

# 中華民國第 55 屆中小學科學展覽會

## 作品說明書

---

國小組 生活與應用科學科

佳作

080811

臨風「愈速」—馬格努斯風力車之探究

學校名稱：臺南市永康區崑山國民小學

作者：	指導老師：
小六 周秉陞	沈聰男
小六 張庭梧	楊栢青
小六 毛筠茜	
小六 莊朝宗	

關鍵詞：馬格努斯效應、氣壓差、環流

## 摘要

馬格努斯效應是一種原理簡單，廣泛應用在球類運動以及日常生活中的物理現象。透過馬格努斯風力車的探究過程，我們理解到：除了風速和滾筒轉速之外，滾筒本身的表面積、造型、質量、表面摩擦力、傾斜角、受風角…等都是影響馬格努斯風力車動力性能的重要因素。此外，在提升馬格努斯風力車動力性能的實驗方面，「單一馬達帶動多滾筒」以及「前側導流翼」的裝設都是相當可行的設計方案。

## 壹、研究動機

爲了一年一度的科展盛會，大家從學期初就開始拚命上 YOUTUBE 網站搜尋一些有趣的科學題材，希望能從中獲得一些「天啓」。幾經搜尋，就在其中發現了一小段很有趣的影片。影片中的主持人手上拿著一輛造型可愛的玩具車，車尾掛著一個馬達帶動旋轉的玩具檸檬。當主持人打開馬達電源之後，玩具檸檬開始高速旋轉，只見主持人輕輕的朝著玩具車的側面（而不是朝後面）吹氣，玩具車居然開始前進了… 這個現象是自然老師在課堂上從沒介紹過的，上網查詢才知道原來這個有趣的物理現象也是應用在伸卡球、香蕉球的原理－馬格努斯效應（The Magnus Effect）。不過，在瞭解它的基本原理之後，心裡頭反而有更多未解的疑惑。知識不求人，大家決定一起動手來探究！



圖一、馬格努斯風力玩具車的運動畫面

(取材自 <https://www.youtube.com/watch?v=Fk2xU8pEIII>)

## 貳、研究目的

- 一. 能自製模型及改良實驗平台，進行馬格努斯風力車各種可能變因的探討。
- 二. 探討滾筒高度對於馬格努斯風力車的影響。
- 三. 探討滾筒直徑對於馬格努斯風力車的影響。
- 四. 探討等條件因素下，細長或寬扁外型的滾筒何者較符合馬格努斯風力車的空氣動力？
- 五. 探討其它形狀的圓切面體滾筒會有什麼樣的推進效果？會不會比傳統的圓柱型滾筒更好？
- 六. 探討滾筒質量對於馬格努斯風力車的影響。
- 七. 探討滾筒傾斜角對於馬格努斯風力車的影響。
- 八. 探討滾筒表面摩擦力對於馬格努斯風力車的影響。
- 九. 探討風向角度對於馬格努斯風力車的影響。
- 十. 嘗試藉由增加滾筒數量來改善馬格努斯風力車的動力表現。
- 十一. 嘗試藉由改變滾筒結構的方法來改善馬格努斯風力車的動力表現。
- 十二. 嘗試藉由外加空力組件的方法來改善馬格努斯風力車的動力表現。

## 參、研究設備、器材

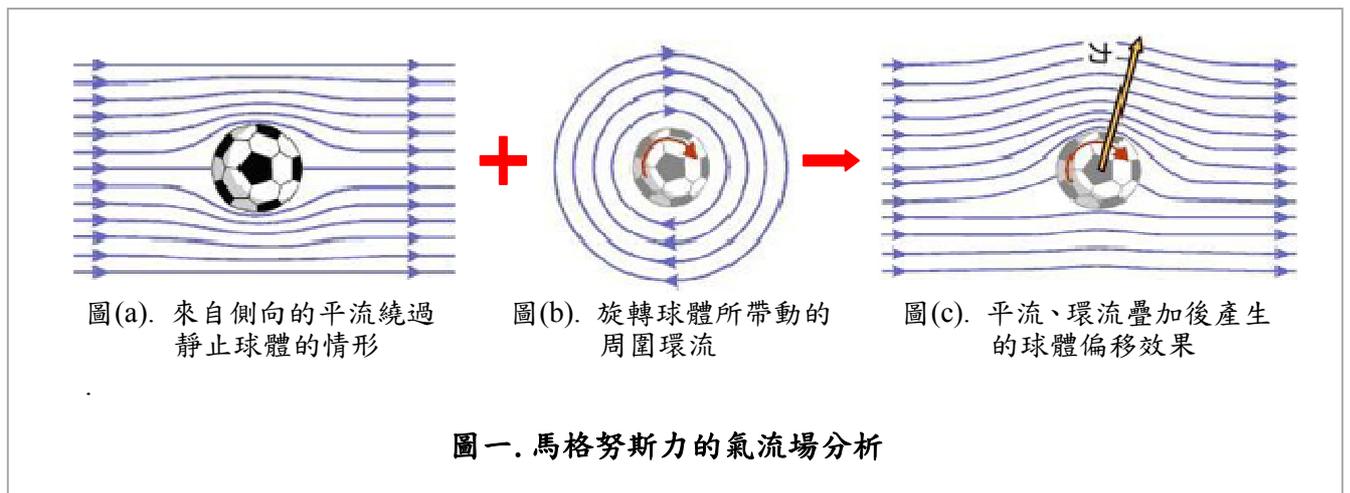
品項	數量	規格/型式	用途
一. 實驗平台：			
角鋼架	1	H 型	實驗平台的支撐結構
鋁尺	2	60cm	作為同步攝影車的滑軌
壓克力板	1	70cm	作為實驗車的跑道
定滑輪	3	-	補償拉力之傳動
砝碼	-	2gw	提供補償拉力
水平儀	1	-	測量跑道及滑軌水平狀態
量角器	1	-	測量滾筒傾斜角
二. 實驗車：			
教具小車	1	方格型	實驗車車身
保麗龍柱(錐)	-	多種造型	做為滾筒
小馬達	1	3V	帶動滾筒
馬達調速器	1	5V~18V	調整馬達轉速
塑膠支架	2	-	固定滾筒轉軸，抑制滾筒劇烈晃動

直流電源	1	30V×5A	實驗車馬達供電
各式砝碼	-	1gw、2gw	車身或滾筒配重用
三. 同步監測攝影車：			
教具小車	1	圓孔型	攝影車車身
機車用行車記錄器	1	迷你型	動態攝影及檔案錄製
轉速計	1	-	監測滾筒轉速
微壓差計	1	50pa	監測滾筒高低壓側壓差
矽膠軟管	1	內徑 4mm	傳送滾筒高低壓側氣壓變化資料
四. 模擬風力場：			
風扇陣列	4×2	24V 直流	提供穩定風力
吸管	很多	-	出風口簡易整流
直流電源	1	24V×6A	風扇陣列供電
風速計	1	-	監測風速
實驗支架台	4		改裝成風扇底座
五. 應用程式及軟體：			
Avidemux 影像處理程式	1		影像處理、數據的精確分析
Microsoft Excel	1		數據統計及製成圖表

## 肆、研究過程

### 一. 相關文獻探討：

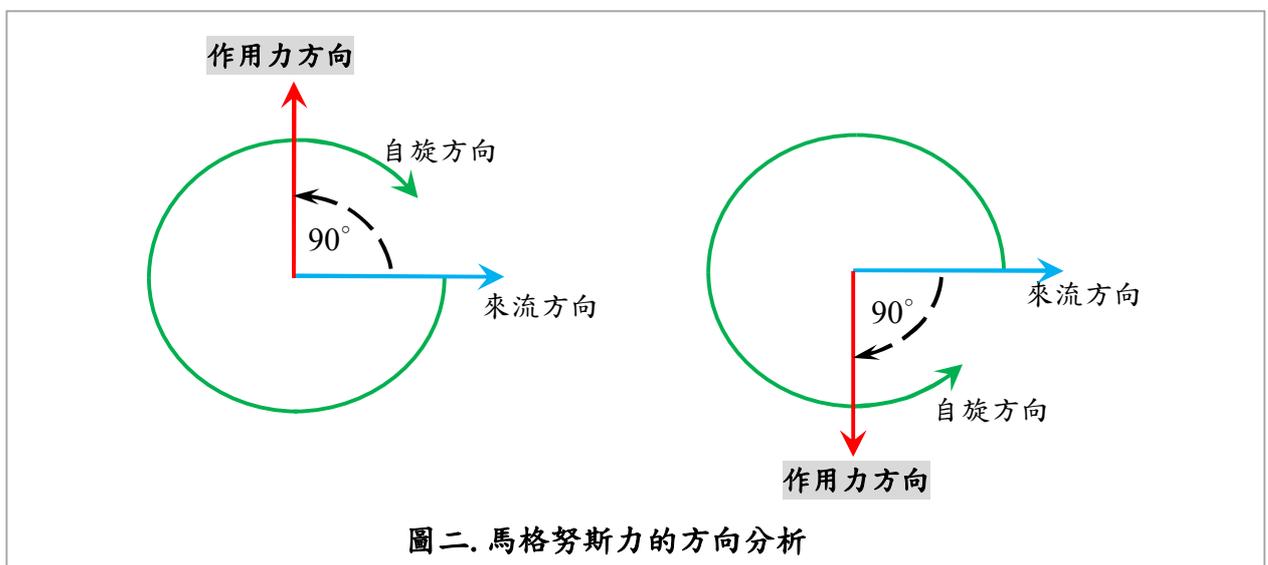
- (一) 從六上自然與生活科技第一單元「天氣的變化」課程中，我們瞭解到：風的形成來自於空氣的流動，而空氣的流動則是由於地表受熱不均，使得同一水平面上產生了氣壓差異，這樣的氣壓差異促使大氣由高氣壓區流向低氣壓區，進而形成了「風」；而風勢的強弱取決於同一水平面上的「氣壓梯度」，梯度越大，風勢越強。
- (二) 馬格努斯效應 (Magnus Effect)，是一種流體力學當中常見的現象。此效應說明：當一個旋轉中的物體（如球或圓柱體）受到來自側向的氣流作用時，物體的旋轉帶動了周圍氣流旋轉，使得氣流環繞在物體周圍的速度分布將會發生變化。如下圖(c)所示，一個順時針旋轉的物體上半部順著氣流的方向轉動，加快了氣流的速度；而下半部則逆向頂著氣流的方向轉動，減緩了氣流的速度。依據伯努利定理，氣流速度的減緩將導致壓力強度的增加，反之將導致壓力強度的降低。如此一來，這個旋轉物體在垂直於氣流場的方向就產生了壓力差，形成一股橫向力，稱之為「馬格努斯效應力」。



