

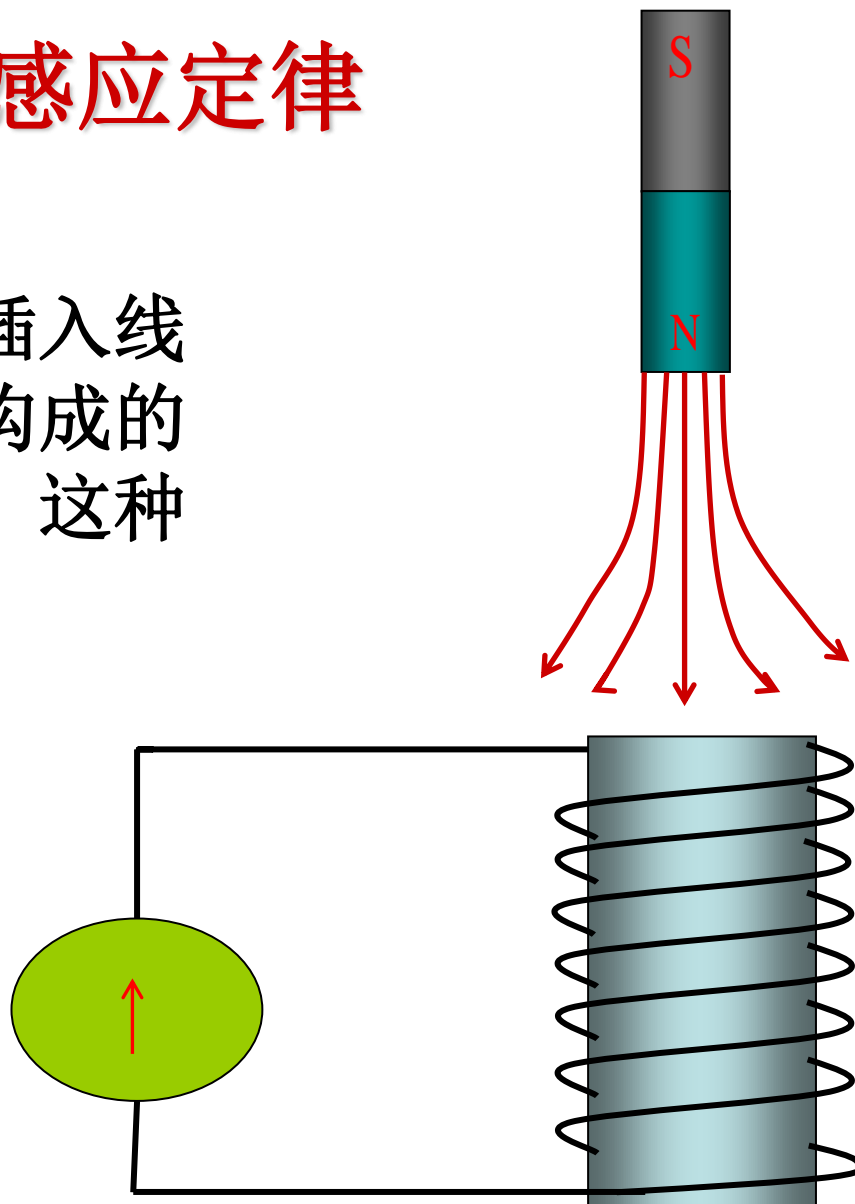
§ 9-1 电磁感应定律

一、电磁感应现象

如图所示，当条形磁铁插入线圈时，由线圈和电流计构成的闭合回路中有电流通过，这种电流称为**感应电流**。

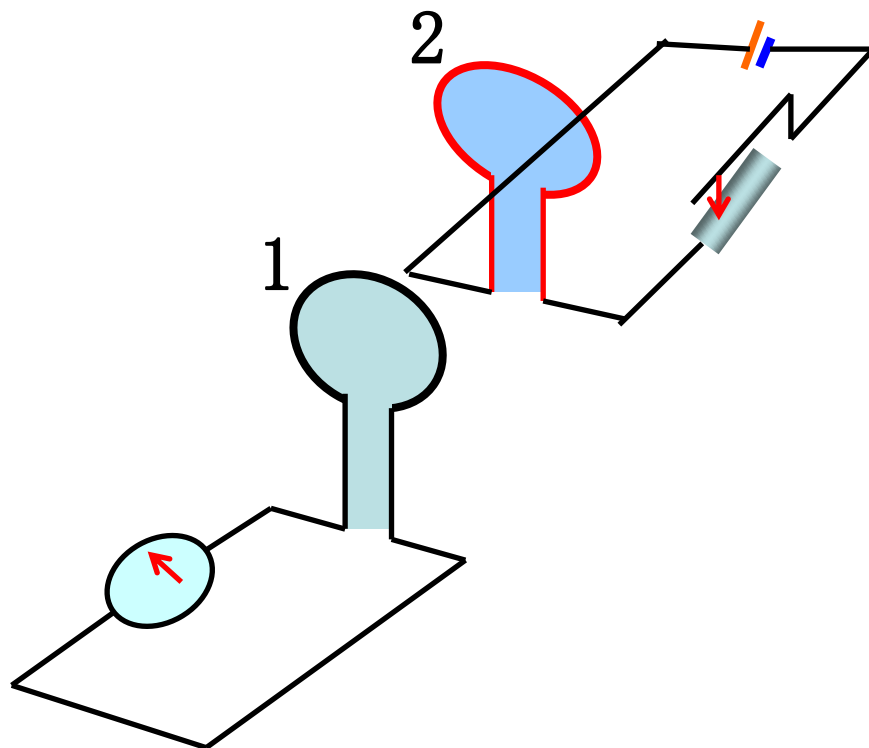
当条形磁铁与线圈相对静止时，闭合回路中没有电流通过；

当条形磁铁从线圈中拔出时，闭合回路中电流和插入时方向相反。

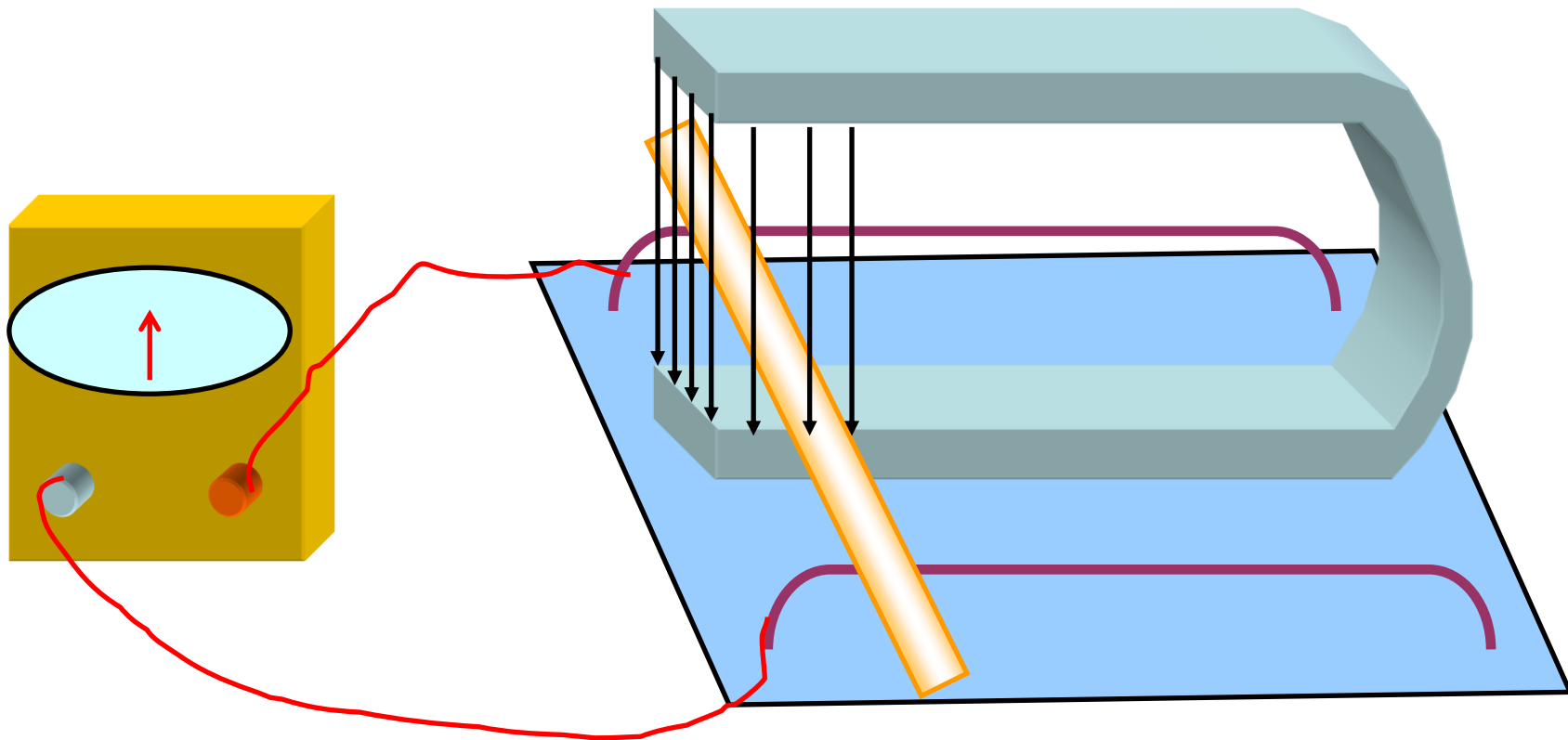


实验表明：只有当磁铁棒与线圈间有相对运动时，线圈中才会出现感应电流，相对运动速度越大，感应电流也越大。

又如图，线圈2中电路接通、断开瞬间或改变电阻器阻值，可观察到线圈1中电流计指针偏转，即线圈1中出现了感应电流。



实验表明：只有线圈2中**电流改变**时，线圈1中才会有感应电流。线圈中加一铁芯，重复实验，感应电流大大增加，说明上述现象还受到**介质影响**。



如图所示，当金属棒垂直于磁场和棒长方向移动时，闭合回路中出现感应电流，而且，棒移动越快，电流越大。

上述三个实验中，前两个的共同之处是：产生感应电流的线圈所在处的磁场发生了变化。

实验3中，磁场没有发生改变，金属棒的移动使它和电流计连成的回路面积发生变化，结果在回路中也能产生感应电流。

总结上面三个实验发现，它们通过不同的方法均改变了回路中的磁通量，从而导致了感应电流的产生。

可得如下结论：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，在导体回路中就会产生感应电流。这种现象称为电磁感应现象。

