

觀念物理一題目

慣性與摩擦 (II)

延續上一單元，讓我們繼續探討「慣性」、「平衡」、「摩擦力」、與「牛頓三大運動定律」的重要概念意義，及彼此的來龍去脈。

小試身手

(以下所有試題皆忽略空氣阻力)

- () 1. 一顆石頭以同一條細繩綁成如圖 1 之情況，當快速下抽石塊下方的細繩，可以使下方繩抽斷且石塊仍被上方繩繫住，則用力抽(繩子斷之前)的瞬間，此時石塊是否達「力平衡」？

(A) 是 (B) 否

- () 2. 承上題，下方繩子抽斷(斷之前)的瞬間，石頭的**加速度**方向應該為何？

(A) 向上 (B) 向下 (C) 加速度為零

- () 3. 圖 2 表示一曲棍球，在水平無摩擦之地面上，以等速由 a 點朝 b 點方向滑動。當球到達 b 點時，受到一球員以箭頭方向**瞬間一擊**。則球在受球員一擊之後的軌跡應該是 (A)~(E) 選項的那一項？

- () 4. A、B、C 三個木塊垂直疊放，受到水平方向之力拉動，已知所有接觸面(含地面)皆為粗糙面(如圖 3)，當此三個木塊保持**等速度**的過程，則

(A) AB 間無摩擦力、BC 間有摩擦力
 (B) AB 間有摩擦力、BC 間無摩擦力
 (C) AB 間、BC 間，均有摩擦力
 (D) AB 間、BC 間，均無摩擦力



圖 1：快抽下方繩

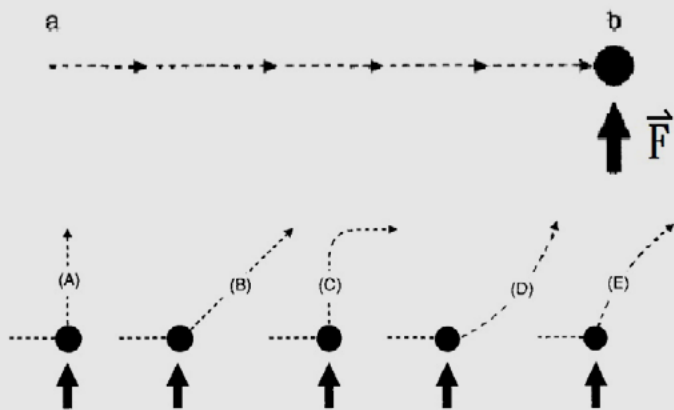


圖 2：曲棍球軌跡

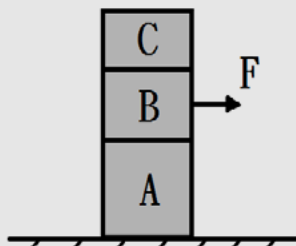


圖 3：木塊間的摩擦

- ()5. 如圖 4，快速抽桌巾使其完全抽離桌面，但桌上餐具幾乎不動，若將桌巾**抽得更快**，**餐具**所受的摩擦力大小應該會如何？
 (A) 變大
 (B) 變小
 (C) 維持為零
 (D) 維持不變，但不為零



圖 4：抽桌巾

- ()6. 承上題，請比較「快抽桌巾使其抽離」與「緩慢拉桌巾」(餐具隨桌巾前進，彼此沒有滑動)，兩過程中餐具受到之摩擦力大小關係
 (A) 快抽 = 慢拉，因為摩擦力的大小與速度無關
 (B) 快抽 > 慢拉，因為快抽時餐具的加速度較大
 (C) 快抽 < 慢拉，因為快抽時間太短，力來不及傳遞
 (D) 快抽 < 慢拉，因為動摩擦係數比靜摩擦係數小
 (E) 以上皆非

