

中華民國第 64 屆中小學科學展覽會
作品說明書

國小組 物理科

第二名

080106

彈止之間~流體對水瓶彈跳高度的影響

學校名稱：彰化縣溪州鄉水尾國民小學

作者： 小六 鐘允呈 小六 陳禹蓁 小五 鐘婉玲 小五 鐘婉軒	指導老師： 吳建儒 林碧珊
---	-------------------------

關鍵詞：水瓶彈跳、能量轉換、旋轉

摘要

本研究主要探討水瓶自高處落下時，瓶內流體如何影響水瓶彈跳，我們自製跳台和彈跳瓶進行實驗，並改進測量精度，找到水瓶落地造成**水彈起、瓶靜止**的變因條件。研究結果如下：一、瓶內流體的流動，依過程共分為**整體、分離、轉換、恢復**等四個時期。二、流體進入轉換期，會將**水瓶位能轉換成流體動能**，主要跟**碰撞時的液面曲度、水量、和液體黏度**有關。三、**旋轉水瓶會改變水面曲度**，讓水在碰撞時**產生更強的水柱**。四、100g 水瓶**轉速大於臨界值 300RPM** 時，**彈跳次數只剩 1 次**，水瓶落地接近**完全非彈性碰撞**。五、加入和**空瓶等重**的水時，**質心高度最低**，**影響彈跳效果越明顯**。六、**液體黏度會影響瓶子彈跳**，**黏度較高**甘油瓶**彈跳次數可達到 5 次**，**黏度較低**只有**2 次**。

壹、研究動機

一、研究動機

我們最近瘋狂的愛上丟水瓶遊戲(圖 1-1)，挑戰成功的條件是：必須讓水瓶經由空中翻轉，到最後能夠站立。在這當中我們發現了一些有趣的現象：1.瓶內水量的多少，似乎會影響成功機率。2.水瓶在空中轉體往下墜之後，**在落地碰撞瞬間，瓶內的水會激烈彈起，瓶子反而會靜止立在地面**(圖 1-2)。讓我們感到很好奇，於是開始思考：**瓶內的水是如何讓瓶子不彈跳呢？瓶子旋轉與彈跳有何關係？放多少水會對彈跳造成最大的影響，這是否與質心改變有關？一定要加水嗎，不同黏度的液體是否也做得到？**為了解開水瓶在**彈止之間**的秘密，我們開始了一連串的研究。



圖 1-1、同學挑戰丟水瓶遊戲

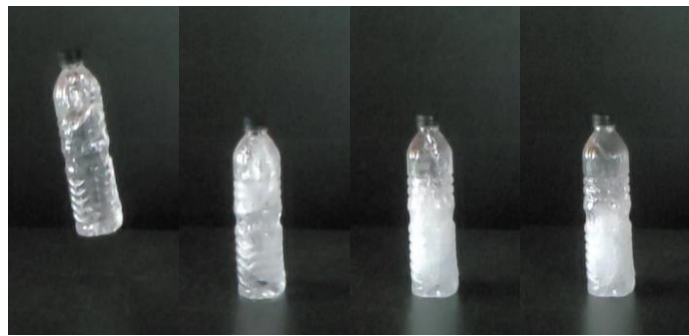


圖 1-2、水瓶落地碰撞瞬間，瓶內的水會激烈彈起，瓶子反而會靜止。

二、文獻探討

(一)水瓶與地面的碰撞

物體由高處自由落下後，碰撞到地面會有三種碰撞方式(圖 1-3)，分別是：

1. **完全彈性碰撞**：恢復係數(C_R)等於 1，表示在碰撞過程沒有耗損能量。
2. **非完全彈性碰撞**：耗損部分能量，造成反彈高度低於原來的高度，恢復係數(C_R)介在 0 與 1 之間。
3. **完全非彈性碰撞**：損失能量最大，完全沒有反彈，恢復係數(C_R)等於 0。

當物體作初速度為 0 的自由落體，落下高度變化不大，重力加速度可以視為定

值，恢復係數關係式可以表示為 $C_R = \sqrt{\frac{h}{H}}$ (H ：落下之最大高度， h ：反彈之最大高度)

思考：恢復係數越低，能量耗損越大，代表能量也轉換的越多，所以我們可以用恢復係數來代表能量轉換的狀況，那如何精準測量水瓶的彈跳高度，會是我們要面對的重要問題。

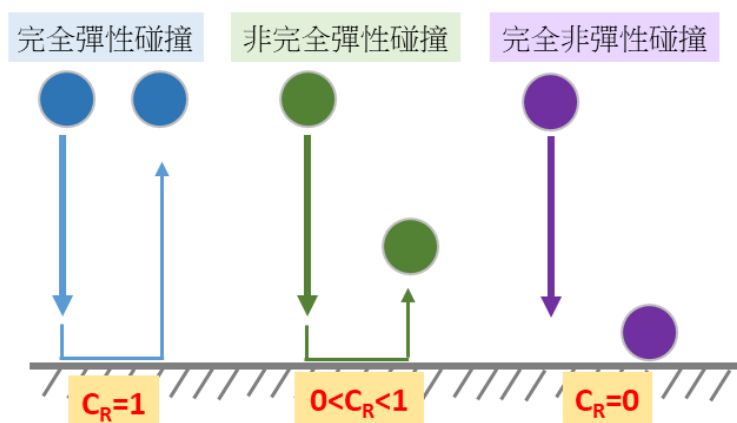


圖 1-3、三種彈性碰撞的方式

(二)需要解決的問題

1. 簡化水瓶運動方式—改為只有往上和往下的一維碰撞

翻轉水瓶時，水瓶是呈現拋物線移動，要同時測量垂直與水平位移比較困難。因此我們簡化運動的方式，改成只有上下的垂直運動(圖 1-4)，為了讓水瓶碰撞後彈跳的情況更明顯，會在水瓶的底部固定彈力球，讓彈跳的高度增加。

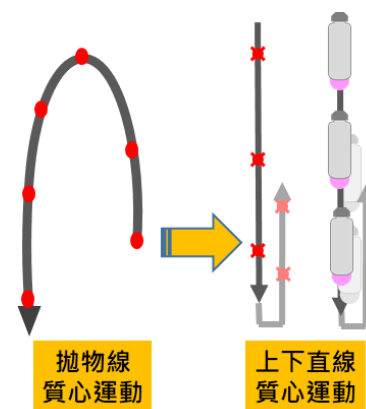


圖 1-4、水瓶運動路線的比較

2.使用同質量、同密度固體來當對照組

我們預計以和水同質量、同密度的**環氧樹脂**填入瓶中，硬化後可以變成**固體瓶**來做實驗，可與流體瓶做數據上的比較(圖 1-5)。另外，如果以懸掛法尋找水瓶的質心，瓶內裝流體，懸掛時因瓶內的流體不斷流動，瓶身無法達到水平。**測量出固體瓶的質心位置，也能等同流體瓶質心的位置。**

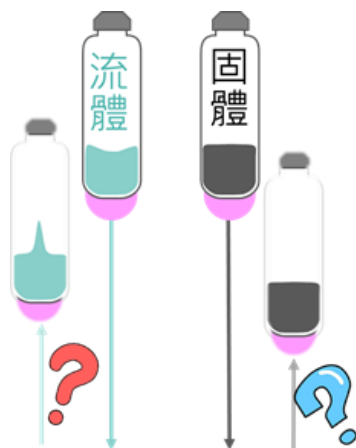


圖 1-5、比較同樣質量的水瓶和固體瓶彈跳的差異

貳、研究目的

- (一)填入固體對瓶子彈跳的影響
- (二)填入水對瓶子彈跳的影響
- (三)探討改變水瓶轉速對瓶子彈跳的影響
- (四)探討水瓶質心改變與彈跳的關係
- (五)探討液體黏度對瓶子彈跳的影響

參、研究設備及器材

一、材料：

環氧樹脂、水、甘油、冰塊、鹽、燒杯、玻璃攪拌棒、寶特瓶、壓克力管、彈力球、培林(6000zz)、智高積木、木箱

二、器材：

電子秤、電子游標卡尺、雷射轉速計、電子溫度計、收音麥克風、電磁鐵、ipad、手機、brain go 開發板、腳架、3D 列印機

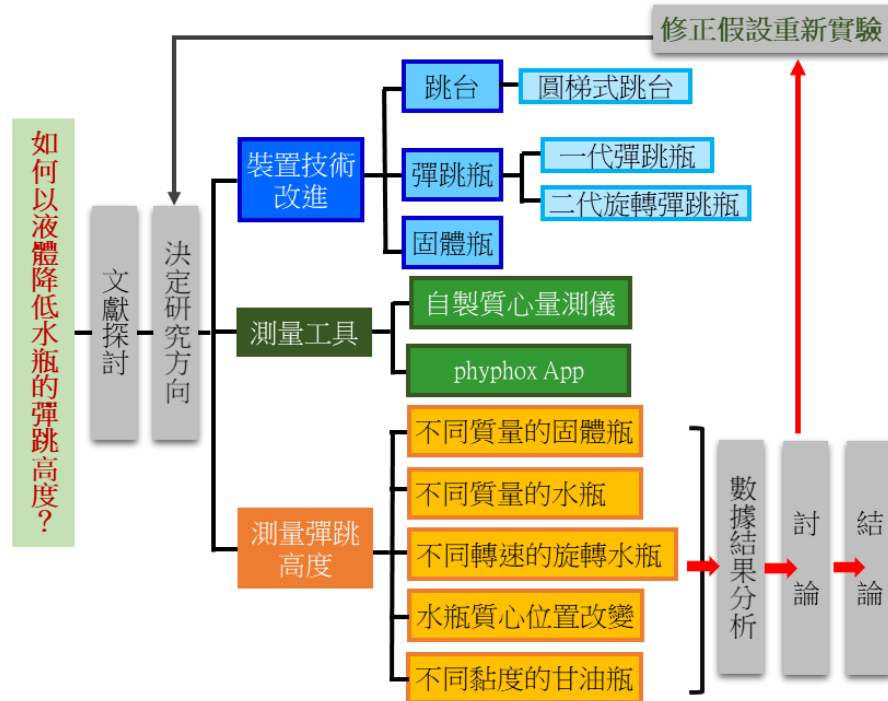
三、軟體：

(一)手機：phyphox[®] App

(二)電腦：Tinkercad[®]、mblock[®]、Microsoft[©] Office Excel[®]

肆、研究過程或方法

一、架構圖



二、裝置技術改進

(一)彈跳高度測量技術改進

一般測量物體彈跳高度的方式，多是以高速攝影記錄下畫面，在以黏貼在彈跳物體旁的尺規，透過慢速播放判讀高度；有的則是以自由軟體 Tracker 做軌跡運動的判讀。

鑒於本實驗的高度測量管長度為 100 公分，以攝影的方式會因角度產生誤差。所以我們讓彈力瓶從高處自由落下，撞擊裝置底座，讓 **ipad** 能清楚接收、辨識撞擊聲，再利用 **phyphox APP** 以聲音碼表測量時間間隔，就可以用公式計算出每次彈跳的最大高度(圖 4-1)。

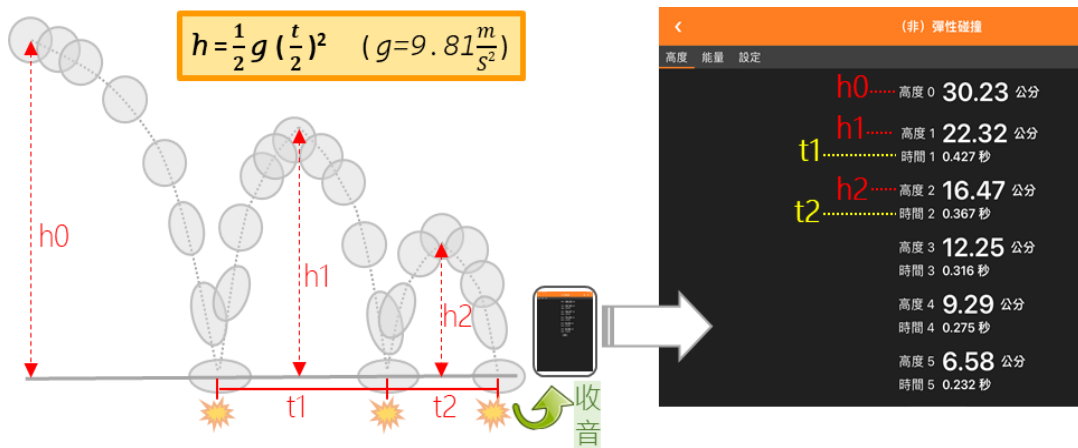



圖 4-1：phyphox APP 高度數據計算方式

(二)自製一維碰撞彈跳裝置

1.圓梯式跳台(圖 4-2)、一代彈跳瓶(圖 4-3)

電磁鐵(直徑26mm) 功用：置於壓克力管上方中心位置。可吸附彈跳瓶上方的華司，讓每次瓶身的位置固定；以開關斷電方式，讓彈跳瓶以自由落體的方式掉落。 固定方式：以3D列印自行設計的平台，將電磁鐵套入平台，入五孔方塊積木，固定在置高積木支架上。		
彈跳高度測量管 固定彈跳瓶運動方向，內徑7cm，長100公分		
木盒 為讓phyphox APP能接收精準的撞擊聲來計算瓶子的彈跳高度，在壓克力管放置中空木盒，以製造共鳴加強音量。 	收音麥克風 在木盒下方固定收音麥克風，降低收到雜音機率，提高實驗效率 	

木盒可抽取，掉落後的彈跳瓶，從此處取出

圖 4-2、圓梯式跳台裝置介紹



華司 配合電磁鐵尺寸，用外徑26mm的華司，確保每次吸附的位置相同，只要調整好電磁鐵位置，落下過程中，便不會擦撞到管壁，減少實驗誤差。 	
彈力球 彈力球底部以砂紙磨平，擴大與地面接觸時的面積，減少剪力並增加彈跳的穩定性 	
銜接環 3D列印銜接環，一銜接華司和瓶蓋，另一卡接瓶身和彈力球，方便拆卸。	
高度：21.5公分 瓶身外徑：5.5公分 重量：100公克	

圖 4-3、一代彈跳瓶結構說明

2. 自製調速器、二代旋轉彈跳瓶(圖 4-4)

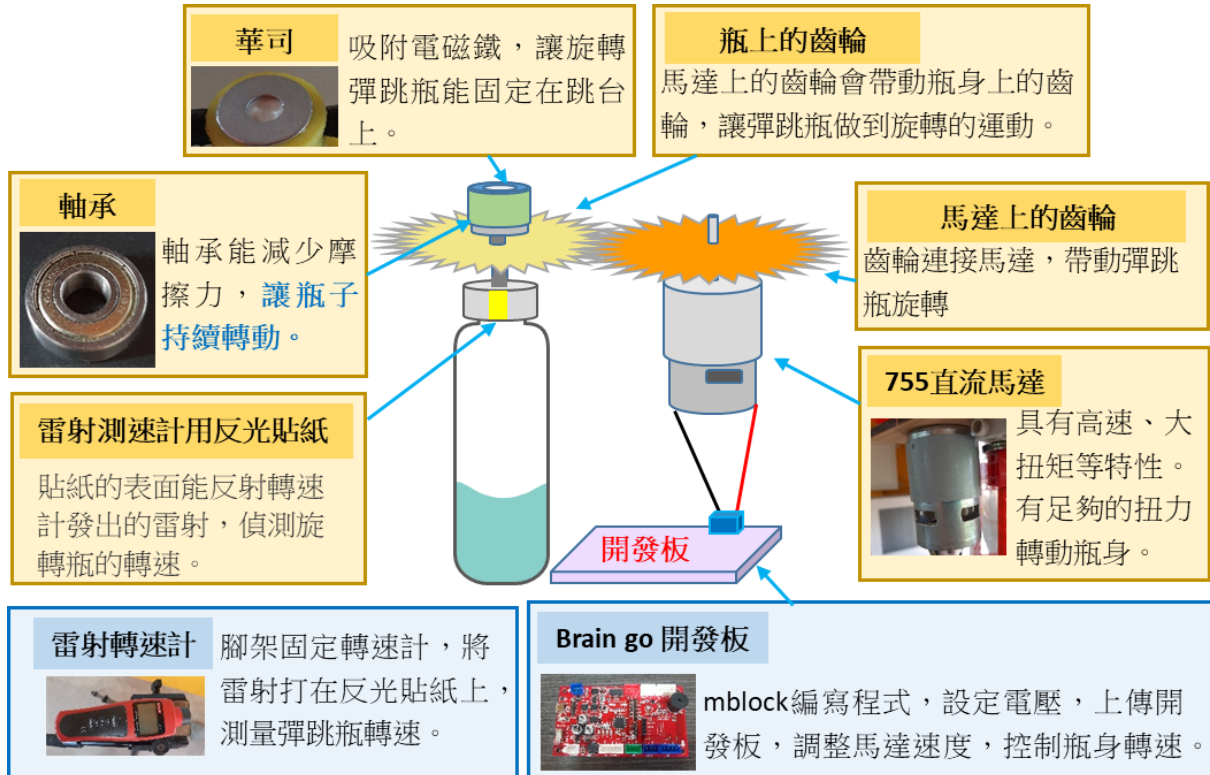


圖 4-4、自製調速器、二代旋轉彈跳瓶說明

(三) 自製質心量測儀(圖 4-5)

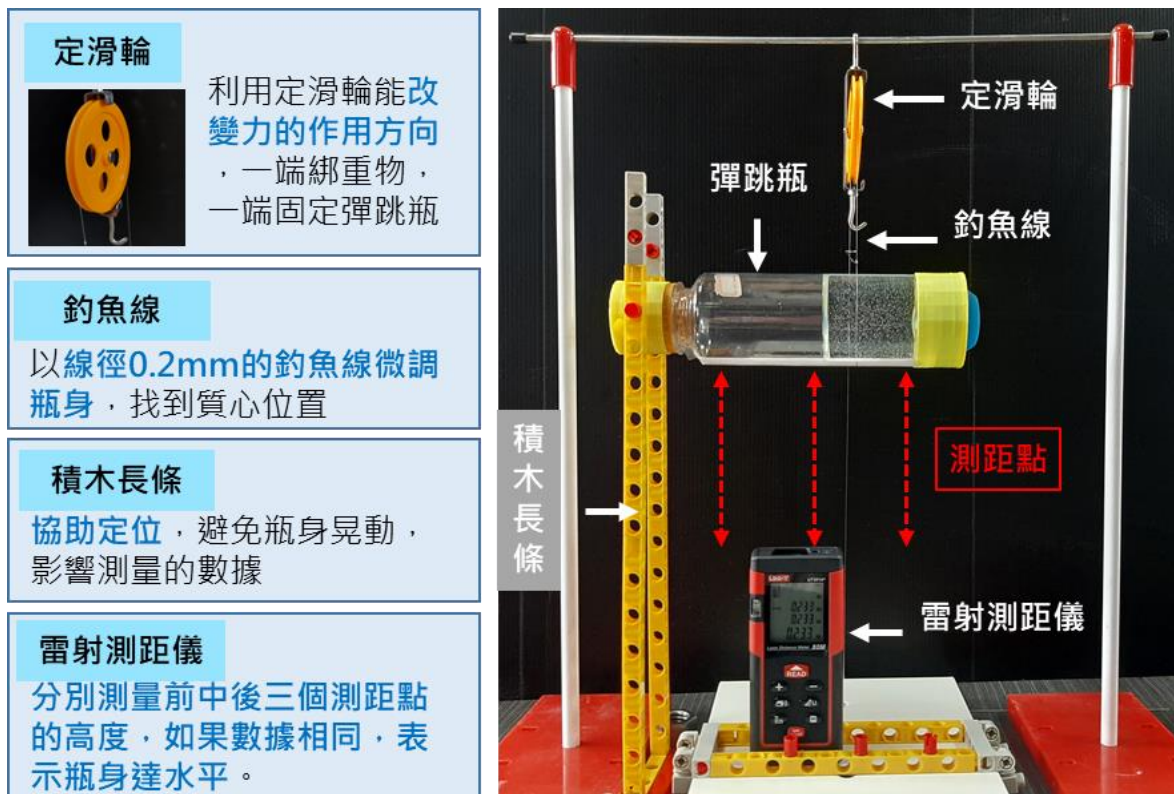


圖 4-5、自製質心量測儀裝置介紹

三、實驗過程

實驗一、填入固體對瓶子彈跳的影響

(一)實驗步驟

- 1.將環氧樹脂和硬化劑以 3 : 1 的比例調製($1.04\text{g}/\text{cm}^3$) (圖 4-6)，作為固體瓶的填充物質，每次增加空瓶質量的 0.5 倍(50g)，共 6 組變項(圖 4-7)。
- 2 將固體彈跳瓶放置在跳台上，使用電磁鐵讓彈跳瓶自由落下，同時用 phyphox APP 測量碰撞時間，並計算彈跳高度(圖 4-8)。
- 3.每組測量 15 次去除極端值後，將碰撞過程的平均時間和平均高度繪製成圖表分析。



圖 4-6、調製環氧樹脂



圖 4-7、以電子秤測量倒入瓶中環氧樹脂的重量

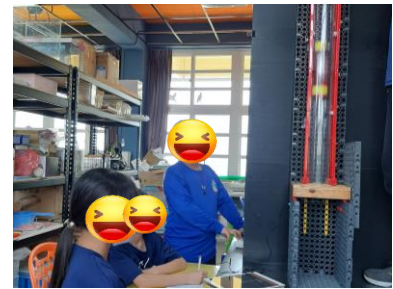


圖 4-8、測量彈跳瓶從跳台掉落的高度

實驗二 填入水對瓶子彈跳的影響

(一)實驗步驟

- 1.對照實驗一，使用密度相同的紅色素水作為流體瓶的填充物質(圖 4-9)，每次增加空瓶質量的 0.5 倍(50g)，共 6 組變項。
- 2.其餘實驗步驟同實驗一操作，以利後續數據比對和分析。
- 3.用手機超慢動作攝影分段拍攝瓶內狀況(圖 4-10)，做瓶內流體的動態觀察記錄(圖 4-11)。



