

# 建國中學36屆數理資優班

## 成果報告書

介電潤濕——

探索液滴在電極版上的現象

作者：楊竣凱、劉柏杰

指導教授：李敏鴻 教授

指導老師：賴奕帆 老師

## 摘要

液滴置於施加電壓之電極板上時會因接觸角產生變化而移動，其中液體對固體表面濕潤程度受電壓改變之現象稱作電潤濕，本研究希望能從電學方面提出相關解釋並對現有理論作出合理改善、通過數值模擬視覺化液滴系統之電位分布、製作出提高液滴移動效率的水電車裝置。目前已可經由實驗測量液滴接觸角及介電層厚度，檢驗數據與Lippmann—Young equation所預測之接觸角的差異；使用市售防水噴霧、石蠟、鐵氟龍等材料作為疏水層，成功得到與理論趨勢相符的數據，顯示已經可以控制材料表面平整度；透過擬合液滴的垂直截面方程，使用python使用有限差分法進行數值模擬計算系統總能量，並且視覺化液滴系統的電位分布。實驗和模擬顯示實際接觸角隨電壓變化程度與理論預測相比較小，並且模擬出現固定液滴大小时，電極板大小越大接觸角變化程度越小的現象，未來希望能通過實驗驗證此關係並製作出移動效率高的水電車裝置。

## 壹、研究動機

在看到MIT關於數位控制電潤濕的影片後，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？是否因為水中有電解質讓它被電場控制？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。

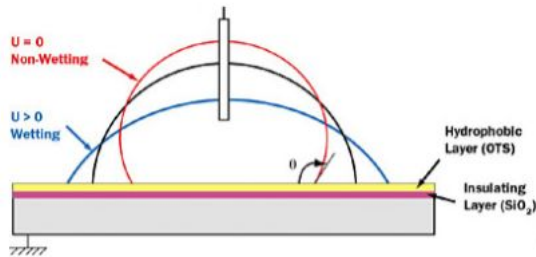


圖1-1、電潤濕示意圖

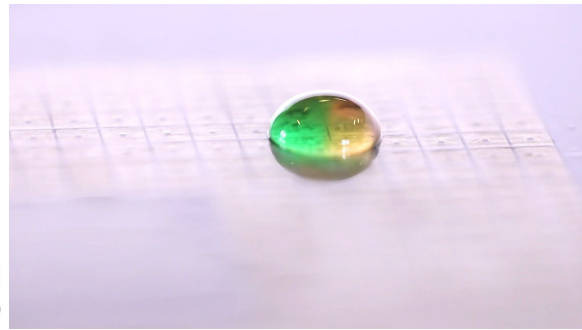


圖1-2、MIT作品圖

## 貳、研究目的

- 一、探討不同材料做介電層或疏水層的影響
- 二、通過數值模擬視覺化液滴與電極板系統的電學性質
- 三、探究液滴與電極板系統的總能量與液滴形狀之間的關係
- 四、探究電極板大小與液滴穩定接觸角的關係



## 參、研究設備及器材

### 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、市售保鮮膜、塗布機、烘箱、絕緣膠帶、測厚儀。

### 二、數值模擬

表3-1.所用程式及計算平台

python	Google Cloud Platform
 python™	 Google Cloud

## 肆、研究方法與過程

### 一、理論

#### (一) 名詞、符號解釋

##### 1. 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夾角，即為接觸角（如下圖之 $\theta$ ）。

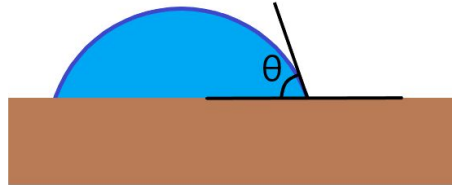


圖4-1、接觸角示意圖

##### 2. 介電強度

介電強度定義為介質被擊穿時，單位厚度承受的最大電壓，物質的介電強度越大，越適合作為絕緣體。單位為(kV/mm)。

#### (二) 理論模型

##### 1. 楊氏方程式(Young's equation)

它是描述固、液、氣界面張力與接觸角 $\theta$ 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。

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

其中 $\gamma$ 為表面張力、 $\theta$ 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 $\gamma_{SG}$ 表示固-氣介面之間的表面張力； $\gamma_{SL}$ 表示固-液介面的表面張力；而 $\gamma_{LG}$ 表示液-氣介面的表面張力。

##### 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， $\varepsilon_0$ 為真空介電常數， $\varepsilon$ 為介電層之介電常數，此處為假設固液間為無邊際效應的平行電容版。

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

$$\cos\theta = \cos\theta_0 + \frac{1}{2} \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{\gamma_{LG} \times t} V^2 \dots\dots\dots(3)$$

### (三) 模擬先備知識

#### 1. 電學

##### (1) 電位

由高斯定律的微分形式：

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

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，即是拉普拉斯方程：

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

本研究模擬中即用式(4)得到空間電位分布

##### (2) 電容(C)

一般而言，電容只和幾何形狀有關，與電壓、電荷量無關。定義為：

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

其中Q為電容器儲存之電荷，V為兩電容器之電位差。

當電容形狀為規則時，其電容可以透過高斯定律計算電荷Q，透過電場的線積分得到電位差，進而得到電容值。但在計算一不規則物體時，一般數學方法就變得很難計算。因此文獻<sup>[7]</sup>中，透過使用能量的觀點切入如下：

當把正電荷dq從V移至V，我們需要做功：

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

而此能量即是電容器所儲存的位能：

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

又知道空間中的電場能量密度為(體積以 $\tau$ 表示)：

$$u = \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2 = \frac{dU}{d\tau}$$

結合上面兩式，可得：

$$C = \frac{2 \iiint \frac{1}{2}\varepsilon_0 E^2 d\tau}{V^2} = \frac{\varepsilon_0}{V^2} \iiint E^2 d\tau \dots\dots\dots(5)$$

## 2. 有限差分法

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。數值分析時，必須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」。而其中又分為三種

$$(1) \text{ 前方差分： } \frac{dy}{dx} \approx \frac{y_{i+1}-y_i}{\Delta x}$$

$$(2) \text{ 中央差分： } \frac{dy}{dx} \approx \frac{y_{i+1}-y_{i-1}}{2\Delta x}$$

$$(3) \text{ 後方差分： } \frac{dy}{dx} \approx \frac{y_i-y_{i-1}}{\Delta x}$$

一般而言，中央差分具有較高的精準度<sup>[7]</sup>，故本文中的電場計算即採用中央差分法。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，其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：

