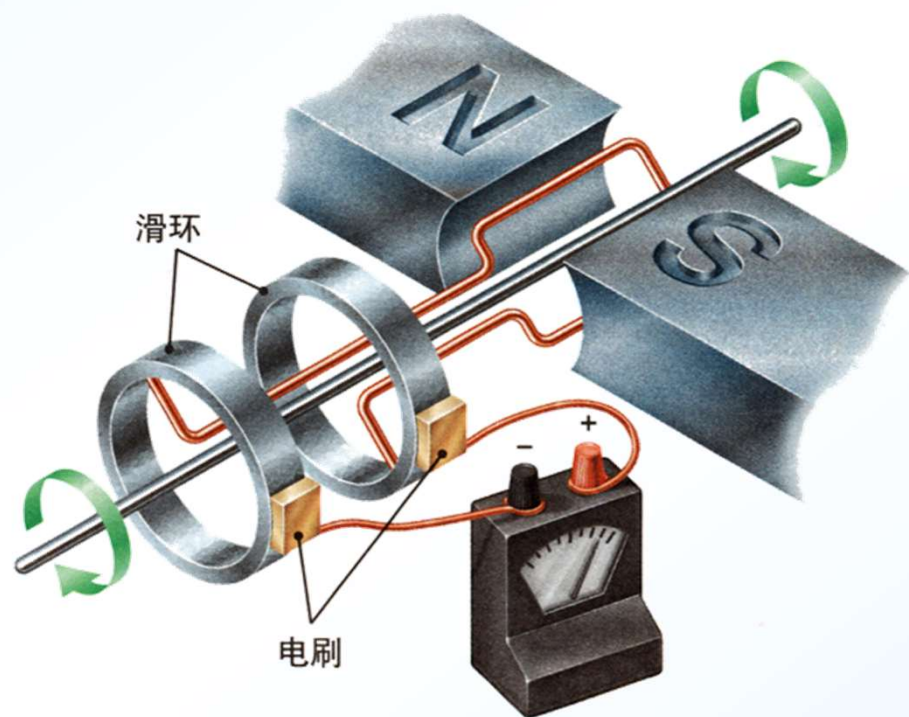


第八章 电磁场与麦克斯韦方程组



在一个简单的交流发电机中，线圈在磁场中转动，线圈中产生感应电流。

第8章 电磁场与麦克斯韦方程组

主要任务： 研究电场或磁场随时间变化时激发场（磁场或电场）的规律，以及它们之间相互依赖、相互激发的规律。

1820年： 奥斯特实验：电 \rightarrow 磁

1821—1831年： 法拉第实验：磁 \rightarrow 电



对称性 { 随时间变化的磁场 \rightarrow 感生电场(涡旋电场)
随时间变化的电场 \rightarrow 磁场

物理学典型方法：实验 \rightarrow 理论 \rightarrow 实验

法拉第



麦克斯韦



赫兹



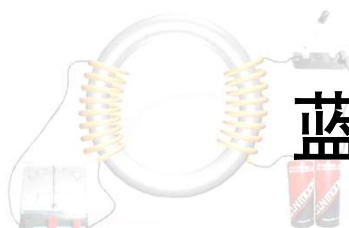
蓝图(基础)



