



台科大圖書

AC10122

技術型高級中等學校 | 電機與電子群

基本電學

上

Basic Electricity



Basic Electricity

CHAPTER 6 電感及電磁

6-1 電感器

6-2 電感量

6-3 磁的基本概念

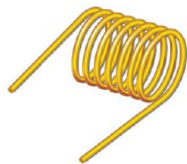
6-4 電磁效應（電生磁）

6-5 電磁感應（磁生電）

6-1 電感器

- **6-1.1 電感器的功能**
- 電感器（**inductor**）是一種藉由電磁感應將電能轉換成磁能，並將此磁能儲存起來的電路元件；它還具有穩定電路電流，防止電磁干擾等功能，因此又稱為抗流線圈（**choke**），電感器常用於電源供應器、顯示器、交換機、掃描器及電話機等。
- **6-1.2 電感器的種類及結構**
- 電感器在結構上是以導線纏繞在鐵心材料上而成，其種類依鐵心材料不同可分為空氣心、鐵心及磁芯三種；依形狀不同則有工字（磁珠）形、E 字形、環形、柱形、帽形等等，為了配合電路板製程需求還有晶片（**SMD**）型式；電感器常見外觀構造如圖6-1 所示。

6-1 電感器



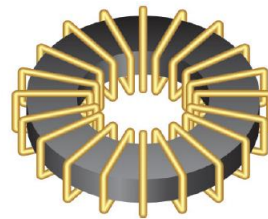
(a) 空氣心電感



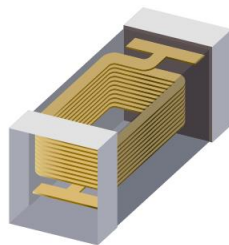
(b) 工形電感



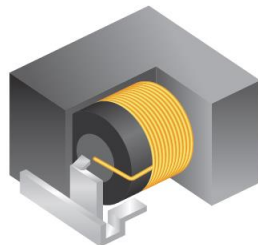
(c) 色環電感



(d) 環形電感



(e) 晶片積層陶瓷電感



(f) 晶片繞線電感

圖 6-1 各種電感器

6-1 電感器

- **1.空氣心電感器**：將漆包導線直接捲繞成螺管狀的線圈，中間只有以空氣當介質，並沒有其他心材，其電感量較小，適用於高頻電路；有時候為方便固定，可用非磁性材料（如塑膠）為心材。
- **2.鐵心電感器**：將漆包導線捲繞在以矽鋼片或鐵鎳合金（**permalloy**）堆積而成的心材上，此種心材具有導磁性，其電感量較空心者為高，常用於低頻電路。
- **3.磁芯電感器**：將漆包導線捲繞在以氧化鐵粉末做成的心材上，調整鐵粉含量可以控制導磁係數及其電感量，因此可用於低頻或高頻電路。電感器使用鐵心或磁芯端，需視所需電感量大小或成本因素考量而定。

6-1 電感器

- **4.晶片型（SMD）電感器**：特點是體積小、尺寸標準化，可分為積層型及繞線型兩種。積層型是將導線及電感材料印刷在基板，經多層堆疊壓合而成的產品；繞線型是以更高密度的方式進行繞線，並封裝成晶片外型。
- 各種電感器符號如圖6-2 所示。



圖 6-2 各種材料的電感器符號

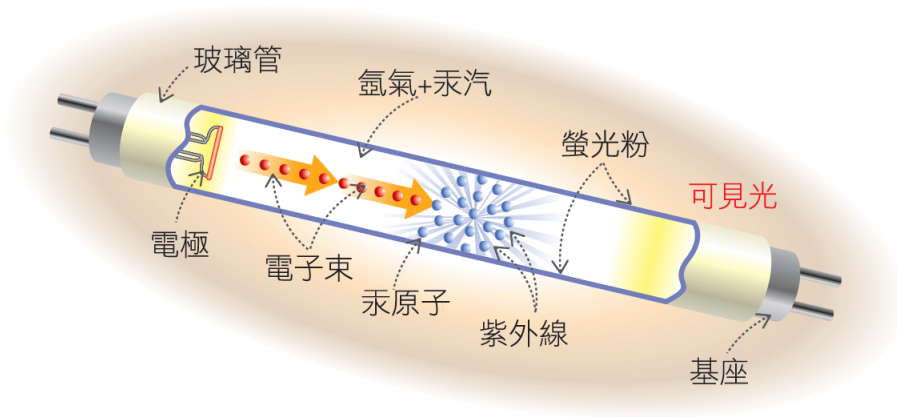
6-1 電感器

✎ 延伸知識 ✎

日光燈安定器的原理

日光燈的發光原理是以瞬間高壓產生的電子束撞擊汞（水銀）原子，產生紫外線再激發塗在管壁上的螢光粉，發出柔和的可見光，如圖(1)所示。

用以產生瞬間高壓的元件稱為安定器，安定器有電感式及電子式兩種；以電感式安定器為例說明點燈過程，如圖(2)所示，從圖中可知電感式安定器在日光燈啟動過程中，可以瞬間產生高壓幫助啟動，在啟動完成後，可以降低及穩定線路電流。



圖(1)

6-1 電感器

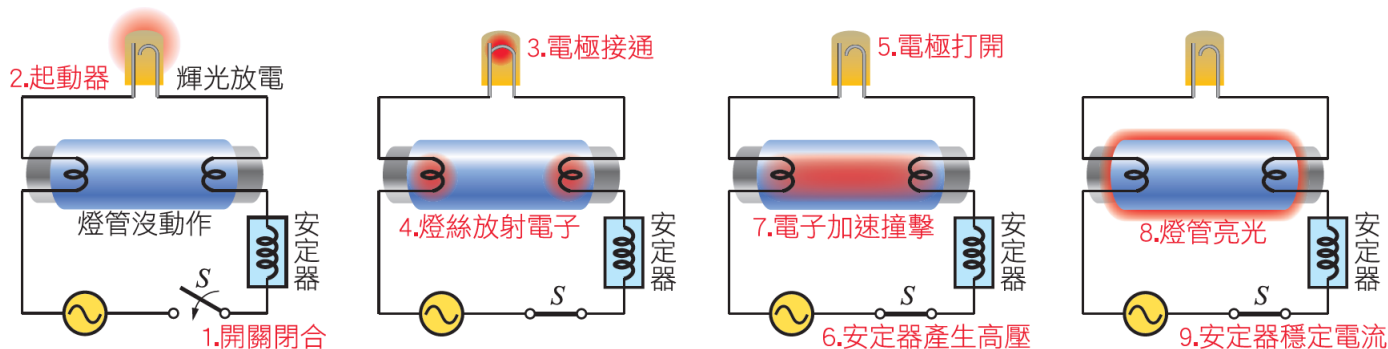


圖 (2) 電感式安定器用於日光燈啟動的過程

另外，電子式安定器是以電子電路製作的高頻率安定器。電子式安定器具有省電、功率因數高、光波穩定不閃爍、雜音低、體積小、重量輕以及調光性好等優點，已逐漸取代傳統電感式安定器。

6-2 電感量

- 電感器通以電流時，在線圈上會產生磁力線形成磁場，當電流變動時，磁場也會隨之變動；電感量（**inductance**）的定義為「線圈抗拒電流變動所造成磁場變動的能力」；電感量分成：線圈本身產生的自感，以及與鄰近線圈交互作用而產生的互感兩種。

6-2 電感量

- **6-2.1 自感**
- 圖6-3 為各種形狀的線圈，根據安培右手定則：「線圈通以電流時，會產生磁力線，形成磁場」；此一線圈匝數（ N ）與磁力線數（或稱為磁通量）（ ϕ ）的乘積稱為磁通鏈（flux linkage），以 λ （讀音Lambda）為符號，即：

$$\lambda (\text{磁通鏈}) = N (\text{匝數}) \times \phi (\text{磁通量}) \quad (\text{韋伯} \cdot \text{匝數}, \text{Wb} \cdot \text{T})$$

公式
6-1

註 ϕ （讀音 Phi）稱為磁力線數，或磁通量，詳見 249 頁說明。

6-2 電感量

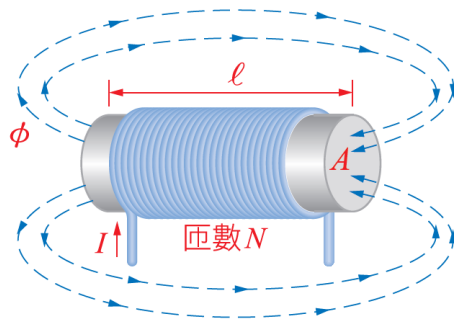
- (6-1) 式表示匝數愈多，產生的磁通鏈愈大。電感器的「電感量」則是：「單位電流所產生的磁通鏈」；或者說，「電感量就是線圈通以電流所產生磁通鏈多寡的能力」。此處磁通鏈為線圈本身所產生，故此電感量為自感，自感以符號 L 表示，單位為亨利（H）。以數學式表示如下：

$$L \text{ (自感電感量)} = \frac{\lambda \text{ (磁通鏈)}}{I \text{ (電流)}} = \frac{N \times \phi}{I} \quad (\text{亨利, H})$$

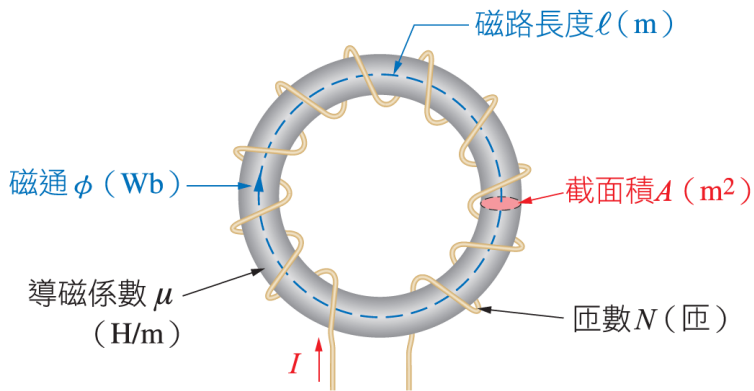
公式
6-2

- 公式涵義：自感愈高的電感器，少許的電流就可以產生大量的磁通鏈。

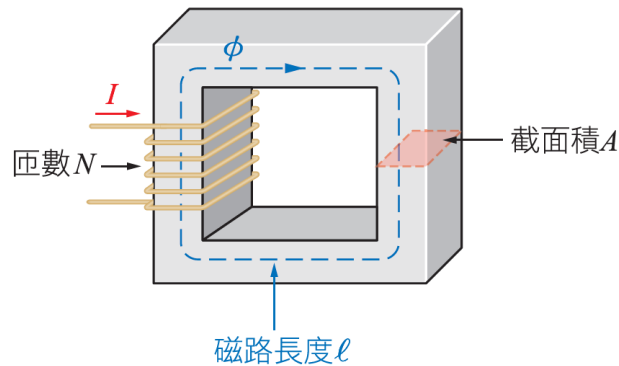
6-2 電感量



(a) 螺管狀線圈



(b) 圓環狀線圈



(c) 變壓器線圈

圖 6-3 各種形狀的線圈通以電流的情形

6-2 電感量

- 例題 **6-1** 電感量運算（一）
- 在一個**100** 匝的線圈上，加上**10** 安培電流產生**0.2** 韋伯的磁通，試求此線圈的電感量為多少亨利？

- 解 根據（6-2）公式
$$L = \frac{N \times \phi}{I} = \frac{100 \times 0.2}{10} = 2 \text{ H}$$

6-2 電感量

- 練習
- 1. 本例題中，相同的線圈，當加上的電流只有**5 A**，則其產生的磁通為多少韋伯？
(A) 0.1 (B) 0.2 (C) 0.4 (D) 4。
- 2. R - L 串聯電路中，當電感器 L 充電完成後， L 儲滿何種能量？
(A) 熱能 (B) 磁能 (C) 電場 (D) 位能。

6-2 電感量

- 接著，再從電感器的實體結構來看，會發現：線圈的電感量和磁路長度（ ℓ ）成反比，和心材的導磁係數（ μ ）、截面積（ A ）成正比，和匝數平方（ N^2 ）成正比，以數學式表示如下：

$$L \text{ (自感電感量)} = \frac{\mu \text{ (導磁係數)} \times A \text{ (截面積)} \times N^2 \text{ (匝數平方)}}{\ell \text{ (長度)}} \quad (\text{亨利, H})$$

公式
6-3

註 可以和第 2 章的電阻 $R = \rho \frac{\ell}{A}$ 、第 5 章的電容 $C = \varepsilon \frac{A}{d}$ 對照學習。

6-2 電感量

- 其中， μ （希臘字母讀作mu）表示介質的導磁係數（**permeability**），有空氣或真空中的導磁係數（ μ_o ）及相對導磁係數（ μ_r ），即： $\mu = \mu_o \times \mu_r$ （亨利／公尺，簡稱H/m），在空氣或真空中， $\mu_r = 1$ ， $\mu_o = 4\pi \times 10^{-7}$ 亨利／公尺。

 註 可以和第 5 章的介電係數 $\epsilon = \epsilon_o \times \epsilon_r$ 法拉／公尺，對照學習。

6-2 電感量

- 例題 **6-2** 電感量運算（二）
- 有一相對導磁係數 μ_r 為100 的圓形鐵心，其直徑2 cm，長度為4 cm，其上繞有100 匝的線圈，試求：
（1）其電感量為多少mH？（2）若將其直徑減半，則電感量變為多少mH？

- 解（1）直徑 $d = 2 \text{ cm} = 2 \times 10^{-2} \text{ m}$

$$\text{截面積 } A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \times (2 \times 10^{-2})^2}{4} = \pi \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

6-2 電感量

長度 $\ell = 4 \text{ cm} = 4 \times 10^{-2} \text{ m}$

導磁係數 $\mu = \mu_o \mu_r = (4\pi \times 10^{-7}) \times 100 = 4\pi \times 10^{-5} \text{ H/m}$ (亨利 / 公尺)

根據 (6-3) 公式

$$L = \frac{\mu \times A \times N^2}{\ell} = \frac{(4\pi \times 10^{-5}) \times (\pi \times 10^{-4}) \times 100^2}{4 \times 10^{-2}}$$
$$= \pi^2 \times 10^{-3} \doteq 10 \text{ mH (毫亨利)}$$

(2) 跟據 $A = \frac{\pi d^2}{4}$ ，直徑減半，則截面積減少至 $\frac{1}{4}$

電感量 L 和截面積成正比，故 $L' \doteq \frac{10}{4} = 2.5 \text{ mH (毫亨利)}$

6-2 電感量

- 練習
- 3. 某一鐵心截面積為1 平方公尺，長度0.5 公尺， $\mu_r=20$ ，繞有100 匝線圈，則此線圈的自感量為多少亨利？
(A) 0.25 (B) 0.5 (C) 2.5 (D) 5。
- 4. 以1.0 mm 線徑之漆包線，繞成長度為10 cm 之螺線管，若改用2.0 mm線徑之漆包線，繞成相同管徑及長度之螺線管，其電感變為原來的多少倍？
(A) 1/2 (B) 1/4 (C) 2 (D) 4。

