

壓電智慧型材料結構系統之 應用與發展

王柏村

教授

國立屏東科技大學
機械工程系暨研究所

TEL: (08)770-3202轉7017

FAX: (08)774-0142

E-mail: wangbt@mail.npust.edu.tw

www: <http://wwwme.npust.edu.tw>

<http://140.127.6.133/teacher/index.htm>

大綱

I. 智慧型材料

II. 壓電材料特性

III. 壓電材料結構系統之動態模型

IV. 壓電智慧型材料結構系統之應用

A. 智慧型材料結構系統於控制之應用

B. 智慧型材料結構系統應用於結構測試

C. 智慧型材料結構系統應用於外力預測

D. 智慧型材料結構系統應用於破壞檢測

V. 未來發展趨勢

VI. 結語

VII. 參考文獻

I. 智慧型材料

常見智慧型材料

陶瓷壓電材料(PZT)

高分子壓電材料(PVDF, PVF2)

記憶合金(Nitinol)

電導液(Electro-Rheological Fluid, ER Fluid)

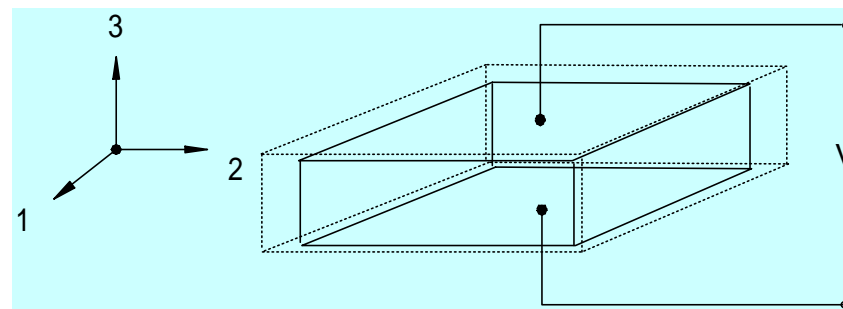
磁導液(Magneto-Rheological Fluid, MR Fluid)

II. 壓電材料特性

壓電材料特性:

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，會產生壓力之效應可作驅動器



III. 壓電材料結構系統之動態模型

壓電驅動器於樑結構之動態模型

純彎曲驅動(pure bending actuation)

純拉伸驅動(pure extension actuation)

不對稱驅動(asymmetric actuation)

壓電驅動器於板結構之動態模型

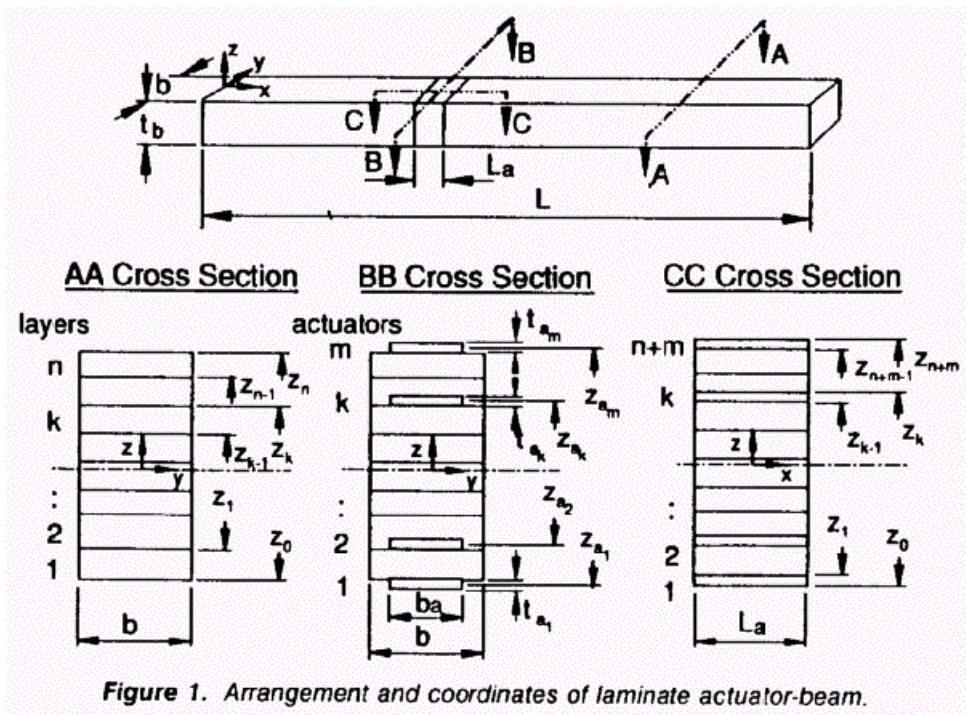
純彎曲驅動(pure bending actuation)

