

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高級中等學校組 工程學科(一)

052303

「電」有所流，「磁」有所場，「水」有所動

學校名稱： 臺中市立文華高級中等學校

| | |
|--------|-------|
| 作者： | 指導老師： |
| 高二 黃冠睿 | 邱建宏 |
| 高二 連奕丞 | |
| 高二 洪翊恩 | |

關鍵詞： 磁流體推進、勞倫茲力

摘要

透過右手開掌定則與磁流體動力學，我們得知當我們在電解水中施加磁場可以使水流動。基於這一點，我們探討了電流對水流流速的影響，並假設勞倫茲力公式吻合此實驗，即電流與流速會呈正比關係。

實驗結果證實了我們的假設，當電流增強時，水流的速度也會隨之增加。隨後我們開始探討電極片間距離及磁場是否也會對流速產生影響，最後實驗結果顯示流速與電極片距離會成負相關，與磁場強度呈正相關。這些研究成果讓我們對磁流體推進學的應用有了更加深入的了解，並希望能藉由這種方式為未來海上交通方式增添新的可能。

壹、前言

一.研究動機

在一次文獻查找過程中，我們意外發現了一段實驗影片。影片中，實驗者通過操作電流與磁場，成功使電解質水產生流動。然而，由於影片更側重於娛樂性，並未深入探討電流強度與磁場強度對流體流速的影響。因此，我們決定仿照影片中的器材，設計一套實驗進行對此實驗的深入探究。

此外，地球作為一個 70% 覆蓋海洋的星球，其中海水蘊含著豐富的鹽類資源，恰好與本實驗所需的電解水溶液不謀而合，因此認為其很有運用價值。我們希望透過實驗數據，歸納出最佳的參數組合，使流體流速達到最優表現，從而開創出新的運輸方式。

二、研究目的

- (一)、探討輸入電流大小對流體表面流速影響
- (二)、探討兩石墨片間距離對流體表面流速影響
- (三)、探討磁場大小對流體表面流速影響
- (四)、探討輸入電流大小對流體表面加速度改變量
- (五)、探討兩石墨片間距離對流體表面加速度改變量
- (六)、探討磁力大小對流體表面加速度改變量
- (七)、探討流體表面及其內部流速是否有差距

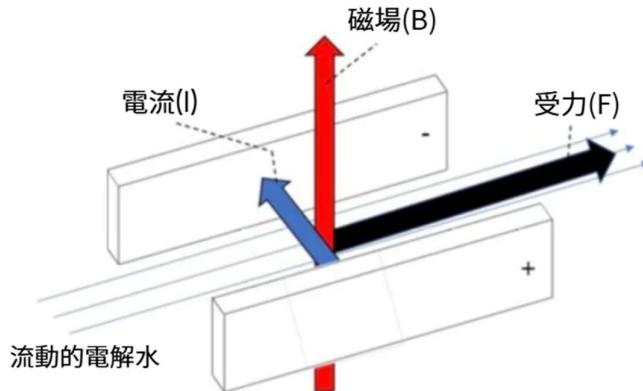
三、文獻探討

(一) 勞倫茲力

根據勞倫茲方程式可以得知，當帶電粒子位於磁場中且有電流通過時，帶電粒子會受到勞倫茲力的作用並產生運動，下列為勞倫茲力方程式：

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B}$$

F_1 ：每單位體積勞倫茲力 (N/m^3) , \mathbf{J} ：電流密度 (A/m^2) , \mathbf{B} ：磁場強度 (T)



勞倫茲力示意圖 (圖片來源：Magnetohydrodynamic Salt Water Drive , 勞倫茲力文獻)

由此可知當電流與磁場垂直時勞倫茲力會有最大值，因此實驗以電流方向與磁場垂直為基準。下列為電流密度公式：

$$\mathbf{J} = s(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

\mathbf{J} ：電流密度 (A/m^2) , s ：流體電導率 (S/m) , \mathbf{E} ：電場強度 (V/m) ,

\mathbf{v} ：流體速度 (m/s) , \mathbf{B} ：磁場強度 (T)

\mathbf{E} 電場強度的數量級約在 $10^2 \sim 10^3$ 之間，而 $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ 的數量級約在 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ ，兩者差距極大，因此 $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ 可忽略不計，故電流密度公式可簡化為下：

$$\mathbf{J} = s\mathbf{E}$$

\mathbf{J} ：電流密度 (A/m^2) , s ：溶液電導率 (S/m) , \mathbf{E} ：電場強度 (V/m)

在理想情況下，可將溶液視為可完全解離，則離子電導率可由以下公式求得：

$$s = \Lambda_m^0 \times M \times 10^{-4}$$

s ：離子電導率 (S/m) , Λ_m^0 ：溶液極限摩爾電導率 ($\text{S}\cdot\text{cm}^2/\text{mol}$) , M ：莫耳濃度 (mole/l)

而溶液極限摩爾電導率可由科爾勞施定律即以下公式表示：

$$\Lambda_m^0 = \nu_+ \lambda_+^0 + \nu_- \lambda_-^0$$

Λ_m^0 ：溶液極限摩爾電導率 ($\text{S}\cdot\text{cm}^2/\text{mol}$)

ν_+ , ν_- ：為溶解 1 莫耳電解質所離解的陽離子和陰離子的莫耳數

λ_+^0 , λ_-^0 ：分別為陽離子和陰離子的極限摩爾電導率 ($\text{S}\cdot\text{cm}^2/\text{mol}$)

而電場強度可由以下求得：

$$E = \frac{V}{d}$$

E：電場強度 (V/m) , d：電極片之間距離 (m) , V：是施加的電壓 (V)

綜上所述，可將勞倫茲力化整為下：

$$\mathbf{F}_1 = \mathbf{J} \times \mathbf{B} , \mathbf{F}_2 = \mathbf{F}_1 \times \underline{V}$$

F_1 ：每單位體積勞倫茲力 (N/m^3) , F_2 ：勞倫茲力 (N) ,
 J ：電流密度 (A/m^2) , B ：磁場強度 (T) , \underline{V} ：通道總體積 (m^3)

透過以上勞倫茲力方程式推導，我們推測流體的受力與電流強度會成正相關，與電極片間距成正相關，也與磁場強度成正相關。

(二) 流體黏滯力

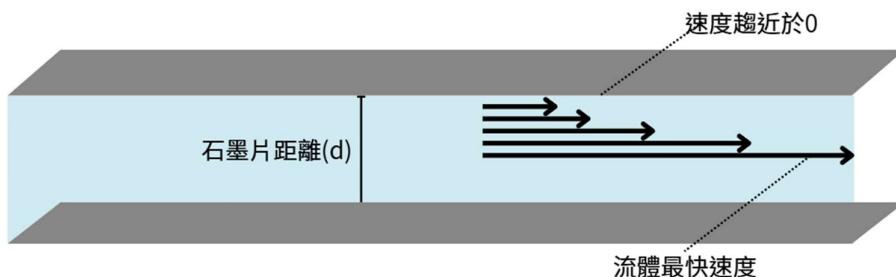
黏滯力是流體受到剪應力時所產生的阻應力。流體黏滯力公式如下：

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{\Delta u}{\Delta y}$$

F：黏滯力, τ ：剪切應力 (N/m^2) , A：接觸面, μ ：流體的黏滯係數,

$\frac{\Delta u}{\Delta y}$ ：速度梯度

假設流體速度如下圖所示，水流呈現一層一層的分層，與石墨片接觸的水流流速趨近於零，兩石墨片正中間的水流流速為流體中的最大流速，且從石墨片旁的流速到正中間的流速呈現線性相關。



流體速度俯視圖（本圖片由作者親自製作）

則剪切應力可由下列公式表示：

$$\tau = \mu \frac{v}{d} = 2\mu \frac{v}{2}$$

τ ：剪切應力 (N/m^2) , μ ：流體的黏滯係數, d：電極片之間距離 (m) ,

v =最快流速(m/s^2)

由以上公式，黏滯力公式可簡化為以下：

$$F = \tau \times A = 2\mu \frac{v}{d} \times A$$

F：黏滯力 (N) , τ ：剪切應力 (N/m^3) , A：電極接觸溶液的面積 (m^2) ,

μ ：流體的黏滯係數 (Pa/s) , d：電極片之間距離 (m) , V=最快流速(m/s^2)

透過黏滯力公式可得知：1、當電極片之間距離越小，黏滯力越大

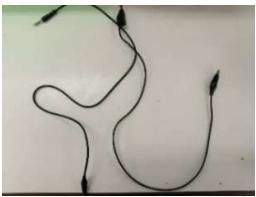
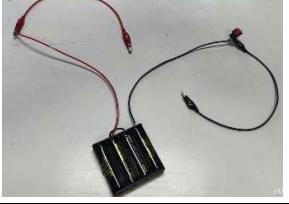
2、流速越大，黏滯力越大

總結以上所有文獻我們假設：

- (1)水流受力與電流強度會成正相關
- (2)水流受力與電極片間距離成負相關
- (3)水流受力與磁場強度成正相關
- (4)水流受力與距磁鐵的距離成負相關
- (5)水流受力會隨著流體流速提升而減少直到所受合力趨近於 0

(流速提升勞倫茲力變大，而流體黏滯力會隨之上升，最終互相抵消)

