

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

壓電材料在液體中的動態特性研究與實驗量測(2/2) 研究成果報告(完整版)

計畫類別：個別型
計畫編號：NSC 95-2221-E-002-211-
執行期間：95年08月01日至96年07月31日
執行單位：國立臺灣大學機械工程學系暨研究所

計畫主持人：馬劍清

計畫參與人員：博士班研究生-兼任助理：林育志、黃育熙

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 96年10月11日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

※

※ 壓電材料在液體中的動態特性研究與實驗量測(2/2)

The Theoretical Investigation and Experimental Measurements of the
Dynamic Characteristics for Piezoelectric Materials in Fluid

※

計畫類別：個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：95-2221-E-002-211

執行期間：95年08月01日至96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 六 年 八 月 卅 一 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

壓電材料在液體中的動態特性研究與實驗量測(2/2)

The Theoretical Investigation and Experimental Measurements of the Dynamic Characteristics for Piezoelectric Materials in Fluid

計畫編號：95-2221-E-002-211

執行期限：94年8月1日至96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：林育志、黃育熙

一、中文摘要

大部分的學術論文探討壓電材料在空氣中的振動問題，甚少有相關研究討論壓電材料在液體中的振動特性，尤其是實驗方面的資料更是少見。本計畫探討應用性頗廣的壓電陶瓷材料以及壓電雙晶片在空氣中以及液體中的振動問題，而此方面的研究亦少有相關文獻作深入之探討，且實驗量測的困難性與複雜性也較大。本研究計畫將整合且有系統地包含理論建立、數值計算以及實驗量測，針對壓電陶瓷材料板及壓電雙晶片在不同液體中的動態特性下作完整的探討，以便理論、數值及實驗能互相驗證。實驗主要以電子斑點干涉術的實驗方法對壓電材料板及壓電雙晶片作全域性的面外及面內振動模態以及共振頻率量測，並配合雷射都卜勒振動儀及阻抗分析的結果作深入之探討，除此之外亦將應用有限元素數值計算作相關問題的理論研究並與實驗結果作比較。本研究計畫為兩年期計畫，第一年本年度計畫主要探討壓電陶瓷長方板在空氣中及在不同液體的振動特性，第二年則討論壓電雙晶片在空氣中及在不同液體中的振動特性。

二、英文摘要

There are many papers investigate the vibration characteristics of the piezoelectric materials in air. However, there is very few results available in the literature discuss the case of the piezoelectric material in fluid. The experimental measurement of resonant frequencies for the piezoceramic plate is generally performed by the impedance analysis. In this project, we

employ an optical interferometry method called the amplitude-fluctuation electronic speckle pattern interferometry (AF-ESPI) to investigate the vibration characteristics of piezoceramic plates and piezoelectric bimorph in air and in fluid. As compared with the film recording and optical reconstruction procedures used for holographic interferometry, the interferometric fringes of AF-ESPI are produced instantly by a video recording system. Based on the fact that clear fringe patterns measured by the AF-ESPI method will be shown only at resonant frequencies, both the resonant frequencies and corresponding mode shapes are obtained experimentally at the same time. The out-of-plane and in-plane vibration modes of piezoceramic plates and piezoelectric bimorph will be discussed in this project. The numerical finite element calculations are also performed, and the results will be compared with the experimental measurements. This is a two-year project, the first year in focused on the piezoceramic plate and the second year investigate the piezoelectric bimorph.

三、背景及目的

從材料科學的歷史演進可概分為結構材料演進到功能材料，再進化到智慧型材料，智慧型材料需同時具有感測器與致動器的功能，也是目前各國全力研究發展的材料，而壓電材料就是具有這些功能也是最具發展及應用潛力的智慧型材料之一。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，濾波器，延遲線

，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。具有壓電效應的材料有多種；如石英(Quartz)就是一種良好的壓電材料，而在各種壓電材料裡以壓電陶瓷的用途最為廣泛，主要是因為它可製成任何形狀，且隨著組成的不同有不同的特性以適合不同的應用。壓電材料的種類有單晶類(如石英)，薄膜類(如氧化鋅)，聚合物(如PVDF)，陶瓷類(如銻鈦酸鉛，PZT)等。由於許多特性好的壓電材料本身即為強介電材料，再加上其它可能的電光效應及光彈效應，壓電材料本身就是最具智慧化潛力的材料，所以壓電材料的特性研究及其相關的應用仍是目前學者的重要研究方向。

壓電材料的靜態問題國內外外皆有許多學者作過相關的研究，而有關壓電材料的動態問題則較少有國內外學者涉入研發，且大都是以理論分析居多，較少有較深入的實驗結果呈現。而壓電陶瓷材料是屬於脆性材料，且在動態的週期性高頻電壓（對面內模態的共振頻率激發可達數萬赫茲(Hz)以上）驅動下往往壓電陶瓷材料的溫度會急速升高數十度甚至一百多度的高溫，在這種高溫且高頻率的動態負載環境下，壓電陶瓷材料的材料性質及動態特性皆會有所影響，而仔細查閱國內外相關的學術期刊，幾乎很少有這一方面的研究成果。

由於聲波為目前唯一可以在水中作為遠距離傳輸者，壓電水聲換能器在海底探勘，水下識別、通信及航海，軍事防禦及海洋生物研究等方面的應用扮演了很重要的角色。而為了更廣泛應用壓電陶瓷材料於水中、人體中之各種壓電醫療裝置、許多不同用途之壓電閥門或壓電泵等運作於液體中或與液體接觸之元件，對於壓電陶瓷材料在各種不同介質中的振動特性之了解將成為一重要的研究課題。然而目前在水中振動之研究大多是理論分析，少有以實驗獲取振動頻率或振形者，尤其水中模態振形之擷取十分困難。本計畫將以主持人以往在壓電材料的研究成果為基礎，針對壓電陶瓷單層板與多層結構之壓電雙晶片在不同的流體介質中之振動特性加以分析，同時獲取其共振頻率與全場振形，而這將使壓電陶瓷元件在流體中

