

## 電磁學

- 動電生磁
- 動磁生電

磁通量改變產生感應電場及電動勢  
 法拉第定律(Faraday's Law)

法拉第感應定律(Faraday's Law of Induction)

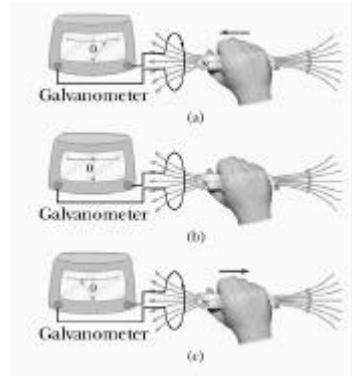
$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt} \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$$

$\mathcal{E}$ : 感應電動勢(induced emf)

$\Phi_B$ : 磁通量(magnetic flux)

“-”: 冷次定律(Lenz's Law)

*The polarity of the induced emf is such that it tends to produce a current that creates a magnetic flux to oppose the change in magnetic flux through the area enclosed by the current loop.*

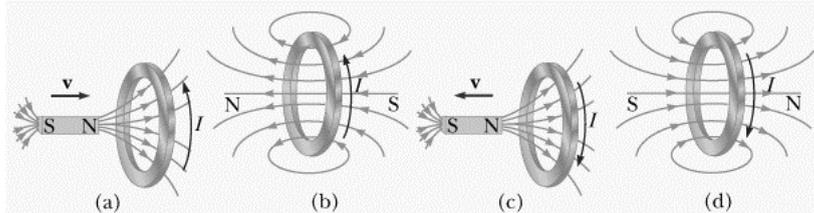


中興大學物理系 孫允武

電磁感應二-1

## 電磁學

冷次定律

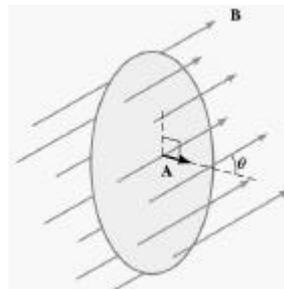


帶電流圈在均勻磁場中的情形

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt} (BA \cos \theta)$$

產生感應電動勢的方法

- $B$ 隨時間改變
- 面積隨時間改變
- 角度 $\theta$ 隨時間改變
- 上面各項之組合



中興大學物理系 孫允武

電磁感應二-2

## 電磁學

Motional emf : 導體在磁場中運動產生之電動勢

磁力的觀點  $qE = q\mathbf{uB}$   $E = \mathbf{uB}$   
 $\Delta V = E\ell = B\ell\mathbf{u}$

磁通變化的觀點

$$\Phi_B = B\ell x$$

$$E = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt}(B\ell x) = -B\ell \frac{dx}{dt}$$

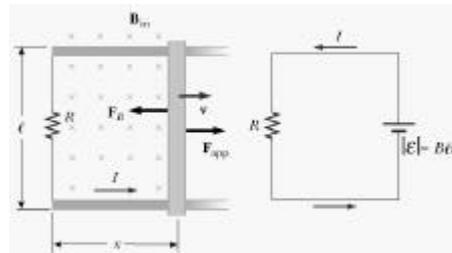
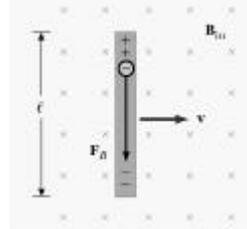
$$E = -B\ell\mathbf{u}$$

加上負載 (loading)  $I = \frac{\Delta V}{R} = \frac{B\ell\mathbf{u}}{R}$

若維持等速運動

$$F_{\text{app}} = I\ell B$$

$$P = F_{\text{app}} \mathbf{u} = I\ell B\mathbf{u} = \frac{B^2\ell^2\mathbf{u}^2}{R} = \frac{\Delta V^2}{R}$$



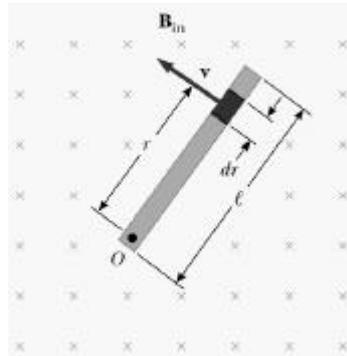
中興大學物理系 孫允武

電磁感應二-3

## 電磁學

### 例題

A conducting bar of length  $\ell$  rotates with a constant angular speed  $\omega$  about a pivot at one end. A uniform magnetic field  $\mathbf{B}$  is directed perpendicular to the plane of rotation, as shown in the figure. Find the motional emf induced between the ends of the bar.