純拉伸驅動(pure extension actuation)

不對稱驅動(asymmetric actuation)

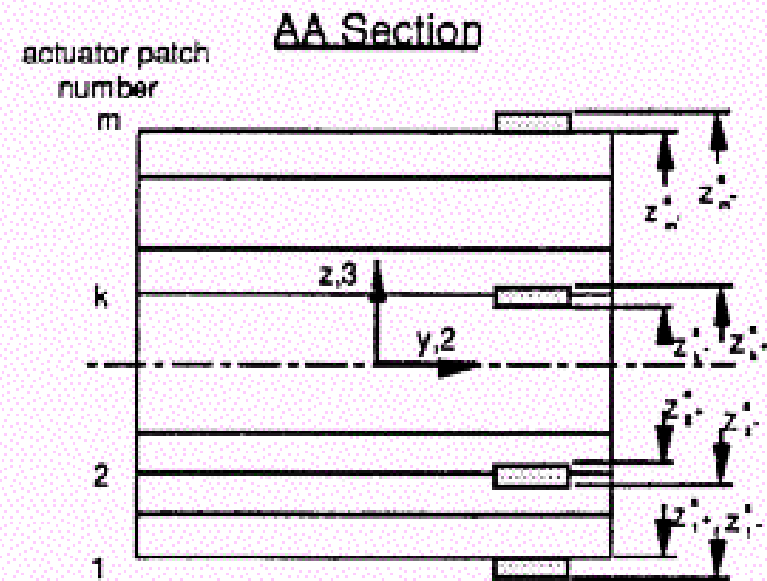
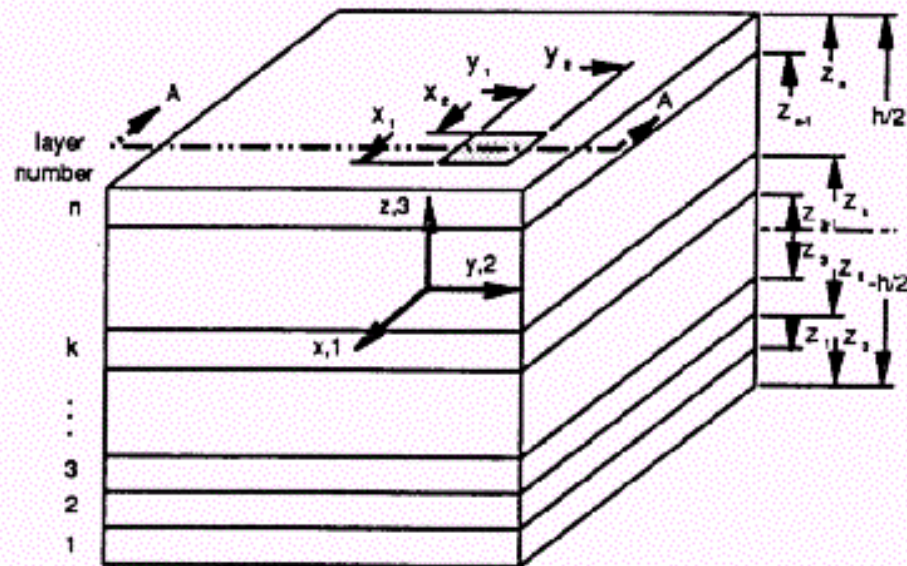
III. 壓電材料結構系統之動態模型