- ()7. 小瑋坐在公車上，放開手上的小球 (直接施放沒有施力)，小瑋看到小球的軌跡如圖 5 所示，當球在點 1 剛被釋放後瞬間 (已離手)，球所受到的力包含哪一 (些) 向量？
 (A) 只有 ↓ (B) 只有 ↓ 及 →
 (C) 只有 ↓ 及 ← (D) 無法判斷

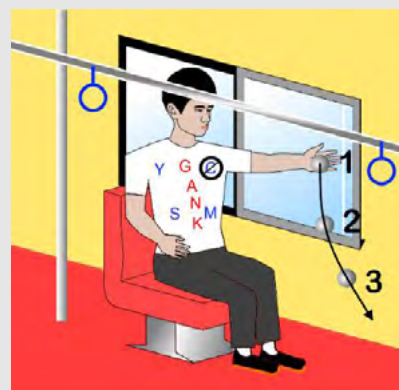


圖 5：公車上的落體

- ()8. 乘客在行駛中的車內，當緊急剎車時，他們的身體會向前傾 (如圖 6)，則緊急剎車之瞬間，乘客的哪些物理量方向向前？
 (i) 合力 (ii) 加速度 (iii) 慣性
 (A) i, ii (B) ii, iii (C) i, iii
 (D) i, ii, iii (E) 以上皆非

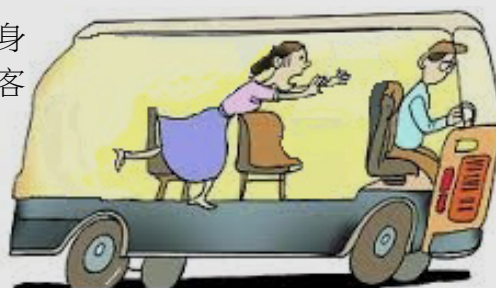


圖 6：剎車前傾

- ()9. 「平衡」是否必為「靜止」？
 (A) 是 (B) 否
- ()10. 「靜止」是否必為「平衡」？
 (A) 是 (B) 否

觀念物理－解答

慣性與摩擦 (II)

詳解與困難剖析

本單元延續上一單元，繼續探討「慣性與摩擦」的概念。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	B	B	B	D	B	A	E	B	B
常見誤答	A	C	A,D,E	C	A,B	A,D	B	D	無	A
難度	難	難	中	難	中	難	中	難	易	難

第 1, 2 題

正確觀念：

當手快速下抽，可扯斷下方繩，且維持石頭靜止(如圖 1a)。雖然石頭看似靜止，但加速度不一定是零。根據 $\Sigma \vec{F} = m\vec{a}$ ，由力圖分析推出「合力」，再推得「加速度」($\Sigma \vec{F} \Rightarrow \vec{a}$)。因為下方繩即將斷裂，所以石頭所受下方繩的張力大於上方繩，再加上重力(W)(如圖 1b)，所以石頭所受合力為向下，故加速度也向下(第 2 題)。因為合力與加速度皆向下(不為零)，所以石頭不滿足平衡的條件(第 1 題)。本題組在於分辨「速度」與「加速度」($\vec{v} = 0$ ，但 $\vec{a} \neq 0$)。

常見錯誤：

本實例常被誤用來解釋「慣性」，造成很高比例的同學誤以為「靜止」就是「平衡」，也以為「加速度=0」。錯誤推理包含：(1)將「靜止」(速度為零)與「加速度為零」畫上等號，他們忽略了 $\vec{a} = \Delta \vec{v} / \Delta t$ 的式子，在分母趨近於零時，是無法推導的。此時應透過「力圖分析」來推出「加速度」；(2)誤解「慣性」是一種維持平衡的作用，如“此時即將斷的瞬間石頭還有慣性，所以維持平衡”；(3)透露出「力的傳遞需要時間」的迷思：“力量還來不及傳到石頭”(所以維持平衡)；(4)也有人創造了反向的「平衡力」，以維持平衡。



