

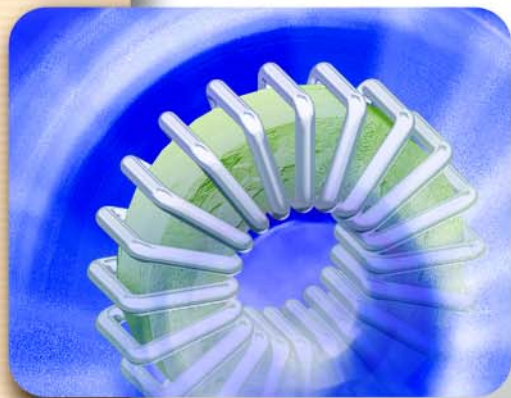


電感與電磁

電阻、電容與電感是電路中最基本的三種元件，在前面的章節中，我們已經分別介紹過電阻與電容兩大基本元件，本章將繼續介紹另一個重要元件：電感器；其特性如同電容器一般可將能量儲存起來，只不過電容器是以電場形式儲存，而電感器則是以磁場形式儲存。在日常生活當中，我們常接觸到的發電機、馬達、變壓器等，都是利用電感特性製作出來的電機產品。另外，本章中也將介紹電學與磁學間的相關知識。

學習目標

- ▶ 認識電感器的基本特性
- ▶ 學習電感器的自感與互感作用
- ▶ 計算電感器串並聯電路
- ▶ 瞭解電感器的充電與放電作用
- ▶ 認識磁學與電學的關係



本章目錄

6-1	電感器	228	6-4	電磁效應	252
6-2	電感量	230	6-5	電磁感應	260
※ 6-3	磁的基本概念	242			

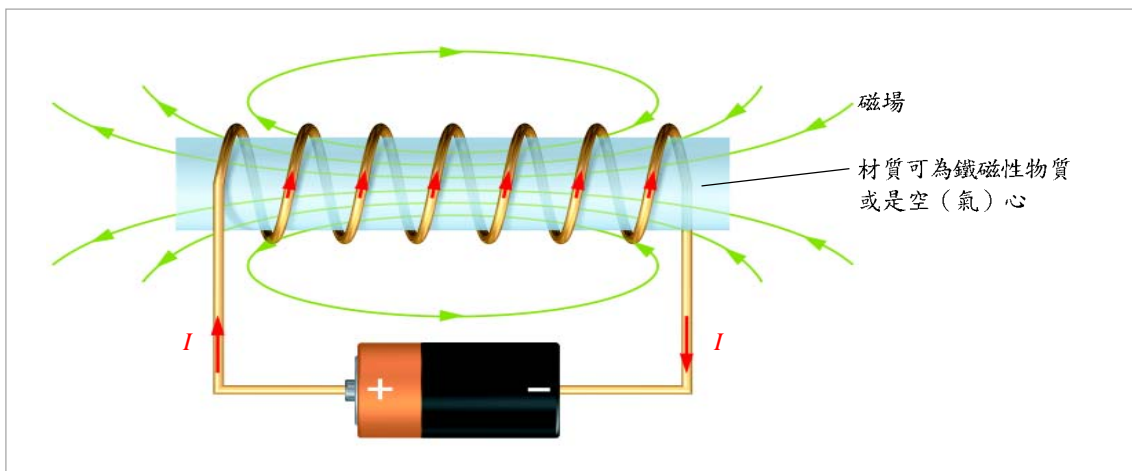


6-1 電感器

電感器（inductor）是可以將电路中的電能轉換成磁能的一種基本电路元件。有關磁場性質及電與磁之間的轉換關係，將在 6-3 節後詳細說明。在本節中，我們先來討論電感器的一些特性。

電感器的構造

將一導線捲繞成線圈狀，如圖 6-1 所示，當線圈導線接電通上電流時，電流會在導線的周圍建立一磁場，這個磁場會將電源的能量轉換為磁能並儲存在線圈中。若是將電源移開，則線圈傾向維持電流而將磁能釋放出來。這種以線圈產生磁場而儲存、釋放能量的性質，便稱為電感（inductance）。電感器的符號以英文 L 表示，其電感值的單位為亨利（Henry，簡記 H），而較常用的單位是毫亨利（mH）及微亨利（ μH ）。



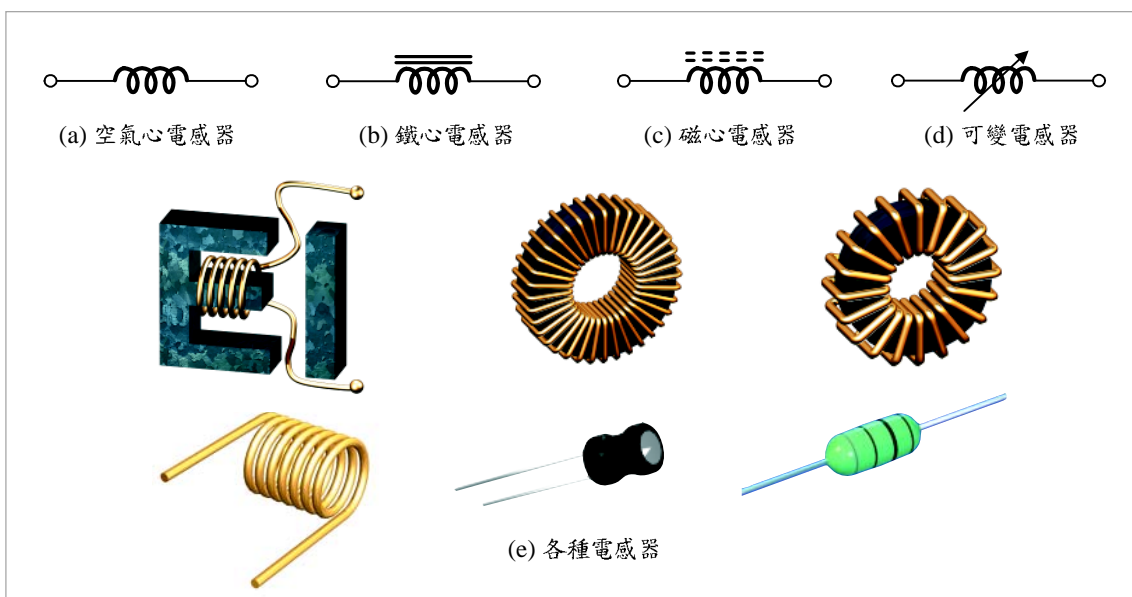
▲ 圖 6-1 電感器示意圖 導線捲繞成線圈狀即成一電感器，線圈內的物質可以是鐵磁性材料，也可以是空心。

電感器的種類

電感器依電感量是否為固定值可以區分為**固定式電感器**及**可變式電感器**，又根據電感器的製作材料與結構，可將電感器再區分為下列幾種類型：

- **空氣心電感器 (air-core inductor)**：在導線（漆包線）纏繞的線圈中，並沒有包含其它材質，或者只是纏繞在非磁性的材質（塑膠、陶瓷等）上；其電感值較小，適用在高頻電路中。
- **鐵心電感器 (iron-core inductor)**：線圈中間的心材為鐵，有最高的電感值，可作為抗流線圈（choke），適用於直流或低頻電路中。
- **磁心電感器 (ferrite-core inductor)**：心材為氧化鐵的粉末製成，其電感值大於空氣心電感器，適用於低頻與高頻電路中。
- **印刷電路線圈 (printed circuit coil)**：直接將線圈製作在印刷電路板上。

圖 6-2 顯示各種常見電感器的電路符號及常見外觀。



▲ 圖 6-2 電感器的電路符號及外觀

單元評量

1. 以線圈產生磁場而儲存、釋放能量的性質，稱為 _____。
2. 電感器的單位為 _____，電路符號為 _____。
3. 依使用材料及結構的不同，電感器可分為 _____、_____、_____、_____ 四類。



6-2 電感量

當線圈通以電流後，在線圈上便會產生磁場，且具有一電感量，這個電感量會 "抗拒" 電流改變所引起的磁場變化（有關電磁感應的現象在 6-5 節將會詳細的說明）。而電感量可以再區分為線圈本身產生的自感（self inductance），以及與其它線圈發生交互作用的互感（mutual inductance）。

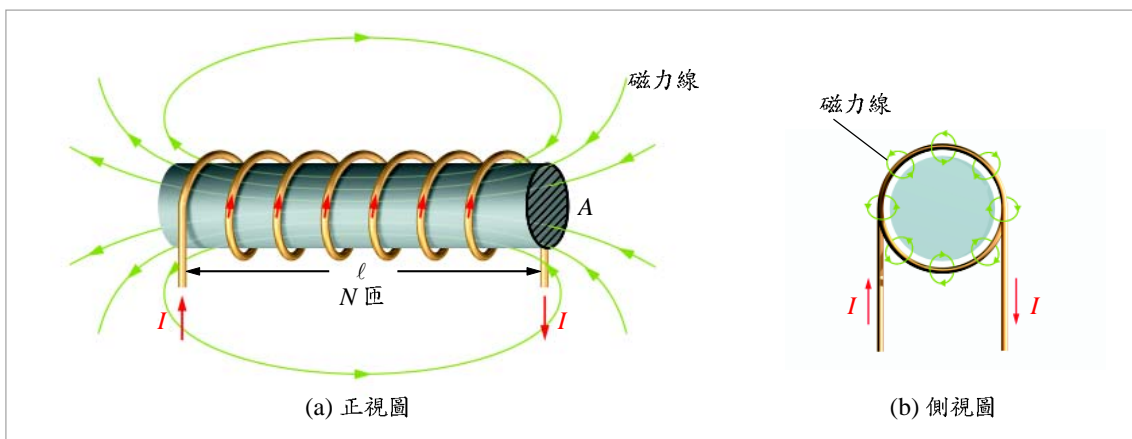
6-2.1 自感

如圖 6-3 所示，當電流通過線圈時，會在導線周圍產生一個磁場，形成磁力線（磁通量）環繞線圈的現象。將線圈的匝數乘以通過的磁力線數即為線圈的磁通鏈（flux linkage），以符號 λ 表示，數學式表示為：

Σ 重要公式

$$\lambda = N\phi \quad [\text{Wb-t, 韋伯 - 匝}] \quad (6-2-1)$$

其中， λ 為線圈的磁通鏈，單位為韋伯 - 匝（Wb-t）； N 為線圈的匝數，單位為匝（turn，簡記 t）； ϕ 為通過線圈的磁通量，單位為韋伯（Wb）。



▲ 圖 6-3 電流通過線圈時的磁力線分佈情形 線圈通上電流後即產生環繞的磁場以儲存磁能。

當線圈的匝數固定時，若通過的電流 I 愈大，所產生的磁通鏈也愈大，我們將磁通鏈 λ 與電流 I 的比值定義為電感量 L ，簡稱為電感。由於磁通鏈完

全由線圈本身電流的自感應（self induction）所產生，所以電感量也稱為自感。用數學式表示為：

Σ 重要公式

$$L = \frac{\lambda}{I} = \frac{N\phi}{I} \quad [\text{H, 亨利}] \quad (6-2-2)$$

影響線圈之電感量大小的因素與線圈匝數 N 、線圈截面積 A 、磁路有效長度（線圈長度） ℓ 、及線圈捲繞材質的導磁係數 μ 有關。以數學式表示為：

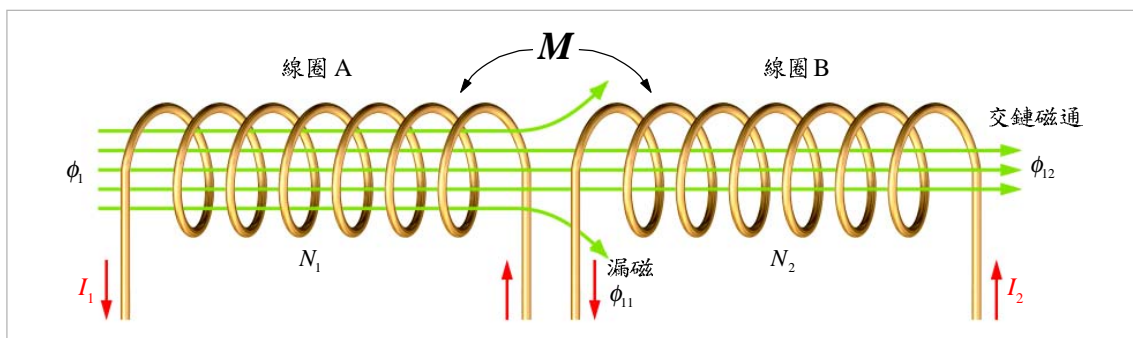
Σ 重要公式

$$L = \frac{N^2 \mu A}{\ell} = \frac{N^2}{\mathcal{R}} \quad [\text{H, 亨利}] \quad (6-2-3)$$

(6-2-3)式中， \mathcal{R} 為線圈中材質的磁阻，我們將於 6-3 節中詳述。由上式得知電感量的大小由線圈匝數與磁阻來決定。

6-2.2 互感

當兩線圈 A、B 距離很近時，線圈 A 的電流若是發生改變，會使線圈 B 產生一感應的電流，如圖 6-4 所示。反之，線圈 B 的電流改變時，也會使線圈 A 產生感應電流。這種由於線圈本身電流的變化導致鄰近線圈發生磁通鏈變動的現象，稱為互感應（mutual induction），其所造成的電感量稱為互感，以符號 M 表示。



▲ 圖 6-4 兩線圈發生磁通交鏈的作用情形 線圈 A 的電流發生變化時，會使線圈 B 產生感應電流；反之亦然。此現象稱為互感應。



圖 6-4 中線圈 A 與線圈 B 的匝數分別為 N_1 及 N_2 ，當線圈 A 有電流 I_1 流入時，線圈本身產生磁通 ϕ_1 ，假設 ϕ_1 與 N_2 發生磁通交鏈的部分為 ϕ_{12} （代表電流 I_1 對 N_2 所造成的磁通量），則其互感量由 I_1 所產生交鏈到線圈 B 的磁通鏈 $N_2\phi_{12}$ 來決定，以數學式表示：

Σ 重要公式

$$M_{12} = \frac{N_2\phi_{12}}{I_1} \quad [\text{H, 亨利}] \quad (6-2-4)$$

同理，若線圈 B 通以電流 I_2 ，則對線圈 A 的互感量為：

Σ 重要公式

$$M_{21} = \frac{N_1\phi_{21}}{I_2} \quad [\text{H, 亨利}] \quad (6-2-5)$$

線圈 A（B）所產生的磁通 ϕ_1 （ ϕ_2 ）並沒有完全與線圈 B（A）發生磁通交鏈，其中有一部份磁通 ϕ_{11} （ ϕ_{22} ）僅和線圈 A（B）本身發生交互作用，稱為**漏磁**；而只有磁通 ϕ_{12} （ ϕ_{21} ）與線圈 B（A）發生交互作用。我們定義兩線圈的**耦合係數** K_m 為 ϕ_{12} 與 ϕ_1 （或 ϕ_{21} 與 ϕ_2 ）的比值，此值恆小於 1，以數學式表示為：

