

REINFORCED PLASTICS  
COMPOSITES

強 塑 複 材

廣 用 新 知 季 刊

2003 SEPTEMBER | vol.96

中華民國強化塑膠協進會發行



## 壓電智慧型材料結構系統之應用與發展 (一)

屏東科技大學機械工程系暨研究所  
王栢村 教授

### 摘要

本文對有關壓電智慧型材料結構系統之應用做一系統性回顧。首先介紹壓電材料結構系統之理論分析方法，其次就壓電智慧型材料結構系統提出四個應用領域，包括振動與噪音控制、智慧型結構測試、外力預測及破壞檢測，分別由文獻回顧介紹其應用理念、方法及實例探討，最後提出未來發展，供各界先進參考指正。

### 壹、前言：

壓電材料有質量輕、體積小，以及具有良好的壓電特性，其中壓電片(PZT)及壓電薄膜(PVDF)適合當作驅動器或感應器。如圖1為典型壓電材料示意圖，正壓電效應(Direct Piezoelectric Effect)：材料受壓力場作用，會產生電場響應可作感應器。逆壓電效應(Converse

Piezoelectric Effect)：材料受電場作用，會產生壓電應變之效應可作驅動器。

有關壓電片的理論模式，已有許多學者提出，Crawley and de Luis [1]最早完整地提出壓電片與結構耦合的靜態模式，包括理想黏在結構表面及嵌合於結構中兩種不同組合的驅動器；並以此推導與懸臂樑耦合之動態模式，最後以實驗證明理論模式。Wang and Rogers [2]應用古典複合層板理論(Classical Laminate Plate Theory)於壓電驅動器，得到驅動器的等效力及彎矩。Wang and Rogers [3]並利用其結果發展層板的應變能模式(Strain Energy Model)，導出純

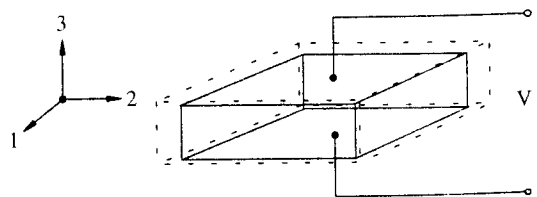


圖1 壓電效應示意圖



彎曲變形壓電片耦合於複合層板及樑的驅動模式。關於壓電薄膜之理論模式亦有許多論文研究，Hubbard [4]發展出壓電薄膜的均佈參數模式(Distributed Parameter Model)，並推導動條狀壓電薄膜的驅動及感應理論，可從事一維樑的振動控制。Lee and Moon [5]發展出模態驅動器及感應器(Modal Actuator/ Sensor)理論，利用各種特定形狀之壓電薄膜，可分別求出特定的模態參數。Collins et al. [6]則提出特定形狀之壓電薄膜的設計、製造及應用。

目前壓電轉換器已經被廣泛應用於結構振動、噪音控制等領域中[7-25]。亦有研究將壓電轉換器發展於模態分析之應用，Sun et al. [26]由壓電片的 electric admittance 推導出頻率響應函數，進行樑的實驗模態分析，得到曲率振型。Wang [27]則推導出傳統轉換器與壓電轉換器四種組合，彼此頻率響應函數及振型(mode shape)的關係，其結果可應用於簡支樑的實驗模態分析。Wang [28]則提出任意驅動器及感應器

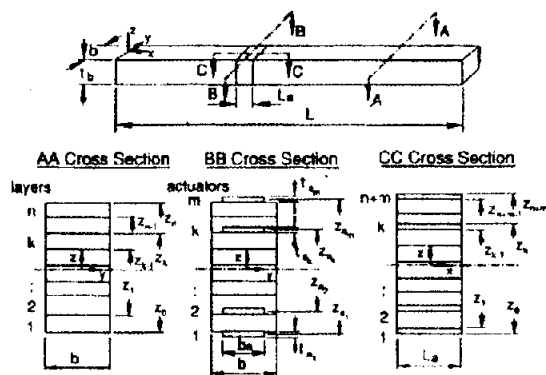


圖 2 複合材料樑具有壓電驅動器之示意圖[2]

形式於結構模態測試之理論分析，也給予應用壓電轉換器於結構測試之理論基礎。

本文旨在對壓電材料結構之相關研究作一系統性之回顧，著重在筆者近年之研究成果之整理與探討，希藉由本文之回顧能對壓電材料智慧型結構之應用有一整體發展概念，並期各界先進惠予指正。

## 貳、壓電材料結構系統之分析

圖 2 為複合材料樑具有壓電驅動器之示意圖[2]，以複合材料理論建立壓電驅動器之理論分析模型，壓電驅動器可以隱含於任意之疊層，圖 3 為單一壓電驅動器於某一疊層之動作示意圖，可產生一等效力  $P_{eq}^k$  及等效力矩  $M_{eq}^k$ 。假設壓電片黏貼於一樑之上下兩側如圖 4 所示，給予上下相差 180 度之電位差，將可形成純彎曲之驅動效應，即  $P_{eq} = 0$ ，等效力矩為作用在壓電驅動器兩端之彎曲力矩大小相等方向相反。幾種典型之壓電驅動器效應整理如表 1，包括(1)純彎曲(pure bending)，(2)純引伸(pure extension)，(3)單邊非對稱驅動(axisymmetric)，(4)中間層引伸驅動。

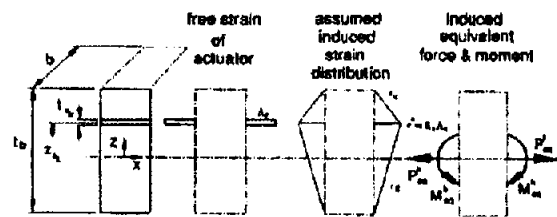


圖 3 單一壓電驅動器之動作示意圖[2]



類似一維樑的複合材料理論分析理念也可擴充應用到板結構[3]，如圖 5 為複合材料板包含壓電驅動器之數學模型，表 2 為壓電驅動幾種可能模式，包括：垂直面均佈力、線均佈力、線均佈力矩及點力作用於端點等，如以圖 6 為例做說明，如同圖 4 純彎曲驅動之壓電樑擴充到二維之壓電板純彎曲驅動模式，其等效力形式為作用於壓電驅動器四週之線均佈力矩。

王和曾[29]在應用商用有限元素軟體，以熱應變來模擬壓電應變，完全不需推導壓電元

表 1 幾種壓電驅動器安排之效應[2]

| case | strain-energy  | pin-force   |
|------|--|---|
|      | $M_{act} = \frac{l_b E_b}{b \cdot t} b \Delta$   | same<br>$\left( \psi = \frac{l_b E_b}{l_s E_s} \right)$   |
|      | $P_{act} = \frac{2l_b E_b}{b \cdot t} b \Delta$  | $P_{act} = \frac{2l_b E_b}{2 \cdot t} b \Delta$   |
|      | $P_{act} = \frac{l_b E_b}{b \cdot t} b \Delta$<br>$M_{act} = \frac{l_b E_b}{2(t \cdot \psi)} b \Delta$ | $P_{act} = \frac{l_b E_b}{t \cdot \psi} b \Delta$<br>$M_{act} = \frac{l_b E_b}{2(t \cdot \psi)} b \Delta$ |
|      | $P_{act} = \frac{l_b E_b}{t \cdot \psi} b \Delta$  | same  |

