

# 光纖測量儀簡析及應用

振聯科技 / 黃子敬

## 一、背景介紹

近些年，光纖傳感器的發展促進了各種技術複雜的設備採用干涉、偏振和波長調製技術。雖然所有這些方法都為特定的應用和專用感測器提供了巨大的前景，但強度調製的光纖位移感測器（通常稱為光纖測量儀）集成了操作簡單、性能好、多功能性和低成本的強大組合特徵，使其非常適合各類的實驗室和工業應用。

Photo by Ricardo Gomez Angel on Unsplash

## 二、光纖測量儀的原理及變化

光纖測量儀的基本原理為使用相鄰的一對光纖元件，一個將光從遠端光源傳送到要測量其位移或運動的目標物體上，另一個用於接收從物體反射的光並將其傳回遠端光敏檢測器。光纖元件是一根可彎曲的玻璃或塑膠線，該元件可保持輸入端接收到的光在其內部的反射接近全反射，從而光沿其長度傳輸，如圖 1 所示。

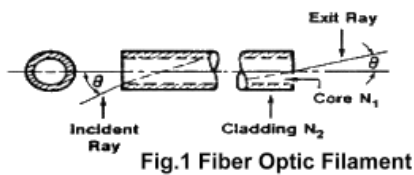


圖 1. 光在光纖元件內部全反射傳輸

最常用的光纖被稱為“階躍折射率光纖”的類型，它由一個承載光通量的內芯和一個外部包層組成。要發生全內反射，核心玻璃的折射率 (N1) 必須大於玻璃包層的折射率 (N2)。定義被接收到纖芯中光的半形正弦為數值孔径 (N.A.)，並由以下公式給出：

$$N.A. = \sin \theta = \sqrt{(N_1^2 - N_2^2)}$$

——(1)

這是入射到光纖表面的光線可以被捕獲在纖芯內並沿其長度反射的最大角度。然後從光纖另一端射出的光線也被限制在相同的角度。單根光纖的直徑通常在約 0.001 英寸到 0.010 英寸的範圍內，儘管光纖製造技術的進步已將尺寸擴大到約 0.060 英寸。傳輸效率取決於纖芯和包層中玻璃的成分和純度，以及光纖端面光學拋光的品質。

圖 2 和圖 3 描述了當光從目標反射時相鄰的發射光纖和接收光纖的相互作用。可以看

出，在零間隙時，發射光纖中的光將直接反射回自身，並且很少或沒有光傳輸到接收光纖。如圖 2，隨著間隙的增加，一些反射光被接收光纖捕獲並傳送到光敏檢測器。如圖 3，隨著間隙進一步的增加，將達到最大反射光傳輸到接收光纖的距離。若間隙再進一步增加，將導致接收光纖表面捕獲的光反而減少，並且來自光感測器的輸出信號相應下降。

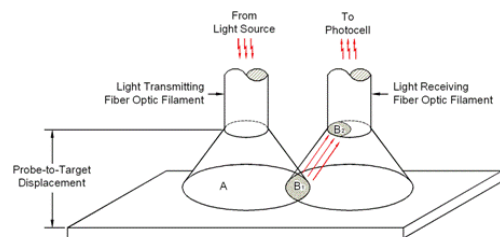


圖 2. 間隙增大，捕獲的光增加

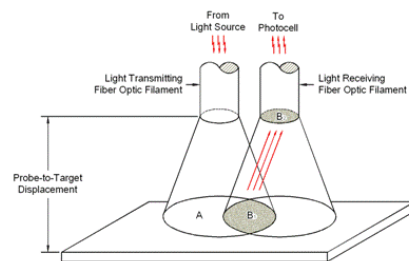


圖 3. 超過最大值，間隙增加，捕獲的光反而減少

光纖測量儀的一個主要優勢是它能夠直接測量各種表面，從鏡面到漫反射的物體，以及從導體到絕緣體的材料。如圖 4 所示，輸出信號的初始上升和最大上升的間隙和位移範圍主要由光纖的直徑和 N.A. 以及光纖工作場內的強度分佈決定。大多數這種類型的商用設備使用多個發射光纖和接收光纖，如圖 5 所示，以獲得更高的強度水準所需的光探測器，確保綜合測量的性能水準。

