

屏東縣第65屆國民中小學科學展覽會 作品說明書

科 別：物理

組 別：國小

作品名稱：馬格努斯飛杯飛行運動之研究

關 鍵 詞：馬格努斯效應、_____、_____

編號：A2016

馬格努斯飛杯飛行運動之研究

壹、摘要

馬格努斯飛杯是一種可以旋轉飛行的玩具。飛杯受到橡皮筋的力帶動飛杯旋轉，因飛杯開口上下氣流的壓力差，產生了馬格努斯升力帶動飛杯向上移動。在本研究中，我們探討了用紙杯製成的飛杯飛行的上升高度與水平距離。橡皮筋的鬆緊、纏繞圈數、發射角度、飛杯重量等會影響飛杯飛行的上升高度；而飛行的水平距離則受到橡皮筋的鬆緊、橡皮筋的串聯數量、飛杯重量、發射角度、開口形狀等條件的影響。此外，我們也初步觀察並分類了飛行時出現的軌跡，大致可以分為拱形、山形、環形等三種不同的軌跡形狀。

貳、前言

一、研究動機

我們喜歡參加學校的「夏日樂學」營隊，老師會帶我們做科學實驗和遊戲。

這次老師帶我們玩「空中飛杯」，用橡皮筋纏繞底部相黏的2個杯子，就能發射飛行；飛杯的飛行路徑與一般紙飛機不同，會飄忽移動，並且橡皮筋纏繞的方向不同，飛杯的飛行方向也不一樣。這個遊戲很有趣，營隊老師也說明這是「馬格努斯效應」，但是在遊戲過程中我們不禁好奇，除了氣流的壓力外，還有其他因素影響飛杯的飛行嗎？又是否能製作更簡單、飛行效率一樣高的飛行器呢？

二、研究目的

透過本研究，我們希望了解「空中飛杯」的飛行原理，並探究影響飛杯飛行的因素。

- (一) 探討影響空中飛杯飛行上升高度的因素。
- (二) 探討影響空中飛杯飛行距離的因素。
- (三) 探討空中飛杯的飛行軌跡。

三、文獻探討

(一) 與自然領域課程相關內容－「天氣的變化」：

「風」來自於空氣的流動，地表受熱不均，造成空氣有冷熱的差異，冷熱空氣在地表面上產生壓力不同，空氣就從氣壓高的區域流向氣壓低的區域，因此形成了「風」。

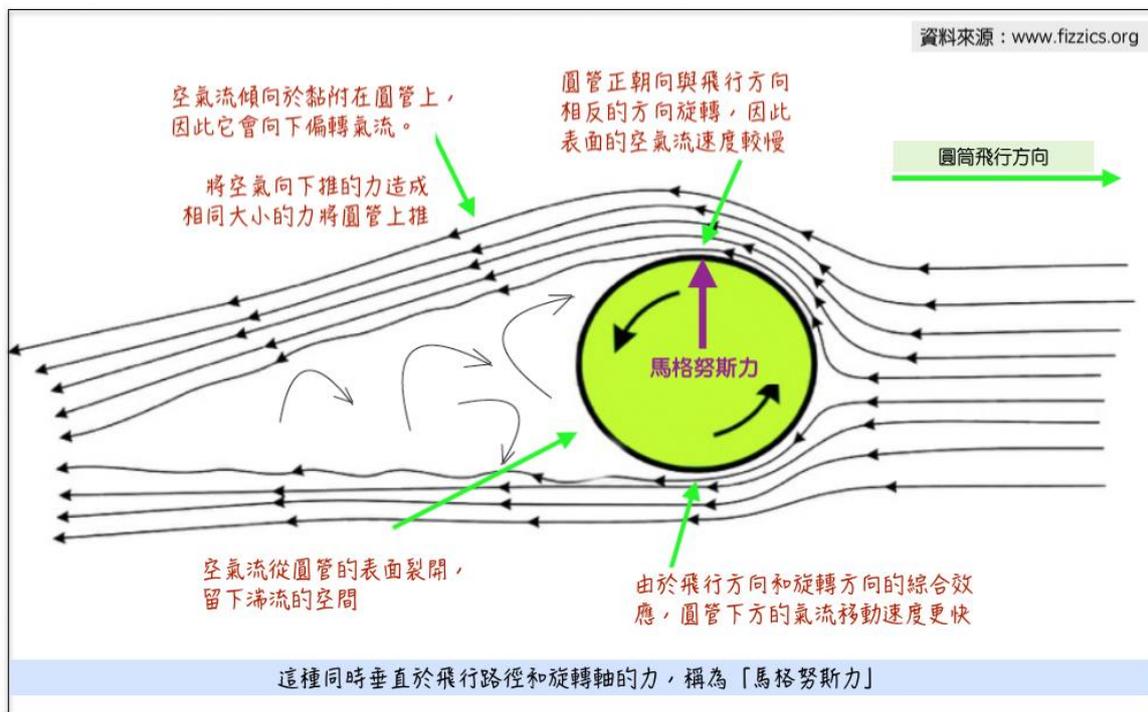
(二) 馬格努斯效應

當旋轉體與流體（液體或氣體）間發生相對運動時，浸入流體的旋轉圓柱形或球形固體上產生橫向力，這種垂直於飛行路徑和旋轉軸的力，被稱為馬格努斯力（Magnus Force）。旋轉物體周圍流體產生壓力差，使旋轉物體上產生側向力，讓它偏離了原本的直線路徑，該現象稱為「馬格努斯效應」。

下圖以綠色圓形表示一個旋轉的球或圓柱形的側面，以逆時針旋轉並往圖面右側方向移動，當它在空氣環境中旋轉時，衝過它外表面的空氣流往往會黏附在其表面；圓管逆時針方

向旋轉，其頂部的旋轉方向與迎面而來的空氣流速疊加，因此表面的空氣流速度大；相反的，圓管下方位置的自旋方向與迎面空氣流速度相反，二者相互削弱，因此該位置的空氣流速度較小。依據「伯努利定律」：「局部流體速度增加時，該處壓力將會相對降低」，因此圓管頂部的壓力小於圓管下方，壓力差使得圓管受到向上的力，而有向上方的偏離。物體周圍這股不平衡的氣流所產生的結果，與鳥或飛機為了飛上天際所利用的力相似，但是當物體是顆旋轉的球，這股力量會稱為馬格努斯效應 (Magnus effect)。(Laurie Winkless, 2022)

