

# 行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

## 疊層壓電材料系統的動態特性分析及實驗 (II) The Analysis and Experimental Investigation on the Dynamic Characteristics of Laminated Piezoelectric Material Systems

計畫類別：個別型計畫      整合型計畫  
計畫編號：NSC89 - 2218 - E - 002 - 034  
執行期間：89年08月01日至90年07月31日

計畫主持人：馬劍清      教授  
共同主持人：

本成果報告包括以下應繳交之附件：  
赴國外出差或研習心得報告一份  
赴大陸地區出差或研習心得報告一份  
出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份  
國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：國立台灣大學機械工程學系

中 華 民 國 九 十 年 十 月 二 十 日

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 疊層壓電材料系統的動態特性分析及實驗 (II)

### The Analysis and Experimental Investigation on the Dynamic Characteristics of Laminated Piezoelectric Material Systems

計畫編號：NSC89-2218-E-002-034

執行期限：89年8月1日至90年8月31日

主持人：馬劍清

國立台灣大學機械工程學系

計畫參與人員：林憲陽、薛明憲、洪光民、林儒禮

#### 一、中文摘要

傳統的壓電材料，例如鋯鈦酸鉛 (PZT) 可利用為機械能及電能之轉換，因此被廣泛應用於各項工程領域中，為了提供壓電材料更佳之性能使其能具備較高之競爭力以匹配各項應用，往往會將壓電材料與其他材料相互結合，本研究將傳統的單層鋯鈦酸鉛壓電平板埋入玻璃纖維預浸材內，以熱壓技術製成一壓電疊層複合板，並以 AF-ESPI 量測壓電疊層板的振頻及振動模態，以期建立一套完整實驗分析方法。

在理論方面則藉由有限元素法模擬長方形壓電疊層板的振動行為，同時與實驗量測數據進行比較。實驗上所使用之電子斑點干涉術可進行非接觸性及全域之量測，配合電腦之處理可迅速得到壓電疊層板之即時振動模態圖及自然頻率，再配合以逐點方式進行量測之雷射都卜勒干涉儀，則可對壓電材料的動態特性進行分析，最後再配合內建之動態訊號分析卡對壓電疊層板頻域信號進行處理，即可獲得壓電疊層板的自然頻率。

#### 二、英文摘要

This study utilizes AF-ESPI and LDV to measure the natural frequencies and mode shapes of a vibrating piezoelectric laminated plate. These two optical techniques are full field and pointwise displacement measurement, respectively. In AF-ESPI

system, both the natural frequencies and mode shapes of the vibrating piezoelectric laminated plate can be obtained. In the LDV system, a built-in dynamic signal analyzer (DSA) can provide the piezoelectric plate with the swept-sine excitation signal whose range and gain are set by the DSA software, it can result in corresponding peak in the bode plot at natural frequencies. From the frequency response curve, the natural frequencies are thus acquired. Beside the two optical methods, a commercially available finite element analysis software can provide the numerical simulation for comparison with the experimental results.

#### 三、緣由與目的

近年來壓電材料已被廣泛應用於精密工業及檢測設備中，例如光學掃描器、磁碟機的尋軌微調機構、超音波馬達及超音波檢測探頭等，由於壓電材料可不需經由機構或電路，即可直接作電能與機械能之間的轉換，因此對於壓電材料動態特性之研究，將有助於其在精密工業及微機電系統中之發展。

壓電陶瓷是一種漸受重視的材料，由於本身的壓電效應現象，已被製成各種型式的感測器 (sensor) 及致動器 (actuator)，目前對於這類壓電換能器之動態特性並無法完全掌握，大多只能利用有限元素進行數值分析，而實驗上的量測及驗證更為缺乏，本計畫為三年的長期計畫的第二年，本年度希望能以第一年建立的實驗量測技術，進行疊層壓電材料板的動態量測，在實驗技術上運用光學電子斑點干涉術來做

