

電磁感應

9-1 應電動勢與冷次定律

9-2 法拉第電磁感應定律

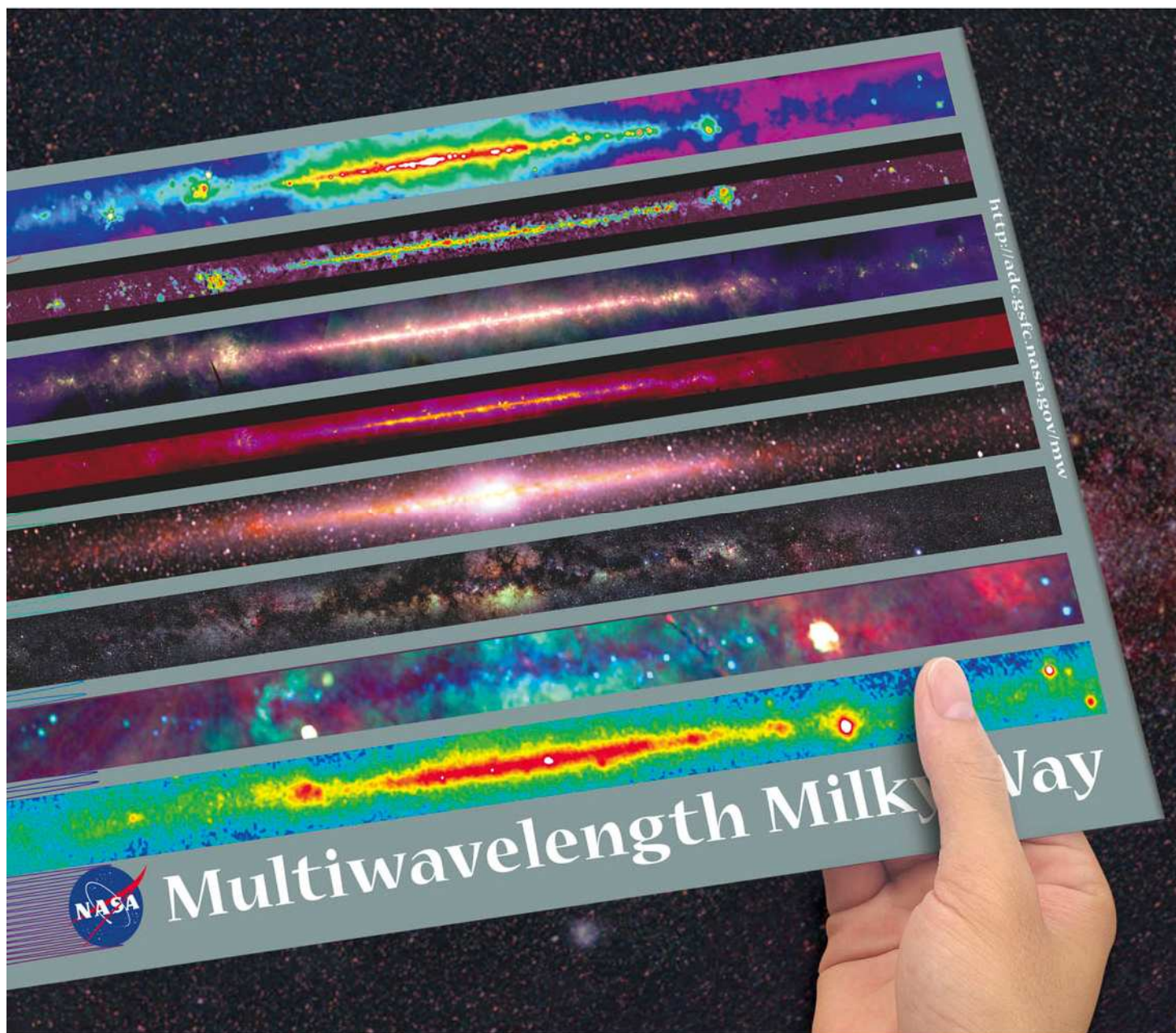
9-3 發電機與交流電

9-4 電磁感應現象的應用

9-5 電磁波



銀河系並不僅是我們在晚間用肉眼觀測到的壯麗景觀，科學家以各種不同波段的電磁波觀測銀河系時，由其呈現出不同的面貌，得以研究分析銀河系的構成及演化。



Nature has always looked like a horrible mess, but as we go along, we see patterns and put theories together; a certain clarity comes and things get simpler.

雖然大自然看起來似乎總是亂糟糟的，但當我們逐步看到各種規則並將理論予以結合時，大自然的事物就會逐漸清晰起來，也變得簡單易明。

— 費曼 (Richard P. Feynman, 1918 - 1988)

電學與磁學有相當多類似的特性，其數學關係也大致相同，使得人們感到困惑；後來又發現「由電生磁」和「由磁生電」的現象，以及這兩種現象之間的關係，更是使人們覺得撲朔迷離，科學家們經過了相當長的時間最後才終於能解開這個迷團。

前一章講述自 1820 年厄斯特發現了載流導線附近的磁針會偏轉的現象後，由電生磁現象的各種研究與實驗相繼迅速展開，並獲得了許多重要的成果。

但是在同一時期也有許多科學家競相研究電流磁效應的逆現象，試圖發現由磁生電的效應，但是所有的實驗結果最後都失敗了。問題到底是出在哪裡呢？

電流磁效應的現象在電流穩定時是很容易觀察到的；可是建立在這種基礎上，想要觀察產生逆效應的實驗中，卻不容易讓人發現到僅能在磁場變化的瞬間，才會產生由磁生電的效應。

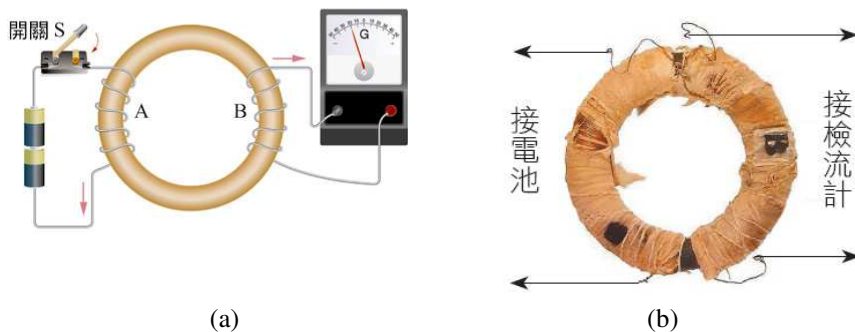
法拉第推想除了電流對磁體的作用及電流對電流的作用之外，還可能有磁對電流的作用。他認為磁鐵既然可以磁化附近的鐵塊，而電荷也可以使附近的導體帶電，所以電流也應該可以使附近的線圈感應出電流。他將磁鐵置於導線附近，不論磁鐵的磁性多強，均無法使附近的導線產生電流；又在導線上通以電流，並置於另一導線附近，但另一導線上並未出現穩定電流。法拉第曾記錄了大量的失敗結果，這些實驗進行了長達十年之久。

直到 1831 年，他才發現到產生應電流原來是一種暫態的效應，自此終於開創了電磁感應的新里程碑。本章將介紹由磁生電的電磁感應現象，以及在日常生活上一些重要的應用。

9-1 應電動勢與冷次定律

1. 法拉第的電磁感應實驗

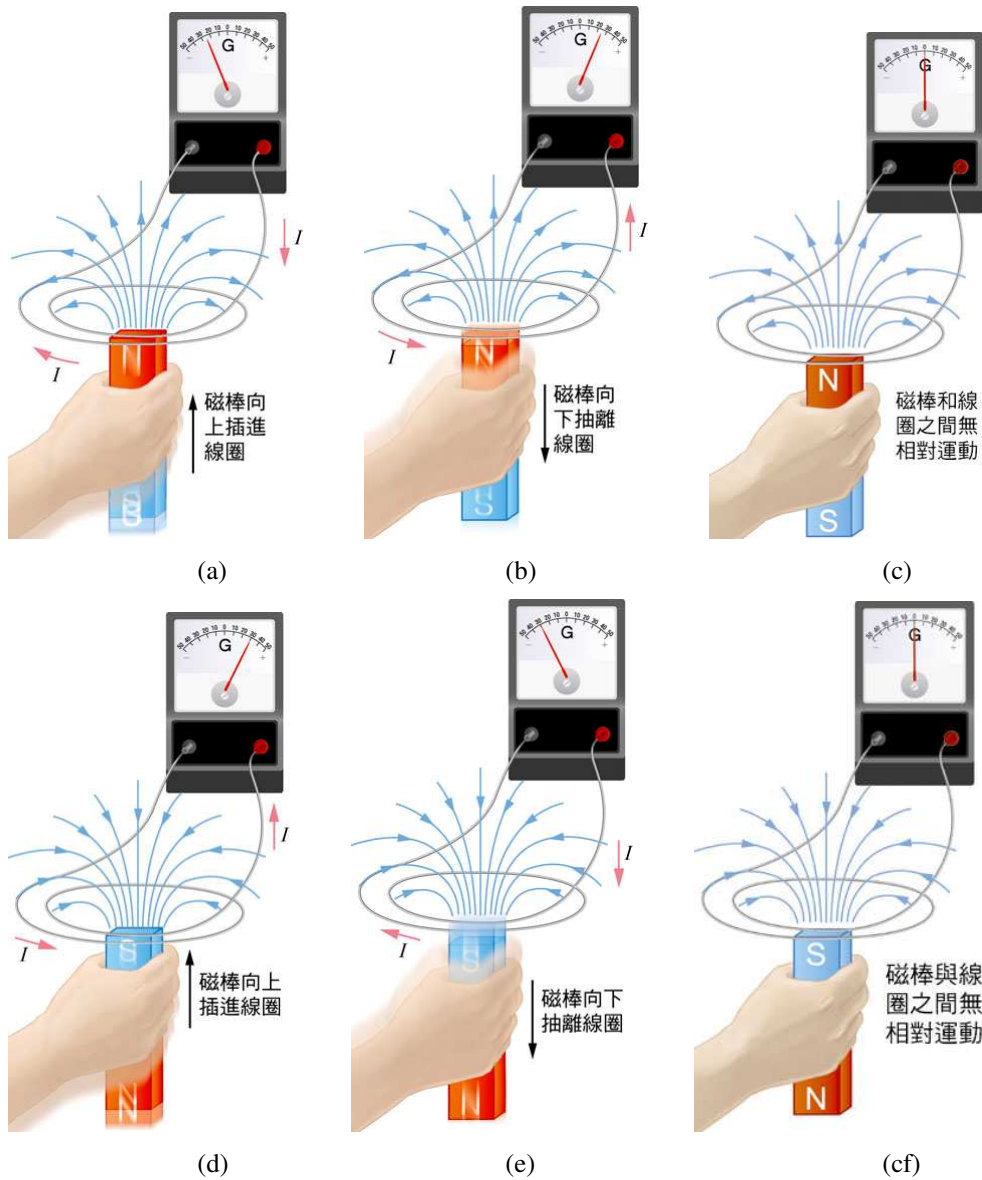
1831年8月，法拉第在一個用軟鐵作成的圓環上繞了A和B兩個線圈，A線圈與一電池連接；而B線圈則連接一指針式檢流計，如圖9-1所示。當A線圈與電池接通的瞬間，B線圈所接檢流計的指針便產生短暫的偏轉，顯示B線圈感應產生短暫的電流，稱為**應電流**（induced current）；當A線圈與電池斷開的瞬間，B線圈所接檢流計的指針也產生短暫的偏轉，但偏轉的方向相反，顯示B線圈產生短暫的反方向應電流。



▲圖 9-1 (a)法拉第的實驗裝置示意圖；(b)法拉第發現電磁感應所使用的線圈，內部是軟鐵環，外面纏繞著銅線圈，每層線圈之間還以麻線及棉布絕緣，左線圈A接電池，右線圈B接檢流計。

同年10月，法拉第將一根磁棒迅速插入線圈或從線圈中迅速拔出時，在線圈中同樣獲得了瞬間的應電流。此後，法拉第又作了一系列的實驗，取得類似的結果。同年11月，法拉第向英國皇家學會報告了他的發現，並描述了一些產生應電流的方法，確定了「由磁生電」的科學假設。法拉第將上述現象定名為**電磁感應**（electromagnetic induction），並指出電磁感應是一種暫態現象，應電流與原電流的變化有關，而不是直接與原電流本身有關。

