

# 臺灣二〇〇七年國際科學展覽會

科 別：工程學

作 品 名 稱：讓氣體無所遁形的微小黏度計

學校 / 作者：臺北市立麗山高級中學                   張璿文  
                  臺北市立麗山高級中學                   林婉茹

## 作者簡介



我是張璿文（圖左），很榮幸的能夠進入麗山高中就讀，參與專題研究的課程，在這長達兩年的時間裡，從無到有，與我的夥伴一起進行科學實驗和研究，所學習到的知識、技能以及待人處世的態度皆受用無窮，在這課業之外的領域裡讓我更充實豐富並且訂定了人生的未來目標。

我是林婉茹（圖右），我的個性積極認真、實事求是，對於老師交代的功課、未完成的專題研究，都能努力盡責地做好。在麗山的三年，經由專題研究的課程，學到了不少課內所學不到的。更非常幸運的能分別到台科大的熱流實驗室及台大的仿生熱流實驗室實習，給兩位教授指導。要感謝的人實在是很多。除了感謝外，還是感謝。

## 摘要

本實驗在微小的測試環境下，以熱線風速計偵測壓縮空氣流經圓柱鈍體後方渦旋逸放的頻率，推導出雷諾數(Re)與史卓荷數(St)之關係。預期能利用有效雷諾數的概念，探討加熱圓柱流場的 Re-St 關係，將 25°C、50°C、100°C、150°C、200°C 時的臨界雷諾數回歸成有效臨界雷諾數，導出 Re 之分母---空氣黏度，以後便能以此不同環境溫度所對應之空氣黏度方程式，於各式環境下量得空氣的黏度。但因為在實驗中碰到了量測精度的限制，所以這個部份只有做現象的探討，並由觀測渦流逸放頻率發現到加熱圓柱確實可有效地穩定流場。未來也將會提高量測的精度，以期望能達到辨識氣體的效果。

---

## Abstract

The purpose of this experiment is to measure the vortex-shedding frequency while the compressed air flow over a cylinder by hot-wire anemometer and all of the experiment is set up at the small testing environment. By this way, we can find out the relationship of Reynolds number and Strouhal number. We expect that research the relationship between Re and St while flow over a heated cylinder by using the concept of effective Reynolds number. We can get the effective Re by curving fitting the critical Re at 25°C、50°C、100°C、150°C、200°C each and derive out the viscosity of the air. After this, then we can measure the viscosity of the air everywhere after knowing the viscosity with respect to the specific temperature. We only discuss the phenomena at this part, because the limitation of the accuracy of the instrument. We also observe that a heated cylinder can stabilize the flow field effectively by the vortex-shedding frequency. We are going to enhance the accuracy of the instrument and fulfill the gas identification.

# 目 錄

摘要.....	i
Abstract.....	i
目錄.....	ii
符號索引.....	iii
表圖索引.....	iv
第一章 前言.....	1
1.1 研究動機.....	1
1.2 研究目的.....	1
1.3 參考文獻.....	2
1.3.1 渦漩逸放現象.....	2-3
1.3.2 有效雷諾數概念.....	3-5
1.3.3 他種測量黏度之方式.....	5-6
第二章 研究方法與過程.....	7
2.1 流程圖.....	7
2.2 研究設備與儀器.....	8-10
2.3 校正設備及方法.....	11
2.3.1 熱線風速計的校正.....	11
2.3.2 熱電偶的校正.....	12
2.4 實驗方法與過程.....	12
2.4.1 未加熱圓柱流場之 Re-St 關係.....	12-15
2.4.2 加熱圓柱流場改變之現象探討.....	16
第三章 結果與討論.....	17
3.1 未加熱圓柱流場之 Re-St 關係.....	17
3.2 加熱圓柱流場改變之現象探討.....	17
3.3 討論.....	18-19
第四章 結論與應用.....	20
4.1 結論.....	20
4.2 未來展望.....	20
參考文獻.....	21

## 符號索引

$d$	圓柱直徑
$f$	渦旋剝離頻率
$Re$	雷諾數(Reynolds number)
$Re_c$	臨界雷諾數
$Re_{eff}$	有效雷諾數
$St$	史卓荷數(Strouhal number)
$T_{eff}$	有效溫度
$T_f$	薄膜溫度
$T_w$	圓柱溫度
$T_\infty$	自由流溫度
$T^*$	$T_w$ 與 $T_\infty$ 溫度比
$U_c$	圓柱位置自由流流速
$U_\infty$	自由流流速
$\nu_\infty$	流體之動黏滯係數
$\nu_{eff}$	有效動黏滯係數

## 表圖索引

表圖編號	表圖名稱	頁次
圖一	完美形成的渦漩逸放.....	2
圖二	John H. Lienhard 使用圓柱體做為鈍體其 St-Re 關係圖.	3
圖三	市面上販賣的落球式黏度測定器.....	6
圖四	小型風洞設計圖.....	8
圖五	小型風洞成品照片.....	8
圖六	熱電偶.....	9
圖七	軸對稱直立式噴流架設情形.....	9
圖八	熱線探針.....	10
圖九	熱線探棒.....	10
圖十	壓縮空氣錶頭.....	10
圖十一	熱線風速計校正裝備.....	11
圖十二	未加熱圓柱流場裝置圖.....	12
圖十三	未加熱圓柱流場裝置照片.....	13
圖十四	在常溫時，由頻譜圖所看出的渦漩逸放.....	14
圖十五	不同流速下對應之渦旋逸放的特徵頻率.....	15
圖十六	實驗所得結果與參考文獻[1]比較.....	15
圖十七	在不同溫度下，由頻譜圖所看出的頻率變化.....	16
圖十八	管內完全發展流的形成.....	18

# 第一章 前言

## 1.1 研究動機

在 2006 年的國際科展中，我們便是以研究渦漩逸放的特性來推得流量，經過一年多的學習和查詢文獻資料，對於這一方面的知識也逐漸累積。在某一次上化學課時，老師剛好講到關於分子與分子間的吸引力，我們對於這個微小的特性感到非常有興趣。經由老師教學的啟發，赫然想到氣體黏度的測量似乎少有人朝這個方向發展。我們也實際查過相關資料，液體黏度的量測已經非常齊全，但是氣體黏度因本身性質的關係，導致要直接且精準的測量有其一定的難度。於是，我們想到可利用偵測渦漩逸放產生頻率的方法來推得雷諾數的分母，也就是黏度。或許這會是一種具有完備理論依據的新測量方式。

