

第 5 章 電與磁的統一

5-1 電流的磁效應

(示範實驗：載流導線的磁效應)

5-2 電磁感應

(示範實驗：電磁感應)

本章教學理念

了解電生磁、磁生電之間相互作用產生的各種現象與應用。

靜電作用、磁鐵互相吸引，看似不相干的兩種作用，在經物理學家發現電流可生磁的磁效應，及變動的磁場可生電的電磁感應後，而將電與磁作用統一起來，成為電磁力的不同表現。

5-1 電流的磁效應 磁鐵與電磁鐵

西元 1820 年物理學家厄斯特在一次有關電池的演講時，意外發現放在通電流導線旁的小磁針有輕微地晃動。演講完後，他反覆做了許多實驗，完成了偉大的發現：當未通電流的導線沿南北方向放置，通以電流後，導線下的磁針會發生很大的轉動(圖 5-1)。



圖 5-1 直導線未通電時，與磁針方向平行，皆在南北方向。通電後磁針方向偏轉，表示此直導線載有電流時，會產生東西向的磁場。

一、載流直導線周圍的磁場

安培 (Andre Ampere, 1775 ~ 1836, 法國人) 重複厄斯特的實驗，並發現電流與所產生磁場方向間的關係。他指出若用右手握住直導線，伸直大拇指指向電流方向，則四指環繞的方向就是所產生磁場之磁力線的方向(圖 5-2)，此為著名的右手定則。



圖 5-2 右手定則：電流方向沿著拇指時，所產生的磁場之磁力線沿四指方向環繞。

直線電流磁效應指北針在下方偏轉

若載流直導線垂直通過一塑膠面板，在板上的導線周圍撒上鐵粉，可顯示出其附近所產生磁力線的分布情形（圖 5-3），由圖可發現磁力線會形成同心圓圖案。若放置多個磁針在通有電流導線周圍（圖 5-4），當電流方向由上向下時，磁針 N 極的方向幾乎皆會沿著順時針方向排列，此結果與「右手定則」一致。在電流由下向上時，亦滿足右手定則。垂直紙面方向的電流，習慣上以交叉符號 \otimes 表示電流垂直紙面流入，而以圓點符號 \odot 表示電流垂直紙面流出。由實驗得知，電流愈大或愈靠近直導線處，所產生的磁場愈強。

直導線電流的磁場電源供應器供電



圖 5-3 載流直導線產生的磁場使周圍的鐵粉排成同心圓

直導線電流的磁力線灑鐵粉出現同心圓

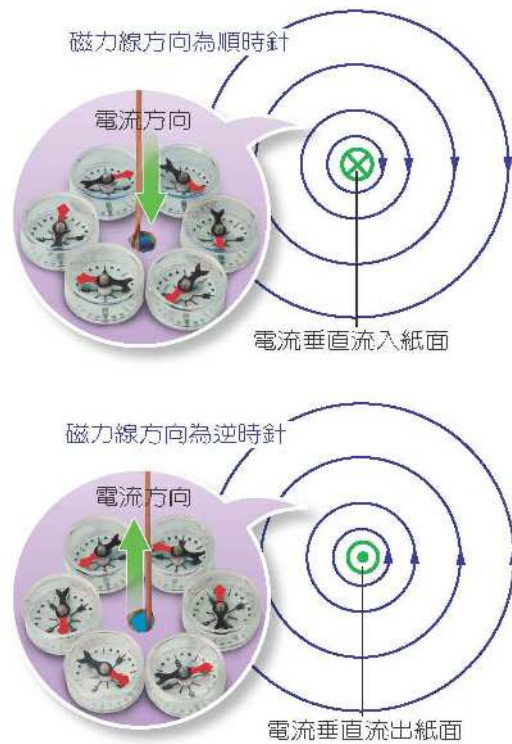


圖 5-4 通有電流的長直導線周圍產生的磁場方向

直導線電流的磁場乾電池電源

二、載流圓形線圈所產生的磁場

將導線圍成圓形線圈，並垂直立於一塑膠面板上，在板上的線圈周圍撒上鐵粉，當電流通過圓形線圈時，產生的磁場如圖 5-5 所示，磁力線仍環繞著導線。對於線圈中心軸上的磁場方向，可以用右手定則的另一形式來描述，此時四指環繞方向為電流方向，則拇指伸直的方向為磁場方向。同樣地，若電流愈大，則所產生的磁場愈強。

