

應用智慧型材料結構系統於結構缺陷預測

王栢村 梁偉光

國立屏東科技大學機械工程系

摘要

本文以壓電轉換器取代傳統轉換器從事實驗模態分析，並發展一套基於結構模態參數變化之結構缺陷預測模式，以一具缺陷懸臂樑為例，首先以有限元素法探討分析有無缺陷懸臂樑之自然頻率及斜率差振型之變化特性，並以實驗模態分析進行模型驗證。最後發展一缺陷自動預測程式，在已知有無缺陷懸臂樑之自然頻率與斜率差振型的條件下，經由自然頻率變化差值百分比，以及斜率差振型之比較分析，可求得結構缺陷指標，作為判斷結構缺陷存在情形。結果顯示以智慧型材料為感測器之缺陷位置預測模式對不同缺陷寬度、深度、位置及多個缺陷時，均有良好之預測適應性，由實驗量測也證明此預測方法的可行性，所發展的以智慧型材料結構為基礎之缺陷位置預測模式將可應用到其他類型結構。

關鍵詞：壓電轉換器、模態參數、結構缺陷預測、懸臂樑、缺陷指標

一、前言

對於結構體有缺陷的存在，已經有許多文獻探討從力學分析到動態分析更發展各種非破壞檢測(NDT)方法[1]，如目視檢測法、壓力和洩漏測試法、液體滲透檢測法、X-射線照相檢測法、超音波檢測法、動態檢測法等，其中動態測試法是以激振結構或材料，也就是以實驗模態分析[2]為基礎，藉由模態參數的變化找出破壞的位置。近來由於頻譜分析儀之普及化以及振動實驗模態分析技術的成熟，以振動量測訊號作為缺陷非破壞檢測的方法也逐漸受到重視，由於動態資料擷取技術及分析能力的改善，再者缺陷之改變對結構物理性質如質量、勁度及阻尼的變化進而導致結構動態特質如自然頻率、阻尼及振型的轉移(shift)，因此振動實驗模態測試之技術提供了缺陷檢測的良好工具。

實驗模態分析在傳統方法是以衝擊錘為驅動器(actuator)施加點力於結構上將結構激振，經由加速度計為感測器(sensor)量得結構響應而由訊號分析儀(FFT analyzer)[3]快速的求得結構之頻率響應函數(Frequency Response Function, FRF)，再經由參數估算的方法(Modal parameter estimation method)，求得結構之模態參數(Modal parameter)，如自然頻率、阻尼比及振型等。由於傳統的驅動器和感測器有操作上的不便，如價格昂貴、體積大、質量重等，以上缺點甚至會影響實驗結果之正確性，而智慧型材料結構系統具有體積小、質量輕、及價格便宜等特性，所以使用智慧型材料結構系統(Intelligent Material System and Structure, IMSS)來取代傳統的驅動器和感測器[4]。

智慧型材料結構系統係指具有一體性的驅動器和感測器，並且可以智慧的啟動驅動器已達成預定設計的功能，IMSS 的研究發展以受到廣泛的重視，也已成功的應用在主動結構噪音控制(Active

Structural Acoustic Control, ASAC)[5]與主動結構振動控制(Active Structure Vibration Control, ASVC)[6]。智慧型材料結構系統主要的材料有壓電材料、形狀記憶合金、電流性與磁流性液體以及光纖。其中壓電材料係利用材料本身在高壓極化後具有良好壓電特性，當施加電場於材料，電壓與應變有良好的線性關係，同時當材料變形時也會產生電壓差，且壓電材料亦具有體積小、質量輕、及價格便宜等性質，所以壓電材料適合於作驅動器和感測器，而一般 PZT 壓電片做的較厚出力較大，可得較大的變形，所以常用來當驅動器，而 PVDF 壓電薄膜做的較薄出力較小較適用於作感測器。

具缺陷樑的理論分析，Xiuting et al.[7]的研究中推導出具缺陷懸臂樑的自然頻率及其振型的探討。而利用實驗模態分析及有限元素分析方法從事結構非破壞檢測的文獻有許多的探討，實驗模態分析方法中以振動為基礎之結構破壞及裂縫之檢測方法[8-15]，主要是量測振動訊號，並以模態分析技術為基礎，獲得結構之頻率響應函數，來判斷破壞之可能性，然而直接由頻率響應函數觀察，通常需良好的頻率解析度，因此可應用曲線嵌合方法來得到模態參數，即自然頻率、阻尼比、及模態振型等，以作為結構破壞或裂縫之預測。Surace and Rutolo[16]以 Wavelet Transform 來找出懸臂樑裂縫的位置。Meneghetti and Maggiore[17]以遭受破壞結構間之動態特性改變，來找出兩端懸吊樑裂縫位置。Wolff and Richardson[18]以振型差來判斷板裂縫的位置。Pandey et al.[19]以有限元素方法分析所得的自然頻率和振型差找出懸臂樑的裂縫位置和大小。此外，缺陷的產生通常會增加結構的阻尼效應[20-22]，由阻尼比的增加亦可預測缺陷的位置，因此也有以發展各種能量模理論角度[21]來探討具裂縫結構之分析，其中有以彎曲彈簧模擬裂

縫能量之消散，也有以裂縫間之摩擦來代表裂縫之阻尼效應[22]。

本文嘗試以壓電轉換器取代傳統轉換器，即以壓電片取代衝擊錘為驅動器，而以壓電薄膜取代加速度計為感測器，從事實驗模態分析，以得到頻率響應函數及結構模態參數，藉由自然頻率的變化及斜率差，找出懸臂樑結構缺陷的位置，最後由分析得到的結果，發展一套自動缺陷偵測的軟體，只需將所分析得到之模態參數值輸入即可偵測出缺陷的位置及大小。

二、有限元素分析

本節探討利用 ANSYS 5.0 軟體為求解工具對無缺陷懸臂樑及具缺陷懸臂樑做自由振動有限元素分析，求取樑結構的自然頻率及斜率差振型。在架構無缺陷懸臂樑及具缺陷懸臂樑有限元素模型過程中，採用殼元素 (SHELL63)，架構雙邊缺陷樑及無缺陷樑。以下分別對有限元素分析之過程及結果作說明。