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

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

$V_{0,0}$	$V_{m,0}$
$E_{x0,0}, E_{y0,0}$	$E_{xm,0}, E_{ym,0}$
$\vdots$	$\vdots$
$E_{x0,n}, E_{y0,n}$	$E_{xm,n}, E_{ym,n}$
$V_{0,n}$	$V_{m,n}$

圖4-2、程式矩陣示意圖

## 二、程式模擬

### (一) 水滴設置

為使控制參數盡量簡化，本研究假設水滴為球型的一部份，如此可用兩個參數(接觸角、體積)來定義其方程式。以下進行推導：

將水珠頂端置於原點，液滴切面垂直x軸，且在x軸正向，由旋轉體積積分公式得：

$$\begin{aligned} V &= \int_0^h (\sqrt{R^2 - (R-x)^2})^2 \pi dx \\ &= \pi(h^2 R - \frac{1}{3}h^3) \end{aligned}$$

其中R為圓球半徑，h為液滴高度，又知  $\cos\theta = \frac{R-h}{R}$ ，整理得：

$$\begin{aligned} \frac{V}{\pi R^3} &= (1 - \cos\theta)^2 - (1 - \cos\theta)^3 \\ &= \cos\theta(1 - \cos\theta)^2 \\ R &= \sqrt[3]{\frac{V}{\pi \cos\theta(1 - \cos\theta)^2}} \\ h &= \sqrt[3]{\frac{V(1 - \cos\theta)}{\pi \cos\theta}} \end{aligned}$$

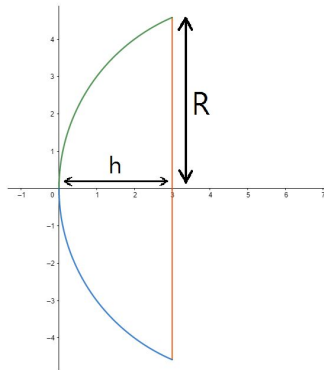


圖4-3、水珠計算示意圖

### (二) 電學模擬

在此情況為三維空間，使用卡式座標，可將式(4)展開：

$$\nabla^2 V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0$$

用前述所提，將其轉換為差分式：

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = \frac{V_{i+1,j,k} - 2V_{i,j,k} + V_{i-1,j,k}}{\Delta x^2} + \frac{V_{i,j+1,k} - 2V_{i,j,k} + V_{i,j-1,k}}{\Delta y^2} + \frac{V_{i,j,k+1} - 2V_{i,j,k} + V_{i,j,k-1}}{\Delta z^2} = 0$$

加上虛擬時間，設所求點座標(i,j,k)時間為N，周圍時間為N-1，如此可確保求值時每個點都是取上一個時刻(非真實時間，為迭代過程時間)的值，再進行移項通分後可得：

$$V_{i,j,k}^N = \frac{\Delta x^2 \Delta y^2 \Delta z^2}{2(\Delta x^2 \Delta y^2 + \Delta x^2 \Delta z^2 + \Delta y^2 \Delta z^2)} \left( \frac{V_{i+1,j,k}^{N-1} + V_{i-1,j,k}^{N-1}}{\Delta x^2} + \frac{V_{i,j+1,k}^{N-1} + V_{i,j-1,k}^{N-1}}{\Delta y^2} + \frac{V_{i,j,k+1}^{N-1} + V_{i,j,k-1}^{N-1}}{\Delta z^2} \right)$$

實際程式碼如下

```
21. def V_value():
22.     global V
23.     pre_V = V.view()
24.     V[1:n+1,1:n+1,1:n+1] = \
25.         ((pre_V[2:n+2,1:n+1,1:n+1]+pre_V[ 0:n ,1:n+1,1:n+1])*((ds[1]*ds[2])**2)+
26.          (pre_V[1:n+1,2:n+2,1:n+1]+pre_V[1:n+1, 0:n ,1:n+1])*((ds[0]*ds[2])**2)+
27.          (pre_V[1:n+1,1:n+1,2:n+2]+pre_V[1:n+1,1:n+1, 0:n ])*((ds[0]*ds[1])**2))
28.         / (2*((ds[1]*ds[2])**2+(ds[0]*ds[2])**2+(ds[0]*ds[1])**2))
```

### (三) 精度測試

為了確保此模擬方式可行，取最基礎的忽略邊際效應的平行電容版進行試驗。設置上下兩版為 $0.1 \times 0.1 \text{m}^2$ ，兩版間距 $0.01 \text{m}$ 。

1. 平行電容版的電容可通過理論得：

$$C = \varepsilon_0 \frac{S}{d} = \varepsilon_0 \frac{0.1 \times 0.1}{0.01} = 8.854187817 \times 10^{-12} \text{ (F)}$$

2. 模擬

上邊界為 $1000 \text{V}$ ，下邊界為 $-1000 \text{V}$ ，側面的電場水平分量為零(即最外圈的電位與向內一格相同)，設置當迭代出的電容值變化比例小於 $10^{-10}$ 時停止迭代，運用(式5)模擬結果如下：

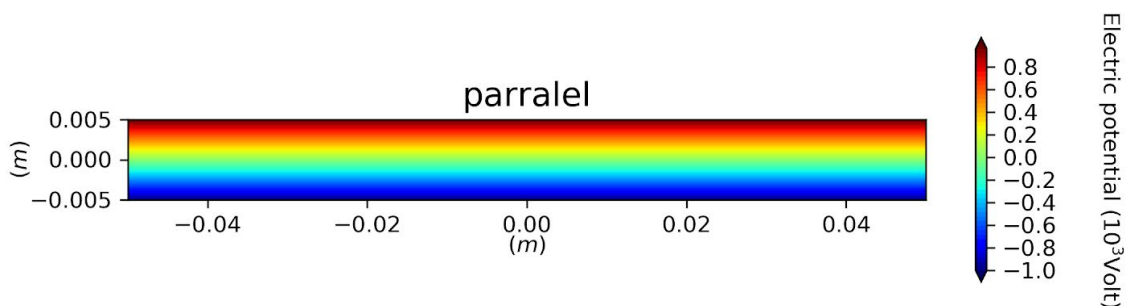


圖4-4、平行電板電容模擬圖

模擬所得之電容值： $8.854187818431714 \times 10^{-12}$ ，與理論誤差： $1.617 \times 10^{-8} \%$ ，可見此方法的使用是合理的，且誤差能達到一定程度之下，與理論十分接近。因為此模型的形狀配置與網格的形狀相符，都是矩形，不會因幾何形狀的表達放