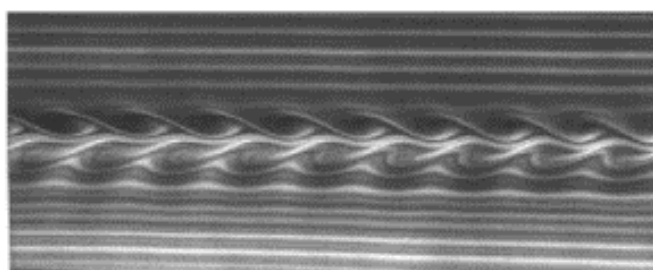
## 1.2 研究目的

- (一) 比較未加熱及加熱鈍體雷諾數(Re)與史卓荷數(St)之關係。
- (二) 量測有效臨界雷諾數與溫度之間的關係。
- (三) 探討溫度與空氣黏度之關係方程式。
- (四) 改換其他氣體以同樣步驟測量其黏度。

## 1.3 參考文獻

### 1.3.1 渦漩逸放現象

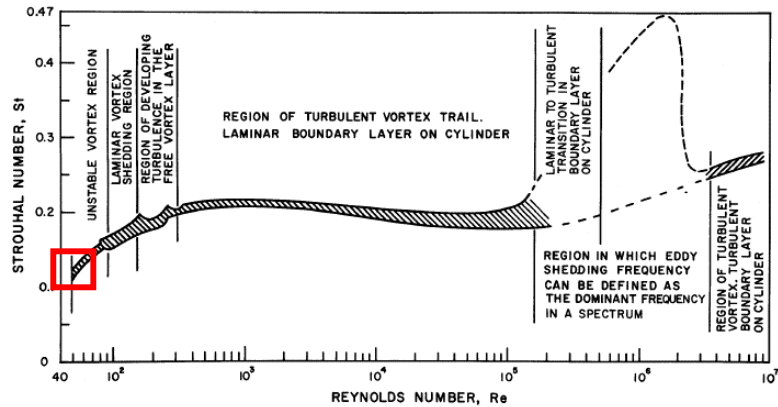
在大自然中，渦漩逸放的現象隨處可見，橋墩後方水流形成的渦漩、旗陣之所以飄飄的原因等等。當一均勻穩定的流體經過鈍體時，因為流體間黏滯力的影響，導致流體流經鈍體後會產生速度梯度，當速度梯度持續增加，大約在  $Re = 40\sim 49$  時，流體便會在鈍體後方開始產生分離，當流體分離由於逆向壓力梯度的關係便會在鈍體後方形成渦漩(vortex)，當上游流速持續增加，於鈍體後端尾流區形成週期性的渦漩。Von Kármán (1911)對此現象進行系統化的研究，這就是著名的 Kármán vortex street，此一現象須在某一特定流速範圍下才會產生，並且輪流交替性地出現在鈍體中心線之兩側。



圖一、完美形成的渦漩逸放 [An-Bang Wang, 2000]



根據 John H. Lienhard 的文獻，當使用圓柱體(circular cylinder)做為鈍體時，其 Strouhal number/Reynolds number 的關係如下圖所示。



圖二、John H. Lienhard 使用圓柱體做為鈍體其 St-Re 關係

我們的實驗主要就是要測量方框圍出來的範圍，也就是渦漩逸放剛開始形成的臨界雷諾數。

### 1.3.2 有效雷諾數概念

當流場與圓柱之間的溫度變動時，流體的黏滯性質就會跟著改變，於是雷諾數就跟著改變，將無法作為一個判斷流體性質的標準值。所以溫度是一個很重要的參考參數，如何定義它一直是個問題。

最早以前，Strouhal 先生首先量測圓柱後方渦漩逸放剝離頻率，並且提出頻率（現稱為 St, Strouhal number）可以用黏滯力（現稱其倒數為 Re, Reynolds number）來表示。

雷諾數的定義為： $Re = \frac{U_{\infty}d}{\nu_{\infty}}$ ，其中 $U_{\infty}$ 是自由流流速， $d$ 是圓柱直

徑， $\nu_{\infty}$ 是動黏滯係數。

史卓荷數的定義為： $St = \frac{fd}{U_{\infty}}$ ， $f$ 為渦漩逸放產生的頻率。

後來的學者(Roshko, Williamson, Brown)逐漸做修正，最後最具代表性未加熱圓柱後方 $Re$ - $St$ 之關係公式如下：

$$St = D + \frac{E}{\sqrt{Re}} + \frac{F}{Re} + \dots$$

但由於雷諾數會隨著溫度的增加而改變，所以始終沒有一個通用的公式能用在加熱圓柱的情形；渦漩逸放產生的頻率受到加熱圓柱的影響也仍然不清楚。

於是，學者 Lange 就提出了溫度比(temperature ratio)的概念：

$$T^* \equiv \frac{T_w}{T_{\infty}} \quad T_w \text{ 是圓柱表面溫度(K)} \quad T_{\infty} \text{ 為常溫(K)}$$

他說渦漩逸放產生的頻率幾乎不會受到表面溫度的影響。

但是後來的學者 Lecordier 發現將圓柱加熱可以抑制渦漩逸放的發生，而使得臨界雷諾數上升。其中，臨界雷諾數(critical Reynolds number,  $Re_c$ )是渦漩逸放剛好開始發生時的數值，一般在未加熱圓柱的環境下約為 40 到 49，而在加熱的狀況下則會隨著溫度而延後發生。

於是，他們提出了有效雷諾數(effective Reynolds,  $Re_{eff}$ )的概念，藉由假定臨界雷諾數在未加熱與加熱的情況下都一樣

$$Re_{c,\infty} = Re_{c,eff} (= U_c d / \nu_{eff})$$

Dumouchel 繼續由這個概念導出有效動力黏度(effective kinematic viscosity,  $\nu_{eff}$ )

$$\frac{T_{eff}}{T_\infty} = 1 + c \frac{T_w - T_\infty}{T_\infty} \quad \text{所有溫度皆以 K 為單位}$$

