

磁盤與轉動

解析

詳解與困難剖析

本單元所有試題的正確答案、常見錯誤、及難度，如表 1 所示：

題號	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
正確答案	A	B	A	B	B	C	D	B	B	D	A
常見誤答	X	A	X	C	E	B	B	A	A	E	C
難度	易	中	易	中	難	中	難	中	中	難	難

表 1：各題之正確答案、常見錯誤、及題目難度

第 1 ~ 4 題

正確觀念：如圖 1 所示，判斷 Y 的感應電流，需根據「**楞次定律**」：

Y 鋁幣的感應磁場，會與 A 磁鐵的磁場**變化**反向 (\mathbf{B}_Y' : $-\Delta\mathbf{B}_A$)。當 A 在 P 點時，A 磁鐵正在靠近 Y 鋁幣，所以磁場正在增加。因 A 之 N 極朝上 (磁場向上)，所以磁場變化 ($\Delta\mathbf{B}_A$: 向上)，使得 Y 感應出反向之磁場 (\mathbf{B}_Y' : 向下)。再由「**安培右手**」由感應磁場反推 Y 的感應電流 ($\mathbf{B}_Y' \Rightarrow \mathbf{I}$)， \mathbf{I} 應為順時針 (第 1 題)。

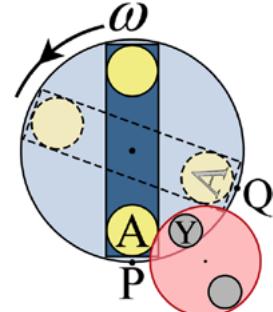


圖 1：鋁幣轉盤置於外緣

若是改變 A 磁鐵的方位，使 N 極朝下 (磁場向下)，則 A 在 P 點時，Y 所受外加磁場變化為向下增加 ($\Delta\mathbf{B}_A$: 朝下)，故 Y 之感應磁場 (\mathbf{B}_Y' : 向上)，進而可反推 Y 的感應電流， \mathbf{I} : 逆時針 (第 2 題)。

因為感應磁場 (\mathbf{B}_Y') 與外加磁場**變化** ($\Delta\mathbf{B}_A$) 反向 ($\mathbf{B}_Y'': -\Delta\mathbf{B}_A$)，所以，A 磁鐵由 P 點轉到 Q 點時，A 磁鐵由靠近 (磁場增加)，變成遠離 (磁場減小)，因此 Y 所受到的磁場變化會反轉 (朝下的磁場正在減小 $\Rightarrow \Delta\mathbf{B}_A$: 朝上)，使得 Y 的感應磁場 ($\mathbf{B}_Y'':$ 朝下，Y 的感應 N 極朝下)，與 A 磁鐵上方之 S 極，因異極而相吸 (第 3 題)(如圖 2 所示)。同時，可以透過「**安培右手**」，根據 Y 感應出的 N 極朝下，而反推 Y 的感應電流為**順時針** (第 4 題)。

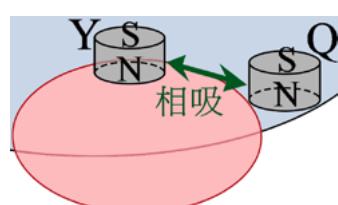


圖 2：Y 鋁幣受 A 磁鐵吸引

常見錯誤：雖然第 1 題答對率高達 80%，卻有將近一半的學生，無法順利推演，A 磁極反轉時，Y 鋁幣的感應電流 (第 2 題)。作答解釋時，許多人僅寫出「**楞次定律**」、「**電磁感應**」、或「**安培右手**」等術語，沒能解釋所涉及的「**磁極**」、「**磁場**」、「**電流**」、「**磁力**」的因果關係。

另外，即使選對感應電流方向（第 2 題），也可能是錯誤的推理，如：“磁極從 N 極變 S 極，使轉盤從排斥轉為吸引”，因而得到反向感應電流。事實上，根據「冷次定律」，無論 A 磁極方向為何，只要是 A 磁鐵正在靠近 Y 鋁幣（P 點處），都會產生斥力，排斥或吸引只與磁鐵正在接近或遠離有關，與磁極方向無關。

