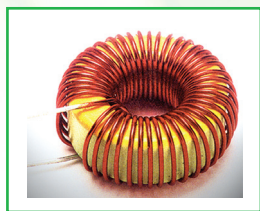


ELECTRICITY

BASIC



ELECTRICITY

BASIC

本章學習目標

1. 瞭解電磁的基本概念。
2. 學習電感器的特性及電感量串並聯的計算。
3. 熟悉電磁效應的原理與應用。
4. 熟悉電磁感應的原理與應用。

本章綱要

- 6-1 電感器
- 6-2 電感量
- 6-3 電磁效應
- 6-4 電磁感應

Chapter 6

電感及電磁





學習導引

將線圈捲繞成串為一組元件即成為電感器，如變壓器、抗流圈等。電感器同電容器亦具有儲能之特性。電感器與電容器同用於電路，一般可形成諧振電路，做為頻率之選擇，以操控電路之頻率。本章需要瞭解之重點及其間之相互關係，如下所列。

一、電學常用名詞－瞭解其定義及單位

1. 磁場、庫侖磁力定律
2. 磁場強度、磁通量、磁通密度、相對導磁係數
3. 磁阻、磁動勢、磁化力
4. 電感、電感量、互感應(互感)
5. 串聯互助、串聯互消
6. 安培右手定則、夫來明左手定則、螺管定則
7. 線圈之感應電勢、自感電勢
8. 夫來明右手定則

二、常用名詞間之相互關係－公式之應用

1. 兩磁極間之作用力，與磁極之強度乘積成正比，而與兩磁極間距平方成反比
2. 磁鐵之四周會吸附或排斥磁性物質，磁鐵可作用之區域稱為磁場
3. 磁極之區域可以磁力線表示。磁力線之總數稱為磁通量
4. 單位面積內可通過之磁力線總數稱為磁通密度
5. 磁力線是否容易通過磁性物質之程度稱為導磁係數
6. 導磁係數為磁場中磁通密度與磁場強度的比值



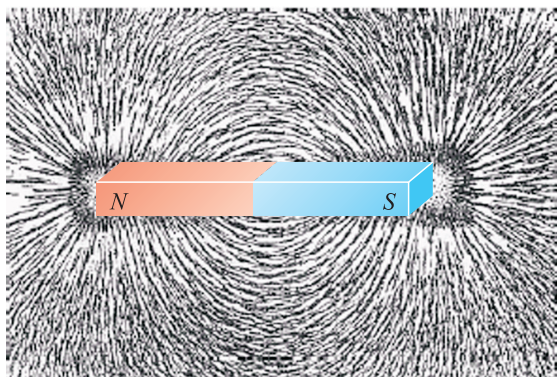
6-1 電感器



6-1.1 磁場與磁力線

鐵質性物質靠近磁鐵時，會被吸引，而具有磁性，稱此鐵質性物質被磁化。可磁化之鐵質性物質又稱為磁性物質，如鐵、鈷、鎳等含有金屬元素的合金。被磁化的物質，當磁化的原因消除時，如移開磁鐵，其磁性便會消失，稱為暫時磁鐵；被磁化的物質，若消除磁化的原因後，其磁性仍可長期保有，稱為永久磁鐵。

磁場是磁鐵可影響的空間。磁場屬向量性，具有大小及方向。將磁鐵置放在磁場中，磁鐵會受到磁力的作用而移動，如相吸引或相斥。磁場的方向以磁針之 N 極在磁場中受力的方向來表示。如圖 6-1 所示為鐵屑在磁場中，排列成整齊的曲線，曲線稱為磁力線。



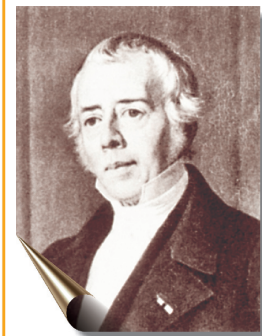
■ 圖 6-1 排列整齊的鐵屑表示磁力線的分佈

由圖所示，磁鐵與磁力線之特性為：

1. 磁鐵的兩端吸附之鐵屑較多，磁性最強。磁鐵兩端稱為磁極。
2. 磁鐵之兩端分別為指北極 (N 極) 與指南極 (S 極)。 N 極和 S 極同時存在。
3. 同極性，如 N 與 N 極，相排斥；異極性，如 N 與 S 極，相吸引。
4. 磁力線是一條封閉的曲線。在磁鐵的外部，由 N 極指向 S 極，在磁鐵的內部，則由 S 極指向 N 極。

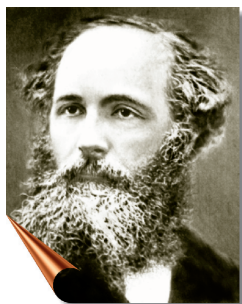
6

奧斯特 (Hans Christian Orsted : 1777~1851)



丹麥的物理學家。奧斯特發現電流的磁作用。今天我們在各方面使用的電磁鐵就是這個發現的結晶。

馬克斯威爾 (James Clerk Maxwell : 1831~1879)



蘇格蘭物理學家。對電磁理論及氣體動力論有重大貢獻。

高斯 (Karl Friedrich Gauss : 1777~1855)



德國數學家與科學家。對電學及磁學有傑出的貢獻。CGS 制的磁通密度單位高斯 (Gauss) 便是以他的名字命名。

5. 磁力線間永不相交。在磁鐵流出或流入端，與磁極相互垂直。
6. 磁力線的疏密程度，代表所在位置的磁場強度。
7. 磁力線上任一點的切線方向，即為該點的磁場方向。

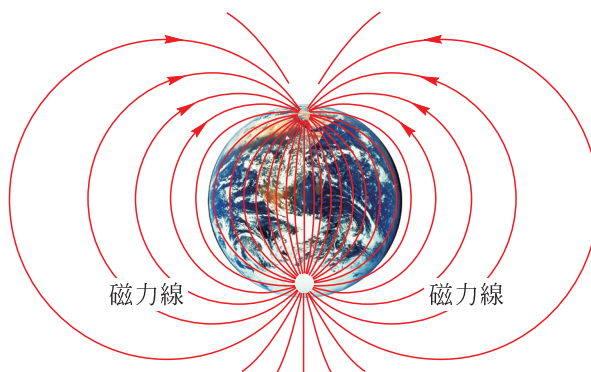


6-1.2 地磁 (magnetism)

地球本身是個很大的磁場，如圖 6-2 所示。通常物質的帶電量，其正和負電的數量是相等的，物質總帶電量為零，呈電中性。由於地球核心物質受到較大的壓力和溫度 (約 6000°C)，使得核心大量的鐵磁物質之電子脫離原子核的束縛，變成自由電子，物質則成為離子體。再加上巨大壓力的作用，自由電子將集中在較低的地幔。如此，地核將帶正電，地幔則帶負電，地球像是一個巨大的原子。

註：地幔是地球內部的構造層，介於地殼和地核之間，分為上地幔、過度層和下地幔三部分，厚度達二千八百多萬公尺，體積佔地球總體積的百分之八十三點三，基本上呈固態。

由於地核的體積極大，溫度和壓力又高，因此提昇了地球表層的導電率，形成了磁場強度較穩定的南北磁極。由於分佈在表層之自由電子並不是固定不變，而且還會受到許多外在因素的影響，與太陽和月亮引力的作用，加上地核的自轉與地殼、地幔並不同步，形成了強大的交變電磁場，使南北磁極產生低速運動，造成南北磁極的翻轉，此性質如同磁鐵般。磁性物質受到地磁的影響，在靜止時，會指南極或北極。

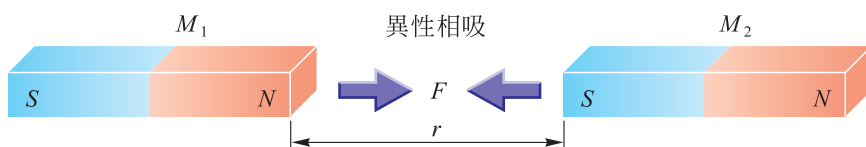


■ 圖 6-2 地球之磁場



6-1.3 庫侖磁力定律

將兩磁極擺在一起，依磁鐵之特性，會有相吸或相斥的作用力產生，如圖 6-3 所示。兩磁極 (M) 作用力 (F) 的大小，與兩磁極強度的乘積成正比，而與兩磁極之間隔距離 (r) 的平方成反比，此為庫侖磁力定律。數學式為：



■ 圖 6-3 庫侖磁力定律

$$F = K \frac{M_1 M_2}{r^2} \dots\dots\dots (6-1)$$

式中，若 F 為正 (+)，表示兩磁極之極性相同，而為斥力；若 F 為負 (-)，則為吸力。 K 為常數， $K = \frac{1}{4\pi\mu} = 6.33 \times 10^4$ 米 / 亨利， $\mu = \mu_0 \mu_r$ 。 μ 為物質的導磁係數； μ_0 為空氣或真空中之導磁係數； μ_r 為相對導磁係數。庫侖磁力定律之單位換算，如表 6-1 所示：

重點提示

庫侖磁力定律：

$$F = K \frac{M_1 M_2}{r^2}$$

F ：作用力 (牛頓)

K ：常數

M ：磁極 (韋伯)

r ：距離 (公尺)

6

表 6-1 庫侖磁力定律之單位

名稱	作用力(F)	磁極(M)	距離(d)	常數(K)	μ_0
CGS制	達因	靜磁	公分(cm)	$\frac{1}{\mu_r}$	1
MKS制或SI制	牛頓	韋伯	公尺(m)	$\frac{1}{4\pi\mu_0\mu_r}$	$4\pi \times 10^{-7}$

1 韋伯 = $\frac{1}{4\pi} \times 10^8$ 靜磁 = 10^8 馬克士威 = 10^8 線，1 牛頓 = 10^5 達因



範例 6-1.1

二磁極皆為 N 極，分別為 20 靜磁單位、50 靜磁單位，若兩磁極相距 5 公分，且置於空氣中，試求兩磁極之作用力為多少達因？

解 依題意，單位為 CGS 制，且兩磁極置於空氣中，則 $K = 1$ 。數學式為：

$$F = K \frac{M_1 M_2}{r^2} = \frac{20 \times 50}{5^2} = \frac{1000}{25} = 40 \text{ 達因 (相斥)}$$

立即練習

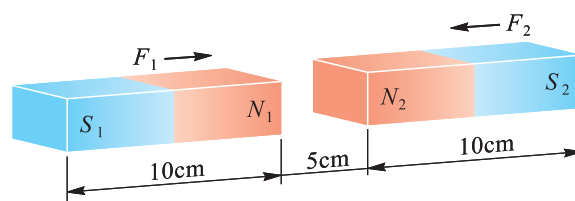
二磁極相距 10 公分，磁極強度分別為 25 靜磁單位及 -40 靜磁單位，若置於空氣中，則兩磁極之作用力為何？

Ans -10 達因 (相吸)。



範例 6-1.2

如圖所示，若磁鐵各磁極強度皆為 100 靜磁單位，在空氣中，則作用力 F_1 及 F_2 各為多少達因？



解 F_1 為磁極 N_1 與 N_2 之作用力，相距 5cm，則

$$F_1 = K \frac{M_1 M_2}{r^2} = \frac{100 \times 100}{5^2} = \frac{10000}{25} = 400 \text{ 達因 (相斥力)}$$

F_2 為磁極 N_1 與 S_2 之作用力，相距 $5 + 10 = 15\text{cm}$ ，則

$$F_2 = K \frac{M_1 M_2}{r^2} = \frac{100 \times (-100)}{15^2} = \frac{-10000}{225} = -44.4 \text{ 達因 (相吸力)}$$

立即練習

二磁鐵之位置，如上圖所示，其磁極強度皆為 50 靜磁單位，在空氣中，求 S_1 與 S_2 之作用力為何？

Ans 4 達因 (相斥力)。



範例 6-1.3

在空氣中，兩磁極之作用力 $F = 5 \times 10^{-4}$ 牛頓，若在 $\mu_r = 5$ 之液體中，其作用力又為多少牛頓？

解 在空氣中，相對導磁係數 $\mu_r = 1$ ，則作用力 F_0 為

$$F_o = \frac{1}{4\pi\mu_o} \times \frac{M_1 M_2}{r^2} = 5 \times 10^{-4} \dots\dots\dots (1)$$

在液體中，作用力 F 為

$$F = \frac{1}{4\pi\mu_o\mu_r} \times \frac{M_1 M_2}{r^2} \dots\dots\dots (2)$$

$$(1) \div (2) \quad F_o / F = \mu_r$$

$$\text{故 } F = F_o / \mu_r = 5 \times 10^{-4} / 5 = 10^{-4} \text{ 牛頓}$$

立即練習

已知在相對導磁係數 $\mu_r = 3$ 之物質中，兩磁極之作用力為 0.001 牛頓，試問在空氣中，兩磁極之作用力為多少牛頓？

Ans 0.003 牛頓。



6-1.4 磁場強度 (magnetic field strength)

將單位磁極置放在磁場中某點上，磁極會有吸力或斥力產生。單位磁極在磁場某點之作用力，稱為磁場中該點之磁場強度 (H)，或稱磁化力。

$$H = \frac{F}{M} \quad \text{牛頓 / 韋伯} \dots\dots\dots (6-2)$$

式中， H 為磁場強度之符號，單位為牛頓 / 韋伯； F 為作用力的符號，單位為牛頓； M 為磁極的符號，單位為韋伯。磁場強度為一向量，受力方向與磁力方向相同，磁力方向係由 N 極指向 S 極。在磁場中，若某兩點之磁場強度相同，表示兩點之磁場強度相等（指數值大小相等）、方向相同（指北或指南極）。

假設在磁極 M_1 所建立之磁場上，將另一磁極 M_2 置放在該磁場的某點，則在該點之磁場強度為：

$$H = \frac{F}{M_2} = K \frac{M_1 M_2}{d^2} \times \frac{1}{M_2} = K \frac{M_1}{d^2} \quad \text{牛頓 / 韋伯} \dots\dots\dots (6-3)$$

磁場強度的單位，在 CGS 制為達因 / 靜磁或奧斯特；SI 制為牛頓 / 韋伯或安匝 / 公尺。

6

重點提示

磁場強度：

$$H = \frac{F}{M} = K \frac{M}{r^2} \\ = 6.33 \times 10^4 \frac{M}{r^2}$$

H ：磁場強度
(牛頓 / 韋伯)
 F ：作用力 (牛頓)
 K ：常數
 M ：磁極 (韋伯)
 r ：距離 (公尺)



範例 6-1.4

有一磁極強度為 5×10^{-3} 韋伯，若置於磁場中某點，其受力為 15×10^{-3} 牛頓，則該點之磁場強度為多少？

解 磁場中某點之磁場強度為：

$$H = \frac{F}{M} = \frac{15 \times 10^{-3}}{5 \times 10^{-3}} = 3 \text{ 牛頓 / 韋伯}$$