大誤差，然而本實驗中，需要用方型網格模擬球狀水珠，可預見其與真實情況的誤差應會大幅增加。

#### (四) 模擬一：單電極板和水滴的電容值

本研究將水滴視為良導體，如此即為整顆水珠電位相同。接著將環境設定是 $10\text{mm}^3$ 液滴在 $4 \times 4 \times 0.5(\text{mm})$ 金屬板上，上電壓為 $-1000\text{V}$ ，下電壓為 $1000\text{V}$ ，整體空間大小為 $10 \times 10 \times 10(\text{mm})$ 。空間設定為此大小是為了在一定精度下，確保電位分布不會因外邊界的設置而影響過大。

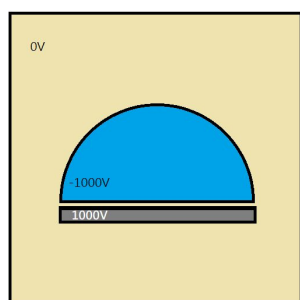


圖4-5、模擬設置示意圖



圖4-6、完整程式碼

#### (五) 模擬二：不同大小電極板的電容值

由於模擬一所呈現的結果顯示電容與理論間有些許差異，因此以電極板大小作變因，了解是否因為電容邊際效應與電極板大小有關。

### 三、實驗架設

#### (一) 實驗一：不同材料做介電層或疏水層

##### 1. 樣本製作

##### (1). 保鮮膜+防水噴霧

- (i). 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。
- (ii). 在至少30cm外噴防水噴霧，防止其被吹皺。

##### (2). 鐵氟龍配置

- (i). 將鐵氟龍粉末加進3M FC-770溶液，配置成1wt%溶液。
- (ii). 隔水加熱至 $70^{\circ}\text{C}$ ，持續3小時。
- (iii). 如溶液清晰即完成；如仍有白色粉末，則以離心機離心後取其澄清溶液。

### (3).鐵氟龍+膠帶/保鮮膜

- (i). 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塗布時被完全甩出。
- (ii). 放至塗布機上，以預先備好之鐵氟龍溶液將所需區域蓋滿。
- (iii). 調至1000~1500rpm旋轉20秒。
- (iv). 塗完後放置烘箱以 $60^{\circ}\text{C}$ 以上溫度烘乾20~30分鐘。



圖4-7、塗布機運作圖

### (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。

- (i). 將固體蠟置於金屬表面。
- (ii). 使用烘箱， $110^{\circ}\text{C}$ 的狀態下將金屬片和石蠟同時加熱至石蠟完全融化。
- (iii). 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。
- (iv). 重複執行步驟(ii)(iii)，持續降低蠟層厚度；而在蠟層出現破洞時，再執行步驟(i)。

## 2. 測量接觸角

### (1).使用接觸角測量儀

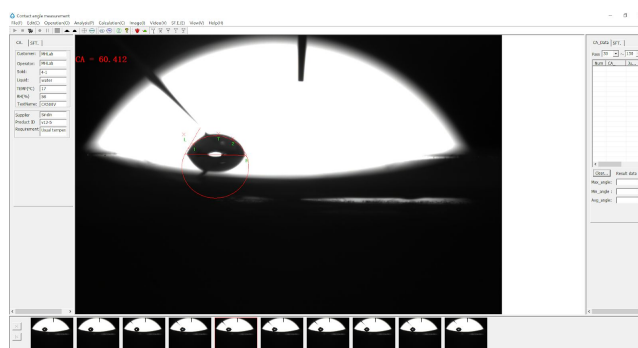


圖4-8、接觸角測量儀使用圖

## 伍、研究結果

### 一、程式模擬

以下數據的環境設定， $10\text{mm}^3$ 液滴在 $4 \times 4 \times 0.5(\text{mm})$ 金屬板上，間隔 $0.2\text{mm}$ ，上電壓為 $-1000\text{V}$ ，下電壓為 $1000\text{V}$ ，整體空間大小為 $10 \times 10 \times 10(\text{mm})$ 。

