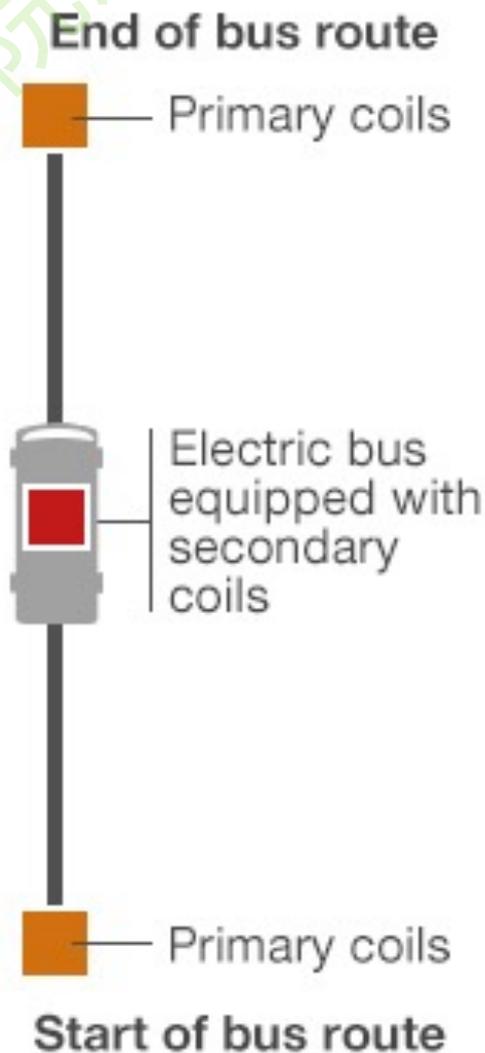


# 第6章 电磁感应与磁场的能量



Secondary coils  
(fixed to bus)



Primary coils  
(fixed to road)

# 第6章 电磁感应与磁场的能量

## § 6.1 电磁感应定律

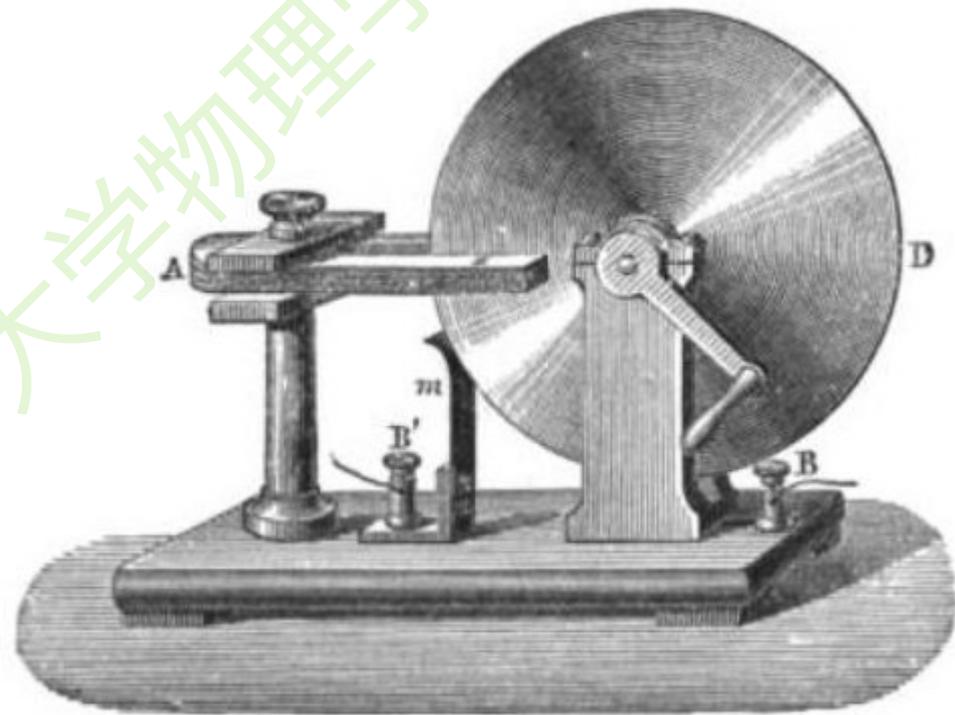
## § 6.2 感生电动势与动生电动势

## § 6.3 互感与自感

## § 6.4 似稳电路与暂态过程

## § 6.5 磁场的能量

# § 6.1 电磁感应定律



中国科学院大学物理学院唐

# 感应

电荷 → 使周围导体感应出电荷

磁体 → 使周围材料感应出磁性

电流 → 使周围的线圈感应出电流？

中国科学技术大学物理学院唐

## 电生磁？ OK

- 安培的分子电流假设
- 奥斯特的实验

电流的磁效应。电流产生磁场。

## 磁生电？ Maybe!

1820年，奥斯特发现电流磁效应。1821年，法拉第在英国《哲学年鉴》上发表了一篇评述文章。

法拉第（Faraday）认为电与磁是一对和谐对称的自然现象。

因而法拉第推理：**电流也可以由磁产生！**



Faraday's law of induction

Electrochemistry

Faraday effect

Faraday cage

Faraday constant

Faraday cup

Faraday's laws of electrolysis

Faraday paradox

Faraday rotator

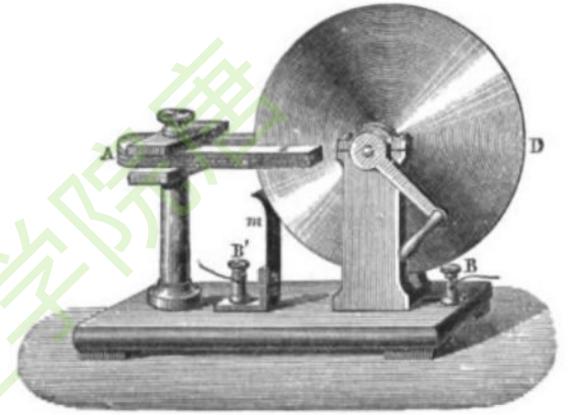
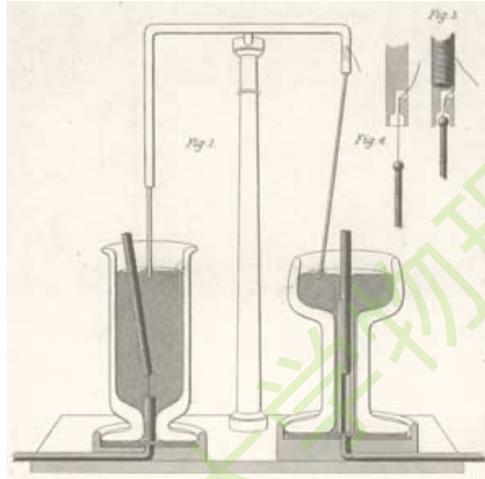
Faraday-efficiency effect

