

2025年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號	160017
參展科別	物理與天文學
作品名稱	磁懸浮裝置探究及相關參數之探討
得獎獎項	三等獎 國際科學博覽會(ESI)

就讀學校	國立臺南第一高級中學
指導教師	何俊昌
作者姓名	陳仕文

關鍵詞	<u>磁懸浮、渦電流 阻尼</u>
-----	-------------------

作者簡介



我來自台南一中，現為高三學生，是個熱愛物理及探究的人。從有記憶以來，我就很愛自己動手拆卸、組裝東西，讓我在做物理實驗的時候能很輕易的架設出各種實驗裝置。高中階段我發現我對物理有很大的熱忱，並多方涉略了很多競賽。在接觸物理探究的過程之中儘管起初遇到了很多挫折，但一一克服後卻讓我找到了我的興趣所在！

2025 年台灣國際科學展覽會 研究報告

區別：

作品名稱：磁懸浮裝置探究及相關參數之探討

參賽類別：物理與天文學科

關鍵字：磁懸浮、渦電流阻尼

編號：

摘要

本研究主要以磁懸浮為主題，嘗試利用單顆磁鐵及銅板組成的系統使銅板上方的磁鐵得以懸浮，並觀察分析其懸浮狀況與上方磁鐵的姿態。過程中量測了銅板對磁鐵造成的阻力以及下方磁鐵連接在轉盤旋轉時銅板上方的磁場大小與各種參數的關係。本研究主要針對轉盤轉速及銅板厚度作為變因，量測分析了在不同參數組合之下上方磁鐵的移動半徑、傾斜角度、面向方向以及其懸浮狀況。由於目前技術尚未突破至能使上方磁鐵穩定懸浮，因此定義了懸浮係數以說明磁鐵懸浮狀況。最後求出了銅板造成的阻力與磁鐵本身移動速度以及銅板厚度的關係式、磁場強度與轉盤中心距離與銅板厚度或轉速的關係、並以相圖描述了不同參數之下上方磁鐵的懸浮狀況。

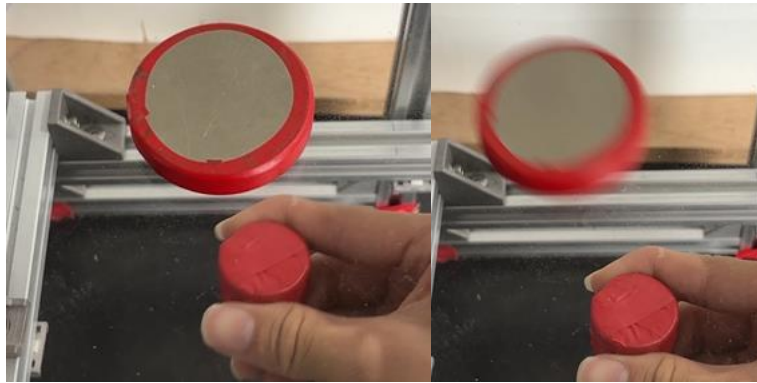
This study focuses on magnetic levitation, attempting to create a system using a single magnet and a copper plate that allows the magnet above the copper plate to levitate. The research observes and analyzes the levitation conditions and the orientation of the magnet above. During the process, we measured the resistance exerted by the copper plate on the magnet, as well as the relationship between the magnetic field strength above the copper plate and various parameters when the magnet below is connected to a rotating platform. This study primarily investigates the rotational speed of the platform and the thickness of the copper plate as variables, measuring and analyzing the movement radius, tilt angle, orientation, and levitation condition of the magnet above under different parameter combinations. Since current technology has not yet advanced to a point where the upper magnet can stably levitate, we defined a levitation coefficient to describe the state of magnetic levitation. Finally, we derived the relationship between the resistance caused by the copper plate, the speed of the magnet's movement, and the thickness of the copper plate, as well as the relationship between magnetic field strength and the distance from the center of the rotating platform in relation to the thickness of the copper plate or the rotational speed, and illustrated the levitation conditions of the upper magnet under different parameters using a phase diagram.

壹、研究題目

本研究主要在研究單顆磁鐵與銅板組成的系統在何種參數及條件下能使銅板上方的磁鐵得以懸浮，以及其懸浮狀況及上方磁鐵的姿態，包含移動半徑以及其傾角與磁鐵面向的方向

貳、研究動機

在實驗室中無意發現當一顆磁鐵放在壓克力板之上，並用另一顆磁鐵從底下靠近時上方的磁鐵會噴飛(如圖(一))；若將壓克力板換成銅板時則可以讓上方的磁鐵短暫懸浮一小段時間，但又隨即向旁邊移走(如圖(二))。即使能讓磁鐵短暫的懸浮，但過程中必須讓操作者隨著上下磁鐵的相對位置及磁鐵的姿態等隨時調整下方磁鐵的位置才能使磁鐵懸浮的久一點。這樣的現象使我想要深入探究是否能僅利用調整一顆磁鐵的移動等及銅板的厚度等參數就使上方的磁鐵成功懸浮。



圖(一):兩磁鐵之間隔著一塊壓克力板。當下方磁鐵嘗試靠近上方磁鐵時上方磁鐵隨即噴飛。(本照片為作者親自拍攝)



圖(二):兩磁鐵之間隔著一塊銅板。當下方磁鐵靠近上方磁鐵時，上方磁鐵會被往上推，隨即產生橫向位移並掉回銅板平面。(本照片為作者親自拍攝)

參、研究目的

- 一、探討下方磁鐵轉速與銅板上量測之磁場大小的關係
- 二、探討銅板厚度與銅板上量測之磁場大小的關係
- 三、量測磁鐵與不同厚度銅板之間造成之阻力
- 四、探討下方磁鐵轉速與上方磁鐵懸浮狀況之關係
- 五、探討下方磁鐵轉速與上方磁鐵位移及姿態之關係
- 六、探討銅板厚度與上方磁鐵懸浮狀況之關係
- 七、探討銅板厚度與上方磁鐵位移及姿態之關係
- 八、繪製移動速度、銅板厚度與磁懸浮關係之相圖

