

中華民國第 60 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高級中等學校組 物理與天文學科

佳作

051819

離子推進器之探索

學校名稱：臺北市立麗山高級中學

作者： 高二 徐冠東	指導老師： 吳明德
---------------	--------------

關鍵詞：離子推進器、尖端放電、電磁扭秤

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。

壹、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。

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。最後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。

貳、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：

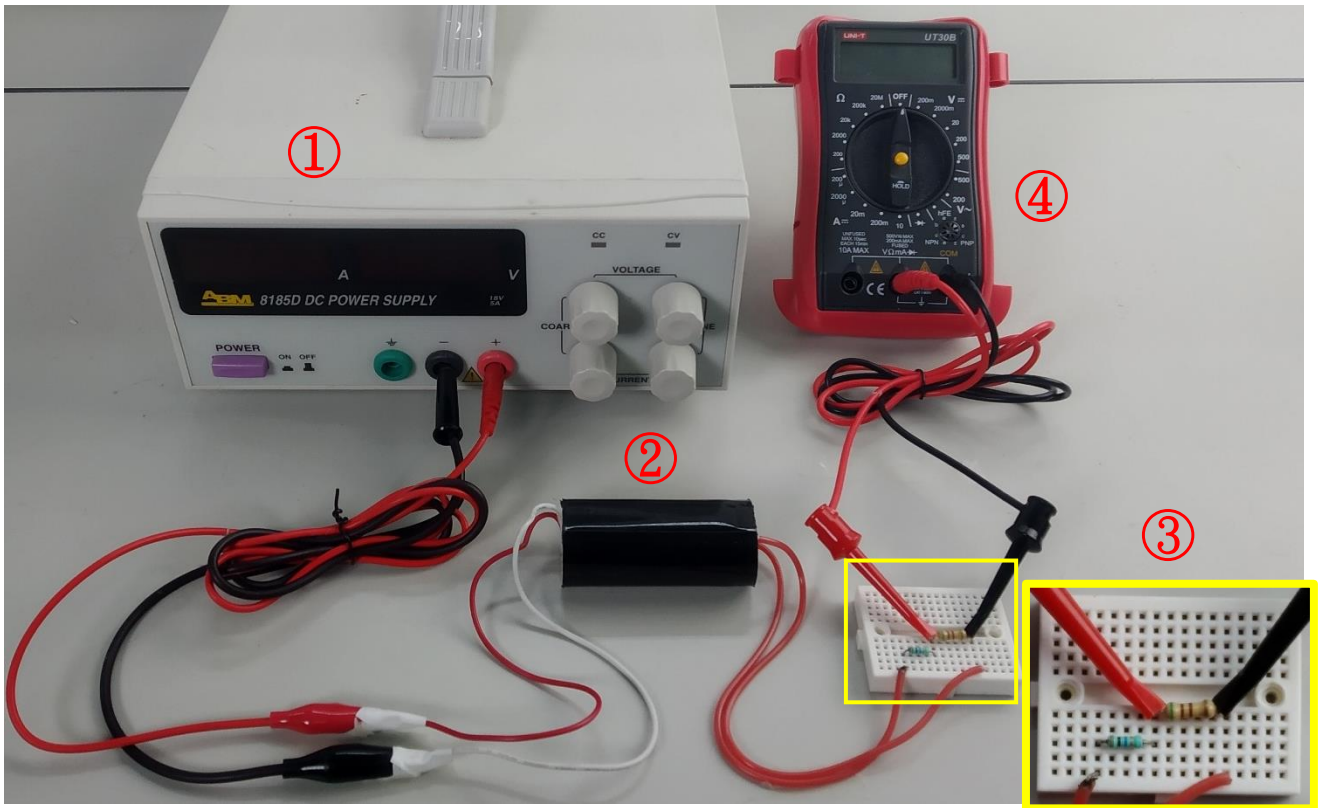
高壓電在銅針的尖端會形成強大的電場，改變針尖與銅管間距時，測量離子推進器的推力是否會發生變化？

五、觀察離子推進器周遭的流場分佈：

空氣游離化時產生離子風推力，而當改變銅針與銅管間的間距時，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。

參、研究設備及器材

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

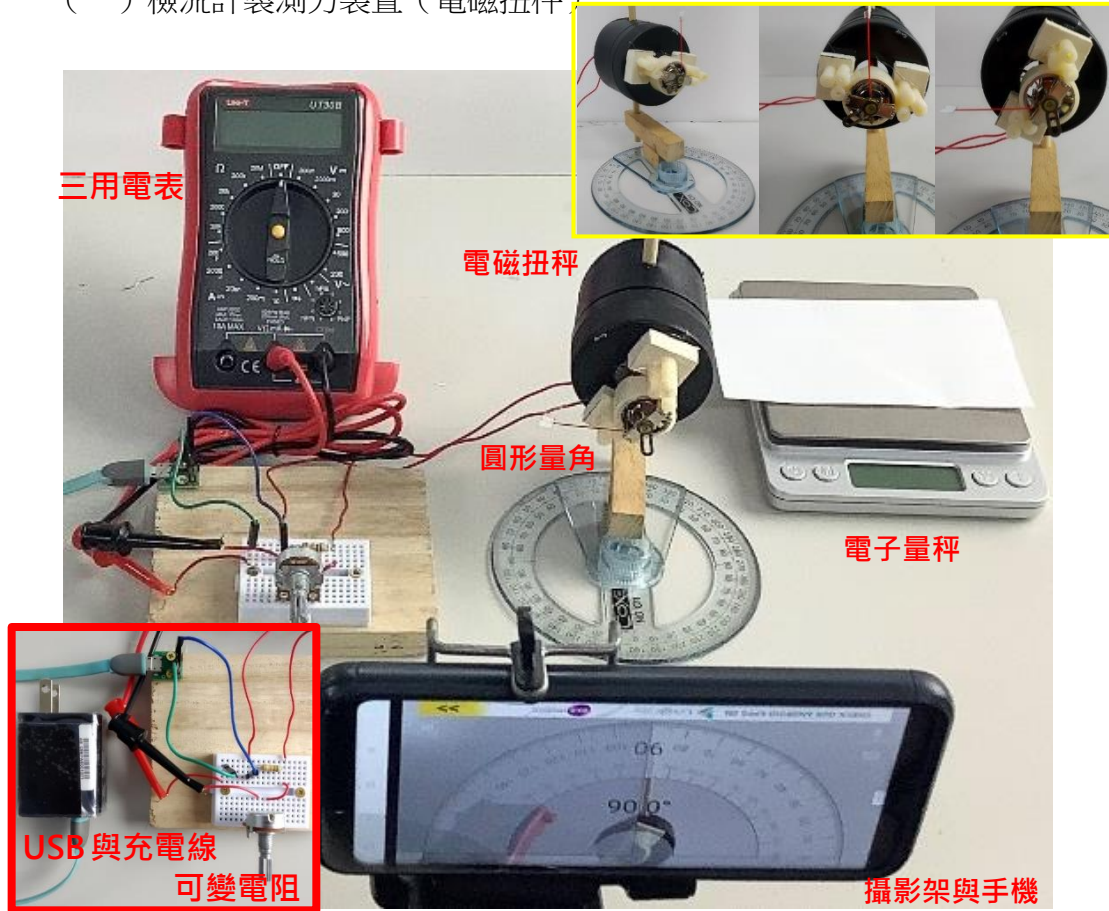
- ① 直流電源供應器：通入一般電壓 110 V 的電壓，輸出 $3.7 \sim 7.3\text{ V}$ 的直流電
- ② 高電壓變壓器：輸入直流電，輸出上千伏特的高電壓
- ③ 麵包板與電阻：麵包板上串聯一個 $10\text{ M}\Omega$ 、一個 $1\text{ k}\Omega$ 的電阻，通入高電壓
- ④ 三用電表：高電壓通入電阻時，利用分壓原理測量 $1\text{ k}\Omega$ 電阻的電壓值(以免燒壞電表)，即可算出高電壓變壓器輸出的總電壓值。

(一) 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(一個 $1000\ \Omega$ ，一個 $10\text{ M}\Omega$)，利用分壓的方式讓電阻較小的電壓值達到不會讓三用電表燒壞的大小，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。



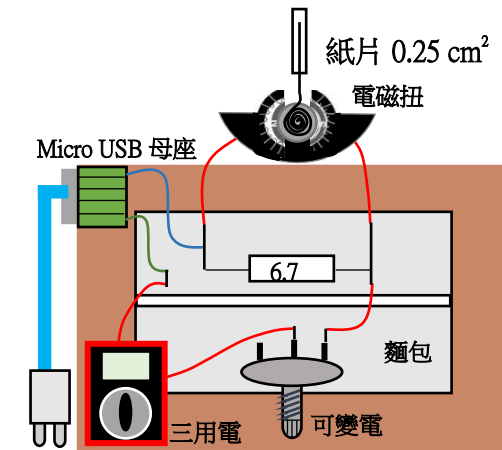
電表無法承受上千伏特的電壓

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
 (一) 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

(二) 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。

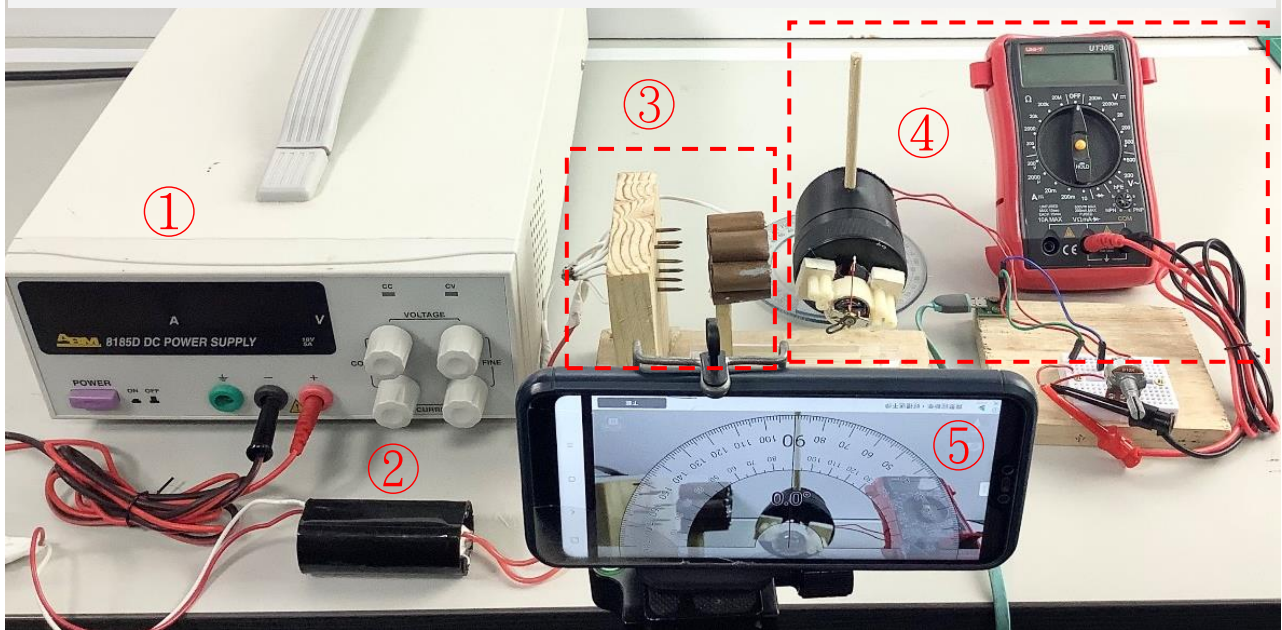


圖三、檢流計自製電磁扭秤示意

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

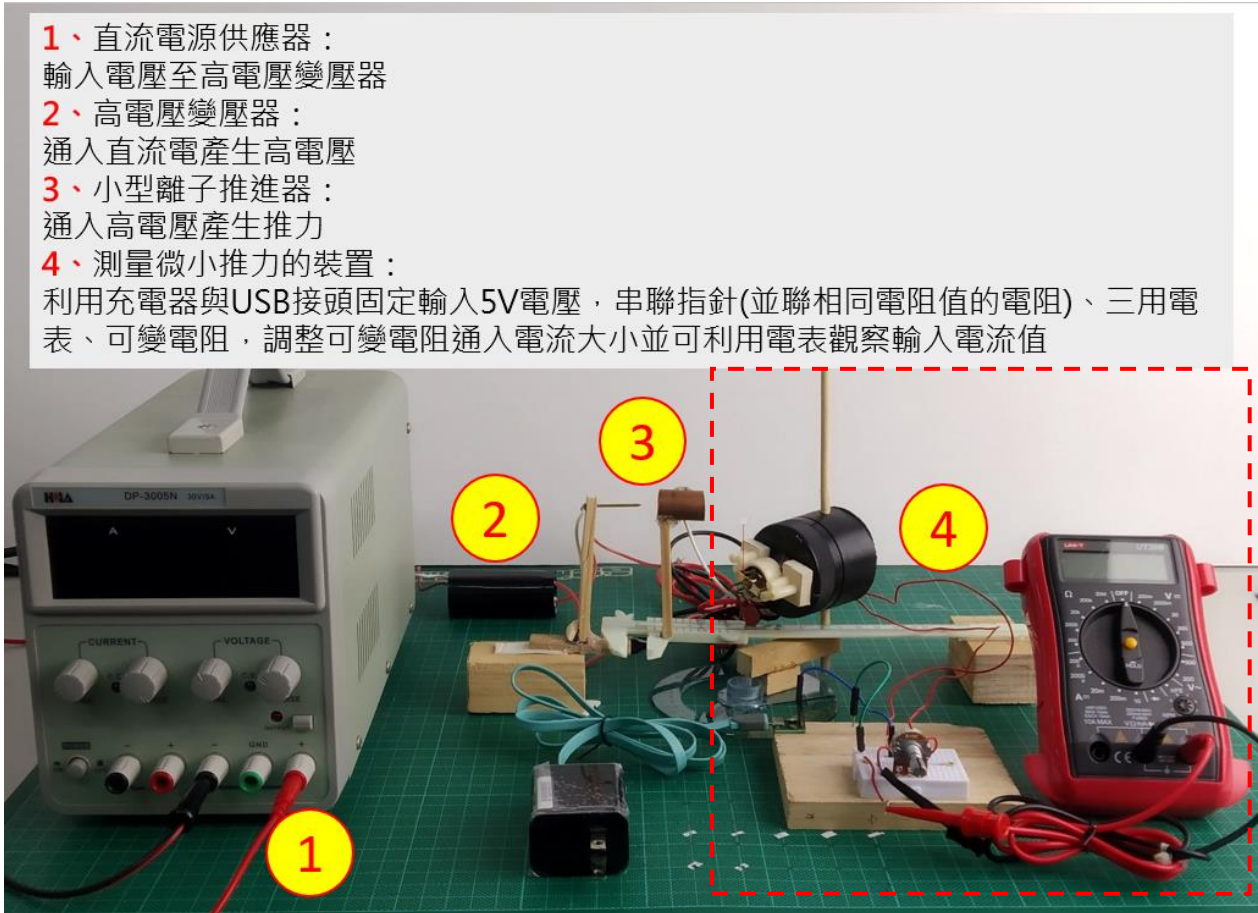
- ① 直流電源供應器：通入一般電壓 110 V 的電壓，輸出 3.7 ~ 7.3 V 的直流電
- ② 高電壓變壓器：輸入直流電，輸出上千伏特的高電壓
- ③ 小型離子推進器：一端銅釘、一端銅管，兩端通入高電壓，此時空氣也為導體並產生電流，在電流流動過程中，空氣中粒子會被游離化成離子，形成離子風並產生推力。
- ④ 測力裝置（電磁扭秤）：調整可變電阻改變通入扭秤的電流值，以測得離子風推力。
- ⑤ 攝影架與手機 APP：利用手機量角器可以觀察出指針被吹動時的偏轉角度。



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。

- (一) 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。
- (二) 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

(一) 實驗五：與之前並聯七個銅管不同，現在使用單個銅釘、銅管來實驗。

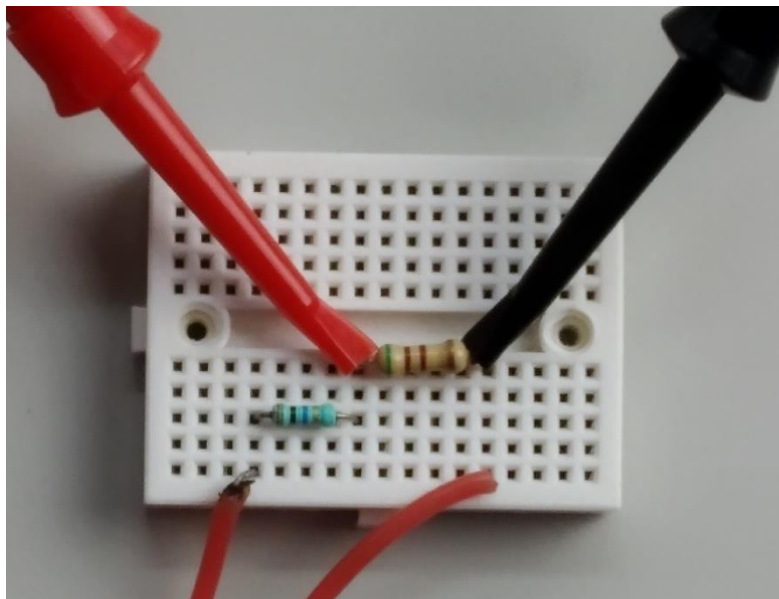
直流電源供應器輸入直流電(3.7~7.3V)，高電壓模組輸出高電壓至離子推進器，產生離子風推力，此時要用電磁扭秤測量裝置四面八方的氣流方向，接著量出每一方向的推力大小，最後繪出裝置開啟時，四周的流場分佈。

肆、研究過程或方法

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。

(一) 家用 110V 電流通入直流電源供應器，直流電源供應器輸入 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，電阻連接、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），即可得知高電壓值。