二、楞次定律

楞次在1833年，得出了判断感应电流方向的楞次定律：**闭合回路中感应电流的方向，总是使得它激发的磁场来阻止引起感应电流的磁通量的变化（增加或减少）。**



注意：

（1）感应电流所激发的磁场要**阻止**的是磁通量的**变化**，而不是磁通量本身。

（2）阻止并不意味抵消。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。

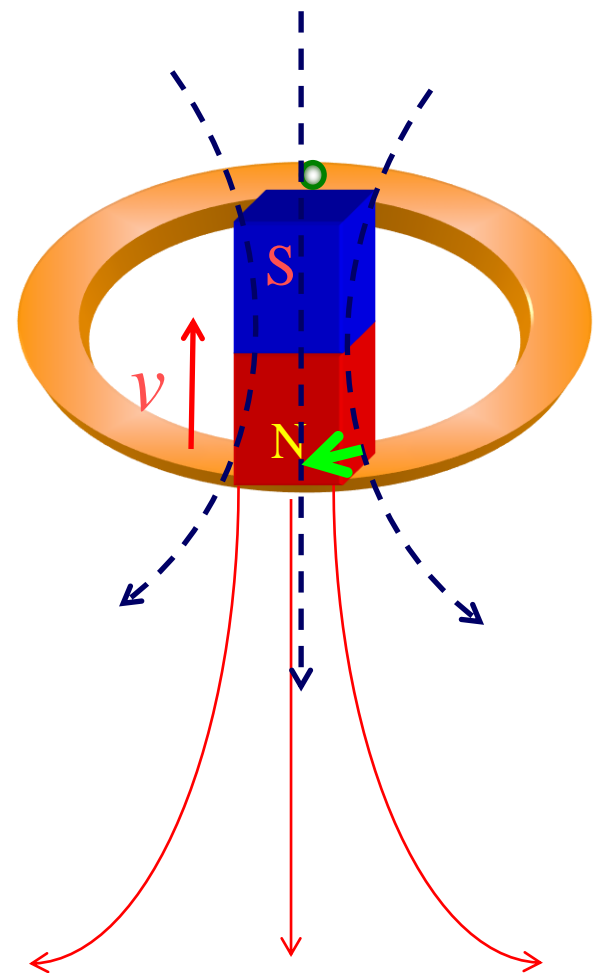
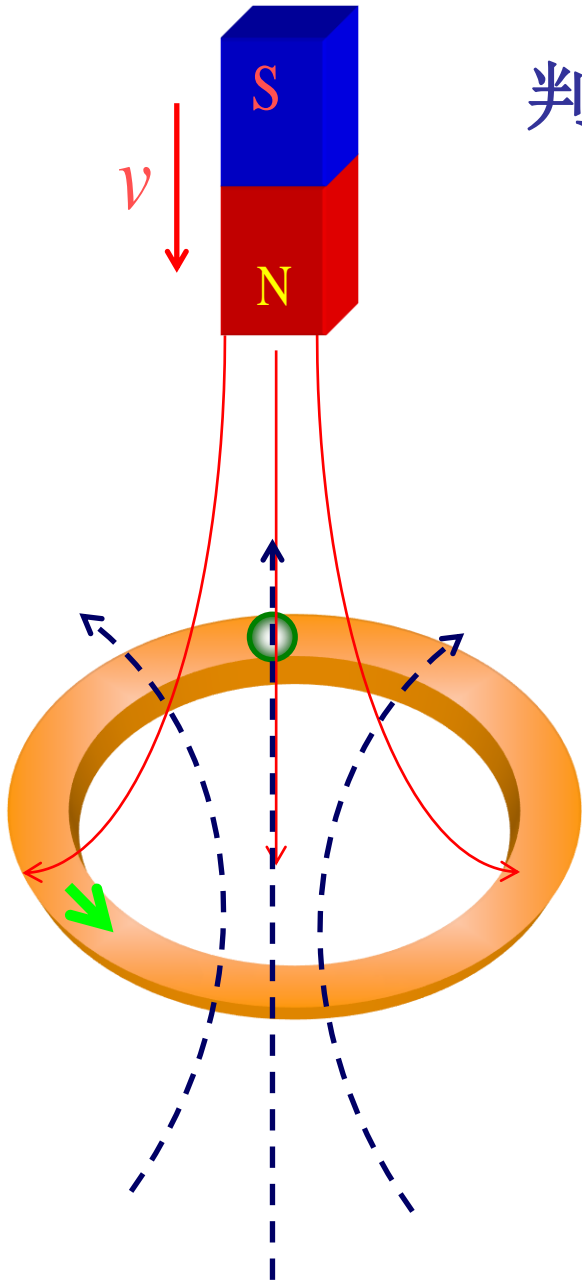
判断感应电流的方向：

