

中華民國第 59 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 物理科

團隊合作獎

030104

蓋世魔球---瓶蓋棒球初探

學校名稱：金門縣立金城國民中學

作者： 國三 莊龍翔 國三 周子言 國三 林季妃	指導老師： 周大成 翁明芳
---	-----------------------------

關鍵詞：瓶蓋、康達效應、馬格努斯效應

摘要

本研究旨在研發製作可強化穩定氣流的風洞，以及可有效測量瓶蓋受力狀況和周圍氣流的測試架，並以此進行瓶蓋棒球研究。研究結果發現，長度比為整流段：壓縮段：實驗段=4：9：3的風洞，可明顯穩定和增強氣流。以小風扇結合 LM393、Arduino 組成的自製風速計可有效測出氣流速度。瓶蓋旋轉對其上升力、向左力及阻力會造成不同程度的影響。瓶蓋轉動方向向上，飛行路徑會向左偏。最後並根據康達效應、馬格努斯效應與實驗結果，推測出瓶蓋以不同旋轉方向及飛行速度所造成的飛行軌跡。

壹、研究動機

"揮棒落空！""哇，這球路也太刁鑽了吧！"最近一股瓶蓋棒球的旋風，從日本開始流行了起來。這是一種類似於棒球的運動，利用小小的寶特瓶蓋，就可以擲出各種千變萬化的曲線。隨手可得的瓶蓋加上飛快的球速與變化莫測的球路，讓大家一玩上手就停不下來。有趣的瓶蓋棒球使我們產生濃厚的興趣，到底是什麼因素使瓶蓋的運動軌跡如此變化多端？瓶蓋棒球在飛行時周圍的氣流和受力狀況有甚麼差異？為了解開瓶蓋棒球的奧秘，我們應用自然課學到的力與運動的觀念，開始了這一系列的研究。

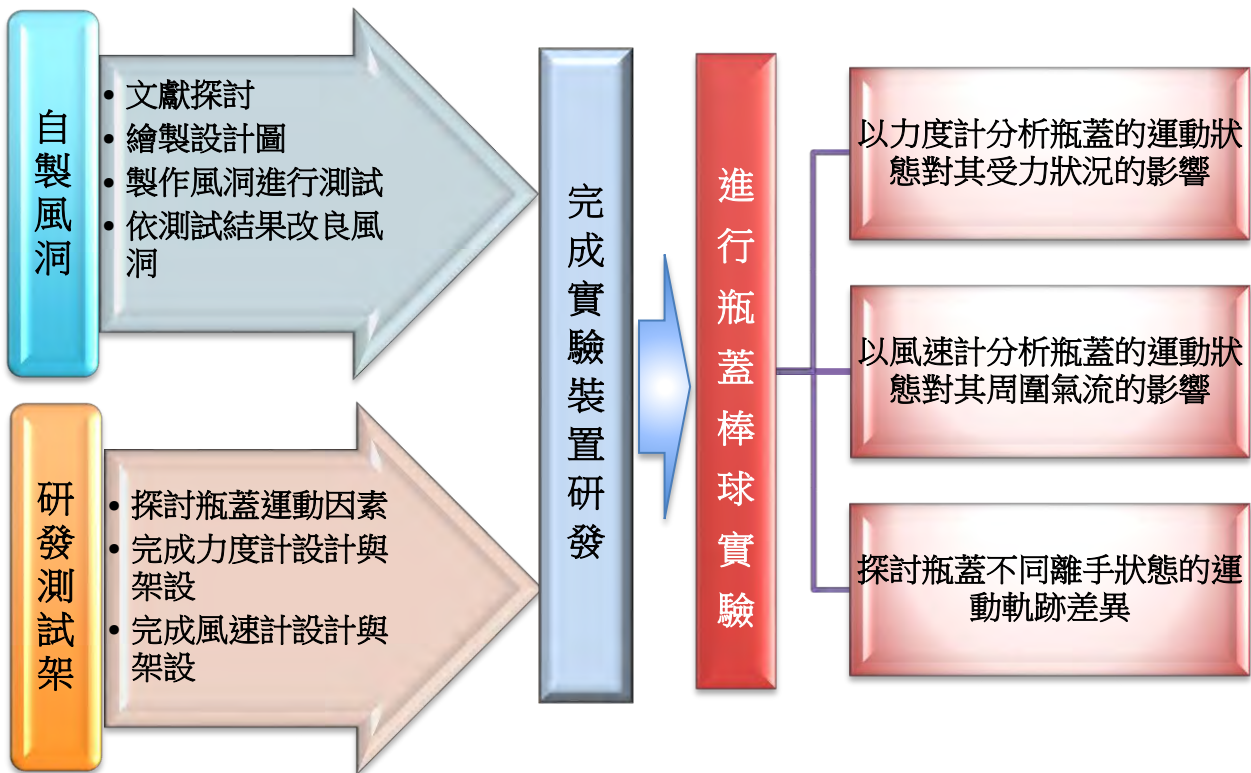
貳、研究目的

- 一、探討風洞原理並製作風洞以建立穩定不變化的氣流
- 二、探討瓶蓋運動相關因素並架設測量瓶蓋的測試架
- 三、研究瓶蓋的運動狀態對其受力狀況的影響
 - (一)探討不同轉速的瓶蓋對其所受垂直力、水平力及阻力的影響
 - (二)探討不同風速下的瓶蓋對其所受垂直力、水平力及阻力的影響
- 四、研究瓶蓋的運動狀態對其周圍氣流的影響
 - (一)探討不同轉速的瓶蓋其周圍氣流的變化
 - (二)探討不同風速下的瓶蓋其周圍氣流的變化
- 五、由研究結果探討瓶蓋離手時的方位及旋轉速度所造成的各種運動軌跡

參、研究設備及器材

			
風扇	風扇馬達專用調速器	風速計	自製風速計
			
滑輪	定滑輪(大)	Arduino uno 板	Arduino mega2560
			
筆記型電腦	力度計	LM393	HX711 力度計 重量感測模組
			
自製風洞	自製測試架	自製瓶蓋	自製測試環
			
線鋸機	鑽床	3D 列印機	可變電阻

肆、研究流程



伍、研究過程與結果

研究一、探討風洞原理並製作風洞以建立強而有力的氣流

一、文獻探討---風洞原理

1. 風洞是一種產生人造氣流的管道，用於研究空氣流經物體所產生的氣動效應，也可使風洞中的風速均一致。
2. 風洞分為整流段、壓縮段(收縮段)、實驗段(試驗段)三個部分。
 - (1) 整流段：擾流經過排列緊密的吸管整流段後，可穩定氣流方向與風速。
 - (2) 壓縮段：可使經過整流段的風集中並增強。
 - (3) 實驗段：提供穩定氣流，利於進行實驗與觀察。

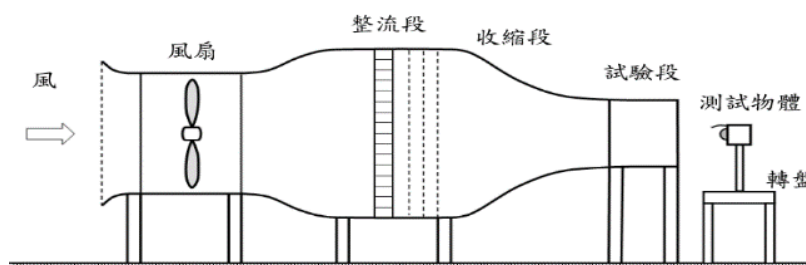
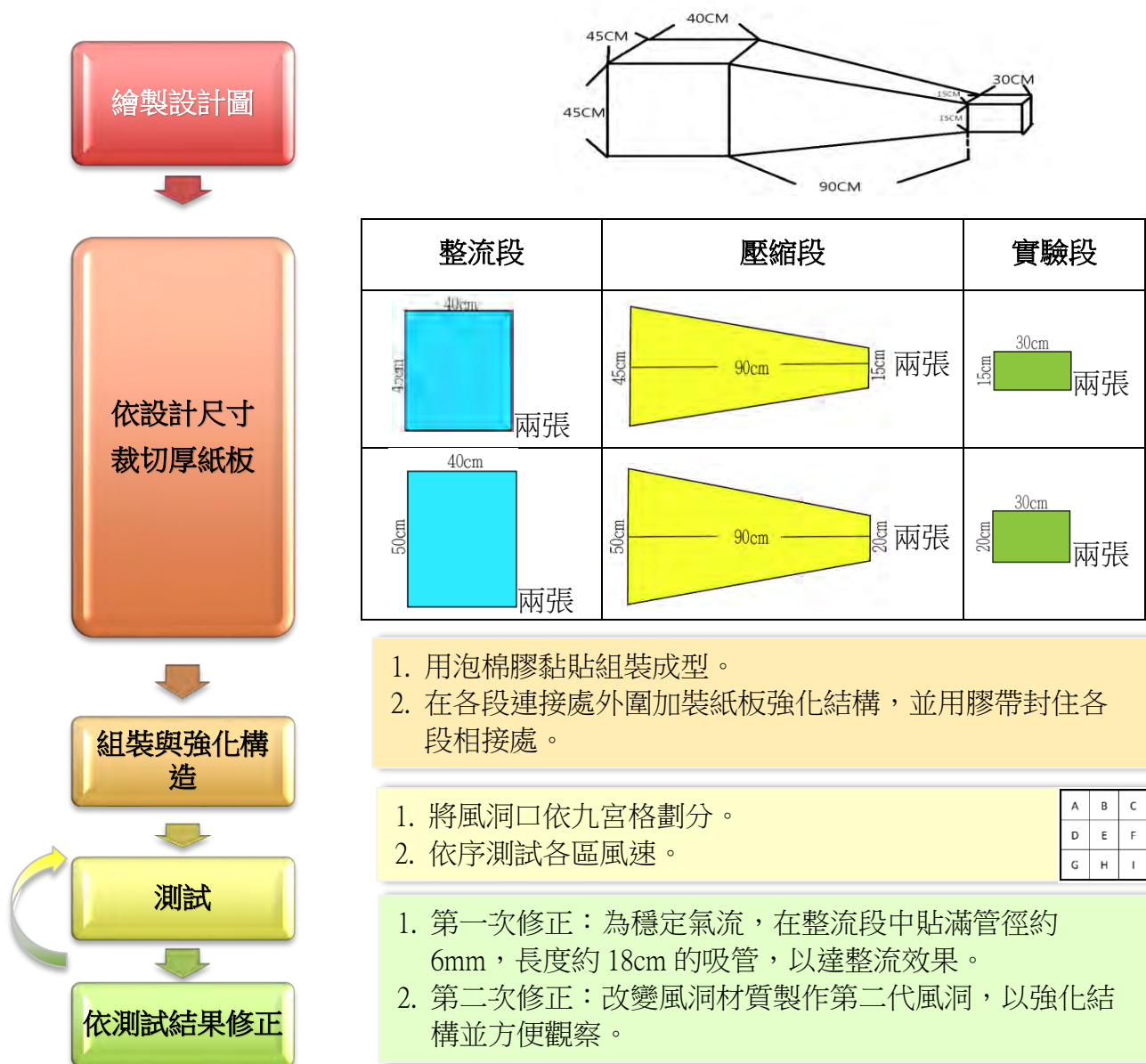


圖 1.風洞構造示意圖 (資料來源: <http://www.cv.ncu.edu.tw/html/IIS/eccc/W01/main2.htm>)

二、設計製作風洞

(一)、第一代厚紙板風洞研製流程：



(二)、第一代風洞測試結果：

1. 用厚紙板做出的第一代風洞裝置，將風洞出口依九宮格方式劃分，依序測試九個區域的風速，結果如表 1 示。



圖 2.第一代風洞完成

測試點	A	B	C	D	E	F	G	H	I
風速(m/s)	3.8	4.0	1.3	3.7	2.8	3.6	2.0	4.0	2.0

表 1. 無整流段紙箱版風洞氣流測試結果紀錄表

2. 由表 1 可發現，直接使用風扇吹出來的風量不穩，不同區域量到的風速變化很大。我們推論這應該是風洞中的氣流，在壓縮段中出現擾流所致。
3. 為了穩定氣流，我們在整流段貼滿管徑約 6mm，長度約 18cm 的吸管，以達整流效果。測試結果(表 2)發現，加了整流裝置的風洞口，每個區域的風速都較平均，氣流穩定，且風速明顯提升。

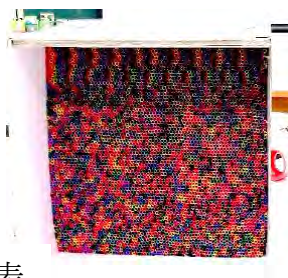


表 2.具整流段 紙箱版風洞氣流測試結果紀錄表

測試點	A	B	C	D	E	F	G	H	I
風速(m/s)	4.9	4.8	4.8	4.9	4.9	4.9	4.8	4.7	4.9

(三)、以木板製作第二代風洞

1. 以厚紙板製作風洞結構，雖然有材料易取得、成本低且易裁切等優點。但考量金門春天相對濕度高，甚至常會遇上霧天，紙質易吸水受潮變形，影響風洞結構。因此我們以第一代紙板風洞設計為依據，裁切厚度 3mm 的夾心木板製作第二代風洞。
2. 第二代風洞主體製作過程：
 - (1) 取約木板，依下列尺寸完成裁切。
 - 整流段：44.4cm*41cm 兩片、44.8cm*41cm 兩片。
 - 壓縮段：44.4cm~15cm*90cm 兩片、44.8cm~15cm*90cm 兩片。
 - 穩流段：15.6*10cm 兩片 15*10cm 兩片
 - (2) 取裁切好的木板，以線鋸機將壓縮段連接到整流段和穩流段部分的木板相接處，切割出鋸齒狀對接，並於接口塗上木工膠黏合。依序完成風洞主體組裝後，再以熱熔膠塗於接縫外圍，避免漏風。



圖 3.第二代風洞製作過程及完成圖

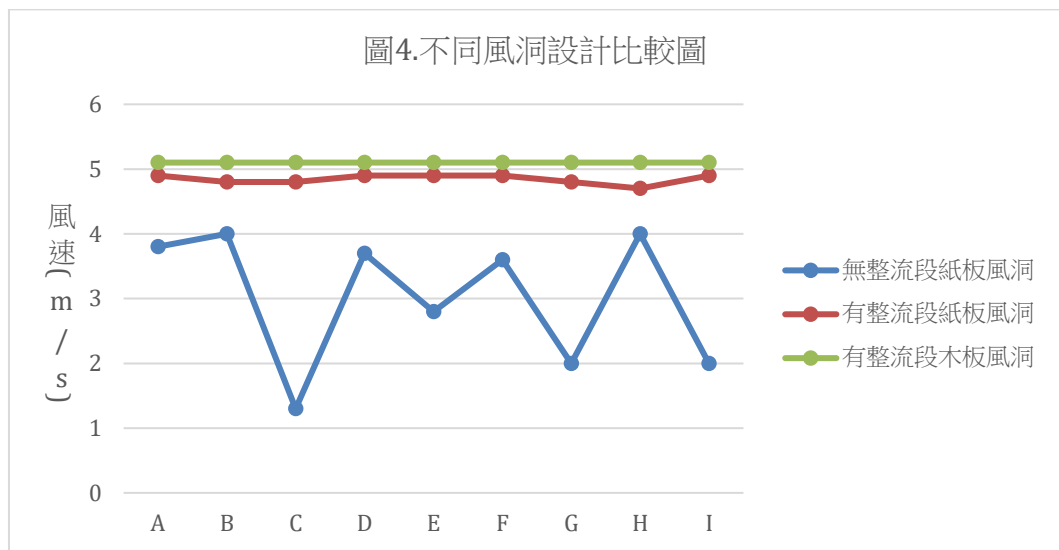
(四)第二代風洞測試結果

表 3.第二代風洞實驗段氣流測試結果紀錄表

測試點	A	B	C	D	E	F	G	H	I
風速(m/s)	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1	5.1

比較實驗段的測試結果(圖 4)可看出，第二代風洞的風速較第一代多

0.2m/s~0.4m/s，且氣流更穩定。可見以熱熔膠封住風洞接縫處外圍，確實能防止風從四周的小縫隙中漏出，使風洞內的氣流更集中，流到實驗段的風也更穩定。



研究二、探討瓶蓋運動相關因素並架設測量瓶蓋的測試架

一、經由資料搜尋與討論後，我們找出影響瓶蓋運動的相關因素包括下列三點，並根據這三個面向設計後續的實驗。

- (一). 瓶蓋飛行時的受力狀況可分為垂直力、阻力、水平力三個面向來討論，這三個力之間的消長變化，影響了瓶蓋的走向。我們利用靈敏度約 0.1 公克重的力度計，搭配 HX711 力度計重量感測模組，來測量力的變化。
- (二). 瓶蓋旋轉時，周圍的氣流流速也會跟著改變。此變化對瓶蓋的運動軌跡應該有很大的影響。我們設計自製風速計來測量瓶蓋旋轉時四周氣流流速的變化，並尋找其與瓶蓋運動軌跡的關係。
- (三). 瓶蓋擲出時是否旋轉，及轉動快慢不同，運動軌跡應該也會不同。我們利用馬達來帶動瓶蓋旋轉，並利用可變電阻調整瓶蓋轉速，以找出瓶蓋轉速與運動軌跡的關係。

二、研發測試架

(一).實驗段設計與製作流程



(二).確認尺寸及設計：

1. 配合風洞設計，實驗段內部尺寸預計為 14.8cm*15.1cm。
2. 實驗段除須放置瓶蓋外，尚要安排測試環、風速扇、LM393 及力度計等裝置位置。實驗裝置初步設計如圖 5 所示。

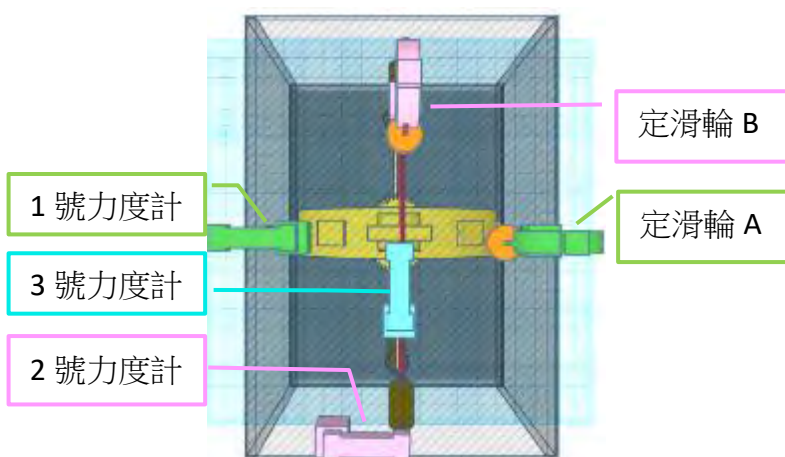


圖 5-1.實驗段設計上視圖

1. **阻力系統 X**:將兩條細繩固定在測試環上方，前後拉出，分別連接 2 號力度計與砝碼(定滑輪 B)以測阻力。
2. **向左力系統 Y**:兩條細繩固定在測試環，左右拉出，分別連接 1 號力度計與砝碼(定滑輪 A)以測向左力。
3. 測試環正上方直接以細繩連接 3 號力度計測向上力
4. **下方穩定系統**:兩條細繩固定在測試環下方前後拉出，分別連接砝碼以穩定測試環。

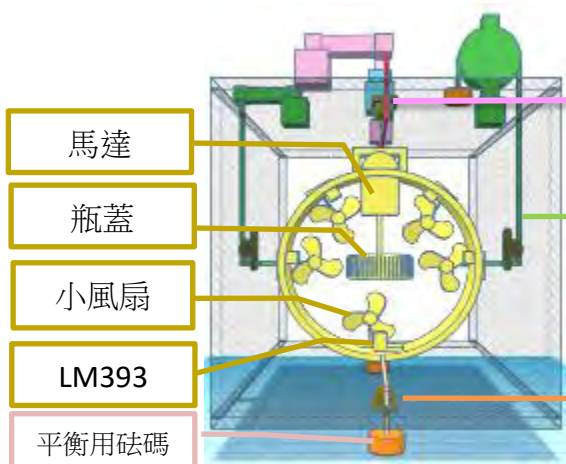
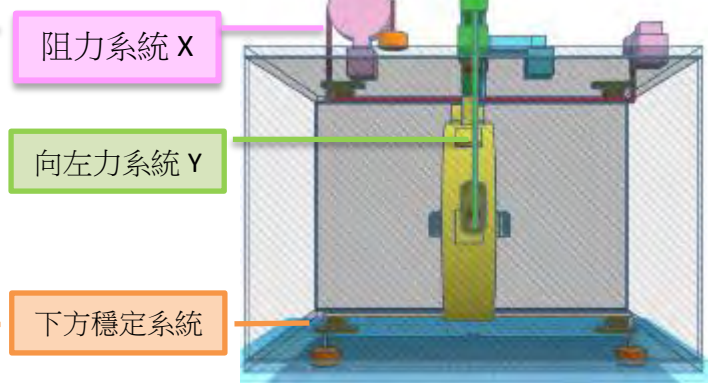


