

臺灣二〇〇八年國際科學展覽會

科 別：物理與太空科學

作 品 名 稱：表面張力測量新方法-連通管原理的再應用

得 獎 獎 項：第一名

紐西蘭正選代表：紐西蘭 2008 科技展覽會

學校 / 作者：臺南市立後甲國民中學
臺南市立後甲國民中學

林孟好
郭曉芮

作者簡介



林孟好(左)及郭曉芮(右)目前就讀於台南市後甲國中。我們從小學就一起在兒科中心參加科學活動，進行很多的研究及實驗，曾經多次在全國中小學科展中獲獎，包括四十四屆物理科第三名、四十五屆生活與應用科學科第二名、及四十六屆生活與應用科學科第三名。進行科學研究一直是我們在假日中最大的樂趣，可以得到很大的成就感。這次有關表面張力測量的研究，整個過程進行了將近一年，是我們進行過的研究中最複雜的一次，但也從中學到許多的科學方法及態度，更加深了我們對科學研究的志向。

表面張力測量新方法－連通管原理的再應用

摘要

傳統表面張力的測量儀器多屬較為貴重、攜帶不便的精密儀器，不利於一般生活或教學上使用。我們發現開口不等高的連通管水面溢出低管口端時，高管口端水位比較高，於是試圖利用此液面高度差來測量表面張力。

我們探討了連通管的高度、內徑大小及材質對於液面高度差的影響，並利用此原理測量已知表面張力的液體，將液面高度差所造成的壓力與標準值做比較。結果發現液面高度差確實可以用來測量表面張力，但是低管口端要用疏水性材質的細管，測量會較準確。如果使用內徑 0.5mm 的鐵氟龍管，測量出來的液面高度差(h) \times 液體比重(ρ)的值，與標準表面張力(T)之間呈線性關係【 $T(\text{dyne/cm})=10.6(h\times\rho)+6.51$ 】，相關係數高達 0.9996 ($p<0.0005$)。

本研究利用連通管的壓力原理建立了一個全新的表面張力測量裝置，我們證明了這種裝置雖然非常簡單、便宜、攜帶方便，卻可以準確的測量液體表面張力。而且它所使用的原理簡明易懂，在各級學校都可以自己製作，作為教學或實驗用。

Measuring Surface Tension by Using a Communicating Pipe

ABSTRACT

Most instruments for measuring surface tension are expensive and fragile, and therefore are seldom applicable in routine daily life or school education. We found a difference in the fluid level between two sides of a communicating pipe, of which one opening was lower than the other, when the inside liquid was just spilled out from the lower one. This study was carried out trying to evaluate the surface tension by measuring this waterhead.

We studied the effects of the length, diameter and material character of the tube bound on the lower head of the communicating pipe, measuring waterhead for each respective condition. We also compared the waterhead to the surface tension of standard liquids. Results showed that the surface tension of a liquid could be evaluated by this device, and the measurement would be accurate if using a small diameter tube made by hydrophobic materials. In a case using a Teflon tube of 0.5mm in diameter, there was a linear relationship between the waterhead and the surface tension as $T(\text{dyne/cm})=10.6(h \times \rho)+6.51$, where T denoted the surface tension, h the waterhead, and ρ the liquid density. The correlation coefficient was $r=0.9996$ ($p<0.0005$).

This study established a novel device for measuring the surface tension of liquids. The device is simple and low cost, whereas accurate and practicable, and therefore is a good tool in routine daily life or school education.

表面張力測量新方法—連通管原理的再應用

壹、前言

一、研究動機

爲了觀察壓力的現象，上課時老師在寶特瓶瓶塞上插入一長一短的吸管到瓶內的水中，然後從長的吸管加水進去，水就會從短吸管冒出來。我們發現當液面高度超過短管口時，短管開始漏水，但是等冒水靜止後，長管液面高度竟然比較高，短管口則出現一顆凸出的小水珠。怎麼會這樣呢？連通管不是應該液面高度一樣嗎？我們想，可能是短管口頂端那顆凸出的小水珠造成的。我們知道水會形成水珠是因為表面張力的關係；是不是跟表面張力有關呢？如果是，我們能不能進一步利用液面高度差來測量液體的表面張力呢？於是我們做了以下的研究。

二、研究目的

1. 探討在一邊高一邊低的連通管中，低管口端液體冒出形成水珠時，高管口端的液面高度比較高是不是因爲液體的表面張力所引起的？
2. 連通管的高度、管徑、及材質對於兩端的液面高度差大小是否有影響？
3. 可不可以利用這個液面高度差來測量液體的表面張力？
4. 測量出來的液面高度差是否可以準確的代表液體真正的表面張力？
5. 找出測量表面張力的新方法，並設計出測量表面張力的新儀器。

貳、基本原理

一、依據靜止液體液壓公式，在連通管中同液體同高度時的壓力相等。所以如右圖在水平面 W 的高度處，A 端的壓力 P_A 應該等於 B 端的壓力 P_B 。

二、 $P_A = A$ 點大氣壓 + $(h-y)$ 水柱壓(假設往下爲正)。

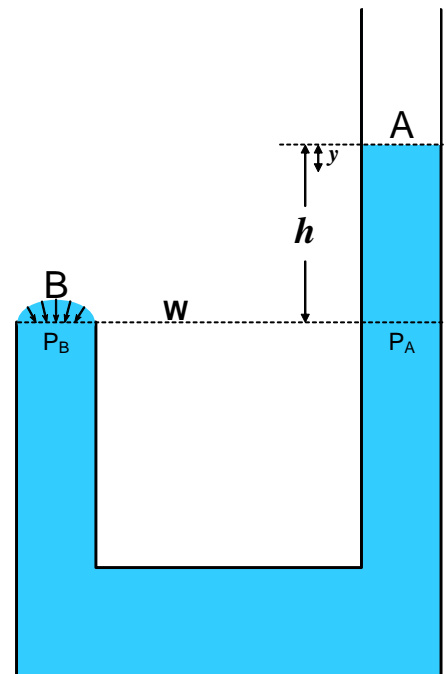
其中 $y = \frac{2T \cos \alpha}{\rho g r_A}$ 爲 A 管毛細現象所造成高度差； T 爲液體表面張力， α 是液面與 A 管壁的交觸角， ρ 是液體密度， r_A 是 A 管半徑。

三、 $P_B = B$ 點大氣壓 + 凸出水珠的重力 + 凸出水珠的表面張力造成的壓力差。

四、因爲 A、B 兩點的大氣壓差別非常小，可以忽略不計。

五、 $P_A = P_B$ ；所以 $(h-y)$ 水柱壓 = (凸出水的重力壓力 + 凸出水珠的表面張力造成的壓力差)。

六、如果能把 A 管毛細現象忽略，並且將凸出水珠的重力忽略不計，那麼【液體的表面張力造成的壓力差 = h 水柱壓力】。



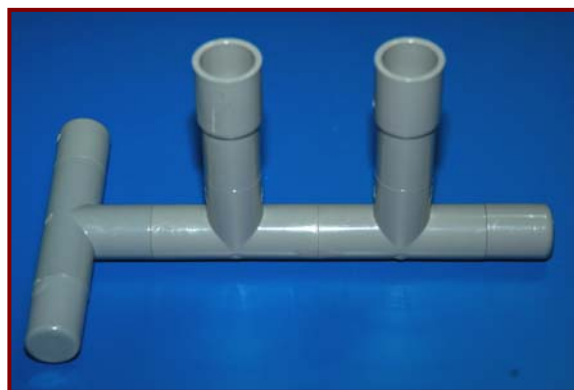
參、研究設備及器材

一、製作實驗裝置：以塑膠水管製作連通管。

1. 以硬質塑膠水管做一個連通管如右圖，以專用接著劑黏接固定，防止漏水。
2. 操作時在兩端開口以合適大小的橡皮塞塞住，中間穿洞讓不同大小的實驗管子插入。

二、器材及材料：

1. 三腳架，雷射水平儀，電子秤，量筒(500ml)，燒杯，空針筒，煮咖啡器玻璃漏斗，橡皮塞，鑽孔器，剉刀，護目鏡，棉手套，紀錄紙。
2. 實驗用細管：各種不同內徑的玻璃管、塑膠吸管及鐵氟龍管。
3. 液體：RO 水，二次蒸餾“純水”，甘油，純橄欖油，100%酒精，沙拉油，醬油，工研醋，95%酒精，洗碗精，鹽水溪溪水。



照片 1：以塑膠水管做的連通管裝置。

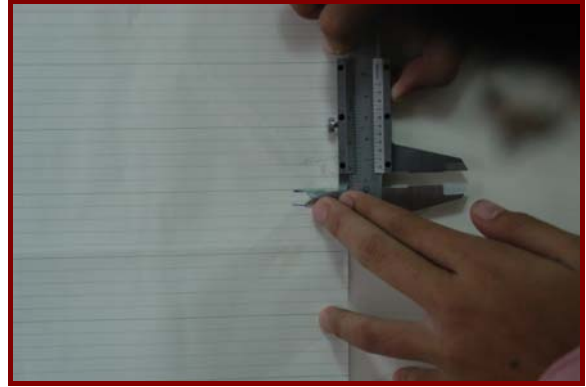
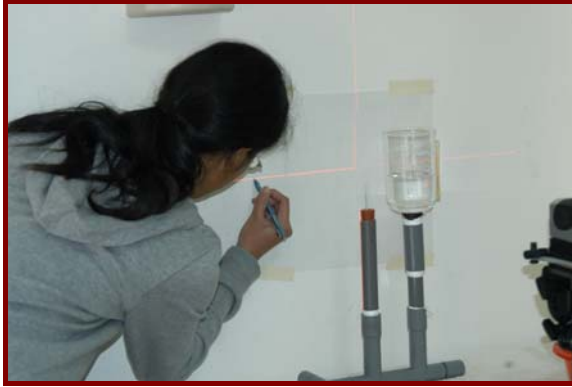
肆、研究方法

一、測量連通管 A、B 兩端液面高度差的步驟：

1. 將連通管裝滿 RO 水，並稍為左右傾斜一下將底座的空氣完全排出來。
2. 在 A 端接上煮咖啡器的直筒玻璃漏斗，再從漏斗加一點水，使 B 端的水滿到出口。
3. 將實驗細管套入橡皮塞然後塞住 B 端開口。
4. 調整雷射水平儀的高度，使雷射光正好到達 B 端細管(簡稱 B 管)的頂端，並將影子投射在後面牆壁上的白紙，在白紙上做一個記號。
5. 慢慢的從 A 端咖啡漏斗內加水，直到水從 B 端的的實驗細管開口溢出來。
6. 調整雷射水平儀的高度，使雷射光正好和 A 端咖啡漏斗中的水面等高，在牆上的紙上再做一個記號。
7. 以游標尺測量兩個記號的距離，得到液面高度差紀錄下來。



