

# 中華民國第 58 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

佳作

051801

金箍棒變身

—鐵棒在外加磁場下磁致伸縮及側向調控

學校名稱：臺北市立麗山高級中學

|   |                             |
|---|-----------------------------|
| 作者：<br><br>高二 王彥文<br><br>高二 陳文琪<br><br>高二 鄭巨媄 | 指導老師：<br><br>徐志成<br><br>許永昇 |
|---|-----------------------------|

關鍵詞：磁致伸縮、磁滯曲線、光槓桿原理

## 摘要

本研究利用光學方法中的光槓桿原理測量鐵棒在外加磁場下的工作特性。而本研究分為四大部分：

第一部分是探討鐵棒及不鏽鋼棒的磁滯曲線；第二部份是將鐵棒及不鏽鋼棒通入直/交流磁場並觀察其工作特性；第三部分是進行磁致伸縮應力的測試；第四部分是用強力磁鐵給予鐵棒二維側向磁場並觀察其工作特性。

和壓電晶片相比，磁致伸縮材料能量較大、可接受之頻率範圍較廣，因此成為現今科技中的主要應用對象，未來希望磁致伸縮材料可以運用在聲納、消震器及電鑽上；而運用側向磁場來進行調控的部分，則希望能運用在高精密電子儀器及變壓器的消音上。

## 壹、研究動機

西元 1842 年英國物理學家詹姆士·焦耳發現當被置於磁場中時，鐵磁性材料會改變它們的形狀，但體積保持不變，而這個現象即為「焦耳磁致伸縮」，而西元 2015 年 Nature 雜誌中提到近代美國坦普爾大學和馬里蘭大學研究人員發現了一新類型磁鐵，他們將特定的鐵基合金放在爐中加熱至大約 760 攝氏度，並持續 30 分鐘，之後迅速將其冷卻到室溫，這時再把該材料放置於磁場中時其表現出了「非焦耳磁致伸縮」行為。

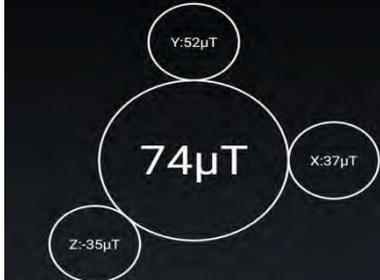
國中的時候，我們在課本中曾經學過電流磁效應及安培右手定則，到了高三選修物理中，我們進一步學到了磁導率、馬克斯威爾方程組及變壓器原理，接著我們進一步的研究得知，變壓器內部的鐵心因為受到磁場發生磁致伸縮現象的緣故，所以在運作的過程當中時常會產生許多噪音，形成一種噪音汙染；因此，我們設計了一連串實驗研究磁致伸縮現象的特性，並且希望透過通入二維側向磁場能夠抑制磁致伸縮現象的發生。

## 貳、研究目的

- 一、探討鐵棒及不鏽鋼棒的磁滯曲線。
- 二、利用光槓桿原理測量鐵棒及不鏽鋼棒接受直流磁場及交流磁場時，外加磁場及交流頻率對其磁致伸縮的影響，並計算出鐵棒及不鏽鋼棒的磁致伸縮率。
- 三、利用力感測器測量鐵棒及不鏽鋼棒通入直流磁場時，外加磁場對其產生應力的影響。
- 四、利用強力磁鐵對鐵棒通入二維側向磁場，測量側向磁場對磁致伸縮現象的影響。

## 參、研究設備及器材

表一、研究設備及器材表

|    |   |  |   |
|----|---|--|---|
| 器材 | 鐵棒(50cm)/不鏽鋼(72.5cm)  | 磁場探測器(手機 app)  | 直/交流電源供應器   |
| 用途 | 研究對象 (半徑：4mm)   | 測量磁場 (0-6000 $\mu$ T)  | 提供電源(0-20V、0-1000Hz)  |
| 照片 |    |    |    |
| 器材 | 雷射筆   | 螺線管(600 匝 3 個)   | 捲尺  |
| 用途 | 提供照射光源  | 提供磁場   | 測量距離  |
| 照片 |   |   |   |
| 器材 | 支架  | 鏡子   | 保麗龍板  |
| 用途 | 架設雷射筆   | 反射光源   | 當作屏幕  |
| 照片 |  |  |  |
| 器材 | 多頻道紀錄器(GLX)   | 亥姆霍茲線圈 (R : 0.15m)   | 強力磁鐵 (3000 $\mu$ T)   |
| 用途 | 測量磁致伸縮應力  | 產生載流磁場 (130 匝)   | 提供側向磁場  |
| 照片 |  |  |  |

表二、實驗器材架設整理表

|   |   |
|---|---|
|   |   |
| <p>給予螺線管磁場，觀察感應磁場 (B 場)與外加磁場(H 場)的關係<br/>(a)磁感測器、(b)螺線管</p>     | <p>給予磁致伸縮材料外加磁場，並觀察其磁致伸縮時的工作特性<br/>(a)待測物、(b)螺線管、(c) 直/交流電源供應器、<br/>(d)鏡面、(e)雷射光源</p> |
|   |   |
| <p>利用強力磁鐵給予磁致伸縮材料二維側向磁場，觀察其磁致伸縮特性<br/>(a)待測物、(b)螺線管、(c)強力磁鐵</p> | <p>給予磁致伸縮材料外加磁場，並觀察其磁致伸縮時所產生的應力<br/>(a)待測物、(b)螺線管、(c) 直/交流電源供應器、<br/>(d) 力感測器</p>     |

## 肆、研究過程或方法

### 一、原理

#### (一) 鐵磁性物質

電子的自旋加上其軌道角動量導致一個偶極子磁矩和形成一個磁場。在大多數物質中所有電子的總偶極磁矩為零。只有電子層不滿的原子（電子不成對）可能在沒有外部磁場的情況下表現一個淨磁矩。鐵磁性物質有許多這樣的電子。假如它們排列在一起的話可以一起產生一個可觀測得到的宏觀場。

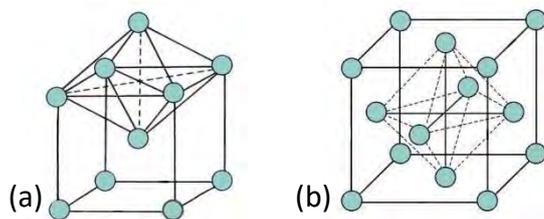
#### (二) 不鏽鋼

不鏽鋼分為兩大類：麻田散體不鏽鋼和奧斯田體不鏽鋼。

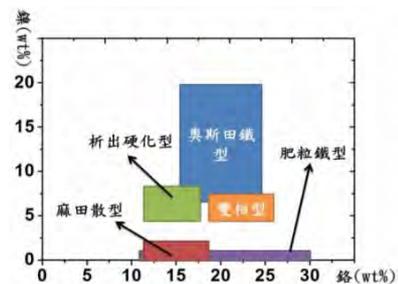
麻田散體不鏽鋼通常含有 11.5%—18% 鉻和 1.2% 以下的碳，有時也含鎳，可通過熱處理進行強化，具有中等的耐腐蝕性且具有磁性，用於刀具、外科用具、扳手和渦輪機。

奧斯田體不鏽鋼含有 16%—26% 鉻和 35% 以下的鎳，通常具有最高的耐腐蝕性，不能通過熱處理進行強化，並且無磁性；最常見的類型是 18/8，或稱 304，即含有 18% 鉻和 8% 鎳；典型的用途包括飛機工業、乳製品和食品加工工業。

本實驗所使用的不鏽鋼為麻田散體不鏽鋼及奧斯田體不鏽鋼，結構上分別是帶有磁性的體心結構及沒有磁性的面心結構。



圖一、麻田散體 (a)、奧斯田體 (b) 結構示意圖



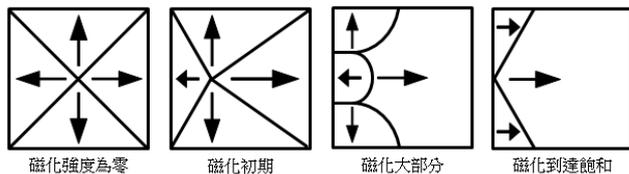
圖二、不鏽鋼成分表

#### (三) 磁化現象

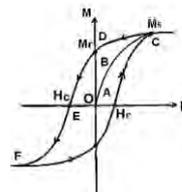
雖然有自生磁化存在，整塊的鐵磁物質通常並非自生磁化，而是處於去磁狀態。這是由於磁塊的內部分成許多磁區，各磁區均自生磁化。因為各磁區的磁化方向各不相同，其合成磁化可從零變到自生磁化之值，最後達飽和磁化，

其值等於自生磁化。假如磁場減少，磁化亦隨之減少，但並不回復到原來的值。這種磁化不可逆過程，稱為磁滯。飽和磁化和磁滯是鐵磁性的重要特徵。

$$\text{公式： } H = \frac{B}{\mu_0 - M}$$



圖三、鐵磁性材料的磁域結構



圖四、典型的鐵磁性物質磁滯曲線圖

#### (四) 磁導率

一種材料對一個外加磁場線性反應的磁化程度，磁導率通常用希臘字母 $\mu$ 來表示。電磁學中， $H$  場描繪  $B$  場在一個特定的媒介下，怎樣影響磁偶極子團，包括偶極子的遷移和磁偶極子的重新定向。

所有物質均由原子所構成，原子是由原子核和電子所構成，原子核中又有所謂的中子與質子。當帶負電的電子自旋以及圍繞著原子核作週期性的軌道運行時，會產生所謂的磁矩。磁矩散發出來的場即為磁場  $H$ 。磁性物質每單位體積所含磁矩稱為磁化強度，是以向量  $I$  表示，其單位是  $Wb/m^2$ ，並且  $Wb/m^2 = 7.96 \times 10^2 \text{ G}$ 。在其他應用方面，磁性也常用磁感應  $B$  來表示， $B$  之單位亦是  $Wb/m^2$ 。

$$\text{公式： } B = \mu \times H = \mu_0 \times n \times I$$

表三、符號解釋

| B    | $\mu$ | H    | $\mu_0$                            | $n$          | $I$ |
|------|-------|------|------------------------------------|--------------|-----|
| 感應磁場 | 磁導率   | 外加磁場 | 真空磁導率<br>( $4\pi \times 10^{-7}$ ) | 螺線管<br>每單位匝數 | 電流  |

單位換算：磁化強度的單位為奧斯特，其定義為：達因每單位磁荷，轉換至 SI 制時，1 奧

$$\text{斯特等於 } \frac{1000}{4\pi} (A/m)$$

由  $B = \mu \times H$  可知在真空情況下， $10e = 100\mu T = 1G$

$$\text{證明： } 10^{-4}(T) = \frac{1000}{4\pi} (A/m) \times 4\pi \times 10^{-7} = 100\mu T$$

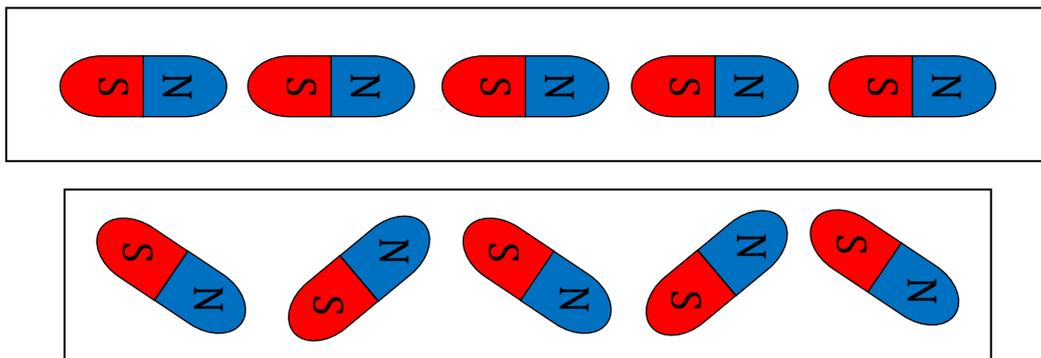
### (五) 磁致伸縮

西元 1842 年英國物理學家詹姆士·焦耳在其研究中發現，當給予鐵磁材料外加磁場的時候，其體積在固定的情況下因為密度的改變而使其形狀、長度發生變化，而這個物理現象就被稱為「焦耳磁致伸縮」。

磁性材料在磁場的作用下顯示形狀及體積的改變，稱為磁致伸縮，隨著所加磁場的大小不同，形變也可以不同，當磁場比飽和磁化場 $H_s$ 小時，樣品的形狀主要是長度的改變（一維磁致伸縮），而體積幾乎不改變；當磁場大於 $H_s$ 時，樣品的形變主要是體積的改變，即所謂體積磁致伸縮。體積磁致伸縮在磁場大於 $H_s$ 時才發生，體積磁伸縮比起一維磁致伸縮還要微弱許多，用途較少。

公式： $\lambda = \frac{\Delta L}{L \times \Delta H}$ （磁致伸縮率：每單位磁場其磁致伸縮量與原始長度的比值）

$\lambda_s = \frac{\Delta L}{L}$ （飽和磁致伸縮率：當磁化程度達飽和時的磁致伸縮率）



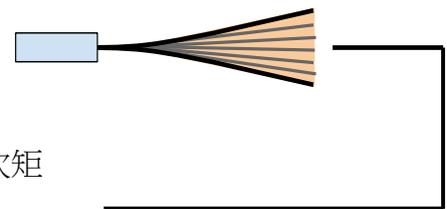
圖五、磁致伸縮原理圖

### (六) 共振原理

共振是指一物理系統在特定頻率下，比其他頻率以更大的振幅做振動的情形，這些特定頻率稱之為共振頻率。在共振頻率下改變波動的振幅但波動的頻率不改變。因此，在這些頻率下，即使以小週期的驅動能量也可能導致大振幅的波動，因為共振系統可以儲存波動能量。