疊層壓電板之共振頻率及全域模態量測，同時使用有限元素分析軟體來進行數值模擬，並與光學所得之結果比較，而光學方法最大之特點為除了能量測共振頻率外亦能同時獲得振型之資訊，此特點對於壓電材料的設計及應用有相當大的助益。

本研究中使用的壓電疊層複合板係將傳統壓電材料埋入玻璃纖維預浸材中，再利用熱壓機固化成形，由於纖維加強材料及壓電材料其材料特質完全不同，因此結合後之產品的動態行為也很難利用數值模擬或理論推導的方式進行分析，為了能完全掌握壓電疊層複合板的特性，實在有必要以實驗方式對其動態行為進行研究，提升傳統壓電材料之競爭能力，而其結果相信對壓電材料的設計與應用上將具備極佳之效益。

#### 四、結果與討論

圖 1 為壓電疊層複合板(疊層順序為 0/90/0/90/PIC-151/90/0/90/0,70mm×25mm×2.1mm)的示意圖，其固化程序為在熱壓機鑄模中批覆一層脫膜紙，然後將試片放置於熱壓機中的上下模間，設定最後加熱溫度及壓力為 163<sup>0</sup>C 及 0.34 MPa，控制加熱速率為每分鐘 1-6<sup>0</sup>C，使試片在鑄模內熱壓 40 分鐘，最後再冷卻至 66<sup>0</sup>C，即可完成固化程序。圖 2 則列出以埋入之壓電薄板當成激振器所激發出之前 9 個模態的全域實驗結果及有限元素分析之比較。值得注意的是，於模態 2,3 及模態 3,4 之間存在一模態圖 2\* 及 3\*，其響應值與周圍的頻率相較，具備了較大的響應，但嚴格而論，此二模態應不屬於正常模態，因為它們無法由 FEM 的數值模擬所預測出且其振型亦不對稱，在此計畫執行中，為了驗證實驗結果之正確性，我們也利用雷射都卜勒干涉儀 (LDV) 配合 AF-ESPI 所得到之模態實驗結果避開各模態之節線區選擇適當之量測點，並配合干涉儀中內建之信號產生卡及動態信號處理軟體量測其動態響應，由所得到之頻率響應圖形所示同樣可驗證 AF-ESPI 之實驗結果。由於對壓電疊層板 AF-ESPI 的影像干涉圖無法顯示出相位之訊息，因此在數值分析結果的振型圖中，

我們利用 "+" 及 "-" 號表示其相位，若某一區域中同為 "+" 或是 "-" 號，則代表了此區域為同相振動否則為反相振動，而在 "+" 與 "-" 號中間的區域，則是代表節線之所在，如圖 2 中之黑粗線即為節線。

圖 3 為雷射都卜勒干涉儀之光學架設圖，本研究中採用之雷射都卜勒干涉儀中具有內建的動態信號產生卡及由 Labview 所建構的分析軟體，可以將傳統動態信號分析儀的功能併入干涉儀中以量測並分析壓電材料之增益與頻率之關係，圖 4 則是利用 LDV 所得之實驗頻譜響應圖，最後在表一中則列出 LDV、AF-ESPI 及 FEM 所得之振頻值比較，其中三者有頗一致的結果。

從觀察兩種不同實驗方式 (AF-ESPI 與 LDV) 所得之共振頻率值與數值計算結果比較，我們可以發現 AF-ESPI 與 LDV 之結果極為接近，這是因為在實驗中材料及邊界情況一致，其動態響應當然也相同，至於這兩者的結果與數值分析的差異較大，可歸納出下列之原因：

- (a) 複合材料試片之固化程序與 3M 技術文獻中所規定之固化程序難以完全一致因此所代入之複合材料之材料係數與實際試片之材料係數有相當之差異。
- (b) 有限元素模擬中係將整片壓電疊層板當成一個構件，並區隔成三個區域，上下區域為複材，中間為壓電層，其中上下複材區係由四層不同之正交性單層板之材料疊合而成，這種非均質性之多層板的材料係數在本研究中係以等效彈性係數來取代以簡化分析，這種模擬趨向於理想之材料結合及簡化之分析，其與實際材料之行為具備相當之差異，另一方面，元素(element)的型態及數目多寡，對有限元素分析的結果具有相當的影響。