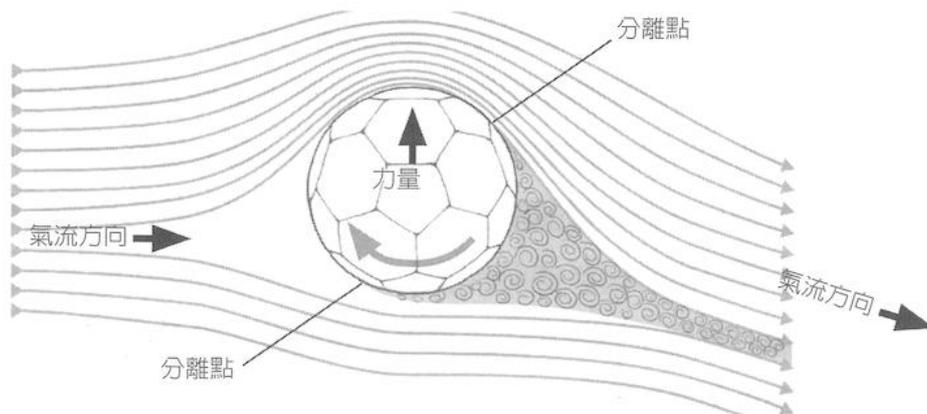
在頂部，旋轉遠離飛行方向，空氣相對於表面的速度很低，因此空氣傾向於黏在表面。其中大部分是向下偏轉的，因此它會向下偏轉氣流，將空氣向下推的力導致將管子向上推相等和相反的力。牛頓第三定律描述了這種效應，即每個動作都有相等和相反的反應。這種反應被稱為「馬格努斯力」。



「馬格努斯效應」以德國物理學家海因裡希·古斯塔夫·馬格努斯 ([Heinrich Gustav Magnus](#)) 的名字命名，他在 1852 年描述了這一效應。這是伯努利定律的一個特殊表現，在該效應中考慮了流體的黏度，而伯努利原理主要適用於沒有黏度的流體。因此，「馬格努斯效應」並不完全依賴伯努利原理。「馬格努斯效應」會出現在各種運動中，如足球運動員能將足球彎曲到球門、棒球投手能改變投出球的方向和旋轉速度，而投出各種球路，例如：曲球、快速球、螺旋球和滑球。

下圖中，球體前方有個高壓區，後方有個低壓區，表面有混合的紊流與層流邊界層。但是加入旋轉的動作後，空氣分子的「黏著層」會沿著表面拖曳。所以如果球丟出去時倒旋——從側面看是順時鐘旋轉（如下圖）——即球體上方的邊界層的移動方向會與氣流相同。這讓空氣附著於表面時間更長，讓氣流分離點變成朝向球的後方。在底部，邊界層流動方向與氣流相反，使其幾乎是立即與表面分離，分離點非常靠近近極點。這些分離點的不對稱代表大部

分氣流是向下偏轉。因為這會對球體施加相等但相反的力量（即牛頓第三運動定律）。因此，球體會向上偏移。球旋轉的速度愈快，這股力量愈大，偏移也愈大。物體周圍這股不平衡的氣流所產生的結果，與鳥或飛機為了飛上天際所利用的力相似，但是當物體是顆旋轉的球，這股力量會稱為馬格努斯效應（Magnus effect）。(Laurie Winkless, 2022)



(三) 牛頓第三運動定律

兩物體間對任何一個作用力，都同時存在一反作用力，其量值相同但方向相反。兩物體間的交互作用力，永遠量值相同但方向相反。作用力和反作用力雖然量值相等、方向相反，但不會互相抵消。因為它們不是作用在同一個物體上，而是作用在不同物體上。(高中選修物理，龍騰出版)

參、研究設備或器材

紙杯、電氣膠帶、橡皮筋、C形鐵夾、大長尾夾、木條、課桌椅、桌墊、Tracker—影像分析與建模工具軟體、iPad 平板

肆、研究過程與方法

一、開始研究之前：

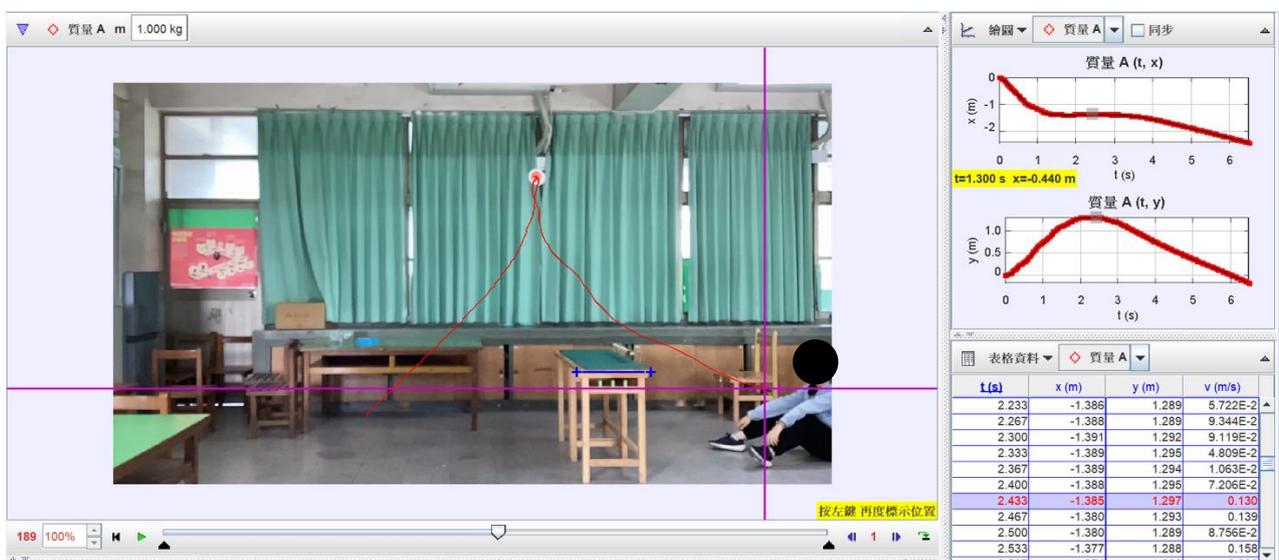
(一) 介紹空中飛杯（原型）

製作飛杯：取 2 個相同大小（高度 12.8cm、杯底半徑 3cm、開口半徑 4.5cm）的紙杯，將其底部相對，使用電氣膠帶纏繞貼合，這是飛杯的中央位置。完成後飛杯平均半徑 $R=3.75\text{cm}$ 、重量 26.0g。



