

中華民國第四十四屆中小學科學展覽會

作者說明書

高中組物理科

040104

國立台東高級中學

指導老師姓名

趙臨軒

作者姓名

沈祐葦

黃冠豪

范晉祥

范姜舜翔

中華民國第四十四屆中小學科學展覽會 作品說明書

科 別：物理科

組 別：高中組

作品名稱：順風而上

關 鍵 詞：側向力、拖曳力、理想流體

編 號：

目 錄

一、摘要	4
二、研究動機	5
三、研究目的	5
四、研究器材	6
五、研究過程及方法	9
(一) 實驗原理：	9
(二) 器材的配置	9
(三) 拖曳力的測量	10
(四) 風速的測量	11
(五) 轉速的測量	11
(六) 側向力的測量	12
(七) 與實驗操作有關的圖片	13
六、研究結果	14
(一) 拖曳力與截面積大小的關係	14
(二) 風速和轉速之間的關係	15
(三) 風速和轉速四次方之間的關係	16
(四) 旋轉速度(角速度)與旋轉體所受側向力的關係	17
(五) 旋轉速度(角速度)與旋轉體所受側向力平方的關係	18
(六) 相對流速大小與旋轉體所受側向力的關係	19
(七) 相對流速大小與旋轉體所受側向力平方的關係	20
(八) 旋轉體截面積與旋轉體所受側向力的關係	21
(九) 旋轉體截面積與旋轉體所受側向力平方的關係	22
(十) 旋轉體質量大小與旋轉體所受側向力的關係	23
七、討論與檢討	24

一、摘要

作品名稱：順風而上		
一、研究動機： 去年我們自製一個風洞裝置，希望能以實驗來觀測各種圓柱體造成飄浮現象的情況，但是因為某些技術層次的無法突破，效果不盡理想。今年，我們解決技術上的障礙，並改良風洞箱及測量方式，希望能一圓去年的夢想。		
二、研究目的： (1) 探討旋轉速度（角速度）與旋轉體所受側向力關係 (2) 探討相對流速大小與旋轉體所受側向力關係 (3) 探討旋轉體截面積與旋轉體所受側向力關係 (4) 探討旋轉體質量大小與旋轉體所受側向力關係		
三、研究過程與方法： 1. 改良風洞箱、旋轉體受力系統 2. (1) 控制流速大小、旋轉體的截面積、質量、表面性質，改變旋轉體的旋轉速度，探討旋轉速度（角速度）與旋轉體所受側向力關係 (2) 控制旋轉速度（角速度）、旋轉體的截面積、質量、表面性質，改變相對流速，探討相對流速大小與旋轉體所受側向力關係 (3) 控制流速大小、旋轉速度（角速度）、質量、表面性質，改變旋轉體截面積，探討旋轉體截面積與旋轉體所受側向力關係 (4) 控制流速大小、旋轉體的截面積、旋轉速度（角速度）、表面性質，旋轉體質量大小，探討旋轉體質量大小與旋轉體所受側向力關係		
四、研究結果： 旋轉體於穩定氣流中所受之(側向力) ² 約和相對流速，旋轉體之最大切線速率，旋轉體之截面積成正比，且表面越粗糙者，側向力越大。		
五、參考資料、		
1.流體動力學導論	李基禎	東華書局
2.流體力學	鄭智光	圓山圖書
3.觀念物理叢書	休伊特	天下文化
4.Fundamentals of Physics	David Halliday	
5.電玩物理學	David M. Bourg	O'REILL

二、研究動機

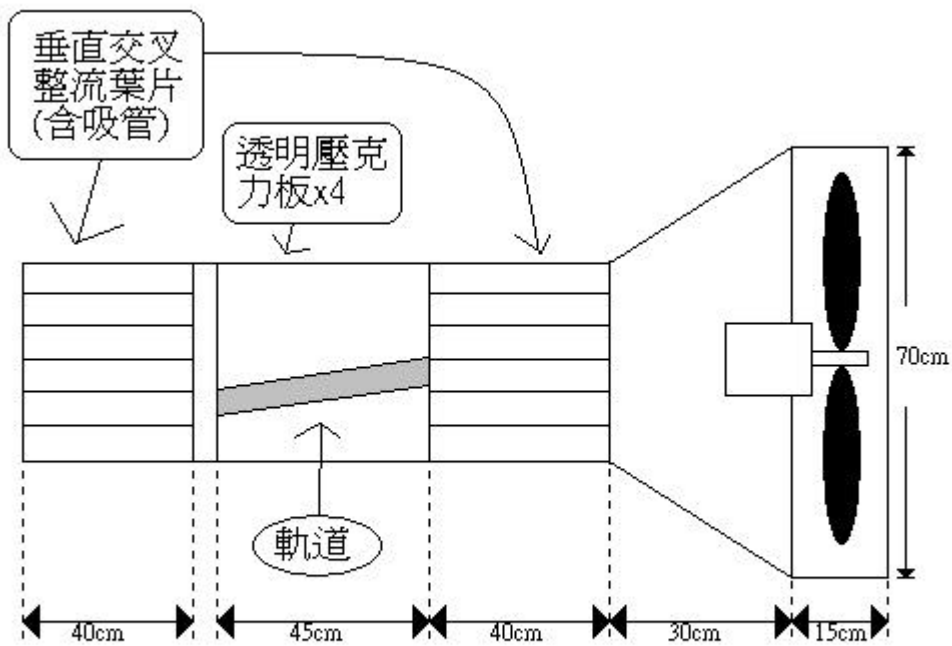
2003 年，冬天的札幌棒球場上，中華隊精湛的球技及日本隊松阪大輔投出高速直球和變化球，激起了我們更加努力完成這件心血的強烈原動力，以滑車改良去年穩定性較低的懸吊式測量，以更細緻的整流片來達到穩流效果。希望能就像這件作品一樣，我們的夢想可以迎風而上。

三、研究目的

- (1) 探討旋轉速度（角速度）與旋轉體所受側向力關係
- (2) 探討相對流速大小與旋轉體所受側向力關係
- (3) 探討旋轉體截面積與旋轉體所受側向力關係
- (4) 探討旋轉體質量大小與旋轉體所受側向力關係

四、研究器材

品名	規格	數量
風洞箱	70cm×70cm×70cm，自製	1 個
整流片（組）	長×寬：40cm×40cm×4 片 內插吸管 8×8 每格，共 64 格	2 組
電源供應器		1 台
旋轉體馬達	電壓：Max. 2.4V 重量：17.0g 外觀尺寸：25.1×20.1 轉速：24,000rpm	數個
風扇馬達	電壓：110/220 V 頻率：60Hz 外觀尺寸：24 吋 電流：4.6/2.3A 轉速：1120rpm	
光電計時器	精確至小數點後第三位	1 組
待測物	圓柱形甲(光滑)：質量=130g 長度=185mm 直徑=65mm 圓柱形乙(光滑)：質量=130g 長度=165mm 直徑=65mm 圓柱形丙(光滑)：質量=130g 長度=145mm 直徑=65mm 圓柱形丁(光滑)：質量=130g 長度=125mm 直徑=65mm 圓柱形甲(光滑)：質量=130g 長度=105mm 直徑=65mm 圓柱形 A(光滑)：質量=90g 長度=145mm 直徑=65mm 圓柱形 B(光滑)：質量=100g 長度=145mm 直徑=65mm 圓柱形 C(光滑)：質量=120g 長度=145mm 直徑=65mm 圓柱形 D(光滑)：質量=130g 長度=145mm 直徑=65mm 圓柱形 E(光滑)：質量=140g 長度=145mm 直徑=65mm	
風速計		1 個
軌道	鋁製軌道(鋁門窗)	3 組
滑車	四驅車	12 台
大理石變壓器	七段變壓(風扇用)	1 台



