

中華民國第 61 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

第一名

探究精神獎

051812

週期性變化磁場對複合磁體磁浮特性的影響

學校名稱：臺北市立麗山高級中學

|               |                     |
|---------------|---------------------|
| 作者：<br>高二 邱子宸 | 指導老師：<br>徐志成<br>張良肇 |
|---------------|---------------------|

關鍵詞：磁浮振盪、鐵磁磁化、渦電流

## 得獎感言

首先，感謝我的指導老師和父母，不辭辛勞地陪我一起走過這段日子，也特別感謝評審給我們的建議和引導，讓我有機會能夠從更專業的角度審視自己的作品。

一年半前開始研究只為了完成學校專題研究的課程，完全沒有預期往後的所有比賽機會。回首最初做科展的過程，從零開始、自己研究、觀察，也沒有前人來替我們開路，只能自己摸索。路途中，曾經以為這個題目沒有未來了，卻捨不得這一路的心血，每次趕在截止日前在實驗室令人身心俱疲的戰鬥和實驗失誤後的沮喪總是把我推向放棄的邊緣。然而，家人的協助扶持、老師的一路相挺、設備組長的辛苦帶隊，都是我堅持下去的助力。過程雖然艱辛，但每次實驗完成的喜悅讓一切變得值得，終於在努力中開闢一條道路，得以繼續前行。

科展最重要的不是比賽，而是相互學習。從獎助計畫一路到全國科展的大舞台，見識到越來越多組的優秀作品，才讓我大開眼界。除了更了解自己的不足，也以更謙虛的態度研究。

除了學習吸收資訊，在研究後的成果呈現也相當費工夫。在競爭激烈的全國科展，我告訴自己，研究內容或許不是最傑出的、完成的簡報作品或許不是最出色的，但有特別的發現和血汗的痕跡。

科展不是頂尖學校的專利，成績好壞，並非是研究成功的主因，能夠抱持著熱忱的心與堅毅的態度才是關鍵，因為挫折總是緊跟在失敗之後，但是，突破瓶頸之後換來的微笑與成就感，是非常值得珍藏的收穫，而思考邏輯的成長，更是我蛻變後的展現。

# 摘要

此研究期望找到穩定磁浮的方法及探討產生磁浮振盪的變因。首先利用吸附上鐵材的磁浮體，觀察其造成的磁浮減震。實驗過程藉由變動磁場，發現週期性變動的磁通量對鐵磁體的磁化及渦電流產生影響，進而改變磁振盪振幅及阻尼係數。研究結果得知磁場的交流頻率越大，會導致磁浮體所受斥力增加且鐵磁體形成的減振效果減緩。另外，複合磁體中受硬磁磁化的鐵磁體在頻率到達一定區間時才能觀察到渦電流的影響，而此區間受複合磁體排列、磁化強度等變因控制。

## 壹、 研究動機

本研究觀察磁浮體運動是否受到磁場的變化影響，針對磁浮振盪進行運動分析，有助於未來儲能、避震、磁鉗等科技的發展。為找出能減緩磁振盪的方法，在實驗過程中發現吸附鐵磁性物質成效佳，且得到不均勻磁場轉動造成減阻效果下降的特殊結果，因而特別針對週期性變動磁場的實驗結果進行探討。

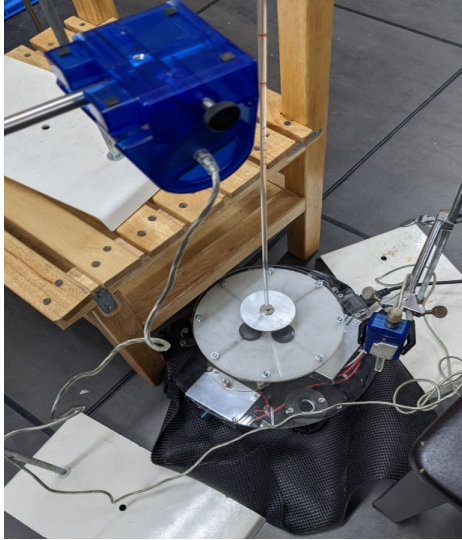
## 貳、 研究目的

- 一、探討吸附鐵片後鐵磁體受反向磁場磁化對振盪振幅的影響
- 二、觀察磁場變動頻率與鐵磁體磁化強度之關係
- 三、研究變動磁場對磁浮高度的影響
- 四、研究不同材質、堆疊方式的複合磁體影響變動磁場下磁浮高度及阻尼係數
- 五、探討鐵磁性金屬通過的外加磁場大小對渦電流形成頻率的影響

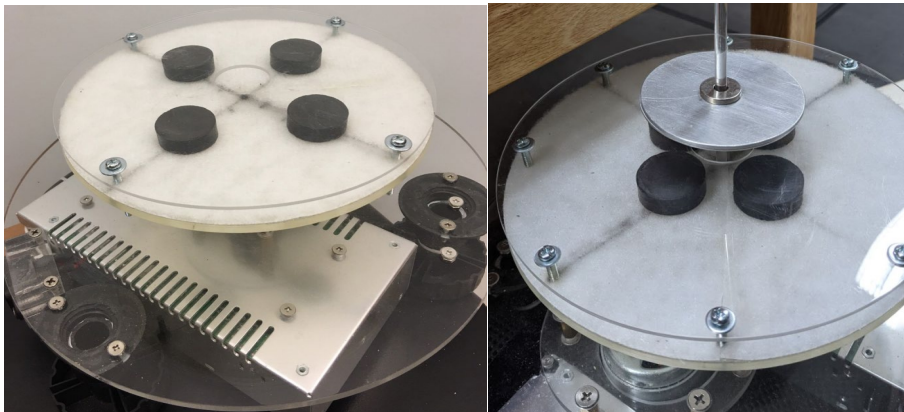
## 參、 研究設備及器材

### 一、 實驗器材

#### (一) 裝置實圖



#### (二) 器材分項\_磁浮載具及測量儀器



在馬達上加裝四顆磁場大小為 1200 高斯的永久磁鐵轉動



PASCO 磁場、位移、應力感測儀

### (三)器材分項\_磁浮體結構

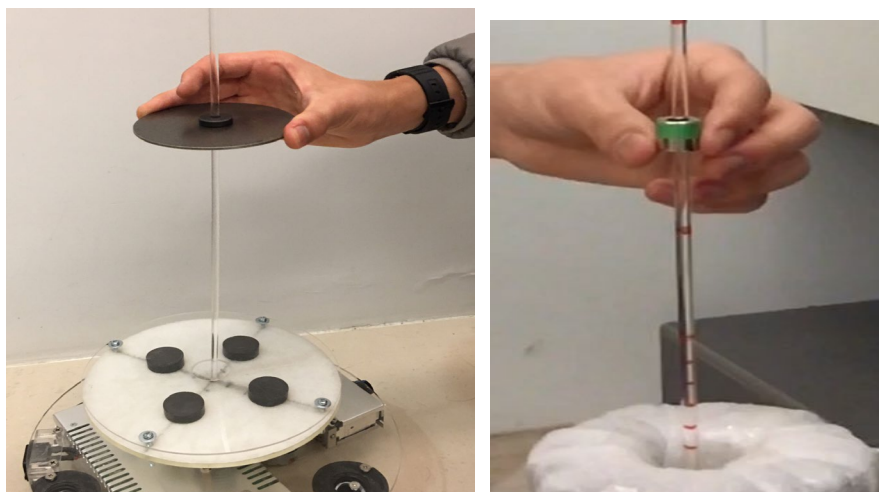


磁場大小為 2400、1500、1358 高斯的鈷鐵硼磁鐵



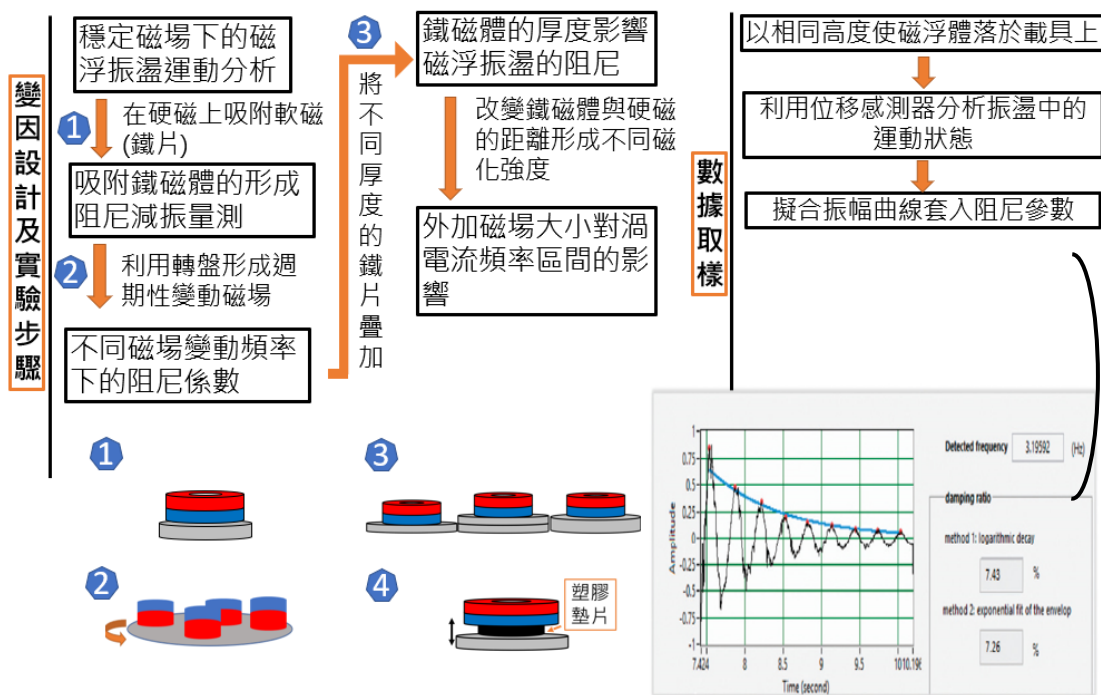
利用硬磁吸附鐵、鋁、銅等方式組成複合磁體，實驗利用半徑及厚度 3cm\*1mm、3cm\*2mm、5cm\*1mm 的三種金屬

### (四)實驗實圖



## 肆、研究過程或方法

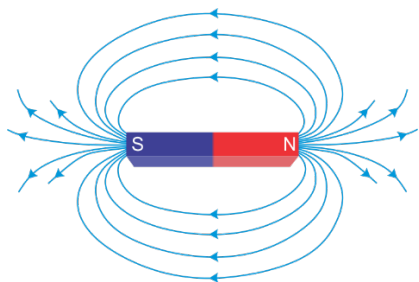
### 一、實驗流程



得到振盪圖形後利用自然對數擬合套入參數求得阻尼比

### 二、相關原理及公式

#### (一) 磁力



兩個條形磁鐵之間的力:

兩個排斥圓柱條形磁鐵的磁場，端對端放置的兩個相同的圓柱形棒狀磁體之間

的力大約為:

$$F \approx \left[ \frac{B_0^2 A^2 (L^2 + R^2)}{\pi \mu_0 L^2} \right] \left[ \frac{1}{x^2} + \frac{1}{(x + 2L)^2} - \frac{2}{(x + L)^2} \right]$$