之應用研究更上層樓。以前所探討的壓電陶瓷材料之動態特性都是在空氣中的情況，而壓電陶瓷材料在液體中的動態特性由於液體以及容器系統皆對壓電陶瓷板的共振頻率及模態都會有相當大的影響，其動態特性也會與在空氣中的壓電陶瓷板有很大的不同。故本計畫的主要目的即是探討液體對壓電陶瓷材料板及壓電雙晶片的面內(In-plane)及面外(Out-of-plane)振動的影響，而其內容不僅只是理論的研究及探討更包含實際的實驗量測，除了理論的研究之外，本計畫的最重要之特色是以三種不同的實驗方法實際量測壓電陶瓷板及壓電雙晶片的動態特性，這三種實驗方法即阻抗分析，雷射都卜勒干涉以及電子斑點干涉，這三種不同方法各有其優缺點，其中阻抗分析是一般應用來量測壓電材料面內運動振頻的方法，其優點是快速而方便，但其缺點在於僅能獲知自然頻率而模態則無從得知。雷射都卜勒干涉的量測精度可達奈米級但僅可作單點的精密垂直位移量測，而電子斑點干涉術是全域式的光學量測其精度為微米級，有能力直接同時獲得振頻及模態的結果。

本研究計畫將應用電子斑點干涉術(electronic speckle pattern interferometry, ESPI)做壓電材料板面內及面外振動之量測為主，包括振頻及全域的模態。同時亦輔以雷射都卜勒振動儀及阻抗分析儀共同來探討此一問題。其頻率範圍將涵蓋低頻（數百 Hz，面外振動），中頻（數千 Hz）以及高頻（數萬 Hz，面內振動）不同頻率範圍。另外由於壓電陶瓷材料在高頻振動時常有溫度急速升高的現象，故本計畫也將對於壓電陶瓷板作溫度量測。所以本計畫內容廣泛而深入且兼具學術及實用性。

由於光電產業迅速發展，加上光學量測精確度較傳統量測方式為高，故近十多年來，以雷射為基礎的光學干涉方法如全像干涉術(holographic interferometry)、疊紋干涉術(moire interferometry)與斑點干涉術(speckle interferometry)等已廣泛地應用在各種量測技術上，包括航空工業、汽車工業、以及電子產業。其中電子斑點干涉術(electronic speckle pattern interferometry, 簡稱 ESPI)因數位影像技術與電腦科技的進步，避免了其它傳統干涉術須沖洗底片的費時與不方便，它整合了光、機電的系統，同時提供了即時

、全場與非接觸式的光學量測優點，且對試片處理上的要求不高。因此本計畫利用上述之電子斑點干涉術之特性及優點，針對壓電陶瓷材料板及壓電雙晶片在不同流體中之振動問題作深入研究。在散斑干涉的實驗光路中，附加上三個部分：電視攝取機(TV-C)、電子處理線路(EP)和電視監控器(TV-M)，就可以直接觀察和分析干涉條紋，這種系統就叫做電子斑點干涉術。

在 1971 年 Butter 及 Leendertz(1971)以相機及電腦結合全像干涉技術的理念，提出了電子斑點干涉術(Electronic Speckle Pattern Interferometry)，是一種不需要使用傳統全像記錄技術而能記錄干涉訊號的儀器，主要是使用了電視照像機來記錄低空間頻率(Low Spatial Frequency)全像圖，而不必應用到底片來記錄，記錄在記憶體中的電視影像和全像底片所記錄的幾乎一樣，而電子斑點干涉術與全像術最主要的不同點是系統的架設及資料的處理。

自從 1980 年代以後，就不斷的有學者投入心力在 ESPI 的理論基礎與實際量測的最佳化研究上。像 Gudmunn、Wykes 和 Moore 等人，對相關的理論、光源及如何取得最佳的對比條紋問題，都有深入的研究與探討。Wykes(1977)發表了一篇有關在一個採用均勻擴散的參考光，對變形前後作相減型式的干涉，其雷射功率對條紋品質的影響，更導出雷射功率、物體表面散射性質、相機解析度及系統空間解析度的關係。隨後 Jones 及 Wykes(1981)更進一步導出相機的特徵函數，雷射光功率和干涉儀型式相互之間的關係。國內學者清大王偉中教授亦提出一套新方法使得在量測振動問題時的條紋較為清楚。這些學者都為 ESPI 的技術奠定了良好的基礎。

而後陸續不少的學者將 ESPI 應用到實際的量測與檢測上。如 Wykes(1982)將 EPSI 應用到量測靜態(Static)和動態(Dynamic)的表面位移；Moor 和 Tyrer(1990)也對 ESPI 在全場的面內位移作一量測；馬劍清和王瑞隆(1994)也對單層的鋁板作過面外位移的探討。在壓電材料的探討上，Kunkel、Locke 和 Pikeroen(1990)使用有限元素法計算壓電陶瓷(PZT-5H)圓盤之振型；Guo、Cawley 和 Hitchings(1992)則對壓電陶瓷圓盤之共振模態，作了定義及分類。

壓電陶瓷材料是一種漸受重視的材料，由於本身的壓電效應現象，使得能製成各種型式的感測器(sensor)與致動器(actuator)。可惜的是對於此類壓電換能器(transducer)的振動模型並沒有理論解，只能以有限元素法加以分析，而實驗上的量測與驗證則更為缺乏。因為壓電材料在水中換能器的應用上已是不可或缺的角色，關於水下換能器或其他結構與液體交互作用的振動分析更是紛紛問世。Koyuncu(1980)在 ESPI 系統中加入參考光調制技術對在水中及空氣環境下的 PZT-4 換能器，進行表面振動振幅及模態的實驗量測；Oswin(1994)以 ESPI 技術量測換能器在空氣中與水中的振動模態，結果發現水中影像由於換能器表面反射不均而較不清楚，不過仍可以提供足夠的資料顯示水中振動特性異於空氣中。Mazuch 等人(1995)利用有限元素法及全像術分析裝不同水量的薄壁圓柱形容器的共振頻率與振形，發現共振頻率隨著水量增加而降低，而數值分析與實驗結果在大部分的模態都十分接近，並推論少數的差異可能來自實驗中固定端的不完美；Petzing 及 Tyrer(1996)建立一個有限元素模型來分析水中壓電陶瓷換能器的振動特性，並與 ESPI 光學干涉術實驗作比較，結果顯示水中的振頻較低而振形則與空氣中有些不同；該研究並改善了原來 ESPI 在實驗上參考光不易調整的缺點而獲得較好的影像品質。Ekeom, Dubus 和 Granger(1998)以有限元素法分析四周為無限大岩層的佈滿水孔洞內之壓電換能器的發射(radiation)情形，並以裝滿油的管中環形 PZT 換能器實驗作驗證；Balabaev 和 Ivina(2000)結合有限元素與邊界元素法分析了靠近一剛體平面且裝滿水的壓電圓柱的振動頻率與造成之壓力和速度分佈，並且發現當圓柱與平面之距離比波長小時，其振動頻率與距離無限大時有極大之差異。

