

中華民國第四十六屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 物理科

佳作

040101

風塵僕僕、阻礙重重——自製風阻測定實驗

學校名稱： 國立臺中女子高級中學

作者：	指導老師：
高二 洪毓鎂	邱雅雯
高二 張育瑄	
高二 陳珮妤	
高二 楊純雯	

關 鍵 詞：阻力、粒子流、圓柱

摘要

現實生活中難免少不了摩擦力,但流體 - 尤其是氣體—所造成的摩擦阻力卻往往被忽略。

丹麥物理學家**斯托克** (Stokes) 推導出當「**球體**」在高黏滯性流體中均勻運動且滿足低雷諾耳數(Reynolds Number)的條件時小球所受的阻力為 $6\pi r\eta v$ 。我們由此實驗獲得靈感,希望找到「**圓柱體**」在穩定流體中所受的阻力關係式。

我們以圓柱體當待測物,並假設兩種可能的變因,分別為**圓柱體底面半徑**和**圓柱體長度**。然後設計實驗將條件不同的圓柱體以棉線連接,吊在壓克力中空管中,另一端繞過阿特午機,綁上砝碼,置於有防風櫥(防止氣流干擾)的電子秤上(電子秤須先歸零),以固定的風速從壓克力管下方吹送,穩定之後,紀錄電子秤上所增加的讀數。該讀數即為該金屬圓柱所受的阻力。

另外取同樣的金屬球數顆,假設兩種可能的阻力變因,改變兩球的**間距**以及固定間距時球的**數目**。然後依照上述步驟測定金屬球所受的總阻力。

經多次的實驗,分析所測量的資料,我們可觀察出待測物所受的阻力與某些變因有關。

壹、研究動機

在高中課程中，我們所學到的力學大部分都是以剛體作為研究方向，關於流體力學只占了一小部分。不過在日常生活中，仍常可以看到許多例子——比如：在浴室裡用蓮蓬頭沖澡時，發現浴簾會往身上靠近，這種現象即可以用我們所學到的白努利定理來解釋。甚至機翼的設計也與此原理有關。

為了更深入瞭解物體在不同流體中所受的阻力，起初我們設計了一組實驗，探討球體在不同液體中自由落體落下時所受的阻力與液體黏度的關係，但後來因器材裝置準備困難、無法有效達到實驗結果，再加上相關資料多，許多人已徹底研究出各種液體精確的黏滯係數，故將實驗方向轉為較少被探討的氣體，研究圓柱體及球體在氣流中所受的風阻力與不同變因的關係。

根據我們所查到的資料，球體的阻力與其半徑有關，那麼圓柱體的長度及底面半徑是否也會影響其所受的阻力？又若將數個球體串接在一起，所受阻力是否也會有所改變？如果再改變兩顆球體之間距，所受阻力又會如何變化？我們找了金屬圓柱體及金屬球體作為待測物，欲設計實驗來觀察阻力與不同變因之間的關係。

貳、研究目的

一、設計出可簡易測量物體在流體中所受阻力的實驗。

二、**實驗一**金屬圓柱體：

取不同底面半徑或長度之金屬圓柱體。在固定風速之壓克力管中，其減輕的重量即為所受的風阻力，藉由阻力的變化即可探討阻力與底面半徑、長度的關係。

三、**實驗二**粒子流：

以固定的間距分別用棉線串接不同數目之金屬球；或固定金屬球的數目，改變其間的間距。在固定風速之壓克力管中，其減輕的重量即為所受的風阻力，藉由阻力的變化即可探討阻力與金屬球數目、間距的關係。

參、研究設備與器材

一、

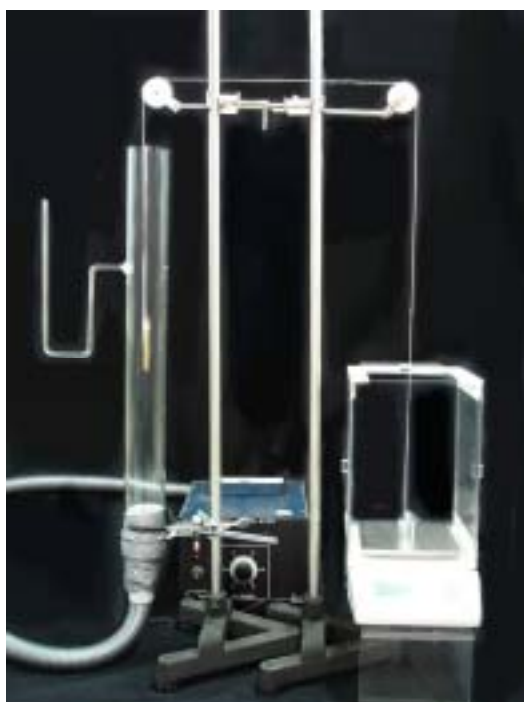
- | | |
|----------|----|
| (一) 金屬架 | 二個 |
| (二) 金屬滑輪 | 二個 |
| (三) 金屬夾 | 一個 |

二、

- | | |
|----------|----|
| (一) 送風機 | 一台 |
| (二) 壓克力管 | 一支 |
| (三) 防風膠帶 | 一捆 |

三、

- | | |
|----------------|----|
| (一) 附防風櫥二位數電子秤 | 一台 |
| (二) 砝碼 | 一盒 |
| (三) 壓克力支撐台 | 一座 |



