

中華民國第 54 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高中組 物理科

最佳團隊合作獎

040108

運用抽吸效應(suction effect)減阻之研究

學校名稱：臺北市立麗山高級中學

作者： 高二 劉昕恬 高二 廖苑婷	指導老師： 吳明德 徐志成
-------------------------	---------------------

關鍵詞：邊界層(boundary layer)、
阻力係數(Drag coefficient)、
抽吸效應(suction effect)

摘要

本實驗創新之處為不耗能的自然抽氣都可以達到需耗能的強制抽氣效果。為了證明抽氣會減少邊界層厚度而降低阻力係數，進而達到減阻的效果，我們做了以下實驗：壹、在不同風速(wind speed)下觀察圓柱細線擾動的位置，比較層流(Laminar flow)和紊流(Turbulent flow)分離點的位置，當風速愈大時，分離點往前緣發生；貳、利用不同風速比較光滑圓柱、自然抽氣(Natural ventilation)圓柱和強制抽氣(Forced ventilation)圓柱之下的圓柱阻力，並分析阻力係數(Drag coefficient)差異，發現強制排氣小孔圓柱(加引流孔)是五組中阻力係數最小的，實驗證明強制抽氣加引流孔減阻效果可達三成多。

壹、 研究動機

在課程中和本研究有相關性的有下列三項：第一個是在南一版基礎物理(二)A 1-3 加速度—描述速度的改變以及 2-1 慣性與牛頓第一運動定律(99 課綱)中有提到終端速度，終端速度就是當物體的淨力為零，因此物體的速度保持不變。在這樣的情況下得知速度平方和阻力成正比。

第二個則是高三選修物理下冊(95 暫綱)的密立坎油滴實驗，得知當油滴落下時，油滴和阻力、速度成正比。

第三個為艾薩克·牛頓(Isaac Newton)《自然哲學的數學原理》(拉丁文:Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica)，共有三卷，其中第二卷論物體的運動中用動量解釋阻力，阻力和空氣密度、截面積成正比。另外阻力還和形狀、物體表面性質有關，所以想研究一個固定的形狀，本研究選擇圓柱體，利用四種表面觀察其阻力變化。氣流流經物體會黏附一層流體，使阻力變大，經由文獻得知抽吸效應(suction effect)能使黏附氣流變薄、降低阻力。但是考慮到強制抽氣會有耗能的缺點，本研究創新之處是利用文氏管(Venturi tube)，即噴霧器原理，高速氣體通過管口產生負壓，這是丹尼爾·白努利(Daniel Bernoulli)所發現的白努利定律(高二下基礎物理 2，95 課綱)，這樣就不需要額外耗能即可達到抽氣減阻。

在同一物體由於阻力係數為定值，阻力只與風速平方成正比，但在某些情況之下阻力係數也可以被改變，例：高爾夫球上的小凹洞會產生許多小窩流使周圍吸附的流體變薄，在此時摩擦阻力也會因而下降(物體邊界層和阻力係數關係在本文之原理有詳細介紹)因此利用上述的啟發，本說明書以圓柱設計出可以使周圍吸附的流體變薄的自然抽氣裝置，期待利用此裝置降低阻力係數而達到減阻的效果。

貳、 研究目的

為了證明抽氣會減少邊界層厚度而降低阻力係數，進而達到減阻的效果，我們做出以下實驗和整理：

一、風速變化和分離點的位置關係

(一)、觀察橫切圓柱體的氣流在不同風速下觀察圓柱細線擾動的位置，觀察層流和紊流的分界點(直尺為實驗二測量厚度的工具)

二、了解風速和圓柱周圍氣流的穩定

(一)、透過旋轉圓柱並記錄每間隔若干弧度邊界層的厚度變化

三、抽氣裝置對圓柱邊界層的影響

(一)、測量表面光滑圓柱在不同風速下的阻力大小

(二)、測量表面小孔圓柱在不同風速下的阻力大小

(三)、測量強制抽氣小孔圓柱在不同風速下的阻力大小

(四)、測量自然抽氣小孔圓柱在不同風速下的阻力大小

(五)、測量強制抽氣小孔(加引流孔)圓柱在不同風速下的阻力大小

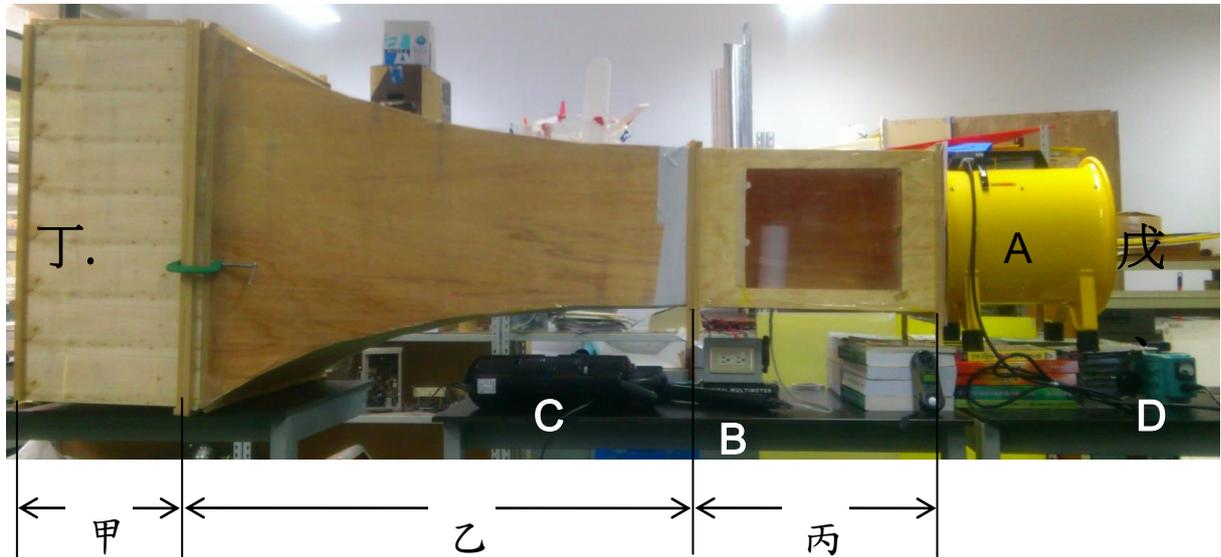
(六)、計算上述五組的阻力係數

(七)、利用上述五組的阻力係數比較抽氣裝置對減阻的效果

參、 研究設備及器材

自製低速風洞採取吸氣方式，能避免送風機攪拌空氣時產生的渦流影響風場穩定。進氣口截面為 90cm×90cm 而觀察區截面為 40cm×40cm，由連續方程式可知截面減小可提高流速。

為了要測量阻力係數 我們所需要的器材如下：



圖一、實驗裝置側視圖

風洞各部位說明

- 甲、穩定段(含雙層網眼)
- 乙、收縮段(截面積變小，流速加快)
- 丙、實驗段(可側開的壓克力窗，方便觀測)
- 丁、進氣口
- 戊、出氣口(風洞採抽氣風洞，避免亂流產生)

實驗器材

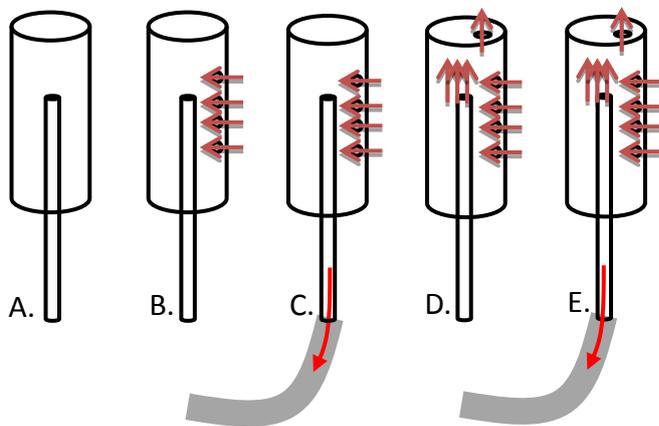
- A.風機
- B.電子秤
- C.吸塵器
- D.自耦變壓器



圖二、風洞前視圖(內含兩層蜂巢網，外層網眼為 2×2mm，內層網眼為 1.5×1.5mm，吸入流體產生細微的亂流後再變為層流)

表一、實驗器材表

器材	規格	數量	功能
實驗器材			
銀絲線	輕盈,極容易隨風擺動	1 捆	由開始擾動行為判斷流場是否進入紊流區
圓柱	高 21.3cm×半徑 7.9cm 每個小孔間隔 2.5cm, 直徑 0.3cm	1 個	做銀線固定之器物, 並旋轉圓柱角度改變銀線位置
量角器	0° ~180°	1 支	測量圓柱旋轉角度
測量器具			
送風機	電壓: 110-120v 速度: 3310rpm	1 臺	提供流場風源
自製低速風洞	觀察區截面積 40cm×40cm	1 組	提供穩定流體環境, 風速範圍 0~12.31m/s
自耦變壓器		1 臺	調整風機電壓以控制風速
電子秤		1 個	測量阻力(精密度 0.01g)
吸塵器		1 台	抽氣裝置



圖三、實驗裝置分別為：

- A. 表面光滑圓柱
- B. 表面小孔圓柱
- C. 強制抽氣小孔圓柱
- D. 自然抽氣小孔圓柱
- E. 強制抽氣小孔圓柱(加引流孔)



圖四、風洞內置圓柱附有四個小孔, 方框為小孔位置, 量角器指示小孔旋轉角度

肆、研究過程或方法

一、原理

(一)、艾薩克·牛頓—《自然哲學的數學原理》之第二卷論物體的運動

由牛頓第二運動定律得知：

$$F = m \frac{\Delta p}{\Delta t} = m \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

接下來以噴流為例，當無黏滯力流體以速率 V 流向平板，流體以單位時間流入質量為：

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = \rho AV$$

流入流體正向平板流速為 $V \cos \theta$ ，流出流體正向平板流速為 0 ，流體受到正向平板的力：

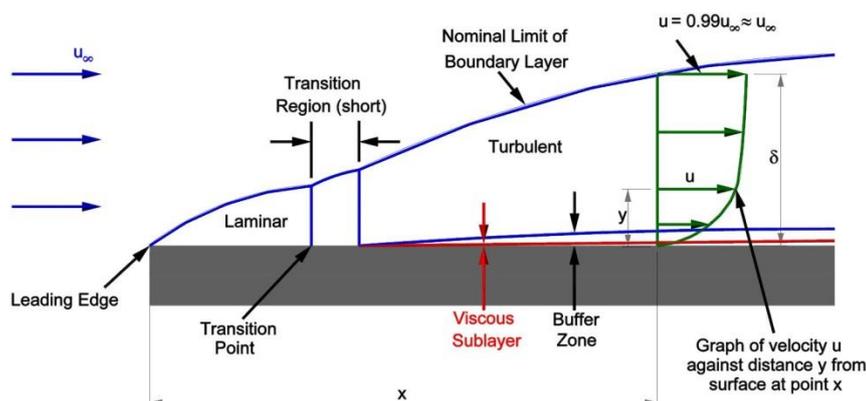
$$F = \rho AV(V \cos \theta) \quad \text{圖五、噴流裝置示意圖}$$