公式： $\omega_n = \frac{n^2 \pi^2}{L^2} \times \sqrt{\frac{EI}{m}}$

$m$  = 質量； $E$  = 楊氏係數； $L$  = 長度； $I$  = 面積二次矩

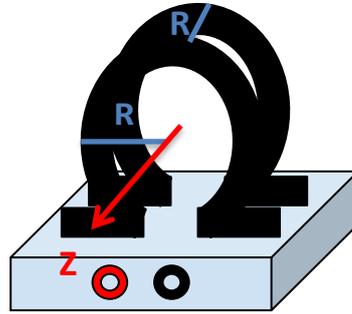


圖六、共振原理圖

(七) 亥姆霍茲線圈

由兩個半徑為  $R$  且完全相同的圓形導體線圈所組成，能製造小範圍區域均勻磁場的工具。使用直角坐標系，且兩個線圈的中心軸都是  $Z$  軸。

$$\text{公式： } B = \frac{8N\mu_0 I}{\sqrt{125}R}$$



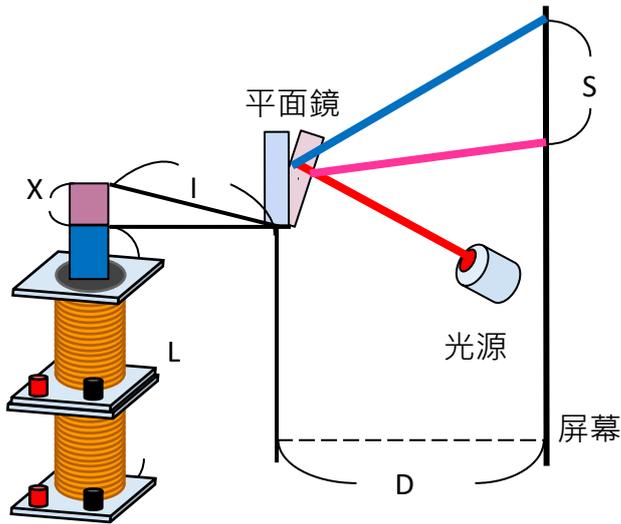
圖七、亥姆霍茲線圈

表四、符號解釋

|         |         |
|---------|---------|
| B       | 磁場大小    |
| $\mu_0$ | 真空磁導率   |
| N       | 線圈匝數    |
| I       | 電流      |
| R       | 線圈半徑    |
| Z       | 線圈中心軸方向 |

二、方法：光槓桿原理

當鏡子旋轉  $\theta$  角則入射角與反射角之間的夾角增加  $2\theta$  角。



圖八、公式推導示意圖

表五、符號解釋

|        |            |
|--------|------------|
| X (待測) | 鐵棒伸縮長度     |
| L (已知) | 原始長度       |
| D (已知) | 反射鏡與尺之間的距離 |
| S (待測) | 光點移動量      |
| l (已知) | 支架長度       |

當鐵棒長度改變  $x$ ，鏡子傾斜角度為  $\theta$  時

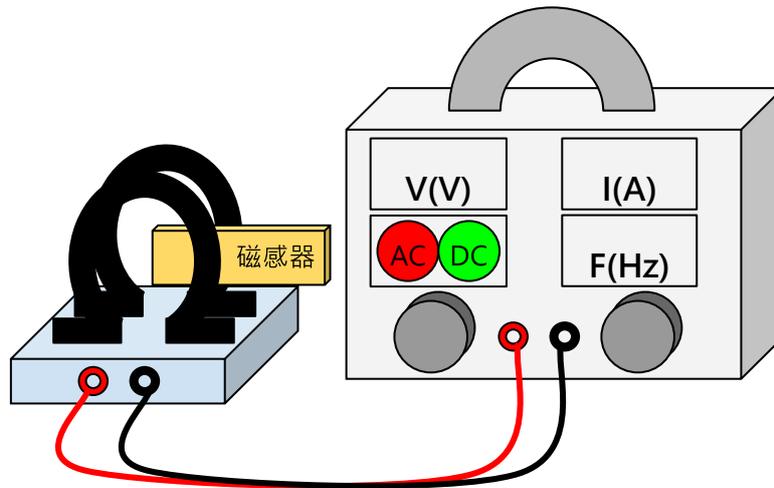
$$\theta = \frac{x}{l} \text{ 或 } \frac{x}{l} = \frac{s}{2D} \text{ 或 } x = \frac{ls}{2D}$$

$$L_{\text{未}} = L + x = L(1 + \lambda\Delta B) = L + L\lambda\Delta B$$

$$\lambda = \frac{x}{L\Delta B} = \frac{ls}{2DL\Delta B}$$

### 三、實驗架設

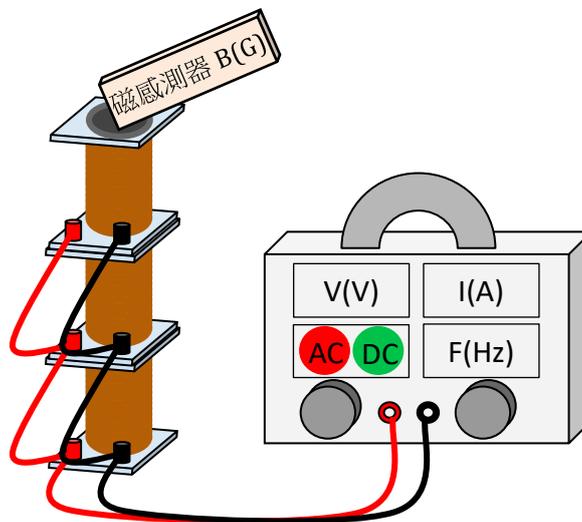
#### (一) 實驗校正：校正手機磁感測器



圖九、校正實驗示意圖

本實驗使用直交流電源供應器提供亥姆霍茲線圈電流使其產生均勻磁場，再用手機裡的磁感測器測量其磁場大小，最後將數據與理論值進行比較。

#### (二) 實驗一：感應磁場與外加磁場關係（磁滯曲線）

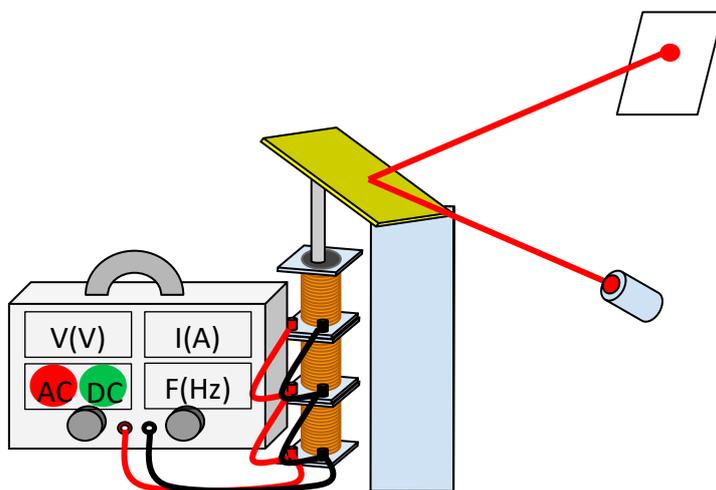


圖十、磁滯曲線測量原理示意圖

在一般的科學研究當中倘若要測量磁性物質之磁滯曲線通常是透過 VSM（振動測磁儀）或磁強計來進行實驗，這些儀器雖然精確度高，卻只能測量小樣本的材料且價格相當昂貴（VSM 每台造價數百萬元）；而本研究則使用載流（直/交流）螺線管提供外加磁場變化，利用手機磁感應器測量磁場並與磁強計進行比對，使用上相當簡易方便且成本低。

此實驗的目的是測量鐵棒及不鏽鋼棒的磁滯曲線，將三個規格皆為 600 匝的螺線管套在待測物的外圍，通入電流之後，螺線圈會產生電流磁效應，對待測物形成一個外加磁場，緊接著利用手機的磁感測器測量待測物的感應磁場。

### (三) 實驗二：通入直/交流磁場時的磁致伸縮特性



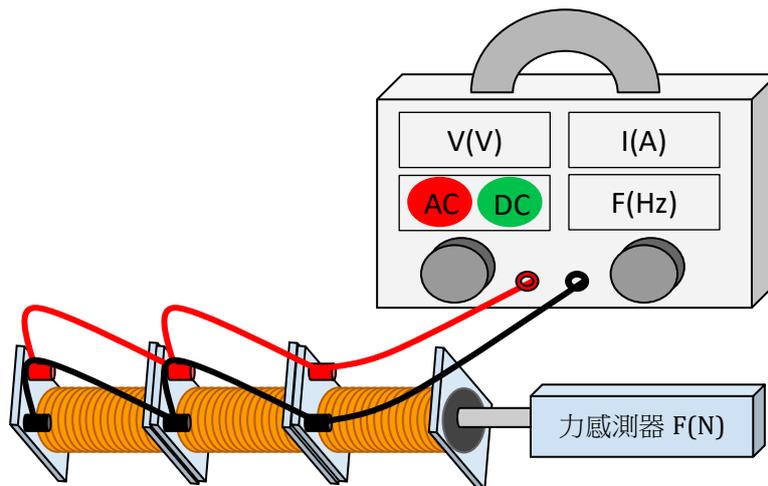
圖十一、通入直/交流磁場時的磁致伸縮特性測量示意圖

由於磁致伸縮量變化量小（約數十微米），若使用光學方法一般使用邁克生干涉法或光槓桿法，邁克生干涉法雖精確度高，但裝置過於複雜且較不容易設置，故本實驗設計運用光槓桿法進行設計與測量伸縮量（率），其設計與測量原理如上圖所示。

此實驗的目的是測量鐵棒及不鏽鋼棒的磁致伸縮量，進而推算出它們的磁致伸縮率。將三個規格皆為 600 匝的螺線管套在待測物的外圍，通入電流之後，螺線管會產生電流磁效應，對待測物形成一個外加磁場，使其發生磁致伸縮的現象。

我們將待測物的底端固定住，頂端則是頂著木板，木板的末端連接一面鏡子，當待測物因為磁致伸縮開始振動時，鏡子的角度會隨著待測物的振動而改變。將雷射光照射在鏡子上，並且使鏡子反射的雷射光投射在我們架設的屏幕上。通入電流後，待測物發生磁致伸縮，同時我們使用手機裡的應用程式來測量磁場大小。觀察投射在屏幕上的雷射光點，由於鏡子的角度改變，光點的位移會很明顯，記錄在每種頻率下光點的位移量，最後代入公式，算出待測物的磁致伸縮率。

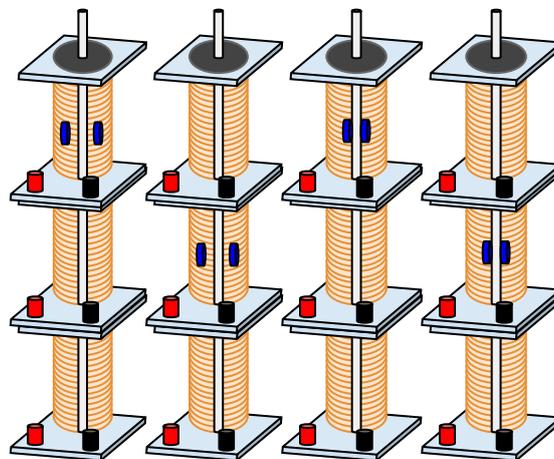
(四) 實驗三：外加磁場對磁致伸縮應力的關係



圖十二、磁致伸縮應力測量示意圖

此實驗的目的是測量鐵棒及不鏽鋼棒因磁致伸縮而產生的應力大小。我們先將鐵棒的頭尾固定住，並且在固定端放置力感測器。當我們給鐵棒外加磁場後，鐵棒會開始振動，並撞擊感測器，就能得到磁場變化量與磁致伸縮應力的關係。