建设大厦



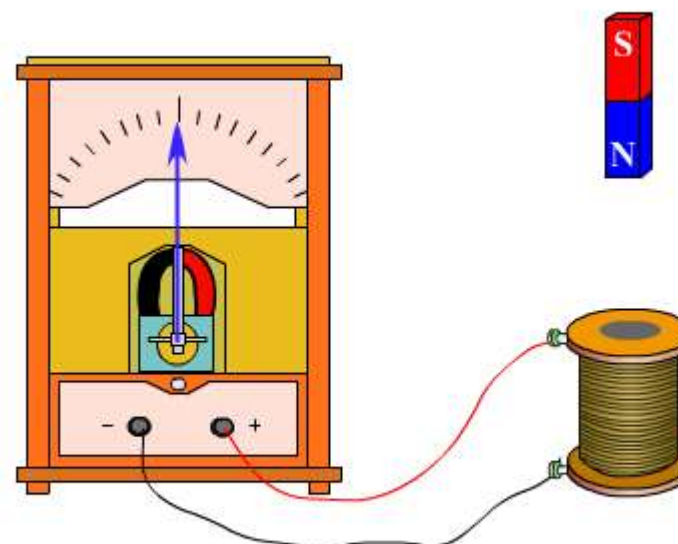
使大厦住满人



§ 8-1 电磁感应基本定律

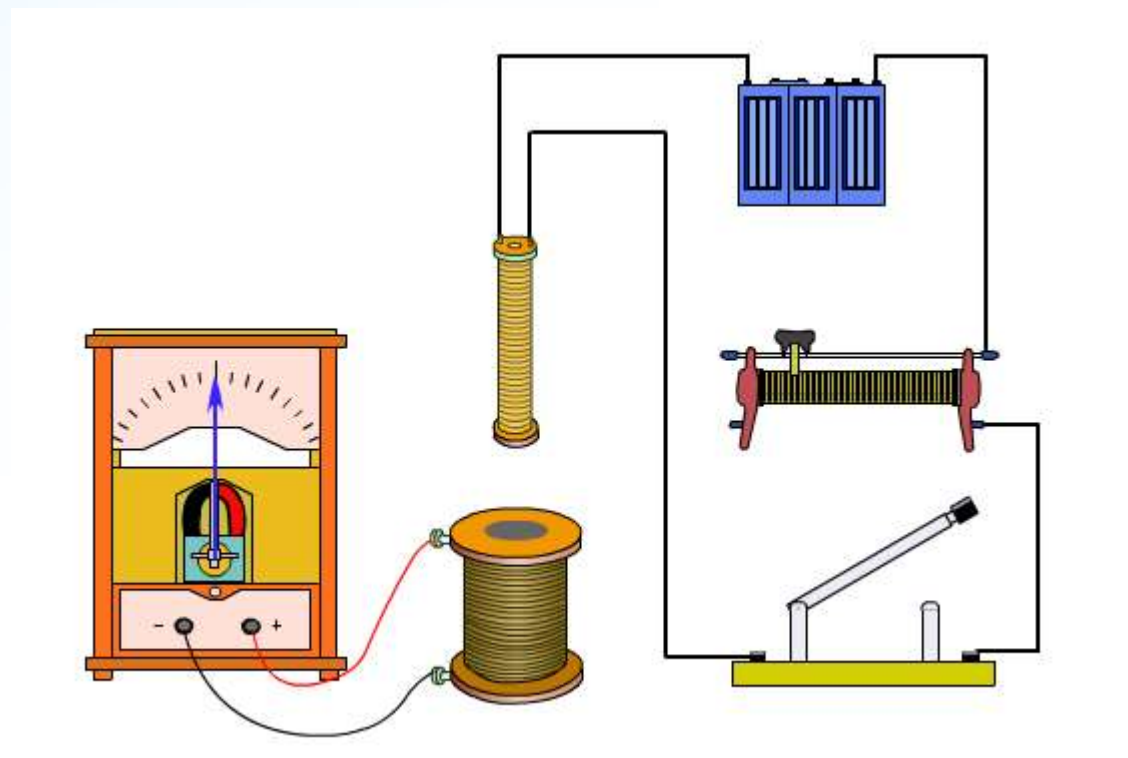
一、法拉第电磁感应定律

实验一：当条形磁铁插入或拔出线圈回路时, 在线圈回路中会产生电流; 而当磁铁与线圈保持相对静止时, 回路中不存在电流.



实验二：以通电线圈代替条形磁铁.

1. 当载流主线圈相对于副线圈运动时，线圈回路内有电流产生.

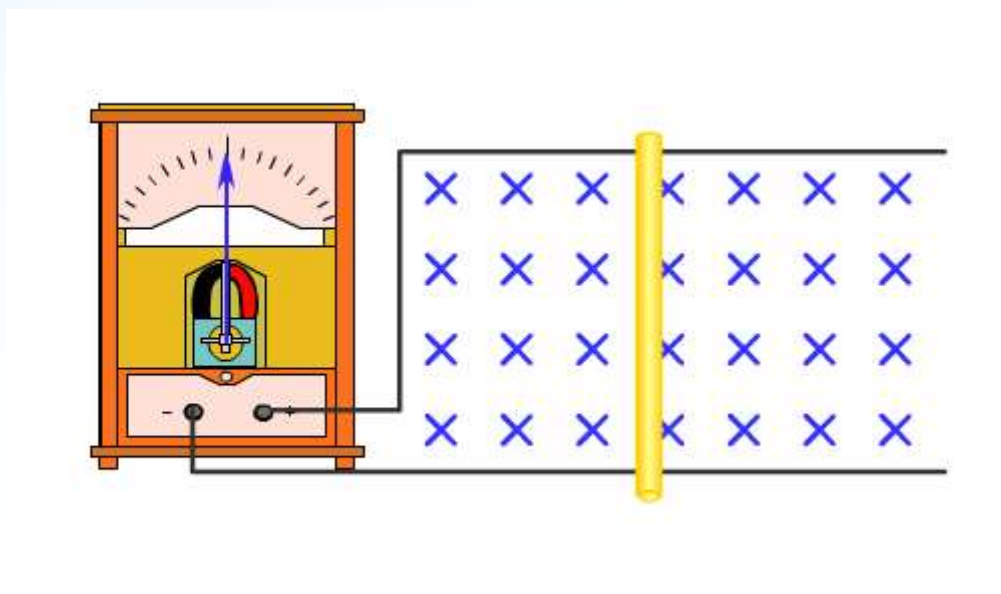


2. 当载流主线圈相对于副线圈静止时，如果改变主线圈的电流，则副线圈回路中也会产生电流.

