

此力非彼力 - 從力與能的迷思到教學的力有未逮

邱韻如

長庚大學通識中心 物理科

前言

力，是學習物理最重要的概念之一，若您是物理教師，您知道學生腦袋裡的力和您在課堂上所講的力是很不一樣的嗎？

學生對力的觀念及看法，常常是與物理教科書裡的力有很大的不同。以作用力和反作用力來說，課本上說兩者的大小相等方向相反，聽起來很簡單，但當學生面對情境問題時，卻總忘了牛頓怎麼說。當二個物體放在斜面上一起下滑時，許多學生會認為後者施於前者的作用力會比前者施予後者的作用力強(Maloney,1990)。打保齡球時，大多數學生認為球作用在保齡球瓶的力大於球瓶作用在球上的力(Brown,1989)。學生為什麼會這樣以為呢？學生可能會告訴你說，這是直覺，上述認為物體會產生(或蘊含)力、以為較重的物體所蘊含的力大於較輕的物體、或是運動中的物體所蘊含的力大於靜止的物體等等，都是非常普遍的迷思概念。特別注意，這裡所謂的物體所蘊含的力，和牛頓第二定律裡的力是大不相同的。

沒力了，是什麼意思？

不只是初學物理的學生會力的迷思，中世紀的學者也同樣有『重的、運動的物體比較有力』的想法。西元十四世紀時，法國哲學家布里丹(Jean Buridan,1292~ 1363)就曾倡議『衝量理論』(Impetus Theory)，他認為當一個人使物體運動時，他就將一個『衝量』輸入該物體內，這個『衝量』使得物體沿著原先的方向繼續運動直到『衝量』逐漸耗盡，物體就停下來了(McCloskey,1983)。

因此，當學生說『球沒力了，所以就停下來』時，學生所謂的『力』，指的應該就是布里丹所謂的『衝量』。特別注意喔，這裡的『衝量』和物理課本裡的『衝量』(impulse，定義為力乘以作用的時間，寫成I)的意思是不同的。

物理老師可能會覺得十四世紀學者的『衝量理論』很扯，很不物理，但是，這在當時算是很先進的想法，可以解釋許多物理現象。若將這樣的觀念放在日常生活裡，其實的確還蠻好解釋的呢。想想，您如何讓您的學生放棄如此好用的衝量想法，來接受課本上的力學？這就是物理難學也難教的地方。

從無力到有力

在科學史的發展上，從亞里斯多德的物理到伽利略運動學，經歷了巨大的觀念改變；從伽利略運動學到牛頓力學，則是從無力到有力。伽利略的運動學，主要是以時間、速度、加速度為主，他並沒有強調力在運動裡所扮演的角色，而牛頓力學則是以力為主角，探討力如何引起運動的改變。

牛頓的 force 有好幾種？

1687年，牛頓的曠世鉅作《原理》發行第一版，於1713年及1725年又修訂發行第二版及第三版。這三個版本，牛頓都是用拉丁文寫作並親自作序。牛頓逝世後兩年，1729年，莫特(Andrew Motte, 1696~1734)根據《原理》第三版譯成英文出版發行。此書的一開始就是八個定義、三個基本定律和六個推論。八個定義的前四個，分別定義質量、運動量、慣性和力；三個基本定律就是大家所熟悉的三大運動定律。八個定義的前四個與三個基本定律的英文版，請參見文後附錄。

用我們現在的眼光來檢視牛頓在《原理》一書中對於力的概念，可以發現，牛頓所講的 force 有好幾種：(1)定義三裡所謂的 innate force of matter 可能相當於慣性。牛頓認為，只有當其它力作用於物體，或是要改變它的狀態時，物體才會產生這種力，這種力的作用，既可以看成是抵抗力，也可以看成是排斥力。(2) 定義四裡 impressed force 就是第二定律裡的力。牛頓特別強調，這種力只存在於作用之時，作用消失後並不留存於物體中。第二定律裡所謂的 the change of motion 指的是運動量的變化，由定義一和二可知，這裡的運動量是指質量和速度的乘積，也就是相當於我們現在所說的動量，因此，牛頓《原理》中的第二定律，若用現代的數學形式來寫，應該是 $F = \Delta P / \Delta t$ 而不是 $F = ma$ ，這和一般教科書寫的形式是不太一樣的。(3)牛頓的第三定律，裡頭用的字眼是 action，而沒有提及 force，到底牛頓的 action 是不是我們現在所以為的 force 呢，也是耐人尋思。