(三) 如上圖(a)所示：當球體處於靜止或平動的狀態，來自側向的平流繞過球體後，流線仍成現上下、左右對稱的分布，球體不會有漂移的情形。但若此時讓球體開始在氣流中旋轉（如圖 b），由於彼此之間存在摩擦力，氣流便會在球體周圍形成同心圓環的流線分布。馬格努斯效應便是(a)(b)兩種情形疊加後所產生的偏移效果。

(四) 分析馬格努斯力的作用方向：

1. 先確認氣流場的來流方向，並以大拇指表示。
2. 再確認球體（或圓柱體）的自旋方向。
3. 由來流方向朝球體（或圓柱體）自旋方向逆轉  $90^\circ$ ，所指方向即為馬格努斯力的方向。



(五) 馬格努斯效應的研究價值及應用：

由於滾筒的轉動需要電力的供輸，馬格努斯載具並非完全綠能的裝置，但許多研究都指出，馬格努斯載具是一種非常高效率的節能裝置。自從七〇年代石油危機爆發以來，馬格努斯裝置的研究逐漸受到科學界的重視；目前廣泛運用在地面風力發電、高空風力發電、滑翔機、沙灘車、輪船等新型載具研發以及新型船舵、螺旋槳之設計等領域。

## 二. 決定探究的方向：

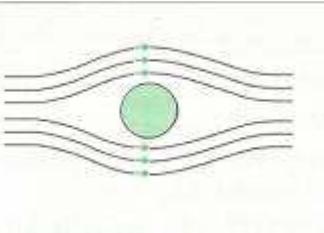
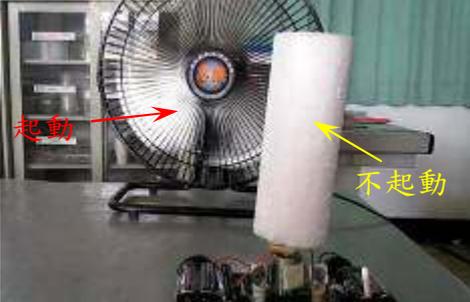
經過文獻資料的蒐整和分析之後，我們發現，所有的研究都指出：馬格努斯載具的推進力(或升力)是來自於滾筒自轉速度以及風力強度兩者之間的交互作用結果；風力愈強或者滾筒轉速愈快，推進力就愈大，這是無庸置疑的。我們因此認為：若實驗再設計「風力強度」、「滾筒轉速」這兩項已知的變因，也只不過是驗證前人的發現罷了，並沒有太大實質的意義，倒不如將探討的方向聚焦在一些文獻資料較少觸及的問題點上，對於觀念的釐清反而有些許幫助。

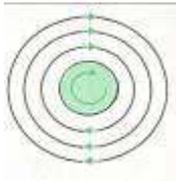
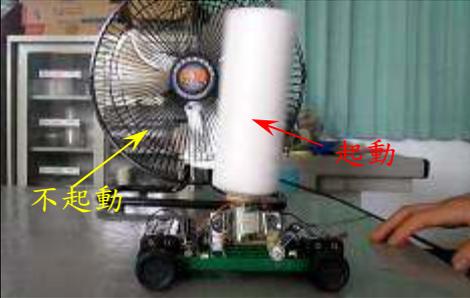
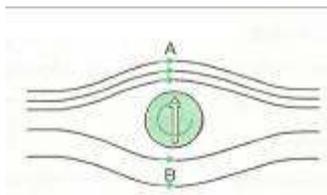
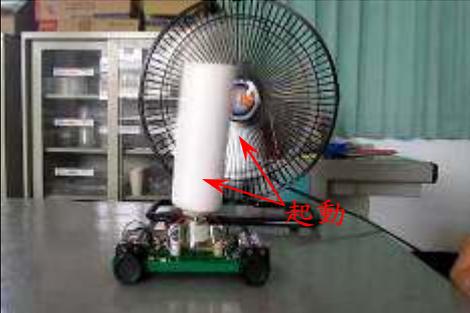
## 三. 有待釐清的問題點：

- (一) 針對所收集的文獻資料進行歸納，發現馬格努斯載具(車、船)的滾筒造型有的寬扁、有的細長，甚至有葉片型的，究竟哪一種造型比較符合空氣力學？
- (二) 馬格努斯效應的探討都是圍繞著球或圓柱體，就連絕大多數馬格努斯載具的滾筒也都是正圓柱造型，但正圓柱滾筒真的是最好的嗎？其它形狀的圓切面體滾筒會產生什麼樣的效果？
- (三) 載具的滾筒都是豎直的，前傾或後仰少許角度，效果會不會更好？
- (四) 文獻或影音資料顯示的風向都是垂直於載具軸線的，如果風向來自載具的斜前方或斜後方，它還能正常運動嗎？
- (五) 在固定的馬達輸出功率、載具總重量的情況下，滾筒質量是愈重愈好，還是愈輕愈好？
- (六) 增加滾筒的表面摩擦力對於載具的動力性能是否有幫助？
- (七) 在固定的馬達輸出功率下，可不可能藉由其它一些物理或結構方式的改變來進行載具動力性能的提升？

## 四. 初步試作與觀察：

- (一) 在教室找一台教具小車，裝上小馬達和電池，就可以完成「陽春版」的馬格努斯風力車。

初步測試	對應的氣流狀態	測試結果
(a) 僅開啟風扇 不起動滾筒	僅風扇輸出之側向氣流繞過靜止的滾筒 	小車紋風不動 

<p>(b) 僅起動滾筒 不開啟風扇</p>	<p>滾筒自轉，僅帶動滾筒周圍環流</p> 	<p>無法前進，或車身跳動而寸進</p> 
<p>(c) 滾筒、風扇 同時起動</p>	<p>風扇之側向平流與滾筒周圍環流開始產生交互作用 A、B 兩點間出現壓力差</p> 	<p>小車真的開始緩緩前進囉…</p> 

圖三(a)~(c). 「陽春版」馬格努斯車的初步測試

(二) 看到自製小車能和文獻資料所說的一樣緩緩推進，心裡頭真的很開心！不過，科學探究可不是能讓小車跑跑就好，還必須把運動過程和數據精確量化才可以。從我們的初步測試中，便發現後續還有一大堆問題須要去解決，例如：

1. 一旦脫離風扇的氣流場，小車馬上就停下來了，又不能拿著風扇跟在車後跑，要怎樣才能提供小車充足且持續的風力？
2. 一般電風扇輸出的氣流是螺旋式且非連續的，這樣的氣流品質適不適合我們的實驗？
3. 車身過輕，風速若是超過 2.5 公尺/秒，就會把車身向外推，造成卡輪或側偏情形，小車底盤可能須要配重，才能和風速匹配。
4. 滾筒在高轉速下一路搖晃，車身跳動且運動軌跡不規律，滾筒的穩定性和車輪摩擦力都要進一步調整，否則實驗的再現性可能會很差。
5. 由於實驗平台有尺寸的限制，實驗車的測速距離將會很短。如果用手操作碼錶，誤差一定很大，而學校又沒有光電計時器這種昂貴的實驗設備，如何用最經濟的方法達成精確計時？
6. 如果在桌旁架攝影機，利用捕捉實驗車的動態影像來分析車速，也會有很大的視角誤差，還是無法精確計時。
7. 陽春車本身的移動就不快了，如果車身再加上一些實驗所需的器材或零件、配重，勢必會跑不動，那實驗要怎麼進行呢？

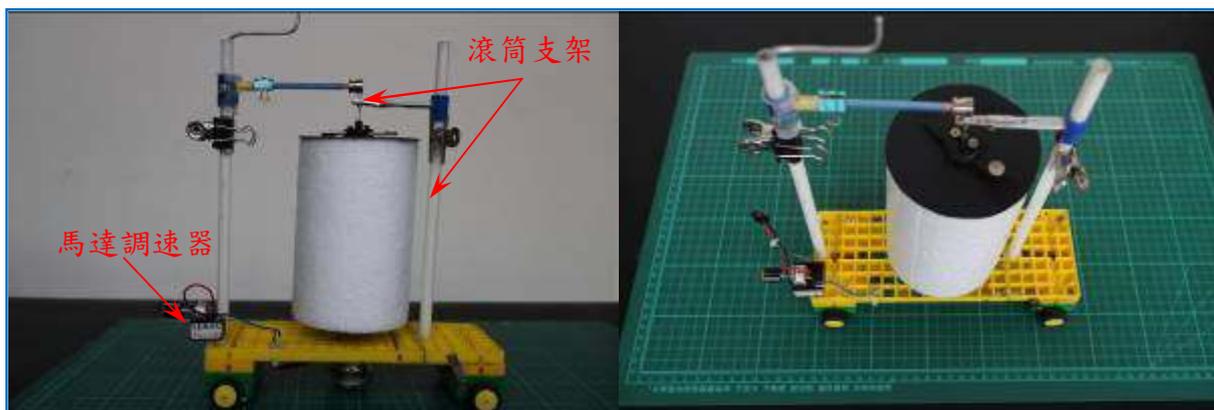
## 五. 實驗平台構想與組裝：

針對上述的困難點，我們著手進行了實驗平台的改良設計和組裝，完成的實驗平台由實驗

車、監測攝影車、模擬風力場（風扇陣列）、H 形測試台四個部分構成，分述如下：

1. **實驗車**：如下圖四.所示

- (1) 小馬達的供電由電池改成直流穩壓電源驅動，並加裝馬達轉速調整器，可調整輸入電壓和滾筒轉速。並在馬達、底盤接合面加裝橡膠墊片，抑制車身的震動。
- (2) 滾筒頂部改良成軸承式，並以軸承支架穩固，避免滾筒因晃動而影響實驗結果。
- (3) 滾筒底部軸心採用強力磁鐵吸附馬達轉盤，可快速更換各型滾筒。
- (4) 車身小方格可用來放置配重用的砝碼，使組內各實驗車的車重能保持均等。
- (5) 滾筒高低壓兩側有軟管支架，用來固定微氣壓計軟管。
- (6) 有一支小連桿，使上下兩車連動。

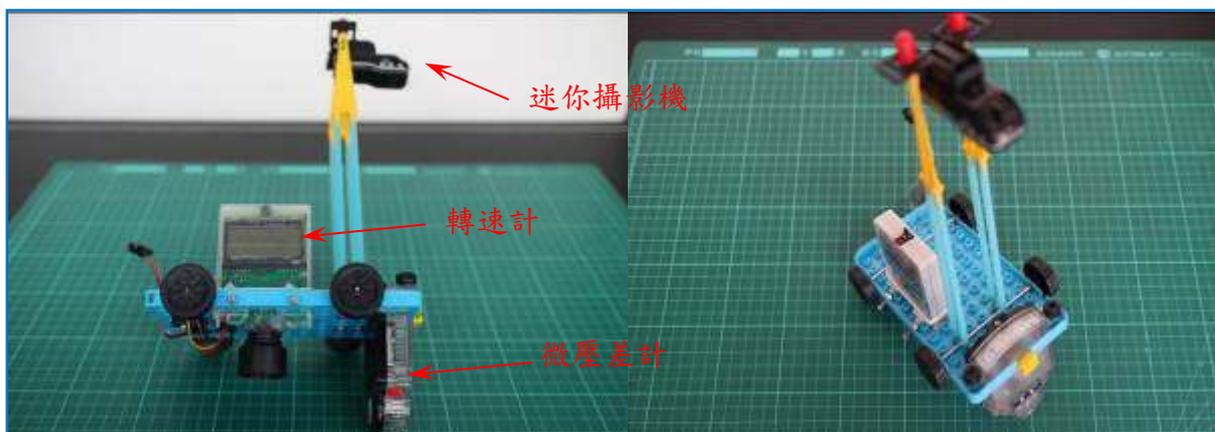


圖四(a). 實驗車(側視)

