

2-1 慣性與牛頓第一運動定律

2-2 牛頓第二運動定律

2-3 牛頓第三運動定律 (作用力與反作用力)

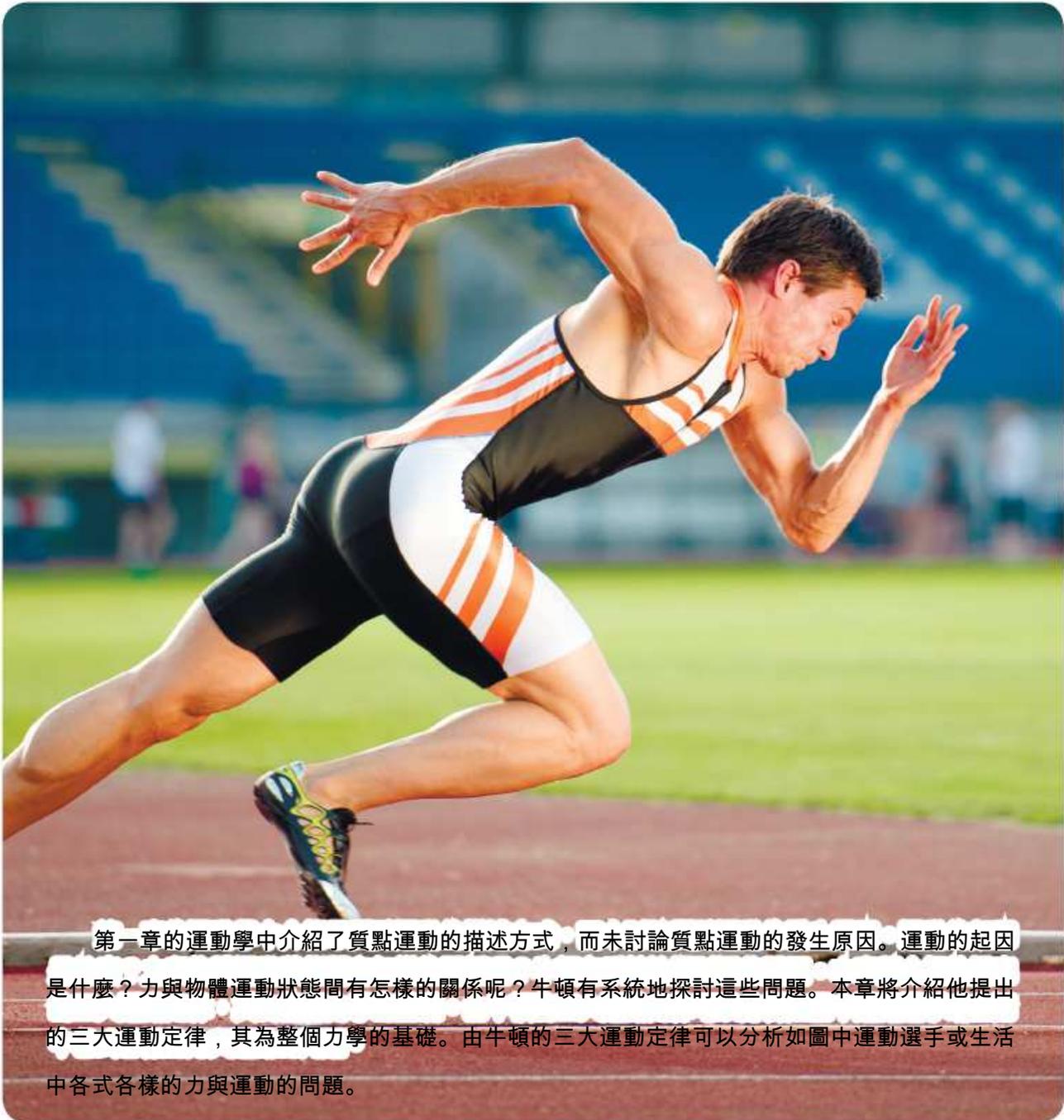
2-4 力與靜力平衡

2-5 摩擦力

CH

2

## 牛頓運動定律



第一章的運動學中介紹了質點運動的描述方式，而未討論質點運動的發生原因。運動的起因是什麼？力與物體運動狀態間有怎樣的關係呢？牛頓有系統地探討這些問題。本章將介紹他提出的三大運動定律，其為整個力學的基礎。由牛頓的三大運動定律可以分析如圖中運動選手或生活中各式各樣的力與運動的問題。



## 一、觀察與想法的變遷

根據生活中的經驗，起腳踢足球可以使球飛很遠（圖 2-1），用力推一輛靜止的卡車通常是推不動，一個球滾得再快終究還是會停下來，這些現象似乎存在某些規律性。



∴圖 2-1 起腳踢足球可以使球飛很遠。

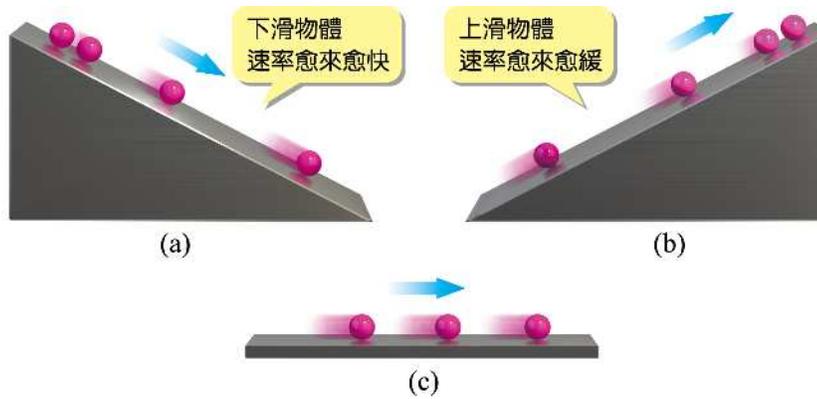
人類很早就想要掌握物體運動的規則，早在兩千多年前的哲學家亞里斯多德就已對力與運動的關係做了一番詮釋，他認為物體會運動是因為受到力的作用，一旦作用力消失，物體終究會停下來。施力方能維持物體運動狀態的錯誤主張，表面上看起來與生活中的經驗吻合，但實際上是觀察歸納不夠仔細造成的誤解。

究竟運動中的物體有保持運動的特性，還是會自動停下來呢（圖 2-2）？義大利物理學家伽利略透過實驗對物體運動作了更詳細的觀察，他發現物體沿光滑斜面



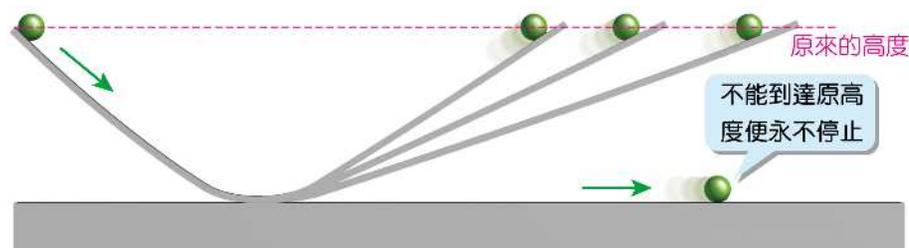
∴圖 2-2 運動中的物體有保持運動的特性，還是會自動停

下滑時，速率愈來愈快，如圖 2-3(a)所示；而上滑的物體，其速率愈來愈緩慢，如圖 2-3(b)所示。而作水平運動的物體會停下來是因為有**摩擦力**（friction）的作用，摩擦力大時物體很快就停下來，摩擦力小時物體可以維持較長時間的運動。雖然無法做到完全無摩擦的實驗過程，但他作了合理的推論：**假如物體在光滑的水平面上運動，則應該不會變快也不會變慢**，如圖 2-3(c)所示。