除此之外，就整個實驗過程來看，導線長度及接觸良好與否、光學量測的解析度、量測點的解析度等等，以及雷射都卜勒干涉儀的信號強弱皆會對實驗結果造成些許之影響，本計劃之相關資料請見參考文獻 [1-14]。

## 五、計畫成果自評

電子斑點干涉術(ESPI)因為具有非接觸式、全場量測及數位化影像處理及儲存等優點，已經廣泛地成為微小位移及動態行為的量測工具，而雷射都卜勒干涉儀結合動態信號分析則提供另一較高精度的動態特性量測技術，以驗證 AF-ESPI 的實驗結果。在本研究計劃中我們同時應用 AF-ESPI 及 LDV 分別對壓電疊層平板作全場及逐點的振動量測與探討，可由實驗上的結果來決定試件的共振頻率與振型，將這些實驗結果與有限元數值分析作比較，也都相當一致，更可證明其在動態量測上的優越性。

綜合以上實驗及分析結果，大致可歸納出以下幾點結論：

- (1) 利用 AF-ESPI 量測壓電疊層材料之振動特性，為一全域之量測技術，其量測時間較為耗時，但卻可準確的同時獲得振形及振頻之資料。
- (2) LDV 結合 DSA 則提供較為便利而又迅速之動態特性量測技術，只要適當選擇量測位置再配合信號處理技術即可獲得壓電材料在面外振動模式之頻率增益圖。
- (3) 在與 FEM 之解析結果進行比較後，其數值模擬及實驗量測結果亦具備相當一致性，因此可以確知本研究中之 AF-ESPI 及 LDV 對疊層壓電材料而言為一相當適合之動態量測實驗技術。

## 六、參考文獻

- [1]Butters, J. N. and Leendertz, J. A., "Speckle Pattern and Holographic Techniques in Engineering Metrology", *Optical and Laser Technology*, 4, 349-354 (1971).
- [2]Creath, K. and Slettemoen, G. A., "Vibration-observation Techniques for Digital Speckle-pattern Interferometry", *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 2(10), 1629-1636 (1985).
- [3]Jones, R. and Wykes, C., *Holographic and Speckle Interferometry*, Cambridge

University Press (1989).

- [4]Koyuncu, B., "The Investigation of High Frequency Vibration Modes of PZT-4 Transducers Using ESPI Techniques with Reference Beam Modulation," *Opt. Lasers Eng.*, 1, 37-49 (1980).
- [5]Løkberg, O. J., "Mapping of In-plane Vibration Modes by Electronic Speckle Pattern Interferometry", *Opt. Eng.*, 24(2), 356-359 (1985).
- [6]Leissa, A. W., *Vibration of Plates*, NASA SP-160 (1969).
- [7]Deobald, L.R. and Gibson, R. F., "Determination of Elastic Constants of Orthotropic Plates by a Modal Analysis/Rayleigh Ritz Technique," *Journal of Sound and Vibration*, 124(2), 269-283 (1988).
- [8]Eer Nisse, E.P., "Variational Method for Electroelastic Vibration Analysis," *IEEE Trans. Sonics and Ultrason.*, SU-14(4), 153-160 (1967).
- [9]Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc., *ABAQUS User's Manual*, version 5.6 (1995).
- [10]Holland, R., "Contour Extensional Resonant Properties of Rectangular Piezoelectric Plates," *IEEE Trans. Sonics and Ultrason.*, SU-15(2), 97-105 (1968).
- [11]Holland, R., "Resonant Properties of Piezoelectric Ceramics Rectangular Parallelepipeds," *J. Acoust. Soc. Am.*, 43(5), 988-997 (1968).
- [12]Chih-Kung Lee and Giin-Yuan Wu, "High performance doppler interferometer for advanced optical storage system," *Japanese Journal of Applied Physics*, 38(3B), 1730-1741 (1999).
- [13] B. K. A. Ngoi, K. Venkatakrisnan, and B. Tan, "Laser scanning heterodyne interferometer for micro-components," *Optics Communication*, 173, 291-301, (2000).
- [14] O. Nishizawa, T. Satoh, and X. Lei, "Detection of shear wave in ultrasonic range by a laser Doppler vibrometer," *Review of Scientific Instruments*, vol. 69(3), 2572-2573, (1998).