6-2 電感量

• 6-2.2 互感

- 單一線圈通以電流時只有自感存在，當附近有相鄰的線圈存在時，除了本身產生自感（ L ）之外，還會交鏈至另一線圈形成互感（mutual induction），互感以 M 表示之。

- 圖6-4 為典型的變壓器原理解說圖， N_1 匝的線圈1 通以電流 I_1 ，產生磁通 ϕ_1 ，則其自感 $L_1 = \frac{N_1 \phi_1}{I_1}$ 。

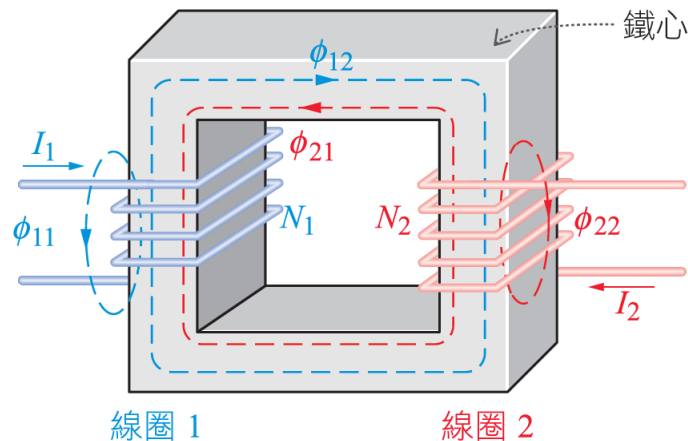


圖 6-4 變壓器的磁通分布情形

6-2 電感量

- 此 ϕ_1 又分成 ϕ_{11} 及 ϕ_{12} 兩個部分，即： $\phi_1 = \phi_{11} + \phi_{12}$ 。
- ϕ_{11} ：線圈1 產生，未交鏈至線圈2 的磁通，又稱為漏磁通。
- ϕ_{12} ：線圈1 產生，經過鐵心交鏈至線圈2 的磁通，又稱為公共磁通。
- 線圈1 交鏈至線圈2 的磁通 ϕ_{12} ，將會產生互感 M_{12} ，其值以下式計算之：

線圈 1 感應至線圈 2 的「互感」 $M_{12} = \frac{N_2 \times \phi_{12}}{I_1}$ (亨利，H)

公式
6-4

註 記憶方法為下標，從分母開始往分子唸過去：1、2、12。

6-2 電感量

同理， N_2 匝的線圈 2 通以電流 I_2 ，產生磁通 ϕ_2 ，其自感 $L_2 = \frac{N_2 \phi_2}{I_2}$ 。而此 ϕ_2 分成 ϕ_{22} 及 ϕ_{21} 兩個部分，即： $\phi_2 = \phi_{22} + \phi_{21}$ 。

線圈 2 感應至線圈 1 的「互感」 $M_{21} = \frac{N_1 \times \phi_{21}}{I_2}$ (亨利，H)

公式
6-5

- 在線圈1中，當交鏈至線圈2的磁通（ ϕ_{12} ）越大時，表示鐵心的導磁效能越好，使得線圈2可獲得的磁通愈多，因此定義： ϕ_{12} 對 ϕ_1 所佔的比值稱為耦合係數（**coefficient of coupling**），以 K 表示。從圖6-4中得知：線圈1和線圈2所產生的交鏈磁通，通過相同的磁路，其導磁效能一樣，故其耦合係數及互感均應相同，即：

6-2 電感量

耦合係數 $K = \frac{\phi_{12}}{\phi_1} = \frac{\phi_{21}}{\phi_2}$ (值應小於 1)

公式
6-6

互感 $M = M_{12} = M_{21}$

公式
6-7

- 兩相鄰線圈的互感 (M) 和其個別自感 (L_1 、 L_2) 的關係式為：

6-2 電感量

$$M = K \times \sqrt{L_1 \times L_2} \quad (\text{亨利, H})$$

公式
6-8

證明如下：

$$M \times M = M_{12} \times M_{21} = \frac{N_2 \phi_{12}}{I_1} \times \frac{N_1 \phi_{21}}{I_2} = N_2 \times \frac{K \phi_1}{I_1} \times N_1 \times \frac{K \phi_2}{I_2}$$

$$M^2 = K^2 \times L_1 \times L_2 \Rightarrow M = K \times \sqrt{L_1 \times L_2} \quad \text{故 得證。}$$

6-2 電感量

- 例題 **6-3** L 和 M 基本運算
- 設有兩相鄰線圈 $N_1=600$ 匝， $N_2=900$ 匝，當線圈1 通以3 A 電流時，產生 6×10^{-3} 韋伯磁通，其中 5×10^{-3} 韋伯磁通交鏈至線圈2，試求線圈1 的自感 L_1 及互感 M_{12} 。

- 解 (1)
$$L_1 = \frac{N_1 \times \phi_1}{I_1} = \frac{600 \times (6 \times 10^{-3})}{3} = 1.2 \text{ H}$$

- $$(2) M_{12} = \frac{N_2 \times \phi_{12}}{I_1} = \frac{900 \times (5 \times 10^{-3})}{3} = 1.5 \text{ H}$$

6-2 電感量

- 練習
- 5. 設有兩相鄰線圈，線圈1 產生磁通 6×10^{-3} 韋伯，其中的 5×10^{-3} 韋伯交鏈至線圈2，試求耦合係數為多少？
(A) 0.16 (B) 0.2 (C) 0.83 (D) 1.2。
- 6. 有兩相鄰線圈 N_1 為600 匝， N_2 為900 匝，當線圈2 通以6 A 電流時，產生磁通 18×10^{-3} 韋伯，其中 15×10^{-3} 韋伯交鏈至線圈1，試求互感 M 為多少亨利？
(A) 0.2 (B) 0.83 (C) 1.5 (D) 2.7。

6-2 電感量

- 例題 **6-4** L 、 K 和 M 綜合運算
- 如圖6-4 所示，設 $N_1=1000$ 匝， $N_2=500$ 匝， $I_1=5$ A， $\phi_1=5\times 10^{-5}$ Wb， $\phi_{12}=4\times 10^{-5}$ Wb，試求：(1) L_1 (2) L_2 (3) K (4) M 。

• 解 (1) $L_1 = \frac{N_1 \times \phi_1}{I_1} = \frac{1000 \times (5 \times 10^{-5})}{5} = 10 \text{ mH (毫亨利)}$

(2) 根據 (6-3) 公式， L 和 N^2 成正比，

$$\text{故 } \frac{L_1}{L_2} = \frac{N_1^2}{N_2^2}, \frac{10 \times 10^{-3}}{L_2} = \frac{1000^2}{500^2} \quad \text{故 } L_2 = 2.5 \text{ mH (毫亨利)}$$

$$(3) K = \frac{\phi_{12}}{\phi_1} = \frac{4 \times 10^{-5}}{5 \times 10^{-5}} = 0.8$$

$$(4) M = K \times \sqrt{L_1 \times L_2} = 0.8 \times \sqrt{10 \times 10^{-3} \times 2.5 \times 10^{-3}} = 4 \text{ mH (毫亨利)}$$

6-2 電感量

- 練習
- 7. 兩串聯線圈其自感分別為3 H 及12 H，其耦合係數為0.8，則此二線圈間之互感為多少亨利？
(A) 4.8 (B) 9 (C) 14.4 (D) 28.8。

6-2 電感量

- **6-2.3 電感器的串聯**
- 電感器的串聯可以分為無互感及有互感兩種算法。
- **1.無互感的電感器串聯**

圖6-5 為兩個無互感電感器串聯，其總電感的算法和電阻器串聯一樣，總電感為各電感之總和。串聯電感器愈多，其總電感量愈大。

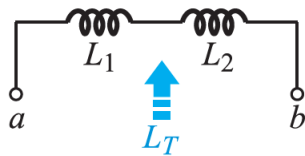


圖 6-5 無互感作用的電感器串聯

無互感的串聯總電感： $L_T = L_1 + L_2$ （亨利，H）

公式
6-9

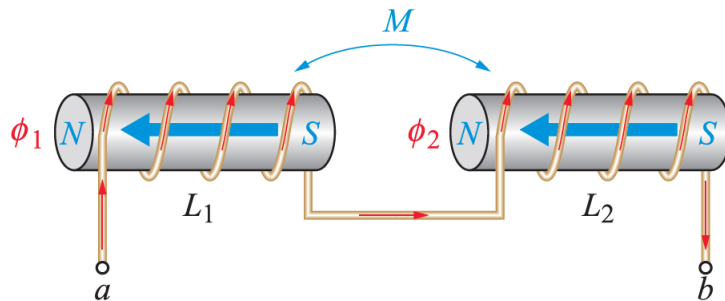
6-2 電感量

- **2.有互感的電感器串聯**
- 將兩個含有互感的電感器串聯時，必須考慮兩者的磁場是互助還是互消，其總電感的算法不同，說明如下：
- (1) 串聯互助：兩串聯線圈的捲繞方向相同，所生磁場方向相同者，如圖6-6 所示；「•」表示***N***極的位置，兩線圈的「•」在同一側時稱為互助，其***M***為正值。此時每個線圈的總電感量為： $L_1 T = L_1 + M$ ， $L_2 T = L_2 + M$ ；串聯後的總電感量為：

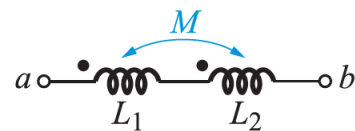
6-2 電感量

公式
6-10

$$L_T = L_{1T} + L_{2T} = (L_1 + M) + (L_2 + M) = L_1 + L_2 + 2 \times M \text{ (亨利, H)}$$



(a) 串聯互助的線圈



兩線圈的「•」在同一側者稱為互助，取 $+M$ 。

(b) 等效電路

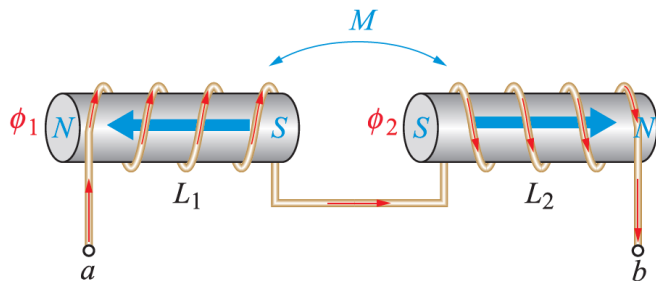
圖 6-6 串聯互助

6-2 電感量

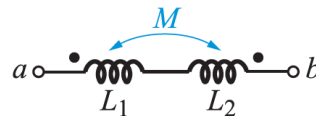
- (2) 串聯互消：兩串聯線圈的捲繞方向不同，所生磁場方向相反者，如圖6-7 所示；兩線圈的「•」在不同側時稱為互消，其 M 為負值。即每個線圈的總電感量為： $L_{1T}=L_1-M$ ， $L_{2T}=L_2-M$ 。串聯後的總電感量為：

$$L_T = L_{1T} + L_{2T} = (L_1 - M) + (L_2 - M) = L_1 + L_2 - 2 \times M \quad (\text{亨利, H})$$

公式
6-11



(a) 串聯互消的線圈



兩線圈的「•」在不同側者稱為互消，取 $-M$ 。

(b) 等效電路

圖 6-7 串聯互消

6-2 電感量

- 例題 **6-5** 不考慮互感的串聯總電感運算
- 將三個電感為 12 H 、 4 H 、 6 H 的線圈串聯，則其總電感量為多少 H ？

- 解 $L_T = L_1 + L_2 + L_3 = 12 + 4 + 6 = 22\text{ H}$

- 練習
- 8. 如圖所示電路，求總電感為多少？

- (A) 3 H (B) 4 H
(C) 6 H (D) 12 H 。



6-2 電感量

- 例題 **6-6** 考慮互感的串聯總電感運算
- 如圖所示之三個電感串聯電路，求其總電感為何？

- 解 L_1 、 L_2 互助， L_2 、 L_3 互消， L_3 、 L_1 互消，

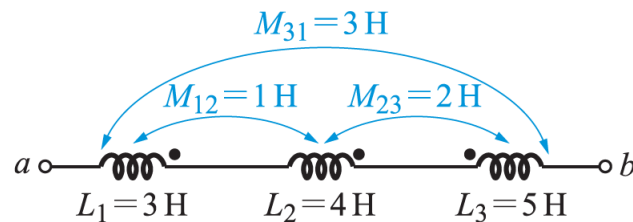
$$L_{1T} = L_1 + M_{12} - M_{31} = 3 + 1 - 3 = 1 \text{ H}$$

$$L_{2T} = L_2 + M_{12} - M_{23} = 4 + 1 - 2 = 3 \text{ H}$$

$$L_{3T} = L_3 - M_{31} - M_{23} = 5 - 3 - 2 = 0 \text{ H}$$

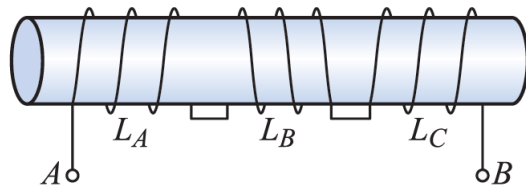
$$L_T = L_{1T} + L_{2T} + L_{3T} = 1 + 3 + 0 = 4 \text{ H}$$

$$\begin{aligned} \text{或 } L_T &= L_1 + L_2 + L_3 + 2 \times M_{12} - 2 \times M_{23} - 2 \times M_{31} \\ &= 3 + 4 + 5 + 2 \times 1 - 2 \times 2 - 2 \times 3 = 4 \text{ H} \end{aligned}$$



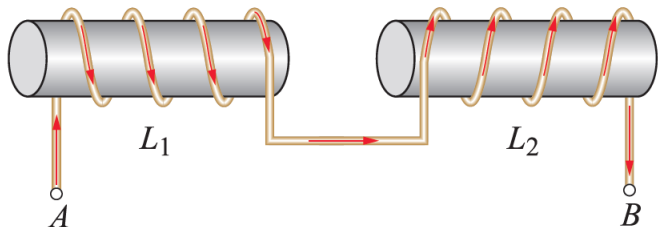
6-2 電感量

- 練習
- 9. 如圖所示之串聯電路， $L_A=5\text{ H}$ ， $L_B=10\text{ H}$ ， $L_C=15\text{ H}$ ，三者之互感均為 3 H ，求總電感為多少亨利？
(A) 12 (B) 18 (C) 20 (D) 24。



6-2 電感量

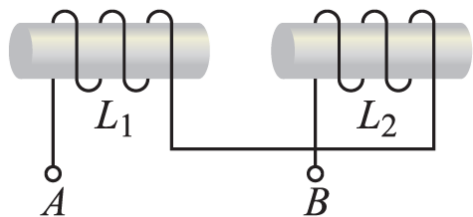
- 例題 **6-7** 串聯總電感綜合運算
- 如下圖所示，若 $L_1=9\text{ H}$ 、 $L_2=4\text{ H}$ 、 $K=0.5$ ，則：(1) 兩線圈的接法屬於哪一種？(2) 互感 M 為何？(3) 總電感 L_{AB} 為何？