(1) 判明穿过闭合回路内原磁场的方向；

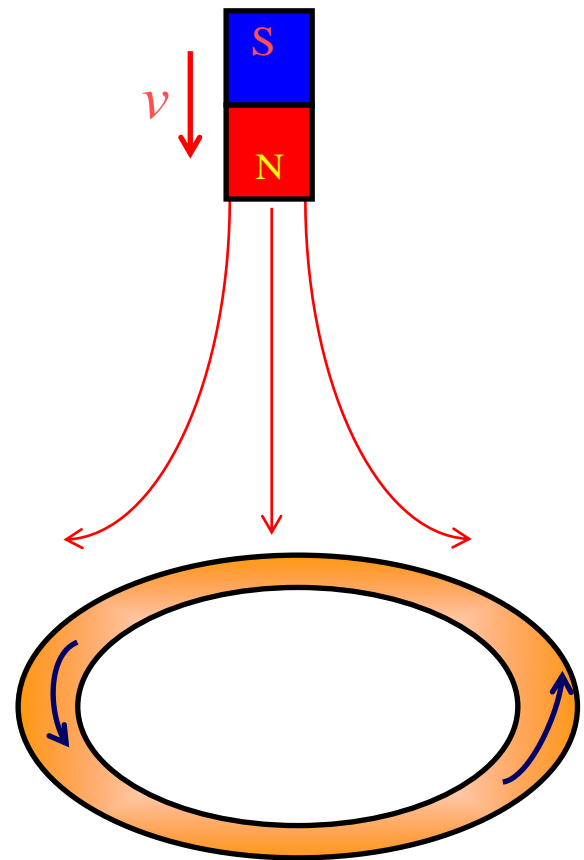
(2) 根据原磁通量的变化，按照楞次定律的要求确定感应电流的磁场的方向。

(3) 按右手法则由感应电流磁场的方向来确定感应电流的方向。

$$\begin{array}{ll} \Phi_m \uparrow & \vec{B}_{\text{感}} \text{与} \vec{B} \text{反向} \\ \Phi_m \downarrow & \vec{B}_{\text{感}} \text{与} \vec{B} \text{同向} \end{array}$$



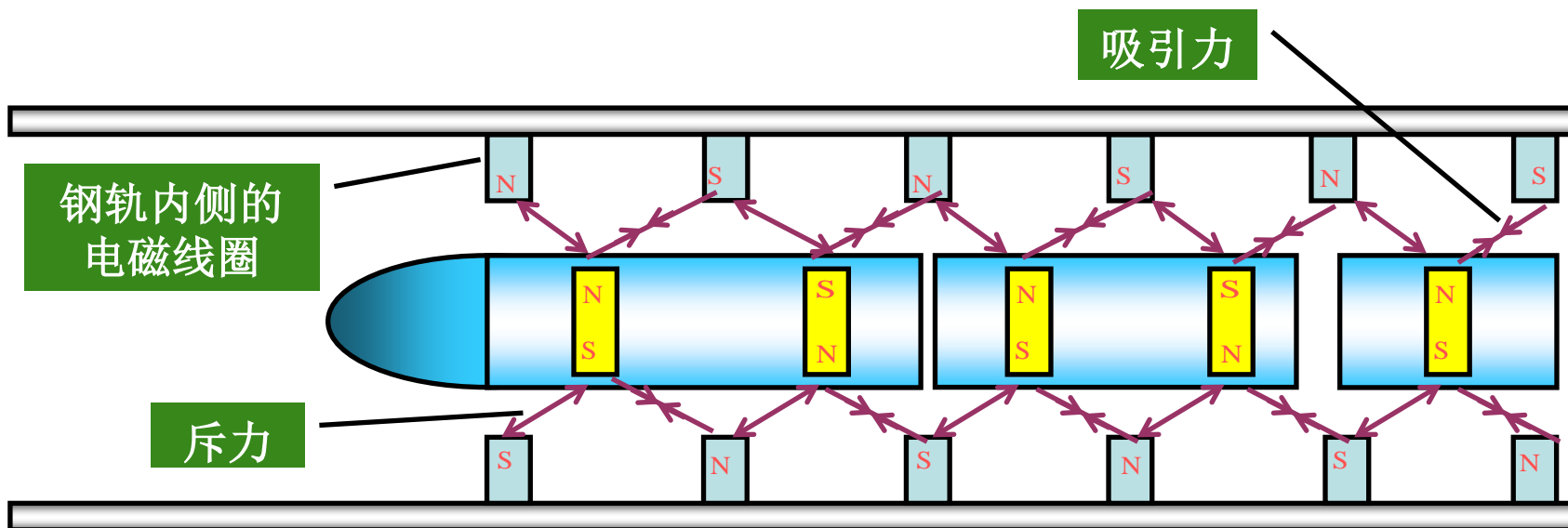
楞次定律实质上是能量守恒定律的一种体现。当磁铁N极向线圈运动时，线圈中感应电流所激发的磁场分布相当于在线圈朝向磁铁的一面出现N极，它阻碍了磁铁棒的相对运动。因此，磁铁棒向前运动，必须克服斥力作功。当其背离线圈离开时，必须克服引力作功。给出的能量转化为线圈中的电能，进而转化为焦耳热。