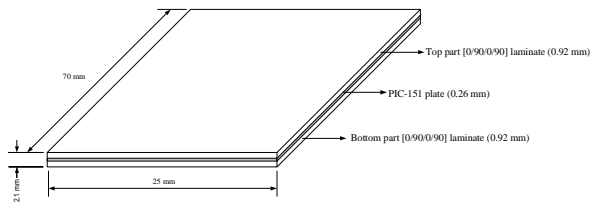


圖1 疊層壓電板構造示意圖

模態	AF-ESPI	FEM
1		
2		
2*		-----
3		
3*		-----
4		
5		
6		
7		
8		
9		

圖2 疊層壓電平板 AF-ESPI及數值分析之全域模態比較

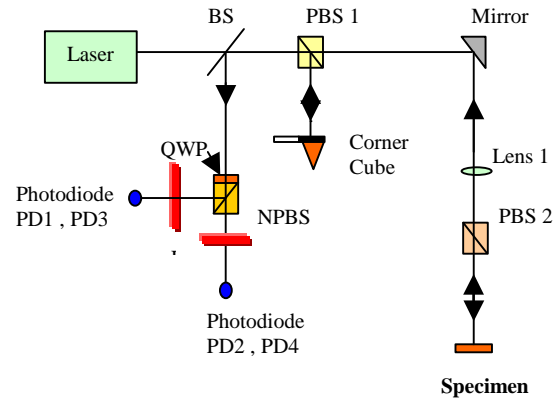


圖3 雷射都卜勒干涉儀之實驗架設

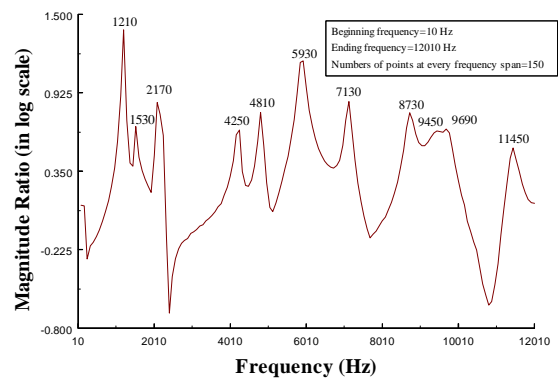


圖4 由都卜勒干涉儀內建之動態信號分析系統所得之壓電疊層板頻率響應圖

	AF-ESPI (Hz)	FEM (Hz)	LDV (Hz)
Mode 1	1185	1349.9 (-13.92)	1210
Mode 2	1510	1529.7 (-1.30)	1530
Mode 2*	2132	-----	2170
Mode 3	3333	3396.1 (-1.89)	-----
Mode 3*	4270	-----	4250
Mode 4	4739	3690.1 (22.13)	4810
Mode 5	5783	5930.2 (-2.55)	5930

<b>Mode 6</b>	7105	7143.3 (-0.54)	7130
<b>Mode 7</b>	8509	9355.1 (-9.94)	8730
<b>Mode 8</b>	9140	10470.0 (-14.55)	9450
<b>Mode 9</b>	9373	10847.0 (-15.73)	9690

表一 實驗量測及有限元素模擬所得前九  
模態之共振頻率