2.1 問題定義與分析目標

考慮兩個鋼性材質的矩形懸臂樑，且材料性質都相同，一個為完整無缺的樑，一個具雙邊缺陷，其幾何模型分別圖 1 所示，其長、寬和厚度分別為 $L = 30\text{cm}$ 、 $b = 4\text{cm}$ 和 $t = 0.16\text{cm}$ ，雙邊缺陷樑其缺陷位置在距固定端處 $L_d = 12\text{cm}$ 及其缺口的寬度和深度均為 2cm ，即 $a = d = 2\text{cm}$ ，但其深度為 1cm 即 $d/2 = 1\text{cm}$ 。樑之材料性質如表 1 所示，而主要的分析目標如下：

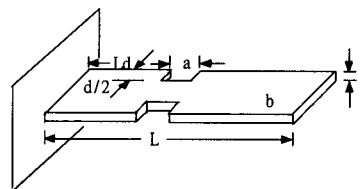
- (1)以殼元素 (SHELL63) 架構有限元素模型，並對結構做自由振動分析，求得結構之自然頻率及斜率差振型。
- (2)比較缺陷懸臂樑和無缺陷懸臂樑間之自然頻率有何改變及斜率差振型差有何差異性。

2.2 有限元素分析模型

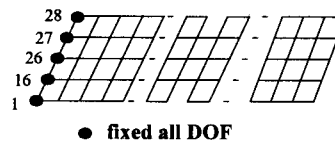
由於結構為一均勻厚度之懸臂樑，其厚度方向都一致，所以可選用 Shell63 元素來分析。Shell63 為三維殼元素，乃假設厚度方向呈純彎曲變形，可看出寬度方向之變形，尤其可得到轉矩模態 (Torsion mode)，亦可以別模擬單邊及雙邊缺陷。圖 1(b)顯示出 Shell63 元素雙邊缺陷情形之有限元素模型分割情形。分割時在寬度方向分割四等分。邊界條件只須在固定端設定位移限制為零，而不須設定任何位移或力量負載。

表 1 懸臂樑之材料性質

材料	鋼
長度 (L)	0.3m
寬度 (b)	0.04m
厚度 (h)	0.0016m
密度 (ρ)	$7870\text{kg}/\text{m}^3$
楊氏係數 (E_x)	$207 \times 10^9\text{N}/\text{m}^2$



(a) 雙邊缺陷懸臂樑之幾何模型



(b) Shell63 元素 (雙邊缺陷樑) 之有限元素模型分割情形

圖 1 雙邊缺陷樑之幾何模型及有限元素分割情形

2.3 有限元素分析結果

本節就無缺陷懸臂樑與缺陷懸臂之自然頻率的改變及斜率差振型差之變化作說明，探討結構有缺陷發生時，其自然頻率及斜率差振型變化之特性。

2.3.1 自然頻率

表 2 顯示出理論值與 Shell63 元素分析所得之自然頻率值及其誤差百分比，由表 2 之結果可以得知由分析得到之自然頻率值與理論值比較誤差很小，當懸臂樑有缺陷產生時，其自然頻率會變小，可能的原因為由於缺陷的產生使得勁度矩陣變小，所以其自然頻率就隨著變小了。

表 2 中缺陷懸臂樑和無缺陷樑比較之自然頻率值差，可以得自然頻率全部都變小，其自然頻率差值百分比都在 4% 以下，總體變化方面，以第一模態和第二模態之自然頻率值差百分比比較大，而第三模態與第四模態之自然頻率差百分比變化較小，再由模態振型的圖比較，可以看出第一模態振型和第二模態振型在缺陷附近響應較大，而第三模態振型在缺陷處接近節點位置，由上述可以歸納如下：

- (1)自然頻率變化最大的模態數，通常是缺陷位置恰好在該模態振型最大響應的位置。
- (2)自然頻率變化最小的模態數，通常是缺陷位置恰好在該模態振型節點的位置。

表 2 以 Shell 元素分析所得之自然頻率值及與理論值之相對誤差

元素 \ 模態數	1	2	3	4
理論值 (無缺陷樑)	14.405	90.272	252.766	495.319
Shell63 (無缺陷樑)	14.546	91.179	256.15	504.46
理論與 Shell63 (無缺陷樑) 誤差	-2.444%	-2.816%	0.0807%	-1.346%
Shell63 (缺陷樑)	14.053	87.730	252.97	488.65
理論與 Shell63 (有缺陷樑) 值差	-0.493	-3.449	-3.18	-15.81
理論與 Shell63 (有缺陷樑) 誤差	-3.39%	-3.78%	-1.24%	-3.24%

2.3.2 斜率差振型差方向

本文以壓電薄膜為感應器，量得懸臂樑之響應為壓電薄膜兩端點之斜率差，所以評估以 Shell63 元素分析雙邊缺陷樑所得之寬度方向旋轉角，所計算出之斜率差振型差，能否預測缺陷位置所在，圖 2 為以 Shell63 元素分析雙邊缺陷樑之斜率差振型差圖，由分析的結果可以得知，在離固定端 13cm 處，斜率差振型差有明顯的變化，而該處為缺陷產生之位置，由此可知當缺陷產生時其在缺陷附近斜率差振型會有變化，而變化的大小有一特性，即缺陷位置若在模態響應最大處，其有無缺陷樑之斜率差振型差變化最大，相反的，若缺陷位置在模態響應最小處，則其有無缺陷樑之斜率差振型差變化最小。

