

2015 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 160028
參展科別 物理與天文學
作品名稱 球形浮體於液面弧度微動力研究
得獎獎項 大會獎：四等獎

就讀學校 臺北市立麗山高級中學
指導教師 吳明德、徐志成
作者姓名 陳志銘、林家蔚

關鍵字 電流天平(current balance)、
表面張力(Surface tension)、弧面(Arc)

作者簡介



大家好，我是陳志銘，目前就讀於麗山高中三年級。時光總在人們不注意時悄悄溜走，沒想到進行物理專題研究已經快兩年了，近兩年的時間讓我有許多成長，無論是知識的增長還是實驗的分析，都讓我覺得花的時間是值得的。

高三的面對學業與專題之間的拉鋸總是讓我心裡很掙扎，也曾想過放棄，但看到在我們的堅持之下實驗終於開花結果讓我決定堅持下去，我也很高興當初自己並沒有放棄這個機會。最後非常感謝這段時間老師們的教導與陪伴，讓我專題路上受益良多。



我是林家蔚，麗山高中三年級生

在實驗室從白天做實驗做到晚上 10 點，從太陽東升做海報到太陽西沉後獨自一人回班級教室收東西，這些獨特的經驗都是比過科展的人才了解的。這一路走來，我沒有後悔，甚至在升學考試和科展的抉擇中，毫不猶豫的就選擇科展，因為，人生只有這一次機會，對自己的研究付出，只為了在科展中有最好的表現。

球形浮體於液面弧度微動力研究

摘要

不同於歷屆科展使用如浮沉子(2)、硬幣(3)、試管(5)等”沉體”在”凹”水面上對表面張力做研究，我們使用乒乓球作為”浮體”並且於”凸”水面上做實驗，過去研究 cheerios effect(6)的實驗多使用簡化的模型，忽略了沉體兩側的作用力只考慮沉體與容器邊壁的作用力，因此，我們強調的是，討論浮體兩側液面上因接觸角的差異所產生的水平側向力，並使用電流天平直接量測水平側向力的大小，我們釋放浮體使用影格分析法研究浮體的運動，最後我們得知浮體於液面上運動的機制。

Abstract

We use the “Ping-Pong” to be the “floating” object to conduct the experiments on convex meniscus different from the previous science fairs to use the “sinking object” like Cartesian diver (2), the coin (3) and test tube (5) to conduct the experiments on the concave meniscus. The research of the previous science fairs only considered the force between the sinking object and the periphery of the container, neglecting the difference of the force act on the sinking object. Consequently, our research emphasize that the different vertical forces act on the floating object and we use the ampere balance to directly measure the forces. At last, we adopt the frame analysis to analyze the motion of the Ping-Pong.

壹、前言

一、研究動機

早上漫不經心地吃著麥片粥時，你是否曾注意到這個顛覆大家想法的現象——在未滿容器中，呈凹弧面的水面上浮體會往較高的邊緣移動，而在裝滿水的容器中，浮體在凸弧度的液面上會移動到頂點。這個看似平淡無奇的事實，卻蘊含了許多有趣的真相，讓我們決定著手進行實驗；根據拍照觀察的結果，浮體在液面上會形成一個向下的接觸角進而產生一個向下的力，這與一般教科書以及教學網頁上都會將表面張力畫成向上力相違背，所以我們決定做更多的延伸實驗。

二、研究目的

- (一) 探討不同弧度凸液面與接觸角的關係
- (二) 分析浮體於不同弧度凸液面上運動的現象
- (三) 藉由電流天秤測量同弧度不同位置作用於浮體上水平力的大小

貳、研究方法與過程

一、研究設備

表 1、研究設備

器材名稱	數量	目的	備註
1.電源供應器	2	電流天秤以及磁力置球	
2.透明圓筒容器	1	盛裝溶液形成液面	直徑 14.3cm
3.電流天秤	1	量測水平力	
4.乒乓球	3	浮體	40.00 毫米 重 2.6~2.8 克
5.鐵架	1	固定位置	
6.感應線圈	1	磁力置球	
7.游標尺	1	測量長度	
8.相機	2	影像分析法	
9.電腦軟體 Excel	1	分析量測	
10.Logger Pro 3.8.6	1	影片分析程式	
11.細繩	1	連接浮體與電流天平	材質為頭髮

二、實驗裝置

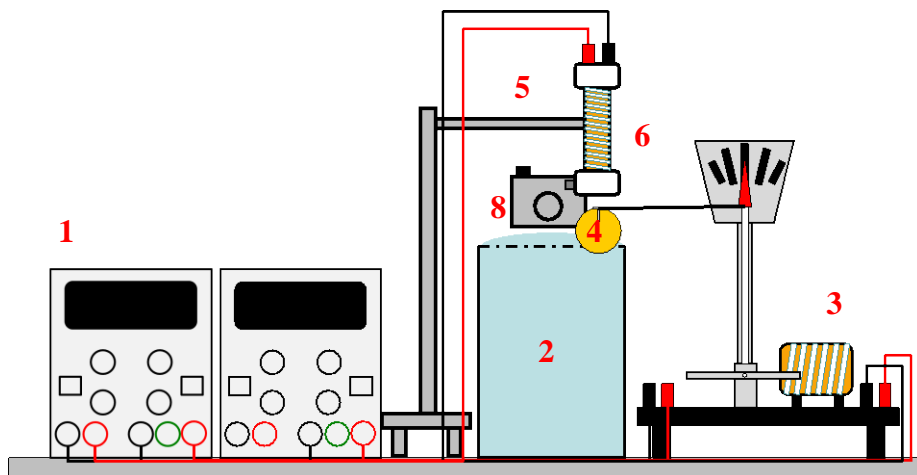


圖 1 研究設備示意與實際圖

三、實驗原理

(一)表面張力

在液體內部，分子在每個方向都受到鄰近分子的吸引力，合力為零；但液體與氣體的界面上的液體分子，各個方向所受到的引力是不均衡的，因為液體的內聚力遠大於與空氣分子的吸引力，使其有縮小液面面積的趨勢；沉體(密度大於水)漂浮在水面上會讓弧面下凹，表面張力欲要使水面恢復最小表面積，所以會產生在兩側斜向上的力(如圖 2)，同時表面張力的分立會撐起沉體。