2. 線圈與磁棒相對運動的實驗



▲圖 9-2 磁棒與線圈相對運動時，可以產生應電流：

- (a)磁棒 N 極與線圈相互接近時，線圈中將產生應電流。
- (b)磁棒 N 極與線圈相互遠離時，線圈中也會產生應電流，其方向與圖(a)相反。
- (c)磁棒 N 極與線圈沒有相對運動時，線圈中不會產生應電流。
- (d)磁棒 S 極與線圈相互接近時，線圈中將產生應電流，其方向與圖(a)相反。
- (e)磁棒 S 極與線圈相互遠離時，線圈中也會產生應電流，其方向與圖(d)相反。
- (f)磁棒 S 極與線圈沒有相對運動時，線圈中不會產生應電流。

產生應電流的方法，大致可簡化為三類。第一類實驗顯示當磁棒與線圈（或螺線管）之間發生相對運動時，線圈中便會產生應電流。

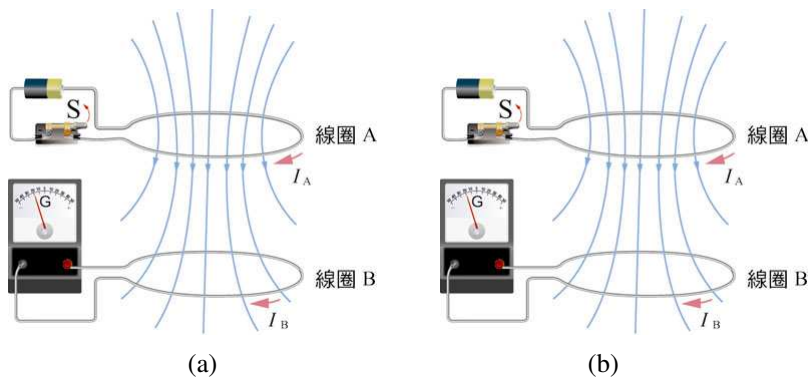
如圖 9-2(a)與圖 9-2(b)所示，當磁棒 N 極接近線圈或遠離線圈時，檢流計的指針發生偏轉，顯示線圈中會有應電流的產生，由檢流計指針的偏轉方向不同，則可顯示兩者產生應電流的方向恰相反。如圖 9-2(d)與圖 9-2(e)所示，若磁棒 S 極接近線圈或遠離線圈時，也會產生應電流，此時應電流的方向則與上述磁棒 N 極的例子又恰好相反。如果磁棒不動，而線圈運動，則線圈中也會產生對應的應電流。

再如圖 9-2(c)與圖 9-2(f)所示，磁棒與線圈沒有相對運動時，不論兩者皆為靜止，或兩者運動速度的量值及方向都相同，檢流計的指針不動，顯示線圈中都不會產生應電流。

3.線圈內磁場發生變化的實驗

第二類實驗使用線圈 A 產生磁場，代替第一類實驗的磁棒。若兩線圈並無相對運動，表示磁場與線圈並未發生相對運動，但在封閉線圈 B 所包圍的範圍內，磁場發生變化時，檢流計的指針將隨之發生偏轉，顯示線圈中產生了應電流。如圖 9-3 所示，當線圈 A 以開關 S 接通或切斷電流 I_A 的瞬間，在其下方的封閉線圈 B，皆會產生一短暫的應電流 I_B ，由檢流計指針兩次偏轉的方向恰相反，顯示前後兩次所產生應電流的方向恰相反。

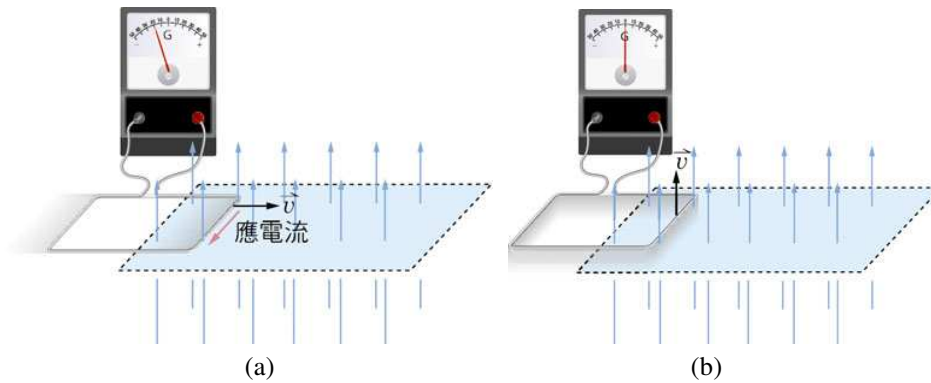
當線圈 A 的電流穩定後，檢流計的指針不再偏轉，此時不論線圈 A 上的電流有多大，線圈 B 上皆不會產生應電流。



▲圖 9-3 當線圈 A 以開關 S 接通和切斷電流 I_A 的瞬間，在其下方的另一線圈 B 會產生應電流 I_B ，但前後兩者產生應電流的方向恰相反。圖(a)接通電流瞬間；圖(b)切斷電流瞬間。

4. 導線與磁場相對運動的實驗

第三類實驗則將線圈的部分導線置於磁場中，當此段導線與磁場發生相對運動時，發現檢流計上的指針將發生偏轉，顯示線圈中產生應電流，如圖 9-4(a)；若導線與磁場沒有發生相對運動，或雖發生相對運動，但導線運動方向與磁場平行時，將不會產生應電流，如圖 9-4(b)。



▲圖 9-4 導線與磁場相對運動時產生應電流。(a)導線切割磁力線，產生應電流；(b)導線並未切割磁力線，不會產生應電流。

我們從上述這些實驗中，可以判斷電磁感應現象的產生，也可以確定應電流的方向。但是該如何解釋這些電磁感應的現象呢？這幾種產生應電流的實驗中是否有一些共通性？

5. 磁力線與磁通量

法拉第在分析了各種電磁感應的實驗後，構想了磁力線模型，來解釋電磁感應的現象。他認為無論磁鐵移近（或遠離）線圈，或是線圈移近（或遠離）磁鐵，都會使線圈內的磁力線數目發生變化；又兩相鄰的線圈之間雖然沒有相對運動，但若其中之一線圈的電流發生變化，也會使得通過另一封閉線圈內的磁力線數目發生變化。綜合而言，當一封閉線圈內的磁力線數目發生變化時，就會產生應電流，在單位時間內磁力線數目變化得愈快，則產生的應電流將愈大。

當整個線圈的某段導線在磁場中運動時，也將使線圈內的磁力線數目發生變化，線圈內將產生應電流。若線圈並非封閉迴路，則導線內將產生自由電子的移動，形成高低電位差，就好像是電池產生的電動勢一樣。此時雖有電動勢的存在，並不產生電流。這種由電磁感應所產生的電動勢，稱為**應電動勢**（induced electromotive force）。

一線圈中的磁力線數目該如何計算呢？按照法拉第的構想，磁力線的密集程度代表磁場的強弱，因此磁場的量值相當於磁力線的密度。定義一個和通過線圈的磁力線總數成正比的物理量，稱為**磁通量**（magnetic flux），並以 φ_B 表示時，若均勻磁場的方向垂直於線圈平面，則 φ_B 定義為磁場的量值和線圈面積 A 的乘積，即

$$\varphi_B = BA$$

9-1 式

式中磁通量的單位稱為韋伯（weber，簡記為 Wb），定義為 $1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot \text{m}^2$ 。按照磁通量的定義，磁場亦可稱為磁通量密度，其單位亦可寫為 Wb/m^2 ，即 $1 \text{ T} = 1 \text{ Wb}/\text{m}^2$ 。

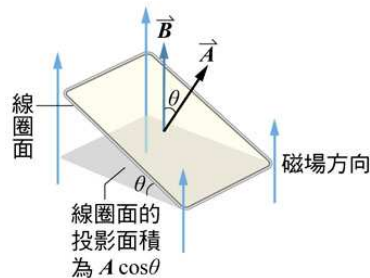
若磁場的方向並不垂直於線圈平面時，那麼通過線圈的磁通量該如何計算呢？如圖 9-5 所示，通過此線圈的磁通量 φ_B 應等於通過其投影面積（垂直於磁場方向）的磁通量，即 $\varphi_B = BA \cos \theta$ 。若定義向量的方向為線圈面的法線方向，其量值為線圈面積，則垂直於磁場的投影面積應為 $A \cos \theta$ ，此時磁通量的數學式，可以用純量積的方式表示如下

$$\varphi_B = BA \cos \theta = \vec{B} \cdot \vec{A} \quad \text{9-2 式}$$



面積的方向表示法.....

\vec{A} 的量值表示面積，其方向定義為該面積的法線方向。



▲圖 9-5 若磁場方向和線圈面的法線之間的夾角為 θ 時，則通過該線圈的磁通量 $\varphi_B = BA \cos \theta$ 。

6. 冷次定律

法拉第指出通過線圈的磁通量改變時，將會產生應電流，但應電流的方向要如何決定呢？1833 年 11 月，俄國人冷次（Heinrich Friedrich Emil Lenz, 1804-1865）歸納實驗的結果，指出由於磁通量的改變，而在封閉線圈內產生的應電動勢（或應電流）會抵抗原有磁通量的變化，稱為冷次定律。

在圖 9-2(a)中，當磁棒 N 極朝上向線圈運動時，根據冷次定律，線圈需產生一向下的磁場排斥磁棒的運動，以阻止其接近，故應電流為順時針方向。在圖 9-2(b)中，當磁棒 N 極朝下遠離線圈運動時，線圈則需產生一向上的磁場吸引磁棒，以阻止其遠離，故應電流為逆時針方向。

我們可以使用法拉第的磁力線概念，將冷次定律重新敘述如下。當磁場增強時，線圈中磁力線的數目增加，則線圈上產生應電流的方向，係使應電流所建立的磁場可以抵銷增加的磁力線數；反之，若磁場減弱時，線圈中磁力線的數目減少，則線圈上產生應電流的方向，係使應電流所建立的磁場可以增補減少的磁力線數。

1847 年德國物理學家亥姆霍茲（Hermann von Helmholtz, 1821-1894）證明了冷次定律是能量守恆律的必然結果。若應電流的方向與冷次定律所指的方向相反，將使得線圈所生的磁場不但不會抵銷原有磁力線數目的變化，反而增大其變化，這將使線圈與磁鐵間的相對運動加速，再引發更大的應電流，而更大的應電流又使兩者間的相對運動更為加速。如此交互影響下去，電流可源源不絕地產生，而電流可以作功，故能量將源源不絕地產生，顯然違背了能量守恆律。

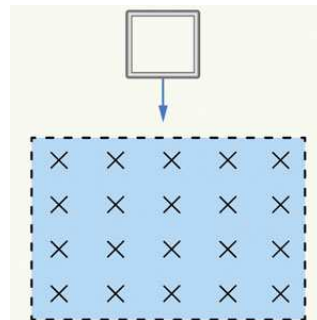
1855 年，英國物理學家馬克士威（James Clerk Maxwell, 1831-1879）將冷次定律改以磁通量的方式來描述，即一線圈中所生應電流的方向，乃欲使其所生的磁場能夠反抗線圈中原有磁通量的變化。

在圖 9-2(a)中，當磁棒 N 極朝上向線圈運動時，可使線圈內朝上方的磁通量增加。根據冷次定律，為阻止線圈內磁通量的增加，應電流須產生一朝下方的磁場，故應電流為順時針方向。在圖 9-2(b)中，當磁棒 N 極朝下遠離線圈運動時，可使線圈內朝上方之磁通量減少，故應電流應為逆時針方向，以阻止朝上方磁通量的減少。

在圖 9-3 中，當線圈 A 以開關 S 接通電源時，產生一順時針方向的電流，因此在其下方的線圈 B 內突然增加朝下方的磁通量。由冷次定律得知，為阻止線圈內磁通量的變化，應電流的方向為逆時針方向。相反地，當線圈 A 的開關切斷電流時，下方的線圈 B 內減少朝下的磁通量，為阻止其改變，應電流之方向應為順時針方向。

