

2023 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 160014
參展科別 物理與天文學
作品名稱 磁性顆粒在變化磁場中的反向運動及運輸
得獎獎項 三等獎

就讀學校 臺北市立第一女子高級中學
指導教師 簡麗賢、江宏仁
作者姓名 林佑亭

關鍵詞 磁性顆粒、反向運動、變化磁場

作者簡介



在不同的學習階段，參加科展帶給我不一樣的體驗和收穫。

國小報名縣市地球科學科，在展板前口頭報告和回答問題的初體驗，雖略顯怯生，卻開啟我的科學視野。國中參加全國科展生物科，投注心力探究與實作，獲評審委員發揮創意設計實驗的肯定。高中忝獲 2023 年臺灣國際科展複審的資格，在物理的專題研究期間，我學到更嚴謹的實驗方法，探索更深入的物理知識，學習以文字和圖像表達研究中發現的奇特現象，享受科學研究的愉悅。

能進入臺灣國際科展複審階段，特別感謝老師和學姐提供我研究的器材和切中肯綮的建議，適時諄諄指導和提供針砭之道，讓我在科學研究的學習過程不寂寞，提升研究的能力。

摘要

本研究探討磁性顆粒在變化磁場中的運動。燒杯內置入水和氧化鐵粉，構成磁性膠體系統，將燒杯放在磁攪拌器檯面上運轉，發現奇特的水流方向，有時順時針方向運轉，有時則逆時針。此現象是否與氧化鐵粉分布在水面或底部有關？底部的氧化鐵粉出現特別的反向運動，原因為何？深入研究磁性顆粒的運動，分析磁場變化、表面摩擦力對其影響，以及顆粒反向運動時，推動物體的力學分析，並自製磁鐵轉盤分析磁場分布對氧化鐵粉顆粒的影響。

Abstract

In the study, black iron oxide powder and water were firstly added to the beaker and placed on the magnetic stirrer for operation, which is a magnetic colloid system. Later, it was found that the direction of the water flow was strange, sometimes it turned clockwise, and sometimes it turned counterclockwise. After observation, I think it may be related to the distribution of black iron oxide powder on the water surface or the bottom. The magnetic particles at the bottom performs a very special reverse movement, which arouses my interest. Therefore, the reverse motion of magnetic particles is studied in depth, and the magnetic field change mode, the influence of surface friction on it, and the force that pushes the object when the particle reverses motion are analyzed.


壹、研究動機



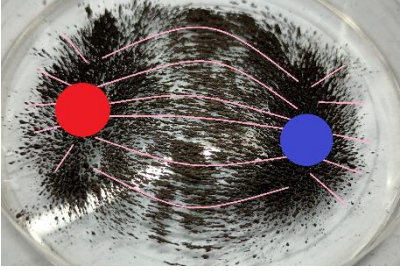
本研究一開始是以氧化鐵粉末取代磁攪拌子，放進磁攪拌器上方的燒杯，結果水流方向竟然不如預期，進一步了解像氧化鐵粉在磁場作用時會聚集成條狀顆粒，這樣的磁性顆粒物質在變化磁場的運動情況與力學分析。

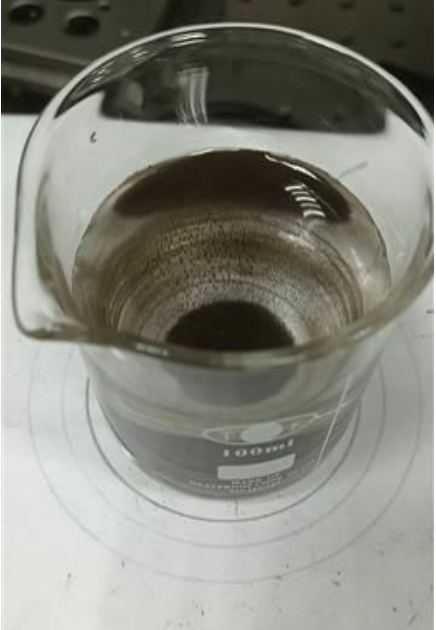


貳、研究目的



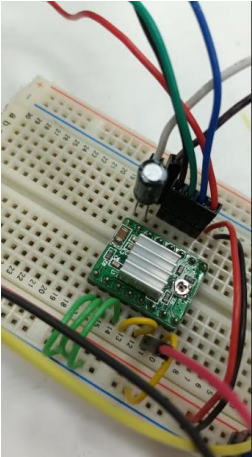

- 一、探討會影響磁性膠體系統的水流方向的變因。
- 二、探討磁性顆粒在磁鐵平移或轉動時的運動。
- 三、自製磁鐵轉盤探討不同磁場分布時氧化鐵粉顆粒的運動。
- 四、探討磁性膠體系統的理论模型。

參、研究設備及器材

編號	名稱	用途	圖片
1	磁攪拌器 6795-420d	提供週期性變化的磁場，本研究使用之磁攪拌器內部磁鐵是順時針轉動。	 ▲磁攪拌器的外觀

			 <p>▲磁攪拌器的內部構造</p>  <p>▲磁攪拌器之磁場分布狀態（靜止時）</p>
2	<p>Fe_3O_4 固體粉末，又稱 FeOFe_2O_3，在本研究中簡稱為氧化鐵粉</p>	<p>在本研究中為磁性膠體系統中移動的粒子，主要用來研究「反向運動」的對象。</p>	 <p>▲氧化鐵粉會在空間中沿磁場方向排列</p>

3	燒杯 (100ml)	用來盛裝磁性膠體溶液的容器。	 <p>▲燒杯的使用方式</p>
4	培養皿	本研究中用來盛裝少量氧化鐵粉顆粒，以方便觀察。	 <p>▲培養皿使用照片</p>
5	砂紙 (240號、2500號)，投影片	用來製造不同粗糙程度表面。	

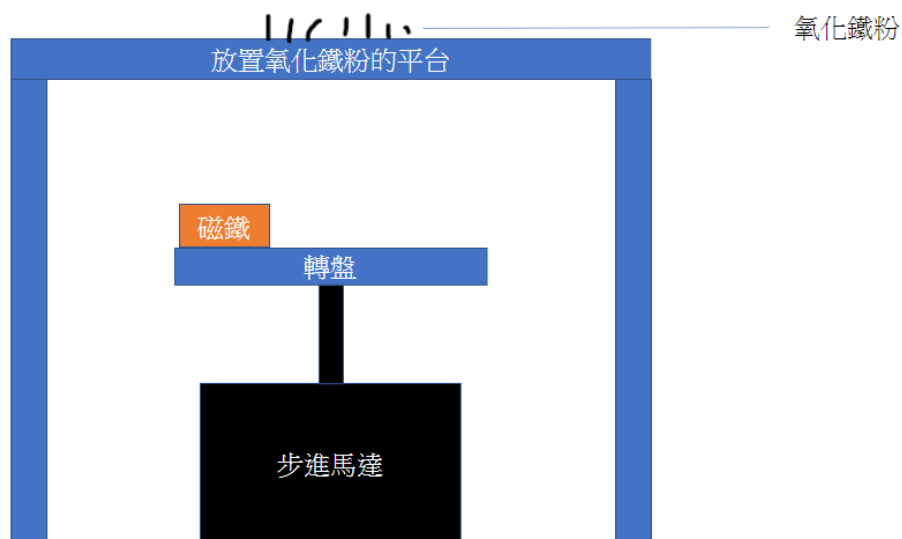
6	小紙片 (圓形： 0.0062g；方 形：0.008g)	準確裁切、量測的小 紙片，用來測量磁性 顆粒的推力。	
7	步進馬達 型號： 42BYGH4417	驅動承載磁鐵的轉 盤，以製造變化磁場	
8	驅動馬達的相 關線路，包含 麵包板、電源 供應器等	驅動步進馬達（可控 制轉速及方向）	
9	壓克力支架、 轉盤平台	放置磁鐵、氧化鐵粉 顆粒，自製儀器用	