圖 5-2.實驗段設計前視圖



5-3.實驗段設計左視圖

(三).完成硬體裝置與軟體設計：

1. 瓶蓋的設計與製作

- (1). 參考可口可樂瓶蓋，並配合實驗段壓克力箱及測試環尺寸，以 Tinkercad 繪製瓶蓋設計圖(圖 6)。

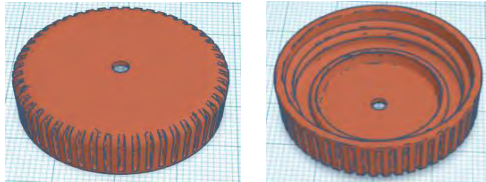


圖 6-1.瓶蓋 3D 設計圖

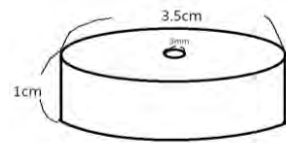


圖 6-2.瓶蓋尺寸設計圖

- (2). 以 Cura 軟體進行切片，再以 3D 列印機列印，完成瓶蓋製作

- (3). 將兩傘骨架裁切成適當長度，連接瓶蓋及馬達軸承(圖 7)。讓瓶蓋可以保持在測試環中央位置進行實驗。

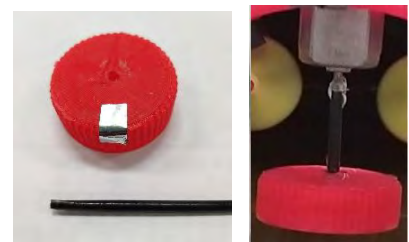


圖 7.瓶蓋及馬達軸承

2. 環的設計與製作

- (1). 配合實驗段壓克力箱尺寸，設計直徑 10cm，厚度 5mm 的測試環。並在其上預留小馬達、LM393 及小風扇等裝置的位置，以 Tinkercad 繪製設計圖(圖 8)。

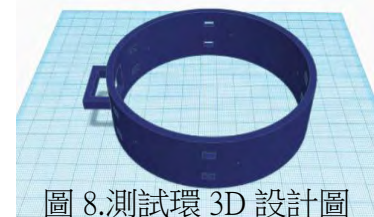


圖 8.測試環 3D 設計圖

- (2). 以 Cura 軟體進行切片，再以 3D 列印機列印，完成測試環製作。



3. 自製風速測量系統

- (1). LM393 光電對射式計數器模組，是藉由感應遮光與未遮光的差異，來測量遮光次數，進而計算出風扇每分鐘轉的圈數(rpm)，換算成風扇的轉速。
- (2). 將五個 LM393 置於測試環中。再以珠針作為 3cm 小風扇的轉軸，將小風扇固定於測試環上，使其能在 LM393 的偵測區中正常轉動，並以 1~5 編號(圖 9)

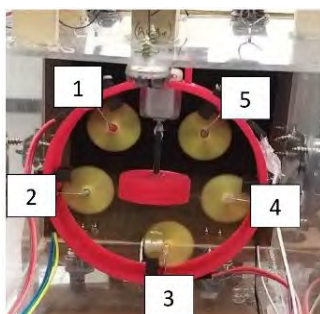


圖 9-1.測試環風扇對應編號圖

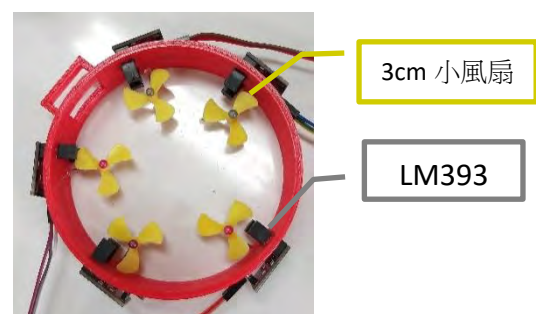


圖 9-2.測試環構造

- (3). 連接 Arduino 微電腦控制板及電腦，測量不同風速下所對應的小風扇轉速。
- (4). 參考天花板隨記的「Arduino 筆記(22)：LM393 光電對射式計數器模組測馬達轉速」，撰寫測量轉速的程式。Arduino 程式碼如下示：

```

sketch_jan19a
unsigned int count1=0;
unsigned int count2=0;
unsigned int count3=0;
unsigned int count4=0;
unsigned int count5=0;
int counterPin1=2;
int counterPin2=3;
int counterPin3=21;
int counterPin4=20;
int counterPin5=19;
unsigned long time2a;
unsigned long time2b;
unsigned long time2c;
unsigned long time2d;
unsigned long time2e;
unsigned int rpma;
unsigned int rpmb;
unsigned int rpmc;
unsigned int rpmd;
unsigned int rpme;
unsigned int grid_num=3;

void counter1(){
  count1++;
}
void counter2(){
  count2++;
}
void counter3(){
  count3++;
}
void counter4(){
  count4++;
}
void counter5(){
  count5++;
}

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(counterPin1, INPUT);
  pinMode(counterPin2, INPUT);
  pinMode(counterPin3, INPUT);
  pinMode(counterPin4, INPUT);
  pinMode(counterPin5, INPUT);
  attachInterrupt(0, counter1, FALLING); //2
  attachInterrupt(1, counter2, FALLING); //3
  attachInterrupt(2, counter3, FALLING); //21
  attachInterrupt(3, counter4, FALLING); //20
  attachInterrupt(3, counter4, FALLING); //20
  attachInterrupt(4, counter5, FALLING); //19
  count1=0;
  count2=0;
  count3=0;
  count4=0;
  count5=0;
  rpma=0;
  rpmb=0;
  rpmc=0;
  rpmd=0;
  rpme=0;
  time2a=0;
  time2b=0;
  time2c=0;
  time2d=0;
  time2e=0;
}

void loop() {
  counterA();
  counterB();
  counterC();
  counterD();
  counterE();

  delay(200);
}

void counterA() {
  if(millis()-time2a>=1000){
    detachInterrupt(0);
    rpma=(60*1000/grid_num)/(millis()-time2a)*count1;
    time2a=millis();
    count1=0;

    Serial.print("RPM1=");
    Serial.print(rpma,DEC);
    attachInterrupt(0, counter1, FALLING);
  }
}

void counterB() {
  if(millis()-time2b>=1000){
    detachInterrupt(1);
    rpmb=(60*1000/grid_num)/(millis()-time2b)*count2;
    time2b=millis();
    count2=0;

    Serial.print("RPM2=");
    Serial.print(rpmb,DEC);

    attachInterrupt(1, counter2, FALLING);
  }
}

void counterC() {
  if(millis()-time2c>=1000){
    detachInterrupt(2);
    rpmc=(60*1000/grid_num)/(millis()-time2c)*count3;
    time2c=millis();
    count3=0;

    Serial.print("RPM3=");
    Serial.print(rpmc,DEC);
    attachInterrupt(2, counter3, FALLING);
  }
}

void counterD() {
  if(millis()-time2d>=1000){
    detachInterrupt(3);
    rpmd=(60*1000/grid_num)/(millis()-time2d)*count4;
    time2d=millis();
    count4=0;

    Serial.print("RPM4=");
    Serial.print(rpmd,DEC);
    attachInterrupt(3, counter4, FALLING);
  }
}

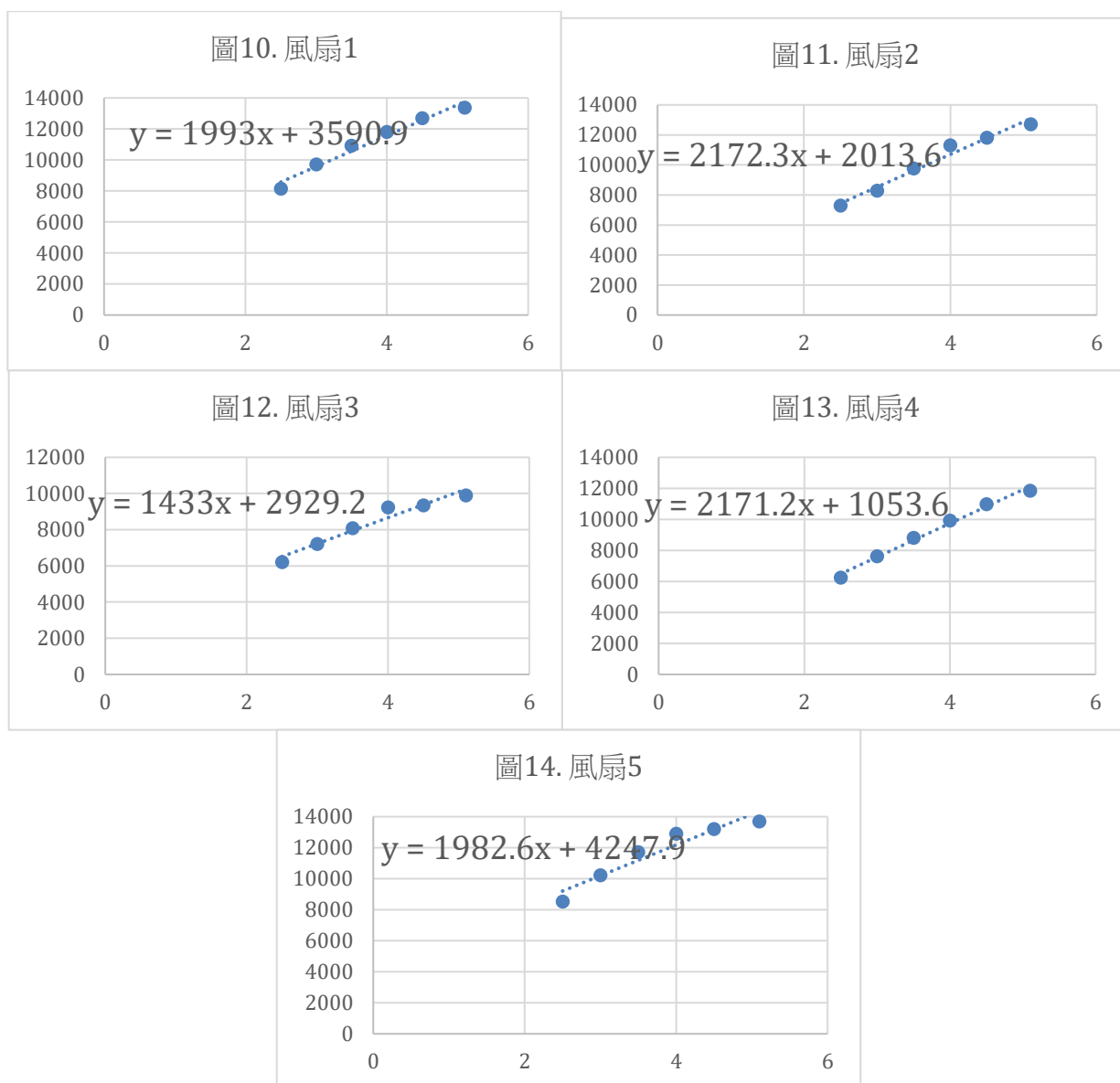
void counterE() {
  if(millis()-time2e>=1000){
    detachInterrupt(4);
    rpme=(60*1000/grid_num)/(millis()-time2e)*count5;
    time2e=millis();
    count5=0;

    Serial.print("RPM5=");
    Serial.println(rpme,DEC);

    attachInterrupt(4, counter5, FALLING);
  }
}

```

(5). 從 Arduino 序列讀取小風扇的風速與轉速數據，並以 Excel 分析，找出其線性關係，其中 x 為風速(m/s)，y 為小風扇轉速(rpm)。結果如圖 10~14 所示。



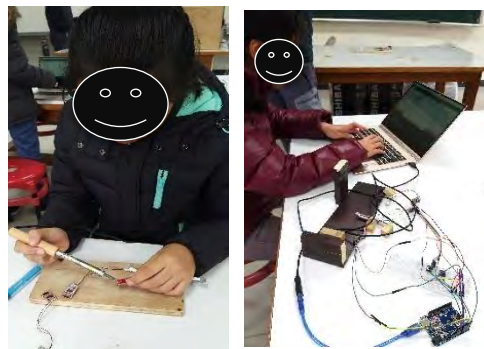
(6). 依據測試結果，找出小風扇轉速與風速關係公式如下表 4 所示。後續實驗將分別以此關係式，將 LM393 讀出的小風扇轉速，換算成風速。

表 4.小風扇轉速與風速關係

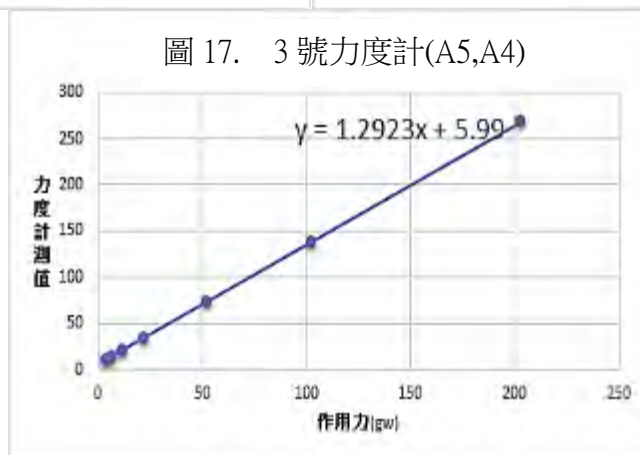
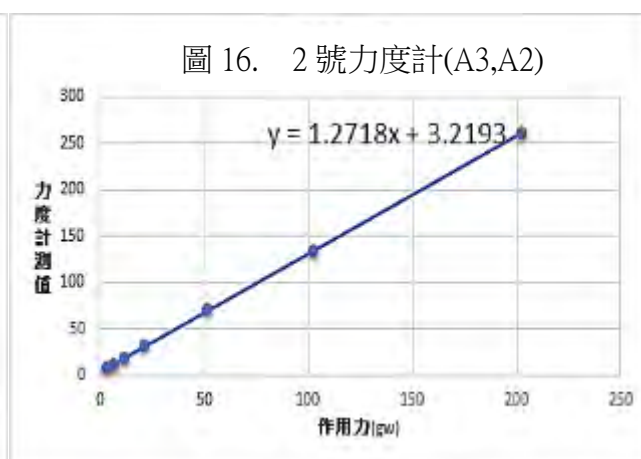
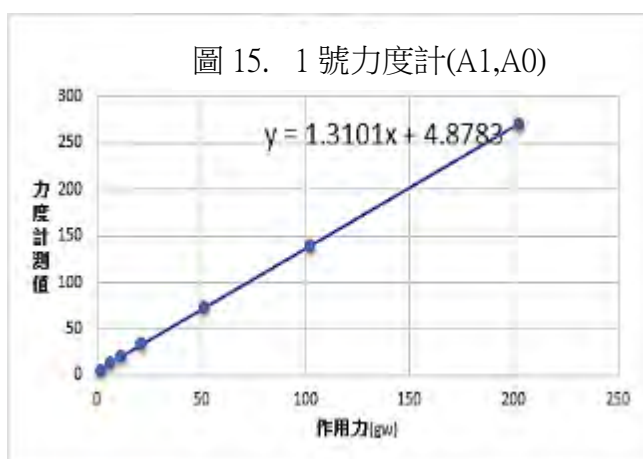
風扇編號	小風扇轉速與風速關係式
1	$y = 1993x + 3590.9$
2	$y = 2172.3x + 2013.6$
3	$y = 2401.5x - 2119.2$
4	$y = 2171.2x + 1053.6$
5	$y = 1982.6x + 4247.9$

4. 自製力度測量系統：

- (1). 將接腳以焊錫焊接在 HX711 重量感測器模組上，以連接力度計。
- (2). 取已知重量的砝碼，進行力度計校正測試。找出每個力度計測量結果與同重量的砝碼之間的線性關係。



三個力度計所測出的數值與砝碼實際重量的線性關係如下圖 15~17。



- (3). 依據測試結果，找出力度計讀數校正關係式如下表 5 所示。後續實驗將分別以此關係式，校正力度計讀數。(表中 x 為作用力(gw)，y 為力度計測量值)

表 5. 力度計讀數校正關係

力度計編號	力度計讀數校正關係式
1	$y = 1.3101x + 4.8783$
2	$y = 1.2718x + 3.2193$
3	$y = 1.2923x + 5.99$

(4). 參考 CSJH-Maker 的「HX711 重量感測」一文，編寫了一個可以同時讀取並顯示三個力度計數據的程式。程式碼如下：

```
sketch_feb30a
1 #include "HX711.h"
2
3 HX711 scale1;
4 HX711 scale2;
5 HX711 scale3;
6
7 void setup() {
8   Serial.begin(38400);
9
10  scale1.begin(A1, A0);
11  scale2.begin(A3, A2);
12  scale3.begin(A5, A4);
13
14  scale1.set_scale(2280.f);
15  scale1.tare();
16  scale2.set_scale(2280.f);
17  scale2.tare();
18  scale3.set_scale(2280.f);
19  scale3.tare();
20 }
21
22 void loop() {
23   Serial.print("one reading:\t");
24   Serial.print(scale1.get_units(), 1);
25   Serial.print("\t");
26   Serial.print(scale2.get_units(), 1);
27   Serial.print("\t");
28   Serial.print(scale3.get_units(), 1);
29   Serial.print("\n");
30   Serial.print("average:\t");
31   Serial.print(scale1.get_units(10), 1);
32   Serial.print("\t");
33   Serial.print(scale2.get_units(10), 1);
34   Serial.print("\t");
35   Serial.print(scale3.get_units(10), 1);
36   Serial.print("\n\n");
37
38   scale1.power_down();
39   scale2.power_down();
40   scale3.power_down();
41   delay(5000);
42   scale1.power_up();
43   scale2.power_up();
44   scale3.power_up();
45 }
46 #include "HX711.h"
47
48 HX711 scale1;
49 HX711 scale2;
50 HX711 scale3;
51
52 void setup() {
53   Serial.begin(38400);
54
55   scale1.begin(A1, A0);
56   scale2.begin(A3, A2);
57   scale3.begin(A5, A4);
58
59   scale1.set_scale(2280.f);
60   scale1.tare();
61   scale2.set_scale(2280.f);
62   scale2.tare();
63   scale3.set_scale(2280.f);
64   scale3.tare();
65 }
66
67 void loop() {
68   Serial.print("one reading:\t");
69   Serial.print(scale1.get_units(), 1);
70   Serial.print("\t");
71   Serial.print(scale2.get_units(), 1);
72   Serial.print("\t");
73   Serial.print(scale3.get_units(), 1);
74   Serial.print("\n");
75   Serial.print("average:\t");
76   Serial.print(scale1.get_units(10), 1);
77   Serial.print("\t");
78   Serial.print(scale2.get_units(10), 1);
79   Serial.print("\t");
80   Serial.print(scale3.get_units(10), 1);
81   Serial.print("\n\n");
82
83   scale1.power_down();
84   scale2.power_down();
85   scale3.power_down();
86   delay(5000);
87   scale1.power_up();
88   scale2.power_up();
89   scale3.power_up();
90 }
91
```