Laminate PZT actuator-Beam (general model)



III. 壓電材料結構系統之動態模型

Laminate PZT actuator-Plate (general model)



IV. 壓電智慧型材料結構系統之應用

A. 智慧型材料結構系統於控制之應用

振動控制

噪音控制

B. 智慧型材料結構系統應用於結構測試

擷取結構模態參數

作業狀態下之模態測試

C. 智慧型材料結構系統應用於外力預測

預測作用外力大小、時間歷程、位置

D. 智慧型材料結構系統應用於破壞檢測

預測結構之破壞存在、位置、程度、壽命評估

A. 智慧型材料結構系統於控制之應用

主動控制系統方塊圖

被動控制與主動控制

智慧型材料結構系統於控制應用

壓電材料應用於主動結構振動控制

簡支樑之結構振動混合主動與被動控制

加速度計與壓電薄膜感應器之比較

壓電材料應用於主動結構噪音控制

智慧型材料結構之噪音控制

壓電驅動器與壓電薄膜感測器位置最佳化

壓電驅動器與麥克風感測器位置最佳化

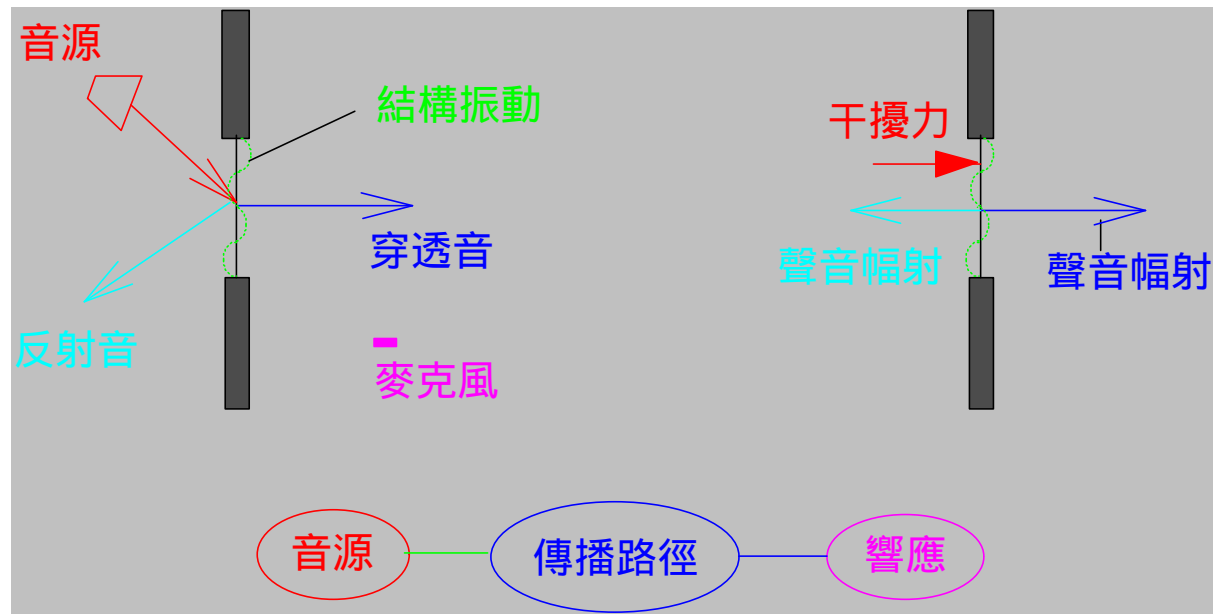
壓電薄膜波數模式感測之噪音控制

A. 智慧型材料結構系統於控制之應用

聲音之產生與傳播

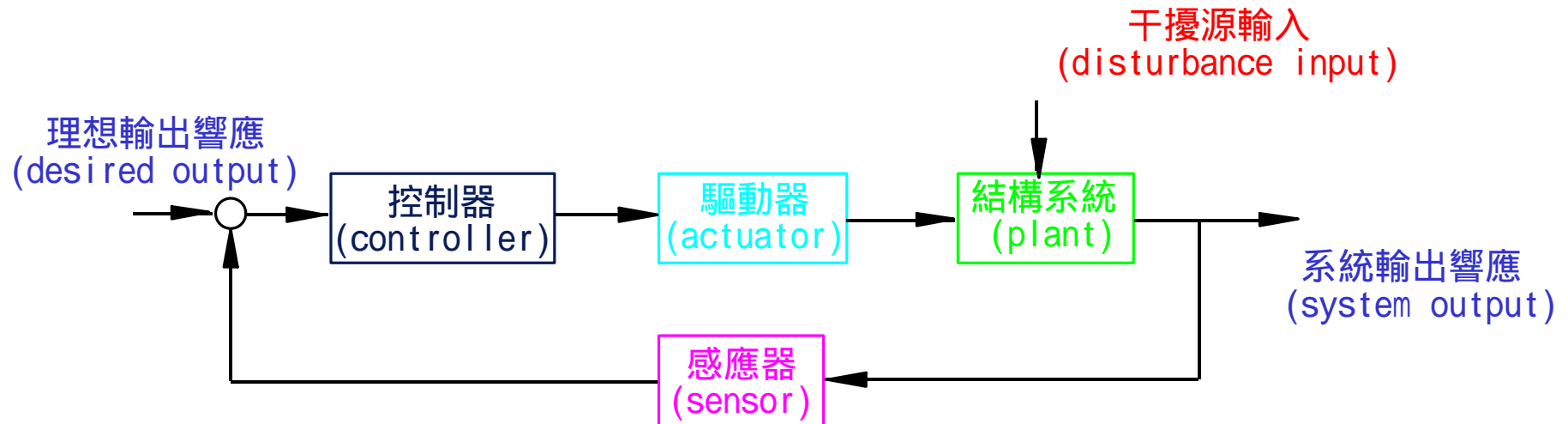
來自流場流動所引發之介質波動

來自結構振動所引發之介質波動



A. 智慧型材料結構系統於控制之應用

主動控制系統方塊圖



A. 智慧型材料結構系統於控制之應用

被動控制：透過改變結構系統之形狀，尺寸，材料性質或以阻尼(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