2000 年王安邦教授(Wang)發表了一篇論文，關於有效雷諾數與史卓荷數於加熱圓柱後方產生之渦漩逸放頻率的關係。他找到上式當 c 值等於 0.28 時，最符合臨界有效雷諾數不受溫度影響的概念。

### 1.3.3 他種測量黏度之方式

黏度為流體分子間引力大小的一項指標。黏度大的流體較易以層流的狀態流動，黏度小的流體則反之。其中，液體黏度隨溫度升高而減少；氣體黏度則隨溫度升高而增大。氣體黏度是氣體在流動過程中產生的內磨擦力的度量，主要是利用毛細管法來測定氣體黏度，落球式黏度測定器則是測量液體為主、氣體為輔，分別敘述如下：

毛細管法是基於波塞尼勒定理(Poiseuille's law)，他以研討血管內血液流動為目的，致力於細圓管內流體流速之研究。

文獻中提出了下列關係式

$$Q = \frac{P_1 - P_2}{L} \frac{\pi r^4}{8\eta} = \frac{V}{t}$$

$Q$  為單位時間所通過的流體體積， $P_1$ 、 $P_2$  各為圓管相距  $L$  兩截面上的壓力， $r$  為圓管半徑。

比例常數  $\eta$  被稱為黏滯係數，可導出

$$\eta = \frac{\pi}{8} r^4 \frac{P_1 - P_2}{L} \frac{t}{V}$$

但是以此種毛細管法來量測黏度，在檢定的過程中，因為受限於雷諾數會隨著溫度而變動的關係，溫度需控制的非常嚴格。而我們是改變溫度將雷諾數回歸成有效雷諾數，便可推得經此一轉換所隨之變動的黏度值。

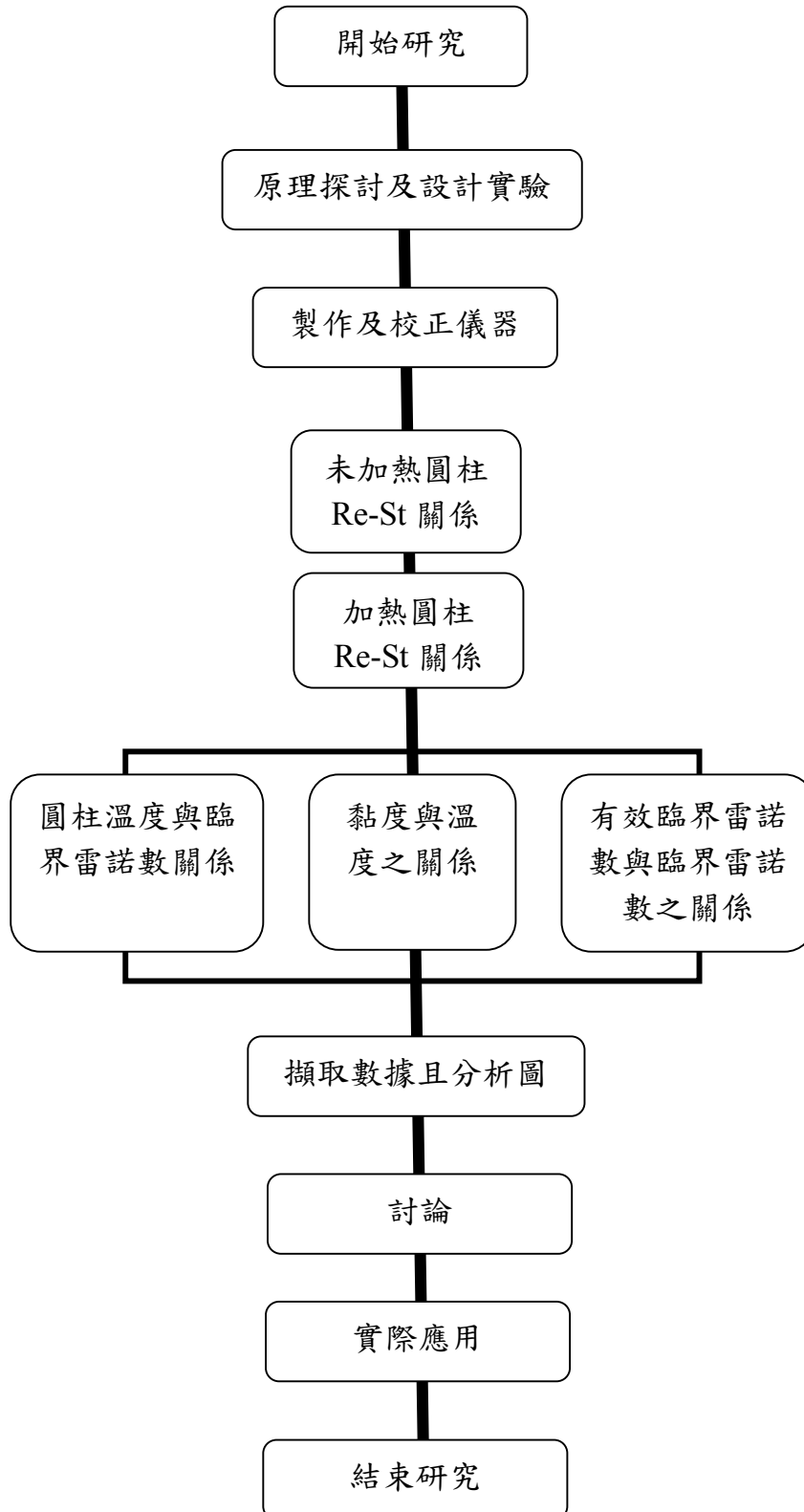
市面上絕大部分的黏度計是用來量測液體，或許是氣體分子間引力較小以及使用需求較少的緣故，我們僅找到一種「落球式黏度測定器(Falling Ball Viscosimeter)」，利用落球在樣品中下沉速度的不同來分析樣品黏度值，可以更換不同材質的落球來測定氣體的黏度，但這種方法主要還是用來測量液體。



