

磁力碰撞實驗

周鑑恆

萬能科技大學航空暨工程學院

物理引人入勝之處在於：從顯而易見的現象入手，深入探討，卻發現看似風馬牛不相及的許多現象竟然有其相同的本質。有人說，將複雜的現象簡化，或者，相反地，挖掘出人盡皆知的現象所蘊含的複雜細節，在教學上都具有一定的價值。

(一) 什麼是碰撞

碰撞是日常生活中很常見的現象。許多人想到碰撞，就會想到打撞球或打彈珠。但在物理學中碰撞有明確的定義，其內容更為豐富多采。物理學中碰撞的明確定義為：兩個或兩個以上的物體，在相對短的時間內，彼此有交互作用力，而在這相對較短的時間內，「外力」（也就是來自這些互相作用之物體以外的力）可以忽略或根本沒有。如此這般，這些有交互作用力的物體就發生了所謂的碰撞。

值得注意的是，發生碰撞的物體之間的作用力，並沒有任何限制。也就是說，碰撞並不一定像兩顆彈珠那樣碰撞，也不必像兩顆彈珠那樣互相接觸地撞在一起。

(二) 碰撞理論

碰撞現象的理論分析，可以基於多質點系統的理論計算。多質點系統理論計算

的重要結論是：

1. 整個多質點系統的總動能，等於整個系統的質心動能加上各質點相對質心運動的動能，可以用公式表示如下：

$$KE_t = \frac{1}{2} M v_{cm}^2 + \sum_i \frac{1}{2} m_i v_{ir}^2$$

其中 KE_t 是整個系統的總動能， M 是所有質點的質量總和， v_{cm} 是系統質心的速度， m_i 是各質點的質量， v_{ir} 是各質點相對系統質心的速度。

2. 如果系統所受外力的向量和為 \vec{F}_{ext} ，牛頓第二定律可以寫成：

$$\vec{F}_{ext} = M\vec{a}_{cm} = \frac{d}{dt} \sum_i \vec{P}_i = \frac{d}{dt} \sum_i m_i \vec{v}_i$$

其中 \vec{a}_{cm} 為質心加速度， \vec{v}_i 是各質點的速度， \vec{P}_i 是各質點動量。

3. 系統所受外力對質心定義的外力矩，會改變系統對質心定義的角動量，亦即

$$\vec{\tau}_{cm} = \frac{d\vec{L}}{dt}$$

其中： $\vec{\tau}_{cm}$ 是以質心為參考點定義的外力力矩， \vec{L} 為整個系統對質心定義的總和角動量。

根據碰撞的定義，發生碰撞的物體所形成的系統不受外力，因此：

1. 由於系統不受外力，無論各物體之間的作用力為何，系統的質心加速度為 \vec{a}_{cm} 零，於是系統的總動量守恆。
2. 因為對質心定義的外力矩也為零，所以整個系統對質心定義的總角動量 \vec{L} 也守恆。
3. 因為沒有外力，系統的質心加速度 \vec{a}_{cm} 為零， \vec{v}_{cm} 系統質心的速度不變，系統的質心動能不變；但相對質心的動能在碰撞過程則會變化。

如果碰撞物體之間的作用力，是保守力，則為彈性碰撞；如果碰撞物體之間的作用力為非保守力，則為非彈性碰撞。一般教科書常有的結論是：彈性碰撞時，系統的總動能在碰撞前後守恆。如果不是彈性碰撞，則碰撞前後，系統的總動能不守恆。而這樣的結論不夠細膩，比較不好使用。

比較好使用的結論是：無論彈性碰撞或非彈性碰撞，系統質心的動能不變，但彈性碰撞時，在碰撞前後，相對質心所有動能的總和不變；非彈性碰撞時，相對質心的動能總和會減少，甚至完全消失。

(三) 兩個有趣的實例

在健身房跳彈力床可以算是碰撞嗎？算！是人體和地球藉彈力床的彈力碰撞。假設極大質量的地球靜止，假設彈力床很完美，地球和人體所形成系統的質心在碰撞過程中幾乎都始終靜止。碰撞前瞬間，人體下墜相對質心的動能，也就是人體的動能，在碰撞（彈力床之彈力與重力共同作為碰撞的作用力）後，人體向上相對質心的動能，也就是人體向上運動的動能，要等於碰撞前人體向下相對質心的動能。地球相對質心運動的動能始終為零。

