

陸、非破壞性檢驗

五、渦電流檢驗

講解討論

講解討論時數：2小時

參考資料：

- 一、技令 33B-1-1，第三篇
- 二、中國國家標準渦電流檢驗通則
- 三、中華民國非破壞性檢驗協會訓練教材
- 四、美國非破壞檢測協會訓練教材

講授內容：

壹、概述：

渦電流檢驗為非破壞性檢驗基本方法之一，主要用於檢查飛機金屬結構件之表面或次表面瑕疵；由於檢驗速度快，且檢驗結果可立即顯示，因此，目前仍廣泛用於飛機維修檢驗。

貳、基本原理：

- 一、交流電場之線圈：將一載有交流電之線圈接近一導體，導體受到線圈磁場變化之影響，依據楞次定律，導體內之自由電子受感應而產生環流運動，此環流運動一如旋渦狀之電流，

所以稱之為「渦電流」，如圖 6-5-1

渦電流流動路徑屬封閉曲線。其流動方向與線圈纏繞方向平行，與交變磁場方向垂直並隨交流電之磁通改變而呈相反方向流動。故其頻率與交流電之頻率相同。線圈所產生之磁場稱為「一次磁場」，而感應渦電流所產生的磁場稱為「二次磁場」如圖 6-5-2

進行檢驗時，當試件無缺陷，則所生之渦電流一定，其二次磁場亦一定，與一次磁場相抵消後之值固定，因此，顯示訊號於指示器上將無變化；但當試件上有缺陷發生時如圖 6-5-3，渦電流路徑將受阻改變，連帶使一、二次磁場之平衡狀態亦發生變化，此時，將使指示器上之顯示訊號產生偏

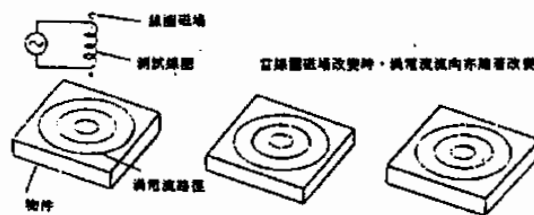


圖 6-5-1 渦電流的感應

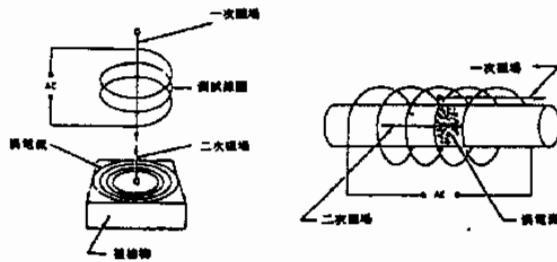


圖 6-5-2 渦電流檢測之一次及二次磁場

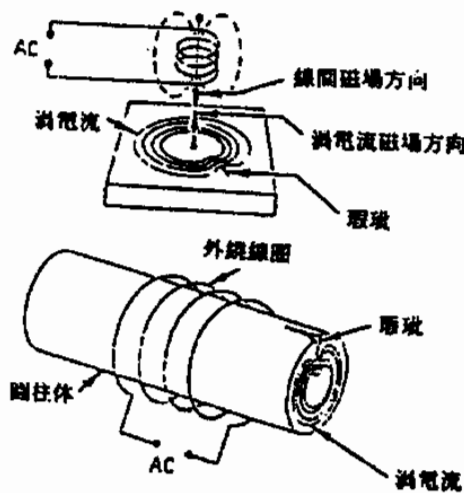


圖 6-5-3 瑕疵對渦電流分佈的影響

移，偏移量之大小與缺陷深度及大小有密切之關係。

二、渦電流特性：

導體所感應之渦電流通常會集中在其表面附近，此現象稱之為"集膚效應"，渦電流密度隨深度增加而快速遞減。圖 6-5-4 為不同深度渦電流密度之變化情形。而當渦電流密度減至為表面處密度之 37% 時，我們定義此時之深度為"標準透入深度"。渦電流之透入深度受測試頻率與材質影響，其公式為

$$\delta = \frac{1}{(\pi f \mu_0)^{1/2}} = \frac{0.564}{(\mu \sigma)^{1/2}} \text{ meter}$$