∴圖 2-3 伽利略透過觀察運動中的物體，推論物體在光滑的水平面上運動應該不會變快也不會變慢。

再使用這種光滑無摩擦的彎曲軌道，如圖 2-4 所示，將一小球由軌道左側下滑，經過最低點後再沿軌道右側上升，恰好上升到原來的高度，縱使右邊軌道面的傾斜度不同，小球仍是達到相同高度時方停止。因此若把右邊軌道面完全放平時，小球因達不到原有的高度，而持續地運動，此與上述「物體在光滑的水平面上運動應該不會變快也不會變慢」的推論吻合。



∴圖 2-4 伽利略對物體在不同傾斜度之光滑軌道上運動的觀察，發現物體的運動有達到原來高度的特性。

## 二、牛頓第一運動定律

牛頓（Issac Newton，英國，1642~1727，圖 2-5）對物體運動作了深刻的研究，承續伽利略的想法，把當時基本的概念作了完整的陳述及推廣，提出牛頓三大運動定律。

牛頓第一運動定律又稱為**慣性定律**（law of inertia）：物體若不受外力作用，則靜止者恆靜止，運動者依原方向作等速運動。

**慣性定律闡述**物體具有維持原來運動狀態的特性，稱為**慣性**（inertia）。例如靜止的物體，若其質量愈大，愈難使其運動，可見其慣性較大。物體不受外力作用保持靜止的情形隨處可見，也很容易被接受，甚至利用這個特性來完成工作，例如拍打衣服除去灰塵、搖動樹枝讓成熟的果實掉下來等。而物體不受外力作用維持等速直線運動的現象，常因摩擦力及空氣阻力之作用而難以被觀察到，我們只要盡量使用光滑面，或只考慮瞬間狀況，並不難瞭解這種物體的固有性質。圖 2-6 中的積木是慣性定律的好例子，迅速敲擊重疊積木中的一塊，受力的那一剎那，僅受力的那一塊積木彈出，而其他未受敲擊的積木仍停留在原處。

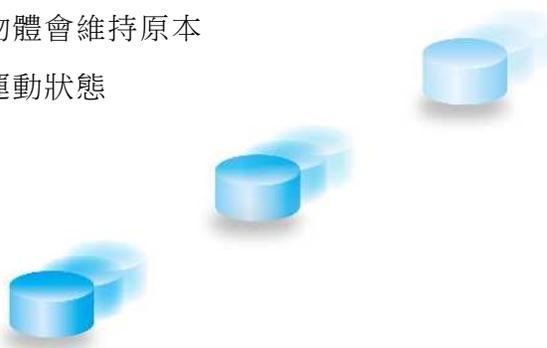
不同於亞里斯多德的錯誤主張，奠基於伽利略及牛頓等人的實驗與理論，牛頓第一運動定律指出：力不是「物體維持運動狀態」的條件，而是「改變物體運動狀態」的條件，也就是不受外力作用時，物體會維持原本的運動狀態，此運動狀態可能是靜止或等速直線運動。



∴圖 2-5 牛頓



∴圖 2-6 慣性定律為「物體若不受外力作用，則靜者恆靜，動者恆依原方向作等速運動。」圖中的積木即是一例。



慣性

1. 如圖(一)，取相同硬幣數枚疊成一疊，置於水平桌面上，再取一直尺迅速在桌面上滑動，依序將最下方的硬幣撞離，但上方硬幣卻不傾倒。
2. 如圖(二)，將手臂彎曲，使前臂接近水平，手掌向上，取硬幣三枚等間隔置於手臂上，欲迅速揮動手臂將三枚硬幣以手掌一次抓住，將手臂略向後縮，方不致將硬幣向前推，同時手掌迅速對準硬幣原來位置抓過去，硬幣因慣性短暫停留在原位置，手便能順利將硬幣一次抓住。



例題 2-1

在中古世紀，還沒有火藥的年代，為了要攻破堅固的城門，常以數人合抬巨木或以圖中這種「衝車」載運巨木，高速衝向城門，會有很好的破壞效果，試說明其原理。



具有一定速度的巨木，要改變其運動的慣性極為困難，城門雖然堅固，也難以阻擋。

想一想

生活中還有哪些應用慣性定律的例子呢？

### 一、牛頓第二運動定律

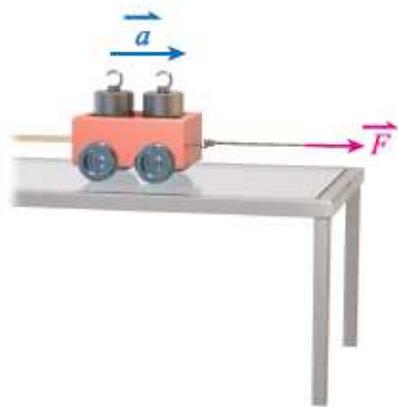
物體所受外力（合力）為零時，會保持原運動狀態。換句話說，若物體所受外力（合力）不為零，運動狀態會改變，即產生加速度，研究物體受力與產生的加速度需考慮哪些狀況呢？舉例來說，騎自行車在剛起步時，用力踩自行車，車即加速前進；若自行車多載一個人使總質量變大，騎起來就不易加速；若兩人一起用力踩協力車，總質量與推力都變大，這時加速又有所不同（如圖 2-7）。我們可以感覺到物體加速度的量值與物體受力及質量都有密切關係，想要更嚴謹的找出其關係，可藉由以下實驗來進行。



圖 2-7 自行車多載一個人時總質量大，不易加速；協力車兩人一起用力踩，

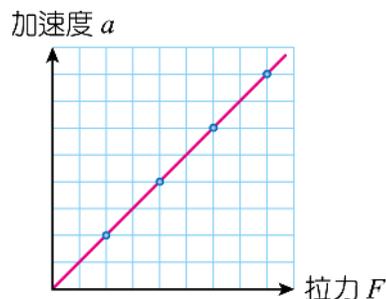


圖 2-8 的裝置可用來研究力與加速度的關係。在光滑水平桌面上的滑車連接一紙帶，當滑車受拉力  $F$  而運動時，以打點計時器於紙帶上打點，記錄滑車在固定時間間隔下的位移，以計算出滑車的加速度  $a$ ，可發現滑車作等加速運動。



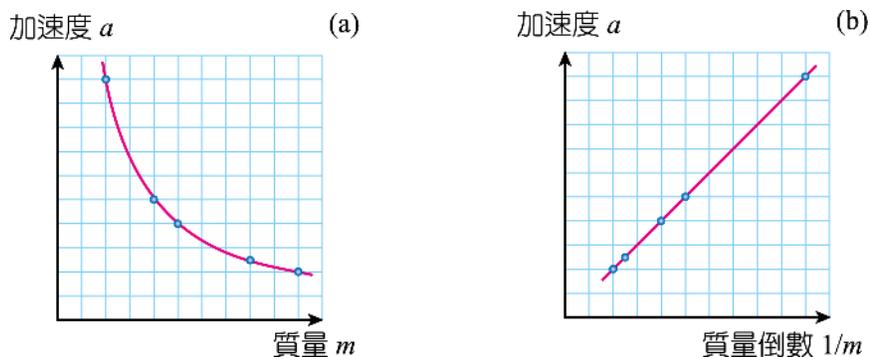
∴ 圖 2-8 滑車實驗可驗證牛頓第二運動定律。

若固定滑車的質量，改變施於滑車的拉力  $\vec{F}$ ，測量其相應的加速度  $\vec{a}$ ，分別以拉力  $F$  和加速度  $a$  作為橫坐標與縱坐標，繪出之圖形為一條通過原點的斜直線，如圖 2-9。由此關係圖可知，若滑車質量  $m$  保持不變，則加速度  $a$  和其所受拉力  $F$  成正比。