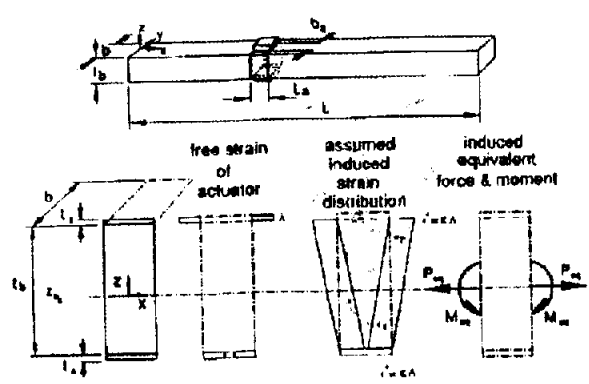


圖 4 純彎曲壓電驅動器[2]

表 2 二維壓電驅動器等效力示意圖[3]

|   |  |
|---|--|
| $R(x, y) = \{M(x - x_1) - M(x - x_2)\}[M(y - y_1) - M(y - y_2)]$                                    |  |
| $\frac{\partial R}{\partial x} = \{l(x - x_1) - l(x - x_2)\}[M(y - y_1) - M(y - y_2)]$              |  |
| $\frac{\partial R}{\partial y} = \{M(x - x_1) - M(x - x_2)\}[l(y - y_1) - l(y - y_2)]$              |  |
| $\frac{\partial^2 R}{\partial x^2} = \{2l(x - x_1) - 2l(x - x_2)\}[M(y - y_1) - M(y - y_2)]$        |  |
| $\frac{\partial^2 R}{\partial y^2} = \{M(x - x_1) - M(x - x_2)\}[2l(y - y_1) - 2l(y - y_2)]$        |  |
| $\frac{\partial^2 R}{\partial x \partial y} = \{l(x - x_1) - l(x - x_2)\}[l(y - y_1) - l(y - y_2)]$ |  |

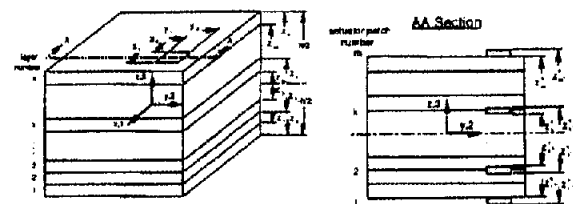


圖 5 複合材料板包含壓電驅動器之數學模型[3]

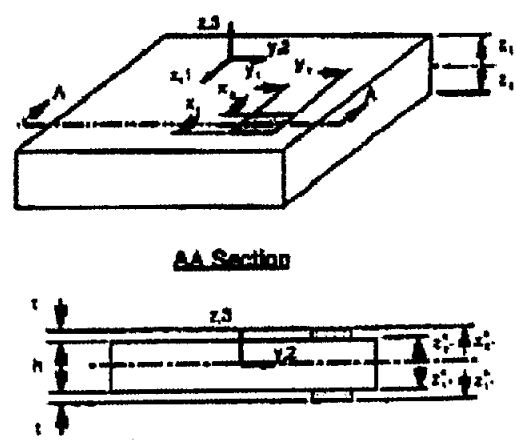


圖 6 方板純彎曲壓電驅動器[3]



素模型，即可以分析壓電材料應用於樑結構之驅動情形，所探討之簡支樑系統如圖 7，同時考慮具有黏著層情況之驅動反應情形，建立有限元素幾何模型及邊界條件之設定如圖 8，並描述所使用之分析技巧，最後數值分析以變形、正向應力、剪應力之分佈分別與 Wang 和 Rogers[2]如圖 9(a)及 Clark et al.[30]如圖 9(b)之理論結果做分析比較，同時有限元素分析也考慮具有黏著層效應之結果。比較結果顯示，有限元素分析與理論模式有相當程度之吻合。

王等人[31]採用類似之分析技巧，使用有限元素分析之熱膨脹分析來模擬樑受壓電材料作用下之變形及應力分析，各別考慮了不同邊界及不同壓電材料位置的情形，探討理論分析

之合理性。圖 10 係以樑元素建立有限元素模型，施以由理論分析求得知壓電驅動器等效力矩  $M$ ，可求得壓電樑之變形及應力；圖 11 則為以熱應變取代壓電應變之有限元素模型示意圖；圖 12(a)及(b)分別為在簡支樑及懸臂樑有相同壓電驅動器作用下之結構變形。

王等人[32]以有限元素分析(Finite Element

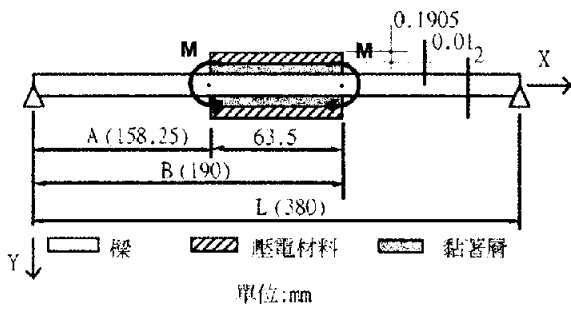


圖 7 壓電材料樑系統示意圖[29]

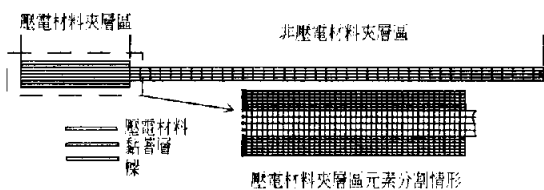
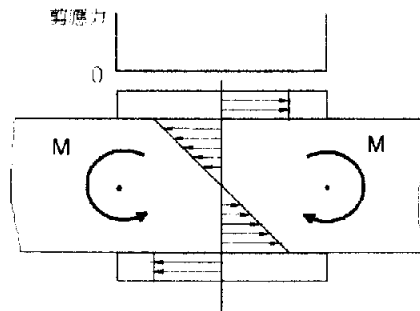
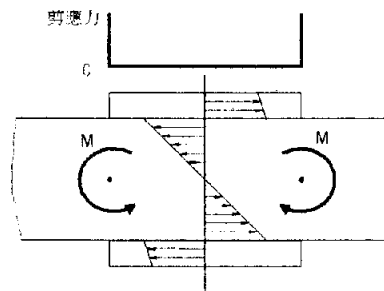


圖 8 壓電材料系統元素分割[29]



(a) Wang 和 Rogers[2]



(b) Clark et al.[30]

圖 9 理論正向應力與剪應力

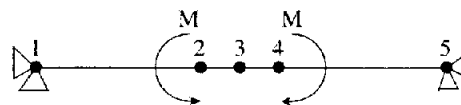


圖 10 純彎曲理論有限元素模型[31]



Analysis, FEA)應用泛用型商業軟體(ANSYS)對懸臂樑(cantilever beam)結構搭配壓電薄膜感應器做理論模型分析,模擬一陣列之方形壓電薄膜感應器黏貼在懸臂樑結構表面上,在受點力

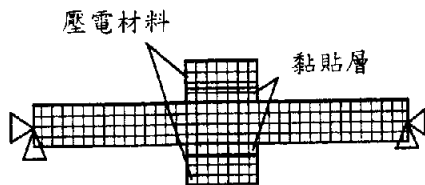
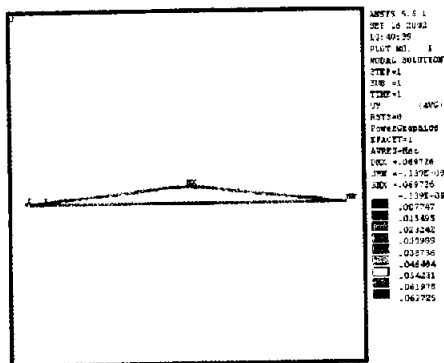
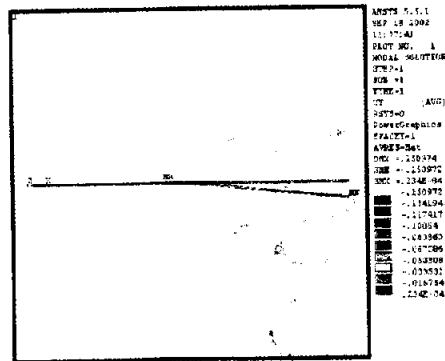