如果感应电流方向不这样，它激发的磁场不是阻止磁铁运动，而是加速它的运动，将违背能量守恒定律。

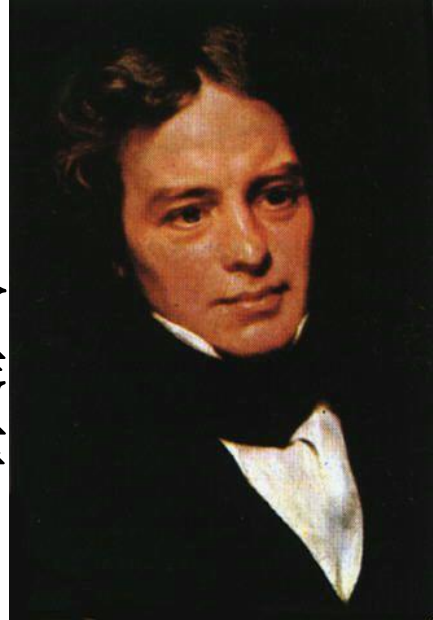
楞次定律的应用：磁悬浮列车制动。

当列车需要停下来而减速时，钢轨内侧的线圈由原先的电动机作用（输出动力）变成发电机作用（产生电流），即列车上的磁铁极性以一定的速度交替的通过这些线圈时，在线圈内产生感应电流，由楞次定律，这些感应电流的磁通量反抗通过其中的磁通量的变化，产生完全相反的电磁阻力。



三、法拉第电磁感应定律

法拉第发现了电磁感应现象并作了深入研究，总结了产生感应电流的几种情况，提出了感应电动势概念，为电磁感应基本定律的提出做出了卓越的开创性贡献。



电磁感应定律的基本表述：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与磁通量对时间的变化率成正比。

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

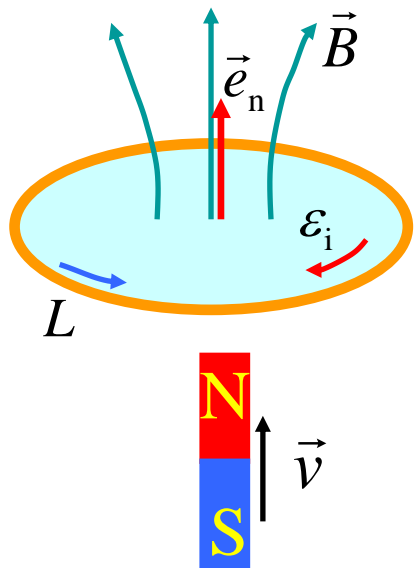
电动势本身是标量，电动势的方向指的是导体中感应电流的方向或者说是导体中正电荷受力的方向

式中负号反映电动势的方向。

电动势方向的确定:

- (1) 确定回路的绕行方向，再按右手螺旋法则确定回路面积的正法向 (做一个相对的参考)；
- (2) 确定穿过回路面积磁通量的正负；凡穿过回路面积的磁场线方向与正法线方向相同者为正，反之为负。
- (3) 由 $\varepsilon_i = -d\phi/dt$ 确定：若 $\varepsilon_i > 0$ ，则 ε_i 与绕行方向一致；若 $\varepsilon_i < 0$ ， ε_i 与绕行方向相反。