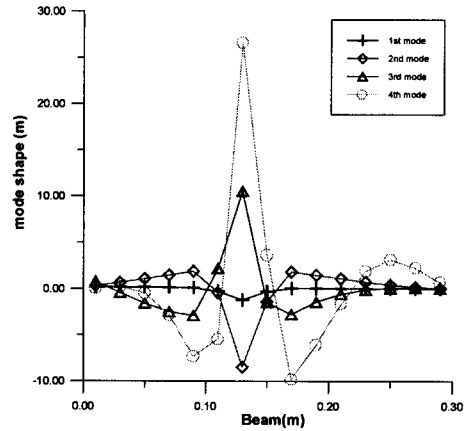


圖 2 Shell63 元素分析有無缺陷樑斜率差振型差圖

三、實驗模態分析

本節主要對無缺陷懸臂樑與缺陷懸臂樑結構從事實驗模態分析，以壓電片取代衝擊錘為驅動器，壓電薄膜取代加速度計為感測器，量測求得結構之頻率響應函數(Frequency Response Function, FRF)，最後經由參數估測方法(modal parameter estimation)，得到結構的模態參數(modal parameter)，包括自然頻率(natural frequency)、阻尼比(damping ratio)、及振型(mode shape)等。以下分別對實驗儀器架構及實驗頻驟作說明，並探討實驗模態分析之結果。

3.1 實驗儀器架構與實驗步驟

圖 3 為本文所使用之懸臂樑模型，實驗架構情形如圖 4 所示，因本實驗所使用之驅動器為壓電片，在實驗的過程中所量得的訊號往往不是一個完整週期之訊號，所以訊號經由訊號分析儀做快速傅立葉轉換後會有洩漏(Leakage)的情形發生，因此實驗過程中驅動器和感測器必須加適當的加權函數(Weighting function)，以減少訊號的洩漏。本實驗以隨機訊號激振，所以加 Hanning 加權函數，在壓電薄膜感測器亦加 Hanning 加權函數。

本實驗的實驗方式為將壓電片黏貼在第 2 點位置，壓電薄膜黏貼第 2、4、6、8、10、12、14、點位置共七點，其中第 2 點和第 4 點黏貼在懸臂樑之反面，為避開壓電片位置，實驗過程中，由訊號產生器產生 -3V 之連續隨機訊號、經電荷放大器連接壓電片對結構激振，壓電薄膜則量得每一黏貼點之訊號，經電荷放大器，將量得之訊號放大，連接至輸入模組 B，為減小 60Hz 雜訊，將一導線接地。以固定壓電驅動器，而移動壓電薄膜感應器之量測方式，可量測得到之七組頻率響應函數，經訊號分析儀做快速傅立葉轉換計算後，傳入 CADA-PC 軟體作曲線嵌合，以求取懸臂樑的模態參數。

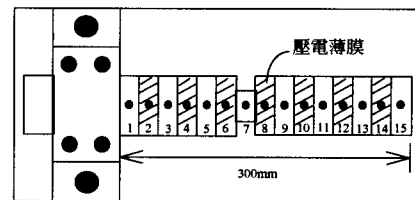


圖 3 懸臂樑模型分割情形

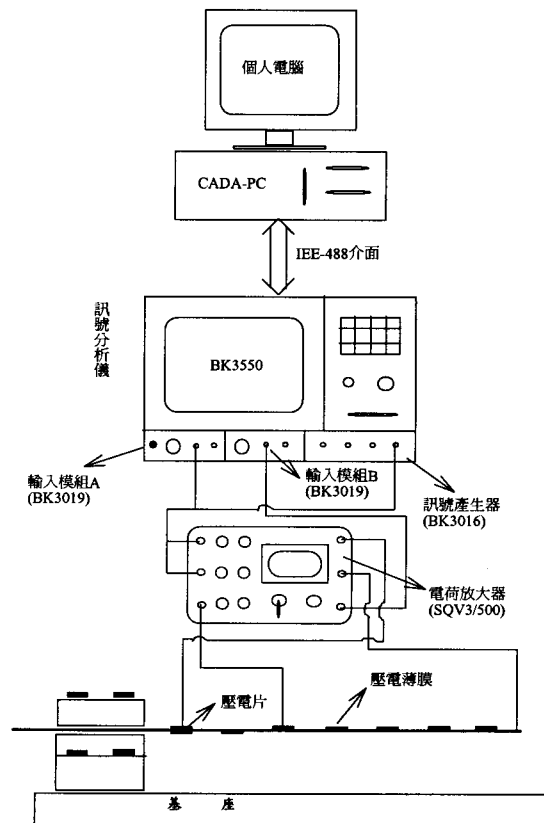


圖 4 加速度計匹配衝擊錘之實驗儀器架構圖

3.2 實驗模態分析結果

本小節討論以壓電薄膜為感測器，壓電片為驅動器實驗所得之結果做比較及討論，以下分別就自然頻率之比較、及振型之比較等作討論。

3.2.1 自然頻率之比較

表 3 為理論之無缺陷樑自然頻率、Shell63 元素分析雙邊缺陷樑之自然頻率、及實驗所得壓電薄膜匹配壓電片所得之自然頻率值做比較，由表 3(a)得知，實驗所得之無缺陷樑之自然頻率和理論值比較，其誤差均在 1%以下，表示結構或實驗沒有問題，由表 3(b)得知，實驗所得之缺陷樑之自然頻率和有限元素分析值之比較，其誤差亦均在 1%以下，最後比較實驗之有無缺陷樑之自然頻率值，由表 3(c)可知，當懸臂樑有缺陷產生時，其自然頻率均變小，原因為結構勁度矩陣變小，所以自然頻率隨之變小，由第二節有限元素分析之探討，當自然頻率變化最大的模態數，其模態振型最大響應處為缺陷可能之位置，當自然頻率變化最小的模態數，其模態振型之節點為缺陷可能之位置，而實驗有無缺陷之自然頻率變化百分比，在不考慮第一個自然頻率下，原因為實驗之振型在第一個模態均不好，以第二個自然頻率變化最大，第三個自然頻率變化最小，而第二個模態振型最大響應處約在離固定端 0.137cm 處，此點剛好為缺陷之位置。且第三個模態振型之節點位置，也有在缺陷位置附近。所以由以上之結果更能證明有限元素分析所推論之自然頻率變化特性對缺陷位置之影響。