Σ 重要公式

$$K_m = \frac{\phi_{12}}{\phi_1} \leq 1 \quad (\text{或 } K_m = \frac{\phi_{21}}{\phi_2}) \quad (6-2-6)$$

由於線圈 A、B 互感應的磁通路徑相同，導磁的效應一致，所以上式中兩種耦合係數定義的值應相同，即 $K_m = \frac{\phi_{12}}{\phi_1} = \frac{\phi_{21}}{\phi_2}$ ，且兩線圈的互感量也應相同，即 $M = M_{12} = M_{21}$ 。將(6-2-4)、(6-2-5)及(6-2-6)式整理後可得互感量與耦合係數的關係為：

Σ 重要公式

$$M = K_m \sqrt{L_1 L_2} \quad [\text{H, 亨利}] \quad (6-2-7)$$



知識充電

兩線圈互感時的磁路相同，導磁的效應一致，互感值應相等，則：

$$M_{12} = M = \frac{N_2 \phi_{12}}{I_1} = \frac{N_2 K_m \phi_1}{I_1} = K_m \frac{N_2}{N_1} \frac{N_1 \phi_1}{I_1} = K_m \frac{N_2}{N_1} L_1 \dots\dots\dots ①$$

$$M_{21} = M = \frac{N_1 \phi_{21}}{I_2} = \frac{N_1 K_m \phi_2}{I_2} = K_m \frac{N_1}{N_2} \frac{N_2 \phi_2}{I_2} = K_m \frac{N_1}{N_2} L_2 \dots\dots\dots ②$$

$$\text{由①} \times \text{②} \Rightarrow M^2 = K_m^2 L_1 L_2 \Rightarrow M = K_m \sqrt{L_1 L_2}$$



範例 6-1

線圈電流為 1A，產生 0.02Wb 的磁通量，線圈匝數為 100 匝，試求線圈產生的自感值為多少？

【解】由(6-2-2)式可知線圈所產生的自感值 L 為：

$$L = \frac{N\phi}{I} = \frac{(100)(0.02\text{Wb})}{1\text{A}} = 2\text{H (亨利)}$$

馬上練習

有一 200 匝的線圈通以 5A 的電流，測得線圈上產生的自感為 4H，試求通過線圈上的磁通量為多少？

【答】 $\phi = 0.1\text{ Wb}$ 。



範例 6-2

匝數為 100 匝的螺線管置於空氣中，長度為 2π 公尺，截面積為 0.001 平方公尺，試求此螺線管的自感量為多少？（ $\mu = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/A} \cdot \text{m}$ ）

【解】由(6-2-3)式可知螺線管所產生的自感值 L 為：

$$L = \frac{N^2 \mu A}{\ell} = \frac{(100)^2 (4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/A} \cdot \text{m})(0.001\text{m}^2)}{2\pi \text{ m}} = 2\mu\text{H (微亨利)}$$

馬上練習

匝數為 200 匝的螺線管置於空氣中，自感量為 $40\mu\text{H}$ ，管截面積為 100 平方公分，則此螺線管的管長為多少？

【答】 $\ell = 4\pi$ 公尺。

**範例 6-3**

線圈 A、B 相鄰放置，若是 A 線圈 1000 匝，B 線圈 800 匝，線圈 A 通過 8 安培電流時產生 $4 \times 10^{-3} \text{ Wb}$ 的磁通量，其中有 $3 \times 10^{-3} \text{ Wb}$ 與線圈 B 發生交互作用，則線圈 A 的自感為多少？兩線圈互感為多少？耦合係數為多少？

$$\text{【解】(1) } L_1 = \frac{N_1 \phi_1}{I_1} = \frac{(1000)(4 \times 10^{-3} \text{ Wb})}{8 \text{ A}} = 0.5 \text{ H}$$

$$(2) M = \frac{N_2 \phi_{12}}{I_1} = \frac{(800)(3 \times 10^{-3} \text{ Wb})}{8 \text{ A}} = 0.3 \text{ H}$$

$$(3) K_m = \frac{\phi_{12}}{\phi_1} = \frac{3 \times 10^{-3} \text{ Wb}}{4 \times 10^{-3} \text{ Wb}} = 0.75$$

馬上練習 承上題，線圈 B 的自感為多少？

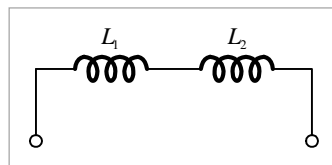
【答】 $L_2 = 0.32 \text{ H}$ 。

6-2.3 電感電路

在本節中將探討兩個電感器的串聯與並聯電路。電感電路的總電感值與電感器間是否產生互感，有極大的關係，以下將分別說明。

串聯無互感

圖 6-5 所示為兩電感器串聯在一起，若兩電感器之間沒有互感的存在，則總電感量會增加，且等於個別電感量的總和，即：



▲ 圖 6-5 串聯無互感電路

Σ 重要公式

$$\text{串聯無互感：} L_T = L_1 + L_2 \quad (6-2-8)$$

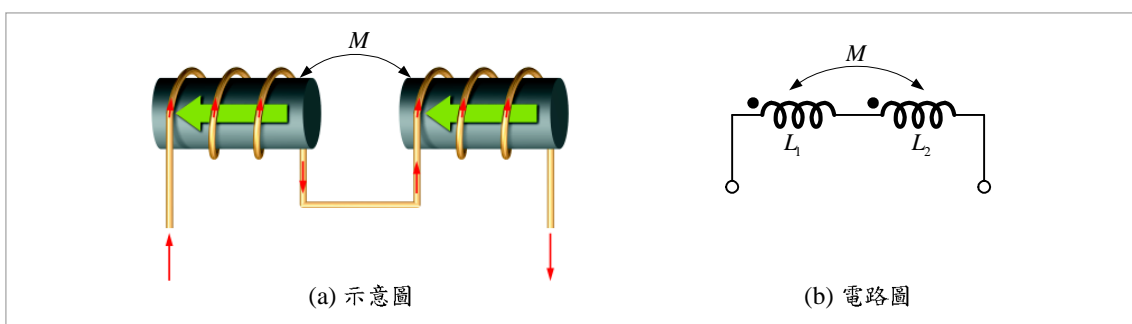
串聯有互感

- **串聯互助：**如果兩電感器距離很近時，就必有磁耦合產生，其間也就有互感的存在。所謂**串聯互助**是指兩電感器在串聯後，其間由互感及

自感所產生之磁力線（或磁通）方向相同者。如圖 6-6 所示，若線圈的纏繞方向相同（電路中以 \bullet 表示線圈產生磁通的方向，故兩線圈之 \bullet 標示在相同位置）時，兩線圈間的互感值 M 均為正，則串聯後的總電感量為：

Σ 重要公式

$$\text{串聯互助： } L_T = (L_1 + M) + (L_2 + M) = L_1 + L_2 + 2M \quad (6-2-9)$$

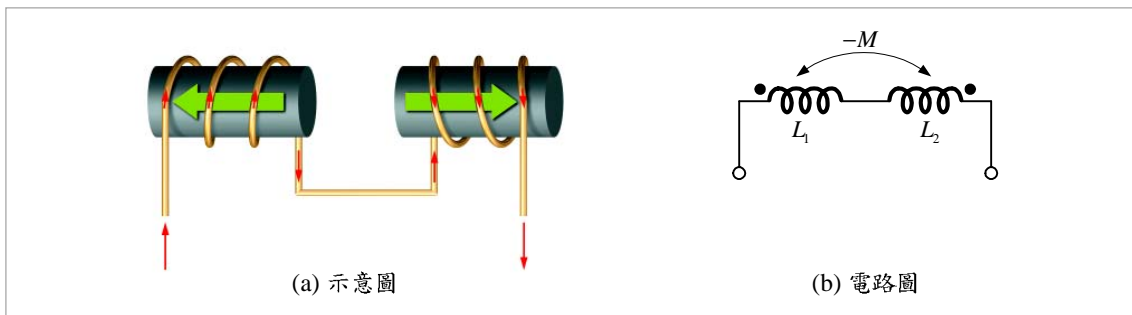


▲ 圖 6-6 串聯互助電路 兩串聯電感器之磁通方向相同。

- 串聯互消：如圖 6-7 所示，若兩線圈因纏繞方向相反，在串聯後其間所產生之磁通方向相反，稱之為串聯互消，則兩線圈間的互感值取 $-M$ ，串聯後的總電感量為：

Σ 重要公式

$$\text{串聯互消： } L_T = (L_1 - M) + (L_2 - M) = L_1 + L_2 - 2M \quad (6-2-10)$$

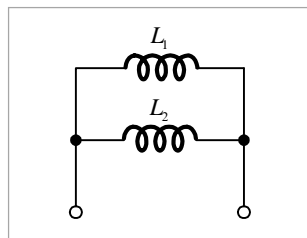


▲ 圖 6-7 串聯互消電路 兩串聯電感器之磁通方向相反。



並聯無互感

圖 6-8 所示為兩電感器並聯在一起，若兩電感器之間沒有互感的存在，則總電感量的求法與並聯電阻的求法相同，即：



▲ 圖 6-8 並聯無互感電路

Σ 重要公式

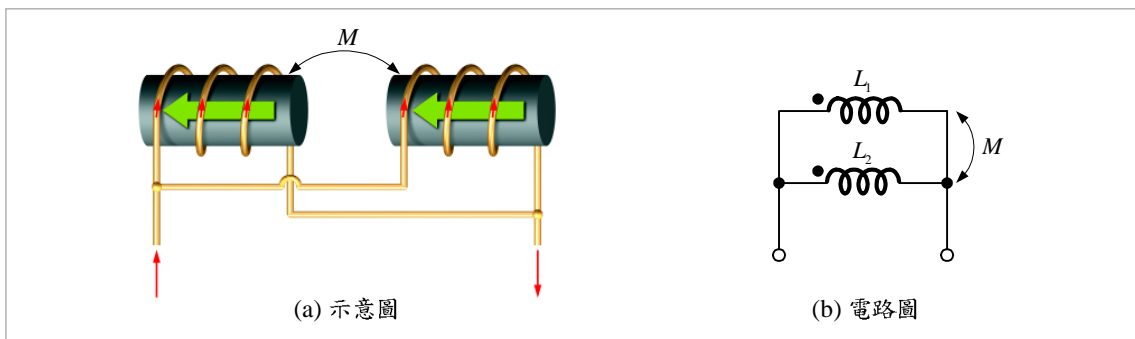
$$\text{並聯無互感：} L_T = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}} = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} \quad (6-2-11)$$

並聯有互感

- **並聯互助：**如圖 6-9 所示，兩線圈的磁通方向相同，是為並聯互助電路，其總電感量為：

Σ 重要公式

$$\text{並聯互助：} L_T = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 - 2M} \quad (6-2-12)$$

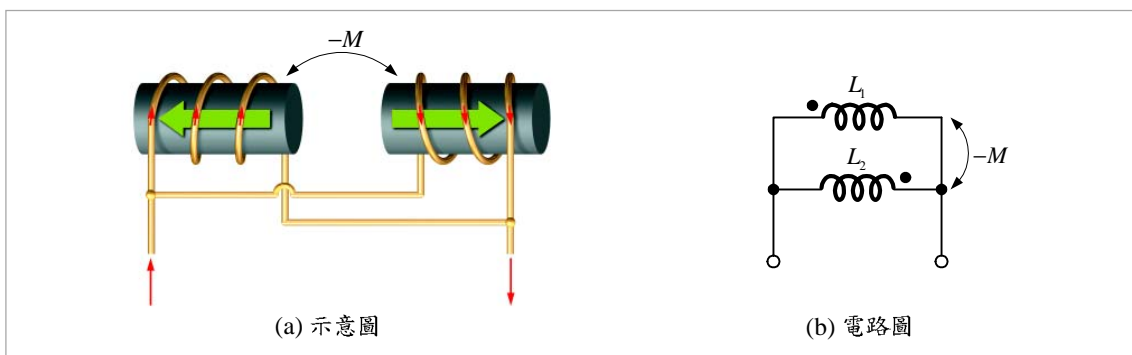


▲ 圖 6-9 並聯互助電路 兩並聯電感器之磁通方向相同。

- **並聯互消：**如圖 6-10 所示，兩線圈的磁通方向相反，是為並聯互消電路，其總電感量為：

Σ 重要公式

$$\text{並聯互消：} L_T = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 + 2M} \quad (6-2-13)$$



▲ 圖 6-10 並聯互消電路 兩並聯電感器之磁通方向相反。

範例 6-4

有兩電感器串聯，且電感器間產生互感，且互感值為正（串聯互助），若 $L_1 = 4\text{H}$ ， $L_2 = 9\text{H}$ ，耦合係數為 0.5，試求總電感值為多少？

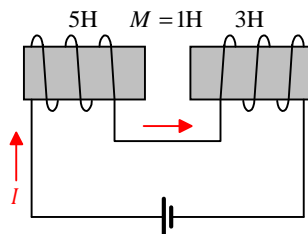
【解】 $M = K_m \sqrt{L_1 L_2} = 0.5 \times \sqrt{(4\text{H})(9\text{H})} = 3$

$L_T = L_1 + L_2 + 2M = 4\text{H} + 9\text{H} + 2(3\text{H}) = 19\text{H}$

馬上練習

如右圖所示電路，兩電感器 $L_1 = 5\text{H}$ 、 $L_2 = 3\text{H}$ ，其間互感為 1H ，試求總電感量為多少？

【答】 $L_T = 6\text{H}$ 。

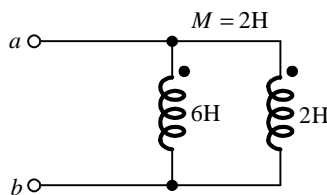


範例 6-5

如右圖所示電路，試求 a 、 b 兩端之總電感值為多少？

【解】此電路為並聯互助，即：

$$L_T = \frac{(6\text{H})(2\text{H}) - (2\text{H})^2}{6\text{H} + 2\text{H} - 2(2\text{H})} = \frac{8}{4}\text{H} = 2\text{H}$$