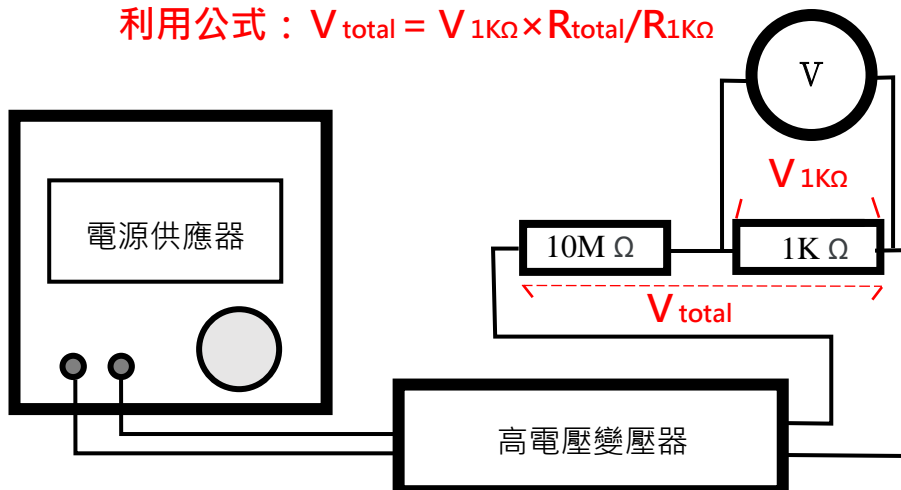
(二) 裝置圖：利用分壓方式得知高電壓總電壓



圖五、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。

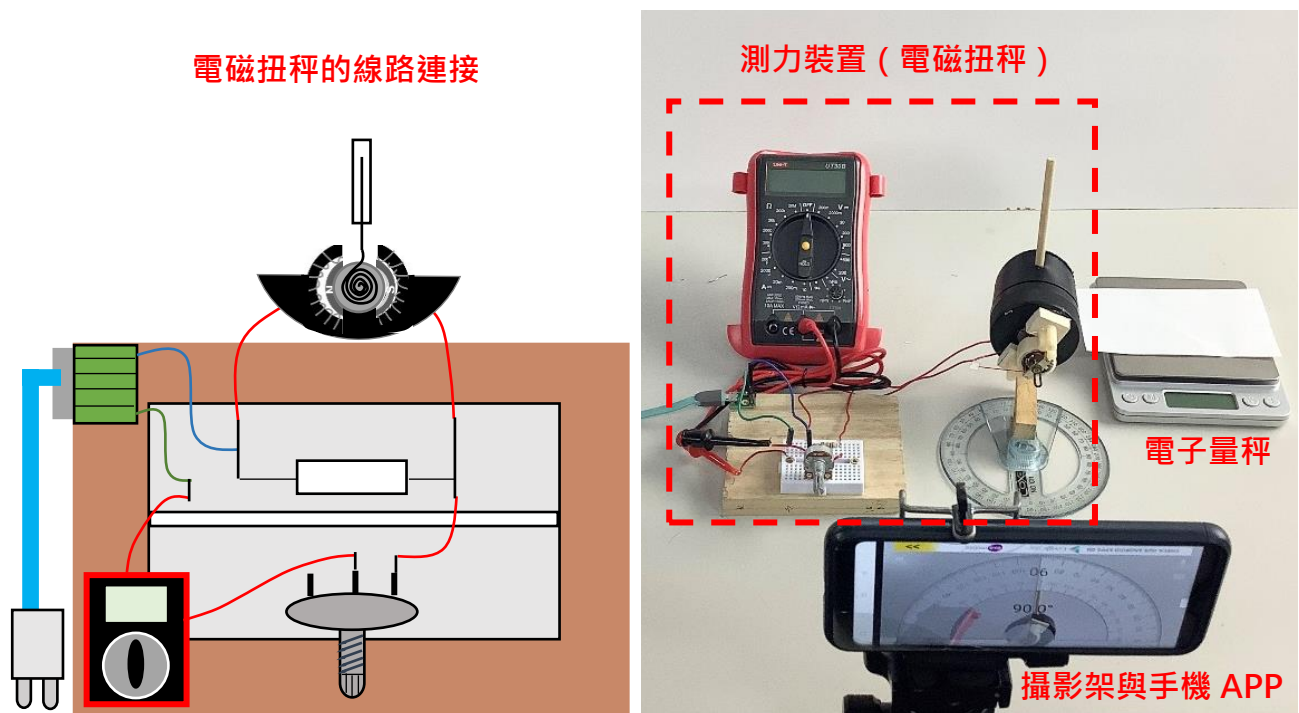
(三) 示意圖：

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

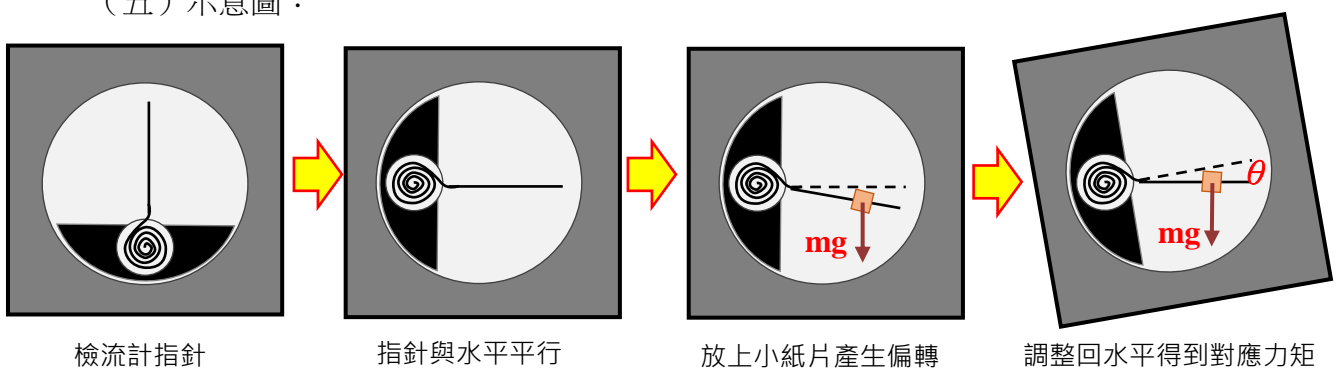


二、實驗二：測力裝置，指針偏移角度與指針回復力矩、通入電流與指針回復力矩關係

- (一) 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）。
- (二) 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）
- (三) 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。
- (四) 裝置圖：利用指針偏轉，得知力矩關係



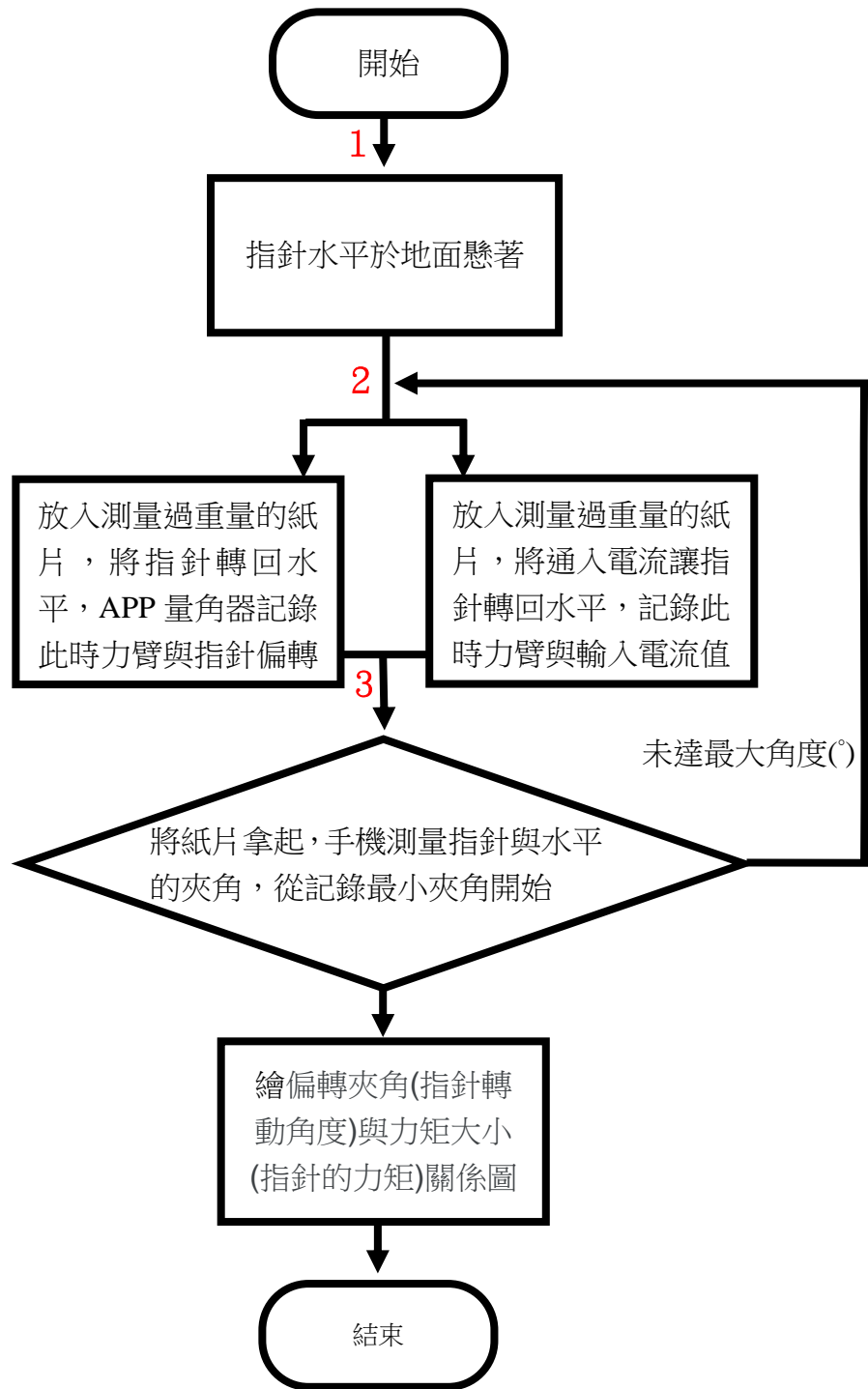
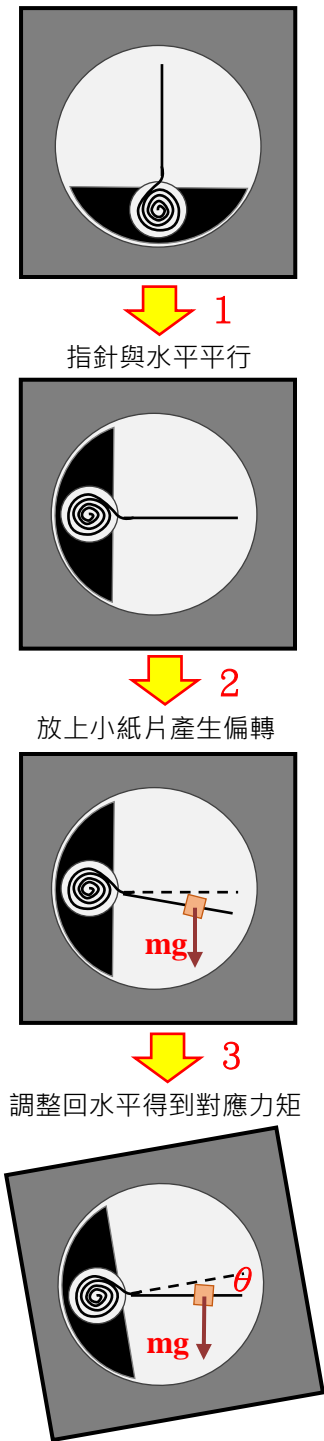
(五) 示意圖：



圖六、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。

(六) 流程圖：



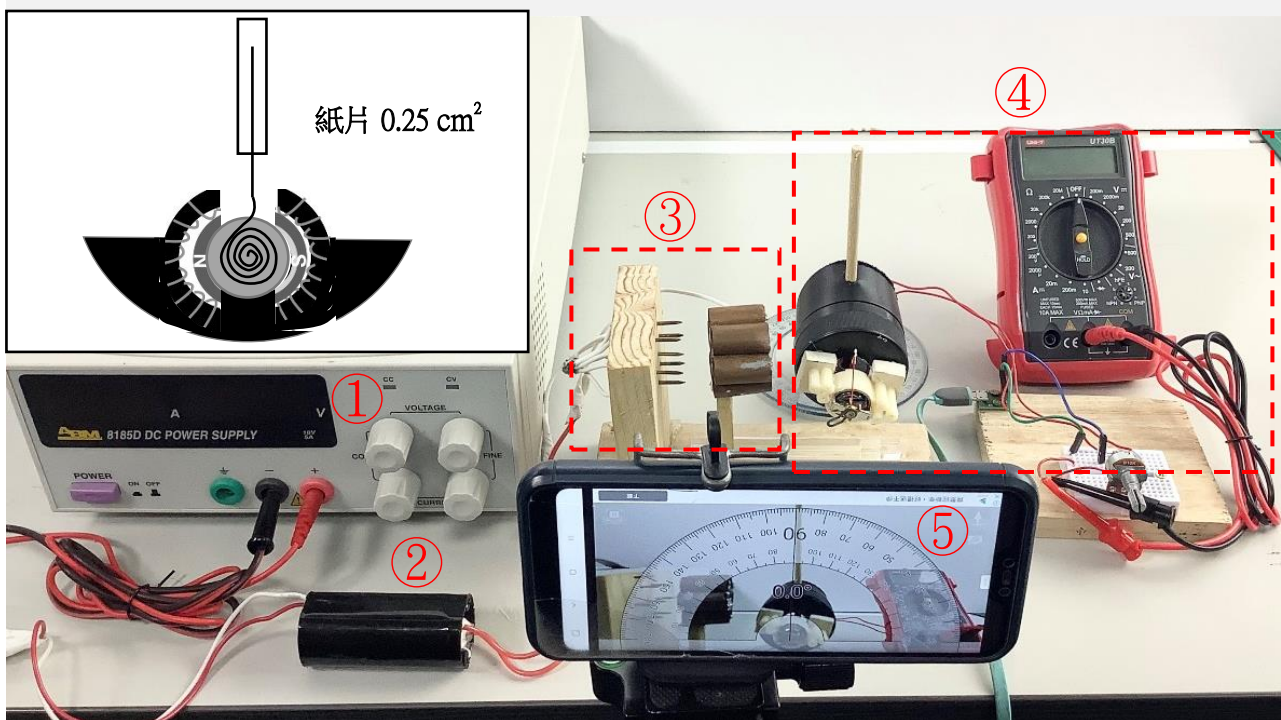
三、實驗三：固定銅針與銅管的間距 1cm、銅管與測力裝置的間距 4cm，利用直流電源供應器的輸入電壓（3.7~7.3V，是高電壓變壓器說明書上的輸入限制）至高電壓變壓器的輸出電壓，得指針偏轉與指針偏轉力

（一）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。

（二）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。

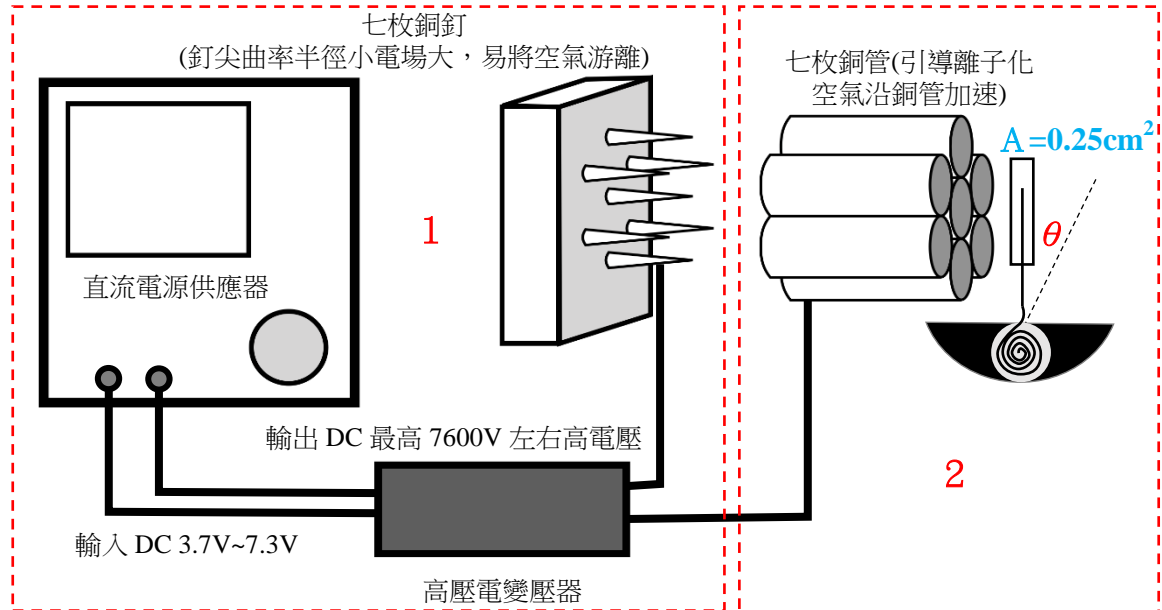
（三）裝置圖與原理圖：

- 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。

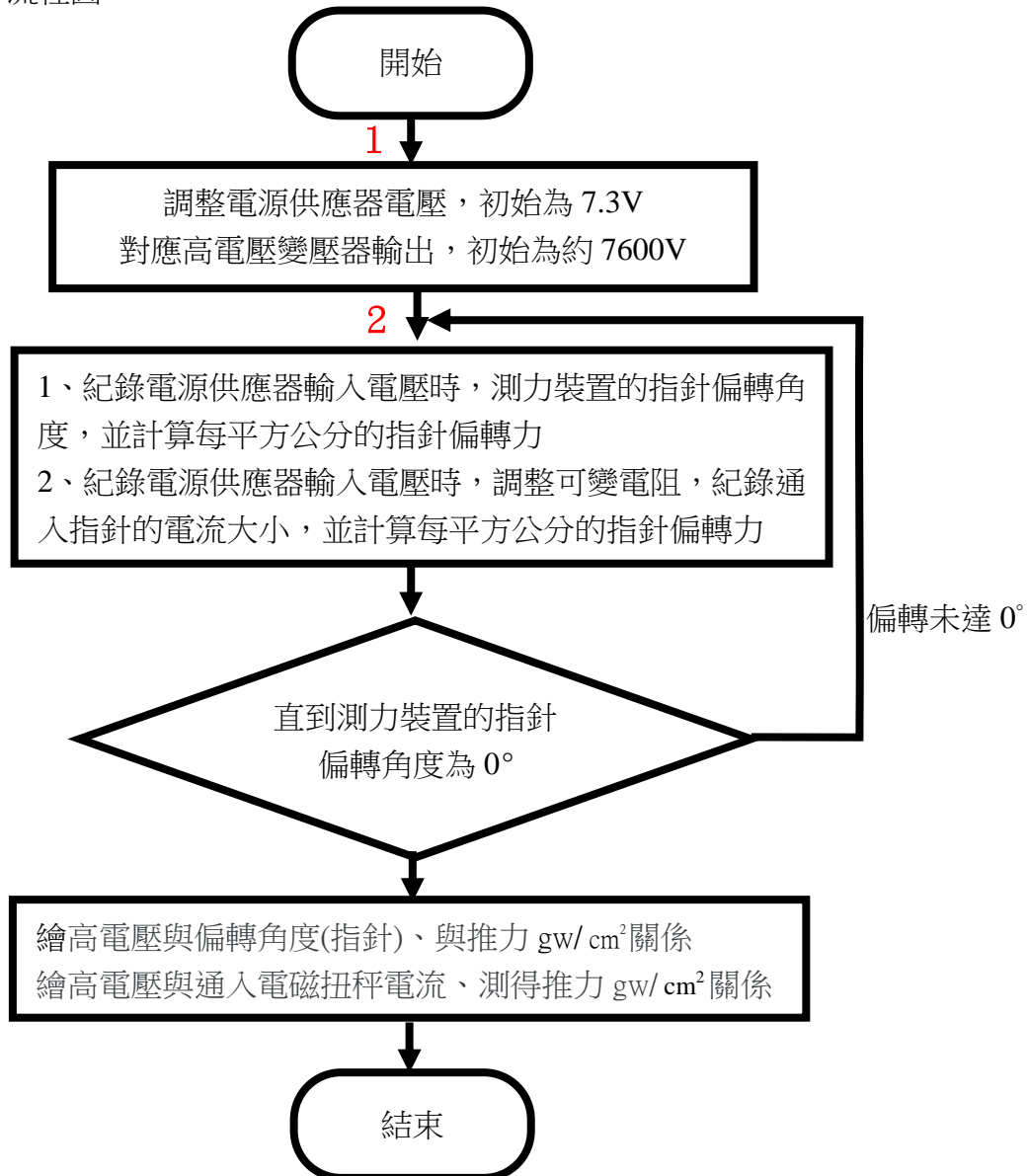


圖七、直流電源供應器輸入電壓，高電壓變壓器輸出高電壓至離子推進器，離子推進器產生推力推動指針，此時開啟電磁扭秤，藉由調整可變電阻來改變電流大小，直到輸入電流產生的指針回復力與離子推進器的離子風推力達到靜力平衡，觀察電表測得電流值，利用通入電流值算出對應的推力值。