(五) 實驗四：側向磁場對於磁致伸縮現象的影響

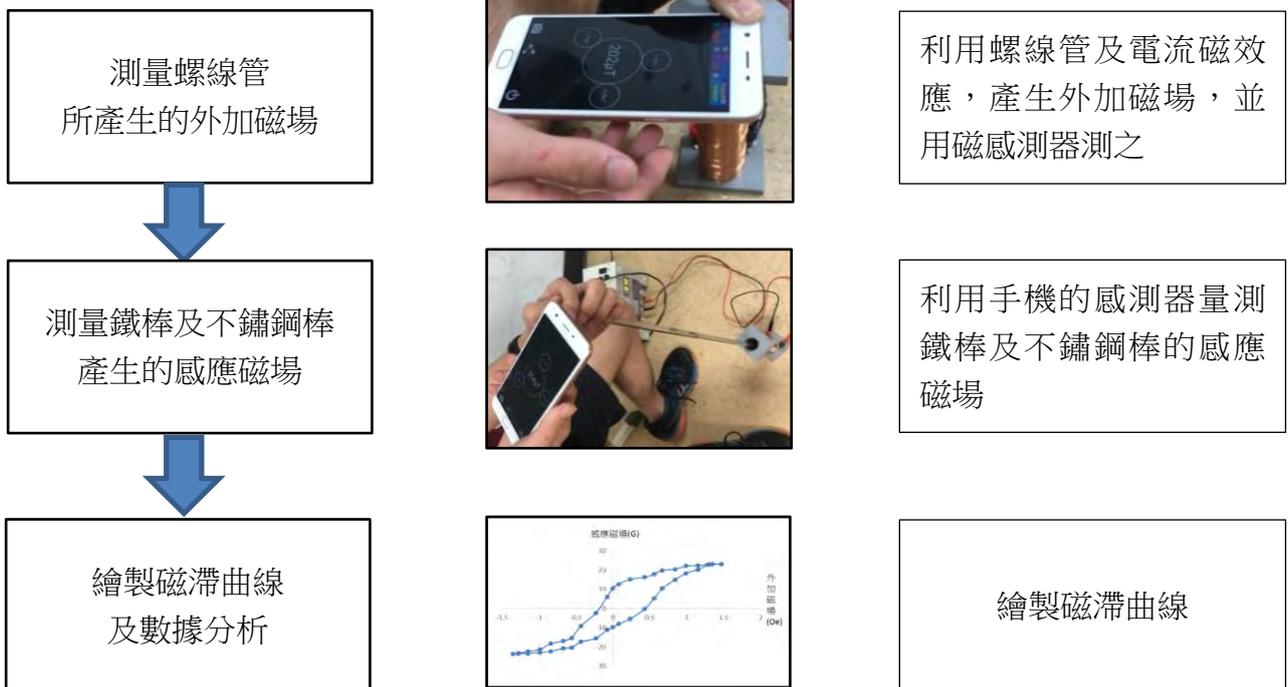


圖十三、給予磁致伸縮材料二維側向磁場，並觀察其磁致伸縮時的工作特性實驗圖

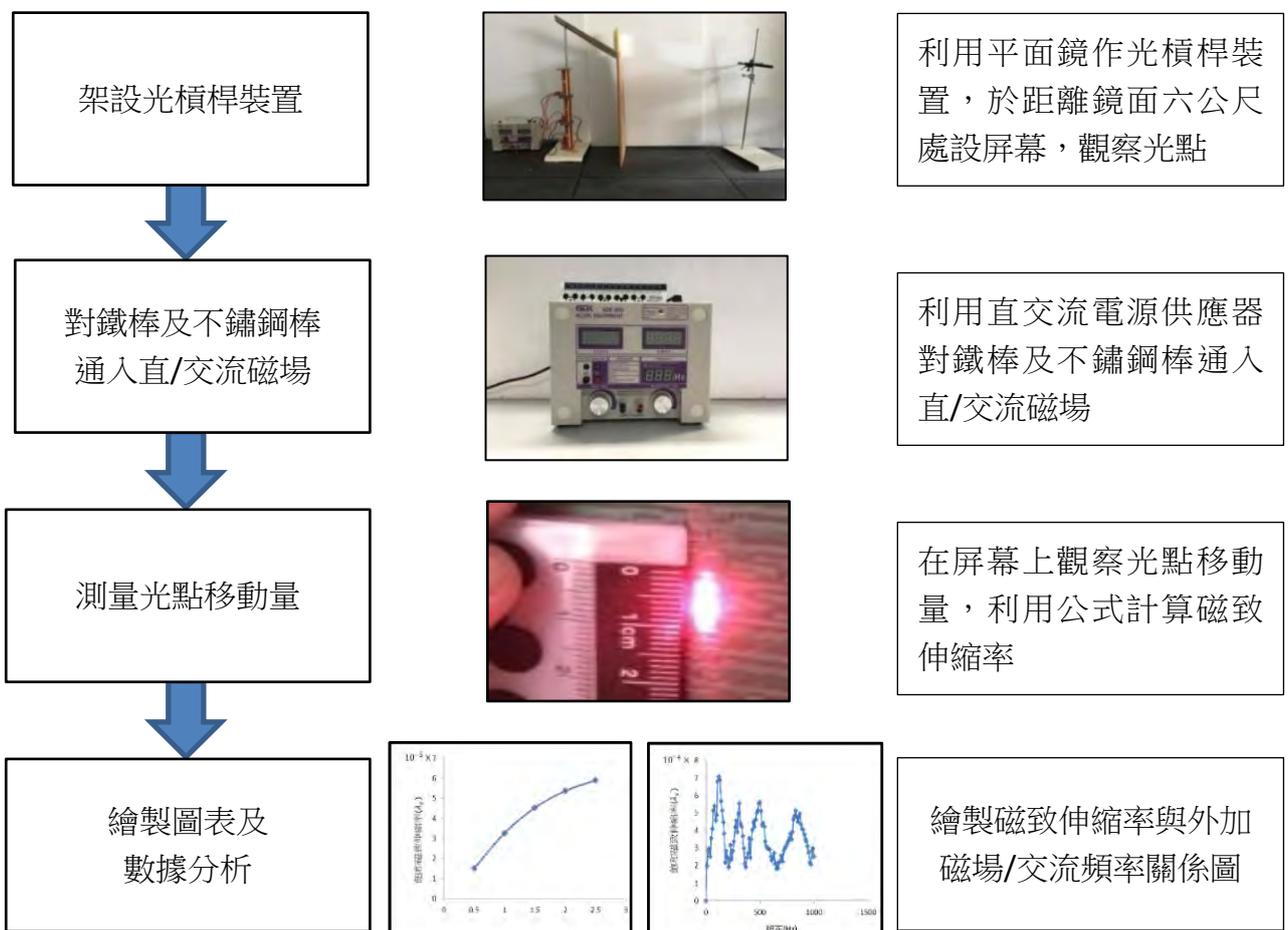
利用強力磁鐵對鐵棒通入二維側向磁場，並重複實驗（一）、（二）、（三）的步驟觀察二維側向磁場對鐵棒磁致伸縮現象的影響。本研究對鐵棒通入側向磁場主要分為通入的位置不同及強度不同兩部分。

#### 四、實驗流程圖

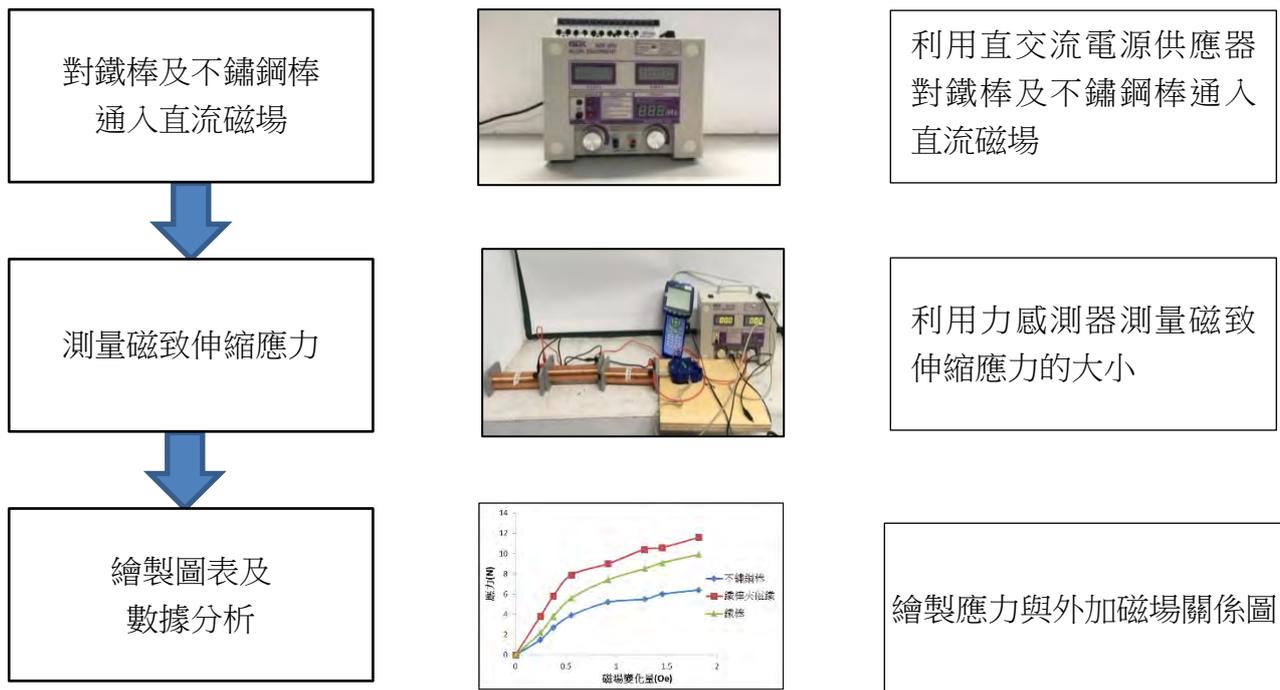
##### (一) 實驗一：感應磁場與外加磁場關係（磁滯曲線）



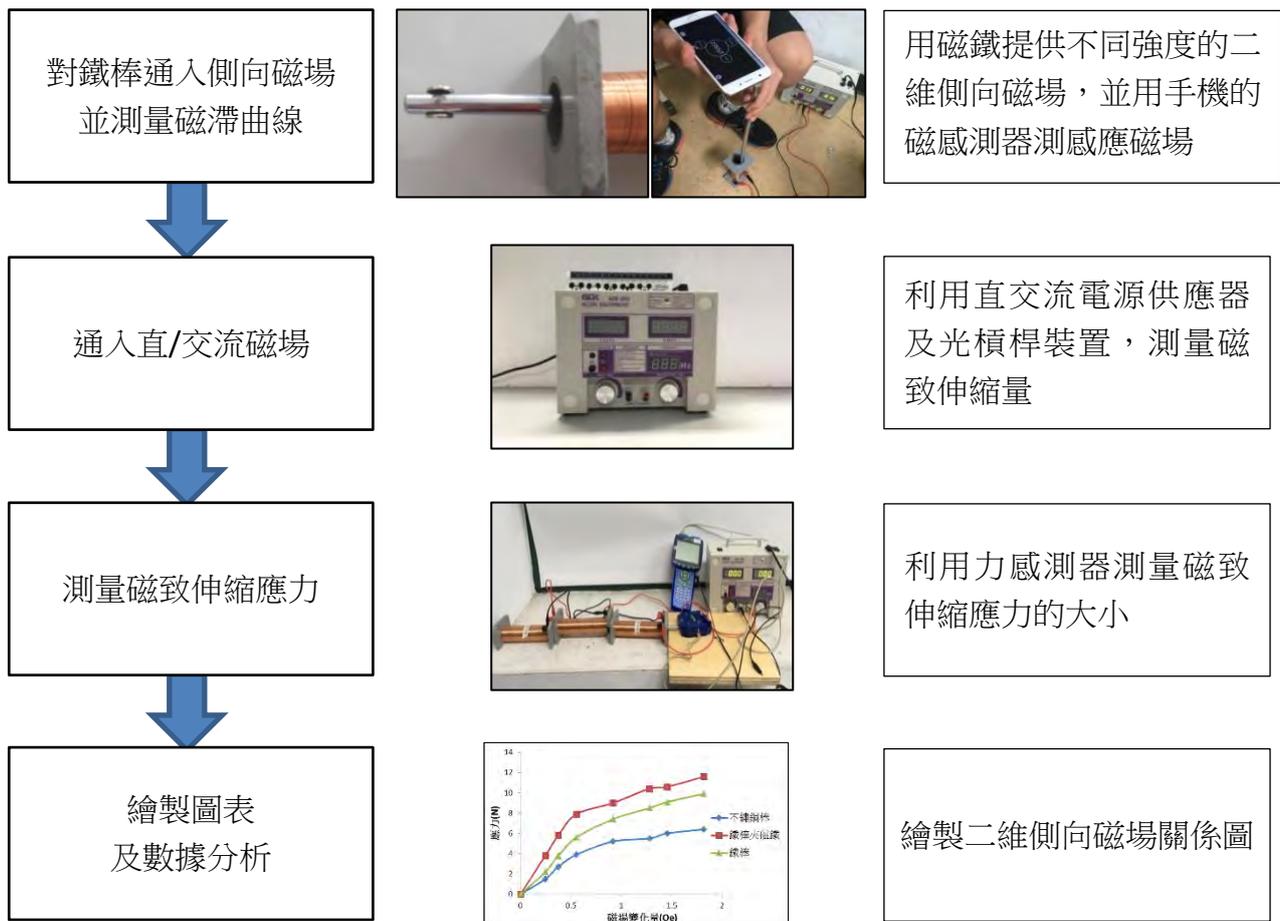
##### (二) 實驗二：通入直/交流磁場時的磁致伸縮特性



(三) 實驗三：外加磁場對磁致伸縮應力的關係



(四) 實驗四：二維側向磁場對於磁致伸縮現象的影響



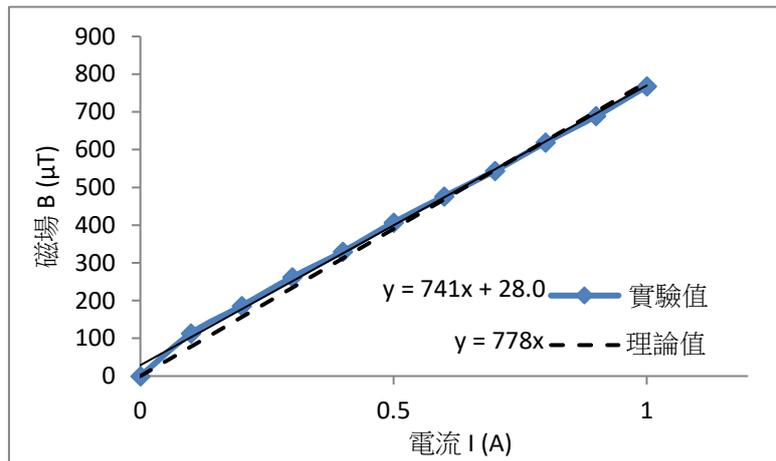
## 伍、研究結果

### 一、手機磁感測器校正

手機磁感測器：應用程式 APP

亥姆霍茲線圈規格：半徑 0.15(m)，130 匝

用電源供應器提供亥姆霍茲線圈電流以產生電流磁效應，再用手機測量磁場大小。



圖十四、磁感測器儀器校正關係圖

由此數據圖可以證明：用手機磁感測器測得之數據理論相當，因此用手機來測量磁場確實是可行的方法。

將實驗值及理論值的趨勢斜率相除後，得到比例為 0.95，相對誤差5%以內，兩者呈高度擬合，由此可知，手機磁感測器所測得之磁場是相當準確，可取代實驗室中常使用的高精度磁強計。