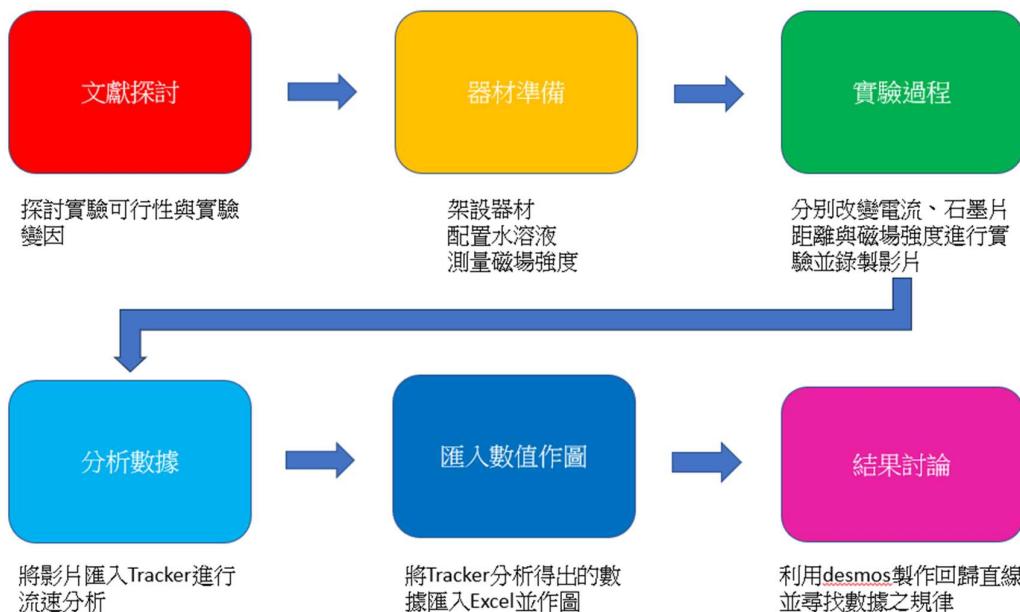
貳、設備及器材

| | | |
|---|---|---|
| 1.塑膠水盆×1 45×33.5×11.5 (cm) | 2.石墨片×2 20×3 (cm) | 3.長條形磁鐵×4 29.5×1.5 (cm) |
|  |  |  |
| 4.電線、鱷魚夾×4 | 5.電源供應器×1 | 6.小蘇打粉 |
|  |  |  |
| 7.電子秤×1 | 8.強力磁鐵×4 10×2 (cm) | 9.量筒(1L) |
|  |  | A graduated glass cylinder (measuring cup) with markings from 0 to 1000 ml. |
| 10.尺(15cm) | 11.磁力計(WT70A) | 12.木條*2、木板*1 |
|  |  |  |
| 13.18650 電池×4 | 14.四節串連電池座 | 15.手機(ios,Android) |
|  |  |  |
| 16.tracker | 17.excel | 18.desmos |
|  |  |  |

(圖片由作者親自拍攝或 Google 設備名稱而來)

參、研究過程

一、研究流程（本圖片由作者親自製作）



二、實驗步驟

(一) 標的物製作

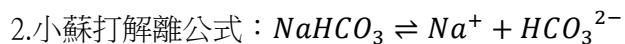
1. 使用剪刀於紙板上取直徑 1 公分圓形紙板
2. 使用膠帶纏繞於取下的紙板使其表面防水
3. 重量測量(0.430 克)

(二) 溶液配置

1. 取 2 公升水與 100 公克小蘇打混合成溶液

(三) 離子電導率計算

$$1. \text{體積莫耳濃度 (mole/l)}: mole / l = 100/84/2 = 0.595238M$$



$$3. \text{離子極限電導率: } Na^+ \rightarrow 50.1 \text{ (S} \cdot \text{cm}^2/\text{mol}) ,$$

$$HCO_3^{2-} \rightarrow 44.5 \text{ (S} \cdot \text{cm}^2/\text{mol})$$

$$4. \text{溶液電導率 s (S/m): } s = (50.1 + 44.5) \times 0.595238 \times 10^{-4}$$

$$= 0.00563 \text{ (S/m)}$$

(四)磁鐵磁場測量（此二圖片由作者親自拍攝）

1. 長條形磁鐵， 29.5×1.5 (cm)

將磁力計置於磁鐵正中央，並測量磁場大小



| | |
|----|---------------------------|
| 一條 | 0.028 特斯拉 (28.02 毫特斯拉) |
| 二條 | 0.046 特斯拉 (46.23 毫特斯拉) |
| 三條 | 0.056 特斯拉 (56.05 毫特斯拉) |
| 四條 | 0.065 特斯拉 (65.24 毫特斯拉) |

2. 強力磁鐵， 10×2 (cm)

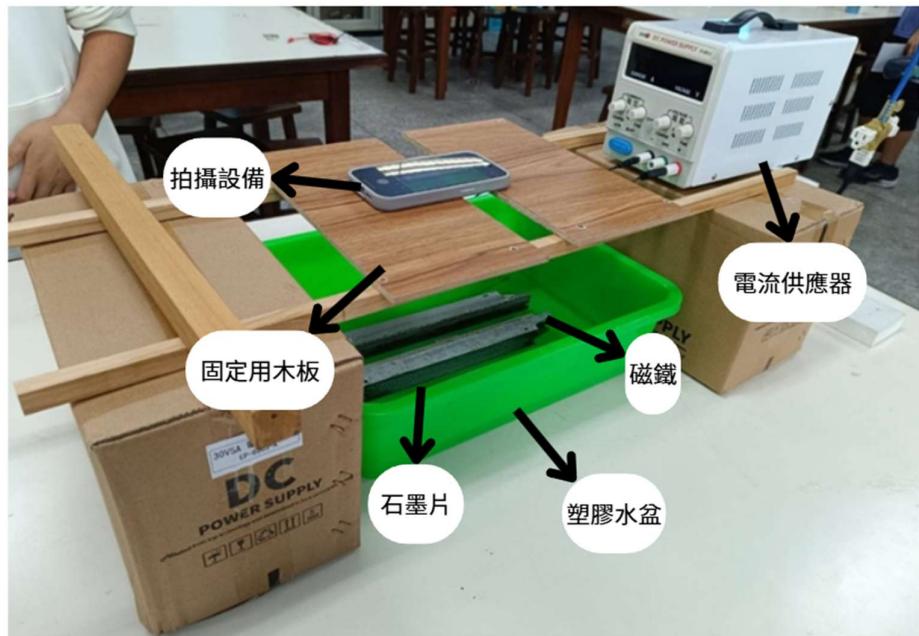
將磁力計置於磁鐵正中央，並測量磁場大小



| | |
|----|-----------------------------|
| 一條 | 0.058 特斯拉 (58.05 毫特斯拉) |
| 二條 | 0.087 特斯拉 (86.76 毫特斯拉) |

(五)器材架設(如下圖)

1. 將長條形磁鐵固定於塑膠水盆底部
2. 將調配完的溶液加入塑膠水盆
3. 將兩片石墨片依實驗變因需要分別固定於長條形磁鐵左右
4. 將電源供應器之正負極使用鱷魚夾分別接於兩石墨片
5. 放入尺作為距離參照依據
6. 將拍攝設備放置於木板上並確保拍攝畫面沒有受到影響

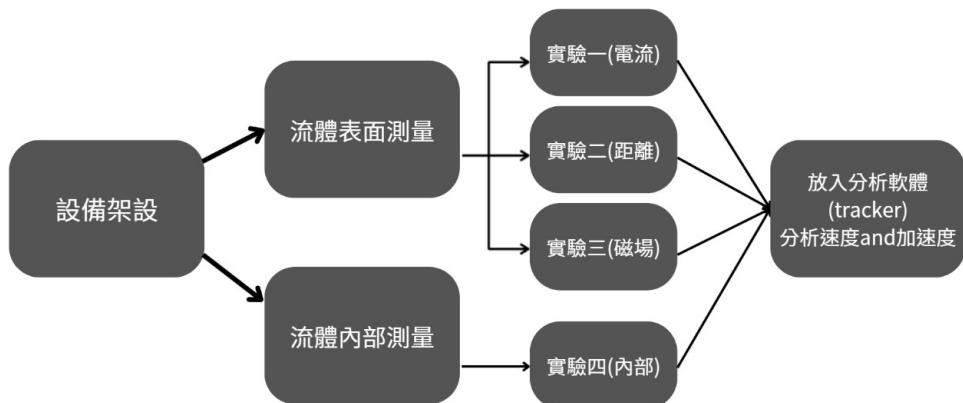


上圖為器材架設圖（本圖片由作者親自製作）



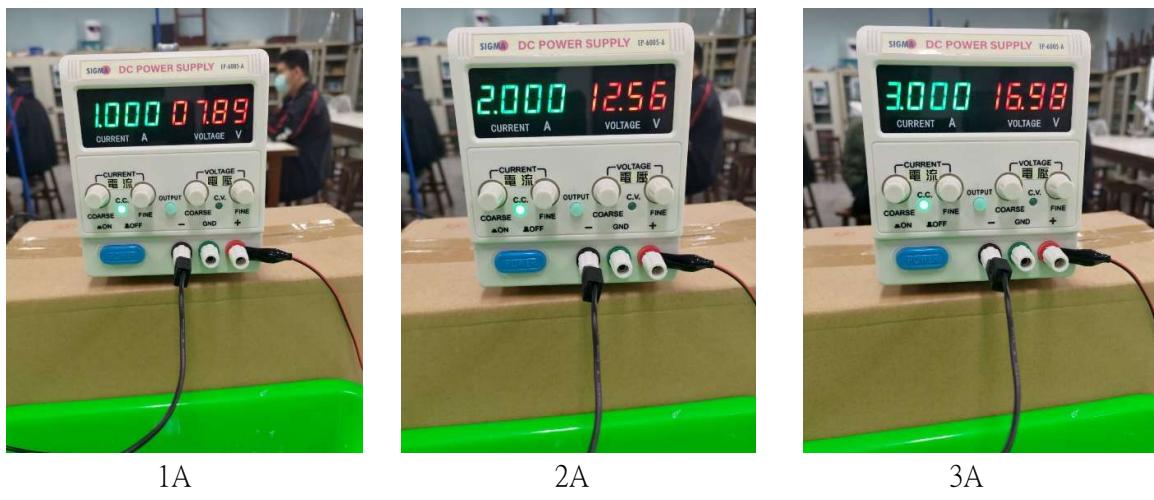
上圖為內部設備圖（本圖片由作者親自製作）

三、實驗過程（本圖片由作者親自製作）



(一) 實驗一(不同電流大小)

1. 控制變因：石墨片距離(4公分)、磁條數量(1條)
2. 操縱變因：電流大小(1A、2A、3A)
3. 應變變因：流體表面速度、加速度
4. 實驗步驟：
 - (1) 待水流穩定後放入標的物
 - (2) 以手機錄製標的物移動軌跡
 - (3) 以上動作重複5次
 - (4) 改變電流大小



(此三圖片由作者親自拍攝)

(二)實驗二(不同石墨片距離)

- 1.控制變因：電流大小(3A)、磁條數量(1條)
- 2.操縱變因：石墨片距離(3公分、4公分、5公分)
- 3.應變變因：流體表面速度、加速度
- 4.實驗步驟：
 - (1)待水流穩定後放入標的物
 - (2)以手機錄製標的物移動軌跡
 - (3)以上動作重複5次
 - (4)改變石墨片距離



4公分



5公分



6公分

(此三圖片由作者親自拍攝)

