

中華民國第 56 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高級中等學校組 物理與天文學科

第二名

051814

Liquid Film Motor

學校名稱：國立彰化高級中學

作者： 高二 許睿安 高二 魏韶逸	指導老師： 劉翠鵬
-------------------------	--------------

關鍵詞：Electrohydrodynamics (EHD)

摘要

一片泡泡薄膜，在通有電流的狀況下，再加上垂直方向的高壓外電場，懸浮薄膜便會開始自發性的旋轉。高壓外電場使薄膜液面產生靜電感應，液面上正負電荷分別分布在靠近電極金屬板的兩側，再加上液膜兩端的電位差形成的電泳電場，會對感應電荷造成電力，而使液膜開始旋轉。

根據過去文獻得知，影響其轉動狀況的變因有高壓外電場、電泳電場、液膜性質等，本次研究將觀察各變因對其轉動狀況的影響，紀錄、分析並推出結論。

壹、研究動機

曾在影音媒體上看過一段影片，一片類似泡泡的薄膜，在某些特定條件下，懸浮液膜竟然開始旋轉，此特殊現象可藉由薄膜干涉清楚觀察到。後來在好奇心的驅駛下，上網查閱相關資料得知，此種裝置稱作「Liquid Film Motor」，是一種置於均勻高壓外電場中並在垂直電場方向的兩端通以電流時，會旋轉的懸浮液膜，這不禁更加令我們好奇，泡泡與電流和電場，看似中學課本習以為常的名詞，為何能產生如此有趣的現象？為了探究這神奇的轉動現象，我們開始研究相關領域的文獻資料，希望能夠找出各項變因之間的關係，建構一完整的轉動模型。

貳、研究目的

由過去文獻得知，影響懸浮液膜旋轉的變因分為：高壓外電場、電泳電場、液膜性質等，本實驗藉由基礎觀念著手設計實驗以探究下列各項變因的關係，找出完整的轉動模型。

- 一、探究液膜旋轉方向與高壓外電場 \vec{E}_{ext} 方向和電泳電場 \vec{U}_{el} 方向之關係
- 二、探究致使液膜旋轉的門檻條件與液膜黏滯度的關係
- 三、探究致使液膜旋轉的門檻條件與液膜厚度 h 的關係
- 四、探究液膜旋轉週期 T 以及平均切線速率 u 與旋轉半徑 R 之關係
- 五、探究液膜旋轉時的角速度 ω 與高壓外電場 \vec{E}_{ext} 之關係
- 六、探究液膜旋轉時的角速度 ω 與電泳電場 \vec{U}_{el} 之關係
- 七、探究液膜旋轉週期 T 與液膜厚度 h 之關係
- 八、探究液膜旋轉週期 T 與液膜導電度 D 之關係
- 九、探究液膜在交流的電泳電場 \vec{U}_{el} 作用下的轉動情形

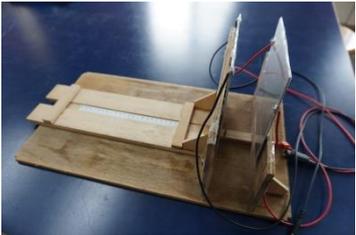
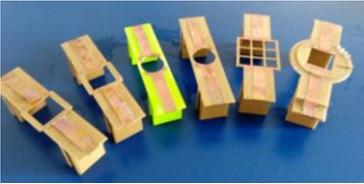
十、探究液膜旋轉時的角速度 ω 與高壓外電場方向 \vec{E}_{ext} 和電泳電場方向 \vec{U}_{el} 的夾角 θ 之關係

參、研究設備及器材

一、研究設備

高壓電源供應器	普通電源供應器	訊號產生器
		
運算放大器	示波器	相機
		

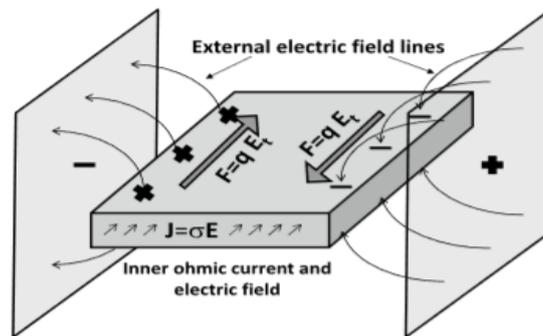
二、研究器材及軟體

木製底座+金屬板電極	3D 列印液膜框架	銅導電膠帶
		
數位式三用電表	tracker	Microsoft Excel 2010
		
介面活性劑 (台塑生醫 Dr's Formula 皮脂平衡沐浴精)	甘油	氯化鈉(食鹽)

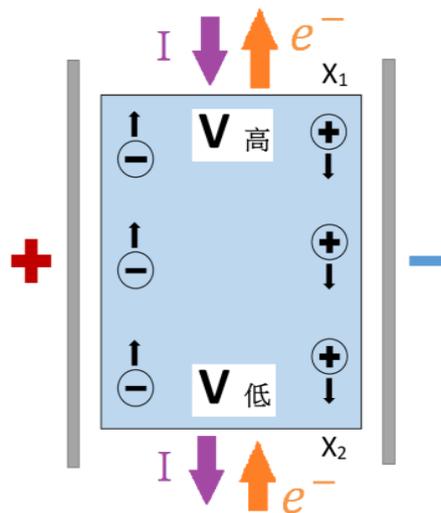
肆、研究過程或方法

一、實驗理論

置於均勻大電場中的懸浮液膜，可視為一種電介質，會因為兩金屬板電極上的大量電荷，發生的靜電感應，致使溶液中的電荷分布在靠近電極金屬板的兩側，同時，液膜上的感應電荷又會改變原本兩平行金屬板間的均勻電場，使兩平行金屬板間的電力線形成如(圖一)所示。而液膜兩端的電位差所形成的電泳電場，則會對分布在兩側的感應電荷造成電力，兩側因為荷性相反，導致兩側作用力方向相反，兩側電荷移動方向亦相反，如(圖二)所示。再者，當電流方向由高電位(圖二) X_1 位置，流到低電位(圖二) X_2 位置時，液膜上的感應正電荷亦由 X_1 移動到 X_2 ，在 X_2 處與電流方向相反的電子流所傳遞的電子電荷中和，相對地，在 X_1 處不斷有溶液解離，解離出的電子由外電路回到 X_1 ，解離後的正電荷則如上述方式移動到 X_2 ，如此不斷循環，電荷移動同時也帶動液膜移動，進而使液膜發生轉動。



(圖一)



(圖二)

二、實驗設置

(一) 溶液：

加入甘油減緩水分蒸發，再加入界面活性劑幫助溶液形成干涉條紋。

1. 溶液 A：重量百分濃度 36%甘油水溶液+界面活性劑少許(折射率 1.38)
2. 溶液 B：重量百分濃度 56%甘油水溶液+界面活性劑少許(折射率 1.41)
3. 溶液 C：重量百分濃度 78%甘油水溶液+界面活性劑少許(折射率 1.43)
4. 溶液 D：溶液 A +過量食鹽(折射率 1.41)

(二) 金屬板電極：

1. 為確保使用高壓電源過程上的安全，金屬板和導線以焊接的方式固定，連接到高壓電源供應器，最後再將整片金屬板電極貼上不導電的膠膜，相互隔絕開來，避免實驗過程發生放電的意外。
2. 為避免兩塊金屬板電極因為距離增加而導致邊界效應愈發明顯，進而致使懸浮液膜處在一不均勻的電場當中，我們採用了相對大面積的金屬板電極，並盡量使懸浮液膜置於兩金屬板電極正中央，降低邊界效應的影響。

(三) 木製底座：

為確保使用高壓電源過程上的安全，自行設計並製造了一個可活動式的木製底座，並在其相對面處黏上金屬板電極並畫上刻度，以便藉由水平推移木製底座並讀取刻度從而得知兩金屬板電極間距，進而得知高壓外電場大小。

(四) 3D 列印液膜框架與金屬膠帶：

為了使實驗更加精準及穩定，我們利用 3D 列印技術製作出特定尺寸的液膜框架，甚至是不同形狀的框架，並在液膜框架的對邊各貼上一條導電膠帶，以便通以電流。

三、實驗方法

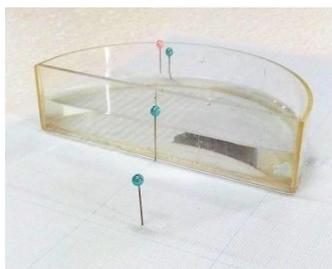
(一) 泡製液膜：

將框架浸置於溶液 A 中並拿起，拭乾多餘的液體，將其固定在支撐架上，形成一懸浮液膜 A，以同樣的方式，製作懸浮液膜 B、C、D。

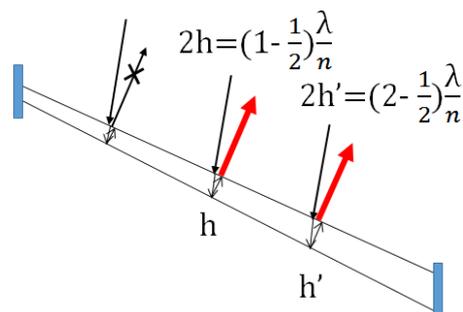
(二) 測量液膜厚度 h ：

1. 利用插針法量測溶液折射率：

將溶液倒至一半圓形透明塑膠盒，放置在一保麗龍板上，中間鋪上方格紙，在半圓形透明塑膠盒一側的保麗龍板上插上大頭針，眼睛在另一側觀察，在特定角度插上大頭針，使所有大頭針影像重合，如此得以畫出光徑，計算入射角、折射角，根據司乃爾定律求得溶液折射率，經過實驗得到溶液 A、B、C、D 的折射率分別為 1.38、1.41、1.43、1.41。（裝置圖見圖三）



(圖三)



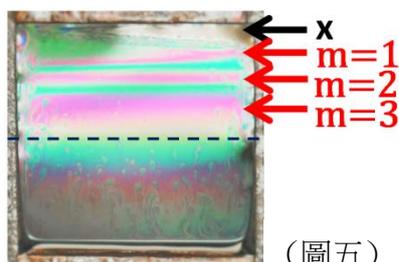
(圖四)

