

屏東縣第 65 屆國中小學科學展覽會 作品說明書

科 別：物理科

組 別：國中組

作品名稱：滾動式調整—馬格努斯效應滾輪改良的探討

關 鍵 詞：馬格努斯、氣體壓力、扇葉

編號：B2004

摘要

馬格努斯效應，是由於滾筒旋轉可以帶動周圍氣體，導致旋轉物體存在橫向的壓力差，並形成側向力。在本實驗中，我們嘗試改變滾筒表面摩擦力、滾筒改成葉扇形式，並改變葉扇數量、改變葉扇形狀來操作實驗。結果發現：在滾筒的形式下，由 400 番砂紙改成 180 番砂紙，側向力由 3.0gw 上升到 3.9gw，顯示摩擦力和馬格努斯效應的側向力呈現正相關。在 3.0m/s 風速時，圓柱形改成 2 個扇葉，側向力由 2.5gw 上升到 4.7gw，顯示兩葉扇應是較合適的選擇。兩扇葉邊緣增加 1cm 的高度，側向力相比普通兩葉扇，由 4.7gw 上升到 5.1gw，顯示兩葉扇邊緣高度的增加是可考慮的方式。葉扇寬度 2.5cm 增為 3.0cm 時，葉扇面積增加 20%，側向力由 4.7gw 上升到 5.6gw，顯示葉扇面積的增加對側向力有很大的提升。經過實驗的結果可以知道，葉扇的改良對側向力提升有幫助。希望我們的實驗能應用到生活中，達到減少耗能的效果。

壹、研究動機

最初的想法，是來自於網路上一段影片，內容是沒有翅膀也能飛的飛機^[1]，影片中的飛機和傳統的飛機外形上有很大的不同，我們覺得很好奇，為什麼沒有翅膀的飛機也能飛？它的原理是什麼？生活中還有哪些現象也和這種原理有關？

我們上網找相關資料，原來生活中相關的現象並不少見，在球類運動中，經常可以看到足球的香蕉球、棒球的變化球、網球下墜球等等。這些現象都伴隨著快速的旋轉，原理被稱為「馬格努斯效應（Magnus effect）」，並且也能找到相關的公式，主要和風力、滾桶半徑、滾桶轉速等變因有關。但是我們發現有些裝置使用滾筒（圖 1-1），有些使用葉片的形式（圖 1-2）。我們在想，這兩者效能何者較好？

網路上討論資料不多^[4]，沒有找到相關的數據和答案，我們決定自己試著來做實驗，自己來思考如何改良滾筒，以提升側向力。我們嘗試改變滾筒表面摩擦力、滾筒改成葉扇形式、改變葉扇數量、改變葉扇形狀……等方式來操作實驗。我們對不同形式的滾輪來進行實驗，會有什麼不同的結果感到十分好奇。

在這些變因中，最困擾我們的是如何固定滾輪轉速、維持旋轉時的穩定度、如何測得側向力的實驗數據、以及製作一組可以更換不同滾輪的裝置。我們想了很多方法，畫了很多設計圖，總算找到完成實驗的方式。

在實驗中，我們參考了自然與生活科技課本第四冊中有關大氣壓力、第五冊中有關力矩和轉動、簡單機械的相關原理^[5]，來進行實驗。

希望我們實驗的結果，能運用到一些動力裝置，例如：無人機改良、汽車前進時提供下壓力或新式風力發電機。也希望在未來有更多不同想法，能有更多不同的設計，達到更節省能源的目的。

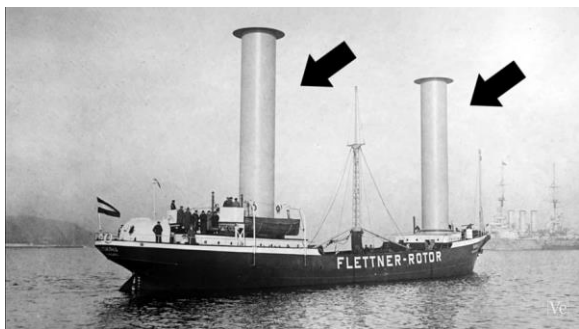


圖 1-1 兩根長長的管子目的是取代風帆^[2]



圖 1-2 用滾輪提供上升力^[3]

貳、研究目的

一、實驗目的：

探討產生的側向力大小。

二、控制變因：

滾輪轉速、滾輪半徑、滾筒長度。

三、操縱變因：

(一) 實驗一 A 組

使用長 12cm、半徑 4cm 的滾筒、轉速為每秒 11 轉，分別貼上普通紙張(A-1)、400 番(A-2)、180 番(A-3)砂紙，以測試接觸面的粗糙度，分別在 2.2m/s、2.5m/s、3.0m/s 三種風力狀態下，產生的側向力大小。如圖 2-1。

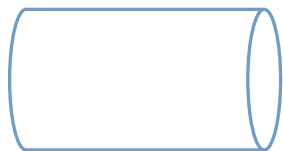
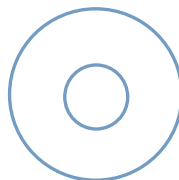


圖 2-1 A-1 組滾筒示意圖



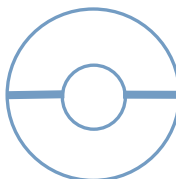
A-1 組滾筒側面圖

(二) 實驗二 B 組

使用長 12cm、半徑 4cm 的滾輪、轉速為每秒 11 轉，分別製作 2 片扇葉(B-1)、4 片扇葉(B-2)、6 片扇葉(B-3)，扇葉寬度為 2.5cm，分別在 2.2m/s、2.5m/s、3.0m/s 三種風力狀態下，以測試扇葉多寡對側向力的影響。如圖 2-2。



圖 2-2 B-1 組滾輪示意圖



B-1 組滾輪側面圖

(三) 實驗三 C 組

使用長 12cm、半徑 4cm 的滾輪、轉速為每秒 11 轉，分別製作 2 片扇葉(C-1)、4 片扇葉(C-2)、6 片扇葉(C-3)，扇葉寬度為 2.5cm，在扇葉邊緣黏上 1cm 的高度，分別在 2.2m/s、2.5m/s、3.0m/s 三種風力狀態下，以測試改良後扇葉對側向力的影響。如圖 2-3。

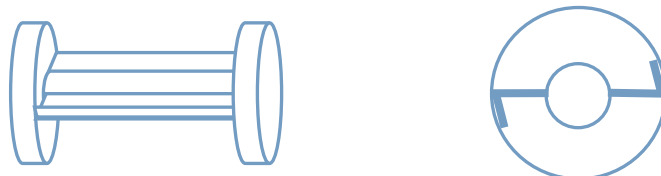


圖 2-3 C-1 組滾輪示意圖

C-1 組滾輪側面圖

(四) 實驗四 D 組

使用長 12cm、半徑 4cm 的滾輪、轉速為每秒 11 轉，分別製作 2 片扇葉(D-1)、4 片扇葉(D-2)、6 片扇葉(D-3)，扇葉寬度為 2.5cm，在扇葉邊緣黏上 2cm 的高度，分別在 2.2m/s、2.5m/s、3.0m/s 三種風力狀態下，以測試改良後扇葉對側向力的影響。如圖 2-4。

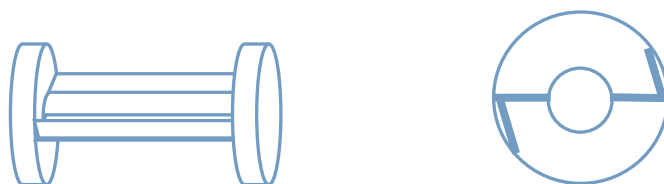


圖 2-4 D-1 組滾輪示意圖

D-1 組滾輪側面圖

(五) 實驗五 E 組

使用長 12cm、半徑 4cm 的滾輪、轉速為每秒 11 轉，分別製作 2 片扇葉(E-1)、4 片扇葉(E-2)、6 片扇葉(E-3)，扇葉寬度為 3cm，和輪子半徑夾角約為 60 度，分別在 2.2m/s、2.5m/s、3.0m/s 三種風力狀態下，以測試增加扇葉面積對側向力的影響。如圖 2-5。

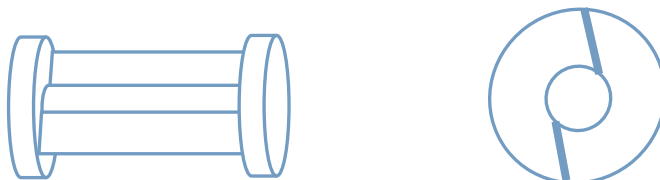


圖 2-5 E-1 組滾輪示意圖

E-1 組滾輪側面圖

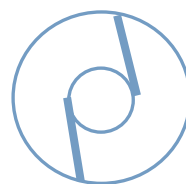
(六) 實驗六 F 組

使用長 12cm、半徑 4cm 的滾輪、轉速為每秒 11 轉，分別製作 2 片扇葉(F-1)、4 片扇葉(F-2)、6 片扇葉(F-3)，扇葉寬度為 4cm，和輪子半徑夾角約為 120 度，分