風洞箱結構圖



圖 1 風洞箱實體圖



圖 2 整流葉片中的吸管

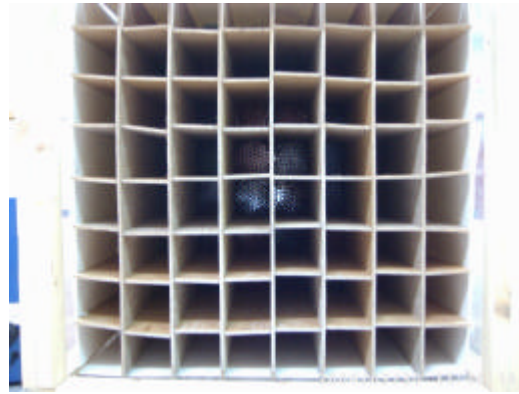


圖 3 整流葉片



圖 4 風扇



圖 5 調整風扇電壓的大理石變壓器



圖 6 變矮的風速計



圖 7 控制旋轉體轉速的電源供應器



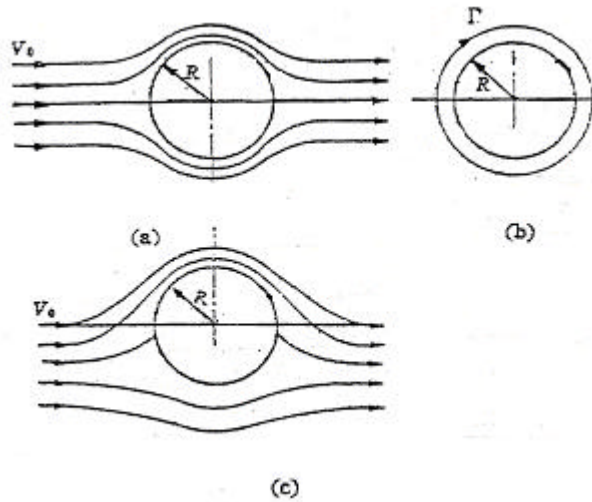
圖 7 用水平儀找水平線



圖 8 圖 7 放大

五、研究過程及方法

(一) 實驗原理：



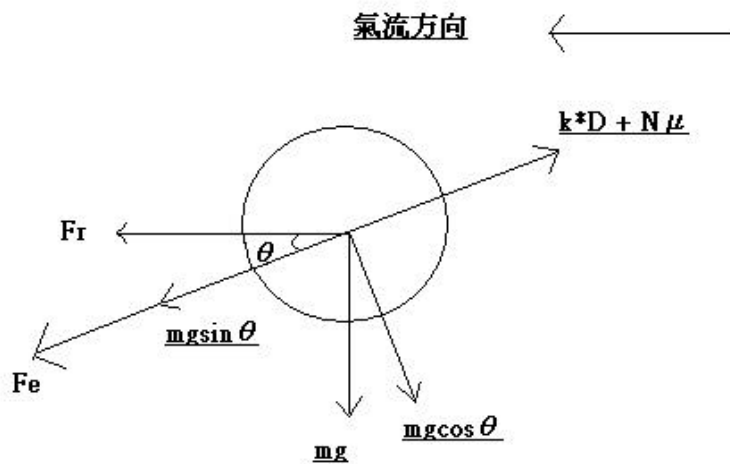
理想流體流經一圓柱時，如(1-a)所示，其流行完全對稱，無任何側向力作用於其上。而根據我們日常生活中的經驗可知，當一圓柱體高速的轉動下會在表面帶起一股氣流，那便是環流量，如圖(1-b)所示，亦即無側向力作用於其上。而當一理想流體流經一轉動中的圓柱時，圓柱上方的流速會加快，圓柱下方流速會變慢，而根據伯努利定律，我們知道流速快壓力小，流速慢壓力大，因此造成了圓柱上下的壓力差，使得圓柱

有了向上的升力。

(二) 器材的配置

先畫出我們所需要的風洞箱規格，包含主架及整流片，之後到木材行尋找必要的主架材料及訂做整流片，架起木製骨架及整流片（今年在其中加置吸管），並尋求學校木工先生的幫助將後方有斜度的腳架處架起，外表貼上壓克力板，底下的方型骨架裝上工業用風扇（新購置）。在第一層和第三層各加入木製整流葉片（含吸管）。將待測物連接至滑車上，並在第二層裝上滑車裝置，再加上光電計速器，整體的風洞裝備即完成。

(三) 拖曳力的測量



使軌道往下傾斜，而圓柱體靜止，用風扇產生相對流速，產生拖曳力，拉動彈簧，
 由上圖可推得 $F_e = mgsin \theta + F_r \cos \theta - k \cdot D - N \mu$
 $N = mg \cos \theta - F_r \sin \theta$ 代入

因此可知 $F_r = (F_e - mgsin \theta + k \cdot D + mg \cos \theta \cdot \mu) / (\cos \theta + \sin \theta \cdot \mu)$ -----公式(2)

- 其中 F_r 為拖曳力
- F_e 為合力
- k 為彈簧的彈力常數
- D 為彈簧伸長量
- m 為滑車與待測物之總質量
- g 為重力常數
- μ 為滑車與軌道間的摩擦係數

步驟：

- (1) 先將軌道向下傾斜 40 度，再把滑車與待測物裝置妥當
- (2) 軌道邊黏上刻度，再在滑車邊黏片小紙片以利於觀察彈簧伸長量
- (3) 固定相對流速大小，改變截面積大小，測量拖曳力與截面積大小的關係。
- (4) 測量出在每一種截面積下的拖曳力值，製成拖曳力的對照表，方便日後數值的計算。
- (5) 探討拖曳力與截面積大小的關係。

(四) 風速的測量

1. 固定風速計：

由於風速計高度過高，我們將下半部的 3 腳架去除，換成半顆保麗龍球，再用膠帶的內圈加以固定，放在中央位置。

2. 將風洞箱用壓克力板密封，打開風扇，經過 3 到 5 分鐘後使風速穩定，再開始測量 10 次，取平均值。

(五) 轉速的測量

因為滑車再移動中轉速不易測量，因此我們使用膠帶與熱熔膠，將滑車固定在軌道上，再將光電計時器的偵測器固定在滑車上。

因為許多的書上提到空氣具有黏滯性，因此我們猜測轉速會因風速的改變而受到影響，所以我們測出各個電壓值的在各個風速下的轉速，製成下表。並探討風速和轉速之間的關係。

(1) 風扇風速單位為 (m/s)

(2) 馬達電壓單位為 (v)

(3) 旋轉體轉速單位為 (rad/s)

風速\電壓	2.0v	2.3v	2.5v	2.8v	3.0v
3.670(m/s)	254.803(rad/s)	290.523(rad/s)	343.416(rad/s)	378.157(rad/s)	394.994(rad/s)
3.703(m/s)	230.865(rad/s)	279.676(rad/s)	337.341(rad/s)	363.366(rad/s)	384.252(rad/s)
3.738(m/s)	209.828(rad/s)	276.566(rad/s)	335.521(rad/s)	357.722(rad/s)	378.867(rad/s)
3.774(m/s)	119.846(rad/s)	275.952(rad/s)	334.438(rad/s)	356.491(rad/s)	374.982(rad/s)
3.810(m/s)	192.364(rad/s)	274.733(rad/s)	333.720(rad/s)	356.082(rad/s)	374.079(rad/s)
3.846(m/s)	185.810(rad/s)	273.644(rad/s)	332.293(rad/s)	354.863(rad/s)	372.734(rad/s)