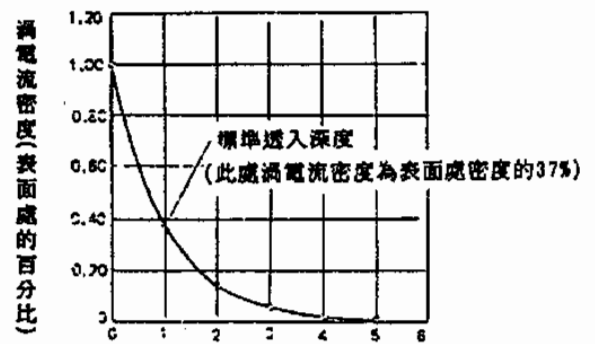
其中 δ ：標準透入深度 (Standard depth of penetration)，m

f ：頻率，HZ。

σ ：導體之導電率，mho/m

μ ：導磁率，Henry/m

隨著深度增加除了渦電流密度遞減外，渦電流的相位角也會有規律的延遲。藉著事先建立的標準我們可以利用渦電流訊號相位變化的情形來準確判別瑕疵的深度。



深度單位(標準透入深度的倍數)

圖 6-5-4 渦電流密度的變化

參、影響渦電流之因素：

影響渦電流檢驗之因素可分為材料本身性質和檢測條件兩大部份。材料性質之因素包括導電率、導磁率

及尺寸變化（外形、厚度、瑕疵等）；檢測條件則包括頻率、磁耦合、環境等。

一、導電率影響：

渦電流係自由電子群流動所生，因此，流經導體之電子總數與材料導電率有密切關係，當導電率增加時，渦電流亦隨之增加，檢驗靈敏度將降低。

二、導磁率影響：

鐵磁性材料中即使微小的導磁率變化也會促使測試線圈之阻抗產生明顯的改變，抑制其它變數之顯示，造成檢測困難。通常在檢驗時，均外加一直流線圈，將試件磁飽和以清除導磁率之影響。

三、尺寸變化影響：

(一) 厚度因素：

當被檢物相當薄或厚時，線圈之磁場有局部無法感應試件產生渦電流如圖6-5-5，因此，造成檢驗不完全。

(二) 外形或邊緣之因素：

測試線圈靠近檢物末端、邊緣或角隅時，渦電流之流動受到邊緣之限制影響而變形，此結果將導致一明顯錯誤指示，此種現象稱之「邊緣效應」如圖6-5-6。

(三) 瑕疵：

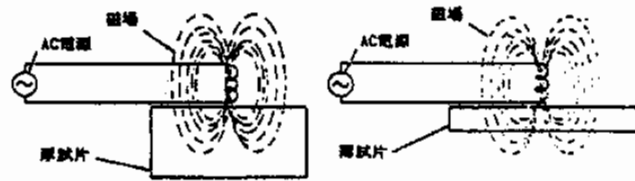


圖 6-5-5 渦電流檢測中試片厚度的影響

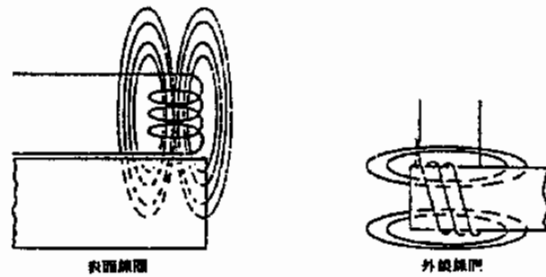


圖 6-5-6 邊緣效應所導致渦電流的變形

被檢物中瑕疵的存在可視為其尺寸變化的一種。訊號顯示的大小與瑕疵阻斷渦電流之流動程度有絕對的關係，所以瑕疵的長、寬、深、位置、方向均會對渦電流有影響。如圖6-5-7。