四、

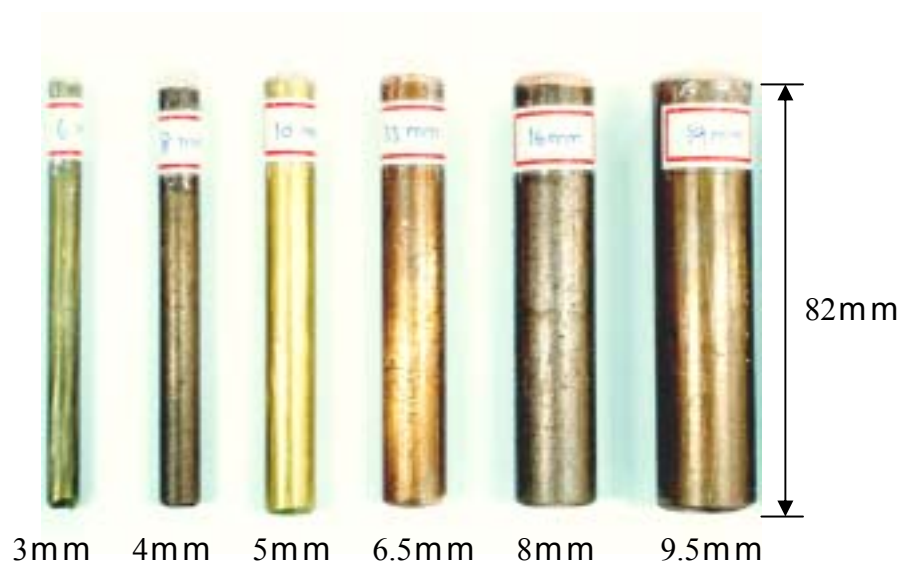
(一) 直徑 6.50mm、長度分別為 40.8mm、50mm、71mm、79mm、89mm、100mm、118mm、130mm、140mm、153mm 銅棒十支

(二) 長 82mm、半徑分別為 3mm、4mm、5mm、6.5mm、8mm、9.5mm 銅棒六支

(三) 半徑為 8mm 的金屬球 十五顆

(四) 棉線 一捆

(五) 熱熔膠 一組



肆、研究過程與方法

一、實驗原理：

(一) 理論根據

丹麥物理學家**斯托克** (Stokes) 推導出當「**球體**」在高黏滯性流體中均勻運動且滿足低雷諾耳數(Reynolds Number)的條件時小球所受的阻力為 $6\pi r\eta v$ 。我們由此實驗獲得靈感，希望找到「**圓柱體**」在穩定流體中所受的阻力關係式。

(二) 自製阻力測定原理

送風機開前——靜力平衡

$$\begin{cases} \text{金屬棒：} T = W_1 \\ \text{砝碼：} T + N = W_2 \\ \rightarrow N = W_2 - T \\ \rightarrow N = W_2 - W_1 \end{cases}$$

送風機開後——球受阻力

$$\begin{cases} \text{金屬棒：} T + F = W_1 \\ \text{砝碼：} T + N' = W_2 \\ \rightarrow N' = W_2 - T \\ \text{又 } T = W_1 - F \\ \rightarrow N' = W_2 - W_1 + F \end{cases}$$

由此可知： $N' = N + F$

$$\rightarrow N' - N = F$$

所以歸零時， N 顯示為零，打開送風機後電子秤上顯示的數位 N' 即為金屬棒所受之阻力 F

T ：繩子張力

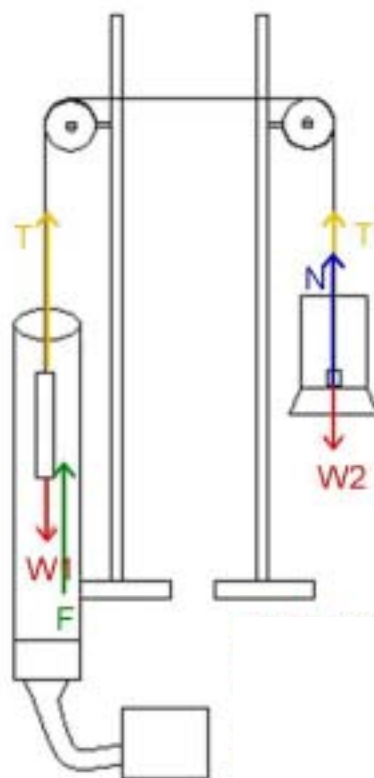
W_1 ：圓柱重量

W_2 ：砝碼重量

N ：靜止時電子秤正向力

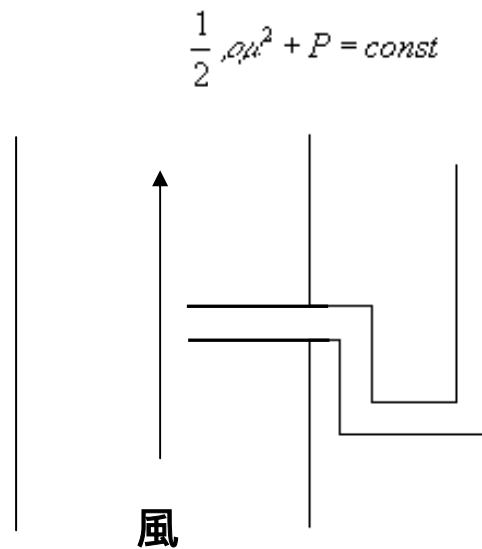
N' ：送風機啟動後電子秤正向力

F ：風阻力



（三）自製風速測定原理

為了測定在壓克力管中空氣流動的速度，我們在壓克力管側邊接出一條U型管，倒入液體，根據白努利定理，流體的壓力，會隨著流速的增加而降低，故當風經過小管口時，管口速度變快，壓力變小，造成U型管內液體的高度差，即為管內外壓力差，藉此可利用此高度差推算送風機所送之風速。（如下圖）