∴ 圖 2-9 固定總質量時，滑車的加速度與其拉力成正比。

若固定拉力  $F$ ，改變滑車上砝碼數目以改變滑車的總質量  $m$ ，測量產生的加速度量值為  $a$ ，可得到如圖 2-10(a)的結果曲線。為使其物理意義明顯，可改作加速度  $a$  與質量倒數  $\frac{1}{m}$  圖，如圖 2-10(b)所示。顯示出



∴ 圖 2-10 受力相同，(a)加速度與質量之關係。(b)加速度與質量的倒數之關係。

由以上的討論可以得到一個簡單的規律如下：當物體質量  $m$  固定時，加速度  $a$  與外力  $F$  成正比；當外力  $F$  固定時，物體加速度  $a$  與其質量  $m$  成反比，除此之外並無其他因素影響加速度。

「力」可藉由牛頓第二運動定律來定義之。規定使質量為 1 公斤之物體產生 1 公尺／秒<sup>2</sup>的加速度所需的力，稱為 1 牛頓（newton，簡寫為 N），且力的方向即為加速度的方向。以數學式表示牛頓第二運動定律為：

$$\text{牛頓第二運動定律} \quad \vec{F} = m \vec{a} \quad (2-1)$$

$F$ ：外力（N）、 $m$ ：質量（kg）、 $a$ ：加速度（m/s<sup>2</sup>），式中  $\vec{F}$ 、 $\vec{a}$  表示此物理量為向量。

## 二、牛頓第二定律應用在重量的概念

物體在星球表面上，受到星球的萬有引力而具有重量，又稱為重力，其量值以  $W$  表示，物體受重力產生的加速度稱為重力加速度，以  $\vec{g}$  來表示，在地球表面的  $g$  值約為 9.8 公尺／秒<sup>2</sup>，會隨地點而略為改變，但差異度不大。質量  $m$  公斤的物體在地表上的重量即為  $m$  公斤重，或表為  $W$  牛頓，其關係如下：

$$\vec{W} = m \vec{g} \quad (2-2)$$

物體加速度的方向即為受力之方向，而重量的方向與重力加速度的方向相同。我們可藉由彈簧秤來測量物體之重量，可知 1 公斤物體在地球表面的重量約為 9.8 牛頓，也稱為 1 公斤重。同一物體在地球與月球表面具有不同的重量，月球表面上的重力加速度約為地表的六分之一，故重量亦約為地表的六分之一；但若以天平來做測量，由地表移到月球表面上，由於物體與砝碼的重量同時改變，天平所受到的力矩仍成平衡狀態，所以測量值不變，也就是說天平測量的是物體的質量。由以上討論可知：質量的大小不會因為物體所在地點不同而改變，同一物體在不同重力加速度的地點，其重量便不相同。

### 三、合力用於牛頓第二運動定律

當物體不只受到一個外力作用時，牛頓第二運動定律中的  $\vec{F}$  所代表的是這些作用力的合力，因此牛頓第二運動定律應表示成：

$$\sum_i \vec{F}_i = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots = m \vec{a} \quad (2-3)$$

2

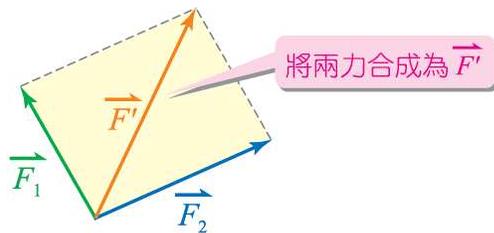
### 四、力的向量性質與力的合成分解

#### (一) 力的向量性質

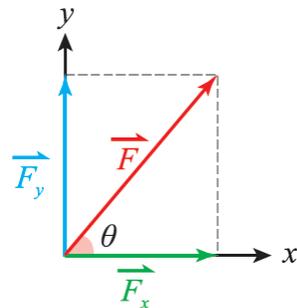
力對物體造成的影響無論是形變還是運動狀態的改變，都不僅和力的量值有關，力的方向也非常重要，因此力為向量。敘述時，必須表明它的量值和方向，作圖時可用一箭矢來表示力，箭矢的長度代表力的量值，箭矢的方向代表力的方向，箭矢的起點代表力的作用點。

#### (二) 力的合成與分解

當物體受到兩個力或兩個以上的力作用時，必須依照向量的法則求出合力。在圖 2-11 中，質點受到  $\vec{F}_1$ 、 $\vec{F}_2$  作用時，可以利用平行四邊形法求出  $\vec{F}_1$  與  $\vec{F}_2$  的合力  $\vec{F}'$ ，也可以先將各力分解在兩個互相垂直的方向上形成分力再作運算，這種過程稱為力的分解。例如在圖 2-12 中， $\vec{F}$  可以分解成兩個互相垂直的分力  $\vec{F}_x$  和  $\vec{F}_y$ 。



∴圖 2-11 兩力可利用平行四邊形法求合力。



∴圖 2-12 一個力可以分解為兩個互相垂直的分力。

## 例題 2-2

在小說《三國演義》中，關羽所使用的兵器：青龍偃月刀質量約等於現代的 16.5 公斤，若關羽手持青龍偃月刀，以加速度 2.0 公尺／秒<sup>2</sup> 水平向前衝，如圖所示，則須對此刀向上及向前施力各多少牛頓？



**思路：** 加速度為零， $\Sigma \vec{F} = 0$ ；加速度為  $\vec{a}$ ， $\Sigma \vec{F} = m \vec{a}$ 。

**解** 青龍偃月刀在鉛直方向所受合力為零， $\vec{W} + m \vec{g} = 0$ ，

故向上施力等於物重  $W = mg = 16.5 \times 9.8 = 162$  (N)，

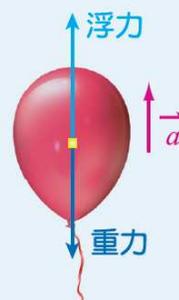
$\vec{F} = m \vec{a}$ ，向前施力產生加速度  $F = ma = 16.5 \times 2.0 = 33$  (N)。