(二) 軌跡分析：

為了讓 Tracker 軟體更容易追蹤飛杯移動軌跡，在飛杯開口處貼上紅色圖紙，做為飛杯空中移動的定位點，使 Tracker 軟體更明確標示出飛杯位置。



(三) 發射方式：

1. 原型（以橡皮筋纏繞飛杯）：將橡皮筋一端在飛杯中央膠帶纏繞處固定，由持杯者由內往外纏繞數圈後，橡皮筋拉開一段長度後發射。



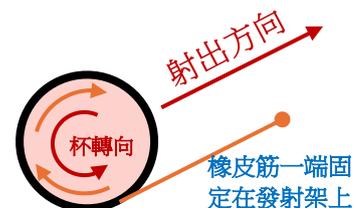
2. 改良型（以飛杯纏繞橡皮筋，使用發射架）：

為了讓飛杯射出時橡皮筋的力量穩定、方向固定，我們製作飛杯發射裝置如下：

(1) 材料：C 形鐵夾、大長尾夾、木條、課桌椅、桌墊

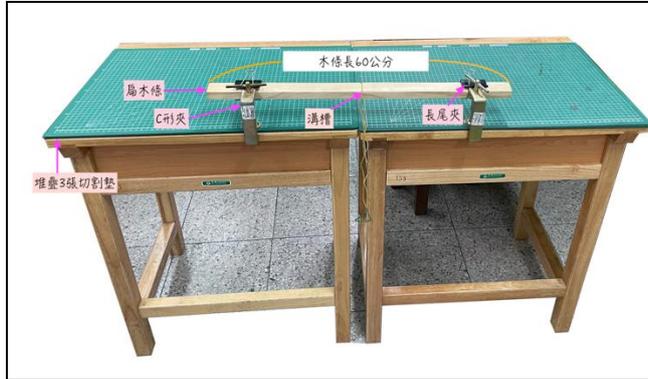
(2) 設置方式：

合併 2 張課桌椅，先在桌面上各放 3 張切割墊板墊高。另取一根扁木條（長 60 公分、寬 3 公分、厚 1.8 公分），用鋸子在木條中央（離端點 30 公分處）鋸出一溝槽以固定橡皮筋。再用 2 個 C 形夾、夾在木條兩端，使其固定在桌面上，再用 2 個大長尾夾住 C 形夾以固定木條。



先將橡皮筋的一端固定在溝槽上，另一端則固定在飛杯的中央，從飛杯這一端的橡皮筋端點，將飛杯順著橡皮筋往前繞旋數圈，當所剩的橡皮筋到達適當長度後，放開飛杯，即可讓飛杯往前飛行。

無論是以橡皮筋纏繞飛杯，或是以飛杯轉繞橡皮筋，杯子的轉向都相同。因此本研究決定採用發射架做為發射工具，所有實驗過程中纏繞方向一致，故以下統稱纏繞。



空中飛杯發射架



飛杯裝設到發射架



原型：拉開長度後發射



使用發射架，調整發射角度



現場器材擺放：使用 iPad 慢速攝影

(四) 橡皮筋的彈性控制

橡皮筋經過數次纏繞拉伸後，橡皮筋變得鬆弛，恐反覆實驗致準度不足。為了做好橡皮筋的彈性控制，我們測量了發射後的橡皮筋長度，做為更換橡皮筋的標準。同一條橡皮筋發射 2 次後，便更換新的橡皮筋。

(五) 以飛杯偏離直線路徑的程度，說明馬格努斯力大小（效果）

從文獻探討發現「馬格努斯效應」會使得旋轉飛杯受周邊氣流壓力差影響，產生「馬格努斯力」，進而推動杯子抬升。因此，我們以「旋轉飛杯偏離原有路徑的程度」，表示「馬格努斯力」的大小，旋轉飛杯偏離原有路徑程度越多（飛杯抬升或下降距離長），就表示產生的馬格努斯力越大、旋轉飛杯偏離原有路徑程度越小（飛杯抬升或下降距離短），就表示產生的馬格努斯力越小。

二、探討影響空中飛杯飛行上升高度的因素

從本研究文獻探討得知，球體的轉速越快，產生的反作用力越大、偏移越大（Laurie Winkless, 2022），考量飛杯受橡皮筋彈力作用飛出，在飛行的過程中旋轉，與周圍氣流產生的馬格努斯力，將飛杯往上抬升；然而飛杯轉速是橡皮筋彈力造成，因此我們透過改變橡皮筋的鬆緊與纏繞圈數來了解飛杯受彈力程度（產生馬格努斯力）使其偏移（上升位移）情形的差異。



