

2016 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 160004

參展科別 物理與天文學

作品名稱 液體膜電動機之性質與泛用性研究

得獎獎項 大會獎：三等獎

就讀學校 國立臺灣師範大學附屬高級中學

指導教師 劉祥麟、高銘宏

作者姓名 林衍辰、林子傑、蔡沛軒

關鍵字 Liquid Film Motor、肥皂膜、電流體

作者簡介



Abstract

Our research is based on a question from IYPT, International Young Physicists' Tournament. By applying stable current onto a liquid film and adding an electric field vertically, the liquid film can start to rotate after these two parameters surpassed a threshold.

Our target is to build a liquid film motor which is able to work properly, and figure out the properties of the rotation. Using the device made by ourselves, we did the experiments about the properties of liquid film as well as the relation between voltage, electric field, radius, and rotation speed.

After finishing analyzing our data, we tried to explain why it can rotate. To verify our explanations, we changed the shape of liquid films and observed its motion, too. At first, we thought that the effect may cause by ions' movement in external electric field. However, we overthrew the hypothesis due to the new experiment data. It shows that adding electrolysis does not affect angular velocity, in addition, we succeeded to make a pure water film rotate.

After all, we brought out a hypothesis of the polarization of water molecules. Liquid film is just like dielectric in a capacitor, which will polarize when capacitor is charged. As the surface charges emerge, electric field will provide torques to them and starts to rotate.

摘要

若對肥皂膜通過電流，並在垂直電流的方向加高電場，只要電壓與電場超過閾值，就能夠在肥皂膜上產生旋轉。

我們的目標是製作能穩定運轉的液體膜電動機，同時持續改進精確度及操作便利性。我們調配溶液，並用電阻法測量厚度控制變因。攝錄影片匯入 Tracker 追蹤，分析旋轉性質。

我們了解到角速度與外加電場呈線性正相關，也了解旋轉半徑與角速度成負相關。我們認為是界面活性劑離子在電場中運動產生的效應。然而，驗證實驗卻推翻了我們的假設，不僅加入電解質沒有改變角速度，甚至純水膜也能夠旋轉，證明離子並非運動來源。

因此我們改從水分子偶極切入，通電的液體膜其實類似介電質，會因電容充電導致電極化，使液體膜上出現電荷分離，因外加電場的作用產生力矩而旋轉。此假說能夠解釋我們所有的實驗結果，我們也希望未來能立基於此，對液體膜電動機的應用領域進行實驗與研究。

一、前言

(一)、研究動機

我們最初接觸到這個主題是在物理辯論賽 I Y P T 的一道題目中，在眾多題目中，這個主題偶然引起了我們的興趣，因而嘗試以肥皂膜製作簡單的液體膜電動機，雖然在製作與設計過程中遭遇許多困難，不過更挑起了想要深入研究的想法。

液體膜電動機在醫學及微量化學上有許多應用，然而它的操作需要高電壓環境，若是能有更好的效率或更方便操作，可能有機會改變醫學與藥學上的許多方法。也因此，我們產生了更進一步研究的想法，並試圖研習關於此效應之流體理論。

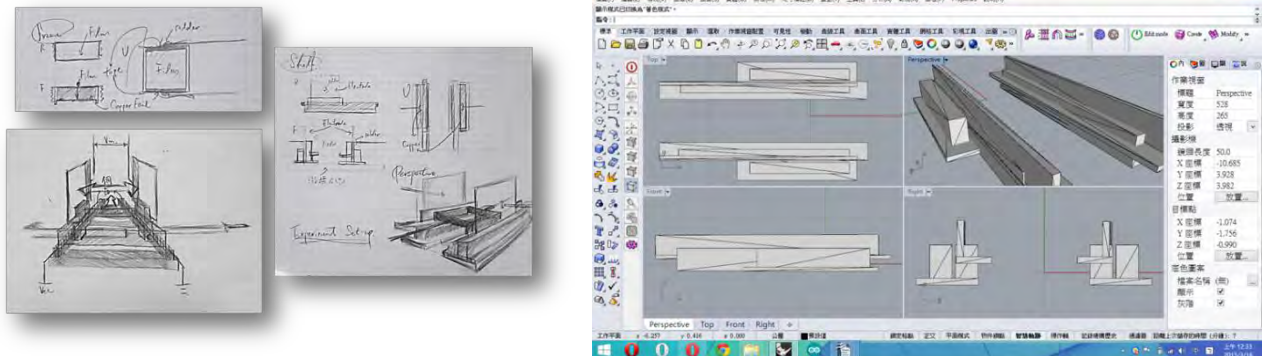
(二)、研究目的

1. 設計實驗裝置讓液體膜電動機穩定運作
2. 研究液體膜電動機之旋轉性質
3. 討論液體膜電動機之旋轉原理
4. 探討建立液體膜電動機簡單旋轉模型
5. 改良液體膜電動機裝置

二、研究方法

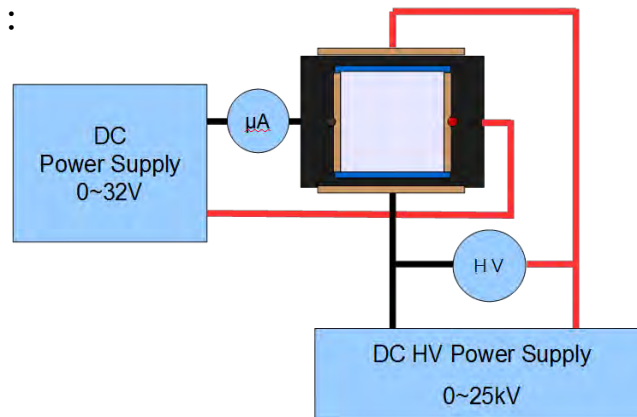
(一)、實驗裝置設計與製作

我們的實驗裝置需要自行製作，且需要有高電場和攝影紀錄。考量到修改裝置的方便性，在設計完成之後，我們將其繪製成 CAD 圖檔，並轉換為模型以 3D 印表機列印製作。



藉由 3D 列印的便利與精準性，為我們後來的裝置提供很大的改善。也因此，我們不只為了實驗設計而修改裝置，更能夠為了實驗操作方便而更改新的設計。

電路設計：



1. 第一代設計

我們印製膜框以固定膜框規格，我們當時對於液體膜電動機的了解十分缺乏，雖成功加以高壓直流電產生高電場，進而讓肥皂膜產生旋轉。卻出現以下幾個問題：

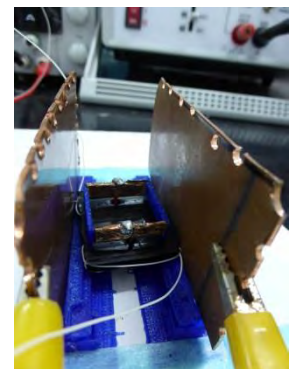
- (1) 電壓過高時尖端放電現象嚴重
- (2) 電極板過小，電場不均勻容易受外界干擾，旋轉難以穩定
- (3) 實驗操作上需要花費很長的時間固定膜框並啟動裝置，容易破壞肥皂膜。
- (4) 薄膜干涉紋路不清，難以追蹤。