(五) 示意圖：

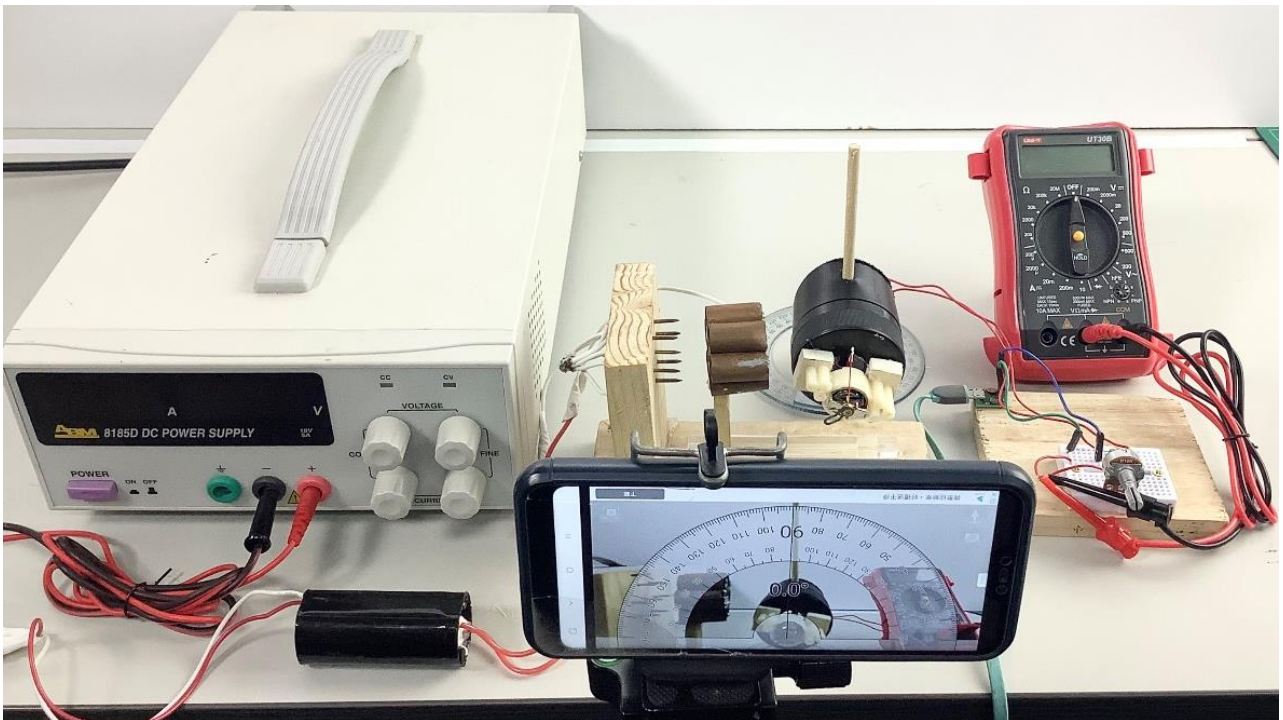


(五) 流程圖：



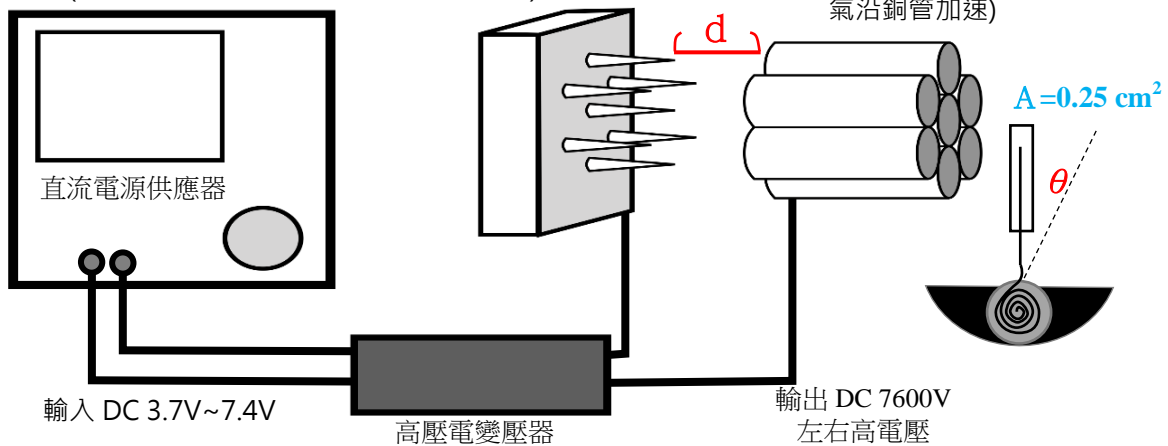
四、實驗四：藉由改變離子推進器內銅針與銅管的間距，測量推力大小變化

- (一) 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。
- (二) 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，得銅針與銅管間距與推力大小關係。
- (三) 裝置圖：觀察當間距改變時，夾角與推力的變化

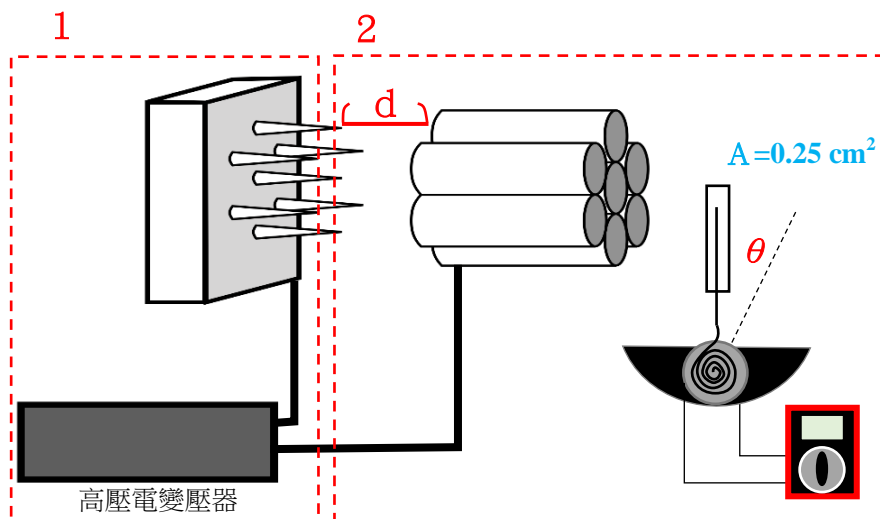
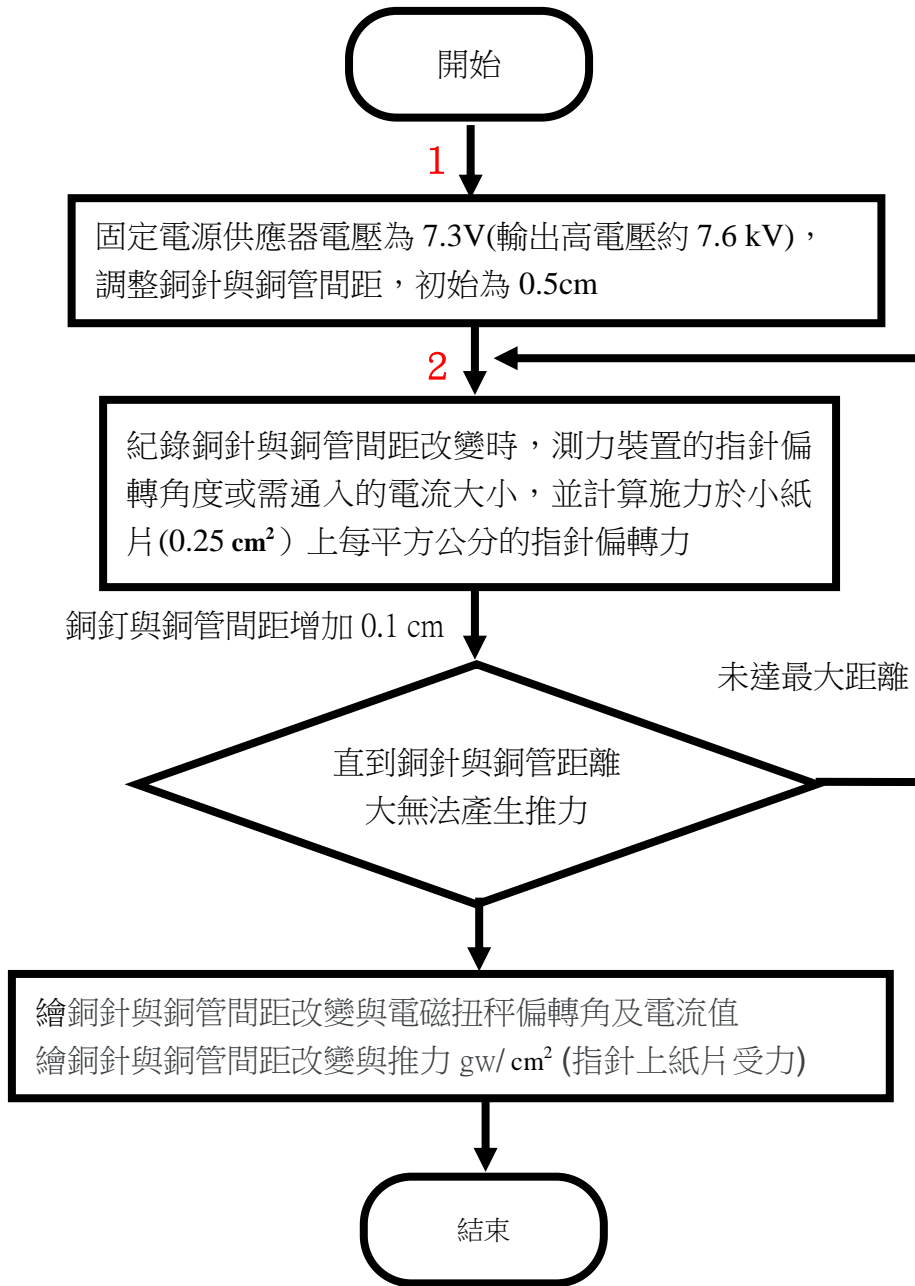


(四) 示意圖：

七枚銅釘(釘尖曲率半徑小電場大，易將空氣游離)



(五) 流程圖：



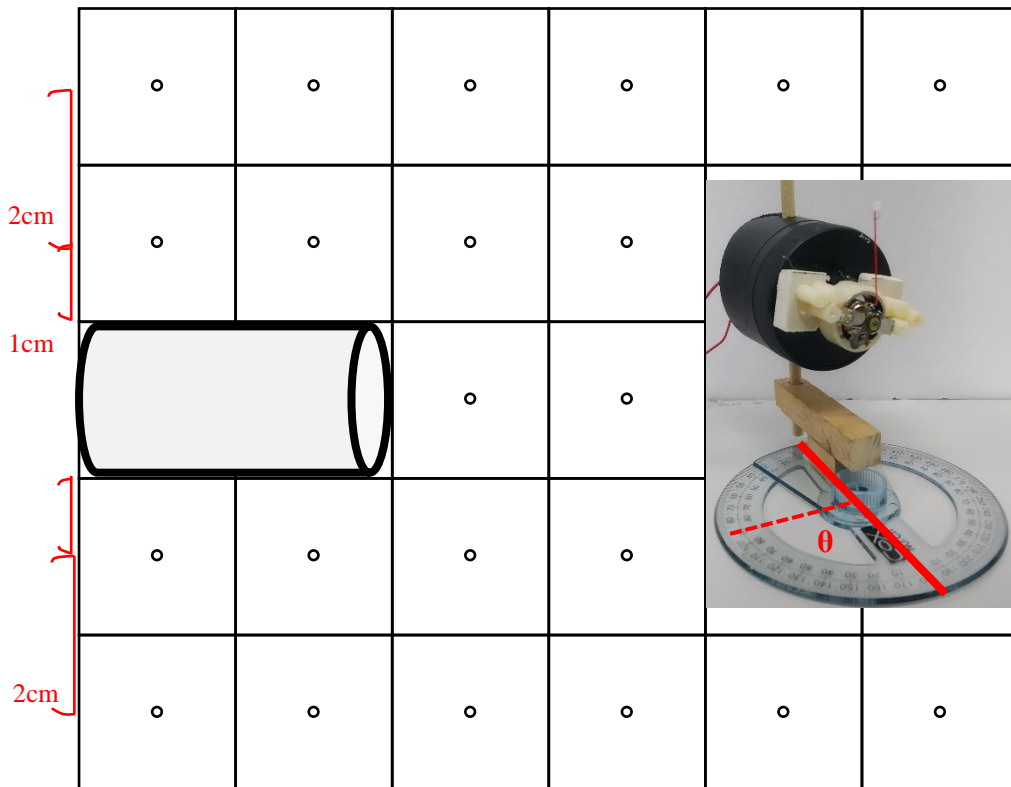
五、實驗五：觀察單一銅釘、銅管周圍的流場分佈

(一) 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，可變電阻調控電組值並改變電流值，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。

(二) 利用座標化的概念畫出方格紙 2×2 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。

(三) 示意圖

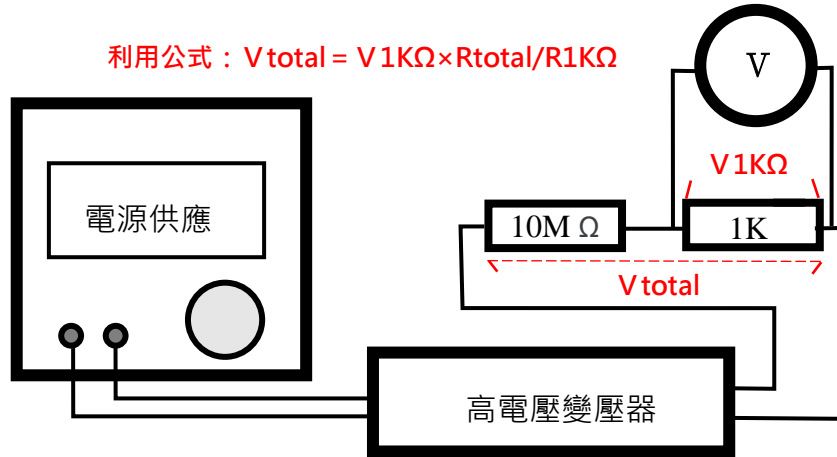


圖八、單一銅管開啟離子推進器裝置(俯視圖)，形成一個回通的氣流，不只產生向前的推力，為了觀察，要使用自製的「測量微小推力裝置」，利用網格上每一點當座標，測量每點的「受力方向」、「受力大小」。

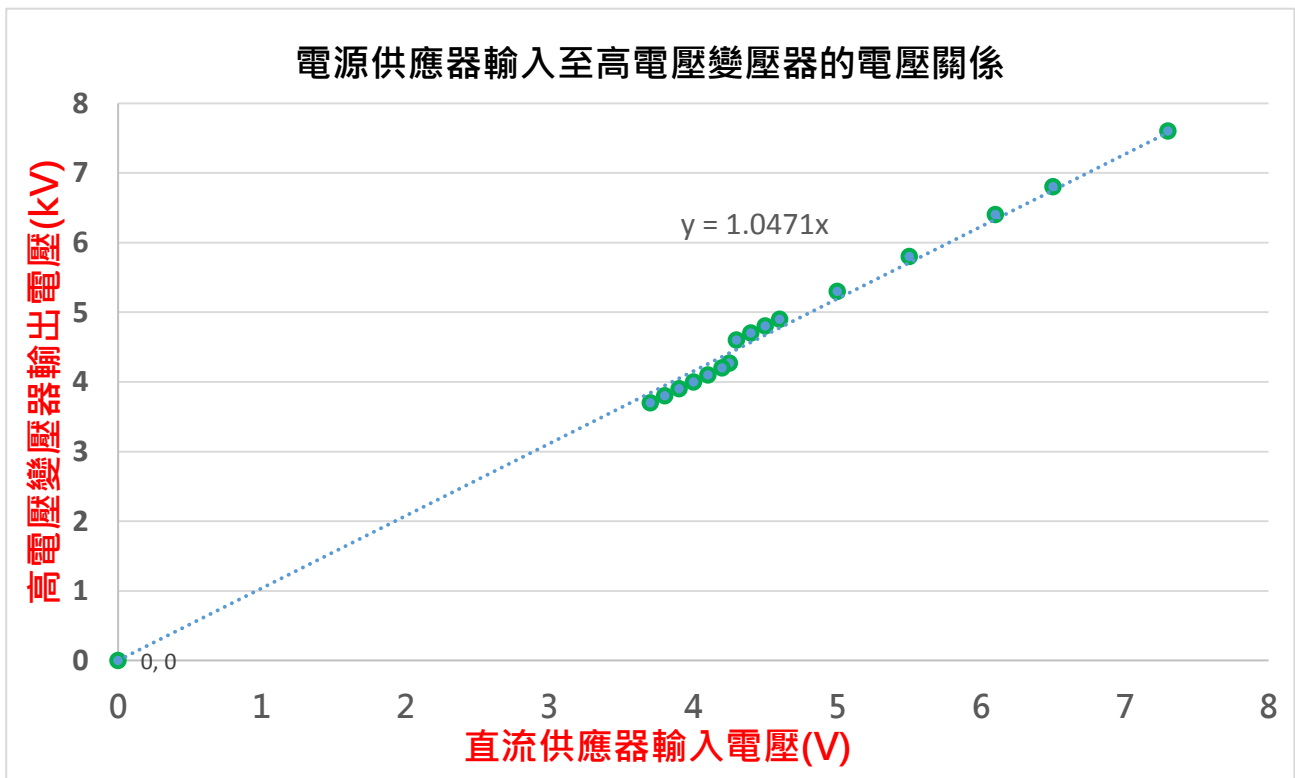
伍、研究結果

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：



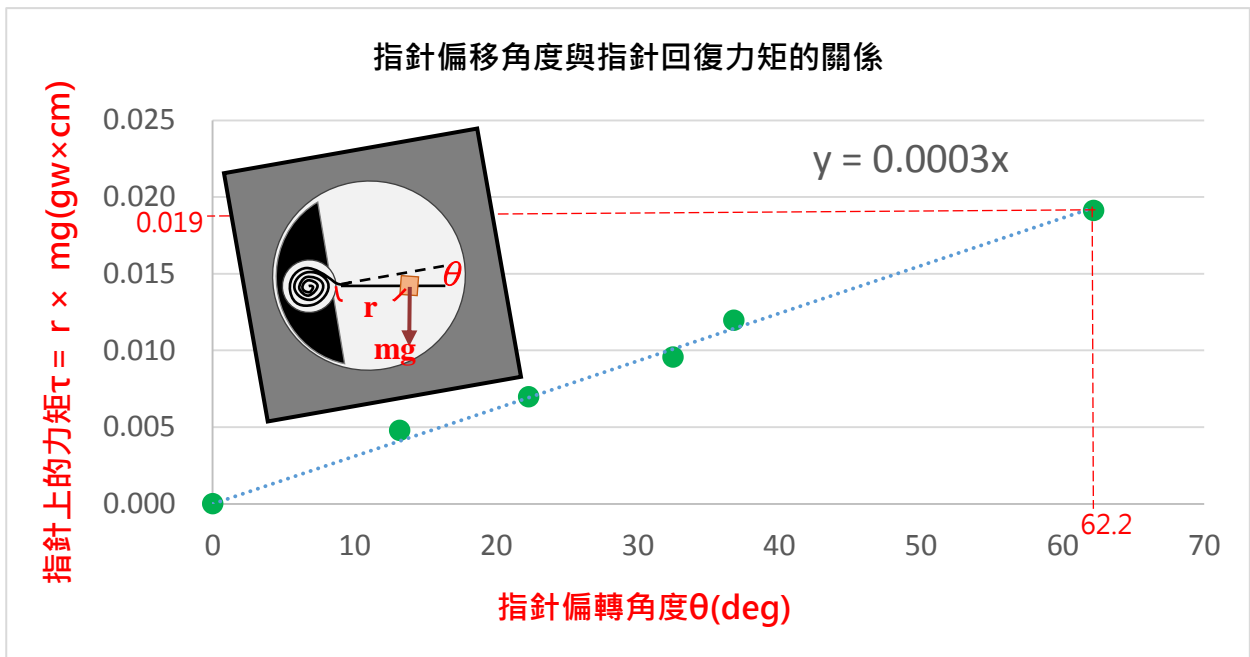
(二) 結果圖表



圖九、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)