圖 4-9、瓶中裝紅色素水，較易觀察水流的變化



圖 4-10、以手機超慢速攝影的功能拍攝流體運動



圖 4-11、瓶內流體碰撞後的動態影像

實驗三、探討改變水瓶轉速對瓶子彈跳的影響

(一)實驗步驟

1. 在二代旋轉瓶放入 100g 的紅色素水，使用自製調速器改變水瓶轉速(圖 4-12)。
2. 當轉速計顯示欲測量轉速時(圖 4-13)，讓彈跳瓶自由落下，同時用 phyphox APP 測量碰撞時間，並計算彈跳高度，每次增加 50rpm，從 100rpm 到 600rpm 共 11 個變項。
3. 將水瓶轉速和彈跳高度繪製成圖表分析，找出影響水瓶彈跳的轉速臨界值。
4. 用手機超慢動作攝影分段拍攝瓶內狀況(圖 4-14)，做瓶內流體的動態觀察記錄。



圖 4-12、以自製調速器改變水瓶的轉速



圖 4-13、以轉速計測量旋轉瓶的轉速



圖 4-14、以手機超慢動作攝影功能拍攝液體流動的情形

實驗四、探討水瓶質心改變與彈跳的關係

(一)質心高度

本實驗水瓶是直上直下運動，我們想知道質量不同時，質心高度的變化，便以相同質量相同密度的非流體，取代水填入水瓶，以此測量水在瓶內的質心位置。

(二)實驗步驟

1. 以質心量測儀測量不同質量固體瓶質心位置(圖 4-15)，標記在瓶身 (圖 4-16)。
2. 用電子游標尺量測各瓶質心與瓶底距離(圖 4-17)，再算出各瓶的相對質心高度。
3. 繪製質心高度長條圖，與水瓶第二次彈跳的恢復係數長條圖做分析比對。

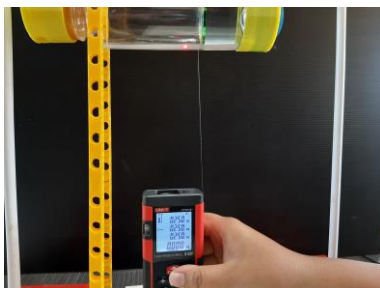


圖 4-15、以測距儀測量固體瓶不同位置的高度，判斷是否有找到質心位置

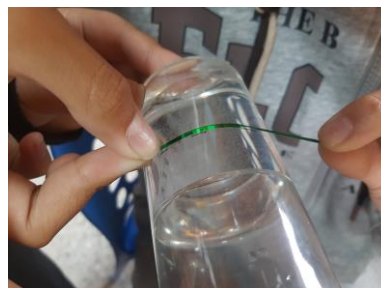


圖 4-16、在質心線的位置用膠帶標示



圖 4-17、以游標尺測量瓶底到質心線的距離

實驗五、探討液體黏度對瓶子彈跳的影響

(一) 實驗步驟

1. 將 100g 甘油放入裝有食鹽和冰塊的量杯調節溫度(圖 4-18)，製造不同黏度。
2. 把不同黏度的甘油放入彈跳瓶，進行彈跳實驗(圖 4-19、4-20)，作法同實驗一。從 0 度到 30 度，每次增加 5 度，共 7 個變項。
3. 將不同黏度甘油瓶的碰撞次數與彈跳高度繪製成圖表分析。



圖 4-18、以食鹽和冰塊降低甘油的溫度



圖 4-19、黏度高(10 度)甘油瓶的碰撞情形



圖 4-20、黏度低(30 度)甘油瓶的碰撞情形

伍、研究結果

一、填入固體是否會影響瓶子彈跳？

(一) 不同質量固體瓶在碰撞後彈跳次數相同，均為四次。

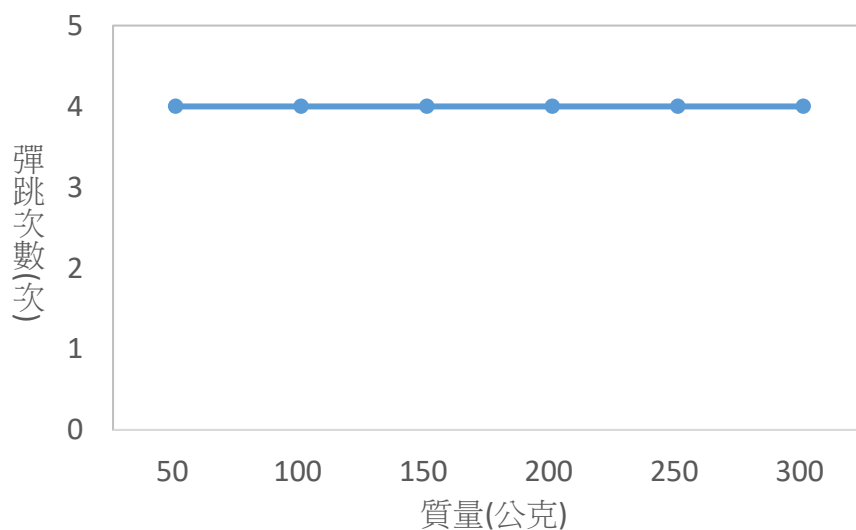


圖 5-1、不同質量固體瓶掉落後的彈跳次數

(二)不同質量固體瓶在碰撞後反彈高度不同，質量越大彈跳越高。

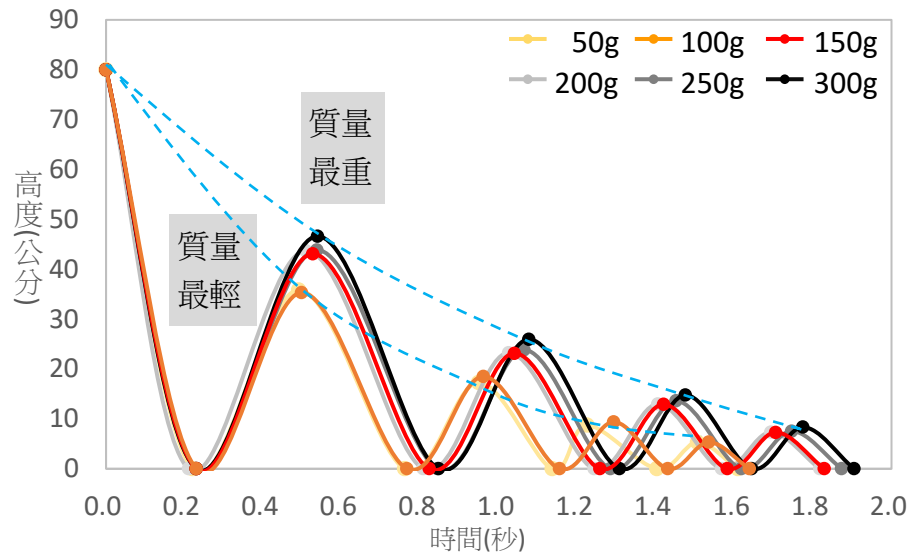


圖 5-2、不同質量固體瓶的彈跳高度變化圖

(三)質量不同的固體瓶，在經過四次碰撞後恢復係數沒有明顯下降，顯示填入固體並沒有影響彈跳。

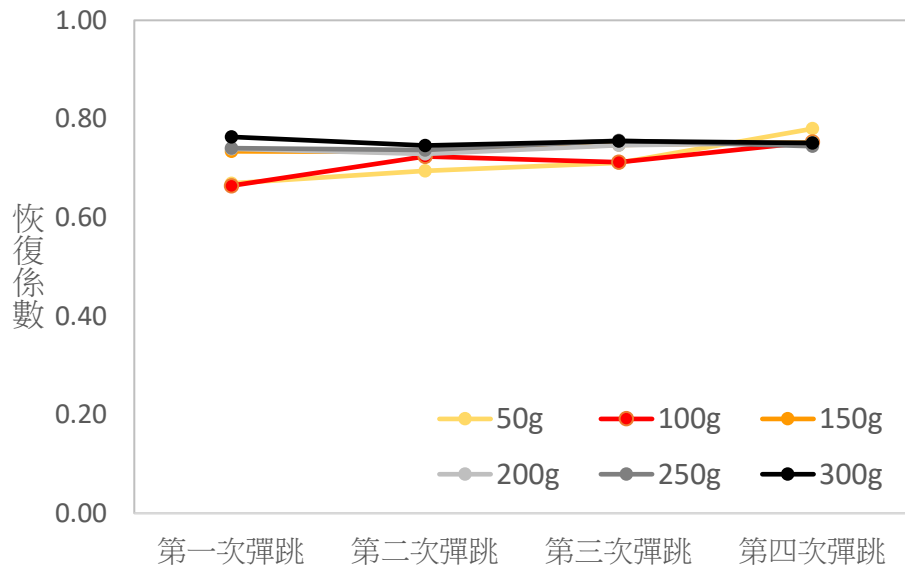


圖 5-3、不同質量固體瓶每次彈跳的恢復係數變

二、填入水是否會影響瓶子彈跳？

(一)不同質量水瓶在碰撞後彈跳次數由四次減少為三次，只有 300g 水瓶維持不變。

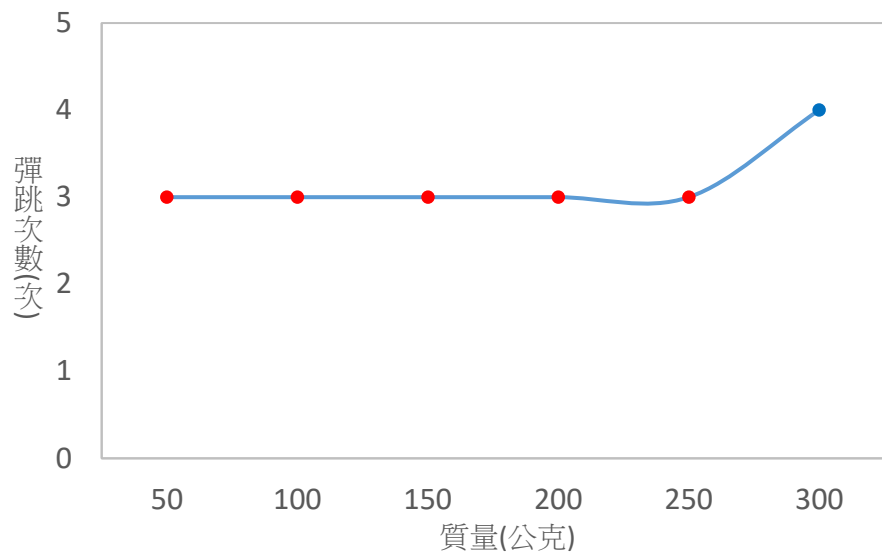


圖 5-4、不同質量水瓶掉落後的彈跳次數

(二)不同質量水瓶在第二次碰撞後反彈狀況呈現差異，50g、100g、150g 的水瓶幾乎彈不起來，200g、250g、300g 的水瓶隨著質量增加，反彈高度變高。

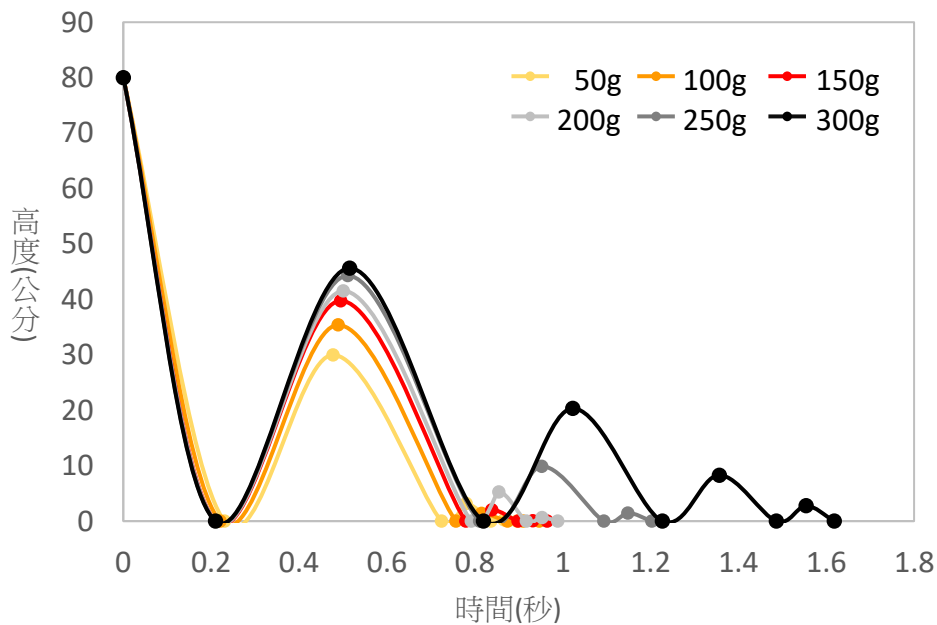


圖 5-5、不同質量水瓶的彈跳高度變化圖

(三)質量不同的水瓶，在**第二次碰撞時恢復係數皆有明顯下降**，其中以**質量 100g 的水瓶下降最多**，結果顯示**填入流體會影響彈跳**。

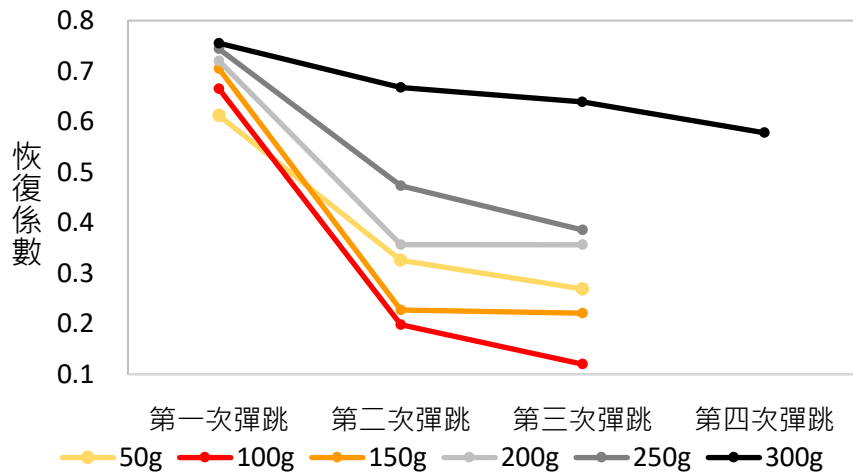


圖 5-6、不同質量水瓶每次彈跳的恢復係數變化

(四)我們將影響彈跳最大的 **100g 水瓶**，在進行**三次碰撞後**，裡面水的狀態和瓶子的運動過程，分為**整體期、分離期、轉換期、恢復期**共四個時期，分段說明如下：