 想一想

1. 如圖 9-6 所示，一圈面鉛直的線圈從上方自靜止落下，途中通過一沿水平方向的均勻磁場區域，則線圈上所生應電流的方向為何？
2. 承上題，若另一相同線圈從相同高度自靜止落下，但途中並不通過磁場區域，則何者著地較快？



▲圖 9-6 一封閉線圈順著鉛直方向落下，通過一水平方向的磁場區域。

9-2 法拉第電磁感應定律

法拉第在 1831 年發表產生應電流的一些方法，並創造了磁力線的概念，雖然可以定性地描述電磁感應的現象，但是因為未能提出量化的數學表述，以致發表初期並不普遍為科學家所接受。

1845 年，德國物理學家諾伊曼（Franz Ernst Neumann, 1798-1895）從法拉第實驗和冷次定律出發，推想出電磁感應的數學表示式，式中引入應電動勢的概念。他認為應電流的產生是由應電動勢所造成的，就如同電池的電動勢可以在迴路上產生電流一樣。但若導線不能形成一個封閉迴路時，雖有電動勢的存在，在導線上仍不能出現應電流。

1. 法拉第電磁感應定律

在 1851 年，法拉第提出磁力線的概念，並用以解釋電磁感應的規律。到了 1855 年，馬克士威發表了他在電磁理論方面的第一篇論文，試圖為法拉第的磁力線模型提供數學基礎。他將諾伊曼所推想的數學式改以磁通量的方式來描述，逐漸形成了今天我們所熟知的電磁感應定律的形式，即線圈中產生的應電動勢 \mathcal{E} 等於線圈內磁通量 ϕ_B 隨時間 t 的變化率，稱為**法拉第電磁感應定律**。若在時間 Δt 內，磁通量產生的變化量為 $\Delta \phi_B$ ，在此段時間之內的平均應電動勢，常以 \mathcal{E}_{av} 或 $\overline{\mathcal{E}}$ 表示，其數學式為

$$\mathcal{E}_{av} = -\frac{\Delta \phi_B}{\Delta t} \quad \text{9-3 式}$$

若（9-3）式中的時間 Δt 很小時， \mathcal{E} 則可稱為瞬時應電動勢，其數學式為

$$\mathcal{E} = -\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \phi_B}{\Delta t} \quad \text{9-4 式}$$

(9-4) 式中的負號表示應電動勢所生成的應電流，其所形成的磁場會反抗線圈內原有磁通量的變化。若取磁通量的單位為韋伯 (Wb)，時間單位為秒 (s)，則應電動勢的單位就是伏特 (V)。



法拉第電磁感應定律的數學式

諾伊曼、馬克士威使用的數學關係式為 $\mathcal{E} = -\frac{\Delta \phi_B}{\Delta t}$



做一做

磁通量的單位為韋伯 (Wb)、時間的單位為秒 (s)，請推導證明 (9-4) 式中，應電動勢的單位為伏特 (V)。

如果封閉迴路由 N 匝線圈所組成，且通過每一匝線圈的磁通量 ϕ_B 都一樣時，則迴路上產生的總應電動勢可視為是由 N 個單匝線圈上所生成的電動勢串聯而成，即當線圈內的磁通量發生變化時， N 匝線圈兩端的應電動勢應為

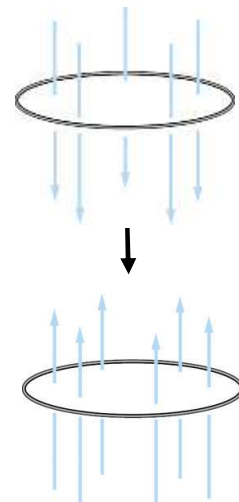
$$\mathcal{E} = -N \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \phi_B}{\Delta t}$$

9-5 式

範例 9-1

如圖 9-7 所示，一個水平放置的 100 匝圓形封閉線圈，其總電阻為 50Ω 。在線圈所包圍的面積內原有磁場的方向向下，磁通量為 $2.5 \times 10^{-5} \text{ Wb}$ ；在 0.0010 s 的時間內，線圈內的磁場突然改變方向，且磁通量改變為 $3.0 \times 10^{-5} \text{ Wb}$ ，則在此段時間內

- (1) 線圈中所產生的平均應電動勢為何？
- (2) 設此段時間內的應電流為一定，則該應電流的大小與方向為何？



▲圖 9-7

[解答] (1) 線圈中所產生平均應電動勢的大小為

$$\begin{aligned} |\mathcal{E}_{av}| &= \left| -N \frac{\Delta \phi_B}{\Delta t} \right| \\ &= 100 \times \frac{(30 \times 10^{-5} \text{ Wb}) - (-2.5 \times 10^{-5} \text{ Wb})}{0.0010 \text{ s}} \\ &= 5.5 \text{ V} \end{aligned}$$

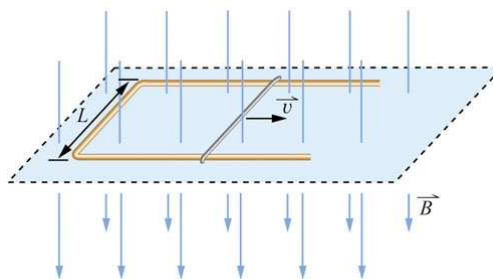
(2) 應電流的大小為

$$I = \frac{|\mathcal{E}_{av}|}{R} = \frac{5.5 \text{ V}}{50 \Omega} = 0.11 \text{ A}$$

另由冷次定律知，線圈內增加向上的磁通量時，應電流的方向應為順時針方向（由上往下看），用以反抗線圈內磁通量的變化。

範例 9-2

如圖 9-8 所示，在一磁場方向為鉛直向下的均勻磁場 \vec{B} 中，有一電阻為 R 的直導線，在一水平光滑且無電阻的固定 U 形金屬軌道上，施力使其以等速度 \vec{v} 向右滑動。若已知兩平行軌道之間的距離為 L ，則



▲圖 9-8

- (1) 在導線和 U 形金屬軌道所構成的迴路中，產生應電動勢的大小為何？
- (2) 直導線所受的磁力為何？
- (3) 欲使直導線維持等速運動，需有外力作用於直導線上，此外力所輸入的功率為何？
- (4) 直導線產生的耗電功率為何？

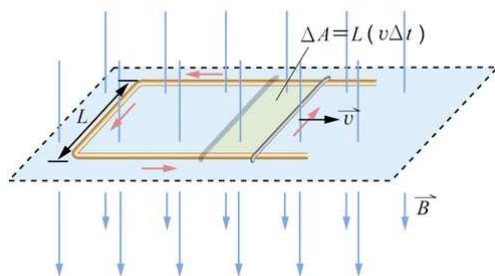
[解答] (1) 如圖 9-9 所示，在 Δt 時間內，直導線所掃過的面積為

$\Delta A = L(v\Delta t)$ ，故迴路所包圍面積中磁通量的變化量為

$$\Delta \varphi_B = B\Delta A = BL(v\Delta t)，$$

因此在迴路中所產生應電動勢的大小為

$$\mathcal{E} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \varphi_B}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{BL(v\Delta t)}{\Delta t} = vBL$$



▲圖 9-9

(2) 在迴路中所生成的應電流 $I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{vBL}{R}$ ，其方向依冷次定律可推

斷應為逆時針方向。則此段載流直導線在磁場中所受的磁力應為

$$F_B = ILB = \frac{vB^2L^2}{R}，\text{方向為向左。}$$

(3) 欲使直導線維持等速運動，所需的外力量值為 $F = F_B = \frac{vB^2L^2}{R}$ ，

方向為向右。故外力所輸入的功率為 $P = \vec{F} \cdot \vec{v} = \frac{v^2B^2L^2}{R}$ 。

(4) 直導線上因電流通過電阻產生的耗電功率為 $P' = I^2R = \frac{v^2B^2L^2}{R}$ 。



想一想

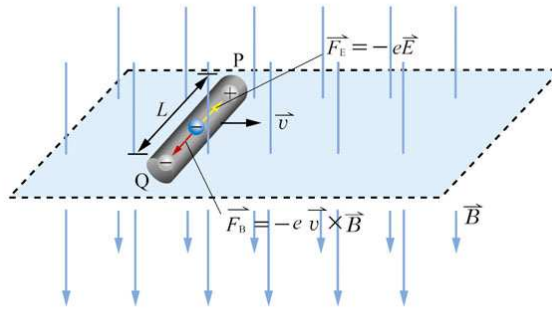
比較範例 9-2 的(3)、(4)兩小題，你認為這兩小題的答案為何相同？有何意義？

2.直導線在磁場中運動產生的應電動勢

由範例 9-2 可知，迴路中產生的應電動勢，雖是由迴路所包圍的面積中磁通量發生變化所致；但顯然也可以看成是由直導線在磁場中運動而獲得。

如圖 9-10 所示，考慮長度為 L 的一段直導線，在均勻磁場中，以等速度垂直於磁場方向及導線長度方向運動。導線內帶電荷為 $-e$ 的自由電子隨著導線在磁場中運動時，受到磁力 $\vec{F}_B = -e\vec{v} \times \vec{B}$ 的作用。此力驅動導線內的自由電子向導線的 Q 端運動，並堆積在該處，而導線 P 端則累積等量的正電荷。因此在直導線內形成了電場，其強度隨著兩端電荷的累積而增加。電子同時受到向 P 的電力和向 Q 的磁力作用，當導體內的電荷重新分布而達成平衡時，電子所受的電力和磁力必定相互抵銷，即

$$\vec{F}_E + \vec{F}_B = (-e\vec{E}) + (-e\vec{v} \times \vec{B}) = 0 \quad \text{9-6 式}$$



▲圖 9-10 直導線垂直於磁場方向運動時，會使導線內的正負電荷分離，分別堆積在其兩端，形成電動勢。

式中 \vec{E} 為導線內部在電荷平衡時所建立的電場。由上式可得

$$\vec{E} = -\vec{v} \times \vec{B} \quad \text{9-7 式}$$

此電場的量值為 $E = |\vec{E}| = vB$ 。因此直導線 PQ 兩端的電位差應為

$$V_{PQ} = V_P - V_Q = EL = vBL \quad \text{9-8 式}$$

若如圖 9-8 所示，將在磁場中運動的直導線兩端，跨接在 U 形金屬軌道上，使成一封閉迴路時，則會在迴路中產生應電流。直導線相當於一個直流電源，其 P 端為正極，而 Q 端為負極。當直導線中的可動電荷最後靜止時，其兩端之電位差即為其電動勢 \mathcal{E} ，故

$$\mathcal{E} = vBL \quad \text{9-9 式}$$

只要直導線維持等速運動，此應電動勢就繼續存在，故稱為**動生電動勢**（motional electromotive force）。當單獨一段直導線在磁場中運動時，此導線並沒有連結成為迴路，自然沒有發生被包圍的磁通量發生變化的情況；但是直導線上仍然產生應電動勢。法拉第將之解釋為**電動勢的產生可以由導線橫向切割磁力線而來**，其值等於在單位時間內所掃過的磁通量。雖然這是十九世紀的想法，但在應用上仍有一定的價值。

前述推算直導線在磁場中運動而產生應電動勢，與範例 9-2 使用迴路所包圍的面積中，磁通量發生變化而產生應電動勢，這兩種推導的方式雖然不同，但所得到的結果卻是相同。

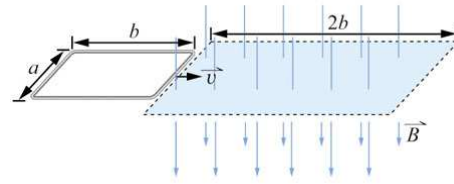


想一想

1. 在圖 9-10 中，如果直導線的運動方向和磁場方向平行，則導線上產生的電動勢為何？
2. 如果直導線的運動方向和磁場方向垂直，但導線與磁場方向平行，則導線上產生的電動勢為何？