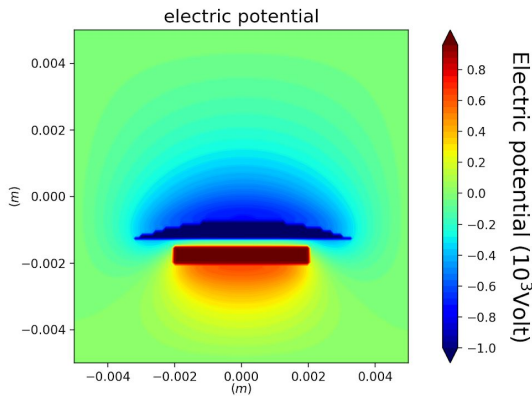


圖5-1、接觸角為 $20^\circ$ 時的電位模擬

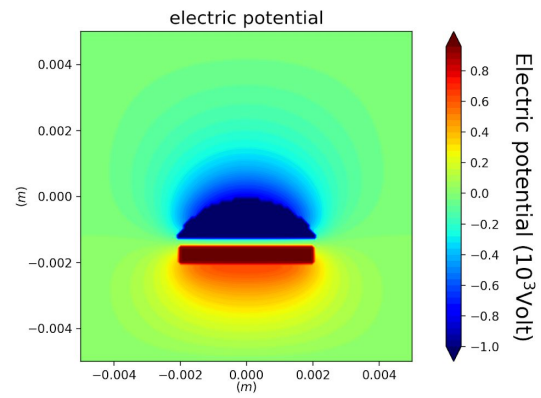


圖5-2、接觸角為 $60^\circ$ 時的電位模擬

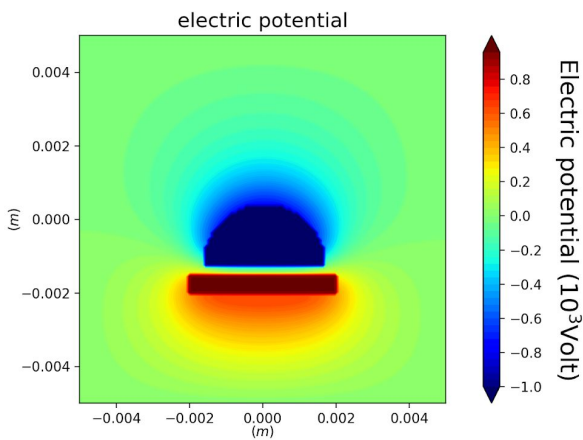


圖5-3、接觸角為 $90^\circ$ 時的電位模擬

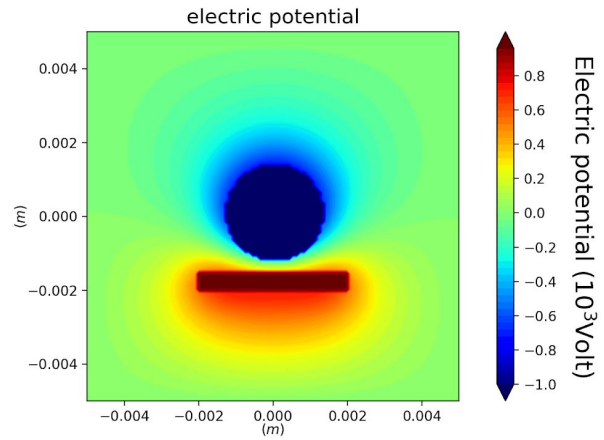


圖5-4、接觸角為 $180^\circ$ 時的電位模擬

### (一) 電容與固液間距、接觸角之關係

如將中間層間距放大至 $0.4\text{mm}$ ，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，因此電容減少程度不像平行電容版，單純與距離成反比。

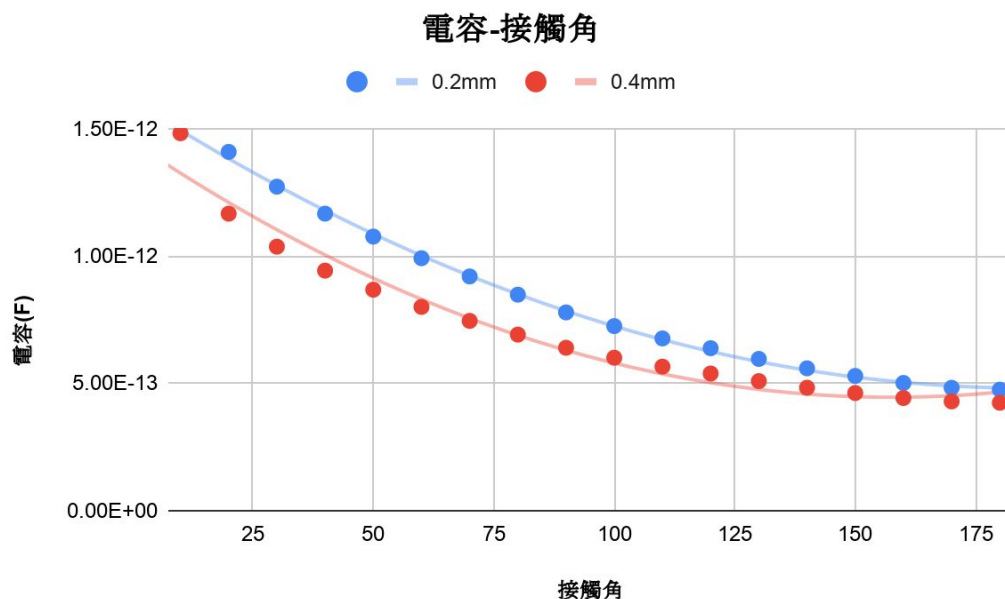


圖5-5、電容-接觸角模擬圖

## (二) 同電壓下不同接觸角下的能量

從文獻得到，20°C下的0.5M氯化鈉溶液表面張力 $\gamma_{LG} = 82.8 \text{ dyne/cm}^2$ ，鐵氟龍表面張力 $\gamma_{SG} = 19.0 \text{ dyne/cm}^2$ 。假設一 $10 \text{ mm}^3$ 水珠在20°C未加電壓下，固體介面為鐵氟龍，介電質厚度為0.2mm，電極版大小為在 $4 \times 4 \times 0.5 \text{ (mm)}$ 金屬板的平衡狀態接觸角為 $90^\circ$ ，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(Ea)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)。

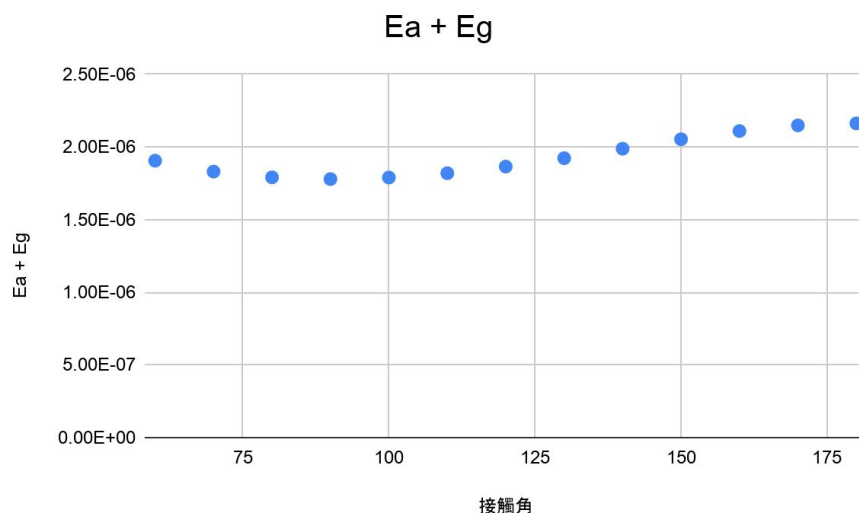


圖5-6、能量圖(0V)