四、頻率之影響：

頻率係諸多因素中唯一能透過儀器調整而有效控制的。頻率愈高則於工件表面所感應之渦電流愈強，即集膚效應愈明顯，反之則愈弱。頻率高一般靈敏度較高但透入深度降低。

五、磁耦合之影響：

影響磁耦合的因素包括線圈大小、線圈結構、物件外形、物件表面狀況及層情形等。

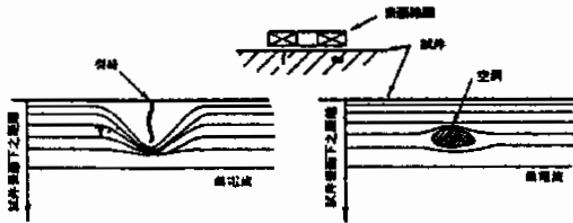


圖 6-5-7 缺陷所導致渦電流變形

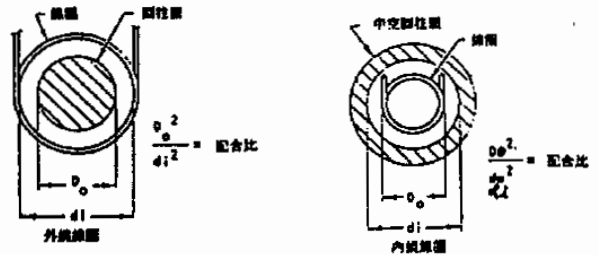


圖 6-5-8 配合比圖 6-41 內繞線圈

(一) 離距(Lift-off)：

影響磁耦合的因素包括線圈大小、線圈結構、物件外形、物件表面狀況及塗層情形等。

量測離距變動的情況可應用於測量導體上之非導電塗層厚度。

(二) 配合比(Fill-factor)：

使用外繞或內繞線圈時，線圈與被檢物間距之因素則利用「配合比」來描述。配合比計算公式為：

外繞線圈之配合比(n)= $\frac{D_o^2}{d_i^2}$

其中 n= 配合比

D_o = 被檢物外徑

d_i = 檢圈內徑

內繞線圈之配合比(n)= $\frac{D_o^2}{d_i^2}$

其中 n= 配合比

d_i = 被檢物內徑

D_o = 線圈外徑

配合比愈接近1耦合效果愈佳，但為了線圈與被檢物間有餘裕空間作相對運動，則必須適度降低配合比。如圖 6-5-8。

六、環境因素之影響：

(一) 溫度：

溫度因素對被檢物的導電率和導磁率均會造成影響。溫度上升會使金屬導電率降低，溫度下降則會使金屬導電率上升。因此，當溫度上升時被檢物表面的渦電流強度會降低，而渦電流的透入深度將會增加。

