

2022 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 週期性變化磁場對複合磁體磁浮特性的影響
得獎獎項 三等獎

就讀學校 臺北市立麗山高級中學
指導教師 徐志成、張良肇
作者姓名 邱子宸

關鍵詞 磁浮振盪、鐵磁磁化、渦電流

作者簡介



我是邱子宸，目前就讀於臺北市立麗山高級中學數理資優班二年級。我在學校的專題初探特色課程中，啟發了我對物理探究實作的興趣，在一次又一次的實驗過程中，也真正體會到手腦並用解決問題的成就感。我非常開心能幸運通過 2021 年臺灣國際科學展覽會的初審，相信透過這次的競賽和觀摩，我能從中獲取到課本學不到的珍貴知識和經驗。

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變頻率越大，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。

ABSTRACT

This research expects to find a method of stabilizing maglev and discuss the variable causes of maglev oscillation. By attaching maglev obstacle with ferromagnetic material to observe the maglev oscillation absorption it produced. During the experiment, it was found that the periodically changing magnetic flux influences the magnetization and eddy current of the ferromagnet by changing the magnetic field, which in turn changed the magnetic oscillation amplitude and damping coefficient. The results demonstrates that the greater the alternating frequency of the magnetic field, the lower the damping coefficient formed by the ferromagnetic substance. In addition, the eddy current can only be observed when the frequency of the fluctuating composite magnet field reaches a certain interval, which causes a sharp decline of damping coefficient, increasing both the amplitude and lasting of oscillation. This interval is controlled by the variable factors such as the arrangement of the composite magnet and the magnetization intensity.

