

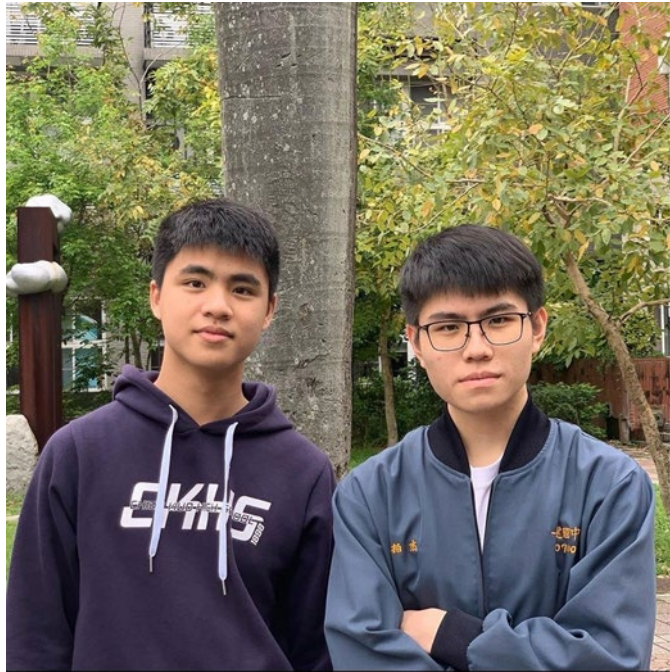
2021 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 160035
參展科別 物理與天文學
作品名稱 介電潤濕機制探討及應用-水電車
得獎獎項 大會獎 四等獎

就讀學校 臺北市立建國高級中學
指導教師 江宏仁、賴奕帆
作者姓名 楊竣凱、劉柏杰

關鍵詞 介電潤濕、電容、數值模擬

作者簡介



大家好，我們是楊竣凱和劉柏杰，目前就讀於建國中學三年級。進行物理專題近兩年了，很有幸能得到賴奕帆老師的指導，不論是物理知識、實驗方法或自行尋找、看論文的能力都進步很多，高三這年，在升學壓力和科展的壓力下，少了老師我們也無法堅持下去。在實驗過程中，不免遇見困境和瓶頸，但看到成果逐漸產出，總是令人感到欣慰，覺得自己的付出都是值得的，也要感謝這兩年來幫助過我們的教授、老師，我們才有機會進入國際科展的殿堂。

摘要

將液滴置於鋪上介電層的電極板，接上電壓時，液滴因表面張力及接觸角產生變化而移動，此現象被稱為介電潤濕，其裝置能讓生醫等產業進行精準的微量藥物配置。為了探討此現象原理及改善裝置，本研究測量液滴位於不同電壓之電極板上方時，液滴接觸角及介電層厚度；透過數值模擬計算系統總能量、視覺化系統的電位空間分布，並計算電容，以能量角度模擬液滴移動模式；對於平面式裝置在長時間移動水珠後，產生水珠移動速率趨緩，甚至朝反方向移動的現象給予解釋；改良文獻中平面式和雙層式的電潤濕裝置，將雙層式上板改為導線。因為形狀酷似電車，因此我們稱其為「水電車」，此裝置保留高電容特性的同時，降低阻力。實驗證實其水珠移動能力優於平面式裝置，除了使液滴更好移動外，相較於封閉的雙層式裝置，開放式系統的特點能讓生醫研究人員更方便置換樣品。

Abstract

When a droplet is placed on a dielectric layer with an electrode plate beneath it, and voltage is then applied to the electrode plate, the droplet moves due to change in its contact angle. This phenomenon is called "electrowetting-on-dielectric" (EWOD). The device enables biomedicine and other industries to achieve precise trace drug configuration. In order to explore the mechanism of this phenomenon and improve the device, we measured the contact angle of the droplet and dielectric layer thickness, while applying different voltages to the electrode plate. We calculated the capacitance and visualized the total energy and the potential spatial distribution of the system in order to simulate the droplet motion. We observed that after the single-plate device is applied with voltage for a long time, the water droplets begin to move slower and eventually even move in the opposite direction. We suggest a theoretical explanation in our article. Last, by replacing the double-plate's upper plate with a wire, we improved the performance of the double-plate electrowetting device. Because the shape of our modified device resembles a tram, we call it a "water tram". This device retains the characteristics of high capacitance, while the resistance is reduced. Experiments have proved that the mobility of the droplets on it is higher than on the single-plate device. Consequently, the loss of energy from the system is reduced. Additionally, compared to the closed chamber double-plate device, the open chamber system is more convenient for biomedical researchers, because it makes it easier to replace the sample.

壹、前言

一、研究動機

在看到MIT關於數位控制電潤濕的研究^{[2][3]}影片後，看著水珠神奇的被電腦程式所控，讓我們對此現象感到十分好奇，水珠是怎麼在這表面上移動？平面加電壓式電極板系統和上下加電壓式的電極板系統有何差別？為了探索其中奧妙、了解原理，我們嘗試把它在現實中製作出來，期望能近距離觀察到水珠移動的有趣現象。

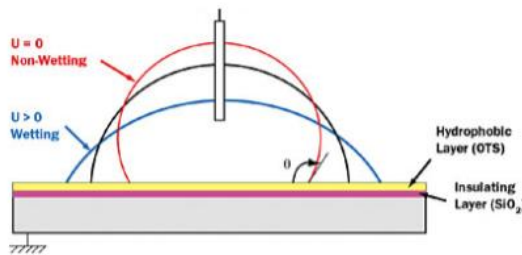


圖1-1、電潤濕示意圖^[1]

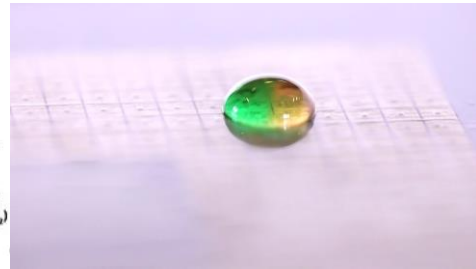


圖1-2、MIT作品圖^[3]

二、研究目的

- (一)、找到經濟實惠的材料作為介電層及疏水層
- (二)、探究電極板電壓與液滴接觸角的關係
- (三)、探究液滴與電極板系統的電位分布、電容及能量
- (四)、通過數值模擬視覺化液滴系統的電位分布
- (五)、實驗水電車裝置效果並與傳統裝置比較優劣




貳、研究過程或方法

一、實驗器材

直流電供應器、接觸角測量儀、香蕉頭-鱷魚夾電線、針、石蠟、鋁片、市售防水噴霧、鐵氟龍、3M FC-770氟化液、塗布機、烘箱、絕緣膠帶、測厚儀、訊號產生器、示波器、顯微鏡、石蠟膜、ITO玻璃、雷射機、矽油(100cs)、Parafilm封口石蠟膜、微量滴管。

二、電腦軟體

表1.所用程式及計算平台

python	Google Cloud Platform
	
COMSOL Multiphysics	Tracker
	

三、理論

(一) 名詞、符號解釋

1. 介電潤濕

介電潤濕是一種藉由電場改變表面疏水能力的技術。實際製作方法為在一電極板上方鋪上介電層，再鋪上疏水層以降低摩擦，滴上水珠。此時，在電極板與液滴製造電位差，就能觀察到液滴塌下的現象。

2. 接觸角(Contact angle)

液滴存在於一固體表面上時，其液-氣界面與所接觸之固體表面會形成一夾角。液體切面與固體切面之間的兩面角，即為接觸角（即下圖之 θ ）。

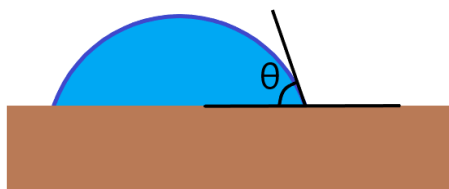


圖4-1、接觸角示意圖

3. DA態(double-activated)

電潤濕系統中，液滴下方兩個電極板皆處於高電位時的狀態(如下圖)

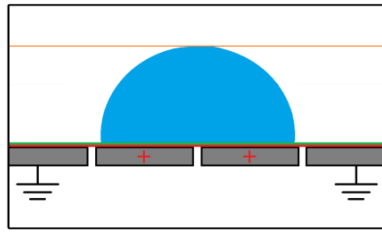


圖4-2、DA態示意圖

4. SA態(single-activated)

電潤濕系統中，液滴下方只有一個電極板處於高電位時的狀態(如下圖)

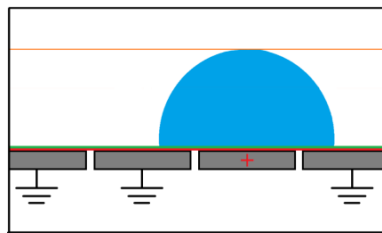


圖4-3、SA態示意圖

(二) 電潤濕理論

1. 楊氏方程式(Young's equation)

它是描述固、液、氣界面張力與接觸角 θ 之間的關係式，適用於均勻表面和固液間無特殊作用的平衡狀態。

$$\gamma_{SG} = \gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cos \theta \quad \dots\dots\dots(1)$$

其中 γ 為表面張力、 θ 為接觸角，下標S,G,L分別表示固體介面、氣體介面及液體介面，故 γ_{SG} 表示固-氣介面之間的表面張力； γ_{SL} 表示固-液介面之間的表面張力；而 γ_{LG} 表示液-氣介面之間的表面張力。

2. Lippmann equation

法國科學家Lippmann觀察到在汞和電解液之間加電壓，出現毛細下降現象，並提出了Lippmann equation：

$$\gamma_{SL} = \gamma_{SL_0} - \frac{1}{2}CV^2, C = \frac{\epsilon\epsilon_0}{t} \dots\dots\dots(2)$$

其中C為比電容（單位面積的電容值），V為電壓，t為介電層厚度， ϵ_0 為真空介電常數， ϵ 為介電層之介電常數。

結合式(1)、式(2)可得到Lippmann—Young equation：

$$\cos\theta = \cos\theta_0 + \frac{1}{2} \frac{\epsilon\epsilon_0}{\gamma_{LG} \times t} V^2 \dots\dots\dots(3)$$