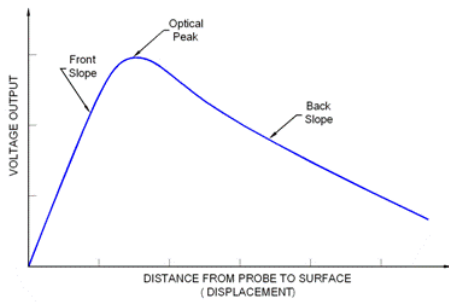


圖 4. 探頭到被測物的距離與輸出信號的關係

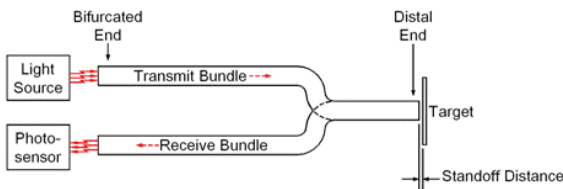


圖 5. 商用設備內部有多個發射光纖和接收光纖

出現最大值或零斜率的間隙提供了一個方便且易於使用的校準參考位置。相對各種表面顏色、光潔度不同的被測物體，在該位置可以對輸出信號進行歸一化，以獲得一致的靈敏度係數。由於最大輸出位置還提供了一個工作點，該點輸出信號在一定範圍內與間隙無關，因此它還為用戶提供了一種額外的操作模式：允許測量具有清晰邊緣物體的橫向位置、位移或反射介面，如圖 6 所示。

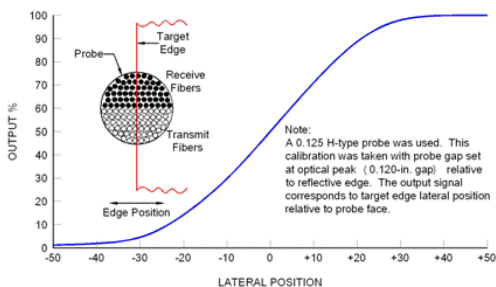


圖 6. 測量具有清晰邊緣物體的信號輸出示意圖

這種相同的零斜率也提供了一種測量目標的反射率的方法，而不受某些位移間隙變化的影響。因此，通過使用複雜的信號調理設備可以得到位置靜態或位移動態的測量，這些測量可以根據反射變化進行校正，否則反射變化會導致資料中的誤差和不確定性。光纖測量儀的尺寸、結構和光纖分佈模式可供使用者廣泛選擇的傳感範圍、解析度、頻率響應、物理形狀等。光纖測量儀既有的簡單性、通用性和易用性，加上其體積小、回應速度快、非接觸無品質載荷和抗電磁干擾能力，在位置、位移和振動測量領域有著廣泛的應用。

當聚焦透鏡系統放置在光纖探頭的傳感端附近時，該設備會獲得一個有趣且非常有用的變化。透鏡和光纖的這種組合的結果如圖 7 所示。可以看到，存在兩個光學峰，在峰與峰的中間出現一個尖銳的零點。零點每一側的任一陡峭回應區域均可用於測量小位移、高解析度應用，同時以接近正常工作間隙的 100 倍運行。利用這種元素組合及其特有的尖銳零點，可以建立一種新穎的自聚焦連續跟蹤光學測量系統。

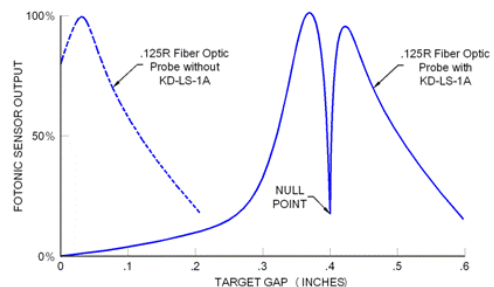


圖 7. 透鏡和光纖組合的測量

光纖測量儀另一種變體可以通過使用由一個共同的傳輸束提供的兩個接收通道的光纖傳感器推導出來。光纖的尺寸和分佈與接收通道

的設計，以產生不同的光槓桿回應，從而可以通過比值提供直接獨立於表面反射率的輸出信號。

### 三、MTI-2100 光纖測量儀

MTI-2100 光纖測量儀（如圖 8）是一種非接觸式儀器，它使用光纖槓桿原理進行位移測量、振動分析和表面狀態測量。MTI-2100 光纖測量儀通過柔性光纖探頭傳輸光束，接收從目標表面反射的光，並將此光轉換成電信號，與探頭和被測目標之間的距離成正比。光纖原理一樣的如圖 1 所示。利用光纖傳感器輸出的信號電壓來確定目標表面的位置、位移、振動幅度、頻率和波形。



圖 8. MTI-2100 光纖測量儀

MTI-2100 具有先進的光纖和光電技術，可以精確的測量位移、位置和振動。其解析度高達 2.5 納米，頻率響應高達 500kHz。

MTI-2100 模組化式設計，具有很強的靈活性，可根據測量範圍的要求訂制客戶需求的探頭，並且可以更換不同類型的探頭。探頭具備抗電磁干擾能力，適用於各種物質測量材料表面：如金屬、合成物、顏料、玻璃、陶瓷以及液體等。