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。

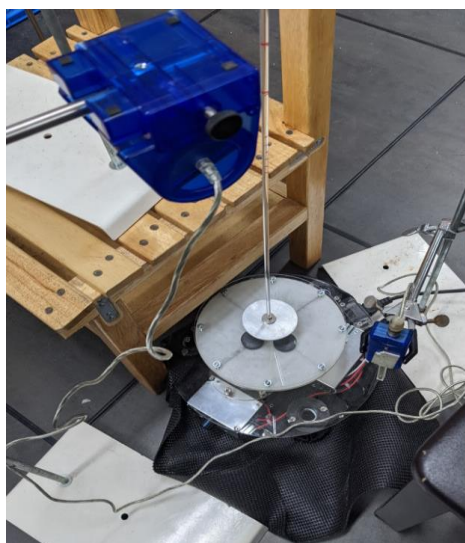
貳、 研究目的

- 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

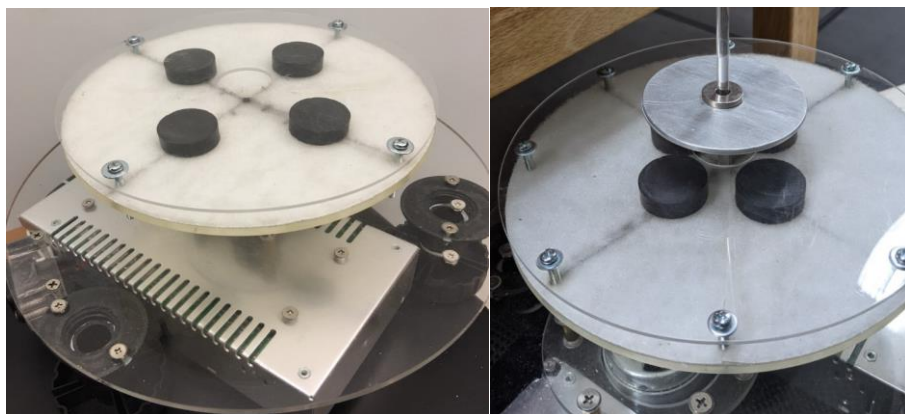
參、 研究設備及器材

一、 實驗器材

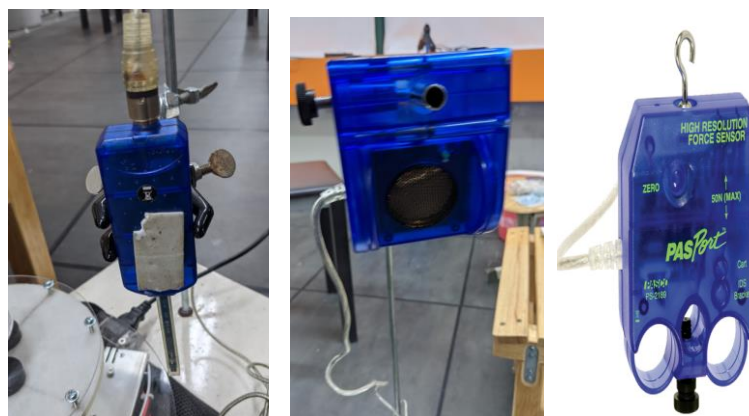
(一)裝置實圖



(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

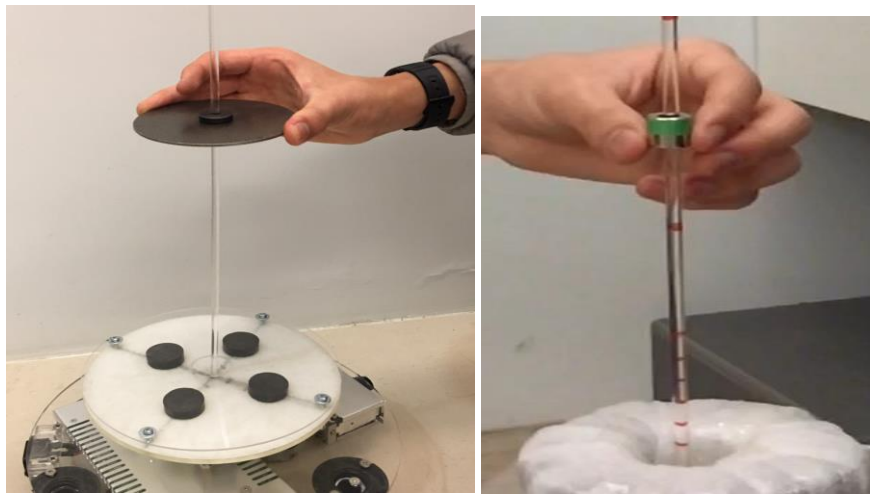


磁場大小為 2400、1500、1358 高斯的鈷鐵硼磁鐵



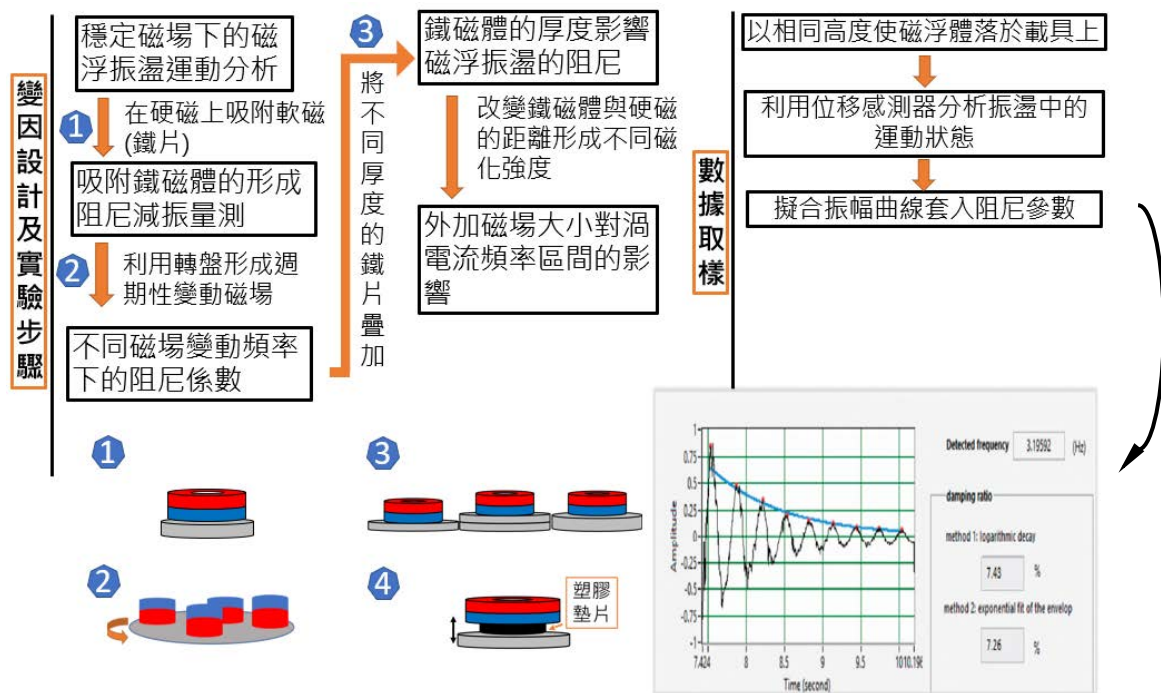
利用硬磁吸附鐵、鋁、銅等方式組成複合磁體，實驗利用半徑及厚度 $3\text{cm} \times 1\text{mm}$ 、 $3\text{cm} \times 2\text{mm}$ 、 $5\text{cm} \times 1\text{mm}$ 的三種金屬