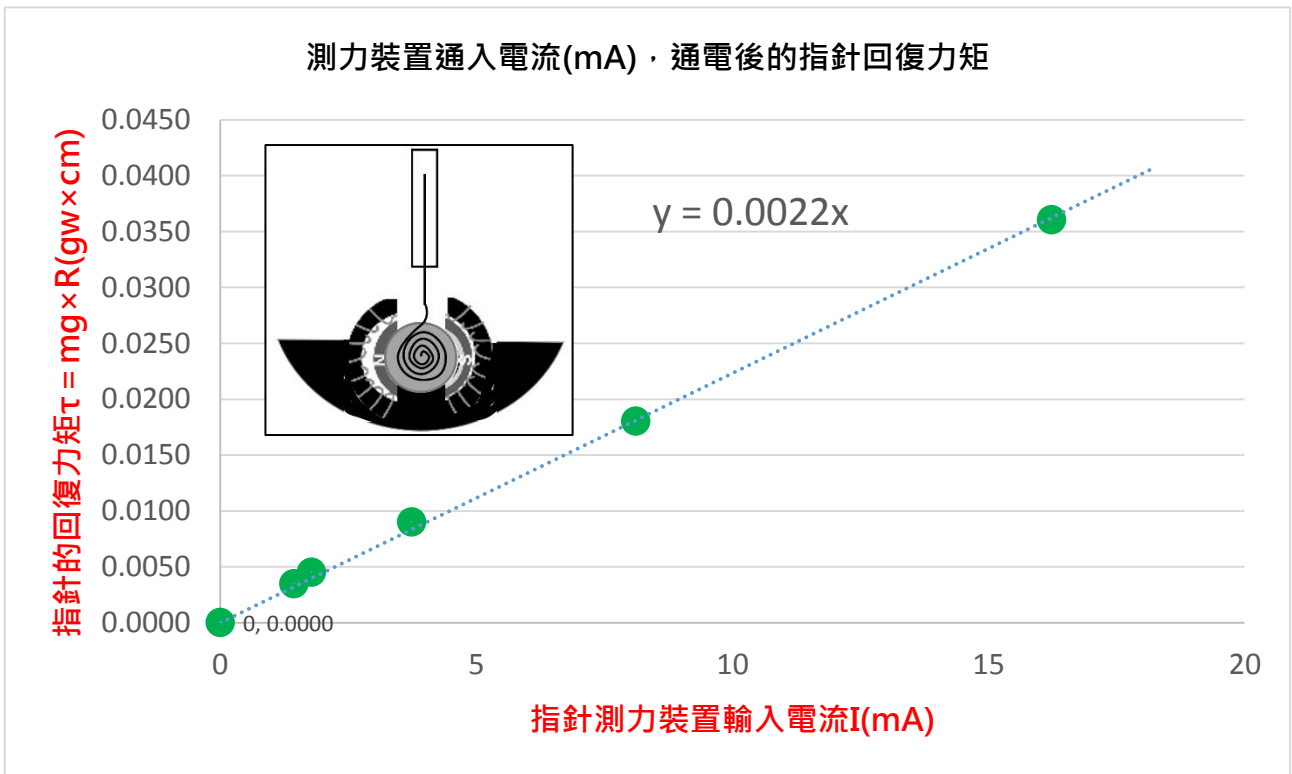
二、實驗二：測量並計算自製微型測力裝置的使用數據，以測量推進器推力

(一) 結果圖表



圖十、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。

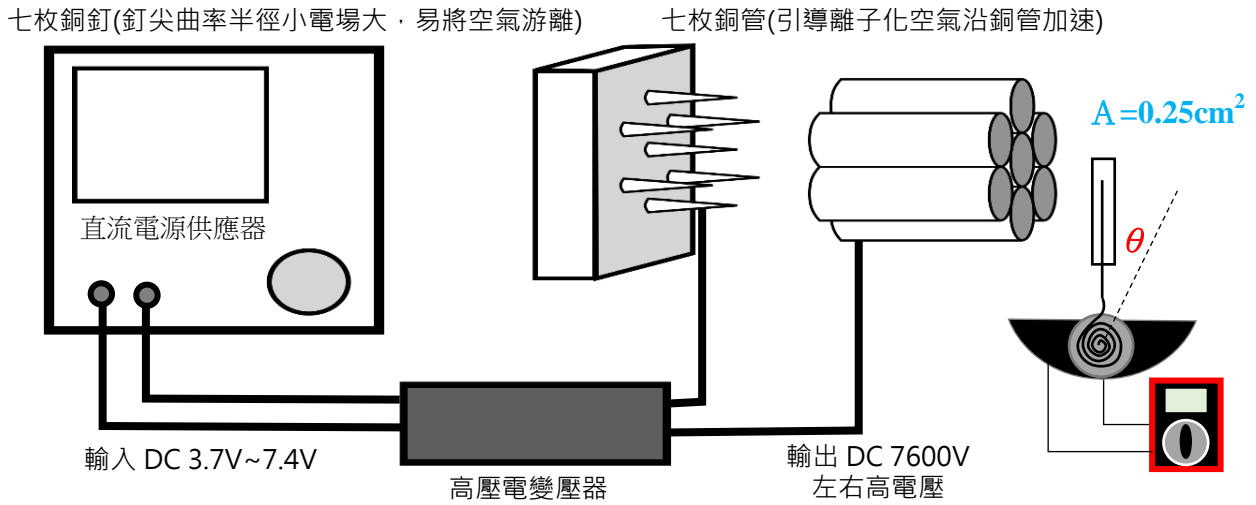


圖十一、電磁扭秤，指針偏移角度與指針回復力矩的關係

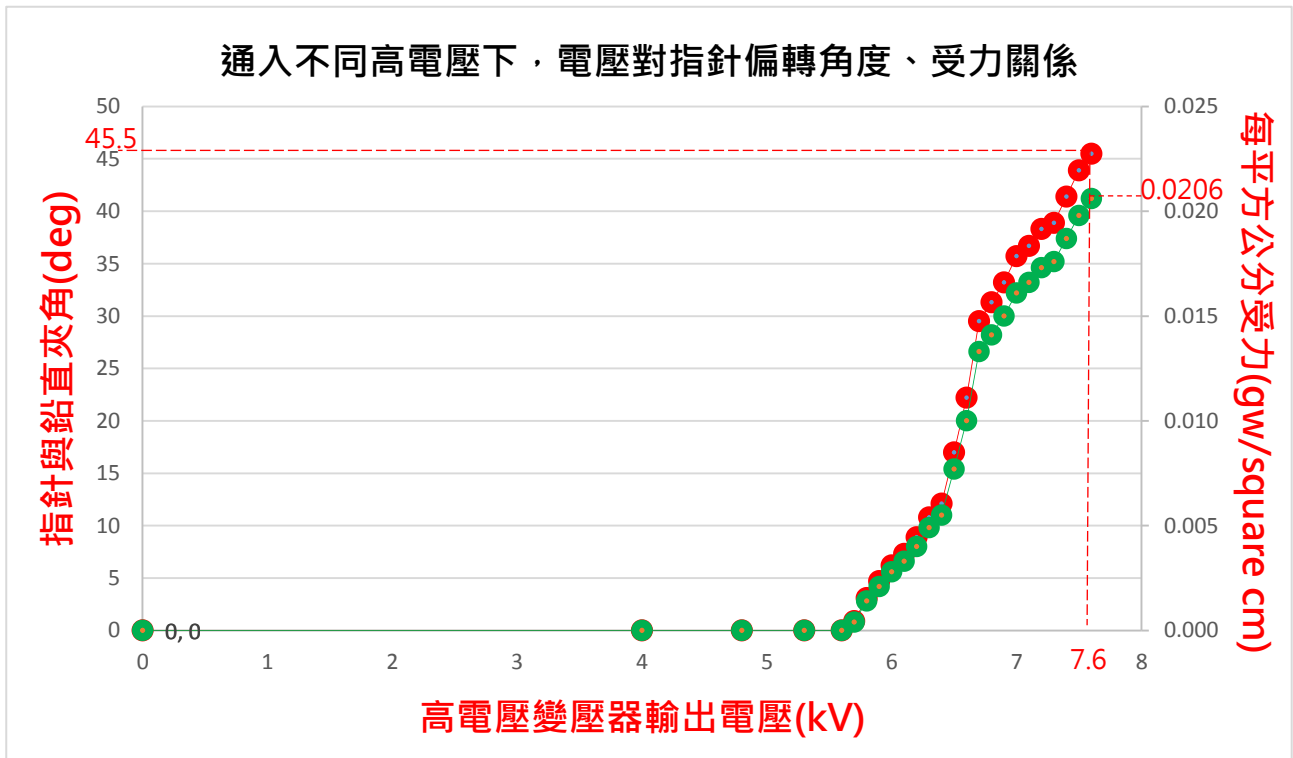
透過力矩 $\tau = F \times d$ ，可算出的力矩 (gw*cm)。由圖可知，當電磁扭秤(指針)需通入的電流越大時，指針偏轉力越大。由圖可知為正比關係，得出公式： τ (gw × cm) = 0.0022 × I (mA) 以此可以推出，當電磁扭秤通入多少電流時，對應的偏轉力矩(gw × cm)大小，可以有效又方便得應用在第三、第四實驗中。

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

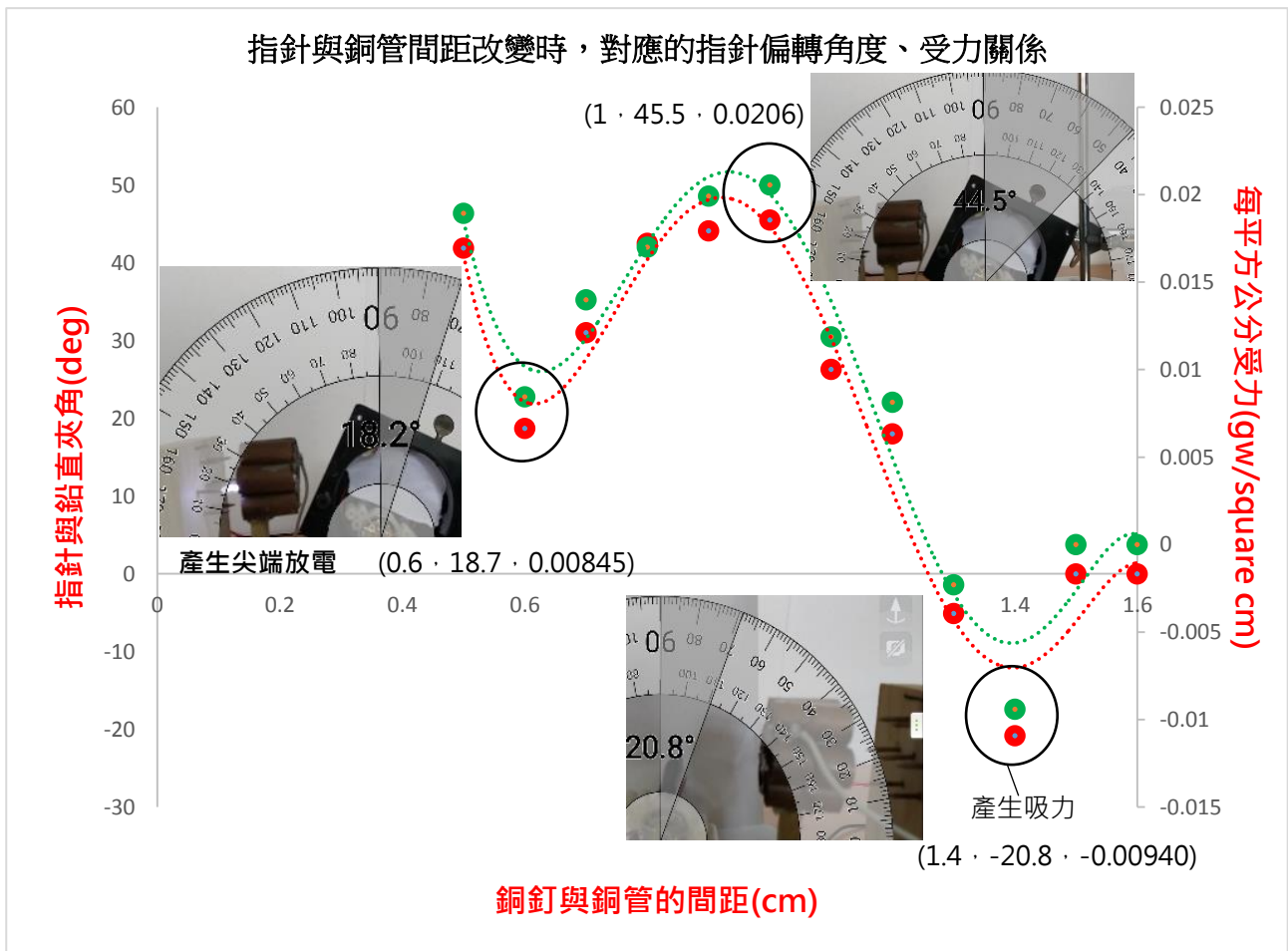
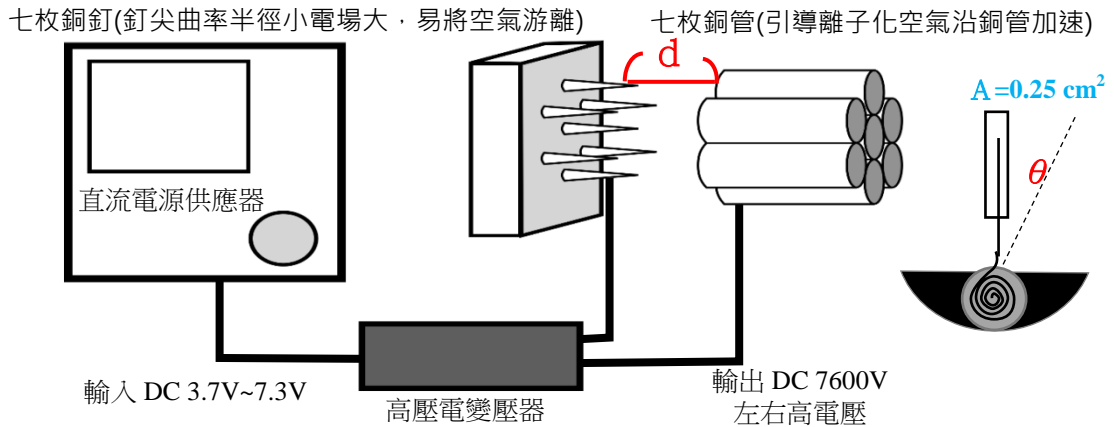


圖十二、測量在不同電壓驅動下，高電壓對指針偏轉角度、受力關係

●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。

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

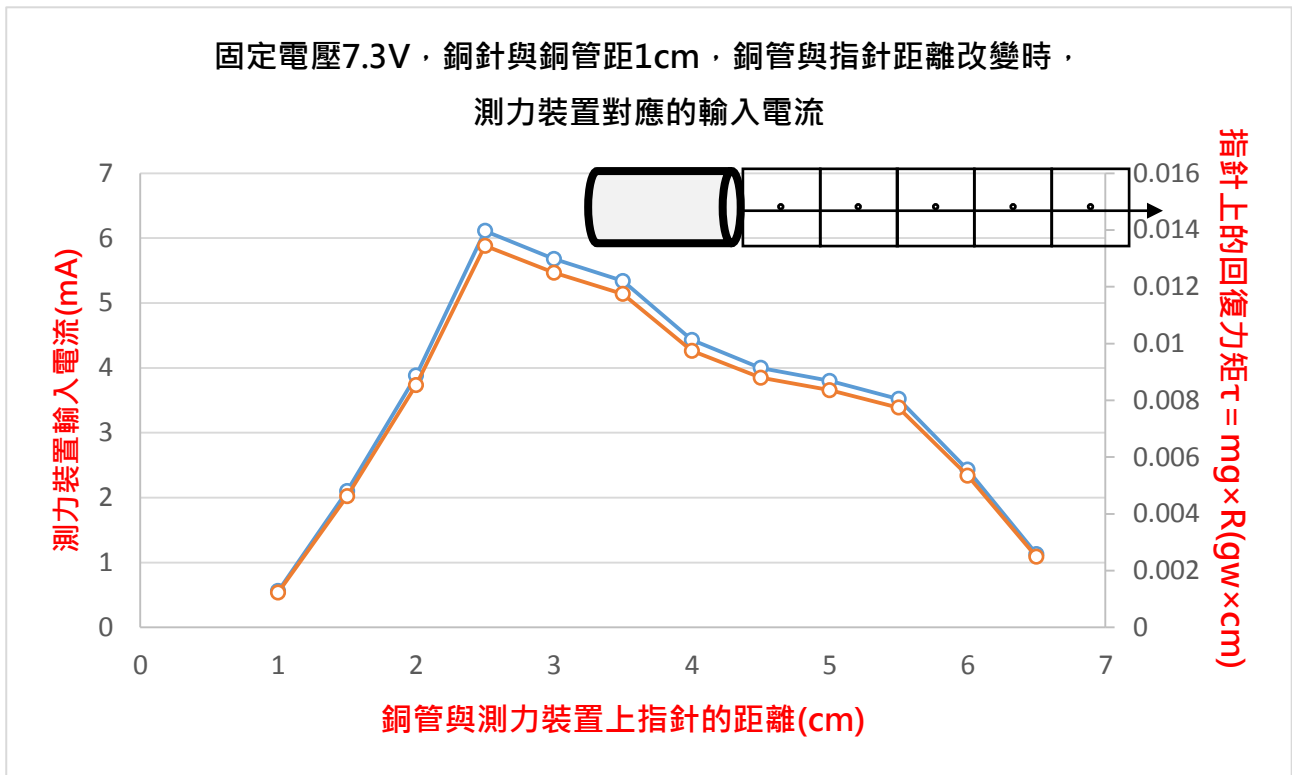


圖十三、指針與銅管間距改變時，間距與指針偏轉角度、受力關係

- 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。

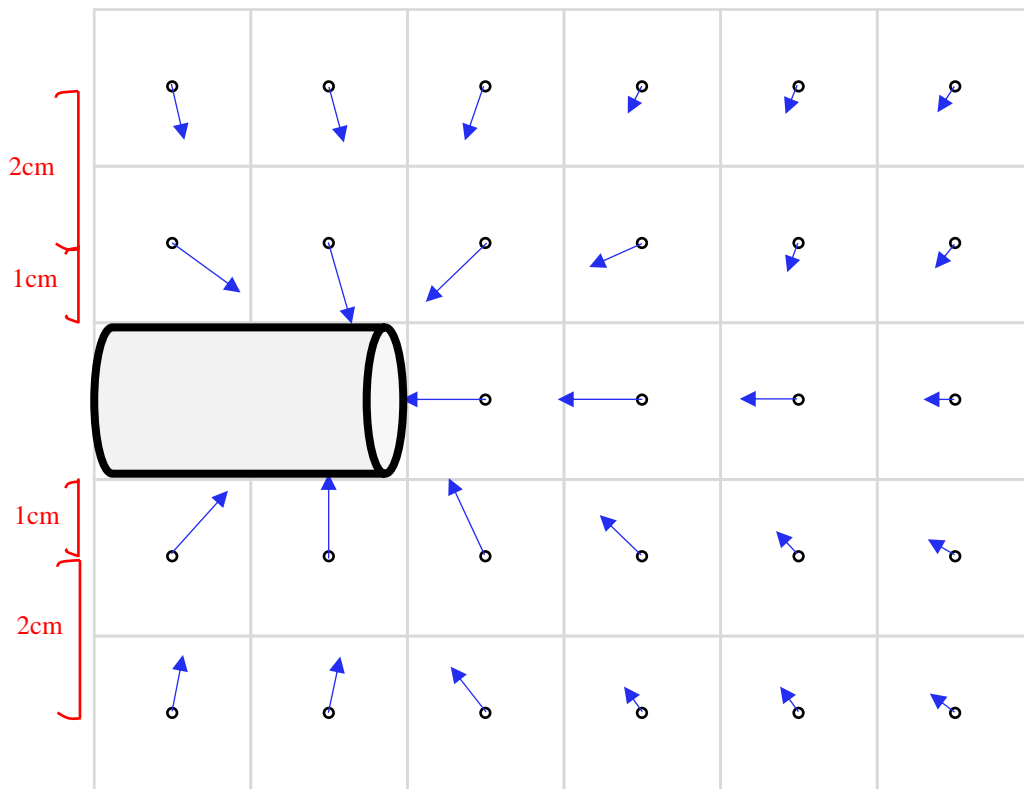
五、實驗五：觀察單一銅釘、銅管周圍的流場分佈

(一) 推力產生時的流場：改變銅管與指針的軸向距離時的流場



圖十四、產生推力時，改變銅管與指針的距離（以 0.5cm 為單位），測量不同間距下的推力

(二) 吸力：測量不同點的吸力方向、大小



圖十五、單一銅管、銅釘流場分佈

陸、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

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：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

