

磁鐵動力車 | 解析

詳解與困難剖析

針對「磁鐵動力車」(如圖 1)，所有試題的正確答案、常見錯誤、及難度，如表 1 所示：



圖 1：磁鐵動力車裝置

題號	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
正確答案	A	A	B	A	D	C	B	A	B	C	B	D	C
常見誤答	X	B	A	BCF	C	D	C	A	AC	A	A	C	AB
難度	易	中	中	難	難	中	難	難	難	難	難	難	中

表 1：各題之正確答案、常見錯誤、及題目難度

第 1~3 題

正確觀念：圖 2 中磁棒組的電流方向，需根據電池的正負極方向來判斷。電流從電池下方的正極流出，負極流入，所以磁棒組的電流應向上(↑)(第 1 題)。

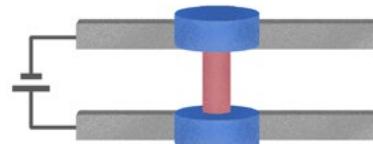


圖 2：器材裝置俯視圖

圖 3 顯示，磁棒組中的兩磁鐵是 S、S 相對，當兩磁鐵由遠處逐漸靠近時，的確會先出現「同極相斥」的現象，但當磁鐵中有鐵棒連接，且非常靠近時，卻會突然由排斥力變為吸引力，使圖 3 的兩磁鐵可以透過鐵棒牢牢吸住(第 2 題)。



圖 3：磁極方位

上述現象，是因為鐵棒受到兩磁鐵的 S 極，分別在上下感應出兩個 N 極，因此，感應後鐵棒出現兩對 NS 極，形成磁四極，如圖 4 所示。所以，在磁鐵與鐵棒接觸點，仍維持 NS 相對而相吸，不違反「同極相斥、異極相吸」的原理(第 3 題)。

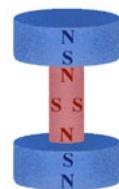


圖 4：鐵棒感應磁四極

常見錯誤：大多數學生都能正確地從電池判斷出磁棒組上的電流方向(第 1 題)。同時，透過實際操作也能親身體驗，同極相對的兩磁鐵，透過中間鐵棒，的確可以吸住(第 2 題)。雖然多數同學同意，此一“同極相吸”的奇異現象，並未違反「同極相斥」的定則，但所持的理由卻出乎意料。例如：“鐵棒沒有 N、S 極，所以不會與磁鐵排斥”；“雖然是 S、S 相對，

但是磁鐵一定可以吸住鐵棒”；“因為鐵棒沒有帶電，所以兩磁鐵還是可以相吸”。以上作答，不但沒有正面解釋，為何鐵棒可吸住同極相對的兩磁鐵，同時，也誤以為“鐵”雖然會吸住磁鐵，但不會受磁鐵感應出N、S極。甚至將磁極與電荷相混淆：誤以為電中性的鐵棒，就不會感應NS極。

另外，還有人說“不會違反，因為物理定律一定是對的，不可能被推翻”；“沒有推翻，因為學說是宇宙的真理，是許多科學家實驗的結果”。這種說法針對兩磁鐵S、S相吸，並未提出具體辯駁，同時也對“物理定律”的適用範圍，存有偏見。所有的物理定律，都有它的限制範圍與適用條件，忽略限制條件的結果，很可能導致定律的濫用。

第4~7題

正確觀念：根據圖4中，鐵棒與磁鐵所感應的NS極分佈，可以畫出磁力線分布圖(俯視圖如圖5)。因此，若以側視圖(如圖6)分析，在鐵棒中央的磁場方向為**輻射向內**，如圖7所示。因此，鐵棒P點之磁場($\mathbf{B}:\uparrow$)(第4題)。

第5題，P點所受磁力，可透過「右手開掌定則」，以圖6之側視圖來觀察，根據磁場($\mathbf{B}:\uparrow$)與電流($\mathbf{I}:\otimes$)方向，推出磁力($\mathbf{F}_B:\rightarrow$)(如圖8)。