具有雙通道，用戶可同步進行測量，這對模態分析和結構動力學的研究非常重要。另外，所有探頭模組都具有兩個測量範圍：一種是高解析，另一種是大量程。如圖 9，當探頭和被測物接觸時，沒有光能傳輸給接收光纖，輸出的信號為“零”，隨著探頭與被測物之間距離增加時，接收光纖接收的光也增加，並且增加的光和距離之間是非常靈敏的，因此 MTI-2100 輸出信號也是非常線性的（Range 1）。隨著距離的繼續增加，接收光纖接收到的光達到峰值，如果探頭和被測物之間的距離繼續增加，接收到的光將會持續減少，這樣就形成了第二個很靈敏、大量程、具有標準距離的測量範圍（Range 2）。

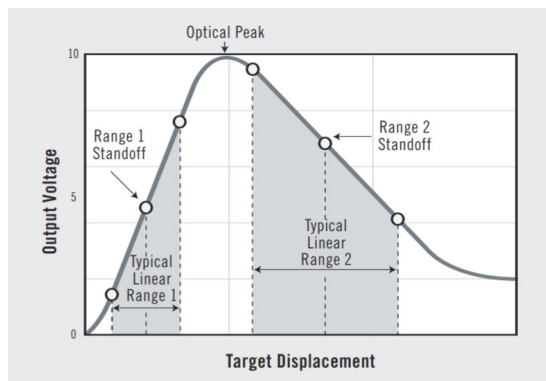


圖 9. MTI-2100 的兩端測量範圍

MTI-2100 光纖探針模組包含一組發射光纖和一組接受光纖，發射光纖和接收光纖以三種不同的方式排列（不規則、半圓心及同心圓形狀，如圖 10）。三種排列圖形的光源全部由鹵鎢燈提供，光傳輸到光纖中，光纖探頭發出的光照射在被測物上，被測物反射回來的光進入接收光纖並傳入到 MTI-2100 中。



## Fiber Distribution

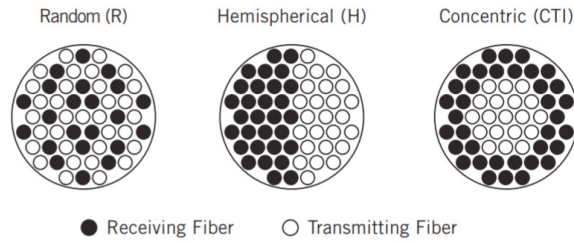


圖 10. 發射光纖和接收光纖的三種排列

以下是 MTI-2100 常規探頭中所有的類型及參數表。

表 1. MTI-2100 常規探頭中所有的類型及參數表

探針型號	探針直徑		電纜全長 (mm)	頻率響應 (-3dBKHz)	輸出雜訊 (mv-D-P)	範圍 / 特性			範圍 / 特性		
	全部外徑 (mm)	活動直徑 (mm)				基本感度 (um/mv)	線性範圍 (um)	標準距離 (um)	基本感度 (um/mv)	線性範圍 (um)	標準距離 (um)
MTI-2020R	0.508	0.178	1.372	90	30	0.016	0.102	0.127	0.076	0.305	0.508
MTI-2023R	0.813	0.483	1.372	130	20	0.019	0.127	0.127	0.127	0.737	0.889
MTI-2047R	1.194	0.686	1.372	130	10	0.020	0.127	0.127	0.203	1.016	1.118
MTI-2062R	1.600	1.194	1.372	130	5	0.025	0.152	0.127	0.381	1.524	1.778
MTI-2062H	1.600	1.194	1.372	130	5	0.127	0.762	0.762	0.508	1.905	3.810
MTI-2125R	3.175	2.286	1.372	150	3	0.025	0.152	0.178	0.762	3.556	3.048
MTI-2125CI	3.175	2.286	1.372	150	3	0.178	0.508	0.762	0.762	3.556	5.588
MTI-125H	3.175	2.286	1.372	150	3	0.330	1.778	1.270	1.016	4.445	7.620

另外一種特殊的光纖探頭交光纖邊緣探頭（如圖 11），這是為了應用於細小物體的位移振動測量而設計的。響應頻率高的特點使它成為硬碟磁碟、磁帶、超聲波工具動態測量和生產線上的理想測量方案。每種探頭由位置相對的發射光纖與接收光纖兩組光纖捆束而成。如圖 12，光直接從發射光纖發射到接收光纖上進行測量，當被測物在探頭間移動時，接收端接收的光量會因此而變化，MTI-2100 將對這些光量的變化轉化成精確的位移量。這種設計提供較大的探頭標準距離及 2.5 納米的解析度。