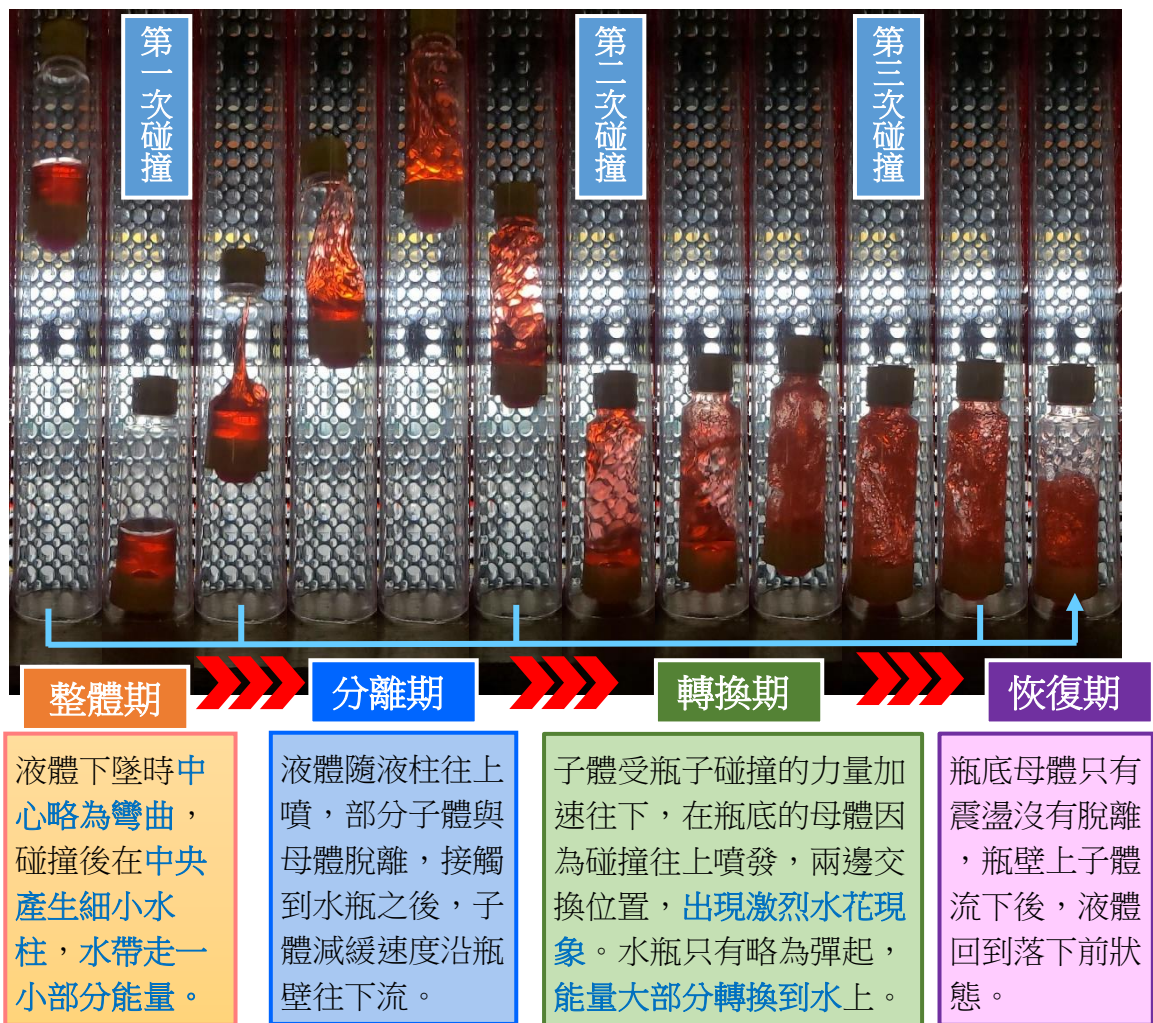


圖 5-7、水瓶落下過程，瓶子和液體運動的四個時期

三、水瓶旋轉後落下是否影響瓶子彈跳？

(一)旋轉後落下的水瓶，影響彈跳更明顯，彈跳次數最多二次，最少一次。

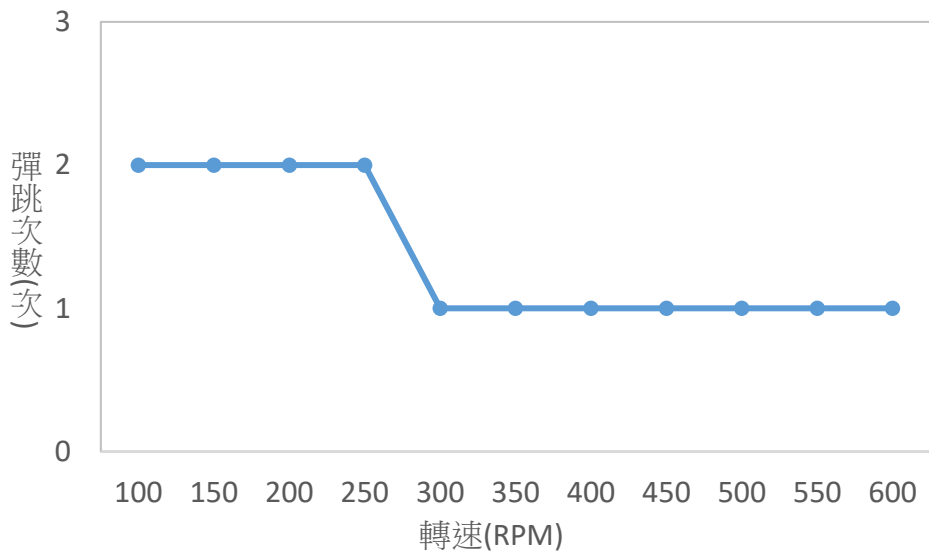


圖 5-8、不同轉速水瓶掉落後的彈跳次數

(二)水瓶轉速大於臨界值 300RPM 時，一次碰撞就彈不起來，接近完全非彈性碰撞。

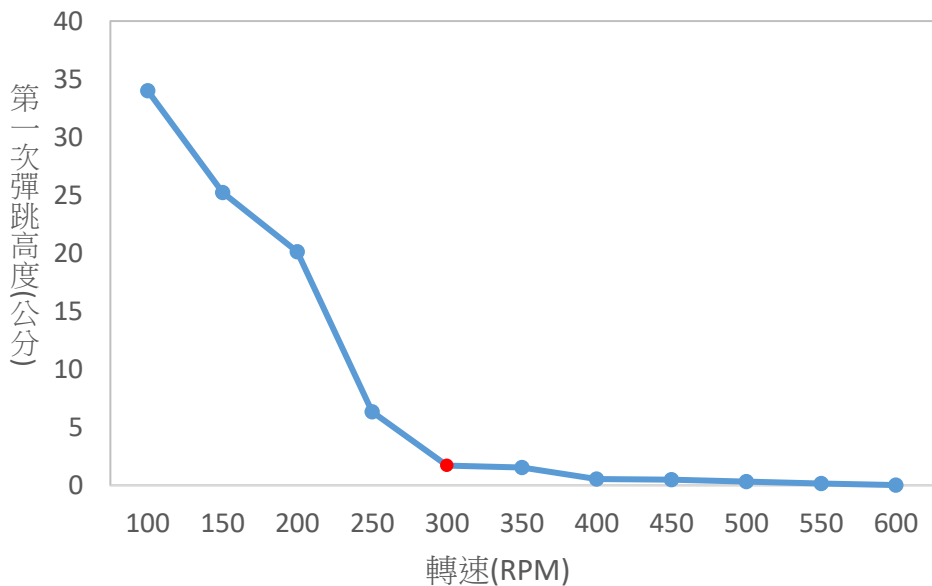


圖 5-9、不同轉速水瓶第一次彈跳的高度

(三)讓水瓶旋轉後會改變水面曲度，轉速越快曲度越大。

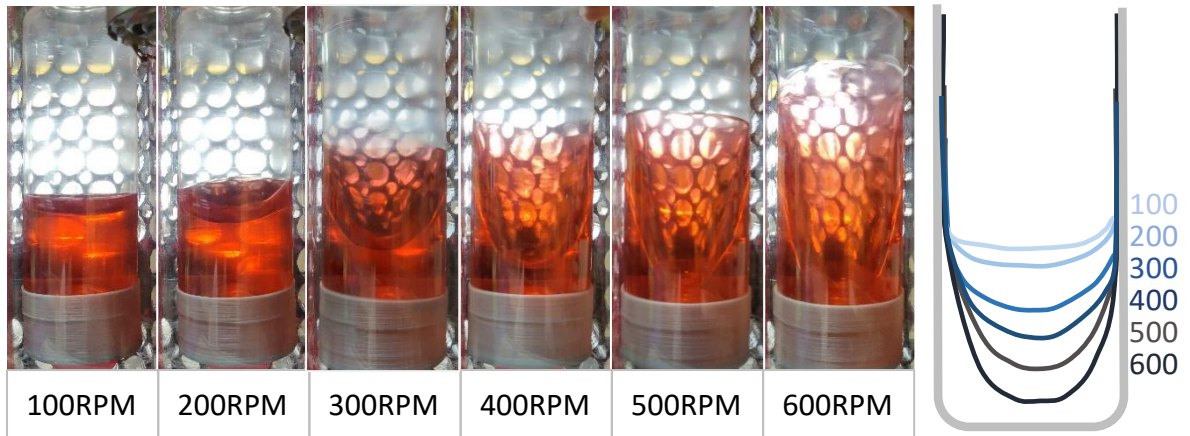


圖 5-10、不同轉速水瓶的液面曲度示意圖

(四)水瓶旋轉後落下，水的狀態和瓶子的運動過程由四個時期縮短為三個時期，為**整體期**、**分離轉換期**、**恢復期**共三個時期，分段說明如下

開始落下至第一次碰撞	第一次碰撞後到第二次碰撞	第二次碰撞後
整體期	分離轉換期	恢復期
<p>旋轉的水先達到轉動平衡，開始落下後因為失去支撐力量，水受旋轉的離心力往瓶壁附著，瓶底的水逐漸佈滿瓶壁，液面呈現U字型。</p>	<p>瓶子落地後，佈滿瓶壁的水往下跑，同時在瓶底中央產生強烈的衝擊水柱，所有的水瞬間離開瓶子，水帶走接近全部的能量，同時瓶子靜止不再往上彈。</p>	<p>回流至瓶底的水開始震盪，在中心產生渦流，再慢慢恢復平靜。</p>

圖 5-11、旋轉水瓶落下過程，瓶子和液體運動的三個時期

四、水瓶質心高度與彈跳有何關係？

(一)隨水的質量增加，質心高度先下降再上升，一倍瓶重時位置最低，三倍時最高。

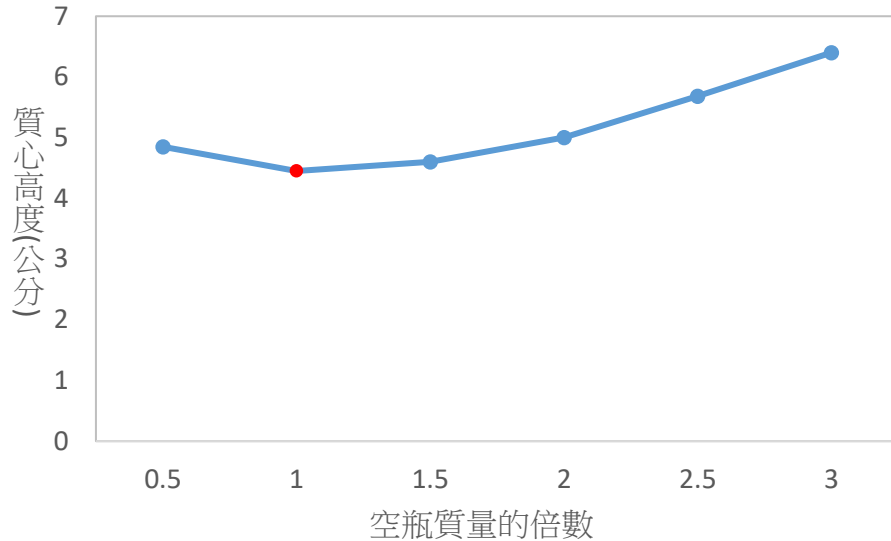


圖 5-12、不同質量水瓶的質心高度變化

(二)隨水的質量增加，水瓶第二次彈跳的恢復係數(C_R)先下降再上升，一倍瓶重時

$C_R=0.20$ 最低，三倍時 $C_R=0.67$ 最高。加入和空瓶等重的水時，質心高度最低，影響彈跳效果越明顯。

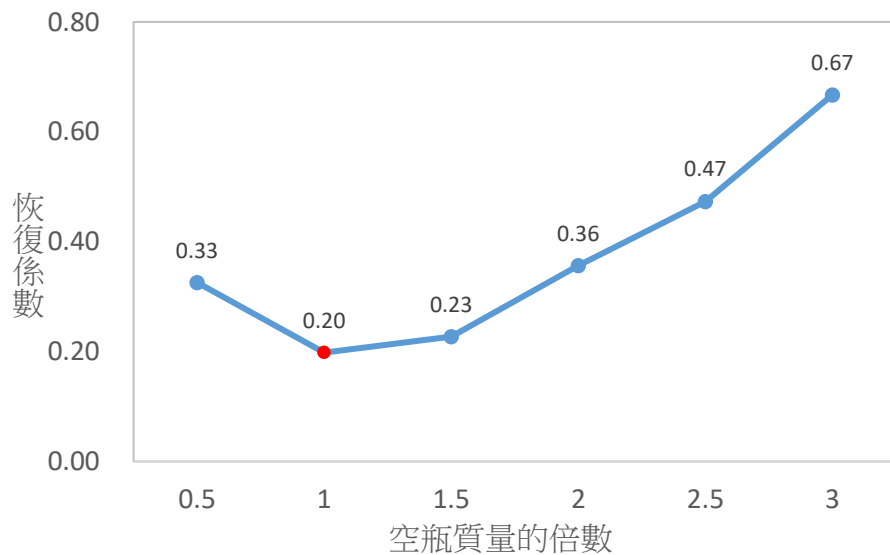


圖 5-13、不同質量水瓶第二次彈跳的恢復係數

五、液體黏度對瓶子彈跳有何影響？

(一)不同黏度的甘油，瓶子彈跳次數有明顯差異，黏度較高的甘油瓶(0 度、5 度、10 度)，彈跳次數可達到 5 次，黏度較低的甘油瓶(30 度、25 度)，彈跳次數只有 2 次。顯示填入液體黏度會影響瓶子彈跳。

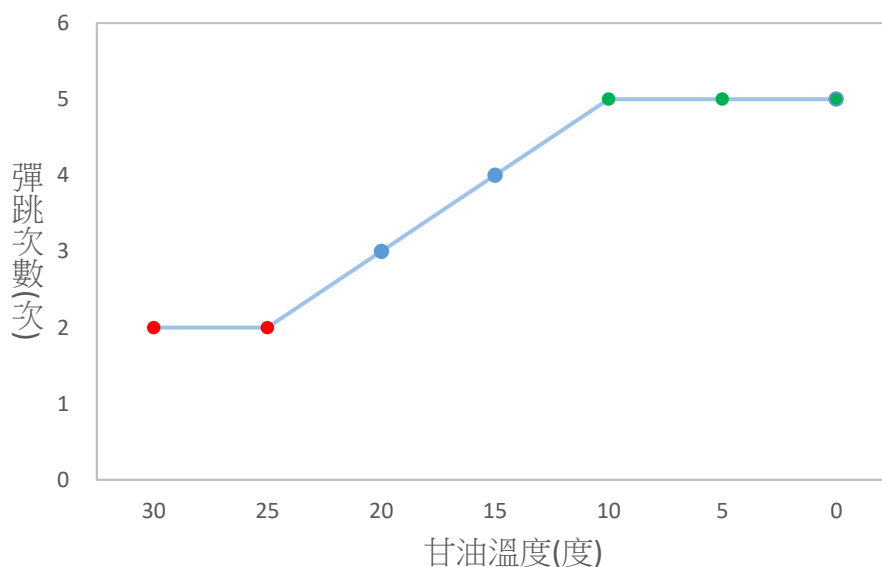


圖 5-14、不同溫度(黏度)甘油的彈跳次數

(二)黏度高的甘油瓶彈跳高度低，但整體彈跳時間長，而黏度低的甘油瓶，彈跳高度高，但整體彈跳時間卻短。

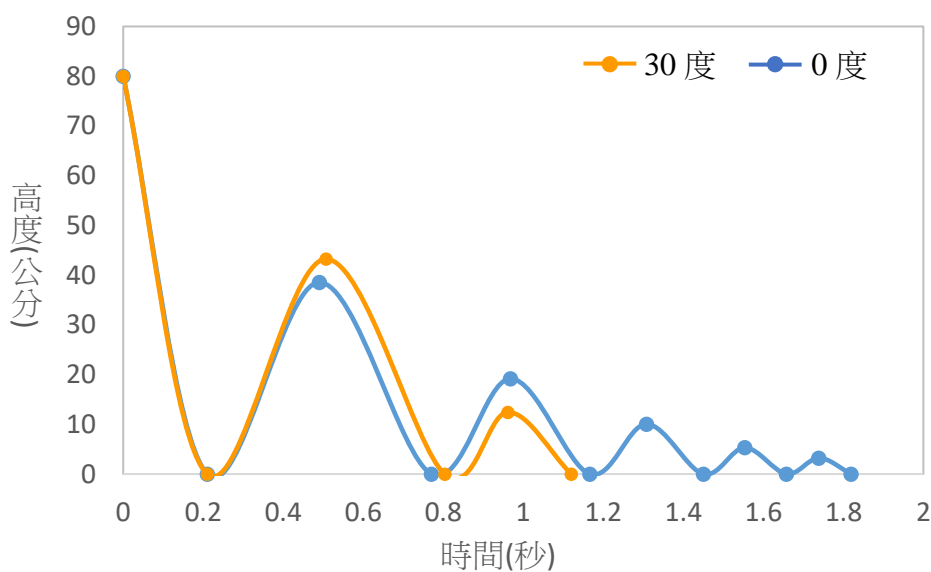


圖 5-15、比較黏度高(0 度)與黏度低(30 度)甘油瓶彈跳高度的變化

陸、討論

一、水瓶彈跳與能量轉換

由實驗一和實驗二的數據可知，流體在瓶子內的流動，會影響彈跳次數與彈跳高度，我們嘗試用**位能與動能的轉換**(圖 6-1)來解釋這個實驗結果：

水瓶落下產生的位能，扣掉碰撞耗損的能量後，會轉換為讓水瓶往上彈起的動能，所以瓶內水產生的動能，會決定瓶子可以彈多高，**水獲得動能越多，瓶子就彈的越低**。

水產生的動能與水的質量和初速度有關，**找到適合的水量，和讓水在撞擊時產生很大的初速度**，就會是**左右瓶子彈跳的關鍵因子**。

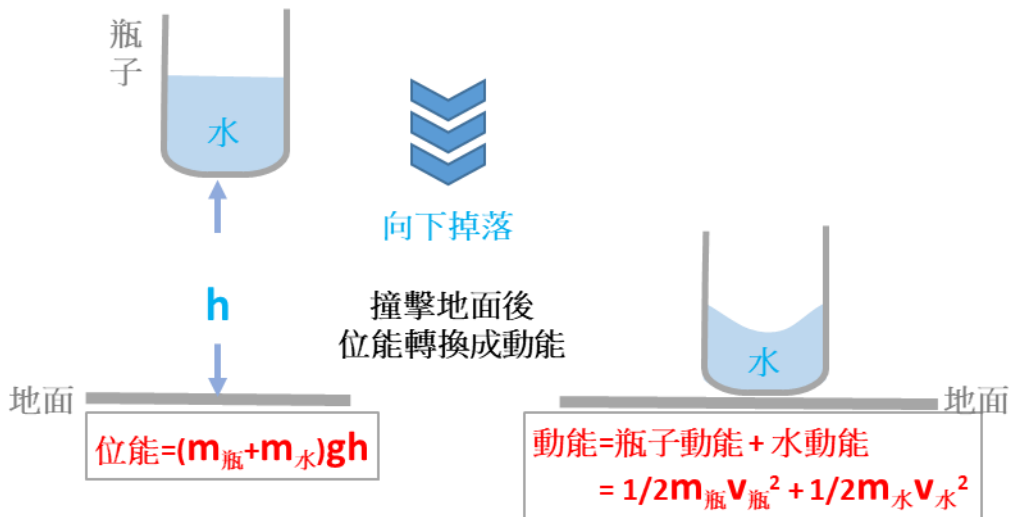


圖 6-1、能量轉換：水瓶掉落過程中能量由位能轉換成動能

二、影響彈跳的變因討論

本研究共有三個重要變因，在此分別就實驗結果做詳細的討論：

(一)碰撞時的液面曲度

由實驗一、二結果得知，在碰撞時液體如果不旋轉，瓶子彈起的高度是和固體瓶差不多的，**自由下落的水瓶碰撞後**，雖然有液柱往上噴發，但**大部分的動能還是在瓶子上面**，水只帶走一小部分。但實驗三結果顯示，如果讓**液體旋轉**，改變液面曲度，**碰撞後水卻會帶走絕大部分動能**，瓶子只能微微彈起，這是**因為液面曲度越大，在碰撞時反彈的作用力可以在瓶底中央讓水產生更大的初速度**(圖 6-2)，只要能提供足夠的初

速度，原本繞瓶壁旋轉的水，在撞擊後改變方向往上運動，就會承接了大部分由位能轉換的動能，所以就造成**水彈起、瓶子靜止**的有趣現象。

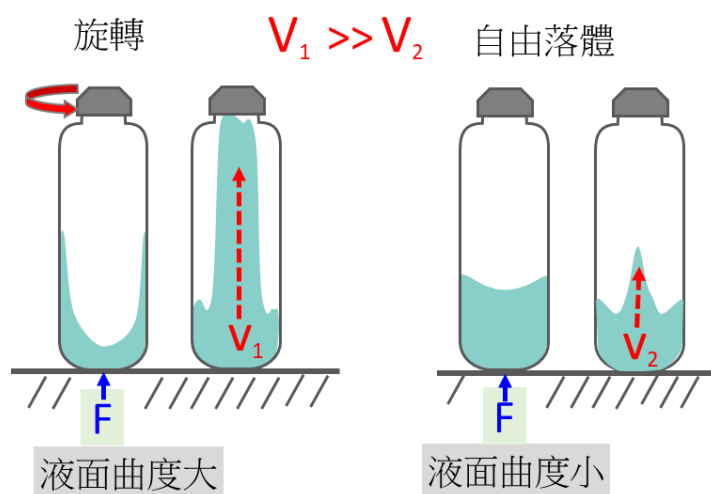


圖 6-2、旋轉與自由落體水瓶碰撞產生之初速度對照圖

(二)水量

水瓶經由碰撞彈跳進行能量轉換時，質量也是一個很重要的變因，**瓶重和水重需多少才最適當**？我們從兩個角度來思考：

1.質心高度

由實驗四結果可知，質心高度的變化並不是質量越大就越高，而是在**液體和瓶子等重時**最低(圖 6-3)，那為何質心高度越低，對彈跳影響就越大呢？我們推測是**距離**的因素，**當質心越低，會越靠近撞擊點**，受力與運動的影響就越大。

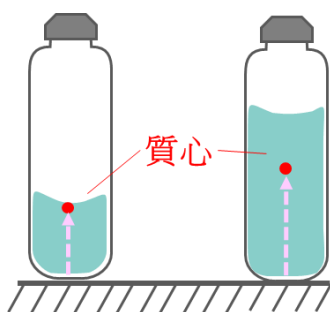


圖 6-3、水瓶質心的高度影響液體受力的位置

2.最大功率傳輸定理

力學和電學雖然是不同的系統，但有些同類的數學公式，往往可以做為類比，其中在基礎電路學中的**最大功率傳輸定理**，主要是說明當**負載電阻等於電源網絡的輸出等效電阻**時，可以從有限的內阻電源**獲得最大的外部功率**，此定理的數學原理，是否可以適用本研究中，**當瓶子重量等於液體重量時**，碰撞後液體可以藉由瓶子傳遞**獲得最大的動能**，這是一個有趣的猜想，可以後續再做研究驗證。

(三)液體黏度

液體的黏度相當於液體內部的摩擦力，會**決定液體碰撞受力後的流動速度**，進而影響瓶子彈跳。由實驗五結果可知，黏度越高，越不會流動的甘油瓶，可彈**5次**，時間也比較長，黏度越低，越會流動的甘油瓶，彈**2次**就結束了，此結果可以合理解釋實驗一、二固體瓶和液體瓶在彈跳次數上的差異。另外在同樣條件下，但**為何黏度高的甘油瓶彈跳次數比固體瓶還多**(圖 6-4)，**黏度低的甘油瓶彈跳次數比水瓶還少**(圖 6-5)，**是否在受力過程中除了黏性也同時表現出彈性**？很值得再做後續的探討。

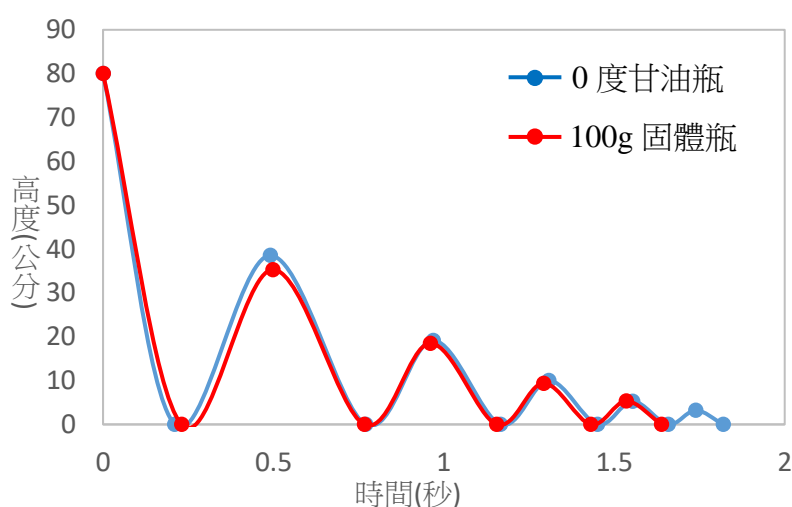


圖 6-4、黏度高的甘油瓶和固體瓶彈跳高度與次數的差異

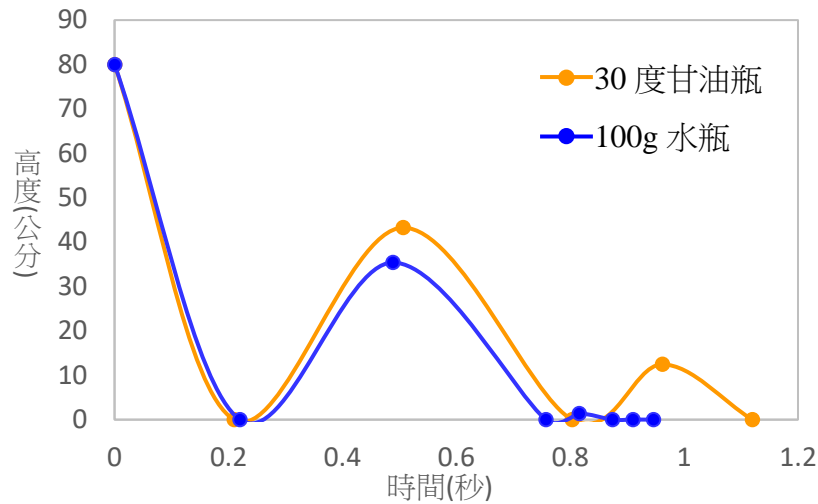


圖 6-5、黏度低的甘油瓶和水瓶彈跳高度與次數的差異

三、實驗和裝置的誤差討論

(一)彈跳高度測量誤差討論

彈跳高度是本研究中最為重要的應變變因，為驗證 phyphox APP 是否精準，我們設計簡單的跳台(圖 6-6)，讓彈力球分別從三個高度自由落下，每個高度測量 15 次，去除極端值後，算出最初高度(h_0)的平均值及誤差值，發現誤差值皆遠小於 3%(表 6-1)，表示 phyphox APP 測出的數值是有信度的。

