

實驗七 磁滯曲線實驗

一、實驗目的：

量測鐵磁性物質的磁滯曲線(magnetic hysteresis curve)。

二、實驗原理：

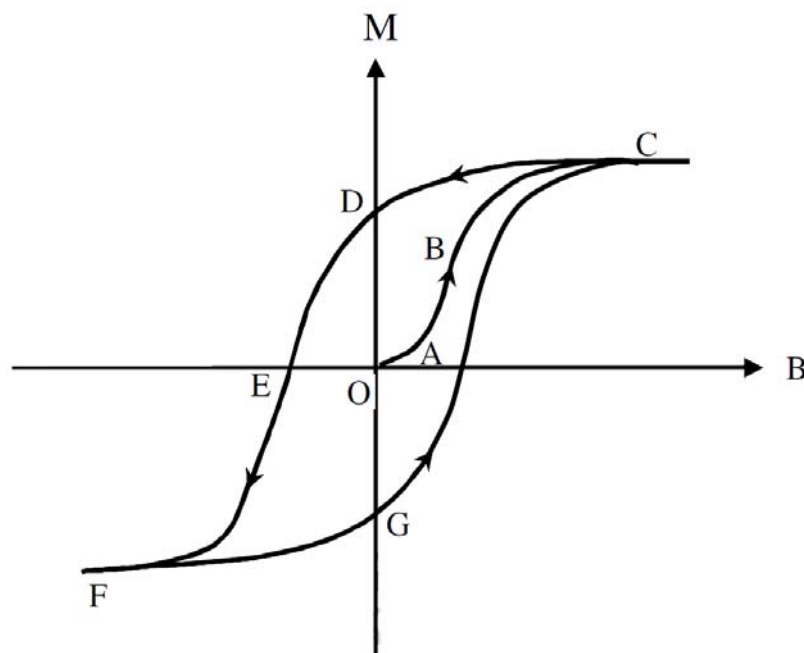
(一) 磁性物質：

在自然界中，最簡單的磁性結構為磁偶極(magnetic dipole)，其可以想像成一個被磁化具有 N 極和 S 極的長形物體，在此兩極周圍形成一個封閉的環繞磁場，正如一個磁鐵永遠存在成對的 N 極和 S 極。截至目前為止，物理學家還沒有發現磁單極的存在。不同的物質在外加磁場作用下，會呈現出不同的磁性，物質的磁性大致可區分為三類：順磁性(paramagnetism)、反磁性(diamagnetism)及鐵磁性(ferromagnetism)。

1. 順磁性物質：出現於含有過渡元素、稀土元素和銅系元素的材料中。當外加磁場存在時，順磁性物質會產生微弱的磁化(magnetization)，方向與外加磁場方向相同，故稱為順磁性。
2. 反磁性物質：大部分的材料均呈現反磁性。即外加磁場存在時，反磁性物質也會產生微弱的磁化，但方向與外加磁場方向相反。
3. 鐵磁性物質：鐵、鈷、鎳及其合金，是相當典型的鐵磁性物質。當外加磁場存在時，鐵磁性物質會產生極強之磁化且方向與外加磁場方向一致。

(二) 磁滯現象：

若將未磁化的鐵磁性物質（例如：鐵、鈷、鎳及其合金）放入通電的螺線管內，其所產生的磁場可以將此材料磁化，使之具有磁性，但外加磁場去除後，鐵磁性物質的磁性不會隨著消失，仍保有磁性，此即為磁滯現象(magnetic hysteresis)。圖一所示為典型之磁滯曲線。