## 自我練習

若關羽停止前進，並以加速度 1.0 公尺／秒<sup>2</sup> 上提瞬間，則對此刀向上及向前施力各多少牛頓？

## 例題 2-3

一氣球質量為 0.050 公斤，以加速度 2.0 公尺／秒<sup>2</sup> 上升，如圖所示，若不考慮空氣阻力，則氣球此時所受到的浮力為多少牛頓？



**解** 氣球所受重力  $mg = 0.050 \times 9.8 = 0.49$  (N)，

若浮力以  $\vec{B}$  表示，並取向上為正， $\vec{B} + m\vec{g} = \vec{F} = m\vec{a}$ ，

則合力  $F = B - mg = B - 0.49 = ma = 0.050 \times 2.0 = 0.10$ ，

得  $B = 0.59$  (N)，方向向上。

### 自我練習

將此氣球掛一質量為 0.30 公斤的重物，則其加速度為多少？

### 例題 2-4

支撐一般人的體重只需耐重 100 公斤重的繩索，但攀岩用的繩索卻需耐重 2500 公斤重以上，如圖所示。

想想看：為何攀岩要使用如此高耐重的繩索？



**思路：**  $\vec{T}$  (張力) +  $\vec{W}$  (體重) =  $m\vec{a}$ ，墜落急停時， $a$  值很大，故  $T$  值很大。

**解** 攀岩或垂降時，繩索除負擔攀岩者體重之外，垂降急停時的加速度造成的作用力比體重大得多，一個總質量 100 公斤的攀岩者單人使用，靜止或等速垂降時，繩索張力約為 1000 牛頓 (100 公斤重)；若垂降急停時的加速度為  $10 \text{ m/s}^2$ ，則所需繩索張力為 2000 牛頓 (約 200 公斤重)，更何況繩索要承受不慎失足墜落時的衝擊力，才能保障攀岩者的安全，而此衝擊力又遠大於 2000 牛頓。一般而言，繩索耐重愈大愈安全，但也要考慮攜帶的方便性。

爬竿時，雙手向下施力讓身體上升，則身體必然受到一個向上的作用力，如圖 2-13(a)所示；划船時，以槳向後對水施力可以使船向前進，則船必然受到一個向前的作用力，如圖 2-13(b)所示。思考這個作用力的來源可以發現，來自於水施給槳向前的力讓船前進，但是水並不會自動施力於船槳，乃是船槳對水施力時，同時產生的水施予船槳反方向作用力。如果改以槳向後對空氣施力時，由於空氣難以提供反方向的作用力，不但划船的人難以施力，船身也很難前進。



∴圖 2-13 (a)爬竿時的作用力與反作用力。  
(b)划船是牛頓第三運動定律的例子，船槳對水施力的方向和船行方向相反。

回顧生活中施力及受力的經驗，可以發現任何兩個物體間的作用力都存在施力體與受力體，而且兩者的角色可以互換。換句話說，若甲對乙向右施力時，甲是施力體而乙是受力體；同時乙也對甲向左施力，乙是施力體而甲是受力體，如圖 2-14 所示。因此，力必是物體間成對產生的交互作用，稱之為**作用力**（action）與**反作用力**（reaction force）。牛頓將這些特性綜合歸納為牛頓第三運動定律：作用力與其反作用力必同時產生且同時消失，兩者之量值相等、方向相反且在同一直線上。

需特別注意作用力與其反作用力乃作用於不同物體上，兩者並不能相互抵消，故上述甲或乙都可能因受力而產生運動。



∴圖 2-14 作用力與反作用力的施力體與受力體。

便利貼

牛頓運動定律

第一運動定律



物體若不受外力作用，則靜者恆靜，動者恆依原方向作等速運動。

第二運動定律



$$\vec{F} = m\vec{a}$$

物體加速度  $a$  與外力  $F$  成正比，與質量  $m$  成反比，且加速度方向與外力方向相同。

第三運動定律



作用力與反作用力必同時產生且同時消失，兩者之量值相等、方向相反且在同一直線上。

作用力與其反作用力乃作用於不同物體上，兩者並不能相

## 例題 2-5

如圖所示， $\vec{F}_1$  為手拉繩子之力， $\vec{F}_2$  為繩子拉物體之力， $\vec{F}_3$  為繩子作用於手之力， $\vec{F}_4$  為物體作用於繩子之力。



試問：

- (1)  $\vec{F}_1$  的反作用力為\_\_\_\_\_。
- (2)  $\vec{F}_4$  的反作用力為\_\_\_\_\_。
- (3) 繩子若處於靜止狀態時，則其受\_\_\_\_\_與\_\_\_\_\_兩力而平衡。

**思路：**「甲對乙施的力」反作用力為「乙對甲施的力」。

- 解**
- (1)  $\vec{F}_1$  為手拉繩子之力，其反作用力為繩子拉手之力，即為  $\vec{F}_3$ 。
  - (2)  $\vec{F}_4$  為物體作用於繩子之力，其反作用力為繩子作用於物體之力，即為  $\vec{F}_2$ 。
  - (3) 作用在繩子上的力為  $\vec{F}_1$  及  $\vec{F}_4$ ，當繩子若處於靜止狀態時，此二力成靜力平衡。

## 自我練習

物體所受重力的反作用力為何？

### 想一想

圖中獨木舟靜止在平靜的湖面上，若右手以船槳向後施力，則船身將如何運動？



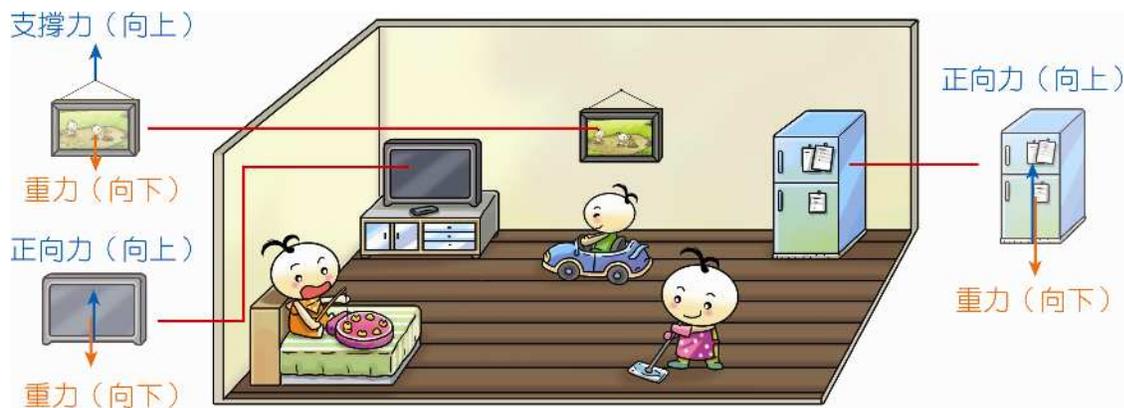
對一個物體施力可能使物體產生形變或改變物體的運動狀態，如圖 2-15 所示，喝完的易開罐由兩側施力會使罐身凹陷，再由上下施力則可壓扁，施力方向不同即可造成不同的形變。而在我們身邊看似不變的物體是否都不受力呢？

事實上，在日常生活中，物體完全不受外力作用的例子並不常見，通常我們容易觀察到的是力平衡的狀態，也就是物體所受外力的合力為零。圖 2-16 中的電視靜置於電視櫃上，並非不受力，而是同時受向下的重力和電視櫃向上支撐的**正向力**（normal force），二者量值相等互相抵消使合力為零；同理冰箱也是同時受到量值相等的重力和地板向上支撐的正向力，而呈現合力為零的狀態。

當合力為零時，物體不會改變原有的運動狀態，若物體原本為靜止則稱該狀態為**靜力平衡**（static equilibrium），圖 2-16 中的電視、冰箱及掛圖都是處在靜力平衡的狀態。圖中的箭頭，**橘色**表示向下的作用力，**藍色**表示向上的作用力，其長度相等表示力的量值相等，箭頭指向相反表示作用力的方向相反，箭頭的起點表示力作用的位置。