另一個例子則是：美國太空總署（NASA）發射飛出太陽系的先鋒十號、十一號，航海家 1 號、2 號，都繞過木星（以及土星），利用木星引力的作用，增加這些太空船的動能，以致於有足夠的能量能夠飛出太陽系。這航太技術也可用碰撞理論輕易理解。為了簡化問題起見，假設：碰撞前，木星和太空船面對面接近，此時質心速度，即等於木星速度；太空船相對質心的速度為 $\vec{v}_s + \vec{V}_j$ ，其中： \vec{v}_s 是太空船在太空的速度， \vec{V}_j 是木星在太空的速度。藉引力碰撞之後，質心速度仍然是木星的速度 \vec{V}_j ，但太空船與木星變成同向，而相對質心的速度（動能），仍要等於碰撞前相互接近的速度 $\vec{v}_s + \vec{V}_j$ （動能），於是，太空船在太空的速度變成 $\vec{v}_s + 2\vec{V}_j$ ，太空船的動能大增。

(四) 作者創作的碰撞教具

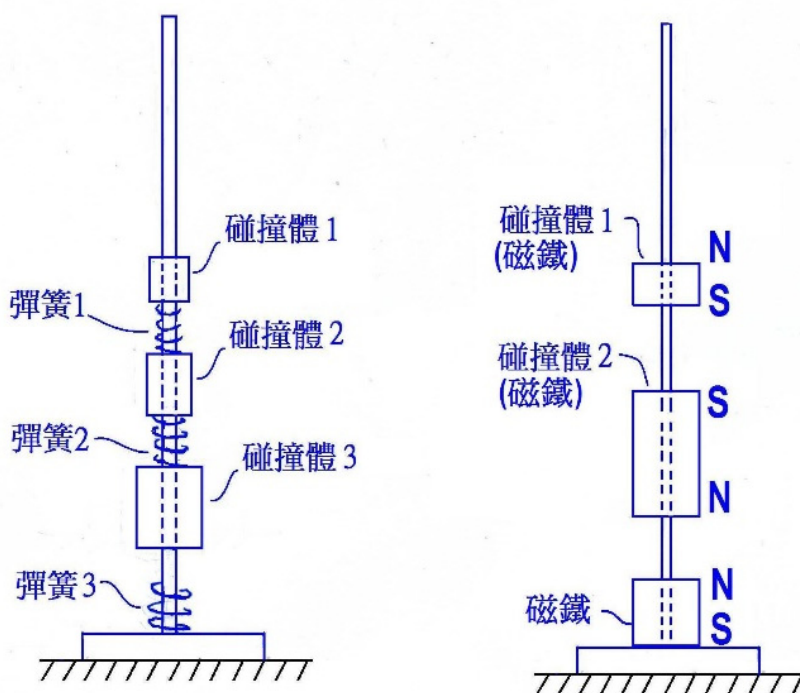
這個實驗是一項著名的彈性碰撞實驗，原先是用籃球和網球來演示，籃球在下，網球置於其上，落至地面反彈，網球可以彈到更高的高度。同樣的碰撞實驗，也有廠商生產販售大小重量不同的兩橡膠彈性球組成的實驗器材，但問題都是不方便使用。

既然只要碰撞物體之間的作用力是保守力，碰撞就是彈性碰撞，因此，重力、彈力、甚至磁力，都可以用來作為彈性碰撞的作用力。靈活應用這項結論，作者早期不用塑膠彈力球，改以彈簧和磁鐵進行

本文所述的彈性碰撞實驗^[1,2]（見圖一）。

如果用磁鐵進行這項實驗，則必須用如鈷鐵硼稀土強磁，稀土強磁價格不便宜（下方的碰撞體之重量至少比上方碰撞體大5倍，作用力也得大5倍以上），整個儀具的重量偏高，用較大磁鐵進行此實驗，由於磁力之特性，儀具必須更大，昂貴且攜帶不便。