圖一 磁滯曲線

將鐵磁性物質放在外加磁場中時，當外加磁場由零（A 點）逐漸增大時，鐵磁性物質之感應磁場也隨之增大，而外加磁場增大到某一程度後，無論磁場再如何加大，鐵磁性物質之感應磁場也不再變化，此即達到飽和（C 點）。接著，再逐漸減少外加磁場時，鐵磁性物質之感應磁場亦會緩慢減小，但其路徑並不沿原本的磁化曲線(magnetization curve)CBA 返回，而是沿著另一曲線 CD 變化，直到外加磁場降為零，鐵磁性物質仍保有磁性，此點（D 點）具有的磁場稱為該磁性物質之殘磁(residual magnetic field, B_r)。若欲使該磁性物質之感應磁場為零（E 點）時，則需外加一反向磁場，稱為去磁(degaussing)作用，此時，在 E 點所需外加之反向磁場，以往常常被稱為鐵磁性物質之矯頑力或矯頑磁力(coercivity)，但稱之為矯頑磁場強度(coercive field intensity)比較適當。

相同於正向磁場之效應，反向磁場大到某一程度後，鐵磁性物質的磁化強度(magnetization, M)亦會達到飽和（F 點），減小反向磁場至零（G 點），鐵磁性物質仍具磁性。再通以正向磁場，磁化曲線會沿著曲線 GC 到達 C 點而形成一個封閉曲線，此封閉曲線即為磁滯曲線。

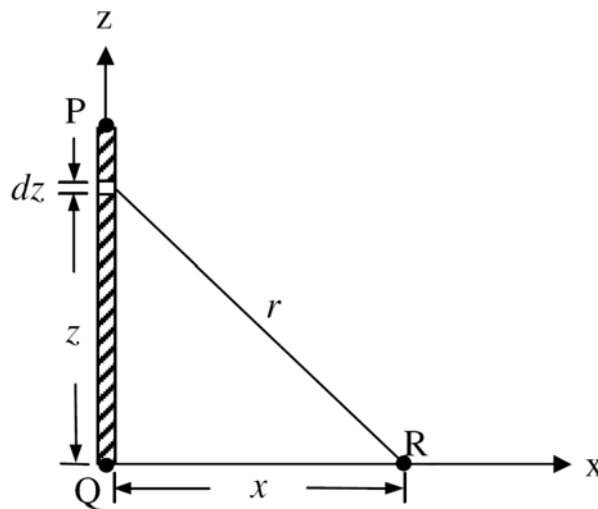
(三) 由細長磁棒所產生的磁場：

假設由鐵磁性物質所做成的細棒被磁化後，其磁化強度為 M 。我們可以想像成磁性是由許多個小磁偶極(magnetic dipole)所組成的，若鐵磁性物質的體積為 V ，體積內的磁偶極數目為 N ，因此磁化強度 M 與磁偶磁矩 μ 之間的關係為 $M = N\mu/V$ 。

由一個磁偶磁矩 μ 所產生的磁場為

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{3\hat{r}(\hat{r} \cdot \vec{\mu}) - \vec{\mu}}{r^3} \quad (1)$$

其中， \hat{r} 為由磁偶磁矩 μ 所在的位置指向測量點的單位向量； r 為這兩點之間的距離。



圖二

在圖二中，我們將磁棒 S 極置於原點，而 N 極置於 $+\hat{z}$ 軸上之 P 點，待測點則在 $+\hat{x}$ 軸上之 R 點，在磁棒上 dz 長度內的磁偶極矩數目為 $N\mu/V$ ，因此由這些磁偶磁矩所產生的磁場為

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{3\hat{r}(\hat{r} \cdot \vec{\mu}) - \vec{\mu}}{r^3} \cdot \frac{N}{V} Adz \quad (1)$$

磁場在 x 方向之分量為

$$B_x = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_0^z \frac{-3\mu xz}{(x^2+z^2)^{\frac{5}{2}}} \cdot \frac{N}{V} Adz = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{MA}{x^2} \left[1 - \left(\frac{x}{r} \right)^3 \right] \quad (2)$$

(四) 磁化強度 M 的測量方式：

本實驗是利用螺線管通入電流，其內部產生近似均勻的磁場 B_0 ，作為待測棒之外加磁場，使待測棒磁化，以便量測其磁化強度 M 。而外加磁場 B_0 之強度為

$$B_0 = \mu_0 nI$$

μ_0 為真空中的磁導率(magnetic permeability)，其大小為 $4\pi \times 10^{-7}$ T·m/A； n 為螺線管之單位長度內的線圈匝數； I 為輸入螺線管的電流大小。