本研究計畫的內容涵蓋了理論分析、數值計算及實驗量測，相當完整而廣泛且兼具學術及實用性，相信完成此計畫後能對壓電材料板在不同流體中的動態特性有深入之瞭解，並預期能發表多篇學術性論文於國際知名期刊，而其成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

4.1 單層壓電陶瓷平板於不同液體中的振動實驗量測與數值分析

(A) 試片規格與邊界條件

本研究所使用的壓電陶瓷平板長 65mm，寬 25mm，厚度 0.26mm，材質為由德國 Physik Instrumente 公司所生產，型號 PIC-151 的壓電陶瓷，其詳細之材料係數可以參考表 1。其邊界條件為將其單邊固定，且試片尺寸規格如圖 1 所示。

各種液體中壓電陶瓷平板振動分析實驗使用如圖 2 的 80mm×80mm×80mm 之水槽，將試片置於水槽中央，水槽裝滿欲研究之液體。使用的液體採用水、甘油與果糖等不同密度與體積模數的液體作分析比較，這些流體的材料常數列於表 2。

面外振動模態之 AF-ESPI 實驗使用圖 3 之架設，實驗獲得之共振頻率與振形則列於表 3 與圖 4。

(B) 數值分析

本研究使用 ABAQUS 有限元素分析軟體來分析空氣中及液體中壓電陶瓷平板的振動。在空氣中的部分，由於 ABAQUS 之平面薄殼元素不支援壓電效應的分析，為了比較結構元素與加入壓電效應的固體元素之優劣，因此分別使用 S4R 薄殼元素及 C3D20RE 固體元素兩種方式來模擬壓電陶瓷平板，並忽略空氣的效應。在液體中的分析部分則是利用 ABAQUS 有限元素分析軟體中的聲學分析，來進行壓電陶瓷平板在不同液體中振動頻率與共振模態振形以及液體壓力分佈的研究。

而本研究乃針對結構物與液體耦合之系統在穩態時的振動特性研究。聲學分析只能用於動態分析當中，而本研究將使用聲學分析作壓電陶瓷平板單邊固定邊界條件下自然頻率的擷取。

(A) 使用材料性質與元素

在液體中的振動分析裡，對於壓電陶瓷平板的模擬是利用一般用途(general purpose)薄殼元素(Shell element):S4R。而對液體的模擬則使用聲學介質(acoustic medium)，並以三維聲學元素(acoustic element):AC3D8 模擬之。

聲學介質用於聲音傳播的問題，乃一只受靜水壓(hydrostatic stress)之彈性體，並假設其為可壓縮非黏

性流。其應力正比於體積應變 ϵ_V ，即 $\sigma = K_f \epsilon_V$ 。其中 K_f 乃體積模數(bulk modulus)，而 $\epsilon_V = \epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33}$ 。其平衡方程式為：

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \gamma \dot{u}^f + \rho_f \ddot{u}^f = 0$$

其中 p 為流體中的壓力(超過靜水壓的部分)， x 為流體質點的位置， \dot{u}^f 為流體質點速度， \ddot{u}^f 乃流體質點加速度， ρ_f 為流體密度， γ 則是體積阻力(volumetric drag)。

(B) 邊界情形

聲學介質與結構物相鄰時會有聲學-結構耦合(acoustic-structural coupling)發生。在 ABAQUS 中，有兩種方式可以用來模擬此耦合現象：當結構與流體共用節點時，使用介面元素(interface element)來模擬。流體除了容器上表面給予自由平面，即聲壓為零之邊界條件，其餘五個容器表面都是剛體假設。而壓電陶瓷平板在液體中是以單邊固定的方式振動。

另外也採用聲學分析模型來作空氣中壓電平板的振動分析，以初步驗證此模型的合理性。亦即將流體的材料常數用空氣的材料常數替代。在空氣中各種分析方法及各種不同流體中之壓電陶瓷平板振動特性分析結果如表 3 與圖 4 所示。

(C) 實驗結果與討論

由表 3 所列之 AF-ESPI 與 FEM 分析的壓電陶瓷平板共振頻率結果可以看出，壓電陶瓷平板在液體中之共振頻率比空氣中低很多，且有隨著密度與黏滯性下降的趨勢。在空氣中的部分，可以觀察出大部分的模態中，薄殼元素(Shell element)之 FEM 分析結果共振頻率與 AF-ESPI 實驗結果較為相近，而固體元素(Solid element)與實驗之誤差則較大。顯然在本研究之單邊固定壓電陶瓷平板的面外模態共振頻率分析上，忽略了壓電效應的結構元素仍然比考慮壓電效應的固體元素為佳。這是因為平面薄殼元素只有兩個維度是以數值方法來近似，另一個維度則是以薄殼理論來計算，而固體元素則是三個維度都以數值方法來近似，因此薄殼元素在此研究中較為準確。

空氣中壓電陶瓷平板振動分析若以聲學分析(Acoustic analysis)的方式進行模擬，其結果與忽略空氣之模型十分接近，符合預期的結果。而水中振動的

部分，FEM 分析結果與 AF-ESPI 實驗結果十分接近，誤差在 8% 以下，此誤差可能導因於實驗與模擬上邊界條件之誤差、材料係數之差異以及材料的不完美等因素。在甘油中與果糖中，AF-ESPI 實驗與 FEM 分析結果之共振頻率，除了第一個模態因其共振頻率非常低而相對有較大誤差，其餘模態的共振頻率的誤差都在 11% 以下。

圖 4 為壓電陶瓷平板在各種介質中振動之 AF-ESPI 實驗與 FEM 分析結果共振模態振形比較。我們可以看出除了液體中第二、第三及第五個模態在水中實驗無法激振出來之外，其餘空氣中與各種液體中之振形都很類似，其中第二與第五個模態皆是反對稱模態。空氣中的第八與第九個模態與在三種液體中的順序相反；空氣中第八個模態到了液體中條紋變得較細長。由於甘油與果糖之密度與黏滯性較大，使得試片位移量減少，且液體因試片振動產生的變形與擾動影響了 AF-ESPI 實驗抓取的影像品質，使其所擷取之振形都比較不清楚。尤其壓電薄板在果糖的振動實驗過程中，經常產生許多果糖積聚在試片與液面交界處，造成實驗上的困擾；在果糖中的第六，第七，第九與第十個模態就顯得特別不清楚。不過一般說來，無論空氣中或是液體中，AF-ESPI 實驗結果之振形與 FEM 分析結果大致上都相當吻合。不過值得一提的是，以 AF-ESPI 實驗模態振形與 FEM 模擬的振形對照，空氣中第九個模態到了液體不但順序變成第八個模態，其節線也因為受到周圍液體的影響慢慢變形成垂直於固定邊，而且在黏滯性高的甘油與果糖中更為明顯，這是 FEM 分析所沒有預測出來的現象。