照片 2：測量連通管 A、B 兩端液面高度差；A 端接上煮咖啡器的直筒玻璃漏斗，B 端接一細管。



照片 3：測量液面高度差；左上：雷射光水平儀；右上：調整高度到細管頂端或水位高度；左下：在雷射光投影處做記號；右下：用游標尺測量兩個記號之間的距離。

二、需要探討的問題：

1. B 管的內徑大小是否會影響液面高度差？
2. B 管的長度是否會影響液面高度差？
3. B 管的材質是否會影響液面高度差？
4. A 端粗管的內徑大小是否會影響液面高度差？
5. 不同的液體的液面高度差大小是否和預期一樣，會隨著液體的表面張力改變？
6. 所測量出來的液面高度差的壓力，是否可以準確代表表面張力的大小？

伍、研究過程與結果

一、實驗一：不同內徑及長度的玻璃管對液面高度差的影響

1. 背景說明：

在整個研究的開始，我們曾做過前導實驗，發現玻璃管內若有氣泡會造成阻塞，使得液面高度差變得非常的高(超過 80mm)，所以換成管徑較大的玻璃管比較不會有氣泡栓塞。但是在過程中發現不同的管徑會得到不一樣的結果，更發現玻璃管長度也會影響結果，所以必須找出內徑及長度對液面高度差的影響。

2. 探討問題：B 端玻璃細管的內徑及長度對液面高度差是否有影響？

3. 控制變因：

(1)測量液體：RO 水(19°C)。

(2)B 管材質：玻璃管。

(3)A 管內徑(直徑)：82mm。

4. 操縱變因：

(1)玻璃管內徑(直徑)：3.1mm(甲)，3.8mm(乙)，4.9mm(丙)，5.9mm(丁)。

(2)玻璃管長度：5cm(A)，10cm(B)，15cm(C)，20cm(D)。

5. 實驗過程：

(1)玻璃管有 4 種內徑、4 種長度，共 16 種管子，每種做 6 支，總共 96 支細管。

(2)每支細管依照上述的實驗步驟測量一次，將每支細管所量到的個別液面高度差記錄下來，共測量 96 次。

(3)將同一種 B 管所得到的 6 個數據平均，代表該種玻璃 B 管造成的液面高度差。

6. 實驗結果：玻璃 B 管所造成的液面高度差如表 1 至表 4；平均值比較如圖一。



照片 4：玻璃細管裝置。

表 1：甲管(3.1mm)量到的液面高度差： 單位：mm

| 高度差 長度 \ 次 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 平均 |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| (A) 5cm | 7.9 | 7.9 | 7.4 | 7.1 | 7.4 | 7.7 | 7.6 |
| (B) 10cm | 8.7 | 9.1 | 8.7 | 8.8 | 8.1 | 8.9 | 8.7 |
| (C) 15cm | 8.8 | 9.0 | 8.6 | 8.6 | 8.7 | 8.7 | 8.7 |
| (D) 20cm | 9.1 | 9.2 | 8.9 | 8.5 | 9.4 | 9.3 | 9.1 |

表 2：乙管(3.8mm)量到的液面高度差： 單位：mm

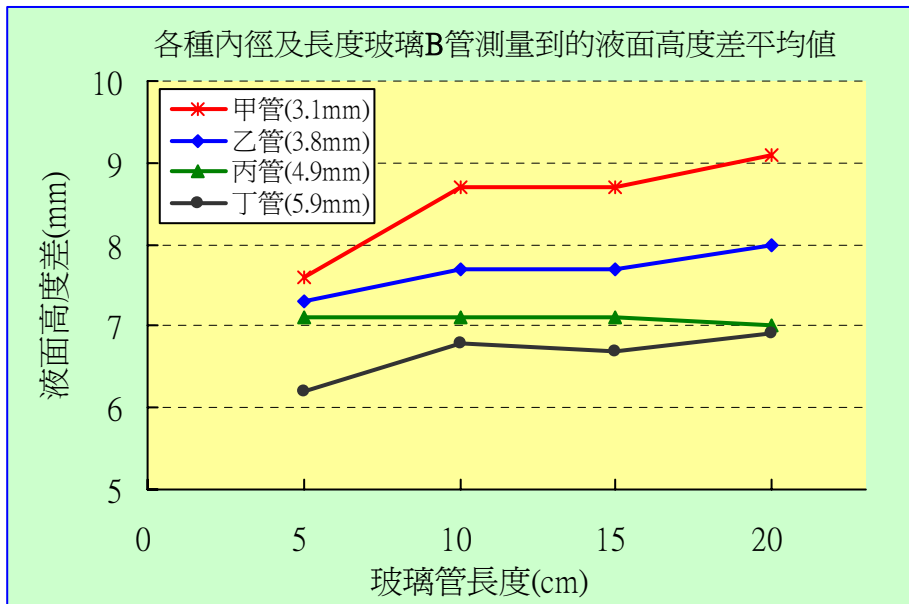
| 高度差 長度 \ 次 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 平均 |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| (A) 5cm | 7.3 | 7.0 | 7.2 | 7.4 | 7.2 | 7.8 | 7.3 |
| (B) 10cm | 7.8 | 7.7 | 8.1 | 7.3 | 8.1 | 7.4 | 7.7 |
| (C) 15cm | 7.5 | 7.8 | 8.0 | 7.4 | 7.8 | 7.9 | 7.7 |
| (D) 20cm | 8.2 | 8.6 | 7.3 | 8.1 | 7.7 | 8.3 | 8.0 |

表 3：丙管(4.9mm)量到的液面高度差： 單位：mm

| 高度差 長度 \ 次 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 平均 |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| (A) 5cm | 7.0 | 6.7 | 7.7 | 6.7 | 7.5 | 7.1 | 7.1 |
| (B) 10cm | 7.1 | 7.4 | 6.8 | 7.3 | 6.7 | 7.3 | 7.1 |
| (C) 15cm | 6.9 | 7.0 | 7.0 | 7.1 | 7.2 | 7.3 | 7.1 |
| (D) 20cm | 6.9 | 6.9 | 6.6 | 7.3 | 7.6 | 6.9 | 7.0 |

表 4：丁管(5.9mm)量到的液面高度差： 單位：mm

| 高度差 長度 \ 次 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 平均 |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| (A) 5cm | 5.8 | 6.2 | 6.2 | 5.9 | 6.8 | 6.4 | 6.2 |
| (B) 10cm | 6.9 | 6.3 | 6.8 | 7.2 | 6.8 | 6.8 | 6.8 |
| (C) 15cm | 6.4 | 5.9 | 6.8 | 7.0 | 7.1 | 6.8 | 6.7 |
| (D) 20cm | 7.1 | 6.7 | 7.1 | 7.1 | 6.8 | 6.6 | 6.9 |

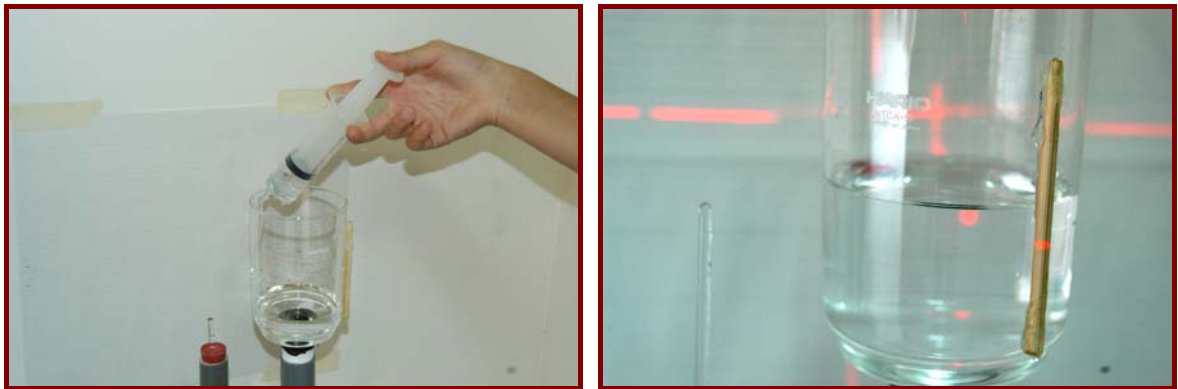


圖一、玻璃管液面高度差平均值比較圖

7. 發現與討論：

- (1) 從 A 端咖啡漏斗內慢慢加水，一開始會發現 B 端的細玻璃管內液面高度比 A 端高(因為毛細現象)，B 端液面到達管口後會凸出來形成一顆半橢圓形水珠，然後固定形狀，此時加進去的水只會使 A 端液面再逐漸升高，一直到 A 端的液面超過 B 管一定高度時，水珠就撐不住而往玻璃管旁邊溢下來。
- (2) 從折線圖中可以明顯的看出，玻璃管越細液面高度差就越大。另外，當玻璃管越長時液面高度差也越大。
- (3) 如果比較同一種內徑的管子，從短管(5cm)到長管(20cm)液面高度差上升的程度，大略可以發現，較細的管子上升的程度較多(甲管上升 1.5mm、乙管上升 0.7mm)，較粗的管子上升的程度較小(丙管上升 0.1mm、丁管上升 0.7mm)。也就是說玻璃管越細，長度的影響就越大。

- (4)表面張力應該只與液體表面的狀態有關，那麼同一種內徑的玻璃管開口都是一樣，液面高度差為什麼會隨著管子的長度增加而上升呢？我們推測可能是玻璃對水分子的附著力會把水吸住，越長的管子吸力越大，因此要比較大的壓力才能夠把水珠從 B 管的管口壓出來。這樣測量到的液面高度差就不單純只是液體表面的狀態所造成的了。
- (5)如果觀察表 1 到表 4 中的數據，比較同一種管子的 6 次實驗結果，發現當管子越粗時，誤差比例就會比較大；而當管子較細時，誤差比例就較小。
- (6)會造成這些誤差的原因，我們想其中的一個因素也是因為玻璃對水分子的附著力所引起的。因為玻璃管口的圓周表面上也是有厚度的玻璃，對水有附著力，尤其是如果表面不平整的話會產生不等程度的毛細現象，會導致誤差。
- (7)除了做多次取平均值之外，有沒有什麼辦法能使結果變得更精準呢？我們認為換一種對水附著力較小的材質來做實驗，就可以減少實驗結果的誤差，也可以減低管子長度所產生的影響，所以實驗二選用塑膠吸管來試試看。



照片 5：左：沿著寬口玻璃漏斗側面慢慢加水；右：B 端細管的管口有一個水珠，而 A 端漏斗內的水位比 B 端管口高。

二、實驗二：不同內徑及長度的塑膠吸管對液面高度差的影響

1. 背景說明：

因為我們推測在實驗一中玻璃管長度對液面高度差的影響可能是因為玻璃對水的附著力所引起來的，所以我們以對水附著力比較小的塑膠吸管試看看。將內徑相同的玻璃管和塑膠吸管同時插入水中，發現玻璃管內液面上升，而吸管內則液面稍微下降，證明吸管對水的附著力比玻璃管小。