(四)實驗實圖



肆、研究過程或方法

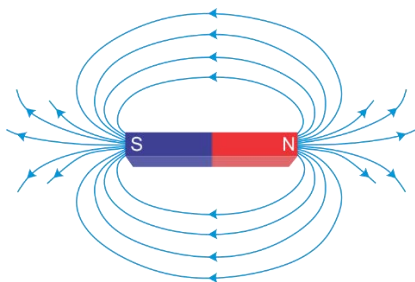
一、實驗流程



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:

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

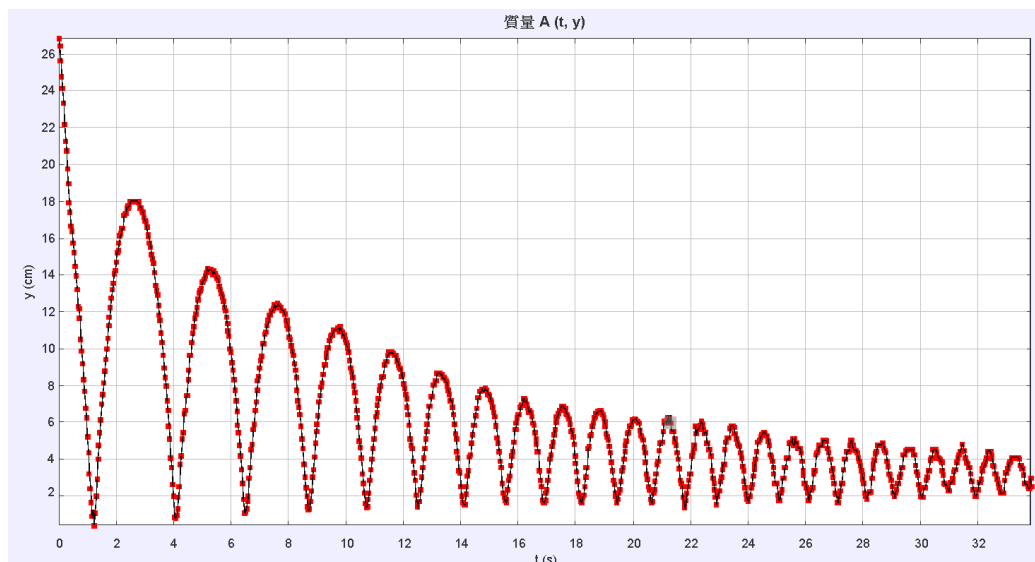
B_0 是非常接近每個極的磁通密度，單位為 T

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

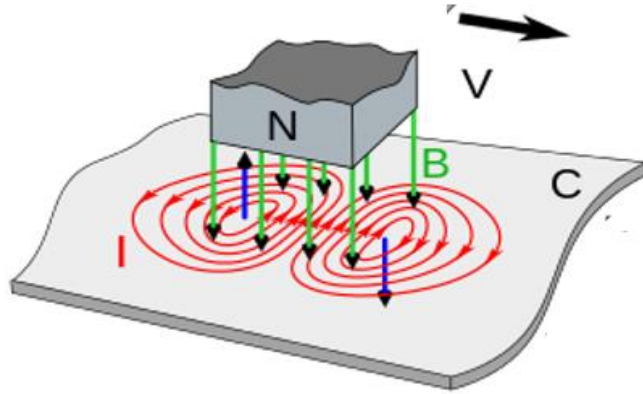
(二) 磁浮振盪:

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_p: 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 / m³)

(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

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \lambda \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0 \quad (1)$$