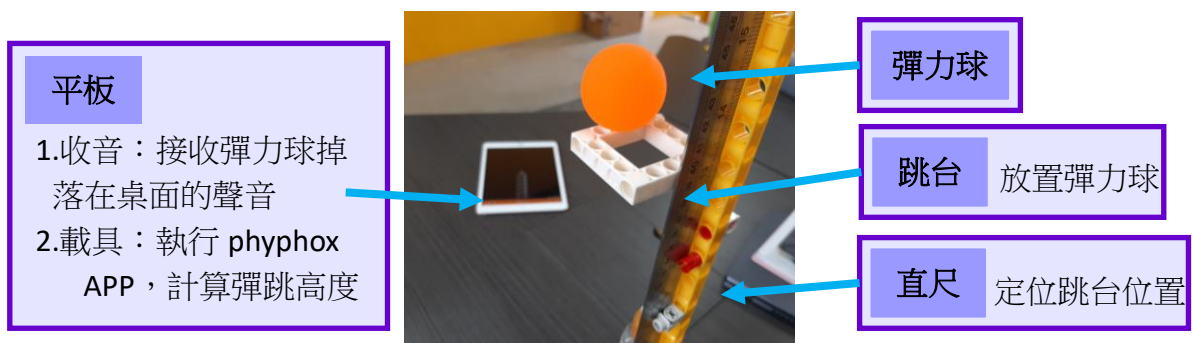


圖 6-6、彈跳高度測量平台

表 6-1：phyphox APP 誤差檢測記錄表

跳台最初高度(h_0)	60cm	40 cm	20 cm
App 測出平均最初高度(cm)	59.41	39.989	19.97
誤差值(%)	0.98	0.0275	0.15

(二)圓梯式跳台裝置誤差討論

本次跳台裝置的設計，因為希望彈跳瓶可以直上直下的彈跳，所以我們將壓克力管緊貼木箱，但是也因此讓管子末端產生相對封閉的情形，我們想知道管子內的空氣阻力是否會對實驗數據造成影響，使用不同質量的固體瓶做誤差測量(表 6-2)，尾端開口和密閉的反應時間只差 0.005 秒，換算成高度後誤差仍然遠小於 3%，**可以忽略空氣阻力在本實驗中造成的影響。**

表 6-2：第一次彈跳高度誤差檢測記錄表

固體瓶質量(g)	50	100	150	200	250	300
管末密閉彈跳高度(cm)	35.84	35.31	43.09	43.76	43.88	46.63
管末開口彈跳高度(cm)	36.12	34.88	42.65	43.52	44.56	45.42
誤差值(%)	0.78	1.21	1.02	1.28	1.55	2.59

四、未來展望

這次的研究，我們找到如何讓**水彈起、瓶靜止**的變因條件，也能夠運用已知的物理知識來解釋這個現象，後續可以試著研究，**如何利用液體來減緩物體高速撞擊時的作用力**。更興奮的是，**我們成功讓流體瓶落下產生的位能，大多數集中在水瓶裡造成激烈的能量釋放**，之後可以進一步探討衝擊波的能量效益，**或許是一個透過流體轉換能量，來產生動力的新方向！**

柒、結論

- 一、水瓶自高處落下彈跳時，**瓶內液體的流動會影響其彈跳高度和彈跳次數**，依過程共分為**整體期、分離期、轉換期、恢復期**等四個時期。
- 二、流體進入**轉換期**時，會產生劇烈的波動，**瓶子彈跳高度也會明顯變低**，這個將**水瓶位能轉換成流體動能**的現象，主要跟**碰撞時的液面曲度、水量、和液體黏度有關**。
- 三、**旋轉水瓶會改變水面曲度**，讓水在碰撞時**產生更快的水柱**，**降低瓶子彈跳高度和次數**。
- 四、100g 水瓶**轉速大於臨界值 300RPM** 時，**彈跳次數只剩一次**，水會在瓶內產生強烈的**衝擊水柱**，讓**瓶子彈不起來**，接近完全非彈性碰撞。
- 五、加入**和空瓶等重的水**時，**質心高度最低**，**影響彈跳效果越明顯**。
- 六、**液體黏度會影響瓶子彈跳**，**黏度較高甘油瓶彈跳次數可達到 5 次**，**黏度較低只有 2 次**。

捌、參考資料及其他

一、碰撞(維基百科)。 <https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%A2%B0%E6%92%9E>

二、恢復係數(維基百科)。

<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E6%81%A2%E5%A4%8D%E7%B3%BB%E6%95%B0>

玖、附錄

一、固體瓶的彈跳平均高度與時間

質量	第一次彈跳		第二次彈跳		第三次彈跳		第四次彈跳	
	高度(cm)	時間(s)	高度(cm)	時間(s)	高度(cm)	時間(s)	高度(cm)	時間(s)
50g	35.84	0.541	17.30	0.376	8.74	0.267	5.315	0.206
100g	35.31	0.537	18.52	0.388	9.40	0.276	5.33	0.208
150g	43.09	0.593	23.16	0.435	12.92	0.324	7.32	0.247
200g	43.76	0.598	23.25	0.435	12.97	0.325	7.32	0.250
250g	43.88	0.614	23.83	0.441	13.62	0.333	8.05	0.256
300g	46.63	0.617	25.95	0.461	14.78	0.337	8.35	0.261

二、水瓶的彈跳平均高度與時間

質量	第一次彈跳		第二次彈跳		第三次彈跳		第四次彈跳	
	高度(cm)	時間(s)	高度(cm)	時間(s)	高度(cm)	時間(s)	高度(cm)	時間(s)
50g	29.99	0.494	3.18	0.112	0.23	0.06		
100g	35.39	0.537	1.39	0.117	0.02	0.07		
150g	39.76	0.570	2.05	0.119	0.10	0.07		
200g	41.53	0.582	5.28	0.125	0.67	0.07		
250g	44.29	0.601	9.92	0.283	1.48	0.11		
300g	45.64	0.610	20.32	0.407	8.30	0.26	2.77	0.128

三、旋轉水瓶的彈跳平均高度(cm)

RPM	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
第一次	33.99	25.23	20.12	6.32	1.71	1.52	0.55	0.49	0.32	0.16	0.02
第二次	3.82	0.91	0.72	0.55							

四、不同質量瓶子的質心高度

水量(g)	50	100	150	200	250	300
空瓶質量(g)	100	100	100	100	100	100
水量/空瓶質量	0.5	1	1.5	2	2.5	3
質心高度(cm)	4.850	4.450	4.60	5.000	5.685	6.400

五、甘油瓶的彈跳平均高度與時間

質量	第一次彈跳		第二次彈跳		第三次彈跳		第四次彈跳		第五次彈跳	
	高度(cm)	時間(s)	高度(cm)	時間(s)	高度(cm)	時間(s)	高度(cm)	時間(s)	高度(cm)	時間(s)
30度	43.24	0.59	12.44	0.32						
25度	43.59	0.60	14.49	0.34						
20度	43.34	0.59	21.51	0.42	8.05	0.25				
15度	41.78	0.58	20.53	0.41	7.90	0.25	4.11	0.18		
10度	39.83	0.57	21.14	0.41	10.07	0.29	4.74	0.20	2.59	0.15
5度	38.20	0.56	19.32	0.40	9.81	0.28	5.43	0.21	3.30	0.17
0度	38.54	0.56	19.17	0.40	10.04	0.28	5.29	0.21	3.22	0.16

四、照片、圖片出處：

(一)照片攝影索引

第一指導教師：圖 4-8、圖 4-10、圖 4-13、圖 5-7、圖 5-11

第一作者：圖 1-1、圖 1-2、圖 4-1、圖 4-3、圖 4-4、圖 4-5、圖 4-6、

圖 4-9、圖 4-12、圖 4-18、圖 5-10、圖 6-6

第二作者：圖 4-6、圖 4-7、圖 3-10、圖 3-12、圖 4-11、圖 4-14、

圖 4-15、圖 4-16、圖 4-17、圖 4-19、圖 4-20、

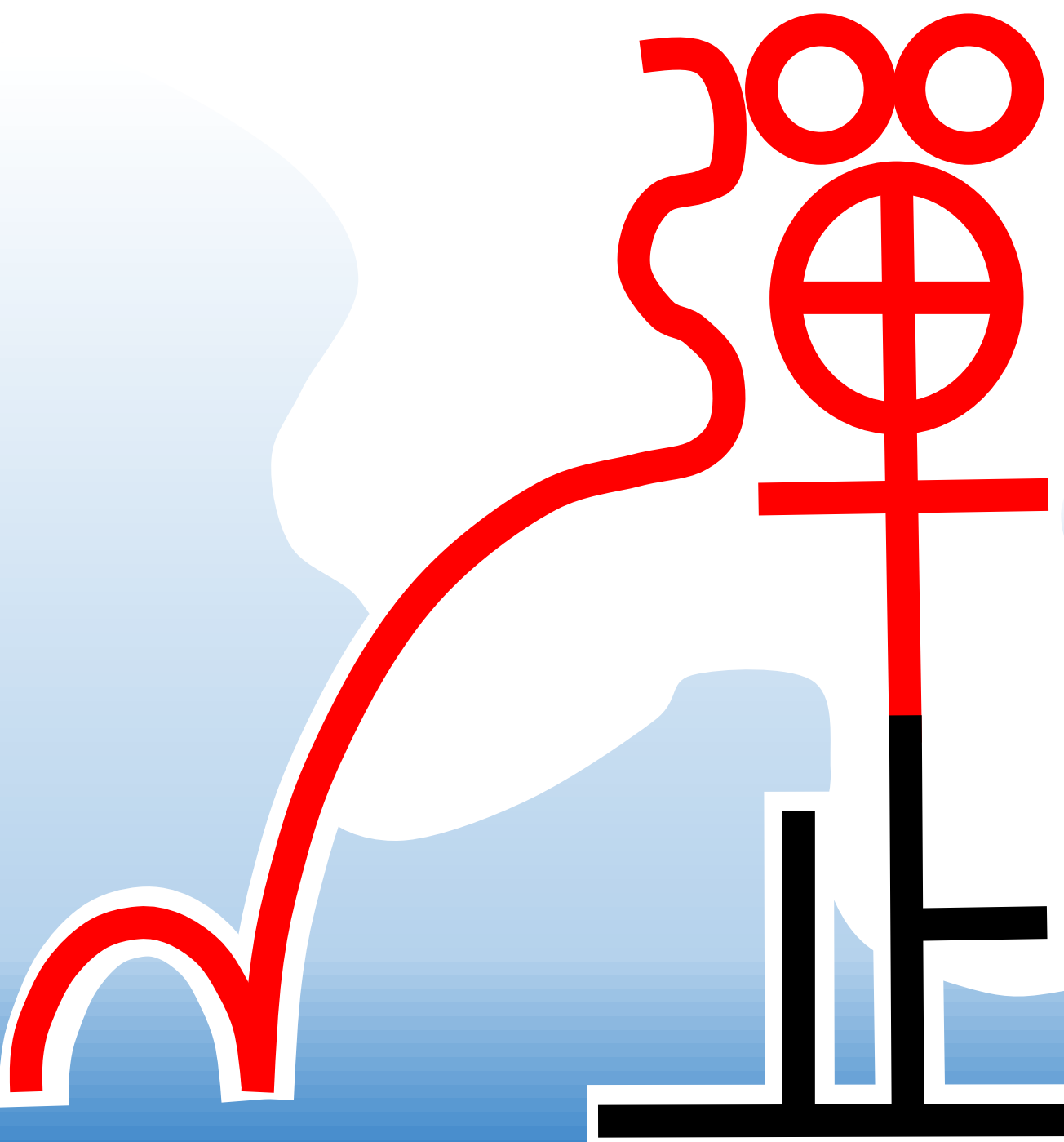
(二)圖片繪製索引

第二指導教師：圖 1-3、圖 1-4、圖 1-5、圖 4-2、圖 6-1、圖 6-2、圖 6-3

【評語】 080106

水瓶彈跳是一個相當有趣的實驗，結合了流體力學、能量守恆、以及碰撞的基本物理概念。該組成員建立了完整的實驗裝置，數據分析也相當的完整，而且具有各種面向。同時也掌握到了在彈跳過程中最重要的變數：也就是能量的轉移，從外部的動能如何轉換成內部的液體能量，成為決定彈跳高度的一個最重要因素。特別令人驚艷的是，他們發現了利用旋轉可以強化能量轉移的效率，由於旋轉所造成的液體分布有效地增加了外部能量轉換成液體內能的效率，進而了解彈跳過程。這是一個很聰明的想法，同時也經過了實驗的驗證。包括加入高明志細述的液體來抑制內能的轉換，也是進一步驗證了這個想法。整體來說在實驗的設計上是有一個明確的主軸與物理的概念在背後支撐是一個相當不錯的科展作品。

作品簡報



上之間～流體對水瓶彈跳高度的影響

摘要

本研究主要探討水瓶自高處落下時，瓶內流體如何影響水瓶彈跳，我們自製跳台和彈跳瓶進行實驗，並改進測量精度，找到水瓶落地造成水彈起、瓶靜止的變因條件。研究結果如下：一、瓶內流體的流動，依過程共分為**整體、分離、轉換、恢復**等四個時期。二、流體進入轉換期，會將水瓶位能轉換成流體動能，主要跟碰撞時的液面曲度、水量、和液體黏度有關。三、**旋轉水瓶會改變水面曲度**，讓水在碰撞時產生更強的水柱。四、100g水瓶轉速大於臨界值**300RPM**時，彈跳次數只剩**1次**，水瓶落地接近完全非彈性碰撞。五、加入和空瓶等重的水時，質心高度最低，影響彈跳效果越明顯。六、液體黏度會影響瓶子彈跳，黏度較高甘油瓶彈跳次數可達到**5次**，黏度較低只有**2次**。

壹、研究動機

我們最近瘋狂的愛上丟水瓶遊戲(圖1-1)

挑戰成功的條件是：必須讓水瓶經由空中翻轉，到最後能夠站立。在這當中我們發現了一些有趣的現象：1.瓶內水量的多少，似乎會影響成功機率。2.水瓶在空中轉體往下墜之後，在落地碰撞瞬間，瓶內的水會激烈彈起，瓶子反而會靜止立在地面。讓我們感到很好奇，於是開始思考：瓶內的水是如何讓瓶子不彈跳呢？瓶子旋轉與彈跳有何關係？放多少水會對彈跳造成最大的影響，這是否與質心改變有關？一定要加水嗎，不同黏度的液體是否也做得到？為了解開水瓶在彈止之間的秘密，我們開始了一連串的研究。