範例 9-3

如圖 9-11，寬度為 a 、長度為 b 、電阻為 R 的矩形線圈，以等速度橫向穿過一長度為 $2b$ 的均勻磁場 B 。當線圈恰要觸及磁場的時候，開始計時，則線圈上產生的應電流 I 隨時間 t 變化的函數關係曲線為何？



▲圖 9-11

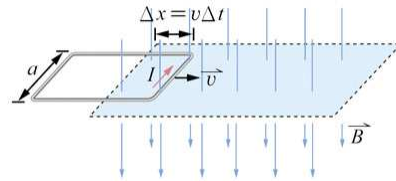
[解答] (1) 在 $0 < t < \frac{a}{v}$ 時，如圖 9-12(a)

所示：僅有部分的線圈面積進入磁場，線圈內的磁通量變化為

$$\begin{aligned}\Delta \varphi_B &= B \Delta A = B (a \Delta x) \\ &= B (a v \Delta t),\end{aligned}$$

故在線圈上所產生應電動勢的大小為

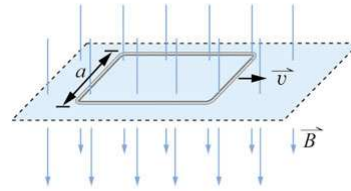
$$E = avB, \text{ 線圈上的應電流為 } I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{avB}{R}, \text{ 方向為逆時針方向。}$$



(a)

(2) 在 $\frac{b}{v} \leq t < \frac{2b}{v}$ 時，如圖 9-12(b)

所示：線圈已完全進入磁場中，線圈內的磁通量沒有任何變化，故應電動勢為零，沒有應電流產生，即 $I=0$ 。



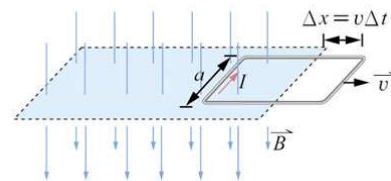
(b)

(3) 在 $\frac{2b}{v} \leq t < \frac{3b}{v}$ 時，如圖 9-12(c)

所示：已有部分的線圈面積穿出磁場之外，線圈中的磁通量變化為

$$\Delta \varphi_B = -B \Delta A = -B (av \Delta t),$$

式中負號表示磁通量減少。

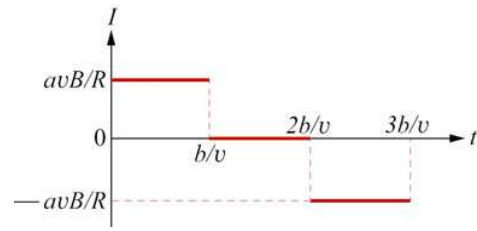


▲圖 9-12

故在線圈上所產生應電動勢的大小為 $\mathcal{E} = avB$ ，線圈上的應電流為

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{avB}{R}, \text{ 方向為順時針方向。}$$

綜合上述結果，若取逆時針方向的電流為正，順時針方向的電流為負，則線圈中電流 I 隨時間 t 的函數關係曲線，將如圖 9-13 所示。



▲圖 9-13

9-3 發電機與交流電

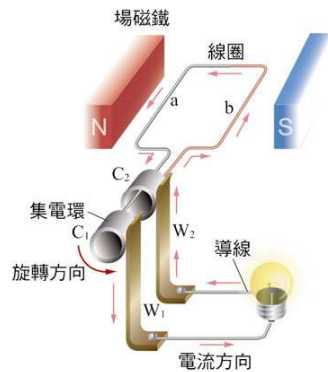
在前一章中，曾經提到電動機的工作原理為電流磁效應的應用。載流線圈在磁場中會受到磁場作用的力矩而轉動，能將電能轉變成為力學能，可以作為動力的來源，對外界作功。

發電機的作用恰與電動機相反，其工作原理則是電磁感應的應用。根據法拉第定律，線圈置於磁場中，以風力、水力、蒸汽等外力使之轉動時，線圈內的磁通量發生變化，產生應電動勢及應電流，能將力學能轉變成為電能輸出。

1. 交流發電機

發電機的基本構造和前章介紹的電動機極為相似。如圖 9-14 所示，其主要構造組件如下：

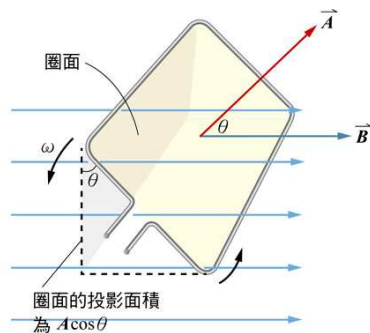
1. 場磁鐵：在永久磁鐵 N、S 兩極之間形成磁場。
2. 線圈：置於場磁鐵的兩磁極之間，轉動時其轉軸垂直於磁場。
3. 集電環 C_1 、 C_2 ：固定在線圈上的兩個圓環，隨線圈一起轉動。
4. 電刷 W_1 、 W_2 ：與集電環相接的固定接點，電流由此輸送至外電路。



▲圖 9-14 交流發電機的主要構造示意圖。

藉著外力作用，使一封閉迴路的線圈在磁場中轉動時，線圈面和磁場間的夾角不斷地改變，使得線圈面所包圍面積中的磁通量隨時間不斷地發生變化，因而在線圈上可以持續地產生應電動勢及應電流。

圖 9-15 所示為線圈在磁場中轉動時的示意圖，設線圈以角速度 ω 逆時針方向等速轉動，在某一時刻 t ，線圈面的法向量 \vec{A} 和磁場 \vec{B} 之間的夾角為 θ 。若當 $t=0$ 時， $\theta=0$ ，則 $\theta(t) = \omega t$ 。設線圈的面積為 A ，



$$\varphi_B = BA \cos \theta = BA \cos \omega t \quad \text{9-10 式}$$

▲圖 9-15 圖中黃色面積代表圈面，灰色面代表投影面積，則通過線圈每一匝截面的磁通量 $\varphi_B = BA \cos \theta$ 。

由上式知線圈內的磁通量會隨時間而改變。應電動勢係因磁通量變化而產生，由 (9-4) 式 $\mathcal{E} = -\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \varphi_B}{\Delta t}$ 知瞬時應電動勢應為 $\varphi_B - t$ 圖中切線斜率的負值，正與基礎物理漁 B 上教材「簡諧運動」的情況相當。



做一做

1. 依據 $\varphi_B = BA \cos \theta = BA \cos \omega t$ ，畫出通過每一匝線圈的磁通量對時間的函數關係圖。
2. 線圈轉動時產生的瞬時應電動勢依定義為 $\mathcal{E} = -\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \varphi_B}{\Delta t}$ ，則在 $\varphi_B - t$ 圖中，畫出函數曲線上各點的切線，估算其斜率，即可得到瞬時應電動勢的變化情況。

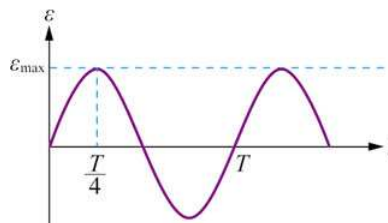
在簡諧運動中，物體的位置為 $x = r \cos \theta = r \cos \omega t$ 時，可以得到物體的速度為 $v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = -r\omega \sin \theta = -r\omega \sin \omega t$ ；則我們可以採用類比的手法，由線圈中磁通量為 $\varphi_B = BA \cos \theta = BA \cos \omega t$ ，得到產生的應電動勢為

$$\mathcal{E} = -\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \varphi_B}{\Delta t} = BA\omega \sin \theta = BA\omega \sin \omega t \quad \text{9-11 式}$$

若線圈共有 N 匝，則產生的應電動勢為

$$\mathcal{E} = NBA\omega \sin \theta = NBA\omega \sin \omega t \quad \text{9-12 式}$$

設線圈逆時針方向轉動，當 $t=0$ 時，線圈平面與磁場垂直，即面積 \vec{A} 與磁場 \vec{B} 平行，此時線圈上下的兩段導線運動方向為轉動時的切線方向，恰與磁場平行，切割磁力線的效率為零，故產生的應電動勢為零；當 $t=T/4$ 時，線圈平面與磁場平行，即面積 \vec{A} 與磁場 \vec{B}



▲圖 9-16 線圈在磁場中等速轉動時，產生的應電動勢 \mathcal{E} 對時間 t 的函數關係圖

垂直，此時線圈左右的兩段導線運動方向恰與磁場垂直，則切割磁力線的效率最大，故產生的應電動勢為最大值 \mathcal{E}_{\max} ，如圖 9-16。

(9-13) 式中，應電動勢與角速度成正比，表示線圈轉動愈快，產生的電動勢愈大；而電動勢也與線圈的匝數成正比，表示線圈的匝數愈多，產生的電動勢也愈大，這些都是在設計發電機時需要考慮的條件。

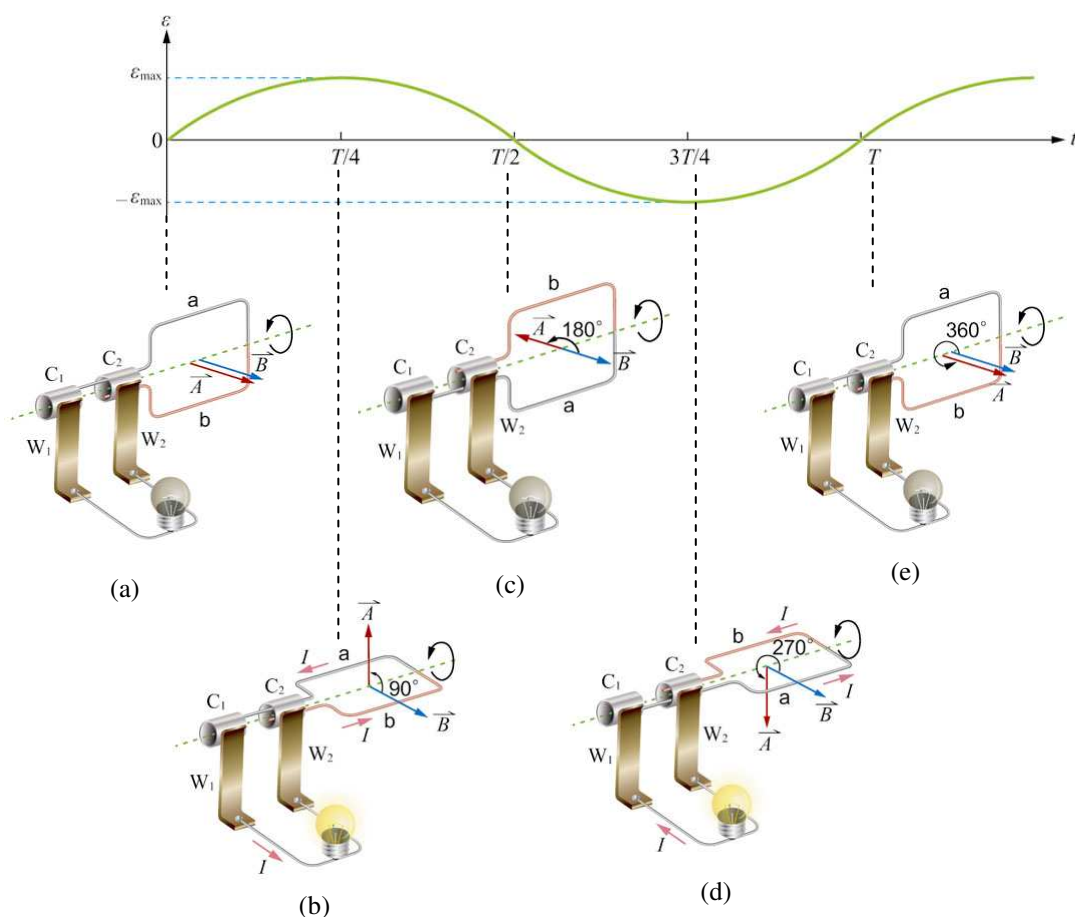
2. 交流電

由 (9-12) 式顯示，發電機所產生的應電動勢將隨時間、或隨線圈截面與磁場間角度的變動作正弦函數的變化，如圖 9-17 所示。圖中 T 為線圈的轉動週期，其變化的情形為：(1) 當 $t=0$ 時，線圈面與磁場恰相垂直，即 $\theta = 0^\circ$ ，線圈上產生的應電動勢為零，如圖 9-17(a)；(2) 當 $t=T/4$ 時，線圈面與磁場平行，即 $\theta = 90^\circ$ 時，線圈上產生的應電動勢為最大，其值為 \mathcal{E}_{\max} ，如圖 9-17(b)；(3) 當 $t=T/2$ 時，線圈面與磁場又恰相垂直，即 $\theta = 180^\circ$ ，線圈上產生的應電動勢為零，如圖 9-17(c)；(4) 當 $t=3T/4$ 時，線圈面與磁場再度平行，即 $\theta = 270^\circ$ 時，線圈上產生的應電動勢為最大，其值為 \mathcal{E}_{\max} ，但方向相反，如圖 9-17(d)；到達 $t=T$ 以後，如圖 9-17(e)，繼續重複相同的變化情況。

