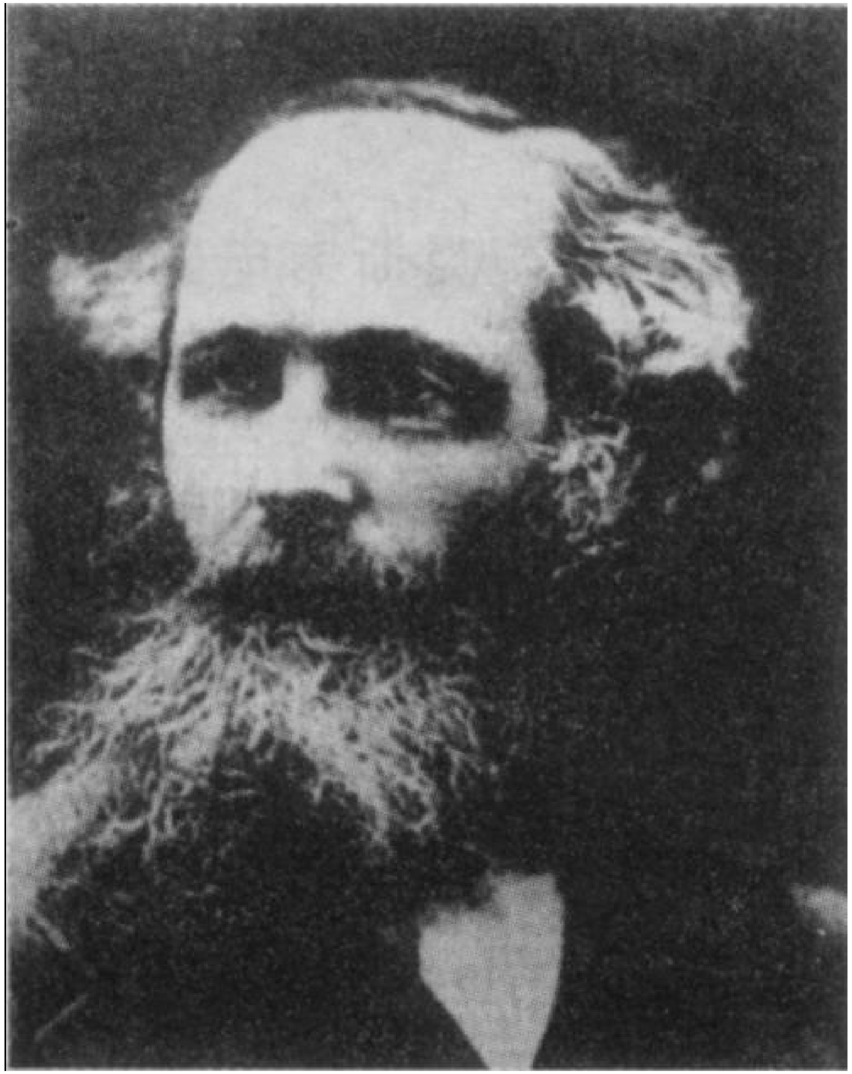
第15章 电磁感应

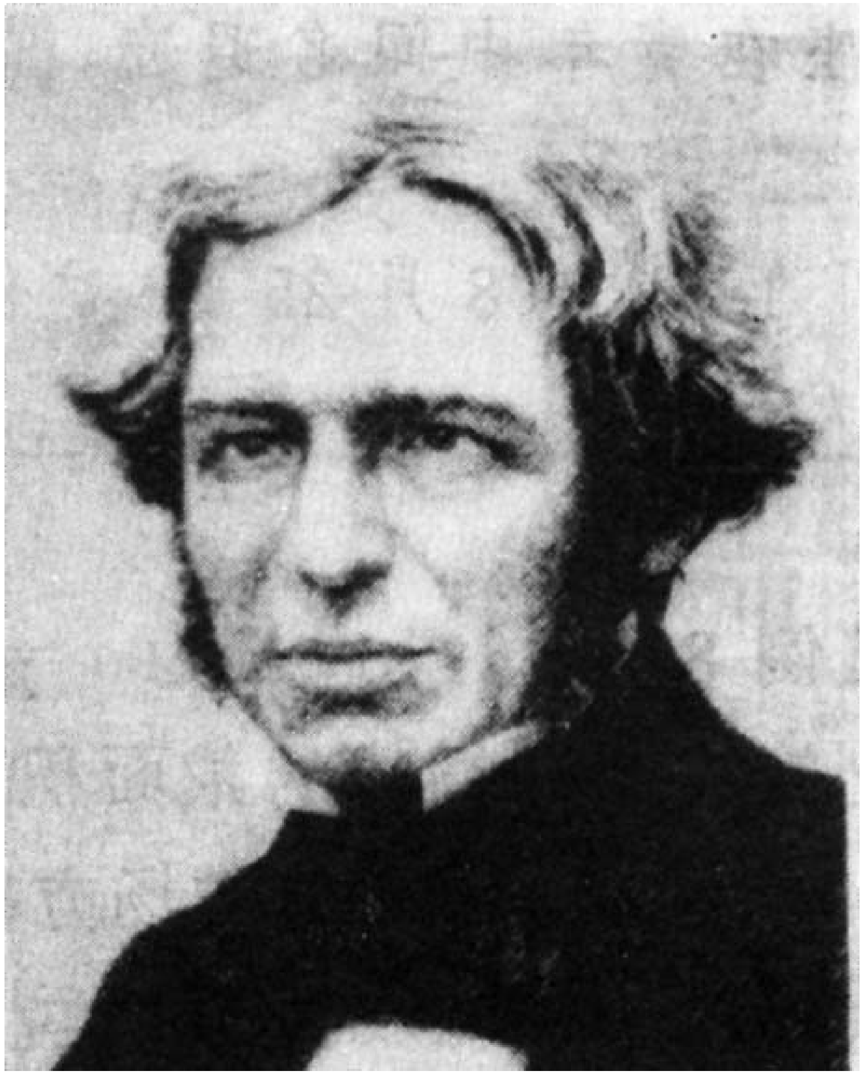
麦克斯韦（1831-1879）
经典电动力学的创始人，
统计物理学奠基人之一。
　　统一了电、磁规律，
著《论电和磁》，被尊
为牛顿《原理》之后最
重要的一部物理学经典。
　　没有电磁学就没有
现代电工学，也就不可
能有现代文明。



