

應用全域光學量測含孔洞及非均厚平板的振動特性
**Investigation of the Vibration Characteristics for Nonuniform
Plates with a Circular Hole by a Whole Field Optical Method**

計畫編號：NSC90-2212-E-002-230

執行期間：90 年 08 月 01 日至 91 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 一 年 八 月 三 十 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

應用全域光學量測含孔洞及非均厚平板的振動特性

Investigation of the Vibration Characteristics for Nonuniform Plates with a Circular Hole by a Whole Field Optical Method

計畫編號：NSC90-2212-E-002-230

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、林儒禮、林育志

一、中文摘要

本計畫利用具備全域量測特性的振幅變動電子斑點干涉術 (Amplitude-fluctuation electronic speckle pattern interferometry, AF-ESPI) 探討含圓孔缺陷及非均厚平板的振動特性，藉由 AF-ESPI 這項實驗技術可同時獲得試片平板共振頻率及共振模態等振動訊息，由所得之實驗資料可瞭解平板缺陷對其振動特性所造成之影響，實驗所得之資料最後則與有限元素計算所得之數值解進行相互比較及驗證。

二、英文摘要

This study utilizes a whole-field AF-ESPI technique to measure the resonant frequencies and mode shapes of the nonuniform vibrating plate and the vibrating plate with a circular hole. The AF-ESPI technique is based on the measurement of displacement and is a whole field measurement technique. In AF-ESPI system, both the resonant frequencies and mode shapes of the vibrating plates can be obtained. The effect of defects on the vibration characteristics of these plates can be evaluated in this study. In addition to this experimental method, a commercially available finite element analysis software is used to provide the numerical simulation for comparison with the experimental results.

三、緣由與目的

平板的振動研究已有百年歷史，無論

在解析或數值方法上皆有不錯的結果呈現。然而在實驗成果的呈現上則相對較為缺乏，特別對其全域分佈的共振模態很難有完整呈現。近來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，因此以雷射為基礎的光學干涉方法如全像干涉術(holographic interferometry)、剪切干涉術(shearography)、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。特別是電子斑點干涉術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、全域與非接觸式的光學量測方法，因此本計畫利用其獨特特性及優點，分別探討兩大類的平板振動，其中第一類是針對含圓孔缺陷的平板，另一類則是探討非均厚平板之振動問題。

首先要探討的振動問題是含對稱圓孔缺陷之平板，我們利用 AF-ESPI 技術能同時量測振頻及振型之優點，對含圓孔缺陷平板之振動行為及缺陷造成之影響，分別由實驗及數值計算進行深入之分析。希望藉此瞭解圓孔缺陷對平板之影響，進而得知缺陷影響振動行為的形式及因素。

另外一個項目是非均厚平板的振動分

析，在真實情況中，若一由數元件組合成的複雜系統產生共振，要由系統之共振狀態推知各元件振形及頻率上的變化通常是較為困難且較為耗時，本計畫利用了非均厚的平板來模擬整個系統，主要是藉由平板上不同厚度的部分來模擬系統中不同的構件，觀察振形在不同厚度條件上所產生的變化。本計畫的相關國內外資料請參考文獻[1]-[13]。

四、結果與討論

(1)含圓孔缺陷平板

在某些對於重量有特別要求的機構或者基於其他實用性需求的平板構件中，常常可以看到在平板中央挖一圓孔的處理，對於這類型結構，在本計畫中以單邊固定(FCFF)的長方平板為例來進行相關振動特性的分析，分別以數值及實驗分析方式來探討這個問題。

試片規格

本計畫中含圓孔缺陷的平板材質是以鋁合金製成，其材料常數為 $E=70.9\text{GPa}$ ， $\nu=0.333$ ， $\rho=2700\text{kg/m}^3$ ，其相關幾何尺寸如下圖 1 所示。

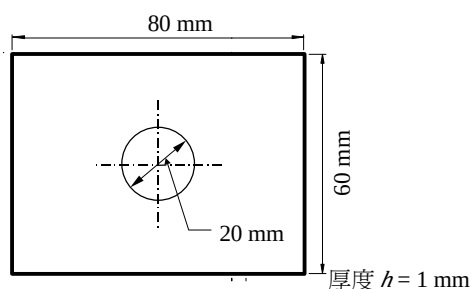


圖 1 FCFF 中央圓缺陷平板之幾何示意圖

有限元素分析

本計畫中採用 ABAQUS V5.8 有限元素軟體，並以 S8R5 之平面殼元素(shell element)進行平板網格模擬，此分析共使用了 2240 個元素。對於圓孔在中央的試片，在網格的建立上採用的是環繞式的網格建立方