請注意 9-17(b) 圖及 (d) 圖中，線圈兩側 a、b 段所標註的電流方向。在 $t=T/4$ ，即 $\theta = 90^\circ$ 時，線圈上 b 段產生的應電流方向為向右後方，如圖上的紅色箭頭方向所示，則電流的方向自電刷 W_2 流向集電環 C_2 ，進入線圈 b 段；而 a 段產生的應電流方向為向左前方，如紅色箭頭方向所示，則電流的方向自集電環 C_1 流向電刷 W_1 ，進入燈泡。

但在 $t=3T/4$ ，即 $\theta=270^\circ$ 時，線圈恰又轉動了半圈，此時線圈上 a 段產生的應電流方向為向右後方，如圖 9-17 上的紅色箭頭方向所示，則電流的方向自電刷 W_1 流向集電環 C_1 ，進入線圈 a 段；而 b 段產生的應電流方向為向左前方，如紅色箭頭方向所示，則電流的方向自集電環 C_2 流向電刷 W_2 ，進入燈泡。

當線圈在磁場中轉動時，每轉動半圈（即轉動 180° ），線圈內的電流即改變方向一次，所輸出電流的方向交替變換，故稱為交流電。此種發電機則稱為交流發電機（alternating-current generator，簡稱 ac generator）。



▲圖 9-17 交流發電機所產生應電動勢對時間的關係圖。(a) $t=0$ 線圈中產生的感應電動勢為零；(b) $t=T/4$ 線圈中產生的應電動勢為極大，應電流的方向自電刷 W_2 進入線圈、自電刷 W_1 流出，進入燈泡；(c) $t=T/2$ 線圈中產生的應電動勢為零；(d) $t=3T/4$ 線圈中產生的應電動勢為極大，應電流的方向自電刷 W_1 進入線圈、自電刷 W_2 流出，進入燈泡；(e) $t=T$ 線圈中產生的應電動勢再度為零。



想一想

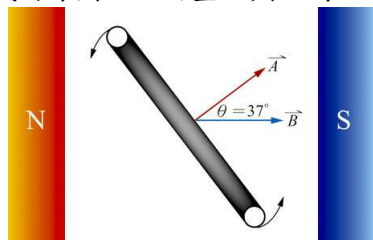
請以導線在磁場中運動的觀點，解釋線圈在磁場中轉動時：

1. 當線圈面與磁場垂直時，通過的磁通量為最大，但為何產生的應電動勢為零？
2. 當線圈面與磁場平行時，通過的磁通量為零，但為何產生的應電動勢最大？

範例 9-4

圖 9-18 所示為發電機的示意圖，線圈共有 200 匝，線圈面積為 0.040 m^2 ，在量值為 0.050 T 的均勻磁場中，以每分鐘 600 轉的固定轉速逆時針等速轉動。今將發電機線圈連接一電阻為 25Ω 的燈泡，並假設線圈的電阻可以忽略不計，則

- (1) 此發電機產生的最大應電動勢為何？
- (2) 當發電機的線圈面法向量 \vec{A} 與磁場 \vec{B} 的夾角為 37° 時，所產生的瞬時應電流為何？



▲圖 9-18

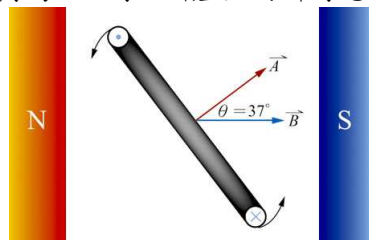


圖 9-19

[解答] (1) 由 (9-12) 式可得線圈所生的最大應電動勢為

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{\max} &= NBA\omega \\ &= 200 (0.050 \text{ T}) (0.040 \text{ m}^2) \left(2\pi \times \frac{600}{60} \text{ s}^{-1} \right) = 25 \text{ V} \end{aligned}$$

(2) 利用 (9-12) 式可得線圈所生的瞬時應電動勢為

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= NBA\omega \sin \theta \\ &= 200 (0.050 \text{ T}) (0.040 \text{ m}^2) \left(2\pi \times \frac{600}{60} \text{ s}^{-1} \right) \times \frac{3}{5} \\ &= 15 \text{ V} \end{aligned}$$

則瞬時應電流的量值為 $i = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{15 \text{ V}}{25 \Omega} = 0.60 \text{ A}$ ，其方向則如圖 9-19 所示。

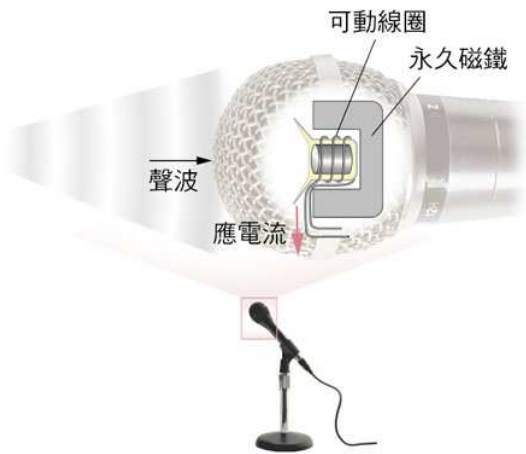
9-4 電磁感應現象的應用

在日常生活中，電磁感應現象的應用甚廣，以不同的技術設計可形成不同的應用產品，除了前節介紹的發電機之外，還有動圈式麥克風、變壓器、電吉他及電磁爐、金屬探測器等，茲舉數例如下。

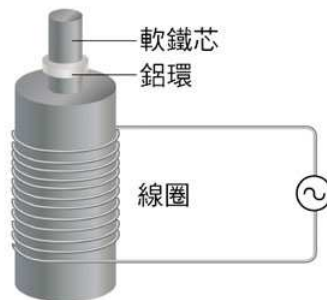
如圖 9-20 所示，動圈式麥克風內，可動線圈套在圓柱形永久磁鐵上，而前端的振動膜片則與可動線圈連結。對著麥克風講話時，聲波的壓力變化使膜片振動，則可動線圈將在永久磁鐵的磁場內振動，切割磁力線，對應於聲波產生相應頻率與強度的應電流。

此電流訊號傳送至揚聲器，則是電流磁效應的應用（如第八章所介紹），即可以使線圈連動膜片振動，發出聲音。

如圖 9-21 所示，當線圈與交流電源連接時，在線圈內產生上下變化的磁場，可以使頂端的鋁環內產生應電流。因為應電流的磁場方向與線圈的磁場方向恰相反，使鋁環被線圈的磁力推斥，可以懸浮在線圈上方。



▲圖 9-20 動圈式麥克風構造示意圖。



▲圖 9-21 線圈通有交流電時，鋁環內產生的應電流使鋁環與線圈互相排斥。



想一想

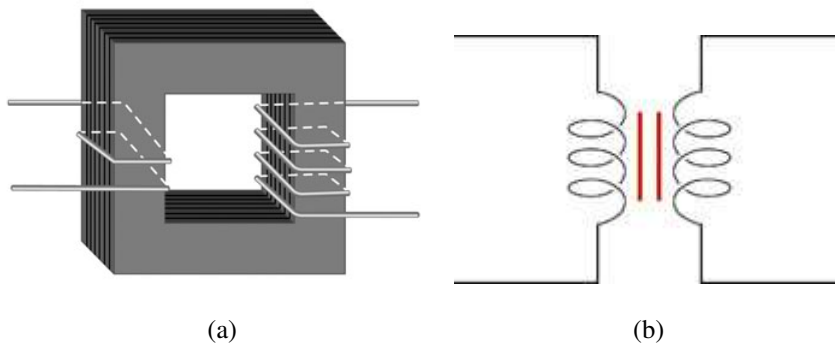
若將上述例子中的線圈連接直流電源及開關時，如圖 9-22 所示。當開關接通瞬間，為何套在軟鐵芯上的鋁環會向上彈起又再落下？

►圖 9-22 開關接通瞬間，線圈上方的鋁環會向上彈起又再落下。



1. 變壓器

法拉第定律的重要應用產品，除了發電機之外，另一個就是變壓器。變壓器是一種能將電壓升高或降低的裝置，其構造和電路符號如圖 9-23 所示。兩組匝數不同的線圈纏繞在同一個軟鐵芯上，作為輸入的線圈稱為主線圈（primary coil），輸出的線圈則稱為副線圈（secondary coil）。



▲圖 9-23 變壓器由主線圈與副線圈所組成，(a)變壓器的構造示意圖；(b)變壓器的電路符號。

當交流電輸入主線圈時，線圈中所產生的磁場使軟鐵芯磁化，由於磁力線被限制在軟鐵芯內部並形成封閉曲線，因此通過副線圈的磁通量變化情況將會和主線圈相同。兩組線圈中每匝線圈內磁通量的時變率均

為 $\frac{\Delta \phi_B}{\Delta t}$ 。

若 N_1 、 N_2 分別表示主線圈和副線圈的匝數，根據法拉第定律，主線圈的輸入電壓 \mathcal{E}_1 和副線圈的輸出電壓 \mathcal{E}_2 分別為

$$\mathcal{E}_1 = -N_1 \frac{\Delta \phi_B}{\Delta t}$$

$$\mathcal{E}_2 = -N_2 \frac{\Delta \phi_B}{\Delta t}$$

兩式相除可得

$$\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

9-13 式

上式表示兩線圈的電壓與其匝數成正比。由此可知，改變副線圈和主線圈的匝數比，可以改變輸出電壓和輸入電壓的比值。如果副線圈的匝數大於主線圈的匝數，可以使得輸出電壓升高，稱為升壓變壓器；反之，若副線圈的匝數較少，則使得輸出電壓降低，稱為降壓變壓器。



想一想

將穩定直流電輸入變壓器時，可否使得電壓改變？

在使用時若變壓器沒有能量的損失，即變壓器的輸入功率 P_1 應等於其輸出功率 P_2 時，此變壓器稱為理想變壓器。假設主線圈與副線圈中的電流分別為 I_1 與 I_2 ，則 $P_1 = P_2$ ，即

$$\mathcal{E}_1 I_1 = \mathcal{E}_2 I_2$$

9-13 式

得

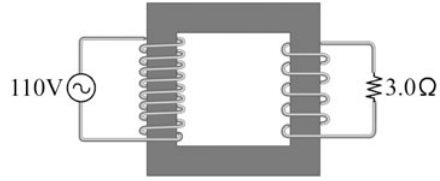
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

9-15 式

上式表示兩線圈的電流與其匝數成反比。

範例 9-5

圖 9-24 所示為一理想變壓器電路的示意圖，其主線圈匝數為 $N_1=4400$ 匝，副線圈匝數為 $N_2=120$ 匝。若輸入主線圈交流電的電壓為 $\mathcal{E}_1=110\text{ V}$ ，而將副線圈的輸出端與 $R=3.0\Omega$ 的電阻器連接，則



▲圖 9-24

- (1) 副線圈及主線圈上的電流各為何？
- (2) 電源輸入變壓器的供電功率為何？
- (3) 外接電阻器的耗電功率為何？

[解答] (1) 參由 (9-13) 式推知，副線圈上的輸出電壓為

$$\mathcal{E}_2 = \mathcal{E}_1 \times \frac{N_2}{N_1} = (110\text{ V}) \times \frac{120}{4400} = 3.0\text{ V}$$

副線圈上的電流為

$$I_2 = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{3.0\text{ V}}{3.0\Omega} = 1.0\text{ A}$$