實驗（一）橡皮筋鬆緊度（拉伸程度）與飛杯上升高度的相關性：

1. 假設：橡皮筋拉伸的長度越長，產生的彈力越強，飛杯上升的高度高。

2. 實驗方法：

(1) 延展橡皮筋：將橡皮筋拉開不同長度，在飛杯中央用橡皮筋纏繞 3 圈後固定位置；

(2) 維持發射仰角：將橡皮筋拉伸後，使用量角器找出與桌面水平夾角 20 度的角度，將飛杯在 20 度角位置向上彈射。

(3) 為了減少橡皮筋彈性疲乏的問題，每做完 2 次的發射，就更換新的橡皮筋。

(4) 使用 iPad 慢速攝影功能拍攝飛杯的運動情形，用 Tracker 軟體進行分析。

(5) 實驗 6 次，去除差異大的極端值後求平均值。

3. 變因控制：

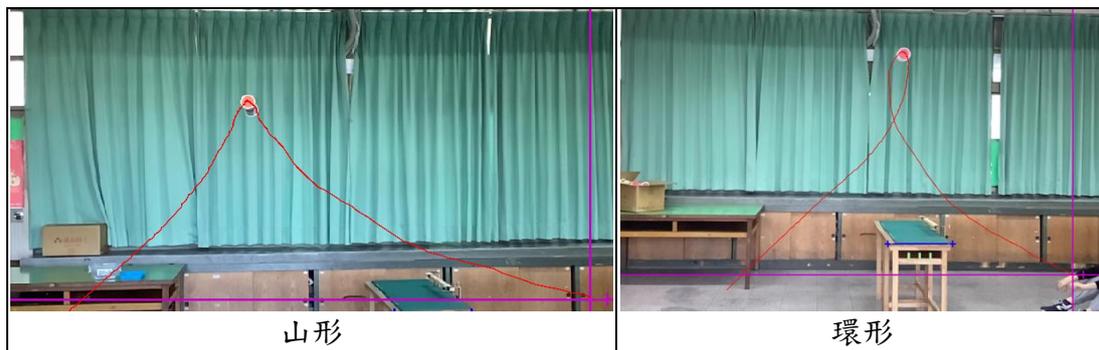
操縱變因	保持不變變因	應變變因
橡皮筋拉開的長度： 61cm、91.5cm、 122cm、152.5cm	橡皮筋：數量 5 條、纏繞飛杯 3 圈。 飛杯：相同紙杯（材質重量與開口大小）、 相同電氣膠帶 發射仰角：20 度 室內：無風狀態	飛行高度

4. 實驗結果：

拉開長度(cm)	61	91.5	122	152.5
上升高度(cm)	76	95	111	127
飛行軌跡	山形	山形	山形	山形、環形

實驗後發現，橡皮筋拉開長度（拉伸程度）增加，飛杯飛行上升高度也增加。

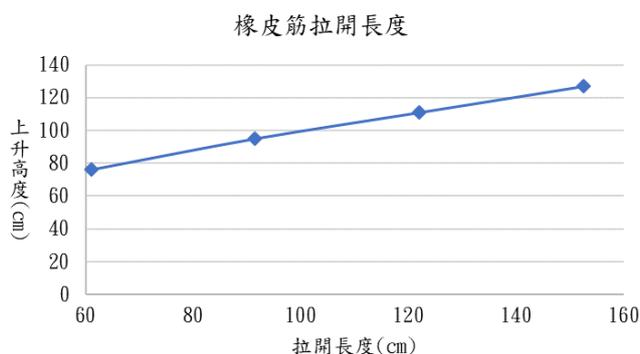
另由於本研究中我們對每種拉伸程度都進行 6 次試驗後取平均值，因此發現第四次（拉開 152.5 公分）的飛行，出現不同的飛行軌跡。



5. 討論：

橡皮筋拉越長，較緊蹦，彈力強，使得飛杯的上升高度增加。

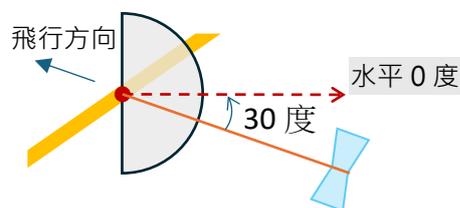
拉伸長度 152.5 公分的飛杯出現 2 種（山形或環形）不同的飛行軌跡。



實驗（二）不同的發射角度與飛杯上升高度的相關性。

1. 假設：發射的角度大，上升的力較大，飛杯上升高度大。

2. 實驗方法：使用大型量角器的 0 度對準發射架木條的溝槽，往下調整成 5 度、15 度、20 度、30 度等不同角度後發射。



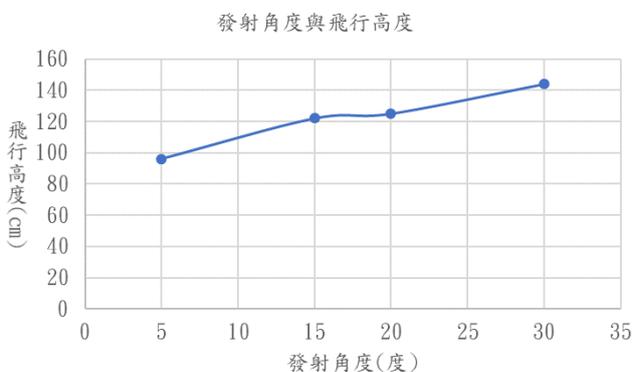
3. 變因控制：

操縱變因	保持不變變因	應變變因
發射角度： 5 度、15 度、20 度、30 度	橡皮筋：5 條、纏繞 3 圈 拉伸長度 152.5cm。 飛杯：紙杯、重量、開口大小、電氣膠帶 室內：無風狀態	上升高度

4. 結果

發射角度(度)	5	15	20	30
上升高度(cm)	96	122	125	144
飛行軌跡	山形	山形	山形	山形 環形

發射角度增加，飛杯上升的高度越高，以發射角 30 度上升最高。發射角 20 度、15 度的飛杯上升高度差距不大，但仍以發射角 20 度的飛杯上升高度略高於 15 度的飛杯。



5. 討論：飛杯以仰角發射時，斜上飛出所受的彈力是往上、往前的力量的總和；我們認為在發射角 30 度時，往上方前進的力量較發射角 5 度、15 度、20 度大，也就是垂直方向的分速度以 30 度角時最大，比 5 度、15 度、20 度角更大程度克服重力下拉，所以飛行的上升高度會最大。

實驗（三）橡皮筋纏繞圈數與飛杯上升高度的相關性：

1. 假設：橡皮筋纏繞飛杯圈數越多，飛得越高。

2. 實驗方法：

考量在上一個實驗中，橡皮筋拉伸越長、飛杯上升高度越高，因此我們在本實驗選擇以上開實驗的最長拉伸程度（152.5cm）進行。

我們將 5 條橡皮筋打結串連成一長條，分別纏繞飛杯 2、3、4、6 圈，使用 iPad 慢速攝影功能拍攝飛杯的運動情形，用 Tracker 軟體進行分析。

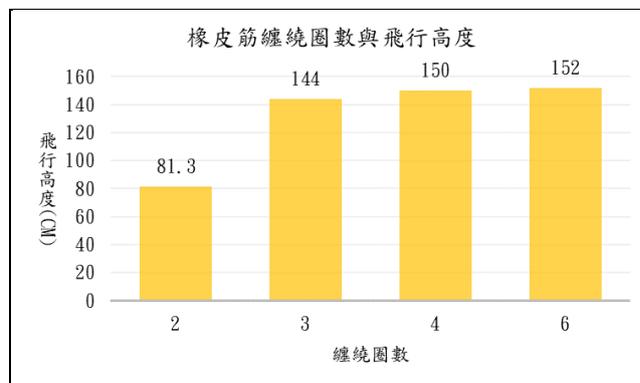
3. 變因控制：

操縱變因	保持不變變因	應變變因
橡皮筋纏繞飛杯的圈數： 2、3、4、6 圈	橡皮筋：數量 5 條。拉伸長度：152.5cm 飛杯：相同紙杯（材質重量與開口大小）、 相同電氣膠帶 發射仰角：30 度 室內：無風狀態	飛行高度