平板受到流體的力，為流體受到平板的力的反作用力，平板受到流體的力，平行於最初流體方向分力為阻力：

$$F_D = \rho AV^2 \cos^2 \theta$$

因此當在同一流場中 ρ (空氣密度)、 A (物體和流體接觸的截面積)可確定時， F_D (阻力)只與 V^2 (風速平方)及 C_D (阻力係數)成正比。

而邊界層是由黏滯力產生的效應，在邊界層外，流體的速度接近定值，不隨位置而變化。邊界層的速度定義為 0.99 倍的原本風速，距固定表面愈遠，速度會趨近一定值。黏滯力是流體受到應力(單位面積所承受的作用力)變形時所產生的阻力。黏滯力愈低的流體，流動性愈佳。



圖六、邊界層分為層流區、過度區(層流區和過度區之間有一過度點)以及紊流區，下方紅色箭頭所指示的為黏性底層，而下方黑色箭頭所指示的為緩衝區

(資料來源：www.tutorhelpdesk.com)

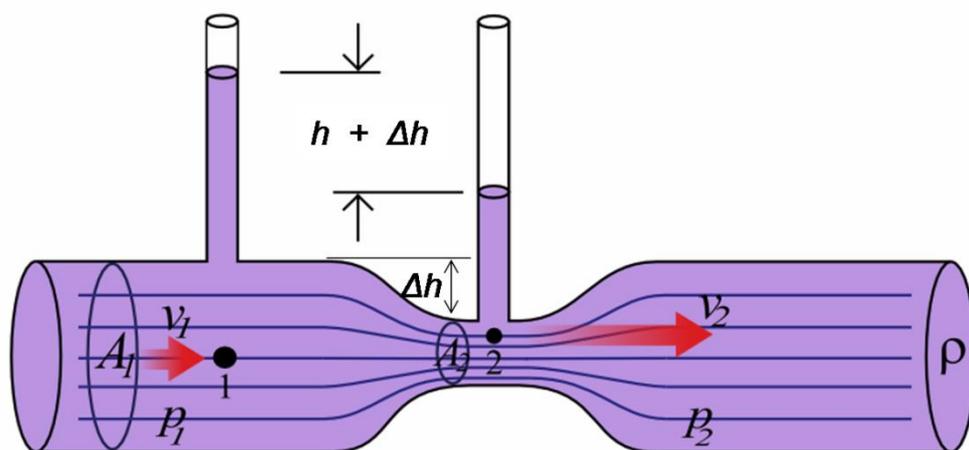
(二)伯努力定律與文氏管

伯努力定律可以從兩個面向解釋：第一個是從能量守恆解釋，一個增加的速度的流體發生動態壓力和動能，並在其靜態壓力和勢能減少成比例的增加。如果液體流出水庫，各種形式的能量的總和是相同的。

第二個是從牛頓第二定律解釋，如果一個小體積區域的流體因水平流動，而有從高壓到低壓的分佈，即後方區域較前面區域有更多的壓力。假設前後方區域面積相等，如此便提供了一個正向淨力施於小體積區域，加速其沿正向流動。因此，在流動的流體的水平之內，以最高的速度發生壓力最低，最低的速度發生壓力最高。

相同的情況也發生在本研究的自製低速風洞中，如下列公式所示：

$$A_1 V_1 = A_2 V_2$$



圖七、文氏管示意圖

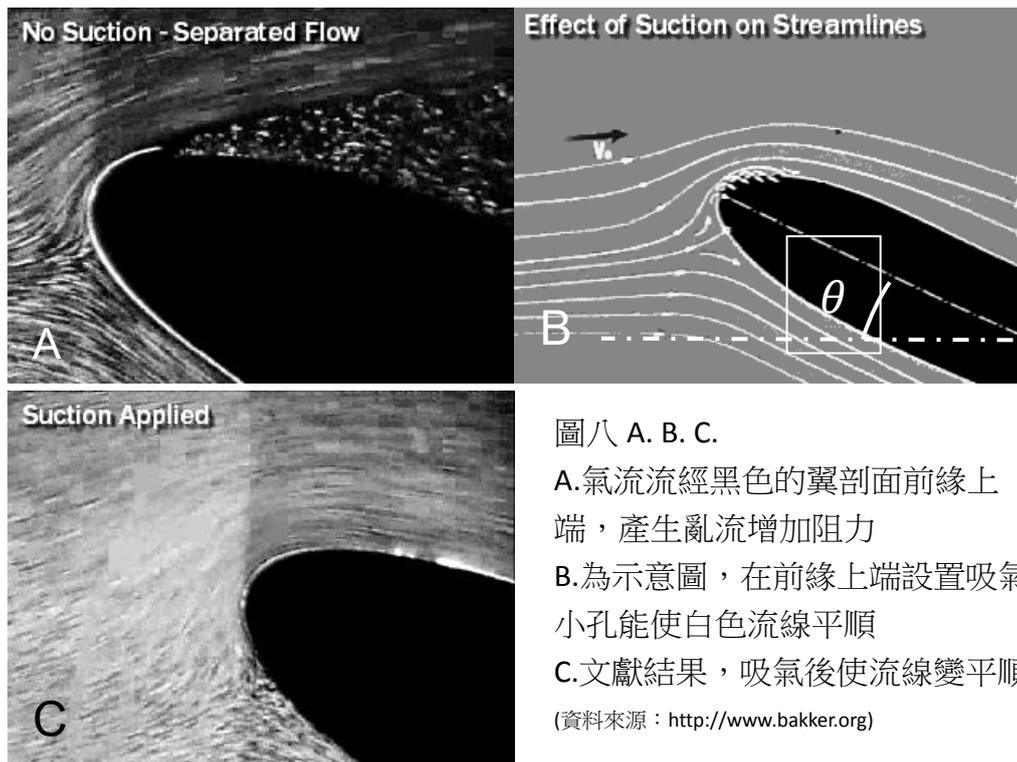
(資料來源：en.wikipedia.org)

(三)、抽吸效應(suction effect)

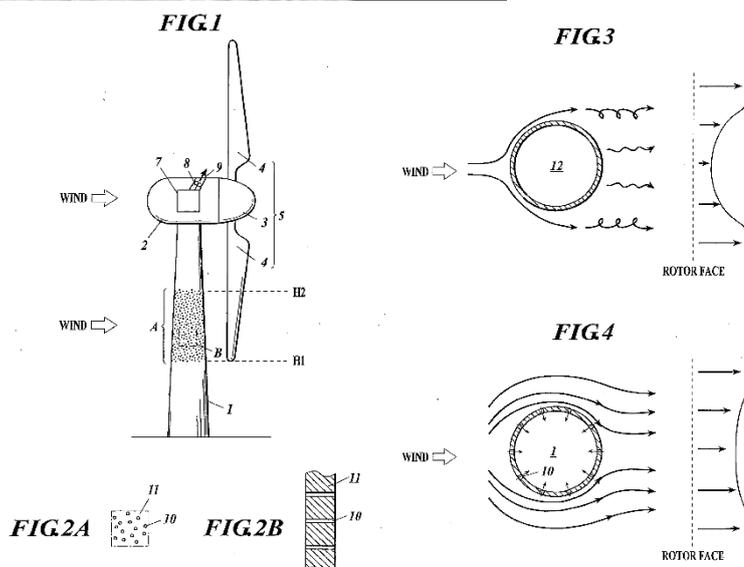
利用溝槽吸入空氣是邊界層控制的方法之一，目的是減少表面摩擦阻力或降低能量散失。這種方法是在 1904 年由 L. Prandtl 提出延遲邊界層分離的理論。

為了實現吸力，表面應具有孔（溝槽，多孔，穿孔等）。這些孔用於抽吸靠近物體表面、流速最慢的邊界層。

而透過多孔壁連續吸入也已經被證實效果會比抽吸槽更有效，例如在機翼上增設小孔所需流經的氣體會比流經抽吸槽的氣體少，但產生的升力卻是一樣大的。



圖八 A. B. C.
 A. 氣流流經黑色的翼剖面前緣上端，產生亂流增加阻力
 B. 為示意圖，在前緣上端設置吸氣小孔能使白色流線平順
 C. 文獻結果，吸氣後使流線變平順
 (資料來源：<http://www.bakker.org>)



圖九、上圖為背風式水平軸風力渦輪機，塔柱的具有多個小孔，塔柱小孔利用抽吸效應吸氣減少阻力。(資料來源：Shigeo Yoshida, Boundary layer suction for the tower of a horizontal axis wind turbine)

(四)、雷諾數(Reynolds number)

雷諾數為慣性力與黏滯力的比值，雖然大小不同物體，但是當雷諾數相同具有相似性質，所以風洞內縮尺模型可以用來研究真實飛機的流體特性。

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{VD}{\nu} = \frac{QD}{vA}$$

V ：風速 (m/s)

D ：球體直徑 (m)

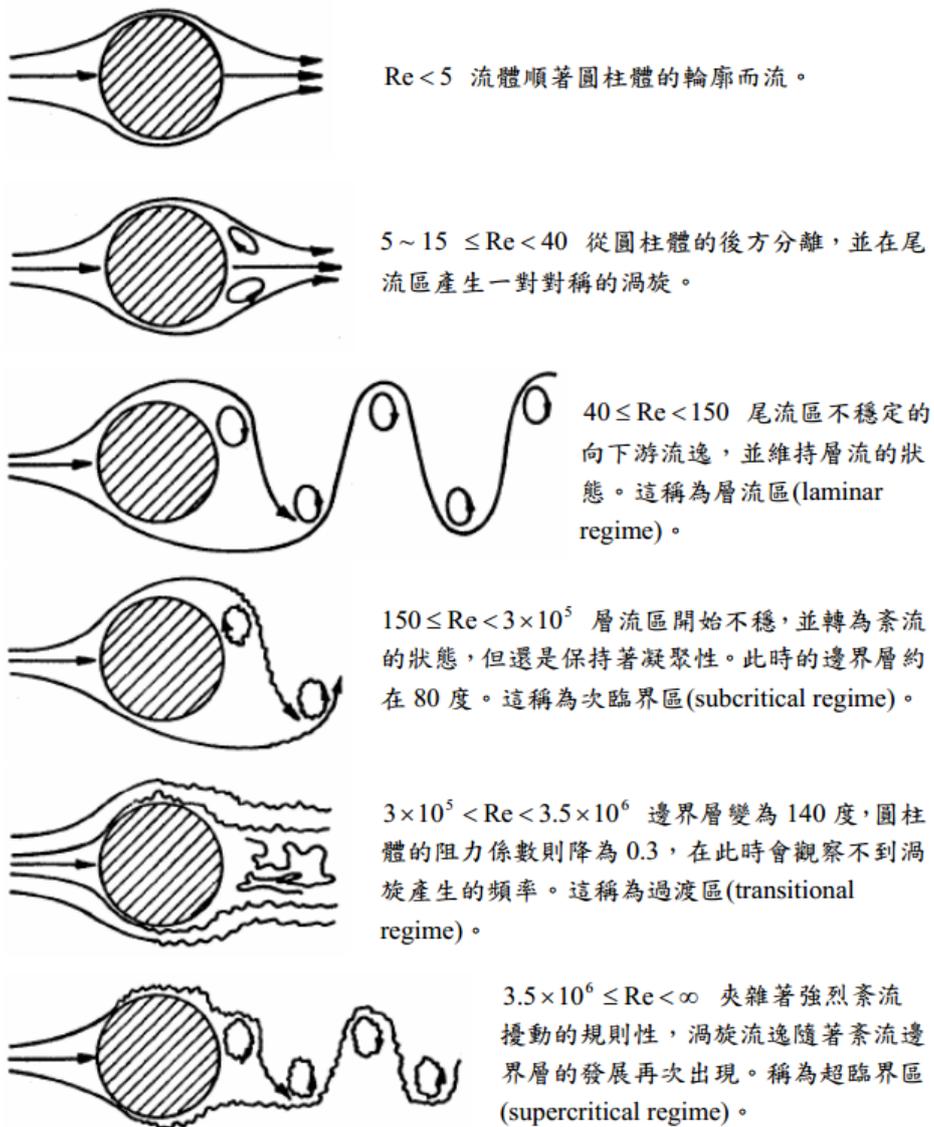
μ ：流體動力黏度 (Pa·s或N·s/m²) (註：Pa = N/m²)