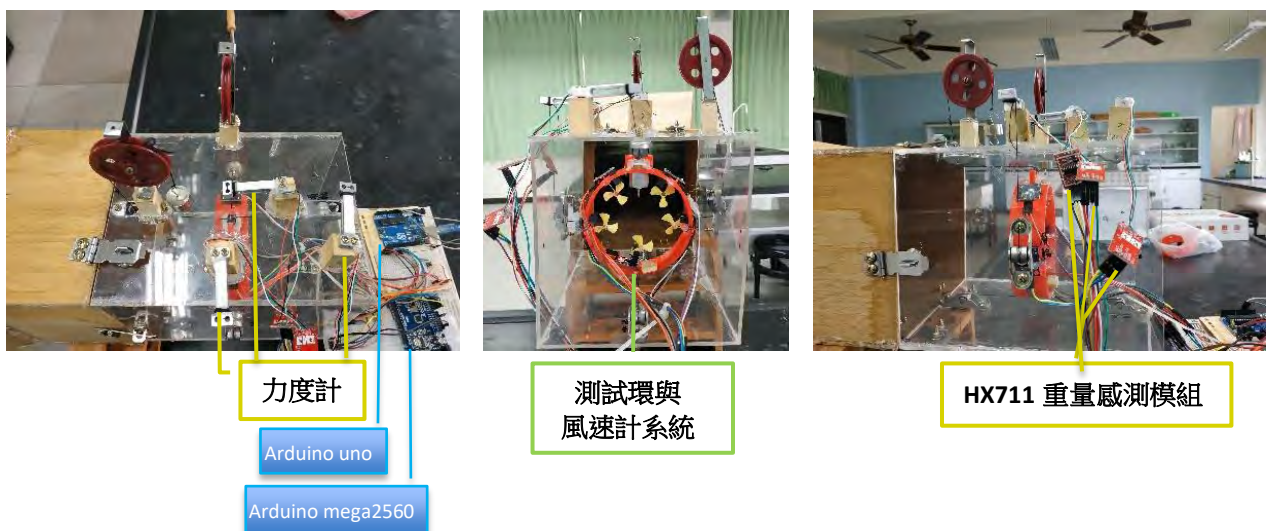
儲存完畢

5. 完成實驗區製作與硬體組裝：

- (1). 為方便觀察實驗進行，前端的實驗段改以厚度 3mm 的壓克力材質製作。並以活動扣與風洞主體連結，以利實驗裝置裝設與調整。
- (2). 依設計圖裁切壓克力板，並以鑽床在壓克力板上鑽 5mm 直徑的洞，以固定小滑輪。另再鑽出 1cm 直徑的洞，以將連結測試環與力度計的線通過。
- (3). 將力度計固定在實驗區頂端，以杜邦線連接 Arduino 板。後續研究主要測量瓶蓋上下、前後、左右三個向度的受力變化，因此我們設計一個面向只用一個力度計，另一側則掛砝碼，以維持測試環初始位置及平衡。
- (4). 將組裝完成的測試環置入實驗區中，以棉線連接力度計或砝碼維持初始位置之平衡。其上之 LM393 以杜邦線連接 Arduino 板。
- (5). 實驗裝置架設完成如下所示：



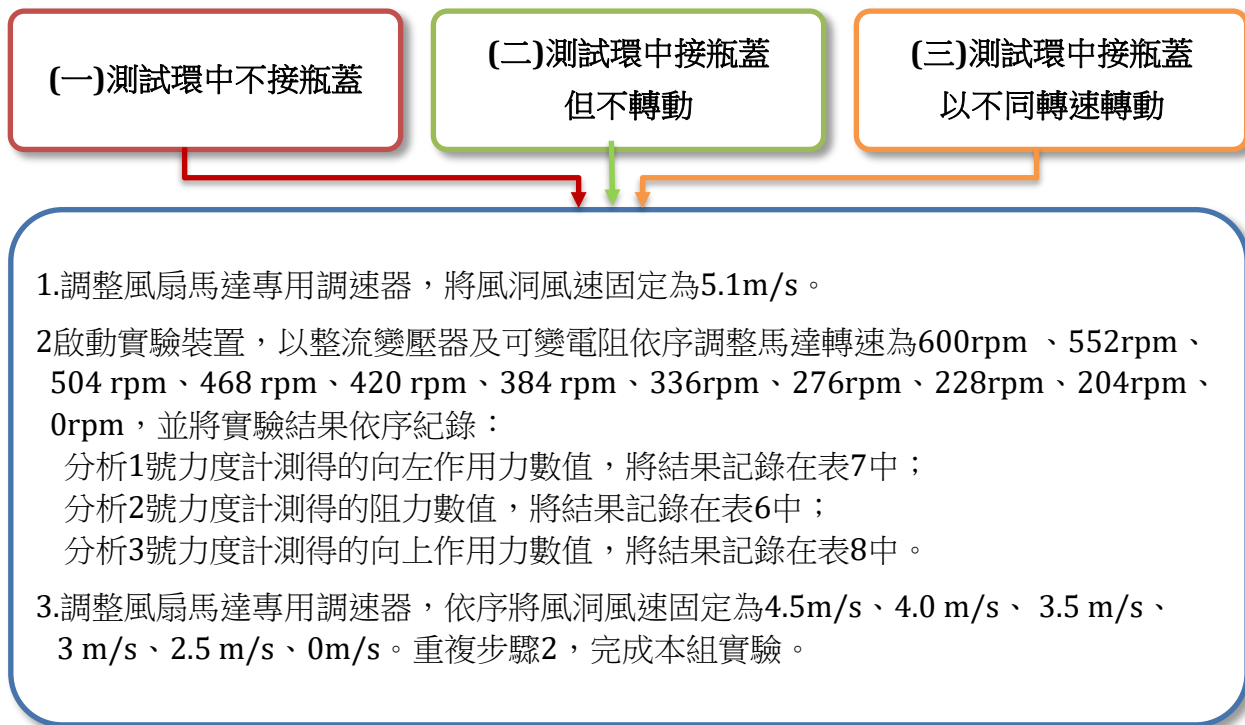
(6). 實驗段構造如下所示：



研究三、研究瓶蓋的運動狀態對其受力狀況的影響

一、以未裝設瓶蓋的實驗裝置作為對照組，探討瓶蓋有無，及不同轉速狀況下，瓶蓋運動狀態與阻力、向左作用力及向上作用力的關係。

二、實驗流程如下：



三、實驗結果：

表 6. 不同運動狀態瓶蓋所受阻力分析紀錄表

力 (gw) 瓶蓋轉速 (rpm) 風速 (m/s)	無瓶蓋	有瓶蓋										
		0	204	228	276	336	384	420	468	504	552	600
0	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.08	0.08	0.08	0.00	0.00
2.5	0.47	0.94	0.63	0.79	0.79	0.64	0.63	0.74	0.63	0.83	0.71	0.71
3.0	0.54	1.49	1.31	1.28	1.15	1.09	0.98	1.16	1.18	1.26	1.10	1.18
3.5	0.94	1.81	1.42	1.34	1.30	1.47	1.49	1.63	1.67	1.73	1.67	1.63
4.0	1.27	2.08	1.57	1.65	1.73	1.73	1.77	1.81	1.73	1.73	1.73	1.89
4.5	2.45	3.15	2.86	2.75	2.76	2.87	2.89	2.75	2.75	2.59	2.67	2.83
5.1	3.01	3.98	3.63	3.71	3.70	3.70	3.63	3.63	3.46	3.71	3.66	3.75

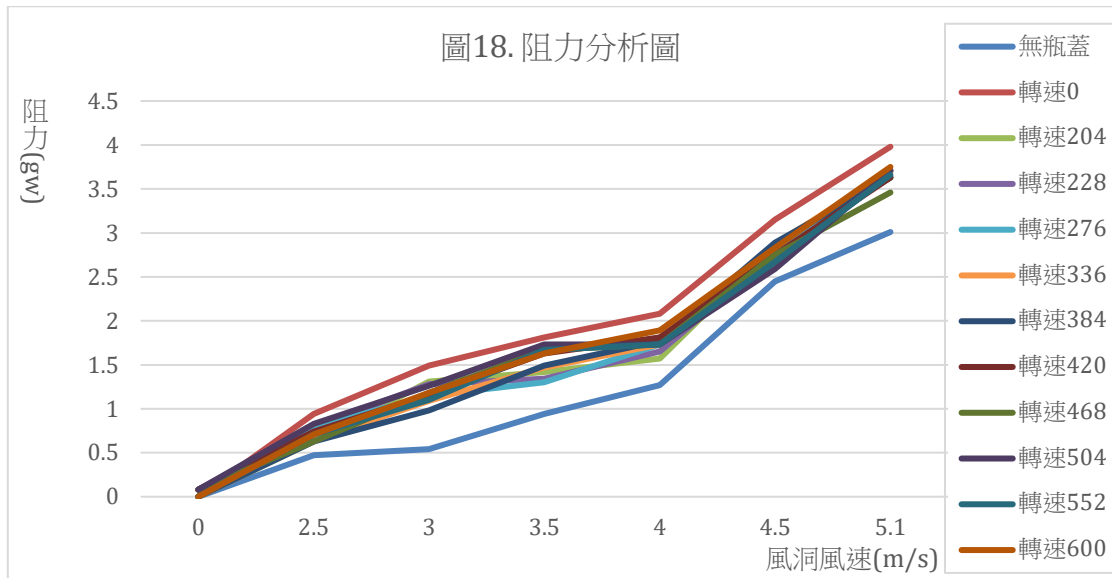


表 7. 不同風速，不同旋轉速度的瓶蓋所受向左作用力分析紀錄圖表

瓶蓋轉速 (rpm)	力 (gw)	無瓶蓋	有瓶蓋										
			0	204	228	276	336	384	420	468	504	552	600
0	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05	0.05	0.03	0.06	0.02	0.03	0.03	0.03	0.06
2.5	0.00	0.00	0.06	0.09	0.07	0.08	0.09	0.14	0.12	0.18	0.15	0.18	
3.0	0.00	0.00	0.01	0.04	0.09	0.08	0.17	0.11	0.17	0.23	0.21	0.24	
3.5	0.00	0.00	0.09	0.11	0.12	0.17	0.18	0.18	0.19	0.19	0.23	0.29	
4.0	0.00	0.00	0.05	0.15	0.14	0.18	0.23	0.21	0.23	0.3	0.33	0.37	
4.5	0.00	0.00	0.09	0.13	0.10	0.18	0.17	0.23	0.28	0.35	0.38	0.44	
5.1	0.00	0.00	0.11	0.14	0.18	0.20	0.26	0.31	0.38	0.43	0.49	0.54	

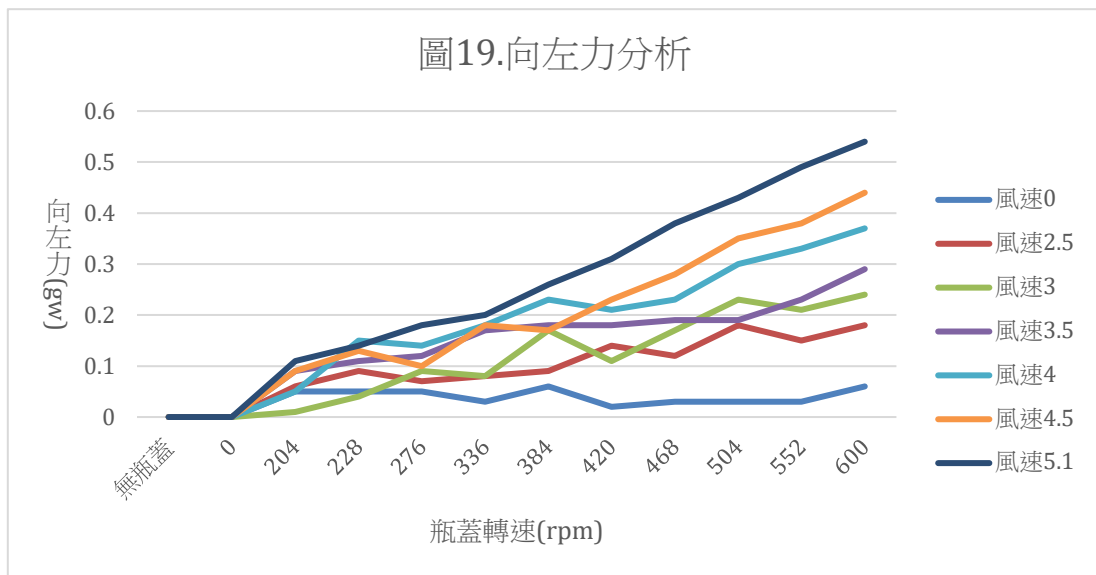
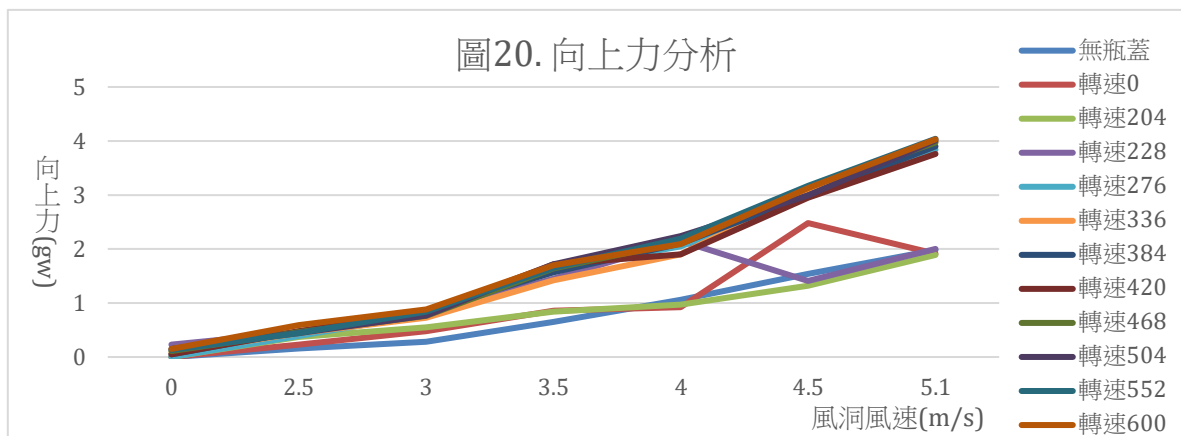


表 8.不同風速，不同旋轉速度的瓶蓋所受向上作用力分析紀錄表

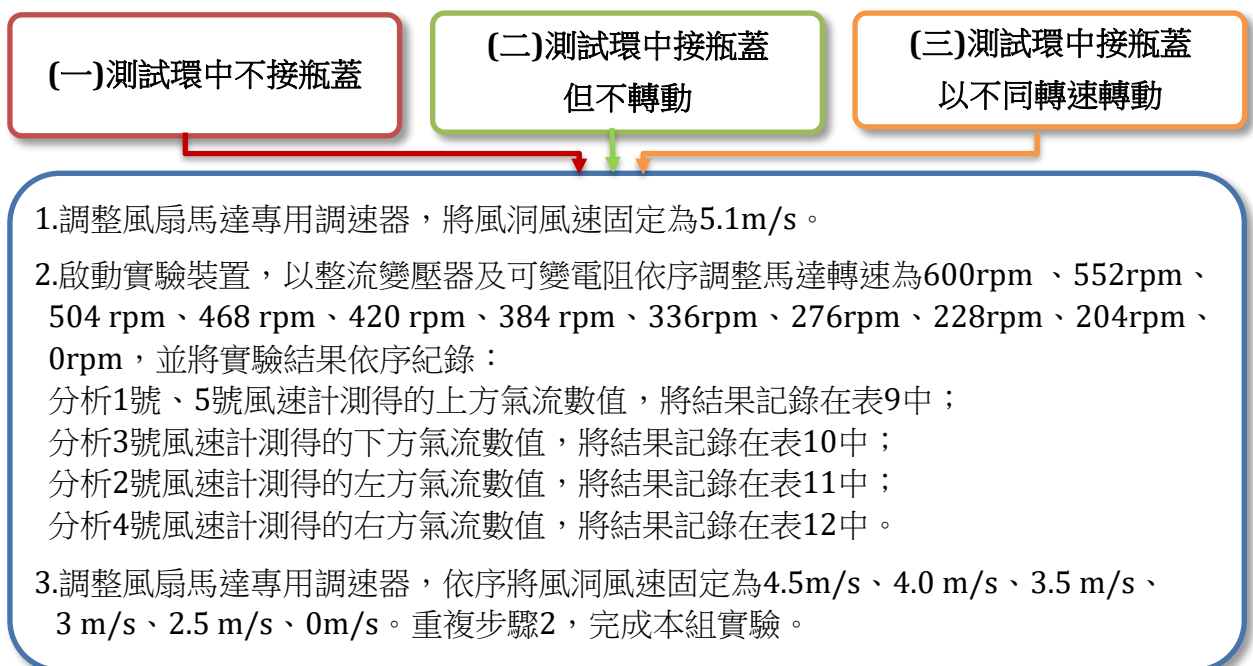
力 (gw) 瓶蓋轉速 (rpm) 風速 (m/s)	無瓶蓋	有瓶蓋										
		0	204	228	276	336	384	420	468	504	552	600
0	0.00	0.00	0.00	0.23	0.00	0.08	0.05	0.05	0.11	0.15	0.13	0.15
2.5	0.16	0.39	0.53	0.46	0.39	0.44	0.47	0.48	0.46	0.44	0.44	0.59
3.0	0.28	0.76	0.83	0.79	0.79	0.73	0.86	0.82	0.76	0.77	0.84	0.88
3.5	0.65	1.51	1.49	1.45	1.63	1.42	1.57	1.72	1.64	1.72	1.65	1.70
4.0	1.06	1.98	2.03	2.15	2.05	1.90	2.10	1.90	2.13	2.24	2.19	2.09
4.5	1.54	3.02	2.86	2.95	2.96	3.07	2.99	2.95	3.15	2.99	3.17	3.13
5.1	1.98	3.89	3.87	3.98	3.84	3.99	3.90	3.76	3.97	4.01	4.04	4.03



研究四、研究瓶蓋的運動狀態與瓶蓋周圍氣流的關係

一、以未裝設瓶蓋的實驗裝置作為對照組，探討瓶蓋有無，及不同轉速狀況下，瓶蓋運動狀態與周圍氣流的關係。

二、實驗流程如下：



三、實驗結果：

表 9.不同風速，不同旋轉速度的瓶蓋上方氣流分析紀錄表

瓶蓋轉速 (rpm) 氣流流速 (m/s) 風速(m/s)	無瓶蓋	有瓶蓋									
		204	228	276	336	384	420	468	504	552	600
2.5	2.5	2.5	2.5	2.4	2.5	2.5	2.4	2.5	2.5	2.4	2.4
3.0	3.0	3.0	3.0	2.9	2.9	2.9	2.9	3.0	3.1	3.1	3.0
3.5	3.5	3.5	3.4	3.5	3.6	3.5	3.5	3.5	3.4	3.4	3.5
4.0	4.0	4.0	4.0	3.9	4.0	3.9	3.9	4.0	4.1	4.0	4.0
4.5	4.5	4.6	4.4	4.5	4.5	4.4	4.6	4.6	4.5	4.6	4.5
5.1	5.1	5.1	5.0	5.1	5.1	5.1	5.0	5.0	5.1	5.1	5.1

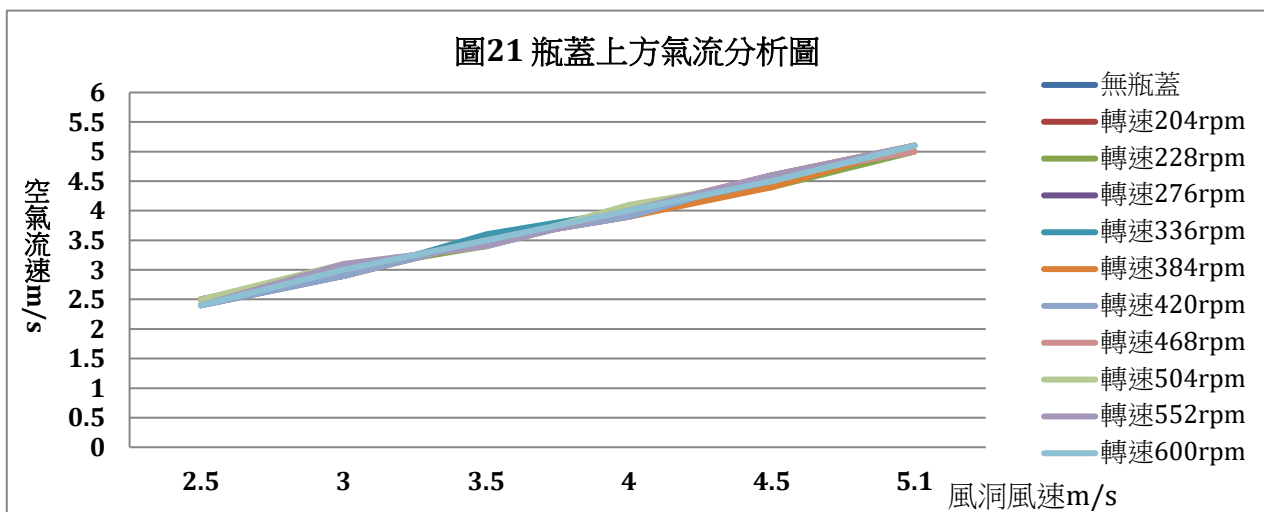


表 10.不同風速，不同旋轉速度的瓶蓋下方氣流分析紀錄表

瓶蓋轉速 (rpm) 氣流流速 (m/s) 風速(m/s)	無瓶蓋	有瓶蓋									
		204	228	276	336	384	420	468	504	552	600
2.5	2.5	2.4	2.4	2.5	2.4	2.5	2.5	2.4	2.4	2.4	2.3
3.0	3.0	2.9	2.9	3.0	3.0	3.0	2.9	2.9	2.9	3.0	2.9
3.5	3.5	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.4	3.3	3.4	3.4	3.3
4.0	4.0	3.8	3.8	3.7	3.9	3.8	3.8	3.7	3.9	3.9	3.8
4.5	4.5	4.4	4.4	4.4	4.3	4.3	4.3	4.4	4.4	4.3	4.4
5.1	5.1	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.9	4.9	4.9	4.8	4.8