$B_0$  是非常接近每個極的磁通密度，單位為 T

A 是每個極的面積，以  $m^2$  為單位

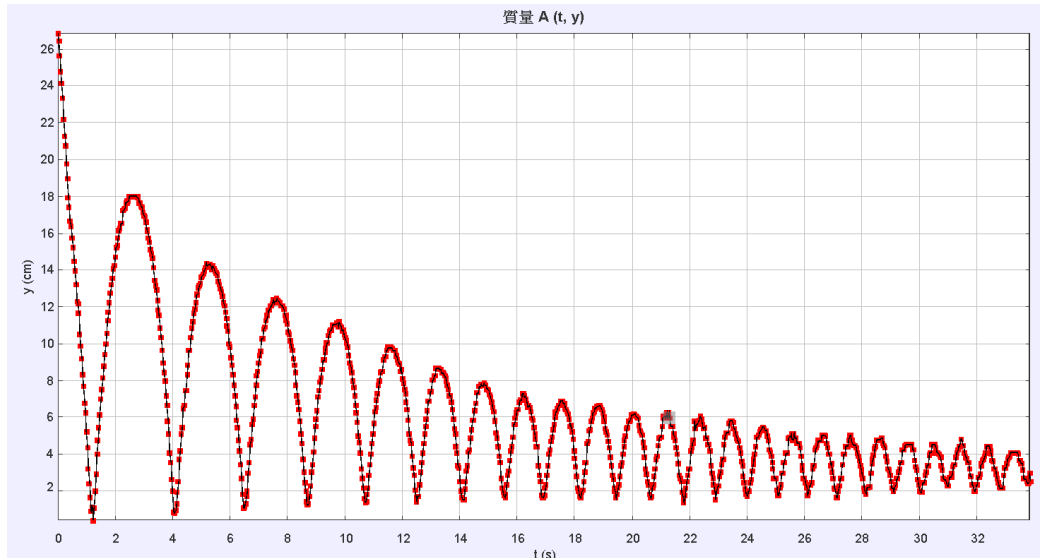
L 是每個磁鐵的長度，以 m 為單位

R 是每個磁體的半徑，以 m 為單位

x 是兩個磁體之間間隔，以 m 為單位

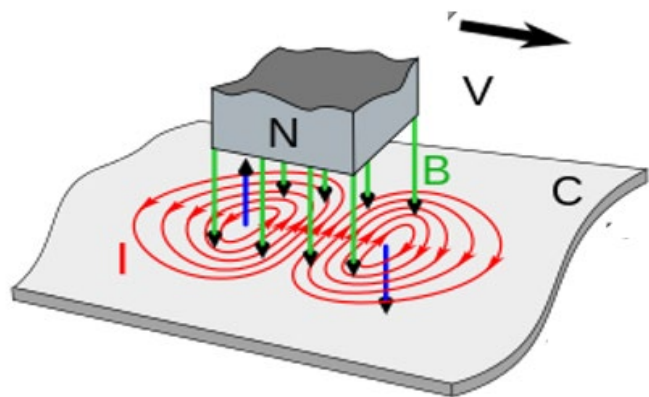
## (二) 磁浮振盪:

由於磁力會隨距離而改變(反比於距離平方)，在當磁力與外力平衡時，磁鐵受力或產生位移，會產生如同彈簧受力般的振盪。但由於同向磁力隨著振盪的距離減小，磁鐵的振盪並非簡諧運動，重力與磁力交互作用下的磁振盪  $x-t$  圖的曲線如下:(初步實驗結果)



## (三) 渦電流:

為金屬材料內電子環狀移動的現象。由於一個移動的磁場與金屬導體相交，或是由移動的金屬導體與磁場垂直交會所產生，但在理想勻強磁場中不會產生渦流。本研究利用轉動中的磁場影響固定的鐵材，讓鐵材上渦電流產生面積更大，且磁場變動頻率更高。





$$P = \frac{\pi^2 B_p^2 d^2 f^2}{6k\rho D}$$

P: 每單位質量的功率損耗 (W / kg) / B<sub>p</sub>: 峰值磁場 (T)

d: 薄片的厚度或線的直徑 (m) / F: 頻率 (Hz)

K: 一個常數，對於薄板等於 1 ρ 是材料的電阻率 (Ωm)

D: 材料的密度 (kg / m<sup>3</sup>)

#### (四) 鐵磁性

一個物質的晶胞中所有的磁性離子均指向它的磁性方向時才被稱為是鐵磁性的。若其不同磁性離子所指的方向相反，其效果能夠相互抵消則被稱為反鐵磁性。若不同磁性離子所指的方向相反，但是有強弱之分，其產生的效果不能全部抵消，則稱為亞鐵磁性。

假設施加外磁場，形成有可能相當強烈的磁化向量與其感應磁場。隨著外磁場的增高，磁化強度也會增高，直到「飽和點」，淨磁矩等於飽合磁矩。這時，再增高外磁場也不會改變磁化強度。假設，現在減弱外磁場，磁化強度也會跟著減弱。但是不會與先前對於同一外磁場的磁化強度相同。磁化強度與外磁場的關係不是一一對應關係。磁化強度比外磁場的曲線形成了磁滯迴線。

#### (五) 阻尼振盪

阻尼的力學模型一般是一個與振動速度大小成正比，與振動速度方向相反的力。如果物體受到一個和速率成正比的阻滯力，使其運動方程式為

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F = -kx - m\lambda \frac{dx}{dt}$$

此處 dx / dt 的係數中，m 是為了方便而加入的，λ 稱為 阻尼係數。整理使得到



$$\frac{d^2x}{dt^2} + \lambda \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0$$

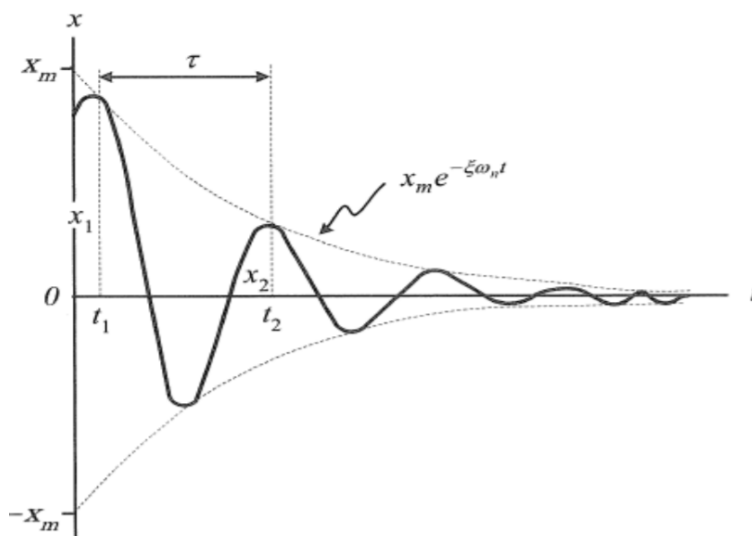
以式

$$x = x_0 \cos(\omega t + \delta)$$

代入(1)式，可以求出運動的角頻率  $\omega$ 。物體是否作振盪，視  $\lambda$  與  $\omega_0$  的關係而定

根據本研究實驗結果推斷實驗結果為欠阻尼，故結果運用自然對數擬合。

描述此以角頻率  $\omega_d$  振盪，振幅隨時間成指數遞減的系統，可由下圖表示：



對於相鄰的兩波峰  $x_n$  以及  $x_{n+1}$ ，可計算出阻尼比  $\xi$  之值為

$$\xi = \frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{x_n}{x_{n+1}}\right)$$

$$\xi / Cc = B$$

$Cc$  為臨界阻尼值

$B$  為阻尼係數

## (六)磁滯曲線

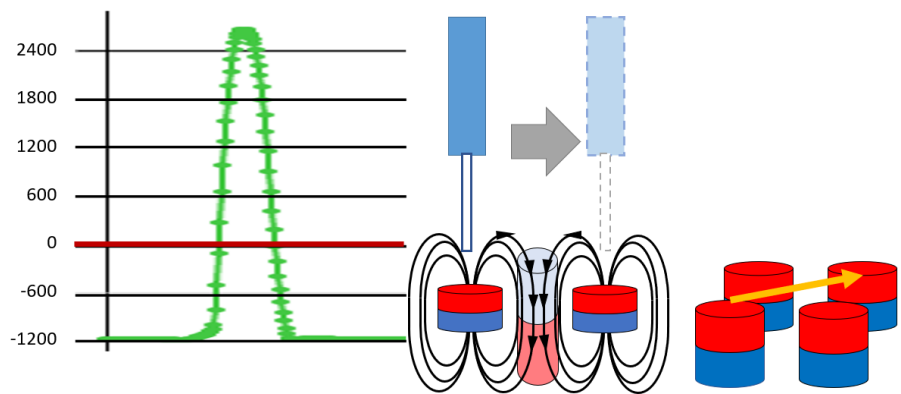
磁滯現象是指鐵磁性物理材料（例如：鐵）在磁化和去磁過程中，即使當外加場被撤離，部分排列仍保持，該材料被磁化。磁性材料的矯頑力一般是用量測磁滯曲線（也稱為磁化曲線）來求得有些材料的矯頑力會隨頻率而增

加。下圖為標準磁滯曲線。本研究利用磁浮體上的鐵磁在接近載具時受到磁化產生的吸力減緩振盪。曲線受磁體厚度、成分、溫度等變因影響。

### 三、實驗設計與方法

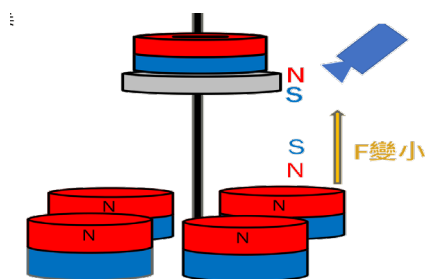
#### (一)載具磁場分布

下圖為實際測量四顆排列的磁鐵間的磁場分布。在對角線方向將磁力探測儀移動，得知在某一最適距離(本研究皆以此最適距離 20cm 進行實驗)下，中央位置磁場方向相反，且近為兩側磁場大小的 2 倍。