2. 第二代設計

首先我們改進了電場問題，改以較大的電極產生電場，使得旋轉狀況及尖端放電的情形獲得顯著改善。

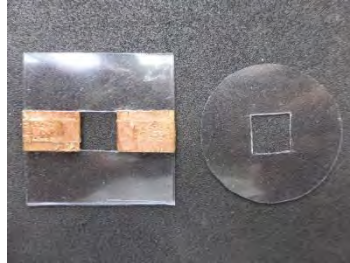
在膜框下安裝**黑色吸光板**使得膜上的薄膜干涉紋路變得明顯，提高分析精確度。



3. 第三代設計

本次設計拋棄前兩代的設計，僅有電極板支撐架的部分使用了3D列印。膜框則捨棄了3D列印的易於控制規格優點，改以塑膠片製作，主要原因為下：

- (1) 我們無法控制膜的厚度，這可能會導致誤差及追蹤上的困難，因此除了使用薄膜干涉進行控制以外，也改以厚度 0.2 mm 的塑膠片製作膜框，從而限制可能的厚度並降低誤差。
- (2) 塑膠片可撓曲，使實驗更易於操作。



4. 第四代設計

本次設計的主要目的是研究不同形狀肥皂膜的旋轉，因此製作不同形狀的膜框。

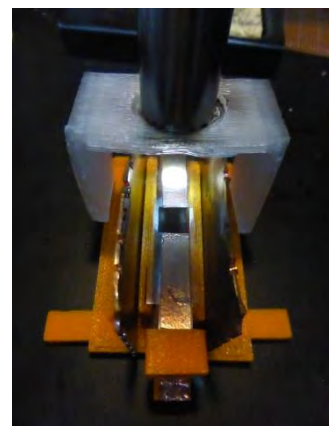
此外，我們為電極板設計滑軌，更方便控制極板間距離。並且由此提高電場最大值，增加額外的實驗數據。



5. 第五代設計

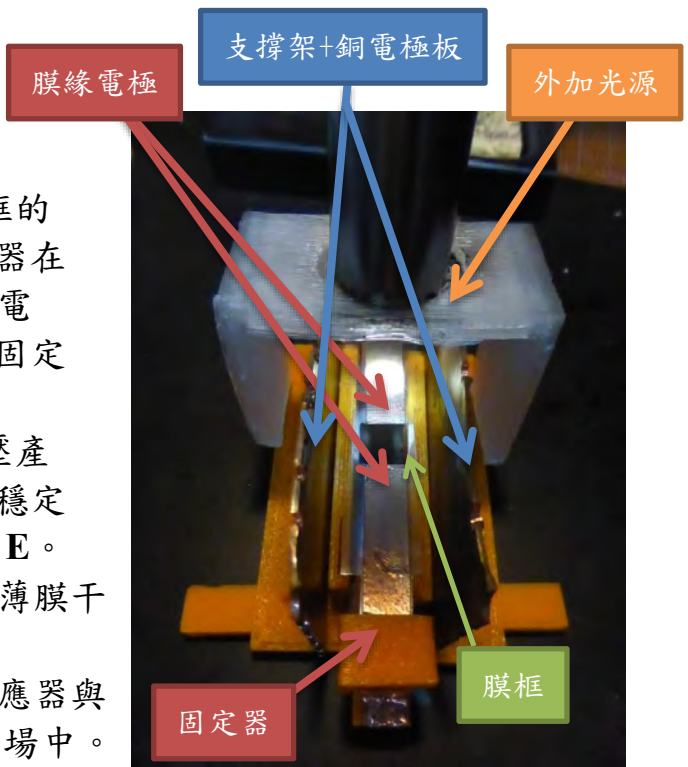
這次修改將我們設計盡善盡美，主要改進以下幾點：

- (1) 在滑軌上增加連接器固定膜框在電極板外側，使得膜框能完整懸空於電極板之間，避免任何可能干擾。
- (2) 增加外加光源，藉由銅極板反射增加環境光，使薄膜干涉更加清楚。
並安裝放大鏡，提高錄影解析度。
- (3) 此設計將電源供應器之鱷魚夾夾在連接器上，再由連接器導通至膜框，避免對膜框造成外力影響。
此外，在實驗中斷時無須切斷電源，可直接更換膜框繼續操作。



6 · 實驗裝置相關名詞

- (1) 膜框：維持肥皂膜的整個外圍框架，包含膜緣電極。
- (2) 膜緣電極：位於膜框的兩側，連接電源供應器在肥皂膜兩端加上固定電壓的電極，我們稱此固定電壓為**膜緣電壓 V** 。
- (3) 銅電極板：連接高壓產生器，在極板間製造穩定電場，稱為**外加電場 E** 。
- (4) 外加光源：照明增加薄膜干涉紋路的亮度
- (5) 固定器：連接電源供應器與膜框，使膜框懸於電場中。



(三)、 溶液配製與肥皂膜性質研究

1、 溶液配製

液體膜電動機最基本的需求，即是維持肥皂膜的穩定存在。

因此我們進行了數次實驗找出適合的肥皂膜配方：

- (1) 水：清潔劑：甘油：膠水 = 20：1：1：1

持續時間 32 sec

- (2) 水：清潔劑：甘油 = 10：1：4

持續時間 50 sec

- (3) 水：清潔劑：甘油 = 15：1：1

持續時間 132 sec

- (4) 水：清潔劑：甘油 = 10：1：8

持續時間 273 sec

這些測試結果的代表性不高，最終我們參考 Colloidal Display: membrane screen that combines transparency, BRDF and 3D volume[5] 的配方，增添甘油比例，決定配方為：

水：清潔劑：甘油 = 5：1：4

實驗過程中我們也發現到，除了溶液本身，如何外界干擾也是一大問題。這個問題的解決是第三代的實驗裝置，我們將膜框縮小為 1.00*1.00 (cm)，並且擴大銅極板面積。這樣的設計除了能