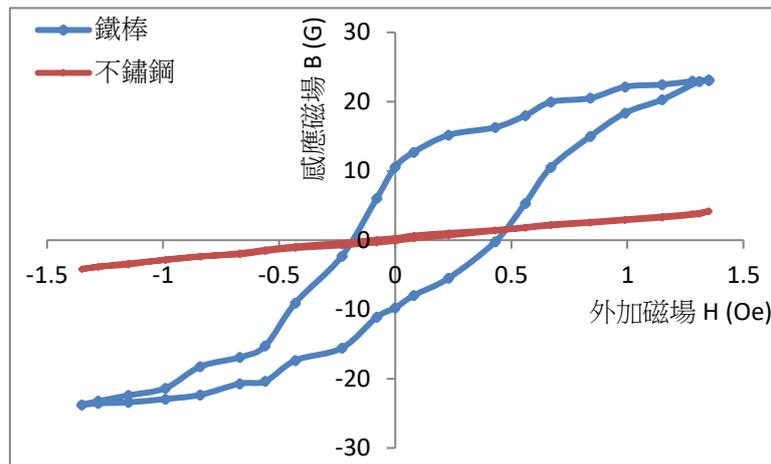
## 二、實驗一：感應磁場與外加磁場關係（磁滯曲線）

螺線管規格：15(cm)，600 匝

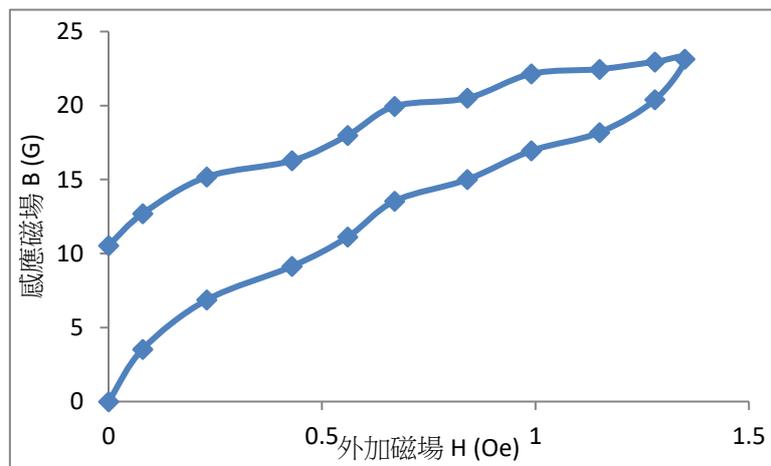
鐵棒規格：50(cm)

不鏽鋼規格：72.5(cm)

將螺線管通入電流並產生電流磁效應作為外加磁場，測量鐵棒及不鏽鋼的感應磁場。



圖十五、鐵棒及不鏽鋼感應磁場與外加磁場關係圖（磁滯曲線）



圖十六、鐵棒的初始磁滯曲線

由此數據圖可以知道：隨著外加磁場逐漸增強，鐵棒會漸漸達到磁飽和，而當外加磁場歸零後鐵棒仍會有大約  $1000 \mu\text{T}$  (10(G)高斯)的剩磁，且其矯頑力約為  $0.3 \text{ Oe}$ ；隨著外加磁場逐漸增強，不鏽鋼棒會漸漸達到磁飽和，而當外加磁場歸零後鐵棒仍會有大約  $10 \mu\text{T}$  (0.1(G)高斯)的剩磁，且其矯頑力約為  $0.05 \text{ Oe}$ 。

### 三、實驗二：通入直/交流磁場時的磁致伸縮特性

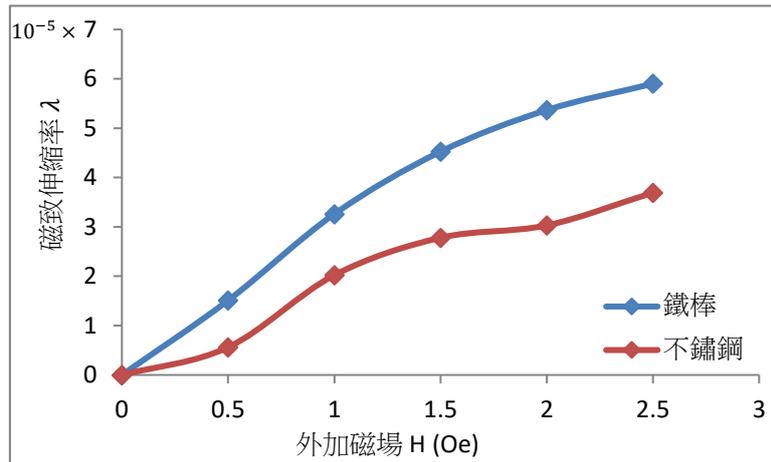
螺線管規格：15(cm)，600 匝

鐵棒規格：50 (cm)

不鏽鋼規格：72.5 (cm)

#### (一) 磁致伸縮率與外加磁場關係

用螺線管及電流磁效應，產生磁場變化量(0~2 Oe)，測量磁致伸縮率。

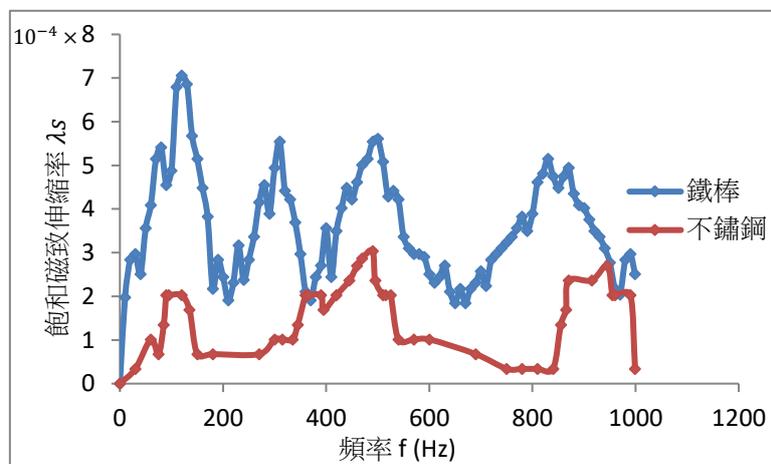


圖十七、磁致伸縮率與外加磁場的關係圖

由此數據圖可以發現：隨著外加磁場逐漸增強，鐵棒及不鏽鋼棒會逐漸達到磁飽和。而當鐵棒及不鏽鋼棒達飽和時，其飽和磁致伸縮率分別為  $5.90(\pm 0.02) \times 10^{-5}$  及  $3.39(\pm 0.04) \times 10^{-5}$ 。

#### (二) 磁致伸縮率與磁場交流頻率關係

改變不同的頻率(0~1000Hz)，測量磁致伸縮率。



圖十八、磁致伸縮率與磁場交流頻率的關係圖

由此數據圖可以發現：當我們對鐵棒及不鏽鋼棒通入不同頻率的磁場時，磁致伸縮率會有所不同。在 120Hz、310Hz、500Hz 及 860Hz 時，鐵棒會出現較明顯的伸縮量；而在 90Hz、490Hz 及 930Hz 時，不鏽鋼會出現較明顯的伸縮量。

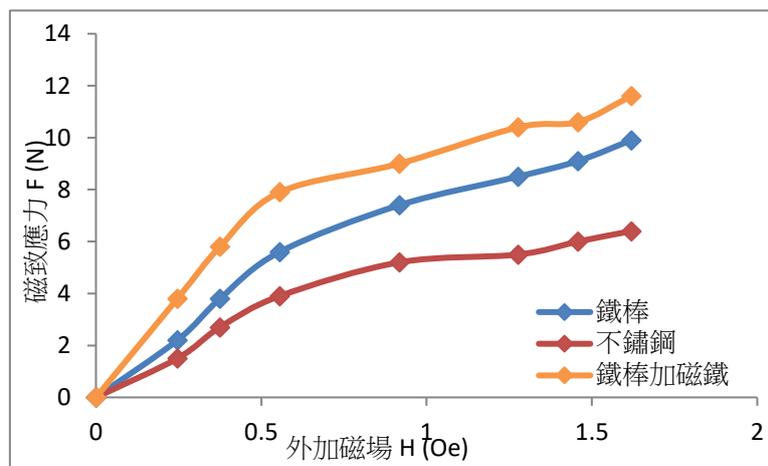
#### 四、實驗三：外加磁場對磁致伸縮應力的關係

螺線管規格：15(cm)，600 匝

鐵棒規格：50 (cm)

二維側向磁場：3000 $\mu$ T

用螺線管改變電流，產生磁場變化量(0~2 Oe)，測量磁致伸縮應力。



圖十九、磁致伸縮應力與外加磁場的關係圖

由此數據圖可以發現：隨著外加磁場逐漸增強，鐵棒及不鏽鋼會逐漸達到磁飽和，而鐵棒及不鏽鋼因磁致伸縮而產生的應力分別趨近於 10N 及 6N，且通入二維側向磁場後磁致伸縮應力將增大 20%。

## 五、實驗四：側向磁場對於磁致伸縮現象的影響

螺線管規格：15(cm)，600 匝

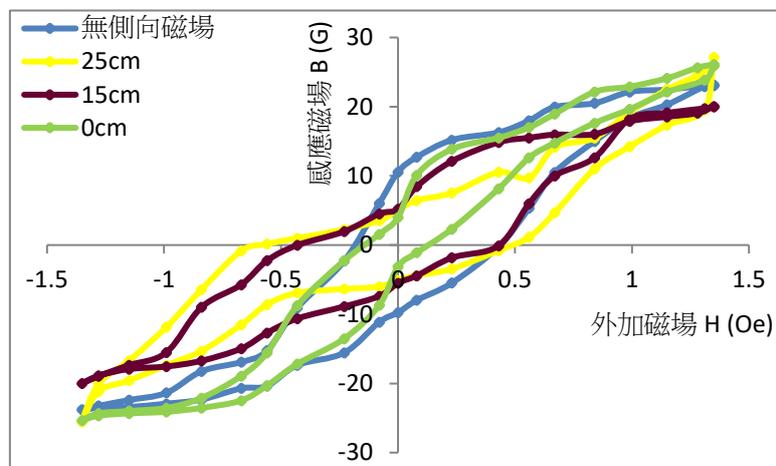
鐵棒規格：50 (cm)

### (一) 感應磁場與外加磁場關係 (磁滯曲線)

#### 1. 通入不同位置的二維側向磁場

二維側向磁場：3000 $\mu$ T

將螺線管通入電流並產生電流磁效應作為外加磁場，並使用強力磁鐵作為側向磁場。藉由施加在不同位置以進行調控，測量鐵棒的感應磁場。



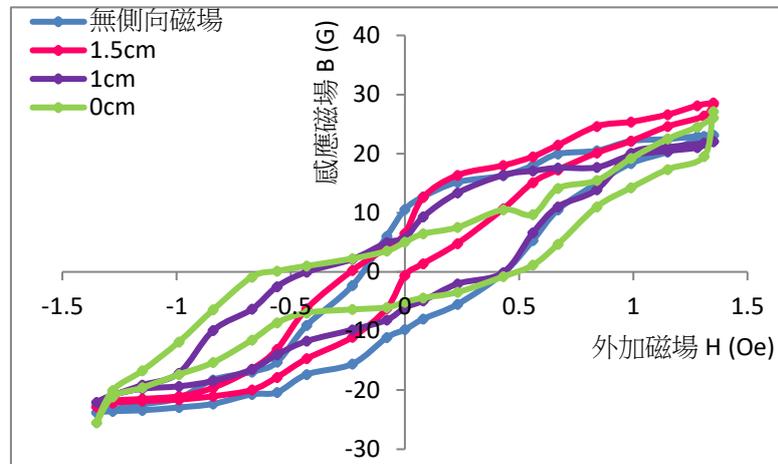
圖二十、在不同位置通入二維側向磁場時鐵棒感應磁場與外加磁場關係圖 (磁滯曲線)

由此數據圖可以知道：通入二維側向磁場過後鐵棒的剩磁變小了(約 5G)，而矯頑力則明顯有增強的趨勢(約 0.5Oe)，且通入二維側向磁場的位置離中心越遠此現象越明顯。