(三) 實驗三(不同磁場大小)

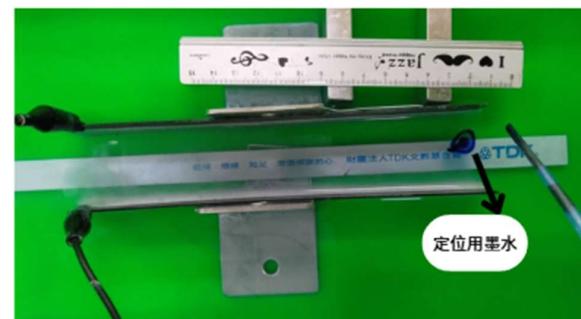
1. 控制變因：電流大小(3A)、石墨片距離(4公分)
2. 操縱變因：磁條數量(1條、2條、3條、4條)
3. 應變變因：流體表面速度、加速度
4. 實驗步驟：
 - (1)待水流穩定後放入標的物
 - (2)以手機錄製標的物移動軌跡
 - (3)以上動作重複5次
 - (4)改變磁條數量(1條、2條、3條、4條)

(四) 實驗四(流體內部)

1. 控制變因：電流大小(3A)、石墨片距離(4公分)
2. 操縱變因：磁條數量(1條、2條、3條、4條)
3. 應變變因：流體內部平均速度
4. 實驗步驟：
 - (1)待水流穩定且墨水顏色變淡後於水平面上方2公分處滴入墨水
 - (2)以手機錄製墨水移動軌跡
 - (3)以上動作重複5次
 - (4)改變磁條數量



流體表面測量



流體內部測量

(此二圖片由作者親自製作)

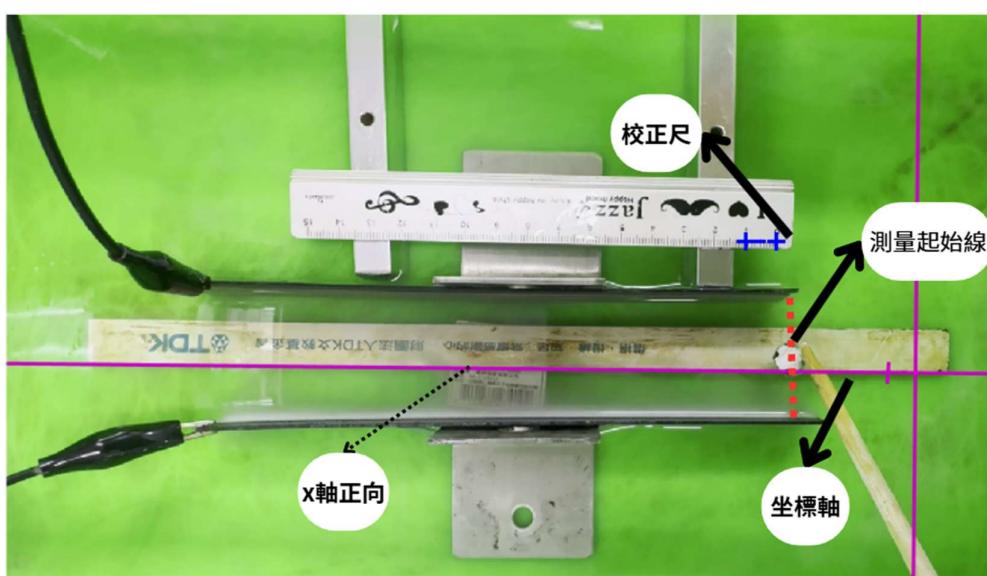
四、數據分析

1. 實驗一、二、三(流體表面)

- (1) 將錄製影片導入分析軟體(tracker)
- (2) 將校正尺對準直尺 1 公分的刻度
- (3) 將座標 x 軸對齊磁條邊緣
- (4) 當標的物進入到石墨片範圍後開始追蹤
- (5) 將所獲得的 v_x 、 a_x 導入 excel 進行數據分析與繪圖

2. 實驗四 (流體內部)

- (1) 將錄製影片導入分析軟體(tracker)
- (2) 將校正尺對準直尺 1 公分的刻度
- (3) 將座標 x 軸對齊磁條邊緣
- (4) 當墨水進入到石墨片前端後開始測量其到石墨片末端所需時間
- (5) 將計算所獲得的平均 v 導入 excel 進行數據分析與繪圖



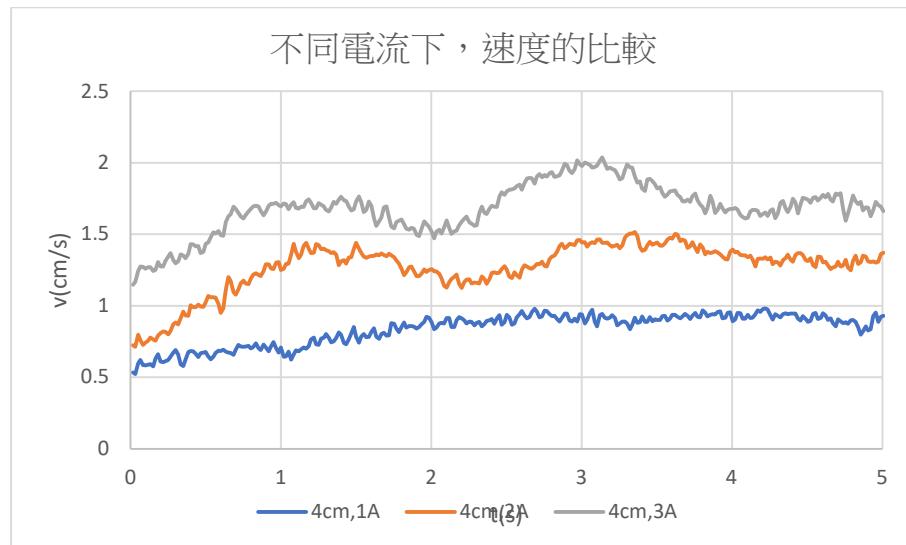
上圖為實驗結果分析方法之示意圖（本圖片由作者親自製作）

肆、研究結果

一、流體表面速度

(一) 實驗一 (不同電流大小的影響)

1. 速度(cm/s)

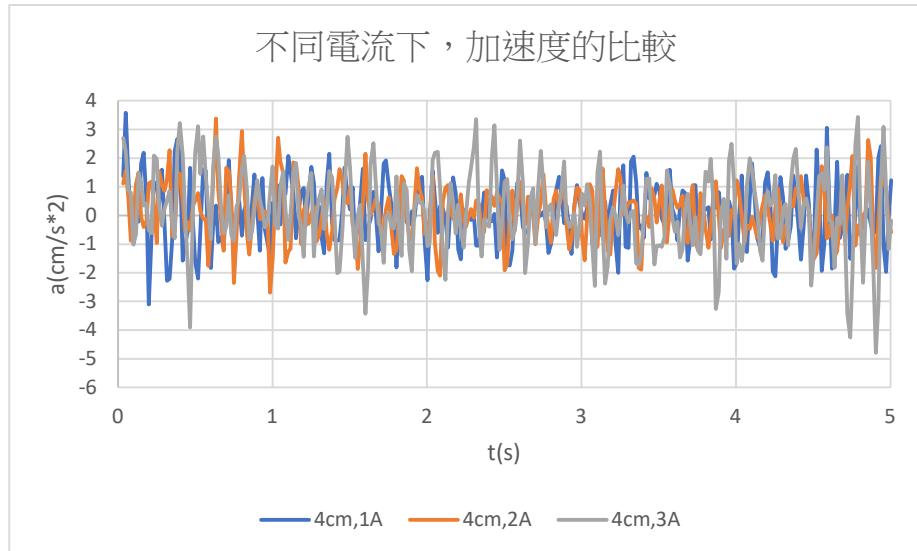


(圖一) 電流為 1A (藍線)、2A (黃線)、3A (灰線) 下，各組之速度變化
(本圖片由作者親自製作)

| 組別 \ 電流 | 1A | 2A | 3A |
|----------|----------|----------|----------|
| (一) | 0.9425 | 1.2955 | 1.3643 |
| (二) | 0.8199 | 1.2732 | 1.7122 |
| (三) | 0.8906 | 1.4846 | 1.6109 |
| (四) | 0.7346 | 1.2723 | 1.9734 |
| (五) | 0.7899 | 1.0234 | 1.7494 |
| 平均(cm/s) | 0.835929 | 1.269798 | 1.682025 |

(表一) 電流為 1A、2A、3A 下，各次實驗所得之速度數據
(本表格由作者親自製作)

2. 加速度(cm/s^2)



(圖二) 電流為 1A (藍線)、2A (黃線)、3A (灰線) 下，各組之加速度變化
(本圖片由作者親自製作)

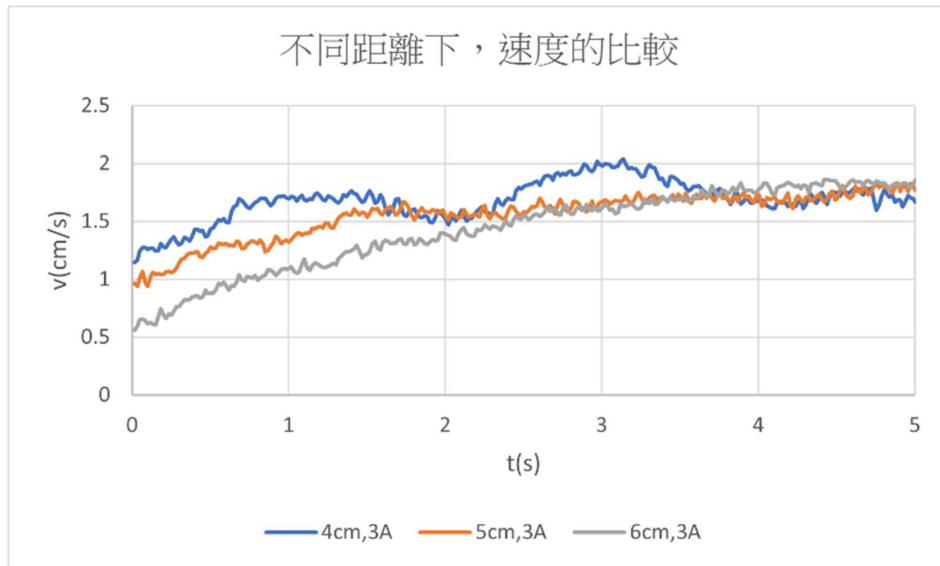
| 組別 \ 電流 | 1A | 2A | 3A |
|------------------------------|----------|----------|----------|
| (一) | 0.0860 | 0.1708 | 0.1095 |
| (二) | 0.0981 | 0.1028 | 0.2149 |
| (三) | 0.1230 | 0.1844 | 0.1946 |
| (四) | 0.0647 | 0.0813 | 0.1279 |
| (五) | 0.0557 | 0.1021 | 0.1581 |
| 平均(cm/s^2) | 0.086885 | 0.128272 | 0.160983 |