#### (二)添加軟磁性物質

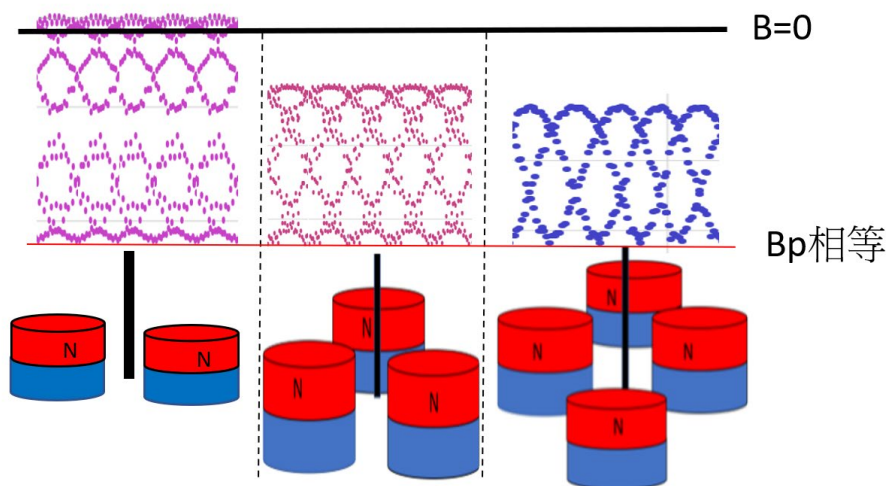
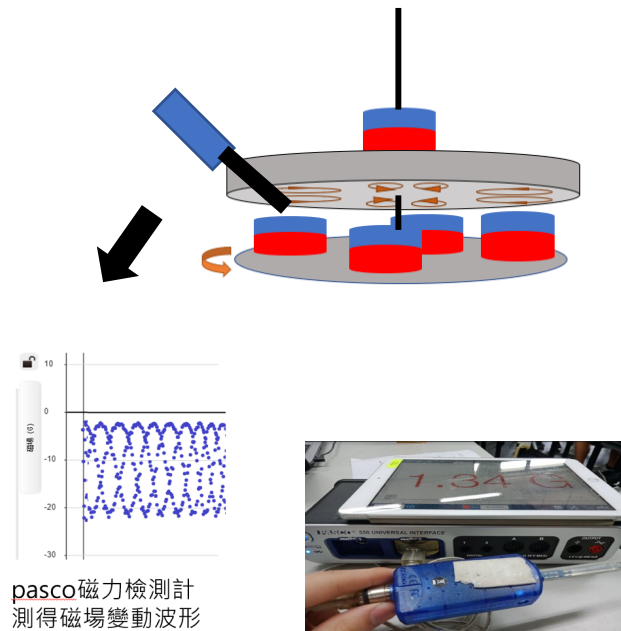
以下圖之設計，觀察磁浮體從距離環形磁鐵固定高度放手時，利用攝影機及 tracker 軟體觀察下方載具磁鐵斥力引發的磁振盪週期與頻率。



#### (三)變動磁場

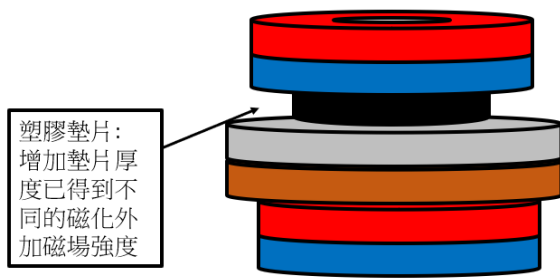
在控制馬達轉動磁浮載具的轉盤轉速，產生週期性的變動磁場觀察磁浮體震盪的變化。以 pasco 磁場探測儀檢測磁場變動波形，發現磁場隨時間呈 sin 函數

波(檢測儀的採樣會回傳前後 0.05 秒及當下共 3 比，拆解鏈波圖即可看出 sin 函數圖形)。針對不同的載具磁場分布可產生不同波形的磁場。



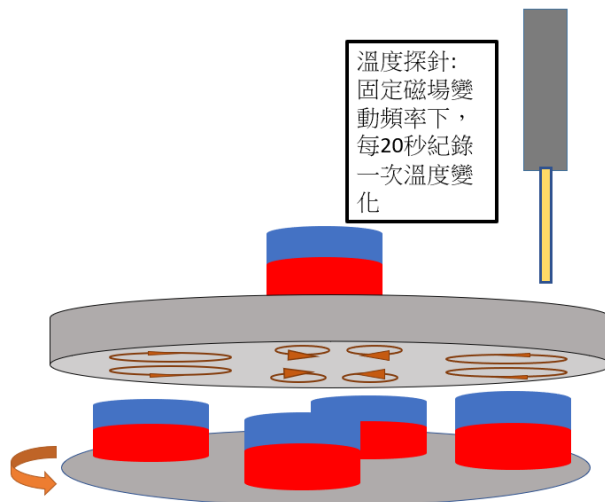
#### (四) 複合磁體

利用鐵片及銅、鋁片的疊層並以硬磁吸附得到複合磁體。在實驗過程中於硬磁及各金屬間用墊塑膠片的方式增加距離。



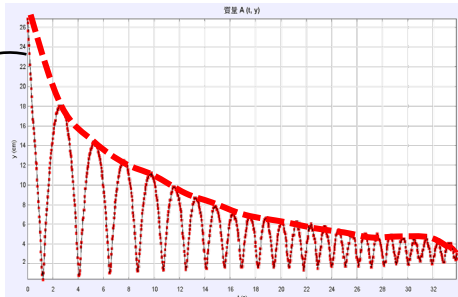
### (五)渦電流的溫度變化檢測

在假設振盪振幅增加為渦電流所造成下，將載具以固定轉速旋轉 3 min，並固定磁浮體高度，每 20 秒以溫度探測針測量磁浮體溫度變化。若明顯測得溫度變化，則表示該頻率下磁浮體產生渦電流。

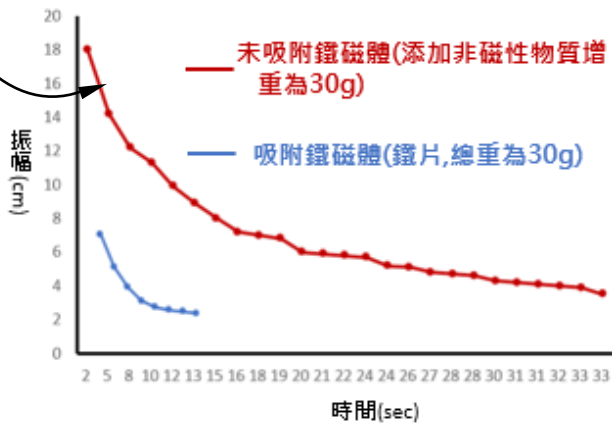
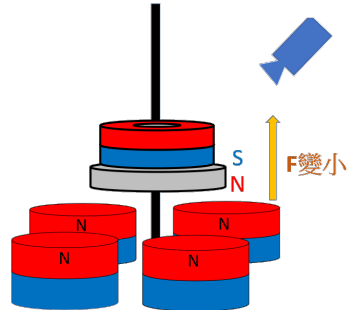


## 伍、 研究結果

### 一、 穩定磁場下的振盪分析與添加鐵磁體的差異



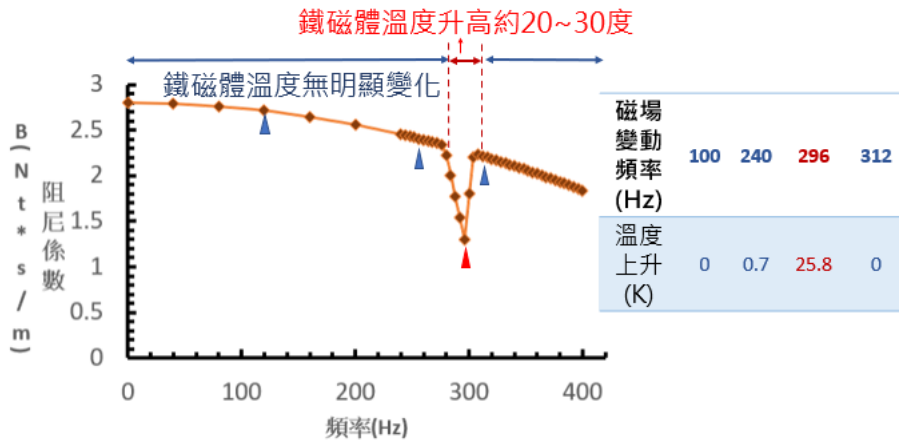
圖(一)-1、磁浮振盪的 y-t 曲線



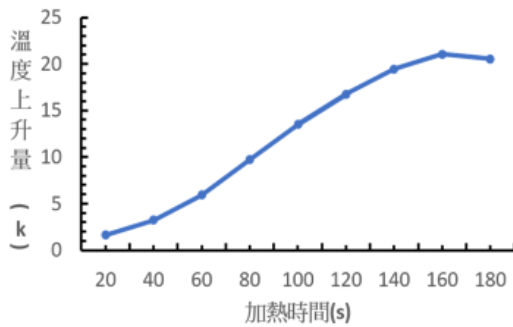
圖(一)-2、吸附鐵磁體後振盪曲線的比較

由圖(一)-1 及圖(一)-2 可得知  
 吸附鐵磁體後的振幅明顯低於  
 單顆硬磁的振盪振幅，最大振  
幅由 18.4cm 降低至  
7.4cm(下降 59%)，且達平衡  
時間由 33.2 秒降低至 11.2 秒  
(減少 67%)

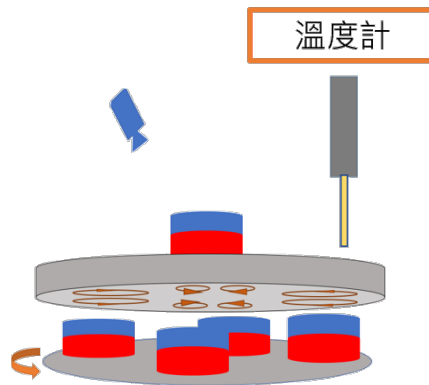
## 二、變動磁場頻率對振盪阻尼係數的影響



圖(二)-1、變動磁場頻率<->振盪阻尼係數

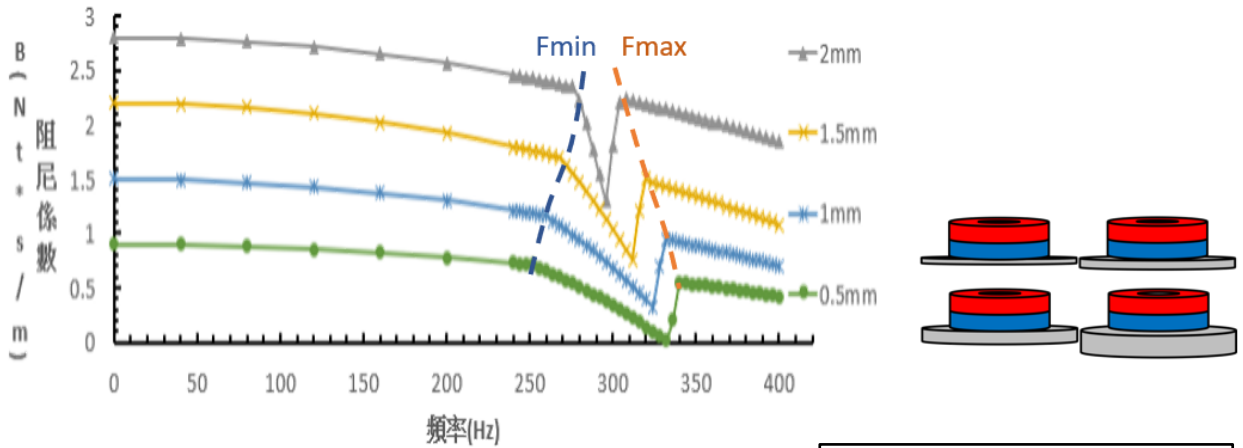


圖(二)-2、鐵磁體在變動磁場下隨時間的溫度變化

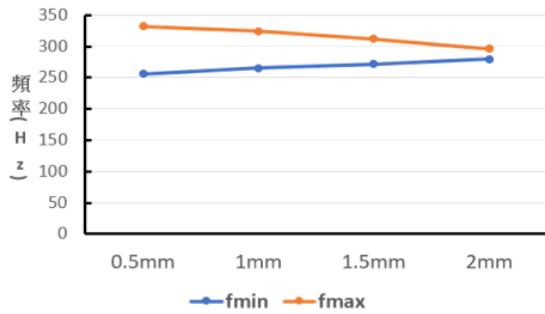


由圖(二)-1 可得知當磁場變動頻率越大，阻尼係數越低，當頻率達 284Hz 時，阻尼係數隨頻率而下降的斜率明顯增加，而當斜率超過 310Hz 時，斜率又回升。推測成因為渦電流，故針對溫度變化進行探討，發現只在 284-312Hz 下靜置 180sec 能測得明顯溫度變化(296Hz 下上升 25.8k)，過程中溫度上升速率隨時間趨緩(見圖(二)-2)。