2. 探討問題：以附著力較低的吸管做實驗，液面高度差是否比較不受管子長度的影響？

3. 控制變因：

(1)測量液體：RO 水(20°C)。

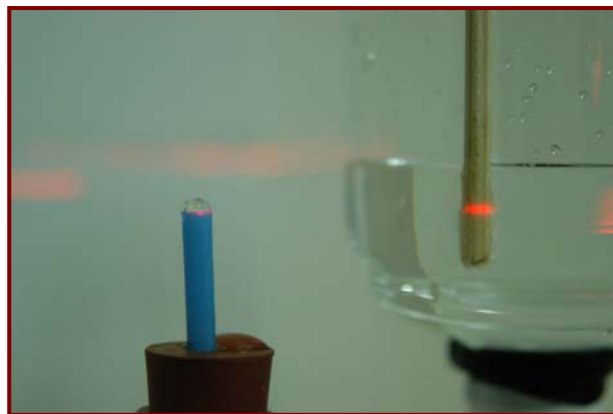
(2)B 管材質：塑膠吸管。

(3)A 管內徑：82mm。

4. 操縱變因：

(1)塑膠管內徑(直徑)：3.0mm(ㄅ)，
4.9mm(ㄆ)，6.2mm(ㄇ)，12.7mm(ㄊ)。

(2)塑膠管長度：5cm(A)，10cm(B)，
15cm(C)，20cm(D)。



照片 6：吸水管口的水珠比實驗一中玻璃管口的水珠圓；A 端漏斗內的水位比 B 端管口高。

5. 實驗過程：

(1)吸管有 4 種粗細、4 種長度，每種做 6 支，但ㄅ管及ㄊ管長度不夠，無法做四種長度的實驗，所以總共 78 支塑膠吸管。

(2)每支吸管依照上述的實驗步驟測量一次，將每支吸管所量到的個別液面高度差記錄下來，共測量 78 次。將同一種管子所得到的 6 個數據平均，代表該種內徑/長度的塑膠吸管造成的液面高度差。

6. 實驗結果：各吸管所造成的液面高度差如表 5 至表 8；平均值比較如圖二。

表 5：ㄅ管(3.0mm)量到的液面高度差： 單位：mm

| 高度差 長度 \ 次 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 平均 |
|---------------|--------|------|------|------|------|------|------|
| (A) 5cm | 10.8 | 10.2 | 10.7 | 11.0 | 10.3 | 10.5 | 10.6 |
| (B) 10cm | 10.2 | 10.8 | 10.7 | 11.0 | 11.1 | 10.7 | 10.8 |
| (C) 15cm | 吸管長度不足 | | | | | | |
| (D) 20cm | | | | | | | |

表 6：ㄆ管(4.9mm)量到的液面高度差： 單位：mm

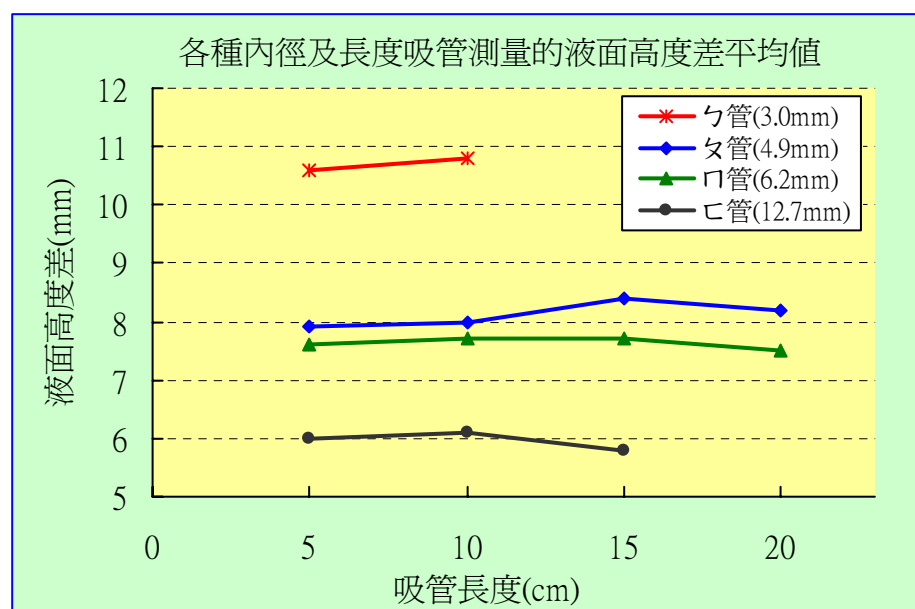
| 高度差 長度 \ 次 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 平均 |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| (A) 5cm | 8.1 | 7.8 | 8.1 | 8.0 | 7.5 | 7.9 | 7.9 |
| (B) 10cm | 7.8 | 7.5 | 8.3 | 7.9 | 8.3 | 8.1 | 8.0 |
| (C) 15cm | 8.8 | 8.2 | 8.4 | 8.4 | 7.8 | 8.5 | 8.4 |
| (D) 20cm | 7.6 | 8.0 | 8.2 | 8.2 | 8.1 | 8.8 | 8.2 |

表 7：口管(6.2mm)量到的液面高度差： 單位：mm

| 高度差 長度 \ 次 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 平均 |
|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| (A) 5cm | 7.3 | 7.3 | 7.6 | 7.4 | 8.1 | 7.7 | 7.6 |
| (B) 10cm | 7.4 | 7.7 | 7.7 | 8.3 | 7.9 | 7.4 | 7.7 |
| (C) 15cm | 8.3 | 7.4 | 7.7 | 7.9 | 7.6 | 7.5 | 7.7 |
| (D) 20cm | 8.1 | 7.4 | 7.0 | 7.5 | 7.2 | 7.5 | 7.5 |

表 8：ㄩ管(12.7mm)量到的液面高度差： 單位：mm

| 高度差 長度 \ 次 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 平均 |
|---------------|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| (A) 5cm | 5.8 | 5.9 | 6.2 | 6.6 | 5.8 | 5.7 | 6.0 |
| (B) 10cm | 6.8 | 5.4 | 5.8 | 5.9 | 6.2 | 6.2 | 6.1 |
| (C) 15cm | 5.4 | 6.4 | 6.0 | 6.1 | 5.1 | 5.6 | 5.8 |
| (D) 20cm | 吸管長度不足 | | | | | | |



圖二、塑膠吸管液面高度差平均值比較圖

7. 發現與討論：

- (1)在吸管管口形成的水珠看起來比實驗一用玻璃管時還要圓，水珠撐不住而往吸管旁邊溢下來時也是圓圓的滾下來，不像實驗一水會沿著玻璃管成一條線流下來。
- (2)與玻璃管的結果類似，從圖二中仍然可以明顯的看出，吸管越細液面高度差就越大。
- (3)吸管長度對液面高度差的影響比較不明顯了，並沒有像玻璃管一樣隨著長度的增加而升高。這代表我們前面的假設可能是對的，塑膠吸管對水的附著力比較小，所以長度的增加不會造成管壁對水分子的吸引力增加，因此比較不會影響到液面高度差。
- (4)如果觀察表 5 到表 8 中的數據，發現同一種管子六次實驗之間的誤差比例比玻璃管的還要小，這可能也是附著力減小所得到的好處。
- (5)綜合實驗一及實驗二的結果我們發現，在連通管 B 端用來測量液面高度差的管子，材質對水的附著力越小越好；另外，因為越細的管子可以得到比較高的液面高度差，測量的誤差比例就會比較小，所以管徑越細越好。

三、實驗三：不同內徑及長度的鐵氟龍管對液面高度差的影響

1. 背景說明：

- (1)如果連通管 B 端的管子長度會影響液面高度差的話，那麼所測量到的液面高度差就無法反映出表面張力的大小。
- (2)由前面的兩個實驗發現對水附著力較小的材質，管子長度比較不會影響液面高度差，所以 B 端管子應該使用對水完全沒有附著力的材質。
- (3)儀器行的老闆說「鐵氟龍」不會沾水，對水的附著力應該非常的小，而且最細的鐵氟龍管內徑只有 0.5mm。
- (4)以同樣 3mm 內徑的吸管及鐵氟龍管一起放入水中，發現鐵氟龍管內的液面比吸管還要低，證明鐵氟龍對水的附著力比吸管小。

2. 探討問題：以對水附著力最低的鐵氟龍管做實驗，管子長短/內徑對液面高度差的影響？

3. 控制變因：

- (1)測量液體：RO 水(21°C)。
- (2)B 管材質：鐵氟龍管。
- (3)A 管內徑：82mm。

4. 操縱變因：

- (1)鐵氟龍管內徑：0.5mm(子)，1.0mm(丑)，1.5mm(寅)，2.0mm(卯)，2.5mm(辰)，3.0mm(巳)。
- (2)鐵氟龍管長度：5cm(A)，10cm(B)，20cm(D)。(只做[子]管)

5. 實驗過程：

- (1)探討長度變因：取子管(內徑 0.5mm)，裁成 5cm(A)、10cm(B)、20cm(D)各三條，每種長度做 3 次實驗取平均值，共 $3 \times 3 = 9$ 次實驗。
- (2)探討內徑變因：取子、丑、寅、卯、辰、巳管，裁成 5cm 各三條，每種內徑做 3 次實驗取平均值，共 $6 \times 3 = 18$ 次實驗。



照片 7：自己裁製的鐵氟龍細管。

6. 實驗結果：不同長度鐵氟龍子管(0.5mm)所造成的液面高度差如表 9，不同內徑鐵氟龍管所造成的液面高度差如表 10。內徑大小與液面高度差的關係比較如圖三，內徑大小與液面高度差倒數的關係如圖四。