我們認為實驗一的誤差來自力臂和紙片重量的不精確，可能肉眼觀察會產生誤差，又或是計算上的小數誤差。測力裝置的渦形彈簧與指針可以測得微小推力，可測量重量範圍在 0.01gw~0.00025gw，也由於數字的精密度高，所以只要稍微有點誤差，造成的影響就不小。

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

在導體中，自由電子是做無規則運動的，在導體的外部加電壓時，就是在導體兩端加有電場，自由電子就會受到電場的力，部分電子就會克服內部阻力（對外部呈現出電阻）產生定向移動，從而形成電流。電流大小是由產向移動的電子數量決定的，並非是速度大，電流就大。電壓大時，外部電場的作用力增大，產生定向移動的電子數量增加了，電流才增大的。其實，電子速度是增加了，但是在內部在受到阻力碰撞的速度增大，所以導體會發熱。但電子純定向移動的速度並不增加，數量卻增加了，電流才變大的。

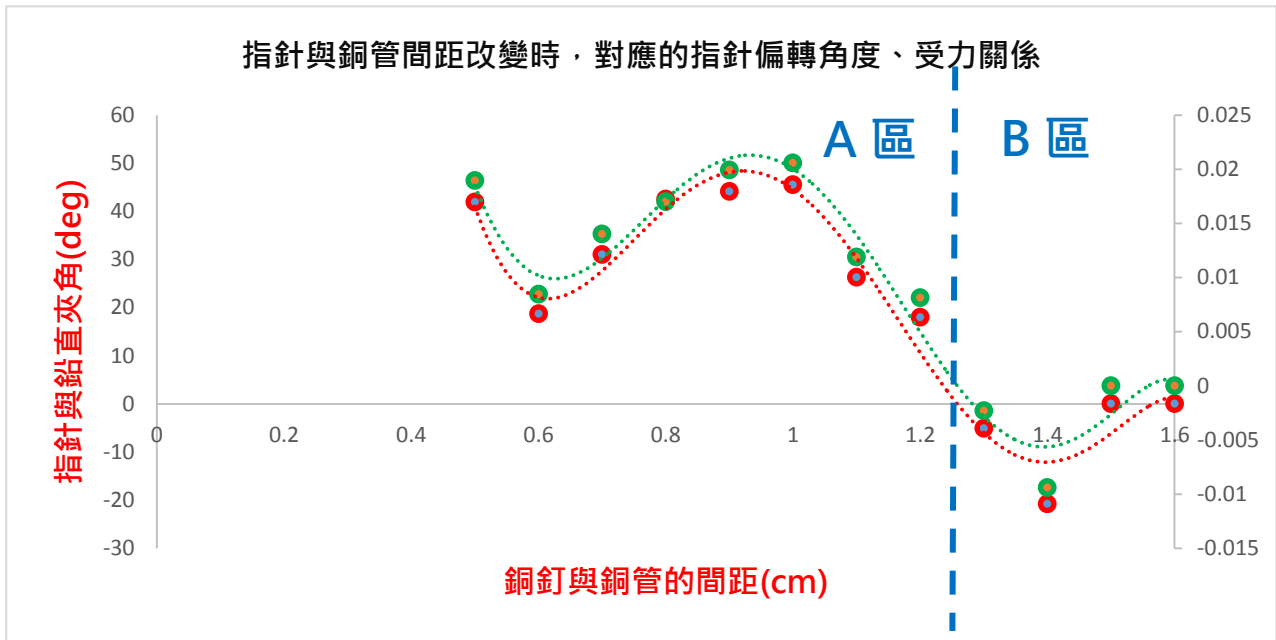
四、實驗四：藉由改變離子推進器內銅針與銅管的間距，測量推力大小變化如用直覺推理的

話，距離越大時，或許推力會越大或越小，公式：1、 $F=mx_a=qx(V/d)$

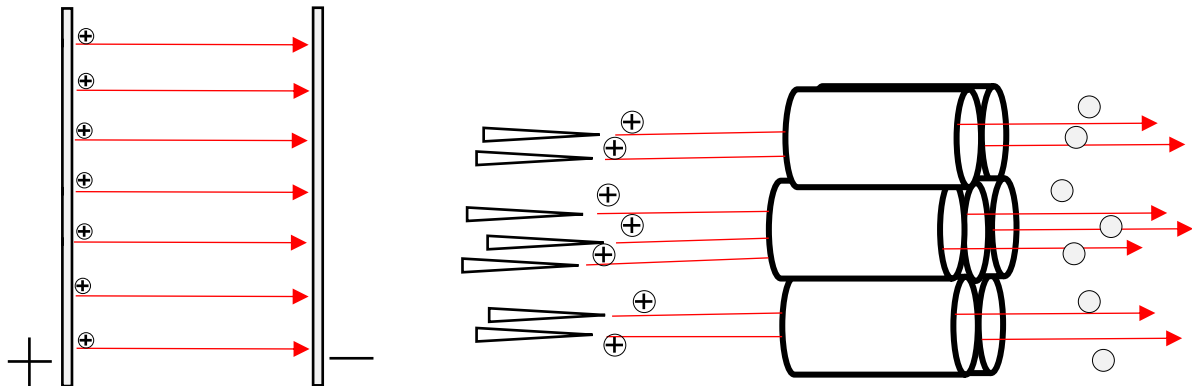
2、 $V(\text{速度})^2=2xaxd=2x(F/m)x d$ ，若距離 d 變為 $2d$ 依據第一式： F 變為 $F/2$ 可是根據第二式來看 $V(\text{速度})^2=2x(F/2m)x 2d$ 可知速度 V 卻不會變，理應隨者力變大才對那到底銅針與銅管的距離與推力大小有什麼關係呢？從圖表中可以發現，並不是間距越大推力大小就越大，反而間距大到一定距離後，即轉變為吸力；而間距越來越小，推力則會越來越小，且銅針與銅管之間就會形成電弧。

五、實驗五：

(一) 原理討論



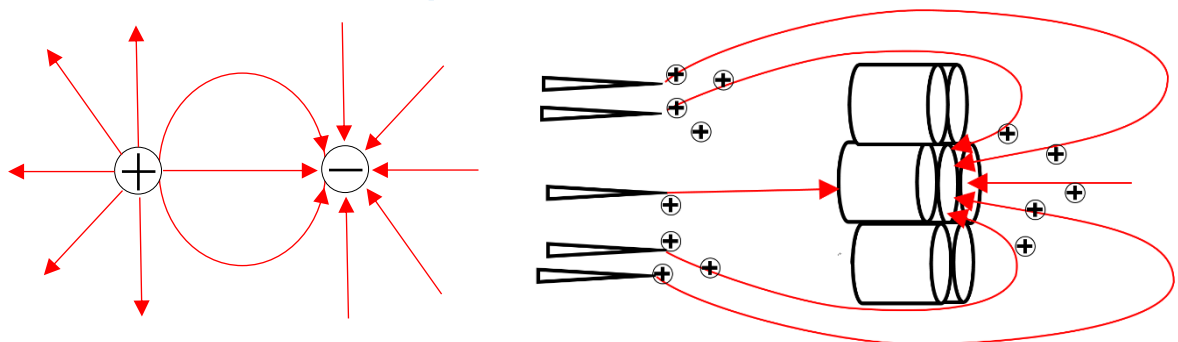
A 區：近場理論模型(視為平行板電場)



圖十六、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。

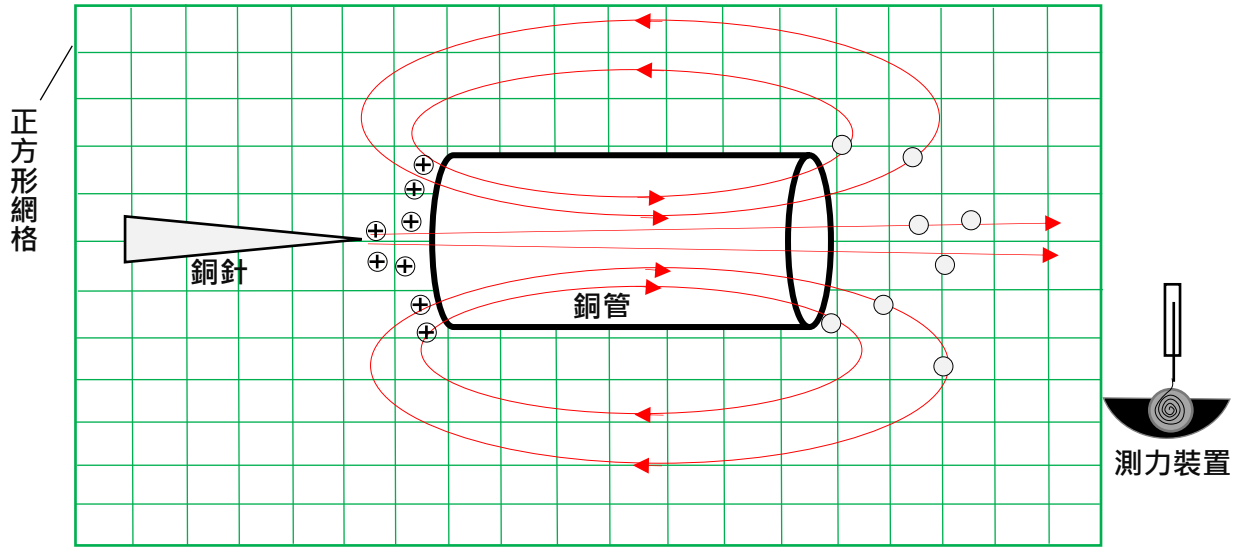
B 區：遠場理論模型(視為點電荷電場)



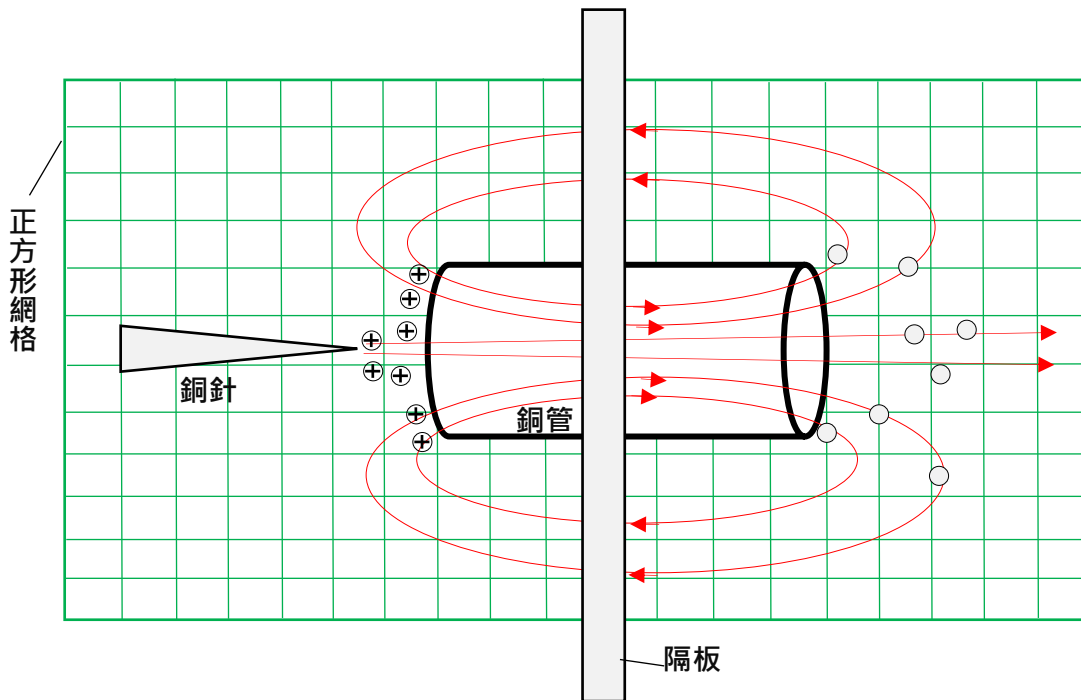
圖十七、形成「遠場」，兩電極夠遠猶如兩個點，此時電流會四面八方地放電，呈由外繞回內的流動。

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。

(二)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，測量氣流的變化情形，要經由實驗證實，並觀察得知裝置開啟間，真正的氣流流動情形。



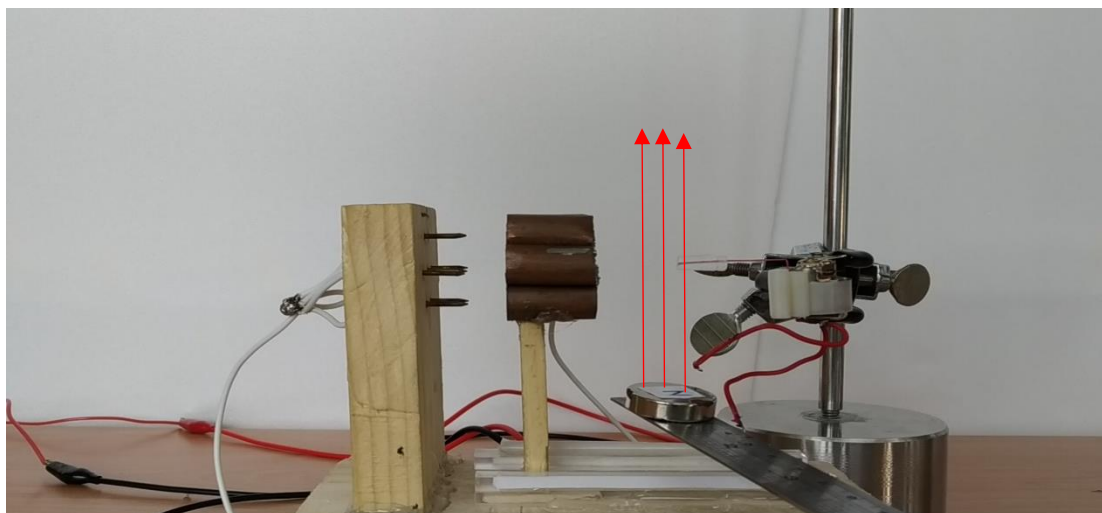
圖十八、單一銅管開啟離子推進器裝置(俯視圖)，形成一個回通的氣流，不只產生向前的推力，為了觀察，要使用自製的「測量微小推力裝置」，利用網格上每一點當座標，測量每點的「受力方向」、「受力大小」。



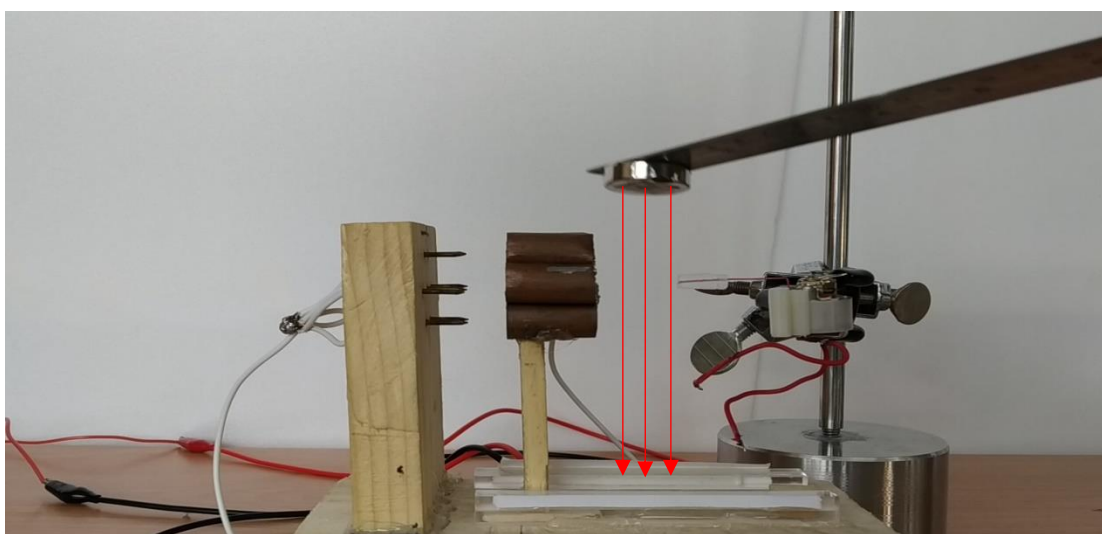
圖十九、單一銅管+隔板進一步實驗(俯視圖)，隔板擋住銅管旁邊的空間，試圖讓氣流不會繞回去，此時不形成一個回通的氣流，少了向內回去的力，向前的推力或許會變得更大，為了觀察，要使用自製的「測量微小推力裝置」，利用網格上每一點當座標，測量每點的「受力方向」、「受力大小」。如此可以再利用測得每一座標的推力方向與大小，推出離子推進器開啟時，實際的氣流流動情形。

六、其他延伸實驗

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、N極向上，指針不產生偏轉，紅色為磁力線



圖二十一、N極向下，指針不產生偏轉，紅色為磁力線

柒、結論

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

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。可推導公式： kV （輸出高電壓） $=1.05 \times V$ （輸入電壓）

以此可以推出，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：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. τ (gw \times cm) = 0.00030 \times θ (deg)

2. τ (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，可以有效又方便得應用在第三、第四實驗中的測微小推力實驗。