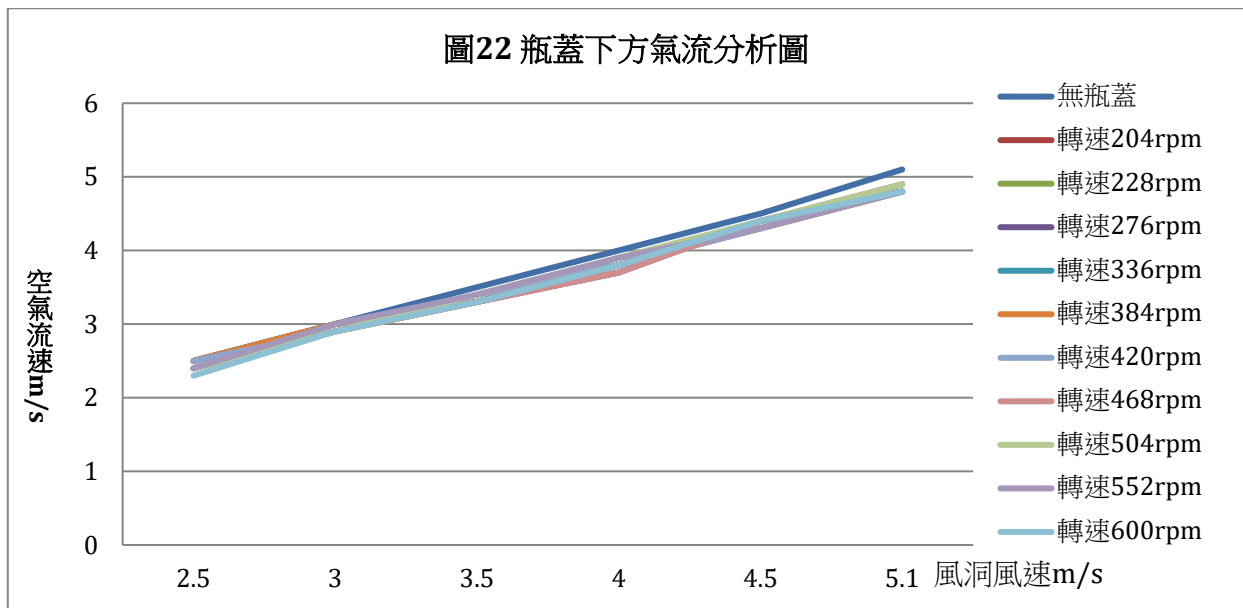


表 11.不同風速，不同旋轉速度的瓶蓋左方氣流分析紀錄表

瓶蓋轉速 (rpm)	無瓶蓋	有瓶蓋									
		204	228	276	336	384	420	468	504	552	600
2.5	2.5	2.6	2.7	2.7	2.7	2.8	2.8	2.8	2.9	2.9	2.9
3.0	3.0	3.7	3.6	3.8	3.7	4.0	4.3	4.7	4.5	4.8	4.6
3.5	3.5	5.3	5.6	5.2	5.1	4.9	4.9	4.9	4.8	4.9	4.3
4.0	4.0	5.2	5.3	5.3	5.3	5.6	5.8	5.7	5.3	5.4	5.7
4.5	4.5	5.8	5.7	5.0	5.3	5.5	5.6	5.6	5.6	5.7	5.7
5.1	5.1	6.2	6.3	6.2	6.4	6.9	6.9	6.3	6.2	6.0	5.6

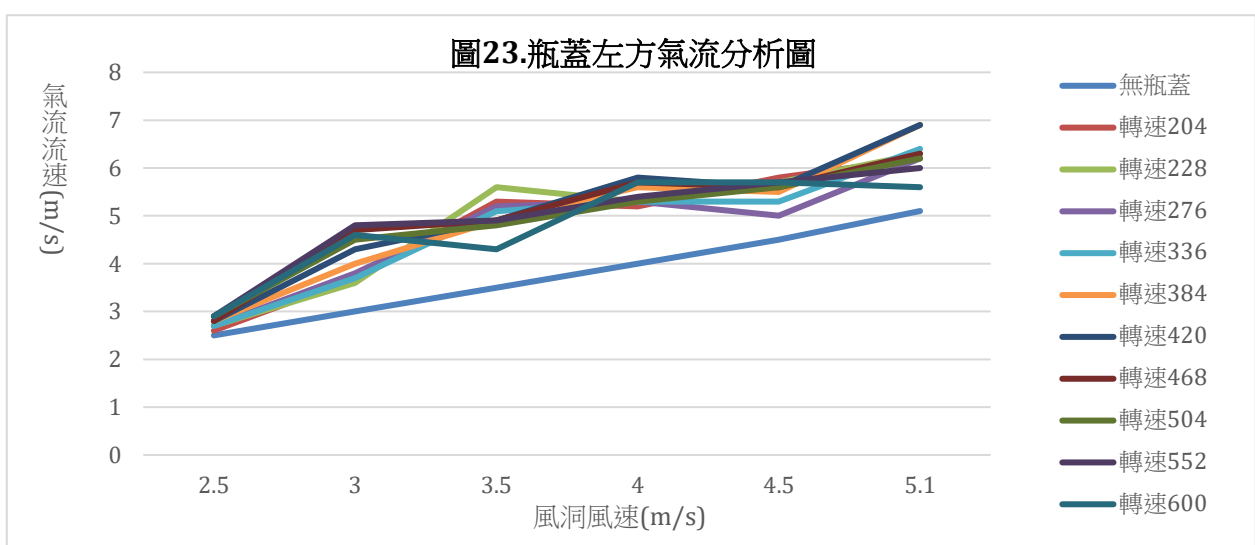
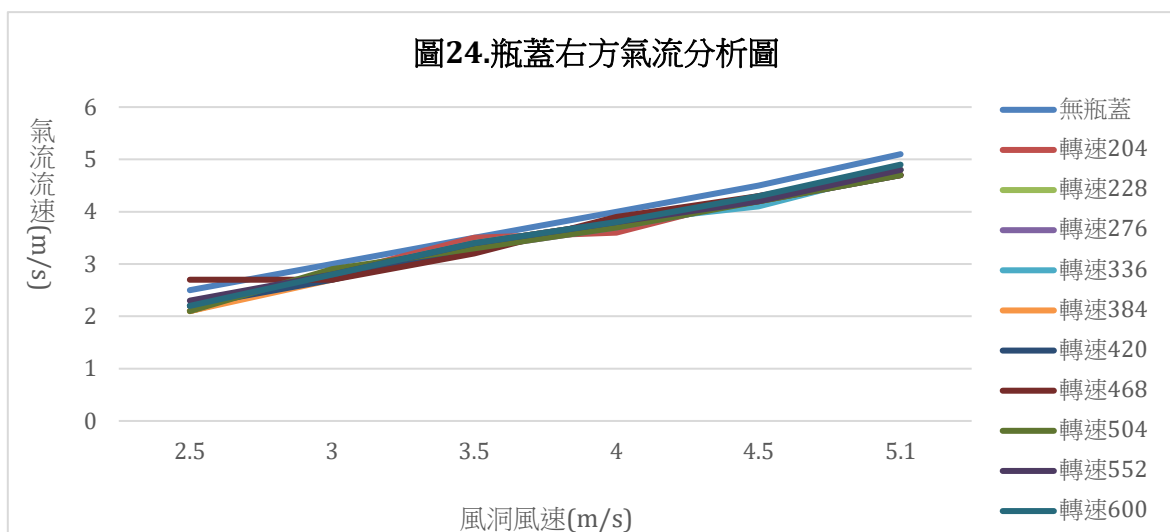


表 12.不同風速，不同旋轉速度的瓶蓋右方氣流分析紀錄表

瓶蓋轉速 (rpm)	氣流流速 (m/s)	風速(m/s)	有瓶蓋									
			無瓶蓋	204	228	276	336	384	420	468	504	552
2.5	2.5	2.5	2.1	2.1	2.2	2.2	2.1	2.2	2.7	2.1	2.3	2.2
3.0	3.0	3.0	2.8	2.8	2.8	2.8	2.7	2.7	2.7	2.9	2.8	2.8
3.5	3.5	3.5	3.5	3.4	3.3	3.4	3.4	3.3	3.2	3.3	3.4	3.4
4.0	4.0	4.0	3.6	3.8	3.7	3.8	3.8	3.8	3.9	3.7	3.8	3.8
4.5	4.5	4.5	4.3	4.2	4.2	4.1	4.2	4.2	4.3	4.2	4.2	4.3
5.1	5.1	5.1	4.8	4.8	4.7	4.8	4.7	4.7	4.7	4.7	4.8	4.9



陸、討論

- 為了有效模擬瓶蓋飛行時產生的氣流速度，並為後續研究提供穩定的氣流環境，我們在設計風洞時，著重整流段及壓縮段的設計。我們在沒有工業級風扇可用的限制下，有效將一般排風扇的風速由最小 1.3m/s 提升到 5.1m/s。由實驗段的檢測可知，經過我們設計的風洞處理後，風扇氣流明顯較穩定且增強，可見本研究在風洞各部分結構及比例上的設計是可行的。
- 由於實驗段空間有限，因此我們計畫用皮托管來測試風速，因皮托管體積較小，可在測試架中置入較大瓶蓋，讓瓶蓋飛行時的受力及氣流變化更明顯，以降低誤差。然而在測試過程中發現，我們購入的皮托管，可能因實驗段風速太低，或靈敏度不足，無法測量出風洞風速變化。所以後來我們改用 LM393 光電對射式計數感測器來進行實驗，以氣流帶動小風扇轉動，測量每個風扇單位時間內的轉速，再找出各組自製風速

計的轉數及風速關係式進行換算。這個設計雖然因體積關係，會對實驗氣流形成一些干擾，但仍不失為一個能成功執行並測出風速的裝置。且從成本上來看，也較經濟實惠。

3. 我們使用的力度計靈敏度很高，即使在較小的風速變化下，也能測出細微差異。但也因此使得一點小改變，例如實驗用的小馬達產生的震動，或實驗裝置拆卸組裝，甚至環境的小震動，都會造成誤差。所以每次開閉瓶蓋馬達時，力度計的數值都無法回到原本狀態。為解決這個問題，我們除盡力提高實驗裝置的穩定度外，更在每一次測完不同實驗後，都關掉馬達與風扇，盡量降低外在因素的影響，重新讀取力度計數值作為基準值，並計算基準值與測試時的數值之間的差值，代進原本求出的線性函數裡去求出作用力，作為我們的數據。

4. 由於設計測試環時，未考慮到在測量力時，需將細線綁在環和力度計之間(圖 25)，導致後來進行實驗時，左右和下方的線沒有拉得很平均，有時甚至還須用熱熔膠定位，這也導致了力的誤差。我們建議未來在進行相關實驗時，可準確設計綁線處(圖 26)，以減少變因。



圖25. 目前設計

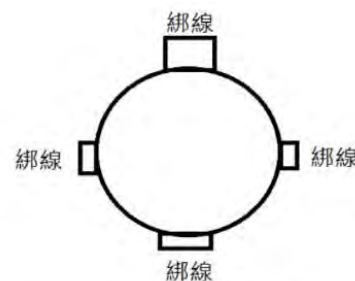


圖26. 未來可改進方向

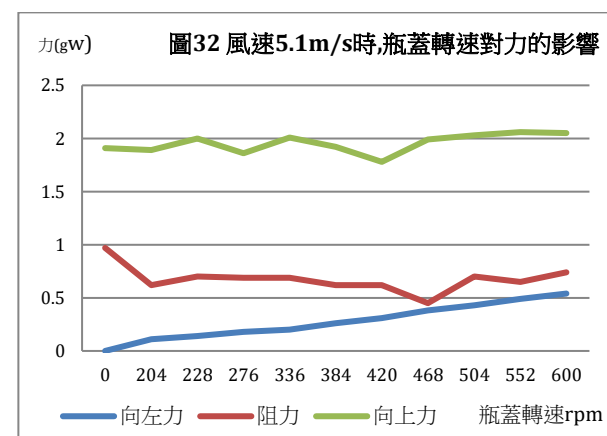
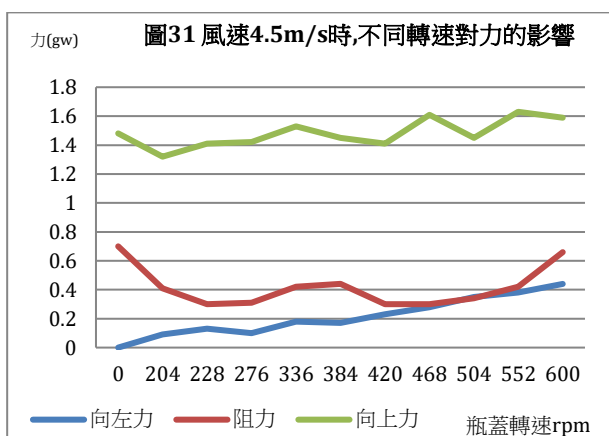
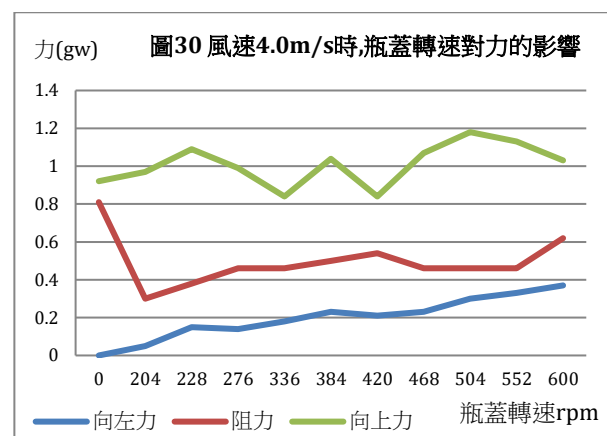
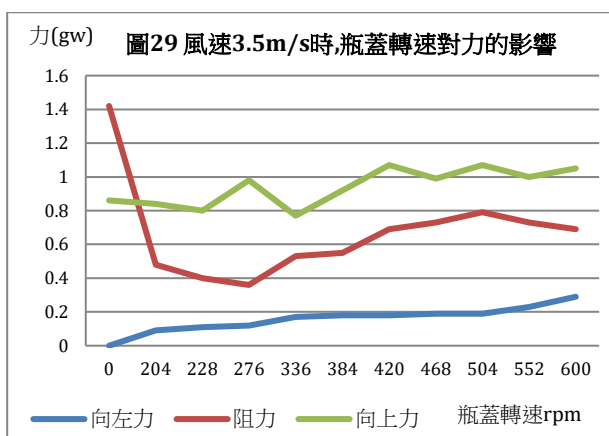
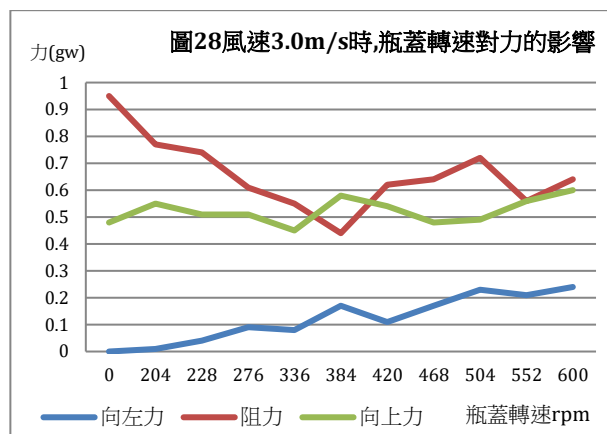
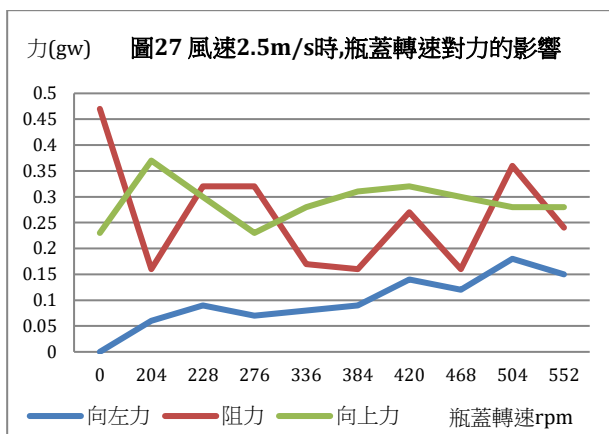
5. 為了瞭解瓶蓋內螺紋對瓶蓋運動的影響程度，我們進一步做出一個內部光滑無螺紋的瓶蓋，來探討螺紋對下方氣流是否有影響。由表 13 可發現內部螺紋對下方氣流的影響並不大，由此可得知瓶蓋內有無螺紋與瓶蓋飛行途徑並無太大關聯。

表 13. 風速 5.1m/s 不同轉速下比較瓶蓋有無螺紋對其下方氣流的影響

氣流流速 (m/s)	瓶蓋轉速 (rpm)	204	228	276	336	384	420	468	504	552	600
瓶蓋種類	光滑瓶蓋	4.9	4.7	4.7	4.8	4.8	4.8	4.9	4.8	5.0	5.1
	有螺紋瓶蓋	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8	4.9	4.9	4.9	4.8	5.0