也有人將「冷次定律」（感應磁場與磁場變化之間）的反向，直接聯想到排斥力（第 3 題），進而錯誤推出感應電流與感應磁極方向（第 4 題），顯示出他們無法辨別磁場正在遠離（Q 點），與正在接近（P 點）時，感應磁場與磁力之不同。不過，從第 4 題的錯誤選項集中在（C），透露出學生已能掌握「安培右手」（I 生 B 的關係）。

第 5、6 題

正確觀念：Y 鋁幣受到 A 磁鐵的磁力大小，與 Y 的感應電流，及 Y 受到 A 的磁場大小有關。A、Y 間的距離越近，則 Y 受 A 的磁場越大；再根據「法拉第定律」，Y 的「感應電動勢」（V）（或稱「感應電壓」），取決於 Y 所受的「磁通量變化率」（ $\Delta\Phi_B / \Delta t$ ）（或簡化為「磁場變化率」， $\Delta B / \Delta t$ ）。因此，Y 的感應電壓，同時與 AY 距離及 A 的速率有關，A 速率越快，磁場變化率越大，Y 的感應電壓越大，造成越大的電流，使得 Y 所受磁力增大。至於 A 的切線加速度，則不會影響同一瞬間的速率或 AY 間的距離（第 5 題）。

Y 鋁幣所受磁力的原理，因為 A 磁鐵在 Y 上產生磁場變化，導致 Y 感應出電流（磁生電），而此感應電流會產生新磁場（電生磁），使 Y 相當於一個新磁鐵，所以 A、Y 兩個磁鐵間出現磁力。因此，Y 的感應磁場（ B_Y' ），是受 A 的磁場變化（ ΔB_A ）而產生（磁生磁，「冷次定律」），涉及「磁生電」及「電生磁」（簡稱「電磁感應」）（第 6 題）。換言之，「冷次定律」（磁生磁），包含了「法拉第定律」（磁生電）及「安培定律」（電生磁）兩者（如圖 3 所示）。



圖 3: 冷次定律涵蓋之概念圖

常見錯誤：雖然許多學生意能夠道出：“單位時間內，磁場變化越大，感應電流越大，受磁力就越大”的正確推論，但卻將影響的因素，錯誤聯結到 A 的切線加速度；有人說“加速度越大，速度就越大”，顯示出他們未能掌握同一瞬間的關鍵變因（第 5 題）。

至於磁盤轉動所造成的磁力現象（第 6 題），雖然多數學生提到「冷次定律」或「電磁感應」，但卻將此原理侷限於「磁生電」，忽略了所涉及的「電生磁」效應。例如：“ \therefore 電磁感應， \therefore 只有磁生電，一開始就沒有通電，所以無電流磁效應”，顯示出學生以為，「電流磁效應」只會發生在外加電流，而不會發生在感應電流的誤解。因此，教師講授「冷次定律」時，需強調如圖 3 所示之完整概念。

第 7、8 題

正確觀念：無論 Y 轉盤在外緣或內緣，只要 A 磁鐵在 P 點（正在接近 Y），則 A 的磁場正在增加，使 Y 產生的感應磁場與 A 磁場反向，故 AY 間的磁力相斥；進而可透過 Y 所受的斥力，在小轉盤推出逆時針力矩（如圖 4 所示）（第 7 題）。

至於 A 磁極的方向反轉時，因為磁場仍是增加，故 Y 產生的感應磁場仍會與 A 磁場反向，磁力維持相斥。A 磁極方位反轉，只會改變 Y 的感應磁場與磁極方向，不會改變磁力方向（第 8 題）。

