

2021 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 160019

參展科別 物理與天文學

作品名稱 離子推進器之流場分析與探討

就讀學校 臺北市立麗山高級中學

指導教師 吳明德

作者姓名 徐冠東

關鍵詞 離子推進器、尖端放電、電磁扭秤

作者簡介



我是徐冠東(左)，目前就讀麗山高中。

我從小就對物理充滿興趣，卻一直沒有機會去實際了解它。自從進入麗山高中有了做專題研究的機會，才得以深入地去認識物理這個領域，慢慢從菜鳥成為能真正獨當一面、解決問題的人。

閒暇時，我也喜愛閱讀、讀書，在紮實理論基礎下，更讓我提升解決問題的能力。最後，在比賽將會遇到其他厲害的人，我要把握機會跟與他們交流、學習，秉持著對物理的熱情，繼續努力走下去。

摘要

本研究藉調控電源供應器電壓至高壓模組，可輸出不同高壓電，驅動自製以銅釘與銅管構造離子推進器，產生不同大小推力。因推力極小需自製儀器測量，藉檢流計內渦形彈簧與通電後檢流計指針偏轉，製作電磁扭秤量測微小推力。發現驅動電壓(3.7~7.6kV)與離子推進力呈正相關。調整銅針與七枚銅管間距，間距小於 0.80cm，尖端放電且推力略為降低，間距介於 1.30cm 與 1.45cm 時，轉變為吸力，進一步觀測單一銅管周圍流場，類似電偶極場分佈，說明離子推進器銅針與銅管間距小，視為平行板電場，而銅針與銅管間距大，可視為電偶極電場分佈。最後間距大於 1.45cm 時，推力驟減為零。產生離子風，通過銅管後的空氣噴流，磁力不偏向證實不具有正負電性，但未經銅管的噴流應帶有正電荷。

Abstract

In this study, by adjusting the voltage of the power supply to the high-voltage module, the module can output different high-voltage power and drive self-made copper nails and tubes. We constructed self-made ion thruster to produce different magnitudes of thrust. However, because the thrust is very small, it is necessary to measure it with a self-made instrument, the vortex spring in the galvanometer. After the power is on, the pointer of the galvanometer deflects, and an electromagnetic torsion balance is made to measure the tiny thrust of the ion thruster.

We found that the driving voltage (3.7~7.6kV) and ion propulsion were positively correlated. We also adjusted the distance between the copper needle and the seven copper tubes. When the distance was less than 0.80cm, it would generated corona discharge and the thrust was slightly reduced. When the distance between 1.30cm and 1.45cm, the thrust turned into the force of attraction, and we further observed the flow field around a single copper tube, which was similar to the field distribution of electric dipole. When the distance was longer than 1.45cm, the thrust will suddenly decline to zero.

The small distance between the copper needle and the copper tubes can be regarded as a parallel plate electric field, while the large distance between the copper needle and the copper tubes can be regarded as a field distribution of electric dipole. Besides, the ion thruster generates ionic wind and the air jet flowing through the copper pipe. Finally, we also added the magnetic force around the ion thruster. It was found that the air jet through the copper pipe was not biased to prove that there was no positive and negative electricity behind the tube, but the jet without passing through the copper pipe should contain positive charge.

壹、前言

一、研究動機

在進行本研究之前，透過網路資料比較有哪些火箭發動機種類。其中完全不同於化學火箭，獨特的『離子推進器』深具發展潛力。雖然現階段離子推進器的推力極小，目前並未廣泛被使用，但僅需攜帶少量可供離子化的氣體，可藉太陽能板或核反應爐供電，並可以長時間使火箭持續加速前進。所以實驗設計就是要探討離子推進器的推力變化及流場分佈。

本研究共有五大實驗，一步步循序漸進地從簡入難，開始研究之前，需要先搜尋對於離子推進或高電壓的相關歷屆科展研究報告，無論是電離轉輪研究（參考1），或者是受高壓電改變液滴曲面（參考2），又或是火焰受高壓電改變偏向角度（參考3）。上述歷屆科展研究報告，多半採固定電壓驅動以及定性化的研究。針對歷屆科展作品的限制，本研究先開發兩項裝置，第一、開發藉改變高電壓的電壓值，以方便調控離子推進器的驅動力。第二、為量測離子推進器的微弱推力，需自製推力儀器，利用檢流計內的渦形彈簧與電磁鐵、自製電磁扭秤測量推力。第三、四，除了分析高電壓驅動而產生的離子風推力，接著還分析調整離子推進器內銅釘與銅管間距，觀測與分析推力變化與流場分佈，運用物理原理提出解釋。在最後實驗五中證實假說，發現類似電偶極場的模型，並計算出能量轉換率，提升了實驗可行性。

二、研究目的

(一) 測量電源供應器輸入電壓至高電壓模組的輸出電壓關係：

離子推進器需要產生高電壓才能驅動，需使用高電壓變壓器（模組）才能有高電壓的輸出。首先要尋找合適的高壓變壓器（模組），並且要能調控輸出的高電壓多寡，也需製作測量輸出的電壓量值的實驗裝置。

(二) 測量並計算自製微型測力裝置的使用數據，以測量推進器推力：

為量測離子推進器微小推力，必需開發能夠測量微小推力裝置，並且校準此測量推力裝置的刻度。

(三) 測量在不同電壓驅動下，離子推進器的推力大小關係：

離子推進器的推力大小是否會隨輸入高電壓的大小不同而改變？當改變電壓時，測量推力的變化關係。

(四) 藉由改變離子推進器內銅針與銅管的間距，測量推力大小變化：

高壓電在銅針的尖端會形成強大的電場，改變針尖與銅管間距時，測量離子推進器的推力是否會發生變化？

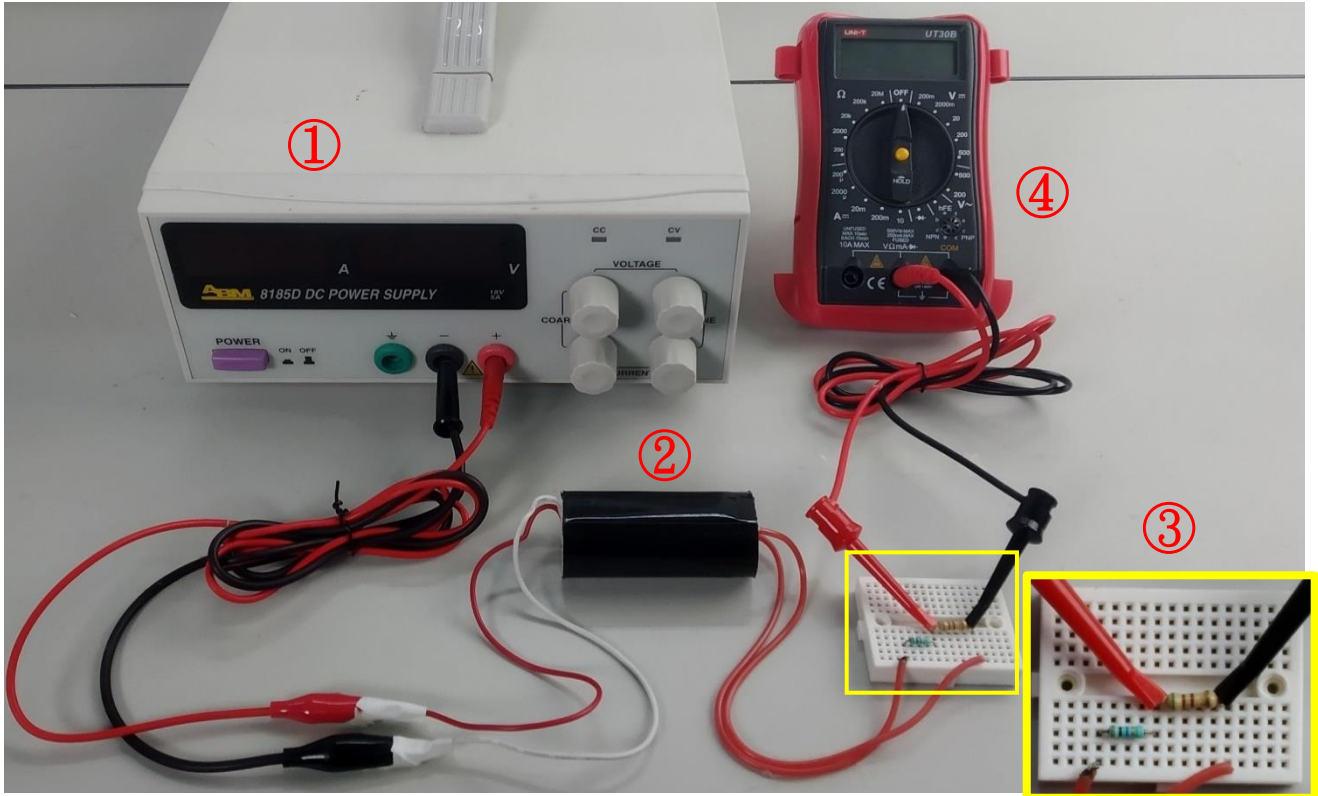
(五) 觀察離子推進器周遭的流場分佈(單一銅釘、銅管)、觀察有無隔板的推力變化：

空氣游離化時產生離子風推力，而當改變銅針與銅管的間距時，推力除了向前推動的力以外，周圍或許也有因電場影響的離子在運動。當銅針與銅管的距離近，相當於近場的均勻放電，但距離遠時，可能會形成遠場，離子的運動或許會跟著轉彎，形成不同方向的推力，這是要去實驗並觀察的，最後發現有類似電偶極場的現象，並進一步計算出功率的轉換率。

貳、研究方法或過程

一、實驗器材與設計

(一) 實驗一裝置圖：測量電源供應器輸入電壓至高電壓變壓器的輸出電壓關係



圖一、利用分壓原理測量高電壓

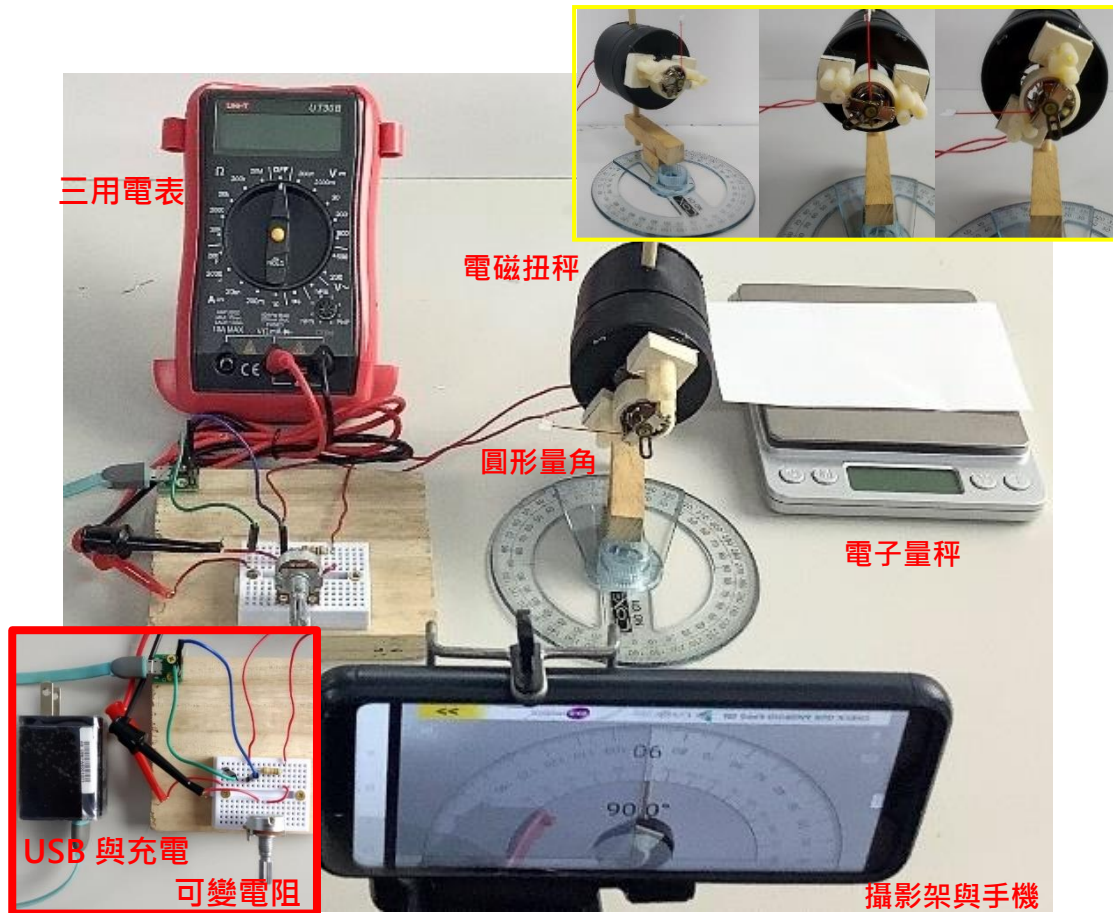
- ① 直流電源供應器：通入一般電壓 110 V 的電壓，輸出 $3.7\sim 7.3\text{ V}$ 的直流電
- ② 高電壓變壓器：輸入直流電，輸出上千伏特的高電壓
- ③ 麵包板與電阻：麵包板上串聯一個 $10\text{ M}\Omega$ 、一個 $1\text{ k}\Omega$ 的電阻，通入高電壓
- ④ 三用電表：高電壓通入電阻時，利用分壓原理測量 $1\text{ k}\Omega$ 電阻的電壓值(以免燒壞電表)，即可算出高電壓變壓器輸出的總電壓值。

1. 實驗一：電源供應器輸入 $3.7\text{ V}\sim 7.3\text{ V}$ 至高電壓變壓器，生成上千伏特的電壓，連接麵包板上的電阻時（一個 1000Ω ，一個 $10\text{ M}\Omega$ ），利用分壓的方式讓電阻較小的電壓值，再用三用電表測出小電阻的電壓值即可承以倍數得知總輸出的高電壓。



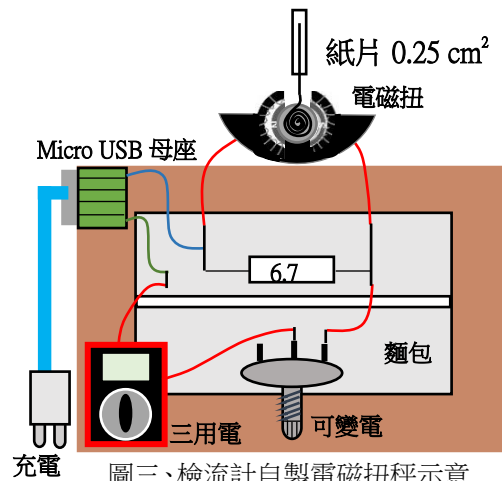
電表無法承受上千伏特的電壓

(二) 實驗二裝置圖：測量並計算自製微型測力裝置的使用數據，以測量推進器推力
 1. 檢流計製測力裝置（電磁扭秤）



圖二、檢流計自製電磁扭秤，可變電阻可以調控電阻，電表觀察 USB 輸入電流值，利用手機 APP 觀

2. 實驗二：手機 APP 量角器(Protractor)使其與指針水平於地面並懸掛著，接著將測量過重量之紙片放置於指針上（指針往下偏轉）再將檢流計轉回至水平，記錄紙片到機心的距離（力臂）再將紙片拿起，手機測量指針偏角。透過力矩 $\tau = F \times d$ ，可得知指針偏移角度與指針回復力矩的關係。

