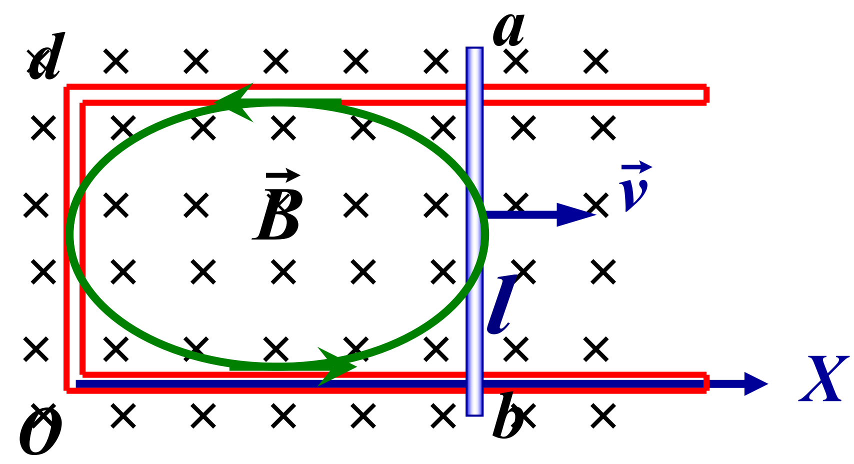
解: 建立如图所示坐标轴。

设t 时刻ab的坐标为x，取逆时针方向为回路的正绕行正方向，

t 时刻穿过回路的磁通量为:

$$\Phi = \vec{B}\cdot\vec{S} = -B \cdot lx$$

$$\Phi = -B \cdot lx$$



当导线匀速向右时，穿过回路的磁通量发生变化，回路感应电动势为：

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

正号表示：感应电动势的方向与回路的正方向一致，即沿逆时针方向。

也可不选定回路绕行方向，而是根据楞次定律判断感应电动势的方向。

例题：　在无限长直载流导线的磁场中，有一运动的导体线框，导体线框与载流导线共面。

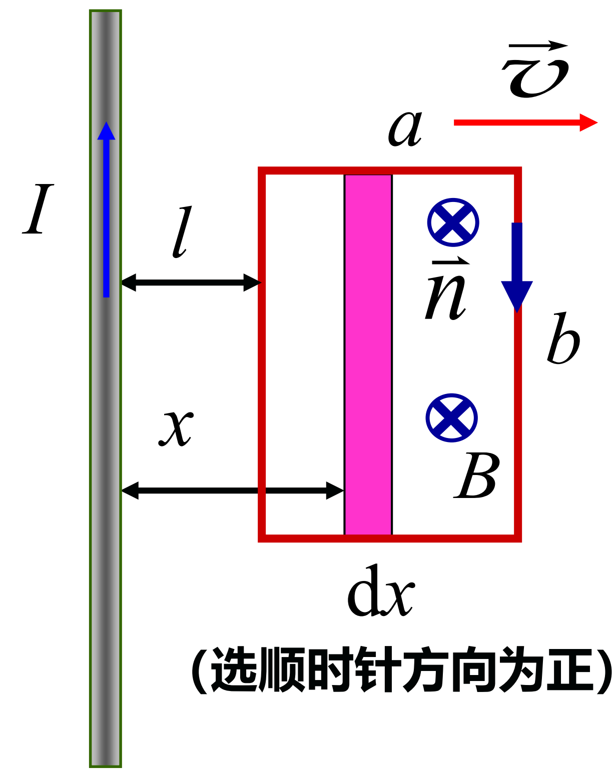
求：线框中的感应电动势。

解：取面积元，通过其磁通量为

$$\mathrm{d}\Phi = B\mathrm{d}S = \frac{\mu_0 I}{2\pi x} b\mathrm{d}x$$

$$\Phi = \int \mathrm{d}\Phi = \int_l^{l+a} \frac{\mu_0 I}{2\pi x} b\mathrm{d}x$$