步驟：

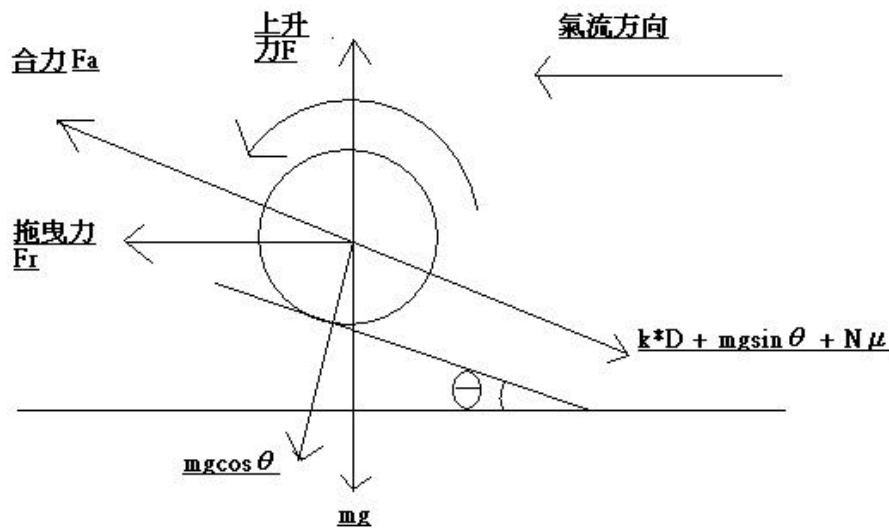
(1) 將軌道、旋轉體(截面積固定)、滑車、與驅動馬達的電線線路安置妥當

(2) 將風扇與驅動馬達啟動 3~5 分鐘後開始測量

(3) 用光電計時器來測量旋轉體旋轉 99 圈所需時間並記錄 10 次取平均值

(4) 控制截面積、質量、驅動馬達電壓為定值，觀察在各個相對流速下旋轉體的角速度

(六) 側向力的測量



由此圖可推得：

$$\text{合力 } F_a = F_r \cdot \cos \theta + F \cdot \sin \theta - k \cdot D - mg \sin \theta - N \cdot \mu$$

$$N = mg \cos \theta + F_r \sin \theta - F \cos \theta \quad \text{代入}$$

$$\underline{F = (F_a + k \cdot D + mg \sin \theta + mg \cos \theta \cdot \mu + F_r \sin \theta \cdot \mu - F_r \cos \theta) / (\sin \theta + \cos \theta \cdot \mu)}$$

μ)-----公式(3)

其中 $k \cdot D$ 是彈簧回復力 (k 是彈簧的彈力常數, D 是彈簧伸長量)

$mg \cos \theta \cdot \mu$ 是滑車與軌道之間的摩擦力 (μ 是動摩擦係數)

步驟：

- (1) 我們先用水平儀找出水平線
- (2) 將軌道上仰 3 度固定好
- (3) 軌道邊黏上刻度, 再在滑車邊黏片小紙片以利於觀察彈簧伸長量
- (4) 將滑車與待測物及彈簧裝置妥當打開風扇及旋轉體的驅動馬達 3~5 分鐘, 使其趨於穩定, 再紀錄彈簧的伸長量 5 次取平均值
- (5) 控制流速大小、旋轉體的截面積、質量、表面性質, 改變旋轉體的旋轉速度, 探討旋轉速度 (角速度) 與旋轉體所受側向力關係
- (6) 控制旋轉速度 (角速度) 旋轉體的截面積、質量、表面性質, 改變相對流速, 探討相對流速大小與旋轉體所受側向力關係
- (7) 控制流速大小、旋轉速度 (角速度) 質量、表面性質, 改變旋轉體截面積, 探討旋轉體截面積與旋轉體所受側向力關係
- (8) 控制流速大小、旋轉體的截面積、旋轉速度 (角速度) 表面性質, 旋轉體質量大小, 探討旋轉體質量大小與旋轉體所受側向力關係

(七) 與實驗操作有關的圖片



圖 9 拖曳測量圖(側視)



圖 10 拖曳力測量圖(俯視)

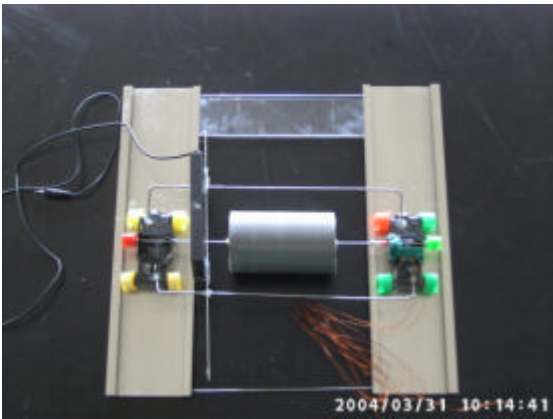


圖 11 轉速測試組(俯視)

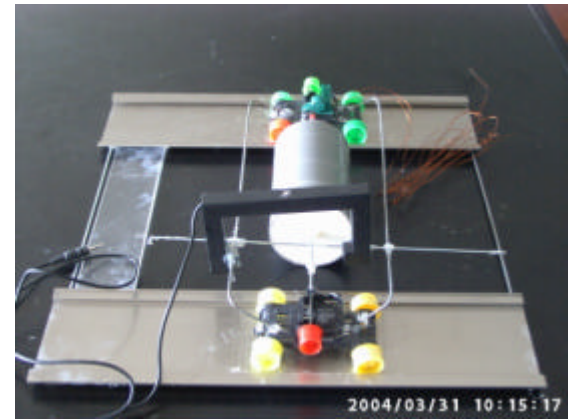


圖 12 轉速測試組(側視)