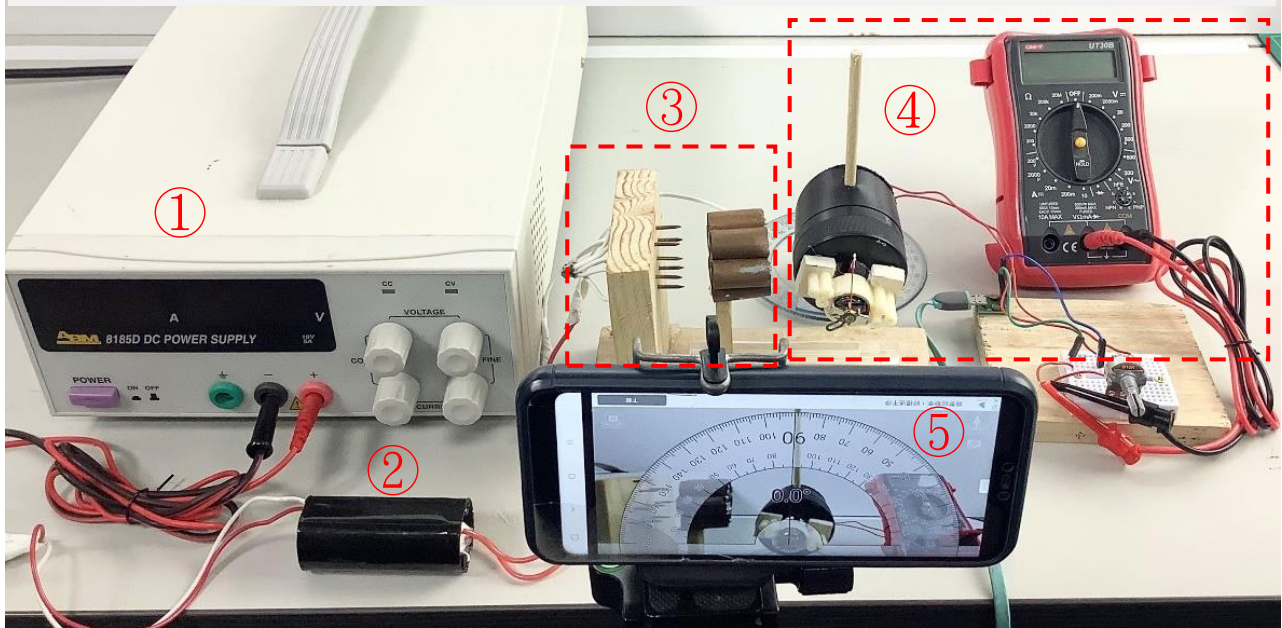


圖三、檢流計自製電磁扭秤示意

當指針受力偏轉時，即可通入電流使指針達到受力平衡，再以此時電流值，計算出指針回復力矩，得知指針上的受力大小。控制電流的線路，先以 USB 與充電器輸入固定電壓 5V，檢流計裝置（電磁扭秤）與同電阻值 6.7Ω 的電阻並聯，接著串聯可變電阻（調整電阻、電流值），最後串聯電表（觀察電流值）並連回 USB 形成通路。控制指針（電磁扭秤）的電流，得對應指針回復力。

(三) 實驗三與實驗四裝置圖：測量在不同電壓驅動下，離子推進器的推力大小關係與藉由改變離子推進器內銅針與銅管的間距，測量推力大小變化

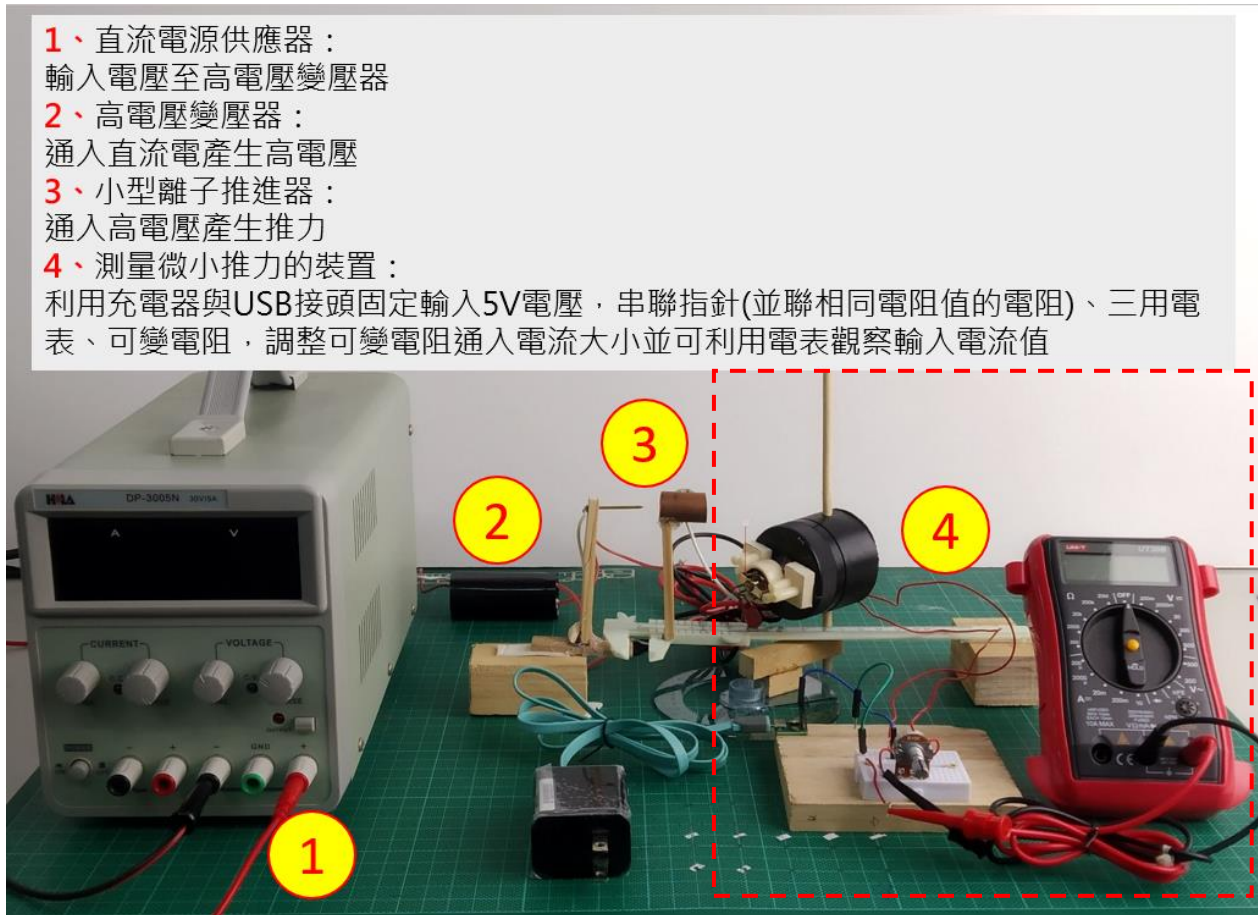
- ① 直流電源供應器：通入一般電壓 110 V 的電壓，輸出 3.7 ~ 7.3 V 的直流電
- ② 高電壓變壓器：輸入直流電，輸出上千伏特的高電壓
- ③ 小型離子推進器：一端銅釘、一端銅管，兩端通入高電壓，此時空氣也為導體並產生電流，在電流流動過程中，空氣中粒子會被游離化成離子，形成離子風並產生推力。
- ④ 測力裝置（電磁扭秤）：調整可變電阻改變通入扭秤的電流值，以測得離子風推力。
- ⑤ 攝影架與手機 APP：利用手機量角器可以觀察出指針被吹動時的偏轉角度。



圖四、實驗三與實驗四裝置圖相同，實驗三是電壓變化與推力大小關係，實驗四是銅針與銅管間距與推力大小關係。

1. 實驗三：電源供應器輸入 3.7V~7.3V 至高電壓變壓器，生成上千伏特的電壓，經過離子推進器的銅針，銅針與銅管之間沒有連接而有間距，由於兩端電壓夠大，所以空氣也可為導體形成電路，而在電子經過空氣中時，氣體應會解離化進而產生離子風，然後產生推力且作用在測量微小推力的裝置上，利用得知的指針偏轉角度可以算出推力大小，了解推力情形。
2. 實驗四：源供應器輸入 3.7V~7.3V 至高電壓變壓器，生成上千伏特的電壓，經過離子推進器的銅針，銅針與銅管之間沒有連接而有間距，此時改變銅針與銅管的間距，推力大小會有變化，要利用測量微小力裝置了解情形。

(四) 實驗五裝置圖：觀察單一銅釘、銅管周圍的流場分佈



圖五、利用電磁扭秤測量裝置周圍流場分佈

1. 實驗五：與之前並聯七個銅管不同，現在使用單一個銅釘、銅管來實驗。

直流電源供應器輸入直流電（3.7~7.3V），高電壓模組輸出高電壓至離子推進器，產生離子風推力，此時要用電磁扭秤測量裝置四面八方的氣流方向，配合方格板，接著量出每一方向的推力大小，最後繪出裝置開啟時，四周的流場分佈。

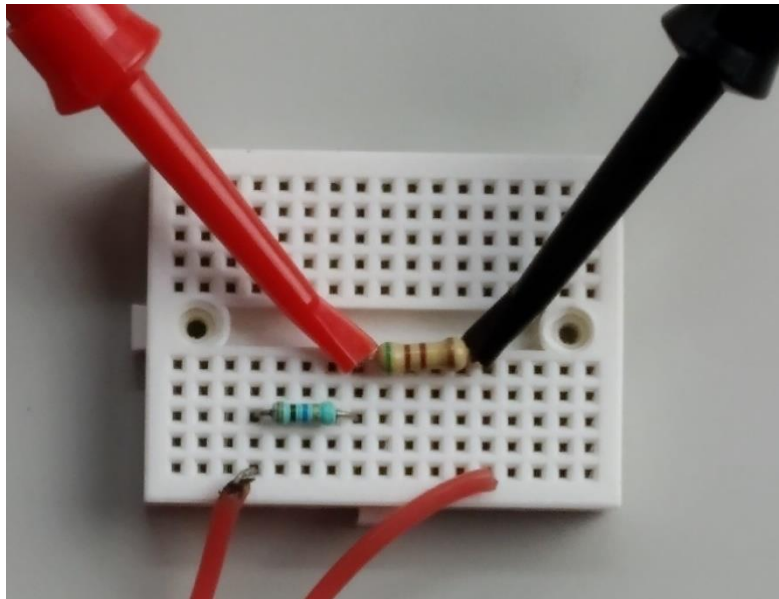
2.(單一銅釘、銅管固定距 1.4cm)測量四周不同點的推力大小與方向、觀察有無外加隔板的推力變化關係。

二、實驗方法與步驟

(一) 實驗一：了解直流電源供應器輸入高電壓變壓器的電壓，對應高電壓變壓器的輸出高電壓，以便掌握電壓的大小。

1. 110V 電流通入直流電源供應器，直流電源輸入 3.7~7.3V 的電壓（高電壓變壓器說明書上的輸入限制）至高電壓變壓器，再輸出高電壓至電組，連接電表測量電壓，利用分壓的原理測量歐姆較小的電阻（以免燒壞電表），即得知高電值。

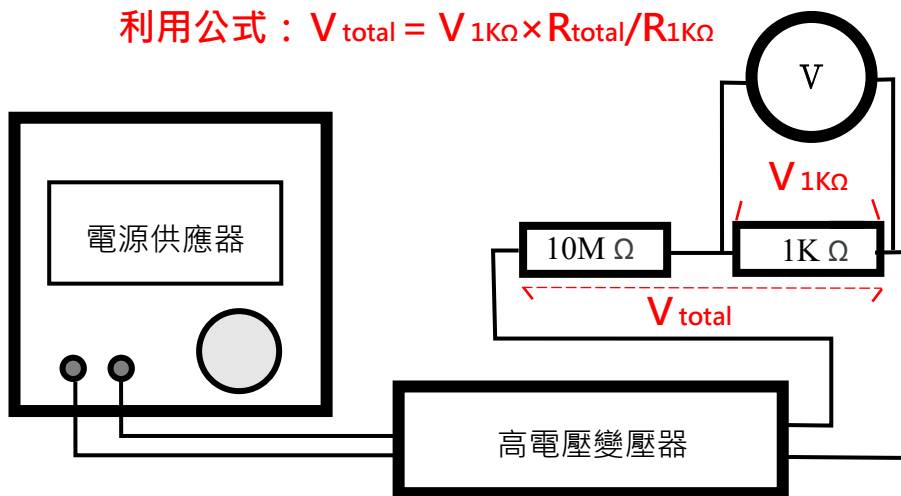
2. 裝置圖：利用分壓方式得知高電壓總電壓



圖六、了解直流電源供應器輸入高電壓變壓器的電壓，對應高電壓變壓器的輸出高電壓，以掌握電壓的大小。

3. 示意圖：

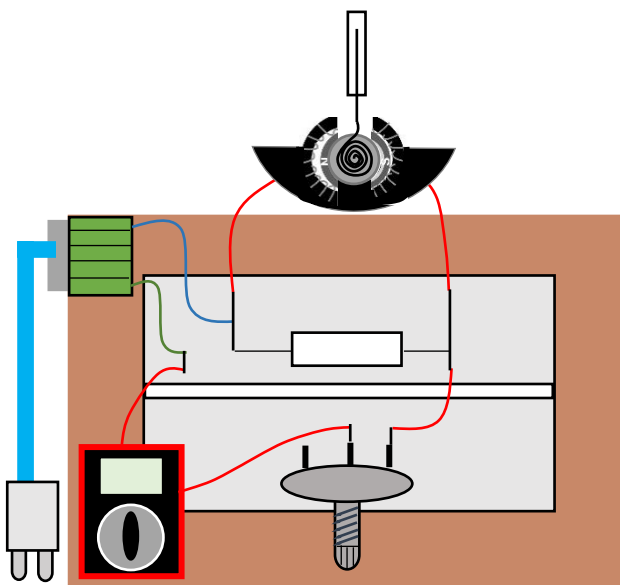
利用公式： $V_{total} = V_{1K\Omega} \times R_{total} / R_{1K\Omega}$



(二) 實驗二：測力裝置，指針的偏移角度與回復力矩、通入電流與指針回復力矩關係

1. 利用手機 APP 量角器使其與指針水平於地面並懸掛著，接著將測量過重量之紙片放置於指針上（此時指針會往下偏轉）。
2. 再將毫安培計轉回至指針水平於地面，同時記錄紙片到機心的距離（力臂）
3. 最後再將紙片拿起，用手機測量指針與水平的夾角。透過力矩 $\tau = F \times d$ ，可得知指針偏移角度與指針回復力矩的關係、指針通入電流與指針回復力矩的關係。
4. 裝置圖：利用指針偏轉，得知力矩關係