圖三、市面上販賣的落球式黏度測定器

## 第二章 研究方法與過程

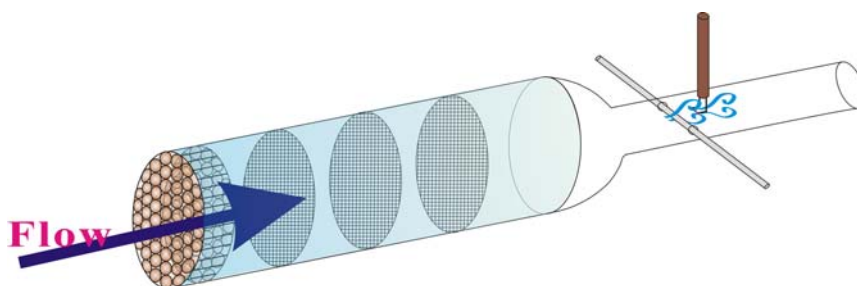
### 2.1 流程圖



## 2.2 研究設備與儀器

自製：

- 小型風洞：為了利用圓柱後方產生渦漩逸放的現象，首先必須製作一小型風洞作為流場。小型風洞分為前段的整流段以及後面的測試段，如圖。



圖四、小型風洞設計圖

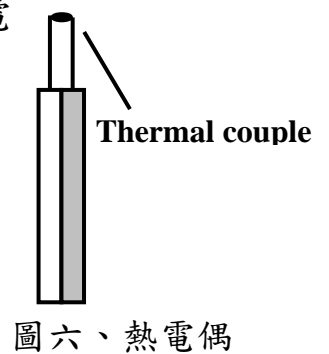


圖五、小型風洞成品照片

其中整流段以蜂巢狀的格子以及三層不同網目的鋼網所組成；並選用內徑 1.8 公分的透明玻璃管為測試段，以避免因加熱而造成融化的現象。又為什麼使用如此小的圓管來製作實驗設備呢？除了考慮到攜帶的方便性外，還有考慮到測試氣體的節省。但這樣微小的流場也產生了其他的問題，測試

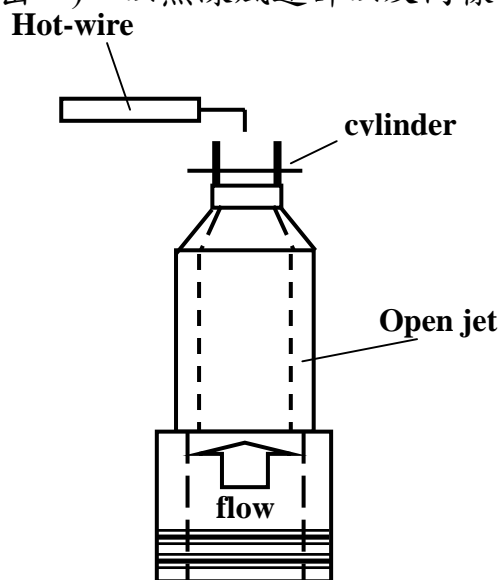
段前方的整流段無法以同尺寸製作，所以我們將漸縮的管子  
 連接兩頭來解決問題。在一般風洞此區域稱為收縮段  
 (Contraction)，位於整流段與測試區之間，目的是增加測試區  
 之速度，並使測試區的流場均勻及降低流場紊流強度。

●熱電偶：為了量測圓柱表面的溫度，我們將熱電  
 偶(Thermocouples, Omega CHAL-005)線的兩端焊  
 接成一個節點，外層先包覆絕緣材料再放入內徑  
 1.1mm 的空心不鏽鋼圓柱中，避免造成短路。



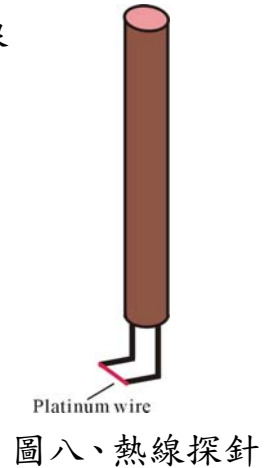
現成：

●軸對稱直立式噴流：此裝置的整流段為直立式的，也就是流  
 體經整流後從收縮段噴出，圓柱直接架在收縮段上(16mm 收  
 縮至 10mm 出口)，以熱線風速計以及同樣的步驟進行實驗，  
 如圖。



圖七、軸對稱直立式噴流架設情形

●熱線風速計：用以偵測渦漩逸放產生頻率的儀器是熱線風速計(Hot-wire anemometer, TSI)，共分為探針、探棒、儀器三部份。探針為 L 單線型，以白金絲焊接在兩針頭上，而探棒是以垂直的方式插入玻璃管內圓柱的正後方。在測量時，藉由流體流動帶走白金絲電阻產生的熱量來測量電壓變化。熱線風速計在使用前必須先進行校正，以確認電壓與風速為四次方的曲線關係。校正完後，就可以開始利用它來偵測渦漩逸放產生的頻率。



圖九、熱線探棒



●圓柱鈍體：使用內徑 1.1mm 之空心不鏽鋼管，與玻璃管的內徑比例為 1.1：18。

●壓縮空氣：在前部分的實驗中，氣體的來源為壓縮空氣，由壓縮機打氣後連接到錶頭以人工方式調整壓力來控制出氣量。



圖十、壓縮空氣錶頭

●流量計：流量計可在 0-250CFM 的範圍下測試經過氣體的流量。其中的偵測端是包覆在玻璃裡的白金電阻溫度感測器 (RTD)，白金絲被焊在穩固的陶瓷心棒，以增加穩定性。但在使用之前，須先進行校正的動作。