馬上練習

承上題，若將其中一個電感器反接，則總電感值為多少？

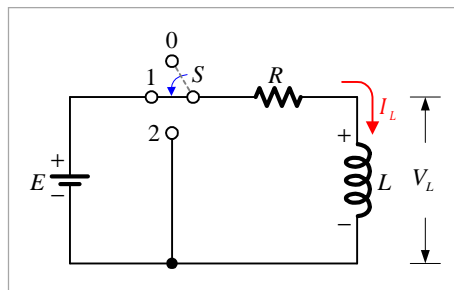
【答】 $L_T = \frac{2}{3}\text{H}$ 。



6-2.4 電感器的充電與放電

電感器的充電

電感器接上電源後，電流會在線圈中建立磁場並儲存能量，其電壓、電流變化的過程說明如下（如圖 6-11 所示電路）：



▲ 圖 6-11 電感器的充電過程

1. 一開始開關 S 在 0 的位置，電路為斷路，電感器中沒有磁場，且電壓為零（ $V_L = 0$ ），電流為零（ $I_L = 0$ ）。
2. 當開關 S 切換到 1 的位置瞬間，電路導通，電流開始要產生變化準備通過電感器，此時電感器會感應出與電源電壓相同的 "反抗" 電壓（ $V_L = E$ ），而通過的電流為零（ $I_L = \frac{E - V_L}{R} = 0$ ）。
3. 經過短暫時間後，電感器反抗的電壓逐漸減小（ $V_L < E$ ），此時電流逐漸增加（ $I_L = \frac{E - V_L}{R}$ ）。
4. 經過一段時間後，電感器的反抗電壓為零（ $V_L = 0$ ），電感器可視為短路，此時電流最大（ $I_L = \frac{E}{R}$ ）。

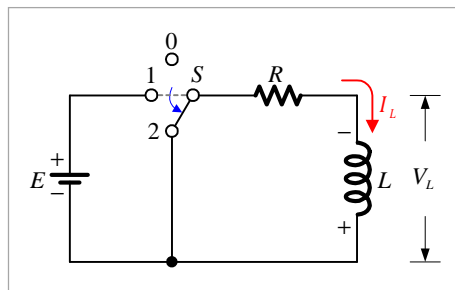
我們將整個充電過程中電壓、電流的變化整理如表 6-1 所示。

▼ 表 6-1 電感器的充電過程

電感器充電時， V_L 、 I_L 的變化情形		
$t = 0$ (S 由 0 \rightarrow 1 瞬間)	$t > 0$ (短暫時間後)	$t \gg 0$ (一段時間後)
$V_L = E$ (最大) $I_L = 0$	V_L 減小 I_L 增加	$V_L = 0$ $I_L = \frac{E}{R}$ (最大)

電感器的放電

電感器通電後會有磁能儲存其中，若將電源移除，則儲存的能量會以電能釋放出來。其放電時電壓、電流變化的過程說明如下（如圖 6-12 所示電路）：



▲ 圖 6-12 電感器的放電過程

1. 一開始開關 S 在 1 的位置，電感器的電壓為零（ $V_L = 0$ ），電流最大（ $I_L = \frac{E}{R}$ ）。
2. 當開關 S 切換到 2 的位置瞬間，電流準備開始減少，電感器為維持電流大小而感應出與原先電源相同的電壓（ $V_L = -E$ ，電壓極性與充電時相反），此時電流不變（ $I_L = -\frac{V_L}{R} = \frac{E}{R}$ ）。
3. 經過短暫時間後，電感器感應的電壓逐漸減小（ $|V_L| < E$ ），此時電流也逐漸減小（ $I_L = -\frac{V_L}{R}$ ）。
4. 經過一段時間後，電感器能量釋放完畢，其電壓為零（ $V_L = 0$ ），電流停止（ $I_L = 0$ ）。

我們將整個放電過程中電荷、電壓、電流的變化整理如表 6-2 所示。

▼ 表 6-2 電感器的放電過程

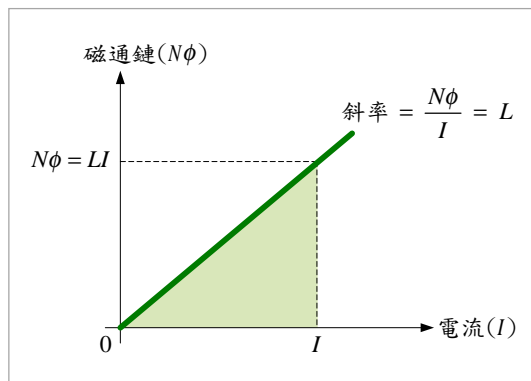
電感器放電時， V_L 、 I_L 的變化情形		
$t = 0$ (S 由 1 \rightarrow 2 瞬間)	$t > 0$ (短暫時間後)	$t \gg 0$ (一段時間後)
$V_L = -E$ (反方向最大) $I_L = \frac{E}{R}$ (最大)	V_L 減小 (反方向) I_L 減少	$V_L = 0$ $I_L = 0$



電感器儲存能量

當電感器接上電源時，電流會在電感器中建立起磁場，而將能量以磁能的方式存其中，只要電流持續，則能量一直存在；若將電源移開，則能量以電能形式釋放回電路中（電感器產生感應電動勢，若無放電路徑，則開關斷開時會造成電弧放電）。

電感器通以電流後，建立的磁場與通過的電流成正比，其磁通鏈 $N\phi$ ($=LI$) 與電流 I 的關係如圖 6-13 所示。圖中磁通鏈 - 電流關係曲線所涵蓋的三角形面積，即代表電感器所儲存的能量，以數學式表示為：



▲ 圖 6-13 電感器儲存的能量 電感器中建立的磁場與電流成正比。

Σ 重要公式

$$W_L = \frac{1}{2}(N\phi)I = \frac{1}{2}(LI)I = \frac{1}{2}LI^2 \quad [\text{J, 焦耳}] \quad (6-2-14)$$

其中， L 為電感器的電感量（單位：亨利）； I 為通過的電流（單位：安培）。



範例 6-6

如右圖所示電路，將開關 S 切換到位置 1，試求：(1) 瞬間 $t=0$ (2) $t \gg 0$ 時之電感器端電壓 V_L 及電流 I_L 為多少？

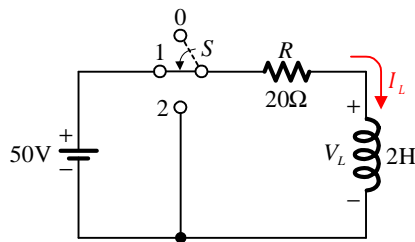
【解】(1) $t=0$ 時

$$V_L = E = 50 \text{ V}$$

$$I_L = \frac{E - V_L}{R} = \frac{50\text{V} - 50\text{V}}{20\Omega} = 0 \text{ A}$$

(2) $t \gg 0$ 時

$$V_L = 0 \text{ V} \quad I_L = \frac{E}{R} = \frac{50}{20} = 2.5 \text{ A}$$



馬上練習 承上題，一段時間後，將開關 S 由 1 切換至 2，試求瞬間 $t=0$ 時之電感器端電壓 V_L 及電流 I_L 為多少？

【答】 $V_L = -50 \text{ V}$, $I_L = 2.5 \text{ A}$ 。



範例 6-7

有一 6 亨利的電感器，試求通過 3 安培的電流時，其儲存的能量為多少？

【解】 $W_L = \frac{1}{2}LI^2 = \frac{1}{2}(6\text{H})(3\text{A})^2 = 27 \text{ J}$ （焦耳）

馬上練習 線圈匝數 600 匝，通過的電流為 15A，產生 $4 \times 10^{-2} \text{ Wb}$ 的磁通，試求線圈所儲存的能量為何？

【答】 $W_L = 180 \text{ J}$ 。



單元評量



1. 電感量與通過線圈之磁通量成 _____ 比。
2. 電感器儲存的能量（ W ），其單位為 _____，與通過之電流成 _____ 比。
3. 電感器接受電源充電時，在充電之瞬間電感器端電壓等於 _____ 電壓，電流等於 _____；當長時間充電完畢後，端電壓等於 _____，電流等於 _____。
4. 某線圈為 100 匝，通以 2A 的電流，且產生 0.03 Wb 的磁通，則其自感量為 _____ H。
5. 兩線圈之耦合係數為 0.8，且自感量分別為 10 mH 與 40 mH ，則其互感量為 _____ H。
6. 兩電感器 $L_1 = 5 \text{ H}$ 、 $L_2 = 3 \text{ H}$ 串聯，總電感為 12 H ，則其互感量為 _____ H，此電路為何種串聯？_____（互助或互消）
7. 將兩電感器 $L_1 = 5 \text{ H}$ 、 $L_2 = 3 \text{ H}$ 串聯，通以 2A 之電流，若無互感，則所儲存的總能量為 _____ J。



※ 6-3 磁的基本概念

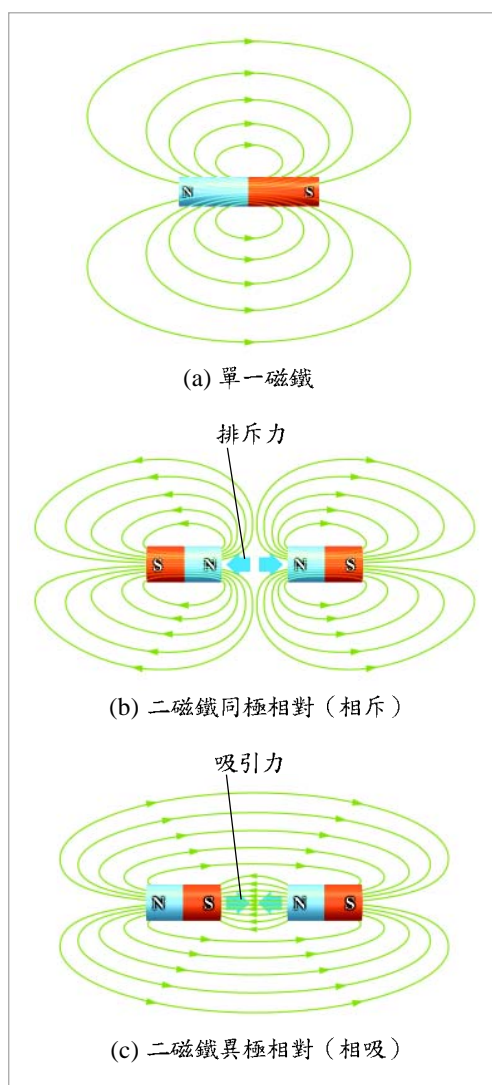
人類對於磁（magnetism）的認識，應是開始於天然磁鐵對於鐵質物體的吸引作用，且發現磁鐵間也會有相吸、相斥等現象。如今在我們的生活中，到處可見運用磁之特性的應用產品，如：電動機、發電機、變壓器、錄音帶、與電腦中的磁碟等，在在顯示磁在生活中的重要性。

6-3.1 磁場的產生

將條形磁鐵懸吊起來，在磁鐵靜止後會固定指向地球的南北端。我們通稱指向北方的磁極為 **N 極**，指向南方的磁極為 **S 極**，如圖 6-14(a)所示。

若兩磁鐵的同性極（即同為 **N 極** 或 **S 極**）互相靠近時，則會產生排斥的力量；若異性極互相靠近時，則會產生吸引的力量，如圖 6-14(b)(c)所示。

因此，磁鐵也如同電荷般，具有同性相斥、異性相吸的特性。這種由磁性物質產生作用力的性質，與電場的作用頗為相似，所以我們稱磁性物質所產生的作用力區域為**磁場**（magnetic field）。



▲ 圖 6-14 磁鐵的作用力與磁力線描繪 在磁力的作用中，同性極相斥，異性極相吸。

如同利用電力線來描述電場的分佈，我們也可以運用**磁力線**（magnetic line of force）來描繪磁場的分佈，如圖 6-14 所示。將磁力線的特性歸納如下：

1. 磁力線由 N 極出發，經由外部空間進入 S 極，在磁鐵內部由 S 極回到 N 極，構成一封閉曲線。
2. 磁力線之間彼此不相交，有相互排斥的特性。
3. 磁力線各自形成獨立的封閉迴路。
4. 磁力線分佈愈密就表示磁場愈強，如磁極的位置。
5. 磁力線的切線方向即表示磁場之方向。

6-3.2 磁通量、磁通密度與磁阻

磁通量

磁場中通過的磁力線總數稱為**磁通量**（magnetic flux，簡記為 ϕ ），而磁力線聚集之處即為**磁極**（magnetic pole，簡記為 m ）。磁極的強度與通過磁力線多寡有關，磁力線愈多，則磁極強度愈強，以數學式表示為：

Σ 重要公式

$$\phi = m \quad [\text{Wb}, \text{韋伯}] \quad (6-3-1)$$

其中，磁通量或磁極強度在 MKS 制中的單位為韋伯（Wb），而 $1 \text{ 韋伯} = 10^8 \text{ 線} = 10^8 \text{ 馬克斯威}$ ；在 CGS 制中的單位則為靜磁單位，而 $1 \text{ 韋伯} = \frac{1}{4\pi} \times 10^8 \text{ 靜磁單位}$ 。



磁通密度

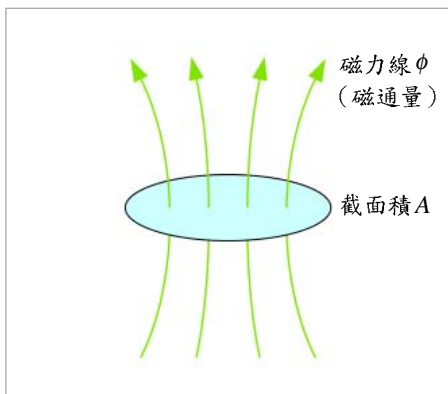
單位面積內垂直通過的磁力線總數（或磁通量）稱為**磁通密度**（magnetic flux density，簡記為 B ），如圖 6-15 所示。以數學式表示為：

Σ 重要公式

$$B = \frac{\phi}{A} \quad [\text{T, 特斯拉}] \quad (6-3-2)$$

其中， B 為磁通密度，單位為特斯拉（T）或韋伯／平方公尺（Wb/m²）； ϕ 為磁通量，單位為韋伯（Wb）； A 為截面積，單位為平方公尺（m²）。單位整理如表 6-3 所示。