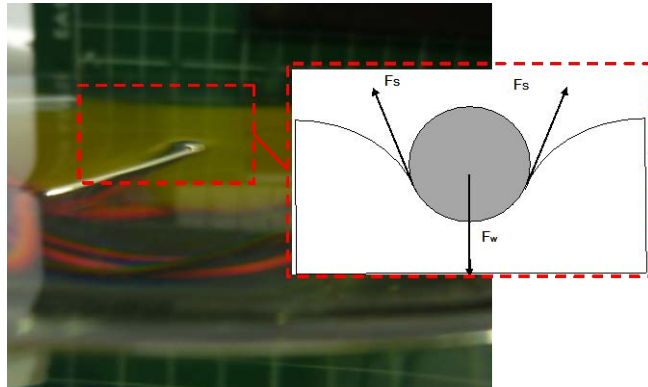


圖 2 沉體漂浮在液面上物體受力示意圖

(二)水的弧面

水弧面的形成受到附壁力與內聚力合力的影響，附壁力大小通常是固定的，能改變的只有內聚力的大小，以凹面能變化的範圍只有接近容器口與些微水量時；凸面則可以透過加入水量改變高度、進而改變內聚力方向，所以相對於凹弧度來說凸弧度較容易控制，所以我們選擇凸弧度做實驗。

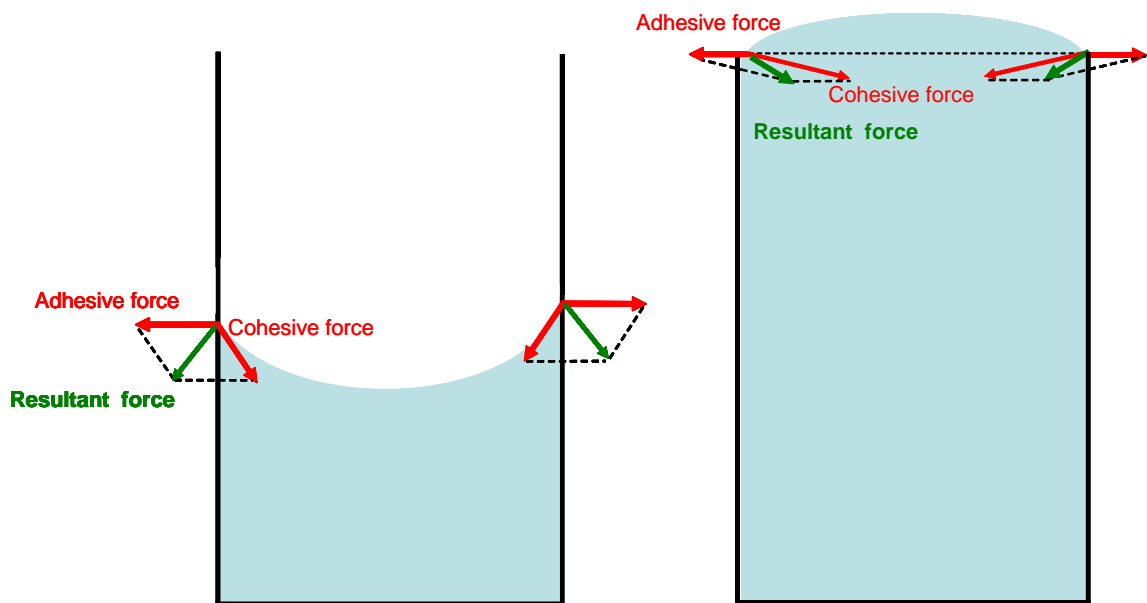


圖 3 凹、凸弧面示意圖

(三) Cheerios effect

Cheerios effect 是指物體於不同弧面上接觸角不同所造成的現象：當水面呈現下凹的曲線、漂浮物與水的接觸角為銳角時，會受到引力作用而往四周移動；當水面呈上凸的曲線，漂浮物與水面接觸角度銳角而與杯子排斥。

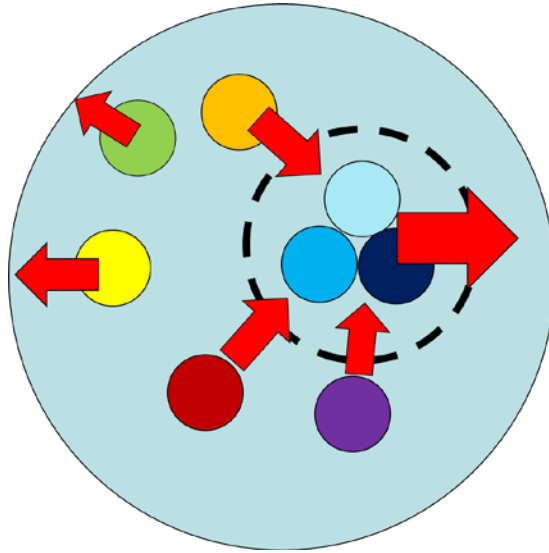


圖 4 Cheerios effect 示意圖

(四) 電流與拉力推導

$$F_{horizontal} \times l \cos \phi = F_B \times a \cos \phi \dots \dots F_B = iLB$$

$$\Rightarrow F_{horizontal} = \frac{iLB \times \phi}{l}$$

$$\Rightarrow F_{horizontal} \propto i$$

$R=0.02(\text{m})$
$r=\sqrt{R^2-h^2}$
$L=0.0445(\text{m})$
$B=148(\mu\text{T})$
$l=0.1415(\text{m})$
$a=0.08075(\text{m})$