(三) python模擬先備知識

1. 電學

(1) 電位分布

由高斯定律的微分形式：

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

且已知：

$$\vec{E} = -\nabla V$$

因為空氣中電荷密度為零，可得其電位之泊松方程，即拉普拉斯方程：

$$\nabla^2 V = 0 \dots\dots\dots(4)$$

本文python模擬中即用式(4)得到空間電位分布

(2) 系統電容(C)

一般而言，電容只和物體幾何形狀及物體材質有關，與電壓、電荷量無關。

其定義為：

$$C \equiv \frac{Q}{V}$$

其中Q為電容器儲存之電荷量，V為兩電容器之電位差。

當物體形狀較為規則，可以透過高斯定律求得電荷Q，再透過線積分電場得到電位差，進而得到電容值。但在計算一不規則物體的電容時，一般數學方法就變得很難計算。因此文獻^[6]透過使用能量的觀點切入：

把正電荷dq從V移至V，我們需要作功：

$$dW = U_f - U_i = Vdq = \frac{q}{C} dq$$

而此能量即是電容器所儲存的位能：

$$U = \int dW = \int \frac{q}{C} dq = \frac{q^2}{2C} = \frac{1}{2} CV^2$$

又知道空間中的電場能量密度為(體積以 τ 表示)：

$$u = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 = \frac{dU}{d\tau}$$

結合上面兩式，可得：

$$C = \frac{2 \iiint \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 d\tau}{V^2} = \frac{\epsilon_0}{V^2} \iiint E^2 d\tau \dots\dots\dots(5)$$

2. 有限差分法(finite difference method)

面對一些難以求出精確解的微分方程，常以數值分析法求近似解，將連續的量轉換成離散的形式才得以計算。而這之中微分所對應的便是「差分」。在求解的過程中，我們會不斷將前一次運算的結果代入下一次運算的初始值，以逼近精確值。對於一定態系統，迭代越多次，整個系統會愈趨穩定。儘管我們求解的是不隨時間變化的穩定系統，但因多次的迭代操作類似於數值隨著時間演變，故被稱為虛擬時間。虛擬時間能幫助我們確保求值時每個點都是取自上一個「時刻」(迭代時間)的值。

而二階微分對於三維情形：

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \approx \frac{\frac{f_{i+1,j,k} - f_{i,j,k}}{\Delta x} - \frac{f_{i,j,k} - f_{i-1,j,k}}{\Delta x}}{\Delta x} = \frac{f_{i+1,j,k} - 2f_{i,j,k} + f_{i-1,j,k}}{\Delta x^2}$$

以此類推可得：

$$\frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \approx \frac{f_{i,j+1,k} - 2f_{i,j,k} + f_{i,j-1,k}}{\Delta y^2}$$
$$\frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \approx \frac{f_{i,j,k+1} - 2f_{i,j,k} + f_{i,j,k-1}}{\Delta z^2}$$

四、實驗介紹

(一)、實驗一：接觸角測量

1. 製作電極基底

2. 滴上40~60 μ L水滴

3. 測量接觸角

(1) 自製環境架設測量

i. 將USB顯微鏡畫面調至與樣本平面平行

ii. 樣本後方架設手機白幕提供光源，以增加畫面對比度

iii. 使用Geogebra中圓錐擬合曲線，測量所攝圖片中液滴的接觸角



圖4-1、自製接觸角測量裝置圖

(2) 接觸角測量儀

i. 直接使用接觸角測量儀進行測量

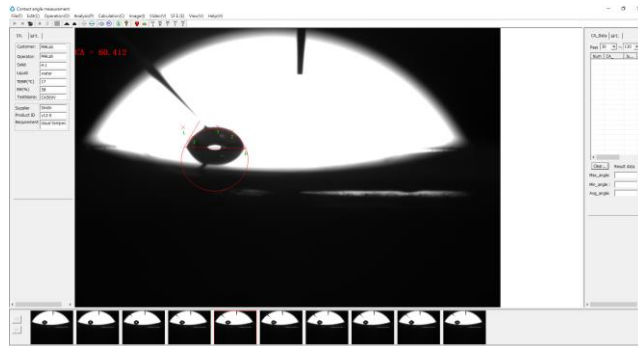


圖4-2、接觸角測量儀使用畫面

(二)、實驗二：電容量測及模擬

1. 電容量測

(1) 前置作業

- i. 使用麵包板固定線路架設
- ii. 將 $20\ \mu\text{L}$ DD water滴至鋪有Parafilm石蠟膜的電極板上
- iii. 滴上少量矽油(100cs)

(2) 用電壓分配推算電容阻抗，測量樣本之電容值

- i. 將訊號產生器頻率調至1MHz
- ii. 用示波器接收電阻及電容之電壓訊號
- iii. 用電阻端訊號推算電流
- iv. 調整訊號產生器輸出電壓
- v. 紀錄並作 $I-V\omega$ 圖，其斜率即為所量電容值

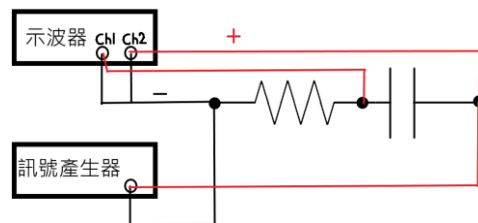


圖4-3、電容測量示意圖

2. 數值模擬

(1) Python

- i. 設置邊界電位參數
- ii. 使用有限差分法(finite difference method)以拉普拉斯方程式進行空間中電位分布的計算。
- iii. 進行電容之計算(以式 $C = \frac{2 \iiint \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 d\tau}{V^2} = \frac{\epsilon_0}{V^2} \iiint E^2 d\tau$)。
- iv. 每100次迴圈輸出一一次電容變化以確認模擬結果是否收斂。
- v. 輸出最終電容值和電位分布圖。

(2) Comsol(使用有限元素法(finite element method))

- i. 設置物件幾何構形
- ii. 設置邊界參數及物理性質
- iii. 使用靜電套件進行計算
- iv. 得到系統電容值

(三)、實驗三：介電潤濕液滴移動模式探討

在先前的研究中，我們發現上下式施加電壓（將電壓兩端分別接在液滴上與下方電極板）將使液滴移動更為顯著，最小驅動電壓也較平面式裝置小。我們推測其原因為，上下式施加電壓，在相同電壓時，電容較平面式大，儲存的能量亦較多，因此能帶給水珠更多動力。文獻中的上下式施加電壓是以在液滴上方加上一電極板的方式，變成類似「兩層式」的裝置。然而，此方式勢必壓迫到水珠，使其變形，從而增加阻力。因此，我們將文獻裡「兩層式」裝置上部電極板換成一細銅線，有了「水電車」的發想，預測其移動能力將比平面式好，且所受阻力會比兩層式小。

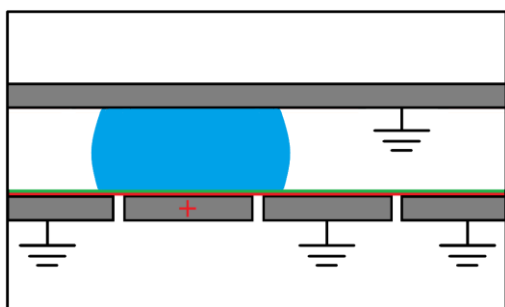


圖4-5、雙層式側視圖

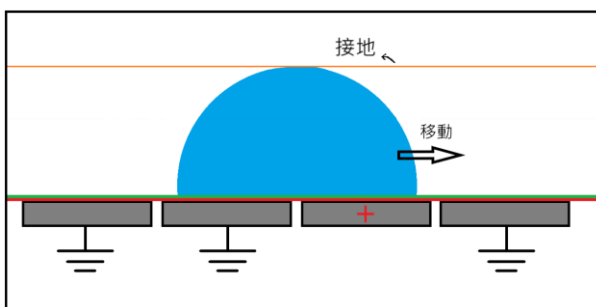


圖4-6、水電車側視圖

1. 在製作好的電極基板上架設銅線於適當高度(液滴高度左右)

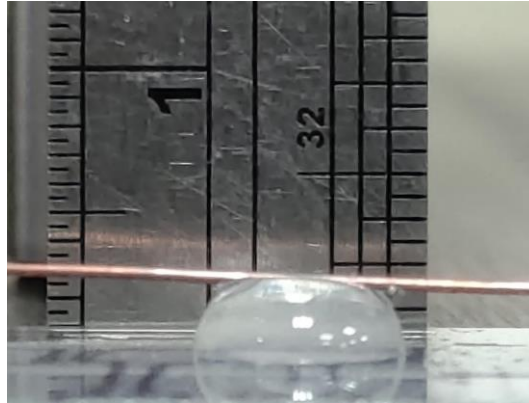
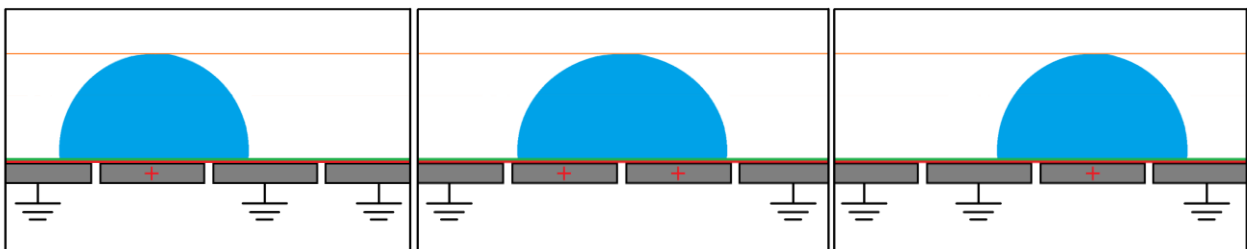


圖4-7、銅線架設圖(並未施加電壓)