(二) 其他因素：

除了溫度因素外，週遭環境因素的影響如電磁干擾、導電或導磁附著物，在檢測過程中都應詳加考慮。

肆、檢測線圈：

檢測線圈依其使用場合可分為表面探頭線圈、外繞線圈和內繞線圈三種基本型式。而依其繞線組合方式又可分為單繞或雙繞之差異或絕對式線圈。

一、測試線圈型式：

(一) 表面探頭線圈：

圖6-5-9為一種典型的表面探頭線圈。通常線圈探頭的接觸端都加塗一層樹脂材料以增加其耐磨性。而其所產生之有效磁場範圍約等於線圈直徑大小。

(二) 外繞線圈：

外繞線圈的型式如圖 6-5-10 所示，由於其外形及能快速移動之特性，外繞線圈較適用於圓管、圓棒之檢測。

(三) 內繞線圈：

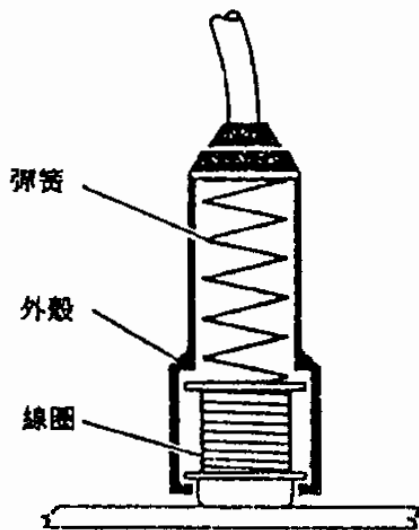


圖 6-5-9 典型的表面探頭線圈

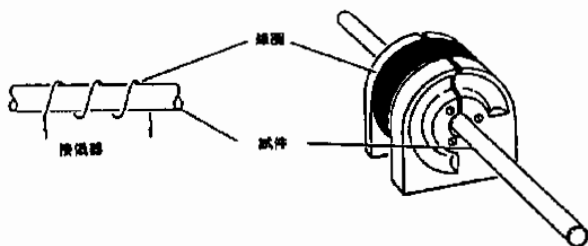


圖 6-5-10 外繞線圈

圖 6-5-11 所示為一種可深入管子內部用來檢測內壁周圍的線圈。和外繞線圈類似，其所引發之渦電流可涵蓋管子整個範圍，所以整個斷面可一次完成檢查。

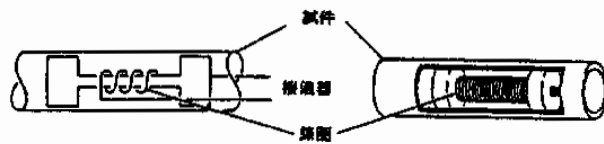
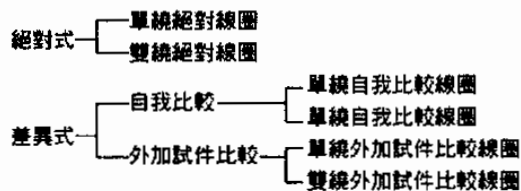


圖 6-5-11 內繞線圈

二、測試線圈繞線的組合方式：

繞線的方式依照檢測部位是否與其它部位或試件比較可分為絕對線圈或差異式線圈。差異式線圈中與同一試件其他部位比較者稱為自我比較線圈，與另一試件作比較者稱為外加試件比較線圈。而依照渦電流訊號激發或接收是否使用同一線圈可分為單繞或雙繞線圈。依照組合方式整理如下：



(一) 絕對線圈：

● 單繞繞絕對線圈：

如圖 6-5-12 所示，此種繞法使用同一線圈激發磁場產生渦電流，並同時接收渦電流

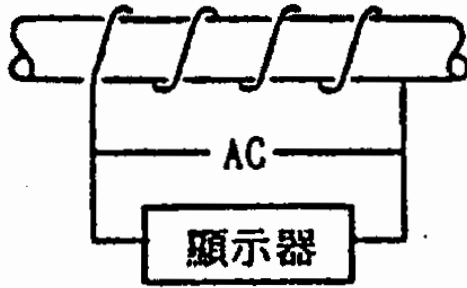


圖 6-5-12 單繞絕對線圈

的訊號。

● 雙繞絕對線圈：

如圖 6-5-13 所示，其結構為兩組分別繞成之線圈，其中一組線圈（激發線圈）之功能為產生激發磁場；另一組線圈（拾取線圈）之功能為接收渦電流所感應之磁場變化，並將之轉換為電流訊號顯示於顯示器上。