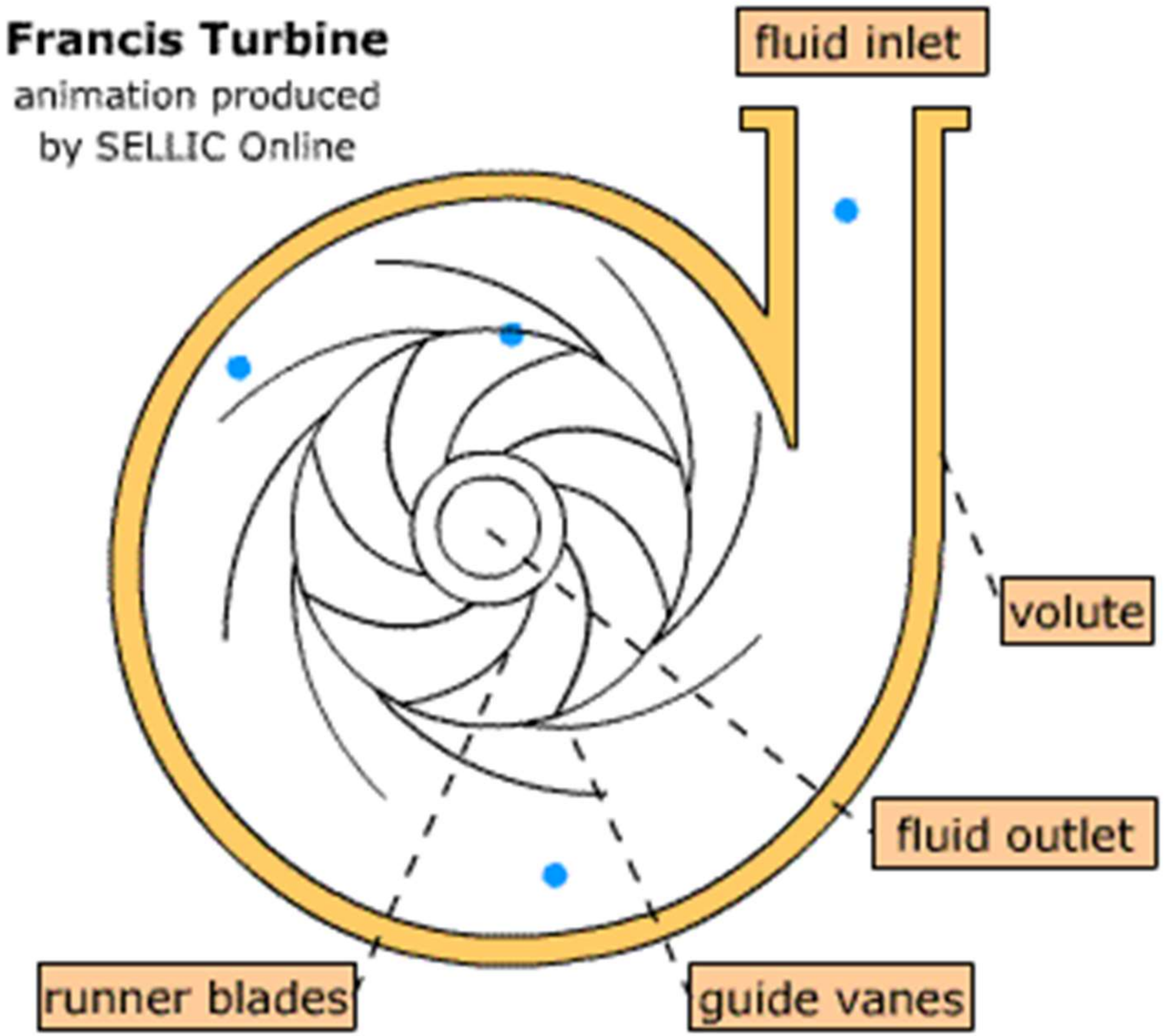
第15章 电磁感应

法拉第（1791-1867）
著名的自学成才的科学家，但却在众多领域中作出惊人成就，堪称刻苦勤奋、探索真理、不计个人名利的典范。

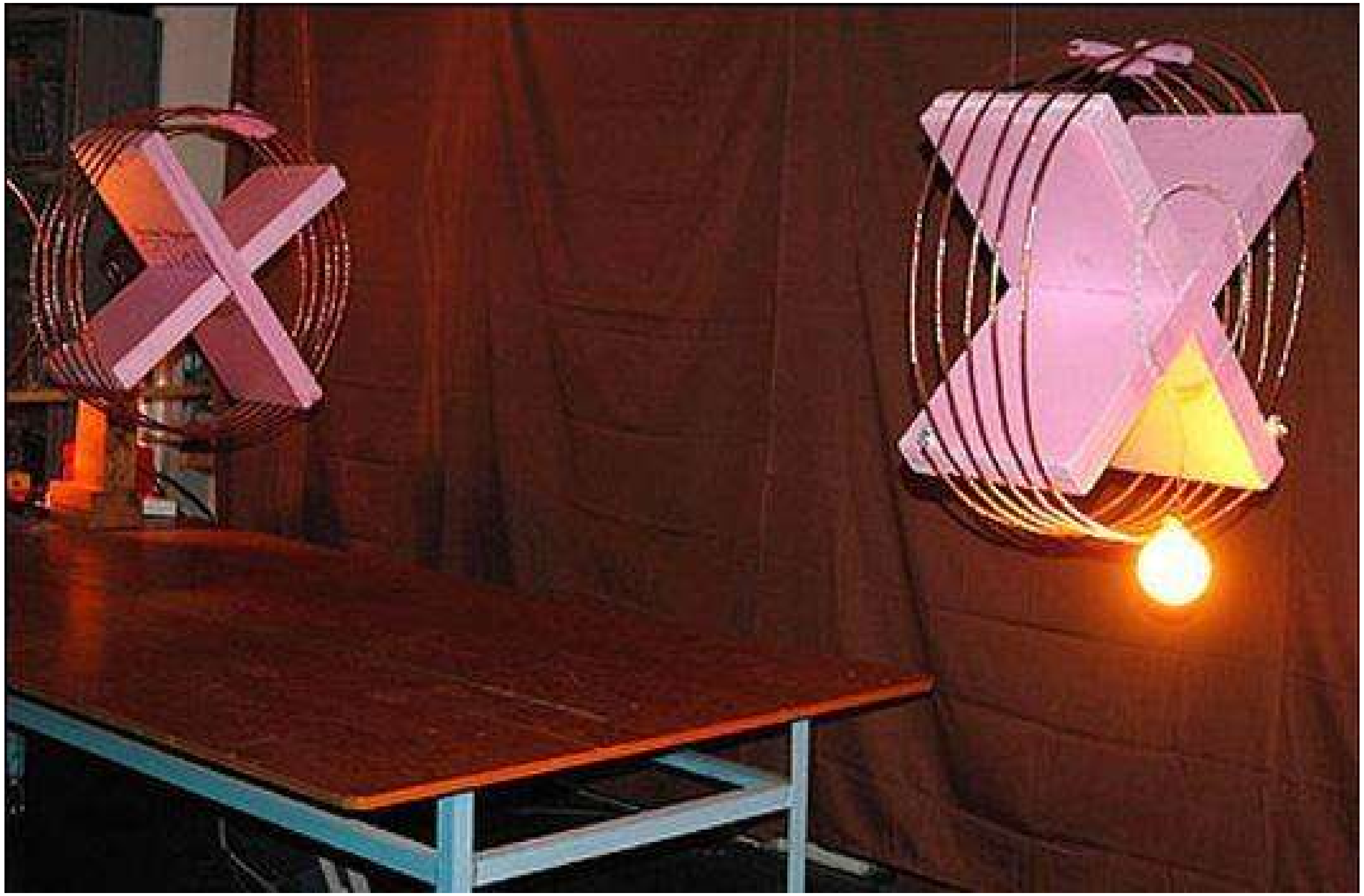
最出色的工作是电磁感应的发现和场的概念的提出。



为什么要讨论电磁感应


Francis Turbine
animation produced
by SELLIC Online
fluid inlet
volute
fluid outlet
runner blades
guide vanes

