

中華民國第 55 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 物理科

第三名

030106

逆流而上~測量物體於流體中所受阻力之創新實驗設計與簡易方法

學校名稱：彰化縣立陽明國民中學

作者： 國二 劉恩宇 國二 李靈 國三 蔡宇柔	指導老師： 蔡名峯 韓顏吉
--	-----------------------------

關鍵詞：慣性阻力、黏滯阻力、實驗設計

摘要

本研究主要目的是創新設計一套既實用又簡便的實驗裝置，來測量物體在流體中運動所受的阻力大小，此裝置可自由的改變液體流速並利用聯通管原理控制水位高低，藉以使液體流速保持穩定，並由電子秤的讀數迅速得知阻力之大小。

為了瞭解本實驗裝置之精確性，本組使用鋼製球體及圓柱體分別在水及甘油中作相對運動來實際測試。實驗結果發現，在湍流的情況下，當物體為球體或圓柱體時，其所受慣性阻力大小與物體的橫截面積 A 及相對運動速度 v 的平方成正比；而在層流的情況下，其所受黏滯阻力大小與物體半徑及運動速度 v 成正比。結果與理論相符，意謂著本組所設計的創新實驗裝置是一個能簡易測量物體在流體中運動所受阻力大小的有效方法。

壹、研究動機

某次，老師再課堂上講解『鮭魚迴游』的情形，鮭魚在淡水環境下出生，之後游到海水生長，又會洄游到淡水繁殖。鮭魚會利用太陽和地球磁場的引導，游回牠自己的出生地裡進行繁殖，而在此過程往往因逆流而上，耗費太多體力而死在途中；後來老師又在課堂上播放了「流言追追-水面下的危機」影片，我們發現水流的力量真的非常恐怖，掉到水中，受到水流的帶動，非常難以控制身體。我們便心想水流的力量到底有多大，因此就利用此次科展的機會來探討物體於流體中運動所受到之阻力的情形。



圖 1 鮭魚迴游

貳、研究目的






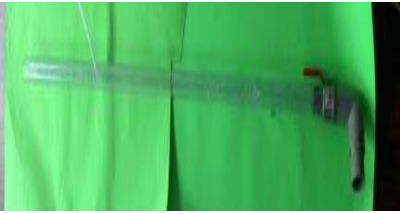
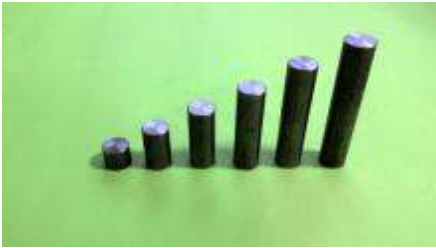

本研究，主要分為兩個部份。第一部份自行設計實驗裝置，第二部份利用我們所設計的實驗裝置去探討不同半徑的鋼球與圓柱鋼體在流體中運動所受到的阻力。詳細目的如下列所示：

- 一、水的流速與鋼球在圓柱管中之慣性阻力的關係。
- 二、鋼球半徑與鋼球在流水中之慣性阻力的關係。

- 三、水的流速與圓柱鋼體在圓柱管中之慣性阻力的關係。
- 四、圓柱鋼體半徑與圓柱鋼體在流水中之慣性阻力的關係。
- 五、在固定圓柱鋼體的半徑及水的流速情形下，測量圓柱鋼體在圓柱管中，其所受之慣性阻力與圓柱鋼體長度之關係。
- 六、甘油的流速與鋼球在圓柱管中之黏滯阻力的關係。
- 七、鋼球半徑與鋼球在甘油中之黏滯阻力的關係。
- 八、甘油的流速與圓柱鋼體在圓柱管中之黏滯阻力的關係。
- 九、圓柱鋼體半徑與圓柱鋼體在甘油中之黏滯阻力的關係。
- 十、在固定圓柱鋼體的半徑及甘油的流速情形下，圓柱鋼體在圓柱管中，其所受之黏滯阻力與圓柱鋼體長度之關係。

參、研究設備及器材

一、器材

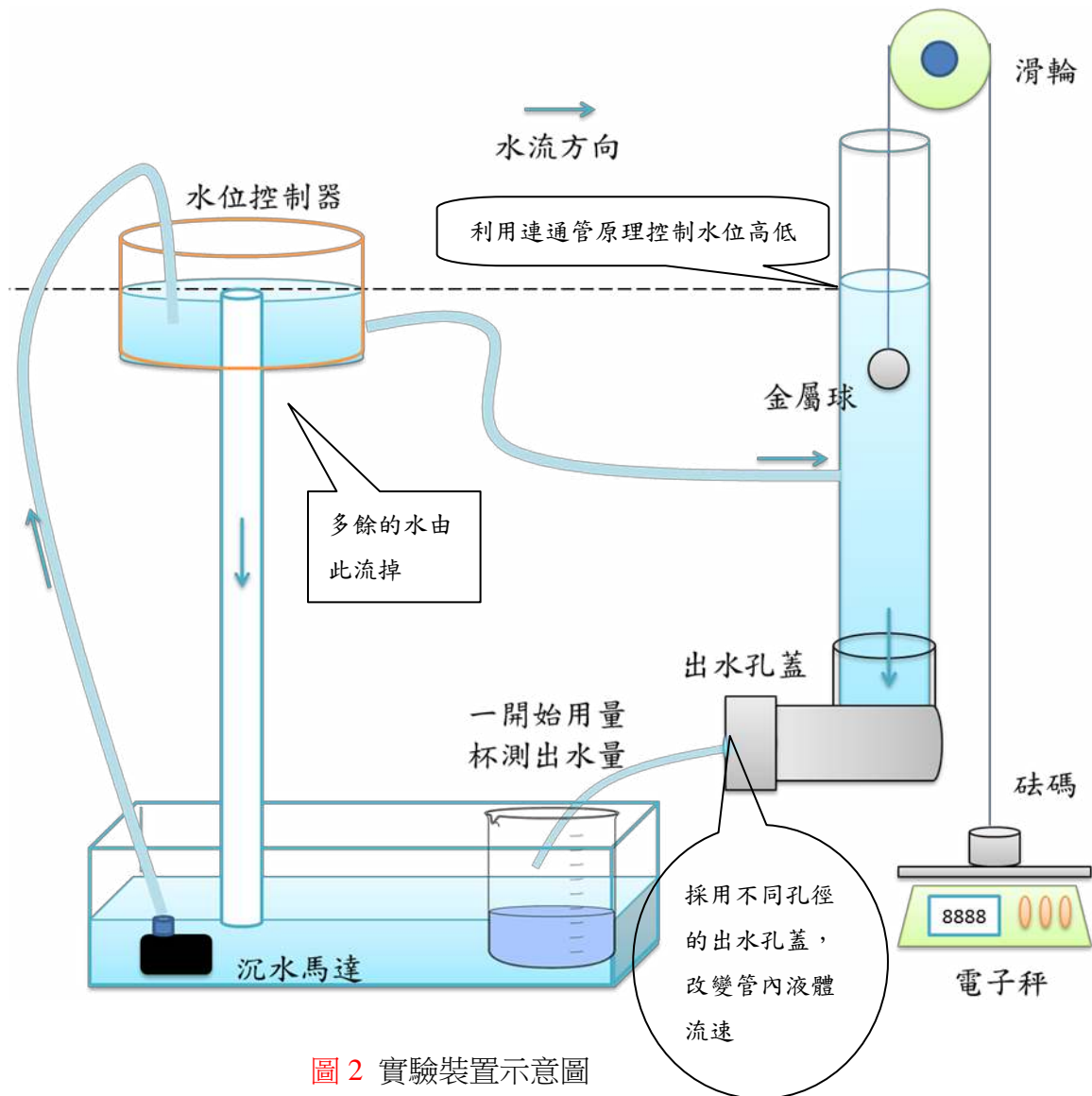
		
硬脂接合劑	銲接槍	熱熔膠槍
		
透明塑膠水桶	塑膠水管	圓柱 PVC 管與流體出口 (大)
		
圓柱 PVC 管與流體出口 (小)	不同半徑的圓柱鋼體	不同口徑之流體出口孔蓋 (大)

		
浴盆	鐵槌	鐵棒
		
不同半徑的金屬球	滑輪	沉水馬達
		
不同口徑之流體出口孔蓋 (小)	砝碼	電鑽
		
棉線	砝碼組	強力膠
		
白鐵線	量筒	鐵氟龍



二、自製研究器材

(一)裝置的介紹



說明：

名稱	圖片	設計理念
水位控制器		<p>利用連通管原理，控制壓克力管內的水位高度，保持壓克力管內的水流速度固定。</p>
電子秤		<p>讀取砝碼減輕的重量，藉以得知流過沉體時的慣性阻力或黏滯阻力。</p>
出水孔蓋		<p>改變不同口徑之流體出口孔蓋，以變化流體流出量，藉以改變管內流體的流速。</p>
沉水馬達		<p>利用馬達循環抽水，控制水位。</p>
鋼球		<p>鋼球置放於壓克力水管中。</p>

