

軟磁鐵氧體的特性與量測

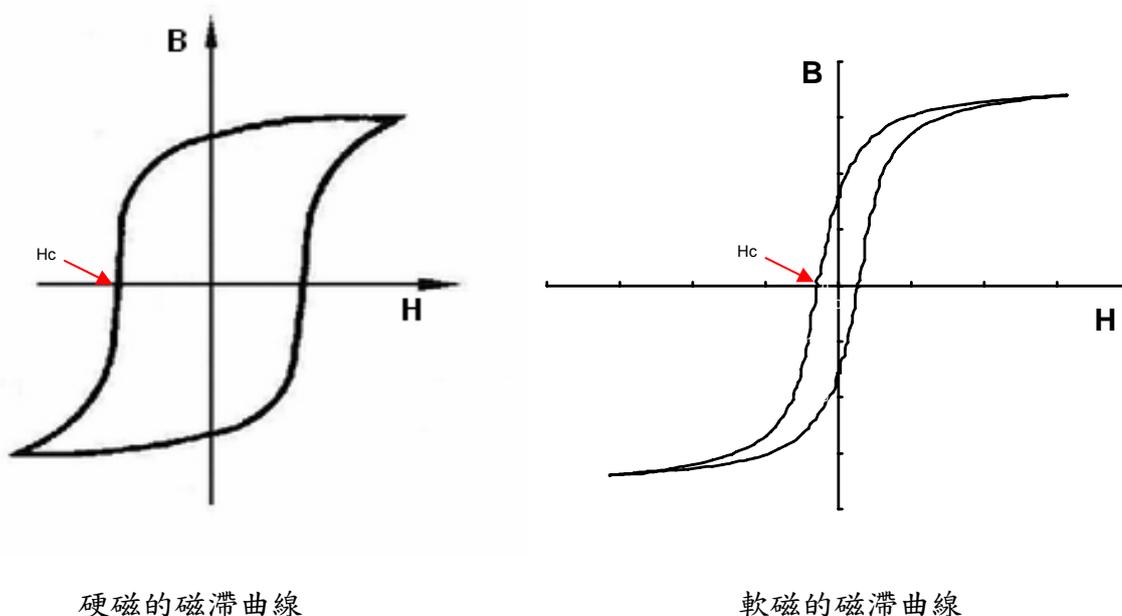
Soft ferrite properties & measurement

C.S. Wang 王正雄 & Ted Lee 李瑞揚

Date: 2016-08-08

引言

現代生活中，磁性材料與我們的生活有非常密切的關係，不論國防、工商業、醫學、育樂…等各方面都有它的存在。目前常使用的磁性材料可分為兩大類：即硬磁與軟磁。通常硬磁於充磁後即會保有很高的殘餘磁性，需給予較高的逆向電流方能使之退磁。而軟磁只需給予很小的逆向電流就可以退磁，在此所謂的逆向電流就與矯頑磁(H_c)有直接關聯。我們可從以下圖(1)硬磁與軟磁的磁滯曲線可觀察出兩者之差異。



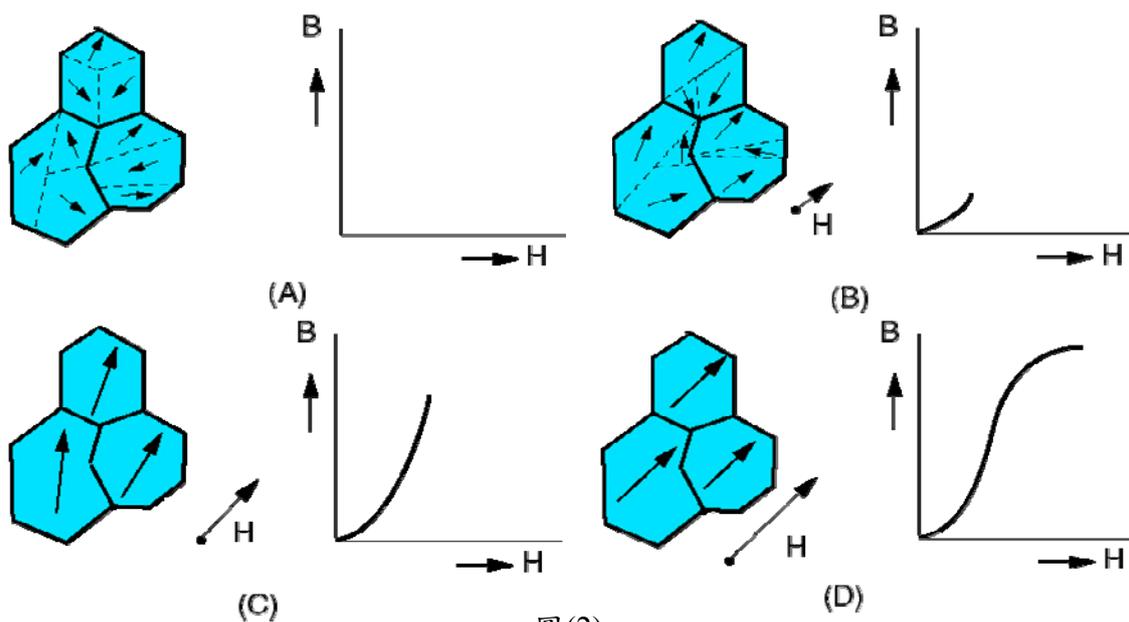
圖(1)