式，如圖 2 所示。

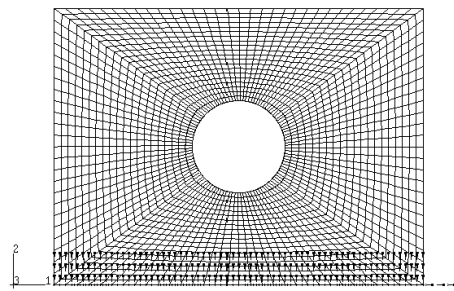


圖 2 FCFF 中央圓缺陷數值模擬之網格模型

具圓孔缺陷平板振動特性之結果討論

圖 3 列出了含圓孔缺陷平板的共振模態，其中第二欄內係由 AF-ESPI 所測得，第三欄則為 FEM 計算而得，表 1 則為實驗及數值計算之共振頻率比較。由圖 3 中可看出實驗所得之整體振型和數值模擬分析的振型極為相似，振型的表現上由於圓孔缺陷而顯得較不對稱，造成這個現象可能的原因在於中央的圓孔缺陷會影響到壓電陶瓷致動器黏貼位置，同時缺陷本身也會影響到節線的分佈，因此在驅動點的選擇上較不容易找到一適合之位置，故僅能取較適合的位置做驅動，使圖形盡量能對稱。

比對 FCFF 圓孔缺陷平板的實驗及數值結果，可發現其共振模態順序並沒有改變，振型上有影響的部份僅存在於有節線通過的圓孔附近，觀察第六模態的振型可以發現原本應為直線型態之節線在有圓孔缺陷的平板上會朝圓孔呈現輻射狀的分佈，其原因乃因節線的兩邊為一正一負之相位，故在圓孔的部份會產生一轉折，原本有材料時其能維持兩邊的力平衡，但現在為一圓孔，故應力的分配會讓圓孔周圍的情況呈現輻射狀的位移等高線。除了以上在圓孔周圍的差異外，整體而言，由實驗及數值結果可發現單邊固定平板中央的

圓孔缺陷並不會對振型產生太大影響。

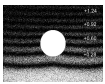
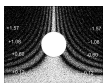
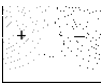
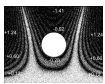
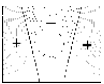
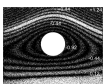
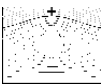
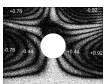
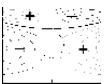
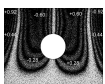
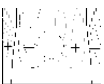
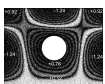
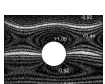
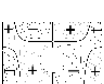
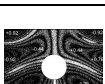
Mode	AF-ESPI	FEM
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

圖 3 FCFF 中央圓孔缺陷平板之實驗與數值分析結果

Mode	AF-ESPI	FEM	Error(%)
1	208.0	232.7	-10.60
2	417.5	447.4	-6.69
3	1049.0	1108.8	-5.39
4	1377.0	1486.6	-7.37
5	1676.0	1817.7	-7.80
6	2449.0	2509.7	-2.42
7	2804.0	2895.6	-3.16
8	3670.0	3948.0	-7.04

9	3950.0	4152.5	-4.88
10	4213.0	4482.4	-6.01

表 1 FCFF 中央圓孔缺陷平板之共振頻率

(2)非均厚平板

在本計畫中第二部分將對非均厚平板的振動特性進行深入探討，在邊界邊界上仍然採用單邊固定（FCFF）的方式，圖 4 為試片幾何外型的規格。平板材料在這部分則是採用鋼板，鋼板之密度較鋁板大，因此相對應之激振力需求較高，因此須較大的驅動電壓方能使平板達到共振。非均厚平板的加工方法上則使用磨床將試片製作成階梯狀，並力求在單一厚度上達到均勻，使厚度方面的誤差減至最小。鋼板相關的材料係數為 $E=215.95 \text{ Gpa}$ ， $\nu=0.2897$ ， $\rho=7457 \text{ kg/m}^3$ 。

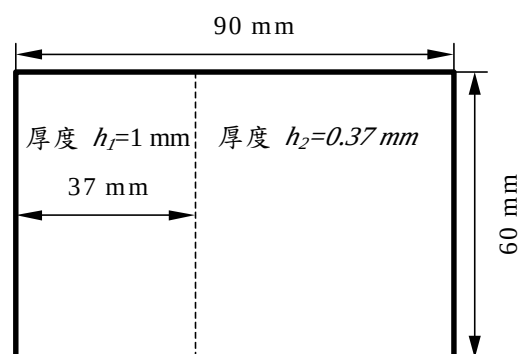


圖 4 FCFF 非均厚平板試片規格

有限元素分析

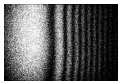
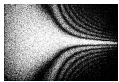
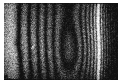
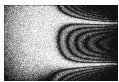
這部分的數值計算上仍採用 ABAQUS V5.8 有限元素軟體，在元素(Element)選擇方面同樣使用 S8R5 之平面薄殼元素(Shell Element)來模擬整個平板，並依厚度分界將元素設為不同群組(Element Set)，將其賦予不同的厚度，以模擬非均厚平板真實情形。