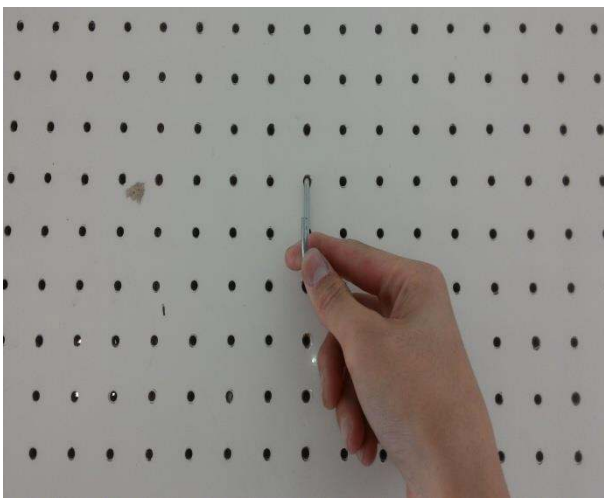
(二) 實驗裝置的組裝過程



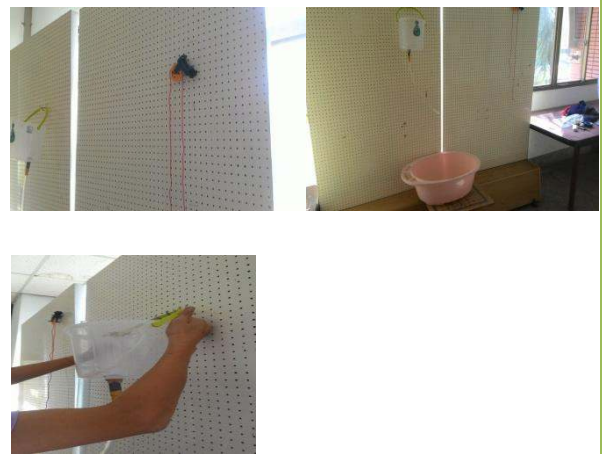
1、首先利用黏膠黏合圓柱 PCV 管與出水孔。



2、黏合寶特瓶、水管與塑膠水桶。



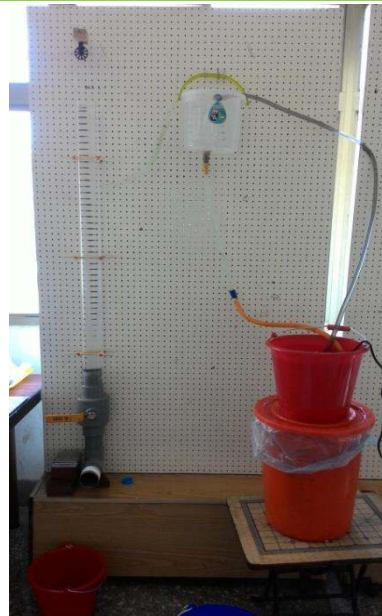
3、在底座板定位鉤子。



4、將各部分儀器定位在底座板。如圖



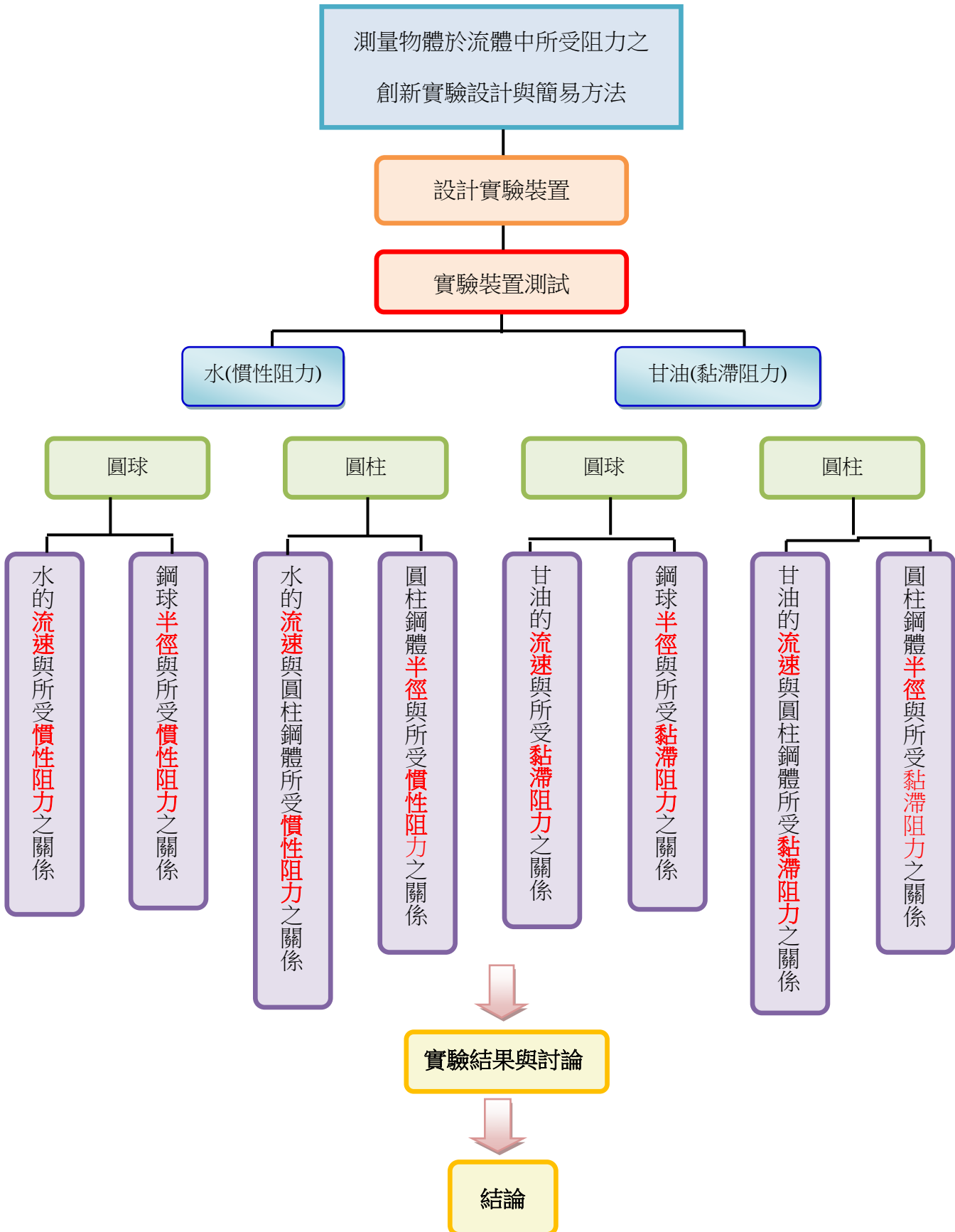
5、注入裝置各部分的水。



6、完成自製測量阻力之裝置。如圖

肆、研究過程與方法

一、研究流程與架構



二、研究原理

曳引阻力(Drag)又稱後曳力或流體阻力，是物體在流體中相對運動產生與運動方向相反的力。阻力的方向和其所在流場的流速方向相反。一般摩擦力不隨速度變化而變化，但阻力會隨速度而變化。阻力可分成兩種：黏滯阻力與慣性阻力。當流體以層流移動時，其黏滯阻力 $F_{黏滯}$ 與流體速度成線性關係。以下式表示：

$$F_{黏滯} = 6\pi r\eta v \quad , \quad (1)$$

(1)式中 r 、 η 與 v 分別是球體的半徑、流體的黏滯係數、與流體相對於物體的速度。當流體相對於物體的速度較大時，流體不再那麼平順得流動而形成湍流。在湍流的情況，流體流過物體所產生的阻力稱為慣性阻力。慣性阻力與速度的平方成正比。以下式表示：

$$F_{慣性} = A \frac{\rho v^2}{2} \quad , \quad (2)$$

(2)式中 ρ 與 A 分別是流體的密度與流體流過物體截面積。至於流體的流動性質是屬於層流或湍流，與雷諾數的大小相關。流體力學中，**雷諾耳數**（Reynolds number）是流體慣性力與黏滯力比值的量度，它是一個無量綱量。雷諾數較小時，黏滯力對流場的影響大於慣性力，流場中流速的擾動會因黏滯力而衰減，流體流動穩定，為層流；反之，若雷諾數較大時，慣性力對流場的影響大於黏滯力，流體流動較不穩定，流速的微小變化容易發展、增強，形成紊亂、不規則的湍流場。雷諾數可由下式計算得到：

$$R_n = \frac{2rv}{\eta} \quad , \quad (3)$$

(3) 式中 $2r$ 為球體的直徑。其餘的符號如上所示。如果 $R_n < 1$ ，則阻力的性質為黏滯阻力，若 $R_n > 1000$ ，則阻力的性質主要為慣性阻力。

$$F = K_f C_d A \frac{\rho v^2}{2}, \quad (4)$$

(4) 式中 K_f 、 C_d 分別為有限尺寸修正係數與阻力係數。會有這兩個實驗參數，源自於(2)式中慣性阻力的計算適用條件為：小尺寸球體在無限寬廣的流體中移動。本研究中，流體被侷限在有限尺寸的圓柱管中，因此慣性阻力與流速的關係需要有這兩個修正項。(4)式中 K_f 與侷限流體的管徑與球體直徑的關係如下：

$$K_f = \frac{1}{1-ax^a}, \quad (5)$$

(5) 式中 $x = 2r/R$ 為球體直徑(2r)與侷限流體管徑(R)的比，如果 $x \leq 0.6$ 則 $a = 1.60$ 。在雷諾數的數值落在 $100 < R_n < 100000$ 的範圍內，吾人可經由(5)式近似修正 K_f 係數到 6% 以內。

再者，考慮懸吊鋼球的繩子阻力，其公式如下：

$$f = \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{R}{r'}\right) - 1} l \eta v, \quad (6)$$

其中 r' 為細線半徑， l 為細線的長度。(此公式也適用於圓柱體)

故一懸吊細線的小球，在流體中所受的總黏滯阻力 F 如下所示：

$$F = F_{黏滯} + f = 2\pi\eta v \left[3r + \frac{l}{\ln\left(\frac{R}{r'}\right) - 1} \right] \quad (7)$$

