

大学物理

University Physics

华中科技大学物理学院

王宁

ningwang@hust.edu.cn

电磁感应定律



Michael Faraday

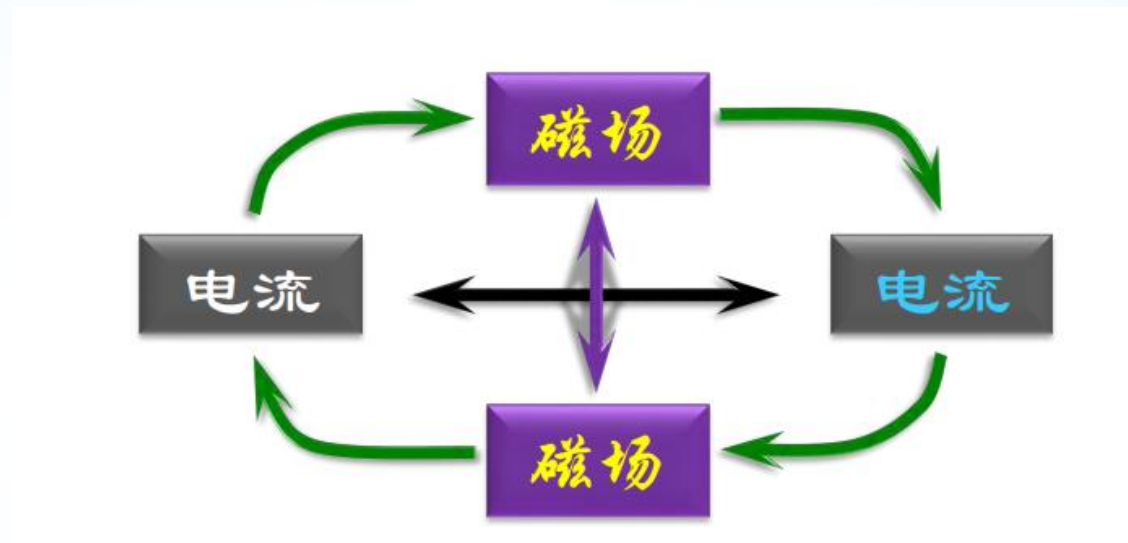
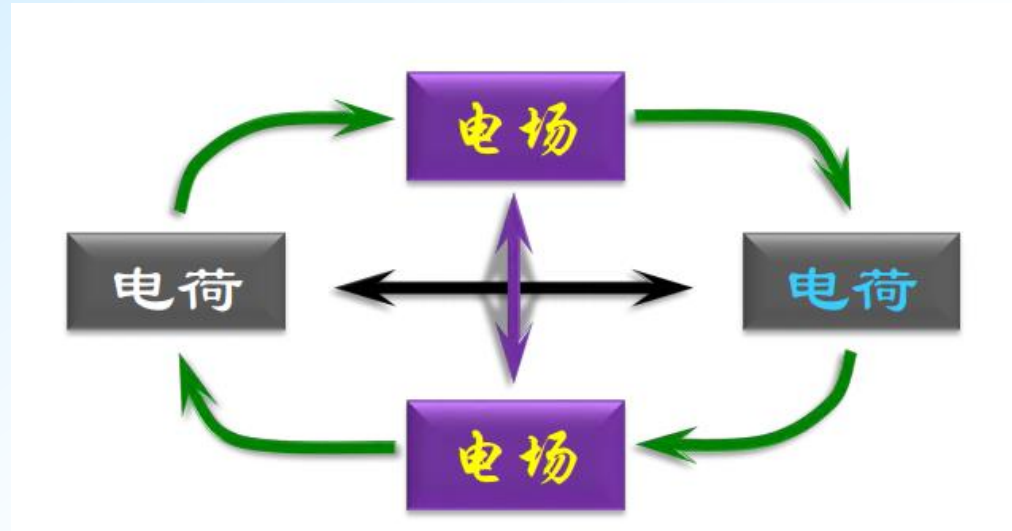


- 出生于英国纽因顿的一个贫穷家庭。勤奋、聪明。
- 成为一家书籍装订店的跑腿，大量阅读。
- 写信给英国皇家协会的大化学家 Davy 求取一份工作， 随信附上自己在 Davy 演讲时所作的装订成册的笔记。
- 其热情打动了 Davy， 在1813年让法拉第成为其助手。
- 1820年结束了第二期学徒。



Michael Faraday
(1791–1867)

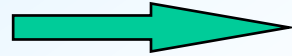
磁场能否在导体中诱导出感应电流？



问题：电磁大统一？



奥斯特



电的磁效应

(毕奥—萨伐尔定律)

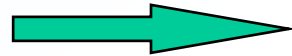
$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$$

(电生磁)

(对称性) ?



法拉第



磁的电效应

(法拉第电磁感应定律)

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\phi}{dt}$$

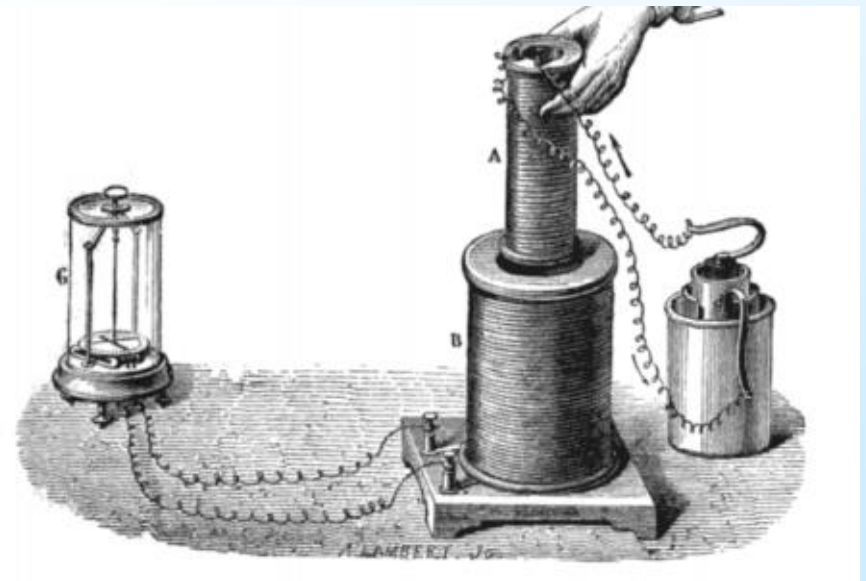
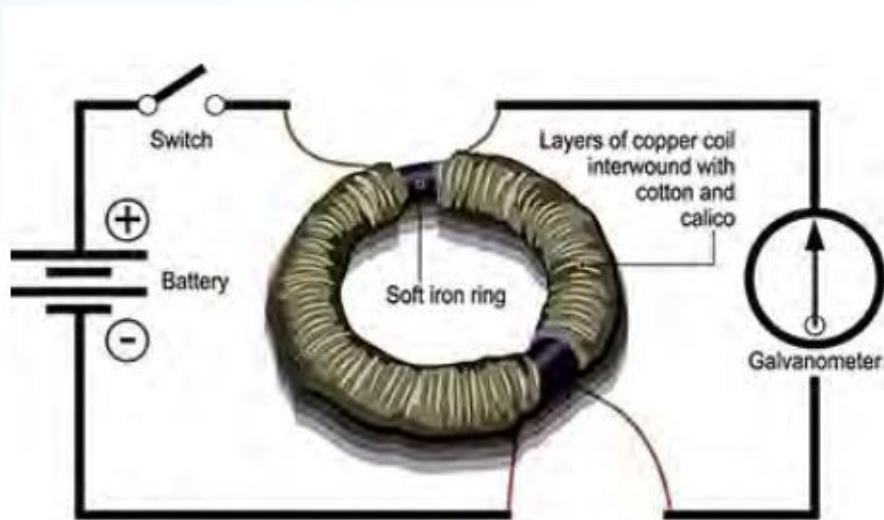
(磁生电)