【註】後來因為U型管內水的高度變化實在太微小，無法測量變化量值，故不將風速列入討論。

二、實驗方法：

(一) 裝置演變過程

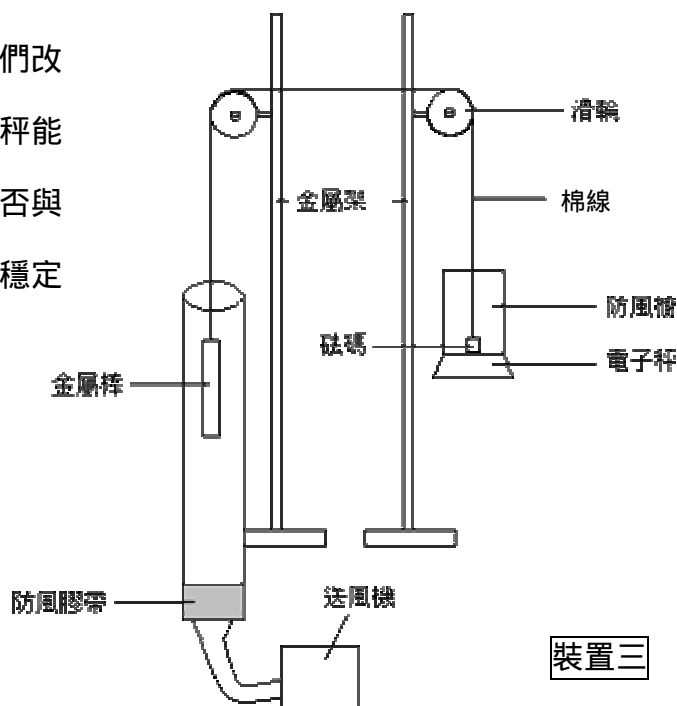
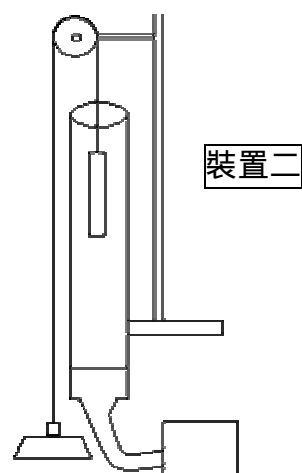
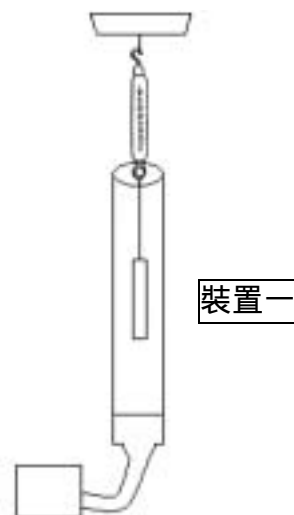
1.最初為了測量壓克力管中的待測物之阻力，我們將待測物直接吊在彈簧秤上。如圖裝置一。

【缺點】彈簧秤顯示的讀數會受到氣流的干擾。

2.為了避免氣流的干擾，我們將棉線繞過一個滑輪，間接地測量待測物所受的阻力。如圖裝置二。

【缺點】滑輪寬度過小，使得底下的電子秤無空間穩定放置，導致數據不穩定。

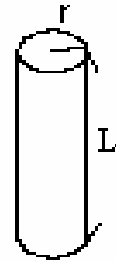
3.為了克服上述缺點，我們改將棉線繞過兩個滑輪，使電子秤能平穩擺放，也便於觀察棉線是否與地面垂直，大大增加了數據的穩定性。如圖裝置三。



(二) 實驗步驟

實驗一 探討圓柱體受空氣阻力之影響因素

1. 準備若干支銅棒，與棉線相連。
2. 架設儀器。(如上頁圖裝置三)
3. 取銅棒半徑 r 大小相同、長度 L 不同十支，分別在棉線另一端接上砝碼，繞過滑輪置於壓克力管中央。
4. 另取銅棒長度 L 相同、半徑 r 大小不同六支，分別在棉線另一端接上砝碼，繞過滑輪置於壓克力管中央。
5. 開啟送風機，固定風速，並紀錄電子秤上顯示的數據。



實驗二 探討多顆球體串接時受空氣阻力影響因素

1. 準備若干金屬球。將棉線另一端接上砝碼，繞過滑輪置於壓克力管中央。
2. 用棉線串接兩顆金屬球，改變其間距，開啟送風機，固定風速，並紀錄電子秤上顯示的數據。
3. 以相同間距串接不同數目的金屬球，開啟送風機，固定風速，並紀錄電子秤上顯示的數據。

伍、研究結果

一、固定直徑，改變圓柱體長度：

圓柱直徑：6.50mm

阻力 (gw) 實驗次數	待測物 銅棒	銅棒	銅棒	銅棒	銅棒	銅棒	銅棒	銅棒	銅棒	銅棒
	40.8mm	50mm	71mm	79mm	89mm	100mm	118mm	130mm	140mm	153mm
第一次	0.09	0.10	0.09	0.12	0.10	0.11	0.16	0.10	0.07	0.08
第二次	0.08	0.07	0.11	0.14	0.09	0.08	0.08	0.08	0.09	0.08
第三次	0.08	0.10	0.06	0.15	0.09	0.11	0.08	0.08	0.12	0.07
第四次	0.15	0.11	0.08	0.13	0.10	0.10	0.12	0.08	0.10	0.13
第五次	0.12	0.13	0.13	0.08	0.12	0.12	0.18	0.09	0.08	0.17
第六次	0.12	0.15	0.08	0.07	0.11	0.11	0.06	0.13	0.09	0.07
第七次	0.14	0.09	0.11	0.09	0.09	0.12	0.10	0.14	0.10	0.13
第八次	0.15	0.11	0.10	0.11	0.11	0.10	0.12	0.10	0.11	0.17
第九次	0.13	0.10	0.08	0.13	0.09	0.11	0.10	0.08	0.10	0.16
第十次	0.10	0.12	0.11	0.13	0.12	0.10	0.13	0.10	0.10	0.11
第十一次	0.10	0.12	0.08	0.07	0.10	0.08	0.11	0.09	0.11	0.07
第十二次	0.09	0.15	0.09	0.06	0.08	0.09	0.10	0.08	0.10	0.17
第十三次	0.09	0.13	0.08	0.06	0.09	0.10	0.06	0.09	0.09	0.08
第十四次	0.09	0.13	0.11	0.10	0.08	0.09	0.08	0.11	0.12	0.06
第十五次	0.08	0.11	0.10	0.08	0.09	0.14	0.06	0.11	0.14	0.07
第十六次	0.07	0.10	0.10	0.09	0.11	0.07	0.09	0.10	0.11	0.07
第十七次	0.09	0.11	0.09	0.09	0.10	0.13	0.06	0.11	0.12	0.13
第十八次	0.09	0.07	0.08	0.06	0.11	0.12	0.10	0.10	0.08	0.07
第十九次	0.09	0.08	0.10	0.10	0.10	0.12	0.09	0.08	0.07	0.10
第二十次	0.07	0.11	0.09	0.11	0.11	0.15	0.10	0.10	0.11	0.11
平均	0.10	0.11	0.09	0.10	0.10	0.11	0.10	0.10	0.10	0.11