(表二) 電流為 1A、2A、3A 下，各次實驗所得之加速度數據
(本表格由作者親自製作)

由（圖一）可以看出電流越大水流流速會越快，而（表一）也能驗證這件事。但因為（圖一）呈現的是鋸齒狀的向上，所以（圖二）加速度會有上下正負的分布，因此看不出它的趨勢，只能透過（表二）平均加速度來觀察。最終藉由（表二）可以看出電流越大加速度越大。

(二) 實驗二 (不同石墨片距離的影響)

1. 速度(cm/s)

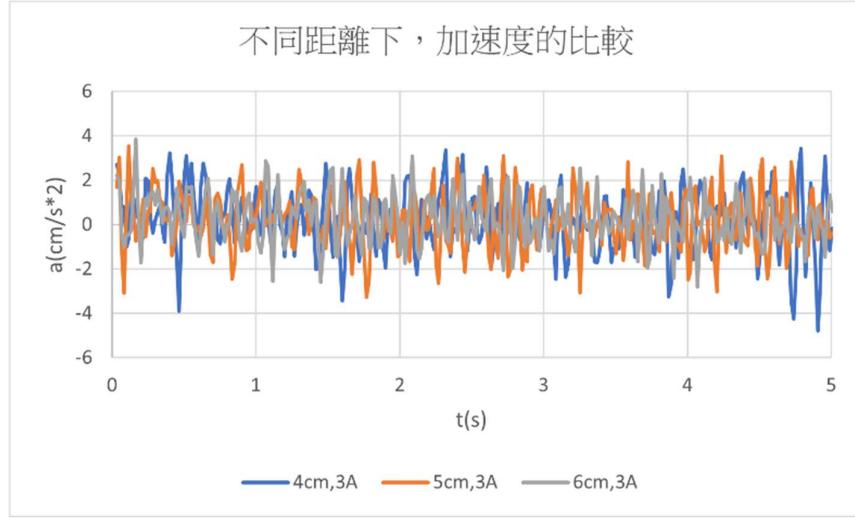


(圖三) 電極片距離為 4 公分 (藍線)、5 公分 (黃線)、6 公分 (灰線) 下，各組之速度變化 (本圖片由作者親自製作)

| 組別\距離 | 4 公分 | 5 公分 | 6 公分 |
|----------|----------|----------|----------|
| (一) | 1.3643 | 1.7112 | 1.6288 |
| (二) | 1.7122 | 1.9317 | 1.4279 |
| (三) | 1.6109 | 1.4717 | 1.0479 |
| (四) | 1.9734 | 1.5578 | 1.3090 |
| (五) | 1.7494 | 1.0943 | 1.7273 |
| 平均(cm/s) | 1.682025 | 1.553345 | 1.428178 |

(表三) 電極片距離為 4 公分、5 公分、6 公分下，各次實驗所得之速度數據
(本表格由作者親自製作)

2. 加速度(cm/s^2)



(圖四) 電極片距離為 4 公分 (藍線)、5 公分 (黃線)、6 公分 (灰線) 下，各組之加速度變化 (本圖片由作者親自製作)

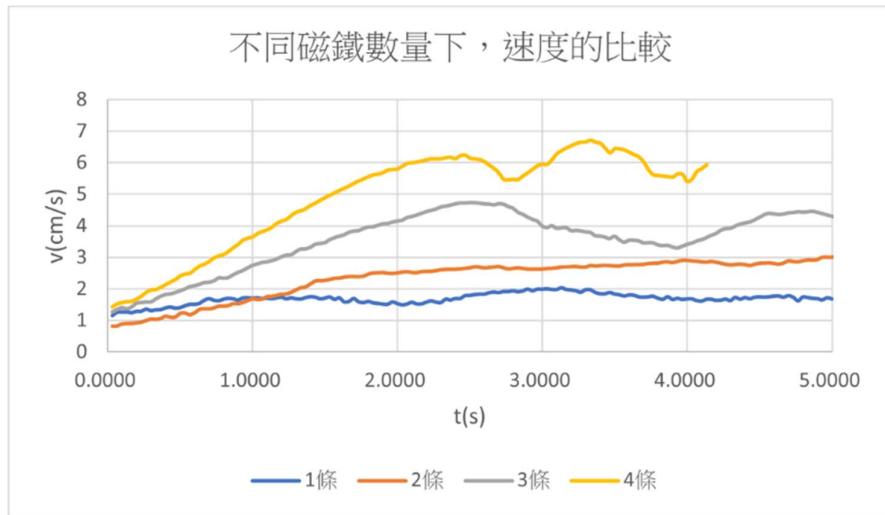
| 組別 \ 距離 | 4 公分 | 5 公分 | 6 公分 |
|------------------------------|----------|----------|----------|
| (一) | 0.1095 | 0.2440 | 0.3181 |
| (二) | 0.2149 | 0.1802 | 0.3054 |
| (三) | 0.1946 | 0.2671 | 0.3741 |
| (四) | 0.1279 | 0.1203 | 0.1084 |
| (五) | 0.1581 | 0.0256 | 0.1610 |
| 平均(cm/s^2) | 0.160983 | 0.167448 | 0.253668 |

(表四) 電極片距離為 4 公分、5 公分、6 公分下，各次實驗所得之加速度數據
(本表格由作者親自製作)

由 (圖三) 的線型圖形起始點可以看出在石墨片距離越接近下，水流起始流速會越快，而 (圖三) 的線型圖形可知水流速度皆成穩步上升，僅第一組(4 公分)速度有些微起伏變動，所以最終水流流速不論距離大小都會趨近於一致，與文獻推論相同，故 (表三) 平均速度隨距離變小而變大。而因各組速度呈現鋸齒狀，故各時間段瞬時加速度分別會呈現正負分佈如 (圖四)，也因為 (圖三) 水流起始流速的不同，但末速度趨於相同，故 (表四) 各組平均加速度反而隨距離增加而增加。綜上所述，得出石墨片距離越小，但加速度會變大。

(三) 實驗三 (不同磁場大小的影響)

1. 速度(cm/s)

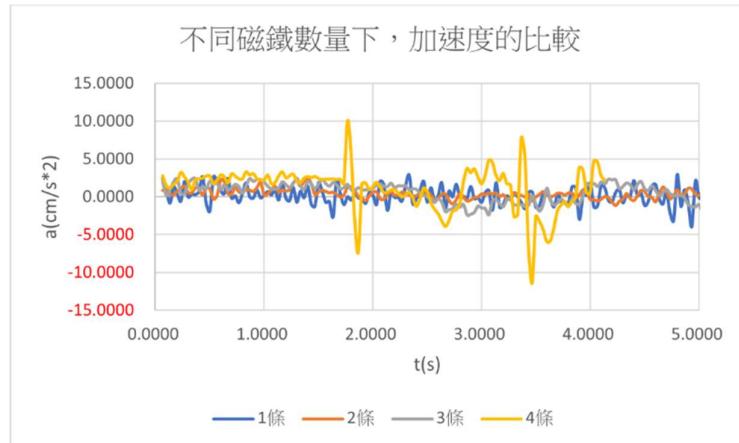


(圖五) 磁鐵條數為 1 條 (藍線)、2 條 (紅線)、3 條 (灰線)、4 條 (黃線) 下，各組之速度變化 (本圖片由作者親自製作)

| 組別\磁鐵數 | 1 條 | 2 條 | 3 條 | 4 條 |
|----------|----------|----------|----------|----------|
| (一) | 1.3643 | 1.7459 | 3.6419 | 6.1476 |
| (二) | 1.7122 | 2.2466 | 3.2965 | 5.1824 |
| (三) | 1.6109 | 2.7014 | 3.4153 | 5.0866 |
| (四) | 1.9734 | 2.5364 | 3.7311 | 3.7593 |
| (五) | 1.7494 | 2.4419 | 3.6708 | 4.2602 |
| 平均(cm/s) | 1.682025 | 2.334440 | 3.551112 | 4.887219 |

(表五) 磁鐵條數為 1 條、2 條、3 條、4 條下，各次實驗所得之速度數據 (本表格由作者親自製作)

2. 加速度(cm/s^2)



(圖六) 磁鐵條數為 1 條 (藍線)、2 條 (紅線)、3 條 (灰線)、下，各組之加速度變化 (本圖片由作者親自製作)

| 組別\磁鐵數 | 1 條 | 2 條 | 3 條 | 4 條 |
|-----------------------|----------|----------|----------|----------|
| (一) | 0.1095 | 0.5481 | 0.5497 | 1.5779 |
| (二) | 0.2149 | 0.4461 | 0.6010 | 1.0356 |
| (三) | 0.1946 | 0.4409 | 0.7416 | 1.3635 |
| (四) | 0.1279 | 0.2071 | 0.6761 | 0.9973 |
| (五) | 0.1581 | 0.5791 | 0.3570 | 0.8613 |
| 平均(cm/s^2) | 0.160983 | 0.444249 | 0.585072 | 1.167133 |

(表六) 磁鐵條數為 1 條、2 條、3 條、4 條下，各次實驗所得之加速度數據 (本表格由作者親自製作)

由 (圖五) 線型圖形可看出，磁場強度愈強，水流流速愈快，尤其在三條及四條磁鐵時水流流速變化尤為明顯，如 (表五) 之數據所示，因此 (圖五) 第四組(四條)也能顯示其流速較快。而由 (圖六) 可得知各時段瞬時加速度成正負交錯，對應 (圖五) 鋸齒狀之線型圖形，且由 (圖五) 線型圖形之斜率也能更好的解釋 (表六) 之平均加速度。總結上述原因，我們可得出磁場可視為比較大的變因，且磁場強度愈強，速度與加速度愈大。