感应电动势

电磁
感应

法拉第的突破

- 1824年至1828年法拉第做了三个实验， 却都在**稳态**下进行的， 均告失败。
- 1831年夏， 法拉第再次回到磁产生电的课题上来， 终于获得突破。1831年8月29日， **法拉第改用磁铁插入和拉出**， 发现电流的指针偏转， 发现了期待已久的电磁感应现象。

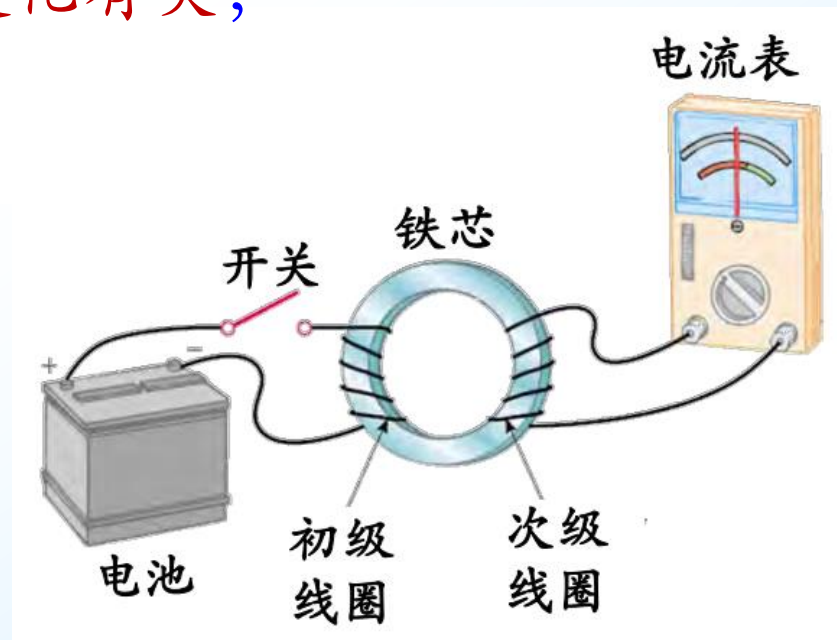


实验I



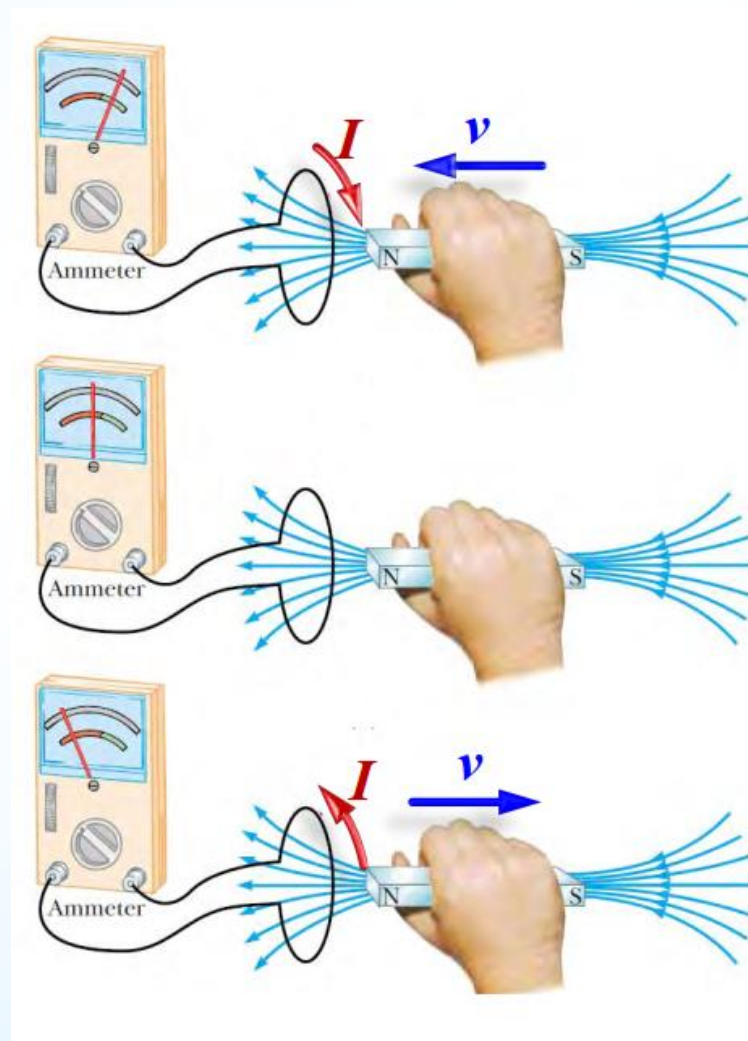
【实验】 1931年8月29日，法拉第发现：在开关开合过程中，次级线圈中有感应电流，且开关开合时感应电流的方向不同。