$$= \frac{\mu_0 I b}{2\pi} \ln\left(\frac{l+a}{l}\right)$$



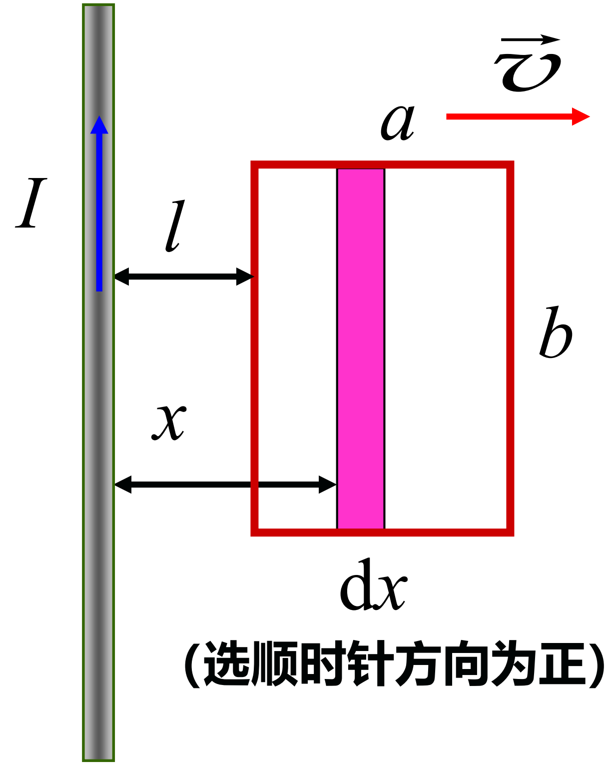
（选顺时针方向为正）

$$\Phi = \frac{\mu_0 I b}{2\pi} \ln\left(\frac{l+a}{l}\right)$$

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

$$= -\frac{\mu_0 I b}{2\pi}\left[\frac{\mathrm{d}l/\mathrm{d}t}{l+a} - \frac{\mathrm{d}l/\mathrm{d}t}{l}\right]$$

$$= \frac{\mu_0 I a b v}{2\pi l(l+a)}$$

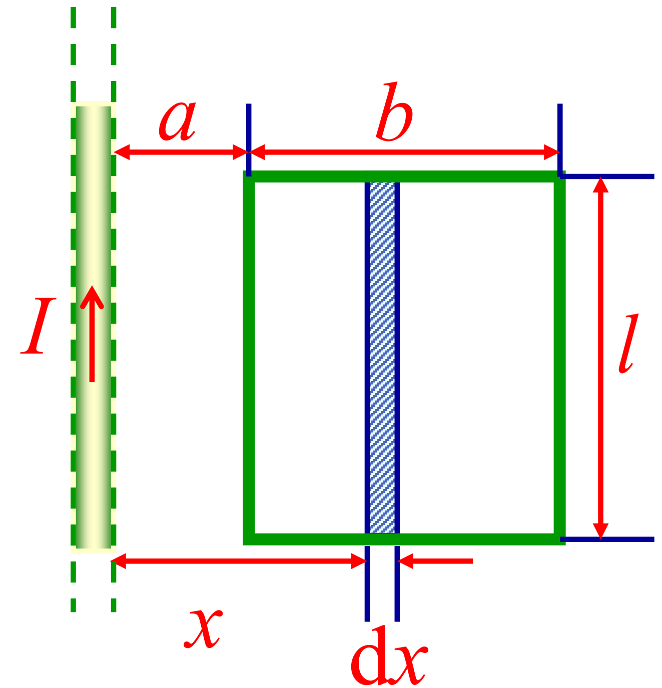


(选顺时针方向为正)

例题： 一长直导线中通有交变电流$I=I_0\sin\omega t$，式中I表示瞬时电流，I_0是电流振幅，ω是角频率，I_0和ω都是常量。在长直导线旁平行放置一矩形线圈，线圈平面与直导线在同一平面内。已知线圈长为l，宽为b，线圈近长直导线的一边离直导线距离为a。求任一瞬时线圈中的感应电动势。