磁场变化产生电流？

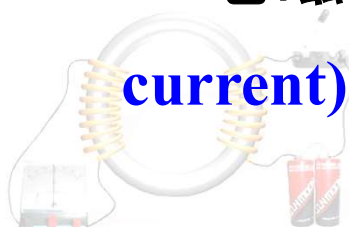


实验三：将闭合回路($abcd$)置于稳恒磁场中,当导体棒在导体轨道上滑行时,回路内出现了电流.



结论：当穿过闭合回路的磁通量发生变化时,不管这种变化是由什么原因引起的,回路中有电流产生.这一现象称为**电磁感应现象**(electromagnetic induction).

电磁感应现象中产生的电流称为**感应电流**(induction current),相应的电动势称为**感应电动势**(induction emf).





楞次（1804--1865）出生在德国的Dorpat。俄国物理学家和地球物理学家，1845年倡导组织了俄国地球物理学会。1836年至1865年任圣彼得堡大学教授，兼任海军和师范等院校物理学教授。

楞次定律：电磁感应现象产生的感应电流的方向，总是使感应电流的磁场通过回路的磁通量阻碍原磁通量的变化。

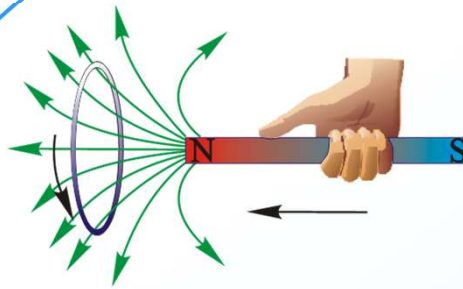
感应电流的效果总是反抗引起感应电流的原因。



法拉第电磁感应定律: 当穿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穿过回路的磁通量对时间变化率的负值成正比。

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

反映感应电动势的方向, 楞次定律的数学表示



注意: (1) 感应电动势与磁通量的变化率有关, 与磁通量的大小无关;

(2) 感应电动势与材料无关; 与回路是否闭合无关.



法拉第(1791–1867), 英国物理学家、化学家, 著名的自学成才科学家, 生于萨里郡纽因顿一个贫苦铁匠家庭。他一生献身科学研究, 成果众多, 1846年荣获伦福德奖章和皇家勋章。

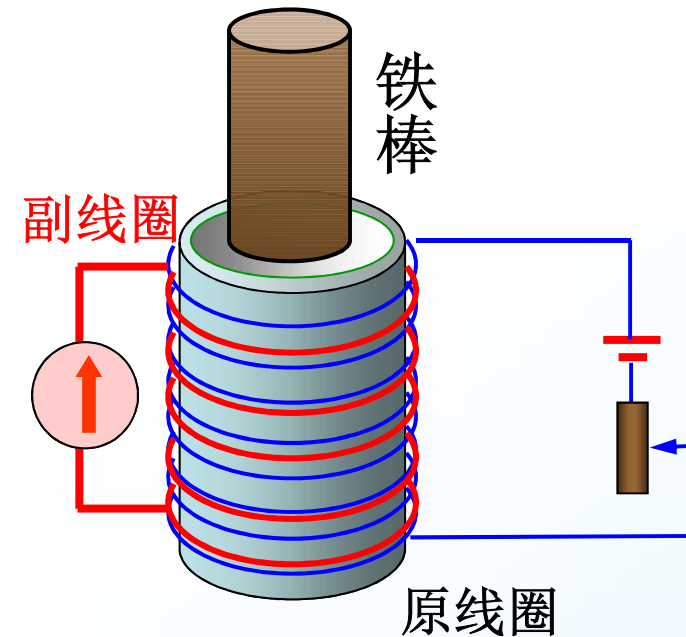
讨论:

(1) Φ_m : \vec{B} 通量还是 \vec{H} 通量? 还是二者皆可?