2. 滴上液滴，使銅線恰接觸於液滴上方，不會破壞液滴表面或進入液滴
3. 以平面式或水電車式施加電壓，並錄影記錄。而對此，我們有兩種施加電壓，使液滴移動的方式。

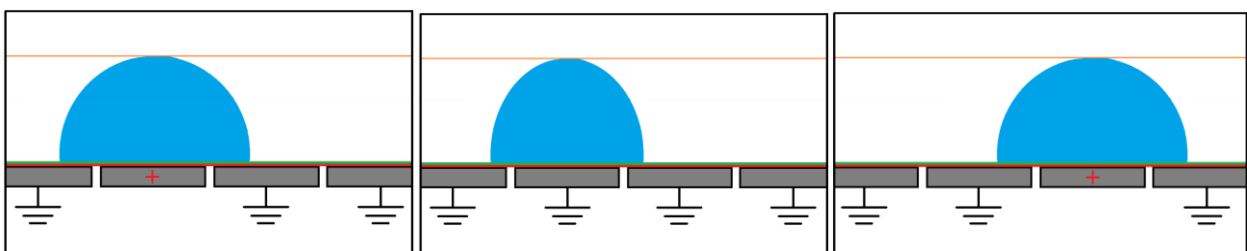
- (1) 方法一：先將原電極(液滴原本所在電極)接上正極，再將目標電極接上正極，此時我們稱為DA(double-activated)，液滴將部分觸碰到目標電極，最後，再將原電極接地，系統進入SA(single-activated)，而此時液滴會完全移動到目標電極上。(如下流程圖，順序為左到右)



SA(接觸角變小，觸碰旁邊電極) DA(移動至兩電極中間) SA(移動至目標電極)

圖4-8~4-10、水電車方法一操作流程圖

- (2) 方法二：液滴夠大能觸碰兩電極，直接將目標電極接上正極，進入SA，使液滴移動。(如下流程圖，順序為左到右)



SA(接觸角變小，觸碰旁邊電極) 無(液滴回縮但仍碰到目標電極) SA(移動至目標電極)

圖4-11~4-13、水電車方法二操作流程圖

4. 以tracker標記液滴較能分辨的前緣及後緣位置，測量液滴移動狀態

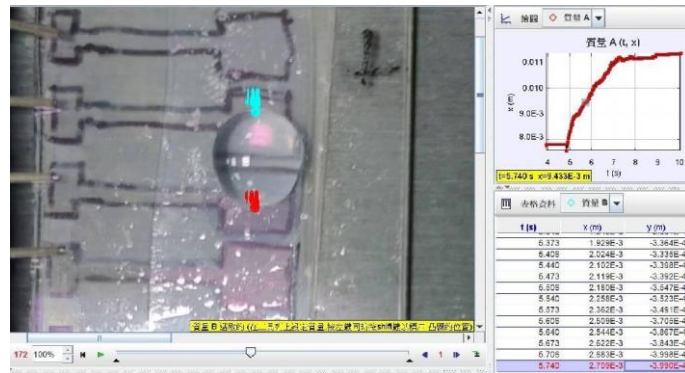


圖4-14、tracker測量圖(藍點為後緣、紅點為前緣)

5. 調整變因（電壓、介電層厚度）進行實驗比較

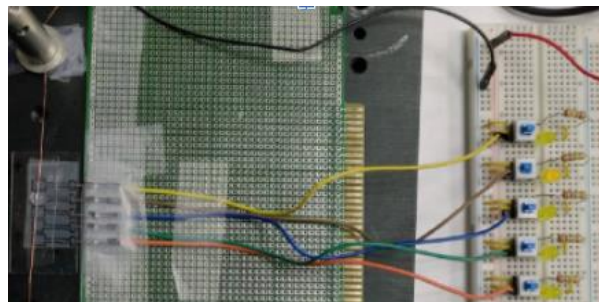


圖4-15、水電車實驗裝置圖

五、基底製作

(一)、實驗一

1. 鐵氟龍配置

- (1) 將鐵氟龍粉末加進3M™ FC-770溶液，配置成1wt%溶液。
- (2) 隔水加熱至70°C，持續3小時。
- (3) 溶液澄清即完成。

2. 防水噴霧+PE(保鮮膜)

- (1) 將保鮮膜表面拉至平整再覆蓋於金屬片上，並盡量去除小氣泡。
- (2) 在至少30cm外噴防水噴霧，防止其被吹皺。

3. 鐵氟龍+膠帶(PET)/保鮮膜(PE)

- (1) 將膠帶/保鮮膜貼平在金屬片上，並將旁邊不需要之電路覆蓋，同時可在旁邊貼兩層膠帶以防止溶液流失。

(2) 以預先備好之鐵氟龍溶液將所需區域蓋滿。

(3) 放置烘箱以70°C以上溫度烘乾20~30分鐘。

4. 石蠟

為了使一層極薄的石蠟附著於金屬上，我們反覆執行融化和刮除的操作，使其薄而均勻。

(1) 將固體蠟置於金屬表面。

(2) 使用烘箱，110度C的狀態下將金屬片和石蠟同時加熱至石蠟完全融化。

(3) 取出樣品，將蠟層的中心部分刮除(因石蠟融化後，邊緣部分的液體蠟會流向中心部分，再次將其填滿)。此操作可直接減少蠟層體積，將蠟層變薄。

(二)、實驗二、三基底製作

1. ITO玻璃電路板製作

(1) 設計圖樣向量圖。

(2) 進行雷射刻蝕。

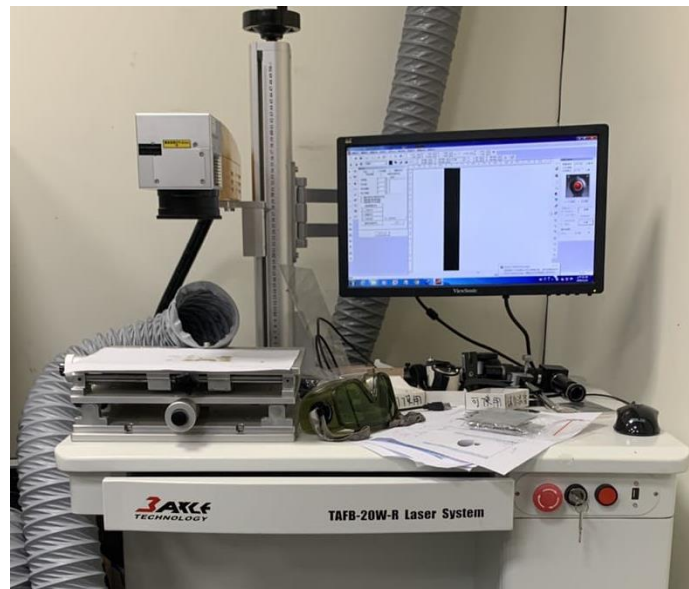


圖4-16、雷射刻蝕機台圖

2. 石蠟膜製作

(1) 將Parafilm石蠟膜拉至約2~3倍長使其變薄，但不致產生裂縫。

(2) 把膜貼平到完成的ITO玻璃上。

(3) 將疏水之100cs矽油取20 μ L滴到膜上，並使其均勻平鋪於表面，減少膜的粗糙度。

參、研究結果及討論

一、接觸角測量與模擬

(一)、實驗數據

由理論公式，我們知道 $\cos\theta-V^2$ 應呈線性關係，據此，我們繪出理論線，並討論實驗結果。

1. 防水噴霧+PE(保鮮膜)

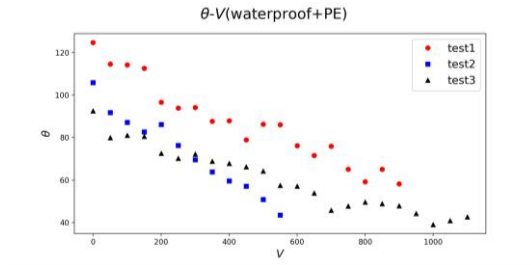


圖5-1、(防水噴霧+PE)接觸角-V 圖

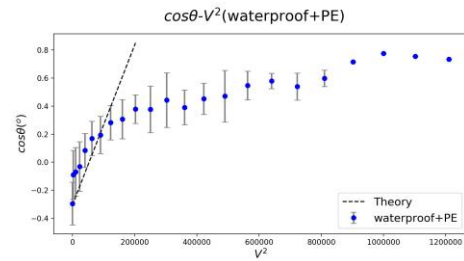


圖5-2、(防水噴霧+PE) $\cos\theta-V^2$ 圖

2. 鐵氟龍+PE(保鮮膜)

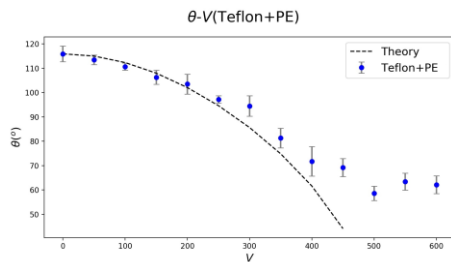


圖5-3、(鐵氟龍+PE)接觸角-V 圖

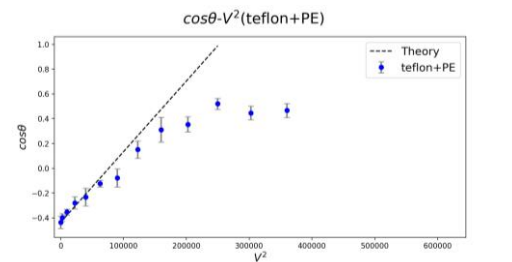


圖5-4、(鐵氟龍+PE) $\cos\theta-V^2$ 圖

3. 鐵氟龍+PET膠帶

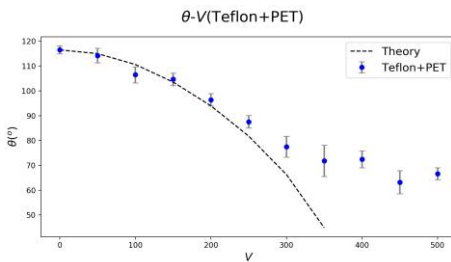


圖5-5、(鐵氟龍+PET)接觸角-V 圖

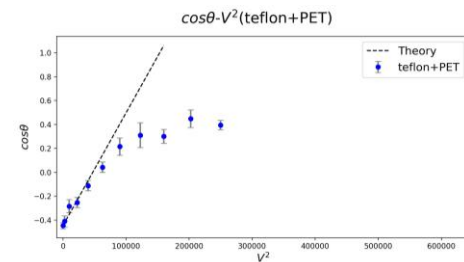


圖5-6、(鐵氟龍+PET) $\cos\theta-V^2$ 圖

4. 石蠟

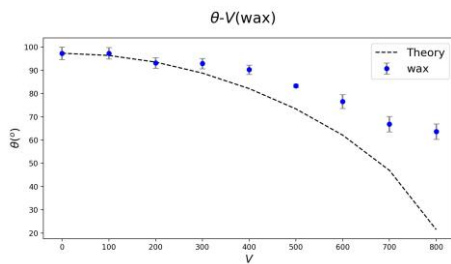


圖5-7、(石蠟)接觸角-V 圖

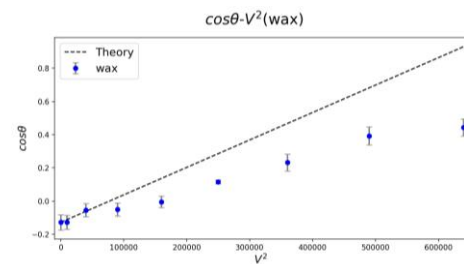


圖5-8、(石蠟) $\cos\theta-V^2$ 圖

(二)、討論

1. 保鮮膜+防水噴霧

因為對保鮮膜的處理還無法保證其平整度，且當防水噴霧裡的高壓冷氣體吹到保鮮膜上時更是會使其皺褶，因此不同測試位置的平整度和化學性質差很多，導致測量到的數據可能差到20度有餘。因此，此組合並不適合做為電潤濕的製作材料。