▼ 表 6-3 磁通密度



▲ 圖 6-15 磁通密度 磁力線 ϕ 通過截面積 A 的情形。

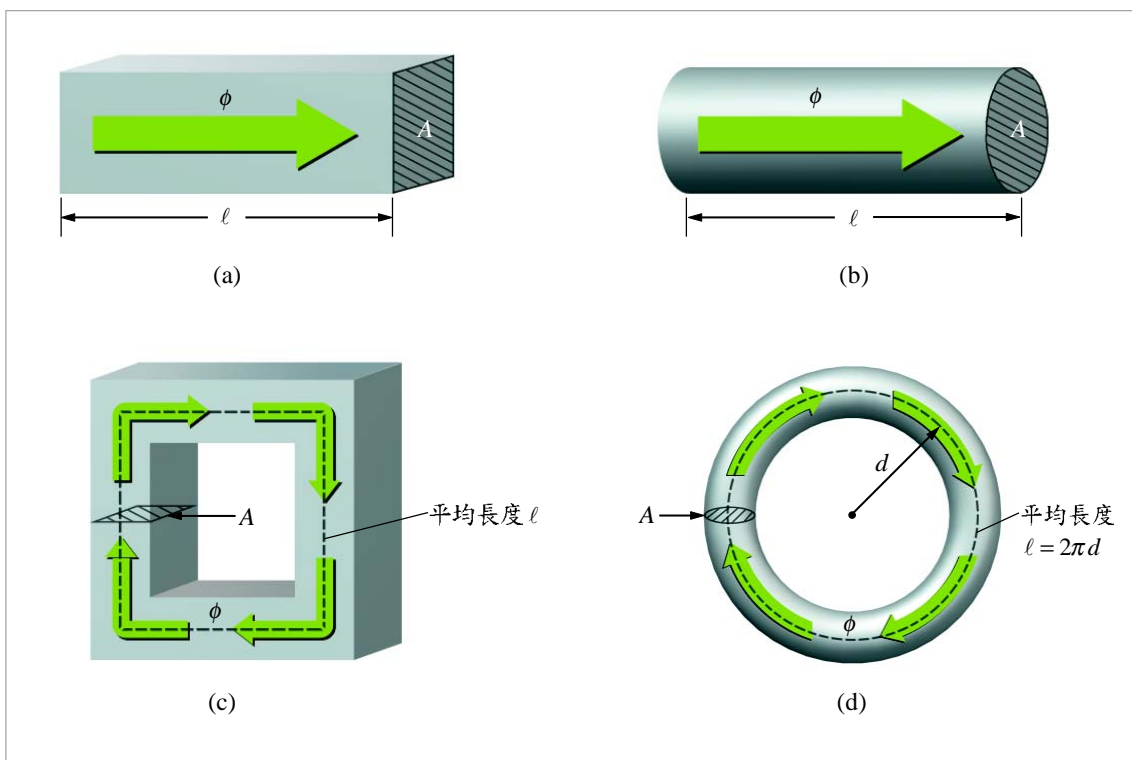
單位制	公式	單位
MKS 制	$\phi = m$ $B = \frac{\phi}{A} = \frac{m}{A}$	ϕ ：韋伯 A ：平方公尺 B ：韋伯／平方公尺
CGS 制	$\phi = 4\pi m$ $B = \frac{\phi}{A} = \frac{4\pi m}{A}$	ϕ ：線或馬克斯威 A ：平方公分 B ：線／平方公分
單位換算	1 韋伯／平方公尺 = 10 ⁴ 線／平方公分 = 10 ⁴ 高斯	

磁阻

在電路中，電流流過導體的阻力稱為電阻；同理，磁力線通過磁性材料所受的阻力稱為**磁阻**（reluctance，簡記為 \mathcal{R} ）。如圖 6-16 所示，磁阻 \mathcal{R} 與材料長度（磁路長度） ℓ 成正比，與材料截面積 A 及導磁係數（permeability，或稱磁導率）的乘積成反比，用數學式表示為：

Σ 重要公式

$$\mathcal{R} = \frac{\ell}{\mu A} = \frac{\ell}{\mu_0 \mu_r A} \quad [\text{A-t/Wb, 安培-匝／韋伯}] \quad (6-3-3)$$



▲ 圖 6-16 磁阻與相關條件示意圖 磁阻： $\mathcal{R} = \frac{\ell}{\mu A}$ ，不同形狀物體有不同的磁路長度 ℓ 及截面積 A 。

若材料中的磁阻愈大，表示磁通愈不容易建立，磁通量較小。而如同介質的介電係數與其電通有關，磁性材料的導磁係數 μ 也可看成：**在磁性材料中建立磁通的難易程度**。較高 μ 值的材料，其磁阻較小，磁通也較容易建立。

相對導磁係數（relative permeability） μ_r 是指磁性材料的導磁係數 μ 相對於真空中導磁係數 μ_0 的比值，即：

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

在 MKS 制中， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 韋伯／安培 - 公尺（Wb/A·m）或亨利／公尺（H/m）；在 CGS 制中， $\mu_0 = 1$ 。例如：某特殊鋼材的 $\mu_r = 2000$ ，則導磁係數為 $\mu = \mu_0 \mu_r = 4\pi \times 10^{-7} \times 2000 = 8\pi \times 10^{-4}$ Wb/A·m。



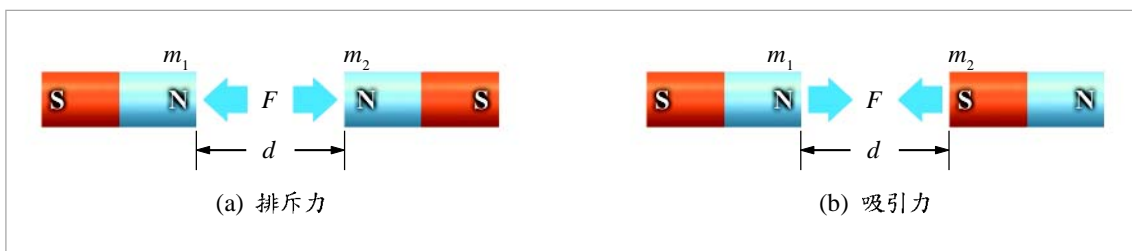
6-3.3 庫侖磁力定律與磁場強度

庫侖磁力定律

如同電荷間有同性相斥、異性相吸的作用力，不同磁極間也有類似的作用。若兩同性磁極（即同為 **N** 極或同為 **S** 極）互相靠近時，則會產生排斥的力量；若異性磁極（**N** 極與 **S** 極）互相靠近時，則會產生吸引的力量。兩磁極間的作用力大小符合**庫侖磁力定律**：與兩磁極強度 m_1 、 m_2 的乘積成正比，與兩磁極距離 d 的平方成反比，如圖 6-17 所示。其公式為：

Σ 重要公式

$$F = K_M \frac{m_1 m_2}{d^2} \quad [N, \text{牛頓}] \quad (6-3-4)$$



▲ 圖 6-17 庫侖磁力定律 兩磁極間作用力的大小與兩磁極強度的乘積成正比，與距離平方成反比。

其中 K_M 為比例常數，若磁極間介質的導磁係數為 μ ，則 $K_M = \frac{1}{4\pi\mu}$ 。不同單位下的公式整理如表 6-4 所示。

▼ 表 6-4 庫侖磁力定律公式

單位制	公式	單位	真空中（空氣中）
MKS 制	$F = \frac{1}{4\pi\mu} \frac{m_1 m_2}{d^2} = \frac{1}{4\pi\mu_0\mu_r} \frac{m_1 m_2}{d^2}$ ($\mu = \mu_0\mu_r$)	F ：牛頓 m ：韋伯 d ：公尺	$F = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{m_1 m_2}{d^2} = 6.33 \times 10^4 \frac{m_1 m_2}{d^2}$ ($\mu_r = 1$)
CGS 制	$F = \frac{1}{\mu} \frac{m_1 m_2}{d^2} = \frac{1}{\mu_r} \frac{m_1 m_2}{d^2}$ ($\mu_0 = 1 \Rightarrow \mu = \mu_0\mu_r = \mu_r$)	F ：達因 m ：靜磁單位 d ：公分	$F = \frac{m_1 m_2}{d^2}$ ($\mu_r = 1$)

磁場強度

前面已提到，只要有磁極存在就必有磁場建立，若是將一測試磁極置於此磁場之各處，我們也會發現其吸力（或斥力）各不相同，亦即各處磁場有強弱之別。因此我們可以定義磁場中某點的**磁場強度**（magnetic intensity，簡記為 H ）為：**單位磁極於該點所受到的磁力大小**，其公式為：

Σ 重要公式

$$H = \frac{F}{m} \quad [\text{N/Wb, 牛頓／韋伯}] \quad (6-3-5)$$

若有一磁極 M 於空間中，根據庫侖磁力定律，其所建立的磁場強度為：

Σ 重要公式

$$H = \frac{F}{m} = \frac{\frac{1}{4\pi\mu} \frac{Mm}{d^2}}{m} = \frac{1}{4\pi\mu} \frac{M}{d^2} \quad [\text{N/Wb, 牛頓／韋伯}] \quad (6-3-6)$$

不同單位下的公式整理如表 6-5 所示。

▼ 表 6-5 磁場強度的大小

單位制	公式	單位	真空中（空氣中）
MKS 制	$H = \frac{1}{4\pi\mu} \frac{M}{d^2} = 6.33 \times 10^4 \frac{1}{\mu_r} \frac{M}{d^2}$ ($\mu = \mu_0 \mu_r$)	H ：牛頓／韋伯 F ：牛頓 M ：韋伯 d ：公尺	$H = 6.33 \times 10^4 \frac{M}{d^2}$ ($\mu_r = 1$)
CGS 制	$H = \frac{1}{\mu} \frac{M}{d^2} = \frac{1}{\mu_r} \frac{M}{d^2}$ ($\mu_0 = 1 \Rightarrow \mu = \mu_0 \mu_r = \mu_r$)	H ：達因／靜磁 F ：達因 M ：靜磁 d ：公分	$H = \frac{M}{d^2}$ ($\mu_r = 1$)

磁場強度與磁通密度之關係

在磁力線通過的路徑（磁路）中，若某點的磁場強度 H 愈大，表示通過的磁力線愈多，亦即磁通密度 B 愈大。其兩者間的比值（ $\frac{B}{H}$ ）會隨著磁



通路徑中的材質而有所不同，而且這比值即是材質的導磁係數 μ ，以數學式表示為：

Σ 重要公式

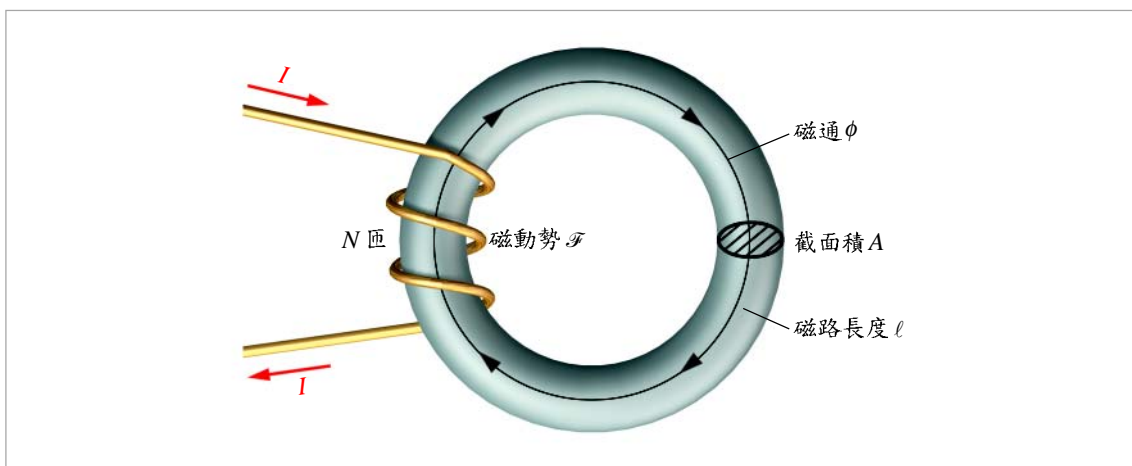
$$\mu = \frac{B}{H} \quad \text{或} \quad B = \mu H \quad (\mu = \mu_0 \mu_r) \quad (6-3-7)$$

這表示相同的磁場強度加於不同的材質中，其導磁係數 μ 值較高的材質，所建立的磁通密度較大。

6-3.4 磁動勢與磁化力

磁動勢

在電路中，電流的流動是一個封閉的迴路；而磁力線也是一個封閉的路徑，因此我們把磁力線通過的路徑稱為**磁路**（magnetic circuit）。另外，在電路中驅動電流的原動力稱為**電動勢**；同理，我們也將磁路中能產生磁力線的原動力稱為**磁動勢**（magnetomotive force，簡記為 mmf），符號以 \mathcal{F} 表示，這個原動力通常是由線圈通電後產生，如圖 6-18 所示。



▲ 圖 6-18 磁路及磁動勢 線圈電流產生磁動勢以形成磁力線（磁通），磁通構成一封閉迴路稱為磁路。

磁力線的建立是由電流所產生，因此磁動勢的大小與通過的電流成正比，另外也與線圈的匝數有關。磁動勢以數學式表示為：

$$\mathcal{F} = NI \quad [\text{A-t, 安匝}] \quad (6-3-8)$$

磁動勢 \mathcal{F} 的單位為安培 - 匝（A-t），簡稱安匝。表 6-6 則列出不同單位下的公式。

▼ 表 6-6 磁動勢

單位制	公式	單位
MKS 制	$\mathcal{F} = NI$	N ：匝數 I ：安培 \mathcal{F} ：安匝
CGS 制	$\mathcal{F} = 0.4\pi NI$	N ：匝數 I ：安培 \mathcal{F} ：吉伯
單位換算	1 安匝 = 0.4π 吉伯 $\cong 1.257$ 吉伯	

磁路的歐姆定律

磁路與電路相似，可以將磁動勢 \mathcal{F} 相當於電動勢 E ，磁通量 ϕ 相當於電流 I ，而磁阻 \mathcal{R} 則對應於電阻 R ，則磁路的歐姆定律表示為：

$$\phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}} \quad \text{或} \quad \mathcal{F} = \phi \mathcal{R} \quad (6-3-9)$$

其中磁阻 \mathcal{R} 與磁路長度 ℓ 成正比，與材料截面積 A 及導磁係數 μ 的乘積成反比，即 $\mathcal{R} = \frac{\ell}{\mu A}$ 。



磁化力

我們可以對磁場強度作另一種定義：在磁路中，若磁路的長度為 ℓ ，磁動勢為 \mathcal{F} ，則磁路上每單位長度的磁動勢稱為磁化力（magnetizing force）。磁化力與磁場強度的意義是一樣的，即：

Σ 重要公式

$$H = \frac{\mathcal{F}}{\ell} = \frac{NI}{\ell} \quad [A \cdot t/m, \text{安匝/公尺}] \quad (6-3-10)$$

$$= \frac{F}{m} \quad [N/Wb, \text{牛頓/韋伯}]$$



範例 6-8

在一磁路中，面積為 20 平方公分，通過 10^5 條之磁力線，試求其磁通密度為多少？

【解】 $B = \frac{\phi}{A} = \frac{10^5 \text{ line}}{20 \text{ cm}^2} = 5 \times 10^4 \text{ 線/平方公分} = 5 \times 10^4 \text{ 高斯}$

馬上練習

在一圓形的磁路中，若其半徑為 20 公分，通過之磁力線為 4π 韋伯，試求該磁路之磁通密度為多少？

【答】 $B = 100 \text{ 韋伯/平方公尺}。$



範例 6-9

某磁路中，磁路之長度 $\ell = 4\pi$ 公尺，截面積 $A = 0.002$ 平方公尺，若其相對導磁係數 $\mu_r = 500$ ，試求此磁路的磁阻為多少？

【解】 $\mathcal{R} = \frac{\ell}{\mu_0 \mu_r A} = \frac{4\pi \text{ m}}{(4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/A} \cdot \text{m})(500)(2 \times 10^{-3} \text{ m}^2)} = 10^7 \text{ 安匝/韋伯}$

