



4

牛頓運動 定律



4-1 慣性與牛頓第一運動定律

4-2 牛頓第二運動定律

4-3 牛頓第三運動定律

4-4 摩擦力

投手將棒球投出，打擊者要將球擊出，兩人對球施力的量值相同嗎？如何進行估算？

名人語錄

If I have seen farther, it is by standing on the shoulders of giants.
如果我比別人看得更為深遠，那是因為我站在巨人的肩膀上。

— 牛頓 (Isaac Newton, 1642-1727)

自古希臘時代以來的二千餘年間，人們對運動與力之間關係的看法相當分歧，希臘的哲學家亞里斯多德（Aristotle, 384-322 BC）認為宇宙裡所有的物體都有各自的歸宿，重物如岩石等會落至地面、輕物如煙等會飄向空中、天上事物（指的是日月星辰）的運動和地上事物的運動有著不同的規律，一旦物體找到了它的自然歸宿，就會停留在它的位置上；想要讓物體維持運動狀態，就必須要對它施力。

在另一方面，物體具有慣性的觀念在不同的時地分別開始萌芽。例如西元前三世紀時，中國的思想家墨子（戰國初期魯國人，姓墨名翟，約468-376 BC），如圖4-1，提出物體運動就是改變了原有位置的看法，並說明物體運動受到阻力的作用，經過一段時間終究會停止下來；這時需要持續對它施力作用，才會繼續運動下去。

在西方，伽利略發現物體不受外力作用時，其速度將維持不變。牛頓承襲前人的研究成果，最後提出了牛頓運動定律及萬有引力定律，成為古典物理的穩固基礎。雖然牛頓說：「如果我比別人看得更為深遠，那是因為我站在巨人的肩膀上。」但是無庸置疑的，牛頓的確就是科學的巨人，以下數節要介紹這位巨人對力學的偉大貢獻。



▲ 圖 4-1 思想家墨翟

小知識 墨子與自然科學

思想家墨子創立墨家學說，並有《墨子》一書傳世，提出兼愛、非攻、節用、尚賢等觀點。在春秋戰國之時，墨學與楊朱之學並駕齊驅，同為顯學，見《孟子·滕文公》篇：「楊朱、墨翟之言盈天下，天下之言，不歸於楊，即歸墨。」

《墨子》書中的〈經上〉、〈經下〉、〈經說上〉、〈經說下〉、〈大取〉、〈小取〉等六篇，一般稱作墨辯或墨經，著重闡述墨家的邏輯思想，以及數學、天文學、力學、幾何光學、聲學等自然科學的論述。

這六篇文章使用甚多的古字詞，且言簡意繁，辯理深奧，加上數學概念及科學理論夾雜其中，以致兩千年來，很少有人問津。直到近代學者認真解讀這本古書，才發現早在二千多年前墨家便已有對光學（研究了光沿直線前進及針孔成像的理論，並討論了平面鏡、凹面鏡和凸面鏡的成像性質）、力學（提出了力與物體運動的關係，重量就是一種力的作用）、數學（論述了圓的定義）等自然現象的探討。但可惜的是，這些科學成就卻因為此書在古代未得到重視，而沒能結出碩果。

4-1 慣性與牛頓第一運動定律

Physics

1 研究運動的歷史發展

亞里斯多德探討物體的運動時，認為落體的速度和它的重量成正比，因此輕重不同的物體從同一高度落下時，重物會先到達地面。這種說法延續了將近二千年之久，終於開始被質疑了。

義大利數學家貝尼德蒂（Giovanni Battista Benedetti, 1530 -1590）認為只要是相同材質的物體，重量雖然不同，但是卻會以相同的速率落下。後來義大利物理學家伽利略在 1638 年出版的《兩門新科學的對話》書中，則運用邏輯推理的方法駁斥了亞里斯多德上述的論點。他先假設亞里斯多德的理論是正確的，即物體愈重時落下愈快。可是若將重物和輕物綁在一起，讓它們落下時，將會出現兩種可能的結果：

