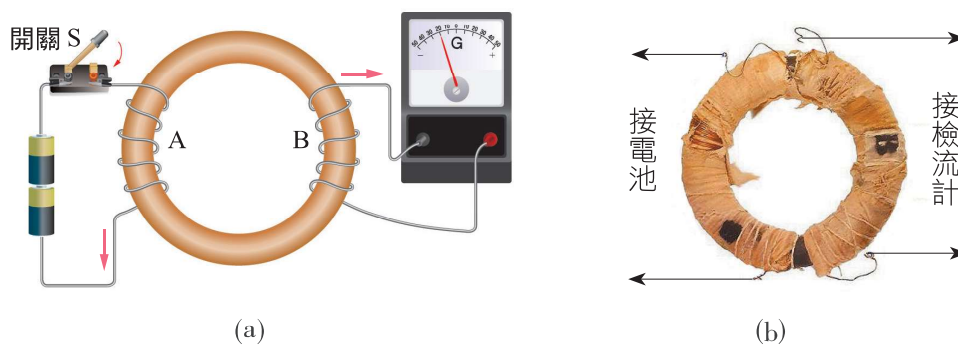


9-1 應電動勢與冷次定律

1. 法拉第的電磁感應實驗

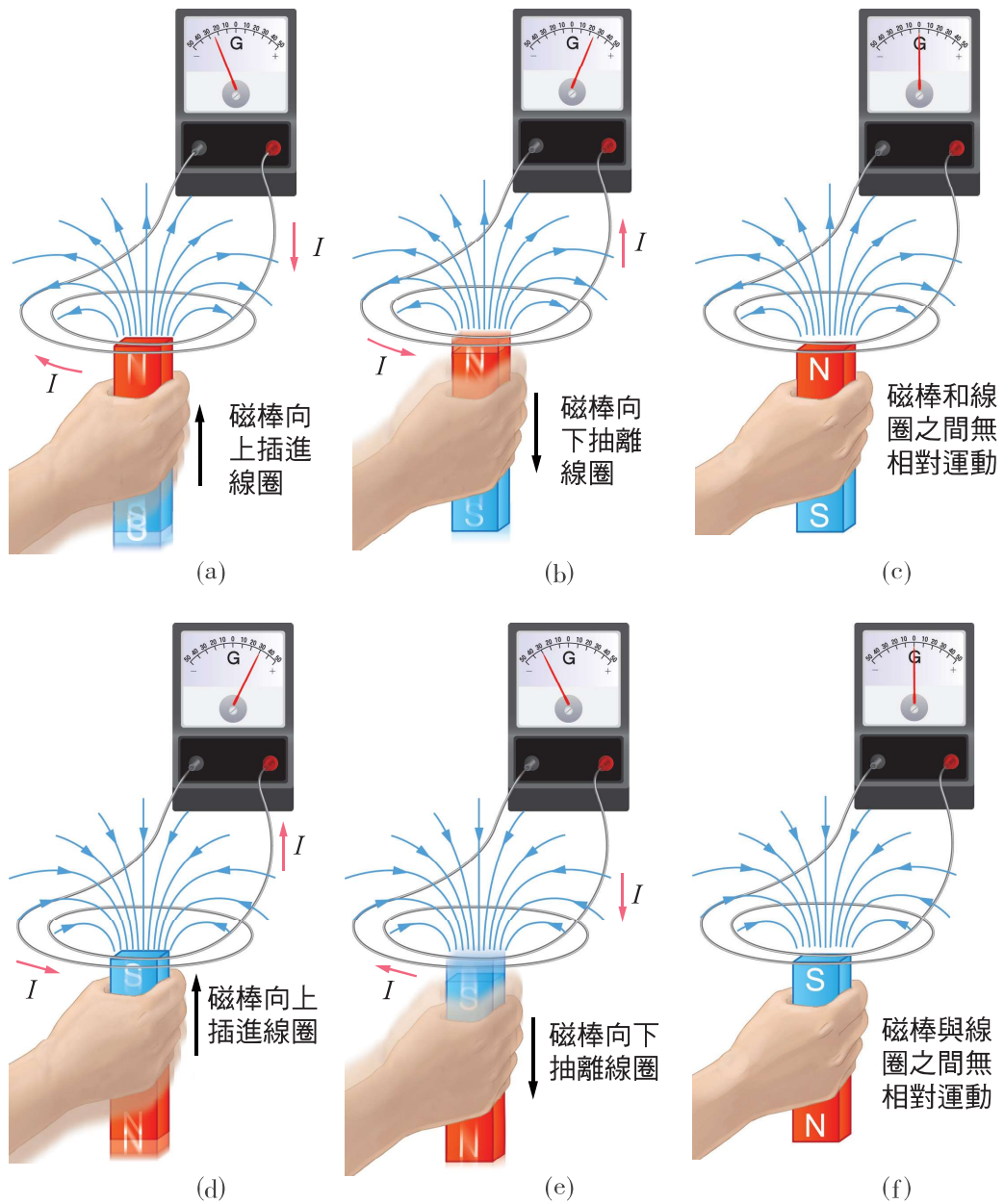
1831 年 8 月，法拉第在一個用軟鐵作成的圓環上繞了 A 和 B 兩個線圈，A 線圈與一電池連接；而 B 線圈則連接一指針式檢流計，如圖 9-1 所示。當 A 線圈與電池接通的瞬間，B 線圈所接檢流計的指針便產生短暫的偏轉，顯示 B 線圈感應產生短暫的電流，稱為**應電流**（induced current）；當 A 線圈與電池斷開的瞬間，B 線圈所接檢流計的指針也產生短暫的偏轉，但偏轉的方向相反，顯示 B 線圈產生短暫的反方向應電流。



