

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 (III) The Analysis and Experimental Investigation on the Characteristics of Laminated Piezoelectric Material Systems (III)

計畫編號：NSC90-2212-E-002-163

執行期限：90年8月1日至91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、洪光民、林儒禮

一、中文摘要

本計畫利用具備全域量測特性的 AF-ESPI 技術對一單層式的壓電圓板及一積層式壓電致動器受到交流荷載後的面外及面內振動特性進行實驗量測，其中在面外模態頻率的實驗驗證上更輔以 LDV-DNA 的量測結果，而阻抗分析技術則提供面內模態頻率之另一種實驗驗證，結合三種實驗技術可對單層式壓電圓板及積層式壓電致動器的面外及面內振動特性提供完整而正確的測試資訊，最後再配合 FEM 的數值計算，提供共振模態及共振頻率的理論比較。

二、英文摘要

This study utilizes AF-ESPI, LDV-DNA and impedance analyzer to measure the natural frequencies and mode shapes of a vibrating piezoelectric disc and a multilayer piezoelectric actuator. The AF-ESPI and LDV techniques are based on the measurement of displacement and are full field and point-wise displacement measurement, respectively. In AF-ESPI system, both the natural frequencies and mode shapes of the vibrating piezoelectric disc and actuator can be obtained. In the LDV system, a built-in dynamic signal analyzer (DSA) can provide the piezoelectric devices 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. The impedance analyzer that is based on the measurement of electrical impedance provides the frequencies of in-plane modes. Beside the three experimental 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

壓電陶瓷元件，特別是積層式的壓電致動器 (multilayer piezoelectric actuator) 由於具備響應速度快、結構輕巧、機電耦合能力高及推力大等重要的特點，因此被廣泛使用在各項工程應用領域中，例如噴墨印表機的噴墨頭、燃燒器中的閥門控制及一些智慧型結構內的主動性振動控制等應用上，這些工程應用大多利用壓電致動器之位移響應而達成，所以為了使這類型致動器能配合工程需求，進而開發利用其特性，有必要對其位移場的響應進行相關的實驗量測及分析。針對這類型壓電致動器的表面位移所使用的實驗量測技術大多採用以雷射為光源的精密光學方法，例如都卜勒干涉儀或疊紋干涉儀 (Moiré interferometer) 等，而所探討的特點則著重在壓電致動器受到直流 (DC) 電場後產生之靜態位移響應，唯對其動態特性特別是受到交流 (AC) 電場後致動器表面之全域位移分佈信息等相關實驗及分析則相當缺乏

，也因此在本計畫中將針對積層式壓電致動器受到 AC 電場後且在系統共振的狀態下產生之動態響應進行實驗量測及理論分析，在實驗技術的選擇上，由於 AF-ESPI 可同時獲得共振頻率及共振模態並具備全域量測之特性，因此將採用為主要之實驗技術，而逐點式的雷射都卜勒振動儀及以電學特性量測為基礎的阻抗分析儀則被採用來量測這類型積層式壓電致動器之共振頻率，在理論解析的驗證上則藉由 FEM 的數值計算結果與相關實驗數據進行比較，希望藉此完整的實驗分析及數值計算，能對積層式壓電致動器的基本動態特性有更深入的瞭解。由於在本計畫中所使用的積層式壓電結構其外型為圓柱狀，結構較為複雜，在相關之力學分析及實驗量測上可能會造成誤差及困擾，因此在本計畫內容安排上首先對一單層壓電圓板結構進行相關之實驗量測及數值計算，這些單層壓電圓板所得之分析結果一來可驗證實驗技術的正確性，二來也有助於積層式壓電致動器動態行為的瞭解。本計畫的相關國內外資料附於參考文獻 [1]-[16]。

四、結果與討論

在本計畫用的單層式壓電圓板試片仍然是採用德國 Physik Instrumente 公司生產，型號為 PIC-151 的壓電陶瓷材料，其試片直徑只有 2 cm，試片面積相當小且厚度為 1 mm，極化方向則沿著厚度方向，故在全域面外及面內位移量測上較為困難。

圖 1 為利用 AF-ESPI 技術與 FEM 數值分析所得到之面外共振模態比較，圖 2 為 AF-ESPI 與 FEM 數值分析之面內共振模態比較，在圖 1 及圖 2 第二欄部分為利用 AF-ESPI 測出之面外及面內振形，第三欄則為數值計算出之振形，由於 AF-ESPI 測出結果