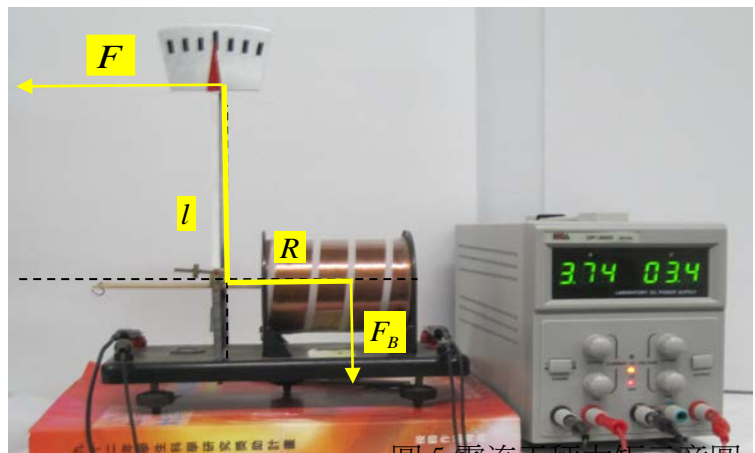


圖 5 電流天秤力矩示意圖

(五)原理假設——接觸角造成表面水平力

我們觀察浮體在水面上的情形，發現浮體會將兩側的水面拉高，水面如果保持最小表面積，就會使浮體受到斜向下的力。我們透過影像紀錄發現浮體兩側接觸角的大小不同，故猜測是兩側接觸角的差異造成了浮體的水平力，所以我們建立了以下的模組：

水面上的表面張力皆為 γ ，球體兩邊接觸角的俯角分別為 φ 、 θ ，浮體半徑是 R 是浸入水面的有效半徑是 r ，經過積分的結果我們得到浮體受到向中央移動的水平力大小為

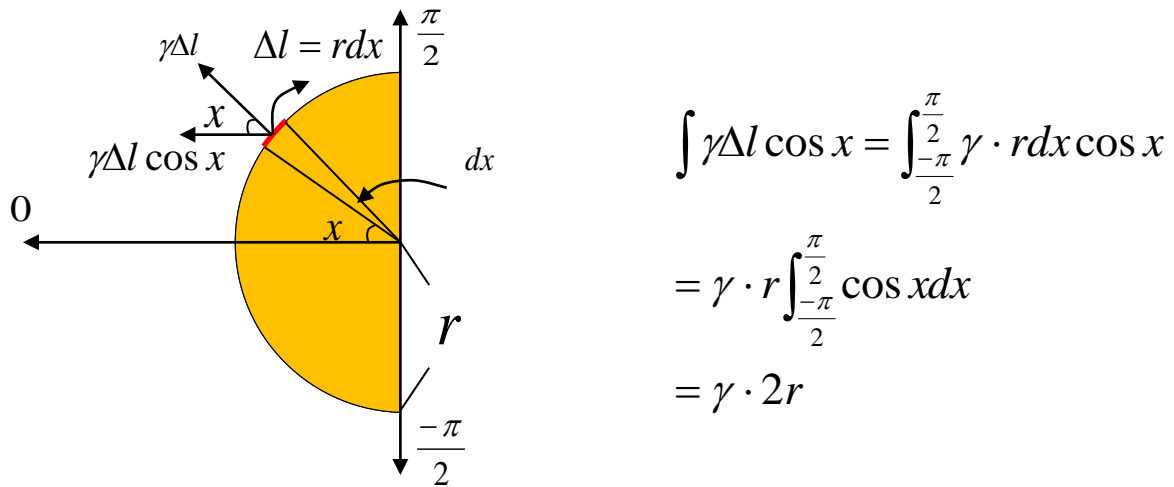


圖 6 浮體在水面上運動的俯視圖：紅色部分為 Δl

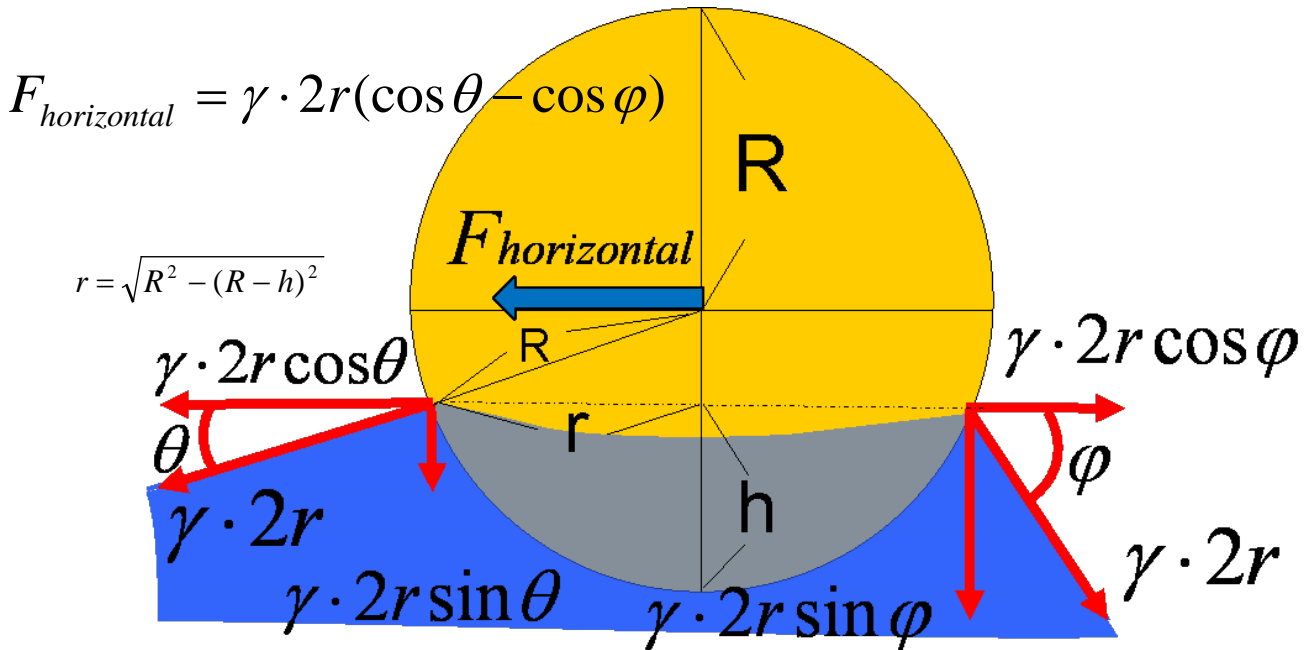


圖 7 浮體在水面上的力學模組

四、實驗方法

浮體在固定位置前，會沿著水面漂向高處，為了避免干擾到實驗的進行，本實驗採用了磁力定位法：在乒乓球上方釘入釘子，將線圈通以電流，固定實驗的初始位置，改善了實驗的精確性。