3.2.2 振型之比較

圖 5 為無缺陷與有缺陷樑之模態振型差之圖，由圖可以得知，當懸臂樑有缺陷的產生時，其振型會變化，尤其在缺陷處，在第二節已有討論，當缺陷產生時，斜率差振型差之變化特性，所以在此就不詳加討論，而缺陷之預測，留待至下節討論。

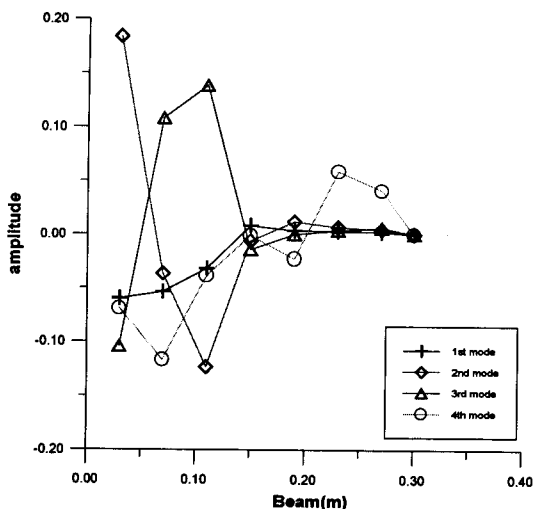


圖 5 實驗有缺陷與無缺陷樑振型差圖

四、預測方法與結果

本節綜合第二節及第三節所探討預測缺陷之方法，撰寫自動缺陷預測程式，找出缺陷發生之位置，綜合前兩節的探討，可以得到

表 3 實驗所得無缺陷樑之自然頻率值和理論無缺陷樑值及有限元素分析雙邊缺陷樑值之比較

(a) 理論無缺陷樑與實驗無缺陷樑之比較

模態數	理論值	實驗值	誤差值	誤差百分比
1	14.405	14.466	0.061	0.42%
2	90.272	90.017	-0.255	-0.28%
3	252.766	252.553	-0.213	-0.084%
4	495.319	494.633	-0.686	-0.13%

(b) Shell63 雙邊缺陷樑與實驗有缺陷樑之比較

模態數	Shell63 分析值	實驗值	誤差值	誤差百分比
1	14.053	14.013	-0.04	-0.28%
2	87.730	87.965	0.235	0.27%
3	252.97	251.001	-1.969	-0.78%
4	488.65	486.674	-1.976	-0.40%

(c) 實驗有無缺陷樑之比較

模態數	無缺陷樑	缺陷樑	誤差值	誤差百分比
1	14.466	14.013	-0.453	-3.13%
2	90.017	87.965	-2.052	-2.28%
3	252.553	251.001	-1.552	-0.61%
4	494.633	486.674	-7.959	-1.61%

以下幾點結論：

1. 有無缺陷結構之自然頻率變化特性

- (1) 當懸臂樑結構有缺陷之發生時，自然頻率變化最大的模態數，其對應之模態振型最大響應處附近為缺陷可能之位置。
- (2) 自然頻率變化小的模態數，其對應之模態振型的節點附近，為缺陷可能發生之位置。

2. 振型變化套特性

本文使用壓電薄膜進行量測，壓電薄膜所量得之訊號為壓電薄膜兩端點之斜率差振型，可得下述特性：

- (1) 斜率差振型差在缺陷處有極值出現
- (2) 綜合各模態之極值出現位置及次數，出現次數最多之位置，為缺陷發生之位置。

綜合上述，缺陷位置在自頻率及斜率差振型差方向之變化特性，利用 Fortran 程式語言撰寫自動缺陷預測軟體，只需將有限元素分析或實驗模態分析所得之有無缺陷自然頻率值及斜率差振型值代入程式，即可判斷出缺陷之位置。缺陷預測分析流程分為自然頻率變化特性及斜率差振型差變化特性兩部份，其流程圖如圖 6 所示，圖 6(a)為自然頻率變化特性之程式架構流程圖，圖 6(b)為斜率差振型差變化特性之程式架構流程圖，以下分別說明自然頻率變化特性及斜率差振型差程式架構之流程：

1. 自然頻率變化特性之程式流程

- (1) 程式之開始輸入分析得到之有無缺陷自然頻率值。
- (2) 接著計算自然頻率值差百分比

- (3)比較自然頻率值差百分比，若自然頻率值差百分比隨模態數之增加，其自然頻率變化百分比也遞增，則固定端為缺陷位置，若自然頻率變化百分比隨模態數之增加，其自然頻率變化百分比遞減，則自由端為缺陷位置。
- (4)若非上述兩種情形，將得到之各模態自然頻率差百分比以最大值作正規化
- (5)比較正規化之值，若正規化後之值大於 0.9，則定義為自然頻率變化大，若正規化後之值小於 0.3，則定義為自然頻率變化小。
- (6)找出自然頻率變化大之模態數及其相對應之模態振型最大響應位置，與自然頻率變化最小之模態數及相對應之模態振型節點位置。
- (7)統計所有可能缺陷位置之次數
- (8)將得到之次數及對應之位置輸出，而輸出這幾點之位置，即為缺陷可能發生之位置。

2.斜率差振型差變化特性之程式流程

在執行程式之前，須先將分析得到之結果整理成斜率差振型，有限元素分析得到的為旋轉角，將此數據代入內插法之程式，找出對應實驗分割 15 點之位置，計算此 15 點之旋轉角，進而得到斜率差振型，而實驗模態分析部份，由於以壓電薄膜得之響應經訊號分析儀做快速傅立葉轉換後，做曲線嵌合之工作，即可得到模態參數，包括自然頻率、阻尼比、及振型。