待測物的磁化強度愈強，所產生的磁場也愈大。因此利用實驗六—磁矩及地磁水平強度的方法，由磁針的偏轉角度與已知的地磁水平分量，求得待測物磁化後所產生的磁場，亦即待測物的磁化強度會與磁針的偏轉角度成正比。

首先，設定坐標以東西向為 x 軸，南北向為 y 軸，待測物磁化後磁針偏轉角度為 ϕ ，則

$$\tan \phi = \frac{B_x}{B_E} \quad (3)$$

其中， B_E 為地磁的水平分量，其大小約為 $36 \mu\text{T}$ ； B_x 為待測物磁化後所產生的磁場。

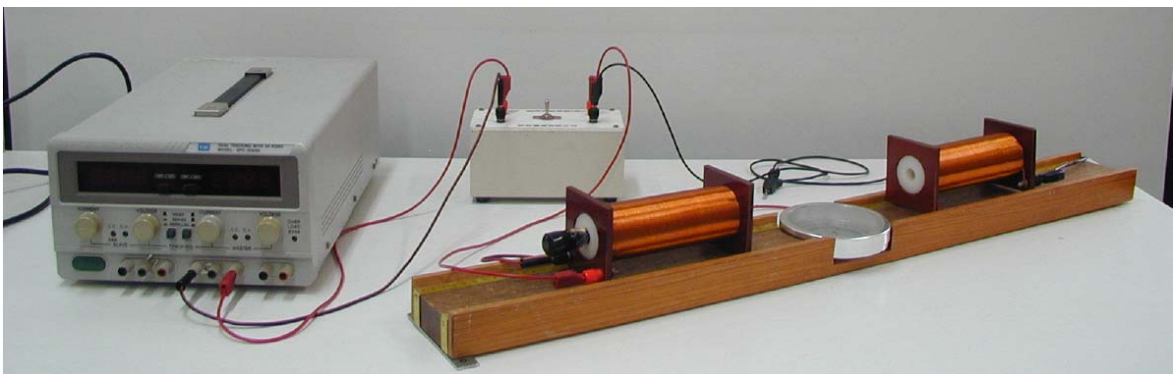
將式(3)代入式(2)，可得磁化強度 M 為

$$M = B_E \frac{x^2}{\frac{\mu_0}{4\pi} \cdot A \left[1 - \left(\frac{x}{r} \right)^3 \right]} \tan \phi = a \tan \phi \quad (4)$$

因此，將 $\tan \phi$ 對 I 作圖，即可得到待測物之磁滯曲線圖。

三、實驗儀器：

螺線管 2 個、交流電源供應器、直流電源供應器、磁力計、換向器、連接線數條、待測軟鐵棒及鋼鐵棒。



圖三

四、實驗步驟：

*注意事項：

1. 實驗開始前，請先將待測鐵棒做去磁動作。
2. 臺中市的地磁水平分量為 $B_E = 3.6132 \times 10^{-5} \text{ T}$ 。
3. 螺線管的線圈匝數 $n = 116/0.149 \cong 778.5 \text{ 匝/m}$ 。

(一) 待測鐵棒去磁：

1. 先將螺線管接上交流電源供應器，將待測鐵棒放入螺線管內，先將輸出電壓調至 40 V，再將電壓緩緩調降至零，把待測鐵棒拿出。
2. 將實驗裝置如圖三所示，架設完成。
3. 旋轉羅盤刻度之位置，使其與磁力計底座垂直（磁力計上羅盤歸零之動作）。
4. 調整磁力計底座的方向，讓指南針垂直於底座的方向（以抵消地磁垂直方向的磁力）。
5. 將兩個螺線管相對放置於磁力計底座之兩側。
6. 利用連接線，將兩個螺線管同方向串聯，並通入直流電源。由於螺線管是相對的，所以產生的磁場方向是相反的。注意：兩個螺線管之距離不可太近，以免偏轉角度過大而導致量測值不準確，因此須調整兩螺線管之距離，使得當電流調至最大值時，其偏轉角度在 60° 以內。
7. 調整其中一個螺線管的位置，使得指針可以再次歸零；亦即讓指針所受兩個反向的磁場之大小恰好可以互相抵消。
8. 將直流電源歸零，再將待測鐵棒插入任一個螺線管內，觀察磁針是否有偏轉，若磁針會偏轉，代表待測鐵棒尚未去磁完成，需再重複進行步驟 1，直到插入待測鐵棒，磁針不會偏轉，才代表去磁完成。