別在 2.2m/s、2.5m/s、3.0m/s 三種風力狀態下，以測試增加扇葉面積對側向力的影響。如圖 2-6。



圖 2-6 F-1 組滾輪示意圖



F-1 組滾輪側面圖

四、應變變因：

測量因馬格努斯效應產生的側向力大小。

參、研究設備及器材

一、常用工具

老虎鉗（圖 3-1）、膠帶、剪刀及電子天平（圖 3-2）。



圖 3-1 實驗中常用工具



圖 3-2 電子天平

圖 3-3 為風速計，可測得電扇吹出的風速。圖 3-4 為用剩餘吸管製作出的風洞，確保電扇（圖 3-5）的風經過風洞時為平行風，比較不會對實驗結果造成誤差。由圖 3-6 中，用風速計測得電扇三種風速分別為 2.2m/s、2.5m/s、3.0m/s。



圖 3-3 風速計



圖 3-4 風洞



圖 3-5 電扇



圖 3-6 測量風速

二、滾輪製作

我們使用圓半徑固定為 4cm 的圈形塑膠板（圖 3-7），粗吸管為軸心（圖 3-8），軸心半徑為 1.5cm，製作長度同為 12cm 的滾輪。以粗吸管為軸可以增加黏合時的面積，才可以製作出較為堅固的滾輪，雖然會減少內圈的葉扇面積，但我們推測內圈的葉扇在旋轉時和空氣的相互作用很小，所以應對實驗結果影響不大。另外，我們使用的材料重量都較輕，可以避免重量不均的高速旋轉下產生的震動。



圖 3-7 圈形瓦楞板和粗吸管

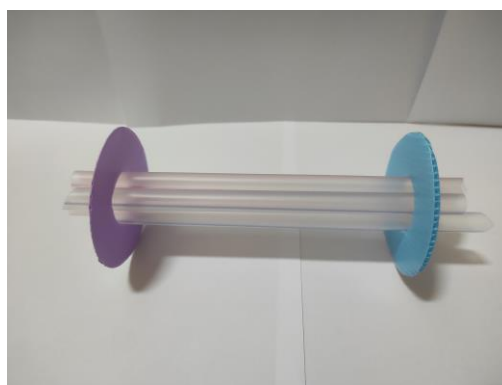


圖 3-8 以粗吸管為滾輪軸心

我們固定滾輪的長為 12cm、半徑為 4cm，因為從公式中可以知道滾輪的長和半徑會對提升側向力有所影響，我們本次實驗主要在探討滾輪改良的方式，因此將滾輪的長和半徑設為控制變因，在葉片的形狀改變時，也不會讓葉片超過滾輪的圓周之外。（圖 3-9）



圖 3-9 製作完成的滾輪



圖 3-10 滾輪兩側黏上磁鐵

製作好滾輪後，在滾輪側面兩端黏上小磁鐵（圖 3-10），可以吸在旋轉器本體上，以進行實驗。使用磁鐵來安裝滾輪，可以方便我們快速更換不同的滾輪來進行實驗。

我們在設計滾輪時，有很多不同的想法，以下是我們在設計時的思考方向：

（一）實驗一 A 組

實驗一為傳統的滾筒形，已知長度和半徑都會提升馬格努斯效應，我們不改變滾筒形狀，但分別貼上普通紙張、400 番、180 番砂紙，改變接觸面的粗糙度，看在不同的阻力下，是否會影響結果？（圖 3-11）

（二）實驗二 B 組

實驗二將滾筒的形式改成葉片形，因為在很多馬格努斯效應的影片中，都可以看到葉片形的滾輪，所以我們分別製作 2 片扇葉、4 片扇葉、6 片扇葉，扇葉寬度為 2.5cm，來進行實驗。（圖 3-12）

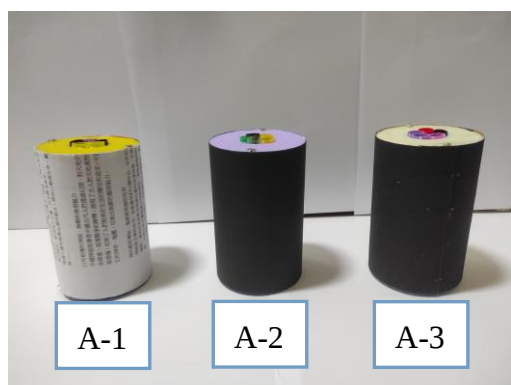


圖 3-11 A 組三種滾筒

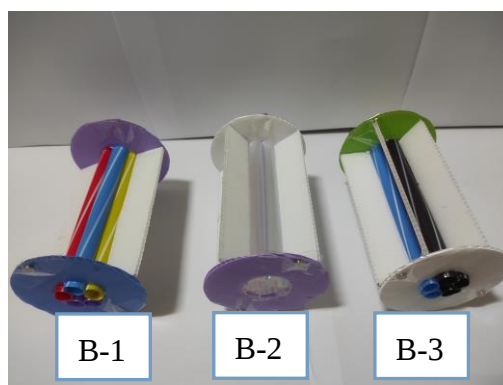


圖 3-12 B 組的三種滾輪

（三）實驗三 C 組

將實驗二的葉片，在扇葉邊緣黏上 1cm 的高度，我們想藉此來留住空氣，增加葉片帶動空氣的能力，以提升空氣密度差，增加側向力。（圖 3-13）

（四）實驗四 D 組

將實驗三中的葉片邊緣 1cm 的高度提升為 2cm，測試更高的邊牆會有更好的效果，還是反而是種阻礙？（圖 3-14）

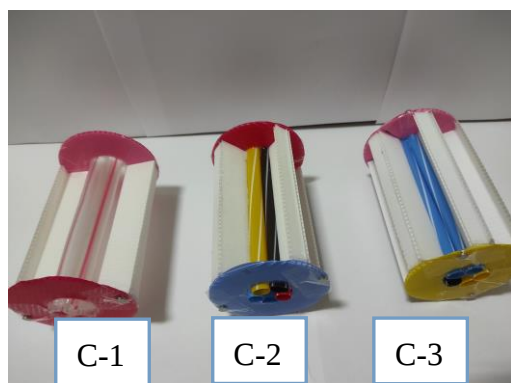


圖 3-13 C 組三種滾輪

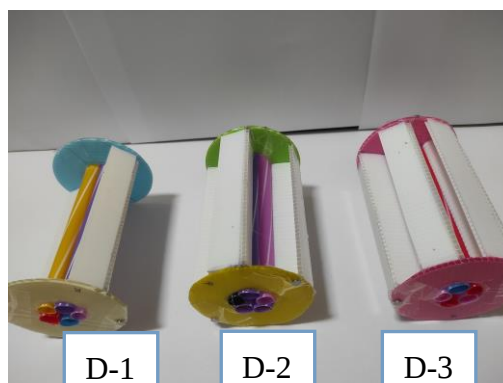


圖 3-14 D 組的三種滾輪

(五) 實驗五 E 組

我們參考了圖 1-2 中的設計，傾斜的扇葉會比較好嗎？我們將扇葉寬度從實驗二中的 2.5cm 增為 3cm，和輪子半徑夾角約為 60 度，看看結果是否有不同？（圖 3-15）

(六) 實驗六 F 組

在實驗五的概念下，再將扇葉寬度增為 4cm，和輪子半徑夾角約為 120 度，以獲得更大的扇葉和空氣的接觸面積。（圖 3-16）

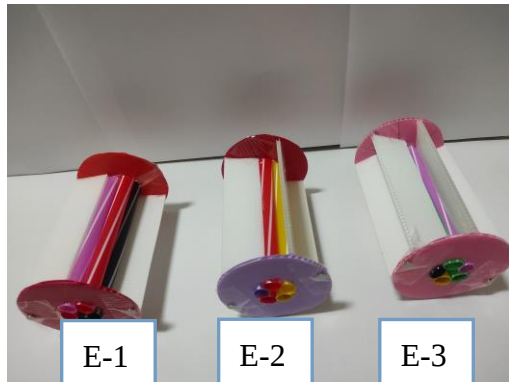


圖 3-15 E 組三種滾輪

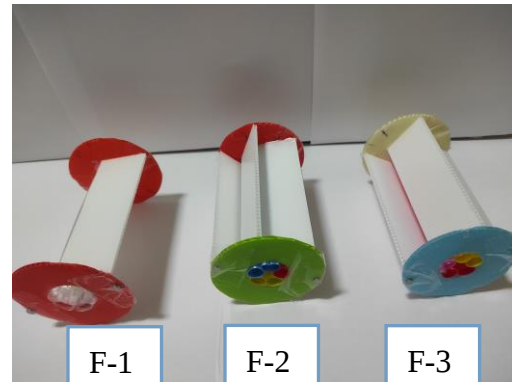


圖 3-16 F 組的三種滾輪

我們一共製作了六組不同形式的滾輪，每組三個，共十八個滾輪。（圖 3-17）



圖 3-17 共有 6 組，18 個滾輪

三、旋轉器本體

在實驗中需要旋轉器帶動滾筒或滾輪來轉動，我們討論了很多次，也畫了很多張實驗裝置設計圖，最後改裝完成，利用馬達帶動轉盤，轉盤黏上磁鐵吸引滾輪，滾輪就會跟著轉動。（圖 3-18）