- (1) 重物下落快，輕物下落慢。但重物受輕物牽制，所以兩物綁在一起的落下速度將介於兩物單獨落下速度之間，會比重物小而比輕物大；
- (2) 兩物綁在一起的重量會比重物更重，因此落下速度會比重物或輕物都大。

以上這兩個結論自相矛盾，所以物體愈重時落下愈快的假設前題不能成立。因此，重物和輕物落下的時間應相等，也就是說，不論物體落下的時間或落下的速度皆應相同，與物體的輕重無關。

伽利略藉由細心的實驗觀察，檢驗前人以哲學思維所做的理論推導。他在《兩門新科學的對話》書中，討論物體在水中落下的情況，顯示他注意到了運動時所受到的阻力作用，所以他設計了許多減少阻力作用的實驗方法。伽利略偉大之處就在於建立了現代的實驗精神，加上想像實驗並延伸到理想狀況，更仔細的觀察和使用類推等方法進行物體運動的研究，因此能獲得精確的實驗結果。

在《兩門新科學的對話》中，伽利略討論等加速運動的性質，以理論推導出移動距離與經過時間的平方成正比，以及速度與時間成比例的關係，認為自由下落是等加速運動。後來在 1602 年至 1604 年間，伽利略完成斜面實驗，證實了以上的假設。

小知識 落體實驗

究竟伽利略有沒有在比薩斜塔做過落體實驗，許多科學史家都懷疑是否真有其事；但在歷史上確實有人進行過落體實驗，此人是荷蘭的數學家及工程師史蒂文（Simon Stevin, 1548 - 1620）。他在 1586 年出版的《靜力學》中，介紹他所做的一次落體實驗：

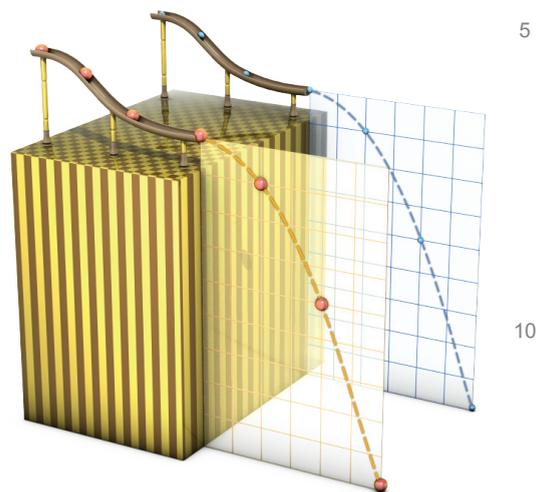
讓我們拿兩個鉛球，其中一個比另一個重十倍，把它們從三十英尺的高度同時丟下來，落在一塊木板或者什麼可以發出清晰響聲的東西上面。那麼，我們會看出輕鉛球並不需要比重鉛球十倍的時間，而是同時落到木板，因此它們發出的聲音聽上去就像是只有一個聲音一樣。

十七世紀時，波以耳（Robert Boyle, 1635 - 1703）在管子裡面放了一支羽毛和一個硬幣，再把管子內的空氣儘可能抽除，以減少空氣阻力的影響，實驗結果是兩者同時落下。

1971 年，美國阿波羅 15 號（Apollo 15）太空船登陸月球，太空人史考特（David Randolph Scott）在月球上使用一把鐵鎚和一根羽毛重複了落體實驗，結果發現同時落地。

2 伽利略的慣性實驗

在《兩門新科學的對話》書中，伽利略描述了砲彈射出後的運動路線是由兩種運動所決定。在鉛直方向的運動是由重力所引起，使砲彈落下；而在水平方向的運動則維持等速前進。如圖 4-2 所示，大小不同的兩砲彈自相同高度的斜面自由下滑，脫離斜面時應有相同的速度。水平射出後落至地面時，相同的落下高度及相同的水平位移可以表示兩者有相同的