**範例 6-10**

有一 2×10^{-3} 韋伯的磁極，置於某磁場中的一點，其受力為 50 牛頓，試求該點之磁場強度為多少？

$$\text{【解】 } H = \frac{F}{m} = \frac{50\text{N}}{2 \times 10^{-3}\text{Wb}} = 2.5 \times 10^4 \text{ 牛頓／韋伯}$$

**範例 6-11**

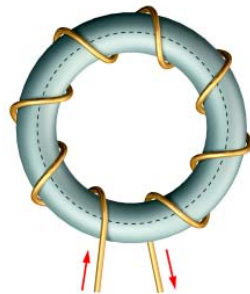
某磁路之磁場強度為 $H = 0.05$ 牛頓／韋伯，而磁通密度 $B = 3$ 韋伯／平方公尺，試求磁路之導磁係數為多少？

$$\text{【解】 } \mu = \frac{B}{H} = \frac{3\text{Wb/m}^2}{0.05\text{N/Wb(A-t/m)}} = 60 \text{ 韋伯／安培-公尺}$$

註： H 的單位亦可為 A-t/m 或 A/m（匝數可視為無單位）。

**範例 6-12**

如右圖所示，若磁路之長度 $\ell = 6$ 公尺，截面積 $A = 0.003$ 平方公尺，共繞有 200 匝線圈，其導磁係數 $\mu = 5 \times 10^{-5}$ 韋伯／安培-公尺，並通以 4 安培的電流，試求 (1) 磁路之磁阻 (2) 磁動勢 (3) 磁通量 (4) 磁化力 各為多少？



$$\text{【解】 (1) } \mathcal{R} = \frac{\ell}{\mu A} = \frac{6\text{m}}{(5 \times 10^{-5}\text{Wb/A-m})(3 \times 10^{-3}\text{m}^2)} = 4 \times 10^7 \text{ 安匝／韋伯}$$

$$(2) \mathcal{F} = NI = (200\text{t})(4\text{A}) = 800 \text{ 安匝}$$

$$(3) \phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}} = \frac{800\text{A-t}}{4 \times 10^7 \text{A-t/Wb}} = 2 \times 10^{-5} \text{ 韋伯}$$

$$(4) H = \frac{\mathcal{F}}{\ell} = \frac{800\text{A-t}}{6\text{m}} \cong 133 \text{ 安匝／公尺}$$

馬上練習

某磁路中，線圈匝數為 100 匝，欲產生 200 安匝之磁動勢，試求線圈需通以多大的電流？

【答】 $I = 2$ 安培。



單元評量



1. 磁力線在磁鐵內部由 _____ 極出發至 _____ 極，而在磁鐵外部則由 _____ 極出發到達 _____ 極。
2. 磁場中某一點的磁場強度與磁極強度成 _____ 比，而與其間距離成 _____ 比。
3. 磁路中之磁阻與磁性物質材料長度成 _____ 比，與截面積成 _____ 比，與導磁係數成 _____ 比。
4. 在真空中兩個相同強度之磁極相距 3 公分，其排斥力為 100 達因，則兩磁極強度為 _____ 靜磁單位。
5. 磁力線的總數稱為 _____，以 ϕ 表示，其中 1 韋伯 = _____ 線。
6. 某磁路之相對導磁係數 $\mu_r = 500$ ，磁場強度為 600 牛頓／韋伯，則磁路中的磁通密度約為 _____ 韋伯／平方公尺。
7. 某螺旋管長 30 公分，每公分繞有 10 匝之線圈，若線圈通以 2A 之電流，則其磁動勢為 _____ 安匝，若此磁路之磁阻為 200 安匝／韋伯，則磁路之磁通量為 _____ 韋伯。
8. 若磁路之磁場強度為 0.4 牛頓／韋伯，磁通密度為 2 韋伯／平方公尺，則磁路之導磁係數 μ 為 _____ 韋伯／安培 - 公尺。
9. 某磁通路徑長 3 公分，截面積為 8×10^{-4} 平方公尺，假設該物質的相對導磁係數 $\mu_r = 40 \times 10^3$ ，磁動勢為 746 安匝，若無漏磁，則其磁通量為 _____ 韋伯。

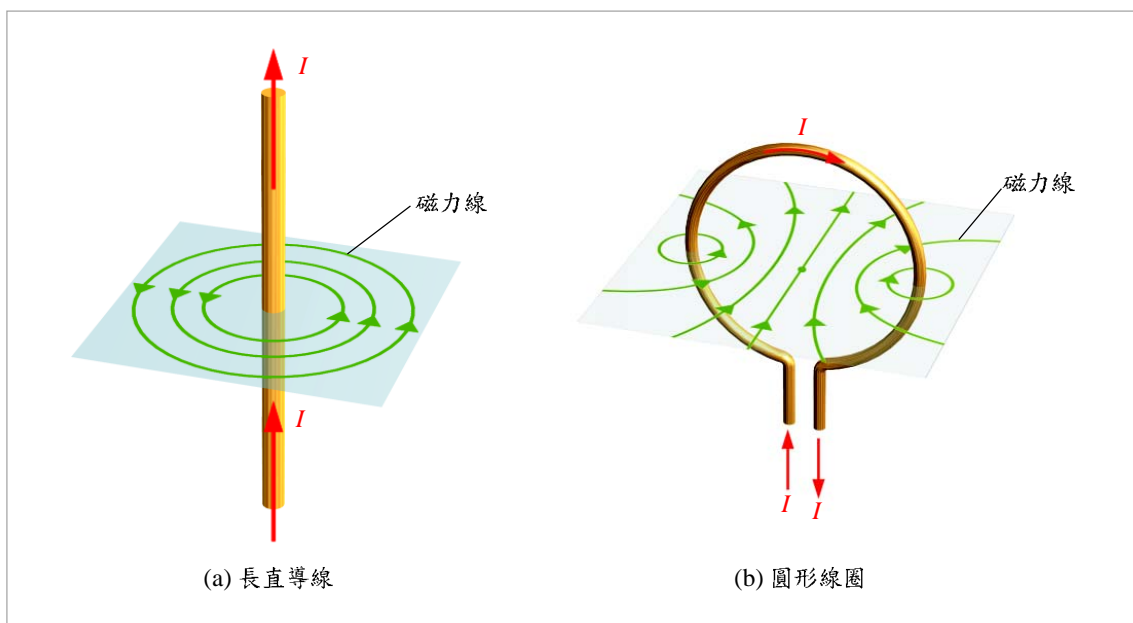
6-4 電磁效應

西元 1819 年丹麥科學家奧斯特（H. Oersted, 1777~1851）發現：將一個可以轉動的磁鐵（羅盤的磁針）靠近一載有電流的導線時會發生偏轉的現象，由此開始確立的電與磁的關係。當一個磁性物質產生的靜磁場與導線電流產生的磁場發生作用時，電流方向、磁場方向、與作用力方向間有什麼樣的關係呢？電流流動在磁場中產生的電磁效應又是什麼？這是本節要討論的主題。

6-4-1 電流的磁效應

安培右手定則

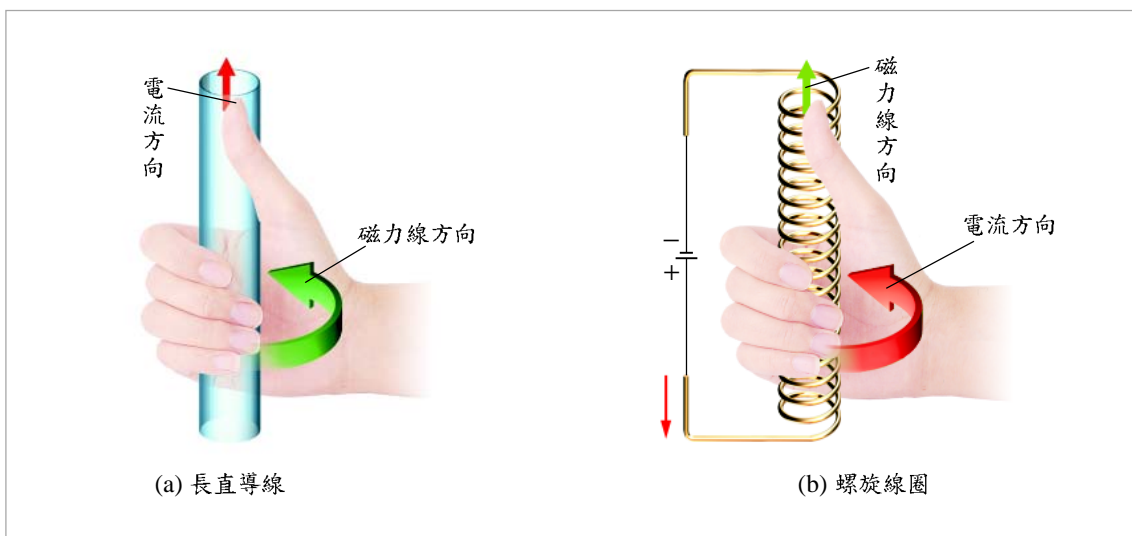
除了磁鐵可以產生磁場外，將一導線通以電流，則其四周也會建立起磁場，稱為**電流的磁效應**。長直導線與圓形線圈所產生的磁場，如圖 6-19 所示。



▲ 圖 6-19 長直導線與圓形線圈所產生的磁場 將一導線通以電流時，其四周會建立起磁場，稱為電流的磁效應。

西元 1820 年法國科學家安培（A. Ampere, 1775~1836）就上述現象，以右手大拇指與其餘彎曲四指來表示電流及磁場方向，而發表了**安培右手定則**：

1. **長直導線**：以大拇指所指方向為電流方向，而其餘彎曲四指表示電流所產生之磁力線的環繞方向，如圖 6-20(a)所示。
2. **螺旋線圈**：以彎曲四指所指方向為電流環繞方向，而大拇指表示電流所產生之磁力線（N 極）的方向，如圖 6-20(b)所示。



▲ 圖 6-20 安培右手定則 圖(a)中，拇指為電流方向，四指為磁場方向；圖(b)中，四指為電流方向，拇指為磁場方向。

電磁效應的磁場強度

對於電流之磁效應所產生的磁場強度，我們分別說明如下：

1. 一載有電流 I 之長直導線，如圖 6-21(a) 所示，在與導線距離 d 之位置的磁場強度為：

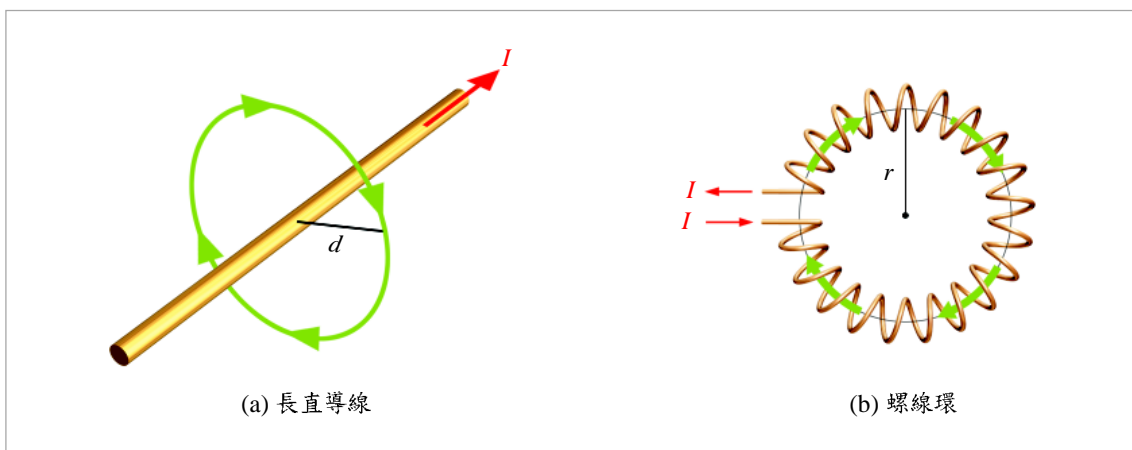
Σ 重要公式

$$H = \frac{I}{2\pi d} \quad [\text{A} \cdot \text{t/m}, \text{安匝} / \text{公尺}] \quad (6-4-1)$$

2. 一通以電流 I 之 N 匝螺線環，其磁路平均路徑為 ℓ ，如圖 6-21(b)，則環中的磁場強度為：

Σ 重要公式

$$H = \frac{\mathcal{F}}{\ell} = \frac{NI}{2\pi r} \quad [\text{A} \cdot \text{t/m}, \text{安匝} / \text{公尺}] \quad (6-4-2)$$

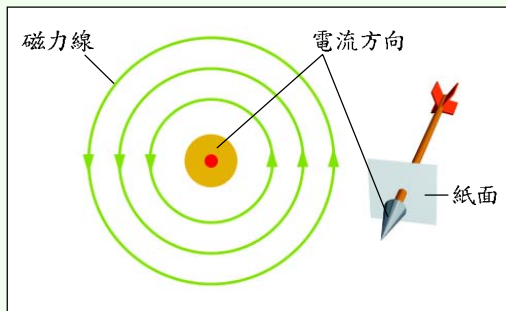


▲ 圖 6-21 電磁效應的磁場強度

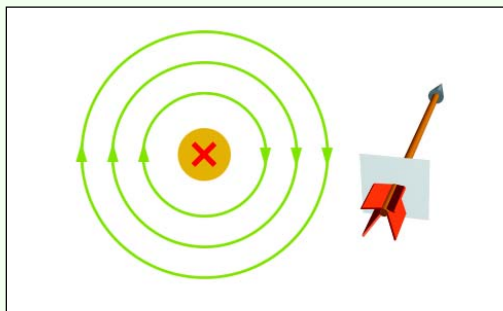


知識充電

為了方便標示電流（或磁場）的方向，常以箭頭或箭尾表示電流的流出或流入，當電流流出紙面方向時，以箭頭 " \odot " 表示；當電流流入紙面方向時，以箭尾 " \otimes " 表示。



流出紙面



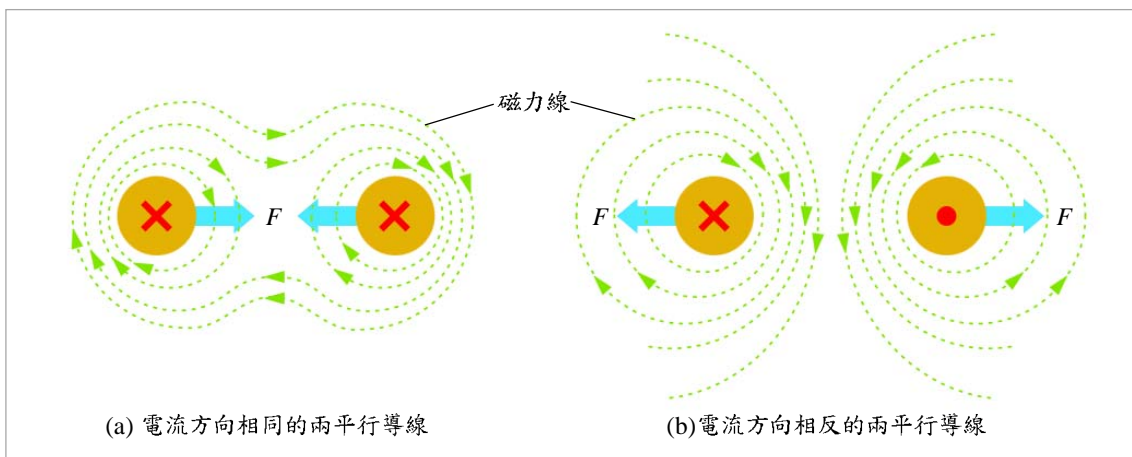
流入紙面

6-4.2 兩平行載流導體間的磁場

如圖 6-22(a)所示，將兩平行導線彼此靠近並通以同方向的電流時，依照安培右手定則，每條導線周圍產生的磁力線方向均相同。在兩導線內側的磁力線相互抵銷，使得內側的磁力線密度較低，因磁力線有相互排斥的特性，所以兩導線中間產生吸引力。