本研究用於測量物體在流體中相對運動所受之阻力的原理如下：

如圖 3 之力圖所示，力的平衡涉及流體的浮力、阻力。實驗進行時，水或甘油從上方往下流過鋼球時，處於平衡狀態時，可從電子秤稱重的變化得到物體所受阻力。

一開始，水尚未流動時：

以鋼球而言，

$$\text{球的重力} = \text{繩子拉力 1} + \text{浮力}$$

以砝碼而言，

$$\text{砝碼重力} = \text{繩子拉力 1} + \text{電子秤作用力(讀數)}$$

$$\text{電子秤作用力(讀數)} = \text{砝碼重力} - \text{球的重力} + \text{浮力}$$

若做歸零動作，則

$$\text{電子秤作用力(讀數)} = \text{砝碼重力} - \text{球的重力} + \text{浮力} = 0$$

水開始流動時：

以鋼球而言，

$$\text{球的重力} = \text{繩子拉力 2} + \text{浮力} + \text{阻力}$$

以砝碼而言，

$$\text{砝碼重力} = \text{繩子拉力 2} + \text{電子秤作用力(讀數)}$$

$$\text{電子秤作用力(讀數)} = \text{砝碼重力} - \text{球的重力} + \text{浮力} + \text{阻力}$$

但因為電子秤歸零，

∴ 電子秤作用力(讀數) = 物體所受的阻力

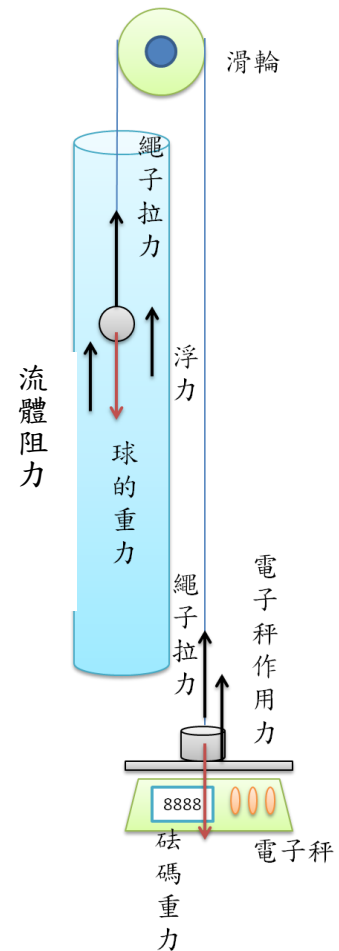


圖 3 物體及砝碼受力的情形

三、實驗過程

(一) 測量不同出水口徑的流體流量

表三 測量不同口徑之流量過程



圖 4 將出水口把手打開



圖 5 以燒杯舀起收集的水



圖 6 測量不同出水口徑，在 30 秒中所流出的水量

1. 先將塑膠板擋在水桶上方並留些許空隙。(避免水濺出)
2. 轉動出水口把手，使水流出 30 秒並關閉。
3. 測量所流出的水量。
4. 記錄水的溫度。

(二) 測量不同尺寸鋼球的直徑、圓柱鋼體的直徑與高度



圖 7 置放鋼球



圖 8 調整游標尺



圖 9 測量鋼球直徑



圖 10 手持圓柱



圖 11 測量圓柱直徑



圖 12 測量圓柱高度

1. 用游標尺測量鋼球的直徑。
2. 用游標尺測量圓柱之直徑與高度。


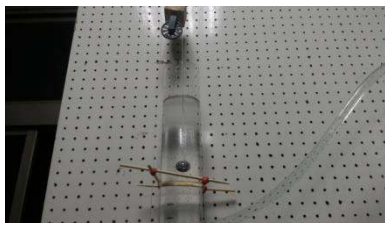

(三) 水在沒有物體時之流動特性測試

1. 將儀器架好後，準備攝影機。
2. 轉動出水口把手，並開始錄影。
3. 將紅墨水利用滴管滴入水中，並觀察水流流動特性。

(四) 水中有物體時之流動特性測試

1. 將儀器架好後(鋼球置於圓柱管中)，準備攝影機。
2. 轉動出水口把手，並開始錄影。
3. 將紅墨水利用滴管滴入水中，並觀察水流流動特性。

(五) 測量鋼球在流水中其慣性阻力與水的流速、鋼球半徑之關係

		
圖 13 歸零電子秤	圖 14 觀察並確定鋼球穩定沒有震盪	圖 15 打開出口後記錄電子秤減輕讀數

1. 使用強力膠黏合棉線與鋼球。
2. 將鋼球置於滑輪上並懸吊於水中，且靜止。
3. 將電子秤歸零。
4. 轉動出水口把手，讀數穩定後讀取電子秤讀數，並測量流體 30 秒中所流出的流量。

(六) 測量鋼製圓柱體在流水中其慣性阻力與水的流速、圓柱體的半徑、長度之關係



1. 使用強力膠黏合棉線與圓柱體。
2. 將圓柱體置於滑輪上並懸吊於水中，且靜止。
3. 將電子秤歸零。
4. 轉動出水口把手，穩定後讀取電子秤讀數，並測量流體 30 秒中所流出的流量。

(七) 測量鋼球在甘油中其黏滯阻力與甘油的流速、鋼球半徑之關係

其實驗步驟與實驗五相同。

(八) 測量鋼製圓柱體在甘油中其黏滯阻力與甘油的流速，圓柱體的半徑、及圓柱體的長度之關係

其實驗步驟與實驗六相同。

伍、研究結果與討論

一、水在圓柱管中流動特性測試結果

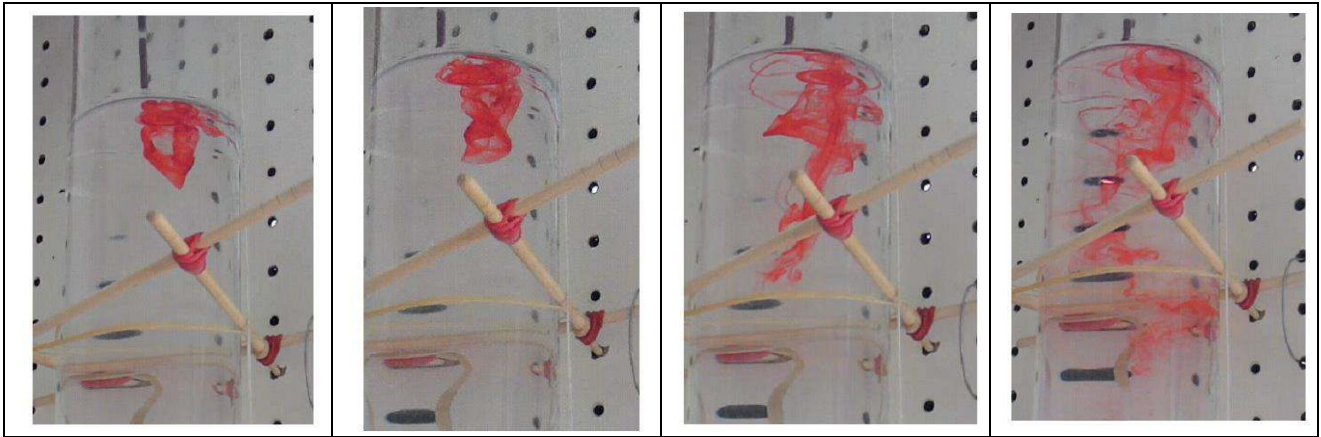


圖 19 圓柱管中沒有沉體時水的流動影像。

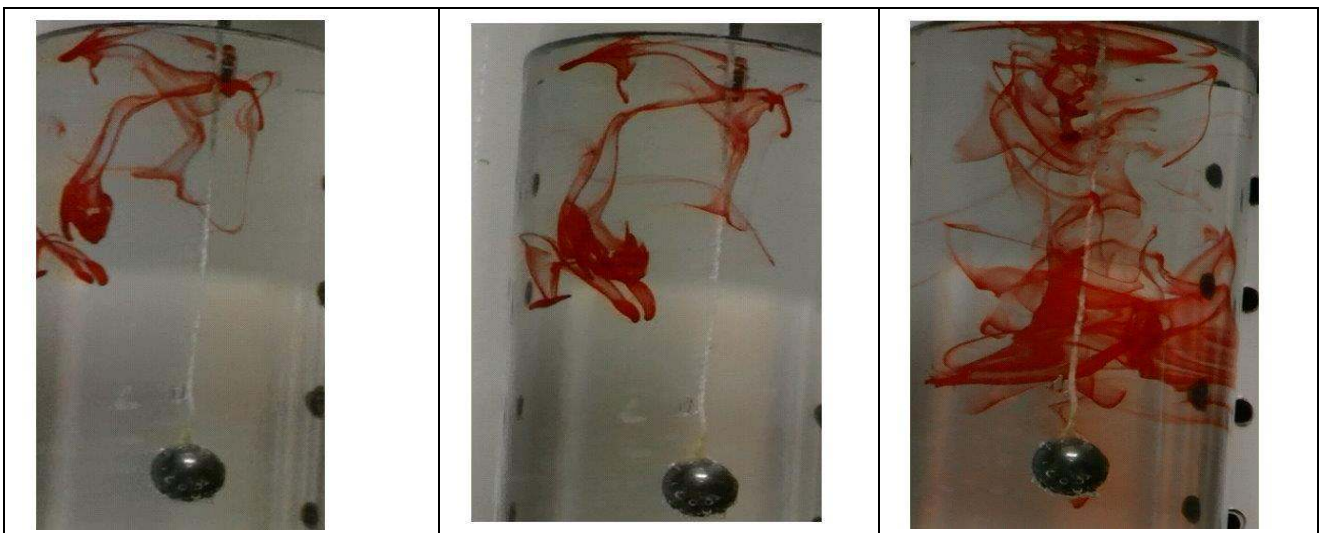


圖 20 圓柱管中有鋼球時水的流動影像。

水在圓柱管中的流動特性測試中，發現圓柱管中無論是否有沉體，從圖 19 與 20 所拍攝的影像知：水在圓柱管中的流動的性質屬於湍流。

二、鋼球在圓柱管中，慣性阻力與水的流速之關係

本研究使用4種不同半徑的鋼球，分別測量慣性阻力與流體流速關係。測量時水溫為17°C，其密度為998.7779 kg/m³，剪切黏度為0.001081 kg/(m-s)。以下為不同半徑的鋼球置於圓柱管中，利用本研究所設計的裝置測量慣性阻力與不同流速中的關係。水在圓柱管中的流速依流出的水量與出水口的口徑，根據每分鐘的出水量先計算出水口的流速 v_2 ，再依據下式計算得到圓柱管中的水流過鋼球的速度 v_1 ：

$$\because v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad \therefore v_1 = v_2 \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 \quad (8)$$