## 2. 通入不同強度的二維側向磁場

將螺線管通入電流並產生電流磁效應作為外加磁場，並使用強力磁鐵作為側向磁場。藉由施加不同強度的磁場以進行調控，測量鐵棒的感應磁場。

| 兩磁鐵距離 | 磁場大小         |
|-------|--------------|
| 0cm   | 3000 $\mu$ T |
| 1cm   | 1900 $\mu$ T |
| 1.5cm | 1500 $\mu$ T |



圖二十一、通入不同強度的二維側向磁場時鐵棒感應磁場與外加磁場關係圖（磁滯曲線）

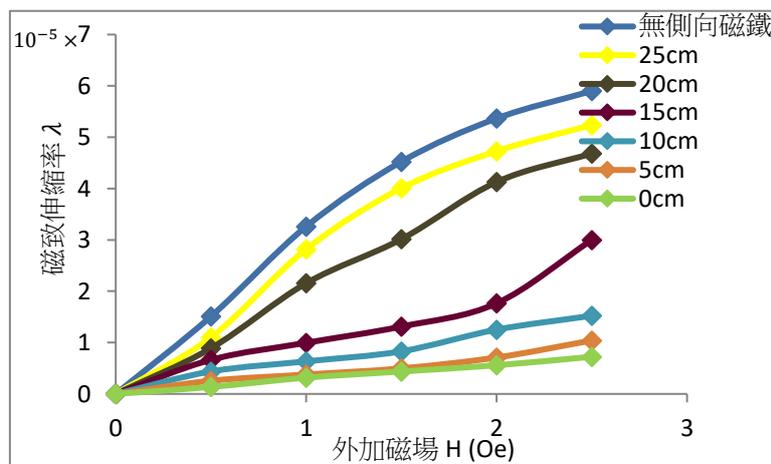
由此數據圖可以知道：通入二維側向磁場過後鐵棒的剩磁變小了(約 5G)，而矯頑力則明顯有增強的趨勢(約 0.5Oe)，且通入二維側向磁場的強度越大此現象越明顯。

### (二) 通入直/交流磁場時的磁致伸縮特性

#### 1. 在直流磁場下，通入不同位置的二維側向磁場

二維側向磁場：3000 $\mu$ T

用強力磁鐵在距離鐵棒的中心不同距離處通入側向磁場，並用螺線管及電流磁效應，產生不同的磁場變化量(0~2.5 Oe)，測量磁致伸縮率。



圖二十二、在不同位置通入側向磁場時，鐵棒磁致伸縮率與外加磁場的關係圖

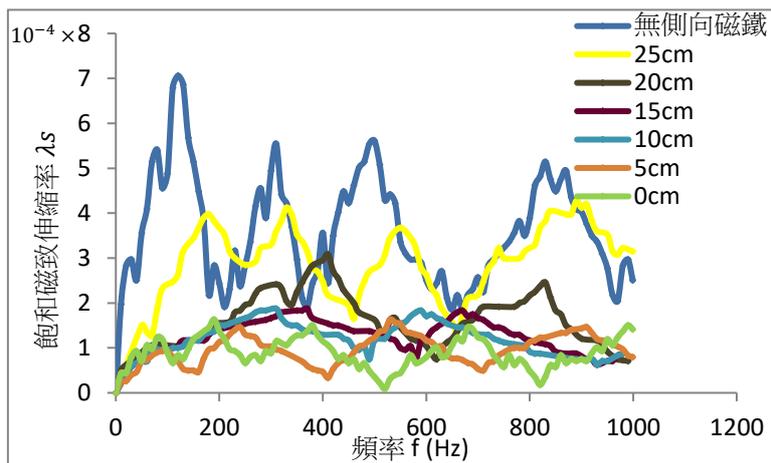
由此數據圖可以發現：在直流磁場下對鐵棒通入側向磁場後磁致伸縮率會受到抑制；而

隨著側向磁場通入的位置離受測物的中心位置越遠，磁致伸縮率被抑制的現象越明顯，且鐵棒越不容易達到磁飽和。

2. 在交流磁場下，通入不同位置的二維側向磁場

二維側向磁場：3000 $\mu$ T

用強力磁鐵在鐵棒不同位置通入側向磁場，改變頻率(0~1000Hz)，測量磁致伸縮率。



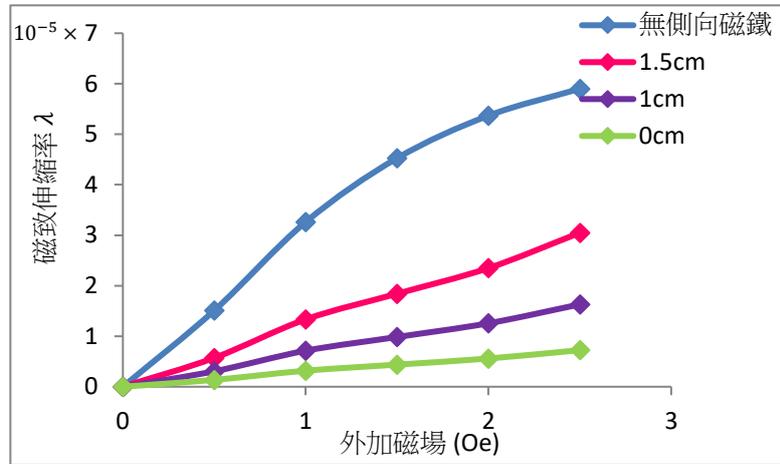
圖二十三、在不同位置通入側向磁場時，鐵棒磁致伸縮率與磁場頻率的關係圖

由此數據圖可以發現：在交流磁場下對鐵棒通入側向磁場後磁致伸縮率會受到抑制；而隨著側向磁場通入的位置離受測物的中心位置越遠，磁致伸縮率被抑制的現象越明顯，且峰值所在之頻率也越往高頻率偏移。

3. 在直流磁場下，通入不同強度的二維側向磁場

改變側向磁場的強度，並用螺線管及電流磁效應，產生不同的磁場變化量 (0~2.5Oe)，測量磁致伸縮率。

| 兩磁鐵距離 | 磁場大小         |
|-------|--------------|
| 0cm   | 3000 $\mu$ T |
| 1cm   | 1900 $\mu$ T |
| 1.5cm | 1500 $\mu$ T |



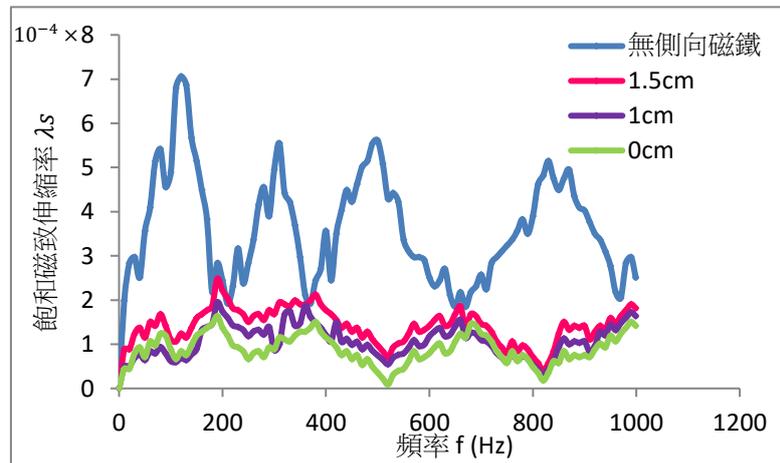
圖二十四、通入不同強度的側向磁場時，磁致伸縮率與外加磁場關係圖

由此數據圖可以知道：側向磁場的強度越強，磁致伸縮被抑制的現象越明顯。

4. 在交流磁場下，通入不同強度的二維側向磁場

改變側向磁場的強度，並改變不同的頻率(0~1000Hz)，測量鐵棒磁致伸縮率。

| 兩磁鐵距離 | 磁場大小         |
|-------|--------------|
| 0cm   | 3000 $\mu$ T |
| 1cm   | 1900 $\mu$ T |
| 1.5cm | 1500 $\mu$ T |

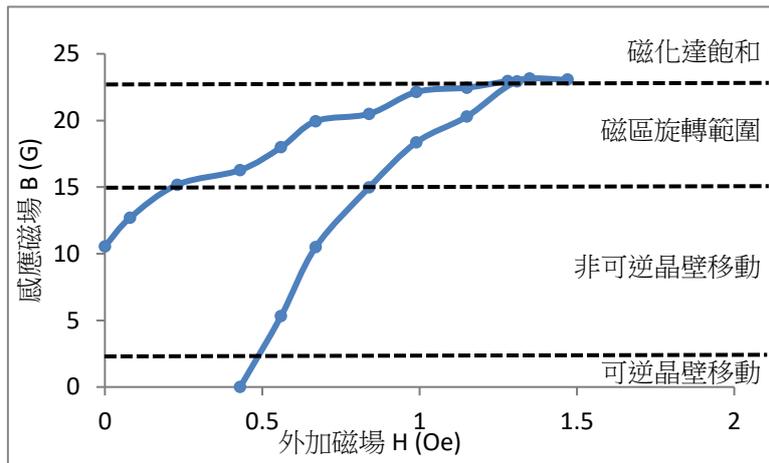


圖二十五、通入不同強度的側向磁場時，磁致伸縮材振幅與磁場交流頻率關係圖

由此數據圖可以知道：側向磁場的強度越強，磁致伸縮被抑制的現象越明顯，且峰值所在之頻率有往高頻率偏移的現象。

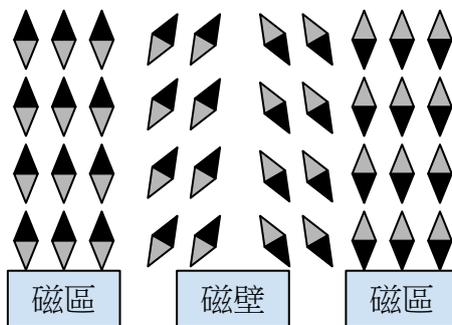
## 陸、討論

- 一、由於手機磁感測器所能準確量測的範圍約為 $\pm 6000\mu\text{T}$ ，所以本實驗只能給予鐵棒  $2.50\text{e}$  的外加磁場使其產生磁感測器所能承受的感應磁場。
- 二、由實驗一（磁滯曲線）的數據得知：鐵棒在飽和磁化量之下的矯頑力為  $0.30\text{e}$  大於不鏽鋼的矯頑力  $0.050\text{e}$ ，且兩者的矯頑力皆小於  $2.50\text{e}$ ，由此可以說明鐵棒及不鏽鋼棒都屬於軟磁性材料，十分適合拿來進行磁致伸縮的研究。



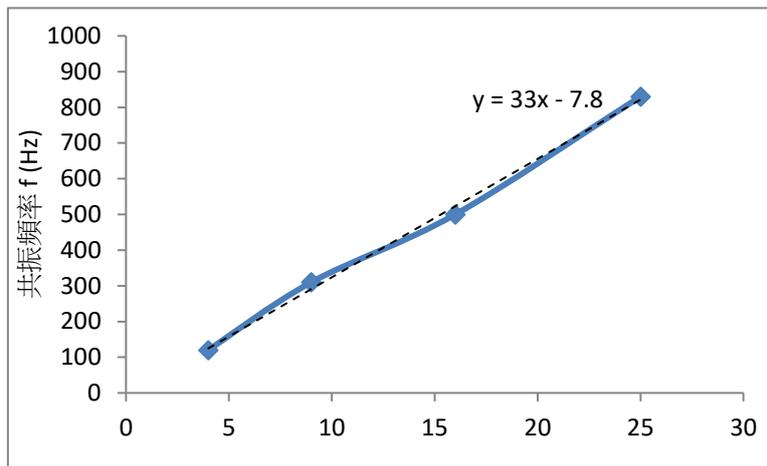
圖二十六、磁滯曲線特性示意圖

- 三、實驗一（磁滯曲線）及實驗二（鐵棒及不鏽鋼棒通入直流磁場的磁致伸縮特性）的數據我們得知：隨著磁化程度逐漸飽和，鐵棒的磁致伸縮率也會漸漸達到飽和，此現象與磁滯曲線的結果不謀而合，因此認為磁致伸縮的發生可能跟磁疇的旋轉有關，當鐵棒達到磁飽和時，由於磁疇已翻轉完畢所以磁致伸縮率便會隨之達到飽和；而從鐵棒及不鏽鋼棒的比較當中可以發現，矯頑力與磁致伸縮率成正相關，當矯頑力越大時磁致伸縮率也會越大。



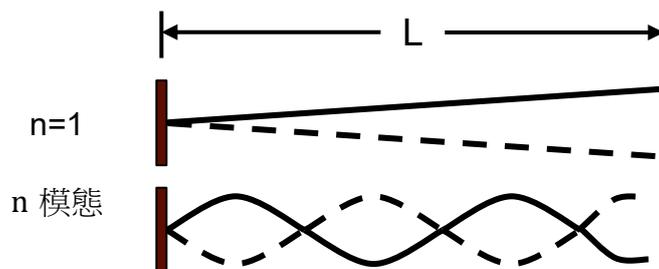
圖二十七、磁壁位移示意圖

四、由實驗二（鐵棒及不鏽鋼棒通入交流磁場的磁致伸縮特性）的數據我們得知：當鐵棒通入交流磁場時，在頻率為 120Hz、310Hz、500Hz 及 830Hz 有較明顯的振幅，此現象可能與共振相關，經由初步計算發現，共振的頻率大致上與某個基底成平方倍數關係，而從共振頻率的公式  $f = f_0 \times n^2$ ，可推測當  $n=1$  時頻率為 33Hz，即為基頻，且的確在圖十八中有相對應的小峰值。