∴圖 2-15 不同的施力方向可造成不一樣的形變。



∴圖 2-16 物體受外力的合力為零時會維持原本的運動狀態，亦即靜者恆靜，動者恆作等速直線運動。

圖 2-16 中還有哪些力平衡的例子？

例題 2-6

重 20 牛頓的重錘置於地板，一端以彈簧秤連接懸於天花板，如右圖所示。當系統達平衡時，彈簧秤指針讀數為 8.0 牛頓，



- (1) 重錘所受作用力有哪些？請畫圖表示之。
- (2) 重錘所受各作用力量值之間的關係為何？
- (3) 地板作用於重錘之力的量值為多少牛頓？

**思路：** 1. 對重錘找出全部作用力。 2. 鉛直方向合力為零。

**解** (1) 重錘所受作用力包括：

- (a) 地球對重錘向下之重力  $m\vec{g} = 20$  牛頓，方向向下；
- (b) 彈簧秤對重錘向上拉力  $\vec{F} = 8.0$  牛頓，方向向上；
- (c) 地板對重錘向上支撐力  $\vec{N}$ （稱為正向力），方向向上。

(2) 重錘達平衡時  $\vec{F} + \vec{N} + m\vec{g} = 0$ ， $mg = F + N$ 。

(3) 由  $mg = F + N$ ，得  $N = mg - F = 20 - 8.0 = 12$ ， $N = 12$ （牛頓）。



如圖，若將重錘改置於磅秤上，此時彈簧秤指針讀數為 15 牛頓，則磅秤指針讀數為多少？



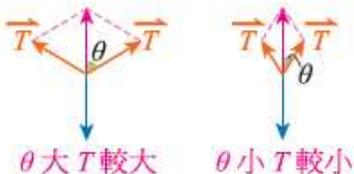
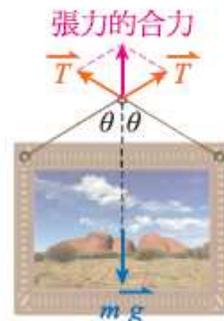
欲在客廳掛一幅畫，畫框的背面有兩個位置固定的釘子。小康將畫對稱的掛在牆壁的掛鉤上，掛好後整條細繩呈緊繃的狀態（如圖所示），則使用繩子的長短對繩子張力有何影響？



**思路：**施力為向量，運算需使用向量法則，繩長影響兩夾角之大小。

**解**

- (1) 確定要討論的物體，本題為畫與畫框。
- (2) 依據物體所受的力，將物體的受力一一畫出。本題畫與畫框共受三個作用力，向下的重力  $m\vec{g}$ ，與掛繩兩端的張力  $\vec{T}$ ，其中張力  $\vec{T}$  作用於物體的方向就是沿著繩子的方向。
- (3) 兩張力所圍成平行四邊形的對角線即為其合力。依靜力平衡，該合力量值等於  $mg$ 。
- (4) 使用較長的繩子， $\theta$  角愈小，則較小的張力即可與  $m\vec{g}$  相抗衡。

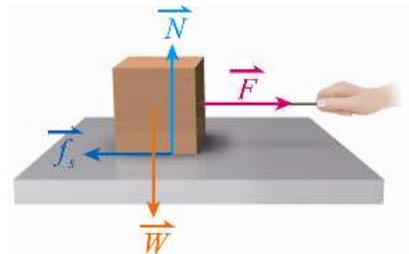


在 2-1 節談到伽利略因注意到摩擦力的作用，而能正確判斷物體運動的原因。現實生活中，運動的物體會漸漸地停下來，就是因為有摩擦力的作用。

當產生相對運動，或有相對運動的傾向時，兩物體在接觸面間所產生阻止相對運動發生的力，就稱為摩擦力，其成因主要為兩接觸面間分子的作用力。

### 一、靜摩擦力 $\vec{f}_s$

如圖 2-17 所示，施力  $\vec{F}$  於物體而物體靜止不動，表示接觸面存在阻止物體欲運動之力，稱為靜摩擦力（force of static friction） $\vec{f}_s$ ，此力和所施的力二者量值相等，方向相反，且作用在同一物體上，而使物體在水平方向所受合力為零，因此不移動。前述圖 2-16 中的冰箱上以磁鐵吸住的文件也是因靜摩擦力和文件的重力量值相等，方向相反而使文件能固定不移動。



∴ 圖 2-17 靜置於桌面物體的受力分析圖。

#### Note

文件可以用磁鐵吸在冰箱上，是由於靜摩擦力和文件的重力平衡。因為重力和磁力作用的方向互相垂直，所以，文件不動並不是因為重力和磁力平衡喔！

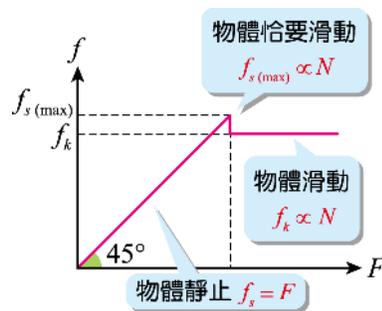


## 二、動摩擦力 $\vec{f}_k$

若發生於兩接觸物體作相對運動時，接觸面間的摩擦力，稱為**動摩擦力**（force of kinetic friction） $\vec{f}_k$ ，例如：緊急煞車時，車子受動摩擦力作用，速率逐漸減少而停止。

## 三、最大靜摩擦力 $\vec{f}_{s(\max)}$

沿著粗糙面拉一物體，在物體運動前，靜摩擦力隨拉力增大而增大，當拉力增大到靜摩擦力的最大值，即**最大靜摩擦力**  $\vec{f}_{s(\max)}$  之後，物體開始運動。物體一旦開始運動，此時阻止物體運動的摩擦力，就轉變為動摩擦力，其方向和物體在接觸面上相對運動的方向相反。通常，動摩擦力略小於最大靜摩擦力且為定值。將外力與摩擦力的關係作圖，以所施外力  $F$  為橫坐標，以物體所受的摩擦力  $f$  為縱坐標繪圖，當兩軸單位相同時，可得圖形如圖 2-18。



∴ 圖 2-18 外力與摩擦力的關係圖。

最大靜摩擦力和動摩擦力的量值隨材料種類及表面粗糙程度之不同而異，且和兩接觸面間的正向力  $N$  成正比，但與接觸面積大小及運動速度無關，其關係可表為：

$$f_{s(\max)} \propto N \quad (2-4)$$

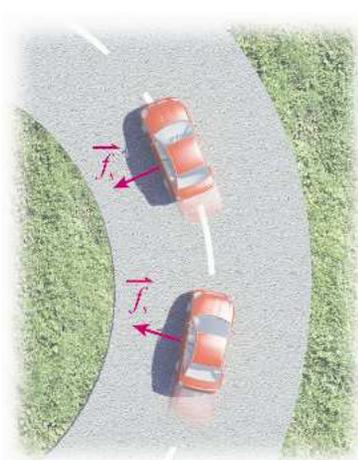
及

$$f_k \propto N \quad (2-5)$$

## 四、摩擦力的應用

摩擦力與我們的生活息息相關，如果沒有摩擦力，人車都無法行進，因為人能行走，是靠人給地面之力的反作用力，也就是需靠地面給人的摩擦力阻止後滑，才能使人前進。為了適應各種地面及不同運動的需求，人們設計了各式各樣的鞋底，來達到不同的功能，如圖2-19。