主動控制：

控制音場響應

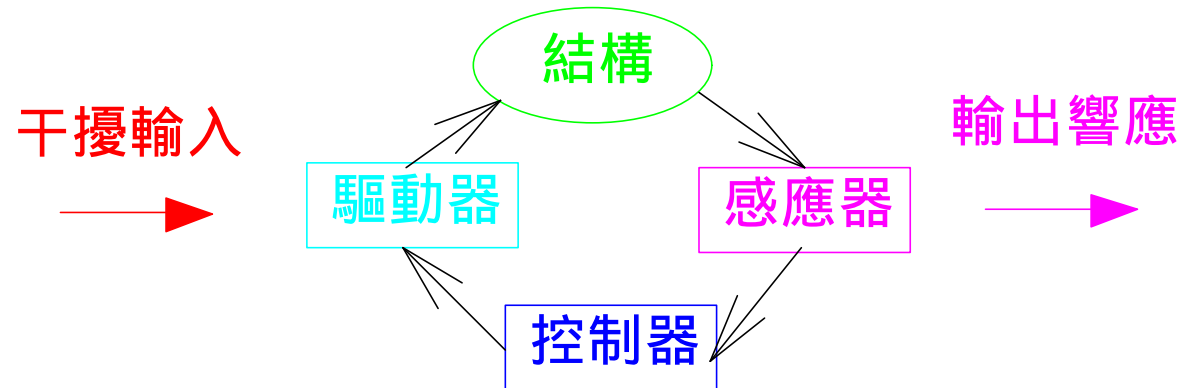
控制結構振動

A. 智慧型材料結構系統於控制之應用

被動控制



主動控制



智慧型控制

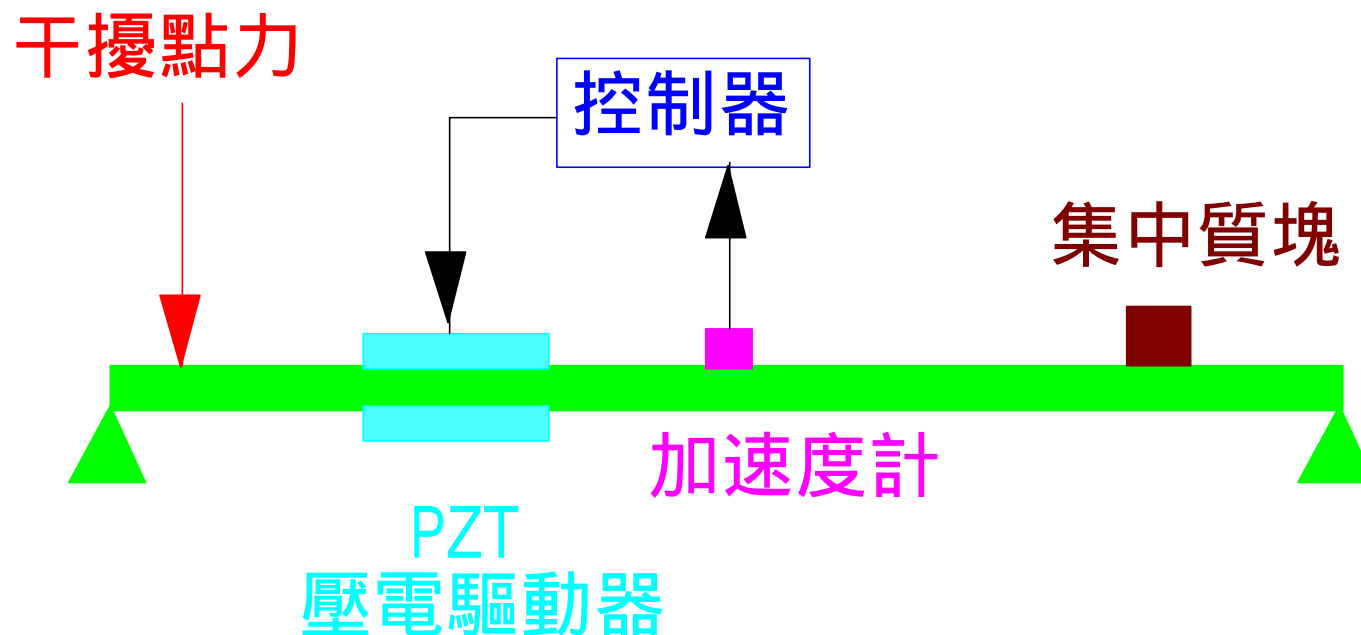


A. 智慧型材料結構系統於控制之應用

簡支梁之結構振動混合主動與被動控制