圖四(b). 實驗車(俯視)

2. **監測攝影車**：如下圖五.所示

- (1) 搭載迷你攝影機、轉速計、微氣壓計各一具。
- (2) 搭配 Avidemux 影像剪輯軟體進行數據分析，可以近距離捕捉實驗車精準清晰的運動畫面，實現同步化的高速攝影(精確度可達小數點以下兩位數)。
- (3) 拆下轉速計電路板，改裝成輕量化轉速計，避免車身過重。
- (4) 滾筒兩側氣壓差可動態顯示（但 50 Pa 測量範圍還是過大，解析度不太好）。



圖五(a). 監測攝影車(側視)

圖五(b). 監測攝影車(俯視)

3. **風扇陣列**：如下圖六.所示

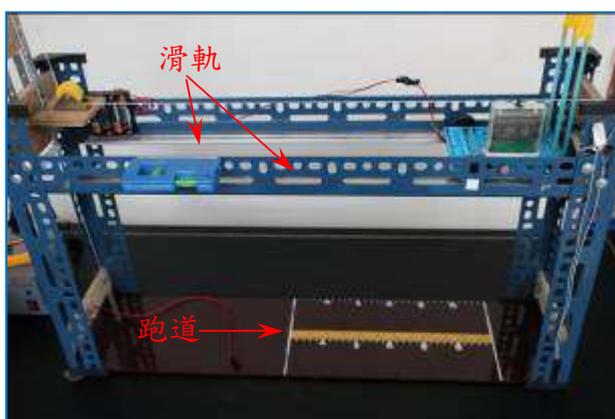
- (1) 隨跑道長度配置，風力可持續供輸，不必跟著車移動。
- (2) 用吸管組裝成簡易整流器，讓氣流平穩化。
- (3) 氣流角度可調整（約  $45^{\circ}$  ~  $135^{\circ}$  ），風口距離固定為 20 公分，風速 3.0 公尺/秒。



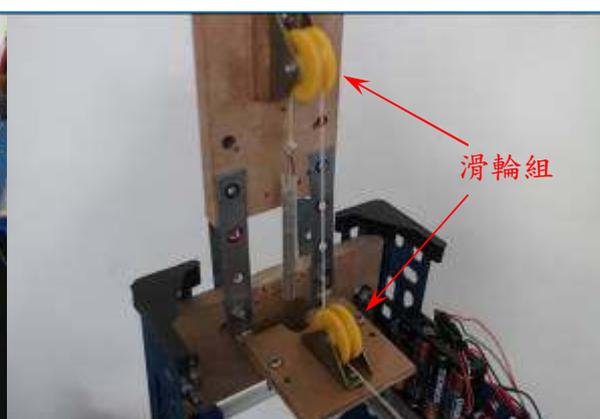
圖六. 風扇陣列

4. **H形測試台**：如下圖七.所示

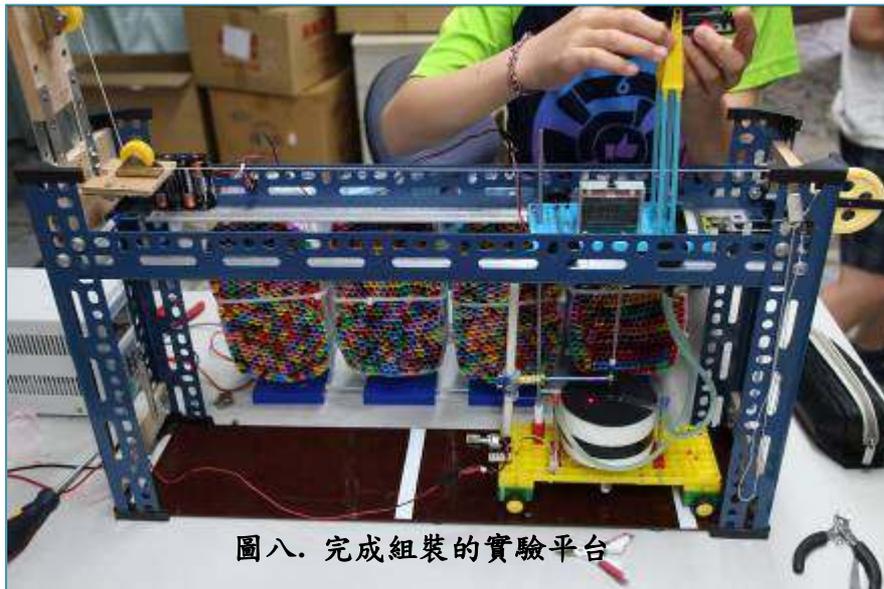
- (1) 下層是壓克力跑道，供實驗車運動；上層有兩條滑軌，供監測攝影車監控實驗車數據及同步攝影。
- (2) 因實驗車和攝影車是連動的，所以上層的滑軌也可以有效抑制下層實驗車運動時軌跡的偏移，使實驗車儘量保持直線前進，降低實驗誤差。
- (3) 運用古代「桔槔」的省力原理，由三個定滑輪、一個平衡錘組成補償拉力機構，可提供恆定的拉力，抵消實驗車因滑輪摩擦、自身配件或推動攝影車等負載所需的額外出力，降低實驗車的起動門檻。
- (4) 配置水平儀，確保實驗車的水平運動。



圖七(a). H形測試台

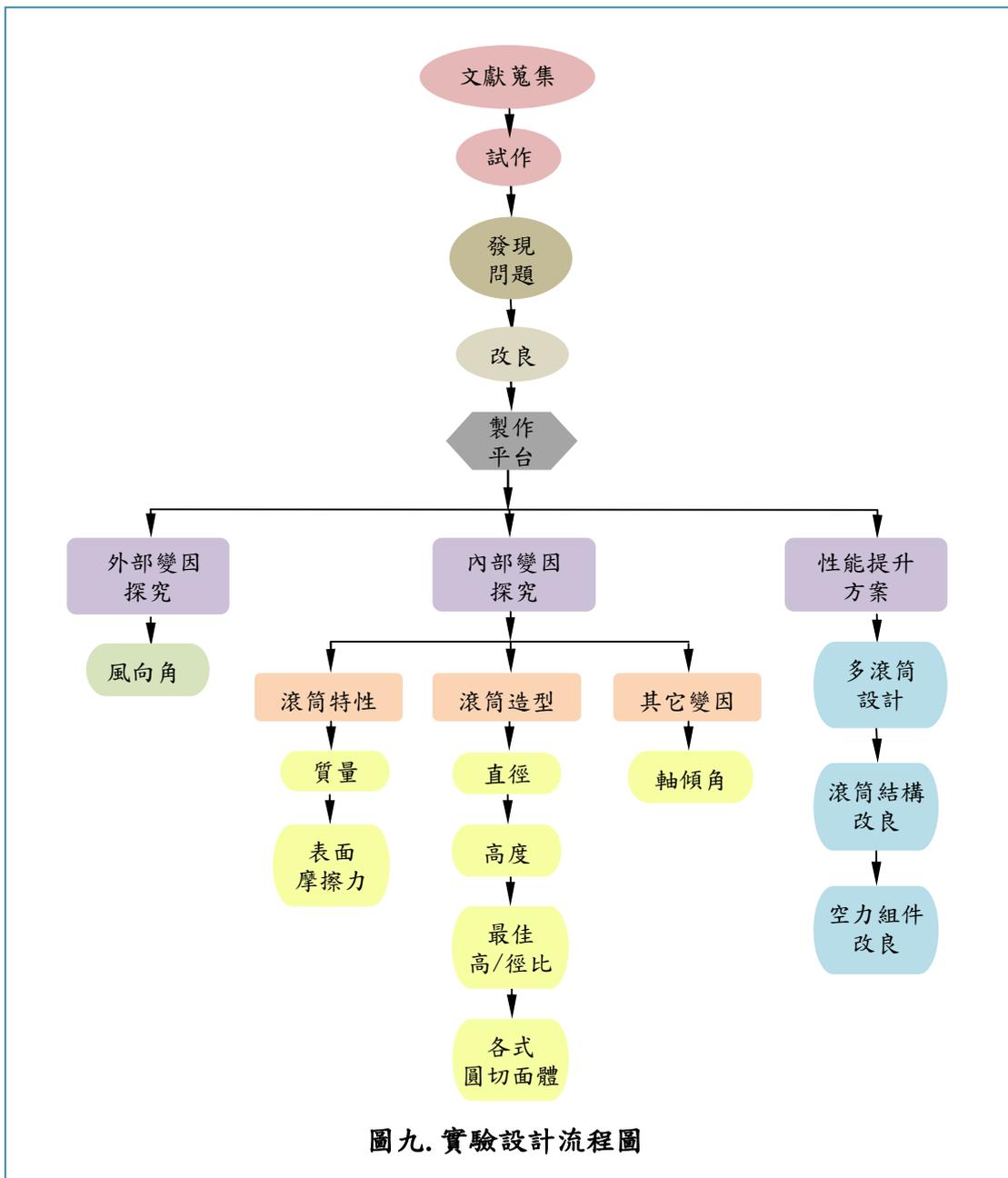


圖七(b). 補償拉力系統



圖八. 完成組裝的實驗平台

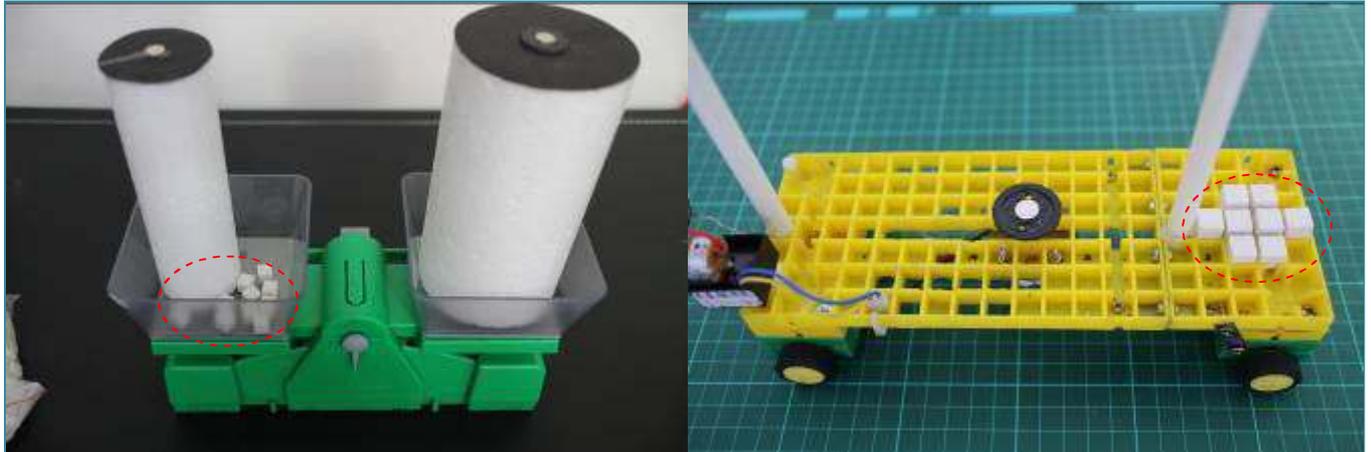
六. 實驗流程：



圖九. 實驗設計流程圖

## 七. 實驗設計：

1. 實驗前要關閉室內門窗和電扇，以免額外的氣流干擾實驗結果。
2. 不同規格的滾筒具有不同的質量，而滾筒質量的差異會同時影響滾筒轉速和實驗車運動速度。所以實驗前要先進行滾筒的配重，這樣就可以讓各組滾筒質量和車身質量總保持一致性。
3. 如果各組滾筒質量是相同的，但因加裝配件(如支架、導流翼等)造成車身總質量不一致，就必須利用車身的小方格先進行車身配重。