立即練習

有一 N 磁極之強度為 10^{-4} 韋伯，在磁場某點之磁場強度為 10 牛頓 / 韋伯，問磁極在磁場中受力大小為何？

Ans 10^{-3} 牛頓。



範例 6-1.5

有一磁極強度為 100 靜磁單位，若置於磁場中某點，其受力為 50 達因，則該點之磁場強度為多少？

解 磁場中某點之磁場強度為：

$$H = \frac{F}{M} = \frac{50}{100} = 0.5 \text{ 達因 / 靜磁單位}$$

立即練習

已知有一磁極在磁場之受力及磁場強度分別為 200 達因及 50 奧斯特，問該磁極強度為何？

Ans 4 靜磁單位。



範例 6-1.6

在空氣中，有一磁極強度為 3.2×10^{-5} 韋伯，若置於距磁場 10 公分處，問磁場在該處之磁場強度約為多少？

解 磁極在磁場某點之磁場強度為：(空氣中 $\mu_r = 1$)

$$H = K \frac{M}{d^2} = \frac{1}{4\pi\mu_0} \times \frac{M}{d^2} = 6.33 \times 10^4 \times \frac{3.2 \times 10^{-5}}{(10 \times 10^{-2})^2}$$

$$= \frac{2.02}{0.01} = 202 \text{ 牛頓 / 韋伯}$$

立即練習

在空氣中，與 7.8×10^{-5} 韋伯之磁極相距 50 公分之磁場強度約為多少？

Ans 20 牛頓 / 韋伯。



6-1.5 磁通密度與導磁係數

在磁場中，穿過磁路之磁力線的總數，稱為磁通 (magnetic flux)，或稱磁通量。磁通量是量度磁大小的物理量，磁指的是物質相吸或相斥的現象。在 SI 制，磁通量的單位是韋伯 (Webers)；在 CGS 制為線或馬克士威。

磁通密度定義為：磁力線垂直通過每單位面積的總數量，以 B 表示，在 SI 制，單位是特士拉 (Teslas) 或韋伯 / 平方米 (Wb / m^2)；在 CGS 制為高斯或線 / 平方公分。磁通密度的數學式為：

$$B = \frac{\phi}{A} \dots\dots\dots(6-4)$$

提示 \rightarrow 1 韋伯 / 米² = 10⁴ 高斯，1 韋伯 = 10⁸ 線。

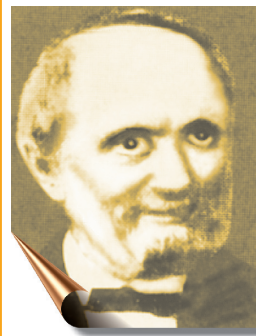
若將兩塊體積相同，材質不同的物質做成電磁鐵，產生磁力線的數量也會不相等，磁場強度也不相同。這種可建立磁力線數多寡的物質，稱為有磁性或高導磁性。衡量物質建立磁力線的難易程度是用物質的導磁係數 (μ)。在空氣或真空中，SI 制之導磁係數為：

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$$

導磁係數定義為：在磁場中之某點，其磁通密度 (B) 與磁場強度 (H) 的比值。以 μ 表示為：

6

韋伯 (W. E. Weber : 1804~1891)



德國的物理學家。研究磁石及磁氣等等。磁極強度的單位韋伯 (Weber) 「Wb」來自於他的名字。

$$\mu = \frac{B}{H} \dots\dots\dots(6-5)$$

相對導磁係數定義為：物質的導磁係數 (μ) 與空氣或真空導磁係數 (μ_0) 的比值。數學式為：

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{B(\text{鐵磁物質})}{B_0(\text{空氣中})} = \frac{\phi(\text{鐵磁物質})}{\phi_0(\text{空氣中})} \dots\dots\dots(6-6)$$

一般鐵磁性物質，如鋼、鈷、鎳等的相對導磁係數 $\mu_r > 100$ ，而非磁性物質，如銅、鋁、玻璃等的相對導磁係數 $\mu_r = 1$ 。



範例 6-1.7

設有磁力線 2×10^{-2} 韋伯，垂直通過長、寬皆為 5 公分之截面，試求其磁通密度為多少？

解 截面之面積 $A = 5 \times 5 = 25 \text{cm}^2 = 25 \times 10^{-4} \text{m}^2$

磁通密度之數學式為：

$$B = \frac{\phi}{A} = \frac{2 \times 10^{-2}}{25 \times 10^{-4}} = \frac{200}{25} = 8 \text{ 韋伯 / 平方公尺}$$

立即練習

磁力線 $\phi = 2.5 \times 10^{-2}$ 韋伯，通過截面 $A = 100$ 平方公分，問其磁通密度 B 為多少？

Ans $B = 2.5$ 韋伯 / 平方公尺。



範例 6-1.8

有一磁極強度為 100 靜磁單位，若置於 40 平方公分之截面，試求該截面上之磁通密度為多少？

解 磁通量與磁極強度之關係式為：

$$\phi = 4 \pi M = 4 \times 3.14 \times 100 = 1256 \text{ (線或馬克士威)}$$

截面之磁通密度為：

$$B = \phi / A = 1256 / 40 = 31.4 \text{ (線 / 平方公分或高斯)}$$

立即練習

有一極面之面積為 100cm^2 ，在空氣中之磁力線數為 2500 線，問該極面之磁通密度為多少？

Ans 25 高斯。



範例 6-1.9

將導線繞於鐵芯上，產生之磁通量為 2000 線，若抽去鐵芯於空氣中，其磁通量變為 50 線，試求鐵芯之導磁係數 μ 為多少？

解 相對導磁係數與磁通量之關係式為：

$$\mu_r = \frac{\phi(\text{鐵磁物質})}{\phi_o(\text{空氣中})} = \frac{2000}{50} = 40$$

鐵芯之導磁係數 μ 為： $\mu = \mu_o \mu_r = 1 \times 40 = 40$ (空氣中， $\mu_o = 1$)

立即練習

已知某鐵磁物質之導磁係數為 20，導線繞在鐵磁物質上，產生之磁力線為 4000 線，若抽去鐵磁物質置於空氣中之磁力線為多少？

Ans 200 線。

6



隨堂練習

- () 1. 依庫倫磁力定律，若兩磁極之距離縮短為原來的一半，其作用力為原來的 (A)2 倍 (B)4 倍 (C)1 / 2 倍 (D)1 / 4 倍。
- () 2. 在 MKS(或 SI) 制中，自由空間之導磁係數 $\mu_o =$ (A) 10^{-7} (B) 9×10^9 (C) 1.6×10^{-8} (D) $4 \pi \times 10^{-7}$ 。
- () 3. 下列何者不是磁通 (ϕ) 的單位？ (A) 韋伯 (B) 高斯 (C) 線 (D) 馬克士威。
- () 4. 相對導磁係數 $\mu_r =$ (A) $B : H$ (B) $H : B$ (C) $\mu_o : \mu$ (D) $\mu : \mu_o$ 。
- () 5. 相對導磁係數 $\mu_r \gg 1$ 之導磁材料具有 (A) 無磁性 (B) 順磁性 (C) 反磁性 (D) 鐵磁性。

- () 6. 下列式子，何者錯誤？ (A) $F = K \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$ (B) $H = \mu B$ (C) $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$ (D) $B = \frac{\phi}{A}$ 。
- () 7. 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 傾斜。
- () 8. 下列有關磁力線之敘述，何者錯誤？ (A) 磁鐵內部磁力係由 N 極至 S 極 (B) 磁力線為封閉曲線 (C) 磁力線恒不相交 (D) 磁力線本身具有伸縮性。



6-1.6 磁路之歐姆定律

在磁場中，磁性物質建立磁力線時，產生之阻力，稱為磁阻 (magnetic reluctance)。以式子表示為：

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A} \quad \text{安匝 / 韋伯 (A·T / Wb)} \dots\dots\dots(6-7)$$

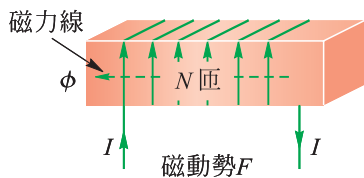
式中， \mathfrak{R} 為磁阻之符號，單位為安培匝數 / 韋伯。 l 為磁路長度之符號，單位為公尺 (m)。 A 為面積之符號，單位為平方公尺 (m²)。如同電阻特性，磁阻亦與面積成反比。意謂大面積之物質可降低電阻或磁阻的影響，電流 (I) 或磁通 (ϕ) 將增大。長度 l 與磁阻成正比，加長物質長度，磁通會減少。導磁係數與磁阻成反比， μ 愈大， \mathfrak{R} 愈小。高導磁性之鐵磁性物質，因導磁係數高，磁阻小，產生之磁力線數目會較多。

在磁性物質中，建立磁力線所需之外力，稱為磁動勢，如圖 6-4 所示，以 F 表示為：

$$F = NI \dots\dots\dots(6-8)$$

式中， F 為磁動勢的代號，單位為安匝 (安培匝數之簡稱)； N 為繞製線圈之數目，單位為匝數 (turns)； I 為電流之代號，單位為安培 (A)。CGS 制單位之磁動勢，其數學式為：

$$F = 0.4 \pi NI = 1.257NI \quad \text{安匝}$$



■ 圖 6-4 磁動勢

磁動勢 (F) 與線圈繞製之圈數 (N)，及流過線圈之電流 (I) 成正比。增加線圈匝數及線圈電流，可使磁動勢增大，亦可增加磁通 (ϕ) 的產生。若以建立磁通之阻力為磁阻 (\mathfrak{R})，則磁通之數學式為：

$$\phi = \frac{F}{\mathfrak{R}} \dots\dots\dots(6-9)$$

如同電學之歐姆定律，稱為磁路歐姆定律，或稱羅蘭定律。磁通與磁動勢成正比，而與磁阻成反比。

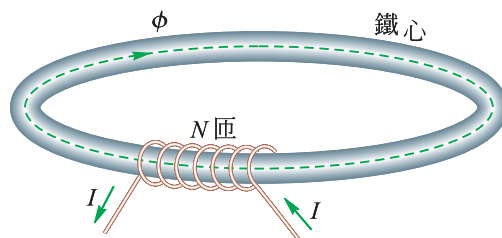
單位長度的磁動勢稱為磁化力 (H)，即磁場強度。其式子為：

$$H = \frac{F}{l} = \frac{NI}{l} \dots\dots\dots(6-10)$$

式中， l 為磁路之長度，單位為公尺 (m)。磁化力以圖 6-5 說明為：假設磁動勢 $F = NI = 50$ 安匝 (A·T)，磁路長度為 0.5 公尺 (m)，則磁化力 H 為：

$$H = \frac{F}{l} = \frac{50}{0.5} = 100 \text{ 安匝 / 公尺, A·T / m}$$

算式之意義為：磁路每公尺須具有 100 安匝之磁動勢，來建立鐵心之磁通。磁通流動之方向，可用右手來判斷。若以右手之四根手指代表鐵心上線圈之電流方向，則大姆指的指向為磁通方向。



■ 圖 6-5 磁化力之說明

6



範例 6-1.10

有一鐵芯長 $l = 0.1$ 公尺，面積 $A = 0.02$ 平方公尺，其導磁係數 $\mu = 5 \times 10^{-4}$ ，試求鐵芯之磁阻 \mathfrak{R} 及相對導磁係數 μ_r 為多少？

解 磁阻之數學式：

$$\mathfrak{R} = \frac{l}{\mu A} = \frac{0.1}{5 \times 10^{-4} \times 0.02} = 10^4 \text{ 安匝 / 韋伯}$$

$$\text{導磁係數 } \mu = \mu_o \mu_r, \mu_r = \mu / \mu_o$$

$$\text{SI 制: } \mu_o = 4\pi \times 10^{-7}; \text{ CGS 制: } \mu_o = 1,$$

$$\mu_r = 5 \times 10^{-4} / 4\pi \times 10^{-7} = 398$$

立即練習

鐵芯長 0.5 公尺，半徑為 0.1 公尺，若導磁係數為 3.2×10^{-4} ，試求鐵芯之磁阻為多少？

Ans 5×10^4 安匝 / 韋伯。



範例 6-1.11

有一繞有 1000 匝之線圈，通過 0.2 安培之電流，若磁阻為 2×10^4 安匝 / 韋伯，問產生之磁通為多少韋伯？

解 磁通 ϕ 與磁動勢 F 成正比，磁動勢 $F = NI$ ，則

$$\phi = \frac{F}{\mathfrak{R}} = \frac{NI}{\mathfrak{R}} = \frac{1000 \times 0.2}{2 \times 10^4} = \frac{200}{20000} = 0.01 \text{ 韋伯}$$

立即練習

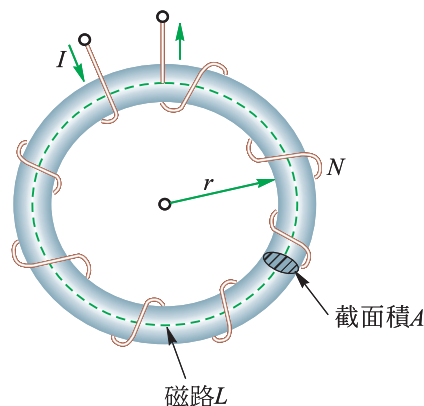
繞有 2000 匝線圈，若通入 0.5 安培電流，產生 0.01 韋伯之磁通，問線圈之磁阻為多少？

Ans $\mathfrak{R} = 10^5$ 安匝 / 韋伯。



範例 6-1.12

如圖所示為環形鐵芯，其截面積 $A = 1$ 平方公分，周長 $L = 100$ 公分，若繞有 200 匝 (N) 線圈，通過電流 $I = 1$ 安培，產生磁通 $\phi = 5 \times 10^{-4}$ 韋伯，求 (1) 磁動勢 F ，(2) 鐵芯磁阻 \mathfrak{R} ，(3) 磁化力 H 為多少？



解 (1) 磁動勢： $F = NI = 200 \times 1 = 200$ 安匝

$$(2) \text{ 磁阻 } \mathfrak{R} = F / \phi = 200 / 5 \times 10^{-4} \\ = 400 \times 10^3 \text{ 安匝 / 韋伯}$$

$$(3) \text{ 磁化力 } H = F / l = 200 / 100 \times 10^{-2} \\ = 200 \text{ 安匝 / 公尺}$$

立即練習

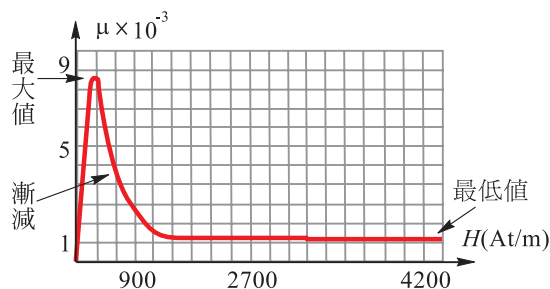
環形鐵芯周長 50 公分，繞有 500 匝線圈，通上 0.5 安培電流，產生 0.05 韋伯磁通，求
(1) 磁動勢，(2) 磁阻，(3) 磁化力為多少？

Ans (1) $F = 250$ 安匝，(2) $\mathfrak{R} = 5000$ 安匝 / 韋伯，(3) $H = 500$ 安匝 / 公尺。



6-1.7 磁化曲線 (magnetization curve) 與磁滯 (magnetic hysteresis)

依 (6-10) 式磁化力 (H) 與繞在鐵心上之線圈圈數 (N)、流過線圈之電流 (I) 及磁路之長度 (l) 有關，而與鐵心之材質無關。依磁通密度 (B)、磁化力 (H)、導磁係數 (μ) 三者之關係， $B = \mu H$ 。若磁通密度維持定值，磁化力與導磁係數之關係，可以 $\mu-H$ 曲線，如圖 6-6 所示，說明為：

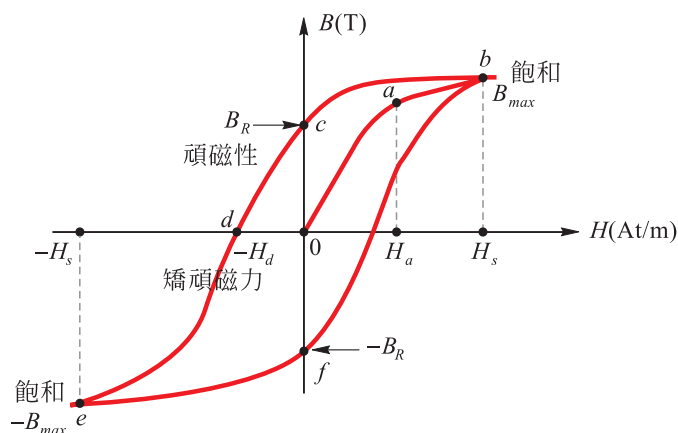


■ 圖 6-6 $\mu-H$ 曲線

當磁化力 (H) 增強時，導磁係數會隨著先增至最大值，再降低至最低值。若導磁係數保持定值，磁通密度 (B) 與磁化力 (H) 成正比，兩者之關係，可以 $B-H$ 曲線，如圖 6-7 所示，說明為：