【结论】 感应电流的产生与磁场变化有关，而不取决于磁场的强弱。



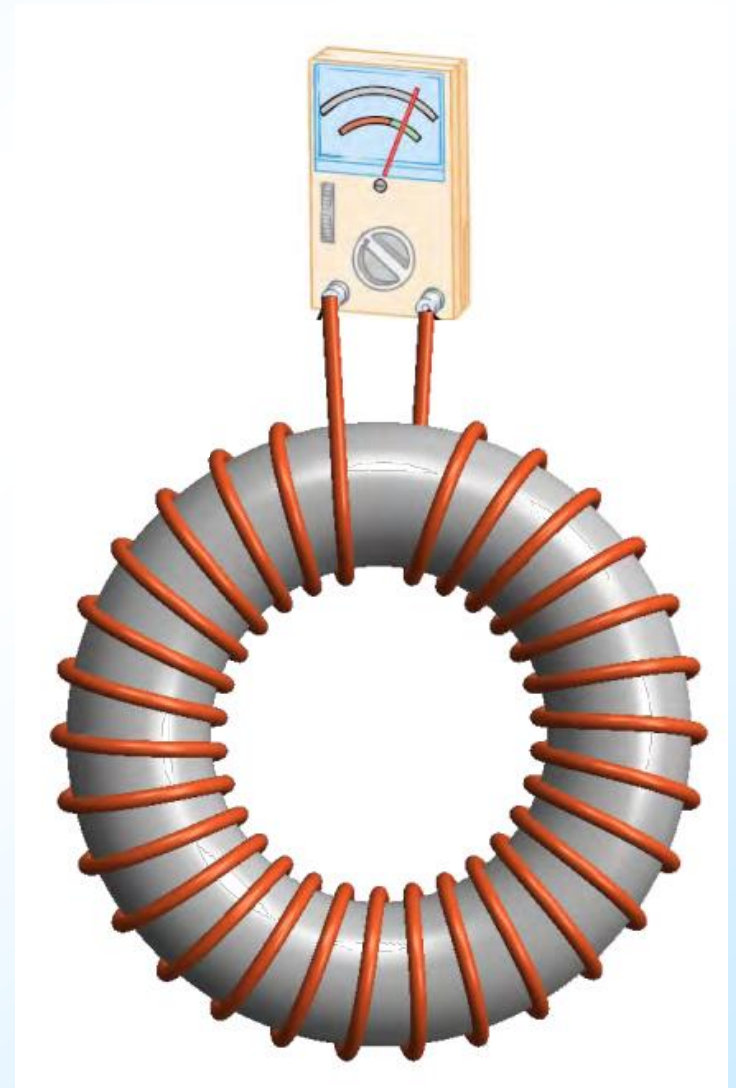
【实验】 感应电流的大小与磁棒运动的快慢有关，方向与磁棒运动的方向有关。

【结论】 感应电流的大小与通过回路的磁场变化快慢有关，方向与磁场的增加还是减弱有关。



【实验】 在开关开合时，如果线圈中有铁芯，感应电流将明显增强。

【结论】 感应电流的产生是由于 B 的变化，而非 H 的变化。



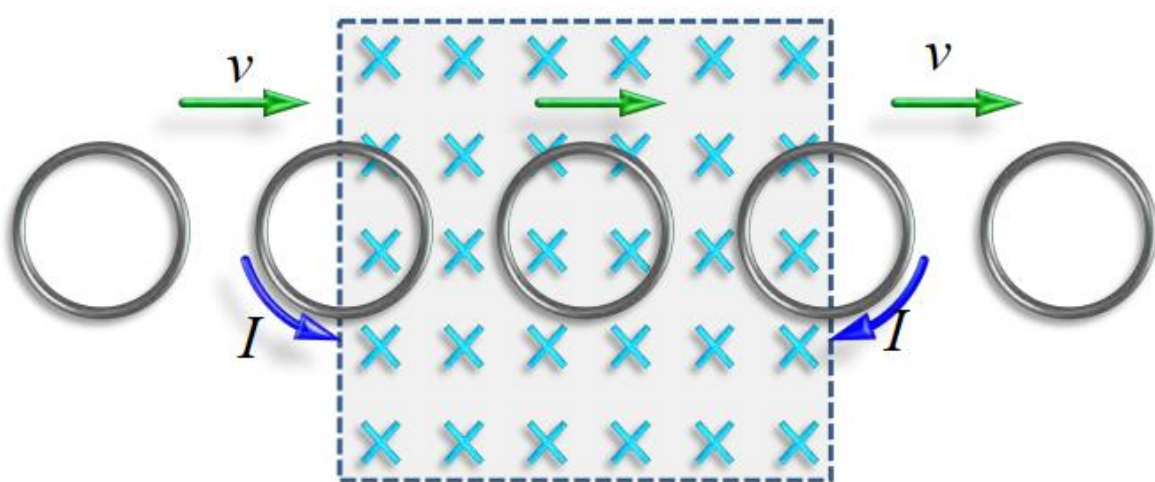
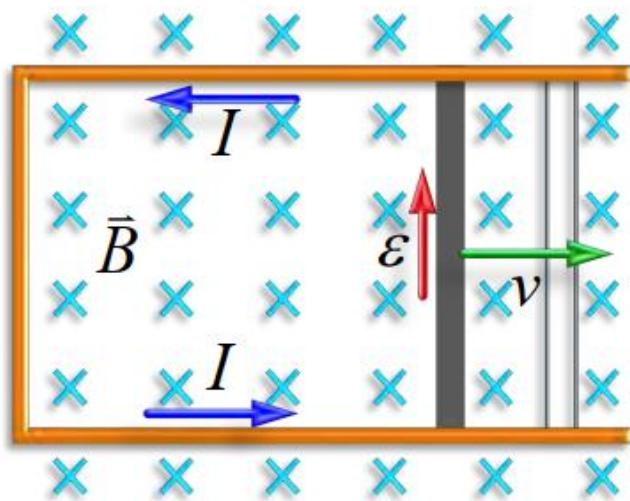
【实验】 在其他条件相同的情形下，不同材质的线圈中感应电流的强弱不同 ($I \propto 1/R$)

【结论】 感应电动势比起感应电流更为本质，即使回路不闭合，仍有感应电动势存在。

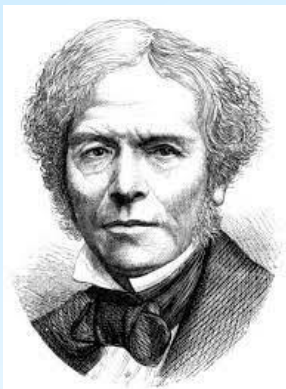
实验V

【实验】 如果磁场不变，导体回路或者回路的一部分在磁场中作切割磁力线运动，也会产生感应电流或感应电动势。

【结论】 闭合回路中的感应电动势来自磁通量的变化。



法拉第的突破

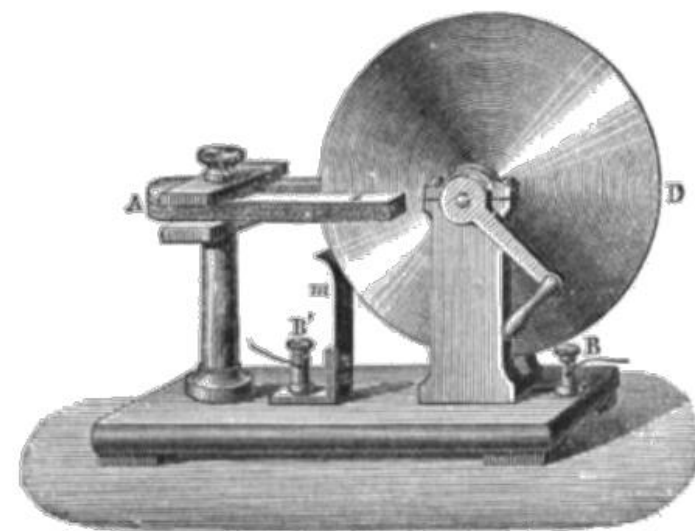


➤ 由**变化的磁通量**产生的电流叫**感应电流**。

法拉第把产生感应电流的情况概括为五类：

- (1) 变化的电流；
- (2) 变化的磁场；
- (3) 运动的恒定电流；
- (4) 运动的磁铁；
- (5) 在磁场中运动的导体

电磁感应
(Electromagnetic induction)

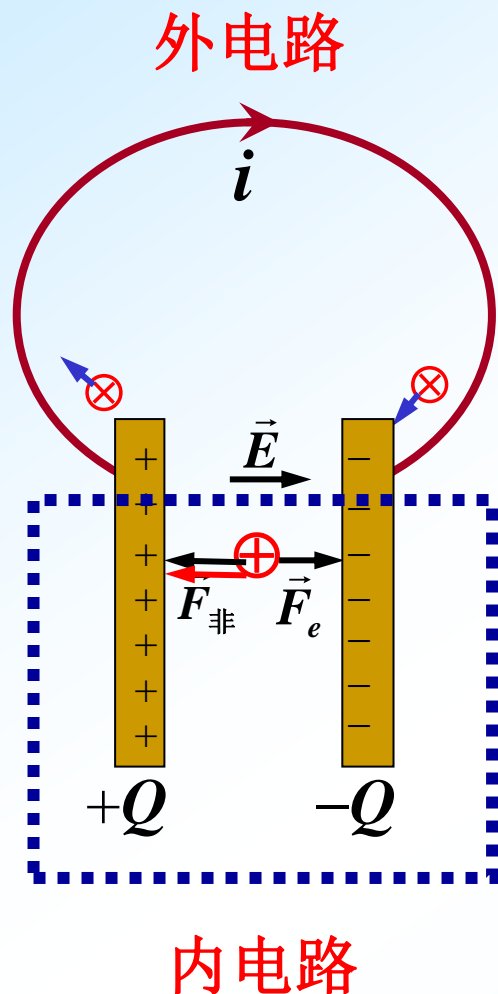


Faraday's disk
世界第一台发电机 (1831)

电磁感应的产生条件：只要穿过闭合导体回路的磁通量发生变化回路中就产生感应电流

电磁感应的实质是产生感应电动势 { 感应电动势
↓
感应电流

问题：感应电动势是什么？



◆ 静电力，非静电力

提供非静电力的装置——**电源**

A —将 q 从负极移到正极 $F_{\text{非}}$ 做的功

则电源的**电动势**为： $\varepsilon = \frac{A}{q}$

◆ 从场的观点：

引入—等效非静电场的强度 $\vec{E}_{\text{非}}$

$$\vec{E}_{\text{非}} = \frac{\vec{F}_{\text{非}}}{q}$$

◆ 电源的**电动势**：

$$\varepsilon = \int_{-}^{+} \vec{E}_{\text{非}} \cdot d\vec{l}$$

或
$$\varepsilon = \oint_L \vec{E}_{\text{非}} \cdot d\vec{l}$$

电源电动势的大小与方向

(1) 电动势的大小:

$$\mathcal{E} = \int_{-}^{+} \vec{E}_{\text{非}} \cdot d\vec{l}$$

$$\vec{E}_{\text{非}} = \frac{\vec{F}_{\text{非}}}{q}$$

电源电动势**等于**把单位**正电荷**从电源的**负极**沿**内电路**移到正极过程中，**非静电力**所做的功。

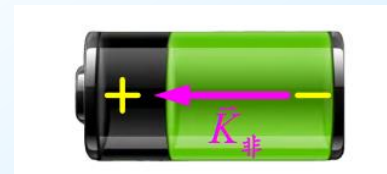
$$\mathcal{E} = \oint_L \vec{E}_{\text{非}} \cdot d\vec{l}$$