Faraday wave

Faraday wheel

Lines of force

- **1821年，发明了第一台电动机**



- **1831年，发明了第一台发电机**

- **1833年，证明摩擦起电和伏打电池产生的电相同。**
- **1834年，发现电解定律。**
- **1845年，发现磁光效应，并解释了物质的顺磁和抗磁性。**
- **他还详细研究了极化和静电感应现象，并首次用实验证明了电荷守恒定律。**

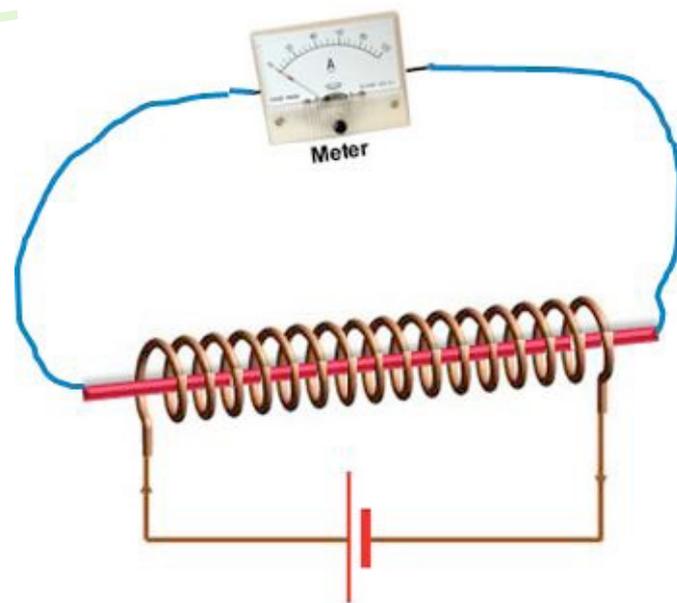
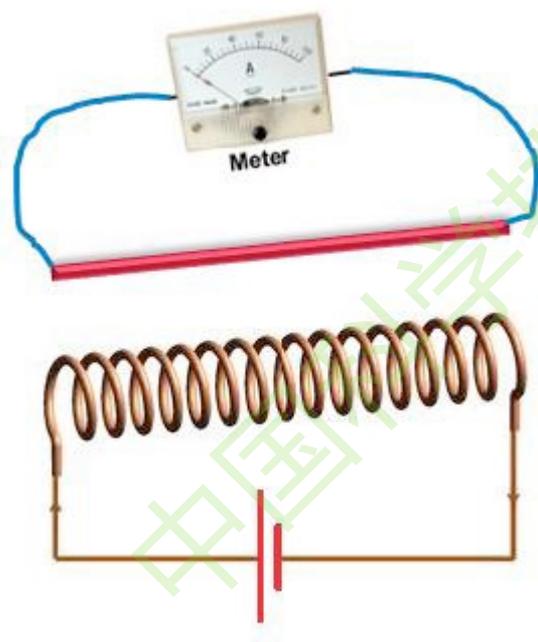
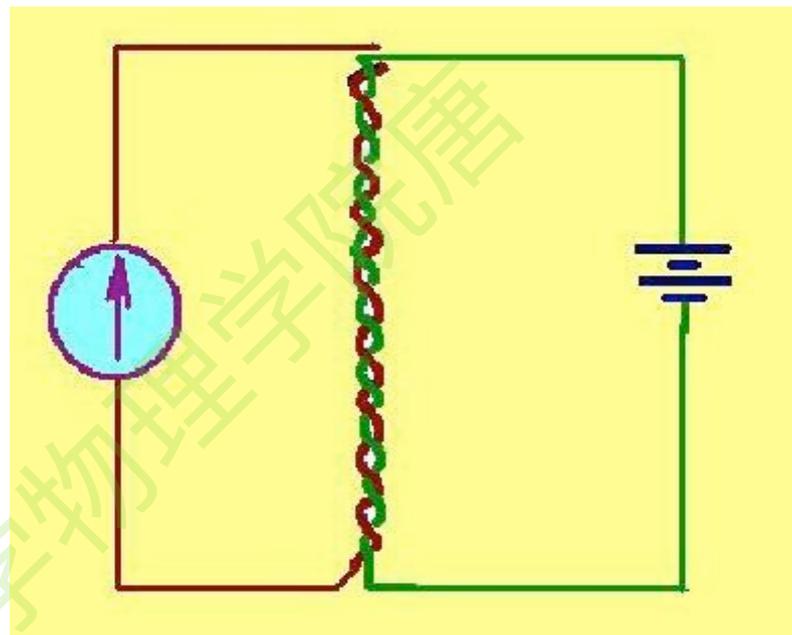
安培也曾探索过磁生电：1822年无意中发现一个电流能感应出另一个电流，安培和他的助手制成了过阻尼冲击电流计。但由于种种原因，安培忽视了这一重要的发现。

1823年，科拉顿（Colladon）用磁铁在螺线管中移动，试图产生电流。但电流计放在另一个房间，没有助手，来回跑。

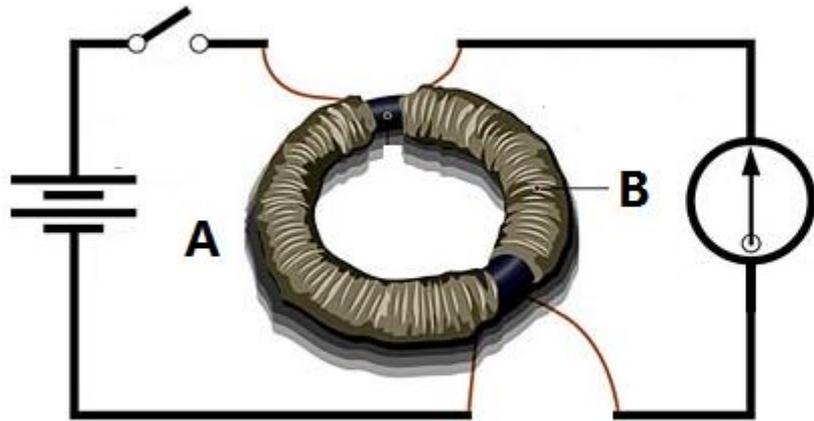
1824年，阿拉果（Arago）偶然发现金属可以阻尼磁针的振动。进一步联想，静止的磁针也可以被一个运动着的金属片带动。设计了“**Arago圆盘实验**”，运动的导体可以带动磁针旋转。震惊欧洲物理学界，留下多年来悬而未决的问题。法拉第称之为“**非凡的实验**”