汽車前行或煞車，同樣得靠地面給予輪胎向前或向後的摩擦力。汽車在水平公路上轉彎，則需靠地面給輪胎之側向摩擦力來造成速度方向的變化，如圖2-20。



∴圖 2-20 地面給輪胎之側向摩擦力使汽車轉彎。



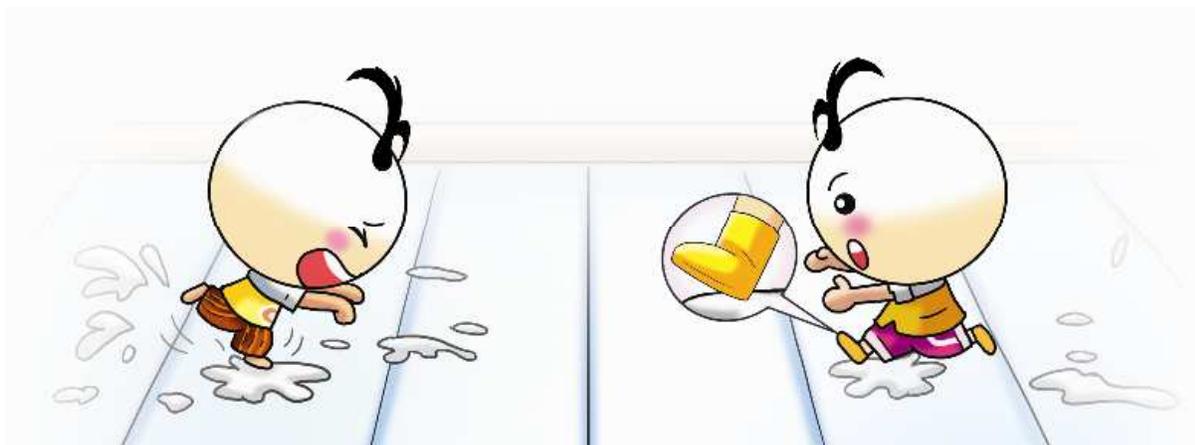
∴圖 2-19 各式各樣的鞋子底部設計，適應各種地面及不同運動的需求。

然而，摩擦會消耗大部分有用的能量，故機械軸承間，常常套以鋼珠，或添加潤滑油以減少摩擦，如何減少摩擦達成節能的目標是機械設計的重要課題，新式的磁浮列車則透過磁力懸浮讓車身與軌道不接觸，完全消除了軌道的摩擦力，如圖 2-21。

∴圖 2-21 磁浮列車

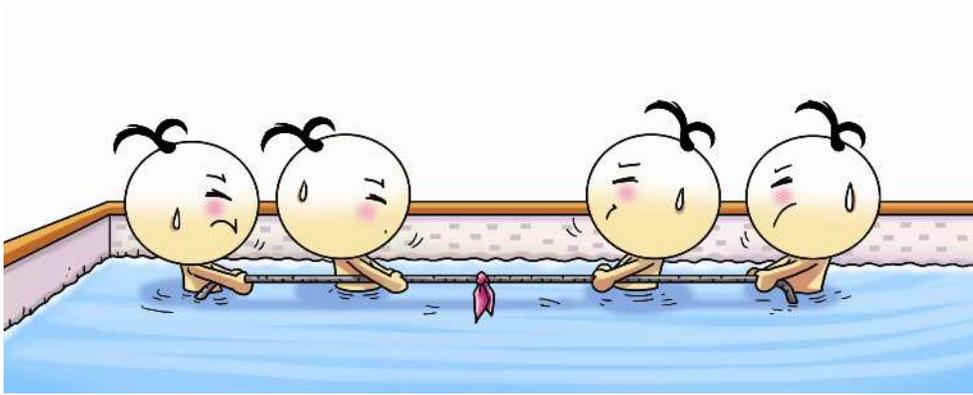
在實際的應用上，視情況不同有時希望增加摩擦力，有時希望減少摩擦力。而由(2-4)式及(2-5)式可知最大靜摩擦力和動摩擦力與正向力成正比，並和接觸面的性質有關。車廂常載重物的貨車若由後輪驅動，可提供較大的摩擦力，而一般轎車則因較重的引擎在前，通常由前輪驅動，即是考慮正向力與摩擦力的關係；鞋底或車輪可利用不同的紋路來改變接觸面的性質以增加摩擦力；潤滑油則可用來改變接觸面的性質使摩擦力減小。圖 2-22 中，穿防滑膠鞋的人比赤腳者有較大摩擦力，可在溼滑的游泳池畔走得更穩。

∴圖 2-22 穿防滑膠鞋者可在游泳池畔走得更穩。



## 想一想

水中的拔河比賽與陸地上不同，若只限制兩隊參賽人數相同，你有什麼好方法可以讓比賽穩操勝券？（例如穿上救生衣有沒有幫助？）



### 例題 2-8

汽車的傳動方式分為前輪傳動、後輪傳動及四輪傳動三種方式，一般的小型房車多採用前輪傳動，但貨車並不適合設計為前輪傳動的方式，仍採用後輪傳動為主，試以摩擦力說明其原因為何？

**解** 貨車載貨時，後輪有較大的負重（正向力），使用後輪傳動能得到較大的摩擦力（最大靜摩擦力較大）來幫助車子的運動，若使用前輪傳動，則容易因為最大靜摩擦力較小而造成輪胎打滑。一般的小型房車引擎位在車子的前端，亦即前輪正向力較大，可取得較大的摩擦力使車子加速。

## 科學家小故事

著名的科普書籍《觀念物理》一書的作者休伊特 (Paul G. Hewitt, 美國, 1930~, 圖 2-23), 1964 年取得美國猶他州立大學教育與物理雙主修碩士學位後, 直到 1999 年退休都在舊金山市立學院擔任教學工作, 並在 1982 年獲得美國物理教師學會頒發的密立根講座獎, 獲獎的原因是他在物理教學的投入, 以生動有趣的解說及教學示範, 讓學生對物理產生興趣。他認為老師不當的教學方式, 會澆熄學生對學習的熱情, 但老師同樣有能力去激發學生的興趣, 這就是教學要做的事。

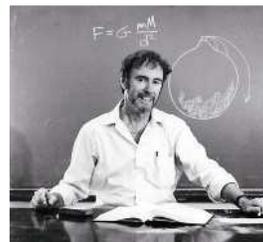


圖 2-23 休伊特

喜歡物理的人會認為物理相當有趣, 不喜歡的人通常是因為學習過程的挫敗, 要如何凸顯物理有趣的一面, 讓學習者更容易掌握物理的內涵, 正是休伊特從事教學工作的信念。他曾說: 「不論是棒球賽、打電動或是團體遊戲, 若你不了解規則, 任何遊戲都無趣。你會錯過別人享受到的樂趣。」學習科學不見得要成為科學家, 就好像不是每個人都要成為運動選手, 但是每個人都應該喜好運動, 有欣賞球賽的基本素養。

《觀念物理》對高中生來說, 是一套很適合在學習物理時自我閱讀的參考書籍, 內容用了很多的例子來說明物理原理, 去除繁複的數學運算, 用了較大的篇幅來闡述問題的想法及分析, 再配合傳神的插圖, 對於概念的釐清很有幫助。大量的實例不僅讓初學者反覆對照自己對原理的認知, 也有助於修正學習上的盲點, 學生習慣了這樣的思考模式, 也會對生活中遇到的種種現象去分析背後的物理意義, 如此也就有了「欣賞球賽的基本素養。」

有人問他: 「年復一年的教牛頓運動定律, 難道你不會覺得累嗎?」他的回答是: 「我不是在教牛頓運動定律; 我是在教人: 每一學期, 都是不同的新人, 都是還不知道牛頓定律可以提供一個嶄新而有趣的方法, 來看周遭生活世界的新人!」不管是站在教學的老師或是站在學習的學生, 永不停熄的熱情絕對是教與學的最佳動力, 我們都相信: 學物理應該是很有趣的, 雖然也許要相當用功, 但一定是有趣的事。