圖 11 簡支樑有限元素模型[31]



(a) 簡支樑

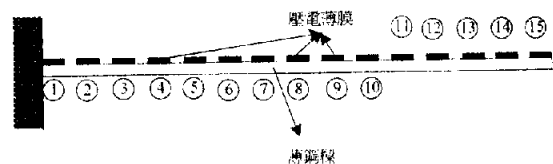


(b) 懸臂樑

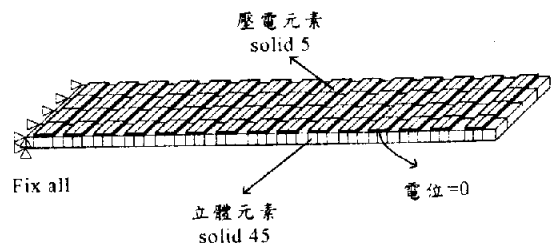
圖 12 壓電樑結構之位移圖[31]

激振下之振動模態分析,壓電材料樑模型如圖 13(a)。在有限元素分析中懸臂樑結構使用三維立體元素(Solid45),壓電薄膜使用三維耦合場立體元素(Solid5),有限元素模型示意如圖 13(b),將壓電薄膜與懸臂樑之結構幾何模型耦合在一起,首先對此結構進行模態分析(modal analysis),求得結構之自然頻率(natural frequency)與振型(mode shape),其中點力激振器與壓電片感測器之特徵函數可分別定義為位移振型及壓電薄膜兩端斜率差振型,針對懸臂樑而言,此壓電薄膜兩端之斜率差振型可證明與位移振型具有比例以及映射之關係。壓電樑結構之前四個側向彎曲模態振型如圖 14。

本節介紹壓電材料結構之理論分析方式,包括結合複合材料理論之力學分析,應用熱變



(a) 系統示意圖



(b) 有限元素模型

圖 13 壓電材料樑模型圖[32]



形模擬壓電變形之等效分析，以及直接應用壓電元素之有限元素分析等，綜合討論如下：

1. 壓電結構理論模式，由於不同結構及壓電驅動器或感應器形式差異，理論分析模型則需另行推衍，以適應不同結構特性之需求。
2. 以熱應變模擬壓電應變有其簡易性，可以在結構靜力分析下取代複雜之壓電特性分析，不過僅適於變形及應力之探討，較不適於動態分析之應用。
3. 以商用 FEA 軟體而言，已經提供了壓電元素，經適當之驗證分析，未來更可適用於不同複雜結構、邊界效應之壓電結構分析，同時不論是靜力或動態分析均可適用。

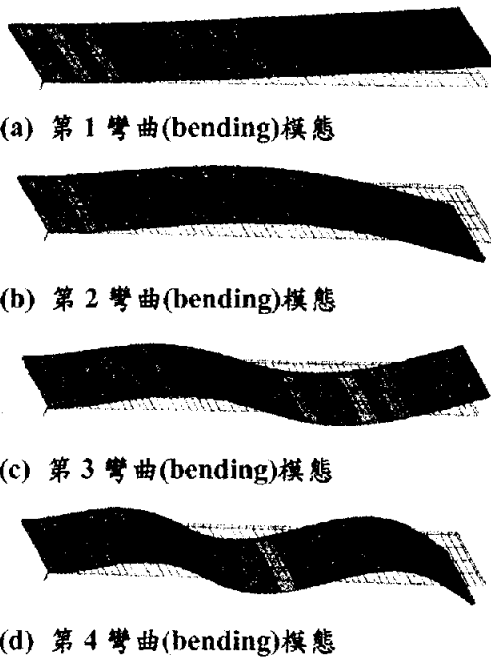


圖 14 壓電梁結構之模態振型[32]

### 叁、壓電智慧型材料結構系統之應用

本節將對壓電智慧型材料結構系統之應用分四部份分別探討。

#### (一)智慧型材料結構系統於控制之應用

典型的主動控制系統方塊圖如圖 15，包含了驅動器、感應器、控制器及結構系統等，由感應器量測得知系統輸出，經由與系統之預定輸出值做比較，再藉由控制器之計算送出控制信號給驅動器，以控制系統之輸出響應。圖 16 為智慧型材料結構控制系統理念演變，被動控制：係透過改變結構系統之形狀，尺寸，材料

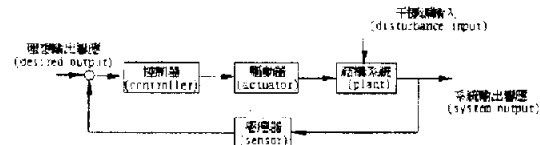


圖 15 主動控制系統方塊圖

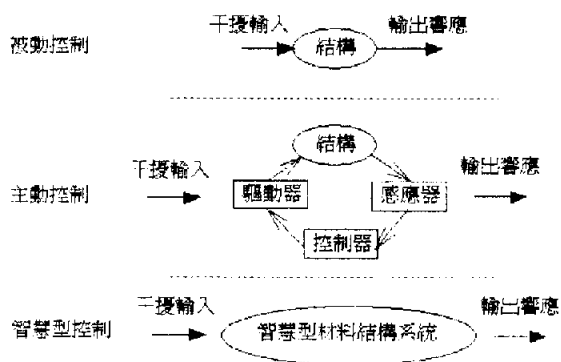


圖 16 智慧型材料結構控制系統理念



性質，藉以達到控制之目的，或者以阻尼(Damping)材料吸振，以振動吸收器(Absorber)吸收振動能量，以振動隔離器(Isolator)隔離振動，以隔音、吸音方式減少噪音等方式。主動控制：則需有如圖 15 之系統元件以期能控制結構振動、或音場響應。智慧型控制理念則將結合被動控制及主動控制元件，整合於一結構系統使達到振動或是噪音控制之需求。

Wang [17]在探討樑振動之混合主動和被動控制的可行性。考慮之系統如圖 17，乃是一簡

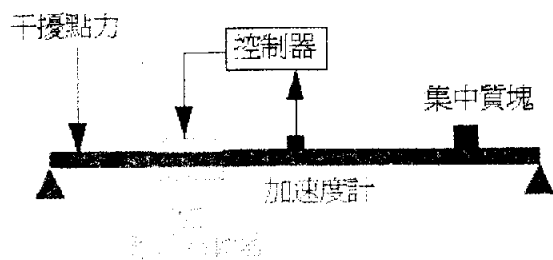


圖 17 簡支樑之結構振動混合主動與被動控制[17]

Displacement Distribution of the Beam for Different Number of Accelerometers,  $f=10\text{Hz}$

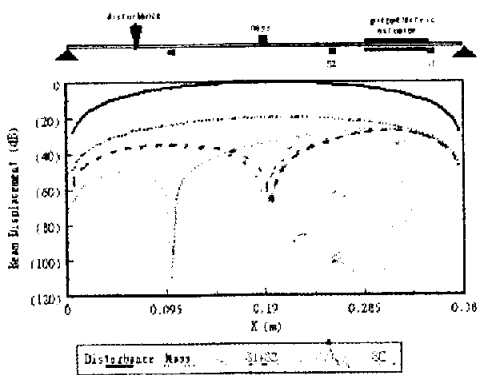


圖 18 不同感應器數目於結構振動混合主動與被動控制之比較[17]