闭合回路的电动势等于**正电荷**绕闭合回路一周**非静电力**所做的功。

(2) 电动势的方向:

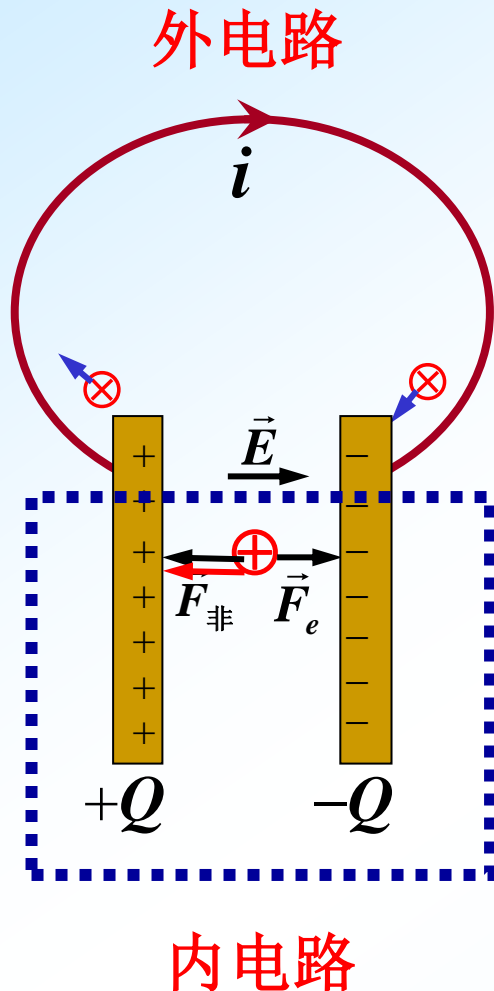
电动势是**标量**;

为了电路中计算的方便，通常将电源内的**电流方向**称为电动势的方向。

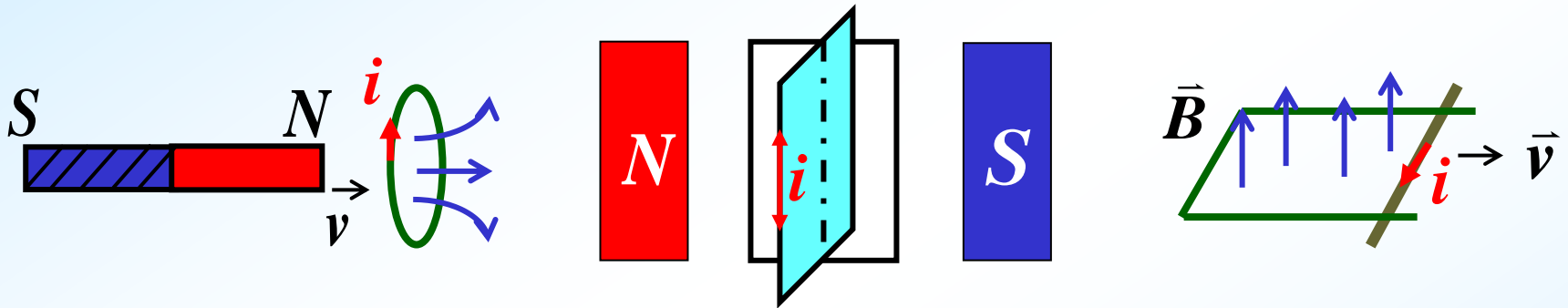


说明

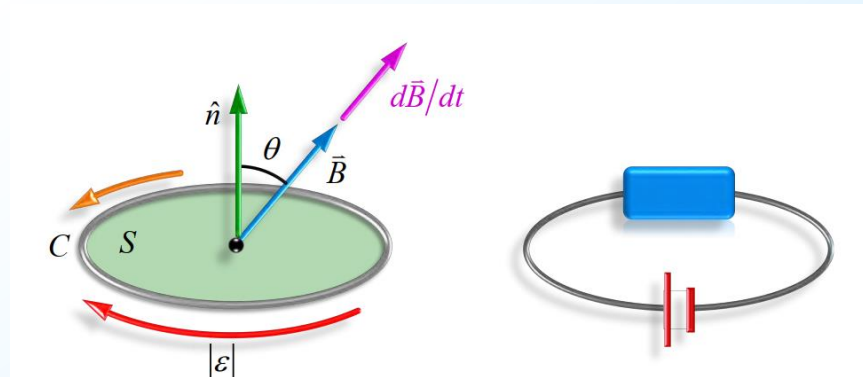
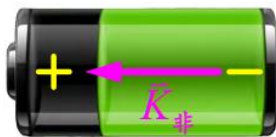
电动势—非静电力的功; 电势—静电力的功;



感应电动势的大小和方向如何确定的？



所谓感应电动势的方向，即由负极指向正极的方向



电磁感应定律：感应电动势的大小与方向

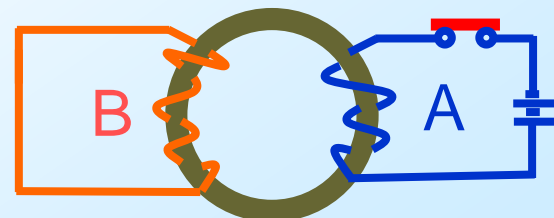
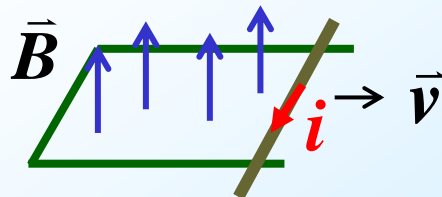
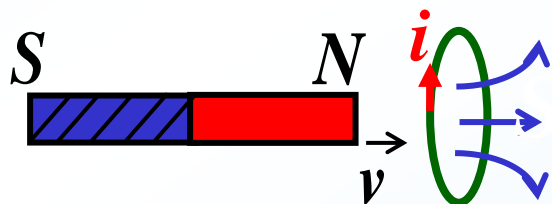


通过导体回路的磁通量随时间发生变化时，回路中就有感应电动势产生，从而产生感应电流。**磁通量的变化**可以是磁场变化引起的，也可以是导体在磁场中运动或导体回路中的一部分切割磁力线的运动产生。

■ **感应电动势的大小**与**磁通量变化的快慢**有关。

（电磁感应现象的实质是磁通量的变化产生感应电动势）

■ **感应电动势的方向**总是企图由它产生的感应电流建立一个附加的磁通量，以**阻止引起感应电动势的磁通量的变化**。



法拉第电磁感应定律



电磁感应的实质是产生**感应电动势**；感应电动势的大小与通过回路的磁通量的变化率成正比。

$$\boxed{\varepsilon_i = - \frac{d\Phi_B}{dt}} \longrightarrow \text{法拉第电磁感应定律}$$

