

# 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

### The Analysis and Experimental Investigation on the 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 - 2212 - E - 002 - 016

執行期間：88年08月01日至89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 七 月 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

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

計畫編號：NSC89-2212-E-002-016

執行期限：88年8月1日至89年7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

#### 一、中文摘要

阻抗分析是一般量測壓電材料振頻的方式，但其缺點在於僅能獲知其較高頻的面內自然頻率，關於對應之較低頻振動模態則無從得知。為求能非接觸並即時量測，本研究計畫建立一套完整分析方法，主要將使用光學系統的實驗動態量測方式以探討壓電材料的振動特性，並整合且有系統地包含數值計算以及實驗量測，有別於一般使用阻抗及電容量測共振頻率之方式。

在理論方面則藉由有限元素法模擬長方形壓電薄板的振動行為，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薄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薄板頻域信號進行處理，即可獲得壓電薄板的自然頻率。

#### 二、英文摘要

This study utilizes AF-ESPI and LDV to measure the natural frequencies and mode shapes of a vibrating piezoelectric thin 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

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 bode plot 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一年，本年度希望能建立實驗量測技術，並進行疊層壓電材料板的動態量測，在實驗技術上除了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外，亦將使用目前一般工業界或研究單位最常用

的阻抗分析儀來量測壓電材料的共振頻率，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。

除此之外，由於前幾年本研究團隊的研究發現面外振動的共振頻率並無法由阻抗分析儀獲得，故本研究計畫另一個研究重點就是發展一套以雷射都卜勒干涉儀為基礎的逐點式動態反應量測技術，並依所獲得的量測資料進行分析以決定共振頻率，此結果可與由電子斑點干涉術的全域式模態量測結果做比較以作為模態特性之探討及動態量測技術之改進，如此才能完全掌握壓電材料的動態特性，而其結果也能幫助國內相關工業對壓電材料的設計與應用。

#### 四、結果與討論

圖 1 為壓電陶瓷長方板(PIC-151 壓電材料，50mm×20mm×0.25mm)的前 6 個模態的全域實驗結果及有限元素分析之比較。由於在實驗上要模擬四邊自由邊界的狀況又需避免剛體運動的影響十分困難，因此我們在壓電薄板背面適當位置黏貼雙面膠並將其固定在海綿上以避免起振時剛體運動所造成之條紋干擾實際之振動模態，又由於實驗中所使用壓電薄板厚度很小，因此在黏貼位置之選擇若不適當，將造成剛性之大幅增加，因此本實驗在第一模態之節線上黏貼一條長 2mm 寬 1mm 的雙面膠帶，在此邊界條件下進行 AF-ESPI 的量測，由圖 1 中可清楚看出 AF-ESPI 所得到之振動模態圖與有限元素模擬出之振動模態幾乎相同，由此可確知自由邊界之模擬利用海綿支撐以避免剛體運動確實可行，由於對壓電薄板 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。

圖 2 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分析卡及由 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 3 則是利用 LDV 所得之實驗頻譜響應圖，最後在圖 4 中則列出 LDV、AF-ESPI 及 FEM 所得之模態-自然頻率對應圖，表 1 為 AF-ESPI、LDV 及數值分析所得之振頻值比較，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) 在實驗中將試片置於海綿上，此與數值分析之自由邊界狀態仍有差異，尤其對較低模態而言常造成剛性之增加。
- (b) 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。
- (c) LDV 的掃頻範圍設定為 10-2010 Hz，頻率範圍內取樣點為 400 點，因此每 5Hz 會有一輸出，若要增加其解析度，則可增加其取樣點數，但將會大幅增加量測及分析時間。

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。

#### 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，一來可以驗證 AF-ESPI 的實驗結果，二來則可彌補阻抗分析儀未能正確量測低頻面外共振頻率之缺失。在本研究計劃中我們同時應用 AF-ESPI 及

LDV 分別對壓電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相當一致，因此可以確知本研究中之 AF-ESPI 及 LDV 對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).

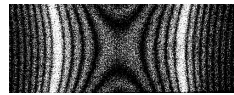
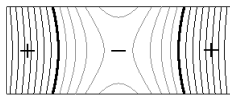

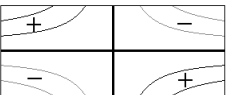
[10]Holland, R., "Contour Extensional Resonant Properties of Rectangular Piezoelectric Plates," *IEEE Trans. Sonics and Ultrason.*, SU-15(2), 97-105 (1968).