肆、研究方法

一、原理說明

本研究的系統有三個元素:上方磁鐵、下方磁鐵及銅板。下方磁鐵給予斥力、銅板因應磁場的改變而產生渦電流及感應磁場。

由法拉第定律:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

又 $J = \sigma E$ ， J 為面電流密度， σ 為電導率，因此

$$\nabla \times J = -\sigma \frac{\partial B}{\partial t}$$

其中， $\nabla \times J$ 與感應磁場的產生相關。

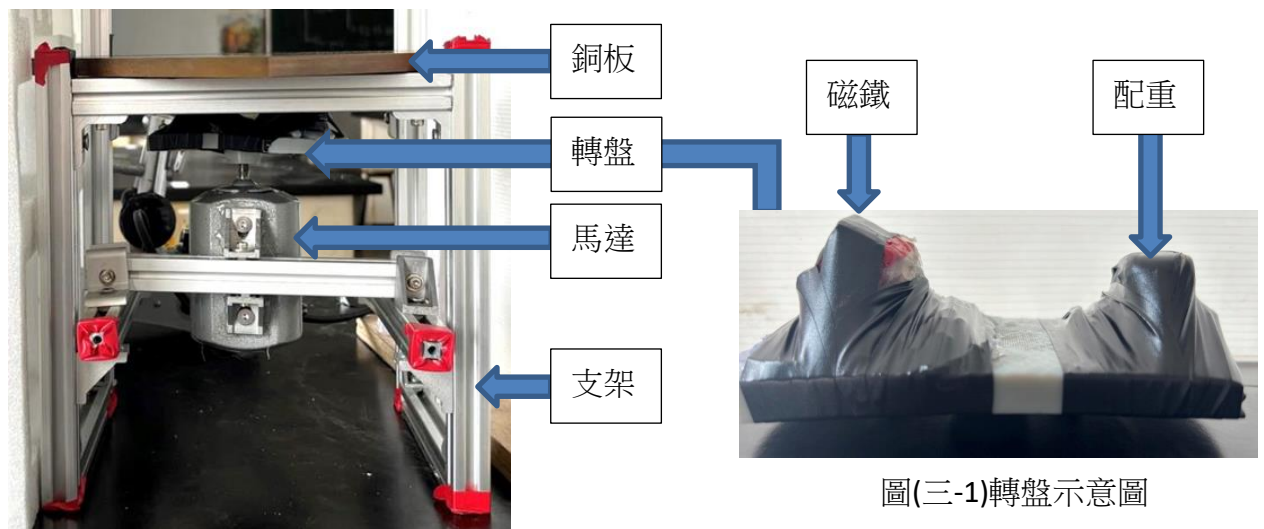
本研究中會造成 $\frac{\partial B}{\partial t}$ 的因素有兩者，分別是小磁鐵在下方規律地轉動以及上方大磁鐵受下方磁場影響所因應的傾斜以及位移。儘管下方小磁鐵會規律的運動，可以產生一個具規律的表面電流密度的分布，但上方大磁鐵由於會因應不同的初始條件(擺放的位置、擺放當下的速度等)而造成不同的電流密度分布，也因此無法直接以理論計算之。但單就定性解釋來講，下方磁鐵在不同的轉速之下銅板上方的磁場強度，因此可以專注於上方磁鐵受到的影響。下方磁鐵轉速越快， $\frac{\partial B}{\partial t}$ 越大，則造成的反向感應磁場越強，導致銅板上方的磁場強度變弱，使上方磁鐵受力變小。其次，當上方磁鐵受磁場作用而運動時，也會產生反向的感應磁場而給予阻力，使移動速度變慢。

從實驗的觀察中可以發現在大磁鐵放到銅板上運動一段時間之後運動狀態趨於穩定，因此計算此穩定狀態下的電流密度分布、銅板因應厚度以及下方磁鐵轉速而產生的感應電流和感應磁場、銅板產生因應上方磁鐵運動的感應磁場對磁鐵造成的阻力是未來的目標，但相關的系數也必須由實驗得出。

二、實驗裝置

(一)實驗裝置示意圖

1.測量磁場強度及上方磁鐵姿態與懸浮狀況



圖(三-1)轉盤示意圖

圖(三)實驗裝置示意圖(本照片為作者親自拍攝)

注意到轉盤上的磁鐵並非垂直指向上，而是有些微的傾斜。其原因是在尋找能使上方磁鐵出現短暫懸浮的現象過程中發現讓下方磁鐵傾斜，調配水平和鉛直方向的力後成功達成能進行探究的現象，因此使磁鐵與 z 軸呈現 30 度的夾角

2.測量磁鐵水平阻力



圖(四)滑輪與配重擺放位置



圖(五)銅板擺放示意圖



圖(六)滑車與磁鐵

(本照片為作者親自拍攝)

銅板擺放高度恰無法碰到滑車上的磁鐵，滑車的其中一端連接著配重

三、研究方法

(一)量測銅板上方磁場

- 1.啟動裝置使馬達開始旋轉並等待一段時間
- 2.以磁場感測器量測旋轉中心上方之磁場
- 3.向外移動 1 公分並重新量測一次直到距離中心點 8 公分為止

(二)測量銅板造成的水平阻力

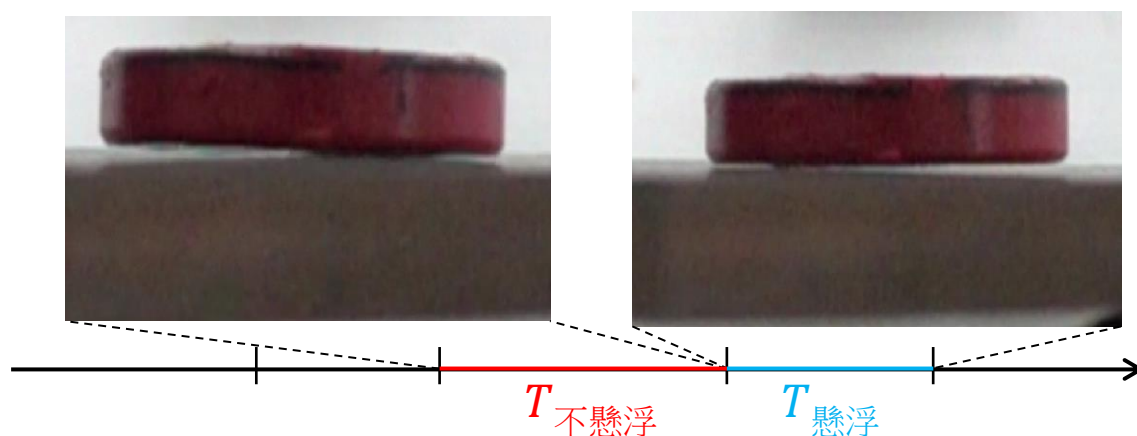
- 1.掛上配重，並將滑車置於銅板之後
- 2.釋放滑車，並以相機記錄其運動

(三)觀測上方磁鐵運動及懸浮狀況

- 1.啟動裝置使馬達開始旋轉，放置磁鐵於旋轉中心點正上方並等待一段時間
- 2.利用攝影機記錄上方磁鐵運動狀態

四、名詞解釋

- 1.轉速:轉盤旋轉時的角速度
- 2.半徑:下方磁鐵中心與轉盤中心的距離
- 3.移動半徑:上方磁鐵中心與轉盤旋轉中心的水平距離
- 4.懸浮係數:由於目前技術尚未突破，磁鐵在裝置運行當下僅能部份時間懸浮，因此定義懸浮係數以描述磁鐵的懸浮狀況。



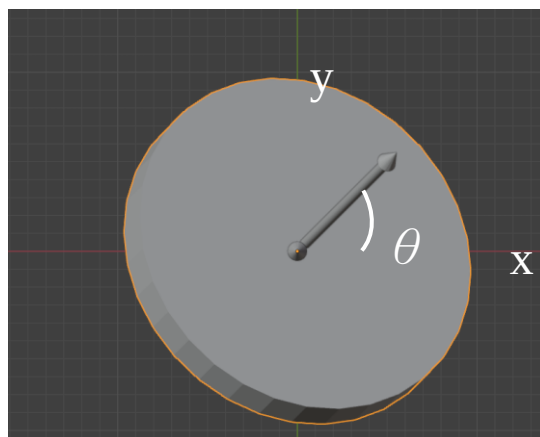
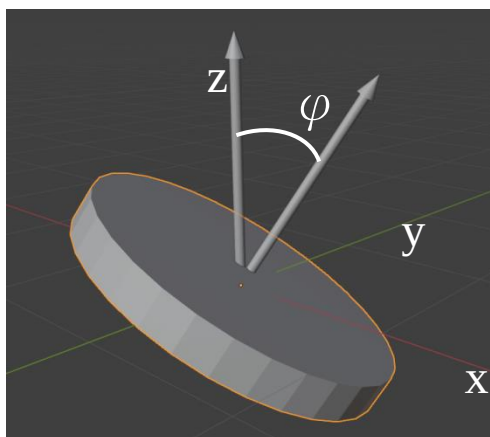
(本圖片為作者親自繪製)