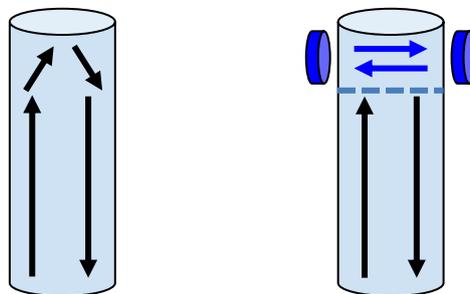
圖二十八、共振頻率與 $n^2$ 的關係

接著再由最簡易的一維弦振盪公式  $f = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{4L}$  可以推算出鐵棒內部磁壁運動的平均值約為  $66 \text{ m/s}$  ( $v = f \times 4L = 33 \times 4 \times 0.5 = 66$ )， $66 \text{ m/s}$  雖然經由實驗數據計算後所獲得的數據( $66 \text{ m/s}$ )和文獻中金屬細絲的理論值( $30 \sim 50 \text{ m/s}$ )有些許的相似，但是此數據與鐵棒內部縱波(如聲波)的傳播速率  $5000 \text{ m/s}$  明顯的不相符，因此我們推測磁致伸縮現象產生的波形為磁疇翻轉所形成的表面波；最後進一步從微觀的角度進行推測，磁致伸縮現象的發生是因為外加磁場改變磁致伸縮材料內部電子自旋的方向，造成電子雲分布不均、影響磁疇的旋轉，使其密度發生改變，最終在體積固定的條件之下發生長度的變化。



圖二十九、振動波模態示意圖

- 五、由實驗一（磁滯曲線）及實驗三（磁致伸縮應力）的數據可以得知：磁致伸縮應力與磁滯曲線之磁能基呈現正相關，磁能基越大則磁致伸縮應力也越大，此現象可能與做功有關，由公式  $W = F \times \Delta X$  可以知道，磁能積相當於磁致伸縮現象應力在磁化過程中磁疇旋轉做功時所產生的能量，因為磁致伸縮現象的振幅相當的小，所以在磁能積固定的條件之下，磁致伸縮應力會很大；另外磁致伸縮應力與矯頑力也呈正相關，矯頑力越大則磁致伸縮應力越大，此現象可能與磁疇翻轉時所需的能量有關。
- 六、由實驗四（對鐵棒通入側向磁場）的數據可以得知：通入側向磁場時鐵棒的剩磁會變小而矯頑力會變大，此現象推測是由於在磁化過程中側向磁場使鐵棒內部磁疇翻轉不易所造成的結果，因此如果希望磁疇正常翻轉，此時所需要的能量就越大，而矯頑力也會越大；通入側向磁場後由於磁疇不易翻轉使得磁致伸縮受到抑制，且側向磁場離鐵棒中心位置越遠則抑制的現象越明顯，此現象推測與鐵棒在磁化過程中磁疇的翻轉是發生在端點處所造成的結果，通入側向磁場後磁疇不易翻轉，使得鐵棒不容易磁化造成磁致伸縮率下降；通入側向磁場時鐵棒在交流磁場下的共振頻率有往高頻率偏移的現象，此現象推測是通入側向磁場後矯頑力變大使鐵棒的硬度增加造成的結果，由共振頻率公式  $f$  正比於  $\sqrt{E}$  可知側向磁場造成鐵棒硬度增加後楊氏係數變大最終使共振頻率向高頻偏移；通入側向磁場時鐵棒的磁致伸縮應力增強，此現象推測與矯頑力的增強有關，通入側向磁場後鐵棒其內部磁疇變得不es翻轉造成矯頑力增強，為了抵抗側向磁場的磁力及磁區壁的翻轉此時所要付出的能量將增強，而由做功公式  $W = F \times \Delta X$  可知能量增強後，在位移固定的條件下磁致伸縮應力將變大。



圖三十、側向磁場對磁疇的影響示意圖

七、本研究所探討的磁致伸縮現象皆為西元 1842 年由英國物理學家焦耳所發現的「焦耳磁致伸縮」，關於西元 2015 年所新發現的「非焦耳磁致伸縮」未來可能透過持續加溫的方式，並於鐵棒側面設計光槓桿裝置探討體積是否有改變。

八、磁致伸縮現象未來的發展與應用

表六、磁致伸縮未來應用整理表

| 裝置 | 通入直流磁場         | 通入交流磁場                         | 側向磁場                    |
|----|----------------|--------------------------------|-------------------------|
| 原理 | 產生磁致伸縮應力       | 利用共振加強磁致伸縮                     | 抑制磁致伸縮                  |
| 應用 | 1. 聲納<br>2. 電鑽 | 1. 聲納<br>2. 多功能傳感器<br>3. 阻尼消震器 | 1. 高精密電子儀器<br>2. 變壓器的消音 |

## 柒、結論

- 一、由磁滯曲線得知，鐵棒及不鏽鋼的剩磁為  $1000\mu\text{T}$  及  $10\mu\text{T}$ ，而矯頑力則為  $0.30\text{e}$  及  $0.050\text{e}$ 。
- 二、鐵棒通入直流磁場時，隨著外加磁場達到飽和，磁致伸縮量也會逐漸達到飽和，且其飽和磁致伸縮率為  $5.90(\pm 0.02) \times 10^{-5}$ ；通入交流磁場，在頻率為  $30\text{Hz}$ 、 $120\text{Hz}$ 、 $310\text{Hz}$ 、 $500\text{Hz}$  及  $860\text{Hz}$  時，會有較為明顯的振幅，飽和磁致伸縮率為  $7.04 \times 10^{-4}$ 。不鏽鋼棒通入直流磁場時，隨著外加磁場達到飽和，磁致伸縮量也會逐漸達到飽和，且其飽和磁致伸縮率為  $3.39(\pm 0.04) \times 10^{-5}$ ；通入交流磁場，在頻率為  $90\text{Hz}$ 、 $490\text{Hz}$  及  $930\text{Hz}$  時，會有較為明顯的振幅，飽和磁致伸縮率為  $3.04 \times 10^{-4}$ 。
- 三、當給予鐵棒及不鏽鋼棒通入磁場時，隨著外加磁場增強並逐漸達到磁飽和，因磁致伸縮而產生的應力也會分別趨近於  $10\text{N}$  及  $6\text{N}$ 。
- 四、鐵棒通入側向磁場時，無論給予直流磁場或是交流磁場，其磁致伸縮率皆會隨著側向磁場的位置離中心越遠而抑制越明顯；同時，鐵棒的磁致伸縮應力會增大。
- 五、透過通入側向磁場可以達到增強矯頑力的效果，並使磁致伸縮應力變大  $20\%$ ，因此通入側向磁場可以成功地達到抑制磁致伸縮的效果。

## 捌、參考資料及其他

一、引自雜誌：《Nature》(2015/5/21) Non-Joulian magnetostriction

二、引自網路：<https://www.fda.gov.tw/upload/133/2014071412092782178.pdf> (圖二)

三、引自書籍：

表七、文獻探討表

| 文章                   | 作者                             | 摘要  | 對研究的幫助                                      | 出處                          |
|----------------------|--------------------------------|---|---|-----------------------------|
| 一些鐵磁薄帶之磁彈性質          | 王上賓                            | 以 X 光繞射儀與震動式樣品磁力計觀察磁性質。                         | 了解磁學基本原理及磁致伸縮現象。                            | 海洋大學光電科學研究所                 |
| 超磁致伸縮致動器的磁滯非線性動態模型   | 王博文<br>翁玲<br>曹淑英<br>黃文美<br>關榮格 | 為了控制及使用超磁致伸縮致動器,必須建立其準確的數學模型。                   | 了解磁致伸縮的磁滯現象及磁致伸縮致動器的模型。                     | 河北工業大學電氣與自動化學院              |
| 超磁致伸縮材料執行器的設計理論及方法   | 侯璐景<br>郭東明<br>賈振元<br>楊興        | 分析超磁致伸縮材料的工作特性,給出了超磁致伸縮微位移執行器的原型。               | 了解超磁致伸縮材料的特性及超磁致伸縮微位移執行器的原型。                | 大連理工大學機械工程學院                |
| 超磁致伸縮材料驅動器實驗研究       | 夏春林<br>路甬祥                     | 介紹採用中國製超磁致伸縮材料研制的新型驅動器的結構、工作原理、理論分析及靜、動態特性實驗結果。 | 了解中國製之驅動器具有較大的靜態位移、力輸出和滿意的動態特性,頻寬可達 1500Hz。 | 浙江大學流體傳動及控制國家重點實驗室<br>中國科學院 |
| 口琴簧片振動與氣流的影響         | 許載文<br>陳泓文<br>蔡佳哲              | 口琴簧片受到各種氣流因子影響,所產生音色、音頻等變化之探討。                  | 了解物體共振自然頻率,且得知矩形體自然頻率公式。                    | 2008 年台灣國際科展                |
| 楊氏係數之精密測定及金屬線塑性行為之探討 | 羅志偉<br>張健良<br>黃瓊慧<br>楊承翰       | 測定楊氏係數及金屬線塑性行為。                                 | 了解磁性物質內部構造及磁疇的旋轉。                           | 中華民國第三十四屆中小學科學展覽會           |

## 【評語】 051801

本作品能以光槓桿放大微小訊號改變，觀測到鐵棒的磁滯效應。但所主張的磁滯伸縮量相當大，應可實驗確定所量測的量確實來自於磁滯伸縮。結論也主張不鏽鋼的矯頑力為  $0.05\text{Oe}$ ，應再實驗確定所採用的量測設置確實可以顯示如此小的磁場行為。

# S Z 研究動機與目的

## 研究動機

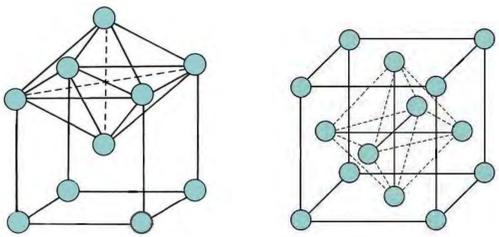
通常鐵磁性物質皆會具有產生磁致伸縮現象的特性，於是本研究為了瞭解磁性物質磁致伸縮的現象及成因，便將這二種不同結構的不鏽鋼分別通入交直流磁場，並進行二維側向磁場的調控，觀察磁致伸縮現象、應力大小、磁滯曲線的變化。

## 研究目的

- 一、利用外加磁場觀測鐵棒及不鏽鋼棒與感應磁場的關係，並繪製出磁滯曲線。
- 二、利用光槓桿原理測量鐵棒及不鏽鋼棒接受交直流磁場時，交變頻率及外加磁場對其伸縮量的影響，並計算飽和磁致伸縮率。
- 三、利用力感測器測量鐵棒及不鏽鋼棒通入直流磁場時，外加磁場對其所產生應力的影響。
- 四、利用強力磁鐵通入二維側向磁場，測量二維側向磁場對磁致伸縮現象及磁滯曲線的影響。

# S Z 實驗原理

## 不鏽鋼結構

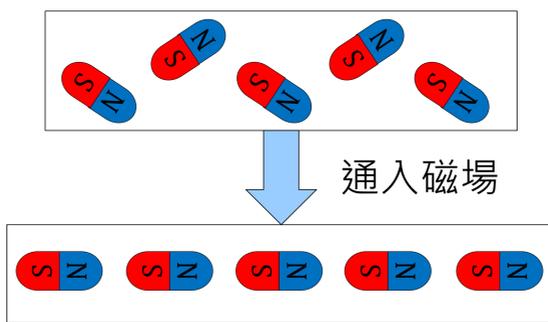


馬氏體(有磁性) 奧氏體(無磁性)

圖一、不鏽鋼內部結構示意圖

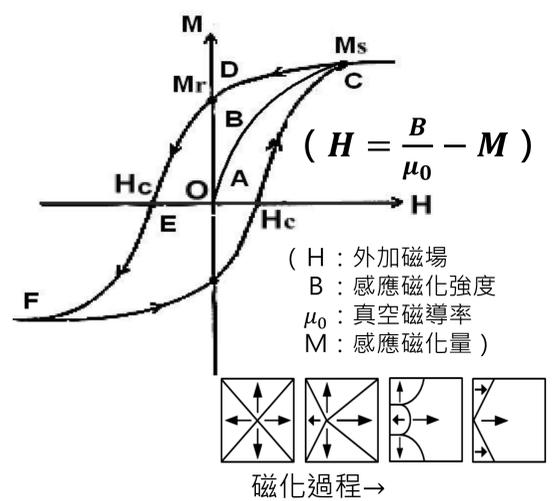
| 元素 | 符號 | 原子序數 | 電子結構                                |
|----|----|------|-------------------------------------|
| 鐵  | Fe | 26   | (Ar)3d <sup>6</sup> 4s <sup>2</sup> |
| 鈷  | Co | 27   | (Ar)3d <sup>7</sup> 4s <sup>2</sup> |
| 鎳  | Ni | 28   | (Ar)3d <sup>8</sup> 4s <sup>2</sup> |