表 1-1 不同圓柱長度之阻力數據

圓柱長度 (mm)	阻力 (gw)
40.8	0.10
50	0.11
71	0.09
79	0.10
89	0.10
100	0.11
118	0.10
130	0.10
140	0.10
153	0.11

表 1-2 不同圓柱長度之阻力平均值

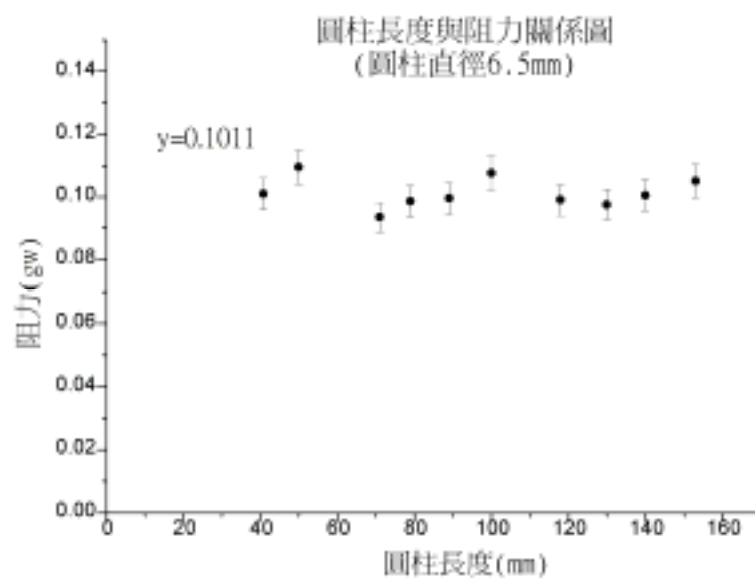


圖 1

二、固定長度，改變圓柱體半徑：

圓柱長度：82mm

待測物 阻力 (gw) 實驗次數	銅棒 3mm	銅棒 4mm	銅棒 5mm	銅棒 6.5mm	銅棒 8mm	銅棒 9.5mm
第一次	0.07	0.08	0.09	0.11	0.16	0.31
第二次	0.08	0.09	0.08	0.11	0.14	0.29
第三次	0.09	0.11	0.09	0.13	0.16	0.29
第四次	0.06	0.10	0.08	0.12	0.17	0.31
第五次	0.06	0.06	0.09	0.13	0.19	0.31
第六次	0.08	0.06	0.10	0.13	0.12	0.28
第七次	0.07	0.09	0.09	0.13	0.15	0.25
第八次	0.11	0.08	0.14	0.13	0.16	0.28
第九次	0.09	0.10	0.10	0.11	0.18	0.31
第十次	0.07	0.10	0.10	0.09	0.18	0.32
第十一次	0.10	0.08	0.07	0.13	0.13	0.29
第十二次	0.07	0.09	0.12	0.13	0.13	0.32
第十三次	0.10	0.11	0.08	0.11	0.13	0.26
第十四次	0.11	0.09	0.10	0.10	0.13	0.32
第十五次	0.10	0.10	0.10	0.12	0.16	0.26
第十六次	0.06	0.07	0.08	0.12	0.15	0.32
第十七次	0.11	0.07	0.07	0.11	0.16	0.30
第十八次	0.08	0.07	0.09	0.13	0.19	0.29
第十九次	0.08	0.08	0.14	0.12	0.17	0.36
第二十次	0.08	0.09	0.09	0.11	0.20	0.30
平均	0.08	0.09	0.10	0.12	0.16	0.30

表 2-1 不同圓柱直徑之阻力數據

圓柱半徑 (mm)	阻力 (gw)
3	0.08
4	0.09
5	0.10
6.5	0.12
8	0.16
9.5	0.30

表 2-2 不同圓柱半徑之阻力平均值

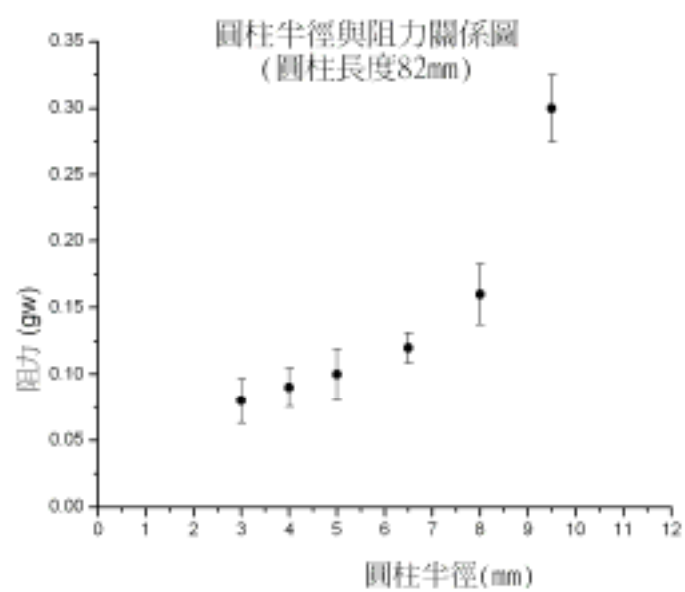


圖 2

三、粒子流

(一) 間距固定，球數增加。

金屬球直徑：16mm

待測物 阻力 (gw) 實驗次數	一球	二球	三球	四球	五球
		間距 5 c m	間距 5 c m	間距 5 c m	間距 5 c m
第一次	0.09	0.36	0.53	0.69	0.71
第二次	0.11	0.25	0.48	0.6	0.72
第三次	0.10	0.27	0.47	0.53	0.75
第四次	0.13	0.27	0.52	0.61	0.74
第五次	0.11	0.25	0.43	0.51	0.77
第六次	0.10	0.21	0.48	0.65	0.72
第七次	0.10	0.29	0.50	0.63	0.62
第八次	0.13	0.30	0.55	0.53	0.69
第九次	0.14	0.31	0.45	0.62	0.70
第十次	0.12	0.34	0.56	0.57	0.68
第十一次	0.10	0.28	0.54	0.63	0.70
第十二次	0.08	0.31	0.51	0.65	0.67
第十三次	0.09	0.38	0.49	0.67	0.73
第十四次	0.13	0.29	0.42	0.53	0.68
第十五次	0.08	0.35	0.43	0.51	0.67
第十六次	0.08	0.39	0.41	0.51	0.73
第十七次	0.09	0.25	0.52	0.57	0.75
第十八次	0.10	0.29	0.45	0.58	0.76
第十九次	0.11	0.21	0.51	0.56	0.65
第二十次	0.12	0.36	0.52	0.54	0.69
平均	0.10	0.30	0.49	0.58	0.71