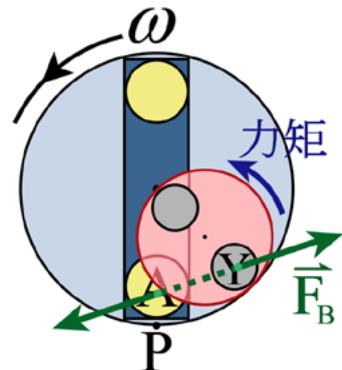


圖 4: Y 受 A 之磁力與力矩

常見錯誤：第 7 題，判斷 A、Y 間的磁力時，有學生誤以為所有導電體（如：鋁），皆會與磁鐵相吸，透露出他們將**導電物質**（金屬）與**磁性物質**（鐵、鈷、鎳）混為一談。令人驚訝的是，高達一半的學生，無法從受力方向推出轉盤的力矩（ $F \Rightarrow \tau$ ）。有人說：“因為排斥力，所以兩個轉盤轉動方向相反”。學生無法由力推出力矩方向，可能源自於知識領域的不當切割，先前學過的**力學**概念，可能被排除在回答**磁學**單元之外，值得教師的重視與協助。

許多學生無法正確判斷 A 磁極反轉時，Y 所感應的磁力方向是否反向（第 8 題），同時，也無法判斷感應電流是否反向（第 2 題），因此，電磁感應的概念推理，對許多學生，似乎仍具挑戰，需透過不同的情境，多加練習。

第 9 ~ 11 題

正確觀念：如圖 5，手握鋁塊，可以使旋轉的磁鐵轉盤減速，可以使學生親身體驗電磁感應，造成磁力的神奇現象。但判斷感應磁極、磁力、感應電流 … 等，則需周全的概念理解。

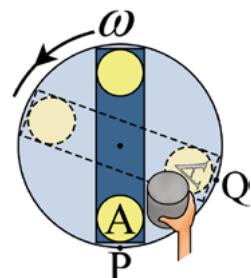


圖 5: 鋁塊使磁鐵減速

A 磁鐵轉到 Q 點瞬間，正在遠離鋁塊，所以鋁塊的感應磁場與 A 的磁場同向（以阻止 A 磁場的減小）。因為 A 的 N 極朝下，A 磁場向下，所以鋁塊的感應磁場也向下，（N 極朝下、S 極朝上）（第 9 題）。因此，Q 點上的 A 磁鐵，會受到鋁塊的吸引力，因而對轉盤造成順時針力矩，使得轉盤減速（如圖 6 所示）。

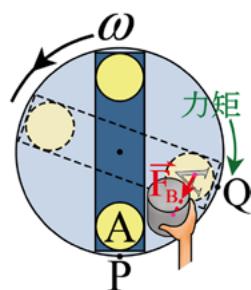


圖 6: Q 點磁鐵受鋁塊吸引

鋁塊因磁力 (F_B) 作用而使轉盤減速，磁力大小取決於鋁塊的感應電流 (I)，而感應電流需要感應電壓 (V) 來驅動，再根據法拉第定律，感應電壓 (V) 取決於磁場變化率 ($V \propto \Delta B / \Delta t$)。因此，全部過程之因果關係為：

[磁鐵旋轉 $\Rightarrow \Delta B / \Delta t \Rightarrow V \Rightarrow I \Rightarrow F_B$]。

若將手持的鋁塊改為木塊，則磁鐵轉盤的轉速不受影響，主因是木塊為非導體，根據 $I = V / R$ ，木塊因電阻 (R) 大，而造成電流 (I) 小。再透過磁力公式：電流越小，磁力就越小，因此木塊無法使 A 磁鐵轉盤減速。然而，判斷鋁與木塊的感應電動勢 (V)，則需依據兩種材料上的磁場變化 ($V \propto \Delta B / \Delta t$)。因為鋁及木頭，皆為非磁性物質，導磁效果皆很差，因此，鋁塊與木塊的感應電動勢 (V) 幾乎相等 (僅與 A 磁鐵的運動有關) (第 10 題)。