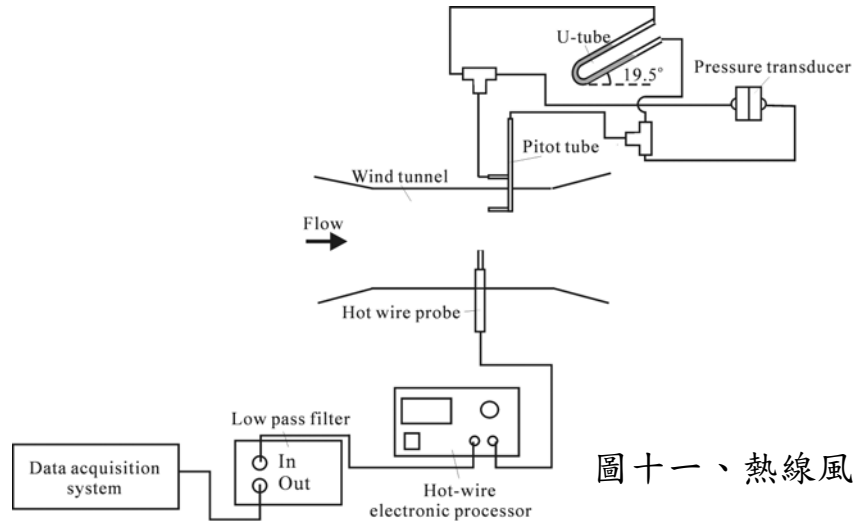
●皮托管，●微壓力計



## 2.3 校正設備及研究方法

### 2.3.1 熱線風速計的校正

整個校正的系統是在大型的閉迴路風洞進行，架設狀況如圖。



圖十一、熱線風速計校正裝備

當風洞開時，同時用皮托管以及熱線風速計來測量流速，並用數據擷取系統分別擷取電壓訊號以及壓力訊號，得到電壓與速度的關係圖後，經由四階的曲線嵌合就可以得到流速為電壓四次方的函數關係圖，藉這張圖，就可以從熱線風速計測量的電壓得知流體的流速。

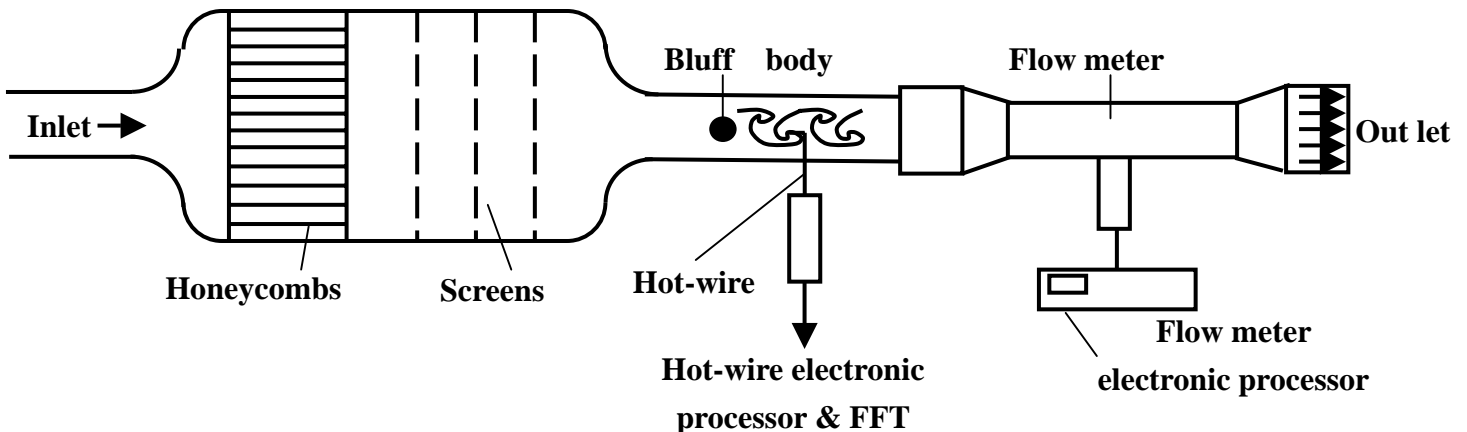
### 2.3.2 熱電偶(thermal couple)的校正

我們是使用熱電偶來得知加熱圓柱的溫度為多少，因此在這之前須先得到熱電偶的校正曲線。直接使用燒杯裝水加熱至沸騰、降溫至  $50^{\circ}\text{C}$ 、加冰塊至  $0^{\circ}\text{C}$  此三點，測得之數據經電腦讀取後與白金電阻溫度計作比對後，就可以得到溫度與電壓的校正曲線。