(二) 差異式線圈：

將兩組或多組線圈，以纏繞方向相反方式加以串連，且各線圈間無相互感應情形，如兩組線圈所感應的部位材質相同且無瑕疵，則線圈輸出之訊號將互相抵消而沒有顯示。

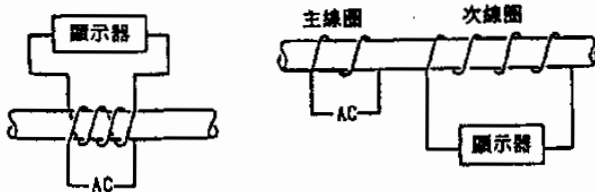


圖 6-5-13 雙繞絕對線圈

● 自我比較線圈：

1. 單繞自我比較線圈：

如圖 6-5-14 所示，將兩繞線相反線圈串連，使線圈本身兼具激發線圈之功能，當檢測進行中無須與外加試件作比較。

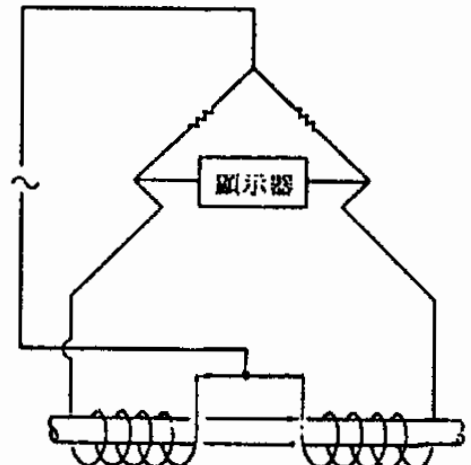


圖 6-5-14 單繞自我比較線圈

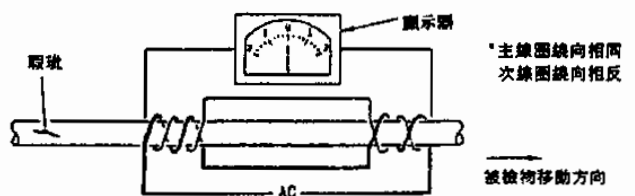


圖 6-5-15 雙繞自我比較線圈無訊號輸出

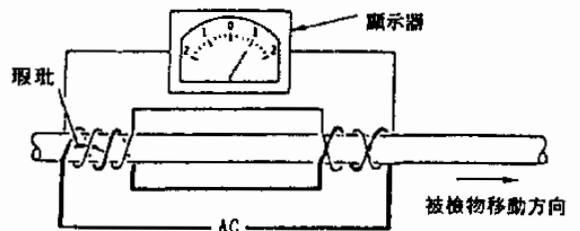


圖 6-5-16 雙繞自我比較線圈，有訊號輸出

2. 雙繞自我比較線圈：

這一類型線圈係由兩組線圈組成，而次線圈又由兩繞線相反之線圈串連而成，這兩組線圈之功能互異，一為專司激發渦電流之主線圈；另一則專司接收渦電流感應訊號之次線圈，此線圈直接與顯示器連接，而作自我比較檢驗。如圖 6-5-15 及圖 6-5-16 所示。

