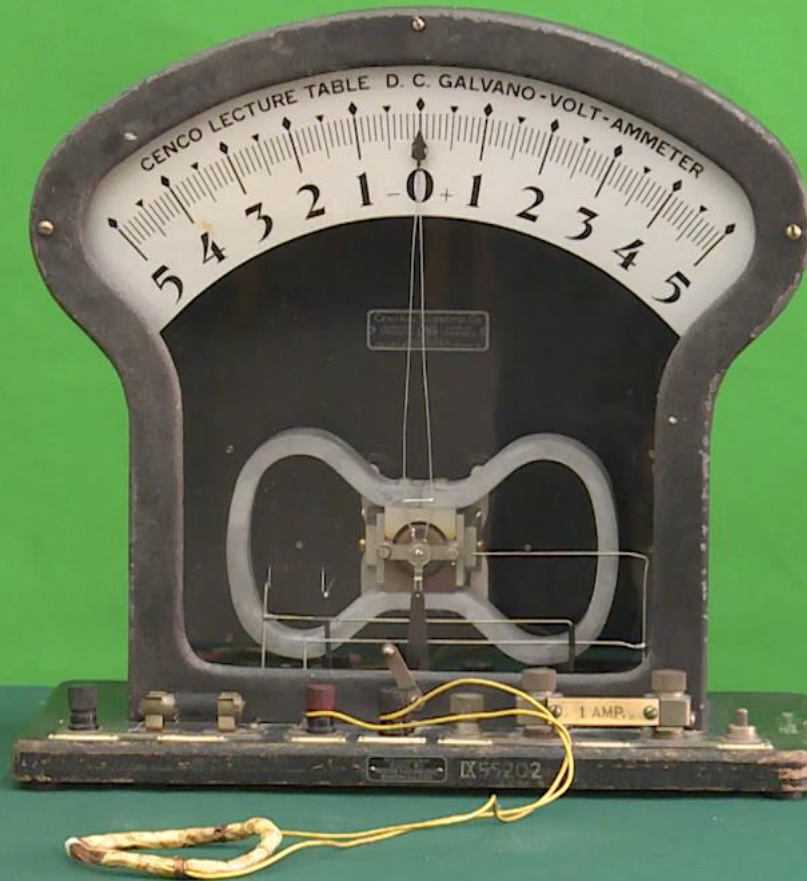




5.1 法拉第电磁感应定律

一. 电磁感应现象 闭合线圈—磁通量变化—快—电流大

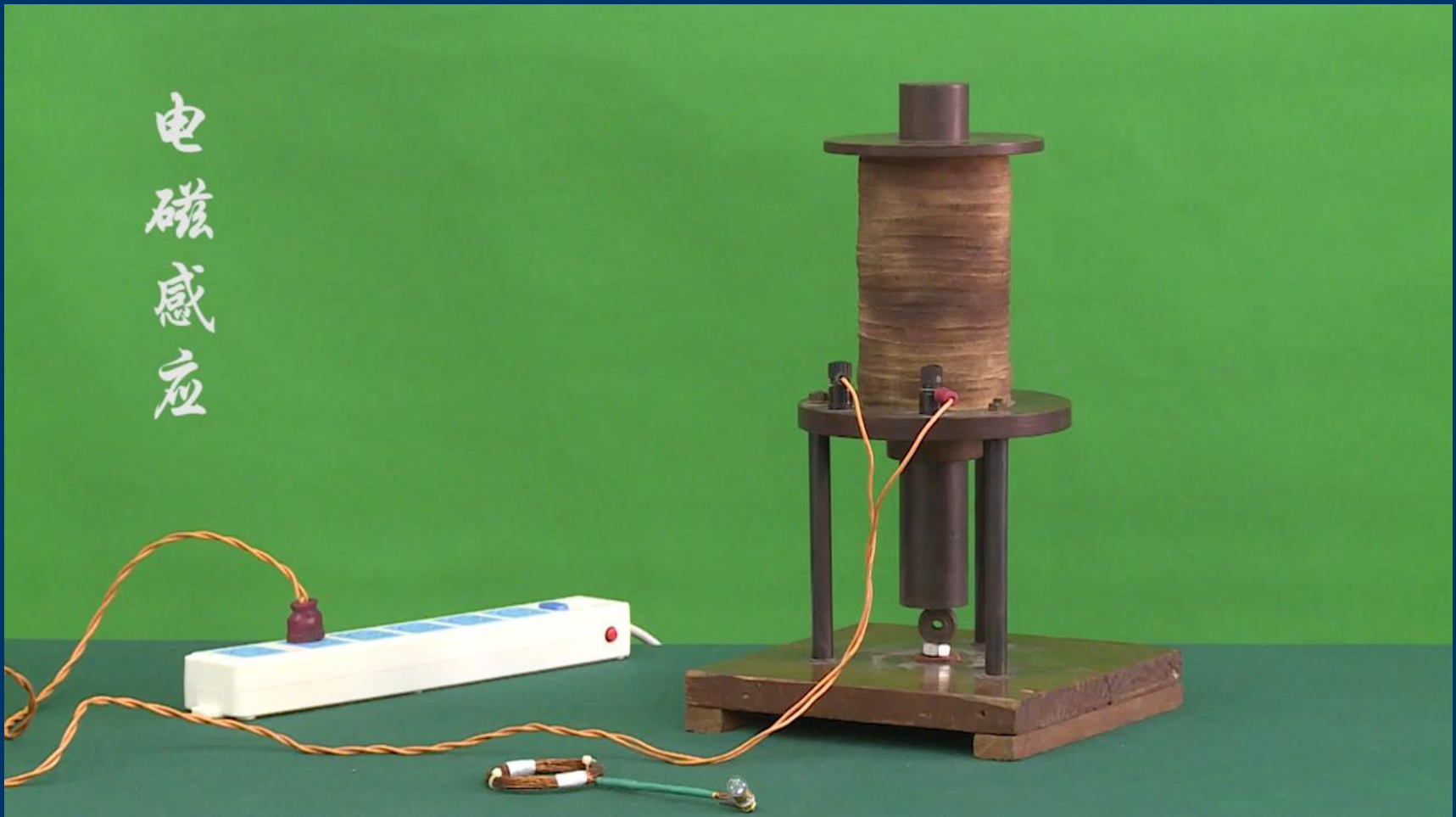
电磁感应



思考：怎样引起磁通量变化呢？

5.1 法拉第电磁感应定律

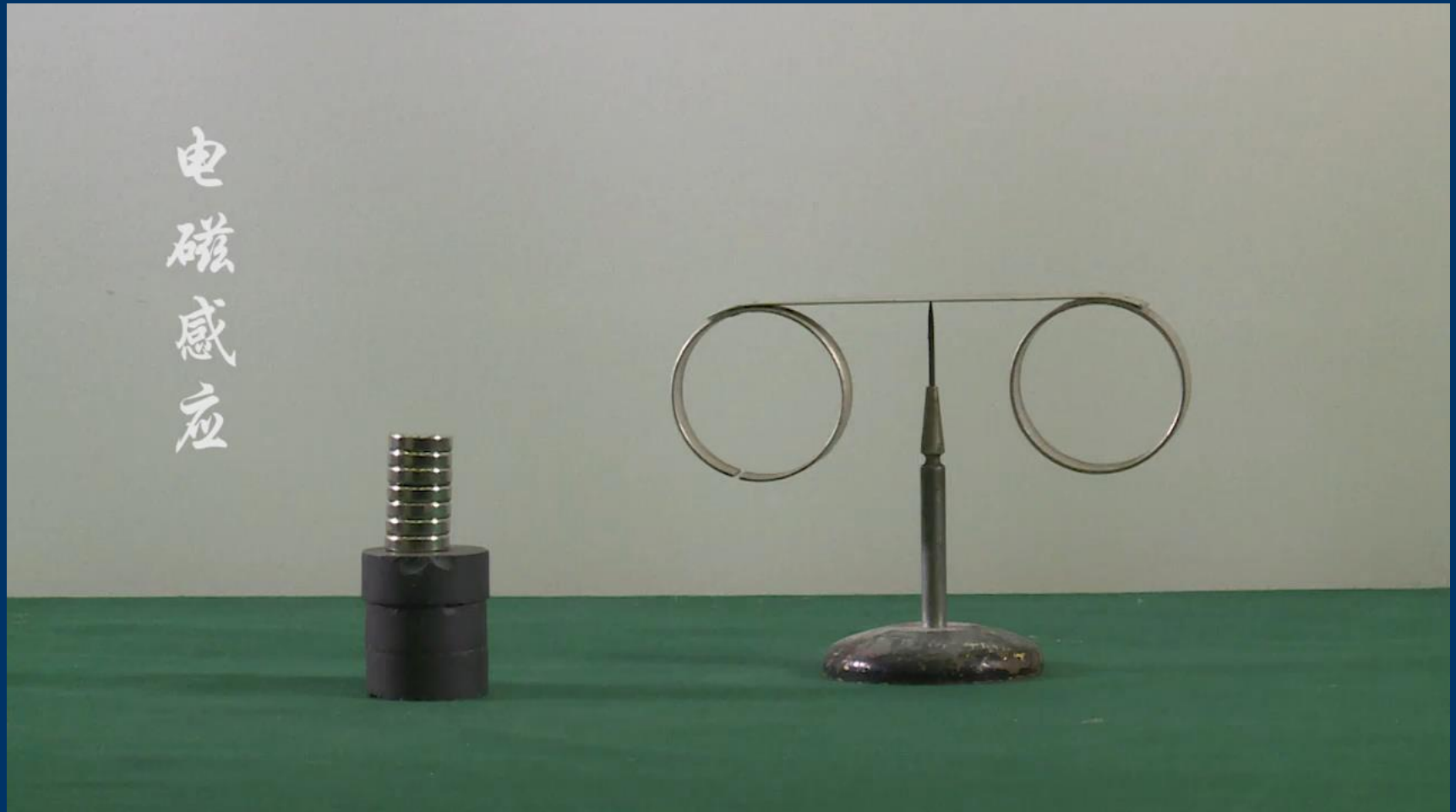
一. 电磁感应现象 闭合线圈—磁通量变化—快—亮



思考：怎样引起磁通量变化呢？

5.1 法拉第电磁感应定律

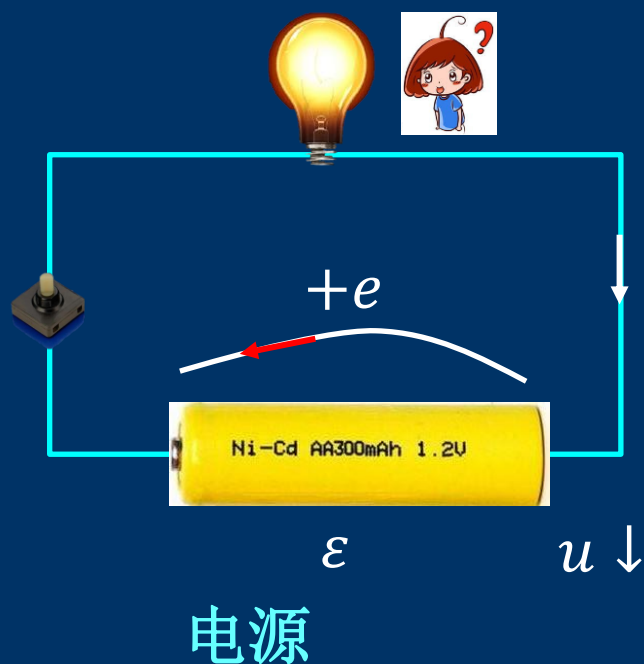
一. 电磁感应现象 闭合线圈-磁通量变化快-受力大-电流大



二. 法拉第电磁感应定律

不论用什么方法，只要使穿过闭合导体回路的磁通量发生变化，此回路中就会有电流产生，这种电流被称为**感应电流**，这一现象被称为**电磁感应现象**。

思考：为何闭合线圈里有电流呢？



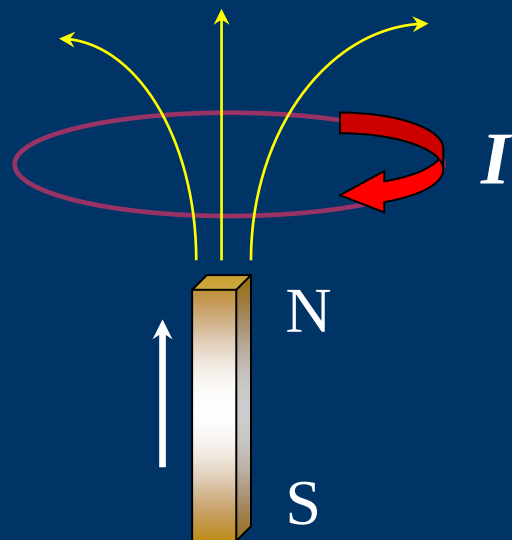
$$\bar{\varepsilon} = \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

$$\varepsilon = \frac{d\phi}{dt}$$

$\Delta\phi$
(这里是绝对值)

$$\bar{\varepsilon} = N \cdot \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

$$\varepsilon = N \cdot \frac{d\phi}{dt}$$