讓肥皂膜更穩定，小的膜框也讓我們能夠以純水形成膜，此部分在後文詳述。

2、肥皂膜性質研究

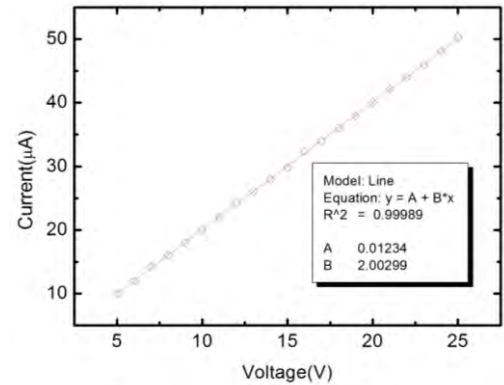
(1) 黏度

我們參考 Viscosity of Glycerol and its Aqueous Solutions^[4]，得知常溫下我們的溶黏度約為 3.72 (cps)。

(2) 電阻

首先我們測試肥皂膜是否符合歐姆定律，量測結果其 I-V 圖呈線性，符合歐姆定律。經過線性回歸並平均之後，得其電阻約為

2.23 (MΩ)



我們參考 製作奈米的肥皂泡膜^[1] 一文，得知電阻在 2.23 (MΩ)時肥皂膜厚度約 525 (nm)，

$$\text{長度 } L = 1.00 \text{ (cm)} = 0.0100 \text{ (m)}$$

$$\text{截面積 } A = 1.00 \text{ (cm)} * 525 \text{ (nm)} = 5.25 * 10^{-9} \text{ (m)}$$

接著透過電阻公式：

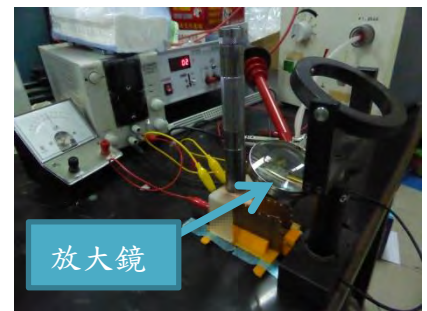
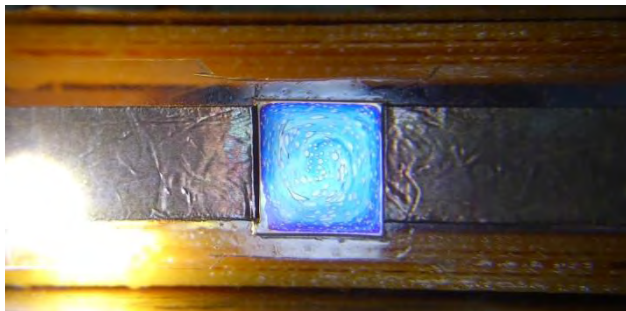
$$R = \rho \frac{L}{A}$$

推得溶液之

$$\text{電阻率 } \rho = 10.5 \text{ (}\Omega\text{-m)}$$

(四)、旋轉性質的分析

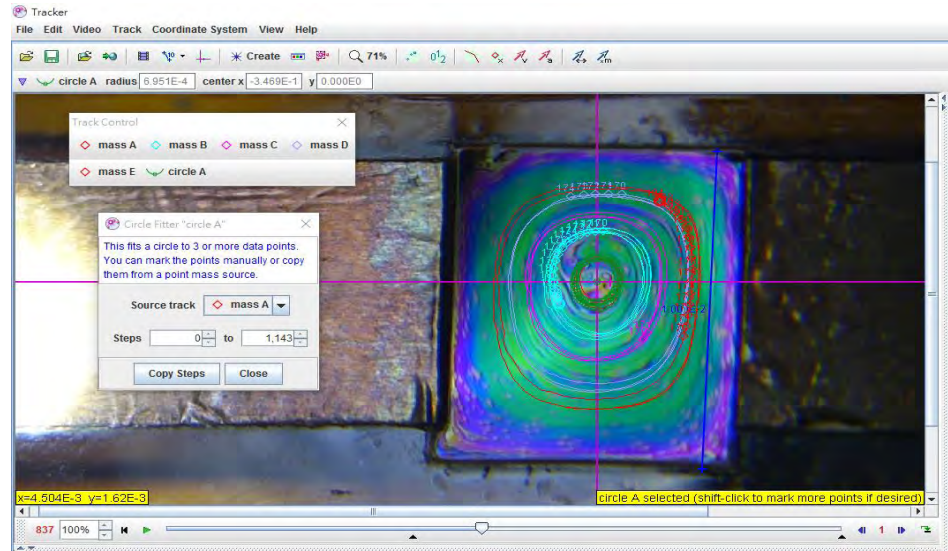
1、攝影



2、影像分析與追蹤

我們將影片匯入 Tracker 進行追蹤。步驟如下：

- (1) 建立質點與校正桿
- (2) 進行追蹤 200 點
- (3) 重複 4~6 次
- (4) 每 100 個追蹤點擬合圓形，取擬合圓心為座標軸原點
- (5) 輸出位置對時間關係資料



3、資料處理

我們在 Origin 中處理數據，步驟如下：

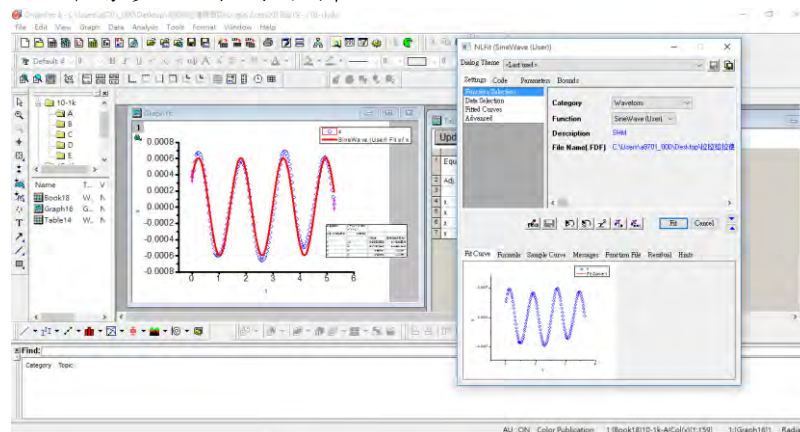
- (1) 取位置資料的 X 方向投影，對時間作圖
- (2) 以方程式：

$$y = y_0 + R(\omega t + \psi)$$

做非線性擬合，得到以下參數：

- R (旋轉半徑)
- ω (旋轉角頻率)
- ψ (相位角)

- (3) 取所需參數作圖分析



(一)、旋轉性質實驗

1 • 調整不同大小的外加電場

(1) 控制變因：

- i. 膜緣電壓固定為 10 (V)
- ii. 旋轉半徑 0.5 (cm)