- 解
- (1) 因為兩線圈捲繞方向不同，所產生的磁場方向相反，判定為串聯互消。
- (2) 互感 $M=K\sqrt{L_1L_2}=0.5\times\sqrt{9\times 4}=3\text{ H}$
- (3) 總電感 $L_{12}=L_1+L_2-2M=9+4-2\times 3=7\text{ H}$

6-2 電感量

- 練習
- 10. 如圖所示之電路， $L_1=16\text{ H}$ ， $L_2=4\text{ H}$ ， $K=0.8$ ，求總電感為多少亨利？
(A) 6.4 (B) 7.2 (C) 20 (D) 32.8。



6-2 電感量

- **6-2.4 電感器的並聯**
- 電感器的並聯也是分為無互感及有互感兩種算法。
- **1. 無互感的電感器並聯**

圖6-8 為兩個無互感的電感器並聯，其總電感的算法和電阻器並聯一樣，總電感為各電感倒數之和再倒數。並聯電感愈多，其總電感量愈小。

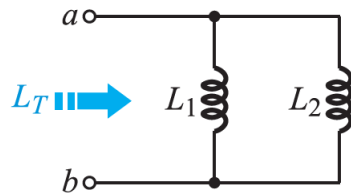


圖 6-8 無互感作用的電感器並聯

無互感的總電感

$$\frac{1}{L_T} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}$$

或

$$L_T = \frac{L_1 \times L_2}{L_1 + L_2} \quad (\text{亨利, H})$$

公式
6-12

6-2 電感量

- **2.有互感的電感器並聯**
- 將兩個含有互感的電感器並聯時，必須考慮兩者的磁場是互助還是互消，其總電感的算法不同，說明如下：
(1) 並聯互助（**mutual in parallel**）：兩並聯線圈的磁場方向相同者，如圖6-9 所示。由於相關公式推導過程繁複，亦無必要，故僅列出公式如下：

$$\text{並聯互助的總電感為 } L_T = \frac{L_1 \times L_2 - M^2}{L_1 + L_2 - 2 \times M} \text{ (亨利, H)}$$

公式
6-13

6-2 電感量

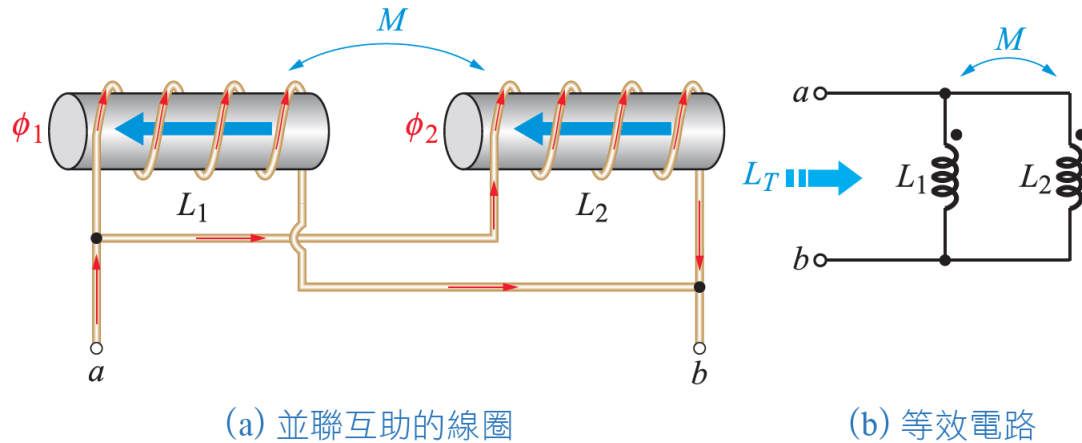


圖 6-9 並聯互助

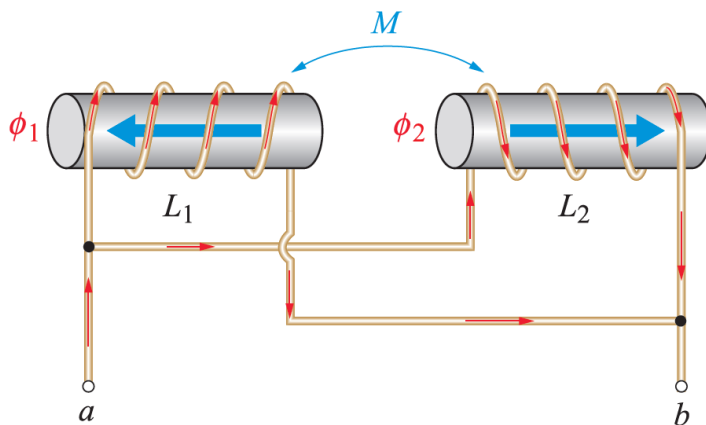
6-2 電感量

- (2) 並聯互消 (offset in parallel)：兩並聯線圈的磁場方向相反者，如圖 6-10 所示。

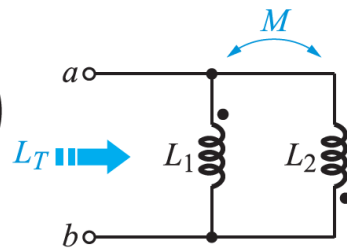
$$\text{並聯互消的總電感為 } L_T = \frac{L_1 \times L_2 - M^2}{L_1 + L_2 + 2 \times M} \quad (\text{亨利, H})$$

公式
6-14

註 並聯互助和互消的公式中，分子都相同；互消時，分母 $+2M$ 其值變大， L_T 變小；互助時，分母 $-2M$ 其值變小， L_T 變大。



(a) 並聯互消的線圈



(b) 等效電路

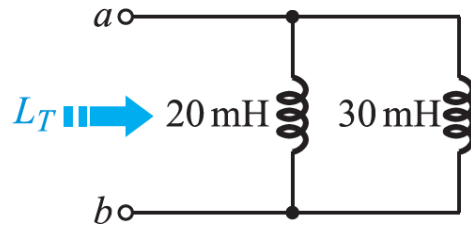
圖 6-10 並聯互消

6-2 電感量

- 例題 **6-8** 不考慮互感的並聯總電感運算
- 如右圖所示，試求總電感為多少亨利？（不考慮互感）

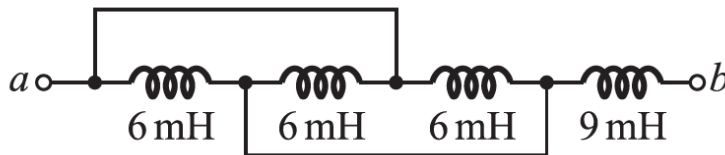
- 解 應用（6-12）公式

$$L_T = \frac{L_1 \times L_2}{L_1 + L_2} = \frac{(20 \times 10^{-3}) \times (30 \times 10^{-3})}{(20 \times 10^{-3}) + (30 \times 10^{-3})}$$
$$= 12 \text{ mH (毫亨利)}$$



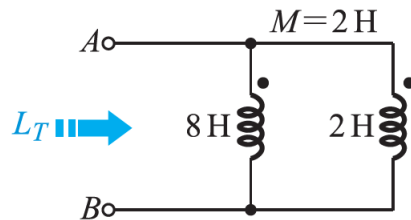
6-2 電感量

- 練習
- 11. 如圖所示，各電感之間無互感存在，則 a 、 b 兩端之總電感值為多少？
(A) 15 mH (B) 11 mH (C) 8 mH (D) 4.5 mH。



6-2 電感量

- 例題 **6-9** 考慮互感的並聯總電感運算
- 如右圖所示，試求總電感 L_T 等於多少H？

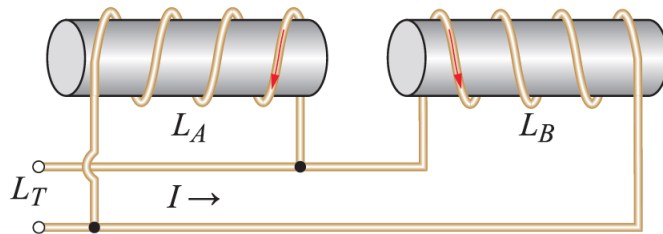


- 解 並聯互助，根據（6-14）公式

$$L_T = \frac{L_1 \times L_2 - M^2}{L_1 + L_2 - 2 \times M} = \frac{8 \times 2 - 2^2}{8 + 2 - 2 \times 2} = 2 \text{ H}$$

6-2 電感量

- 練習
- 12. 如圖所示之並聯線圈， $L_A=2\text{ H}$ ， $L_B=4\text{ H}$ ，互感 M 為 1 H ，則其總電感為多少亨利？
(A) 0.5 (B) 0.875
(C) 1.33 (D) 1.75。



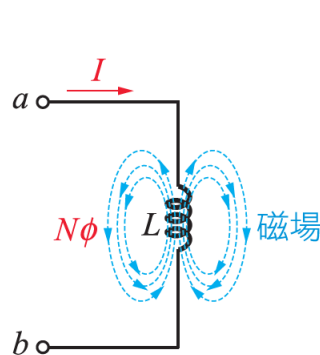
6-2 電感量

- **6-2.5 電感器的儲能特性**
- 在5-3 節「電場與電位」中知道：電容器是以電場的形式儲存能量，其能量的算式為 $W = \frac{1}{2} CV^2$ ；從6-1 節「電感器」中得知：電感器是以磁場的形式儲存能量。
- 從（6-2）公式 $L = \frac{N\phi}{I}$ 得知：對某一電感器而言，所加入的電流 I 逐漸增加時，其所產生的磁交鏈 $N\phi$ 隨之增加，而其儲存的磁能亦由零逐漸增大；整個過程中，電感器所加入的電流 I 及其產生的磁交鏈 $N\phi$ 的變化為一線性關係，如圖6-11 所示，該直線的斜率 $m = \frac{N\phi}{I} = L$ ；在 $N\phi$ 及 I 之間的三角形面積，代表該電感器的儲存能量 W ，根據三角形面積計算公式，故儲存能量 W 為：

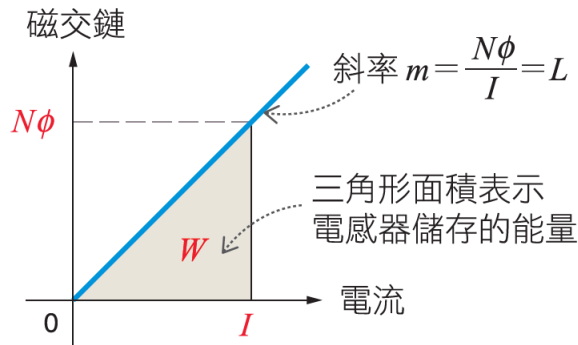
6-2 電感量

公式
6-15

$$W = \frac{1}{2} \times N\phi \times I = \frac{1}{2} \times LI^2 \quad (\text{焦耳, J})$$



(a) 電路圖



(b) 直角座標圖

圖 6-11 電感器的能量儲存（可以和圖 5-12 對照學習）

註 有關電感器的充電及放電的過程及運算式，將於本書下冊 7-2 節「RL 暫態電路」中詳述。

6-2 電感量

- 例題 **6-10** 電感器儲能運算
- 某一電感器通以 **10 A** 之電流，產生 **5 焦耳** 之能量，則此電感器之電感量為多少 **H** ？
- 解 應用 (6-15) 公式 $W = \frac{1}{2} \times L \times I^2 \quad \therefore L = \frac{2 \times W}{I^2} = \frac{2 \times 5}{10^2} = 0.1 \text{ H}$
- 練習
- 13. 一線圈之匝數為 **1000 匝**，通過之電流為 **5 安培**，產生之磁通為 2×10^{-3} 韋伯，試求該線圈所儲存之能量為多少焦耳？
(A) 5 (B) 8 (C) 10 (D) 12。

6-3 磁的基本概念

- **6-3.1 磁場及磁力線**
- 凡是能夠吸引鐵器的物體便稱為磁鐵；磁鐵分為天然磁鐵（ Fe_3O_4 四氧化三鐵）及人造磁鐵兩類，人造磁鐵又分為永久磁鐵及電磁鐵。磁鐵具有下列特性：
 - **1.**磁鐵的兩端其磁性最強，稱之為磁極。
 - **2.**將磁鐵懸吊於空中，待靜止後指向地球北方的磁極為***N***極，指向地球南方的磁極為***S***極。
 - **3.**任何一塊磁鐵，***N***、***S***兩極同時存在於兩端，亦即磁極無法單極存在。
 - **4.**若將兩磁鐵靠近時，相同極性者會互相排斥、不同極性者會互相吸引。

6-3 磁的基本概念

- 磁鐵附近磁力作用所及的空間稱為磁場（**magnetic field**）；通常以磁粉灑在磁鐵四周，觀察磁粉的排列即可得知磁場分布的情形，如圖6-12所示；其中磁粉集結密度最高的兩端稱為磁極，兩磁極間呈現規則性的線條稱為磁力線；磁力線的特性歸納如下：

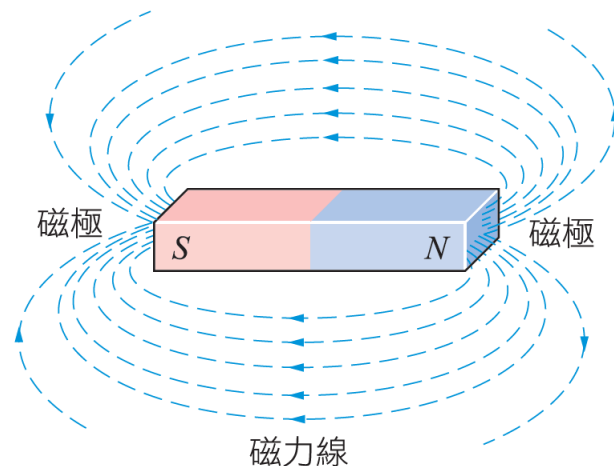


圖 6-12 磁力線分布情形

6-3 磁的基本概念

- **1.**磁力線由***N*** 極發出，經由外部空間進入***S***極，再經過磁鐵內部回到***N*** 極，形成一封閉曲線，其路徑具有緊縮現象。
- **2.**磁力線在出發或進入磁極時，必定與磁極表面垂直，而且不會交叉。
- **3.**磁力線愈密集處，表示其磁場強度愈強。
- **4.**磁力線上任一點的切線方向，即為該點的磁場方向。

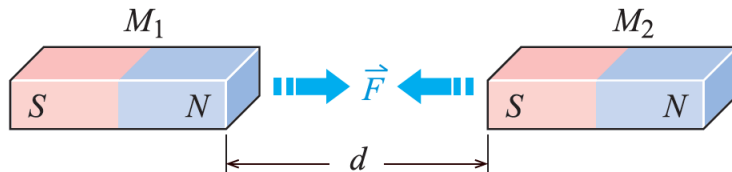
6-3 磁的基本概念

- **6-3.2 庫侖磁力定律**
- 在5-3 節「電場及電位」中，我們知道兩電荷之間有作用力存在，其關係式是依據庫侖靜電力定律而來；同理在兩個磁極間也會有相互排斥或吸引的力量，依據的也是庫侖所發表的庫侖磁力定律，其含義為：「兩個磁極間的磁力大小（ F ），與兩磁極強度（ M_1 、 M_2 ）的乘積成正比，和其距離的平方（ d^2 ）成反比」，以數學式表示為：（如表6-1 及圖6-13所示）

$$\vec{F} \text{ (磁力)} = K \text{ (常數)} \times \frac{M_1 \text{ (磁極 1)} \times M_2 \text{ (磁極 2)}}{d^2 \text{ (距離平方)}} \quad (\text{牛頓, N})$$