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，如下二圖，導致其所儲存的位能下降。

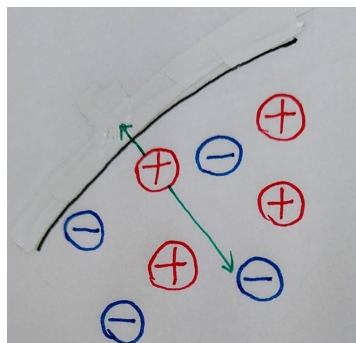


圖5-7、無外在條件時邊際分子圖

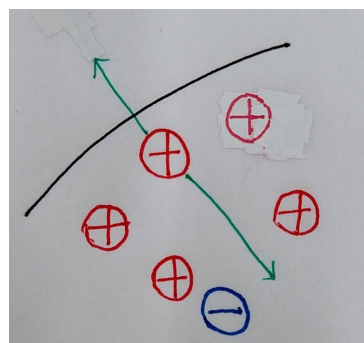


圖5-8、施加電壓時邊際分子圖

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：

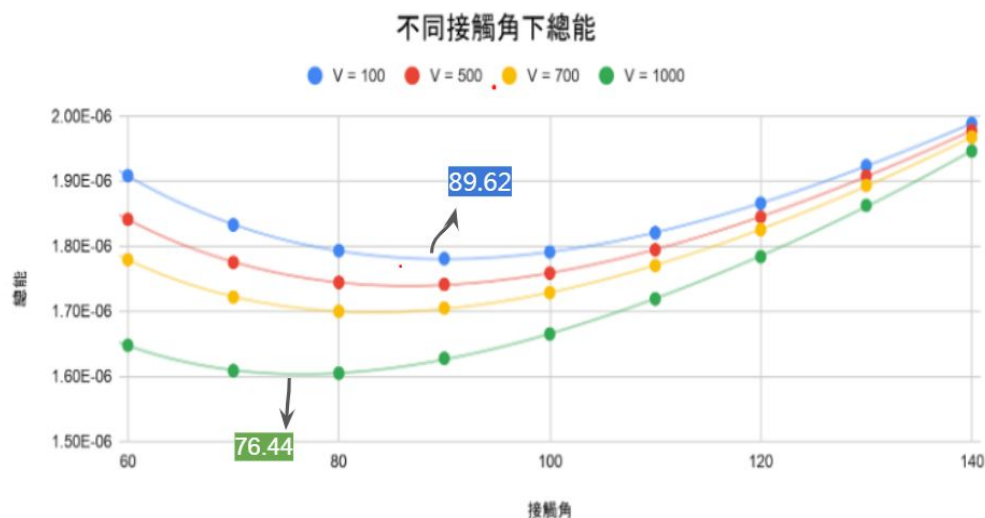


圖5-9、不同電壓下總能變化

由於一個數據點模擬約需30~45分鐘，以上僅先以10度做間隔。與理論模型對比過後，如下表，顯示我們使用的模擬方法與理論十分接近，然而多較理論所預測的大。

表5-1.穩定接觸角比較

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

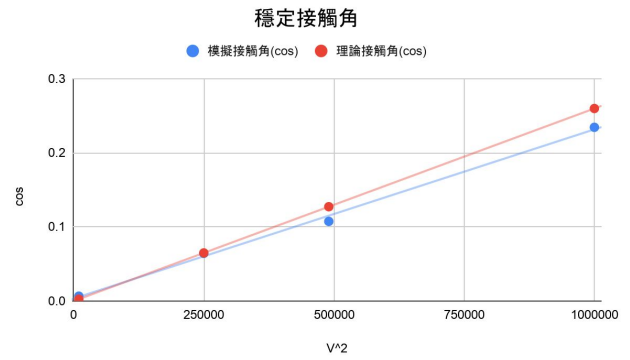
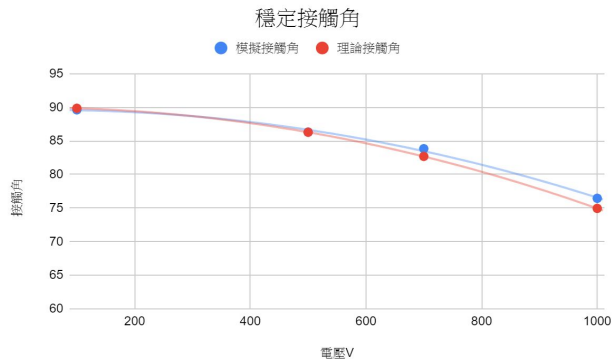


圖5-10、5-11、不同電壓下穩定接觸角(右 $\theta$ -V圖，左 $\cos$ -V<sup>2</sup>圖)

### (三) 模擬二：不同大小電極板的電容值

同（二）考慮不同接觸角下的總能( $E_a + E_g + E_e$ )後，作出穩定接觸角的圖。

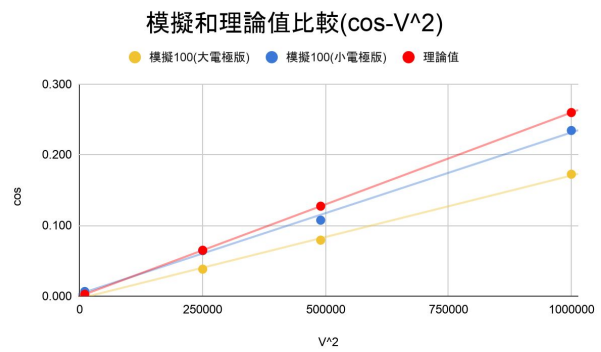
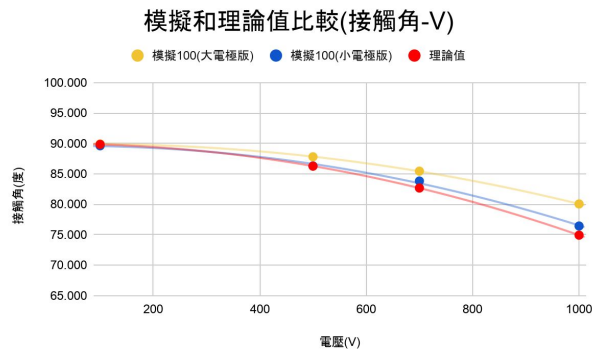


圖5-12、5-13、不同大小的電極板(右 $\theta$ -V圖，左 $\cos$ -V<sup>2</sup>圖)