二、液體內、外部的流速區別

(一)液體表面的流速

| | 1 條 | 2 條 | 3 條 | 4 條 |
|----------|----------|----------|----------|----------|
| 平均(cm/s) | 1.682025 | 2.334440 | 3.551112 | 4.887219 |

(表七) 液體表面磁鐵條數分別為 1 條、2 條、3 條、4 條下，實驗所得之速度數據（本表格由作者親自製作）

(二)液體內部的流速

| | 1 條 | 2 條 | 3 條 | 4 條 |
|----------|----------|----------|----------|----------|
| 平均(cm/s) | 2.300887 | 4.744506 | 8.247553 | 10.52838 |

(表八) 液體內部磁鐵條數分別為 1 條、2 條、3 條、4 條下，實驗所得之速度數據（本表格由作者親自製作）

| | 1 條 | 2 條 | 3 條 | 4 條 |
|------------|----------|----------|----------|----------|
| 流速差(內部-液面) | 0.618862 | 2.410066 | 4.696441 | 5.641161 |

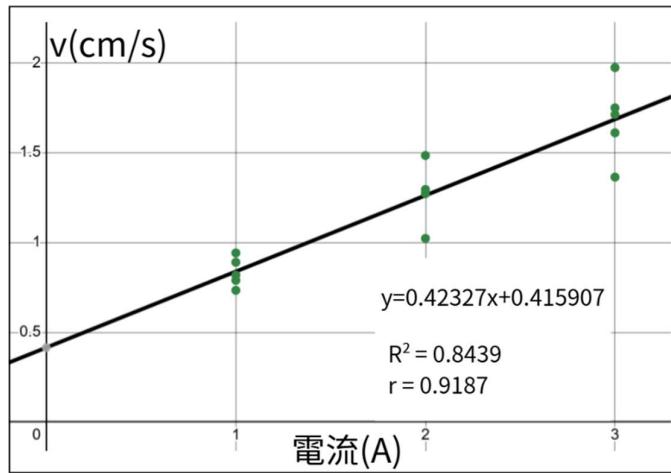
(表九) 磁鐵條數分別為 1 條、2 條、3 條、4 條下，實驗所得之溶液內部與液面速度差（本表格由作者親自製作）

由（表七）與（表八）各項對比可得知在相同條件下，水流內部的流速皆會大於表面流速，且根據（表九）可知水流內部與表面速度的差異會隨著磁場強度增強有更顯著的差異。

伍、分析與討論

一、流體表面速度

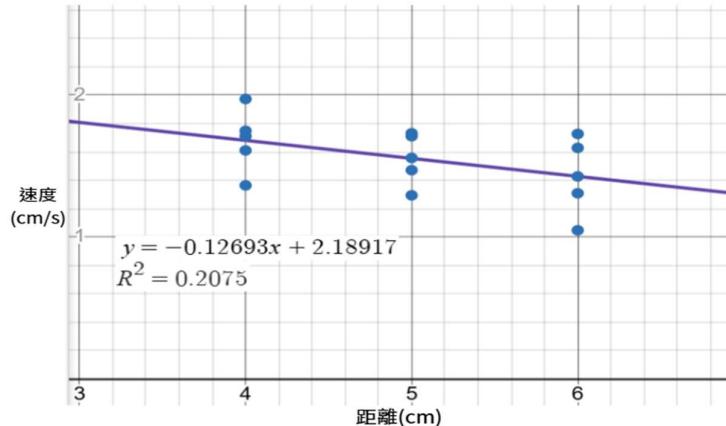
實驗一（不同電流大小的影響）



圖一、電流與速度相關圖（本圖片由作者親自製作）

由以上資料可得知電流 (A) 與速度 (cm/s) 間的關係可用 $y=0.42327x+0.415907$ 函數式表達，即每增加 1 安培時水流速度就會增加 0.42327 (cm/s)，由相關係數 $R^2=0.8439$ 可以顯示電流與速度之間的關聯性為高度正相關，與推論相同。

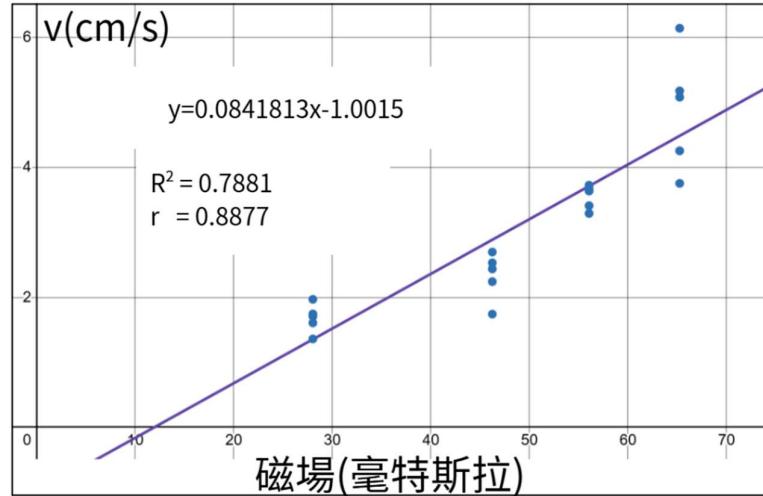
實驗二（不同石墨片距離的影響）



圖二、距離與速度相關圖（本圖片由作者親自製作）

由以上資料可得知石墨片距離 (cm) 與速度 (cm/s) 之間的關係可用 $y=-0.12693x+2.18917$ 函數式表達，即距離增加 1 公分時水流速度就會減少 0.12693 (cm/s)，整體趨勢呈負相關，由相關係數 $R^2=0.2075$ 可以得知距離與速度的關聯性不高，可能受到其他因素的影響較大，像是文獻探討中的流體黏滯力，因而成低度負相關。

實驗三（不同磁場大小的影響）



圖三、磁場與速度相關圖（本圖片由作者親自製作）

由以上資料可以得知磁場強度 (毫特斯拉) 與速度 (cm/s) 之間的關係可表示為函數 $y=0.0841813x-1.0015$ ，即每當磁場強度增強 1 毫特斯拉時，水流速度增加 0.084181 (cm/s)，由相關係數 $R^2=0.7881$ 可以得知磁場強度與速度成高度正相關。

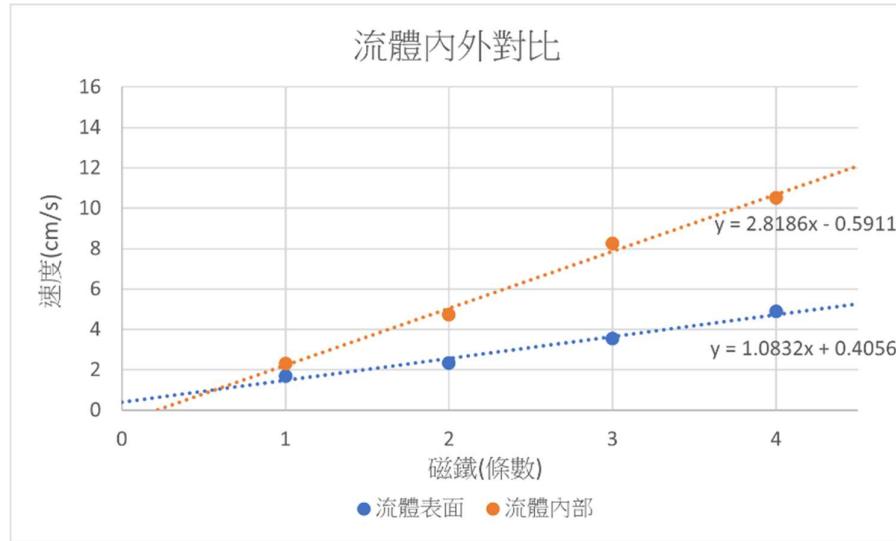
最終考慮磁場強度 B 、電流大小 I 以上變因，可將表面流速 v 以下方程式表達：

$$v = 0.42327I + 0.08418B - 1.0015$$

v : 表面流速 (cm/s), I : 電流 (A), B : 磁場 (mT)

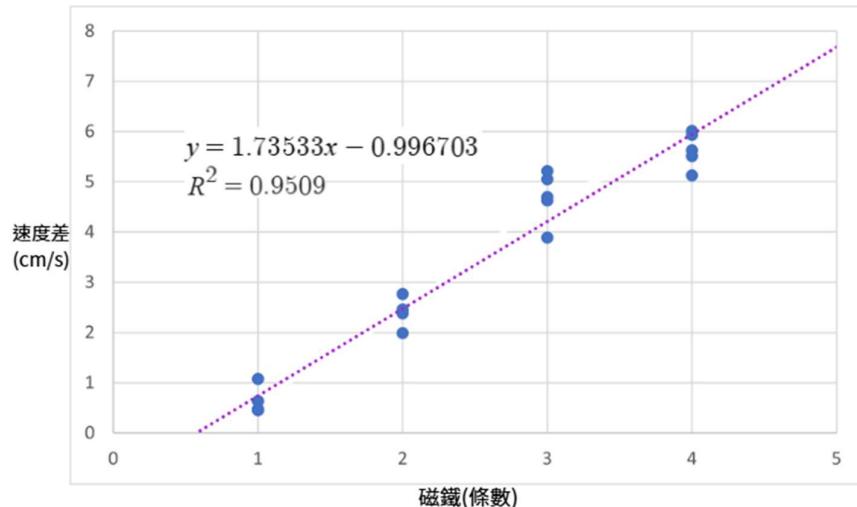
二、流體內外流速

實驗四（流體內外速度）



圖四、水流內部與表面流速圖（本圖片由作者親自製作）

由「肆、實驗數據」中「液體內、外部的流速區別」數據以及圖四可以明顯的看到水流內部流速大於其表面流速，且彼此差距越來越大進而產生圖五。



圖五、水流內部與表面流速差相關圖（本圖片由作者親自製作）

由上圖五可以得知水流內部與表面流速的差值 (cm/s) 與磁鐵條數可表示為函數 $y=1.73533x-0.996703$ ，即當磁場強度增強時，水流內部對表面流速的差值越大。相關係數 $R^2=0.9509$ 可以得知「水流內部流速與表面流速差值」和「磁場強度」成高度正相關。

三、流體表面加速度

根據文獻公式以及牛頓第二定律 ($F = ma$) 推出理論受力以及實際受力，而受力由以下所呈現：(所有力的單位皆以微牛頓 μN 表示)