解：某一瞬间，距离直导线x处的磁感应强度为

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



选顺时针方向为矩形线圈的绕行正方向，则通过图中阴影部分的磁通量为

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

在该瞬时t，通过整个线圈的磁通量为

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

由于电流随时间变化，通过线圈的磁通量也随时间变化，故线圈内的感应电动势为

$$\varepsilon_{\mathrm{i}} = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -\frac{\mu_0 l I_0}{2\pi}\ln\frac{a+b}{a}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\sin\omega t$$

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

感应电动势随时间按余弦规律变化，其方向也随余弦值的正负作顺、逆时针转向的变化。

§ 12-2 动生电动势与感生电动势

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

$\left.\begin{array}{l}\text{磁场恒定、回路运动：动生电动势} \\[2em] \text{磁场变化、回路静止：感生电动势}\end{array}\right\}$ **感应电动势**

【思考】非静电力是什么？

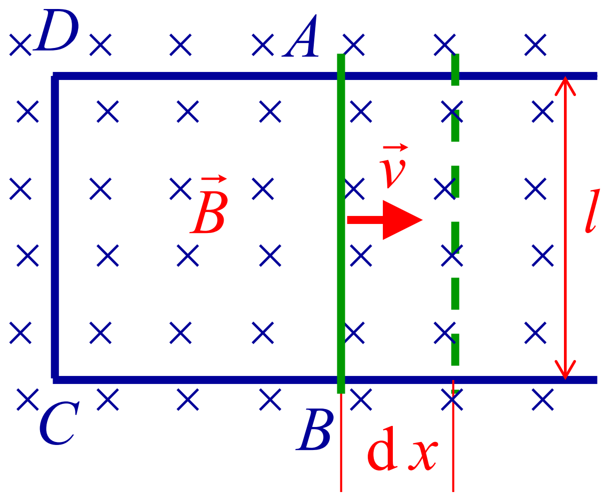
动生电动势

1．在磁场中运动的导线内的感应电动势

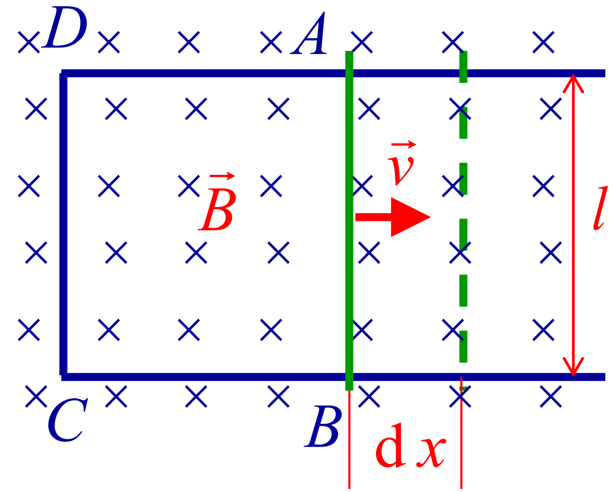
由于导体运动而产生的感应电动势，称为动生电动势。图中回路取顺时针绕向为正。

$$\mathrm{d}\Phi = \vec{B}\cdot\mathrm{d}\vec{S} = Bl\,\mathrm{d}x$$

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



当导线AB以速度 $\vec{v}$ 向右运动时，导线内每个自由电子也就获得向右的定向速度$\vec{v}$，由于导线处在磁场中，自由电子受洛仑兹力$\vec{F}$为



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

若以$\vec{E}_k$表示非静电场强，则有 $-e\vec{E}_k = -e\vec{v} \times \vec{B}$

$$\Rightarrow \vec{E}_k = \vec{v} \times \vec{B}$$

$$\varepsilon_i = \int_A^B \vec{E}_k \cdot \mathrm{d}\vec{l} = \int_A^B (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \mathrm{d}\vec{l} = -lvB$$

动生电动势的非静电力场来源 —— 洛伦兹力.