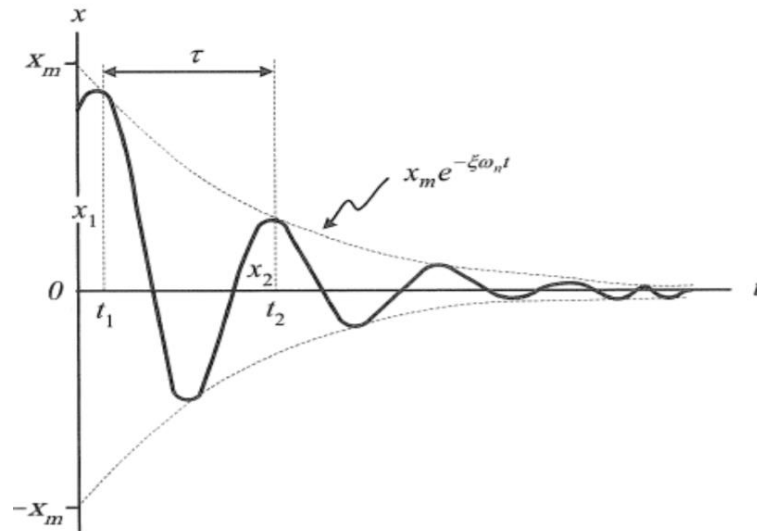
以式

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

代入(1)式，可以求出運動的角頻率 ω 。物體是否作振盪，視 λ 與 ω_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 ω_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 ξ 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

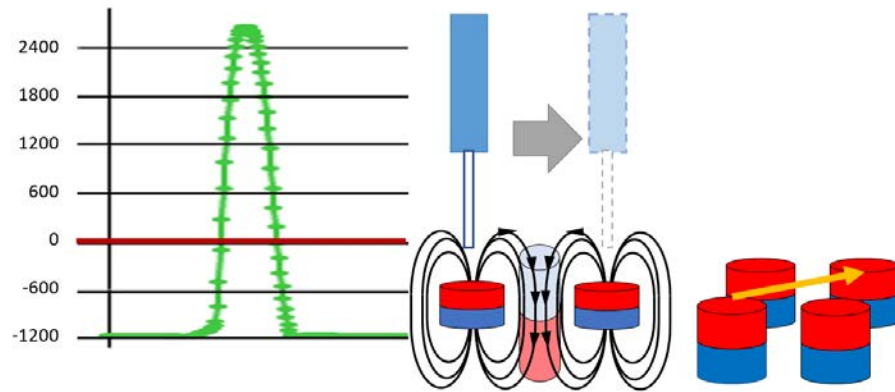
磁滯現象是指鐵磁性物理材料（例如：鐵）在磁化和去磁過程中，即使當外加場被撤離，部分排列仍保持，該材料被磁化。磁性材料的矯頑力一般是用量測磁滯曲線（也稱為磁化曲線）來求得有些材料的矯頑力會隨頻率而增加。下圖為標準磁滯曲線。本研究利用磁浮體上的鐵磁在接近載具時受到磁化產生的吸力減緩振盪。曲線受磁體厚度、成分、溫度等變因影響。

三、實驗設計與方法

(一)載具磁場分布

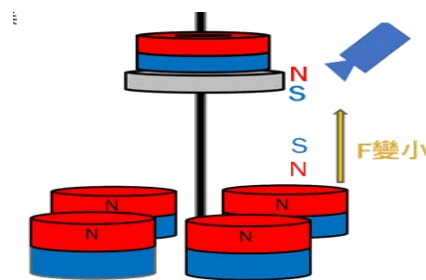
下圖為實際測量四顆排列的磁鐵間的磁場分布。在對角線方向將

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。



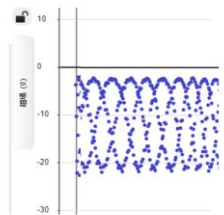
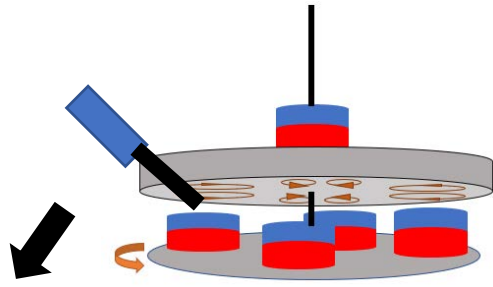
(二)添加軟磁性物質