几点说明:

(1) 如果被感应的线圈是N匝时，各圈的感应电动势应叠加，则整个线圈的总感应电动势应为：

$$\varepsilon = N \frac{d\phi}{dt}$$

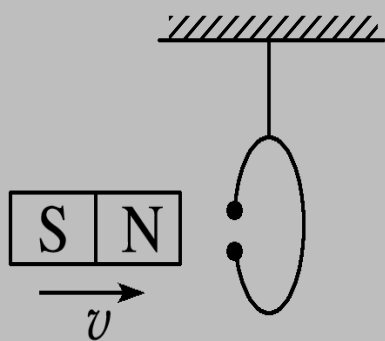
(2) 在回路中产生感应电动势的原因是由于通过回路平面的磁通量的变化，而不是磁通量本身，即使通过回路的磁通量很大，但只要它不随时间变化，回路中依然不会产生感应电动势。

而通过平面s的磁通量为 $\phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S} = BS \cos \theta$
单位：韦伯 (Wb) $1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \times \text{m}^2$

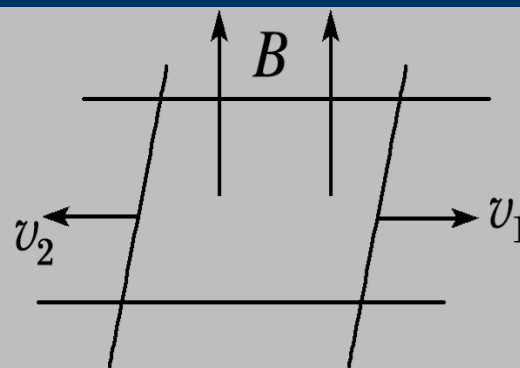
所以引起磁通量变化可以是：

磁感应强度随时间变化，回路的面积随时间变化，
也可以它们之间的夹角在随时间变化。

【例题】下列图中能产生感应电流的是(B)

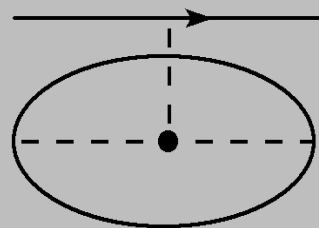


A

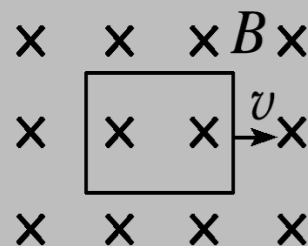


B

通入增大的电流



C



D

三.电动势

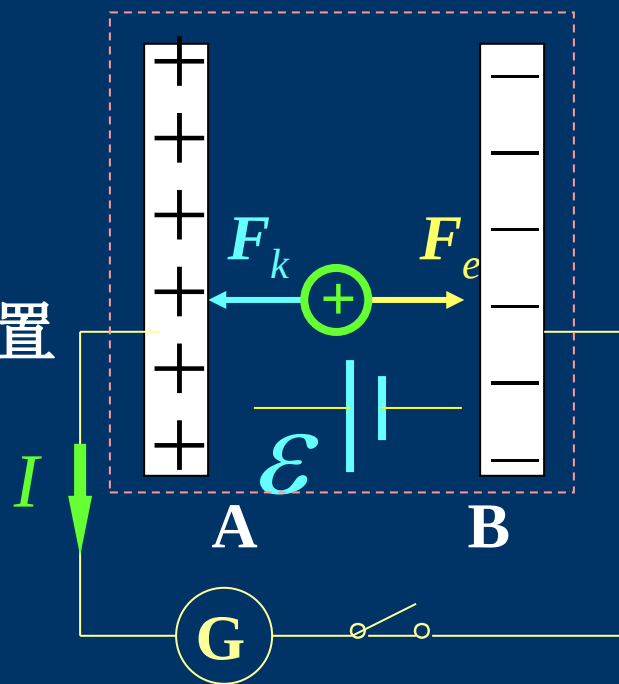
要求在电源内电路中存在一种能反抗静电力、并把正电荷由负极低电势处推向正极高电势处的非静电力 F_k