應用 (9-15) 式可得流經主線圈的電流為

$$I_1 = I_2 \times \frac{N_2}{N_1} = (1.0\text{ A}) \times \frac{120}{4400} = 0.027\text{ A}$$

- (2) 電源輸入變壓器的供電功率應等於變壓器的輸入功率，則

$$P_1 = \mathcal{E}_1 I_1 = (110\text{ V}) (0.027\text{ A}) = 3.0\text{ W}$$

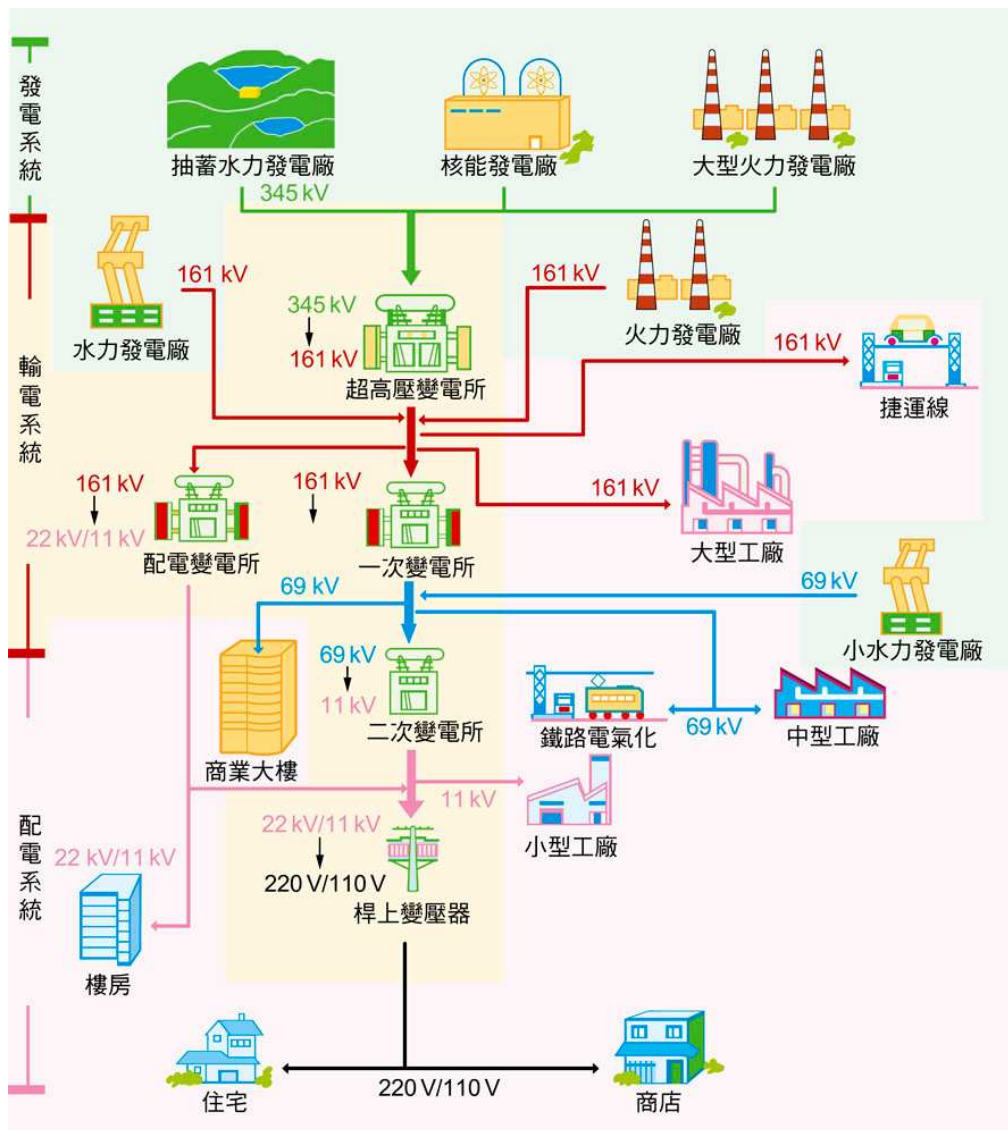
- (3) 外接電阻器的耗電功率應為

$$P_2 = \mathcal{E}_2 I_2 = (3.0\text{ V}) (1.0\text{ A}) = 3.0\text{ W}$$

理想變壓器的輸入功率應等於輸出功率，即外接電阻器的耗電功率，故(2)與(3)的答案應相同。

2.高壓輸電系統

以各種不同電壓的線路將發電廠、變電所與用戶聯繫成為一個電力輸配網絡，稱為電力系統，或電力網，圖 9-25 為臺灣電力公司的電力系統圖。



▲圖 9-25 臺灣電力公司電力系統圖

將發電廠產生的交流電升壓至 345 kV，輸出至高壓輸配線路中；在到達用戶端時，將電壓降至 161 kV，即可送至大型工廠及捷運線使用；另一部分再降壓至 69 kV，可送至中型工廠或鐵路電氣化使用；其後再降壓至 22 kV 或 11 kV，送至商業大樓及路邊變壓箱；最後降壓至 220 V 及 110 V，送至商店及住宅。

由 (9-15) 式知，流經兩線圈的電流與其電壓成反比，即升高電壓時，是電流較小，這正是發電廠將電力輸送至用戶的過程中要將電壓升高的原因。因為在長距離電力傳輸時，將電壓盡量升高，可使導線中的電流減小，如此在傳輸導線上耗損的電功率即可儘量降低。



想一想

由變壓器的原理可知，輸出電壓升高時，輸出電流應減小。在考慮輸出線路的耗損功率時，若使用 $P=I^2R$ 計算，可以發現電流減小，耗損功率會減小；但若使用 $P=V^2/R$ 計算時，發現電壓升高，耗損功率反而會增大。何以兩種結論彼此矛盾，到底哪一個對？問題出在哪裡？

9-5 電磁波

在前幾章中，分別介紹了電磁學的幾個重要的定律。透過這些定律，我們知道靜止電荷在空間中能產生穩定的電場；均勻分布的電荷以等速在導線中運動時，將形成穩定的電流，則在周圍的空間產生穩定的磁場。在這兩種情況中，空間中各點的電場強度或磁場強度都恆為一定，並不會發生變化。但是當電荷作加速運動或電流不穩定而發生變化時，將會產生什麼現象呢？

由本章所介紹的法拉第電磁感應定律知，若通過線圈中的磁場隨時間而變動時，在導線中會產生應電動勢，表示在空間中將產生應電場。換句話說，隨時間而變的磁場會產生電場。馬克士威推想隨時間而變的電場也能產生磁場，並統整了電學與磁學的相關定律，在 1864 年發表描述電學與磁學的四個方程式，被後人稱之為馬克士威方程式（Maxwell's equations），建構成電磁學理論的核心內容。



穩定的電場與磁場不會產生電磁波.....
依電場或磁場都恆為一定，不會發生變化，因此就不會觀察到引起波動的現象。

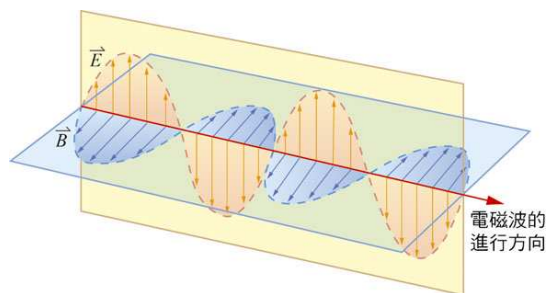
1. 電磁波的產生

馬克士威在 1861 年發表有關電學的研究論文《論物理力線》，對變化的磁場能產生應電動勢的現象作了深入的分析，認為即使沒有實際的線圈或迴路存在，變化的磁場在周圍的空間也會激發出應電場。這個應電場的存在，導致了導線上產生應電動勢，若導線形成迴路時，其上才會有應電流的出現。

在 1864 年馬克士威發表了《電磁場的動力學理論》，有系統的總結了庫倫、安培、法拉第以及他自己的研究成果，推出著名的馬克士威方程式，不但說明了電磁場理論，也預言了電磁波的存在。

什麼是電磁波呢？電磁波係依據電磁感應原理，在空間變化的電場與磁場交互相生而傳遞的電磁場波動現象。當電荷振盪運動或電流隨時間而變時，所產生的電場與磁場也會隨時間而變。因為隨時間變動的磁場會生成電場，而隨時間變動的電場也同樣會產生磁場，兩者交互影響，向外傳播出去，便產生了電磁波。馬克士威推算出電磁波可在真空中傳播，不需要依靠介質，其傳播速率為 3×10^8 m/s，恰和真空中的光速相等，故認為光是一種電磁波。

由馬克士威的電磁理論可知，電磁波是電場和磁場振盪產生的擾動現象，如圖 9-26 所示，圖中電場和磁場的向量積 ($\vec{E} \times \vec{B}$) 的方向，為電磁波的行進方向，而電場與磁場的振動方向皆與波的行進方向垂直，因此我們可將電磁波視為橫波。當電荷以某一頻率振盪時，產生相同頻率的電磁波，而電磁波在真空中傳播時，其速率恆為一定值，與頻率無關。



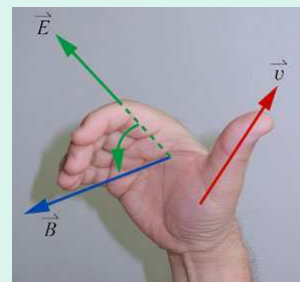
▲圖 9-26 電磁波之電場、磁場和行進方向關係圖。

在 1886 至 1888 年期間，德國物理學家赫茲（Heinrich Rudolph Hertz, 1857-1894）在實驗室中進行了一系列的實驗，以簡單的電流振盪裝置產生了電磁波，並證實電磁波有反射、折射、繞射及偏振等現象，與光波有類似的性質，驗證了馬克士威的電磁理論。



電磁波方向的判定

電磁波為橫波，其電場方向、磁場方向和傳播方向三者恆相互垂直。這三個方向間的關係，可以使用右手來判定。將右手掌張開，五指手指在同一平面上，並使大拇指伸直且與其他四指垂直。再將四指彎曲，由電場的方向彎向磁場的方向時，則大拇指所指的方向就是電磁波傳播速度的方向，如圖 9-27 所示。

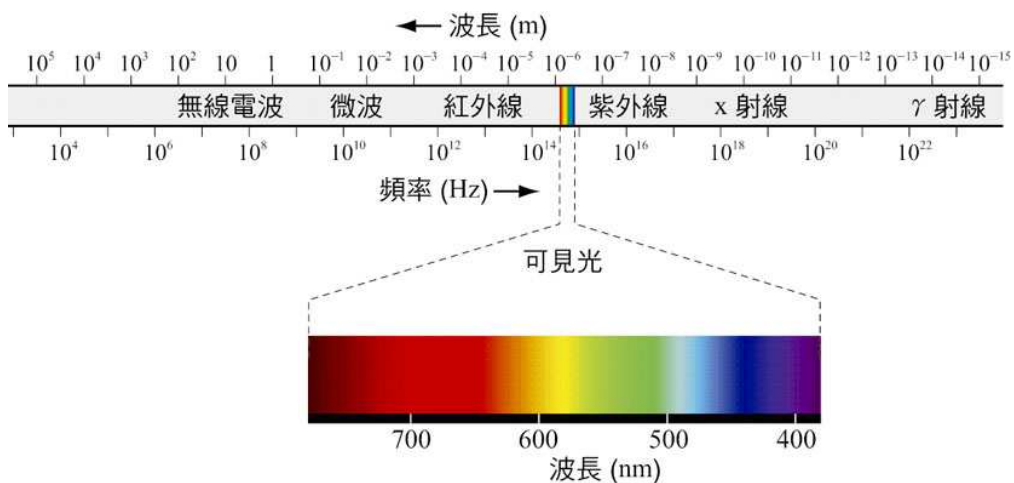


▲圖 9-27 用右手判斷電磁波的電場、磁場及行進的方向。

從 1895 年起，義大利人馬可尼（Guglielmo Marconi, 1874-1937）致力於研究電磁波的發射與接收，並大幅改進赫茲的實驗儀器。在 1901 年，他成功地傳送無線電橫越大西洋，開始電磁波的實際應用，並於 1914 年，在義大利建立了一所無線電報站。今日我們所接收的廣播、無線電視和無線通訊，都是由振盪電流或振盪電壓所產生的電磁波。