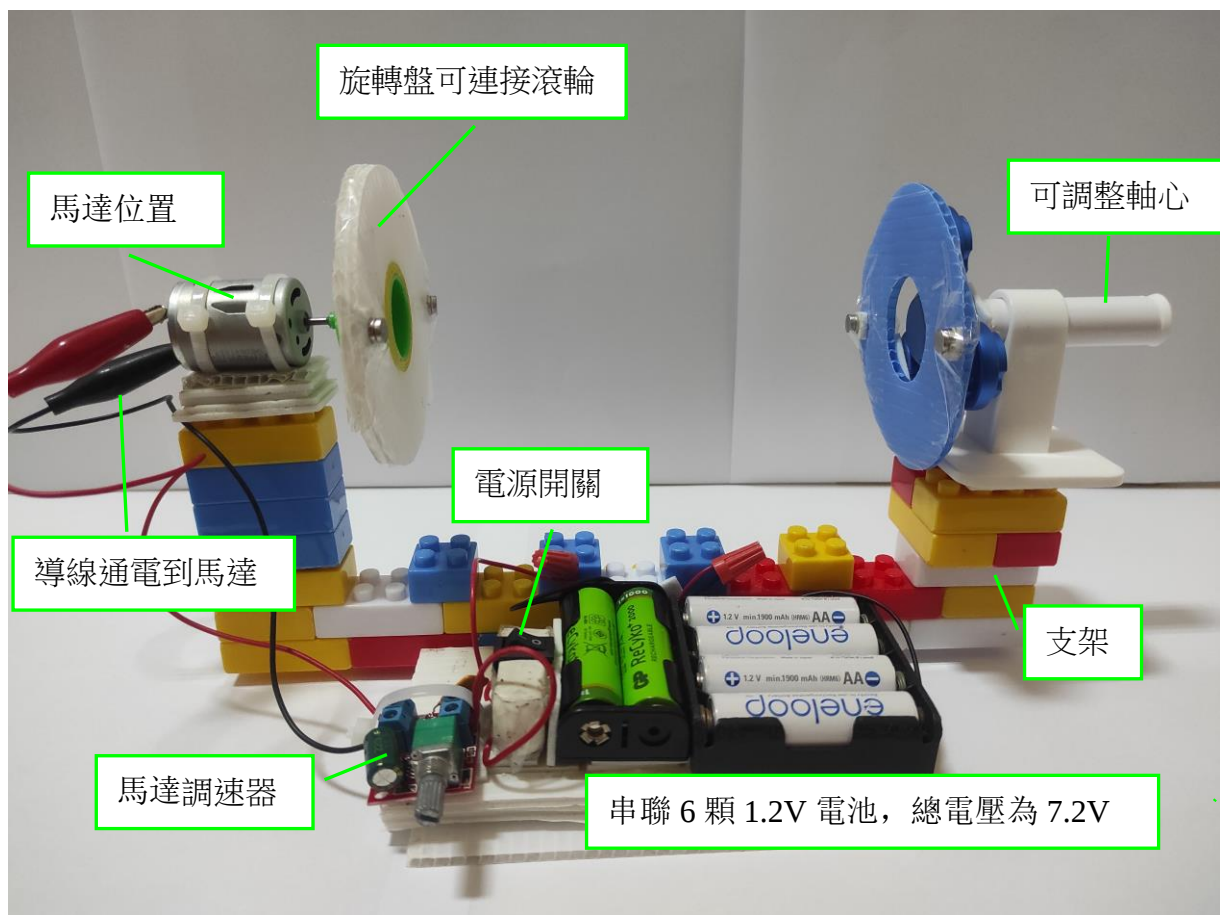


圖 3-18 旋轉器本體說明

我們要有一個能固定轉盤旋轉速度的裝置，所以加裝一個調速器，可以利用調速器來調整滾輪旋轉速度，實驗中各組滾輪旋轉速度為控制變因。我們使用 pwm 直流馬達調速器（圖 3-19），此調速器常被用作直流迴路中燈具調光或直流馬達調速，它主要是通過改變輸出，使得負載上的平均接通時間從 0~100% 變化，以達到調整負載亮度或馬達旋轉速度的目的。

依照調速器上接口的標示，將電池的正、負極用導線連接到調速器的正、負極，調速器的輸出、輸入口也用導線接到馬達的兩個端點上（圖 3-20），輸入馬達的正、負極若接反，馬達也會反向旋轉，用壓線帽連接不夠長的導線，使用調整鈕以方便實驗時可調整旋轉速度。

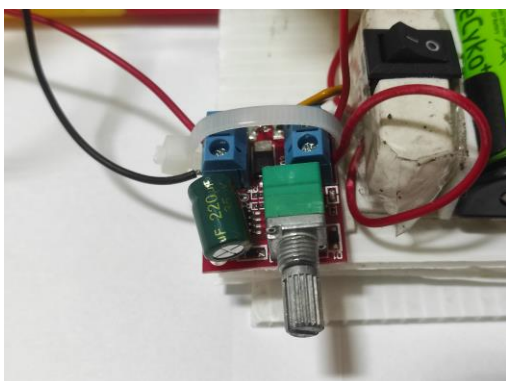


圖 3-19 pwm 直流馬達調速器

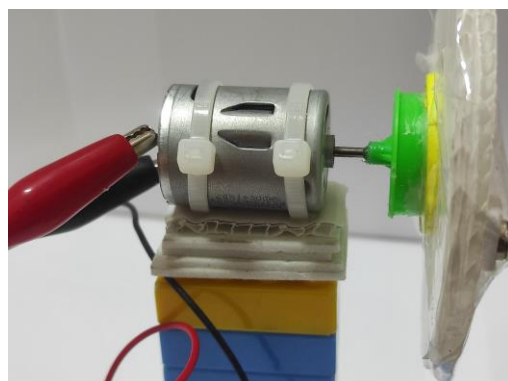


圖 3-20 馬達

為了增加馬達的轉速，需要多串聯幾顆電池來增加電壓，我們的馬達可以承受的電壓為 6V~9V，所以我們串聯 6 顆 1.2 伏特的充電電池，使得總電壓達到 7.2 伏特（圖 3-21）。因每一個製作出來的滾輪重量都有不同，轉動時需要的動力也會不同，所以需要能調節轉速的裝置，以固定每個滾輪的轉速，才能比較哪種滾輪的設計有利於側向力的產生。

實驗進行時，我們會始用 Arduino 和霍爾傳感器，來測得滾輪的轉動數據，再調整調速器來調成實驗需要的數值。

圖 3-22 為可調整長度的軸心，因為我們製做出的滾輪還是有幾 mm 長度的不同，雖然誤差不大，我們手工製做時也很難做到完全相同，但是裝上旋轉器時，會造成和轉盤密合度不佳。使用可調整長度的軸心，可以貼合不同組的滾輪長度，以方便實驗的進行。



圖 3-21 使用電壓為 7.2 伏特

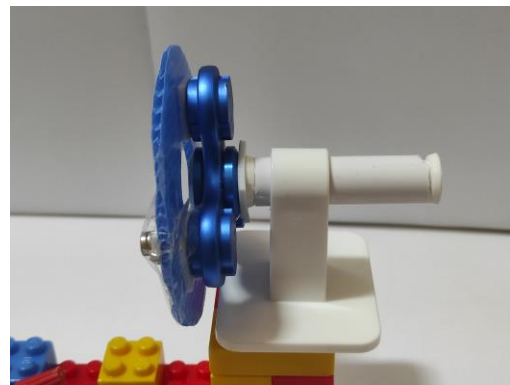


圖 3-22 可改變長度的軸心

最後，在轉盤的直徑兩端也貼上磁鐵，方便和滾輪上的磁鐵相吸，旋轉器旋轉時，即可帶動滾輪一起旋轉。

四、Arduino 和霍爾傳感器

Arduino 是整合微控制晶片及燒錄功能在一塊開發板上，現在很多機器人營隊中都有使用，學校中也有相關社團，Arduino 必須得搭配感測器或周邊設備，來達到邏輯判斷或是自動控制的目的。（圖 3-23）