圓形電流磁效應 1. 電磁力 1 心型馬達 DIY

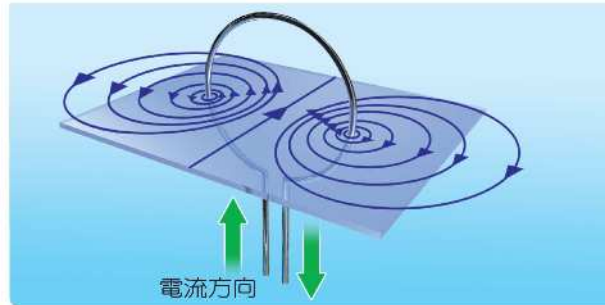


圖 5-5 圓形線圈通電時產生的磁場

電磁力 2 右手開掌

三、載流螺線管所產生的磁場

若電流通過以數圈導線彎曲而成的螺線管時，內部所產生的磁場如圖 5-6 所示。管內的磁場方向平行螺線管中心軸，其電流與磁場方向的關係，也可以用右手定則來表示(圖 5-7)，此時四指環繞方向為電流方向，拇指伸直的方向則為磁場的方向。管外的磁場很弱，貼近管壁外側處的磁場可視為零。螺線管電流磁效應 2 灑鐵粉

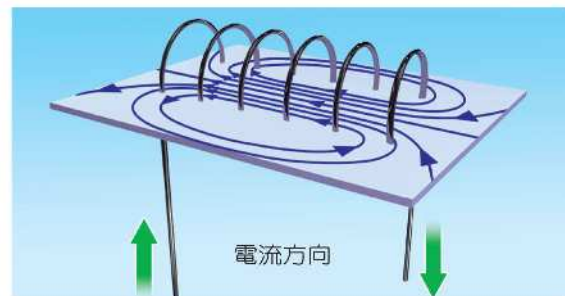


圖 5-6 螺線管通電時產生的磁場



圖 5-7 若四指環繞方向為電流方向，則螺線管內磁場的方向在拇指伸直的方向。

螺線管電流磁效應 1

除了電流大小會影響螺線管所產生磁場的強弱外，螺線管本身每單位長度的纏繞匝數愈多，其管內的磁場亦會愈強。圓形電流磁效應 2 匝數多

接著，加上軟鐵心有何影響？將螺線管套在軟鐵心上，或將漆包線纏繞在軟鐵心上，當通入電流時，除了螺線管本身產生的磁場，軟鐵心被磁化後也會產生非常強的磁場，方向與螺線管本身的磁場方向相同，形成電磁鐵，當電流切斷後，軟鐵心磁化的現象也漸漸消失，之後整個電磁鐵就不具有磁性。在港口貨櫃裝卸場的起重機，便是利用強大電流的電磁鐵來吊起沉重的貨櫃（圖 5-8）。電磁鐵

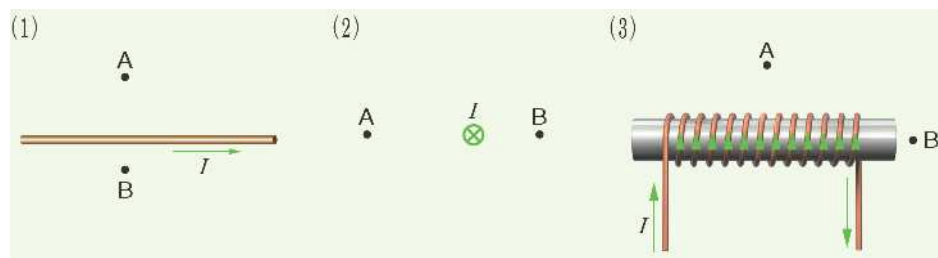


圖 5-8 港口的大型起重機利用電磁鐵吸住及放開貨櫃

範例 5-1

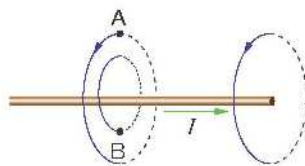
指出下列各圖中 A、B 點所在位置的磁場方向。

【相關練習：習題 1.~4.】



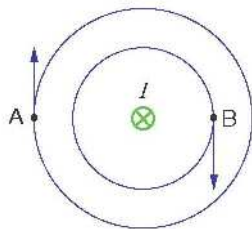
分析 分別以載流直導線的右手定則及載流螺線管的右手定則，可判定兩者所產生磁場的方向；磁力線上任一點的切線方向即為該點的磁場方向。

解 (1) 右圖為立體斜視圖，載流直導線附近所產生磁場之磁力線為同心圓，導線所在處為圓心，虛線表示磁力線在紙面後方。故 A 點的磁場方向為「射出紙面的方向」，B 點磁場方向則為「進入紙面的方向」。

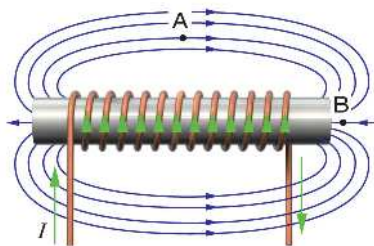


(2) 如右圖，導線電流進入紙面，故磁力線為紙面上的同心圓，A、B 點的磁場

方向即如圖示之切線方向。



- (3) 參考圖 5-6，右圖中螺線管在 B 點產生的磁場方向應平行螺線管中心軸，且為進入螺線管的方向，即方向向左；磁力線由左端指出螺線管，向右繞過管壁外側後，再由右端進入螺線管，故在 A 點的切線方向，或在 A 點的磁場方向向右。