10	強力磁鐵（圓形，直徑2.0cm，高0.5cm）	自製儀器用	
----	-------------------------	-------	--

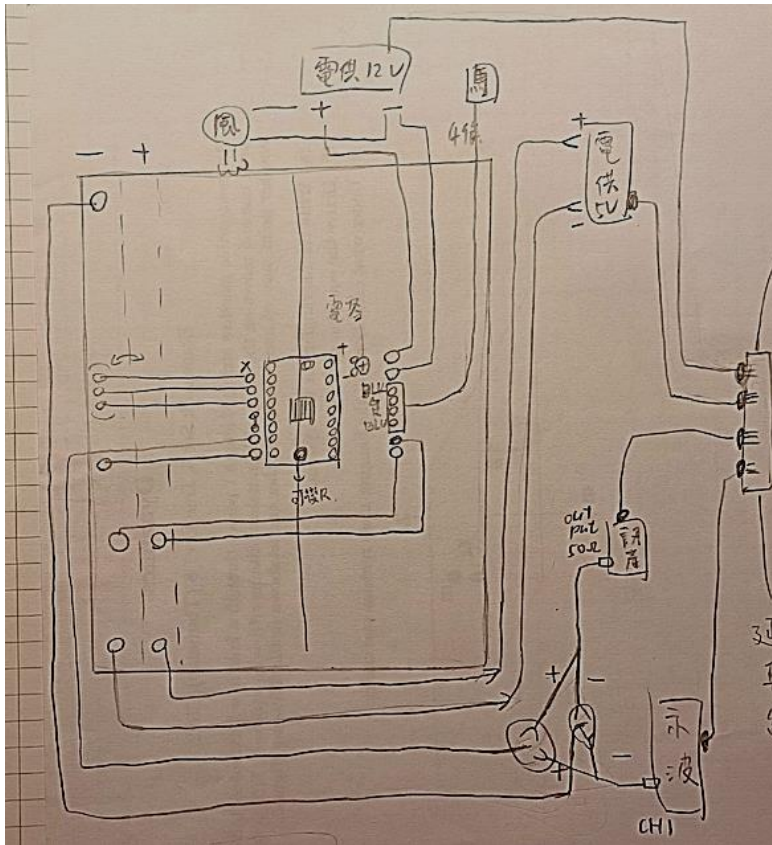
自製磁鐵轉盤 氧化鐵粉運動實驗裝置：

裝置示意圖、電路、及運作簡介

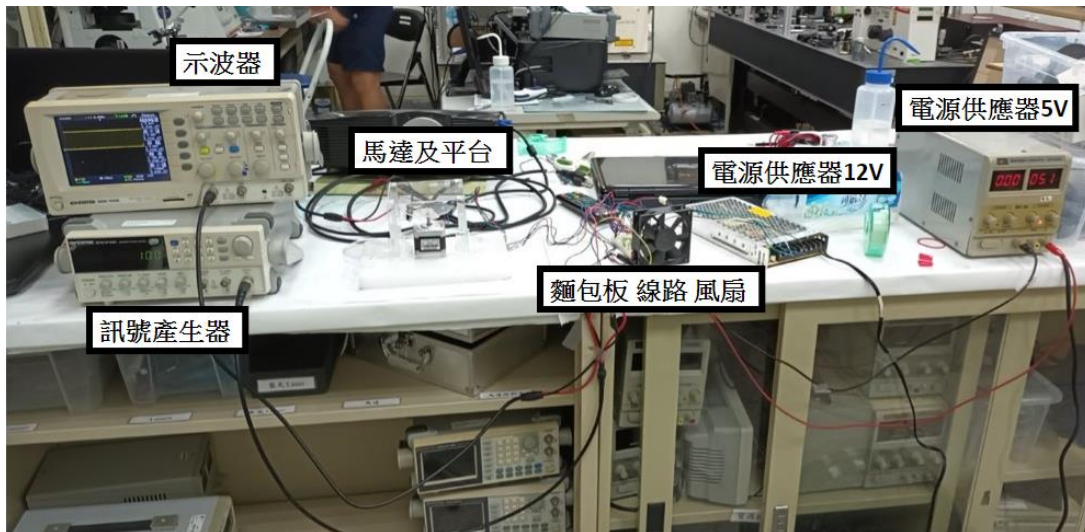
實驗裝置示意圖(從側面看)



▲裝置示意圖



▲ 電路示意圖

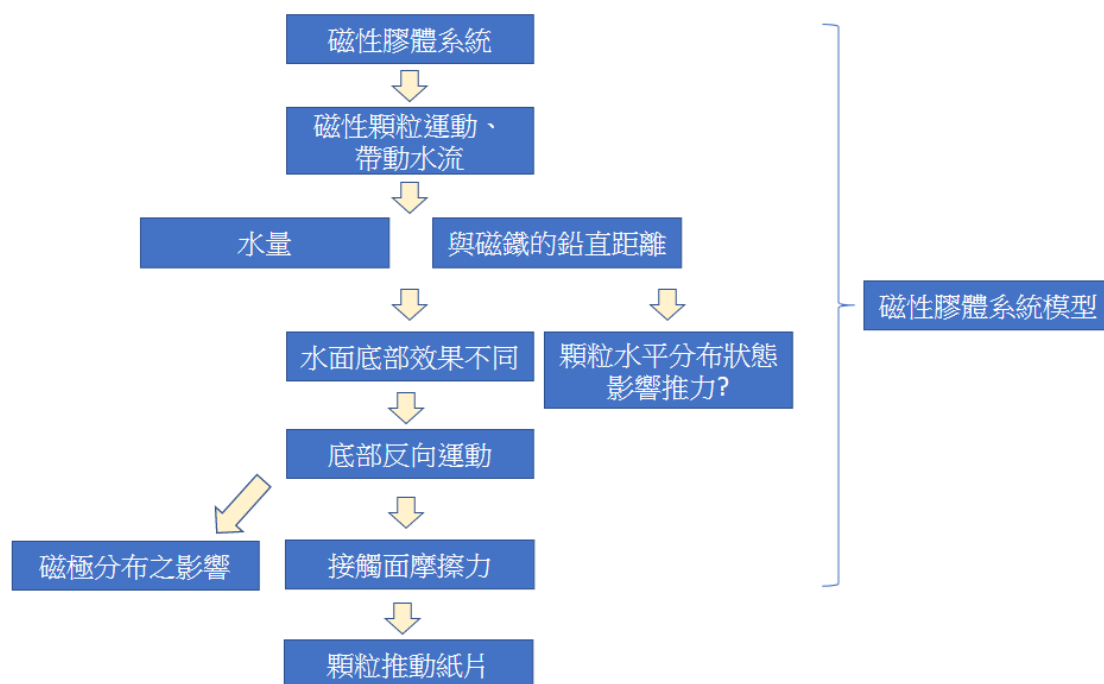


▲ 實際照片

將步進馬達依電路示意圖接上電源及訊號產生器（控制轉速），馬達上的軸即會轉動，且可以控制方向及轉速。將壓克力轉盤黏在軸上，磁鐵黏在轉盤上，則磁鐵將隨馬達的轉軸轉動，平台上的氧化鐵粉受下方磁鐵磁力影響，依序做平面轉動、豎起等運動，運度狀況取決於下方磁鐵的分布情形。