公式
6-16

6-3 磁的基本概念



註 此處 $\vec{F}$ 用以表示兩磁極相吸或相斥力屬於向量，有大小及方向。

圖 6-13 兩磁極間的磁力作用示意

表 6-1 庫倫磁力定律之單位

名稱	磁力 (F)	磁極磁通量 (M_1 、 M_2)	距離 (d)	常數 (K)	空氣或真空中 導磁係數 (μ_o)
MKS 制	牛頓 (N)	韋伯 (Wb)	公尺 (m)	$\frac{1}{4\pi\mu_r\mu_o}$	$4\pi \times 10^{-7}$
CGS 制	達因 (dyne)	靜磁	公分 (cm)	$\frac{1}{\mu_r}$	1

6-3 磁的基本概念

其中 MKS 制視同為國際單位系統 SI 制；CGS 制已較少使用，僅供參考。

單位換算：1 牛頓 = 10^5 達因，1 靜磁 = 4π 線，1 韋伯 = 10^8 線 = $\frac{1}{4\pi} \times 10^8$ 靜磁。

公式中 K 為一常數， $K = \frac{1}{4\pi\mu}$ ，其中 μ 表示介質的導磁係數， $\mu = \mu_o \times \mu_r$ ，在空氣或真空中，相對導磁係數 $\mu_r = 1$ ，空氣或真空導磁係數 $\mu_o = 4\pi \times 10^{-7}$ 亨利／公尺（H/m），故

$$\begin{aligned} \text{空氣中，常數 } K &= \frac{1}{4\pi\mu} = \frac{1}{4\pi \times (4\pi \times 10^{-7}) \times 1} \\ &= 6.33 \times 10^4 \quad (\text{公尺} / \text{亨利}, \text{m/H}) \end{aligned}$$

公式
6-17

6-3 磁的基本概念

- 代入（6-16）公式，得空氣中電磁力為：

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\mu} \times \frac{M_1 \times M_2}{d^2} = 6.33 \times 10^4 \times \frac{M_1 \times M_2}{d^2} \quad (\text{牛頓, N})$$

公式
6-18

註 可以和 P.200 的（5-19）公式，靜電力 $\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \times \frac{Q_1 \times Q_2}{d^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{Q_1 \times Q_2}{d^2}$ 對照學習。

6-3 磁的基本概念

- 例題 **6-11** 兩磁場所生磁力的計算
- 在空氣中有兩個磁極 M_1 及 M_2 相距20 cm，若 $M_1=4\times 10^{-3}$ 韋伯， $M_2=10\times 10^{-3}$ 韋伯，試求：
 - (1) 兩磁極之間的作用力為多少牛頓？
 - (2) 若將兩磁極移至相對導磁係數為10 的介質中，則其作用力變為多少牛頓？

6-3 磁的基本概念

- 解

$$\begin{aligned}
 (1) \vec{F} &= 6.33 \times 10^4 \times \frac{M_1 \times M_2}{d^2} \\
 &= 6.33 \times 10^4 \times \frac{(4 \times 10^{-3}) \times (10 \times 10^{-3})}{(20 \times 10^{-2})^2} = 63.3 \text{ N (牛頓) 相互排斥}
 \end{aligned}$$

(2) $\because \vec{F}$ 和 μ_r 成反比，假設原來的作用力為 $\vec{F}_1$ ，新的作用力為 $\vec{F}_2$ ，則

$$\vec{F}_2 = \vec{F}_1 \times \frac{\mu_{r1}}{\mu_{r2}} = 63.3 \times \frac{1}{10} = 6.33 \text{ N (牛頓)}$$

- 練習

- 14. 根據庫侖磁力定律，介質的導磁係數愈高，則磁極所受的磁力？

(A) 變大 (B) 變小 (C) 不變 (D) 不一定。

6-3 磁的基本概念

- **6-3.3 磁場強度**
- 和5-3 節「電場與電位」之電場強度雷同；磁場強度（**magnetic field intensity**）的定義是：「單位磁極（ m ）在磁場中某一點所受到的磁力（ $\vec{F}$ ）」，其符號以 $\vec{H}$ 表示；即

$$\vec{H} \text{ (磁場強度)} = \frac{\vec{F} \text{ (磁力)}}{m \text{ (磁極)}} \quad (\text{牛頓／韋伯，N/Wb})$$

公式
6-19

6-3 磁的基本概念

- 因為磁力為向量，故磁場強度也是向量，其方向為磁力線的切線方向；將（6-18）式 $\vec{F}$ 代入（6-19）式，可得：

$$\vec{H} = \frac{\vec{F}}{m} = \frac{1}{4\pi\mu} \times \frac{M \times m}{d^2} = \frac{1}{4\pi\mu} \times \frac{M}{d^2}$$

$$= 6.33 \times 10^4 \times \frac{M}{d^2} \quad (\text{牛頓 / 韋伯, N/Wb}) \quad \text{空氣中 } \mu_r = 1$$

公式
6-20

註 可以和（5-21）公式，電場強度 $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} = 9 \times 10^9 \times \frac{Q}{d^2}$ 對照學習。

- 發現：磁場強度（ H ）和該磁極的大小（ M ）成正比，和其距離的平方（ d^2 ）成反比。

6-3 磁的基本概念

- 例題 **6-12** 磁場強度運算公式（一）
- 某磁極為**2** 韋伯，在磁場中某點受到**16** 牛頓之作用力，試求該點的磁場強度為何？

- 解 運用（6-19）公式

$$\vec{H} = \frac{\vec{F}}{m} = \frac{16}{2} = 8 \text{ N/Wb (牛頓 / 韋伯)}$$

- 練習
- 15. 韋伯（Wb）是下列何者的單位？
(A) 電通量 (B) 電量 (C) 磁通量 (D) 磁力。

6-3 磁的基本概念

- 例題 **6-13** 磁場強度運算公式（二）
- 空氣中，距離某磁極**6.33** 公尺處的磁場強度為**10** 牛頓／韋伯，試求該點磁極為多少韋伯？

- 解 運用（6-20）公式 $\vec{H} = 6.33 \times 10^4 \times \frac{M}{d^2}$ N/Wb（牛頓／韋伯）

$$10 = 6.33 \times 10^4 \times \frac{M}{6.33^2} \quad \therefore M = 6.33 \times 10^{-3} \text{ Wb（韋伯）}$$

- 練習
- 16. 在空氣中距離 **25×10^{-4}** 韋伯磁極**50 cm** 處的磁場強度為多少牛頓／韋伯？
(A) 31.65 (B) 63.3 (C) 316.5 (D) 633。

6-3 磁的基本概念

- **6-3.4 磁通密度及導磁係數**
- **1.磁通量 (magnetic flux)：**磁場中磁力線通過的數量，以符號 ϕ （讀作phi）表示；根據磁的高斯定理：「一磁極所進出的磁力線總數（ ϕ ），恆等於該磁極之磁極強度（ M ）」，即： $\phi=M$ （韋伯）。
- **2.磁通密度 (magnetic flux density，代號為 B)：**磁場中，單位面積（ A ）磁力線通過的總數（ ϕ ）；以公式表示如下：

$$B \text{ (磁通密度)} = \frac{\phi \text{ (磁通量)}}{A \text{ (截面積)}}$$

（韋伯／平方公尺 或 特斯拉， Wb/m^2 或 T）

公式
6-21

註 磁通密度之單位為「韋伯／平方公尺」，又可稱為特斯拉（Tesla, T）。

6-3 磁的基本概念

- 若以磁極 M 為球心，距離 d ，則球形面積 $A=4\pi d^2$ ，代入上式得：

$$B = \frac{\phi}{A} = \frac{M}{A} = \frac{M}{4\pi d^2} \quad (\text{特斯拉, T})$$

公式
6-22

註 可以和 P.204 的 (5-24) 公式，電通密度 $D = \frac{\Psi}{A} = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{4\pi d^2}$ 對照學習。

- 比較 (6-20) 及 (6-22) 式，得：

$$B = \mu \times H \quad (\text{特斯拉, T})$$

公式
6-23

- 發現：磁通密度和磁場強度成正比；磁場強度愈強的地方，其磁通密度愈高。

6-3 磁的基本概念

- **3. 導磁係數 (μ)**：磁通密度和磁場強度的比值；此值愈高表示其導磁效能愈好，例如：矽鋼、鐵、鈷等。導磁係數以數學式表示如下：

$$\mu \text{ (導磁係數)} = \frac{B \text{ (磁通密度)}}{H \text{ (磁場強度)}} \quad (\text{亨利 / 公尺, H/m})$$

公式
6-24

註 可以和 P.204 的 (5-26) 公式，介電係數 $\epsilon = \frac{D}{E}$ 對照學習。

6-3 磁的基本概念

表 6-2 磁通密度與磁場強度

名稱	磁通密度 (B)	磁通量 (ϕ)	截面積 (A)	磁場強度 (H)	導磁係數 (μ)
MKS 制	韋伯／平方公尺或 特斯拉 (T)	韋伯 (Wb)	平方公尺 (m^2)	牛頓／韋伯 (N/Wb)	亨利／公尺 (H/m)
CGS 制	馬克士威／平方公分 或高斯 (Gauss)	線或馬克士威	平方公分 (cm^2)	達因／靜磁 或奧斯特	

單位換算：1 韋伯 = 10^8 馬克士威或線；1 T = 1 Wb/ m^2 = 10^4 Gauss。

6-3 磁的基本概念

- 例題 **6-14** 磁通密度基本運算
- 某一磁極發射出磁力線數為 2×10^{-3} 韋伯，已知該磁極之截面積為 10 cm^2 ，試求磁通密度為多少特斯拉？

- 解 應用（6-22）公式

$$B = \frac{\phi}{A} = \frac{2 \times 10^{-3}}{10 \times 10^{-4}} = 2 \text{ T (特斯拉)}$$

- 練習
- 17. 在 6 cm^2 的表面積上有20 特斯拉的磁通密度，則其磁通量有多少韋伯？
(A) 0.012 (B) 0.12 (C) 12 (D) 120 。

6-3 磁的基本概念

- 例題 **6-15** B 與 H 的關係運算
- 設某磁路之磁通密度為 8 Wb/m^2 ，磁場強度為 1000 N/Wb ，試問該磁路的導磁係數為何？

- 解 應用公式 (6-24)

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{8}{1000} = 0.008 = 8 \times 10^{-3} \text{ H/m (亨利 / 公尺)}$$

- 練習
- 18. 在空氣中，若某處磁通密度為 20 韋伯 / 平方公尺，則其磁場強度為多少牛頓 / 韋伯？

(A) $\frac{3}{\pi} \times 10^3$ (B) $\frac{3}{\pi} \times 10^4$ (C) $\frac{5}{\pi} \times 10^7$ (D) $\frac{\pi}{3} \times 10^4$ 。

6-3 磁的基本概念

- **6-3.5 磁化及磁動勢**
- 將一未帶有磁性的鐵或鋼，使之產生磁性的過程，稱為磁化（magnetizing）；如圖6-14 所示，在一環形材料繞上線圈、通以電流後，將使該材料產生磁通，成為帶有磁性的電磁鐵；其中的線圈稱為磁化線圈，電流稱為磁化電流，而磁化電流（ I ）和線圈匝數（ N ）的乘積稱為磁動勢（magnetic motive force，簡稱mmf，符號 $\mathcal{F}$ ），即

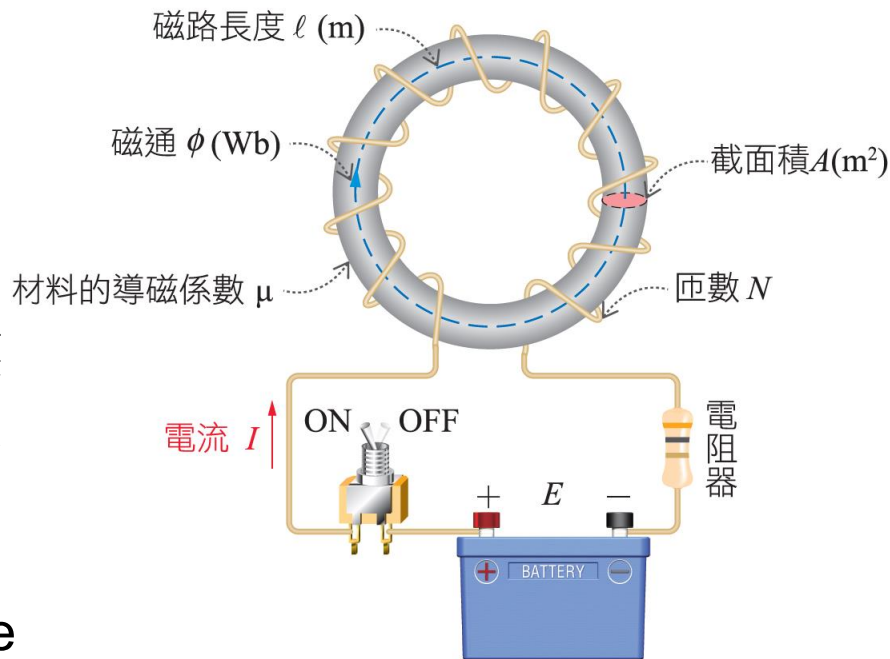


圖 6-14 磁化的觀念

6-3 磁的基本概念

公式
6-25

$$\mathcal{F} \text{ (磁動勢)} = N \text{ (匝數)} \times I \text{ (電流)} \quad (\text{安匝, AT})$$

- 磁動勢是產生磁通的原動力，在電磁鐵上磁動勢是由外加電流所產生；在電路中，電動勢是提供電流的原動力；就電路和磁路的對應關係而言：
- 電動勢加在電阻（ R ）上，形成電流，關係式為歐姆定律： $E=I \times R$
- 磁動勢加在磁阻（ $\mathcal{R}$ ）上，產生磁通，關係式為羅蘭定律（Rowland's law）：

6-3 磁的基本概念

$$\mathcal{F} \text{ (磁動勢)} = \phi \text{ (磁通量)} \times \mathcal{R} \text{ (磁阻)} \quad (\text{安匝, AT})$$

公式
6-26

$$\mathcal{R} \text{ (磁阻)} = \frac{\ell \text{ (磁路長度)}}{\mu \text{ (導磁係數)} \times A \text{ (截面積)}} \quad (\text{安匝 / 韋伯, AT/Wb})$$

公式
6-27

 註 電阻 $R = \rho \times \frac{\ell}{A} = \frac{\ell}{\sigma \times A}$ (歐姆, Ω) ; 磁阻 ($\mathcal{R}$) 可視為阻止磁力線通過的參數。