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。

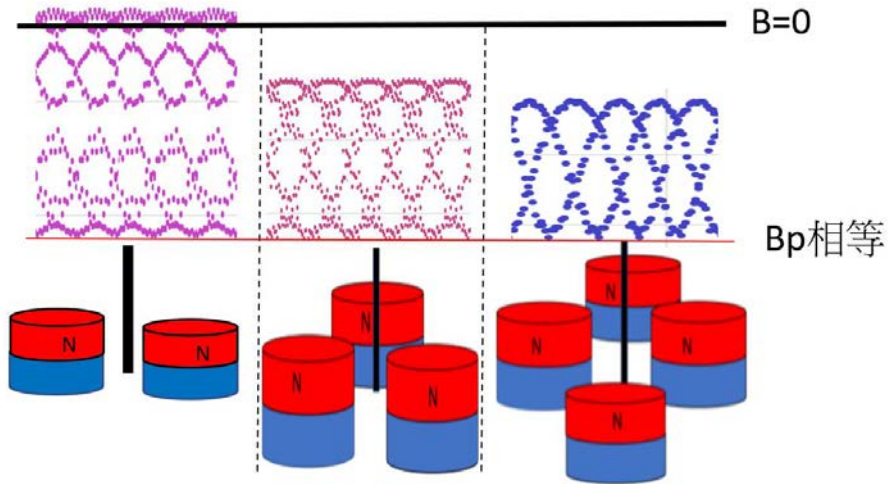


(三)變動磁場

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。

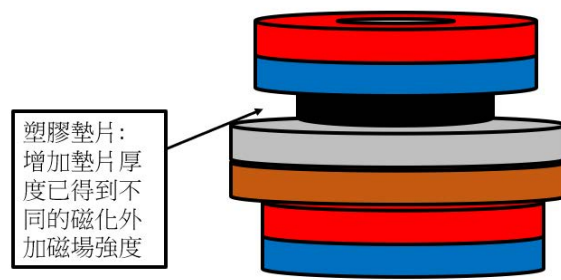


pasco磁力檢測計
測得磁場變動波形



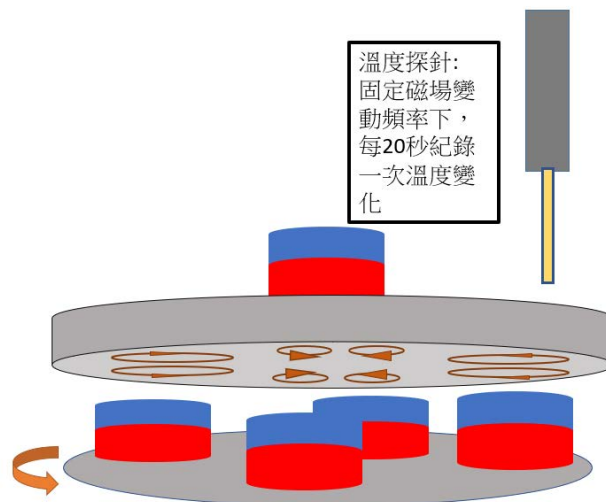
(四)複合磁體

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。



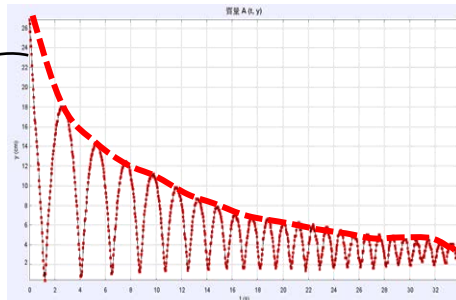
(五)渦電流的溫度變化檢測

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。

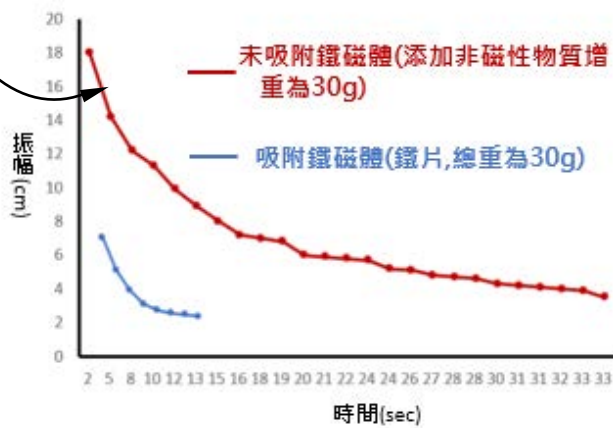
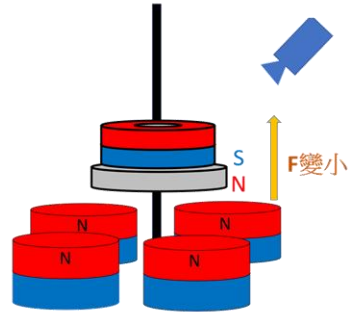