## 物理加油站

本書第一、二章中，計算討論都限定在一維直線運動卻沒有討論二維和三維，是不是有點不切實際呢？人們居住活動在三維的空間中，三維的運動應該是最常見的。從家裡出來搭公車到學校上學，因為到學校不是剛好一直線，又牽涉到上下樓梯，當然是三維的運動。然而在物理中，我們應該學到如何簡化問題做進一步分析：如果細部動作不重要，人也可看成質點，如果問題重點在家到學校的路程及速度，上下公車這種次要的小位移就可以忽略；就算所有的位移都很重要，仍然可以將三維的運動分解為二維的運動，二維的運動再分解為兩個直線運動來處理。事實上，由於各維度運動的獨立性，常將運動分解簡化為直線運動，在物理中，適當的簡化問題，非但不是不切實際，反而是解決問題的重要途徑。

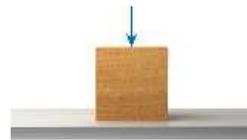
## 本章重點

1. 物體有維持原來運動狀態之特性，受力方能改變物體的運動狀態。
2. 牛頓第一運動定律：物體若不受外力，則靜止者恆靜止，運動者恆依原方向作等速運動。
3. 當物體所受合力為零時，原有的運動狀態不會改變，若物體原本靜止則保持靜止，該狀態稱為靜力平衡。
4. 牛頓第二運動定律：物體受力時產生的加速度與外力成正比，與其質量成反比，且力的方向即為加速度的方向，以數學式表示為  $\vec{F} = m \vec{a}$ 。當物體不只受到一個外力作用時，其加速度與合力之關係為  $\sum_i \vec{F}_i = m \vec{a}$ 。
5. 牛頓第三運動定律：作用力與其反作用力必同時產生且同時消失，兩者之量值相等方向相反且在同一直線上。
6. 作用力與其反作用力分別作用於不同物體上，兩者不能相互抵消。
7. 互相接觸的兩物體間，當產生相對運動，或有相對運動的傾向時，在接觸面間所產生阻止相對運動發生的力就是摩擦力。
8. 最大靜摩擦力和動摩擦力和垂直於接觸面間的正向力  $N$  成正比。最大靜摩擦力和動摩擦力的量值和接觸面間的粗糙程度有關，和接觸面的面積、物體速度及受力大小無關。

## 習題

### 是非題

1. 以繩子拉動重物，若繩重不計，且重物成等加速運動，則手對繩子的施力與繩子拉重物之力量值相等。
2. 以繩子拉動重物，若繩重不可忽略，重物與地面有一動摩擦力，此時重物成等加速運動，則手對繩子施力與動摩擦力量值相等。
3. 物體的運動方向必定為合力方向。
4. 物體的加速度方向必定為合力方向。
5. 電影中，女主角先跳傘後發現降落傘故障，男主角隨後趕緊跳下，在落地前追上女主角，演出英雄救美。以上情節的原理是因男主角體重較大，故下降的加速度較大。
6. 一輛重量為 1200 公斤重（重心在正中央）的昂貴跑車，與總重量為 1800 公斤重的貨車（重心在正中央），若使用相同的輪胎，且兩車引擎施力均足以使輪胎打滑，兩車以繩索連結，來場拔河比賽，則跑車將贏得比賽。
7. 若兩車迎面對撞，損壞較嚴重的那一輛車受力較大。
8. 甲乙兩人互推，依作用力與反作用力原理，甲乙互推之力大小相等方向相反，則這場互推永遠沒有輸贏。
9. 一個在水平桌面的木塊受一個向下的力，若木塊仍靜止，則不論作用力大小如何，木塊與桌面間之摩擦力皆為零。



10. 著名的貝瑞塔（Barrett）92F 型手槍及 M82A1 狙擊槍的規格如下表：

	92F 型手槍	M82A1 狙擊槍
		
全長（公分）	21.7	144.8
槍管長（公分）	12.5	73.7
子彈出口初速 （公尺 / 秒）	334	853
最大有效射程（公尺）	50	1830

表中顯示槍枝規格不同，子彈射程的差異很大，若以口徑相同，槍管長度不同的槍枝來比較，使用相同的子彈射擊，則槍管較長的槍枝，其子彈射程較大。

## 選擇題

### ■ 2-1 慣性與牛頓第一運動定律

- 將一個小鋼珠置於圓盤中央，再將圓盤固定在小車上一起向東作水平等速運動，若小車向北轉彎，此瞬間鋼珠的運動方向為何？  
(A)東 (B)西 (C)南 (D)北 (E)瞬間靜止。



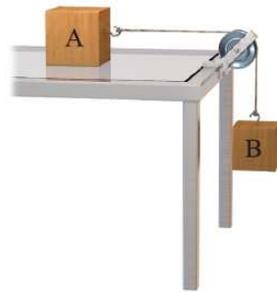
## 習題

2. 下列有關慣性現象的敘述，哪些正確？
- (A) 自一無頂火車上鉛直向上丟一球，不計空氣阻力，如果火車是等速前進，且不考慮空氣阻力，則球最後將落回拋者手中
  - (B) 一般用來剝排骨的刀最好比切菜的菜刀的刀背更為厚重
  - (C) 若不考慮空氣阻力，等速水平飛行的飛機上，陸續丟下一批炸彈，在遠處拍下飛機與正在落下的炸彈照片，可觀察到飛機與陸續丟下的數顆炸彈的連線為鉛直線
  - (D) 站在汽車內的乘客，當汽車突然開動時易向後仰，突然停止時易向前傾
  - (E) 由移動中的火車上跳下，容易跌倒。

### ■ 2-2 牛頓第二運動定律

3. 總質量 80 公斤的跳傘員，當降落傘張開之後以每秒 8 公尺穩定下降，此時所受的空气阻力及其加速度各為多少？（重力加速度  $g = 10$  公尺/秒<sup>2</sup>）
- (A) 0、10 公尺/秒<sup>2</sup>    (B) 800 牛頓、0
  - (C) 800 牛頓、10 公尺/秒<sup>2</sup>
  - (D) 400 牛頓、5 公尺/秒<sup>2</sup>
  - (E) 200 牛頓、10 公尺/秒<sup>2</sup>。
4. 將 A 木塊置於水平光滑之桌面上，連一細繩（不計質量）通過桌緣之一無摩擦的滑輪，鉛直懸掛 B 木塊，整體因而滑動，若加速度量值為  $a$ ，B 之質量為  $m$ ，則 A 之質量為何？

- (A)  $m$     (B)  $\frac{mg}{a}$     (C)  $\frac{ma}{g}$     (D)  $m\left(\frac{g}{a}-1\right)$     (E)  $m\left(\frac{a}{g}-1\right)$ 。



5. 一架飛機從水平跑道一端，自靜止以  $4 \times 10^4$  牛頓的固定推進力開始作等加速運動，第 5 秒末時，飛機瞬時速率為 10 公尺／秒。若飛機質量為  $10^4$  公斤，則飛機在前 5 秒的加速過程所受的平均阻力為多少牛頓？



(A)  $4 \times 10^5$  (B)  $2 \times 10^5$  (C)  $4 \times 10^4$  (D)  $2 \times 10^4$  (E)  $4 \times 10^3$ 。 【99 學測】

6. 具有相同體積且質料均勻的實心鐵球與鋁球，從離地面等高處由靜止自由落下，重力加速度的量值為  $g$ 。在落下的時間均為  $t$  時（尚未到達地面），忽略空氣阻力及風速的影響，下列哪幾項敘述正確？（應選三項）