圖十(a). 滾筒配重~利用天平教具測得滾筒質量差(砝碼數)

圖十(b). 車身配重~小方格放置砝碼

4. 輔助拉力可視實驗車的組件重量進行微調，調整的原則如下：
  - (1) 調整電源輸出的電流和電壓，使滾筒轉動，先確定實驗車在滾筒自轉和風力條件下能自行啓動並前進。
  - (2) 將起動的實驗車連結上層的攝影車，如果實驗車動力不足以直接推動攝影車，則須逐步增加平衡錘重量(每次增加一克重量)，直到兩車可以開始同步推進，此時平衡錘的最終重量就是臨界補償拉力。
  - (3) 關閉馬達電源及風扇，確認上下兩車不會因平衡錘拉力而自行滑動，才能開始實驗。
  - (4) 如果有上述滑動情形，必須減輕平衡錘重量，重新調整。
5. 由於平衡錘提供固定的補償拉力，所以同組內的實驗過程中不可臨時增減平衡錘重量，確保實驗條件的一致。
6. 馬達的電源供應器可以定電流、定電壓、最大功率三種輸出模式，可視實驗需求調整。
7. 車速的測量方法：
  - (1) 實驗車、風扇起動後，打開攝影車的迷你攝影機，錄製實驗車運動過程的短片。
  - (2) 每個實驗重複五次。
  - (3) 運用 Avidemux 影像剪輯軟體判讀實驗車跑完 30 公分跑道的時間，如下圖所示：



(4) 以公式：「平均速度 = 30 公分 / 運動時間」測得車速。

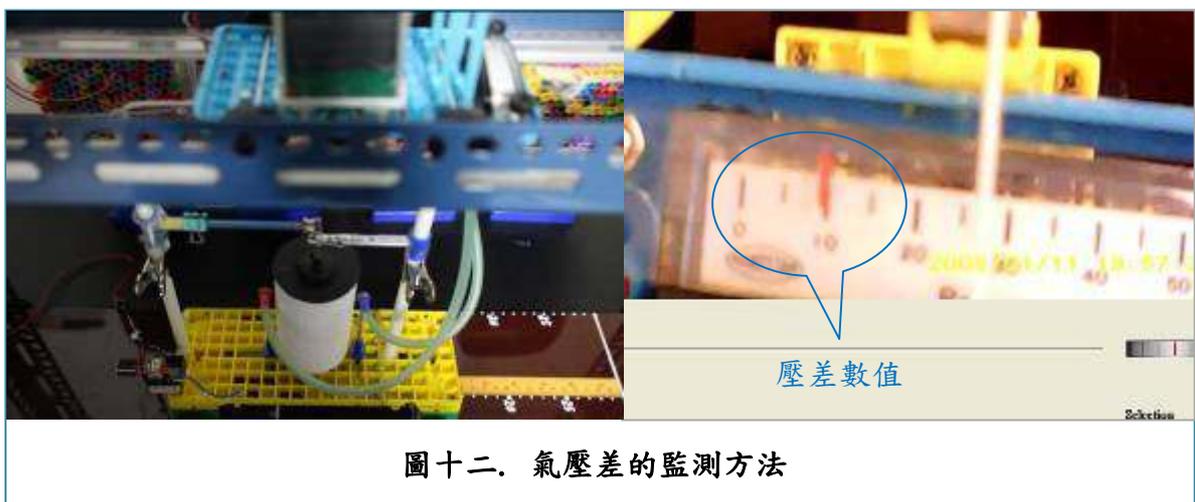
(5) 利用 EXCEL 計算實驗平均值，並製作圖表。

#### 8. 氣壓差的監測：

(1) 從滾筒高低壓兩側接好微壓差計管路。

(2) 可從影像中判讀動態的壓差變化及最大壓差。

(3) 本實驗中微壓差計只用於垂直面滾筒的點監測，有斜面的情形較不適用。



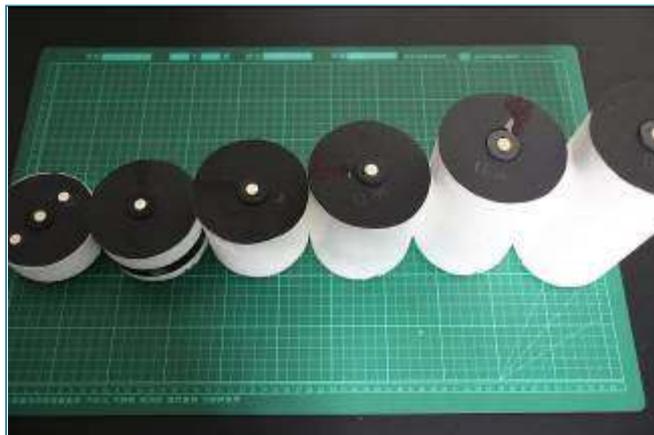
9. 實驗以車速為主要的反應變因，氣壓差數據只做為環繞滾筒周圍氣流變動的參考。

## 伍、研究方法與實驗結果

### 【實驗一】 不同的滾筒高度對於馬格努斯車的推進力有何影響？

#### (一) 實驗方法：

1. 準備直徑 10cm，高度分別為 3 cm、6cm、9cm、12cm、15cm、18cm 的保麗龍圓柱滾筒
2. 以 18cm 高滾筒為基準，在各滾筒內放置配重砝碼，使各組滾筒質量一致、車重一致。
3. 起動實驗車試跑。
4. 調整滾筒馬達電源，使各組滾筒轉速固定為 1800rpm (此為定轉速模式)。
5. 平衡錘的補償拉力設定為 20 克重，風速 3.2 公尺/秒。
6. 利用動態影像測量各組平均車速。
7. 反復實驗三次，並求取各組車速平均值繪製成圖表。
8. 重新調整滾筒馬達電源，使電源輸出固定為 8V×300mA (此為定功率模式)。
9. 重複步驟 5.~7.



圖十三. 不同高度的等徑滾筒

#### (二) 實驗結果：



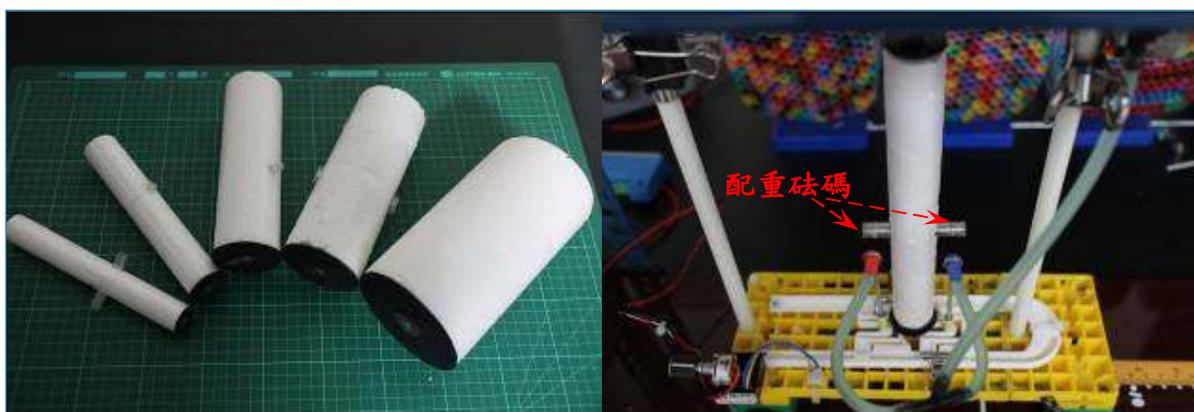
### (三) 結果分析與推論：

1. 分別以定功率和定轉速模式進行實驗，發現兩種模式的推進力曲線斜率稍有差異，但大致吻合，除了 3cm 高的滾筒動力不足無法順利起動外，其它滾筒的推進力都隨著滾筒高度的增加而遞增。
2. 實驗結果說明：在相同的轉速條件或功率條件下，馬格努斯風力車的推進力和滾筒高度呈現正相關。

### 【實驗二】 不同的滾筒直徑對於馬格努斯車的推進力有何影響？

#### (一) 實驗方法：

1. 準備高度 18cm，直徑分別為 2.5 cm、3.2cm、5.5cm、7cm、10cm 的保麗龍圓柱滾筒。
2. 以 10cm 直徑滾筒為基準，在各滾筒內放置配重砝碼，使各組滾筒質量一致、車重一致。
3. 其餘設定及步驟同【實驗一】3.~7.。



圖十四(a). 不同直徑的等高滾筒

圖十四(b). 滾筒配重方式

#### (二) 實驗結果：



#### (三) 結果分析與推論：

1. 定功率和定轉速兩種模式下的推進力曲線出現較大的差異，但仍然維持推進力隨筒徑增大而增加的趨勢，且定功率模式下推進力在筒徑增加到 5.5 cm 時就已趨近組內的最大車速。
2. 實驗結果說明：在相同的轉速條件或功率條件下，馬格努斯風力車的推進力和滾筒直徑呈現正相關。

### 【實驗三】 細長或寬扁滾筒的差異，對於馬格努斯車的推進力有何影響？

#### (一) 實驗方法：

1. 準備外型不同但側表面積相同(約為  $50\pi$ )的保麗龍圓柱滾筒五組，高度/直徑分別為：20 cm/2.5 cm、16 cm/3.2 cm、9 cm/5.5 cm、7 cm/7 cm、5 cm/10 cm，並以此比值來代表它們的細長寬扁。
2. 因各組側表面積相同，整體的體積和質量差異不大，實驗前不配重。
3. 其餘設定及步驟同【實驗一】3.~7.。