2. 電磁波譜

電磁波的頻率範圍或波長範圍均甚廣，因產生的原因及方式不盡相同，大致上可以區分為無線電波、微波、紅外線、可見光、紫外線、X 射線及 γ 射線等不同的波段，其頻率範圍並無明確的分界線。圖 9-28 表示電磁波各個波段的頻率或波長的分布，稱為**電磁波譜**（spectrum of electromagnetic wave）。



▲圖 9-28 電磁波譜

1. 無線電波

無線電波（radio wave）又稱為射電波或射頻波，是由交流振盪電路產生的電磁波。常見的無線電波可依波長的長短區分為長波、中波、短波及超短波等波段，其頻率約介於 3 kHz 至 300 MHz 之間，波長則介於 100 公里至 1 公尺之間。無線電波多應用於廣播、電視、行動電話等無線通訊，以及雷達定位、距離量測等用途，與日常生活有密切的關係。

2. 微波

微波 (microwave) 是頻率約介於 3×10^8 Hz 至 3×10^{11} Hz 之間的電磁波，波長則約介於 1 公尺至 1 毫米之間。微波較紅外線或雷射不易為環境所干擾，常應用在雷達、衛星通訊 (圖 9-29)。微波能量可以產生熱效應，故常應用於微波爐 (圖 9-30)。



▲圖 9-29 中華電信的微波發射站



(a)



(b)

▲圖 9-30 由微波爐內部的磁控管發出微波，圖(a)為微波爐，圖(b)為其內部的磁控管。

3. 紅外線

紅外線 (infrared, 簡寫為 IR) 主要是由常溫下物體的熱輻射所產生，又稱為熱射線，其頻率約介於 3×10^{11} Hz 至 4×10^{14} Hz 之間，波長則約介於 1000 微米至 0.7 微米之間，因頻率低於紅光而得名。常作為家用電熱器或烤箱的熱源，也應用在遙控、偵測、及紅外線攝影等 (圖 9-31)。



▲圖 9-31 紅外線攝影照片，圖中頭髮藍色部分表示溫度較低；背部紅色部分表示溫度較高、白色部分表示溫度更高。

4. 可見光

可見光 (visible light) 為人類肉眼可見的電磁波，其頻率約介於 3.9×10^{14} Hz 至 7.9×10^{14} Hz 之間，波長則約介於 780 奈米至 380 奈米之間。由紅、橙、黃、綠、藍、紫等色光依波長由長而短分布，在電磁波譜中僅占相當狹窄的範圍，見圖 9-28。藉著可見光的觀察，讓我們可以看見這五彩繽紛的世界。

5. 紫外線

紫外線（ultraviolet，簡寫為 UV）是波長小於可見光的電磁波，可由高溫物體（如太陽）或氣體放電管等發出，在地球表面的紫外線大多是來自太陽。其頻率約介於 7.5×10^{14} Hz 至 3×10^{16} Hz，波長則約介於 400



▲圖 9-32 紫外線殺菌燈

奈米至 10 奈米之間，因頻率高於紫光而得名。紫外線照射物體時可引起光化學反應，故又稱為化學線，為傷害性的電磁輻射，會引起細胞病變，故常用於殺菌（圖 9-32）。

6. X 射線

X 射線（X-ray，或 X 光）通常由高電壓的氣體放電管中，由加速的電子撞擊金屬靶產生，其頻率約介於 3×10^{16} Hz 至 3×10^{19} Hz 之間，波長則約介於 10 奈米至 0.01 奈米之間，因發現初期並不明瞭該射線的性質，故名之為 X 射線。因可穿透肌肉、黑布，但無法穿透骨骼及厚金屬板，常使用於醫學診斷（圖 9-33）。又因為 X 射線的波長與晶體內原子之間的距離接近，故常用來研究晶體的結構。



▲圖 9-33 小腿骨折的 X 光照片

7. γ 射線

γ 射線（ γ -ray 或 gamma ray）通常由放射性元素在原子核衰變或分裂時所放射，是波長最短的電磁波，其頻率高於 10^{20} Hz，波長極短，因此能量極大，穿透力很強，可以殺死癌細胞，故可作為放射醫學之用；但也因為會引起細胞突變、以致破壞造血功能或引起癌症。

紫外線、X 射線及 γ 射線均為對人體有危險性的電磁波，因為可以使原子或分子游離，故稱為游離輻射。

本章學習重點

Chapter Summary

9-1 應電動勢與冷次定律

1. 法拉第發現由磁生電的電磁感應現象，並指出電磁感應是一種暫態現象，應電流的產生與磁場的變化有關；由電磁感應所產生的電動勢，稱為應電動勢。
2. 產生應電流的方法，大致可以簡化分成三類：線圈與磁場作相對運動、線圈內磁場發生變化及導線與磁場作相對運動。
3. 當磁棒與線圈（包括迴線或螺線管）之間發生相對運動時，不論是磁棒在運動，或是線圈在運動，線圈中都會產生應電流。若磁棒與線圈沒有相對運動時，不論兩者皆為靜止，或兩者運動速度的量值及方向都相同，線圈中都不會產生應電流。
4. 在線圈 A 以開關接通或切斷電流瞬間，使附近的線圈 B 所包圍的面積內，磁場發生變化時，線圈 B 上將產生應電流。當線圈 A 的電流穩定後，不論電流的大小如何，皆不能使線圈 B 產生應電流。
5. 將線圈的部分導線置於磁場中，當此段導線與磁場發生相對運動時，線圈中產生應電流。
6. 法拉第構想了磁力線模型，來解釋電磁感應的現象，當一封閉線圈內的磁力線數目發生變化時，就會產生應電流。
7. 若均勻磁場的方向垂直於線圈平面，則磁通量 ϕ_B 定義為磁場的量值 B 和線圈面積 A 的乘積，即 $\phi_B = BA$ ，其單位為韋伯（Wb）；若磁場的方向並不垂直於線圈平面時，則磁通量為 $\phi_B = BA \cos \theta = \vec{B} \cdot \vec{A}$ 。
8. 冷次定律：由於磁通量的改變而在封閉線圈內產生的應電動勢（或應電流），會抵抗原有磁通量的變化。
9. 亥姆霍茲證明了冷次定律是能量守恆律的必然結果。

9-2 法拉第電磁感應定律

10. 法拉第電磁感應定律：線圈中產生的應電動勢 \mathcal{E} ，等於線圈內磁通量 ϕ_B 隨時間 t 的變化率。
11. 平均應電動勢：在時間 Δt 內，磁通量產生的變化量為 $\Delta \phi_B$ ，則在此段時間內的平均應電動勢為 $\mathcal{E}_{av} = -\frac{\Delta \phi_B}{\Delta t}$ 。
12. 瞬時應電動勢：上式中的時間 Δt 很小時， \mathcal{E} 稱為瞬時應電動勢，即

$$\mathcal{E} = -\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \phi_B}{\Delta t}。$$

13. 直導線垂直於磁場，其運動方向垂直於磁場方向及導線長度方向時，法拉第將之解釋為導線橫向切割磁力線，並因此產生電動勢。若導線長度為 L ，磁場的量值為 B ，導線的橫向運動速率為 v ，則產生的應電動勢為 $\mathcal{E} = vBL$ 。

9-3 發電機與交流電

14. 發電機的工作原理是電磁感應的應用。根據法拉第定律，線圈置於磁場中，以風力、水力、蒸汽等外力使之轉動時，線圈內的磁通量發生變化，產生應電動勢及應電流，能將力學能轉變成為電能輸出。
15. 發電機的主要構造組件為場磁鐵、線圈、集電環及電刷。藉著外力作用，使線圈在磁場中轉動時，線圈面和磁場間的夾角不斷地改變，使得線圈面所包圍面積中的磁通量隨時間不斷地發生變化，因而在線圈上可以持續的產生應電動勢及應電流。
16. 若磁場的量值為 B ，線圈的面積為 A ，轉速為 ω ，則每一匝線圈中的磁通量為 $\varphi_B = BA \cos \omega t$ ，產生的應電動勢為 $\mathcal{E} = BA\omega \sin \omega t$ ，若線圈共有 N 匝，則產生的應電動勢為 $\mathcal{E} = NBA\omega \sin \omega t$ 。
17. 應電動勢與線圈的轉速成正比，表示線圈轉動愈快，產生的電動勢愈大；而電動勢也與線圈的匝數成正比，表示線圈的匝數愈多，產生的電動勢也愈大。
18. 發電機所產生的應電動勢將隨時間或隨線圈平面的方向與磁場間角度的變動作正弦函數的變化，當線圈在磁場中轉動時，每轉動半圈（ 180° ），線圈內的電流即改變方向一次，所輸出電流的方向交替變換，故稱為交流電。此種發電機則稱為交流發電機。

9-4 電磁感應現象的應用

19. 在日常生活中，電磁感應現象的應用甚廣，以不同的技術可設計成不同的應用產品，例如發電機、動圈式麥克風、變壓器、電磁爐及金屬探測器等。
20. 對著動圈式麥克風講話時，聲波的壓力變化使膜片振動，則可動線圈將在永久磁鐵的磁場內振動，切割磁力線，對應於聲波產生相應頻率與強度的應電流。
21. 變壓器是一種能將電壓升高或降低的裝置，其構造為兩組匝數不同的線圈纏繞在同一個軟鐵芯上，作為輸入的線圈稱為主線圈，輸出的線圈則稱為副線圈。
22. 變壓器中兩線圈的電壓與其匝數成正比，即 $\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{N_1}{N_2}$ 。
23. 理想變壓器在使用時沒有能量的損失，即變壓器的輸入功率 P_1 等於其輸出功率 P_2 ，則 $P_1 = P_2$ ，故 $\frac{I_1}{I_2} = \frac{\mathcal{E}_2}{\mathcal{E}_1} = \frac{N_1}{N_2}$ 。

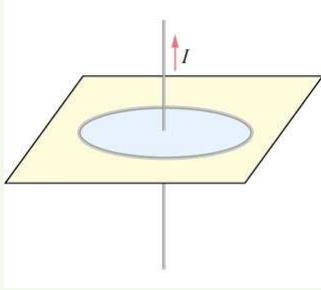
24. 發電廠將電力輸送至用戶的過程中要將電壓升高，可使導線中的電流減小，如此在傳輸導線上耗損的電功率即可降低。

9-5 電磁波

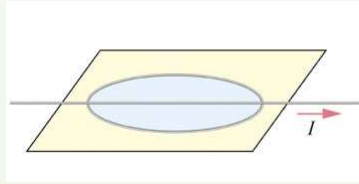
25. 靜止電荷在空間中能產生穩定的電場；均勻分布的電荷以等速在導線中運動時，將形成穩定的電流，並在空間中產生穩定的磁場。在這兩種情況中，空間中各點的電場或磁場都恆為一定，並不會隨時間而改變。
26. 馬克士威統整了電學與磁學的相關定律，發表描述電學與磁學的四個方程式，被後人稱之為馬克士威方程式，建構成電磁學理論的核心內容，不但說明了電磁場理論，也預言了電磁波的存在。
27. 當電荷加速運動或電流隨時間而變時，所產生的電場與磁場也會隨之而變。因為隨時間變動的磁場會產生電場，而隨時間變動的電場也同樣會產生磁場，兩者交互影響，向外傳播出去，便產生了電磁波。
28. 電磁波是電場和磁場振盪產生的擾動現象，電場和磁場的向量積（ $\vec{E} \times \vec{B}$ ）方向為電磁波的行進方向。
29. 電磁波可在真空中傳播，不需依靠介質，其速率為 3×10^8 m/s。
30. 赫茲進行了一系列的實驗，以簡單的電流振盪裝置產生了電磁波，並證實電磁波有反射、折射、繞射及偏振等現象，與光波有類似的性質，驗證了馬克士威的電磁理論。
31. 電磁波譜中不同波段範圍的電磁波是由不同的方法產生，其頻率範圍並無明確的分界線。按頻率由低而高可區分無線電波、微波、紅外線、可見光、紫外線、X射線及 γ 射線等。