示範實驗 載流導線的磁效應

實驗器材：

可變電阻、檢流計、桌架（中心有孔）、厚紙板、鐵粉、磁針、電源供應器、電源開關、導線

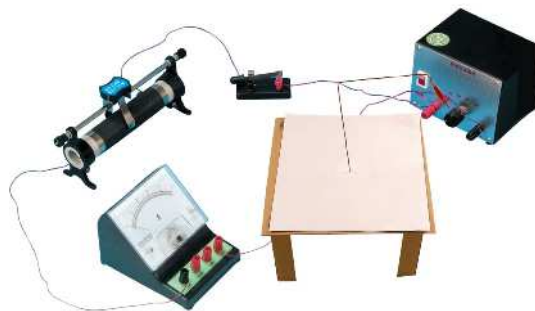


圖 5-9

實驗步驟：

1. 在一塊厚紙板中央鑽一個小孔，將一條導線垂直穿過這個小孔，並連結實驗儀器(圖 5-9)。
2. 把鐵粉均勻地灑在水平的厚紙板上，接通開關使電流通過垂直的導線，並輕輕敲擊厚紙板，觀察鐵粉顯示出的形狀(圖 5-10)。

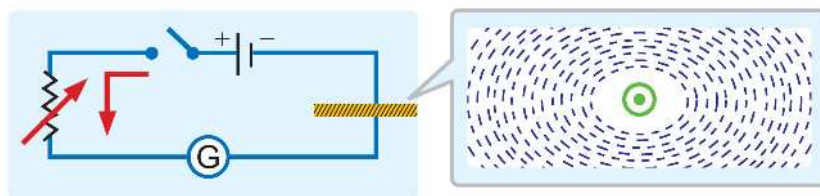


圖 5-10

3. 將鐵粉收起。將磁針放在硬紙板上 A、B、C、D 四點處，如圖 5-11 所示，觀察磁針的偏轉方向。



圖 5-11

4. 將導線的正、負極改變，重複步驟 3.，觀察磁針的偏轉方向是否改變？

討論：

1. 在載流直導線周圍的鐵粉呈現什麼形狀？磁場的形狀為何？
2. 載流直導線建立的磁場其方向為何？

5-2 教學理念

定性介紹法拉第電磁感應定律，可知電與磁是不可分割的現象。並介紹馬克士威方程式可以定量的方式描述電磁現象。本節不需要具體說明方程式的形式。

發電機

5-2 電磁感應

電磁感應與發電機

一、電磁感應 磁生電 電磁感應

厄斯特發現電流的磁效應後，以前被認為互不相干的電、磁兩種現象，有了關聯。「若逆向思考磁是否可生電呢？」也引起了許多科學家研究的熱潮。1821 年，法拉第（圖 5-12）在其筆記上寫下他的疑問，也是他日後的工作目標：「利用磁場是否可產生電流？」經過十年的實驗研究，終於發現當磁場發生變化時，在其附近封閉的線圈上會產生電流，此現象稱為電磁感應（electromagnetic induction）。電磁感應現象可由以下實驗來說明。

圖 5-12 發現電磁感應現象的法拉第

法拉第定律

實驗一

將線圈與檢流計連接，線圈上原本並沒有電流，但當磁棒的 N 極進入或離開線圈時，檢流計的指針將隨之偏轉，這表示線圈上有電流通過，磁棒進入和離開線圈時，檢流計偏轉的方向相反（圖 5-13(A)、(B)），實驗發現磁棒的運動速率愈快，檢流計上的指針偏轉愈多。同樣地，當磁棒 S 極進入或離開線圈時，亦有電流產生（圖 5-13(C)、(D)）。實驗結果亦顯示，當磁棒不動時，無論它是否在線圈內，指針均沒有偏轉，表示沒有電流產生。