被動控制：集中質塊

主動控制：壓電驅動器及加速度感應器



A. 智慧型材料結構系統於控制之應用

簡支梁之結構振動混合主動與被動控制

以壓電材料作驅動器之智慧型材料結構系統做 主動振動控制可行性

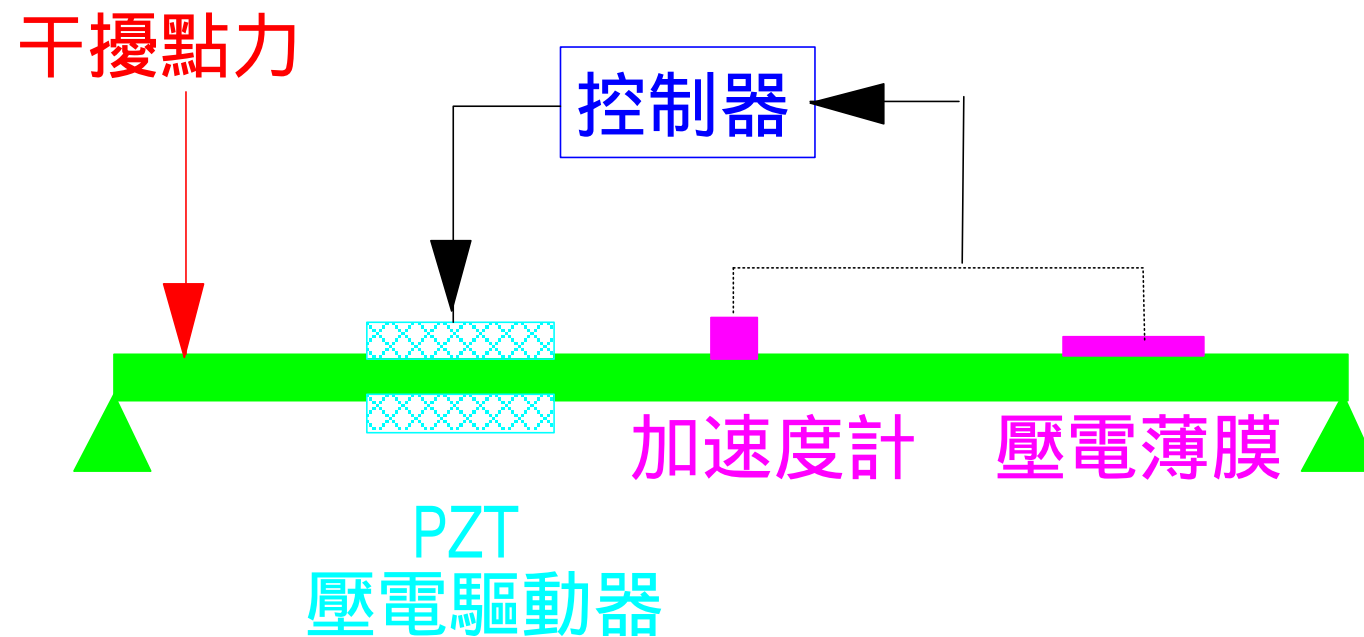
並結合被動控制元件(集中質塊)作混合控制 (hybrid control)