肆、研究過程及方法

一、研究架構圖



二、背景知識

(一) 鐵磁性、亞鐵磁性

鐵磁性 (Ferromagnetism)，又稱**強磁性**，是一種材料的磁性狀態，具有自發性的磁化現象。某些材料在外部磁場的作用而磁化後，即使外部磁場消失，依然能保有磁性，即所謂自發性的磁化現象。

亞鐵磁性 (Ferrimagnetism) 物質為不同亞晶格的原子磁矩呈相反的物質，如在反鐵磁性中；然而，在亞鐵磁性物質中，相反的磁矩不相等，存在自發磁化。該情況發生於亞晶格是由不同的材料或不同價態的鐵離子如 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 組成時。

(二) 旋度的斯托克斯公式

三維空間 R^3 中，設 Γ 為分段光滑的空間有向封閉曲線， S 是以 $\Gamma = \partial S$ 為邊界的分片光滑的有向曲面， Γ 的正向與 S 的側右手規則，函數 $P(x, y, z)$ ， $Q(x, y, z)$ ， $R(x, y, z)$ 在曲面 S (連同邊界 Γ 上具有一階連續偏導數)，則有

$$\iint_S \left(\frac{\partial R}{\partial y} - \frac{\partial Q}{\partial z} \right) dy dz + \left(\frac{\partial P}{\partial z} - \frac{\partial R}{\partial x} \right) dz dx + \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} \right) dx dy = \oint_{\Gamma} P dx + Q dy + R dz$$

用旋度表示，就是：

$$\int_S (\nabla \times \mathbf{A}) \cdot d\mathbf{S} = \oint_{\partial S} \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l}$$

這個公式是一般的斯托克斯公式在 n 為 2 時的特例，在歐氏三維空間上的向量場的旋度的曲面積分和向量場在曲面邊界上的線積分之間建立關係。說明向量場 A 在某個曲面的封閉邊界線上的閉合路徑積分，等於 A 的旋度場在這個曲面上的積分。

(三) 外在磁場作用於磁鐵的力矩

處於外來磁場的磁鐵會感受到外在磁場施加的力矩，促使磁鐵的磁矩與外來磁場呈相同方向。做簡單實驗就可以很容易地觀察到這現象：固定一塊條形磁鐵 X 於某位置，假若磁鐵 X 作用於條形磁鐵 Y 的磁場與磁鐵 Y 的磁矩呈不同方向，則會有力矩作用於磁鐵 Y ，促使磁鐵 Y 旋轉，使得磁鐵 Y 的磁矩與磁鐵 X 的磁場呈相同方向。磁矩為 μ 的磁鐵 Y ，因為處於磁鐵 X 所產生的磁場 B 而感受到的力矩 τ 以方程式表示為

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\mu} \times \mathbf{B}$$

這現象可以解釋，為什麼在地球表面某位置的局域磁場方向，是指南針或任意磁鐵的指北極的指向。

(四) 外磁場作用於磁鐵的磁力

高磁場區域會吸引或排斥磁鐵，決定於磁鐵與磁場之間的相對取向。這是個一般定則。異性磁極相互吸引，同性磁極相互排斥，就是這定則的特例。兩個磁鐵的異性磁極相互吸引，因為兩個異性磁極之間的磁場較強烈，而且這磁場與磁鐵的磁矩呈相同方向。

假設磁矩的方向被逆反，則結果也會被逆反。假設磁鐵的磁矩與磁場呈相反方向，而磁鐵又不會因為磁場施加的力矩而改變取向，則作用於磁鐵的磁力，其方向會朝向磁場比較微弱的區域，這對應於兩個磁鐵的同性磁極相互排斥。不均勻外磁場可以區分不同定向的磁偶極子。

處於不均勻外磁場 B 的磁鐵所感受到的磁力 F ，以方程式近似為

$$\mathbf{F} = \nabla (\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B})$$

其中 μ 為磁鐵的磁矩

$-\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B}$ 是磁場與磁矩之間的作用能量。所以，作用力 F 的方向是朝向減少作用能量的方向。磁矩 μ 固定不變，當磁場與磁矩呈相同方向時，作用力的方向是朝向磁場比較強的區域；當磁場與磁矩呈相反方向時，作用力的方向是朝向磁場比較弱的區域。

(五) 反向運動(研究者自行定義)

反向運動是指氧化鐵粉顆粒位於一表面上，下方有磁鐵一極朝上，運動經過顆粒下方，此時顆粒呈長條狀由平倒狀態，以接近磁鐵初位置的一端為固定點豎起再倒下，造成一個和磁鐵運動方向相反的位移，稱為反向運動。

三、實驗設計與方法

(一) 氧化鐵粉在變化磁場運動，對容器中水流的影響

1. 水量對水流速率的影響

實驗方法

改變燒杯中的水量，固定其他變因，探討水量對水流速率的影響

實驗組別： a 組:20g 水

b 組:60g 水

實驗步驟

- (1) 在燒杯中 0.100g 的 FeOFe_2O_3 粉末和定量的水
- (2) 待水中氧化鐵粉自然沉降
- (3) 用拭鏡紙撈除水面的粉末，在水面放上一個小紙片
- (4) 將燒杯放至攪拌器上以 60rpm 運轉
- (5) 用 ImageJ 分析實驗影片，量測紙片每隔 10sec 繞中心旋轉的角度



2. 距離磁鐵遠近對水流速率的影響

實驗方法

改變燒杯和攪拌器磁鐵的距離，固定其他變因，探討距離磁鐵遠近對水流速率的影響

實驗組別： a 組:不墊高

b 組:用玻片墊高約 2cm

實驗步驟

- (1) 在燒杯中 0.100g 的 FeOFe_2O_3 粉末和 30g 的水
- (2) 待水中氧化鐵粉自然沉降
- (3) 用拭鏡紙撈除水面的粉末，在水面放上一個小紙片
- (4) 將燒杯放至攪拌器上，分別以墊高及不墊高，以 60rpm 運轉
- (5) 用 ImageJ 分析實驗影片，量測紙片每隔 10sec 繞中心旋轉的角度

3. 水面氧化鐵粉對水流方向的影響

實驗方法

撈除水面的氧化鐵粉，固定其他變因，探討表面氧化鐵粉對水流速率的影響

實驗組別 a 組:留下水面氧化鐵粉

b 組:撈除水面氧化鐵粉

實驗步驟

- (1) 在燒杯中 0.100g 的 FeOFe_2O_3 粉末和 30g 的水
- (2) 待水中氧化鐵粉自然沉降
- (3) 用拭鏡紙撈除或留下水面的粉末，在水面放上一個小紙片
- (4) 將燒杯放至攪拌器上以 60rpm 運轉
- (5) 用 ImageJ 分析實驗影片，量測紙片每隔 10sec 繞中心旋轉的角度

(二) 進一步觀察不同位置 Fe_3O_4 的運動

1. 直接觀察水面 Fe_3O_4 之移動、轉動方式
2. 直接觀察底部 Fe_3O_4 之移動、轉動方式
3. 自行操控磁鐵及氧化鐵粉，觀察其運動

實驗方法：

將少量氧化鐵粉撒在桌面上，用手拿磁鐵在桌下平移。

實驗步驟：

- (1) 在桌面依序鋪上方格紙和光滑投影片
- (2) 倒少量 Fe_3O_4 在投影片上
- (3) 用手持永久磁鐵，沿桌面下緣 N 極朝上由左滑到右
- (4) 紀錄氧化鐵粉移動情形