2. 利用薄膜干涉計算液膜厚度 h ：

根據空氣中薄膜產生建設性干涉的條件，即可推得 $h = \frac{1}{2} \left(m - \frac{1}{2} \right) \frac{\lambda}{n}$ ， h 為液膜厚度， λ 為色光波長， n 為液膜折射率， m 則表示厚度與波長的倍數關係(示意圖見圖四)，為了確定 m 值，我們將框架連同懸浮液膜小角度傾斜，靜置一段時間，使液膜厚度呈現由上而下遞減的情形，直至液膜色帶清楚出現且液膜上端的厚度不足以對任何可見光形成建設性干涉，即液膜上端沒有任何色帶，如此便可以確定下方第一條色帶的 m 值即為 1，下方第二條相同顏色色帶的 m 值即為 2，以此類推，只需觀察液膜中央色帶的顏色，並記下該色帶是第幾條，便可以確定該處的液膜厚度，又由於液

膜的厚度呈現由上而下遞減的情形，所以可以用液膜中央處的膜厚，代表整

體液膜厚度。(詳見圖五)



(圖五)

*備註：以(圖五)為例，此為溶液 A 的液膜，折射率為 1.38，中央處為 $m=3$ 的黃色色帶，黃色光波長介於 570~590 (nm)，取中間值 580 (nm) 故膜厚 $h =$

$$\frac{1}{2} \left(3 - \frac{1}{2} \right) \frac{580}{1.38} \cong 525 \text{ (nm)}$$

(三) 電泳電場 \vec{U}_{el} :

電源供應器分別接上 3D 列印的液膜框架上黏貼的導電膠帶，以在框架中央處建立電泳電場 \vec{U}_{el} 。

(四) 量測電泳電場 \vec{U}_{el} :

使用三用電表以並聯的方式跨接到電源供應器的兩輸出端，再測量框架的邊長，根據公式 $E = V/d$ ，即可求得電泳電場 \vec{U}_{el} 大小。在交流的電泳電場 \vec{U}_{el} 的實驗中則改以示波器代替三用電表進行量測的工作。

(五) 高壓外電場 \vec{E}_{ext} :

利用高壓電源供應器連接兩間距可調整的金屬板電極進而在其中央製造一均勻電場。

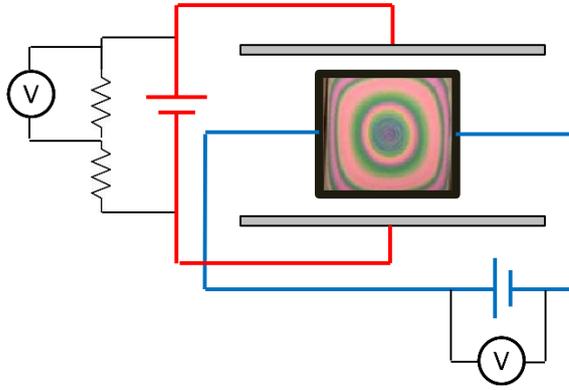
(六) 量測高壓外電場 \vec{E}_{ext} :

使用三用電表量測兩塊金屬板電極間的電位差，由於我們使用的高電壓遠遠超過三用電表所能量測的最高電壓，所以我們利用電阻串聯的方式，將 10 個 10M 的電阻焊接串連在一起，如此只需量測其中一個電阻兩端的電位差，即可推算兩塊金屬板電極間的電位差，進一步測量兩塊金屬板電極間的距離，根據公式 $E = V/d$ ，即可求得電場大小。

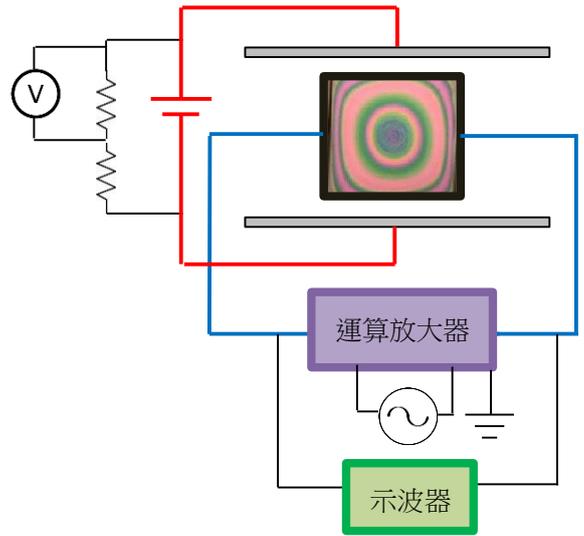
(七) 裝置架設：

將懸浮液膜水平置於均勻電場當中，在液膜框架垂直電場的方向通以電流。

(裝置示意圖見圖六、圖七)



(圖六) 直流電流



(七) 交流電流

(八) 紀錄：將相機架設於液膜正上方，避免影像扭曲，錄影記錄轉動情形。

(九) 分析：利用影像分析軟體 **tracker** 分析週期與角速度。

四、研究過程

(一) 探究液膜旋轉方向與高壓外電場方向 \vec{E}_{ext} 和電泳電場方向 \vec{U}_{el} 之關係

實驗過程：依照上述方法，使用懸浮液膜 A，依序改變高壓外電場方向 \vec{E}_{ext} 及電泳電場方向 \vec{U}_{el} ，觀察並記錄。

(二) 探究致使液膜轉動的門檻條件與液膜黏滯度的關係

實驗過程：分別使用懸浮液膜 A、B、C 並測量膜厚，確定液膜的厚度相同，先後施加 5 個不同數值的高壓外電場 \vec{E}_{ext} ，逐漸減少電泳電場 \vec{U}_{el} ，找出液膜恰轉動的電泳電場值 \vec{U}_{el}^* 。

(三) 探究致使液膜轉動的門檻條件與液膜厚度 h 的關係

實驗過程：使用懸浮液膜 A，製成三個不同膜厚的液膜，分別施加 5 個不同數值的高壓外電場 \vec{E}_{ext} ，逐漸減少電泳電場 \vec{U}_{el} ，找出液膜恰轉動的電泳電場值 \vec{U}_{el}^* 。

(四) 探究液膜旋轉週期 T 以及平均切線速率 u 與旋轉半徑 R 之關係

實驗過程：使用懸浮液膜 A 先後施加 5 個不同數值的高壓外電場 \vec{E}_{ext} ，並固定電泳電場 \vec{U}_{el} ，用相機拍攝液膜轉動情形，再利用影像分析軟體 tracker 分析週期 T 與旋轉半徑 R 之關係。

(五) 探究液膜旋轉時的角速度 ω 與高壓外電場 \vec{E}_{ext} 之關係

實驗過程：使用懸浮液膜 A 先後施加 5 個不同的高壓外電場 \vec{E}_{ext} ，並固定電泳電場 \vec{U}_{el} ，用相機拍攝液膜轉動情形，再利用影像分析軟體 tracker 分析角速度 ω 與高壓外電場 \vec{E}_{ext} 之關係。

(六) 探究液膜旋轉時的角速度 ω 與電泳電場 \vec{U}_{el} 之關係

實驗過程：使用懸浮液膜 A 先後施加 5 個不同大小的電泳電場 \vec{U}_{el} ，並固定高壓外電場 \vec{E}_{ext} ，用相機拍攝液膜轉動情形，再利用影像分析軟體 tracker 分析角速度 ω 與電泳電場 \vec{U}_{el} 之關係。

(七) 探究液膜旋轉週期 T 與液膜厚度 h 之關係

實驗過程：使用懸浮液膜 A 做成兩個不同膜厚的懸浮液膜，固定高壓外電場

\vec{E}_{ext} 及電泳電場 \vec{U}_{el} ，用相機分別拍攝液膜轉動情形，再利用影像分析軟體 tracker 分析週期 T 與液膜厚度 h 之關係。

(八) 探究液膜旋轉週期 T 與液膜導電度 D 之關係

實驗過程：使用懸浮液膜 A 及懸浮液膜 D，固定高壓外電場 \vec{E}_{ext} 及電泳電場

\vec{U}_{el} ，並測量兩者膜厚，確定膜厚相同後，用相機拍攝液膜轉動情形，再利用影像分析軟體 tracker 分析角速度 ω 與液膜導電度 D 之關係。

(九) 探究液膜在交流的电泳電場 \vec{U}_{el} 作用下的轉動情形

實驗過程：使用懸浮液膜 A，固定高壓外電場 \vec{E}_{ext} ，將電泳電場 \vec{U}_{el} 替換成交流信號，分別使用正弦波、三角波以及方波的交流信號，用相機拍攝液膜轉動情形，再利用影像分析軟體 tracker 分析。

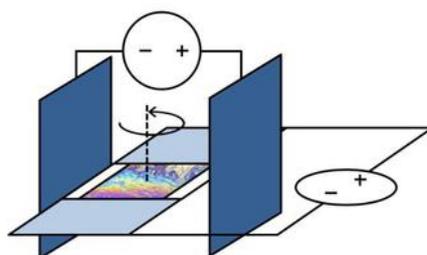
(十) 探究液膜旋轉時的角速度 ω 與高壓外電場方向 \vec{E}_{ext} 和電泳電場方向 \vec{U}_{el} 的夾角 θ 之關係

實驗過程：使用同一個懸浮液膜 A，先後轉動 5 個不同角度，使電泳電場方向 \vec{U}_{el} 和高壓外電場方向 \vec{E}_{ext} 夾一角度 θ ，並用相機拍攝液膜轉動情形，再利用影像分析軟體 tracker 分析角速度 ω 與高壓外電場方向 \vec{E}_{ext} 和電泳電場方向 \vec{U}_{el} 的夾角 θ 之關係。

伍、研究結果

一、探究液膜旋轉方向與高壓外電場 \vec{E}_{ext} 方向和電泳電場 \vec{U}_{el} 方向之關係

結果：穩定旋轉的液膜，其旋轉方向滿足右手螺旋定則 $\vec{E}_{ext} \times \vec{U}_{el}$ ，如(圖八)所示。



(圖八)