为什么要讨论电磁感应



用两个铜线圈作为电磁共振器的无线充电技术，效率可达**80%**（**2014**年）

本讲基本要求

掌握法拉第电磁感应定律

第15章 电磁感应

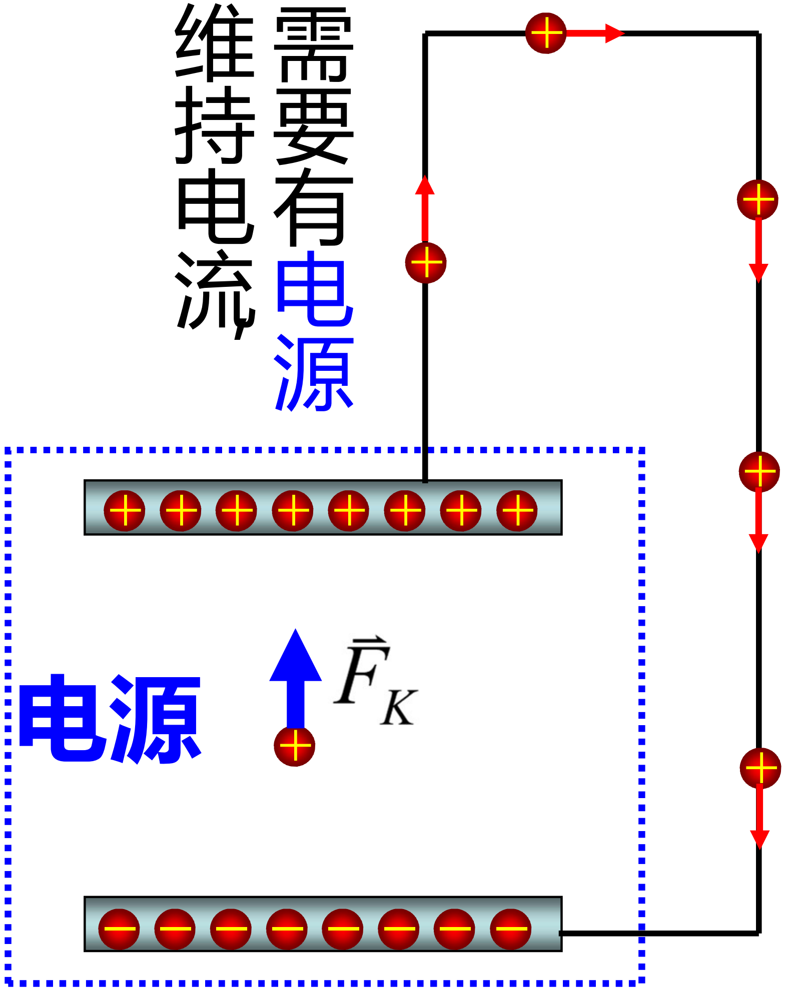
§15.1 电源及其电动势

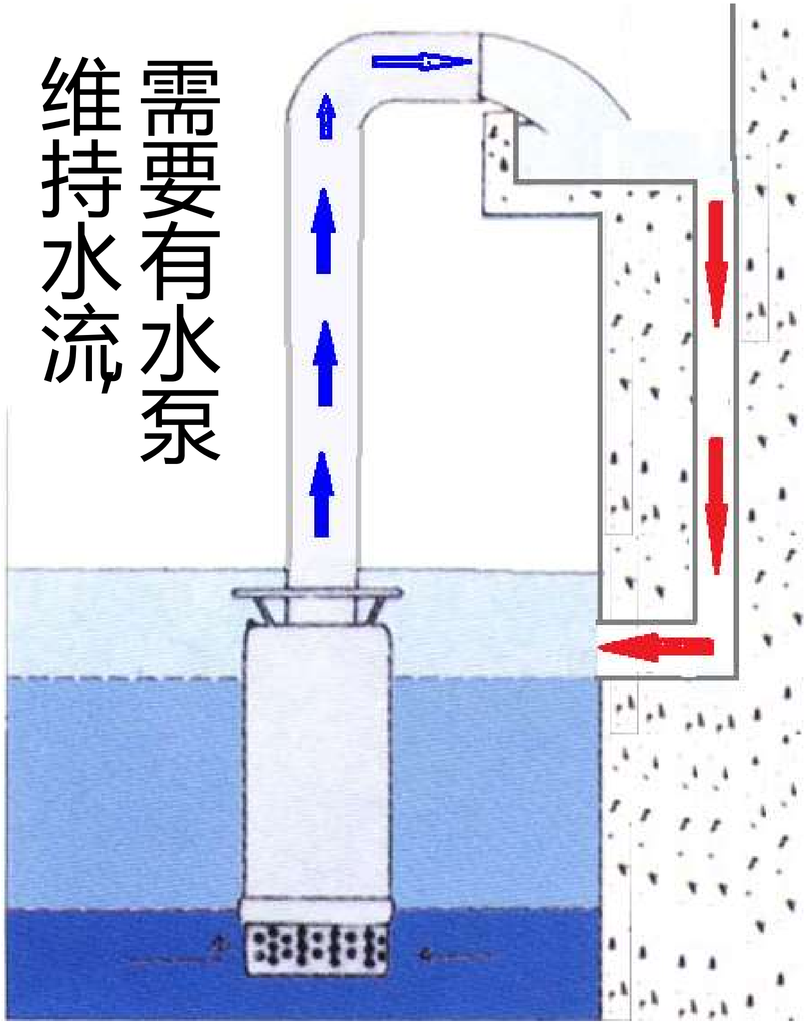
主要内容：

1. 电源电动势
2. 电磁感应现象
3. 法拉第电磁感应定律

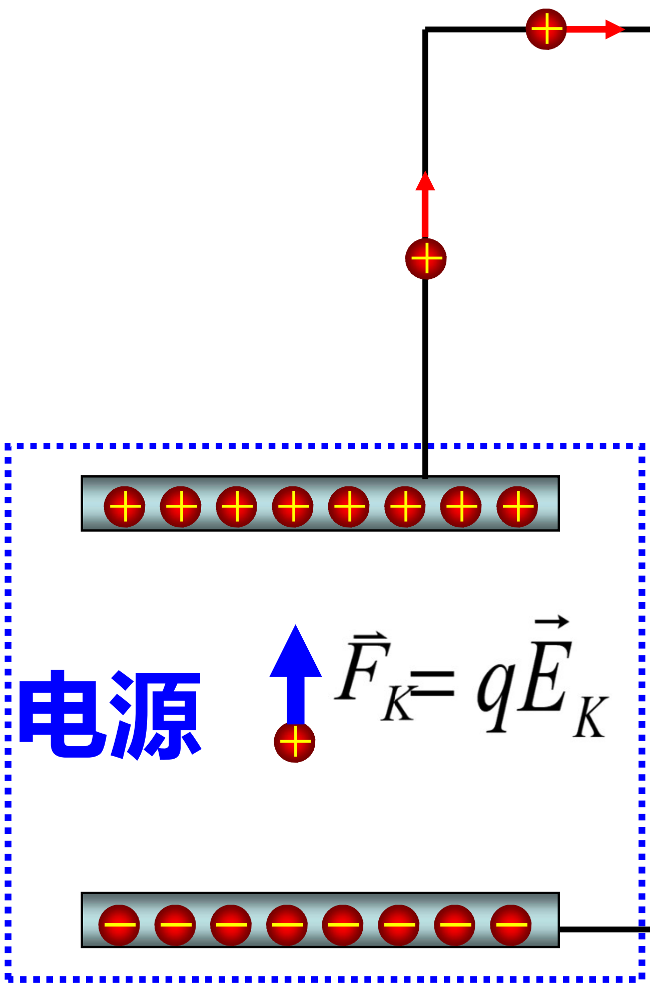
15.1.1 电源

维持电流，需要有电源





15.1.2 电源电动势



$\vec{F}_K$:反抗静电力，把正电荷由低电势处推向高电势处的非静电力

$\vec{E}_K$: 非静电性场场强

电源：能提供非静电力的装置，将其他形式的能量转化为电能

15.1.2 电源电动势

电源电动势ε： **电源把单位正电荷从负极移动到正极所做的功**

$$\varepsilon = \frac{A_{非}}{q} = \frac{\int_{(-)}^{(+)} \vec{F}_K \cdot \mathrm{d}\vec{l}}{q} = \frac{\int_{(-)}^{(+)} q\vec{E}_K \cdot \mathrm{d}\vec{l}}{q} = \boxed{\int_{(-)}^{(+)} \vec{E}_K \cdot \mathrm{d}\vec{l}}$$