非均厚平板振動特性之結果討論

圖 5 列出了非均厚平板前十個實驗及數值模擬的共振模態圖形，表

2 則為實驗及數值計算之共振頻率比較，由圖 5 中可以輕易發現振形分佈上大多會集中於較薄的一側，這是由於薄層部份剛性較小，因此較容易受激發的緣故，特別是在第一、二、四、九模態都可以發現這種現象。其中在第三、五、六、八、十模態中，則可以發現位移量在厚薄兩側有顯著差距，在左側較厚部份的位移量均較薄層部份為小，例如在第十模態中，左側較厚部分的位移量為 $0.28\mu\text{m}$ ，右側的最大振幅卻達到 $0.84\mu\text{m}$ ，兩者的差距高達 3 倍，這種振幅差距過大的情況，對於試片本身極易造成疲勞問題進而產生破壞。此外在厚度分界處則也可以發現等位移線有不平滑的現象，如第八模態便十分明顯，中央處的等位移線在經過厚度分界時會產生不平滑的狀況，而第九模態中由數值分析的圖形中亦可發現節線在厚度分界處亦出現不平滑的情形。

較為特殊的則是第四及第九模態這兩種振形幾乎只有薄層部分在振動，較厚的部分完全沒有任何的位移量。這是由於左側是固定端，剛性較大不易驅動，因此試片依然在較「軟」的部分，亦即靠近右側自由端的部分振動。由以上結果可得知厚度改變可能會對一些特定模態產生較為明顯影響。

Mode	AF-ESPI	FEM
1		
2		
3		
4		

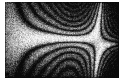
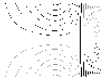
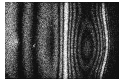
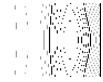
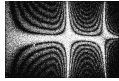
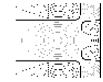
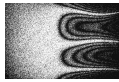
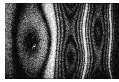
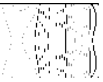
5		
6		
7		
8		
9		
10		

圖 5 FCFF 非均厚平板之實驗與數值分析結果

Mode	AF-ESPI	FEM	Error(%)
1	92	101.8	-9.63
2	240	243.4	-1.40
3	411	437.6	-6.08
4	712	729	-2.33
5	772	775.9	-0.50
6	850	962.9	-11.72
7	1254	1269.4	-1.21
8	1518	1526	-0.52
9	1737	1745.4	-0.48
10	1938	2081.6	-6.90

表 2 FCFF 非均厚平板之共振頻率

結論

電子斑點干涉術(ESPI)因為具有非接觸式、全域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。在本文中我們應用 AF-ESPI 分別對含圓孔缺陷的平板及非均厚平板進行全場的量測與討論，所得到之共振頻率和共振模態等資訊，在與有限元素

數值分析結果作比較後，皆有相當不錯的對應，經由兩者互相搭配可以將平板動態量測做一完整精確的分析。

綜合以上實驗及分析結果，大致可歸納出以下幾點結論：

- 1.採用 AF-ESPI 光學量測方式配合影像累加之後處理步驟，可以將共振模態之影像對比有效的提高，這項影像累積技術在實驗上所需時間不多而且也不需增加系統設備，對於共振模態的觀測極有助益。
- 2.圓孔缺陷在對稱的試片中，對於共振模態的影響很小。
- 3.單邊固定的平板中若加入階梯造型，對於共振模態的主要影響在於等位移線的移動及不同厚度處所產生的振幅是不一樣的。
- 4.在厚度分界處的等位移條紋往往會產生不平滑的情形。

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]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).
- [4]John J. Tracy and Gerard C. Pardoen, "Effect of Delamination on the Natural Frequencies of Composite Laminates", Journal of Composite Materials, 23(12), 1200-1215(1989).
- [5]Løkberg, O. J., "Mapping of In-plane Vibration Modes by Electronic Speckle Pattern Interferometry," Opt. Eng., 24(2), 356-359 (1985).
- [6]Stetson, K. A. and Brohinsky, W. R., "Electro-optic Holography System for Vibration Analysis and Nondestructive Testing", Optical Engineering, 26(12), 1234-1239 (1987).
- [7]Maruyama, K. and Ichinomiya, O., "Experimental Study of Free Vibration of Clamped Rectangular Plates with Straight Narrow Slits," JSME Int. J. Series III, 32(2), 187-193 (1989).
- [8]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).
- [9]Eer Nisse, E.P., "Variational Method for Electroelastic Vibration Analysis," IEEE Trans. Sonics and Ultrason., SU-14(4), 153-160 (1967).
- [10]Hibbit, Karlsson and Sorensen, Inc., ABAQUS User's Manual, version 5.6 (1995).
- [11]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]黃吉宏，應用振幅變動電子斑點干涉術探討三維壓電材料體及含裂紋板的振動問題，國立台灣大學機械工程研究所博士論文，87 年 6 月。