



國立臺灣大學工學院機械工程學系

碩士論文

Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master's Thesis

液滴發電器的發電參數分析與模型建置

Parameter Analysis and Modeling of Droplet-based Electricity
Generators

蔡閔

Min Tsai

指導教授：張鈞棣 博士

Advisor: Chun-Ti Chang, Ph.D.

中華民國 114 年 10 月

October, 2025

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

MASTER'S THESIS ACCEPTANCE CERTIFICATE
NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY

液滴發電機的發電參數分析與模型建置

Parameter Analysis and Modeling of Droplet-based Electricity Generators

本論文係蔡閔（R12522315）在國立臺灣大學機械工程學系完成之碩士學位論文，於民國 114 年 10 月 27 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明。

The undersigned, appointed by the Department / Institute of Mechanical Engineering on 27 (date) 10 (month) 2025 (year) have examined a Master's thesis entitled above presented by Min Tsai (R12522315) candidate and hereby certify that it is worthy of acceptance.

口試委員 Oral examination committee:

張鈞棟

(指導教授 Advisor)

林皇宏

王榮昇

林福勝

系主任/所長 Director:

莊志揚

誌謝



能完成這篇論文，我非常感謝指導教授張鈞棣老師不斷指點迷津，以及感謝實驗室夥伴們對我的支持與鼓勵，並討論實驗相關的知識。同時，感謝劉建豪老師與蔣雅郁老師分別借用阻抗分析儀與導電度計使我的實驗能順利進行。還要感謝王安邦老師、林宗宏老師與林孟芳老師提出研究的建議與指教，以及感謝林宗宏老師與林孟芳老師實驗室的夥伴，幫助我製作實驗樣品。另外還要感謝陳建中師傅幫忙加工複雜的旋轉平台。

中文摘要



為了解液滴發電器在不同條件下的發電效率，本研究比較了示波器在不同取樣頻率記錄到的電壓值、評估計算電功率的方法以及進行所有不同參數組合的實驗，並藉以建立液滴發電器的測量方式的標準流程。本研究製備多種不同介電層厚度的液滴發電器，透過不同濃度的液滴滑落液滴發電器以產生電力，且改變液滴墜落高度後，結果顯示液滴接觸面積與峰值電壓有正相關性。在固定液滴發電器傾斜角度的情況下，結果顯示當介電層厚度在 $100\mu\text{m}$ 與液滴濃度為 1mM 的時，液滴發電器有最高的平均電功率，若是厚度與濃度持續上升，會導致功率下降。本研究亦串聯不同大小的電阻於示波器上作為負載，尋找液滴發電器的阻抗匹配結果。本研究基於液滴發電器的電壓訊號，代入不同實驗參數，建立一套簡易的發電模型，用以模擬液滴發電器的發電過程。

關鍵字：液滴發電器、摩擦起電、接觸起電、等效電路模型

ABSTRACT



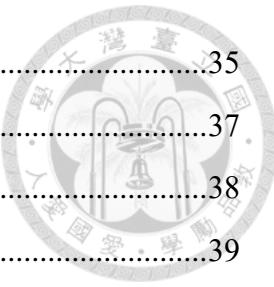
To understand the power generation efficiency of a droplet-based electricity generator (DEG) under various conditions, this study compared the voltage recorded by the oscilloscope at different sampling frequencies, evaluated different methods for calculating power, and conducted experiments across all parameters to establish a standardized measurement procedure for the DEG. Several droplet-based electricity generators with different dielectric layer thicknesses were fabricated. Electricity was generated by droplets of various concentrations sliding down the DEGs, and the results showed a positive correlation between the droplet's contact area and the peak voltage when the droplet impacted the surface at different falling heights. Under a fixed tilt angle of the DEG, the results showed that we got the highest average power when the dielectric layer thickness was $100\mu\text{m}$ and the droplet concentration was 1mM . Further increases in dielectric layer thickness and droplet concentration led to a decrease in power. By connecting resistors of different sizes in series to the oscilloscope as a load, the impedance matching result of the DEG could be determined. Furthermore, based on the voltage signal of the DEG, a simple power generation model was established by substituting different experimental parameters to simulate the power generation process of the DEG.

Keywords: Droplet-based Electricity Generator (DEG), Triboelectric Effect, Contact Electrification, Equivalent Circuit Model

目次



口試委員會審定書	i
誌謝	ii
中文摘要	iii
ABSTRACT	iv
目次	v
圖次	vii
表次	ix
參數表	x
第一章 緒論.....	1
第二章 實驗方法.....	10
2.1 研究問題與參數定義	10
2.2 取樣頻率校正實驗	11
2.3 液滴發電器測試平台	12
2.4 液滴發電實驗	15
2.5 電功率計算方法	15
2.6 液滴接觸面積測量實驗	18
2.7 液滴發電器的等效電容	20
2.8 液滴發電器的頻率響應	21
2.9 液滴導電度	22
第三章 液滴發電器電路模型	23
3.1 線性電路模型	23
3.2 電路模型自我驗證	25
第四章 結果與討論	29
4.1 取樣頻率的影響	29
4.2 液滴發電器之電功率比較	32
4.3 不同實驗參數的電功率	34
4.3.1 液滴墜落高度的影響	34



4.3.2	負載阻抗、介電層厚度、液滴濃度	35
4.3.3	最佳參數組合的搜尋方法	37
4.4	液滴接觸面積	38
4.5	液滴發電器波德圖	39
4.6	實驗與理論的液滴發電器電容	40
4.7	發電模型驗證	41
4.8	量化液滴濃度	44
第五章	結論	46
附錄 A	47
A.1	取樣頻率實驗表	47
A.2	電功率等高線圖	48
A.3	口試紀錄表	49
參考文獻	52

圖次



圖 1.1、TENG 分類方式[2].....	1
圖 1.2、液-固 TENG 之發電過程	3
圖 1.3、DEG 示意圖	3
圖 1.4、文獻的電壓-時間圖[52, 53, 57]	5
圖 1.5、峰值功率與阻抗匹配[50, 51, 69]	6
圖 1.6、Zhang, Q.等人的實驗順序[53]	7
圖 1.7、Zhang, N.等人的實驗順序[67]	7
圖 2.1、DEG 參數與實驗示意圖	11
圖 2.2、DEG 測試系統示意圖	13
圖 2.3、液滴發電器測試系統(4X)示意圖	14
圖 2.4、液滴電壓訊號。液滴濃度：1 mM、 $h = 100 \mu\text{m}$ 、 $H = 10 \text{ cm}$ 。	16
圖 2.5、DEG 電路圖	16
圖 2.6、文獻的 DEG 發電過程[47, 57]	17
圖 2.7、DEG 的發電過程	18
圖 2.8、高速攝影機架設圖	19
圖 2.9、高速攝影機連接示意圖	19
圖 2.10、一階 RC 電路相位角波德圖[76]	21
圖 2.11、一階 RC 電路增益波德圖[76]	22
圖 3.1、電路模型示意及模型相關參數	23
圖 3.2、不同截止條件的迴圈數	25
圖 3.3、釋放電荷比例	25
圖 3.4、模型演算流程圖	25
圖 3.5、發電模型(時間步距：1 微秒).....	26
圖 3.6、模型時間步距分析	26
圖 3.7、模型時間步距分析	26
圖 3.8、修正模型時間步距分析	28
圖 3.9、修正模型時間步距分析	28

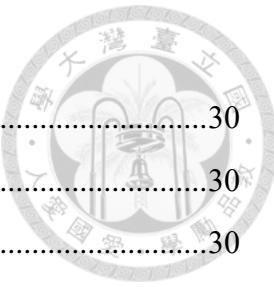


圖 4.1、取樣頻率電壓-時間圖	30
圖 4.2、取樣頻率實驗的平均峰值電壓	30
圖 4.3、取樣頻率實驗的變異係數	30
圖 4.4、取樣頻率實驗比較(橘色方點：20kHz、藍色圓點：1kHz)	31
圖 4.5、文獻的電壓-時間圖[53]	32
圖 4.6、峰值電壓與平均電功率比較	33
圖 4.7、不同實驗參數與液滴墜落高度關係	34
圖 4.8、不同液滴濃度與外接電阻的實驗結果	36
圖 4.9、地毯式搜索-1 (氯化鈉水溶液：0.1 M).....	37
圖 4.10、地毯式搜索-2 (串聯電阻：10 MΩ).....	38
圖 4.11、液滴碰觸上電極(俯視圖).....	39
圖 4.12、液滴接觸面積與峰值電壓關係	39
圖 4.13、厚度為 100μm 之 DEG 波德圖	40
圖 4.14、模型架構圖	40
圖 4.15、100 μm 的 DEG 測量電容.....	41
圖 4.16、電容與 PTFE 厚度比較	41
圖 4.17、模型與文獻比較	42
圖 4.18、模型與實驗比較與無因次化結果	42
圖 4.19、修正模型與實驗比較與無因次化結果	43
圖 4.20、液滴接觸面積對模型影響與無因次化比較	43
圖 4.21、PTFE 厚度對模型的影響與無因次化比較	44
圖 4.22、修正模型與取樣實驗資料無因次化比較	44
圖 4.23、液滴濃度於不同串聯電阻的平均電功率	45



表次

表 2.1、發電實驗參數表	13
表 3.1、模型時間步距平均絕對誤差	27
表 3.2、修正模型時間步距平均絕對誤差	28
表 4.1、文獻平均功率與峰值功率比較	32
表 4.2、不同濃度氯化鈉水溶液導電度	45

參數表



A_{DEG}	DEG 上電極面積
A_{drop}	液滴接觸上電極時的面積
CV	變異係數
C_{DEG}	DEG 等效電容
D	PTFE 表面電荷密度
DEG	液滴發電器
d_{DEG}	DEG 厚度
f_c	一階 RC 電路截止頻率
f_s	示波器取樣頻率
g	重力加速度
H	液滴墜落高度
h	PTFE 厚度
k	示波器響應時間倒數
$PTFE$	聚四氟乙烯(Polytetrafluoroethylene)
PI	聚醯亞胺(Polyimide)
MAE	平均絕對誤差
$MAPE$	平均絕對百分比誤差
Q_{sur}	PTFE 表面電荷
R_{DEG}	DEG 等效電阻
R_{load}	外接電阻
T'	無因次化時間
V_{ap}	峰值電壓的平均值
V_p	峰值電壓
V'	無因次化電壓
ϵ_0	真空介電值
ϵ_{DEG}	DEG 介電常數
θ	DEG 傾斜角度

σ

峰值電壓標準差



第一章 緒論



在 2012 年，Wang, Z. L. 團隊提出摩擦起電微型發電器 (Triboelectric Nanogenerator, TENG) 的概念[1]。他們的發電器由兩片電負度不同的介電材料薄片組成，藉這兩片薄片反覆接觸、摩擦、分離產生電荷，這些電荷可透過外接電極導出。TENG 可依結構不同分成四大類：垂直接觸/分離模式 (Vertical Contact-Separation Mode)、橫向滑動模式 (Lateral-Sliding Mode)、單電極模式 (Single-Electrode Mode)、摩擦起電層獨立模式 (Freestanding Triboelectric-Layer Mode)[2]，如圖 1.1 所示。

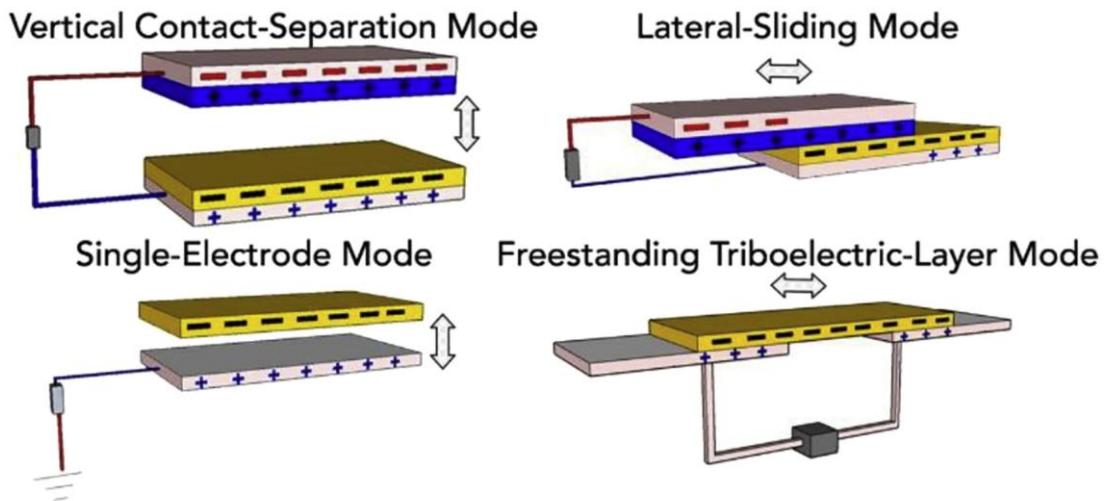


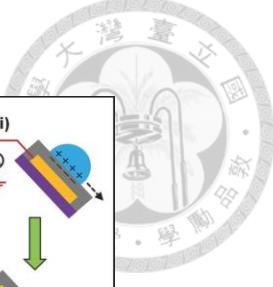
圖 1.1、TENG 分類方式[2]

四種 TENG 的運行原理相似，都是透過外力使兩個介電材料的介面接觸與分離。垂直接觸/分離模式的 TENG 透過調整兩片介電材料介面的垂直距離以產生分離電荷。介面週期性地接觸與分離，會使電極之間產生電位差的變化，進而驅動外部電流的產生[3-5]。橫向滑動模式使介電材料平行於介面的方向相對移動、摩擦，進而使上下電極產生電流平衡摩擦起電產生的電荷[6-8]。橫向滑動模式也可透過旋轉的方式產生滑動以實現電荷分離的效果[9-11]。單電極模式以大地為參考電極 (Reference Electrode)，頂部介電材料反覆碰觸底部電極產生感應電荷[12]。單電極模式又可以分成接觸分離[13-15]與接觸滑動[16-19]兩種型態，其中接觸分離的頂部介電材料反覆碰觸底部電極，而接觸滑動則由頂部介電材料反覆在底部電極上移動。摩擦起電層獨立模式為單電極模式的延伸，在單電極模式中新增一個底部電極以取代大地作為參考電極，兩個底部電極使用導線連接，研究人員移動頂部物體

後，使兩端電極的電荷不相等以產生電流[20-23]。上述四種模式的 TENG 常以兩片的固體介電材料作為 TENG 摩擦起電的薄膜，這種固體-固體 TENG 需透過外力來進行摩擦起電，且固體與固體摩擦易磨損與消耗介電材料[24]，但研究人員希望 TENG 能夠有更長的使用壽命，因此許多研究將其中一個介電材料改成更柔軟的材質，例如：水[13]、水凝膠[25]等材料以延長 TENG 壽命[24]。

液體與固體 TENG 是將固體-固體 TENG 的其中一個介電材料換成液體，如：水[13]、油[26]等。液-固 TENG 的好處為液體能輕易在疏水表面上滑動，並藉重力迅速脫離 TENG 表面以進行下一次的發電，且相較於固體與固體的摩擦會消耗介電材料，液體對介電材料的損傷較小，使 TENG 能長久使用。有鑑於此，Lin, Z. H. 等人在 2013 年提出液態水能夠當作摩擦材料之一，他們設計出以水與聚二甲基矽氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS)為摩擦材料的 TENG[13]，為單電極模式中的接觸分離模式，透過對 PDMS 基板施加、放鬆壓力，使得水面產生波動，製造高分子材料與水波的摩擦起電效應，從而開啟液-固 TENG 之發展。

2014 年，Lin, Z. H. 等人改良了初始的液-固摩擦發電器[16]，能將液滴下落時的位能轉化為動能後，液滴撞擊介電材料時的一部分動能轉為電能。Lin, Z. H. 等人將銅電極黏貼至在聚甲基丙烯酸甲酯(polymethyl methacrylate, PMMA)基板上，並以聚四氟乙烯(Polytetrafluoroethylene, PTFE)覆蓋電極及基板，而電極則連接數位電表顯示感應電壓、電流，這種三重結構的發電板為單電極 TENG 中的接觸移動模式。他們將進行運動的材料從聚合物改變為水，使水藉重力自由落下，而介電膜採用 PTFE 是因為 PTFE 的疏水性和高電負度，這些特性有利於水的滑落及電荷的分離。尤其，PTFE 因為電負度高，表面容易殘留電荷，飽和表面電荷密度可以達到 $-27 \mu\text{C}/\text{m}^2$ [27]。如圖 1.2 所示，液滴在與 PTFE 薄膜摩擦時會產生正電荷，而 PTFE 產生負電荷，但液滴離開 PTFE 表面後，電中性被破壞，銅電極被感應起電，電流流進銅電極，以維持 TENG 的電中性。而後下顆液滴再次接觸 PTFE 表面，銅電極的電中性再次被破壞，電流流出銅電極，再次產生電力。液-固 TENG 的結構簡單，且不容易損壞，後續研究發展繁多[28-42]，而液-固 TENG 有許多研究參數，如：液滴濃度[30, 42, 43]，不同種類的液滴[38, 41, 43]、液滴墜落高度[36, 38, 40, 41]、液滴滴落頻率[28, 35, 38, 40, 41, 44]、液滴大小[35, 38]、TENG 傾斜角度[28, 35-37, 39-41, 44]、底電極擺放方式[35, 37, 38]，文獻透過改變不同的實驗參數，以尋找液



-固 TENG 最大的發電功率。

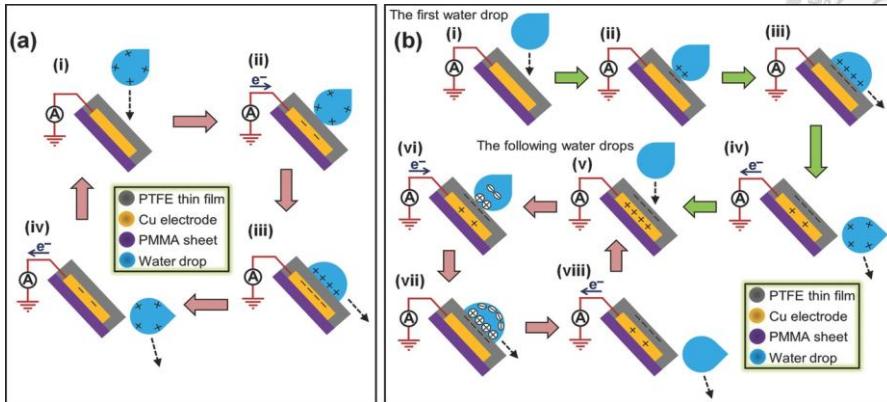


圖 1.2、液-固 TENG 之發電過程

在液-固 TENG 發展多年後，於 2020 年，Xu, W. H. 等人在液-固 TENG 貼上一鋁電極，製作出液滴發電器(Droplet-based Electricity Generator, DEG)，如圖 1.3 所示[45]。其發電原理與液-固 TENG 相似，不同的是在液滴與 PTFE 摩擦起電之後，液滴將接觸上電極產生通路，使得電流流向鋁電極，產生電力。在 Xu, W. 等人提出 DEG 的概念後，針對 DEG 的研究蓬勃發展[46-75]，像是改變 DEG 介電層表面粗糙度[52, 75]、不同液滴濃度[47, 48, 59, 66, 75]、改變液滴墜落高度[59-64, 66-68, 74]、改變 DEG 傾斜角度[59-64]、改變 DEG 上電極的疏水性[54]與上電極面積[71]或是 DEG 的應用[47, 62, 67, 71]等。

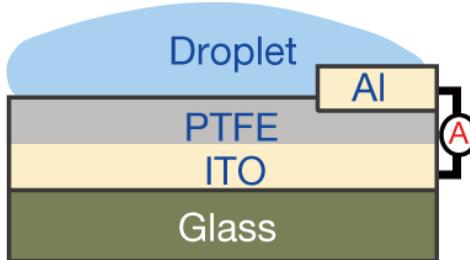


圖 1.3、DEG 示意圖

由於 DEG 的工作原理與與液-固 TENG 雷同，故相關實驗參數也相似，包含 DEG 的傾斜角度[59-64]、DEG 介電層的厚度[45, 47, 59, 62, 64, 65, 74]、液滴的墜落高度[59-64, 66-68, 74]、液滴滴落頻率[60-62, 67, 74]、DEG 阻抗匹配[45, 59, 63, 64, 68, 74]，以及液滴的濃度[47, 48, 54, 59, 66, 75]或液滴種類[45, 48, 49, 54, 60, 62-

64, 69]。相關參數眾多，且相關文獻豐富，但文獻中卻也充滿各種矛盾。譬如，Xu, W.等人的研究測量 DEG 傾斜 40°到 70°時的電流輸出，發現傾斜角度越大則電流越大[60]，但 Yang, Y. W.等人的研究表示傾斜角度在 15°到 45°時，最大的輸出電流在 30°時產生[59]。Yang, Y. W.等人的結論與 Zhou, L.等人的研究結果相同[62]。Wang, X.等人的研究則指出傾斜角度 45°有最大的峰值電壓[61]，但 Wu, H.等人的研究表明 DEG 的傾斜角度在 40°時有最高的輸出電壓[63]，而 Liu, Di 等人的研究結果說明 DEG 的傾斜角度為 30°與 45°的輸出電壓差不多[64]。另外，關於液滴墜落高度對電力輸出的影響，Xu, W.等人的研究指出液滴墜落高度越高，輸出電流越低[60]，但其他研究者皆顯示墜落高度越高，則輸出電流或電壓越高[59, 61-64, 66-68]，其中 Zhou, L.等人提到，液滴的墜落高度與電壓的關係呈現指數關係，墜落高度在 40 公分與 50 公分後，電壓的上升幅度會下降[62]。

液滴水溶液種類的實驗結果也有許多矛盾。諸多研究使用去離子水、自來水、雨水等作為不同環境水對 DEG 輸出結果的比較[45, 48, 49, 54, 60, 62-64, 69]，或是調配水溶液比較離子濃度對 DEG 的輸出影響[47, 48, 54, 59, 66, 75]。在液滴水溶液種類的研究中，Liu, D.等人的研究表明使用雨水與自來水作為液滴的輸出電流大於去離子水[64]，而 Wu, H.則是去離子水作為液滴的輸出電壓最高，雨水輸出次之，自來水輸出最低[63]，與 Zhou, L.等人研究結果相同[62]。Xu, W.等人的輸出電流由高到低分別為自來水、雨水、海水[45]。在液滴濃度如何影響電力輸出的研究中，Yang, Y.等人指出液滴濃度在 0.1 M 時，輸出的電力比其他濃度的高，隨著液滴濃度的增加到 0.5 M，輸出會跟著下降[59]，Yang, L.的輸出結果同樣為液滴濃度越低則輸出電壓與電流越高[54]。Wang, K. Q.等人的實驗結果則完全相反：當濃度為 1 mM 到 1 M，濃度越高時電壓會越高[47]。

在許多文獻中，量測到的電訊號隨時間變動甚大，如圖 1. 4(a)-(d)所示。圖 1. 4(a)-(b)為 Zhang, Q.等人的研究[53]，使用 Keithley 6514 靜電計測量 DEG 在不同液滴墜落高度與液滴流速(即液滴滴落頻率)下產生的電壓。在圖 1. 4(a)中，當墜落高度為 5 公分與液滴流速為 0.22 mL/s 時，有些峰值電壓未被完整記錄，導致峰值電壓的大小有所差距，此現象隨著墜落高度越高也越容易觀察到。圖 1. 4(b)則是不同液滴滴落頻率產生的電壓，電壓值差距更明顯，從低滴落頻率到高滴落頻率都是如此。圖 1. 4(c)為 Meng, J.等人的研究[57]，Meng, J.等人在 DEG 上方 30 公分的位置

滴落自來水液滴，並調整 DEG 的傾斜角度，使用示波器(Tektronix)紀錄電壓，在 DEG 傾斜角度 10° 、 20° 、 80° 的條件下，能較明顯觀察到峰值電壓的大小有所差距。Wang, L.等人使用示波器(Rohde and Schwarzte, RTE1024)測量液滴為 $22 \mu\text{L}$ 時所產生的訊號[52]，圖 1.4(d)也可見峰值電壓訊號的數值高低起伏。從上文提到的文獻中得知不同儀器都會有峰值電壓差距甚大的問題，這顯然是量測方法影響了量測的結果。為此，本研究在執行初期先測試不同液滴濃度、墜落高度、示波器取樣頻率等參數組合，釐清影響訊號一致性的因素後才進一步系統性地進行量測實驗。