同理，若兩平行導體通以反方向的電流時，在二導線內側的磁力線方向相同而密度較高，所以兩導線中間產生排斥力，如圖 6-22(b)所示。

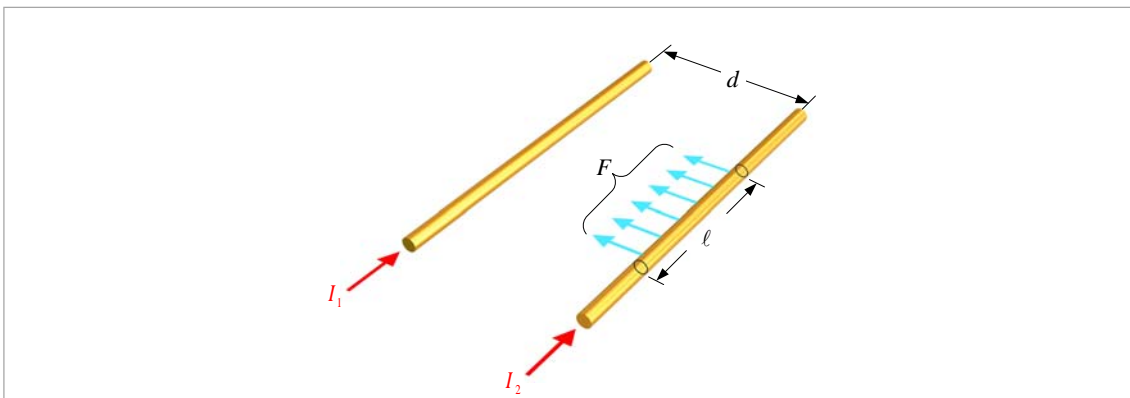


▲ 圖 6-22 兩平行載流導體間的磁力線分佈 電流方向相同時，兩平行導線相互吸引；電流方向相反時，兩平行導線相互排斥。

如圖 6-23 所示，兩平行載流導線間的作用力大小，與通過兩導線的電流、導線的有效長度、及導線間的距離有關，且兩導線的受力必定相等，其公式如下：

Σ 重要公式

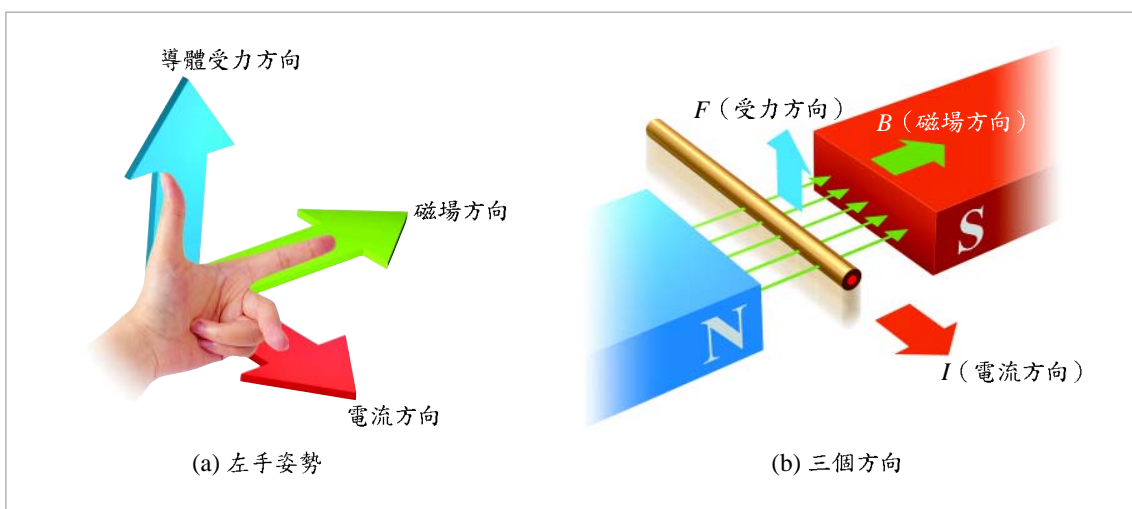
$$F = \frac{\mu I_1 I_2 \ell}{2\pi d} \quad [\text{N, 牛頓}] \quad (6-4-3)$$



▲ 圖 6-23 兩平行載流導線間的作用力 單位長度的受力與兩電流乘積成正比，與距離成反比。

6-4.3 佛萊明左手定則

載有電流之導體，其周圍必有磁場產生，若將此載流導體置於另一磁場中，則兩磁場就會產生交互作用而使導體受力。若欲決定載流導體在磁場中的受力方向，則可利用**佛萊明左手定則**：將左手大拇指、食指及中指伸直而相互垂直，而各手指代表的意義如圖 6-24 所示。這個定則可以用來判定電動機的旋轉方向，所以又稱為**電動機定則**。



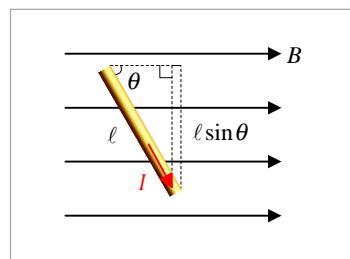
▲ 圖 6-24 佛萊明左手定則示意圖 食指代表磁場方向；中指代表電流方向；拇指代表受力方向。

由實驗得知，一載流導體置於磁場中，其受力的大小（如圖 6-25 所示），可由下列數學式決定：

Σ 重要公式

$$F = BIl \sin \theta \quad [\text{N, 牛頓}] \quad (6-4-4)$$

其中， F 為導體所受的作用力，單位為牛頓（N）； B 為磁通密度，單位為特斯拉（T）或韋伯／平方公尺（ Wb/m^2 ）； I 為通過導體的電流，單位為安培（A）； θ 為導體電流方向與磁力線方向的夾角； $l \sin \theta$ 為導體在磁場中與磁場方向垂直的有效長度，單位為公尺（m）。



▲ 圖 6-25 載流導體於磁場中的作用力

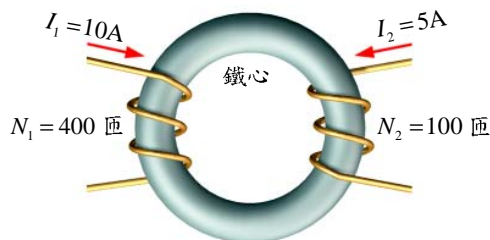
**範例 6-13**

有一無限長之導線，通入 15 安培的電流，試求距離導線 2 公尺處之磁場強度為多少？

【解】 $H = \frac{I}{2\pi d} = \frac{15\text{A}}{(2\pi)(2\text{m})} \cong 1.19 \text{ 安匝／公尺}$

**範例 6-14**

如右圖所示，若已知線圈中鐵心的平均長度為 4 公尺，試求鐵心內的磁場強度為多少？



【解】利用 $H = \frac{NI}{\ell}$ 可知：

線圈 1 產生之 $H_1 = \frac{(400\text{t})(10\text{A})}{4\text{m}} = 1000 \text{ 安匝／公尺}$ （方向為順時鐘）

線圈 2 產生之 $H_2 = \frac{(100\text{t})(5\text{A})}{4\text{m}} = 125 \text{ 安匝／公尺}$ （方向為逆時鐘）

$H = H_1 - H_2 = 1000 - 125 = 875 \text{ 安匝／公尺}$ （方向為順時鐘）

**範例 6-15**

設長度均為 50 公尺之兩平行導線，相隔 2 公分，導線各通以 30A 及 40A 之電流（方向相同），試求每一導線之作用力為多少？（在空氣中）

【解】 $F = \frac{\mu_0 I_1 I_2 \ell}{2\pi d} = \frac{(4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb/A} \cdot \text{m})(30\text{A})(40\text{A})(50\text{m})}{(2\pi)(0.02\text{m})} = 0.6 \text{ 牛頓}$ （相吸）

馬上練習

長度均為 1 公尺之兩平行導線，導線各通以 10A 及 20A 之電流（方向相反），若每一導線之作用力為 4×10^{-3} 牛頓，則兩導線相隔為多少？（在空氣中）

【答】 $d = 1$ 公分。



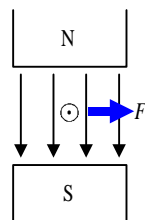
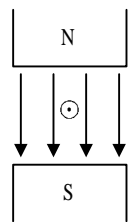
範例 6-16

如右圖所示，若導體通以 5A 之電流，長度為 2 公尺，置於磁通密度為 0.03 韋伯／平方公尺之磁場中，試求導體之作用力及方向各為何？

【解】(1) 電流方向與磁場方向的夾角 $\theta = 90^\circ$

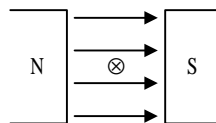
$$F = BIl \sin \theta = (0.03 \text{ Wb/m}^2)(5\text{A})(2\text{m})\sin 90^\circ \\ = 0.3 \text{ 牛頓}$$

(2) 由佛萊明左手定則可知：磁場（食指）向下，電流（中指）穿出紙面，則導體受力（拇指）向右，如右圖所示。



馬上練習

如右圖所示，若導體通以 10A 之電流，長度為 2 公尺，置於磁通密度為 2 韋伯／平方公尺之磁場中，試求導體之作用力及方向各為何？



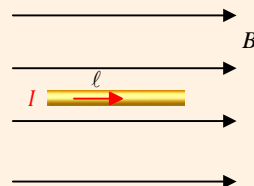
【答】 $F = 40$ 牛頓（向下）。



單元評量



- 利用安培右手定則來判斷長直導線的磁場方向，則大拇指代表 _____ 方向，而彎曲四指則表示 _____ 方向。
- 有一長直載流導線，其與導線距離 d 之位置的磁場強度與導線電流 I 成 _____ 比。
- 佛萊明左手定則中規定：食指代表 _____，中指代表 _____，拇指代表 _____，又稱為 _____ 定則。
- 在空氣中有長度均為 1 公尺之兩平行導線，相隔 50 公分，導線各通以 10A 及 5A 之反向電流，則每一導線之作用力為 _____ 牛頓，作用力為 _____。（相吸或相斥）
- 如右圖所示，若磁通密度 $B = 5$ 韋伯／平方公尺，導線長度 $\ell = 2$ 公尺，電流 $I = 10$ 安培，則導線受力為 _____ 牛頓。





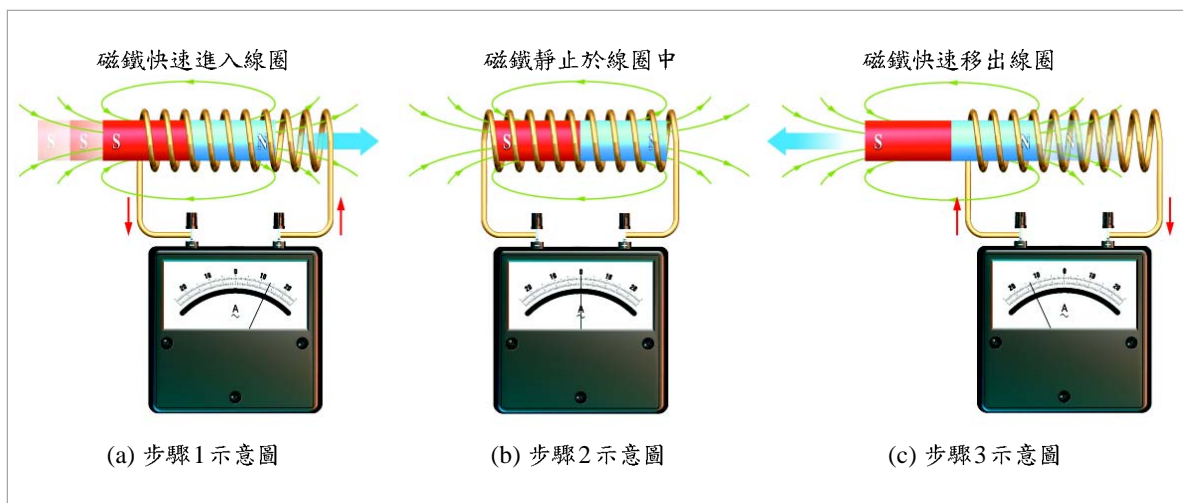
6-5 電磁感應

前一節所闡述的是電生磁的效應，本節中則是要來說明磁生電的現象，我們稱為**電磁感應**（electromagnetic induction），應用這項原理製造的儀器很多如發電機、變壓器、電磁爐等，使人類生活產生極大的轉變。

6-5.1 電磁感應的現象

西元 1831 年英國物理學家法拉第（M. Faraday, 1791~1867）發現：當一線圈周圍的磁場發生變化時，會令線圈中產生電流，此效應稱為**電磁感應**。法拉第電磁感應的實驗步驟為：

1. 將一磁鐵快速插入線圈時，會發現電流計的指針向一方偏轉，如圖 6-26(a)所示。
2. 將磁鐵置於線圈中靜止不動，則電流計指針歸零，如圖 6-26(b)所示。
3. 若將磁鐵自線圈中急速抽出，則指針反向偏轉，如圖 6-26(c)所示。
4. 若將磁鐵固定不動，而將線圈套入或抽出，則指針也同樣會偏轉。



▲ 圖 6-26 電磁感應實驗示意圖 當線圈中的磁通量發生變化時，會使線圈感應生成一電流，此為電磁感應現象。

由上述可知，只要穿過線圈中的磁通量發生變化，均會使電流計的指針偏轉，那就表示線圈中有電動勢產生，稱為**感應電動勢**（induced voltage），所產生的電流則稱為**感應電流**（induced current），此種由磁通量變化而在閉合電路中產生電流的效應，稱為**電磁感應**。此項實驗可獲得結論如下：

1. 線圈與磁鐵有相對運動時（線圈的磁通量產生變化），就有感應電流（或電動勢）產生。
2. 相對運動一旦停止，電流等於零；相對運動愈快，感應電流愈大。
3. 感應電流的方向與相對運動的方向有關。