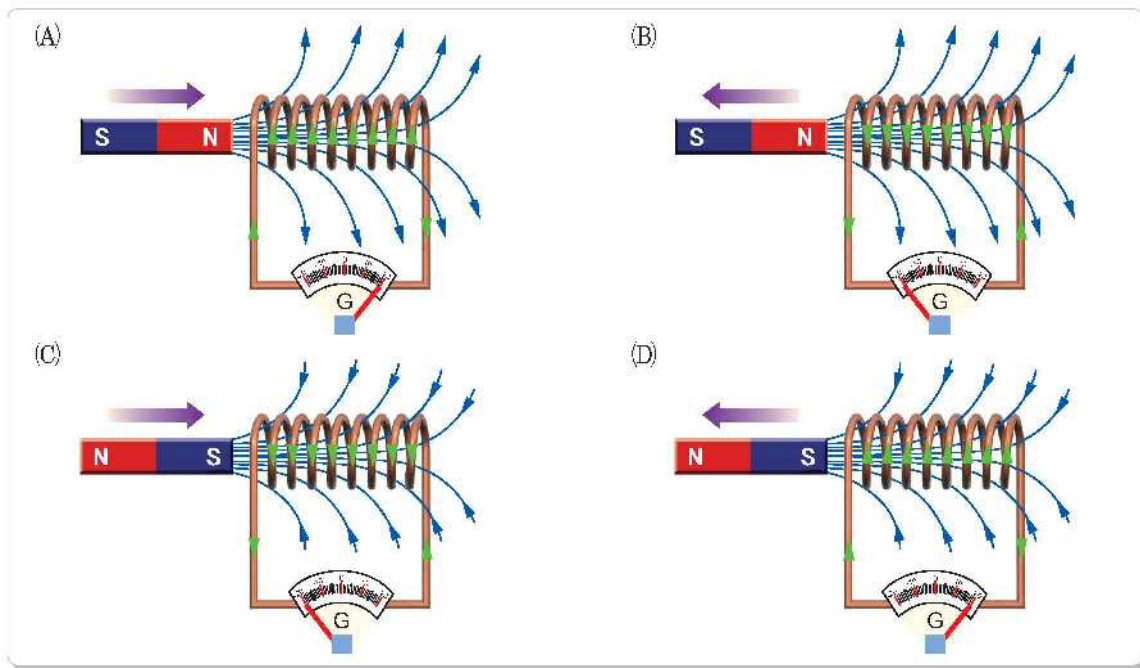


圖 5-13 磁棒進入或抽離線圈瞬間，檢流計指針偏轉，表示線圈產生電流。

實驗二

將線圈和檢流計連接，並置於磁場中，當與磁場方向垂直的線圈面左右水平移動時（圖 5-14(A)、(B)），通過線圈的磁力線數目減少，此時檢流計的指針會偏轉，表示有電流產生。實驗發現，線圈的移動速率愈大，指針偏轉愈多。然而當線圈靜止或平行磁場方向上下移動時，則不會有電流產生（圖 5-15）。

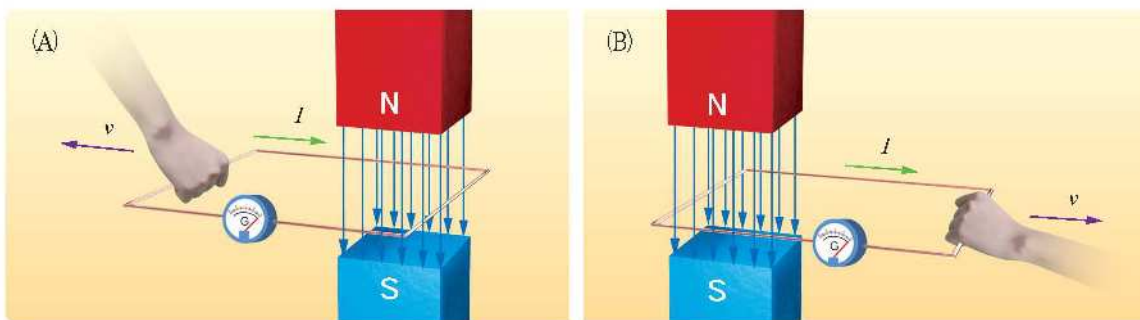


圖 5-14 圖 (A) (B) 中，通過線圈的磁力線數目均變少，檢流計偏轉方向相同。

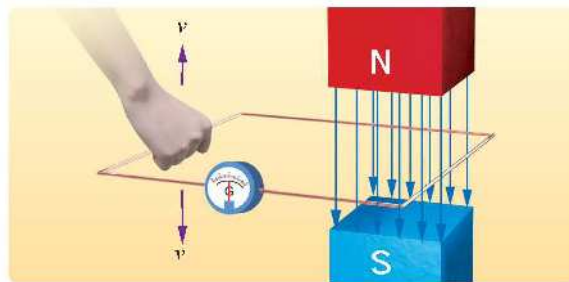


圖 5-15 線圈靜止或平行磁場移動時，通過線圈的磁力線數目沒有變化，線圈上沒有電流產生。

由上述實驗，線圈均未連接電源，但由於通過線圈的磁場（或磁力線數目）發生了變化，因而產生出感應的電流。此電流稱為應電流（induced current）。

法拉第的電磁感應現象，對日後人們的生活產生了巨大影響，發電機的發明即是電磁感應原理的應用，它提供了一種可持續產生電流的方式。另外，可用來烹煮食物的電磁爐，也是電磁感應原理的應用。