硬磁需要較大的矯頑磁力使之殘磁消退，因此它在電路上的操控會很不容易。反觀軟磁的矯頑磁力與硬磁相較之下，顯得非常小，相對磁滯損也就很小，且易於在電路上設計磁通操作的區域。由此可知，軟硬磁名稱的區分是屬於磁特性上的。隨著電子電路高頻化的趨勢，軟磁材料類別中的鐵氧體，因其低功耗的優越特性，已普遍的應用於各類電子產品中。

在此將軟磁鐵氧體的基本特性與量測做一簡單的介紹，進而對它有更多的瞭解。

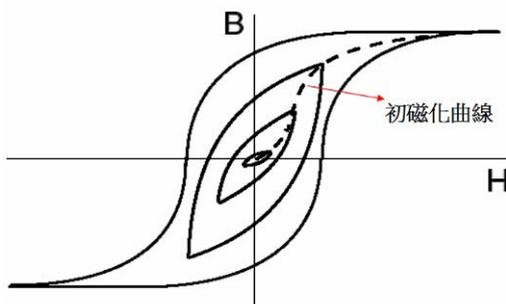
磁滯曲線的介绍

磁性材料結構體是由眾多的磁域所組成，各磁域中又有很多磁矩。未磁化前，磁性材料各磁域中的磁矩方向各自不同，彼此互相抵消，不具磁性，如下圖(2A)。當外加磁場 H 作用在磁性材料上，使得磁域逐漸擴大，且其中的磁矩開始受外加磁場的方向而偏轉，如下圖(2B)。隨著磁場繼續增加，磁性材料會由多重磁域狀態逐漸轉變為單一磁域，此時全部磁矩近乎同方向，最終全部與外加磁場同方向而達磁通飽和狀態，如下圖(2C)、(2D)。



圖(2)

磁滯曲線的量測就是利用所提供的弦波訊號作為外加磁場的來源。磁場強度(H)與磁通密度(B)兩者呈現非線性關係，當磁場(H)不斷增加，磁通(B)也隨之增加，直至飽和。接著磁場逐漸衰減，磁通也隨著減少，但無法延著原來的初磁化曲線軌跡走。不同大小的磁場強度可形成不同大小的磁滯曲線，但這些大小不一的磁滯曲線會按初磁化曲線的趨勢形成，如圖(3)。



圖(3)

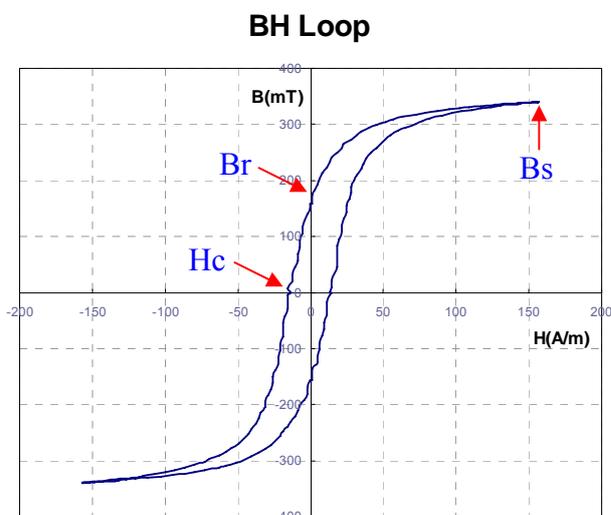
目前業界所使用的磁滯曲線量測設備包含示波器、訊號產生器、放大器等儀器組合而

成，可以量測磁滯曲線、鐵損…等。其外觀可參考如下：



量測動作的執行是由軟體程式控制，經由電腦輸入量測項目與條件後，電腦即會給出指令讓訊號產生器提供所需訊號源，再依量測時所需訊號之大小經由放大器做高低頻切換與電壓訊號放大等程序後將正確訊號提供給待測物，再由示波器取得此時的電壓、電流與相位差等數值轉由電腦進行數據處理並得到測試結果。

磁性材料經量測出來之磁滯曲線如下圖：

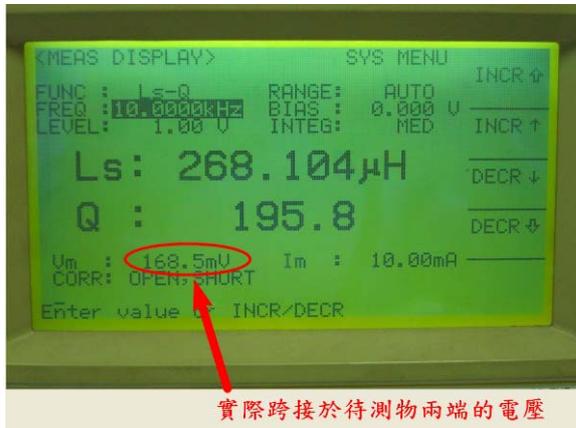


該磁滯曲線為實測 T25/15/10 尺寸的磁環所得，材質為 R8K。從中可瞭解該材料的飽和磁束密度、殘磁、矯頑磁等特性。

初導磁率(μ_i)與有效導磁率(μ_e)