依據(3)式 $R = \frac{2r\rho v}{\eta}$ 求出雷諾數，發現雷諾數落在137~596的範圍。因此，水流的屬性應屬於湍流。所以我們依據(2)式 $F_{\text{慣性}} = A \frac{\rho v^2}{2}$ ，在鋼球半徑一樣的條件下，探討 $F_{\text{慣性}}$ 阻力與流速的關係。根據我們使用之鋼球的球徑與圓柱管的管徑，計算得到 $x \leq 0.6$ 。所以我們根據(5)式，計算出不同實驗中所使用之4種不同球徑鋼球的 K_f 值。最後根據(4)式，計算出阻力係數 C_d 值。以下列出實驗的數據、計算結果、與作圖。

依據文獻內容，必須扣除細線阻力，但因水的黏滯性與甘油比較起來相對小很多，因此可以忽略不計。

(一) 鋼球半徑 $r_3 = 0.635 \text{ cm}$

根據(5)式，鋼球半徑為 0.635 cm 之球體的 K_F 值為 1.1 。

表一、量測半徑為 0.635 cm 鋼球在水中之慣性阻力之相關數據。

鋼球半徑 (cm)	每分鐘水的流量 (ml/min)	出水口流速 (v_2) (cm/sec)	PVC管中水下降流速 (v_1) (cm/sec)	v_1^2 (cm/sec) ²	慣性阻力 (10^{-3} N)	雷諾數	阻力係數 C_d
0.635	2224	73.8	0.86	0.93	0.29	101	56.6
0.635	3804	323	1.47	2.17	0.49	173	32.2
0.635	5223	173	2.02	4.10	0.88	237	30.8
0.635	5238	174	2.03	4.12	0.98	238	34.0
0.635	6339	210	2.46	6.05	1.37	288	32.5

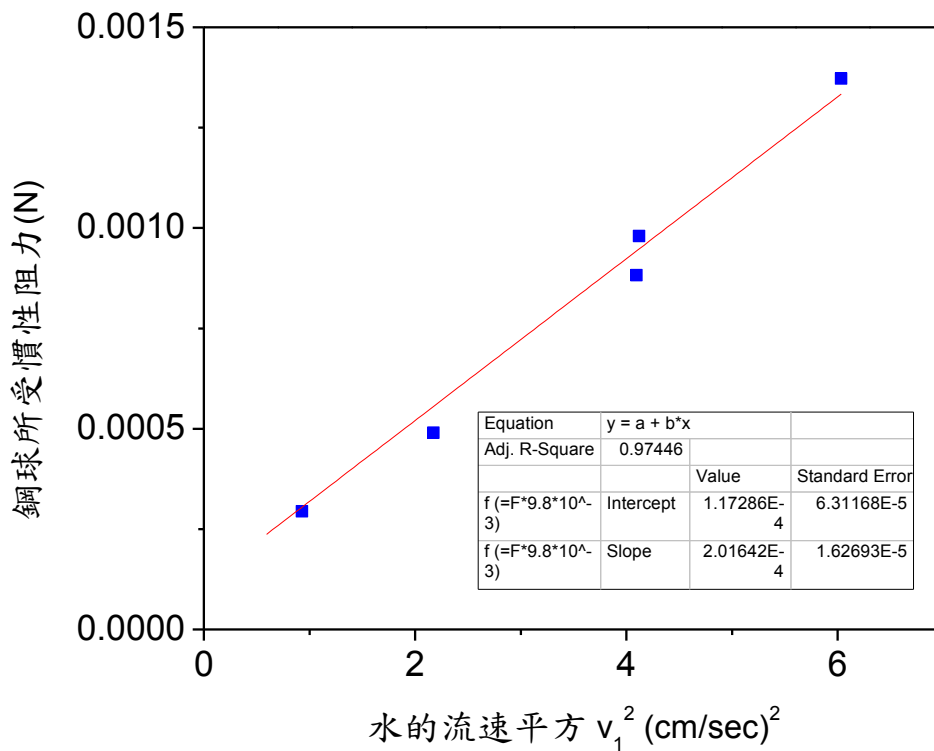


圖21 鋼球半徑 0.635 cm 之慣性阻力與水的流速 v_1 的平方之關係圖。

(二) 鋼球半徑 $r_3 = 0.955 \text{ cm}$

根據(5)式，球體半徑為 0.955 cm 之球體的 K_f 值為 1.2 。

表二、量測半徑為 0.955 cm 鋼球在水中之慣性阻力之相關數據。

鋼球半徑 (cm)	每分鐘出水口流量 (ml/min)	出水口流速 (v_2) (cm/sec)	PVC 管中水下降流速 (v_1) (cm/sec)	v_1^2 (cm/sec^2)	慣性阻力 (10^{-3} N)	雷諾數 R	阻力係數 C_d
0.955	2000	472	0.78	0.60	0.20	137	18.6
0.955	3465	460	1.34	1.80	0.49	237	15.5
0.955	4600	390	1.78	3.18	1.57	315	28.2
0.955	6725	223	2.61	6.79	2.25	460	18.9

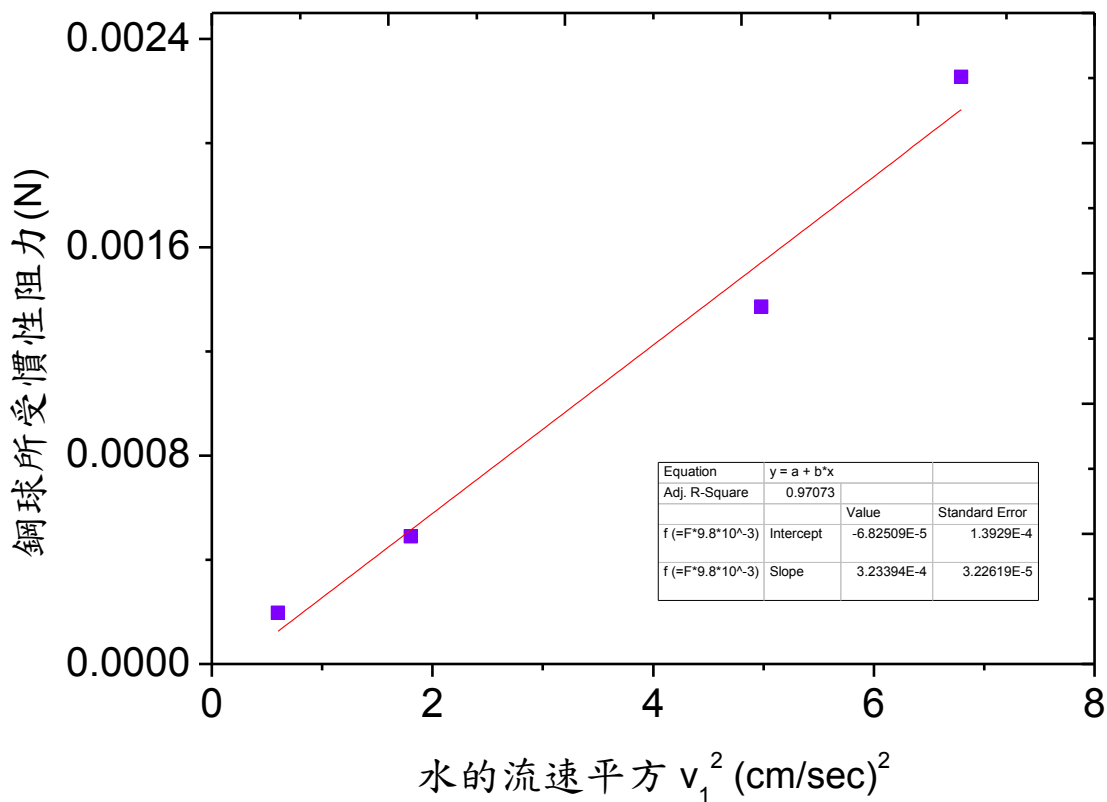


圖22 鋼球半徑 0.955 cm 之慣性阻力與水的流速 v_1 的平方之關係圖。

(三) 鋼球半徑 $r_3 = 1.105 \text{ cm}$

根據(5)式，球體半徑為1.105cm之球體的 K_f 值為1.3。

表三、量測半徑為 1.105 cm 鋼球在水中之慣性阻力之相關數據。

鋼球半徑 (cm)	每分鐘 出水口 流量 (ml/min)	出水口 流速 (v_2) (cm/sec)	PVC 管中 水下降流速 (v_1) (cm/sec)	v_1^2 (cm/sec) ²	慣性阻力 (10^{-3} N)	雷諾數 R	阻力 係數 C_d
1.105	3576	474	1.39	1.93	0.20	283	4.2
1.105	5408	459	1.88	3.54	0.59	383	6.7
1.105	5936	504	2.30	5.29	0.78	470	5.9
1.105	6612	219.	2.56	6.56	0.98	523	6.0