2. 鐵氟龍

經由與理論值對照後，發現當電壓小時與理論值的偏差不大，但到後期出現明顯趨緩的現象，推測除了因為現實中阻力影響外，也是因為隨著表面能減弱，表面能逐漸趨近於零無法再下降，才會出現接觸角飽和的現象。且可觀察到測量時數據偏差大，精確度不理想，推測是因接觸角測量時環境變因多。

3. 石蠟

從圖(5-8)中可看出石蠟數據線斜率明顯較實驗線小，推測是因為石蠟表面和水滴間阻力較大所致，且因為石蠟層厚度較厚，當電壓施加超過400V，接觸角變化仍未超過十度。以本研究目前技術來看，直接熔化石蠟已難以再下降其厚度，否則會造成部分金屬裸露，失去介電層的效果，因此我們後改用paraflim石蠟膜作為我們的介電材料。單以石蠟而言，目前其表面摩擦力不適合作為電潤濕的材料，但我們發現透過滴上矽油可改善表面粗糙程度，能夠成為電潤濕的材料，在實驗二、三中我們也以此方法做為基底。

(三)、python模擬結果

我們知道系統總是傾向最低能量的狀態。因此，我們在液滴體積固定的限制下，改變其接觸角，求出各個接觸角的電容，以得到系統總能。其中，總能最小時的接觸角便應是此系統最穩定的狀態。使用此方法，我們改變電壓，求出液滴在此電壓的接觸角應該是多少，再與理論比較。

以下數據的環境設定：10mm³液滴在4×4×0.5(mm)金屬板上，間隔0.2mm，上電位為-1000V，下電位為1000V，整體空間大小為10×10×10(mm)。

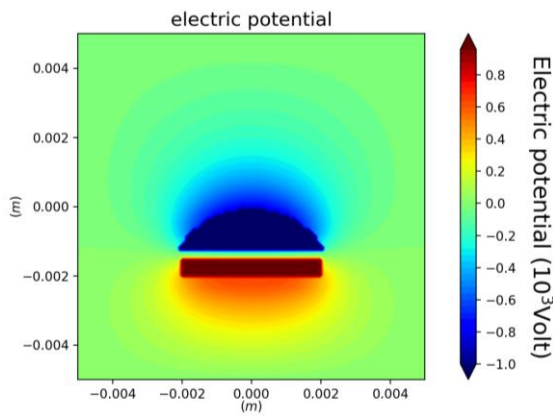


圖5-9、接觸角為60°時的電位模擬

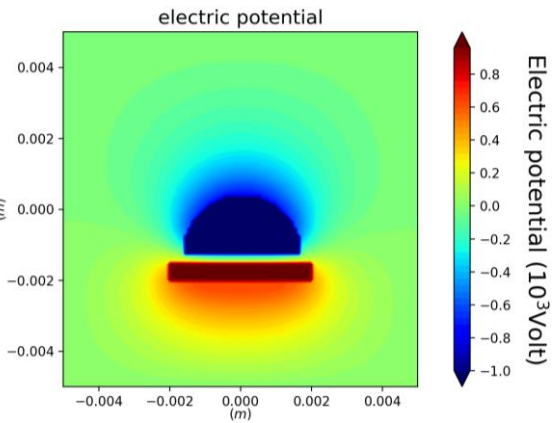


圖5-10、接觸角為90°時的電位模擬

(1) 電容與固液間距、接觸角之關係

如將中間層間距放大至0.4mm，可看到其電容隨之下降，但變化比例不是定值，因為隨著接觸角越大，固液介面面積越小，水珠越接近球形，此時因電力線多受到上半部球形影響，電場最強處所貢獻電容減弱，又因模擬環境限制，介電層厚度設置較大，無法忽略邊際效應，因此電容減少程度不像平行電容板，單純與距離成反比。

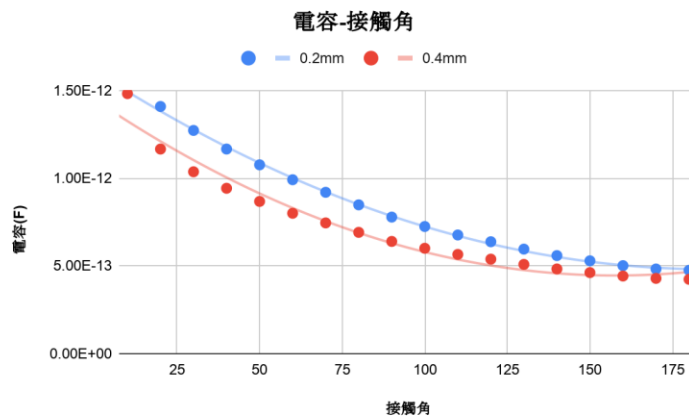


圖5-11、電容-接觸角模擬圖

(2) 同電壓下不同接觸角下的能量

從文獻^{[7][8]}得到，20°C下的0.5M氯化鈉溶液表面張力^[7] $\gamma_{LG} = 82.8 \text{ dyne/cm}^2$ ，鐵氟龍表面張力^[8] $\gamma_{SG} = 19.0 \text{ dyne/cm}^2$ 。假設一水珠在20°C未加電壓下，固體介面為鐵氟龍的平衡狀態接觸角為90°，通過式(1)可得到其固液介面表面張力 $\gamma_{SL} = 19.0 \text{ dyne/cm}^2$ 。假定表面張力為固定，電容所儲存的能量另外計算，通過計算表面能(Ea)加重力位能(Eg)可得到其不加電壓下不同接觸角的能量(其中表

面能(E_a)是加總各介面面積乘以表面張力而得，重力位能是通過重心計算，以固體表面為零位面算得)。

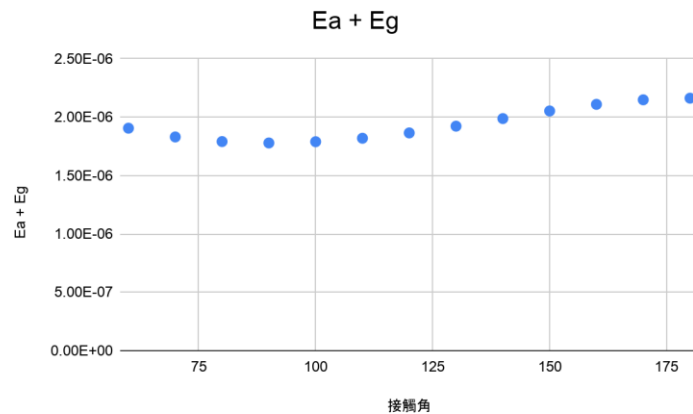


圖5-12、能量圖(0V)

施加電壓後，液滴邊際的分子會因為電荷的累積而有向外的排斥力，因此原本因介面分子與不同相分子之間作用力較小，而產生向內的力變小，向內移的趨勢減小，因此所儲存電能應和表面能相差一個負號。將前面模擬所算電容乘上電壓後可得到電能(E_e)，如此可導出不同電壓下的總能($E_a + E_g + E_e$)如下圖：

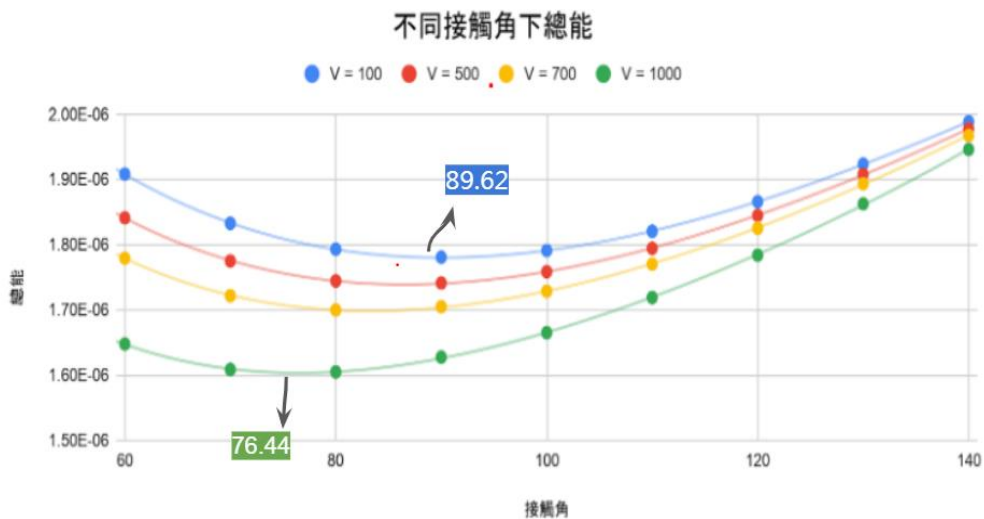


圖5-13、不同電壓下總能變化

針對不同電壓，接觸角變化使系統總能亦隨之改變，為了求得使系統能量最低的接觸角使用多項式擬合，並計算使其導數為零的角度(如上圖)，此角度就是此電壓下的穩定接觸角。

與Lippmann—Young equation對比過後(如下表)，發現我們得出的模擬數據與理論十分接近，然而多較理論所預測的大。這應是電容的邊際效應造成，當電極板