1824-1828年，法拉第做了三次实验，但是都在稳态下进行的，没有发现“电生电”。



1831年夏，法拉第再次回到“磁生电”的课题上来。



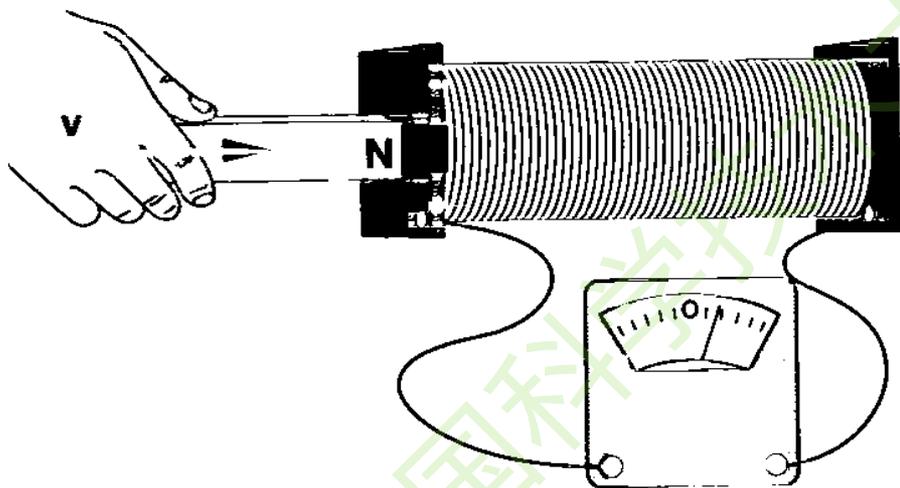
按下开关时，**“电生电”**！

断开开关时，也有“电生电”，感应电流方向相反。

通电线圈匝数变多时，“电生电”更剧烈。

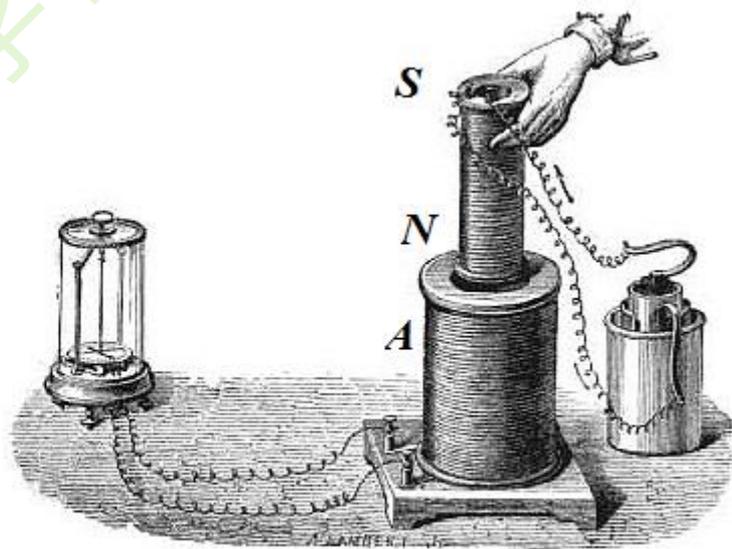
法拉第改用磁铁插入和拉出线圈。发现电流表的指针有偏转。

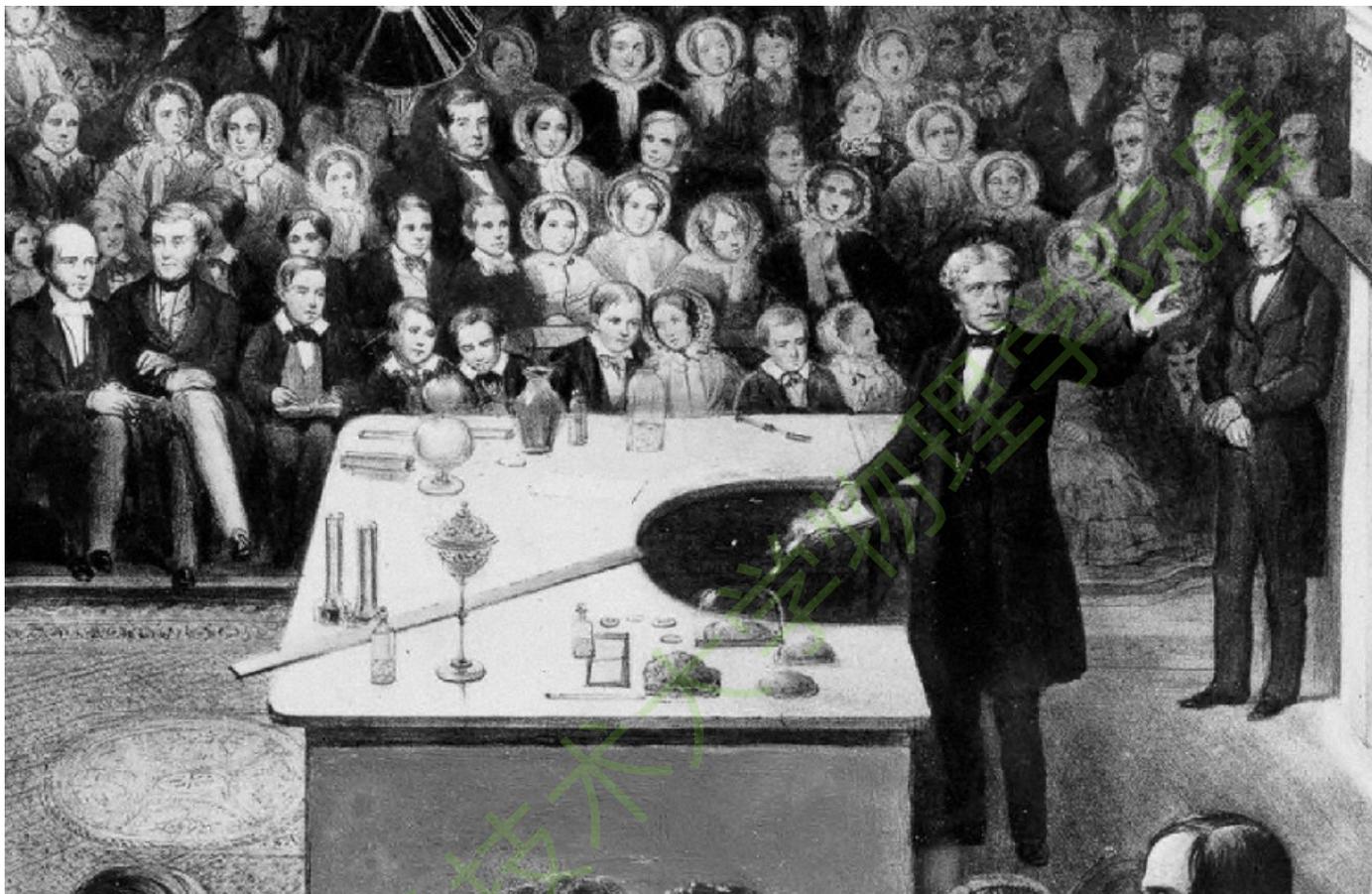
“磁生电”！



法拉第改用通电线圈代替磁铁插入和拉出线圈。发现电流表的指针仍然有偏转。

“电生磁” + “磁生电”！





- 《论电流的感应》
- 《论从磁产生电》
- 《论物质的一种新的电状态》
- 《论Arago的磁现象》

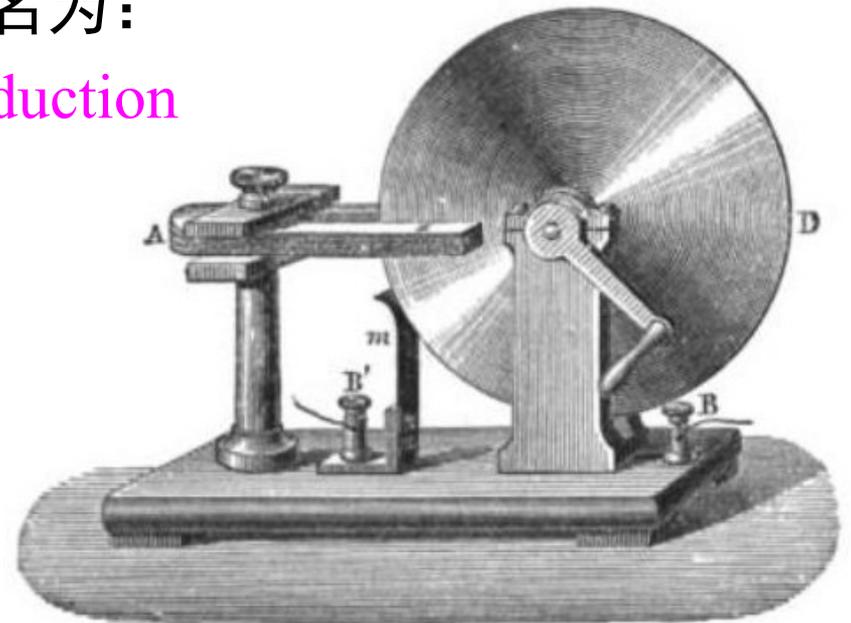
法拉第把产生感应电流的情况概括为五类：

- 变化的电流
- 变化的磁场
- 运动的恒定电流
- 运动的磁铁