## 二、實驗一

### (一) 保鮮膜+防水噴霧



圖5-14、0V實驗圖



圖5-15、300V實驗圖



圖5-16、600V實驗圖

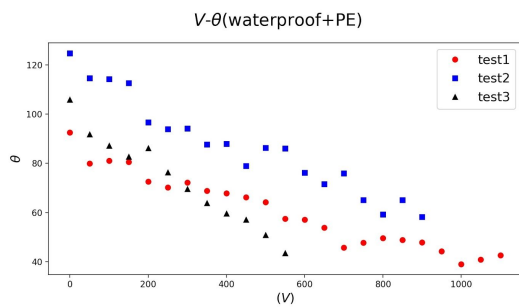


圖5-17、接觸角-V 圖

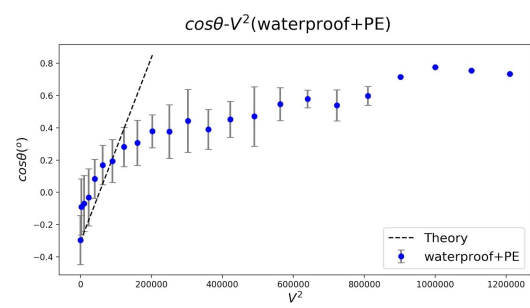


圖5-18、 $\cos\theta$ - $V^2$ 圖

## (二) 石蠟

### 1. 接觸角測量

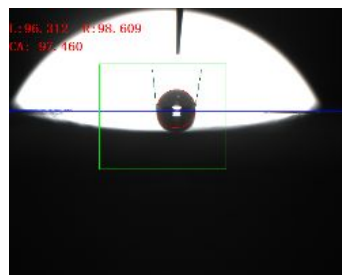


圖5-19、接觸角測量儀使用圖

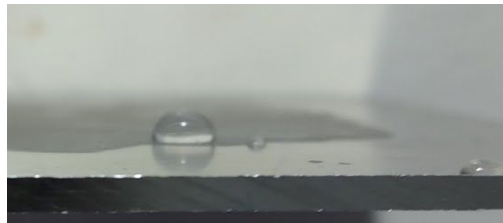


圖5-20、水滴處於石蠟層上

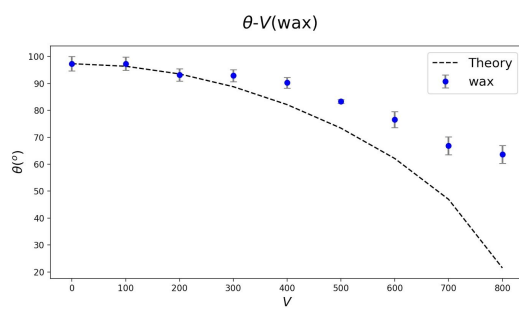


圖5-21、接觸角-V 圖

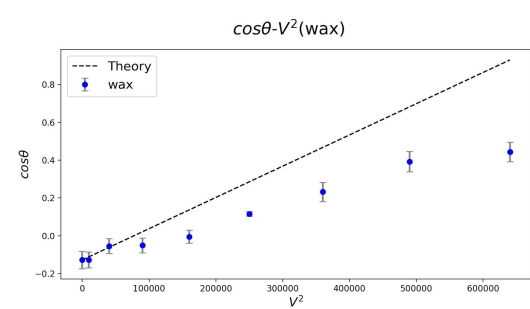


圖5-22、 $\cos\theta$ - $V^2$ 圖

## (三) 鐵氟龍+PET膠帶

### 1. 接觸角測量

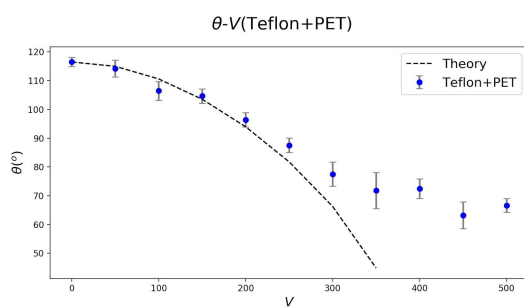


圖5-23、接觸角-V 圖

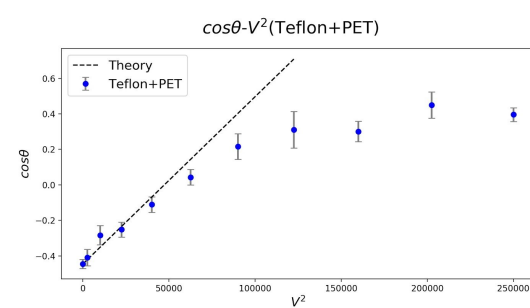


圖5-24、 $\cos\theta$ - $V^2$ 圖



#### (四) 鐵氟龍+PE(保鮮膜)

##### 1. 接觸角測量

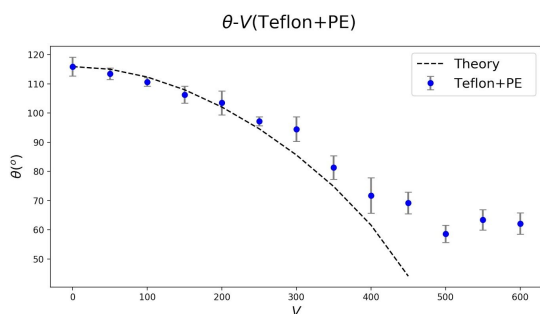


圖5-25、接觸角-V 圖

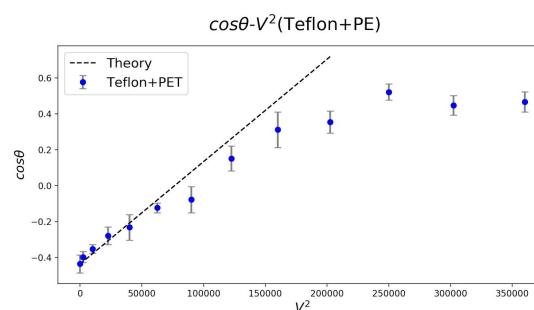