二、探究致使液膜轉動的門檻條件與液膜黏滯度的關係

(一) 實驗數據：

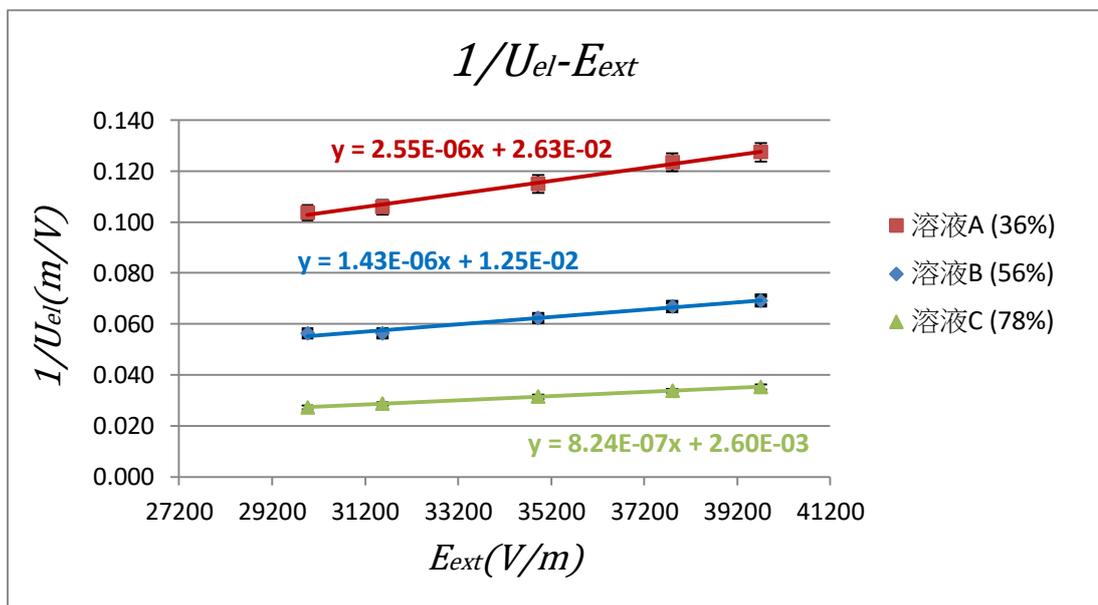
框架：圓形框架，半徑 10.0 ± 0.5 (mm)			
液膜：溶液 A(甘油重量百分濃度=36%)，厚度 600(nm)			
$\vec{E}_{ext} \times 10^4$ (V/m)	\vec{U}_{el}^* (V/m)	$1/\vec{U}_{el}^* \times 10^{-1}$	$E_{ext} \times U_{el}^* \times 10^5$
3.00 ± 0.02	9.65 ± 0.30	1.04 ± 0.03	2.89 ± 0.09
3.16 ± 0.02	9.45 ± 0.30	1.06 ± 0.03	2.98 ± 0.08
3.49 ± 0.03	8.70 ± 0.30	1.15 ± 0.03	3.04 ± 0.10
3.78 ± 0.03	8.10 ± 0.20	1.23 ± 0.03	3.06 ± 0.09
3.97 ± 0.03	7.85 ± 0.20	1.27 ± 0.04	3.12 ± 0.09
液膜：溶液 B(甘油重量百分濃度=56%)，厚度 600(nm)			
$\vec{E}_{ext} \times 10^4$ (V/m)	$\vec{U}_{el}^* \times 10^1$ (V/m)	$1/\vec{U}_{el}^* \times 10^{-2}$	$E_{ext} \times U_{el}^* \times 10^5$
3.00 ± 0.02	1.78 ± 0.06	4.40 ± 0.11	6.81 ± 0.18
3.16 ± 0.02	2.18 ± 0.06	4.60 ± 0.12	6.86 ± 0.19
3.49 ± 0.03	2.06 ± 0.05	4.85 ± 0.12	7.19 ± 0.19
3.78 ± 0.03	1.99 ± 0.05	5.03 ± 0.13	7.52 ± 0.20
3.97 ± 0.03	1.93 ± 0.05	5.18 ± 0.14	7.66 ± 0.21
液膜：溶液 C(甘油重量百分濃度=78%)，厚度 600(nm)			
$\vec{E}_{ext} \times 10^4$ (V/m)	$\vec{U}_{el}^* \times 10^1$ (V/m)	$1/\vec{U}_{el}^* \times 10^{-2}$	$E_{ext} \times U_{el}^* \times 10^6$
3.00 ± 0.02	3.67 ± 0.09	2.72 ± 0.07	1.10 ± 0.03
3.16 ± 0.02	3.49 ± 0.09	2.86 ± 0.07	1.10 ± 0.03
3.49 ± 0.03	3.19 ± 0.08	3.14 ± 0.08	1.11 ± 0.03
3.78 ± 0.03	2.96 ± 0.07	3.38 ± 0.08	1.12 ± 0.03
3.97 ± 0.03	2.84 ± 0.07	3.53 ± 0.09	1.13 ± 0.03

(表一)

*備註：

- (1). 此處液膜厚度乃是藉由前述方法，將液膜傾斜，觀察中央處的色帶，並配合溶液 A、B、C 的折射率求得分別的液膜厚度。

- (2). 此處的電泳電場 \vec{U}_{el}^* 指的是在左欄的高壓外電場 \vec{E}_{ext} 的條件下，電泳電場必須達到此一門檻值，才能致使液膜旋轉。
- (3). 此處高壓外電場 \vec{E}_{ext} 的不準量是由於高壓電源供應器輸出的不穩定以及三用電表測量時的讀數跳動所造成的，以下的實驗皆是如此。
- (4). 此處電泳電場 \vec{U}_{el}^* 的不準量是由於我們判讀液膜旋轉與否的範圍。
- (5). 此處 $\frac{1}{\vec{U}_{el}^*}$ 及 $E_{ext} \times U_{el}^*$ 的不準量是前述兩物理量的不準量經過誤差傳播所得到的結果，以下的所有數據的不準量皆是透過誤差傳播而得。



(圖九)

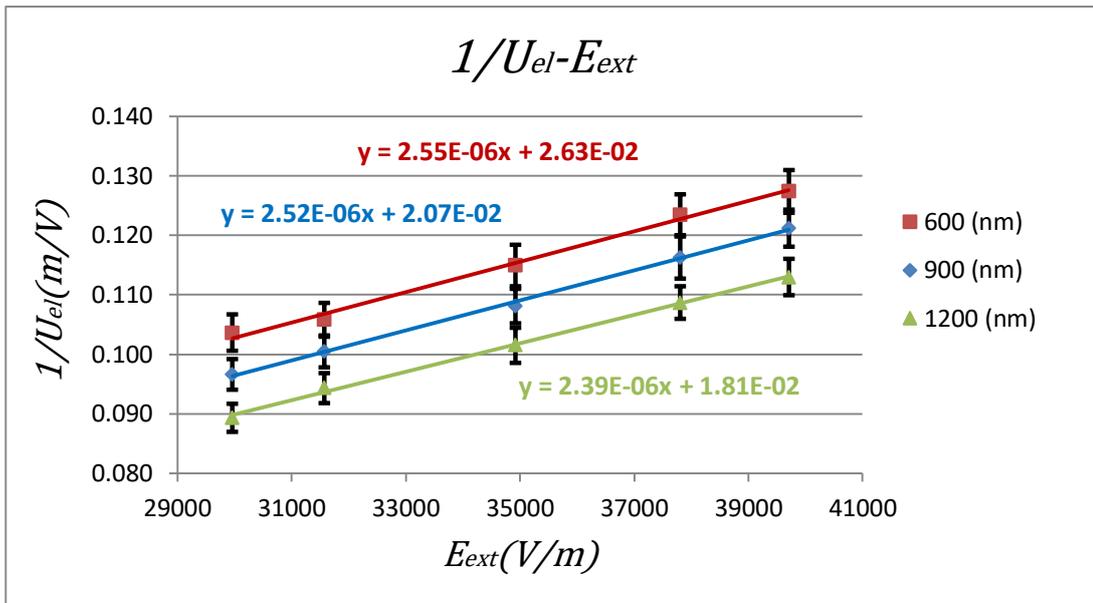
- (二) 結果：要使液膜轉動，其高壓外電場大小 \vec{E}_{ext} 與電泳電場 \vec{U}_{el}^* 的乘積必須超過一特定門檻值，否則液膜無法轉動，且液膜黏滯度越高，其門檻值越高。

三、探究致使液膜轉動的門檻條件與液膜厚度 h 的關係

(一) 實驗數據：

框架：圓形框架，半徑 10.0 ± 0.5 (mm)			
液膜：溶液 A(甘油重量百分濃度=36%)，厚度 600(nm)			
$\vec{E}_{ext} \times 10^4$ (V/m)	\vec{U}_{el}^* (V/m)	$1/\vec{U}_{el}^* \times 10^{-1}$	$E_{ext} \times U_{el}^* \times 10^5$
3.00 ± 0.02	9.65 ± 0.30	1.04 ± 0.03	2.89 ± 0.09
3.16 ± 0.02	9.45 ± 0.30	1.06 ± 0.03	2.98 ± 0.08
3.49 ± 0.03	8.70 ± 0.30	1.15 ± 0.03	3.04 ± 0.10
3.78 ± 0.03	8.10 ± 0.20	1.23 ± 0.03	3.06 ± 0.09
3.97 ± 0.03	7.85 ± 0.20	1.27 ± 0.04	3.12 ± 0.09
液膜：溶液 A(甘油重量百分濃度=36%)，厚度 900(nm)			
$\vec{E}_{ext} \times 10^4$ (V/m)	\vec{U}_{el}^* (V/m)	$1/\vec{U}_{el}^* \times 10^{-1}$	$E_{ext} \times U_{el}^* \times 10^5$
3.00 ± 0.02	9.95 ± 0.30	1.01 ± 0.03	2.98 ± 0.08
3.16 ± 0.02	9.70 ± 0.30	1.03 ± 0.03	3.06 ± 0.09
3.49 ± 0.03	9.10 ± 0.20	1.10 ± 0.03	3.18 ± 0.10
3.78 ± 0.03	8.50 ± 0.30	1.18 ± 0.04	3.21 ± 0.09
3.97 ± 0.03	8.15 ± 0.20	1.23 ± 0.03	3.24 ± 0.09
液膜：溶液 A(甘油重量百分濃度=36%)，厚度 1200(nm)			
$\vec{E}_{ext} \times 10^4$ (V/m)	\vec{U}_{el}^* (V/m)	$1/\vec{U}_{el}^*$	$E_{ext} \times U_{el}^* \times 10^5$
3.00 ± 0.02	3.67 ± 0.09	$(8.93 \pm 0.24) \times 10^{-2}$	3.36 ± 0.09
3.16 ± 0.02	3.49 ± 0.09	$(9.43 \pm 0.25) \times 10^{-2}$	3.35 ± 0.09
3.49 ± 0.03	3.19 ± 0.08	$(1.02 \pm 0.03) \times 10^{-1}$	3.34 ± 0.10
3.78 ± 0.03	2.96 ± 0.07	$(1.09 \pm 0.03) \times 10^{-1}$	3.48 ± 0.09
3.97 ± 0.03	2.84 ± 0.07	$(1.13 \pm 0.03) \times 10^{-1}$	3.51 ± 0.10

