

關於慣性演示實驗的討論

林瑞文

高雄市立左營國民中學

壹、前言

關於「一疊硬幣最下方的一個被水平迅速移動的鐵尺敲開後，其他硬幣會原地落下來」的演示，如果有人提出：「此實驗並不是在慣性定律適用情形（物體不受力或受合力為零）下進行，所以並不適合作為慣性的展示。」，你覺得合理嗎？

貳、常見的慣性實驗演示

TED_Ed 教育頻道 11 年前計畫開始時，有一段亞當·薩維奇(流言終結者節目主持人)的短講¹：「簡單的點子如何導引出科學上的發現」，當中提到費曼與慣性的故事，小時候費曼問父親為何拉動車子時會看到車上的球向後滾，對於他的疑問，他父親說：「那是慣性，但沒人知道為甚麼。」，費曼後來回憶那次對話給他的啟發：從簡單的問題開始，可以帶你探索到人類知識的前鋒。

的確，慣性觀念看似簡單，維基百科中寫道：

在物理學裡，慣性（英語：inertia）是物體抗拒其運動狀態被改變的性質。物體的慣性可以用其質量來衡量，質量越大，慣性也越大。艾薩克·牛頓在鉅著《自然哲學的數學原理》裡定義慣性為：慣性，或物質固有的力，是一種抗拒的現象，它存在於每一物體當中，大小與該物體相當，並盡量使其保持現有的狀態，不論是靜止狀態，或是等速直線運動狀態。

現行國中教科書通常如此敘述：「物體具有維持原來運動狀態的特性，稱為慣性」。眾多慣性相關的實驗與演示²，可大致分為兩大類：

第一類演示_物體靜止狀態時的慣性：

演示 1. 把一個靜止重物下方的輕物快速抽出，結果重物直接落下，水平位置幾乎未移動。例如前言所述：關於鐵尺快速敲開硬幣的實驗，翰林版課本中解釋道：「最底層的硬幣受力被鐵尺彈開的瞬間，上方靜止的硬幣仍維持靜止狀態，而後受到重力作用垂直落下，落點與被彈開的硬幣原本的位置幾乎相同」。

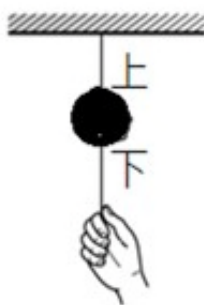
演示 2. 用細繩懸吊的重物。如圖一所示，重物上下各以細繩懸吊，如果忽然用力拉扯，下方細繩會斷裂，如果施力由零慢慢增加，最終斷裂的是上方的細繩。

第二類演示_物體運動狀態時的慣性：

演示 1. 加速中的汽車，車內水杯的液面非水平。

演示 2. 行駛中的玩具車被阻擋後，車上小飾品會飛出去。

演示 3. 原本直行的小汽車轉彎後，車上的小飾品會被拋出。



圖一：靜物慣性的演示

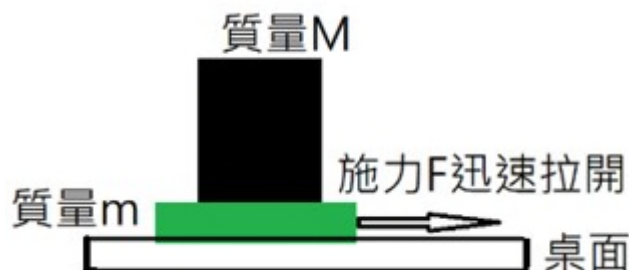
參、討論

上述第一類演示，在國中自然教師共備社群³中，常有老師對其適用性感到疑惑(見前言)，本文即針對此類兩種演示進行討論。

演示 1： 把靜止重物下方的輕物快速抽出，重物水平位置幾乎不動。

見解 1. 認為不宜單以重物慣性來解釋：

以鐵尺敲硬幣的例子來看，常見的解釋是「下方物體快速移動可以讓上方物體顯出有明顯的慣性」，參考 108 課綱國中自然領綱⁴學習內容 Eb-IV-12：物體的質量決定其慣性大小。由此點來看，不管用力敲或慢慢推，上方的硬幣應該具有相同的慣性，但如果我們慢慢推動最下方的硬幣，會看到整疊的硬幣一起移動，但在此整疊的硬幣的質量與慣性與快速敲擊時相同，但結果卻大不相同！所以用「重物慣性顯現」來說明並不精確，深究其關鍵在「敲的行為」，因為「敲的行為」，使最下方的硬幣有較大的加速度，此屬於牛頓第二運動定律適用的範圍，敲得快讓硬幣快速脫離，過程中兩硬幣相互摩擦，使上方硬幣產生加速度的時間很短，能產生的水平速度很小，所以落下時，「落點與被彈開的硬幣原本的位置幾乎相同」。依上述的解釋，此演示與慣性的關係在於：下方物體質量愈小，慣性小，所以越容易成功。