原、副线圈实验

$$H = nI \quad B = \mu_0 \mu_r nI$$

引起闭合回路中产生感应电动势的是通过回路的 \vec{B} 通量的变化, 而不是 \vec{H} 通量的变化



(2) 磁通量变化的原因:

$$d\varphi_m = B \cos \theta dS \quad B \text{ 变}, \theta \text{ 变}, S \text{ 变}$$

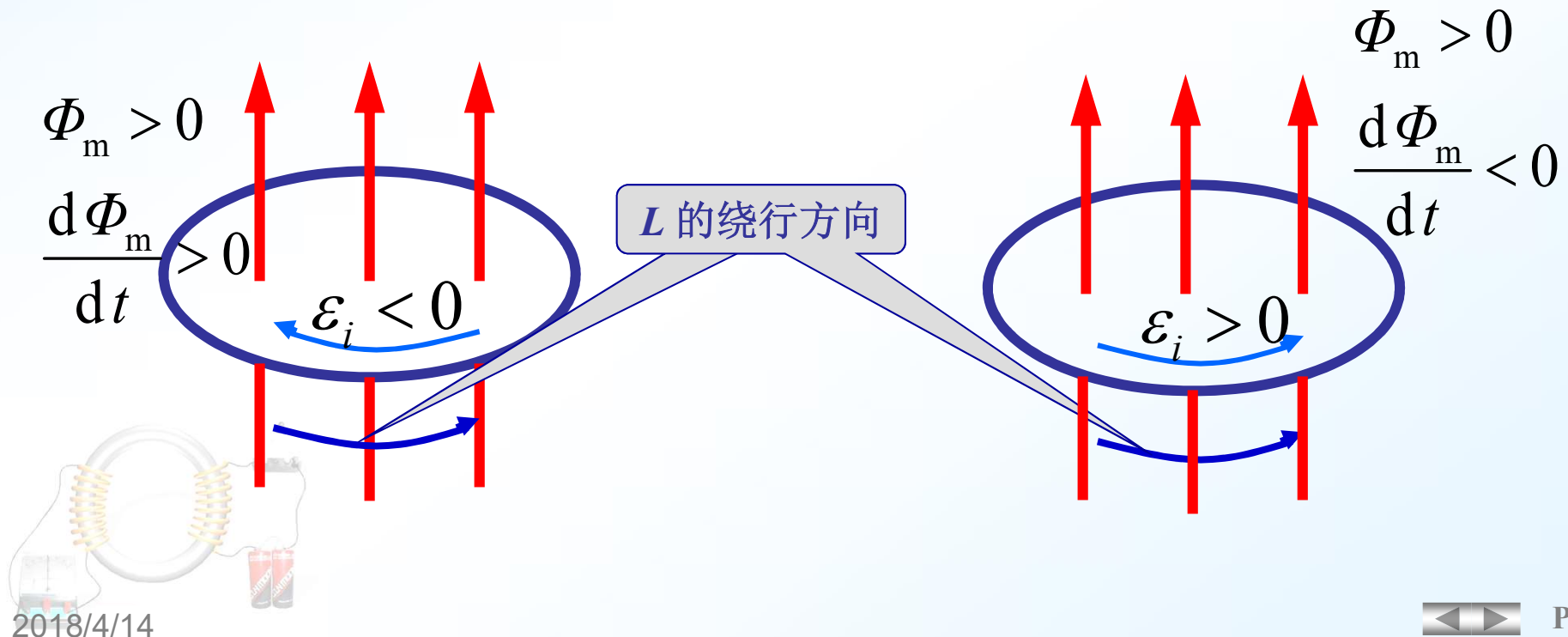
(3) 楞次定律的本质: **能量的转化和守恒**

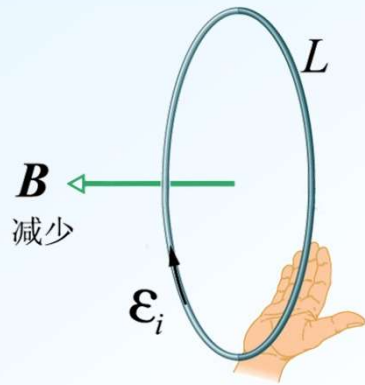
磁场中运动的导线, 感应电流所受安培力与运动方向相反, 安培力做功为负



符号法则：

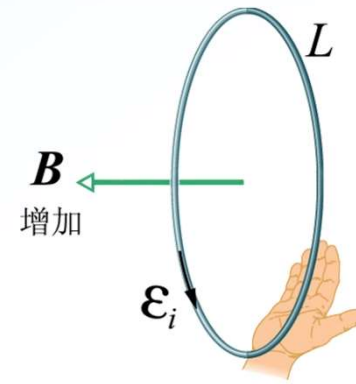
1. 对回路 L 任取一绕行方向。
2. 当回路中的磁感线方向与回路的绕行方向成右手螺旋关系时, 磁通量为正(+), 反之为负(-).
3. 回路中的感应电动势方向凡与绕行方向一致时为 正(+), 反之为负(-).