為等位移線，這種全域等位移線恰好為壓電試片達穩態振動時之共振模態，因此可以直接與 ABAQUS 計算的結果相互比較，在共振模態比較上，由圖 1 及圖 2 可看出兩者不管在面外振動或面內振動的振型都相當一致，由此可見對單層式壓電圓板而言，不管在實驗邊界或 AF-ESPI 實驗技術上應當具備相當的正確性。而由於面積小，故所展示的變形量尤其在較高振頻時較小，故所得到的全場干涉條紋數並不多，特別對面內模態第三個，但仍可看出其振型。

利用 LDV-DSA 量測出之壓電圓板頻率響應圖如圖 3 所示，其中掃頻信號範圍設定在 10-45010 Hz，解析度設為 450 (points/frequency span)，其輸出結果係以 10, 110, 210, 310,....., 45010 Hz 方式輸出。

利用阻抗分析量測出之頻譜-阻抗圖則如圖 4 所示，由於在全電極情況下，阻抗分析無法量測出面外模態，因此在圖 4 中阻抗局部最低部分所對應之共振頻率均為面內伸展模態之共振頻，其共振模態則對應圖 2 中之振型所示。此外，在共振頻率的比較上，表 1 為三種實驗方法與 FEM 數值計算所得之振頻比較。在表 1 中以 AF-ESPI 量測值為基準列出了各項方法所得數值之誤差大小，其中 LDV-DSA 及阻抗分析的誤差比例都在 2% 之內，相對的 FEM 計算值的誤差比例則在 7% 之內，這些誤差可能導因於實驗試片的邊界效應、厚度上之不均勻性及數值計算中代入材料係數等因素，本節實驗方法之正確性及可靠性可經由實驗及理論結果比較後的低誤差比率而得知。

此外，在面外模態的共振頻上，實驗量測值都小於 FEM 數值計算結果，兩種實驗方法 (AF-ESPI 及 LDV-DSA) 的量測值相當接近，而在面內模態的共振頻比較上，兩種實

驗方法 (AF-ESPI 及 Impedance) 之實驗量測值也出現非常一致的結果，但其量測值卻大於數值計算值，推測其主要原因可能有二：第一是壓電圓板背後有貼置一小區域的雙面膠並固定於海綿上，這種實驗邊界對面內伸展模態的影響要較面外影響為大，第二點則是試片上下表面披覆金屬電極，這種效應在 FEM 數值計算上僅將上下電極面的電位 (potential) 設為零以模擬短路的情況，並不考慮實際之電極影響，因此可能會導致模態頻率的變化，由實驗結果顯示，特別是對面內模態頻率造成較大的影響。

在本計畫中使用的積層式壓電試片，是由美國 Piezomechanik 公司所生產，型號為 Pst1000/25/5 的裸露式的壓電陶瓷致動器 (不加任何金屬護套)，如圖 5 所示，其主要構成為十片材料性質類似商用 PZT5A 的壓電陶瓷圓板及前後端兩片絕緣陶瓷相互黏結而成，其中前後端是由絕緣陶瓷及 PZT5A 相關之材料所構成。在每層壓電圓板之間還包含有很薄的金屬電極及黏膠，這些成份所佔厚度大約為 0.27 mm。

表 2 為利用三種實驗技術 (AF-ESPI、LDV-DSA 與 Impedance) 及 FEM 數值計算所得之共振頻率值，其中 LDV-DSA 所量測出之共振頻率值有兩組，分別列在表 2 內的第三及第四欄內，這兩組共振頻率分別是在不同的掃頻驅動電壓下由 LDV-DSA 量到的頻率響應圖中所直接判讀的，在本計畫中為了區分起見，特別以代號 LDV-DSA I 及 LDV-DSA II 來加以區分，LDV-DSA I 及 LDV-DSA II 分別代表輸入信號驅動電壓放大後 (經功率放大為 10V) 及未放大 (內定值 1V) 的情況下，由表中數據可清楚看到利用 AF-ESPI 所量測到的數值要大於 LDV-DSA II 及阻抗分析所得之數值，而 LDV-DSA II 及阻抗分析所得之量測值則非常接近，探究其原因可能是因為在 LDV-DSA 及阻抗分析量