(三) 測量氧化鐵粉排列成的長條狀顆粒翻動的力之量值

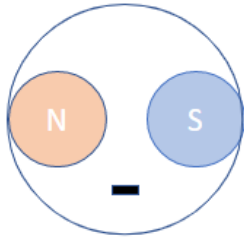
1. 測量顆粒在不同粗糙程度表面上由平倒變成豎起來的力之量值

實驗方法：

使用不同粗糙程度的投影片墊在顆粒下方，再放定量紙片於顆粒上方，利用攪拌器驅動鐵粉顆粒，看是否能驅動所有的紙片。顆粒最初是平倒的。

實驗步驟：

- (1) 用不同號數的砂紙均勻磨出由粗糙到光滑 240，2500，光滑的投影片
- (2) 將投影片鋪在培養皿中把氧化鐵粉（約 0.100g）放在距中央 20mm 處
- (3) 把前步驟的整組器材放上攪拌器檯面，對齊培養皿位置及方向使氧化鐵粉平倒。此時磁鐵和氧化鐵粉相對位置：



- (4) 在氧化鐵粉上方堆疊定量之紙片，啟動磁攪拌器，紙片數量由 1 逐一增加，

紀錄最多能驅動多少紙片



2. 測量顆粒在不同粗糙程度表面上推動紙片的力之大小

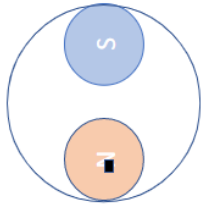
實驗方法：

使用不同粗糙程度的投影片墊在顆粒下方，再放定量紙片於顆粒上方，利用攪拌器驅動氧化鐵粉顆粒，看是否能驅動所有的紙片。顆粒最初是直豎的。

實驗步驟：

- (1) 用不同號數的砂紙均勻磨出由粗糙到光滑 240，2500，光滑的投影片
- (2) 將投影片鋪在培養皿中把氧化鐵粉（約 0.100g）放在距中央 20mm 處
- (3) 把前步驟的整組器材放上攪拌器檯面，對齊培養皿位置及方向使氧化鐵

粉直豎。此時磁鐵和氧化鐵粉相對位置：



(4) 在氧化鐵粉上方堆疊定量之紙片，啟動磁攪拌器，紙片數量由 1 逐一增加，紀錄最多能驅動多少紙片

3. 測量氧化鐵粉顆粒在和磁鐵不同距離處推動紙片的力之大小

實驗方法：

把少量氧化鐵粉放在和攪拌器磁鐵中心不同距離的地方，測試放在不同位置的氧化鐵粉的力之大小。氧化鐵粉顆粒最初是豎立的。

實驗組別：

和攪拌器內部磁鐵正上方之距離 (mm) 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 共 7 組

實驗步驟：

- (1) 先將少量氧化鐵粉 (約 0.1g) 放在培養皿上的的指定位置
- (2) 將前步驟的整組器材放上攪拌器檯面，對齊培養皿位置及方向使氧化鐵粉顆粒直豎。
- (3) 在氧化鐵粉上方堆疊定量之紙片，啟動磁攪拌器，紙片數量由 1 逐一增加，紀錄最多能驅動多少紙片。

4. 底部氧化鐵粉分布情況對水流的影響

實驗方法：

改變燒杯底部氧化鐵粉分布（集中在中央或分散在整個燒杯底部），探討底部氧化鐵粉分布對水流的影響。

實驗組別：

a 氧化鐵粉集中

b 氧化鐵粉分散

實驗步驟：

- (1) 在燒杯中放 0.100g 的氧化鐵粉和 30g 的水
- (2) 待氧化鐵粉自然沉降。
- (3) a 組：使用較低的轉速將底部氧化鐵粉聚集到正中央。
- (4) 用拭鏡紙撈除水面的粉末，在水面放上一個小紙片
- (5) 將燒杯放至攪拌器上以 60rpm 運轉
- (6) 用 ImageJ 分析實驗影片，量測紙片每隔 10sec 繞中心旋轉的角度



(四) 自製磁鐵轉盤 氧化鐵粉運動實驗裝置:

探討不同磁場分布情況下，氧化鐵粉顆粒的運動情形

1. 單極磁鐵 (N 極朝上)