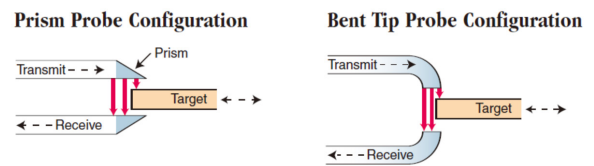


圖 11. 邊緣探頭測量示意圖

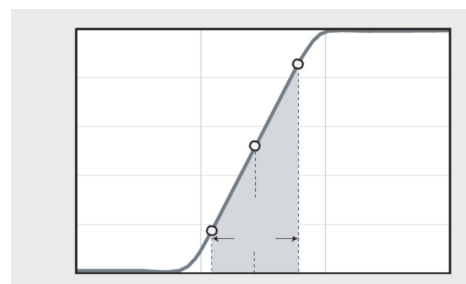


圖 12. 邊緣探頭測量移動的被測物時的輸出信號

#### 四、光纖測量儀的應用

我們彙整客戶在長期的使用過程中，有關光纖測量儀的應用實例：

- (一)、小型輕型零件或機構的模態分析，如硬碟。
- (二)、驅動器讀寫頭和 flexure 彙編器。
- (三)、滾動軸承性能研究。
- (四)、測量非常高的頻率，小振幅振動，如超聲驅動的醫療設備或焊接設備。
- (五)、用於衝擊管和放電環境的快速回應壓力感測器的開發。
- (六)、在液氧環境中運行的旋轉設備的軸承健康監測。
- (七)、精密機械機構或壓電微定位器的重複性、遲滯性和回應時間。
- (八)、壓電 / 鐵電陶瓷測量的應用。

其中鐵電材料的測試是應用比較多的。所謂鐵電材料，是指材料的晶體結構在不加外電場時就具有自發極化現象，其自發極化的方向能夠被外加電場反轉或重新定向。鐵電材料的這種特性被稱為“鐵電現象”或“鐵電效應”。鐵電現象是在一種名為鈣鈦礦的材料中發現的，而鈣鈦礦材料的晶格點陣中的離子，是在某一方向上被分離成的正負離子，也就是在鈣鈦礦晶體內部產生了一個電耦極子。當給這種晶體加上一個電壓時，這些耦極子就會在電場作用下排列。改變電壓的方向，可使耦極子的方向反轉。耦極子的這種可換向性，意味著它們可以在記憶晶片上表示一個“資訊單元”。而且，即使在電壓斷開時，這些耦極子也會保持在原來的位罝，使鐵電記憶體不用電就能保存資料。這與大多數電腦中使用的隨機存取記憶體的記憶晶片明顯不同，後者需要電才能保存資料。MTI-2100 可進行納米解析度級別的振動、位移測量，這一點可用於鐵電材料在高壓下的振幅特性測試。如圖 13 和圖 14 是 MTI-

2100 搭配 TF Analyzer 2000 的測試結果。

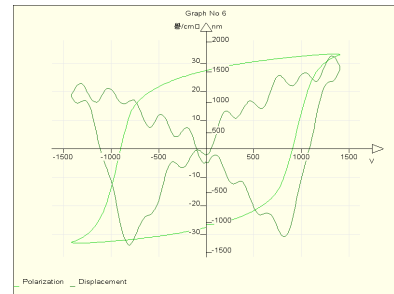


圖 13 . MTI-2100 搭配 TF Analyzer 2000 的測試結果

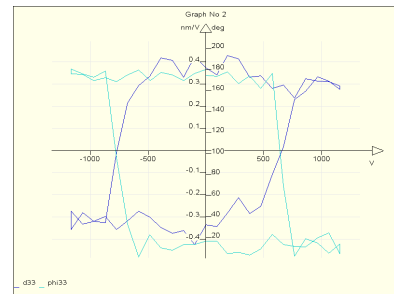


圖 14 . MTI-2100 搭配 TF Analyzer 2000 的測試結果

鐵電 / 壓電材料是一種新型材料，具有較大的運用市場潛力，會有越來越多的高校及研究所做這方面的研究，故會有更多的測試儀器需要。採用 MTI-2100 可以達到客戶測試要求並節省客戶的經費，同時我們還可提供更高測試要求的儀器。未來可以整合所有鐵電分析的硬體及軟體，提供完整的鐵電 / 壓電測試系統給客戶，以達到客戶的方便使用。

#### 五、結語

光纖測量儀具有先進的光纖和光電技術，作為高分辨率、高頻率的非接觸振動和位移的測量設備，同時還可以抗電磁干擾，適用於金屬、合成物、玻璃、陶瓷等多種物質的測量，這對科學研究提供了很大的幫助，是振動、位移實驗室中非常實用的儀器設備。也許以後在高端的實驗室中都能看見光纖測量儀的身影。