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

$$\mathcal{E}_i < 0$$



$$\Phi_m < 0, \quad \frac{d\Phi_m}{dt} < 0$$

$$\mathcal{E}_i > 0$$

根据电磁感应定律公式来判断感应电动势的方向往往比较复杂，一般用楞次定律会更加方便！



对 N 匝线圈, 其总磁通量称全磁通.

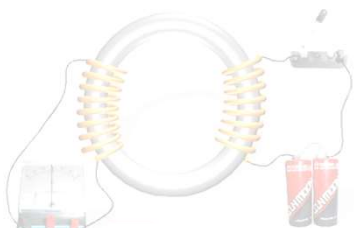
$$\Psi_i = \Phi_{m1} + \Phi_{m2} + \cdots = \sum_{i=1}^N \Phi_{mi} = N\Phi_m$$

N 称为**磁通链数**.

N 匝线圈的总电动势为各匝产生的电动势之和:

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_i &= -\frac{d\Psi_i}{dt} = -\left(\frac{d\Phi_{m1}}{dt} + \frac{d\Phi_{m2}}{dt} + \cdots\right) \\ &= -\frac{d}{dt}(\Phi_{m1} + \Phi_{m2} + \cdots) = -N\frac{d\Phi_{mi}}{dt}\end{aligned}$$

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Psi_i}{dt} = -N\frac{d\Phi_{mi}}{dt}$$



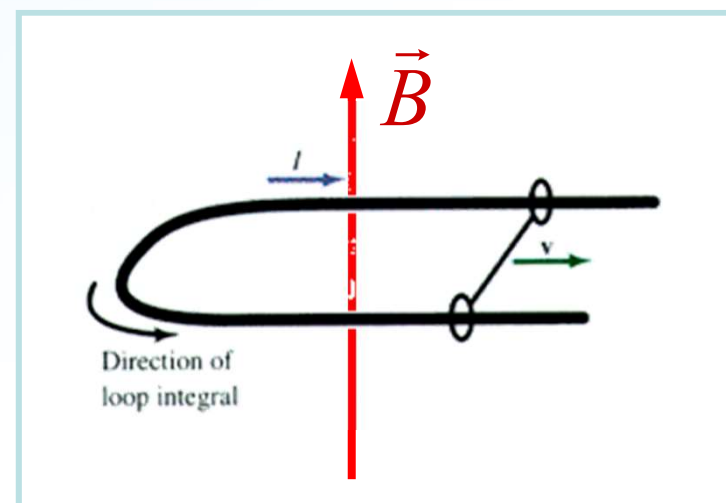
(3) 感应电流 I

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = -\frac{1}{R} \frac{d\Psi_m}{dt}$$

在直导体棒匀速向右运动过程中, 如果其外框是:

- ①是导体, 回路闭合 — 有持续 I
- ②是导体, 回路不闭合 — 瞬态 I , 稳定 ε
- ③不是导体 — 无 I , 但有 ε

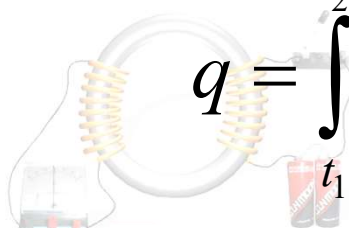
本质: 磁通量变化引起了感应电场



一定时间内通过回路截面的感应电量:

$$q = \int_{t_1}^{t_2} I dt = -\frac{1}{R} \int_{\Psi_{m1}}^{\Psi_{m2}} d\Psi_m = -\frac{1}{R} (\Psi_{m2} - \Psi_{m1})$$

磁通计原理



例8-1.导线 ab 弯成如图形状, 半径 $r=0.10\text{m}$, $B=0.50\text{T}$, 转速 $n=3600\text{转/分}$. 电路总电阻为 1000Ω . 求感应电动势和感应电流, 以及最大感应电动势和最大感应电流.

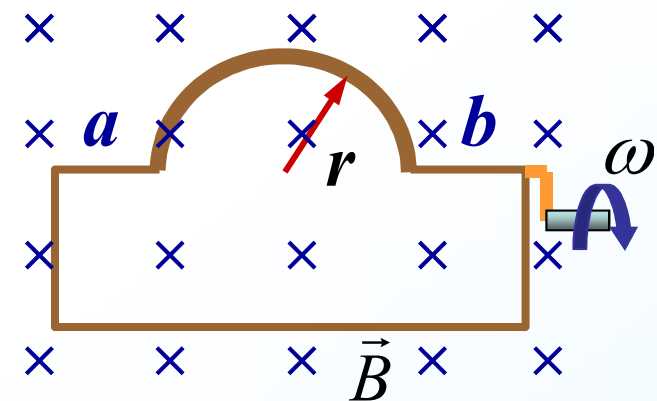
解: $\omega = \frac{2\pi n}{60} = 120\pi \text{ s}^{-1}$