圖1-1挑戰丟水瓶

貳、文獻探討

一、水瓶與地面的碰撞

恢復係數關係式

$$C_R = \sqrt{\frac{h}{H}}$$

思考：恢復係數越低，能量耗損越大，可以用恢復係數來代表能量轉換的狀況，如何精準測量水瓶的彈跳高度？

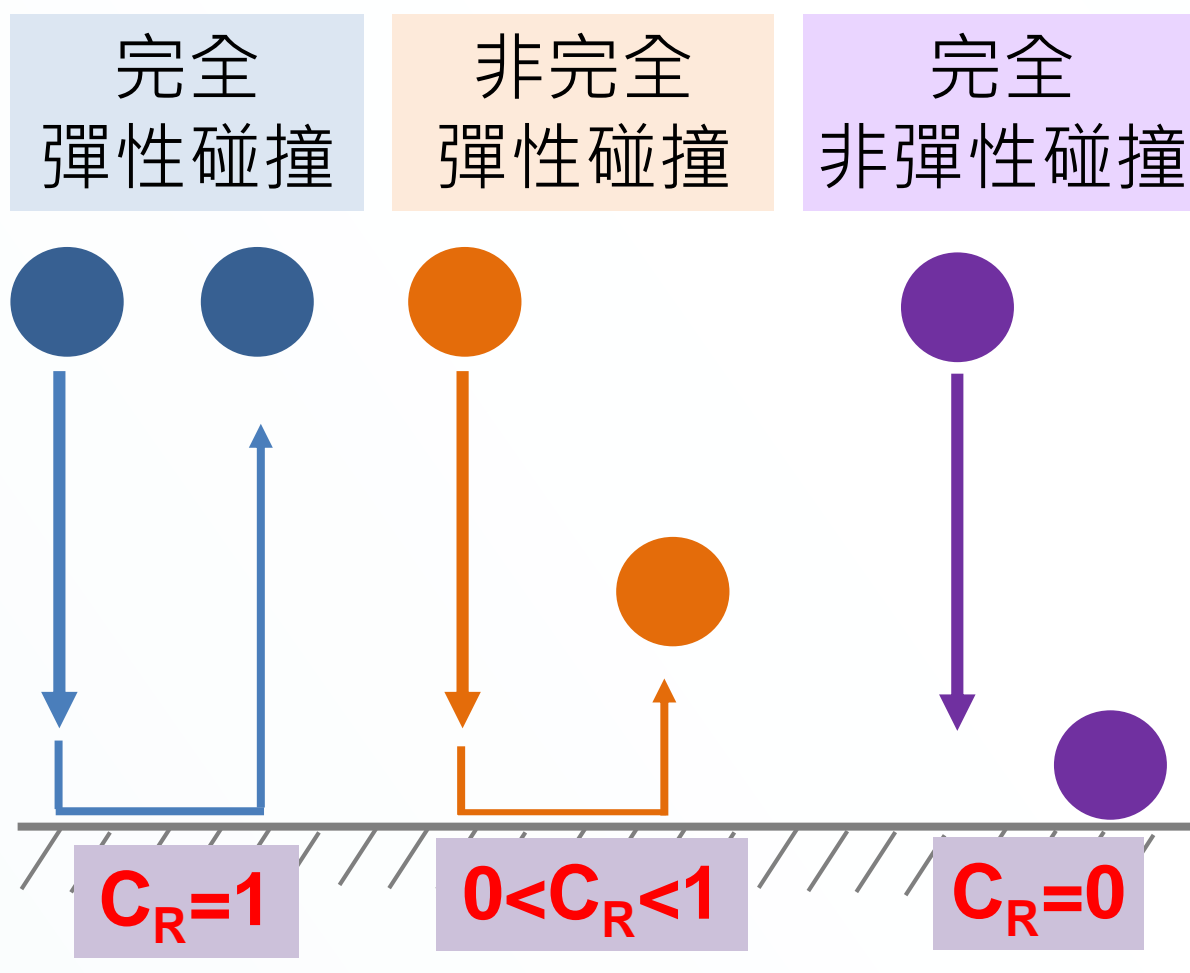


圖2-1三種彈性碰撞的方式

二、需要解決的問題

1.簡化水瓶運動方式：

改為只有往上和往下一維碰撞。

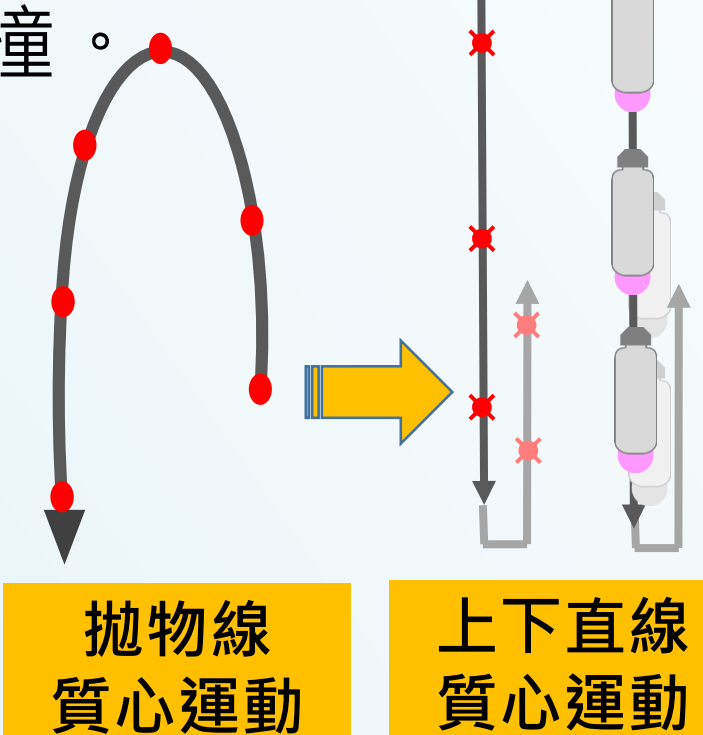


圖2-2水瓶運動路線的比較

2.找出水瓶運動時質心的位置：使用同質量固體來當對照組。

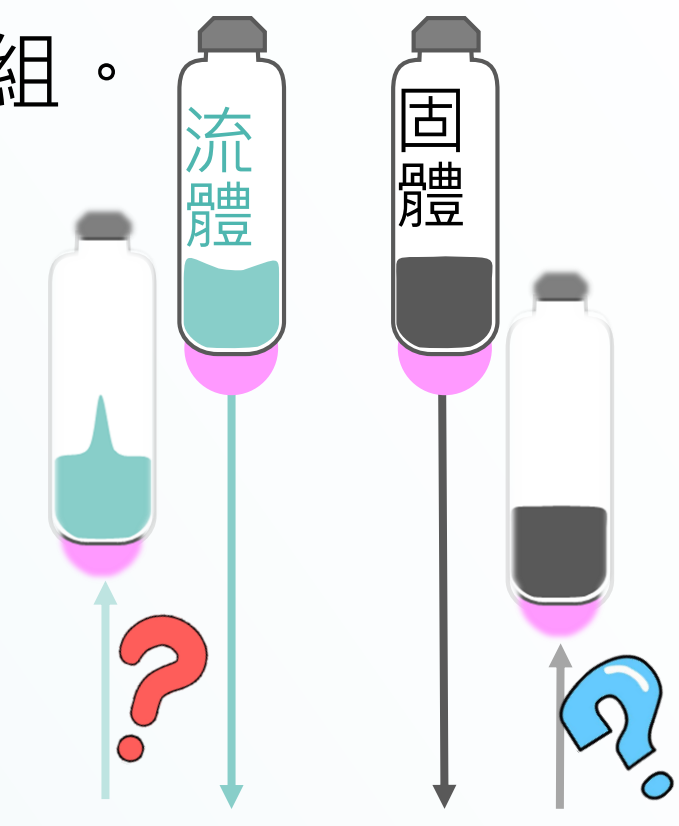
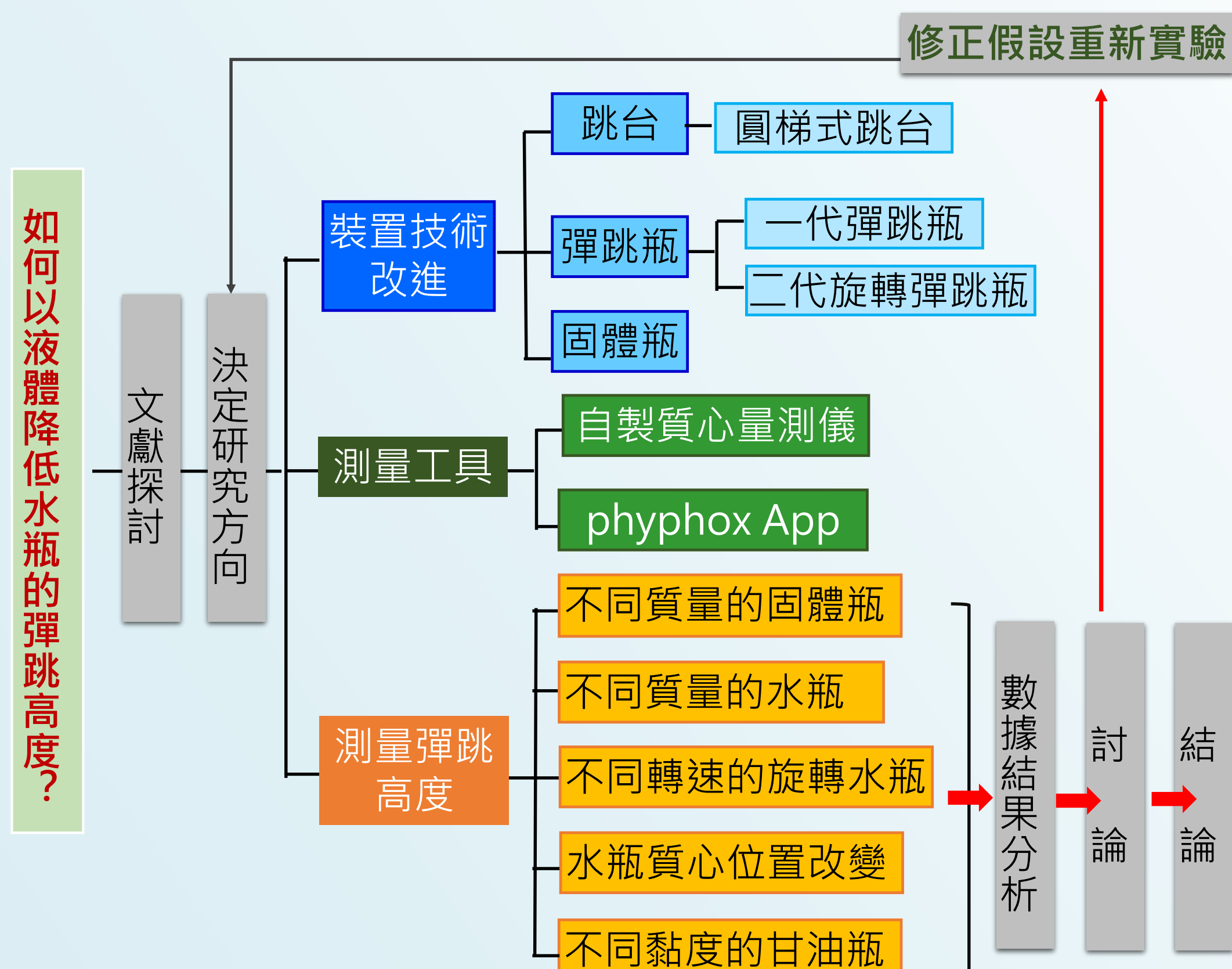


圖2-3同質量水瓶和固體瓶彈跳的差異

參、研究目的與架構

- 一、填入固體對瓶子彈跳的影響
- 二、填入水對瓶子彈跳的影響
- 三、探討改變水瓶轉速對瓶子彈跳的影響
- 四、探討水瓶質心改變與彈跳的關係
- 五、探討液體黏度對瓶子彈跳的影響



肆、實驗過程與方法

一、裝置技術改進

(一)彈跳高度測量技術改進

利用Phyphox APP以聲音分析撞擊的時間間隔，計算相對於彈跳的高度。

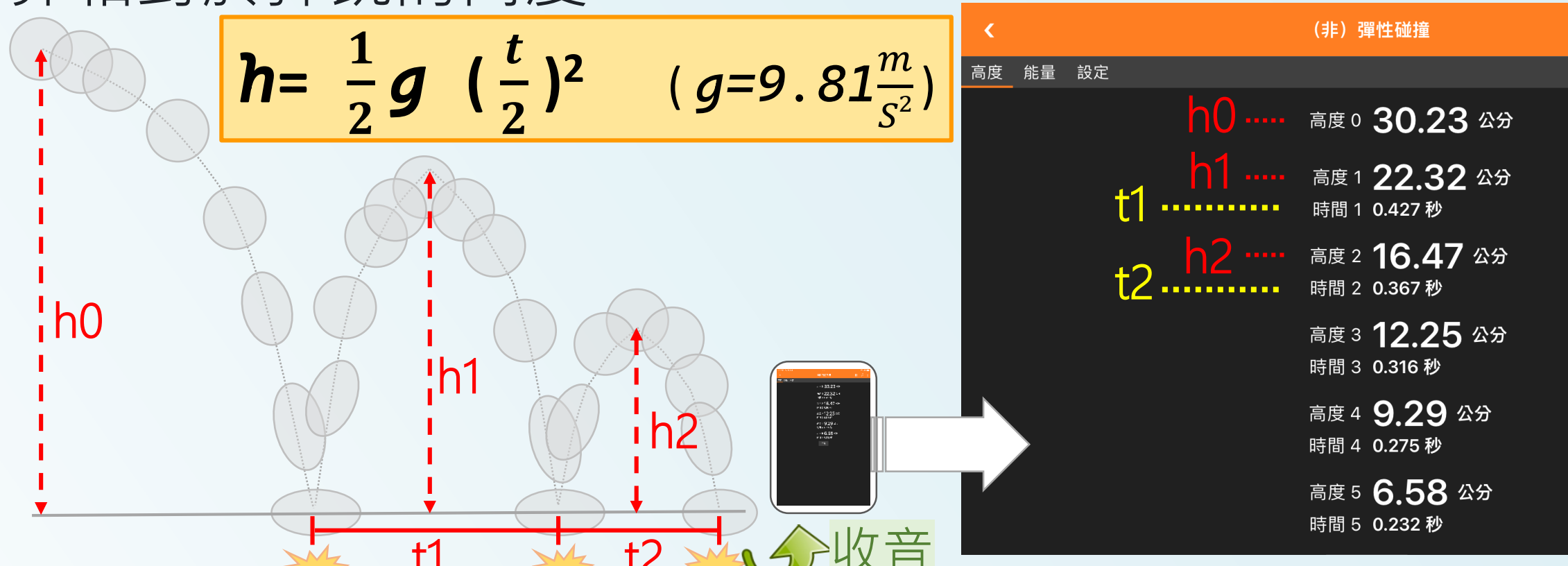


圖4-1：phyphox APP高度數據計算方式

(二)自製一維碰撞彈跳裝置

1.圓梯式跳台

電磁鐵(26mm)

吸附彈跳瓶上方的華司，以斷電方式讓瓶子自由落下。

彈跳高度測量管

製造彈跳瓶一維碰撞，長100公分

壓克力管下

放中空木盒，以加大碰撞音量。

收音麥克風

在木盒下方固定收音麥克風

2.一代彈跳瓶

高度：21.5公分
瓶身外徑：5.5公分
重量：100公克

配合電磁鐵尺寸，確保每次吸附的位置相同，落下過程中，便不會擦撞到管壁，減少實驗誤差。

球底磨平，擴大與地面接觸時的面積，減少剪力並增加彈跳的穩定性。

圖4-2：圓梯式跳台及一代彈跳瓶說明

3.自製調速器、二代旋轉彈跳瓶

軸承 能減少摩擦力，讓瓶子持續轉動。

瓶上的齒輪 馬達上的齒輪會帶動瓶身上的齒輪，讓瓶子做到旋轉的運動。

雷射測速計用反光貼紙 表面能反射測速計發出的雷射，偵測瓶子的轉速

馬達上的齒輪 齒輪連接馬達，帶動彈跳瓶旋轉

775直流馬達 具有高速、大扭矩等特性。

雷射轉速計



Brain go 開發板

編寫程式，設定電壓，調整馬達速度。

圖4-3：自製調速器及二代旋轉彈跳瓶說明

(三)自製質心量測儀

定滑輪 利用定滑輪能改變力的作用方向，一端綁重物，一端固定彈跳瓶。

釣魚線 為求質心精準的位置，以線徑0.2mm的釣魚線微調瓶身

積木長條 協助定位，避免瓶身晃動，影響測量的數據。

雷射測距儀 裝置底部用積木做軌道，讓測距儀可以水平滑動，確定在同一直線上，在彈跳瓶貼反光貼條，方便測量。待瓶身靜止後，分別測量前中後三個測距點的高度，如果數據相同，表示瓶身達水平。