定義懸浮係數(Coefficient of levitation):

$$cl = \frac{T_{\text{懸浮}}}{T_{\text{不懸浮}}}$$

5.上方磁鐵的位置及姿態:

要描述上方磁鐵的姿態可分為位置(x,y,z)與角度(θ, φ)



(本圖片為作者親自繪製)

x, y, z : 磁鐵質心在空間中的座標，以轉盤旋轉中心投影至銅板頂面的點為座標原點(0,0,0)。

φ : 磁鐵頂面的法向量與 z 軸的夾角。物理意義為磁鐵傾斜的程度。

θ : 磁鐵頂面的法向量投影至 xy 平面上所指向的位置，以 $+x$ 為基準點，逆時針為正。物理意義為磁鐵最高點-最低點所指向的方向。

五、變因統整

控制變因:

(一)銅板頂端與轉盤距離:4cm

(二)半徑:2.6cm

操縱變因:

(一)銅板厚度:2/4/6/8/10mm

(二)轉速: 21.2/34.6/35.2/37.7/39.2 (rad/s)

應變變因:

(一)銅板上方案測到的磁場大小

(二)上方磁鐵的姿態(包含移動半徑、 θ 及 φ)

(三)上方磁鐵的懸浮狀況

其中，銅板厚度 10mm，轉速 21.2rad/s 為預設參數。舉例來說，假如改變銅板厚度則轉速固定為 21.2rad/s

六、數據擷取與分析方法

(一)數據擷取方法

1.測量磁鐵與銅板之間的阻力

利用相機記錄滑車的運動後利用影像分析軟體求其終端速度，並可求出磁鐵移動速度與銅板造成之阻力的關係

2.觀測上方磁鐵姿態

如右圖(七)，將攝影機架在實驗裝置的側邊及上方，

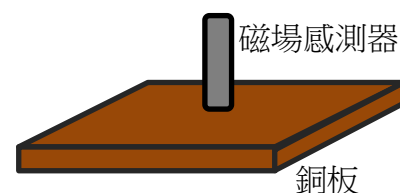


圖(七)相機機位示意圖

並記錄銅板上方的磁鐵的運動狀態並利用影像分析軟體(Tracker)進行進一步的分析

3.量測磁場強度

如右圖(八)，將磁場感測器置於銅板上方，並量測其數值。由於感測器有固有的量測頻率，且下方轉盤持續在轉動，因此採用量測到的數值的最大值進行後續的作圖及分析

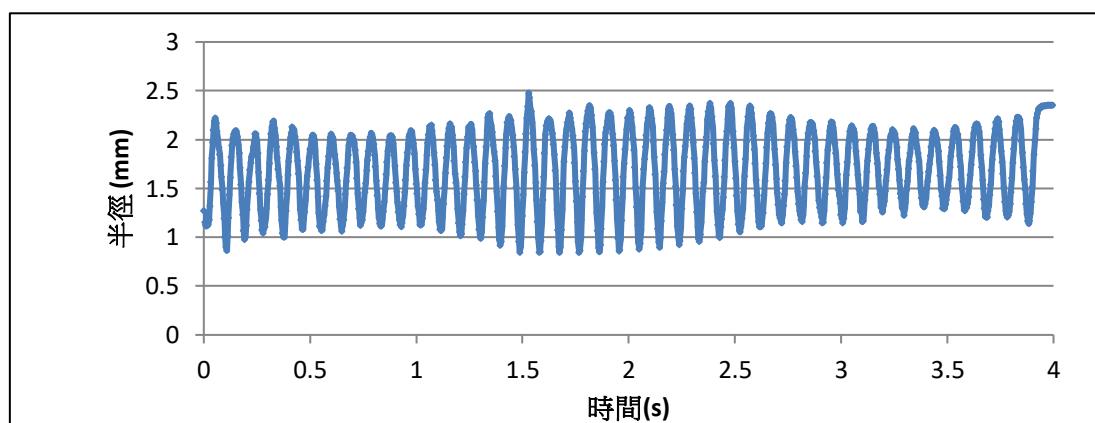


圖(八)銅板與磁場感測器相對位置示意圖
(本圖片為作者親自繪製)

(二)數據分析方法

1.移動半徑

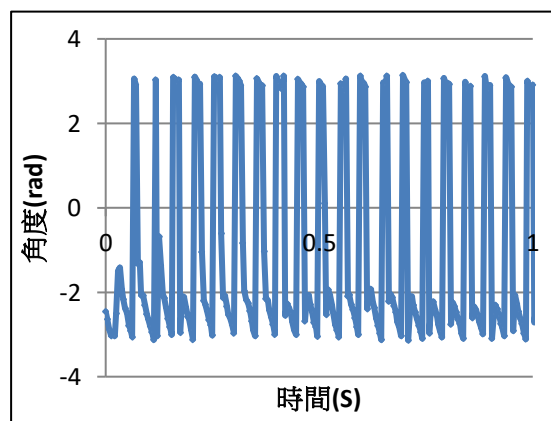
圖(九)為移動半徑隨時間關係圖，將其取平均後即為平均移動半徑



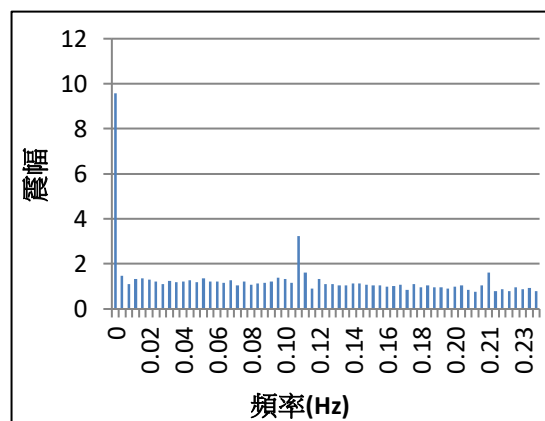
圖(九)移動半徑例圖

2. θ 及 φ

圖(十)及圖(十一)分別代表角度隨時間的關係圖及經過傅立葉變換後得到的頻率與震幅關係圖。可以看到圖(十一)中有三個峰值。本研究分析 θ 與 φ 的方法為擷取經傅立葉轉換後得到的峰值所對應的頻率後與同組變因進行比較與分析。