支樑受協振點力之干擾激振，利用簡潔的均佈驅動器，如壓電驅動器，為主動控制源，來減小樑的橫向振動，並採用最小平方前饋控制方式，同時，也加上被動控制元件之一的阻塊適當地置於樑上，因而藉著改變樑的物理性質來減小樑之橫向振動。利用線性平方法求小值理論，可計算最佳的控制電壓，以供給壓電驅動器，使能得到最小的成本函數，此成本函數乃是由一串加速度感應器測量而得的加速度最小平方和或為理想之均佈加速度感應器所測得之最小平方和。圖 18 為不同感應器數目振動控制效果之比較，本研究討論了主動壓電驅動器控制源以及被動控制元件阻塊在樑之振動控制效果，結果顯示樑之振動在混合主動與被動控制是可行的。本研究也提供了智慧型材料結構系統的設計原則。

Wang [20]進一步導入壓電薄膜感應器於智慧型材料結構系統之主動振動控制，所考慮之系統如圖 19，並比較壓電薄膜與傳統加速度計兩者感應器控制效果，圖 20 為不同壓電薄膜感應器位置於結構振動控制之比較。

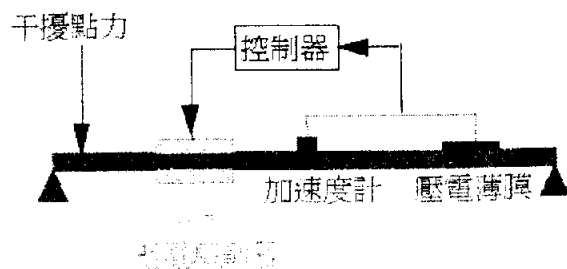


圖 19 加速度計與壓電薄膜感應器之比較[20]





為控制驅動器，又以壓電薄膜作為結構型誤差感應器。架構以幅射聲能為基礎之目標函數，並定義壓電驅動器及感應器位置為設計參數之最佳化問題，配合線性平方最佳控制理論計算驅動器之控制電壓，以遺傳學演算法求得片狀壓電驅動器及感應器之最佳位置，結果顯示最佳化之壓電驅動器及感應器比任意選擇者，有較佳之聲音幅射控制，特別在非共振激振時，更可有效減少散溢(spill over)現象。圖 24 為不同設計流程之壓電驅動器與壓電薄膜感測器最佳化位置，圖 25 為最佳化之樑結構聲音幅射指向圖比較，可看出不論共振或非共振激振狀

Optimal Locations of PZT Actuators and PVDF Sensors

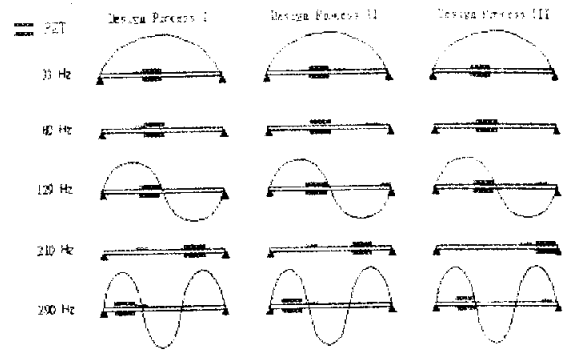


圖 24 壓電驅動器與壓電薄膜感測器位置最佳化[24]

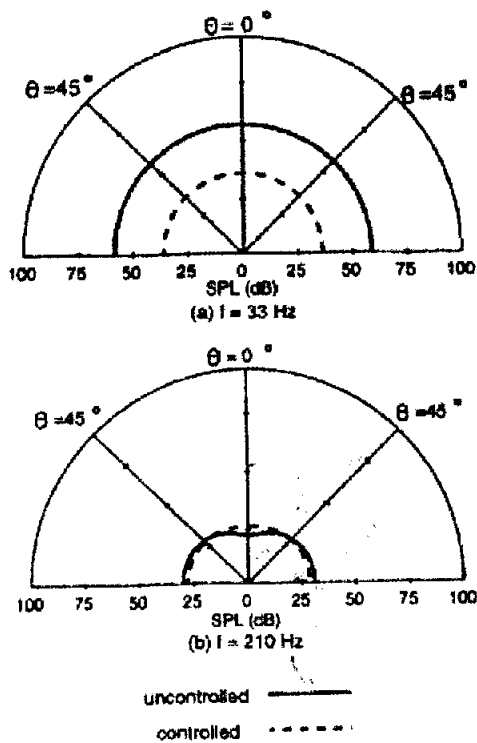


圖 23 樑結構之聲音輻射指向圖[23]

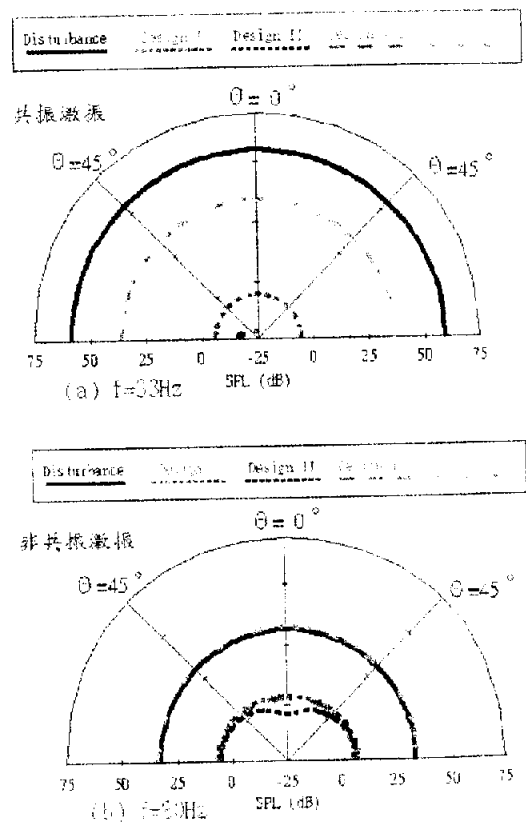


圖 25 最佳化之樑結構聲音輻射指向圖比較[24]



態，最佳化之壓電驅動器與壓電薄膜組合均有較佳之聲音輻射控制效果。

Wang [25]也探討壓電驅動器與麥克風感測器於結構噪音控制之最佳化位置如圖 26。圖 27 為不同數目之麥克風於最佳化安置後，聲音輻射控制效果之比較，大體上麥克風愈多控制效果愈好。

Wang [33]進一步發展以一陣列之加速度計或壓電薄膜作波數感測，結構系統如圖 28，考慮一具無限長剛體屏障之簡支樑，受簡諧外力激振，以壓電片為驅動器，將此陣列式感測器信號取離散波數轉換以求取波數轉換函數，圖 29 為以壓電薄膜作波數感測之控制信號流程圖，並以在超音波域之任一個波數平方值定義為成本函數，再以最小平方求小值法可求得輸入壓電驅動器之控制電壓，分別以加速度計及壓電薄膜進行波數感測，並評估二者在聲音輻射控制之效果。圖 30 為以不同數目之陣列壓電薄膜作波數感測控制之樑結構聲音輻射指向圖