(2) 操縱變因：

取外加電場 50、100、150、200、250、300 (kV-m)。

2 • 調整不同大小的膜緣電壓

(1) 控制變因：

- i. 外加電場固定為 100 (kV-m)
- ii. 旋轉半徑 0.5 (cm)

(2) 操縱變因：

取膜緣電壓 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 (V)

3 • 不同旋轉半徑下角頻率的差異

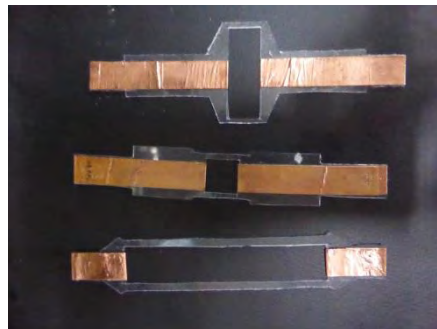
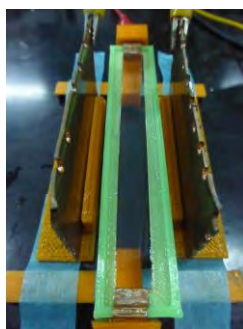
液體膜電動機的旋轉並非剛體運動，我們觀察到由內向外速度不均的現象，因此嘗試對此現象進行研究。

此外，為了了解旋轉理論，我們進行了下列幾個實驗：

4 • 不同形狀的膜框

(1) 寬度增加

將膜框的寬度改為膜緣電極部分的兩倍長，觀察膜面運動。



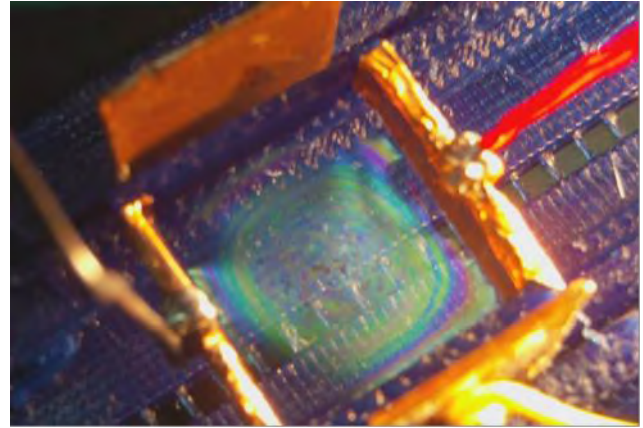
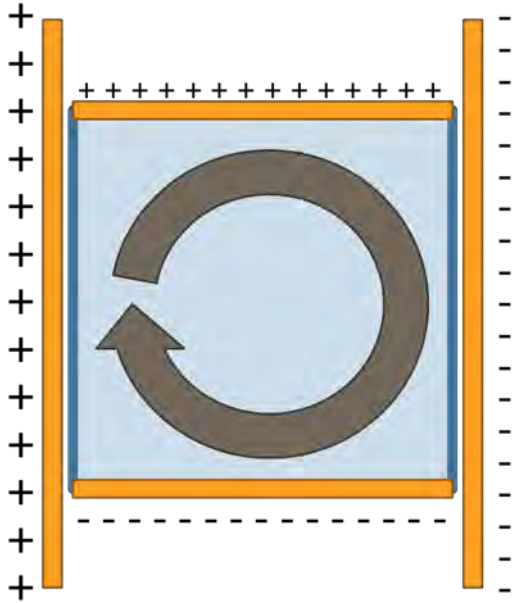
(2) 長度增