前置實驗 電流天秤之電流與力之關係

Step1：將電流天秤校準至平衡狀態

Step2：在電流天秤左端放置砝碼，並通以電流使其達成平衡

Step3：紀錄電流大小與質量之關係



圖 8 通電後與砝碼達成平衡

(一)實驗一 不同凸弧度液面與兩側接觸角之關係

Step1：加入不同水量改變弧度，將表面拍下後做影像分析

Step2：將浮體放置水面上，對磁力定位裝置通以電流，固定浮體之位置

Step3：拍照紀錄接觸角 θ_1 、 φ_1

Step4：改變固定距離並拍照紀錄接觸角 θ_2 、 φ_2

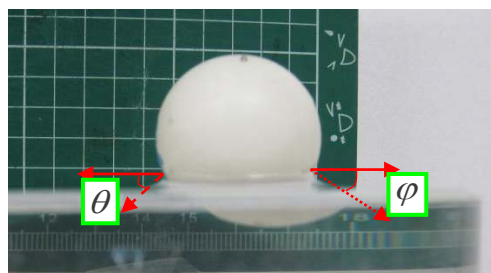


圖 9 拍照紀錄接觸角 θ 、 φ

(二)實驗二 利用影像分析浮體在水面上受微動力影響之運動狀態

Step1：將磁力定位裝置通以電流，固定浮體之初始位置

Step2：開啟錄影機紀錄浮體之運動過程

Step3：關閉磁力置球裝置之電源，使浮體自由運動，當浮體靜止後停止錄影

Step4：將檔案輸入到 Logger Pro ，進行位置、速度、加速度之分析

Step5：將數據點輸入至 Excel 後整理數據並繪製成圖表