由磁通量的觀點：

$$d\Phi_B = BdA = B\left(\frac{1}{2} \ell ds\right) = \frac{1}{2} B\ell^2 dq$$

$$E = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{1}{2} B\ell^2 \frac{dq}{dt} = -\frac{1}{2} B\ell^2 \omega$$

也可以由每小段  $dr$  產生之 emf 加起來求得。

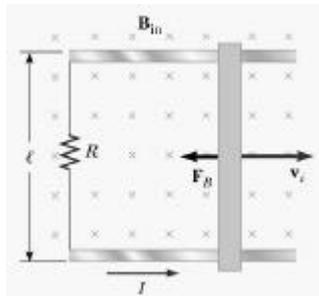
中興大學物理系 孫允武

電磁感應二-4

## 電磁學

### 例題

The conducting bar illustrated in the right figure, of mass  $m$  and length  $\ell$ , moves on two frictionless parallel rails in the presence of a uniform magnetic field directed in the page. The bar is given an initial velocity  $\mathbf{v}_i$  to the right and is released at  $t=0$ . Find the velocity of the bar as a function of time.



$$F_x = ma = m \frac{d\mathbf{u}}{dt} = -I\ell B = -\frac{B^2 \ell^2}{R} \mathbf{u}$$

$$\frac{d\mathbf{u}}{\mathbf{u}} = -\frac{B^2 \ell^2}{mR} dt \quad \int_{u_i}^u \frac{d\mathbf{u}}{\mathbf{u}} = -\frac{B^2 \ell^2}{mR} \int_0^t dt$$

$$\ln\left(\frac{\mathbf{u}}{\mathbf{u}_i}\right) = -\left(\frac{B^2 \ell^2}{mR}\right) t = -\frac{t}{\tau} \quad \tau = \frac{mR}{B^2 \ell^2}$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_i e^{-t/\tau}$$

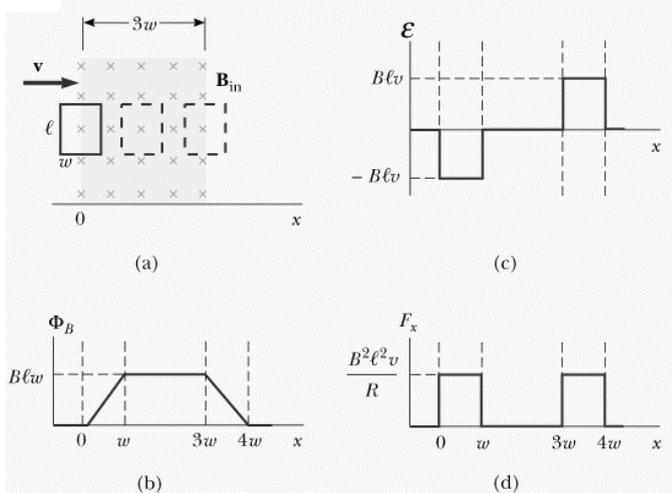
中興大學物理系 孫允武

電磁感應二-5

## 電磁學

### 例題

A Loop Moving Through a Magnetic Field



中興大學物理系 孫允武

電磁感應二-6

## 電磁學

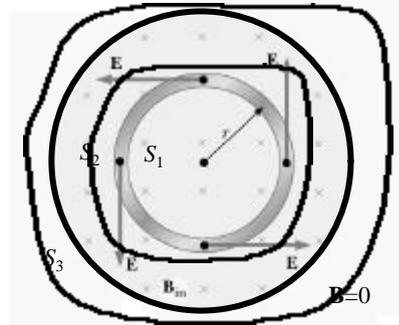
### 感應電場(induced electric field)

我們再仔細探討感應電動勢的成因。

右圖中 $S_1$ 為在變化磁場中的導線， $S_2$ 則為變化磁場內之任一封閉曲線， $S_3$ 是無磁場區之一封閉曲線。

沿 $S_1$ 有感應電場及電流，沿 $S_2$ 及 $S_3$ 呢？

他們都有感應電場，感應電流則必須有導體形成迴路才有。



$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt} \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$$



$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt} \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$$