(表二)



(圖十)

(二) 結果：要使液膜轉動，其高壓外電場大小 \vec{E}_{ext} 與電泳電場 \vec{U}_{el}^* 的乘積必須超過一特定門檻值，否則液膜無法轉動，且液膜厚度 h 越大，其門檻值越高。

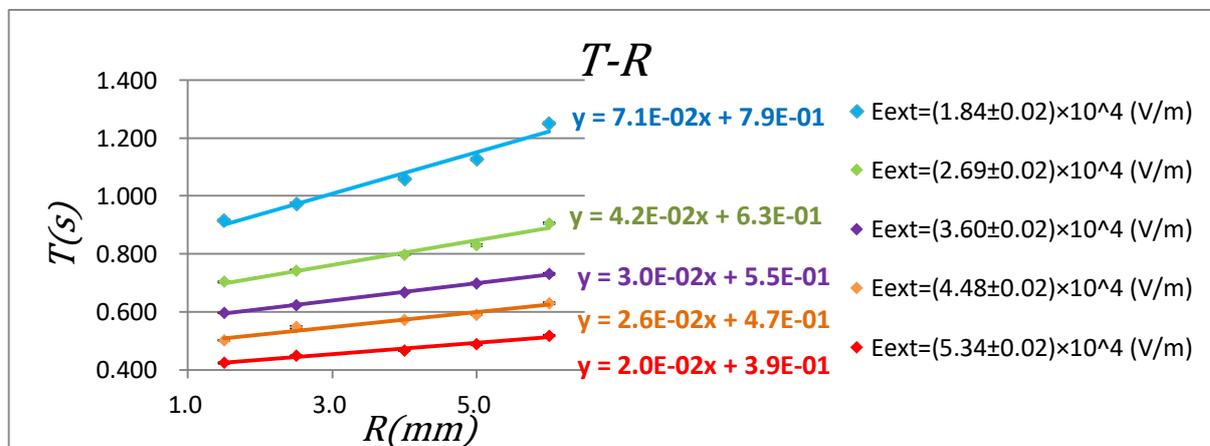
四、探究液膜旋轉週期 T 以及平均切線速率 u 與旋轉半徑 R 之關係

(一) 實驗數據：

1. 旋轉週期 T 對電場 \vec{E}_{ext} 與旋轉半徑 R 的關係

框架：圓形框架，半徑 10.0 ± 0.5 (mm)					
$\vec{U}_{el} = (3.09 \pm 0.08) \times 10^2$ (V/m)					
$\vec{E}_{ext} = (5.34 \pm 0.06) \times 10^4$ (V/m)		$\vec{E}_{ext} = (4.48 \pm 0.05) \times 10^4$ (V/m)		$\vec{E}_{ext} = (3.60 \pm 0.04) \times 10^4$ (V/m)	
$R(mm)$	$T \times 10^{-1}(s)$	$R(mm)$	$T \times 10^{-1}(s)$	$R(mm)$	$T \times 10^{-1}(s)$
1.5 ± 0.5	4.24 ± 0.02	1.5 ± 0.5	5.02 ± 0.01	1.5 ± 0.5	5.97 ± 0.02
2.5 ± 0.5	4.49 ± 0.01	2.5 ± 0.5	5.47 ± 0.04	2.5 ± 0.5	6.24 ± 0.03
4.0 ± 0.5	4.67 ± 0.02	4.0 ± 0.5	5.73 ± 0.01	4.0 ± 0.5	6.67 ± 0.01
5.0 ± 0.5	4.88 ± 0.02	5.0 ± 0.5	5.91 ± 0.03	5.0 ± 0.5	6.99 ± 0.01
6.0 ± 0.5	5.18 ± 0.02	6.0 ± 0.5	6.30 ± 0.03	6.0 ± 0.5	7.31 ± 0.04
$\vec{E}_{ext} = (2.69 \pm 0.03) \times 10^4$ (V/m)		$\vec{E}_{ext} = (1.84 \pm 0.03) \times 10^4$ (V/m)			
$R(mm)$	$T \times 10^{-1}(s)$	$R(mm)$	$T(s)$		
1.5 ± 0.5	7.03 ± 0.02	1.5 ± 0.5	$(9.15 \pm 0.04) \times 10^{-1}$		
2.5 ± 0.5	7.43 ± 0.03	2.5 ± 0.5	$(9.72 \pm 0.04) \times 10^{-1}$		
4.0 ± 0.5	7.97 ± 0.02	4.0 ± 0.5	1.059 ± 0.003		
5.0 ± 0.5	8.30 ± 0.04	5.0 ± 0.5	1.127 ± 0.004		
6.0 ± 0.5	9.06 ± 0.03	6.0 ± 0.5	1.251 ± 0.004		

(表三)

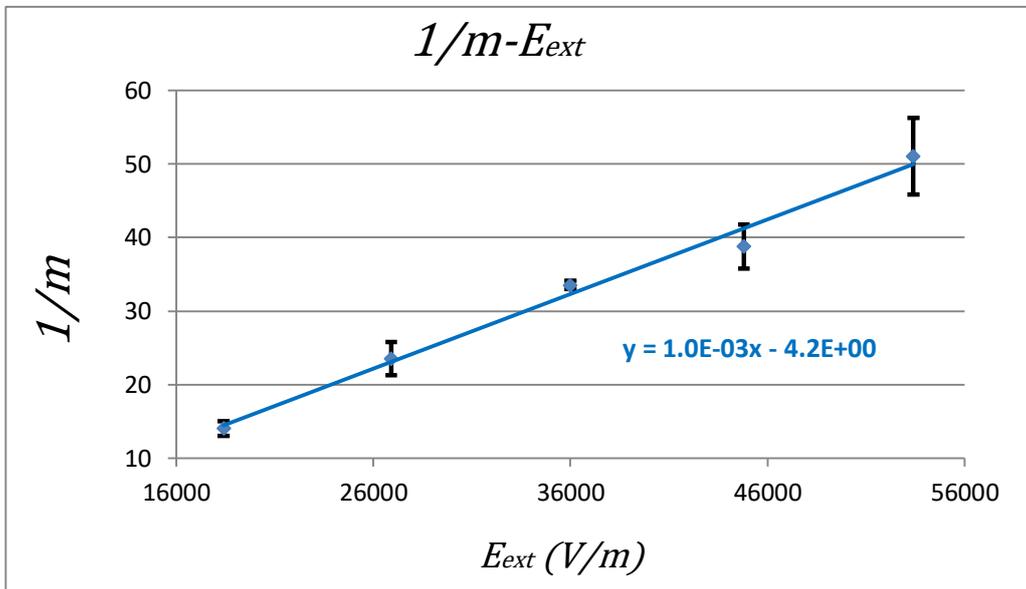


(圖十一)

2. (圖十一) $T-R$ 圖斜率的倒數 $1/m$ 與高壓外電場 \vec{E}_{ext} 的關係

$\vec{E}_{ext} \times 10^4 (V/m)$	斜率 $m \times 10^{-2}$	$1/m \times 10^{-1}$
5.34 ± 0.06	2.0 ± 0.2	5.1 ± 0.5
4.48 ± 0.05	2.6 ± 0.2	3.9 ± 0.3
3.60 ± 0.04	3.0 ± 0.1	3.4 ± 0.1
2.69 ± 0.03	4.3 ± 0.4	2.3 ± 0.2
1.84 ± 0.03	7.1 ± 0.7	1.4 ± 0.1

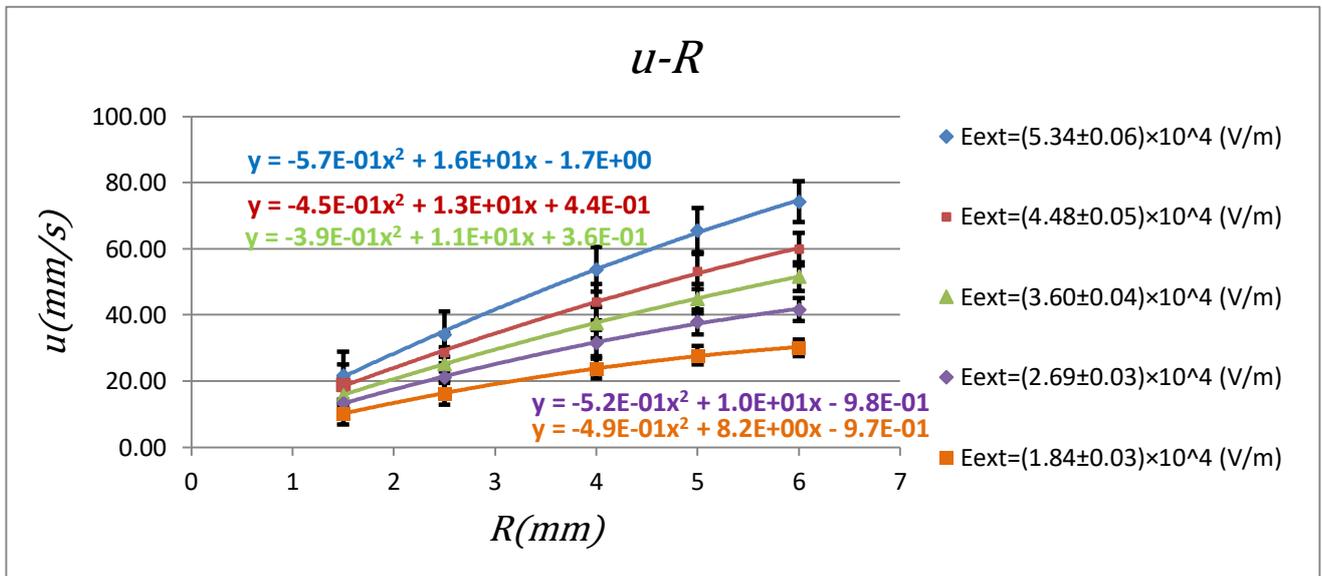
(表四)