當電流 I 增加時，磁化力 H 與磁通密度 B 隨著增加， $H = NI / l = B / \mu$ ，兩者成正比，如曲線段 0-a。若電流 I 持續增加，磁通密度 B 與磁化力 H 變化不大，如曲線 $a-b$ ，此時磁通密度為最大值 B_{\max} ，磁化力也為定值 H_s ， b 點稱為飽和點。

當電流 I 減為 0A 時，磁化力 H 降為 0，磁通密度卻不為 0 而為 B_R ，曲線由 b 降至 c ，表示磁性物質仍保有相當的磁性，此為殘 (或剩) 磁 (residual flux)。曲線段 0-c 部份稱為頑磁性 (remanence)。永久磁鐵係利用此殘餘的磁通密度 B_R 製成。



■ 圖 6-7 磁滯曲線

因為有殘磁，所以鐵心仍具有磁性。若欲完全消除磁性物質之殘磁，如圖所示必須施以相反之磁化力 $-H$ 。當反向電流 $-I$ 增加時，磁通密度會減少，磁化力為 $-H_d$ ，磁通密度則降為 0 ，曲線由 c 至 d 。此種降低磁通密度為 0 ，需要之磁化力 $-H_d$ 稱為矯頑磁力 (coercive force)，曲線 $0d$ 段。矯頑力可用來衡量磁性物質的抗磁性。

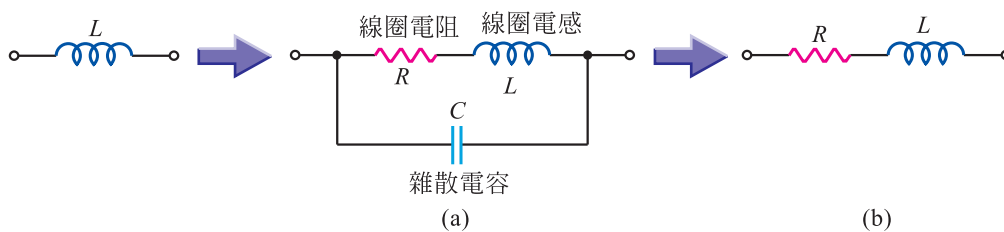
反向電流 $-I$ 繼續增加時，再次達到飽和 $-B_{max}$ 、 $-H_s$ 。反向電流降為 0 時，磁化力為 0 ，磁通密度仍具殘磁性，曲線 $d-e-f$ 。當正向電流增加時，磁化力向正向 $+H$ 增加，磁通密度沿曲線 f 回至 b 。由 $b-c-d-e-f-b$ 形成完整之封閉曲線，因整個過程磁通密度 B 皆落後磁化力 H ，故稱曲線為鐵磁性物質之磁滯曲線 (hysteresis curve)。hysteresis 為希臘文，表示落後的意思。

磁滯曲線是增加反向磁化力以消除殘餘磁通密度所形成。故磁滯曲線的面積表示，磁性物質在磁化的過程中，正負循環一次所損耗的能量，稱為磁滯損失 (hysteresis loss)。也就是在磁化中，電源供給之能量，有部份會轉換為熱能，此熱能即磁滯損失造成。



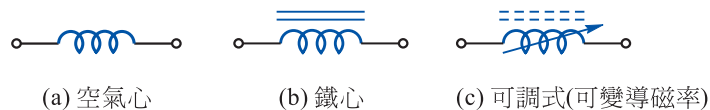
6-1.8 電感器之種類

每個電感器 L 都存有線圈電阻 R 及雜散電容 C ，如圖 6-8(a) 所示為電感器之等效電路。



■ 圖 6-8 電感器之等效電路

在實用上，常將雜散電容忽略，如圖 6-8(b) 所示。線圈電阻 R 對電感影響很大，因 $R = \rho L / A$ ，當線圈又細 (A 小) 又長 (L 大) 時，電阻 R 會由幾歐姆變成幾百歐姆。不過在分析時，皆視電感器為理想元件。電感器之符號，如圖 6-9 所示。



■ 圖 6-9 電感器之符號

電感器之材質

1. 矽鋼片 (silicon steel page)

矽鋼片為含矽高達 0.8%-4.8% 的電工矽鋼，經熱、冷軋製成。一般厚度在 1mm 以下，又稱薄板。矽鋼片於製程中，全都順著軋製方向製成，因這是鐵的易磁化結晶方向，故矽鋼片具有高磁通密度、低鐵損等特性，是作為電磁鐵的最佳材料。矽鋼片主要用作變壓器及配電器材等。

2. 鐵粉芯、磁粉芯

鐵芯使用於高頻訊號時，容易因鐵芯產生的渦電流而損失能量。若將鐵芯做成鐵粉，並燒結成鐵粉芯，可以增加電阻值，以減小產生的渦電流，就可以減少能量損失。

(1) 純鐵粉芯

純鐵粉加壓製成，如同粉末冶金，具有較好的偏磁特性，但在高頻下損耗較大，是製造較低頻率開關電路之輸出扼流圈，與功率電感器等較經濟而實用的材料。

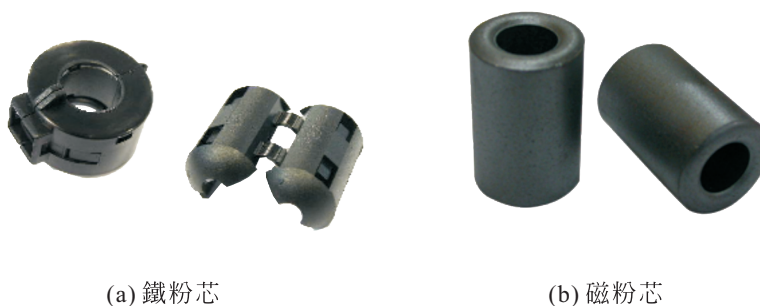
(2) 羰基鐵粉芯

由超細純鐵粉製成，具良好的偏磁特性、高頻適應性、與較低的高頻渦流損耗，應用在 100kHz 到 100MHz

頻率範圍內。羰基鐵粉芯材料廣泛應用在高頻開關電源及無線電通訊領域。

(3) 磁粉芯

磁粉芯的 Q 值 (品質因數) 最高，而且磁芯損耗最低。磁粉芯的溫度與磁通性能最穩定，並具有最寬的磁導率，是直流開關電源中輸出濾波電感器，與兆赫芝 (Hz) 級應用場合的最佳選用材料等。



■ 圖 6-10 鐵粉芯、磁粉芯

電感器之種類，可分為固定與可調兩類。說明於下：

可調式電感器

可調式為調節導磁係數的線圈。在線圈內，有一可轉動的鐵磁軸，藉由磁軸的轉動以改變交鏈的磁通量，而改變電感值。可調式電感器應用在各種射 (或高) 頻 (RF) 電路，作為振盪器之配件，如通信之對講機、電視機之選台器、無線電中之可變電感等。其電感值為 $1\mu\text{H}\sim 100\mu\text{H}$ 。

固定式電感器

1. 固定電感線圈

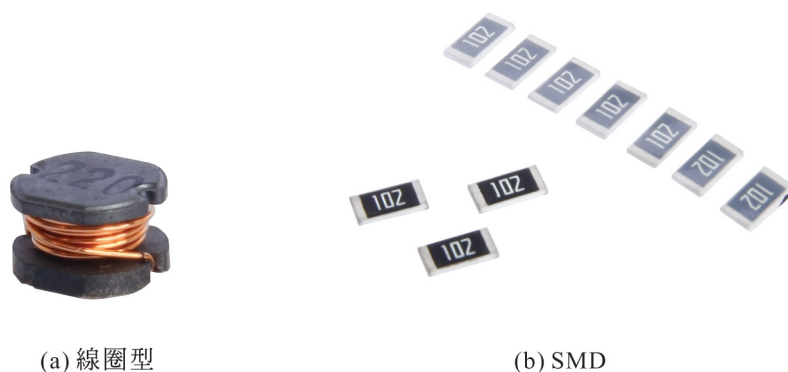
固定電感線圈是將絕緣導線，如漆包線等，一圈圈地繞在絕緣管上。絕緣管有空心、鐵芯或磁粉芯。線圈的 Q 值 (品質因數) 愈高，電路的消耗愈小。線圈的 Q 值通常為幾十到幾百。線圈之 Q 值常受到線圈間之分佈電容影響，分佈電容愈大， Q 值愈小，穩定性變差，所以線圈間之分佈電容愈小愈好。固定電感線圈有引腳型與貼片型兩類，如圖 6-11 所示。固定電感線圈廣泛地使用在網路、電信、電腦、交流電源和周邊設備上。



■ 圖 6-11 固定電感線圈

2. 射頻電感器

射頻電感器，如圖 6-12 所示，具有高頻，高共振頻率及高 Q 值等特性。且結構性佳、使用方便。廣泛應用於呼叫器、行動式電話、數位相機及高頻通訊類產品，如全球定位系統、無線網絡、藍牙模組、汽車電子產品等。電感值為 $1\mu\text{H}\sim 100\mu\text{H}$ 。



■ 圖 6-12 射頻電感器

3. 功率電感器

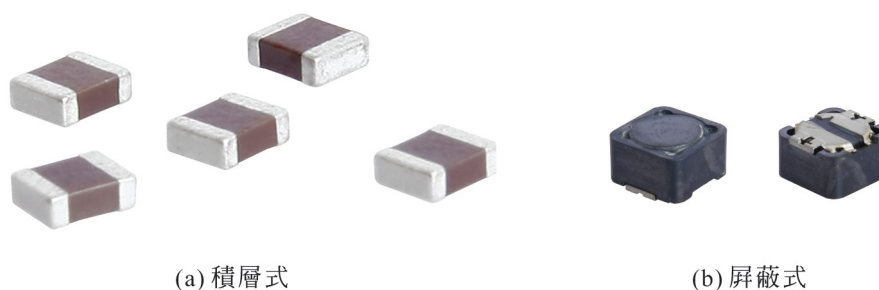
在開關電源中，功率電感器，如圖 6-13 所示，可作為儲能元件。在開關導通期間儲存磁能；在開關斷開期間，將儲存的能量傳送到負載。具有整流、濾波的作用。功率電感器的功率損耗有磁芯方面的損耗，即鐵損，與線圈方面的損耗，即銅損。磁芯是因磁滯損失造成的損耗，若加大導磁係數，則磁滯曲線之面積會變小，磁芯之功率損耗也會變小。功率電感器應用於電源供應器，並作為電機、電腦、自動化設備之直流 / 直流 (DC / DC) 轉換器。

通訊器材之技術日益精進，電子產品朝輕、薄、短、小與多功能方面發展。相對於電子產品與零組件之要求，其整合性與裝配密度要高，但裝配的成本要降低。如此，對電子工程師



■ 圖 6-13 功率電感器 (SMD)

而言，解決電磁干擾 (Electromagnetic Interference，簡稱 EMI) 是一嚴峻的挑戰。EMI 是指通訊信號受到雜音或雜訊的干擾時，所造成不良的通訊。干擾通訊之途徑有經空間傳播者，即幅射雜訊，與經信號線或電源線傳導者，即傳導雜訊等兩類。使用積層晶片電感器或 EMI 濾波器可去除傳導雜訊，使用電磁屏蔽 (Shield) 則可消除幅射雜訊。如圖 6-14 所示。



■ 圖 6-14 晶片電感器

晶片 (chip) 電感器有繞線式、薄膜式及厚膜式等三類。繞線式晶片電感器用銅線捲繞在磁蕊，覆蓋上樹脂後，再加以密封；薄膜式晶片電感器是在陶瓷薄片之基板上，蒸鍍卷線圖案的導體與絕緣層所組成；厚膜式晶片電感器是以厚膜導體膠經網版印刷於磁性體生胚薄片上，經積層或捲曲後，再疊壓，並以適當的長度切斷、燒結、沾塗上端子電極製成。厚膜式晶片電感器有長方體與圓柱體兩種形狀。



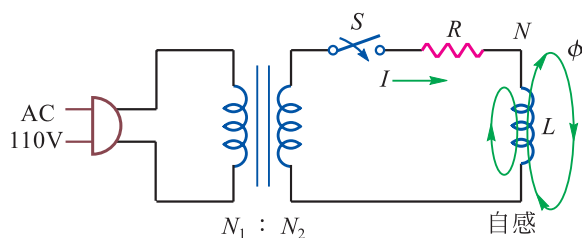
6-2 電感量

當線圈通上交變電流時，線圈會產生電感量對應電流之變化，電感量是線圈之自我電感 (self-inductance) 簡稱電感。電感之量測單位為亨利 (Herrirs, H)，用來紀念美國物理學家 Joseph Herry(1797~1878)。電感量與線圈之磁性有關，因此鐵磁性物質常增加線圈交鏈的磁通，以增加線圈的電感量。電感有自感與互感的分別。



6-2.1 自感

如圖 6-15 所示電路，當按下開關 S ，電流 I 流經線圈，用右手四指指向電流方向，大姆指指向圖示磁通 (或磁力線) 方向，磁通形成之空間即磁場，將磁通 ϕ 乘以線圈之圈 (或匝) 數，乘積 $N\phi$ 稱為磁通鏈 (flux linkage)。在線圈上，單位電流產生之磁通鏈稱為電感量 (inductance)，以 L 表示，單位為亨利 (H)。數學式為：

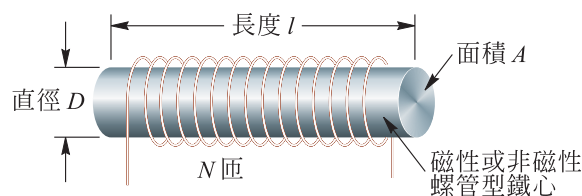


■ 圖 6-15 電感電路

$$L = \frac{N\phi}{I} \dots\dots\dots(6-11)$$

式中， N 為線圈繞有之圈數，單位為匝； ϕ 為磁通或磁力線之代號，SI 單位為韋伯 (Wb)。實際上，影響線圈之電感量，有材質之導磁係數 μ 、線圈繞的圈數 N 、磁性或非磁性螺管鐵心的截面積 A 、鐵心之有效長度 l ，如圖 6-16 所示，數學式為：

$$L = \frac{N^2\mu A}{l} = \frac{N^2}{\mathfrak{R}} \dots\dots\dots(6-12)$$



■ 圖 6-16 螺管型鐵心

式中， μ 為鐵心之導磁係數， $\mu = B / H$ ； A 是鐵心之截面積，單位為平方公尺； l 為鐵心之長度，單位為公尺。由式可知，電感值亦可與流經線圈之電流及產生之磁量無關，而與鐵心之磁阻成反比。

提示 $\rightarrow L = \frac{N\phi}{I}$ ，因 $\phi = BA$ 、 $B = \mu H$ 、 $H = \frac{NI}{l}$ 代入式中，則 $L = \frac{N\mu A}{l} \times \frac{NI}{l} = \frac{N^2\mu A}{l}$



範例 6-2.1

繞有 2000 匝之線圈，通入 2 安培之電流，產生 5×10^{-3} 韋伯之磁通，問 (1) 自感量，(2) 若線圈之匝數增加 3 倍，則自感量變為多少？

解 線圈之自感量與匝數及磁通量成正比，而與流過之電流成反比，

$$\text{則 } L = \frac{N\phi}{I} = \frac{2000 \times 5 \times 10^{-3}}{2} = 5\text{H}$$