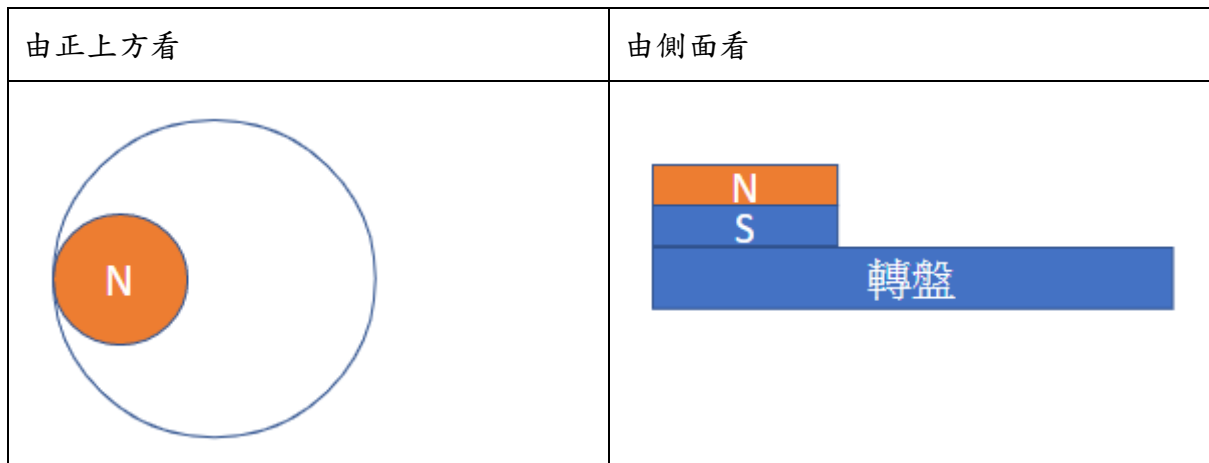
實驗方法：

利用自製裝置進行實驗。如圖，在轉盤上安裝一顆 N 極朝上的圓形磁鐵。

實驗步驟：

(1) 在自製轉盤上安裝磁鐵如下圖，啟動馬達使轉盤以 30rpm 轉動。

(2) 在平台上放少量氧化鐵粉顆粒，觀察顆粒的運動。



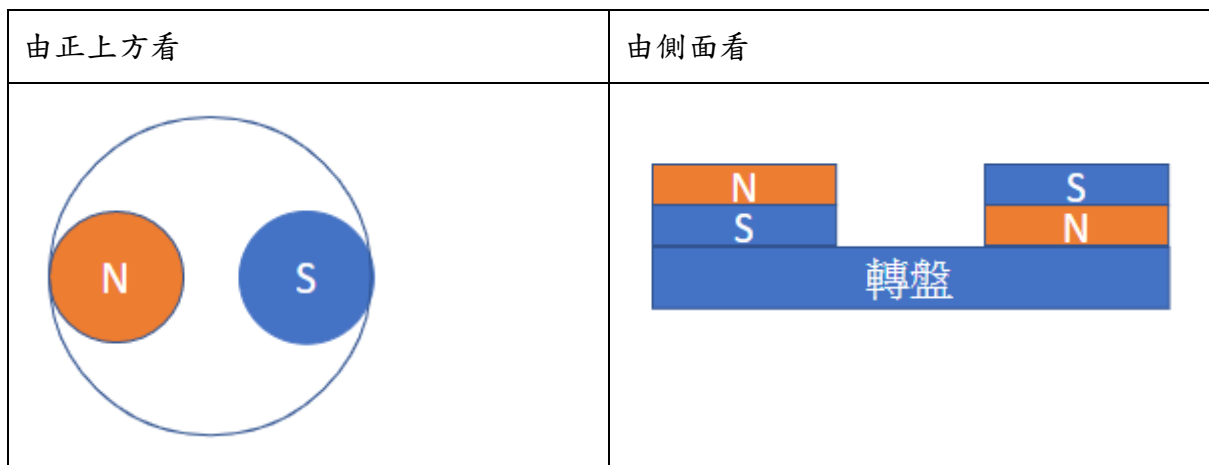
2. 雙極磁鐵（一個磁鐵的 N 極朝上，另一個磁鐵的 S 極朝上）

實驗方法：

利用自製裝置進行實驗。如圖，在轉盤上安裝二顆分別是 N、S 極朝上的圓形磁鐵。

實驗步驟：

- (1) 在自製轉盤上安裝磁鐵如下圖，啟動馬達使轉盤以 30rpm 轉動。
- (2) 在平台上放少量氧化鐵粉顆粒，觀察顆粒的運動。



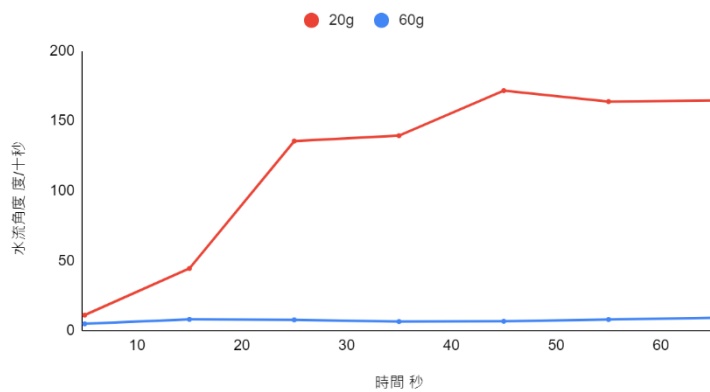
伍、研究結果

(一) 氧化鐵粉在變化磁場運動，對容器中水流的影響

1. 水量對流速的影響

由圖表可知，在氧化鐵粉的量及分布位置相同且攪拌器轉速相同的情況下，水量會影響水流速率，水量少較容易被下方氧化鐵粉推動，流速較大。

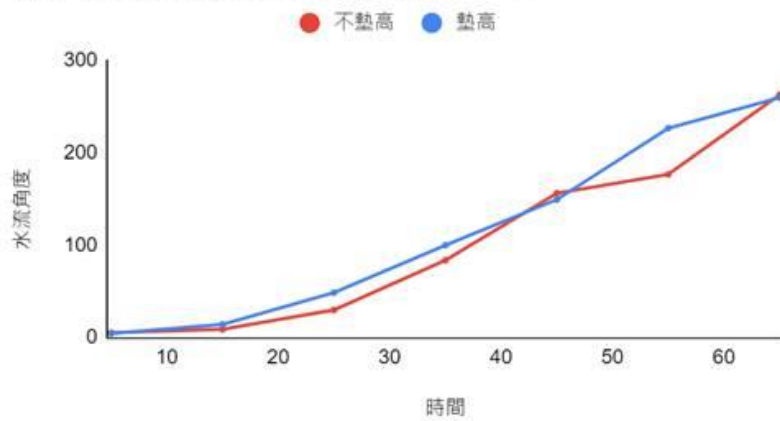
水量對流速的影響



2. 距離磁鐵遠近對水流速率的影響

由圖表可知，兩組流速無明顯差異

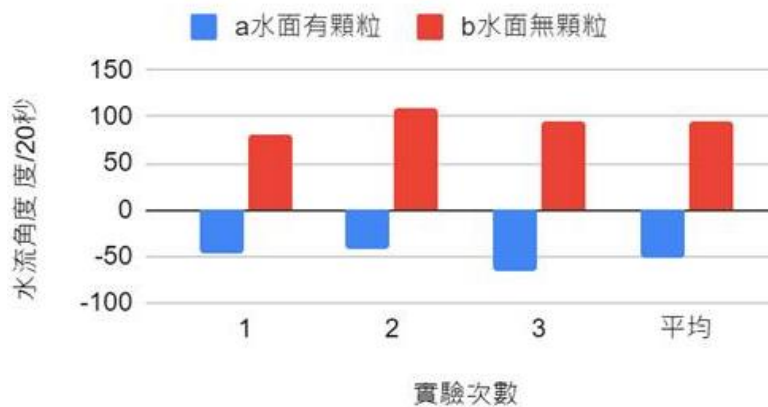
和下方磁鐵距離對流速的影響 平均



3. 水面氧化鐵粉對水流方向的影響

由實驗結果可知，若表面沒有氧化鐵粉顆粒，水流方向為逆時針。若水面有大量氧化鐵粉，水流方向為順時針。

水面有無顆粒對水流方向的影響



(二) 進一步觀察不同位置的氧化鐵粉的運動

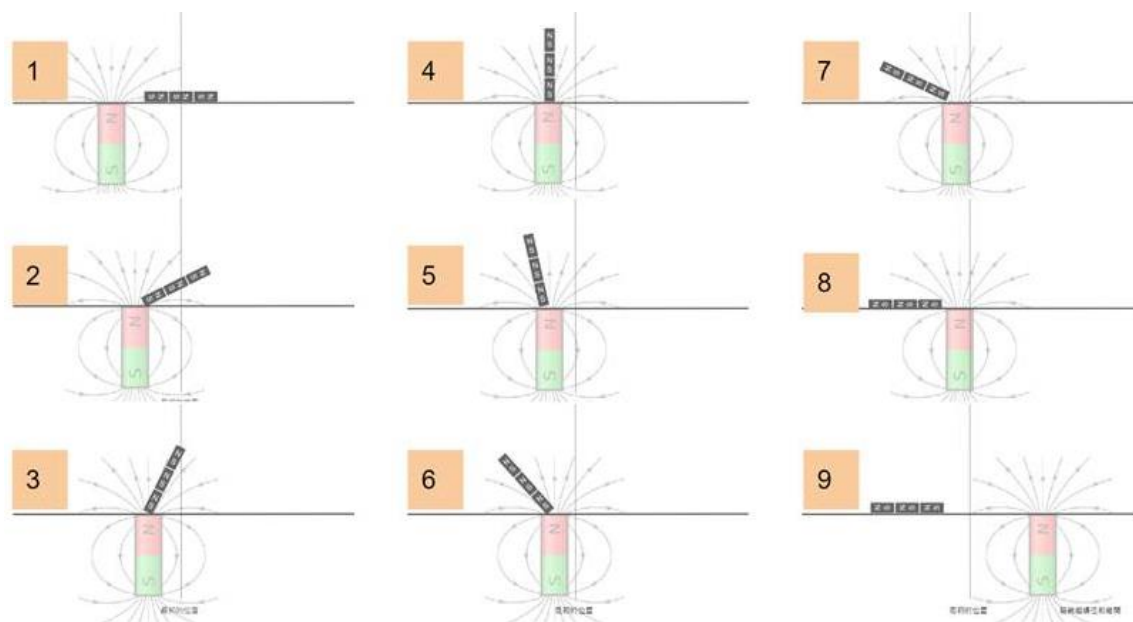
1. 直接觀察水面氧化鐵粉之移動、轉動方式

順時針轉動（和攪拌器磁鐵轉動方向相同），隨水面的水流移動。

2. 直接觀察底部氧化鐵粉之移動、轉動方式

隨攪拌器磁鐵磁力線在空間中排列成許多棒狀顆粒，隨磁場變動轉動。轉動加上與表面的作用力使氧化鐵粉顆粒向逆時針的方向移動。

3. 自行操控磁鐵及氧化鐵粉，觀察其運動



下方磁鐵水平移動(如上圖)則氧化鐵粉顆粒會進行反向運動，即其位移方向與磁鐵移動方向相反

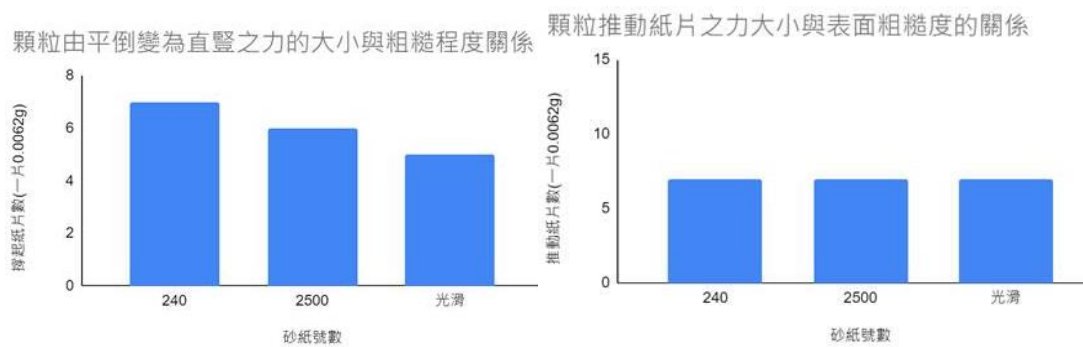
(三) 測量底部氧化鐵粉排列成的長條狀顆粒翻動的力量值

1. 測量顆粒在不同粗糙程度表面上由平倒變為直豎的力量值