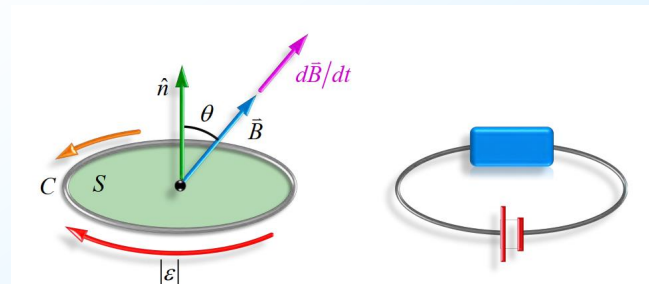
其中 ε_i 为回路中的感应电动势，“-”反映其在回路中的方向。

回路中的感应电流：

$$I_i = \frac{\varepsilon_i}{R} = - \frac{1}{R} \frac{d\Phi_B}{dt}$$

ε_i 为回路中载流子提供能量！

注：以下 Φ_B 简写为 Φ ！



电磁感应的实质是产生**感应电动势**；感应电动势的大小与通过回路的磁通量的变化率成正比。

$$\boxed{\varepsilon_i = - \frac{d\Phi_B}{dt}} \longrightarrow \text{法拉第电磁感应定律}$$

- 引起导体回路中产生感应电流的原因，是由于电磁感应在回路中建立了**感应电动势**，**比感应电流更本质**，即使由于回路中的电阻无限大而电流为零，感应电动势依然存在。
- 回路中**产生感应电动势的原因**是通过回路平面的磁通量的变化，而不是磁通量本身。

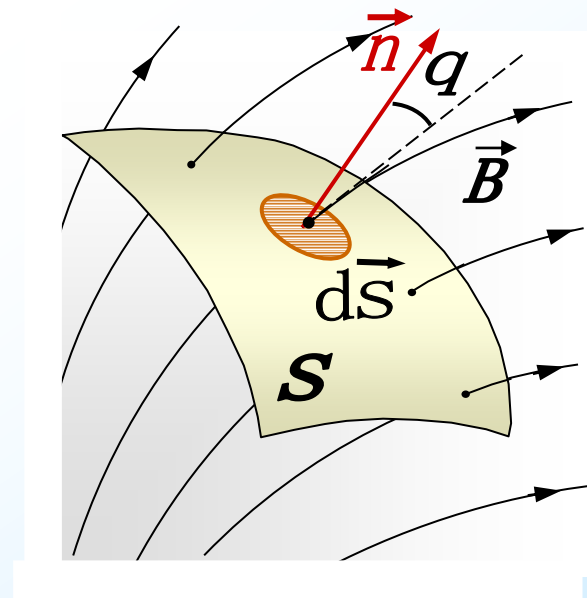
感应电动势



电磁感应的实质是产生**感应电动势**；感应电动势的大小与通过回路的磁通量的变化率成正比。

(回路中的) 感应电动势: $\varepsilon_i = -\frac{d\phi}{dt}$

任一回路中**磁通量**: $\phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{s} = \int B \cos \theta ds$

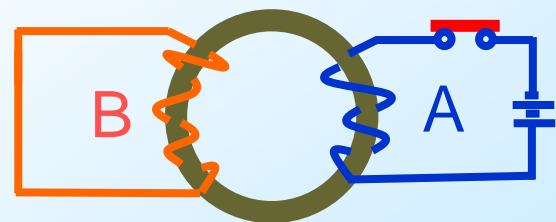
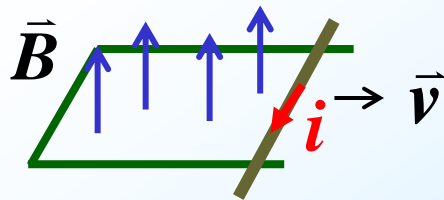
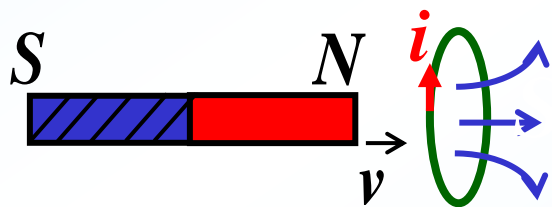


\vec{B} 、 θ 、 s 中有一个量发生变化，回路中就有 ε_i 的存在。

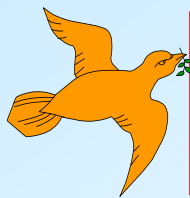
感应电动势

通过导体回路的磁通量随时间发生变化时，回路中就有感应电动势产生，从而产生感应电流。**磁通量的变化**可以是磁场变化引起的，也可以是导体在磁场中运动或导体回路中的一部分切割磁力线的运动产生。

感应电动势 { 动生电动势 ← 回路 (S, θ) 变, \vec{B} 不变
感生电动势 ← B 变, 回路 (S, θ) 不变



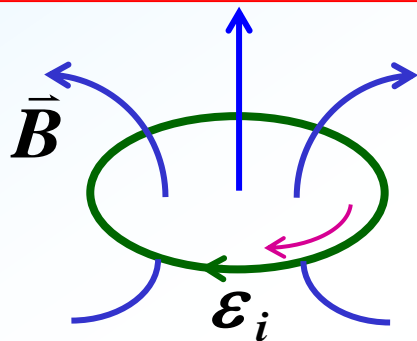
感应电动势的方向



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

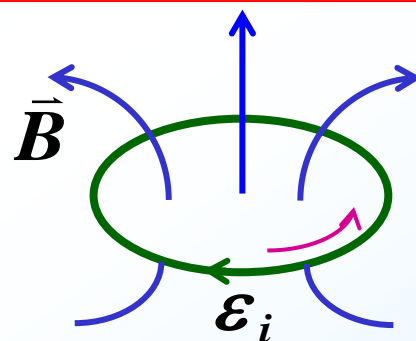
$$\phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{s} = \int B \cos\theta ds$$

“ - ” 表示感应电动势的方向， ε_i 和 ϕ 都是标量，方向只是相对于约定的回路绕行方向而言。



与回路的绕
行方向**相同**

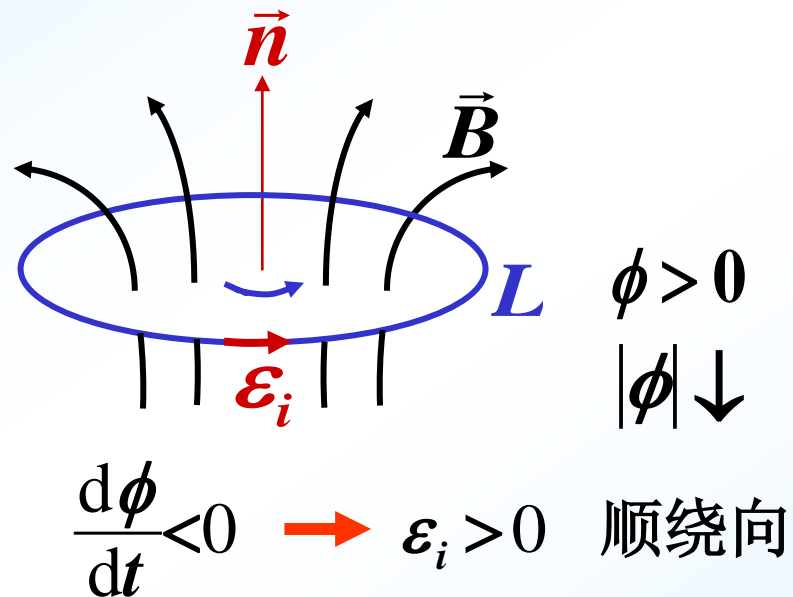
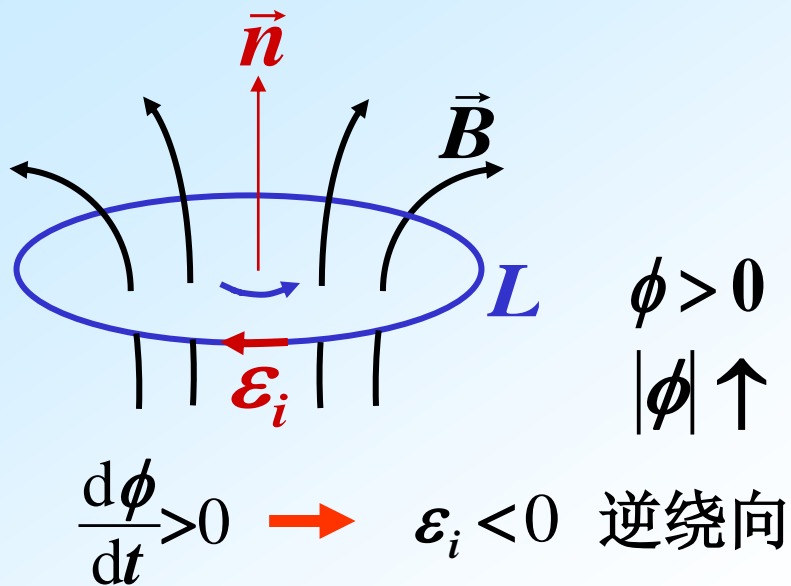
$$\varepsilon_i > 0$$