(A) 兩球所受的重力相同 (B) 兩球下落的距離相同 (C) 兩球有相同的速度  
(D) 兩球有相同的加速度 (E) 兩球有相同的質量。 【97 學測】

### ■ 2-3 牛頓第三運動定律（作用力與反作用力）

7. 賽跑時使用的起跑架如圖所示，起跑架對短距離起跑有較佳的表現，若一位 80 公斤的選手以 400 牛頓的水平推蹬力量施加在起跑架上，該選手的水平加速度量值為多少公尺／秒<sup>2</sup>？



(A) 2 (B) 5 (C) 6.5 (D) 8 (E) 10。

8. 花園使用的灑水器如右圖所示，可以邊灑水邊旋轉，其旋轉的作用是來自於下列何者？

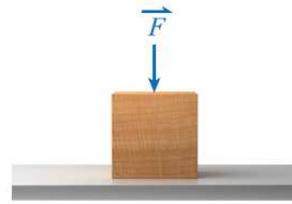
(A) 因重力作用而旋轉 (B) 一開始將其旋轉後即依慣性旋轉 (C) 風力吹動而旋轉 (D) 受噴水時的反作用力而旋轉。



## 習題

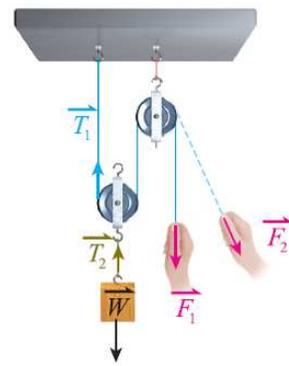
### 2-4 力與靜力平衡

9. 如右圖所示，鉛直向下施一外力  $\vec{F}$  於一放置在水平桌面上的木塊。設  $\vec{W}$  代表木塊所受之地球引力， $\vec{N}$  代表桌面作用於木塊之力，則  $F$ 、 $W$ 、 $N$  三者之關係為何？



- (A)  $W = N$  (B)  $W + F = N$  (C)  $W + N = F$  (D)  $F = N$  (E)  $W = F + N$ 。

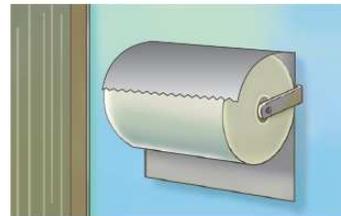
10. 如圖所示，將一重  $W$  的物體以滑輪懸吊（包括一個定滑輪及一個動滑輪）並由  $\vec{F}_1$  維持其靜力平衡狀態，若不計滑輪重量與摩擦造成的影響，則下列敘述哪些正確？



- (A)  $T_1 = W$  (B)  $T_2 = W$  (C)  $F_1 = W$  (D)  $F_1 = T_1$   
(E) 若將  $\vec{F}_1$  的施力方向改變到  $\vec{F}_2$  的方向，且系統仍平衡，則  $F_2 > F_1$ 。

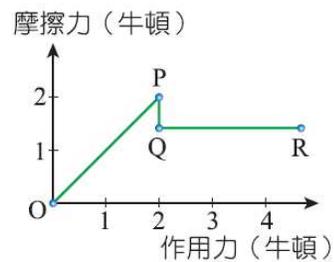
### 2-5 摩擦力

11. 捲筒衛生紙當紙捲較大時，較易拉斷；當快用完時紙捲較小，往往因不易拉斷而拉出過長的衛生紙，其作用與下列何者有關？（應選二項）



- (A) 大紙捲較重，與轉軸的最大靜摩擦力較大  
(B) 大紙捲受力時，力矩較大，較易拉斷  
(C) 大紙捲半徑大，紙捲外圈與捲筒架之間摩擦力較大  
(D) 接近軸心處的紙捲韌度較強  
(E) 小紙捲應輕輕慢拉才能將紙捲拉斷。

12. 一物體在某水平面上開始時為靜止，後來物體受一由小而大的作用力作用，其所受摩擦力與作用力的關係如右圖所示。依據右圖，下列有關摩擦力的敘述何者正確？（應選三項）



- (A)物體受力作用後立即開始運動  
 (B)作用力如圖從 O 到 P 點時，物體維持靜止  
 (C)作用力如圖 P 點時，物體所受摩擦力最大  
 (D)作用力如圖 P 點時，物體的加速度最大  
 (E)作用力如圖從 Q 到 R 點時，物體運動的加速度愈來愈大。 【96 學測】

### 題組題

#### 1~2 題為題組題

台灣高鐵列車的設計基礎來自於日本新幹線 700 系列車，單組列車共 12 節車廂，動力提供型式採動力分散式電車組（9 節動力車廂、3 節無動力車廂），因應高鐵路線多隧道的特性，甚至考量到未來與歐系列車連結的可能性，不但重新設計車頭，亦取消首、尾兩節車廂的駕駛員專用車門，將駕駛室的門改設於首、尾兩節車廂的乘車室內。列車總載客數 989 人（標準車廂 923 人、商務車廂 66 人），載客後總重量約 540 公噸，最高營運速率為 300 公里／小時（ $\frac{250}{3}$  m/s），最大加速度為  $0.56 \text{ m/s}^2$ 。



1. 由以上數據可知，列車起動後的最大推力約為多少牛頓？

- (A)  $2.0 \times 10^5$  (B)  $3.0 \times 10^5$  (C)  $4.0 \times 10^5$  (D)  $5.0 \times 10^5$  (E)  $6.0 \times 10^5$ 。

## 習題

2. 若每節車廂重量相等，且每節動力車廂的動力也相等，今將 12 節車廂皆改為動力車廂，則列車最大加速度約為多少  $\text{m/s}^2$ ？  
(A) 0.40 (B) 0.56 (C) 0.62 (D) 0.75 (E) 0.85。

### 3~4 題為題組題

拔河比賽選手每隊 8 名，依出賽 8 名選手的體重總和，設定不同等級，並分男女性及青年組。2012 年世界盃室內拔河錦標賽，臺灣代表隊再次贏得女子 540 公斤錦標賽冠軍，衛冕成功揚威國際，但另一支男子代表隊，原本一路過關斬將取得冠軍賽資格，但沒想到卻在決賽前，被裁判取消資格，原因是選手在鞋底使用清潔劑，但我方認為使用清潔劑是要去除鞋底髒汙，恢復抓地力，而大會也沒有明文規定禁止使用或是類似判例，向大會抗議仍然無效，在最後關頭被判失格，讓選手們都很難過。請回答以下有關拔河運動之問題：

3. 拔河比賽時，下列哪些條件是影響輸贏的客觀因素？（應選二項）  
(A) 選手體重 (B) 選手身高 (C) 選手所穿鞋子種類 (D) 繩子粗細  
(E) 繩子長短。
4. 當 A、B 兩隊選手正使盡全力拔河時，下列哪些敘述正確？（應選二項）  
(A) 當兩隊僵持不下時，腳與地板間摩擦力等於手部與繩子間的摩擦力  
(B) 當兩隊僵持不下時，手部握緊繩子之力等於手部與繩子間的摩擦力  
(C) 當兩隊僵持不下時，腳施予地板之摩擦力其反作用力為手部施予繩子之摩擦力  
(D) 當兩隊僵持不下時，A 隊隊員腳與地板之摩擦力總和等於 B 隊隊員手部與繩子間摩擦力總和  
(E) 當 A 隊隊員手部與繩子間摩擦力總和大於 A 隊隊員腳與地板之摩擦力總和時，A 隊即將獲勝。