由以上可以看到，牛頓所謂的力可能蘊含好幾種意思，和現今的力的概念不盡相同，這樣的說法不無道理，因為在牛頓及牛頓之後的時代，人們對於力仍有各種不同的

概念，甚至把我們現在所謂的能量都稱之為力。

碰撞問題碰出了什麼？

伽利略開始研究碰撞的問題，但進一步進行有系統的探討是始於笛卡兒(Descartes 1596-1650)。笛卡兒於1644年，在《哲學原理》中對碰撞情況進行了研究，他針對下列幾個狀況進行探究：(1)兩物體重量相等、速度相同，對撞；(2)兩物體重量不同、速度相同，對撞；(3)兩物體重量相同、速度不同，對撞；(4)一物體靜止，用相同重量的物體來撞；(5)一物體靜止，以不同重量的物體來撞；(6)兩物體以不同的速度同向追撞等。笛卡兒並沒有得到圓滿的解答，他沒有區別彈性碰撞與非彈性碰撞，但他以『重量×速度』這個物理量(mv)來研究，為後世開了先機，此外，他還把『力×時間』稱為『力量的碰撞』(現在稱為『衝量』)。在這個時候，重量和質量其實也還沒被區分。

1668年，英國皇家學會懸賞有關碰撞問題的論文。數學家瓦利斯(Wallis, 1616~1703)論述了非彈性碰撞，物理學家惠更斯(Huygens, 1629-1695)則論述了彈性碰撞，他們都對在同一直線上前進的兩個物體的碰撞進行了論述。在惠更斯的論文中，他所敘述的守恆定理是：

兩個物體從兩方碰撞時，質量和速度的平方之積的和，在碰撞前後相等。

以現在的觀點來看，惠更斯說的不是『動量守恆』，而是『動能守恆』。他當時並沒有把『質量和速度的平方之積』說成是『能』。

有活力，還有死力？

與牛頓爭奪微積分發明權的萊布尼茲 (Leibnitz, 1646~1716) 也研究這個議題，他把惠更斯的『質量和速度的平方之積』稱為『活力』(相當於現在的動能)，並把現在所謂的位能稱為『死力』。萊布尼茲在《萊布尼茲書簡集》是這樣說的：

力量有兩種：基本力量（我稱他為死的力量，因為這種力量沒有運動，只有運動的願望），它相當於在投石器中只靠弦來保持著石頭的力量；第二種力量是與真正的運動相結合的普通的力量，我稱它是活的力量。死的力量的實際例子由離心力、重力或向心力、以及即將放支撐著的彈簧時的力量就可以獲得。而由在某個時間內已在下落著的重石，或由在某個時間之前開放的弦以及其他一切原因所引起的碰撞所產生的力就是活的力量。而這種力量就是由死的力量的無限傳遞而產生的。(引自大森實一書, p76)

萊布尼茲的『活力』和牛頓第二定律裡的力的意義是不同的。在牛頓看來是外力對物體產生作用，改變物體的運動狀態。萊布尼茲所說的『活力』是物體的一種特性，它取決於物體的質量與速度。在碰撞時，一個物體的質量越大速度越快，它的作用就越大。當讓物體下落到軟泥土上時，質量大或速度快的物體，所形成的坑就越深。萊布尼茲說，物體的活力是由質量和速度平方的乘積決定的。當一物體下落時，速度不斷增加，活力(現在我們所說的動能)就從內力(現在我們所說的位能)中產生。

有平方還是沒平方？

我以前就常常在想，為什麼動量要定為 mv ，而動能是 $(1/2)mv^2$ ？為何後者需要有平方？又為何有個 $1/2$ ？（ $1/2$ 不是本文探討的重點，留給讀者思考！）。

我們看到，笛卡兒強調的物理量是 mv ，萊布尼茲則是 mv^2 。十七世紀下半葉，笛卡兒學派和萊布尼茲學派對『力』的爭論，讓歐洲各國的學者捲入了討論。直到十九世紀中期之前，人們對於能和力的概念依然混亂。