和水珠間距較大時，邊際效應會較大而產生差異，邊際效應會造成實際儲存電荷較理想種況下多，實際電容較大。因為算法空間設置和電腦算力的限制，介電層厚度須保持一定厚度，無法和現實貼近，因此之後我們改用comsol程式進行電容的模擬。

表5-1.穩定接觸角比較

V	模擬接觸角(度)	理論接觸角(度)
100	89.621	89.851
500	86.312	86.277
700	83.833	82.689
1000	76.449	74.948

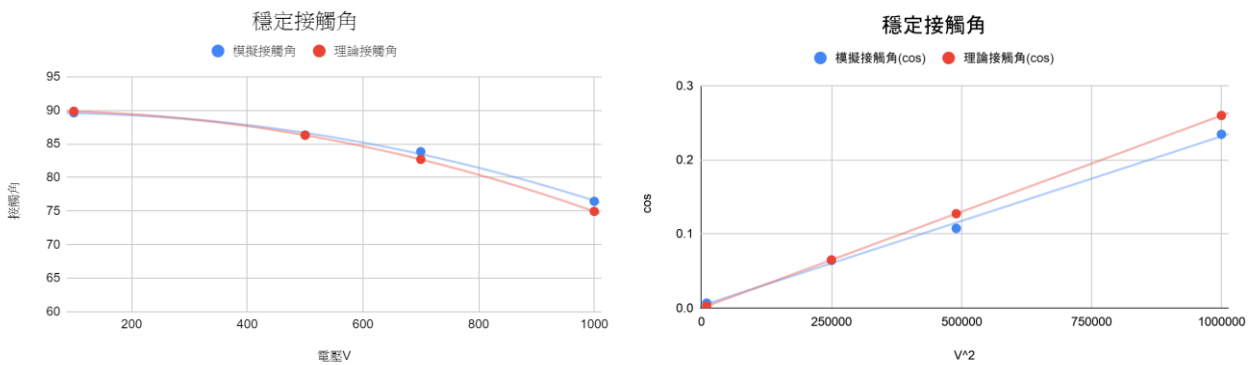


圖5-14、5-15、不同電壓下穩定接觸角(左 θ -V圖、右 $\cos\theta$ - V^2 圖)

二、電容測量與模擬

1. 先備實驗：市售電容及麵包板電容量測

測量電壓分配推算電容阻抗，間接測量樣品之電容值，訊號產生器電流頻率1MHz。

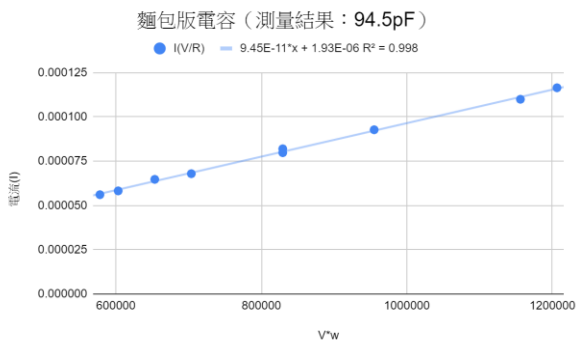


圖5-16、麵包板電容測量結果

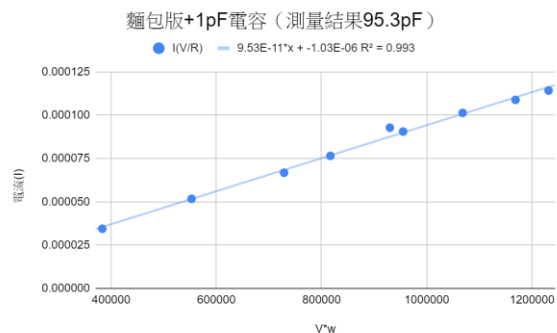


圖5-17、麵包版加市售1pF電容測量結果

由上圖可知，實驗中電容與麵包板可類比為並聯（與直接將電容值相加結果相近）。因此我們測量麵包版加市售1pF及麵包板加市售20pF電容，將結果與麵包板直接相減，可以得到下表：

表5-2.市售電容測量

項目	測量電容(pF)	與標示差距
市售1pF	0.8	0.2pF (20%)
市售20pF	17.5	2.5pF (12.5%)

2. 電容量測--液滴

以下為測量10*10mm電極板、介電質為石蠟膜、液滴為純水之數據，透過測量電壓分配推算電容阻抗，訊號產生器電流頻率1MHz。

表5-3.液滴電容測量

項目	測量電容(pF)
DD water 20 μ L	10.7
DD water 40 μ L	16.2

假設不同體積大小下接觸角相同，由幾何關係可知液滴與固體表面接觸面積A

$$A \propto V^{\frac{2}{3}}$$

將數值帶入可得到

$$\frac{A_{40}}{A_{20}} = 2^{\frac{2}{3}} = 1.5874$$

與所測量電容之比(1.514)十分接近，驗證了Lippmann equation中比電容為定值的假設。

3. Comsol模擬結果

以下為假設水珠形狀為體積 $20\mu\text{L}$ 之半球，介電質層為 hard wax，相對介電常數為2.

3、厚度為 0.03mm ，電極板尺寸為 $10\text{mm}\times 10\text{mm}$ 。

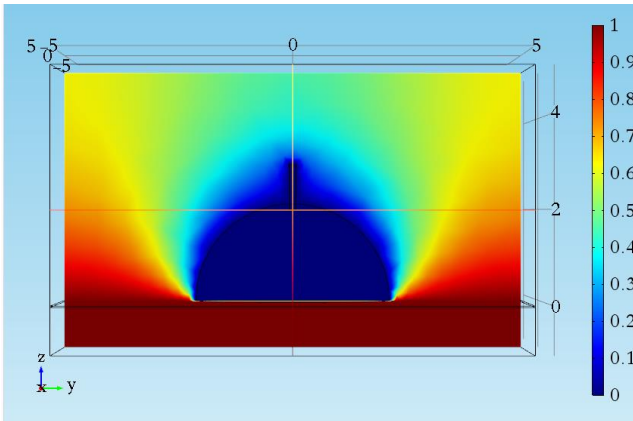


圖5-18、上下式施加電壓

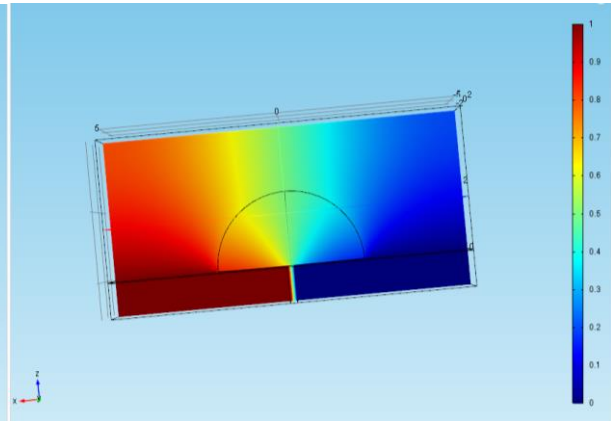


圖5-19、平面式施加電壓

表5-4.comsol模擬電容

項目	測量電容(pF)
上下式施加電壓	10.24
平面式施加電壓	1.1969

上下施加電壓模擬結果與2.中 $20\mu\text{L}$ 同樣施加電壓方法所測量出的電容十分接近。

三、液滴移動模式探討

(一)、電荷穿過介電層(鐵氟龍)

由於平整度、電壓限制目前還未測得有效實驗數據，但在實驗時透過高壓直流電供應器的電流計，我們觀察到會有些微電流穿過介電層，如下兩圖(裝置有並聯LED作為指示燈，因此要看兩種狀態電流差)。因為樣本只塗布了一層鐵氟龍，厚度可猜測為小於 $1\mu\text{m}$ ，在遠小於石蠟膜的情況下，仍只有些微電流($12\mu\text{A}$)通過，因此可以合理推測，電壓高的情況下，石蠟膜也無法完全絕緣，只是儀器測不出來，這合理的解釋了平面式液滴經長時間移動後，速率越來越慢甚至反向移動的現象。



圖5-20、鐵氟龍加電壓前電流



圖5-21、鐵氟龍加電壓後電流

(二)、實驗數據

以下樣本為parafilm石蠟膜經拉薄後塗上約 $20 \mu\text{L}$ 矽油(100cs)進行表面改質，並標記水珠前緣和後緣端點作為測量基準。

1. 同電壓下水電車式與平面式液滴比較(方法一、移動一次)

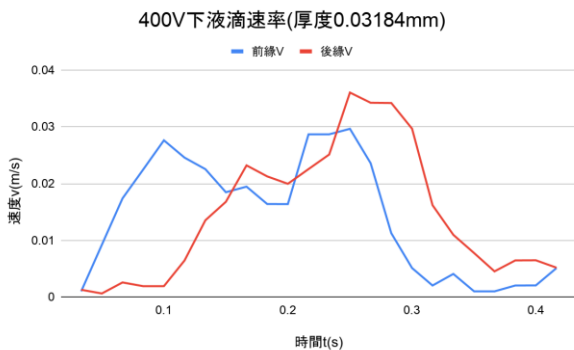


圖5-22、水電車400V速率圖

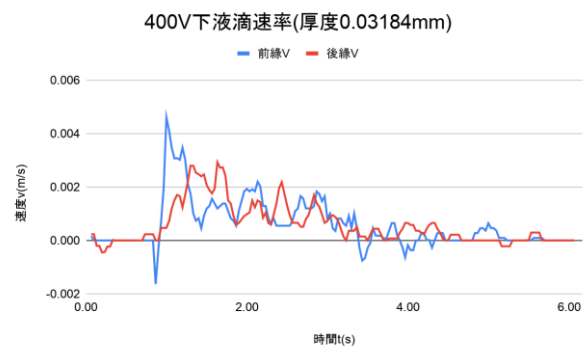


圖5-23、平面式400V速率圖

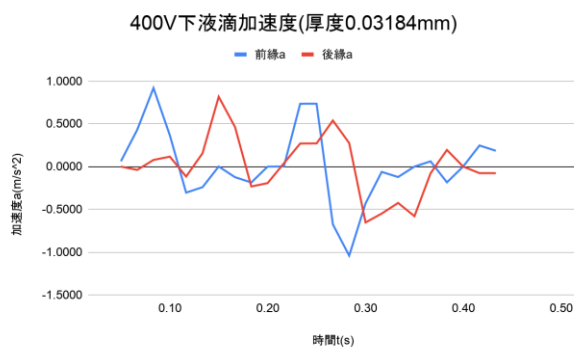


圖5-24、水電車400V加速度圖

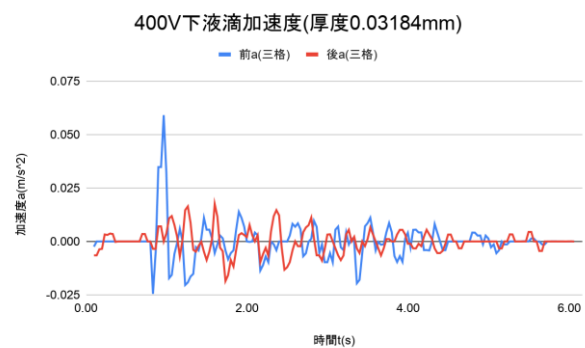


圖5-25、平面式400V加速度圖

圖(5-22)中速率形成雙峰結構，是因為使用方法一時，DA態的穩定位置在兩片電極板中間，導致液滴移動至兩片中間後速率下降，但關掉一邊成SA態後，因平衡位置改變，又再度往