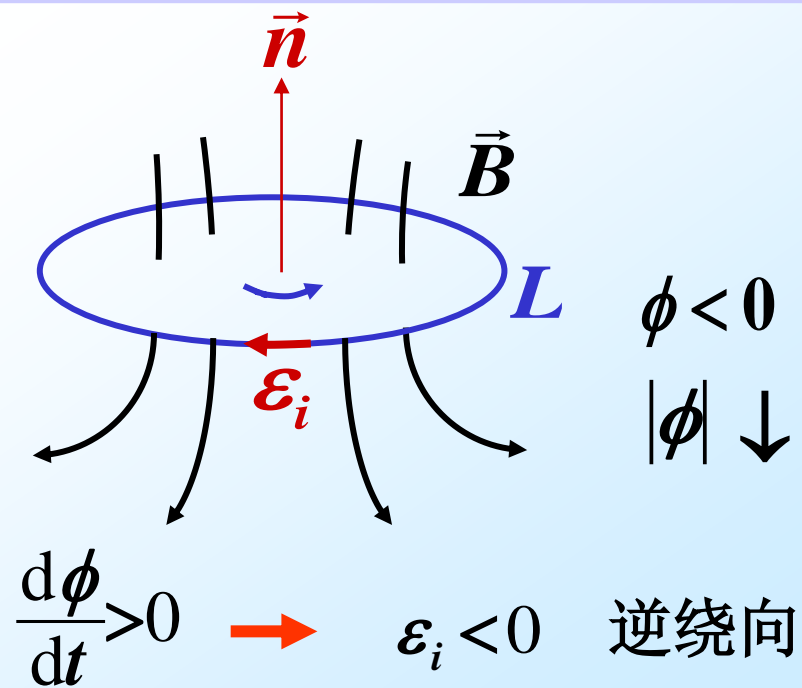
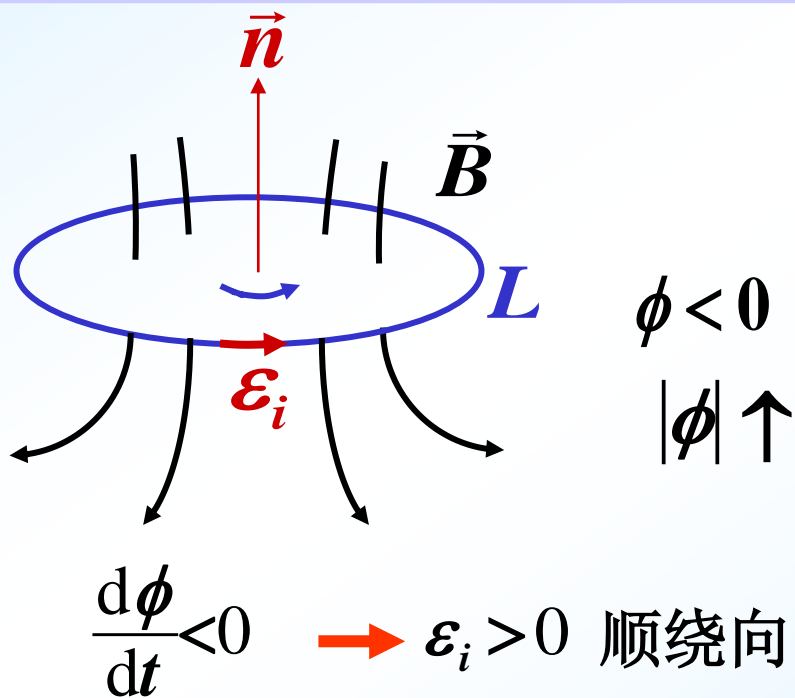
与回路的绕
行方向**相反**

$$\varepsilon_i < 0$$

据此可直接由法拉第电磁感应定律判断感应电动势的方向！



$$\epsilon_i = -\frac{d\phi}{dt}$$



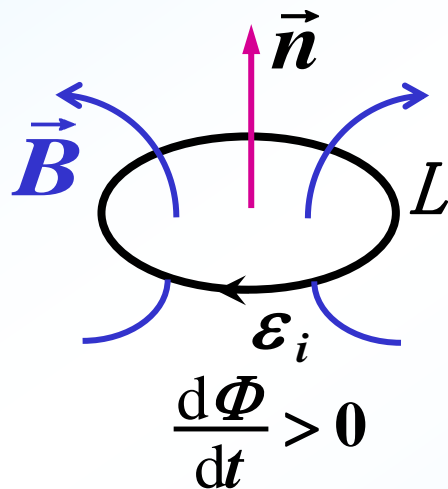
感应电动势的方向：楞次定律

感应电流的效果总是反抗引起感应电流的原因

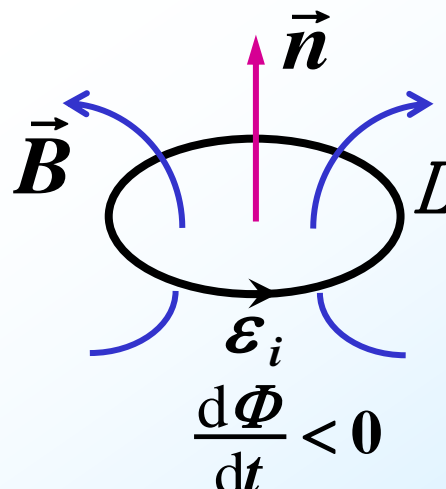
楞次定律中“**反抗**”与法拉第定律中“-”号对应

闭合回路中感应电流的**方向**，总是使它所激发的磁场来**阻止**引起感应电流的磁通量的**变化**。

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



顺时针方向

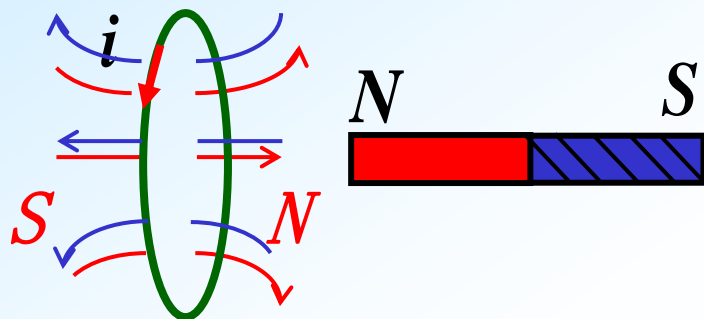


逆时针方向

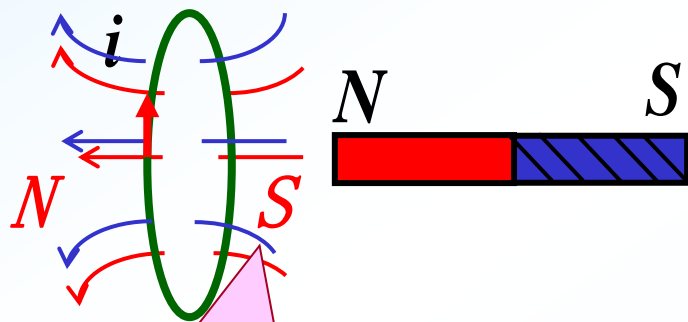
为什么感应电动势的方向必须是楞次定律规定的方向？

楞次定律是能量守恒定律在电磁感应现象上的具体体现

保证了电磁现象中的能量守恒与转换定律的正确，并且也确定了电磁“永动机”是不可能的。



正是外界克服阻力做功，将其它形式的能量转换成回路中的电能。



电磁永动机

若没有“-”或不是反抗将是什么情形？

过程将自动进行，磁铁动能增加的同时，感应电流急剧增加，而 $i \uparrow$ ，又导致 $\Phi \uparrow \rightarrow i \uparrow \dots$ 而不须外界提供任何能量。