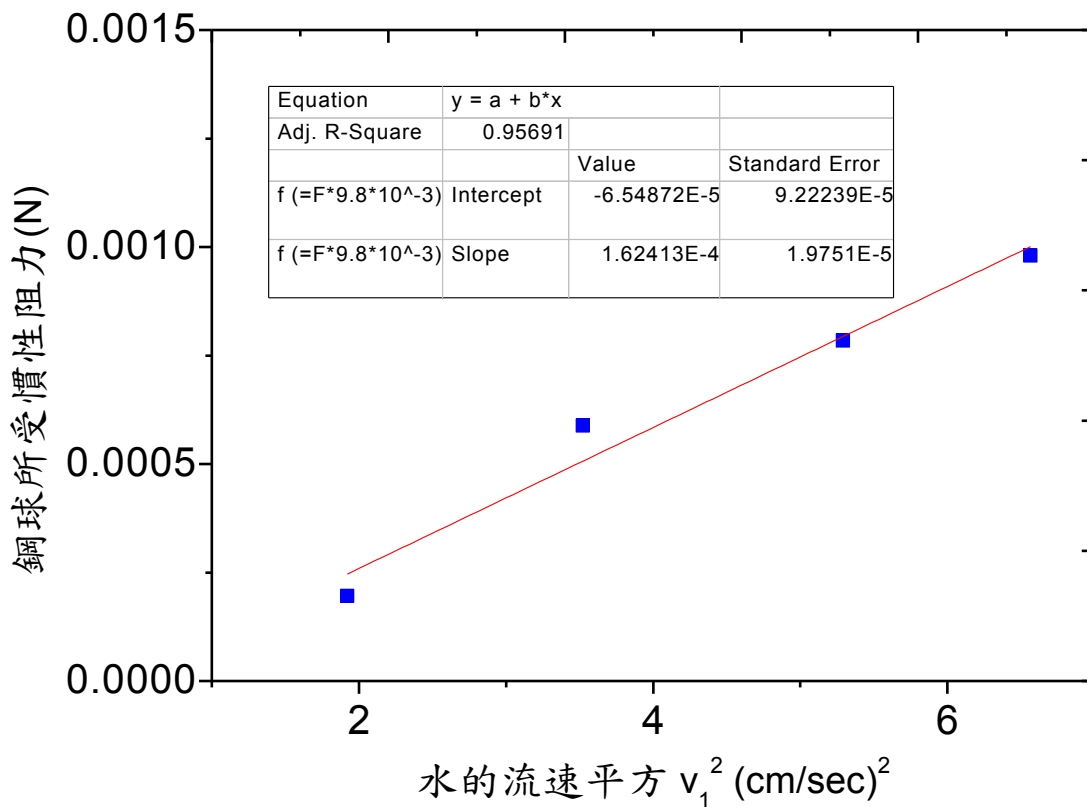


圖23 鋼球半徑1.105 cm之慣性阻力與水的流速 v_1 的平方之關係圖。

(四) 鋼球半徑 $r_3 = 1.27 \text{ cm}$

根據(5)式，球體半徑為 1.27cm 之球體的 K_f 值為 1.4 。

表四、量測半徑為 1.27 cm 鋼球在水中之慣性阻力之相關數據。

鋼球半徑 (cm)	每分鐘出水口流量 (ml/min)	出水口流速 (v_2) (cm/sec)	PVC管中水下降流速 (v_1) (cm/sec)	v_1^2 (cm/sec^2)	慣性阻力 (10^{-3} N)	雷諾數 R	阻力係數 C_d
1.27	1950	460	0.76	0.57	0.20	177	9.6
1.27	4126	350	1.60	2.56	1.57	375	17.2
1.27	4150	352	1.61	2.59	1.67	377	18.1
1.27	5680	482	2.20	4.84	3.14	517	18.2
1.27	6550	217	2.54	6.44	5.29	596	23.1

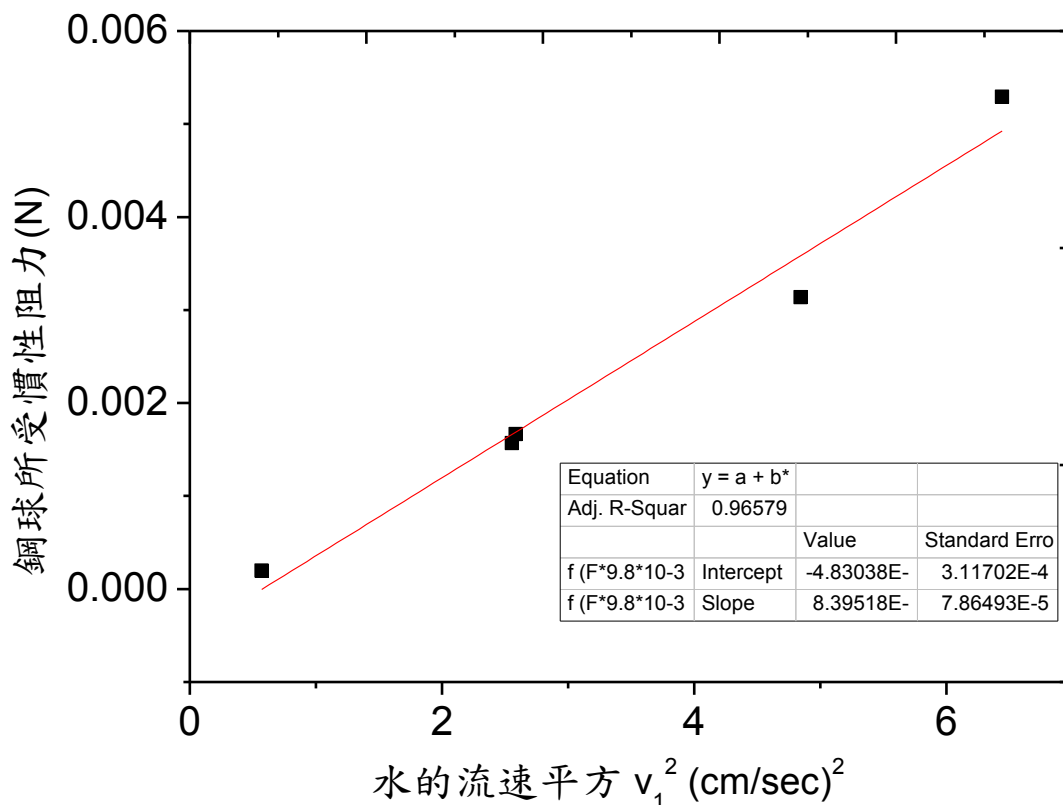


圖24 鋼球半徑 1.27 cm 之慣性阻力與水的流速 v_1 的平方之關係圖。

從圖21-24發現水的流速平方與慣性阻力如(2)式呈線性的關係。

三、在固定流速下，鋼球在圓柱管中，鋼球所受之慣性阻力與鋼球半徑之關係

依據(2)式，我們選擇一樣的出水口半徑 (0.4 cm)，即控制一樣的流速，測量鋼球半徑與水流過鋼球的慣性阻力。其結果列於下表，分析鋼球半徑的平方(即流體流過物體截面積)與 $F_{慣性}$ 阻力關係並作圖。

表五、量測不同半徑的鋼球在水中慣性阻力之相關數據。

鋼球半徑 r_3 (cm)	r_3^2 (cm^2)	慣性阻力 (10^{-3} N)	雷諾數	阻力係數 C_d
0.635	0.4032	0.39	296	8.81
0.955	0.9120	1.57	462	13.1
1.105	1.2210	2.16	519	13.4
1.27	1.6129	3.14	517	18.2

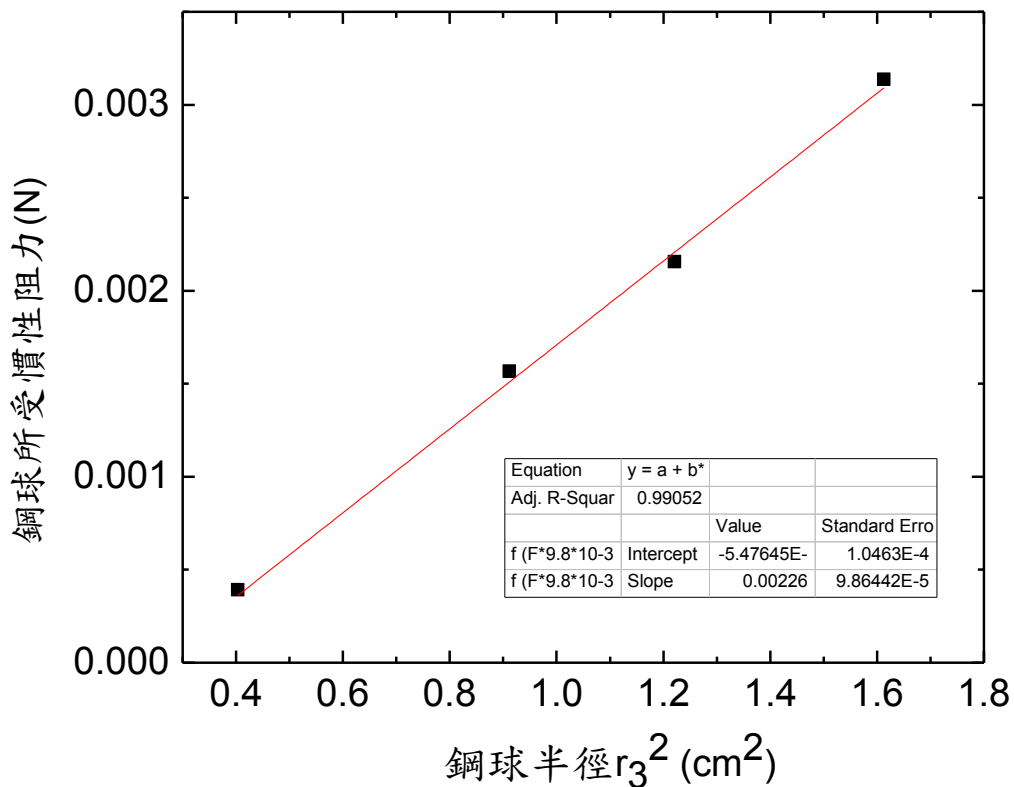


圖 25 固定流速，鋼球半徑 r_3 平方與慣性阻力之關係圖。

從圖 25 發現鋼球半徑 r_3 的平方與慣性阻力如(2)式呈線性的關係。

四、圓柱鋼體半徑固定，在圓柱管中，圓柱體所受之慣性阻力與水的流速之關係

圓柱鋼體半徑 $r_3 = 0.95 \text{ cm}$

根據(5)式，圓柱鋼體半徑 0.95 cm 高度 4.05 cm 的 K_f 值為 2.23。其結果列於下表，分析水流流速與 $F_{\text{慣性}}$ 阻力關係並作圖。從圖 26 發現水的流速平方與慣性阻力如(2)式亦呈線性的關係。