表 3-1 不同金屬球個數之阻力數據

金屬球個數 (間隔 1cm)	阻力 (gw)
一球	0.10
二球	0.30
三球	0.49
四球	0.58
五球	0.71

表 3-2 不同金屬球個數之阻力平均值

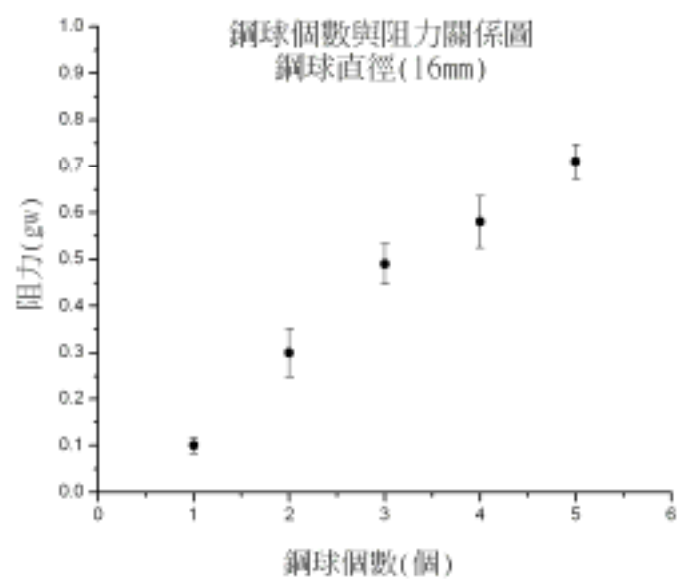


圖 3

(二)球數固定，間距改變。

金屬球直徑：16mm

阻力 (gw) 待測物 實驗次數	雙球 間隔 1cm	雙球 間隔 5cm	雙球 間隔 10 cm	雙球 間隔 15 cm	雙球 間隔 20 cm	雙球 間隔 30 cm	雙球 間隔 40 cm	雙球 間隔 50 cm
第一次	0.30	0.36	0.34	0.26	0.17	0.36	0.25	0.62
第二次	0.27	0.47	0.32	0.32	0.16	0.31	0.22	0.62
第三次	0.23	0.42	0.49	0.31	0.15	0.33	0.29	0.51
第四次	0.27	0.39	0.28	0.34	0.17	0.30	0.30	0.51
第五次	0.22	0.40	0.45	0.33	0.12	0.31	0.24	0.63
第六次	0.27	0.43	0.40	0.26	0.23	0.40	0.28	0.48
第七次	0.25	0.44	0.30	0.26	0.16	0.42	0.29	0.56
第八次	0.24	0.44	0.33	0.20	0.18	0.39	0.23	0.56
第九次	0.27	0.42	0.38	0.26	0.23	0.40	0.25	0.62
第十次	0.28	0.43	0.44	0.26	0.18	0.33	0.27	0.53
第十一次	0.25	0.47	0.34	0.30	0.26	0.44	0.20	0.68
第十二次	0.33	0.45	0.43	0.25	0.32	0.38	0.21	0.63
第十三次	0.26	0.45	0.34	0.26	0.29	0.38	0.28	0.65
第十四次	0.30	0.41	0.30	0.23	0.18	0.45	0.23	0.64
第十五次	0.25	0.45	0.38	0.22	0.17	0.43	0.21	0.63
第十六次	0.28	0.40	0.37	0.25	0.13	0.4	0.24	0.58
第十七次	0.24	0.38	0.43	0.26	0.17	0.38	0.25	0.57
第十八次	0.32	0.44	0.39	0.19	0.14	0.43	0.27	0.64
第十九次	0.23	0.41	0.37	0.19	0.21	0.37	0.28	0.62
第二十次	0.25	0.41	0.36	0.30	0.17	0.40	0.24	0.53
平均	0.27	0.42	0.37	0.26	0.19	0.38	0.25	0.59

表 4-1 不同間距之阻力數據

兩金屬球間距 (cm)	阻力 (gw)
1	0.27
5	0.42
10	0.37
15	0.26
20	0.19
30	0.38
40	0.25
50	0.59

表 4-2 不同間距之阻力平均值

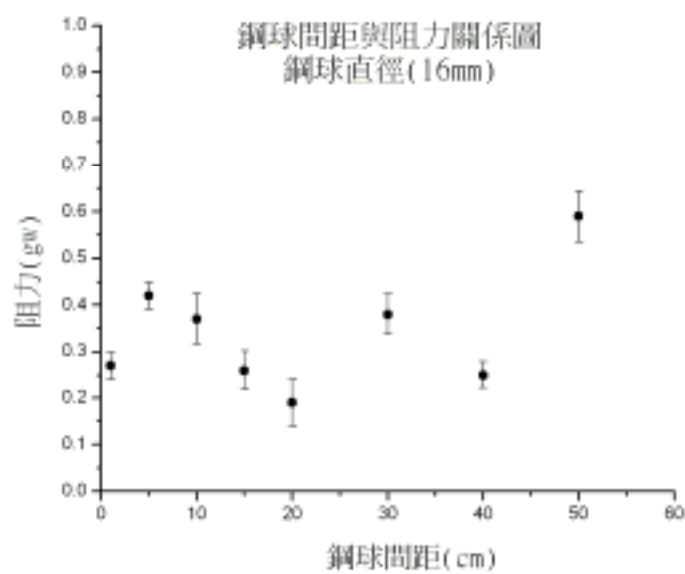


圖 4

陸、討論

一、圓柱長度與阻力的關係

根據圖 5-1，不同長度圓柱的阻力，雖然有些微變動，但是大約都維持在相同的量值，在 0.10(gw)至 0.11(gw)附近。其中長度為 71(mm)的鉛棒為 0.09gw，與其他差距較大，推測應為誤差所造成。