測系統中都是內定以 1V 的掃頻電壓輸入到壓電試片中，而 AF-ESPI 則因量測精度之不同，往往在輸入驅動電壓上要先經過功率放大才足以將試片激振到可被量到的變形，由於 AF-ESPI 及 LDV-DSA 都是以表面位移的量測為基準，為了驗證驅動電壓會造成其共振頻率飄移這項推測，我們試著使 LDV-DSA 的輸入信號先經由放大器放大後輸入給壓電試片，再去量測其位移響應並轉換到頻域內求取其頻率響應圖，圖 6 及圖 7 分別是利用 LDV-DSA 技術在輸入信號為 1V 及 10V 的情況下所得到的頻率響應圖，比較兩圖可以發現在不同 AC 驅動電壓下這個積層式壓電試片之共振頻率有往上飄移的趨勢，為了避免系統上之不同設定影響到量測值之正確性，在 LDV-DSA 的設定上，掃頻範圍對圖 6 及圖 7 兩種驅動電壓而言都是設定在 10~200010 Hz，頻率解析度為 2000，每隔 100 Hz 會產生一輸出。再回到表 2，括弧內的數值代表各量測值相較於 AF-ESPI 結果的誤差比例，由這些誤差比例可發現在輸入信號同樣被放大的情況下，AF-ESPI 與 LDV-DSA I 得到之共振頻率值相當接近，對四個模態而言，誤差比率都在 2.7% 以內，此外 LDV-DSA II 與阻抗分析之測值由於都是在輸入信號電壓未被放大的情況所測出，因此在共振頻率及誤差比例的數值上相當接近，由此可知對這種相互黏結而構成的積層式壓電致動器而言，在交流信號作用，不同的驅動電壓可能會造成共振頻率飄移的作用，以本實驗的情況來討論，其剛性會隨著信號電壓之提高而加大。另外一點值得注意的是，由於本計畫中所使用的積層式試片厚度高達 8.27 mm，其直徑為 25 mm，因此面內及面外振動相互耦合在一起，為三維的體振動問題。所以原先單層壓電圓板在 LDV-DSA 與阻抗分析測值不會同時出現，因為其中一個為量測面外振動而另一個為量測面內振動，但在本研究中當面外與面內模態相互耦合時，對前四個模態而言，不管是 LDV-DSA 或阻抗分析幾乎有相同的共振

頻率。此外，在實驗量測與 FEM 數值計算的比較上，除了第一模態有較大之誤差比例外，其他三個模態差值並不大。由於在整個實驗中並未量測各層壓電陶瓷的材料特性，在數值計算的材料輸入中僅以商用之 PZT-5A 的相關係數代入，同時也忽略電極及黏膠之效應，因此很有可能對計算出的共振頻率產生較大之誤差，尤其對第一個振動模態的影響較大。圖 8 則示出由阻抗分析量測出之阻抗頻譜圖，而圖 9 則為利用 AF-ESPI 與 FEM 所得到之共振模態比較圖，在圖 8 中可以看到四組共振及反共振頻率曲線，其中第一組最為明顯因此反應在振動模態上也最為清楚，第三組共振及反共振頻率曲線相較於其他三組則是最不明顯，因此由 AF-ESPI 量到之面外振動模態也最為模糊，在面內模態上則因變形量太小而無法由 AF-ESPI 量測出。圖 9 中的第一模態由其節線分佈位置再對應圖 1 第一模態，可以判斷第一個模態主要由面內變形所主導，藉由面內變形再衍生出面外變形，因此圖 9 及圖 1 之第一個模態應屬相同之變形模式，再回到圖 9 的第二個模態，基本上它是屬於徑向模式，可與圖 1 中之第三個模態相互對應，故第二種變形模態應由面外變形所主導。第三個模態由於變形太小影像模糊，因此較難判定。對第四個模態而言，若與圖 1 中之第二個模態相比較可以發現兩者亦為相同情況之變形，所以第四個模態與第一個模態一樣都是由面內變形所主導。

綜合以上實驗及分析結果，大致可歸納出以下幾點結論：

(1) 在本計畫中，結合了 AF-ESPI 的面外及面內架設之量測方式，對單層壓電圓板試片及多層的壓電致動器的面內及面外振動模態及對應之共振頻率進行量測，所得到之結果與 FEM 計算出結果的一致性相當匹配。而 LDV-DNA 及阻抗分析兩種方法則提供了迅速求取共振頻率之實驗技術，其量測值並可與 AF-ESPI 所量測結果進行相互