对闭合电路： $\varepsilon = \oint \vec{E}_K \cdot \mathrm{d}\vec{l}$

15.1.2 电源电动势

- **讨论**

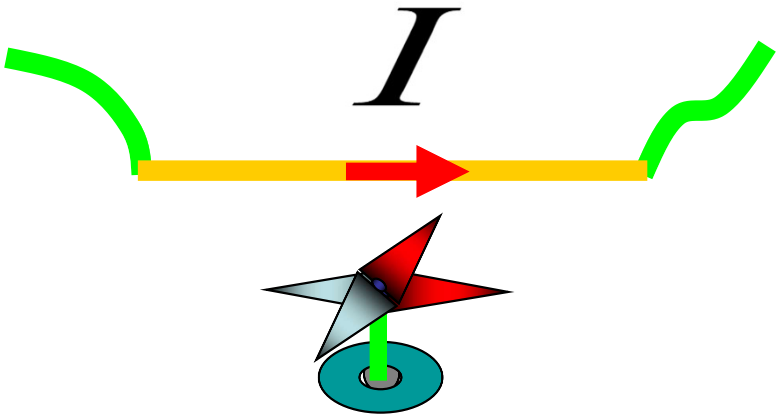
(1)ε：反映电源作功能力，与外电路无关；

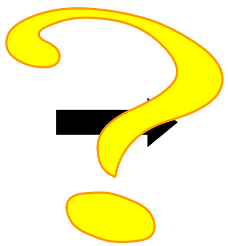
(2)ε是标量
方向:电源内部电势升高方向；

(3)电动势与电势差的区别。

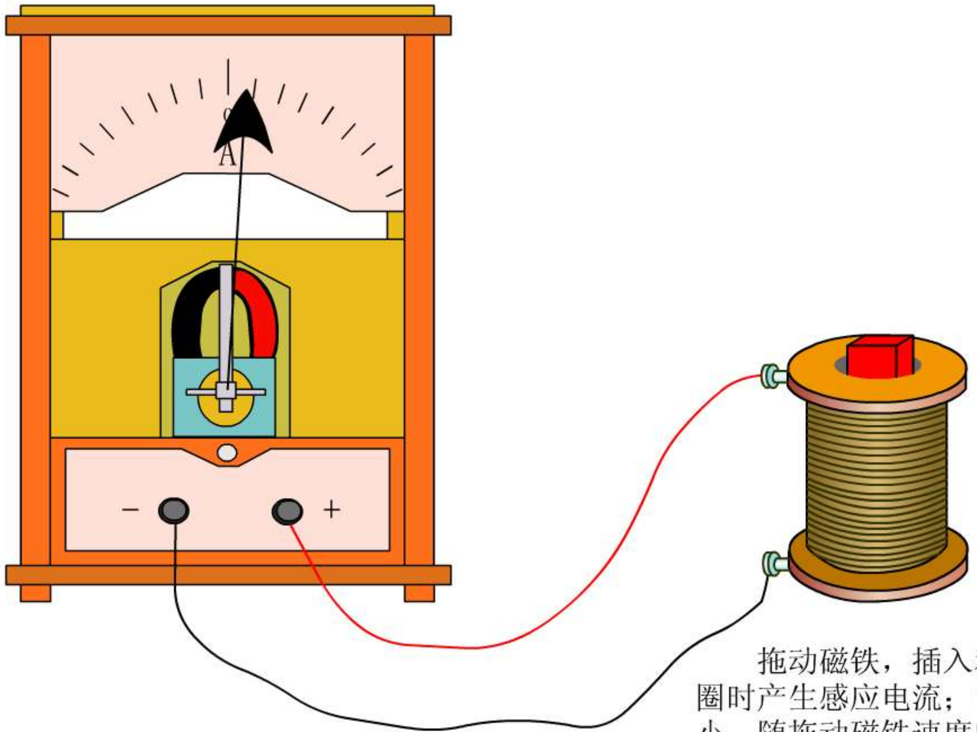
§15.2 电磁感应的基本规律

电流的磁效应 → 电生磁



磁的电效应  **磁生电**

15.2.1 法拉第电磁感应定律



拖动磁铁，插入和拔出线圈时产生感应电流；电流的大小，随拖动磁铁速度的变化而变化。

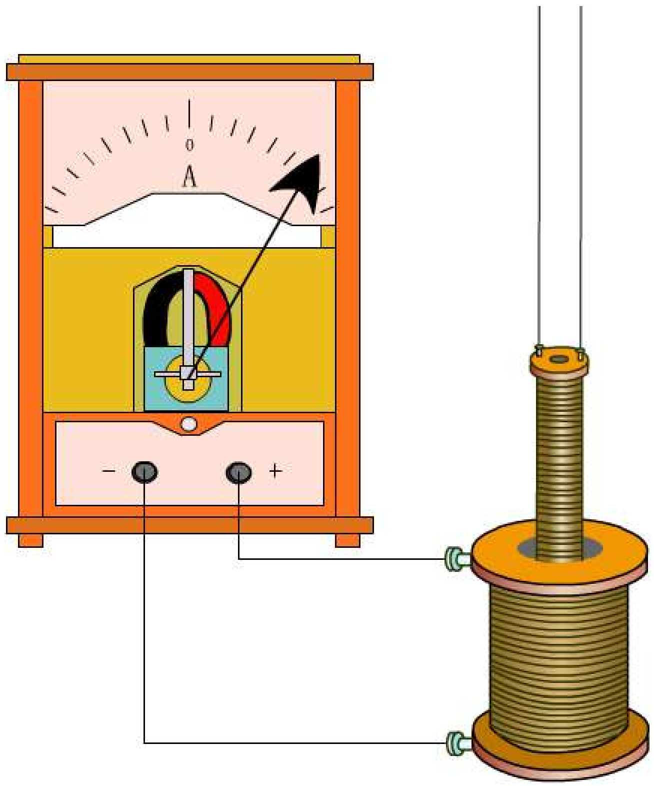
(磁生电现象)

可能原因：

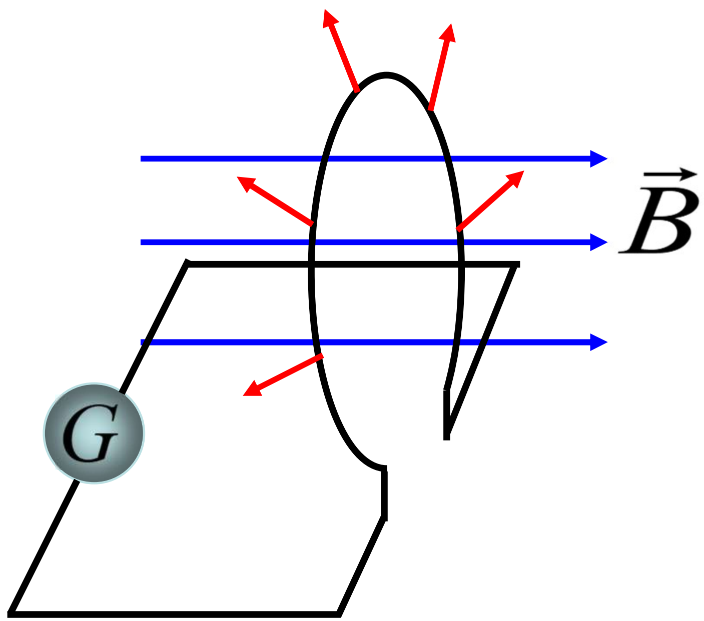
相对运动