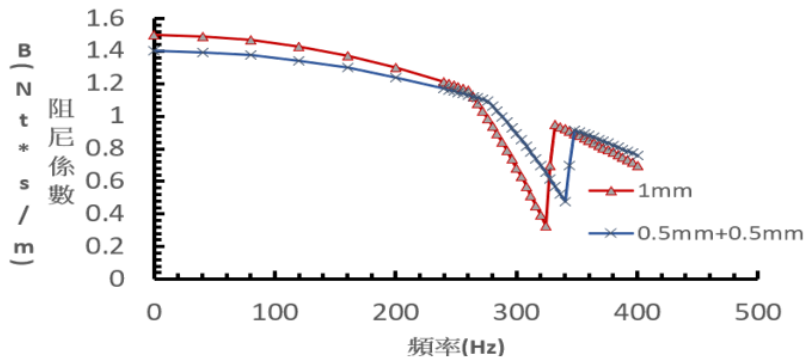
### 三、不同厚度及排列的複合磁體在變動磁場下的振盪變化



圖(三)-1、不同鐵磁體厚度的頻率->阻尼係數關係圖



圖(三)-2、不同鐵磁體厚度的渦電流頻率區間



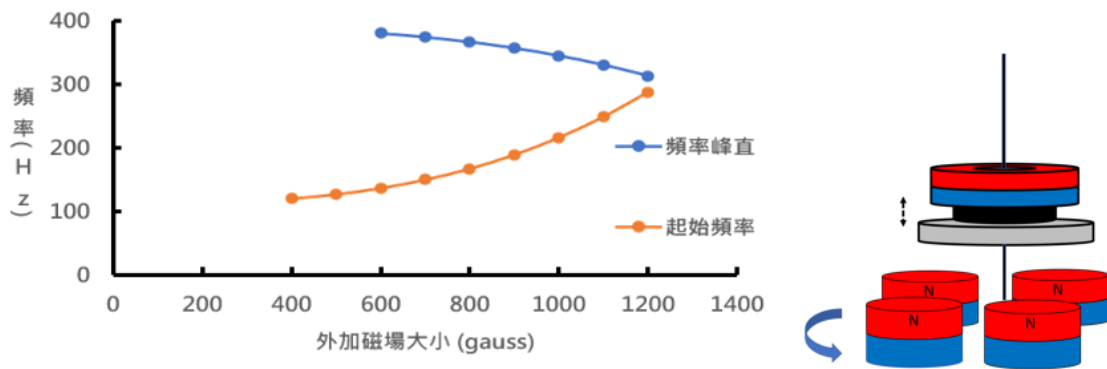
圖(三)-3、比較鐵磁體切片前後的頻率->阻尼係數關係圖

由圖(三)-1、圖(三)-2 可得知鐵片越厚，形成渦電流的起始頻率越大，頻率峰值越小。  
 (2mm→284Hz~296Hz,  
 1.5mm→272Hz~308Hz,  
 1mm→264Hz~324Hz,  
 0.5mm→252~334Hz)。

由圖(三)-3 可得知 1mm 相對 2\*0.5mm 的鐵片形成渦電流的起始頻率及頻率峰值皆較小。  
 (1mm→264Hz~324Hz,  
 2\*0.5Hz→280~340Hz)。



#### 四、外加磁場大小對渦電流頻率區間的影響



圖(四)-1、外加磁場大小對渦電流頻率區間的影響

由圖(四)-1 可得知外加磁場越大，形成渦電流的起始頻率越大，同時頻率峰值越小(當磁場大小低於 600 高斯則未能觀察到頻率峰值)。回歸後起始頻率隨磁場大小上升斜率約為 0.235Hz/gauss，頻率峰值隨磁場大小下降斜率約為 0.113Hz/gauss。

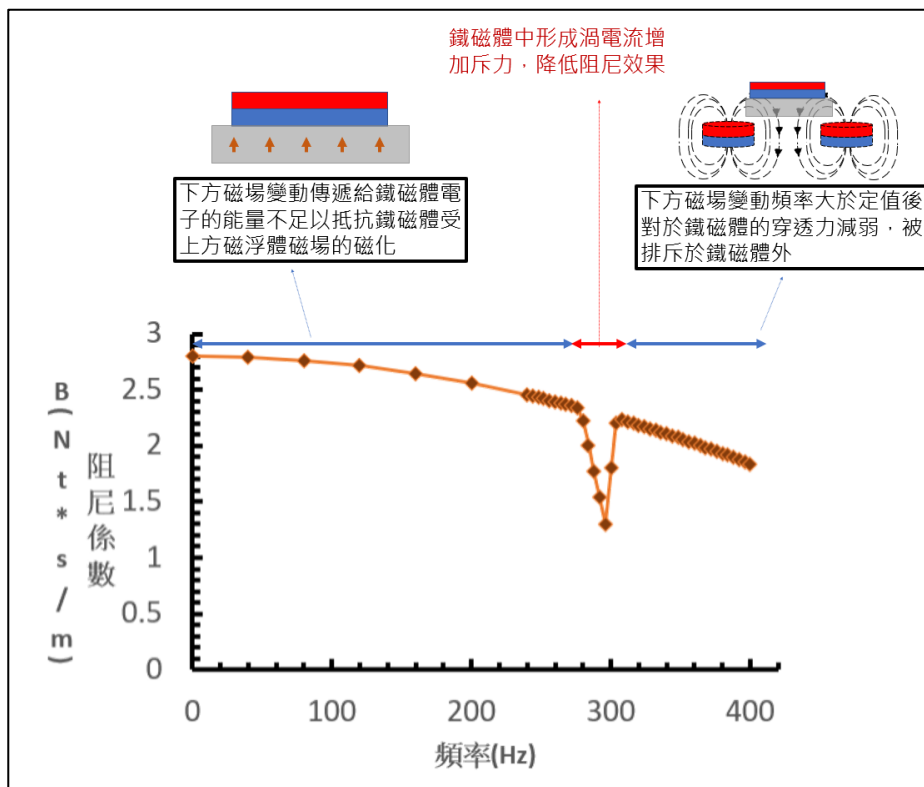
## 陸、 討論

### 一、可能的誤差成因

|                     |                    |
|---------------------|--------------------|
| 一、穩定磁場下鐵磁體的阻尼       | 穩定磁場的均勻程度          |
| 二、變動磁場對阻尼係數的影響      | 轉動磁場帶動磁浮體自轉        |
| 三、鐵磁體的排列對阻尼係數的影響    | 未考量夾層間距離           |
| 四、外加磁場大小對渦電流頻率區間的影響 | 拉大磁體間距離影響鐵磁體上的磁路方向 |

## 二、特殊現象及推測原因

| 特殊現象                           | 推測原因   |
|--------------------------------|--|
| 磁場變動頻率越高，鐵磁體所受的磁化強度減弱          | <b>起始頻率:</b> 在鐵磁體受上方硬磁磁場磁化下，外加磁場變動所供給的能量需到達一定值才能抵抗原磁場方向對電子形成的作用力 |
| 在特定磁場變動頻率達一定區間下，觀測到渦電流降低磁浮阻尼係數 |  |
| 鐵磁體的厚度會改變渦電流頻率區間               | <b>頻率峰值:</b> 根據有關渦電流臨界頻率的理論得知磁場到達一定變動頻率時便難以進入磁體，推測與集膚深度有關        |
| 兩片疊加的鐵磁體和單片的鐵磁體頻率區間不同          |  |
| 外加磁場大小影響鐵磁體受反向的磁化              | <b>矯頑力:</b> 變動磁場頻率上升會增加矯頑力                                       |



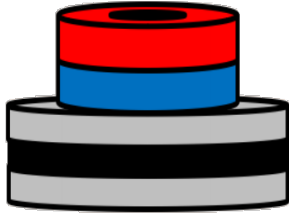
## 三、未來展望

### (一) 實驗步驟中的限制

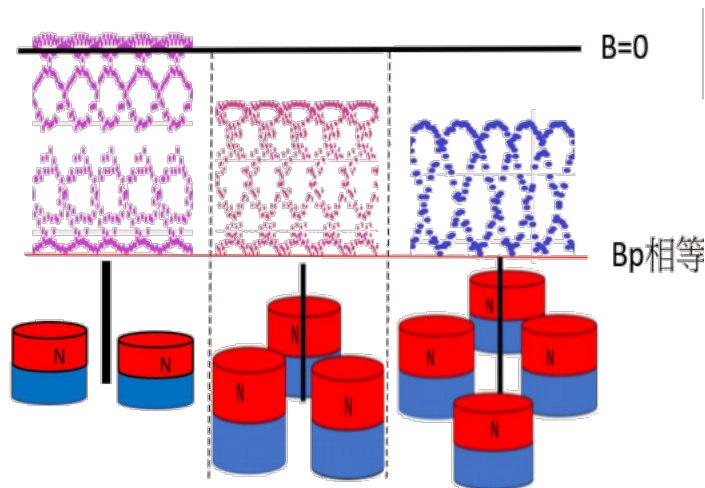
1. 分析鐵磁體的磁滯曲線
2. 針對磁化率與渦電流的臨界頻率進行定量分析
3. 裝置環境的 3D 磁場分析

## (二)變因設計

1. 鐵磁體間隔: 根據上述實驗 結果發現不同厚度的鐵磁 性材料疊加所觀察到的渦電流頻率區間不同。未來可針對疊加時的夾層間隔或添加絕緣物質進行實驗。



2. 磁場波形: 研究過程中有發現不同載具的排列會造成磁場變動波形的差異，未來可針對波形研究是否影響渦電流頻率區間。



## 四、應用

- (一) 磁煞車: 本研究針對渦電流臨界頻率的探討有機會應用於永磁煞車系統在高轉速運作下的渦電流控制。
- (二) 磁浮避震: 本研究中對磁浮振盪之分析有機會應用於磁浮避震的阻尼參數控制。
- (三) 磁性記憶體: 本研究中在變動磁場下觀察到的臨界頻率可能與磁性記憶體在交變磁場下的磁化儲存技術相關。