同時，也可根據圖7得知鐵棒Q點之磁場($\mathbf{B}:\downarrow$)，且已知電流($\mathbf{I}:\otimes$)，因此Q點所受磁力($\mathbf{F}_B:\leftarrow$)，因此Q點之磁場(\mathbf{B})及磁力(\mathbf{F}_B)，皆與P點反向(第6題)。

綜合以上，P、Q兩點的磁力恰好左右相反，且因對稱而大小相等，依此類推，鐵棒中央任何相對應的兩點，所受到的磁力，都因對稱而互相抵消，所以磁力和為零($\Sigma\mathbf{F}_B=0$)，質心不會移動。但各點所受**磁力矩**，則皆為逆時針，會使磁棒組(原地)逆時針旋轉。但當磁棒組轉動時，磁鐵會向右頂軌道，使軌道對磁鐵產生向左的摩擦力。此摩擦力會使磁棒組向左加速前進。

根據以上，判斷磁棒組的磁力(第5、6題)，是透過「右手開掌定則」，根據**B**及**I**推得 **\mathbf{F}_B** ；其中的磁場方向(**B**)，是磁鐵對鐵棒所造成的，需由磁極分佈推得，因此推導磁力，沒有使用「安培定律」(第7題)。

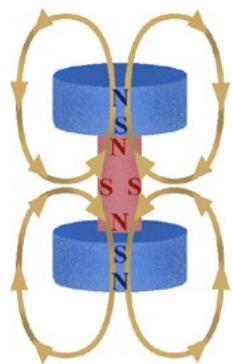


圖5：磁力線分佈

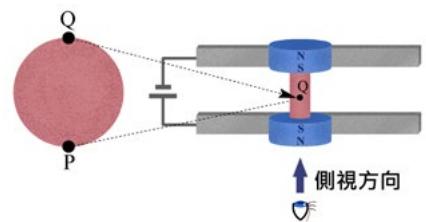


圖6：鐵棒中央側視圖

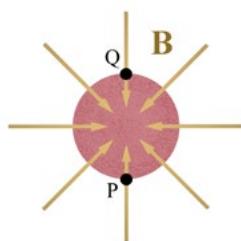


圖7：側視圖磁場分佈

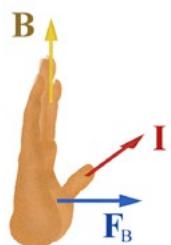


圖8：右手開掌定則

值得探討的是，在理論上，透過「安培定律」是可能讓**鐵棒**，在通電的鋁製軌道上移動（如圖 9 所示）。因為電池所提供的逆時針電流，會在電路中產生射出的磁場（ $\mathbf{B}:\odot$ ）。在鐵棒上電流（ $\mathbf{I}:\uparrow$ ）及磁場（ $\mathbf{B}:\odot$ ），所以產生磁力（ $\mathbf{F}_B:\rightarrow$ ）。但因磁力太小，不足以克服軌道的摩擦，因此鐵棒維持靜止不動。所以，理論上「安培定律」雖然可能使鐵棒前進，但以現有器材的數值條件，鐵棒的運動現象，無法實現。



圖 9：鐵棒維持靜止不動

常見錯誤：磁場的判斷（第 4、6 題），常見錯誤包含：(1) 誤以迴路電流（ \mathbf{I} ：逆時針）的感應磁場（俯視圖 $\mathbf{B}:\odot$ ；側視圖 $\mathbf{B}:\uparrow$ ），當成磁鐵的磁場；或誤以鐵棒上的電流（側視圖 $\mathbf{I}:\otimes$ ），推論鐵棒上 P 點的磁場（ $\mathbf{B}_p:\leftarrow$ ）。兩種情況都引用「安培右手」，但皆忽略了試題中指明的“磁鐵所產生的磁場”。(2) 誤將「射出」（ \odot ）與「向上」（ \uparrow ）相混淆，顯示出空間向量概念的混淆。(3) 以為鐵棒中的磁場（磁力線），必平行於鐵棒的 N、S 極（側視圖中選擇 $\mathbf{B}_p:\otimes$ 或 \odot ），缺乏磁力線需形成**封閉曲線**的性質，也未考慮到兩端磁鐵對整體磁力線（磁場）的影響（如圖 5 所示）。

