

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※

※

※應用光學量測三維壓電材料體的振動以及材料常數反算※

※Measurement of Three-dimensional Vibration and Inverse※

※Problem for Piezoelectric Material by using Optical Method※

※

※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※

計畫類別：個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC89-2212-E-002-017

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 八 十 九 年 十 月 十 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告
應用光學量測三維壓電材料體的振動以及材料常數反算
Measurement of Three-dimensional Vibration and Inverse Problem for
Piezoelectric Material by using Optical Method

計畫編號：NSC89-2212-E-002-017

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：林儒禮、張志毅、郭佩菁、楊育青、張適文

一、中文摘要

壓電材料由於具有反應速度快、解析度高、體積小等特色，至今已廣泛被應用在各個層面，例如醫療、電子工業、超音波檢測、控制等方面，因此瞭解壓電材料之動態特性及其材料常數的量測，對於設計與應用方面或是缺陷檢驗、品質管制而言皆是一重要之課題。本研究計畫將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三維振動特性，並整合且有系統地包含理論建立，數值計算以及實驗量測，最後並進行材料常數的反算，有別於一般使用阻抗及電容量測共振頻率之方式。

在理論方面主要將以有限元數值計算來探討側向等向性(transverse isotropic)壓電陶瓷材料物體的三維振動行為。實驗主要使用電子斑點干涉術作全域性的面外及面內位移的三維振動量測，此光學系統有非接觸性、全域性、即時性及不需沖洗底片等優點，並配合影像處理系統即能快速而正確地得到壓電陶瓷材料的自然頻率與共振模態。最後將利用最佳化的方法來反算壓電材料的彈性常數並與其它測試方法的結果比較，並對整個反算過程進行誤差分析與收斂分析。

二、英文摘要

Electronic speckle pattern interferometry (ESPI) is a powerful tool for the full field measurement of a deformed body. In this project, a three dimensional vibrating block which couples the out-of-plane and in-plane motions will be

investigated by using the amplitude-fluctuation ESPI (AF-ESPI). This method demonstrates its advantages of combining the high processing speed like the subtraction method with the high fringe sensitivity just like the time-averaged method. The optical system for AF-ESPI will be employed to analyze the volume vibration of piezoelectric material for rectangular parallelepiped configuration. Based on the fact that fringe patterns appears a clear figure only at the resonant frequency measured by AF-ESPI method, both the natural frequencies and the out-of-plane and in-plane vibration mode shapes can be successfully obtained. It is worthy to investigate the whole-field (three-dimensional) resonant vibration modes by combining out-of-plane and in-plane vibration at each face. The impedance analysis as well as the finite element method (FEM) with three-dimensional model will also be conducted. Finally, an optimum method will be used to inverse calculation of elastic constants for piezoelectric material based on the experimental measurement of resonant frequencies and mode shapes.

三、緣由與目的

近年來壓電材料已被廣泛地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，因此對於壓電材料特性之研究及材料常數之決定，將有助於其在精密工業及微機電系統中之發展。

一般金屬等均向性材料的材料常數皆可使用標準化的測試如超音波檢測與拉伸試驗來量得，但對於壓電材料而言，由於其為脆性材料，而且兩面鍍有電極，因此若使用傳統之靜態量測方式，勢必窒礙難行。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自然頻率，關於對應之模態則無從得知。在這種情形之下，應用光學量測技術得到壓電材料的動態材料參數(dynamic material parameters)是一個可行的替代方法。所謂動態材料參數即是利用材料振動實驗所得的資料找出材料的彈性常數。

本研究計畫中主要探討以光學方法量測壓電材料的動態行為並反算其動態材料參數，由於所使用的實驗方法電子斑點干涉術具有全域性、即時性及其結果(等位移條紋)可儲存於電腦中的多項優點，故可與理論分析的結果作直接的比較，吾人可清楚了解其中之差異。本研究計畫的主要特點為利用光學系統量測振動，利用實驗實際獲得的振頻資料及振動模態來反算壓電材料的材料參數，並與使用阻抗分析儀作阻抗分析的方法進行比較。目前一般學者對物體的振動研究大多為二維的平面問題，而本計劃則將對壓電材料作較深入三維物體的振動研究。本研究計劃的完成對壓電材料的學理實用分析上將有相當大的助益，故除了對壓電材料的動態反算有了學理上的探討研究外並可推展至應用及實用的階段。(相關資料列於參考文獻)