(一)勞倫茲力

| | 勞倫茲力 | 實際受力 |
|----|----------|---------|
| 1A | 5.59700 | 0.86885 |
| 2A | 8.90981 | 1.28272 |
| 3A | 12.04527 | 1.60983 |

(表一) 不同電流勞倫茲力與實際受力比較 (本表格由作者親自製作)

| | 勞倫茲力 | 實際受力 |
|-----|-----------|---------|
| 4公分 | 12.04527 | 1.60983 |
| 5公分 | 12.846872 | 1.67448 |
| 6公分 | 14.145037 | 2.53668 |

(表二) 不同石墨片距離勞倫茲力與實際受力比較 (本表格由作者親自製作)

| | 勞倫茲力 | 實際受力 |
|-------------|-----------|----------|
| 1條(0.0021T) | 12.04527 | 1.60983 |
| 2條(0.0039T) | 21.338657 | 4.44249 |
| 3條(0.0056T) | 29.822335 | 5.85072 |
| 4條(0.0074T) | 42.30565 | 11.67133 |

(表三) 不同磁場強度勞倫茲力與實際受力比較 (本表格由作者親自製作)

由上可知實際受力主要是受到勞倫茲力影響，且與推論相同水流受力與電流強度、磁場強度會成正相關，與石墨片距離呈負相關。

造成勞倫茲力與實際受力有差距的原因：

- 1.溶液電導率實際上並不會趨近於理論極限，所以勞倫茲力實際上會更小。
- 2.流體受力會受阻力影響，流體黏滯力可能為主要阻力。
- 3.磁場強度測量過於接近磁鐵，所以導致勞倫茲力會被高估。

(二)流體黏滯力

| | 勞倫茲力 | 流體黏滯力 | 理論受力 |
|----|----------|----------|---------|
| 1A | 5.59700 | 1.946874 | 3.65013 |
| 2A | 8.90981 | 3.200554 | 5.70925 |
| 3A | 12.04527 | 3.973784 | 8.07148 |

(表一) 不同電流勞倫茲力與流體黏滯力比較 (本表格由作者親自製作)

| | 勞倫茲力 | 流體黏滯力 | 理論受力 |
|-----|-----------|----------|----------|
| 4公分 | 12.04527 | 3.973784 | 8.07148 |
| 5公分 | 12.846872 | 2.935822 | 9.91104 |
| 6公分 | 14.145037 | 2.249380 | 11.89565 |

(表二) 不同石墨片距離勞倫茲力與流體黏滯力比較 (本表格由作者親自製作)

| | 勞倫茲力 | 流體黏滯力 | 理論受力 |
|-------------|-----------|-----------|----------|
| 1條(0.0021T) | 12.04527 | 3.973784 | 8.07148 |
| 2條(0.0039T) | 21.338657 | 5.515114 | 15.82354 |
| 3條(0.0056T) | 29.822335 | 8.389502 | 21.43283 |
| 4條(0.0074T) | 42.30565 | 11.546054 | 30.75959 |

(表三) 不同磁場強度勞倫茲力與流體黏滯力比較 (本表格由作者親自製作)

由以上數據可知流體黏滯力與電極片之間距離呈負相關，與速度呈正相關，與理論推導相同。而其中，推進力 (勞倫茲力) 大於阻力 (流體黏滯力)，使流體受力並產生流動，也與理論受力吻合。而最終阻力 (流體黏滯力) 應該差不多等於推進力 (勞倫茲力)，使最終達到等速度運動。

綜合以上所述，我們認為造成此影響的主要原因可能是：

1. 高估磁場與溶液電導率，導致計算的勞倫茲力較高
2. 除了流體黏滯力可能還有阻力，導致理論受力被高估
3. 利用標的物的加速度無法完全表達整個水體受力

四、數值波動原因推斷

在「肆、研究數據」中的各組速度及加速度圖均有發生波動現象，我們推測造成此情況的原因源自於流速分析時，水流流速過低所導致。因為拍攝的影片幀數為 60 幀，每一秒裡會拍攝出 60 張畫面，而每一張畫面的時間間格較短，且水流流速本身沒有到特別快，所以造成每一張畫面中標的物移動的距離較小難以辨識出準確移動，因而造成在速度及加速度圖的波動現象。若要避免此現象發生，我們推測可以透過加大電流、增強磁場強度，使標的物在單位時間內的距離變化能夠被準確偵測。

陸、結論

一、實驗結果

根據實驗數據及分析結果，我們可以得知：

- (一)在輸入電流為 3A 時，水流表面流速有最大值。
- (二)石墨片距離僅影響初始速度，且最終水流速度趨向於一定值。
- (三)磁鐵條數為 4 條（即磁場強度為 65.24 毫特斯拉）時，水流流速有最大值。
- (四)水流內部流速會高於同情況水流表面流速，且水流內部流速與表面流速差值會隨磁場增強成高度正相關增長。

二、理論假設與實驗結果

- (一) 水流速度與輸入電流成正相關 →支持，呈現高度正相關， $R^2=0.81$
- (二) 水流速度與石墨片距離成負相關 →不支持， $R^2=0.21$ ，受其他因素影響
- (三) 水流速度與磁場成正相關 →支持，呈現高度正相關， $R^2=0.86$
- (四) 水流速度與磁鐵距離成負相關 →支持
- (五) 水流受力與電流強度會成正相關 →支持
- (六) 水流受力與電極片間距離成正相關 →支持
- (七) 水流受力與磁場強度成正相關 →支持

三、未來展望

隨著航海技術的進步和研究的深入，磁流體推進器有望成為一種環保且無噪音的運輸工具。然而本實驗水流總受力的單位僅為毫牛頓，無法滿足現實中的實際應用，離實際應用還有一段不小的距離。

所以未來可嘗試提升水流總受力，嘗試提升電流大小、磁場強度、調整電解溶液，例如測試百安培以上電流、使用外部電磁線圈產生 1 特斯拉以上磁場、改變溶質為 NaCl，並探討在此影響下的水流流速，討論是否能使水流受力提升，進而提升流速及受力。或者尋找是否有其他影響變因並優化實驗參數組合，進而提升理論的完整性，並進行實驗驗證、推導出適用於各流體內部及表面流速的方程式組，並將實驗推廣至實際應用，期許未來在交通運輸方面的應用。

柒、實驗應用

一、模型船建立

構想如下：

- (1)尋找合適容器並進行裁切
- (2)將磁鐵固定於容器底部中線位置
- (3)將 4 個 18650 電池串聯，放置於電池座中，透過電線連接到石墨片上
- (4)在電路中裝上開關方便調控
- (5)打開電路並觀察模型的運行

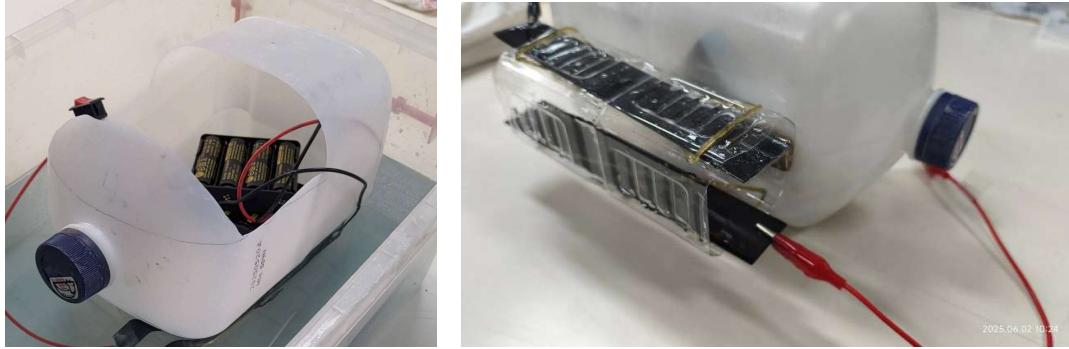
(A).第一代模型船（此二圖片由作者親自拍攝）



我們想將上述的理論給予實際的應用，故打算製作一艘模型船來加以驗證。因考量經費不足及環保，因此先以生活周遭可以利用的材料為優先。最先想到的是媽媽在市場買小番茄的塑膠盒作為模型船，並透過熱熔膠將石墨片固定於盒子外側底部。但實際操作後，遇到一些困難，例如：

- 問題：
1. 缺乏流線型，吃水過深 ————— 阻力較大，移動效果頗差
 2. 石墨片位置難以固定 ————— 底部不平整，石墨片難以固定
 3. 熱熔膠遇水易脫落 ————— 石墨片提供的電場方向難以維持

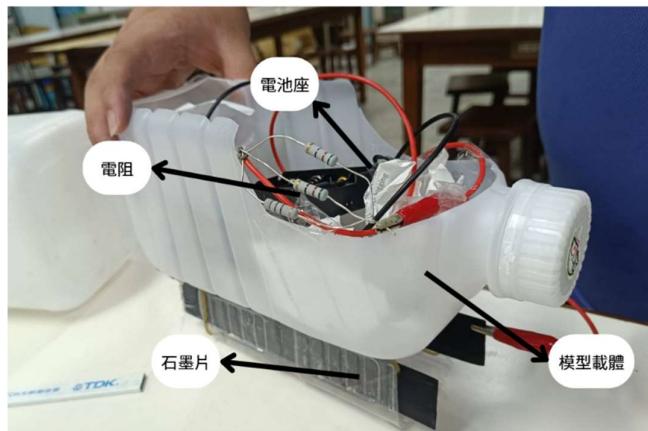
(B).第二代模型船（此二圖片由作者親自拍攝）



接著改用 3685 毫升鮮奶塑膠盒作為模型船，透過橡皮筋將石墨片固定於矩形寶特瓶兩內壁，並利用磁鐵將寶特瓶固定於鮮奶盒底下。雖然吃水深度大幅減少，但仍遭遇諸多問題。