圖二：實驗示意圖

我們可以將此實驗簡化成圖二來討論，假設桌面摩擦係數 μ_k ， m 受到施力 F 被抽走的過程， M 受到動摩擦力 $Mg\mu_k$ ，產生的加速度值 $Mg\mu_k/M = g\mu_k$ ， M 的加速度與質量無關， M 會幾乎留在原處是因為 m 質量小、加速度大，所以被迅速抽離，導致 M 受摩擦力作用時間很短，此部分可用牛頓第二運動定律來解釋。

見解 2. 物體的慣性經常以受力後產生加速度的難易程度來顯示，此實驗當然適用於解釋慣性：

討論此事時，有社群夥伴提醒：「慣性 $\neq$ 慣性定律」，慣性定律屬於物理定律，其適用於物體不受力或受合力 $=0$ 的情形。若是陷入「慣性 $=$ 慣性定律」的思維陷阱，自然認為圖二實驗時兩物體都有受力摩擦力，所以不適合用來解釋慣性，但由於「 m 質量小、慣性小 $\rightarrow$ 加速度快所以被迅速抽走 $\rightarrow M$ 受力時間短 $\rightarrow M$ 幾乎原地落下」，所以仍適合拿來演示慣性，只是需要教師多加解釋。至於何常有「慣性 $=$ 慣性定律」的概念呢？此與各家課本在同一小節中，都是先談慣性再提慣性定律，這樣的呈現方式加上名稱上的相容(慣性 $\rightarrow$ 慣性定律)，很容易讓讀者產生「慣性 $=$ 慣性定律」的概念，建議教師應注意此點。

演示 2：如圖一，用細繩懸吊的重物。此為不易解釋的演示，常會看到以下解釋：

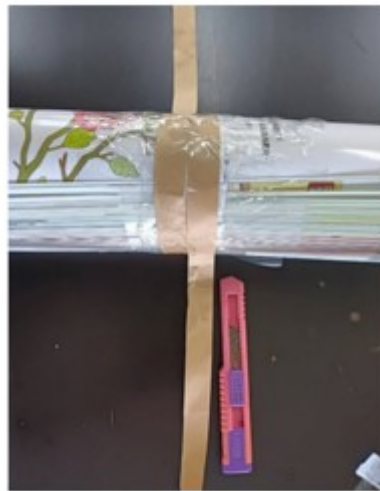
- (1). 快速拉動時，物體的慣性會顯示出來。
- (2). 快速拉動時，力傳不到上段繩子。

為何用力拉扯會讓繫繩斷在下半段？設重物質量 M ，上下兩段繩子質量 m ，把各段細繩視為單一物體，已知 $M \gg m$ ，當施力 F 作用在下段 m 時產生的加速度 a_1 ，當力傳到 M ，產生的加速度 a_2 ，兩者相差極大，所以下半部的繩子會被扯斷，但以白話口語：「力傳不到上方的繩子」來解釋可能不恰當。至於兩段繩子張力為何不同？教學時可以用如圖三的例子輔助說明：繫繩質量不計，當系統向右加速運動時，右側繩張力 T_2 會大於 T_1 。



圖三：各段繩子張力不同

所以對下段繩子被拉斷的合宜的解釋是：「手用力拉扯下段繩子時，下段繩子與重物產生的加速度差很大，致使下段繩子迅速被扯斷，在斷繩之前，此力拉此對上段繩子產生的張力有限，所以不會使其斷裂。」，至於為何慢慢增加拉力會使上段繩子斷裂？那是因為繩斷之前，上段的繩子的張力等於「施力與物重總和」，而下段的繩子的張力等於「施力」，所以隨著施力漸增，最後必然是上段繩子先斷。雙底線的字就是因為物體質量不同產生的加速度不同所致，還是可以用來演示慣性。要進行此實驗，建議用紙帶取代繩子會較容易成功。裝置參見圖四。