## 柒、 結論

### 一、 吸附鐵片的複合磁體之振盪過程

(一) 吸附鐵片後的振盪週期、達平衡時間、振幅下降

### 二、 變動磁場頻率對鐵磁體磁化及渦電流的影響

(一) 磁場變動頻率越大，鐵磁性物質受磁場磁化的現象會明顯減弱，故振幅增加

(二) 磁場變動頻率達一定數值時，渦電流效應明顯增強，形成向上的斥力降低減振效果，振幅增加。若持續增加頻率，則無法觀測到渦電流頻率渦電流

### 三、 不同複合磁體於變動磁場下的磁浮變化

(一) 鐵片越厚，觀測到渦電流的最低頻率越高、最高頻率越低(區間越小)

(二) 相同厚度鐵片在裁切後形成多片鐵片，造成觀測到渦電流的最小頻率、最高頻率皆上升

### 四、 外加的磁場強度與渦電流的關係

(一) 外加磁場強度越強，則渦電流形成的頻率區段越小

## 捌、 參考文獻資料

- [1] Hughes, R., Fan, Y., & Dixon, S. (2014). Near electrical resonance signal enhancement (NERSE) in eddy-current crack detection. *NDT & E International*, 66, 82-89.
- [2] Buford, B. (2016). Modeling, Fabrication, and Characterization of Magnetic Thin Films for Integrated Inductor and MRAM Applications.
- [3] Mun, K. (2017). *Study of the applied current asymmetry of the spin-torque interaction* (Doctoral dissertation).
- [4] El Hajjaji, A., & Ouladsine, M. (2001). Modeling and nonlinear control of magnetic levitation systems. *IEEE Transactions on industrial Electronics*, 48(4), 831-838.
- [5] Durmus, N. G., Tekin, H. C., Guven, S., Sridhar, K., Yildiz, A. A., Calibasi, G., ... & Demirci, U. (2015). Magnetic levitation of single cells. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(28), E3661-E3668.

## 【評語】 051812

利用轉動磁鐵產生磁浮的現象，並利用阻尼係數分析磁浮的穩定性，得到磁場在特定的變化頻率區間會產生渦電流，造成磁浮不穩定的結論，是本實驗最大的貢獻，建議未來可以再設計新的實驗，測量渦電流之分布以更深入了解影響穩定性的機制。

## 作品簡報

# 週期性變化磁場對複合磁體 磁浮特性的影響

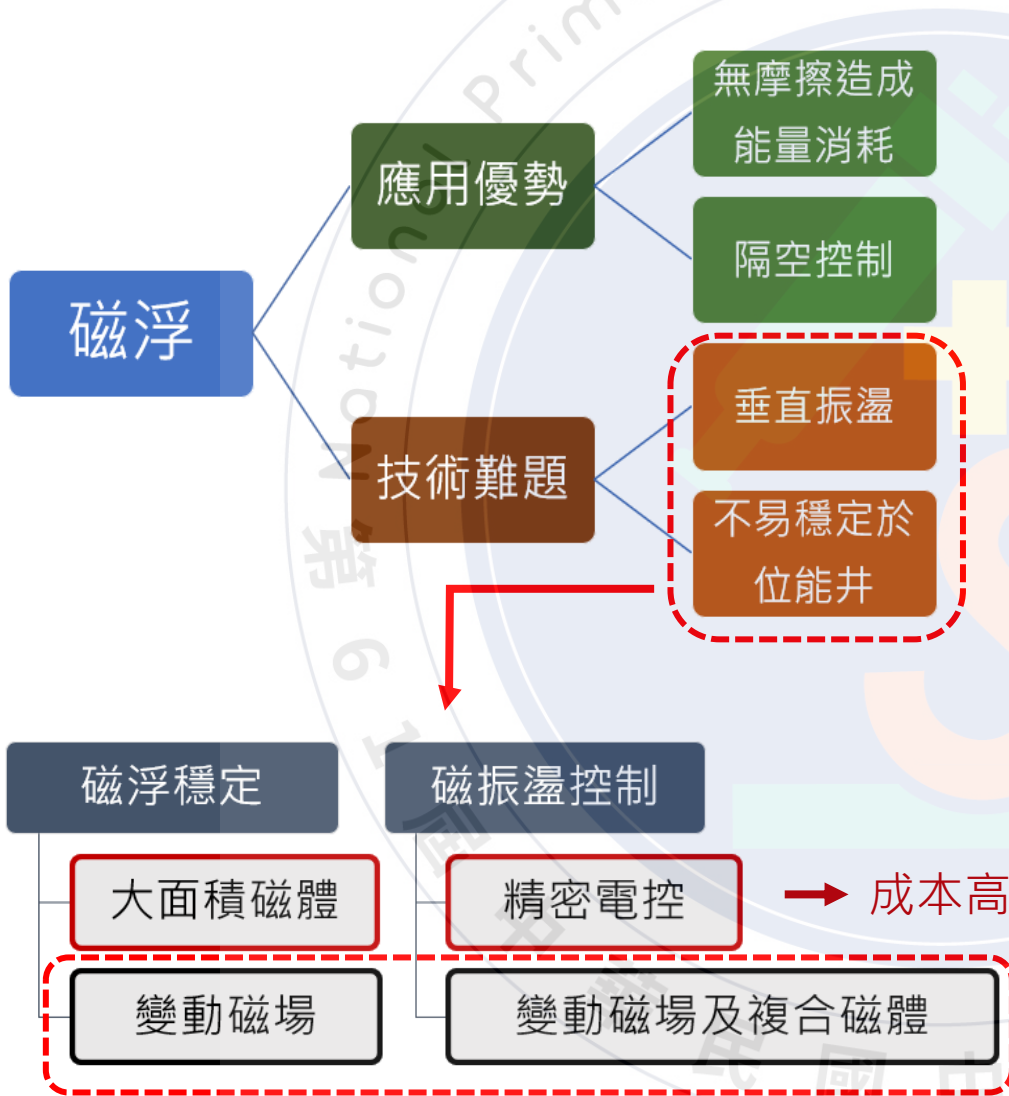
THE EFFECT OF FLUCTUATING MAGNETIC FIELD  
ON LEVITATING COMPLEX MAGNETIC OBSTACLES



# 前言 Introduction

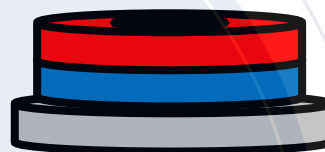
動機(motivation):

目的(project goal):



複合磁體的磁浮振盪:

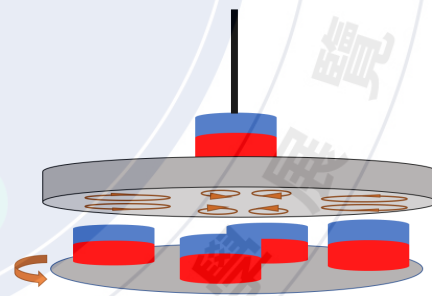
觀察吸附鐵片後鐵磁體受反向磁場磁化對振盪振幅的影響



→ 複合磁體

變動磁場下複合磁體的振盪:

研究不同材質、堆疊方式的複合磁體影響變動磁場下磁浮振盪的阻尼係數

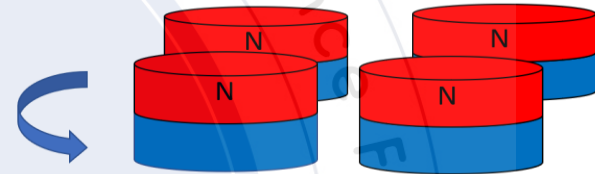
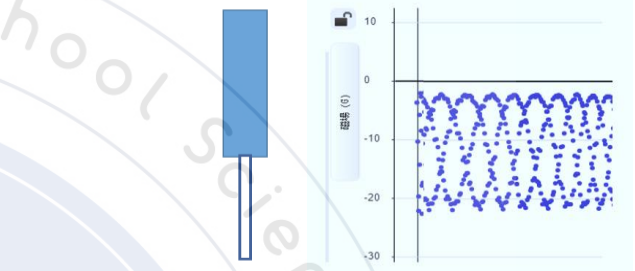
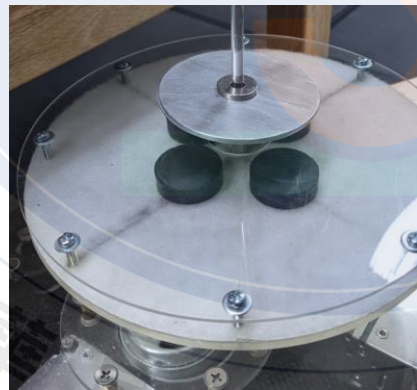
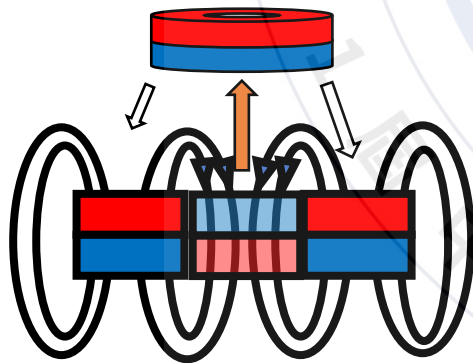
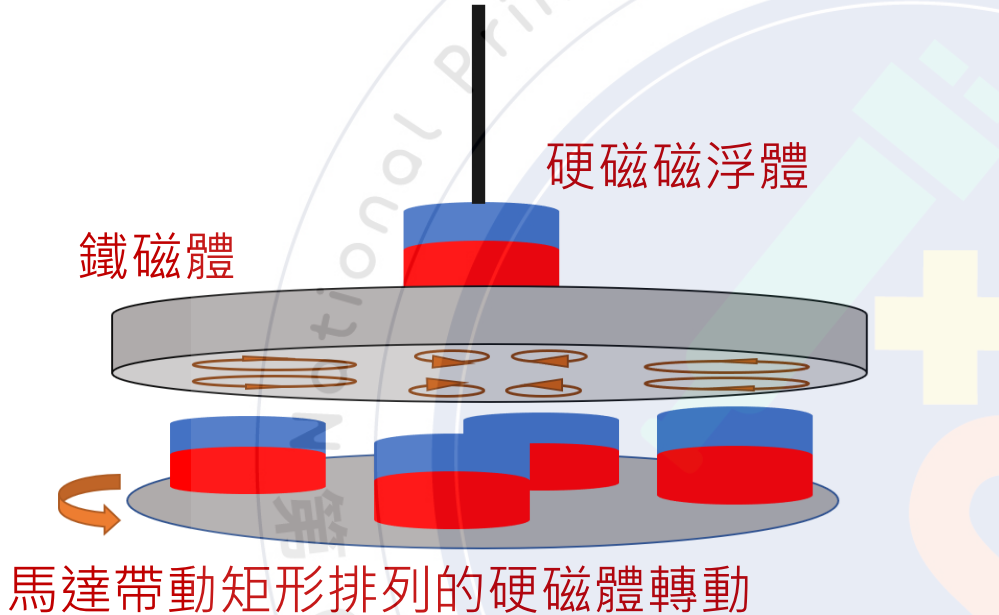


不同頻率變動磁場下的磁浮振盪:

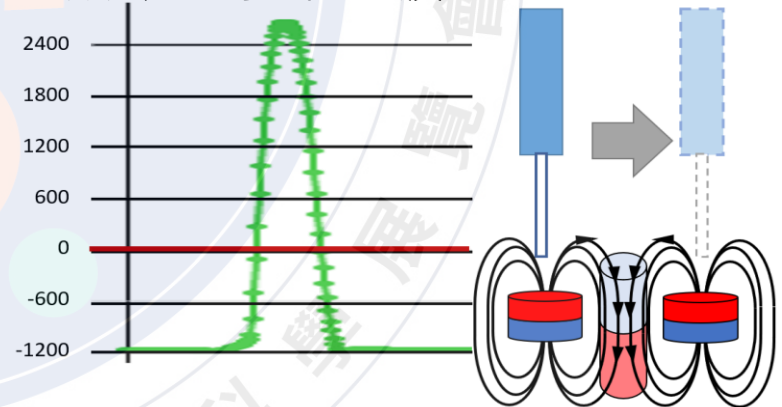
探討鐵磁性金屬通過的外加磁場大小對影響渦電流造成的振盪變化

# 研究方法 Methods

## 實驗裝置(equipment):



左圖為轉盤旋轉的過程中數位磁力計於四顆矩形排列的磁鐵正上方紀錄的波形可發現產生多筆sin波。



在對角線方向將磁力探測儀移動，得知在某一最適距離(本研究皆以此最適距離20cm 進行實驗)下，中央位置磁場方向相反，且近為兩側磁場大小的2倍。

# 研究方法 Methods

## 實驗流程(process):

變因設計及實驗步驟

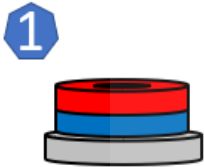
穩定磁場下的磁浮振盪運動分析

1 在硬磁上吸附軟磁(鐵片)

吸附鐵磁體的形成  
阻尼減振量測

2 利用轉盤形成週期性變動磁場

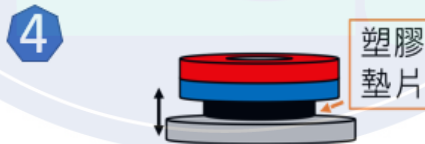
不同磁場變動頻率下的阻尼係數



3 鐵磁體的厚度影響磁浮振盪的阻尼

4 改變鐵磁體與硬磁的距離形成不同磁化強度

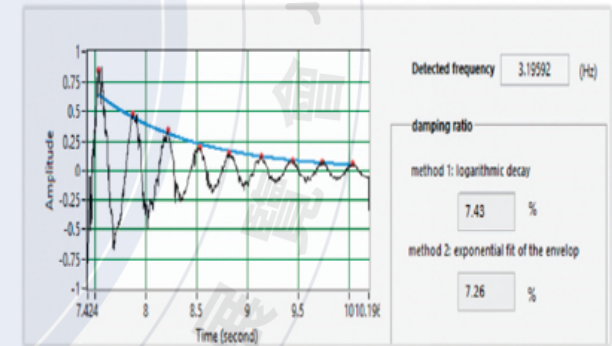
外加磁場大小對渦電流頻率區間的影響



以相同高度使磁浮體落於載具上

利用位移感測器分析振盪中的運動狀態

擬合振幅曲線套入阻尼參數



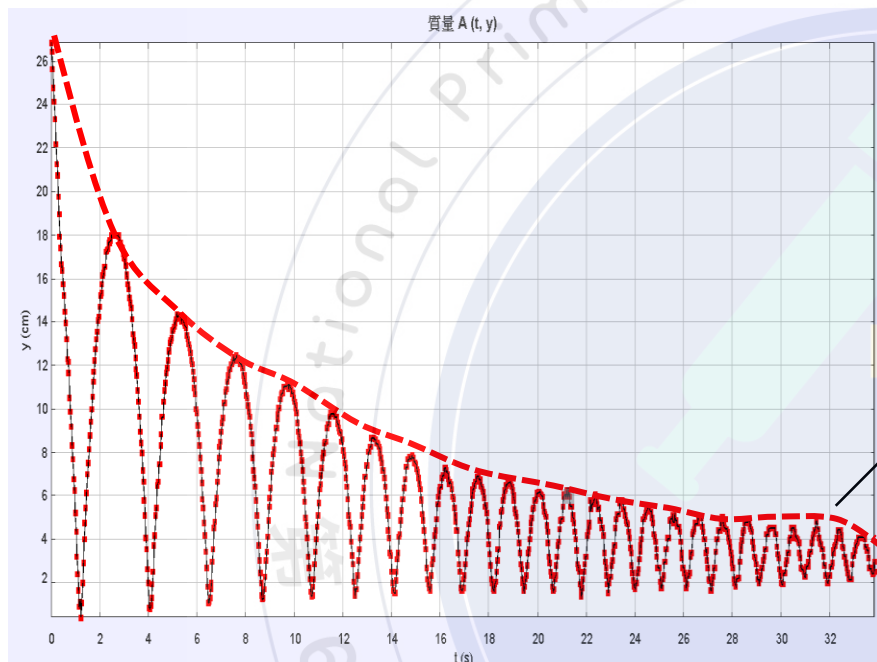
$$y = y_0 e^{-Bt} \cos(\omega t)$$

B為阻尼(衰減)係數

值越大代表阻尼減振效果越好

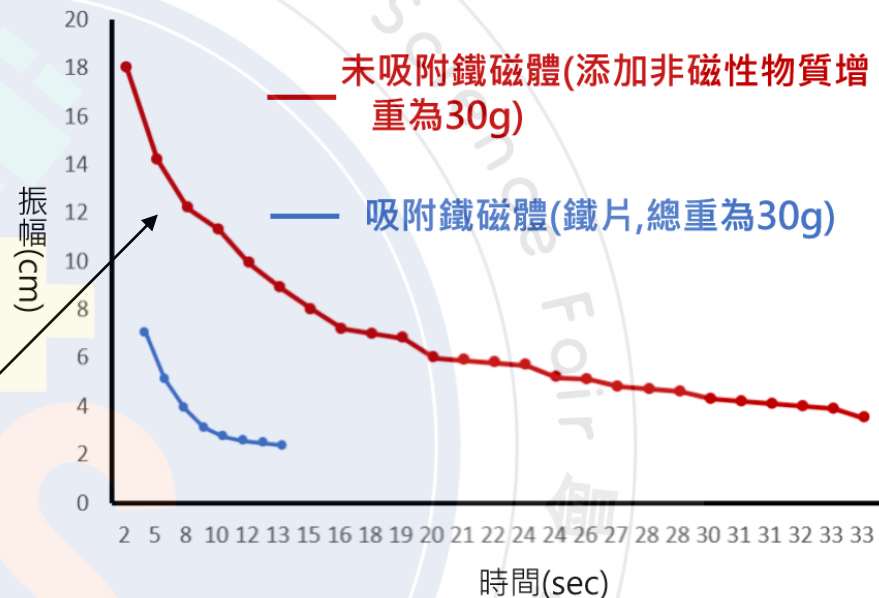
# 研究結果 Results

## 穩定磁場下的振盪分析與添加鐵磁體的差異:

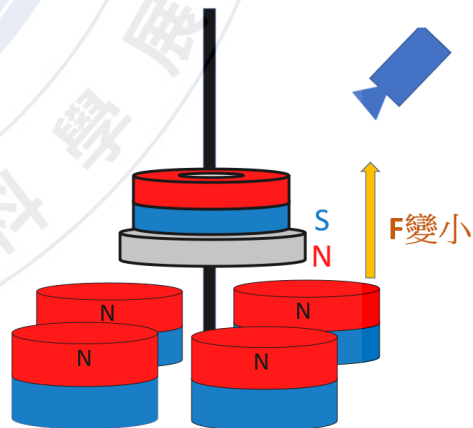


圖(一)-1、磁浮振盪的y-t曲線

由圖(一)-1及圖(一)-2可得知吸附鐵磁體後的振幅明顯低於單顆硬磁的振盪振幅，最大振幅由18.4cm降低至7.4cm(下降59%)，且達平衡時間由33.2秒降低至11.2秒(減少67%)



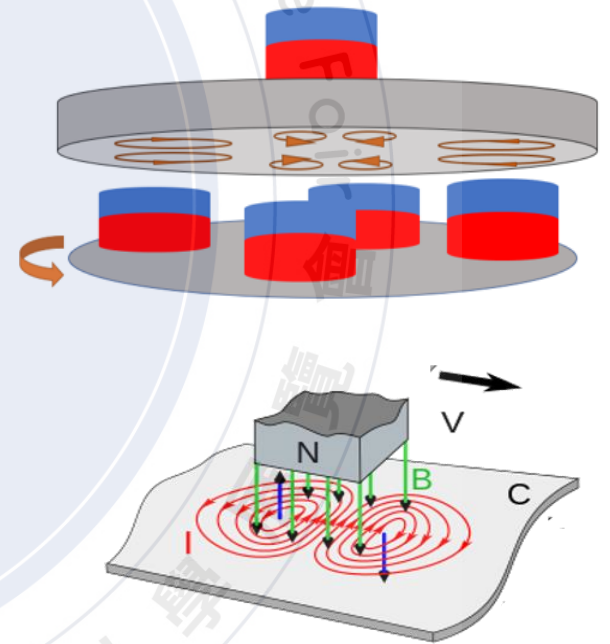
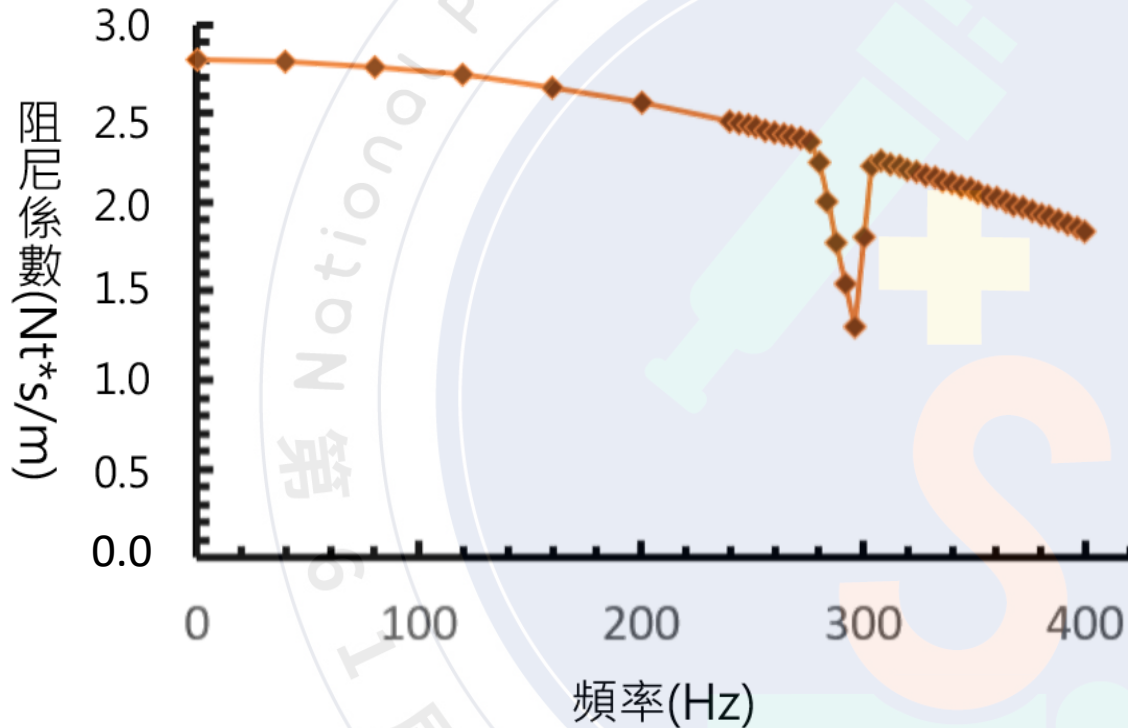
圖(一)-2、吸附鐵磁體後振盪曲線的比較





