

4-3 牛頓第三運動定律

Physics

「作用」與「反作用」這兩個詞彙在日常生活中可能以不太相同的講法出現，例如在圖 4-30 中所示：(a)在打靶時，教官告訴同學說：「你們在射擊時要將槍托抵緊肩窩，不然子彈射出的時候，槍身產生的後座力會撞到你。」(b)小華對小明說：「籃球向下丟得愈用力，它會彈得愈高。」(c)學習溜冰時，教練對小強說：「站好以後，右腳對著前方，你側著左腳對地施力愈大時，向前衝的速度也會愈大」等，有時我們還會把這種講法引伸到日常生活上做比擬的應用，如(d)甲對乙說：「你不要給丙太大的壓力，小心他會激烈地反彈。」顯然上述的這些說法，都是生活中常見的現象，用的也是一般的生活語言。

10



▲ 圖 4-30 生活中常見有關作用與反作用的例子

牛頓對作用與反作用早有研究，並建立了第三運動定律，我們來看看牛頓原來的說法。如果甲物體與乙物體碰撞，因為被撞的乙物體受力作用，因此改變了乙物體的「運動」^註；那麼，當我們看到甲物體的「運動」在同樣的時間內也發生了量值相等而方向相反的變化時，可以證實

5 作用力與反作用力應有等值反向的關係。

某人坐在有輪子的辦公椅上，兩腳撐著牆壁用力推牆時，我們看到牆壁並沒有移動，但人和椅子會向後退，顯示牆壁對人施一反方向的作用力。划船時，以船槳向船後方施力於水，結果船卻能向前行進，顯示水施反方向的作用力給船槳。將氣球充氣後再鬆開吹口，則氣球收縮時

10 對其內的氣體施力向外噴出，結果氣球本身將反向飛行，顯示氣體也能對氣球施以反方向的作用力。以上這些例子都有類似的現象，我們可以觀察到有一作用力，就有一反作用力。

想一想

在上述人推牆的例子中，為什麼牆壁不會移動？是因為它沒有受到作用力嗎？

任何兩個物體間的作用都是相互對應的，當物體 A 施力於物體 B 時，總是能發現物體 B 也同時對物體 A 施力，因此，力絕不是某物

15 體單方面的行為，而是物體與物體彼此間的相互作用。我們將物體間相互作用的這一對力，稱之為**作用力**（action）與**反作用力**（reaction force），每一個力都是作用力，同時也互為對方的反作用力。

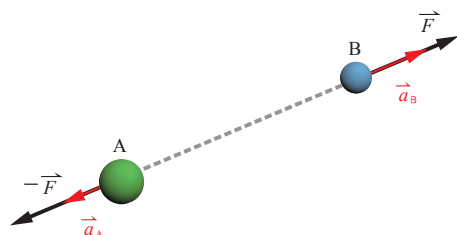
在《自然哲學的數學原理》一書中，牛頓寫道：

第三定律：對每一個作用力恆有一個相等而方向相反的反作用力；

20 或是說，兩個物體彼此間的相互作用力總是相等而方向相反。

^註 牛頓所謂的「運動」，可以從牛頓原著《原理》的前後文中看出，即意指現在使用的「動量」。

如圖 4-31 所示，假設兩物體之間的相互作用力為排斥力（例如同性電荷之間的靜電排斥力）。只考慮物體 A 及物體 B 二者之間的相互作用時，若物體 A 施作用力 $\vec{F}$ 於物體 B，則施力物體是 A，而受力物體是 B，使物體 B 獲得加速度 $\vec{a}_B$ ；同時物體 B 會施反作用力 $-\vec{F}$ 給物體 A，此時施力物體是 B，而受力物體則是 A，並使物體 A 獲得加速度 $\vec{a}_A$ 。作用力與反作用力分別作用在兩個不同的物體上，而非作用在同一物體上，因此並未使物體 A 或物體 B 達成靜力平衡。



▲ 圖 4-31 作用力與反作用力量值相等、方向相反；而加速度雖方向相反，但量值並不一定相等，A 的質量較大則其加速度較小；B 的質量較小則其加速度較大。

5

想一想

在《仙履奇緣》的故事中，灰姑娘仙杜瑞拉穿上漂亮的禮服及一雙玻璃鞋，搭車要去參加王子的舞會。老鼠正想要拉著南瓜車前進時，突然回過頭來對灰姑娘說：「我施力拉車，但車對我有反作用力，這兩個力的量值應相等，因此車子根本不能前進。」你認為老鼠的說法對嗎？

如圖 4-32 所示，有些地區的生活習慣是用頭頂重物。物體的重量就是地球將物體向下拉的重力 $\vec{F}_1$ ，但物體並未產生加速度，那是因為頭頂對物體施以向上的支撐力 $\vec{F}_2$ ，抵銷了地球對物體所施之重力。雖然 $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$ ，但此兩力係同時作用在物體上，其合力為零，恰能使物體保持平衡，而不是一組作用力與反作用力。根據牛頓第三運動定律， $\vec{F}_1$ 的反作用力為物體施於地球向上的萬有引力 $\vec{F}_1'$ ；而 $\vec{F}_2$ 的反作用力為物體向下擠壓頭頂的作用力 $\vec{F}_2'$ 。