比較，結果顯示對應於波數方位角之聲壓及成本函數均可大幅降低，因此以離散波數轉換之波數感測可達到控制效果。本文提供以壓電材

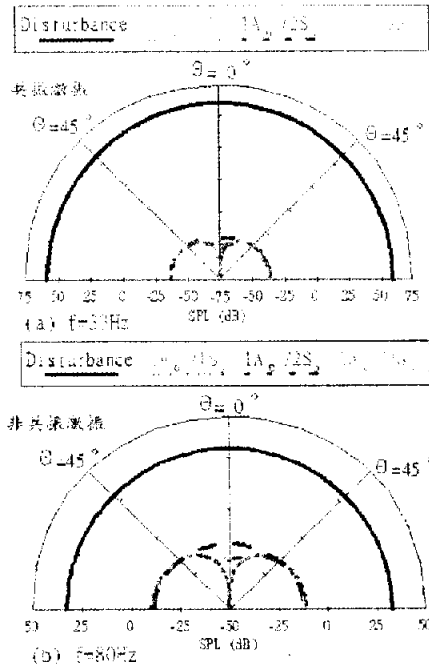


圖 27 最佳化之樑結構聲音輻射指向圖比較[25]

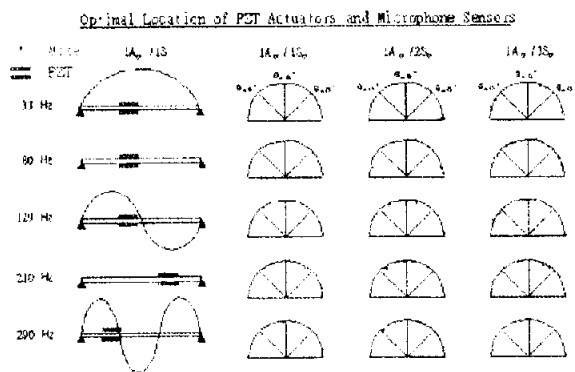


圖 26 壓電驅動器與麥克風感測器位置最佳化[25]

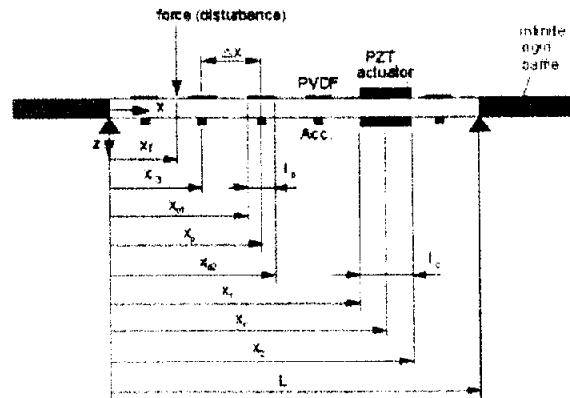
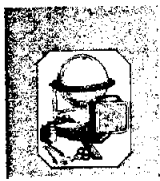


圖 28 加速度計或壓電薄膜作波數感測之噪音控制[33]



料為基礎之波數感測方式，加強了智慧型材料結構系統在主動噪音控制之感測能力。

智慧型材料結構系統係指結構系統具有感知與自我調整能力，以滿足工程需求與適應外在環境之變化，以質量輕體積小之壓電片做驅動器，另以壓電薄膜做感測器可應用於結構振動與噪音控制。結合主動與被動控制原理做結構樑之振動控制[17,20]，進而做樑結構之聲音幅射分析與控制[21,23]；比較三種實用型感測器，包括加速度計、麥克風及壓電薄膜[22]，並分別對麥克風與壓電驅動器應用於聲場控制之最佳化位置作分析[25]，以及完全以壓電材料作感測與驅動器之最佳化設計[24]，另外，發展應用壓電薄膜作波數域(wavenumber domain)感測技術之建立[33]，以及配合壓電薄膜作波數域感測時之最佳壓電驅動器位置的分析設計[34]，又針對各種可能應用選為作主動控制之成本函數做系統性之比較分析[35]，以期更有效地做結構噪音控制，及應用到其它結構系統。

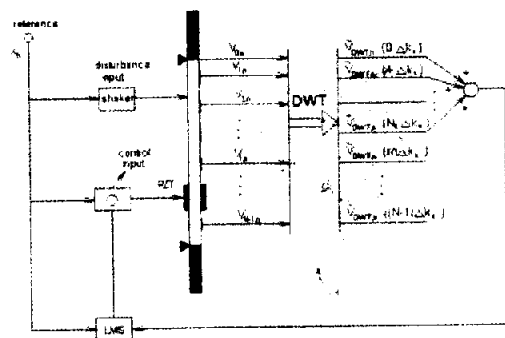


圖 29 波數感測控制信號流程圖[33]

## 二)智慧型材料結構系統應用於結構測試

結構振動問題之實驗量測分析可概分成兩大方向：

### 1.信號分析(signal analysis)：

以圖 31 典型的系統方塊圖(system block diagram)作說明，信號分析係針對所量測之輸出響應(response)以了解此輸出信號之特性，以作為其他之工程應用，典型之信號分析如振動位準(vibration level)、噪音位準(sound level)，操作變形振型(operational deflection shape, ODS)，振

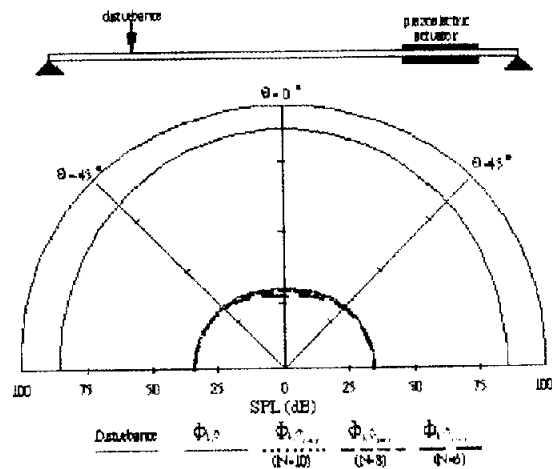


圖 30 波數感測控制之樑結構聲音輻射指向圖比較 [33]

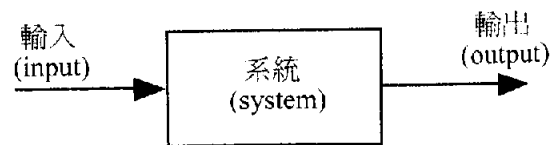


圖 31 典型之系統方塊圖

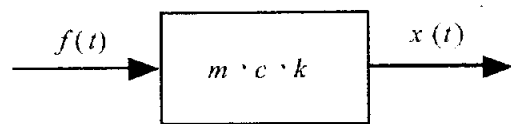


動強度(vibration intensity)，聲音強度(sound intensity)，溫度等。信號分析不在了解輸入狀態或系統之內涵，而在由適當的輸出響應來了解在未知之輸入時的系統狀態。

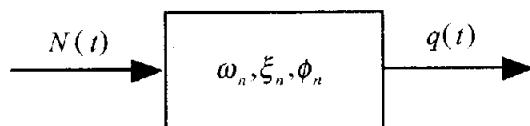
## 2.系統分析(system analysis)

系統分析之目的則在了解系統的內涵，而系統之內涵可以由三個層次說明如下：

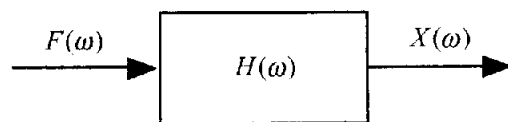
(1)物理域形式：如圖 32(a)為對應於單自由度振動系統之物理域形式系統方塊圖，其中  $m$ 、 $c$  及  $k$  為系統之內涵，分別代表質塊、阻尼及彈簧元件，也是代表系統內涵可度量之物理量，亦即質量、阻尼係數及彈簧常數。而典型之輸入物理量為外力  $f(t)$ ，而輸出物理量為系統質塊之位移響應  $x(t)$ 。若為線性系統，則此系統內涵包括質量、阻尼係數及彈簧常數，並不