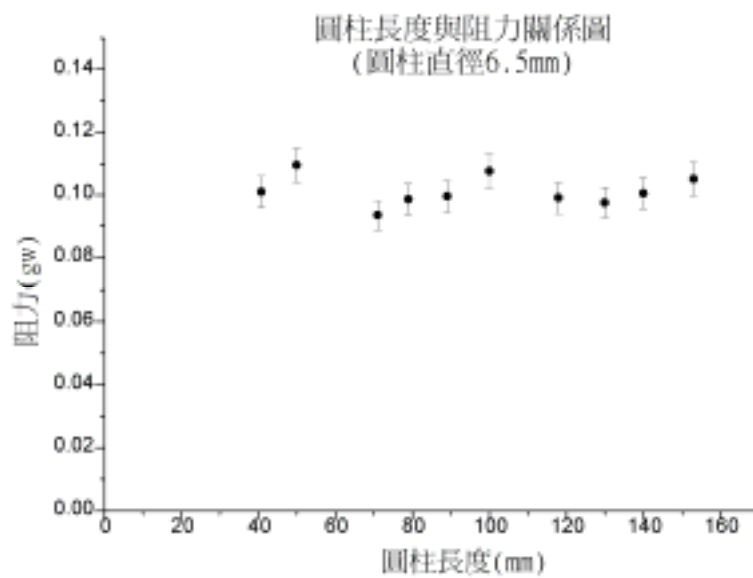


圖 5-1

二、圓柱半徑與阻力的關係

根據實驗結果，圓柱所受阻力隨著半徑改變有增加的趨勢。

本來預期將呈線性關係，但是由點的分佈看來不太可能，加上趨勢線後也明顯不合(如圖 5-2)。我們考慮圓柱阻力與其截面積有關，於是將半徑平方後畫出與阻力的關係圖(圖 5-3)，但是也並沒有非常吻合。

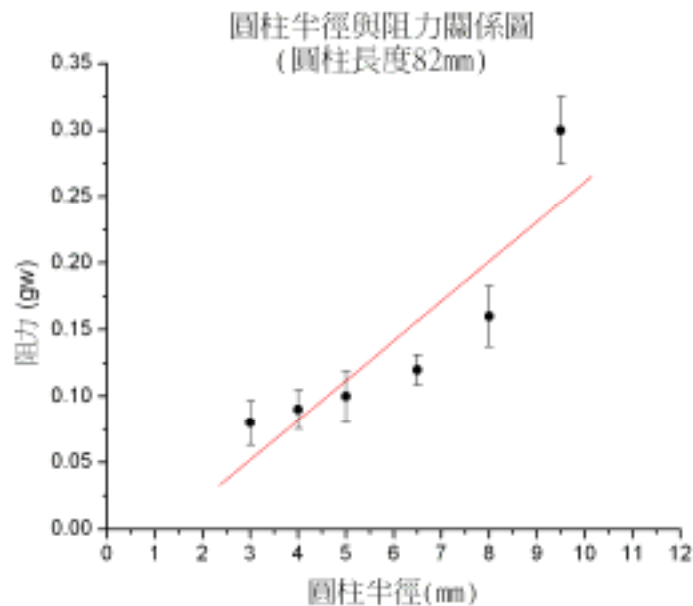


圖 5-2

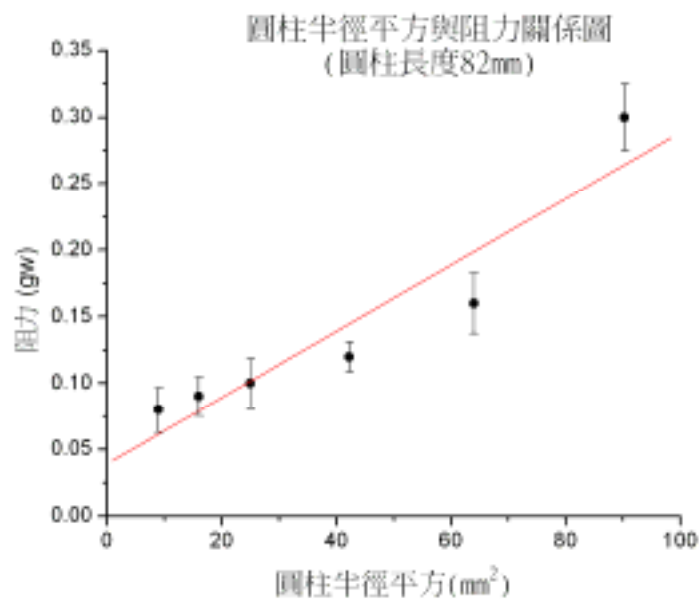


圖 5-3

假設阻力可能與 r 的二次多項式有關，我們嘗試將資料做另一趨勢擬合，其結果如圖 5-4。

由於斯托克公式只適用於層流中(流速慢的流體)，而本實驗流體速度非常快(屬擾流)，我們推測阻力也許在擾流中會受到不同因素的影響。若將半徑與阻力做指數趨勢線，發現其關係圖非常相近， R 值也非常高(如圖 5-5)，顯示其與指數有較大關聯。