6-3 磁的基本概念

前述的磁場強度為「單位磁極在磁場中某一點所受的作用力， $H = \frac{F}{m}$ 」又可稱為磁化力（magnetizing force），以圖 6-14 表示，則「磁化力可視為磁路上每單位長度（ ℓ ）的磁動勢（ $\mathcal{F}$ ）」；以數學式表示如下：

$$H \text{ (磁化力)} = \frac{\mathcal{F} \text{ (磁動勢)}}{\ell \text{ (長度)}} = \frac{N \text{ (匝數)} \times I \text{ (電流)}}{\ell \text{ (長度)}}$$

（安匝／公尺 或 牛頓／韋伯，AT/m 或 N/Wb）

公式
6-28

綜合（6-25）、（6-26）及（6-28）公式，得磁動勢：

$$\mathcal{F} = N \times I = \phi \times \mathcal{R} = H \times \ell \text{ (安匝，AT)}$$

6-3 磁的基本概念

- 例題 **6-16** 磁阻計算
- 有一環形鐵心截面積為 0.05 m^2 ，導磁係數 μ 為 $4 \times 10^{-3} \text{ H/m}$ ，其磁路長 80 cm ，試求該磁路的磁阻為多少安匝／韋伯？

- 解 應用（6-27）公式

$$\text{磁阻 } \mathcal{R} = \frac{\ell}{\mu \times A} = \frac{80 \times 10^{-2}}{(4 \times 10^{-3}) \times (5 \times 10^{-2})} = 4 \times 10^3 \text{ AT/Wb (安匝／韋伯)}$$

- 練習
- 19. 在磁學中，安匝是何者的單位？
(A) 磁動勢 (B) 磁通量 (C) 磁通密度 (D) 磁場強度。

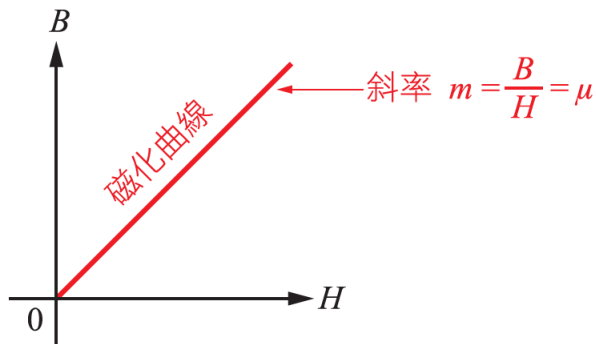
6-3 磁的基本概念

- 例題 **6-17** 磁動勢與磁化力計算
- 在一磁路長10 cm 的鐵心上，繞上50 匝線圈，通以0.4 A 電流時，則產生磁動勢為多少安匝？
- 解 應用（6-25）公式
磁動勢 $\mathcal{F}=N \times I=50 \times 0.4=20 \text{ AT}$ （安匝）
- 練習
- 20. 在一磁路長10 cm 的鐵心上，繞上50 匝線圈，通以0.4A電流時，則鐵心的磁化力為多少安匝／公尺？
(A) 20 (B) 80 (C) 120 (D) 200 。

6-3 磁的基本概念

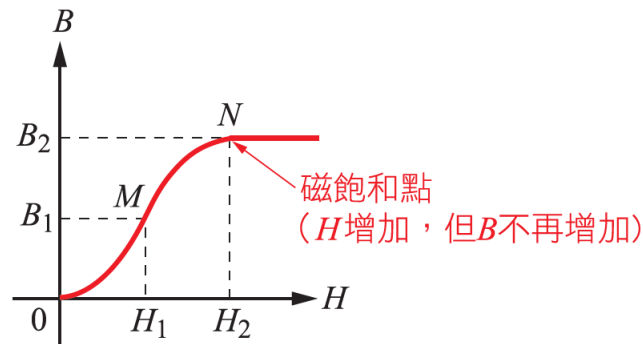
- **6-3.6 磁化曲線及磁滯迴線**
- 1. 磁化曲線
- 物體在磁化過程中，磁化力（ H ）的改變會造成磁通密度（ B ）的變化，這種變化的過程以曲線表示稱為磁化曲線（magnetizing curve），又稱為 $B-H$ 曲線。不同材質的物體會有不同的磁化曲線。圖6-15(a) 為非磁性、圖6-15(b) 為磁性材料的磁化曲線及其特性。

6-3 磁的基本概念



(a) 非磁性材料的磁化曲線

- 特性：
- (1) B 、 H 呈線性變化
 - (2) 不會有磁飽和現象
 - (3) 斜率 $m = \frac{B}{H} = \mu$



(b) 磁性材料的磁化曲線

- 特性：
- (1) B 、 H 呈非線性變化
 - (2) N 點稱為磁飽和點，斜率 $m=0$
 - (3) MN 段斜率 $m = \frac{B_2 - B_1}{H_2 - H_1} = \mu$

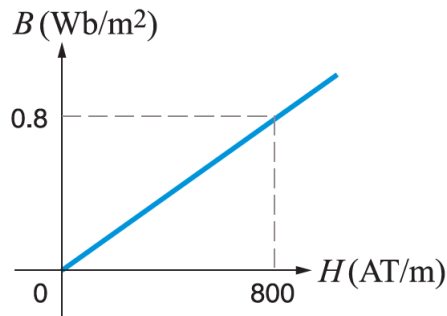
圖 6-15 磁化曲線或 B - H 曲線

6-3 磁的基本概念

- 根據（6-24）式， $B=\mu\times H=\mu_0\times\mu_r\times H$ ，其中 μ_0 為定值， μ_r （相對導磁係數）則會因磁性材料不同而異，可分為下列四類：
- **1.強（鐵）磁性材料：** $\mu_r \gg 1$ ，導磁性最佳，如鐵、矽鋼、鈷及鎳等。
- **2.順磁性材料：** $\mu_r > 1$ ，感應磁通與磁場同向，具導磁性，如鋁、鉑及鎢等。
- **3.非磁性材料：** $\mu_r = 1$ ， $B-H$ 曲線為一直線，不會發生磁飽和，如真空。
- **4.反磁性材料：** $\mu_r < 1$ ，感應磁通與磁場反向，不具導磁性，如金、銀及銅等。

6-3 磁的基本概念

- 例題 **6-18** 磁化曲線的應用
- 有一材料經實驗獲得其磁化曲線如右圖所示，試求此材料的導磁係數 μ 為多少 H/m ？

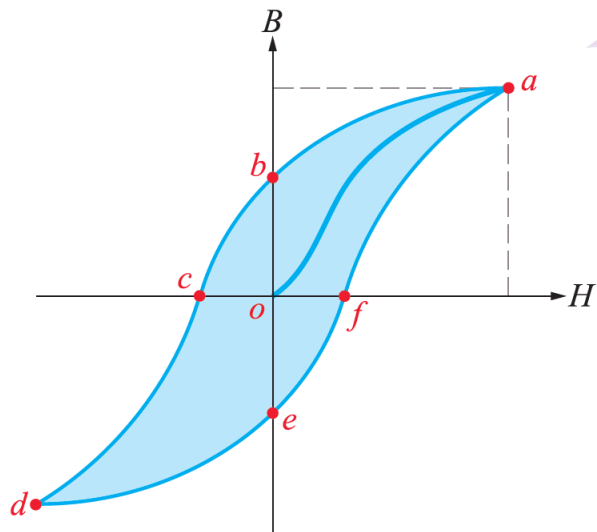


- 解 $\mu = \frac{B}{H} = \frac{0.8}{800} = 10^{-3} \text{ H/m}$ (亨利 / 公尺)
- 練習
- 21. 有一材料經實驗獲得其磁化曲線如例題的圖，試求當 $H=100 \text{ AT/m}$ 時，對應的 B 為多少 Wb/m^2 ？
(A) 10 (B) 1 (C) 0.1 (D) 0.01 。

6-3 磁的基本概念

- 2. 磁滯迴線
- 圖6-16 為一磁性物體經過一磁化循環所得到的曲線，從 o 點開始往 $abcdefa$ 歷經一次正負的變化，形成一封閉曲線稱之為磁滯迴線（**hysteresis loop**）；所謂磁滯是指磁通密度 B 的變化比磁化力 H 為遲緩的現象；各區段所代表的涵義說明如下：

6-3 磁的基本概念



$\overline{oa}$ 段：正常「磁化飽和曲線」。

$\overline{ab}$ 段： H 減少， B 隨之減少。

$\overline{ob}$ 段： $H=0$ 時，所剩下的 B 稱為「剩磁」。

$\overline{bc}$ 段：加反向 H ，使 B 降至 0。

$\overline{oc}$ 段：使 B 降至 0，所加的 H ，稱為「矯頑磁力」。

$\overline{cd}$ 段：加反向 H ，使 B 反向增加至飽和。

$\overline{de}$ 段：減少反向的 H ，使反向 B 隨之減少。

$\overline{oe}$ 段： $H=0$ 時，剩下的反向 B 。

$\overline{ef}$ 段：加正向 H ，使 B 降至 0。

$\overline{fa}$ 段：正常磁化飽和曲線。

$abcdefa$ ：所圍成的面積為磁化過程中的「磁滯損失」；
此磁滯損失會使磁化物體發熱。

圖 6-16 磁滯迴線

6-4 電磁效應（電生磁）

- **6-4.1 前言**
- 物理學家奧斯特（Hans Christian Oersted，1777-1851）於西元1819年經實驗發現：當電流通過導體時，能使旁邊的磁針受到感應而偏轉；這種通電流能產生磁力的「電生磁」效應稱為電磁效應（electromagnetic effect），它提供了後來發明電動機的理論基礎。
- 接著，英國科學家法拉第（Michael Faraday，1791-1867）於西元1831年發現：線圈在磁場中運動時，會因感應而產生電流，這種因磁場變化而感應電勢的「磁生電」作用稱為電磁感應（electromagnetic induction），它奠定了創造發電機的理論基礎。由此得知：電和磁之間有著互有共生的密切關係。

6-4 電磁效應（電生磁）

- **6-4.2 帶電導體周圍之磁場方向**
- 1. 載流導體的磁場
- 奧斯特發現：當電流通過導體時，會使周圍的羅盤針受到感應而偏轉；這種現象說明：只要有電流，其周圍就會產生磁場；法國物理學家安培以圖6-17 之實驗發現：
- 1. 磁力線的分布是以導線為中心，成同心圓狀。
- 2. 當電流由上往下流時，磁力線呈順時針方向。
- 3. 當電流由下往上流時，磁力線呈逆時針方向。
- 4. 磁場的方向為磁力線的切線方向，也就是圖中小磁針 **N** 極的方向。

6-4 電磁效應（電生磁）

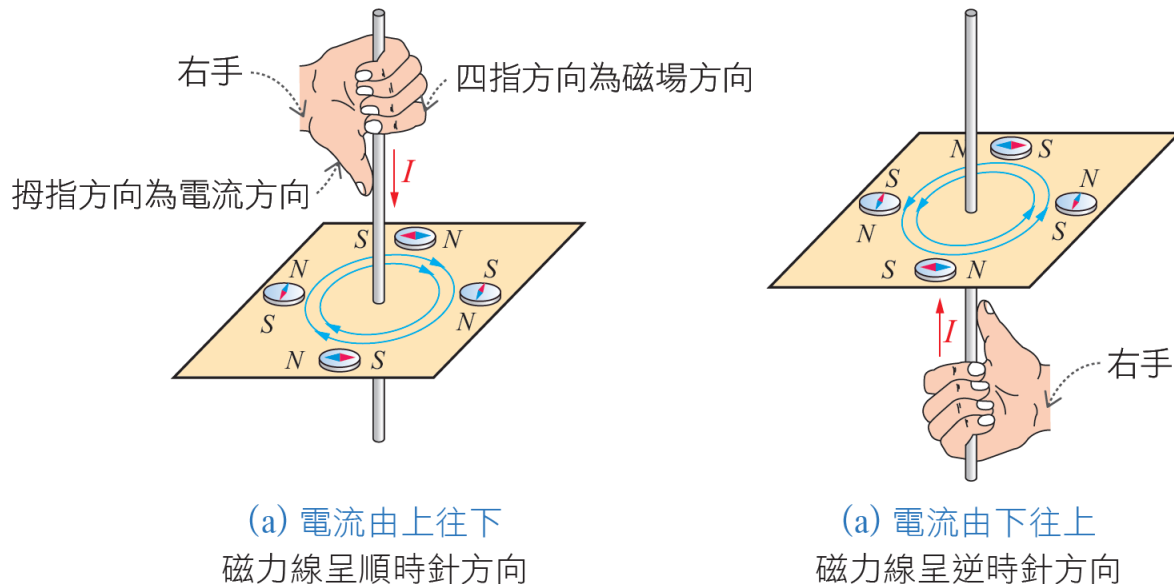


圖 6-17 載流導體磁場的分布

6-4 電磁效應（電生磁）

- 2. 安培右手定則—(1) 單直導線
- 安培於西元**1820** 年發表有名的安培右手定則，用來判斷載流導體所生磁場的方向，此定則適用於長直導線及螺線管。
- 就長直導線而言，安培右手定則的使用方法是：以右手掌握住導線，大拇指平伸、四指彎曲，則大拇指指向電流的方向，四指表示***N*** 極的磁場方向。當以平面圖來表示電流及磁場方向時如圖**6-18** 所示，通常以箭尾（形狀如「+」）表示電流流入紙面 $\oplus$ ，其磁場方向為順時針；以箭頭（形狀如「•」）表示電流自紙面流出 $\odot$ ，其磁場方向為逆時針。

6-4 電磁效應（電生磁）

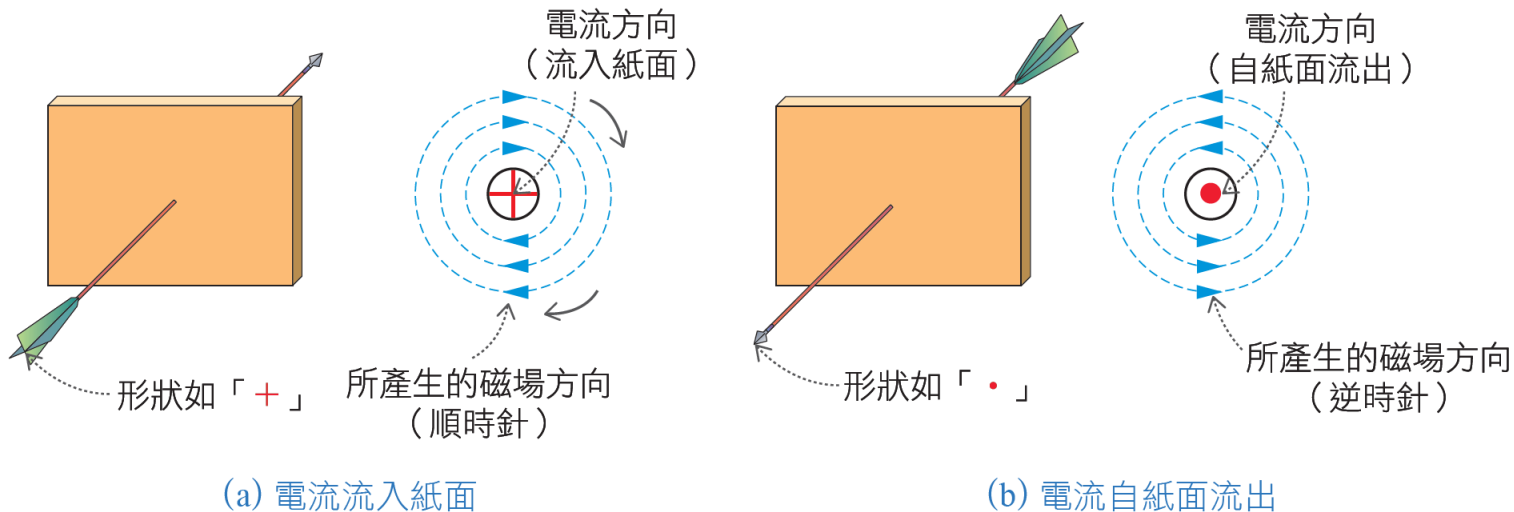


圖 6-18 電流流向及其磁場方向

6-4 電磁效應（電生磁）

- 3. 安培右手定則— (2) 螺旋線圈
- 當導體繞成螺旋狀線圈時，安培右手定則的使用方法是：彎曲的四指向電流的方向，大拇指表示 N 極磁場的方向，如圖6-19所示。