- 在磁场中运动的导体

法拉第把发现的这种现象正式定名为：

“电磁感应” Electromagnetic induction

1831年，法拉第发明了世界上  
第一台发电机

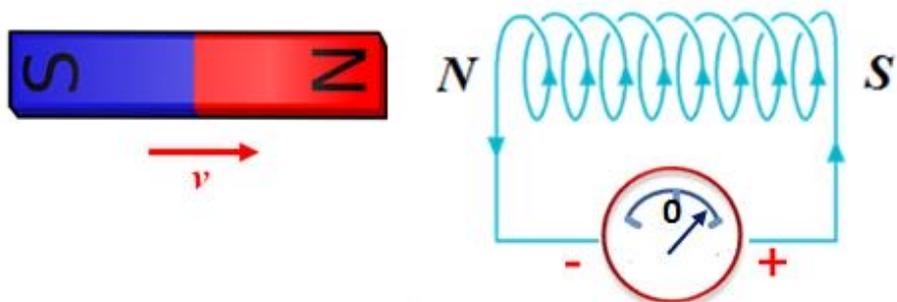


## § 6.1.2 法拉第电磁感应定律

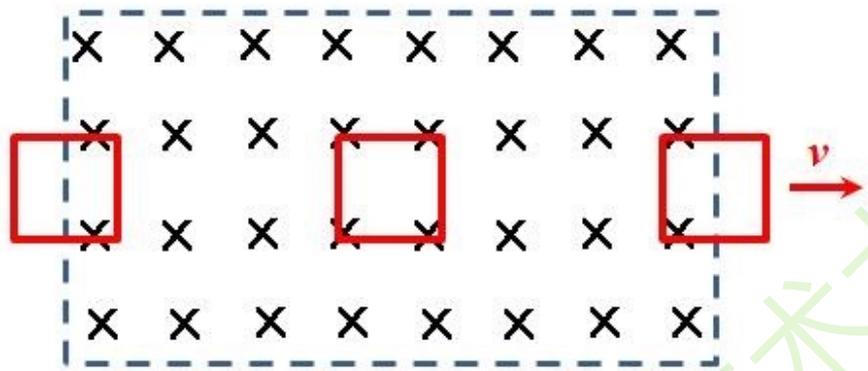
法拉第发现感应电流的产生是由于产生了与导体性质无关的**感应电动势**。

**法拉第电磁感应定律：**

当通过导体回路的**磁通量**发生改变时，回路中就有**感应电动势**的产生，进而产生感应电流。

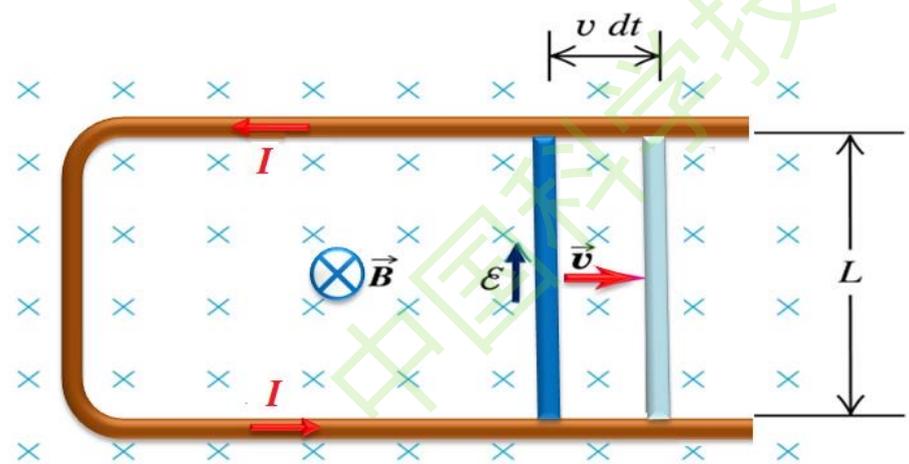


磁场的变化



导体回路在  
磁场中运动

磁通量  
的变化



回路中一部分  
导体做切割磁  
力线运动



## 感应电动势的大小：

与磁通量变化的快慢有关

或者说与磁通量随时间的变化率有关

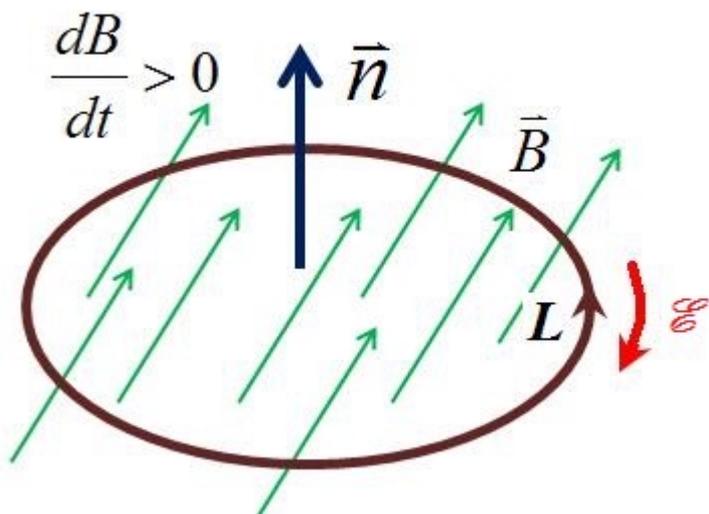