# 研究結果 Results

變動磁場頻率對振盪阻尼係數的影響:

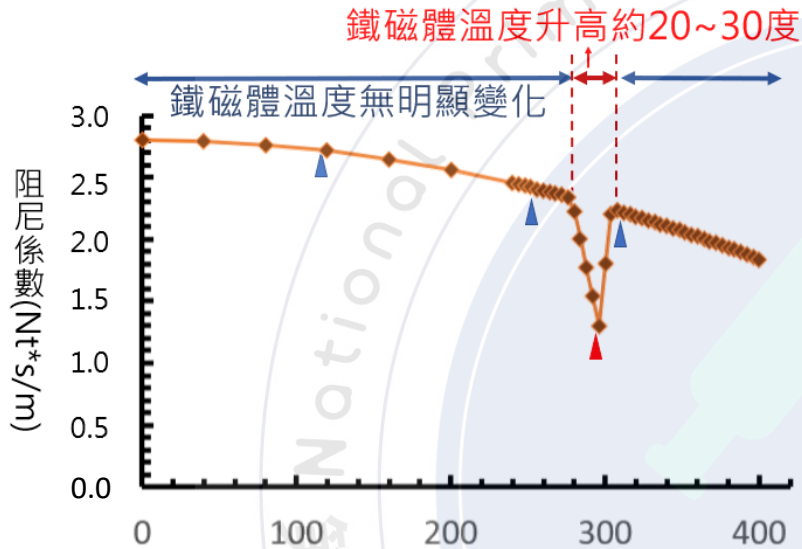


圖(二)-1、變動磁場頻率 $\leftrightarrow$ 振盪阻尼係數

由圖(二)-1可得知當磁場變動頻率越大，阻尼係數越低，當頻率達284Hz時，阻尼係數隨頻率而下降的斜率明顯增加，而當斜率超過310Hz時，斜率又回升。

# 研究結果 Results

## 驗證頻率區間受渦電流影響:



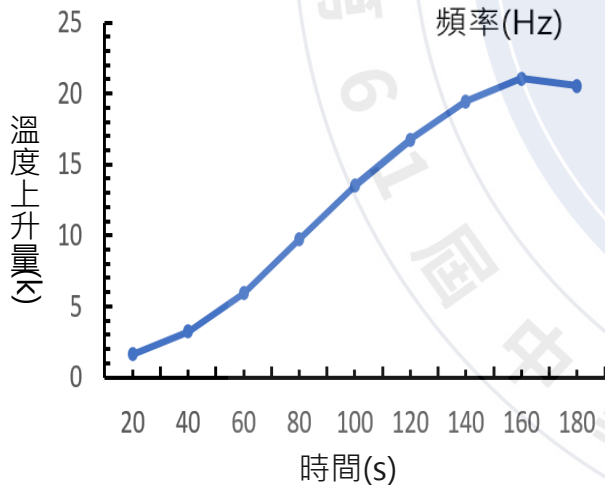
磁場  
變動  
頻率  
(Hz)

100 240 296 312

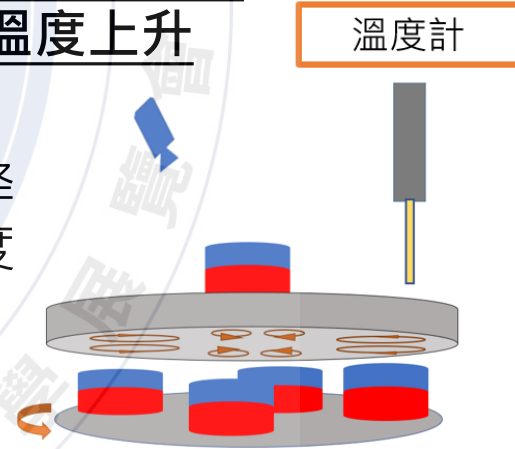
溫度  
上升  
(K)

0 0.7 20.4 0

表(二)-2、不同頻率下磁浮體靜置的180秒後的溫度上升



推測特定頻率下阻尼係數驟降的成因為渦電流，故針對溫度變化進行探討，發現只在284-312Hz下靜置180sec能測得明顯溫度變化(296Hz下上升20.4k)，過程中溫度上升速率隨時間趨緩(見圖(二)-3)

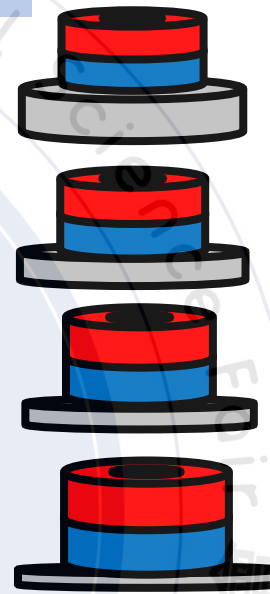
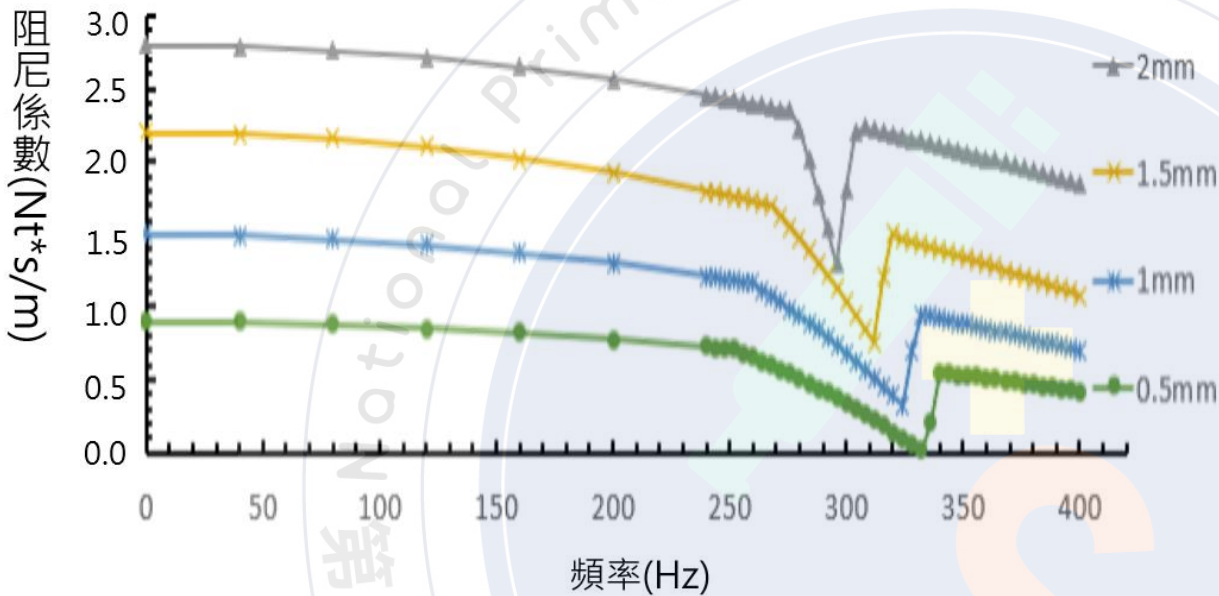


於固定頻率下磁浮180秒並測量磁浮體軟磁區域溫度

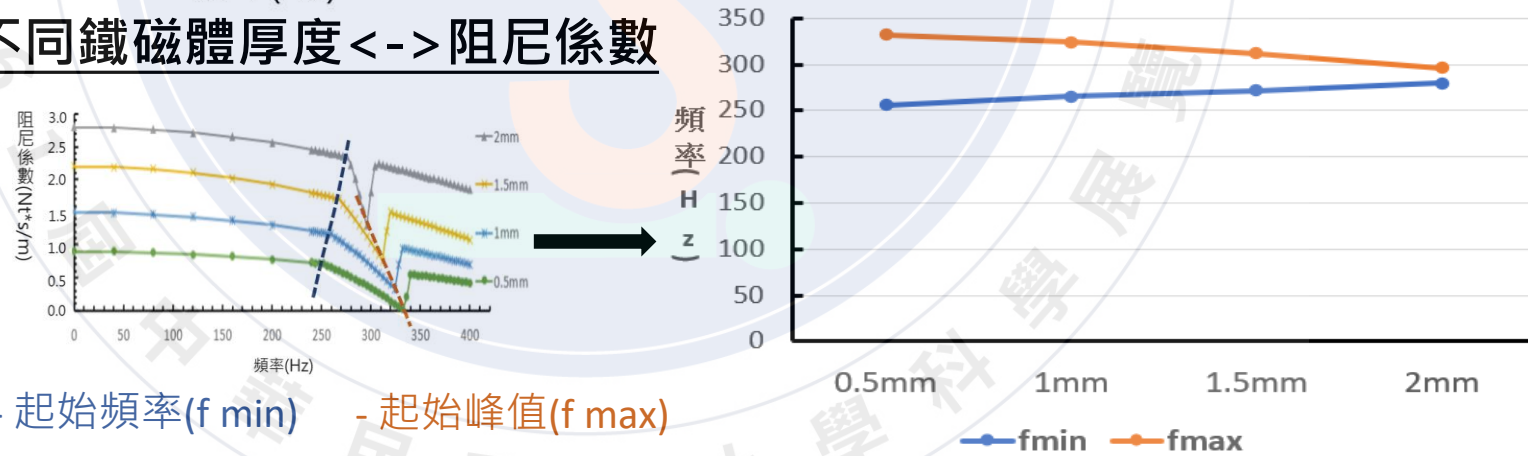
圖(二)-3、296Hz下的磁浮體溫度變化

# 研究結果 Results

不同厚度的複合磁體在變動磁場下的振盪變化:



圖(三)-1、不同鐵磁體厚度 <-> 阻尼係數



- 起始頻率(f min)      - 起始峰值(f max)