圖 13 實驗啟動前

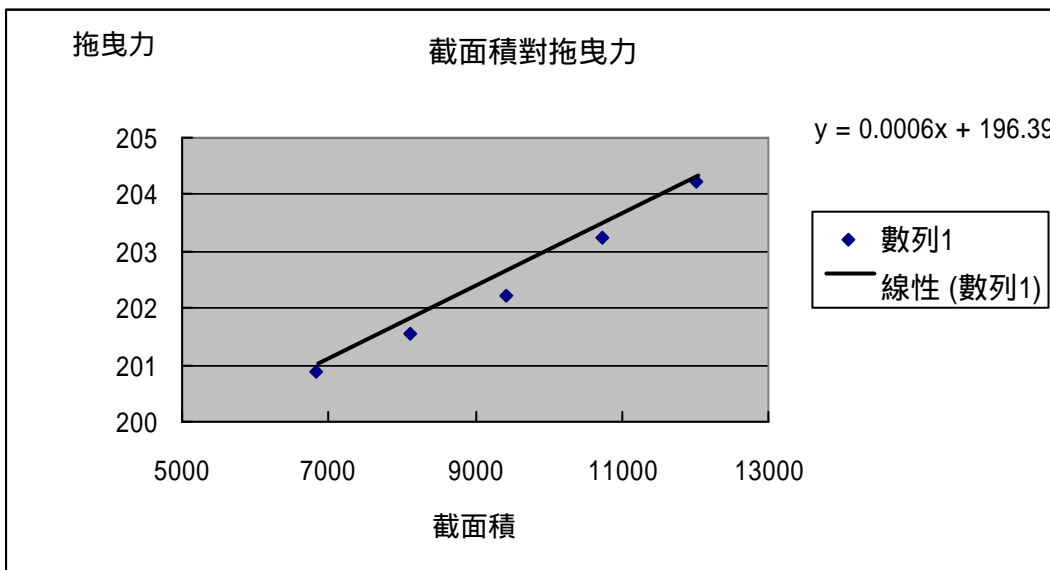


圖 14 實驗啟動後

六、研究結果

(一) 拖曳力與截面積大小的關係

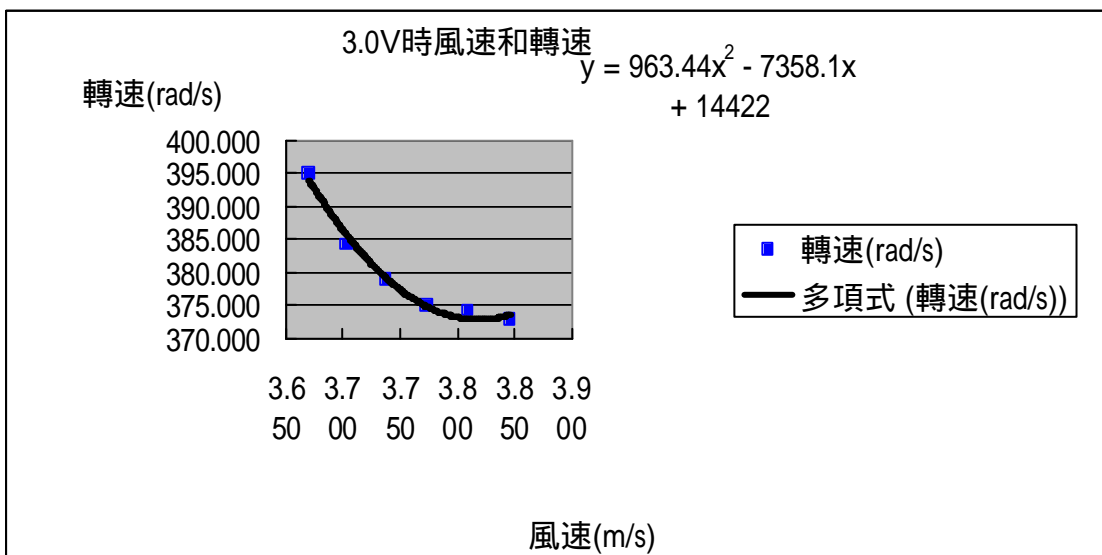
截面積(mm ²)	彈簧伸長量(cm)	滑車與待測物重(g)	合力(gw)	拖曳力(gw)
12025±0.975	3.51±0.07	225±2.0	26.95	204.23
10725±0.975	3.23±0.11	225±2.0	24.64	203.23
9425±0.975	2.96±0.09	225±2.0	22.33	202.23
8125±0.975	2.78±0.14	225±2.0	20.79	201.56
6825±0.975	2.53±0.08	225±2.0	19.25	200.89



研究結果：拖曳力與截面積成正比

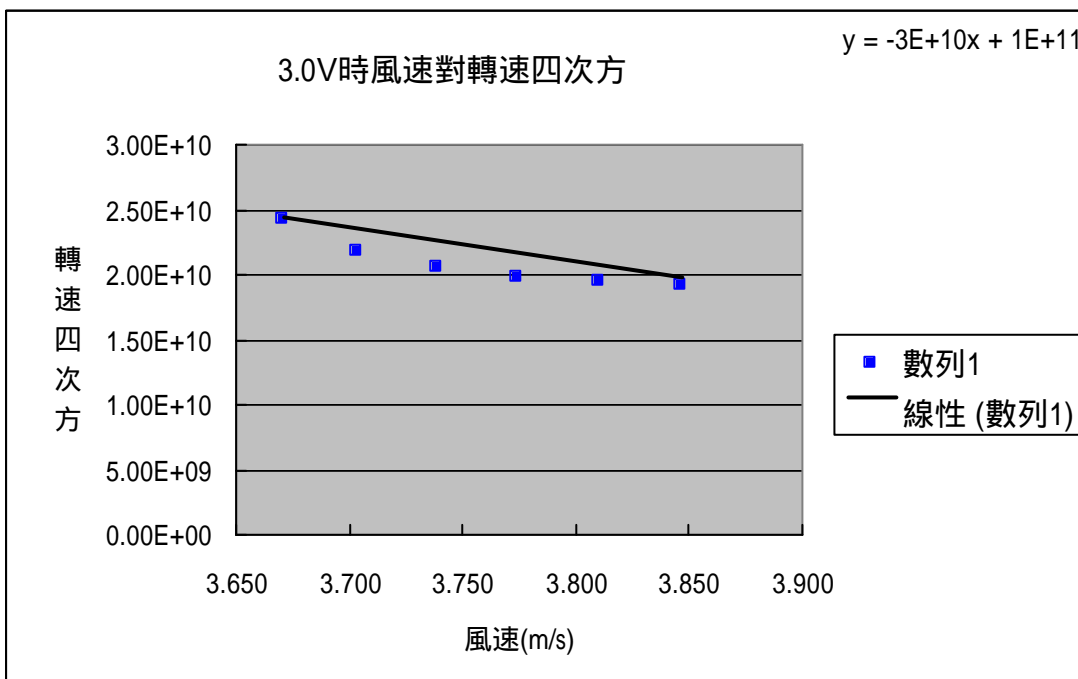
(二) 風速和轉速之間的關係

風速(m/s)	時間(s)	轉速(rad/s)
3.670±0.003	1.574±0.046	394.99
3.703±0.001	1.618±0.038	384.25
3.738±0.004	1.641±0.043	378.86
3.774±0.003	1.658±0.031	374.98
3.810±0.002	1.662±0.052	374.07
3.846±0.002	1.668±0.029	372.73



(三) 風速和轉速四次方之間的關係

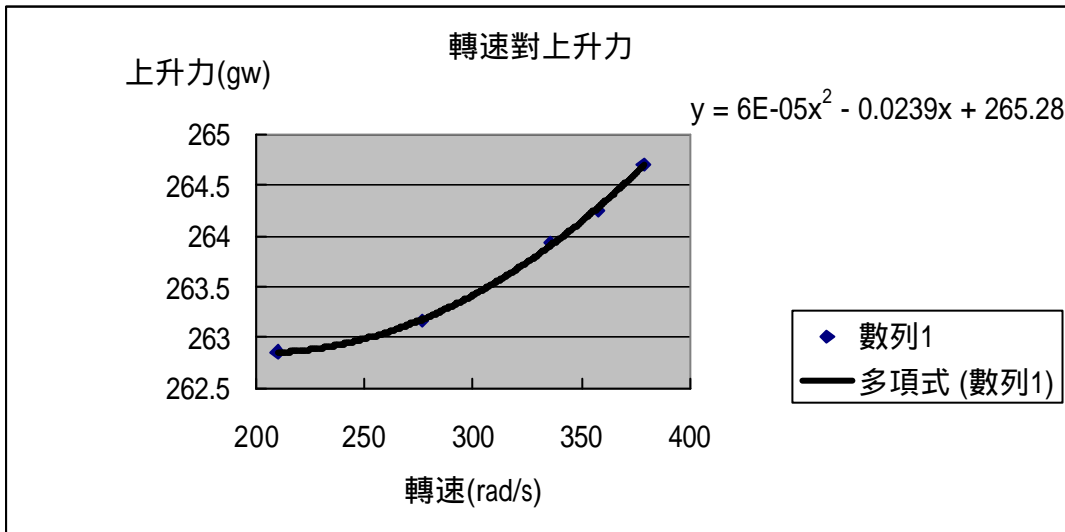
風速(m/s)	時間(s)	轉速(rad/s)	轉速四次方
3.670±0.003	1.574±0.046	394.99	2.43*10 ¹⁰
3.703±0.001	1.618±0.038	384.25	2.18*10 ¹⁰
3.738±0.004	1.641±0.043	378.86	2.06*10 ¹⁰
3.774±0.003	1.658±0.031	374.98	1.98*10 ¹⁰
3.810±0.002	1.662±0.052	374.07	1.96*10 ¹⁰
3.846±0.002	1.668±0.029	372.73	1.93*10 ¹⁰