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = BS \cos \theta$$

$$= B \frac{\pi r^2}{2} \cos \omega t$$

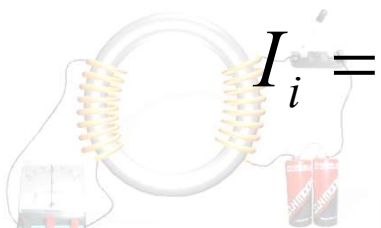
$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt} = \frac{B \pi r^2 \omega}{2} \sin \omega t$$

$$I_i = \frac{\varepsilon_i}{R} = \frac{B \pi r^2 \omega}{2R} \sin \omega t$$



$$\varepsilon_{im} = 2.96 \text{ V}$$

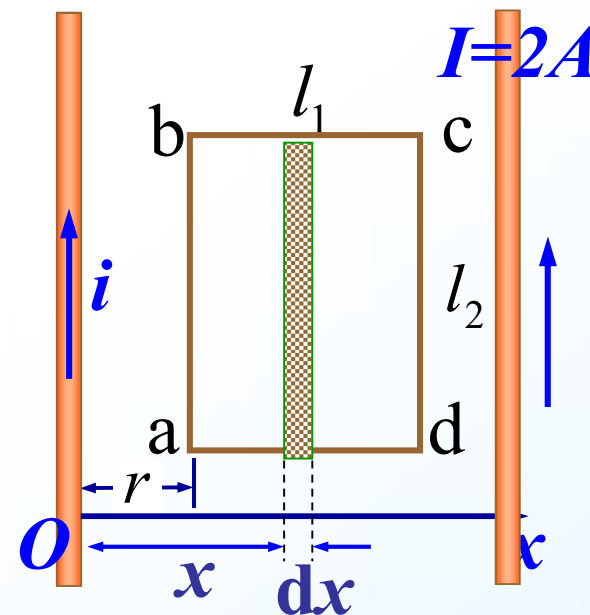
$$I_{im} = 2.96 \text{ mA}$$



例8-2. 一长直导线通以电流 $i = I_0 \sin \omega t$ (I_0 为常数). 旁边有一个边长分别为 l_1 和 l_2 的矩形线圈abcd与长直电流共面, ab边距长直电流 r . 求线圈中的感应电动势.

解: 建立坐标系 Ox 如图

$$\begin{aligned}\Phi &= \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int_r^{r+l_1} \frac{\mu_0 i}{2\pi x} l_2 dx \\ &= \frac{\mu_0 I_0 l_2}{2\pi} \sin \omega t \ln \frac{r+l_1}{r} \quad \otimes \\ \varepsilon_i &= -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{\mu_0 I_0}{2\pi} l_2 \omega \cos \omega t \ln \frac{r+l_1}{r}\end{aligned}$$



当 $-\frac{\pi}{2} < \omega t < \frac{\pi}{2}$ 时, $\cos \omega t > 0$

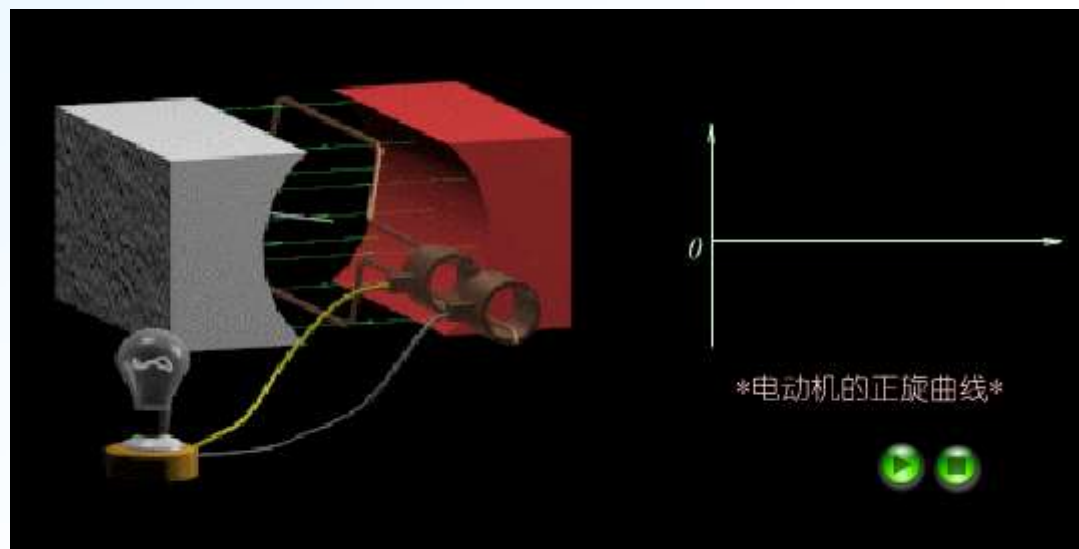
当 $\frac{\pi}{2} < \omega t < \frac{3\pi}{2}$ 时, $\cos \omega t < 0$

$\varepsilon_i < 0$ 为逆时针转向

$\varepsilon_i > 0$ 为顺时针转向

若线圈右侧再添加如图所示的电流 $I=2A$, 请问通过线圈的磁通量和感应电动势如何变化?