变化的磁场

无相对运动（改变电流）



磁场恒定



结论：Φ 变化 ⟶ 感应电流(感应电动势)

——电磁感应现象

$$\varepsilon = -\frac{\mathrm{d}\Phi_{\mathrm{m}}}{\mathrm{d}t}$$

ε：电动势，单位伏特

Φ_m：穿过回路的磁通量

导体回路中产生的感应电动势的大小与穿过导体回路的磁通量的变化率成正比。

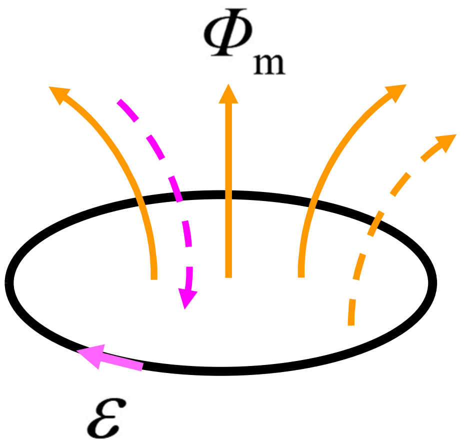
(1831年迈克尔 · 法拉第)

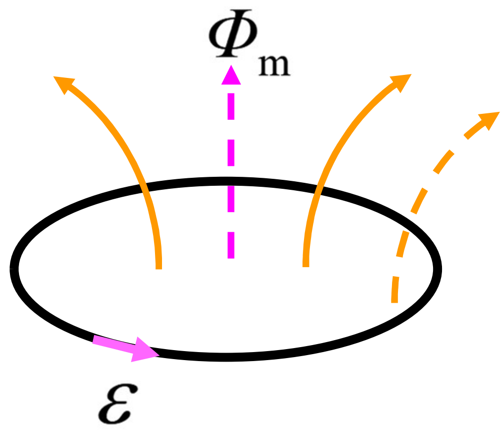
N匝线圈中的感应电动势就等于各匝所产生的感应电动势之和，所以：

磁通匝链数

$$\varepsilon = -N\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -\frac{\mathrm{d}(N\Phi)}{\mathrm{d}t} = -\frac{\mathrm{d}\Psi}{\mathrm{d}t}$$