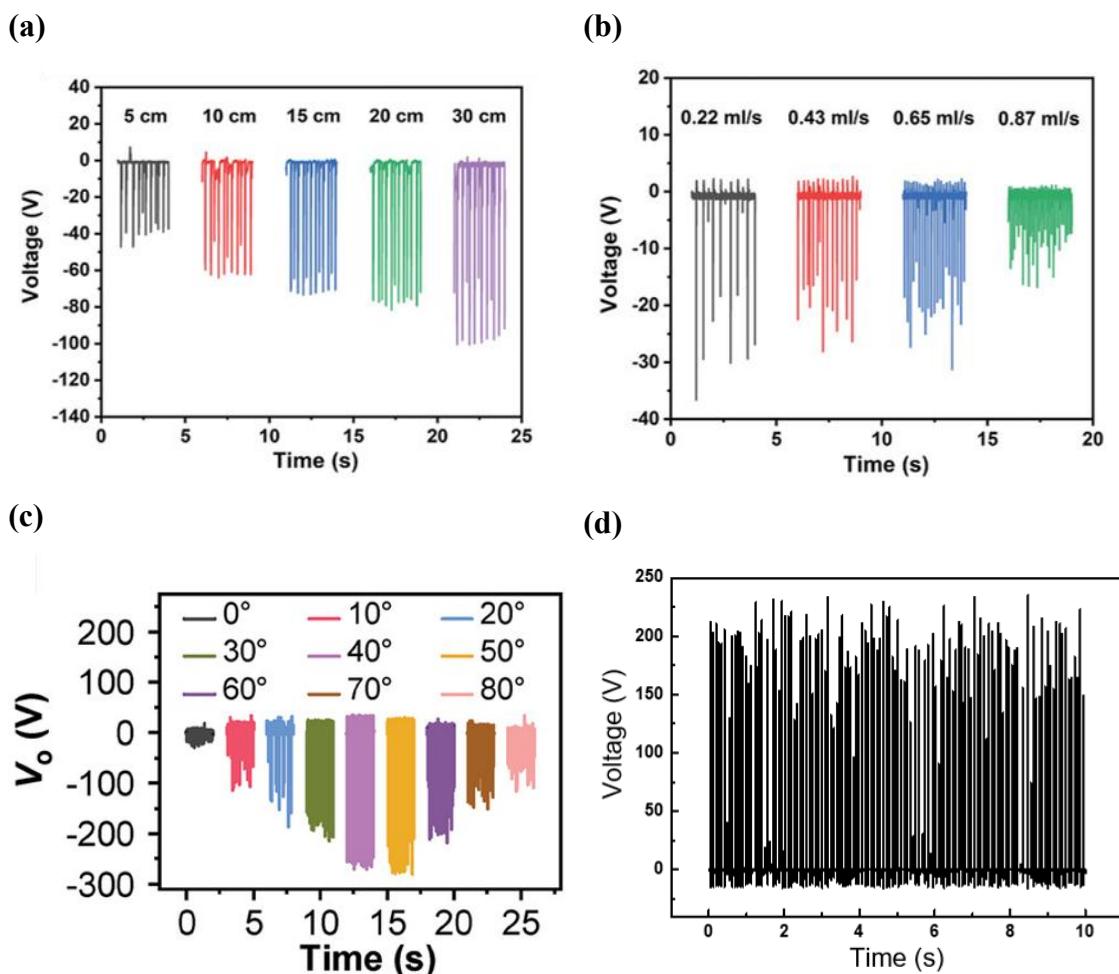


圖 1.4、文獻的電壓-時間圖[52, 53, 57]

或許是為了資料處理的簡便，許多研究使用峰值電壓或峰值電流計算發電器的輸出電力[50, 63, 69]，如圖 1.5(a)菱形標點所示，Li, X.等人使用峰值電流與峰值電壓相乘後得到電功率[50]。在圖 1.5(b)中，Wu, H.在文中提到其 DEG 的峰值功率密度可以達到 $1.265 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，同樣是透過峰值電壓與峰值電流計算[63]，L. Wang 與 Li, X.和 Wu, H.相同，在圖 1.5(c)中，Wang, L.所計算出的峰值功率密度可以達



到 $419 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ [69]。然而，這些文獻多以 DEG 的瞬時輸出功率作為比較基準。實際上，液滴接觸 DEG 上電極後，電力並非瞬間完全釋放。文獻的計算方式顯然高估了 DEG 的實際發電功率。因此本實驗將採用平均電功率作為比較基準，以評估 DEG 的性能。

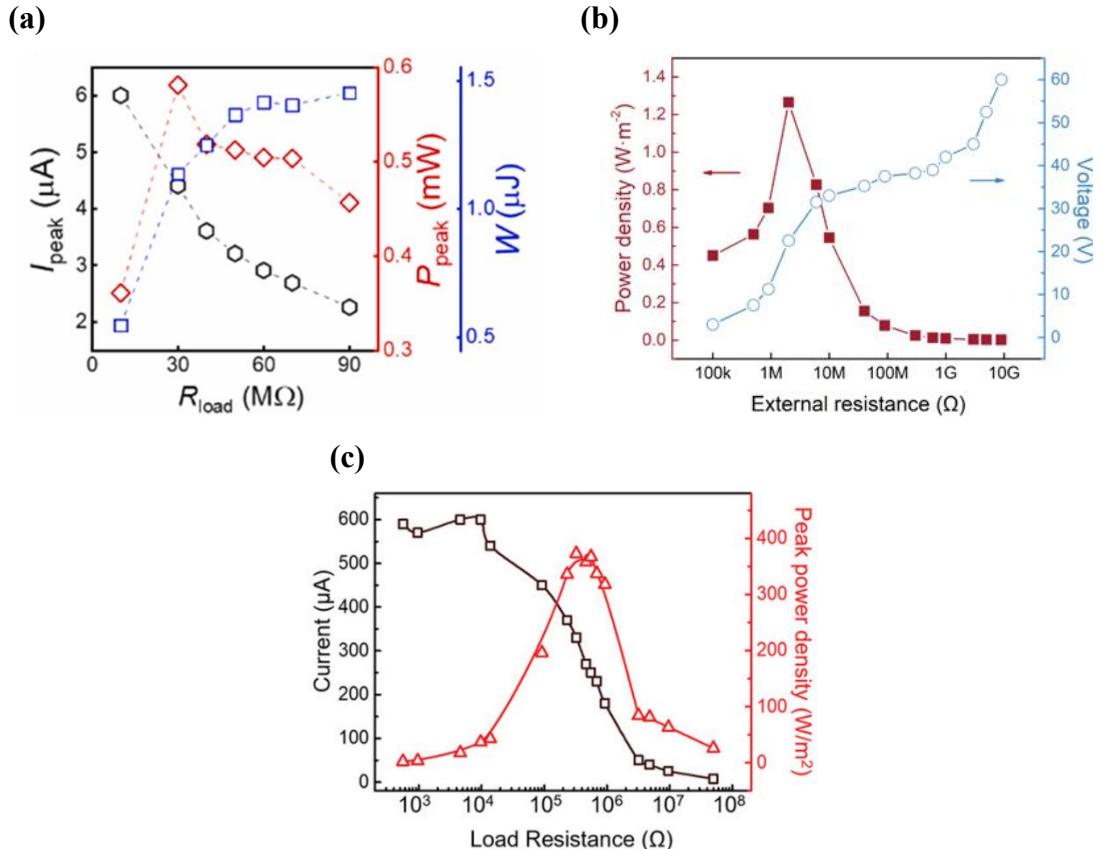


圖 1.5、峰值功率與阻抗匹配[50, 51, 69]

文獻通常先固定多個參數，改變一個參數尋找該參數的最佳輸出結果，再根據此結果進行下個參數的實驗[53, 67]，以此方法來找出最佳參數組合的 DEG 輸出效能，這種方法可以快速收斂實驗參數組合，但易受到測試參數順序的影響，無法得知是否遺漏真正的最佳參數組合。圖 1.6(a)顯示 Zhang, Q. 等人[53]先固定高度及角度得知液滴在流速(即液滴滴落頻率)低的情況下會有最大的輸出電壓與電流，隨著低落頻率越高則輸出結果越低。圖 1.6(d)為固定滴落頻率後再改變 DEG 傾斜角度。圖 1.6(e)-(f)顯示當傾斜角度為 30° 時，有最大的輸出電壓與輸出電流。最終於圖 1.6(g)中再固定滴落頻率及角度，當液滴墜落高度越高時則輸出電壓與電流越大。圖 1.7 為 Zhang, N.等人的研究結果，他們先尋找最佳的液滴低落頻率為 4.5

Hz。固定滴落頻率為 4.5 Hz 後，再測試最佳墜落高度與液滴的體積[67]，墜落高度越高且液滴體積越大時有最高的輸出電壓。但單獨優化某個參數，可能無法尋找到整體最佳的電功率輸出，如 Zhang, Q. 等人的研究[53]，從文獻當中無法知曉若是 DEG 傾斜角度為 30° 的情況下是否在高滴落頻率的時候同樣有最好的輸出表現。基於這樣的疑慮，本研究嘗試地毯式地搜尋所有實驗參數組合產生的電力輸出，再藉結果評論這個作法的必要性，本研究將地毯式搜索所有實驗參數的關係。

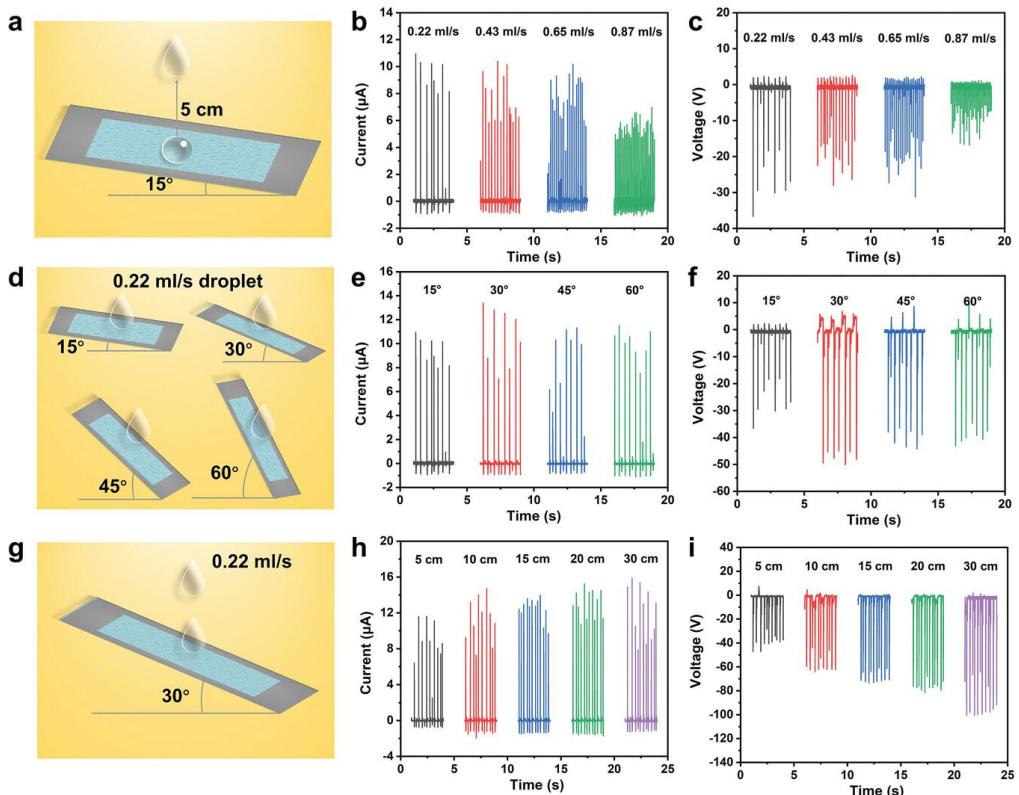


圖 1.6、Zhang, Q. 等人的實驗順序[53]

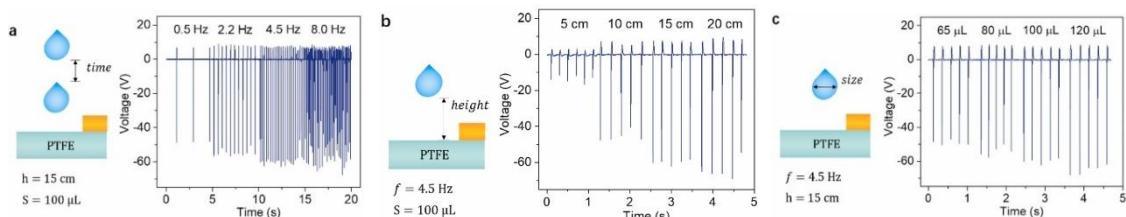


圖 1.7、Zhang, N. 等人的實驗順序[67]

大多數研究皆是針對不同實驗參數來比較 DEG 的發電能力，只描繪 DEG 等效電路，且僅說明 DEG 的等效電路的架構為三個電容與數個電阻組成所組成：介電層的電容、介電層與液滴接觸後產生的電容，以及液滴與上電極接觸時所產生的

電容，而電阻則包含液滴的電阻、PTFE 的電阻及不同材料之間的電阻等，但實際電路的數值並未代入計算，且未將等效電路與實驗相互映證[47, 48, 60, 68]，對 DEG 的等效電路模型幾乎深入沒有研究。文獻中等效電路架構由電阻與電容所組成，兩者皆須納入考量，在文獻阻抗匹配的研究中，Wang, L. 說明負載在 $325\text{ k}\Omega$ 時輸出功率比其他負載時大，如圖 1. 5(c)所示[69]。Xu, W. H. 等人和 Yang, Y. W. 等人的研究表明，DEG 的阻抗匹配約為 $1\text{ M}\Omega$ [45, 59]。Gwon, G. 等人則發現 DEG 阻抗匹配結果為 $1.5\text{ M}\Omega$ [68]。Wu, H. 等人阻抗匹配為 $2\text{ M}\Omega$ ，如圖 1. 5(b)所示[63]，Zhu, L. 等人阻抗匹配同樣為 $2\text{ M}\Omega$ [74]。圖 1. 5(a)中顯示 Li, X. 等人也在負載為 $30\text{ M}\Omega$ 時獲得了阻抗匹配的結果[50]。但文獻中由於 DEG 的材料與製程些許不同，阻抗匹配沒有統一的結果，無法直接比較及套用文獻的研究結果。為找到 DEG 的阻抗匹配為何，本研究測試 DEG 在串聯不同電阻的情況下，計算 DEG 的輸出結果，並將最大輸出功率的串聯電阻代入 DEG 模型中。

在建立 DEG 等效電路模型的研究中，大多以電容作為 DEG 的模型的基礎。Wu, H. 等人首先將水滴與 DEG 之間的所有電容模擬為一個時變電容 $C(t) = C_d \cdot A(t)$ ，其中 C_d 為單位面積電容，透過介電常數與介電層厚度計算得出，而水滴與 DEG 的接觸面積 $A(t)$ 則是透過高速攝影機求得，Wu, H. 等人將時變電容作為 DEG 初始電荷，透過面積與初始電荷的變化建立電流模型[70]。後續 Costanzo, L. 等人也將 DEG 的等效電路模型與實驗進行交互比對[72]，為避免計算上可能產生誤差，DEG 與液滴之間的所有電容被模擬成一個時變電容，Costanzo 等人透過改變負載的電阻與電容，計算出時變電容作為 DEG 的等效電路，透過外接不同負載的電容與電阻，應證實驗的結果。同樣對 DEG 的等效電路建立模型[65]，其將 DEG 的放電過程分成 4 個階段，液滴接觸上電極的瞬間、液滴滑過上電極的時間、液滴在上電極收縮的時間，以及液滴離開上電極後的時間，將這 4 個階段分別擬合，再組合 4 個擬合曲線，作為 DEG 等效電路的模擬，但 Sriphan 等人的研究僅將各種 DEG 可能的參數放入擬合曲線當中，並無放電模型的物理意義，因此無法使用其模型做為參考。在 Wu, H. 等人[70]的模型中，電容是透過計算求得，且電流模型與 DEG 的電容的關係不完全為函數關係，需重複修正初始電荷。Costanzo 等人[72]的模型，僅可在不同負載的情況下進行模擬，若是改變 DEG 本身的條件，包含液滴的參數改變、介電層的厚度與材料改變，便無法透過其模型做預測。

各個不同實驗參數對於 DEG 輸出的影響甚大，而為比較各文獻中的問題與爭議，本研究將進行以下測試：一、進行取樣頻率的測試，確認資料的真實性。二、改變液滴墜落高度，了解面積與電壓的關係。三、透過改變液滴墜落高度、液滴濃度、DEG 的介電層厚度以及串聯不同電阻測試，尋找 DEG 最佳的輸出結果，並比較不同參數的實驗流程，說明地毯式參數搜尋的必要性。四、計算文獻與實驗中，峰值電壓功率與平均電功率的比例，了解 DEG 實際電功率。五、本研究將透過電路學了解 DEG 的電路樣態[76]，同時，本研究將參考 Wu 與 Costanzo 等人的模型[70, 72]，建立一個簡易的線性發電模型，用以模擬各個 DEG 條件下可能的輸出結果，並希望藉此模型與實驗參數預測 DEG 的發電過程。

第二章 實驗方法



本研究藉取樣頻率校正實驗、液滴發電實驗、液滴面積量測實驗以及電容量測實驗探討示波器取樣頻率、液滴墜落高度、液滴濃度、負載電阻、介電層厚度對DEG輸出電力的影響，並量測電壓訊號、DEG電容、液滴接觸面積、液滴導電度等性質，希望藉這些性質，為DEG建立簡單的模型。下文中，§2.1定義本研究中所有實驗中控制、觀測及推求的參數。§2.2介紹DEG詳細實驗參數與測試平台的功能。§2.3說明取樣頻率校正實驗與比較方法。§2.4說明DEG發電實驗流程。§2.5呈現電壓訊號分析與計算功率的方法。§2.6介紹液滴在DEG上的影像與電壓對比的實驗，了解液滴接觸面積與電壓的關係。§2.7介紹DEG電容測量實驗的設置及流程。§2.8介紹DEG的頻率響應，以促成後續模型的建立。§2.9量測不同液滴濃度的導電度，利用量化的數值比較文獻與實驗的結果。DEG模型的建構方法則匯整於第三章。

2.1 研究問題與參數定義

DEG的研究參數眾多，實驗採用了其中五種不同的參數。如圖2.1所示，DEG傾斜角度 θ (tilting angle)固定為 45° ，因為 θ 為定值，液滴接觸上電極時在PTFE上的面積 A_{drop} (contact area)僅受到液滴墜落高度 H (falling height)的影響， H 為液滴釋放位置至DEG的垂直距離。當液滴接觸上電極時，可在負載(load)觀測到電壓訊號 V_{osc} 。氯化鈉(NaCl)水溶液濃度、PTFE厚度 h (thickness)以及外接串聯電阻 R_{load} (load resistance)、接觸面積 A 直接影響 V_{osc} 的量測結果。而在實驗初期，本研究發現取樣頻率 f_s (sampling frequency)會影響 V_{osc} 的記錄。因此，本文將以上述五種影響 V_{osc} 量測結果的參數進行實驗，並根據 V_{osc} 推算DEG的電功率。

如圖2.1所示，本研究使用串聯外接電阻 R_{load} 的形式量測DEG的阻抗匹配結果。文獻是以儀器並聯電阻的方式量測DEG的阻抗匹配，因文獻儀器的阻抗為 $T\Omega$ 等級，當外接電阻並聯儀器時，等效電阻會接近但小於並聯的電阻，文獻透過等效電阻量測DEG阻抗匹配的結果。實驗不以外接電阻並聯示波器是因實驗所使用的示波器阻抗為 $M\Omega$ 等級，無論示波器並聯電阻的大小為何，等效電阻皆無法超過示波器的阻抗，使示波器量測到的分壓 V_{osc} 變小。而示波器串聯外接電阻可增加等

效阻抗以匹配 DEG 的阻抗，且總電壓可根據克西荷夫定律與示波器量測到的分壓 V_{OSC} 求得。因此本研究使用串聯外接電阻的方式量測 DEG 阻抗匹配的結果。

圖 2.1 為參照 Xu, W. 等人的研究[45]自製 DEG 的示意圖，將不同厚度的聚四氟乙烯(Polytetrafluoroethylene, PTFE)與參雜氟的氧化錫導電玻璃(Fluorine-doped Tin Oxide, FTO，銳隆光電有限公司製造)裁剪成 $25\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ ，並使用聚醯亞胺(Polyimide, PI)雙面膠帶將作為介電層的 PTFE 與作為下電極的 FTO 導電玻璃貼合，再將銅箔膠帶裁剪為 $5\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ ，將其貼在 PTFE 上作為上電極，以完成 DEG 的製備。

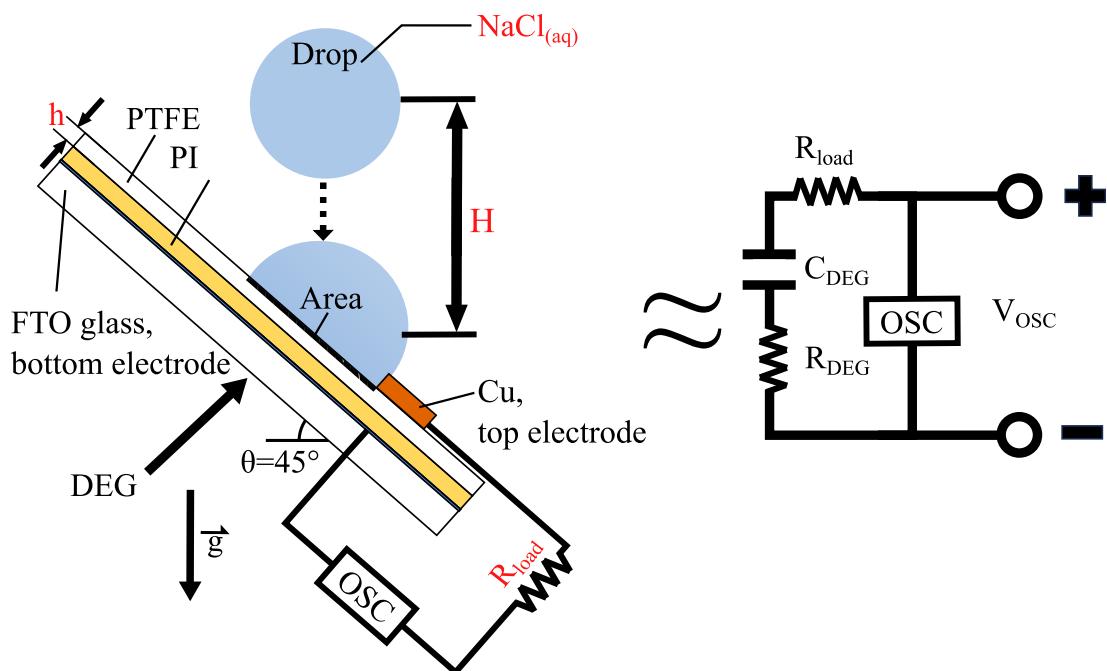


圖 2.1、DEG 參數與實驗示意圖

2.2 取樣頻率校正實驗

本研究在一開始進行了示波器取樣頻率測試的實驗，以 8 公分墜落高度、 45° 傾斜角度，測試 1 kHz - 100 kHz 取樣頻率量測 DEG 電壓訊號的效果。實驗初期，本研究發現示波器與靜電計(型號：Keithley 6514，Tektronix 製造)量測數據時，若時基(time base)增加而不調整總資料點數，取樣頻率下降會導致儀器記錄到的電壓訊號會高低起伏，使量測結果重複性低。所有實驗以每個取樣頻率量測兩次，順序從低取樣頻率到高取樣頻率，再從高取樣頻率回到低取樣頻率。液滴成分為純水，示波器接受 DEG 產生的訊號，其取樣頻率透過調整時基與紀錄長度(record length)



設定取樣頻率，藉[Acquire]按鍵進入[Record length]以改變資料點數，其中總資料點數能夠選取一千到一百萬個點數，在Horizontal處改變[Scale]可以變更時間間距，將兩者相互對應，可以獲得相對應的取樣頻率。本實驗比較各組取樣頻率實驗的最大峰值電壓比例，將每組實驗的最大峰值電壓除以取樣頻率實驗中最大的峰值電壓。測得的電壓訊號被用來計算各組實驗的峰值電壓平均值(average peak voltage, V_{ap})與標準差 σ 值， σ 的定義為：

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_{p,i} - V_{ap})^2} \quad (2.1)$$

式中 N 為峰值電壓個數， $V_{p,i}$ 為峰值電壓。在計算出總體標準差後，尋找不同取樣頻率所記錄的峰值電壓變異係數(coefficient of variation, CV)：

$$CV = \frac{\sigma}{V_{ap}} \quad (2.2)$$

如下文§4.1 所載，取樣頻率過低會造成資料缺失，而取樣頻率過高則使資料過於龐大。本研究藉變異係數的比例和資料點數量確保訊號量測準確的同時不使量測資料過於龐大。而為比較不同取樣頻率的實驗差異，式(2.3)計算取樣頻率之間的平均絕對百分比誤差(mean absolute percentage error, MAPE)：

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{V_{lf,i} - V_{hf,i}}{V_{hf,i}} \right| \times 100\% \quad (2.3)$$

式中的 n 為低取樣頻率的資料點， V_{lf} 為低取樣頻率的電壓訊號， V_{hf} 為對應時間點的高取樣頻率電壓訊號。

2.3 液滴發電器測試平台

本研究測試 6 種不同厚度的 PTFE 薄膜、9 種不同液滴墜落高度、4 種不同濃度的氯化鈉水溶液，以及 4 種的負載電阻，共 864 種參數組合，如表 2.1 所列。在不同參數組合的實驗中，每筆實驗紀錄時間為 50 秒，液滴的滴落頻率約為 2 Hz。