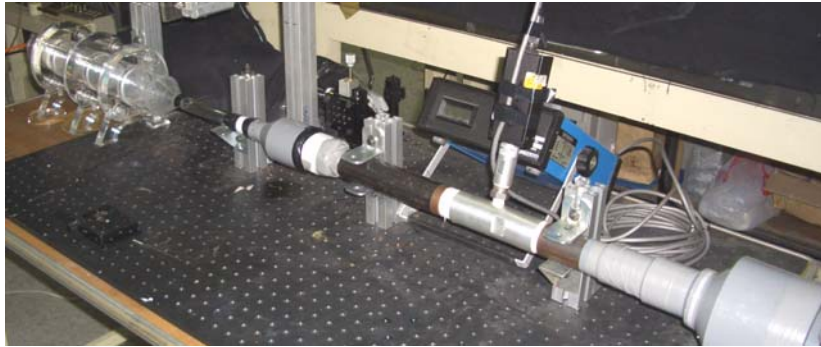
## 2.4 實驗方法與過程

### 2.4.1 未加熱圓柱流場之 Re-St 關係

實驗設備包括了壓縮空氣源、小型風洞、玻璃管測試段、流量計以及熱線風速計，如下圖。

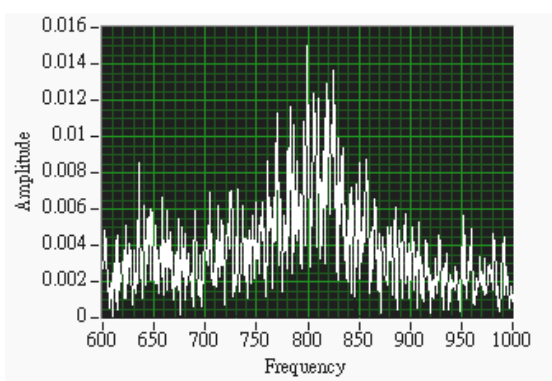
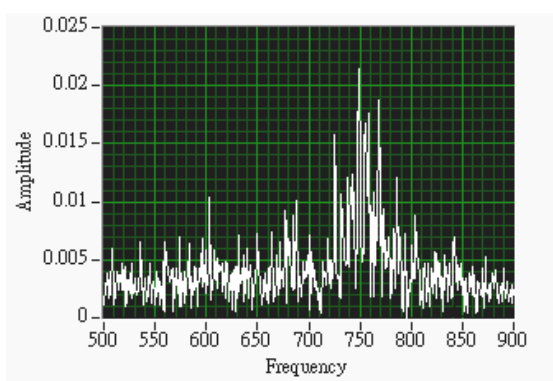
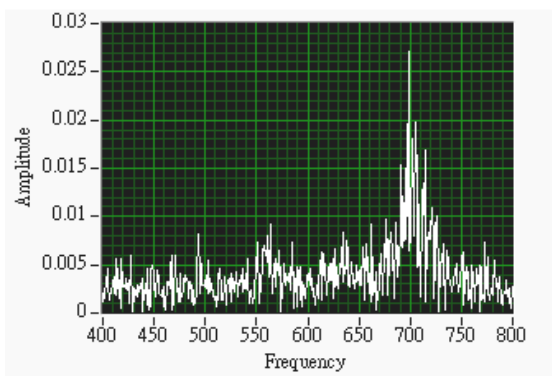
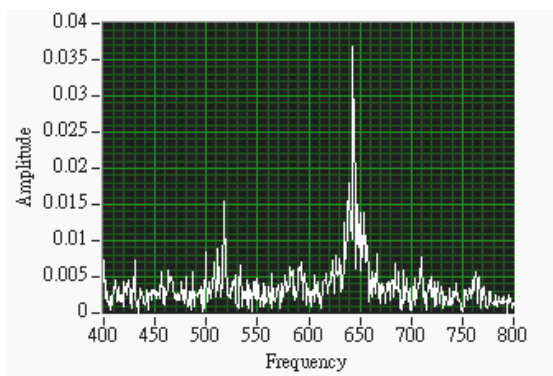
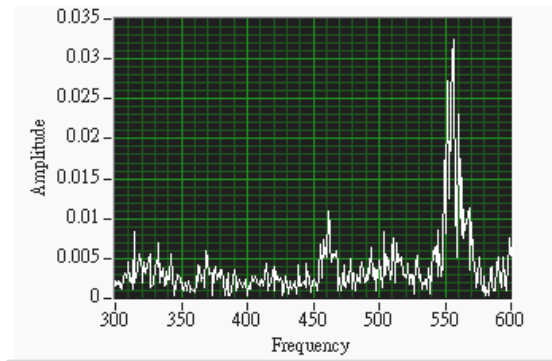
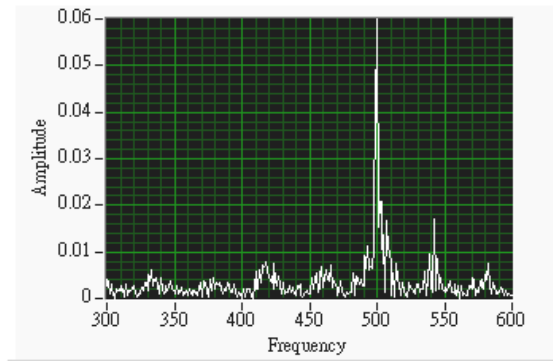
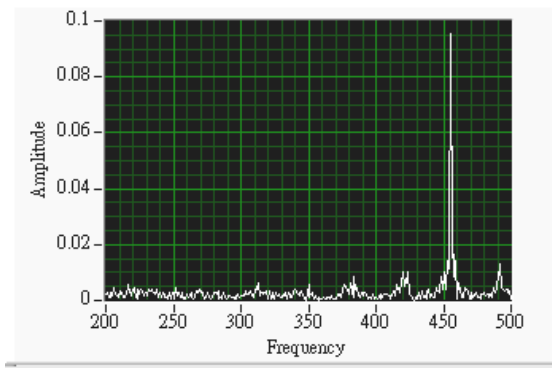
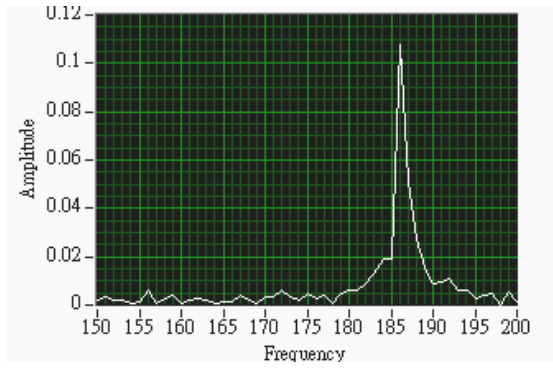


圖十二、未加熱圓柱流場裝置圖



圖十三、未加熱圓柱流場裝置照片

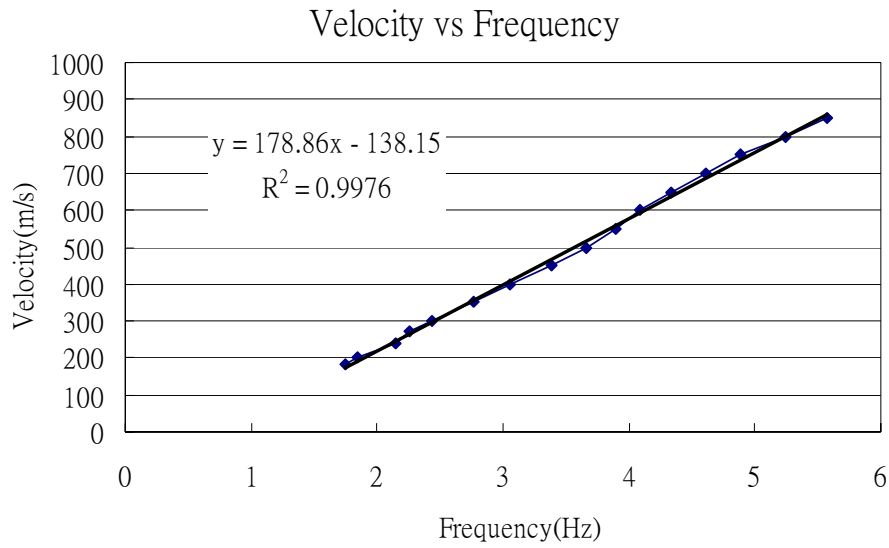
架好後，開始供應氣體，由接在下游的流量計測得目前流量；由熱線風速計偵測到圓柱後方渦漩逸放產生的頻率，以電腦每秒鐘抓取 3000 筆的流速變化資料，經由 FFT 快速傅立葉轉換成頻率變化，即可以得到在不同流速下的空氣經過圓柱後方產生的渦漩逸放的特徵頻率，如下頁圖。