ν ：運動黏度 ($\nu = \mu/\rho$) (m²/s)

ρ ：流體密度 (kg/m³)

Q ：體積流量 (m³/s)

A ：截面積 (m²)



圖十、說明雷諾數越大尾流擾動增加

(資料來源：林婉如、張瓊文 2006 年國際科工程組作品)

(五)、阻力係數(drag coefficient)

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho AV^2}$$

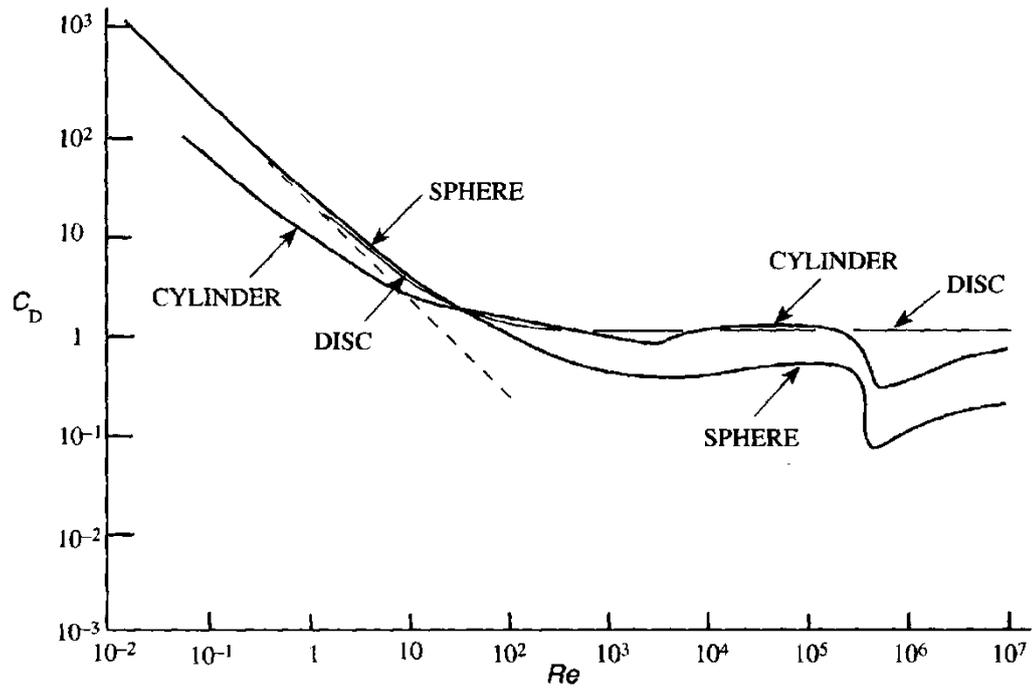
ρ : 流體密度 (kg/m^3) = 空氣密度 = $1.29 \text{ kg}/\text{m}^3$

A : 截面積 (m^2) = 圓柱截面積 = 0.0168 m^2

V : 平均流速 (m/s) = 風速

C_D : 阻力係數 (無因次)

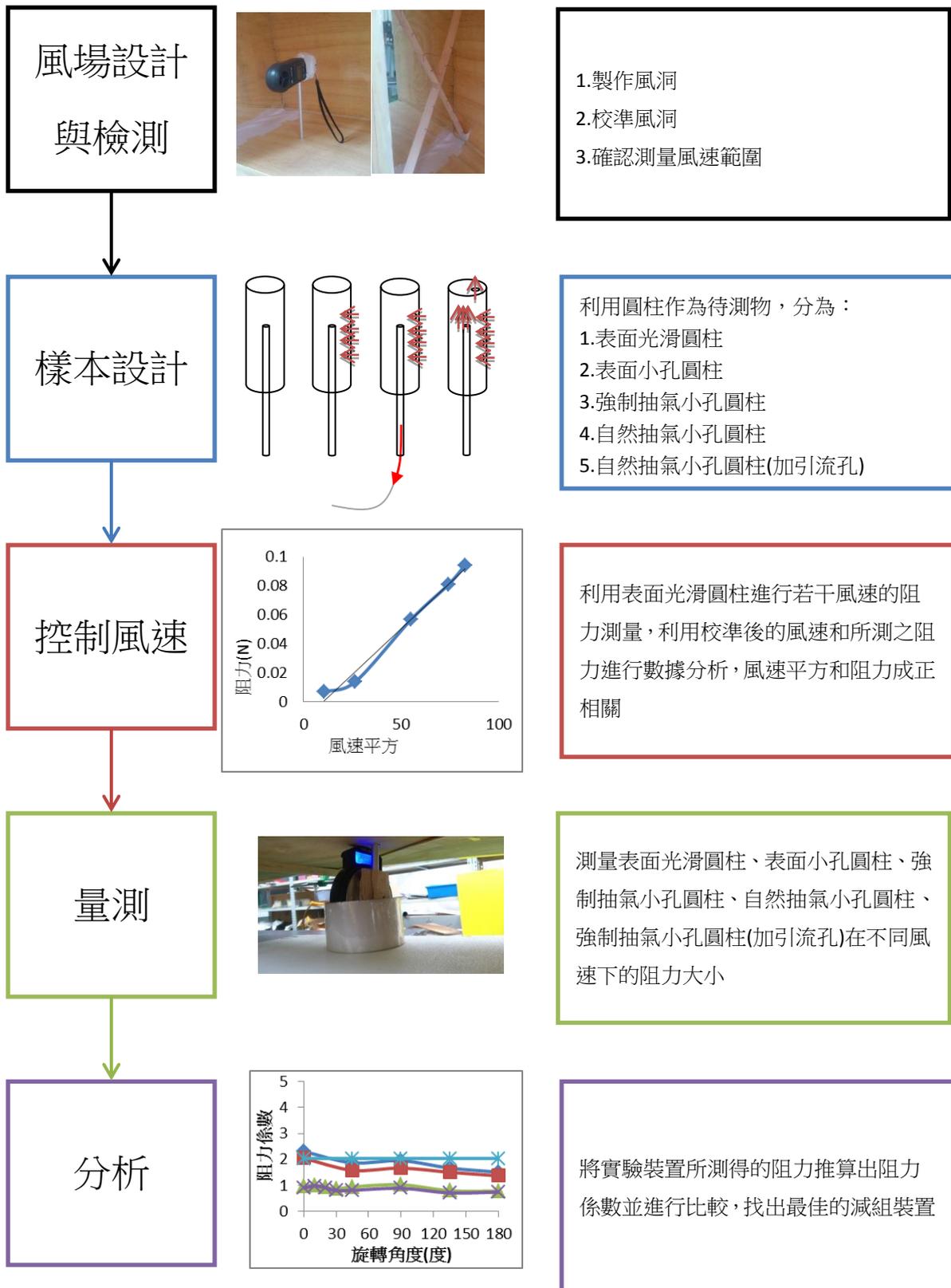
F_D : 阻力 ($\text{N} = \text{kg} \times \text{m}/\text{s}^2$)



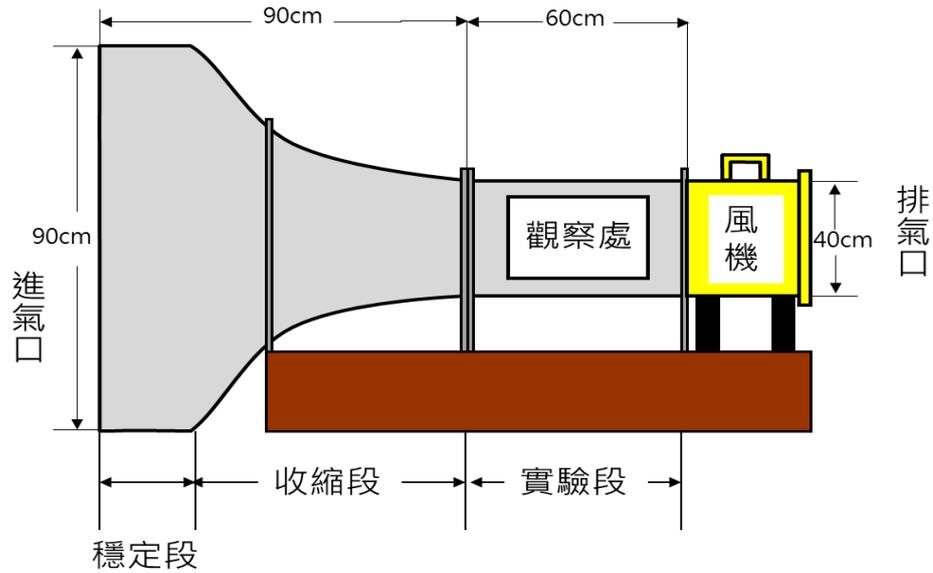
圖十一、圓柱、球體、圓盤隨著雷諾數不同之阻力係數變化

(資料來源：misclab.umeoce.maine.edu)