我們使用霍爾傳感器來測量馬達轉速（圖 3-24）。霍爾傳感器，是一個換能器，將變化的磁場轉化為輸出電壓的變化。霍爾傳感器首先是實用於測量磁場，此外還可測量產生和影響磁場的物理量，例如被用於接近開關、位置測量、轉速測量和電流測量設備^{【6】}。

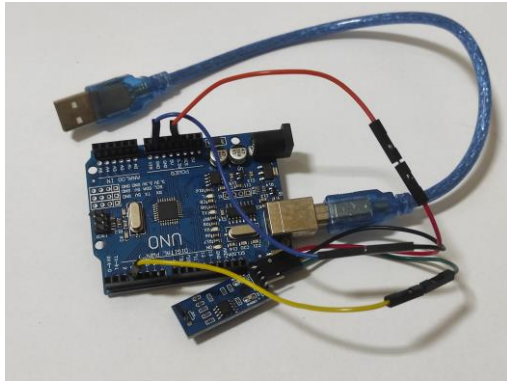


圖 3-23 Arduino 和霍爾傳感器

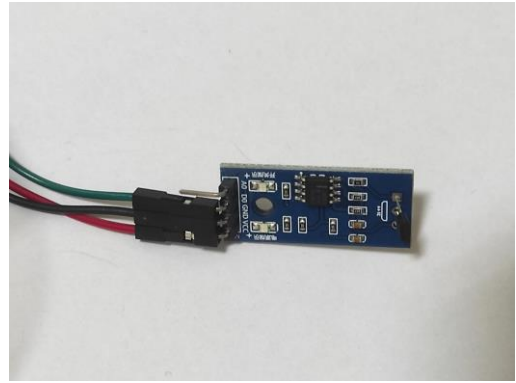


圖 3-24 霍爾傳感器

(一) 測馬達轉速

首先，在旋轉器黏上磁鐵（圖 3-25），為保持轉動時的平衡，在兩側都貼上磁鐵。將 Arduino 和霍爾傳感器以杜邦線連接好，然後燒入程式，讓數據回傳到電腦上。

霍爾傳感器前端感受到磁力時，會計下次數（圖 3-26），再算出轉動的速率，單位為每秒轉動次數。我們開啟電腦即可看到回傳的數據（圖 3-27），我們可以調整到我們要的轉速。



圖 3-25 讓磁鐵也跟著旋轉

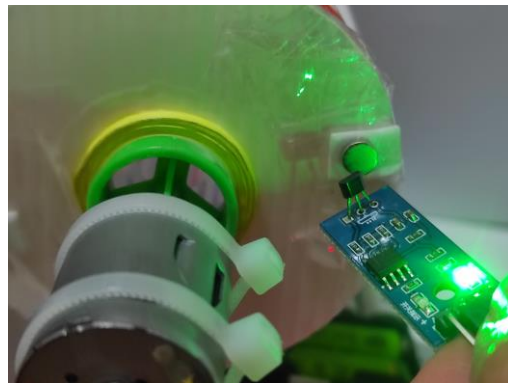


圖 3-26 感測器可偵測到旋轉次數

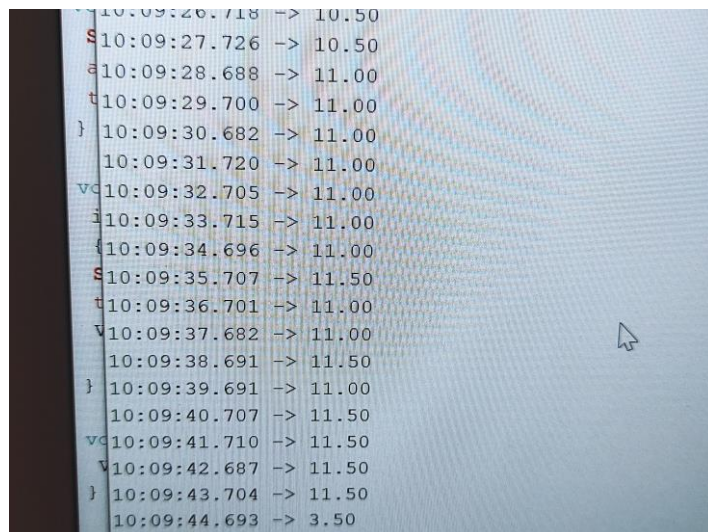


圖 3-27 數據回傳到電腦

以下為本實驗中使用的 Arduino 程式碼^[7]：

```
const byte interruptPin = 3;
const long taketime = 1000; // 每次測量的時間
unsigned long time; //設定變數 time，計時
float Val = 0; //設定變數 Val，計數

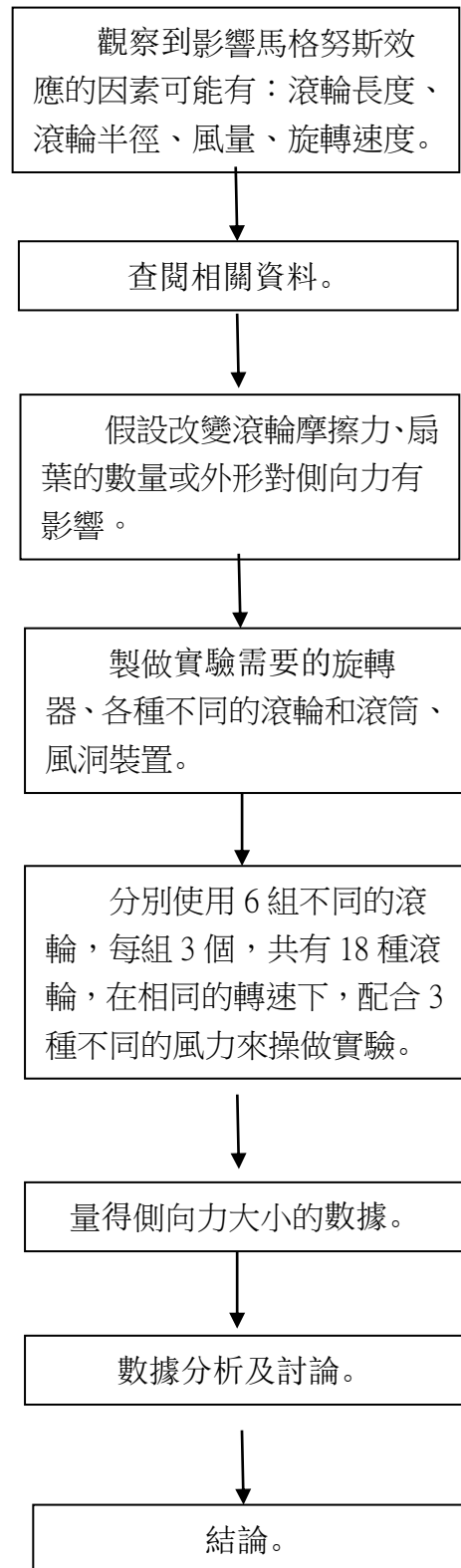
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(interruptPin), count, FALLING); //觸發訊號必須是變化的，上升或下降皆可
  time = millis(); //開始計時，time 獲得當前系統時間
}

void loop() {
  if (millis() >= time)
  {
    Serial.println(Val*0.5); //因為有 2 個磁鐵所以乘 0.5
    time = millis() + taketime; //標記未來的時間點，1000ms 後執行 if 判斷，輸出結果。另，降低重新整理頻率，可以提高解析度
    Val = 0; //輸出速度結果後清零，記錄下一秒的觸發次數
  }
}

void count() {
  Val += 1;
}
```

肆、研究方法

一、實驗流程圖



二、實驗方法

(1)將滾輪安裝於旋轉器上，旋轉器本體放置於天平上，按下歸零扣掉旋轉器的重量，接通電源開始旋轉（圖 4-1），使用 Arduino、霍爾傳感器和轉速調整器來控制旋轉器轉動速度(約每秒 11 轉)。

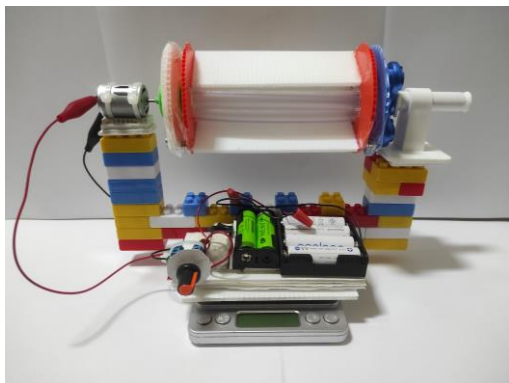


圖 4-1 實驗裝置圖

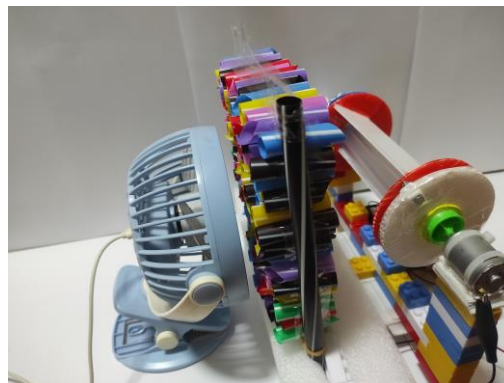


圖 4-2 將風扇架設好

(2)先在無風的情形下記錄天平的數值。（圖 4-2）

(3)打開風扇，讓風扇的風經過風洞後，使用風速計測得風速。

(4)安裝上不同組的滾輪開始實驗，記錄下天平上數值的變化量，再改變風速，並記下天平上的數值。因為滾輪在旋轉時會有震動的現象，所以我們將天平上數值變化時的大小值都記錄下來，再以平均值的方式來處理。