表六、量測半徑 0.95 cm 高度 4.05 cm 的圓柱鋼體在水中慣性阻力之相關數據。

圓柱鋼體半徑 (cm)	每分鐘出水口流量 (ml/min)	出水口流速 (v_2) (cm/sec)	PVC 管中水下降流速 (v_1) (cm/sec)	v_1^2 (cm/sec) ²	慣性阻力 (10^{-3} N)	雷諾數	阻力係數 C_d
0.95	3200	271	1.24	1.53	0.88	218	33.3
0.95	3560	472	1.38	1.90	1.08	242	32.7
0.95	5236	444	1.82	3.31	1.67	319	29.2
0.95	5906	501	2.29	5.24	2.45	402	27.0
0.95	6550	109	2.54	6.44	2.84	446	25.5

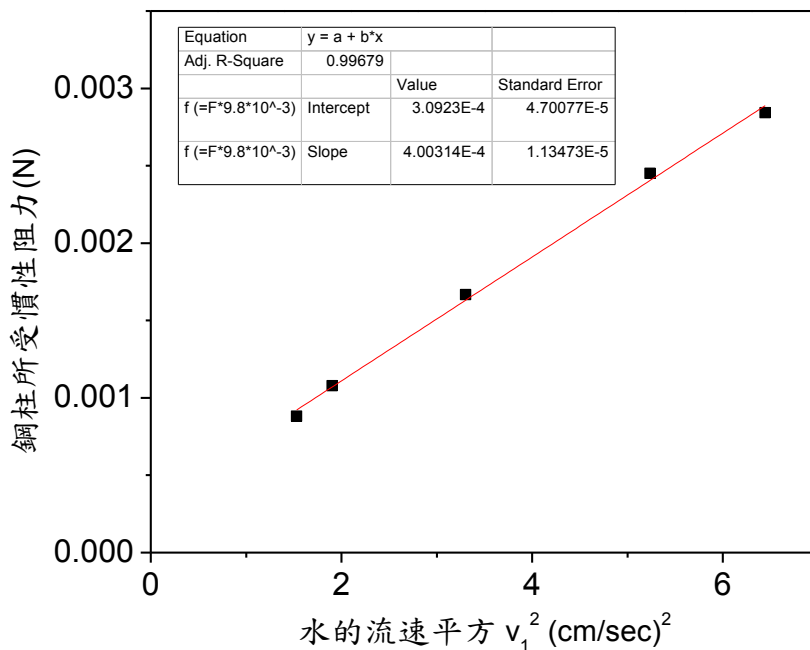


圖 26 圓柱半徑 0.95 cm 高度 4.05 cm 之慣性阻力與水的流速 v_1 的平方之關係圖。

從圖 26 發現水的流速平方與慣性阻力如(2)式亦呈線性的關係。

五、在固定流速下，圓柱鋼體在在圓柱水管中，其所受之慣性阻力與圓柱鋼體半徑之關係

依據(2)式，我們控制水流一樣的流速，測量圓柱鋼體半徑與水流過圓柱鋼體的慣性阻力。其結果列於下表，分析圓柱鋼體半徑的平方(即流體流過物體截面積)與 $F_{慣性}$ 阻力關係並作圖。

從圖 27 發現圓柱鋼體半徑 r_3 的平方與慣性阻力如(2)式呈線性的關係。

表七、量測不同半徑高度同為 4.05 cm 的圓柱鋼體在水中慣性阻力之相關數據。

圓柱鋼體半徑 r_3 (cm)	r_3^2 (cm ²)	慣性阻力 (10 ⁻³ N)	雷諾數	阻力係數 C_d
0.4	0.16	0.59	168	43.4
0.45	0.20	0.69	186	40.6
0.6	0.36	0.98	250	31.1
0.8	0.64	1.96	332	33.4
0.95	0.90	2.45	402	27.0