二、過程



(一)、製作風洞



圖十二、風洞和風機示意圖

1. 實驗段

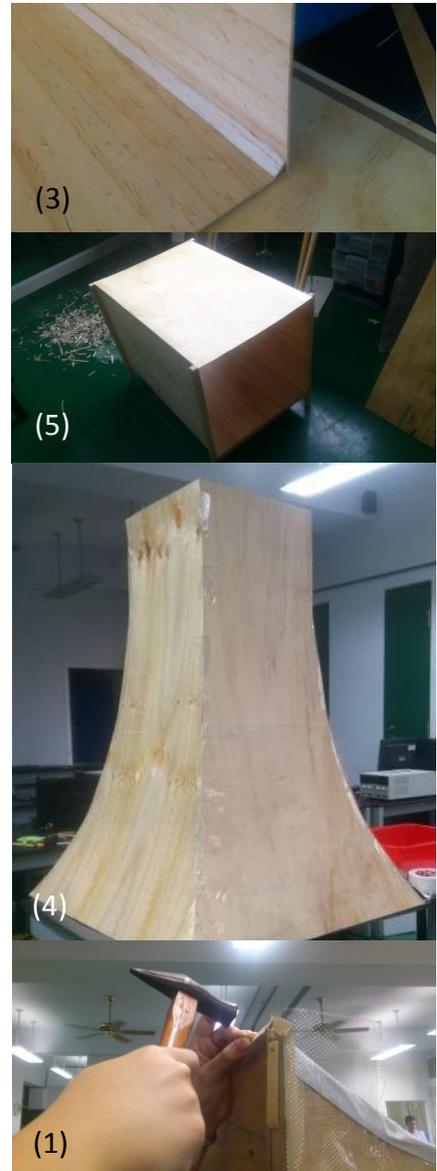
- (1) 切割木板四片
- (2) 每段巴爾沙木棒對切成三角木材，(減少角落的渦流)
- (3) 將三角木條黏貼在木板內側
- (4) 將木板邊緣和木棒利用螺絲釘接合
- (5) 實驗段完成

2. 收縮段

- (1) 利用棉線將弧形輪廓畫出來
- (2) 利用美工刀和線鋸機割出圖三的形狀
- (3) 利用實驗段固定的方法製作即可 (步驟 4、5、6、7)
- (4) 收縮段完成

3. 整流段

- (1) 加入兩層蜂巢網
- (2) 利用實驗段固定的方法製作即可
- (3) (步驟(4)、(5)、(6)、(7))
- (4) 整流段完成



4. 風洞組合及修飾

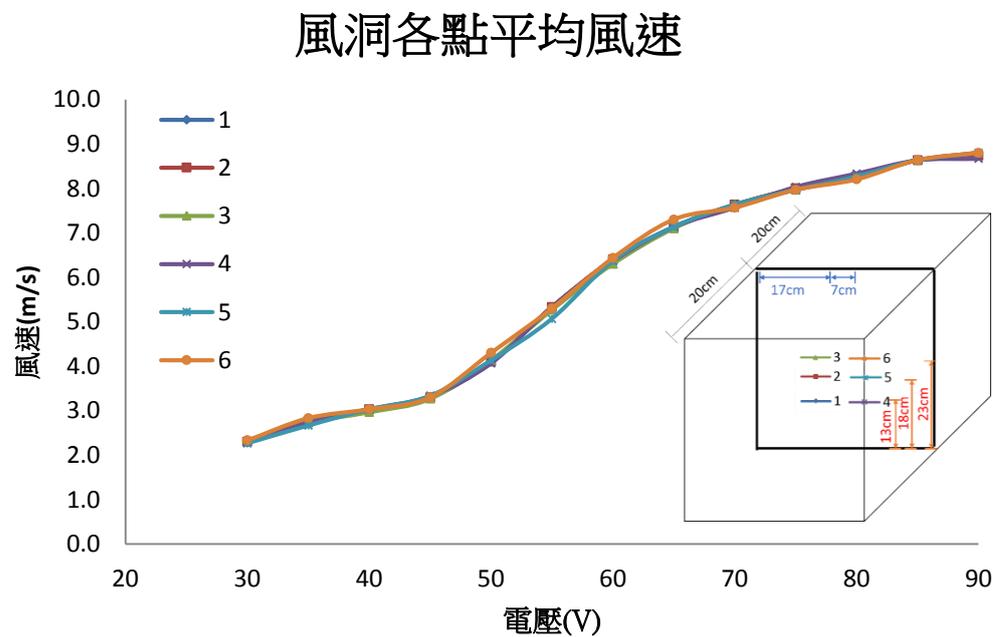
- (1) 加入升降架讓風洞平直
- (2) 將實驗段部分貼上四片三角形木片，讓風洞出口成八邊形，較接近鼓風機的形狀，以便黏貼



(二)、校正風速

1. 風洞和電壓之關係

在做實驗之前，本研究利用暑假製作出一低速風洞，本研究利用自耦變壓器調控風量，利用控制電壓(30-90 伏特)改變風速，實驗發現風速根據中一風機規格可達 12.31m/s，最高電壓 110 伏特，本研究測量 30-90 伏特，如下圖：



圖十三、自製風洞利用自耦變壓器調整電壓和利用風速計測量風速的關係圖

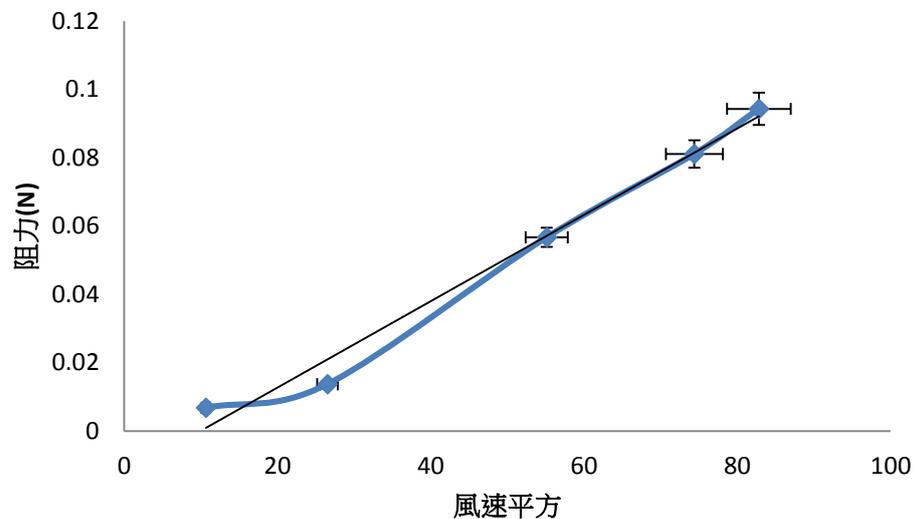
(三)、確認測量風速範圍

利用 excel 進行風速的數據分析，並計算其標準差確認風速的精確度，將標準差小於 0.1 的風速納入考量(風速 1.8-8.3m/s)。因為風速計的精確度為 0.1m/s，為了提高風速的精準度，除了用標準差之外，本研究還用電壓和風速的關係式找出風速，下列式子是以電壓 30V 時計算其標準差。

$$\text{標準差 SD} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}$$

(四)、驗證風速和阻力之關係

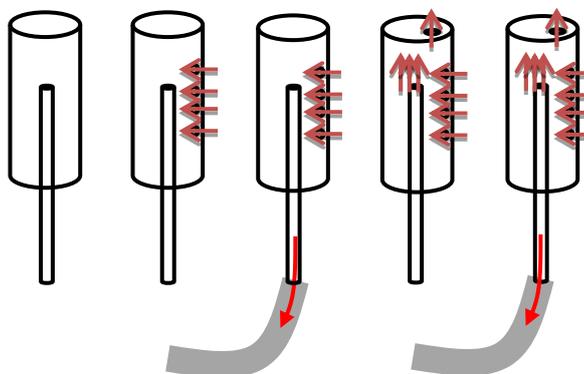
依據文獻可知在較一般風速下風速平方和阻力成正比，但是在極低風速下，如密立坎的油滴實驗時，風速和阻力成正比，於是我們做出下列圖表：



圖十四、在較高風速下風速平方與阻力成正比(受測物：表面光滑圓柱)

(五)、製作實驗裝置

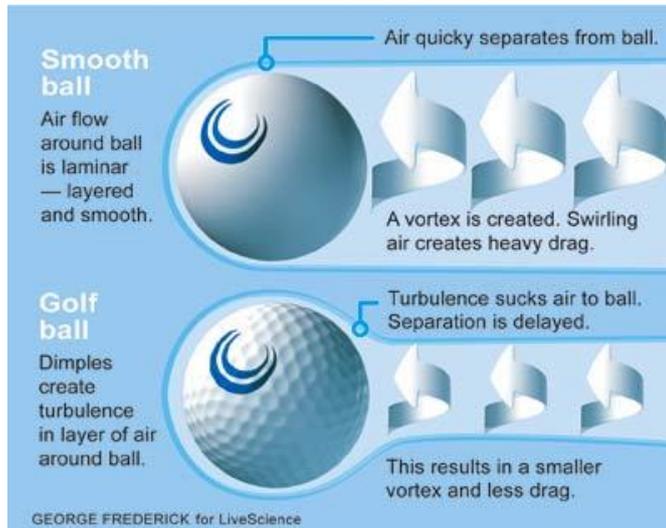
本研究以五組圓柱做為測試樣本，如下圖所示：



圖十五、依左到右分別為：

- A.表面光滑圓柱：對照組
- B.表面小孔圓柱：類似高爾夫球
- C.強制抽氣小孔圓柱：有耗能的缺點
- D.自然抽氣小孔圓柱：無耗能的缺點
- E.強制抽氣小孔圓柱(加引流孔)：引導氣流順利抽氣

- 1、利用吸附周圍氣流的方法減少亂流的產生，亂流會產生紊流動能(turbulence kinetic energy)，紊流動能會因為流體剪切力、摩擦阻力〈邊界層〉或浮力而產生，其稱之為耗散(Dissipative)現象：在紊流的情況下，氣流會產生擾動須要有額外能量推動物體，因此依據能量守恆的概念，過多的亂流反而會損耗額外能量。
- 2、利用抽氣裝置將原本吸附的邊界層抽掉，因為黏附一層幾乎靜止的流體等於物體截面積變大，自然阻力變的更大，而將邊界層抽得更薄可以減少截面積的大小。



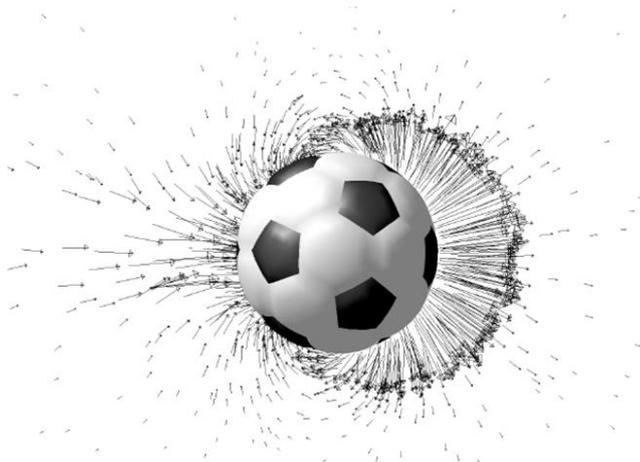
圖十六、光滑球周圍的氣流為層流，空氣在光滑球後快速分離，並產生紊流及較大的阻力。高爾夫球的凹孔使球在周圍產生小渦流，球因為渦流而將邊界層破壞，邊界層分離隨著這樣的現象而延遲，這將產生較小渦流和阻力

(參考資料: <http://kp.whut.edu.cn/>)