6-5.2 法拉第電磁感應定律

法拉第根據實驗結果做了以下的描述：當通過一線圈的磁通量發生變化時，線圈會感應出一個電動勢，其大小與線圈的匝數及通過線圈的磁通量變化率成正比，這即是法拉第電磁感應定律（Faraday's law of electromagnetic induction），用數學式表示為：

Σ 重要公式

$$e = N \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad [V, \text{伏特}] \quad (6-5-1)$$

其中， e 為線圈所產生的平均感應電動勢； N 為線圈匝數； $\Delta\phi (= \phi_1 - \phi_2)$ 為穿過線圈的磁力線數變化量； Δt 為發生磁通變化所經過的時間。各項單位如表 6-7 所示。

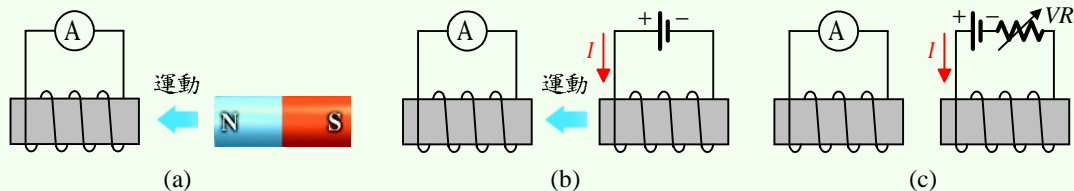
▼ 表 6-7 法拉第電磁感應定律的公式與單位

單位制	公式	單位
MKS 制	$e = N \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$	e ：伏特 (V) N ：匝數 (t) ϕ ：韋伯 (Wb) t ：秒 (s)
CGS 制	$e = N \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \times 10^{-8}$	e ：伏特 (V) N ：匝數 (t) ϕ ：線或馬克斯威 t ：秒 (s)



知識充電

由上述可知，只要線圈中的磁通量發生變化，就會產生感應電流，則以下幾種方法都能造成電磁感應：



圖(a)：移動磁鐵使線圈磁通量改變，產生感應電流。

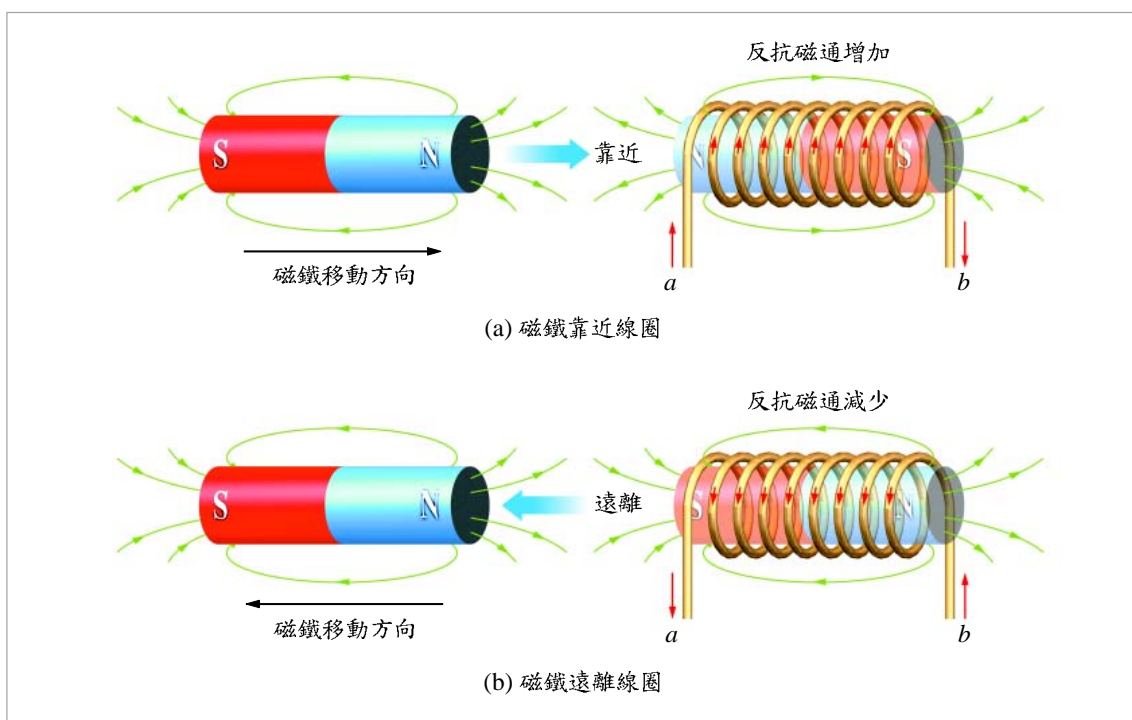
圖(b)：將磁鐵用一載流線圈（電磁鐵）取代，則移動載流線圈也可產生感應電流。

圖(c)：調整 VR 改變載流線圈的電流大小，也可使磁通量發生變化產生感應電流。

6-5.3 楞次定律

法拉第在上述實驗中並未說明如何判別感應電流的方向，在西元 1834 年時，德國科學家楞次（H. Lenz, 1804~1865）針對這個問題提出一個簡單的規則來解釋：

1. 如圖 6-27(a)所示，當磁鐵 N 極向線圈靠近時，則往右方通過線圈的磁通量將增加；此時線圈將感應出一電流，以使此電流所產生的磁通量**反抗**原磁通量的增加。因此感應電流的磁通方向應向左，根據安培右手定則，感應電流的方向為 a 進 b 出。如此線圈猶如是一個 N 極向左的磁鐵，以抗拒磁鐵靠近。
2. 如圖 6-27(b)所示，當磁鐵 N 極從線圈遠離時，往右方通過線圈的磁通量將減少；則線圈感應電流產生的磁通量將**反抗**原磁通量的減少。因此感應電流的磁通方向應向右，根據安培右手定則，感應電流的方向為 a 出 b 進。如此線圈猶如是一個 S 極向左的磁鐵，以抗拒磁鐵遠離。



▲ 圖 6-27 感應電流方向與磁鐵移動方向之關係 感應電流的方向是要反抗原線圈之磁通量變化，即感應電流所產生的磁通方向與原線圈之磁通變化相反。

因此，楞次定律（Lenz's law）即是說明：**感應電流的方向是要反抗原線圈之磁通量變化**。將此觀念引入法拉第電磁感應定律，則(6-5-1)式可改寫為：

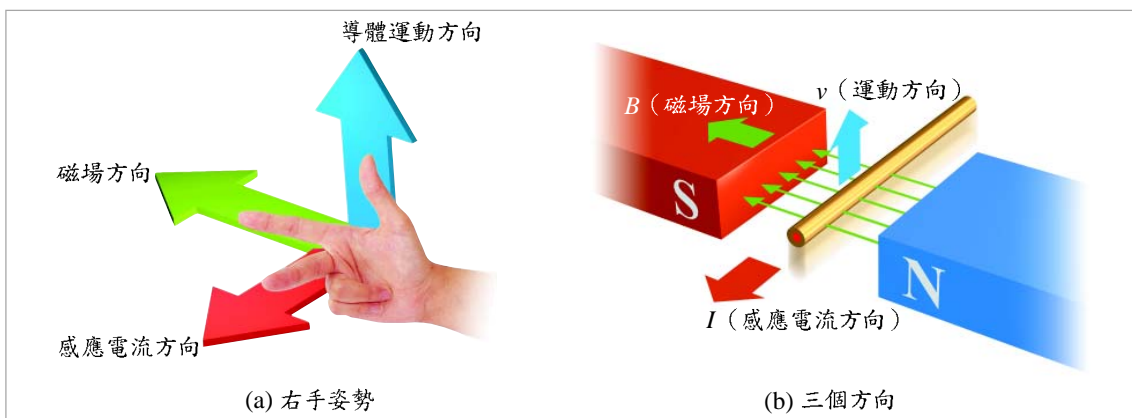
Σ 重要公式

$$e = -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad [V, \text{伏特}] \quad (6-5-2)$$

其中負號表示感應電動勢的方向是為反抗原磁通之變化。

6-5.4 佛萊明右手定則

雖然根據法拉第定律及楞次定律，我們可以依磁通量變化來決定感應電動勢的大小與方向，但若欲知一導體在磁場中運動時，其感應電動勢（電流）的方向，則須利用到**佛萊明右手定則**：將右手大拇指、食指及中指伸直而相互垂直，而各手指代表的意義如圖 6-28 所示。



▲ 圖 6-28 佛萊明右手定則示意圖 食指代表磁場方向；拇指代表運動方向；中指代表電流方向。

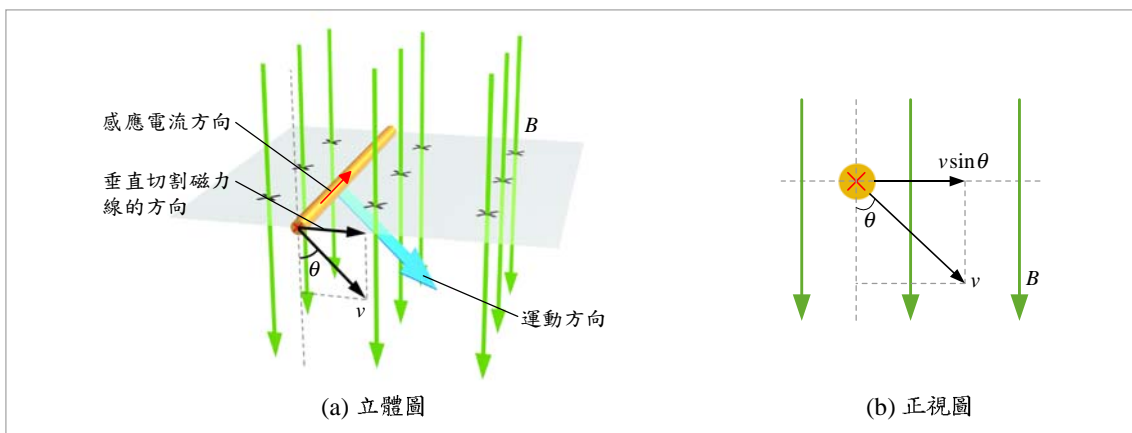
這個定則告訴我們，當使用其他能量（如位能、熱能、核能等）推動導體在磁場中運動時，將會產生感應電動勢及感應電流，這種能量轉換成電能的作用，就是發電機運作的原理，所以佛萊明右手定則又稱為**發電機定則**。

對於一導體在磁場中運動切割磁力線所產生的感應電動勢（如圖 6-29 所示），可用下列公式表示：

Σ 重要公式

$$e = B\ell v \sin\theta \quad [V, \text{伏特}] \quad (6-5-3)$$

其中， e 為感應電動勢，單位為伏特（V）； B 為磁通密度，單位為特斯拉（T）或韋伯／平方公尺（ Wb/m^2 ）； ℓ 為導體在磁場中的有效長度，單位為公尺（m）； θ 為導體運動方向與磁力線方向的夾角； $v \sin\theta$ 為導體在磁場中垂直切割磁力線的有效速度，單位為公尺／秒（m/s）。



▲ 圖 6-29 移動導體於磁場中的感應電動勢



範例 6-17

某線圈有 200 匝，線圈內磁通在 3 秒內由 2 韋伯升至 8 韋伯，試求 (1) 線圈的感應電動勢為多少？ (2) 若線圈外接 80Ω 之電阻器，則感應電流為多少？

【解】(1) $e = N \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = 200 \times \frac{8\text{Wb} - 2\text{Wb}}{3\text{s}} = 400 \text{ 伏特}$

(2) $I = \frac{e}{R} = \frac{400\text{V}}{80\Omega} = 5 \text{ 安培}$

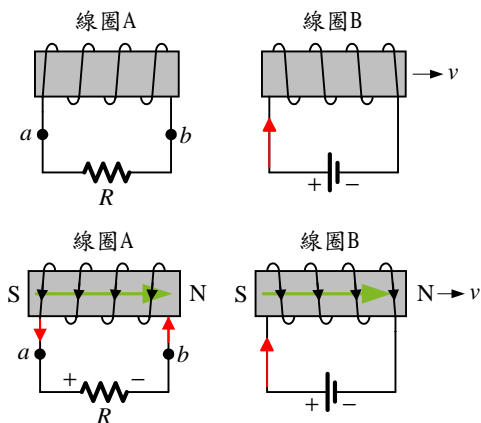


範例 6-18

如右圖所示，將 B 線圈向右移動，則 a 、 b 兩端電壓如何？

【解】如右圖所示：

- (1) 由安培右手定則知 B 線圈磁場方向如右下圖所示。
- (2) B 線圈遠離則線圈 A 往右方磁通減少，A 線圈感應產生向右之磁通以補足原磁力線。
- (3) 依安培右手定則判斷電流方向為由 a 流出、由 b 流進線圈，則 a 端電壓為正， b 端為負。



馬上練習 承上題，若 B 線圈向左移動，而電壓極性反接，則 a 、 b 兩端電壓如何？

【答】 a 端電壓為正， b 端為負。



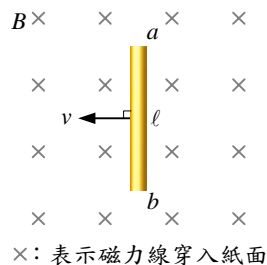
範例 6-19

如右圖所示，設 $B = 0.2\text{Wb/m}^2$ ，導線有效長度 $\ell = 2\text{m}$ ，運動速度 $v = 10\text{m/s}$ ，試求 (1) 感應電動勢為多少？ (2) 感應電流方向為何？

【解】(1) $e = B\ell v \sin\theta$

$= (0.2\text{Wb/m}^2)(2\text{m})(10\text{m/s})\sin 90^\circ = 4 \text{ 伏特}$

- (2) 依佛萊明右手定則，可知電流向下，所以 b 端為正、 a 端為負。

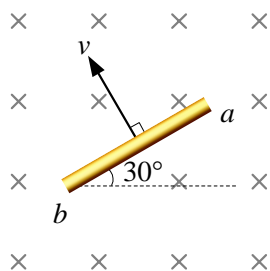




馬上練習

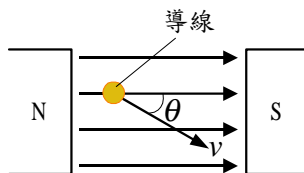
如右圖所示，設 $B = 2 \text{ Wb/m}^2$ ，導線有效長度 $\ell = 2 \text{ m}$ ，運動速度 $v = 5 \text{ m/s}$ ，試求 (1) 感應電動勢為多少？ (2) 感應電流方向為何？

【答】 $e = 20$ 伏特；電流由 b 端流出導體。



範例 6-20

如右圖所示，設 $B = 3 \text{ Wb/m}^2$ ，導線有效長度 $\ell = 2 \text{ m}$ ，運動速度 $v = 10 \text{ m/s}$ ， $\theta = 30^\circ$ ，試求 (1) 感應電動勢為多少？ (2) 感應電流方向為何？