(圖十二)

3. 旋轉時的平均切線速率 u 與電場 \vec{E}_{ext} 與旋轉半徑 R 的關係

$\vec{E}_{ext}=(5.34 \pm 0.06) \times 10^4$ (V/m)		$\vec{E}_{ext}=(4.48 \pm 0.05) \times 10^4$ (V/m)		$\vec{E}_{ext}=(3.60 \pm 0.04) \times 10^4$ (V/m)	
$R(mm)$	$u \times 10^1 (mm/s)$	$R(mm)$	$u \times 10^1 (mm/s)$	$R(mm)$	$u \times 10^1 (mm/s)$
1.5±0.5	2.2 ± 0.7	1.5±0.5	1.9 ± 0.6	1.5±0.5	1.6 ± 0.5
2.5±0.5	3.4 ± 0.7	2.5±0.5	2.9 ± 0.6	2.5±0.5	2.5 ± 0.5
4.0±0.5	5.4 ± 0.7	4.0±0.5	4.4 ± 0.6	4.0±0.5	3.8 ± 0.5
5.0±0.5	6.6 ± 0.7	5.0±0.5	5.3 ± 0.5	5.0±0.5	4.5 ± 0.5
6.0±0.5	7.4 ± 0.6	6.0±0.5	6.0 ± 0.5	6.0±0.5	5.2 ± 0.4
$\vec{E}_{ext}=(2.69 \pm 0.03) \times 10^4$ (V/m)		$\vec{E}_{ext}=(1.84 \pm 0.03) \times 10^4$ (V/m)		(表五) *備註：此處的平均切線速率 u 係由上述(表三)的實驗值計算推得，其不準量亦經由誤差傳播而得。	
$R(mm)$	$u \times 10^1 (mm/s)$	$R(mm)$	$u \times 10^1 (mm/s)$		
1.5±0.5	1.3 ± 0.5	1.5±0.5	1.0 ± 0.3		
2.5±0.5	2.1 ± 0.4	2.5±0.5	1.6 ± 0.3		
4.0±0.5	3.2 ± 0.4	4.0±0.5	2.4 ± 0.3		
5.0±0.5	3.8 ± 0.4	5.0±0.5	2.8 ± 0.3		
6.0±0.5	4.2 ± 0.4	6.0±0.5	3.0 ± 0.3		



(圖十三)

(二) 結果：穩定旋轉的液膜，其旋轉週期 T 與旋轉半徑 R 成線性正相關，

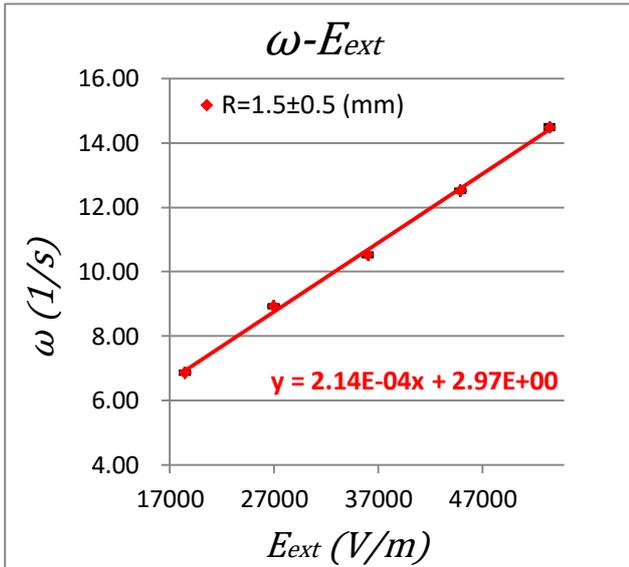
但是其平均切線速率 u 與旋轉半徑 R 卻呈現一類似開口朝下的二次函數圖形，旋轉半徑 R 越大其平均切線速率 u 越大，但斜率漸小，意即平均切線速率 u 隨旋轉半徑 R 的變化率越小。

五、探究液膜旋轉時的角速度 ω 與高壓外電場 \vec{E}_{ext} 之關係

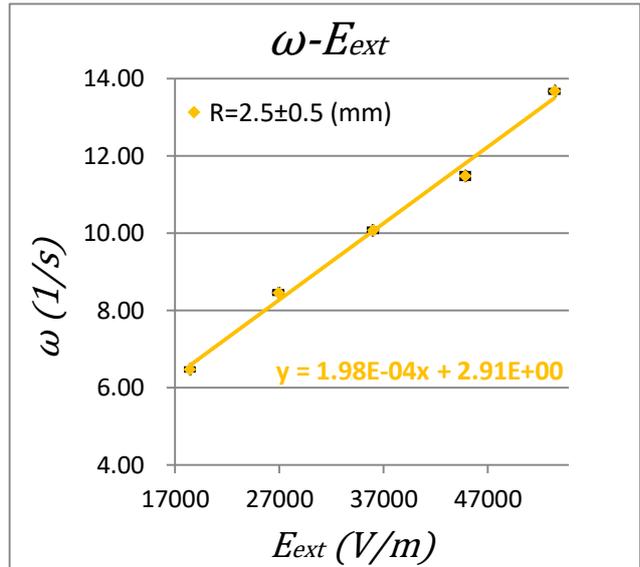
(一) 實驗數據：

框架：圓形框架，半徑 10.0 ± 0.5 (mm)			
$\vec{U}_{el} = (3.09 \pm 0.08) \times 10^2$ (V/m)			
$R=1.5 \pm 0.5$ (mm)		$R=2.5 \pm 0.5$ (mm)	
$\vec{E}_{ext} \times 10^4$ (V/m)	ω (1/s)	$\vec{E}_{ext} \times 10^4$ (V/m)	ω (1/s)
5.34 ± 0.06	$(1.45 \pm 0.01) \times 10^1$	5.34 ± 0.06	$(1.368 \pm 0.003) \times 10^1$
4.48 ± 0.05	$(1.252 \pm 0.003) \times 10^1$	4.48 ± 0.05	$(1.15 \pm 0.01) \times 10^1$
3.60 ± 0.04	$(1.053 \pm 0.003) \times 10^1$	3.60 ± 0.04	$(1.007 \pm 0.004) \times 10^1$
2.69 ± 0.03	8.93 ± 0.03	2.69 ± 0.03	8.46 ± 0.03
1.84 ± 0.03	6.86 ± 0.03	1.84 ± 0.03	6.47 ± 0.03
$R=4.0 \pm 0.5$ (mm)		$R=5.0 \pm 0.5$ (mm)	
$\vec{E}_{ext} \times 10^4$ (V/m)	ω (1/s)	$\vec{E}_{ext} \times 10^4$ (V/m)	ω (1/s)
5.34 ± 0.06	$(1.35 \pm 0.01) \times 10^1$	5.34 ± 0.06	$(1.31 \pm 0.01) \times 10^1$
4.48 ± 0.05	$(1.097 \pm 0.002) \times 10^1$	4.48 ± 0.05	$(1.06 \pm 0.01) \times 10^1$
3.60 ± 0.04	9.41 ± 0.01	3.60 ± 0.04	8.99 ± 0.02
2.69 ± 0.03	7.31 ± 0.02	2.69 ± 0.03	7.57 ± 0.03
1.84 ± 0.03	5.93 ± 0.02	1.84 ± 0.03	5.58 ± 0.02
$R=6.0 \pm 0.5$ (mm)			
$\vec{E}_{ext} \times 10^4$ (V/m)	ω (1/s)		
5.34 ± 0.06	$(1.24 \pm 0.01) \times 10^1$		
4.48 ± 0.05	9.98 ± 0.04		
3.60 ± 0.04	8.60 ± 0.04		
2.69 ± 0.03	6.94 ± 0.02		
1.84 ± 0.03	5.02 ± 0.02		

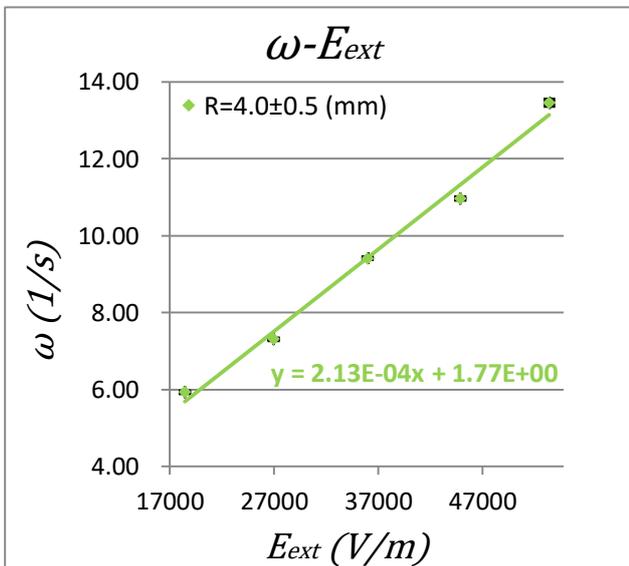
(表六)



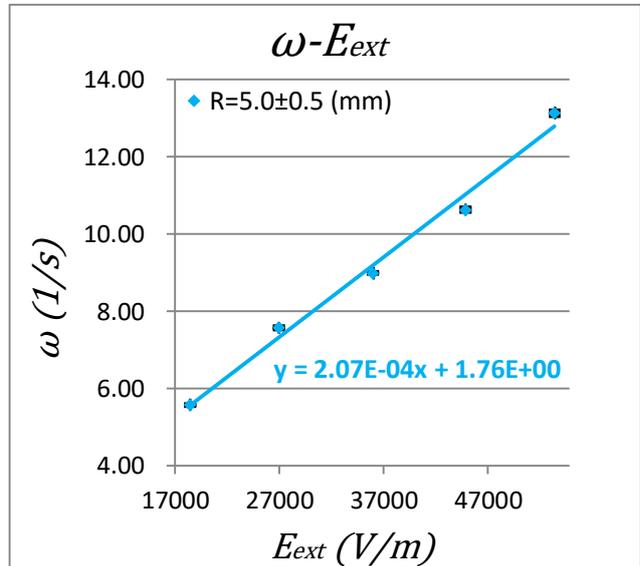
(圖十四)