圖5-26、cos-V²圖

## 陸、討論

### 一、模擬結果分析

#### (一) 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，因此電容減少程度不像平行電容版，單純與距離成反比。

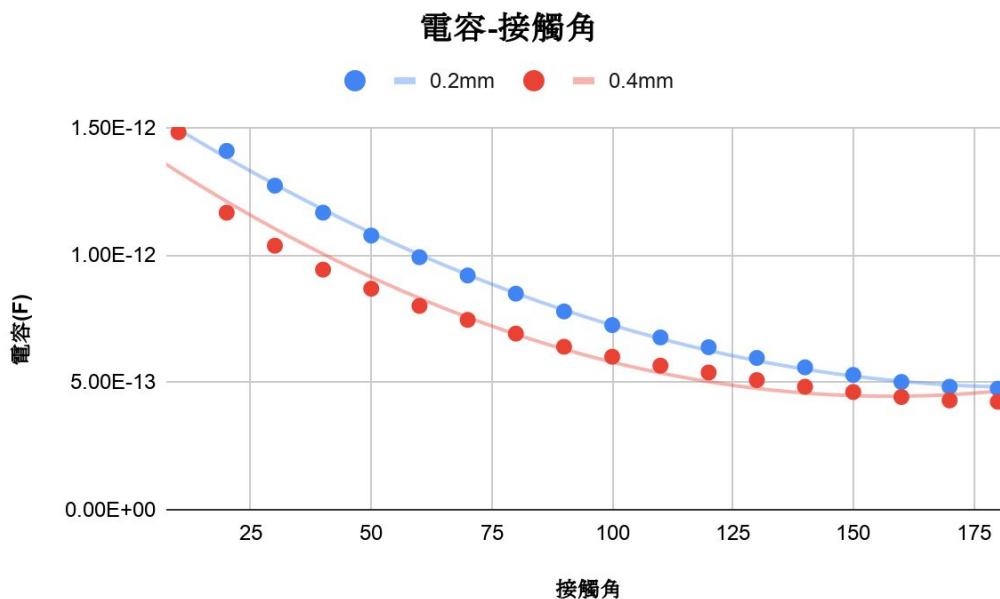


圖6-1、電容-接觸角模擬圖



## (二) 同電壓下不同接觸角下的能量

施加電壓會導致其所儲存的位能下降。因此所儲存電能應和表面能相差一個負號。與理論模型對比過後，如下表，顯示我們使用的模擬方法與理論十分接近，然而模擬出來的多較理論所預測的大。

表6-1.穩定接觸角比較

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

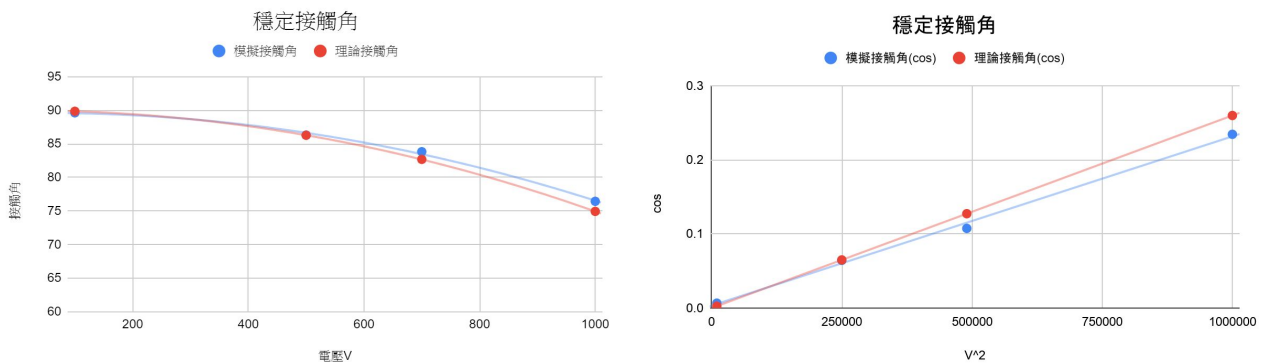


圖6-2、6-3、不同電壓下穩定接觸角(右 $\theta$ -V圖，左 $\cos$ -V<sup>2</sup>圖)

## (三) 模擬二：不同大小電極板的電容值

考慮不同接觸角下的總能( $E_a + E_g + E_e$ )後，作出穩定接觸角的圖。可以看到電極版越大模擬出的接觸角越大，也就是接觸角受電壓而變化的程度越小，考慮到電容的邊際效應，這可能是當電極板和水珠接觸面積大小所占電極板比例較小時的邊際效應較大所造成的。大電極板的接觸角與理論的差距較大，且模擬中接觸角都較理論預測的大，這與實驗做出來的結果的趨勢相符，會在後續的實驗部分進行討論。

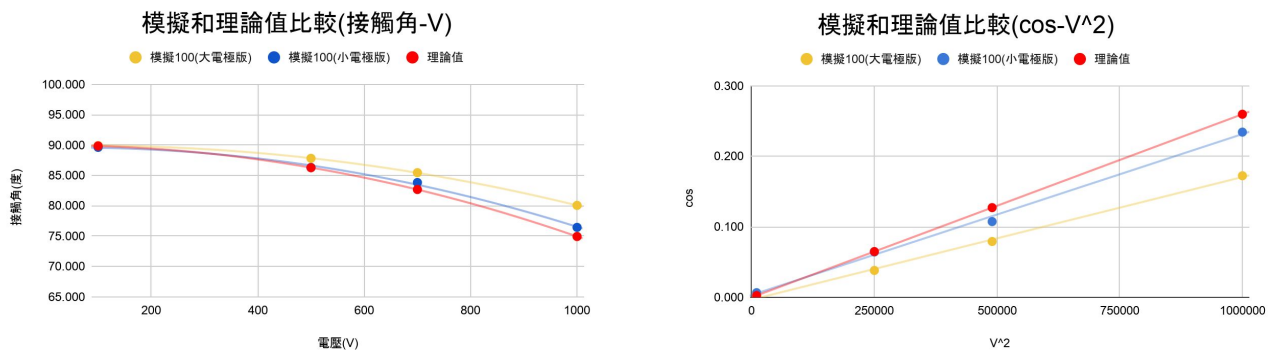


圖6-4、6-5、不同大小的電極板(右 $\theta$ -V圖，左 $\cos$ -V<sup>2</sup>圖)