● 外加試件比較線圈：

此類線圈與自我比較線圈纏繞方向雷同，其僅有差異為使用外加參考試件與被檢物件作比較，以達成檢測之目的。

1. 單繞外加試比較線圈

如圖 6-5-17 所示，與前述之單繞線圈功能相同，線圈兼具激發與拾取渦電流訊號之功能，可將被檢物中與外加

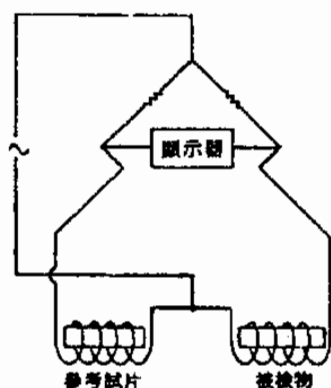


圖 6-5-17 單繞外加試片比較線圈

參考試件所不同之處檢測出來。

2. 雙繞外加試件比較線圈

如圖 6-5-18 所示，此類型線圈如前述之雙繞線圈，有兩組線圈，一組偵測外加參考試件，另一組偵測被檢物，兩組得出之訊號加以比較而得到檢測結果。

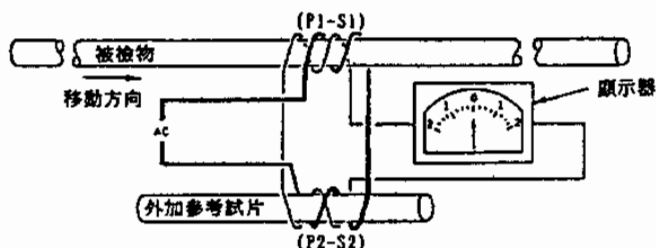


圖 6-5-18 雙繞外加試片比較線圈

伍、檢驗儀具：

一、儀具基本構造：

渦電流檢測中，渦電流之儀具繁多，一般均根據其輸出模式加以分類，大致包含下列基本功能：

(一) 載波激發：

主要作用在產生可選擇之不同頻率之激發信號傳至檢測線圈，而此訊號則透過線圈傳送至被檢物上產生渦電流。

(二) 信號調制：

透過線圈與被檢物之磁耦

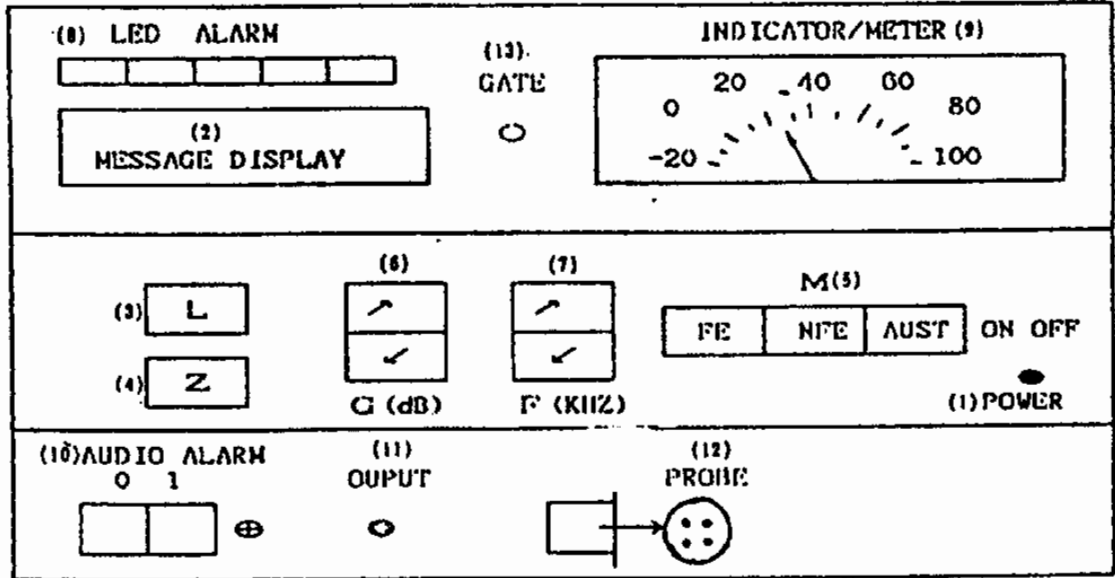


圖 6-5-19 指針式渦電流裂縫測深儀器

合，被檢物上之缺陷會造成渦電流訊號之振幅或相位變化，即為調制作用。

(三) 信號處理：

將帶有缺陷指示之調制信號透過平衡、放大、過濾等電路進行前處理，提供訊號解調作用。平衡電路用於抵消激發之交流信號，使指示歸零。至於放大及過濾電路在改善信號雜訊比，以利解調制分析。

(四) 解調制（信號分析）

解調制信號分析部份，利用偵測電路量測缺陷信號之振幅及相位，並用信號鑑別、取樣與高低通過之電路分辨缺陷信號種類及過濾雜訊，

而達到解調分析功能。

(五) 顯示：

信號顯示之方式依信號處理方法及檢測目的不同而有所差異，常見之顯示方式有示波器、指示儀表、記錄器、警示器、電腦、自動信號警示或自動剔退機構等方式。

二、儀器簡介：

(一) 指針式渦電流檢測儀：

簡易之渦電流儀器內部採用電橋電路，顯示方式為指針式，主要用於導電率量測或裂紋檢測等單一功能。圖 6-5-19 為一指針式渦電流列紋檢測儀器之面板。

1. 電源開關 (POWER)
2. 顯示幕 (MESSAGE DISPLAY)

顯示包含：距離補償、零點補償、材質材況、靈敏度 (dB)、電源狀態及 "READY" 等指示。

3. 離距補償鈕(L)：探頭離開試片，然後按此鈕而達離距補償功能。
 4. 平衡鈕(Z)：將探頭置於試片，然後按此鈕而達歸零功能。
 5. 材質選擇鈕(M)：包含鐵磁、奧斯田鐵、非鐵類依被檢物之材質選擇適當之探頭與其配合。
 6. 感度調整鈕(G)：檢測靈敏度調整，"↑"增加dB數，"↓"減少dB數。
 7. 頻率調整鈕(F)：檢測頻率調整，"↑"增加，"↓"降低。
 8. 缺陷示燈(LED ALARM)：若缺陷指示值超過Gate設定值時，LED即亮。
 9. 缺陷深度指示表(INDICATOR/METER)。
 10. 警示聲開關(AUDIO ALARM)：當缺陷指示值超過Gate設定值時，即有警示聲。
 11. 訊號輸出插座(OUTPUT)
 12. 線圈插座(PROBE)。
 13. 警示低限設定鈕(Gate)
- (二) 向量點式渦電流檢測儀：