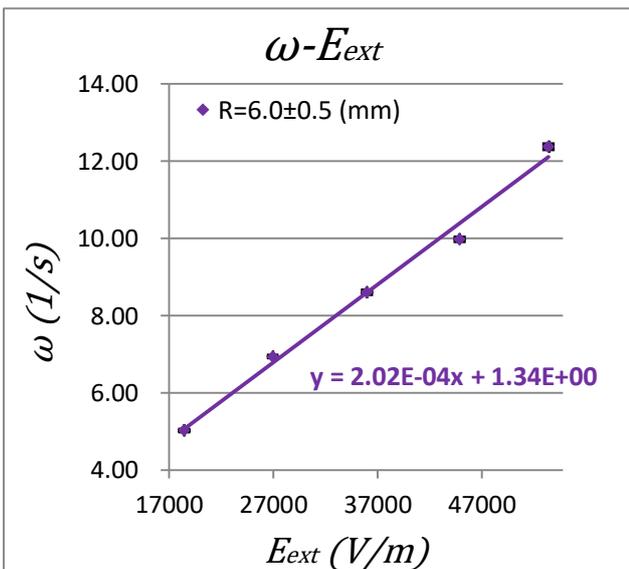
(圖十五)



(圖十六)



(圖十七)



(圖十八)

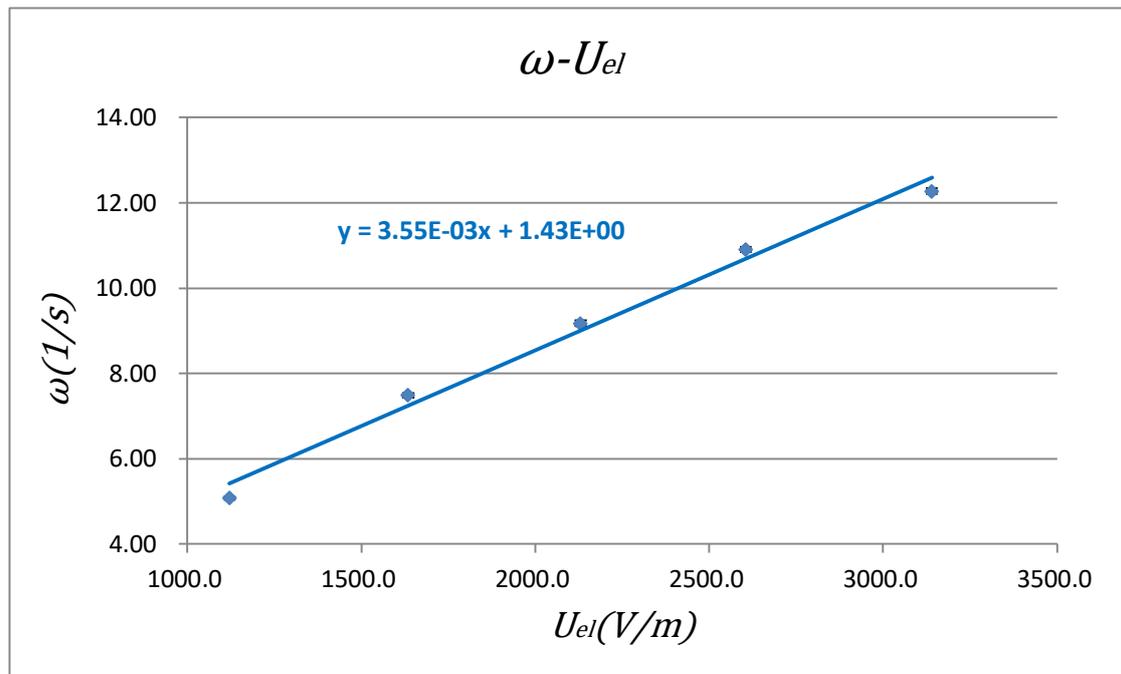
(二) 結果：穩定旋轉的液膜，其旋轉時的角速度 ω 與高壓外電場 \vec{E}_{ext} 成線性正相關。

六、探究液膜旋轉時的角速度 ω 與電泳電場 \vec{U}_{el} 之關係

(一) 實驗數據：

框架：圓形框架，半徑 10.0 ± 0.5 (mm)			
\vec{E}_{ext} (V/m)	R (mm)	$\vec{U}_{el} \times 10^3$ (V/m)	ω (1/s)
$(5.36 \pm 0.06) \times 10^4$	3.0 ± 0.5	3.14 ± 0.08	$(1.227 \pm 0.007) \times 10^1$
		2.61 ± 0.07	$(1.091 \pm 0.006) \times 10^1$
		2.13 ± 0.05	9.18 ± 0.07
		1.63 ± 0.04	7.49 ± 0.05
		1.12 ± 0.03	5.08 ± 0.04

(表七)



(圖十九)

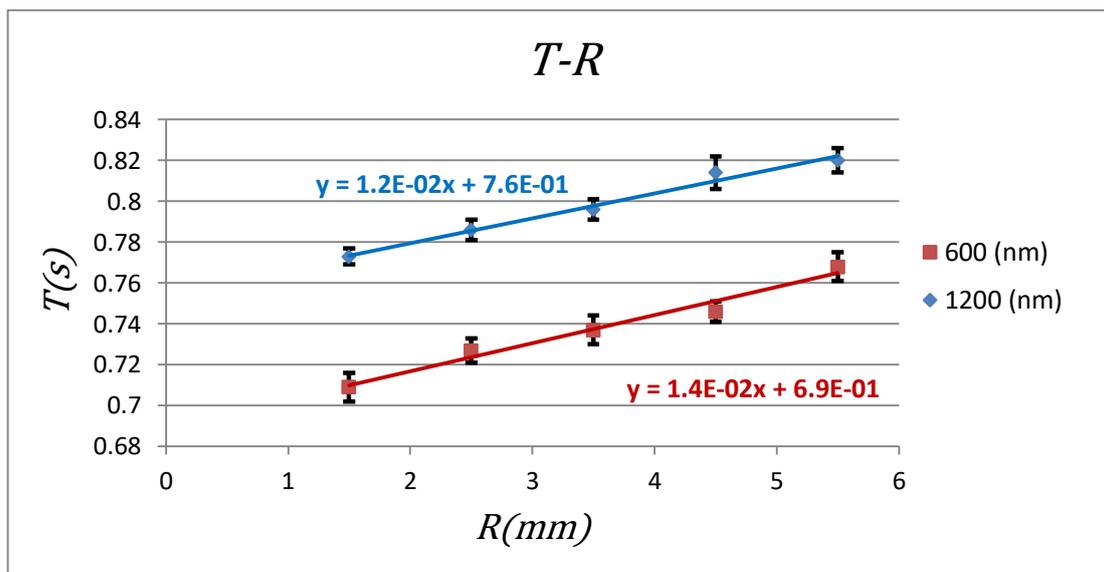
(二) 結果：穩定旋轉的液膜，其旋轉時的角速度 ω 與電泳電場 \vec{U}_{el} 成線性正相關。

七、探究液膜旋轉週期 T 與液膜厚度 h 之關係

(一) 實驗數據：

框架：圓形框架，半徑 10.0 ± 0.5 (mm)		
$\vec{E}_{ext} = (2.69 \pm 0.03) \times 10^4$ (V/m)		
$\vec{U}_{el} = (3.09 \pm 0.08) \times 10^2$ (V/m)		
	液膜厚度 600 (nm)	液膜厚度 1200 (nm)
R (mm)	T (s)	T (s)
1.5 ± 0.5	$(7.09 \pm 0.07) \times 10^{-1}$	$(7.73 \pm 0.04) \times 10^{-1}$
2.5 ± 0.5	$(7.27 \pm 0.06) \times 10^{-1}$	$(7.85 \pm 0.05) \times 10^{-1}$
4.0 ± 0.5	$(7.37 \pm 0.07) \times 10^{-1}$	$(7.96 \pm 0.05) \times 10^{-1}$
5.0 ± 0.5	$(7.46 \pm 0.05) \times 10^{-1}$	$(8.14 \pm 0.08) \times 10^{-1}$
6.0 ± 0.5	$(7.68 \pm 0.07) \times 10^{-1}$	$(8.20 \pm 0.06) \times 10^{-1}$

(表八)



(圖二十)

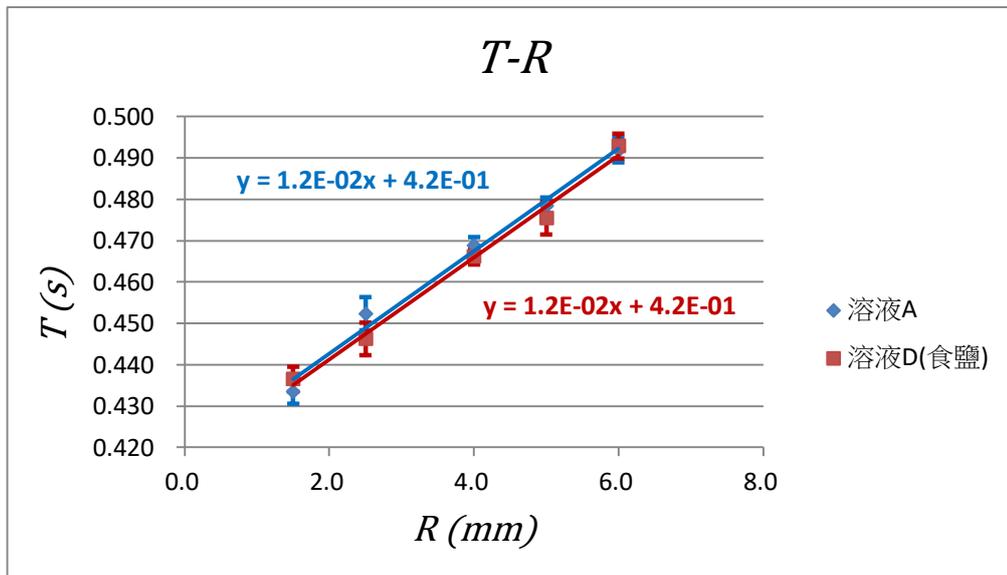
(二) 結果：在其他條件皆相同的情況下，液膜厚度 h 越大，其旋轉週期 T 越大。