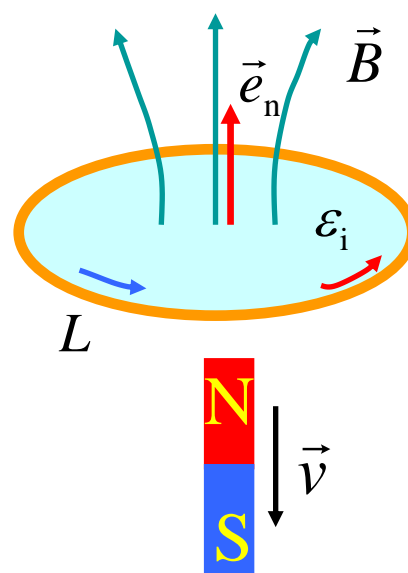
感应电动势方向可以按上述符号规则确定，也可按楞次定律确定。



$$\Phi > 0$$

$$\frac{d\Phi}{dt} > 0$$

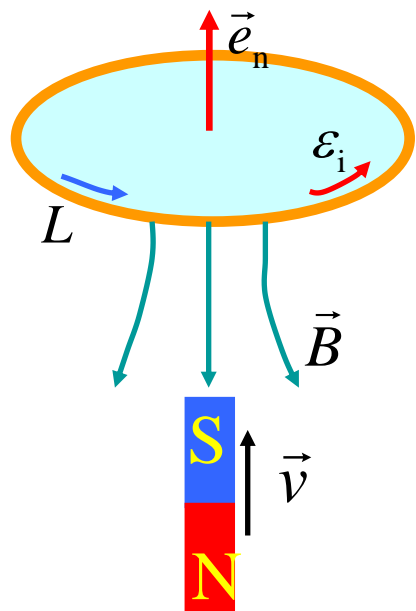
$$\epsilon_i < 0$$



$$\Phi > 0$$

$$\frac{d\Phi}{dt} < 0$$

$$\epsilon_i > 0$$



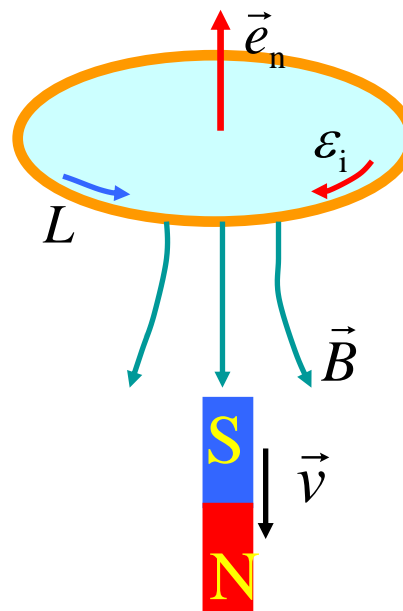
$$\Phi < 0$$

$$\frac{d\Phi}{dt} < 0$$

$$\epsilon_i > 0$$

$$\Phi_1 = -3$$

$$\Phi_2 = -5$$



$$\Phi < 0$$

$$\frac{d\Phi}{dt} > 0$$

$$\epsilon_i < 0$$

磁通量在增加

当回路由 N 匝导线**串联而成**时，则当磁通量变化时，每匝中都将产生感应电动势，如果每匝中通过的磁通量都是相同的，则 N 匝线圈中的总电动势为各匝中电动势的总和，即

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

$N\Phi$ ——称磁通量匝数或磁链

注意：

如果各匝磁通量不同，则以各圈中磁通量的和 $\sum \Phi$

代替 $N\Phi$ 。

$$\varepsilon_i = -\frac{d\sum \Phi}{dt} = -\frac{d(\Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_N)}{dt}$$