將膜框的長度超過銅電極板的長度，觀察中心及邊緣運動。

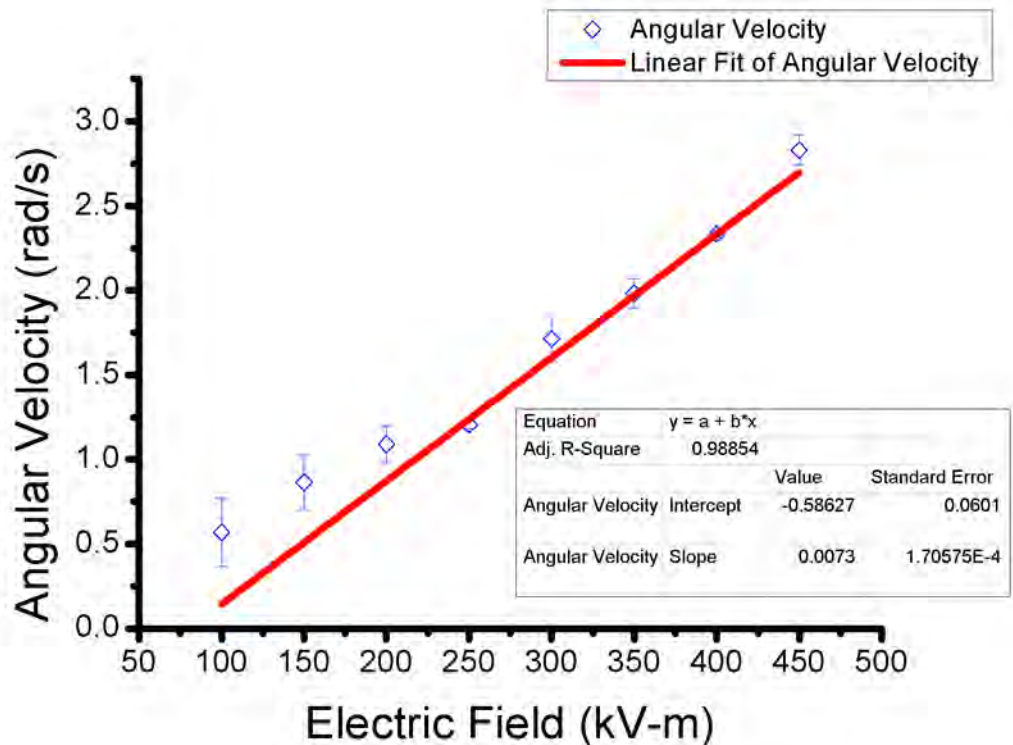
三、研究結果與討論

(一)、液體膜電動機的設計與製作

成功以肥皂膜製作液體膜電動機，能夠維持穩定的單漩渦旋轉，其旋轉方向與文獻中相同，為電場方向與電流密度方向的外積 $\vec{E} \times \vec{j}$

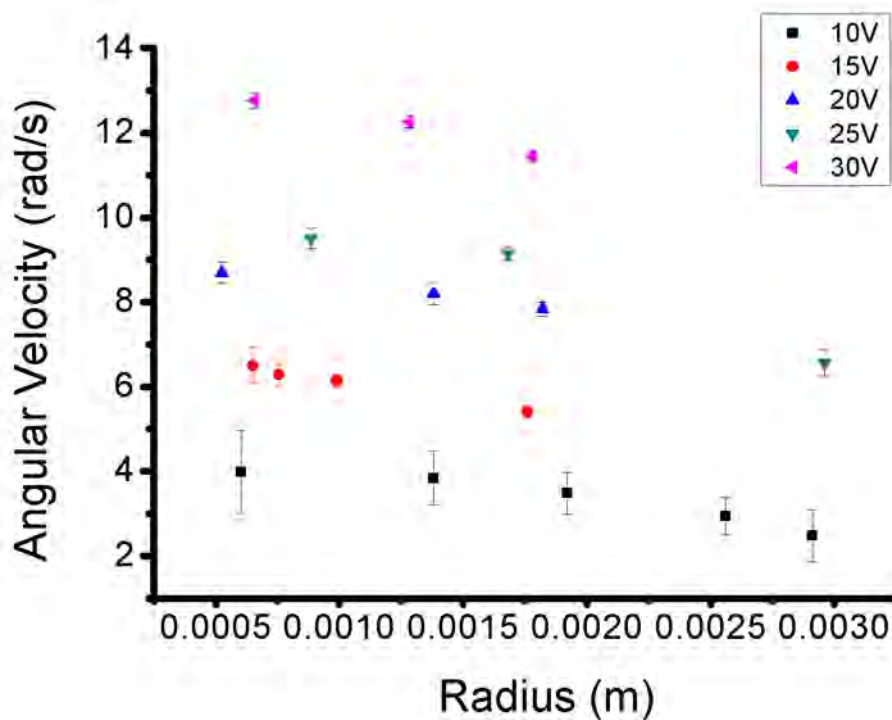


(二)、外加電場對旋轉角頻率的影響



從圖中可以觀察到，外加電場與電壓的關係呈現線性正相關。可看到在 100、150、200 (kV-m) 誤差狀況明顯，是因為膜緣電壓與電場剛超過閾值，旋轉未達到穩定的狀態。在 250 (kV-m) 之後便漸趨穩定。

(三)、膜緣電壓與旋轉半徑對旋轉角頻率的影響



從圖中可以明顯發現，膜緣電壓與旋轉角頻率呈現正相關，且變化狀態相當規律的遞增。

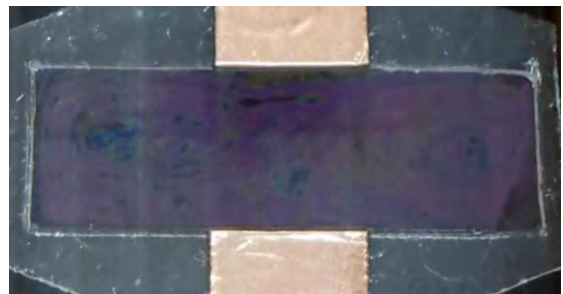
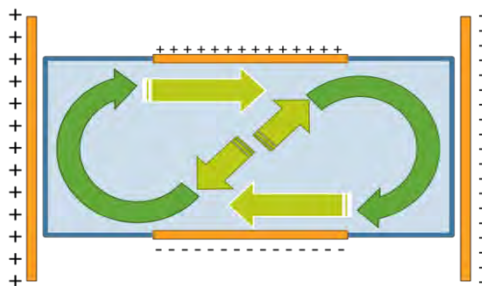
隨著旋轉半徑越大，旋轉角頻率也會下降。此外，此遞減的狀況並非線性，而是遞減率隨著半徑的增加而遞增，可能含有二次的性質，但由於我們的數據點尚未十分足夠，暫未對數據進行擬合。