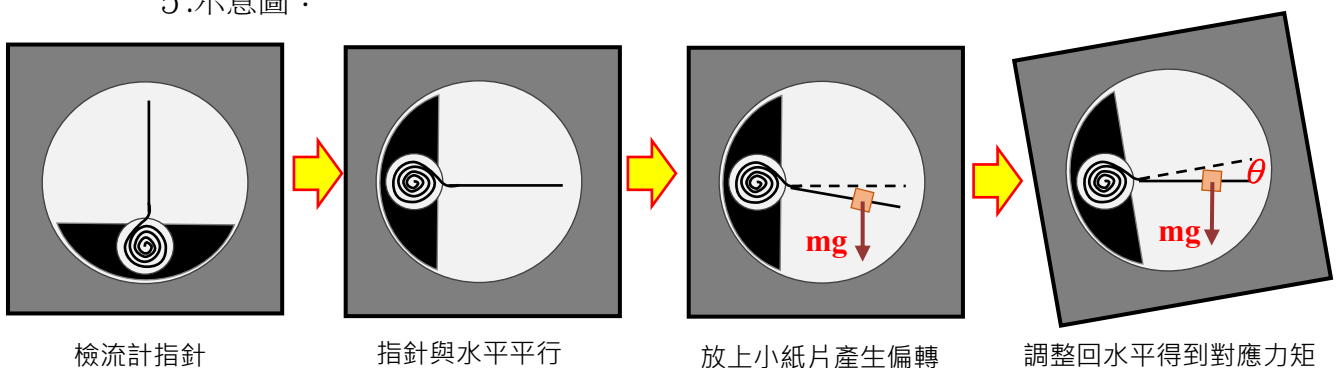
電磁扭秤的線路連接



測力裝置 (電磁扭秤)



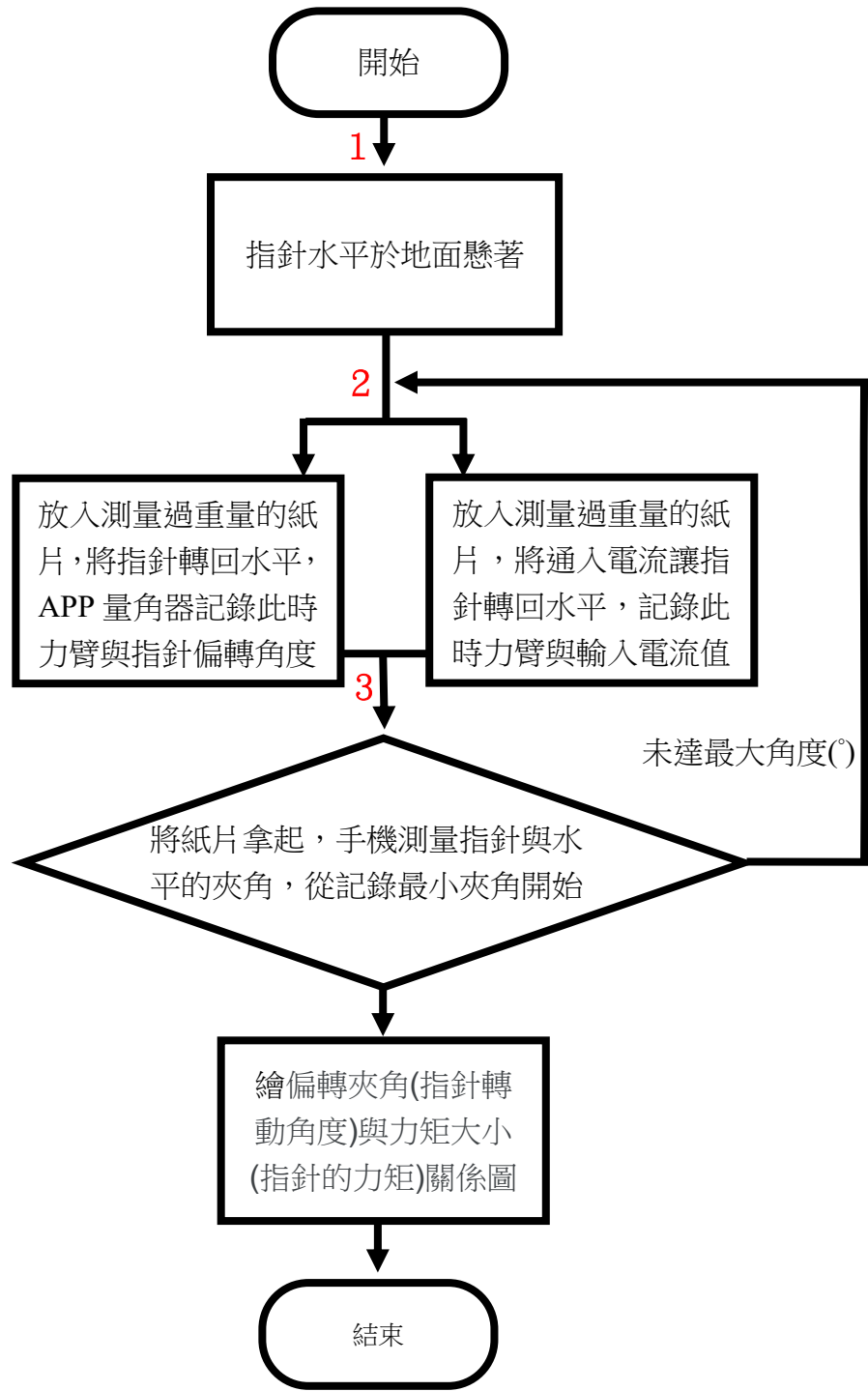
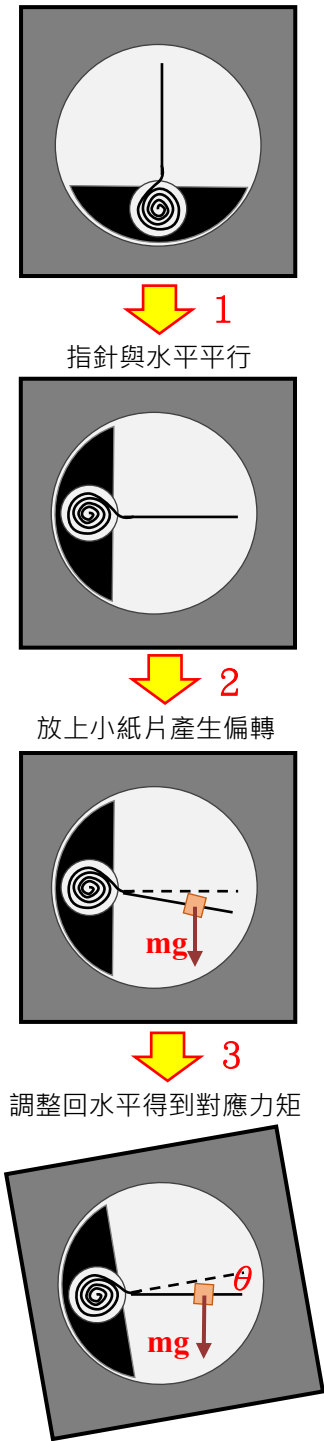
5. 示意圖：



圖七、指針放置為水平，此時放上不同重量的小紙片讓指產生偏轉，此時轉動指針，讓指針與紙片達到受力平衡回到水平，記錄不同重量的小紙片與指針的偏轉角度(力臂 1cm)，利用所得數據繪成圖表，得知指針偏轉角度與指針回復力矩關係。

利用同樣方法放上小紙片讓指針偏轉，此時通入電流讓指針轉回水平，記錄不同重量的小紙片(力臂 1cm)，繪成圖表可得知通入電流與指針產生的回復力矩關係。

6. 流程圖：

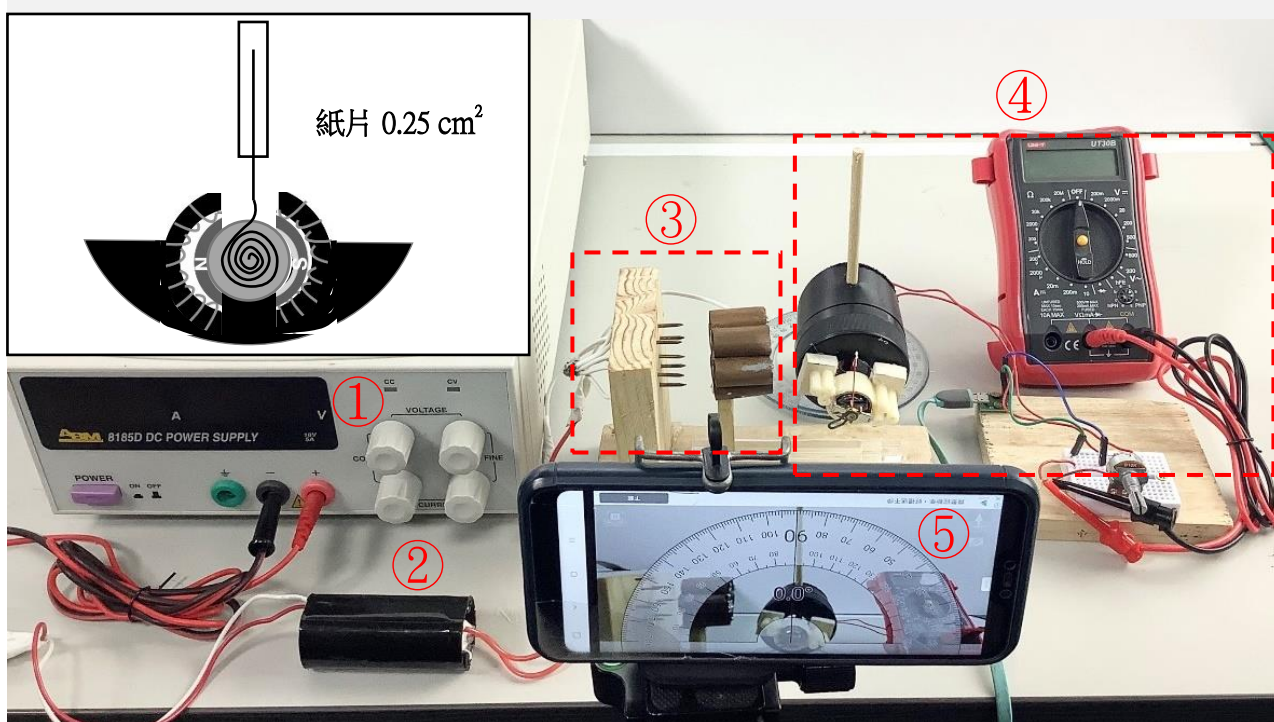


(三) 實驗三：固定銅針與銅管的間距 1cm、銅管與測力裝置的間距 4cm，利用直流電源供應器的輸入電壓（3.7~7.3V，是高電壓變壓器說明書上的輸入限制）至高電壓變壓器的輸出電壓，得指針偏轉與指針偏轉力

1. 利用直流電源供應器的輸入電壓至高電壓變壓器的輸出電壓，並記錄輸入電壓（電源供應器）、與指針偏轉角度。
2. 得知高壓變壓器的輸出高電壓，並記錄輸出電壓（高電壓變壓器）、與指針偏轉力。固定力臂為 1cm 和已知的力矩圖表得出力矩大小，算出指針偏轉力，再除以紙片面積（方便吹動指針），即可得知平均每平方公分的偏轉力。

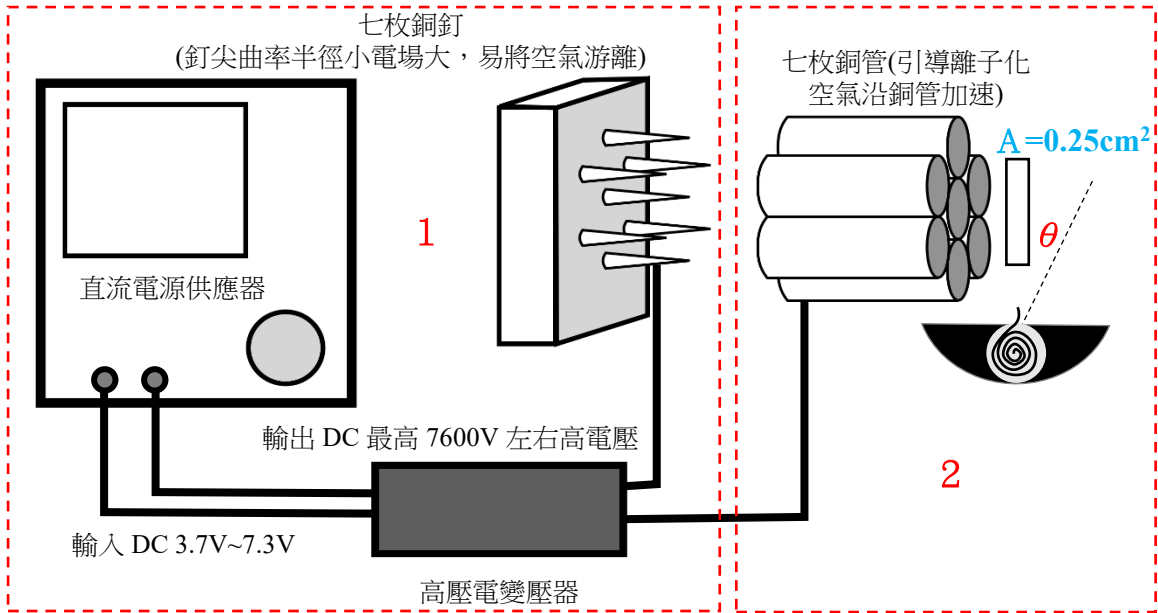
3. 裝置圖與原理圖：

- ① 直流電源供應器：通入一般電壓 110 V 的電壓，輸出 3.7 ~ 7.3 V 的直流電
- ② 高電壓變壓器：輸入直流電，輸出上千伏特的高電壓
- ③ 小型離子推進器：一端銅釘、一端銅管，兩端通入高電壓，此時空氣也為導體並產生電流，在電流流動過程中，空氣中粒子會被游離化成離子，形成離子風並產生推力。
- ④ 測力裝置（電磁扭秤）：調整可變電阻改變通入扭秤的電流值，以測得離子風推力。
- ⑤ 攝影架與手機 APP：利用手機量角器可以觀察出指針被吹動時的偏轉角度。