當一根導線通上電流，根據安培右手定律，會產生以導線為圓心之磁力線。若在磁場路徑上再加上具有導磁能力的磁性物質，在該磁性物質內將可導引出更多的磁力線。導磁率就是導引磁力線的能力，每一種不同材質的鐵氧體都有不同的導磁率特性；初導磁率(μ_i)是特指在封閉磁路(通常指磁環)條件下的性質；一旦磁路上有了氣隙，無論氣隙大小形狀，都歸類為有效導磁率(μ_e)的性質。一般量測的標的物為 T25/15/10 大小的磁環，繞上少許的圈數，再接上 LCR Meter，以極小訊號源的測試條件來量測其電感。茲以 HP 4284A LCR Meter 為

例，訊號源必須以 V_m 為準，如圖(4)所示，此即實際跨接於待測物兩端的電壓有效值。



圖(4)

有關 LCR-meter 的量測原理可參考本公司研發技術報告 [BWTR2015-02](#)。

國際電工委員會(IEC)對於軟磁的測試條件定有標準規範，可參閱 IEC 62044-2。建議測試頻率在 10KHz~100KHz，且圈數不要太多，以避免進入電感自體諧振區，使量測值受到影響，且測試訊號強度 $\Delta B \leq 0.5\text{mT}$ 。此 ΔB 即為磁通密度的振幅(Tesla)，與 $V_m(\text{V})$ 的換算關係式如下：

$$\Delta B = \frac{\sqrt{2} V_m}{2 \pi \cdot N \cdot A_e \cdot f} \quad \text{————— (1)}$$

在(1)式中， N 為待測物的圈數， A_e 為待測物之有效截面積(m^2)； f 為測試頻率(Hz)。我們使用以上所述之量測標的物與量測條件，再提供一個很小的交流訊號，形同在進行微量的磁滯曲線的測量。此時磁場強度與磁通密度皆會有非常微小的變化量，這個微小變化量所形成的磁滯小迴圈斜率可依以下數學定義連結初導磁率 μ_i ：

$$\mu_i \equiv \frac{1}{\mu_0} \times \frac{\Delta B}{\Delta H_{(\Delta H \rightarrow 0)}} \quad \text{————— (2)}$$

一般在已知所用磁性材料 μ_i 的情況下，可藉由以下電感公式進行所設計電感值的計算：

$$L = \mu_0 \mu_i \frac{A_e \cdot N^2}{l_e} \quad \text{————— (3)}$$

其中電感 $L(\text{Henry})$ ， μ_0 為一常數： $4\pi \times 10^{-7}$ ， A_e 為有效截面積(m^2)， l_e 為有效磁路徑(m)。此一電感公式實際上是由前述初導磁率 μ_i 的數學定義(2)式推導出來的。若是在未知磁性材料 μ_i 的情況下，可先就所設計的電感進行電感值的量測(L_{measured} in Henry)，透過(3)式的轉換即可換算出 μ_i ：

$$\mu_i = \frac{l_e}{\mu_0 \cdot A_e \cdot N^2} \times L_{\text{measured}} \quad \text{————— (4)}$$

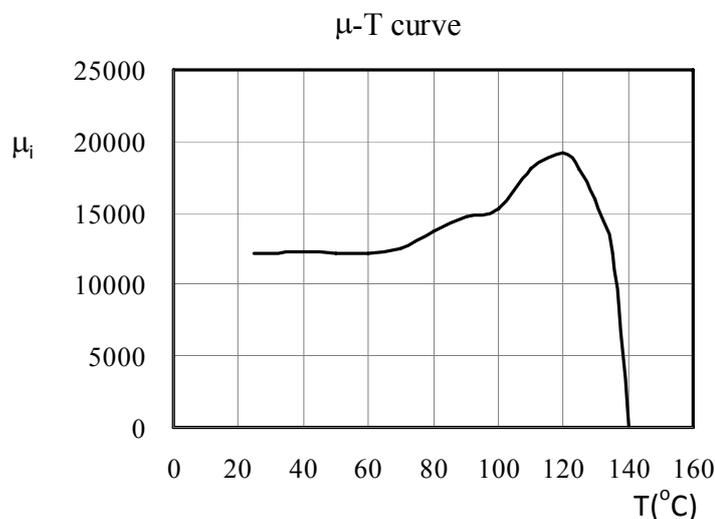
必須注意的是，如待測物電感的磁路含有氣隙，則(4)式所求出的結果即為有效導磁率(μ_e)的性質。