四、結果與討論

圖 1 為壓電陶瓷長方體(30mm×30mm×15mm)的前 5 個模態的實驗結果及有限元素分析之比較，為了說明方便起見，我們在試片的兩面分別以 A、B 標示，因此在 x_3 方向的位移，對 A 面而言是面外位移，但對 B 面而言則是面內位移；同理在 x_1 方向的位移，對 A 面而言是面內位移，但對 B 面而言則是面外位移，並且這兩者之干涉條紋將會於 A、B 兩面之交界處互相吻合。由於 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 為使用阻抗分析儀所得之阻抗分析實驗頻譜圖，表 1 為 AF-ESPI、阻抗分析及數值分析所得之振頻值比較，其中由 AF-ESPI 及阻抗分析兩者有頗一致的結果。

從觀察兩種不同實驗方式 (AF-ESPI 與阻抗分析法) 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 與阻抗分析之結果極為接近，這是因為在 AF-ESPI 實驗中使用示波器量測電壓變化，以輔助測得共振頻率的方法，其實與阻抗分析的原理非常類似，都是應用壓電材料的壓電效應而得。至於這兩者的結果與數值分析的差異較大，其實應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，而且由於重力作用造成之振頻影響，在有限元素之分析中，並未列入考慮。
- (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。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、阻抗分析頻率量測點的解析度等等，皆會對實驗結果造成些許之影響。

在本研究計劃中所使用的反算方式為 simplex 反算法，主要是以 Rayleigh-Ritz 模型作為正算解，而整個材料常數反算的過程，即在於調整 Rayleigh-Ritz 模型中的材料參數，使得正算理論得到的自然頻率與實驗的自然頻率作最佳之調配。在進行反算之前，我們需先將實驗的振頻與其所代表的模態指標輸入，以作為反算過程中要去符合(match)的振頻，接著輸入試片的尺寸大小與密度，以建構 Rayleigh-Ritz 正算解，然後給予一組材料常數的起始猜測值，則程式將據此形成初始的誤差曲面(simplex)，並開始進行反覆疊代，直到所有材料常數收斂為止。

將壓電陶瓷平板(30 mm×30 mm×1.5

mm)的實驗結果代入反算程式中，則可得到如表 2 之柔性常數的反算結果，而利用反算值計算所得之振頻與實驗所得振頻的比較如表 3 所示。

從上述之反算結果來看，對於實驗所用的壓電平板而言，雖然 s_{11}^E 、 s_{22}^E 及 s_{66}^E 之值與實際值之誤差不到 6%，但是 s_{12}^E 之誤差卻高達 40%，造成如此結果的原因大致可歸納如下：

- (a) 正算解的誤差：由於 Rayleigh-Ritz 模型只是近似解而非解析解，因此正算解的正確性將影響到反算的結果。
- (b) 假設的誤差：理論上的建立是假設薄板的狀況，且沒有考慮剪力變形效應，但在此反算例子中，試片之邊長僅為厚度的 20 倍，因此難免會產生較大之誤差，這種情形可以由我們所假設的兩種平板尺寸來加以說明，當平板愈接近薄板之假設時，其誤差就會降低，例如 $L = W = 750 \text{ mm}$ 時， s_{66}^E 之誤差降至只有 0.02%。
- (c) 靈敏度的關係：造成 s_{12}^E 誤差較大的原因在於此參數對於共振頻率的貢獻較小，因為若以利用反算值計算所得之振頻與實驗所得振頻來看，可發現彼此間相差極小，因此可知 s_{12}^E 對於反算之靈敏度較低。