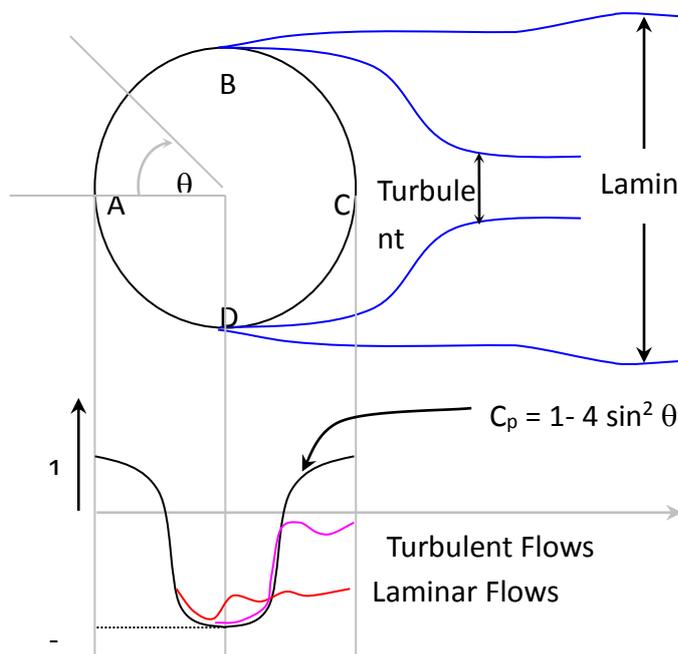
- 3、吸氣小孔的目的在於減少表面摩擦阻力或降低能量散失。為了實現吸力，表面應具有孔（溝槽，多孔，穿孔等）。這些孔用於抽吸靠近物體表面，而且流速最慢的邊界層。

以下是利用吸氣小孔的專利：郝艷紅四人等，高速列車抗風的抽吸減載方法：為了提高列車在大風中運行的安全性，利用抽吸氣法控制列車繞流邊界層分離，以減小橫風氣動力。研究結果表明：抽吸氣腔室和條縫的設置能夠在列車高速行駛時產生低於車體外部繞流的壓力，有效地控制邊界層的分離和減小列車的阻力，透過抽吸效應能減少總阻力 7%~30%。

- 4、本研究所探討的抽氣裝置和高爾夫球的淺凹洞不同點在於抽氣裝置是使邊界層層流化，從而降低摩擦阻力的損失。而抽吸效應使邊界層變為穩定是因為減少了邊界層的厚度，較薄的邊界層可以減少渦流，而另一原因則是因為邊界層變薄，接近物體表面的流速變為更加接近原本流速。
- 5、下圖利用流線向量說明足球周遭壓力分佈，該球向左方前進，箭頭愈長代表壓力愈大，箭頭指向球為正壓，箭頭背離球為負壓。



圖十七、由上圖可知足球的前端為正壓，但足球後端的部分卻是負壓



圖十八、 C_p 為壓力係數，球體的前端壓力為正值，球體的兩側及後端壓力為負值

(資料來源：people.rit.edu/angeme/550cd/blnotes.doc)

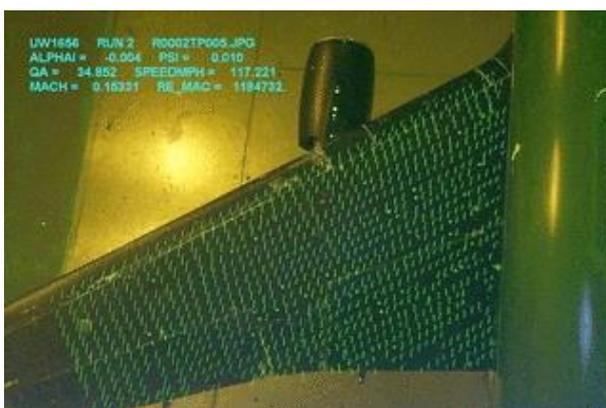
6. 氣流可視化：因為空氣看不到，所以需要透過一些技術觀測流場，例如：煙(smoke)、細毛(tufts)，本研究以細毛觀測流場，所以我們會在圓柱小孔附近設置係毛並旋轉圓柱了解圓柱的擾動狀況。將細毛的擾動分為下列三類：



圖十九、由細毛的擾動判斷氣流是否為層流區、過度區、紊流區



圖二十、當周圍氣流為紊流時，細毛會呈現不穩定擾動的狀態；當周圍器流為層流時，細毛會呈現穩定不動的狀態
(參考資料:維基百科)



圖二十一、圖為將細毛裝在機翼上觀察氣流的擾動情形
(參考資料:維基百科)

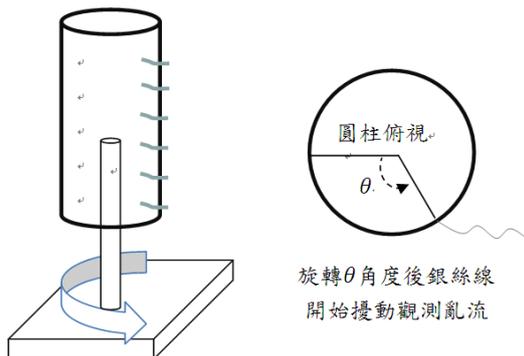
在做實驗一時，我們利用細毛測量邊界層的分布情況，因為空氣是透明的，很難直接觀察到的空氣運動本身。但已經有了測試在風洞中的定量和定性流動可視化的多種方法，例如利用煙(smoke)以及細毛(tufts)，其中細毛可以用來衡量空氣流動模式及流動分離。空氣運動的可視化常使用細毛將它們附著在模型上。而煙則可用於觀察物體周圍空氣的流動區域。

實驗一、利用圓柱測量不同風速下層流區、過渡區、紊流區相對位置的差異

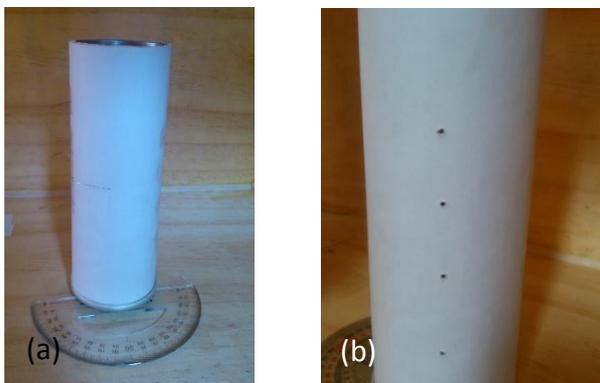
先在圓柱上戳若干個洞，再將銀絲線(細毛)穿於洞中並黏貼固定於圓柱上再以鉛棒固定圓柱位置，將裝置置於風洞內，當開啟風機時細線就會隨著流場變化而藉此反映出風吹過圓柱時，圓柱周圍(2.5 公分內)的流場變化。以細毛位置的角度設為 0 度，順時針旋轉，與 0 度間的夾角設為 θ ，並觀察在不同風速下 θ 為幾度時圓柱周圍流場開始出現紊流，就可推知風速和渦流發生位置的關係。

實驗說明:

圓柱上的銀絲線可以順著氣場飄動，當周圍開始產生紊流層時，因氣場開始不穩定顫動或旋轉，因此銀絲線飄動時旋轉即可說明此時、此為此位置有紊流產生。



圖二十二、實驗一示意圖



圖二十三、實驗一照片

(a)：利用旋轉圓柱測量邊界層厚度；

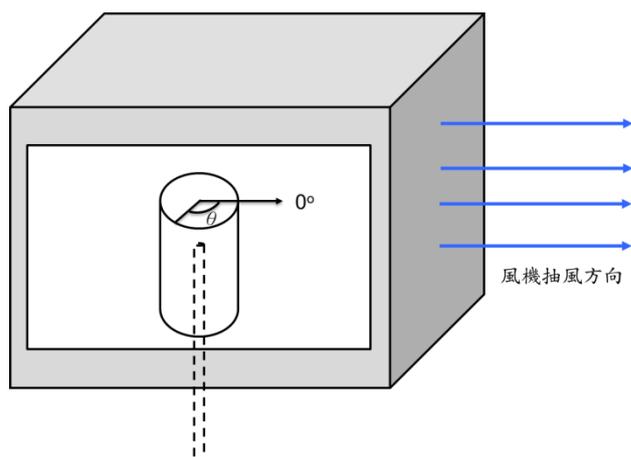
(b)：在圓柱上戳若干個洞

實驗二、測量不同風速下的層流區在各點的厚度差異

將圓柱至於風洞內，在 0° 的位置加裝細毛，藉著圓柱順時針旋轉，觀察細毛尾端擾動距圓柱的位置，並記下厚度，分別在風速 3~10m/s 之間取數點，紀錄圓柱周圍的層流區厚度變化。

實驗說明:

利用不同風速下的的層流區厚度變化觀察在多少風速下加裝抽氣裝置會最有效果。



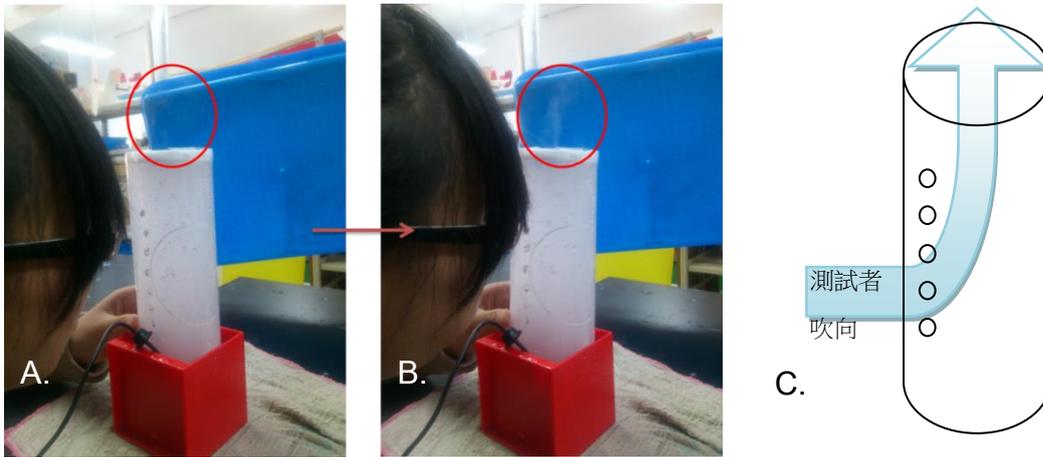
圖二十四、實驗二示意圖

實驗三、利用有無抽氣裝置比較圓柱阻力係數的大小

於圓柱側邊挖一使氣流由筒內排出的直徑 0.5 公分，並於側挖一排相互間隔 2 公分、半徑約 0.2 公分的圓 5 個，將軟細管一端吸塵器吸風口相接，另一端連接鉛棒將鉛棒一端與圓柱底相接，並以 AB 膠(環氧樹脂)固定，使之不搖動再把電子秤以立式與鉛棒底部側面以 AB 膠固定最後將裝置置於一連接風機的自製風動中測量。