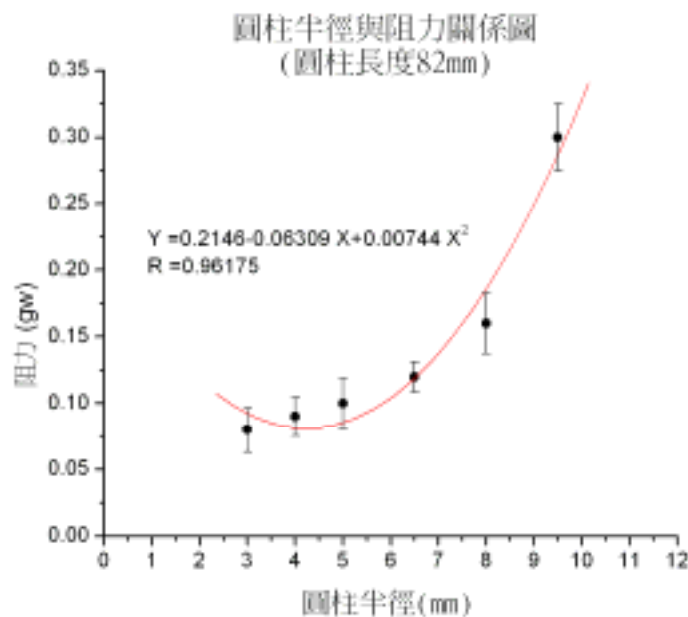


圖 5-4

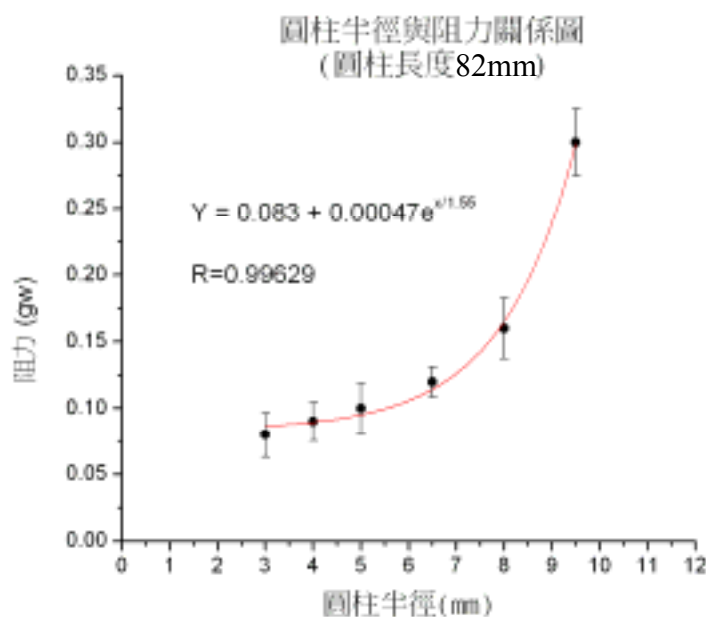


圖 5-5

三、粒子流

(一) 間距固定，球數增加。

觀察圖表的數據，大致上呈線性關係，也符合用公式擬合的結果。

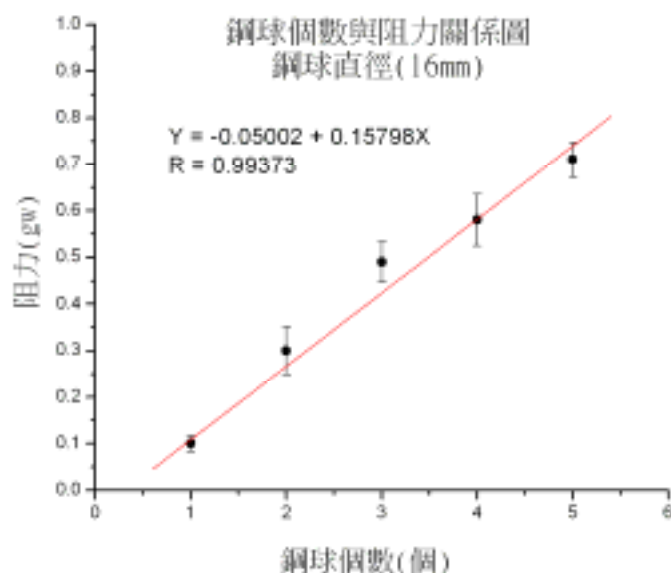


圖 5-6

(二) 球數固定，間距改變。

此實驗的結果，數據上下震盪，本來預期當小球相隔越遠可能阻力會有其他變化，例如變小或是維持一定的值，但是觀察數據的分佈，很難找出其規則，我們認為造成此種現象的原因，可能是風的湍流或是在棉線上造成的不平衡的力矩所導致。(如實驗結果圖 4)

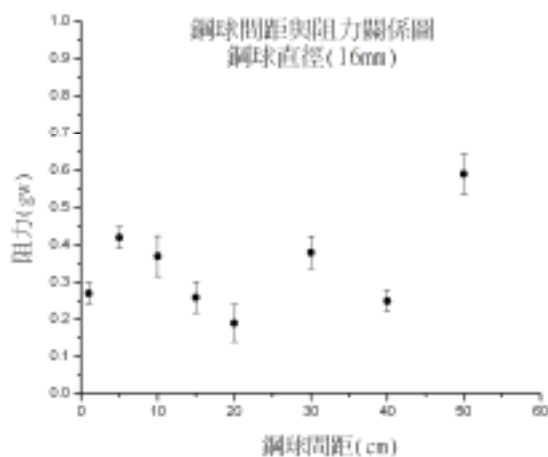


圖 4

柒、結論

根據數據及圖表，我們可以明顯觀察出阻力和圓柱長度及底面直徑的關係。阻力和圓柱長度的關係似乎不大，數線並無明顯遞增或遞減的情形發生，反而略呈鋸齒狀的在一定範圍內震盪；然而，阻力和圓柱底面直徑卻出現了以指數關係成長的情況，由此可見：圓柱體所受的阻力是與其受力底面直徑有較大的關係！

在粒子流的部分，我們發現當球數增加的時候，阻力有增加的趨勢；而改變間距的阻力卻上下震盪。

在此實驗中，由於流體為非理想狀態，及各種摩擦力因素，使得實驗不穩定，以下歸結出各種可能性：

一、湍流因素：實驗在設計上應該盡可能取穩定的氣流(穩流)作為測量對象，以減低其他變因的干擾；但由於在現實生活中，穩流的形成極不容易，因此，我們只能在有限的半密閉空間(壓克力中空管)中盡可能將氣流控制在一定的穩定狀態下來進行實驗。

二、摩擦因素：實驗上為了使棉線不至於歪曲乃採用兩個滑輪架起來(便於觀察)，為了減少滑輪對棉線的摩擦，已盡量找最新，最光滑的滑輪，增加實驗準確度；另外，中空壓克力管也是有限空間，流體流過時會由於黏度的影響，使愈接近管壁的流體速度愈慢，進而影響中央待測物所受風的風速與穩定性。

三、待測物：待測物與棉線相連時，必定有些許熱熔膠殘留，加上微觀裡待測物表面不平整，都會影響風經過待測物的流線，影響阻力。

流體(尤其是氣體)的實驗中本來就充滿著不穩定，所受摩擦的影響也很大，但透過這次實驗還是可以粗略地找出關係式，且藉由探討週邊的影響因素，使我們更懂得找尋、討論實驗誤差。