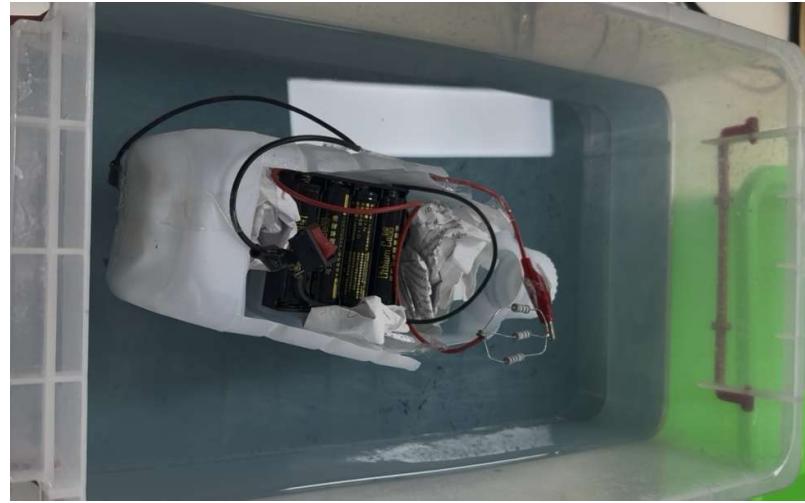
- 問題：
1. 電源打開沒多久，電線因承受不住高溫而冒煙，電池座也因高溫變形並發出燒焦味
 2. 船艙過大，電池座容易滑動，造成船體重心偏移，有翻覆的疑慮

(C).第三代模型船（本圖片由作者親自拍攝）



改以 1858 毫升鮮奶塑膠盒作為模型船，並在電路上加上電阻，以改善電流過大，線路燒毀問題。但電流又不能太小，使得勞倫茲力太小，效果不好。故以數個 10 歐姆及 20 歐姆的電阻並聯，進行實驗。

二、下水實驗操作（本圖片由作者親自拍攝）



將所製作的模型船放入水中，當電源打開時，滴入墨水可見水流會透過底下通道推力，並透過水流的反作用力使模型船產生運動，可觀察到模型船以緩慢的速度向水流反方向移動。

三、模型船速度緩慢

我們發現到藉由勞倫茲力所產生的推力能使模型船向前移動，然而模型船的行進速度緩慢，並且較液體表面所測得的速度慢了不少，

因此我們推測可能原因： 1.電池能提供的電場強度較小，獲得的勞倫茲力較小

2.磁鐵提供的磁場不夠強，獲得的勞倫茲力較小

3.質量過重，使得藉由勞倫茲力獲得的加速度漸少

嘗試解決方法：串連兩個電池座

藉由串連電池座來增加電壓，增加所能產生的勞倫茲力，以提升模型行進速度。然而串聯的電池質量過重，使質量對於模型帶來的影響遠大於增加電壓所帶來的影響，以至於雖然提升了勞倫茲力，卻反而使模型的行進速度變更慢。

未來可能解決方法：將做為提供電場的電源供應二次利用，將其線路纏繞並將其當成線圈，使其產生的磁場納入可產生勞倫茲力的範圍內，進而能提供的勞倫茲力大小。

擇、參考文獻資料

1. 實驗演示影片

https://youtu.be/bPSowtQ9rjI?si=5dihxUuw_jgfqZFG

2. 離子的極限摩爾電導率

<https://www.expertsmind.com/topic/molar-conductivity/ionic-species-911053.aspx>

3. 電導率-維基百科

[https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E7%94%B5%E5%AF%BC%E7%8E%87_\(%E7%94%B5%E8%A7%A3%E8%B4%A8\)](https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E7%94%B5%E5%AF%BC%E7%8E%87_(%E7%94%B5%E8%A7%A3%E8%B4%A8))

4. Tracker 軟體安裝與使用教學

http://www.phys.nthu.edu.tw/~gplab/file/resources/How%20to%20use%20Tracker-CYCU_CCYang.pdf

5.什麼是洛倫茲力？

<http://www.kc373.com/news/257.html>

6.安培力定律-維基百科

<https://zh.wikipedia.org/zh-tw/%E5%AE%89%E5%9F%B9%E5%8A%9B%E5%AE%9A%E5%BE%8B>

7.勞倫茲力公式

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016816300126>

8. 労倫茲力公式示意圖

https://digitalcommons.csbsju.edu/cgi/viewcontent.cgi?params=/context/physics_students/article/1003/&path_info=Magnetohydrodynamic_Salt_Water_Drive.pdf

9.黏滯力公式

<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/49/pdf/040111.pdf>

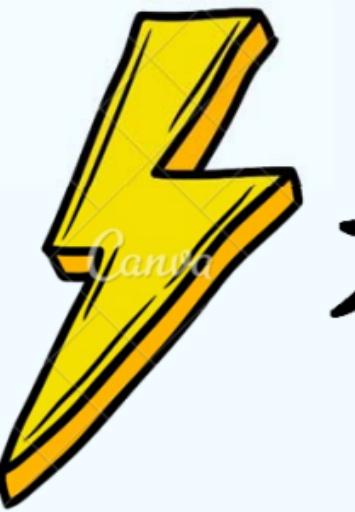
10.水黏滯力依據

<https://m.antpedia.com/news/2918260.html>

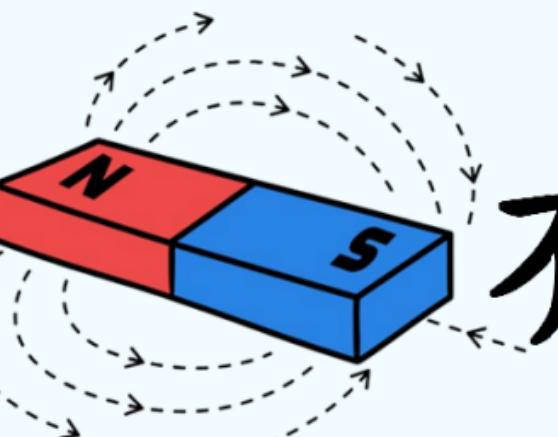
【評語】052303

1. 本作品探討在電解水域(以海洋作為應用情境)時，外加磁場與電力而產生勞倫茲力進而驅動水流速度，未來可應用於船隻航行節能等。
2. 研究著重探討不同電流、石墨片距離、磁場大小(磁條數量)對於水流動速度的影響，有清楚製圖並給予迴歸分析，但對於水流動之原理著墨較少，期待選手們強化此部分討論。
3. 參賽選手亦展示整合磁鐵、電池與石墨片的船體模型，錄製影片展示其推動模型船之能力，有工程應用之潛力，值得鼓勵。
4. 建議未來討論各變因之間的交互作用關係，並釐清流體速度在表面與水下的差異，將更有助於推動船體。

作品海報



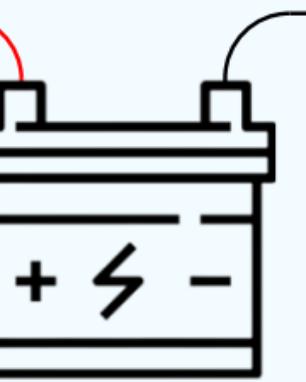
有所流



有所場



有所動



摘要

透過右手開掌定則與磁流體動力學，我們得知在電解溶液中施加磁場可以使水流動。因此探討了電流對水流流速的影響。而實驗結果顯示當電流增強時，水流的速度也會隨之增加。

隨後本研究開始探討電極片間距離及磁場是否也會產生影響，最終實驗結果顯示流速與電極片距離會成負相關，與磁場強度呈正相關。我們希望能藉由這些研究成果為未來海上交通方式增添新的可能。

壹、研究動機

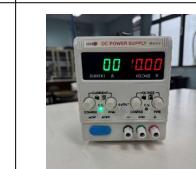
在文獻查找中，有一段實驗影片，實驗者通過操作電流與磁場，使電解水產生流動。因此，我們決定仿造影片設計一套實驗並對實驗深入探究。

此外，海水蘊含著豐富的鹽類資源，符合與本實驗所需的電解水溶液。所以我們希望透過實驗數據，歸納出最佳的參數組合，使流體流速達到最優，從而開創出新的運輸方式。

貳、研究目的

- 1、電流大小的影響
-不同電流對速度、加速度的影響
- 2、兩石墨片間距離的影響
-不同距離對速度、加速度的影響
- 3、磁場大小的影響
-不同磁場對速度、加速度的影響
- 4、流體表面及內部流速差距

參、研究設備

| 1. tracker | 2. 石墨x2 | 3. 長條形磁鐵x4 | 4. 電源供應器 | 5. 小蘇打粉 |
|--|---|---|--|---|
|  Video Analysis and Modeling Tool |  |  |  |  |

(本圖片由搜尋名稱獲得) (本圖片由作者親自製作) (本圖片由作者親自製作) (本圖片由作者親自製作) (本圖片由搜尋名稱獲得)

肆、研究過程

一、器材架設

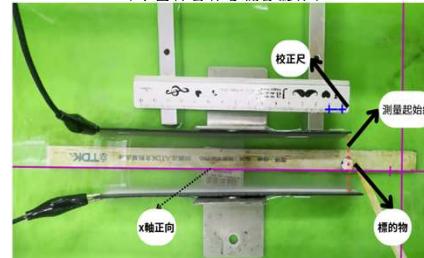
1. 將磁鐵固定於塑膠水盆底部
2. 將電解溶液加入塑膠水盆
3. 兩片石墨片固定於磁鐵旁
4. 將電流供應器接於石墨片
5. 放入尺作為距離參照物
6. 將拍攝設備放置於木板上



圖(一)器材架設圖
(本圖片由作者親自製作)

二、實驗過程

1. 將標的物置於水面
2. 拍攝標的物的流動



圖(二)實驗過程圖
(本圖片由作者親自製作)

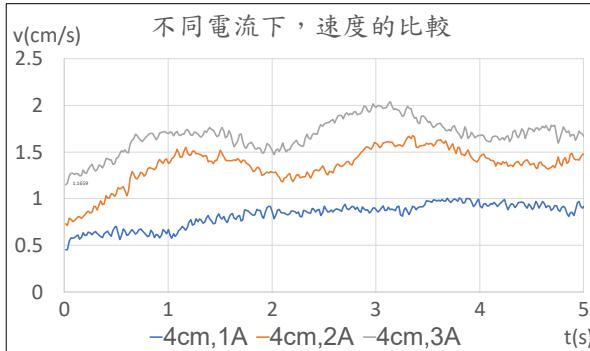
三、實驗分析

1. 將拍攝影片導入tracker
2. 分析標的物速度、加速度

伍、研究結果

一、水流流速

(一)不同電流下，水流流速對比

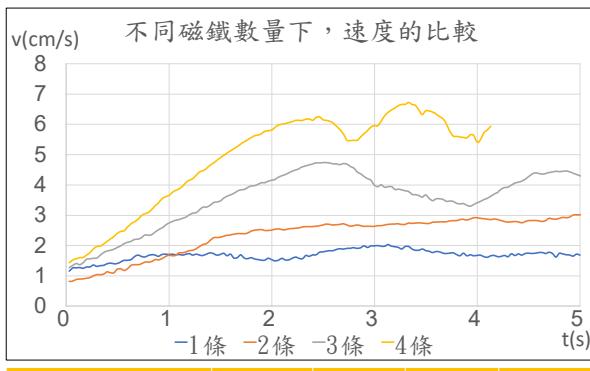


| 電流 | 1A | 2A | 3A |
|------------|-------|-------|-------|
| 平均速度(cm/s) | 0.824 | 1.354 | 1.682 |