由於向量點顯示法可以得到較多阻抗改變之資料，向量點式渦電流儀器已是目前常見之渦電流儀器。圖6-5-20為一向量點式渦電流檢測儀器之面板。

1. 電源開關(POWER)。
2. 平衡鈕(Balance)：按此鈕使向量回到CRT中央而達到歸零功能。
3. 頻率調整鈕(FREQUENCY)：依據檢測條件之需要，選擇適當頻率。
有時要使兩個不同材料特性改變之向量點移動方向相互垂直，也是利用頻率鈕調整。
4. 相位調整鈕(PHASE)：調整CRT上向量點移動方向的相位角，以便辨認不同的信號。通常相位角調整在使對檢測無意義的信號，例如離距變化，旋轉至水平基準線上。
5. 感度調整鈕(GAIN)：檢測靈敏度調整。
6. 顯示模式選擇(Display Mode)：選擇CRT顯示方式，可以用X-Y、X-T、Y-T。
7. 濾波調整鈕(FILTER)：選擇高通、低通或帶通模式。用以消除雜波。

8. 警示低限設定鈕(GATE)：設定最低警報值。
9. 線圈插座(PROBER)：探頭線圈安插位置。
10. 顯示幕(CRT)：檢測結果顯示之位置。

而有許多種形式，其操作程序亦有所差異，因此，在使用之前必須針對儀具之性能先行了解，始能發揮其功能。

習題：

- 一、請說明渦電流之特性。
- 二、影響渦電流之因素有那些？
- 三、渦電流檢測儀器有幾種？試簡述之。

陸、結論：

- 一、影響渦電流檢測之因素可分為材料性質和檢測條件兩大部份。材料性質包括導電率、導磁率及尺寸變化；檢測條件則包括頻率、磁耦合、環境等。
- 二、渦電流檢驗儀具針對不同用途

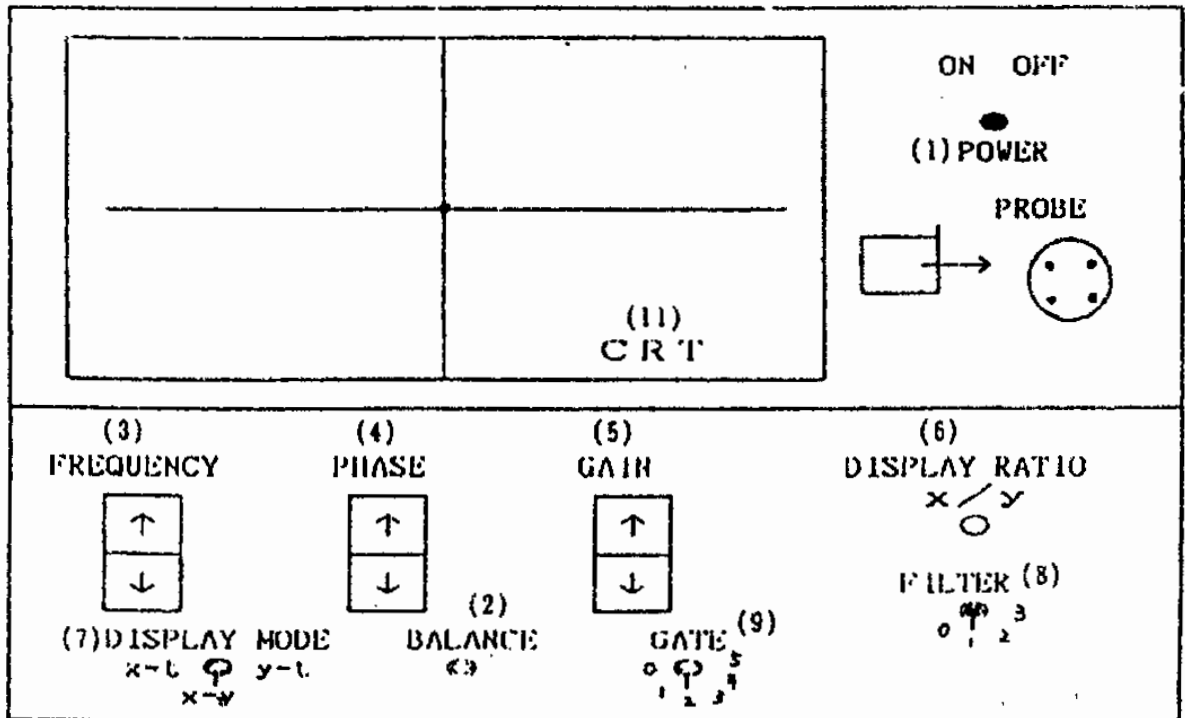


圖 6-5-20 向量點式渦電流檢測儀器