我們推論此現象為液體黏滯力產生，外側的液體分子經過較長的運動軌跡，也因此持續的受力減速。

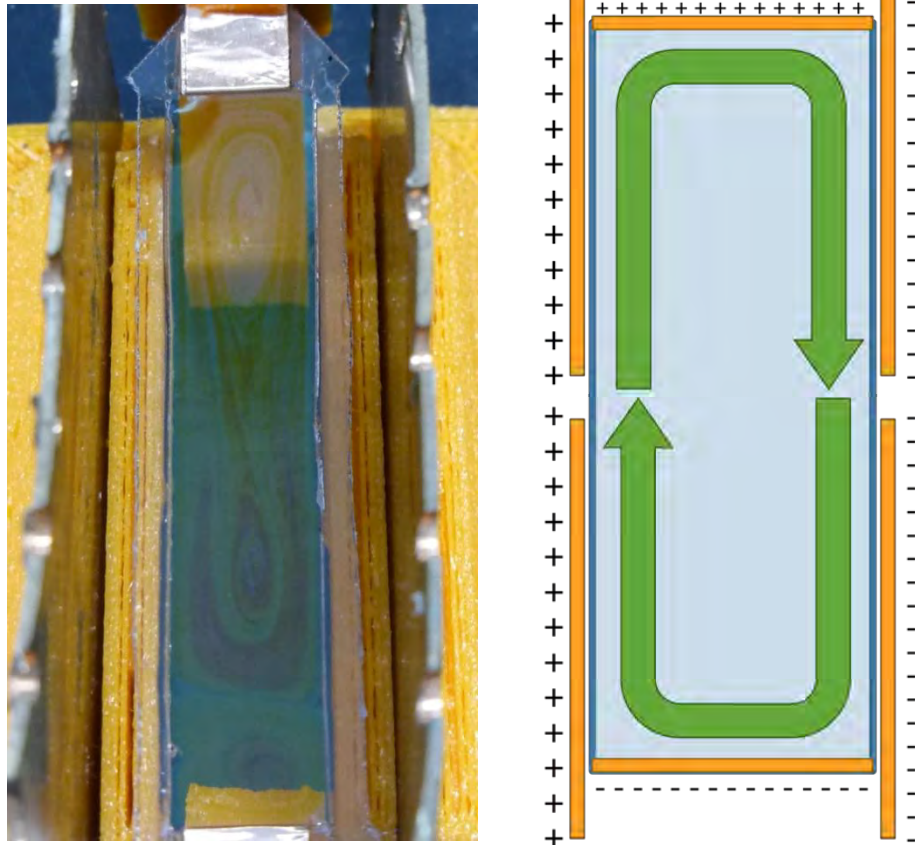
(四)、不同形狀膜框的旋轉情形

1. 寬型膜框

在膜緣電極外側兩邊分別出現漩渦，同樣以 $\vec{E} \times \vec{j}$ 的方向運動，卻明顯出現膜緣電極旁的液體流動。

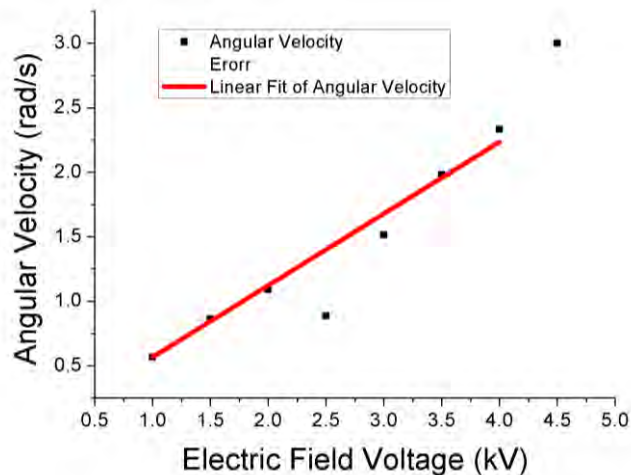


2 · 長型膜框



長型膜上的液體膜流動整體而言也類似方形膜的旋轉狀況，為 $\vec{E} \times \vec{j}$ 的旋轉方向，只是在長軸方向拉伸。

不過，更引起我們注意的是，在膜縱向拉伸的過程當中，出現了第二的漩渦中心。雙核心的流動狀況與橫向的膜不同，兩個漩渦中心間的流動並不多，而是以外側的流動為主



我們也對其旋轉進行定量實驗，發現長型肥皂膜的旋轉閾值比方形高出許多，我們認為是在縱向長度的拉長之下，由於液體膜是不良導體，造成了膜上離子受到膜緣電壓的影響由外朝內逐漸減弱，從而產生出第二個漩渦中心。

(五)、討論

1. 離子在液體膜上的運動

總和了以上效應，我們提出的第一個假說，是有關離子在電場中的運動。

(1) 離子的產生

i. 水的解離

ii. 介面活性劑離子：為大多數離子來源

(2) 膜緣電壓對離子的力

這種運動類似於電泳，在液體兩側加上電壓，如此一來陰離子與陽離子分別向正極與負極運動。此外，由於我們的液體膜是不良導體，因此離子的運動速率隨著與膜緣電極的接近而提高。

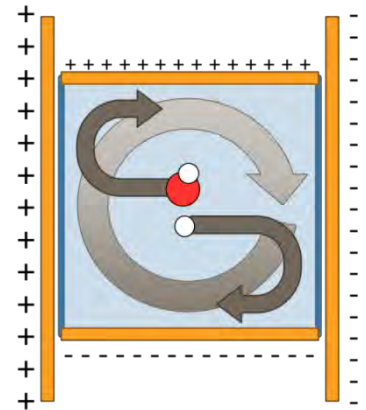
(3) 外加電場對離子的力

帶電的陰陽離子在外加電場中同樣受到牽引往相反方向運動

外加電場的數量級(kV)遠大於膜緣電壓(V)，因此也對帶電離子產生較大的力，所以合力偏向銅電極板。

(4) 離子的運動

離子的運動過程當中，因摩擦力帶動周圍水分子，在膜中央產生旋轉。由此推論的旋轉的方向與實驗相同，為 $\vec{E} \times \vec{j}$ 。



2. 水分子與膜緣電極接觸時的運動

(1) 電雙層的形成(Electric Double Layer)

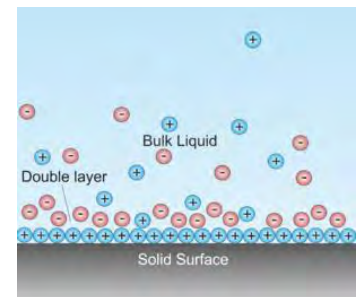
靠近膜緣電極的介面活性劑離子受膜緣電極吸引，向交界面移動。

(2) 外加電場對離子的影響

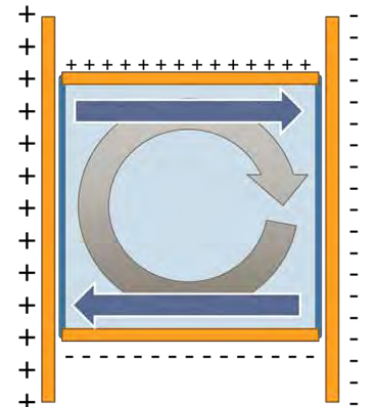
外加電場對膜緣電極邊的離子作用，使得兩膜緣電極邊的水分子往相反方向流動。

(3) 膜緣液體流的產生

當膜加上穩定的膜緣電壓極外加電場時，便會在膜緣電極旁產生液體流。從而在膜上產生運動。



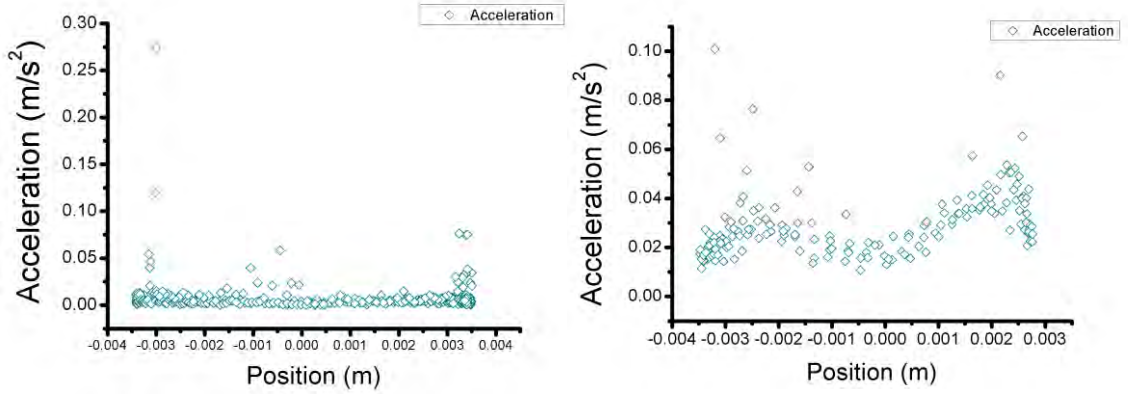
[https://en.wikipedia.org/wiki/Double_layer_\(interfacial\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Double_layer_(interfacial))