示範實驗 電磁感應 磁生電 楞次定律、磁生電 飛天鋁箔與電磁爐

1. 將直立的螺線管兩端，分別以導線與檢流計串聯。
2. 將磁鐵棒之 N 極，迅速插入及抽出螺線管，觀察並記錄檢流計偏轉方向。
3. 將磁鐵棒之 N 極，放入螺線管後維持靜止不動，觀察並記錄檢流計偏轉方向。
4. 將磁鐵棒之 S 極朝向螺線管，重複步驟 2.、3.。



二、馬克士威方程式

厄斯特、法拉第等物理學家把原本沒有關聯的「電」、「磁」兩個現象結合起來，說明了電與磁是不可分割的現象，而電力和磁力可被統稱為更廣義的電磁力。

西元 1864 年，馬克士威（圖 5-16），將「電流產生磁場」及「變化的磁場在封閉線圈內產生電流」等現象加以歸納統整，並轉化為電荷、電流、電場、磁場等物理量所應遵守的數學關係式，這些數學方程式稱為馬克士威方程式。其中每一個方程式代表一個定律：

圖 5-16 綜合整理電和磁現象的馬克士威

1. 庫倫作用力與電場觀念。
2. 單一磁極無法獨立存在。
3. 載有電流的導線或電場改變，皆可生磁場。
4. 磁場變化可產生電場（即電磁感應原理）。

電荷與電場

第 4 章中，曾提到磁場、磁力線的觀念，這種圖像也可應用到「靜電作用力」上。空間中若因帶電荷物體的存在，而改變了原來空間的性質，稱為帶電體在其附近空間中形成電場

(electric field)。而正電荷置於電場中的受力情形，可由電場中的電力線 (line of electric force) 來描述 (圖 5-17)，愈靠近點電荷源的地方，電力線愈密集，表示該處電場愈強，正電荷在該處所受的力也愈大，且受力方向為沿著電力線方向。磁與靜電不一樣的地方為磁棒的 N 極、S 極必同時存在，第 4 章曾提到，即使將磁棒從中折斷，每一段都會各自產生新的磁極 (圖 5-18)。

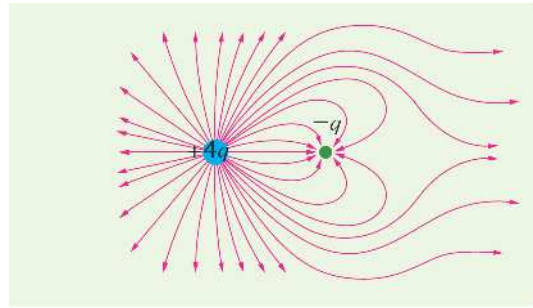


圖 5-17 兩電荷 $-q$ 與 $+4q$ 附近之電力線分布

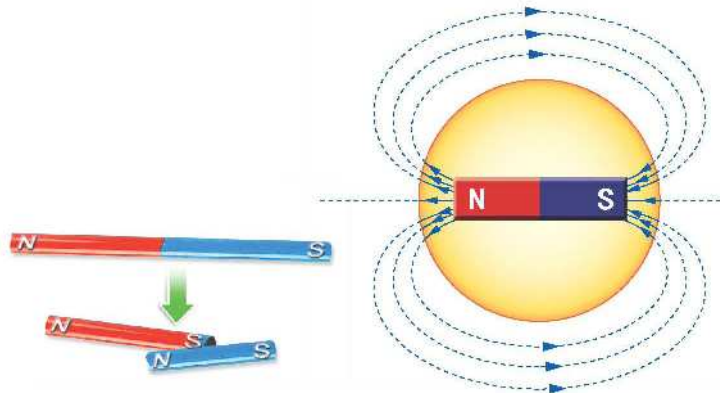


圖 5-18 磁棒的兩磁極必同時存在

馬克士威體會出電場有兩種來源—電荷與改變的磁場，但為何磁場卻只有一種來源—電流 (N、S 兩極產生的磁場性質與電流磁場相同)？是否意謂改變的電場也可產生磁場？另一方面，如果就馬克士威之前物理學家所得出之數學關係式，加以整理後會產生與電荷守恆律不一致的矛盾情形。但當他將改變的電場也可產生磁場之可能性，加到前述實驗定律後，與電荷守恆律不一致的情形便消失了。根據這個新方程式，磁場與電場可以交互改變，且一直持續下去，並充滿和傳播在整個空間。

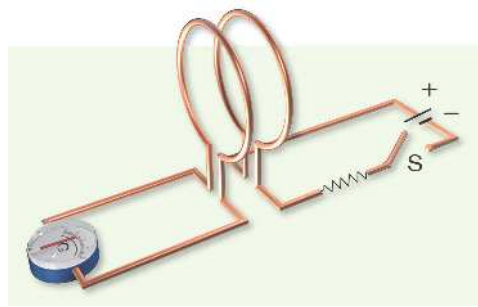
他計算出此電磁場交互改變的電磁波動，會以 3×10^8 公尺/秒的速度前進，而這正是當時光學實驗所量測出在真空中的光速，說明了光就是一種電磁波。