4.2 多層壓電雙晶片於不同液體中的振動實驗量測與數值分析

壓電雙晶片一般是以兩片長方形壓電陶瓷夾著一片金屬片，將上下兩壓電陶瓷片之極性與電壓方向作變化，使得其變形方向相反(一伸一縮)而產生整體彎曲變形。以兩塊壓電陶瓷的極性來分：當上下兩壓電陶瓷極性對稱(相反)，即串聯組合時，稱為對稱型；當兩片壓電陶瓷極性相同，即並聯組合時，稱為非對稱型。

(A) 試片規格與邊界條件

本研究所使用之壓電雙晶片為美國 American

Piezo Ceramics 公司所生產，型號為 401010 的壓電雙晶片，其詳細之尺寸與材料常數如圖 5 與表，試片單邊固定後之尺寸與示意如圖 6 所示。

其中壓電陶瓷 APC856 為美國 American Piezo Ceramics 公司所生產之壓電陶瓷材料，其材料係數由該公司提供；而 CFRP 由於確實之材料係數無法取得，我們所採用的僅為參考之係數。在本研究中我們用並聯式的接電方式，將壓電雙晶片之上下表面壓電陶瓷部分接至同一電極，而中間 CFRP 夾層則接至另一極。其自由端之偏向位移(deflection)與電壓之關係如下：

$$\Delta = 2.2 \times 10^{-6} (L_f^2 / t^2) V$$

其中 Δ 為位移量， L_f 為試片長度， t 為試片總厚度，而 V 則為電壓。在本研究中 $L_f = 50\text{mm}$ ， $t = 0.6\text{mm}$ ，因此當電壓加至 30Volts 時，就有 0.46mm 之位移量。

而水中振動實驗所用之水槽則與圖 2 所示相同。由實驗獲得之壓電雙晶片在空氣中及水中共振頻率與振形列於圖 7。

此外，我們為了解 AF-ESPI 實驗技術在不同流體中振動分析應用上之可行性，及壓電雙晶片在各種流體中振動之特性，我們也分析了壓電雙晶片在甘油與果糖中之振動特性。各種流體之材料性質如表 2 所示。若先進行 FEM 分析模擬容器的的大小關係對試片共振現象的影響，如圖 8 所示，縱軸為壓電雙晶片在水中振動的前五個共振模態之共振頻率，而橫軸則是試片與前後壁之距離，當容器的前後壁越來越靠近時，壓電雙晶片的共振頻率將有明顯下降的趨勢，因此我們也將壓電雙晶片置於一個 80mm×80mm×5mm 裝滿水的容器中，以 AF-ESPI 實驗來驗證其共振頻率是否明顯變小。上述的 AF-ESPI 實驗得到之壓電雙晶片共振頻率與振形，在不同流體與容器尺寸之影響結果如圖 9 所示。

由於壓電雙晶片之振動位移量大，因此雖然振動主要為面外運動，所產生之面內運動量仍然足夠大而能由阻抗分析儀量測出來。本節也使用 HP4194A 阻抗分析儀來量測壓電雙晶片在不同液體中之共振頻率，並與 AF-ESPI 實驗作比對。壓電雙晶片在不同液

體中振動之阻抗分析曲線如圖 10~圖 12。

(B) 數值分析

如同單層壓電陶瓷利用 ABAQUS 有限元素分析軟體分析空氣中及水中壓電雙晶片的振動。在空氣中的部分，由於平面薄殼元素不考慮壓電效應，為了比較結構元素與加入壓電效應的固體元素之優劣，我們分別使用薄殼元素及固體元素兩種方式來模擬壓電雙晶片，並忽略空氣效應的影響。由於單邊固定壓電雙晶片的 FEM 振動分析結果誤差比單層壓電陶瓷平板大一些，為了降低誤差，在薄殼元素的分析模型中，我們使用一次的 S4R 元素與二次的 S8R5 元素作比較，發現 S8R5 元素之分析結果與 AF-ESPI、LDV 以及阻抗分析實驗結果都較接近，因此本節的壓電雙晶片振動分析結果是採用 S8R5 之分析模型。

在水中分析的部分，我們將使用 ABAQUS 有限元素分析軟體之聲學分析作雙晶片單邊固定邊界下自然頻率的擷取。

(A) 使用材料性質與元素

在水中分析裡我們對壓電雙晶片的模擬是利用薄殼元素(Shell element)S8R5，此元素為二次的平面薄殼元素。而對液體的模擬則以三維聲學元素(acoustic element)AC3D20 模擬之。

(B) 邊界情形

本節亦是利用*Tie 指令連接壓電雙晶片與相鄰液體之表面而使雙晶片與流體的交界處產生交互影響。流體除了容器上表面給予自由平面，即聲壓為零之邊界條件，其餘五個容器表面都是剛體假設。而壓電雙晶片在水中是以單邊固定的方式振動。我們同樣以*Frequency 指令作共振頻率之擷取。

另外，我們亦使用此聲學分析模型來作空氣中壓電雙晶片的振動分析。亦即將流體的材料常數用空氣的材料常數替代。在空氣中各種分析方法及水中之壓電雙晶片振動特性分析結果列於表 5 及圖 7。

(C) 實驗結果與討論

由表 5 可以看出，不論是 AF-ESPI 實驗或 FEM 分析都顯示壓電雙晶片在空氣中的共振頻率比水中高很多。如同圖 9 的壓電陶瓷平板的實驗結果，在黏滯性高的甘油與果糖中其共振頻率更低於水中。不過所不同的是壓電雙晶片在甘油中共振頻率並不是每

個模態都高於果糖，且兩者頻率較為接近。在空氣中的部分，用薄殼元素的共振頻率分析結果較近於實驗結果，誤差在 16% 以下。而加入聲學分析的結果與忽略空氣的分析結果十分接近。由於聲學-結構耦合分析較為複雜，在水中振動的部分，AF-ESPI 實驗與 FEM 對共振頻率分析結果之誤差大於空氣中，但一般在 28% 以下。壓電雙晶片不論在空氣中或水中，其 FEM 對共振頻率之分析結果與 AF-ESPI 實驗結果之誤差都大於上一節之壓電陶瓷平板，我們估計較大之誤差乃導因於壓電雙晶片其複雜之多層材料相互黏合的結構，以及當中 CFRP 複合材料層其確實材料係數未知，而以黏膠固定此振動位移量大之雙晶片對於固定邊界之模擬而言也較難以完美。