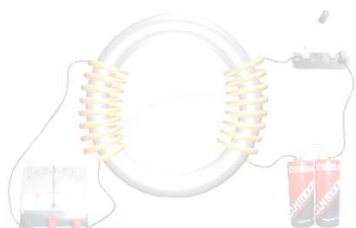
二、线圈在磁场中转动——交流发电机(alternator)

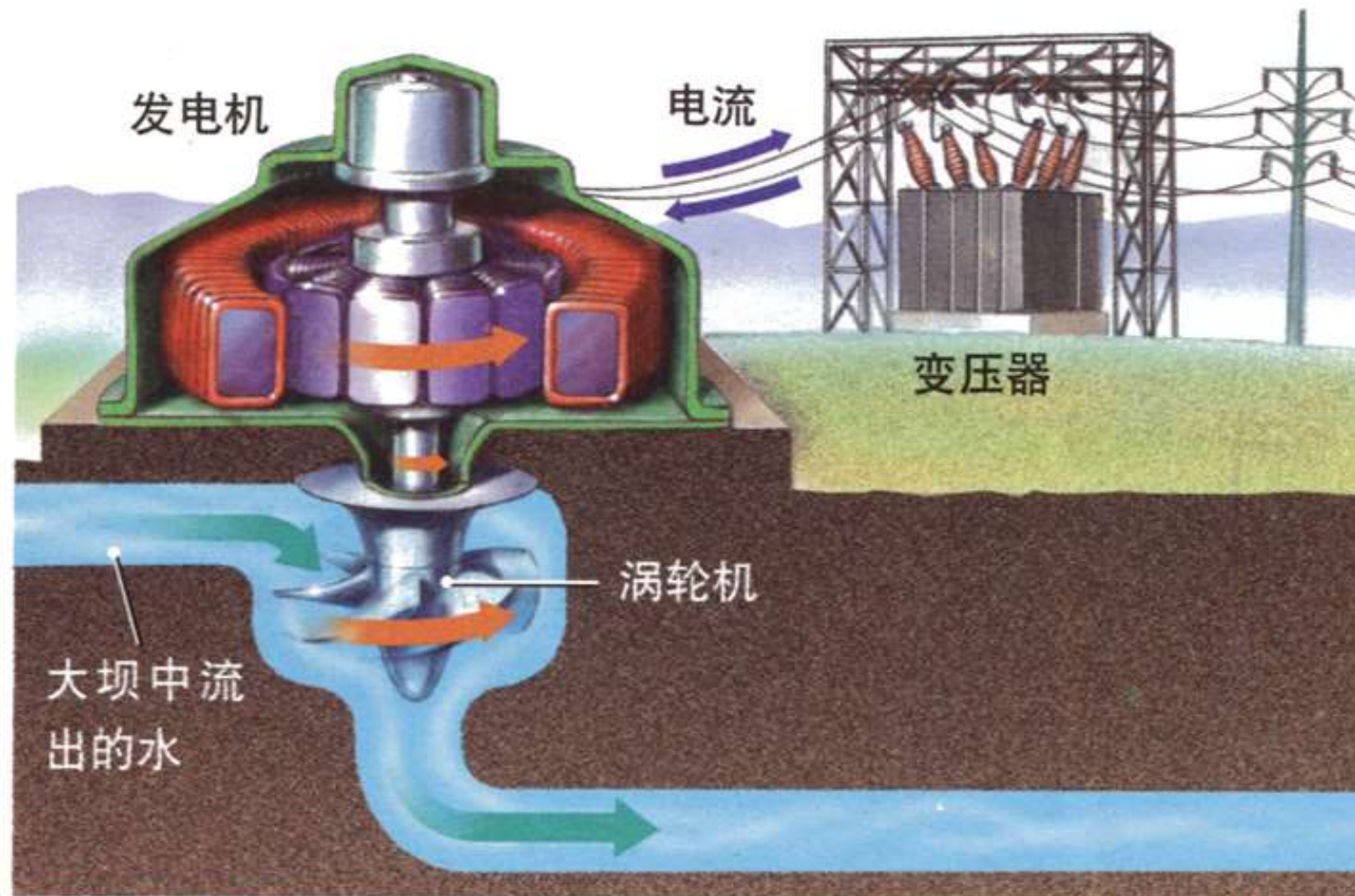


线圈在磁场中旋转→线圈切割磁感线→产生感应电动势→产生感应电流.