馬克士威利用了此種特殊的數學語言所形成的方程式，不僅描述了所有電和磁的基礎現象，它還預測了電磁波的存在，甚至進一步將電磁和光統一了起來，這是一個綜合性的大成就，可與牛頓的力學媲美，造成的影響同樣深遠。

範例 5-2

如右圖所示的裝置，左邊線圈連接檢流計，右邊線圈連接電池和開關 S。當右邊開關 S 在(A)接通電路瞬間，(B)接通電路一段時間後，(C)再切斷電路的瞬間，上述三種情形中，什麼情況下，檢流計將偏轉？

【相關練習：習題 6.】



分析
解

通過線圈的磁場改變時，會有電流產生，使檢流計的指針發生偏轉。

(A) 接通電路瞬間，右邊線圈產生電流，通過左邊線圈的磁場突然增大，因而有應電流的產生，指針偏轉。

(B) 接通電路一段時間後，右邊線圈的電流穩定，通過左邊線圈的磁場不再產生改變，沒有應電流產生，指針不偏轉。

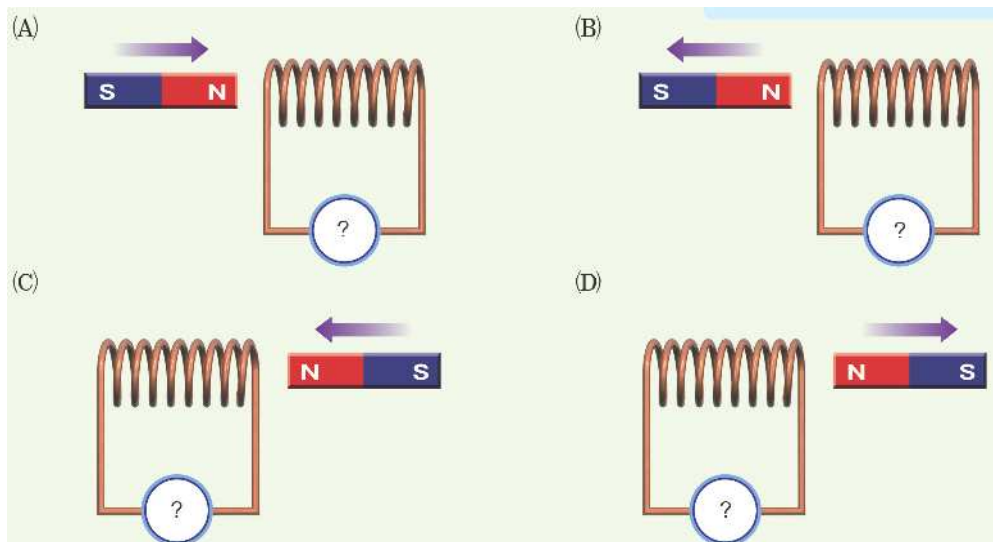
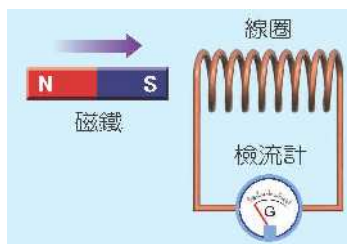
(C) 再切斷電路的瞬間，右邊線圈電流減為 0，通過左邊線圈的磁場降為 0，因而有應電流產生，指針反方向偏轉。

答案為 (A)(C)

範例 5-3

將線圈連接檢流計，將磁鐵向右插入線圈內，發現檢流計的指針偏左（如右圖）。問下列哪些情形，檢流計的指針將偏右？

【相關練習：習題 8.】



分析

1. 通過線圈的磁場改變時，會有應電流產生。
2. 磁鐵進入以及磁鐵離開線圈，均產生應電流，但檢流計的偏轉方向相反。
3. 磁鐵的 N、S 極位置相反，產生應電流使檢流計偏轉的方向亦相反。

解 (A) 磁鐵的 N、S 極與題目中的情形相反，故檢流計偏轉方向為



(B) 磁鐵離開線圈，與 (A) 相反，故檢流計偏轉方向為



(C) 磁鐵的磁場（磁力線）向右，且磁鐵靠近線圈，與題目中的情形相同，故

檢流計偏轉方向為



(D) 磁鐵離開線圈，與 (C) 相反，故檢流計偏轉方向為



答案為 (A)(D)

要點整理

基本原理

- 電流的磁效應：載有電流的導線附近可產生磁場，使磁針偏轉。
- 右手定則(I)：以右手握住直導線，若伸直的大拇指指向電流方向，則四指環繞的方向即為導線周圍所產生磁場之磁力線方向。
- 右手定則(II)：四指環繞載有電流的圓形線圈之電流方向，則拇指伸直的方向即為中心軸上的磁場方向。
- 電磁感應：變化的磁場，在其附近封閉的線圈上可產生應電流。
- 馬克士威方程式：馬克士威將「電流產生磁場」及「變化的磁場在封閉線圈內產生電流」等現象加以歸納統整，並轉化為電荷、電流、電場、磁場等物理量所應遵循的數學關係式。其中每一個方程式代表一個定律：
 - (1) 庫侖作用力與電場觀念。
 - (2) 單一磁極無法獨立存在。
 - (3) 載有電流的導線或電場改變，皆可生磁場。
 - (4) 磁場變化可產生電場（即電磁感應原理）。