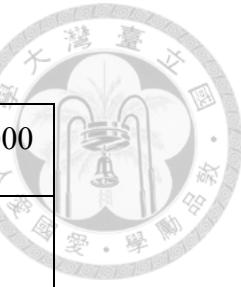


表 2.1、發電實驗參數表

PTFE 厚度(μm)	30、80、100、250、500、1000
液滴墜落高度(cm)	2-18，以 2 cm 為間隔
氯化鈉水溶液濃度(M)	1、0.1、0.01、0.001
外接電阻($M\Omega$)	0、1、10、100

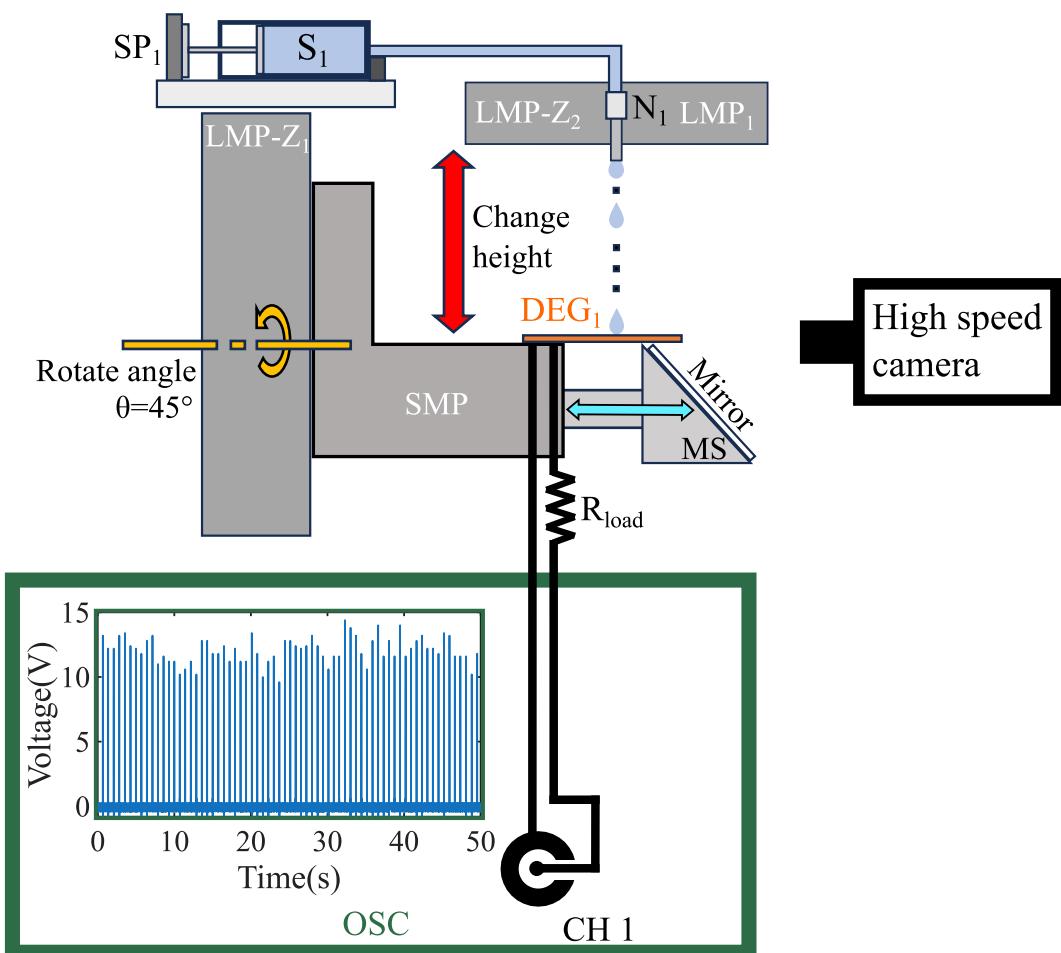


圖 2.2、DEG 測試系統示意圖

如圖 2.2 所示，本研究建置的 DEG 測試系統由發電模組、移動模組與測量模組所組成。測試系統中的發電模組包含液滴發電器 DEG_i 、注射泵 SP_i (syringe pump，型號：SP201，聯勝儀器有限公司)、針筒 S_i (syringe)、14G 針頭 N_i (needle)。移動模組由數個移動平台所組成，包含控制液滴下落位置的線性移動平台 LMP_i (linear

motion platform，型號：TSS120-2-series，匠星光電儀器企業股份有限公司製造)、控制液滴墜落高度的 Z 軸線性移動平台 LMP-Z_i、控制 DEG 傾斜角度的旋轉平台 SMP(swivel motion platform)，以及鏡座 MS(mirror stage)。本研究中鏡子(mirror)被黏貼到鏡座上以供拍攝液滴在 DEG 上的運動行為，同時同步拍下液滴的側視圖與俯視圖。測量模組包含一台示波器(型號：TDS-1104B，固緯電子實業股份有限公司製造)，即圖中的 OSC，以及高速攝影機(型號：HX-3E，NAC Image Technology 製造)。在系統運轉時，本研究將透過發電模組中的針頭和注射泵產生液滴，接著控制移動模組改變液滴的落下位置，並開啟注射泵擠出液滴，使液滴的位能轉化為動能，最終液滴滴落在 DEG 表面上。同時，DEG 將連接至測量模組，以觀察、記錄電壓訊號與液滴在 DEG 上的運動行為。

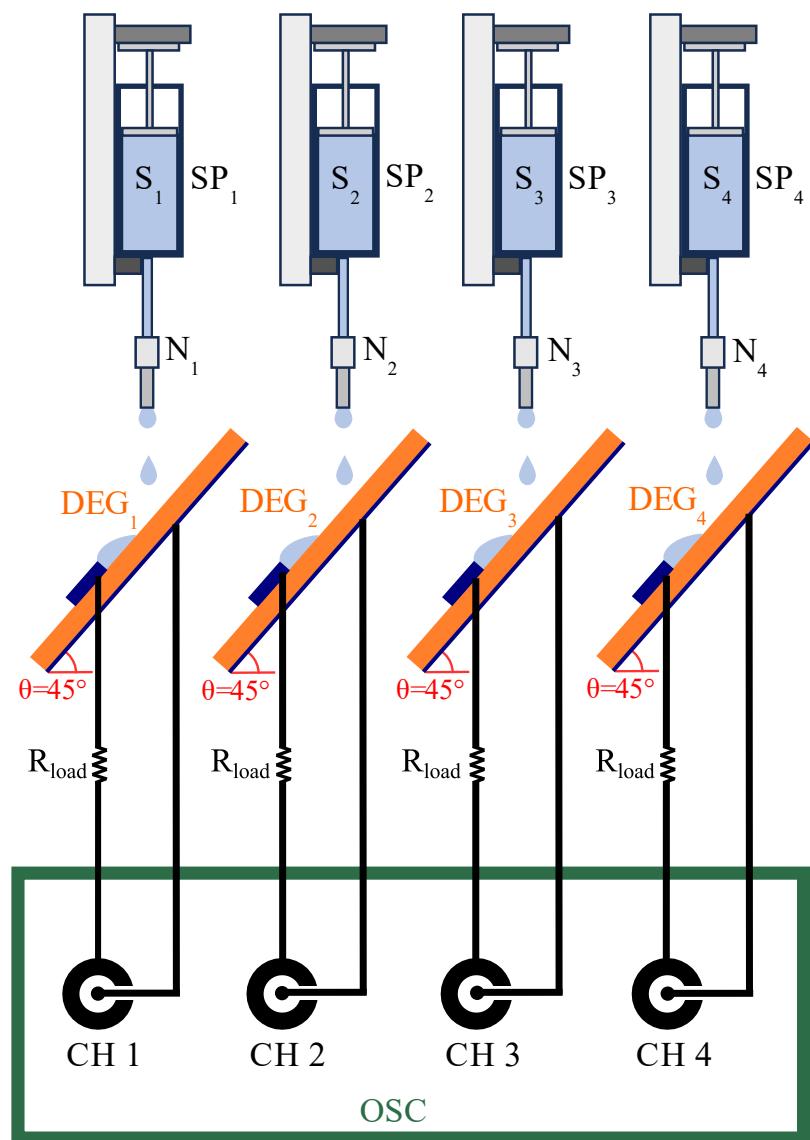


圖 2.3、液滴發電器測試系統(4X)示意圖

圖 2.2 並非本研究 DEG 測試系統的完整示意圖。由於本研究採用的示波器可以同時測量並記錄 4 組實驗資料，相關研究最多得以同時觀測 4 種不同濃度氯化鈉水溶液液滴的電力訊號。如圖 2.3 所示，若將鏡座替換為 DEG 乘載平台，乘載平台可一次放置 4 個 DEG。乘載平台由厚度為 5 mm 的壓克力板裁切成，尺寸為 5 cm×35 cm。同時，此研究裝置可改變串聯電阻 R_1 ，而測量完不同串聯電阻的結果後，更改液滴墜落高度並重複改變串聯電阻的實驗。該實驗裝置使本研究得以縮短約 60 % 的實驗操作時間。

2.4 液滴發電實驗

確認適當的取樣頻率後，本研究進行液滴發電實驗。實驗的第一步是調配出濃度為 1 M、0.1 M、0.01 M、0.001 M 的氯化鈉水溶液。第二步是將氯化鈉水溶液放入 60mL 的注射筒中，並安裝注射筒在注射泵上。注射泵的流速為 5 mL/s，針頭尺寸為 14 G，對應 35.9 μL 的液滴體積。實驗第三步是將 DEG 放到乘載平台上，調整旋轉平台 SMP，使 DEG 與桌面產生 45° 的夾角。第四步是調整 Z 軸線性移動平台，改變針頭與 DEG 垂直距離，每次以 2 公分為間距，將液滴墜落高度設定為 2 公分到 18 公分。落下高度越高越容易使液滴撞擊 DEG 表面時破裂，18 公分已足以使 35.9 μL 的液滴噴濺出小液滴，所以本研究設定最大落下高度為 18 公分。第五步是使用 X 軸與 Y 軸線性移動平台，將液滴的墜落位置調整在 DEG 的中心位置。第六步是將示波器探棒正極與 DEG 的上電極連接，DEG 下電極則與探棒負極連接。第七步是串聯以下三種碳膜電阻 1 $\text{M}\Omega$ 、10 $\text{M}\Omega$ 、100 $\text{M}\Omega$ ，以尋找 DEG 阻抗匹配的結果。第八步是將儲存的資料透過 MATLAB 分析各個條件下所產生的功率。

2.5 電功率計算方法

本研究比較兩種電功率，第一種為各液滴產生的峰值電壓對應的功率取平均後的平均峰值功率，第二種為所有電壓訊號對應的平均峰值功率。兩種功率皆是透過 MATLAB 從量測資料中提取與計算的結果，分述如下。電功率計算的第一步是將資料讀取至 MATLAB 中並繪製電壓與時間關係圖。每筆資料記錄時長共 50 秒與 100 萬個取樣點，每組實驗將有 100 顆液滴所產生的電壓訊號。每個電壓訊號



對應的資料點即為電壓訊號指標 (index) 的序列。

如圖 2.4 所示，為尋找發電模組所產生之電壓訊號，第二步是先搜尋整組資料的最大電壓值，將設定電壓的閾值為最大電壓值的 0.3 倍，找出所有大於閾值的電壓值。第三步是計算相鄰電壓訊號的指標，若是相鄰指標斜率大於 1，則將紀錄為下個電壓峰值，同時對每個液滴所產生的電壓訊號進行分組。第四步是在每個小組當中，會進行一次峰值電壓的判斷，當尋找到峰值電壓後，回到原始資料當中，以局部峰值電壓指標為基準，向前尋找到 0 V 的位置，為液滴一接觸到上電極的開始時間 t_1 ，向後尋找到 0 V 的位置，為電量釋放完畢的時間點 t_2 。

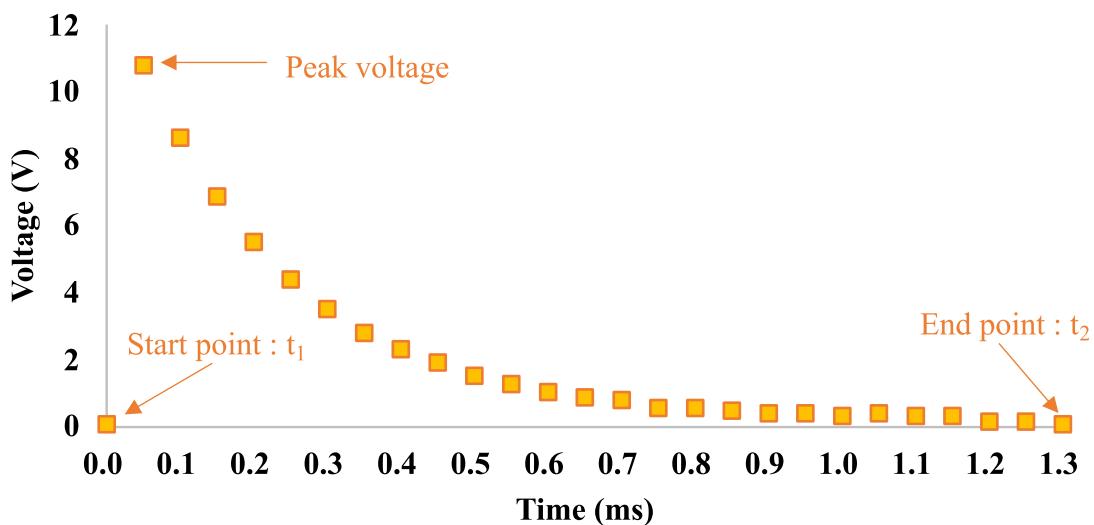


圖 2.4、液滴電壓訊號。液滴濃度：1 mM、 $h = 100 \mu\text{m}$ 、 $H = 10 \text{ cm}$ 。

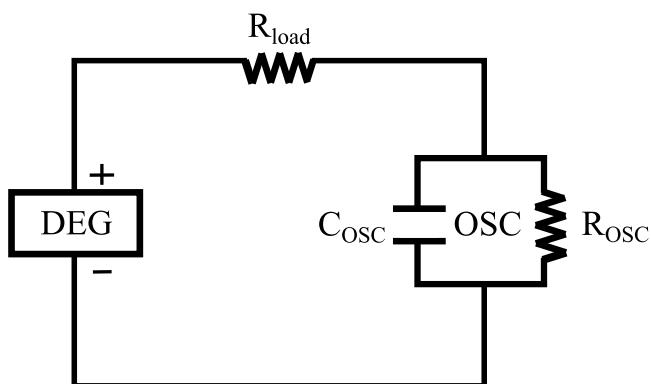


圖 2.5、DEG 電路圖

如圖 2.5 所示，示波器可被視為電阻 R_{OSC} 與電容 C_{OSC} 的並聯等效電路，並連接到 DEG，而在示波器與 DEG 之間串聯的碳膜電阻表示為 R_{load} 。電功率計算的第五步是將 MATLAB 提取出的峰值電壓訊號，並以克西荷夫電流定律計算流經示波



器的瞬時電流 I_{inst} ：

$$I_{inst}(t) = \frac{V_{osc}(t)}{R_{osc}} + C_{osc} \frac{dV_{osc}(t)}{dt} \quad (2.4)$$

且流過外接電阻的電流 $I_{R_{load}}$ 等於流過波器的電流 I_{inst} ：

$$I_{R_{load}} = I_{R_{osc}} + I_{C_{osc}} = I_{inst} \quad (2.5)$$

再以流經 R_{load} 的電流最大值 I_{peak} 與峰值電壓 V_{peak} ，計算峰值電壓的功率 P_{peak} ：

$$P_{peak} = I_{peak}^2 \cdot R_{load} + \frac{V_{peak}^2}{R_{osc}} \quad (2.6)$$

第六步是計算平均電功率，DEG 產生的能量 E_{DEG} 可以表示為：

$$E_{DEG} = \int_0^{t_{all}} I_{inst}(t)^2 \cdot R_{load} + \frac{V_{osc}(t)^2}{R_{osc}} dt \quad (2.7)$$

再除以整個資料的全程時間 $t_{all} = 50$ 秒，計算平均電功率並比較各個參數下的功率：

$$P_{aver} = \frac{E_{DEG}}{t_{all}} \quad (2.8)$$

第七步是比較峰值電壓功率 P_{peak} 與平均電功率 P_{aver} 的比例，以了解 DEG 的實際發電功率。第八步是不同實驗參數組合的平均電功率以 MATLAB 的 contour 功能繪製出等高線圖，以比較不同參數組合的結果。

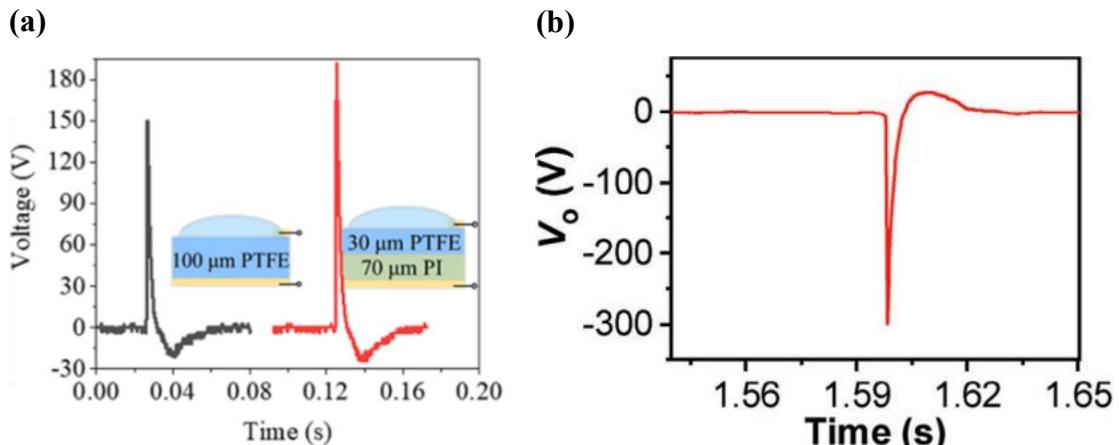
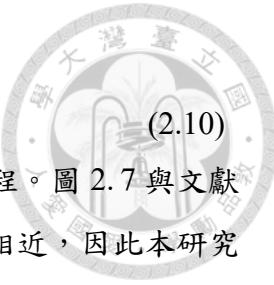


圖 2.6、文獻的 DEG 發電過程[47, 57]

最後，本研究比較文獻與實驗的 DEG 發電過程。圖 2.6 (a)-(b)為文獻中 PTFE 厚度為 100 μm 的發電過程，因文獻使用負載為 10 $\text{M}\Omega$ 的示波器進行量測，本文以外接 10 $\text{M}\Omega$ 電阻的實驗進行比較。根據式 2.5 與歐姆定律， R_{load} 的電壓 V_{load} 為：

$$V_{load} = I_{R_{load}} \cdot R_{load} \quad (2.9)$$



再根據克西荷夫定律，總電壓 V_{total} 為示波器與負載電壓的總和：

$$V_{total} = V_{osc} + V_{load} \quad (2.10)$$

藉式 2.10 的 V_{total} 得到圖 2.7，為外接 $10\text{ M}\Omega$ 電阻的實驗發電過程。圖 2.7 與文獻中的 DEG 發電時間相似，約為 2.5 毫秒，且峰值電壓與波形也相近，因此本研究得以再現文獻的 DEG 發電過程。

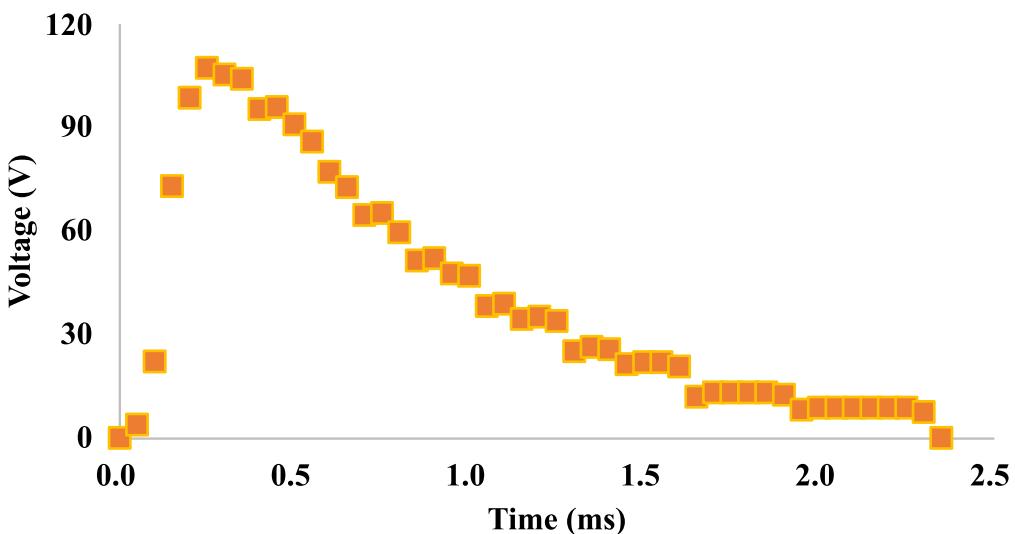


圖 2.7、DEG 的發電過程

2.6 液滴接觸面積測量實驗

為分析液滴接觸上電極時的面積與電壓的關係，本研究使用高速攝影機拍攝液滴在 DEG 表面上運動的影像。如圖 2.8 所示，架設實驗的第一步是將 DEG 乘載平台卸下，並安裝鏡座，將鏡子黏貼至鏡座平面上，DEG 黏貼至旋轉平台上，鏡子與 DEG 將形成 45° 夾角，鏡子將反射 DEG 仰視圖於高速攝影機上。第二步是將 DEG 連接到示波器的 Channel 1 上，並開啟注射泵擠出液滴使電壓訊號產生。

第三步是安裝高速攝影機到攝影機支架上，將高速攝影機連接到電腦上的 HXlink 程式，同時將高速攝影機 Trigger 的 BNC 接孔連接到一個手動開關，將開關繼續連接到示波器的 Channel 2 上，圖 2.9 為連接方式示意圖，示波器 Channel 2 的訊號將顯示 5 V 的持續訊號。第四步是調整高速攝影機位置至可看到於鏡子內的 DEG 仰視圖，並調整鏡頭與光圈使得 DEG 仰視圖的液滴影像能在電腦上清晰顯示。拍攝 DEG 俯視圖需將 DEG 黏貼至鏡座上，同樣調整鏡頭與光圈使的 DEG 的俯視圖能夠清晰顯示在電腦上。

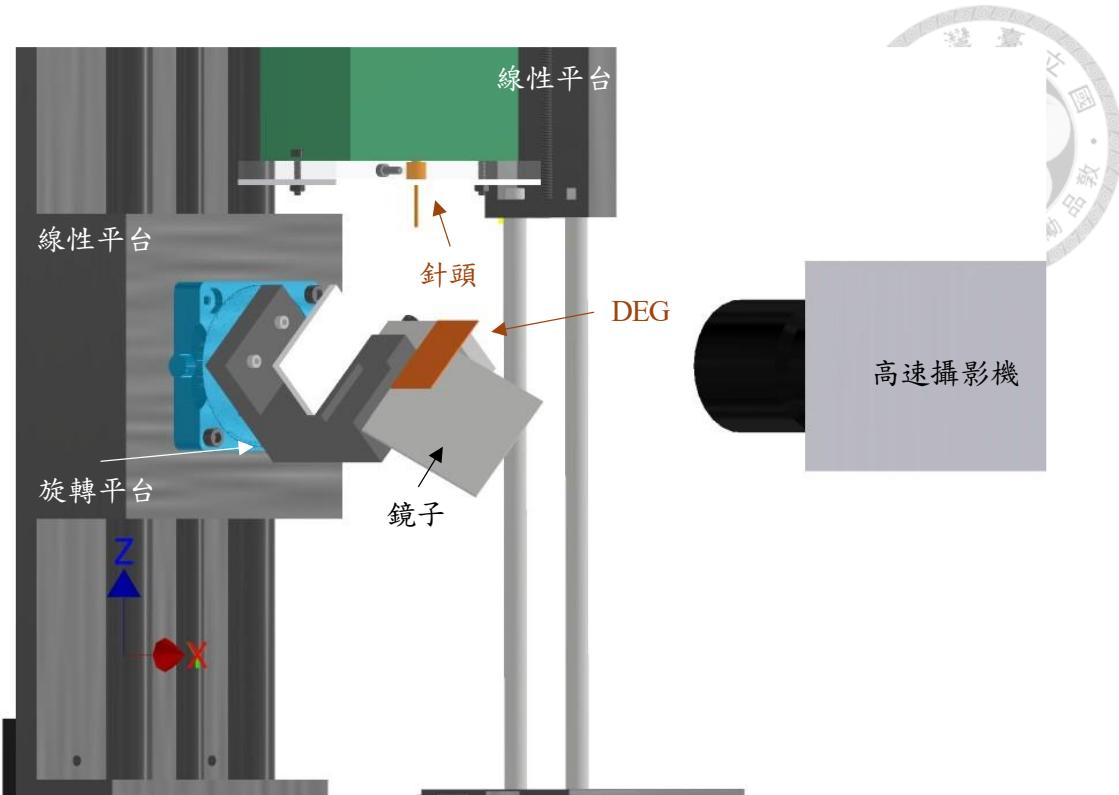


圖 2.8、高速攝影機架設圖

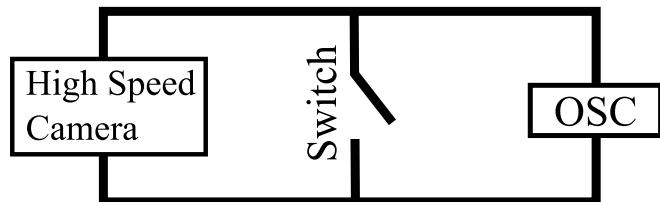


圖 2.9、高速攝影機連接示意圖

待高速攝影機校正完後，實驗的第一步是切換開關啟動高速攝影機 Trigger，在示波器 Channel 2 可以看到電壓會從 5 V 下降為 0 V，而該時間點為 Trigger 開始的時間，同時將紀錄 Channel 1 的電壓訊號。第二步是時間序將透過 Channel 2 的 Trigger 訊號調整，由 5 V 轉變成 0 V 的時間點設定為零點，透過§2.3 的方法尋找 Channel 1 峰值電壓的訊號指標，將其匹配到 Channel 2 的訊號。第三步是將影像的張數與 Channel 2 的訊號做比較，1 張影像對應的 Channel 2 訊號為 4 個點，尋找液滴碰觸上電極時的影像，該影像將使用 ImageJ 分析液滴接觸面積。