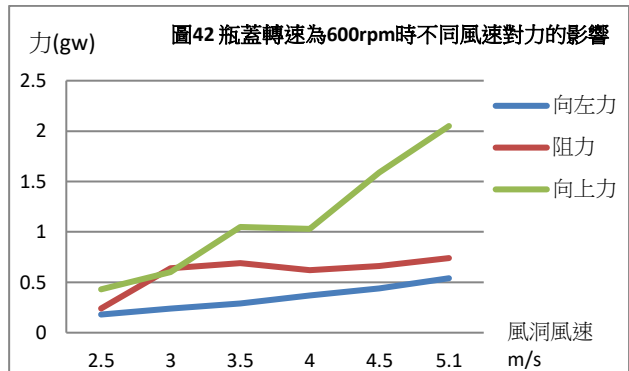
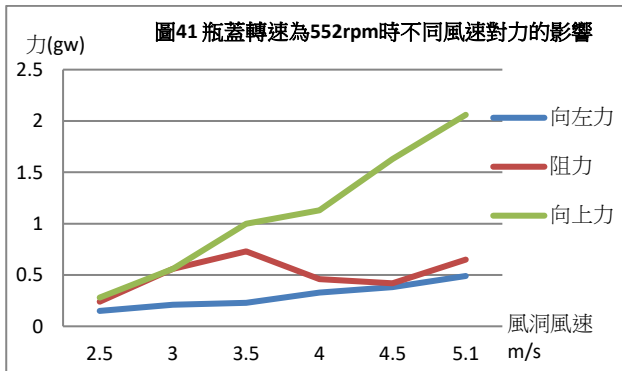
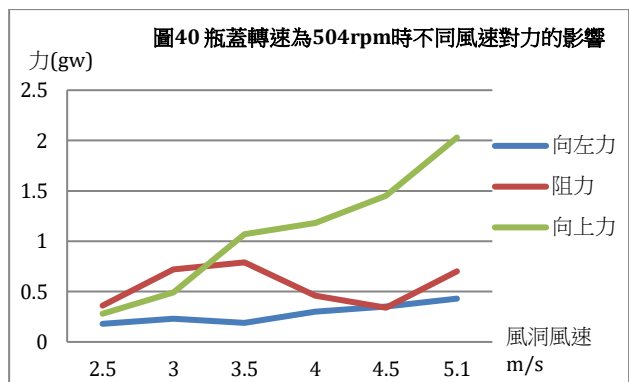
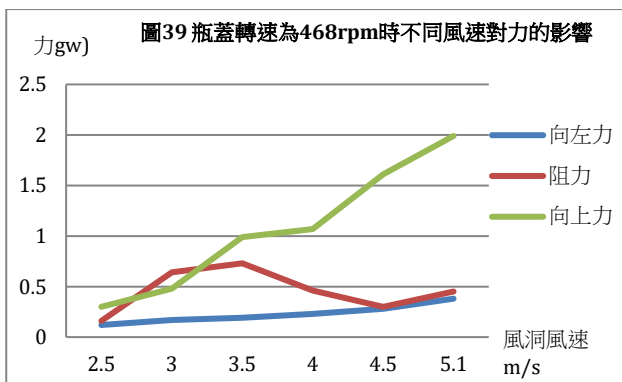
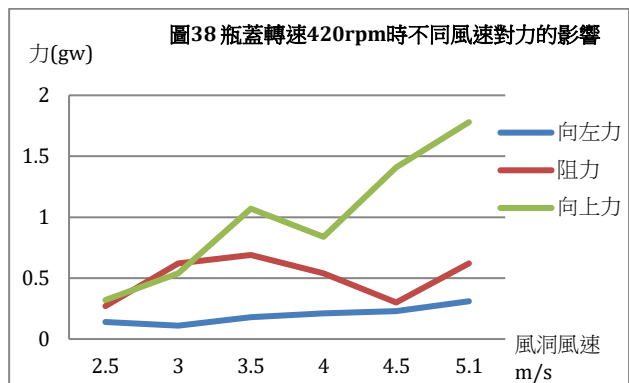
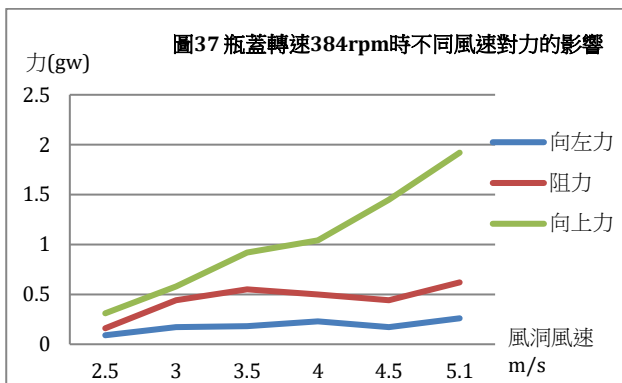
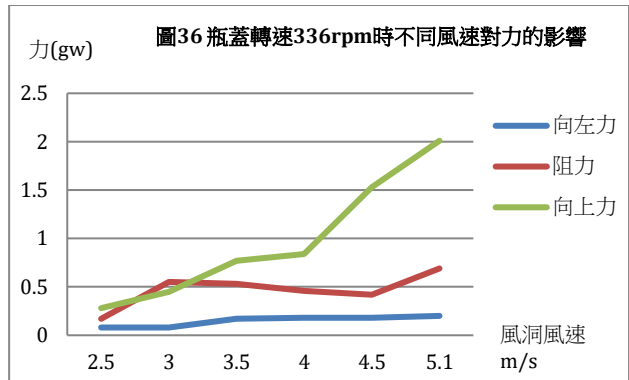
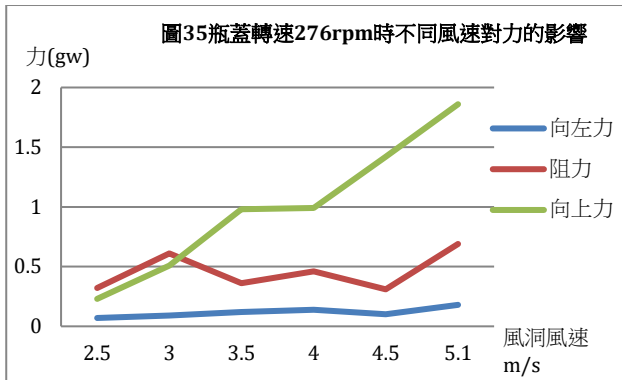
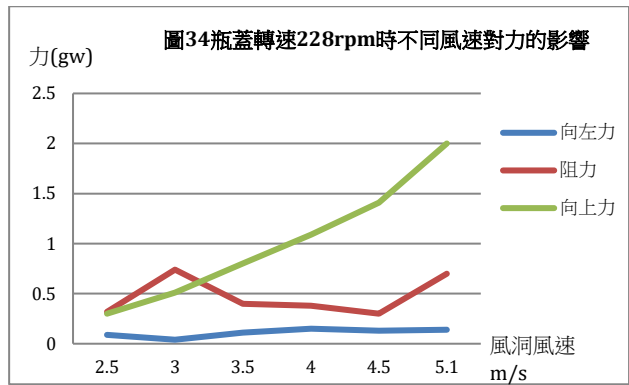
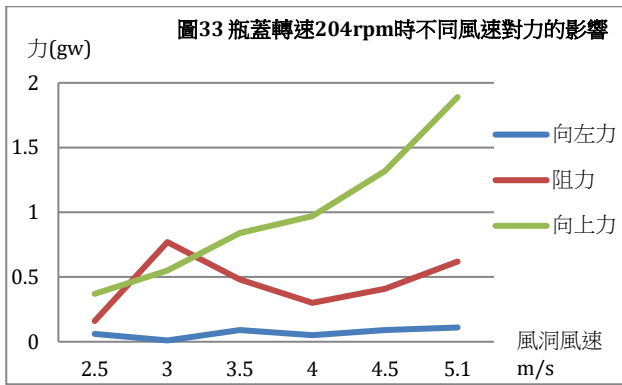
6. 我們將馬達接上變壓器與可變電阻，以改變不同電壓搭配不同電阻的方式來轉變馬達轉速。並在瓶蓋上貼反光貼紙，錄下瓶蓋轉動影片後，利用 Movavi Video Editor 15 計算影格以換算轉速。除了轉速為 0 的對照組外，我們還找了 10 個不同的轉速進行實驗，進而分析轉速對瓶蓋的受力及周圍流速所造成的影響。

7. 進一步分析不同轉速下的瓶蓋所受垂直力、水平力及阻力的變化。由圖 27 到圖 32 可發現，風洞風速與瓶蓋轉速確實對瓶蓋的受力狀況造成影響。



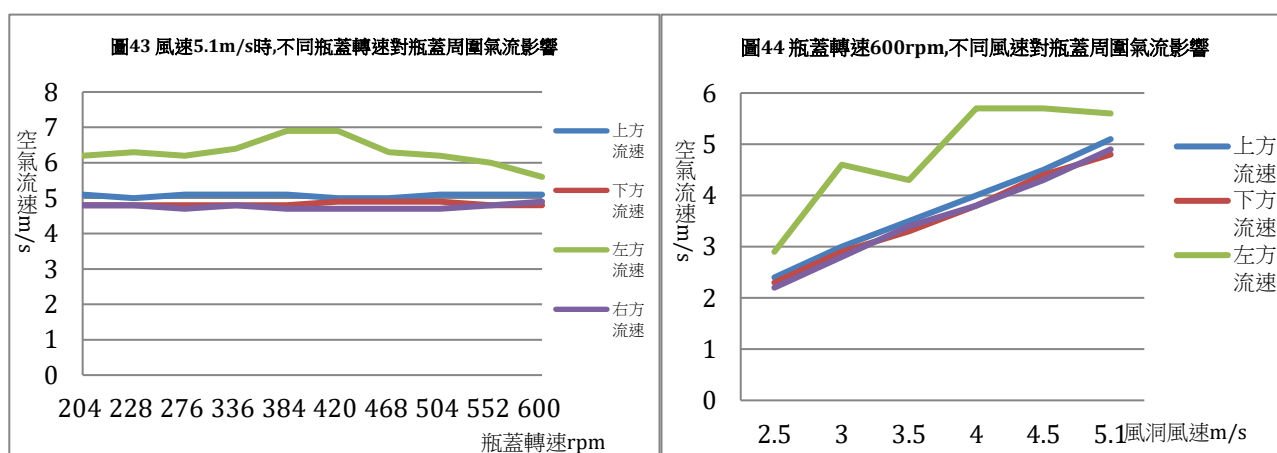
- (1). 在不同轉速中，轉速越快向左力確實會變大，且能從其中看出轉速與向左力有趨於正比的趨勢。
- (2). 不同轉速下的阻力和向上力皆看不出明顯趨勢。

8. 接下來我們分析不同風洞風速對瓶蓋垂直力、水平力及阻力的變化。由圖 33 到圖 42 可發現以下現象：



- (1).瓶蓋的轉速不變時，改變風洞風速，可看出風速與向左力有趨於正比的趨勢。
- (2).不論轉速高低，都可觀察出風速越快時，瓶蓋所受到的阻力就越大，這也將使瓶蓋的球速因阻力大而減慢。
- (3).不論轉速高低，都可觀察出風速愈大時，向上力也明顯有變大的趨勢。

9. 分析瓶蓋周圍氣流變化(圖 43、44)可發現：



- (1).在風洞風速不為 0 時，旋轉中的瓶蓋，其上方空氣流速都比下方空氣流速快。
- (2). 當風速為 0m/s 時，轉動瓶蓋可觀察出 2 號與 4 號風扇的轉動方向相反，代表當瓶蓋轉動時所引動的氣流流向也相反，因次造成 2 號風扇測到的風速會比 4 號風扇的風速大。
- (3).風扇 2(左方流速)的值在不同風速的情況下幾乎都是最大的，而相對於風扇 2(左方流速)的風扇 4(右方流速)的值在不同風速的情況下幾乎都是最小的，可得知左方流速會大於右方流速，這也符合我們的觀察。
- (4).風速的改變對瓶蓋流速影響較轉速改變大，但轉速的改變還是可以看出瓶蓋旋轉向上時，左方流速大於右方流速，這是因為當瓶蓋旋轉越快時會帶動越多周圍的氣流導致瓶蓋左右氣流的差值越大。

10. 由圖 43、44 的分析也可發現，不論風速多大，瓶蓋下方氣流都比上方氣流小，且當風洞風速愈大時，向上力也愈大。我們推測瓶蓋凹面處是因流速較慢，壓力較大，因此產生上升力。對於物體四周的氣流與物體的受力相互變化關係，原先我們認為此現象符合白努力定律：流速慢壓力大。但在物理雙月刊網站「白努力定裡的誤解與錯誤應用中」提到，白努力定律最基礎的假設為，必須在同一道流體中，但當流體經瓶蓋上下後，已分為兩道不同流體，因此我們認為此結論較符合康達效應。

11. 康達效應是流體離開本來的流動方向，改為隨著物體表面流動。因流線的彎曲需要向心力，而相對應的反作用力作用於物體，上下方流體速度不同，向心力的反作用力亦不同。當球速越快，向心力也會越大，此時反作用力也增加。圖 43、44 證實了上方氣流都比下方氣流快流速快，由圖 33 到圖 42 也可看出向上力有隨風速變大的趨勢。

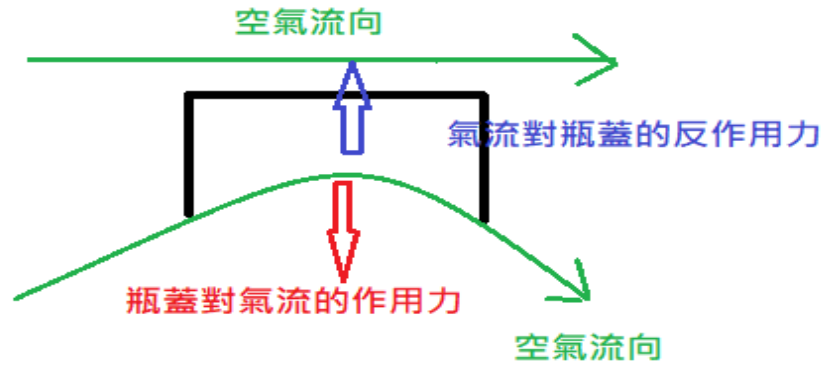


圖 45.瓶蓋的康達效應示意圖

12. 由於在平面上很難準確描述出轉動的方向，因為當兩人站在對立面時，我的順時針將會是他人的逆時針。因此，我們以圖 46 的右手定則，以角速度方向來表示其轉動方式，接下來的討論中所提到的轉動方向都以此方式描述。

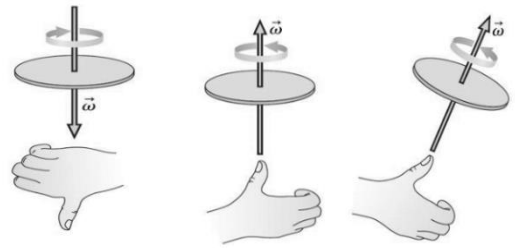


圖 46.右手定則與角速度向量的方向關係

13. 由圖 43.44 可分析出無論瓶蓋變換球速或是轉速，左方流速都大於右方。經查詢資料深入探討，我們認為此現象符合馬格努斯效應。馬格努斯效應所描述的力，其方向可用向量外積的右手定則來判斷，如圖 47 所示。在實驗的設定中， \vec{v} 為瓶蓋的飛行方向， $\vec{\omega}$ 為瓶蓋旋轉的角速度方向，則 $(\vec{\omega} \times \vec{v})$ 即為瓶蓋的受力方向 \vec{F}_M ，且瓶蓋的角速度方向與飛行方向的夾角為 90° ，因此瓶蓋的橫向受力的大小為 $F_M = \omega \times V$ 。

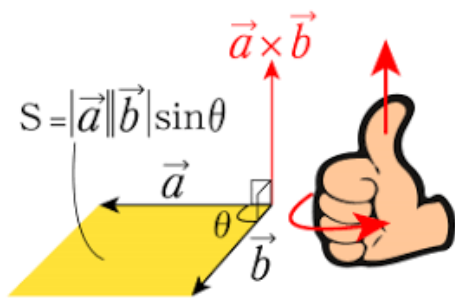
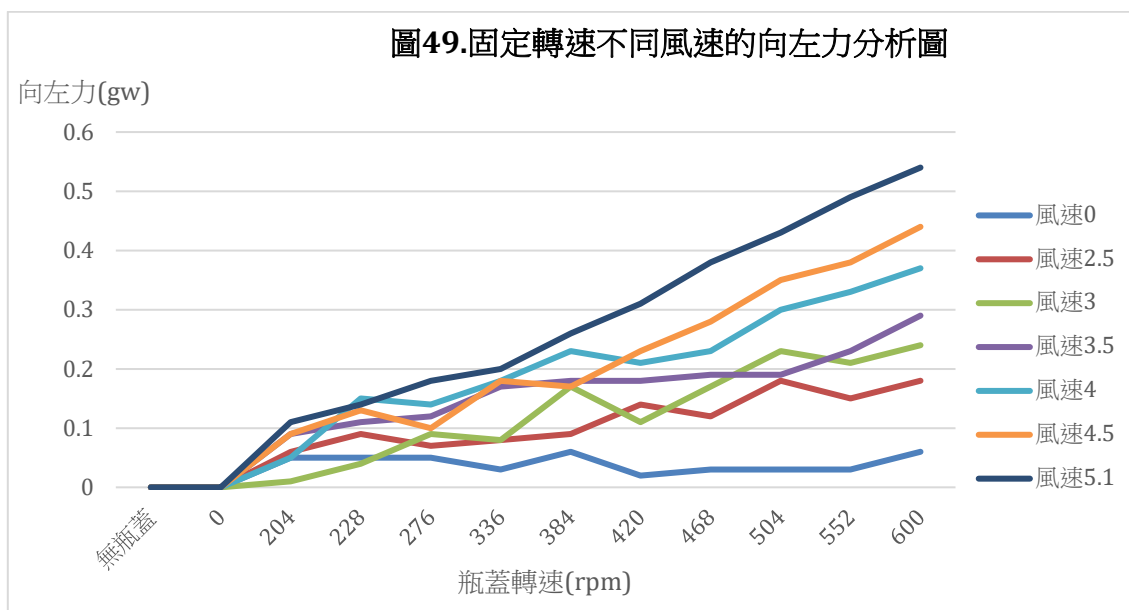
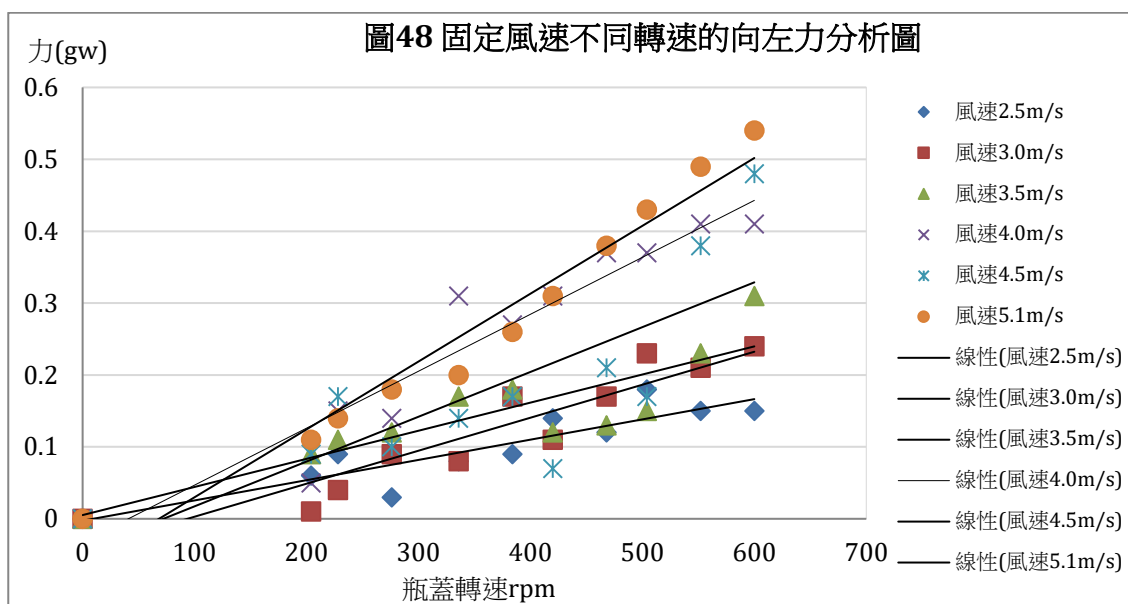


圖 47.向量外積右手定則示意圖

$$\vec{F}_M = S(\vec{\omega} \times \vec{v})$$

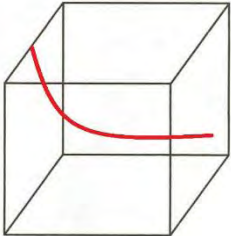
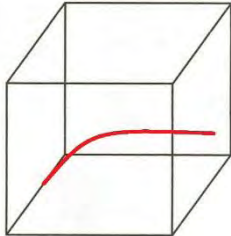
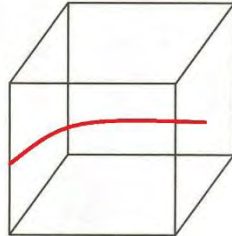
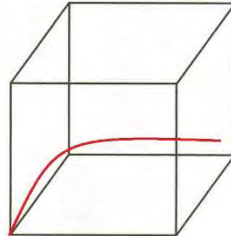
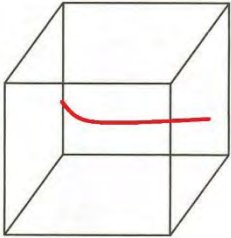
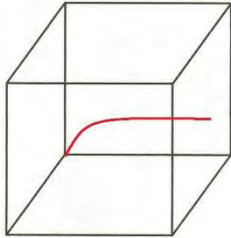
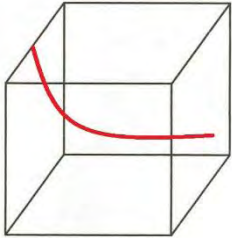
\vec{F}_M	: 產生的力
S	: 空氣阻力平均係數
$\vec{\omega}$: 角速度向量
\vec{v}	: 速度向量

14. 由圖 48 可看出當風速固定時，向左力有隨著轉速一同變大的趨勢，由此證實了當速度固定時，轉速與向左力趨於正比。由圖 49 我們可以發現，當轉速不變時，風速(球速)的大小與向左力數值也會趨於正比。此現象符合馬格努斯效應。