目標電極加速，最後停留在目標電極。此方法之數據可觀察到水電車移動速率較平面式快上許多，移動的穩定性也較平面式好。因方法一在DA態停留的時間會因人為操作而有所不同，因此此方法不易討論其運動情形。

2. 不同電壓下水電車移動速率（方法二）

此取一次完整運動時間和位移計算平均速率，以下以厚度 $30.95(\mu\text{m})$ 的parafilm石蠟膜作為介電層。橫軸為施加電壓(Volt)，縱軸為平均速率(m/s)。

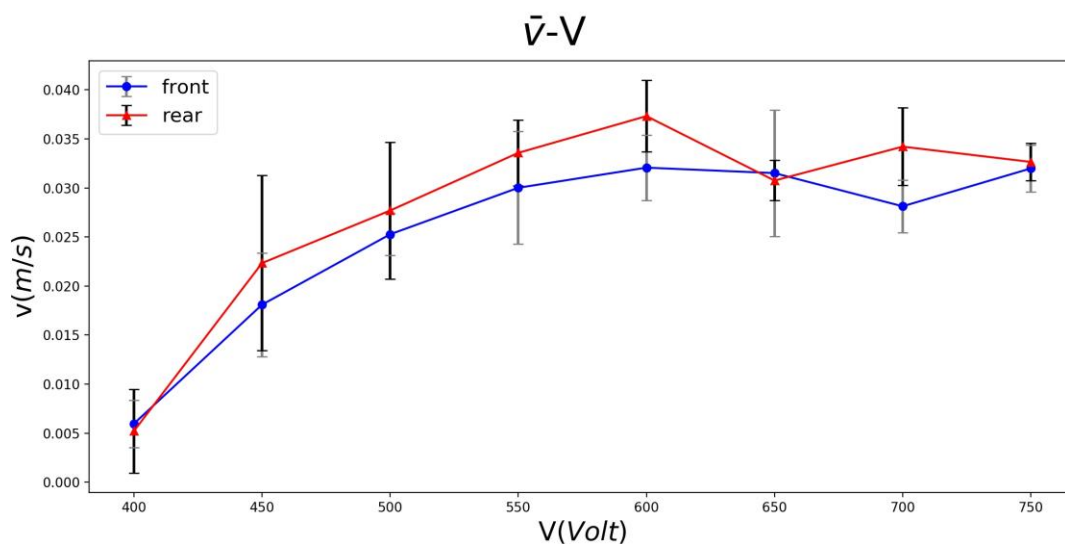


圖5-26、不同電壓下液滴平均移動速率

由上圖(5-26)可觀察到前緣(藍色)主要受到電極和液滴內的向後拉的阻力，而後緣(紅色)則先被液滴內拉力向前拉，後受到電極拉力，因此可看到前緣平均速率較後緣小。整體液滴速率從400V較低電壓開始隨電壓升高而逐漸增加，但到高電壓時，增加程度趨緩甚至下降，此現象可由實驗(一)所觀察到的現象解釋，高電壓下，因為表面能的限制，液滴接觸角不再變化，液滴在電場中能量變化有極限，因此速率並無法隨電壓上升而無限升高。

3. 不同介電層厚度下水電車的移動速率（方法二）

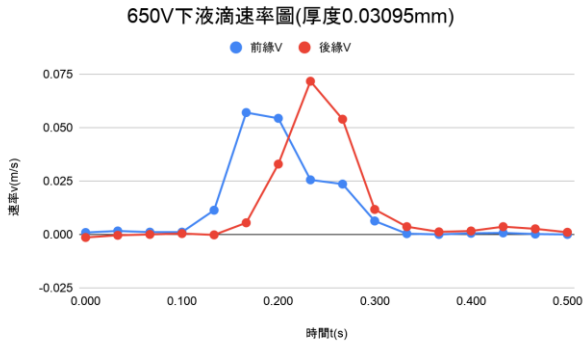


圖5-27、30.95 μm 650V速率圖

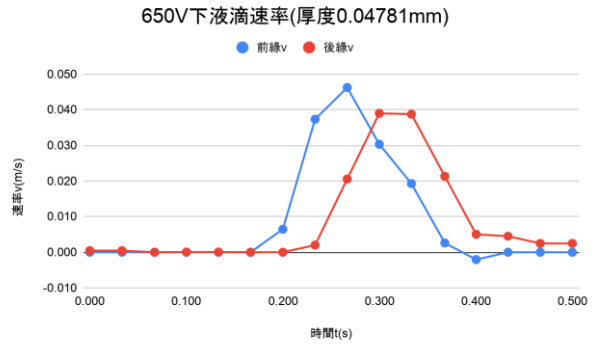


圖5-28、47.81 μm 650V速率圖

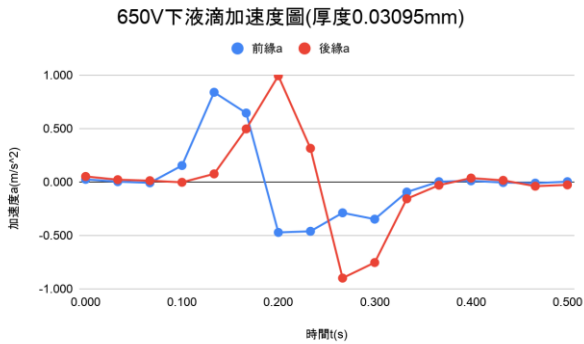


圖5-29、30.95 μm 650V加速度圖

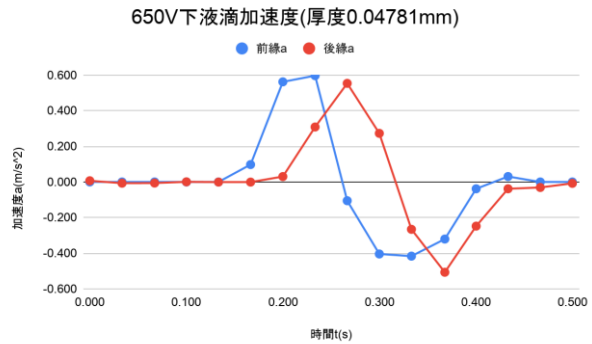


圖5-30、47.81 μm 650V加速度圖

由平行電容板電容公式(6)，可知電容大致與介電層厚度成反比，而藉由電容儲存電能的關係式(7)，和力與位能的關係(8)，可知在同電壓下，液滴受力應會與電容大小成正比，因此，介電層厚度較大的樣本，其速率、加速度會較小。在上圖中，可見速率、加速度峰值大小的確有符合預測。

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \dots\dots\dots(6)$$

$$U_e = \frac{1}{2} CV^2 \dots\dots\dots(7)$$

$$\vec{F}_e = -\nabla U_e \dots\dots\dots(8)$$

4. 電場下液滴速率、加速度與位置的關係(水電車，方法二)

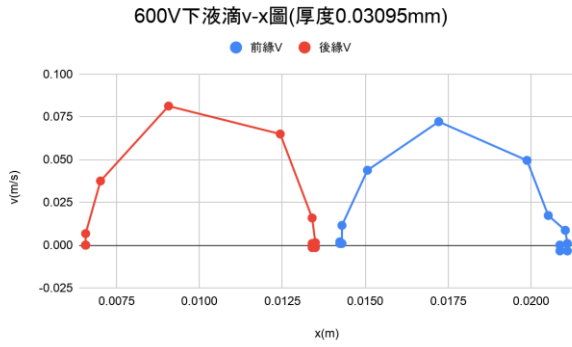


圖5-31、650V速率與位置關係

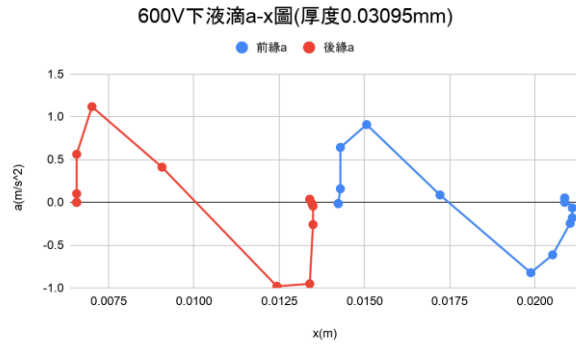


圖5-32、650V加速度與位置關係

實驗結果發現液滴需在同時碰到兩電極板、有電場作用的情況下，才會受力移動。雖受所攝影片幀數少的影響，在液滴快速移動下數據點不夠多，誤差可能較大，但仍能觀察到其加速度與位置的關係與彈簧受力模式相似，且其平衡位置位於目標電極中央。這也可由能量角度解釋，且符合接下來comsol的模擬結果。

(三)、comsol模擬結果

以下為假設水珠形狀為體積 $60 \mu\text{L}$ 之半球，介電質層為 hard wax，相對介電常數為2.3、厚度為 0.03mm，電極板尺寸為 5mm*5mm，一共設置3個電極板，模擬不同位置(液滴中心位置)下之電容值。