至於**磁力**的推理盲點（第 5、6 題），主要是誤解了，「右手開掌定則」所涉及電流、磁場、及磁力的**因果關係**（ $\mathbf{I}, \mathbf{B} \Rightarrow \mathbf{F}_B$ ）。磁力的產生，需要有導線電流，搭配**外加**的磁場，因為同一位置的電流，並不會在自己身上產生磁場。因此，電流（ \mathbf{I} ）與磁場（ \mathbf{B} ）必須是兩個不同的來源，才能產生磁力（ \mathbf{F}_B ）。但是，許多學生卻誤以磁棒組的電流，及此電流所產生的磁場，來推導磁力。

另外，也有少數學生沒能掌握「右手開掌定則」的用法，可能混淆了 \mathbf{I} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{F}_B 在右手掌/手指的對應關係，也可能誤以左手判斷。

第 8~9 題

正確觀念：根據前述推論，鐵棒上所受的磁力，因對稱而使**磁力總和 = 0**，但會造成力矩，故僅能使鐵棒組（原地）加速**轉動**。第 8 題，已知磁棒組向右加速，故磁力矩為順時針，所需的外力，需由摩擦力提供，故此磁棒組所受軌道的摩擦力為向右（如圖 10 所示）。

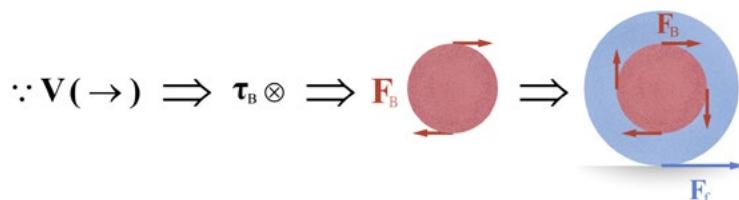


圖 10：由運動推導摩擦力

同時，此摩擦力的產生，需有賴磁棒組順時針加速旋轉，而旋轉所需的力矩，則來自鐵棒各點所受的磁力矩。因此，單就**磁力**的效果，只能使磁棒組順時針（原地）轉動（第9題）。

常見錯誤：許多學生誤以為摩擦力必為阻力，所以認為摩擦力會與運動方向相反（第8題）。同時，也誤以為磁力是使得磁棒組向右平移的原因，忽略了磁力總和為零，僅磁力矩不為零（第9題）。另外，更多的人將磁棒組的**向右平移**及順時針轉動，皆視為磁力的效果。解釋時，誤以為物體只要“順時針轉動，就會向右前進”，缺乏“打滑”的概念，沒能區分**「力」**（ $F = ma$ ）及**「力矩」**（ $\tau = I\alpha$ ）的不同運動效果。

其實，摩擦力可能使物體減速，也可能加速物體。例如：汽車也是靠輪子，受到地面施與向前的（靜）摩擦力，才能加速前進，而此摩擦力則是透過引擎提供車輪自轉的力矩，讓輪子原地轉動所造成。如果地面過於光滑（如冰上或沙灘上），則車子只會原地打滑，無法加速前進。磁鐵棒的滾動前進，與車輪的情況類似。

第 10~13 題

正確觀念：如圖 10 之推論，因為磁棒組向右滾，得知磁力矩為順時針，因此可知圖 11 中，鐵棒 Y 點所受的磁力（ $F_B: \uparrow$ ），再以「右手開掌定則」，根據 $I:(\otimes)$ 及 $F_B:(\uparrow)$ ，反推所需的磁場（ $B: \leftarrow$ ）（第 10 題）。因此，推導流程是由運動方向推出磁力方向，再反推所需磁場方向（ $v \Rightarrow F_B \Rightarrow B$ ）（第 11 題）。