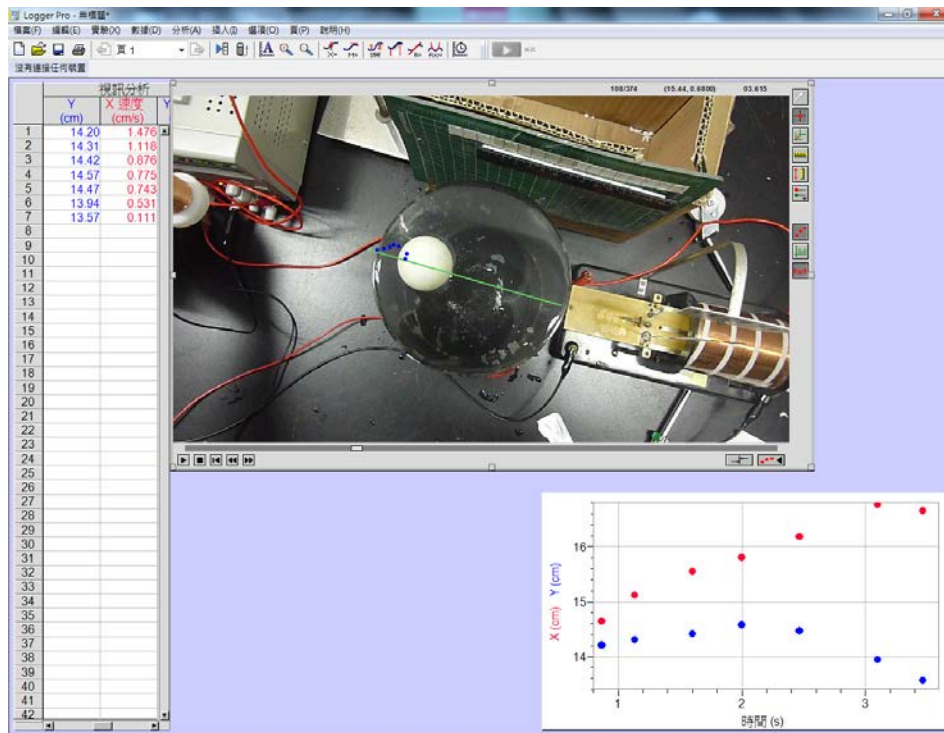


圖 10 將影片放入程式中進行分析

(三)實驗三 同一弧度液面浮體距邊緣距離與水平力大小之關係

Step1：將磁力定位裝置通以電流，固定浮體之初始位置

Step2：拍照紀錄接觸角 θ 及 φ

Step3：解除磁力置球裝置使其自由運動

Step4：將電流天秤通以一電流使其達成平衡

Step5：紀錄電流大小並利用前置實驗所得之公式推算水平力之大小

Step6：完成後，改變與邊緣之距離，重複實驗

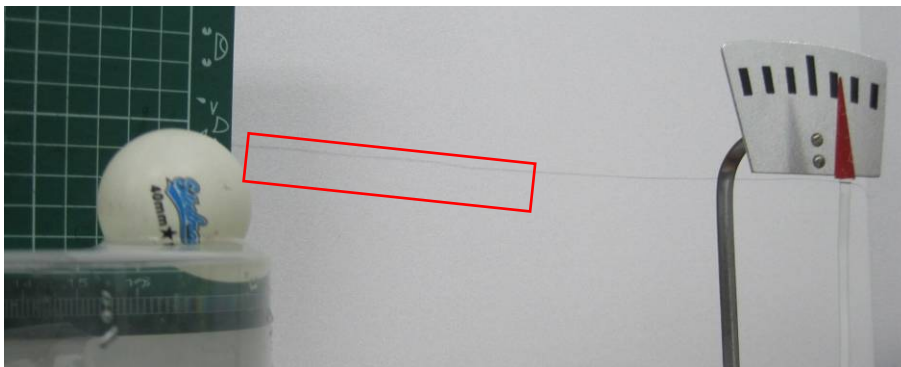


圖 11 測量距邊緣距離以及水平力之關係

參、研究結果與討論

一、實驗結果

前置實驗 電流天秤之電流與力之關係

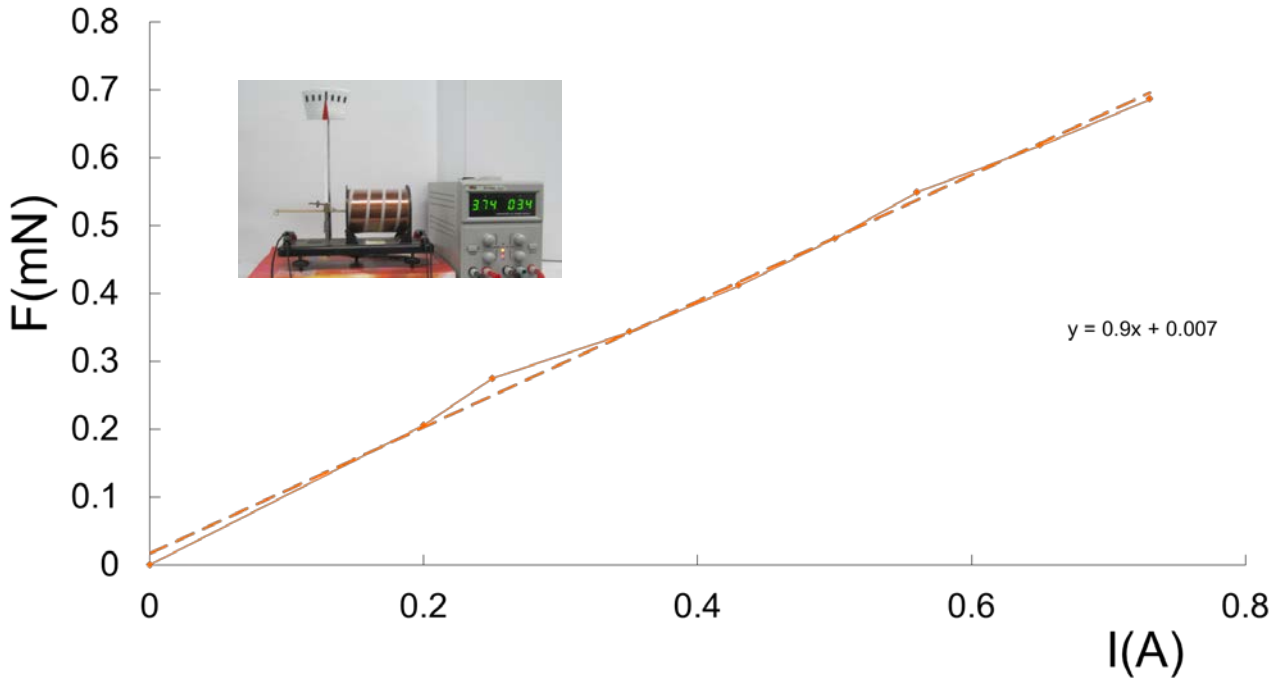


圖 13 電流天秤之電流與力關係圖

從圖 13 中可以看到電流天秤產生的作用力約可得一輸出電流得到的拉力趨勢方程式 $F = 0.9 \times I$ (單位: A) + 0.007 (單位: mN)