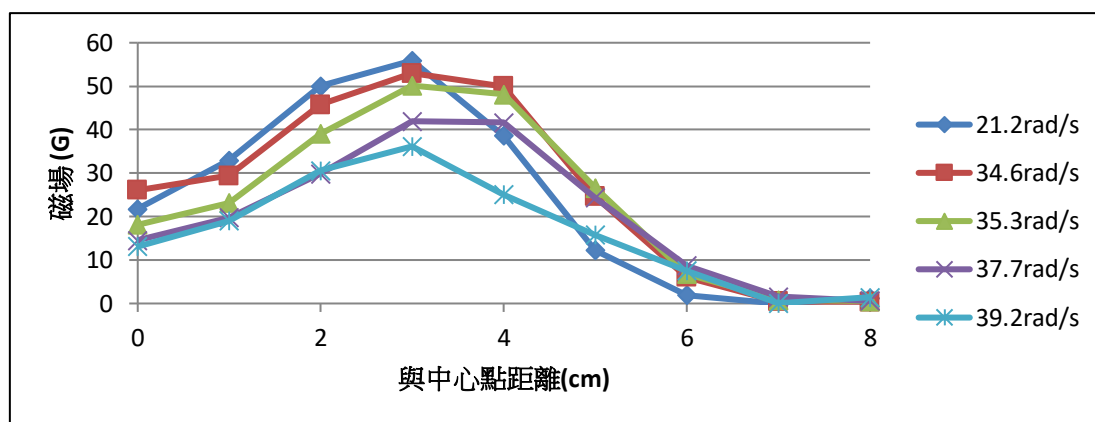
圖(十)角度與時間關係例圖



圖(十一)將圖(十)作傅立葉轉換

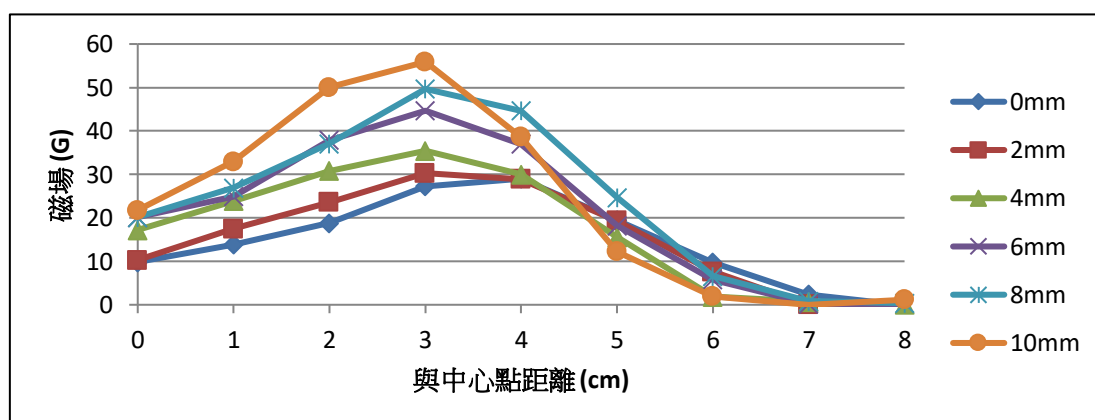
伍、初步研究成果

一、銅板上方磁場

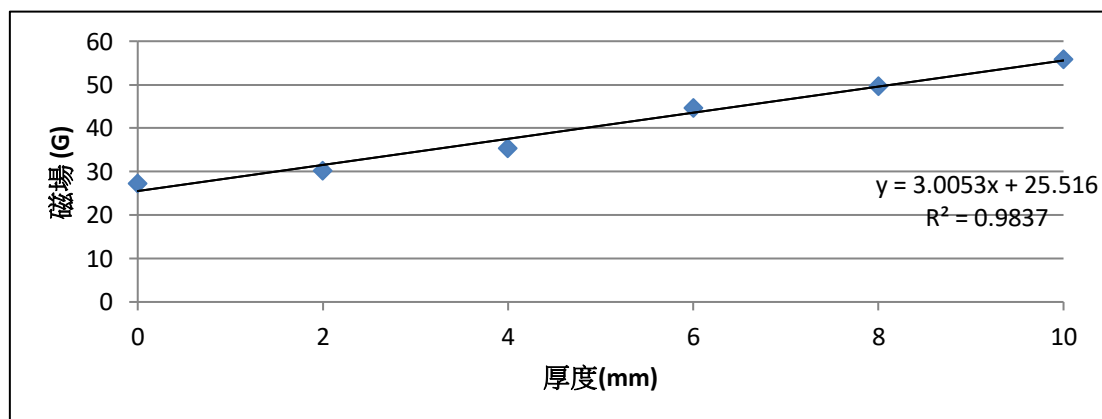


圖(十二)不同轉速與磁場強度隨距中心點距離關係圖

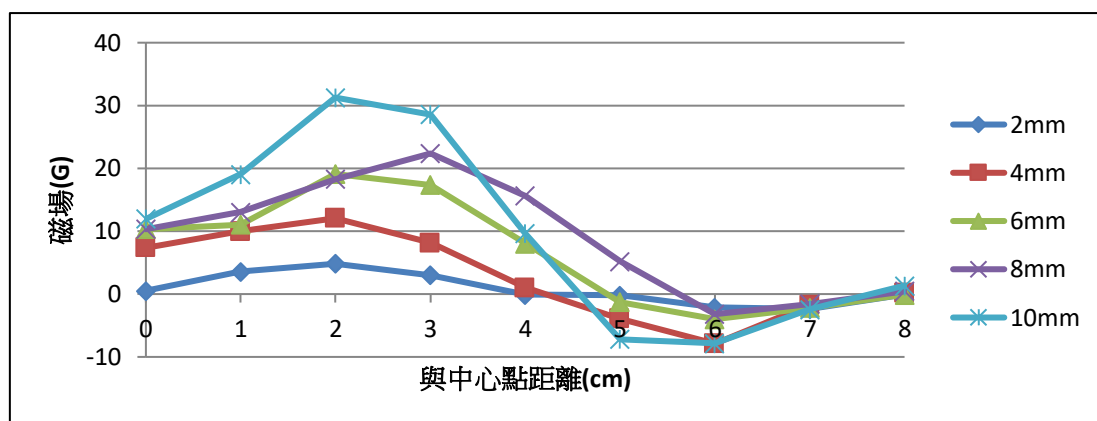
由法拉第定律： $\nabla \times \mathbf{J} = -\sigma \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$ (其中 $\mathbf{J}$ 為面電流密度， σ 為電阻率)，可知，當轉速越高時 $\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$ 會越高，進而造成 $\nabla \times \mathbf{J}$ 越小，使銅板上方量測到的磁場隨著轉速提升而變小。



圖(十三)不同銅板厚度與磁場強度隨距中心點距離關係圖



圖(十四)將圖(十三)中距中心 3cm 處之磁場與銅板厚度關係作圖



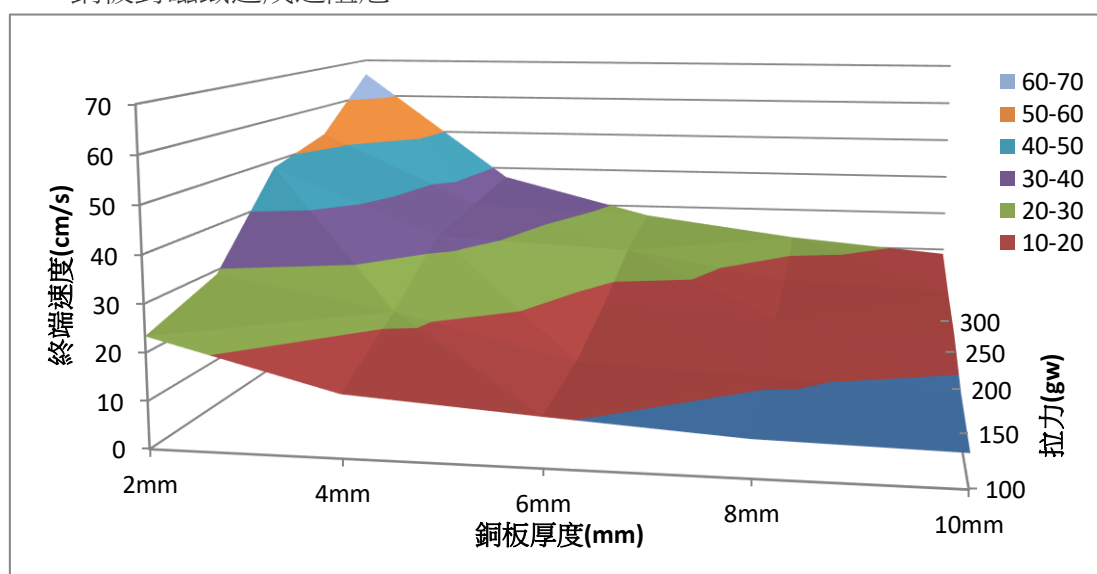
圖(十五)將圖(十三)中各數據點與 0mm 厚所量測之磁場相減

由圖(十三)可以知道隨著銅板厚度越厚，銅板上方測得的磁場越大。並且針對磁場最大值發生的地方，也就是距離轉軸中心 3cm 處的磁場強度對銅板厚度作圖，可得到圖(十四)。可以發現磁場強度隨銅板厚度呈現線性關係，且截距即為中間並未隔著銅板時單純由磁鐵本身產生的磁場。