## 磁致伸縮現象



圖二、磁致伸縮原理圖

## 磁滯現象

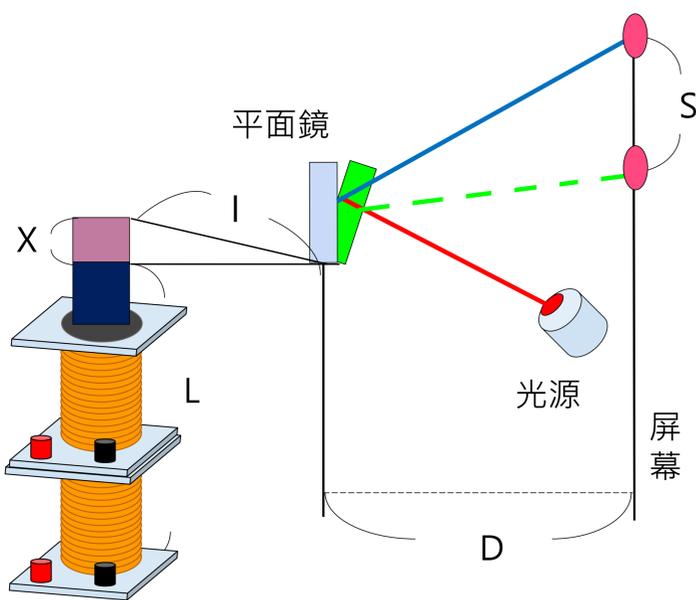


$$B = \mu \times H \text{ 在真空下, } 10e = 100\mu T = 1G$$

$$10^{-4}(T) = \frac{1000}{4\pi} (A/m) \times 4\pi \times 10^{-7} = 100\mu T$$

圖三、磁滯曲線圖

# S Z 量測原理(光槓桿原理)



圖四、公式推導示意圖

$$\theta = \frac{x}{l} \text{ 或 } \frac{x}{l} = \frac{s}{2D} \text{ 或 } x = \frac{ls}{2D}$$

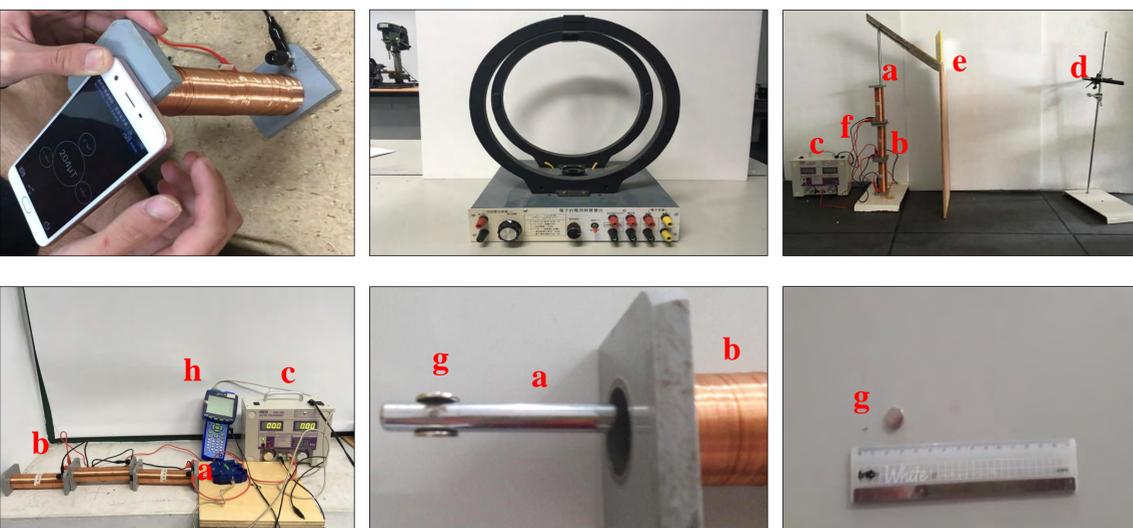
$$L_2 = L + x = L(1 + \lambda\Delta B) = L + L\lambda\Delta B$$

$$L_2 - L = x = L + L\lambda\Delta B$$

$$\lambda = \frac{x}{L\Delta B} = \frac{ls}{2DL\Delta B}$$

|   |          |
|---|----------|
| X | 鐵棒伸縮長度   |
| L | 原始長度     |
| D | 反射鏡與尺的距離 |
| S | 光點移動量    |
| l | 支架長度     |

# S Z 實驗器材及儀器



- 鐵棒 / 不鏽鋼棒 . . . 研究對象 (鐵棒 : 50cm、不鏽鋼棒 : 72.5cm)
- 螺線管 . . . . . 提供側向磁場
- 交直流電源供應器 . . . 提供電源
- 雷射筆 . . . . . 提供光源
- 鏡子 . . . . . 反射光源
- 鱷魚夾 . . . . . 連接螺線管
- 強力磁鐵 . . . . . 抑制磁致伸縮
- 力感測器 . . . . . 測量應力

# S Z 研究過程與方法

實驗一：磁滯曲線



測量外加磁場



測量感應磁化量

實驗二：伸縮量



通入交直流磁場

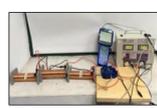


測量光點移動量

實驗三：應力



通入直流磁場

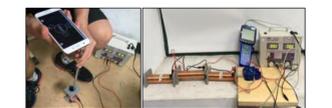


測量磁致伸縮應力

實驗四：二維側向磁場



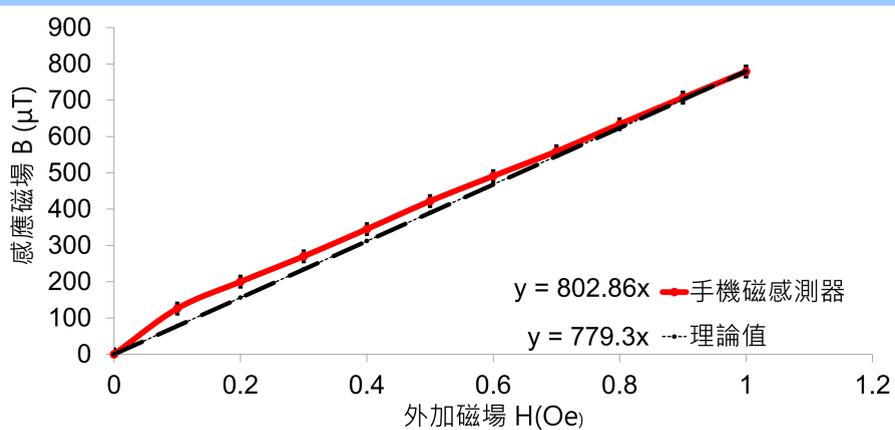
通入二維側向磁場



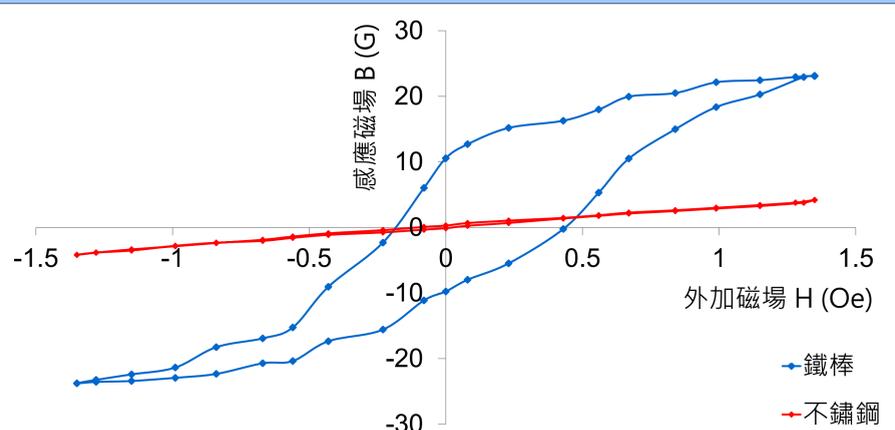
測量磁滯曲線、應力

# S Z 實驗結果

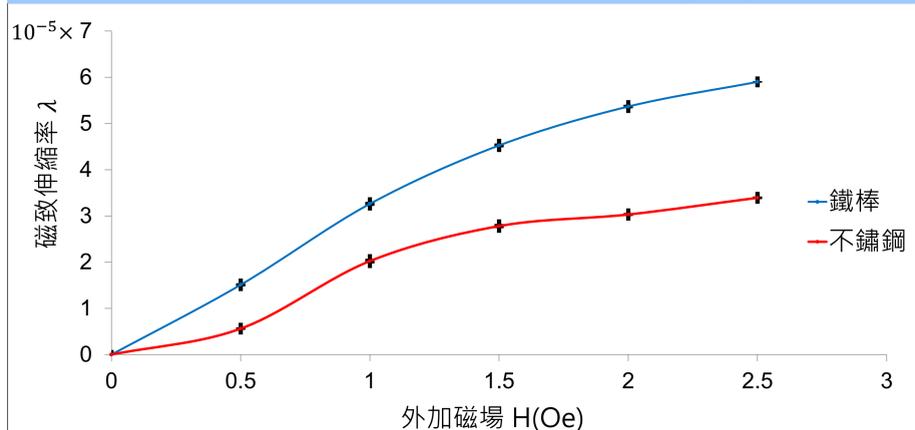
運用亥姆霍茲線圈進行磁感測器校正



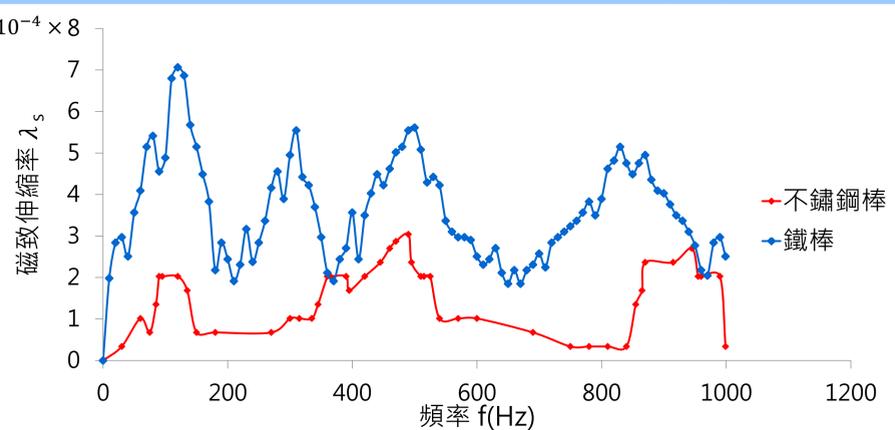
實驗一、鐵棒及不鏽鋼棒的磁滯曲線



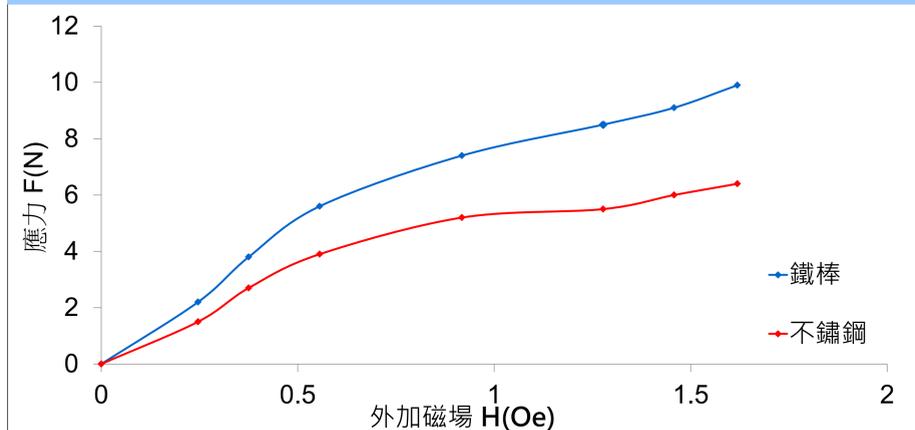
實驗二、伸縮量與外加磁場關係(DC)



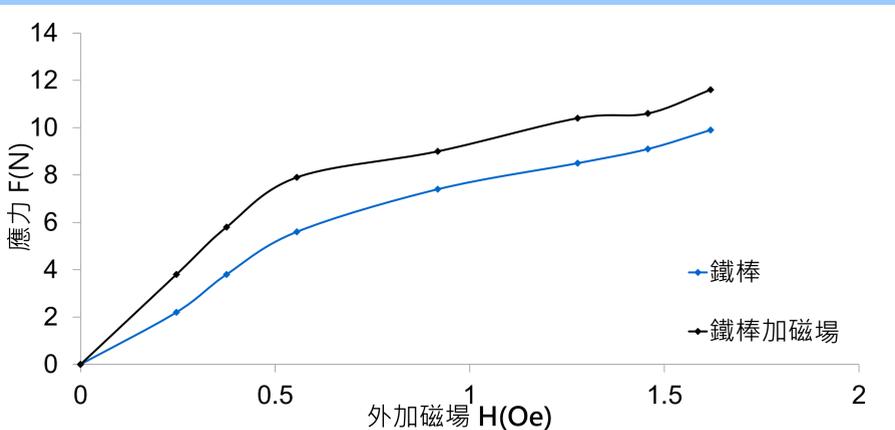
實驗二、伸縮量與外加磁場關係(AC)