伍、 研究結果

一、 穩定磁場下的振盪分析與添加鐵磁體的差異



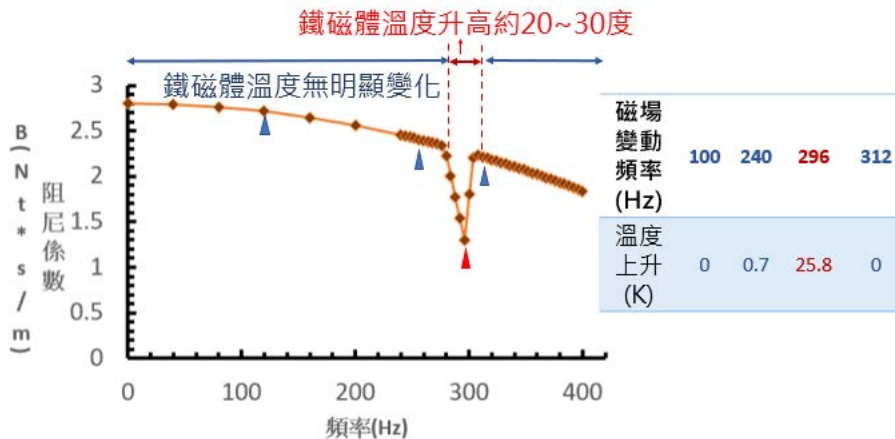
圖(一)-1、磁浮振盪的 y-t 曲線



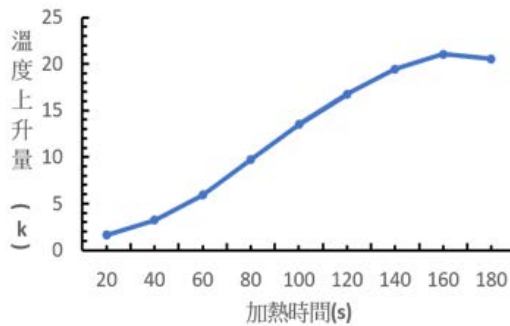
圖(一)-2、吸附鐵磁體後振盪曲線的比較

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%)

