

觀念物理－解答

「冷次定律」與磁煞現象

詳解與困難剖析

針對「冷次定律與磁煞現象」的問題，每題的正確答案、常見錯誤選項、及試題難度，列於表 1，並說明如下。

表 1：各題之正確答案、常見錯誤、及題目難度

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

第 1 題

正確觀念：根據現象的觀察，磁鐵在鋁管中的下落速度會小於玻璃管（如圖 1）。其原理是：磁鐵在下落的過程，磁鐵的外加磁場變化（ ΔB ），在管子上產生感應電壓（ $V' \propto \Delta B$ ），使管子產生感應電流（ $I' = V'/R$ ），進而產生感應磁場（ B' ）。鋁管因感應磁場（ B' ）與磁鐵（ B ）間，會有磁力阻礙磁鐵的運動。而鋁管之所以阻力較大，是因鋁為金屬，電阻（ R ）較小，所以感應電流較顯著（ $I' = V'/R$ ），使磁（阻）力比玻璃管來得明顯。

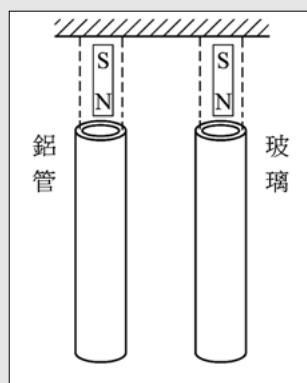


圖 1：磁鐵賽跑

常見錯誤：雖然大多數同學皆答對，但似乎有許多人誤解鋁管較玻璃管顯著的原因。兩種管子主要是電阻影響感應電流（ $I' = V'/R$ ），而不在於磁生電（ $V' \propto \Delta B$ ）的差異。換句話說，無論是鋁管或玻璃管，磁鐵的外加磁場皆相同，根據「法拉第定律」（ $V' \propto \Delta B$ ），因磁鐵的移動，在玻璃管中的「感應電壓」（或電動勢），並不會小於鋁管的效果，只是因為電阻的差異，導致電流與磁力的顯著不同。

第 2~5,7 題

正確觀念：首先，根據「法拉第定律」，外加磁場（或磁通量）變化（ ΔB ），會導致感應電壓與電流（ V', I' ），簡稱為「磁生電」（ $\Delta B \Rightarrow V', I'$ ）；再根據「安培定律」感應電流會產生感應磁場（ B' ），簡稱為「電生磁」（ $I' \Rightarrow B'$ ），因此外加磁場變化會產生感應磁場（ $\Delta B \Rightarrow B'$ ）。而「冷次定律」則描述「感應磁場」（ B' ）會與「外加磁場變化」（ ΔB ）間反向的關係（第 7 題）。換言之，「冷次定律」（磁生磁），涵蓋了 [磁生電]（法拉第定律）與 [電生磁]（安培定律），兩個定律（如圖 2 所示）。

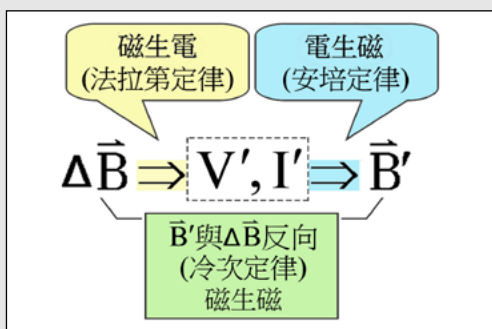


圖 2: 「冷次定律」的涵蓋面

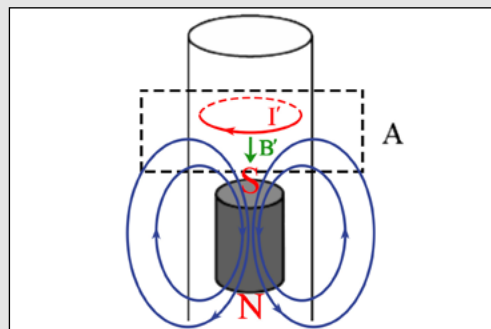


圖 3: 感應電流與感應磁場

根據「冷次定律」，感應磁場 (B') 會與外加磁場的變化 (ΔB) 反向。根據圖 3，磁鐵因 S 極在上、N 極在下，在鋁管內的外加磁場方向為向下 ($B: \downarrow$)，且磁鐵正在遠離 A 區，外加磁場正在減小，故外加磁場變化為向上 ($\Delta B: \uparrow$)。根據冷次定律，A 區的感應磁場 (B') 應與 ΔB 反向，所以感應磁場 ($B': \downarrow$)。若比較感應磁場 (B') 與磁鐵的磁場 (B)，則兩者皆向下，(B, B' 間同向，第 3 題)。既然鋁管 A 區的感應磁場向下，則 A 區相當於一個 N 極在下、S 極在上的磁鐵，所以 A 區與磁鐵會相吸 (第 5 題)。