什么装置能提供非静电力？

电源

能将其他形式的能量转化为电能的装置

例：干电池、发电机、太阳能电池



思考：如何衡量一个电源搬运电荷的能力呢？

$$\vec{E}_k = \frac{\vec{F}_k}{q} \quad E_k \text{表示非静电性场强}$$

$$A_k = \int_{-(\text{电源内})}^{+} \vec{F}_k \cdot d\vec{l} = q \int_{-(\text{电源内})}^{+} \vec{E}_k \cdot d\vec{l}$$

电动势：非静电力 F_k 把单位正电荷负极通过电源内部搬到正极所作的功

通过这段描述，你知道电动势的单位吗？

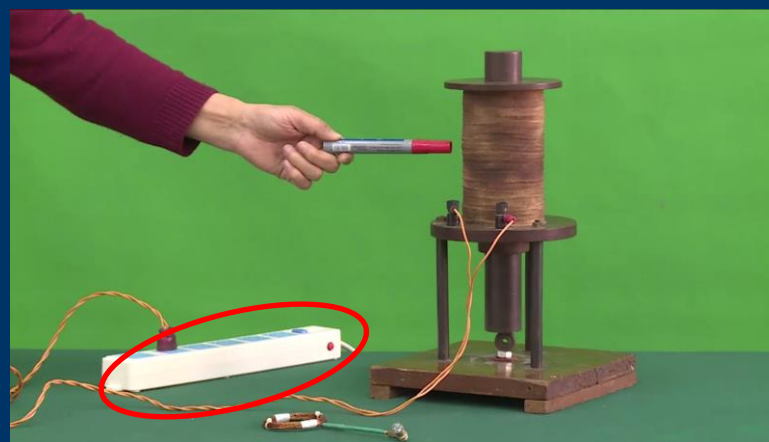
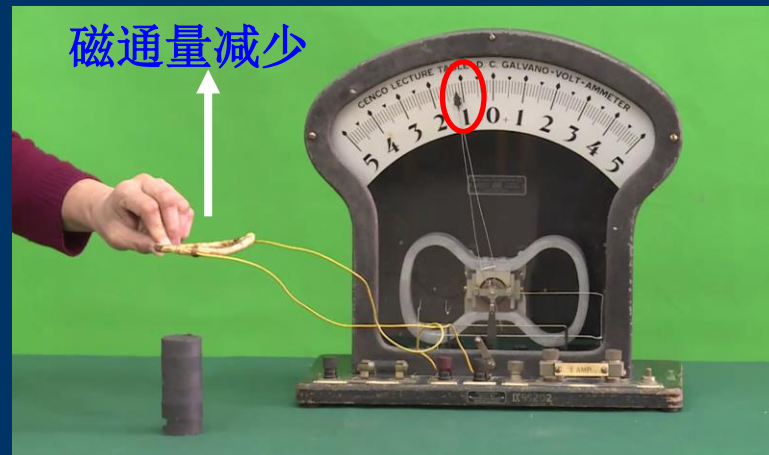
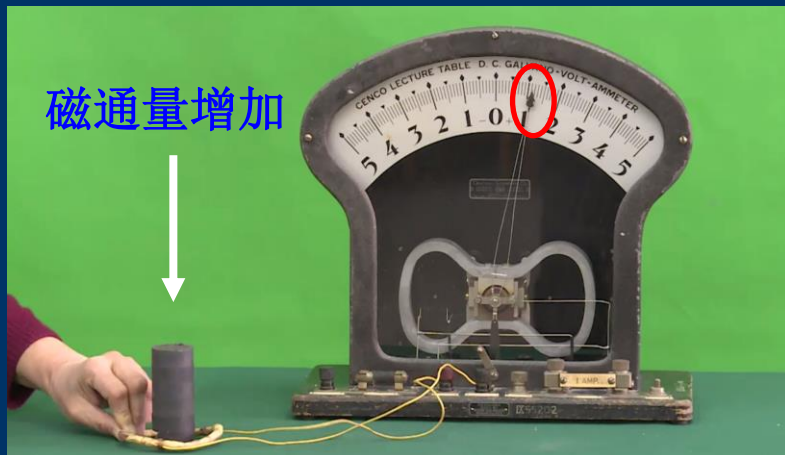