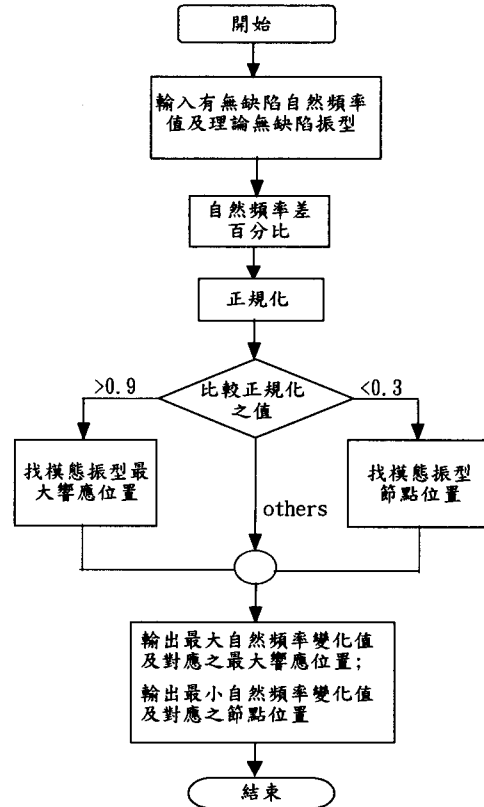
- (1)程式之開始，將分析處理後之有無缺陷斜率差振型值輸入程式。
- (2)第一步驟為將有缺陷得到之斜率差振型減無缺陷得到之斜率差振型，即可得到斜率差振型差。
- (3)接著判斷極大值及極小值。
- (4)統計極值出現之次數及位置
- (5)將極值出現位置及其次數輸出，而極值出現最多次之位置，即為缺陷可能之位置。

最後將自然頻率變化特性所找出之缺陷可能發生之位置，和以斜率差振型差改變特性得到之缺陷可能發生之位置，加以整合及統計，則可以找出真正缺陷發生之位置。

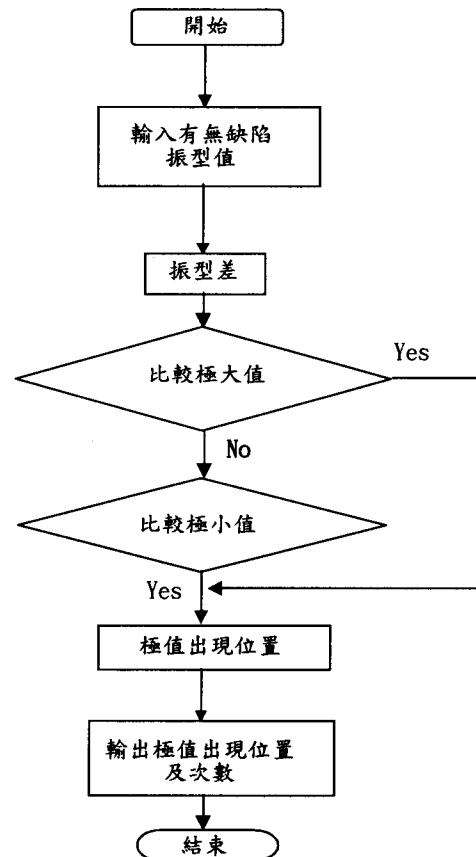
由上述之結果，可以歸納下式

$$D = D_1 + D_2$$

其中 D_1 為以斜率差振型差預測缺陷之指標； D_2 為以自然頻率變化特性預測之缺陷位置指標； D 則稱之為缺陷指標，而缺陷指標最大處之對應位置即為缺陷發生之位置。



(a) 自然頻率變化特性之程式架構流程圖



(b) 位移振型差變化特性之程式架構流程圖

圖 6 程式架構流程圖

五、缺陷預測結果

為證明所發展之自動缺陷預測模式的適用性及正確性，本節將分別探討：5.1 不同缺陷位置之預測、5.2 不同缺陷深度之預測、5.3 不同缺陷寬度之預測、及 5.4 當同時有兩個缺陷產生時，這四種不同情況下，自動缺陷預測模式的適用性及正確性。最後將實驗所得之自然頻率值及振型值代入自動缺陷預測模式，來找出缺陷發生之位置。

5.1 不同缺陷位置之預測

本組預測之項目為缺陷寬度為 2cm，深度為 2cm 情形下，缺陷位置分別在第 4、7、10、及 13 點之位置，其分割點之位置為對應實驗所分割樑之 15 等分位置，為對應實驗模態分析分割點之結果，取前四個模態之有無缺陷自頻率值及斜率振型值代入程式執行，執行之結果如缺陷指標之統計圖如圖 7。舉缺陷位置在分割點第七點之位置說明，斜率差振型差極值出現之位置，以第一模態而言出現在第 7 點及第 9 點，所以在位置 7 及 9 處標記，第二模態極值出現在第 5、7、9 三點，同樣的也在對應之模態數及位置處標記，以此類推，第三模態及第四模態同樣的找出極值出現之位置，最後分別合計此四個模態在 15 個分割點出現次點之總合，即為指標 D_1 ，同樣地，自然頻率也以相同之方法標記，得到指標 D_2 ，將 D_1 加上 D_2 即為缺陷指標，由表可以得知，在第 7 點位置缺陷指標最大，則第 7 點為缺陷位置，實際上第 7 點也為缺陷位置。由圖 7 結果可以正確出缺陷位置，由此可以驗證此自動缺陷預測程式可以分析當缺陷寬度及深度固定下，不同缺陷位置預測之正確性。

5.2 不同缺陷深度之預測

本組預測之項目為缺陷寬度為 2cm，缺陷位置在樑分割點第 7 點（離固定端 12cm）情形下，預測當缺陷深度分別為 0.5cm、1cm、1.5cm、及 2cm 情況下，缺陷位置是否出現在第七點位置。除圖 8(a) 缺陷深度 0.5cm 外，其餘皆可找出真正缺陷位置，本組之驗證得到一個結果，當缺陷深度越深，越能找出缺陷真正位置，缺陷深度淺的樑，能找出缺陷可能之位置。所以發展之自動缺陷預測軟體，也適用於不同缺陷深度之預測。

5.3 不同缺陷寬度之預測

本組預測之項目為缺陷深度為 2cm，缺陷位置在樑分割點第 7 點（離固定端 12cm）情形下，預測當缺陷寬度分別為 0.5cm、1cm、1.5cm、及 2cm 情況下，預測缺陷位置是否出現在第七點位置。