註 和長直導線時相反。

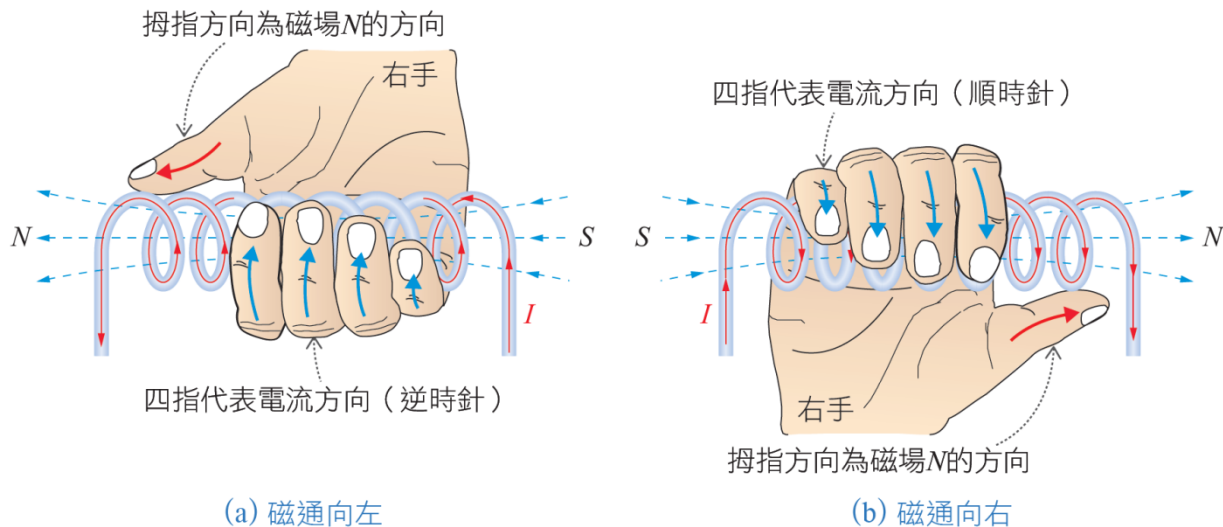


圖 6-19 安培螺旋定則

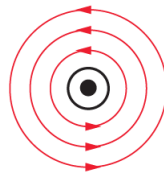
6-4 電磁效應（電生磁）

- **6-4.3 載流導體在磁場中之受力方向**
 - 1. 以「安培右手定則」判定
 - 載有電流之導體在磁場中受力的情形，如圖6-20 所示。圖6-20(a) 為主磁極所產生的磁力線方向，由左至右，圖6-20(b) 為導線通電流後產生磁力線之方向，為逆時針方向；若將圖6-20(a)、圖6-20(b) 兩圖合併，亦即將導體置於磁場中，則在導體上方，兩磁力線方向相反而相消如圖6-20(c) 所示，導體下方兩磁力線方向相同而相加如圖6-20(d) 所示，結果造成導體下方磁場較密而強，而導體上方疏而弱，迫使導體向上運動，如圖6-20(e) 所示。

6-4 電磁效應（電生磁）

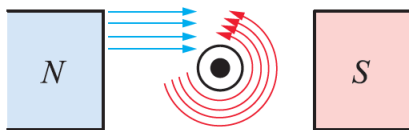


(a) 主磁極所生磁通 ($N \rightarrow S$)



(b) 載流導體所生磁通

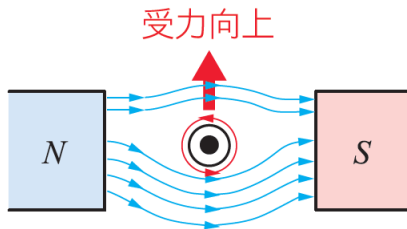
圖 6-20 載流導體在磁場中之受力情形



(c) 導體上方磁力線減弱



(d) 導體下方磁力線增強



(e) 綜合上述，導體產生向上運動之力

圖 6-20 載流導體在磁場中之受力情形（續）

6-4 電磁效應（電生磁）

- 2. 以「佛萊明左手定則」判定
 - 導體受力的方向，除了上述的判斷方法外，尚可用佛萊明左手定則（**Fleming's left-hand rule**）來決定之，如圖6-21 所示。其規則為：
 - 1.將左手大拇指、食指及中指伸直，並使之互成直角。
 - 2.各手指所代表的涵義如下：
 - 食 指：表示磁力線（ **B** ）方向（ **N** 指向 **S** 的方向）；
 - 中 指：表示外加電流（ **I** ）的方向；
 - 大拇指：即為導線受力（ **F** ）運動之方向；
- 此定則應用於電動機，故又稱為電動機定則。

6-4 電磁效應（電生磁）

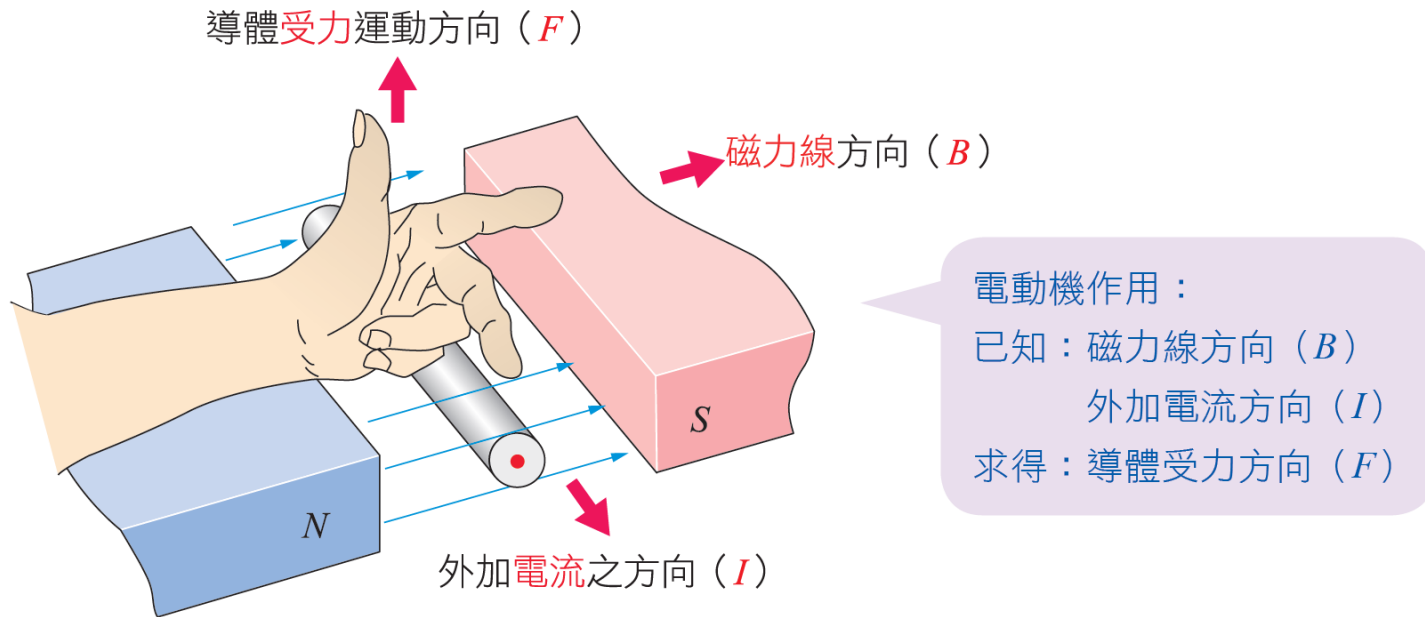


圖 6-21 佛萊明左手（電動機）定則說明

6-4 電磁效應（電生磁）

- **6-4.4 載流導體在磁場中所受力的大小**
- 載流導體在磁場中，所受力（ F ）的大小，受下列因素影響：
 - **1.磁通密度（ B ）**：導體所在磁場的磁通密度。
 - **2.電流（ I ）**：導體所通過電流之大小。
 - **3.有效長度（ $l\sin\theta$ ）**：有效切割磁場的導體長度；也就是導體和磁場的垂直分量， l 是導體的長度， θ 為導體和磁場的夾角。

6-4 電磁效應（電生磁）

- 假設導體和磁場方向相交 θ ，如圖6-22 所示，則導體所受之力為：

$$F(\text{力}) = B(\text{磁通密度}) \times I(\text{電流}) \times \ell \sin \theta(\text{有效長度}) \quad (\text{牛頓, N})$$

公式
6-29

- 若導體和磁力線方向垂直，即 $\theta=90^\circ$ ， $\sin \theta=1$ ，亦即

$$F = B \times I \times \ell \quad (\text{牛頓, N})$$

公式
6-30

6-4 電磁效應（電生磁）

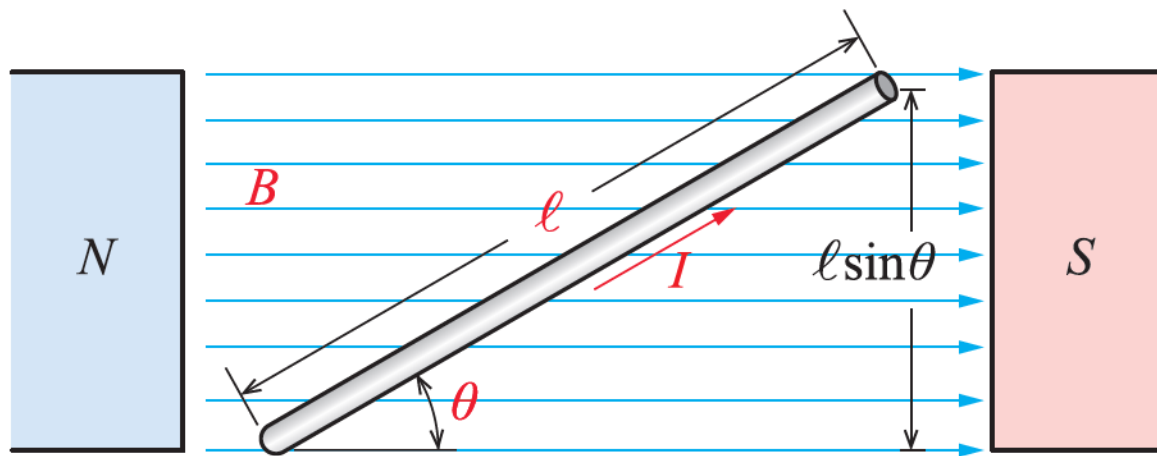


圖 6-22 載流導體在磁場中的情形

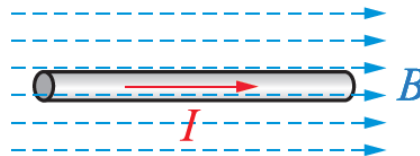
6-4 電磁效應（電生磁）

- 例題 **6-19** 載流導體受力計算（含夾角）
- 設有一導體長為40 cm，通以50 A 之電流，置於有0.3 Wb/m² 的均勻磁場中，試求當導體與磁場相交成30° 角時，此導體之受力為多少牛頓？
- 解 $\sin \theta = \sin 30^\circ = 0.5$ ， $\ell = 40 \text{ cm} = 0.4 \text{ m}$
 $F = B \times I \times \ell \times \sin \theta = 0.3 \times 50 \times 0.4 \times \sin 30^\circ = 3 \text{ N}$ （牛頓）

6-4 電磁效應（電生磁）

- 練習
- 22. 通有20 A 的導體，置於磁通密度為5 Wb/m² 中，如右圖所示，其中導體長50 公分，則導體受力為多少牛頓？

(A) 0 (B) 50 (C) 80 (D) 100 。



6-4 電磁效應（電生磁）

- **6-4.5** 兩平行導體間的作用力
- 圖6-23(a) 為兩導線電流方向相同時，其磁場分布的情形，根據安培右手定則，兩導體中間磁場方向相反互為抵消，使中間的磁通密度低於外側，因此兩導體有互相靠近、互相吸引的作用；反之，如圖6-23(b) 所示，當兩導線電流方向不同時，兩導體中間磁場方向相同而增強，使中間的磁通密度高於外側，因此兩導體有互相排斥的作用力。綜合以上所言，結論如下：兩平行導線所載電流方向相同時相互吸引，電流方向不同時相互排斥。