μ -T 曲線

μ -T 曲線即磁性材料對溫度變化的特性響應的表現，當超過其臨界溫度時，將導致所有磁特性消失，此臨界溫度稱之為居禮溫度(Curie Temperature)。不同材質的磁性材料皆有其不同的居禮溫度特性。磁性材料的 μ_i 在不同的溫度下會隨著溫度的變化而改變，當材料所處環境溫度不斷增加而大於居禮溫時，該材料的磁特性就會消失；反之隨著溫度慢慢降低，磁性材料的 μ_i 會回復到居禮溫度往低溫部份的曲線走勢，意即磁性材料的 μ -T 曲線是可逆的。

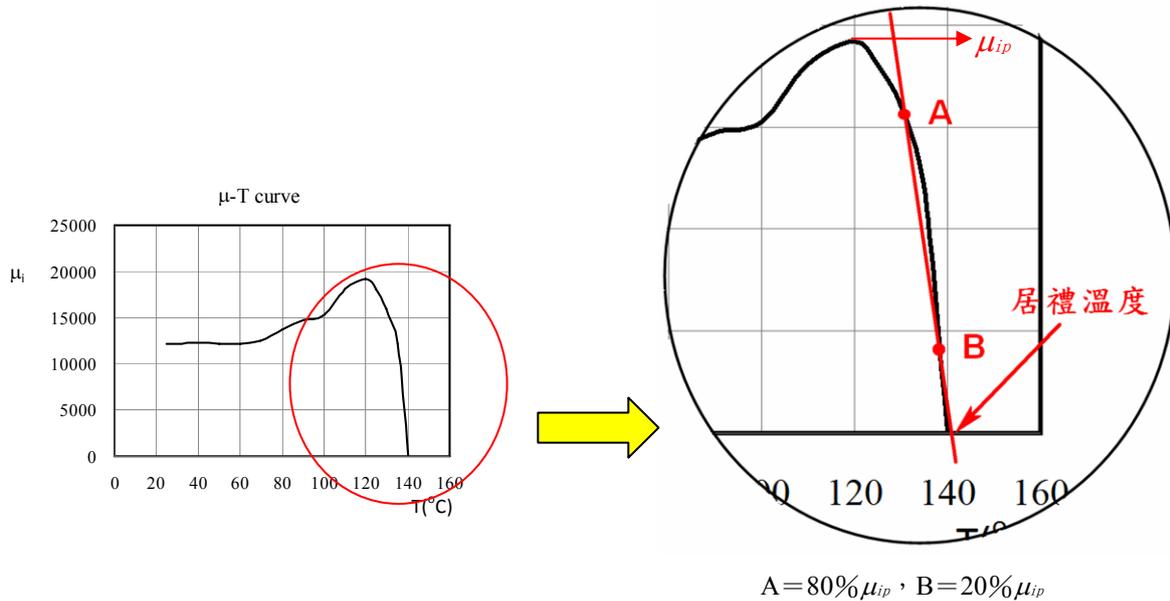
我們可以將磁性材料在不同的溫度下用 LCR meter 所測得之電感值，用(4)式換算出 μ_i ，並將之記錄於 μ -T($^{\circ}\text{C}$)的座標上，即得 μ -T 曲線。實際取用 T22/14/13 尺寸的磁環，為越峰 A10 材質，將該磁環繞上 10 匝的線圈。一般可將磁環放置於控溫爐中，並將每一設定溫度點所測得之電感值記錄下來。量測過程中每當達到所設定的溫度點時，需再等待約 5~10 分鐘，讓待測物與爐內環境溫度到達平衡的狀態，再將量測結果做出記錄。

T22/14/13-A10 實測的 μ -T 曲線如下：



由以上曲線圖中我們可以瞭解到該 A10 材料在不同的溫度下，電感的表現會有所不同。在一般我們常接觸的溫度環境下，其電感的表現差異也不大。但是在極端的溫度環境中，如電路應用在高溫的環境溫度或氣候嚴寒的地方，電感值就有會較大的差異。因此這可作為我們產品設計、或材料檢驗需注意到的一個參考依據。

居禮溫度的定義是取 80%的 μ_{ip} 與 20%的 μ_{ip} ，將此兩點連成一線段，該線段與曲線圖之溫度橫軸的交點，即為該磁性材料的居禮溫度，如下圖：



以這一款 A10 材質的居禮溫度實測的曲線來看，當環境溫度約超過 140°C 時，就不具磁特性了，我們也因此得以瞭解該材質適用的溫度範圍。

μ'_s/μ''_s 曲線

μ'_s 與 μ''_s 曲線也是一項重要的材料特性， μ'_s 就是實際以 LCR meter 量測到的電感值經由電感換算成 μ 的關係式(4)計算所得，若再將 μ'_s 除上相同量測條件下的 Q 所得就是 μ''_s 的部份。茲簡單論證如下：實際電感的等效電路可分為串聯模式與並聯模式，若以實際電感的等效電路串聯模式來探討其阻抗性質，可以用(5)式來表達：

$$Z = j\omega L_s + R_s \text{ ————— (5)}$$

其中 $j\omega L_s$ 代表電感的純電抗， R_s 代表總損耗，下標 s 即代表串聯模式。關於電感的等效電路型式的詳細探討，可參考本公司研發技術報告 [BWTR2014-02](#) & [BWTR2015-02](#)。