(5)進行數據的分析和討論。

(6)如圖 4-3，我們讓滾輪以圖中所示的方向逆時針旋轉，讓風從左側吹來，使得滾輪產生向下的側向力。所以在實驗時，天平的數值會提高，因為我們實測的結果，讓側向力向下會使實驗數據較穩定。

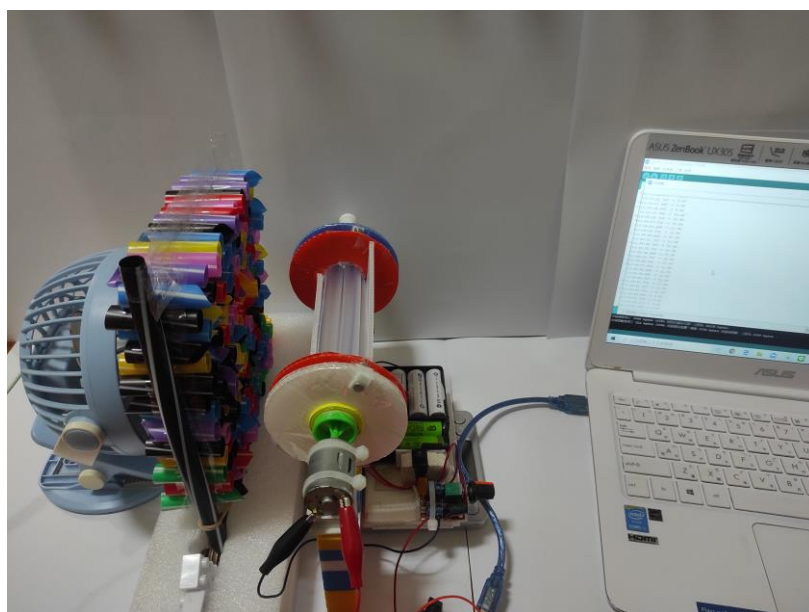


圖 4-3 實驗裝置接上電腦以測轉速

伍、研究結果

在操做實驗時，旋轉器帶動滾輪，無可避免產生震動的情形，這對我們測量數據時產生很大的阻礙，可以在表格中看到在沒有風速時，震動較小，一但有風力，且風力越大時，震動會明顯加劇。

所以，我們會將操作實驗時天平的數據變動上下值記錄下來，再扣掉無風時的數值，得到修正後數據，再用修正後數據來求平均值，儘力讓實驗數值較準確。

表格內為側向力：單位:gw 轉速為每秒 11 轉

A	實驗數據				修正後數據			平均值		
	無風時	2.2m/s	2.5m/s	3.0m/s	2.2m/s	2.5m/s	3.4m/s	2.2m/s	2.5m/s	3.0m/s
A-1	0.2	1.7	1.9	2.5	1.5	1.7	2.3	1.8	2.1	2.5
	0.3	2.4	2.8	3.0	2.1	2.5	2.7			

A-2	0.0	2.0	1.8	2.4	2.0	1.8	2.4	2.1	2.5	3.0
	0.3	2.4	3.5	3.9	2.1	3.2	3.6			

A-3	-0.3	1.9	2.2	3.6	2.2	2.5	3.9	2.1	2.8	3.9
	0.5	2.5	3.6	4.4	2.0	3.1	3.9			

B	實驗數據				修正後數據			平均值		
	無風時	2.2m/s	2.5m/s	3.0m/s	2.2m/s	2.5m/s	3.0m/s	2.2m/s	2.5m/s	3.0m/s
B-1	0.0	3.1	3.8	4.0	3.1	3.8	4.0	3.8	4.2	4.7
	-0.5	3.9	4.0	4.8	4.4	4.5	5.3			

B-2	-0.2	2.7	3.0	3.6	2.9	3.2	3.8	3.4	3.2	3.9
	0.0	3.8	3.2	3.9	3.8	3.2	3.9			

B-3	-0.5	1.7	2.5	2.7	2.2	3.0	3.2	2.2	2.9	3.2
	0.2	2.3	3.0	3.4	2.1	2.8	3.2			

C	實驗數據				修正後數據			平均值		
	無風時	2.2m/s	2.5m/s	3.0m/s	2.2m/s	2.5m/s	3.0m/s	2.2m/s	2.5m/s	3.0m/s
C-1	-0.4	2.9	4.0	4.6	3.3	4.4	5.0	3.4	4.7	5.1
	0.0	3.4	4.9	5.1	3.4	4.9	5.1			

C-2	0.0	3.2	4.0	4.8	3.2	4.0	4.8	3.2	4.0	4.8
	0.4	3.6	4.4	5.2	3.2	4.0	4.8			

C-3	-0.4	2.5	3.0	3.6	2.9	3.4	4.0	2.9	3.4	3.8
	0.6	3.5	3.9	4.1	2.9	3.3	3.5			

D	實驗數據				修正後數據			平均值		
	無風時	2.2m/s	2.5m/s	3.0m/s	2.2m/s	2.5m/s	3.0m/s	2.2m/s	2.5m/s	3.0m/s
D-1	0.0	2.6	3.6	4.6	2.6	3.6	4.6	2.7	3.7	4.7
	0.1	2.8	3.9	4.9	2.7	3.8	4.8			

D-2	0.1	2.2	2.6	3.0	2.1	2.5	2.9	2.2	2.6	3.1
	0.2	2.4	2.9	3.4	2.2	2.7	3.2			

D-3	0.2	2.0	2.8	2.8	1.8	2.6	2.6	2.0	2.6	2.7
	0.4	2.5	3.0	3.1	2.1	2.6	2.7			

E	實驗數據				修正後數據			平均值		
	無風時	2.2m/s	2.5m/s	3.0m/s	2.2m/s	2.5m/s	3.0m/s	2.2m/s	2.5m/s	3.0m/s
E-1	-0.5	3.7	4.7	5.2	4.2	5.2	5.7	4.2	5.0	5.6
	0.2	4.3	5.0	5.6	4.1	4.8	5.4			

E-2	-0.2	1.7	2.6	3.6	1.9	2.8	3.8	2.1	2.9	4.0
	0.0	2.3	2.9	4.1	2.3	2.9	4.1			

E-3	0.2	2.0	2.8	3.0	1.8	2.6	2.8	1.8	2.7	2.8
	0.6	2.4	3.4	3.4	1.8	2.8	2.8			

F	實驗數據				修正後數據			平均值		
	無風時	2.2m/s	2.5m/s	3.0m/s	2.2m/s	2.5m/s	3.0m/s	2.2m/s	2.5m/s	3.0m/s
F-1	0.2	3.7	5.6	6.0	3.5	5.4	5.8	3.6	5.5	6.2
	0.3	4.0	5.8	6.9	3.7	5.5	6.6			

F-2	0.0	2.9	3.6	4.5	2.9	3.6	4.5	3.2	3.7	4.5
	0.2	3.6	3.9	4.7	3.4	3.7	4.5			

F-3	0.2	2.2	2.8	3.2	2.0	2.6	3.0	2.1	2.7	3.2
	0.4	2.6	3.1	3.7	2.2	2.7	3.3			

陸、討論

我們上網找相關資料時，可以從 NASA 的網頁發現圓柱體馬格努斯效應的公式，產生的側向力大小會受到下列幾個因素的影響：圓柱體的長度和半徑、風速大小、空氣密度、圓柱體轉速，且和上列因素皆呈正相關。

公式 式 6-1^[8]：

$$L = \rho G V \quad \rho : \text{空氣密度} \quad V = \text{風速}$$

$$G = 2 \pi b V_r \quad G : \text{渦流強度}$$

$$V_r = 2 \pi b S \quad V_r = \text{角速度} \quad S = \text{轉速} \quad b = \text{滾桶半徑}$$

但是沒有找到圓柱體表面摩擦力或改成扇葉形式後，所產生側向力大小的相關資料，所以我們在實驗中固定了圓柱體的長度和半徑、空氣密度，想要找到有沒有比傳統圓柱體更好的轉動體來增加馬格努斯效應所產生的側向力。改變風速這個變因是因為我們想知道不同扇葉形狀下，風速和側向力是否仍呈現正比的關係。