圖十五. 不同外型的等表面積滾筒

#### (二) 實驗結果：



### (三) 結果分析與推論：

1. 定轉速和定功率兩種模式下的推進力曲線已不相同。定轉速時各組車速都很接近，不論細長型或寬扁型都維持在 12 公尺/秒左右的水準；定功率模式下車速隨筒高/筒徑比值減小而明顯下滑。
2. 與前兩個實驗相互比對，發現推進力曲線出現差異的最大原因是本實驗中滾筒因質量相近而不再如【實驗一、二】進行配重，造成定功率模式下滾筒轉速的極大差異( 2.5cm 組轉速高達 5000 rpm 左右 )。
3. 實驗結果說明：在定功率且整體質量相近的情形下，細長型滾筒半徑小，馬達輸出轉矩小，容易達到高轉速狀態；寬扁型滾筒半徑較大，馬達輸出轉矩隨之增大，轉速自然呈現遞減的情形，導致實驗車推進力曲線的下滑。
4. 對於馬格努斯風力車而言，在不限定低速旋轉的情形下，細長型滾筒明顯優於寬扁型。

### (四) 其它想法與疑問：

1. 定轉速模式可能較不符合一般載具的實際情形與應用，後續的實驗都以定功率模式進行。
2. 除了滾筒轉速之外，是否滾筒的表面積大小就決定了馬格努斯風力車的推進速度呢？
3. 其它等表面積的圓切面體有沒有機會超越圓柱體滾筒的動力表現呢？

## 【實驗四】 有沒有哪一種圓切面造型的滾筒，比圓柱體滾筒更適合馬格努斯車？

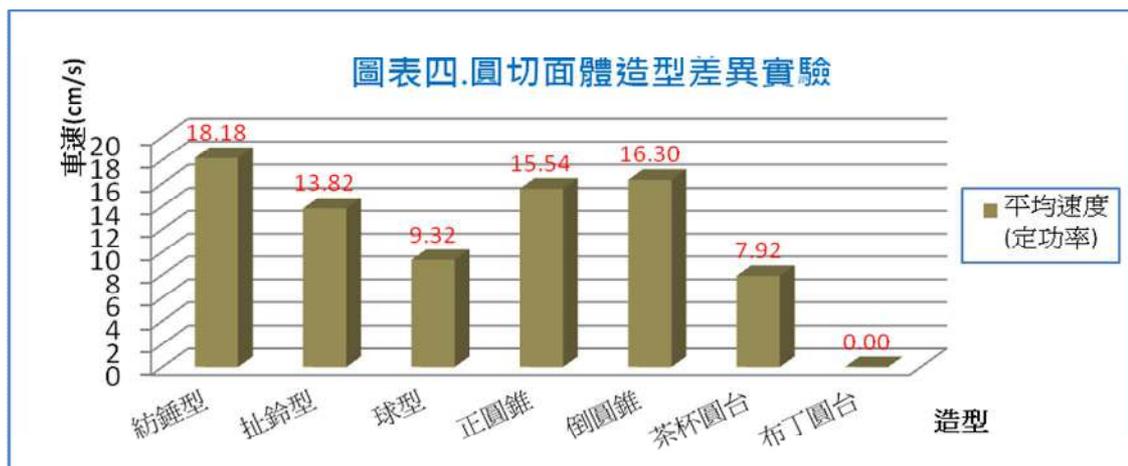
### (一) 實驗方法：

1. 上網查詢各種圓切面體表面積的計算公式。
2. 裁切造型不同但側表面積相同(約為  $50\pi$ )的保麗龍圓切面體滾筒五種，分為紡錘型、扯鈴型、球型、正圓錐、倒圓錐、正圓台(布丁型)、倒圓台(茶杯型)七組進行實驗。
3. 各組滾筒質量接近，不進行配重。
4. 起動實驗車試跑。
5. 電源輸出設定為  $8V \times 300mA$ ，其餘設定及步驟同【實驗一】5.~7.。



圖十六. 各種圓切面造型的等表面積滾筒

## (二) 實驗結果：



## (三) 結果分析與推論：

1. 各種圓切面體滾筒的動力表現有很大落差，尤其布丁圓台無法順利起動最令人意外。
2. 因側表面積同為  $50\pi$ ，與【實驗三】結果進行組間比對，發現紡錘型滾筒的動力表現與高/徑比值 8 的細長圓柱滾筒相當接近，正、反圓錐滾筒也勝過同表面積的寬扁組。

## (四) 其它想法與疑問：

1. 正、反圓台表面積、筒徑、質量和轉速是相同的，動力表現的落差應可排除轉動慣性和空氣阻力的影響。
2. 相同的氣流環繞等表面積的各種圓切面體，卻產生不同的推進效果。這是傳統研究圓柱滾筒的馬格努斯效應理論比較難以合理解釋的。
3. 經由反覆的觀察，發現茶杯圓台、扯鈴型滾筒的運動軌跡有較明顯的側偏現象，由於實驗設備的限制，我們只能懷疑是不是這樣的側向分力造成馬格努斯力的減弱。

## 【實驗五】滾筒的質量對於馬格努斯車的推進力有何影響？

### (一) 實驗方法：

1. 準備空紙筒，在紙筒內放置吸管。依吸管數不同，分為七組進行實驗。
2. 由於操縱變因是「滾筒質量」而非「車身質量」，所以須以滾筒最重的 60 支吸管車為基準，利用塑膠砝碼進行整車配重，使各組實驗車總質量一致。
3. 電源輸出固定為  $8V \times 300mA$ ，其餘設定及步驟同【實驗一】5.~7.。



圖十七. 滾筒質量的調整

## (二) 實驗結果：



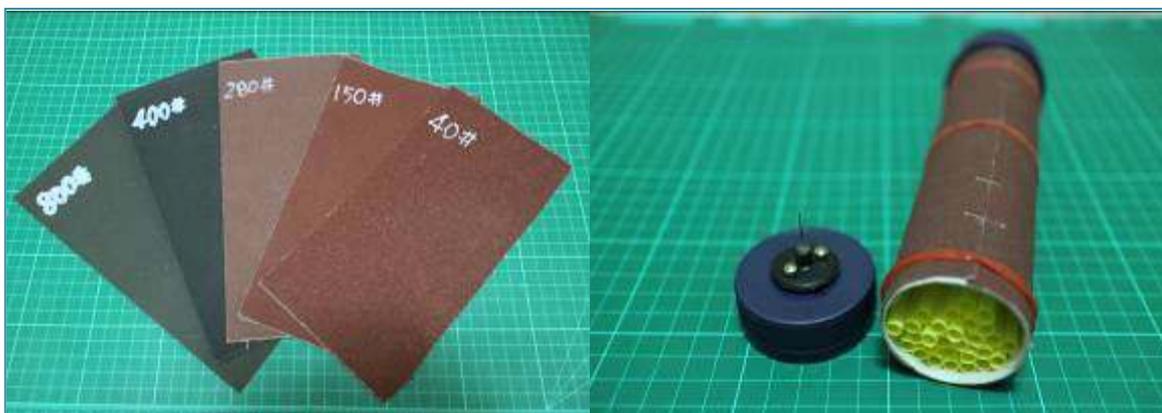
## (三) 結果分析與推論：

1. 在定功率模式、車身總質量一致的條件下，搭載質量愈大的滾筒，實驗車的移動速度愈慢。
2. 滾筒並不會因本身轉動慣量的增加而帶動更多氣流，反而因此導致滾筒轉速降低，影響動力性能。

## 【實驗六】 滾筒的表面摩擦力對於馬格努斯車的推進力有何影響？

### (一) 實驗方法：

1. 準備空紙筒及 800 目、400 目、280 目、150 目、40 目砂紙（目數愈小愈粗糙）。
2. 在紙筒表面捲上砂紙，內部放置吸管配重（以 40 目砂紙為基準）。
3. 依摩擦係數不同，分六組進行實驗。
4. 電源輸出固定為  $8V \times 300mA$ ，其餘設定及步驟同【實驗一】5.~7.。



圖十八(a). 不同摩擦係數的砂紙

圖十八(b). 砂紙滾筒配重

## (二) 實驗結果：



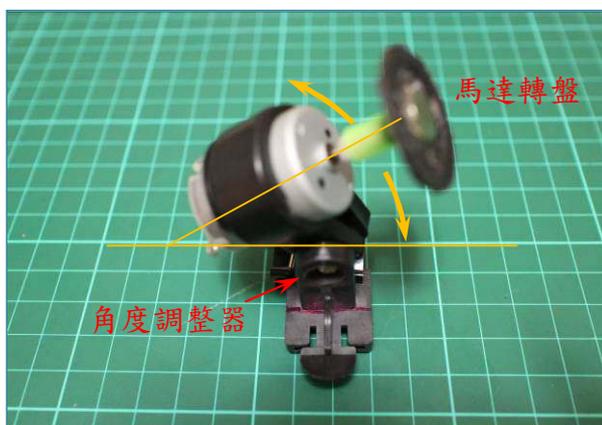
## (三) 結果分析與推論：

1. 滾筒的表面摩擦力與實驗車的移動速度呈現正相關。
2. 空氣本身是帶有黏滯性的流體，適度的增加滾筒表面摩擦力可以讓滾筒帶動周圍的環流量相對增加，對於馬格努斯風力車的性能提升也會有所幫助。

## 【實驗七】 調整滾筒傾斜角對於馬格努斯車的推進力會不會有幫助？

### (一) 實驗方法：

1. 將馬達與角度調整器結合，並利用可彎折的塑膠細管製作成可調整角度的軸承滑軌。
2. 準備直徑 7cm，長度 15 cm 的保麗龍滾筒。
3. 利用量角器依設定角度調整滾筒傾斜角。從  $40^\circ$  ~  $140^\circ$  每  $10^\circ$  進行一個實驗。
4. 電源輸出固定為  $8V \times 300mA$ ，其餘設定及步驟同【實驗一】5.~7.。