4. 實驗結果：

橡皮筋纏繞的圈數增加，空中飛杯飛行的上升高度也隨著增加。

圈數	2	3	4	6
上升高度(cm)	81.3	144	150	152
飛行軌跡	山形	環形	環形	環形



5. 討論：

飛杯旋轉飛行，橡皮筋纏繞越多圈，越緊繃，對飛杯施的力度越大，上升高度會增加。橡皮筋纏繞的圈數多，飛杯也越容易被固定在發射架上的橡皮筋打到，影響它的飛行。只纏繞 2 圈的飛杯，受到的彈力較小，出現的是山形的飛行軌跡。

實驗（四）飛杯的重量與上升高度的相關性。

1. 假設：杯身重量輕，上升飛行高度會比較高。
2. 實驗方法：

取用 10 個相同的紙杯，進行以下的重量調整：

- (1) 製作原型飛杯：以 2 個相同大小（高度 12.8cm、杯底半徑 3cm、開口半徑 4.5cm）的紙杯製作，所製飛杯重量 27.1 克。
- (2) 製作配重飛杯：分別使用 3 克、6 克、9 克的油黏土固定在 2 個紙杯的底部，再各以膠帶纏繞，分別做出 29.5 克、32.7 克、36.0 克共三種不同重量的飛杯。
- (3) 製作輕質飛杯：再製作一個原型飛杯，製成後再用剪刀剪去飛杯兩側距離開口位置約 3.5 公分的杯緣，製作出減輕重量的飛杯，其重量是 19.9 克。

3. 變因控制

操縱變因	保持不變變因	應變變因
5 種不同重量的飛杯： 19.9 克、27.1 克、29.5 克、 32.7 克、36.0 克	橡皮筋：數量 5 條、纏繞 3 圈。 拉伸長度：纏繞飛杯後所餘長度拉伸為 152.5cm。 發射角度：30 度 飛杯：紙杯、電氣膠帶 室內：無風狀態	飛行高度

4. 結果：

飛杯重量(g)	19.9	27.1	29.5	32.7	36.0
上升高度(cm)	164.7	144	134.3	132.8	116.6
飛行軌跡	山形	環形	山形	山形	山形

實驗結果與假設相符。

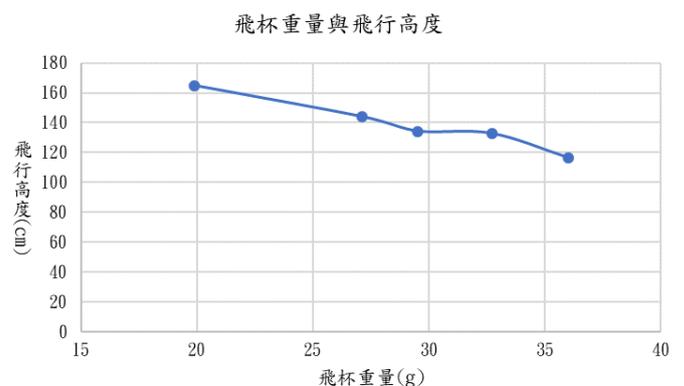
5 種不同重量的飛杯中，以重量最重的 36 克重飛杯，飛行上升高度為 116.6 公分，上升高度最短；最輕的 19.9 克重飛杯，上升高度最高。其餘飛杯則依配重情形，越重的上升高度越短。

5. 討論：透過橡皮筋彈力，將重量輕的飛杯推得較高，而重量重的飛杯飛行上升高度較低。

三、探討影響飛杯飛行距離的因素

實驗（五）不同的發射角度與飛杯水平飛行距離的相關性。

1. 假設：發射角度小，上升的力較小、水平的力較大，可以飛行的距離較遠。
2. 實驗方法：使用大型量角器的 0 度對準發射架木條的溝槽，往下調整成 5 度、10 度、15 度、20 度、30 度等不同發射角度。