在一般情况下，磁场可以不均匀，导线在磁场中运动时各部分的速度也可以不同，$\vec{v}$、$\vec{B}$ 和 $\mathrm{d}\vec{l}$ 也可以不相互垂直，这时运动导线内总的动生电动势为

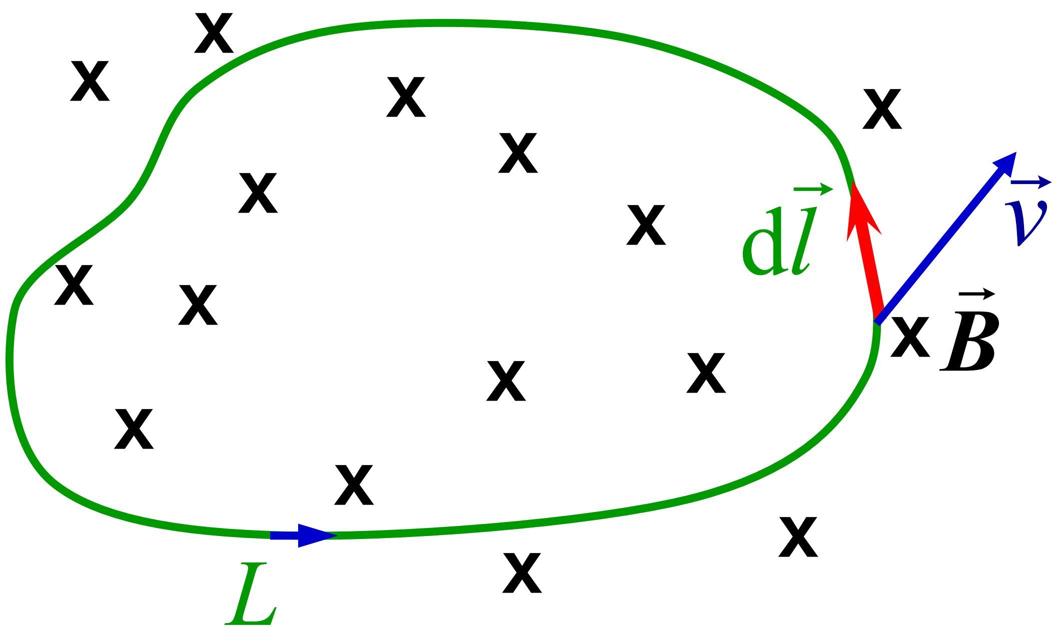
$$\varepsilon_i = \int_L (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \mathrm{d}\vec{l}$$

矢积 $\vec{v} \times \vec{B}$ 与 $\mathrm{d}\vec{l}$ 成锐角时，ε_i为正；成钝角时，ε_i为负。

由上式算出的电动势有正负之分，ε_i为正时，表示电动势方向顺着$\mathrm{d}\vec{l}$ 的方向；ε_i为负时，则表示电动势的方向逆着 $\mathrm{d}\vec{l}$ 的方向。

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：

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

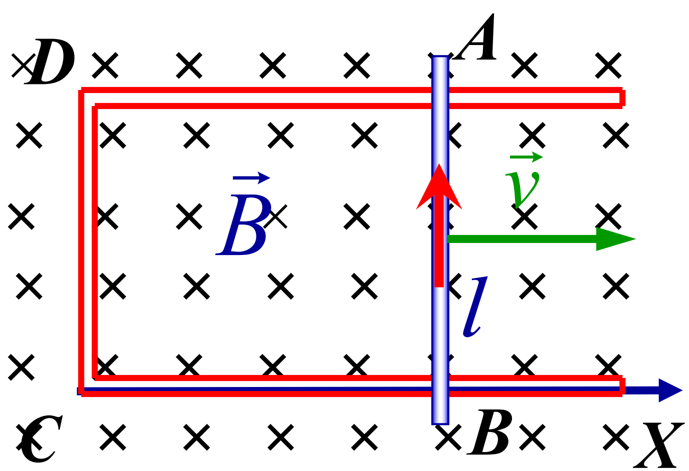


$$\varepsilon_i = \int_L \vec{v}\times\vec{B}\cdot \mathrm{d}\vec{l}$$

复杂吗?

$$\vec{A}\times\vec{B}\cdot\vec{C} = \underline{(\vec{A}\times\vec{B})}\cdot\vec{C}$$

新矢量$\vec{D}$ 大小：$AB\sin\theta$, 方向：右手螺旋 $\Rightarrow \vec{D}\cdot\vec{C}$



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