$$\mathcal{E} = \int_{-(\text{电源内})}^{+} \vec{E}_k \cdot d\vec{l}$$

- (1) $\mathcal{E}$ 反映电源作功能力，与外电路无关；
- (2) $\mathcal{E}$ 是标量，规定其方向为电源内部电势升高的方向；

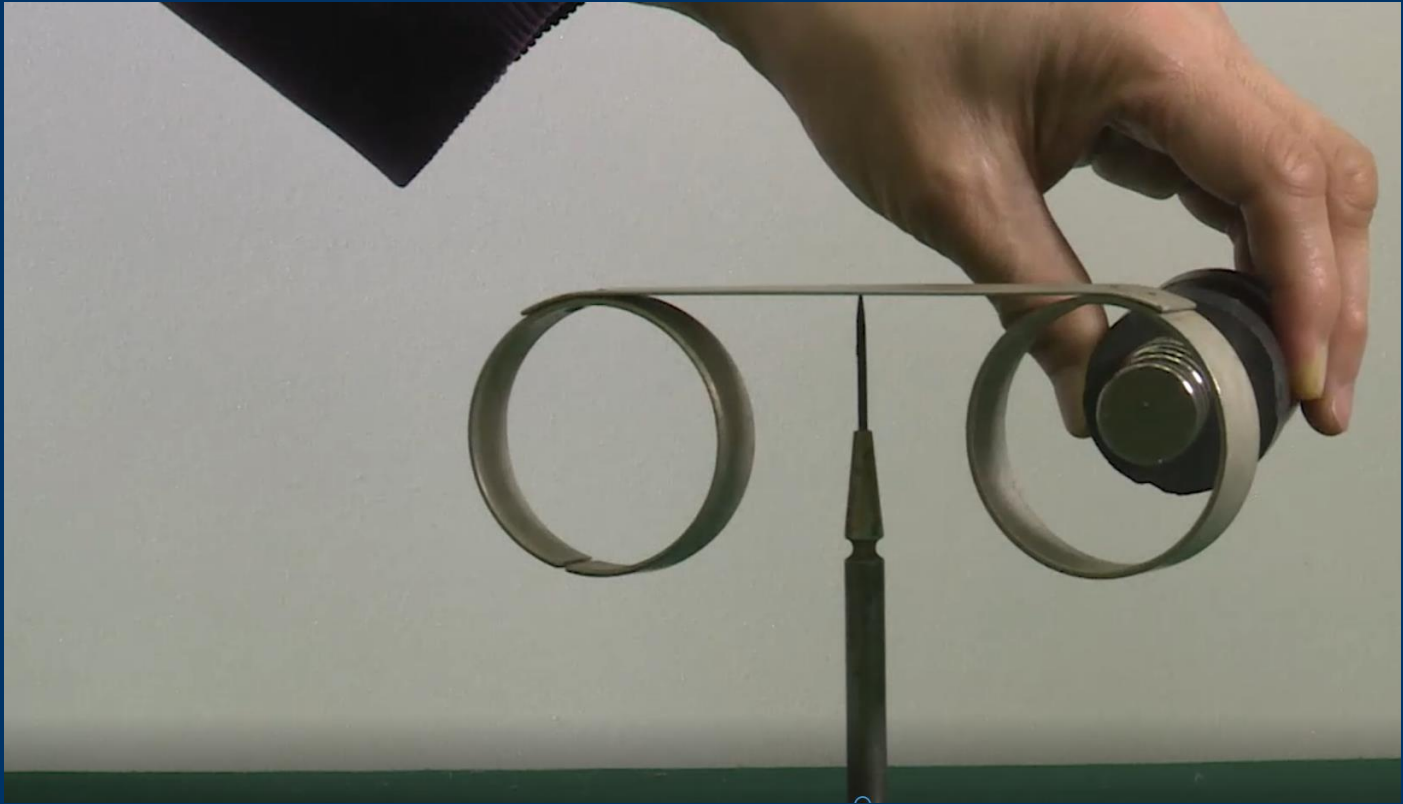
四. 电动势方向

移动-改变磁场强度-改变闭合线圈磁通量



交变电流-改变磁场强度-改变闭合线圈磁通量

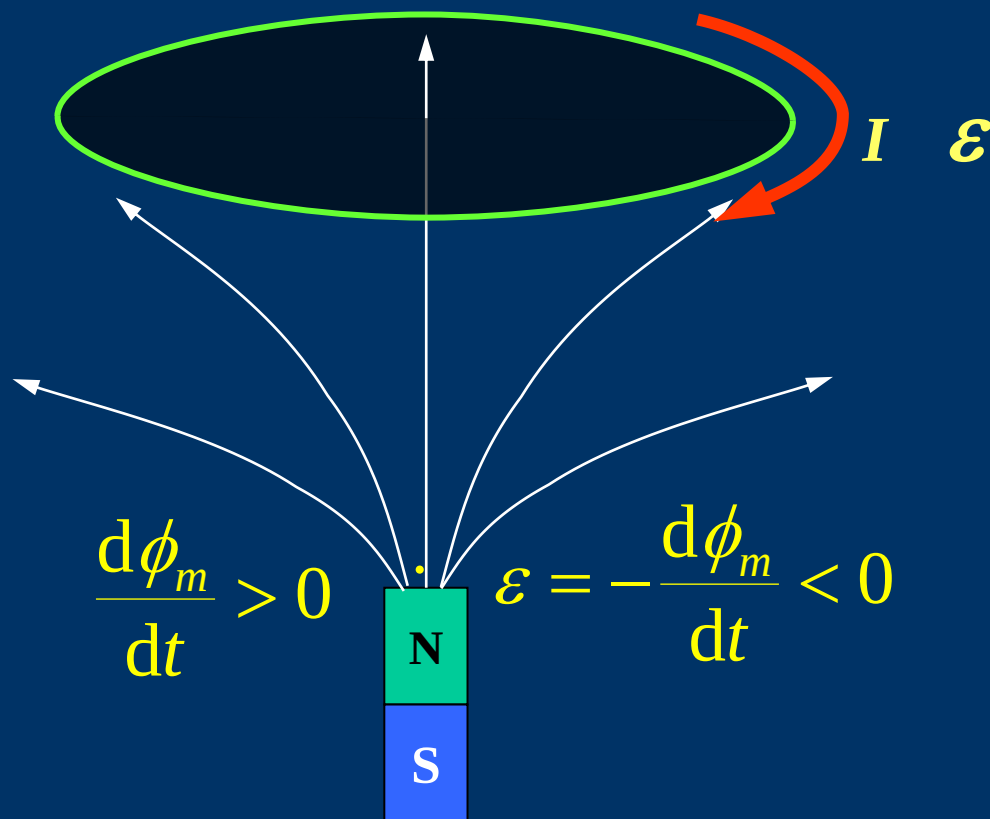
四. 电动势方向



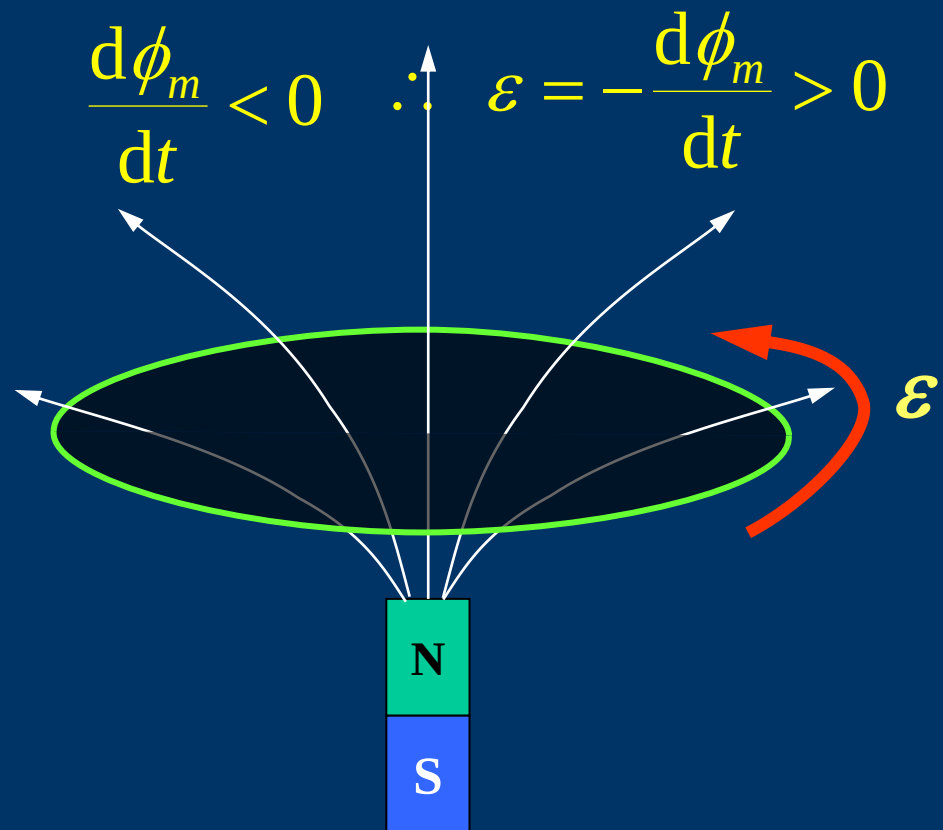
移动-改变闭合线圈磁通量 产生感应电动势

产生感应电流 磁场的相互作用产生了力

楞次定律



反抗磁通的变化



反抗磁通的变化

■ 楞次定律

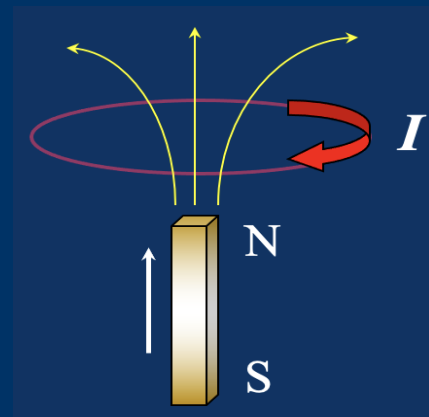
感应电流具有这样的方向，即感应电流的磁场总要**阻碍引起**感应电流的磁通量的变化

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

■ 为什么感应电动势的“方向”必须是楞次定律所规定的？

这是**能量守恒定律**所要求的。

譬如：当磁铁插入线圈时，按照楞次定律，感应电流激发的磁通量应抵消原磁通量的改变，**线圈将对磁棒产生排斥力**，阻碍磁棒继续往上插入。所以，**要使感应电流连续不断，则外界必须克服排斥力对磁棒做功**。因此，线圈中感应电流的获得，即电能的获得，是以消耗机械能为代价的。

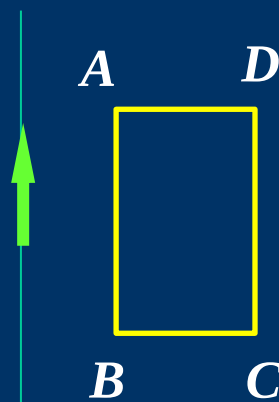


Φ 、 $\Delta\Phi$ 、 $\Delta\Phi/\Delta t$ 的意义

	物理意义	与电磁感应关系
磁通量 Φ	穿过回路的磁感线的条数多少	没有直接关系
磁通量变化 $\Delta\Phi$	穿过回路的磁通量变化了多少	产生感应电动势的条件
磁通量变化率 $\Delta\Phi/\Delta t$	穿过回路的磁通量变化的快慢	决定感应电动势的大小

矩形线圈ABCD位于通电长直导线附近，线圈与导线在一个平面内，线圈的两个边与导线平行。下列哪种情况线圈中产生感应电流？

- (1) 在这个平面内，线圈远离或靠近长直导线时； ✓
- (2) 在这个平面内，线圈沿着平行与导线的方向上下运动时； ✗
- (3) 线圈以AB边为轴转动时； ✓
- (4) 线圈以AD边为轴转动时； ✓
- (5) 线圈以长直导线为轴转动时； ✗
- (6) 长直导线中的电流发生变化时； ✓
- (7) 在中心点不变的情况下，把矩形线圈ABCD拉成圆形时。 ✓