[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).

mode	AF-ESPI	FEM
1		
2		
3		

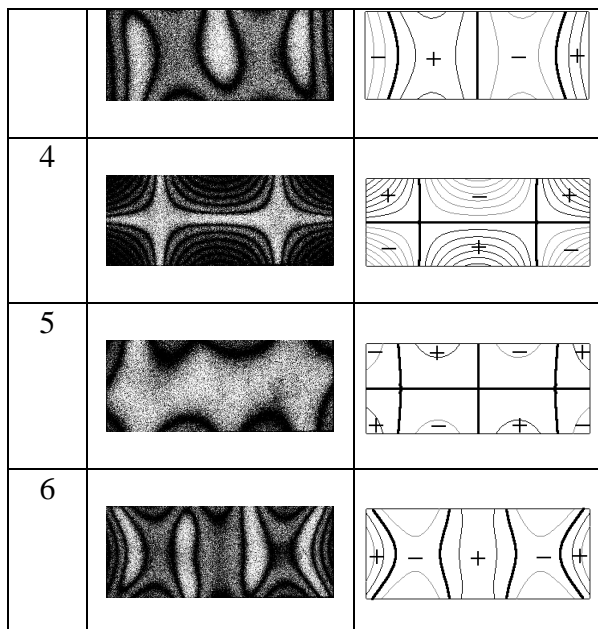


圖1 長方形壓電平板 AF-ESPI及數值分析之全域模態比較

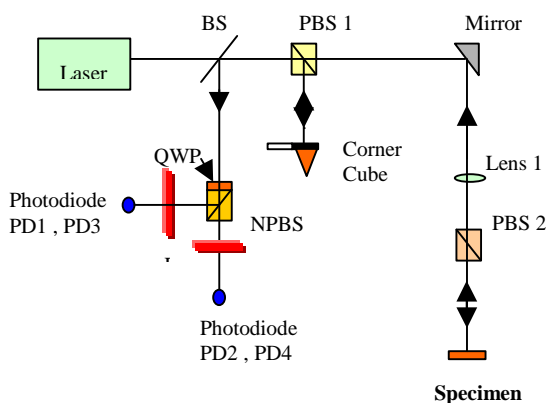


圖2 雷射都卜勒干涉儀之實驗架設

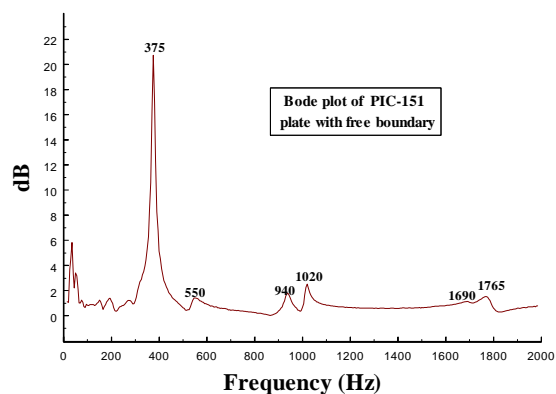


圖3 由都卜勒干涉儀內建之動態信號分析系統所得之壓電材料-頻率增益圖

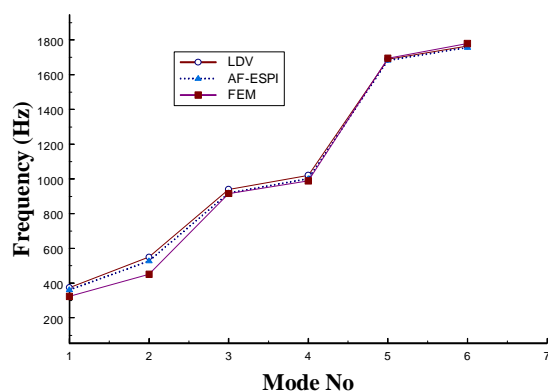


圖4 實驗量測及FEM所得之自然頻率

	AF-ESPI (Hz)	FEM (Hz)	LDV (Hz)
Mode 1	362	324.4	375
Mode 2	528	451.6	550
Mode 3	919	916.6	940
Mode 4	1002	989	1020
Mode 5	1683	1695	1690
Mode 6	1757	1780.3	1765

表一 實驗量測及有限元素模擬所得前六模態之共振頻率