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，以了解電壓與推力的關係。

（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時，間距小於 0.80cm 時，會有尖端放電且推力略為降低，呈正相關係，但是特別發現當銅針與銅管間距介於 1.30cm 與 1.45cm 時，推力居然轉變為吸力、角度轉為負值，且間距與吸力大小呈正相關。最後間距大於 1.45cm 以上時，推力驟減為零。

五、實驗五：

（一）軸向推力流場分佈：推力最大時，並非在管口，而是距管口 1.5 公分處，離管口 2.5 公分內，越近管口推力越低；離管口 2.5~6.5 公分內，越遠管口推力遞減。

（二）吸力流場分佈：每一點推力方向皆指向銅管，距離管口越遠時，吸力急遽降低，似乎可以將銅釘、銅管視為兩電偶極的電場分佈類似。

捌、參考資料及其他

- 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：整流二極體
https://www.rohm.com.tw/electronics-basics/diodes/di_what3
- 11.Magnetic Games · (2019) · Plasma Vortex in a Magnetic Field | Magnetic Games · Youtube
https://youtu.be/O_qv2-rSLhM
- 12.Alexander Reifsnnyder · (2015) · Build an Ionic Thruster like NASA Uses for Space PropulsionMAKE
<https://makezine.com/projects/ionic-thruster/>
- 13.標題：Why DO Ion Thrusters Use Xenon?
https://www.youtube.com/watch?v=Cb_U_CbQ5sc

【評語】 051819

1. 內容的新穎性：離子束增生及應用，有可探究的空間。
2. 實驗設計、數據、分析的創新性：簡易自製實驗裝置，以紙片偏轉能量測微量偏轉，可達到實驗主軸數據，能討論實驗設計與內涵。
3. 內容完整性：藉由改變離子推進器內銅針與銅管的間距，在不同電壓驅動下，測量推力大小變化。較少新穎結果，實驗可以再進行，可在實驗安全範圍下，進入極致參數環境，探究是否能顯新穎現象。

研究動機 Introduction

火箭是目前進入太空的主要載具，於是本研究先由火箭發動機有哪些推力方式。經網上查詢到完全不同於化學火箭，全新的推進器概念：即『離子推進器』。但目前並未廣泛被使用，所以實驗設計就是要探討離子推進器的推力變化。

本研究分析對於離子推進或高電壓相關歷屆科展研究，無論是電離轉輪研究(參考1)，或著是受高壓電改變液滴曲面(參考2)，又或著是火焰受高壓電改變偏向角度(參考3)，多半採固定電壓裝置以及定性化的研究。針對歷屆科展作品的限制，本研究先開發兩項裝置：

- 1、開發藉改變高電壓的電壓值，以調控離子推進器的驅動力。
- 2、為量測離子推進器的微弱推力，需自製推力儀器。最後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、流場的變化。

年/屆	主題	方法
107年中小學科展第57屆第三名	與電共舞-電場對火焰影響之研究	高壓變壓器轉換產生電場，施於平面、針型電極，對干擾之火焰以及針型電極產生離子風速數據測量並比較。
107年中小學科展第57屆第一名	論平行電板間肥皂泡之變形現象	平行電板肥皂泡在施加電場前後的高度比與寬度比是兩電極板間電壓的二次曲線，且離心率與電壓成正比關係。
2004年臺灣國際科展第43屆	電離轉輪放電現象	漆包線兩端接上交流高壓電源，尖端曲率半徑小，電場強度相對大，游離尖端空氣分子，產生尖端放電，而交流電交替產生的正、負離子形成交流離子風，產生轉動力矩，轉輪轉動。

表一、離子推進器或高電壓相關歷屆科展研究

研究目的 Project Goal

●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：

離子推進器需要產生高電壓才能驅動。首先要尋找合適的高壓變壓器，並且要設計能調整輸出的高電壓多寡。也需製作測量輸出的電壓量值的實驗裝置，最後得出關係式。

●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：

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。

●測量在不同電壓驅動下，離子推進器的推力大小關係：

了解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?改變電壓時，測量推力的變化關係。

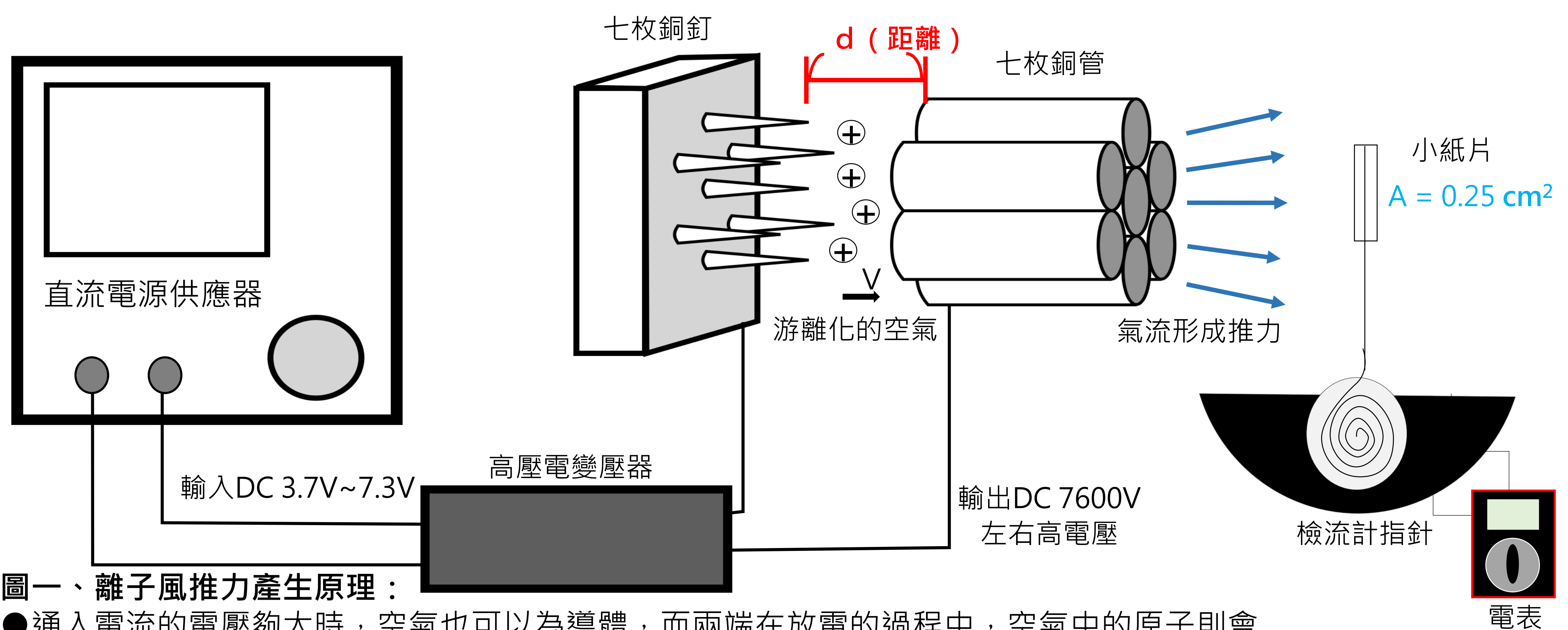
●藉由改變離子推進器內銅針與銅管的間距，測量推力大小變化：

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

●觀察離子推進器周遭的流場分佈：

空氣游離化產生離子風推力，而當改變銅針與銅管間的間距時，推力除了向前推動的力以外，周圍也有因電場影響的離子在運動。其中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。

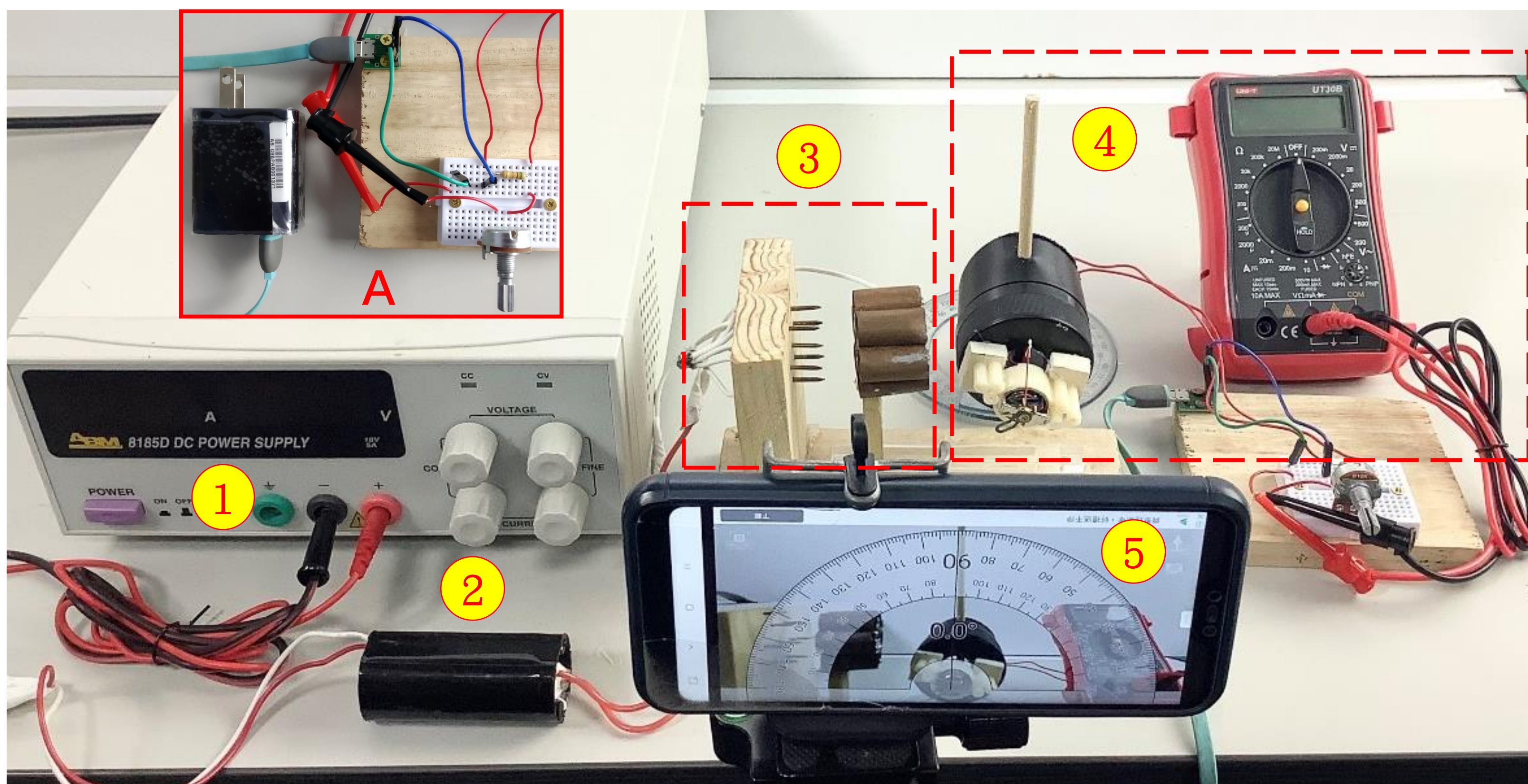
原理 Theory



圖一、離子風推力產生原理：

- 通入電流的電壓夠大時，空氣也可以為導體，而兩端在放電的過程中，空氣中的原子則會被游離化，隨著電流射出，形成離子風的推力。
- 銅釘(釘尖曲率半徑小電場大，易將空氣游離)、銅管(引導離子化空氣沿銅管加速)

研究設置 Experimental Setup



圖二、實驗裝置圖：

- 直流電源供應器輸入電壓至高電壓變壓器產生高電壓，在經過銅釘、銅管，過程中產生離子風，並利用測量微小力裝置測得微小推力，再製作圖表以看出關係。

- 1、直流電源供應器：輸入電壓至高電壓變壓器
- 2、高電壓變壓器：通入直流電以產生高電壓
- 3、小型離子推進器：通入高電壓，產生離子風
- 4、測力裝置(電磁扭秤)：調整可變電阻改變通入扭秤電流值，測得離子風推力
- 5、攝影架與手機APP：手機量角器可以觀察出指針被吹動時的偏轉角度。

- A、線路以USB、充電器固定輸入電壓5V，電磁扭秤與同電阻 6.7Ω 的電阻並聯，裝置再串聯可變電阻(調整電阻、電流)，最後串聯電表並連回USB形成通路。

討論 Discussion

●實驗四:改變離子推進器內銅針與銅管的間距，測量推力大小變化

圖六中可以發現，並不是間距越大推力大小就越大，反而間距大到一定距離後，即轉變為吸力。

●實驗五:在銅管前端加上隔板，測量周圍推力大小變化

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。

功率的轉換：加上隔板後的功率公式推導

檢流計測量離子推進器的通入電流：

$$\text{電流} = \frac{\text{電量}}{\text{單位時間}} = \frac{\text{離子個數}}{\text{單位時間}} \times (\text{離子電量})$$

令空氣離子為二價~三價間，

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

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

總推力(F)=(壓力) × (面積)，電磁扭秤實驗中：

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

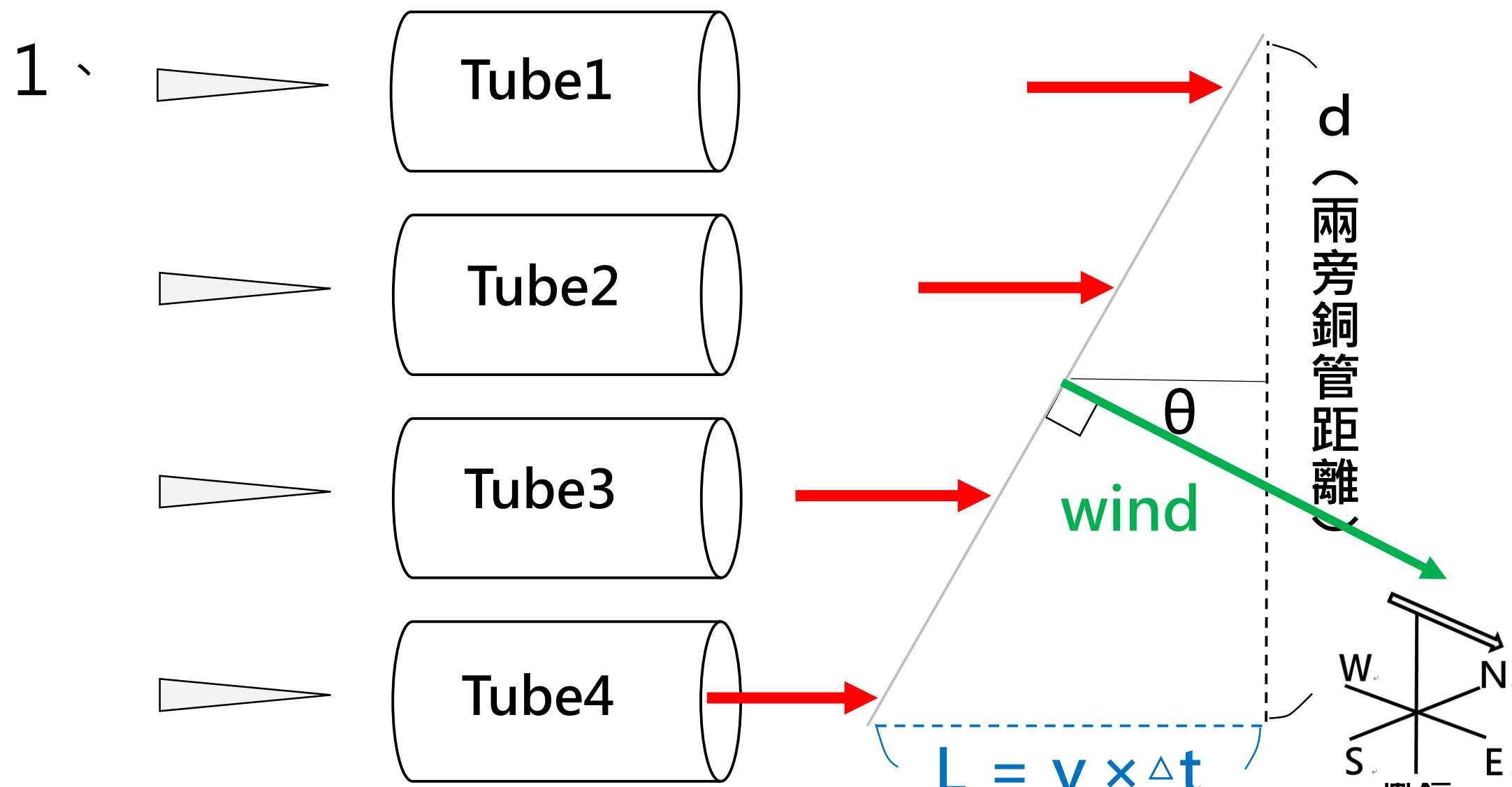
又推力=動量的時變率 = $\frac{\text{離子個數}}{\text{單位時間}} \times (\text{平均空氣離子質量}) \times (\text{速度變化})$ ，可知速度變化 $\Delta v \approx 2.002 \times 10^5 \text{ m/s}$