我們可利用(5)式重新整理如下：

$$Z = j\omega L_s + R_s = j\omega L_s \left(1 + \frac{R_s}{j\omega L_s} \right) = j\omega L_s \left(1 - j \frac{R_s}{\omega L_s} \right) = j\omega L_0 \mu_i \left(1 - j \frac{R_s}{\omega L_s} \right) = j\omega L_0 \mu$$

在此引入新的參數 L_0 使之脫離磁芯材料性質的影響，僅與圈數以及磁路結構相關(為一概念參數，不同於空氣線圈之電感)，並參考(3)式定義

$$L_0 = \mu_0 \frac{Ae \cdot N^2}{le} \text{ ————— (6)}$$

另一個引入的複數導磁率 μ 則可表示如下

$$\mu = \mu_i \left(1 - j \frac{R_s}{\omega L_s} \right) = \mu'_s - j\mu''_s$$

其中 $\mu'_s = \mu_i$ ， $\mu''_s = \frac{\mu_i R_s}{\omega L_s}$ 。由於前述串聯模式的等效電路的品質因子 $Q = \frac{\omega L_s}{R_s}$ 與損耗相關，如此便可將 μ'_s 與 μ''_s 透過 Q 而取得聯結：

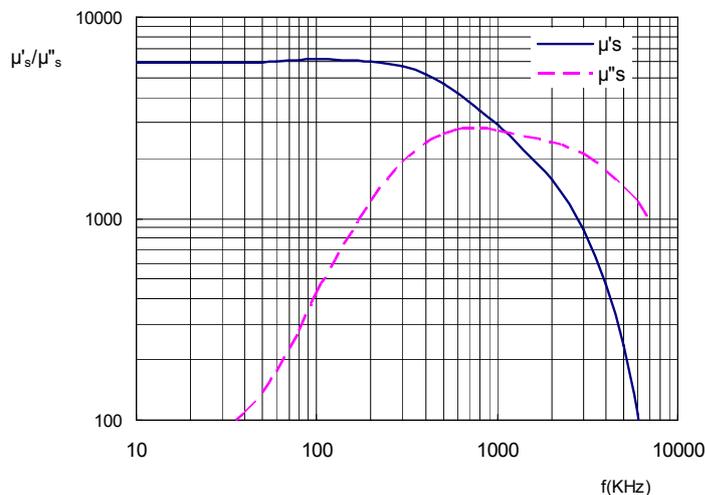
$$\mu''_s = \frac{\mu'_s}{Q} \quad \text{————— (7)}$$

由於電感的等效電路並聯模式在數學的表示上較為複雜(可參考本公司研發技術報告 BWTR2015-02)，且其最終的物理性質與串聯模式為同等，故業界一般多以串聯模式下的 μ'_s 與 μ''_s 來表現相關材料的複數導磁率特性曲線。

若要實際量測材料的 μ'_s 與 μ''_s 曲線，必須注意的是，待測之磁環不能太大，因為磁環體積越大，在高頻量測條件下的渦電流損耗會過度地影響到量測，進而無法呈現材料的真實性質，故待測的磁環大小最好不要超過 OD20，甚至更小都可以。

一般測試時多是從較低頻段到較高頻段，因此測試條件也應遵循 IEC 所制訂的規範，避免遇到自體諧振區。此外儘量降低線損也是很重要的一環，所以繞在磁環上使用的線材必需線阻越低越好，最好是選用多股絞線或較粗的導線且圈數越少越好。在規劃量測前，應儘量將一些非鐵芯性質的因素如線阻、諧振區的影響等降至最低，以得到較客觀與正確的材料性質數據，如此才能忠實呈現最接近該材料的原始特性。