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Psi_m}{dt} = -N \frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = -N \frac{d}{dt} (BS \cos \theta) = NBS\omega \sin(\omega t)$$

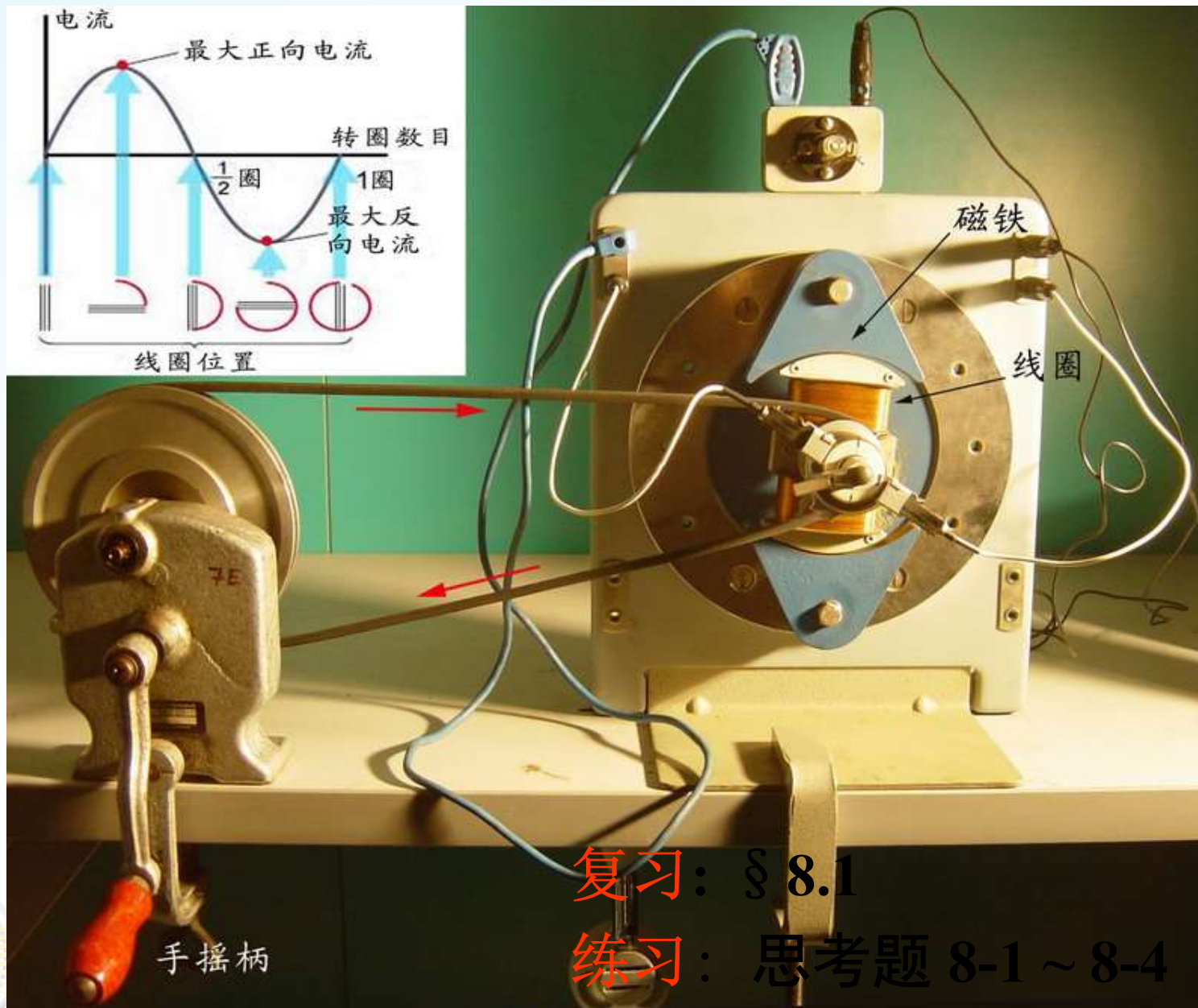
$$\varepsilon = \varepsilon_m \sin \omega t$$





许多情况下发电机都与巨大的涡轮机组合在一起，如图所示。机械能驱动涡轮机转动，使发电机转子转动，发电机线圈中就会产生电流。





复习: § 8.1

练习: 思考题 8-1 ~ 8-4

预习: § 8.2, § 8.3