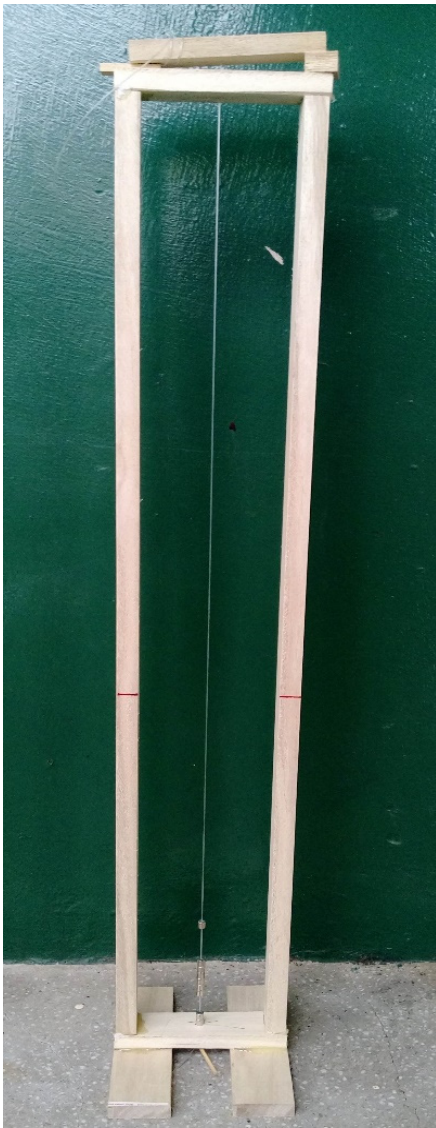
於是作者以中間有穿孔、軸向充磁的小磁鐵作為碰撞物體，但中間的柱子就必須又細又硬，相當危險，彈跳出來的小磁鐵又容易遺失。但以磁鐵進行碰撞實驗，匠心獨運，頗具啟發意義。



圖一：作者創作的彈性碰撞實驗，更為靈活，內容更為豐富而深入。軸心有穿孔的碰撞體，穿在一根棒子上。

在本文中，作者提出一個兩全其美的辦法。先製作一高約 80 公分的木框（見圖二），以適當的簡易方法（見圖三），繃緊一直徑約 0.6mm 左右的釣魚線，將直徑 6mm，中間小孔直徑約 1mm，高約 6mm 的磁鐵穿在這釣魚線中。6 個小磁鐵合而為

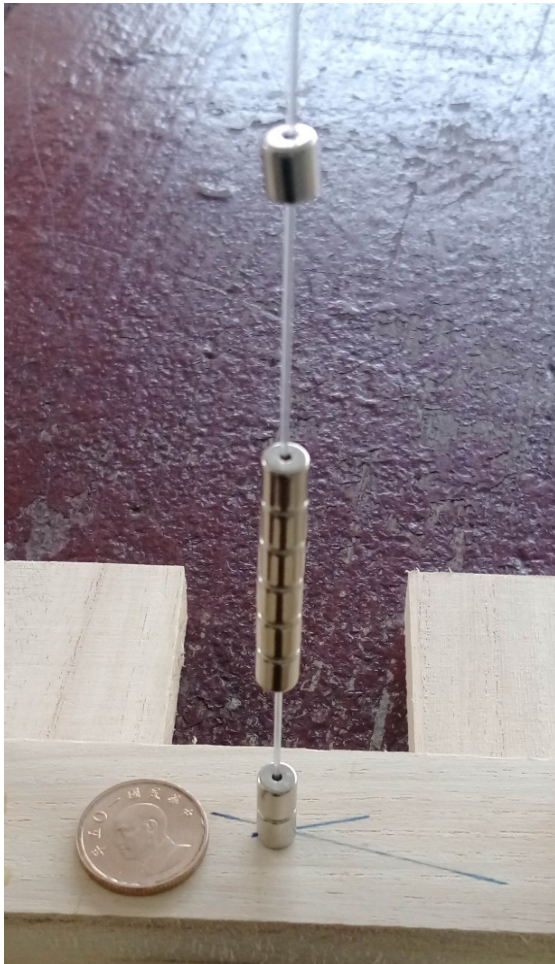
一，作為下方的碰撞物體，單獨一個小磁鐵作為上方的碰撞物體，最下方放置 2 個小磁鐵（見圖四）。磁鐵各自同極相對互斥，作為碰撞時的作用力，將 6 顆小磁鐵舉起、靜止下墜（見圖五），最上方的小磁鐵會彈得相當高。