## 二、實驗結果分析

### (一) 保鮮膜+防水噴霧

雖然防水噴霧的疏水性效果不錯，初始接觸角達110度，但當防水噴霧裡的高壓冷氣體吹到保鮮膜上時會使其些微得皺褶，加上噴霧受到噴嘴的限制噴灑出來不是很均勻，因此不同測試位置的平整度和化學、物理性質差很多。因此可以看到三條實驗線的初始接觸角甚至差到了20度有餘。未來若能克服噴防水噴霧時造成皺褶的困難，將有望得到一個經濟實惠的電潤濕基材製作方法。

### (二) 石蠟

從圖(5-22)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，石蠟的厚度已難以再下降，否則會造成部分金屬裸露，失去介電層的效果。以石蠟而言，目前其摩擦力和厚度不適合作為電潤濕的材料，將來若能改變其表面物理結構，並找出有效降低厚度的方法，或許能夠成為電潤濕的新材料。

### (三) 鐵氟龍

鐵氟龍的數據經由與理論值對照後發現其與理論值的偏差不大，但到後期出現明顯上升趨緩的現象，推測除了因為現實中摩擦力等阻力影響外，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。且因介電層過厚，使得表面張力變化不大，從而接觸角僅有微小改變，難以在小電壓時就發生變化。

### (四)與理論、模擬比較

在模擬中我們發現當固定大小水珠而電極板越大時，水珠接觸角受電壓影響的變化程度越小，在實驗中，我們也可以觀察到實驗接觸角隨電壓的上升，與理論的差距也是變大的，與模擬趨勢相符。然而因為模擬精度的影響，目前模擬與實驗的環境設定不相同，故只能討論出變化趨勢是一樣的，尚不能討論精準的修正理論。期望未來實驗和模擬精度上升後，可依此對理論作出合理的改善。

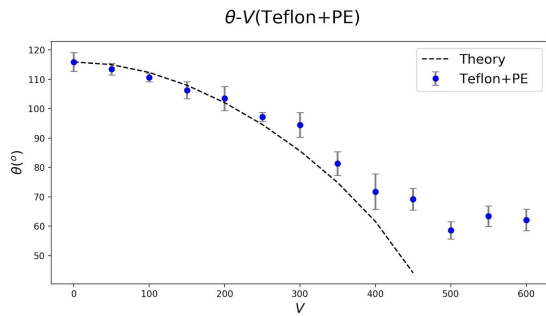


圖6-6、接觸角-V 圖(以鐵氟龍+PE為例)

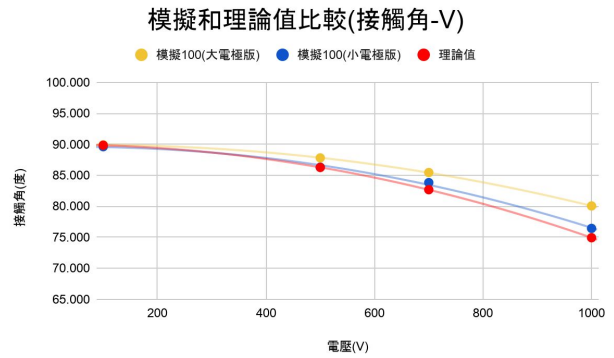


圖6-7、模擬接觸角-V 圖

## 柒、結論

### (一)目前本實驗已完成

1. 理解理論中電能與表面張力之關係
2. 使用python進行電潤濕的接觸角模擬
3. 進行單電極板與水珠的實驗與分析
4. 進一步將模擬與實驗數據分析

### (二)預計未來進度

1. 利用實驗與模擬將理論公式做合理的修正
2. 了解不同電極板大小對接觸角的影響
  - 由於模擬中可發現到不同面積金屬版對水滴接觸角變化的影響，為了觀察及驗證此現象，將透過蝕刻PCB版製作出不同大小的金屬板進行實驗比較。預期會觀察到電極版越大接觸角變化程度越小的現象。
3. 設計及製作完成「水電車」
  - 「水電車」的設計

由於現今開放式的電潤濕應用裝置，多靠底下兩電極板電壓變化，造成電場大小不同讓水珠移動，由於未直接接觸到水滴，因此實際操作電壓大；雙層式電濕潤系統雖靠上方接地有與水珠直接接觸，但因接觸面積變大，摩擦力等阻力增加，實際效率並未有大幅提升。因此希望將上方電極板，面改線，以降低阻力。因模樣與電車相似故暱稱為水電車，預期能有效的控制水珠的移動。

初步設計圖如下：

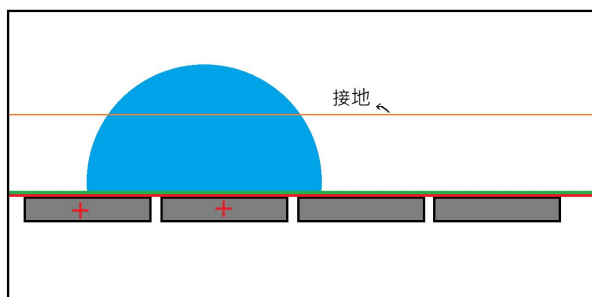


圖7-1、側視圖

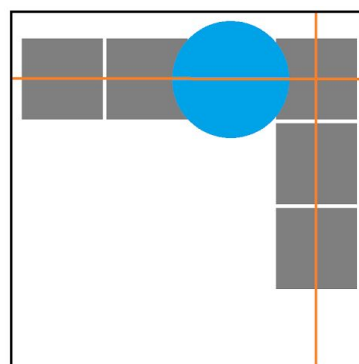


圖7-2、上視圖

## 捌、參考資料及其他

- 一、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/>
- 二、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>
- 三、MIT Media Lab (2018). Programmable Droplets. Retrieved October 9, 2019, from <https://www.youtube.com/watch?v=z0NBsyhApvU>
- 四、維基百科(表面張力)。2019年10月9日，取自 <https://zh.wikipedia.org/wiki/表面張力>
- 五、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
- 六、潘姘婷 (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
- 七、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。
- 八、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
- 九、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://bohua188.com/hangye/hangye-191.html>
- 十、PET薄膜介電常數介質損耗 (2014年)。取自：<https://zhidao.baidu.com/question/122291414>
- 十一、Plastics Properties Table (2010年)。取自：[http://yuamsong.com/en/engineering\\_table.html](http://yuamsong.com/en/engineering_table.html)