根據冷次定律，由外加磁場的變化，確定感應磁場的方向後 ($B': \downarrow$)，可以反推鋁管上的感應電流，利用安培右手定則，由上方觀察的感應電流應為順時針 (第 2 題)。感應電流與感應磁場的關係，是遵守「安培定律」(電生磁) ($I' \Rightarrow B'$) 的規範 (第 4 題)。但是，推理的流程卻需與因果流程相反，由感應磁場反推電流方向 ($B' \Rightarrow I'$)，因為感應磁場需由外加磁場變化先確定 ($\Delta B \Rightarrow B'$, 冷次定律)。因果流程與推理流程的分歧，請參閱圖 4。

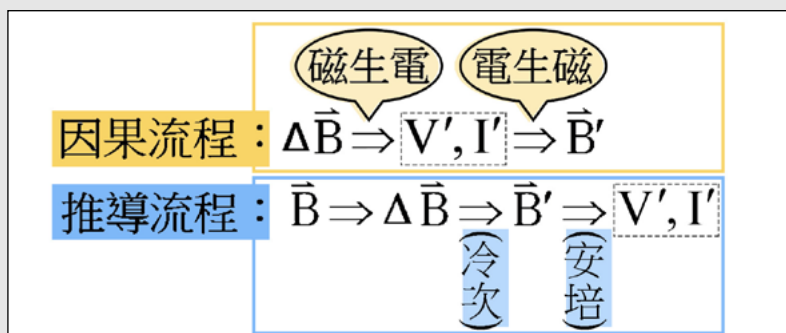


圖 4: 因果流程及推導流程

常見錯誤：許多學生對「冷次定律」所涵蓋的概念，存有許多模糊的想法。包含以下五點。(1) 將「冷次定律」所描述的反向概念，侷限於「磁生電」的現象 (第 7 題)，卻沒有意識到，感應「電流」、甚至「電場」，都與「磁場」方向相垂直，不可能彼此反向。只有**感應磁場**，才可能跟**外加磁場**變化相反向，因此，冷次定律所探討的是「磁生磁」的反向關係。(2) 既然探討的是「磁生磁」，就包含 [磁生電] + [電生磁]，但許多同學卻忽略了 [電生磁] (安培定律) 在冷次定律中所扮演的角色，混淆了彼此的因果關係 (第 4 題)。(3) 多數學生對「冷次定律」，雖然知道有「反向」的概念，但卻以為感應磁場會與外加磁場反向，第 3 題有許多人誤選了感應磁場與磁鐵磁場「反向」，忽略了「變化」的要素。**感應磁場抵抗的，是外加磁場的「變化」，而不是外加磁場本身。**(4) 冷次定律探討的是感應磁場 (鋁管產生) 與外加磁場 (磁鐵產生) 間的關係，但有部分同學卻誤將兩者混為一談。(5) 也有多人誤將冷次定律的「抵抗」與「排斥力」畫上等號，直接套招而沒有進行推理 (第 5 題)。因此，似乎有許多學生無法掌握「冷次定律」全部的細節。

第 6 題

正確觀念：將鋁管的 A 區改為 B 區來探討，則外加磁場的變化，由遠離（減小）變為靠近（增大），因此感應磁場會與外加磁場反向（以阻止磁場的變化）。因此，B 區的感應磁場方向會與 A 區相反，感應電流也需相反（根據安培定律），而磁力也會變成排斥力。因此，B 區的感應磁場、電流、磁力，皆不同於 A 區的答案。