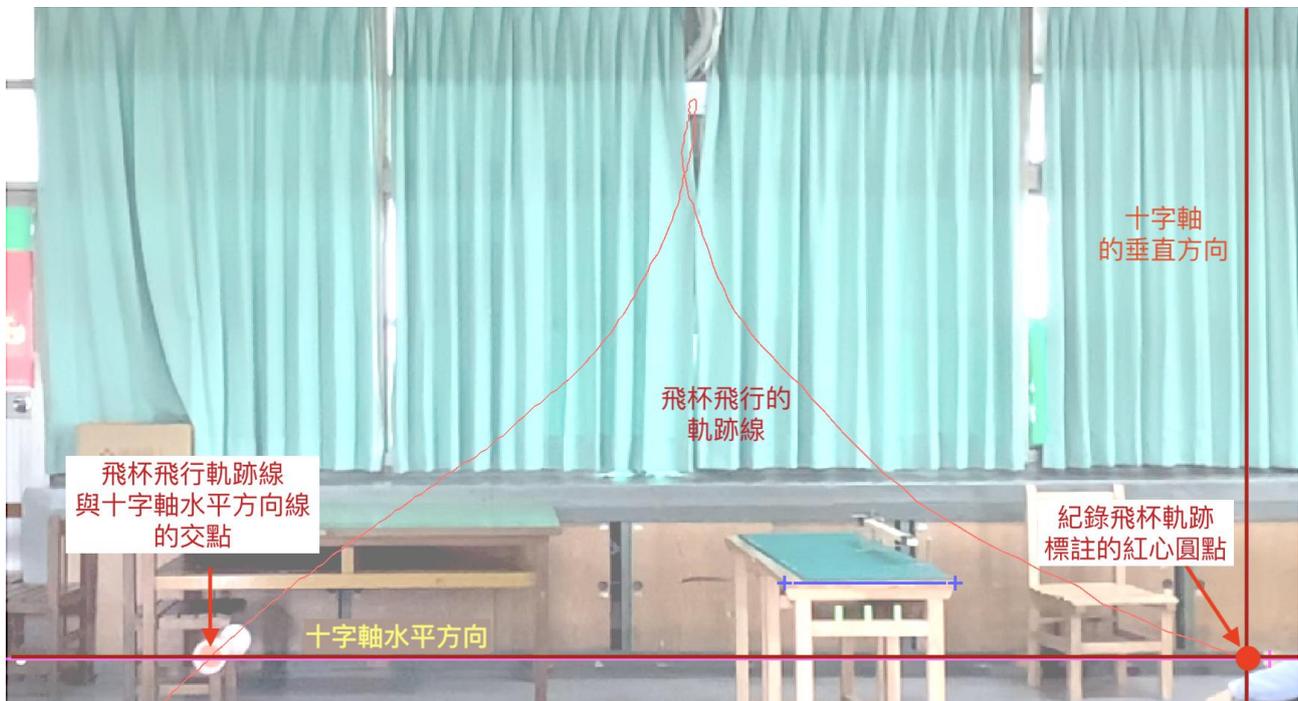


3. 變因控制:

操縱變因	保持不變變因	應變變因
發射角度: 5 度、10 度、15 度、20 度、30 度	橡皮筋: 數量 5 條、纏繞 3 圈。 拉伸長度: 纏繞飛杯後所餘長度拉伸為 152.5cm。 飛杯: 同型紙杯、電氣膠帶 室內: 無風狀態	飛行的水平距離

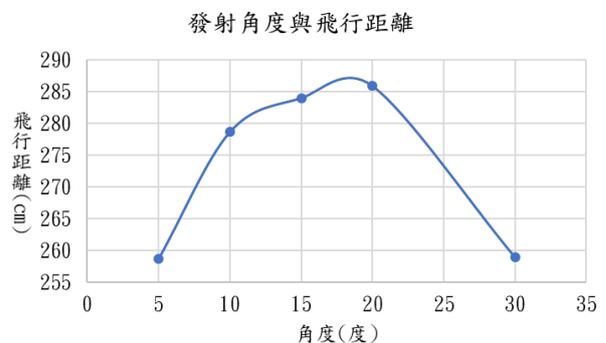
4. 結果

以飛杯紅心圓點做為飛行軌跡的標註，使用 Tracker 追蹤紀錄，標註出發位置，再透過飛杯飛行的軌跡線與十字軸的水平方向線的交叉點，做為飛杯飛行水平距離的終點，起點與終點間的距離就是飛杯飛行的水平距離（如下圖）。



發射角度(度)	5	10	15	20	30
水平飛行距離 (cm)	258.8	278.7	284	285.9	259
飛行軌跡	山形	環形山形	山形	山形環形	環形

實驗結果，飛杯發射角自 5 度、10 度、15 度遞增到 20 度，飛杯水平飛行距離逐漸增長，其中以發射角 20 度的水平飛行距離最遠，但 30 度的飛行水平距離變短，與 5 度相近。



5. 討論：不同發射角射出的飛杯，其水平飛行距離不同；在小角度發射（5 至 20 度）的情形下，發射角變大、水平飛行距離也越大，到了發射角 30 度的飛杯水平飛行距離變短，我們認為可能是因為發射角 30 度時的彈射的垂直分力也變大，使得沒有足夠的水平分力支持水平飛行的距離，使得飛行距離變短。

實驗（六）橡皮筋鬆緊度（拉伸程度）與飛杯水平飛行距離的相關性：

1. 假設：橡皮筋拉伸的長度越長，彈力強，飛杯飛行的距離會越遠。
2. 實驗方法：在飛杯中央纏繞橡皮筋 3 圈，將所餘橡皮筋拉伸不同程度。為了減少橡皮筋彈性疲乏的問題，每做完 2 次的發射，就更換新的橡皮筋。使用 iPad 慢速攝影功能拍攝飛杯的運動情形，用 Tracker 軟體進行分析。
3. 變因控制：

操縱變因	保持不變變因	應變變因
橡皮筋拉伸程度： 橡皮筋拉開 61cm、 91.5cm、122cm、152.5cm	橡皮筋：數量 5 條、纏繞 3 圈。 發射角度：20 度 飛杯：同型紙杯、電氣膠帶 室內：無風狀態	水平飛行距離

4. 結果：

拉開長度(cm)	61	91.5	122	152.5
水平飛行距離 (cm)	220.7	236.9	256.5	249.6
飛行軌跡	山形	山形	山形	山形 環形

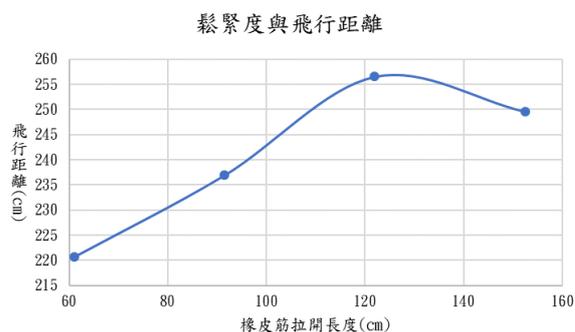
實驗結果，橡皮筋拉開為 122 公分時，水平飛行距離最長，與拉長至 61 公分、91.5 公分相比，橡皮筋拉伸長度越長，水平飛行距離也較長。但在拉伸長度為 152.5 公分時，飛杯的水平飛行距離變短。

5. 討論：

橡皮筋拉伸程度越長，飛杯的水平飛行距離越長；但是在橡皮筋拉長到極限長度時，飛杯的水平飛行距離卻變短了，我們認為，可能在橡皮筋的拉伸長度極限，已經到達該橡皮筋的彈性極限，使得橡皮筋過於緊繃，因為彈性降低，造成彈力能量無法獲得有效儲存，以致也無法做出能量的有效釋放，因此使得飛杯的水平飛行距離無法再增加，反而變短。