八、探究液膜旋轉週期 T 與液膜導電度 D 之關係

(一) 實驗數據：

框架：圓形框架，半徑 10.0 ± 0.5 (mm)		
液膜：溶液 A、溶液 D，厚度皆為 600(nm)		
$\vec{E}_{ext} = (5.31 \pm 0.02) \times 10^4$ (V/m)		
$\vec{U}_{el} = (3.09 \pm 0.08) \times 10^2$ (V/m)		
	溶液 A	溶液 D(食鹽)
R (mm)	T (s)	T (s)
1.5 ± 0.5	$(4.34 \pm 0.02) \times 10^{-1}$	$(4.37 \pm 0.03) \times 10^{-1}$
2.5 ± 0.5	$(4.52 \pm 0.04) \times 10^{-1}$	$(4.46 \pm 0.04) \times 10^{-1}$
4.0 ± 0.5	$(4.69 \pm 0.02) \times 10^{-1}$	$(4.66 \pm 0.02) \times 10^{-1}$
5.0 ± 0.5	$(4.78 \pm 0.02) \times 10^{-1}$	$(4.75 \pm 0.04) \times 10^{-1}$
6.0 ± 0.5	$(4.92 \pm 0.03) \times 10^{-1}$	$(4.93 \pm 0.03) \times 10^{-1}$

(表九)



(圖二十一)

(二) 結果：穩定旋轉的液膜，加入食鹽改變其導電度 D 並不會影響其週期 T 。

九、探究液膜在電泳電場 \vec{U}_{el} 替換為交流信號時的轉動情形

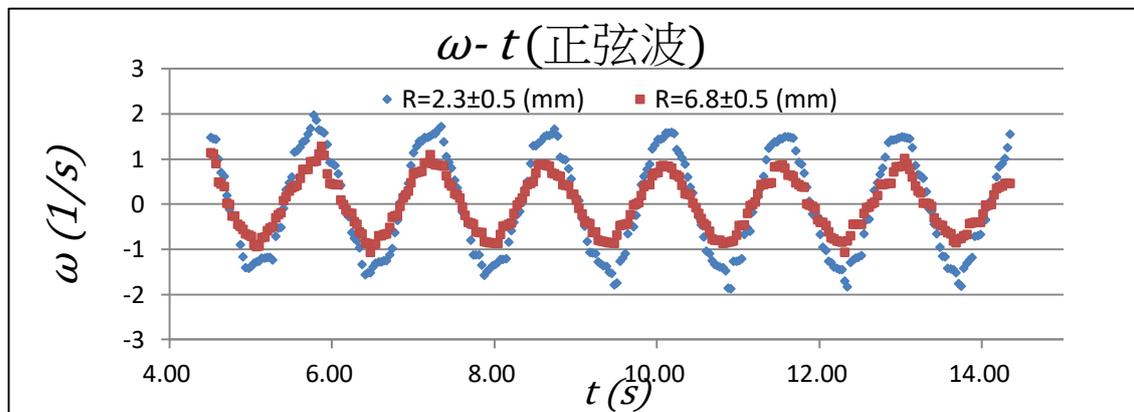
(一) 實驗數據：

1. 使用訊號產生器產生正弦波，比較兩個半徑 R 的角速度 ω 隨時間 t 的變化。

框架：圓形框架，半徑 10.0 ± 0.5 (mm)			
\vec{E}_{ext} (V/m)	\vec{V}_{el} (V)	f (mHz)	T (s)
$(5.29 \pm 0.06) \times 10^4$	23.0	685.7	1.458

(表十)

*備註：此處 \vec{V}_{el} 代表電泳電場 \vec{U}_{el} 交流信號的電壓峰對峰值， f 表示交流信號的頻率，皆由示波器讀出，以下實驗亦同。

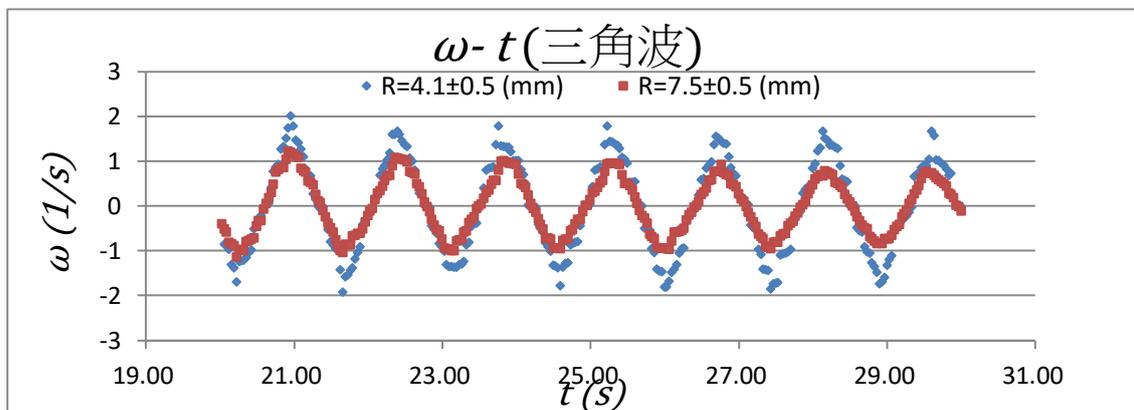


(圖二十二)

2. 使用訊號產生器產生三角波，比較兩個半徑 R 的角速度 ω 隨時間 t 的變化。

框架：圓形框架，半徑 10.0 ± 0.5 (mm)			
\vec{E}_{ext} (V/m)	\vec{V}_{el} (V)	f (mHz)	T (s)
$(5.29 \pm 0.06) \times 10^4$	23.0	685.7	1.458

(表十一)

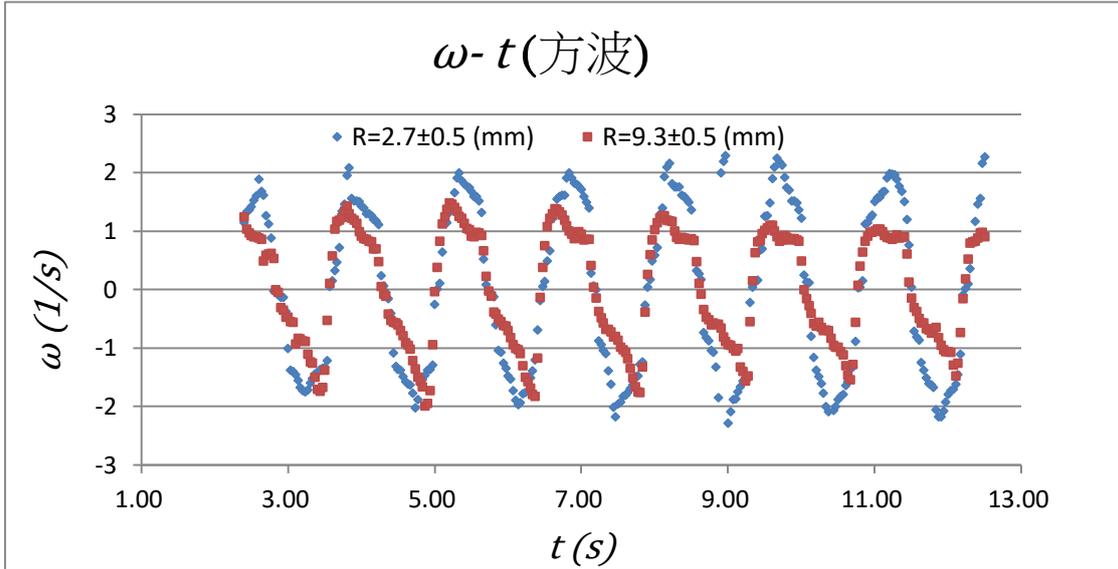


(圖二十三)

3. 使用訊號產生器產生方波，比較兩個半徑 R 的角速度 ω 隨時間 t 的變化。

框架：圓形框架，半徑 10.0 ± 0.5 (mm)			
\vec{E}_{ext} (V/m)	\vec{V}_{el} (V)	f (mHz)	T (s)
$(5.29 \pm 0.06) \times 10^4$	23.0	685.7	1.458

(表十二)



(圖二十四)

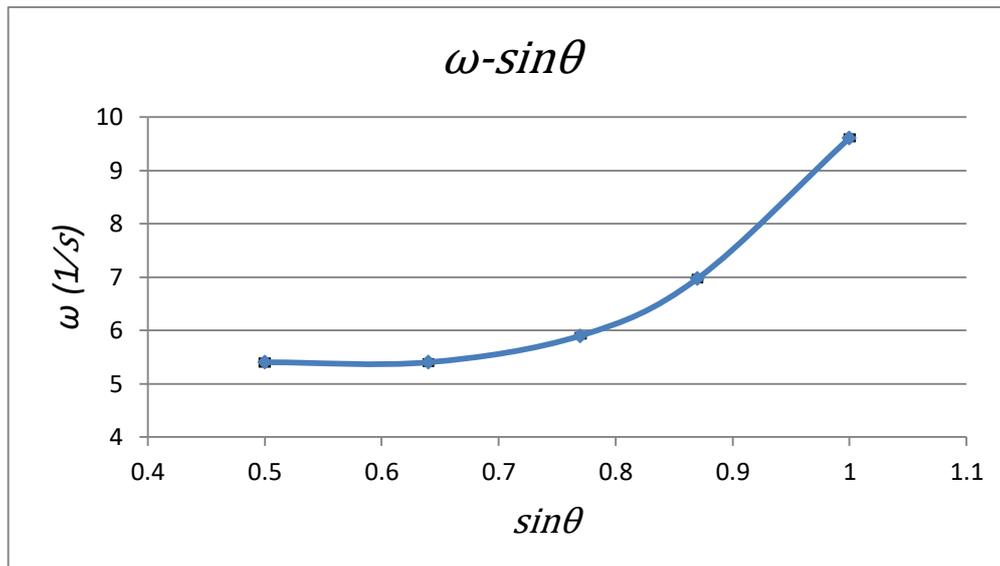
(二) 結果：當電泳電場 \vec{U}_{el} 替換為交流信號時，液膜的轉動方向也隨著交流信號的轉換而反轉，反轉週期恰等於交流信號的週期，且半徑越大，其瞬時角速度 ω 越小，結果與實驗四相符。