為計算液滴在碰觸上電極時的面積，本研究在 ImageJ 上將拍攝過程中沒有液滴的其中一張影像作為背景，將液滴碰觸上電極時的影像扣除背景，僅留下液滴的影像。液滴的影像透過 ImageJ 轉換為 8-bits 灰階圖，液滴影像與其他部分根據灰



階圖閾值不同可明顯區分，液滴影像的像素點將透過 ImageJ 中的 Measurement 計算。為了與實際長度做比對，本研究將未含液滴的影像多次計算 DEG 的面積，並取平均值，換算像素點與實際面積的比值，帶回液滴影像的像素面積，計算出液滴實際面積。

2.7 液滴發電器的等效電容

本研究透過阻抗分析儀(型號:E4990A,是德科技有限公司製造)測量 DEG 的等效電容，實驗的第一步是用 75 % 酒精擦拭 DEG 表面，並確認 DEG 的上電極無氧化現象。第二步是從[Display]選項中的[Num Of Traces]設定需要觀察的參數數量，並在[Allocate Traces]設定視窗的排列方式。第三步是回到[Menu]點選[Measurement]設定需要觀察何種參數。因本研究需測量 DEG 的電容，故選擇並聯電容 C_p 、總阻抗 $|Z|$ 、相位角 θ_z 為觀測參數。因 DEG 的阻抗在 $100\text{ K}\Omega$ 以上，量測時電容被設定為並聯電容而非串聯電容 C_s 。第四步是將每個視窗調整 y 軸比例，從[Meau]中的[Format]調整[Y-Axis]成[LOG]的顯示方式。第五步是從[Stimulus]中調整測量頻率，設定[Start]為 20 Hz 與[Stop]為 20 MHz，這兩個頻率是 E4990A 的上下限頻率。為使測量數值更準確，第六步是從 E4990A [Menu]的[Average]選項中的[Point Average]設定為[ON]，以便多次測量每個頻率下的數值並取平均值，並在[Sweep Setup]中的[OSC level]設定電壓訊號為 20 mV，以確保電壓訊號與系統響應的線性關係，同時因為測量頻率範圍較大，因此在[Sweep Setup]中的[Sweep tape]設定為[Log Freq]。

E4990A 設定好後還需校正避免過多雜訊。校正第一步是裝上接頭 16047E，並將一條導線連接 16047E 的正負極使其短路，從[Menu]的[Cal Compen]點選[Fixture Compen]，點選[Short]，待機器校正完後，將導線拆除。第二步是將 DEG 的正極連接到 16047E 的正極，或是 DEG 負極連接到 16047E 的負極，並點選[OPEN]，待機器校正完後，將 DEG 另一端電極連接到 16047E。進行實驗時，第一步是到[Menu]點選[Trigger]，先後點選[Trigger]內的[Single]與[Trigger]，即可開始測量數據。第二步是點選要儲存的數據視窗，並從[Menu]的[Save/Recall]中點選[Save Trace Data]儲存資料。每次更換不同 PTFE 厚度的 DEG 時，皆會重複校正阻抗分析儀。測量到的電容值將代入§3.1 的模型使用。



2.8 液滴發電器的頻率響應

本研究將藉波德圖(Bode plot)了解 DEG 的電路特性。DEG 是一片較小的上電極與一片較大的底部電極，以及一層介於電極間的介電層所組成。這使得 DEG 可被視為一個平行板電容。然而，與理想電容不同的是，DEG 的介電層材料及其電極在實際操作中存在電阻損耗。為了更精確地描述 DEG 的電路行為，本研究將 DEG 假設為一個電容串聯電阻的 RC 電路。

根據電路學理論[76]，當電阻與電容以串聯方式連接，即形成典型的一階 RC 電路，如同低通濾波器。一階 RC 電路在低頻段時，由於電容器呈現較高的容抗，大部分的輸入電壓作用於電容，而輸出電壓與輸入電壓之間的相位差接近零，因此增益幾乎無衰減。然而，隨著輸入頻率逐漸升高，電容的容抗逐漸減小，導致大部分的分壓在串聯電阻上被消耗，使得輸出電壓開始下降，且輸出電壓相位逐漸落後於輸入電壓。在高頻段時，電容的容抗趨近於零，等效上近似為短路，導致大部分電壓作用在電阻上，使輸出電壓更低，此時相位角則趨近-90°，如圖 2. 10 所示。DEG 被假設為電容與電阻串連的元件，因此§2.7 量測 DEG 相位角 θ_z 的結果預期在高頻段時與圖 2. 10 近似。

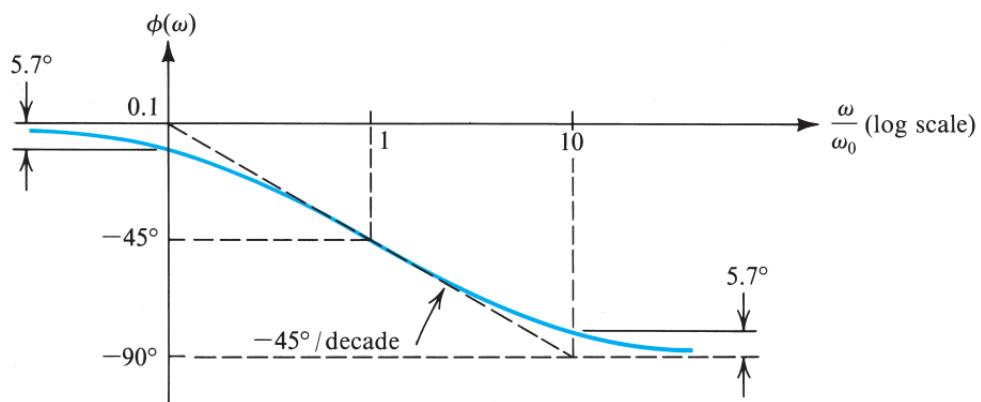


圖 2. 10、一階 RC 電路相位角波德圖[76]

根據圖 2. 11 的波德圖分析，一階 RC 電路的增益響應曲線在截止頻率(cutoff frequency, f_c) -3dB 之後呈現每十倍頻率下降 20 dB (-20 dB/decade)的線性遞減。若已知電阻 R 或是電容 C 的數值，以截止頻率 $f_c = \frac{1}{2\pi RC}$ 可推求 DEG 的電容與電阻，且根據增益曲線以-20 dB/decade 線性遞減的結果得以驗證 DEG 等效為一階 RC 電路，透過波德圖進行頻率響應分析，以波德圖所提供的理論分析結果，進一



步理解 DEG 的等效電路。

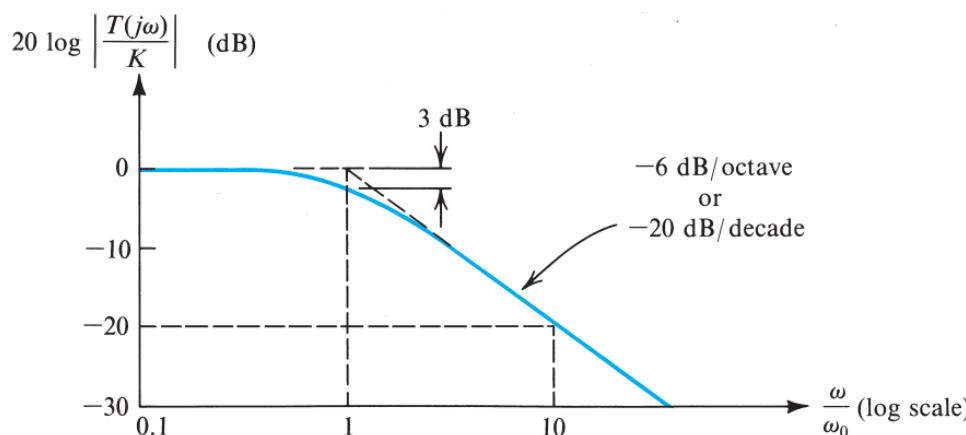


圖 2.11、一階 RC 電路增益波德圖 [76]

2.9 液滴導電度

不同濃度液滴的導電度由導電度計(型號：CTS-405，高極電子有限公司製造)量測。首先，本研究從保養液中拿出導電度計的電極，以去離子水清洗電極表面的保養液，輕微甩動電極將多餘水份去除，並使用拭鏡紙輕柔擦拭電極表面剩餘水份。校正的第二步是開啟導電度計的校正模式，並將乾淨的電極放入裝有電導度值 $1413 \mu\text{S}/\text{cm}$ 標準液的小瓶中，輕微搖晃標準液瓶身，儀器將自動辨識標準液之目標值。當讀數穩定顯示後，螢幕將顯示 Calibration 字樣閃爍，最終出現 END 圖示，代表校正成功，儀器將返回測量模式。

量測溶液導電度時，需將不同濃度氯化鈉水溶液倒入 100 mL 的燒杯中，並以去離子水清洗導電度計的電極。電極表面的水份透過拭鏡紙去除後，即可測量不同氯化鈉水溶液的濃度。為避免交叉污染水溶液，在每次更換不同濃度的水溶液時，必須以去離子水清理電極。測量水溶液導電度時，須將電極完全沒入水溶液中，並稍微搖晃燒杯或電極，待儀器上的數值變動小於 $0.01 \text{ mS}/\text{cm}$ 時紀錄該溶液的導電度，每次重複測量三組並平均數值。測量完所有導電度後，電極須再以去離子水清洗、擦乾後放回保養液中。

第三章 液滴發電器電路模型



為模擬 DEG 的發電行為，本研究利用電路學理論建立一套發電模型，用來描述系統的放電過程。建構該模型的本意是要預測不同液滴接觸面積所產生的電壓曲線，同時檢視線性電路理論是否足以描述 DEG 的行為。下文中，§3.1 展示 DEG 充電行為與放電行為結合的模型。§3.2 以時間步距驗證模型的收斂性。

3.1 線性電路模型

DEG 電路學模型及重要參數如圖 3.1 所示，本研究的模型有 5 個假設，第一個假設是 DEG 的 PTFE 藉摩擦起電使表面電荷 Q_{sur} 達到飽和狀態。第二個假設是因為 DEG 產生電壓的速度遠大於液滴在 DEG 上運動的速度，液滴在接觸上電極時的面積 A_{drop} 幾乎不會改變，與 Costanzo 等人假設相同，令 A_{drop} 為一常數[72]，且 A_{drop} 是模型的重要參數，其包含了液滴墜落高度與 DEG 傾斜角度的影響。由於 DEG 類似於平行板電容，當液滴接觸上電極時，DEG 像平行板電容一樣的放電方式，因此第三個假設是模型的 DEG 電路等效為電容 C_{DEG} 進行放電， C_{DEG} 為 §2.7 量測 DEG 電容的結果。第四個是假設系統的模型為 DEG 電源對示波器的等效電路充電，如同示波器消耗電力，因此將 k 假設為示波器的 RC 電路響應時間的倒數，且 DEG 放電電壓全部由示波器電阻 R_{OSC} 消耗。第五個假設是 DEG 放電過程會消耗表面電荷，直到表面電荷消耗完畢。

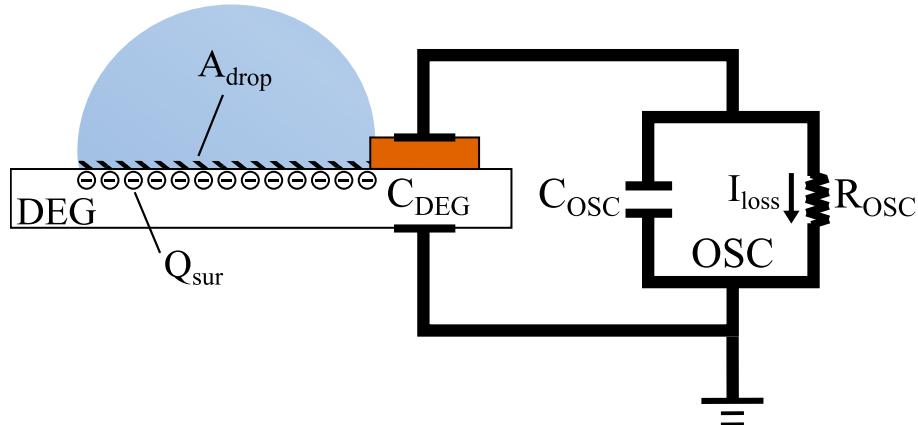


圖 3.1、電路模型示意及模型相關參數

模型的第一步是計算 DEG 表面電荷數值，S. Liu 等人提到當 PTFE 表面電荷



達到飽和時的表面電荷密度 $D = -27.5 \mu C/m^2$ [27]，根據第一個與第二個假設將表面電荷密度代入式(3.1)中，DEG 表面初始電荷可視為：

$$Q_{sur} = |D| \cdot A_{drop} \quad (3.1)$$

模型的第二步是因 DEG 會像平行板電容一樣的放電方式，放電電壓可以表示為：

$$V_{dis}(t) = \frac{Q_{sur}(t) \cdot (1 - e^{-kt})}{C_{DEG}} \quad (3.2)$$

$$k = \frac{1}{R_{osc} \cdot C_{osc}} \quad (3.3)$$

其中 $(1 - e^{-kt})$ 項模擬液滴在碰觸到 DEG 上電極時，電壓快速上升的表示方式， t 為時間間距，而時間步距設定為 1 毫秒(ms)， k 為示波器的 RC 電路響應時間的倒數。根據第四個假設 DEG 放電電壓全部由示波器電阻 R_{osc} 消耗，模型的第三步是透過歐姆定律計算流失的電流 I_{loss} 為：

$$I_{loss}(t) = \frac{V_{dis}(t)}{R_{osc}} \quad (3.4)$$

模型的第四步是透過流失的電流計算在時間間距內的轉移到示波器的電荷：

$$Q_{loss} = \int dQ = \int I_{loss}(t) \cdot dt \quad (3.5)$$

模型第五步是將初始電荷扣除轉移電荷後可得到剩餘電荷：

$$Q_{sur} = Q_{sur} - Q_{loss} \quad (3.6)$$

模型第六步是根據最後一個假設將剩餘電荷代入初始電荷當中，進行下個時間間距的電荷轉移，直到 $Q_{sur} < 10^{-3} \mu C$ ，即剩餘表面電荷約為初始表面電荷的 0.05%，模型將停止計算，將電壓與時間對應，得以形成電路模型。

為驗證模型的截止條件，截止條件被設定為 $10^{-1} \mu C$ 到 $10^{-4} \mu C$ ，每次減少一個數量級，共四種截止條件。圖 3.2 為各截止條件的迴圈數，每減少一個數量級，計算成本分別增加 71.58 %、41.60 % 以及 29.46 %。本研究再根據釋放的總電荷 Q_{dis} 比例 R_Q 比較四種截止條件的效益：

$$R_Q = \frac{Q_{dis}}{Q_{sur}} \times 100 \% \quad (3.7)$$

為使模型盡可能完全釋放表面電荷，截止條件應越小越好。在圖 3.3 中，截止條件為 $10^{-3} \mu C$ 的 R_Q 為 99.9548 %，截止條件為 $10^{-4} \mu C$ 的 R_Q 為 99.9955 %。雖然截止條件為 $10^{-4} \mu C$ 能將初始表面電荷幾乎完全釋放，但為了將 0.0407 % 的電荷釋放完， $10^{-4} \mu C$ 較 $10^{-3} \mu C$ 多花費 29.46 % 的計算成本，因此本研究選擇 $10^{-3} \mu C$ 作為截止



頻率。線性電路模型的演算流程如圖 3.4 所示。

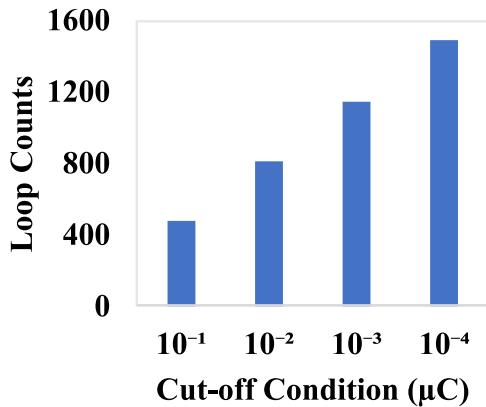


圖 3.2、不同截止條件的迴圈數

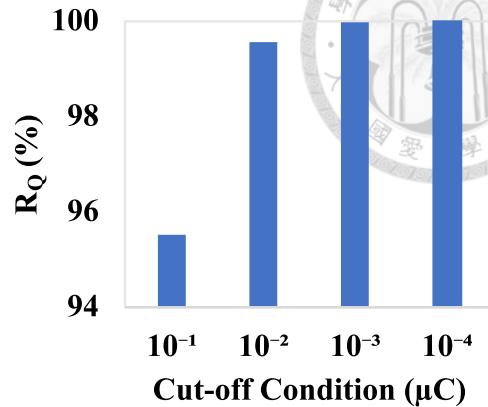


圖 3.3、釋放電荷比例

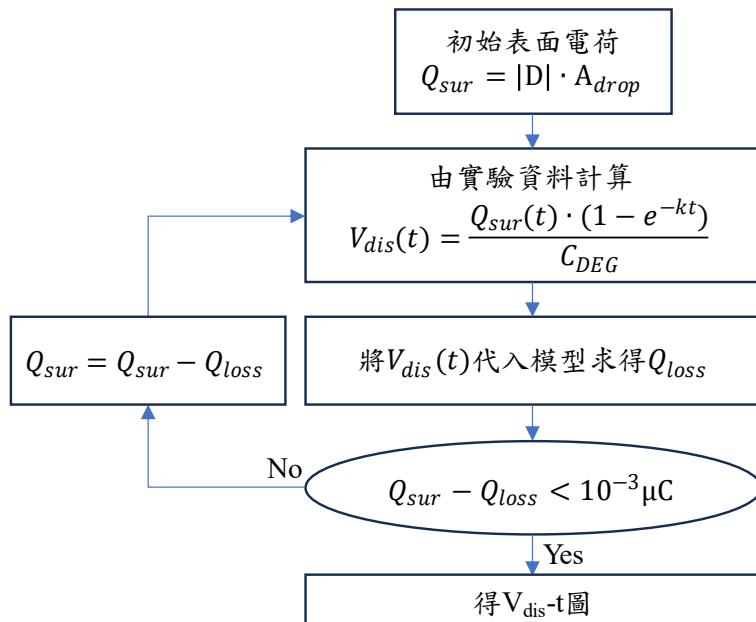


圖 3.4、模型演算流程圖

3.2 電路模型自我驗證

本研究以§2.4 的接觸面積實驗及§2.6 測量電容實驗的 A_{drop} 與 C_{DEG} 代入§3.1 的模型進行模擬。接觸面積實驗中，在液滴墜落高度為 10 公分時，即液滴在碰觸到上電極的面積約為 80 mm^2 。測量電容實驗中，PTFE 厚度為 $100 \mu\text{m}$ 液滴發電器的平均電容值約為 18 pF ，本研究將兩項數值代入計算，得到電壓與時間關係圖，如圖 3.5 所示，在模型當中可觀察到與實際發電情況相似的趨勢，在極短暫的時間內達到峰值電壓，並且快速的釋放電力。

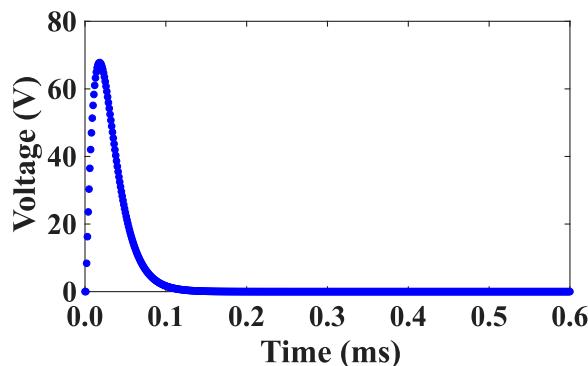


圖 3.5、發電模型(時間步距：1 微秒)

為確認模型在不同時間步距下如何收斂，本研究先測試模型在時間步距為 10 微秒(μs)、5 微秒、1 微秒、0.1 微秒及 0.01 微秒下的預測結果，同時以 1 微秒作為參考比較不同時間步距的電壓訊號。圖 3.6 的時間步距分別為 10 微秒、5 微秒及 1 微秒，其中當時間步距為 10 微秒時，電壓訊號顯現震盪。時間步距為 5 毫秒時，電壓訊號仍有過衝(overshoot)的現象產生。在圖 3.7 中，當時間步距為 0.1 微秒及 0.01 微秒時，模型的預測結果與時間步距為 1 微秒時的電壓訊號幾乎重疊。為進一步確認模型收斂性，本研究比較同個時間點由不同時間步距模擬出的電壓訊號計算平均絕對誤差(Mean Absolute Error, MAE)：

$$MAE = \sum_{i=1}^n \left| \frac{V_{lt,i} - V_{st,i}}{n} \right| \quad (3.8)$$

式中 n 值為時間步距大的資料點個數， V_{lt} 為時間步距大的模擬電壓訊號， V_{st} 為時間步距小的模擬電壓訊號。

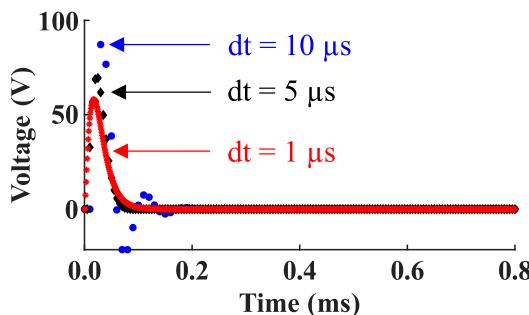


圖 3.6、模型時間步距分析

(藍色圓點：10 微秒、
黑色菱形：5 微秒、紅色米字：1 微秒)

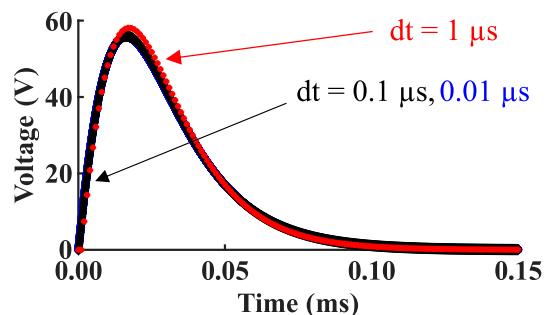


圖 3.7、模型時間步距分析

(藍色圓點：0.01 微秒、

黑色菱形：0.1 微秒、紅色米字：1 微秒)

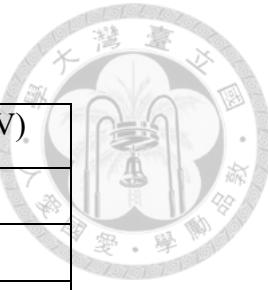


表 3.1、模型時間步距平均絕對誤差

時間步距(μs)	以 1 微秒為標準之平均絕對誤差(V)
10	6.512
5	0.703
1	0.000
0.1	0.161
0.01	0.172

如表 3.1 所示，以時間步距 1 微秒作為參考，在時間步距為 10 微秒與 1 微秒的平均絕對誤差達到 6.5V。而 5 微秒與 1 微秒的時間步距比較後，平均絕對誤差下降到 0.7 V。時間步距 1 微秒與 0.1 微秒和 0.01 微秒的平均絕對誤差已收斂為 0.16 V。因此，從圖 3.6、圖 3.7 與表 3.1，時間步距為 1 微秒已能提供足夠的準確度與穩定性，進一步縮小時間步距對電壓訊號的呈現沒有顯著影響，因此本研究將模型的時間步距設定為 1 微秒。

根據圖 2.4，DEG 的實際充放電過程約 1.3 毫秒，電荷轉移速度並非像模型一樣快速，僅有 0.1 毫秒，因此本研究假設電荷轉移並非瞬間發生，並新增放電係數 $f = \frac{1}{7.5}$ 至式 3.2 中，以減緩模型當中電荷轉移速度：

$$V_{dis}(t) = \frac{f \cdot Q_{sur}(t) \cdot (1 - e^{-kt})}{C_{DEG}} \quad (3.9)$$