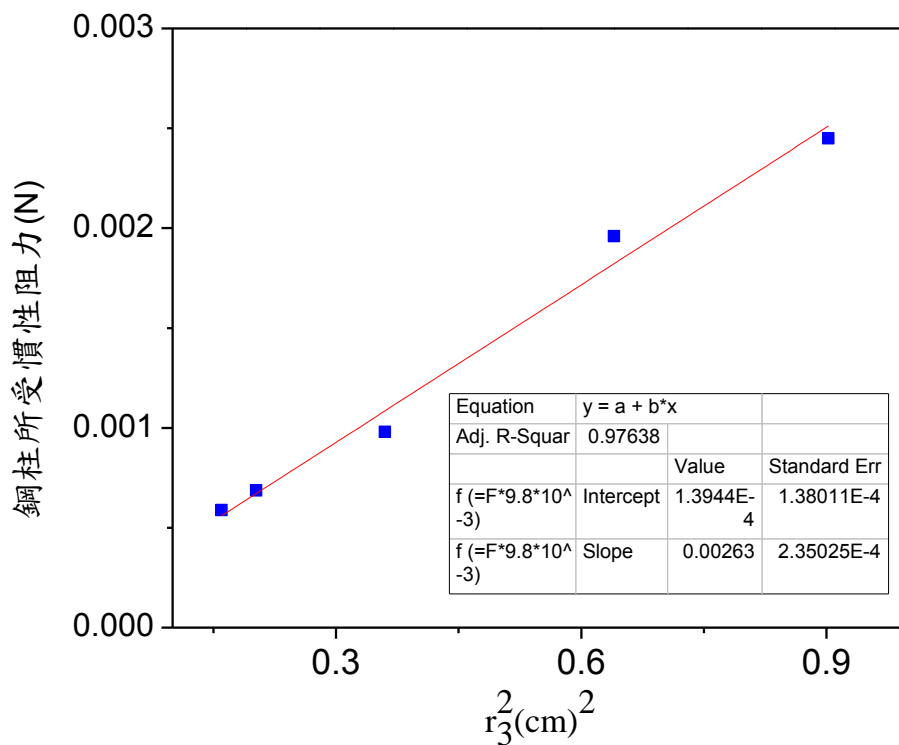


圖 27 固定流速，鋼柱半徑 r_3 平方與慣性阻力之關係圖。

從圖 27 發現圓柱鋼體半徑 r_3 的平方與慣性阻力如(2)式呈線性的關係。

六、在固定圓柱鋼體的半徑及水的流速情形下，測量圓柱鋼體在圓柱管中，其所受之慣性阻力與圓柱鋼體長度之關係

r_2 ：出水口半徑； r_3 ：圓柱鋼體半徑

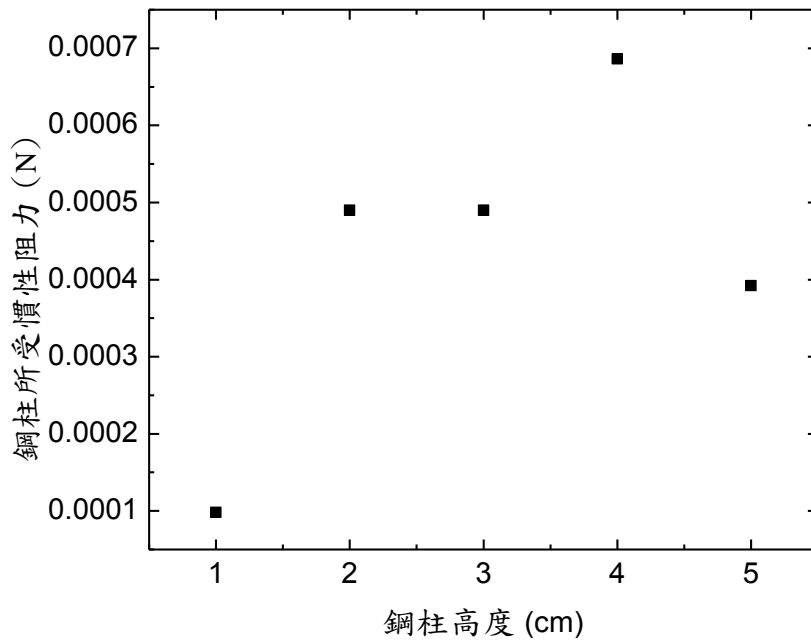


圖 28 固定流速($r_2 = 0.2$ cm)及鋼柱半徑($r_3 = 0.6$ cm)，鋼柱高度與慣性阻力之關係圖 I。

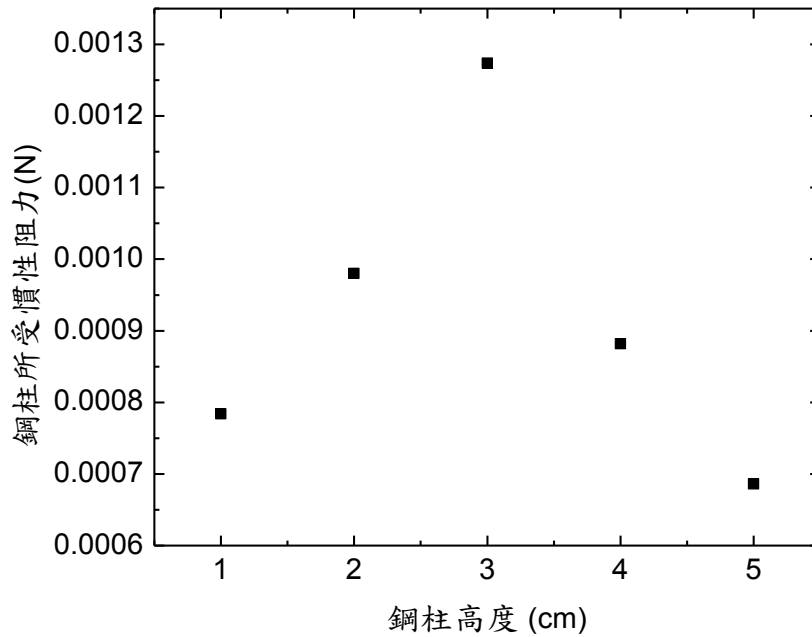


圖 29 固定流速($r_2 = 0.25$ cm)及鋼柱半徑($r_3 = 0.6$ cm)，鋼柱高度與慣性阻力之關係圖 II。

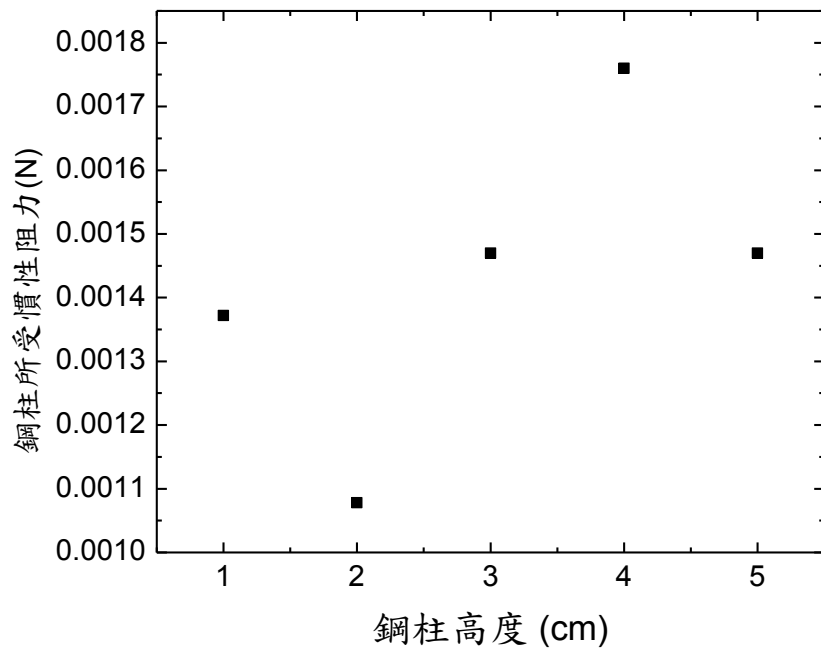


圖 30 固定流速($r_2 = 0.4$ cm)及鋼柱半徑($r_3 = 0.6$ cm)，鋼柱高度與慣性阻力之關係圖 III。

由圖 28~30 可以發現鋼柱高度與其所受之慣性阻力似乎無明顯的線性關係。

。

七、不同半徑鋼球在圓柱管中，所受甘油的黏滯阻力與甘油的流速之關係。

以下甘油的黏滯阻力已依照(7)式扣除細線阻力。

表八、量測半徑分別為 0.35 cm 與 0.635 cm 鋼球在甘油中之黏滯阻力之相關數據。

鋼球半徑 (cm)	每分鐘甘油流量 (ml/min)	甘油在孔蓋出口流速 (v ₂) (cm/sec)	PVC 管中甘油下降流速 (v ₁) (cm/sec)	黏滯阻力 (10 ⁻³ N)	雷諾數	阻力係數 C _d
0.35	140	74	0.21	1.19	0.013	3002
0.35	518	122	0.76	4.90	0.048	3246
0.35	1291	171	1.90	11.10	0.120	3026
0.35	2001	170	2.94	24.85	0.180	3991
0.35	3231	190	4.75	37.43	0.300	3780
0.635	107	57	0.16	1.89	0.018	1307
0.635	441	104	0.65	7.52	0.074	1268
0.635	1138	151	1.67	20.44	0.190	1325
0.635	2255	191	3.31	43.88	0.380	1418
0.635	3154	186	4.64	49.45	0.530	1184

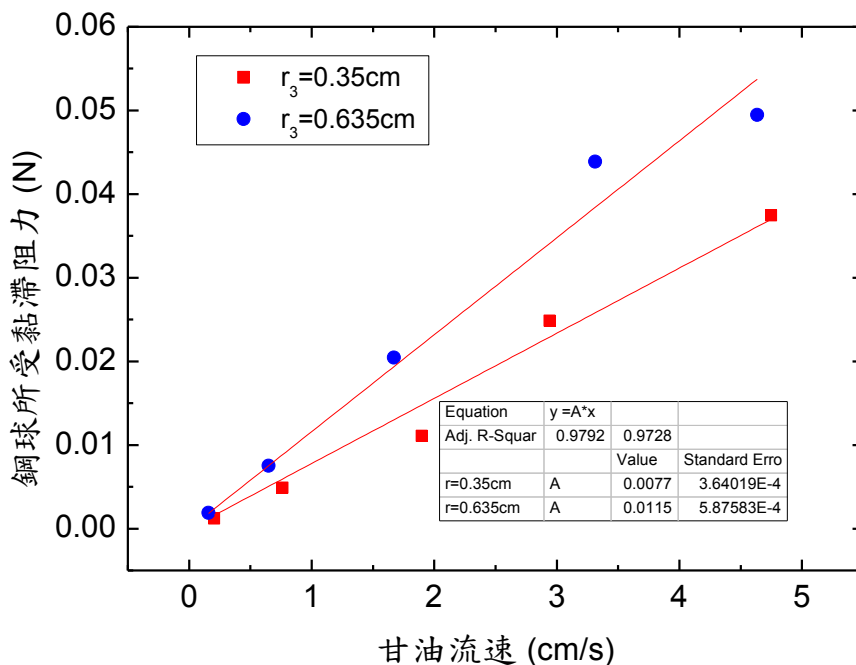


圖 31 不同鋼球半徑，黏滯阻力與甘油流速之關係圖。

由圖 31 可以發現鋼球所受黏滯阻力與甘油流速是成正比，且鋼球半徑越大，線性分析的斜率也越大，行為與(1)式相符。

八、固定甘油流速，鋼球在圓柱管中，所受甘油的黏滯阻力與鋼球半徑之關係。

表九、量測不同半徑的鋼球在甘油中黏滯阻力之相關數據。

圓球鋼體半徑 r_3 (cm)	黏滯阻力 (10^{-3} N)	雷諾數	阻力係數 C_d
0.35	4.90	0.048	3246
0.635	7.52	0.074	1268
1.105	12.56	0.200	201
1.27	16.39	0.219	98