混合控制比單獨之被動或主動控制效果佳

感應器及驅動器之位置影響控制效果

A. 智慧型材料結構系統於控制之應用

加速度計與壓電薄膜感應器之比較



A. 智慧型材料結構系統於控制之應用

加速度計與壓電薄膜感應器之比較

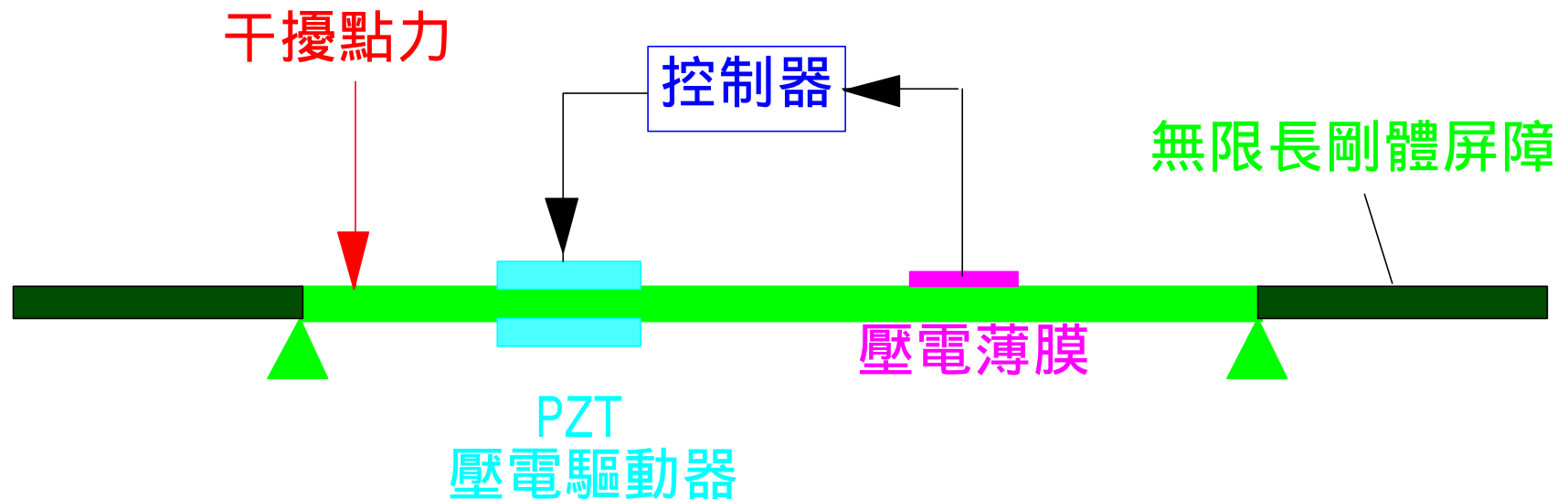
壓電薄膜與加速度計於主動振動控制做感應器效果都不錯

特別是具壓電薄膜之智慧型結構，有體積小，重量輕，低功率消耗之實用價值

感應器位置對控制效果有相當之影響

A. 智慧型材料結構系統於控制之應用

智慧型材料結構之噪音控制



A. 智慧型材料結構系統於控制之應用

智慧型材料結構之噪音控制

以壓電驅動器及壓電薄膜感應器成功地作結構噪音控制

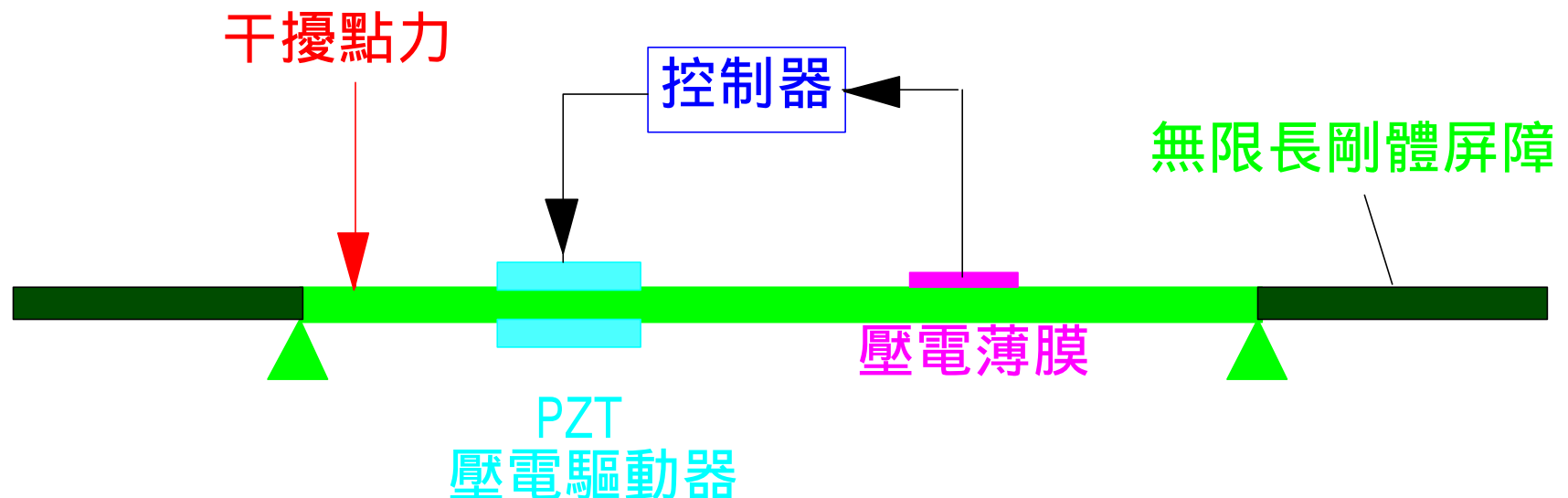
證明了智慧型材料結構之噪音控制可行性