电磁感应定律的一般形式

若回路由 N 匝线圈组成: $\mathcal{E}_i = -\frac{d\Psi}{dt}$

其中 $\Psi = \phi_1 + \phi_2 + \dots + \phi_N$, 回路的总磁通匝链数 **全磁通**

若 $\phi_1 = \phi_2 = \dots = \phi_N$, 则 $\mathcal{E}_i = -N \frac{d\phi}{dt}$

回路中相应的感应电流: $I_i = \frac{\mathcal{E}_i}{R} = -\frac{1}{R} N \frac{d\phi}{dt}$

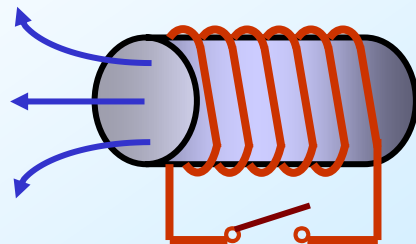
从 $t_1 \rightarrow t_2$ 时间内, 通过回路导线任一横截面的电量:

$$q = \int_{t_1}^{t_2} I_i dt = -\int_{\phi_1}^{\phi_2} \frac{N}{R} \frac{d\Phi}{dt} \cdot dt = -\frac{N}{R} (\Phi_1 - \Phi_2) \quad \phi$$

磁通计原理

若已知 N 、 R 、 q , 便可知 $\Delta\Phi = ?$

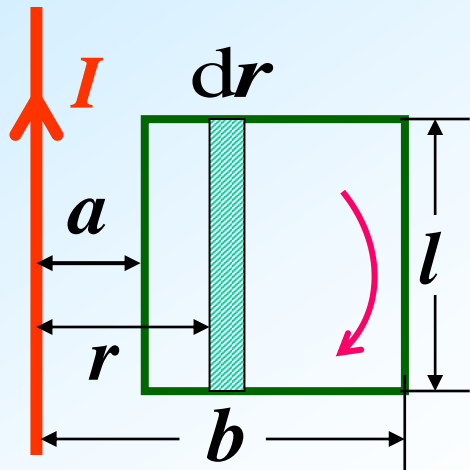
若将 Φ_1 定标, 则 Φ_2 为 t_2 时回路的磁通量



$$I = \frac{dq}{dt}$$

$$dq = I dt$$

例：长直导线通有电流 I ，在它附近放有一矩形导体回路。求
 1) 穿过回路中的 ϕ ； 2) 若 $I=kt$ (k =常数)，回路中 ε_i =? 3) 若 I =常数，回路以 v 向右运动， ε_i =? 4) 若 $I=kt$ ，且回路又以 v 向右运动时，求 ε_i =?



解：设回路绕行方向为顺时针，

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

$$ds = l dr$$

$$1) \quad \phi = \int_a^b B \cdot l dr = \int_a^b \frac{\mu_0 I}{2\pi r} l dr = \frac{\mu_0 I l}{2\pi} \ln \frac{b}{a}$$

$$2) \quad I=kt \text{ 时，在 } t \text{ 时刻，} \phi = \frac{\mu_0 l k}{2\pi} t \ln \frac{b}{a}$$

$$\varepsilon_i = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{\mu_0 l k}{2\pi} \ln \frac{b}{a} < 0 \quad \text{逆时针方向}$$

3) I =常数， t 时刻，此时回路的磁通：

$$\phi = \int_{a+vt}^{b+vt} \frac{\mu_0 I l}{2\pi r} dr = \frac{\mu_0 I l}{2\pi} \ln \frac{b+vt}{a+vt}$$

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

$$\phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{s} = \int B \cos \theta ds$$

$$\varepsilon_i = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{\mu_0 I l}{2\pi} \frac{(a-b)v}{(a+vt)(b+vt)} > 0. \quad \text{顺时针方向}$$

$$2) \varepsilon_i = -\frac{\mu_0 l k}{2\pi} \ln \frac{b}{a} \quad 3) \varepsilon_i = -\frac{\mu_0 l l}{2\pi} \frac{(a-b)v}{(a+vt)(b+vt)}$$



4) 综合2)、3), t 时刻回路的磁通: $\phi = \frac{\mu_0 k t l}{2\pi} \ln \frac{b+vt}{a+vt}$

$$\varepsilon_i = -\frac{d\phi}{dt} = \frac{\mu_0 k l}{2\pi} \left(\frac{(b-a)v}{(a+vt)(b+vt)} - \ln \frac{b+vt}{a+vt} \right)$$

此题若这样考虑: $\varepsilon_i = -\frac{d\phi}{dt}$ 而: $d\phi = \vec{B} \cdot d\vec{s} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} l dr$

$$\text{则: } \varepsilon_i = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{\mu_0 I}{2\pi r} l \frac{dr}{dt} = -\frac{\mu_0 I}{2\pi r} l \cdot v.$$

这样就有: ~~2) $v=0, \therefore \varepsilon_i=0$~~

~~$$3) \varepsilon_i = -\frac{\mu_0 I}{2\pi r} l \cdot v$$~~

~~$$4) \varepsilon_i = -\frac{\mu_0 k t}{2\pi r} l \cdot v$$~~

错在那里?

$$\begin{aligned} d\phi &\neq \vec{B} \cdot d\vec{S} \\ d\phi &= \vec{B} \cdot d\vec{S} + \vec{S} \cdot d\vec{B} \end{aligned}$$

考虑特例, 均匀磁场中的平面回路。则



$$\phi = \vec{B} \cdot \vec{S}$$

小结

电磁感应的实质是产生感应电动势：

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt} \longrightarrow I_i = \frac{\varepsilon_i}{R} = - \frac{1}{R} \frac{d\Phi}{dt}$$

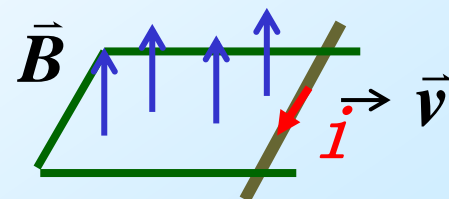
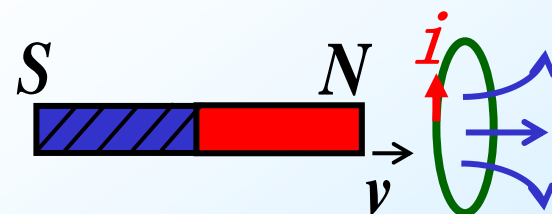
ε_i 为回路中载流子提供能量！