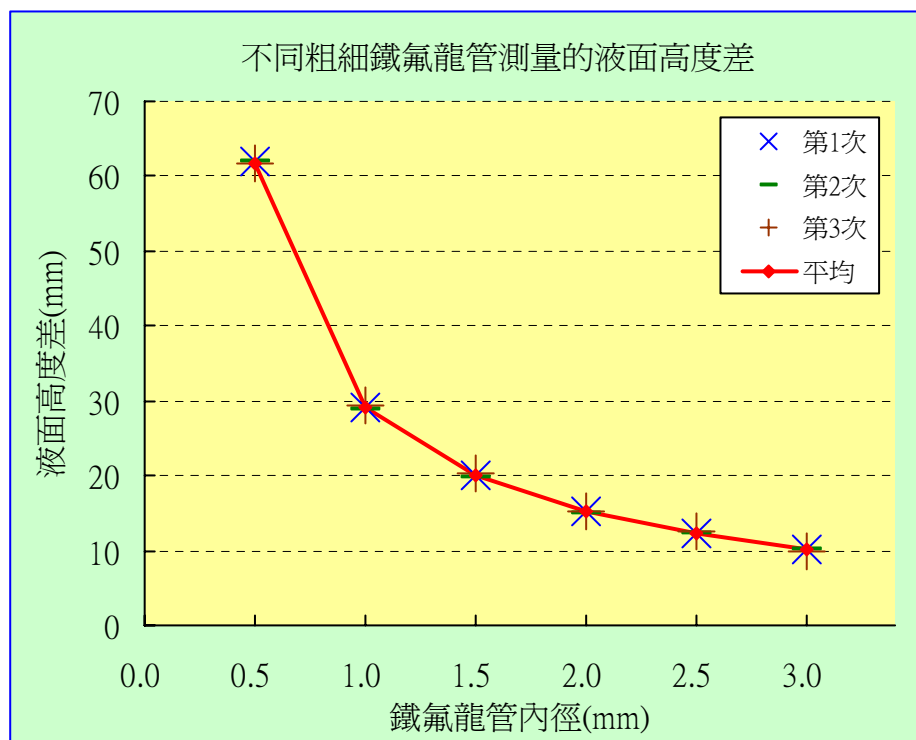
表 9：鐵氟龍子管(0.5mm)在不同長度時的液面高度差(mm)：

| 高度差 長度 \ 次 | 1 | 2 | 3 | 平均 |
|---------------|------|------|------|------|
| (A) 5cm | 61.9 | 61.9 | 61.6 | 61.8 |
| (B) 10cm | 61.4 | 61.9 | 62.2 | 61.8 |
| (D) 20cm | 62.2 | 62.6 | 63.0 | 62.6 |

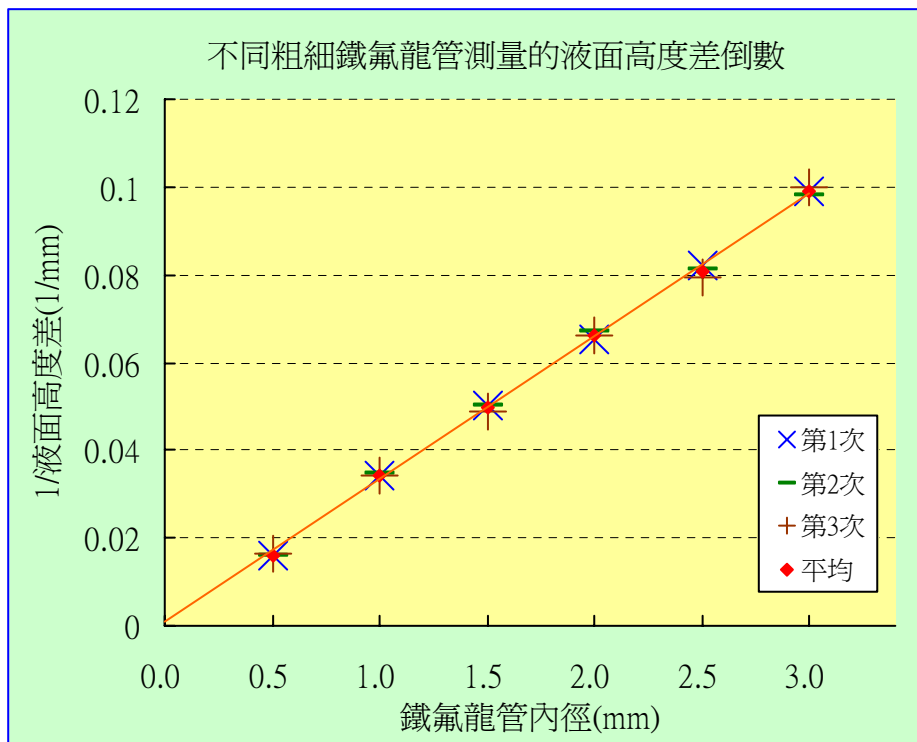
表 10：不同內徑鐵氟龍管的液面高度差：

單位：mm

| 高度差 次 \ 內徑 | (子) 0.5mm | (丑) 1.0mm | (寅) 1.5mm | (卯) 2.0mm | (辰) 2.5mm | (巳) 3.0mm |
|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 第 1 次 | 61.9 | 29.1 | 20.0 | 15.3 | 12.2 | 10.1 |
| 第 2 次 | 61.9 | 28.8 | 19.9 | 14.9 | 12.3 | 10.2 |
| 第 3 次 | 61.6 | 29.4 | 20.4 | 15.1 | 12.6 | 10.0 |
| 平均 | 61.8 | 29.1 | 20.1 | 15.1 | 12.4 | 10.1 |



圖三、鐵氟龍管內徑與液面高度差的關係圖



圖四、鐵氟龍管內徑與液面高度差倒數的關係圖

7. 發現與討論：

(1)與實驗一的玻璃管不同，在 A 端咖啡漏斗內加水，一開始就會發現 B 端鐵氟龍管內的液面高度比 A 端低；B 端液面到達管口後也不會凸出來形成一個大水珠，只有在出口處稍為凸出，而且不會接觸到管口牆面上的鐵氟龍。一旦繼續加水使 A 端液面到達一定的高度時(這個高度就是實驗數據)，出口處的水會突然凸起來變大形成水珠，然後不斷的溢出一顆一顆很圓的水珠。



照片 8：鐵氟龍管口的水只在開口處凸起來，不會沾到管口的鐵氟龍牆面上。此時 A 端玻璃漏斗內的水位已經比這個管口高。

(2)從表 9 的數據可以發現，內徑 0.5mm 的鐵氟龍子管，長度從 5cm 增加到 20cm 時液面高度差只增加了 0.8mm，相對於液面高度差超過 60mm 實在比例非常低。所以我們認為長度對鐵氟龍管的液面高度差幾乎是沒有影響的。如果長度完全沒有影響，那麼我們所測量到的液面高度差所代表的壓力，單純只有管口的大小會影響，這樣就可以代表真正的表面張力了！

(3)前面的實驗結果告訴我們，越細的管子越會受到長度的影響，那麼既然最細的[子]管都不會受到長度的影響，其他的丑、寅、卯、辰、巳管，都只做 5cm 的長度就好了，不再作長度的比較。

(4)不論從表 9 還是表 10 來看，同一種長度或內徑做 3 次結果都非常接近，誤差值很明顯的比玻璃管及吸管小，所以鐵氟龍管是相對比較可以準確測量的材質。

(5)從圖三看出，當管子細時液面高度差的變化量比較大，而當管子粗時液面高度差的變化量比較小；我們又發現，如果分別把內徑的大小和它的液面高度差相乘，竟然大約都是「30」！於是我們對液面高度差的倒數畫折線圖，結果發現每個點可以連成幾乎一直線(如圖四)，代表液面高度差和鐵氟龍管內徑的大小「成反比」。

四、實驗四：利用特殊設計的鐵氟龍管驗證反比關係

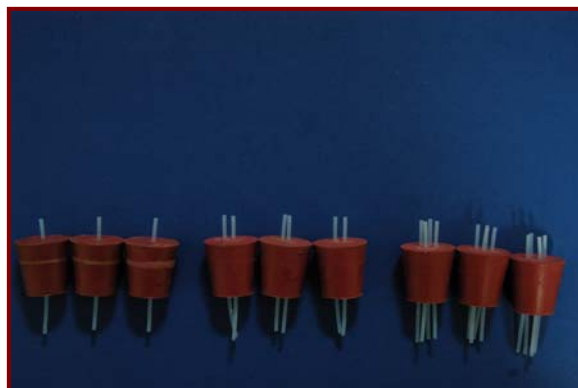
1. 背景說明：

雖然在實驗三的長度變因實驗中，我們證明了鐵氟龍管的長度不會影響測量的結果，但是因為實驗結果顯示液面高度差的高低與內徑的大小成反比，所以必須進一步證明這種「反比」關係並不是因為內徑大小的阻力不同所造成。

2. 兩種特殊設計的 B 端鐵氟龍管：

(1)取長 5cm 的鐵氟龍子管(內徑 0.5mm)，上面接一小段 1.5cm(其中 1cm 重疊)比較粗的寅(1.5mm)、卯(2.0mm)、辰(2.5mm)或巳(3.0mm)管。測量時如果液面高度差受到管子內的阻力影響比較大，那麼測量出來的結果就會和單獨子管的結果相近；反過來說，如果測量出來的結果比較接近單獨的寅、卯、辰、巳管液面高度差，那就代表管內阻力的影響比較小，而是開口表面的大小影響了液面高度差的變化。

(2)同時在橡皮塞上插 2 支或 4 支子管(內徑 0.5mm)。插 2 支管子時總阻力會減半，插 4 支管子時總阻力會變成四分之一；但每支獨立的管口直徑仍是 0.5mm，表面張力不會改變。如果液面高度差的變化完全是因為管子內的阻力所引起，那麼插 2 支子管的液面高度差就會變成單獨 1 支時的一半，而 4 支管時液面高度差是四分之一；反過來說，如果測量出來的結果都和 1 支時一樣的話，那就代表是表面張力的影響，與管內的阻力沒有關係。



照片 9：兩種特殊設計的鐵氟龍管。

3. 控制變因：

(1)測量液體：RO 水(28°C)。

(2)B 管材質：鐵氟龍管。

(3)A 管內徑：82mm。

4. 操縱變因：

(1)1 支子管，2 支子管，4 支子管。

(2)5cm 長的子管(0.5mm)上接寅(1.5mm)，卯(2.0mm)，辰(2.5mm)或巳(3.0mm)管。

5. 實驗過程：每種特殊設計的管子都做 3 支，7 種不同的設計，共 21 次測量。將同一種設計的數據取平均值，代表該種設計造成的液面高度差。

6. 實驗結果：特殊設計鐵氟龍管裝置所測量到的液面高度差如表 11。

表 11：子管(0.5mm)不同支數及接不同內徑開口的液面高度差： 單位：mm

| 高度差 次 | 子管 1 支 | 子管 2 支 | 子管 4 支 | 接寅管 1.5mm | 接卯管 2.0mm | 接辰管 2.5mm | 接巳管 3.0mm |
|----------|-----------|-----------|-----------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 第 1 次 | 59.6 | 60.1 | 59.8 | 20.5 | 15.3 | 13.1 | 11.4 |
| 第 2 次 | 60.7 | 59.4 | 60.1 | 19.7 | 15.6 | 12.8 | 10.6 |
| 第 3 次 | 60.0 | 60.4 | 60.0 | 21.1 | 14.6 | 12.1 | 10.3 |
| 平均 | 60.1 | 60.0 | 60.0 | 20.4 | 15.2 | 12.7 | 10.8 |