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

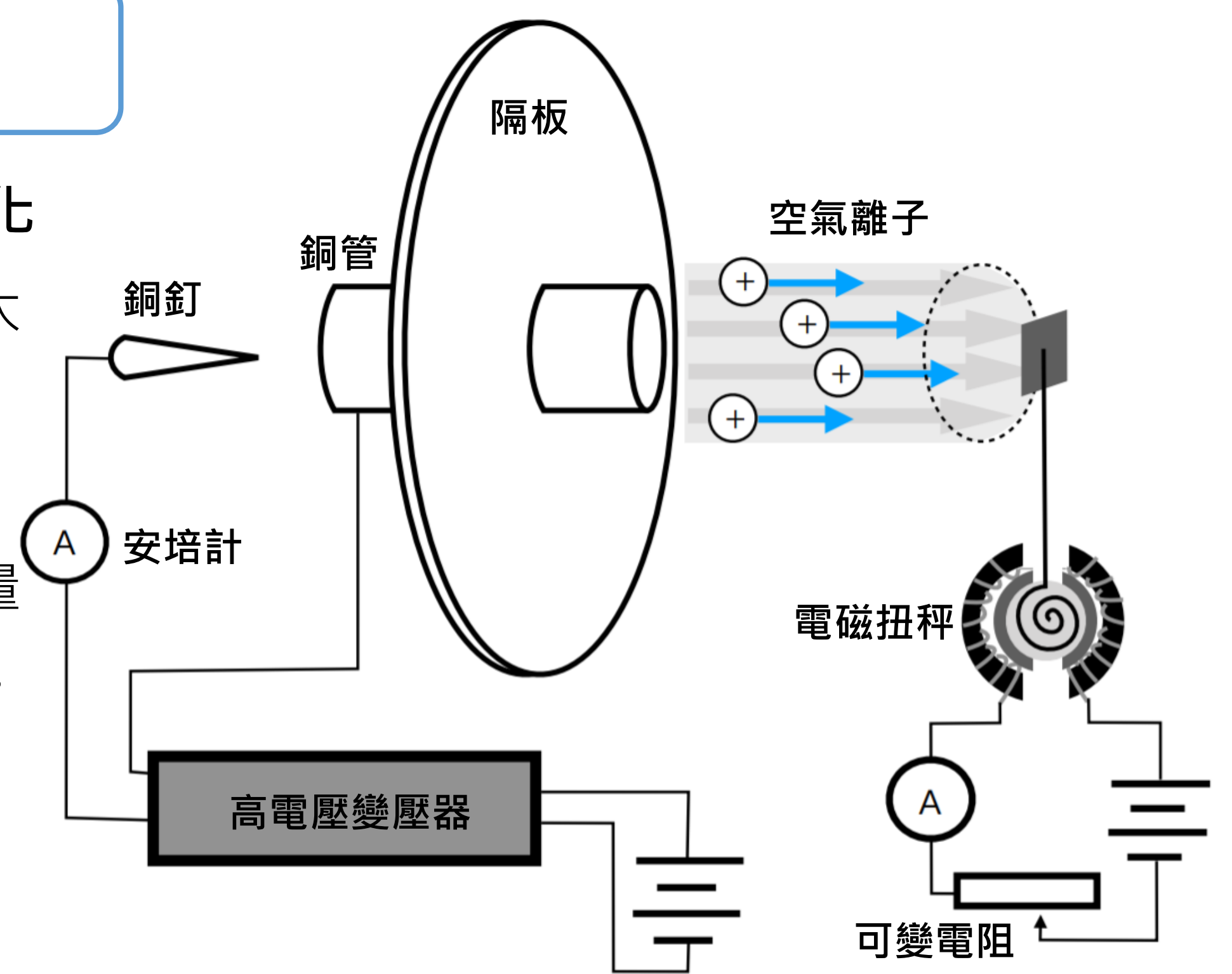
●進一步實驗了解推力是因正離子或負離子造成的？

利用磁鐵施加磁場於銅針與銅管之間，發現推力有變化、影響偏轉，則證明銅針與銅管間空氣游離後形成正離子。

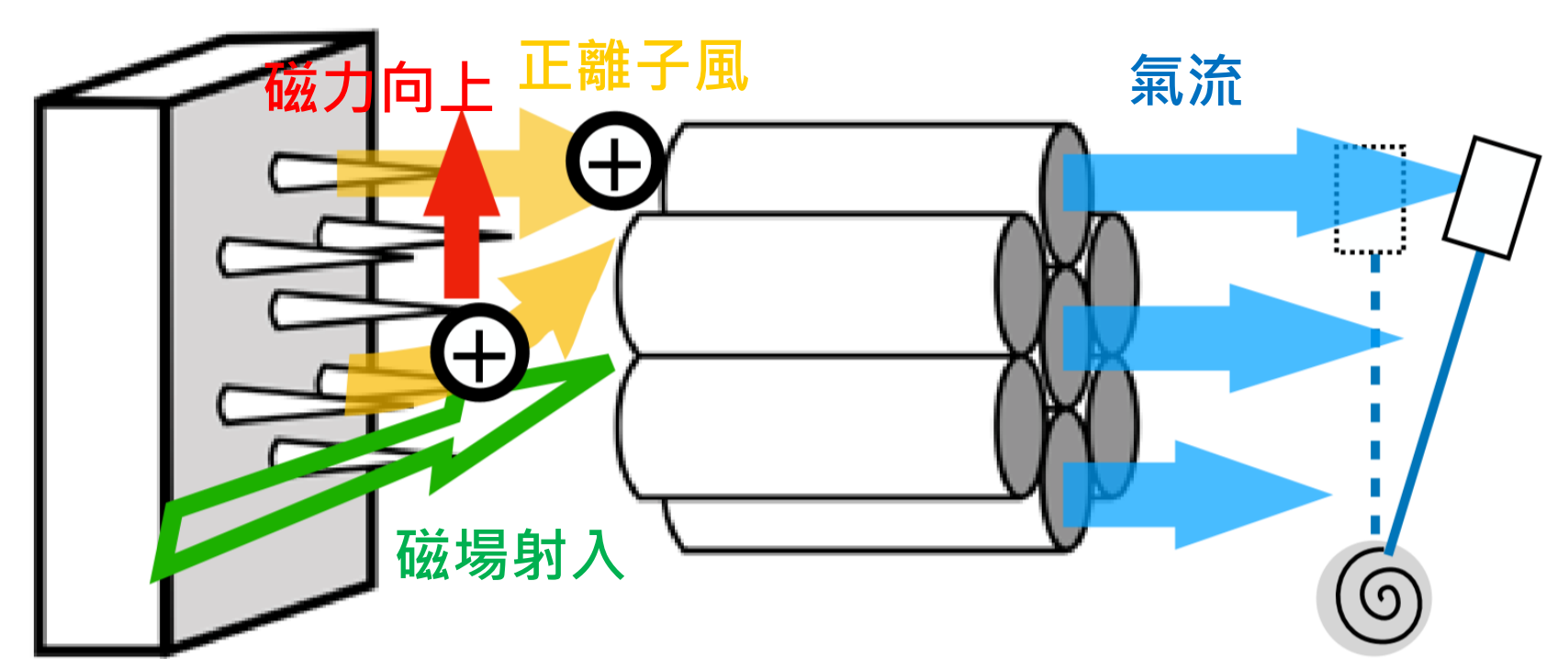
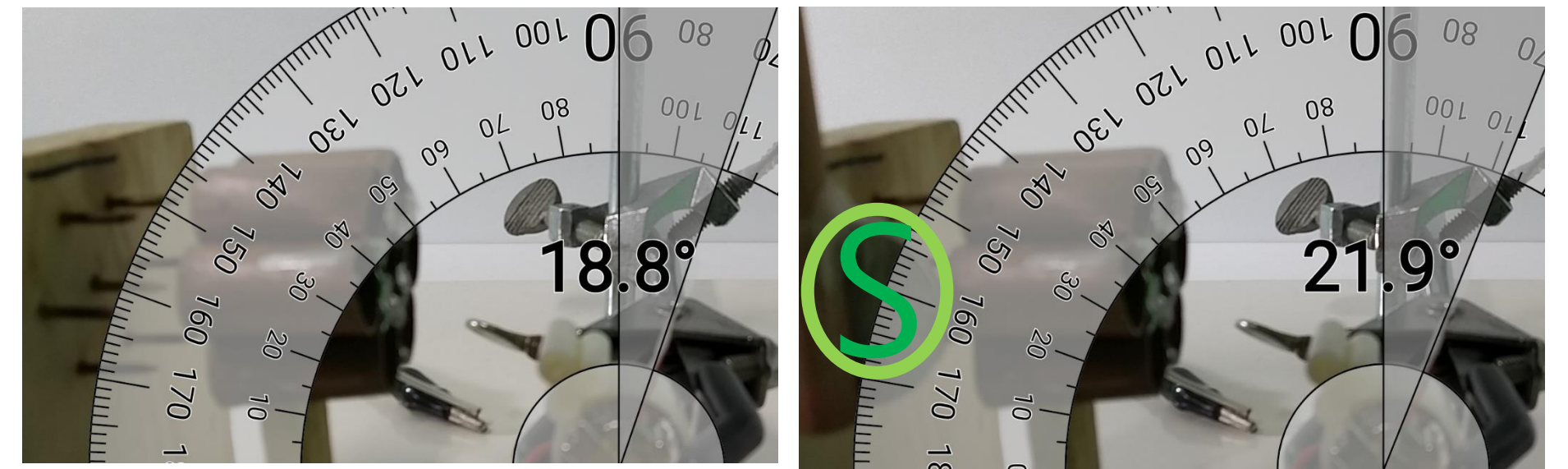
●未來的實驗，要更進一步地探究離子推進器



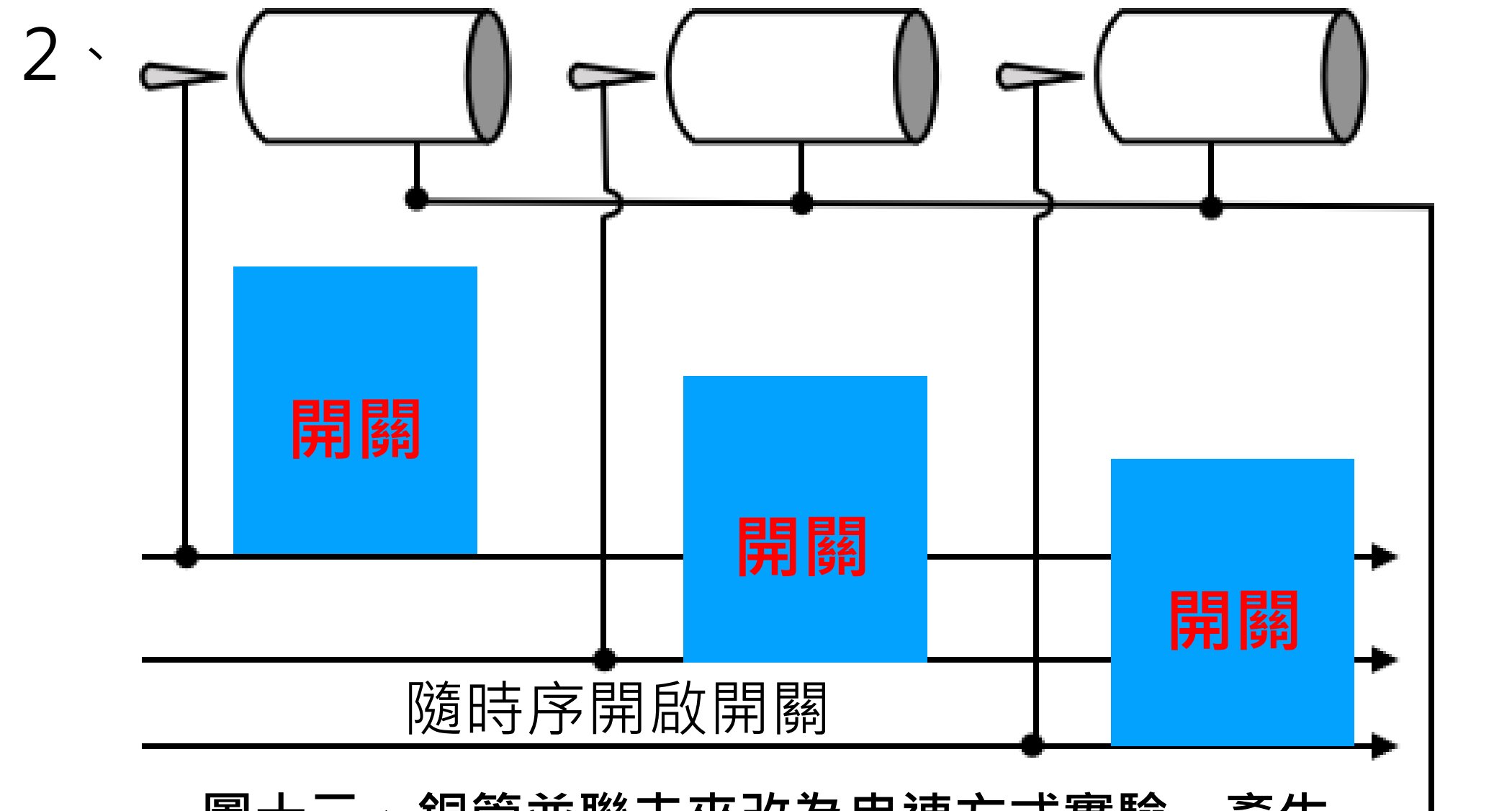
圖十一、依時序開啟裝置(俯視圖)，每一銅管依次產生推力



圖九、單一銅管離子推進器(加上隔板)，測量通入電流，並以電磁扭秤測量推力大小。



圖十、沒有外加磁鐵角度為18.8度，增加側向磁場(N射入紙面)，偏轉增加至21.9度。



圖十二、銅管並聯未來改為串連方式實驗，產生多段加速效果，測試是否能達到增加推力的目標。

結論 Conclusions

●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

- 1、發展出便宜簡單調控輸入電壓，輸出達千伏的高電壓裝置，且可以利用電阻測出分壓，得知總輸出電壓值。
- 2、關係式： $V_{\text{輸出}} = 1047 \times V_{\text{輸入}}$ 。

●實驗二：開發自製微型測力裝置，整理數據，得以測量推進器推力

- 1、可測量微小推力扭秤裝置(可測到0.001gw)。關係式： $\text{力矩值}(\text{gw} \times \text{cm}) = 0.0022(\text{gw} \times \text{cm}/\text{mA}) \times \text{電流}(\text{mA})$ 。

●實驗三：測量在不同電壓驅動下，離子推進器(七枚銅釘、銅管)的推力大小關係

- 1、當輸出高電壓(V)越大，則離子風推力(gw)及越大，呈正相關。

●實驗四：藉由改變離子推進器(七枚銅釘、銅管)內銅針與銅管的間距,測量推力大小變化

- 1、固定輸出7.6kV、指針與銅管間距5cm、七枚銅釘和銅管。銅釘與銅管間距小於 0.80cm，產生尖端放電且推力降低。間距1.30~1.45cm，轉為吸力。間距1.45cm 以上，推力驟減為零。

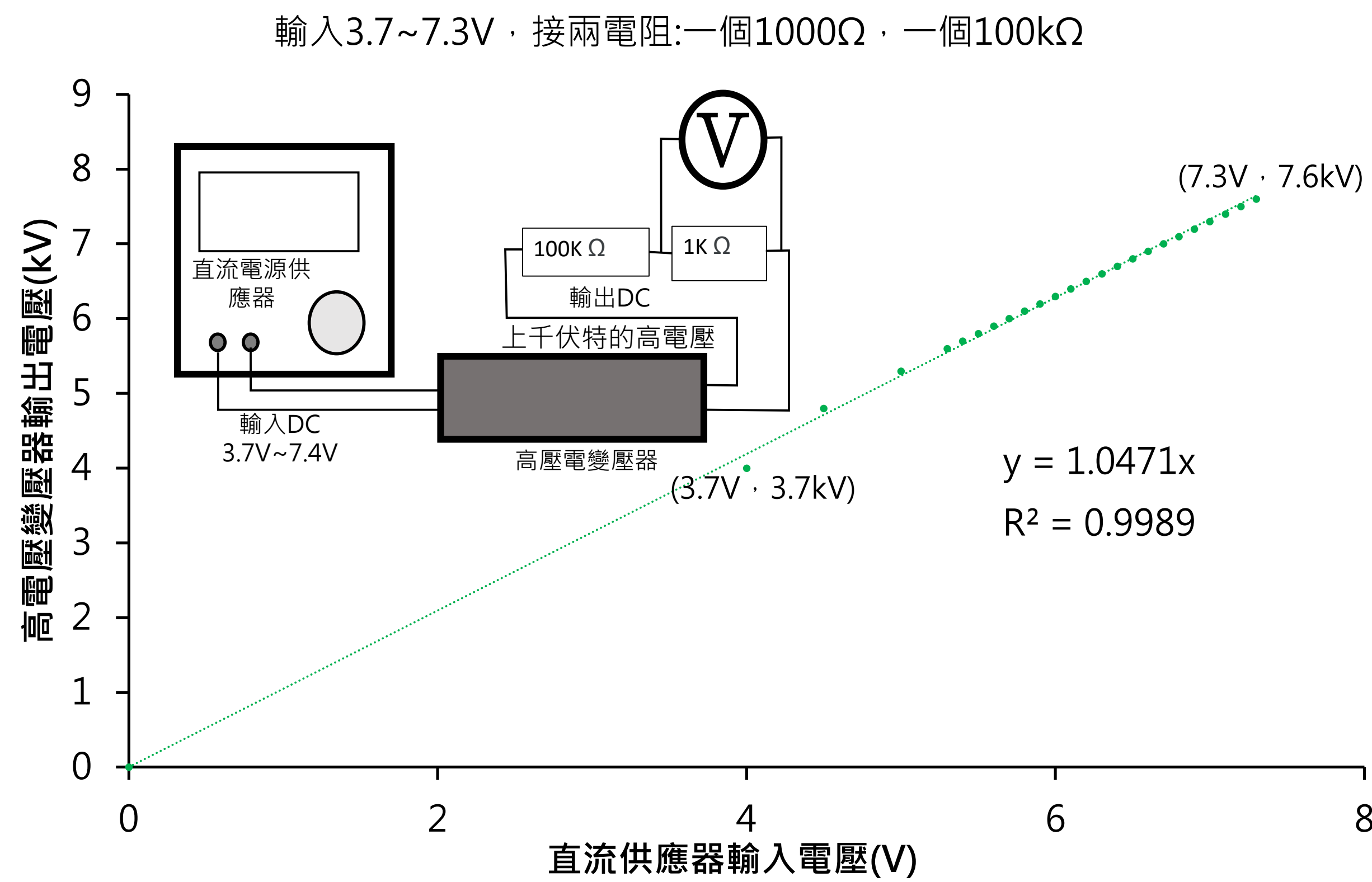
●實驗五：測量裝置(單一銅釘、銅管距1.4cm)四周不同點的推力大小與方向、觀察有無隔板的推力變化關係

- 1、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。
- 2、無外加隔板，X軸產生推力，其他周圍的點產生吸力。管口與指針距離(cm)與受力大小(gw/cm²)呈負相關。
- 3、有外加隔板，唯有X軸產生推力，且推力比無隔板大，但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，同時也證明了氣流會呈電偶極場的模型。

參考資料 Reference

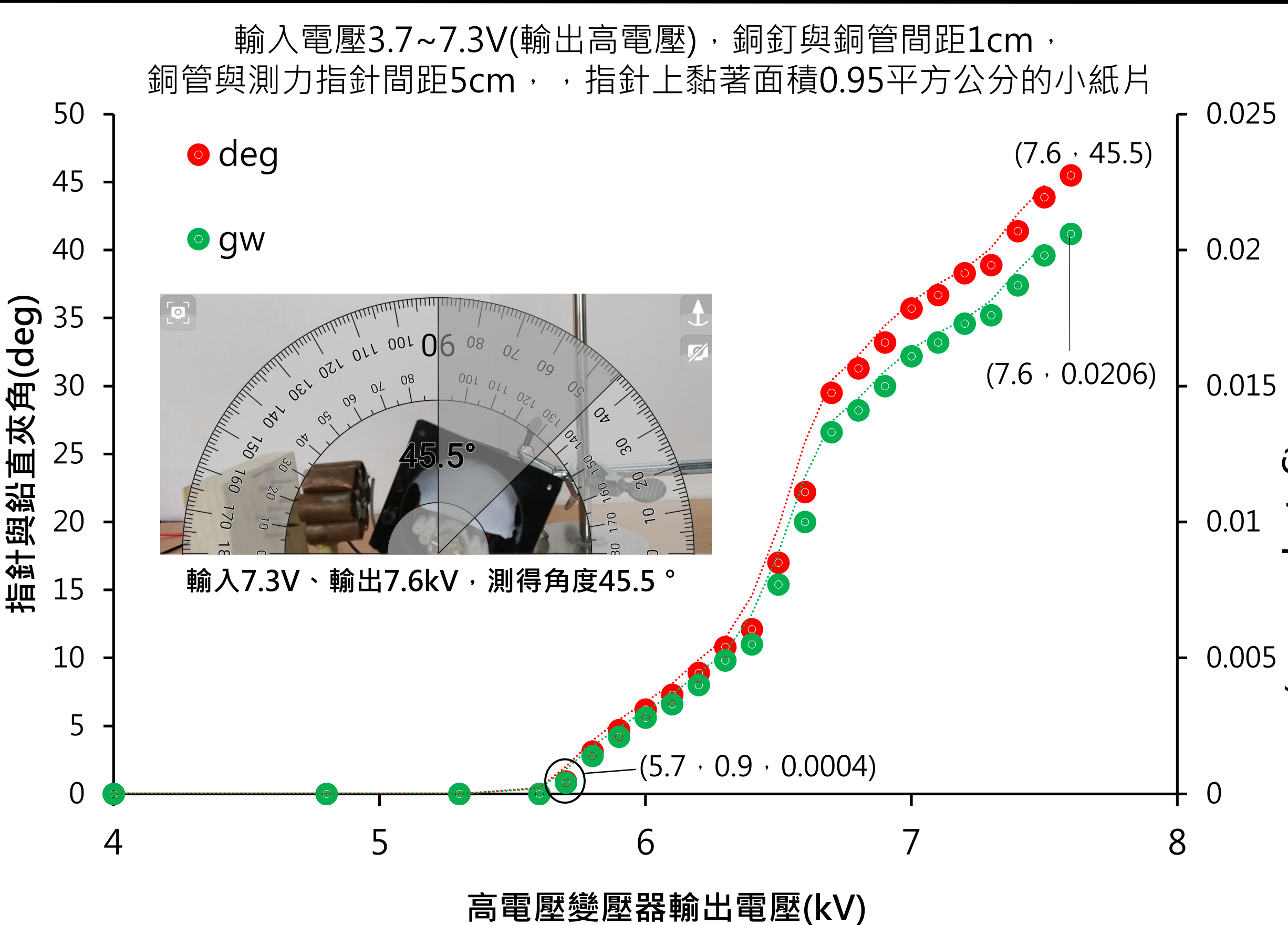
- 1、彭靖文·(2004)·電離轉輪·臺灣國際科展第43屆
- 2、姜理元·(2018)·論平行電板間肥皂泡之變形現象·中小學科展第57屆
- 3、吳嘉輝、周靖榮、劉騏鋒·(2018)·與電共舞-電場對火焰影響之研究·中小學科展第57屆
- 4、希弦·(2016)·史上最強我國離子發動機真相令人很吃驚·<https://kknews.cc/zh-tw/military/obzn6o.html>
- 5、維基百科·自由的百科全書:離子推進器(Ionic Thruster)·維基百科
- 6、Alexander Reifsnnyder·(2015)·Build an Ionic Thruster like NASA Uses for Space Propulsion·MAKE
- 7、Magnetic Games·(2019)·Plasma Vortex in a Magnetic Field | Magnetic Games·Youtube