實際取得 T9/5/3 之磁環，材質為 R5K，測試頻率從 10KHz~7MHz，匝數為 1 圈，量測所得之 μ'_s 與 μ''_s 曲線如下：



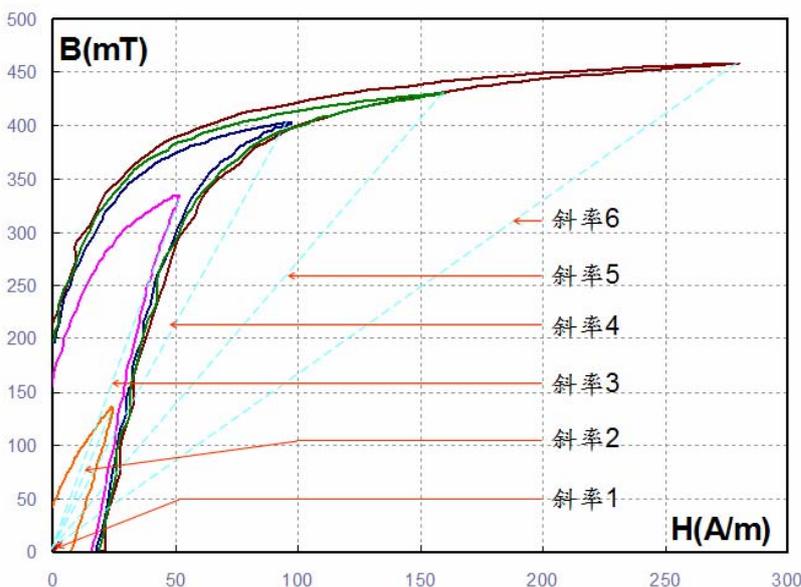
從以上實測之 μ'_s 與 μ''_s 曲線，可以找出 R5K 材質在一些應用上的參考依據：1. 電感隨頻率增加而衰減的行為(μ'_s 曲線)。2. 各個不同頻率下的損耗表現(μ''_s 曲線)。3. 越接近 μ'_s 與 μ''_s 曲線交叉的頻段，就是阻抗較佳的區段，可作為應用於雜訊抑制之材料選擇的參考(詳見本公司研發技術報告 BWTR2014-02)。

μ_a -Bp 曲線

μ_a 是在大的交流訊號的測試條件下材料之磁導率的表現，其定義如下：

$$\mu_a \equiv \frac{I}{\mu_0} \times \frac{\hat{B}}{\hat{H}} \quad \text{————— (8)}$$

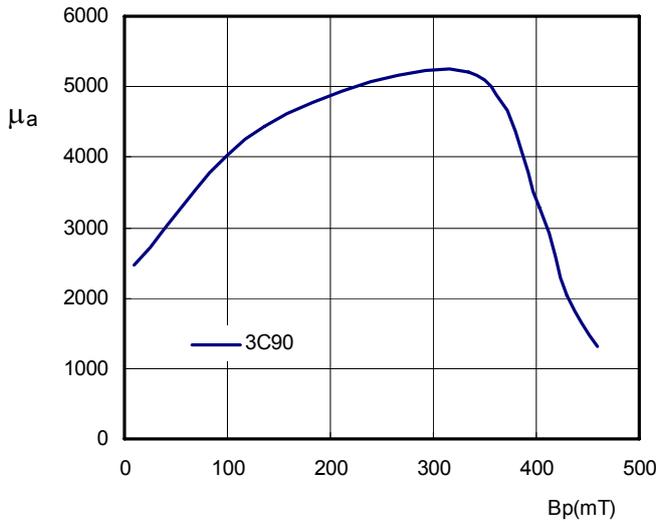
當我們以不同大小振幅的交流訊號量測材料時，可得到大小不一的磁滯曲線，每一個磁滯曲線的 Bp 座標與座標原點所連線的斜率，就可以根據(8)式的計算而得出 μ_a 。以 T25/15/10-3C90 之磁環進行不同大小訊號的實際量測為例，其結果與數據如下：



斜率	Bp(mT)	Hp(A/m)	μ_a
1	9.07	2.92	2467
2	135.62	24.37	4428
3	335.15	51.30	5199
4	403.53	97.59	3290
5	430.39	160.06	2139
6	459.07	277.55	1316

圖(5)

將每一個不同大小的訊號所測出的磁滯曲線重疊在一起，並分別將每一個磁滯曲線的 Bp 與原點連成一直線，每一個磁滯曲線所連成的斜率都不同，所試算出的 μ_a 也不同，可以從圖(5)的結果與數據觀察出它們的關係。斜率越大(越陡)， μ_a 越大，斜率越小(平緩)， μ_a 就越小。若取 Bp 與 μ_a 之間的對應關係就可得到 μ_a -Bp 的曲線圖，如下圖：



由此材料的 μ_a-B_p 特性曲線可以瞭解:材料會因大小不同的交流訊號而產生大小不同磁通量,這些大小不一的磁通量可帶出不同的 μ_a ;有了這些 μ_a ,就可推導出大信號下的電感值。利用這個曲線圖,我們可以知道在不同強度的訊號下,所呈現的電感值皆會有所不同。當材料應用於實際電路中時,電路信號所驅動出的磁通量通常都很高。

μ_Δ-H 曲線

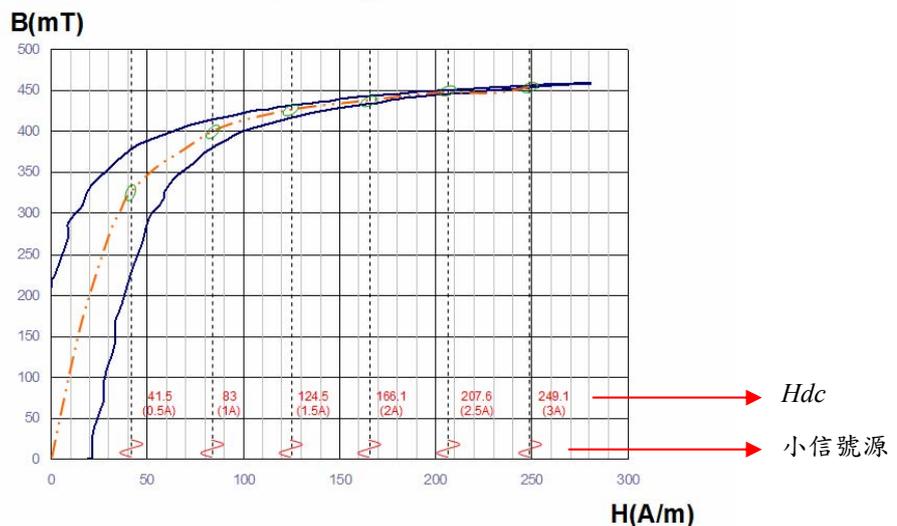
μ_Δ是模擬磁性材料在加載不同的直流偏置狀態時電感的表現,當磁性材料處於一直流偏置條件時,可以由以下(9)式計算出該直流偏置所對應的磁場強度(H)。