7. 發現與討論：

- (1)同時用 2 支或 4 支子管測得的液面高度差都和單獨 1 支時非常接近，並沒有因為鐵氟龍管數量加倍而使液面高度差減半，所以液面高度差受到管內阻力的影響很小。
- (2)接不同內徑開口的鐵氟龍管時，所得到的液面高度差都和實驗三中各種內徑管結果很接近，更證明液面高度差是因為開口的表面張力所造成，與下面管子的內徑比較沒有關係。
- (3)所測得的液面高度差與開口的大小也是成反比的關係，證明我們實驗三中的「反比關係」是因為表面開口的大小所形成的，並不是下面管子的阻力所造成。

五、實驗五：A 端(加水端)的內徑大小對液面高度差的影響

1. 背景說明：

連通管的 A 側因為是使用玻璃製品，由於玻璃對水的附著力大於水分子之間的內聚力，會產生向上的毛細現象，抵消掉液面高度差所產生的壓力，這樣會使測量到的液面高度差偏高而造成誤差，所以必須探討 A 端內徑對實驗結果的影響。(即使 A 端改用鐵氟龍等對水附著力低的材質，仍然會因為向下的毛細現象而產生誤差，所以本實驗不論用什麼材質，都是必須的)

2. 探討問題：A 端玻璃管的內徑大小，對液面高度差有多少影響？

3. 控制變因：

- (1)測量液體：RO 水(28°C)。
- (2)B 管：鐵氟龍子管(內徑 0.5mm)長 5cm。
- (3)A 管材質：玻璃。

4. 操縱變因：A 管內徑(直徑)：93.0mm，82.0mm，45.7mm，36.0mm，26.0mm，16.4mm，9.0mm，8.0mm，6.0mm，5.0mm。



照片 10：各種內徑的 A 端玻璃管。

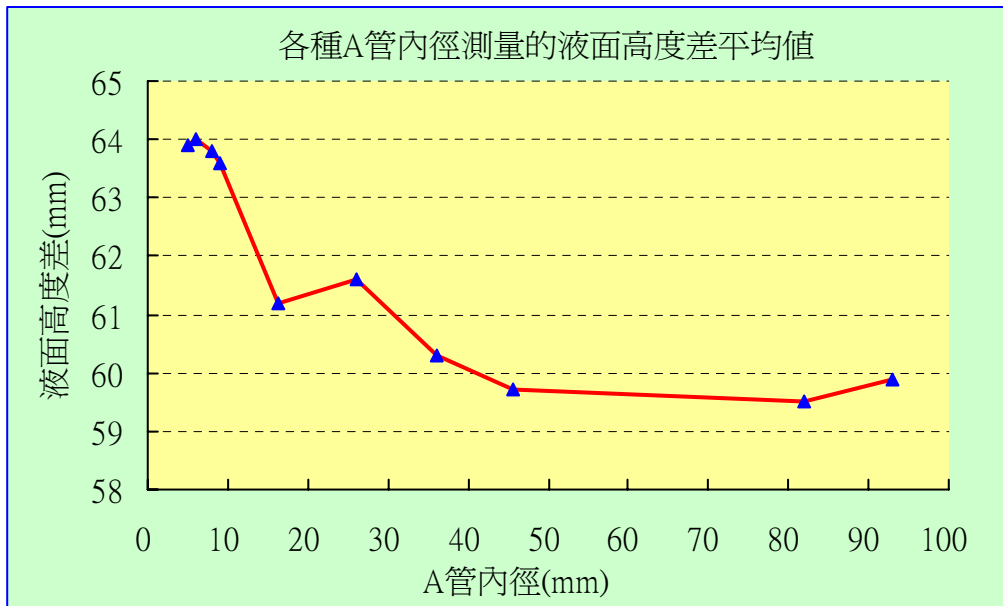
5. 實驗過程：每種管徑的 A 管都只有一支，用同一支重複做 3 次測量，取平均值做為該種 A 管的測量結果。

6. 結果：不同內徑玻璃 A 管所測量到的液面高度差如表 12；平均值比較如圖五。

表 12：不同內徑 A 管測量到的液面高度差：

單位：mm

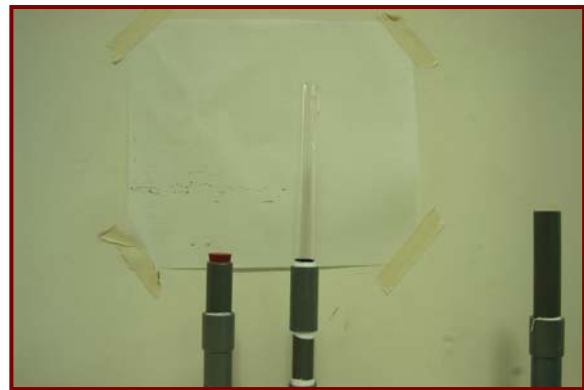
| 內徑 高度差 次 | 93.0 | 82.0 | 45.7 | 36.0 | 26.0 | 16.4 | 9.0 | 8.0 | 6.0 | 5.0 |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 第 1 次 | 60.2 | 59.6 | 59.6 | 61.1 | 61.8 | 61.5 | 63.7 | 63.6 | 64.0 | 63.1 |
| 第 2 次 | 60.0 | 59.6 | 59.4 | 60.0 | 61.5 | 61.0 | 64.0 | 63.9 | 63.9 | 64.6 |
| 第 3 次 | 59.6 | 59.2 | 60.0 | 59.8 | 61.6 | 61.1 | 63.2 | 64.0 | 64.2 | 64.0 |
| 平均 | 59.9 | 59.5 | 59.7 | 60.3 | 61.6 | 61.2 | 63.6 | 63.8 | 64.0 | 63.9 |



圖五、玻璃 A 管內徑大小與液面高度差關係圖

7. 發現與討論：

- (1)從表 12 及圖五所顯示的結果可以看出，A 端玻璃管若用太細的，會明顯產生預期中的毛細現象，而使得測量到的液面高度差偏高。
- (2)但是從內徑 36.0mm 到 93.0mm 之間的玻璃管，所測得的結果相差在 1mm 以內。因此若 A 端的玻璃管內徑大於 36mm，因為毛細作用而造成的液面高度差偏高效應微乎其微，所測量到的液面高度差產生的壓力，應該可歸因於 B 端管口的表面張力所致。



照片 11：內徑小於 36mm 的 A 管會使液面高度差偏高。

六、實驗六：各種溶液的表面張力

1. 背景說明：

我們知道純水中如果加入雜質，表面張力就會改變(降低)，尤其是如果加了介面活性劑，表面張力會大大的降低，這個現象可以用來驗證這一台自製的儀器，是否可以顯示出這些溶液的 surface tension 變化。

2. 探討問題：RO 水中加入不同的溶質，液面高度差是否會下降？

3. 控制變因：

- (1)B 管：鐵氟龍子管(內徑 0.5mm)及丑管(內徑 1.0mm)，長度都是 5cm。
- (2)A 管：煮咖啡器的直筒玻璃，內徑 82.0mm。
- (3)液體溫度：21°C。

4. 操縱變因：RO 水及下列各種溶液

| 溶液成份 | 備註 |
|-----------------|---------------------------------------|
| 1%糖水 | 自己配置，重量百分比(1g 糖 + 99gRO 水)。 |
| 10%糖水 | 自己配置，重量百分比(10g 糖 + 90gRO 水)。 |
| 1%鹽水 | 自己配置，重量百分比(1g 鹽 + 99gRO 水)。 |
| 10%鹽水 | 自己配置，重量百分比(10g 鹽 + 90gRO 水)。 |
| 1%洗碗精水 | 自己配置，重量百分比(1g 洗碗精 + 99gRO 水)。 |
| 10%洗碗精水 | 自己配置，重量百分比(10g 洗碗精 + 90gRO 水)。 |
| (10%洗碗精 + 1%鹽)水 | 自己配置，重量百分比(10g 洗碗精 + 1g 鹽 + 89gRO 水)。 |
| 肥皂水 | 拿一塊肥皂在 RO 水中搖兩下。 |
| 醬油 | 超市買現成的食用醬油。 |
| 沙拉油 | 超市買現成的食用沙拉油。 |
| 醋 | 超市買現成的食用醋。 |
| 95%酒精 | 藥房買現成的藥用 95%酒精。 |

5. 實驗過程：

- (1)因為怕溶液互相混合影響結果，所以針對不同的溶液做 8 支 5cm 長的[子]管及[丑]管。將這 16 支鐵氟龍管每支都用 RO 水測量一次，如果有一支管子對 RO 水的誤差值大於 2mm 就淘汰不要，重做一支。
- (2)因為每種溶液的密度不同，所以同樣的高度產生的壓力可能就不一樣，所以我們先測量每一種溶液的比重，記錄下來；再將測量到的液面高度差(h)乘以比重(ρ)。
- (3)同一種溶液，不同濃度時，從低濃度的溶液先做，再用高濃度沖洗，然後再做高濃度的。
- (4)換另一種溶液時，要先將整個裝置用大量的清水沖洗，再用新的溶液沖洗一次，然後再做下一種溶液。
- (5)操作步驟與前面的實驗相同，每一種溶液都做 3 次(同一支鐵氟龍管)，取平均值。共 12(種溶液) \times 2(種管徑) \times 3(次)=60 次實驗。



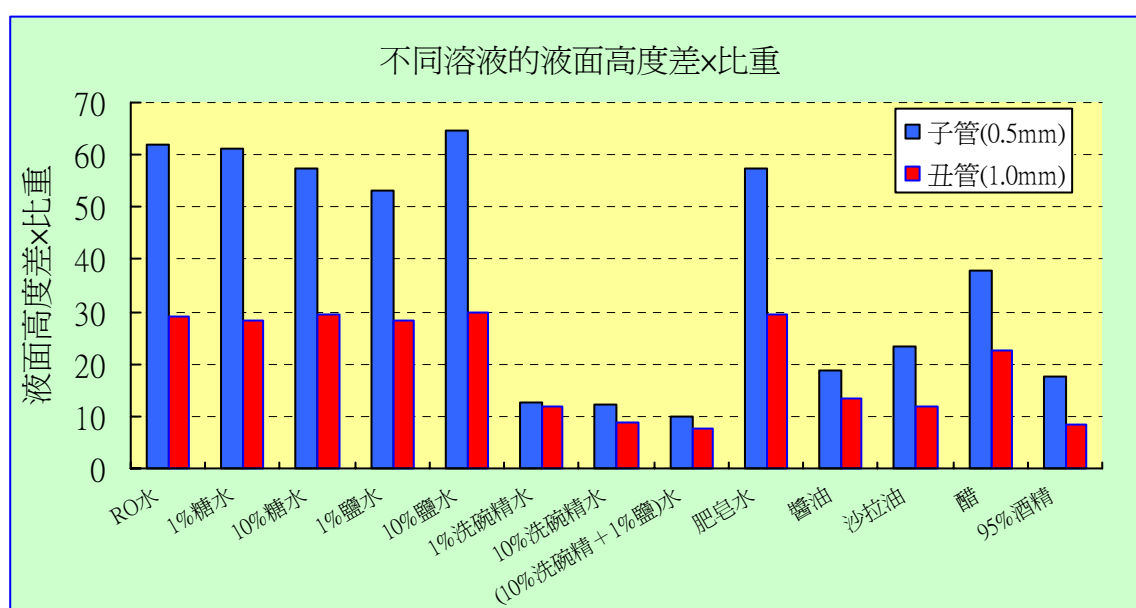
照片 12：測量溶液的比重。

6. 實驗結果：分別用子管(0.5mm)或丑管(1.0mm)測量各種溶液的液面高度差，將液面高度差(h)乘以比重(ρ)代表相當於純水的液面高度差，結果如表 13；結果的比較如圖六。