电动势 ε_i 内是什么力作功？

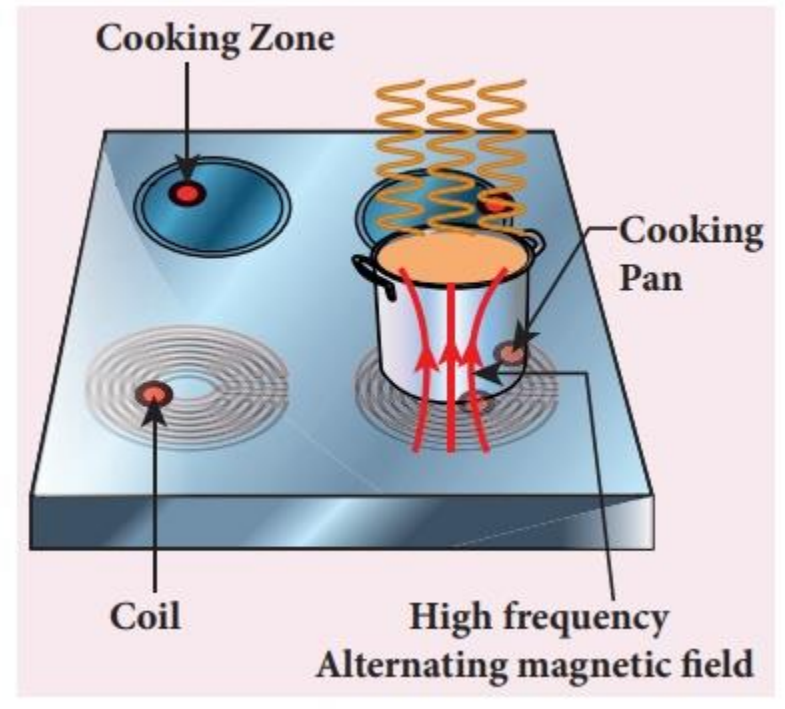
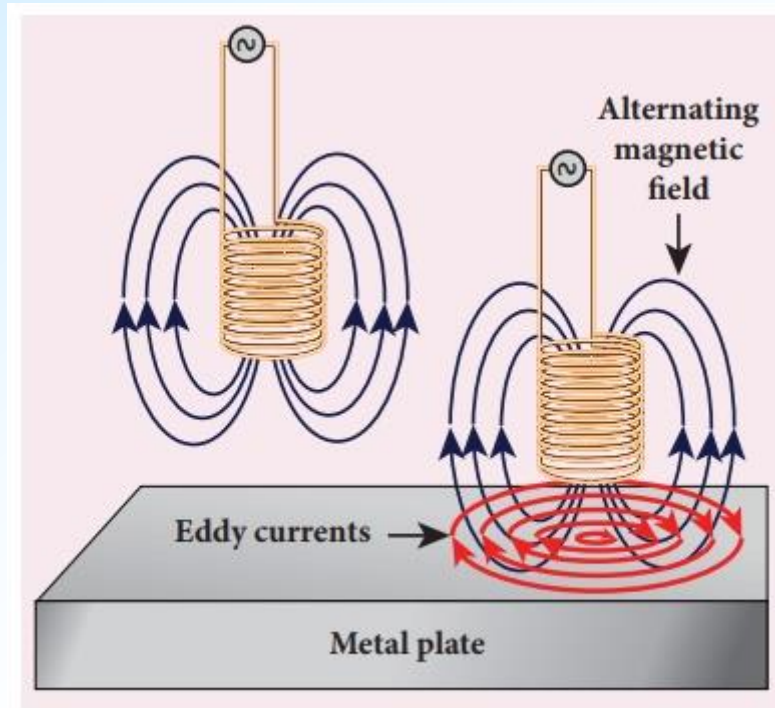
Φ 的变化方式：

- 导体回路不动， B 变化~~感生电动势
- 导体回路运动， B 不变~~动生电动势

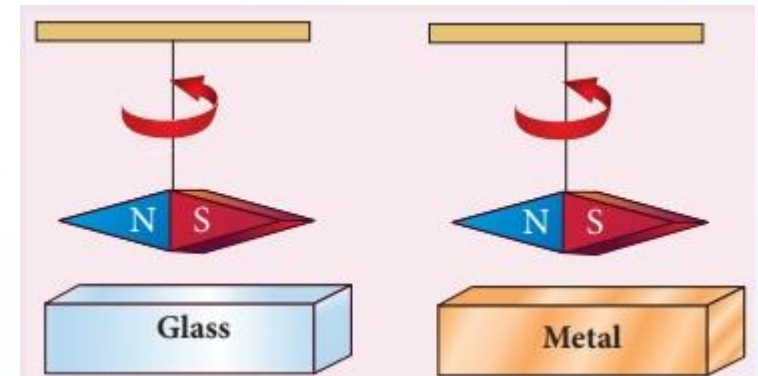
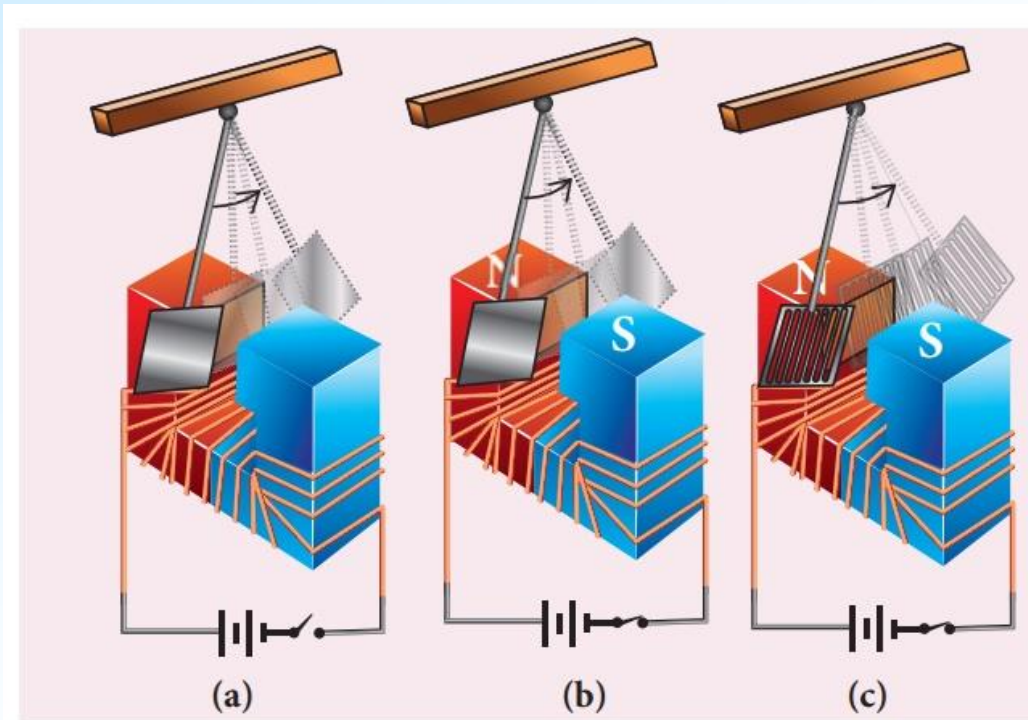
它们产生的微观机理是不一样的！



电磁感应的实验现象



电磁感应的实验现象



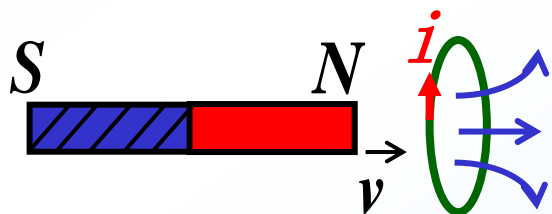
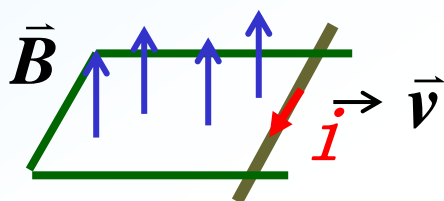
电源电动势定义

$$\mathcal{E} = \int_{-}^{+} \vec{E}_{\text{非}} \cdot d\vec{l}$$

法拉第电磁感应定律

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

利用定律求感应电动势！



动生电动势具有什么样的形式？特点？物理机制？大小和方向怎么样确定？

感生电动势具有什么样的形式？特点？物理机制？大小和方向怎么样确定？

下周二请交作业: **page 43 - page 44**

作业: **Chap.8(page 45-46) —T3、 T4、 T5、 T6、 T7**

1. 独立完成作业。
2. 图和公式要有必要的标注或文字说明。
3. 作业纸上每次都要写学号(或学号末两位)。
4. 每周周二交作业。
5. 作业缺交三分之一及以上者按规定不能参加考试。