分析應用

- 電流愈大或愈靠近直導線處，所產生的磁場愈強。
- 電流愈大則螺線管內的磁場愈強，螺線管每單位長度的纏繞匝數，也會影響磁場強弱，亦即纏繞愈緊密的螺線管，管內所產生的磁場愈強。
- 馬克士威方程式描述了所有電和磁的基礎現象，並可預測電磁波的存在。

名詞術語

電流的磁效應、右手定則、電磁感應、應電流、馬克士威方程式、電場、電力線

迷思概念辨析



概念錯誤

⊗、⊙ 只能表示電流流入紙面或流出紙面。

磁力線為磁針的運動軌跡。

磁生電是指有磁場通過線圈，必有應電流產生。

正電荷、負電荷、單一磁極（N極或 S 極）均可以單獨存在。



概念正確

⊗、⊙ 為表示方向的符號，不必固定是指哪一些物理量，可以是電流流向，也可以是磁場方向。

磁力線的切線方向為磁針 N 極所指的方向。

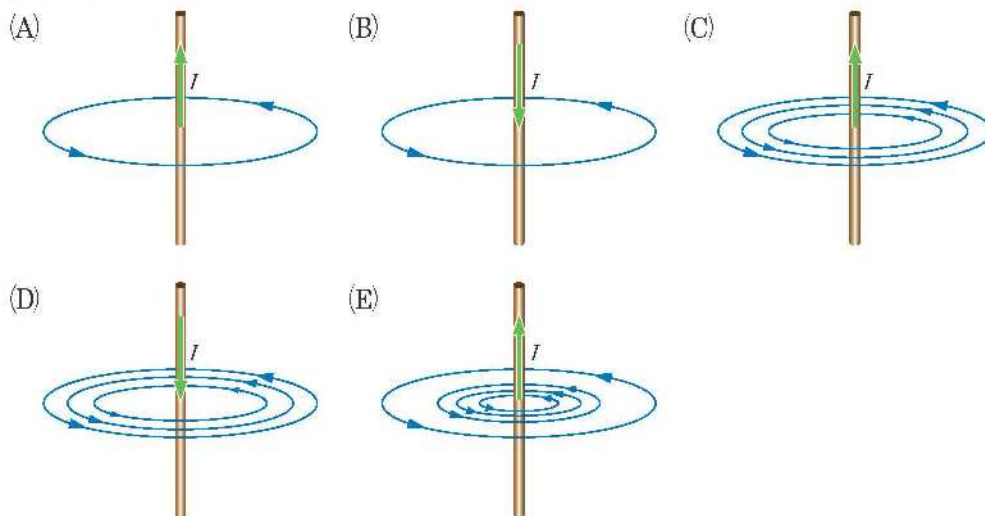
通過線圈的磁場發生改變時，才有應電流產生。

正電荷、負電荷可以單獨存在，單一磁極無法單獨存在。

習題

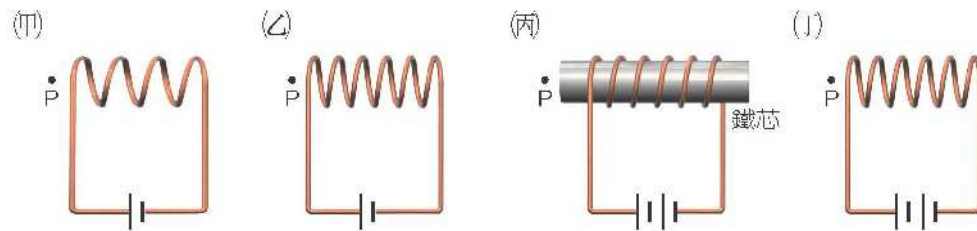
5-1 電流的磁效應

() 1. 一條載有穩定電流的長直導線，在周圍所產生磁場的磁力線最接近下列何者？



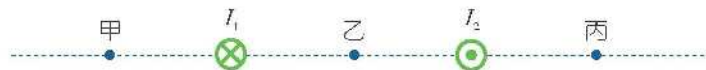
() 2. 下列各圖中，若導線及線圈的總電阻皆相同，所有電池亦完全相同，則 P 點的磁