## 感应电动势的方向：

总是企图由它产生的感应电流建立一个附加磁通量，阻碍磁通量的变化。（“楞次定律”）

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

- 感应电动势比感应电流更本质，即使回路不闭合，仍有感应电动势的存在
- 感应电动势的产生原因是磁通量的变化，与原来磁通量的大小无关

## 感应电动势方向的确定

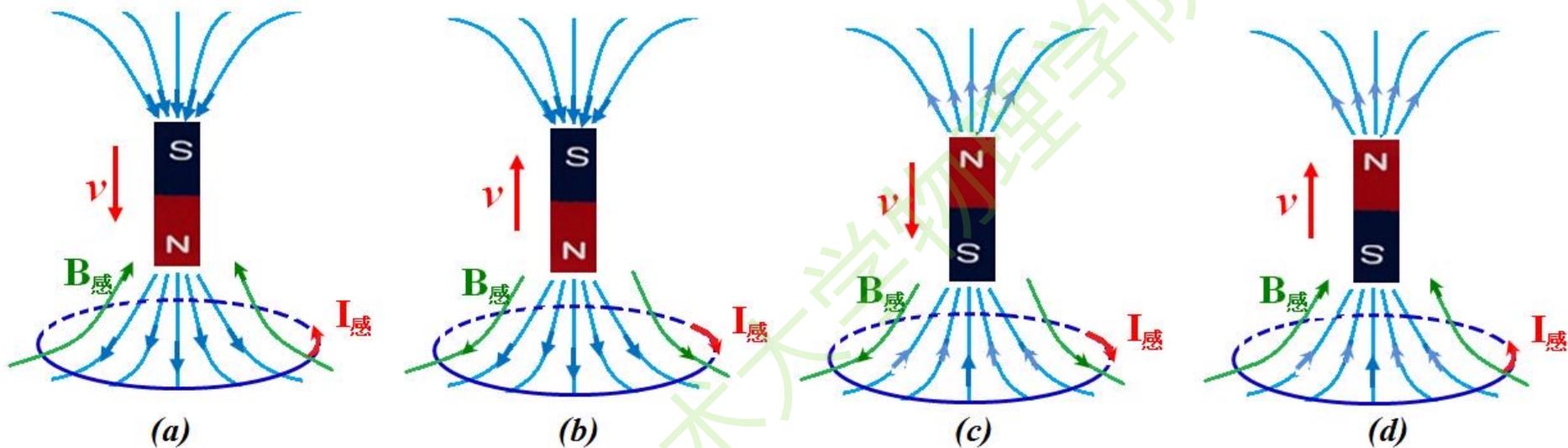


对闭合回路，根据回路的**绕行方向**，用**右手定则**确定磁通量的方向。

当**磁通量变大**，感应电动势方向与回路绕行方向**相反**

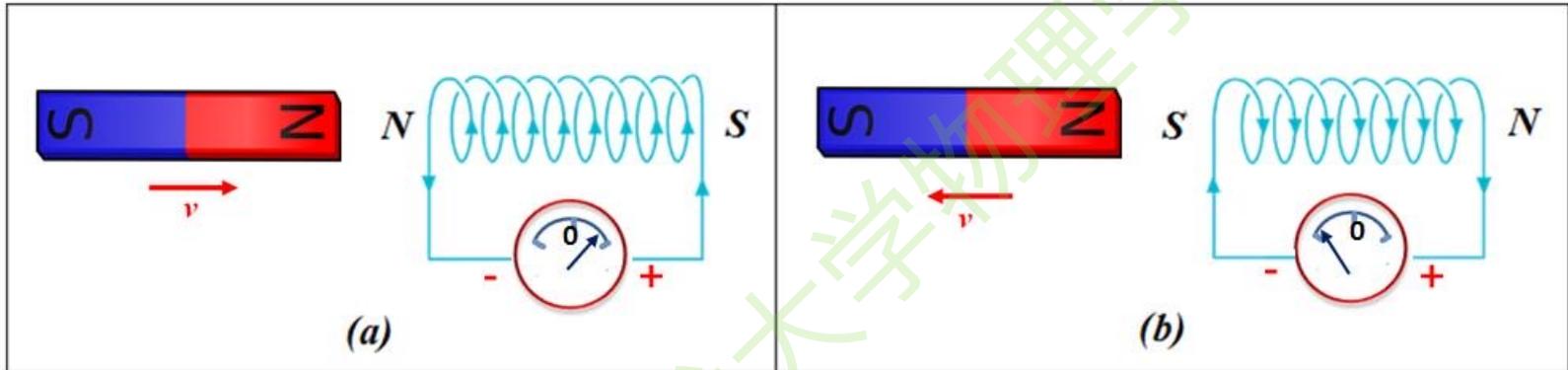
当**磁通量变小**，感应电动势方向与回路绕行方向**相同**

但仍然可以用楞次定律来判断感应电动势（电流）方向



# 楞次定律的实质是能量守恒定律

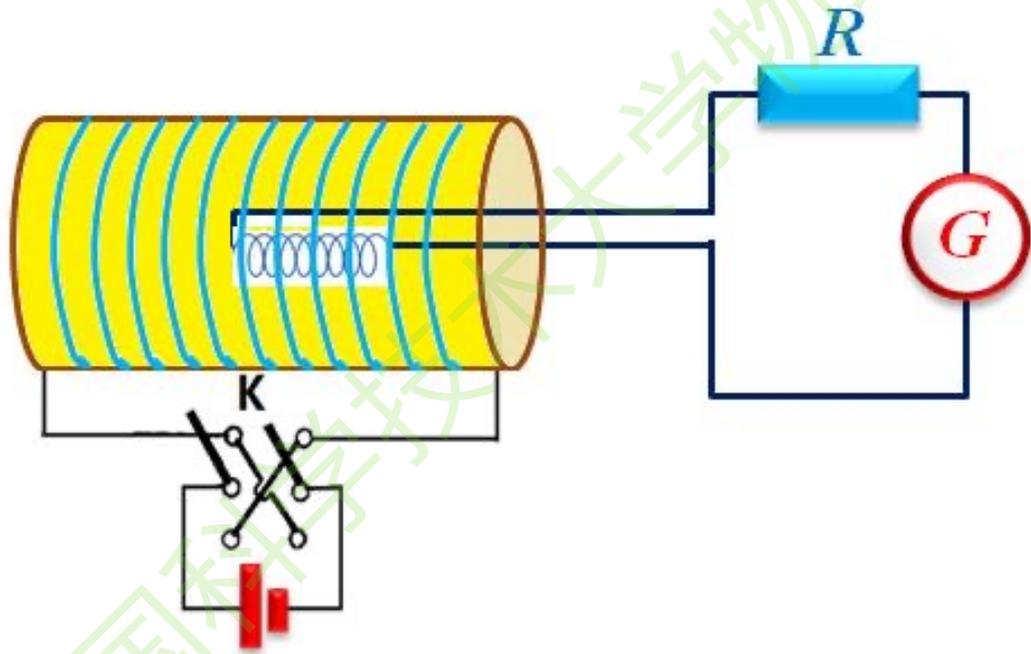
当导体与磁场有相对运动时，导体中出现的感应电流受到的磁场力必然阻碍这一相对运动。