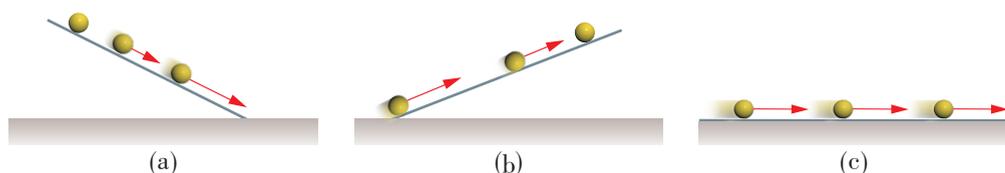
▲ 圖 4-2 砲彈自斜面底端水平拋出後的運動軌跡示意圖

落至地面時，相同的落下高度及相同的水平位移可以表示兩者有相同的

運動路線，此運動路線與物體的大小無關。在那個沒有靈敏的攝影設備，沒有精確計時鐘錶的時代，若想要憑藉肉眼直接觀察落體的運動路徑實在不易，更無法進行精確的量測及記錄。在觀測條件極為不足的情況下，伽利略能夠構想出各種實驗的方法，並得到精準的數學描述。他的
5 的創意及實驗技巧，在科學領域開創出理論與實驗並重的研究方法，因此被譽為現代科學之父。

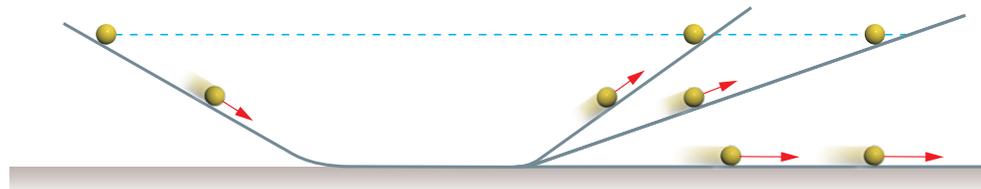
伽利略認為力並非用以維持物體的運動狀態，而是改變物體運動狀態的原因。瞭解到當物體受力作用時將產生加速度；因而物體不受力時即沒有加速度，將維持其原有的運動速度。他的想法最後導致牛頓第一
10 運動定律的推出。

伽利略發現物體沿著光滑斜面向下運動時，速率會漸增，如圖 4-3(a)；而沿斜面向上運動時，其速率會漸減，如圖 4-3 (b)。因此他推論假如斜面的角度降為零度，即成為光滑水平面時，物體應該不加速也不減速，能夠維持等速運動，如圖 4-3 (c)。



▲ 圖 4-3 伽利略觀察物體在斜面上的運動，推論物體在光滑水平面上應作等速運動。

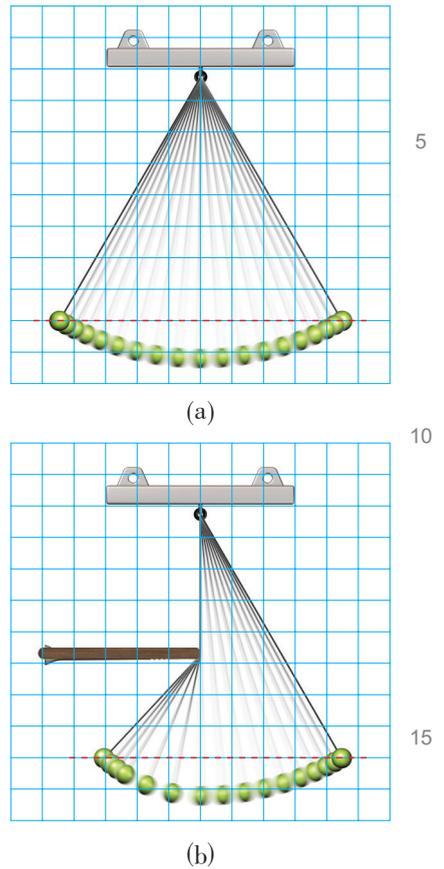
15 若將兩個光滑斜面置放在光滑水平面的兩端，並讓一小球由左邊斜面頂端自由滑下，它就會在右邊斜面上爬升到原來的高度，如圖 4-4。



▲ 圖 4-4 伽利略推論物體為達到相同高度，在光滑水平面上將會永遠維持等速運動。

若將右邊斜面的仰角減小，則小球達到相同高度時，在斜面上會移動較長的距離。因此伽利略推想，若把右邊斜面完全平放成為水平時，小球豈不是無法爬升到原有的高度，而必須永遠地運動下去嗎？