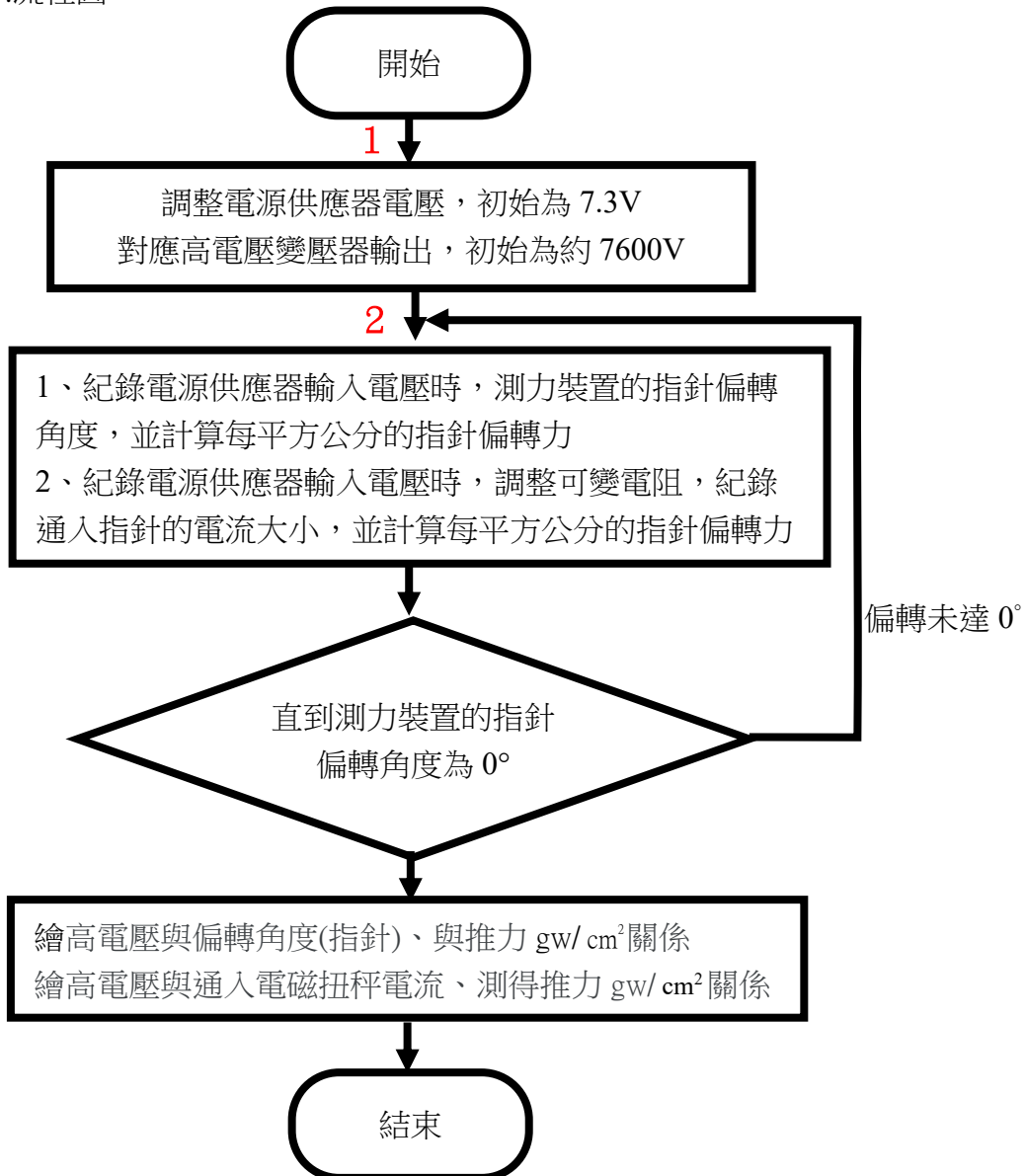


圖八、直流電源供應器輸入電壓，高電壓變壓器輸出高電壓至離子推進器，離子推進器產生推力推動指針，此時開啟電磁扭秤，藉由調整可變電阻來改變電流大小，直到輸入電流產生的指針回復力與離子推進器的離子風推力達到靜力平衡，觀察電表測得電流值，利用通入電流值算出對應的推力值。

4. 示意圖：

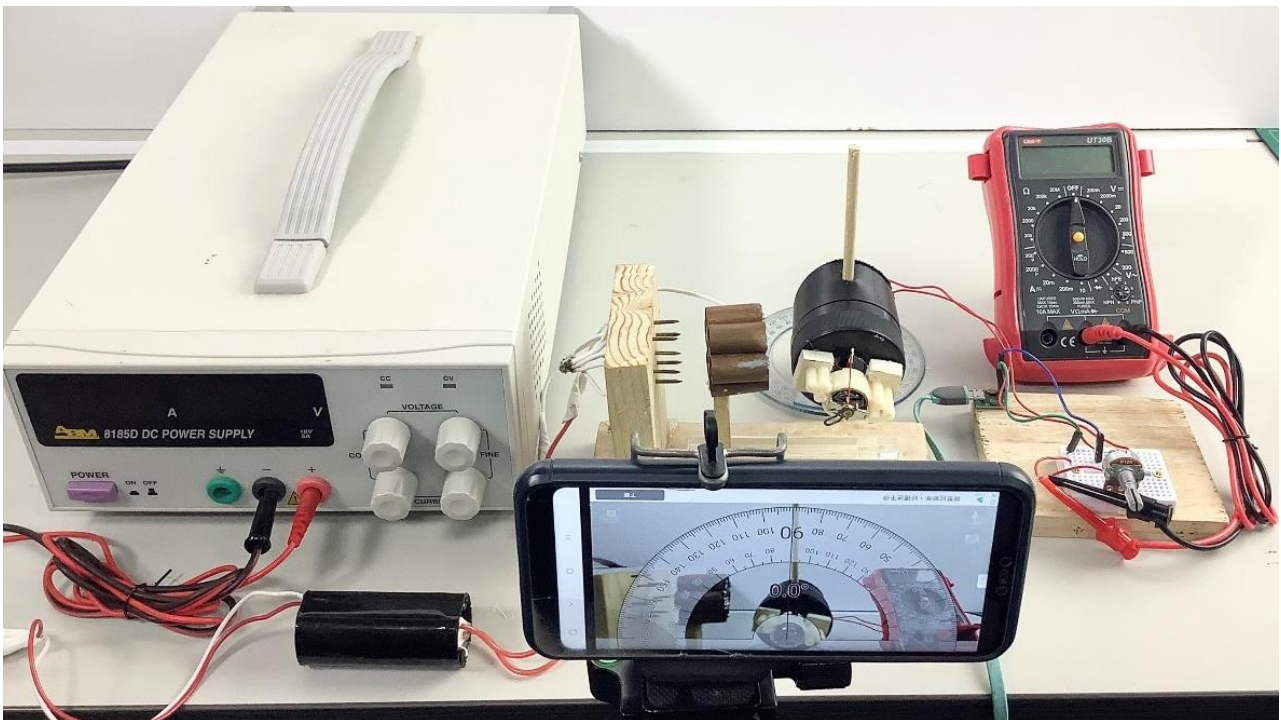


5. 流程圖：

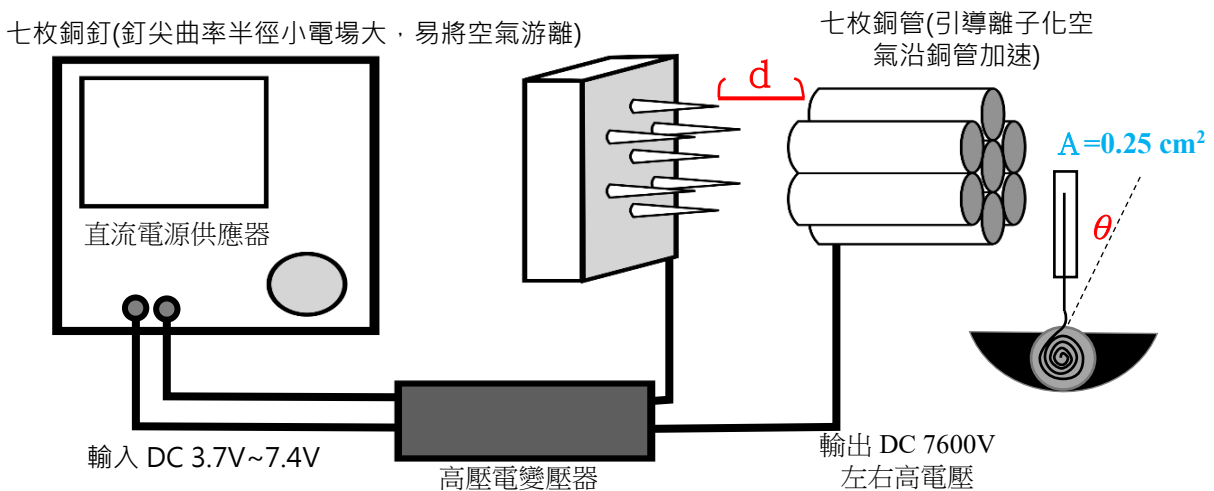


(四) 實驗四：藉由改變離子推進器內銅針與銅管的間距，測量推力大小變化

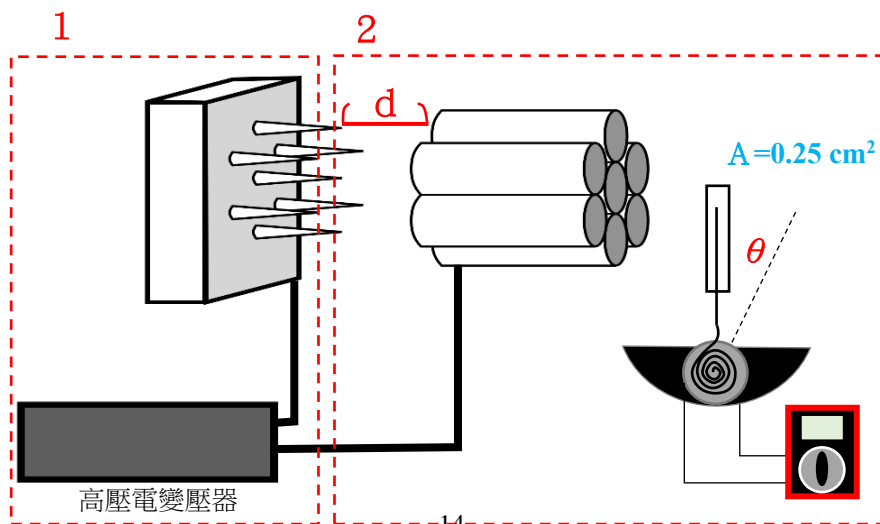
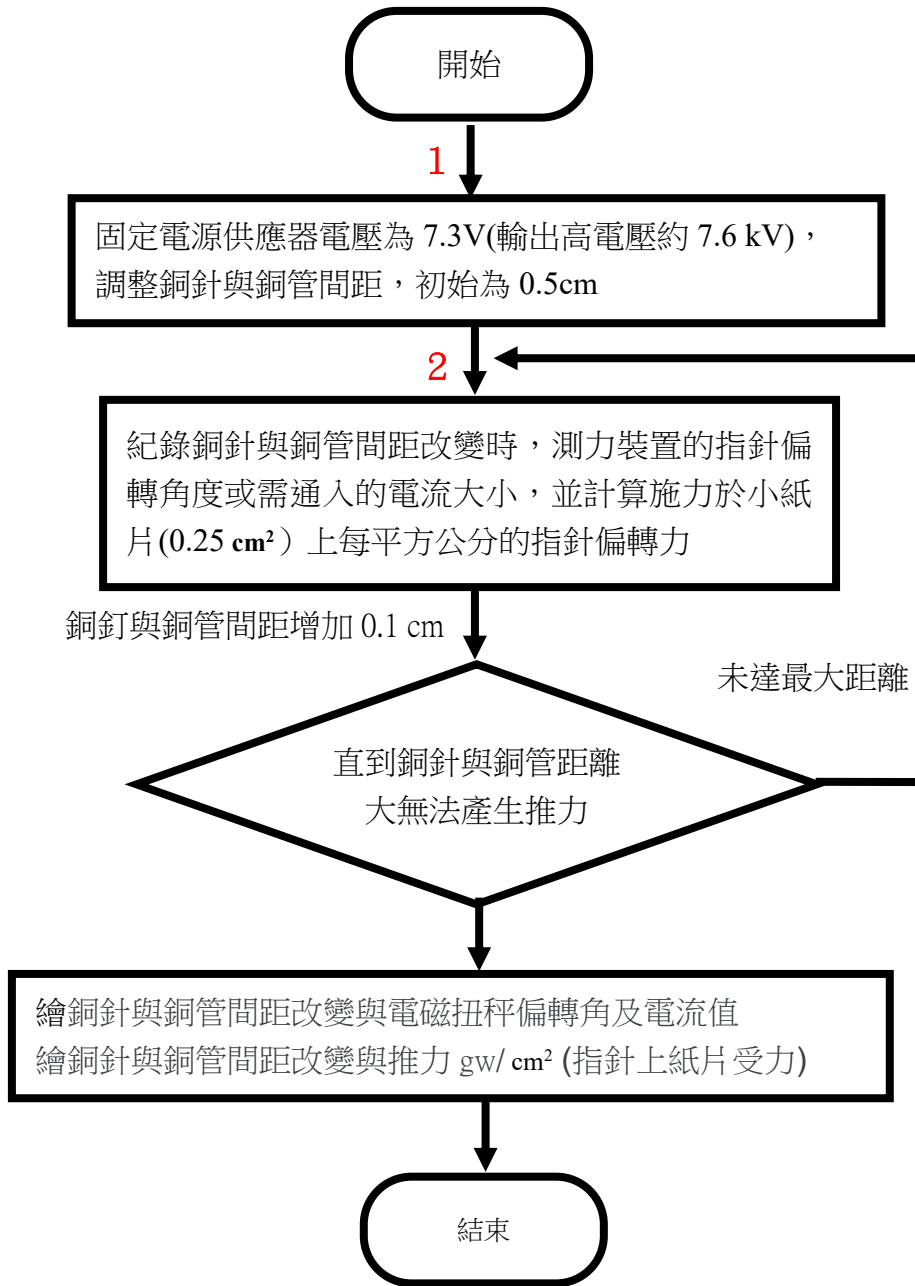
1. 固定輸入電壓 7.3V(直流電源供應器)、銅管與測力裝置的間距，改變銅針與銅管的間距。
2. 測量並紀錄銅針與銅管間距離改變時，對應到測力裝置的指針偏轉角度以及算出指針偏轉力，得銅釘與銅管的間距與對應推力大小關係。
3. 裝置圖：觀察當間距改變時，夾角與推力的變化



4. 示意圖：



5. 流程圖：



(五) 實驗五：觀察單一銅釘、銅管周圍的流場分佈

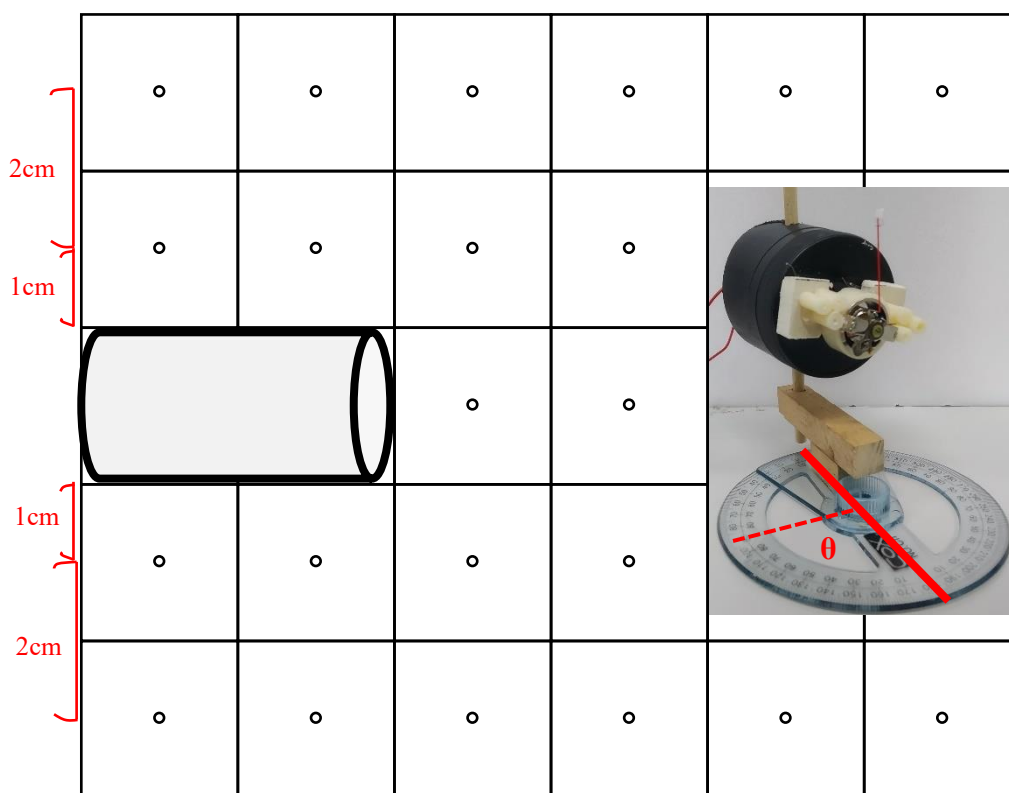
1. 測量離子推進器開啟時的四周流場分佈：

輸出高電壓至離子推進器會產生離子風，離子風形成推力作用在檢流計指針上而產生偏轉，此時開啟電磁扭秤，可變電阻調控電阻值並改變電流值，調整電流讓指針產生回復力矩，直到與離子風推力平衡，利用實驗二的電流與力矩數據，即可以計算出作用在指針上的推力大小。