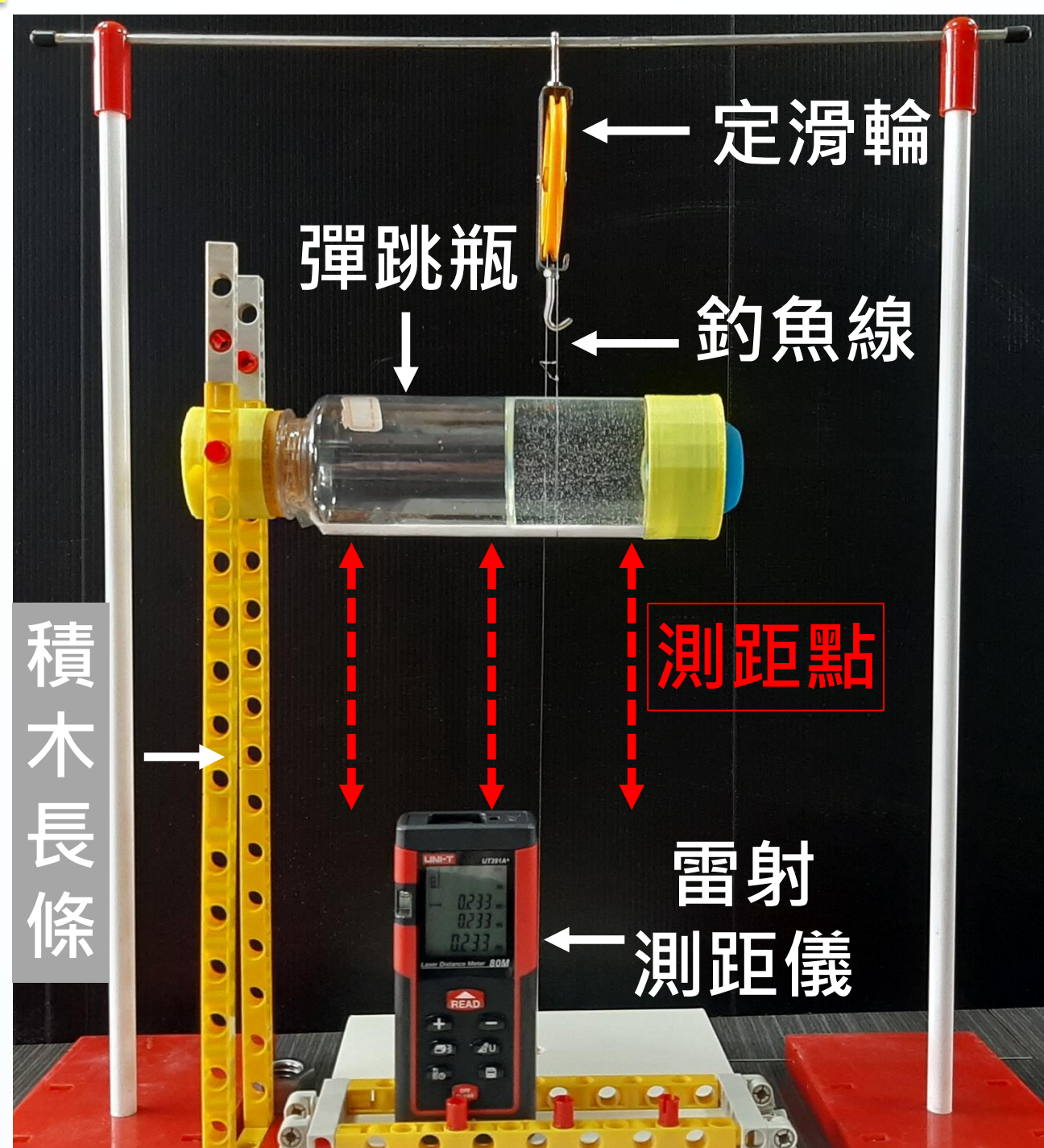


圖4-4：自製質心量測儀裝置說明

伍、研究結果

一、填入固體是否會影響瓶子彈跳？

(一)不同質量固體瓶在碰撞後彈跳次數均為四次。

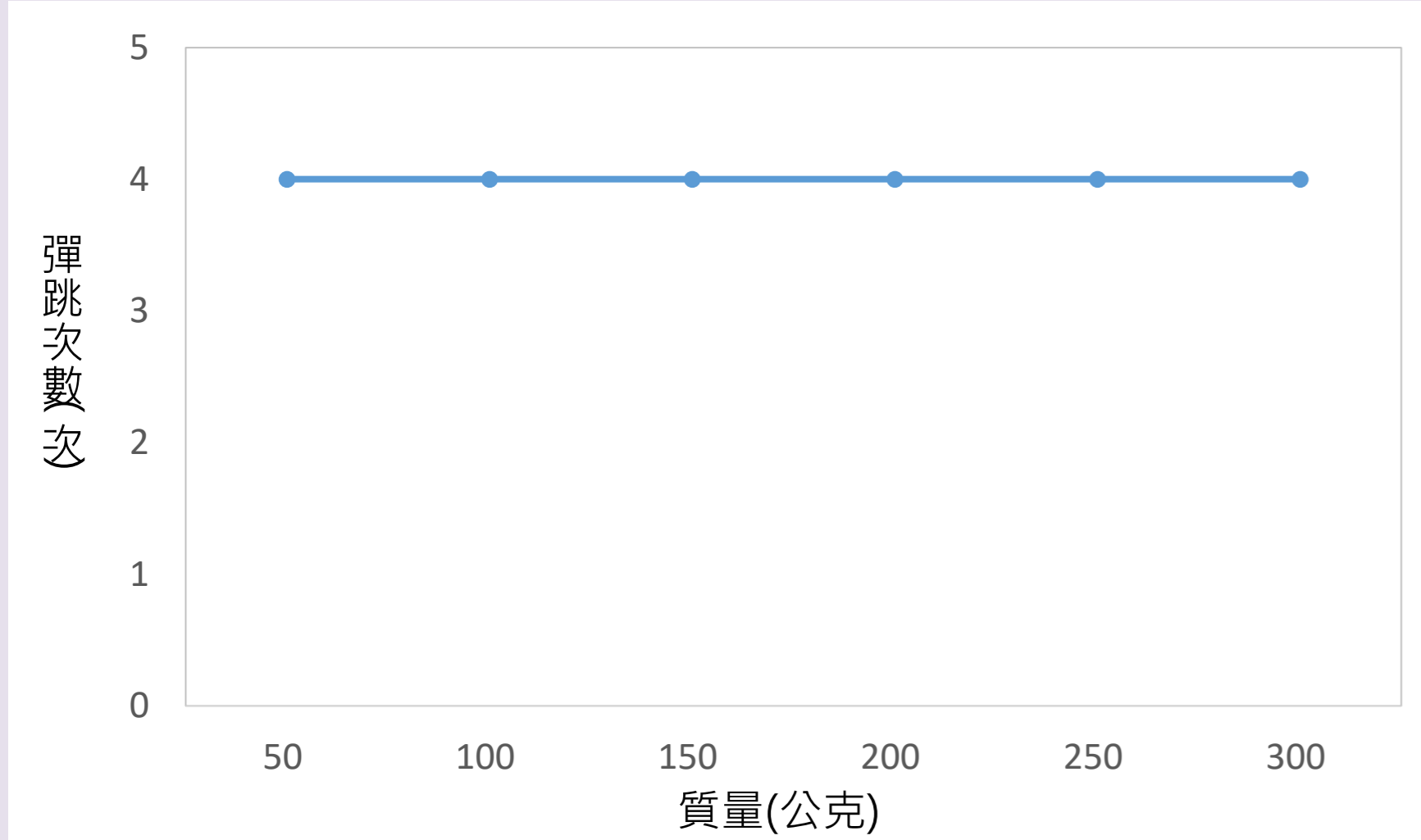


圖5-1 不同質量固體瓶掉落後的彈跳次數

(二)不同質量固體瓶在碰撞後，質量越大反彈高度越高。

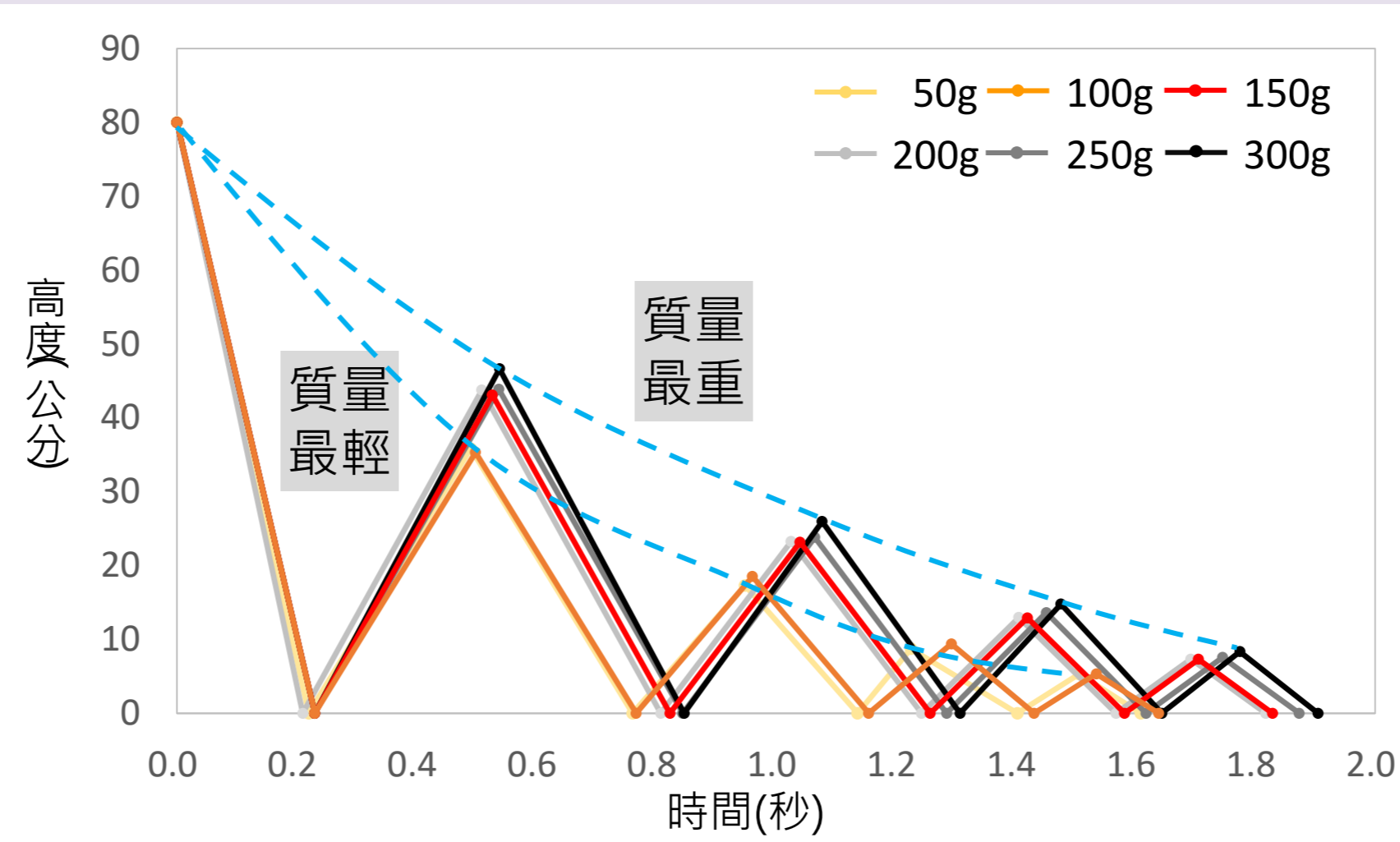


圖5-2 不同質量固體瓶的彈跳高度變化圖

(三)質量不同的固體瓶，在經過四次碰撞後恢復係數沒有明顯下降。

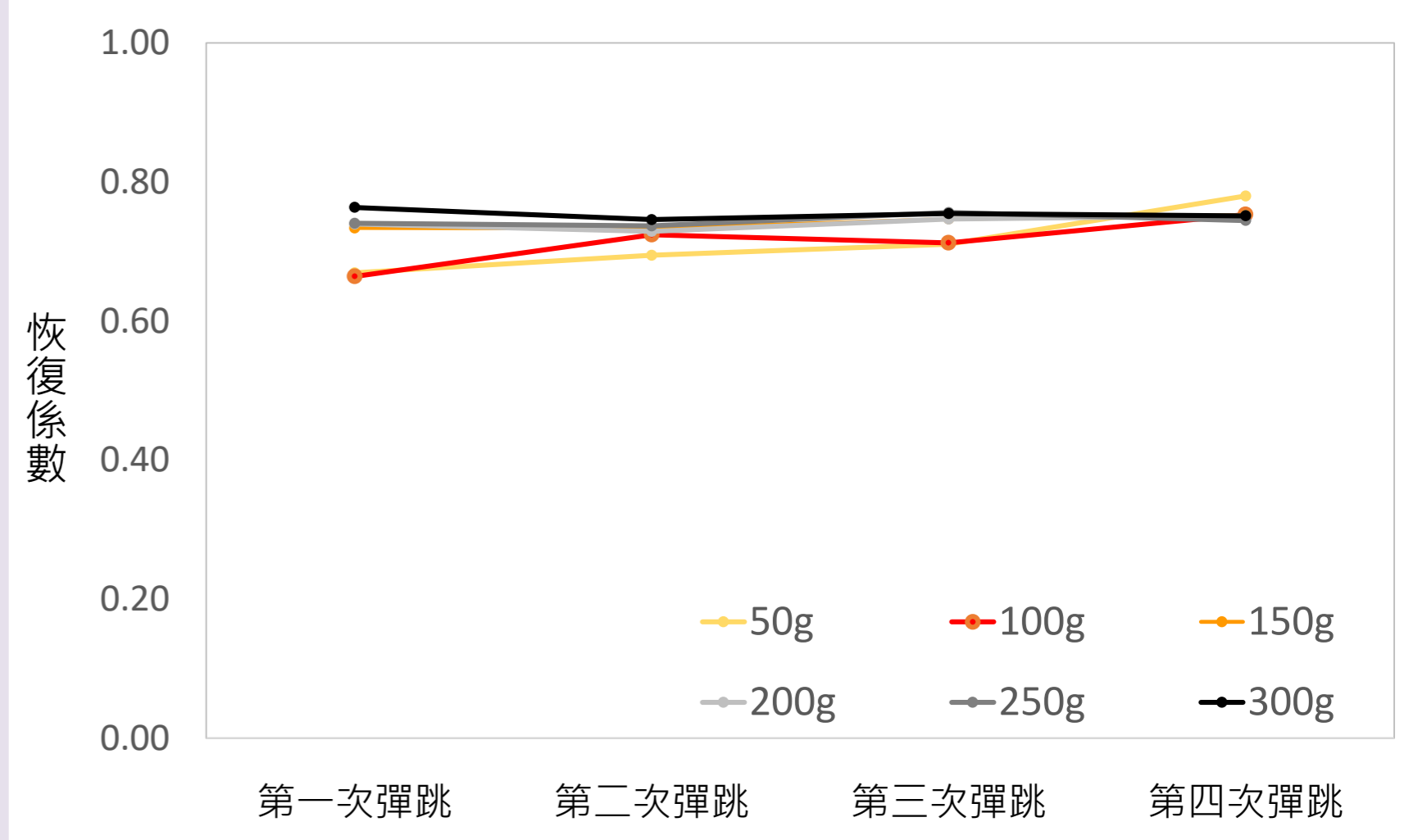


圖5-3 不同質量固體瓶每次彈跳的恢復係數變化

二、填入水是否會影響瓶子彈跳？

(一)不同質量水瓶在碰撞後彈跳次數為三次，只有300g水瓶為四次。

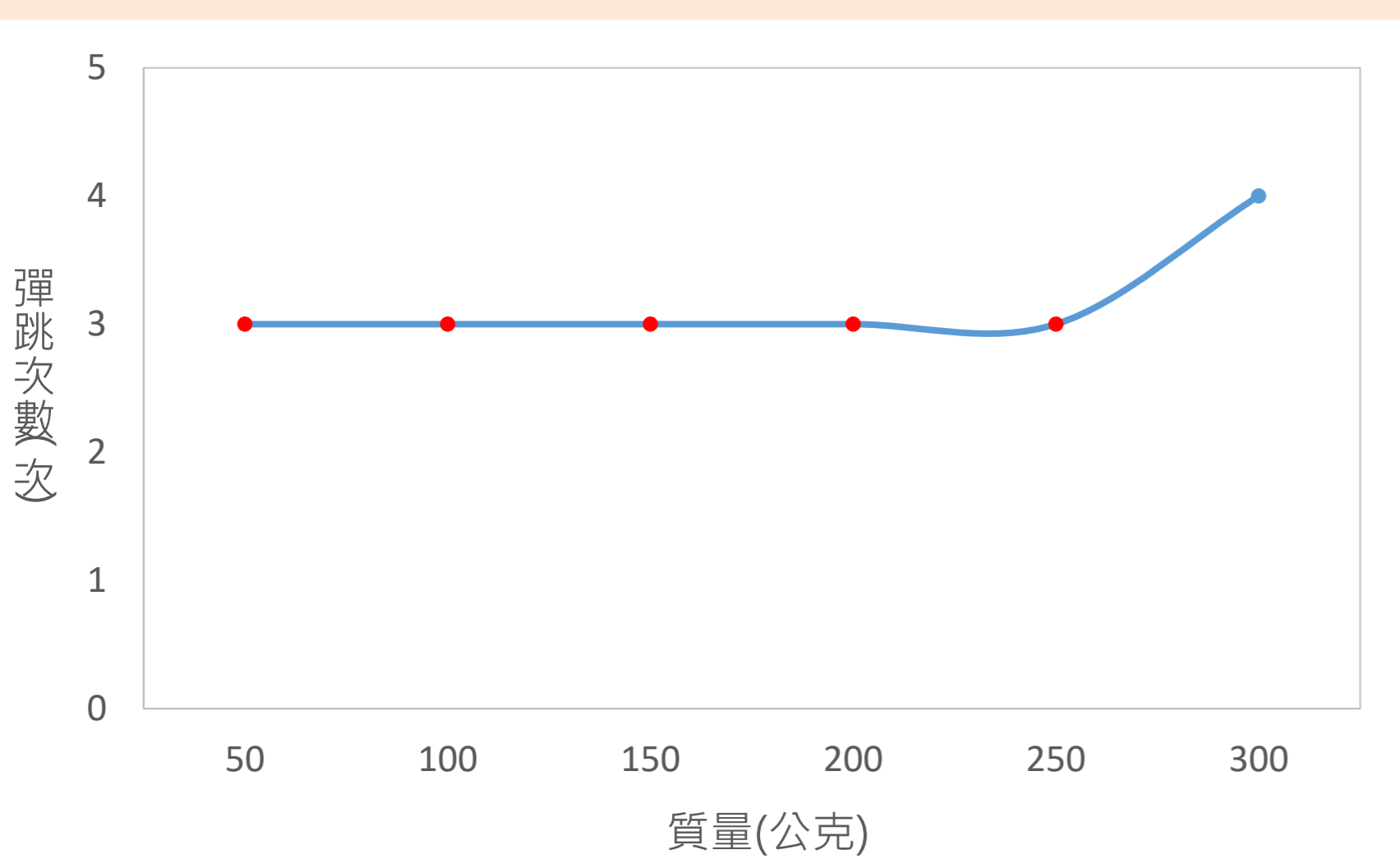


圖5-4 不同質量水瓶掉落後的彈跳次數

(二)50g、100g、150g的水瓶幾乎彈不起來，200g、250g、300g的水瓶反彈高度變高。

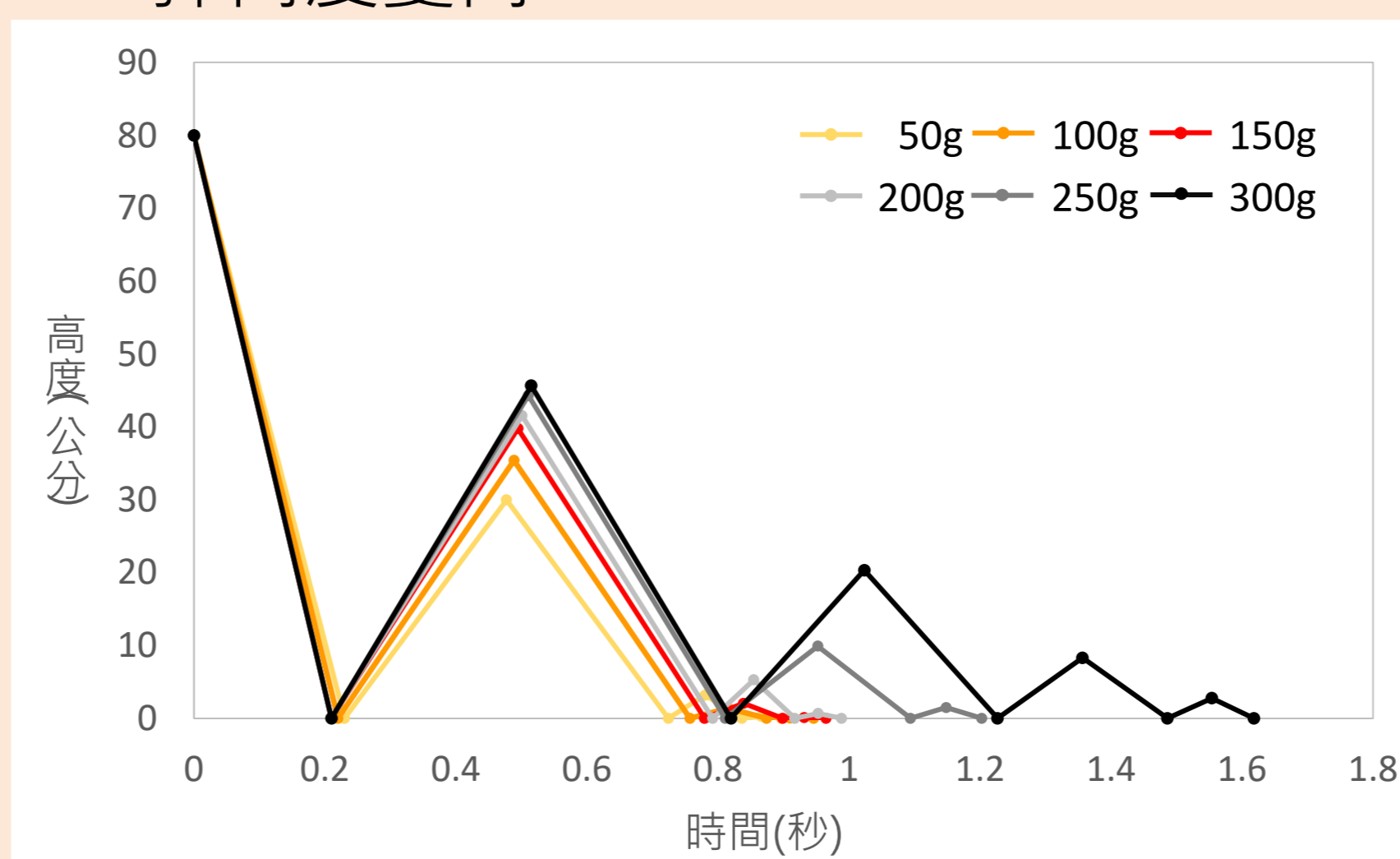


圖5-5 不同質量水瓶的彈跳高度變化圖

(三)質量不同的水瓶，在第二次碰撞時恢復係數皆有明顯下降，以質量100g的水瓶下降最多。

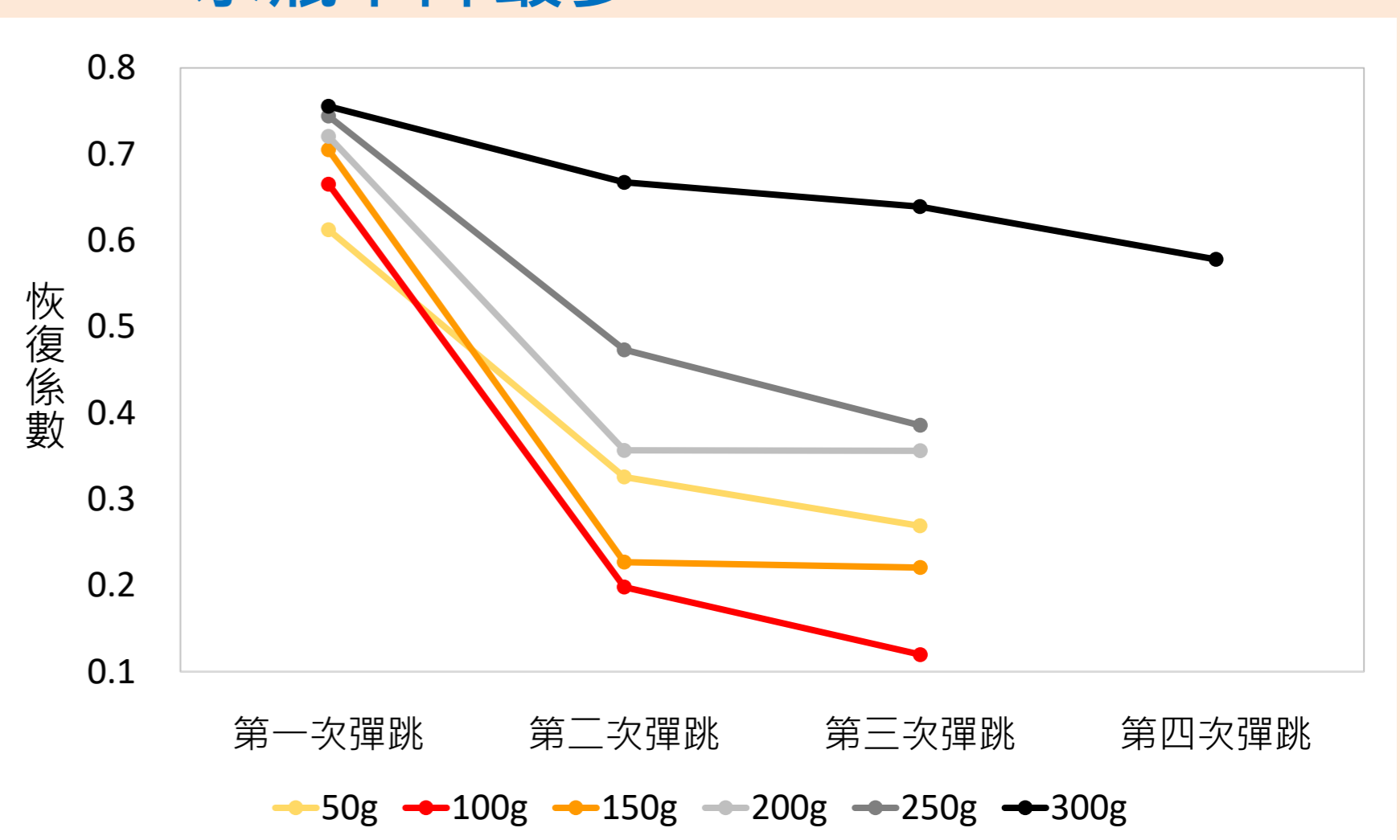


圖5-6 不同質量水瓶每次彈跳的恢復係數變化

(四)水瓶落下過程，瓶子和液體運動的四個時期

開始落下到第一次碰撞	第一次碰撞後到第二次碰撞	第二次碰撞後到第三次碰撞	第三次碰撞後
整體期	分離期	轉換期	恢復期
液體緊貼瓶底下墜，中心略為凹陷，碰撞後瓶子往上彈時，在中央有液柱往上噴發。	液體隨液柱往上噴，部分子體與母體脫離，接觸到水瓶之後，子體減緩速度沿瓶壁往下流。	子體受瓶子碰撞的力量加速往下，在瓶底的母體因為碰撞往上噴發，兩邊交換位置。水瓶受子體力量，往上彈起受阻。	瓶底母體只有震盪沒有脫離，瓶壁上子體流下後，液體回到落下前狀態。

圖5-7 水瓶落下過程，瓶子和液體運動的四個時期

三、水瓶旋轉後落下是否影響瓶子彈跳？

(一)旋轉水瓶落下過程，瓶子和液體運動的三個時期

開始落下到第一次碰撞	第一次碰撞後到第二次碰撞	第二次碰撞後
整體期	分離轉換期	恢復期
旋轉的水先達到轉動平衡，開始落下後因為失去支撐力量，水受旋轉的離心力往瓶壁附著，瓶底的水逐漸佈滿瓶壁，液面呈現U字型。	瓶子落地後，佈滿瓶壁的水往下跑，同時在瓶底中央產生強烈的衝擊水柱，所有的水瞬間離開瓶子，水帶走接近全部的能量，同時瓶子靜止不再往上彈。	回流至瓶底的水開始震盪，在中心產生渦流，再慢慢恢復平靜。