一、問答題

1. 如圖 9-34，一載流長直導線垂直穿過圓形迴線的圈面中心，當導線上的電流 I 發生變化時，圓形迴線上是否會產生應電流？
2. 承 1.題，若長直導線平行於圓形迴線的圈面並與直徑重合，如圖 9-35 所示，當導線上的電流發生變化時，圓形迴線上是否會產生應電流？

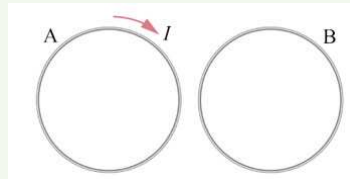


▲圖 9-34

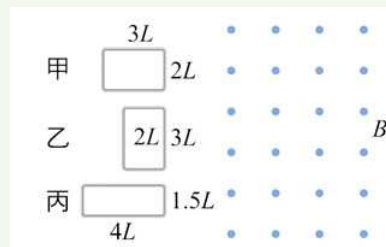


▲圖 9-35

3. 如圖 9-36 所示，一左一右兩個圓形線圈 A、B 共平面，當 A 線圈突然出現一順時針方向的電流時，在 B 線圈中產生應電流的方向為何？
4. 說明在何種情形下，線圈置於均勻磁場中，通過線圈的磁通量為零？在何種情形下，所通過的磁通量為最大？
5. 如圖 9-37，甲、乙、丙三個長方形線圈分別進入垂直紙面向外的均勻磁場 B ，若此三個線圈的邊長分別為甲 $3L \times 2L$ 、乙 $2L \times 3L$ 、丙 $4L \times 1.5L$ ，線圈的水平速度皆為 v ，請寫出在這三個線圈剛進入磁場時，各線圈上產生應電動勢大小的比例關係。

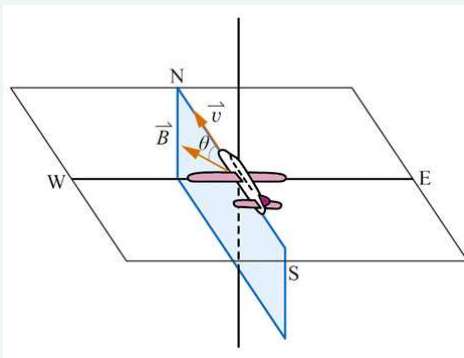


▲圖 9-36



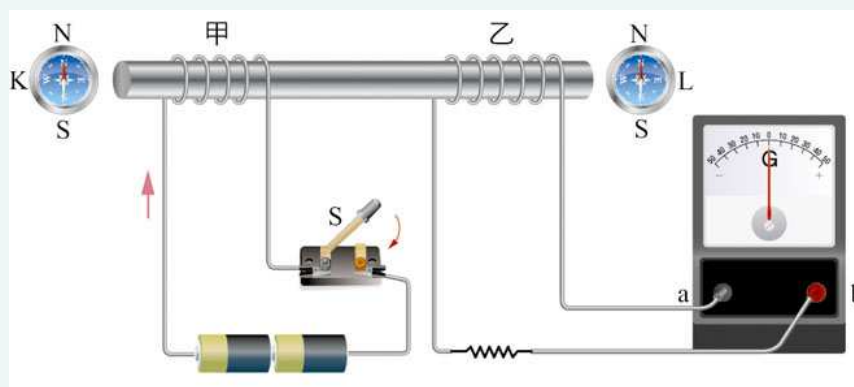
▲圖 9-37

6. 如圖 9-38，在磁傾角（地球北半球的磁場方向與水平面的俯角）為 θ 斜向下的區域中，飛機向正北方飛行時，左右兩金屬機翼上帶負電的自由電子受地磁影響，所受磁力的方向為何？左右兩機翼的電位何者較高？



▲圖 9-38

7. 有一電磁感應裝置，甲、乙兩線圈纏繞在同一軟鐵棒上，各線路連結如圖 9-39 所示，兩小磁針 K、L 分別放置在軟鐵棒的兩端。開始時，甲電路上的開關 S 是打開的，甲、乙兩電路上均無電流。



▲圖 9-39

- (1) 當按下開關 S，將電路接通，在甲電路上的電流穩定後，若電流在軟鐵棒兩端產生的磁場遠大於地球磁場，則小磁針 K 與 L 的 N 極會指向何方？
- (2) 承上題，在甲電路中的電流穩定後，將開關 S 打開使甲電路突然成為斷路的瞬間，則乙電路會出現何種情形？

8. 將一 N 極在上、S 極在下的磁棒由靜止釋放，使其自由落下，如圖 9-40(a)；再取一長金屬鋁管，將同一磁棒在管口仍然由靜止釋放，如圖 (b)。則此磁棒於金屬鋁管中落下與前項落下情況相比，有何不同？



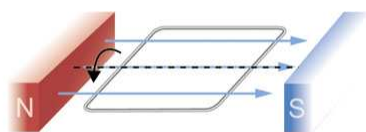
▲圖 9-40

9. 如圖 9-41，發電機中線圈的轉軸若與磁場平行時，是否也有發電的效果？

10. 電廠發電後，先用變壓器把電壓升高，再輸送到遠方；送到用戶附近時，使用變壓器把電壓降低，然後才送至各用戶，

這是因為輸電電壓 V 愈高，電流 I 愈小，輸送電線耗電愈少。若輸送電線的總電阻為 R ，則有關輸送電線本身所消耗電功率 P 的計算式，甲生認為應使用 $P = IV$ 、乙生認為應使用 $P = IR$ 、丙生認為應使用 $P = V^2/R$ 、丁生認為應使用 $P = I^2R$ 。哪個人講得對，理由為何？

11. 若某廣播頻道的電磁波由左向右傳播，電場在鉛直方向上下振動，而磁場在水平方向往返振動。現有一收音機用螺線管作天線，則螺線管之管軸應如何放置，才能有最大之收訊效果？



▲圖 9-41

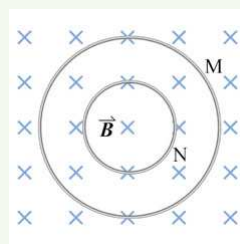
二、計算題

9-1 應電動勢與冷次定律

12. 一面積為 60 cm^2 的圓形線圈，其圈面垂直置於 0.15 T 的均勻磁場中。若以其直徑為軸轉動 53° ，則線圈中磁通量的變化為何？

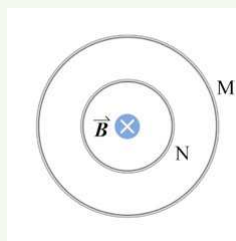
9-2 法拉第電磁感應定律

13. 兩材料相同、粗細相同的圓形導線圈 M、N，半徑之比為 $2:1$ ，兩圓心重疊置於同一平面上，如圖 9-42 所示。垂直於兩圓形線圈的平面上有一均勻磁場，其量值以一定的時變率增加（即 $B = kt$ ，式中 k 為常數），則兩導線圈 M、N 上產生的應電流之比應為何？



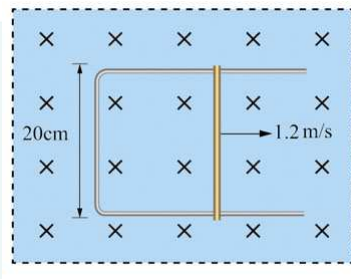
▲圖 9-42

14. 兩材料相同、粗細相同的圓形導線圈 M、N，半徑之比為 $2:1$ ，兩圓心重疊置於同一平面上，如圖 9-43 所示。在圓心處放置一螺管線圈，產生沿軸心的磁場，其量值以一定的時變率增加（即 $B = kt$ ，式中 k 為常數），則兩導線圈 M、N 上產生的應電流之比應為何？



▲圖 9-43

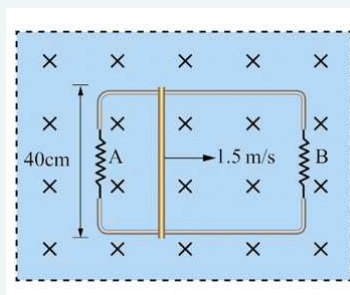
15. 如圖 9-44 所示，一固定的水平 U 型金屬導線置於量值為 0.40 T ，方向為垂直紙面向下的均勻磁場中。現有一長度為 20 cm 的直導線，以 1.2 m/s 的速度在 U 型金屬導線上向右滑動，則產生的應電動勢為何？



▲圖 9-44

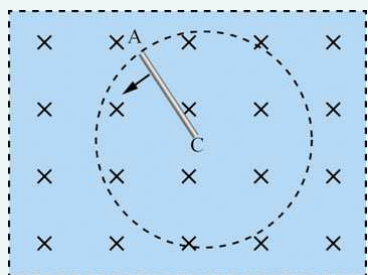
16. 承 15. 題，若 U 形金屬導線的電阻甚小可視為零，而直導線的電阻為 $16\ \Omega$ ，則維持該導線作等速運動時，所需的外力為何？

17. 如圖 9-45 所示，一長度為 40 cm 的直導線在量值為 0.40 T ，方向為垂直與紙面向下的均勻磁場中，以 1.5 m/s 的速率在一固定的矩形導線框上等速滑動。若直導線的電阻甚小可視為零，而矩形導線上有電阻分別為 $25\ \Omega$ 及 $15\ \Omega$ 的兩電阻器 A、B，則流經直導線上的電流為何？



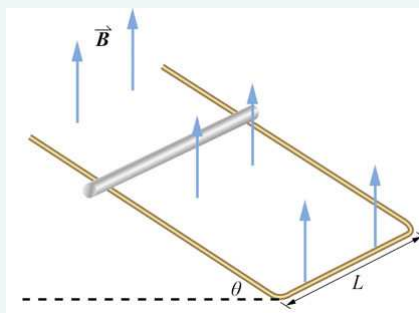
▲圖 9-45

18. 如圖 9-46 所示，在垂直紙面向下，量值為 B 的均勻磁場中，一長度為 L 的直導線以 C 端為圓心，在水平面上的轉速為 ω ，則直導線上 A、C 兩端之間的應電動勢為何？



▲圖 9-46

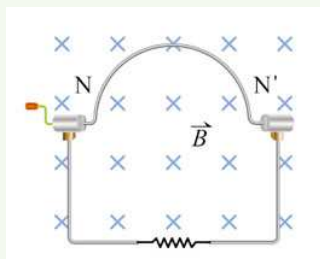
19. 如圖 9-47 所示，在鉛直向上的均勻磁場中，一質量為 m 、電阻為 R 的金屬棒，自靜止開始沿傾斜角為 θ 、間距為 L 的 U 型光滑軌道向下滑行。若軌道夠長，且電阻甚小可以忽略不計，則金屬棒滑下時所能獲得的最大速率為何？



▲圖 9-47

9-3 發電機與交流電

20. 一交流發電機，其線圈的匝數為 200 匝，線圈面積為 0.040 m^2 ，以每分鐘 300 轉的固定轉速在 0.060 T 的均勻磁場中作等角速轉動，則此發電機的最大應電動勢為何？
21. 承 20.題，當圈面與磁場之間的夾角為 30° 時的瞬間，所產生的應電動勢為何？
22. 如圖 9-48 所示，有一半徑為 r 的半圓形導線在一均勻磁場中繞 NN' 轉軸以等角速度旋轉，其旋轉頻率為 f ，則當導線由圖中位置旋轉 90° 時，半圓導線面恰與磁場平行，此半圓形導線上所產生的瞬時應電動勢為何？



▲圖 9-48

9-4 電磁感應現象的應用

23. 某變電箱利用理想變壓器將 11 kV 的電壓降壓成 110 V ，供給某社區使用。若此時該社區使用電器的等效總電阻為 $2.2 \times 10^2 \Omega$ ，則
- (1) 此變壓器的主線圈匝數為副線圈匝數的幾倍？
 - (2) 流經變壓器主線圈的電流為何？
24. 承 23.題，此變壓器之輸入功率為何？

9-5 電磁波

25. 某地區行動電話所使用的頻率為 900 MHz ，則使用電磁波的波長為何？