2. 利用座標化的概念畫出方格紙 2x2 cm，把銅管的四周標出每一個點，調整電磁扭秤底座的量角器，直到指針有最大偏角，此為流場方向。用電磁扭秤測量每點的推力方向、推力大小，利用紀錄的數據繪製裝置的流場分佈。

3. 進一步，利用隔板觀察是否會影響周圍的流場分佈，並以數據繪製圖表

4. 示意圖

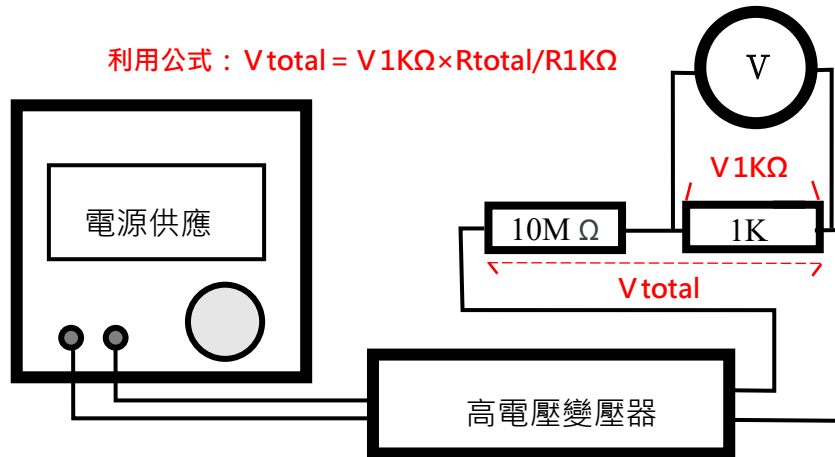


圖九、單一銅管開啟離子推進器裝置(俯視圖)，形成一個回通的氣流，不只產生向前的推力，為了觀察，要使用自製的「測量微小推力裝置」，利用網格上每一點當座標，測量每點的「受力方向」、「受力大小」。

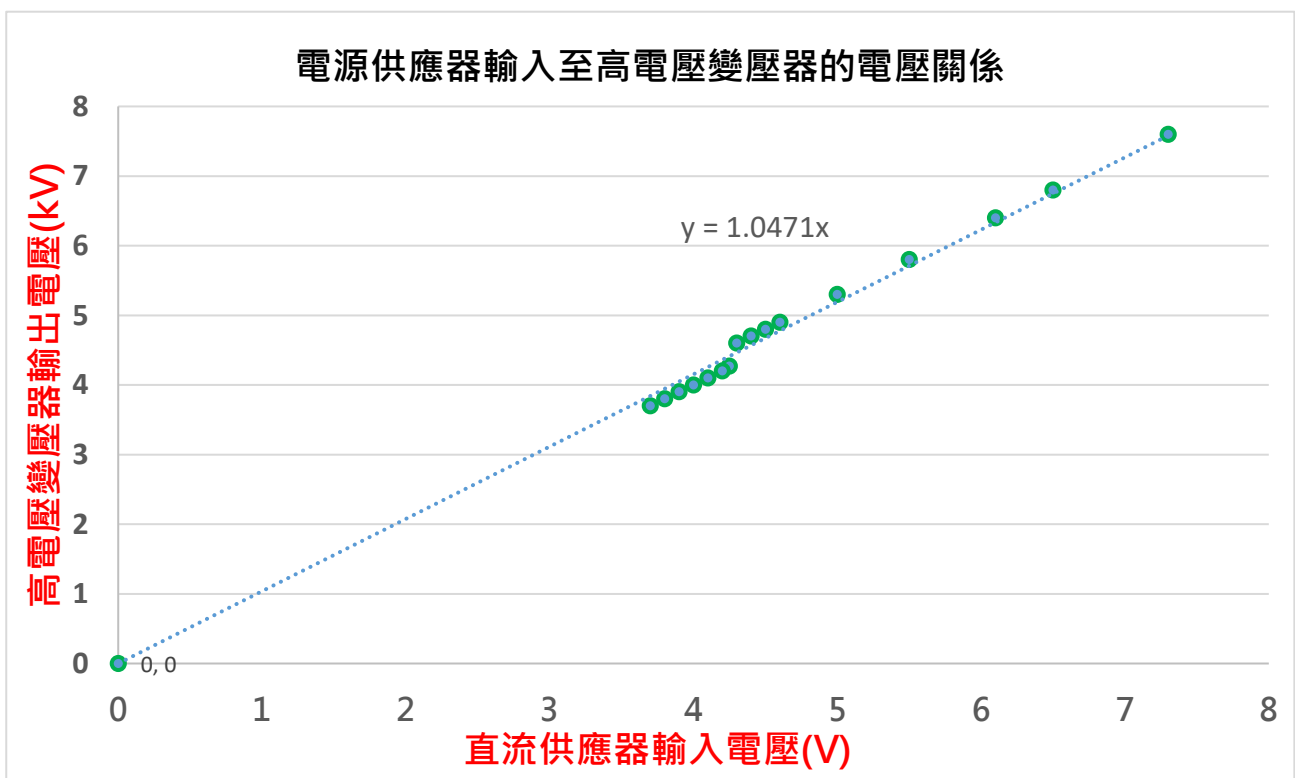
參、研究結果與討論

一、實驗一：測量電源供應器輸入電壓至高電壓變壓器的輸出電壓關係

(一) 示意圖：



(二) 結果圖表

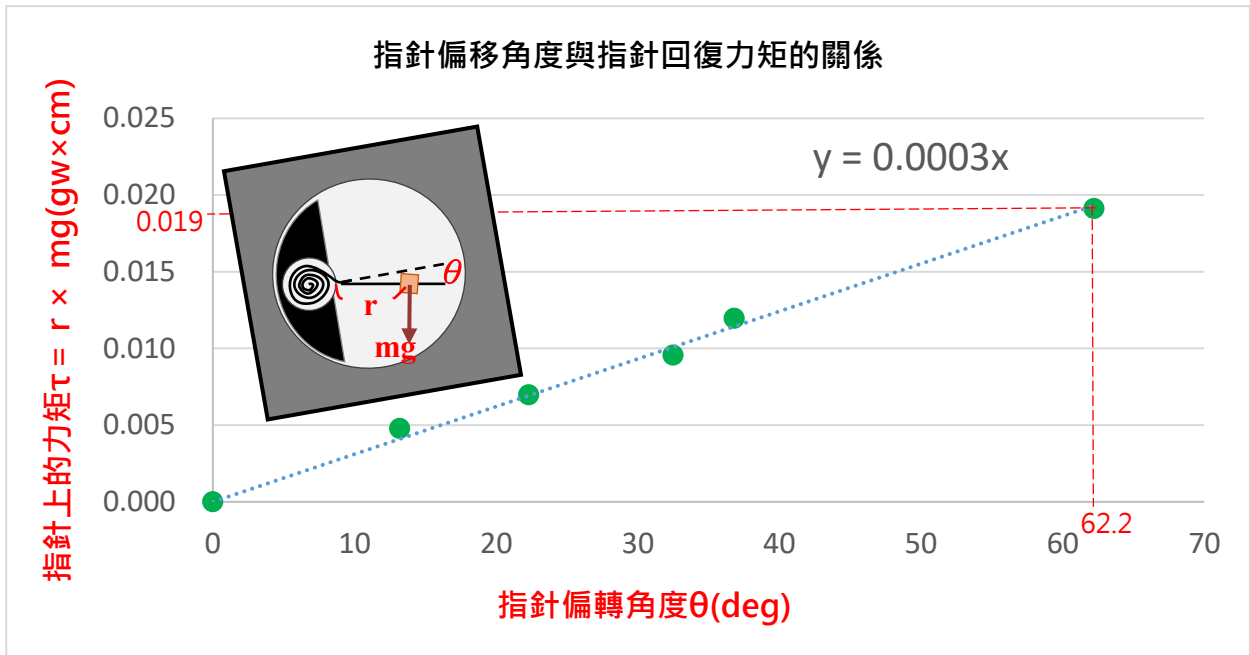


圖十、當直流電源供應器輸入多少電壓 (V) 至變壓器時，對應輸出的高電壓值 (kV)

- 根據簡單的轉換概念，電源供應器輸入電壓至高電壓變壓器，變壓器輸出高電壓會隨著輸入電壓增強而變大，而且經過圖表與公式的分析，可以有效的知曉，當要輸出多少高電壓時，所需輸入多少電壓值以對應。

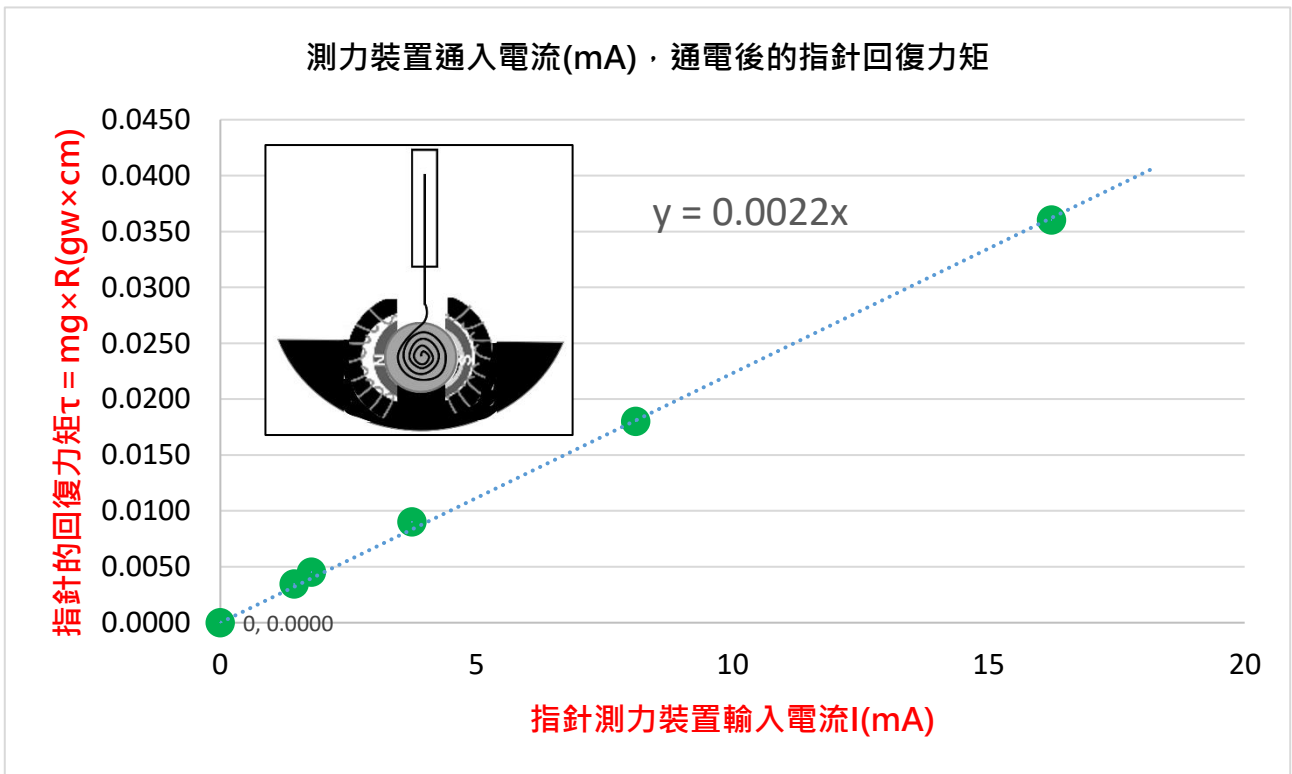
二、實驗二：測量並計算自製微型測力裝置的使用數據，以測量推進器推力

(一) 結果圖表



圖十一、測力裝置，指針偏移角度與指針回復力矩的關係

透過力矩 $\tau = F \times d$ ，可算出的力矩 (gw*cm)。由圖可知，當指針偏轉的角度越大時，指針偏轉力越大。由圖可知為正比關係，得出公式： τ (gw × cm) = 0.0003 × θ (deg) 以此可以推出，當指針偏轉多少角度 (deg) 時，對應的偏轉力矩(gw × cm)大小，可以有效又方便得應用在第三、第四實驗中。