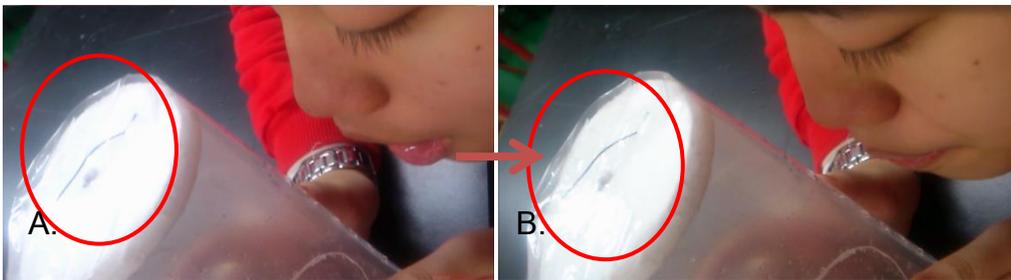
實驗說明：

利用細毛和煙測試抽氣裝置是否有效(圖十三)；改變風速，分別測量有挖洞無吸風圓柱各風速下的電子秤數值。

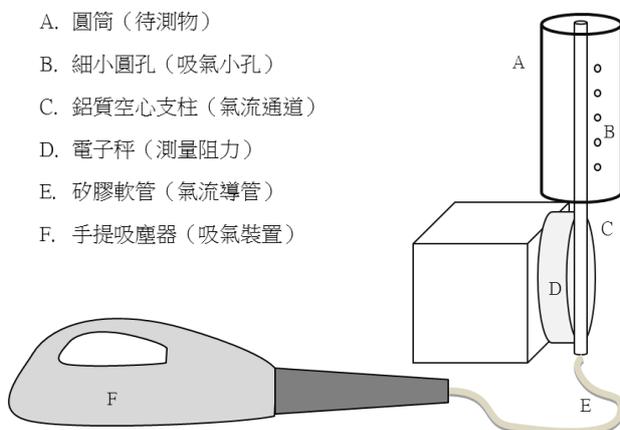


圖二十五、

- A. B.經測試者吹氣後瓶內的霧氣經由上面的孔洞流出
- C.實驗示意圖



圖二十六 A. B.經測試者吹氣後瓶內的氣流經由上面的孔洞流出，導致棉線飄動



- A. 圓筒（待測物）
- B. 細小圓孔（吸氣小孔）
- C. 鋁質空心支柱（氣流通道）
- D. 電子秤（測量阻力）
- E. 矽膠軟管（氣流導管）
- F. 手提吸塵器（吸氣裝置）

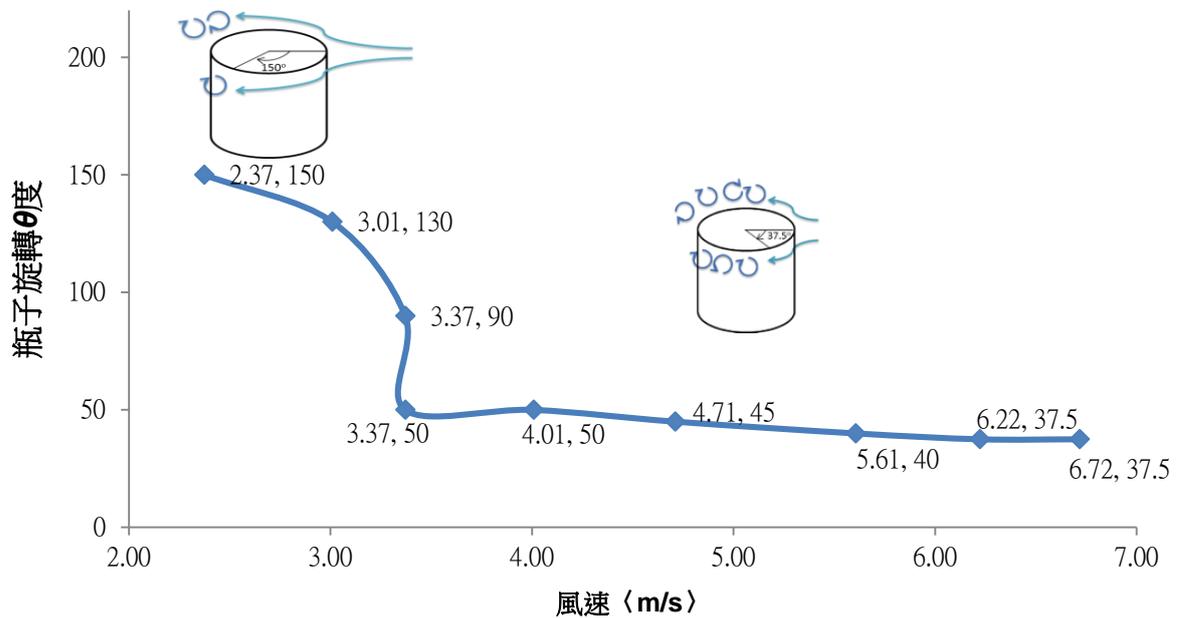
圖二十七、抽氣減阻實驗裝置示意圖



圖二十八、強制抽氣裝置：細管和抽氣裝置連接，經由抽氣裝置將圓柱周圍的空氣層吸出，並利用電子秤測出阻力

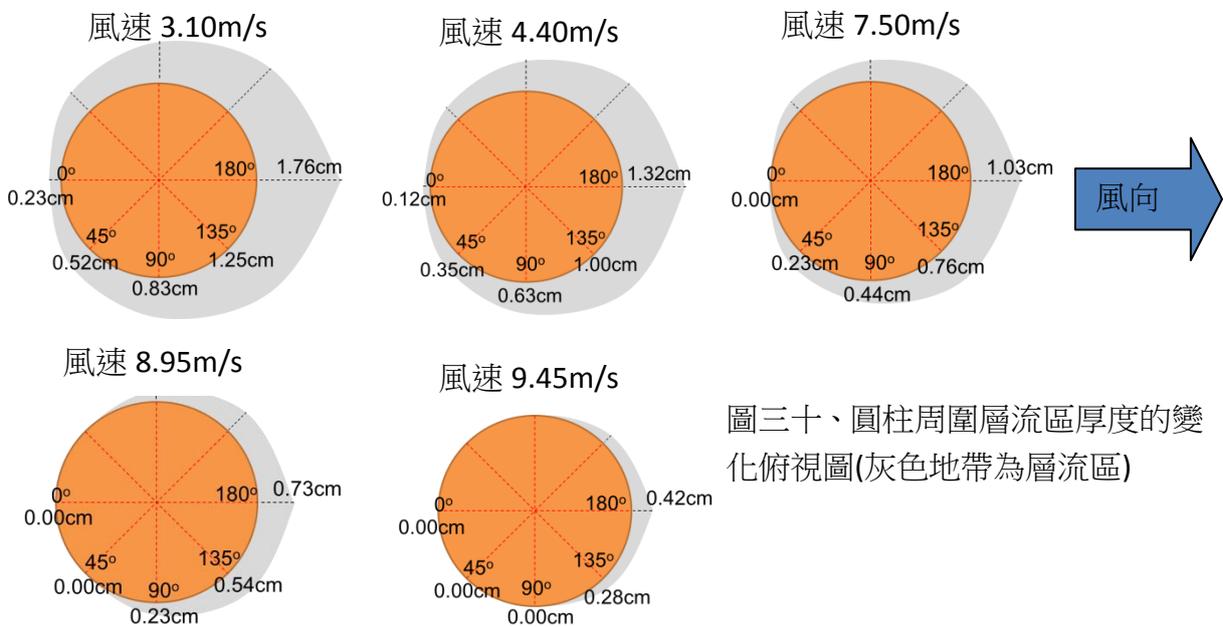
伍、 研究結果

實驗一、利用圓柱測量不同風速下層流區、過度區、紊流區相對位置的差異



圖二十九、觀察氣流經過管子的流動方向後，發現結果如上圖，風速愈大，氣流於位置 θ 愈小開始擾動，表示層流與紊流的分離點愈早發生，由此可知風速愈大，紊流發生位置愈前段，因此相對的邊界層厚度愈薄。

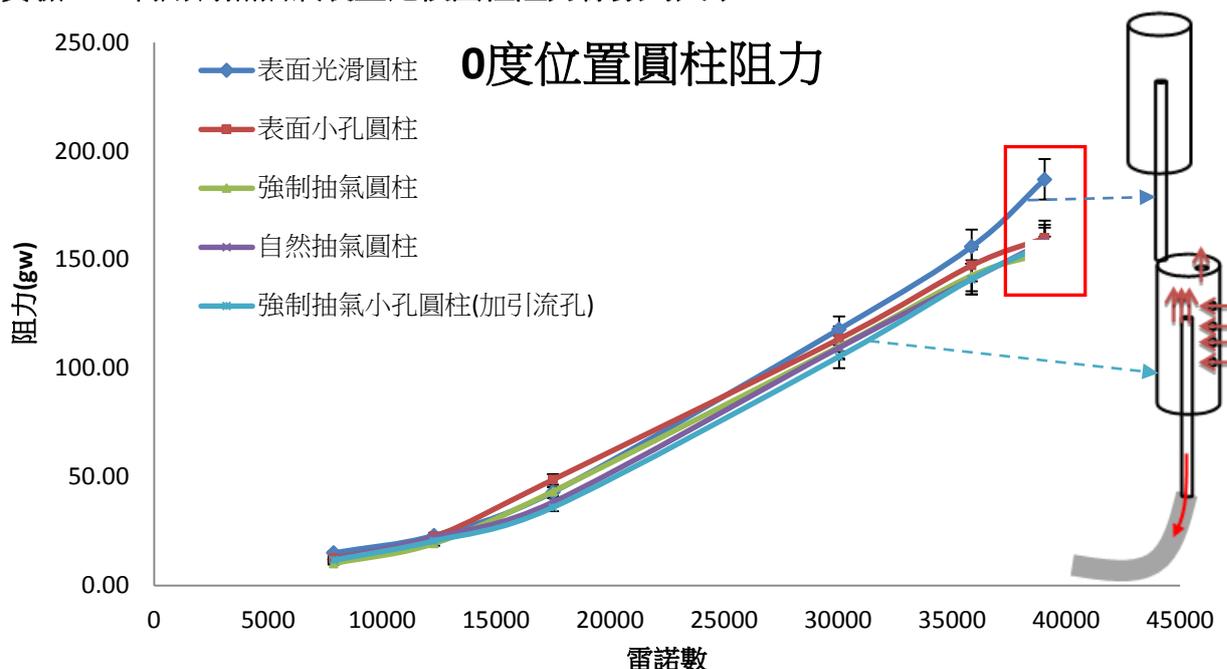
實驗二、測量不同風速下的層流區在各點的厚度差異



圖三十、圓柱周圍層流區厚度的變化俯視圖(灰色地帶為層流區)

由左而右分別是風速從 3~10m/s 所觀察到的圓柱周圍層流區厚度。本研究發現當風速愈大時，層流區愈薄，結合實驗一：分離點發生得愈早，紊流也發生得愈早，所以可知邊界層會隨風速上升愈來愈薄。