15

▲ 圖 4-32 兩組作用力與反作用力示意圖

20

做一做

在自然界也會看到許多類似圖 4-32 的例子，例如南太平洋上復活節島的巨石像，如圖 4-33，和桃園小烏來的風動石，如圖 4-34。圖中繪出了某個作用力，接著

- (1) 請你畫出其反作用力，並說明它們為什麼是一對作用力與反作用力？
- (2) 請你畫出能夠使該物體維持靜力平衡所需的作用力。



◀ 圖 4-33 復活節島的巨石像



◀ 圖 4-34 小烏來的風動石

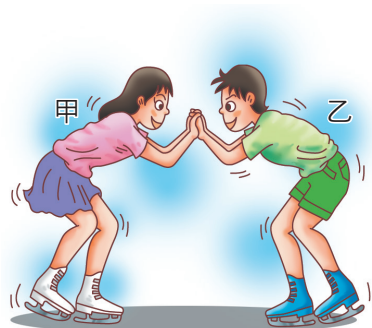
同一組作用力與反作用力的物理本質應相同，若物體 A 對物體 B 所施的作用力為萬有引力，則物體 B 對物體 A 的反作用力也必須是萬有引力。將氣球在牆壁上摩擦後，氣球被牆壁吸引可以黏附在牆壁上，氣球對牆壁的作用力為靜電力，則牆壁對氣球的反作用力也必須是

5 靜電力。

所以在觀察某兩個作用力時，可以依據這兩個作用力是否分別作用在兩物體上，且並非使某一物體維持平衡，以及它們是否性質相同，就可以很容易地判斷出是否為一組作用力與反作用力。

範例 4-7

電影中有時會看到溜冰的情節，兩人在溜冰場中原為靜止，在互推之後兩人開始後退，如圖 4-35 所示。甲和乙兩人的質量各為 30 公斤及 40 公斤，若甲以 240 牛頓的力推乙，作用力持續的時間為 0.50 秒，則兩人分開時的速度量值各為若干？



▲ 圖 4-35

解答

由牛頓第三運動定律知：甲推乙的作用力與乙推甲的反作用力量值相等，故皆為 240 牛頓，則甲和乙兩人的加速度量值分別為

$$a_{\text{甲}} = \frac{F}{m_{\text{甲}}} = \frac{240 \text{ N}}{30 \text{ kg}} = 8.0 \text{ m/s}^2$$

$$a_{\text{乙}} = \frac{F}{m_{\text{乙}}} = \frac{240 \text{ N}}{40 \text{ kg}} = 6.0 \text{ m/s}^2$$

因兩人受力作用的時間應相同，故分開時的速度量值為

$$v_{\text{甲}} = a_{\text{甲}} t = (8.0 \text{ m/s}^2) (0.50 \text{ s}) = 4.0 \text{ m/s}$$

$$v_{\text{乙}} = a_{\text{乙}} t = (6.0 \text{ m/s}^2) (0.50 \text{ s}) = 3.0 \text{ m/s}$$

想一想

我們有時會看到這種說法：甲、乙兩人站立在光滑的水平冰面上，甲以 160 N 的力推乙，乙以 240 N 的力推甲，則甲所受的總力為 400 N，乙所受的總力亦為 400 N，因此能夠符合牛頓第三定律。

上述這種說法的觀念正確嗎？你認為的理由是什麼？

範例 4-8

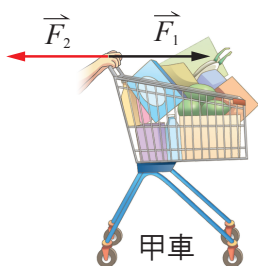
- 如圖 4-36 所示，嬌嬌為了要準備聖誕節晚會，在超市採買了大量的物品，因此使用了兩輛手推車，推車甲及物品的總質量為 35.0 公斤、推車乙及物品的總質量為 20.0 公斤。嬌嬌以 165 牛頓的水平力對推車甲施力，讓推車甲頂著推車乙一起前進。若地板對推車的摩擦力甚小可以忽略不計，則推車甲對推車乙的作用力，以及推車乙對推車甲的作用力各為若干？



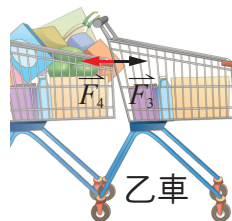
▲ 圖 4-36 購物時使用了兩輛手推車。

解答

- 嬌嬌對推車甲施力 $\vec{F}_1$ ，推車甲對嬌嬌則施以反作用力 $\vec{F}_2$ ，如圖 4-37。推車甲對推車乙施力 $\vec{F}_3$ ，推車乙對推車甲施以反作用力 $\vec{F}_4$ ，如圖 4-38 所示。甲、乙兩推車一起運動時有相同的加速度，設其加速度為 $\vec{a}$ 。



▲ 圖 4-37 嬌嬌與甲車之間的作用力



▲ 圖 4-38 甲車與乙車之間的作用力

若考慮整個系統時，系統僅受外力 $\vec{F}_1$ 作用，則由牛頓第二運動定律知

$$a = \frac{F_1}{\Sigma m} = \frac{165 \text{ N}}{35.0 \text{ kg} + 20.0 \text{ kg}} = 3.00 \text{ m/s}^2$$

對推車甲而言，受二水平力作用：一為 165 N 的水平推力 $\vec{F}_1$ ，方向向右；另一為推車乙對推車甲的作用力 $\vec{F}_4$ ，方向向左。由牛頓第二運動定律知

$$165 \text{ N} - F_4 = (35.0 \text{ kg})(3.00 \text{ m/s}^2)$$

5

可得推車乙對推車甲的作用力為

$$F_4 = 60.0 \text{ N}$$

對推車乙而言，僅受推車甲的作用力 $\vec{F}_3$ ，方向向右。則由牛頓第二運動定律知

$$F_3 = (20.0 \text{ kg})(3.00 \text{ m/s}^2) = 60.0 \text{ N}$$

10

想一想

在範例 4-8 中可以計算出推車甲對推車乙的作用力及推車乙對推車甲的作用力，可否據以驗證牛頓第三定律？