15. 瓶蓋棒球和真正的棒球一樣都有許多不同的投擲方式與球種。藉由握法、瓶蓋開口方向、轉動方向、角度等因素的改變，就能將瓶蓋丟出許多不同的路徑，像棒球一樣擲出快速直球、變速球、滑球、曲球、二縫線快速球、伸卡球、切球等不同球種。我們蒐集不同的球路資料，分析在表 14 中。

表 14.不同球種路徑分析

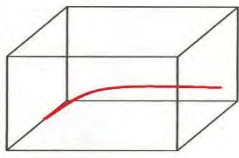
快速直球	變速球	滑球	曲球
			
球快速直線前進，再微微上升。	球慢速直線前進，最後直接墜落。	球會在直線前進後突然左轉。	球會在直線前進後突然左轉墜落。
二縫線快速球	伸卡球	切球	
			
球會快速直線前進後突然右轉。	球會先直線前進，再突然右轉下墜。	球會先筆直前進，再微微上升。球速比快速直球稍慢。	

16. 根據本研究的實驗結果，並參考各種棒球球路，我們歸納出以下三點：

- (1).根據康達效應及實驗結果，當瓶蓋開口向上丟出，會產生一向下的作用力；當瓶蓋開口向下丟出，會產生一向上的作用力；當瓶蓋開口向右丟出，會產生向左作用力；當瓶蓋開口向左丟出，會產生向右的作用力。
- (2).根據馬格努斯效應及實驗結果，當瓶蓋轉動方向向上，瓶蓋會向左偏移；當瓶蓋轉動方向向下，瓶蓋會向右偏移；當瓶蓋轉動方向向右，瓶蓋會向上移動；當瓶蓋轉動方向向左，瓶蓋會向下移動。
- (3).不論瓶蓋開口朝向為何，風速(球速)越快、轉速越快，力對瓶蓋的影響都越大，其路徑的改變也越加明顯。

17. 接下來我們根據實驗結果，比較不同瓶蓋開口方向與轉動方向丟擲出的瓶蓋路徑差異，並嘗試以馬格努斯效應找出影響球路變化因素，並將分析結果整理成表 15。

表 15. 瓶蓋棒球出手方式與球路分析表

開口朝向及其影響			轉動方向及其影響			球路	相似球種	軌跡示意圖
開口方向	氣流差異	受力狀況	轉動方向	氣流差異	受力狀況			
上	上<下	下	上	右<左	左	左轉後 向下墜落	曲球	
右	右<左	左	左	上<下	下			
上	上<下	下	下	左<右	右	右轉後 向下墜落	伸卡球	
左	右<左	下	左	上<下	下			
上	上<下	下	X	無	無	直線前進 後下墜	變速球	
下	下<上	上	上	右<左	左	左轉後 向上升起	--	
右	右<左	左	右	下<上	上			
下	下<上	上	下	左<右	右	右轉後 向上升起	--	
左	左<右	右	右	下<上	上			
下	下<上	上	X	無	無	直線前進 後上升	快速直球 切球	
右	右<左	左	X	無	無	直線前進 後向左轉	滑球	
左	左<右	右	X	無	無	直線前進 後向右轉	二縫線快 速球	

柒、結論

- 一、以長度比為整流段：壓縮段：實驗段=4：9：3 製作而成的風洞，可使氣流有明顯穩定和增強效果。
- 二、本研究設計的風洞包含兩個可拆換部分。前端風扇可依實驗需求，更換更強力的風扇，提高最大風速；而末端實驗段可依不同實驗需求，重新量身設計。更可提供教學應用，讓大家在學習相關課程時，不再只能憑空想像，也為後續製作及改良風洞設計相關研究，提供參考。
- 三、利用變壓器搭配可變電阻可調整瓶蓋轉速，再使用 Movavi Video Editor 15 分析轉動影片，即可算出實際轉速。
- 四、以小風扇結合 LM393，並搭配 Arduino 組成的自製風速計可有效測出氣流速度。但若能找到可測量風洞風速的皮托管，就能在實驗裝置中放入較大瓶蓋，使其在飛行時各種受力更加明顯，更可減少對測量環境的干擾，同時減少誤差，使實驗數據更準確。
- 五、我們的力度計靈敏度達 0.1 公克重，即使些微的環境因素都會影響到讀數，導致部分實驗數據誤差值較大。若能想辦法克服此問題，減少誤差，我們的數據或能更加準確。
- 六、在固定的環境中，瓶蓋的存在會影響氣流流動，進而增加阻力。且風速變大，阻力也有變大的趨勢。
- 七、瓶蓋旋轉對其受力狀況會造成不同程度的影響。風洞風速不變時，不同轉速的瓶蓋所受的上升力並無太大差異。但瓶蓋旋轉越快對周圍氣流流動影響越大，瓶蓋受到的向左力也越大，飛行時所受的阻力也降低，有利於瓶蓋飛行。
- 八、瓶蓋轉速不變時，改變風洞風速，向左力沒有太大變化。不論轉速高低，都可觀察出風速越快，瓶蓋所受阻力越大。向上力也明顯有變大趨勢。因此若想要瓶蓋向上飄，丟擲速度越快，效果越明顯。
- 九、當瓶蓋轉動方向向上時，因瓶蓋在轉動時會帶動周圍空氣流動，再加上瓶蓋飛行速度，使其右側空氣流速較左側慢，壓力也比左側大，對瓶蓋產生向左作用力，使飛行路徑向左偏。
- 十、根據康達效應、馬格努斯效應以及與我們的實驗結果，可推測出瓶蓋以不同旋轉方向及不同球速扔出時可能的飛行路徑，以此可丟擲出各種匪夷所思的飛行軌跡。

捌、參考資料及其他

- 一、1/2 秒的偏移-棒球之變化球軌跡模式的建立，第 49 屆中小學科展物理與太空科學科
<https://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-2/2013/pdf/140006.pdf>
- 二、天花板隨記 Arduino 筆記(22)：LM393 光電對射式計數器模組測馬達轉速
<http://atceiling.blogspot.com/2017/04/arduinolm393.html>
- 三、以 Arduino 製作計時器
<http://physlab.ep.nctu.edu.tw/wp-content/uploads/2016/11/以-Arduino-製作計時器 070129.pdf>
- 四、白努力定律：
<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E4%BC%AF%E5%8A%AA%E5%88%A9%E5%AE%9A%E5%BE%8B>
- 五、白努力定理的誤解與錯誤應用：
https://pb.ps-taiwan.org/catalog/ins.php?index_m1_id=3&index_id=192
- 六、馬格努斯效應：
<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%A9%AC%E6%A0%BC%E5%8A%AA%E6%96%AF%E6%95%88%E5%BA%94>
- 七、百變魔球—球體變化原因的探討，第 44 屆中小學科展國中組物理科
<https://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/44/D/030110.pdf>
- 八、キャップ投げ講座 完全版 how to throw a bottle cap
<https://www.youtube.com/watch?v=LBXv5BiRXfs>
- 九、CSJH-Maker，HX711 重量感測
https://sites.google.com/site/cs_jhmaker/e0/hx711-gan-ce-qi-mo-zu
- 十、抗風強度測試風洞
<http://www.cv.ncu.edu.tw/html/IIS/ecce/W01/main2.htm>
- 十一、風洞
<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%A3%8E%E6%B4%9E>
- 十二、低音速簡易風洞
<http://web.tnu.edu.tw/me/me-htdocs/study/proj/proj91/91-50%E4%BD%8E%E9%80%9F%E7%B0%A1%E6%98%93%E9%A2%A8%E6%B4%9E.pdf>
- 十三、簡易風洞的製作和應用……………岑惠平
- 十四、https://pb.ps-taiwan.org/catalog/ins.php?index_m1_id=3&index_id=192

【評語】 030104

本作品由研究瓶蓋如何影響周圍氣流的方式切入，製作穩定的風洞及精密的受力量測系統，以及瓶蓋旋轉裝置。實驗很完整，結論明確，與預期相同。

唯此類型題目在科展中已相當多見，並不算是非常有原創性的作品，很多的控制變因的結果都是可預期的。另外，作者認為當流體經瓶蓋上下後，已分為兩道不同流體，白努力定律不適用，此一論述有待深入研究確認。以瓶蓋這種形狀，也有可能只是康達效應的作用力大過白努力效應。

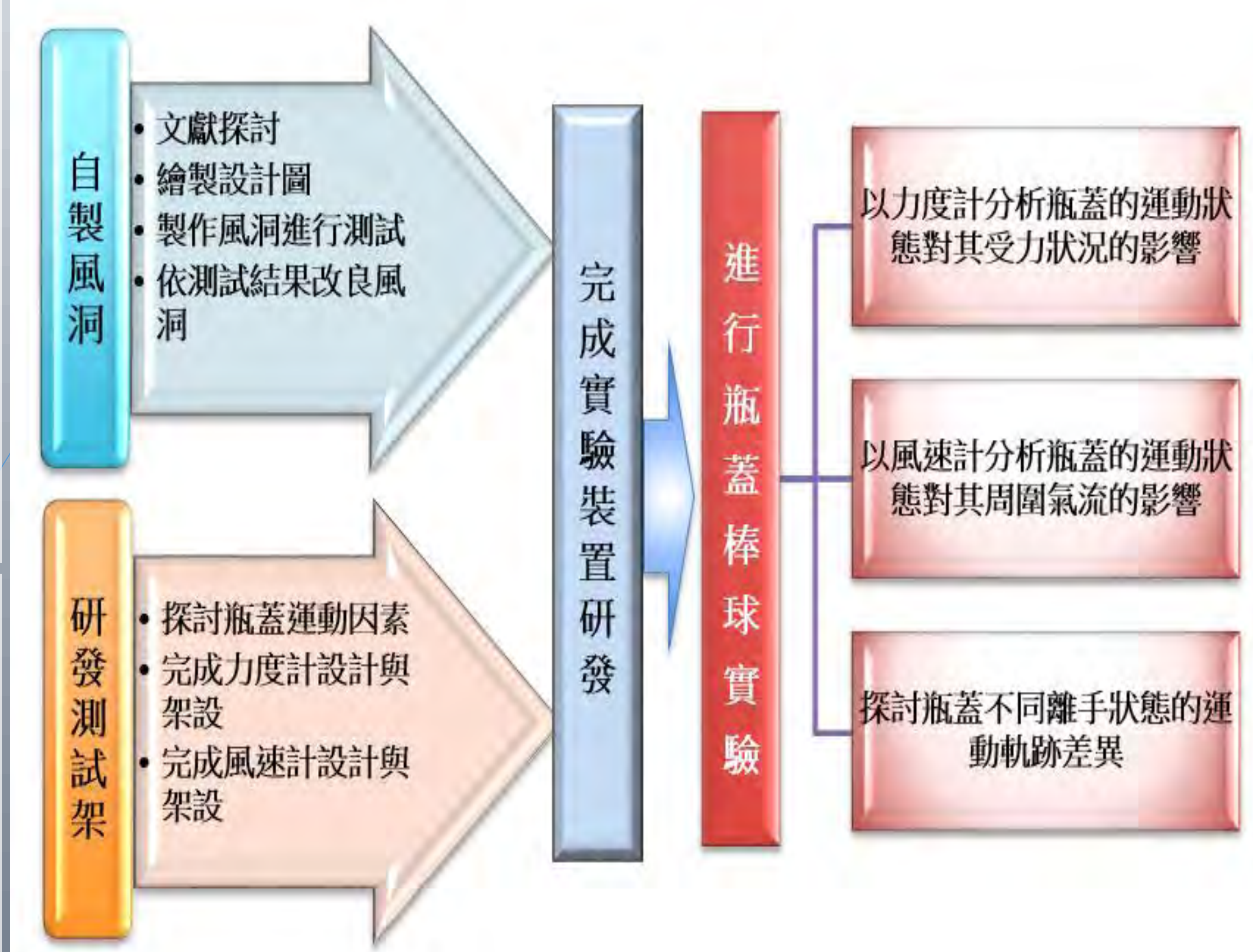
壹、研究動機:

瓶蓋棒球旋風從日本流行起來，利用寶特瓶蓋，就可擲出各種千變萬化的曲線。這使我們產生濃厚興趣，為解開瓶蓋棒球的奧秘，我們應用自然課中力與運動的觀念，開始了一系列的研究。

貳、研究目的:

- 一、探討風洞原理並製作風洞以建立穩定不變化的氣流
- 二、探討瓶蓋運動相關因素並架設測量瓶蓋的測試架
- 三、研究瓶蓋的運動狀態對其受力狀況的影響
- 四、研究瓶蓋的運動狀態對其周圍氣流的影響
- 五、由研究結果探討瓶蓋離手時的方位及旋轉速度所造成的各種運動軌跡

肆、研究流程:



參、研究設備及器材:

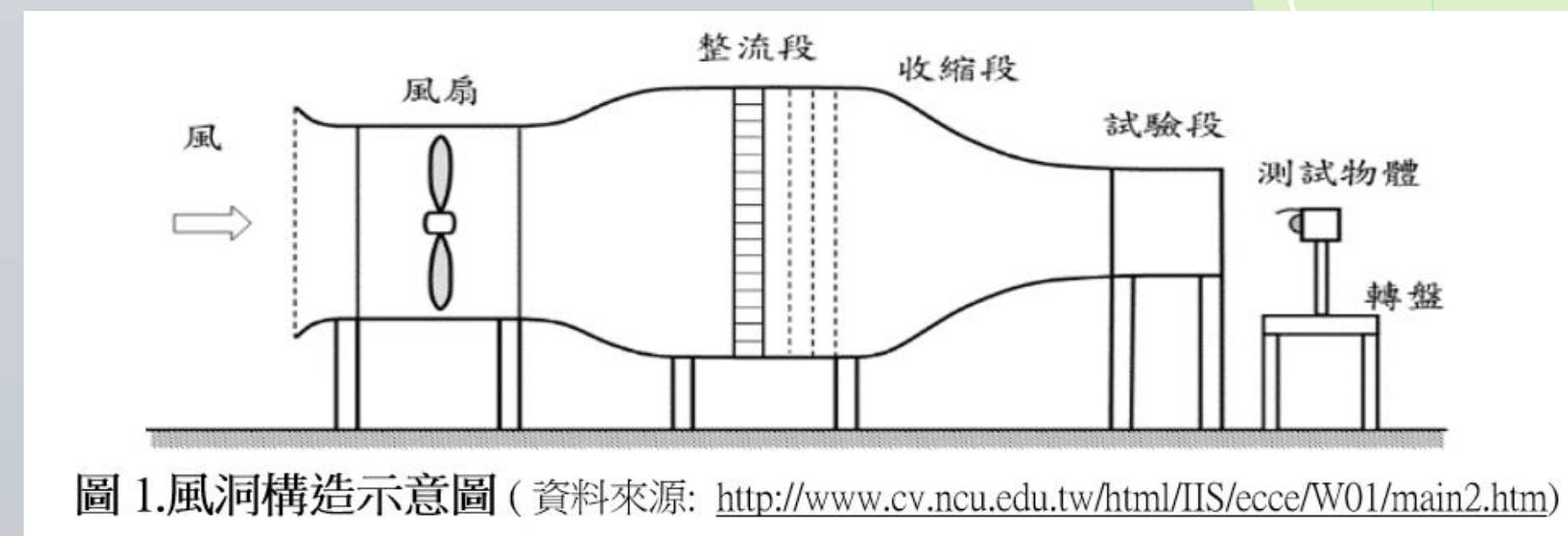
風扇	風扇馬達專用調速器	風速計	LM393光電對射式模組	自製風速計
滑輪	定滑輪(大)	力度計	HX711力度計感測模組	自製測試架
鑽床	自製風洞	筆記型電腦	Arduino uno 板	自製測試環
線鋸機	可變電阻	3D列印機	Arduino mega2560	自製瓶蓋

伍、研究過程與結果:

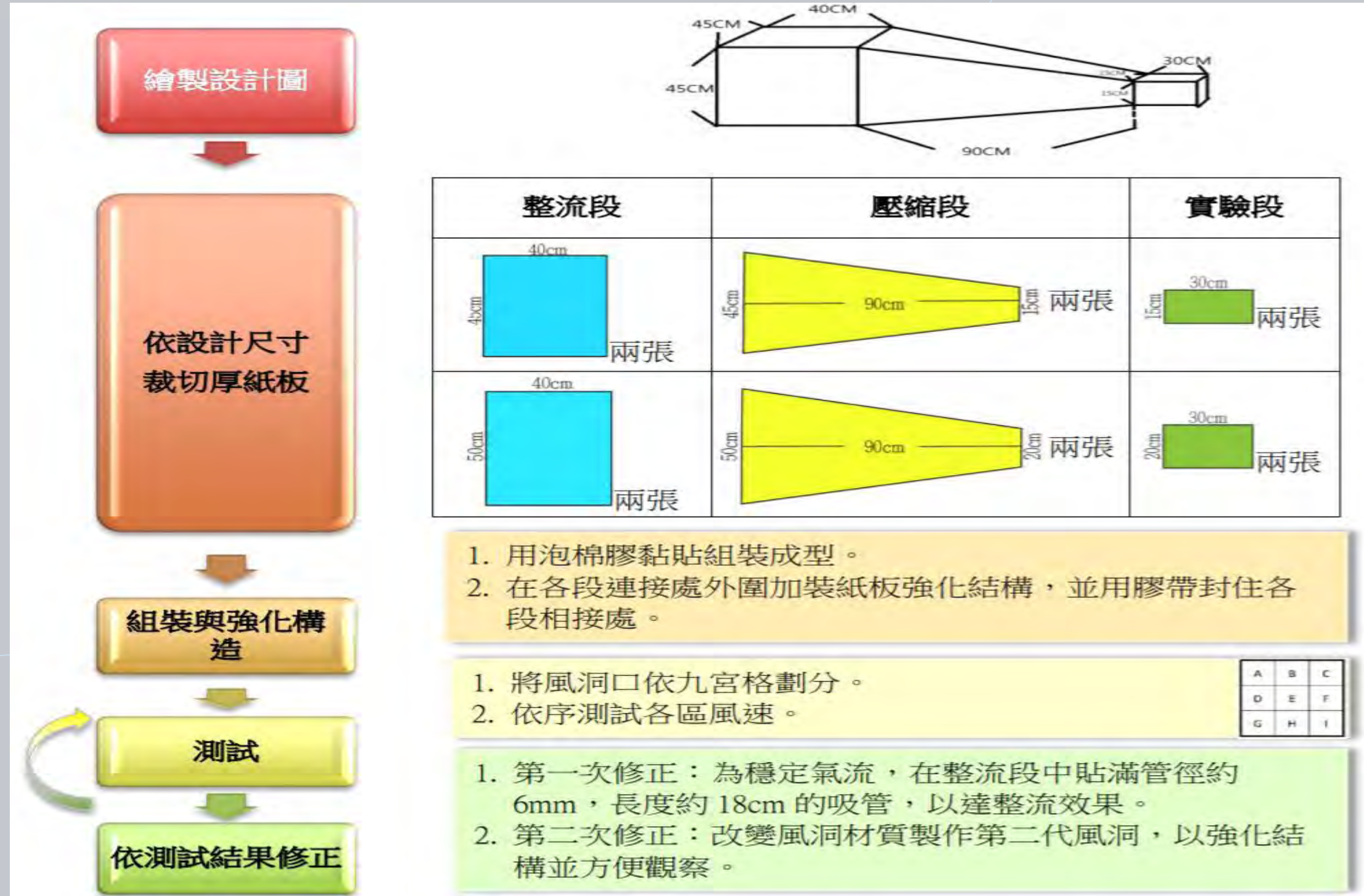
研究一、製作強力穩定的風洞

一、文獻探討

1. 風洞是一種產生人造氣流的管道，用於研究空氣流經物體所產生的氣動效應，也可使風洞中的風速均一致。
2. 風洞分為整流段、壓縮段、實驗段三個部分。



二、風洞研發流程



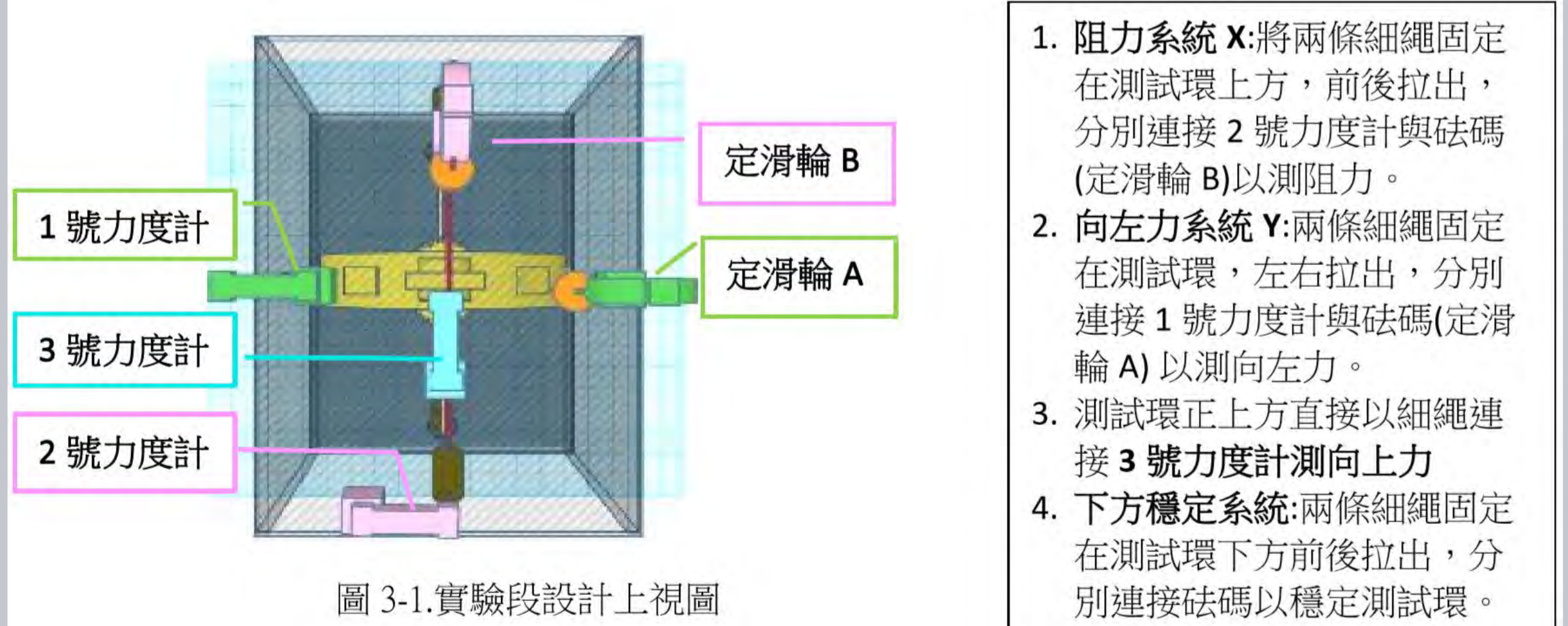
	材料	測試結果	成品
第一代風洞	厚紙板	1.初版無整流裝置，風速不均 2.二版加裝吸管整流，風速趨穩	
第二代風洞	整流段、壓縮段：3mm木板 實驗段：3mm透明壓克力	1.木板架構穩固 2.有效提高且穩定風速	