不能定義電位能

感應電場是非保守性的，隨時間改變的。和靜電場不同。

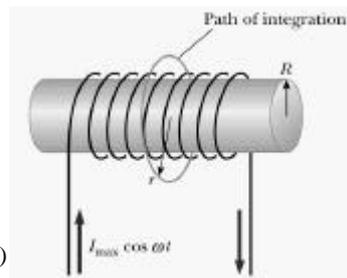
中興大學物理系 孫允武

電磁感應二-7

## 電磁學

### 例題

A long solenoid of radius  $R$  has  $n$  turns of wire per unit length and carries a time-varying current that varies sinusoidally as  $I = I_{\max} \cos \omega t$ , where  $I_{\max}$  is the maximum current and  $\omega$  is the angular frequency of the alternating current source. (a) Determine the magnitude of the induced electric field outside the solenoid, a distance  $r > R$  from its long central axis. (b) What is the magnitude of the induced electric field inside the solenoid, a distance  $r$  from its axis?



$$(a) \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{d}{dt}(B\pi R^2) = -\pi R^2 \frac{dB}{dt} = -\pi R^2 \frac{d\mu_0 n I}{dt} = -\pi R^2 \mu_0 n I_{\max} \frac{d}{dt} \cos \omega t = E(2\pi r)$$

$$E = \frac{\omega R^2 \mu_0 n I_{\max}}{2r} \sin \omega t$$

$$(b) -\frac{d}{dt}(B\pi r^2) = -\pi r^2 \mu_0 n I_{\max} \frac{d}{dt} \cos \omega t = E(2\pi r) \quad E = \frac{\omega \mu_0 n I_{\max}}{2} r \sin \omega t$$

中興大學物理系 孫允武

電磁感應二-8

## 電磁學

### 發電機(Generators) 及馬達(Motors)

#### 發電機

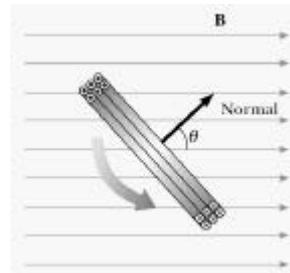
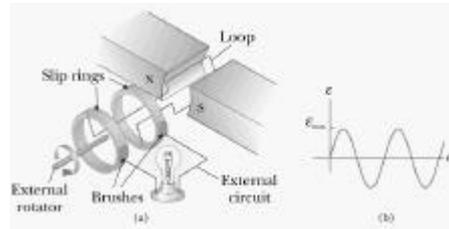
##### 交流發電機

$$\Phi_B = BA \cos q = BA \cos \omega t$$

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi_B}{dt} = -NAB \frac{d}{dt} \cos \omega t$$

$$= NAB \omega \sin \omega t$$

$$\mathcal{E}_{\max} = NAB \omega$$



中興大學物理系 孫允武

電磁感應二-9

## 電磁學

馬達（電動機）：將發電機逆向操作，及加入電流線圈受磁力而運動旋轉。

#### 直流發電機

馬達啟動時，所需之電流最大。當旋轉至高速時，會產生一反相電動勢（back emf），他會減小線圈中之電流。

當機械負載大時，馬達會變慢，back emf 減小，電流增加。



#### 例題

Assume that a motor in which the coils have a total resistance of  $10\Omega$  is supplied by a voltage of  $120\text{V}$ . When the motor is running at its maximum speed, the back emf is  $70\text{V}$ . Find the current in the coils (a) when the motor is turned on and (b) when it has reached maximum speed.

(a) 
$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{120\text{V}}{10\Omega} = 12\text{A}$$

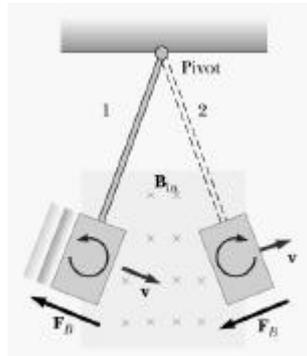
(b) 
$$I = \frac{\mathcal{E} - \mathcal{E}_{\text{back}}}{R} = \frac{120\text{V} - 70\text{V}}{10\Omega} = 5.0\text{A}$$

