

玩彈珠 也能悟出道理

張育斌

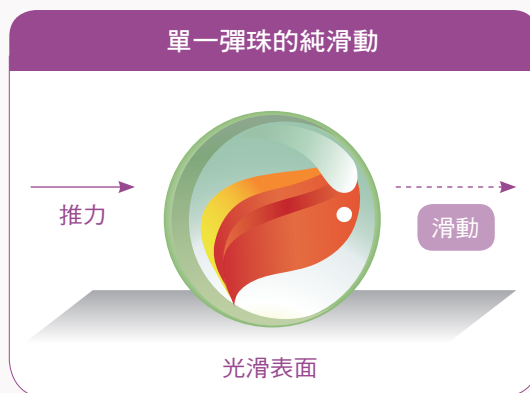
玩彈珠是很多人的童年記憶。也許正因為彈珠具有圓圓滾滾的體態、輕輕巧巧的動作被許多童心未泯的工程師活用，促進了機械產業的革新與發展，提升傳動元件的優勢與效率。

只有 1 顆彈珠

即使只有 1 顆彈珠，也能有許多奇特與難以掌控的運動特性。

純滑動的運動是必須刻意控制的，若是光滑表面，推力要直接通過圓形彈珠的質心才可能；若非光滑表面，推力與摩擦力相對於質心的力矩須正好抵銷。滑動摩擦意指兩接觸表面相對運動時，在某一固定點發生連續的接觸摩擦。因此，滑動不但會受到表面接觸形態如粗糙度的影響，也會受到兩接觸材質之間黏附作用的影響。

純滾動的運動也是必須刻意控制的，若是光滑表面，推力需與圓形彈珠邊緣正相切才可能；若非光滑表面，產生的摩擦力須小於最大靜摩擦力。滾動摩擦意指兩表面的實際接觸位置持續改變。滾動的形成是由於受到不是 0 的合力矩作用。如果材料表面性質夠硬，則發生滾動時只有很小的區域實際接觸，這是構成滾動摩擦的成因，因此滾動阻抗通常很小。滾動件若是圓柱，其力學是「線」



滑動不但會受到表面接觸形態如粗糙度的影響，也會受到兩接觸材質之間黏附作用的影響。

接觸形式；滾動件若是圓球如彈珠，其力學是「點」接觸形式。

單獨 1 顆彈珠的一般運動形式常是滾動複合滑動，稱為滾帶滑。這是由於在很多實際條件下，還是可能在很小的接觸區域產生微小的滑動。

2 顆以上彈珠

當 2 顆以上的彈珠同處於某一空間時，非常可能發生在極短時間內的相互撞擊，2 顆彈珠之間產生很大的作用力（衝力），稱為碰撞。由於 2 顆彈珠行進方向的差異，碰撞有正碰撞與斜碰撞 2 種形式。

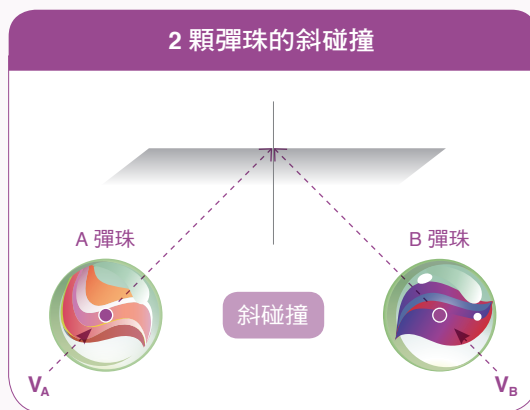
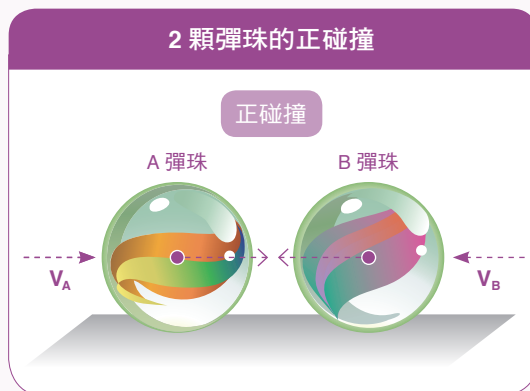
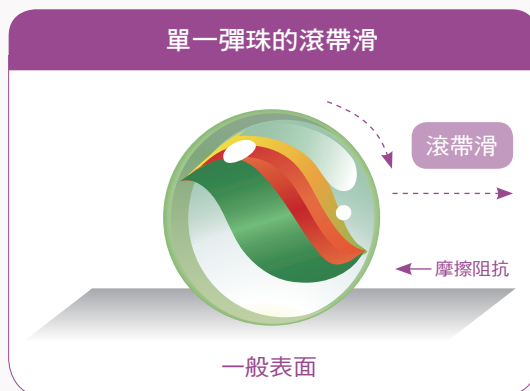
當 2 顆彈珠沿著相互的質心連線方向行進，就會發生正碰撞。碰撞期間，兩顆彈珠互相給予對方大小相等、方向相反的作用力。因此力學分析時，可以把速度或動量等向量假設在同一直線上求解。