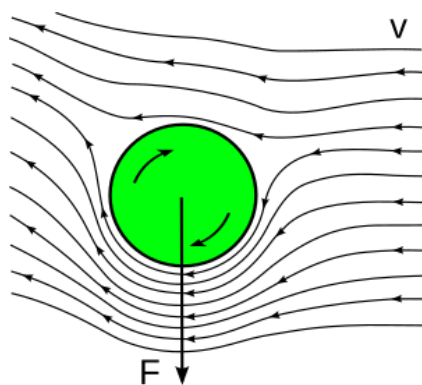


圖 6-1 滾筒周圍氣流變化^[9]

由圖 6-1 我們可以知道，馬格努斯效應的主要形成原因，是由於滾筒旋轉可以帶動周圍氣體，使得滾筒下側的流體速度增加，上側流體速度減小。氣體速度增加將導致氣體壓力減小，氣體速度減小將導致氣體壓力增加，這樣就使旋轉物體在橫向產生壓力差，並形成橫向力，即圖 6-1 中所形成向下的力 F。

討論一：滾筒和扇葉形滾輪比較

我們以 A 組及 B 組數據，畫成柱狀圖，來討論滾筒形式和扇葉形式的差異，如圖 6-2 所示。

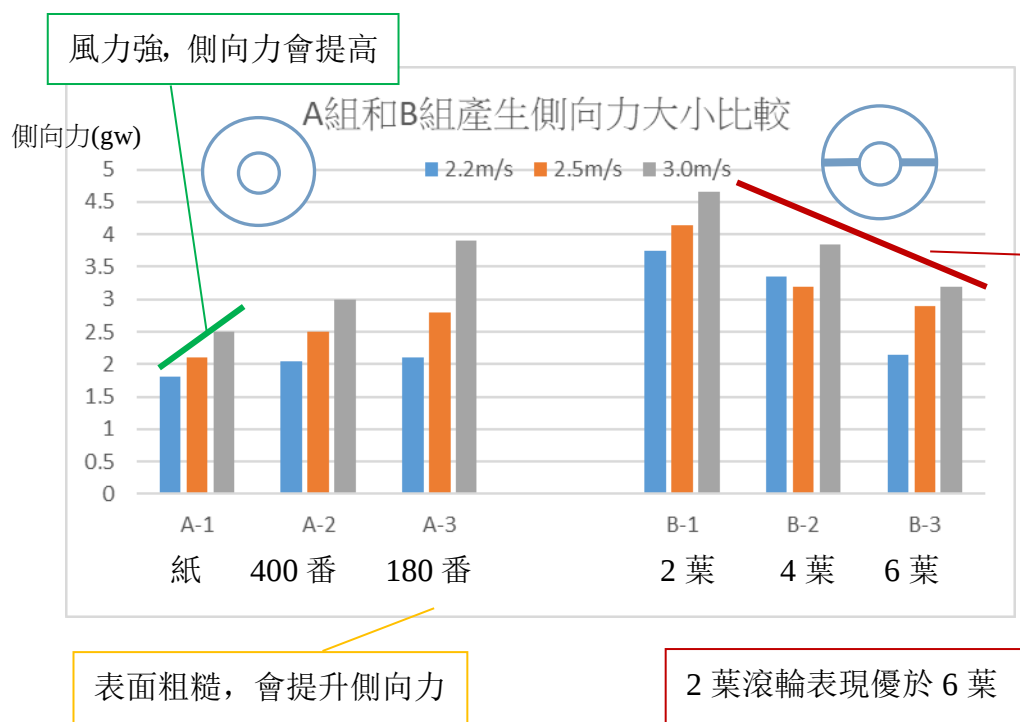


圖 6-2 A 組和 B 組數據柱狀圖

首先，在所有的實驗組別中，都可以發現，側向力和風力大小呈現正相關，這點在公式 6-1 中即可看得出來，我們的實驗中也驗證了此點。在圖 6-2 中的 A 組實驗，同為圓筒形狀，但增加摩擦力時，側向力有明顯提高，代表滾筒接觸面較粗糙時，會有更好的帶動空氣的能力，使滾筒上下壓力差增加，也促使側向力跟著增加。

	材質	拉動 50 克重 砝碼所需拉力 (gw)	摩擦力增加 百分比	3.0m/s 風速時 實驗數據(gw)	側向力增加 百分比
A-1	A4 紙	12		2.5	
A-2	400 番砂紙	20	67%	3.0	20%
A-3	180 番砂紙	46	130%	3.9	30%

表 6-1 摩擦力和側向力增加比例

我們做了簡單的實驗來測得 A-1~A-3 組實驗材質的摩擦力相對大小，經由拉動放置在上的 50gw 砝碼來求得最大靜摩擦力，由表 6-1 中的數據，在 3.0m/s 風速的情形下，滾桶摩擦力增加 67%時，滾桶側向力可增加 20%；滾桶摩擦力再增加 130%時，滾桶側向力也再增加 30%，看起來摩擦力增加也不是成正比關係，摩擦力影響也會漸漸下降。

將滾桶改成扇葉形式的 B 組實驗，從實驗數據來看有更好的帶動空氣的能力，尤其兩片扇葉的滾輪表現最佳，在 3.0m/s 的最大風力中，表面材質皆沒有砂紙的 A-1 及 B-1，數值從 2.5g 提升到 4.7g，大約提升了 86%。這讓我們瞭解為何在一些馬格努斯效應飛機的影片中，看到的大部份是使用兩片扇葉而非滾筒的形式。

不過，扇葉並非越多越好，在接下來的四葉 B-2 及六葉 B-3 實驗中可以看到，側向力逐漸下滑。為什麼扇葉數提升，反而不利於空氣的帶動呢？

我們試著以圖 6-3 來解釋。

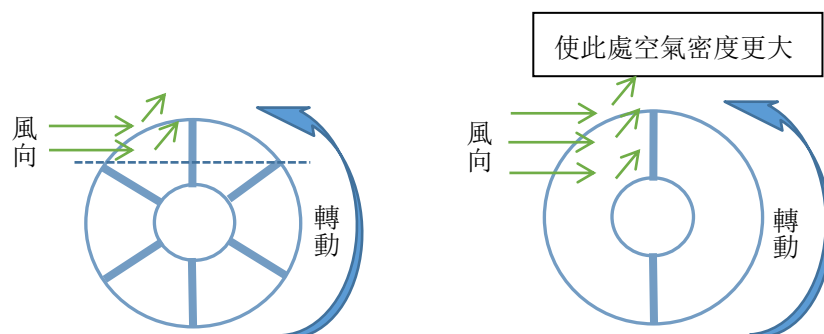


圖 6-3 6 葉扇和 2 葉扇轉動示意圖

從圖 6-3 中可以看到，兩葉扇在旋轉時，和空氣垂直作用的接觸面積比六葉扇大，更能使滾輪上方的氣體流動變慢，增加滾輪上方的氣體壓力，進而使馬格努斯效應的側向力更大。

	扇葉數	3.0m/s 風速時 側向力 (gw)	增加百分比
B-1	2 葉	4.7	
B-2	4 葉	3.9	-17.2%
B-3	6 葉	3.2	-16.9%
A-1	圓柱形	2.5	-21.9%

表 6-2 摩擦力和側向力增加比例

表 6-2 中可以看到，每增加兩個扇葉，約下降 17% 的側向力，若 6 葉扇變成 A-1 組的圓柱形滾輪，則側向力再下降 21.9%，顯示兩葉扇應是較合適的選擇。

討論二：L 形葉扇的影響

我們比較 C 組和 D 組 L 形葉扇的影響，我們設計的想法如圖 6-4，在葉扇邊緣黏貼一道小牆，是希望能留住空氣，使空氣形成亂流，促使空氣密度變大。

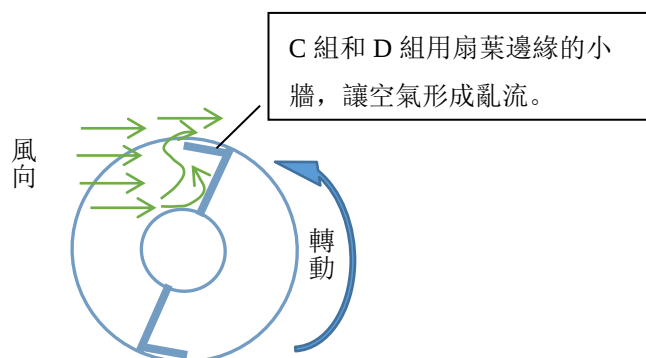


圖 6-4 L 形扇葉轉動示意圖

在扇葉數量由 2 片增加到 6 片時，側向力和 B 組實驗一樣逐漸減少，顯示多扇葉設計可能不是正確的做法。

C 組扇葉邊緣的高度為 1cm，D 組扇葉邊緣的高度為 2cm，以圖 6-5 中所示，扇葉邊緣更高的 D 組表現反而變差，以 3.0m/s 的風速下，D-1 比 C-1 下降 7.8%，而 D-3 比 C-3 更是下降了 29%。