圖 9 為程式執行得到之相關缺陷指標對應圖，由圖 9(a)、圖 9(c) 與圖 9(d) 缺陷寬度分別為 0.5cm、1cm、1.5cm、及 2cm 之缺陷指標圖，可以得知最大之缺陷指標出現在第 7 點，所以第 7 點為真正之缺陷位置，實際上也是如此，由本組之預測，可以得知，自動缺陷預測程式，不受缺陷寬度之影響，都能真正的預測出缺陷位置。

5.4 兩個缺陷同時發生之預測

本組之預測為當缺陷寬度深度均為 2cm 時，同時有兩個缺陷發生之情況下，自動缺陷預測軟體之適用性及正確性，本組之預測規劃三個不同之缺陷位置組合，分別為：

- (1) 缺陷位置在離固定端 5cm（對應樑之分割點介於第 3 點和第 4 點間），及 15cm（對應樑之分割點介於第 8 點和第 9 點間）處。
- (2) 缺陷位置在離固定端 8cm（對應樑之分割點為第 5 點），及 20cm（對應樑之分割點介於第 11 點）處。
- (3) 缺陷位置在離固定端 10cm（對應樑之分割點為第 6 點），及 21cm（對應樑之分割點介於第 11 點和 12 點間）處。

圖 10 為程式執行得到之相關缺陷指標對應圖，由本組之預測，可以得知，自動缺陷預測程式，對有兩個缺陷同時發生時，若缺陷位置能明確地在分割點位置上，也能適當的預測出缺陷位置，顯示預測方法對多個缺陷預測位置之適應性。

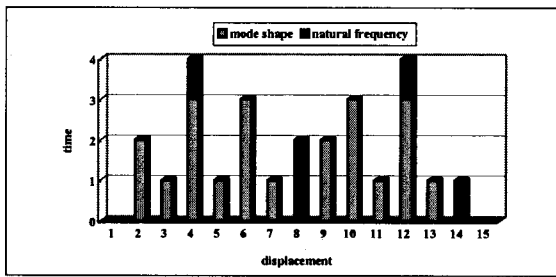
5.5 實驗分析結果之預測

本組是以壓電薄膜為感測器，壓電片為驅動器從事實驗模態分析得到之結果做缺陷之預測，由於壓電薄膜所得到的為斜率差振型，在預測時使用斜率差振型之變化特性預測，圖 11 為以壓電片匹配壓電薄膜所預測得到之缺陷指標圖表，由圖 11 可以得知，缺陷指標在第 3 點為最大值，而缺陷之位置於第 3 點及第 4 點間，所以不能真正的指出缺陷位置，只能預測出缺陷可能發生之位置，如果能將樑再細分割，自動缺陷程式將會有一定的準確性。又為了能提高預測準確度，應適當增加分割點以及所使用之模態數，在此應注意，本文採 15 個分割點，僅考慮前 4 個模態。

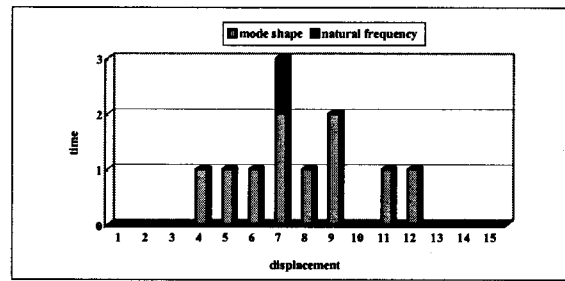
六、結論

本文主要以壓電轉換器，從事結構之非破壞檢測，以有限元素分析搭配實驗模態分析，探討樑結構有缺陷產生時，結構在自然頻率及模態振型上變化特性，最後由探討得到之特性，發展一自動缺陷預測軟體，預測缺陷發生之位置。

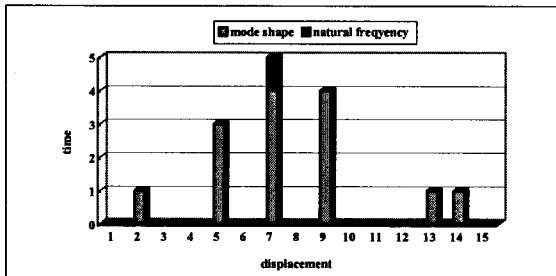
本文在有限元素分析部份以不同缺陷位置、不同缺陷寬度、不同缺陷深度、及兩個缺陷同時發生情形下，成功地驗證自動缺陷預測軟體之適用性及準確性，在實驗模態分析方面，以壓電轉換器從事實驗，成功地驗證以薄膜為感測器壓電片為驅動器，得到之自然頻率值及斜率差振型，將之代入自動缺陷預測軟體，能成功地找出缺陷可能發生位置，本文以懸臂樑結構進行實驗，發展基於實驗模態分析之破壞預測方法，未來還可應用到其他形式結構之破壞診斷。