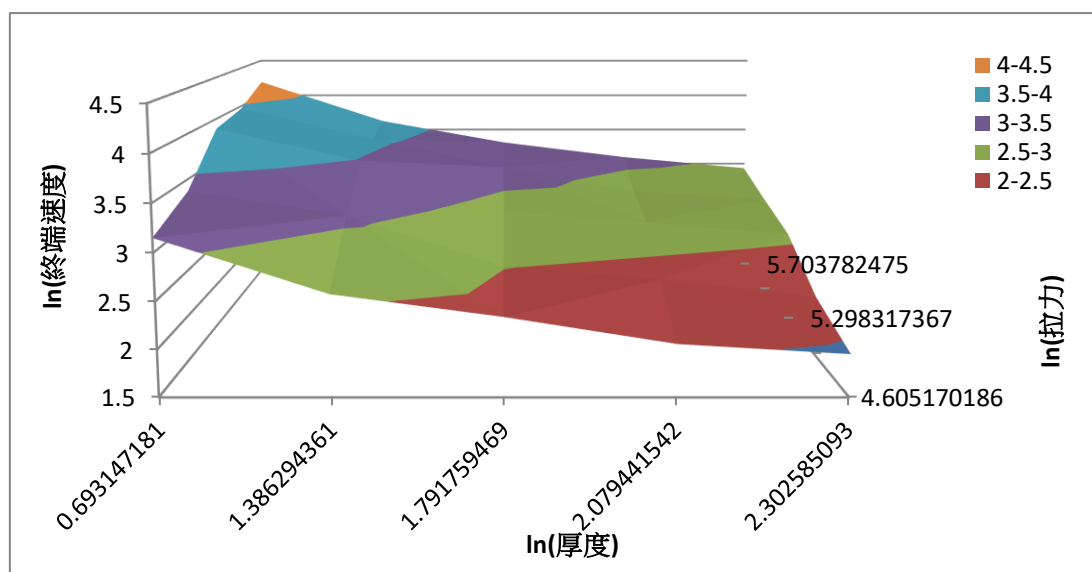
將圖(十三)中各點數據與銅板厚度 0mm，也就是並未隔著銅板的數據相減，可以得到單純由銅板造成的磁場大小，即圖(十五)。可以發現在距離中心 4-5cm 處時銅板造成的磁場方向發生改變，也就是磁力線穿過銅板的方向在那距離區間前後有所不同。此外，磁場最大值發生在距離中心 3cm 處，但銅板造成的磁場最大值發生在距離中心 2cm 處。其原因皆因為下方磁鐵並非正立，而是有 30 度的傾斜。

照常理來說，銅板受磁場產生的渦電流應為相反於磁場本身的方向，但實驗中量測到的卻相反，從後續實驗觀察到的現象皆能以此實驗結果解釋，代表此實驗量測的結果是準確的。造成此現象的背後原因還不清楚，為未來探究之目標。

二、銅板對磁鐵造成之阻尼



圖(十六)銅板厚度、拉力與終端速度關係圖



圖(十七)ln(銅板厚度)、ln(拉力)與 ln(終端速度)關係圖

由圖(十六)可看到，銅板厚度越厚，達成相同拉力所需要的速度越小。換句話說，相同移動速度下，越厚的銅板給予的阻力越大。

將圖(十六)中的厚度、拉力及終端速度取自然對數可得到圖(十七)，並透過二元線性迴歸分析求出三者的關係

令 x 為 $\ln(\text{厚度})$ ， y 為 $\ln(\text{終端速度})$ ， z 為 $\ln(\text{拉力})$ 。經回歸分析後得

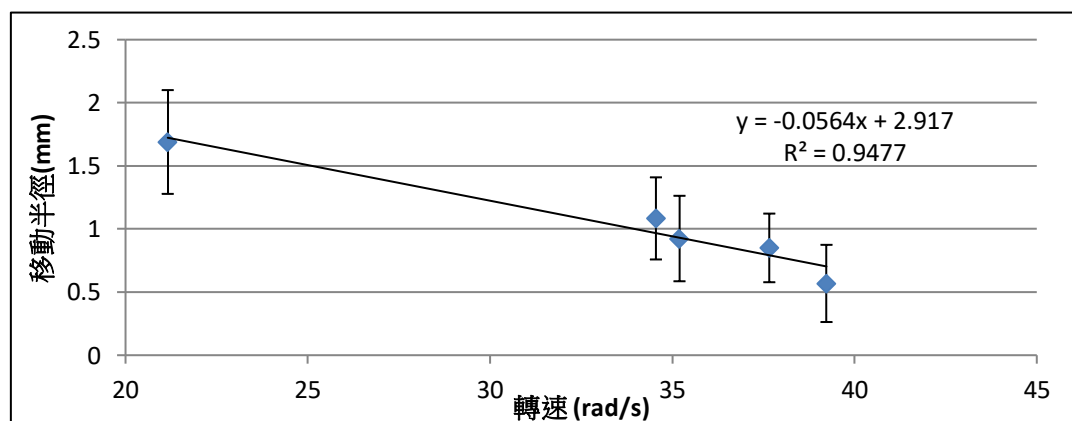
$$z = 0.9315 + 0.7942x + 1.0011y, R^2 = 0.9525$$

R^2 顯示此擬合平面與實驗數值吻合。將上式反推回阻力與移動速度、銅板厚度的關係，可得

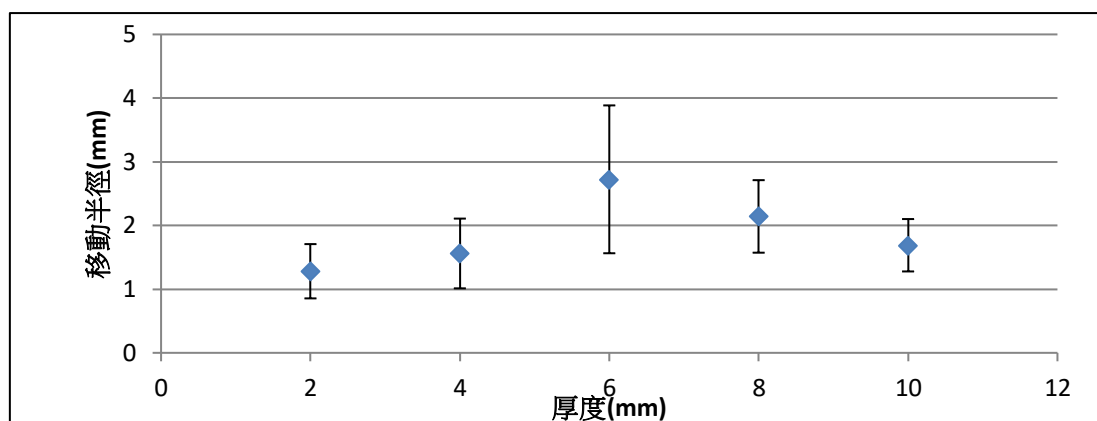
$$F = e^{0.9315} * d^{0.7942} * v^{1.0011}$$