【解】(1) $e = B\ell v \sin \theta = (3 \text{ Wb/m}^2)(2 \text{ m})(10 \text{ m/s}) \sin 30^\circ = 30$ 伏特

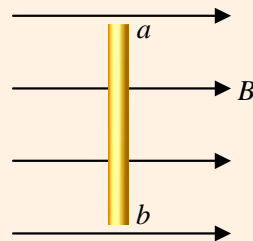
(2) 依佛萊明右手定則，可知電流方向流出紙面 (\odot)。



單元評量



- 欲判斷移動導體在磁場中感應電流的方向，應使用 _____ 定則。
- 佛萊明右手定則中規定：食指代表 _____，拇指代表 _____，中指代表 _____，又稱為 _____ 定則。
- 某線圈有 100 匝，有感應電壓 80V，而磁通在 5 秒內降為零，則原來磁通量為 _____ 韋伯。
- 一條導線運動於磁場中，在 0.05 秒內切割 4×10^7 馬克斯威的磁場，則感應電動勢為 _____ 伏特。
- 如右圖所示，設 $B = 3 \text{ Wb/m}^2$ ，導線有效長度 $\ell = 2 \text{ m}$ ，運動速度 $v = 20 \text{ m/s}$ ，試求 (1) 導體向內（進入紙面內）移動的感應電動勢為 _____ 伏特；(2) 導體向右移動的感應電動勢為 _____ 伏特。





重點摘要

1. 電感器：具有以線圈產生磁場而儲存、釋放能量的性質，符號 L ，單位為亨利（H）。

2. 磁通鏈：

$$\lambda = N\phi \quad [\text{Wb-t, 韋伯-匝}]$$

3. 電感量：

$$L = \frac{N\phi}{I} \quad [\text{H, 亨利}]$$

4. 自感：本身電流所產生磁通鏈與本身電流的比值。

互感：由本身線圈電流的變化，使鄰近線圈發生磁通鏈的變動。

5. 自感與互感的關係：

$$M = K_m \sqrt{L_1 L_2} \quad [\text{H, 亨利}]$$

耦合係數 K_m ：表示兩線圈的耦合程度，其值恆小於 1。

6. 電感器儲存的能量：

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

7. 電感器串聯電路：

(1) 串聯無互感： $L_T = L_1 + L_2$

(2) 串聯有互感：

串聯互助： $L_T = L_1 + L_2 + 2M$ 串聯互消： $L_T = L_1 + L_2 - 2M$

8. 電感器並聯電路：

(1) 並聯無互感： $L_T = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2}$

(2) 並聯有互感：

並聯互助： $L_T = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 - 2M}$ 並聯互消： $L_T = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 + 2M}$

9. 磁場：磁力作用所及的空間。

10. 磁通密度：

$$B = \frac{\phi}{A} \quad [\text{T, 特斯拉}]$$





11. 磁阻：磁力線通過磁性材料所受的阻力。

$$\mathcal{R} = \frac{\ell}{\mu A} = \frac{\ell}{\mu_0 \mu_r A} \quad [\text{A-t/Wb, 安培-匝/韋伯}]$$

其中，導磁係數可看成在磁性材料中建立磁通的難易程度。

12. 庫倫磁力定律：

$$F = \frac{1}{4\pi\mu} \frac{m_1 m_2}{d^2} \quad [\text{N, 牛頓}]$$

13. 磁場強度：單位磁極於該點所受到的磁力大小。

$$H = \frac{F}{m} \quad [\text{N/Wb, 牛頓/韋伯}]$$

磁場強度與磁通密度的關係：

$$\mu = \frac{B}{H} \quad \text{或} \quad B = \mu H$$

14. 磁動勢：產生磁力線的原動力。

$$\mathcal{F} = NI = \phi \mathcal{R} = H\ell \quad [\text{A-t, 安匝}]$$

15. 磁化力：磁路上每單位長度的磁動勢，與磁場強度是同樣意義。

$$H = \frac{\mathcal{F}}{\ell} = \frac{NI}{\ell} \quad [\text{A-t/m, 安匝/公尺}] \quad \text{或} \quad [\text{N/Wb, 牛頓/韋伯}]$$

16. 兩平行載流導線間的作用力大小：

$$F = \frac{\mu I_1 I_2 \ell}{2\pi d} \quad [\text{N, 牛頓}]$$

17. 載流導體在磁場中的受力：方向由佛萊明左手定則（電動機定則）決定，大小為

$$F = B I \ell \sin \theta \quad [\text{N, 牛頓}]$$

18. 電磁感應：由磁通量變化而在閉合電路中產生電流的效應。

法拉第電磁感應定律：

$$e = -N \frac{\Delta \phi}{\Delta t} \quad [\text{V, 伏特}]$$

19. 楞次定律：感應電流的方向是要反抗原線圈之磁通量變化。

20. 導體在磁場中運動的感應電動勢：方向由佛萊明右手定則（發電機定則）決定，大小為

$$e = B \ell v \sin \theta \quad [\text{V, 伏特}]$$



學後評量

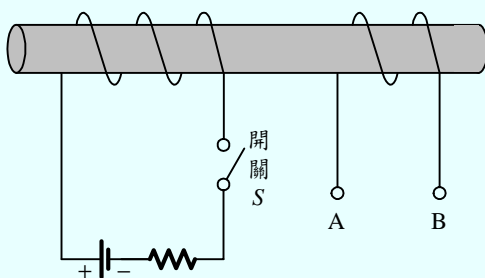
一、選擇題

- () 1. 有一線圈匝數為 100 匝，電感量為 4H，若是有相同條件的線圈電感量為 1H，則匝數為 (A)25 匝 (B)50 匝 (C)100 匝 (D)200 匝
- () 2. 有一線圈其匝數為 100 匝，其電感量為 10H，若欲將自感量減為 2.5H，則應減多少匝的線圈？ (A)75 匝 (B)50 匝 (C)25 匝 (D)10 匝
- () 3. 兩線圈之耦合係數為 0.5，且其自感量各為 10mH 與 40mH，則其互感量為 (A)8mH (B)10mH (C)16mH (D)20mH
- () 4. 兩完全相同之線圈間，若互感為 0.6 亨利，耦合係數為 0.4，則線圈之自感量為 (A)1.25 亨利 (B)1.5 亨利 (C)0.85 亨利 (D)1 亨利
- () 5. 兩個無磁耦合現象的 20mH 電感器並聯時，其等效電感量為 (A)40mH (B)20mH (C)10mH (D)5mH
- () 6. 承上題，若兩線圈間互感為 10mH（互消），其等效電感量為 (A)20mH (B)15mH (C)10mH (D)5mH
- () 7. $N_1 = 200$ 匝與 $N_2 = 300$ 匝之兩線圈相鄰放置，當 N_1 線圈有 4A 電流流過時，產生 8×10^5 線的磁通與 N_1 交鏈，而其中 4×10^5 線的磁通與 N_2 交鏈，則 N_1 線圈的自感及兩線圈間的互感分別為 (A)1H，2H (B)2H，1H (C)0.4H，0.3H (D)0.3H，0.4H
- () 8. 鐵磁性材料的相對導磁係數 (A)等於 1 (B)遠小於 1 (C)略小於 1 (D)遠大於 1
- () 9. 台灣地處北半球，故台灣境內磁針之 N 極均 (A)向下 (B)向上 (C)向右 (D)向左
- () 10. 在螺線管中加入鐵棒，即為電磁鐵，除了增加內部磁力線之外，尚有 (A)導磁係數增加，磁阻增加 (B)導磁係數增加，磁阻減少 (C)導磁係數減少，磁阻增加 (D)導磁係數減少，磁阻減少
- () 11. 100 匝線圈通以 0.1 安培的電流，所產生的磁動勢為 (A)10 安匝 (B)10 韋伯 (C)10 高斯 (D)1000 奧斯特
- () 12. 某人將一導線置於磁場中，此導線的電流方向由左向右，磁場方向指向此人，則作用於導體的磁力方向為 (A)向上 (B)向下 (C)向左 (D)向右
- () 13. 發現由電流作用可以產生磁場之效應的是 (A)安培 (B)佛萊明 (C)法拉第 (D)奧斯特





- () 14. 導線中通過電流時，其周圍會產生磁場，磁場之方向與電流之方向 (A) 相同 (B) 相反 (C) 垂直 (D) 無關
- () 15. 根據法拉第電磁感應定律，通過線圈的磁通量變化呈穩定線性減少，線圈兩端感應電動勢 (A) 為定值不變 (B) 呈線性減少 (C) 呈線性增加 (D) 呈反比減少
- () 16. 如圖(1)所示，當開關 S 切入之瞬間，A、B 線圈因而感應電動勢，兩端之電位關係是 (A) A 端電位高於 B 端 (B) B 端電位高於 A 端 (C) A、B 端電位相等 (D) 電位之高低無法確定



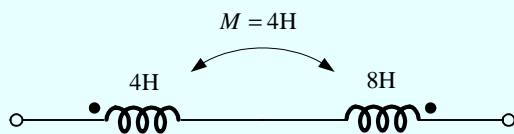
圖(1)

- () 17. 兩根長度均為 50 公尺之導體，平行置於空氣中相距 50 公分，分別通以同方向之電流 10 安培及 20 安培，則其間之作用力為多少牛頓？
(A) 0.002 (B) 0.004 (C) 0.006 (D) 0.008
- () 18. 有自感為 0.1 亨利的線圈，其通過的電流在 0.1 秒中，由 0 增至 10A，則此時之感應電動勢為 (A) 0.1V (B) 1V (C) 10V (D) 100V
- () 19. 法拉第楞次定律 $e = -N(\Delta\phi/\Delta t)$ 中，負號的正確意義是 (A) 感應電動勢方向和磁通變化相反 (B) 電壓值與匝數成反比 (C) 感應電動勢方向在阻止磁通變化 (D) 電壓值與時間變化成反比
- () 20. 有一 300 匝線圈，其磁通在 0.2 秒內，從 1 毫韋伯降至零，則線圈的平均感應電動勢為 (A) 0.5 伏特 (B) 1 伏特 (C) 1.5 伏特 (D) 2 伏特
- () 21. 一長直導線加以穩定之直流電流 0.5A，試求距離導線 1 米處之磁通密度為 (A) 10^{-4} Wb/m² (B) 10^{-5} Wb/m² (C) 10^{-6} Wb/m² (D) 10^{-7} Wb/m²
- () 22. 一導線在磁場中的有效長度為 20 公分，其磁場的磁通密度為 0.2 Wb/m²，感應電動勢為 2V，若導體移動的方向垂直磁場，則此導體的移動速度為 (A) 10m/s (B) 20m/s (C) 40m/s (D) 50m/s

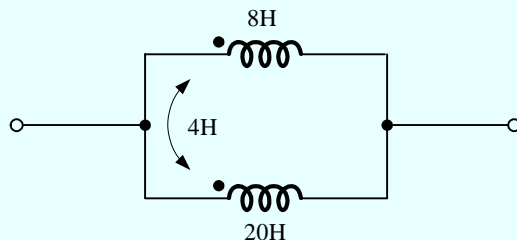


二、計算題

1. 試分別求出圖(2)及(3)的總電感量。

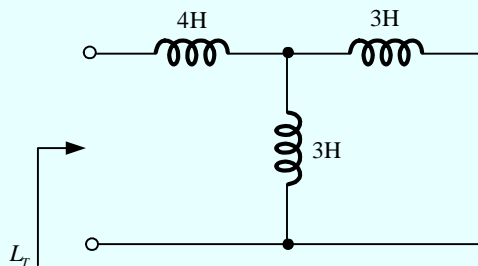


圖(2)



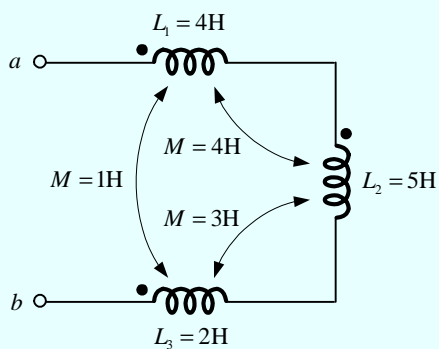
圖(3)

2. 如圖(4)所示，若各電感之間均無互感，試求其等效電感？



圖(4)

3. 如圖(5)所示， M 為互感量，則 L_{ab} 值為多少？



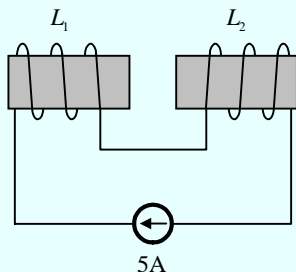
圖(5)

4. 有 A、B 兩線圈在相同磁路上，線圈 A 的自感為 12H，線圈 B 的自感為 3H，若兩線圈的耦合係數為 0.8，則兩線圈的互感量為多少？若線圈 A 為 200 匝，則線圈 B 的匝數為多少？

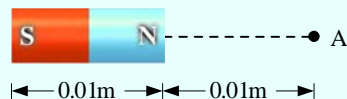




5. 如圖(6)所示，設有兩串聯之電感器 L_1 及 L_2 ，其中 $L_1 = L_2 = 5$ 亨利，兩者間之耦合係數為 0.8，則兩電感器所儲存的總能量為多少焦耳？

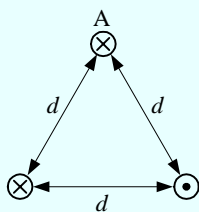


圖(6)

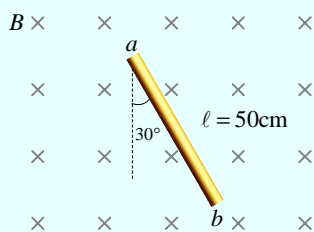


圖(7)

6. 如圖(7)所示，若磁鐵的磁極強度為 $4\pi^2 \times 10^{-7} \text{ Wb}$ ，則 A 點的磁場強度為多少？
7. 某螺線管有 300 匝之線圈，其長度 $\ell = 4\pi$ 公分，截面積 $A = 10$ 平方公分， $\mu_r = 20$ ，試求其磁阻與電感量各為多少？
8. 承上題，若線圈通以 2 安培的電流，試求線圈的 (1)磁動勢 (2)磁通量 (3)儲存的能量 各為多少？
9. 有三條相互平行的長直導線如圖(8)所示，導線間距離為 d 米。若三條導線上均通以大小相等的電流 I 安培，則導線 A 中單位長度所受的合磁力大小及方向各為何？（ $K = \frac{\mu_0}{2\pi} = 2 \times 10^{-7} \text{ 牛頓/安培}^2$ ）



圖(8)



圖(9)

10. 如圖(9)所示，磁通密度 $B = 2$ 韋伯/平方公尺，試求：
- (1) 若由 a 至 b 通以電流 10 安培，則導體所受磁力大小及方向各為何？
- (2) 若導體向右移動的速度 $v = 10$ 公尺/秒，則導體的感應電動勢大小及方向各為何？