6-4 電磁效應（電生磁）

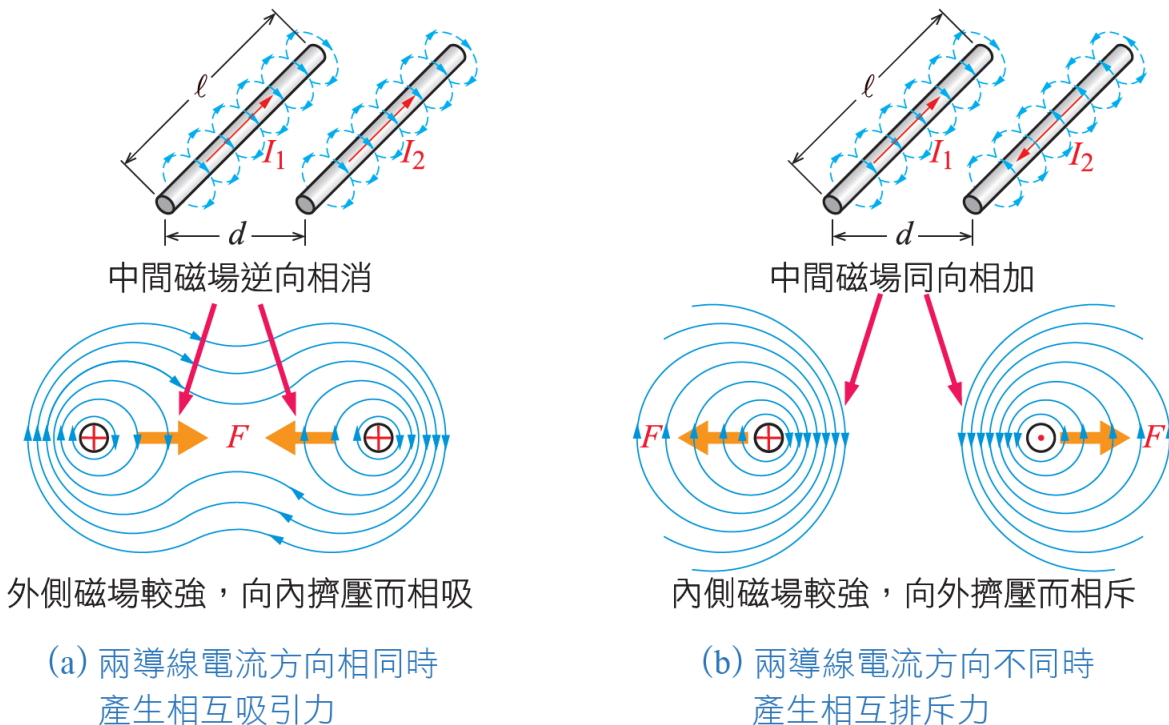


圖 6-23 兩平行載流導線間的磁場作用力

6-4 電磁效應（電生磁）

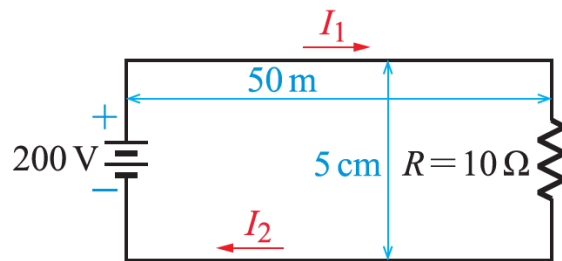
- 結論：兩載流平行導體之作用力（ F ）與導磁係數（ μ ）、長度（ ℓ ）及兩導體電流（ I_1 、 I_2 ）成正比，和兩導體之間距（ d ）成反比，以數學式表示如下：

$$F = \frac{\mu \times \ell \times I_1 \times I_2}{2\pi \times d} \quad (\text{牛頓, N})$$

公式
6-31

6-4 電磁效應（電生磁）

- 例題 **6-20** 求電路中兩條導線間的受力
- 如右圖所示，有一直流電源供應遠在**50** 公尺外的負載，試求兩線間作用力的大小及方向。（導線電阻忽略不計）



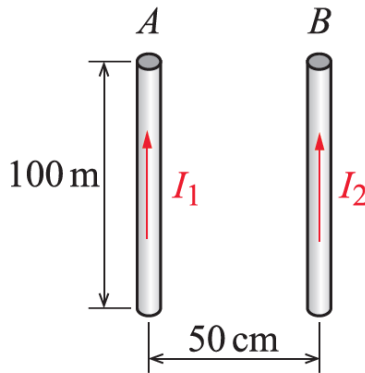
• 解
$$I_1 = I_2 = \frac{200}{10} = 20 \text{ A}$$

$$F = \frac{\mu \times \ell \times I_1 \times I_2}{2\pi d} = \frac{(4\pi \times 10^{-7}) \times 50 \times 20 \times 20}{2\pi \times (5 \times 10^{-2})} = 0.08 \text{ N (牛頓)}$$

兩導線所通電流方向相反，作用力相排斥，故上方導體受力向上，下方導體受力向下。

6-4 電磁效應（電生磁）

- 練習
- 23. 如右圖所示，有兩導線長度均為100 公尺， $I_1=5\text{ A}$ ， $I_2=10\text{ A}$ ，相距50 公分，試求A 導體受力為多少，方向為何？
(A) 0.2 mN 向右 (B) 0.2 mN 向左
(C) 2 mN 向右 (D) 2 mN 向左。



6-4 電磁效應（電生磁）



電學之父—法拉第（Michael Faraday, 1791-1867）

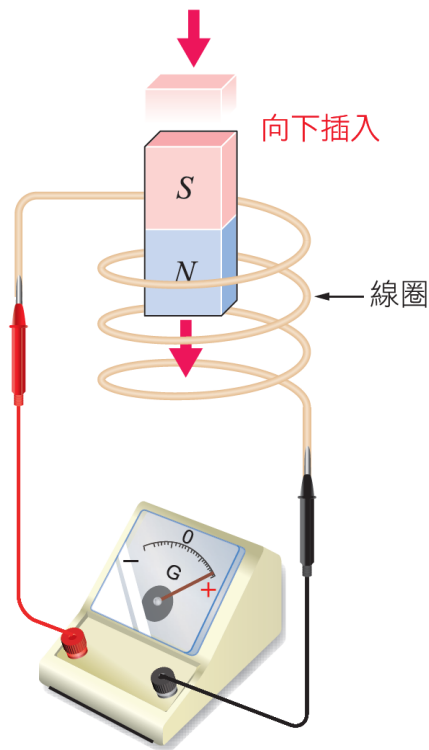
實驗物理學家邁克爾·法拉第生於倫敦一個鐵匠的家庭，讀過兩年小學後在書店當裝訂書的學徒，他喜歡讀書並動手做實驗，對科學研究很有興趣。1812 年跟隨皇家學院的化學家戴維進行科學研究，1831 年他發現了電磁感應現象，1833 年發現電流化學定律，奠定了日後電學的發展基礎，因此被尊稱為電學之父，同時為了紀念他，電容的單位稱為「法拉」。



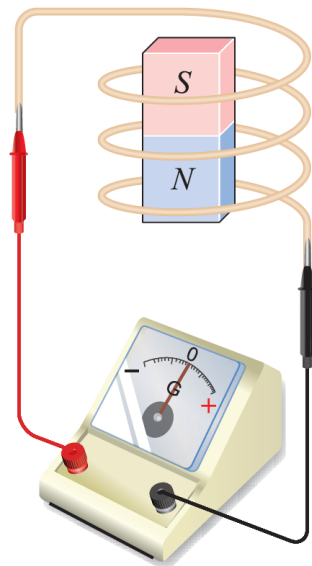
6-5 電磁感應（磁生電）

- **6-5.1 法拉第電磁感應定律**
- 1. 「電磁感應」的現象
- 法拉第曾經以一個多匝線圈與一靈敏之檢流計相連，再取一條形磁鐵，如圖6-24所示，依序實驗如下：
- 1. 當磁鐵插入線圈時（磁通量增加），此時檢流計指針會向一個方向偏轉。
- 2. 若磁鐵置入於線圈後靜止不動，則檢流計指針會回歸至0。
- 3. 將磁鐵從線圈內移出（磁通量減少），此時檢流計指針會向反方向偏轉。

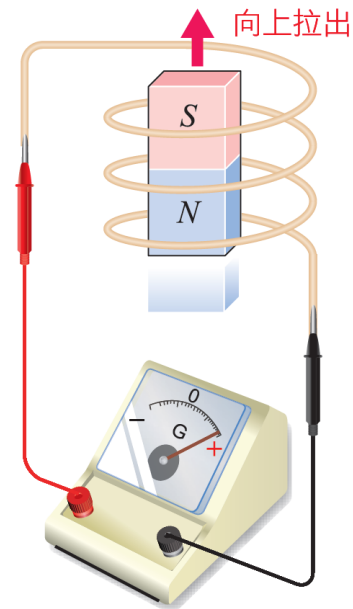
6-5 電磁感應（磁生電）



(a) 磁鐵插入時指針正向偏轉，
線圈感應正值電流



(b) 磁鐵靜止時指針歸零，線圈
無感應電流



(c) 磁鐵抽離時指針反向偏轉，
線圈感應負值電流

圖 6-24 法拉第電磁感應實驗

6-5 電磁感應（磁生電）

- 同理，若將磁鐵固定，而把線圈套入或抽出磁鐵時，則同樣會造成電流計的偏轉或靜止。換言之，磁鐵和線圈只要有相對運動，就會感應出電流，這種現象稱為電磁感應。其相對運動的速度快慢，會影響電流流動之大小；速度愈快，則電流流動愈大，而沒有相對運動時，則電流流動為零。
- 當一線圈中有電流流動發生時，必有與之相當的電動勢存在，此電動勢稱為感應電動勢。

6-5 電磁感應（磁生電）

- 2. 法拉第定律
- 感應電動勢（ e ）的大小和線圈的匝數（ N ）、穿越線圈的磁通量變動率（ $\frac{\Delta\phi}{\Delta t}$ ）成正比，這個關係稱為法拉第定律（Faraday's law），以公式表示為：

$$e \text{（感應電勢）} = N \text{（匝數）} \times \frac{\Delta\phi \text{（磁通變化量）}}{\Delta t \text{（時間變化量）}} \quad \text{（伏特，V）}$$

公式
6-32

6-5 電磁感應（磁生電）

- 例題 **6-21** 法拉第電磁感應定律的基本運算
- 100 匝之線圈中，若磁通在0.1 秒內由0.01 韋伯增加至0.03 韋伯，則該線圈感應電勢為多少伏特？
- 解 應用（6-32）式
$$e = N \times \frac{\Delta \phi}{\Delta t} = 100 \times \frac{0.03 - 0.01}{0.1} = 20 \text{ V}$$
- 練習
- 24. 200 匝之線圈在0.4 秒內感應100 V 之平均電勢，則其磁通變化量為多少Wb ？
(A) 0.2 (B) 0.4 (C) 2 (D) 4 。

6-5 電磁感應（磁生電）

- 例題 **6-22** 法拉第電磁感應定律的進階運算
- 有一匝導體，通過磁通密度為2 韋伯／平方公尺，磁極之截面積為50 公分×50 公分，需時0.1 秒，則此導體之感應電勢為何？

- 解 $B = 2 \text{ Wb/m}^2$ ， $A = 50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} = 50 \times 50 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
$$e = N \times \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = N \times \frac{BA}{\Delta t} = 1 \times \frac{2 \times (50 \times 50 \times 10^{-4})}{0.1} = 5 \text{ V}$$

- 練習
- 25. 一線圈之磁通量若直線增加時，線圈兩端感應之電勢為何？
(A) 增大 (B) 不變 (C) 隨著磁通量之增加而減少 (D) 不感應電勢。

6-5 電磁感應（磁生電）

- **6-5.2 楞次定律**
- 前述的法拉第定律中，定義了感應電勢的大小，但沒有說明感應電勢的方向；直到西元**1834**年德國物理學家楞次（**Heinrich Friedrich Emil Lenz**，**1804-1865**）進一步發現：「感應所生的電流會產生另外一個磁場，其方向為反抗原磁通的變化」，此稱為楞次定律（**Lenz's law**）；依據楞次定律，公式（**6-32**）應修正為：

$$e = -N \times \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (\text{伏特, V})$$

公式
6-33

6-5 電磁感應（磁生電）

- 負號表示「感應電勢之方向為反抗原來磁交鏈之變化」。
- 圖6-25(a) 用以說明外加磁場增加時，線圈的磁通及感應電流的變化，如下：
- **1.**當磁鐵向右靠近時，表示外加磁通會向右增加。
- **2.**根據楞次定律，其感應電流會產生一個向左方向的磁場，用以反對外加磁場的增加。
- **3.**根據安培右手定則，拇指向左表示***N*** 極磁場方向，四指向上表示電流方向，最後電流自右方流出，故流經負載的電流方向為從右往左。

6-5 電磁感應（磁生電）

- 反之，圖6-25(b)用以說明外加磁場減弱時，線圈的磁通及感應電流方向：
- **1.**當磁鐵向左移出時，表示外加磁通量向右減少。
- **2.**根據楞次定律，其感應電流將產生一個和原磁通相同方向的磁通，用以反對外加磁場的減少。
- **3.**根據安培右手定則，拇指向右表示 N 極磁場方向，四指向下表示電流方向，最後電流自左方流出，故流經負載的電流方向為從左往右。

6-5 電磁感應（磁生電）

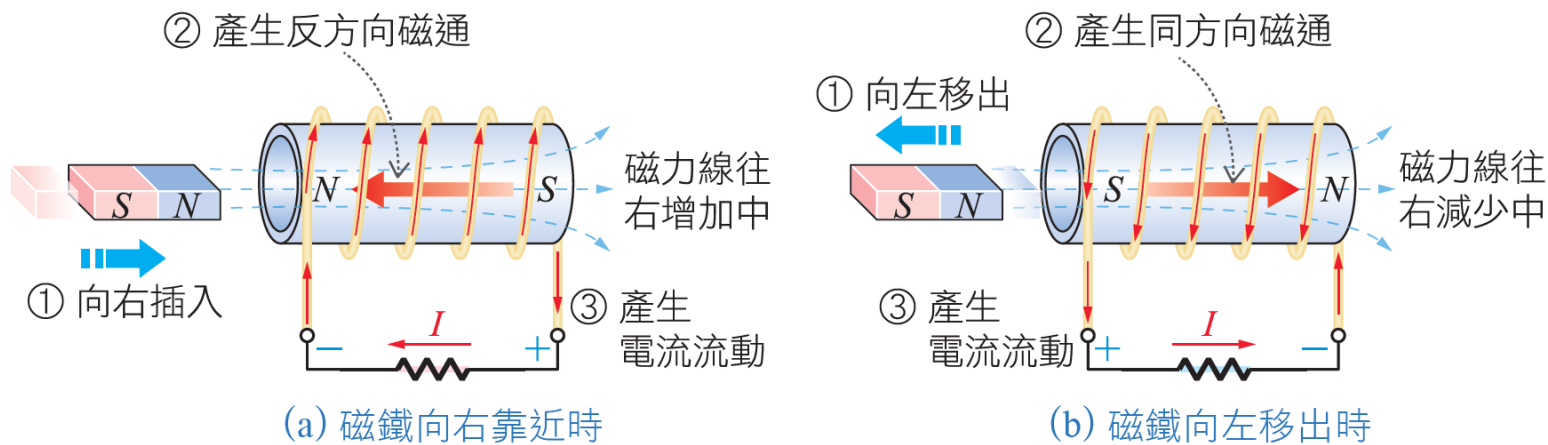
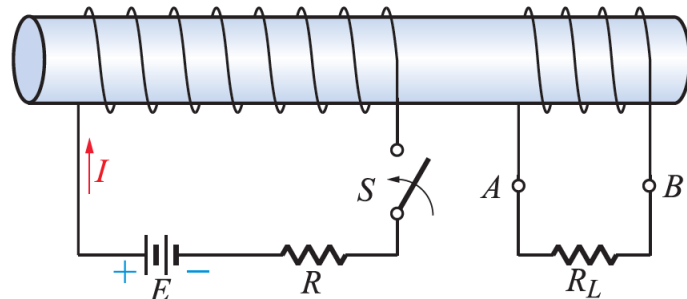