其中 F 為銅板造成之阻力(gw)； d 為銅板厚度(mm)； v 為磁鐵在銅板上的移動速度(cm/s)。

三、不同參數下上方磁鐵的姿態



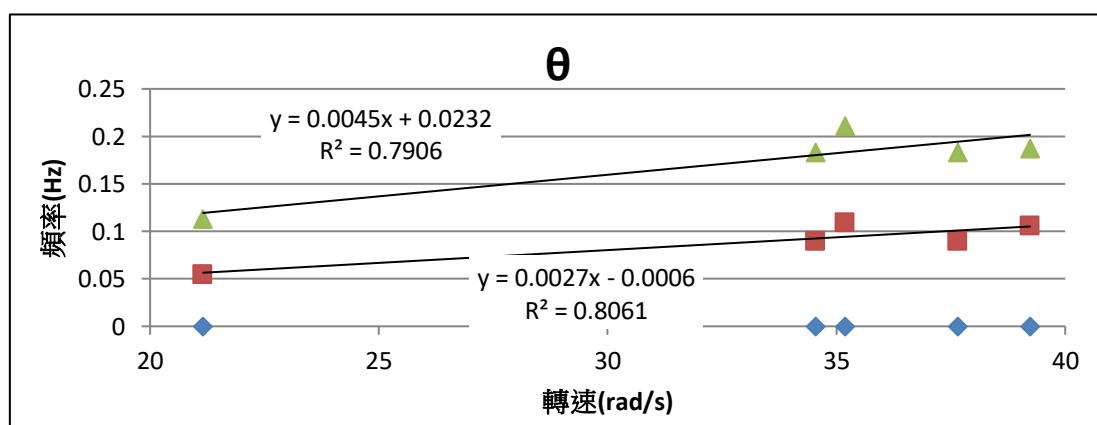
圖(十八)上方磁鐵平均移動半徑與轉速關係圖



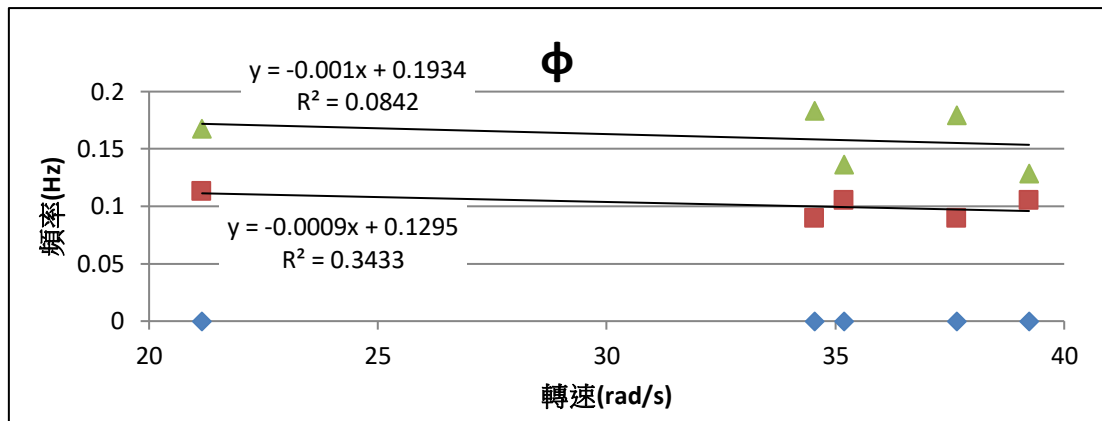
圖(十九)上方磁鐵平均移動半徑與銅板厚度關係圖

由圖(十八)可以看到隨著轉速增加，磁鐵的移動半徑減少，且與轉速呈線性關係。配合結果(一)可以知道隨著轉速增加，銅板上方的磁場減少，上方磁鐵所受到的水平推力也隨之減少。且因為轉速更高，上方磁鐵會更快的受到轉盤轉到另一邊時所提供的反向推力，因而造成移動半徑減小。

由圖(十九)可以看到移動半徑的趨勢在銅板厚度為 6mm 時發生轉折，其原因可以從結果(一)及結果(二)推論。由結果(一)可知隨著銅板厚度增加，銅板上方的磁場也隨之增加，因此上方磁鐵受力增加而讓移動半徑變大。但是由結果(二)可以看到銅板厚度越厚，上方磁鐵移動時受到的阻力越大，而使移動半徑減小。因此在兩因素共同影響之下使移動半徑在銅板厚度為 6mm 時最高，而大於或小於 6mm 時移動半徑都減小。