圖 1a：快抽下方繩

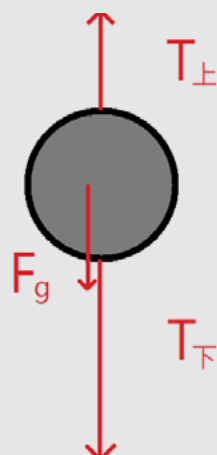


圖 1b：石頭的力圖

第 3, 4 題

正確觀念：

這兩題的概念要點都是「合力=0」與「維持等速度」的連結。第 3 題 (如圖 2)，當腳瞬間一踢，使得曲棍球獲得向上的動量，之後外力消失，球會**維持等速度運動**，加上原有向右的速度 ($\rightarrow + \uparrow = \nearrow$)，所以軌跡為直線朝右上 (B)。

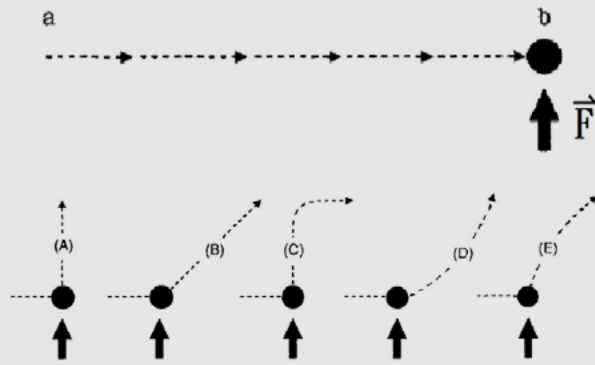


圖 2：曲棍球軌跡

第 4 題 (如圖 3a) 探討的是三個木塊在粗糙平面上維持等速度，每個接觸面的摩擦力。分析時，須先將 A、B、C 三個木塊視為獨立系統 (如圖 3b)，根據「牛頓第一定律」：維持等速度，則合力=0。先從木塊 C 開始，因為 C 的水平外力來源只可能來自 BC 間的摩擦力，且知其合力=0，所以 BC 間必無摩擦。至於 B 木塊因已受到向右的拉力 F，且 BC 間無摩擦，故 B 應會受到 A 的摩擦向左 (大小=F)，才能維持 B 的合力=0。因此，A 木塊上方受到 B 的摩擦為 F 向右，但 A 仍能滿足合力=0，因為 A 受到地面的摩擦向左 (大小也是 F)。所以，AB 間有摩擦，但 BC 間無摩擦。

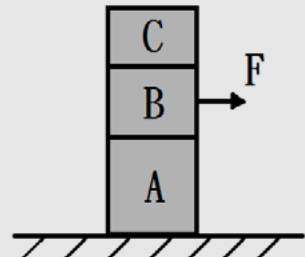


圖 3a：木塊間的摩擦

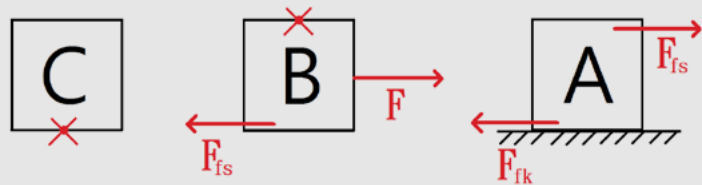


圖 3b：切割系統分析

常見錯誤：

第 3 題的作答很紛歧，有人選 (E)，透露出「力會在作用結束後慢慢減小」及「維持運動需要力」的雙重迷思。選擇 (D) 的則誤以為力會在接觸後慢慢增加，選 (A) 的則是將「受力與軌跡」混為一談，缺乏「維持等速度不需力」的概念。

第 4 題主要的盲點包含：(1) 以為粗糙面上運動必有摩擦，而選 (C)；(2) 雖然掌握了「等速度，則合力=0」的概念，但誤解「慣性」具有抵抗外力的作用，也選 (C)；(3) 忽略了 A 木塊與地面會有摩擦，以為三個木塊皆等速，所以皆無摩擦。