在振形的部分，我們由圖 7 可以看出，不論在空氣中或是水中，AF-ESPI 實驗與 FEM 分析之共振模態振形都十分吻合。而壓電雙晶片在水中的振形除了第六與第七個模態之順序與空氣不同外，其餘都十分接近。圖 9 為壓電雙晶片在各種介質中 AF-ESPI 實驗所獲得之共振模態頻率與振形比較。我們看到由於壓電雙晶片之振動位移量大，即使在密度與黏滯性較高之甘油與果糖中，都可以得到清楚的振形，只是模態的形狀因液體的影響而有些變形。在甘油與果糖中的振形十分類似，其第四，第六，第七，第八，第九，第十與第十二個模態都有相鄰正負位移之條紋相連接使得節線不連續的現象，其中第六，第七與第八這三個模態尤其因變形較嚴重而難以區分。壓電雙晶片 AF-ESPI 實驗結果比位移量小的壓電陶瓷平板要清楚，在實驗上也較不困難。在 80mm×80mm×5mm 小容器之振動分析中，由於其液體量少，所得到之振形與空氣中一樣十分清楚，而其共振頻率如數值分析預期之結果比 80mm×80mm×80mm 之容器中低很多。甘油與果糖同為密度與黏滯性較高之液體，因此壓電雙晶片在這兩種液體中之振形十分類似。此外我們可以看到壓電雙晶片於不同液體中的阻抗分析圖 10~圖 12 所量測到的共振頻率，與 AF-ESPI 實驗結果相比，除了某些模態因面內位移量較小而未能顯示在阻抗分析曲線外，其餘都可以有很好的對應。壓電雙晶片在不同液體或容器中之阻抗曲線雖然有所不同，但都有一個共同之特性，亦即第五個模態的曲線變化最大。

這可能是因為此類的變形模態所引發的面內位移量較其他模態大，因而能在阻抗分析曲線上顯示出較大的變化。

本研究的壓電陶瓷平板與壓電雙晶片在液體中振動之 AF-ESPI 實驗量測裡，光線通過液體雖然產生折射，但反射回來的光線依然循原路徑回去，因此液體與空氣折射率的變化對光路方向並不產生影響。而本實驗液體容器很小，只有 80mm×80mm×80mm，因此對於物光與參考光光程差之改變亦在相干長度之內。所以液體中的 AF-ESPI 實驗在本研究中光學上受液體之影響應可忽略，而實驗結果也印證了這個推論。整體而言，本研究之聲學分析模型可以適當模擬壓電雙晶片在各種介質中之振動行為。而 AF-ESPI 實驗對壓電雙晶片在各種介質中之振動分析都有十分良好之結果。

圖表資料

表 1 壓電陶瓷之材料係數

Quality	PIC-151
$C_{11}^E (N/m^2)$	10.760×10^{10}
C_{12}^E	6.313×10^{10}
C_{13}^E	6.386×10^{10}
C_{33}^E	10.04×10^{10}
C_{44}^E	1.962×10^{10}
C_{66}^E	2.224×10^{10}
$e_{31} (N/Vm)$	-9.52
e_{33}	15.14
e_{15}	11.97
$\rho (Kg/m^3)$	7800
$\epsilon_{11}^s / \epsilon_0$	1111
$\epsilon_{33}^s / \epsilon_0$	925
ϵ_0	8.85×10^{-12}

表 2 各種流體之材料性質(續)

材料性質	流體			
	空氣	水	甘油	果糖
體積模數 (N/m ²)	1.42×10^5	2.2×10^9	4.39×10^9	8.43×10^9

表 2 各種流體之材料性質(續)

材料性質	流體			
	空氣	水	甘油	果糖
密度 (Kg/m ³)	1.2	1000	1260	1570
波速 (m/s)	344	1483	1875	2317
黏滯係數 (Pa·s)	1×10^{-5}	0.001	1.2	2.5

表 3 壓電陶瓷平板在不同流體中 AF-ESPI 與 FEM 分析之共振頻率結果比較(續)

PZT	共振頻率 (Hz)					
	空氣			水	甘油	果糖
模態	殼元素	固體元素	聲學分析			
1 ESPI	30			10	8	7
FEM Err%	28 -6.7	32 6.7	28 -6.7	10 0.0	9 12.5	9 28.6
2 ESPI	142			.....	.....	.....
FEM Err%	150 5.6	153 7.7	150 5.6	77	71	65
3 ESPI	180			.....	.....	.....
FEM Err%	176 -2.2	199 10.6	176 -2.2	70	63	57
4 ESPI	505			198	175	160
FEM Err%	494 -2.2	561 11.1	496 -1.8	213 7.6	194 10.9	176 10.0
5 ESPI	870	.....	.....	.....	.....	.....
FEM Err%	883 1.5	935 7.5	886 1.8	478	441	404
6 ESPI	1010	440	375	355	.....	.....
FEM Err%	971 -3.9	1102 9.1	980 -3.0	455 3.4	415 10.7	379 6.8
7 ESPI	1440	730	630	600	.....	.....
FEM Err%	1280 -11.1	1513 5.1	1286 -10.7	751 2.9	695 10.3	1280 -11.1
8 ESPI	1680	825	720	670	.....	.....
FEM Err%	1537 -8.5	1776 5.7	1544 -8.1	817 -1.0	749 4.0	686 2.4
9 ESPI	1750	910	820	735	.....	.....
FEM Err%	1642 -6.2	1943 11.0	1670 -4.6	917 0.8	851 3.8	788 7.2

表 3 壓電陶瓷平板在不同流體中 AF-ESPI 與 FEM 分析之共振頻率結果比較(續)

PZT	共振頻率 (Hz)					
	空氣			水	甘油	果糖
	殼元素	固體元素	聲學分析			
10 ESPI	2600	1270	1170	1160	.....	.....
FEM Err%	2438 -6.2	2845 9.4	2607 0.3	1294 1.9	1187 1.5	1089 -6.1

表 4(a) 壓電陶瓷層 APC856 材料常數

Quality	APC-856
$E_{11}(N/m^2)$	5.80×10^{10}
E_{22}	5.80×10^{10}
E_{33}	4.50×10^{10}
G_{12}	2.35×10^{10}
G_{23}	2.30×10^{10}
G_{13}	2.30×10^{10}
ν_{12}	0.2772
ν_{23}	0.4901
ν_{13}	0.4901
$d_{31}(N/Vm)$	-260
d_{33}	620
d_{15}	710
$\rho (Kg/m^3)$	7600
$\epsilon_{11}^s/\epsilon_0$	2400
$\epsilon_{33}^s/\epsilon_0$	2150
ϵ_0	8.85×10^{-12}