驗證。事實上在 200 kHz 以內由 FEM 計算出之自然模態數目相當多，然而在實驗量測上僅存在四個可加以判定之模態，其餘模態雖存在於理論分析中，但由於其動態反應相當小，在實驗上很難激振出來，故其在應用上較為困難。因此要對這類型積層式壓電致動器進行分析，適當且完整之實驗技術是不可避免的，在本計畫中，結合了三種實驗方法及數值計算方法針對積層式壓電致動器的基本振動特性進行完整的分析，所獲得之結果亦令人滿意，因此這種分析方式應當是非常適合壓電疊層結構之動態分析。

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]Løfkberg, O. J., "Mapping of In-plane Vibration Modes by Electronic Speckle Pattern Interferometry," *Opt. Eng.*, 24(2), 356-359 (1985).
- [6]Francois, M. G. and Jacek, J., "Electromechanical Response of Polymer Films by Laser Doppler Vibrometry," *Journal of Acoustic Society of America*, 103(3), 1421-1427 (1996).
- [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] Wang, W. C., Hwang, C. H. and Lin, S. Y., "Vibration Measurement by the Time-Averaging Electronic Speckle Pattern Interferometry Method," Applied Optics, 35, pp. 4502-4509 (1996)

[13] 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).

[14] B. K. A. Ngoi, K. Venkatakrishnan, and B. Tan, "Laser scanning heterodyne interferometer for micro-components," Optics Communication, 173, 291-301, (2000).

[15] Moilanen, H. and Leppavuori, S., "Laser Interferometric Measurement of Displacement-Field Characteristics of Piezoelectric Actuators and Actuator Materials," Sensors and Actuators, A: Physical, 92(1-3), 326-334 (2001).

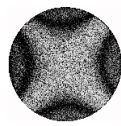
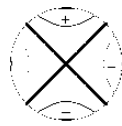

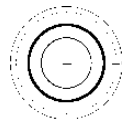
[16] Stewart, M., Cain, M. G. and Battrick, W., "Surface Displacement Mapping of Piezoelectric Multilayer Actuators," Eighth International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications, (IEE Cof, pub), 473, 445-447 (2000).

表 1 單層壓電圓板實驗量測及數值計算之結果比較

面外 模態	AF-ESPI (Error %)	LDV-DSA (Error %)	Impedance (Error %)	FEM (Hz)
1	6895	7010 (1.67)	-----	7131 (3.42)
2	14630	14610 (-0.14)	-----	15589 (6.56)
3	16059	16210 (0.94)	-----	16612 (3.44)
4	28194	28410 (0.77)	-----	29056 (3.06)
5	31537	31610 (0.23)	-----	33294 (5.57)
6	43223	43410 (0.43)	-----	44244 (2.36)
面內 模態	AF-ESPI (Error %)	LDV-DSA (Error %)	Impedance (Error %)	FEM (Hz)
1	102090	-----	102280 (0.19)	96497 (-5.48)
2	260430	-----	260875 (0.17)	250374 (-3.86)
3	408072	-----	408508 (0.11)	394774 (-3.26)

表 2 積層式壓電致動器實驗量測及數值計算之結果比較

模態	AF-ESPI (Hz)	LDV-DSA I (Error %)	LDV-DSA II (Error %)	Impedance (Error %)	FEM (Error %)
1	85410	87710 (2.69)	79910 (-6.44)	79545 (-6.87)	107683 (26.08)
2	150310	151510 (0.80)	148710 (-1.06)	148900 (-0.94)	152099 (1.19)
3	155876	156310 (0.28)	155610 (-0.17)	155095 (-0.50)	164413 (5.48)
4	194345	196210 (0.96)	191010 (-1.72)	191280 (-1.58)	210270 (8.19)