線圈之自感量 $L = N^2 / \mathfrak{R}$ ，因只改變匝數，磁阻維持不變，則

$$L' = 3^2 \times L = 9 \times 5 = 45\text{H}$$

立即練習

線圈通入 5 安培電流，產生 0.004 韋伯磁通，若線圈之匝數為 1500 匝，問產生之自感量為多少？若線圈增為 3000 匝，則自感量變為多少？

Ans $L = 1.2\text{H}$ ， $L' = 4.8\text{H}$ 。



範例 6-2.2

在鐵芯上繞上 1000 匝之線圈，自感量為 16mH，若在相同之鐵芯上產生 4mH 之自感量，問其繞有多少匝之線圈？

解 相同鐵芯，磁阻應相同，而 $L_1 = N_1^2 / \mathfrak{R}$ ， $L_2 = N_2^2 / \mathfrak{R}$ ，則

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{N_1^2}{N_2^2}, \quad \frac{16\text{m}}{4\text{m}} = \frac{(1000)^2}{N_2^2}$$

$$N_2 = \sqrt{\frac{(1000)^2}{4}} = \frac{1000}{2} = 500 \text{ 匝}$$

立即練習

在鐵芯上繞上 2000 匝之線圈，自感量為 2mH，若在相同之鐵芯上產生 8mH 之自感量，問其繞有多少匝之線圈？

Ans 4000 匝。



範例 6-2.3

設線圈匝數為 200 匝，且磁路之總磁阻為 2×10^5 安匝 / 韋伯，則此電感器之電感量應為多少？

解 電感器之電感量為：

$$L = \frac{N^2}{\mathfrak{R}} = \frac{200^2}{2 \times 10^5} = 0.2\text{H}$$

立即練習

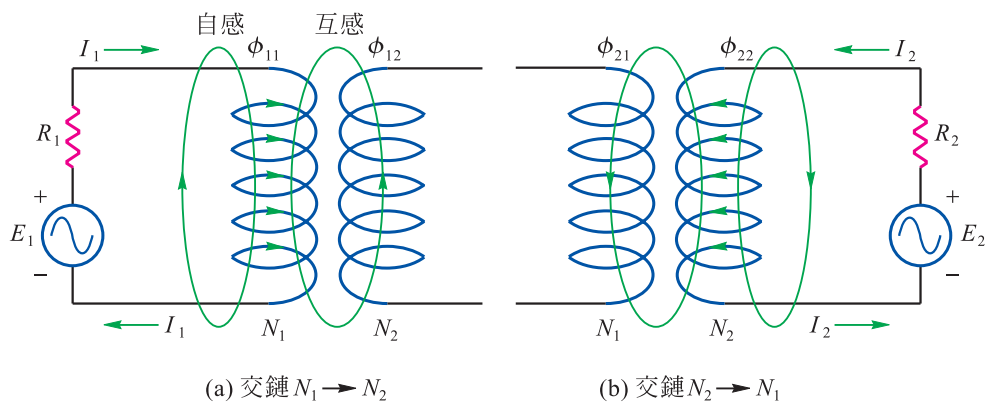
若磁路之總磁阻為 5000 安匝 / 韋伯，線圈之匝數為 250 匝，則此電感器之電感量應為多少？

Ans 12.5H。



6-2.2 互感

如圖 6-17 所示，將兩線圈相鄰放置，當兩線圈通上交流電源時，兩線圈產生之磁通會相互交流，稱為互感應 (mutual-inductance)，簡稱互感，以 M 表示，單位為亨利 (H)。圖示解釋於下：



■ 圖 6-17 互感

- 圖 6-17(a)，當線圈 N_1 流經電流 I_1 時，產生之磁通量定為 ϕ_1 。
 $\phi_1 = \phi_{11} + \phi_{12}$ ，磁通 ϕ_{11} 不與線圈 N_2 交鏈稱漏磁通。磁通 ϕ_{12} 稱交鏈磁通。數學式為：

$$M_{12} = \frac{N_2 \phi_{12}}{I_1} \dots\dots\dots(6-13)$$

2. 圖 6-17(b)，當線圈 N_2 流經電流 I_2 時，產生之磁通量定為 ϕ_2 。
 $\phi_2 = \phi_{22} + \phi_{21}$ ，磁通 ϕ_{22} 不與線圈 N_1 交鏈稱漏磁通。磁通 ϕ_{21} 稱交鏈磁通。數學式為：

$$M_{21} = \frac{N_1 \phi_{21}}{I_2} \dots\dots\dots(6-14)$$

3. 耦合係數為交鏈磁通量與電流磁通量之比值，以 K 表示， K 值恒小於 1。數學式為：

$$K = \frac{\phi_{12}}{\phi_1} = \frac{\phi_{21}}{\phi_2} < 1 \dots\dots\dots(6-15)$$

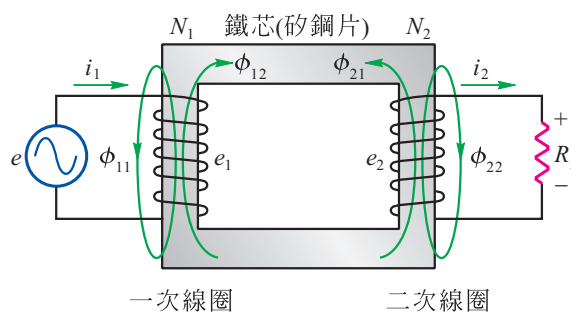
4. 兩線圈之自感量與互感量的關係，以數學式表示為：

$$M = K\sqrt{L_1 L_2} \dots\dots\dots(6-16)$$

式中， L_1 與 L_2 為線圈 N_1 與 N_2 的自感量， K 為兩線圈的耦合係數。

5. 變壓器之原理

如圖 6-18 所示變壓器之結構，在矽鋼片堆疊而成之口形鐵芯上，左、右兩側各繞有比例圈數的線圈，接上電源側的線圈稱為原級線圈 (primary coil)，或一次側線圈，代號為 N_1 ，接負載側之線圈稱為次級線圈 (second coil)，或二次側線圈，代號為 N_2 。



■ 圖 6-18 變壓器之自感與互感磁通

當一次側線圈接上電源 e 時，線圈因磁通 ϕ_{11} 之變化，兩端會產生感應電壓 e_1 。因互感應交鏈之效應，磁通 ϕ_{12} 會經鐵芯切割二次線圈，二次線圈因冷次定律感應相對應之磁通 ϕ_{22} ，此磁通的變化，二次線圈也會產生感應電壓 e_2 。兩線圈感應電壓的大小，依法拉第定律為：

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi_{11}}{dt}, e_2 = N_2 \frac{d\phi_{22}}{dt}$$

在理想變壓器的情況下，磁通之交鏈作用，沒有任何損耗，則兩線圈之磁通可視為相同，即 $\phi_{11} = \phi_{22} = \phi$ ，兩線圈感應產生之電壓的關係為：

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1 \frac{d\phi}{dt}}{N_2 \frac{d\phi}{dt}} = \frac{N_1}{N_2} \dots\dots\dots(6-17)$$

依能量守恆定理，理想變壓器中，兩線圈之導線電阻產生之熱能消耗為 0 瓦，輸入功率 $P_1 =$ 輸出功率，因功率為電壓與電流之乘積， $P = ei$ ，則：

$P_1 = P_2, e_1 i_1 = e_2 i_2$ 整理電壓、電流與匝數之關係為：

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{i_2}{i_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad \text{或} \quad \frac{E_1}{E_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \dots\dots\dots(6-18)$$

在理想變壓器，線圈感應產生之電壓與線圈之匝數成正比，而與電流成反比。

6



範例 6-2.4

兩線圈之自感量分別為 0.6 亨利及 0.15 亨利，若耦合係數為 0.5，則互感 M 為多少？

解 $M = K\sqrt{L_1 L_2} = 0.5 \times \sqrt{0.6 \times 0.15} = 0.5 \times \sqrt{0.09}$
 $= 0.5 \times 0.3 = 0.15\text{H}$

立即練習

自感各為 100mH 之二線圈，若耦合係數為 0.8，則互感為多少？

Ans 0.08H。



範例 6-2.5

兩線圈之互感為 0.1 亨利，耦合係數為 0.5，若一線圈之電感量為 0.1 亨利，則另一線圈之電感量為何？

解 互感之數學式為：

$$M = K\sqrt{L_1L_2} = 0.5 \times \sqrt{0.1 \times L_2} = 0.1$$

$$L_2 = (0.2)^2 / 0.1 = 0.04 / 0.1 = 0.4\text{H}$$

立即練習

兩線圈之電感量皆相同，互感為 0.2 亨利，耦合係數為 0.8，則單線圈之電感量為多少？

Ans 0.25H。



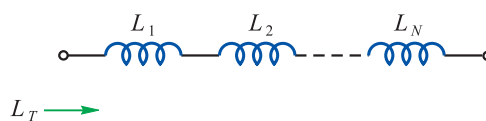
6-2.3 電感器的串聯

將電感器串接起來，總電感值會增大，串聯的效果如同電阻串聯。但電感器具互感應的影響，故實際計算時，應考慮電感器是否具有互感現象，而分為：

1. 無互感的串聯

如圖 6-19 所示為無互感之電感器串聯電路。總電感值為各電感值之和。

$$L_T = L_1 + L_2 + L_3 \cdots + L_N \cdots \cdots (6-19)$$

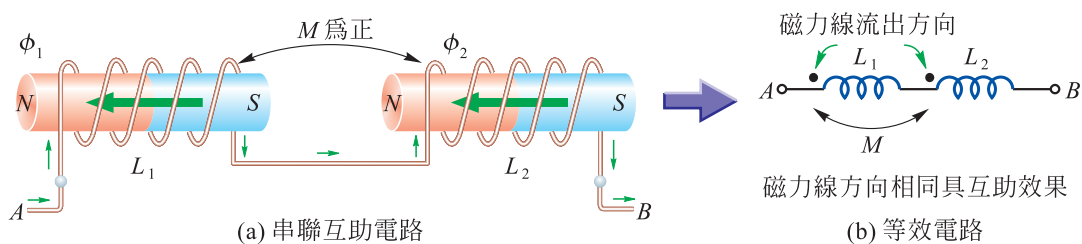


■ 圖 6-19 無互感之電感串聯

2. 具互感的串聯

將具有互相感應的電感器串接在一起，必須考慮因磁力線 (或磁通) 方向的相同或相反，產生總磁力線數的增加或減少，對總電感值的影響。說明於下：

- (1) 串聯互助：如圖 6-20 所示電路，兩線圈的磁力線方向相同，磁力有增強的趨勢，互感值取正。

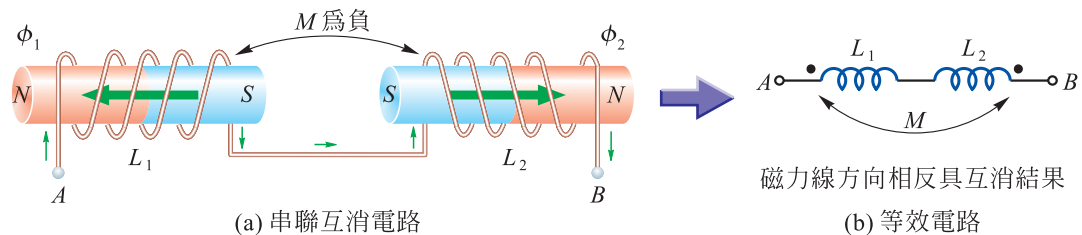


■ 圖 6-20 串聯互助

線圈 N_1 之電感值為 $L_1 + M$ ，線圈 N_2 之電感值為 $L_2 + M$ ，總電感值 L_T 的數學式為：

$$L_T = L_1 + L_2 + 2M \dots\dots\dots(6-20)$$

- (2) 串聯互消：如圖 6-21 所示電路，兩線圈的磁力線方向相反，磁力有減弱的趨勢，互感值取負。



■ 圖 6-21 串聯互消

線圈 N_1 之電感值為 $L_1 - M$ ，線圈 N_2 之電感值為 $L_2 - M$ ，總電感值 L_T 的數學式為：

$$L_T = L_1 + L_2 - 2M \dots\dots\dots(6-21)$$



範例 6-2.6

如圖所示，兩線圈之耦合係數 $K = 0.5$ ，則 a 、 b 兩端間之總電感為多少？



解

$$互感量 M = K\sqrt{L_1L_2} = 0.5 \times \sqrt{0.15 \times 0.6} = 0.5 \times 0.3 = 0.15$$

總電感 $L_T = L_1 + L_2 - 2M = 0.15 + 0.6 - 0.15 \times 2 = 0.45$ 亨利；兩線圈之磁力線方向相反

立即練習

如圖所示，若 $L_1 = 0.4H$ ， $L_2 = 0.5H$ ， $M = 0.3H$ ，則總電感量為多少？

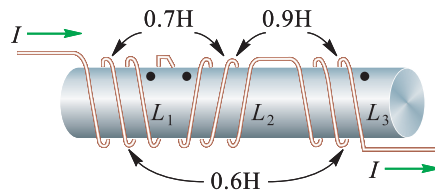


Ans 1.5H。



範例 6-2.7

如圖所示，若 $L_1 = 2H$ 、 $L_2 = 3H$ 、 $L_3 = 2.5H$ ，則總電感量為多少？



解

$$L_1 \text{ 之純量 } L_1' = 2 - 0.7 + 0.6 = 1.9H$$

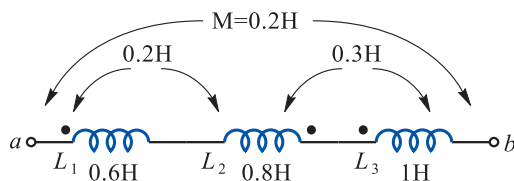
$$L_2 \text{ 之純量 } L_2' = 3 - 0.7 - 0.9 = 1.4H$$

$$L_3 \text{ 之純量 } L_3' = 2.5 - 0.9 + 0.6 = 2.2H$$

$$總電感量 L_T = L_1' + L_2' + L_3' = 1.9 + 1.4 + 2.2 = 5.5H$$

立即練習

如圖所示為串聯電感電路，試求總電感為多少？



Ans $L_{ab} = 1.8H$ 。

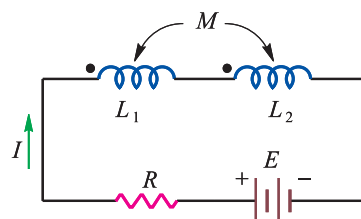


範例 6-2.8

如圖所示，設 $L_1 = 5\text{H}$ ， $L_2 = 8\text{H}$ ， $M = 2\text{H}$ ，則電路之總電感量為多少 H？

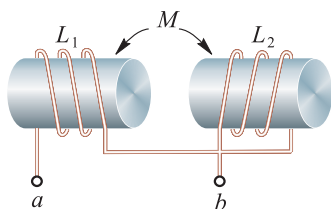
解 兩線圈之磁力線方向相同，總電感為串聯互助。

$$L_T = L_1 + L_2 + 2M = 5 + 8 + 2 \times 2 = 17\text{H}$$



立即練習

如圖所示電路， $L_1 = 6\text{H}$ ， $L_2 = 12\text{H}$ ， $M = 2\text{H}$ ，求 L_{ab} 為多少？



Ans 22H。

隨堂練習

- () 1. 若螺管之圈數為 500 匝，電流為 4 安培，產生之磁通為 2×10^6 線，則此螺管之電感量為 (A)5.625 (B)1.54 (C)2.5 (D)10 亨利。
- () 2. 如第 1 題所述之螺管，若圈數增加至 750 匝，電流不變，則電感量變為 (A)5.625 (B)1.54 (C)2.5 (D)10 亨利。
- () 3. 有 A、B 兩個電感器，將其串聯後測得總電感量為 42 毫亨利 (mH)，若將其中任一電感器的兩線端對調連接後，再測得其總電感量為 30 毫亨利，則兩電感間互感量為 (A)2 毫亨利 (B)3 毫亨利 (C)6 毫亨利 (D)12 毫亨利。
- () 4. 一線圈有 1000 匝，通過 5A 之電流時，產生磁通量 5×10^{-3} 韋伯，則自感量 $L =$ (A)1 (B)0.2 (C)1.5 (D)2 亨利。
- () 5. 如上題所述，若將自感量增至 3 亨利時，應增加匝數為 (A)3000 (B)3500 (C)2500 (D)1732。
- () 6. 二線圈其自感分別為 3 亨利及 12 亨利，兩線圈相串聯，其耦合係數為 0.8，則此二線圈之互感量為 (A)4.8 (B)15 (C)9 (D)12 亨利。