當 2 顆彈珠的運動方向不在一條線上，就會發生斜碰撞。因此，力學分析時，必須把速度或動量等向量分別依據水平方向及垂直方向分解以求解。

根據彈珠的材料性質，兩顆彈珠發生碰撞時可分為彈性碰撞、一般碰撞與塑性碰撞 3 種。完全的彈性碰撞不涉及能量損失，因此可以同時適用動量守恆、能量守恆原理。然而實際上，完全的彈性碰撞幾乎不可能發生。一般碰撞與塑性碰撞（碰撞後兩物體相結合，而以一樣的運動速度運動）則都會損失一定的能量，原因可能是熱能散失、產生噪音或材料變形。因此，功與能原理就不適用，僅能利用衝量與動量原理來分析。

童年時期的疑問

童年玩彈珠時，心中就經常浮現一些疑問。如今回想起，再與當前工業界的實際情況相互印證，相當有趣。



物體移動時產生的摩擦力一定與運動方向相反嗎？拉動一物體時，在接觸界面之間會產生與這物體運動方向相反的摩擦力，只要拉力消失，物體會很快就停止滑動。這說明當發生滑動摩擦時，摩擦力與物體運動總是反向的。

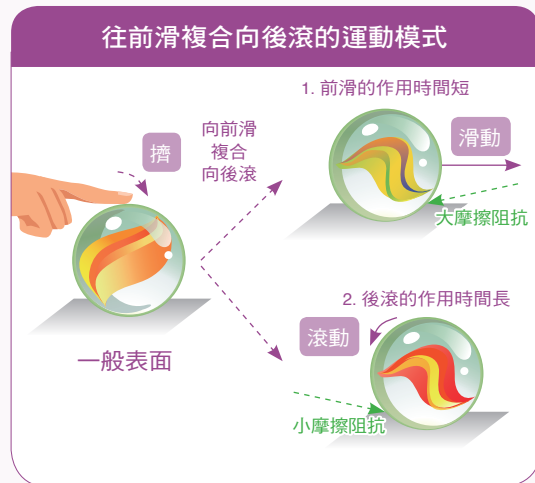
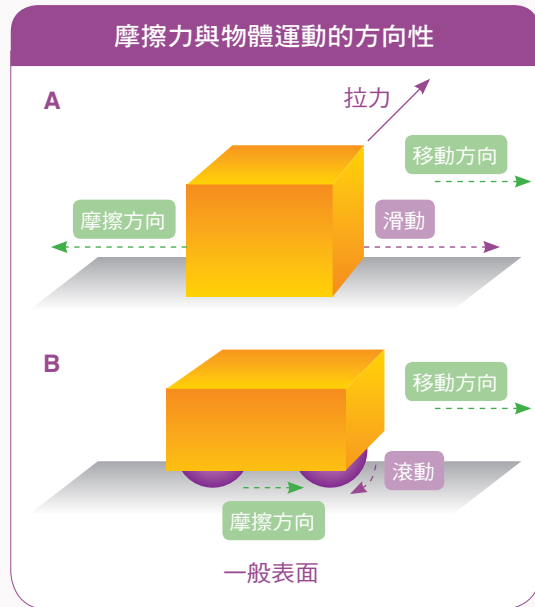
因圓珠具有較低摩擦損失的優勢，若能導入原本是滑動接觸的機械元件中，會有非常優異的產品競爭力。

然而，若是像車輪轉動運行的情況呢？當車輛要向前加速移動時，其輪胎必會順時針加速轉動，輪胎施予地面一個切線向後的力量，同時地面反作用給車輛一個向前的摩擦力，即摩擦力與物體的運動同向。這個力學特性在工業界設計傳動元件時有很高的價值。

用手指擠彈珠，為什麼彈珠會先前進一段距離，然後竟然會再倒退回來？

用手指擠彈珠，因為同時推動彈珠的質心向前及轉動彈珠向後旋轉，因此彈珠會獲得「向前滑」複合「向後滾」的運動模式。就向前滑而言，因為滑動的摩擦阻抗較大，向前滑動的作用時間會較短，其作用力就不存在。而因為滾動的摩擦阻抗很小，向後滾動的作用時間會很長，當向前滑動已經停止後，向後滾動的慣性還依然持續著，彈珠才會呈現再倒退回來的有趣現象。這表示滾動的摩擦損失遠小於滑動摩擦，工業界若使用圓珠當作傳動元件，就能獲得較低摩擦損失的節能效果。

因圓珠具有較低摩擦損失的優勢，若能導入原本是滑動接觸的機械元件中，會有非常優異的產品競爭力。例如，一般軸承的外環與內環若是直接接觸的滑動摩擦，傳動時就會因為高摩擦作用而導致溫度急遽上升，且機台的振動情況會隨著相互運動越劇烈而上升，導致磨耗嚴重與能量損失，定位精度下降與傳動效率降低。但只要在外環與內環間置入滾珠，則可以大幅減少摩擦而提升效率，也有助於減少機械震動而更加穩定，減少磨耗損失材料與提高可靠度的性能，兼具節能、省資源與高品質。若再添加適當的潤滑油品，則更能減少上述各種的摩擦損失。



張育斌

崑山科技大學機械系 / 潔淨能源中心