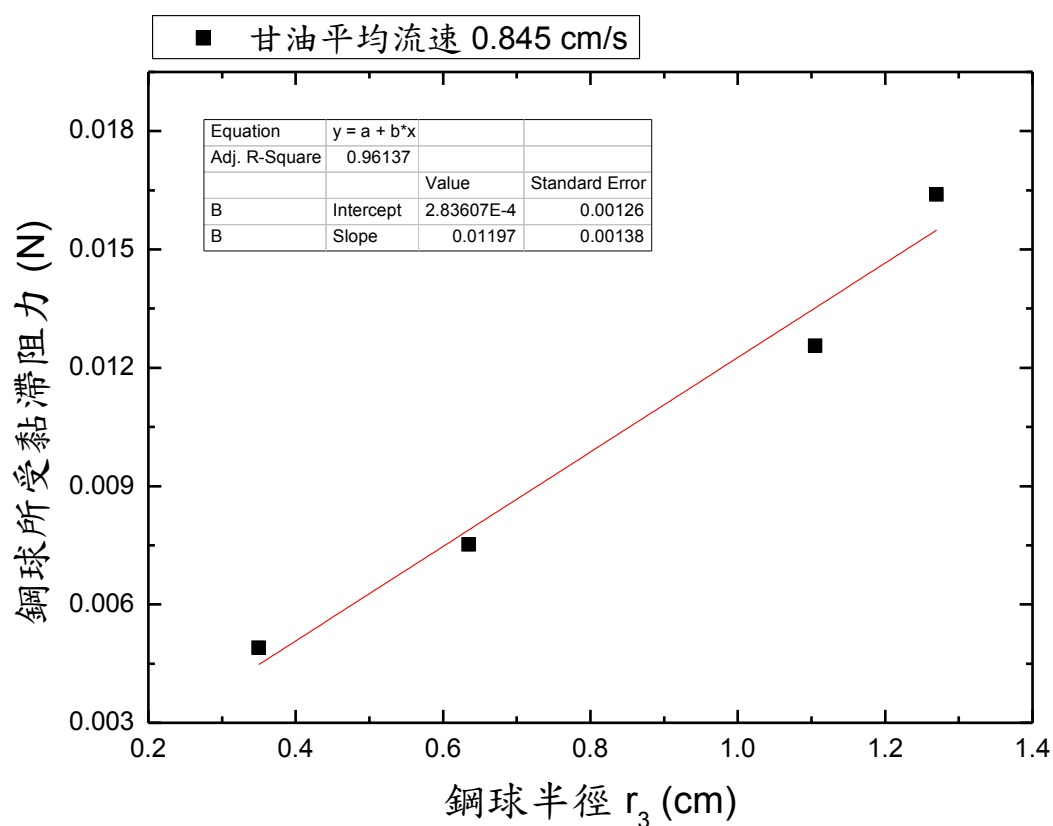


圖 32 相同流速下，黏滯阻力與鋼球半徑參數之關係圖。

由圖 32 可以發現鋼球所受黏滯阻力與鋼球半徑參數也是成線性關係。

九、長度及半徑固定下，圓柱鋼體在圓柱管中，所受甘油的黏滯阻力與甘油的流速之關係。

表十、量測半徑分別為 0.45 cm 與 0.6 cm 的圓柱鋼體在甘油中黏滯阻力之相關數據。

圓柱鋼體半徑 (cm)	每分鐘甘油流量 (ml/min)	甘油在孔蓋出口流速(v_2) (cm/sec)	PVC 管中甘油下降流速(v_1) (cm/sec)	黏滯阻力 (10^{-3} N)	雷諾數	阻力係數 C_d
0.45	196	104	0.29	2.08	0.023	2007
0.45	681	160	1.00	8.14	0.081	2205
0.45	1421	188	2.09	18.72	0.168	2380
0.45	2882	245	4.23	34.99	0.341	2232
0.45	3791	223	5.57	45.20	0.448	2200
0.6	257	137	0.38	3.27	0.004	1157
0.6	634	149	0.93	11.86	0.014	1587
0.6	1532	203	2.25	26.84	0.032	1501
0.6	2607	221	3.83	44.55	0.053	1471
0.6	3481	205	5.12	69.44	0.081	1676

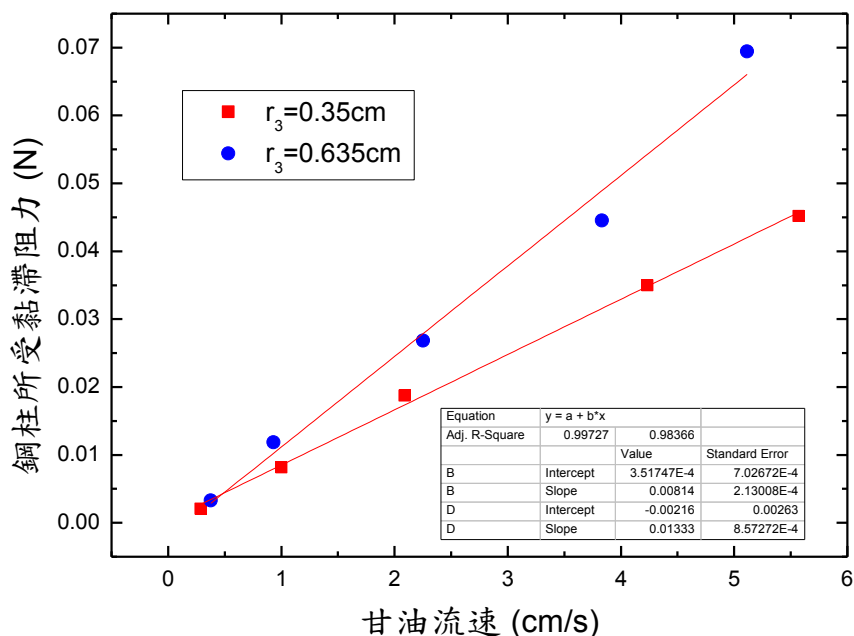


圖 33 鋼柱半徑 0.45 及 0.65cm 相同長度下，其黏滯阻力與甘油流速之關係圖。

由圖可以發現鋼柱所受黏滯阻力與甘油流速成線性關係。

十、在圓柱鋼體長度及甘油流速固定下，其在圓柱管中，所受甘油的黏滯阻力與圓柱鋼體半徑之關係。

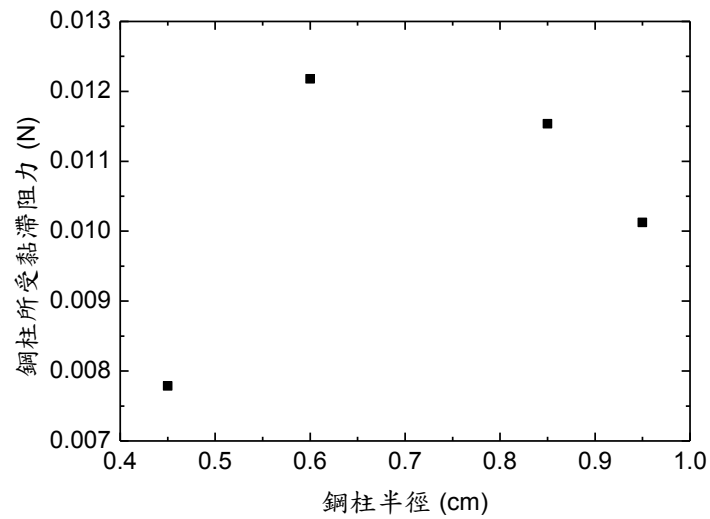


圖 34 相同鋼柱長度，固定甘油流速下，黏滯阻力與鋼柱半徑之關係圖。

由圖 34 得知黏滯阻力與鋼柱半徑並不會成線性關係。

十一、在固定圓柱鋼體的半徑及甘油的流速情形下，測量圓柱鋼體在圓柱管中，其所受之黏滯阻力與圓柱鋼體長度之關係

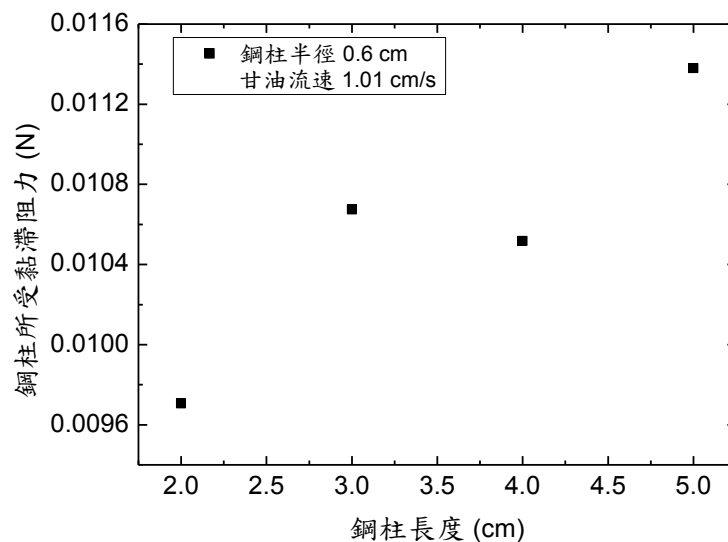


圖 35 固定甘油流速(1.01 cm/s)，及鋼柱半徑(0.6 cm)，黏滯阻力與鋼柱長度之關係圖。

由圖 35 得知，鋼柱高度與其所受之黏滯阻力似乎無明顯的線性關係。

陸、結論

- 一、本研究設計了一套簡易測量物體於流體中相對運動所受阻力的裝置，能夠藉由電子秤讀數的變化，迅速讀出物體於流體中相對運動所受的阻力。
- 二、球體於湍流中所受到的慣性阻力為 $F = K_f C_d A \frac{\rho v^2}{2}$ ，與物體截面積 A 及流速 v 的平方成正比。由不同半徑鋼球的實驗結果與數據的擬合可以發現:在相同截面積 A 時，慣性阻力與水相對於鋼球的流速的平方 v^2 呈線性關係；控制水相對於鋼球的流速 v 時，慣性阻力與鋼球半徑的平方 r^2 (即水流過鋼球的最大截面積)亦呈線性關係。
- 三、同樣湍流的情況下，當物體為圓柱鋼體時，實驗的結果與數據的擬合，與物體為鋼球時的分析結果類似。
- 四、在層流的情形下，本實驗發現:當物體為球體或圓柱體時，物體所受黏滯力分別與物體之半徑大小和速度成正比。
- 五、實驗結果顯示本研究的創新實驗設計，提供了一個簡易測量物體於流體中相對運動所受之阻力的有效方法，且此設計不管在湍流或層流的條件下皆適用。

柒、參考資料

- 一、水的黏度與密度（無日期）。維基百科。2015年1月25日，取自：
<http://www.viscopedia.com/viscosity-tables/substances/water/>
- 二、Clift, R., Grace, J. R., and Weber, M. E. (1978). Drops, and Particles. p. 226, Academic Press.
- 三、洪偲璋等，2011年，”沖沖沖！石頭石頭我不怕～探討水的力量對大自然的災害及其防治之道”，中華民國第51屆中小學科學展覽會 國中組 地球科學科，國立台灣科學教育館，台北。
- 四、The concept of viscosity（無日期）。2015年1月25日，取自：
<http://www.columbia.edu/itc/ldeo/lackner/E4900/Themelis3.pdf>
- 五、Drag (Physics)（無日期）。維基百科。2015年1月25日，取自：
[http://en.wikipedia.org/wiki/Drag_\(physics\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Drag_(physics))
- 六、Dynamic viscosity of liquid water from 0° C to 100°C（無日期）。2015年2月25日，取自：
http://www.vaxasoftware.com/doc_eduen/qui/viscoh2o.pdf
- 七、Happel, J. and Brenner H. (1958). J. Fluid Mechanics 4, 195-213.
- 八、Happel, J. and Brenner H. (1983). Low Reynolds Number Hydrodynamics, Martinus, Nijhoff Publishers.
- 九、Scott A. Shearer, Jeremy R. Hudson, ”Fluid Mechanics Stokes law Viscosity”, Measurement Laboratory Investigation No. 3.

【評語】 030106

實驗設計很有趣，所引用的物理機制也恰當，建議底部流速可以做穩定的變因控制及加入流體討論。分析與觀察的方式很仔細，加油。