雖然在反算過程中因為 s_{12}^E 之靈敏度較低而造成結果不盡理想，但是我們在此所使用的方法，卻是完全脫離電力系統之考慮，而單純地以機械行為來探討壓電材料之振動。一般利用實驗的共振頻率來反算壓電材料性質的研究，皆是使用阻抗分析設備來進行共振頻率的量測，而由本計劃中的探討中可知由阻抗實驗量測出的頻譜圖並不能提供準確的模態訊息，而且對於我們反算所使用的彎曲模態，更是根本無法量測，本計劃中所使用的 ESPI 方法相較於一般使用阻抗分析設備的方式，提供了非接觸、即時觀察與全域量測的優點，不僅能獲得共振頻率的資訊且能立即由光斑影像圖作模態辨識，使誤差函數計算時不會有模態不對應的情形發生，進而可以減少反算的誤差。

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。在本研究計劃中我們應用 AF-ESPI 分別對等向性平板及三維壓電材料體作全場的振動量測與探討，藉由判斷影像干涉圖之清晰程度及干涉條紋之分佈，便可由實驗上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。

綜合以上各章之實驗結果及分析，大致可歸納出以下幾點結論：

- (1) 利用振動資料從事材料常數之反算，可以避免製作標準試片之麻煩，同時因為使用 ESPI 作量測時振頻與振型之對應關係可以由實驗中正確地確定，自然也較其他動態量測方式以確定材料常數更為便利及準確。
- (2) 藉著三個方向的位移獨立量測方式，可建構出物體的三維振型，而且我們可根據影像圖之清晰度或干涉條紋數來判斷物體各個模態的主要振動模式。
- (3) 影像干涉圖可作為判斷壓電材料組織或尺寸是否正確的依據，對於此類價位及精度要求較高之材料，從事此類之檢測確有必要。
- (4) 我們已證實利用 ESPI 的位移量測方式可以彌補阻抗分析所無法展現之模態，並且以實驗的觀點配合數值計算之分析，對於二維到三維間的模態轉換完整地依其特性做出分類及說明。

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] 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] 林湛喬，應用電子斑點干涉術於複材層板振動的全場實驗量測與材料性質反算，國立台灣大學機械工程研究所碩士論文，民國八十六年六月

表1 長方體壓電陶瓷AF-ESPI、阻抗分析及數值分析之結果比較

	AF-ESPI (Hz)	Impedance analysis (Hz)	FEM (Hz)
Mode 1	49400	49750	50259

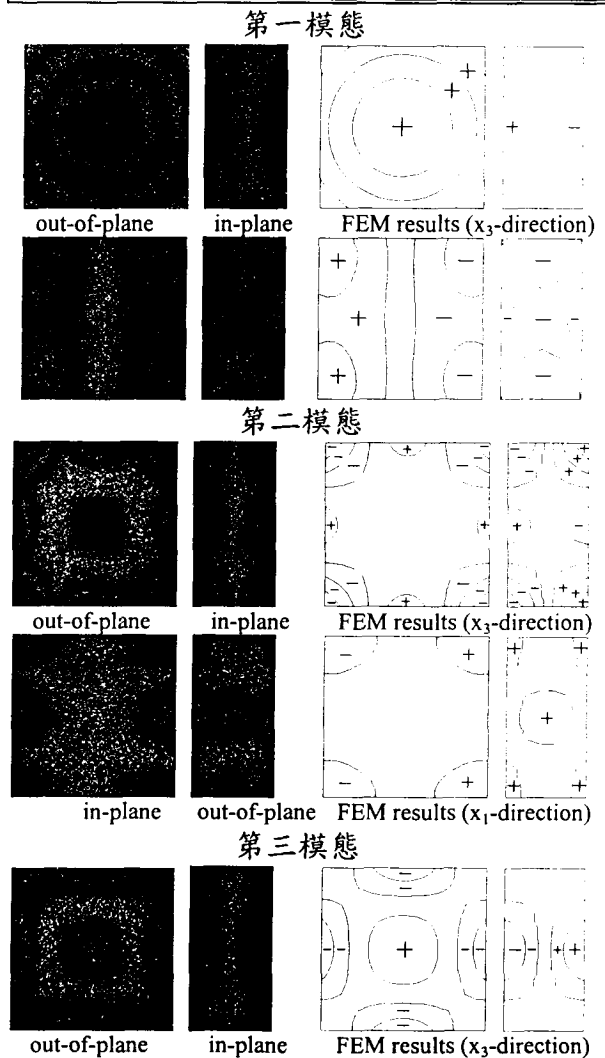
Mode 2	85300	85600	87243
Mode 3	87600	87850	90223
Mode 4	104100	104325	107337
Mode 5	123650	123650	124035