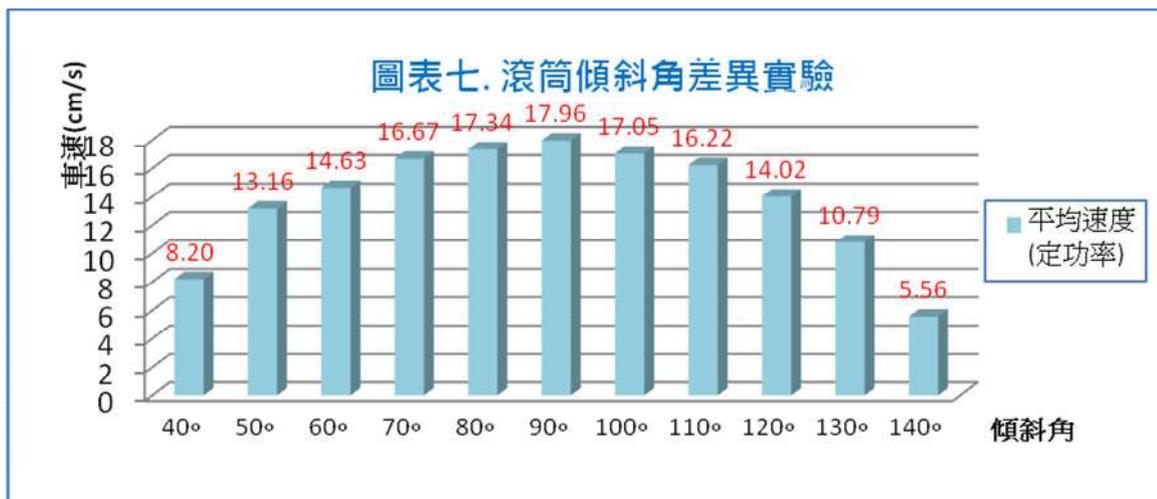


圖十九(a). 結合角度調整器的馬達



圖十九(b). 調整滾筒傾斜角

## (二) 實驗結果：



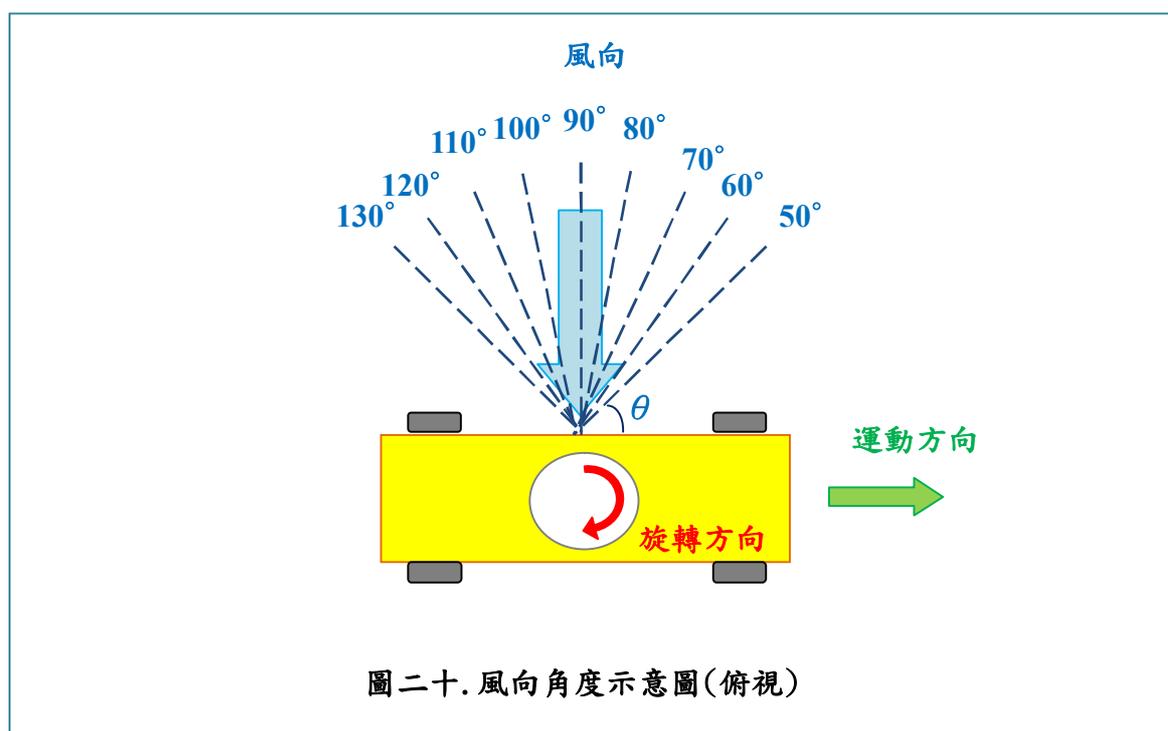
## (三) 結果分析與推論：

1. 推進力曲線呈近似拋物線，且 90° 的鉛直滾筒已是最佳的角度。
2. 實驗結果可知：無法藉由增大或減小軸傾角來改善馬格努斯風力車的動力性能。

## 【實驗八】 風向的差異對於馬格努斯車的推進力有何影響？

### (一) 實驗方法：

1. 從 50° ~ 130° 逐步調整風扇陣列的風向角度，每 10° 進行一個實驗。
2. 選用直徑 5.5cm 高度 18cm 圓柱作為實驗車滾筒，各項條件均不變動。
3. 電源輸出固定為 8Vx300mA，其餘設定及步驟同【實驗一】5.~7.。



## (二) 實驗結果：



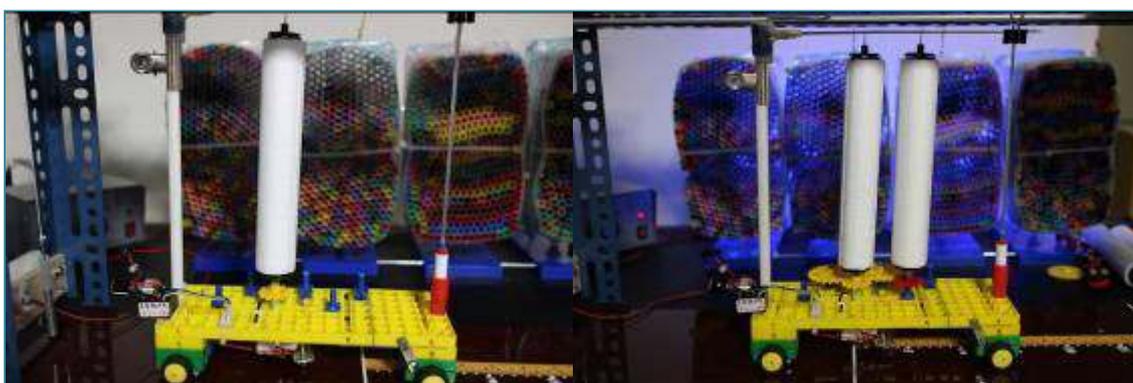
## (三) 結果分析與推論：

1. 90° 側風並不是最佳的風向角度，大於 90° 的側順風才是。
2. 實驗車具有像傳統風帆船一樣，在特定的風向範圍內逆風而行的特性。實驗結果顯示，側風角小於 90° 時，實驗車動力開始遞減，但處於 60° 的側逆風環境中仍能跑動，不過風向角度一旦小於 50° 時，全車就會失去動力。
3. 綜合以上兩點，可知：實驗車的動力表現和風力、馬格努斯效應力兩者的水平軸合力有關，推論請參閱【陸、討論】。

## 【實驗九】 增加滾筒的設計方式，對於馬格努斯車的推進力會不會有幫助？

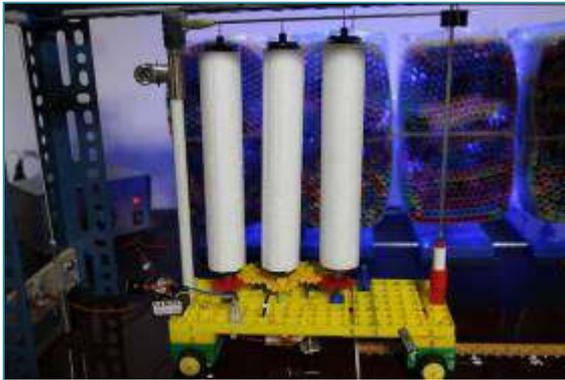
### (一) 實驗方法：

1. 使用同一顆馬達作為滾筒動力源，利用教具齒輪傳送馬達的輸出動力。
2. 選用直徑 2.5cm 高度 18cm 圓柱製作單滾筒、雙滾筒、三滾筒、四滾筒實驗車。滾筒本身不配重。
3. 因滾筒數和所需齒輪數不同，必須以四滾筒實驗車為基準進行整車配重。
4. 其它實驗車的各項條件均不變動。
5. 電源輸出固定為 8Vx300mA，其餘設定及步驟同【實驗一】5.~7.。

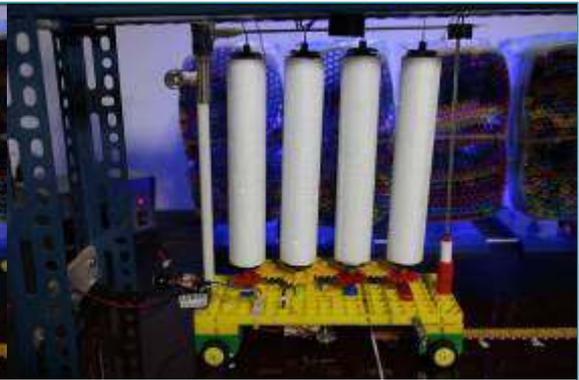


圖二十一(a). 單滾筒車

圖二十一(b). 雙滾筒車

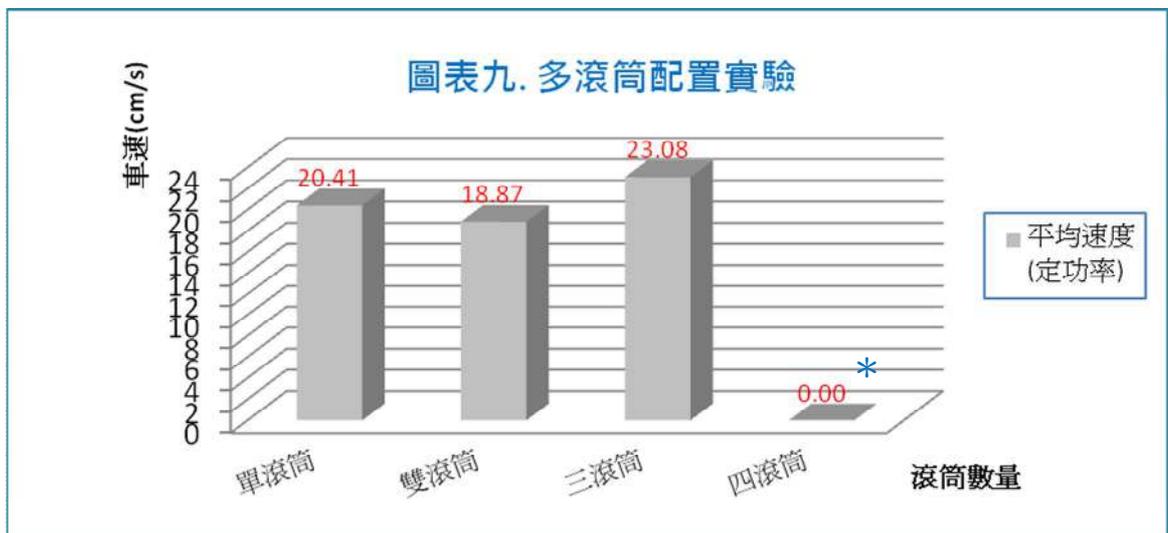


圖二十一(c). 三滾筒車



圖二十一(d). 四滾筒車

(二) 實驗結果：



(\*註：馬達無法帶動滾筒齒輪)