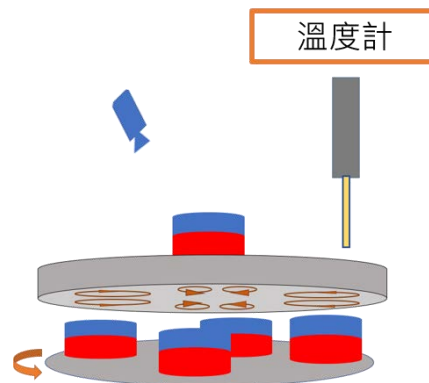
二、變動磁場頻率對振盪阻尼係數的影響



圖(二)-1、變動磁場頻率<->振盪阻尼係數

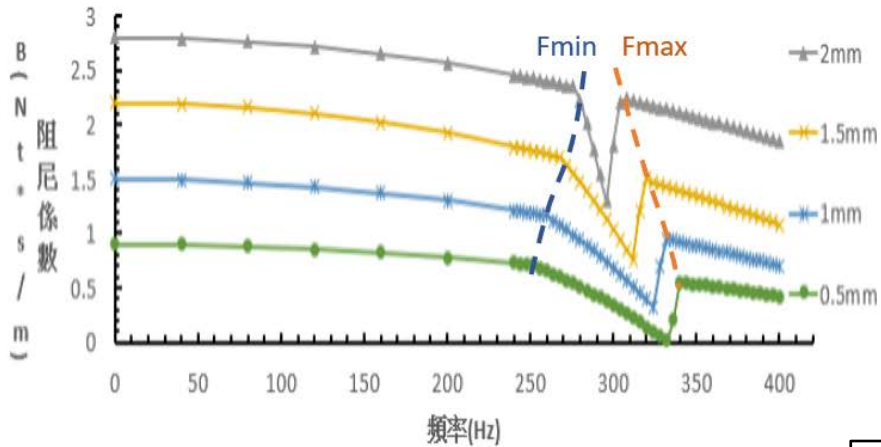


圖(二)-2、鐵磁體在變動磁場下隨時間的溫度變化

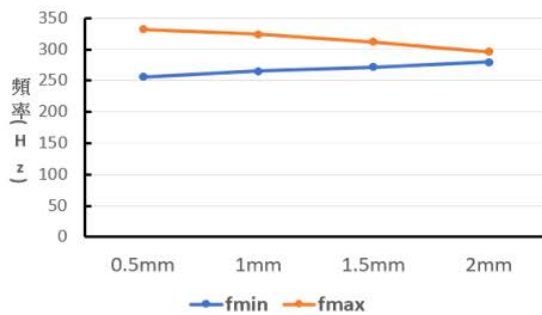


由圖(二)-1 可得知當磁場變動頻率越大，阻尼係數越低，當頻率達 284Hz 時，阻尼係數隨頻率而下降的斜率明顯增加，而當斜率超過 310Hz 時，斜率又回升。推測成因為渦電流，故針對溫度變化進行探討，發現只在 284-312Hz 下靜置 180sec 能測得明顯溫度變化(296Hz 下上升 25.8k)，過程中溫度上升速率隨時間趨緩(見圖(二)-2)。