表2 [0/45/90/-45]_{2s} 複材正方板的反算結果

	s_{11}^E	s_{22}^E	s_{12}^E	s_{66}^E
反算值	15.866	15.866	-7.944	47.62
實際值	16.83	16.83	-5.656	44.97
誤差%	5.73	5.73	-40.45	-5.89

表3 利用反算值計算所得之振頻與實驗所得振頻的比較

	Rayleigh-Ritz method (Hz)	Experimental result		FEM result	
		Hz	error (%)	Hz	error (%)
Mode 1	2902	2970	2.29	2915	0.45
Mode 2	4459	4480	0.47	4418	-0.93
Mode 3	6693	6770	1.14	6839	2.13
Mode 4	8007	7880	-1.61	7844	-2.08
Mode 5	14888	14580	-2.11	14556	-2.28



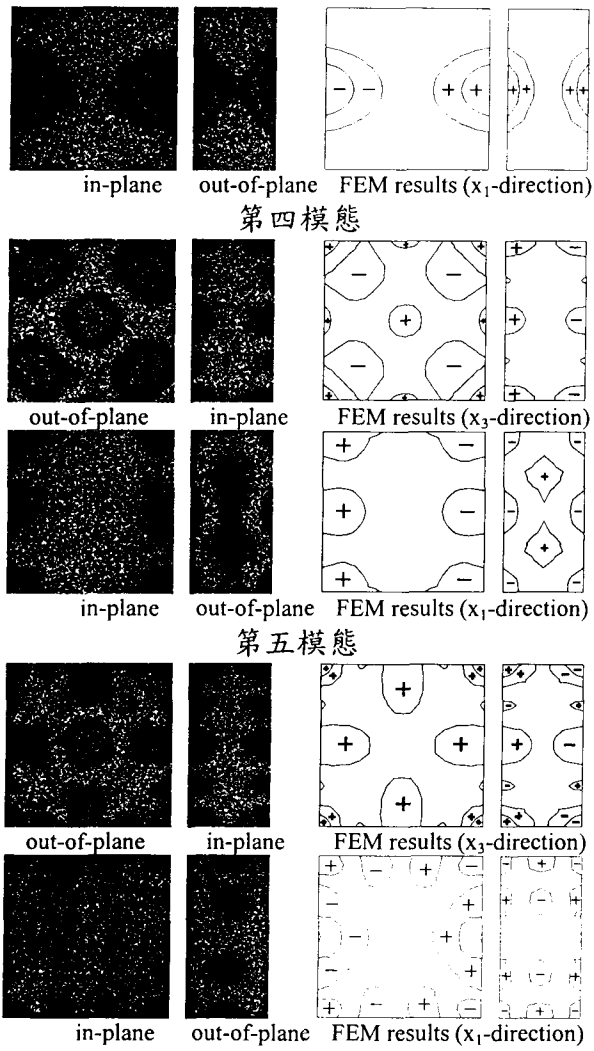


圖 1 長方體壓電陶瓷之實驗與數值分析結果

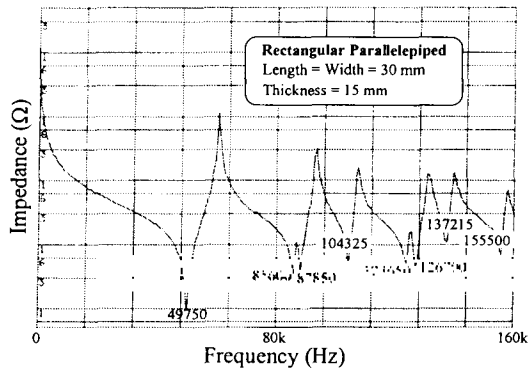


圖 2 長方體壓電陶瓷之阻抗分析頻譜圖