實驗三、利用有無抽氣裝置比較圓柱阻力係數的大小



圖三十一、阻力隨雷諾數(風速)上升變大

以小孔位置 0 度為例，隨著雷諾數愈大(風速愈大)，阻力就愈大，其中阻力最大的為表面光滑圓柱，阻力最小的為強制抽氣小孔圓柱(加引流孔)，並在高風速(雷諾數 40000~45000 之間)下，無論是強制抽氣或是自然抽氣的減阻裝置均能大幅減少阻力。

阻力與阻力係數轉換：因為阻力影響因素不只為物體本質(形狀)，還有風速、流體密度、物體截面積……，如下面公式所示。因此為了與標準值比較，將阻力轉為無因次的阻力係數，以利未來可以將本研究所得到的結果應用於了解其他物件，其各種抽吸裝置對減少阻力的影響。

$$F_D = \frac{1}{2} \rho A V^2 C_D$$

ρ ：流體密度 (kg/m^3) = 空氣密度

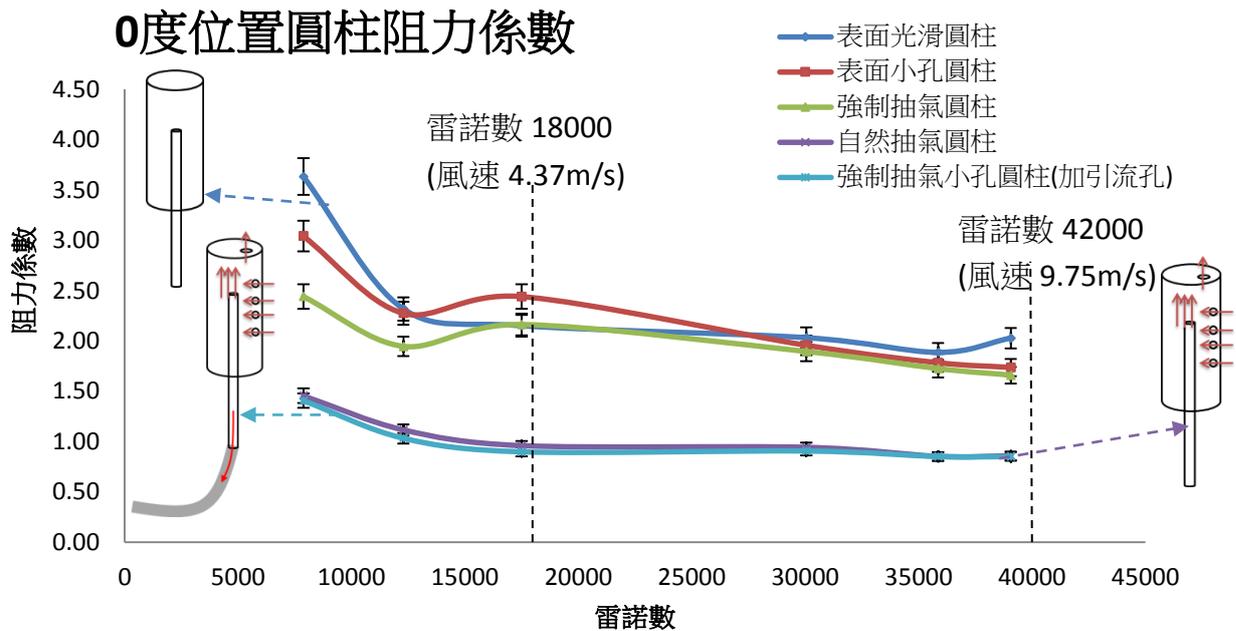
A ：截面積 (m^2) = 圓柱截面積

V ：平均流速 (m/s) = 風速

C_D ：阻力係數 (無因次)

F_D ：阻力 ($\text{N} = \text{kg} \times \text{m/s}^2$)

風洞對於氣流平整、平均的效果：經由細毛運動方式幾乎不動可知風洞內氣流平順，並由標準差可確定風洞內各個位置風速幾乎相等，因此可用於本研究之實驗，確保實驗不會因為風速差異而有誤差。



圖三十二、阻力係數隨雷諾數(風速)上升變小

阻力係數是阻力除以空氣密度和截面積和風速平方的無因次量值，可以明顯看出阻力係數均隨著雷諾數愈大(風速愈大)而有遞減的趨勢，這與文獻相同。註、圖十一

比較阻力係數發現本研究中強制抽氣加引流孔有最佳的減阻效果。

表面小孔對於圓柱阻力係數降低影響：表面小孔圓柱 < 表面光滑圓柱

表面小孔對於減阻幾乎沒有影響，甚至在低風速時有負效果，而一樣是表面小孔在抽氣時的阻力係數有稍微降低，但和光滑圓柱相比還是偏高。因此雖然高爾夫球可利用表面小孔形成渦流而達到減阻的效果，這因為小孔是經過設計的，但本研究之表面小孔並無法形成相同效果，反而會因為表面變粗糙而使阻力係數上升。

自然抽氣(引流孔)對圓柱阻力係數降低影響：表面小孔 < 表面光滑 < 強制抽氣 < 自然抽氣

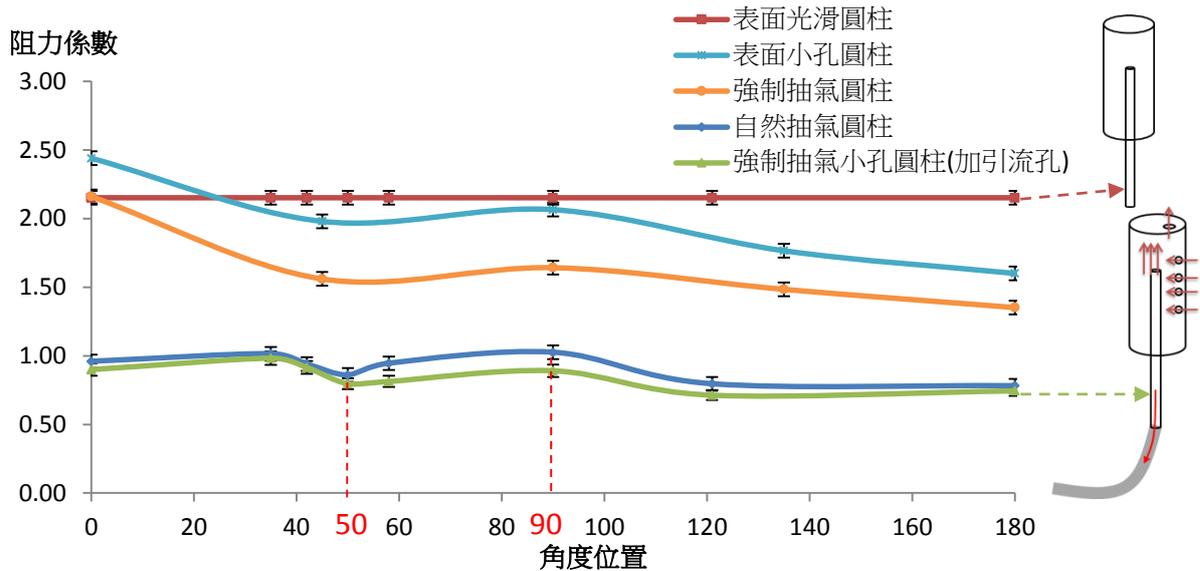
圓柱上端加裝引流孔後，其阻力係數不只比表面小孔的阻力係數低，也比表面光滑圓柱的阻力係數低，甚至且其減阻效果還比強制抽氣更為明顯(可以利用無耗能方式產生更高的減阻效果)。

強制抽氣對於圓柱阻力係數降低影響：

表面光滑 < 表面小孔 < 強制抽氣 < 強制抽氣+引流孔(自然抽氣)

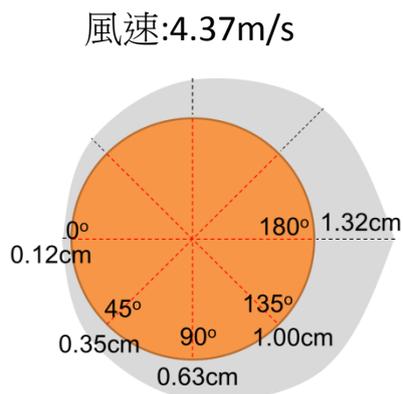
比較將表面光滑和表面小孔以及強制抽氣發現，強制抽氣有減阻的效果，因此又利用強制抽氣和引流孔製作出減阻效果最好的圓柱，其最佳效果可達到 37.5% 的減阻效果，接近文獻抽吸效應的最佳值。

雷諾數18000(風速4.37m/s)

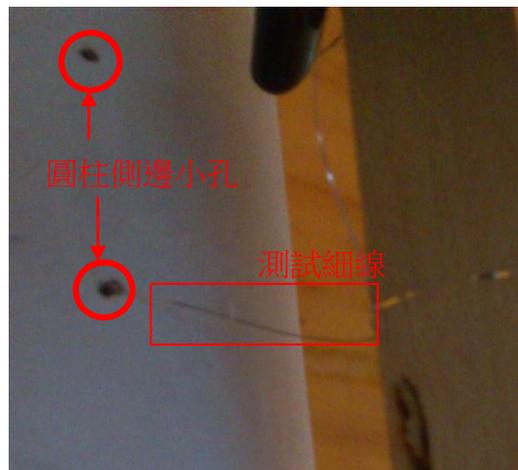


圖三十三、雷諾數 18000 時減阻圓柱的阻力係數隨小孔位置向後而降低，強制抽氣(加引流孔)為這五組中阻力係數最小的，自然抽氣圓柱在 50 度時有最低的阻力係數，90 度時阻力係數會微微上升。

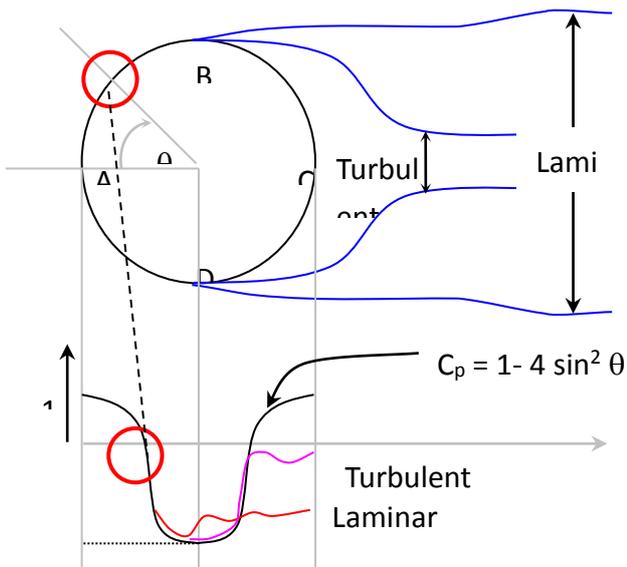
自然抽氣圓柱在 50 度時有最低的阻力係數，結合實驗二結果，在此時層流區有明顯增厚，因此抽氣減少的層流厚度相對較厚，並文獻圖三十五顯示 45 度後圓柱週圍由正壓轉為負壓，因此即使 45 度後有較厚的層流區，但負壓造成自然抽氣效果減弱，因此阻力係數會回復上升，並於 90 度位置(壓力最低處)有最高阻力係數