(本圖片、表格由作者親自製作)

圖三不同電流下，水流流速對比。共重複五次取其平均，其實驗結果可得知在固定電極片距離及磁場強度下，輸入的電流愈大，水流流速愈大，且在實驗中輸入的三種電流數值（1、2、3A）所得出的結果。

(三)不同磁場下，水流流速對比

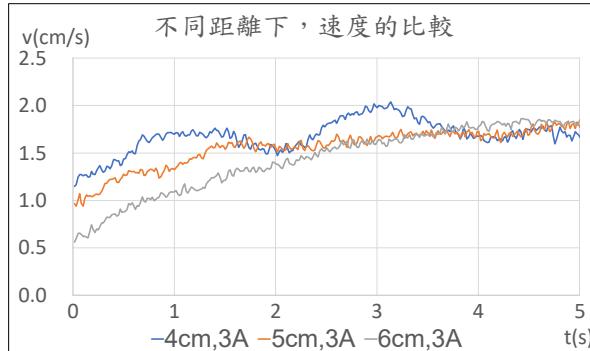


| 磁鐵(條數) | 1條 | 2條 | 3條 | 4條 |
|------------|-------|-------|-------|-------|
| 平均速度(cm/s) | 1.682 | 2.334 | 3.551 | 4.887 |

(本圖片、表格由作者親自製作)

圖五、不同磁場強度下，水流流速對比。共重複五次取其平均，其實驗結果可得知在固定輸入電流大小及電極片距離下，磁鐵數量直接的影響磁場大小進而影響流速，造成磁場強度越強，水流流速越大的現象。

(二)不同電極片距離下，水流流速對比

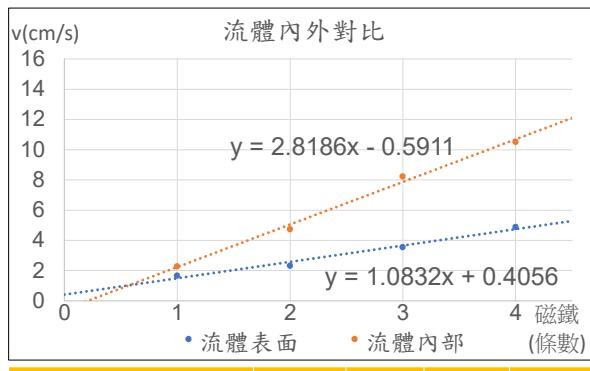


| 電極片距離 | 4 cm | 5 cm | 6 cm |
|------------|-------|-------|-------|
| 平均速度(cm/s) | 1.682 | 1.553 | 1.428 |

(本圖片、表格由作者親自製作)

圖四、不同電極片距離下，水流流速對比。共重複五次取其平均。其實驗結果可得知在固定輸入電流大小及磁場強度下，電極片距離僅影響水流之初始速度，而最終流速趨向於一定值（與輸入電流強度與磁場有關）。

(四)水流內部與表面流速對比

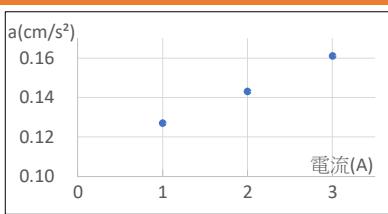


| 磁鐵(條數) | 1條 | 2條 | 3條 | 4條 |
|--------------|-------|-------|-------|--------|
| 表面平均速度(cm/s) | 1.682 | 2.334 | 3.551 | 4.887 |
| 內部平均速度(cm/s) | 2.300 | 4.745 | 8.248 | 10.528 |

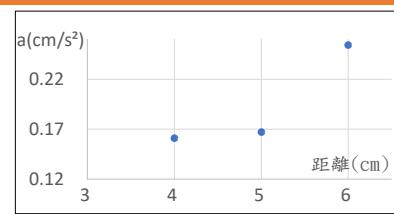
(本圖片、表格由作者親自製作)

圖六、水流表面/內部流速。在相同條件下，水流內部的流速皆會大於表面流速，且流速差距隨磁場強度增強而加大。

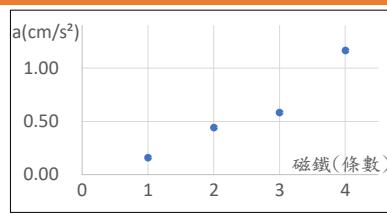
二、水流表面加速度



圖七、不同電流，加速度比較
(本圖片由作者親自製作)



圖八、不同電極片距離，加速度比較
(本圖片由作者親自製作)



圖九、不同磁場，加速度比較
(本圖片由作者親自製作)

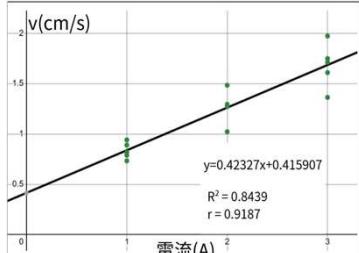
由上方圖七、圖八、圖九分別為「輸入不同電流」、「不同電極片距離」、「不同磁場強度大小」所測得之水流平均加速度，每組變因各取五次數據做平均。本研究探討不同電流、電極片距離及磁場數量對水流加速度的影響。結果顯示，隨電流增加，加速度波動略有擴大，影響有限。電極片距離增加時，加速度波動減小，顯示電場強度隨距離減弱。磁場數量增加時，加速度波動幅度明顯增大，尤以3條與4條磁鐵最為劇烈，顯示磁場對水流加速度影響顯著。

陸、討論

一、流體表面流速

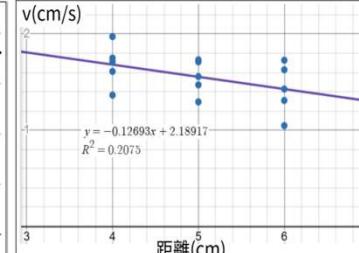
——電流、磁場大小為影響流速的主要因素，距離大小只會影響初始流速，不影響最終流速

1. 電流大小



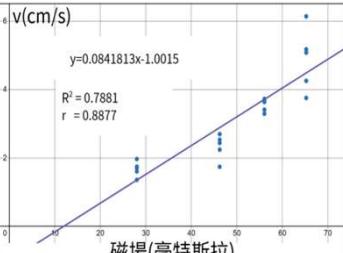
(本圖片由作者親自製作)

2. 距離大小



(本圖片由作者親自製作)

3. 磁場大小



(本圖片由作者親自製作)

最終考慮磁場 B 、電流 I ，可將表面流速 v 以下方程式表達：

$$v = 0.42327 I + 0.08418 B - 1.0015$$

v ：表面流速 (cm/s), B ：磁場 (μ T), I ：電流 (A)

二、流體表面加速度——實際受力主要是受到勞倫茲力影響

| | 勞倫茲力 | 實際受力 |
|----|----------|----------|
| 1A | 0.419776 | 0.419681 |
| 2A | 0.668236 | 0.470445 |
| 3A | 0.903395 | 0.531244 |

(本表格由作者親自製作)

| | 勞倫茲力 | 實際受力 |
|-----|----------|----------|
| 4cm | 0.903395 | 0.531244 |
| 5cm | 0.963515 | 0.552578 |
| 6cm | 1.060878 | 0.837104 |

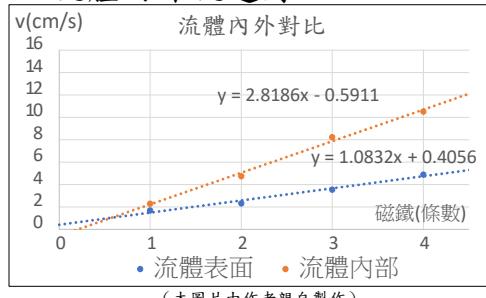
(本表格由作者親自製作)

| | 勞倫茲力 | 實際受力 |
|----|----------|----------|
| 1條 | 0.903395 | 0.531244 |
| 2條 | 1.809147 | 1.466022 |
| 3條 | 2.982234 | 1.930738 |
| 4條 | 4.816336 | 3.851539 |

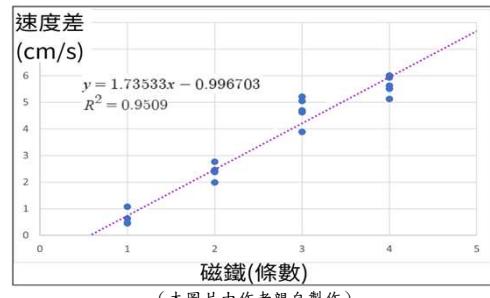
(本表格由作者親自製作)

水流受力與電流強度、磁場強度會成正相關，與石墨片距離呈負相關。

三、流體內外流速對比



(本圖片由作者親自製作)



(本圖片由作者親自製作)

圖十、水流表面流速大於同條件下水流內部流速。圖十一、水流表面、內部流速比較。

水流表面與內部流速差隨磁場強度增強而升高且兩者呈高度正相關

柒、結論

(一) 水流表面流速受磁場、電流共同影響，且皆呈現正相關，可推得公式：

$$v = 0.42327 I + 0.08418 B - 1.0015$$

(二) 水流受勞倫茲力作用產生加速度，與電流強度和磁場強度呈正相關

與石墨片距離呈負相關

(三) 水流內部流速會高於同情況水流表面流速，且水流內部流速與表面流速之差值會隨磁場增強成高度正相關增長

(四) 速度值最終會趨於定值，而最終加速度會趨近於0
若需求得準確速度→取後段趨近於水平的數據
準確加速度→取前段速度0到水平時的數據

捌、參考資料

1. I Made a Real Magnetohydrodynamic Drive -The Action Lab

https://youtu.be/bPSowtQ9rjI?si=5dihxUuw_jgfqZFG

2. 勞倫茲力公式

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016816300126>

3. 什麼是洛倫茲力？-Mastervolt

<http://www.kc373.com/news/257.html>