結果 Results



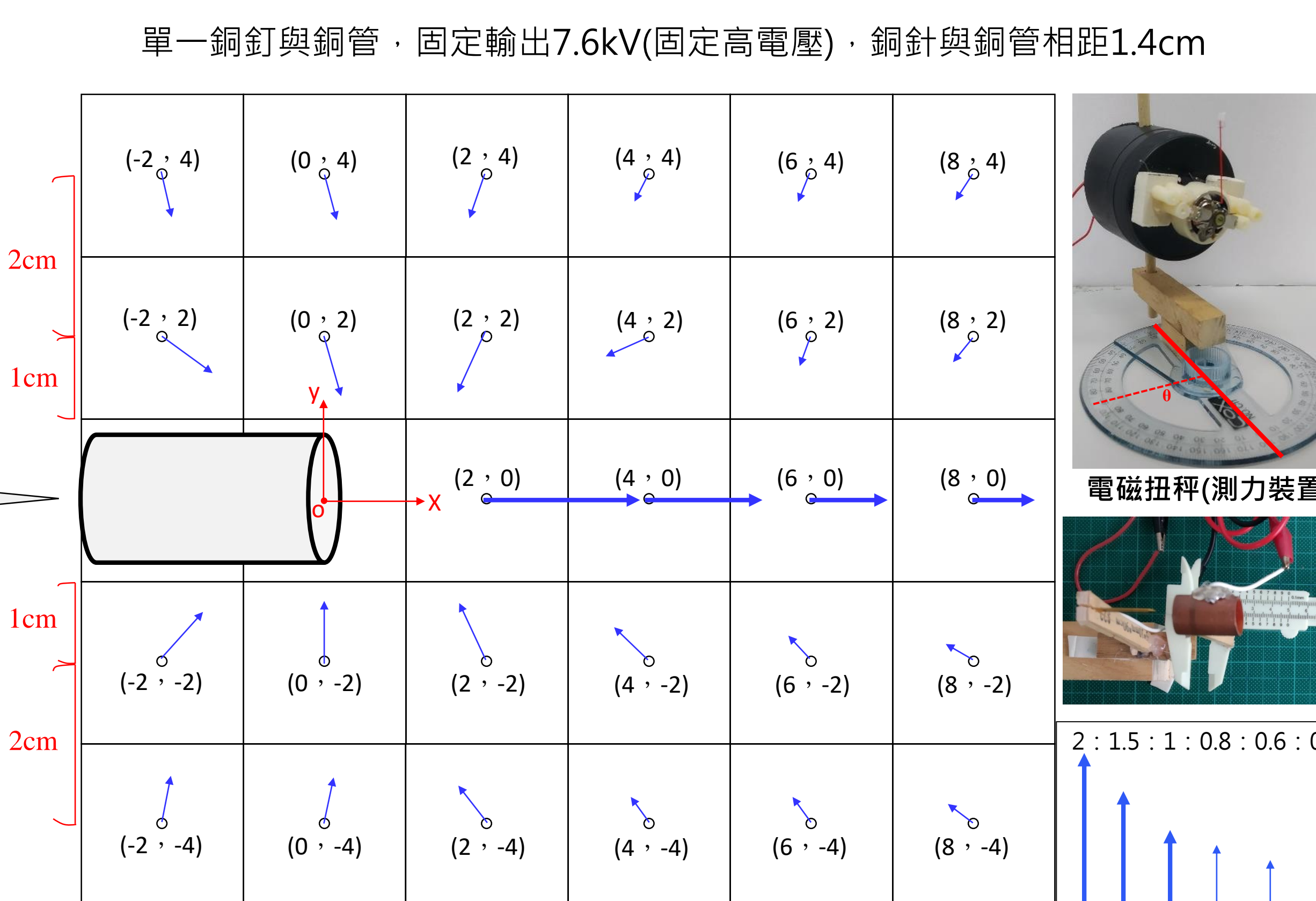
圖三、測量電源供應器輸入至高電壓變壓器的電壓關係

- 電源供應器輸入3.7~7.3V至高電壓變壓器，利用分壓的方式，測出實際輸出高電壓約為3700~7600V的電壓值。
- 輸入電壓 X (V) 與輸出電壓 y (kV) 呈正比關係。
- 關係式： $y = 1.0471 X$ ，即可得知實際輸出的高電壓值(kV)。



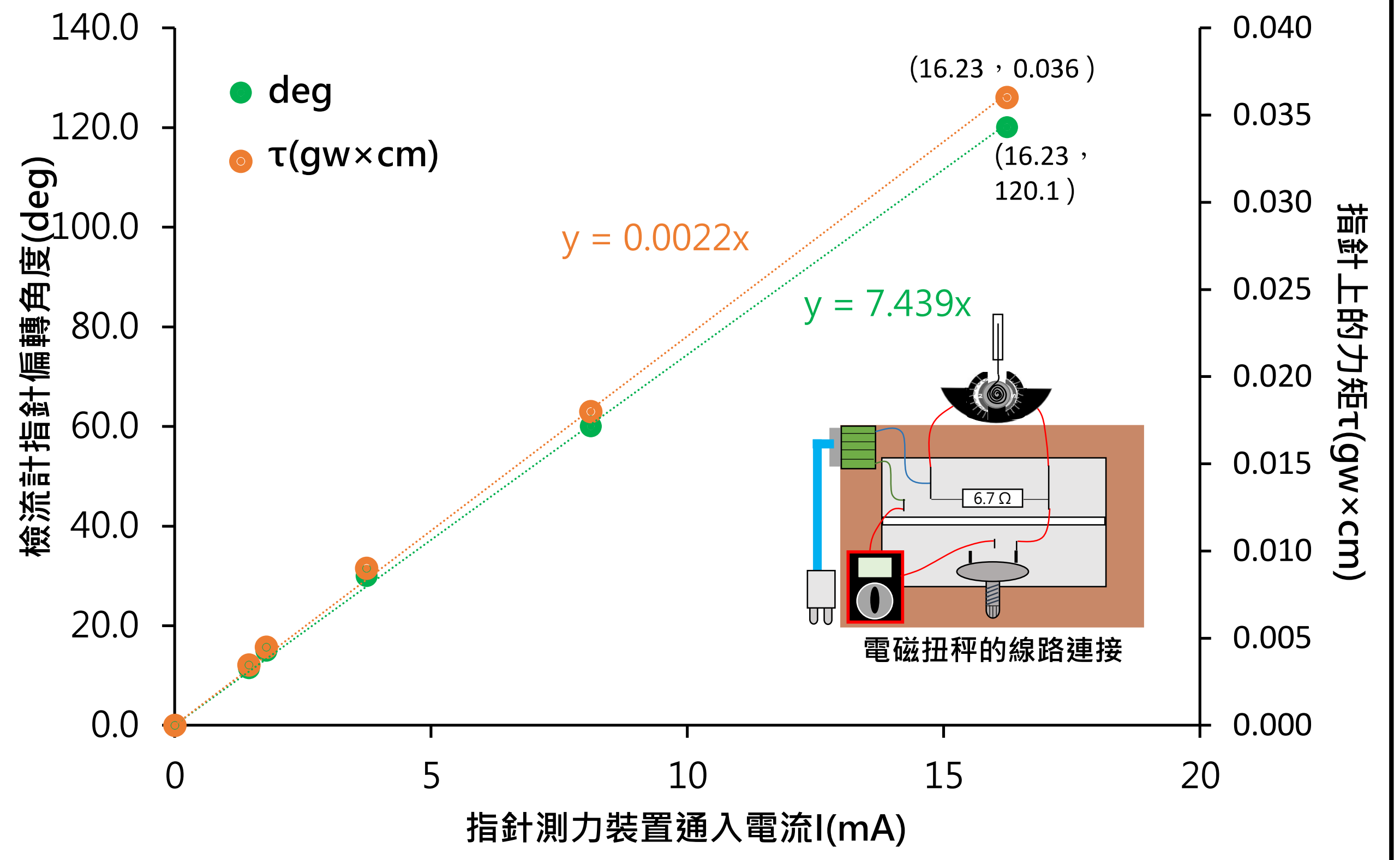
圖五、測量在不同電壓驅動下，高電壓對指針偏轉角度、受力關係

- 輸入DC 3.7~7.3V輸出約3.7~7.6kV，指針偏轉角為45.5°內，紙片面積0.25cm²受氣體噴流壓力約為0.0206gw/cm²之內。
- 由圖可知，輸出高電壓(kV)與指針偏轉角度(deg)成正相關，也與指針上小紙片的受力大小(gw/cm²)呈正相關。



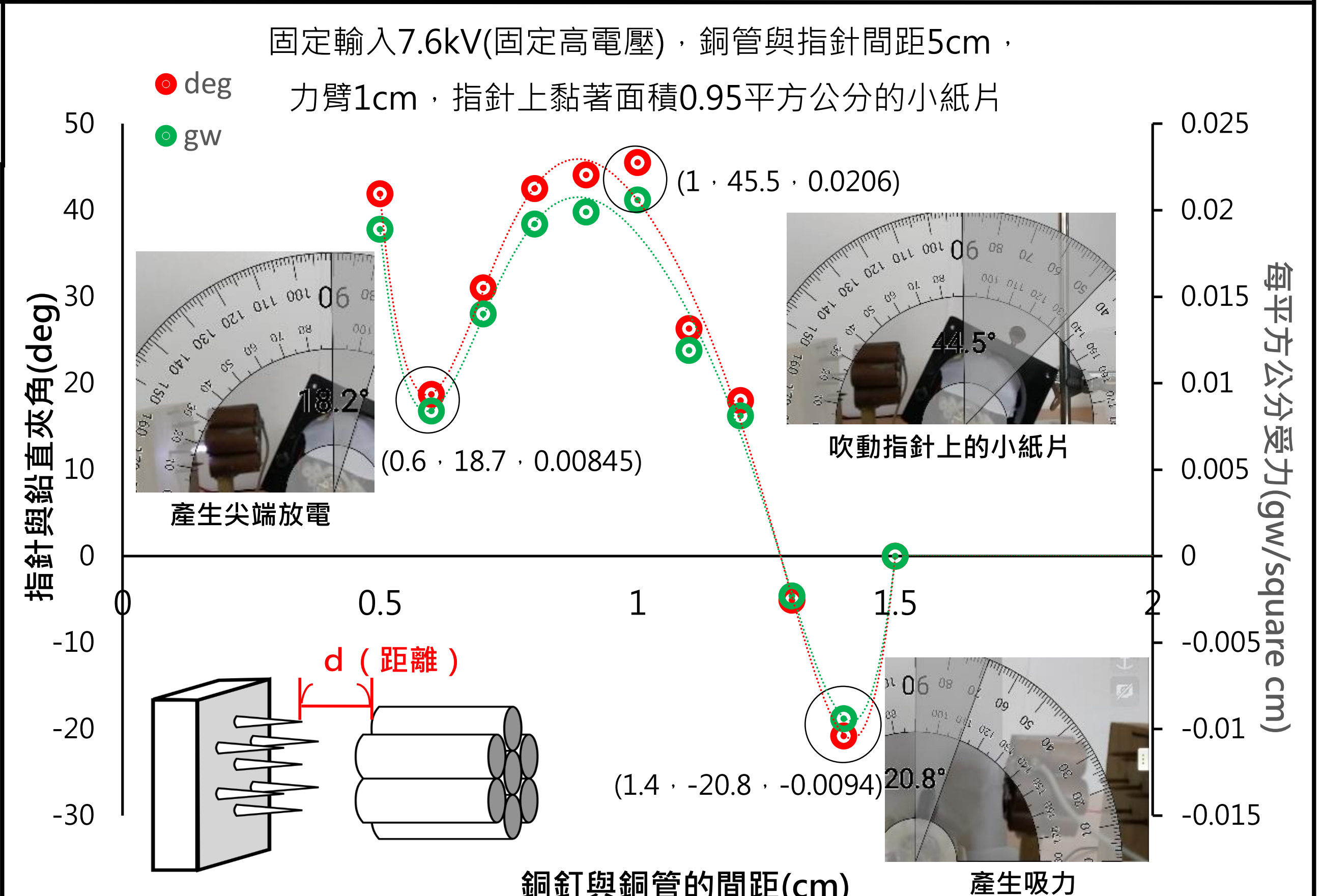
圖七、單一銅管裝置(俯視圖)，座標測量每點的受力方向及大小

- 固定銅釘與銅管間距1.4cm，改變銅管與指針距離，測單一銅管開啟，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 ≠ 0 的流場分佈：產生吸力，管口距離增加，則吸力驟減。
- 兩電極夠近，此時電流會均勻的放電，離子風如「近場」單方向的流動；兩電極夠遠，猶如兩個點，此時電流會四面八方地放電，離子風如「遠場」由外繞回內的流動。
- 由圖可知，每一點的推力分布情形類似於電偶極場，可以將銅釘、銅管間的流場變化視為兩電偶極的電場分佈。



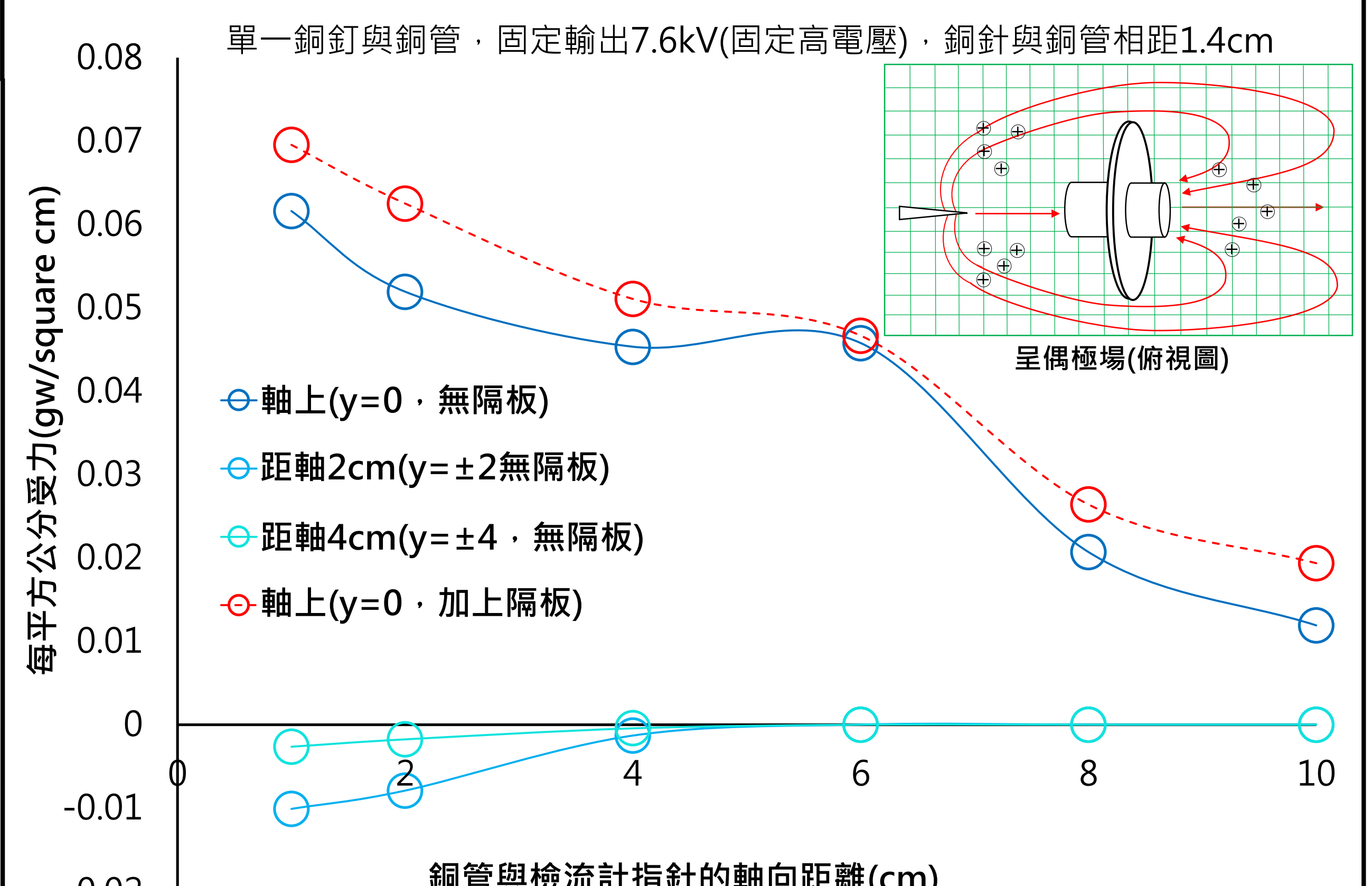
圖四、測力裝置，指針偏移角度與指針回復力矩的關係。

- 電流通入電磁扭秤，指針達力平衡，得力矩0.036gw×cm之內。
- 通入指針的電流 X (mA) 與指針回復力矩 y₂ (gw×cm) 呈正比關係。
- 關係式： $y_2 = 0.0022 X$ ，以此關係式，可以用來測量微小的推力，並應用在本實驗的離子推進器上。



圖六、銅釘與銅管間距改變時，間距與指針偏轉角度、受力關係

- 固定輸出約7.6kV，改變銅釘、銅管間距0.5~1.5cm。
- 小於1cm，產生尖端放電，間距越大，則偏轉角度(deg)會越大；大於1cm時，間距越大，則偏轉角度(deg)會越小。但到達1.3cm時，會形成吸力、偏轉角度(deg)為負值。



圖八、測量不同點的推力大小、觀察有無隔板的推力變化關係

- 固定銅釘與銅管間距1.4cm，此時周圍會產生吸力，呈電偶極場，但X軸向會產生推力，且推力遠大於其他位置的吸力。
- 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/cm²，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/cm²)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/cm²，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/cm²)呈負相關。