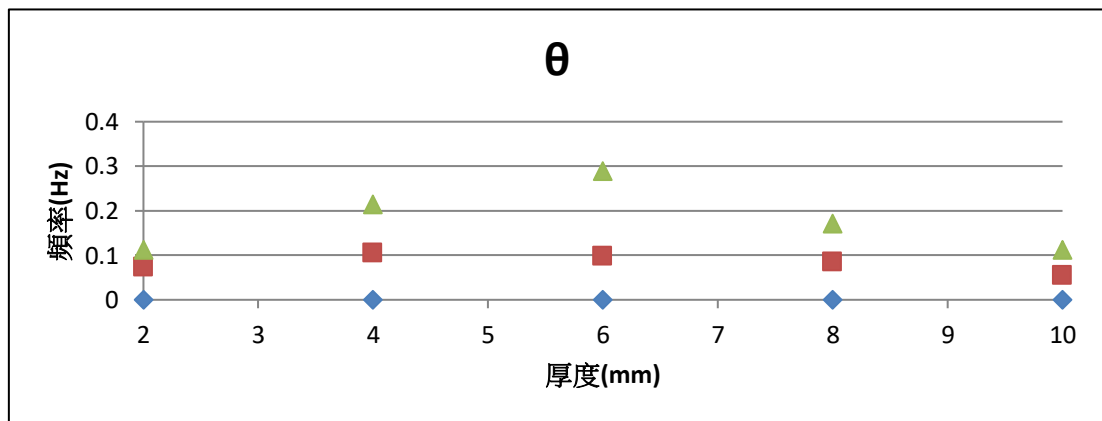
圖(二十) θ 經傅立葉轉換後與轉速關係圖



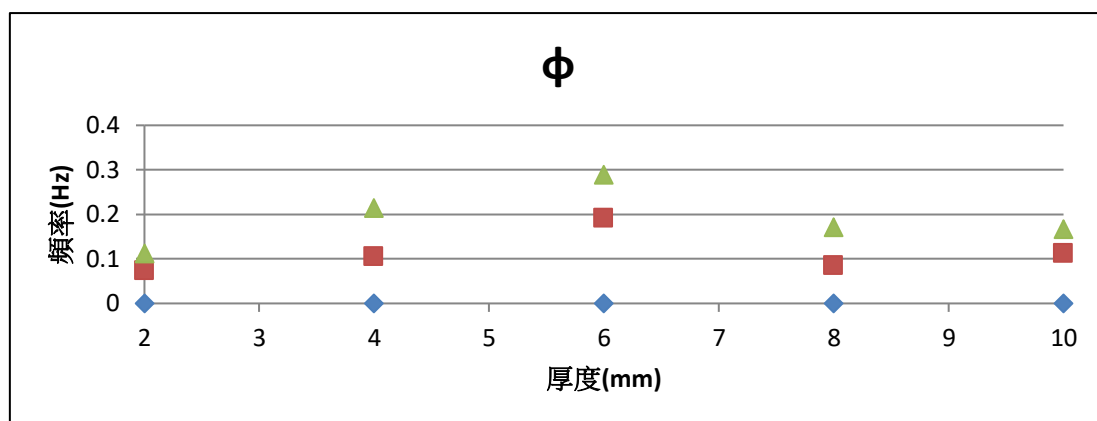
圖(二十一) ϕ 經傅立葉轉換後與轉速關係圖

隨著轉速越大， $\theta(t)$ 經過傅立葉轉換後得出的峰值所對應的頻率越高。由於 θ 為上方磁鐵最高點-最低點連線，而最高點又會隨著下方轉盤磁鐵的位置而產生改變，因此隨著轉速增加， $\theta(t)$ 改變的越快，經傅立葉轉換後得出的峰值對應的頻率也就越高

藉由趨勢線的斜率以及 R^2 可以得知 $\phi(t)$ 無明顯的隨轉速改變而產生的差異及關係。由於 ϕ 為上方磁鐵的法向量與 z 軸夾角，也就是翹起來的程度，是由下方磁鐵將其中一邊向上推起後又隨即向下這個過程所產生的角度改變。因此在銅板厚度不改變，只改變轉速的情況之下這個過程作用的時間不會相差太多，也就是 $\phi(t)$ 經傅立葉轉換後峰值對應的頻率不會隨著轉速增減而有明顯的差異。



圖(二十二) θ 經傅立葉轉換後與銅板厚度關係圖

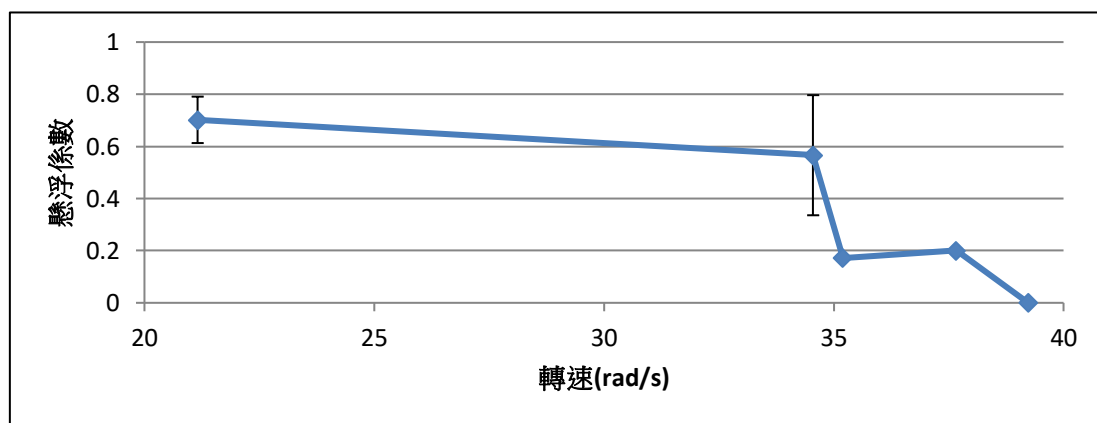


圖(二十三) ϕ 經傅立葉轉換後與銅板厚度關係圖

$\theta(t)$ 經傅立葉轉換後的頻率與銅板厚度的關係在銅板厚度為 6mm 時出現了峰值，與改變轉速得出的結論有出入。推測原因為銅板產生的渦電流所造成的合力與下方磁鐵的位置及造成的力產生了相位差，即渦電流產生的磁場最大值的位置與下方磁鐵的位置不同，因此才出現此結果。

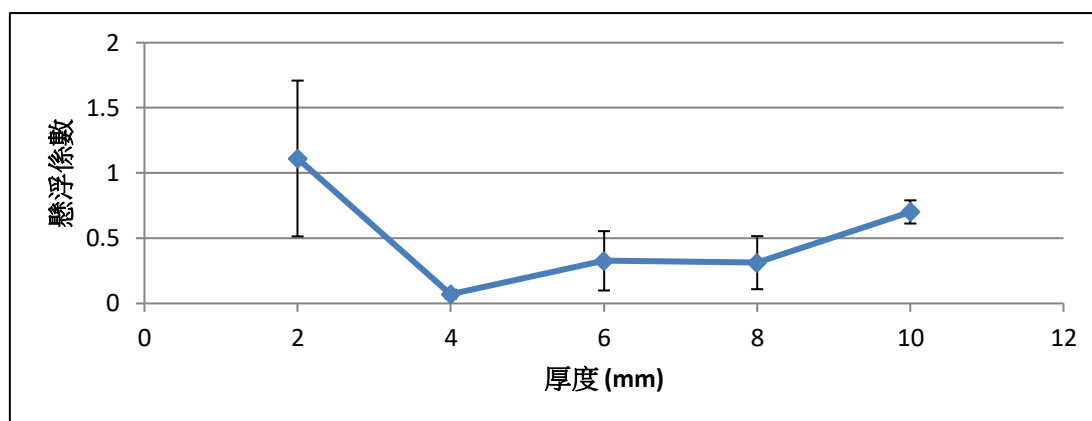
$\varphi(t)$ 也同樣有峰值出現在銅板厚度為 6mm 的原因推測與結果(一)的移動半徑會在銅板厚度為 6mm 出現峰值一致。由於 $\varphi(t)$ 是下方磁場造成的上推與上方磁鐵下傾時銅板給予的阻力共同控制的，因此磁場隨銅板厚度增加而變大與阻力隨銅板厚度增加而增加兩者交互使 $\varphi(t)$ 經傅立葉轉換後得到的峰值的頻率在銅板厚度為 6mm 時達到最大。

四、不同參數下上方磁鐵的懸浮情形



圖(二十四)懸浮係數與轉速關係圖

由結果(一)可以知道當轉速越高，銅板上方的磁場會越弱。由於磁鐵要懸浮必須要抵抗其本身的重量，因此當磁場越弱，則能滿足磁鐵懸浮條件的磁場大小的位置會越往下(接近下方轉盤上的小磁鐵)，而使懸浮狀況趨於不穩定，也就是轉速為 34.6rad/s 的數據點有如此大的誤差線的原因。當轉速越來越高，使能支撐磁鐵懸浮的磁場大小出現的位置低於銅板本身的平面時磁鐵就完全浮不起來，也就是轉速為 39.2rad/s 時懸浮係數為 0 的原因。



圖(二十五)懸浮係數與銅板厚度關係圖

由結果(一)可以知到當厚度越厚時磁場越強，因此懸浮狀況會越穩定，懸浮係數也越高。至於銅板厚度為 2mm 時懸浮係數突然增大的原因推測是因為銅板厚度太薄，對上方磁鐵造成的阻力很小，使磁鐵本身很容易被突然推起。在實驗中觀察到厚度為 2mm 時磁鐵不太像是被轉盤與銅板造成之磁場平滑的推起，產生懸浮現象，而是很突然的跳起來再落下。其現象本身出現的頻率就很不穩定，才造成如此大的誤差線。