(一) 實驗一

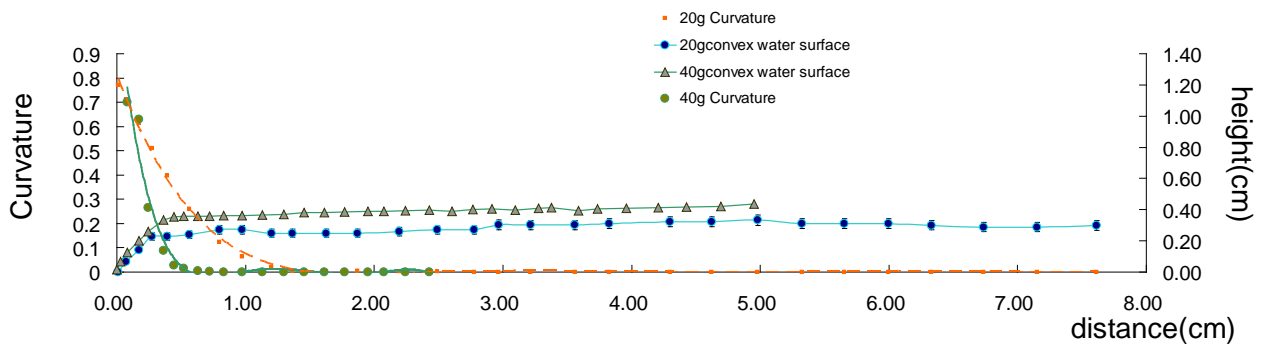


圖 14 不同水量的弧度與曲率

結果顯示加入的水量越多，水面的曲率變化越大

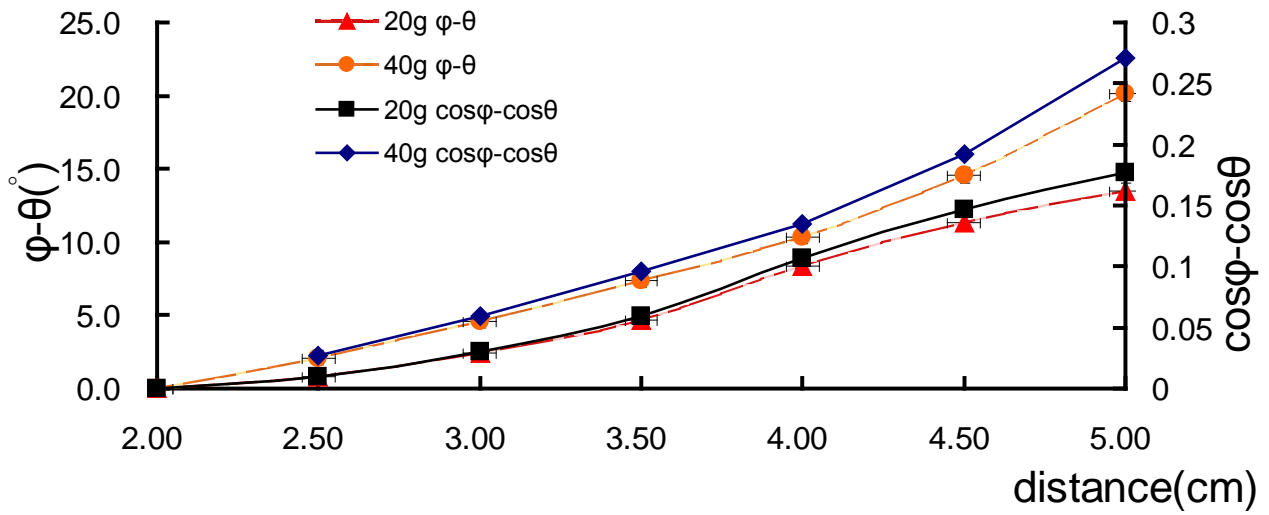


圖 15 不同弧面上，浮體兩側接觸角差值和餘弦值與距弧面中心距離之比較圖

(二)實驗二

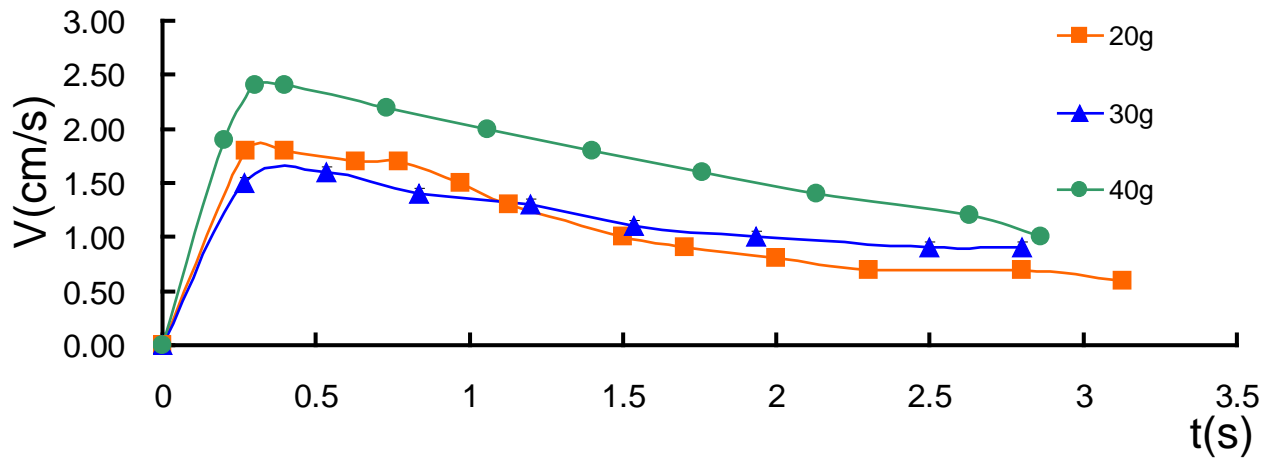


圖 16 不同液面上，浮體運動之速度-時間圖

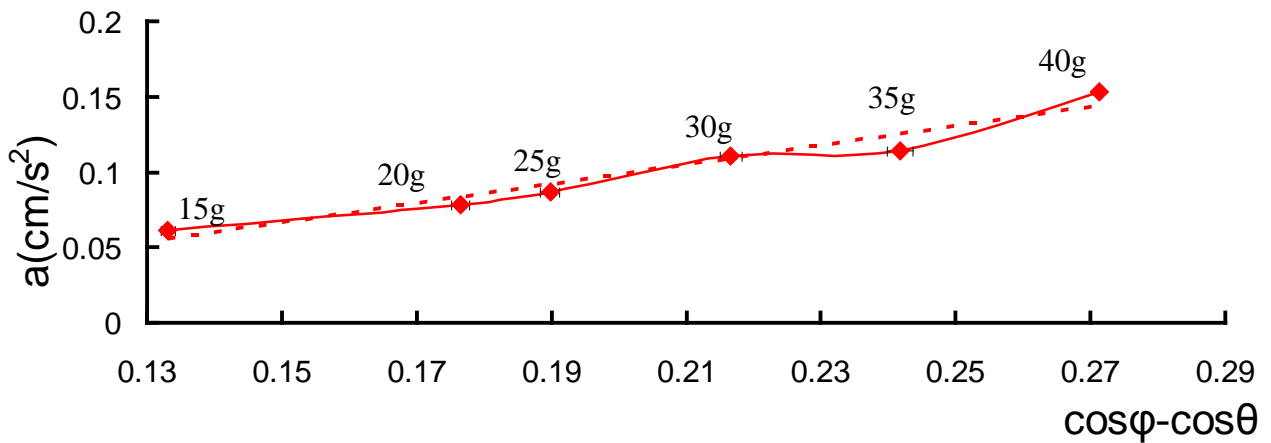


圖 17 不同弧度上，浮體之初始加速度大小與餘弦值差圖

浮體於水面上會受到合力作用而運動，為了求得浮體所受到水平力的大小，我們求取浮體的初始加速度避免運動時產生的水阻力；結果顯示浮體兩側接觸角的餘弦值差越大，其初始加速度越大