圖5-8 旋轉水瓶落下過程，瓶子和液體運動的三個時期

(二)不同轉速落下後的水瓶，彈跳次數最多二次，最少一次。

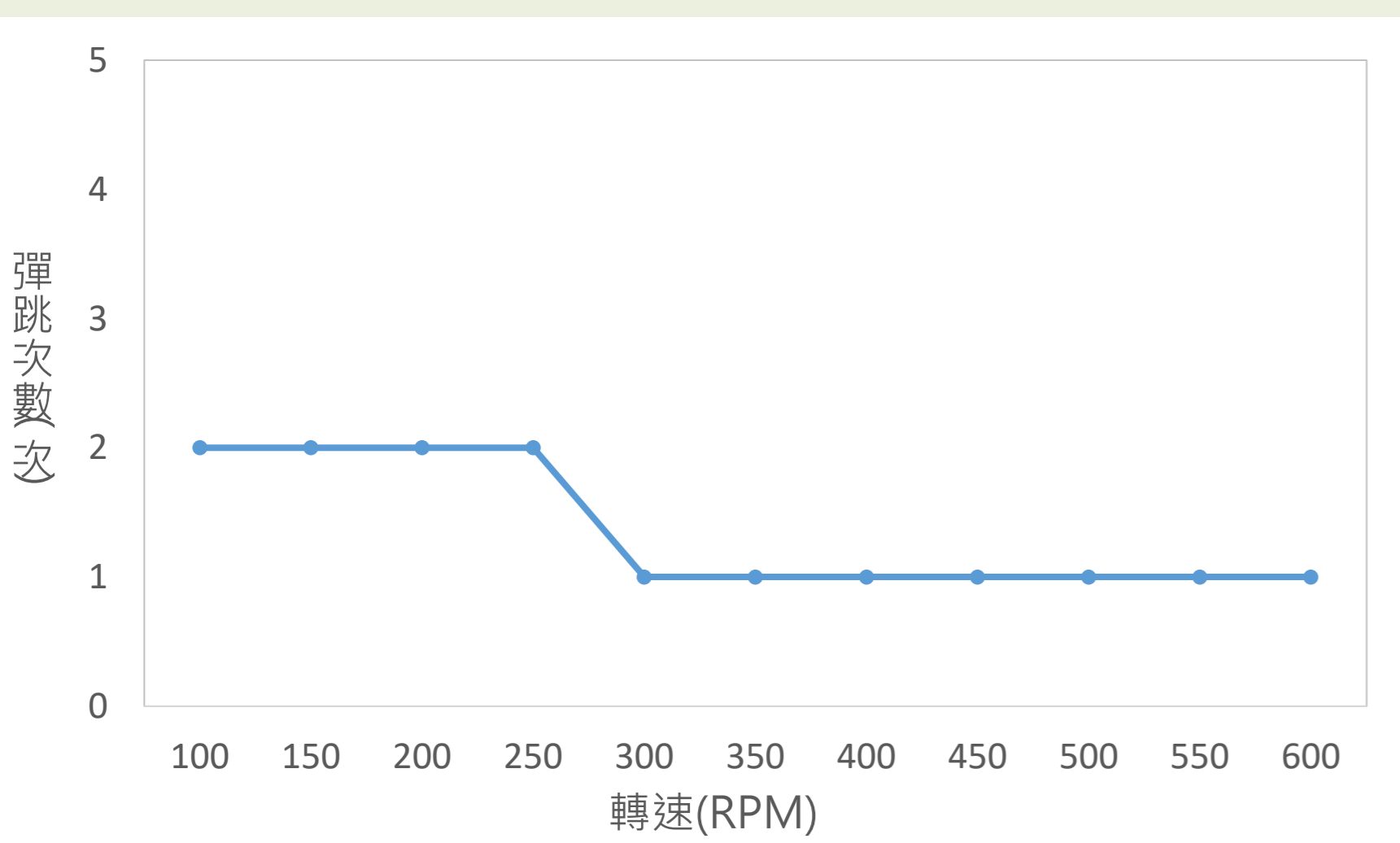


圖5-9 不同轉速水瓶掉落後的彈跳次數

(三)水瓶轉速大於臨界值300RPM時，一次碰撞就彈不起來，接近完全非彈性碰撞。

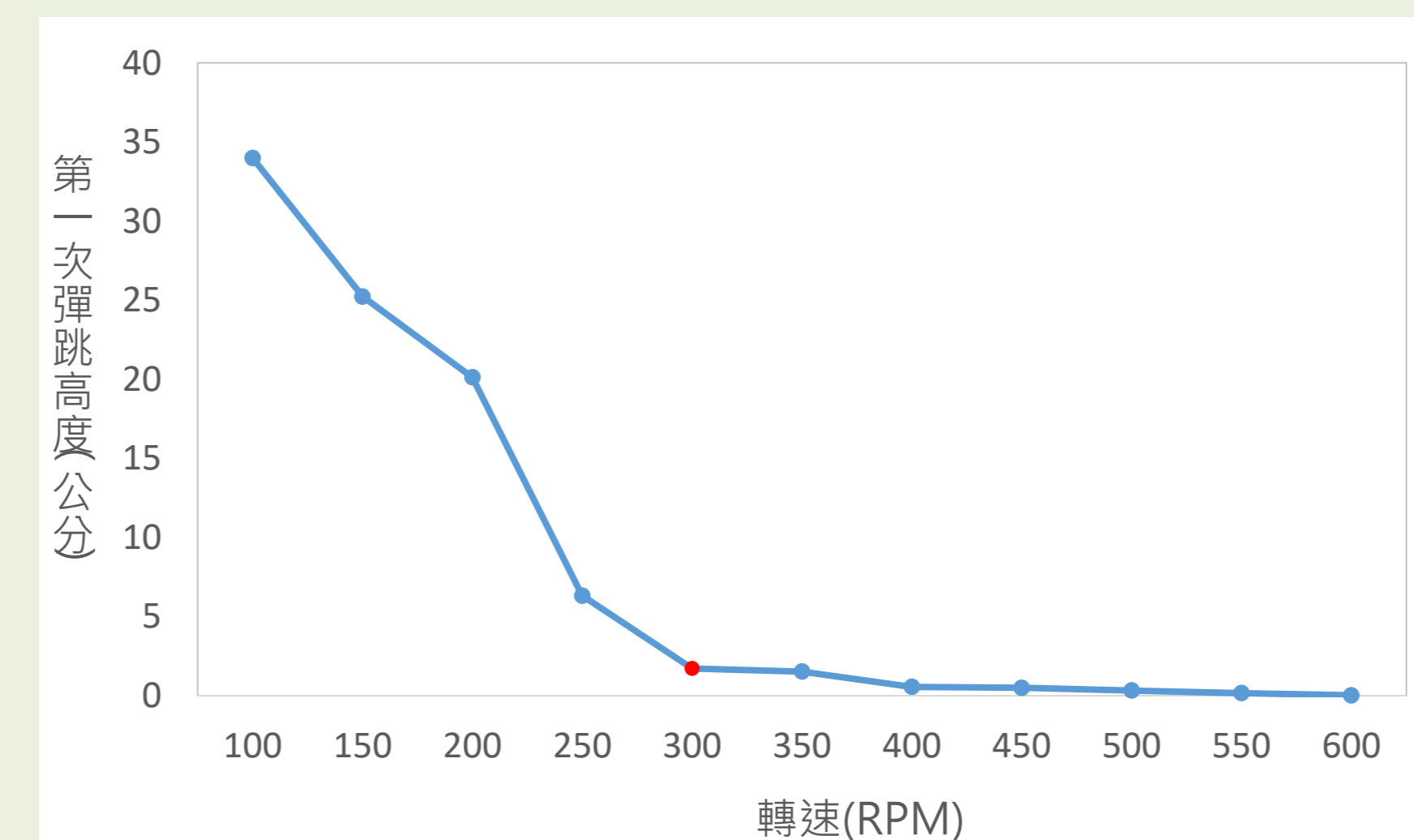


圖5-10 不同轉速水瓶第一次彈跳的高度

(四)水瓶旋轉後會改變水面曲度，轉速越快，曲度越大。

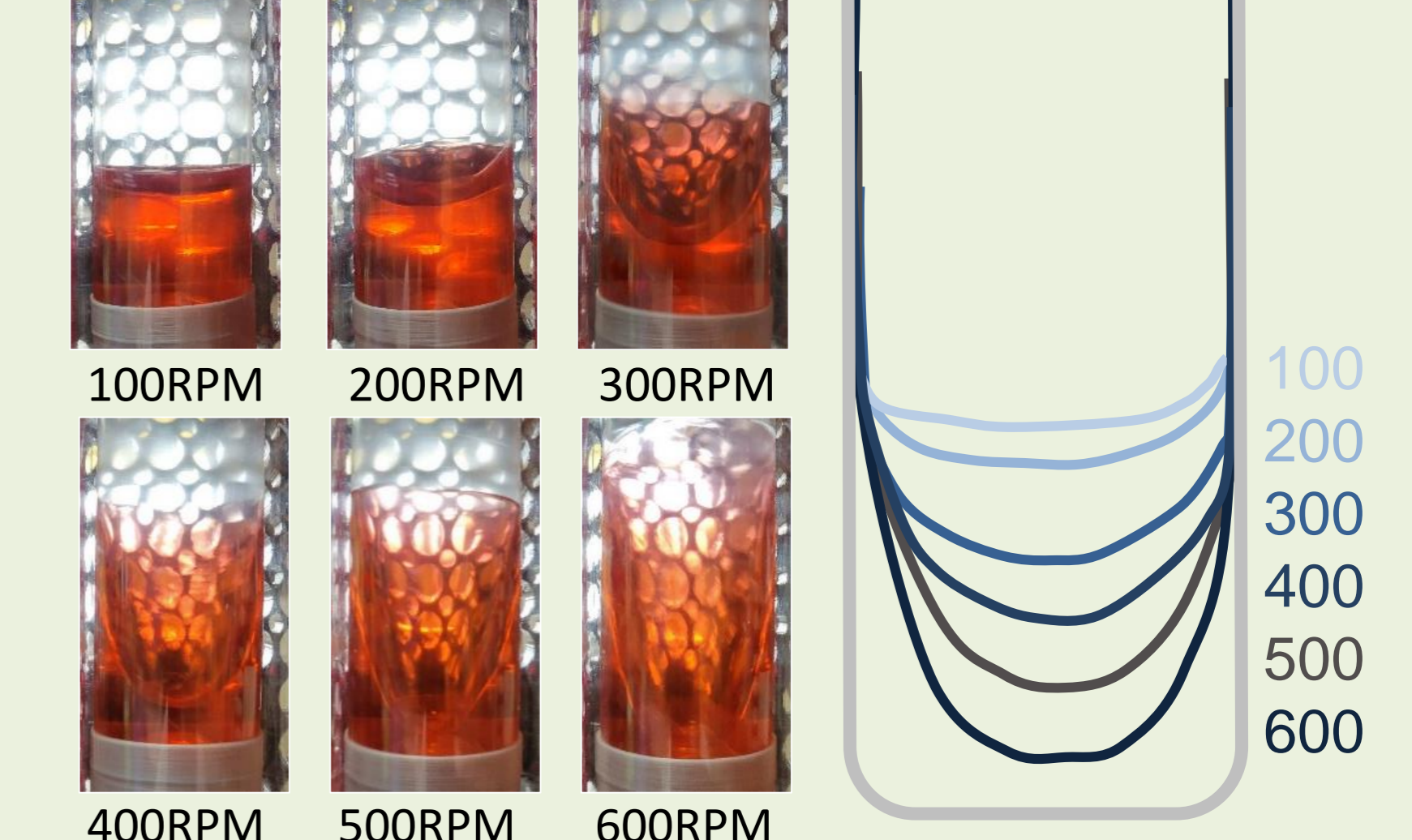


圖5-11 不同轉速水瓶的液面曲度示意圖

四、水瓶質心高度與彈跳有何關係？

(一)隨水的質量增加，質心高度先下降再上升，一倍瓶重時位置最低，三倍時最高。

(二)加入和空瓶等重的水時，質心高度最低，影響彈跳效果越明顯。

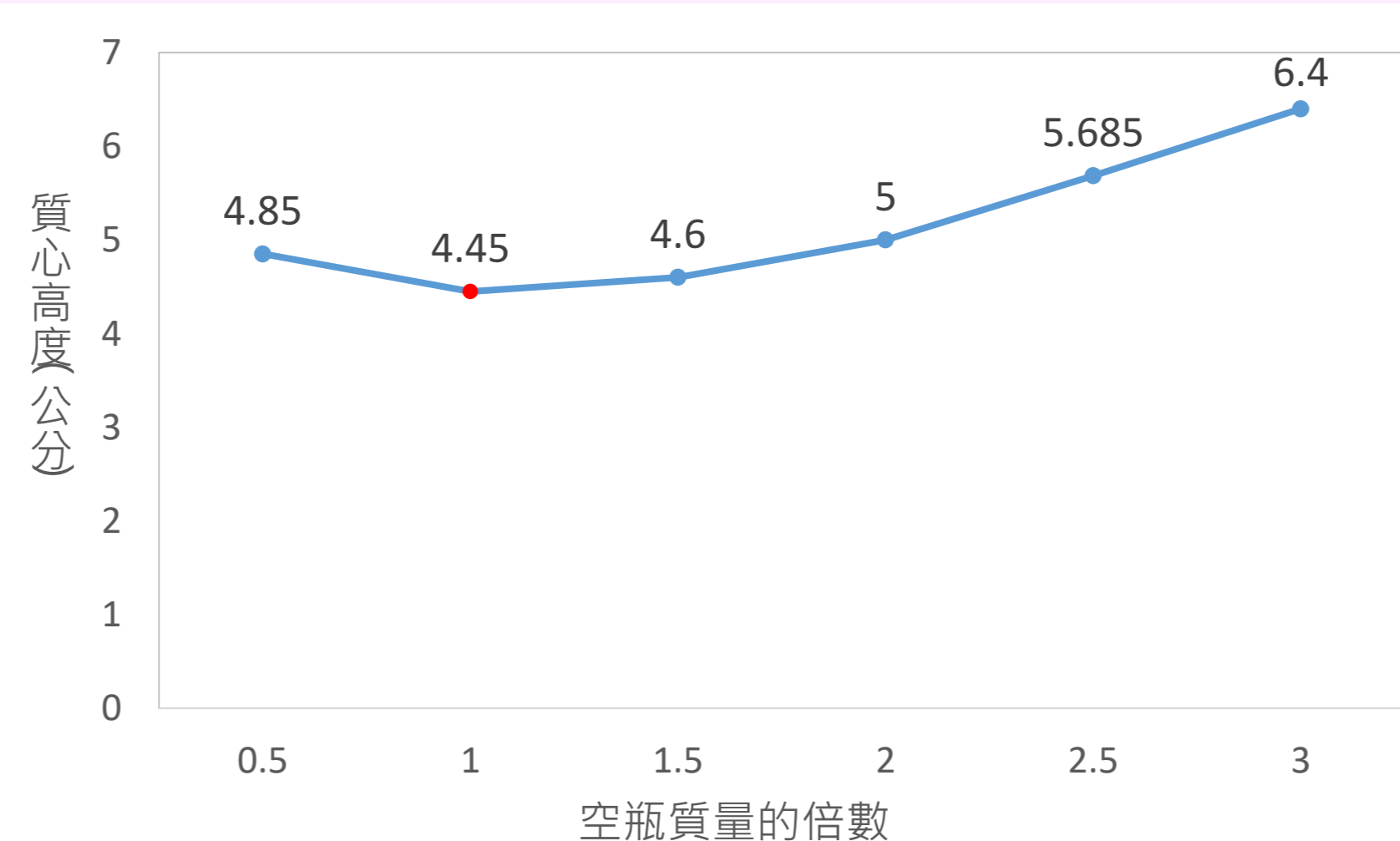


圖5-12 不同質量水瓶的質心高度變化

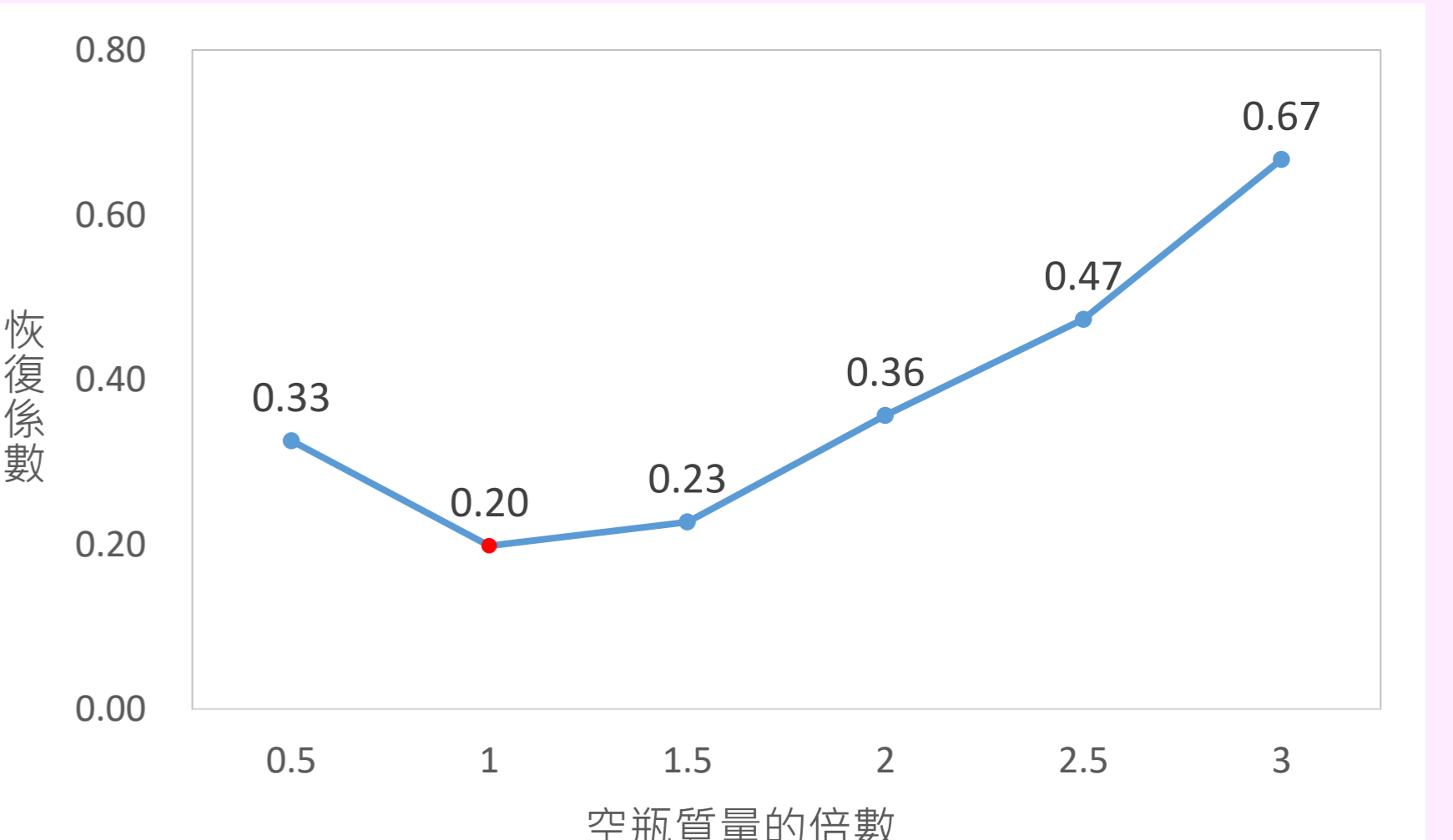


圖5-13 不同質量水瓶第二次彈跳的恢復係數

五、液體黏度對瓶子彈跳有何影響？

- (一)黏度較高的甘油瓶，彈跳次數可達到5次，黏度較低的只有2次，顯示液體黏度會影響瓶子彈跳(圖5-15)。
- (二)黏度高的甘油瓶彈跳高度低，但整體彈跳時間長，而黏度低的，彈跳高度高，但整體彈跳時間卻短(圖5-16)。

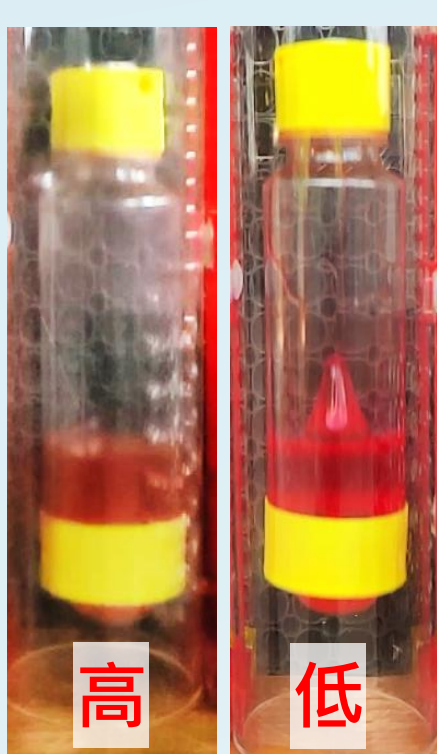


圖5-14 不同黏度甘油瓶

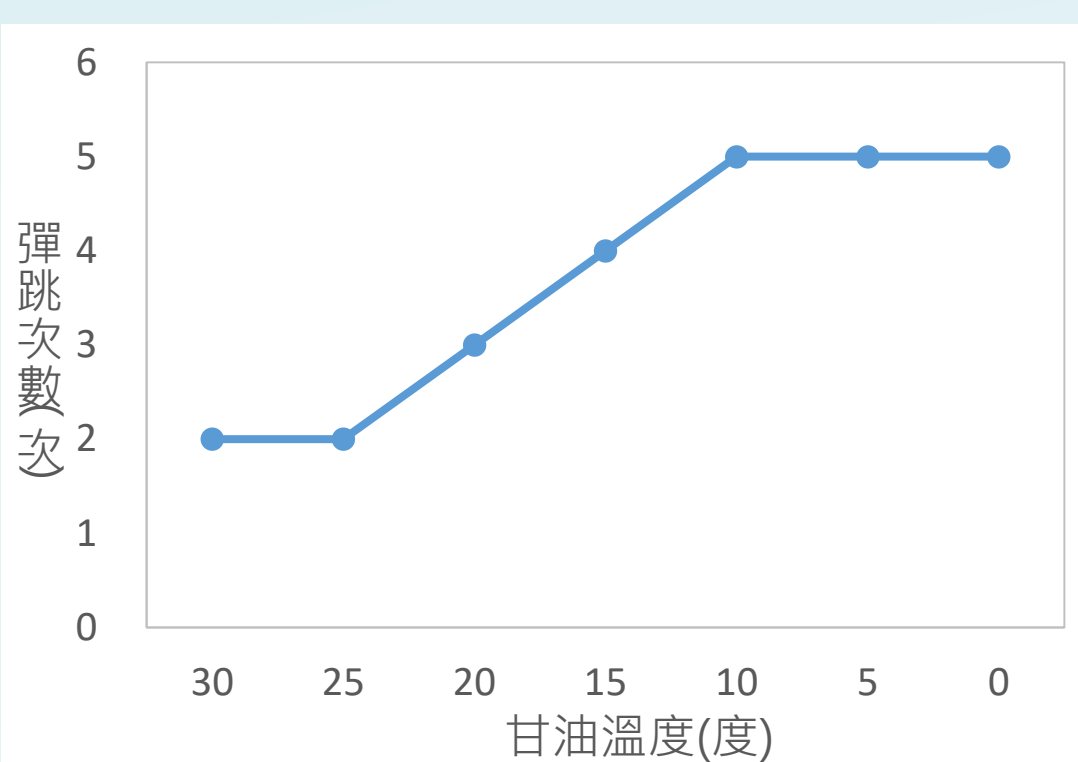


圖5-15 不同溫度(黏度)甘油瓶的彈跳次數

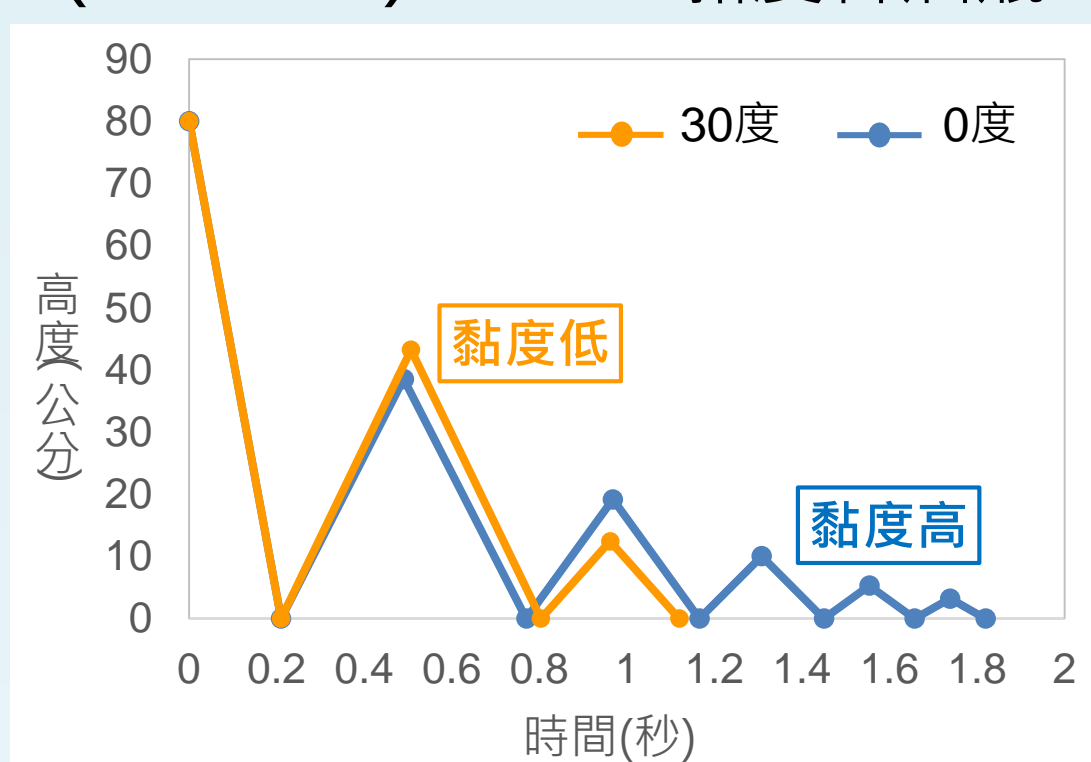


圖5-16 比較0度(黏度高)與30度(黏度低)甘油瓶彈跳高度的變化

陸、研究討論

一、水瓶彈跳與能量轉換

由實驗一、二的數據可知，流體在瓶子內的流動，會影響彈跳次數與彈跳高度，我們以位能與動能的轉換來解釋實驗結果：

- (一)水瓶落下產生的位能，扣除碰撞耗損的能量後，會轉換為讓水瓶往上彈起的動能，所以瓶內水產生的動能，會決定瓶子可以彈多高，水獲得動能越多，瓶子就彈的越低。
- (二)水產生的動能與水的質量和初速度有關，找到適合的水量，和讓水在撞擊時產生很大的初速度，就會是左右瓶子彈跳的關鍵因子。