- () 7. 如圖 (1) 所示, $L_{ab} =$ (A)30H (B)18H (C)24H (D)10H。
 () 8. 如圖 (2) 所示, 其中 $L_1 = 12H, L_2 = 24H, L_3 = 10H, M_{12} = 5H, M_{23} = 7H,$
 $M_{31} = 3H,$ 則 A、B 間之等效電感量為 (A)16H (B)28H (C)37H
 (D)61H。

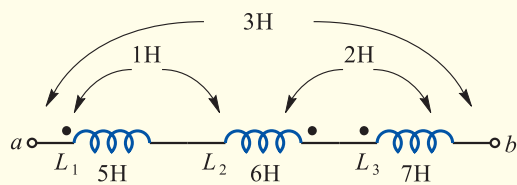


圖 (1)

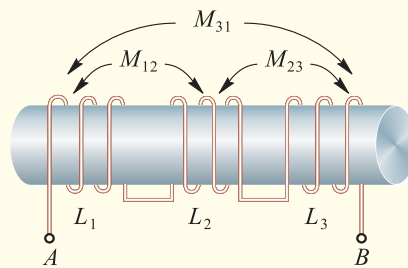


圖 (2)

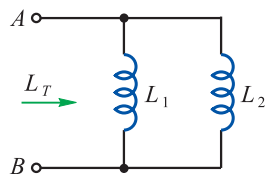


6-2.4 電感器的並聯

電感器的並聯，因線圈磁通的有無互相感應，分為無感應與有感應並聯電路。說明於下：

1. 無互感的並聯

如圖 6-22 所示為無互感應的電感器並聯電路。總電感值的求法，同電阻並聯，為各電感值之倒數和，再取倒數值。



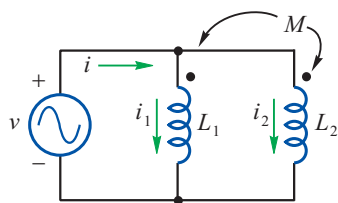
$$L_T = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2}} = \frac{L_1 \times L_2}{L_1 + L_2}$$

■ 圖 6-22 無互感的並聯

2. 有互感的並聯

將具有互相感應的電感器並接在一起，必須考慮因磁力線（或磁通）方向的相同或相反，產生總磁力線數的增加或減少，對總電感值的影響。說明於下：

- (1) 並聯互助：如圖 6-23 所示電路，兩線圈的磁力線方向相同，磁力有增強的趨勢，互感值取正。



■ 圖 6-23 並聯互助

圖示為並聯電感電路， L_1 與 L_2 之壓降為：

$$L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} = v \cdots (1)$$

$$M \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} = v \cdots (2) ; \text{並聯電壓相同}$$

整理式 (1) 及式 (2)，可求得分路電流 di_1/dt 與 di_2/dt 為：

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{(L_2 - M)v}{L_1 L_2 - M^2}, \quad \frac{di_2}{dt} = \frac{(L_1 - M)v}{L_1 L_2 - M^2}$$

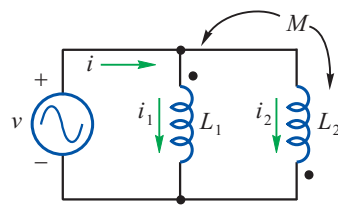
並聯總電流為分路電流之和，即 $di/dt = di_1/dt + di_2/dt$ ，則

$$\frac{di}{dt} = \frac{L_1 + L_2 - 2M}{L_1 L_2 - M^2} \times v$$

因電壓 $v = L_T \times di/dt$ ，可得並聯互助之總電感 L_T 為：

$$L_T = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 - 2M} \cdots \cdots (6-22)$$

- (2) 並聯互消：如圖 6-24 所示電路，兩線圈的磁力線方向相反，磁力有減弱的趨勢，互感值取負。



■ 圖 6-24 並聯互消

圖示為並聯電感電路， L_1 與 L_2 之壓降為：

$$L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} = v \cdots \cdots (1)$$

$$-M \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt} = v \cdots \cdots (2) ; \text{並聯電壓相同}$$

整理式 (1) 及式 (2)，可求得分路電流 di_1/dt 與 di_2/dt 為：

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{(L_2 + M)v}{L_1 L_2 - M^2}, \quad \frac{di_2}{dt} = \frac{(L_1 + M)v}{L_1 L_2 - M^2}$$

並聯總電流為分路電流之和，即 $di/dt = di_1/dt + di_2/dt$ ，則

$$\frac{di}{dt} = \frac{L_1 + L_2 + 2M}{L_1 L_2 - M^2} \times v$$

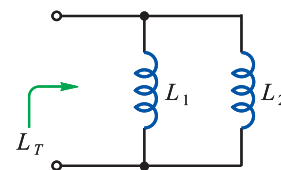
因電壓 $v = L_T \times di/dt$ ，可得並聯互消之總電感 L_T 為：

$$L_T = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 + 2M} \cdots \cdots (6-23)$$



範例 6-2.9

如圖所示為兩電感器並聯電路，若 $L_1 = 6\text{H}$ ， $L_2 = 3\text{H}$ ，則並聯線圈總電感 L_T 為多少？

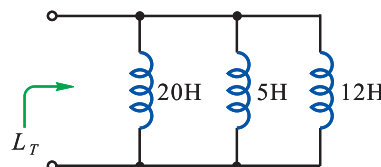


解 兩電感未相互感應，並聯總電感之求法，如同並聯電阻。

$$L_T = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} = \frac{6 \times 3}{6 + 3} = \frac{18}{9} = 2\text{H}$$

立即練習

試求三電感並聯之總電感值為多少？

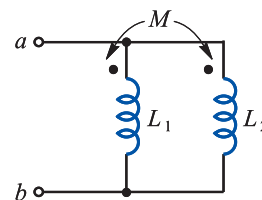


Ans $L_T = 3\text{H}$ 。



範例 6-2.10

如圖所示為電感並聯電路，其中 $L_1 = 3\text{H}$ ， $L_2 = 6\text{H}$ ，互感 $M = 2\text{H}$ ，則 a 、 b 兩端之總電感值 L_{ab} 應為多少？

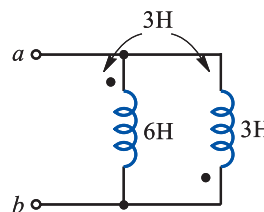


解 圖示為有相互感應 M 之並聯電路，並聯互助之總電感值的數學式為：

$$L_T = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 - 2M} = \frac{3 \times 6 - 2^2}{3 + 6 - 2 \times 2} = \frac{14}{5} = 2.8\text{H}$$

立即練習

如圖所示為有感並聯電感電路，試求總電感值為何？



Ans 0.6H 。

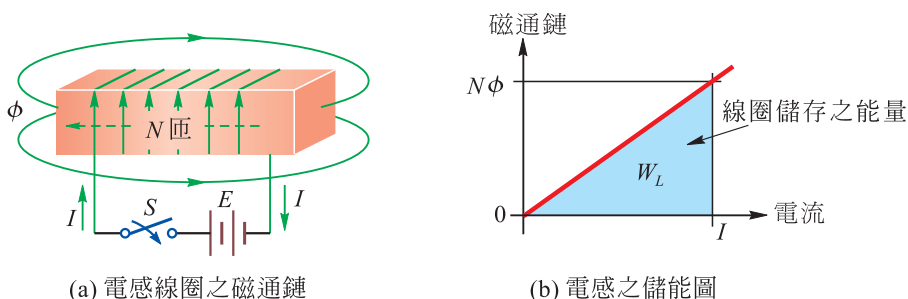


6-2.5 電感器儲存之能量

電感器會以磁場的形式儲存能量，如同電容器儲存之能量不會被消耗掉。如圖 6-25 所示電路，當電流經電感線圈時，線圈週圍會產生磁通鏈 $N\phi$ ，而將能量 W_L 儲存起來。磁通鏈與電流成線性關係，線圈儲存之能量顯示於曲線下之三角形部份：

$$W_L = \frac{1}{2} \times N\phi \times I = \frac{1}{2} LI^2 \quad (\because L = \frac{N\phi}{I}) \dots\dots\dots(6-24)$$

式中， W_L 為電感量儲能之符號，單位為焦耳 (J)。



■ 圖 6-25 電感之儲能

6



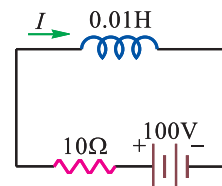
範例 6-2.11

在一電感器之自感量為 2 亨利之電路，通入 6 安培之電流，問此磁場所儲存之能量為多少焦耳？若將電流於 3 秒內中斷，則此磁場於時間內所消耗之功率為多少瓦特？

解 電感儲存之能量 $W = LI^2/2 = 2 \times 6^2/2 = 36\text{J}$
 消耗功率 $P = W/t = 36/3 = 12$ 瓦特

立即練習

如圖所示，當電流達到穩定值時，試求電感中之能量為多少焦耳？

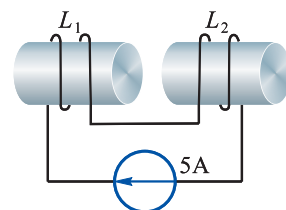


Ans $W = 0.5\text{J}$ 。



範例 6-2.12

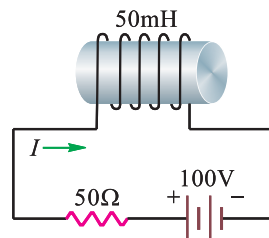
如圖所示，設有兩串聯之電感器 L_1 及 L_2 ，其中 $L_1 = L_2 = 6$ 亨利，兩者之間之耦合係數 K 為 0.8，兩電感器所儲存的總能量為多少焦耳？



解 互感量 $M = K\sqrt{L_1L_2} = 0.8 \times \sqrt{6 \times 6} = 0.8 \times 6 = 4.8$
 兩線圈之磁力線方向相反，串聯互消之電感值為：
 $L_T = L_1 + L_2 - 2M = 6 + 6 - 2 \times 4.8 = 12 - 9.6 = 2.4\text{H}$
 線圈之儲能 $W = LI^2/2 = 2.4 \times 5^2/2 = 30\text{J}$

立即練習

如圖所示，當電流達到穩定時，線圈儲存之能量為多少？



Ans $W = 100\text{mJ} = 0.1\text{J}$ 。

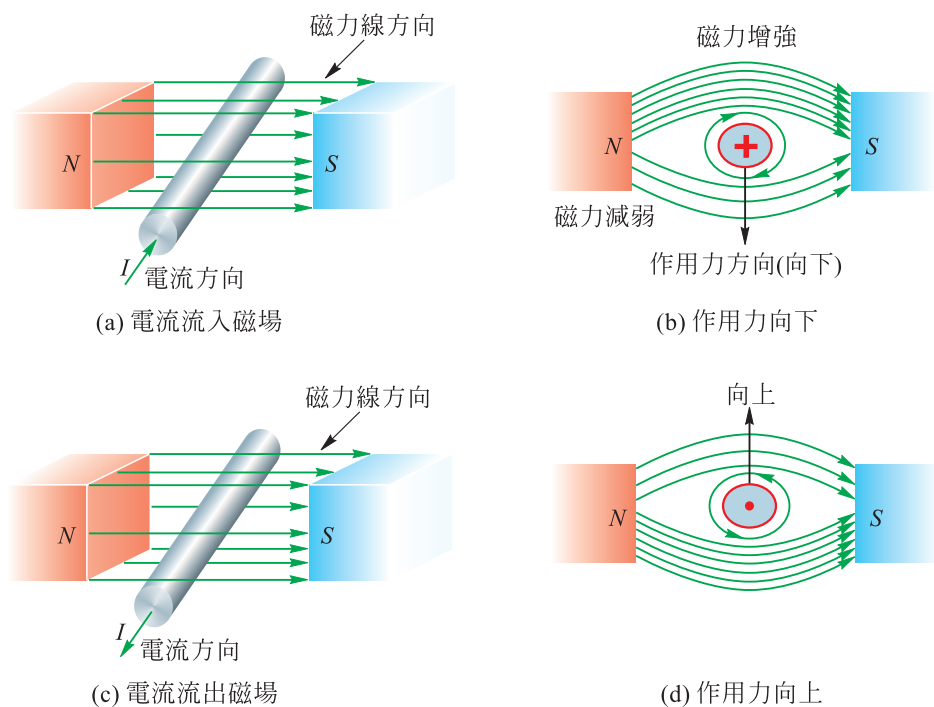


6-3 電磁效應



6-3.1 載電流導體在磁場中的受力方向

在磁場中，置入載有電流之導體，如圖 6-26(a)(b) 所示，若導體之電流方向為流入磁場“ \oplus ”，則導體上方之磁力線與磁場同向，磁力有增強趨勢，導體下方之磁力線因方向相反，磁力有減弱的傾向，導體因彈力作用而向下移動。同理，如圖 6-26(c)(d) 所示，導體會向上移動。此種因電流產生之磁效應，簡稱電磁效應。

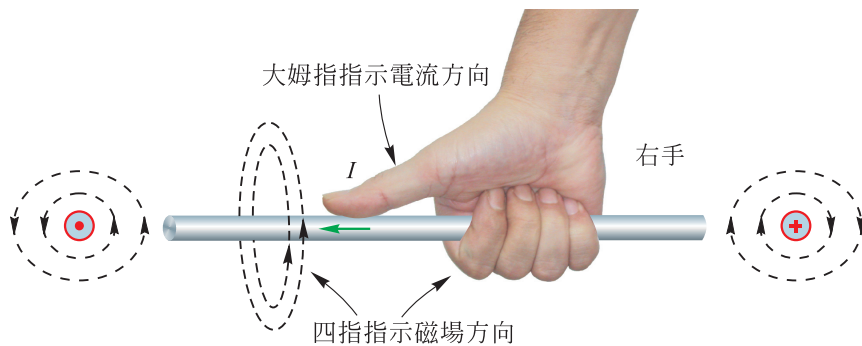


■ 圖 6-26 載流導體的作用力方向

載流導體在磁場中，因電流產生之磁通而使導體移動的方向，可由法國物理學家安培 (Ampere, 1775~1836) 發表之安培右手定則，與英國電氣學家夫來明 (Fleming, 1849~1945) 之左手定則說明。

1. 安培右手定則

如圖 6-27 所示，安培右手定則說明，以右手大姆指指示電流在導體流動的方向，則四指可以指示產生之磁力線的方向。



■ 圖 6-27 安培右手定則

6

安培 (A. M. Ampere : 1775~1836)



法國的物理學家。發現所謂的「安培右手」定則。電流的單位安培 (Ampere)「A」就是依據他的名字所命名的。

夫來明 (J. A. Fleming)
: 1849~1945)