表 4(b) 壓電陶瓷層 APC856 材料常數

Quality	APC-856
$E_{11}(N/m^2)$	1.310×10^9
E_{22}	1.033×10^9
G_{12}	6.900×10^9
ν_{12}	0.220
$\rho (Kg/m^3)$	1770

表 5 壓電雙晶片在空氣中及水中 AF-ESPI 與 FEM 分析之共振頻率結果比較

模態	共振頻率 (Hz)			
	空氣			水中 8x8x8
	殼元素	固體元素	聲學分析	
1 ESPI	110			60
FEM (Err%)	121 (10.0)	125 (13.6)	121 (10.0)	62 (3.3)
2 ESPI	650			320
FEM (Err%)	753 (15.8)	781 (20.2)	758 (16.6)	408 (27.5)
3 ESPI	1890			970
FEM (Err%)	2109 (11.6)	2191 (15.9)	2126 (12.5)	1224 (26.2)
4 ESPI	3640			2100
FEM (Err%)	4118 (13.1)	4279 (17.6)	4164 (14.4)	2555 (21.7)
5 ESPI	4910			3200
FEM (Err%)	4940 (0.6)	5175 (5.4)	5165 (5.2)	3681 (15.0)
6 ESPI	5710			3580
FEM (Err%)	6063 (6.2)	6285 (10.1)	6323 (10.7)	4461 (24.6)
7 ESPI	6160			3770
FEM (Err%)	6862 (11.4)	7187 (16.7)	6967 (13.1)	6862 (11.4)
8 ESPI	7400			4900
FEM (Err%)	8032 (8.5)	8293 (12.1)	8359 (13.0)	8032 (8.5)
9 ESPI	9110			5630
FEM (Err%)	10183 (11.8)	10643 (16.8)	10401 (14.2)	6958 (23.6)
10 ESPI	9650			6400
FEM (Err%)	10578 (9.6)	10939 (13.4)	10970 (13.7)	7988 (24.8)
11 ESPI	12330			6690
FEM (Err%)	.....	.....	.....
12 ESPI	12750			8100
FEM (Err%)	14186 (11.3)	14898 (16.8)	14616 (14.6)	10119 (24.9)

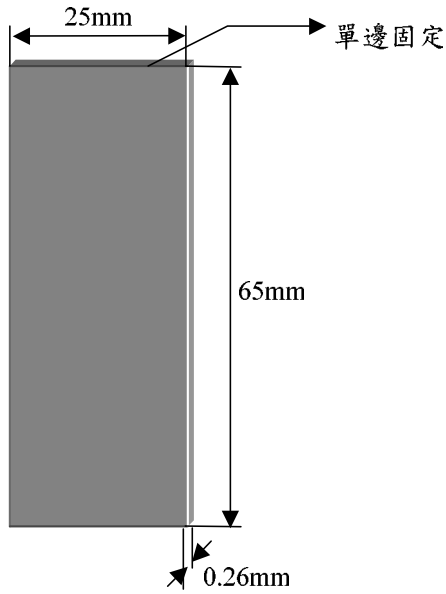


圖1 壓電陶瓷平板尺寸與邊界條件示意圖

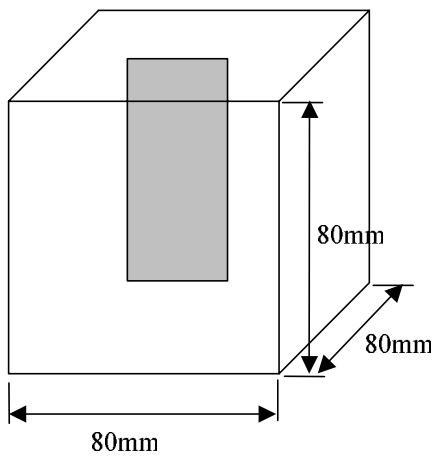


圖2 水槽尺寸示意圖

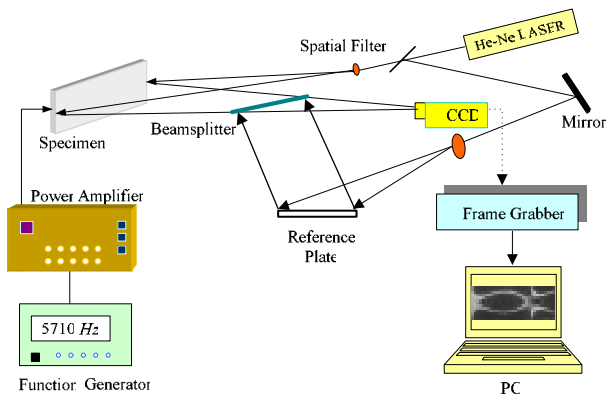


圖3 AF-ESPI之架設示意圖與實際架設圖片

模態振形—PIC151				
模態	空氣	水	甘油	果糖
1 ESPI				
Freq.	30	10	8	7
1 FEM				
Freq.	28	10	9	9
2 ESPI		.....	.....	.....
Freq.	142			
2 FEM				
Freq.	150	77	71	65
3 ESPI		.....	.....	.....
Freq.	180			
FEM				
Freq.	176	70	63	57

圖4 壓電陶瓷平板在各種介質中 AF-ESPI 與 FEM 分析結果共振頻率與振形比較(續)

模態振形—PIC151				
模態	空氣	水	甘油	果糖
4 ESPI				
Freq.	505	198	175	160
FEM				
Freq.	494	213	194	176
5 ESPI		.....	.....	.....
Freq.	870			
FEM				
Freq.	883	478	440	404
6 ESPI				
Freq.	1010	440	375	355
FEM				
Freq.	971	455	415	379

模態振形—PIC151				
模態	空氣	水	甘油	果糖
7 ESPI				
Freq.	1440	730	630	600
FEM				
Freq.	1280	751	695	642
8 ESPI				
Freq.	1680	825	720	670
FEM				
Freq.	1537	817	749	686
9 ESPI				
Freq.	1750	910	820	735
FEM				
Freq.	1642	917	851	788

圖 4 壓電陶瓷平板在各種介質中 AF-ESPI 與 FEM 分析結果共振頻率與振形比較(續)