場量值由大而小依次為何？



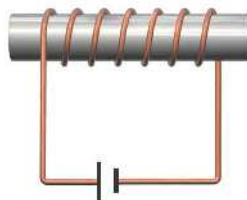
- (A)(丙) $>$ (丁) $>$ (乙) $>$ (甲) (B)(丁) $<$ (丙) $<$ (乙) $<$ (甲) (C)(丙) $=$ (丁) $>$ (乙) $>$ (甲)
(D)(甲) $=$ (乙) $=$ (丙) $=$ (丁)。

- () 3. 兩長直導線的電流 I_1 、 I_2 ，流向均垂直紙面，電流大小相等，流動方向相反，如下圖所示，則甲、乙、丙三處的磁場方向為何？



- (A)甲處方向向左 (B)乙處方向向右 (C)丙處方向進入紙面
(D)甲、丙處方向皆向上 (E)乙處方向進入紙面。

- () 4. 通電流的螺線管纏繞在軟鐵棒上，如右圖所示，則下列敘述何者正確？



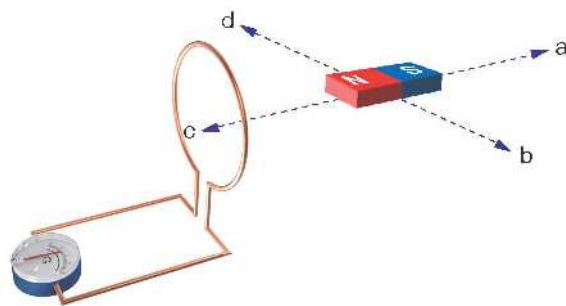
- (A)軟鐵棒的右端為 N 極
(B)螺線管內磁場量值與通過的電流成反比
(C)軟鐵棒內的磁力線方向為由右向左
(D)纏繞軟鐵棒上的匝數愈多，螺線管內的磁場愈強
(E)螺線管壁外的磁場與管內磁場量值相同，但方向相反。

5-2 電磁感應

- () 5. 下列器材中，哪些的工作原理和電磁感應現象有關？（應選三項）
(A)電鍋 (B)電磁爐 (C)變壓器 (D)交流發電機 (E)馬達。

【修改自 93. 指考】

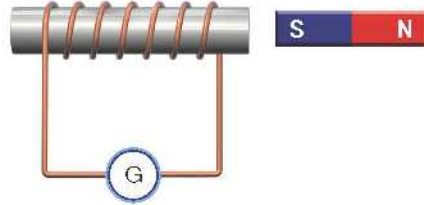
- () 6. 將下圖中的磁棒往不同的方向移動時，關於線圈上的應電流之敘述，何者正確？（應選兩項）



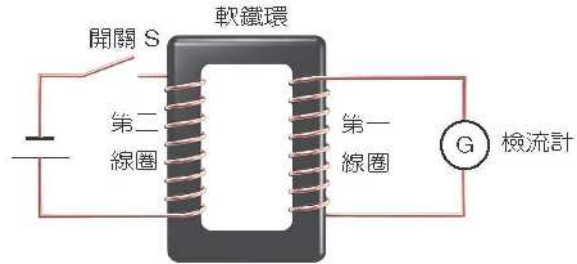
- (A)磁棒往 a 和往 c 方向移動時，產生的應電流方向相同

- (B)磁棒往 a 和往 c 方向移動時，產生的應電流方向相反
 (C)磁棒往 b 和往 d 方向移動時，產生的應電流方向相同
 (D)磁棒往 b 和往 d 方向移動時，產生的應電流方向相反
 (E)磁棒往 b 和往 d 方向移動時，沒有產生應電流。

- () 7. 用漆包線繞成的線圈與磁鐵的位置如圖(一)，則下列敘述何者正確？(應選兩項)
 (A)磁鐵靠近線圈的速率愈大時，檢流計指針會偏轉愈多
 (B)線圈靠近磁鐵時，檢流計指針不偏轉
 (C)磁鐵、線圈一起以相同的速度向右移動時，檢流計指針不偏轉
 (D)磁鐵、線圈分別向左、向右移動時，檢流計指針不偏轉。



圖(一)



圖(二)

- () 8. 有一電磁感應實驗裝置(如圖(二)所示)，假設開關 S 原來是關上的，第二線圈中有穩定的電流，第一線圈中沒有電流。現在我們突然打開 S，使電流停止，隔一段時間後我們再關上 S，使恢復為穩定電流，則在以上各種操作情形下，檢流計 (G) 中所顯示的電流情形為何？(每行各選一項，共應選三項) 【85. 推甄】

S 打開的瞬間	S 打開一段時間後	S 再關上的瞬間
(A)有電流	(C)有電流	(E)有電流
(B)沒電流	(D)沒電流	(F)沒電流

- () 9. 下列關於電與磁敘述，何者正確？(應選兩項)
 (A)電力線愈密集，表示該處電場愈強
 (B)磁力線愈密集，表示該處磁場愈弱
 (C)正電荷、N 極均可單獨存在
 (D)磁鐵附近必可產生電場
 (E)正電荷在電場中的受力方向沿著電力線的切線方向。