表 13：不同溶液測量到的比重及液面高度差

單位：mm

| 溶液 | 比重 | 內徑 | 第 1 次 | 第 2 次 | 第 3 次 | 平均(h) | h×比重(ρ) |
|---------------|-------|----|-------|-------|-------|-------|----------------|
| RO 水 | 1.001 | 子 | 61.9 | 61.9 | 61.6 | 61.8 | 61.9 |
| | | 丑 | 29.1 | 28.8 | 29.4 | 29.1 | 29.1 |
| 1%糖水 | 1.006 | 子 | 57.3 | 62.5 | 62.4 | 60.7 | 61.1 |
| | | 丑 | 29.0 | 26.6 | 29.0 | 28.2 | 28.4 |
| 10%糖水 | 1.044 | 子 | 53.9 | 60.7 | 50.2 | 54.9 | 57.3 |
| | | 丑 | 28.0 | 28.8 | 27.6 | 28.1 | 29.3 |
| 1%鹽水 | 1.008 | 子 | 49.1 | 51.5 | 57.5 | 52.7 | 53.1 |
| | | 丑 | 28.3 | 27.7 | 28.7 | 28.2 | 28.4 |
| 10%鹽水 | 1.076 | 子 | 59.2 | 60.3 | 61.0 | 60.2 | 64.8 |
| | | 丑 | 28.3 | 27.3 | 28.1 | 27.9 | 30.0 |
| 1%洗碗精水 | 1.006 | 子 | 12.9 | 12.8 | 12.4 | 12.7 | 12.8 |
| | | 丑 | 12.2 | 12.2 | 11.4 | 11.9 | 12.0 |
| 10%洗碗精水 | 1.013 | 子 | 11.5 | 13.2 | 10.9 | 11.9 | 12.1 |
| | | 丑 | 9.6 | 8.6 | 8.0 | 8.7 | 8.8 |
| (10%洗碗精+1%鹽)水 | 1.015 | 子 | 9.8 | 10.3 | 9.7 | 9.9 | 10.0 |
| | | 丑 | 7.7 | 6.9 | 7.8 | 7.5 | 7.6 |
| 肥皂水 | 1.002 | 子 | 52.2 | 60.0 | 59.9 | 57.4 | 57.5 |
| | | 丑 | 29.4 | 29.4 | 29.3 | 29.4 | 29.5 |
| 醬油 | 1.162 | 子 | 15.6 | 14.8 | 18.3 | 16.2 | 18.8 |
| | | 丑 | 13.3 | 11.1 | 9.9 | 11.4 | 13.2 |
| 沙拉油 | 0.930 | 子 | 25.9 | 25.7 | 24.4 | 25.3 | 23.5 |
| | | 丑 | 13.3 | 12.4 | 13.0 | 12.9 | 12.0 |
| 食用醋 | 1.020 | 子 | 37.0 | 36.8 | 37.5 | 37.1 | 37.8 |
| | | 丑 | 21.1 | 21.9 | 22.9 | 22.0 | 22.4 |
| 95%酒精 | 0.816 | 子 | 20.7 | 21.9 | 21.8 | 21.5 | 17.5 |
| | | 丑 | 10.5 | 10.7 | 10.4 | 10.5 | 8.6 |



圖六、各種溶液的(液面高度差×比重)比較圖

7. 發現與討論：

- (1)從表 13 的數據中發現，和 RO 水比較，當水中有加入雜質時，誤差值就會比較大，推測可能是這些雜質在水面的濃度不平均而造成。
- (2)並不是加入的雜質都會使表面張力變小，例如加入糖或鹽對表面張力的影響都不大。甚至於 10%的鹽水，表面張力比 RO 水還大；重複做了多次都得到同樣的結果，原來以為操作中間有錯誤，後來查了網路上的參考資料，才知道鹽水在某一個濃度範圍間，濃度越高表面張力就越大，我們並沒有做錯。
- (3)洗碗精溶液的液面高度差很低，符合事先預期它的表面張力很低；其他的溶液也有不等程度的下降。
- (4)除了洗碗精以外，幾乎所有的溶液都可以看出[子]管的液面高度差大都是[丑]管的 2 倍，也驗證我們之前「成反比」的結果是可信的。

七、實驗七：液面高度差與表面張力之間的關係

1. 背景說明：

綜上所述，我們找出液面高度差與表面張力有關係，但我們更想進一步知道，液面高度差能不能直接與表面張力(dyne/cm)作轉換。因此，我們需要取已經知道表面張力標準值的液體來做實驗，看看液面高度差和已知的表面張力標準值之間是否有什麼相關性。

2. 探討問題：不同液體的液面高度差是否和其表面張力的大小呈線性相關？

3. 控制變因：

- (1)B 管：鐵氟龍子管(內徑 0.5mm)，長度 5cm。
- (2)A 管：煮咖啡器的直筒玻璃，內徑 82.0mm。
- (3)液體溫度：20°C。

4. 操縱變因：

- (1)我們用純的液體來做比較，而不是用水溶液；因為水溶液經過泡製，誤差比較大，用單純的 100%液體，就不會有這個問題。
- (2)我們先上網找資料，看看有沒有各種液體的標準表面張力，結果找到下列的資料：

| 液體(20°C) | 表面張力(dyne/cm) | 選用與否 |
|----------|---------------|------------------|
| 苯 | 28.9 | 有毒，不選用 |
| 甘油 | 63.1 | 可以選用 |
| 水銀 | 465.0 | 有毒，且會汙染環境，不選用 |
| 橄欖油 | 32.0 | 可以選用 |
| 酒精 | 22.3 | 可以選用，但要通風良好且須帶眼罩 |
| 水 | 72.8 | 可以選用 |
| 乙醚 | 16.5 | 是麻醉劑，蒸氣有毒，不選用 |
| 石油 | 26.0 | 不知是哪種石油，不選用 |

- (3)選用液體：純水(化學材料行買二次蒸餾的純水)，純酒精(化學材料行買 100%的酒精)，甘油(化學材料行買純甘油)，橄欖油(超級市場買 100%橄欖油)。

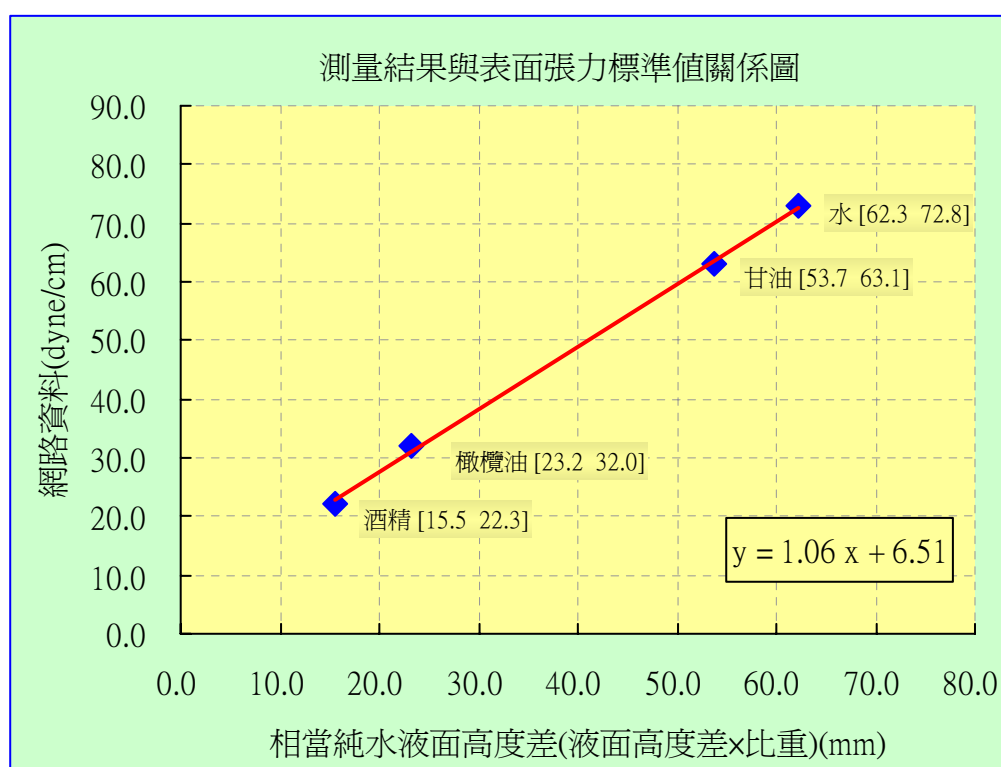
5. 實驗過程：

- (1)在冷氣房裡把室溫調整在 20°C，四種液體放在房間內，等液體的溫度也維持在 20°C 才做實驗。實驗過程中在液體內放一根溫度計，隨時注意溫度是否維持在 20°C。
- (2)測量每一種液體的比重，計算液面高度差(h)乘以比重(ρ)。
- (3)依據實驗步驟，每種液體都做 3 次，取平均值，共 4(種液體) \times 3(次)=12 次實驗。

6. 實驗結果：四種標準液體的表面張力標準值及測量到的液面高度差與比重如表 14；乘以比重後的相當於水的液面高度差與表面張力標準值之間的關係如圖七。

表 14：不同液體的表面張力及測量到的液面高度差與比重： 單位：mm

| 液體 | 已知表面張力 | 比重 | 第 1 次 | 第 2 次 | 第 3 次 | 平均(h) | $h \times$ 比重(ρ) |
|-----|---------------|-------|-------|-------|-------|-----------|-------------------------|
| 純水 | 72.8(dyne/cm) | 1.000 | 62.4 | 62.5 | 62.1 | 62.3 | 62.3 |
| 甘油 | 63.1(dyne/cm) | 1.264 | 41.7 | 44.4 | 41.3 | 42.5 | 53.7 |
| 橄欖油 | 32.0(dyne/cm) | 0.926 | 24.4 | 25.5 | 25.1 | 25.0 | 23.2 |
| 酒精 | 22.3(dyne/cm) | 0.789 | 19.2 | 20.1 | 19.6 | 19.6 | 15.5 |