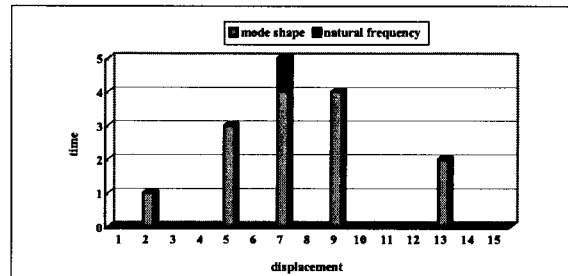
(a) 缺陷位置在第 4 點



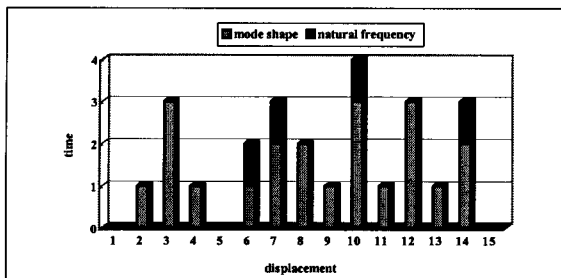
(b) 缺陷深度 1cm



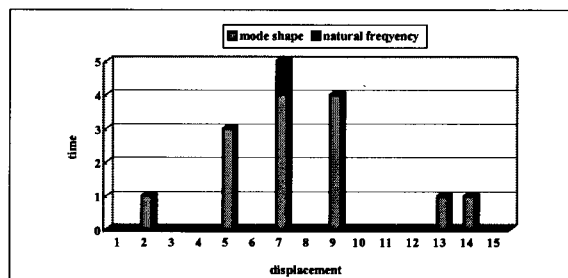
(b) 缺陷位置在第 7 點



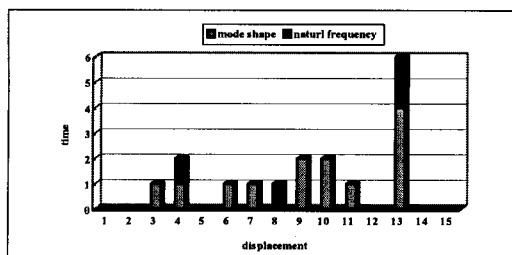
(c) 缺陷深度 1.5cm



(c) 缺陷位置在第 10 點

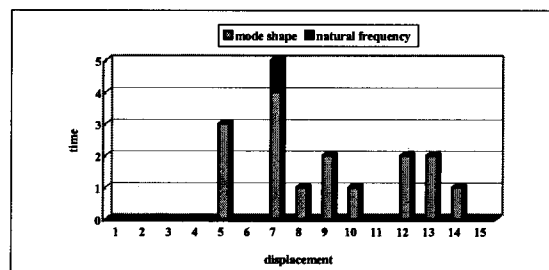


(d) 缺陷深度 2cm



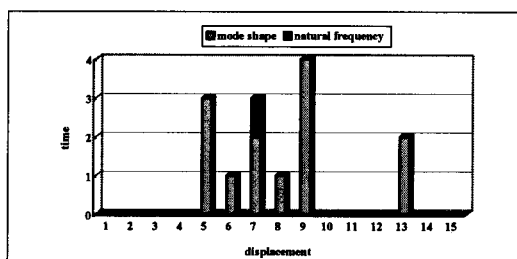
(d) 缺陷位置在第 13 點

圖 8 不同缺陷深度預測結果(續)

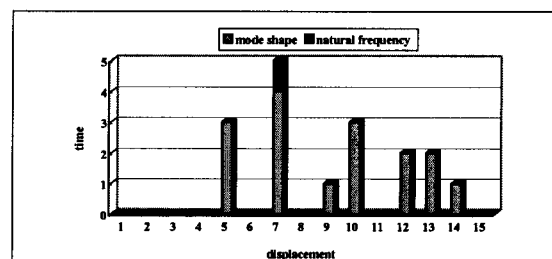


(a) 缺陷寬度 0.5cm

圖 7 不同缺陷位置預測結果



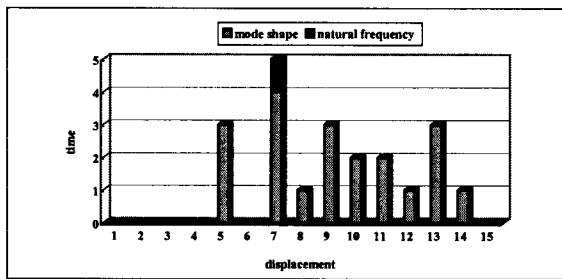
(a) 缺陷深度 0.5cm



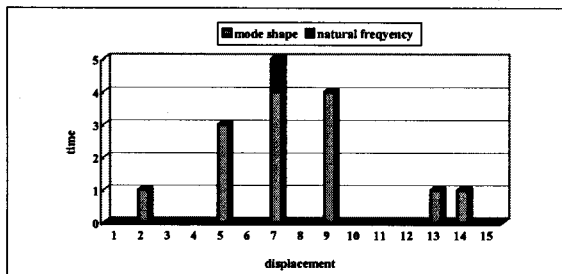
(b) 缺陷寬度 1cm

圖 8 不同缺陷深度預測結果

圖 9 不同缺陷寬度預測結果

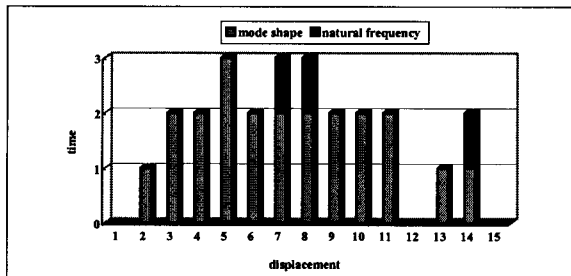


(c) 缺陷寬度 1.5cm

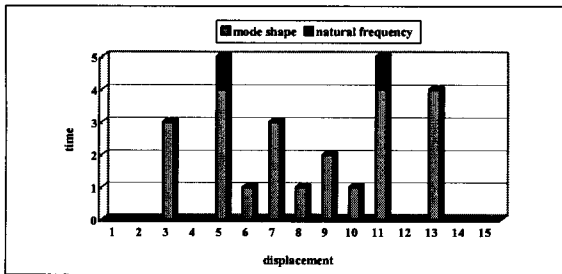


(d) 缺陷寬度 2cm

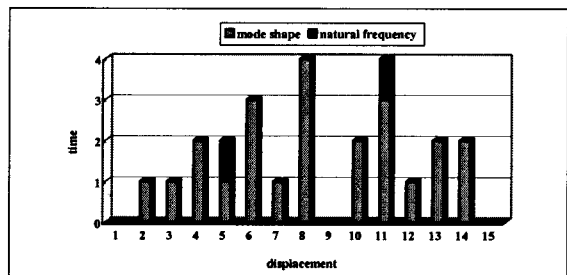
圖9 不同缺陷寬度預測結果(續)