(a) 物理域形式



(b) 模態域形式



(c) 頻率域形式

圖 32 對應於單自由度振動系統之系統方塊圖

會因輸入量之大小不同而有所改變。

(2)模態域形式：如圖 32(b)為對應於單自由度振動系統之模態域形式系統方塊圖，其中  $\omega_n$  為自然頻率及  $\xi_n$  為阻尼比，分別為此單自由度振動系統之模態參數，代表此系統模態域之內涵。若系統為多自由度系統或連續系統則模態振型亦為系統內涵，同樣此模態參數為系統內涵，且為系統之固有特性不會因輸入之不同而變化。任意一個結構系統皆有其固有之振動自然模態(natural modes of vibration)，每一個振動自然模態皆有其對應之模態參數(modal parameter)，模態參數包括自然頻率(natural frequency)，阻尼比(damping ratio)及模態振型(mode shape)。「結構系統」之「模態參數」就如同一種「材料」之「密度」、「楊氏係數」等材料性質，材料性質不會因製作成不同形狀、尺寸之結構而改變其密度及楊氏係數，而模態參數為一結構系統之固有性質，只要材料、形狀、尺寸、邊界條件不變，不會因受力或其他外部干擾而有所改變。

(3)頻率域形式：如圖 32(c)所示為對應於單自由度振動系統之頻率域形式系統方塊圖，其中  $H(\omega)$  為頻率響應函數，當輸入為外力形式時，輸出為系統位移時，此頻率響應函數代表輸入與輸出之關係，在控制領域通稱為轉移函數(transfer function)，在振動分析上，則通稱為頻率響應函數(frequency response function, FRF)也代表系統內涵。頻率響應函數實際上是系統物理參數或模態參數之函數，也就是在求得輸入與輸



出間之關係，可表示如下：

$$\text{系統內函} = \text{輸出} \div \text{輸入} \quad (1)$$

實驗模態分析 (Experimental Modal Analysis) 或實驗模態測試 (Experimental Modal Testing)，最主要目的在發展具體之方法步驟及實驗量測方式，以求得實際結構之數學模型，可表示成模態參數之數學模型或表示成物理參數之數學模型。具體之實驗模態分析步驟如圖 33，分成四個階段：

1. 量測階段：必須具備適當之量測儀器，以量測得輸入及輸出響應，並應有適當之量測技術以確保量測品質及其正確性。典型之輸入為外力，以力轉換器(force transducer)量測，而結構輸出響應典型之感測器(sensor)為加速度計(accelerometer)。
2. 信號處理階段：對已量得之輸入及輸出信號之時間域響應，通常需進行濾波(filtering)、取樣(sampling)、數位至類比轉換(A/D converting)、加權(weighting)、快速傅立葉

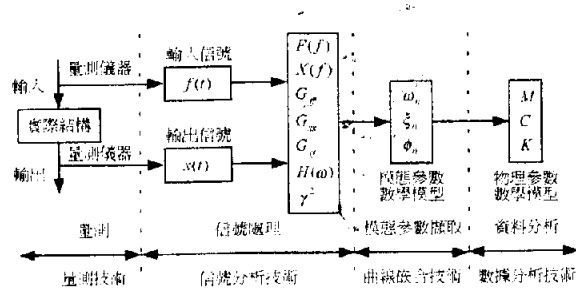


圖 33 實驗模態分析具體步驟

轉換(fast Fourier Transform, FFT)等信號處理過程，以獲得圖示之各種函數，其中最重要的是頻率響應函數，有關信號處理及分析技術本文不深入探討。

3. 模態參數擷取階段：由前階段已量測可得到系統內涵之頻率響應函數，透過各種曲線嵌合(curve fitting)技術或稱模態參數擷取方法(modal parameter extraction method)，可以求得表示系統內涵之模態參數，亦即可得到模態參數形式表示之數學模型，有關模態參數擷取方法如 Ewins [36]。
4. 資料分析階段：經適當之分析過程，可由模態參數形式之數學模型，求得物理參數形式之數學模型，再作為其他後續應用之分析。

Wang and Wang [37]以理論模擬分析提出以壓電驅動器取代傳統使用之衝擊錘或激振器，配合加速度計作感應器，對懸臂樑作實驗模態分析。文中先以理論推導加速度計與壓電驅動器間之頻率響應轉換函術，並得知加速度振型為位移振型，而壓電驅動器振型為其兩端斜率差振型，在懸臂樑之應用，二者恰為鏡像映射關係，實驗證明可成功地得到前四個模態之自然頻率與阻尼比，除了低頻的第一個振型差異較大外，其餘振型皆與理論振型相當吻合。此測試方式將可應用到結構系統偵測，甚至遙控檢測。王和王[38]、王和陳[39]分別以實驗方式驗證其可行性，圖 34 為壓電材料樑智慧型結構模態測試系統架構圖，圖 35(a)及(b)分別為壓電樑實體照片及系統示意圖。圖 36(a)及(b)分別為



實驗求得及理論分析之壓電感應器模態振型 (PVDF sensor mode shape)，此振型物理意義為壓電薄膜感應器其兩端斜率差振型，在懸臂樑之應用，恰為鏡像反射關係如圖 36 所示。

Wang and Chen [40]進一步將前述一維壓電樑結構測試理念擴充到二維板結構，圖 37 為壓電材料板智慧型結構模態測試系統架構圖，以壓電陶瓷(PZT)及壓電薄膜(PVDF)分別為驅動器

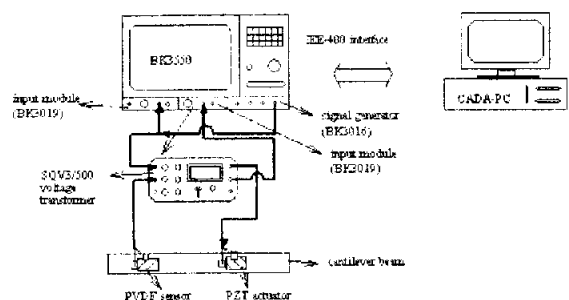
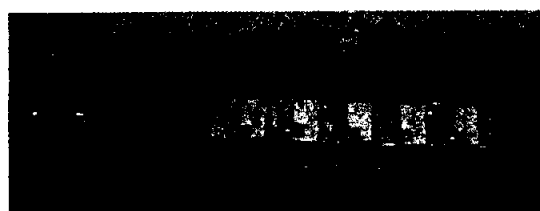
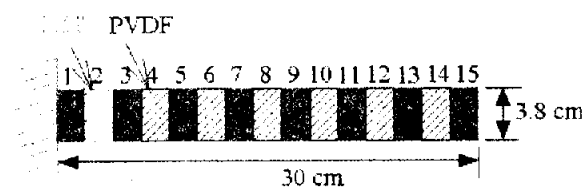


圖 34 壓電材料樑智慧型結構模態測試系統架構圖 [39]



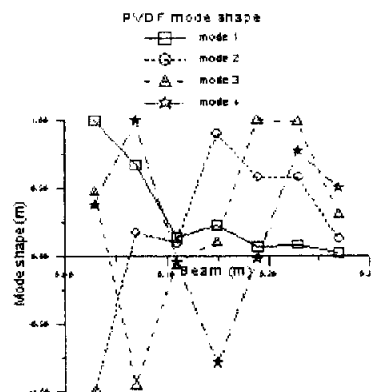
(a) 實體照片



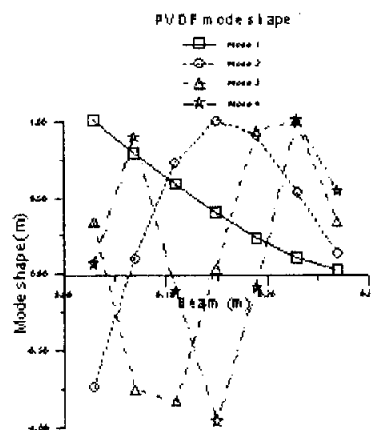
(b) 示意圖

圖 35 壓電材料樑結構[39]