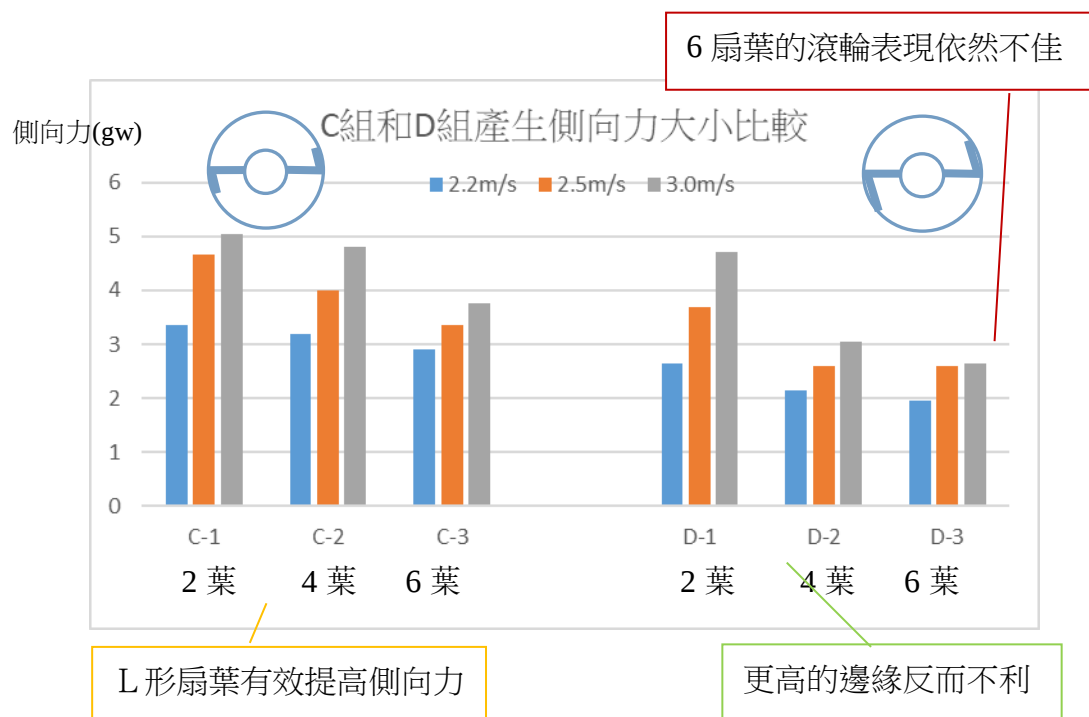


圖 6-5 C 組和 D 組數據柱狀圖

我們推測原因可能為過大的邊緣高度，會讓滾輪形式更接近滾筒外形，尤其是扇葉數量增加時，所以數據表現也會下降，圖 6-6。

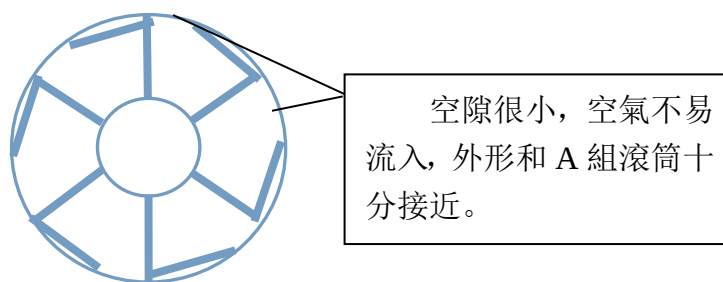


圖 6-6 邊緣高度 2 公分，六葉扇的 D-3 滾輪

討論三：增大葉扇面積的影響

最後我們比較 E 組和 F 組，這兩組是參考圖 1-2 中的設計，扇葉不裝在圓半徑上，而是和半徑有個夾角，但扇葉仍不超出滾輪圓周，這個做法可以增加扇葉和空氣接觸的面積，但仍保持滾輪半徑相同。B 組的扇葉寬度為 2.5cm，而 E 組將扇葉寬度增為

3cm，和輪子半徑夾角約為 60 度，而 F 組扇葉寬度增為 4cm，和輪子半徑夾角約為 120 度。

這兩組的側向力得到明顯的提升，也出現了我們共 18 個滾輪中表現最佳的側向力，2 葉的 F-1 滾輪有 6.2gw 的側向力。在 E 組和 F 組，葉片數量越多表現仍然越不佳，如圖 6-7。

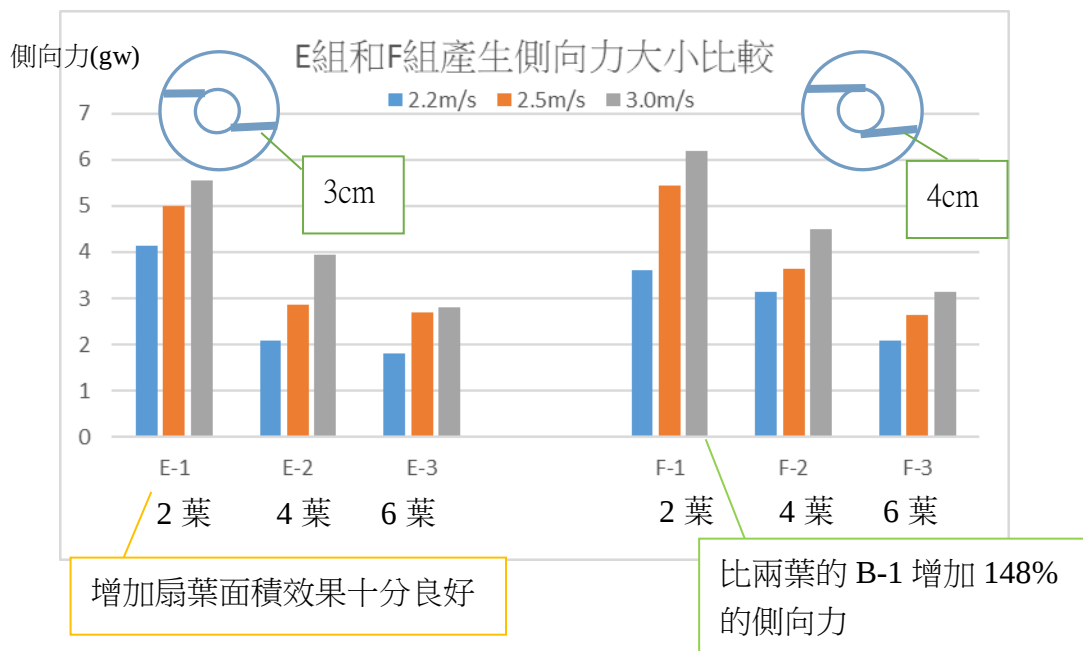


圖 6-7 E 組和 F 組數據柱狀圖

從實驗結果來看，增加葉片表面積是有用的。在表 6-3 中，當葉片表面積增加 20% 時，側向力也增加 19.4%，但是當表面積再增加 33.3% 時，側向力並沒有等比上升，只再增加了 11.7%。這顯示增加表面積也有其上限，而且在我們的實驗中，以兩片扇葉製作時，能擠下兩片寬 4cm 的葉片也已是極限，而前面的結果也說明增加更多扇葉也是不可行的做法。

	葉片寬度 cm (長度皆為 12cm)	葉片面積 (平方公分)	面積增加 百分比	側向力大小 (gw)	側向力增加 百分比
B-1	2.5	20.0	面積增加百分比	4.7	側向力增加百分比
E-1	3.0	24.0		5.6	
F-1	4.0	32.0		6.2	

表 6-3 葉片面積和側向力增加的關係

F 組滾輪的優勢應來自於較大的扇葉與角度，如圖 6-8 當風撞中扇葉時，有更多的風會順著扇葉上升，並在上方形成亂流減少空氣流速，使空氣形成較大壓力，也增加向下的側向力。