V=1.76	Re=126
V=3.63	Re=260
V=4.33	Re=310
V=4.89	Re=350

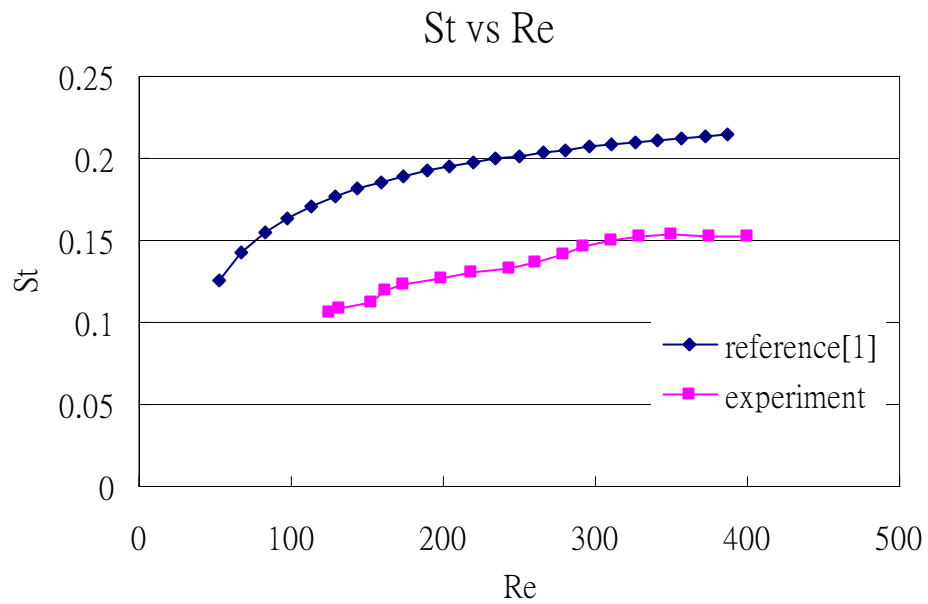
V=3.39	Re=243
V=3.90	Re=279
V=4.59	Re=328
V=5.24	Re=375

圖十四、在常溫時，由頻譜圖所看出的渦漩逸放



圖十五、不同流速下對應之渦漩逸放的特徵頻率

接著將實驗結果代換到  $St$  與  $Re$  的公式裡。 $Re$ - $St$  的關係如圖所示。因為整個實驗設備尺寸很小，所以壓縮空氣的進氣量也需控制的很小，流速的範圍大約在  $0 \sim 2 \text{ m/s}$  之間。

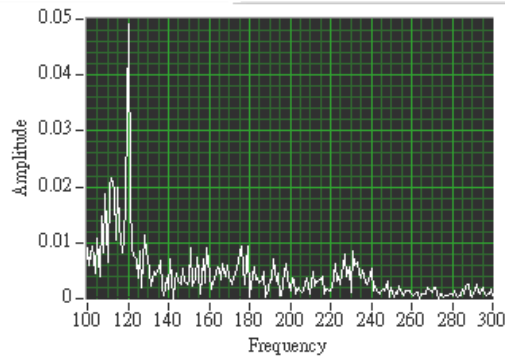
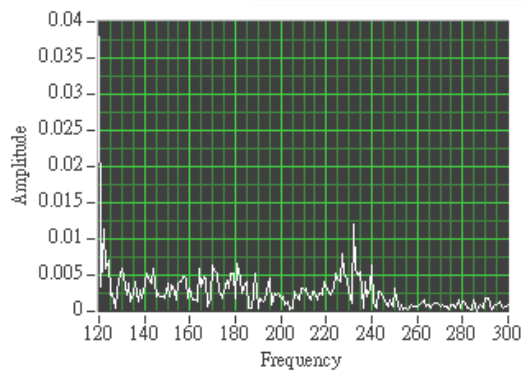
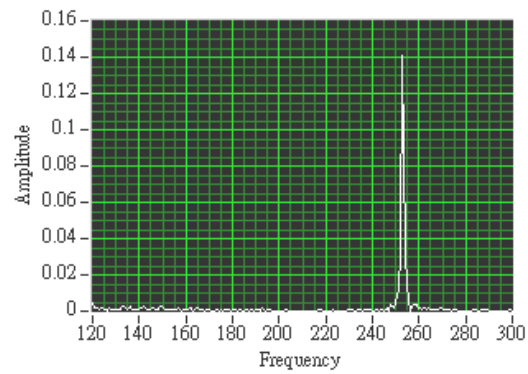


圖十六、實驗所得結果與參考文獻[1]比較

## 2.4.2 加熱圓柱流場改變之現象探討

將圓柱從室溫 25°C 加熱至 200°C，分別如實驗一的作法得到

Re-St 在不同圓柱溫度下的關係，如圖十七所示。



T=28 ; V=2.13 ; Re=152
T=175 ; V=2.20 ; Re=157
T=208 ; V=2.18 ; Re=156

圖十七、在不同溫度下，由頻譜圖所看出的頻率變化

## 第三章 結果與討論

### 3.1 未加熱圓柱流場之 Re-St 關係

比較王教授報告裡提供的公式推得之 Re-St 關係與在軸對稱直立式噴流上所測得的 Re-St 關係後，發現雖然其中線條的曲率符合，但是我們所測得的 Re 卻呈現偏高的趨勢。

由於教授是在風洞這一個較為穩定的流場測量，而我們是在軸對稱直立式噴流上測量，但因出口的流速快速減低，容易造成誤差。故經過討論後，推測其誤差的來源可能是由於測試環境的不同，而導致高估了實際的流速。