中興大學物理系 孫允武

電磁感應二-10

## 電磁學

### 渦電流(Eddy Currents)



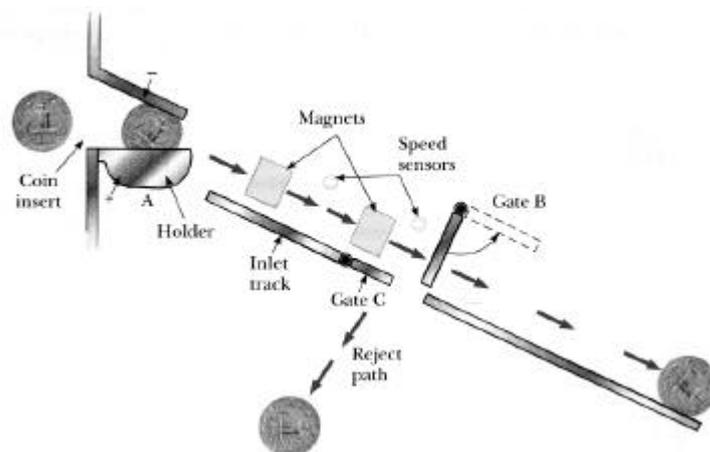
電磁爐也是利用渦電流加熱

中興大學物理系 孫允武

電磁感應二-11

## 電磁學

### 販賣機(vending machine)的檢查機制



中興大學物理系 孫允武

電磁感應二-12

## 電磁學

馬克斯威爾方程式(Maxwell's Equations)---積分形式

$$\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

Gauss's law

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$$

Gauss's law in magnetism

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

Faraday's law

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 I + \epsilon_0 \mu_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

Ampere-Maxwell law

Lorentz force law

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

## 射频和天线设计培训课程推荐

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,致力并专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;我们于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

易迪拓培训课程列表: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/129.html>



### 射频工程师养成培训课程套装

该套装精选了射频专业基础培训课程、射频仿真设计培训课程和射频电路测量培训课程三个类别共 30 门视频培训课程和 3 本图书教材;旨在引领学员全面学习一个射频工程师需要熟悉、理解和掌握的专业知识和研发设计能力。通过套装的学习,能够让学员完全达到和胜任一个合格的射频工程师的要求...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/rfe/110.html>

### ADS 学习培训课程套装

该套装是迄今国内最全面、最权威的 ADS 培训教程,共包含 10 门 ADS 学习培训课程。课程是由具有多年 ADS 使用经验的微波射频与通信系统设计领域资深专家讲解,并多结合设计实例,由浅入深、详细而又全面地讲解了 ADS 在微波射频电路设计、通信系统设计和电磁仿真设计方面的内容。能让您在最短的时间内学会使用 ADS,迅速提升个人技术能力,把 ADS 真正应用到实际研发工作中去,成为 ADS 设计专家...



课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/ads/13.html>



### HFSS 学习培训课程套装

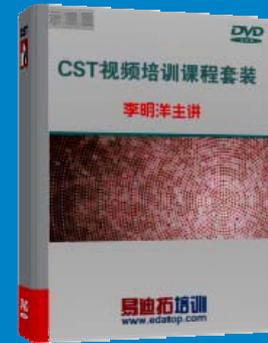
该套课程套装包含了本站全部 HFSS 培训课程,是迄今国内最全面、最专业的 HFSS 培训教程套装,可以帮助您从零开始,全面深入学习 HFSS 的各项功能和在多个方面的工程应用。购买套装,更可超值赠送 3 个月免费学习答疑,随时解答您学习过程中遇到的棘手问题,让您的 HFSS 学习更加轻松顺畅...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/11.html>

## CST 学习培训课程套装

该培训套装由易迪拓培训联合微波 EDA 网共同推出,是最全面、系统、专业的 CST 微波工作室培训课程套装,所有课程都由经验丰富的专家授课,视频教学,可以帮助您从零开始,全面系统地学习 CST 微波工作的各项功能及其在微波射频、天线设计等领域的设计应用。且购买该套装,还可超值赠送 3 个月免费学习答疑...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/24.html>



## HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书,课程从基础讲起,内容由浅入深,理论介绍和实际操作讲解相结合,全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程,可以帮助您快速学习掌握如何使用 HFSS 设计天线,让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

## 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程,培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合,全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作,同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习,可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



### 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年,10 多年丰富的行业经验,
- ※ 一直致力并专注于微波射频和天线设计工程师的培养,更了解该行业对人才的要求
- ※ 经验丰富的一线资深工程师讲授,结合实际工程案例,直观、实用、易学

### 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>