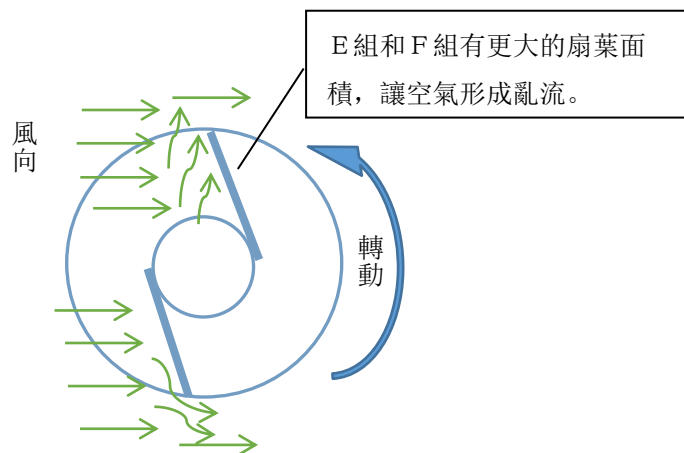


圖 6-8 E 組和 F 組滾輪轉動示意圖

討論四：改良形扇葉增加的效能比較

我們將各組材質相似、表現最佳的滾輪數據放在一起比較，如圖 6-9。

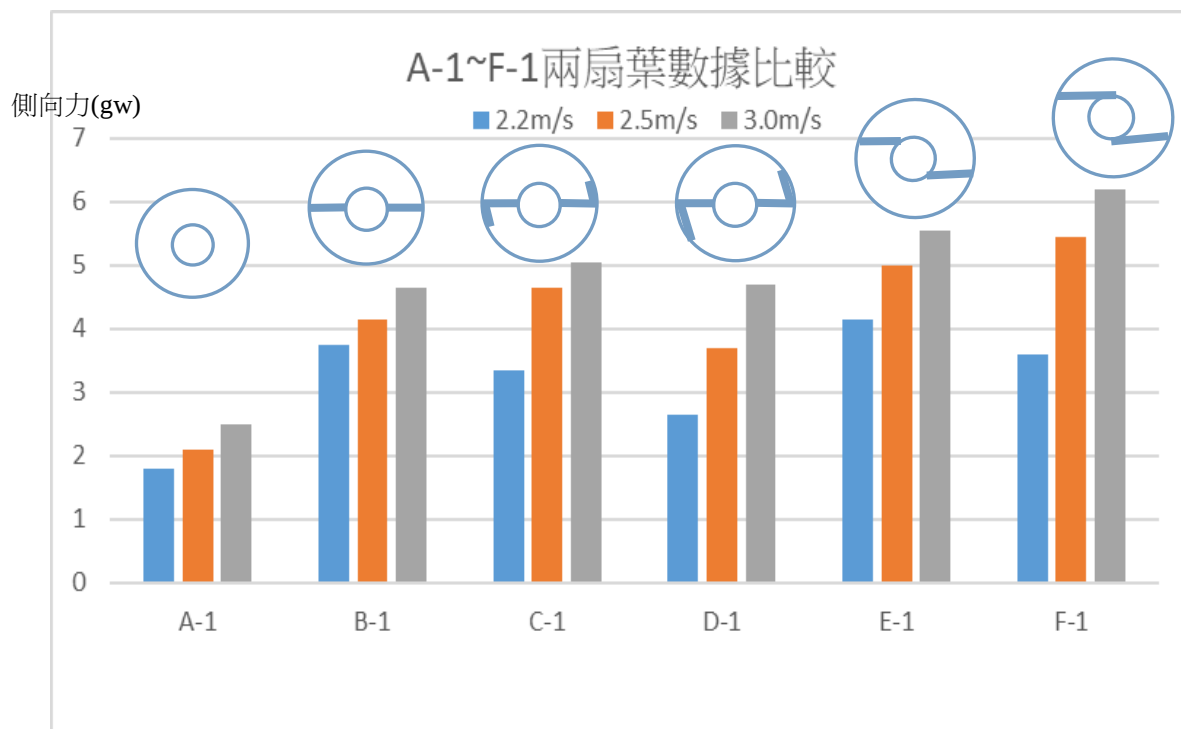


圖 6-9 A-1 滾筒、B-1~F-1 兩葉扇數據柱狀圖

	在 3.0m/s 的風速下產生 的側向力(gw)	相對於 A-1 組側向力 增加百分比
A-1	2.5	
B-1	4.7	86%
C-1	5.1	102%
D-1	4.7	88%
E-1	5.6	122%
F-1	6.2	148%

表 6-4 側向力增加百分比

從表 6-4 可以看得出來，改良滾輪形式對馬格努斯效應產生的側向力有相當的幫助，在我們的改良滾輪下，相較於常見的滾筒形式，兩葉扇就有 86% 的提升；而扇葉寬度增加到 4cm 的兩葉扇，能產生比滾筒最多達到 148% 的側向力，顯示這是值得研究的有趣課題。希望我們的實驗能激發更多的創意和想像力，有更多不同的改良扇葉出現。

討論五：應用討論

馬格努斯效應在生活應用上，因為滾輪需要額外滾動的動力，設計上較為不便，此點為其缺點。另外，飛機翅膀雖然占空間，但在引擎損壞時還可以滑翔，這也是使用滾輪的飛機所沒有的優點。但是，若能將滾輪安裝在高速行駛火車上，可以提供上升力，使火車重量減輕，減少燃料損耗；或安裝在汽車尾部，在汽車前進時增加下沉力，增加輪子抓地力，使車子較不易打滑。

希望我們的實驗，使用改良的滾輪有更好的側向力，能為節能環保做出貢獻。

柒、結論

在實驗中，我們發現：

固定滾輪的長度為 12cm、半徑為 4cm、轉速皆為每秒 11 轉下

1. 馬格努斯效應的側向力大小和風力強弱呈現正相關。
2. 在滾筒的形式下，3.0m/s 風速時，由 A4 紙張改成 400 番砂紙，滾筒摩擦力增加 67%，側向力由 2.5gw 上升到 3.0gw，側向力可增加 20%；由 400 番砂紙改成 180 番砂紙，滾筒摩擦力再增加 130% 時，側向力由 3.0gw 上升到 3.9gw，也再增加 30%。**顯示摩擦力和馬格努斯效應的側向力呈現正相關。**
3. 在 3.0m/s 風速時，圓筒形改成 2 個扇葉，側向力由 2.5gw 上升到 4.7gw，可提升 86% 的側向力；若將 2 扇葉改成 4 扇、4 個扇葉改成 6 扇，分別約下降 17% 的側向力，**顯示兩葉扇應是較合適的選擇。**
4. 在 3.0m/s 風速時，兩扇葉邊緣增加 1cm 的高度，側向力相比普通兩葉扇，由 4.7gw 上升到 5.1gw，可增加 8.5%；但若將扇葉邊緣高度增加為 2cm，側向力反而下降 7.8%。**顯示兩葉扇邊緣高度的增加是可以考慮的方式，但不是越高越好。**

5. 在 3.0m/s 風速時，兩葉扇的葉扇寬度 2.5cm 增為 3cm 時，葉扇面積增加 20%，側向力由 4.7gw 上升到 5.6gw，側向力增加 19.4%；當兩葉扇的葉扇寬度從 3cm 增為 4cm 時，葉扇面積再增加了 33.3%，側向力由 5.6gw 上升到 6.2gw，側向力也再提升了 11.7%。
顯示葉扇面積的增加對側向力有很大的提升。
6. 在我們的改良滾輪下，相較於常見的滾筒形式，兩葉扇就有 86%的提升；而滾筒變成寬度 4cm 的兩葉扇，能產生比滾筒最多達到 148%的側向力提升。**顯示葉扇的改良對側向力提升有幫助。**
7. 生活應用上，若能將滾輪安裝在高速行駛火車上，可以提供上升力，使火車重量減輕，減少燃料損耗，可達成節能的效果。

捌、參考資料

- 1.馬格努斯飛行器，越改進越原始的怪異機器
<https://www.youtube.com/watch?v=wEhVe0yrpps>
- 2.Redball，給你一對翅膀🦋 (馬格納斯效應)
<https://medium.com/@yeh10290304/redball-%E7%B5%A6%E4%BD%A0%E4%B8%80%E5%B0%8D%E7%BF%85%E8%86%80%E9%A6%AC%E6%A0%BC%E7%B4%8D%E6%96%AF%E6%95%88%E6%87%89-46ca045a6df8>
3. Magnus effect plane 【自製】馬格努斯效應飛行器，一般人都看不懂的飛機
<https://www.youtube.com/watch?v=-10zyHlXjpY>
4. 中華民國第 55 屆中小學科學 馬格努斯風力車之探究
- 5.國中自然與生活科技課本第四冊、第五冊 翰林版
6. 維基百科 霍爾傳感器
<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%9C%8D%E5%B0%94%E6%95%88%E5%BA%94%E4%BC%A0%E6%84%9F%E5%99%A8>
- 7.基礎教程 12 霍爾感測器與 Arduino 外部中斷
<https://itw01.com/QUDJPED.html>
8. Lift of Rotating Cylinder <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/cyl.html>
- 9.維基百科 馬格努斯效應
<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E9%A9%AC%E6%A0%BC%E5%8A%AA%E6%96%AF%E6%95%88%E5%BA%94>