▲ 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。

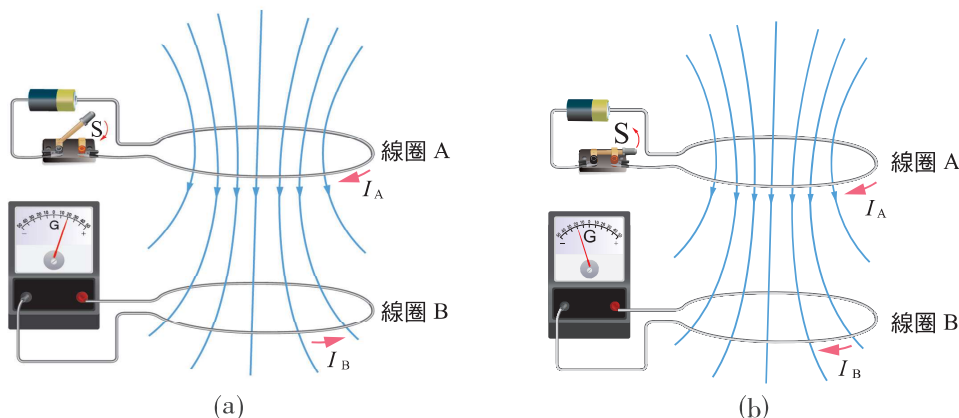
如圖 9-2 (a)與圖 9-2 (b)所示，當磁棒 N 極接近線圈或遠離線圈時，檢流計的指針發生偏轉，顯示線圈中會有應電流的產生，由檢流計指針的偏轉方向不同，則可顯示兩者產生應電流的方向恰相反。如圖 9-2 (d)與圖 9-2 (e)所示，若磁棒 S 極接近線圈或遠離線圈時，也會產生應電流，此時應電流的方向則與上述磁棒 N 極的例子又恰好相反。如果磁棒不動，而線圈運動，則線圈中也會產生對應的應電流。

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。

10 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。

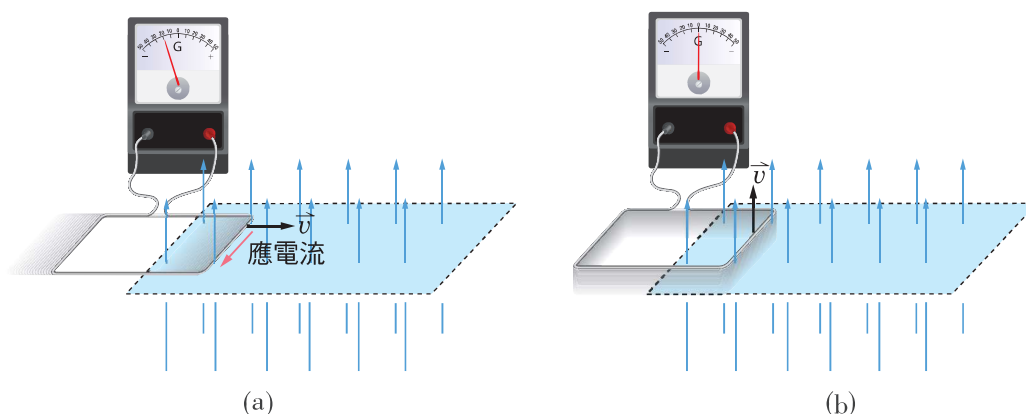


▲ 圖 9-3 當線圈 A 以開關 S 接通和切斷電流 I_A 的瞬間，在其下方的另一線圈 B 會產生應電流 I_B ，但前後兩者產生應電流的方向恰相反。圖(a)接通電流瞬間；圖(b)切斷電流瞬間。

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)。

5



▲ 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 10
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 15
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

5 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 \vec{B} 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，

10 則 ϕ_B 定義為磁場 \vec{B} 的量值和線圈面積 A 的乘積，即

$$\phi_B = BA$$

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 $1 \text{ T} = 1 \text{ Wb}/\text{m}^2$ 。

15 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 $\phi_B = BA \cos \theta$ 。若定義向量 \vec{A} 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

20 示如下

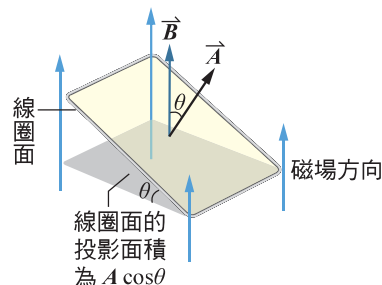
$$\phi_B = BA \cos \theta = \vec{B} \cdot \vec{A}$$

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 $\phi_B = BA \cos \theta$ 。

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。

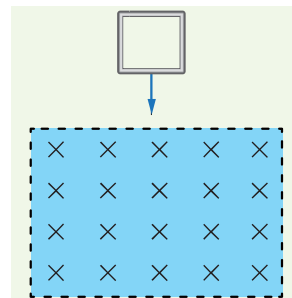
在圖 9-2 (a)中，當磁棒 N 極朝上向線圈運動時，可使線圈內朝上方的磁通量增加。根據冷次定律，為阻止線圈內磁通量的增加，應電流須產生一朝下方的磁場，故應電流為順時針方向。在圖 9-2 (b)中，當磁棒 N 極朝下遠離線圈運動時，可使線圈內朝上方之磁通量減少，故應電流應為逆時針方向，以阻止朝上方磁通量的減少。

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。