我們現在所熟知的 Energy(能量)一詞來自希臘文 *energeia*，是工作或功的意思，這個字最早出現在 1807 年楊氏 (Thomas Young, 1773~1829) 的《自然科學研究》一書中，他把 mv^2 稱之為能，而不是力。

能與力大不同

科學史上被認為最早提出『能量守恆』的是赫姆霍茲 (Helmholtz, 1821~1894)。值得注意的是，他當時所用的字眼，是『活力』和『張力』，而不是『動能』和『位能』。也就是說，在那個時代，『能量』這個字眼還沒有普遍被使用，還是用『力』來稱呼。

赫姆霍茲在 1847 年發表的《論力的守恆》論文中，把 h 高處的物體所做的功，稱為『張力』。物體被地球所吸引而接近地球時，『張力』減少，而『活力』則相應地增加。『張力』是由於位置關係而產生，『活力』則是由於運動而產生的，他認為物體的『張力』與『活力』的總和是一成不變的。

1853 年，藍琴 (Rankine, 1820~1872) 用『能量守恆』取代『力的守恆』，此時他用實際能和勢能分別稱呼我們現在所謂的動能和位能。此時，十九世紀中葉，『力』和『能量』的概念才較清楚的被分辨出來。由此我們可

以理解，為什麼學生對『力』有這麼多的迷思，學生會把力、速度、能量通通混為一談，是很普遍的現象。

由古觀今，鑒往知來

力是日常生活常見的字眼，在日常生活的許多力，如能力、活力、壓力、風力...等等，都與物理課堂上的力大大不同，因此，學生會有各種力的迷思概念，是想當然耳的。

從這段力與能量概念的混戰中我們看到，能量的概念是從混亂分歧的力的概念逐漸發展來的；從牛頓出版《原理》到能量守恆概念的熟成，科學家們討論了近兩百年，力與能量才被清楚的分辨出來。

由古觀今，我們可以理解，在中學階段的物理課，要讓學生拋棄自己的迷思概念來接受物理課本裡的力與能量，並用來解題，並不是一件容易的事，難怪費力在力學的教學上，卻總是力有未逮。期望物理教師能由此體會到不是講過力與能量的定義，學生就懂了，而是應該花更多力氣來和學生討論與建立力與能量的概念，作為學習物理的基礎。

參考資料

1. 大森實(1988)：物理學史簡明教程，凡異出版社。
2. 牛頓著，王克迪譯：自然哲學之數學原理，大塊文化出版社。
3. 邱韻如(2012)：牛頓有說過 $F=ma$ 嗎？刊登於《科學月刊》，43卷3期，p174~175，2012年3月號。
4. 關洪(2000)：物理學史講座，凡異出版社。
5. Brown, D. E. (1989). Students' concept of force: the importance of understanding Newton's third law. *Physics Education*, 24, 353-358.

6. Maloney, D. (1990). Forces as interactions. *The Physics Teacher*, 28, 386-390.
7. McCloskey, M. (1983). Intuitive physics. *Scientific American*, 248, 122-130.

附錄

《原理》英文版 八個定義的前四個，分別定義質量、動量、慣性和力：

Definition I : The quantity of matter is the measure of the same, arising from its density and bulk conjointly.

Definition II : The quantity of motion is the measure of the same, arising from the velocity and quantity of matter conjointly.

Definition III: The vis insita, or innate force of matter, is a power of resisting, by which every body, as much as in it lies, continues in its present state, whether it be of rest, or of moving uniformly forwards in a right line.

Definition IV: An impressed force is an action exerted upon a body, in order to change its state, either of rest, or of uniform in a right line.

《原理》英文版 三個基本定律：

Law I : Every body continues in its state of rest, or of uniform motion in a right line, unless it is compelled to change that state by forces impressed upon it.

Law II : The change of motion is proportional to the motive force impressed; and is made in the direction of the right line in which that force is impressed.

Law III : To every action there is always opposed an equal reaction: or, the mutual actions of two bodies upon each other are always equal, and directed to contrary parts.