(二) 測量磁滯曲線：

1. 將實驗裝置如圖三所示，架設完成。
2. 旋轉羅盤刻度之位置，使其與磁力計底座垂直（磁力計上羅盤歸零之動作）。
3. 調整磁力計底座的方向，讓指南針垂直於底座的方向（以抵消地磁垂直方向的磁力）。
4. 將兩個螺線管相對放置於磁力計底座之兩側。
5. 利用連接線，將兩個螺線管同方向串聯，並通以直流電源。由於螺線管是相對的，所以產生的磁場方向是相反的。注意：兩個螺線管之距離不可太近，以免偏轉角度過大而導致量測值不準確，因此須調整兩螺線管之距離，使得當電流調至最大值時，其偏轉角度在 60° 以內。
6. 調整其中一個螺線管的位置，使得指針可以再次歸零；亦即讓指針所受兩個反向的磁場之大小恰好可以互相抵消。
7. 將直流電源歸零，再將待測鐵棒插入螺線管內；使螺線管通入電流 $I = 0.2 \text{ A}$ ，維持 30 秒至 1 分鐘後，紀錄其偏轉角度 ϕ 。
8. 逐漸增加直流電源（外加磁場）的電流大小 I ，每次增加 0.2 A，並依次記錄指針偏轉的角度 ϕ ，直到量測角度達到飽和值（此時電流約為 2 A）。

9. 再將電流遞減至零，記錄磁針偏轉的角度 ϕ 。
10. 利用換向器，改變螺線管電流方向（即改變磁場方向），重複步驟 8~9。
11. 再切換一次換向器，重複步驟 8~9。
12. 利用所得之數據繪出 $\tan\phi$ 對 I 之圖形，以及 M 對 B_0 之圖形。

五、問題與討論：

1. 請針對此實驗裝置試修正公式(2)。
2. 在實驗中，若電流突然調大太多，對實驗結果有何影響？原因為何？
3. 在實驗中，每增加 0.2 A 電流所停留的時間長短對實驗結果是否有影響？會有何種現象產生？
4. 兩螺線管上所通的電流為何採用串聯方式，而不分別由兩個直流電源供應器提供？

物理實驗記錄表格
實驗七、磁滯曲線實驗

實驗時間： 年 月 日 姓名：_____

編號	螺線管 電流 I (A)	軟鐵棒	鋼鐵棒	編號	螺線管 電流 I (A)	軟鐵棒	鋼鐵棒
		偏轉角度 ϕ	偏轉角度 ϕ			偏轉角度 ϕ	偏轉角度 ϕ
1	0.2			31	-1.8		
2	0.4			32	-1.6		
3	0.6			33	-1.4		
4	0.8			34	-1.2		
5	1.0			35	-1.0		
6	1.2			36	-0.8		
7	1.4			37	-0.6		
8	1.6			38	-0.4		
9	1.8			39	-0.2		
10	2.0			40	0		
11	1.8			41	0.2		
12	1.6			42	0.4		
13	1.4			43	0.6		
14	1.2			44	0.8		
15	1.0			45	1.0		
16	0.8			46	1.2		
17	0.6			47	1.4		
18	0.4			48	1.6		
19	0.2			49	1.8		
20	0			50	2.0		
21	-0.2						
22	-0.4						
23	-0.6						
24	-0.8						
25	-1.0						
26	-1.2						
27	-1.4						
28	-1.6						
29	-1.8						
30	-2.0						