(三)實驗三

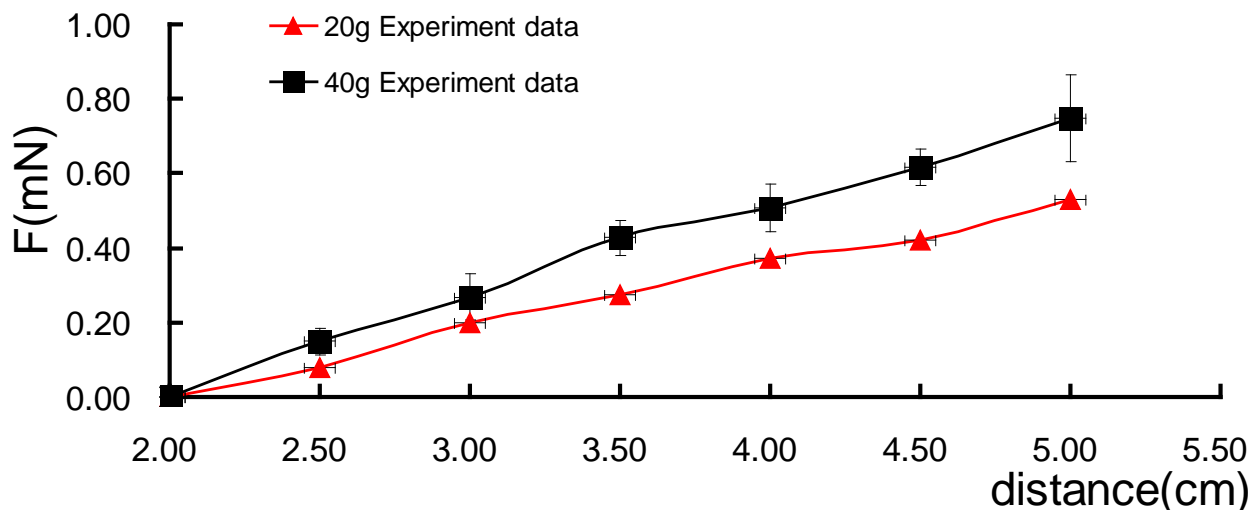


圖 18 不同弧面上，浮體受力與液面中心距離之實驗圖

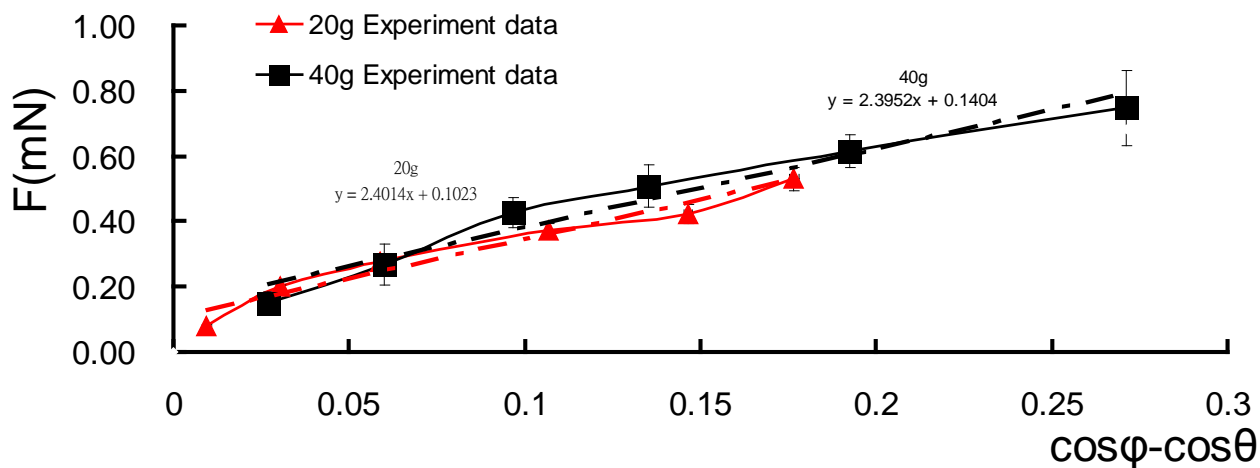


圖 19 不同弧面上，浮體受力大小與浮體兩側接觸角餘弦值差關係圖

我們真正想要探討的是浮體接觸角與力的關係，透過實驗一測到 20g、40g 位置與接觸角的結果與實驗三結合，作了以上的圖表；結果顯示分別於 20g 和 40g 的液面上浮體所受的側向力與餘弦值呈現正比趨勢

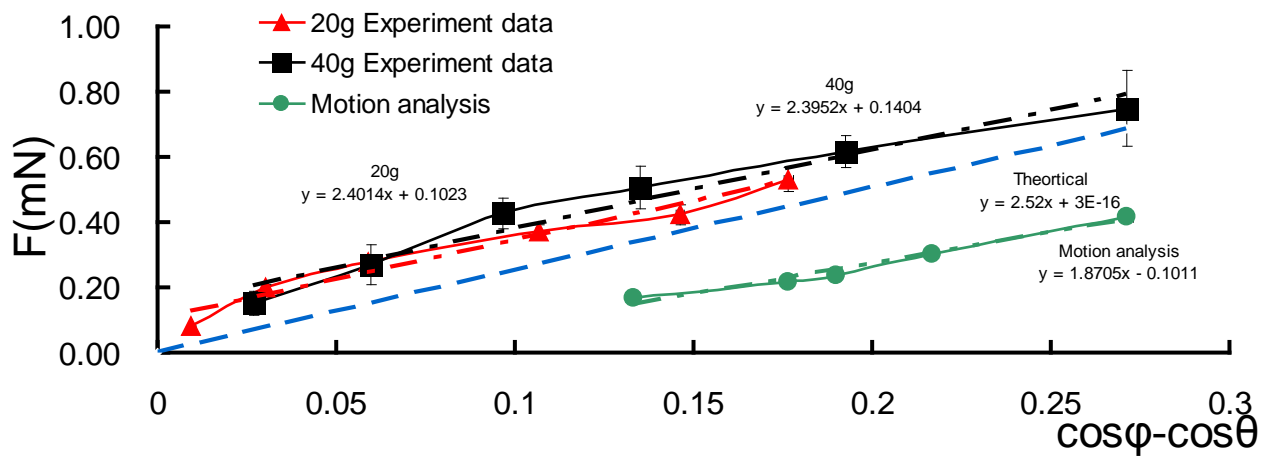


圖 20 影片法與靜力法浮體受力和餘弦值之關係比較圖

為了瞭解預測的模組是否與浮體實際在水面上受力的情形相同，故將實驗結果與理論模型作疊圖，從圖中可以看見無論是使用何種方法浮體兩側接觸角餘弦值差與力的大小皆呈正比關係，與我們的理論相吻合。