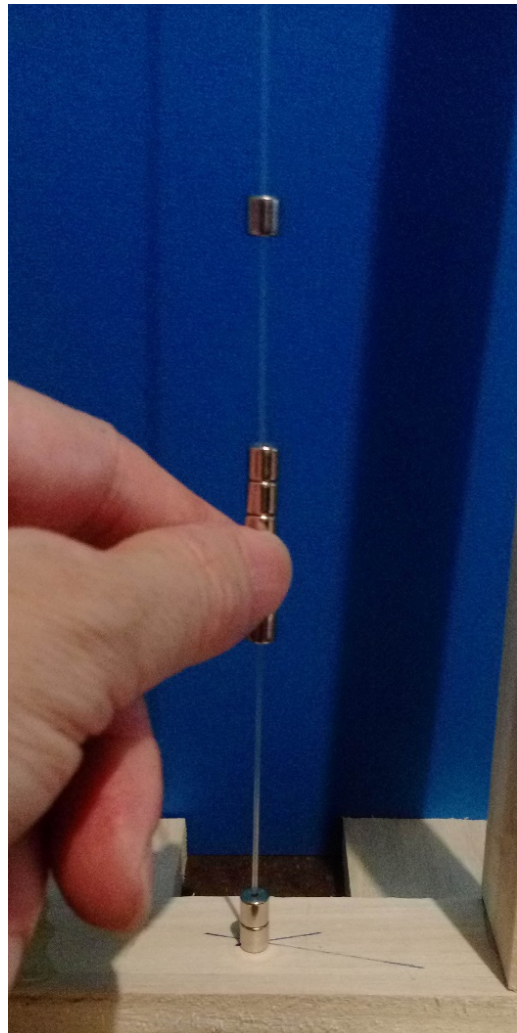
圖二：架設釣魚線的木框將近 80 公分高。木框上下各有一穿孔。



圖三：繃緊釣魚線的廉價方法。木棒上多穿幾孔，釣魚線穿繞其中，便於打結。讀者也可以自行設計繃緊釣魚線的方法。



圖四：二個碰撞體特寫：下方六個磁鐵合為一個，上方僅一個磁鐵。重量約 1：6。最下方兩磁鐵提供最下方的作用力。壹圓硬幣當作比例尺。



圖五：將 6 顆小磁鐵與最上方的小磁鐵一起舉起、再靜止放下。

（五）改良的可能

以磁力作為彈性碰撞的作用力，與橡膠彈力球之間的作用力有些不同，橡膠彈力球至少要接觸到彼此，作用力才發生，但磁鐵不必相互接觸作用力即已發生，因

此進行這項彈性實驗時，磁鐵碰撞前，磁鐵的距離須加大一些。

此外，有許多顯而易見的改良。例如：雖然比較不方便進行實驗，圓柱狀的磁鐵也可置入透明管中來進行實驗。例如：只要

遵守愈下方的碰撞磁鐵愈重（本文只展示 2 個碰撞磁鐵的實驗）、愈下方的作用力愈大的規則，用本文所述的方法，也可以進行 3 個以上的碰撞磁鐵的實驗，更為有趣，前所未見。

中間穿孔的磁鐵還可以做得更小，用更細的釣魚線（中間釣魚線直徑比磁鐵中間孔直徑小一些），就可以製作更迷你的儀具，既省成本，又便於攜帶。

（六）應用與結語

用磁力進行這項彈性碰撞實驗，是一項創舉，一方面可輕易演示這項乍看起來匪夷所思的實驗；另一方面，打破一般人對碰撞既有的狹隘認知，利用磁力來進行彈性碰撞，實驗本身又另人好奇，引起學生真正了解碰撞的本質，在彈性碰撞教學上頗有啟發價值。

為了壓低成本、縮小尺寸、遍於攜帶，在科教活動中通常用尺寸相當小的磁鐵進行這項實驗，以利推廣，但如圖一所示早期的設計，直立的細桿必須又硬又細，相當容易傷人。此外，實驗時最上方的小磁鐵彈出，又很容易遺失。本文的設計一舉兩得，同時解決了這些問題。

誌謝

感謝科技部實作計畫（編號：MOST 106-2511-S-238-001-MY2）經費支持。

參考文獻：

- 周鑑恆，彈性碰撞實驗，**科學教育月刊**，**100 年 5 月 第 338 期**。
- 周鑑恆，新型專利，證書號 M313830，碰撞實驗教具 THE EXPERIMENTAL INSTRUMENT FOR COLLISIONS。（公告日期：2007/06/11）