无法显示该图片。



【例】用冲击电流计测磁感应强度 $B$ 。已知与冲击电流计串联的线圈直径为2.5 cm，共200匝。与电流计串联的电阻为1k $\Omega$ 。开关反转时电流计通过电荷为 $\Delta q = 2.5 \times 10^{-7} C$ 。



【解】 电荷量为感应电流的积分

$$\Delta q = \int i dt$$

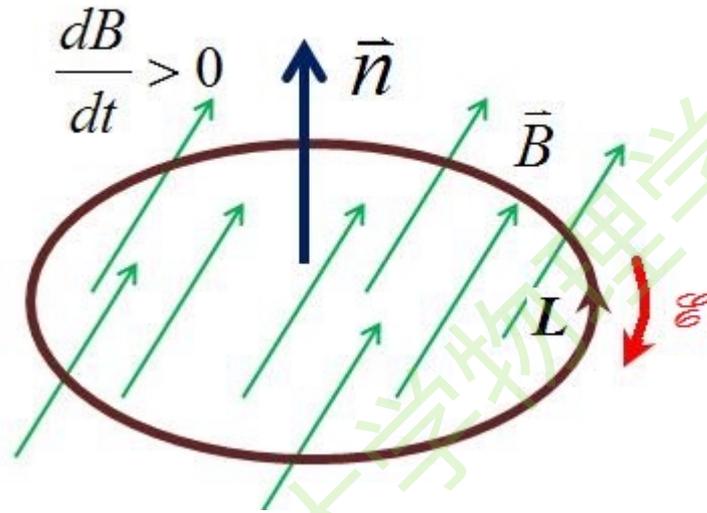
$$i = \frac{\varepsilon}{R} = -\frac{1}{R} \frac{d\Phi}{dt}$$

$$\Delta q = \int -\frac{1}{R} d\Phi = -\frac{1}{R} \Delta\Phi$$

$$\Delta\Phi = -\Phi - \Phi = -2\Phi = -2NSB$$

$$B = \frac{R\Delta q}{2NS} = \frac{1000 \cdot 2.5 \times 10^{-7}}{2 \cdot 200 \cdot \pi(0.025/2)^2} = 1.3 \times 10^{-3} T = 13 G$$

## § 6.2 动生电动势与感生电动势



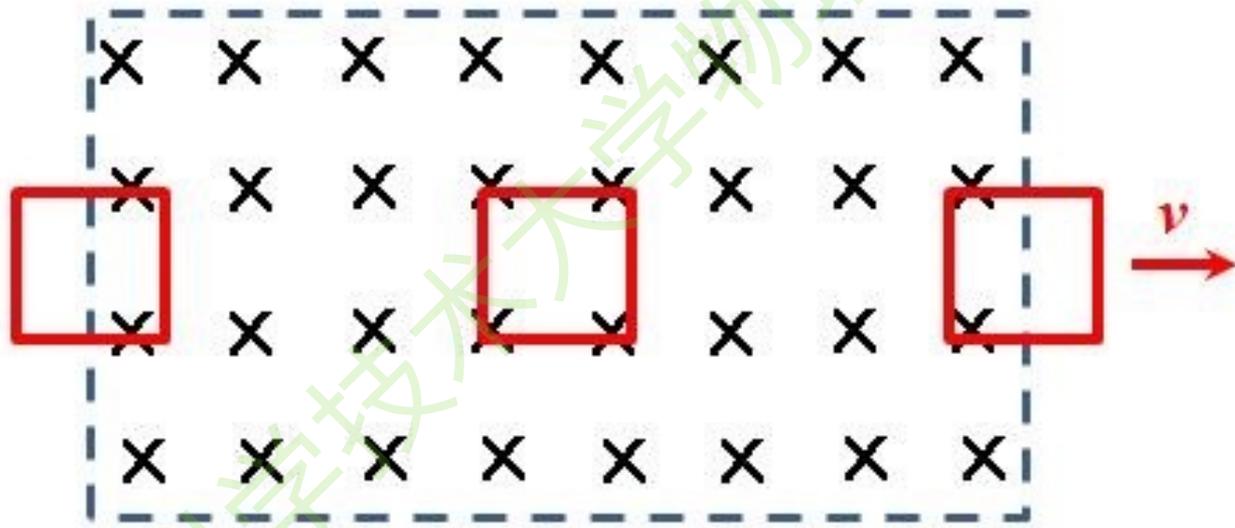
$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt} = -S \cos \theta \frac{dB}{dt} - B \cos \theta \frac{dS}{dt} + BS \sin \theta \frac{d\theta}{dt}$$