设闭合导体回路中的总电阻为 R ，由全电路欧姆定律得回路中的感应电流为

$$I_i = \frac{\mathcal{E}_i}{R} = -\frac{1}{R} \frac{d\Phi}{dt}$$

设在时刻 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 ，那么，对上式积分，就可以求得在这段时间内通过回路导体任一截面的感应电荷量为

$$q = \int_{t_1}^{t_2} I_i dt = -\frac{1}{R} \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} d\Phi = \frac{1}{R} (\Phi_1 - \Phi_2)$$

磁通计的原理：上式表明，在一段时间内通过导体截面的电荷量与这段时间内导线回路所包围的磁通量的变化值成正比，而与磁通量的变化快慢无关。如测出**感生**电荷量，而回路电阻也已知，即可计算磁通量的变化量。此即磁通计的原理

根据电动势的概念可知，当通过闭合回路的磁通量变化时，在回路中出现某种非静电力，感应电动势就等于移动单位正电荷**沿闭合回路一周**这种非静电力所作的功。如果用 \vec{E}_k 表示**等效**的非静电性场强，则感应电动势可以表示为

感应电流或感应电动势整个回路都有，因此要对整个回路一周进行积分

$$\varepsilon_i = \oint \vec{E}_k \cdot d\vec{l}$$

因为 $\Phi = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$

可得法拉第电磁感应定律积分形式：

$$\varepsilon_i = \oint \vec{E}_k \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

路线积分方向则用右手螺旋定则正好来判断面元的法线方向

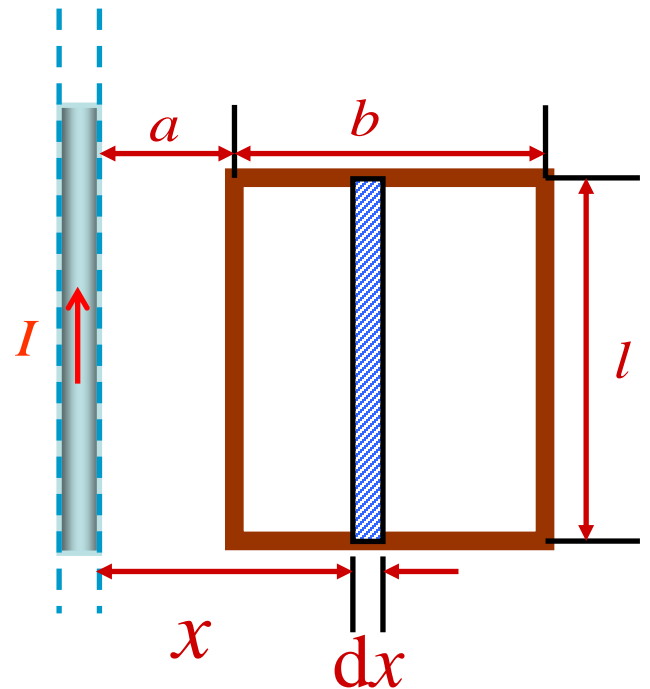
式中积分面S是以闭合回路为边界的任意曲面。

例题9-1 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 电流振幅， ω 角频率， I_0 和 ω 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



$$d\Phi = B \cos 0^\circ dS = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I}{x} l dx$$

在该瞬时 t ，通过整个线圈的磁通量为

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

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

$$\begin{aligned} \varepsilon_i &= -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{\mu_0 l I_0}{2\pi} \ln \left(\frac{a+b}{a} \right) \frac{d}{dt} \sin \omega t \\ &= -\frac{\mu_0 l I_0 \omega}{2\pi} \ln \left(\frac{a+b}{a} \right) \cos \omega t \end{aligned}$$

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。

选择进入下一节

§ 9-0 教学基本要求

§ 9-1 电磁感应定律

§ 9-2 动生电动势

§ 9-3 感生电动势 感生电场

§ 9-4 自感应和互感应

§ 9-5 磁场的能量

§ 9-6 位移电流 电磁场理论

* § 9-7 电磁场的统一性和电磁场量的相对性