第 5, 6 題

正確觀念：

快速抽出桌巾，可使餐具 (幾乎) 維持在原地的有趣實驗 (如圖 4)，也常被教材誤當成「慣性定律」或「慣性」的實例。但桌巾被抽出時程，必然會對餐具產生動摩擦力 ($F_{fk} = \mu_k N$)，動摩擦力大小與抽的速度無關 (第 5 題)。因為餐具的受力不為零，所以違



圖 4：抽桌巾

反「慣性定律」。若仔細推導餐具的位移(S)，其實也與餐具的「慣性」(質量)無關 ($S \propto a \propto F_f / m \propto N / m \propto m / m = \text{常數}$)，因此本實例與「慣性定律」或「慣性」都沒有關聯。

至於快抽與慢拉的摩擦力比較，慢拉時因為餐具與餐巾間沒有滑動，故屬於靜摩擦。其大小會隨外力而變，沒有公式。因為是緩慢拉動，所以物體的「加速度 $\rightarrow 0$ 」，推得「合力 $\rightarrow 0$ 」，故「靜摩擦 $\rightarrow 0$ 」。因此，透過加速度的比較，快抽的摩擦力會明顯大於慢拉(第6題)。

常見錯誤：

第5題主要的錯誤，是由餐具位移推論摩擦力的大小，雖然抽得更快餐具位移的確變小，但並不代表摩擦力就會減小。因為位移(S)還與時間(t)有關 [$S = (1/2)at^2 = (1/2)(F_{fk} / m)t^2 \propto F_{fk} \cdot t^2$]，速度變快使得位移變小的原因，是作用時間變短，而不是受力變小。

至於比較快抽與慢拉的摩擦力(第6題)，常見的誤解包含：(1)認為兩者會相等，以為摩擦力與速度無關，忽略了此概念不適用於動摩擦與靜摩擦的比較；(2)誤將**最大靜摩擦**力公式 ($F_{fs} = \mu_s N$) 當成是慢拉時的靜摩擦，以為所有的靜摩擦都會大於動摩擦。

第 7, 8 題

正確觀念：

這兩題都含有「慣性座標」的概念。牛頓第二定律 ($\Sigma \vec{F} = m\vec{a}$) 必須限制觀察者在「慣性座標」才會成立。「慣性座標」就是無加速度的位置，靜止的地面因(地球自轉)加速度很小，可以視為是「慣性座標」。

第7題，公車上的乘客雖然看到球落下的軌跡會往前，但球所受的力圖，根據力的來源，球因已經離手，只受到向下的重力。因沒有向前的作用力來源，不可能有向前的力，而乘客會觀察到球軌跡向前的理由，只可能是車子加速度向後(不是慣性座標)，因此車內乘客所觀察到的物體 $\Sigma \vec{F} \neq m\vec{a}$ 。

相同地，第8題公車內的乘客在緊急剎車時會前傾(圖6)，並不代表他們有受到向前的力或加速度。因為公車應受到向後的外力才能剎住，也會對車上乘客的腳產生摩擦力(向後)，否則乘客會繼續往前滑行。因公車的加速度(向後)大於乘客質心(的向後加速度)，所以乘客對公車而言前傾，並不代表受力向前。因為「力」與「加速度」都須限制在「慣性座標」，而公車並不是。而「慣性」=「質量」沒有方向性。因此本題應選「以上皆非」。