题：无限直导线通电流 I 置于真空中，其中 $I = I_0 \sin \omega t$

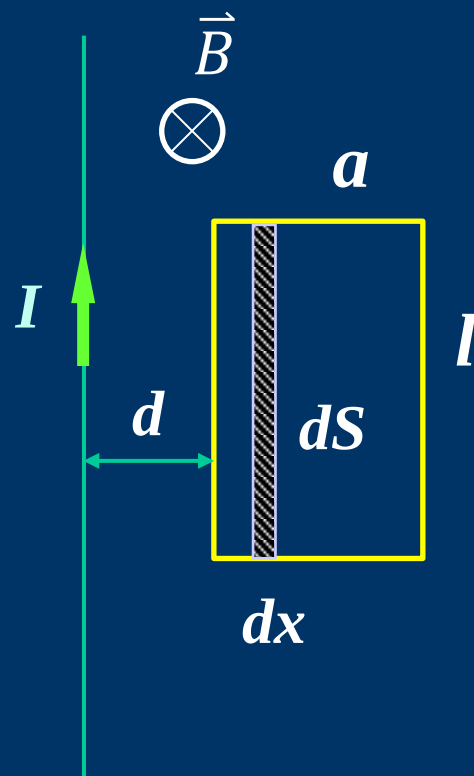
求：与其共面的矩形回路中的感应电动势

已知无限长直流导线产生的磁场 $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi x}$

解：在任意坐标处取一面元 dS

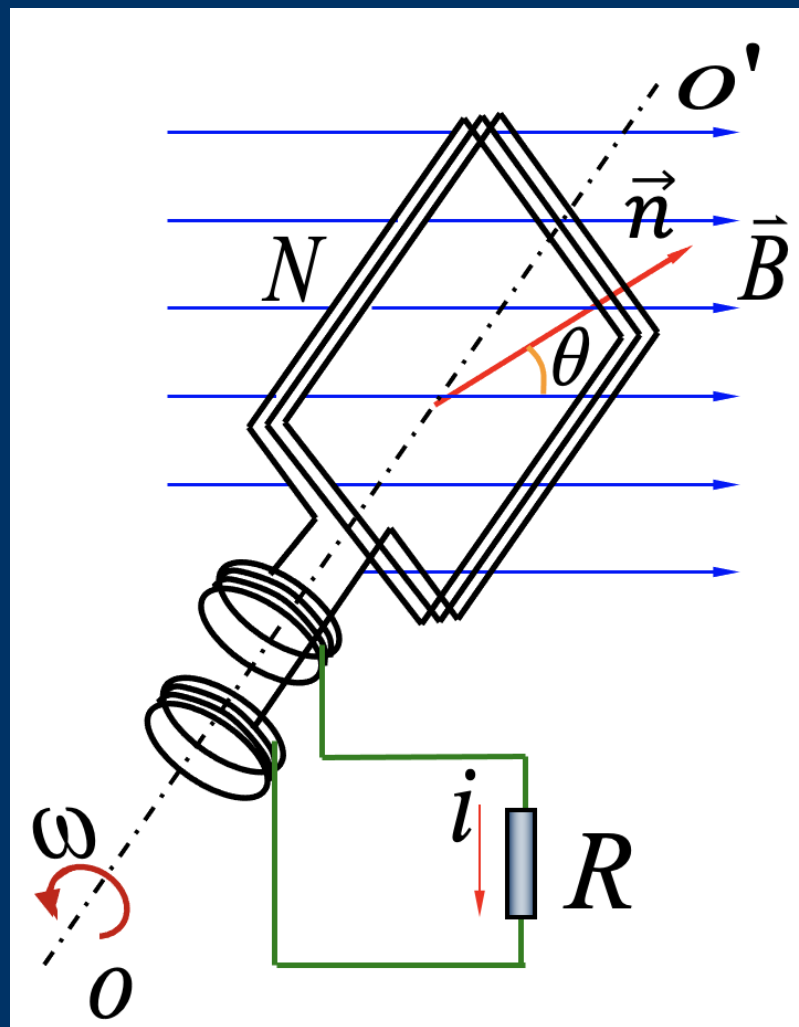
$$\begin{aligned}\varphi &= \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \iint_S B dS \\ &= \int_d^{d+a} \frac{\mu_0 I}{2\pi x} l dx = \frac{\mu_0 I l}{2\pi} \ln \frac{d+a}{d}\end{aligned}$$

$$\varepsilon = -\frac{d\varphi}{dt} = -\frac{\mu_0 N I_0 l \omega}{2\pi} \cos \omega t \ln \frac{d+a}{d}$$



例 在匀强磁场中，置有面积为 S 的可绕轴转动的 N 匝线圈。若线圈以角速度 ω 作匀速转动。

求 线圈中的感应电动势。



解 设 $t=0$ 时,

$\vec{n}$ 与 $\vec{B}$ 同向,

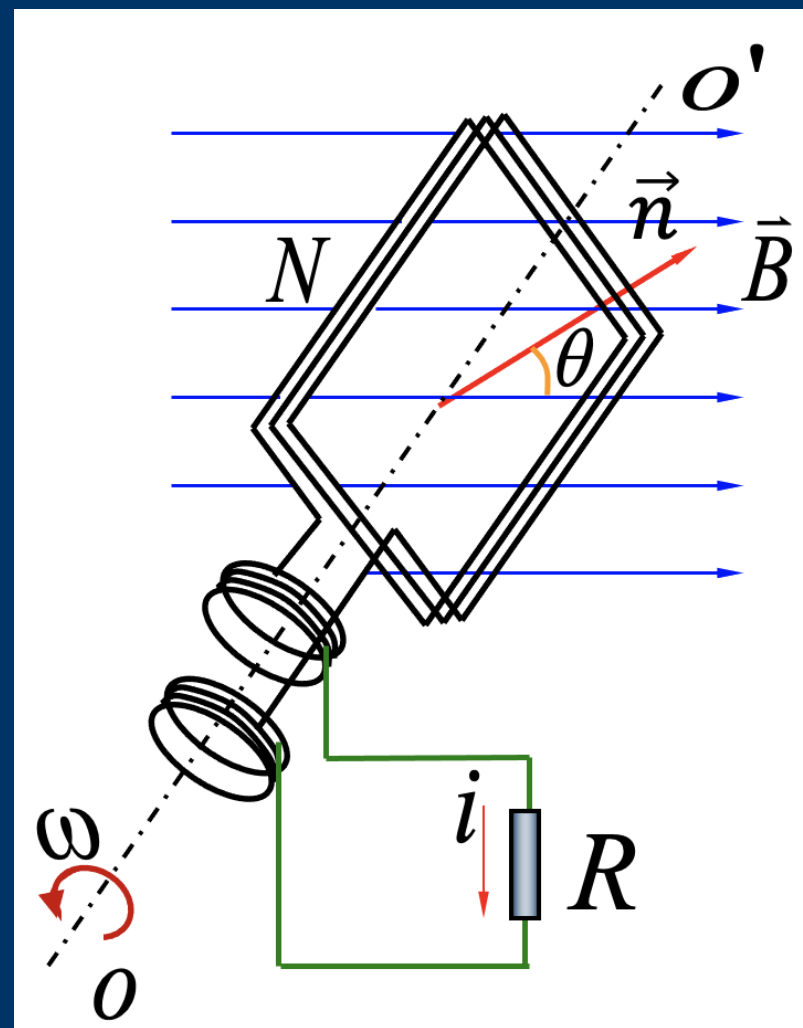
则 $\theta = \omega t$

$$\Psi = N\Phi_m = NBS \cos\omega t$$

$$\begin{aligned}\varepsilon &= -\frac{d\Psi}{dt} \\ &= NBS\omega \sin\omega t\end{aligned}$$

另 $\varepsilon_m = NBS\omega$

则 $\varepsilon_i = \varepsilon_m \sin\omega t$

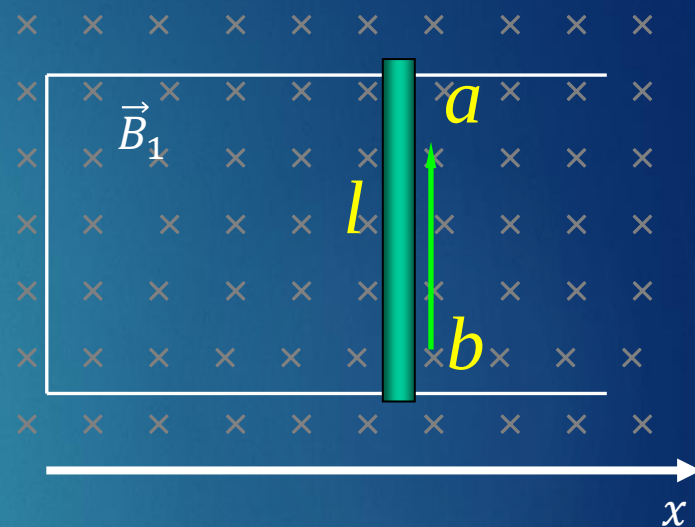


1

在如图所示的闭合区域存在有随时间变化的磁场， $B_1(t) = B_0 t$ ，($B_0 > 0$)

以下说法正确的是

- ☐ A 闭合回路中无 ε ，无 I
- ☐ B 闭合回路中有 ε ，有 I ，方向为顺时针
- ☐ C 闭合回路中有 ε ，有 I ，方向为逆时针
- ☐ D 闭合回路中有 ε ，无 I ，方向为逆时针