由圖表可知，在較粗糙的表面上，氧化鐵粉由平倒變為直豎的力較大。

2. 測量顆粒在不同粗糙程度表面上推動紙片的力之量值

由圖表可知，在此實驗中，若顆粒最初是直豎的狀態，則在不同粗糙程度表面上推動物體的力無明顯差異。

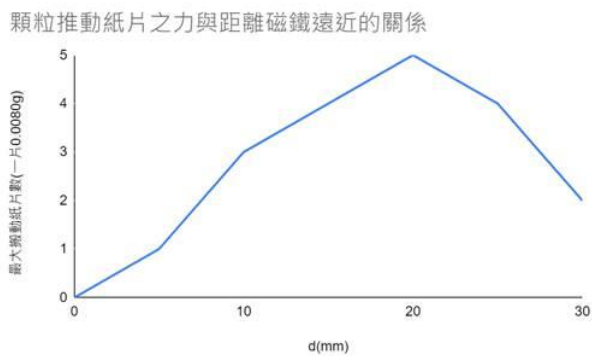


▲平倒變為直豎(1)

▲推動紙片(2)

3. 測量氧化鐵粉顆粒在和磁鐵不同距離處推動紙片的力之量值

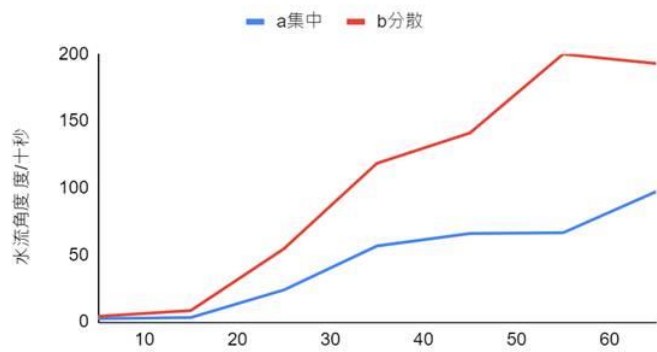
由圖表可知，距攪拌器磁鐵中央 20mm 處推動紙片的力最大，力的量值向兩邊遞減。經比對攪拌器磁鐵大小發現該處大概是磁鐵兩極的位置。



4. 底部氧化鐵粉分布情況對水流的影響

由圖表可知，底部氧化鐵粉分散分布的組別水流速率明顯較快，代表分散分布的氧化鐵粉推動水的效果比集中的氧化鐵粉好。

底部氧化鐵粉分布對流速的影響

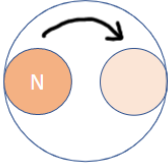
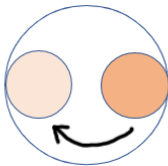


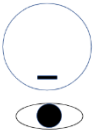



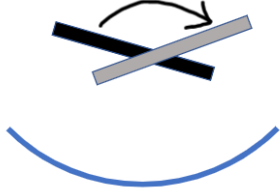
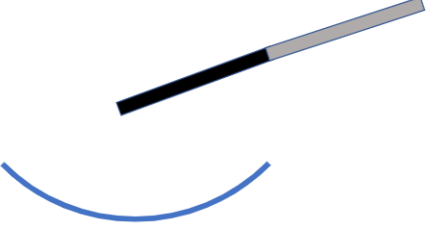


(四) 自製磁鐵轉盤 氧化鐵粉運動實驗裝置:

探討不同磁場分布情況下，氧化鐵粉顆粒的運動情形

1. 單極磁鐵 (N 極朝上)

根據實驗及觀察，氧化鐵粉顆粒在一個磁鐵旋轉週期內的運動大致可分為 2 個階段

單極磁鐵	第一階段	第二階段
磁鐵位置 深色為初 位置，淺 色為末位 置		
氧化鐵粉 顆粒位置		
由側面觀 察 	顆粒所在之 水平表面 	
由正上方 觀察 		

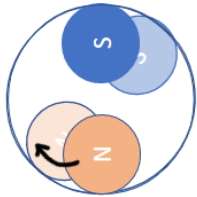
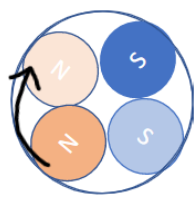
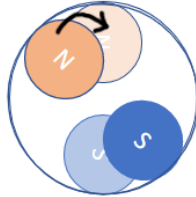
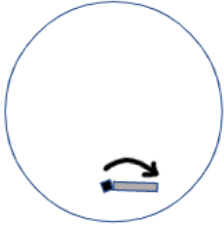
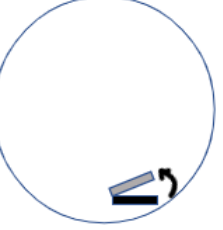
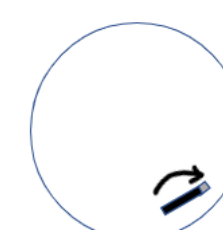
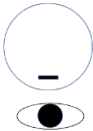
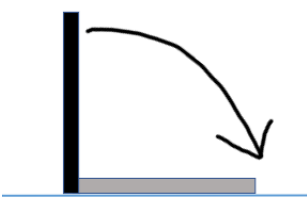