及感應器，圖 38(a)及(b)分別為壓電材料板實體照片及系統示意圖。由理論分析及實驗驗證可以完全以壓電轉換器取代傳統模態測試使用之衝擊錘及加速度計，並可以合理的求得結構模態參數，圖 39 及 40 分別為理論及實驗求得之前四個模態振型，可看出相當吻合。



(a) 實驗振型



(b) 理論振型

圖 36 壓電材料樑結構模態振型[39]

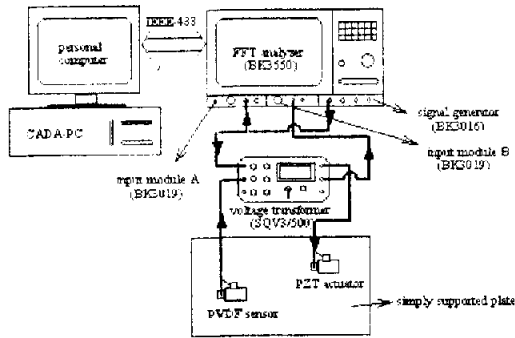
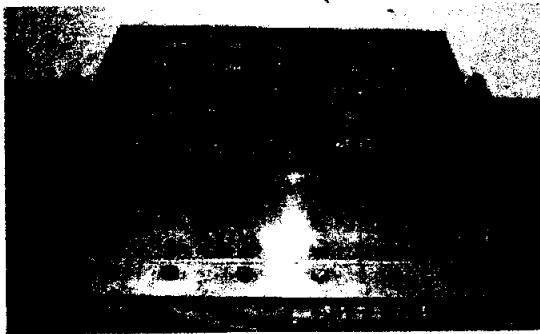
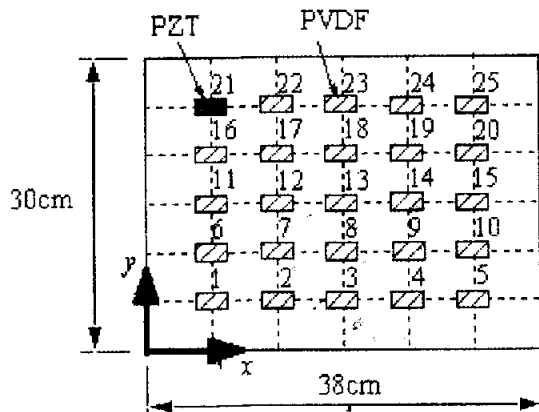


圖 37 壓電材料板智慧型結構模態測試系統架構圖 [40]



(a) 實體照片



(b) 示意圖

圖 38 壓電材料板結構[40]

Wang [28]推導任意形式之驅動器與感測器之實驗模態分析理論基礎，並成功的應用到壓電驅動器(PZT actuator)及壓電薄膜感測器(PVDF sensor)於結構模態分析與測試陣列式之壓電轉換器(transducer)。一維樑與二維板結構已完成理論與實驗驗證應用智慧型材料結構系統作模態測試，對傳統型與壓電式轉換器以簡支樑之特性響應作比較分析[27]，並提出應用於模態測試之可行性，並以懸臂樑為測試體作可行性分析探討[37]與實驗驗證[38,39]，也擴充至板結構之分析[39]，及實驗證明[40,41]。

為瞭解結構之動態特性，需透過實驗模態分析(Experimental Modal Analysis, EMA)之方法

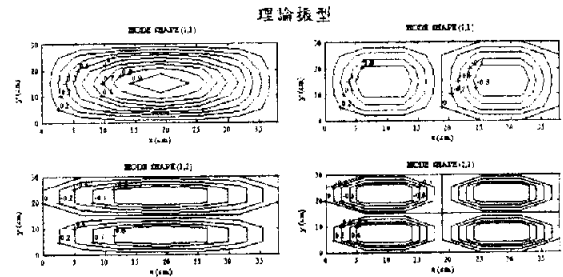


圖 39 壓電材料板結構理論模態振型[40]

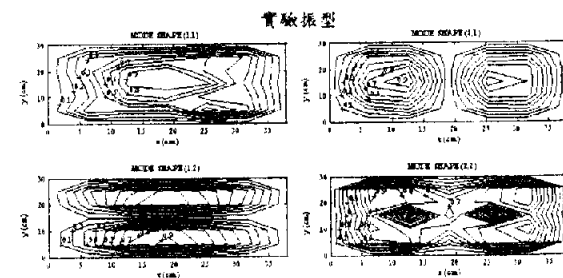


圖 40 壓電材料板結構實驗模態振型[40]



進行，以求得實際結構之模態參數(Modal Parameter)。一般而言，實驗模態分析往往需要輸入及輸出，在輸入方式則採用衝擊錘(hammer)或是激振器(shaker)進行，而結構之響應輸出則使用加速度計量測，再將量測所得到輸入及輸出之訊號輸入頻譜分析儀，透過快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform, FFT)進行處理，便可以得頻率響應函數(Frequency Response Function, FRF)，再透過模態參數擷取方法(Modal Parameter Extraction Method)進而得知模態參數。此傳統模態分析方法可以完整獲得系統輸入及輸出關係，但結構須在靜止狀況下進行，由於會有以上限制條件，故發展一結構於操作狀態下之實驗模態分析有其必要性。

在實際結構當中，其結構往往處於操作狀態(Operating Condition)下，因此，結構於操作狀態下之響應輸出即為操作變形振型(Operating Deflection Shapes, ODS)。當結構系統承受簡諧激振外力輸入時，其輸出響應亦為簡諧形式。故發展僅藉由單純量測輸出(output only)的響應，即操作變形振型，來預測結構系統模態振型的分析模式。採用單純量測輸出的響應分析方式，除了可改善傳統模態分析須在靜止狀態下的缺點，亦可提高模態測試分析的適用性及速度，且利用此方式量測而獲得的操作變形振型，不但可瞭解結構系統的實際振動行為，亦可作為破壞檢測或外力預測等分析的參考依據。

當結構系統受簡諧外力激振時，其輸出響

應亦為簡諧形式。由頻率響應函數得知，結構系統輸出響應為頻率響應函數與外力之乘積，而結構系統之模態參數如自然頻率、阻尼比及模態振型，其中之自然頻率與阻尼比可經一次實驗模態分析求得，加上簡諧激振外力為已知；因此，利用結構系統輸出響應即操作變形振型在理論上便可預測出結構系統的模態振型。

Wang and Wu [42,43]將針對樑結構系統於操作狀態下，使用時域法、頻域法二種操作變形振型量測方法，將實驗所量測的 ODS 配合實驗模態分析所得到的自然頻率、阻尼比及激振外力，代入所發展的模態振型預測模式中，分別探討共振狀態與非共振狀態下所得之預測模態振型的結果。圖 41 為由 ODS 預測模態振型之理念示意圖，以加速度計進行簡諧操作狀態下之模態測試系統架構及懸臂樑之量測點規劃分別如圖 42(a)及(b)。圖 43(a)及(b)為應用時間域法求得之 ODS 及預測之模態振型圖，圖 43(c)及(d)為應用頻率域法分析結果，兩種方法均可合理的預測得到結構模態振型。