研究二、設計製作瓶蓋測試架

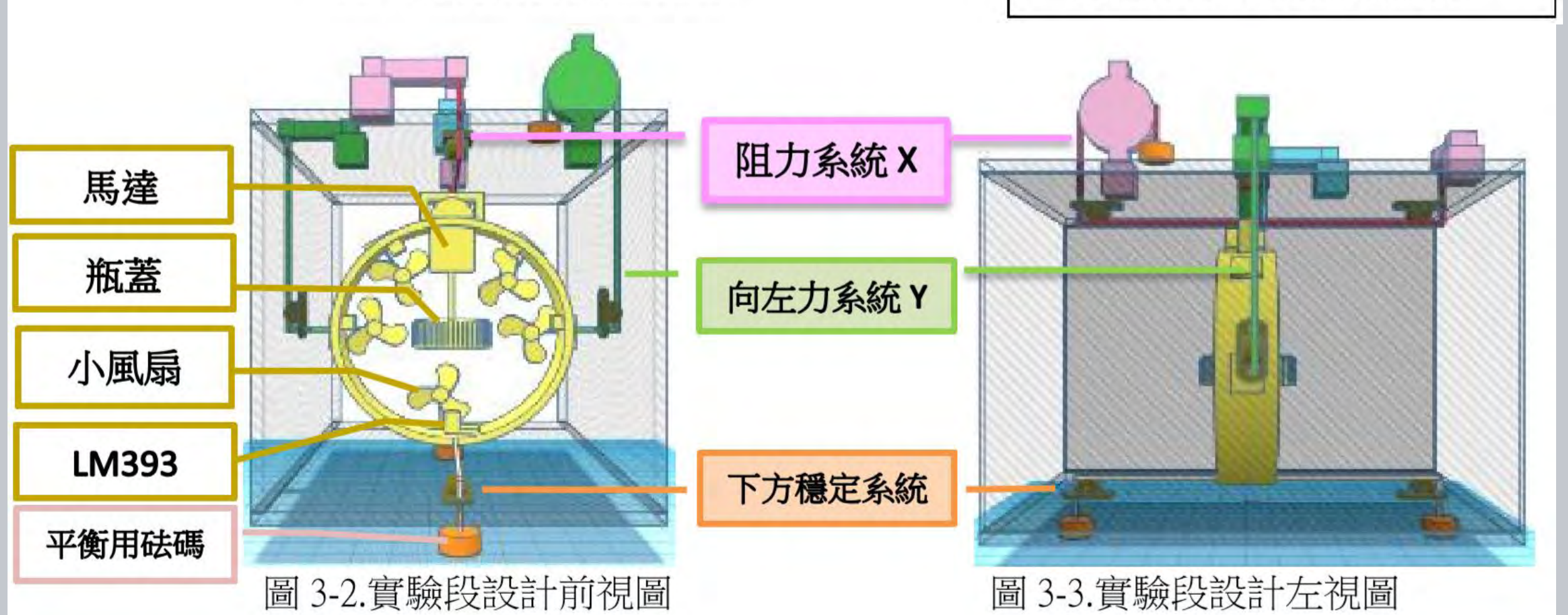
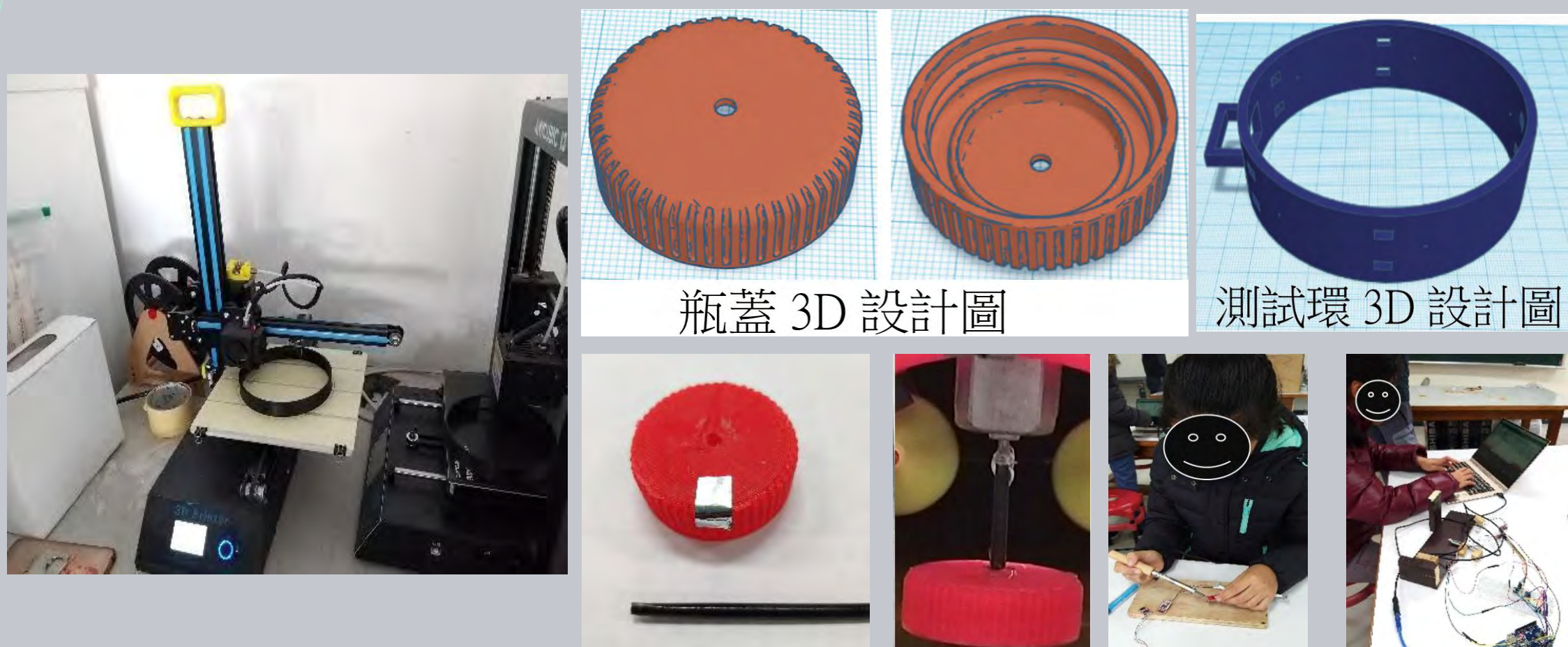
一、研究流程:



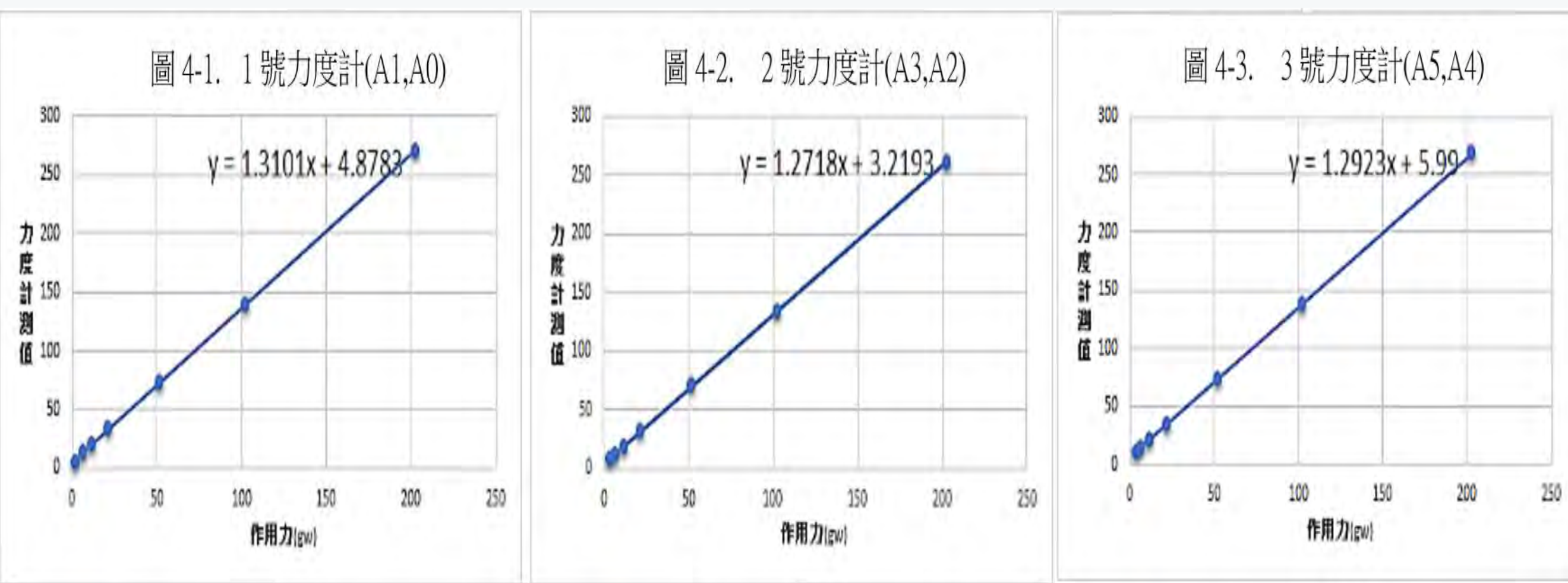
三、測試段設計:



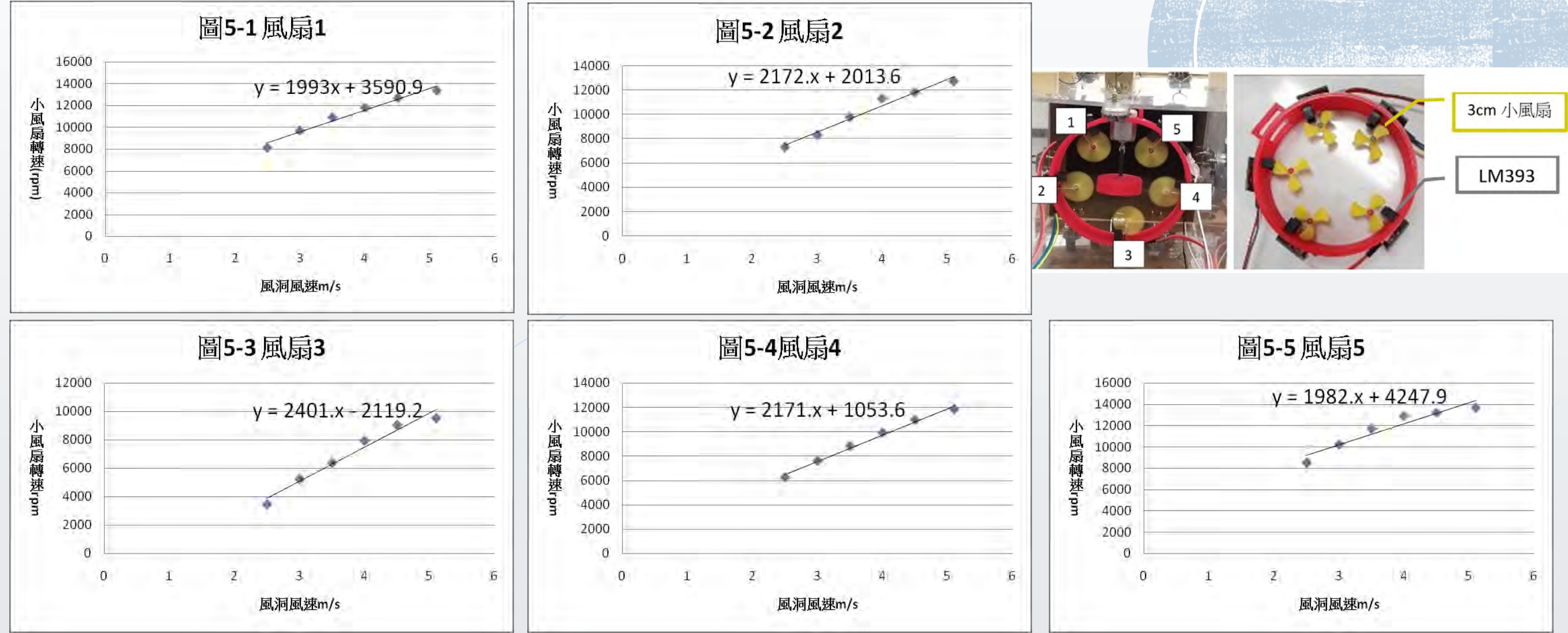
二、瓶蓋與測試環設計:



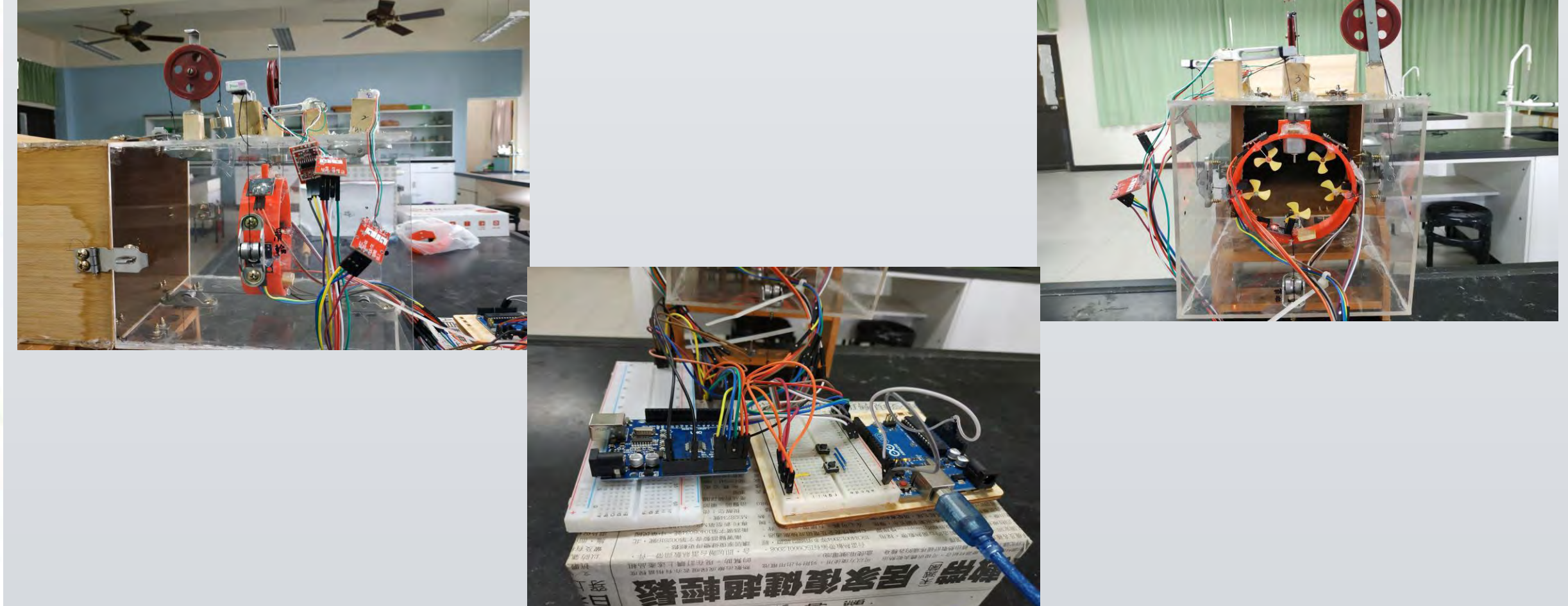
二、以HX711力度計重量感測模組測量瓶蓋飛行時的受力狀況，力度計校正資料如下：