(a) 缺陷位置在第 3,4 點間及第 8,9 點間



(b) 缺陷位置在第 5 點間及第 11 點間



(c) 缺陷位置在第 6 點間及第 11,12 點間

圖10 兩個缺陷同時發生之預測結果

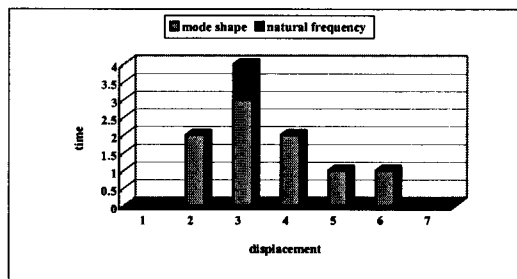


圖11 壓電薄膜匹配壓電片之預測結果

誌謝

本計劃承蒙行政院國科會 NSC89-2212-E-020-001 補助

參考文獻

- 侯國琛, 1992, *非破壞性檢測法*, 財團法人徐氏基金會, 台北。
- Ewins, D. J., 1986, *Modal Testing : Theory and Practics*, Research Studies Press Ltd., England.
- Bruel & Kjaer Inc., 1992, *Multichannel Analysis System Type 3550 Documentation*.
- Wang, B. T., and C. C. Wang, 1997, "Feasibility Analysis of Using Piezoceramic Transducers for Cantilever Beam Modal Testing," *Smart Material Structures*, Vol. 6, pp. 1-11.
- Clark, R. L., R. A. Burdisso, and C. R. Fuller, 1993, "Desige Approaches for Shaping Polyvinylidene Fluoride Sensors in Active Structural Acoustic Control," *Journal of Intelligent Material System and Structures*, Vol. 4, pp. 354-365.
- Chen, C. Q., and Y. P. Shen, 1997, "Optimal Control of Active Structures with Piezoelectric Modal Sensors and Actuators," *Smart Material Structure*, Vol. 6, pp. 403-409.
- Xiuting, C. Man, R. D. Finch, and B. H. Jansen, 1997, "Vibration Monitoring of Slotted Beams Using an Analytical Model," *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 102, pp. 382-390.
- Balis Crema, L., and A. Castellani, 1985, "Modal Tests on Composite Material Structures Application in Damage Detection," *Proceedings of the 3rd International Modal Analysis Conference*, pp. 708-713.
- Ko, J. M., C. W. Wong, and H. F. Lam, 1994, "Damage Detection in Steel Framed Structures by Vibration Measurement Approach," *Proceedings of the 12th International Modal Analysis Conference*, pp. 280-286.
- Richardson, M. H., and M. A. Mannan, 1991, "Determination of Modal Sensitivity Functions for Location of Structural Faults," *Proceedings of the 9th International Modal Analysis Conference*, pp. 670-676.
- Richardson, M. H., and M. A. Mannan, 1992, "Remote Detection and Location of Structural Faults Using Modal Parameters," *Proceedings of the 10th International Modal Analysis Conference*, pp. 502-507.
- Richardson, M. H., and M. A. Mannan, 1993, "Correlating Minute Structural Failults with Changes in Local Parameters," *Proceedings of the 11th International Modal Analysis Conference*, pp. 893-898.
- Perchard, D. R., and A. S. J. Swamidias, 1994, "Crack Detection in Slemder Cantilever Plate Using Modal Analysis," *Proceedings of the 12th International Modal Analysis Conference*, pp. 1769-1777.
- Mannan, M. A., and M. H. Richardson, 1990, "Detection and Location of Structural Cracks Using FRF Measurements," *Proceedings of the 8th International Modal Analysis Conference*, pp.

652-657.

15. Adams, R. D., and P. Cawley, 1979, "The Location of Defects in Structures from Measurements of Natural Frequencies," *Journal of Strain Analysis*, Vol. 14, pp. 49-57.
16. Surace, C., and R. Rutolo, 1994, "Crack Detection of a Beam Using the Wavelet Transform", *Proceedings of the 12th International Modal Analysis Conference*, pp. 1141-1147.
17. Meneghetti, U., and A. Maggiore, 1994, "Crack Detection by Sensitivity Analysis", *Proceedings of the 12th International Modal Analysis Conference*, pp. 1292-1298.
18. Wolff, T., and M. Richardson, 1989, "Fault Detection in Structure from Changes in their Modal Parameters", *Proceedings of the 7th International Modal Analysis Conference*, pp. 87-94.
19. Pandey A. K., M. Biswas, and M. M. Samman, 1991, "Damage Detection from Changes in Curvature Mode Shapes", *Journal of Sound and Vibration*. Vol. 138, No 2, pp. 321-332.
20. Rizos, P. F., N. Aspragathos, and A. D. Dimarogonas, 1990, "Identification of Crack Location and Magnitude in a Cantilever Beam From The Vibration Modes," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 138, 381-388.
21. Lee, H. P., and T. Y. Ng, 1994, "Natural Frequencies and Modes for the Flexural Vibration of a Cracked Beam," *Applied Acoustics*, Vol. 42, pp. 151-163.
22. Sanliturk, K. Y., and M. Imregun, 1991, "Theoretical Modelling of the Damping Produced by Fatigue Cracks," *Proceedings of the 9th International Modal Analysis Conference*, pp. 1370-1374.

Application of Smart Material Structural System to Structural Damage Detection

Bor-Tsuen Wang and Wei-Kuang Liang

Department of Mechanical Engineering
National Pingtung University of Science and Technology

Abstract

This paper presents the use of piezoceramic transducers in stead of conventional transducers for structural model testing. A prediction algorithm to determine the location of structural defect based on structural modal parameters is developed. A defected cantilever beam is considered. Theoretical modal analysis via finite element method is first performed to obtain the natural frequencies and slop difference mode shapes for PVDF sensors applying to cantilever beam, with and without defect. The change of modal properties can be characterized in comparison with the difference of natural frequencies or slop difference mode shapes between with and without defected beam. An automative defect prediction algorithm is developed and shown for its adoptation for different defect locations, defect sizes, and multiple defects. Experimental model testing is also conducted to validate the prediction method. The application of smart material structural system to structural damage detection is enhanced and can be extended to other structures.

keyword : piezoceramic transducer, modal parameter, structural damage detection, cantilever beam, damage index