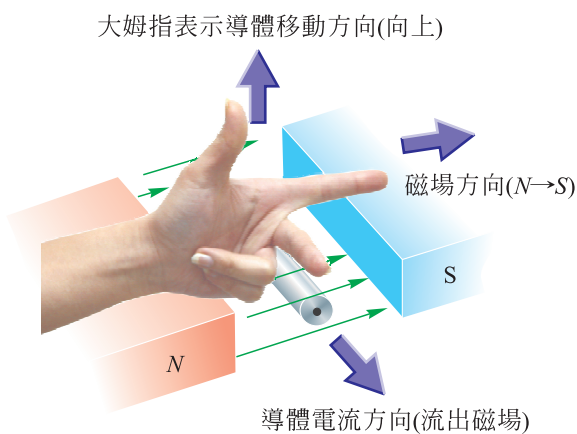


英國的電氣學家。發明第一個用來偵測無線電波的電子真空管。

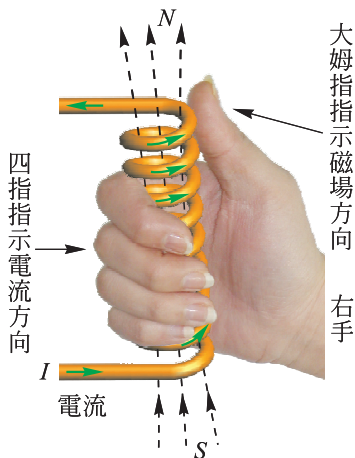
2. 夫來明左手定則

如圖 6-28 所示，夫來明左手定則又稱電動機定則，說明載流導體在磁場中移動的方向。若令左手之大姆指、食指、中指等三指互成 90 度，則大姆指指示載流導體移動的方向，食指指示磁場的方向，在空間中磁力線由 N 極流向 S 極，中指指示導體之電流方向。

提示 ➔ 使用夫來明左手定則，三指同時指示，易生混淆，可先伸出食指指示磁場方向，確定後，才伸出中指指示導體之電流方向，最後伸出大姆指可知導體移動的方向。



■ 圖 6-28 夫來明左手定則



■ 圖 6-29 螺管定則

3. 螺管定則

如圖 6-29 所示。螺管定則常用以指示變壓器之磁場方向。螺管定則同安培右手定則使用右手，只是指示之方向兩者相反。螺管定則之磁場方向，以大姆指表示，導體之電流方向以四指表示。



隨堂練習

- () 1. 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。
- () 2. 在直流 RL 串聯電路中，設 $E = 15\text{V}$ 、 $R = 3\Omega$ 、 $L = 20\mu\text{H}$ ；試求當電流穩定時，該線圈儲存之能量為 (A)62.5 微焦耳 (B)125 微焦耳 (C)250 微焦耳 (D)312.5 微焦耳。

- () 3. 夫來明左手左則中，食指所指的方向表示 (A) 電流方向 (B) 磁力線方向 (C) 導體移動方向 (D) 電子流方向
- () 4. 如圖 (1) 所示，導體 A 通以圖示方向之電流，則導體受力之方向為 (A) 向左 (B) 向上 (C) 向右 (D) 向下。
- () 5. 若有一束電子流垂直於試題紙面流出，欲測定所產生的磁力線方向宜採用 (A) 右手定則 (B) 左手定則 (C) 法拉第定則 (D) 歐姆定則。
- () 6. 如圖 (2) 所示，電流輸出端在 (A) A 點 (B) B 點 (C) A 、 B 點皆可 (D) 無法判斷。
- () 7. 如圖 (3) 所示，判斷導體移動之方向，下列敘述何者為對？ (A) 夫來明右手定則，向上 (B) 夫來明右手定則，向下 (C) 夫來明左手定則，向上 (D) 夫來明左手定則，向下。

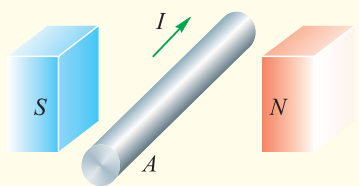


圖 (1)

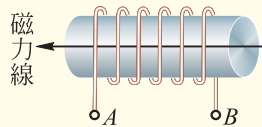


圖 (2)

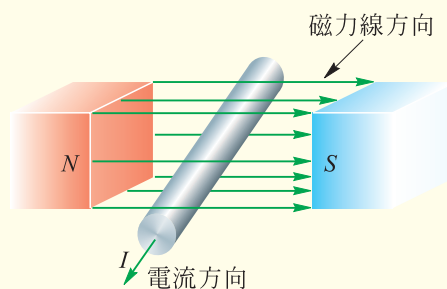


圖 (3)



6-3.2 載電流導體在磁場中受力的大小

在磁場中，將導體通入電流，導體產生之磁通會與磁場起交互作用，而使導體移動。讓導體移動之作用力的大小為：

$$F = BIl \sin \theta \dots\dots\dots(6-25)$$

式中， B 為磁場之磁通密度，單位為韋伯 / 平方公尺 (Wb / m^2)； l 為導體割切磁力線之有效長度，單位為公尺 (m)； I 為流經導體之電流，單位為安培 (A)； θ 為導體與磁場方向的夾角。當夾角 $\theta = 90^\circ$ 時，因 $\sin 90^\circ = 1$ ，產生之作用力 F 最大。當夾角 $\theta = 0^\circ$ 或 180° 時，即導體與磁場方向平行，導體未受力作用，只作直線移動。如圖 6-30 所示。

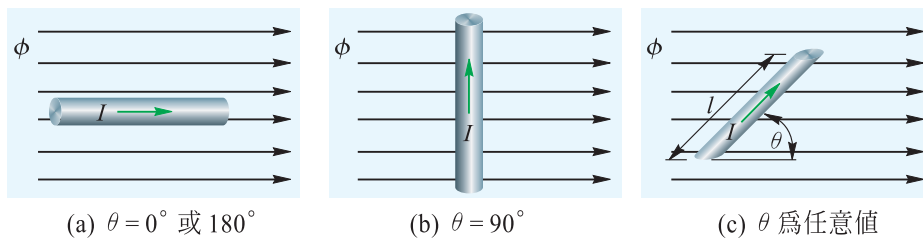


圖 6-30 導體與磁場之夾角



6-3.3 導體在磁場中移動之感應電勢

如圖 6-31 所示，在磁場 (B) 中之導體，以 v 速度移動，若在 Δt 秒內移動 Δd 距離，則導體上感應之電勢為：

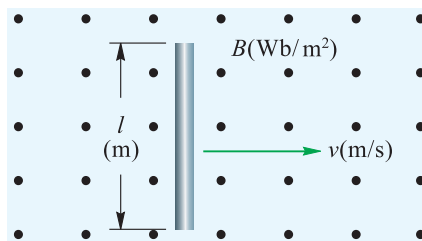


圖 6-31 導體在磁場中垂直移動

$$e = Blv \sin \theta$$

式中， B 為磁通密度，SI 單位為韋伯 / 平方公尺； l 為導體割切磁力線之有效長度，單位為公尺； v 為導體移動之速度，單位為公尺 / 秒； θ 為導體移動方向與磁場之夾角。夾角若為 0 度，因 $\sin 0^\circ = 0$ ，則導體沒感應電勢產生，即 $e = 0V$ ；夾角若為 90 度，導體移動方向與磁場垂直，則導體之感應電勢最大，即 $e = Blv$ 最大。

提示 $\rightarrow \sin 0^\circ = 0 \quad \sin 30^\circ = \frac{1}{2} \quad \sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} \quad \sin 90^\circ = 1$



範例 6-3.1

在磁通密度為 2000 高斯之均勻磁場中，置入長 100 公分之導體，當導體通入 5A 之電流，問導體之位置與磁力線 (1) 互相垂直，(2) 成 30 度時，導體承受之作用力分別為若干？。

解 導體在磁場中產生之作用力 $F = BIl\sin\theta$ ，則

$$(1) \theta = 90^\circ : F = 2000 \times 10^{-4} \times 100 \times 10^{-2} \times 5 \sin 90^\circ \\ = 0.2 \times 5 = 1 \text{ 牛頓}$$

$$(2) \theta = 30^\circ : F = 2000 \times 10^{-4} \times 100 \times 10^{-2} \times 5 \sin 30^\circ \\ = 0.2 \times 5 \times 0.5 = 0.5 \text{ 牛頓}$$

註：單位換算：1 韋伯 / 米² = 10⁴ 高斯，1 公尺 = 100 公分。

立即練習

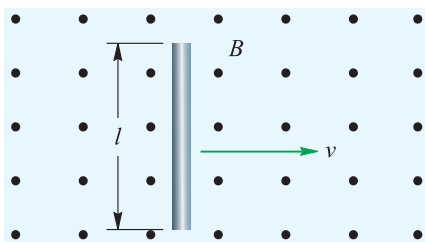
磁場之磁通密度 $B = 0.5$ 韋伯，置入長 0.2 公尺之導體，導體與磁場成 60 度，問當導體通入 1.2 安培之電流時，導體產生之作用力約為多少牛頓？

Ans 0.1 牛頓。



範例 6-3.2

如圖所示，一導體長度 $l = 4\text{m}$ ，以 10m/sec 的速度在磁通密度 $B = 10^{-3}$ 韋伯 / 米² 中，向右移動，其感應電勢及電流方向為何？



6

解 導體在磁場中運動，產生之電勢的數學式為： $e = Blv\sin\theta$ 。

$$e = 10^{-3} \times 4 \times 10 \times \sin 90^\circ = 0.04\text{V}$$

判斷感應電勢 (或電流) 方向，應依夫來明右手定則，電流方向向下

立即練習

有一導體在磁場裡，有效長度為 10cm，磁通密度為 0.02 韋伯 / 米²，若應電勢為 0.1V，則導體移動之速度為若干米 / 秒？(設導體移動方向與磁場垂直)

Ans 50 米 / 秒 (或 m / sec)。



範例 6-3.3

如圖所示，導體 A 通過 50A 電流時，所受之電磁力若為 5 牛頓，而機械功率為 50 瓦特，則導體 A 滑動後感應之電勢為多少伏特？

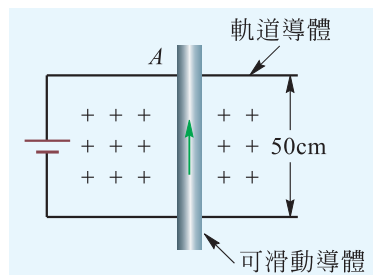
解 首先求出磁通密度 B ，因 $F = BIl$ ，則

$$B = \frac{F}{l \times I} = \frac{5}{0.5 \times 50} = 0.2 \text{ 韋伯 / 平方公尺}$$

次求導體移動之速度，因功率 $P = F \times v$ ，則

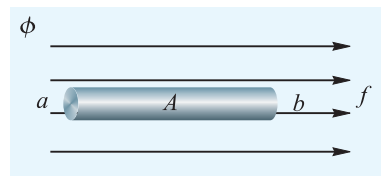
$$v = \frac{P}{F} = \frac{50}{5} = 10 \text{ 公尺 / 秒}$$

感應電勢 $e = Blv = 0.2 \times 0.5 \times 10 = 1$ 伏特



立即練習

如圖所示，若導體 A 向 f 方向移動，則導體 A 感應之電勢以 a 、 b 兩點表示，其關係為何？



Ans a 電位與 b 電位相等。



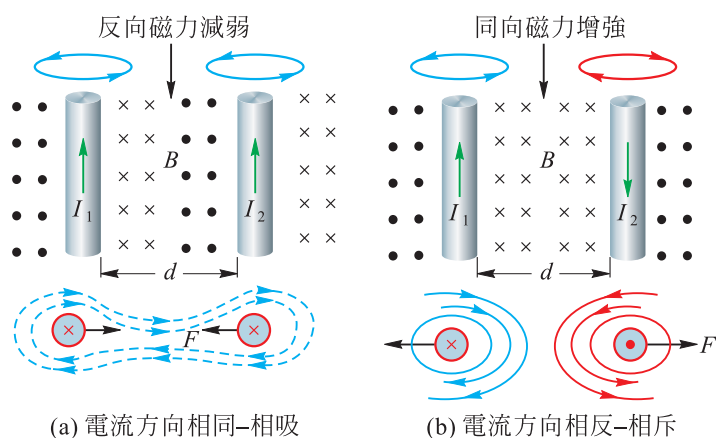
6-3.4 兩平行載流導體之作用力

通上電流之兩導體，若固定間隔平行置放一起，因磁場之作用，兩導體會有相吸或相斥的作用力發生。如圖 6-32(a) 所示，兩導體載入之電流方向相同，依安培右手定則，在兩導體間之磁力線方向相反，兩磁力線相互抵消，磁力有減弱的趨勢，形成兩導體之磁力，外側較內側為強，兩導體之作用力方向向內，具相吸作用。如圖 6-32(b) 所示，兩導體載入之電流方向相反，依安培右手定則，在兩導體間之磁力線方向相同，磁力有增強的傾向，形成兩導體之磁力，內側較外側為強，兩導體之作用力方向向外，具相斥作用。

兩平行載流導體之作用力為：

$$F = \frac{\mu I_1 I_2 l}{2\pi d} \dots\dots\dots(6-26)$$

式中， F 為兩導體間之作用力，單位為牛頓； μ 為導體之導磁係數，介質若為空氣，則 $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$ 亨利 / 米； d 為兩導體之間距，單位為米 (m)； I 為電流，單位為安培 (A)， l 為導體之長度，單位為米 (m)。



■ 圖 6-32 兩載流導體之作用力



範例 6-3.4

在空氣中，兩導體相隔 10 公分平行並排，兩導體之長度皆為 1 公尺，流經兩導體之電流分別為 15A 及 20A，且電流方向相同，試求每一根導體所承受之作用力為何？若電流方向相反，則每一根導體承受之作用力又為何？

解 兩平行載流導體之作用力 $F = \frac{\mu I_1 I_2 l}{2\pi d}$

每一根載流導體之作用力

$$F_1 = F_2 = 4\pi \times 10^{-7} \times \frac{1 \times 15 \times 20}{2\pi \times 10 \times 10^{-2}}$$

$$= 2 \times 10^{-7} \times 30 \times 10^2 = 6 \times 10^{-4} \text{ 牛頓}$$

兩導體之電流方向相同，作用力方向為相吸引。

若電流方向相反 $F_1 = F_2 = -6 \times 10^{-4}$ 牛頓，負號表示作用力方向為相排斥。

立即練習

兩平行導線 a 及 b ，若導線之電流 $I_a > I_b$ ，則兩導體之作用力 F_a 與 F_b 之關係為何？

Ans $F_a = F_b$ 。



6-4 電磁感應



6-4.1 法拉第定律 (Faraday law)

導體在磁場中移動，將割切磁場的磁力線，而於兩端間形成電位差。當移動中之導體，割切磁力線數愈多，產生之電勢愈大。或導體固定不動，而移動磁場，使磁力線割切導體，在導體上產生之電勢也會相同。

西元 1831 年，英國科學家法拉第 (M.Faraday, 1791~1867) 以線圈、檢流計 (具正、負極刻度，沒動作則停在 0 刻度) 及條形磁鐵，如圖 6-33 所示，在 N 匝線圈內移動磁鐵，或稱移動磁場，產生隨時間變動之磁通量 $d\phi / dt$ 時，在線圈之兩端會有電位差，當接上檢流計，將指示電流的變化。線圈感應之電勢為：