感生电动势：磁场变化带来的电动势

动生电动势：导体与磁场的相对运动产生的电动势

## § 6.2.1 动生电动势

导体在不随时间改变的磁场内运动，因导体运动而产生的感应电动势，称为动生电动势



设磁场中闭合回路 $C$ ，以速度 $v$ 在 $t+dt$ 时刻移动到 $C'$

$t \rightarrow t+dt$ , 磁通量的变化为:  $d\Phi = \Phi' - \Phi$

根据高斯定理  $-\Phi + \Phi' + \Phi'' = 0$

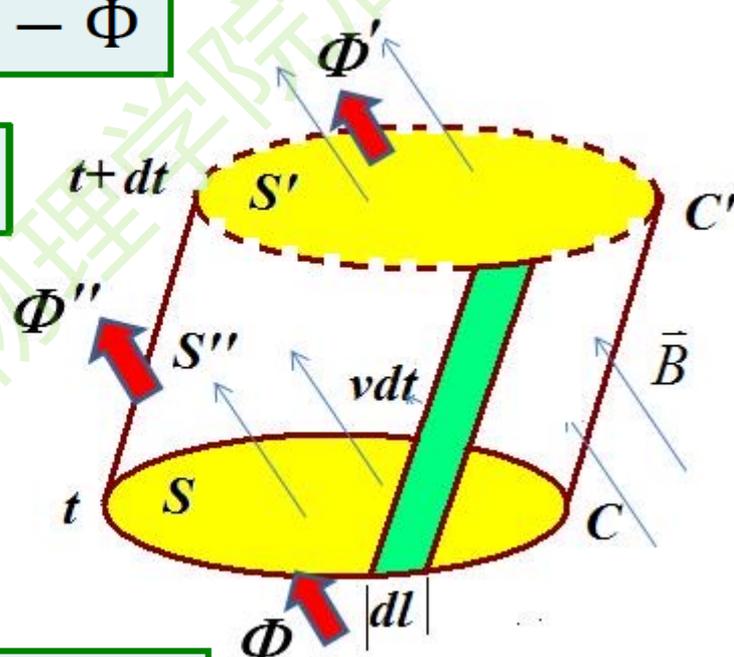
$$d\Phi = \Phi' - \Phi = -\Phi''$$

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

$$\Phi'' = \iint_{S''} \vec{B} \cdot d\vec{S}'' = \oint_C \vec{B} \cdot (d\vec{l} \times \vec{v} dt)$$

$$\Phi'' = dt \oint_C (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}$$

$$\mathcal{E} = \oint_C (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}$$

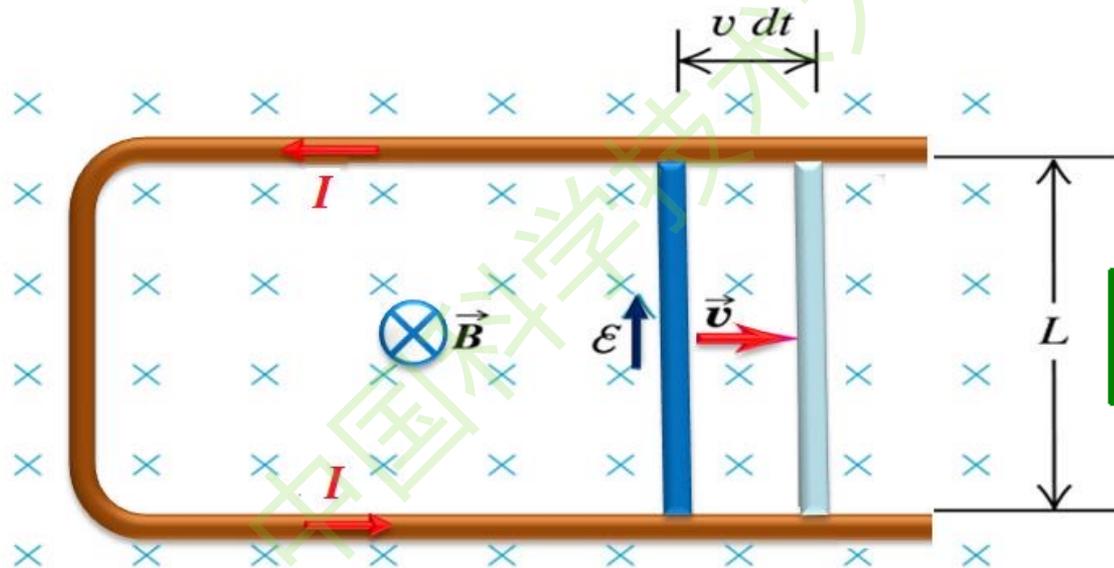


对不闭合的一段导体，有

$$\mathcal{E} = \int_a^b (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}$$

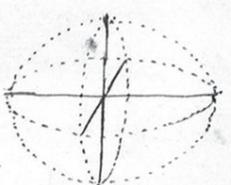
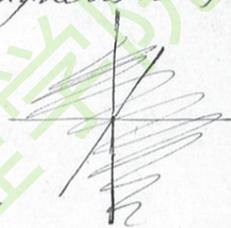
当  $\vec{v} = 0$ ，或者  $\vec{v} \times \vec{B} = 0$ ，或者  $\vec{v} \times \vec{B}$  总积分为 0  
动生电动势为 0

一段直导体垂直于均匀磁场运动：



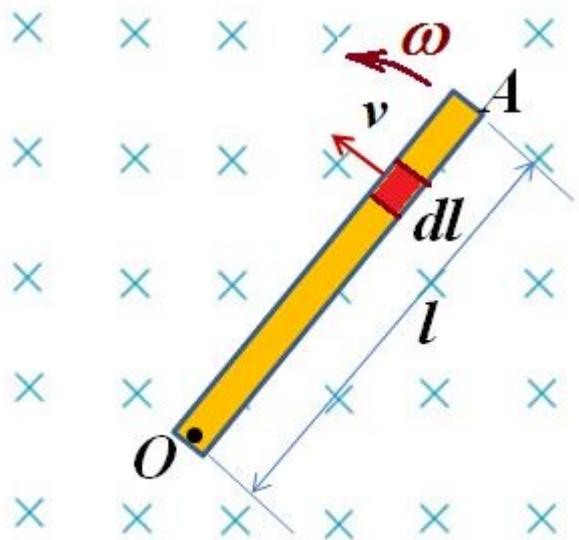
$$\mathcal{E} = vBL = BLv$$

403 The mutual relation of electricity magnetism & motion may be represented by three lines at right angles to each other any one of which may represent any one of these points and the other two lines the other points. Then if electricity be determined in one line of motion in ~~the~~ another magnetism will be developed in the third or if electricity be determined in one line of magnetism in another motion will occur in the third or if magnetism be determined first then motion will produce electricity or electricity motion or if motion be the first point determined Magnetism will evolve electricity or electricity magnetism



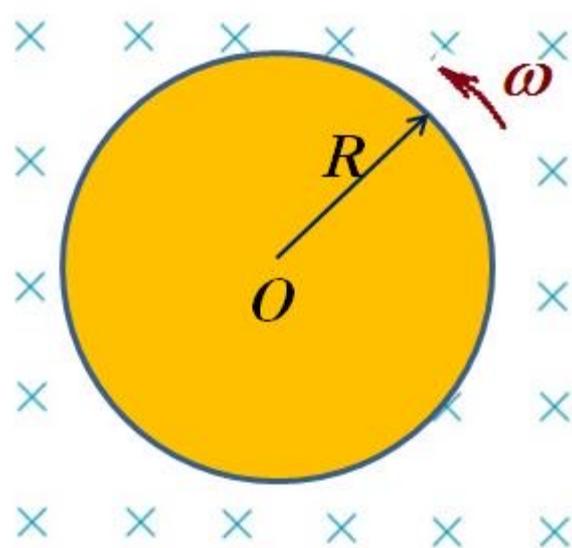
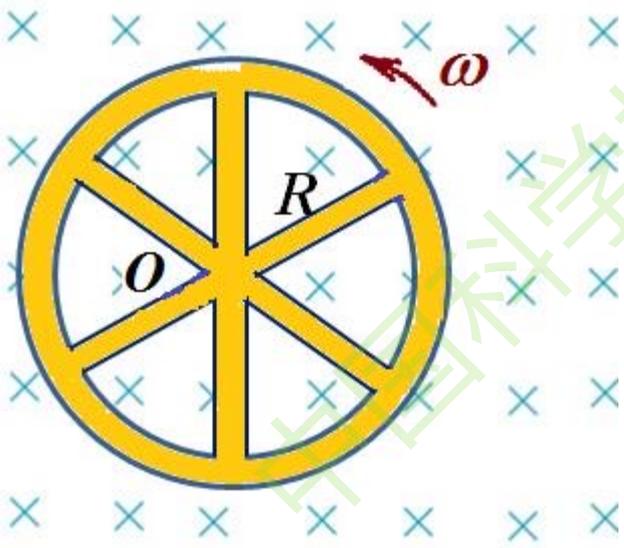
若导体一端固定，以角速度 $\omega$ 旋转