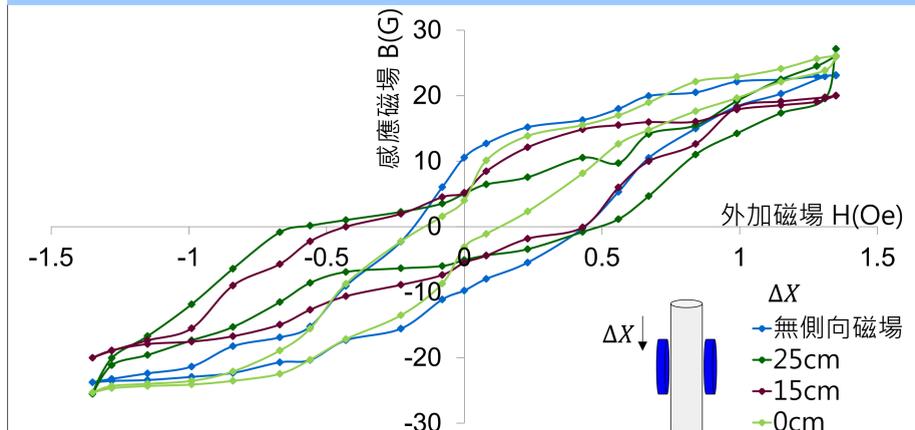
實驗三、磁致伸縮應力與材料及外加磁場關係



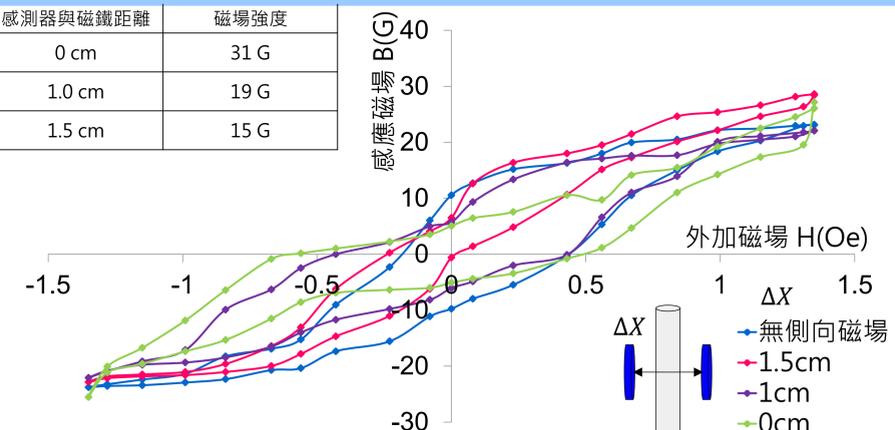
實驗三、磁致伸縮應力與材料及外加磁場關係



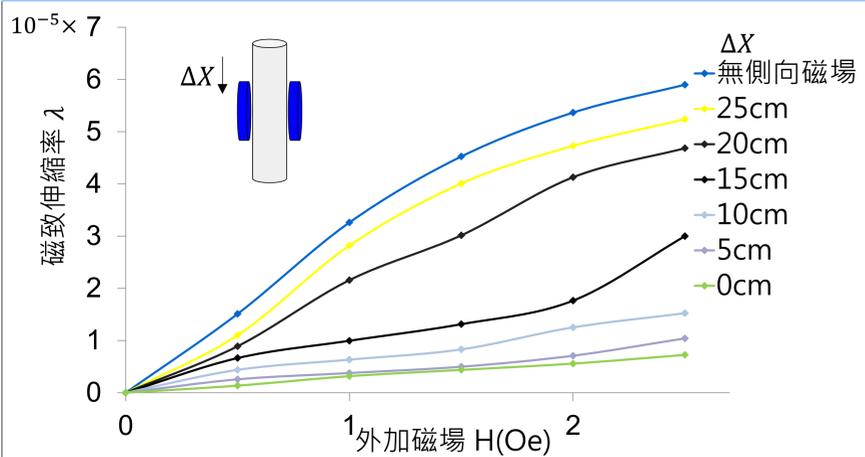
實驗四、改變側向磁場位置，鐵棒的磁滯曲線



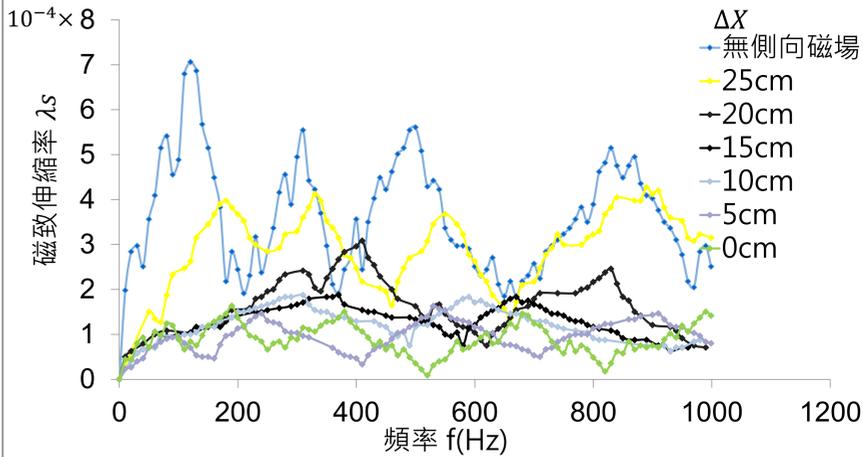
實驗四、改變側向磁場位置，鐵棒的磁滯曲線



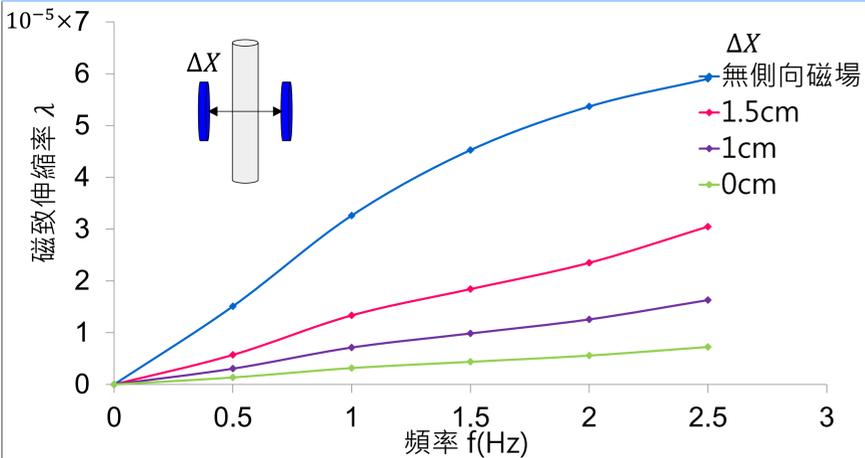
### 實驗四、改變側向磁場位置，伸縮量與外加磁場關係



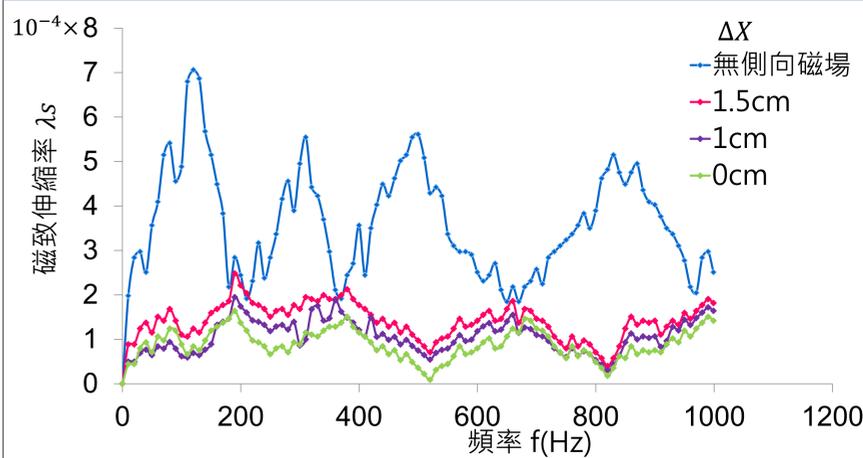
### 實驗四、改變側向磁場位置，伸縮量與磁場交變頻率



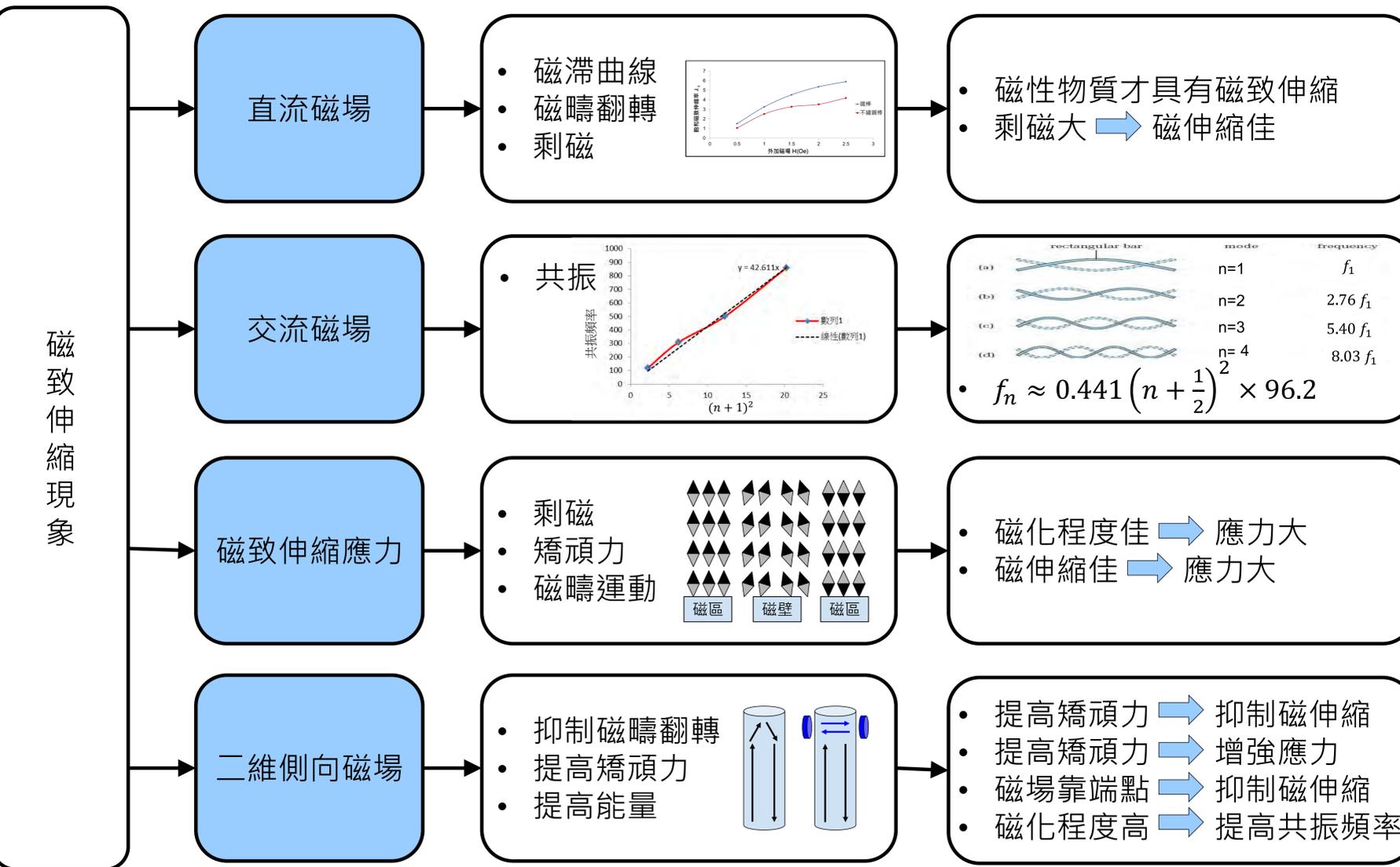
### 實驗四、改變側向磁場強度，伸縮量與外加磁場關係



### 實驗四、改變側向磁場強度，伸縮量與磁場交變頻率



## 討論



## 結論

- 由磁滯曲線得知，鐵棒及不鏽鋼的剩磁為 $1000\mu T$ 及 $10\mu T$ ，而矯頑力則為 $0.4Oe$ 及 $0.05Oe$ 。
- 通入交流磁場，鐵棒在頻率為 $120Hz$ 、 $310Hz$ 、 $500Hz$ 及 $860Hz$ 時，會有較為明顯的振幅，飽和磁致伸縮率為 $7.04 \times 10^{-4}$ ；而不鏽鋼棒較明顯的振幅則是出現在頻率 $90Hz$ 、 $490Hz$ 及 $930Hz$ ，且飽和磁致伸縮率為 $3.04 \times 10^{-4}$ 。通入直流磁場，隨著外加磁場達到飽和，磁致伸縮量也會逐漸達到飽和，鐵棒的飽和磁致伸縮率為 $7.83 \times 10^{-5}$ ；而不鏽鋼棒的飽和磁致伸縮率則為 $5.65 \times 10^{-5}$ 。
- 鐵棒通入磁場時，隨著外加磁場增強並逐漸達到磁飽和，因磁致伸縮而產生的應力會趨近於 $10N$ 。
- 鐵棒通入側向磁場時，無論給予交流磁場或是直流磁場，其磁致伸縮率皆會隨著側向磁場的位置離端點越近而抑制越明顯；同時，鐵棒的磁致伸縮應力增大了 $20\%$ 。
- 透過通入側向磁場可以達到增強矯頑力的效果，並使磁致伸縮應力變大，因此通入側向磁場可以成功地達到抑制磁致伸縮的效果。

## 參考資料

引自雜誌：《Nature》(2015/5/21) Non-Joulian magnetostriction  
 引自書籍：作者：羅志偉、張健良、黃瓊慧、楊承翰，中華民國第三十四屆中小學科學展覽會作品說明書(楊氏係數之精密測定及金屬線塑性行為之探討)