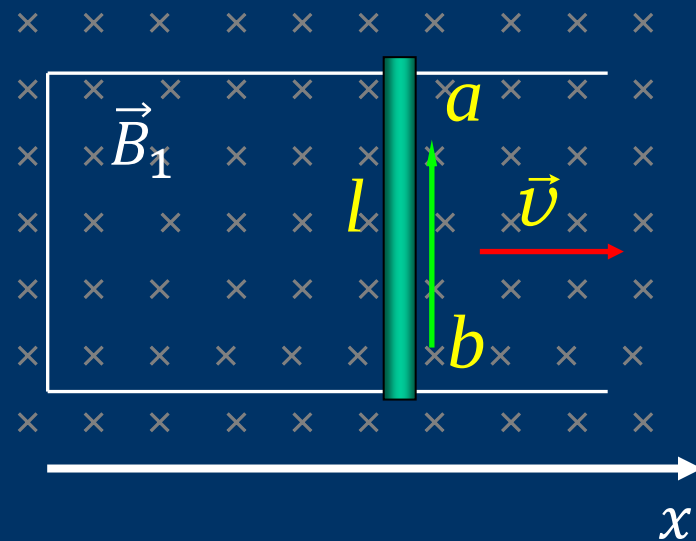
提交

例 匀强磁场中，导线可在导轨上滑动

求 回路中感应电动势

解 在任一时刻 $\phi_m = B_1 \cdot lx$

$$\varepsilon = \frac{d\phi_m}{dt} = B_1 l \cdot \frac{dx}{dt} = B_1 lv$$



若导线停留在 x_0 处固定不动，变化的磁场为 $B_1(t) = B_0 t$

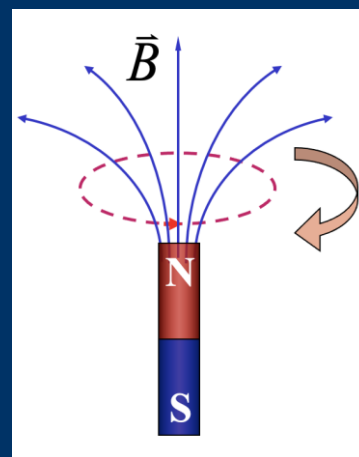
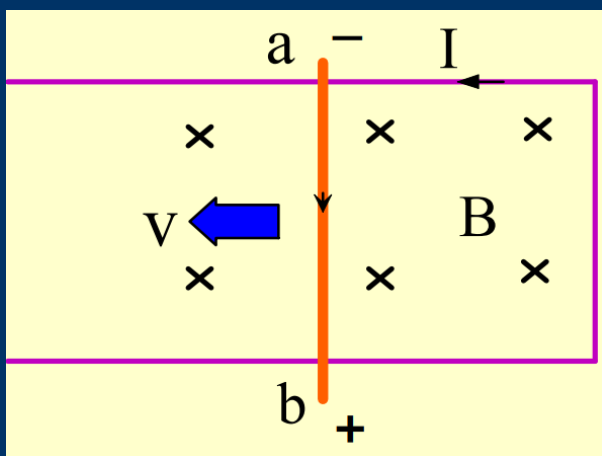
在任一时刻 $\phi_m = B_1 \cdot lx_0$ $\varepsilon = \frac{d\phi_m}{dt} = lx_0 \cdot \frac{dB_1}{dt} = lx_0 \cdot B_0$

思考：如果导线滑动、同时磁场变化，如何处理？

在任一时刻 $\phi_m = B_1 \cdot lx$ $\varepsilon = \frac{d\phi_m}{dt} = B_0 tlv + B_0 lx$

动生电动势与感生电动势

- **动生电动势**——导体回路或其一部分在磁场中运动，使其回路面积或回路的法线与磁感应强度 B 的夹角随时间变化，从而使回路中的磁通量发生变化；
- **感生电动势**——回路不动，磁感强度随时间变化，从而使通过回路的磁通量发生变化。



动生电动势

动生电动势的非静电力场来源



洛伦兹力

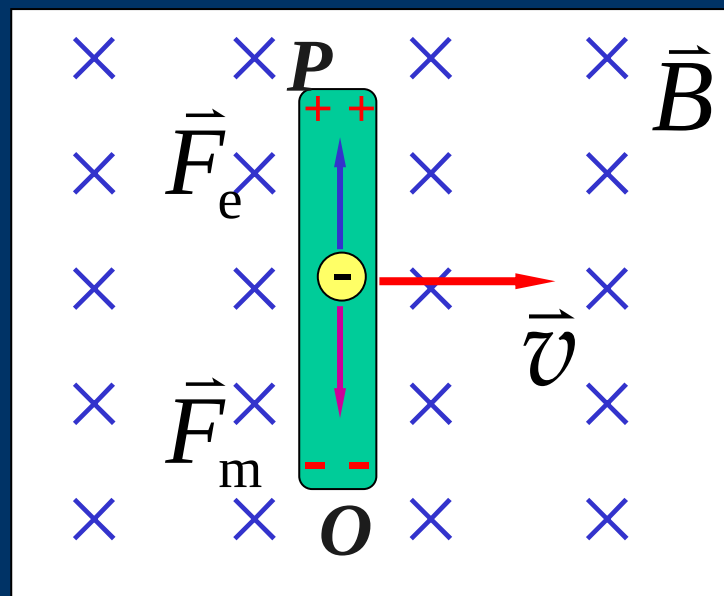
$$\vec{F}_m = (-e) \vec{v} \times \vec{B}$$

平衡时 $\vec{F}_m = -\vec{F}_e = -e\vec{E}_k$

$$\vec{E}_k = \frac{\vec{F}_m}{-e} = \vec{v} \times \vec{B}$$

$$\varepsilon_i = \int_{OP} \vec{E}_k \cdot d\vec{l} = \int_{OP} (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}$$

若杆长为 l $\varepsilon_i = \int_0^l vBdl = vBl$



感生电动势

变化的磁场在其周围空间要激发一种电场，这个电场叫做 **感生电场**，也称**涡旋电场**。正是由于感生电场的存在，才在闭合回路中形成感生电动势。

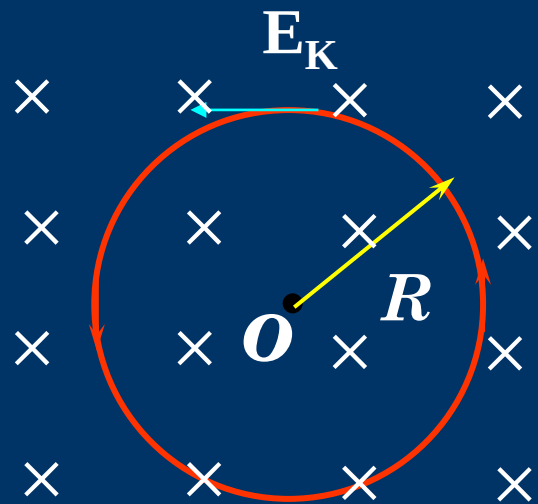
感生电场

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

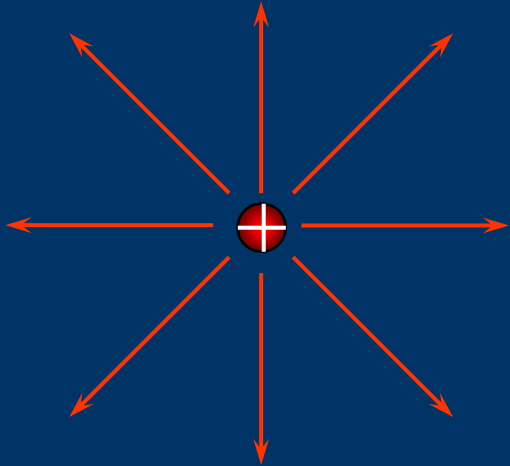
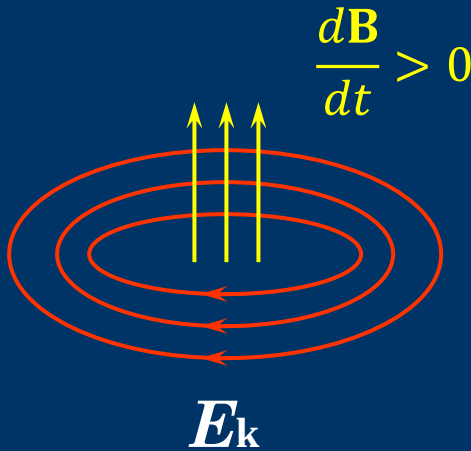
感生电动势