實驗（七）橡皮筋串連的總長度的飛杯與水平飛行距離的相關性。

1. 假設：橡皮筋條數串連的數量少，總長度短，橡皮筋較緊繃，張力大，飛行距離較遠
2. 方法：使用 2 條、3 條、4 條、5 條不同數量的橡皮筋串連出不同的長度，在發射前測量橡皮筋實際拉伸的長度。在前一個不同角度的實驗中，角度 20 度發射的飛行距離最遠，



所以我們採用 20 度來作為發射飛杯的角度。串連 2 條的橡皮筋拉不到 152.5 公分，所以拉伸長度改成 91.5 公分。

3. 變因控制：

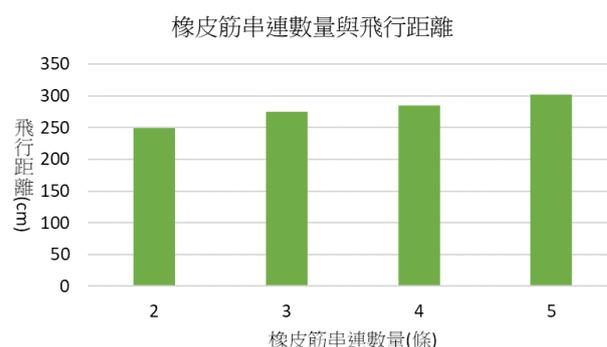
操縱變因	保持不變變因	應變變因
橡皮筋串連後總長度： 27.3 公分、54 公分、 70.8 公分、78.3 公分	橡皮筋：纏繞 3 圈。 拉伸長度：纏繞飛杯後所餘長度拉伸為 91.5cm。 發射角度：20 度 飛杯：同型紙杯、電氣膠帶 室內：無風狀態	水平飛行距離

4. 結果

橡皮筋數量(條)	2	3	4	5
橡皮筋串連後總長(cm)	27.3	54	70.8	78.3
飛行距離(cm)	249.3	274.5	284.4	302.3
飛行軌跡	山形	山形	山形	山形

實驗結果與假設不符。

橡皮筋串連長度最長的情形下，飛杯的水平飛行距離最遠，可達 302.3cm；橡皮筋串連長度最短時，飛杯的飛行水平距離也最短。



5. 討論：

將橡皮筋串連成不同的長度，用來發射飛杯，在纏繞飛杯 3 圈後，以串連總長度最短的橡皮筋所剩餘的橡皮筋長度最短；而當我們將每種串連總長所餘橡皮筋的發射長度都一致拉長到 91.5 公分時，串連總長最短的橡皮筋，剩餘橡皮筋長度最短，緊繃狀態下、彈性也受限，因此作用在飛杯的彈力不足，使得水平飛行距離短；相反的，串連總長度長，所餘橡皮筋長度長，有足夠的彈力彈射飛杯，彈射出去的力較大，水平飛行距離就比較遠。

實驗（八）飛杯的重量與水平飛行距離的相關性。

1. 假設：重量輕的飛杯飛得較遠。
2. 實驗方法：使用實驗（四）的配重方式，將飛杯配重成 19.8 克、26.6 克、29.4 克、32.4 克、36.0 克共計 5 種不同的類型。每種飛杯都纏繞橡皮筋 3 圈，纏繞飛杯後所餘橡皮筋長度拉伸到 152.5cm 後，發射飛杯，比較飛杯飛行的水平距離。

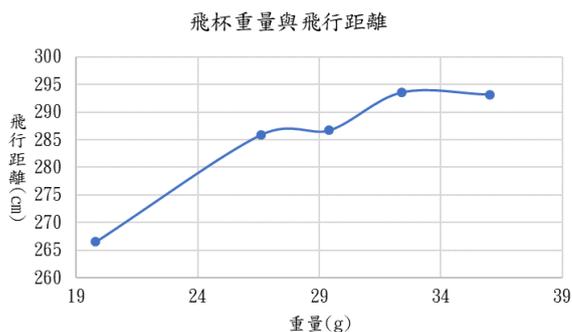
3. 變因控制

操縱變因	保持不變變因	應變變因
飛杯的重量： 19.8 克、26.6 克、29.4 克、 32.4 克、36.0 克	橡皮筋：數量 5 條、纏繞 3 圈。 拉伸長度：纏繞飛杯後所餘長度拉伸為 152.5cm。 發射角度：20 度 飛杯：同型紙杯、電氣膠帶 室內：無風狀態	飛行的水平距離

4. 結果

飛杯重量(g)	19.8	26.6	29.4	32.4	36.0
水平飛行距離(cm)	266.5	285.9	286.7	293.6	293.2
飛行軌跡	山偏 尖形	山形	山形	山形	山形

與假設不符合假設。飛杯重量增加，飛行距離也增加。增重 9g 與 6g 飛行距離差異不大。



5. 討論:

重量重的飛杯會受到重力影響，飛行高度較低，但往前飛行的水平距離較遠；重量輕的飛杯，往下的力較小，飛行高度高，但水平飛行距離較短。

我們認為，重量重的物體動能較大（就像汽車的動能就比腳踏車大，被汽車撞到的傷害程度遠大於被腳踏車撞到的情形），因此重量較重的飛杯動能較大，更能抵抗迎風面的空氣阻力，因此能維持較高的速度，可以飛得更遠；相反的，重量輕的飛杯動能小，容易被空氣阻力減速，飛行距離較短。

實驗（九）飛杯的開口形狀不同與水平飛行距離的相關性。

1. 假設：圓形的飛杯，飛行距離較遠，其它多邊形的飛行距離較短。
2. 實驗方法：將飛杯的開口做成圓形、六芒星形、正方形、三角形等不同的開口造型，比較水平的飛行距離。
3. 變因控制：

操縱變因	保持不變變因	應變變因
不同開口形狀： 圓形、六芒星形、 正方形、三角形	橡皮筋：數量 5 條、纏繞 3 圈。 拉伸長：纏繞飛杯後所餘長度拉伸為 152.5cm。 發射角度：20 度。 飛杯：同型紙杯、電氣膠帶。 室內：無風狀態。	飛行的水平距離