$$H = \frac{N \cdot I}{le} \quad \text{————— (9)}$$

N為繞製於待測物上線圈的圈數,I為加載於待測物的直流偏壓,le為待測物的有效磁路徑。現以 T25/15/10-μ_i=2300 之磁環為實測案例(le=60.2mm),圈數為5圈,分別以加載0.5A、1A、1.5A、2A、2.5A、3A為直流偏置條件,經以(9)式分別計算出各直流偏置加載時的磁場強度,例如:加載0.5A直流偏置時,表現在磁滯曲線上的狀態為41.5(A/m)的位置加載一小的訊號源,這小的訊號源就是一個小的B-H迴圈,如下圖所示。H_{dc}為每加載一不同的直流偏置所對應的磁場強度。

BH Loop

圖說:
加載直流偏置於磁滯曲線中的表現。
綠色小迴圈即為小信號源在不同H_{dc}下所造成的B-H小迴圈,其斜率也因其所在位置而有所不同。



百 徽 股 份 有 限 公 司

上圖每一個小迴圈即代表一個斜率，也就是 μ_{Δ} ，其數學定義為

$$\mu_{\Delta} = \frac{1}{\mu_0} \times \frac{\Delta B}{\Delta H_{Hdc}} \quad \text{————— (10)}$$

不同直流偏置的位置所測得之參考數據與試算出的 μ_{Δ} 如下表

Idc(A)	Vm(mV)	B(mT)	Im(mA)	μ_{Δ}	L(μ H)
0	5.43	0.5	1.63	2079.2	52.8
0.5	3.42	0.315	1.58	1351.4	34.4
1.0	1.27	0.117	1.60	495.6	12.5
1.5	0.77	0.0709	1.61	298.5	7.0
2.0	0.57	0.0525	1.61	221.0	5.0
2.5	0.46	0.0423	1.61	178.0	3.9
3.0	0.38	0.0350	1.61	147.3	3.1

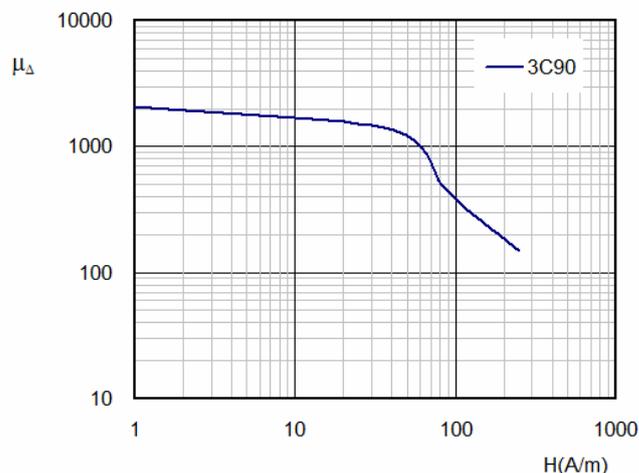
T25/15/10-3C90, 10KHz/5Ts

- ◎Idc 代表所疊加的直流偏置
- ◎Vm 則是實際跨接於待測物兩端的電壓均方根值
- ◎B 是訊號源振幅的大小，可以由 Vm 藉著(1)式換算而得
- ◎Im 是實際跨接於待測物兩端的電流均方根值

當無加載直流偏置($I_{dc}=0A$)時，我們提供一個交流訊號源 $V_m \sim 5.43mV$ ，相當於 $0.5mT$ ，也就是 ΔB 。在此同時，也將 I_m 紀錄下來，接著利用(9)式算出 ΔH ， I_m 必須先乘上 $\sqrt{2}$ ，再代入(10)式。計算如下：

$$\mu_{\Delta} = \frac{1}{4\pi \times 10^{-7}} \times \frac{0.5 \times 10^{-3}}{(5 \times 1.63 \times 10^{-3} \times 1.414) / 60.2 \times 10^{-3}} = 2079.2$$

接著再繼續加載 0.5A 偏置，並紀錄 V_m 與 I_m ，同樣用(10)式算出 0.5A 時的 μ_{Δ} 。其餘不同的直流偏置也是以此類推。當我們瞭解 μ_{Δ} 的緣由之後，就可運用磁滯曲線上各直流加載的場強度與 μ_{Δ} 的對應關係，描繪出 μ_{Δ} -Bp 曲線，如下圖