研究結果：轉速的四次方與風速成反比

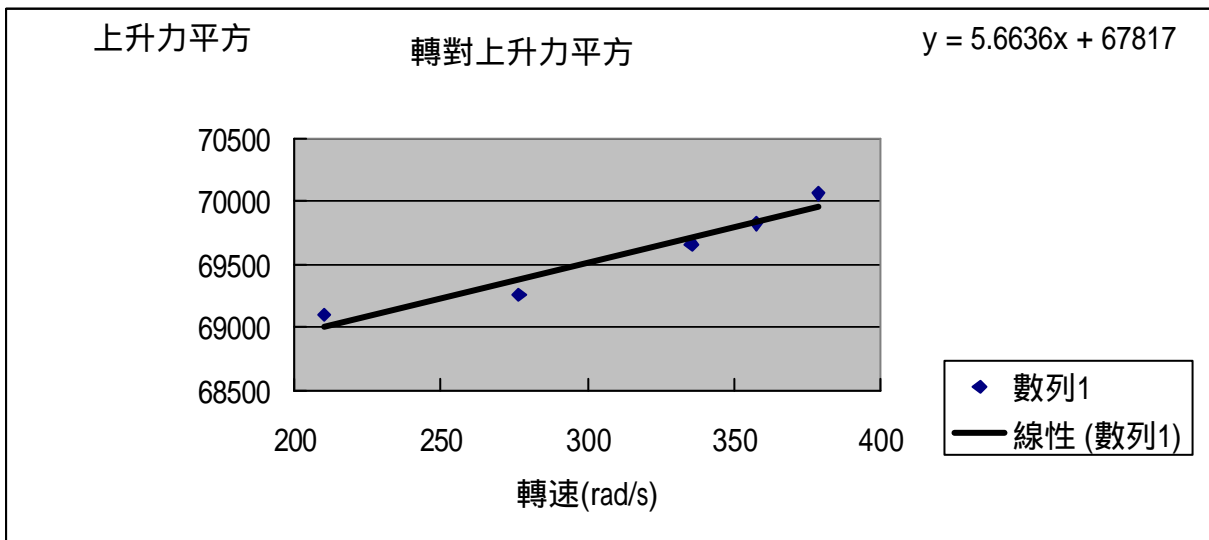
(四) 旋轉速度 (角速度) 與旋轉體所受側向力的關係

風速(m/s)	轉速(rad/s)	彈簧伸長量(cm)	合力(gw)	上升力(gw)
3.738±0.004	209.828	2.46 ±0.15	18.48	262.86
3.738±0.004	276.566	2.63 ±0.14	20.02	263.17
3.738±0.004	335.521	3.12 ±0.16	23.87	263.93
3.738±0.004	357.722	3.38 ±0.11	25.41	264.24
3.738±0.004	378.867	3.69 ±0.19	27.72	264.70



(五) 旋轉速度 (角速度) 與旋轉體所受側向力平方的關係

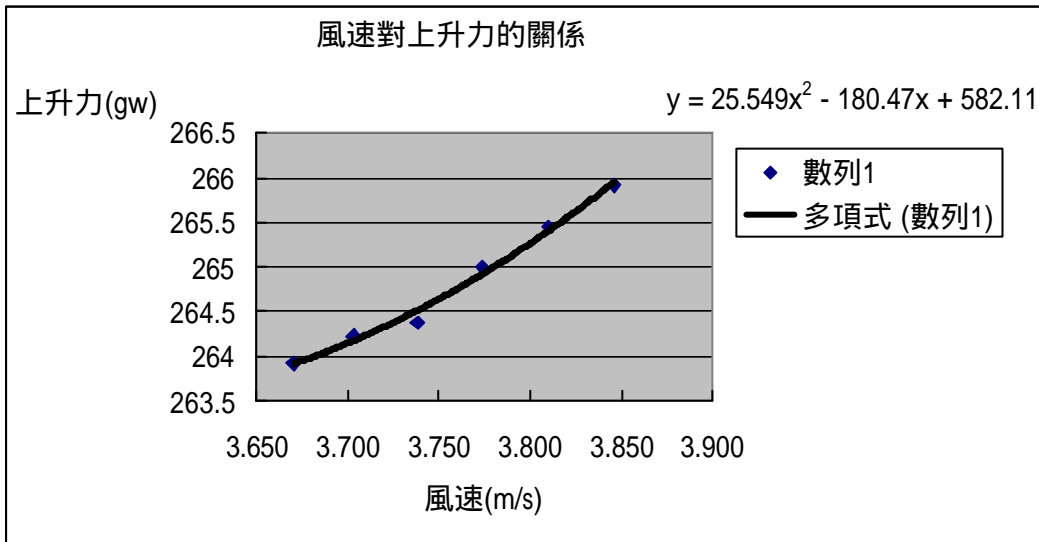
風速(m/s)	轉速(rad/s)	彈簧伸長量(cm)	合力(gw)	上升力(gw)	上升力平方
3.738±0.004	209.828	2.46 ±0.15	18.48	262.86	6.91*10 ⁴
3.738±0.004	276.566	2.63 ±0.14	20.02	263.17	6.93*10 ⁴
3.738±0.004	335.521	3.12 ±0.16	23.87	263.93	6.97*10 ⁴
3.738±0.004	357.722	3.38 ±0.11	25.41	264.24	6.98*10 ⁴
3.738±0.004	378.867	3.69 ±0.19	27.72	264.70	7.01*10 ⁴