二、討論

(一)從圖 16 中可以觀察到浮體在水面上會有先加速再逐漸減速的現象。我們推測浮體一開始受兩側的接觸角造成運動時，浮體所受的表面張力大於浮體所受之水阻力，因此產生一個正向的合力造成浮體向中央進行加速度運動，之後浮體因兩側的接觸角差變小、水平力也隨之變小，水面上的阻力大小已經超越了表面張力，造成一個反向的合力阻止浮體的運動，讓浮體減速。

(二)我們使用了兩種不同的方式去測量表面張力的大小，分別是電流天平的靜力平衡法和影像分析法，從圖 20 可以看到靜力平衡法所測得的力皆略大於我們的理論值，影像分析法所測得的力小於理論值，對此我們大膽的對我們的模型做以下的修正

1.我們對靜力平衡法做了歸零校準實驗:將浮體置於水與容器同高的容器中央，測量恰拉動浮體時所需最小的力，約為 0.056mN

2.我們運動法所取的初始加速度所取到的是起點與第一個影格之間的平均加速度，並不是真正的零點加速度，所以我們透過外插的方法將我們的數值外插回去。

由以上兩點的誤差修正後我們得到下方的結果

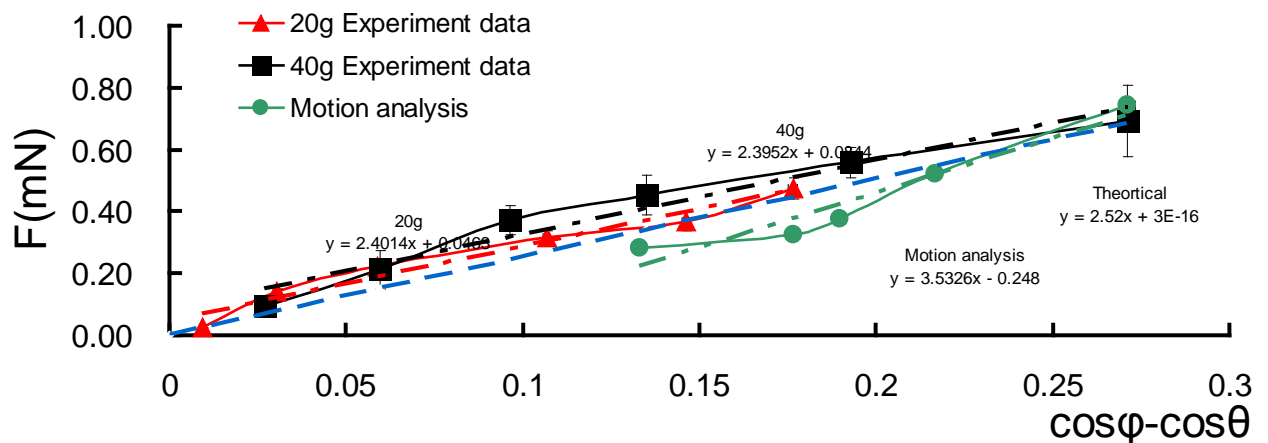


圖 20 影片法與靜力法浮體受力和餘弦值之關係比較圖(經過修正)

我們所測得實際力大小與我們理論值準確率達到 1%

(三)根據模組的敘述，浮體浸水體積除了受到重力與浮力的影響，亦會受到表面張力向下的分力，我們觀察了邊緣和中央的浸水高度，發現確實有變化，我們猜想浸水面積的變化是誤差來源之一，這是我們未來努力改進的方向。

肆、結論與應用

一、結論

(一)我們用電流天秤靜力平衡法測量時，當球形浮體(重約 2.73g 直徑 4cm)距離邊緣(容器半徑 7.15cm)2~7cm 之內，距壁越近球形浮體兩側接觸角度差漸大，並造成水平力漸大，當接觸角差最大值約為 20.12° 其造成水平力的約為 $8.64 \times 10^{-4} \text{N}$ 。

(二)浮體距離邊壁越近、曲率越大，浮體兩側接觸角差也會越大

(三)浮體之初始加速度與浮體兩側接觸角的餘弦值插成正比，兩側接觸角的餘間值差應是浮體運動的主因。

(四)由靜力法和運動分析法所測得的實驗數據與理論模型在修正水阻力誤差後約為 8%和 1%

二、未來展望

(一)改變實驗的操縱變因，探討表面張力的改變與水平力大小之間的關係，並完善我們浮體在水面上受力的模組。

(二)改變容器兩側的親疏水性使兩側的接觸角造成物體的移動，做出類似微流道系統的結果。

(三)將浮體通以電流，改變物體兩側的接觸角，造成浮體自主的移動。

伍、參考資料及其他

- 一、柯賢文。2007。表面張力的應用。科普知識期刊 858 期
- 二、高頌凱。2006。利用浮沉子測量液體表面張力並演示 ” Cheerios effect” 。臺灣 2006 年國際科學展覽物理科。國立臺灣科學教育館。台北
- 三、蔡依靜、劉育辰、趙得佑。「深」在「浮」中不知「浮」～探討表面張力對『沉體』浮於水面行為之影響。第 53 屆中小學科學展覽會
http://203.145.193.110/NSC_INDEX/Journal/EJ0001/9603/9603-08.pdf
- 四、何明翰、柳禹誠、楊育聰。2013。萬浮金安。第 53 屆高雄市中小學科學競賽
- 五、洪碩成、張上仁、吳東翰。2011。「液表」人才一同性相吸，異性相斥。第 51 屆中小學科學展覽會
- 六、Dominic Vella and L. Mahadevan(2005),The ” Cheerios effect” ,American Association of Physics Teachers, Am. J.Phys 73(9), 817-825
http://203.145.193.110/NSC_INDEX/Journal/EJ0001/9603/9603-08.pdf

【評語】 160028

本作品研究球型浮體在液面上的各項作用力，以解釋浮體為什麼會往水面中央移動，作品中用簡易的作法，測得浮體水平作用力，再和理論模型比較。是一件完整的作品，接下去應再考慮浮力作用，使得本作品微動力研究能更完備。