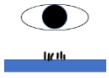
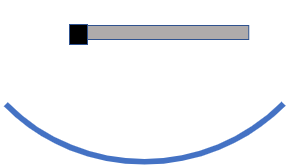
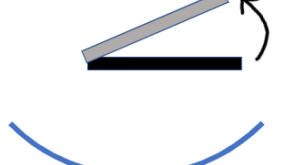

說明:深色為初位置,淺色為末位置

紅點:轉動中固定不動之點

箭頭:表示物體的轉動方向

2. 雙極磁鐵 (一個磁鐵的 N 極朝上, 另一個磁鐵的 S 極朝上)

根據實驗及觀察, 氧化鐵粉顆粒在 0.5 個磁鐵旋轉週期內的運動大致可分為 3 個階段, 之後的 0.5 個週期, 同樣的運動情形重複出現, 故不再贅述

ns 雙極	第一階段	第二階段	第三階段
磁鐵位置 深色為初 位置，淺 色為末位 置			
氧化鐵粉 顆粒位置			
由側面觀 察 			
由正上方 觀察 			

陸、討論

一、磁性膠體系統中的水流速率及方向。

經研究發現磁性膠體系統的水流是受到氧化鐵粉在磁場作用時聚集的顆粒推動所影響。分別討論如下：

(一)由實驗 1-1 可知，水量愈多，代表氧化鐵粉推動的質量愈大，故相同時間內，質量較小的水受到氧化鐵粉運動，流速較大。

(二)依據實驗 1-2 推測，水面上小顆粒可提供順時針方向，與攪拌器磁鐵同向的推力，而沉在杯底的顆粒會提供逆時針方向，與攪拌器磁鐵反向的推力。

二、不同位置的氧化鐵粉的運動及其對水流的影響

(一)水面：水面上的氧化鐵粉聚集成許多較短小的顆粒，顆粒本身隨著攪拌器磁鐵轉動，提供順時針方向的推力。



(二)底部：底部的氧化鐵粉受磁場作用，沿磁力線在空間中排列出長條狀的顆粒，受到磁力以及底部摩擦力作用使其呈現獨特的反向運動。磁性顆粒在運動的同時，也能推動其他物體，達到運輸效果。本研究成功地利用這種特殊的反向運動運輸容器中的水

或質量不大的紙片。此外，使用較高濃度的氧化鐵粉顆粒在變動磁場，如磁攪拌器的作用時可快速地運輸微流體。(如圖)



利用磁攪拌器提供變動磁場時，亦觀察到整體氧化鐵粉顆粒逐漸往內繞的趨勢，換言之，觀察單一顆粒的初始位置及經過變化磁場作用一段時間的末位置，會發現它和磁鐵圓周運動中心的距離縮短，其運動軌跡類似上圖螺旋形軌跡，這個現象也導致實驗時氧化鐵粉顆粒逐漸聚集至正中央。

三、影響氧化鐵粉組成的磁性顆粒對物體推力大小的因素

(一)接觸表面的粗糙程度：

依據實驗 3-1、3-2 結果，在氧化鐵粉由平倒變為直豎的過程中，表面粗糙程度會影響其直豎的力量，在由直豎變為平倒的過程中，表面粗糙程度不影響其推動的力量。

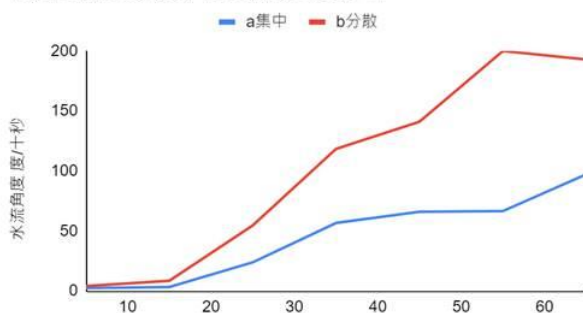
(二)氧化鐵粉所受磁力大小：

依據實驗 3-3，氧化鐵粉顆粒在磁場較強，接近兩極位置可運輸較多紙片。

(三)氧化鐵粉分布位置：

由實驗 3-4 對磁性膠體系統的研究中，發現氧化鐵粉分散的 b 組流速明顯大於集中的 a 組，推測是因為氧化鐵粉顆粒在靠外側處對水造成的力矩較大。分散分布之 b 組後期流速有下降趨勢，推測是因為底部顆粒一面旋轉一面向內繞的現象，又依據實驗結果知分布位置較靠近中央的顆粒提供的推力較小。

底部氧化鐵粉分布對流速的影響



四、分析磁攪拌器的磁場分布及磁場分布對氧化鐵粉顆粒運動之影響

(一)撒氧化鐵粉觀察磁力線



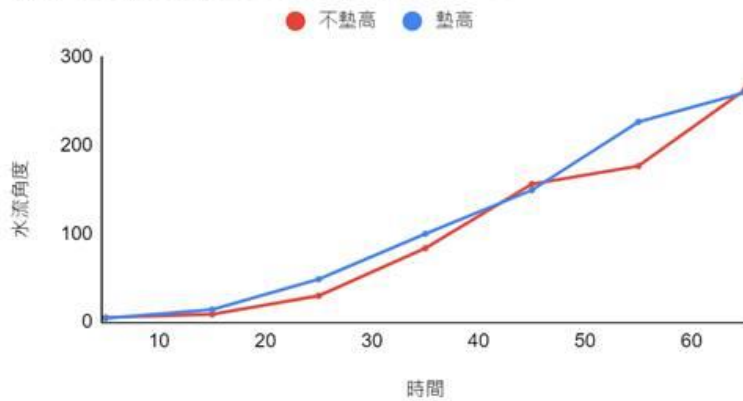
由上圖可知，攪拌器磁鐵應是類似馬蹄型磁鐵兩極分布

(二)原先猜測磁場強度可能影響顆粒攪動水流的效率，曾做以下實驗欲探討與磁鐵的鉛直距離是否影響流速

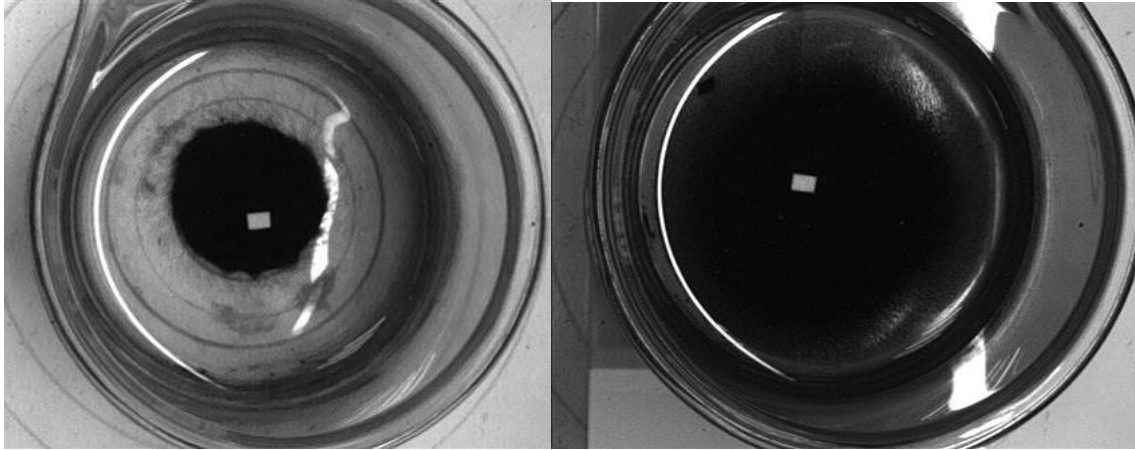
磁鐵遠近對水流速率的影響：

由圖表可知，兩組流速無明顯差異

和下方磁鐵距離對流速的影響 平均



兩種可能解釋此結果，一是本實驗中雖調整距離，但距離差異不大因而造成磁場差異也不大，另一是其他因素影響實驗結果。觀察得知墊高的組別(磁場較小)底部的氧化鐵粉顆粒由分散變為集中的幅度明顯較另一組小。由於使用攪拌器提供變化磁場時，顆粒會有往內繞的現象，因此底部顆粒隨操作時間增長會逐漸向內集中，攪動水流的能力變差，推測此緣故和磁場強度的影響恰抵銷，導致流速差異不明顯。