3. 液體膜電動機的旋轉受力情形

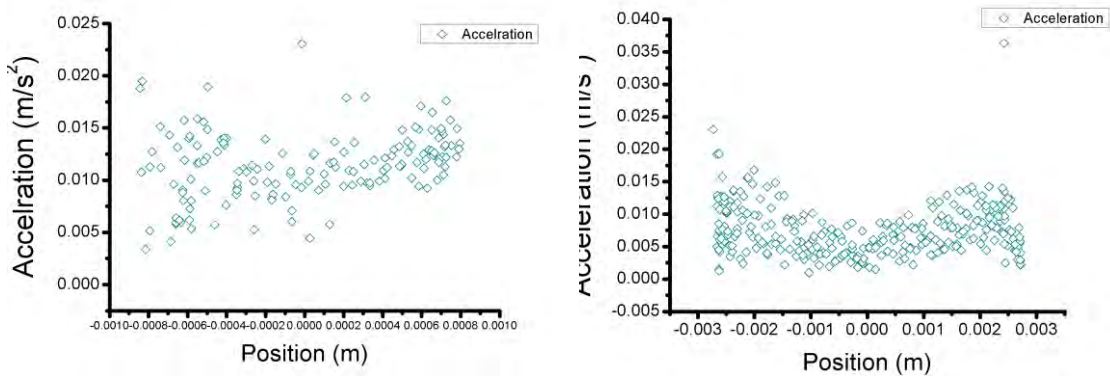
(1) 膜邊緣的旋轉情形

從圖中可以觀察到，兩側的加速度較高，而中間較低。X軸是膜的截面，左右兩側是靠近膜緣電極的部分。可以從數據得知，在靠近膜緣電極的部分的確有受力增加的情形。



中心的旋轉情形

然而，在膜中心的部分卻沒有呈現這樣的加速度分布，而呈現更加均勻的分配，可以說明在膜中心的部分較無此種效應作用。而是由離子運動的機制掌控。

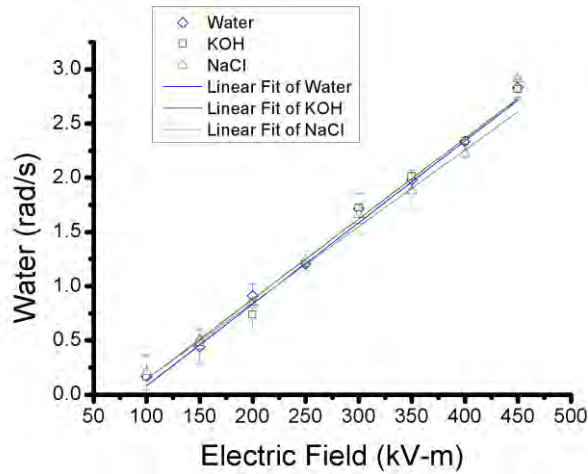


4. 旋轉運動總結

- (1) 裝置啟動
- (2) 中心離子流將水分子帶往膜框邊緣
- (3) 膜緣電極產生的液體流獲得補充，持續產生流動
- (4) 單漩渦旋轉產生，旋轉方向為 $\vec{E} \times \vec{j}$

5 · 推翻

為了驗證此推論，我們也嘗試加入電解質。



我們在溶液中加入 1M 的 KOH 及 NaCl 進行實驗，實驗結果卻發現，並沒有產生顯著的差異，與未加入電解質的實驗結果十分接近。由此可知，可能離子造成的影響，並不如我們所假設的狀況。為了更進一步驗證，我們也利用純水膜進行實驗。



我們藉由縮小膜框使水膜縮小。在膜框上方以滴管同時將水滴滴出，部分水滴落至下方，而碰觸到邊緣的部分因表面張力足以維持，進而產生小型水膜。

實驗結果發現純水膜亦能夠產生旋轉，說明了離子的作用與旋轉無關，推翻以上兩個假設。

由於純水膜的製作十分困難，且非常不穩定，兼之厚度太大，薄膜干涉不明顯，導電度極低使得無法測得電阻。因此實驗仍然以加入介面活性劑的溶液進行。

6 · 水溶液的電極化

了解旋轉效應與離子無關之後，我們將旋轉的核心問題擺到了水分子本身。液體膜電動機的裝置其實十分類似兩個相互垂直的電容器。而液體膜則類似電容器中的介電質。

(1) 外加電場的影響

水分子的偶極矩在外加高電場中偏轉，使得液體膜出現電極化現象。

電極化強度定義為平均偶極矩除以體積，在均勻電場及各項同性的線性介電質條件中，電極化強度可表為：

$$P \equiv \frac{p}{V} = X_e \epsilon_0 E_{ext}$$

p 為偶極矩、 V 為溶液體積

X_e 為電極化率、 ϵ_0 為真空介電常數、 E_{ext} 為外加電場

電極化率之定義為：

$$X_e = \epsilon_r - 1$$

ϵ_r 為相對電容率

則偶極矩可表為：

$$p = X_e \epsilon_0 V E_{ext} = (\epsilon_r - 1) \epsilon_0 V E_{ext}$$

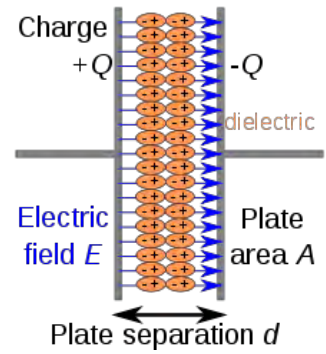
從巨觀的角度來看，在外加電場的作用下，液體膜上靠近銅電極板的正極部分帶正電，而靠近負極部分帶負電。

(2) 膜緣電壓的影響

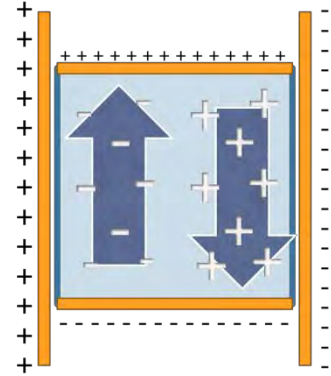
裝置中的兩個膜緣電極直接接觸液體膜，在膜上形成電場 E_{film} 。又由於電極厚度遠大於液體膜厚度，電場可視為均勻。電極化的液體膜受作用形成力矩，在膜上產生旋轉。