加載直流測試的目的，意在模擬實際電路中電感元件是否能在應用條件下的電流波形範圍內，有足夠的電感量可以抑制漣波，防止因漣波竄出形成電流突波造成磁芯飽和而使線圈溫度過高，甚至燒毀元件。因此加載直流測試是磁性材料特性一個很重要的測試項目。

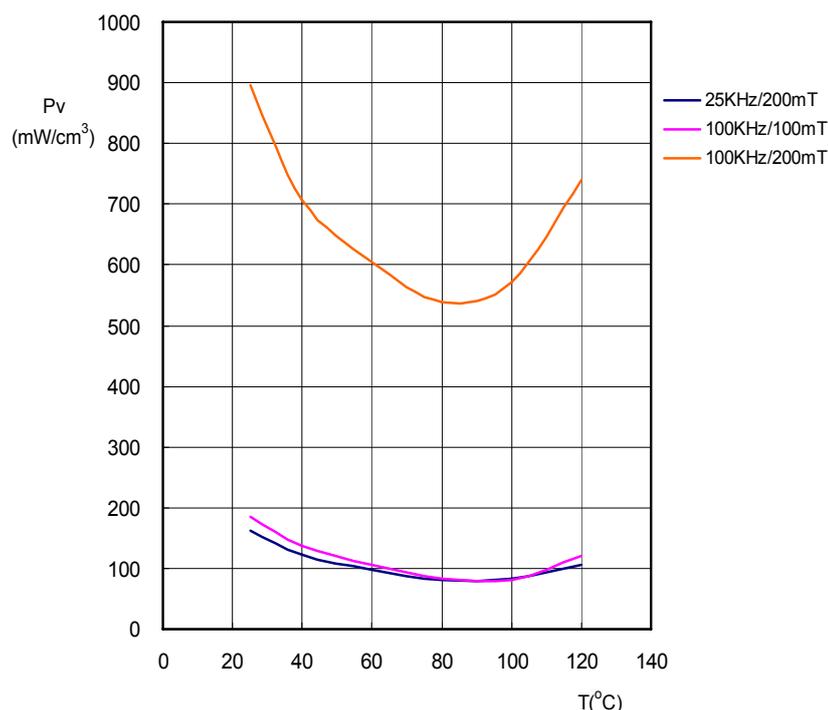
P_v 曲線

鐵芯損耗(Core loss)代表鐵芯在特定應用條件下所消耗的功率，最終會以熱的方式耗散至空間。鐵芯損耗主要與交變的頻率(渦電流損)與磁通的變化量(磁滯損)有關。單位體積的損耗可以下列經驗函數算式推算：

$$P_v(\text{W/m}^3) = C_m \cdot f^x \cdot B^y \cdot (ct_0 - ct_1 \cdot T + ct_2 \cdot T^2)$$

其中 f 為頻率(單位：Hz)， B 為磁通量(單位：Tesla)， T 為溫度(單位：°C)， C_m 、 x 、 y 與 ct_0 、 ct_1 、 ct_2 是經驗參數。不同的材質，參數大多會不相同，鐵芯廠商一般都會提供對應的參數。另外有一個影響損耗的重要因素就是溫度，因此 ct_0 、 ct_1 、 ct_2 和 T 代表溫度的影響。實際鐵芯的損耗是由儀器測試出，首先我們必須提供待測物的有效截面積(A_e)、磁路徑(l_e)等參數與測試條件，如頻率、磁束密度、圈數等，儀器會依據我們所提供的條件，推算出所需的電壓，接著放大器將訊號調整至正確的電壓並經由示波器取得實際的電壓與電流數據，最後由電腦軟體程式計算出 V_{rms} 、 I_{rms} 與相位等，並換算出鐵芯的損耗。在不同的環境溫度下，材料的阻抗會因溫度的變化而改變，使得量測出的 I_{rms} 與相位等結果不同，因此在不同的溫度下鐵芯的損耗也不同。

取一 T25/15/10-3C90 的磁環，給予所需的測試條件，所得 P_v 曲線如下：



由曲線圖可看出該磁性材料在不同頻率、磁束密度與溫度下的損耗表現。產品設計者可以根據所設計產品的環境溫度等條件，參考鐵芯製造商所提供的材料 Pv 曲線來選用最適合的材質。雖然一個電感元件整體的損耗還包含線損，但鐵芯損耗所佔的影響卻複雜得多，也是一般磁性元件設計者所不易掌握的。因此鐵芯損耗的特性曲線絕對是磁性材料選用時的重要參考依據。有關鐵芯損耗的細節，我們將另闢專題做深入探討。

關於作者：

王正雄 前東南工專(現改制為東南科技大學)電子工程科畢業。曾任台灣飛磁材料股份有限公司資深應用工程師。現擔任研發工程部經理。

李瑞揚 國立宜蘭大學電機工程系學士(2006)。現擔任研發部專案工程師。