常見錯誤：此題的盲點相當多元，有些同學可以掌握感應磁場的不同，但對於電流與磁力的判斷，卻遭受困難。這項結果呼應上述的推理流程，因為感應磁場 (B') 是推導電流 (I') 與磁力 (F_B) 的基礎，學生雖已掌握此項基礎，但似乎對後續的電流與磁力的概念推理，不夠熟悉。

第 8~10 題

正確觀念：在磁鐵下滑過程，磅秤所秤得的重量 (W)，會等於鋁管所受的向下合力，不包含磁鐵的重力 ($m_B g$)，因為磁鐵並未直接碰到磅秤。磁鐵及鋁管所受的力圖分析，如圖 5 所示。鋁管所受的向下外力，除了鋁管重力 ($m_t g$) 之外，還需加上磁鐵對鋁管作用的磁力 (F_B) (第 8 題)。磁鐵因磁力而減緩其下滑速率，因此磁鐵所受的磁力向上，根據牛頓第三定律，得知鋁管所受磁力應向下。

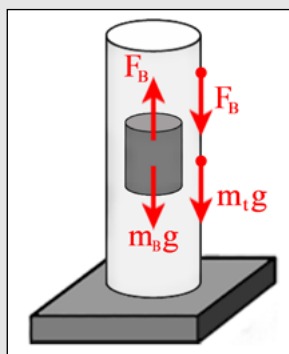


圖 5: 力圖分析

至於磁鐵的加速度，可根據磁鐵的合力，透過 $\Sigma \vec{F} = m\vec{a}$ 推得。磁鐵所受合力包含磁鐵重力 ($m_B g \downarrow$) 及磁力 ($F_B \uparrow$)，所以磁鐵加速度 $a = (m_B g - F_B) / m_B$ (第 9 題)。過程中的加速度並非定值，因為其中的磁力 (F_B)，會隨磁鐵的速率而增加 ($F_B \propto I' \propto V' \propto \Delta B / \Delta t \propto v$)。當磁力等於磁鐵重力時，加速度等於零 ($F_B = m_B g \Rightarrow a = 0$)，此時磁鐵達終端速度。

因此，磁力的大小會由零，逐漸增大，直到與磁鐵重力相等後，維持定值。所以，秤重 (W) 也會受磁力增加的影響，秤重逐漸增大後，再維持定值 (第 10 題)。

常見錯誤：針對秤重與加速度的問題，學生常見的盲點包含：(1) 忽略了磁鐵並非等速 ($a \neq 0$)，誤以為 [秤重] = [磁鐵 + 鋁管] 的重力，但此答案僅適用於磁鐵達終端速率的條件 ($a = 0$)；(2) 誤以為鋁管所受的磁力向上，則秤重大小 (第 8 題)、及秤重變化 (第 10 題)，均會同時答錯；(3) 也有人將「質量」與「重量」相混淆，用 m_B 代表其重量，直接將 m_B 與 F_B 相加減。

不當推理及有效策略

綜合以上，雖然多數學生對於「冷次定律」應用於磁煞現象，並不陌生。但是，對於冷次定律的涵蓋面與概念推理，仍有許多誤解。本單元透露出學生對於冷次定律的常見盲點包含以下四點：

(1) 冷次定律所描述的“反向”是「磁與磁」間的比較，不是「磁與電」之間；
(2) 冷次定律不僅是描述磁生電，還包含電生磁，所以，冷次定律涵蓋法拉第定律與安培定律，而其中的電生磁（安培定律），往往在冷次定律的推理中被忽略；
(3) 冷次定律指的是感應磁場與外加磁場的**變化**反向，但很多同學忽略了“變化”，誤以為「感應磁場」會與「外加磁場」反向；
(4) 甚至，有人將鋁管的**感應**磁場與磁鐵的**外加**磁場混為一談；
(5) 產生感應磁場的來源，是來自感應電流 ($I' \Rightarrow B'$)，但判斷時須逆著此因果順序。由感應磁場（根據冷次定律），才能進而反推感應電流（根據安培定律），推理流程與因果流程的分歧，造成學生的困難。

以上所歸納的概念推理盲點，不單單是源自觀念上的誤解，還包含學生如何看待「冷次定律」的“視野”。例如：「冷次定律」究竟涉及幾個定律？幾個磁場？「磁生電」是否需與「電生磁」相整合？「推理流程」是否必然需順著「因果流程」？要促進學生的概念理解，啟發上述的“視野”應是學習的第一步。