研究結果：旋轉體的切線速率與側向力平方成正比

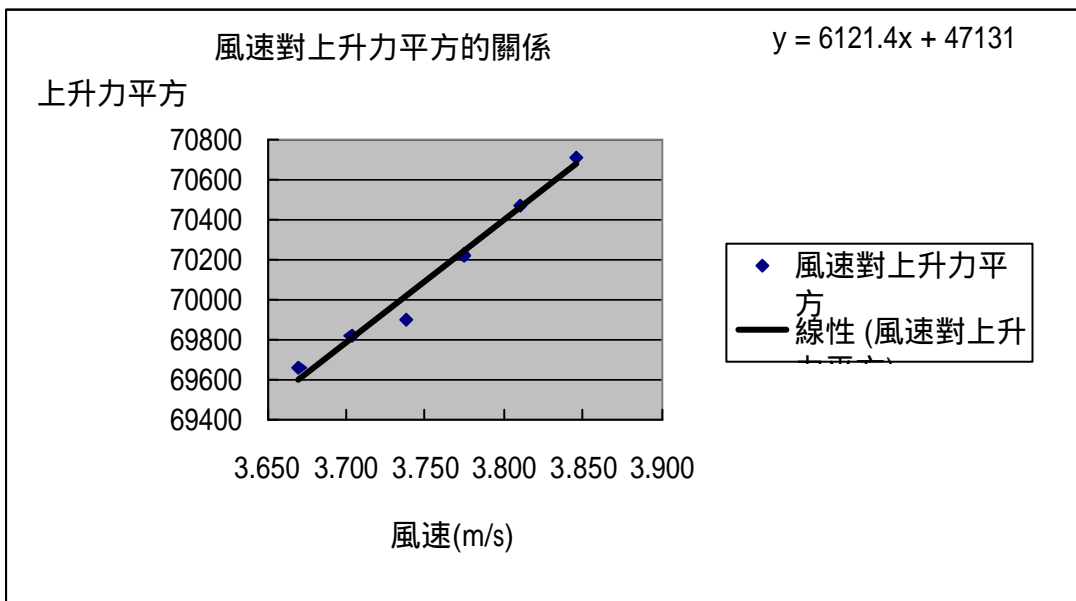
(六) 相對流速大小與旋轉體所受側向力的關係

風速(m/s)	電壓(v)	轉速(rad)	截面積(mm ²)	彈簧伸長量(cm)	合力(gw)	上升力
3.670±0.003	2.50	343.416	12025±0.975	2.93 ±0.13	22.33	263.92
3.703±0.001	2.56	343.529	12025±0.975	3.19 ±0.11	23.87	264.23
3.738±0.004	2.61	343.367	12025±0.975	3.24 ±0.17	24.64	264.38
3.774±0.003	2.64	343.229	12025±0.975	3.65 ±0.19	27.72	265.00
3.810±0.002	2.69	343.473	12025±0.975	3.93 ±0.16	30.03	265.46
3.846±0.002	2.75	343.423	12025±0.975	4.24 ±0.18	32.34	265.92



(七) 相對流速大小與旋轉體所受側向力平方的關係

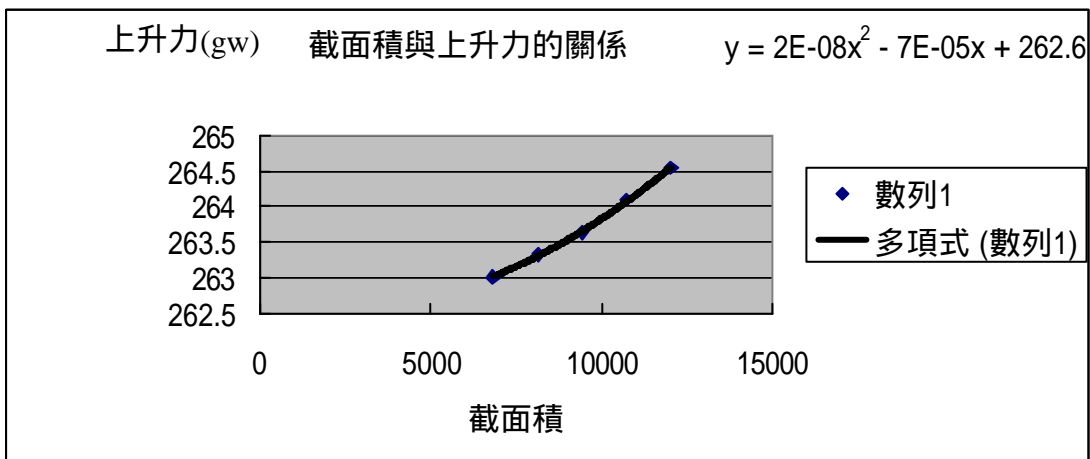
風速(m/s)	電壓(v)	轉速(rad)	彈簧伸長量(cm)	合力(gw)	上升力	上升力平方
3.670±0.003	2.50	343.416	2.93 ±0.13	22.33	263.92	6.97*10 ⁴
3.703±0.001	2.56	343.529	3.19 ±0.11	23.87	264.23	6.98*10 ⁴
3.738±0.004	2.61	343.367	3.24 ±0.17	24.64	264.38	6.99*10 ⁴
3.774±0.003	2.64	343.229	3.65 ±0.19	27.72	265.00	7.02*10 ⁴
3.810±0.002	2.69	343.473	3.93 ±0.16	30.03	265.46	7.05*10 ⁴
3.846±0.002	2.75	343.423	4.24 ±0.18	32.34	265.92	7.07*10 ⁴



研究結果：相對流速大小與側向力平方成正比]

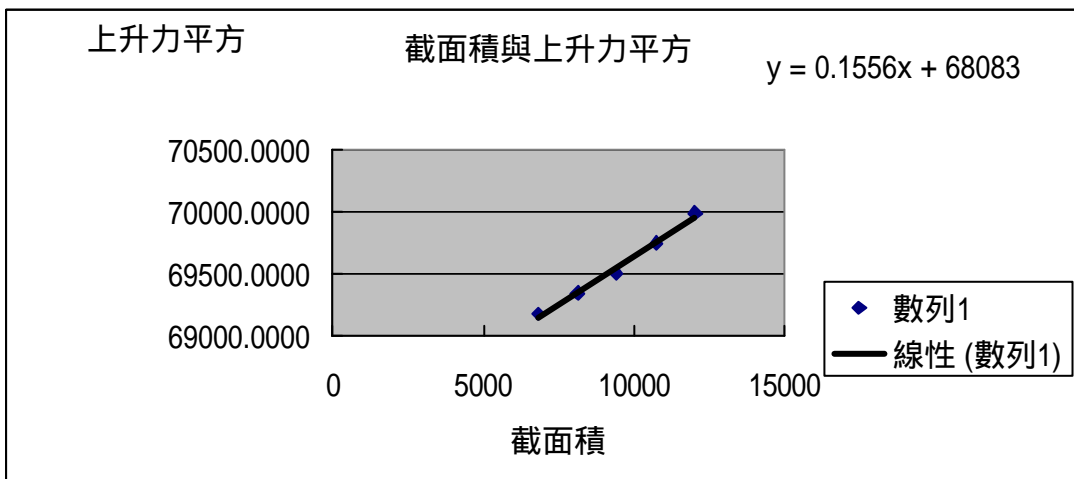
(八) 旋轉體截面積與旋轉體所受側向力的關係

截面積(mm ²)	彈簧伸長量(cm)	滑車與待測物重(g)	合力(gw)	拖曳力(gw)	上升力
12025±0.975	3.52 ±0.13	225±2.0	26.95	204.22	264.55
10725±0.975	3.26 ±0.16	225±2.0	24.64	203.22	264.09
9425±0.975	2.93 ±0.14	225±2.0	22.33	202.22	263.63
8125±0.975	2.79 ±0.11	225±2.0	20.79	201.55	263.32
6825±0.975	2.54 ±0.18	225±2.0	19.25	200.89	263.01