力矩可表為：

$$\tau = \vec{P} \times \vec{E} = P E_{film} \sin \theta$$



https://en.wikipedia.org/wiki/Dielectric#Dielectric_dispersion



最終可以將產生旋轉的力矩表示為：

$$\tau = (\epsilon_r - 1)\epsilon_0 V E_{ext} E_{film} \sin \theta$$

在液體膜上，因為外加電場的作用，表面電荷的分布是固定的，液體分子會受力產生運動的過程中並不會將電荷帶走。從而產生穩定的旋轉運動。

此推論符合旋轉方向，也能夠驗證液體膜電動機旋轉的閾值是外加電場與膜緣電壓的反比關係。

(3) 黏滯力作用

在液體膜電動機運作的過程當中，可見得是相當穩定的層流，因此可以用黏滯力表達其流動受到的阻力。

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$$

雖然我們無法有效測量其剪應變梯度，不過可以理解，在黏滯力作用之下，旋轉角速度隨著旋轉半徑增加而下降，符合實驗的結果。

四、結論與應用

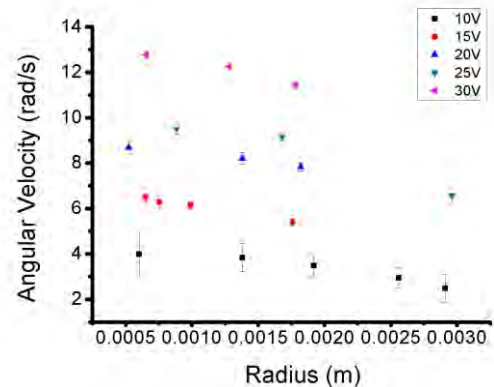
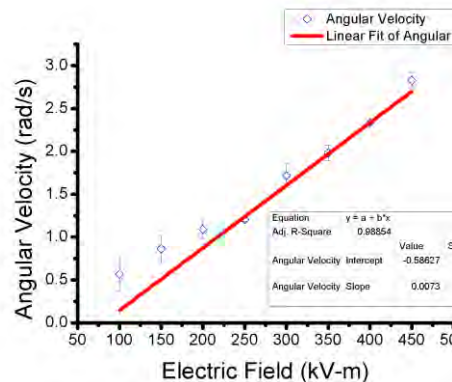
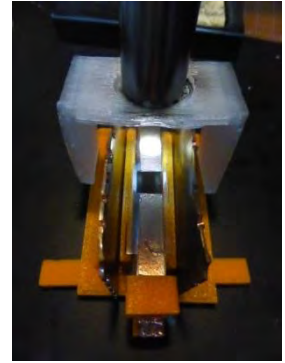
(一)、結論

1. 設計並製作實驗裝置讓液體膜電動機穩定運作

- (1) 旋轉方向為 $\vec{E} \times \vec{j}$ ，能穩定運作。
- (2) 進行裝置改良，改進實驗精確度。

2. 研究液體膜電動機之旋轉性質

- (1) 膜緣電壓與角速度呈正相關
- (2) 外加電場對角速度成一次正比
- (3) 旋轉半徑對角速度呈負相關，遞減率隨半徑增加而增加



(4) 分析旋轉過程中的受力情形，發現在受力朝外側增加。

3. 討論液體膜電動機之旋轉原理

(1) 離子在電場中的電泳運動

離子因為膜緣電壓及外加電場進行運動，外加電場之影響遠大於膜緣電壓，故運動產生偏向情形進而出現旋轉。

(2) 離子感應產生液體流

- i. 離子在朝膜緣電極運動聚集成電雙層
- ii. 受外加電場影響沿著電極流動

(3) 以實驗推翻上述兩個假設

- i. 在液體膜中加入電解質
- ii. 以純水膜使液體膜電動機旋轉

(4) 水溶液的電極化

水分子在外加電場影響下電極化，並受垂直方向的電場產生力矩而旋轉。

4 · 探討建立液體膜電動機之簡單運動模型

(1) 推論轉動力矩

$$\tau = (\epsilon_r - 1)\epsilon_0 V E_{ext} E_{film} \sin \theta$$

(2) 黏滯力造成旋轉半徑與角速度的負相關

(二)、應用

本研究的主題為液體膜電動機，雖然這只是一個發生在為小薄膜上的效應，又需要提供高電壓作為驅動力致使其運轉。然而，液體膜電動機在未來發展上也頗有可觀。首先醫學上，目前有離子電泳等藉由流體離子做溶劑以及運送媒介，攜帶藥物對特定部位進行治療的方式，液體膜電動機便可以做為一個穩定而持續的動力來源。而在奈米感測器的控制與運輸上，利用液體膜電動機所能達到的效果也十分有發展空間。再者，在工業製造上，液體膜電動機可以進行的有效運用是在於靜電的去除，若能夠調整薄膜本身化學特性以吸附靜電荷，就能夠藉由流動的方式將靜電帶出工作場域，以達到去除靜電的效果。此外，液體膜電動機不如一般的電動機是利用電場磁場的連續變換達到旋轉的效果，它是存在在穩定電廠與電壓下的渦漩，這樣的特性使得它能夠使用在需要顧慮電場磁場變化的場域之中，足見其特色與發展之可能性。

五、參考資料及其他

- [1] 嚴凱傑 朱柏憲 040109 製作奈米的肥皂泡膜 第 49 屆中小學科學展覽會 物理科 中華民國
- [2] Amjadi, R. Shirsavar, N. Hamedani Radja, M. R. Ejtehadil, 2008, *A Liquid Film Motor* , arXiv:08050490v2
- [3] D.Bernard, G.Boffetta, A. Celani, G.Falkovich, 2006, *Conformal invariance in two-dimensional turbulence*, doi:10.1038/nphys217
- [4] E.V. Shiryayeva, M. Yu. Zhukov, V.A. Vladimirov, 2013, *Rotating electrohydrodynamic flow in a suspended liquid film*, arXiv:0902.3733v1
- [5] J. B. Segur, Helen E. Oberstar, 1951, *Viscosity of Glycerol and Its Aqueous Solutions*, Ind. Eng. Chem., 43 (9), pp 2117–2120
- [6] Yoichi Ochiai, Alexis Oyama, Keisuke Toyoshima, 2012, *Colloidal Display: membrane screen that combines transparency, BRDF and 3D volume*, DOI: 10.1145/2343456.2343458
- [7] Z. G. Chiragwandi, O. Nur, M. Willander, and I. Panas, *Vortex rings in pure water under static external electric field*, Applied Physics Letters 87, 153109; doi: 10.1063/1.209952
- [8] Z. G. Chiragwandi, O. Nur, M. Willander, and N. Calander, *dc characteristics of a nanoscale water-based transistor*, Applied Physics Letters 83, 5310 (2003); doi: 10.1063/1.1635070

【評語】 160004

此作品設計在液體膜以電動機方式激發，在液膜外加電場後，產生液膜之運動，並觀察液膜的各種運動情形與外加場之關係，此實驗提供一個相當新穎的物理現象、具新意，是值得嘉許之處。如果能將結果以物理理論作詳盡分析，可以更加提高作品內容層次。