本研究同樣改變時間步距以探討修正模型在不同時間步距下的收斂性。時間步距被設定為 100 微秒(μs)、10 微秒直到 0.01 微秒(μs)，每次縮小一個數量級。因未修正模型的時間步距為 1 微秒，因此，本研究將以 1 微秒作為參考比較修正模型在不同時間步距的電壓訊號。

為確保不同時間步距的準確性，本研究同樣比較同個時間點由不同時間步距模擬出的電壓訊號，並計算平均絕對誤差。如表 3.2 所示，以時間步距 1 微秒作為標準，時間步距為 100 微秒與 1 微秒的平均絕對誤差為 0.98 V，相較未修正的模型在 10 微秒時，時間步距大一個數量級而平均絕對誤差小 6 倍之多。同時比較新舊模型在時間步距為 10 微秒時的平均絕對誤差可達 15 倍。而在修正模型在時間步距為 1 微秒、0.1 微秒及 0.01 微秒時，幾乎沒有誤差，因此本研究也驗證修正模型的時間步距設定為 1 微秒時，已能提供修正模型足夠的準確度與穩定性。

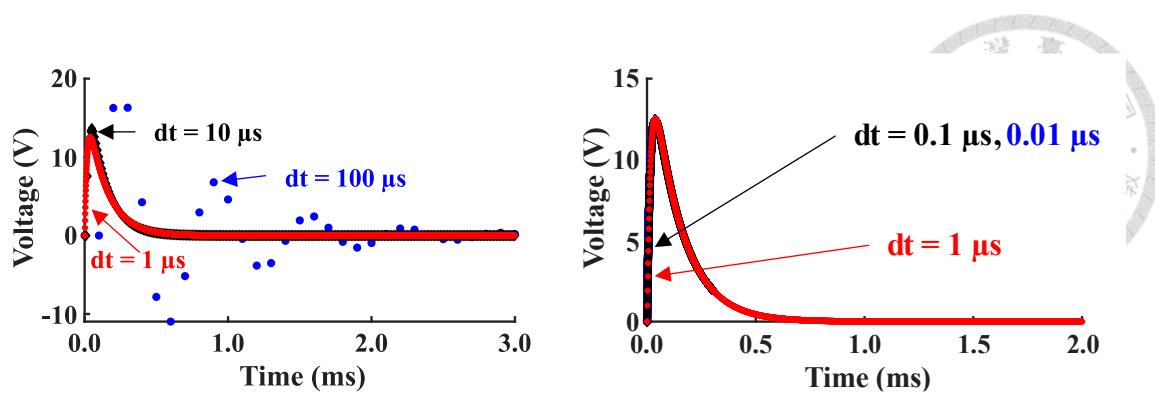


圖 3.8、修正模型時間步距分析

(藍色圓點：0.1 毫秒、黑色菱形：0.01 毫秒、紅色米字：1 微秒)

圖 3.9、修正模型時間步距分析

(藍色圓點：0.01 微秒、黑色菱形：0.1 微秒、紅色米字：1 微秒)

表 3.2、修正模型時間步距平均絕對誤差

時間步距(μs)	以 1 微秒為標準之平均絕對誤差(V)
100	0.985
10	0.421
1	0.000
0.1	0.026
0.01	0.028

第四章 結果與討論



下文中，§4.1 說明取樣頻率對液滴發電實驗紀錄的影響，尋找到最佳的取樣頻率，並以此頻率作為後續實驗的主要取樣頻率。§4.2 比較平均電功率與峰值電功率，並說明平均電功率的重要性。§4.3 比較了 DEG 在不同 PTFE 厚度、液滴墜落高度、液滴的濃度，以及示波器串聯電阻後所產生的電功率，並說明地毯式參數搜尋的必要性。§4.4 展示高速攝影機拍攝之影像與 DEG 放電訊號的比較，找到峰值電壓與液滴接觸 DEG 面積的關係。§4.5 描繪 DEG 的波德圖，了解 DEG 的電路樣態。§4.6 分析實驗與理論的 DEG 電容。§4.7 展示模型的可用性，將模型與文獻、實驗結果比較。§4.8 將液滴濃度量化為導電度，並說明導電度與其他參數的交互影響。

4.1 取樣頻率的影響

本研究調整示波器資料點數與時間軸長短產生不同的取樣頻率(sampling frequency, f_s)，藉此測試取樣頻率對量測結果的影響。圖 4.1 的電壓-時間圖是以幾個不同取樣頻率先後測量相同實驗的結果。在取樣頻率為 1 kHz 時，有 10 個峰值電壓高於平均峰值電壓(average peak voltage, V_{ap}) 110 %，而 23 個峰值電壓低於平均峰值電壓 62.7 %。當取樣頻率增加到 5 kHz，16 個峰值電壓超過平均值 20.8%，另一半峰值電壓低於平均值 19.6 %。當 $f_s = 20$ kHz 時，有六成的峰值電壓高於平均值 3.2 %，且其餘四成的峰值電壓低於平均值 5 %。在 $f_s = 50$ kHz 時，各個峰值電壓與平均峰值電壓相差在 2 %內。取樣頻率越高，峰值電壓的幅度會收斂到 5 %以內。

本研究藉圖 4.2 的標準差與圖 4.3 的變異係數比較圖 4.1 中不同取樣頻率的峰值電壓與平均峰值電壓，而在表 A. 1 彙整了所有取樣頻率實驗的結果。在 $f_s = 1$ kHz 時，標準差為 2.422 V 而變異係數為 0.93，說明每次量測的峰值電壓值相差甚大。而 $f_s = 5$ kHz 時，變異係數仍在 0.23 以上且標準差約為 1.7 V。若將取樣頻率提高至 20 kHz 以上時變異係數已小於 0.10，且相較於 10 kHz 的結果，標準差從 1.07 V 下降至 0.5 V 明顯減小。其中，取樣頻率為 50 kHz 及 100 kHz 以上的實驗資料，因點數繁多，以儲存裝置自示波器存取資料的時間超過 200 秒甚為耗時，且

變異係數約為 0.02，與取樣頻率 20 kHz 的變異係數相差甚少。且以 $f_s=100$ kHz 的實驗資料作為基準計算不同取樣頻率實驗的平均絕對百分比誤差，得知 $f_s=20$ kHz 的平均絕對百分比誤差為 9.4%，而 $f_s=50$ kHz 的平均絕對百分比誤差為 2.9%，說明 20 kHz 的取樣頻率已能描述 DEG 的發電過程，因此後續實驗將採用 20 kHz 作為示波器的取樣頻率。

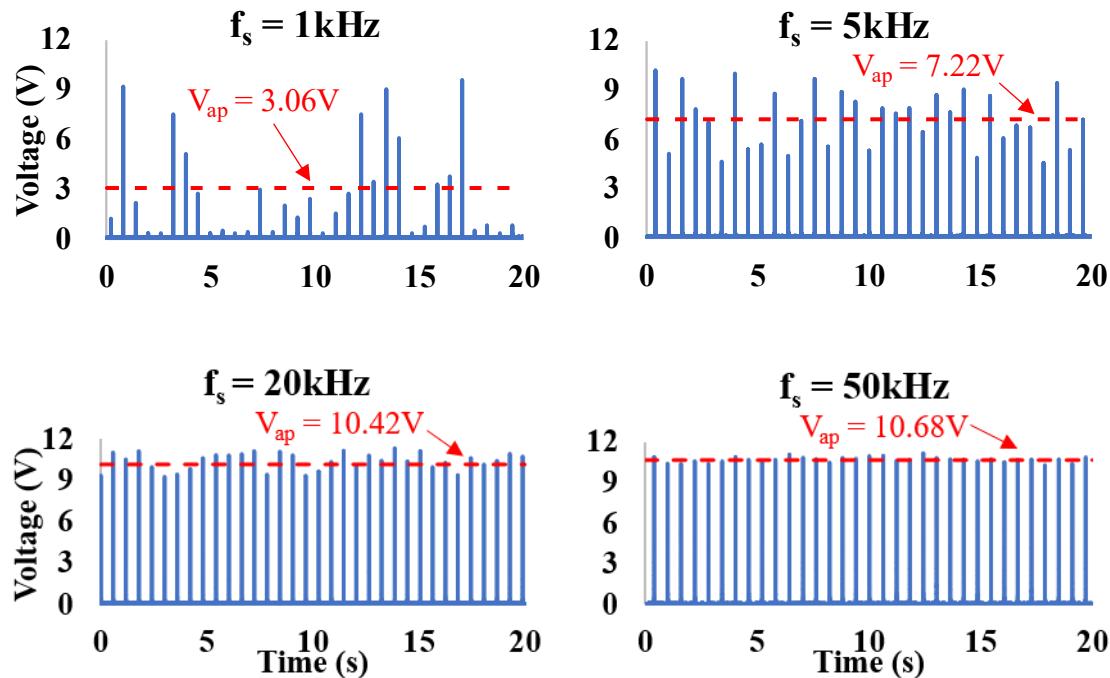


圖 4.1、取樣頻率電壓-時間圖

(取樣頻率 f_s ：1 kHz、5 kHz、20 kHz、50 kHz， V_{ap} ：平均峰值電壓)

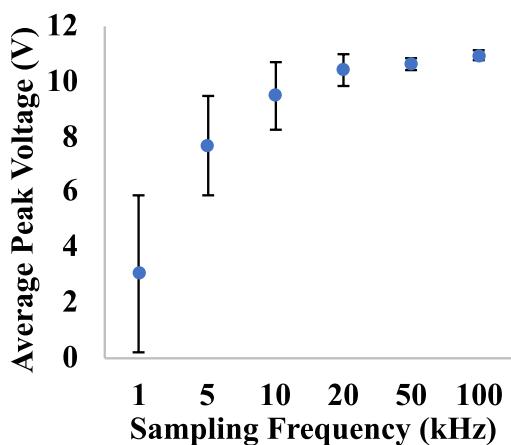


圖 4.2、取樣頻率實驗的平均峰值電壓

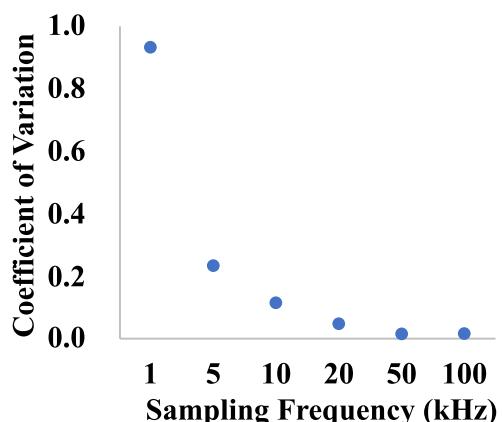


圖 4.3、取樣頻率實驗的變異係數

低取樣頻率之所以使變異係數較大，是因為資料點取樣得不夠頻繁，導致資料點缺失嚴重。為突顯取樣頻率對電壓量測的重要性，圖 4.4 比較 1 kHz 與 20 kHz 取樣頻率的實驗資料，其中藍色圓點為 $f_s = 1 \text{ kHz}$ 的資料，橘色方點為 $f_s = 20 \text{ kHz}$ 的資料。在 $f_s = 20 \text{ kHz}$ 時，若以 DEG 產生電壓的時間點為起點，而電壓訊號值降到峰值電壓值的 3 % 以下作為終點，則單顆液滴放電過程共計 26 個資料點，對應的放電時長為 1.3 毫秒(ms)。當 $f_s = 1 \text{ kHz}$ 時，示波器每 1 毫秒(ms)記錄一次電壓訊號，而 DEG 放電時長約僅 1.3 毫秒，以 $f_s = 1 \text{ kHz}$ 取樣量測，最多只能在 1.3 毫秒中記錄到 2 個資料點。在最樂觀的狀況下， $f_s = 1 \text{ kHz}$ 的兩個資料點當然有機會命中 $f_s = 20 \text{ kHz}$ 26 個資料點中的峰值電壓(即圖 4.4 的 Q 點)，但機率僅 $2 \div 26 = 7.69\%$ 。

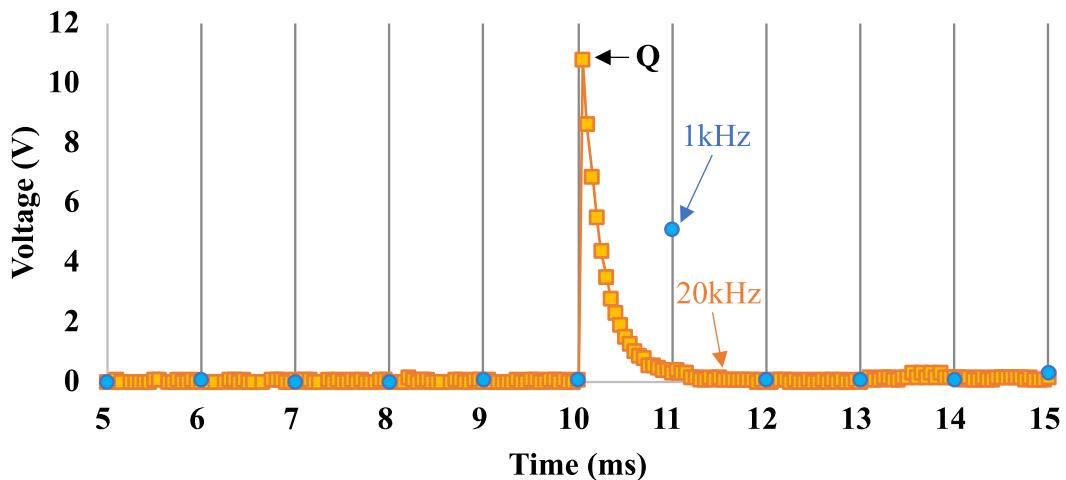


圖 4.4、取樣頻率實驗比較(橘色方點：20 kHz、藍色圓點：1 kHz)

上述實驗結果顯示取樣頻率必須夠高，才能量測到完整的電壓訊號，確保資料的可靠度與實驗的重複性。在已發表文獻中，不合適的取樣頻率可能是峰值電壓隨時間大幅、隨機跳動的原因。圖 4.5 取自 Zhang, Q. 等人的研究[53]，他們使用 Keithley 6514 靜電計測量 DEG 在不同液滴流量(flowing rate)下產生的電壓。當液滴流量為 0.22 mL/s 時，第一個液滴產生的峰值電壓為 11 個峰值電壓的最大值。第三個、第六個與第九個峰值電壓明顯比其他峰值電壓低，且這三組正電訊號也未被完整記錄。將圖 4.1 結果與圖 4.5 比較，低取樣頻率實驗的電壓-時間圖與 Zhang 等人的研究結果相似，峰值電壓未被量測到，導致標準差擴大。其他文獻中得知不同儀器，如：示波器、靜電計等，都會有峰值電壓差距甚大的問題，且並未說明取樣頻率[52, 53, 57]。既然取樣頻率會影響電壓測量的結果，除了慎選儀器取樣頻率

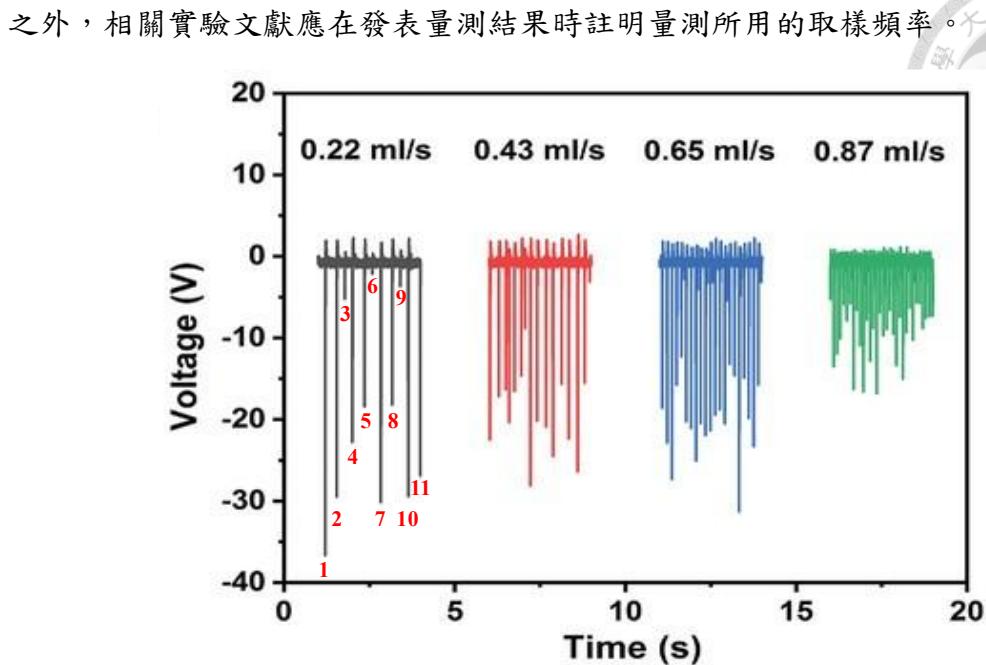


圖 4.5、文獻的電壓-時間圖[53]

4.2 液滴發電器之電功率比較

相關研究常以峰值電功率衡量 DEG 的發電能力，雖然峰值電功率能顯示 DEG 發電的最大值，但 DEG 的放電過程並非只有峰值的時間點，而是持續一小段時間，DEG 的發電能力應以這段時間的平均電功率來衡量，單以峰值電功率作為比較發電能力的基準明顯高估了 DEG 的發電功率。因此，本研究比較峰值電功率與平均電功率，探究峰值電功率是否適合用來表示 DEG 的發電性能。

表 4.1、文獻平均功率與峰值功率比較

文獻作者	單顆液滴平均功率(μW)	峰值功率(μW)	峰值功率比例
Wang, K. [47]	0.455	1.862	4.09
Yang, Y. [59]	0.396	1.769	4.47
Meng, J. [57]	0.11	0.444	4.03
Li, Z. [51]	0.05	0.204	4.08

表 4.1 呈現幾組文獻中的電力量測數據[47, 51, 57, 59]。本研究以式 2.6 代入文獻的儀器電阻計算液滴的總功率與峰值功率，再將總功率除以液滴在該時間段的資料點數得到液滴的平均功率。峰值功率比例為峰值功率除以液滴平均功率，這



些數據顯示峰值能量約為液滴平均功率的四倍以上，說明以峰值功率高估了 DEG 的發電能力。在圖 4.6 中，紅色方點為本研究中 DEG 未外接電阻的實驗，以示波器的電阻代入§2.5 計算 DEG 的峰值電功率與平均電功率，計算結果與表 4.1 相近，峰值功率為平均電功率的 3 至 4 倍。

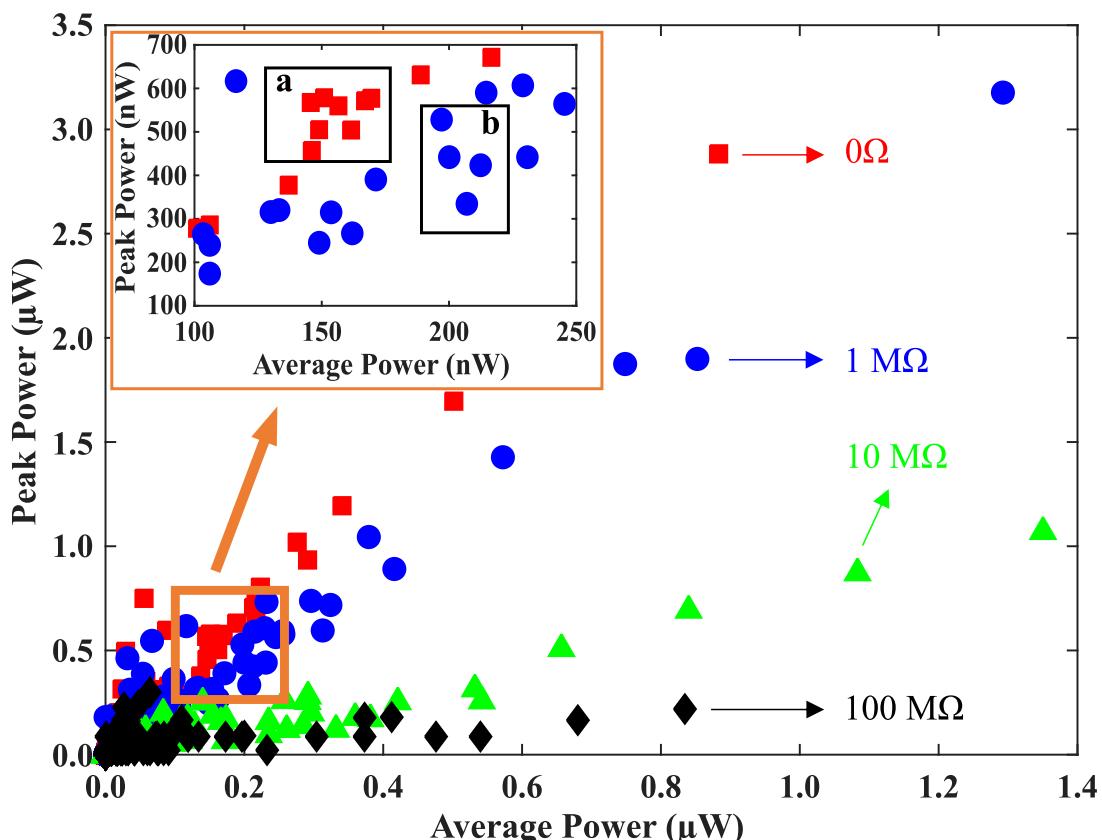


圖 4.6、峰值電壓與平均電功率比較

圖 4.6 比較不同串聯電阻造成的平均電功率與峰值功率。在大多實驗結果中，峰值電功率越大，則平均電功率越大。在圖 4.6 的橘色方框中，紅色方點為 DEG 未外接電阻的實驗資料，藍色圓點為串聯 $1\text{ M}\Omega$ 電阻的實驗資料。本研究比較橘色方框中黑色方框內的實驗結果，在未外接電阻的實驗中(即 a 方框)，當平均電功率約由 150 nW 提升至 160 nW 時，峰值電功率從約 600 nW 下降至 500 nW 。在串聯 $1\text{ M}\Omega$ 電阻的實驗中(即 b 方框)，當平均電功率約由 190 nW 提升至 210 nW 時，峰值電功率從約 530 nW 下降至 330 nW ，兩種實驗參數皆顯示平均電功率上升，峰值功率反而可能下降，此種情況同樣在串聯 $10\text{ M}\Omega$ 與 $100\text{ M}\Omega$ 的電阻時發生，導致 DEG 在不同實驗參數組合的性能優劣排序被誤判，因此本研究將使用平均電功率比較 DEG 的性能，採用峰值電壓以外的電壓訊號，計算液滴的完整發電量，避

免高估 DEG 發電性能且能有效排列 DEG 在不同實驗參數組合的性能優劣，並考慮不同的外接負載，測試各實驗參數下的平均電功率。



4.3 不同實驗參數的電功率

本研究透過在不同氯化鈉水溶液濃度、不同串聯電阻以及不同 PTFE 厚度的參數下，了解液滴墜落高度對於 DEG 平均電功率的影響。§4.3.1 說明液滴墜落高度與 DEG 輸出功率的正相關性。§4.3.2 比較不同實驗參數的輸出功率。§4.3.3 說明搜尋最佳參數組合的方法。

4.3.1 液滴墜落高度的影響

如圖 4.7(a)所示，在 PTFE 厚度為 $30\text{ }\mu\text{m}$ 且無外接電阻的條件下，液滴濃度越小時，DEG 的電功率越高。若液滴濃度相同，液滴墜落高度越高，DEG 的平均電功率越高。這顯示改變液滴濃度並不會改變墜落高度對電功率的影響趨勢。