(九) 旋轉體截面積與旋轉體所受側向力平方的關係

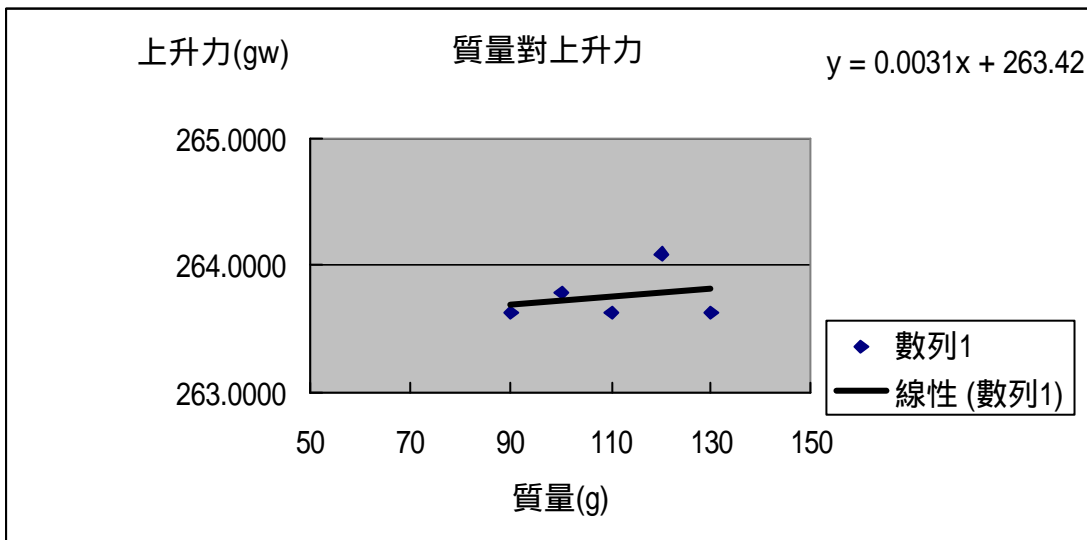
截面積(mm ²)	彈簧伸長量(cm)	總重(g)	合力(gw)	拖曳力(gw)	上升力(gw)	上升力平方
12025±0.975	3.52 ±0.13	225±2.0	26.95	204.22	264.55	6.999*10 ⁴
10725±0.975	3.26 ±0.16	225±2.0	24.64	203.22	264.09	6.974*10 ⁴
9425±0.975	2.93 ±0.14	225±2.0	22.33	202.22	263.63	6.950*10 ⁴
8125±0.975	2.79 ±0.11	225±2.0	20.79	201.55	263.32	6.934*10 ⁴
6825±0.975	2.54 ±0.18	225±2.0	19.25	200.89	263.01	6.918*10 ⁴



研究結果：截面積與側向力平方成正比

(十) 旋轉體質量大小與旋轉體所受側向力的關係

截面積(mm ²)	風速(m/s)	轉速(rad/s)	質量(g)	彈簧伸長量(cm)	合力(gw)	上升力
9425±0.975	3.738±0.004	209.828	90±2.0	2.9	22.33	263.63
9425±0.975	3.738±0.004	209.828	100±2.0	3.0	23.10	263.78
9425±0.975	3.738±0.004	209.828	110±2.0	2.9	22.33	263.63
9425±0.975	3.738±0.004	209.828	120±2.0	3.2	24.64	264.09
9425±0.975	3.738±0.004	209.828	130±2.0	2.9	22.33	263.63



研究結果：質量與側向力無絕對關係

總結果：

1. 拖曳力與截面積成正比
2. 旋轉體的切線速率四次方與風速成反比
3. 相對流速大小與側向力平方成正比
4. 旋轉體的切線速率與側向力成正比
5. 截面積與側向力平方成正比
6. 質量與側向力無任何關係

七、討論與檢討

1. 旋轉體之驅動馬達由電源供應器以直流電予以驅動，因此旋轉體之轉速頗為穩定，但實驗發現，當氣流通過正在旋轉的旋轉體時，旋轉體的轉速頓時減少，由此我們可以發現空氣具有黏滯性，使得旋轉體的轉速減少，且氣流風速越大，損失之轉速越多，而轉速的四次方和風速成反比，旋轉體表面和氣流摩擦產生之摩擦力，綜合兩者產生拖曳力而減少了旋轉體之轉速，且轉速四次方成反比約和風速。因此為使旋轉體的轉速達到預定之數值，避免損失轉速，需再啟動風扇調整電源供應器使轉速達到預定數值。
2. 實驗過程中，本組是以各種方法顯示出氣流流線現象。採用 5 支線香之煙霧，試圖找出流線現象但效果不佳，爾後在暗室中輔以強光器在以黑色紙版為底，則可得到顯著的現象。



圖 19 線香

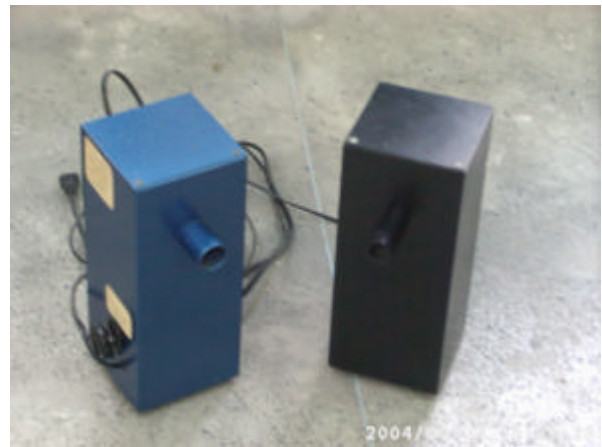


圖 20 強光器

圖 21~26 為一組連續動作



圖 21 風洞箱內氣流動情形 1



圖 22 風洞箱內氣流動情形 2



圖 23 風洞箱內氣流動情形 3



圖 24 風洞箱內氣流動情形 4



圖 25 風洞箱內氣流動情形 5



圖 26 風洞箱內氣流動情形 6

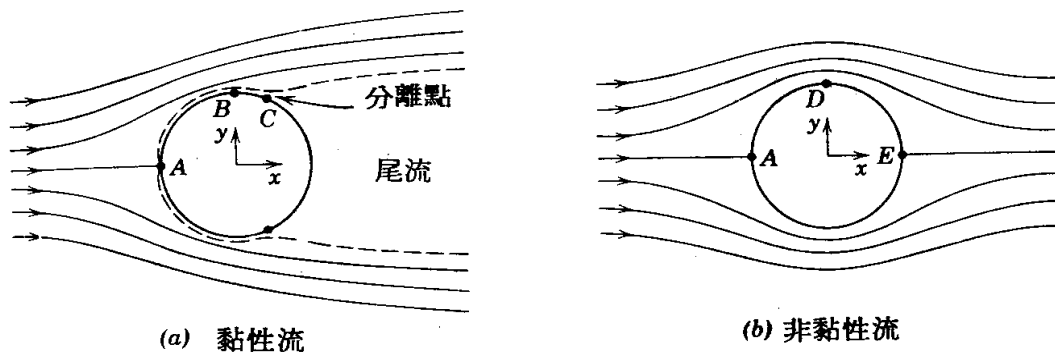
圖 27~28 為一組連續動作



圖 27 風洞箱內氣流動情形 1



圖 28 風洞箱內氣流動情形 2



由圖 27、28 可發現明顯的尾流現象，因此我們特別去找尋資料，希望能充分了解尾流這個現象之所以會發生的原因，並加以思考。

當我們開始考慮一壓力與黏滯力均重要的穩流流場(流過圓柱之不可壓縮流)。若應用合宜之觀察技術，我們可觀察流場之一般性如圖 a 所示。

由上圖之流線對稱於 x 軸。流體沿中央流線撞擊在圓柱上，由 A 點分開流經該圓柱。圓柱上 A 點稱為滯流點。如同流體流經平板一般，在固體表面附近形成一邊界層。邊界層外圍之速度分佈情形可為由流線間之問隔求得。由於流體無法流穿流線。故流線間之問隔遞減者，其速度在該區間必遞增。相反的，流線之間隔遞增，其速度必遞減。