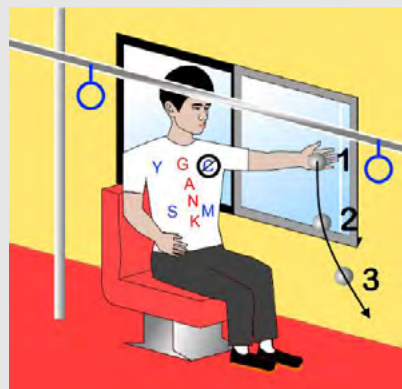


圖 5：公車上的落體

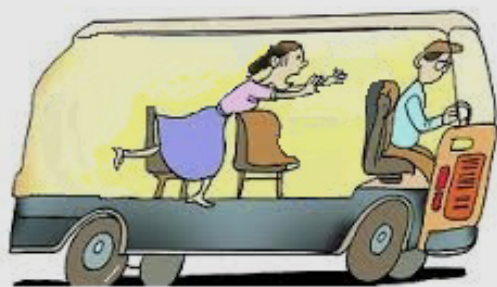


圖 6：剎車前傾

常見錯誤：

第 7 題常見錯誤在於根據軌跡向前，而誤以為球受到向下及向前的力，未能顧及「力」需有作用來源，也可能忽略了觀察「力」需在「慣性座標」的限制。

第 8 題，多數同學誤認為剎車時人向前傾是「慣性向前」，也有許多人認為合力向前或加速度向前。學生似乎將「慣性」和「速度」做了不當的聯想，或者將慣性視為抵抗外力或加速度的一種作用。例如：“急剎時人仍依慣性向前。向前的慣性就相當於人瞬間受力向前”。

第 9, 10 題

正確觀念：

幾乎所有受測同學都能成功釐清「平衡不一定是靜止」，因為「平衡」還包含等速度運動（第 9 題）。但反過來，只有極少數成功回答「靜止也不必然為平衡」（第 10 題），顯示出他們並未掌握到瞬間受力仍具有加速度，如圖 1 及圖 4 都是靜止但不平衡的例子。

常見錯誤：

誤以為「靜止就是平衡」的理由非常多元：(1) 將速度與加速度混為一談，(2) 受到「靜力平衡」的誤導，以為靜止就是平衡，(3) 將靜止視為「運動狀態不變」，其實「運動狀態」的意義非常模糊，可能是速度或加速度，甚至可聯想到軌跡，所以教學上應避免這種模糊的字眼。

不當推理及有效策略

與上一單元相同，本單元再次引入常被誤以為「慣性定律」的實例（包含圖 1, 4, 6），都不符合「合力=0」的條件。而「慣性定律」應該要強調的觀念，包含：(1) 等速度不需力（第 4 題），(2) 合力=0 會維持等速度（第 3 題），(3) 「力」與「加速度」需限制在慣性座標（第 7, 8 題）等，大多仍困擾著學生。因此這些適用「慣性定律」的試題，才是教學上應該引用的例子。

至於違反「慣性定律」的實例，則不需完全捨棄，相關的試題可以用來：(1) 澄清靜止不一定平衡（如第 1, 5, 10 題）、(2) 區別「速度」與「加速度」的大小與方向（如第 2, 6 題）、(3) 理解 $\Sigma \vec{F} = m\vec{a}$ 的意義，並掌握其雙向推導的用途（如第 1, 2, 6, 8 題）。

從這兩個單元顯示，學生的困難往往源自於對於原理概念限制的忽略，如：慣性定律限制合力=0、 $\Sigma \vec{F} = m\vec{a}$ 需在慣性座標觀察、 $\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}$ 公式需限制分母不為零、靜摩擦力公式僅限於最大靜摩擦，摩擦力與速度無關僅限於同一物體的動摩擦 ... 等。

另外，對於術語意義的混淆也導致概念盲點的原因，例如：靜止 ≠ 平衡、有速度 ≠ 有受力、粗糙 ≠ 有摩擦、慣性 ≠ 抵抗外力、慣性 ≠ 動量 ≠ 速度、靜止 ≠ 靜摩擦 ... 等。透過大量的實例觀念題的練習，才能釐清彼此的差別與關連性，逐漸掌握概念的內涵。

註 1: 指出圖 1 和圖 4 均違反「慣性定律」的文獻，如：

Jones, E. (1977). The tablecloth pull. *The Physics Teacher*, 15, 389.

Hudson, H. (1985). There's more to it than inertia. *The Physics Teacher*, 23(3), 163.

Sandin, T. R. (1990). The jerk. *The Physics Teacher*, 28(1), 36-40.

張慧貞. (2015). 教科書對於演示實例之理解與誤解. *物理雙月刊*, 37(3), 5-20.