(三) 結果分析與推論：

1. 實驗車的動力曲線不是呈線性遞增，而在雙滾筒組出現 U 型反折，三滾筒組的動力性能則有明顯提升。
2. 從雙滾筒組的動力反折和四滾筒組的馬達動力不足以帶動齒輪來研判，原因可能是：
  - (1) 單一馬達帶動多個滾筒，在轉矩固定的情況下造成轉速大幅下降。
  - (2) 教具齒輪的摩擦力太大，兩個滾筒產生的風力效應還不足以彌補馬達、齒輪間的摩擦損失，增加到三個滾筒時才開始發揮邊際效能。
3. 對於馬格努斯風力車而言，如果能匹配適當轉矩的馬達或有效降低齒輪間的摩擦損失，「單一馬達帶動多滾筒」是一個相當不錯的設計方案。

**【實驗十】改變滾筒的結構，對於馬格努斯車的推進力會不會有幫助？**

(一) 實驗方法：

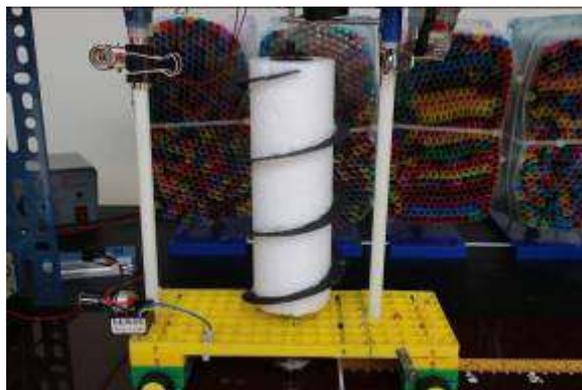
1. 利用直徑 5.5cm 高度 18cm 滾筒與紙板、保利龍板黏合，製作孔洞型、竹節型、螺旋型、側裙型、葉片型滾筒五種，未處理的空滾筒作為對照組。
2. 各組滾筒以側裙型為基準進行配重。
3. 電源輸出設定為 8Vx300mA，其餘設定及步驟同【實驗一】5.~7.。



圖二十二(a). 孔洞滾筒車



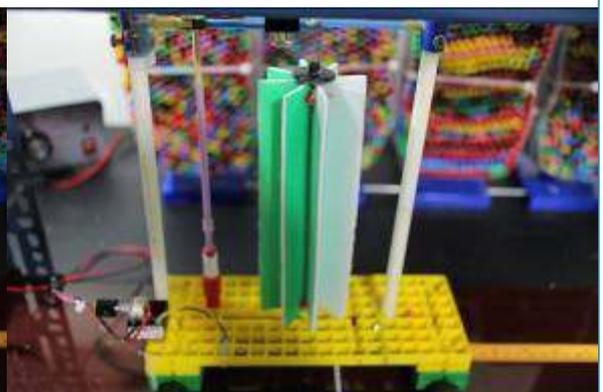
圖二十二(b). 竹節滾筒車



圖二十二(c). 螺旋滾筒車

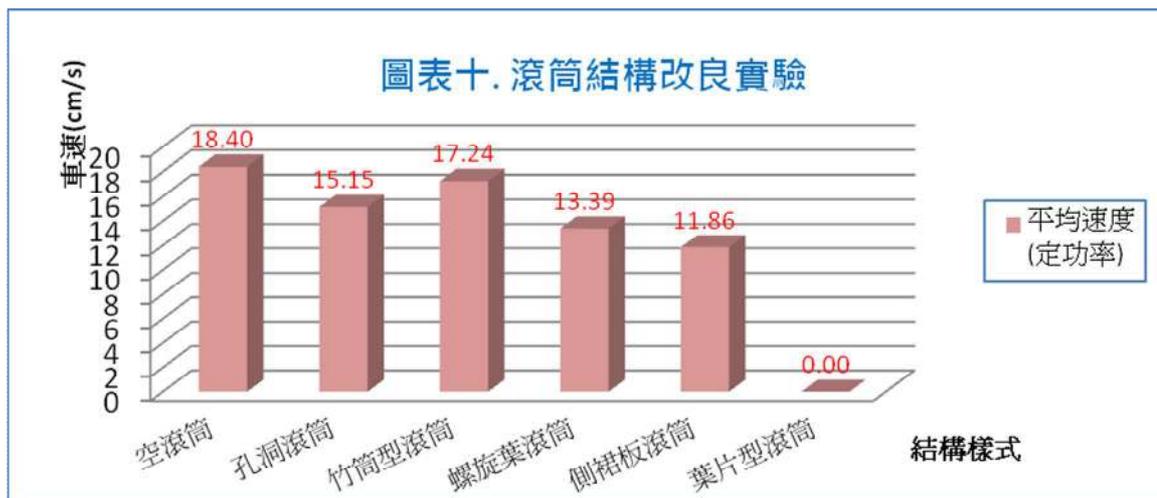


圖二十二(d). 側裙滾筒車



圖二十二(e). 葉片滾筒車

## (二) 實驗結果：



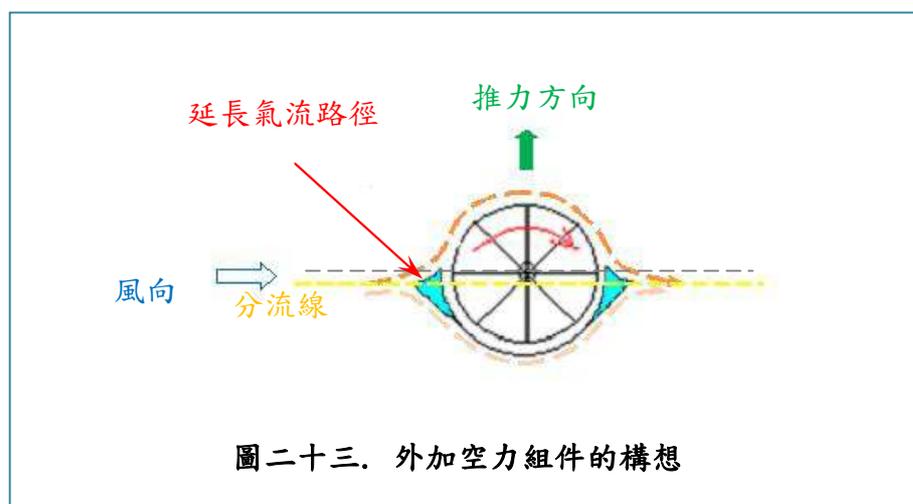
## (三) 結果分析與推論：

1. 改裝的各組動力性能都比未處理的空滾筒差，其中以竹筒型滾筒的動力性能最接近未處理的空滾筒，加裝葉片型滾筒的實驗車滾筒空轉無法推進。
2. 從側裙型、葉片型來看，滾筒外型結構的改變可能會造成滾筒周圍環流的紊亂或提早從表面剝離，造成反效果。

## 【實驗十一】 加裝空力組件對於馬格努斯車的推進力會不會有幫助？

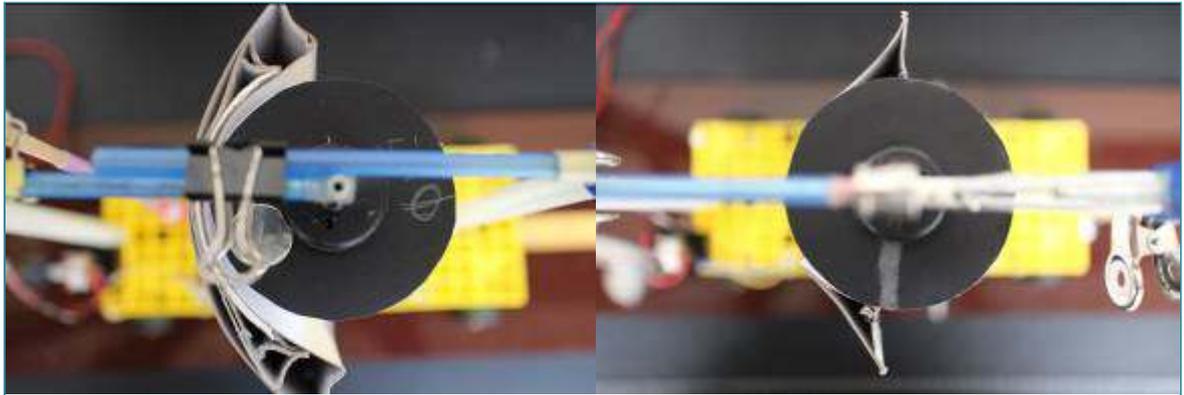
### (一) 實驗方法：

1. 不改造滾筒的外型結構，而運用伯努利效應造成機翼升抬的原理，在滾筒外圍加上延長氣流路徑的導流翼，嘗試增大滾筒高低壓兩側的氣壓差（構想如下圖二十三。）。



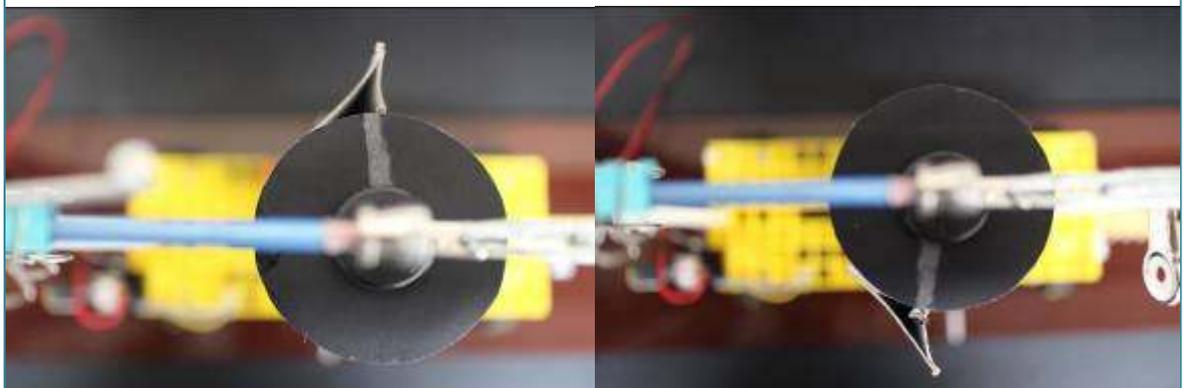
2. 選定直徑 5.5cm 高度 18cm 滾筒，利用紙板製作導流翼，分未處理、包覆式導流、雙側導流、前導流、後導流五組進行實驗。