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

$$= -\frac{d\Phi_m}{dt} = -\iint \frac{\partial B}{\partial t} \cdot dS$$



感生电场与静电场的区别

	静电场 E	感生电场 $E_{\text{感}}$
起源	由静止电荷激发	由变化的磁场激发
电场线形状	电场线为非闭合曲线  静电场-有源无旋	电场线为闭合曲线  感生电场-无源有旋

1 穿过一个电阻为 1Ω 的单匝闭合线圈的磁通量始终是每秒均匀减少 2Wb ，则

A 线圈中的感应电动势一定是每秒减少 2V

B 线圈中的感应电动势一定是 2V

C 线圈中的感应电流一定是每秒减少 2A

D 线圈中的感应电流一定是 2A

提交

电磁感应现象的应用

法拉第的圆盘发电机——人类第一台发电机

1831年圣诞节前夕，一次科学报告会上，法拉第当众表演了一个实验。一个铜盘的轴和铜盘的边缘分别连在“电流表”的两端。法拉第摇动手柄使铜盘在磁极之间旋转，“电流表”的指针随之摆动。这是最早的发电机。



现代发电机

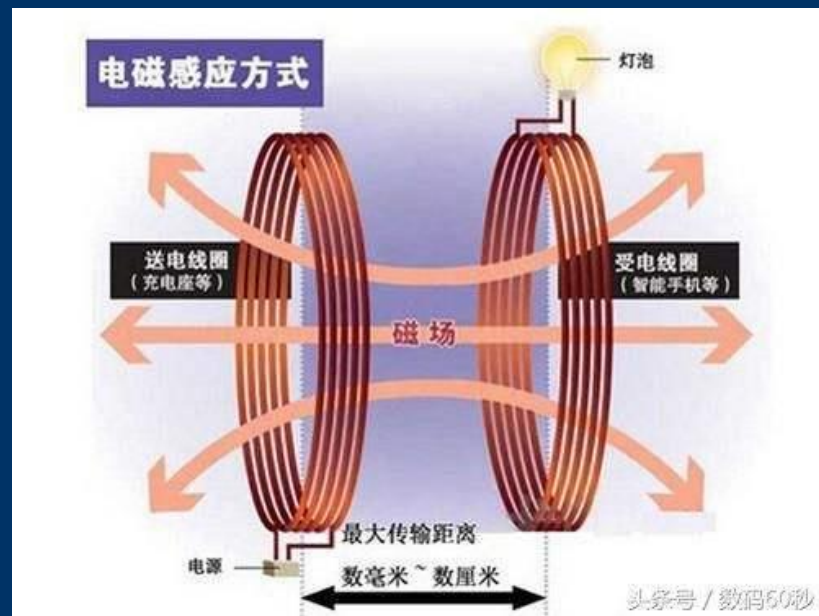


三峡电站一台发电机的转子



生活中的变压器

感应电流的应用

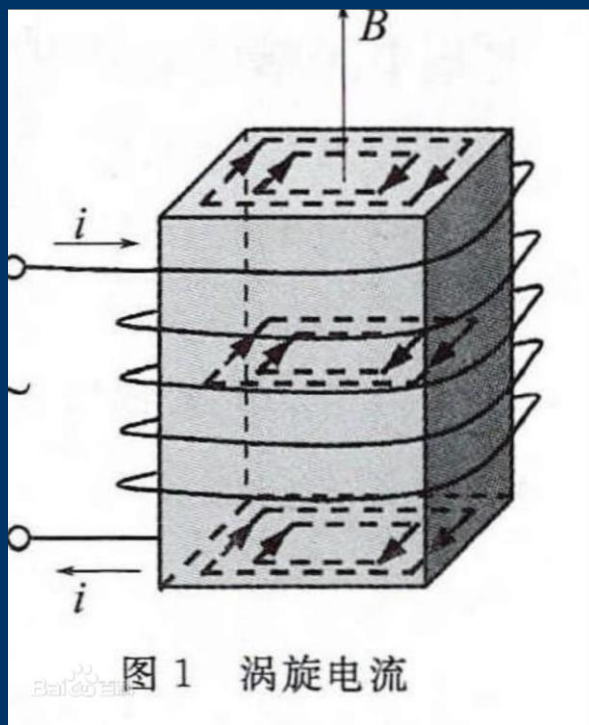


电磁感应式无线充电



感应电流的应用

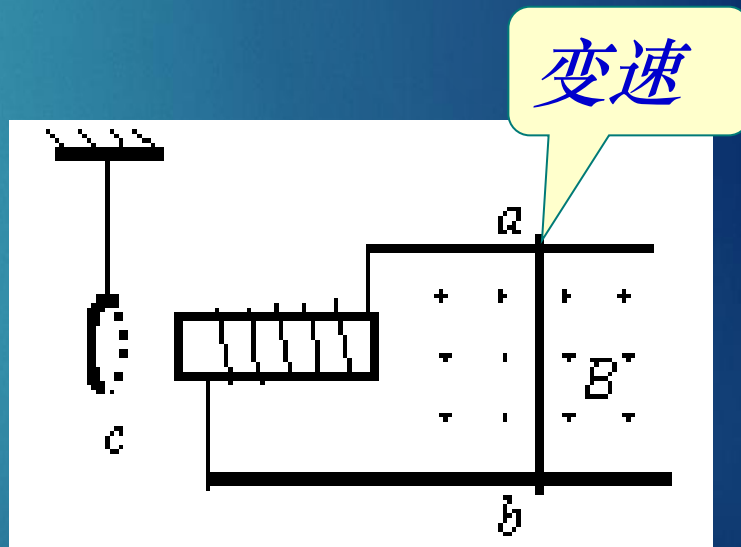
感应熔炼炉



1 如图所示，金属导轨上的导体棒 ab 在匀强磁场中沿导轨做下列哪种运动时，线圈 c 中将有感应电流产生

思考：判断的依据？

- ☐ A 向右做匀速运动
- ☐ B 向左做匀速运动
- ☐ C 向右做减速运动
- ☐ D 向左做加速运动



1

单匝矩形线圈在匀强磁场中匀速转动，若线圈所围面积里磁通量随时间变化的规律如图所示（正弦图象一部分），则

思考：判断的依据？

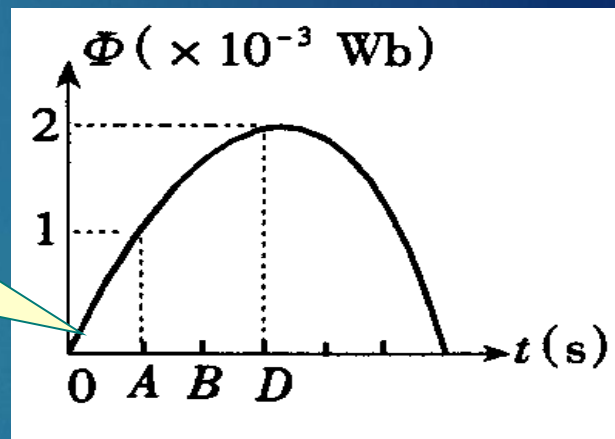
A 线圈中0时刻感应电动势为0

B 线圈中0时刻感

斜率表示 Φ 的变化率

C 线圈中D时刻感应电动势为0

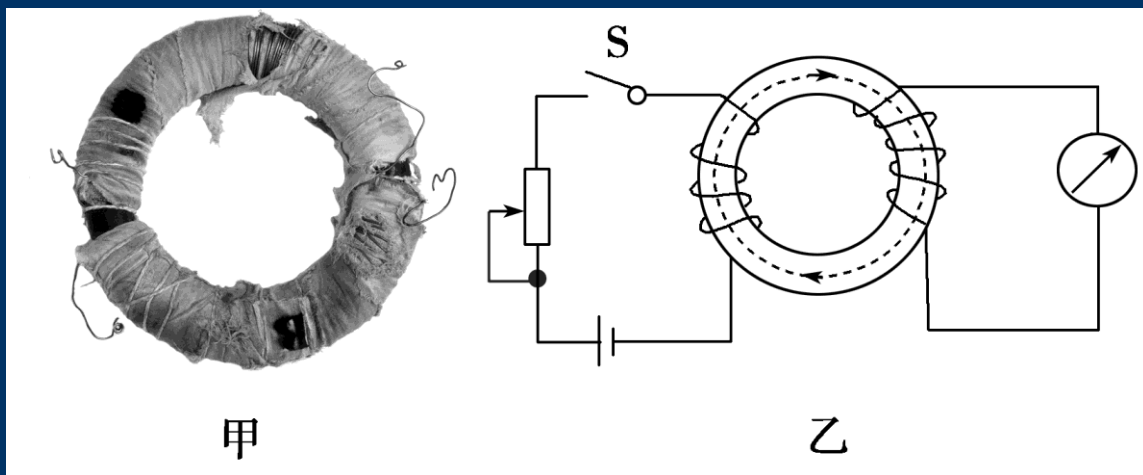
D 线圈中A时刻感应电动势大于B时刻感应电动势



提交

如图所示，A、B为俩线圈，绕在铁环上，则实验中不会使电流表指针发生偏转的是（ A ）

- A. 保持开关闭合
- B. 开关闭合瞬间
- C. 开关断开瞬间
- D. 移动变阻器滑片

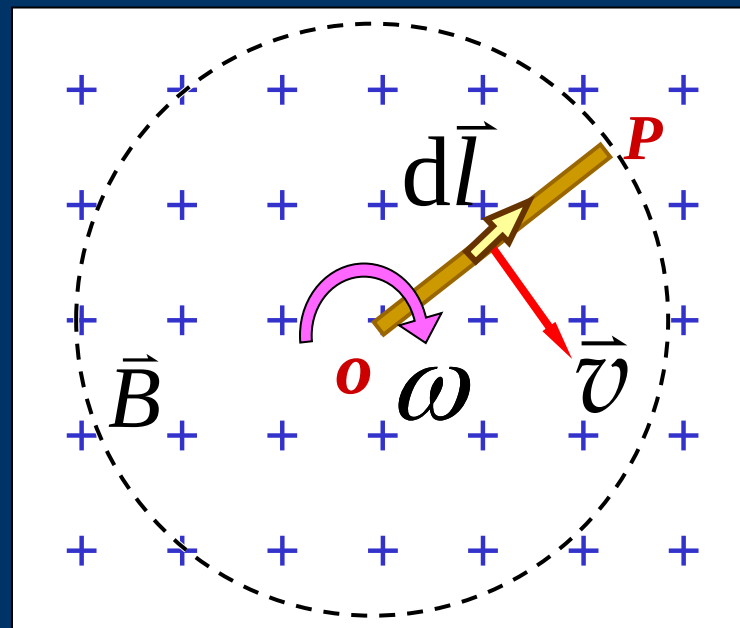


例 一长为 L 的铜棒在磁感强度为 B 的均匀磁场中,以角速度 ω 在与磁场方向垂直的平面上绕棒的一端转动,求铜棒两端的感应电动势.

解 $d\varepsilon_i = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} = vBdl$

$$\varepsilon_i = \int_0^L vBdl = \int_0^L \omega l B dl$$

$$\varepsilon_i = \frac{1}{2} B \omega L^2$$



ε 方向 $O \longrightarrow P$

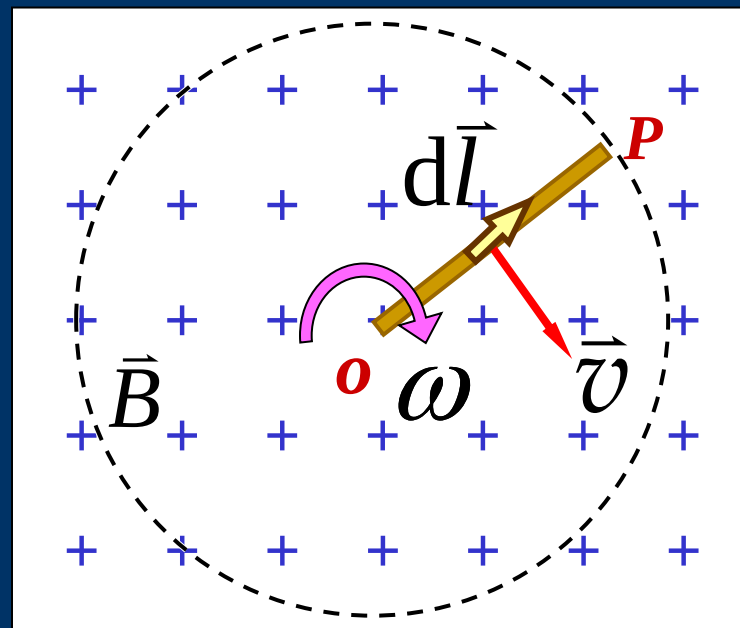
(点 P 的电势高于点 O 的电势)

例 一长为 L 的铜棒在磁感强度为 B 的均匀磁场中,以角速度 ω 在与磁场方向垂直的平面上绕棒的一端转动,求铜棒两端的感应电动势.

解 $d\varepsilon_i = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} = vBdl$

$$\varepsilon_i = \int_0^L vBdl = \int_0^L \omega l B dl$$

$$\varepsilon_i = \frac{1}{2} B \omega L^2$$



ε 方向 $O \longrightarrow P$

(点 P 的电势高于点 O 的电势)