圖 6-25 楞次定律示意

6-5 電磁感應（磁生電）

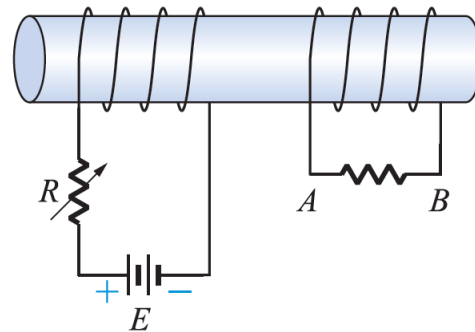
- 例題 **6-23** 楞次定律的應用
- 如右圖所示，當開關 **S** 切入之瞬間，右邊的線圈會產生感應電動勢，試問 **A**、**B** 兩端之電位何者較高？



- 解
 - (1) **S** 切入，根據安培右手定則，左邊線圈產生向右磁場。
 - (2) 根據楞次定律，右邊線圈會產生向左磁場，反對其增加。
 - (3) 根據安培右手定則，得知電流從 **B** 端正面向上流入，**A** 端背面向下流出；流出為正，故 **A** 端電位高於 **B** 端。

6-5 電磁感應（磁生電）

- 練習
- 26. 如圖所示，若將可變電阻 R 調小，則 A 、 B 間之電位高低為
(A) $V_A > V_B$ (B) $V_A < V_B$
(C) $V_A = V_B$ (D) V_A 比 V_B 電位先高後低。



6-5 電磁感應（磁生電）

- **6-5.3 自感應電勢及互感應電勢**
- 由法拉第感應定律得知：線圈的磁交鏈 $N\phi$ 產生變動時，此線圈即可感應電勢；如圖6-26所示，如果此磁通鏈的變動是因為線圈本身電流的變動所引起者，則稱此線圈有「自感（ L ）」存在，而由自感所產生的應電勢即為「自感應電動勢 e_L 」。

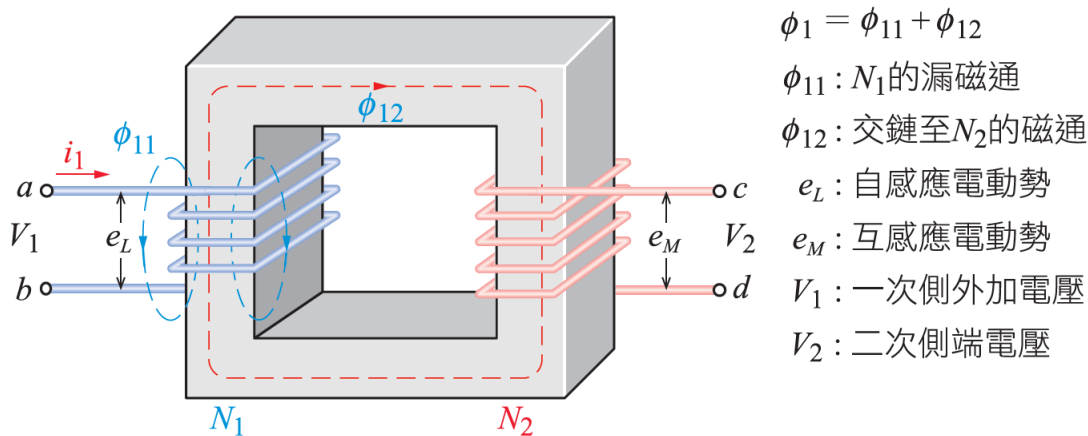


圖 6-26 自感應電勢與互感應電勢

6-5 電磁感應（磁生電）

由（6-2）公式自感 $L = \frac{N \times \phi}{i}$ ，即 $N \times \phi = L \times i$ ；依據（6-32）公式，則

$$\text{自感應電勢 } e_L = N_1 \times \frac{\Delta \phi_1}{\Delta t} = L_1 \times \frac{\Delta i_1}{\Delta t} \quad (\text{伏特, V})$$

公式
6-34

當 N_1 線圈內之電流 i_1 變動時， N_2 線圈會有「互感（ M ）」產生，而由互感所產生的感應電動勢，稱之為「互感應電動勢 e_M 」。

$$\text{互感應電勢 } e_M = N_2 \times \frac{\Delta \phi_{12}}{\Delta t} = M \times \frac{\Delta i_1}{\Delta t} \quad (\text{伏特, V})$$

公式
6-35

6-5 電磁感應（磁生電）

- 例題 **6-24** 求自感應電勢互感應電勢的方向與大小
- 在圖6-26 中， N_1 的自感 $L_1=4\text{ H}$ ， N_2 的自感 $L_2=10\text{ H}$ ，互感 $M=2\text{ H}$ ，當 i_1 在0.1秒內由0.3A 增加到0.8A 時，試求：
(1) N_1 的自感應電勢 e_L (2) 在 N_2 產生的互感應電勢 e_M
(3) 判斷 e_L 的極性 (4) 判斷 e_M 的極性。

- 解 (1) 應用 (6-34) 公式 $e_L = L_1 \times \frac{\Delta i_1}{\Delta t} = 4 \times \frac{(0.8 - 0.3)}{0.1} = 20\text{ V}$
(2) 應用 (6-35) 公式 $e_M = M \times \frac{\Delta i_1}{\Delta t} = 2 \times \frac{(0.8 - 0.3)}{0.1} = 10\text{ V}$

6-5 電磁感應（磁生電）

(3) 判斷 e_L 的極性

因為 i_1 值增大，依楞次定律會產生反向磁通、感應電勢，形成反向電流，流向 a 端，故 a 端為正， b 端為負。

(4) 判斷 e_M 的極性

因為 i_1 值增大，產生的交鏈磁通亦增加，依楞次定律會感應反向的磁通，即在二次側的感應磁通為向上，根據安培螺旋定則，電流自 c 點流出，故 c 端為正， d 端為負。

- 練習
- 27. 兩線圈間之互感為0.1 亨利，原線圈內有2 安培之電流在0.01 秒內降為零，則該線圈感應之平均電勢為
(A) 2 V (B) 4 V (C) 20 V (D) 40 V 。

6-5 電磁感應（磁生電）

- **6-5.4 佛萊明右手定則（發電機定則）**
- 感應電勢的方向，除了用前述的楞次定律來決定外，還可以使用佛萊明右手定則（**Fleming's right-hand rule**）來判定，其規則為：
- **1.**將右手大拇指、食指及中指伸直，並使之互成直角，如圖**6-27**所示。
- **2.**各手指所代表的涵義如下：
 - (1) 大拇指：表示導體受力（ F ）運動方向。
 - (2) 食指：表示磁場（ B ）方向（ N 到 S 的方向）。
 - (3) 中指：表示感應電勢或電流流動（ I ）之方向。

6-5 電磁感應（磁生電）

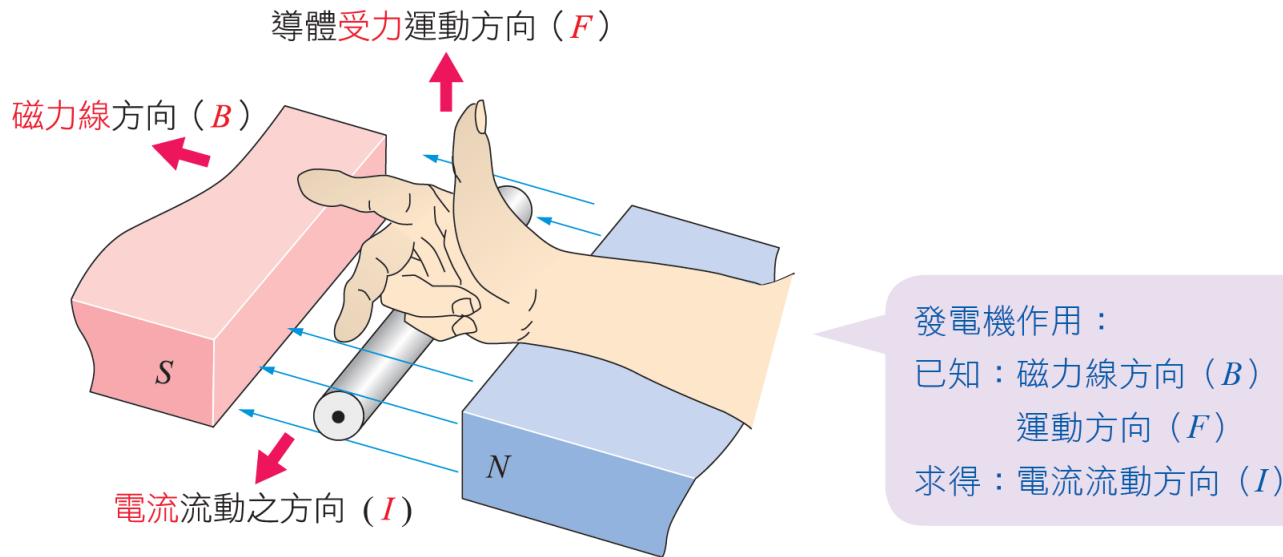


圖 6-27 佛萊明右手（發電機）定則說明

- 佛萊明右手定則適用於發電機，故又稱為發電機定則。發電機的原理是：導體在磁場中運動、切割磁力線、感應電勢。

6-5 電磁感應（磁生電）

- **6-5.5** 感應電勢的另一種算法
- 如圖6-28 所示，在磁通密度為 B 的磁場內，有一單心導線，此導線在單位時間 Δt 內，自 A 位置向 B 位置移動 Δs 公尺。設此導線和磁通接觸的有效長度為 l 公尺，移動速度為 v 公尺／秒。

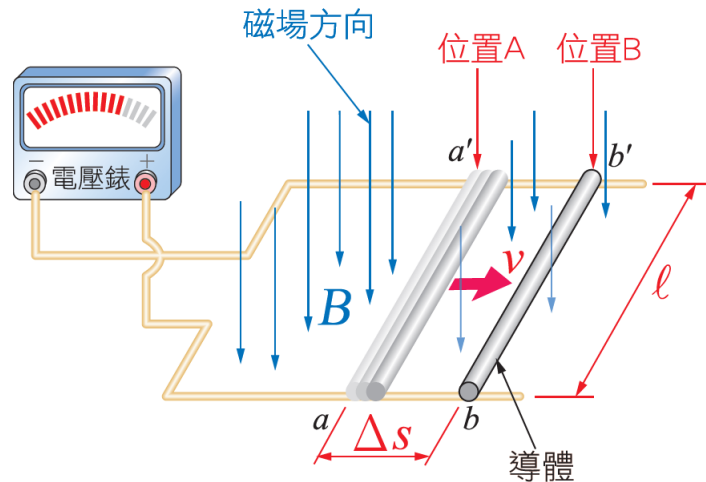


圖 6-28 導體切割磁場產生感應電勢之情形

6-5 電磁感應（磁生電）

- 由（6-32）公式得知：

$$\begin{aligned} e &= N \times \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \frac{B \times A}{\Delta t} \quad (\because \text{設 } N=1, \text{ 且 } \Delta\phi = B \times A) \\ &= \frac{B \times (\ell \times \Delta s)}{\Delta t} \quad (\because A = \ell \times \Delta s) \\ &= B \times \ell \times v \quad (\text{伏特, V}) \quad (\because \text{速度 } v = \frac{\text{距離 (s)}}{\text{時間 (t)}}) \end{aligned}$$

公式
6-36

6-5 電磁感應（磁生電）

- 由此可知：感應電勢的大小與磁通密度（ B ）、導體有效長度（ ℓ ）及移動速度（ v ）成正比。如果 B 、 ℓ 、 v 三者並非垂直，則必須依向量法則，取其垂直分量，因此（6-36）式應修正為：

$$e = B \times \ell \times v \times \sin \theta \quad (\text{伏特, V})$$

公式
6-37

註 其中 θ 為 $\vec{v}$ （導體移動方向）與 $\vec{B}$ （磁通 N 至 S 方向）之夾角。

6-5 電磁感應（磁生電）

- 例題 **6-25** 感應電勢大小的計算
- 在圖6-28 中，設 ℓ 為2 公尺，導體以15 公尺／秒的速度向右移動，若磁通密度 B 為0.5 韋伯／平方公尺，則此導體感應電勢為何？

- 解

此處移動方向和磁通方向成垂直，故 $\theta=90^\circ$

由公式（6-37）知

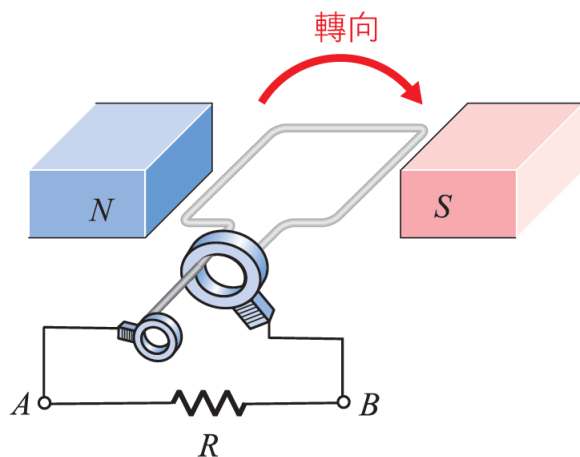
$$e = B \times \ell \times v \times \sin \theta = 0.5 \times 2 \times 15 \times \sin 90^\circ = 15 \text{ V}$$

6-5 電磁感應（磁生電）

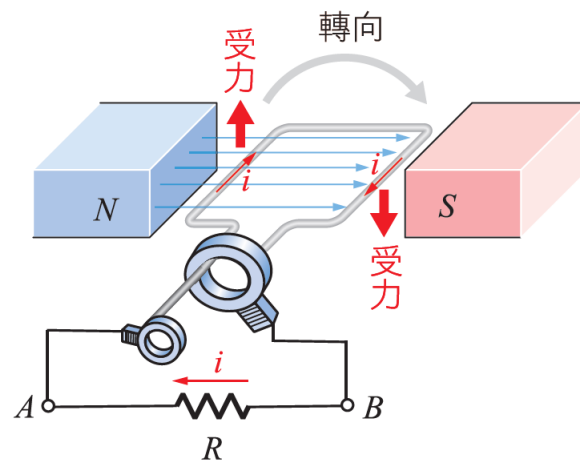
- 練習
- 28. 有一導體在磁場內的有效長度為10 cm，磁通密度為0.02 特斯拉，若應電勢為0.1 V，則表示導體移動之速率為每秒多少公尺？
(A) 10 (B) 20 (C) 50 (D) 200。

6-5 電磁感應（磁生電）

- 例題 **6-26** 感應電流方向的判別
- 如圖(a)所示，一線圈在磁場中順時針旋轉，試問流過電阻 R 的電流方向為何？



(a) 已知轉向



(b) 以佛萊明右手定則求得電流方向

6-5 電磁感應（磁生電）

- 解

已知：順時針旋轉，故線圈左邊導體受力向上，線圈右邊導體受力向下。

判定：依據佛萊明右手定則，左邊導體電流流入，右邊導體電流流出。

結果：電阻 R 的電流方向為自 B 端流向 A 端，如圖(b)所示。

6-5 電磁感應（磁生電）

- 練習
- 29. 如圖所示之導體 a 若向上運動時，則該導體感應電流之方向為何？
(A) 流入紙內 (B) 自紙內流出 (C) 向右
(D) 向左。