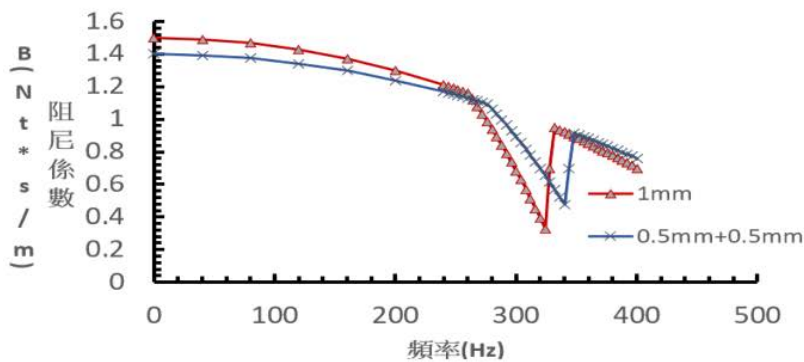
三、不同厚度及排列的複合磁體在變動磁場下的振盪變化



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

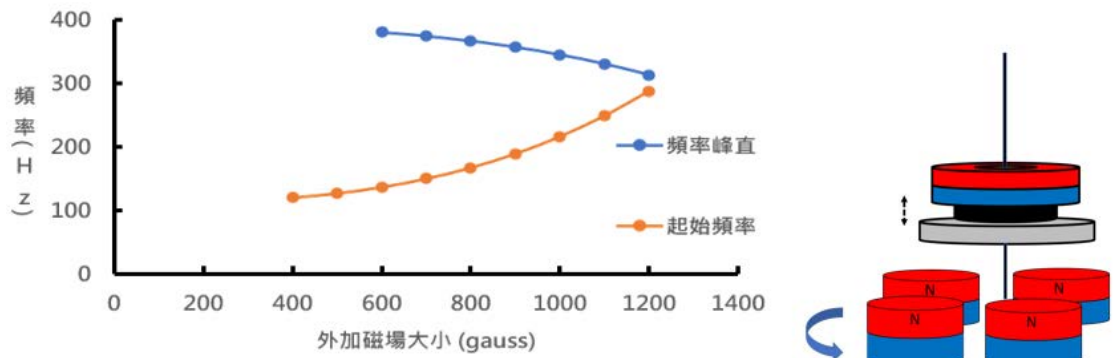


圖(三)-3、比較鐵磁體切片前後的頻率<->阻尼係數關係圖

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。

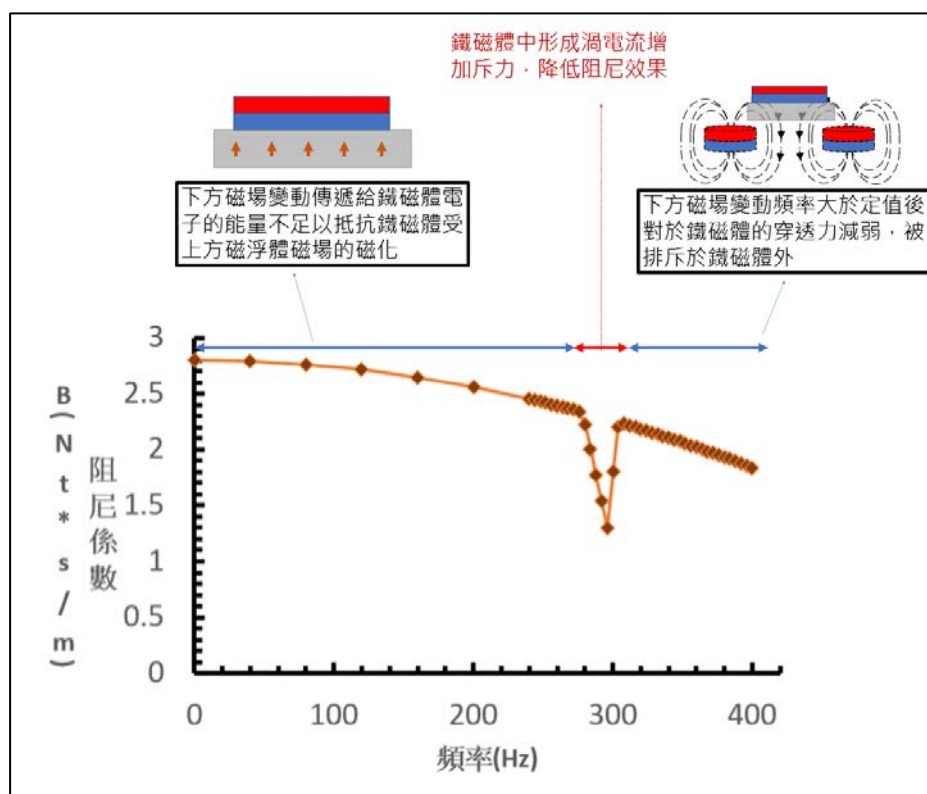
陸、 討論

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	起始頻率: 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矯頑力
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	頻率峰值: 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	矯頑力: 變動磁場頻率上升會增加矯頑力



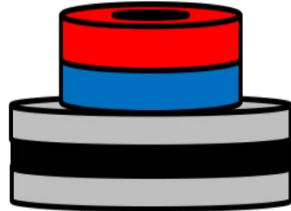
三、未來展望

(一) 實驗步驟中的限制

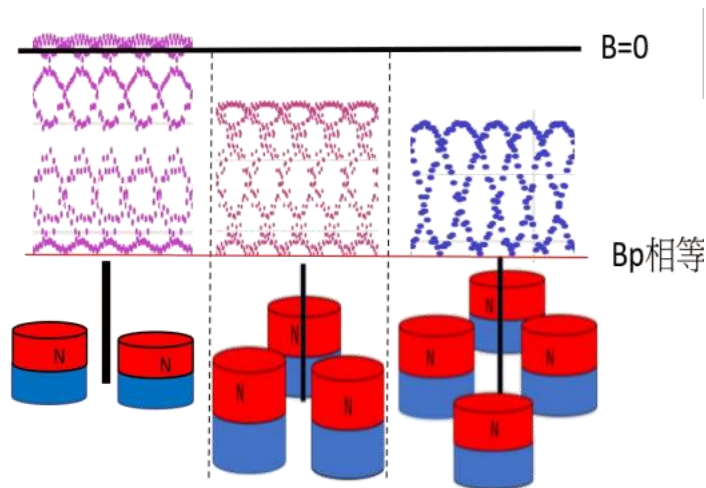
1. 分析鐵磁體的磁滯曲線
2. 針對磁化率與渦電流的臨界頻率進行定量分析
3. 裝置環境的 3D 磁場分析

(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】 160017

展板製作搭配投影片講解清晰有條理。英語流利，答問應對清楚，思考縝密成熟。研究主題組合磁鐵的阻尼效應，自創磁鐵結構，探討電流頻率對阻尼強度的效應，內容豐富，分析合宜，可再變換參數延伸實驗，發展成實驗課教材。能做邏輯歸納。對於特別發現的數據變化處，值得再多作原理探討。