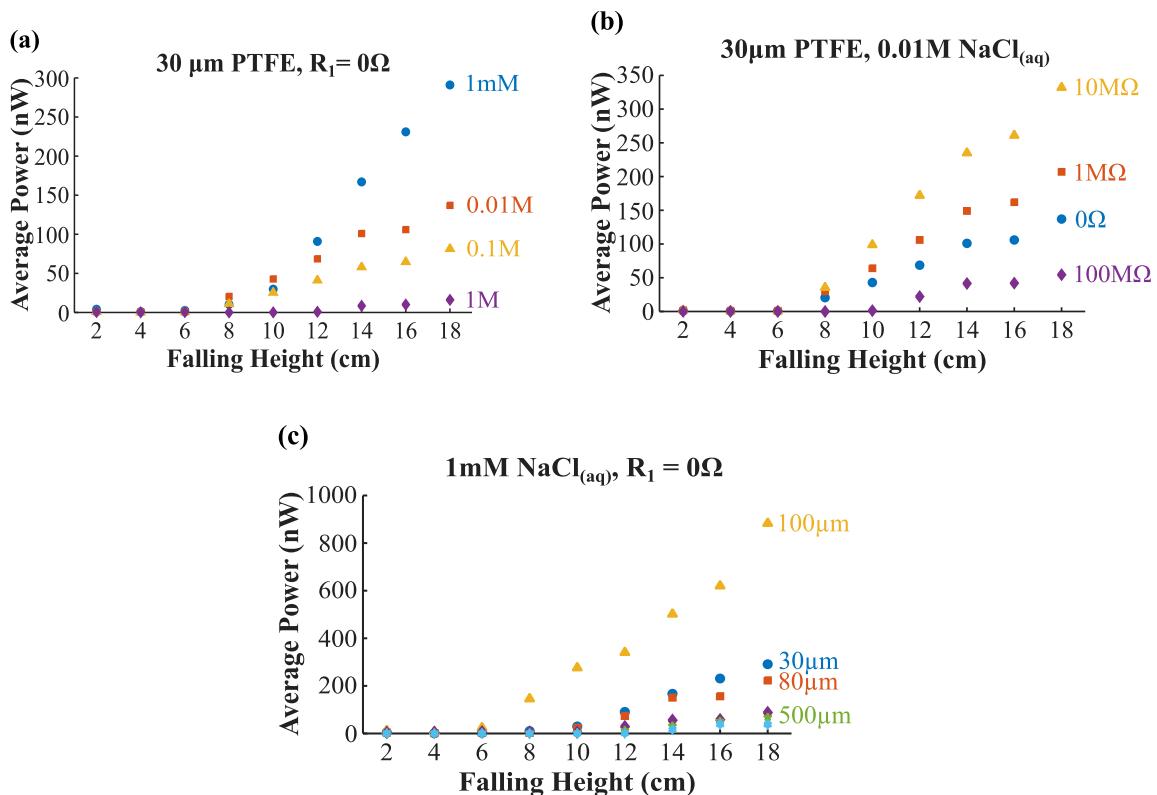


圖 4.7、不同實驗參數與液滴墜落高度關係

在圖 4.7(b)中，當 PTFE 厚度為 $30\text{ }\mu\text{m}$ 且液滴濃度為 0.01 M 氯化鈉水溶液時，比較串聯不同電阻的平均電功率，當串聯電阻為 $10\text{ M}\Omega$ 時，DEG 的平均電功率最大，而示波器串聯 $100\text{ M}\Omega$ 時，電功率會比未外接電阻的條件下還低。而在所有串聯電阻條件下，液滴墜落高度增加皆伴隨平均電功率上升，顯示改變串聯電阻不會影響液滴墜落高度對電功率的影響趨勢。如圖 4.7(c)所示，在液滴濃度 1 mM 且未串聯電阻的條件下，PTFE 厚度為 $100\text{ }\mu\text{m}$ 時有最高的平均電功率。同樣地，無論 PTFE 厚度為何，液滴墜落高度的增加會導致平均電功率上升，顯示 PTFE 厚度的變化不影響此趨勢，PTFE 厚度與液滴墜落高度對電功率的影響相互獨立。上述結果顯示，液滴墜落高度為獨立的實驗參數，其他實驗參數皆不影響液滴墜落高度與 DEG 輸出功率的正相關性，液滴高度越高則平均電功率越高。

4.3.2 負載阻抗、介電層厚度、液滴濃度

在上小節中，液滴墜落高度與串聯電阻不會交互影響，因此下文將固定墜落高度為 18 公分，比較不同阻抗下的平均電功率。未外接電阻的負載電阻為 $1\text{ M}\Omega$ ，這是示波器的電阻，而負載阻抗(Load Resistance)為示波器串聯電阻的總阻抗。如圖 4.8(a)所示，在液滴濃度為 1 M 、PTFE 為 $80\text{ }\mu\text{m}$ 時，串聯電阻與否都不產生電力。在串聯電阻為 $1\text{ M}\Omega$ 、PTFE 厚度為 $30\text{ }\mu\text{m}$ 與 $100\text{ }\mu\text{m}$ 時，平均電功率比串聯電阻為 $10\text{ M}\Omega$ 時高，而 PTFE 厚度為 $500\text{ }\mu\text{m}$ 及 $1000\text{ }\mu\text{m}$ 則是在液滴濃度為 1 M 與串聯 $10\text{ M}\Omega$ 電阻時平均電功率最大。其中 PTFE 厚度為 $250\text{ }\mu\text{m}$ 的 DEG 與液滴濃度為 1 M 的條件下，只在串聯電阻為 $100\text{ M}\Omega$ 時產生功率，且不同 PTFE 厚度的 DEG 在串聯 $100\text{ M}\Omega$ 後只有 PTFE 厚度為 $250\text{ }\mu\text{m}$ 的 DEG 有電力產生。在圖 4.8(b)中，液滴濃度為 0.1 M 且 PTFE 厚度為 $250\text{ }\mu\text{m}$ 時，串聯電阻與否都不產生電力。而 PTFE 厚度為 $1000\text{ }\mu\text{m}$ 的 DEG 平均電功率與 PTFE 厚度為 $250\text{ }\mu\text{m}$ 時相似，在串聯不同電阻也幾乎沒有電力產生。而 PTFE 厚度為 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的 DEG 在液滴濃度為 0.1 M 與串聯 $1\text{ M}\Omega$ 時，比串聯其他電阻時產生的電力還多。其餘 PTFE 厚度在液滴濃度 0.1 M 時，阻抗匹配的結果為 $11\text{ M}\Omega$ 。同時，在液滴濃度 0.1 M 時，比較不同 PTFE 厚度在串聯不同電阻的平均電功率，PTFE 厚度為 $30\text{ }\mu\text{m}$ 的 DEG 平均電功率最高。

在圖 4.8(c)中，在液滴濃度為 0.01 M 且 PTFE 厚度為 500 μm 時，串聯電阻與否都不產生電力。PTFE 厚度為 100 μm 與 250 μm 的 DEG 在液滴濃度為 0.01 M 與串聯 1 $\text{M}\Omega$ 電阻時，比串聯其他電阻時產生的電力還多。在液滴濃度 0.01 M 時，同樣比較不同 PTFE 厚度在串聯不同電阻的平均電功率，PTFE 厚度為 80 μm 的 DEG 平均電功率最高。如圖 4.8(d)所示，液滴濃度為 1 mM 與串聯 10 $\text{M}\Omega$ 電阻時，PTFE 厚度為 100 μm 的 DEG 有在所有實驗參數下，有最高的平均電功率 1.35 μW 。在液滴濃度為 1 mM 的條件下，PTFE 厚度為 30 μm 、80 μm 及 250 μm 的 DEG 實驗結果與 PTFE 厚度為 100 μm 的 DEG 實驗結果相同，皆在串聯 10 $\text{M}\Omega$ 電阻時有最大的平均電功率。而 PTFE 厚度為 500 μm 及 1000 μm 時，使用濃度為 1 mM 的氯化鈉水溶液，串聯電阻越大則平均電功率越高。

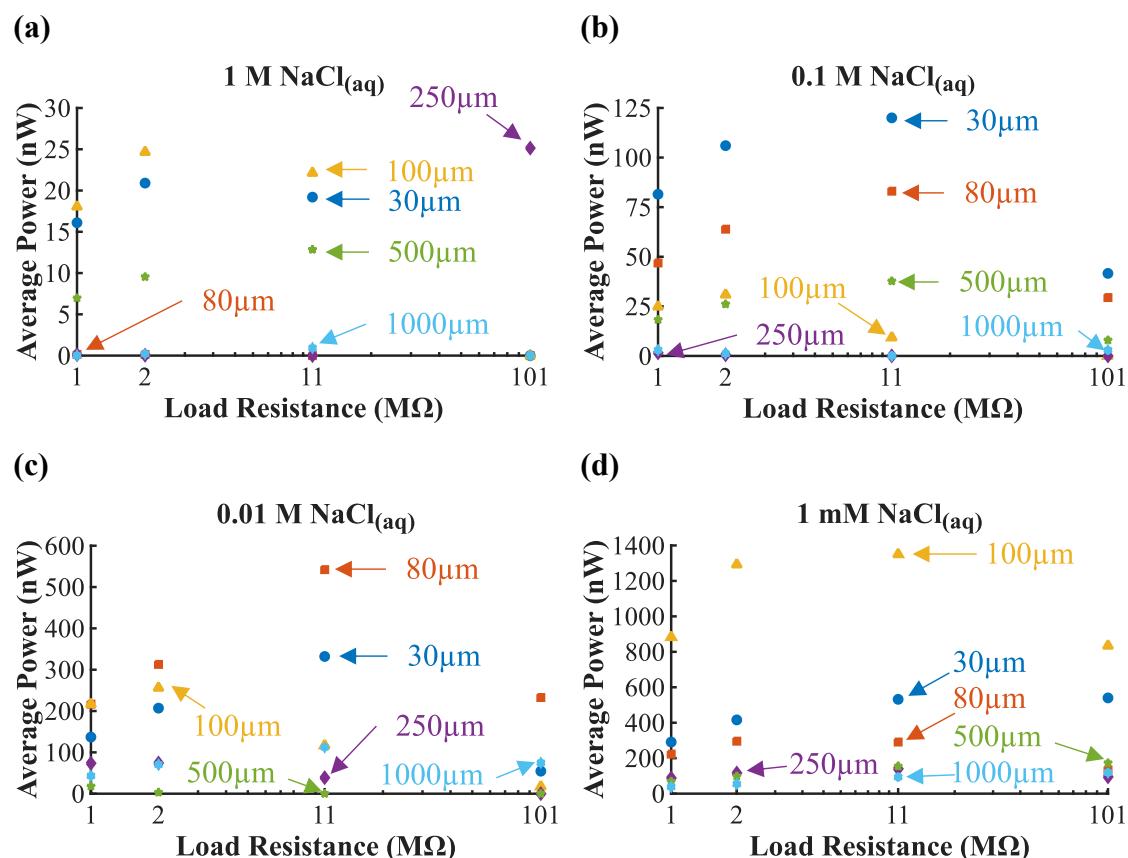


圖 4.8、不同液滴濃度與外接電阻的實驗結果

根據實驗結果，本研究在液滴濃度為 1 mM、串聯 10 $\text{M}\Omega$ 電阻與 PTFE 厚度為 100 μm 的 DEG 的參數組合有最高的平均電功率 1.35 μW 。且不同實驗參數組合可能出現多個峰值的結果，例如：在圖 4.8(a)中，串聯電阻為 100 $\text{M}\Omega$ 與液滴濃度為

1 M 的實驗結果，只有 PTFE 厚度為 250 μm 的 DEG 產生平均電功率，而其餘 PTFE 厚度的峰值出現在串聯 1 $M\Omega$ 與 10 $M\Omega$ 電阻的情況下。在圖 4.8 (b) 中，比較 PTFE 厚度為 100 μm 及 500 μm 的 DEG 在串聯 1 $M\Omega$ 與 10 $M\Omega$ 電阻的實驗結果中，兩者的平均電功率大小排序相反，因此，本研究進行所有參數組合的實驗並繪製等高線圖，以觀察多個平均電功率峰值的現象。

4.3.3 最佳參數組合的搜尋方法

在文獻中，研究者常採取逐步優化的實驗方法。他們會先固定多個參數，並調整其中一個參數來尋求最佳結果。以這個階段的最佳結果為基礎，再改變下一個參數，並重複這個過程，最終找出所有參數的最佳組合[53, 67]。而這種方式可能會導致最優解的某種參數組合被忽略。因此本研究透過地毯式參數搜尋，將所有參數組合進行實驗並尋找最大峰值。而為確認地毯式參數搜尋的必要性，本研究以等高線圖描述不同實驗參數下的平均電功率，比較液滴墜落高度 18 公分時不同實驗參數組合的結果，其中等高線圖以 8bits 灰階值表示，顏色越深則平均電功率越低。圖 4.9 是固定液滴濃度為 0.1 M、不同 PTFE 厚度與不同串聯電阻的實驗結果。

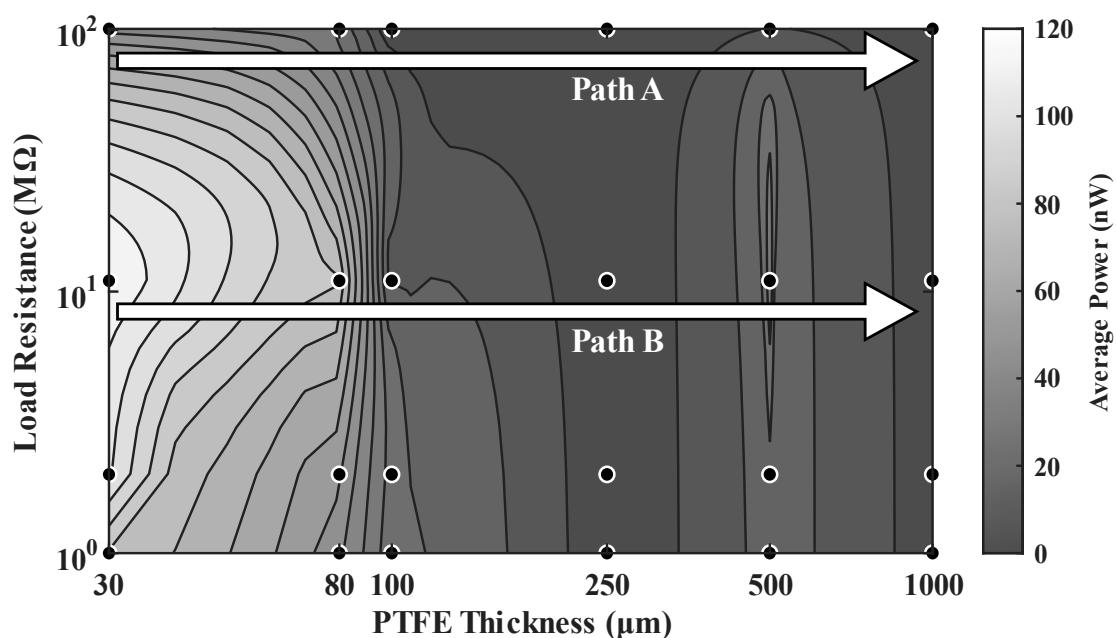


圖 4.9、地毯式搜索-1 (氯化鈉水溶液：0.1 M)

在串聯 100 $M\Omega$ 電阻時(即路徑 A)，平均電功率的峰值只出現在 PTFE 厚度為 30 μm 的實驗，當 PTFE 厚度增加時，平均電功率減少。但在串聯 10 $M\Omega$ 電阻的



實驗中(即路徑 B)，比較 PTFE 厚度為 $30\text{ }\mu\text{m}$ 到 $1000\text{ }\mu\text{m}$ 的平均電功率，PTFE 厚度為 $30\text{ }\mu\text{m}$ 與 $500\text{ }\mu\text{m}$ 時有兩個峰值，在附錄的圖 A. 1 與圖 A. 2 中在不同實驗參數下也有兩個或多個峰值產生。根據等高線圖中多峰值的結果，若非地毯參數搜尋，則無法觀測到額外的峰值。

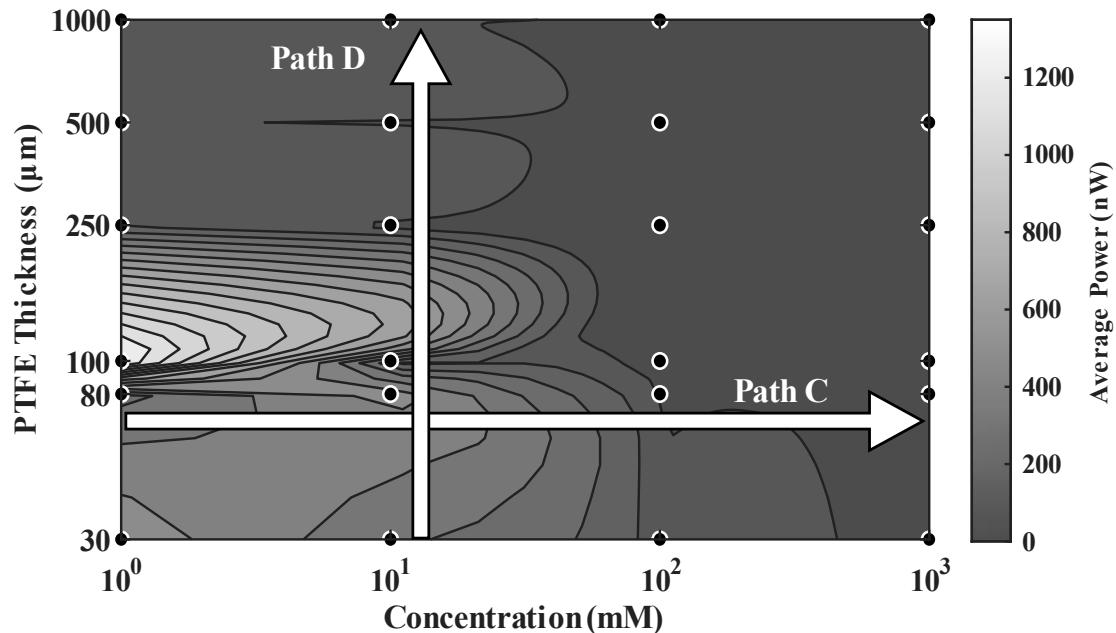


圖 4.10、地毯式搜索-2 (串聯電阻： $10\text{ M}\Omega$)

在圖 4.9 中，無論路徑 A 或 B 都能在進行一組實驗後得到該組最高的平均功率。但在圖 4.10，以路徑 C 進行實驗，在 PTFE 厚度為 $80\text{ }\mu\text{m}$ 時，使用液滴濃度為 10 mM 氯化鈉水溶液有最高的平均功率。再以濃度為 10 mM 的液滴(即路徑 D)進行實驗，在 PTFE 厚度為 $80\text{ }\mu\text{m}$ 時有最高的平均功率。實驗按照路徑 C 與 D 先後進行，會在 PTFE 厚度為 $80\text{ }\mu\text{m}$ 與液滴濃度為 10 mM 時有最高的平均功率，然而最佳實驗參數組合為 PTFE 厚度為 $100\text{ }\mu\text{m}$ 與液滴濃度為 1 mM 。不使用地毯式參數搜尋的方法會陷入局部最佳解，因此文獻中最佳結果的尋找方式不適用於 DEG 的實驗當中，故相關文獻中應採取地毯式參數搜尋以驗證其研究之最佳結果。

4.4 液滴接觸面積

從§4.3 得知液滴墜落高度越高，電功率會越高，因此本研究透過高速攝影機拍攝液滴在 DEG 上滑行的影像，圖 4.11 為液滴接觸 DEG 上電極時的影像。液滴接觸 DEG 上電極時的影像以§2.6 的方法計算出接觸面積 A_{drop} ，如圖 4.12 所示，接

觸面積與電壓的關係與發電實驗結果相符：液滴落下高度越大時，液滴和 DEG 的接觸面積會越大，而接觸面積越大時，峰值電壓也會隨著上升，當面積上升到約 80 mm^2 後，峰值電壓將不再上升，與 Zhou, L. 等人提到的結果相似，墜落高度在提升後，電壓的上升幅度會下降[62]。在沒有改變其他參數，如：液滴濃度、串聯電阻與 PTFE 厚度的情況下，圖中的峰值電壓可以表示為平均電功率。因此，當接觸面積越大時，峰值電壓越大解釋了為什麼墜落高度越高時，平均電功率越大。

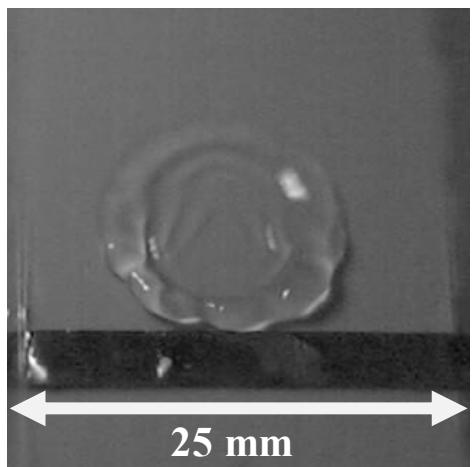


圖 4.11、液滴碰觸上電極(俯視圖)

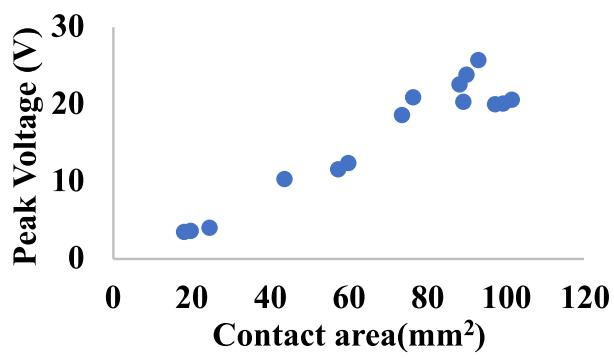


圖 4.12、液滴接觸面積與峰值電壓關係

4.5 液滴發電器波德圖

為了解 DEG 的特性，本研究透過§2.5 測量出的 DEG 總阻抗與相位角繪製成波德圖(Bode plot)，如圖 4.13(a)所示，高頻段的區域為一階 RC 電路響應，但低頻段因 60 Hz 與其諧波的雜訊干擾，在-3 dB 的截止頻率被雜訊覆蓋，因此只知道 DEG 為一階 RC 電路而無法準確尋找 DEG 電阻值與電容值。在圖 4.13(b)中，低頻段同樣因為雜訊干擾無法判斷相位角在 -45°的頻率。

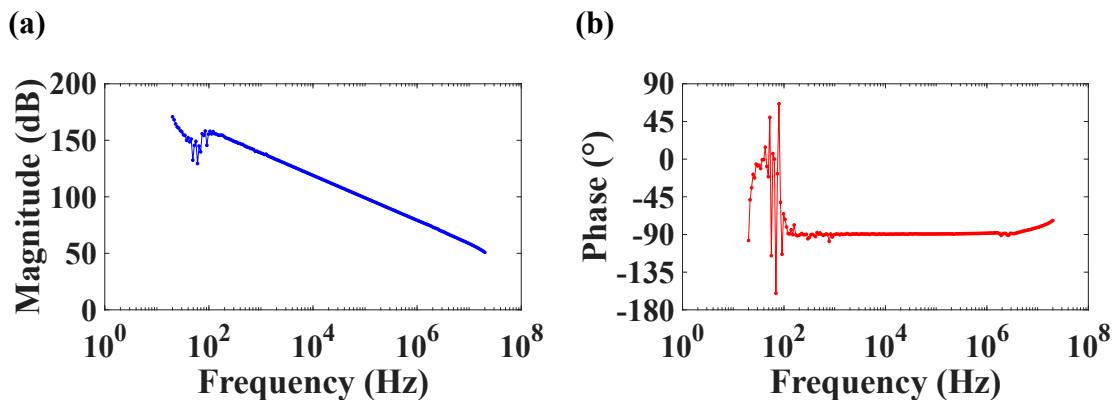




圖 4.13、厚度為 $100\mu\text{m}$ 之 DEG 波德圖

圖 4.13(a)與(b)在 100 Hz 到 1 MHz 的頻率段中，增益曲線的斜率為 -20 dB/decade 且 DEG 的相位角約為 -89° ，因此 DEG 與純電容的特性很類似，本研究將 DEG 視為一個如同電容放電的電源，而示波器的等效電路可視為 RC 並聯電路，圖 4.14 為電路架構圖。

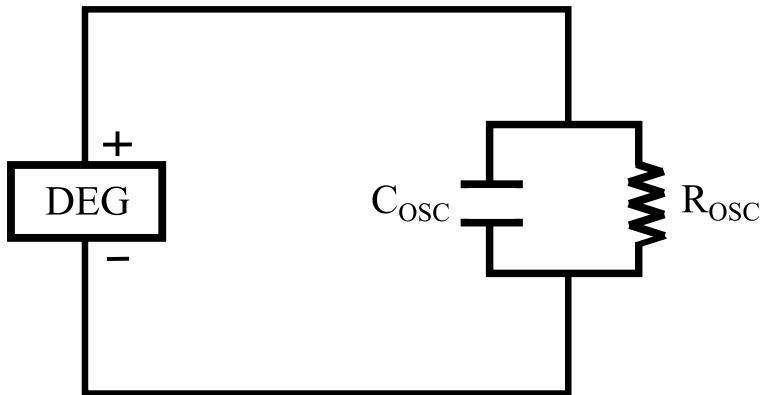


圖 4.14、模型架構圖

4.6 實驗與理論的液滴發電器電容

相關文獻通常只提到 DEG 的電容，而並未計算電容值[48, 54, 68]，或是使用液滴接觸面積計算 DEG 的電容[63, 70, 72]。據本文作者所知，並沒有文獻實際透過儀器測量 DEG 電容，因此本研究透過阻抗分析儀測量 DEG 的電容 C_{DEG} 。在圖 4.15 中，PTFE 厚度為 $100\mu\text{m}$ 的 DEG 的電容在低頻段同樣被雜訊所干擾而無法被判讀，但在 100 Hz 到 1 MHz 頻率段中， C_{DEG} 的數值變動微小，說明 DEG 在該頻率段中，已經接近純電容，故將 100 Hz 到 1 MHz 的電容值平均之後作為 DEG 的電容 C_{DEG} ，其值約為 18 pF 。為比較實驗與理論的 DEG 電容，根據§2.12 的 DEG 結構圖(圖 2.1)，DEG 可視為平行板電容，因此 DEG 等效電容的計算方式與平行板電容相似，定義為

$$C_{DEG} = \frac{\epsilon_{DEG} \cdot \epsilon_0 \cdot A_{DEG}}{d_{DEG}} \quad (4.1)$$

其中真空介電係數 $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}\text{ F/m}$ 、 ϵ_{DEG} 為 DEG 的介電常數、 d_{DEG} 為 DEG 的總厚度以及 A_{DEG} 為電極面積。在 ϵ_{DEG} 與 A_{DEG} 不改變的情況下，改變 PTFE 厚度如同改變 DEG 的厚度 d_{DEG} ，DEG 的電容因而該隨 PTFE 厚度增加而減少。