陸、研究結論與未來展望

一、研究結論與討論

(一)實驗結論

- 1.當銅板厚度增加或轉速增加時，銅板上方所測得的磁場大小增加
- 2.轉盤旋轉所造成的磁場在距離旋轉中心 3 公分處有最大值；銅板因應磁場改變而產生的感應磁場在距離旋轉中心 2 公分處有最大值，並且在距旋轉中心 4 到 5 公分處由正轉負。其原因為下方磁鐵有 30 度的傾角
- 3.經過二元線性迴歸分析後得出銅板造成的阻力與磁鐵移動速度及銅板厚度的關係為:

$$F = e^{0.9315} * d^{0.7942} * v^{1.0011}$$

說明隨著銅板厚度與移動速度增加，銅板造成的阻力隨指數增加。

- 4.對上方磁鐵移動半徑及轉盤轉速進行作圖，得回歸直線方程式 $y = -0.0564x + 2.917$ ， R^2 為 0.9477，可說明移動半徑與轉速在 21.2~39.2rad/s 區間呈線性關係；將移動半徑對銅板厚度作圖，圖形在銅板厚度為 6mm 時有峰值

5. $\theta(t)$ 經傅立葉轉換後的峰值頻率與轉速呈現正相關，而 $\varphi(t)$ 則和轉速無明顯關聯；兩者皆與銅板厚度有關連且峰值頻率與銅板厚度的關係在銅板厚度為 6mm 時有峰值

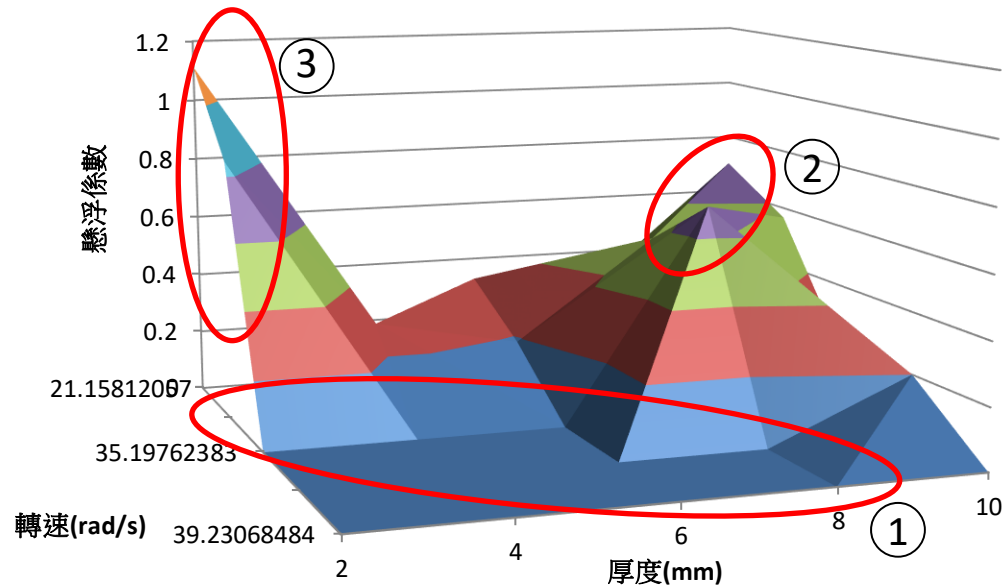
- 6.銅板厚度改變造成的阻尼以及磁場大小改變共同影響著整體的現象，但在不同的厚度區間這些改變造成影響的程度有所不同。藉由上述實驗可推測整個系統的現象在銅板厚度大於或小於 6mm 時由不同的機制主

導，即改變銅板厚度時造成圖形趨勢不同的主要原因：

- 銅板厚度大於 6mm:銅板厚度不同造成不同的阻尼影響最大
- 銅板厚度小於 6mm:磁鐵及不同銅板厚度造成的磁場改變影響最大

(二)相圖

將轉速、銅板厚度與懸浮係數組合起來繪製成相圖



圖(二十六)轉速、銅板厚度與懸浮係數關係圖

其中，這張相圖有三個值得注意的點(圖中紅圈處)

- ①:隨著轉速增加，磁場強度減弱；隨著銅板厚度增加，磁場強度變強，兩者互相影響而出現一個邊界，此些參數所產生之邊界所相對應的磁場為能使上方磁鐵出現懸浮現象的最小磁場強度。
- ②:紅圈處出現類似於稜線的形狀，代表著有一個最佳的銅板厚度與轉速的比例能使懸浮係數達到峰值。如先前提到的銅板厚度與轉速共同影響磁場強度，但在達成懸浮這件事上還有一個重要的因素是銅板厚度所造成的阻力，因此銅板厚度太厚時反而不利於磁鐵懸浮，才沒有使懸浮係數的極大值皆出現在銅板厚度為 10mm 的線上
- ③:在銅板厚度為 2mm 時懸浮係數激增，原因是銅板本身能造成的阻力太小，上方磁鐵更接近於突然被磁場推起來再落下，而非如在其他銅板厚度下平滑的被推起再落下

二、未來展望

- (一)完善理論推導及數值模擬，並與實驗結果進行擬合
- (二)設計實驗，使上述每個由實驗結果推測背後的原因得到確認
- (三)增加實驗組數使數據點更密、涵蓋範圍更廣

- (四)使技術突破，讓磁鐵能夠穩定的懸浮而非短暫的浮空
- (五)完善相圖，找出所有懸浮條件的邊界
- (六)使磁懸浮的狀況可由初始的參數進行準確預測

柒、參考資料

- 一、M. Bonvalot, P. Courtois, P. Gillon, and R. Tournier. Magnetic levitation stabilized by eddy currents. J. Magn. Mater. 151, 1-2, 283-289 (1995)
- 二、C. Elbukem, M. B. Khamesee, and M. Yavuz. Eddy current damping for magnetic levitation: Downscaling from macro- to micro-levitation. J. Phys. D: Appl. Phys. 39, 18, 3932-3938 (2006)
- 三、G. Sinha and S. S. Prabhu. Analytical model for estimation of eddy current and power loss in conducting plate and its application. Phys. Rev. ST Accel. Beams 14, 6, 062401 (2011)
- 四、Eddy Current Levitation (Harvard Natural Sciences Lecture Demonstrations), <https://sciencedemonstrations.fas.harvard.edu/presentations/eddy-current-levitation>
- 五、S. Palagummi, F.-G. Yuan. (2016). Magnetic levitation and its application for low frequency vibration energy harvesting. Structural Health Monitoring (SHM) in Aerospace Structures. Elsevier
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100148-6.00008-1>
- 六、Wikipedia: Magnetic levitation, https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_levitation
- 七、Wikipedia: Faraday's law of induction, https://en.wikipedia.org/wiki/Faraday%27s_law_of_induction

【評語】 160017

1. 以由單顆磁鐵及銅板組成的系統達到置於銅板上方的磁鐵得以懸浮，分析懸浮及磁鐵的姿態，以懸浮係數說明磁鐵懸浮狀況。
2. 雖能藉由紀錄上方磁鐵的移動半徑、傾斜角度、面向，計算銅板造成的阻力及磁鐵移動速度與銅板厚度的關係式，以相圖描述了參數改變對懸浮的影響。建議可以進一步就達到穩定懸浮之條件及在銅板引發的渦電流，再做探討，亦可發展成實驗課教材。