	AF-ESPI	FEM
Mode 1		
Mode 2		

Mode 3		
Mode 4		
Mode 5		
Mode 6		

圖 1 圓形壓電平板面外共振模態之實驗及數值分析結果

	AF-ESPI	FEM
Mode 1		
Mode 2		
Mode 3		

圖 2 圓形壓電平板面內共振模態之實驗及數值分析結果

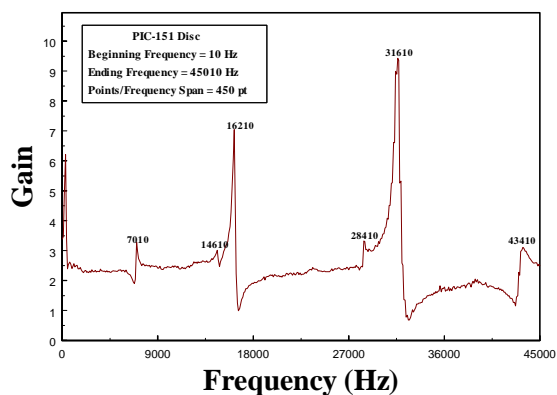


圖 3 利用LDV-DSA測出之圓形壓電平板頻率響應圖

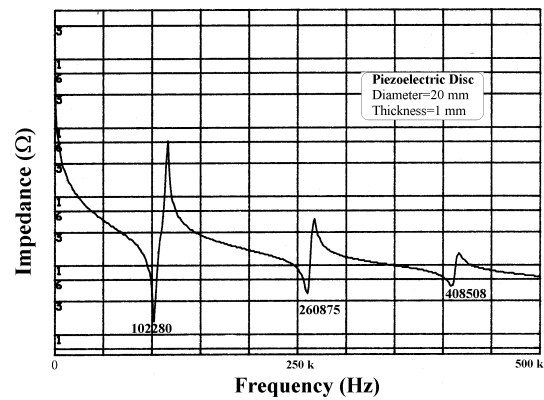


圖 4 單層圓形壓電平板的頻率阻抗圖

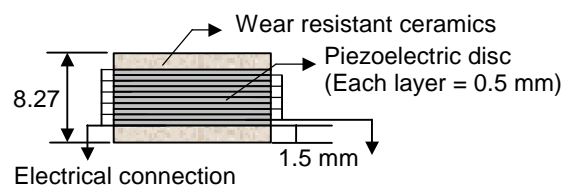


圖 5 積層式壓電致動器組成示意圖

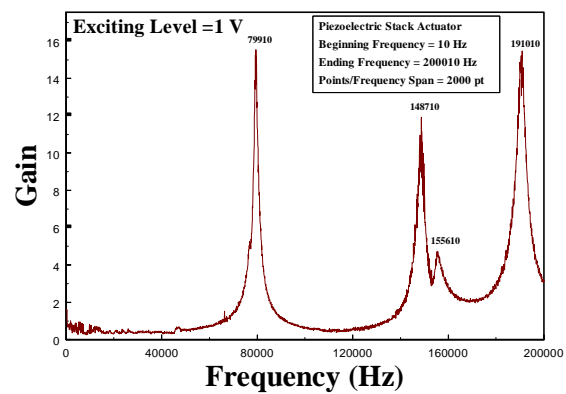


圖 6 積層式壓電致動器在驅動電壓 1V 時的頻率響應圖

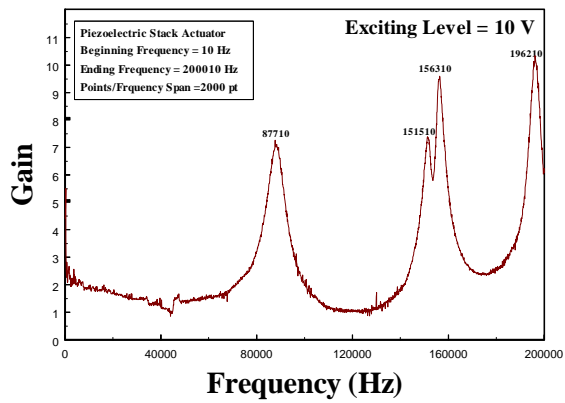


圖7 積層式壓電致動器在驅動電壓 10V時的頻率響應圖

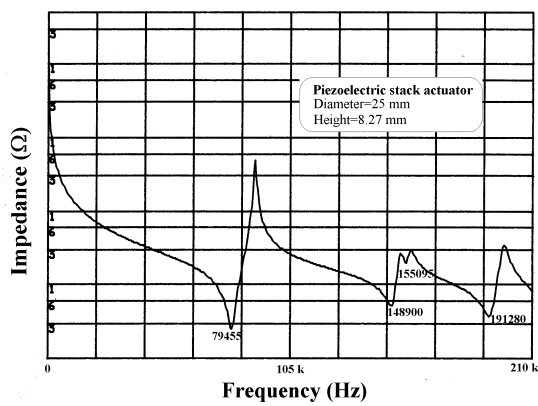


圖8 積層式壓電致動器的頻率阻抗圖

AF-ESPI		FEM	
面外	面內	面外	面內

圖9 積層式壓電致動器的共振模態之實驗量測及數值比較