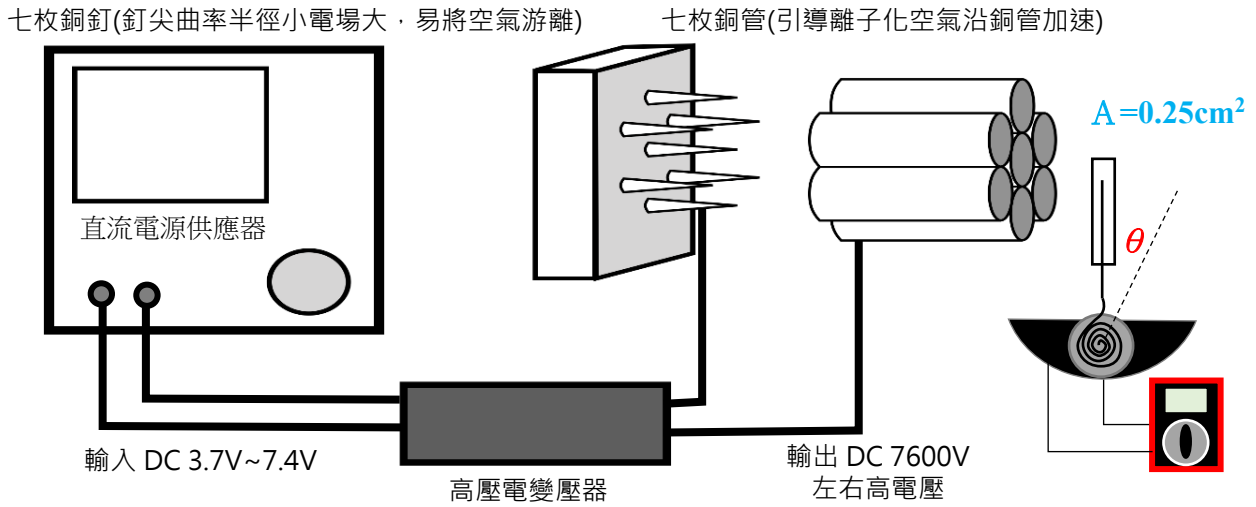


圖十二、電磁扭秤，指針偏移角度與指針回復力矩的關係

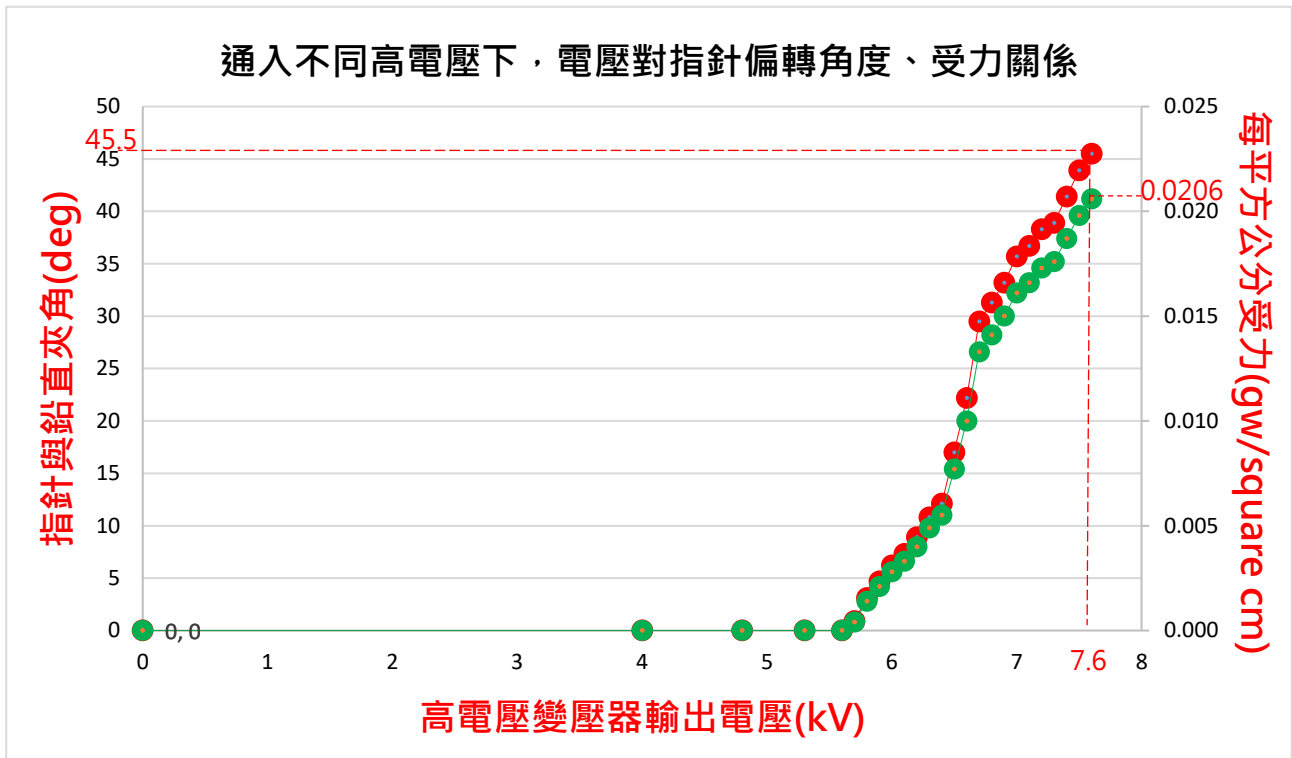
透過力矩 $\tau = F \times d$ ，可算出的力矩 (gw*cm)。由圖可知，當電磁扭秤(指針)需通入的電流越大時，指針偏轉力越大。由圖可知為正比關係，得出公式： τ (gw × cm) = 0.0022 × I (mA) 以此可以推出，當電磁扭秤通入多少電流時，對應的偏轉力矩(gw × cm)大小¹⁷，可以有效又方便得應用在第三、第四實驗中。

三、實驗三：測量在不同電壓驅動下，離子推進器的推力大小關係

(一) 示意圖



(二) 結果圖表

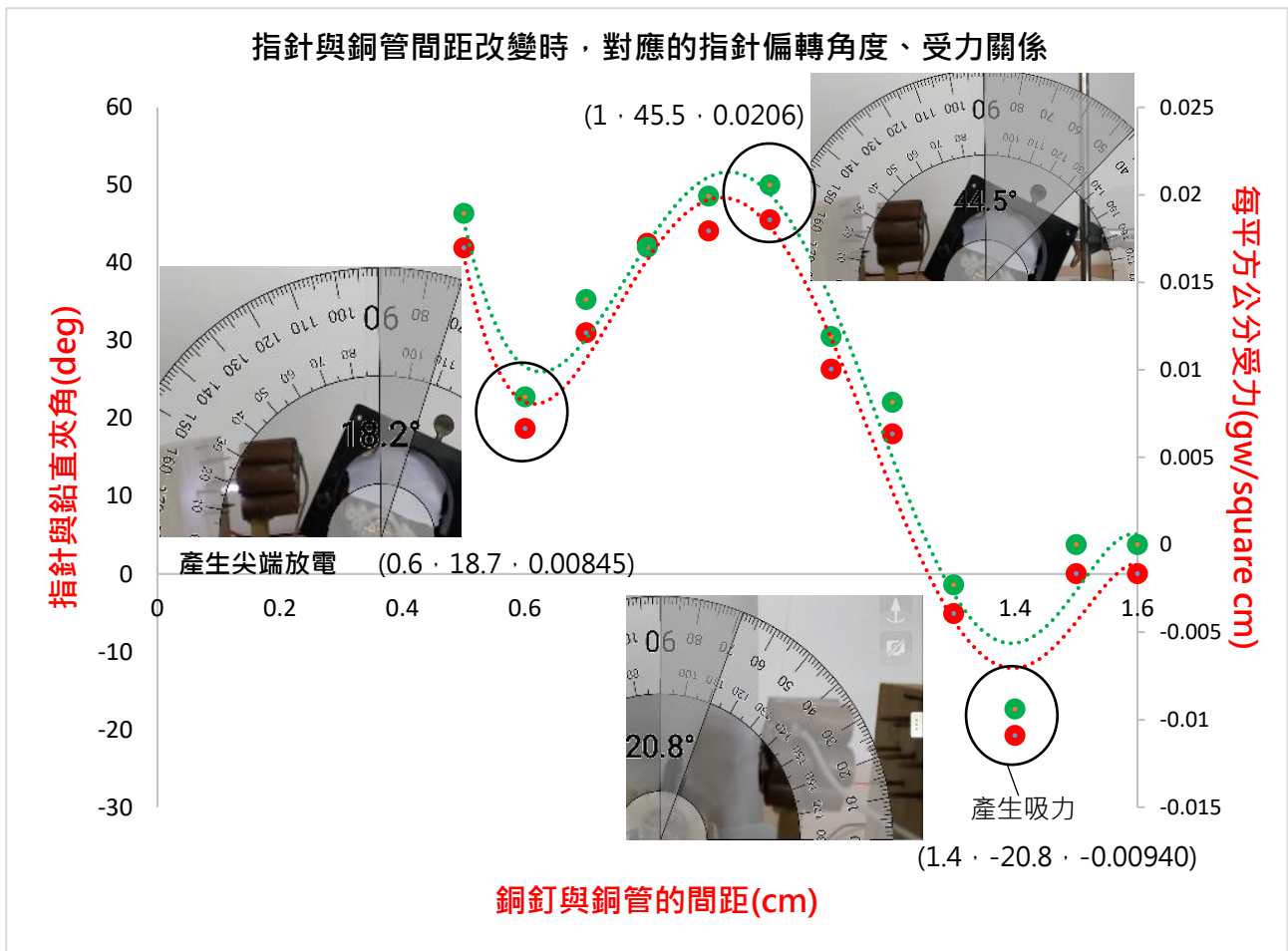
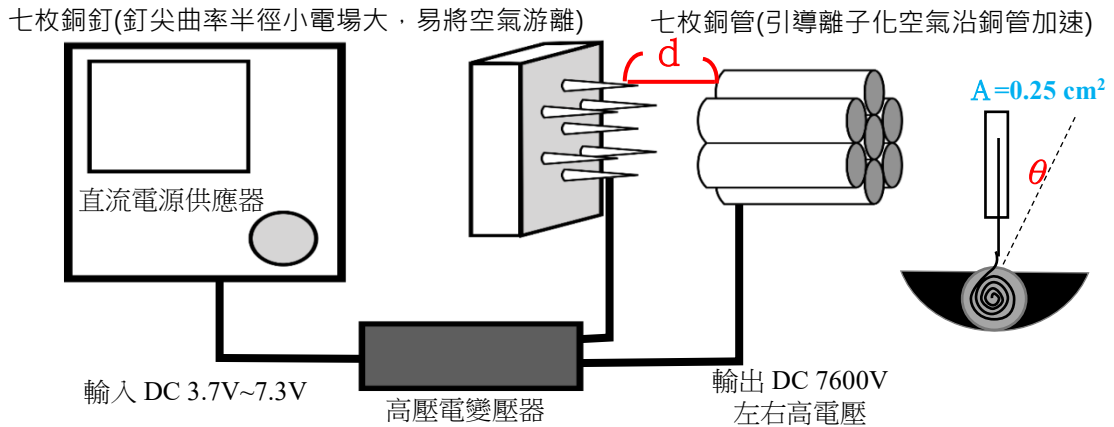


圖十三、測量在不同電壓驅動下，高電壓對指針偏轉角度、受力關係

- 由圖七可知，輸出電壓與指針偏轉角度成正相關，也與指針小紙片的受力大小成正相關。
- 在導體中，自由電子是做無規則運動的，外部加電壓時，等於導體兩端加上電場，電子就受到電場的力，部分電子會克服內部阻力（對外部呈現出電阻）產生定向移動，形成電流。

四、實驗四：藉由改變離子推進器內銅針與銅管的間距，測量推力大小變化

(一) 示意圖與結果圖表



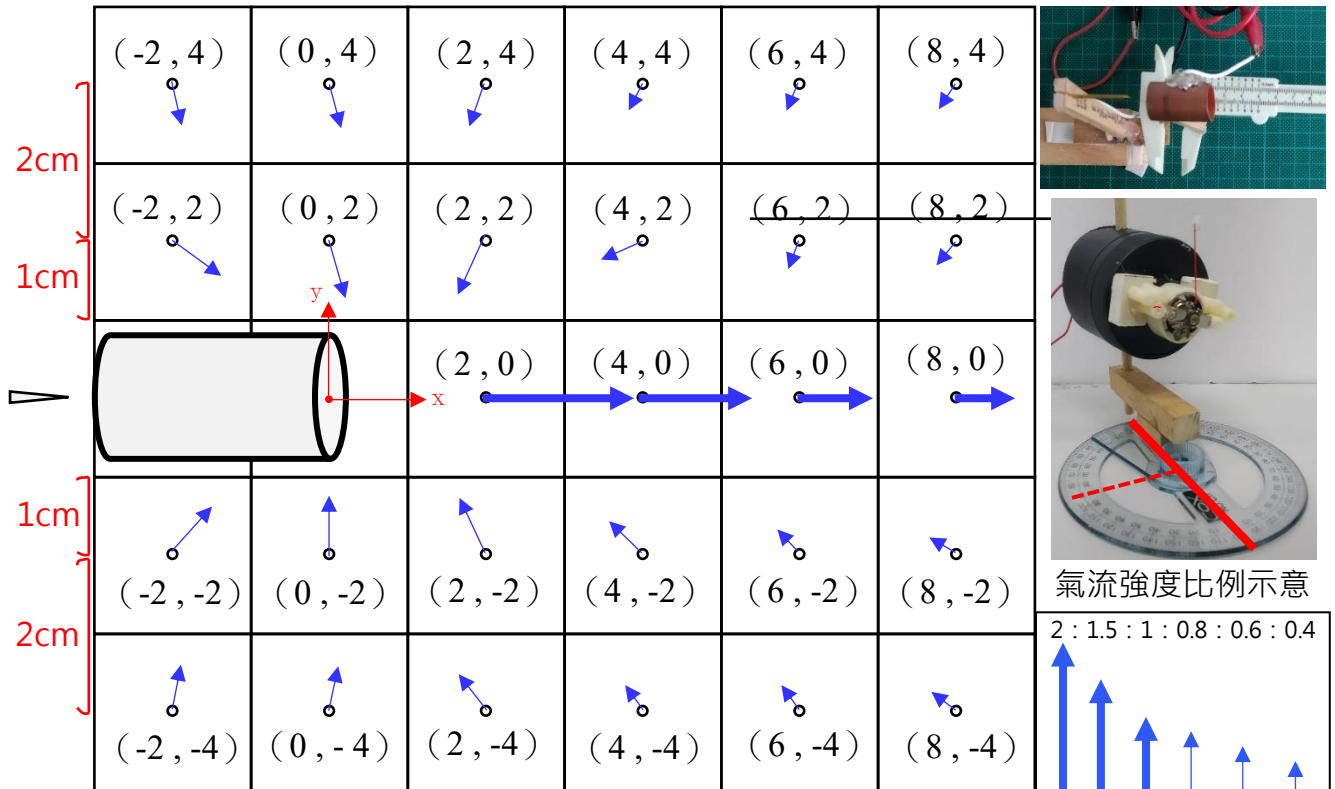
圖十四、指針與銅管間距改變時，間距與指針偏轉角度、受力關係

- 電源供應器固定輸入 7.3V 至高電壓變壓器輸出約 7.6kV，隨著改變銅釘、銅管間距 0.5~1.5cm，小於 1cm 時，會產生尖端放電，此時間距越大，則指針偏轉角度(deg) 會越大；而大於 1cm 時，間距越大，則指針偏轉角度(deg) 會越小。但到達 1.3cm 時，指針會往內偏轉，會形成吸力、指針偏轉角度(deg) 為負值。
- 由圖八可知，約銅管間距 0.5~1cm 時，間距與指針偏轉角度成正相關；但是特別發現當銅針與銅管間距介於 1.30cm 與 1.45cm 時，新發現推力居然轉變為吸力、角度轉為負值。間距大於 1.45cm 以上時，推力驟減為零。