捌、參考資料及其他

一、參考資料

- ▶ 陳錫桓 著 《力學》 中央圖書 出版
- ▶ 蔡旭容 著 《流體力學概論》 三 民 出版
- ▶ Halliday.Resnick.Walker 著 《Fundamentals of Physics Sixth Edition》
全華科技圖書股份有限公司 出版
- ▶ Shan-Tarng Chen , 1996 , " The drag Force on a String fastened to a Sphere Moving in a viscous Fluid" Chinese Physics Letters. Vol. 13 , No. 9 , 682-685.
- ▶ Shan-Tarng Chen 1994. The resistive force on a sphere with a string moving in a viscous fluid. Chinese Journal of Physics. 32(4):395-404.
- ▶ 陳 汕 塘 1994. 利用阿特武德贏裝置測量黏滯係數。 科學教育月刊 175 期 P17-20.
- ▶ 陳 汕 塘 1993. 利用光電管裝置及斯托克定律探討細線在流體 中所受到的粘滯力。 科學教育月刊 162 期 P26-29.
- ▶ 陳 汕 塘 1993. 利用光電管測量黏滯係數的實驗設計。 科學教育月刊 160 期 P39-42
- ▶ Using the Atwood machine to study Stoke's law
(<http://www.ugrad.physics.mcgill.ca/labs/Reports/Sample1.htm>)
- ▶ Stoke's Law
(<http://web.umn.edu/~wlf/MW/Stokes.html>)

二、其他

(一) 層流

黏度：流體流動時，由於內部的摩擦產生許多阻力，此即為黏性。因為黏性的存在，要使某一層流體滑過另一層，就必須施力。如圖所示，一體底面被固定，而頂面受一切(剪)力(shearing force) Ft 之作用，而相對於底面有一位移 X 。

切變係數(shear modulus) $\equiv$ shear stress/shear stain

$$\Rightarrow S = Ft/A / x/h \text{ (流體呈層狀流動)}$$

層狀流動(laminar)：每一個表面所接觸的流體與其表面的速度相同，所以頂面的流速具有速度 V ，在底面附近的流體則處於靜止狀態，中間流體則自底面滯頂面速度均勻增加，此種流動稱之。若黏性大，則產生此種現象所需的力亦大。

< 另外 >

$$\text{(黏性} \rightarrow \text{用於流體) 切變係數 (shear modulus) } \equiv \frac{\text{shearstress(應力)}}{\text{shearstain(應變)}} \Rightarrow S = \frac{Ft/A}{\Delta X/h}$$

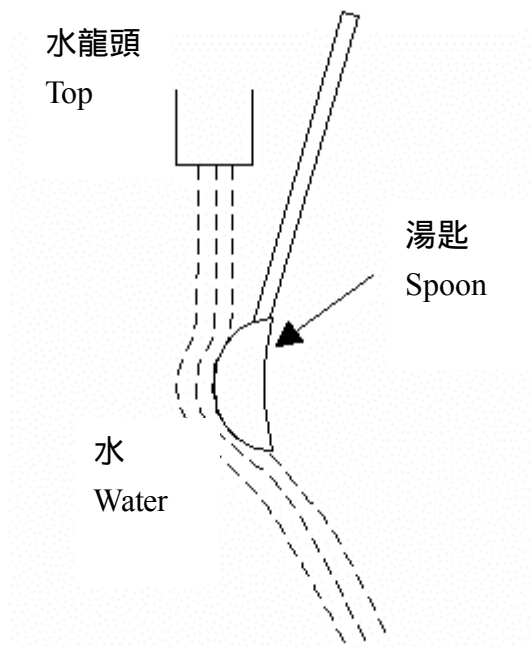
$$\text{剛體} \left\{ \begin{array}{l} \text{圓柱： } Y = \frac{F/A}{\Delta l/l} \text{ (楊氏係數)} \\ \text{圓球： } B = \frac{F/A}{\Delta v/v} \end{array} \right.$$

$$\text{流體：黏滯係數 } \eta = \frac{Ft/A}{v/h} \text{ (v 表相鄰兩層間之相對速度)}$$

對流體而言，切應力會致使相鄰兩流層間的相對運動，因而流層與流層間會產生摩擦。而描述此現象的量度就是黏滯係數 η (viscosity)。

(二) 康達效應(Coanda Effect)

流動中的物質，都會有依附接觸面的傾向，宏觀的解釋是與流體的「黏度」(Viscosity)有關。試把匙羹彎曲的底部貼向由水龍頭流出的水柱，觀察水流過曲面後的情況，會發現水流的方向改變了，由垂直向下變成跟隨匙羹曲面的方向(圖二)。此外，拿湯匙的手會感覺到有力把匙羹拉近水柱。這感覺可用牛頓第三定律來解釋：因為匙羹改變水流的方向(作用力 Action)，匙羹亦同時被拉向水柱(反作用力 Reaction)。



圖二：康達效應

(三) 雷諾數

雷諾數(Reynold number)，是判斷流體流動形態的指標。

1883 年奧斯本 雷諾(Osborne Reynolds)所作的有名的實驗。對流體的流動模式有了更完整的說明。可觀察流體在玻璃管中的流動情形。

當流速小時，染料自始至終均成一直線，而不向周圍擴散，稱為層流(laminar flow)。而當流速甚大時，管內染料則將整支管子染色，此乃因其向周圍擴散之故，稱為擾流(turbulent flow)。

雷諾數的定義為
$$Re = \frac{D\bar{u}\rho}{\mu}$$

D：管內直徑，[m]

$\bar{u}$ ：平均速度，[m/s]

ρ ：密度，[kg/m³]

μ ：黏度，[kg/m·s，或 Pa·s]

Re<2100 層流

Re>4000 擾流

2100<Re<4000 過渡流

評	語
---	---

040101 風塵僕僕、阻礙重重-自製風阻測定實驗

實驗設計巧妙，能夠運用巧思設計新穎的測量方法，將問題重新詮釋，唯在氣流穩定的控制與實驗的精密度仍嫌不足，以致對所得數據的推論不夠完整。