15.2.2 感应电动势方向的判别

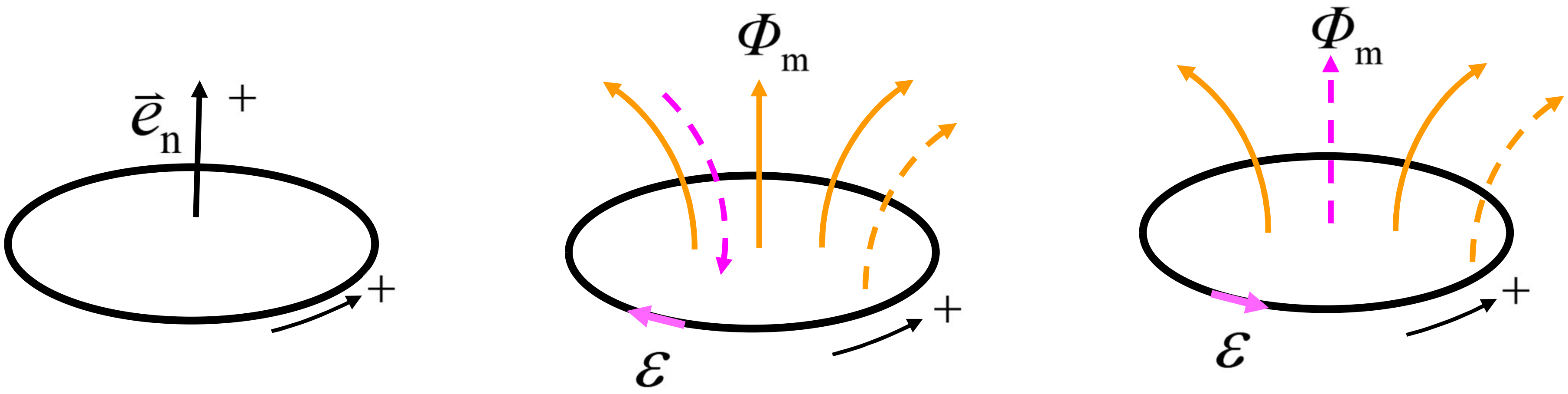




楞次定律:感应电流的方向总是使得它自身所产生的磁通量反抗引起感应电流的磁通量变化

能量守恒

15.2.2 感应电动势方向的判别



规定正方向

$\frac{d\Phi_m}{dt} > 0 \quad \varepsilon < 0$

$\frac{d\Phi_m}{dt} < 0 \quad \varepsilon > 0$

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_m}{dt}$$

讨论

(1)若闭合回路电阻为*R*

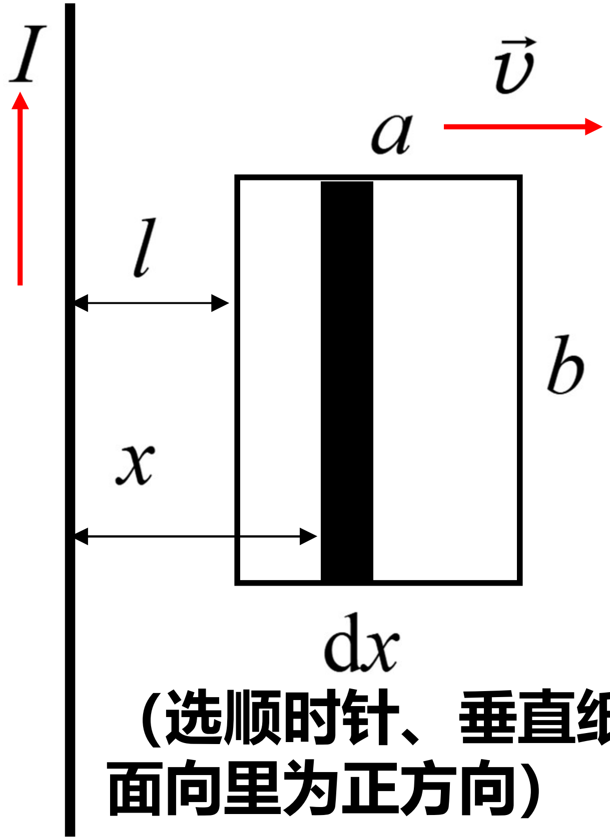
$$I_i = \frac{\varepsilon}{R} = -\frac{\mathrm{d}\Phi_\mathrm{m}}{R\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}q_i}{\mathrm{d}t}$$

感应电荷 $q_i = \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} -\frac{1}{R}\mathrm{d}\Phi_\mathrm{m} = (\Phi_\mathrm{m1} - \Phi_\mathrm{m2})/R$

(2) 感应电动势与导体回路是否存在无关

例 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



（选顺时针、垂直纸面向里为正方向）

解 通过面积元的磁通量

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

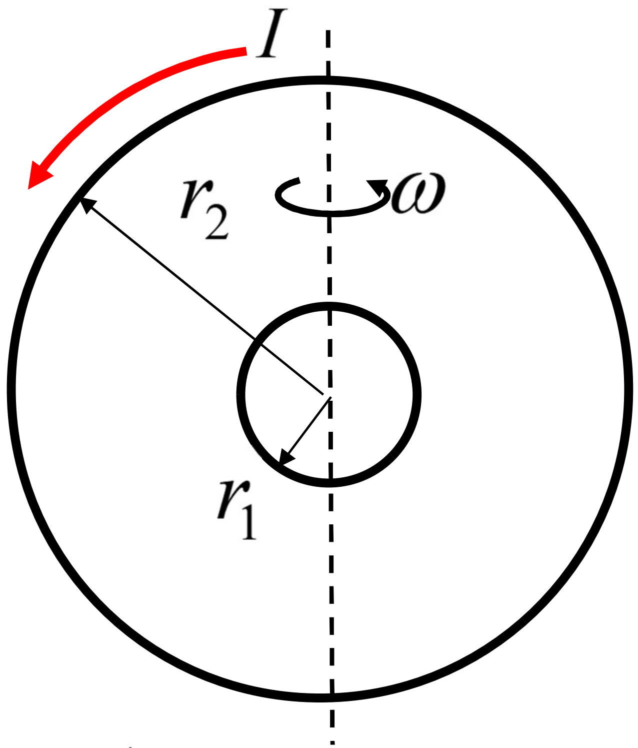
$$\Phi_{\mathrm{m}} = \int \mathrm{d}\Phi_{\mathrm{m}} = \int_l^{l+a} \frac{\mu_0 I}{2\pi x} b\mathrm{d}x$$