模態振形—PIC151				
模態	空氣	水	甘油	果糖
10 ESPI				
Freq.	2600	1270	1170	1160
FEM				
Freq.	2438	1294	1187	1089

圖 4 壓電陶瓷平板在各種介質中 AF-ESPI 與 FEM 分析結果共振頻率與振形比較(續)



圖 5 壓電雙晶片外形及尺寸側視圖

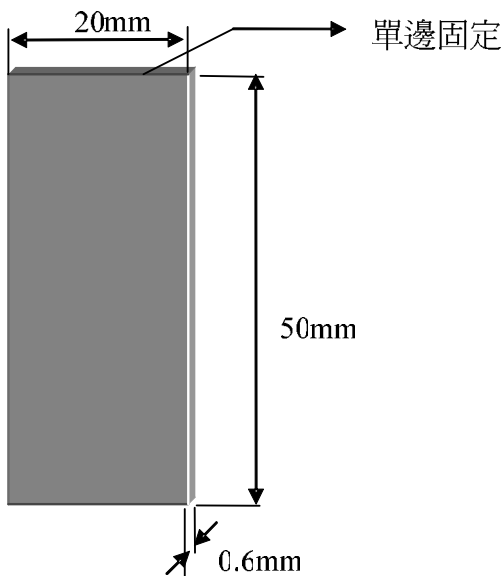


圖6 壓電雙晶片的尺寸及邊界條件示意圖

模態	模態振形—Bimorph	
	空氣	水中(8x8x8)
1 ESPI	 (110)	 (60)
FEM	 (121)	 (62)
2 ESPI	 (650)	 (320)
FEM	 (753)	 (408)
3 ESPI	 (1890)	 (970)
FEM	 (2109)	 (1224)
4 ESPI	 (3640)	 (2100)
FEM	 (4118)	 (2555)
5 ESPI	 (4910)	 (3200)
FEM	 (4940)	 (3681)
6 ESPI	 (5710)	 (3580)
FEM	 (6063)	 (4461)
7 ESPI	 (6160)	 (3770)
FEM	 (6862)	 (4546)

圖 7 壓電雙晶片在空氣中及水中 AF-ESPI 與 FEM 分析結果共振頻率與振形比較(續)





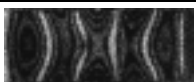
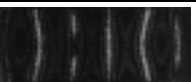


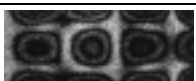



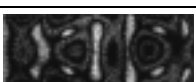
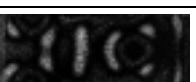

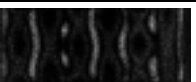


模態	模態振形—Bimorph	
	空氣	水中(8x8x8)
8 ESPI	 (7400)	 (4900)
FEM	 (8032)	 (6013)
9 ESPI	 (9110)	 (5630)
FEM	 (10183)	 (6958)
10 ESPI	 (9650)	 (6400)
FEM	 (10578)	 (7988)
11 ESPI	 (12330)	 (6690)
FEM	.....	.....
12 ESPI	 (12750)	 (8100)
FEM	 (14186)	 (10119)

圖 7 壓電雙晶片在空氣中及水中 AF-ESPI 與 FEM 分析結果共振頻率與振形比較(續)

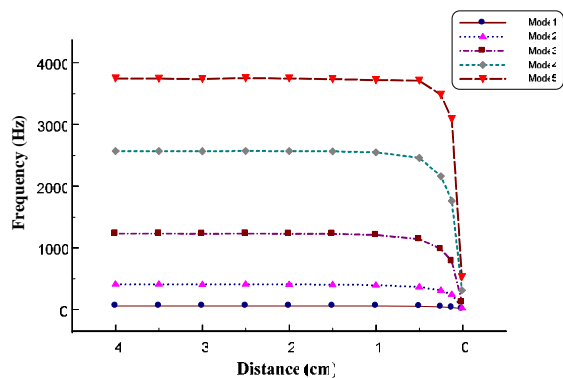


圖 8 壓電雙晶片置於不同大小容器之水中 FEM 分析之共振頻率變化



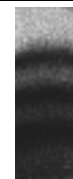
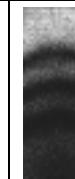


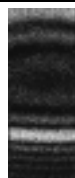



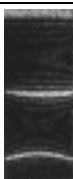
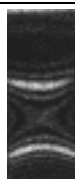
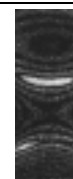
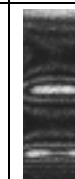





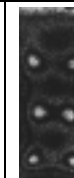


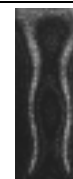

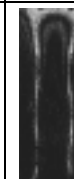
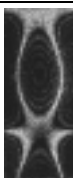


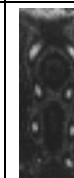



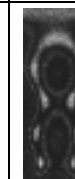
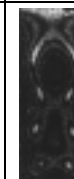
模態	模態振形				
	空氣	水中 8x8x8	水中 8x8x0.5	甘油 8x8x8	果糖 8x8x8
1 ESPI	 110	 60	 28	 60	 30
2 ESPI	 650	 320	 172	 255	 260
3 ESPI	 1890	 970	 545	 830	 830
4 ESPI	 3640	 2100	 1300	 1880	 1750
5 ESPI	 4910	 3200	 2500	 2800	 2650
6 ESPI	 5710	 3580	.....	3200	 3050
7 ESPI	 6160	 3770	 3080	 3560	 3160

圖 9 AF-ESPI 實驗所得到之壓電雙晶片在不同流體中共振頻率與振形之比較(續)



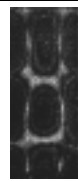

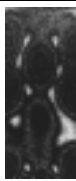
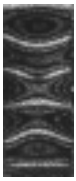
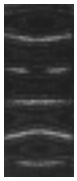
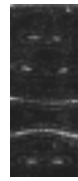



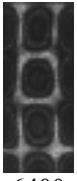


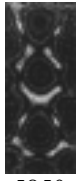


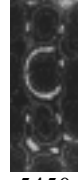







模態	模態振形				
	空氣	水中 8x8x8	水中 8x8x0.5	甘油 8x8x8	果糖 8x8x8
8 ESPI	 7400	 4900	 4080	 4500	 4350
9 ESPI	 9110	 5630	 4300	 5160	 5160
10 ESPI	 9650	 6400	 5080	 6000	 5850
11 ESPI	 12330	 6690	 5450	 7080	 7090
12 ESPI	 12750	 8100	 6050	 7700	 7560

圖 9 AF-ESPI 實驗所得到之壓電雙晶片在不同流體中共振頻率與振形之比較(續)