4. 結果

開口形狀	圓形	六芒星形	正方形	三角形
飛行距離(cm)	285.9	191.6	259.7	256.9
飛行軌跡	山形	山形	山形	山形



六芒星形開口的飛杯水平飛行距離最短，飛行時不穩定。圓形開口的飛杯飛得最遠。正方形與三角形開口飛行距離差異不大。

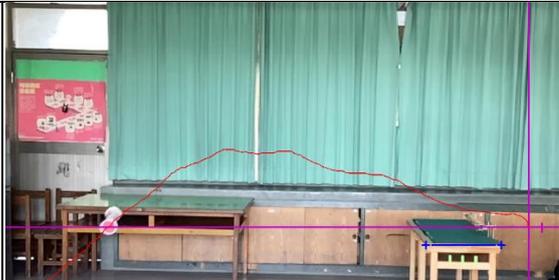
5. 討論：

飛杯原型是圓形開口，沒有外凸的角，而六芒星形是凹多邊形，外凸的角較多；相比而言，六芒星形開口的飛杯在飛行過程中，在其周圍的空氣流動較不均勻，使得飛杯受到的風阻大，自然造成飛行不穩定，能飛行的距離就變短了。

因此，與圓形開口的飛杯相比，其他形狀（如六芒星形、正方形、三角形）開口的飛杯可能會因為周圍空氣流動不穩定，產生較大的阻力，從而減少飛行距離。

四、探討空中飛杯的飛行軌跡

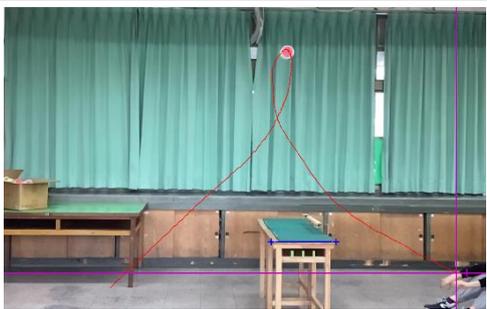
經過了上述的飛杯實驗，搜集了有關飛杯飛行軌跡資料與照片，整理如下：

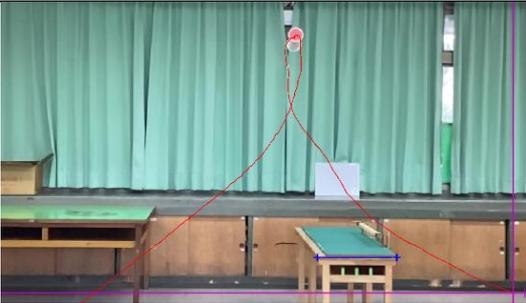
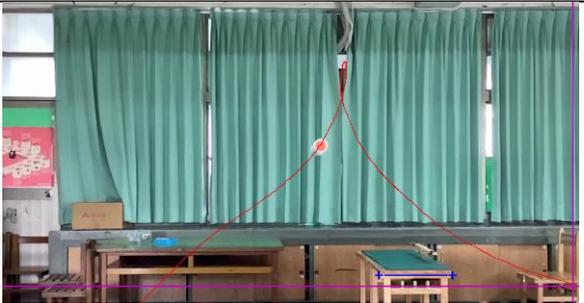
實況照片		
軌跡形狀	拱形	拱形
橡皮筋數	2	2
拉開長度	91.5	91.5
纏繞圈數	3	3
角度	20	20

在橡皮筋串連數量 2 條，拉開長度 91.5，角度 20 度時，向上的升力較弱，爬升的高度不高，出現較平緩的拱形飛行軌跡。

實況照片		
軌跡形狀	山形	山形
橡皮筋數	5	5
拉開長度	152.5	152.5
纏繞圈數	3	3
角度	10	10

山形軌跡最常見，有的頂端較平緩，有的較尖。

實況照片		
軌跡形狀	環形	環形
橡皮筋數	5	5
拉開長度	152.5	152.5
纏繞圈數	4	3
角度	30	10

實況照片		
軌跡形狀	環形	環形
橡皮筋數	6	5
拉開長度	152.5	152.5
纏繞圈數	3	3
角度	30	20

環形軌跡出現情形是在發射角度 10 度、20 度、30 度時，橡皮筋纏繞圈數 3 圈時會開始有環形的跡象，纏繞圈數在 4 圈以上，環形的圓越大越明顯。

伍、 結論

- 一、橡皮筋的拉開長度與纏繞圈數、發射角度、紙杯重量都會影響飛杯的飛行高度。如果要讓飛杯飛行的上升高度高，可以加強橡皮筋拉開時的緊度、減輕飛杯的重量、向上的發射角度大、杯口平整，飛杯飛行的上升高度可以較高。
- 二、橡皮筋的拉開長度與串聯數量、發射角度、紙杯重量都會影響飛杯飛行的水平距離。想要讓飛杯飛行的水平距離遠，要讓橡皮筋的鬆緊度適中（不能達到彈性極限），發射角不能太大，紙杯要有一定的重量、不能太輕，飛杯開口形狀圓形，可以增加飛行的水平距離。
- 三、研究中使用的橡皮筋彈性極限不同，使得飛杯受到的彈力有差異，改變了飛杯飛行的速度，因而影響了飛杯飛行的上升高度和水平距離。
- 四、本研究中重量輕的飛杯上升高度高，但水平飛行距離短；反之，重量重的飛杯飛行的上升高度低，水平飛行的距離較遠。
- 五、本研究中飛杯飛行的軌跡可以分成拱形、山形、環形，以山形出現的次數最多。環形的軌跡在橡皮筋纏繞圈數多、彈力大時出現，以角度 30 度時最容易發生。

陸、 參考文獻資料

- 一、Laurie Winkless, 2022。黏黏滑滑，摩擦力與表面科學的秘密。晨星出版。
- 二、The physics of Magnus gliders, American Journal of Physics, 第 89 卷，第 9 期，2021 年 9 月。
- 三、高中選修物理(I)全，民 111 年，龍騰文化出版。
- 四、Britannica, 物理，馬格努斯效應。<https://www.britannica.com/science/Magnus-effect>
- 五、Fizzics.org, 馬格努斯效應，彎曲球的解釋（The magnus effect – a curved ball explained）https://www.fizzics.org/the-magnus-effect-notes-and-video/#google_vignette
- 六、<https://byjus.com/jee/magnus-effect/>。馬格奴斯效應