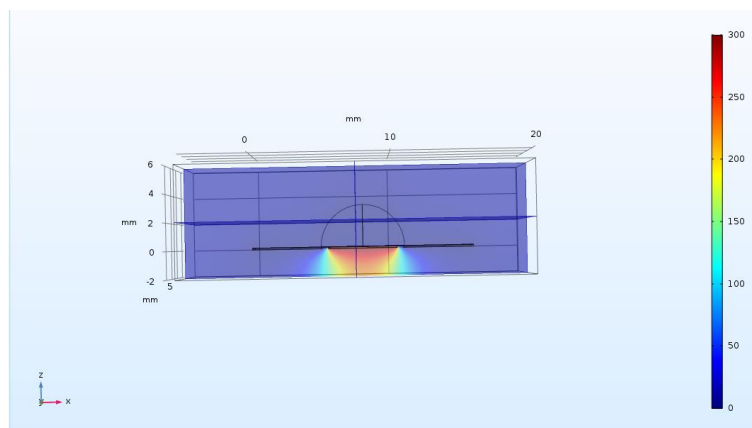


圖5-33、模擬過程圖

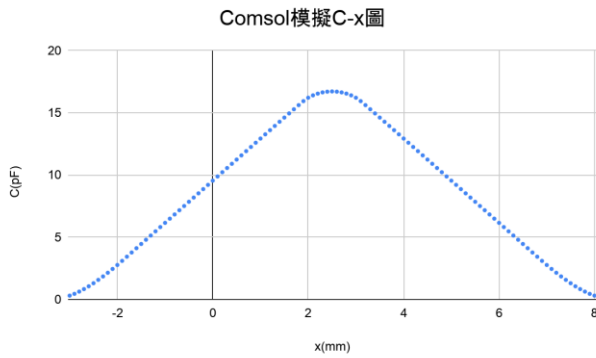


圖5-34、模擬C-x圖

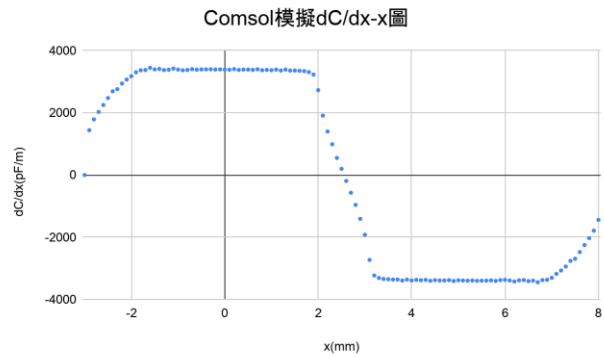


圖5-35、模擬dC/dx-x圖

由上二圖可見電容變化以目標電極中心為對稱軸，隨位置變化關係趨於線性。藉由式(7)計算電能，結合實驗一-(三)-(2)對液滴能量之討論，可知液滴能量在目標電極中央時最小。

(四)、水電車電容計算

看到電容模擬的結果圖後，由圖中幾乎線性的C-x關係，我們猜測液滴與電極板之間的電容幾乎可視為兩平行電極板之間的電容。並且，此平行板電容大小僅和上下電極相交(共同覆蓋)面積成正比，其餘部分僅造成可忽略不計的誤差。

以下計算液滴在不同位置時，液滴在通過某一個電極板期間，液滴和此電極板相交的底面積大小。並由平行板電容公式，計算C-x關係，檢驗它和模擬所得的C-x圖的相符程度。

符號定義：

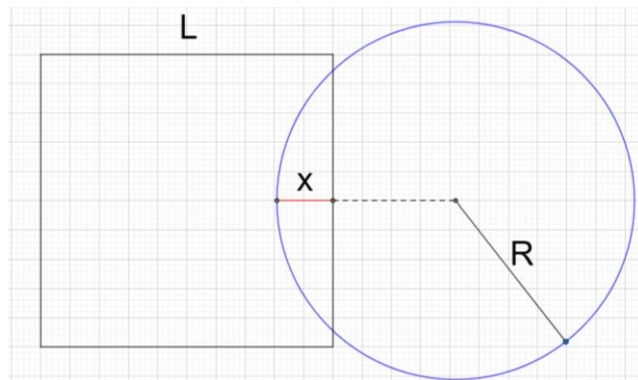


圖5-36、符號定義

上圖中，R表示液滴底面半徑，L表示電極板邊長，x定義為液滴前端至電極板後緣的垂直距離。

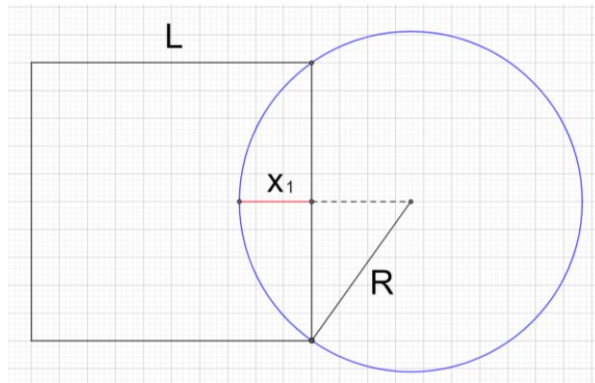


圖5-37、 x_1 定義圖

特別地，當液滴恰交電極板於其兩個頂點時，我們定義此時 $x=x_1$ 。顯然，此情形將在液滴剛接觸電極板不久與完全離開電極板前一段時間各發生一次，我們取 x 較小的那次(如上圖)。

由簡單的幾何關係，我們可以得到：

$$x_1 = R - \sqrt{R^2 - \frac{L^2}{4}}$$

我們將它的運動過程分為7個階段，並定義 $A_i(x)$ 為第 i 階段的相交面積

表5-5.不同階段幾何關係示意圖

$i=1$	$i=2$	$i=3$	$i=4$
$i=7$	$i=6$	$i=5$	

$$(1) 0 \leq x < x_1$$

$$A_1(x) = R^2 \arccos\left(\frac{R-x}{R}\right) + (x-R)\sqrt{2xR-x^2}$$

$$(2) x_1 \leq x < 2R - x_1$$

$$A_2(x) = A_1(x_1) + (x - x_1)L$$

$$(3) 2R - x_1 \leq x < L$$

$$A_3(x) = 2A_1(x_1) + 2L(R - x_1) - A_1(2R - x)$$

$$(4) L \leq x < 2R$$

$$A_4(x) = A_3(x) - A_1(x - L)$$

$$(5) 2R \leq x < L + x_1$$

$$A_5(x) = A_3(2R + L - x)$$

$$(6) L + x_1 \leq x < 2R + L - x_1$$

$$A_6(x) = A_2(2R + L - x)$$

$$(7) 2R + L - x_1 \leq x \leq 2R + L$$

$$A_7(x) = A_1(2R + L - x)$$

由此組公式計算，代入與comsol模擬相同的參數：R=3.059mm、L=5mm、兩電極板間距d=0.5mm後，我們得到下兩圖：

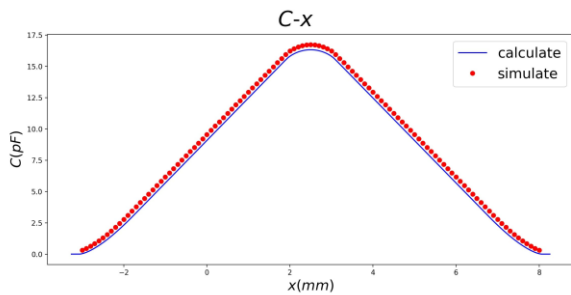


圖5-38、C-x計算與模擬比較

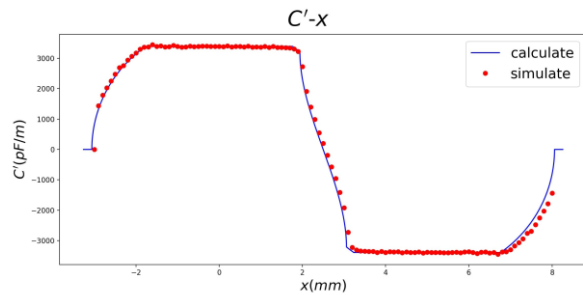


圖5-39、C'-x計算與模擬比較

上右圖中C'表示為C對x微分。可看到透過公式計算的結果與comsol模擬結果一致，證明在此厚度下，液滴系統的邊際效應可以忽略。我們以此組公式作為基準，考慮適當摩擦係數，對液滴移動模式進行模擬。

(五)、模擬液滴的運動過程

我們簡化模型假設液滴為剛體，在不考慮液滴形變的情況下，計算不同位置液滴受電容儲存電能影響的能量分布，我們可以到下方如能量井般的圖(5-40)，其中最低點即為施加電壓之電極板中心，如此即可解釋為何施加電壓後液滴會朝電極板移動，並在適當阻力下停留於目標電極板中心。透過計算能量梯度，即可求得液滴受力情形。

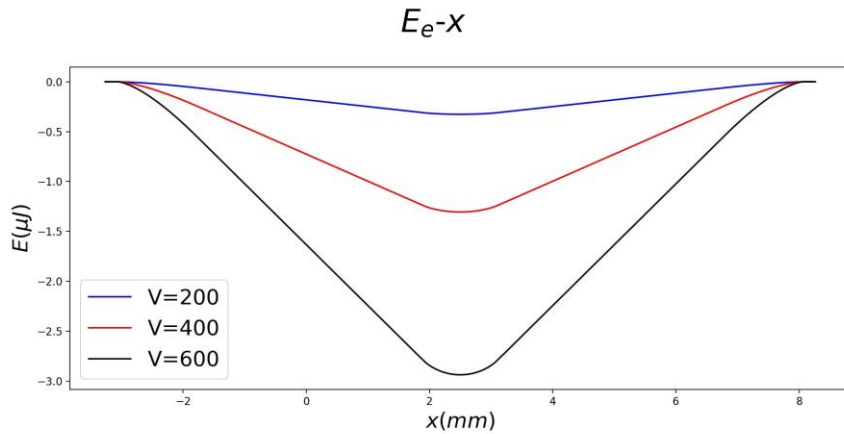


圖5-40、液滴能量(E)-液滴中心(質心)位置(x)圖

由平行電容公式(6)，考慮液滴於y軸(介電層厚度)上變化，可得電力之y分量。液滴共會受電力(F_e)、重力(F_g)、正向力(N)和摩擦力(f)：

$$\left\{ \begin{array}{l} \vec{F}_e = -\nabla U_e = \left(\frac{1}{2} \frac{dC(x)}{dx} V^2, -\frac{1}{2} \frac{C(x)}{d} V^2 \right) \\ \left| \vec{N} \right| = \frac{1}{2} \frac{C(x)}{d} V^2 + mg \\ f_{smax} = \mu_s N, f_k = \mu_k N \end{array} \right.$$