▲氧化鐵粉集中

▲氧化鐵粉分散

(三)自製磁鐵轉盤氧化鐵粉顆粒運動實驗結果討論

1. 單極磁鐵

氧化鐵粉在第一階段的運動為在水平面旋轉，其中一端恆指向磁鐵，跟著磁鐵的位置變化轉變方向，另一端則隨之轉動，此時磁鐵和氧化鐵粉距離較遠。第二階段，磁鐵位置較接近氧化鐵粉顆粒的正下方，此時氧化鐵粉顆粒靠近磁鐵的一端固定於底面，另一端豎起翻 180° 後落至另一邊，如實驗結果的圖表所示。

推測原因為：當磁鐵距離氧化鐵粉顆粒較遠時，顆粒周圍的磁場梯度較小，故顆粒受到力矩作用較明顯。當磁鐵距離氧化鐵粉顆粒較近時，顆粒周圍的磁場梯度較大，故顆粒受磁鐵的吸引力較明顯，導致鐵粉顆粒受到接觸面的正向力及摩擦力增大，足以使顆粒反向運動。

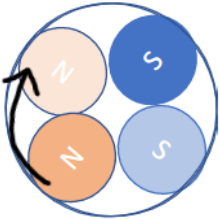
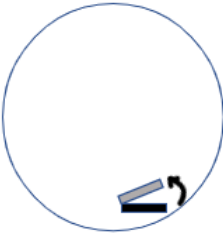
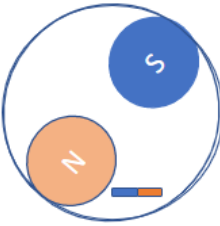
2. 雙極磁鐵（一個磁鐵的 N 極朝上，另一個磁鐵的 S 極朝上）

如實驗 4-2 結果所述，將氧化鐵粉顆粒的運動分為一、二、三階段，其中第一、三階段類似單極磁鐵的第二階段，推測原因亦為磁鐵距離較近時的磁作用力造成。

以下圖為例，在第二階段期間，一開始氧化鐵粉顆粒位置較靠近磁鐵 N 極，磁鐵 N 極由深橘色位置順時針轉至淺橘色位置，磁鐵 S 極由深藍色位置順時針轉至淺藍色位置，氧化鐵粉顆粒靠近 N 極這端(藍色端)會固定在接觸面上，而另一端(紅色端)會快速移動至指向 S 極。

推測原因為：藍色端受到鄰近 N 極吸引力，摩擦力較大，固定不動，而紅色端受遠處 S 極作用，因 S 極距顆粒較遠，作用於顆粒，促使其磁矩和 NS 磁鐵構成之外磁場呈相同方向的力矩較明顯，故第二階段運動情形如下圖所示。

另外，實驗中發現在雙極磁鐵磁場分布中，氧化鐵粉顆粒運動方式和利用磁攪拌器驅動的顆粒相同。

<p>第二階段:</p> <p>磁鐵位置</p> <p>深色為初位置，淺色為末位置</p>	
<p>氧化鐵粉顆粒位置</p>	
<p>初位置疊圖</p>	

對於磁顆粒在經過數個磁場週期變化後移動軌跡為向內螺旋之討論:

推測原因是第二階段時，顆粒移動端快速移至指向接近中磁極的過程，造成顆粒本身向內的位移。

五、磁性膠體系統的模型及反向運動研究結果總整理



▲氧化鐵粉顆粒下一瞬間的轉動方向示意圖



▲經多次磁場週期變化後氧化鐵粉移動的軌跡



磁性膠體系統模型

水面:

浮在水面的顆粒隨攪拌器磁鐵順時針自轉，與表面的水產生摩擦力黏滯力，帶動水面水流。由旋度斯托克斯定理，所有順時針旋轉的粒子旋轉效果之總和可使表面水流順時針轉。

底部:

沉在底部的顆粒進行反向運動，逆時針方向帶動水流。

攪拌器磁鐵之磁場分布造成磁性顆粒進行反向運動的同時也會向中央移動，亦即逆時針繞且軌跡向內偏，最後會到達正中央。

據研究結果，顆粒在靠外側處帶動水流效果優於中央。

由於底部的磁性顆粒數量眾多且提供極大推力，當擾動範圍到達水面且該分量大於水面顆粒造成之順轉分量，則水面水流亦發生逆轉。

柒、結論

一、在磁性膠體系統中，水面的氧化鐵粉顆粒會使水面水流順時針方向轉，底部顆粒則作反向運動，由下往上使整體水流逆時針方向旋轉。當底部顆粒對水的推力影響到水面且造成的影響大於水面顆粒造成的影響，則水面水流為逆時針方向。

二、氧化鐵粉顆粒的反向運動是顆粒受磁場影響，經一連串平躺變為直豎再變為平躺，如步行般的運動，接觸表面的一端會受到不對稱作用力，造成和磁鐵移動方向相反的位移。

三、磁性顆粒的反向運動，除了顆粒本身運動，其纖毛般的擺動亦可推動其他物體，本研究中的氧化鐵粉顆粒成功地進行水、紙片及微流體(少量水形成的液滴)的運輸。

捌、未來展望

一、外加磁場使磁性顆粒直接對液滴施力，探討其如何運輸微流體，以及外加磁場使磁性顆粒做反向運動的同時，製成微型輸送帶，可運輸微小物體。

二、運用不同變化方式的外加磁場，操控磁性顆粒的轉動、移動，可用於血管中運送藥物等。

三、探討量化分析磁場分布對於氧化鐵粉顆粒整體運動及位移的影響。

玖、參考資料

1. Charles E. Sing, Lothar Schmid, Matthias F. Schneider, Thomas Franke, and Alfredo Alexander-Katz.(2008) Controlled surface-induced flows from the motion of self-assembled colloidal walkers. PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES Vol. 107 | No. 2 January 12, 2010.

2. 陳慶耀。2012。磁性粒子操控之力學探討與於微奈米系統之應用
Manipulations of Ferro-Particles: Mechanisms and Applications in Nano-Micro-Systems

【評語】 160014

本研究題目有趣，內容具有新穎性。有關氧化鐵粉粒在轉動水中的運動，值得再探究。本研究紀錄氧化鐵粉粒的運動，做簡易軌分析，能觀測到上層氧化鐵粉粒與下層氧化鐵粉粒相互牽動象，已能觀測到數種氧化鐵粉粒運動行為，已屬不易，但是可以有更詳盡的現象描述。實驗也合理，可以把結果說明更清楚。此作品探討有趣的實驗現象，也呈現了不同條件下呈現的結果，但科學探討的部分較少，有可多加說明。