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

$$\varepsilon = -\frac{\mathrm{d}\Phi_{\mathrm{m}}}{\mathrm{d}t} = -\frac{\mu_0 I b}{2\pi}\left[\frac{\mathrm{d}l/\mathrm{d}t}{l+a} - \frac{\mathrm{d}l/\mathrm{d}t}{l}\right] = \frac{\mu_0 I a b v}{2\pi l(l+a)}$$

例 两个同心圆环，已知 $r_1 << r_2$, 大圆环中通有电流I ,当小圆环绕直径以 ω 转动时

求 小圆环中的感应电动势



解 大圆环在圆心处产生的磁场

$$B = \frac{\mu_0 I}{2r_2}$$

通过小线圈的磁通量

$$\Phi_{\mathrm{m}} = \vec{B} \cdot \vec{S} = \frac{\mu_0 I}{2r_2} \pi r_1^2 \cos\theta = \frac{\mu_0 I}{2r_2} \pi r_1^2 \cos\omega t$$

感应电动势 $\varepsilon = -\frac{\mathrm{d}\Phi_m}{\mathrm{d}t} = \frac{\mu_0 I \pi r_1^2 \omega}{2r_2} \sin\omega t$

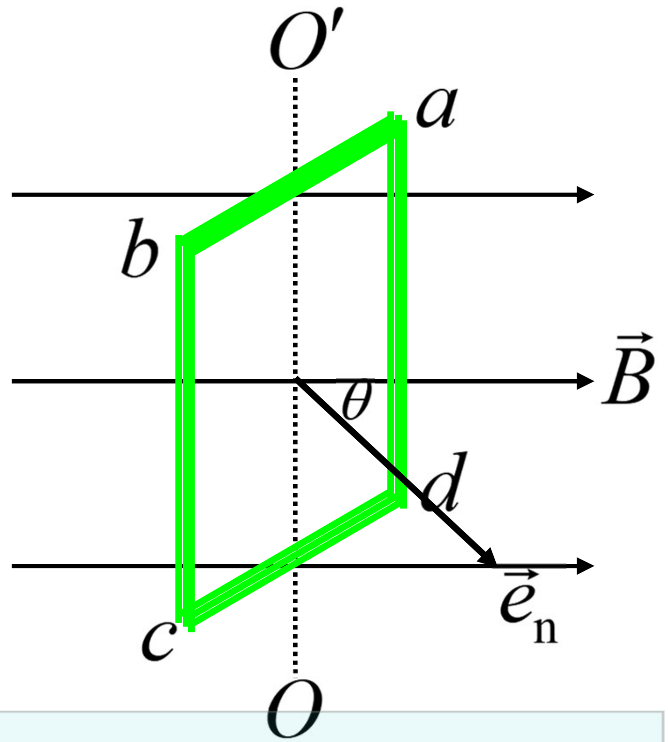
例 计算转动线圈的感应电动势

***abcd*：面积*S*，匝数*N*，矩形线圈**

$$\psi = N\vec{B}\cdot\vec{S} = NBS\cos\omega t$$

$$\varepsilon = -N\frac{\mathrm{d}\psi}{\mathrm{d}t} = NBS\omega\sin\omega t$$

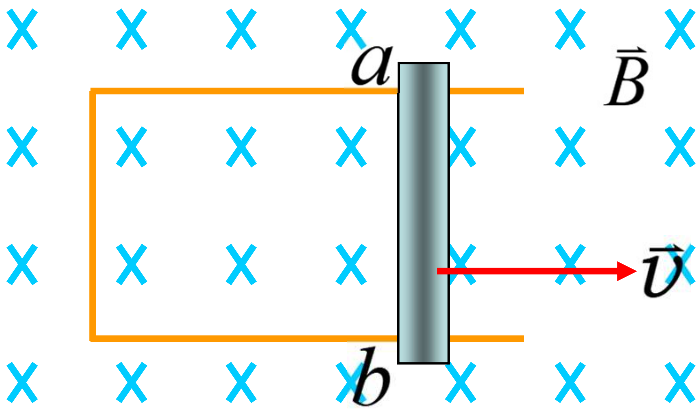
$$\varepsilon_{\mathrm{m}} = NBS\omega$$ **（最大值）**



转动线圈中的感应电动势是随时间变化的（交流电）

例 均匀磁场与导体回路

平面垂直，磁感应强度 $\boldsymbol{B}$ 随时间按规律 $B=kt$ 变化，式中 k 为大于零的常数。ab 边长为 l，以速度 $\boldsymbol{v}$ 向右运动，求任意时刻回路中的感应电动势。（设 $t=0$ 时，$x=0$）



【解】用法拉第电磁感应定律求解如下。

$$\Phi = \boldsymbol{B} \cdot \boldsymbol{S} = BS = ktl\upsilon t$$

$$\Phi = kl\upsilon t^2$$

故
$$\varepsilon = -\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} = -2kl\upsilon t$$

小结

$$\varepsilon = -\frac{\mathrm{d}\Phi_{\mathrm{m}}}{\mathrm{d}t}$$