以下為靜摩擦係數(μ_s)=0.02與動摩擦係數(μ_k)=0.01之模擬結果。

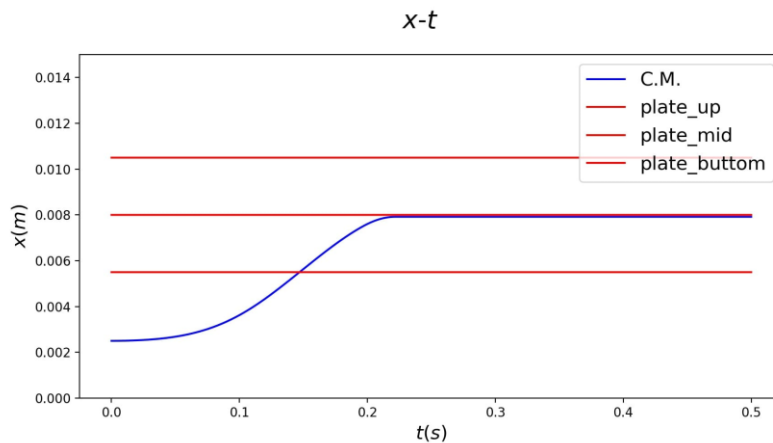


圖5-41、液滴中心(質心)x-t圖

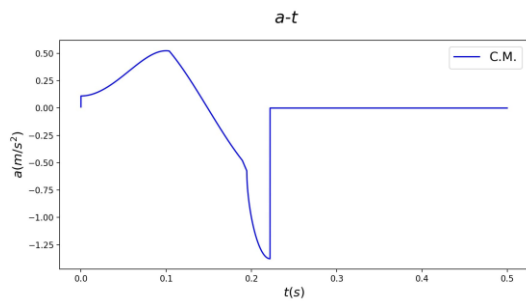


圖5-42、液滴中心(質心)a-t圖

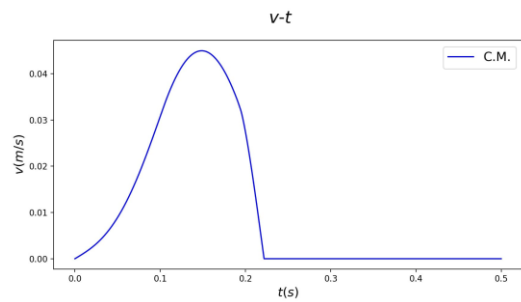


圖5-43、液滴中心(質心)v-t圖

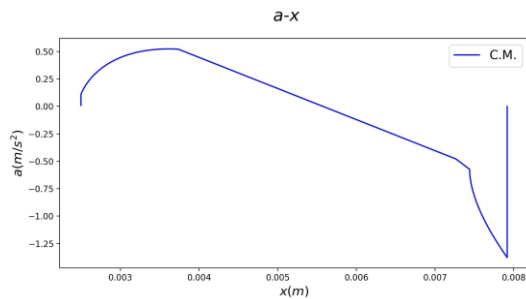


圖5-44、液滴中心(質心)a-x圖

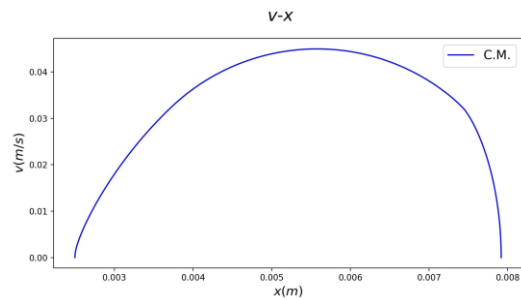


圖5-45、液滴中心(質心)v-x圖

由上圖可看到其加速度與位置的關係，與實驗圖形相似。由a-x圖(5-44)可看到，當液滴越接近目標電極板中心，所受電力y方向分力越大，正向力越大，因此在平衡點前加速度呈線性下降；過了中心點後由於所受電力x分量改變方向，加上摩擦力，液滴會迅速停下，達到液滴停在目標電極的目的。

然而，因模型未考慮表面能限制，因此沒有出現速率飽和的現象，且因為模型簡化液滴為一剛體，並未考慮其流體特性、表面能下降等造成的能量差異，液滴移動過程中，形變造成的能量損失、力效應也都無法考慮；同時電荷穿過介電層的實驗也說明了介電層在高電壓下並無法完全絕緣，有些許電流的情況下，液滴實際接受到的電壓會比預期低，綜合以上因素，導致模型模擬出來的速率較實驗高。但模擬數據仍與實驗具有一樣的趨勢，且其加速度與位置關係、速率與位置關係圖形，皆與實驗相似，驗證了透過能量的角度來解釋電潤濕液滴移動現象是可行的。

肆、結論

一、接觸角測量與模擬

1. 測量結果發現，市售防水噴霧+保鮮膜之組合並不適合做為電潤濕之材料，而實驗室常見的石蠟膜加上些許矽油改質可得到良好效果。
2. 實驗接觸角在較小電壓時與理論值較為接近，電壓較大時接觸角則趨於飽和，這是因為表面能限制造成的必然結果。

3. python模擬部分，受到模擬算法和電腦算力限制，所設介電層厚度較大，受電容的邊際效應影響，雖接觸角模擬結果幾乎與理論線貼合，但略大於理論值。

二、電容測量與模擬

1. 測量 $20\ \mu\text{L}$ 和 $40\ \mu\text{L}$ DDwater在大電極板上電容，其電容比值與底面積比值十分接近，間接驗證了Lippmann equation中比電容為定值的假設。
2. 使用comsol模擬 $20\ \mu\text{L}$ 液滴在上下式與平面式的電容，驗證上下式電容大小確實大於平面式，並且模擬結果與實驗數據幾乎相同。

三、液滴移動模式探討

(一)、平面式反向移動探討

藉由鐵氟龍樣本的實驗，發現到有少量電荷穿過介電層，造成水珠電性的改變。隨著多次施加電壓，液滴內部將逐漸累積正電荷，導致反向運動的現象。然而，水電車系統直接將液滴接地，將電荷導出，便不會有此現象發生，這也是水電車的一大優勢。

(二)、水電車實驗

1. 相較於平面式系統，水電車優勢為有更加穩定的移動過程和較高的移動速率。而相較於雙層式系統，水電車以線的方式接觸，降低其受阻力，且其開放式空間對於未來實驗應用有較好的操作性；水電車缺點和平面式相同，因缺乏上方板子所給予壓力，液滴難以被分裂，相較雙層式少了一種運動方式。
2. 兩種施加電壓的方式中，方法一在DA態停留的時間因人為操作而有所不同，因此v-t圖中呈現時間間隔寬度不一的雙峰結構；相較於方法一，方法二的運動過程更為固定，受力模式也較為單一。
3. 實驗觀察到，液滴移動速率會隨電壓上升，但到高電壓時出現飽和的現象，符合在實驗一表面能限制的結論。

(三)、模擬液滴的運動過程

1. 根據comsol模擬結果，液滴在介電層厚度 0.03mm 的電極板上電容邊際效應可忽略。經過計算接觸面積比較，我們證實了這點。我們寫出不同位置面積公式將點狀的C-x模擬數據轉成可供電腦計算的方程式。
2. 取液滴能量的負梯度，我們可以得到其受力。屏除較為複雜的流體情形和電泳力，我們簡化液滴成為剛體，列出包含電力、重力、正向力和摩擦力的運動方程(如下)。模擬出來的a-x關係、v-x關係，皆與實驗相似，驗證了透過能量的角度來解釋電潤濕液滴移動現象是可行的。

$$\begin{cases} \vec{F}_e = -\nabla U_e = \left(\frac{1}{2} \frac{dC(x)}{dx} V^2, -\frac{1}{2} \frac{C(x)}{d} V^2 \right) \\ \left| \vec{N} \right| = \frac{1}{2} \frac{C(x)}{d} V^2 + mg \\ f_{smax} = \mu_s N, f_k = \mu_k N \end{cases}$$

伍、參考文獻

1. Baelmans, M. (2006). On-chip electrowetting cooling. *Electronics Cooling*. Retrieved October 16, 2019, from <https://www.electronics-cooling.com/2006/05/on-chip-electrowetting-cooling/>
2. Umapathi, U., & Chin, S., & Shin, P., & Koutentakis, D., & Ishii, H. (2018). Scaling electrowetting with printed circuit boards for large area droplet manipulation. *MRS Advances*, 331, 1475-1483. Retrieved October 16, 2019, from <https://trackr-media.tangiblemedia.org/publishedmedia/Papers/652-OTQwM/Published/PDF>
3. MIT Media Lab (2018). Programmable Droplets. Retrieved October 9, 2019, from <https://www.youtube.com/watch?v=z0NBsyhApvU>
4. 朱彥勳 (2011)。液滴於電潤濕上的移動現象。國立虎尾科技大學：碩士論文
5. 潘姍婷 (2008)。鏡像介電濕潤之液滴法研究並應用於平行微液滴操控。國立交通大學：碩士論文
6. 吳致頡、姜理元、賴奕帆 (2018)。Python 求解不同形狀之電容值。物理教育學刊。19, 19-42。
7. 陳英杰 (1980)。探討溶質、溫度、濃度對於液體表面張力之影響。國立臺灣科學教育館
8. 鐵氟龍是目前表面能最小的一種固體材料 (2020年2月29日)。東莞市博華塑化科技有限公司官網，取自：<http://bohual88.com/hangye/hangye-191.html>
9. PET 薄膜介電常數介質損耗 (2014年)。取自：<https://zhidao.baidu.com/question/122291414>
10. Plastics Properties Table (2010年)。取自：http://yuamsong.com/en/engineering_table.html

【評語】 160035

這一類的探究主題多有雷同，本作品改良文獻中平面式和雙層式的電潤濕裝置，將雙層式上板改為導線。主題與部分實驗流程類似於過往科展作品與文獻報導。相較於本屆參展的優秀作品而言，本件較不具創新性、數據嚴謹性與分析完整性仍有進步與充實的空間。