今天我們可以模仿伽利略的上述實驗，但改成使用單擺在空中擺動，以減少物體在斜面及水平面上運動時所受到的摩擦阻力作用。因為空氣阻力甚小，所以單擺在擺動時，擺錘幾乎可以到達相同的高度，如圖 4-5 (a)，這正如圖 4-4 中顯示的小球自左端斜面某高度下滑後，能在右端的斜面向上滑行至相同的高度。若在擺線中途使用障礙物加以阻擋，擺錘仍會到達相同高度，其結果與伽利略的斜面實驗相似，如圖 4-5 (b)所示，擺錘在左端擺動的坡度較陡峭，而右端擺動的坡度較平緩，這也和圖 4-4 中，將右端的斜面放倒下來，使其傾角減小時的情況類似，小球也能到達相同的高度。若使單擺的擺長向上逐漸增長至無限長時，擺錘擺動的軌跡則近似水平直線，如同圖 4-4 小球在右端的水平面上將永遠無法上升至原有的高度，而會永遠地運動下去。



▲ 圖 4-5 觀察單擺的運動，發現擺錘要達到原有高度才會折返。

小知識 想像實驗

想像力是人類與生俱來的一種思維模式，在思維的過程中，不受既有規則的限制，將腦海中曇花一現的靈感、頓悟或圖像描繪出來。透過想像力的運作，人類發展出驚人的創造力與發明力。

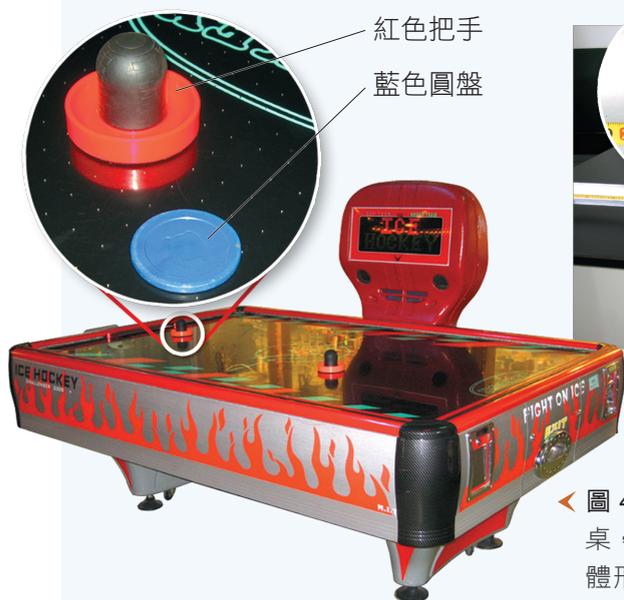
科學上的發現有些是經由實驗的驗證，有些卻在當時無法體現，所以必須透過想像實驗才能完成。牛頓由蘋果落地推想萬有引力的研究，就是一個很好的想像實驗例子。他假想位於山頂的火砲發射砲彈時，砲彈沿水平方向射出，因為受重力作用沿拋物線軌跡落到地面。若發射速度愈大，則落地距離將愈遠。當增加發射速度至某一值時，砲彈將繞過地球作圓周運動，恰如月球繞地球的軌道運動。

科學家或哲學家富有豐富的想像力，藉著想像實驗的做法，使用思考作為工具，在內心的思維進行各種假設及嘗試的解法，用來研究事物的本質。

本節內文末段關於擺長延伸至無限長的敘述，雖然是個想像的實驗，無法在真正的生活中實現，但是這種想像實驗對於進階的思維及科學理論的建立常有極大的助益。

小知識 使用氣墊可以減少摩擦

伽利略所設計的實驗，需要在完全沒有摩擦力的條件下才能成立；而現實中摩擦力難以消除，所以要用實驗觀察的方法驗證伽利略的說法並不容易。在遊樂場中常見到氣墊桌，在箱形桌面上密布氣孔向外噴出氣體，小圓盤即能漂浮在桌面上，在運動時幾乎沒有摩擦力，如圖 4-6 所示。目前在實驗室中則使用氣墊軌道，自密布的小孔向外噴出氣體形成氣墊，使物體漂浮在軌道上，當物體運動時即可避免軌道產生的摩擦力，僅剩餘微小的空氣阻力，如圖 4-7 所示。磁浮列車則是現代化交通工具的設計，利用車體與軌道間的磁力，使列車漂浮在軌道上以減少行進時的摩擦阻力作用。