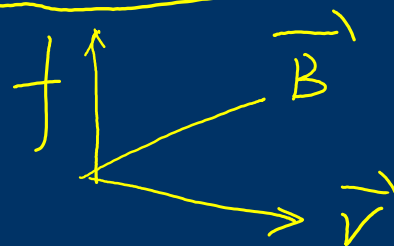
$$\vec{B} \rightarrow \vec{\Phi} = \vec{B} \cdot \vec{S}$$

$$\vec{f} = (q\vec{v} \times \vec{B}) \quad \text{洛伦兹力}$$

霍尔效应

E_H

mg



四叉穴, 电子

$\vec{F}$

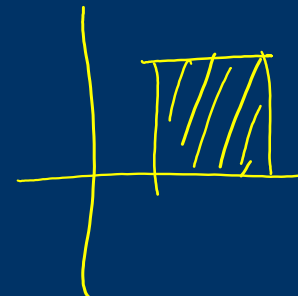
安培力 $\vec{F} = I\vec{L} \times \vec{B} \rightarrow$ 磁力矩 $\vec{M} = I\vec{S} \times \vec{B}$

电磁感应定律

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

~~楞次定律~~ 楞次定律.

基本概念 $\rightarrow$ 计算.



平衡态, 准静态过程

P, V, T 不随时间变化. $\bar{v}_x = \bar{v}_y = \bar{v}_z = 0$

理想气体方程 $pV = \nu RT \rightarrow p = n k T \quad k = \frac{R}{\nu}$

温度: 热力学第零定律.

Q, A 过程量

$$\star \quad \underbrace{Q = \Delta E + A}_{\substack{\text{热量} \quad \text{内能变化}}} \quad \text{热力学第一定律}$$

ΔE - 状态量

动能. 势能 -

$$\bar{\epsilon} = \frac{3}{2} kT \rightarrow \frac{E(T)}{\Delta E} = \nu C_V \Delta T$$

定体热容 C_V $R/2$ C_P

等压, 等体, 等压, 绝热

$$P \downarrow V = C \quad P \uparrow V = C \quad \frac{V}{T} = C \quad P V^\gamma = C$$

$$\Delta E = 0 \quad A \Rightarrow A = P \Delta V \quad Q = 0$$

$$Q = A \quad Q = \Delta E$$

$$\Delta E = -A$$

循环



$$\eta = \frac{A}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

卡诺循环

$$1 - \frac{T_2}{T_1}$$

$$Q = \Delta E + A$$

$$C_p = C_v + R$$

$$\Delta E = \nu C_v \Delta T$$

等, 等, 等

$$\frac{1}{2} R$$

$$\eta = \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$$

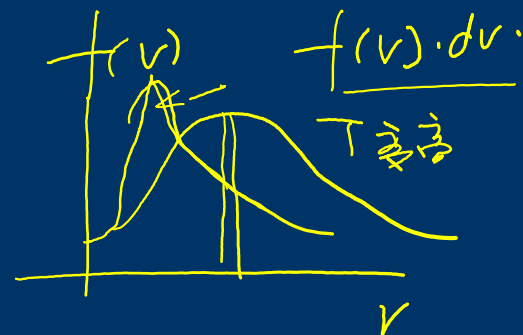
$$\frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

$$p = \frac{2}{3} n \bar{\epsilon} = nkT \rightarrow \bar{\epsilon} = \frac{3}{2} kT = \frac{1}{2} m \bar{v}^2$$

能量均分 $\rightarrow \bar{\epsilon} = \frac{1}{2} (\underbrace{t}_{\text{平动}} + \underbrace{r}_{\text{转动}}) kT \rightarrow C = \frac{i}{2} R$

$$f(v) = \frac{dN}{N dv}$$

$$\frac{dN}{N} = f(v) \cdot dv$$



$$\int_0^{\infty} f(v) dv = 1 = \int_0^{\infty} \frac{dN}{N}$$

$$\bar{v} \quad \bar{v}^2 \quad \bar{v}_p = \sqrt{\frac{2RT}{M}}$$