圖七、不同液體測量結果與網路上查到的表面張力標準值關係圖

7. 發現與討論：

- (1)發現(液面高度差 h) \times (比重 ρ)後的(相當純水液面高度差 H)，與網路上查到的表面張力標準值之間的關係，竟然可以連成一條直線，代表相當高度差 H 與表面張力 T 之間呈線性關係。
- (2)以線性回歸的統計方法計算，可以算出直線的方程式 $T=10.6H+6.51$ ，其中 T (dyne/cm) 是表面張力標準值， H (cm)是計算(液位差 $h \times$ 比重 ρ)後的相當純水液面高度差。
- (3)雖然只有四個點，但線性相關係數高達 $r=0.9996$ (統計上 $p<0.0005$)，顯示以這種連通管液面高度差的方法來量測表面張力相當準確。也可以用這個線性方程式將液面高度差轉換成傳統上以達因/厘米(dyne/cm)的表式法。

八、實驗八：應用實例

1. 背景說明：

在鹽水溪的流經之處有幾個工業區，使得鹽水溪受到嚴重污染。因為工廠排放的廢水含有許多的污染物，水中雜質多，且電子工業區可能有清洗電路板的介面活性劑，我們推測溪水的表面張力應該會受到這些污染而降低，因此我們決定用自己發明的這個裝置來測量溪水的表面張力。



2. 探討問題：受到污染的溪水，表面張力是否會下降？

3. 測量裝置：

(1)B 管：鐵氟龍管子(內徑 0.5mm)，長度 5cm。

(2)A 管：煮咖啡器的直筒玻璃，內徑 82.0mm。

(3)液體溫度：27°C。

4. 取水位置：鹽水溪上游有兩條主要支流，許縣溪和潭頂溪，另外從台南科工區有一條不知名的支流。從支流到出海口共取 14 處河水，從橋的中央將水桶繫著繩子朝河水向下放，撈取河中央在流動的水。

照片 13：取河流中央流動的水。

5. 實驗過程：

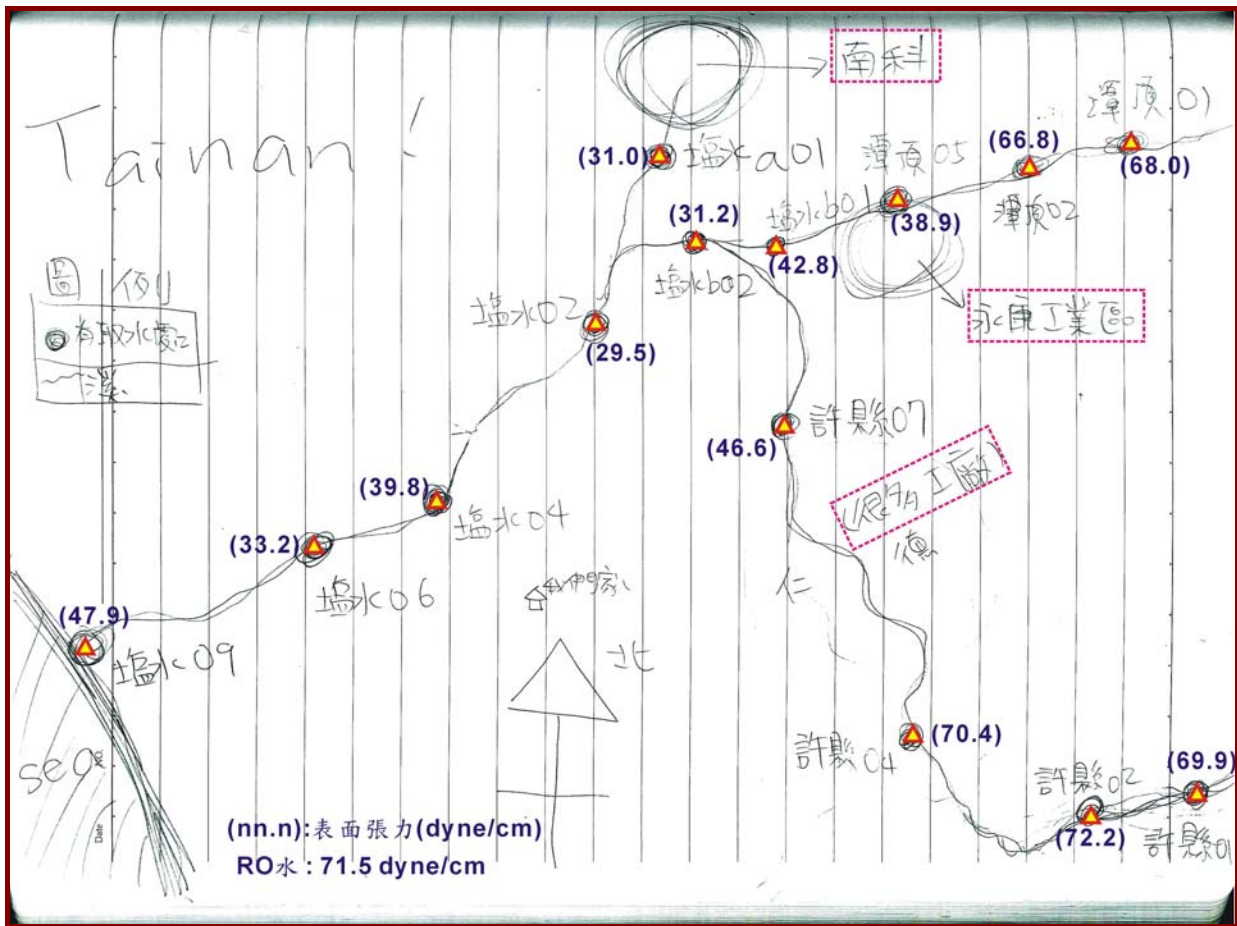
(1)取回的溪水先逐一測量比重，再以實驗裝置測量液面高度差。

(2)將液面高度差和比重的測量結果帶入實驗七所推算出來的公式，轉換成表面張力。

6. 實驗結果：鹽水溪及其支流各取水點的溪水液面高度差與推算之表面張力如表 15；表面張力與取水點及工業區之間的地理關係如圖八。

表 15：不同位置溪水測量到的比重，液面高度差及轉換後的表面張力。

| 取水位置 | 比重 | 液面高度差(mm) | 以($T=10.6H+6.51$)轉換成 dyne/cm |
|--------|-------|-----------|--------------------------------|
| RO 水 | 1.000 | 60.3 | 70.4 |
| 許縣溪 01 | 0.999 | 59.9 | 69.9 |
| 許縣溪 02 | 1.000 | 60.1 | 72.2 |
| 許縣溪 04 | 1.000 | 60.3 | 70.4 |
| 許縣溪 07 | 1.001 | 37.8 | 46.6 |
| 潭頂溪 01 | 1.001 | 58.0 | 68.0 |
| 潭頂溪 02 | 1.001 | 56.8 | 66.8 |
| 潭頂溪 05 | 1.001 | 30.6 | 38.9 |
| 鹽水溪 b1 | 1.001 | 34.2 | 42.8 |
| 鹽水溪 b2 | 1.002 | 23.3 | 31.2 |
| 鹽水溪 a1 | 1.002 | 23.1 | 31.0 |
| 鹽水溪 02 | 1.002 | 21.7 | 29.5 |
| 鹽水溪 04 | 1.004 | 31.3 | 39.8 |
| 鹽水溪 06 | 1.008 | 25.0 | 33.2 |
| 鹽水溪 09 | 1.026 | 38.0 | 47.9 |



圖八、取水點與該溪水表面張力及工業區之間的地理關係圖

7. 發現與討論：

- (1)在上游水質比較清澈，表面張力都比較大，可能是沒有受污染的關係。
- (2)河流經過了工業區之後，溪水表面張力都明顯的變小，而且還有一股難聞的臭味，可能是工廠排放的廢水把溪水污染了的關係。
- (3)最後的出海口附近因為海水的潮汐，使溪水混了含鹽的海水而稀釋，因此表面張力又稍微升高。

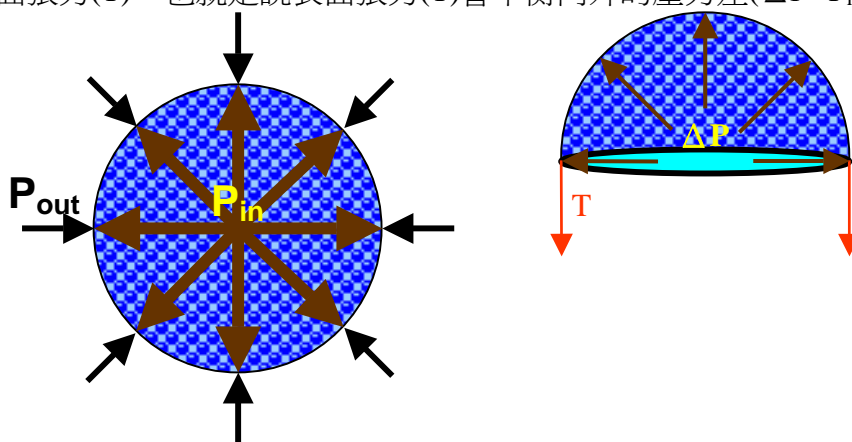


照片 14: 鹽水溪上游(左)及中下游(右)的水質顏色完全不一樣。

陸、綜合討論

- 考慮到在第二節「原理」中所述，A 端的毛細現象及 B 端凸出水珠的重量會影響測量的結果，所以要越小越好。在實驗五中我們證明 A 管內徑如果大於 36mm，由 A 端產生的毛細力對液面高度差的影響就非常小了，我們很容易就可以解決此因素。但是 B 端凸出水珠的重量就很難評估了，不同內徑及材質的 B 端細管會產生大小不一、圓扁不一的凸出水珠，甚至如果使用玻璃管時，因為管斷面的玻璃也會附著水，所以水珠每次都形狀不同，所以很難把水珠重量的因素算進去。還好使用鐵氟龍管發現，在表面張力作用使水不會溢出 B 端管口時，鐵氟龍管口的水面只有一點點浮起來，因此我們認為，使用鐵氟龍管時水珠的重量很小，可以忽略不計。
- 事實上因為鐵氟龍管口的水面只有一點點浮起來，可能還有另外一個優點。在考慮不同內徑對液面高度差的影響時，玻璃管及塑膠吸管所凸出來的水珠，有時直徑會超過管口的邊緣，這時表面張力所施力的面可能就變得更為複雜，而不是原來的口徑了；而鐵氟龍管只有管口中央浮起來，表面張力的施力面就正好等於管口的截面積，因此可以準確測量，而且發現了液面高度差與管口內徑「成反比」的現象。
- 雖然這個「成反比」的現象是我們在實驗結果中自己看出來的，但在研讀了相關的物理書籍後，發現這個現象是合理的，而且理論上球型水珠或氣泡的表面張力也是和其半(直)徑成反比。所以液面高度差與鐵氟龍頂端開口的直徑成反比，更證明了我們測量到的液面高度差可以代表液體的表面張力大小。關於這一點的理論說明如下：