紅色把手
藍色圓盤



▲ 圖 4-7 長形氣墊軌道可以用來做驗證運動學的實驗。

◀ 圖 4-6 遊樂場常見的氣墊桌，桌面上密布小孔噴出氣體形成氣墊，使用紅色把手撥動藍色圓盤在桌面上滑動。

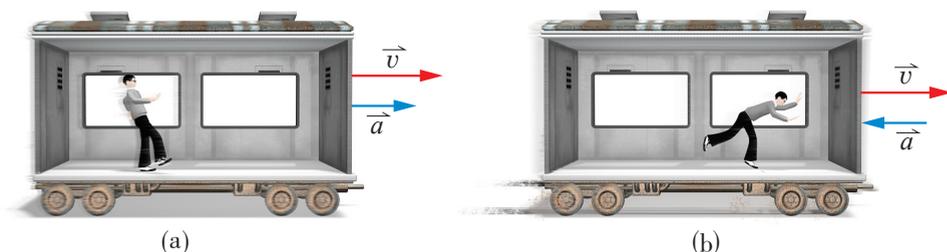
3 牛頓第一運動定律

伽利略在實驗中發現，在水平面上運動的物體終會停止，是由於有摩擦力作用的緣故。若接觸面愈光滑，則物體在停下來之前所行的距離便愈長。他認為力並非用來維持物體的運動狀態，而是改變物體運動狀態的原因。也就是說，若運動物體沒有受外力作用，則其速度將不會改變。物體若不受外力作用時，仍然保持原來運動狀態的特性，稱為物體的慣性（inertia）。

牛頓在伽利略的研究基礎上，對物體的運動進行深入的研究，提出牛頓三大運動定律，說明了力與運動的關係。在《自然哲學的數學原理》（*Mathematical Principles of Natural Philosophy*）一書中，牛頓寫道：

第一定律：每個物體都保持其靜止或等速直線運動狀態，除非受外力作用迫使它改變其原有狀態。

牛頓第一運動定律又稱為**慣性定律**（law of inertia），此定律在日常生活中應用甚多。例如：在搭乘汽車或火車時，若車子突然向前開動，如圖 4-8 (a)所示，紅色向量 \vec{v} 表示車子前進的運動速度，藍色向量 \vec{a} 表示加速向前，此時人由於慣性而向後仰；而當車子突然煞車減速時，如圖 4-8 (b)所示，紅色向量 \vec{v} 表示車子前進的運動速度，藍色向量 \vec{a} 表示煞車減速，此時人又因慣性而向前衝。



▲ 圖 4-8 (a)車子突然前進，人因慣性而向後仰；
(b)車子突然煞車，人因慣性而向前衝。

慣性是物體的固有性質，靜止物體能維持其靜止，或運動物體能維持其等速運動，並不需外力才能維持其運動。將雨傘上的水珠甩走、拍打衣服將灰塵擲去和用力向下跺手柄可以使鐵鏈或斧頭嵌緊等，都是慣性定律的應用。

想一想

人在車中因加速或煞車而傾倒時，為什麼腳能固定在車上？

在運動學中描述物體的運動時，觀察者必須先選擇一個參考系。如果這個參考系中的物體在不受力作用或所受的淨力為零時，能夠維持靜止或等速運動，表示此參考系能滿足慣性定律，這種參考系稱為**慣性參考系**（inertial frame），又稱為慣性坐標系。

- 5 但如前述的加速前進或煞車減速的車子內，即為一個加速度的參考系，該參考系內的物體，因為無法滿足慣性定律，所以這是一個**非慣性參考系**（non-inertial frame）。