3. 滾筒不配重，整車以包覆式導流組為基準配重。
4. 電源輸出設定為  $8V \times 300mA$ ，其餘設定及步驟同【實驗一】5.~7.。



圖二十四(a). 包覆式導流翼

圖二十四(b). 雙側導流翼



圖二十四(c). 前導流翼

圖二十四(d). 後導流翼

(二) 實驗結果：

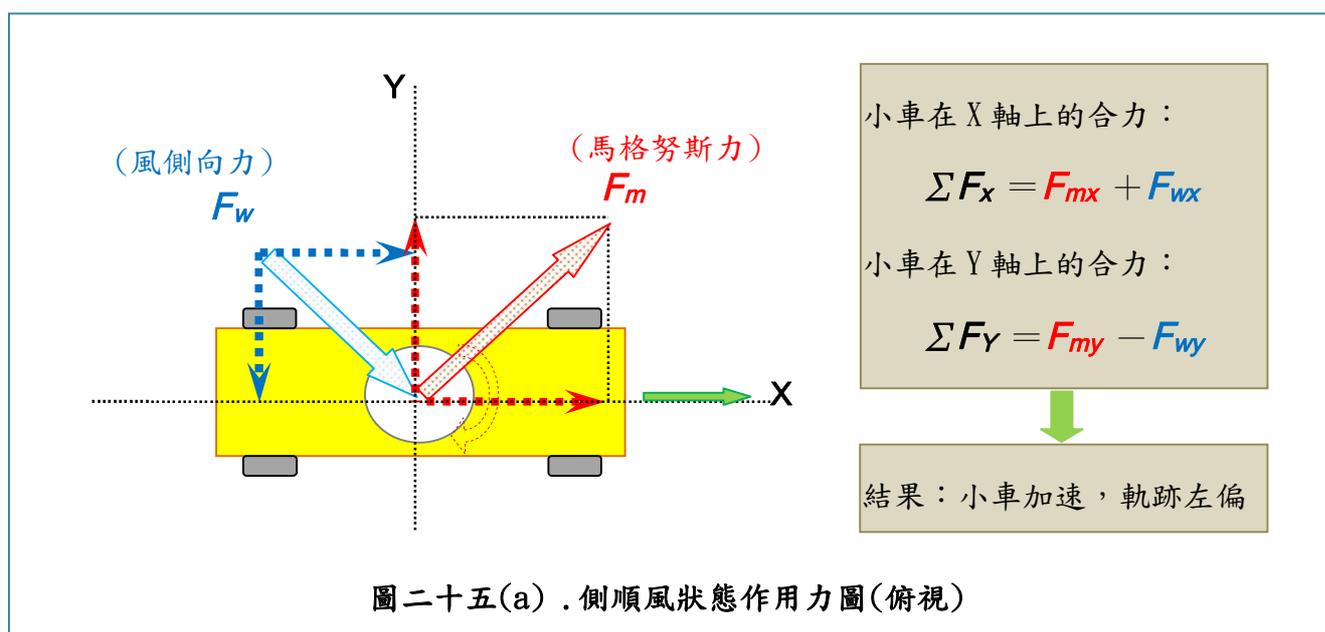


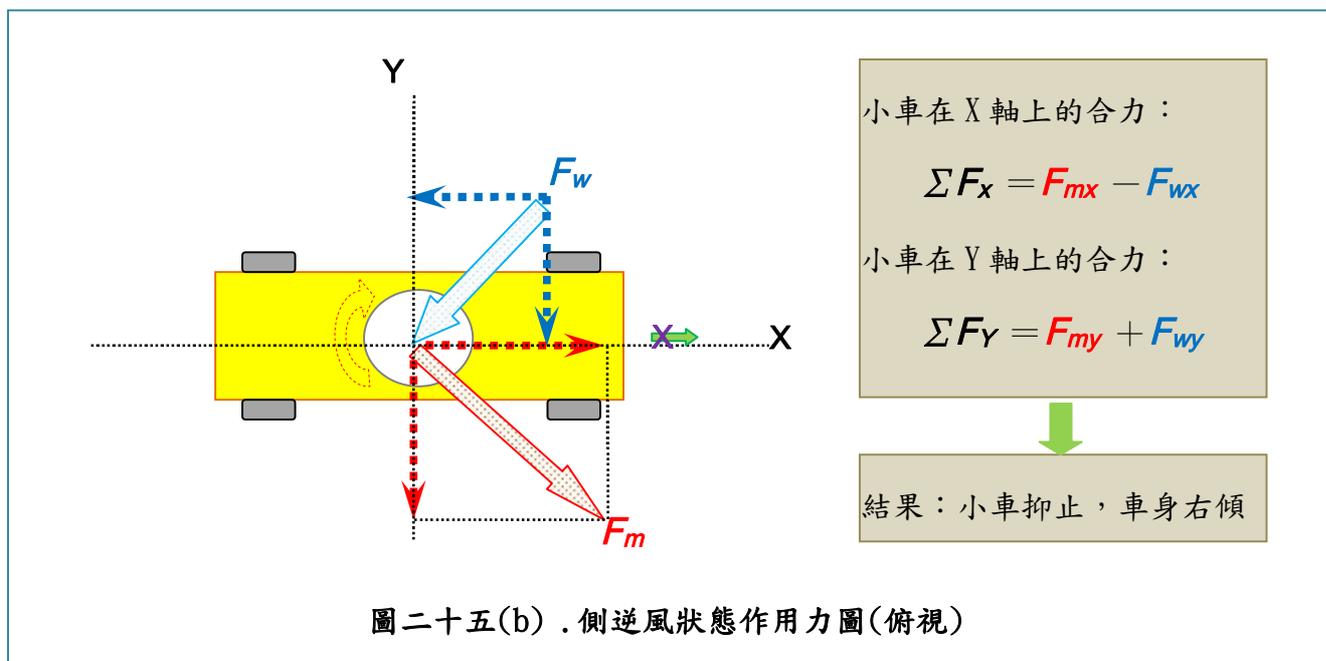
(三) 結果分析與推論：

1. 各組導流翼組滾筒的動力表現都沒有預期中的提升效果，包覆式導流翼效果很差，但前導流翼的數據卻與未處理組十分接近。
2. 從包覆式導流翼和其它三組開放型導流翼來看，過度的遮罩滾筒受風面積應是無法達到預期效果的主因。

## 陸、討論

- 一、綜合【實驗一】～【實驗三】的研究結果，我們可以歸納出：馬格努斯風力車在限定轉速和質量的情形下，動力性能與滾筒表面積大小有決定性的關聯；但如果馬達處於定功率模式下，則滾筒轉速成爲影響動力性能的關鍵。
- 二、【實驗一、二、五、六】中的滾筒即使有人爲的配重使得各組質量相等，但因爲配重後的滾筒質量分布並不是完全均勻的，從實驗模擬的觀點來看，各組間的轉動慣性仍然會有些許落差，這是我們在實驗中無法避免的誤差來源。
- 三、在【實驗四】的探究中，正、反圓台滾筒除了方向顛倒之外，其餘的操作變因都相同，卻呈現不同的動力表現。我們只能懷疑可能還有一些其它被忽略的變因，例如：斜面型滾筒的環流量可能因本身的斜率而造成氣壓梯度的不勻稱而造成動力表現上的差異，但由於這個觀點目前我們還沒找到相關的論據，而且實驗設備簡陋，也無法將我們的想法加以驗證，這是有待我們後續努力之處。
- 四、關於【實驗八】的結果，我們認爲風向角度對於馬格努斯風力車有相當的加乘或抑制效果。由下圖二十五(a)、(b)的力圖加以分析可知：馬格努斯風力車的推進主要來自風力  $F_w$ 、馬格努斯效應力  $F_m$  在水平軸上的合力，也就是兩股作用力在 X 軸上投影量的和。當車子處於側順風狀態時，兩股作用力在 X 軸上的分力是同向的，疊加後就會造成車子的加速；而當車子處於側逆風狀態時，兩股作用力在 X 軸上的分力是反向的，互減後就會造成車速的抑止。





五、回顧【實驗十一】的嘗試，雖然改良方案沒有預期中的明顯成效，但我們認為，伯努利原理的構想如果適用在飛機機翼上，應該也是適用在滾筒導流翼上的，只是實驗用的滾筒無法達到正圓的規格，紙板做的導流翼又太軟，兩者間間隙無法縮小（常常會打到）。如果模型能製作的更精密一些，或許實驗結果更能符合我們的預期。

六、除了風力車之外，希望我們的研究成果未來在馬格努斯風力發電機組、馬格努斯滑翔機、甚至是新型船舵的設計方面也能提供些許的參考價值。

## 柒、結論

- 一、在相同的轉速條件或功率條件下，馬格努斯風力車的推進力和滾筒高度呈現正相關。
- 二、在相同的轉速條件或功率條件下，馬格努斯風力車的推進力和滾筒直徑也呈現正相關。
- 三、在定功率條件下，等表面積的細長型滾筒明顯優於寬扁型滾筒。
- 四、等表面積、不同造型的圓切面體滾筒在動力表現方面可能會有很大落差。其中以細長紡錘體最佳，正圓台表現最差。
- 五、滾筒本身的質量也會影響馬格努斯風力車的推進，質量愈大表現愈差。
- 六、適度的增加滾筒表面摩擦力對於馬格努斯風力車的性能提升會有所幫助。
- 七、馬格努斯風力車的滾筒設計一定要保持鉛直，否則推進效能會隨角度偏移量而遞減。
- 八、馬格努斯風力車兼具了傳統風帆車的物理特性，側順風狀態會有明顯的加速效果，即使碰到程度不大的側逆風，仍能逆風而行。
- 九、對於馬格努斯風力車而言，如果能匹配適當轉矩的馬達或有效降低摩擦損失，「單一馬達帶動多滾筒」的設計是相當符合經濟效益的選擇。

十、滾筒外型結構的改變必須考量滾筒周圍環流的完整性，否則會造成反效果。

十一、我們依據伯努利原理設計的各型導流翼中，以前側導流翼的空力特性最佳，包覆式導流翼最差。

## 捌、參考資料及其他

一、黃鴻博。(民 103.8.)。國小自然與生活科技六上(第七冊) - 天氣的變化。南一書局。

二、黃鴻博。(民 103.8.)。國小自然與生活科技六下(第八冊) - 巧妙的施力工具。南一書局。

三、牛山泉。(2010.11)。圖解風力發電入門。世茂出版有限公司。

四、水崎高浩。(2012.4)。不需算式的物理學。世茂出版有限公司。

## 【評語】 080811

1. 實驗設計頗具巧思，也能考慮補償拉力的因素。
2. 研究中未提及 Magnus force 有已知計算公式，因此好幾項實驗可由公式預知結果，形成實驗目的是在“驗證”，並非“發現”。
3. 實驗設計可再思考改進的：(1)風險陣列應避免有間隙；(2)“定功率”的必要性，可再詳加說明；(3)已有拉力補償，因此改變滾筒質量的實驗應無必要。