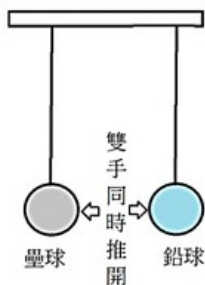
圖四：利用課本及牛皮紙製成的實驗器材

肆、呼應慣性定義的演示設計

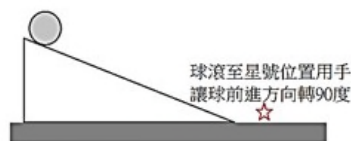
筆者選用慢速壘球與國中女用鉛球進行如下 3 個小實驗，兩球體積相近但質量相差甚大，可以讓學生充分體驗「物體的質量決定其慣性大小」。球體用兩層水槽濾網包裹後可以輕易懸吊起來，參見圖五。



圖五：懸吊起來的慢速
壘球(左)及鉛球



圖六：體驗靜止物體
的慣性



圖七：改變物體的運動方向

實驗 1：體驗推動靜態球體所需力量之差別。

如圖六所示，將兩球像單擺一樣懸吊起來，左右手同時推動使其晃動，感受所需力量不同。

實驗 2：體驗使動態球體停止所需力量之差別。

如實驗 1 的裝置，另一位同學將球像單擺一樣拉高約 20 公分之後自由釋放，實驗者在擺動軌跡的最低點以單手手掌接住球體，分別以兩球進行實驗，讓實驗者感受所需力量有無差異。

實驗 3：體驗使動態球體運動方向改變所需力量之差別。

如圖七所示，同學將球自固定斜面頂自由釋放，實驗者在斜面底部，用手推動滾下的球使其運動方向改變 90 度，體會不同球體所需力量是否有差異。

這樣的實驗可以讓學生親自體會：慣性指的是物體保持其狀態（包括速度和方向）不變的性質，質量愈大者慣性越大。

伍、現行教材的分析與建議

108 課綱自然領綱國中部分，關於慣性與牛頓第一、二的學習內容如下，括號內是相對應的學習內容說明。

Eb-IV-10 物體不受力時，會保持原有的運動狀態。（當物體不受外力作用或所受外力的合力為零時，靜者恆靜，動者必做等速度運動。）

Eb-IV-11 物體做加速度運動時，必受力。以相同的力量作用相同的時間，則質量愈小的物體其受力後造成的速度改變愈大。（透過實驗，由所得資料整理出慣性規則，以光滑平面上進行的直線運動為例：當速度大小改變相同時，物體的質量越大所需的力越大。）

Eb-IV-12 物體的質量決定其慣性大小。（以生活實例說明質量越大越不容易改變運動狀態。）

課綱中接下來的 Eb-IV-13：「對於每一作用力都有一個大小相等、方向相反的反作用力」屬於第三運動定律的內容，故依照領綱的安排，Eb-IV-10 屬於牛頓的一運動定律，Eb-IV-11、Eb-IV-12 都屬於第二運動定律時需闡述的觀念，但筆者綜觀康軒、翰林與南一三家出版社現行課本，安排順序都是：

先介紹慣性的現象、演示與定義，然後進入慣性定律，第二小節再介紹第二運動定律，但此小節中都完全沒出現「慣性」二字，課文沒有與學習內容 Eb-IV-12 類似的敘述，這對字字珠璣的學習內容而言，是很罕見的情形，以此詢問三家課本編輯部，都回覆雖然課本中沒有此段文句，但都有用類似「以生活實例說明質量越大越不容易改變運動狀態」的敘述加以闡述，明顯三家教科書都對學習內容 Eb-IV-12 採取模糊處理的策略，而審書委員也認可這樣的安排。

牛頓第一運動定律然稱為慣性定律，並不意味只有此定律適用情形(物體不受力或受合力為零)下的演示，才是慣性的演示，如果要演示「物體質量越大、慣性也就越大」，勢必涉及第二運動定律，因此「慣性 $\neq$ 慣性定律」與「兩定律都涉及慣性」都是教師教學時應該向學生說明的要點。

參考文獻

1. 簡單的點子如何導引出科學上的發現(民 101 年 3 月 14 日)。民 113 年 1 月 10 日，取自：TED-Ed 影片，<https://www.youtube.com/watch?v=F8UFGu2M2gM&t=52s>。
2. 高永遠、陳淑敏、賈至達、鄭嘉良(民 92 年 10 月)。生活化實驗設計模組－牛頓第一運動定律。科學教育月刊，263。民 113 年 1 月 20 日，取自：<https://bit.ly/497XmQr>。
3. Line 國中超自然共備社群。成員 940 人，歡迎自然老師加入。
4. 十二年國民基本教育課程綱要(民 107 年 11 月)。台北市：教育部國前署。民 113 年 1 月 20 日，取自：<https://bit.ly/40n6dKp>。