五、實驗五：測量出單一銅釘、銅管周圍的流場分佈

(一) 推力產生時的流場：

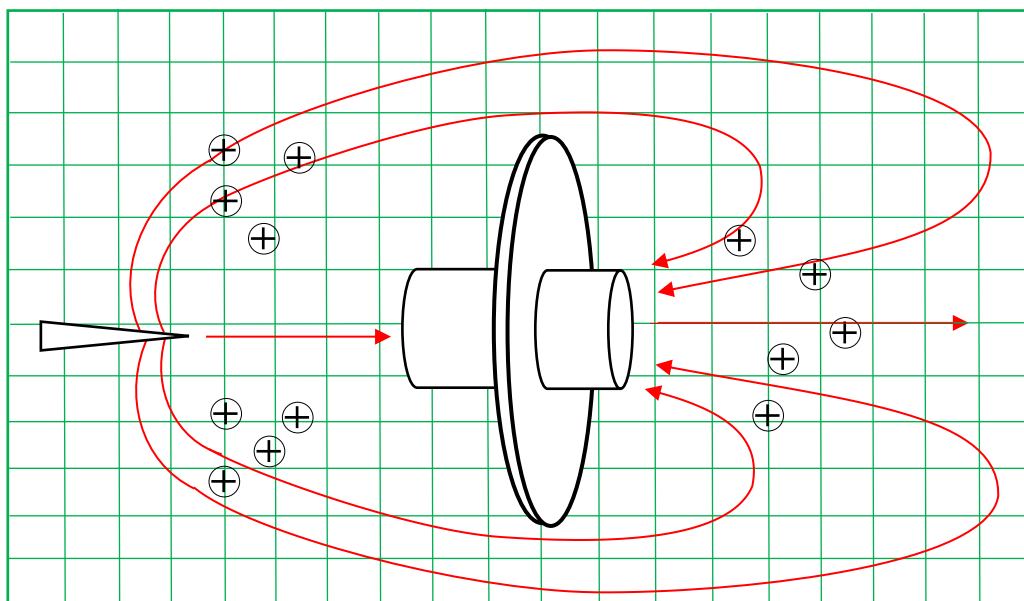
座標表示，測量銅管與指針的軸向距離時的流場



圖十五、單一銅管裝置(俯視圖)，固定輸出 7.6kV(固定高電壓)，銅針與銅管相距 1.4cm

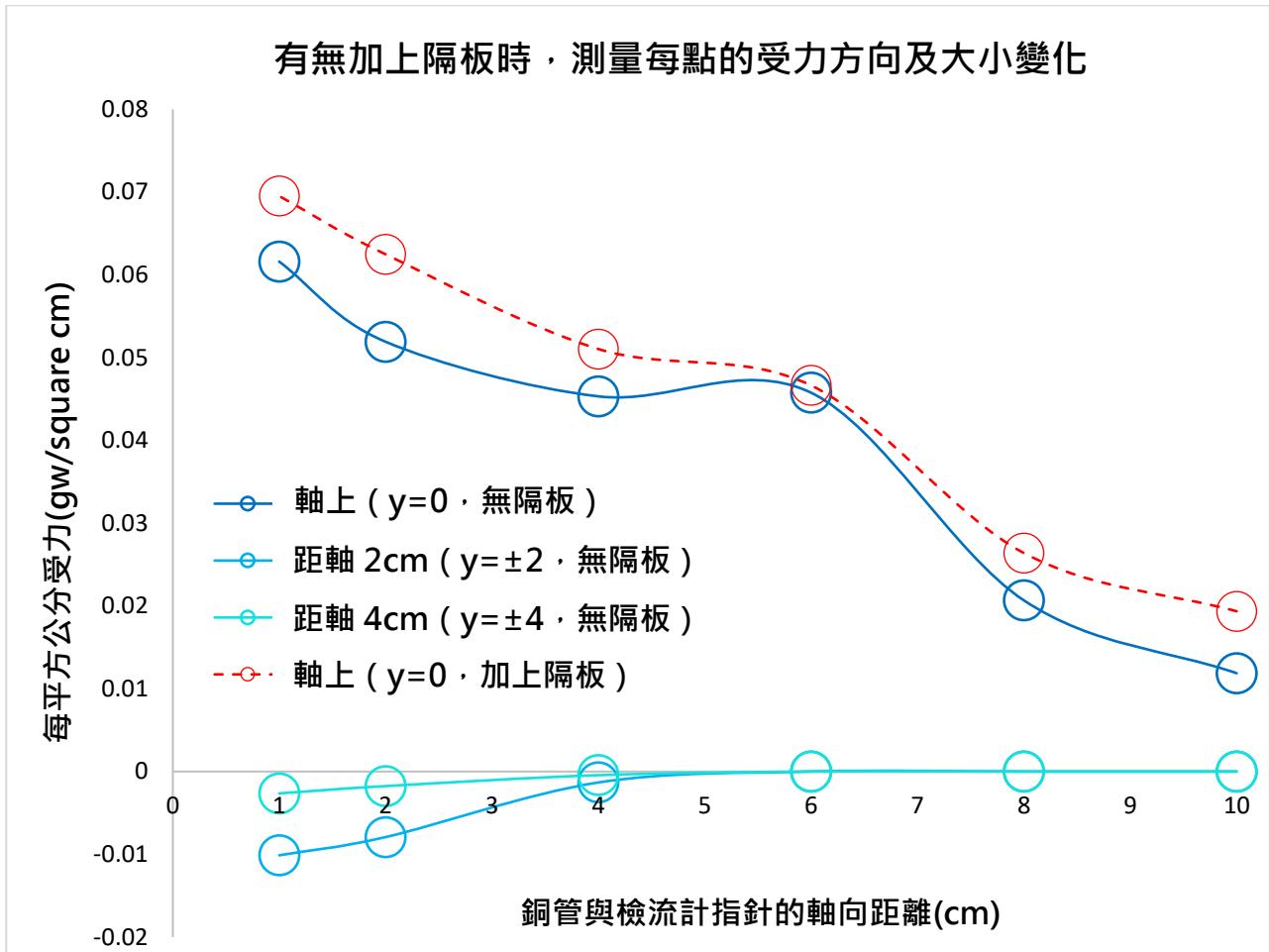
- 方格紙 2x2 cm 座標測量每點的受力方向及大小，測單一銅管開啟時，周圍的氣體流動情形，知每點「受力方向」、「受力大小」。X 軸向推力分佈：產生推力，管口與指針距離增加，則推力遞減。Y 座標 $\neq 0$ 的流場分佈：產生吸力，管口距離增加，則吸力驟減。此現象與電偶極場非常相似。

(二) 示意圖：觀察使用隔板後，是否影響周圍的吸力。



圖十六、加上隔板(俯視圖)，測量每點的受力方向及大小，觀察吸力的氣流是否有所改變

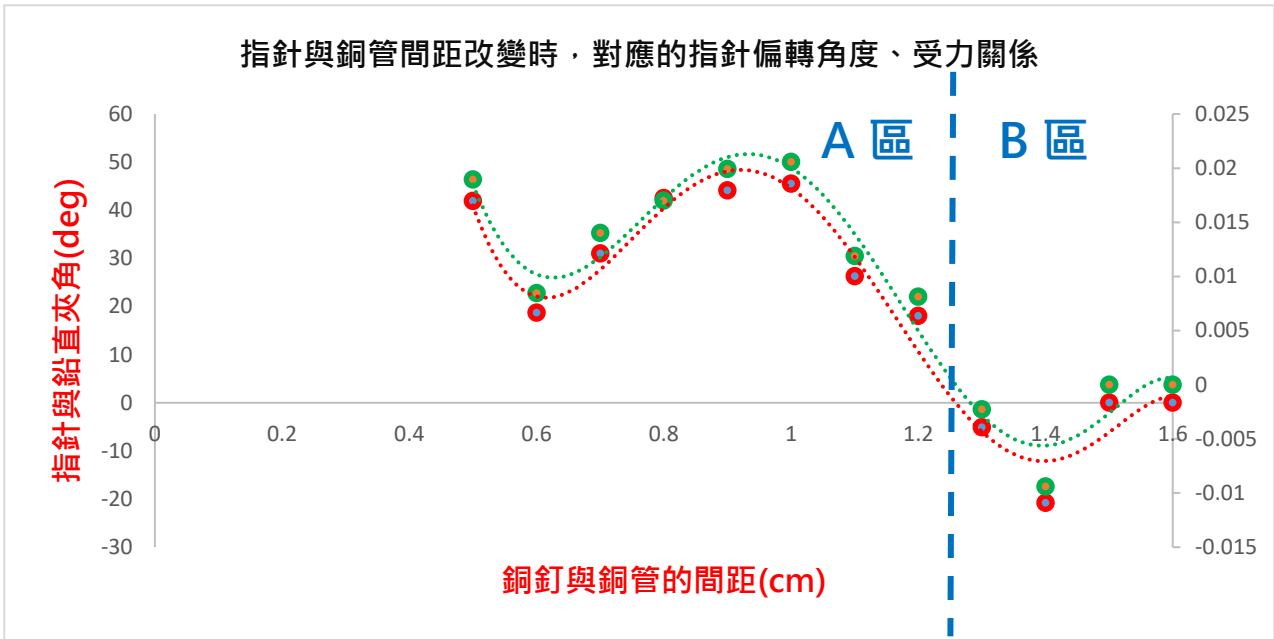
(三) 結果圖表：外加隔板前後，是否影響周圍的吸力



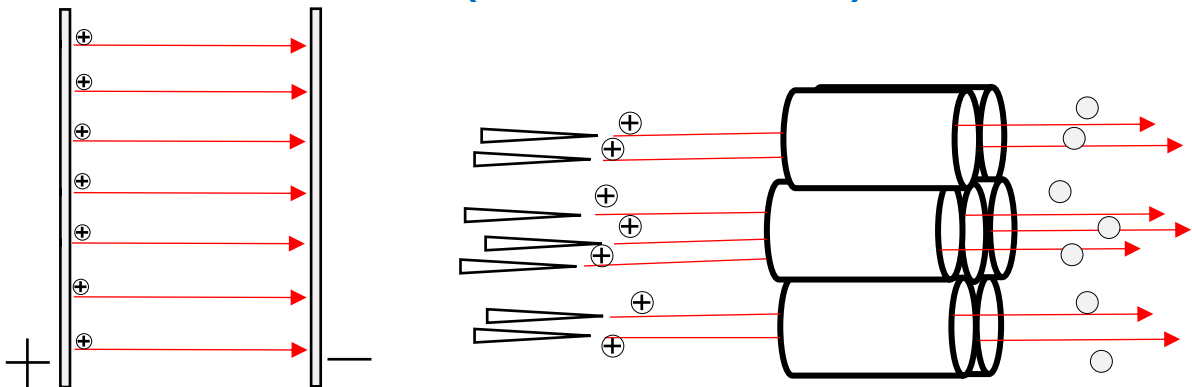
圖十七、實線（無隔板）、虛線（有隔板）的氣流變化

- 由圖可知，單一銅管開啟(無外加隔板)，X軸產生向前推力，管口距指針 1cm，紙片最大受力 0.0616gw/cm^2 ，在其他周圍的點產生向內吸力。管口至指針距離(cm)與受力大小(gw/cm^2)呈負相關。
- 由紅色虛線可知，單一銅管開啟(有外加隔板)，在X軸產生向前的推力，管口與指針距離 1cm，紙片有最大受力 0.0695gw/cm^2 ，但此時其他周圍的點幾乎不產生推力，唯X軸產生推力，且推力比無隔板大，管口至指針距離(cm)與受力大小(gw/cm^2)呈負相關。
- 一開始有軸向推力，也有周圍的吸力，加上隔板後，阻礙了吸力的偶極場路徑使吸力消失，而軸向能量與推力也因此增加，同時也進一步證明氣流呈電偶極場的模型。

(四) 實驗四、五的原理討論與解釋



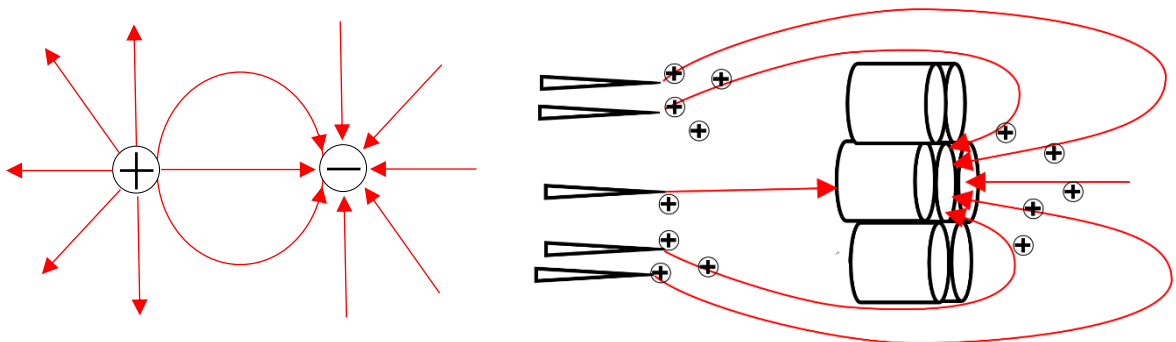
A 區：近場理論模型(視為平行板電場)



圖十八、形成「近場」，兩電極板夠近，此時電流會均勻的放電，呈單方向的流動。

套用在離子推進器上，此時距離夠近，所以會均勻地向前產生離子風推力。

B 區：遠場理論模型(視為點電荷電場)



圖十九、形成「遠場」，兩電極夠遠猶如兩個點，此時電流會四面八方地放電，呈由外繞回內的流動。

套用在離子推進器上，此時距離夠遠，所以會形成由旁邊繞回銅管的吸力。

(五) 結果討論

之前是使用七個銅管並聯來做實驗，為了簡化模型，接下來設計一銅釘與一銅管，讓裝置簡化以應證理論。在離子推進器裝置在開啟時，測量氣流的變化。

1、推力產生時的流場，座標表示，測量銅管與指針的軸向距離時的流場：

由圖十五可知，每一點的推力分布情形類似於電偶極場，可將銅釘、銅管間的流場變化視為兩電偶極的電場分佈，軸線方向仍有推力產生，周圍產生吸力。

2、由圖十六、十七可知，此時流場類似於電偶極場，加上隔板後阻礙了吸力的氣流，讓原本產生吸力的路徑改變，變得以軸向為主要路徑，所以能量集中在中間而產生更強的推力，最後形成周圍吸力減弱，而軸向推力增強的現象。

3、功率的轉換：裝置加上隔板時，利用測得

數據，用物理公式進一步探討功率轉換。

推導流程：

先在裝置上串聯檢流計並開啟裝置，檢流計測量離子推進器的通入電流，得知開啟裝置時的電流值 $\cong 0.357 \text{ A}$

$$\text{公式：電流} = \frac{\text{電量}}{\text{單位時間}} = \left(\frac{\text{離子個數}}{\text{單位時間}} \right) (\text{離子電量})$$

令空氣離子為二價~三價間，

$$\text{則每個空氣離子電量} = 2 \times 1.6 \times 10^{-19} \sim 3 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$\text{由已知電流、平均空氣離子電量，推算出：} \frac{\text{離子個數}}{\text{單位時間}} = \frac{\Delta n}{\Delta t} \cong 8.93 \times 10^{17}$$

接著用電磁扭秤測量軸向推力，得知施在指針紙片上的壓力，

公式：總推力(F)=(壓力) × (面積)，電磁扭秤在實驗五中：

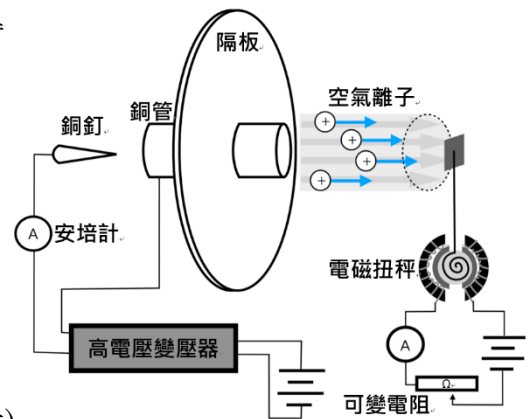
$$\text{半徑 } R=1\text{cm 圓面積上，指針的紙片壓力} \cong 0.0695 \text{ gw/cm}^2$$

$$\text{又推力} = \text{動量的時變率} = \left(\frac{\text{離子個數}}{\text{單位時間}} \right) (\text{平均空氣離子質量}) \times (\text{速度變化})$$