三、以LM393光電對射式計數器模組測量小風扇轉速，再換算風速。風速計校正資料如下：



四、實驗裝置架設完成：



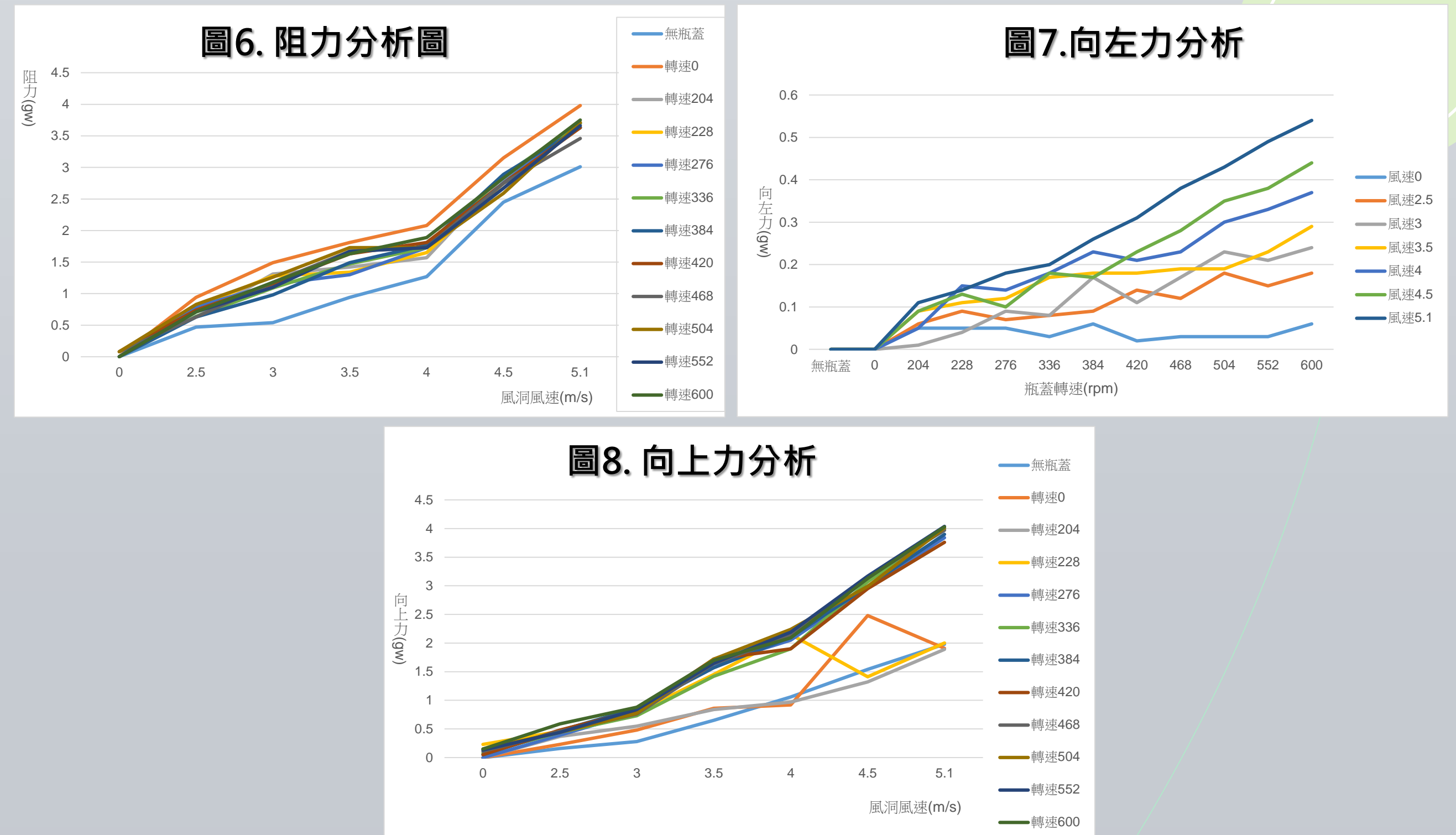
研究三、研究瓶蓋的運動狀態對其受力狀況的影響

一、實驗流程

- (一) 測試環中不接瓶蓋
- (二) 測試環中接瓶蓋但不轉動
- (三) 測試環中接瓶蓋以不同轉速轉動

- 調整風扇馬達專用調速器，將風洞風速固定為5.1m/s。
- 啟動實驗裝置，以整流變壓器及可變電阻依序調整馬達轉速為600rpm、552rpm、504rpm、468rpm、420rpm、384rpm、336rpm、276rpm、228rpm、204rpm、0rpm，並將實驗結果依序紀錄；
分析1號力度計測得的向左作用力數值，將結果記錄在表7中；
分析2號力度計測得的阻力數值，將結果記錄在表6中；
分析3號力度計測得的向上作用力數值，將結果記錄在表8中。
- 調整風扇馬達專用調速器，依序將風洞風速固定為4.5m/s、4.0m/s、3.5m/s、3m/s、2.5m/s、0m/s。重複步驟2，完成本組實驗。

二、實驗結果



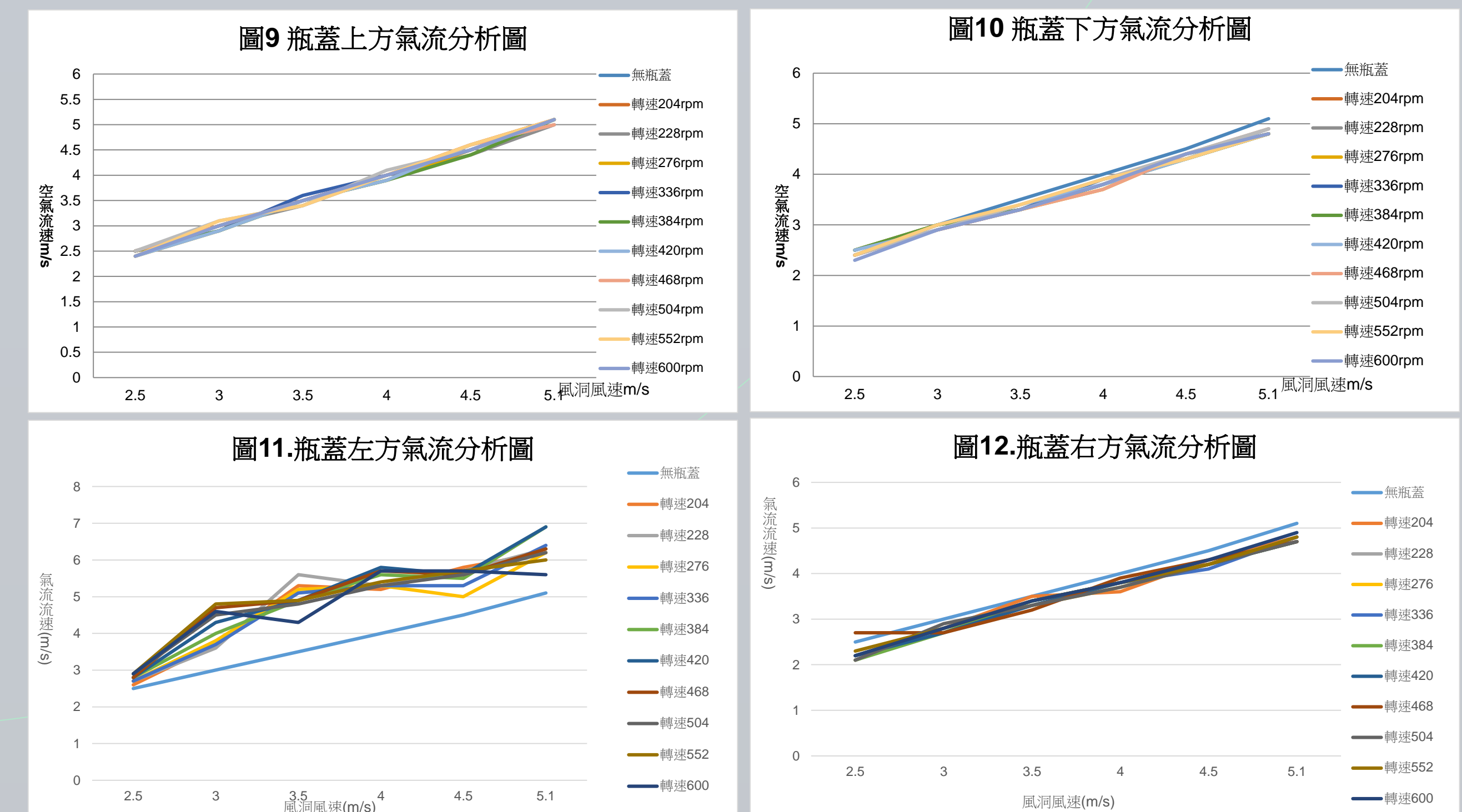
研究四、研究瓶蓋的運動狀態與瓶蓋周圍氣流的關係

一、實驗流程

- (一) 測試環中不接瓶蓋
- (二) 測試環中接瓶蓋但不轉動
- (三) 測試環中接瓶蓋以不同轉速轉動

- 調整風扇馬達專用調速器，將風洞風速固定為5.1m/s。
- 啟動實驗裝置，以整流變壓器及可變電阻依序調整馬達轉速為600rpm、552rpm、504rpm、468rpm、420rpm、384rpm、336rpm、276rpm、228rpm、204rpm、0rpm，並將實驗結果依序紀錄；
分析1號、5號風速計測得的上方氣流數值，將結果記錄在表9中；
分析3號風速計測得的下方氣流數值，將結果記錄在表10中；
分析2號風速計測得的左方氣流數值，將結果記錄在表11中；
分析4號風速計測得的右方氣流數值，將結果記錄在表12中。
- 調整風扇馬達專用調速器，依序將風洞風速固定為4.5m/s、4.0m/s、3.5m/s、3m/s、2.5m/s、0m/s。重複步驟2，完成本組實驗。

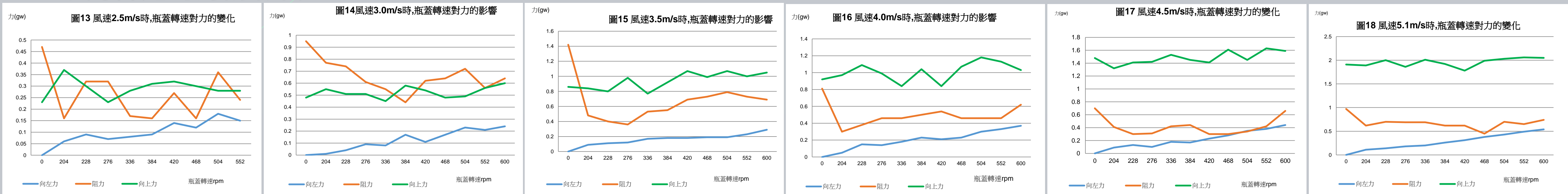
二、實驗結果



陸、討論：

一、瓶蓋受力狀況分析

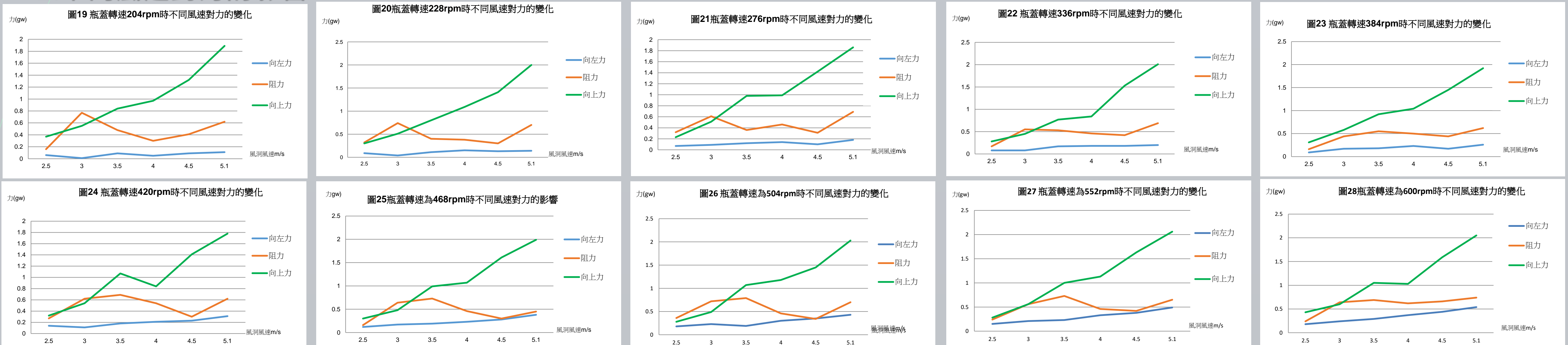
1. 不同轉速對力的影響



透過實驗我們發現，轉速愈快時：(1) 轉速越大向左力也越大，且有趨於正比的趨勢。

(2) 不同轉速下的阻力和向上力皆看不出明顯趨變化。

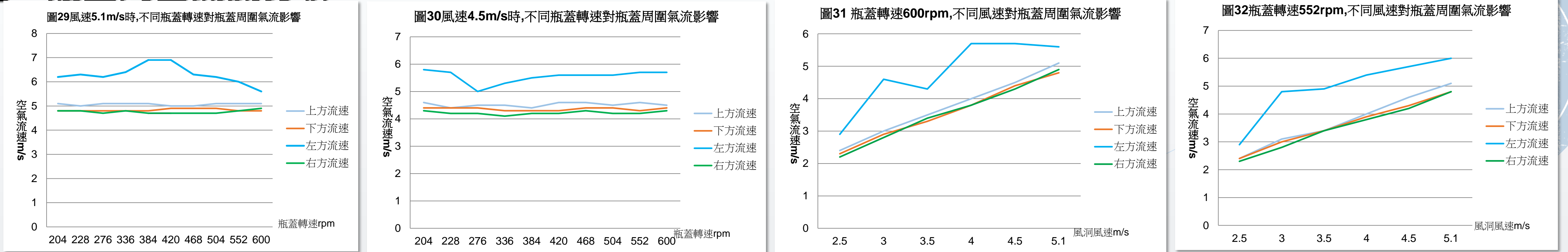
2. 不同風速對力的影響



由實驗結果發現，風速愈快時：(1) 風速與向左力有趨於正比的趨勢。

(2) 不論轉速高低，風速越快，瓶蓋所受向上力越大。

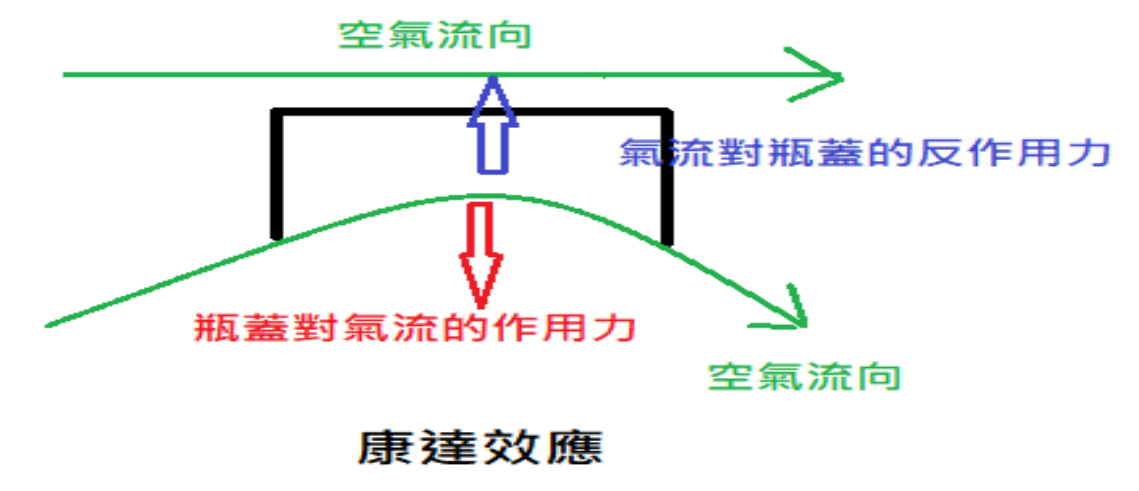
二、瓶蓋周圍氣流分析



1. 無論風洞風速及瓶蓋轉速如何變化，上方氣流流速都大於下方，左方都大於右方。
2. 瓶蓋旋轉越快會帶動越多周圍氣流導致其左右氣流流速差值越大。
3. 當風速為0m/s時，轉動瓶蓋可觀察出2號與4號風扇的轉動方向相反，代表當瓶蓋轉動時所引動的氣流流向也相反。

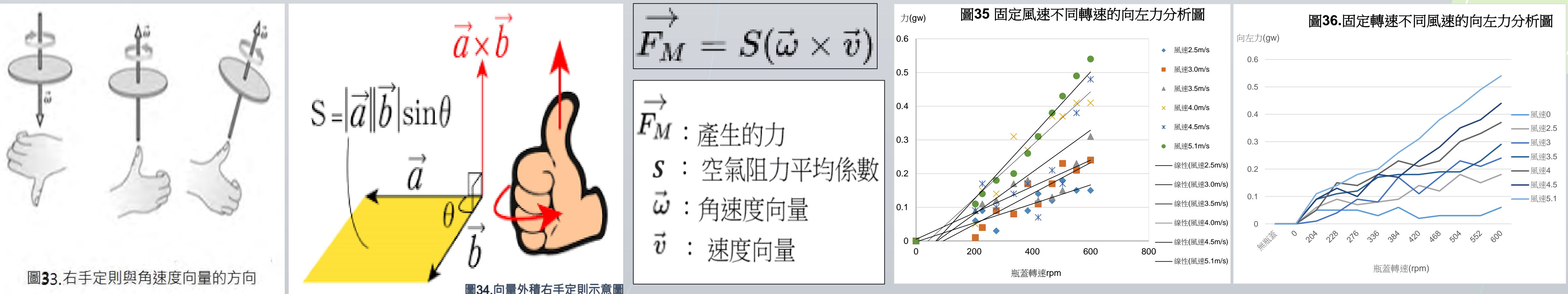
三、康達效應

康達效應是流體離開本來的流動方向，改為隨著物體表面流動。因流線的彎曲需要向心力，故相對應的反作用力會作用於物體。



四、馬格努斯效應

馬格努斯效應所描述的力，其方向可用向量外積的右手定則來判斷。在實驗的設定中， \vec{b} 為瓶蓋的飛行方向 \vec{v} ， \vec{a} 為瓶蓋旋轉的角速度方向 $\vec{\omega}$ ，則 $(\vec{a} \times \vec{b})$ 即為瓶蓋的受力方向 \vec{F}_M ，且瓶蓋的角速度方向與飛行方向的夾角為90度，因此瓶蓋的橫向受力的為 $F_M = \omega \times V$ 。



五、根據實驗結果，並參考各棒球球路，我們歸納出瓶蓋飛行軌跡如下表：

開口朝向及其影響			轉動方向及其影響			球路	相似球種	軌跡示意圖	開口朝向及其影響			轉動方向及其影響			球路	相似球種	軌跡示意圖
開口方向	氣流差異	受力狀況	轉動方向	氣流差異	受力狀況				開口方向	氣流差異	受力狀況	轉動方向	氣流差異	受力狀況			
上	上<下	下	上	右<左	左	左轉後 向下墜落	曲球		下	下<上	上	下	左<右	右	右轉後 向上升起	--	
右	右<左	左	左	上<下	下				左	左<右	右	右	下<上	上			
上	上<下	下	下	左<右	右	右轉後 向下墜落	伸卡球		下	下<上	上	X	無	無	直線前進 後上升	快速直球 切球	
左	右<左	下	左	上<下	下				下	右<左	左	X	無	無			
上	上<下	下	X	無	無	直線前進 後下墜	變速球		右	右<左	左	X	無	無	直線前進 後向左轉	滑球	
下	下<上	上	上	右<左	左				左	左<右	右	X	無	無			
下	下<上	上	上	右<左	左	左轉後 向上升起	--		左	左<右	右	X	無	無	直線前進 後向右轉	二縫線快 速球	
右	右<左	左	右	下<上	上				右	右<左	左	X	無	無			

1. 由於瓶蓋開口處流速較平面處慢，瓶蓋的開口方向與其生成的作用力方向相反。
2. 瓶蓋轉動向上，右側流速較左側慢，會向左偏，反之向右轉動向右，下方流速較上方慢，會向上移，反之則向下。

柒、結論：

- 一. 風洞比例--整流段：壓縮段：實驗段 4：9：3可使氣流有明顯穩定和增強效果。
- 二. 活動式風洞可依不同實驗需求，更換風扇並量身設計實驗段。也可提供相關課程教學應用。
- 三. 瓶蓋旋轉對其受力狀況會造成不同程度的影響。風洞風速不變時，不同轉速瓶蓋所受上升力無太大差異。依實驗結果及瑪格努斯效應，當瓶蓋轉動及飛行速度越快，瓶蓋所受向左作用力也越大。
- 四. 改變風洞風速，不論轉速高低，依實驗結果及康達效應分析，當瓶蓋飛行速度越快，瓶蓋所承受向上作用力也會變大。因此若想要瓶蓋向上飄，丟擲速度越快，效果越明顯。
- 五. 不論瓶蓋開口朝向為何，風速(球速)越快、轉速越快，力對瓶蓋影響越大，路徑改變也越明顯。
- 六. 根據康達效應、瑪格努斯效應以及我們的實驗結果，可推測出瓶蓋以不同旋轉方向及不同球速扔出時可能的飛行路徑，以此可丟擲出各種匪夷所思的飛行軌跡。

捌、參考資料：

1. 馬格努斯效應 <https://zh.wikipedia.org/wiki/%E9%A9%AC%E6%A0%BC%E5%8A%AA%E6%96%AF%E6%95%88%E5%BA%94>
2. 1/2 秒的偏移-棒球之變化球軌跡模式的建立，第49屆中小學科展物理與太空科學科 <https://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-2/2013/pdf/140006.pdf>
3. 以 Arduino 製作計時器 <http://physlab.ep.nctu.edu.tw/wp-content/uploads/2016/11/以-Arduino-製作計時器070129.pdf>
4. 天花板隨記Arduino筆記(22)：LM393 光電對射式計數器模組測馬達轉速 http://atceiling.blogspot.com/2017/04/arduino_lm393.html