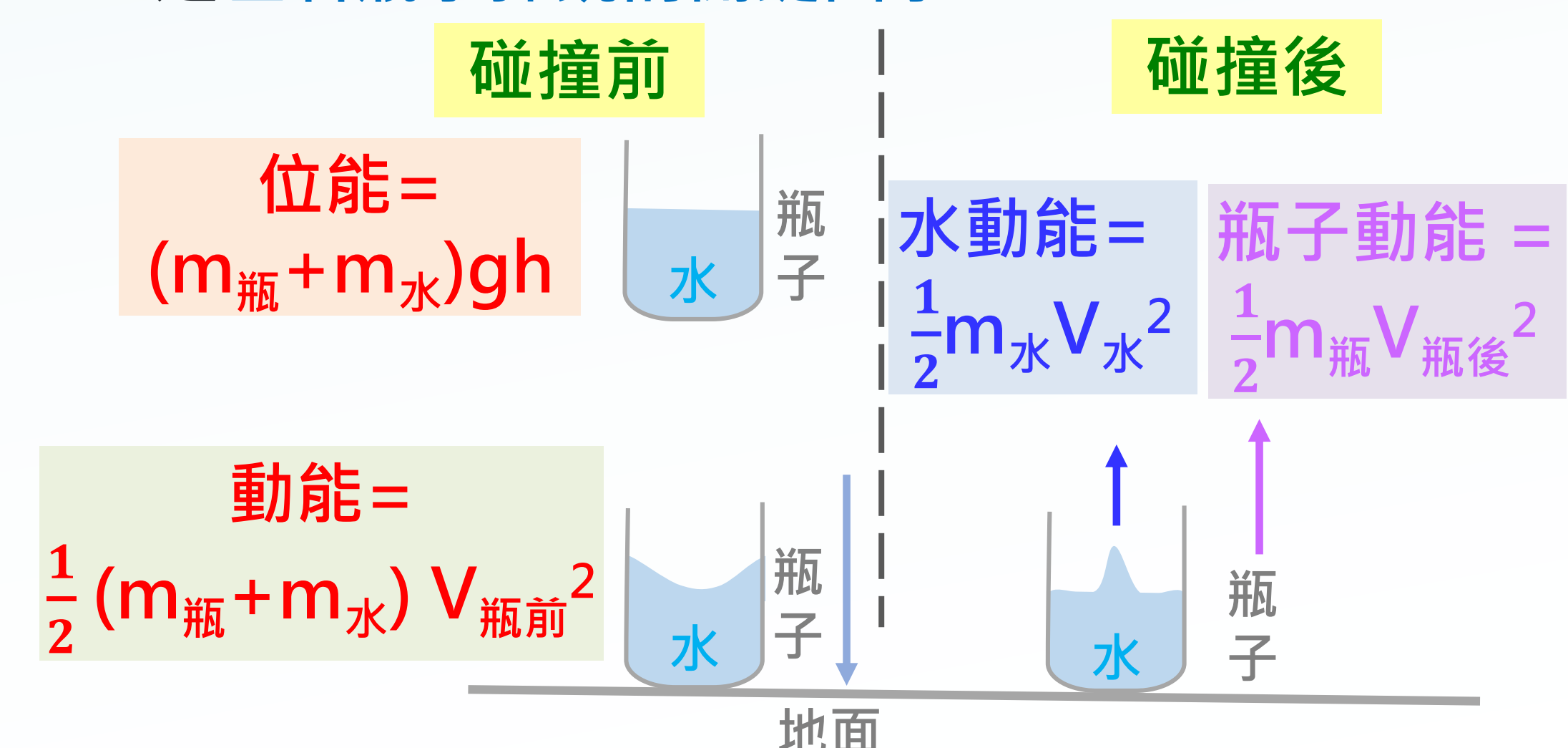


圖6-1 水瓶掉落過程的能量轉換

二、影響彈跳的變因討論

(一)碰撞時的液面曲度

由實驗一、二結果得知，在碰撞時液體如果不旋轉，瓶子彈起的高度是和固體瓶差不多的，自由落下的水瓶碰撞後，雖然有液柱往上噴發，但大部分的動能還是在瓶子上面，水只帶走一小部分。

但實驗三結果顯示，讓液體旋轉，改變液面曲度，碰撞後水會帶走絕大部分動能，瓶子只能微微彈起，這是因為液面曲度越大，在碰撞時反彈的作用力可以在瓶底中央讓水產生更大的初速度，只要能提供足夠的初速度，原本繞瓶壁旋轉的水，在撞擊後改變方向往上運動，就會承接了大部分由位能轉換的動能，所以就造成水彈起、瓶子靜止的有趣現象。

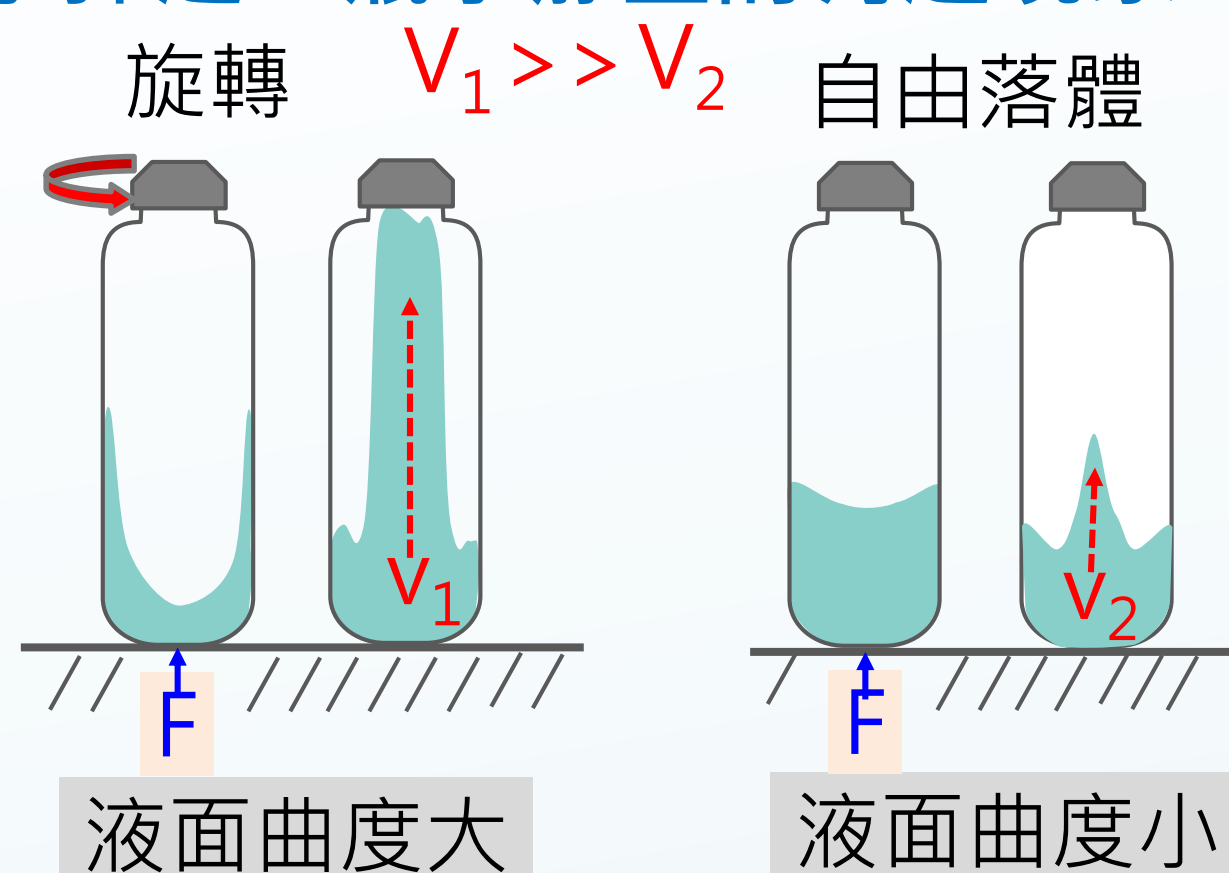


圖6-2 旋轉與自由落體水瓶碰撞產生之初速度對照圖

(二)水量

1.質心高度

實驗四結果可知，質心高度的變化並不是質量越大就越高，而是在液體和瓶子等重時最低，那為何質心高度越低，對彈跳影響就越大呢？我們推測是距離的因素，當質心越低，會越靠近撞擊點，受力與運動的影響就越大。

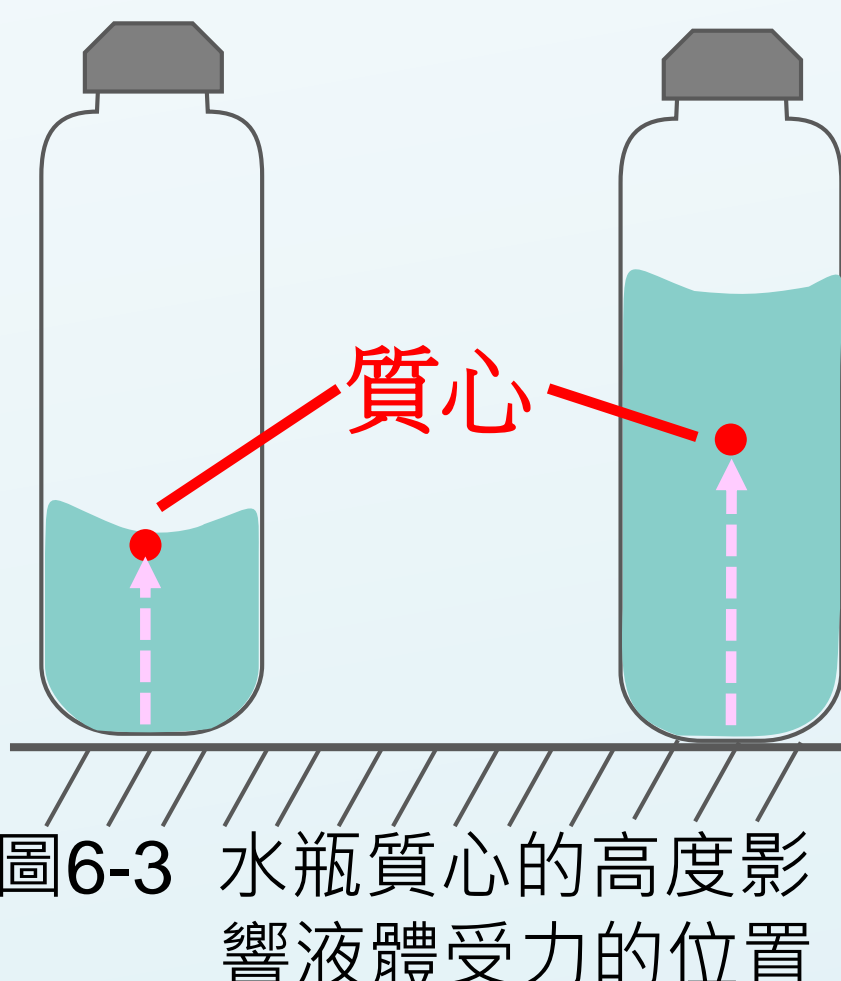


圖6-3 水瓶質心的高度影響液體受力的位置

2.最大功率傳輸定理

力學和電學雖然是不同的系統，但有些同類的數學公式，往往可以做為類比，其中在基礎電路學中的最大功率傳輸定理，主要是說明當負載電阻等於電源網絡的輸出等效電阻時，可以從有限的內阻電源獲得最大的外部功率，此定理的數學原理，是否可以適用本研究中，當瓶子重量等於液體重量時，碰撞後液體可以藉由瓶子傳遞獲得最大的動能，這是一個有趣的猜想，可以後續再做研究驗證。

(三)液體黏度

液體的黏度相當於液體內部的摩擦力，會決定液體碰撞受力後的流動速度，進而影響瓶子彈跳。由實驗五結果可知，黏度越高，越不會流動的甘油瓶，可彈5次，時間也比較長，黏度越低，越會流動的甘油瓶，彈2次就結束了，此結果可以合理解釋實驗一、二固體瓶和液體瓶在彈跳次數上的差異。另外在同樣條件下，但為何黏度高的甘油瓶彈跳次數比固體瓶還多(圖6-4)，黏度低的甘油瓶彈跳次數比水瓶還少(圖6-5)，是否在受力過程中除了黏性也同時表現出彈性？很值得再做後續的探討。

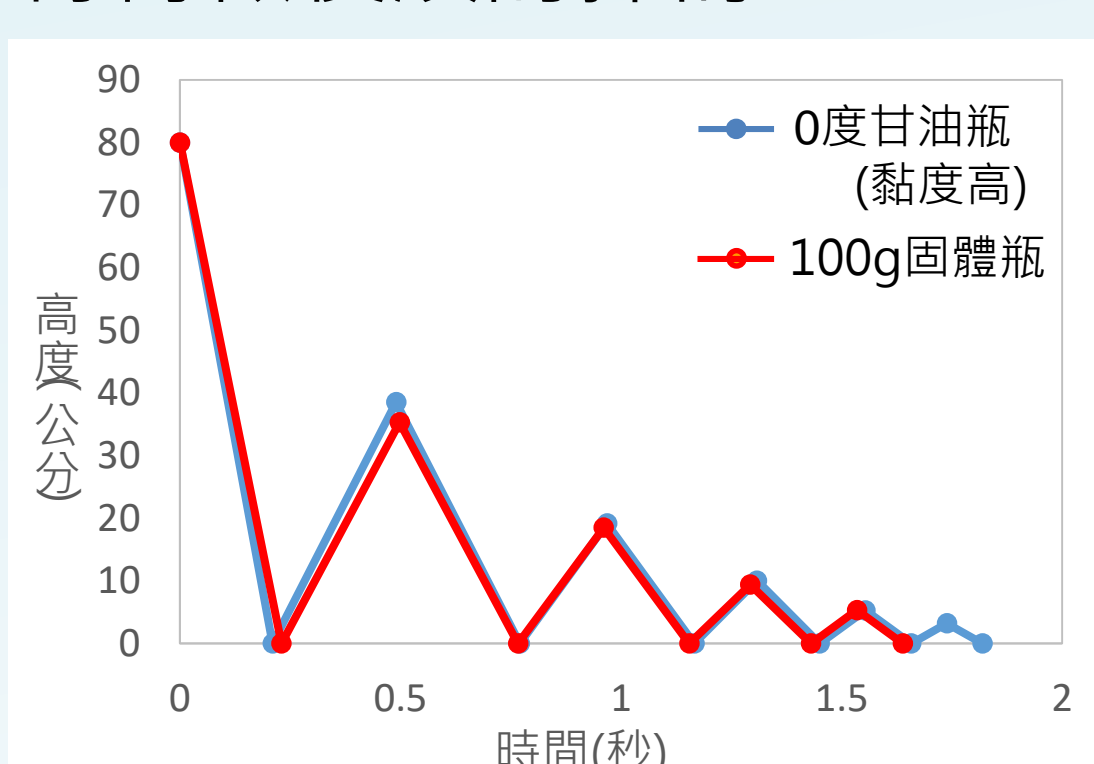


圖6-4 黏度高的甘油瓶和固體瓶彈跳高度與次數的差異

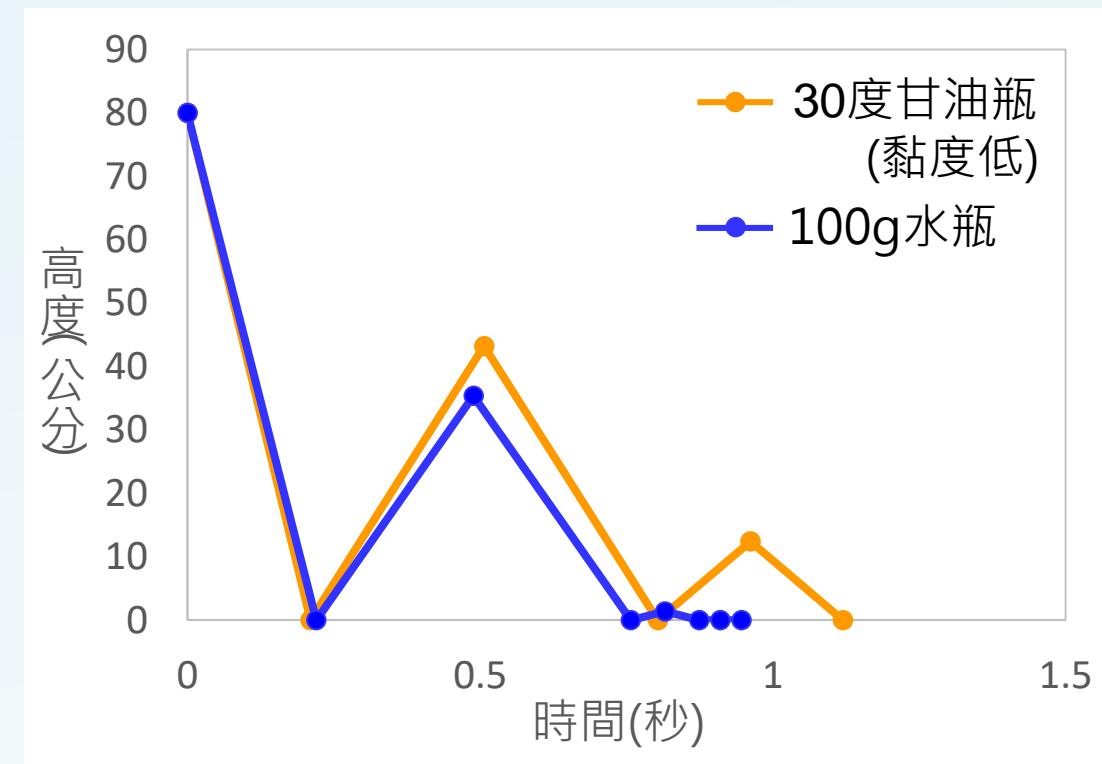


圖6-5 黏度低的甘油瓶和水瓶彈跳高度與次數的差異

三、實驗和裝置的誤差討論

(一)彈跳高度測量誤差討論

設計簡單的跳台，讓彈力球分別從三個高度自由落下，算出最初高度的平均值及誤差值，發現誤差值皆遠小於3%(表6-1)，表示phyphox APP測出的數值是有信度的。



圖6-6 彈跳高度測量平台

表6-1、phyphox APP誤差檢測記錄表

跳台最初高度(h0)	60cm	40 cm	20 cm
App測出平均最初高度(cm)	59.41	39.989	19.97
誤差值(%)	0.98	0.0275	0.15

(二)圓梯式跳台裝置誤差討論

管子內的空氣阻力是否會對實驗數據造成影響，使用不同質量的固體瓶做誤差測量(表6-2)，尾端開口和密閉的反應時間只差0.005秒，換算成高度後誤差仍然遠小於3%，可以忽略空氣阻力在本實驗中造成的影響。

表6-2、第一次彈跳高度誤差檢測記錄表

固體瓶質量(g)	50	100	150	200	250	300
管末密閉彈跳高度(cm)	35.84	35.31	43.09	43.76	43.88	46.63
管末開口彈跳高度(cm)	36.12	34.88	42.65	43.52	44.56	45.42
誤差值(%)	0.78	1.21	1.02	1.28	1.55	2.59

四、未來展望

這次的研究，我們找到如何讓水彈起、瓶靜止的變因條件，也能夠運用已知的物理知識來解釋這個現象，後續可以試著研究，如何利用液體來減緩物體高速撞擊時的作用力。更興奮的是，我們成功讓流體瓶落下產生的位能，大多數集中在水瓶裡造成激烈的能量釋放，之後可以進一步探討衝擊波的能量效益，或許是一個透過流體轉換能量，來產生動力的新方向！

柒、結論

- 一、水瓶自高處落下彈跳時，瓶內液體的流動會影響其彈跳高度和彈跳次數，依過程共分為整體期、分離期、轉換期、恢復期等四個時期。
- 二、流體進入轉換期時，會產生劇烈的波動，瓶子彈跳高度也會明顯變低，這個將水瓶位能轉換成流體動能的現象，主要跟碰撞時的液面曲度、水量、和液體黏度有關。
- 三、旋轉水瓶會改變液面曲度，讓水在碰撞時產生更快的水柱，降低瓶子彈跳高度和次數。
- 四、100g水瓶轉速大於臨界值300RPM時，彈跳次數只剩一次，水會在瓶內產生強烈的衝擊水柱，讓瓶子彈不起來，接近完全非彈性碰撞。
- 五、加入和空瓶等重的水時，質心高度最低，影響彈跳效果越明顯。
- 六、液體黏度會影響瓶子彈跳，黏度較高甘油瓶彈跳次數可達到5次，黏度較低只有2次。

捌、附錄

照片攝影索引

第一作者：圖1-1、圖4-2、圖4-4、圖5-11、圖5-14、圖6-6

第一指導教師：圖5-7、圖5-8

圖表繪製索引

第一作者：圖4-1、圖4-3

第二作者：表6-1、表6-2

第三作者：圖5-1-5-6、圖5-9、圖5-10、圖5-12、圖5-13、圖5-15、圖5-16、圖6-4、圖6-5

第二指導教師：圖2-1、圖2-2、圖2-3、圖6-1、圖6-2、圖6-3