圖三十四、位置 45 度，始產生明顯層流，因此在風速 4.37m/s 於位置 45 度抽氣會有最明顯的減阻效果。

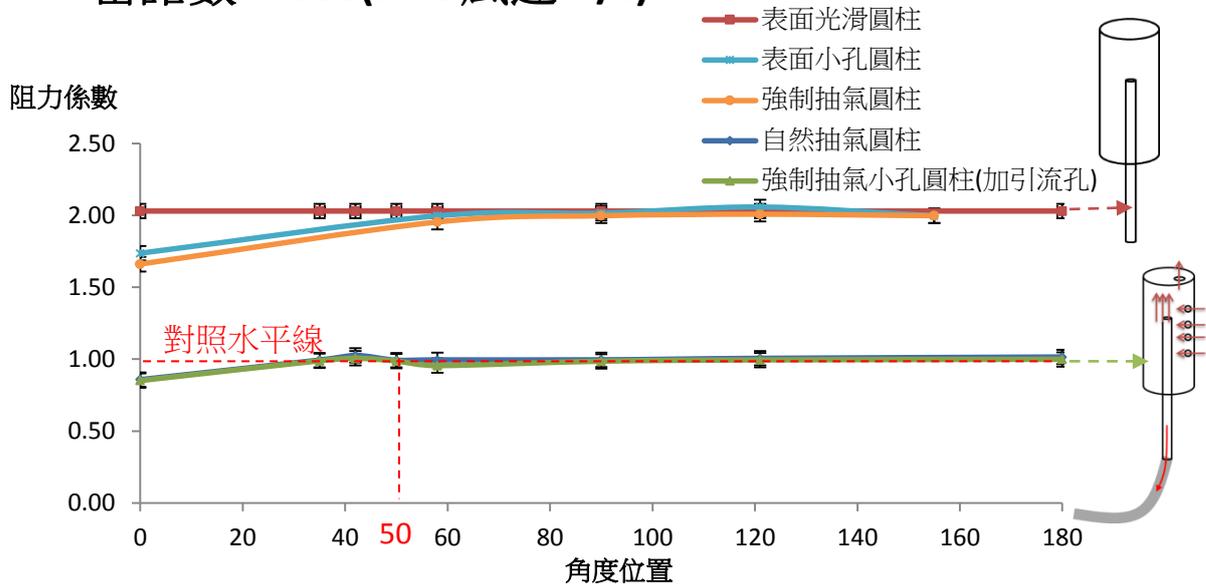


圖三十五、位置 45 度時，細線受到小孔正壓吸入，呈現穩定不動，周圍吸附層流瞬間變薄。



圖三十六、上圖為風從左向右流，兩條藍線 turbulent wake、laminar 分別代表紊流、層流兩種狀況。對照下圖，標準狀況紅圈處為 45 度時前氣流對於圓柱呈正壓狀態，45 度至 135 度為負壓，135 後為正壓，而隨紊流、層流產生，圓柱後方壓力漸降低為負壓。

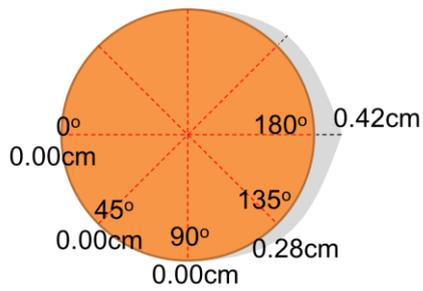
雷諾數42000(9.45風速m/s)



圖三十七、雷諾數 42000 時減阻圓柱的阻力係數在位置 50 度後幾乎為定值，強制抽氣與強制抽氣(加引流孔)阻力係數值幾乎重合，為這五組中最小的。

減阻圓柱阻力係數只在 50 度前有微微降低，因為圖三十六高風速在 50 度前為正壓仍有抽氣效果可減阻，但在位置 50 後阻力係數幾乎為定值，因為圖三十八圓柱週圍層流區非常薄，減阻裝置利用減薄層流區而減阻效果也會隨之降低。

風速 9.45m/s



圖三十八、風速 9.45m/s 圓柱周圍幾乎沒有層流

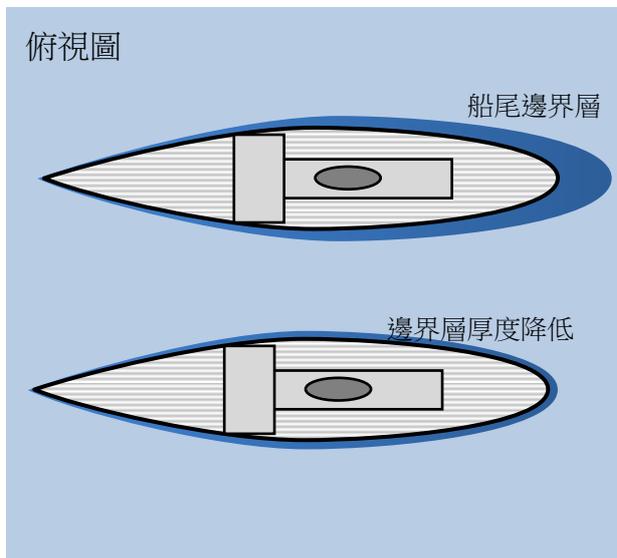
比較低、高風速：

45 度~50 度角：比較各風速下不同旋轉角度的自然抽氣、強制抽氣小孔圓柱(加引流孔)後發現在低風速時 50 度角的阻力係數會明顯降低，到了高風速時則在 50 度角後阻力係數為定值。

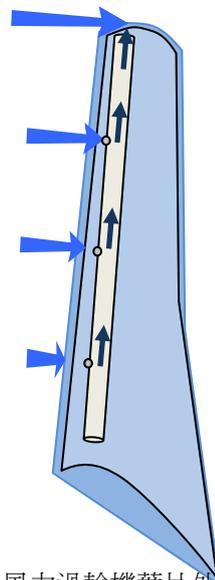
不同風速下 135 度角：在低風速時 135 度角後仍有良好的減阻效果，但在高風速時 135 度角後對減阻效果的差異就明顯降低。

陸、 討論

1. 經由文獻得知，圓柱從前方小口正壓吸氣，或是側邊、後方小孔排氣，本研究僅用細毛測試，未作進一步證實
2. 測量流速方法除了用風速計測量以外，還可以利用微粒法觀測單位時間內流動的粒子距離得到其風速，可以改善本研究風速計精確度上的缺失。
3. 但本研究減阻的效果為三成多已達到文獻中減阻的最佳效果，已盡量利用標準差計算出精確度、反覆多次做本實驗，但仍需探討其原因。
4. 水的黏滯力遠大於空氣，若可以適當減少阻力，本研究想利用抽吸效應減少船隻後方黏滯邊界層的厚度。
5. 在風力渦輪機的葉片尖端設立引流孔，在高速旋轉時，產生負壓抽出氣體，幫助葉片中的小孔產生抽吸效應減少阻力，降低亂流。



圖三十九、船殼吸水降低邊界層厚度減少阻力



圖四十、風力渦輪機葉片外側流速快、壓力小會向外吸出空氣使葉片上小孔吸氣減少邊界層減

柒、 結論

1. 由圓柱外細線的擾動來觀測，當風速愈大時，細線開始產生擾動的位置愈靠近前緣。在風速 3.37m/s 以上時，發生擾動的位置在 50 度角以內。
2. 在低風速時(3.10m/s)，由細線穩定不動的狀態來判斷圓柱周圍均為層流區；在高風速時(7.50m/s 以上)，周圍的層流區範圍急遽減小。
3. 隨著雷諾數愈大(風速愈大)，阻力就愈大，阻力最大的為表面光滑圓柱，阻力最小的為強制抽氣小孔圓柱(加引流孔)，在高風速下，無論是經過強制抽氣或是自然抽氣的減阻裝置均能大幅減少阻力。
4. 阻力係數均隨著雷諾數愈大(風速愈大)而有遞減的趨勢，本研究的強制抽氣加引流孔有最佳的減阻效果，減阻效果可達三成多。
5. 在低風速時(風速 4.37m/s)，藉由改變圓柱小孔的位置發現強制排氣小孔圓柱(加引流孔)是五組中阻力係數最小的，且在距離前緣 50 度角處時有最低的阻力係數。
6. 在高風速時(風速 9.45m/s)，藉由改變圓柱小孔的位置發現強制排氣小孔圓柱(加引流孔)是五組中阻力係數最小的，且在距離前緣 50 度角後阻力係數為定值。
7. 文獻中運用抽吸效應達到減阻的設備(飛機機翼)均為強制抽氣。本實驗創新之處為不耗能的自然抽氣都可以達到需耗能的強制抽氣效果。

捌、參考資料及其他

- 一、高二基礎物理(二)A，1-3 加速度—描述速度的改變以及 2-1 慣性與牛頓第一運動定律(99 課綱)
- 二、高二必修物理，流體力學(95 課綱)
- 三、高三選修物理下，密立坎油滴實驗(95 暫綱)
- 四、艾薩克·牛頓(Isaac Newton)，1687，《自然哲學的數學原理》第二卷 論物體的運動
- 五、吳聖儒、林聰得，2005，紊流邊界層內微氣泡減阻實驗研究
- 六、林婉如、張璿文，2007，讓氣體無所遁形的微小黏度計，國際科學展覽會工程組作品
- 七、吳智偉等，1993，相對運動中一渦流與升阻力之研究，第 33 屆全國中小學科展作品
- 八、李怡玟，1994，速率愈大阻力就愈大嗎？—流體阻力的探討，第 34 屆全國中小學科展作品
- 九、謝勝己，2002，束縛渦漩；附著渦漩 <http://terms.naer.edu.tw/detail/1325901/>
- 十、suction effect <http://www.thermopedia.com/content/1166/?tid=110&sn=23>
- 十一、2013，Parasitic drag http://en.wikipedia.org/wiki/Parasitic_drag
- 十二、Dubai college，Research
<http://www.dubaicollege.org/pages/activities/f1-in-schools/design-process/research.php>
- 十三、2013，vortex shedding http://en.wikipedia.org/wiki/Vortex_shedding
- 十四、Harvard Natural Sciences Lecture Demonstrations，2012，Vortex Shedding
http://www.youtube.com/watch?v=_Hbbkd2d3H8
- 十五、Science of doom，2012，Heat Transfer Basics - Convection - Part One
<http://scienceofdoom.com/2011/01/02/heat-transfer-basics-convection-part-one/>
- 十六、Nasa，drag of sphere
<http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/dragsphere.html>
- 十七、Natural convection on cylinders and spheres
http://www.thermalfluidscentral.org/encyclopedia/index.php/Natural_convection_on_cylinders_and_spheres

【評語】 040108

本作品以孔洞導高流體遇阻所引發的紊流，實驗能看到現象之改善，但或可再以較佳孔洞紋路、分佈或大小來探究最佳組合，以提升此老問題的新穎物理討論。