因為這一些實驗上的誤差，所以小的 Re 很難找到，所以必須從公式由大到小慢慢回推  $Re_{cr}$ 。

### 3.2 加熱圓柱流場改變之現象探討

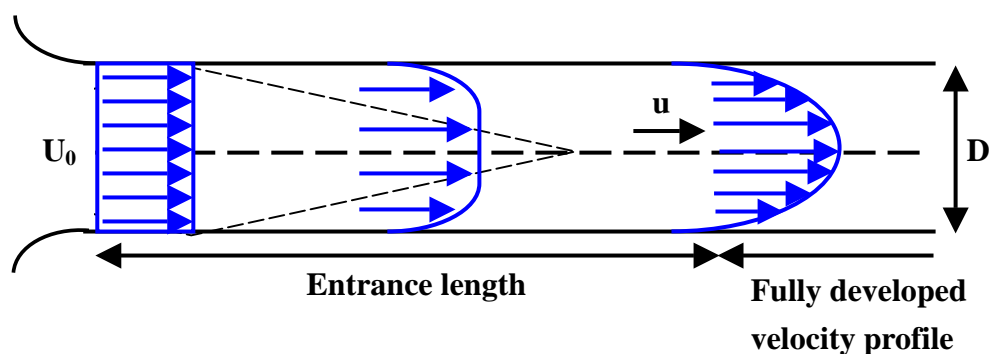
理論上其渦漩逸放曲線應為向後平移的，即頻率下低，因為溫度升高氣體黏度上升會抑制渦漩逸放的情形發生。確認 Re-St 關係曲線在不同溫度變因下仍然符合未加熱流場的趨勢。

### 3.3 討論

我們在找臨界雷諾數的實驗中遇到了許多問題：

1、首先是調整壓縮空氣出氣量的錶頭刻度太大，導致一轉開錶頭，流量和流速就已經很大了，當然渦漩逸放早就形成，無法得知臨界  $Re$ 。而我們的風洞及圓柱鈍體都是縮小比例的模型，所以依照相似定律，流速必然在很小的時候就會產生渦漩逸放的現象，因此換了一刻度較為精細的錶頭來做實驗，結果流速約在  $0.8\text{m/s}$  時熱線風速計便可以偵測到渦漩逸放的特徵頻率。

2、我們面臨的第二個問題是圓柱置入的位置太後面，原本在測試段的 10 公分處，結果偵測到的渦漩頻率很不規則。經過討論後，原因可能是流體在整流之後一段距離便會形成完全發展流，也就是其流體剖面各點的速度皆不一樣，甚至可能形成紊流。因此我們將圓柱位置調整到收縮段後 2 公分處，此時便是剛整流完的均勻層流，偵測到的渦漩逸放頻率訊號就很清楚。



圖十八、管內完全發展流的形成



3、在擷取渦漩逸放頻率時，外界的干擾雜訊很多包括交流電的頻率訊號，以致於特徵頻率不容易讀取，將原本使用的一般電線換成隔絕雜訊較好的電線，情況便能改善。

4、我們原本是設定在微小的流道進行實驗，並且也做好了所需的儀器和設備，開始進行實驗後才發現困難重重，首先是微小流道使鈍體後方發生渦漩逸放的速度相對降低，但是微小流速(在 1m/s 以下)的控制極為不穩定，因此使渦漩逸放的發生頻率不容易判斷，而且因為此時渦漩逸放的能量還不夠強，會被雜訊蓋住。一般在進行此類實驗都是使用架設在實驗室的市售大型風洞，查了許多相關研究論文，也沒有以流道管徑 1.8cm 為實驗模型的例子，因此本實驗的難度大增。

為了解決這個棘手的問題，故將實驗模型移至「軸對稱直立式噴流」測試，此裝置的整流段為直立式的，也就是流體經整流後從收縮段噴出，圓柱直接架在收縮段上(16mm 收縮至 10mm 出口)，沒有原本的玻璃管測試段，以同樣的熱線風速計以及同樣的步驟進行實驗。

## 第四章 結論與應用

### 4.1 結論

經過完善小心驗證後，初步實驗進度可以歸納為兩個結論：

- 1、我們經由軸對稱直立式噴流來測量所得到的  $Re-St$  關係，除了因環境等誤差影響所造成偏移外，與王教授的  $Re-St$  關係的趨勢基本上是呈現一致的。
- 2、由測量鈍體後方加熱圓柱渦旋逸放產生頻率與溫度，可以觀察到其中，當溫度增高時，渦旋逸放便會延後產生的現象。

### 4.2 未來展望

- 1、由於本實驗尚未量測到臨界雷諾數，日後希望能夠提升量測能力，以達整個實驗的完整性。
- 2、阻力的形成決定在於黏度的大小，此物理特性是一不可或缺的重要參數；又本黏度計只需要將儀器安插在待測管道口，而並非像一般市售液體黏度計需要取出樣本來檢測黏度，因此非常適合應用於工廠管內流體的監測。
- 3、本黏度計除了可以使用於氣體黏度的量測外，如將測量渦旋逸放產生頻率的熱線風速計改換成如壓電晶片等測量頻率的感測器，亦可使用於液體黏度的量測。

## 參考文獻

[1]K. A. Cliffe and S. J. Tavener, “The effect of cylinder rotation and blockage ratio on the onset of periodic flow,” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 501, pp. 125-133, 2004.

[2] An-Bang Wang, Zdenek Tra’vni’c’ek, “On the linear heat transfer correlation of a heated circular cylinder in laminar crossflow using a new representative temperature concept,” *Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, pp. 4635-4647, 2000.

[3]An-Bang Wang, Zdenek Tra’vni’c’ek, and Kai-Chien Chia, “On the relationship of effective Reynolds number and Strouhal number for the laminar vortex shedding of a heated circular cylinder,” *Journal of Physics of Fluids*, Vol. 12, No. 6, 2002, pp. 1401-1410.

[4]Robert W. Fox, Alan T. McDonald, Philip J. Pritchard, “Introduction to Fluid Mechanics,” John Wiley & Sons, Inc, 2004.

[5]Merle C. Potter, David C. Wiggert, *etc.*, “Mechanics of fluids”, 3rd BROOKS/COLE, Inc, 2001.

[6]杜文允，”冷卻圓柱尾流特性之有效雷諾數研究”，國立台灣大學應用力學研究所碩士論文，民 94。

[7]吳明勳，”加熱圓柱尾流在層流與過渡區特性之研究”，國立台灣大學應用力學研究所碩士論文，民 90。

[8]台灣儀器網 <http://tw17.water.com.tw/index3.asp>

## 評語

此研究以自製之微小型風洞裝置，施以溫控之方法，以實驗量得不同溫度下之流體特性，再以理論校正求得該流體之黏度值。不論在創作能力、思考程序、完整性、應用價值，都有突出的表現。建議可在實驗上，將變因控制做得更精確，可獲得較佳的理論吻合程度。此研究有此良好的表現，實屬難得，故給予肯定與鼓勵。