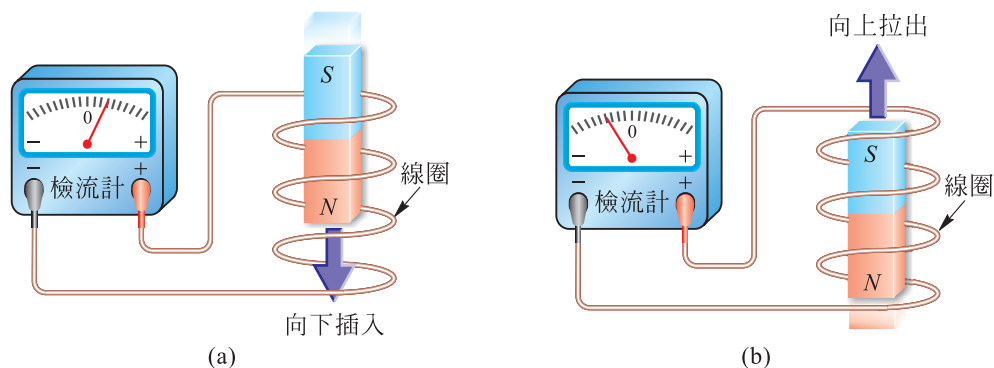
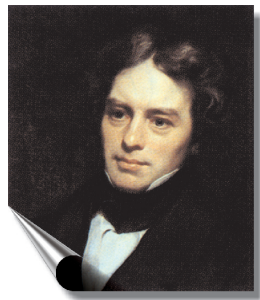


圖 6-33 法拉第電磁感應實驗

法拉第 (M. Faraday : 1791~1867)



英國的物理學家。以自學的方式學習科學，22 歲即進入研究所，展開科學家的研究生涯。發現關於電氣分解的法拉第定律及電磁傳導現象等等。

$$e = N \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots(6-27)$$

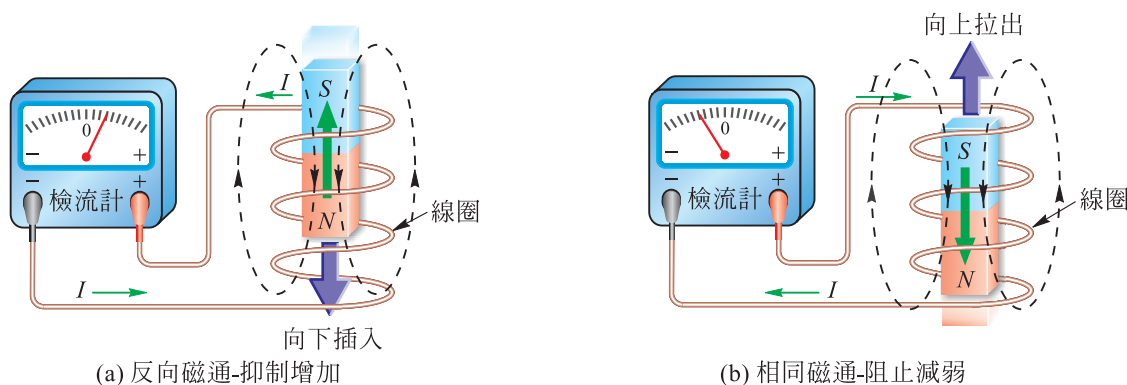
式中， N 為線圈的匝數， $d\phi / dt$ 為磁通隨時間變動的變化量，SI 制單位為韋伯 / 秒，CGS 制單位為馬克士威。

提示 → 1 韋伯 = 10^8 馬克士威 = 10^8 線。



6-4.2 冷次定理 (Lenz's law)

法拉第證實，磁場在線圈內變動，線圈兩端會產生電勢。電勢形成之電流的方向，則於西元 1834 年，德國科學家冷次 (H.Lenz, 1804~1865) 提出說明。如圖 6-34 所示，當磁鐵 N 極插入線圈，線圈兩端感應出一電勢，電勢使電流流經線圈，電流將產生與原先磁通變化相反之磁通量，來抑制原先磁通量的變化。依安培右手定則，大姆指指向反向磁通，四指表示如圖 6-34(a) 之電流方向。



■ 圖 6-34 冷次定律說明電流方向

如圖 6-34(b) 所示，當抽出磁鐵，磁場之磁通量將減弱，感應之電勢形成之電流會產生與原先相同之磁通，以阻止磁通量之減少，電流之方向如圖 6-34(b)，此稱冷次定律，線圈感應之電勢為：

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \dots\dots\dots (6-28)$$

式中，負號表示感應電勢的方向為反抗原磁通的變化。感應電勢又稱反電勢。



6-4.3 自感電勢與互感電勢

當電流流經線圈，產生磁通量的變化，線圈之電感量也隨之變化。變動之電感量為：

$$L = N \frac{d\phi}{di} \dots\dots\dots (6-29)$$

式中， $d\phi / di$ 為磁通隨電流之變化量。當線圈之匝數 N 固定時，流經線圈之電流的變動，引起磁通量的變化愈大，產生之電感量會成正比的增大。然而，線圈磁通量之變化亦與感應之電勢成正比，則電感量與感應電勢之關係，可轉換為：

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} = -N \frac{d\phi}{di} \times \frac{di}{dt} = -N \frac{d\phi}{di} \times \frac{di}{dt} = -L \frac{di}{dt}$$

式中，線圈之感應電勢與電感量，及電流之變化量成正比。此感應電勢係線圈之自感應量產生，故稱為自感電勢。負號表示自感電勢之方向在阻止線圈電流的變化。

如圖 6-35 所示，當電流 i_1 流經線圈 N_1 ，產生磁通 ϕ_1 ， $\phi_1 = \phi_{11} + \phi_{12}$ 。互感量 ϕ_{12} 將割切線圈 N_2 ，產生感應電勢 e_2 。 e_2 稱為互感電勢。互感電勢為：

$$e_2 = -N_2 \frac{d\phi_{12}}{dt} = -N_2 \frac{d\phi_{12}}{di_1} \times \frac{di_1}{dt} = -M \frac{di_1}{dt}$$

式中， M 為互感量，單位為亨利 (H)。 $M = d\phi_{12} / di_1$ 。負號表示互感電勢之方向在阻止電流的變化。

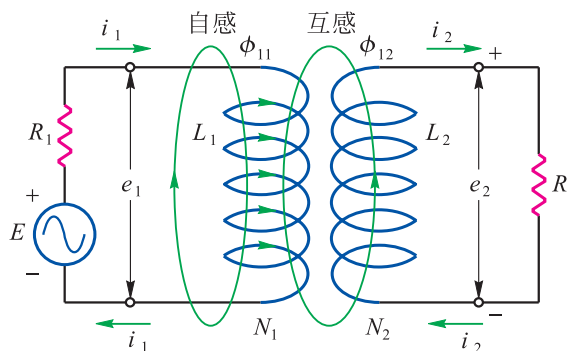


圖 6-35 線圈產生之感應電勢



範例 6-4.1

在 500 匝之線圈上，有 0.002 韋伯之磁通穿過，並於 0.5 秒後降為零，問線圈之感應電勢為多少伏特？

解 磁通變化在線圈上感應之電勢為：

$$e = N \frac{d\phi}{dt} = 500 \times \frac{0.002}{0.5} = 2 \text{ 伏特}$$

立即練習

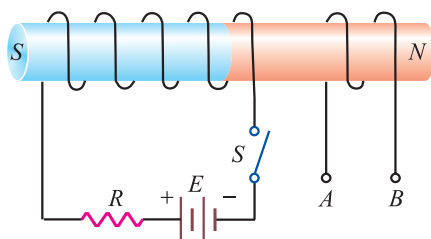
繞有 200 匝之線圈上，在 0.02 秒內其磁通之變化量為 0.004 韋伯，問感應之電勢為多少伏特？

Ans 40 伏特。

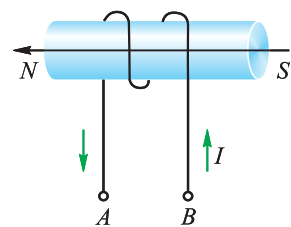


範例 6-4.2

如圖所示，當開關 S 切入之瞬間， AB 線圈因而感應電勢，則 AB 兩端之電位關係為何？



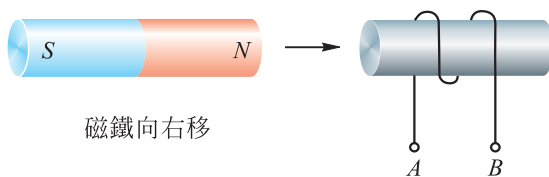
解 依楞次定律，當開關 S 關上之瞬間，線圈之磁通切割 AB 端線圈， AB 端線圈會產生相反之磁通，如圖所示， A 端為 N 極， B 端為 S 極，再依螺管定則可知，電流方向由 B 端流入， A 端流出。故 A 端之電位高於 B 端，即 $V_A > V_B$ 。



6

立即練習

如圖所示，問線圈感應之極性為何？



Ans A 正， B 負。



範例 6-4.3

有一繞有 2000 匝之空氣心線圈，當通入 5 A 之電流時，線圈產生 4×10^{-3} 韋伯之磁通，試求 (1) 線圈之自感為何？(2) 若線圈中之電流在 0.5 秒內降為零，則線圈所產生之自感應電勢為若干伏特？

解 線圈自感量 $L = N \frac{d\phi}{di}$

與磁通隨電流之變化成正比，則

$$L = 2000 \times \frac{4 \times 10^{-3}}{5} = \frac{8}{5} = 1.6\text{H}$$

$$\text{自感應電勢 } e = -L \frac{d\phi}{di} = -1.6 \times \frac{5}{0.5} = -16\text{V}$$

(負號表示電勢將阻止線圈電流之變化)

立即練習

線圈上之自感量為 0.01H，而電流為 50mA，當斷路時，電流在 0.01 秒內降為零，問線圈感應之電勢為多少伏特？

Ans 50mV。



範例 6-4.4

設兩線圈 $N_1 = 20$ 匝， $N_2 = 200$ 匝並列置放，若線圈 N_1 通入 5 安培電流時，產生磁通 4000 線，而其中有 3000 線與 N_2 作磁交鏈，而線圈 N_2 通入 5 安培電流時，產生磁通 40000 線，其中有 30000 線與 N_1 作磁交鏈，試求 (1) 線圈 N_1 之自感量，(2) 線圈 N_2 之自感量，(3) 兩線圈間之互感為多少？

解 (1) N_1 之自感量： $L_1 = N_1 \frac{d\phi_1}{dI_1} = 20 \times \frac{4000 \times 10^{-8}}{5} = 16000 \times 10^{-8} = 1.6 \times 10^{-4}\text{H}$

(2) N_2 之自感量： $L_2 = N_2 \frac{d\phi_1}{dI_1} = 200 \times \frac{40000 \times 10^{-8}}{5} = 1600000 \times 10^{-8} = 0.016\text{H}$

(3) 兩線圈之互感： $M_{12} = M_{21} = N_1 \frac{\phi_{12}}{I_1} = N_1 \frac{\phi_{21}}{I_2} = 200 \times \frac{3000 \times 10^{-8}}{5}$
 $= 120000 \times 10^{-8} = 0.0012\text{H}$

立即練習

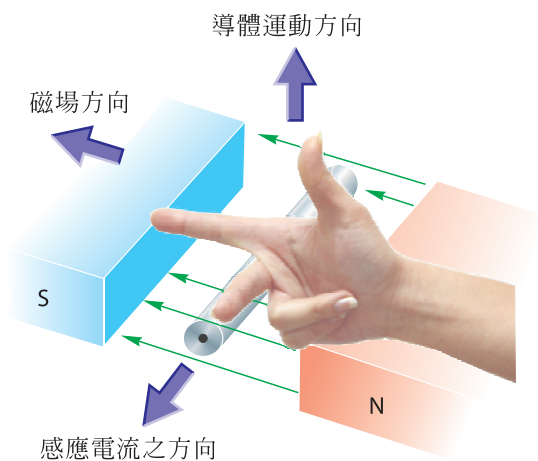
兩線圈相鄰，其中一線圈在 0.001 秒內，變化之電流為 2 安培時，另一線圈則感應產生 60 伏特之電勢，問其間之互感量為多少？

Ans 0.03H。



6-4.4 夫來明右手定則 (Fleming's right hand rule)

夫來明右手定則又稱發電機定則，用來判斷導體在磁場中運動，產生感應電勢的方向。如圖 6-36 所示，首先使右手之拇指、食指、中指相互垂直，再以食指指示磁場方向，拇指指示導體運動方向，中指即可指示導體感應產生之電流方向，此稱夫來明右手定則。



發電機定則：
已知磁場方向及導體運動方向，可判定感應電勢產生的電流方向。

■ 圖 6-36 夫來明右手定則

6

隨堂練習

- () 1. 有一線圈其通過之電流 0.1 秒中由 0 增至 10 安培，若感應 10 伏特時，此線圈之自感應為 (A)0.01 亨利 (B)0.1 亨利 (C)1 亨利 (D)10 亨利。
- () 2. 有自感為 0.1 亨利的線圈，其通過之電流在 0.1 秒中由 0 增至 10A，則此時之感應電勢為 (A)10V (B)1V (C)0.1V (D)100V。
- () 3. 電磁感應所產生感應電勢的方向，為反抗原磁交鏈的變化，稱之為 (A) 安培定律 (B) 夫來明右手定則 (C) 冷次定律 (D) 夫來明左手定則。

- ()4. 有平行長直導線，皆載有同方向之電流，此兩平行導線彼此間會 (A) 互相排斥 (B) 互相吸引 (C) 變成互相垂直 (D) 沒有力的作用。
- ()5. 兩條長 1 米之平行導體，在真空中相距 1 米，各流有相等電流，若每一導體每單位長度所受之力為 2×10^{-7} 牛頓，則此電流為 (A) 1A (B) 0.5A (C) 0.1A (D) 2A。
- ()6. 有一線圈匝數為 1000 匝，電感量為 20H，若希望電感量降為 5H 時，匝數應減為多少匝？ (A) 250 匝 (B) 500 匝 (C) 760 匝 (D) 1000 匝。
- ()7. 若流通於某一電感器中的電流係一穩定直流電流，則下列敘述何者為正確？ (A) 電感器兩端會感應出正值的電壓 (B) 電感器兩端會感應出負值電壓 (C) 電感器兩端的感應電壓為零 (D) 電感器沒有儲存能量。
- ()8. 有一 200 匝的線圈，當 1 安培的電流通過時，產生 4×10^{-4} 韋伯的磁通，則線圈的自感為 (A) 0.02 亨利 (B) 0.04 亨利 (C) 0.08 亨利 (D) 0.16 亨利。



本章摘要

第 1 節

1. 磁場是磁鐵可影響的空間。磁場屬向量性，具有大小及方向。
2. 磁性物質受到地磁的影響，在靜止時，會指南極或北極。
3. 將兩磁極擺在一起，依磁鐵之特性，會有相吸或相斥的作用力產生。
4. 庫侖磁力定律： $F = K \frac{M_1 M_2}{r^2}$ ， $K = \frac{1}{4\pi\mu} = 6.33 \times 10^4$ 米 / 亨利。
5. 單位磁極在磁場某點之作用力，稱為磁場中該點之磁場強度，或稱磁化力。

$$H = \frac{F}{M}, \quad H = \frac{F}{M_2} = K \frac{M_1 M_2}{d^2} \times \frac{1}{M_2} = K \frac{M_1}{d^2} \text{ 牛頓 / 韋伯}$$

6. 在磁場中，穿過磁路之磁力線的總數，稱為磁通 (magnetic flux)，或稱磁通量。
7. 磁通密度定義為：磁力線垂直通過每單位面積的總數量，以 B 表示。
8. 相對導磁係數定義為：物質的導磁係數 (μ) 與空氣或真空導磁係數 (μ_0) 的比值。

$$B = \frac{\phi}{A}$$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{B(\text{鐵磁物質})}{B_0(\text{空氣中})} = \frac{\phi(\text{鐵磁物質})}{\phi_0(\text{空氣中})}$$