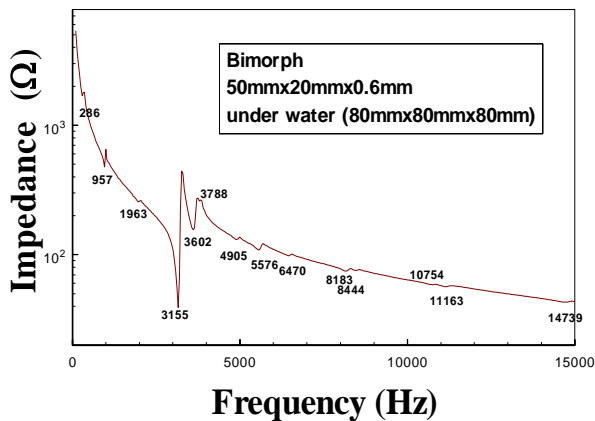


圖 10 壓電雙晶片在 80mm×80mm×80mm 容器水中之阻抗分析曲線

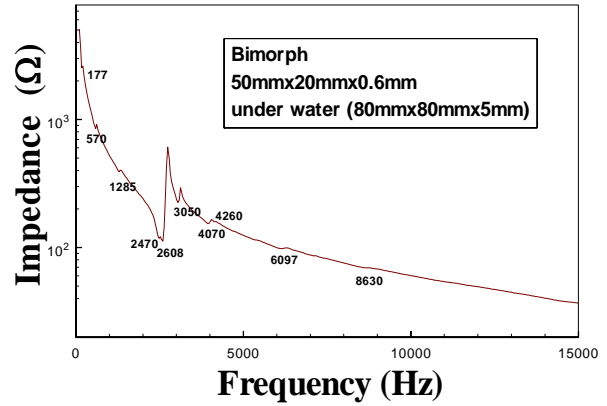


圖 11 壓電雙晶片在 80mm×80mm×5mm 容器水中之阻抗分析曲線

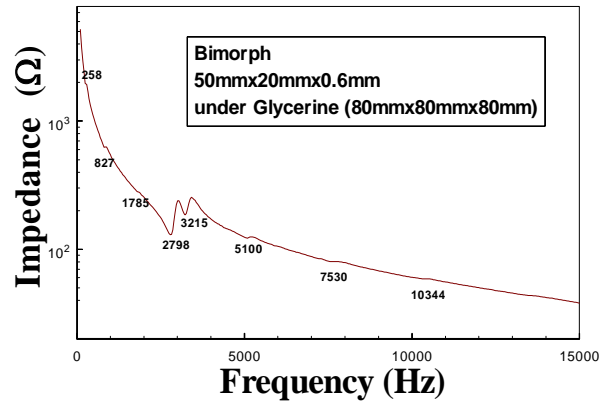


圖 12 壓電雙晶片在 80mm×80mm×80mm 容器甘油中之阻抗分析曲線

結論

整體看來，無論是共振頻率或是共振模態振形，此壓電陶瓷平板與壓電雙晶片在流體中振動之聲學分析模型都可以適當模擬實際之振動行為。在 AF-ESPI 實驗中，隨著液體密度與黏滯性之增加，不但實驗難度稍增，振形也稍微變得模糊。不過一般而言，AF-ESPI 在各種流體中之振動模態擷取都有良好的結果，且液體的折射不影響 AF-ESPI 的光路與量測能力。而 AF-ESPI 實驗技術與 FEM 分析兩者配合，提供壓電陶瓷平板與壓電雙晶片在液體中振動特性非常完整的資訊。

參考文獻

Blevins, R. D.(1979). *Formulas for Natural Frequency and Mode Shape.*, Van Nostrand Reinhold Company, New York.

Butters, J. N. and Leendertz, J. A.(1971). *Journal of Measurement and Control* , **4** , 344.

Claassen, R. W. and Thorne, C. J.(1960). *Transverse vibrations of thin rectangular isotropic plates.* , NOTS Tech. Pub., 2379.

Jones, R.(1976)., " The design and application of a speckle patten inter-ferometer for total plane strain field measurement. " *Optics and Laser technology* , October , 166.

Joenathan, C. and Khorana, B. M.(1992). " Contrast of the vibration fringes in time averaged electronic speckle pattern interferometry:effect of speckle averaging. " *Applied Optics* , April , **3.1** , 1863.

Jones, R. & Wykes, C.(1989).*Holographic and Speckle Interferometry*. Second edition , Cambridge University press. 1989 , 6.

Jones, R. M.(1975). "*Mechanics of Composite Materials*",Scripta Book Company.,Washington,D. C. 1975 , 6.

Koyuncu, B.(1980). "The Investigation of High Frequency Vibration Modes of PZT-4 Transducers Using ESPI Techniques with Reference Beam Modulation," *Opt. Lasers Eng.*, **1**, 37-49.

Koyuncu, B. and Cookson, J.(1980). "Semi-automatic measurements of small high-frequency vibrations using time averaged electronic speckle pattern interferometry." , *The Institute of Physics* , 206.

Miller, R. A., Castro-Montero, A. and Shah, S. P.(1991). "Use of laser holographic interferometry and image analysis for the study of fracture specimens. " *Experimental Techniques* , May/June , 14.

Oswin, J.R., Salter, P.L., Santoyo, F.M. and Tyrer, J.R.(1994). "Electronic Speckle Pattern Interferometric Measurement of Flextensional Transducer Vibration Patterns: in Air and Water," *J. Sound and Vib.*, **172**(4), 433-448.

Stetson, K. A. and Brohinsky, W. R.(1987). " Electrooptical holography system for vibration analysis and nondestructive testing ." , *Optical Engineering* , **26** , 1235.

Wei-Chung Wang, Chi-Hung Hwang, and Shu-Yu Lin(1996) "Vibration measurement by the time-averaged electronic speckle pattern interferometry methods", *Applied Optics*, **35** (22), 4502

Wykes, C.(1982). " Use of electronic speckle pattern interferometry(ESPI) in the measurement of static and dynamic surface displacements." , *Optical Engineering* , May , **21** , 400.

Yen, C. S. and Wu, E. " On the inverse problems of rectangular plates subjected to elastic impact,Part I :Method development and numerical verification.", *ASME Journal of Applied Mechanics* , 1994.

胡錦標主編(1990) , *精密光電技術* , 高立圖書有限公司。79年2月。

王瑞隆(1994) , *電子斑點干涉術在變形體之實驗量測與檢測* , 國立台灣大學機械工程學研究所碩士論文。83年6月