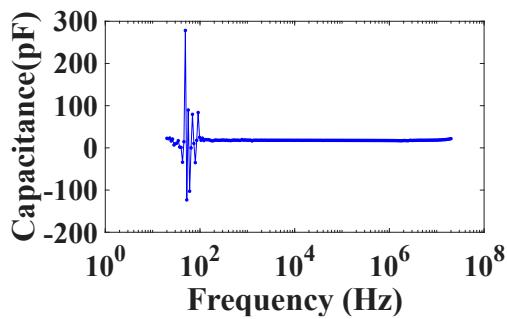


圖 4.15、100 μm 的 DEG 測量電容

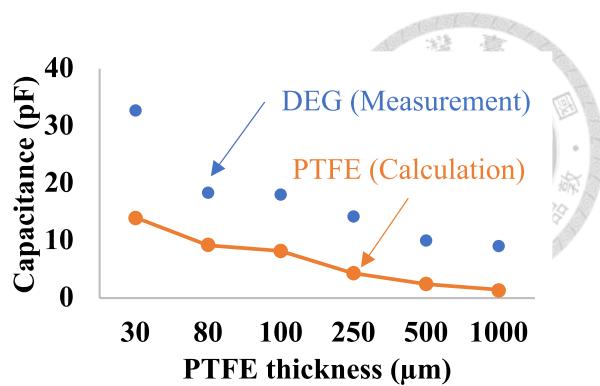


圖 4.16、電容與 PTFE 厚度比較

如圖 4.16 所示，隨著 PTFE 厚度的越厚，DEG 的電容將越小，這與式(4.2)的 DEG 電容計算結果的趨勢相同，然而 DEG 的電容並不隨 DEG 厚度增加而等比例下降，這可能是因為 PTFE 的製程導致不同厚度的 PTFE 介電係數不相同，因此實驗應實際測量以確保 DEG 的電容無誤。

4.7 發電模型驗證

本研究根據§3.1 建立一套 DEG 的線性電路模型，用來模擬 DEG 的發電流程，並將模型與文獻、實驗結果比較以測試模型的可用性。Costanzo 等人的研究透過擬合 DEG 電容，並建立出等效電路模型[72]，他們使用的示波器電阻與電容分別為 $10 \text{ M}\Omega$ 與 10 pF ，而本研究使用之示波器的電阻與電容為 $1 \text{ M}\Omega$ 與 16 pF ，故無法直接比較。因此本研究將模型與該文獻的電壓訊號進行無因次化，將單顆液滴所產生的電壓訊號能除以區間最大電壓，也就是峰值電壓，時間項則除以峰值電壓的時間點，比較模型與該文獻之差異，由圖 4.17，在無因次化後，本研究之發電模型與該文獻的充電段幾乎一致，而文獻的放電段會先以較模型快的速度釋放電力，再緩慢釋放完電力，最後模型與文獻釋放完電力的時間約在 $T'=7.16$ 的位置時，因此驗證了模型適用性。

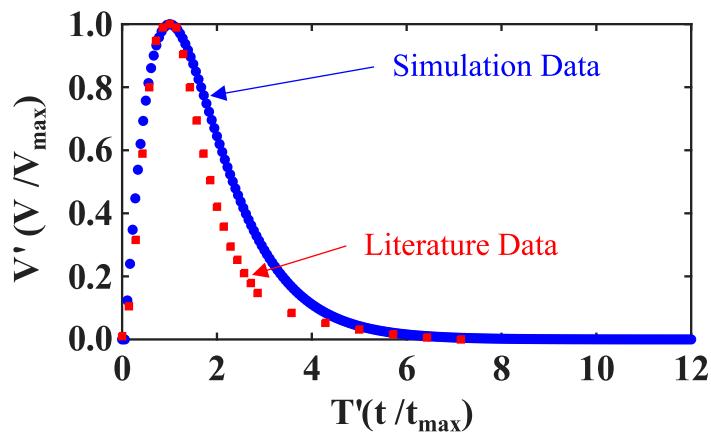


圖 4.17、模型與文獻比較

圖 4.18(a)是模型與實驗的比較結果，其中實驗的參數是 PTFE 厚度為 $100\text{ }\mu\text{m}$ 、液滴接觸上電極的面積為 80 mm^2 以及 1 mM 氯化鈉水溶液。模型的充電與放電速度都較實際情況的發電曲線快，為觀察兩者的相異之處，本研究將模型與實驗資料無因次化。如圖 4.18(b)所示，在模型與實驗資料無因次化後的比較中，模型與實驗的充電曲線幾乎一致，雖然放電過程與原始資料相似，實驗的放電過程還是較模型久。

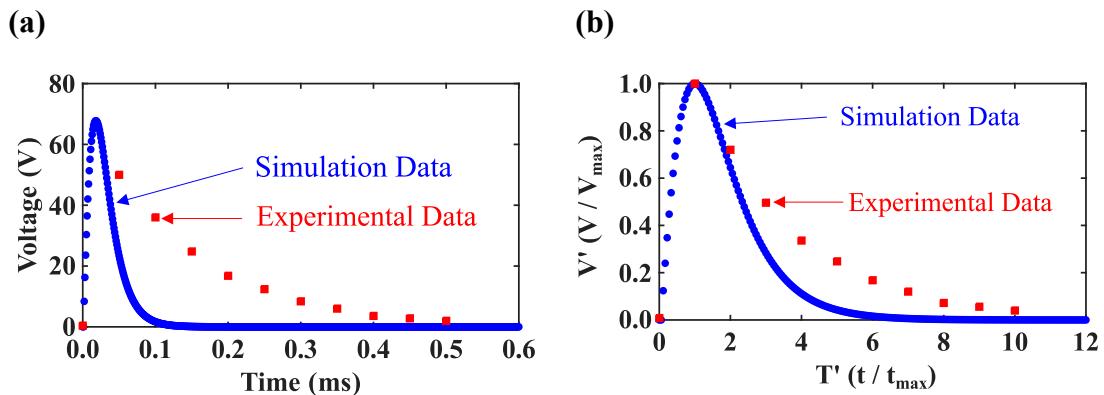


圖 4.18、模型與實驗比較與無因次化結果

圖 4.19 (a)為修正模型代入相同的實驗參數計算的結果。修正模型與實驗的充電曲線斜率相近，但峰值電壓明顯下降，而放電曲線比舊模型的放電時間更長。在圖 4.19 (b)中，修正模型與實驗資料無因次化後，兩者的充放電曲線較為接近。

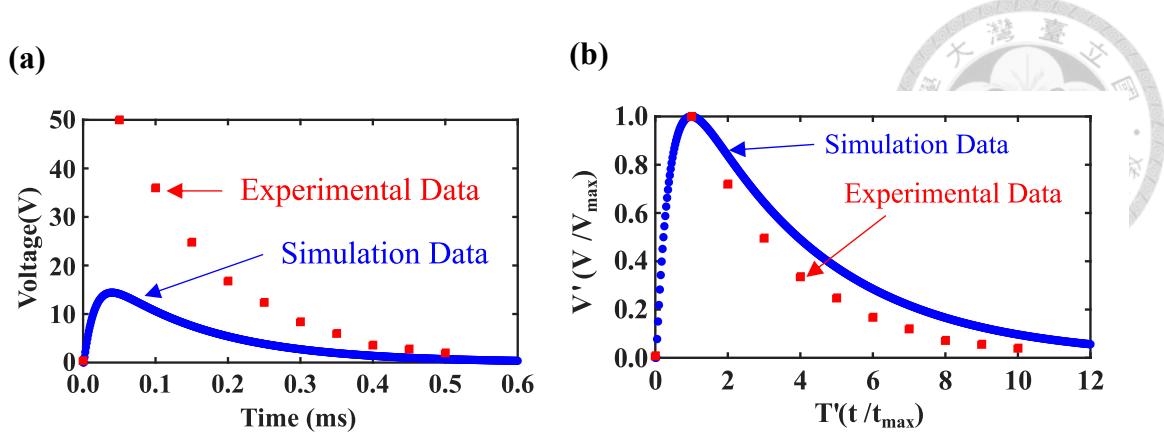


圖 4.19、修正模型與實驗比較與無因次化結果

為與不同實驗參數結果進行比較，本研究改首先改變模型的液滴接觸面積 A_{drop} 模擬 DEG 發電過程。圖 4.20 (a) 模型結果與實驗的結果相似，隨著 A_{drop} 越高，峰值電壓將越大。圖 4.20(b) 為模型無因次化後的結果，顯示放電過程與液滴接觸上電極時的面積無關，僅與峰值電壓有關。從 §4.4 可得知液滴接觸面積與電壓正相關，而從模型也可得知接觸面積與輸出也是正相關，兩者都指出面積越大則輸出結果越好。

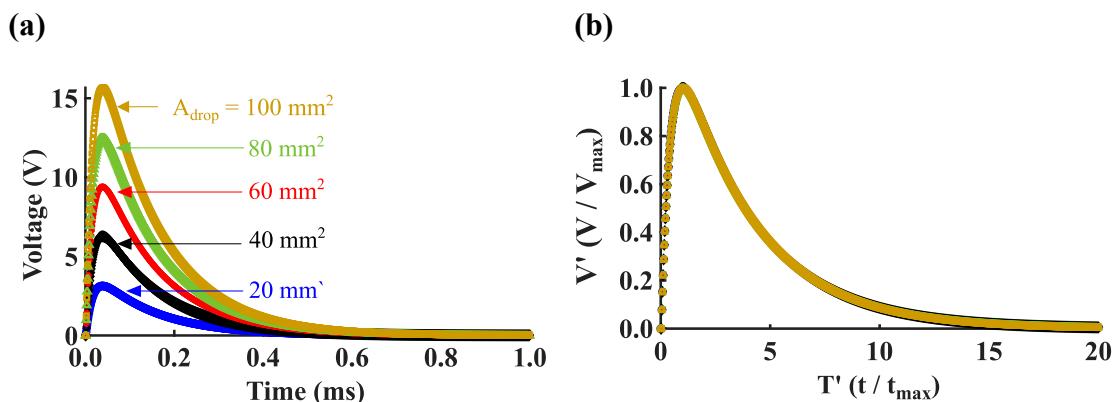


圖 4.20、液滴接觸面積對模型影響與無因次化比較

圖 4.21(a) 是將 DEG 電容測量數值代入模型的結果，電容越大會使峰值電壓增加，但放電時間會減少，其中 PTFE 厚度在 $80\ \mu\text{m}$ 與 $100\ \mu\text{m}$ 在阻抗分析儀測量出的電容為 $18.43\ \text{pF}$ 與 $18\ \text{pF}$ ，因此兩者在模型中的充放電曲線相似度高。但模型結果與實驗的結果不相符，§4.3 在 PTFE 厚度為 $100\ \mu\text{m}$ 的時候會有最高的峰值電壓，因此 PTFE 厚度可能不只改變了電容，也改變了模型中的某項變數。圖 4.21(b) 為 DEG 電容代入模型無因次化後的結果，不同電容值的充電曲線皆相同，代表

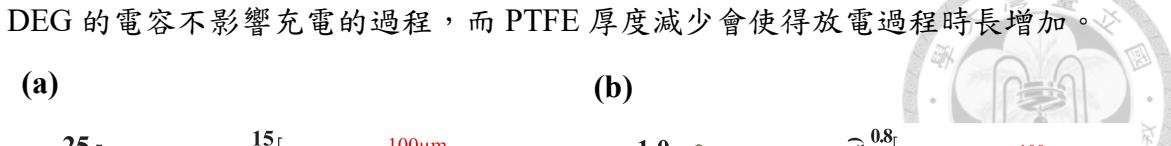


圖 4.21、PTFE 厚度對模型的影響與無因次化比較

為驗證模型可用性，本研究將§2.3 中 50 kHz 與 100 kHz 取樣頻率的實驗資料與模型做比較，由於取樣頻率實驗的液滴墜落高度為 8 公分，液滴接觸面積約為 70 mm^2 ，需調整模型的參數再進行預測。圖 4.22 為取樣頻率與模型無因次化比較圖，充電曲線中幾乎一致，放電曲線仍有些許誤差，但模型已大致可以模擬 DEG 的發電過程。

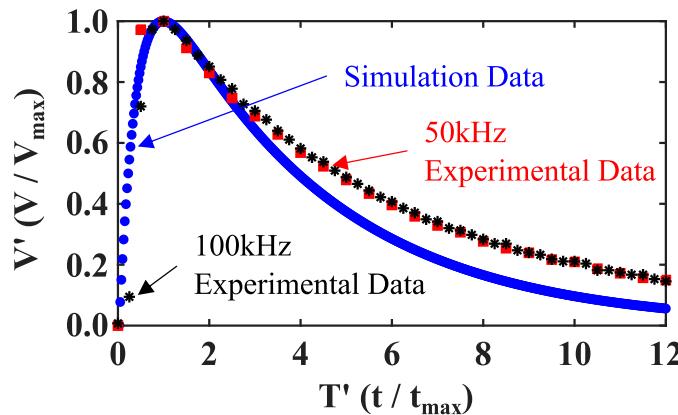


圖 4.22、修正模型與取樣實驗資料無因次化比較

4.8 量化液滴濃度

為比較文獻中使用不同種類液滴的輸出，本研究透過§2.4 的實驗測量不同濃度的氯化鈉水溶液導電度，以量化液滴濃度。測量的結果如表 4.2 所示，氯化鈉水溶液的濃度在 1M 時導電度為 77.167 mS/cm ，隨著水溶液中離子濃度的減少，導電度也會隨著下降，在水溶液濃度為 1 mM 時，導電度僅剩 0.145 mS/cm 。實驗結



果與 Yang, L. 等人[54]測量氯化鈉水溶液的導電度的結果比較，兩者的導電度數值在同一數量級，且導電度越低則輸出電壓與電流越高[54]，同樣呈現嚴格遞減的關係，與圖 4.23 中 DEG 未外接電阻(路徑 E)的趨勢相反。在圖 4.23 中的路徑 F 為 DEG 串聯 $10\text{ M}\Omega$ 電阻的實驗結果，平均電功率不隨液滴導電度降低而增加，因此串聯電阻的有無與液滴導電度同樣應於相關研究中描述。

表 4.2、不同濃度氯化鈉水溶液導電度

氯化鈉水溶液濃度 (M)	實驗導電度 (mS/cm)	文獻導電度 (mS/cm)[54]
1	77.167	75.5
0.1	9.177	10.3
0.01	1.274	1.08
0.001	0.145	0.112

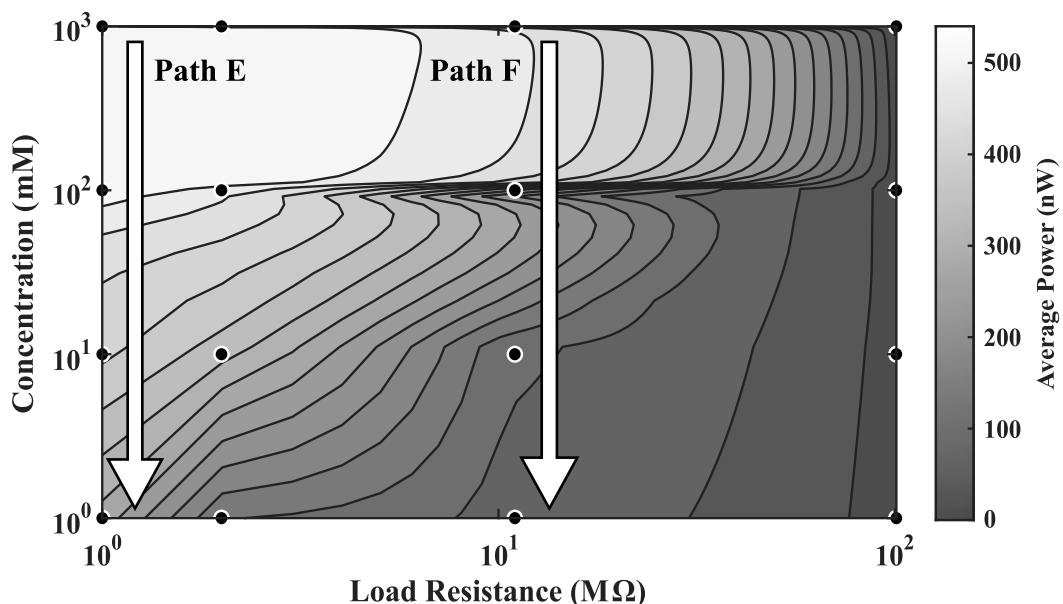


圖 4.23、液滴濃度於不同串聯電阻的平均電功率



第五章 結論

本研究為液滴發電器的量測方法建立了不同的標準，進行一系列的實驗研究，旨在驗證這些量測標準的可行性，以及參考 Costanzo 等人的研究建立了一套 DEG 發電模型，並檢視 DEG 的發電過程。本研究的第一個貢獻是量測 DEG 的輸出電壓或電流時，須慎選取樣頻率，且應於相關研究中註明儀器的取樣頻率。第二個貢獻是應採用平均電功率而非峰值電功率表示 DEG 的性能，否則可能高估 DEG 的功率與性能優劣排列。第三個貢獻是 DEG 各個參數可能會交互影響，因此需進行地毯式地參數搜尋以確保 DEG 的最佳輸出結果。

而透過改變不同實驗參數，研究各項參數對於發電的影響，尋找到最佳的實驗參數，在 PTFE 厚度為 $100 \mu\text{m}$ 、氯化鈉水溶液為 1 mM 、串聯電阻為 $10 \text{ M}\Omega$ 時，DEG 的平均電功率為 $1.35 \mu\text{W}$ 。本研究透過高速攝影機拍攝液滴運動行為，並了解液滴碰觸上電極時的面積至關重要，因其會直接影響電功率的大小。DEG 的電容在實際測量結果與理論計算並不相同，其可能的原因是介電層 PTFE 的製程差異，因此 DEG 的電容應透過儀器測量以得知正確數值。將各項參數代入模型造成的影响，與實驗結果交互比較，將模型修正並預測 DEG 在不同條件下可能的發電過程。

然而，本研究仍有幾個方向需進一步研究，包含 DEG 電容實際的影響為何，因模型當中，改變電容影響了整個模型的發電曲線。另外，本研究猜測了模型當中的電荷轉移不為馬上釋放，因此假設放電係數為一常數，該常數為何影響以及其物理意義仍需探討。最後，本模型利用了示波器的訊號作為模型的參考依據，雖然與 Costanzo 等人的研究相同，但其他文獻中，大多都採用數位電表或是電子式靜電計測量電流，因此仍需測試模型是否通用不同的儀器上。



附錄 A

A.1 取樣頻率實驗表

表 A. 1、取樣頻率實驗之變異係數

取樣頻率(kHz)	平均電壓(V)	總體標準差(V)	變異係數
1	2.603	2.422	0.931
1	3.061	2.840	0.927
5	7.221	1.693	0.235
5	7.673	1.793	0.234
10	9.278	1.073	0.116
10	9.496	1.222	0.129
20	10.284	0.505	0.491
20	10.422	0.587	0.563
50	10.679	0.184	0.172
50	10.625	0.217	0.204
100	10.888	0.197	0.181
100	10.914	0.168	0.154



A.2 電功率等高線圖

圖 A. 1 是固定液滴濃度為 1 mM 的實驗結果，圖 A. 2 為固定液滴濃度為 1 M 的實驗結果。兩等高線圖中皆具有雙或多峰值的路徑。

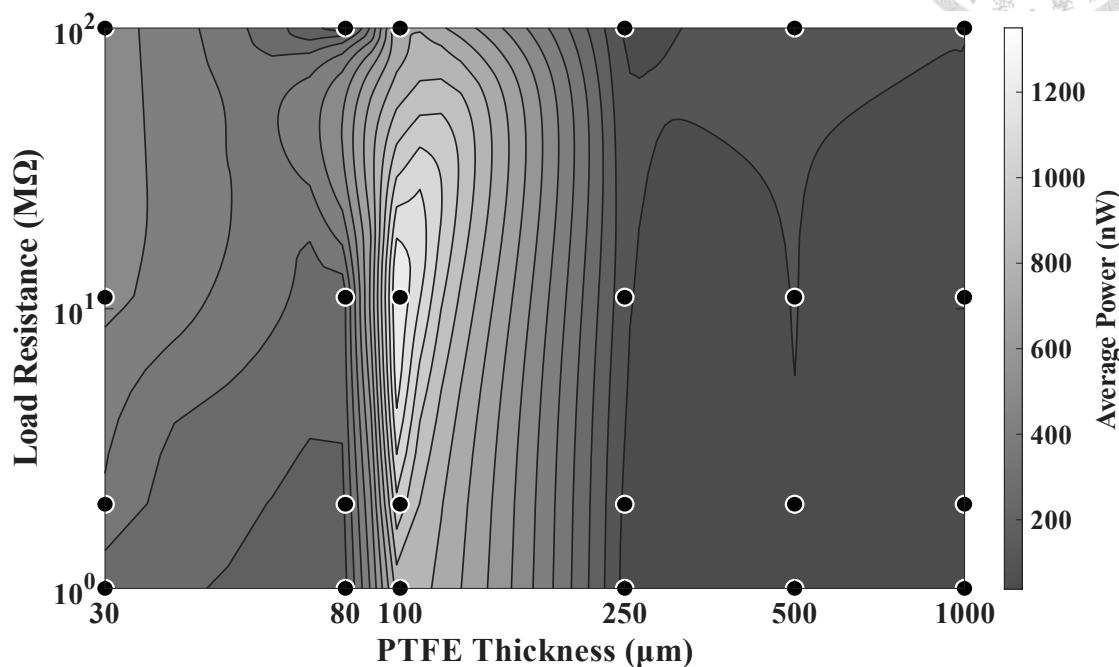


圖 A. 1、地毯式搜索-a (氯化鈉水溶液濃度：1 mM)

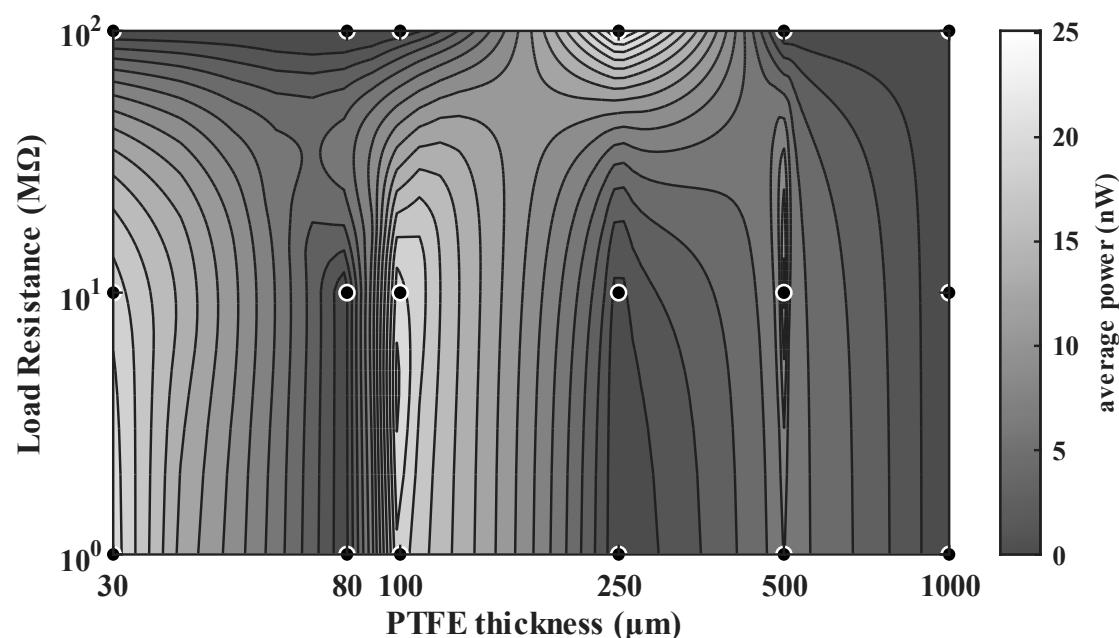


圖 A. 2、地毯式搜索-b (氯化鈉水溶液濃度：1 M)



A.3 口試紀錄表

林孟芳老師：示波器本身有電阻， R_{load} 不應該為 0Ω ？

答： R_{load} 是示波器外接的電阻， 0Ω 是將示波器直接接上 DEG 的結果。

林宗宏老師：應該將示波器本身的電阻與 R_{load} 同時在示意圖上表示。

答：已標示於§2.1 的圖 2.1。

林孟芳老師：地毯式參數搜尋的等高線圖是怎麼畫出來的？

答：使用 MATLAB 中的 contour 功能，將量測結果模擬出來的(已標示在§2.5，於第 17 頁)。

林孟芳老師：是量測完後模擬出來的嗎？資料點總共有多少？

答：是。總共有 864 個資料，每兩種實驗參數可以繪製成一張等高線圖。

林孟芳老師：液滴接觸面積圖需要新增尺寸，否則不清楚液滴接觸面積的大小。

答：已標示於§4.4 的圖 4.11。

王安邦老師：接觸面積的定義？是哪個時間點的接觸面積？

答：是液滴接觸到上電極時的面積。

王安邦老師：那就跟落點有關。接觸面積有甚麼特性？是長到最大的嗎？

答：在低墜落高度時沒有長到最大就已經接觸上電極了。

王安邦老師：每個人的實驗不同，落點往前一點、往後一點，接觸面積就不同？

答：在圖中接觸面積從小到大，包含了所有接觸面積。以拍攝的時間點作為基礎，以時間軸作為定義，尋找第一次接觸到上電極時的面積。因此不受到落點的影響。

王安邦老師：所以是不是液滴接觸面積越大，電壓越大？

答：是的，接觸面積越大，電壓越大。(圖 4.12)