9. 在磁場中，磁性物質建立磁力線時，產生之阻力，稱為磁阻。

$$R = \frac{l}{\mu A} \text{ 安匝 / 韋伯 (At / Wb)}$$

10. 在磁性物質中，建立磁力線所需之外力，稱為磁動勢，以 F 表示。

$$F = NI, \quad F \text{ 為磁動勢；} N \text{ 為繞製線圈之數目；} I \text{ 為電流}$$

11. 磁動勢 (F) 與線圈繞製之圈數 (N)，及流過線圈之電流 (I) 成正比。

$$\phi = \frac{F}{R}$$

12. 單位長度的磁動勢稱為磁化力 (H)，即磁場強度。

$$H = \frac{F}{l} = \frac{NI}{l}$$



本章摘要

13. 當線圈通上交變電流時，線圈會產生電感量對應電流之變化，電感量是線圈之自我電感 (self-inductance) 簡稱電感。電感之量測單位為亨利。

第 2 節

14. 單位電流產生之磁通鏈稱為電感量 (inductance)，以 L 表示，單位為亨利 (H)。

$$L = \frac{N\phi}{I}$$

15. 當兩線圈通上交流電源時，兩線圈產生之磁通會相互交流，稱為互感應 (mutual-inductance)，簡稱互感，以 M 表示，單位為亨利 (H)。

16. $\phi_1 = \phi_{11} + \phi_{12}$ ，磁通 ϕ_{11} 不與線圈 N_2 交鏈稱漏磁通。磁通 ϕ_{12} 稱交鏈磁通。

$$M_{12} = \frac{N_2 \phi_{12}}{I_1}, M_{21} = \frac{N_1 \phi_{21}}{I_2}$$

17. 無互感之電感器串聯電路。總電感值為各電感值之和。

$$L_T = L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_N$$

18. 串聯互助：兩線圈的磁力線方向相同，磁力有增強的趨勢，互感值取正。

$$L_T = L_1 + L_2 + 2M$$

19. 串聯互消：兩線圈的磁力線方向相反，磁力有減弱的趨勢，互感值取負。

$$L_T = L_1 + L_2 - 2M$$

20. 無互感應的電感器並聯，總電感值的求法，為各電感值之倒數和，再取倒數值。

21. 並聯互助：兩線圈的磁力線方向相同，磁力有增強的趨勢，互感值取正。

$$L_T = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 - 2M}$$

22. 並聯互消：兩線圈的磁力線方向相反，磁力有減弱的趨勢，互感值取負。

$$L_T = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 + 2M}$$



本章摘要

23. 電感器儲存之能量： $W_L = \frac{1}{2} \times N\phi \times I = \frac{1}{2} LI^2$ 焦耳 ($\because L = \frac{N\phi}{I}$)

第 3 節

24. 安培右手定則說明，以右手大姆指指示電流在導體流動的方向，則四指可以指示產生之磁力線的方向。
25. 夫來明左手定則又稱電動機定則，說明載流導體在磁場中移動的方向。若令左手之大姆指、食指、中指等三指互成 90 度，則大姆指指示載流導體移動的方向，食指指示磁場的方向。
26. 螺管定則常用以指示變壓器之磁場方向。螺管定則之磁場方向，以右手之大姆指表示，導體之電流方向則以四指表示。
27. 在磁場中，將導體通入電流，導體產生之磁通會與磁場起交互作用，而使導體移動。讓導體移動之作用力的大小，以數學式表示為：

$$F = BIl\sin\theta$$

28. 導體在磁場中移動之感應電勢： $e = Blv\sin\theta$

29. 兩平行載流導體之作用力： $F = \frac{\mu I_1 I_2}{2\pi d}$

第 4 節

30. 線圈感應之電勢： $e = N \frac{d\phi}{dt}$

31. (冷次定律) 線圈感應之電勢： $e = -N \frac{d\phi}{dt}$

32. 當電流流經線圈，產生磁通量的變化，線圈之電感量也隨之變化。變動之電感量：

$$L = N \frac{d\phi}{di}$$

33. 感應電勢係線圈之自感應量產生，稱為自感電勢。 $e = -L \frac{di}{dt}$

34. 互感電勢之數學式為： $e_2 = -N_2 \frac{d\phi_{12}}{dt} = -N_2 \frac{d\phi_{12}}{dt} \times \frac{di_1}{di_1} = -M \frac{di_1}{dt}$

35. 夫來明右手定則以食指指示磁場方向，姆指指示導體運動方向，中指即可指示導體感應產生之電流方向。



學後評量

EXERCISE

一、選擇題

基礎題

- () 1. 如圖 (1) 所示電路，求 a 、 b 兩端的總電感 $L_{ab} = ?$ (A)3H (B)4H (C)5H (D)6H。
- () 2. 如圖 (2)， \otimes 代表一導體且其電流流入紙面，則導體受力方向為何？ (A) 向上 (B) 向下 (C) 向左 (D) 向右。

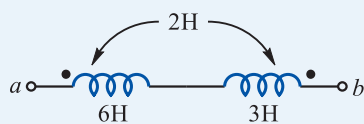


圖 (1)

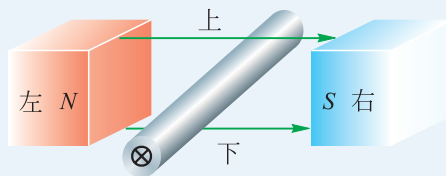


圖 (2)

- () 3. 兩線圈之耦合係數為 0.7，且其自感量各為 10mH 與 40mH，則其互感量為 (A)8mH (B)20mH (C)21mH (D)14mH。
- () 4. 有一線圈共 20 匝置於磁場中，若磁力線在 0.5 秒內由 0.1 韋伯增加至 0.4 韋伯，則此線圈之應電勢為 (A)0 (B)6 (C)10 (D)12 伏特。
- () 5. 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 100 安培及 1000 安培，則其間之作用力為多少牛頓？ (A)2 (B)4 (C)6 (D)8。
- () 6. 「感應電勢之極性恒抵制線圈原磁通量的變動」這個敘述就是 (A) 法拉第電磁感應定律 (B) 安培右手定則 (C) 冷次定律 (D) 夫來明左手定則。
- () 7. 有一個 500mH 的電感器，若通過該電感的電流在 0.5 毫秒內由 10mA 降至 5mA 時，試求電感兩端的感應電勢為多少？ (A)2V (B)4V (C)5V (D)7V。
- () 8. 長 1 米的導線以 $V(\text{m} / \text{sec})$ 的速度，垂直切割一強度為 0.5 韋伯 / 米² 之均勻磁場，產生 10 伏特之感應電動勢，則 V 為 (A)5 (B)10 (C)20 (D)25 m / sec 。

進階題

- () 1. 磁通密度的單位換算，何者正確？ (A) $1\text{Wb} / \text{m}^2 = 1\text{Gauss}$ (B) $1\text{Tesla} = 10^3\text{Gauss}$ (C) $1\text{Wb} / \text{m}^2 = 10^4\text{Tesla}$ (D) $1\text{Tesla} = 10^4\text{Gauss}$ 。
- () 2. 兩個不同磁性材料之鐵心電感 L_1 及 L_2 ，已知其鐵心上所繞之線圈匝數均為 100 匝，若分別通以 1A 之電流，其產生之磁通分別為 $\phi_1 = 1\text{mWb}$ 及 $\phi_2 = 4\text{mWb}$ ，再將此兩電感器串聯，若其磁通互助且耦合係數為 0.1，則此兩電感串聯之總電感量 $L_T = ?$ (A) 0.52H (B) 0.54H (C) 0.48H (D) 0.46H。
- () 3. 如圖 (3)，若鐵心中的 $B_c = 0.5\text{Wb} / \text{m}^2$ ，且假設鐵心與氣隙之面積相同並忽略邊緣效應，求在氣隙中之磁場強度為何？ (A) $1.78 \times 10^5 \text{At} / \text{m}$ (B) $3.98 \times 10^5 \text{At} / \text{m}$ (C) $5.64 \times 10^5 \text{At} / \text{m}$ (D) $7.13 \times 10^5 \text{At} / \text{m}$ 。

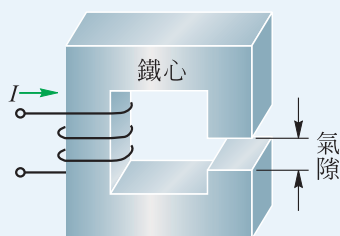


圖 (3)

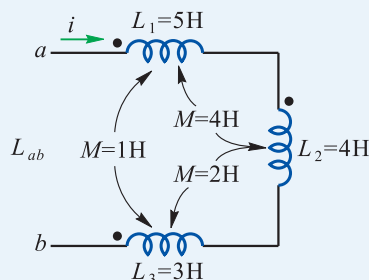


圖 (4)

- () 4. 下列有關電場與磁場的敘述，何者正確？ (A) 磁通量隨時間變化會產生電場 (B) 導線周圍一定有磁場 (C) 馬蹄形電磁鐵兩極間一定有電場 (D) 將磁鐵鋸成很多小段，可使其中一小段只帶北極。
- () 5. 如圖 (4) 所示， M 為互感量，則 L_{ab} 值為多少亨利？(H：表示亨利) (A) 10H (B) 14H (C) 18H (D) 26H。
- () 6. 如圖 (5)，若 b 為 ac 的中心抽頭，而 $L_{ac} = 8\text{H}$ ，則 $L_{ab} =$ (A) 1H (B) 2H (C) 4H (D) 8H。
- () 7. 如圖 (6)， $L_1 = 1\text{H}$ ， $L_2 = 2\text{H}$ ， $L_3 = 3\text{H}$ ， $M_{12} = 0.5\text{H}$ ， $M_{23} = 0.5\text{H}$ 及 $M_{13} = 0.2\text{H}$ ，則總電感為 (A) 4.4H (B) 5.2H (C) 6.2H (D) 7.2H。

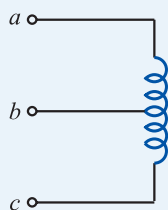


圖 (5)

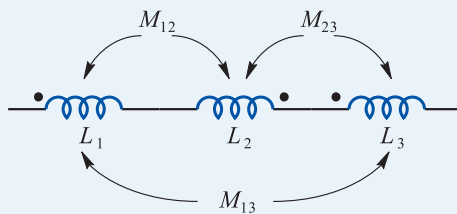


圖 (6)

- () 8. $N_1 = 200$ 匝與 $N_2 = 400$ 匝之兩線圈相鄰放置，當 N_1 線圈有 4A 電流流過時，產生 6×10^{-3} 線的磁通與 N_1 交鏈，而其中 4×10^{-3} 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。
- () 9. 兩線圈 A 和 B 分別為 300 匝及 400 匝，當 A 線圈通以 10 安培電流時，產生磁通 5×10^{-3} 線與之交鏈，若其中之 2×10^{-3} 線與 B 線圈相鏈，則兩線圈間之互感為 (A)0.08 (B)0.1 (C)0.16 (D)0.2 亨利。
- () 10. 有一線圈其匝數為 1000 匝，其電感量為 10H，若欲將自感量減為 2.5H，則應減少多少匝的線圈？ (A)500 匝 (B)750 匝 (C)250 匝 (D)100 匝。
- () 11. 如圖 (7) 所示， $a-b$ 兩端之等效電感為 (A)16.8H (B)18.8H (C)20.8H (D)22H。
- () 12. 如圖 (8) 所示，二線圈所儲存之能量為多少焦耳？當其間之互感量 M 為 4H 時 (A)82 (B)106 (C)112 (D)96 焦耳。

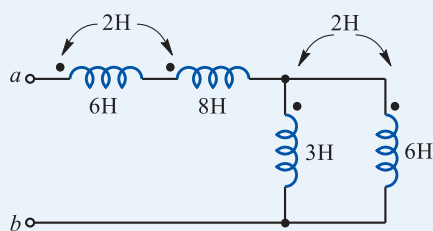


圖 (7)

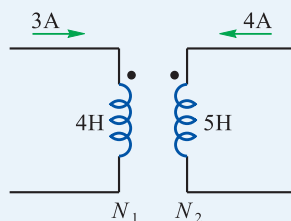


圖 (8)

- () 13. 如圖 (9) 所示， $L = 3\text{mH}$ ， $M = 1\text{mH}$ ，則輸入端等效電感 L_{ab} 為 (A)1mH (B)5 / 4mH (C)5 / 3mH (D)5 / 2mH。
- () 14. 如圖 (10) 所示，永久性磁鐵向左移動靠近線圈時，線圈感應之電勢為 (A)A 端高於 B 端 (B)B 端高於 A 端 (C)A、B 兩端電位相等 (D)A、B 兩端電動勢為 4V。

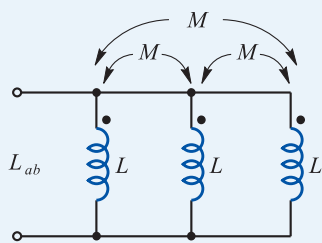


圖 (9)

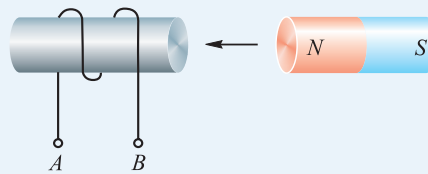


圖 (10)

應用題

- () 1. 有一 3mH 之電感器，在 $t \geq 0$ 秒時，其端電流 $i(t) = 10 - 10e^{-100t}(3\cos 200t + 4\sin 200t)$ A，則在 $t = 0$ 秒時，此電感器儲存之能量為 (A)2400mJ (B)1500mJ (C)600mJ (D)150mJ。
- () 2. 一線圈在向下磁場中往左移動，如圖 (11) 所示，則流經安培計 A 的電流方向為 (A)由左向右 (B)由右向左 (C)無電流 (D)無法判斷。

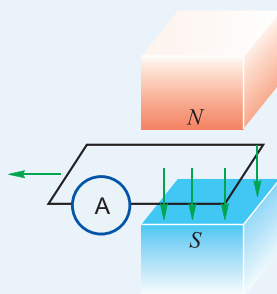
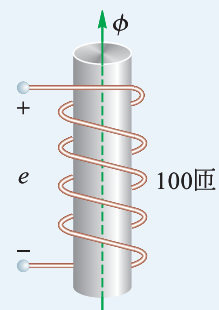


圖 (11)

- () 3. 有一 80 匝之方形線圈，具有 0.05 平方公尺之面積，今置於和磁通密度 $0.8\text{T}(\text{Wb} / \text{m}^2)$ 磁場垂直，若在 0.2 秒內轉動線圈使線圈和磁場平行，則線圈之平均感應電勢為 (A)16V (B)20V (C)40V (D)80V。

二、計算題

- 如圖所示，磁通若 0.2 秒內由 0.8 韋伯降至 0.4 韋伯 (方向不變)，且線圈匝數為 100 匝，則線圈上所感應之電勢 e 為何？
- 有一線圈，其匝數為 500 匝，若通過的磁通在 0.1 秒內由 0.4 韋伯降至 0.3 韋伯，則此線圈兩端之感應電勢為多少伏特？
- 有一個 50mH 的電感器，若通過該電感器的電流在 0.5 毫秒 (ms) 內由 10mA 增加至 50mA 時，試求電感兩端的感應電勢為多少伏特？
- 某線圈為 100 匝，通以 2 安培電流，產生 0.01 韋伯的磁通，其自感量為多少亨利？
- 兩完全相同之線圈間，若互感為 0.5 亨利，耦合係數為 0.4，則線圈之自感量為多少亨利？



6



心得筆記

NOTE

A large rectangular area with a light yellow background and a dashed orange border, intended for writing notes. The area contains 15 horizontal dashed orange lines for writing.