暫且考慮如圖 b 中所示流經圓柱體之不可壓縮之非黏性流時，其流動乃對 x 軸與 y 均呈對稱。沿著圓柱體，流速遞增至最大點 D，然後沿著流動方向呈遞增。對非黏性流而言，速度之增加乃伴隨著壓力之減少，反之亦然，速度之減少乃伴隨著壓力之增加。因此對不可壓縮之無黏性流而言，壓力分佈乃由 A 點至 D 點呈遞減，然後由 D 點至 E 點呈遞增現象。由於其流動對稱於 x 軸與 y 軸，因此我們判斷其壓力分佈亦對呈於該兩軸。無黏性流動事實即如此。

由於在無黏性流中，剪應力並不存在，故決定對圓柱之淨作用力須考慮其壓力即可。現在壓力分佈呈對稱性，不可歸結出在無黏性流中無論在 x 或 y 方向上均無淨作用力。通常在 x 方向上之淨作用力稱之為拖力(阻力)。因此無黏性流流過圓柱體時並不產生拖力，此係違於常情，由經驗知道任何物體在真實流中均受到拖力。對無黏性流流經物體時，我們依據無黏性流之定義而忽略了邊界層之存在。讓我們再返回探討真實流。

在真實的流動中，實驗證明出在圖 a 中，A 點和 C 點間的邊界層是薄的。由於該層係

薄的，故假設其壓力場之狀態與無黏性流者相同乃是合理的。又知壓力在 A 點與 B 點之間呈遞減，故邊界層內之流體乃承受一沿著流動方向之淨壓力。在點 A 與點 B 間，淨壓力足夠克服剪應力之阻力，故流體之流動方向不變。

接著考慮圓柱體背面，在 B 點之後邊界層內之流體。由於壓力沿著流動方向遞增，流體元素承受著與流動方向相反之淨壓力。最後，邊界層內流體之動量已不足以將該元素帶入壓力遞增區。緊鄰固體面之流體將停滯下來，而流動與表面分離；此點稱之為分離點。物體背後相對低壓區之形成乃緣起於邊界層之分離，該區屬動量較低區，通常稱為尾流(wake)。因而物體表面產生分離流時，源於流動方向上存有不平衡之淨壓力，結果導致物體之壓力拖力。尾流越大，其壓力拖力越大。

3. 旋轉體所受合力方向是否與氣流方向垂直？

由上述實驗結果得知，旋轉體於氣流中所受之力除了側向力(F_1)尚有拖曳力(F_2)所以合力大小 $F=(F_1^2+F_2^2)^{1/2}$ 其方向為 F_1 和 F_2 之和向量方向故其受力方向並非與氣流方向垂直。

4. 為何採用整流葉片及吸管？

因為我們採以吸入氣流易使氣流產生扭曲和轉動現象，為了使其接近理想流體降低實驗誤差，我們讓氣流經過整流葉片與吸管，讓外界之空氣經整流葉片與吸管後產生平穩氣流才通過待測旋轉體，並減低旋轉體產生震盪之機會並減少測量值誤差，但還是無法保證完全無擾流現象。

5. 減低摩擦的方法：

- (1).旋轉體之軸心採用滾珠軸承。
- (2).於齒輪接觸面上滴潤滑油，減低摩擦力。

6. 減少誤差之方法：

- (1).風速測量：
使用風速計測量風扇風速，風扇開始旋轉 3 到 5 分鐘，才開始測量。
- (2)轉速測量：
使用電光計時器測量旋轉體角速度，馬達啟動 3 到 5 分鐘，才開始測量。
- (3)側向力測量：
使滑車輪胎與軌道壁接觸，產生摩擦力來穩定旋轉體高速轉動下所產生的強烈震動所造成的彈簧震動。

7. 誤差的最大來源：

由於學校設備，我們借不到冷氣房，無法固定實驗時的室溫與溼度還有壓力恆定，導致每次實驗時，溫度、溼度、壓力都各自不同，影響空氣密度，而根據公式 1，側向力與空氣密度有關，如此一來便嚴重影響實驗準確度。

8.與去年的比較：

- (1) 去年我們採取垂吊式，由於旋轉體在高速轉動下會強烈的震動，而且當時的整流葉片並無吸管，因此整流效果並不佳，所以誤差十分大，今以我們加以改良，改用滑車，由於有摩擦力的關係，我們用摩擦力來克服它的的震動問題，此外我們購置一台新的電扇，經測量後發現風速極為穩定，經過這些改變後，我們的誤差比起去年少掉許多。
- (2) 由於我們去年對於實驗的相關事項並不甚了解，所以討論的東西較少，今年討論的則多了許多，而結果與去年所做的也大致相同。
- (3) 去年我們觀察氣流情形是以細線來觀察，今年我們借到了一間暗室，於是改用線香煙霧輔以強光器，果然得到比去年更好的效果。

9.實驗中的困難與克服：

- (1) 風洞箱的設計與製造是我們所遇到的第一個難題，在老師的指導下與工友的協助下而解決。
- (2) 待測物的製造則是第二個難題，因為無論我們多細心，待測物在高速轉動下都會震動，而理想的圓球體也不好找，轉軸的洞又不易鑽，而轉軸的材料更是難找，可是在我們日以繼夜奔走下，我們去腳踏車店買了腳踏車輪框上新的細輪軸充作轉軸，又向老師借了鑽洞機，還想到了用摩擦力克服震動這個方法，但是就是找不到圓球體，要知道保麗龍球質量過輕，無法產生足夠的摩擦力來抵制震動，而其他球體又不符合我們之需求，最後我們甚至想到要用地球儀，卻發現市面上所售之地球儀都不是球體，因此我們只好放棄圓球體了。
- (3) 而拖曳力的出現便是第三個難題了，根據我們所找到的資料，我們知道除了形狀簡單的物體外，升力和拖曳力很難以分析方法求出，一般是以實驗建立經驗法則求得，而經由實驗發現拖曳力主要來自表面摩擦和上下面(不同風速)之壓力差，在資料中有在理想狀態下的公式(經由分析得拖曳力係數 $C_D=24/N_R$ 雷諾數 N_R 而拖曳力為 $F_D=C_D V^2 A/2$ -----公式 V =相對風速 A =物體之截面積)，但是我們認為理想與現實是有差距的，因此我們設計了一個實驗來專門測量拖曳力，此外我們還做出了一個結果-----拖曳力和截面積成正比。

八、結論

- (1) 旋轉體於穩定氣流中所受之(側向力)² 約和相對流速，旋轉體之最大切線速率，旋轉體之截面積成正比，且表面越粗糙者，側向力越大。
- (2) 側向力的大小與質量大小無絕對關係。

九、參考資料

- | | | |
|---------------------------|----------------|---------|
| 1.流體動力學導論 | 李基禎 | 東華書局 |
| 2.流體力學 | 鄭智光 | 圓山圖書 |
| 3.觀念物理叢書 | 休伊特 | 天下文化 |
| 4.Fundamentals of Physics | David Halliday | |
| 5.電玩物理學 | David M. Bourg | O'REILL |

評語

040104 高中組物理科 佳作

順風而上

1. 實驗步驟嚴謹，但理論敘述尚嫌不足。
2. 內容有深度。