林孟芳老師：論文內容中，TENG 的分類是文獻中有提到的，可以將他們的圖放進來，有利於後來的人閱讀。

答：已標示於圖 1.1。

林孟芳老師：可以更詳細說明文獻圖的內容。

答：已補充在第 6-7 頁。

林孟芳老師：數字與單位之間需要空格。

答：已通篇修正。

林孟芳老師：PI 膠帶與銅箔膠帶都是絕緣體，你怎麼排除這些因素？

答：使用阻抗分析儀將 DEG 的電容直接量測出來。

林孟芳老師：PTFE 厚度越低，電容越高， $30 \mu\text{m}$ 應該是最好，為什麼你的結果是 $100 \mu\text{m}$ 有最高的平均電功率？

答：DEG 的平均電功率受到多個參數影響，有些影響較大，有些比較小。在有外接電阻時，可能就是 $30 \mu\text{m}$ 的平均電功率最好，但其他條件下又不一樣。因此這就是我們為什麼想要地毯式參數搜尋。

王安邦老師：論文應該要有符號表，以給之後的人參考。

答：已新增於第 x 頁。

王安邦老師：文獻中的姓名，後面的列表是姓在前面，名字在後面。可能要跟文章內的姓名對照。

答：已通篇修正。

王安邦老師：DEG 的沿革到底是什麼進步了？你應該要敘述一下，因為這要很了解的人才知道。

答：第一個是提升了 TENG 的壽命，第二個是提升了發電量。



王安邦老師：你說地毯式是最好的方法，但需要做全部實驗，有辦法精簡地毯式參數搜尋嗎？

答：無法精簡，因有可能會陷入局部最佳解(§4.3.32 的圖 4. 10)。

林宗宏老師：為什麼你的 R_{load} 是串聯不是並聯，我第一次看到這樣的接法。

我自己做實驗的時候串聯電壓訊號不會有變化。不管實驗室學生、文獻都是這樣做。

答：因為示波器的阻抗比較小，不像 Keithley6514 一樣是 $T\Omega$ 等級的儀器，因此可以用串聯電阻的方式阻抗匹配，所以我們使用串聯的方式進行測量(標示於§2.1)。

王安邦老師：如果改成並聯會怎麼樣？

答：並聯電阻越大會讓示波器上顯示的電壓越小(標示於§2.1)。

王安邦老師：為什麼模型終止條件是 $10^{-3} \mu C$ ，是你自己設的嗎？

答：是，因為我要讓模型停止演算。

王安邦老師：那你應該要以 $10^{-4} \mu C$ 進行演算後，再說明 $10^{-4} \mu C$ 比 $10^{-3} \mu C$ 所需時間更多，但結果相同。

答：已標示於§3.1。

林宗宏老師：你應該要挑一個不錯的文獻並重現文獻最簡單的研究。根據這個依據、一樣的設計，再外接阻抗等等，求出電壓、電流之類的。要怎麼說服別人這系統值得參考。

答：已標示於§2.5 的圖 2.6 及圖 2.7。

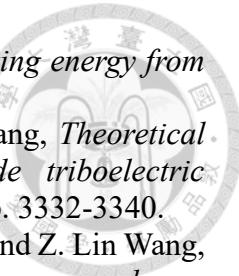
林宗宏老師：你可以將相同的實驗資料堆疊再一起比較，像是在相同取樣頻率下，不同實驗結果的電壓圖堆疊再一起，能更直觀的比較實驗結果。

答：經重疊過後的圖，圖形過於雜亂，因此無法更直觀比較結果。



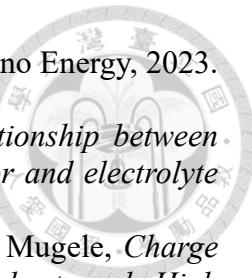
參考文獻

1. Fan, F.-R., Z.-Q. Tian, and Z. Lin Wang, *Flexible triboelectric generator*. Nano Energy, 2012. **1**(2): p. 328-334.
2. Gunawardhana, K.R.S.D., N.D. Wanasekara, and R.D.I.G. Dharmasena, *Towards Truly Wearable Systems: Optimizing and Scaling Up Wearable Triboelectric Nanogenerators*. iScience, 2020. **23**(8).
3. Niu, S., S. Wang, L. Lin, Y. Liu, Y.S. Zhou, Y. Hu, and Z.L. Wang, *Theoretical study of contact-mode triboelectric nanogenerators as an effective power source*. Energy & Environmental Science, 2013. **6**(12): p. 3576-3583.
4. Zhu, G., C. Pan, W. Guo, C.-Y. Chen, Y. Zhou, R. Yu, and Z.L. Wang, *Triboelectric-Generator-Driven Pulse Electrodeposition for Micropatterning*. Nano Letters, 2012. **12**(9): p. 4960-4965.
5. Wang, S., L. Lin, and Z.L. Wang, *Nanoscale Triboelectric-Effect-Enabled Energy Conversion for Sustainably Powering Portable Electronics*. Nano Letters, 2012. **12**(12): p. 6339-6346.
6. Wang, S., L. Lin, Y. Xie, Q. Jing, S. Niu, and Z.L. Wang, *Sliding-Triboelectric Nanogenerators Based on In-Plane Charge-Separation Mechanism*. Nano Letters, 2013. **13**(5): p. 2226-2233.
7. Niu, S., Y. Liu, S. Wang, L. Lin, Y.S. Zhou, Y. Hu, and Z.L. Wang, *Theory of Sliding-Mode Triboelectric Nanogenerators*. Advanced Materials, 2013. **25**(43): p. 6184-6193.
8. Zhou, Y.S., G. Zhu, S. Niu, Y. Liu, P. Bai, Q. Jing, and Z.L. Wang, *Nanometer resolution self-powered static and dynamic motion sensor based on micro-grated triboelectrification*. Advanced Materials, 2014. **26**(11): p. 1719-1724.
9. Lin, L., S. Wang, Y. Xie, Q. Jing, S. Niu, Y. Hu, and Z.L. Wang, *Segmentally structured disk triboelectric nanogenerator for harvesting rotational mechanical energy*. Nano letters, 2013. **13**(6): p. 2916-2923.
10. Jing, Q., G. Zhu, P. Bai, Y. Xie, J. Chen, R.P.S. Han, and Z.L. Wang, *Cage-Encapsulated Triboelectric Nanogenerator for Harvesting Energy from Reciprocating Sliding Motion*. ACS Nano, 2014. **8**(4): p. 3836-3842.
11. Cheng, G., Z.-H. Lin, L. Lin, Z.-l. Du, and Z.L. Wang, *Pulsed Nanogenerator with Huge Instantaneous Output Power Density*. ACS Nano, 2013. **7**(8): p. 7383-7391.
12. Yang, Y., Y.S. Zhou, H. Zhang, Y. Liu, S. Lee, and Z.L. Wang, *A single-electrode based triboelectric nanogenerator as self-powered tracking system*. Advanced Materials, 2013. **25**(45): p. 6594-6601.
13. Lin, Z.-H., G. Cheng, L. Lin, S. Lee, and Z.L. Wang, *Water-solid surface contact electrification and its use for harvesting liquid-wave energy*. Angew. Chem. Int. Ed, 2013. **52**(48): p. 12545-12549.
14. Yang, Y., Y.S. Zhou, H. Zhang, Y. Liu, S. Lee, and Z.L. Wang, *A Single-Electrode Based Triboelectric Nanogenerator as Self-Powered Tracking System*. Advanced Materials, 2013. **25**(45): p. 6594-6601.
15. Yang, X., S. Chan, L. Wang, and W.A. Daoud, *Water tank triboelectric nanogenerator for efficient harvesting of water wave energy over a broad frequency range*. Nano Energy, 2018. **44**: p. 388-398.
16. Lin, Z.-H., G. Cheng, S. Lee, K.C. Pradel, and Z.L. Wang, *Harvesting water drop energy by a sequential contact-electrification and electrostatic-induction process*. Adv. Mater, 2014. **26**(27): p. 4690-4696.
17. Zhang, H., Y. Yang, X. Zhong, Y. Su, Y. Zhou, C. Hu, and Z.L. Wang, *Single-*

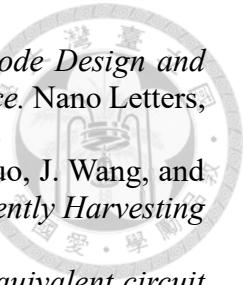


- electrode-based rotating triboelectric nanogenerator for harvesting energy from tires.* ACS nano, 2014. **8**(1): p. 680-689.
18. Niu, S., Y. Liu, S. Wang, L. Lin, Y.S. Zhou, Y. Hu, and Z.L. Wang, *Theoretical investigation and structural optimization of single-electrode triboelectric nanogenerators.* Advanced Functional Materials, 2014. **24**(22): p. 3332-3340.
19. Su, Y., X. Wen, G. Zhu, J. Yang, J. Chen, P. Bai, Z. Wu, Y. Jiang, and Z. Lin Wang, *Hybrid triboelectric nanogenerator for harvesting water wave energy and as a self-powered distress signal emitter.* Nano Energy, 2014. **9**: p. 186-195.
20. Wang, S., Y. Xie, S. Niu, L. Lin, and Z.L. Wang, *Freestanding triboelectric-layer-based nanogenerators for harvesting energy from a moving object or human motion in contact and non-contact modes.* Advanced materials, 2014. **26**(18): p. 2818-2824.
21. Xie, Y., S. Wang, S. Niu, L. Lin, Q. Jing, J. Yang, Z. Wu, and Z.L. Wang, *Grating-Structured Freestanding Triboelectric-Layer Nanogenerator for Harvesting Mechanical Energy at 85% Total Conversion Efficiency.* Advanced Materials, 2014. **26**(38): p. 6599-6607.
22. Lin, L., S. Wang, S. Niu, C. Liu, Y. Xie, and Z.L. Wang, *Noncontact Free-Rotating Disk Triboelectric Nanogenerator as a Sustainable Energy Harvester and Self-Powered Mechanical Sensor.* ACS Applied Materials & Interfaces, 2014. **6**(4): p. 3031-3038.
23. Le, C.-D., C.-P. Vo, T.-H. Nguyen, D.-L. Vu, and K.K. Ahn, *Liquid-solid contact electrification based on discontinuous-conduction triboelectric nanogenerator induced by radially symmetrical structure.* Nano Energy, 2021. **80**: p. 105571.
24. Zhao, J. and Y. Shi, *Boosting the Durability of Triboelectric Nanogenerators: A Critical Review and Prospect.* Advanced Functional Materials, 2023. **33**(14): p. 2213407.
25. Dang, C., C. Shao, H. Liu, Y. Chen, and H. Qi, *Cellulose melt processing assisted by small biomass molecule to fabricate recyclable ionogels for versatile stretchable triboelectric nanogenerators.* Nano Energy, 2021. **90**: p. 106619.
26. Jiang, P., L. Zhang, H. Guo, C. Chen, C. Wu, S. Zhang, and Z.L. Wang, *Signal Output of Triboelectric Nanogenerator at Oil–Water–Solid Multiphase Interfaces and its Application for Dual-Signal Chemical Sensing.* Advanced Materials, 2019. **31**(39): p. 1902793.
27. Liu, S., W. Zheng, B. Yang, and X. Tao, *Triboelectric charge density of porous and deformable fabrics made from polymer fibers.* Nano Energy, 2018. **53**: p. 383-390.
28. Zheng, L., Z.-H. Lin, G. Cheng, W. Wu, X. Wen, S. Lee, and Z.L. Wang, *Silicon-based hybrid cell for harvesting solar energy and raindrop electrostatic energy.* Nano Energy, 2014. **9**: p. 291-300.
29. Zheng, L., G. Cheng, J. Chen, L. Lin, J. Wang, Y. Liu, H. Li, and Z.L. Wang, *A Hybridized Power Panel to Simultaneously Generate Electricity from Sunlight, Raindrops, and Wind around the Clock.* Advanced Energy Materials, 2015. **5**(21): p. 1501152.
30. Jeon, S.-B., D. Kim, G.-W. Yoon, J.-B. Yoon, and Y.-K. Choi, *Self-cleaning hybrid energy harvester to generate power from raindrop and sunlight.* Nano Energy, 2015. **12**: p. 636-645.
31. Jeon, S.-B., D. Kim, M.-L. Seol, S.-J. Park, and Y.-K. Choi, *3-Dimensional broadband energy harvester based on internal hydrodynamic oscillation with a package structure.* Nano Energy, 2015. **17**: p. 82-90.
32. Zhu, G., Y. Su, P. Bai, J. Chen, Q. Jing, W. Yang, and Z.L. Wang, *Harvesting Water*

- Wave Energy by Asymmetric Screening of Electrostatic Charges on a Nanostructured Hydrophobic Thin-Film Surface.* ACS Nano, 2014. **8**(6): p. 6031-6037.
33. Cheng, G., Z.-H. Lin, Z.-l. Du, and Z.L. Wang, *Simultaneously Harvesting Electrostatic and Mechanical Energies from Flowing Water by a Hybridized Triboelectric Nanogenerator.* ACS Nano, 2014. **8**(2): p. 1932-1939.
34. Xu, C., X. Fu, C. Li, G. Liu, Y. Gao, Y. Qi, T. Bu, Y. Chen, Z.L. Wang, and C. Zhang, *Raindrop energy-powered autonomous wireless hyetometer based on liquid-solid contact electrification.* Microsystems & Nanoengineering, 2022. **8**(1): p. 30.
35. Kil Yun, B., H. Soo Kim, Y. Joon Ko, G. Murillo, and J. Hoon Jung, *Interdigital electrode based triboelectric nanogenerator for effective energy harvesting from water.* Nano Energy, 2017. **36**: p. 233-240.
36. Zeng, Y., Y. Luo, Y. Lu, and X. Cao, *Self-powered rain droplet sensor based on a liquid-solid triboelectric nanogenerator.* Nano Energy, 2022. **98**: p. 107316.
37. Zhao, Z., H. Li, A. Li, L. Liu, L. Xue, Z. Cai, R. Yuan, X. Yu, and Y. Song, *Two-orders of magnitude enhanced droplet energy harvesting via asymmetrical droplet-electrodes coupling.* Nano Energy, 2023. **108**: p. 108213.
38. Hu, S., Z. Shi, R. Zheng, W. Ye, X. Gao, W. Zhao, and G. Yang, *Superhydrophobic Liquid-Solid Contact Triboelectric Nanogenerator as a Droplet Sensor for Biomedical Applications.* ACS Applied Materials & Interfaces, 2020. **12**(36): p. 40021-40030.
39. Yu, A., X. Chen, H. Cui, L. Chen, J. Luo, W. Tang, M. Peng, Y. Zhang, J. Zhai, and Z.L. Wang, *Self-Powered Random Number Generator Based on Coupled Triboelectric and Electrostatic Induction Effects at the Liquid-Dielectric Interface.* ACS Nano, 2016. **10**(12): p. 11434-11441.
40. Wang, W., L. Zhang, H. Wang, Y. Zhao, J. Cheng, J. Meng, D. Wang, and Y. Liu, *High-Output Single-Electrode Droplet Triboelectric Nanogenerator Based on Asymmetrical Distribution Electrostatic Induction Enhancement.* Small, 2023. **19**(37): p. 2301568.
41. Zhang, M., C. Bao, C. Hu, Y. Huang, Y. Yang, and Y. Su, *A droplet-based triboelectric-piezoelectric hybridized nanogenerator for scavenging mechanical energy.* Nano Energy, 2022. **104**: p. 107992.
42. Zhan, F., A.C. Wang, L. Xu, S. Lin, J. Shao, X. Chen, and Z.L. Wang, *Electron Transfer as a Liquid Droplet Contacting a Polymer Surface.* ACS Nano, 2020. **14**(12): p. 17565-17573.
43. Wei, X., Z. Zhao, C. Zhang, W. Yuan, Z. Wu, J. Wang, and Z.L. Wang, *All-Weather Droplet-Based Triboelectric Nanogenerator for Wave Energy Harvesting.* ACS Nano, 2021. **15**(8): p. 13200-13208.
44. Liu, X., A. Yu, A. Qin, and J. Zhai, *Highly Integrated Triboelectric Nanogenerator for Efficiently Harvesting Raindrop Energy.* Advanced Materials Technologies, 2019. **4**(11): p. 1900608.
45. Xu, W., H. Zheng, Y. Liu, X. Zhou, C. Zhang, Y. Song, X. Deng, M. Leung, Z. Yang, and R.X. Xu, *A droplet-based electricity generator with high instantaneous power density.* Nature, 2020. **578**(7795): p. 392-396.
46. Zhang, N., H. Zhang, W. Xu, H. Gu, S. Ye, H. Zheng, Y. Song, Z. Wang, and X. Zhou, *A droplet-based electricity generator with ultrahigh instantaneous output and short charging time.* Droplet, 2022. **1**(1): p. 56-64.
47. Wang, K., W. Xu, J. Li, H. Zheng, S. Sun, W. Song, Y. Song, Z. Ding, R. Zhang, Y. Sun, H. Zhang, J. Li, and Z. Wang, *Enhancing water droplet-based electricity*



- generator by harnessing multiple-dielectric layers structure.* Nano Energy, 2023. **111**: p. 108388.
48. Shima, S., R. Uejima, E. Takamura, and H. Sakamoto, *Relationship between output voltage of water droplet-based electricity nanogenerator and electrolyte concentration.* Nano Energy, 2023. **112**: p. 108503.
49. Wu, H., N. Mendel, S. van der Ham, L. Shui, G. Zhou, and F. Mugele, *Charge Trapping-Based Electricity Generator (CTEG): An Ultrarobust and High Efficiency Nanogenerator for Energy Harvesting from Water Droplets.* Advanced Materials, 2020. **32**(33): p. 2001699.
50. Li, X., X. Ning, L. Li, X. Wang, B. Li, J. Li, J. Yin, and W. Guo, *Performance and power management of droplets-based electricity generators.* Nano Energy, 2022. **92**: p. 106705.
51. Li, Z., D. Yang, Z. Zhang, S. Lin, B. Cao, L. Wang, Z.L. Wang, and F. Yin, *A droplet-based electricity generator for large-scale raindrop energy harvesting.* Nano Energy, 2022. **100**: p. 107443.
52. Wang, L., Y. Song, W. Xu, W. Li, Y. Jin, S. Gao, S. Yang, C. Wu, S. Wang, and Z. Wang, *Harvesting energy from high-frequency impinging water droplets by a droplet-based electricity generator.* EcoMat, 2021. **3**(4): p. e12116.
53. Zhang, Q., Y. Li, H. Cai, M. Yao, H. Zhang, L. Guo, Z. Lv, M. Li, X. Lu, C. Ren, P. Zhang, Y. Zhang, X. Shi, G. Ding, J. Yao, Z. Yang, and Z.L. Wang, *A Single-Droplet Electricity Generator Achieves an Ultrahigh Output Over 100 V Without Pre-Charging.* Advanced Materials, 2021. **33**(51): p. 2105761.
54. Yang, L., J. Yu, Y. Guo, S. Chen, K. Tan, and S. Li, *An Electrode-Grounded Droplet-Based Electricity Generator (EG-DEG) for Liquid Motion Monitoring.* Advanced Functional Materials, 2023. **33**(36): p. 2302147.
55. Zhang, N., H. Zhang, Z. Liu, W. Xu, H. Zheng, Y. Song, Z. Wang, and X. Zhou, *Performance transition in droplet-based electricity generator with optimized top electrode arrangements.* Nano Energy, 2023. **106**: p. 108111.
56. Ho, C.-Y., C.-Y. Su, and W.-Z. Hu, *Exploring the energy harvest of droplet flow over inducted film for the rainy-shiny solar panel application.* Materials Today Communications, 2024. **38**: p. 107609.
57. Meng, J., L. Zhang, H. Liu, W. Sun, W. Wang, H. Wang, D. Yang, M. Feng, Y. Feng, and D. Wang, *A New Single-Electrode Generator for Water Droplet Energy Harvesting with A 3 mA Current Output.* Advanced Energy Materials, 2024. **14**(5): p. 2303298.
58. Hu, T., X. Li, X. Wang, H. Sheng, J. Yin, and W. Guo, *Assessing the Mechanical-to-Electrical Energy Conversion Process of a Droplet Sliding on the Poly(tetrafluoroethylene) Surface.* ACS Applied Materials & Interfaces, 2024. **16**(1): p. 1892-1898.
59. Yang, Y., B. Cao, C. Yang, Z. Wang, H. Zhang, L. Fang, W. He, and P. Wang, *A droplet-based multi-position and multi-layered triboelectric nanogenerator for large-scale raindrop energy harvesting.* AIP Advances, 2023. **13**(5).
60. Xu, W., X. Li, J. Brugger, and X. Liu, *Study of the enhanced electricity output of a sliding droplet-based triboelectric nanogenerator for droplet sensor design.* Nano Energy, 2022. **98**: p. 107166.
61. Wang, X., S. Fang, J. Tan, T. Hu, W. Chu, J. Yin, J. Zhou, and W. Guo, *Dynamics for droplet-based electricity generators.* Nano Energy, 2021. **80**: p. 105558.
62. Zhou, L., D. Zhang, X. Ji, H. Zhang, Y. Wu, C. Yang, Z. Xu, and R. Mao, *A superhydrophobic droplet triboelectric nanogenerator inspired by water strider for self-powered smart greenhouse.* Nano Energy, 2024. **129**: p. 109985.



63. Wu, H., J. Li, R. Du, L. Liu, and W. Ou-Yang, *Study of Electrode Design and Inclination Angle for Superior Droplet-Driven TENG Performance*. Nano Letters, 2024. **24**(49): p. 15676-15682.
64. Liu, D., P. Yang, Y. Gao, N. Liu, C. Ye, L. Zhou, J. Zhang, Z. Guo, J. Wang, and Z.L. Wang, *A Dual-Mode Triboelectric Nanogenerator for Efficiently Harvesting Droplet Energy*. Small, 2024. **20**(31): p. 2400698.
65. Sriphan, S., U. Pharino, K. Chaithawee, and N. Vittayakorn, *Equivalent circuit model and simulation for dynamic sliding droplet-based triboelectric nanogenerators*. Nano Energy, 2024. **130**: p. 110100.
66. Naganuma, R., D. Tajima, and Y. Aoki, *Relationship between water droplet motion and output characteristics in droplet-based electricity generator*. Molecular Crystals and Liquid Crystals, 2023. **762**(1): p. 71-80.
67. Zhang, N., H. Gu, K. Lu, S. Ye, W. Xu, H. Zheng, Y. Song, C. Liu, J. Jiao, Z. Wang, and X. Zhou, *A universal single electrode droplet-based electricity generator (SE-DEG) for water kinetic energy harvesting*. Nano Energy, 2021. **82**: p. 105735.
68. Gwon, G., D. Kam, S. Jang, M. La, and D. Choi, *Development of multi droplet-based electricity generator system for energy harvesting improvement from a single droplet*. Functional Composites and Structures, 2024. **6**(3): p. 035009.
69. Wang, L., W. Li, Y. Song, W. Xu, Y. Jin, C. Zhang, and Z. Wang, *Monolithic Integrated Flexible Yet Robust Droplet-Based Electricity Generator*. Advanced Functional Materials, 2022. **32**(49): p. 2206705.
70. Wu, H., N. Mendel, D. van den Ende, G. Zhou, and F. Mugele, *Energy Harvesting from Drops Impacting onto Charged Surfaces*. Physical Review Letters, 2020. **125**(7): p. 078301.
71. Li, L., X. Li, W. Deng, C. Shen, X. Chen, H. Sheng, X. Wang, J. Zhou, J. Li, Y. Zhu, Z. Zhang, J. Yin, and W. Guo, *Sparking potential over 1200 V by a falling water droplet*. Science Advances, 2023. **9**(46): p. eadi2993.
72. Costanzo, L., A.L. Schiavo, and M. Vitelli, *Circuital Modeling of a Droplet Electrical Generator*. IEEE Sensors Journal, 2023. **23**(12): p. 13028-13036.
73. Ye, C., D. Liu, P. Chen, L.N. Cao, X. Li, T. Jiang, and Z.L. Wang, *An integrated solar panel with a triboelectric nanogenerator array for synergistic harvesting of raindrop and solar energy*. Advanced Materials, 2023. **35**(11): p. 2209713.
74. Zhu, L., L. Guo, Z. Ding, Z. Zhao, C. Liu, and L. Che, *Self-Powered Intelligent Water Droplet Monitoring Sensor Based on Solid–Liquid Triboelectric Nanogenerator*. Sensors, 2024. **24**(6): p. 1761.
75. Hu, W., Z. Gao, X. Dong, J. Chen, and B. Qiu, *Contact Electrification of Liquid Droplets Impacting Living Plant Leaves*. Agronomy, 2024. **14**(3): p. 573.
76. Sedra, A.S. and K.C. Smith, *Microelectronic Circuits*. 2016, United States of America: Oxford University Press.