可知速度變化 $\Delta v \cong 2.002 \times 10^5 \text{ m/s}$ ，離子速度可達光速的千分之一，

$$\text{最後，功率轉換} = \frac{\text{推力功率}}{\text{電功率}} = \frac{F \cdot \Delta v}{I \cdot V} \cong 56\%$$

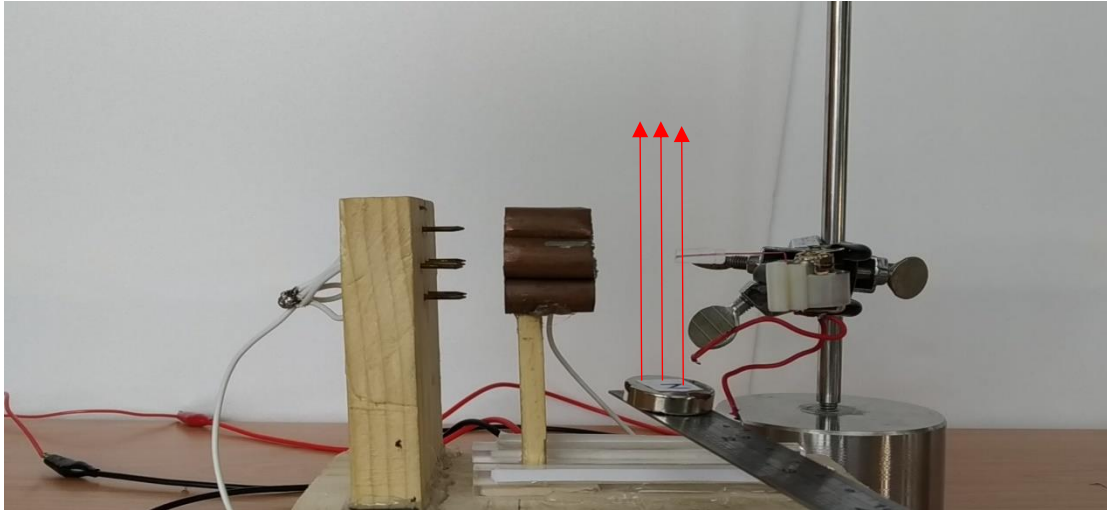
功率轉換達五成以上，證明了離子推進器未來應用的可行性。



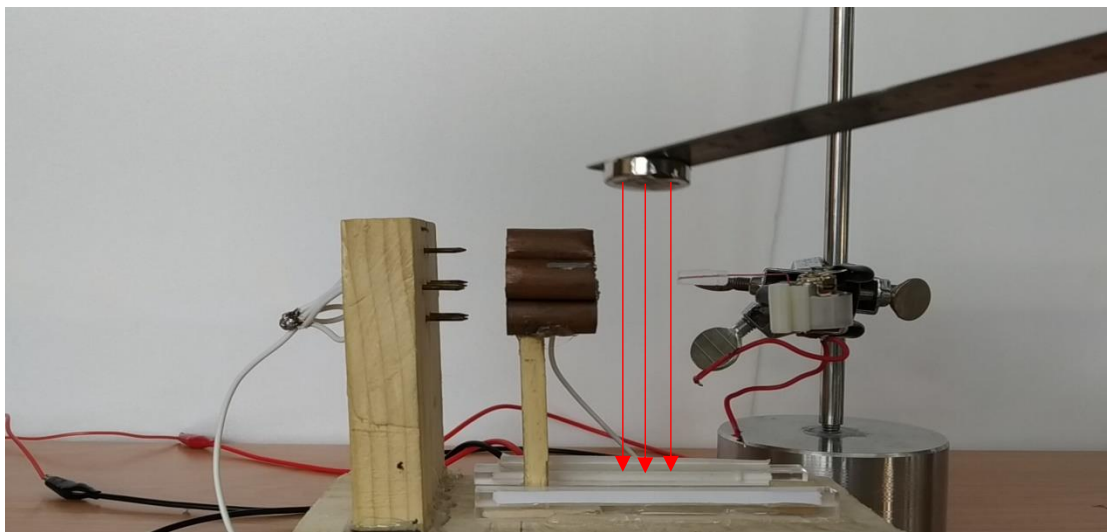
圖二十、單一銅管(加上隔板)，測量通入電流，並以電磁扭秤測量推力大小。

六、其他延伸討論

(一) 用磁鐵放置在離子推進器的周圍，觀察是否會有偏轉推力，如果吹出來的粒子是帶電性的話，那理應要產生偏向的推力，讓指針往左或右偏轉。但經由實驗後發現，無論N極磁鐵向上或向下，指針的偏轉角度都不會改變，由此現象推知，或許吹出來的風並不是離子風，而分子經加熱產生熱膨脹形成的風。



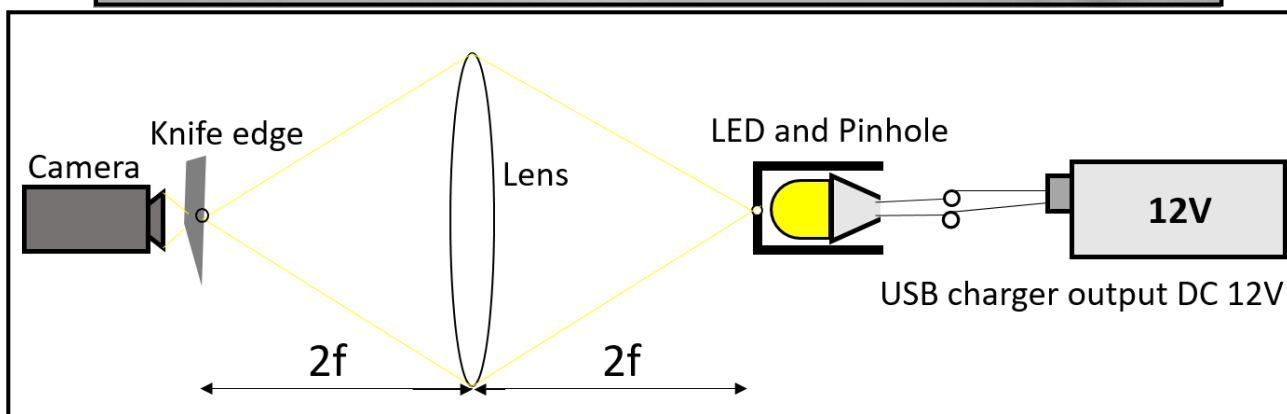
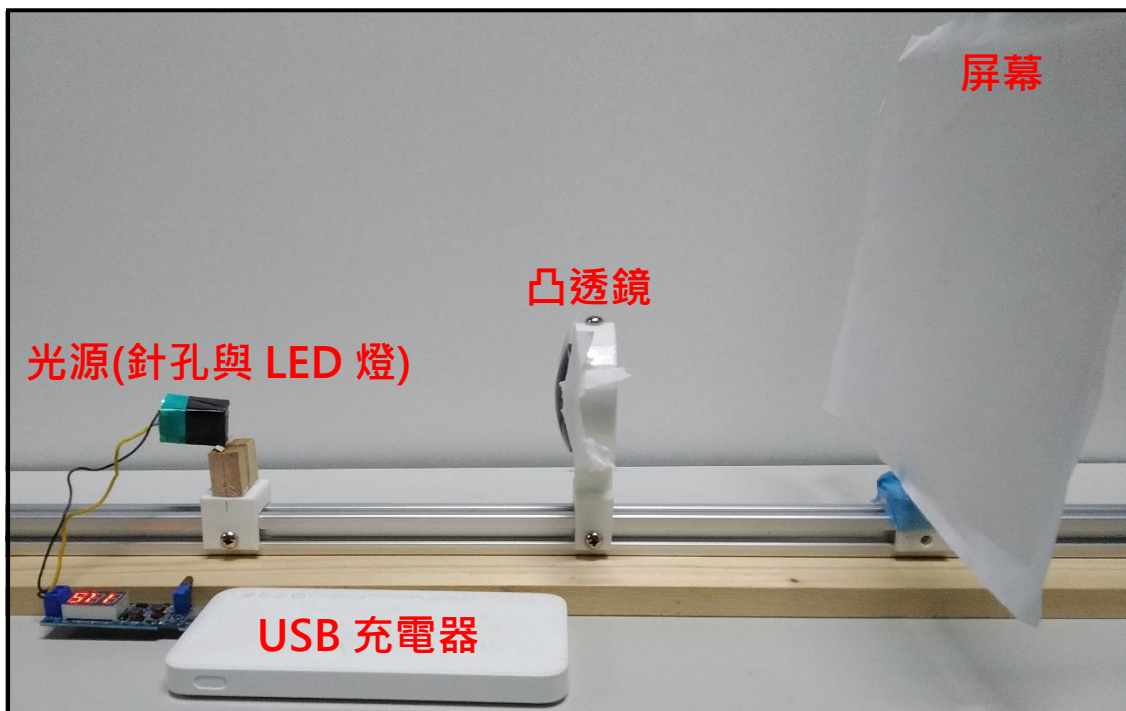
圖二十一、N極向上，指針不產生偏轉，紅色為磁力線



圖二十二、N極向下，指針不產生偏轉，紅色為磁力線

本實驗發現把磁鐵放在銅管出口端時，推力並不會產生偏轉。可是放在銅釘與銅管之間的磁力，卻會使推力產生些許干擾，所以本實驗推論，在銅釘、銅管間會產生出游離化的離子，但一到銅管出口時，將再次中和掉並留下原有動能。

(二) 利用紋影攝影法看出氣體的流動



圖二十三、紋影法裝置圖、示意圖

之前都是利用測量與實驗的方式，間接觀察流場分佈。未來要試著用紋影攝影法，直接用肉眼觀測，以光學的方式，透過相機把觀測到的氣流捕捉下來，用直接觀測的方式證明電偶極場的流場分佈與理論假設。



圖二十四、目前已經可以觀測小範圍的線香氣流，未來要觀測離子推進器還有改善空間。

肆、結論與應用

一、實驗一：測量電源供應器輸入電壓至高電壓變壓器的輸出電壓關係

當輸入電壓（電源供應器）越大時，輸出電壓（高電壓變壓器）就會越大，呈正相關係。本裝置可推得公式： kV （輸出高電壓） $=1.05 \times V$ （輸入電壓）

以此，可以有效調控高電壓，當電源供應器輸入多少電壓時，對應的高電壓大小值。

二、實驗二：測量並計算自製微型測力裝置的使用數據，以測量推進器推力

當指針偏轉的角度越大時，指針偏轉力越大，呈正相關係。

公式： $1. \tau$ (gw \times cm) = $0.00030 \times \theta$ (deg) $2. \tau$ (gw \times cm) = $0.0022 \times I$ (mA)

以此可以推出，當指針偏轉多少角度（deg）時，對應的偏轉力矩(gw \times cm)大小，可以有效又方便地應用在第三、四、五實驗中的測量微小推力實驗。

三、實驗三：測量在不同電壓驅動下，離子推進器的推力大小關係

當輸出高電壓（V）越大，則離子風推力（gw）及越大，呈正相關係，由圖表可知當輸入多少高電壓，對應的推力大小，了解高電壓與推力的關係。（直流電源供應器輸入電壓限制在 3.7V~7.3V，高電壓即 3700V~7600V，以此為數據的測量範圍）

四、實驗四：藉由改變離子推進器內銅針與銅管的間距，測量推力大小變化

調整離子推進器銅針與銅管間距，當間距小於 0.80cm 時，兩端會有尖端放電且推力略為降低，呈正相關，但是特別發現當銅針與銅管間距介於 1.30cm 與 1.45cm 時，原本的推力居然轉變為由外往內的吸力、電磁扭秤的指針角度轉為負值並測得負值的吸力，且間距與吸力大小呈正相關。最後間距大於 1.45cm 以上時，能量不夠使推力驟減為零。

五、實驗五：

- （一）測量並觀察每一點的推力分布情形，可以將流場變化視為兩電偶極的電場分佈。
- （二）無外加隔板，軸向產生推力，其他周圍的點產生吸力。有外加隔板，唯有軸向產生推力，且推力比無隔板大，其他周圍的點幾乎不產生推力或吸力，管口與指針距離(cm)與受力大小(gw/cm²)呈負相關，同時也證明流場會呈電偶極場的模型。
- （三）公式推導中，功率轉換可達五成以上，是非常良好的轉換率，同時也證明了離子推進器的可行性與潛力，本研究未來也將會繼續發展下去。

伍、參考文獻

- 1.彭靖文·(2004)·電離轉輪·臺灣國際科展第43屆 <https://www.ntsec.edu.tw/Science-Content.aspx?cat=96&a=6822&fld=&key=&isd=1&icop=10&p=7&sid=2835>
- 2.姜理元·(2018)·論平行電板間肥皂泡之變形現象·中小學科展第57屆 <https://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/57/pdf/051804.pdf>
- 3.吳嘉輝、周靖榮、劉騏鋒·(2018)·與電共舞-電場對火焰影響之研究·中小學科展第57屆 <https://activity.ntsec.gov.tw/activity/race-1/57/pdf/051803.pdf>
- 4.標題：維基百科，自由的百科全書:離子推進器(Ionic Thruster)
<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E7%A6%BB%E5%AD%90%E6%8E%A8%E5%8A%9B%E5%99%A8>
- 5.作者：希弦 標題：史上最強我國離子發動機真相令人很吃驚
<https://kknews.cc/zh-tw/military/obzn6o.html>
- 6.作者：Alexander Reifsnnyder 標題：Build an Ionic Thruster like NASA Uses for Space Propulsion
<https://makezine.com/projects/ionic-thruster/>
- 7.標題：力的測量參考教學
<https://www.youtube.com/watch?v=er08zONYMjk>
- 8.標題：離子引擎(ION engine)
https://www.youtube.com/watch?v=1nmBTE_Y8-E
- 9.標題：陰極射線管 Cathode ray tube
<https://www.youtube.com/watch?v=6GB-fR6UuAw>
- 10.標題：離子風推進?電能飛機會是我們的未來嗎?
<https://youtu.be/7ZljWc99evc>
- 11.標題：9秒！世界首架“離子推進”飛機試飛成功
<https://youtu.be/UvIcDlhAQAk>
- 12.標題：整流二極體
https://www.rohm.com.tw/electronics-basics/diodes/di_what3
- 13.Magnetic Games·(2019)·Plasma Vortex in a Magnetic Field | Magnetic Games·Youtube
https://youtu.be/O_qv2-rSLhM
- 14.Alexander Reifsnnyder·(2015)·Build an Ionic Thruster like NASA Uses for Space PropulsionMAKE
<https://makezine.com/projects/ionic-thruster/>
- 15.標題：Why DO Ion Thrusters Use Xenon?
https://www.youtube.com/watch?v=Cb_U_CbQ5sc
- 16.鄭永銘·(2016)·跟著鄭大師玩科學—紋影

【評語】 160019

本作品探討離子推進器之流場分析。改變高電壓，調控驅動力。自製電磁扭秤量推力。觀測與分析推力變化與流場分佈。流場的電性尚待進一步釐清。具體量化、分析與討論相對薄弱。相較於參展的優秀作品而言，本件的嚴謹度與完整性仍有進步與充實的空間。