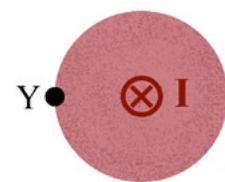


圖 11：鐵棒中央磁場與磁力

至於磁鐵的方位，可由 Y 點磁場（ $B: \leftarrow$ ），類推到鐵棒中央的磁場分佈，應為輻射向外。因此鐵棒中央應為 N 極，故上下兩端為 S 極，所以，推得兩磁鐵應為 N、N 相對（如圖 12）（第 12 題）。

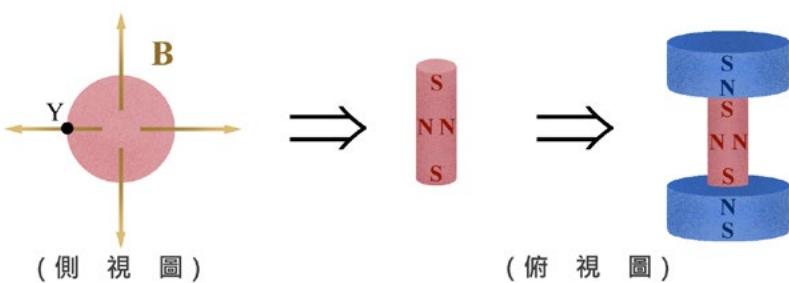


圖 12：磁場推出磁極方位

最後，要造成磁棒組反向滾動，需要反向的力矩（由磁力提供），因此，磁力方向須反轉。根據「右手開掌定則」（ $I \cdot B \Rightarrow F_B$ ），只有電流或磁場，任何一種方向反轉皆可，但不能兩者皆反轉（第 13 題）。

常見錯誤：許多同學則直接從鐵棒電流，根據「安培右手」得到Y點的磁場($\mathbf{B}:\uparrow$)，進而推得磁力($\mathbf{F}_B:\rightarrow$)(第10題)。此推論若考量鐵棒夠粗，則理論上是正確的，但依此類推到鐵棒圓周的磁力，則會因對稱而相互抵消，合力為零。同時也沒有磁力矩，因此，鐵棒本身電流所產生的磁場，並不會使鐵棒運動。

另外，許多人誤以為「右手開掌定則」只能從磁場推出磁力($\mathbf{B} \Rightarrow \mathbf{F}_B$)，不能反推。透露了推理流程，只能從原因推結果，無法從結果來反推原因的迷思。事實上，推理流程可以順著因果，但也可能需逆著因果推導，一切取決於已知條件(第11題)。

最後，造成磁棒組反轉的方法(第13題)，選錯的人多數認為，“只有電流方向才是決定磁力方向的原因”(與磁極方位無關)，這項錯誤與前幾題有關，皆是選錯了有效磁場的來源。

重要概念及常見盲點

綜合以上，本單元除了涉及磁學的重要原理之外，也展現出「探究與實作」的內涵與精神。從觀察一個真實現象，到探究可能原因(科學建模)，到檢測原理的合理性(實作)，進而確定(或修正)原有理論(探究)。

例如：透過鐵棒與磁棒組的比較，可以釐清造成運動的磁場，究竟來自電流或是磁鐵？「安培定律」是否適用此情境？另外，“同極相對”的磁鐵，可以透過鐵棒吸住，又不違反「同極相斥」定律，則有賴於鐵棒感應磁極的科學建模。因此，本單元凸顯出「探究與實作」中，科學原理與現象觀察需緊密結合的特徵，現象觀察(實作)，需建立在科學理論之上，並透過所觀察的結果，篩選適用的科學模型。

同時，本單元也發現了學生常見的概念盲點，包含：(1)「力」與「力矩」的區別，「力矩」只能使物體原地轉動，而物體的前進則需靠「力」(第9題)。(2)摩擦力不一定阻止運動，也可能是促進物體運動的原因(第8題)。(3)「右手開掌定則」的推導流程，不一定順著因果流程，也有可能從結果(\mathbf{F}_B)反推原因(\mathbf{I} 或 \mathbf{B})(第11題)。同理，所有定律的使用，都可能順著因果，或逆著因果來推導。

作 | 張慧貞 教授
者 | 彰化師範大學物理系物理教育組