王和陳[44]進一步將前述操作狀態下之模態測試理念，導入應用智慧型材料結構，針對

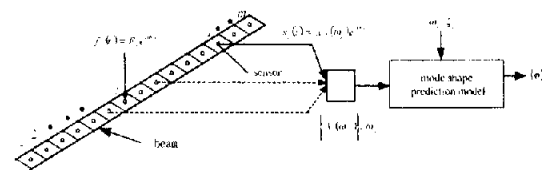


圖 41 由 ODS 預測模態振型之理念[42]





一壓電材料樑結構於操作狀態下，採頻率域法量測操作變形振型，並配合一次實驗模態分析所得之自然頻率、阻尼比與外力大小，分別代入模態振型預測程式中，最後進行共振激振與非共振激振之狀況下預測之所得之模態振型結果探討。圖 44(a)及(b)為壓電材料樑結構於簡諧操作狀態下模態測試之系統架構示意圖及實體照片。圖 45 為理論驗證分析於第 2 個模態共振激振下之 ODS 振型與預測之振型圖；圖 46 則為實驗驗證結果，圖 46(a)-(d)分別為由預測模式求得之前四個壓電薄膜模態振型之預測與理

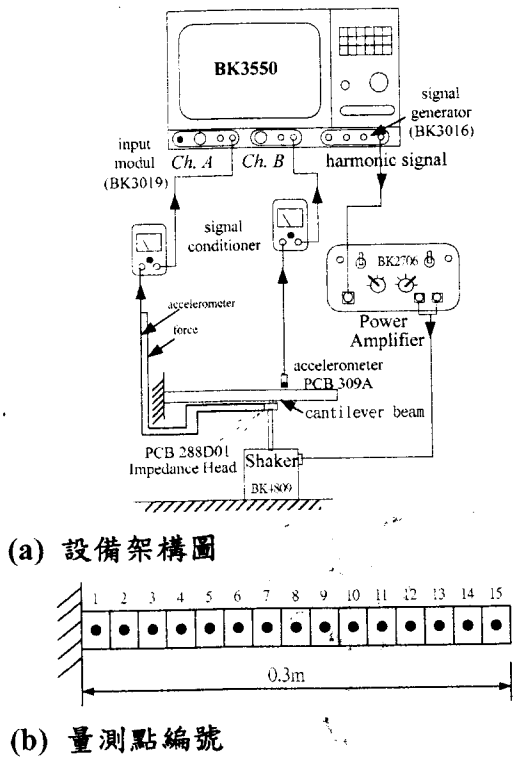


圖 42 以加速度計進行簡諧操作狀態下之模態測試系統架構[42]

論值比較，顯示有不錯之預測，圖 46(e)則為其對應之實驗與預測之 ODS。由這一模態振型預測模式可合理地求得壓電材料樑之模態振型，亦有助於操作狀態下之實驗模態分析進行。由共振激振及非共振激振結果顯示，壓電材料樑之操作狀態下模態振型可由預測程式得到良好之預測。

結構系統之模態測試通常係在結構呈靜止或於實驗室之控制環境下進行的，而對實際結構，往往有外力干擾或實際運轉條件，因此結構系統於作業狀態之模態測試與分析相形重要。探討結構系統於作業狀態下，特別是在簡諧外力激振條件下，經由量測系統之操作變形振型，發展模態振型預測模式，以僅有系統之輸出響應時，特別是在作業狀態中之結構，可

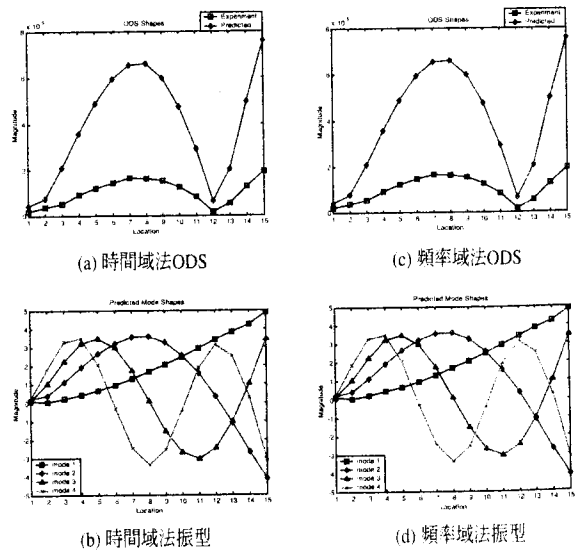


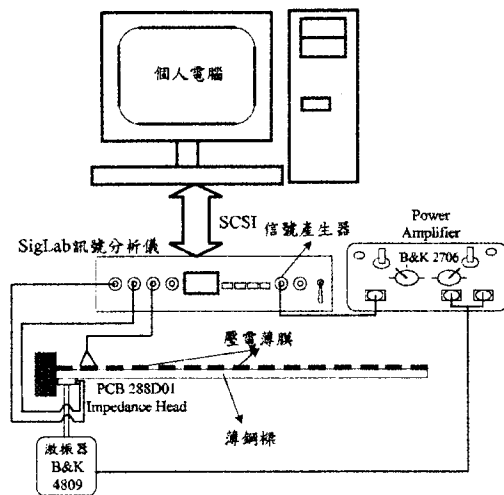
圖 43 共振激振下振型預測， $f_s=90\text{Hz}\approx f_2$ [42]



完整求得結構系統之模態參數，綜合討論如下：

1. 已發展出多自由度系統之操作變形振型求得系統模態振型之預測模式[45]。以加速度計為感測器量測多自由度系統受簡諧外力激振下之操作變形振型響應，進而由預測模式求得系統之模態振型[46]。

2. 進而拓展至連續系統之模態振型預測模

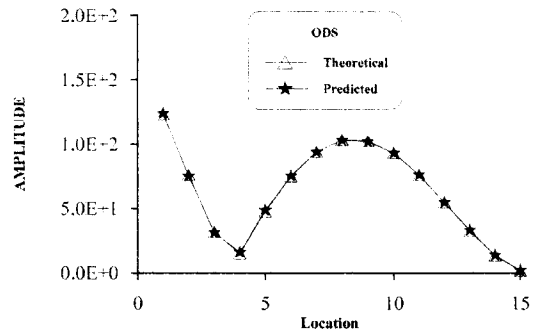


(a) 示意圖

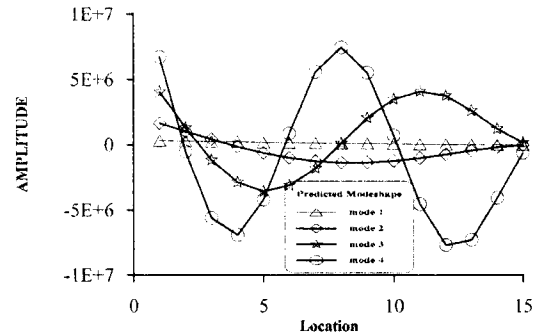


(b) 實體照片

圖 44 ODS 量測之實驗儀器架構圖[44]



(a) 理論與預測之 ODS 振型比較



(b) 預測所得之振型

圖 45 第 2 模態共振激振下之 ODS 振型與預測之振型圖[44]

式，以懸臂樑及簡支樑結構配合加速度感測器分別進行模態分析、簡諧分析及操作變形振型分析。以在僅已知輸出響應條件下，預測出系統模態振型之模態參數[42,43]。

3. 也導入智慧型材料結構系統之應用，以壓電材料樑為例，探討以壓電薄膜感測器所量測之操作變形振型，預測求得結構完整之模態參數資訊[44]。