- 以無重力狀態下的一個靜止的球型小水滴來看，水滴內的壓力(P_{in})應等於水滴外的壓力(P_{out})加上表面張力(T)，也就是說表面張力(T)會平衡內外的壓力差($\Delta P = P_{in} - P_{out}$)。



- 考慮上右圖半球的受力，靜止狀態下往下的力要等於往上的力，其中往下的力是由表面張力而來，在這個例子中往下的力等於($T \times 2\pi r$)，往上的力是($\Delta P \times \pi r^2$)，其中 r 代表半徑；因此($T \times 2\pi r$) = ($\Delta P \times \pi r^2$)，推得 $\Delta P = \frac{2T}{r}$ 。
- 在連通管 B 端管口面往下的作用力，則要加上凸出水珠的重力 $\rho \frac{4}{3} \pi r_B^3 g$ (因為每一種材質的管子凸出水珠的形狀不一，先以整顆球形水珠計算，實際應該更小)，其中 r_B 是 B 端細管的半徑；因此 $[T \times 2\pi r_B + \rho \frac{4}{3} \pi r_B^3 g] = (\Delta P \times \pi r_B^2)$ ，推得 $\Delta P = \frac{2T}{r_B} + \frac{\rho \frac{4}{3} \pi r_B^3 g}{\pi r_B^2}$ 。
- 因為在連通管兩端等高的位置壓力應該相等，意即一開始在第二節基本原理中所述的(凸出水珠的表面張力造成壓力差+凸出水的重力壓力) = ($h-y$ 水柱壓)。因此

$$\Delta P = \frac{2T}{r_B} + \frac{\rho \frac{4}{3} \pi r_B^3 g}{\pi r_B^2} = [\rho \times g \times (h - y)]$$
，其中 $y = \frac{2T \cos \alpha}{\rho g r_A}$ 為 A 管毛細現象所造成高度差， α 為液面與 A 管壁之交觸角， r_A 是 A 管的半徑。

5. 這個關係最後可以推導出這種連通管測量表面張力的理論值：
$$T = \frac{\rho g r_B \left(\frac{h}{2} - \frac{2}{3} r_B \right)}{1 + \frac{r_B}{r_A} \cos \alpha}$$

(1) 這個式子分子部分的 $\left(\frac{h}{2} - \frac{2}{3} r_B \right)$ 代入實驗七純水的數據， $h=6.23\text{cm}$ ， $r_B = 0.025\text{cm}$ ，比較數據誤差約 0.53%；這是考慮半徑為 r_B 的整顆圓球水珠的重量，實際情形還會更低，故水滴重量可忽略。

(2) 分母部分 $1 + \frac{r_B}{r_A} \cos \alpha$ 代入實驗七的數據 $r_B = 0.025\text{cm}$ ， $r_A = 4.1\text{cm}$ 比較數據誤差最大約 0.61% (以 $\cos \alpha = 1$ 計算，實際情形會更低)，故 A 管毛細現象所造成高度差也可忽略。

6. 若忽略凸出水的重力壓力和毛細現象所造成高度差，就可以簡化為 $\frac{2T}{r_B} = [\rho \times g \times h]$ ，最

後推導出 $T = \frac{r_B \times (\rho \times g \times h)}{2}$ (最大會有多約 1% 的誤差)。而因為其中的 T 、 ρ 、 g 都是定值，所以液面高度差高度 (h) 會與管口半徑 (r_B) 成反比。所以我們所做出來「液面高度差與 B 管內徑成反比」的結果，與理論上的推導結果完全吻合。

四、若將我們所測量出來的液面高度差帶入上述的推導結果 $T = \frac{r_B \times (\rho \times g \times h)}{2}$ ，可以直接

算出表面張力值。但是我們試算之後發現有較大的誤差，以實驗七的數據來看可以得到 $T_{(水)}=76.3\text{dyne/cm}$ ， $T_{(甘油)}=65.8\text{dyne/cm}$ ， $T_{(橄欖油)}=28.4\text{dyne/cm}$ ， $T_{(酒精)}=18.9\text{dyne/cm}$ 。我們認為這是因為在測量當中，有許多無法避免的誤差因素 (例如：液體的黏滯力、細管的吸附力、人為誤差...等)，我們只能想辦法將其降低，但最終仍然無法完全相等於理論上的理想結果。因此我們主張，所測量出來的液面高度差，還是以實驗七所估算出來的轉換公式【 $T=10.6(h \times \rho)+6.51$ 】 (h 在這裡以 cm 計) 來計算，會比較接近實際情形。各種換算方法所得的結果及與標準值比較的誤差如下表 16：

表 16：實驗七的結果以不同公式換算成表面張力及與標準值之間的誤差

| 液體 | 網路資料 表面張力 (dyne/cm) | 比重 | 液面 高度 差 (mm) | 代入 $T = \frac{r_B \times (\rho \times g \times h)}{2}$ (dyne/cm) | 誤差 (%) | 代入 $T = \frac{\rho g r_B \left(\frac{h}{2} - \frac{2}{3} r_B \right)}{1 + \frac{r_B}{r_A} \cos \alpha}$ (dyne/cm) | 誤差 (%) | 代入 $T = 10.6(h \times \rho) + 6.51$ (dyne/cm) | 誤差 (%) |
|-----|---------------------------|-------|-----------------------|--|-----------|--|-----------|---|-----------|
| 純水 | 72.8 | 1.000 | 62.3 | 76.3 | 4.81 | 75.4 | 3.57 | 72.5 | -0.41 |
| 甘油 | 63.1 | 1.264 | 42.5 | 65.8 | 4.28 | 64.9 | 2.85 | 63.4 | 0.48 |
| 橄欖油 | 32.0 | 0.926 | 25.0 | 28.4 | -11.2 | 27.8 | -13.1 | 31.0 | -3.12 |
| 酒精 | 22.3 | 0.789 | 19.6 | 18.9 | -15.2 | 18.5 | -17.0 | 22.9 | 2.69 |

- 五、既然 A 端會有毛細現象的影響，那麼 B 端難道就不用考慮毛細現象嗎？事實上因為 B 端使用內徑很小的管子，所以毛細現象會非常的明顯，這在實驗過程中就可以看出來。在 A 端慢慢加水而 B 端細管中的液面高度還沒有到達管口前，若是使用玻璃管時 B 端液面高度會明顯比 A 端粗管中的液面高度高，而使用鐵氟龍管時則 B 端液面高度比 A 端粗管中的液面高度低，這就是毛細現象的結果。但是當液面高度上升到達 B 端管口時，因為液體在管口的頂端，側面上方已經沒有玻璃(或鐵氟龍)，不會再因為毛細現象把液體往上拉，因此這時候可以不必考慮 B 管中的毛細現象。
- 六、我們思考了整個系統可能會有的誤差包括：(1)水平儀的雷射光投影在牆上紙張的寬度有 1mm，雖然我們用游標尺定位在 1mm 寬的中心點以求準確，但誤差仍會產生，因此小數點後第一位即為估計值；(2)雖然鐵氟龍管對水的附著力很小，但並不是「0」，所以前面各實驗中因為附著力而產生的誤差仍會存在，只是使用鐵氟龍誤差會比較小；(3)A 端玻璃管雖然很寬了，但理論上毛細現象並不等於「0」；(4)鐵氟龍管口的水珠重量雖然很小，但也不是「0」；(5)實驗過程中管口的水珠表面受到空氣的吹拂，會干擾表面水分子的穩定，影響表面張力的測量結果。在我們的實驗中這些因素都已經盡量的降低，但無法完全避免。不過如果思考其他目前各種測量表面張力的儀器，不論是利用拉薄膜、水珠重量、氣泡壓力、接觸角、毛細現象測量等方法，也都有一些無法完全避免的誤差因素。
- 七、反過來說，這種以連通管液面高度差測量表面張力的儀器和其它種類的儀器比起來有很多的優點：
1. 很便宜，材料只有水管、壞掉的咖啡器玻璃漏斗、和一小段鐵氟龍管。在家裡就可以自己做一台，材料成本不會超過 200 元。
 2. 做出來的結果可以換算成大家在使用的表面張力單位，而且很準確。
 3. 攜帶方便，外出時可先拆卸攜帶，要用時再組裝。可以到野外的時候測量泉水的表面張力，如果表面張力比水低很多，代表雜質很多，不可以喝。也可以測量河水污染的程度。

柒、結論與應用

- 一、經過了許多實驗後，我們證明了一邊高一邊低的連通管中，在低管口端液體滿出來的時候，高管口端的液面高與液體的表面張力有關係。利用這個原理我們做了一個表面張力測量儀；為了測量準確，在低管口端要使用對測量液體沒有附著力(鐵氟龍)的細管(內徑 0.5mm)，在高管口端要用粗內徑的管子(內徑>36mm)。測量出來的液面高度差經過換算成表面張力之後，可以與傳統儀器測量的表面張力做比較，誤差比例在 3% 之內。
- 二、將來如果因為材料科技的進步，能有一種對任何液體都完全沒有附著力的材質做為細管，這種測量表面張力的方法還會更準確。
- 三、這是一個嶄新的發明，我們查過資料並沒有發現以前有人用這種連通管的方法來測量表面張力。雖然有一點點無法避免的誤差，但這個裝置非常簡單、便宜實用，而且攜帶方便、不用電能，野外組裝起來就能隨時使用。而且它所使用的原理簡明易懂，在各級學校都可以自己製作，作為教學或實驗用。

捌、參考資料

一、中文參考資料

1. 林麗華著 (2002) 趣味科學攜遊記第二冊 建宏出版社。
2. 林麗華著 (2007) 空氣與水的遊戲 國立台灣科學教育館。
3. 柯賢文著 (2007) 表面張力的應用 科學發展 411 期 p48-51。
4. 蘇賢錫著 (1991) 表面張力 國立台灣師範大學科學教育中心編印。
5. F.W. Sears, H.D. Young, M.W. Zemansky; 張桐生譯 (1976) 大學物理學上冊 臺灣中華書局 第十二章流體靜力學 p280-307。

二、英文參考資料

1. Uri Paz, Hillel Rubin(1970):Surface Tension Observation in Distilled and Saline Water Interface. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*. Vol. (3); p509-511.

三、網路資源

1. 靜止流體的力學性質 取自 http://140.111.104.1/BASIC_SCIENCE/P2/107A.ppt。
2. How does dissolving substances in water affect surface tension? From <http://www.acs.ucalgary.ca/~schramm/explan.htm#1>

評語

創意新穎，並以簡單的儀器量出不容易以平常方法測量的物理量。理論的分析亦非常精確，殊為難得。