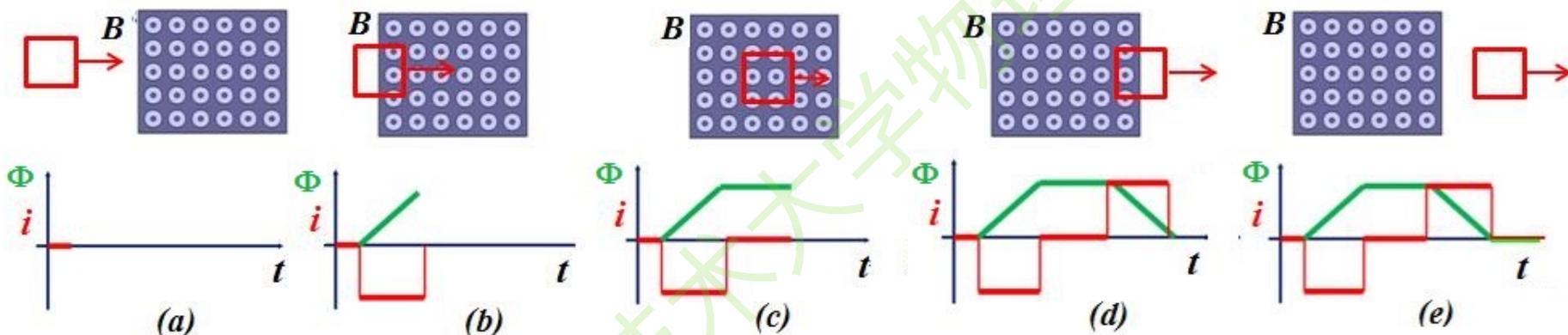
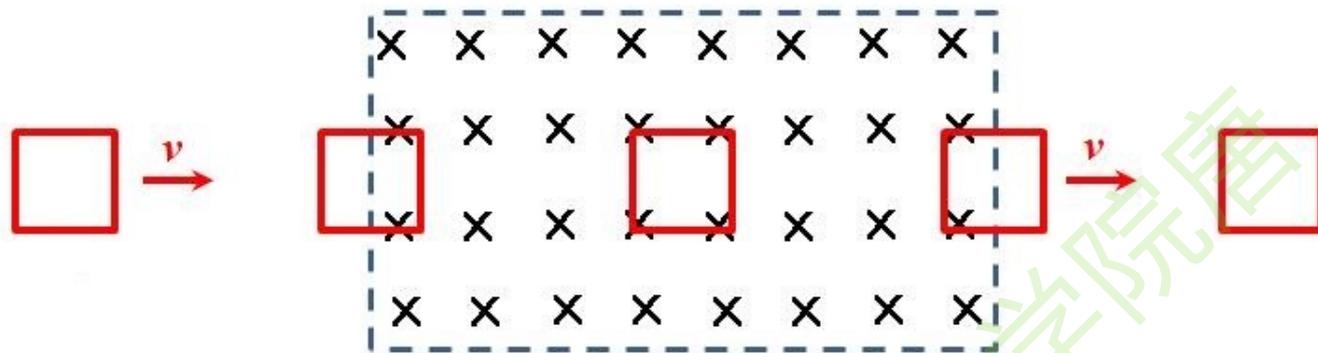
$$\mathcal{E} = \int_a^b (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}$$



$$(\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} = -vBdl = -B\omega l dl$$

$$\mathcal{E} = \int_0^A -B\omega l dl = \frac{1}{2} B\omega l^2$$





驱动电荷流动的非静电力是什么？

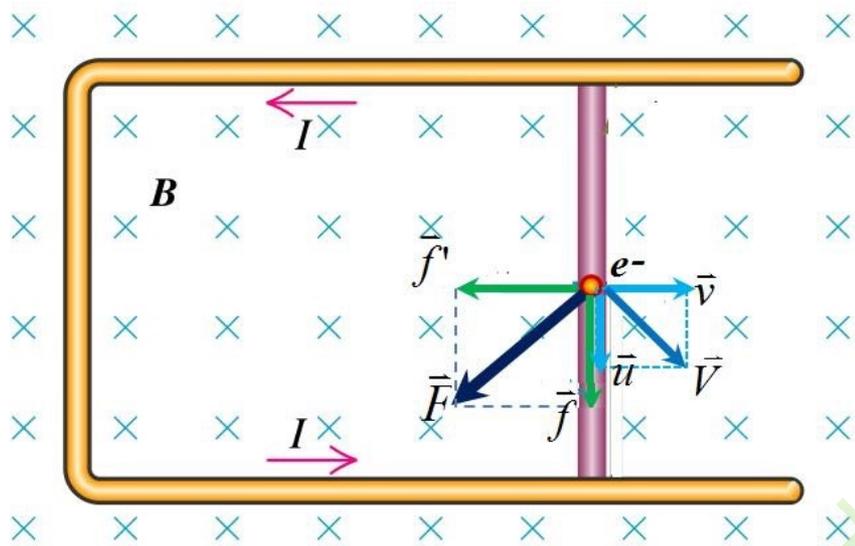
$$\mathcal{E} = \int_a^b \vec{K} \cdot d\vec{l}$$

$$\mathcal{E} = \int_a^b (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}$$

$$\vec{K} = \vec{v} \times \vec{B}$$

感应电流的**非静电力**来源与电荷受到的**洛伦兹力**

# 洛伦兹力不做功?!



设电子的定向运动速度为 $\vec{u}$

导体运动速度为 $\vec{v}$

电子的总的定向运动速度为

$$\vec{V} = \vec{v} + \vec{u}$$

$$\begin{aligned}\vec{F} &= -e\vec{V} \times \vec{B} = (-e\vec{v} \times \vec{B}) + (-e\vec{u} \times \vec{B}) \\ &= \vec{f} + \vec{f}'\end{aligned}$$

$\vec{f}$ 为非静电力的来源。驱动电荷沿导体定向运动。

但其本质来源于外力克服 $\vec{f}'$ 做功。