綜合以上，與鋁塊可使磁鐵轉盤減速，而木塊不會的原因，只是因為導電性的不同，而兩者的導磁性並無明顯差異 (第 11 題)。

常見錯誤：第 10 題，分辨鋁塊與木塊的感應電壓 (V) 與電流 (I) 是否有明顯差異，難倒了大多數學生，高達八成誤選了木塊的 I 、 V 、 F_B 皆小於鋁塊。錯誤的原因包含：

(1) 誤解感應電流 (I) 與電壓 (V) 的因果關係，以為 V 是 I 的結果。事實上，有電壓 (V) 才有電場 (E)，得以使電子受力，以便驅動電流 (I)，因此 V 是 I 的原因，不是結果。

有關電流 (I) 與電壓 (V) 間的因果，可進一步參閱本專欄的『真、假「歐姆定律」』單元。

(2) 對於材料「導電性」與「導磁性」(磁化程度)的混淆，以為導電性好的材料，導磁性也必然較好 (第 11 題)。事實上，有許多的金屬 (如：鋁)，都無法與磁鐵相吸 (跟木頭一樣)，所以鋁與木頭的導磁性是一樣差的。

(3) 誤用了「安培右手」的電生磁 ($I \Rightarrow B$)，以為磁場變化 ($\Delta B / \Delta t$) 是感應電流 (I) 的結果，因此，錯誤推得 I 小 $\Rightarrow B$ 小 $\Rightarrow V$ 小。事實上，磁場變化 ($\Delta B / \Delta t$)，是造成感應電壓 (V) 與電流 (I) 的原因，而非結果。

—————| 重要概念及常見盲點 |————

綜合以上，雖然大多數學生寫出「冷次定律」的名稱，來解釋本單元的現象，但許多人卻未能掌握「冷次定律」所涉及的概念推理。

「冷次定律」所涉及的“反向”，指的是 Y 鋁幣的感應磁場，與 A 磁鐵的磁場變化，方向相反 ($\mathbf{B}_Y' \hat{=} -\Delta\mathbf{B}_A$)。但學生可能誤以為，Y 與 A 的磁場必反向，或 A、Y 磁極必反向，忽略了“變化”的概念(第4題)；也可能誤將反向，聯到 Y、A 間必互相排斥(第3、7題)。

本教具所涉及的「冷次定律」**因果推理**包含：

- (1) A 磁鐵因轉動而改變磁場，進而在 Y 鋁幣產生感應電壓 ($\Delta\mathbf{B}_A \Rightarrow V_Y$ ，磁生電)，
- (2) Y 之感應電壓，造成感應電流 ($V_Y \Rightarrow \mathbf{I}_Y$ ， $I = V / R$)；
- (3) Y 之感應電流產生感應磁場 ($\mathbf{I}_Y \Rightarrow \mathbf{B}_Y$ ，電生磁)，
- (4) 最後的 \mathbf{B}_Y 會與 $\Delta\mathbf{B}_A$ 反向(冷次定律)。

所以，「冷次定律」不僅包含「磁生電」，還包含「電生磁」(第6題)。讀者可參閱本專欄的「**冷次定律與磁煞現象**」單元，進一步釐清其中的因果推理。

最後，鋁塊的磁力效果比木塊顯著(圖5)，則是因為上述推理中的 ($V_Y \Rightarrow \mathbf{I}_Y$ ， $I = V / R$)，故僅與材料之「導電性」差異有關，與「導磁性」無關(第11題)。許多學生誤以為金屬導體(如：鋁)，也會吸引磁鐵(第7、9題)；或是電流大的物體，電壓必較大(第10題)，都是未能辨別材料「導電性」與「導磁性」的不同，讀者可參閱本專欄的「**彈跳線圈探討磁學**」單元，以進一步釐清此概念。

註 1. 所有的黑體英文字母，代表向量，包含大小與方向。

註 2. 本單元承蒙科技部科學教育實作學門補助，計畫編號

MOST 107-2511-H-018-008 –

作 | 張慧貞 教授
者 | 彰化師範大學物理系物理教育組