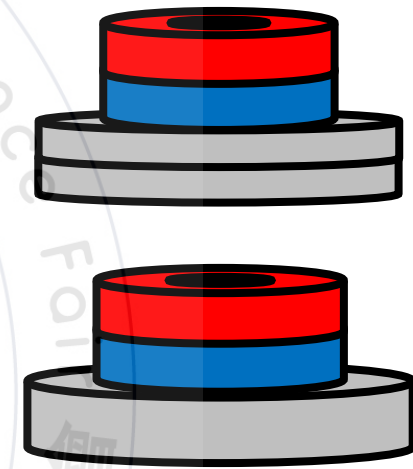
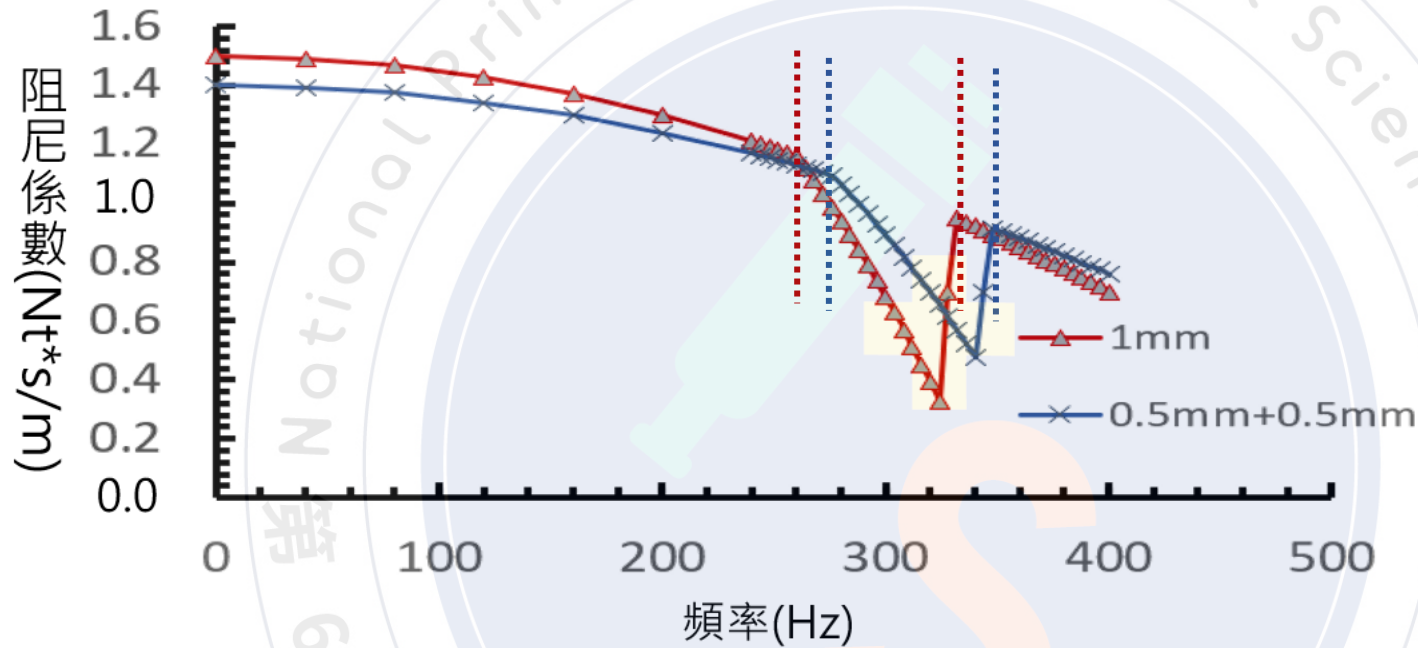
圖(三)-2、不同鐵磁體厚度的渦電流頻率區間

由圖(三)-1、圖(三)-2可知鐵片越厚，形成渦電流的起始頻率越大，頻率峰值越小



# 研究結果 Results

不同排列的複合磁體在變動磁場下的振盪變化:



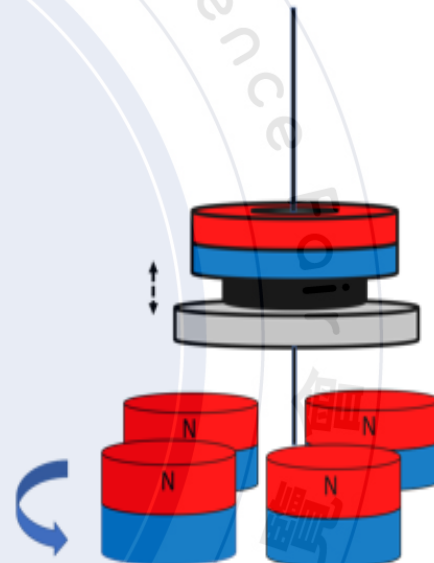
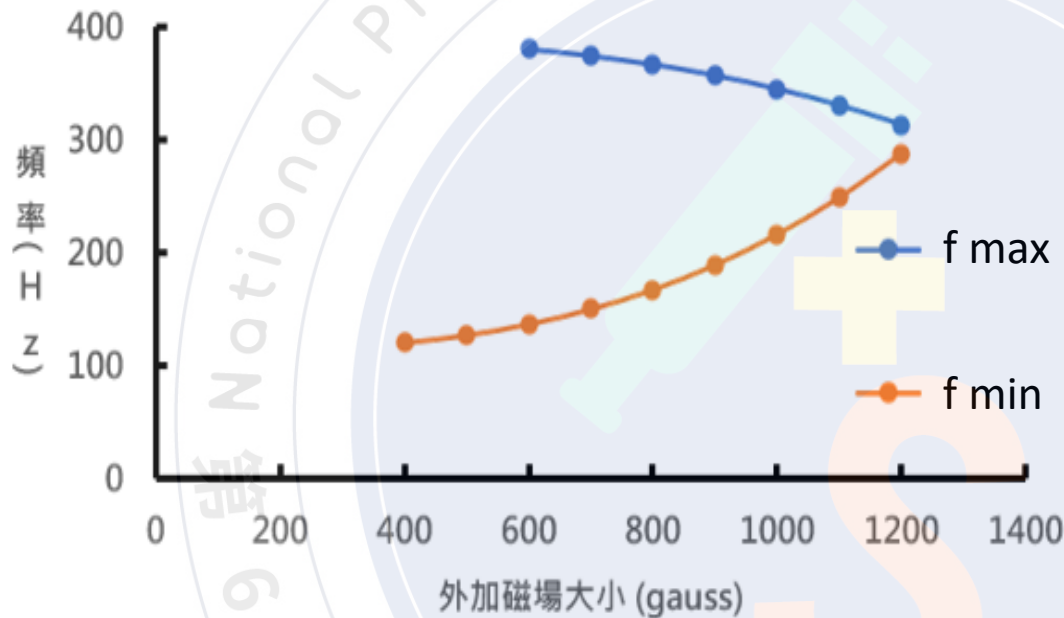
圖(三)-3、不同軟磁體的排列 <-> 阻尼係數關係圖

由圖(三)-3可得知1mm相對2\*0.5mm的鐵片形成渦電流的起始頻率及頻率峰值皆較小。(1mm→264Hz~324Hz, 2\*0.5mm→280~340Hz)。

# 研究結果 Results

外加磁場大小對渦電流頻率區間的影響:

以絕緣體調整硬磁及軟磁的間隔距離改變外加於鐵磁的磁場大小



圖(四)-1、外加磁場大小對渦電流頻率區間的影響

由圖(四)-1可得知外加磁場越大，形成渦電流的起始頻率越大，同時頻率峰值越小(當磁場大小低於600高斯則未能觀察到頻率峰值)。回歸後起始頻率隨磁場大小上升斜率約為 $0.235\text{Hz/gauss}$ ，頻率峰值隨磁場大小下降斜率約為 $0.113\text{Hz/gauss}$ 。

# 討論 Discussion

於特定頻率下觀察到渦電流減阻:

$$P = \frac{\pi^2 B_p^2 d^2 f^2}{6k\rho D}$$

P: 每單位質量的功率損耗 (W / kg)

B<sub>p</sub>: 峰值磁場 (T)

D: 薄片的厚度或線的直徑 (m)

F: 頻率 (Hz)

k: 一個常數

對於薄板等於1ρ是材料的電阻率 (Ωm)

d: 材料的密度 (kg / m<sup>3</sup>)

鐵磁體中形成渦電流增加斥力，降低阻尼效果

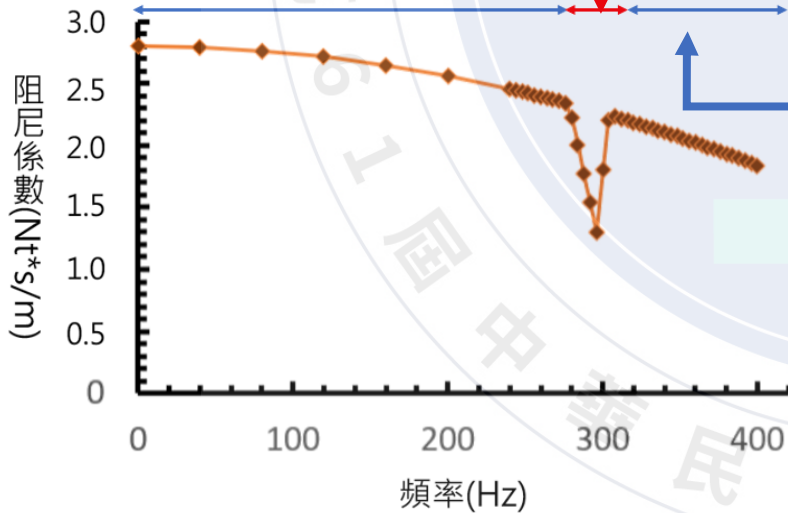
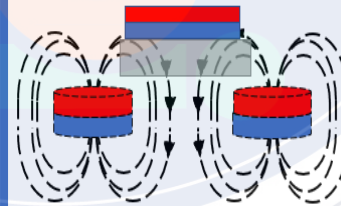
**起始頻率:**

下方磁場變動傳遞給軟磁體電子的能量不足以抵抗鐵磁體受上方磁浮體磁場的磁化



**頻率峰值:**

下方磁場變動頻率大於定值後對於軟磁體的穿透力減弱，被排斥於鐵磁體外



# 結論 Conclusion

1. 磁場變動頻率越大，鐵磁性物質受磁場磁化的現象會明顯減弱，故振幅增加
2. 磁場變動頻率達一定數值(起始頻率)時，渦電流效應明顯增強，形成向上的斥力降低減振效果， 振幅增加。若持續增加頻率到另一定值(頻率峰值)後，則無法觀測到渦電流頻率渦電流
3. 不同複合磁體於變動磁場下渦電流的作用頻率區間隨軟磁厚度、排列、外加磁場

|      | 軟磁體厚度增加 | 固定厚度切片 | 外加磁場增加 |
|------|---------|--------|--------|
| 起始頻率 | ↑       | ↓      | ↑      |
| 頻率峰值 | ↓       | ↑      | ↓      |

## 參考資料 References

1. Hughes, R., Fan, Y., & Dixon, S. (2014). Near electrical resonance signal enhancement (NERSE) in eddy-current crack detection. *NDT & E International*, 66, 82-89.
2. Mun, K. (2017). *Study of the applied current asymmetry of the spin-torque interaction* (Doctoral dissertation).
3. El Hajjaji, A., & Ouladsine, M. (2001). Modeling and nonlinear control of magnetic levitation systems. *IEEE Transactions on industrial Electronics*, 48(4), 831-838.