十、探究液膜旋轉角速度 ω 與電場方向 \vec{E}_{ext} 和電泳電場 \vec{U}_{el} 的夾角 θ 之關係

(一) 實驗數據：

框架：方形框架，邊長 10.0 ± 0.5 (mm)		
$\vec{E}_{ext} = (3.60 \pm 0.04) \times 10^4$ (V/m)		
$\vec{U}_{el} = (3.09 \pm 0.08) \times 10^2$ (V/m)		
$R = 3.3 \pm 0.5$ (mm)		
θ	$\sin\theta$	ω (1/s)
90	1.00	9.61 ± 0.04
60	0.87	6.97 ± 0.05
50	0.77	5.90 ± 0.03
40	0.64	5.40 ± 0.04
30	0.50	5.40 ± 0.05

(表十三)



(圖二十五)

(二) 結果：穩定旋轉的液膜，其液膜旋轉的角速度 ω 與高壓外電場方向 \vec{E}_{ext} 和電泳電場方向 \vec{U}_{el} 的夾角 θ 的正弦值呈正相關， $\sin\theta$ 愈大，液膜旋轉的角速度 ω 愈大，然而， $\sin\theta$ 愈小，液膜旋轉的角速度 ω 卻不會持續的減小，最終會達到一極小值。

陸、討論

- 一、由實驗二及實驗三發現，液膜黏滯度和液膜厚度 h 都會影響液膜轉動的門檻值，比較(圖九)和(圖十)，會發現黏滯度的改變比膜厚 h 所造成的影響明顯的多，此外，從(表一)和(表二)可以發現，液膜沿轉動時其高壓外電場大小與電泳電場的乘積 $\vec{E}_{ext} \times \vec{U}_{el}^*$ 有隨著高壓外電場大小 \vec{E}_{ext} 的減少而下降的趨勢，表示轉動的門檻值愈發降低，推測其原因乃歸因於做實驗時是由較高的高壓外電場值 \vec{E}_{ext} 逐步調降，也就是說在測量較低的高壓外電場值 \vec{E}_{ext} 轉動的門檻值時，相對第一個高電壓的數據點間隔了一段時間，隨著時間的增加，液膜中的水分也小幅度的蒸發，導致液膜黏滯度可能因為水分減少而增加，液膜的厚度 h 卻相對地減少，最終使得轉動的門檻值下降。然而，單就實驗過程中門檻值下降來說，我們認為並不足以說明膜厚 h 的影響比黏滯度來的大，因為我們並不清楚液膜厚度 h 及黏滯度隨時間的變化究竟為何，所以並不會和我們的結論相抵觸。
- 二、由實驗四發現， $T-R$ 圖斜率的倒數 $1/m$ 與高壓外電場 \vec{E}_{ext} 成線性正相關，表示斜率當中隱含高壓外電場 \vec{E}_{ext} 這個參數。且旋轉半徑 R 越大，雖然其平均切線速率 u 越大，平均切線速率 u 的變化量卻越小，推測是由於受到邊界的影響，因為實驗過程中，我們發現最外圍的液膜幾乎是靜止不動的，所以才會導致平均切線速率 u 無法持續遞增。
- 三、由實驗七發現，液膜厚度 h 的確會影響其旋轉週期 T ，但是因為膜厚 h 的變因操作相當具有難度，且膜厚 h 變化不大，所以由(圖二十)並不能判斷膜厚 h 這個變因影響的到底是 $T-R$ 圖斜率還是 $T-R$ 圖截距，抑或是兩者，有待後續更精確的研究。

- 四、由實驗八發現，液膜週期 T 與導電度 D 並沒有關係，但是其機制究竟為何，我們目前仍不得而知，推測是因為增加導電度 D 只是幫助高壓外電場 \vec{E}_{ext} 對液膜造成靜電感應，即協助液膜的電荷分布，但是推動液膜轉動的依舊是電泳電場 \vec{U}_{el} 對每一個帶電粒子造成的電力大小，故加入食鹽增加導電度 D 並不影響液膜週期 T 。
- 五、實驗九中，將電泳電場 \vec{U}_{el} 替換為交流信號，使得液膜的轉動方向也隨著交流信號的轉換而反轉，但是因為慣性，液膜並不會立刻反向轉動，尤其在方波時特別明顯，而且由(圖二十四)可以發現，角速度 ω 似乎在正值的時候才容易表現出方波的特性，也就是維持一段時間的穩定角速度 ω ，然而反轉時數據差異性就偏大，不僅角速度 ω 變化量趨勢改變，角速度 ω 峰值也發生改變，甚至不同旋轉半徑 R 趨勢也不太一致，還需要更精確的實驗研究方波這種特殊的性質。
- 六、由實驗十發現，當高壓外電場方向 \vec{E}_{ext} 和電泳電場方向 \vec{U}_{el} 夾角為 θ 時，真正等效的高壓外電場值可視為 $E_{ext} \sin \theta$ ，故角速度 ω 當然會隨著等效高壓外電場的減小而遞減，但是相對的高壓外電場的分量 $E_{ext} \cos \theta$ 卻可以視為等效的電泳電場，且會因為兩電場方向而影響電場分布，故角速度 ω 並不單純只受到其中一項的影響，而是必須同時考慮電場的分布改變情形。

柒、結論

- 一、穩定旋轉的液膜，旋轉方向滿足右手螺旋定則 $\vec{E}_{ext} \times \vec{U}_{el}$ 。
- 二、要使液膜轉動，高壓外電場大小 \vec{E}_{ext} 與電泳電場 \vec{U}_{el}^* 的乘積必須超過特定門檻值，否則液膜無法轉動，且液膜黏滯度越高，其門檻值越高。
- 三、要使液膜轉動，高壓外電場大小 \vec{E}_{ext} 與電泳電場 \vec{U}_{el}^* 的乘積必須超過特定門檻值，否則液膜無法轉動，且液膜厚度 h 越大，其門檻值越高。
- 四、穩定旋轉的液膜，其旋轉週期 T 與旋轉半徑 R 成線性正相關，但是其平均切線速率 u 與旋轉半徑 R 卻呈現一類似開口朝下的二次函數圖形，旋轉半徑 R 越大其平均切線速率 u 越大，但斜率漸小。
- 五、穩定旋轉的液膜，其旋轉時的角速度 ω 與外電場 \vec{E}_{ext} 成線性正相關。
- 六、穩定旋轉的液膜，其旋轉時的角速度 ω 與電泳電場 \vec{U}_{el} 成線性正相關。
- 七、在其他條件皆相同的情況下，液膜厚度 h 越大，其旋轉週期 T 越大。
- 八、穩定旋轉的液膜，加入食鹽改變其導電度 D 並不影響其旋轉週期 T 。
- 九、當電泳電場 \vec{U}_{el} 替換為交流信號時，液膜的轉動方向也隨著交流信號的轉換而反轉，反轉週期恰等於交流信號的週期，且旋轉半徑 R ，其瞬時角速度 ω 越小。
- 十、穩定旋轉的液膜，液膜旋轉角速度 ω 與電場方向 \vec{E}_{ext} 和電泳電場方向 \vec{U}_{el} 的夾角 θ 的正弦值呈正相關，然而 $\sin\theta$ 愈小，液膜旋轉的角速度 ω 卻不會持續的減小，最終會達到一極小值。

捌、參考資料及其他

- 一、林秀豪、高文芳、高涌泉、張明哲、楊樹基、蔡榮泰(2015)。選修物理(下)。新北市：龍騰文化。
- 二、朱柏憲、嚴凱傑(2009)。製作奈米的肥皂泡膜。中華民國第49屆中小學科學展覽會(編號：040109)。臺北市：國立台灣科學教育館。
- 三、A. Amjadi, M.R. Ejtehad, N. Hamedani Radja, M. D. Nirya, M. Reza Rahimi Tabar, R. Shirsavar (2006). *A water film motor* (Connell University Library). Retrieved from <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0605029>
- 四、A. Amjadi, M.R. Ejtehad, N. Hamedani Radja, R. Shirsavar (2008). *A Liquid Film Motor* (Connell University Library). Retrieved from <http://arxiv.org/abs/0805.0490v2>
- 五、Ahmad Amjadi, Mansoure Moeini Rizi, Mohammad Shirsavar, Reza Shirsavar. (2014). *Liquid Film Motor*. Proceedings of 67th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics. doi: <http://dx.doi.org/10.1103/APS.DFD.2014.GFM.V0017>
- 六、Gan Kong-Yin, Li Ying-Jun, Liu Zhong-Qiang, & Jiang Su-Rong (2012). Electrohydrodynamical characteristics of liquid film motor driven by a square-wave electrophoresis electric field. *Acta Physica Sinica*, 61(13), 134-703. doi: 10.7498/aps.61.134703

玖、未來展望

- 一、嘗試其他可以更精準的測量液膜厚度的方法，降低膜厚造成的誤差。
- 二、實驗其他的特性的溶液，例如：非極性液體，進而探討液膜的介電常數 ϵ 對整體運動的影響。
- 三、嘗試將液膜黏滯度量化，藉由實驗方法加以比較不同液膜的黏滯度。
- 四、繼續擴充實驗四的實驗，紀錄更多不同的旋轉半徑其轉動情形的變化，進而建構一個完整液膜的轉動模型。
- 五、繼續擴充實驗七的實驗，改變更多的液膜厚度，找出液膜厚度對轉動的影響。
- 六、繼續擴充實驗八的實驗，改以添加二正金屬陽離子的氯化鎂或是其他價數的離子，觀察其結果並與實驗八相互比較。
- 七、更精準的研究液膜在方波電泳電場時的轉動情形，特別是不同旋轉半徑反轉時的變化與機制。
- 八、研究液膜在交流的高壓外電場 \vec{E}_{ext} 作用下的轉動情形，藉由改變其靜電感應的機制，觀察其旋轉情形與單純改變電泳電場是否有差別。
- 九、嘗試將此原理設計成一微型攪拌器應用在工業製程上或是生物醫學上，此一裝置的優點是不須直接碰觸液膜，特別是在液膜厚度極薄時，可以減少碰觸造成的干擾及破壞，再者，因為生物體到處充斥著類似本實驗的液膜，倘若藉由此一特性使液膜反覆旋轉，便能達到混合、攪拌的作用，未嘗不失應用在藥物運送的可能性，是一個值得深入研究並善加應用的裝置。

【評語】 051814

本作品以外加電場和電泳電場交錯使液體溶液產生旋轉現象，這現象以前雖已看過，到作者發現越靠近圓心的溶液轉速越快，越遠的越慢。這第一次看到的現象非常有趣，而其他部分的探討亦詳實，是一件可喜之作，值得嘉獎。