在共振點激振之噪音可有效控制

在非共振點激振之噪音不能有效被控制

A. 智慧型材料結構系統於控制之應用

壓電驅動器與壓電薄膜感測器位置最佳化



A. 智慧型材料結構系統於控制之應用

壓電驅動器與壓電薄膜感測器位置最佳化

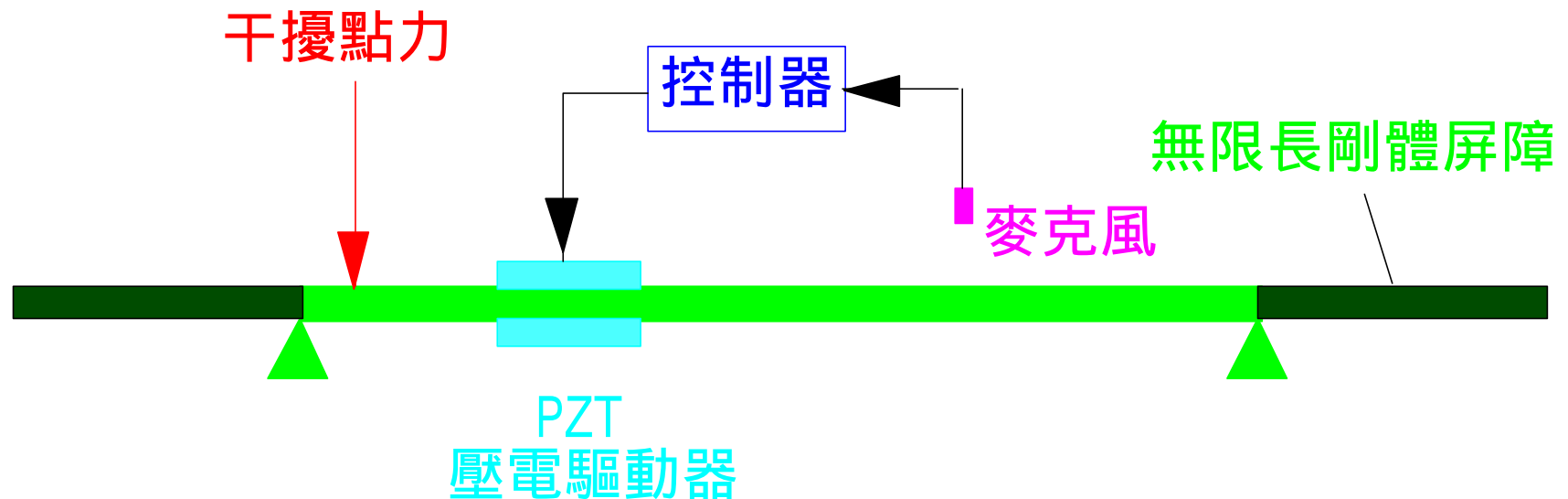
成功地應用遺傳學演算法(Genetic Algorithm, GA)作
轉換器位置最佳化設計

最佳安置之壓電驅動器與壓電感測器大大 提升噪音
控制能力

尤其在非共振激振，更可看出最佳化之優點

A. 智慧型材料結構系統於控制之應用

壓電驅動器與麥克風感測器位置最佳化



A. 智慧型材料結構系統於控制之應用

壓電驅動器與麥克風感測器位置最佳化

最佳安置之壓電驅動器及麥克風可大大提升噪音控制效果

壓電驅動器最佳位置與模態振型有相當關連性

麥克風最佳位置與聲音輻射指向性(radiation directivity)有相當關連性

麥克風愈多，噪音控制效果愈佳

A. 智慧型材料結構系統於控制之應用

壓電薄膜波數模式感測之噪音控制

首創以陣列式之壓電薄膜為感測器，利用信號處理技術得到波數域(wavenumber domain)之響應，以作為控制之成本函數(cost function)

本文壓電薄膜波數模式感測技術於樑結構噪音控制有良好之控制效果

同時亦比較連續波數轉換(continuous wavenumber transform)以及實用化之離散波數轉換(discrete wavenumber transform)之控制效果

也分別比較以加速度計及壓電薄膜之波數感測技術之控制效果

B. 智慧型材料結構系統應用於結構測試

結構測試理念

實驗模態分析具體步驟

壓電材料應用於實驗模態分析之實例分析

懸臂樑 + 壓電驅動器 + 壓電薄膜感測器

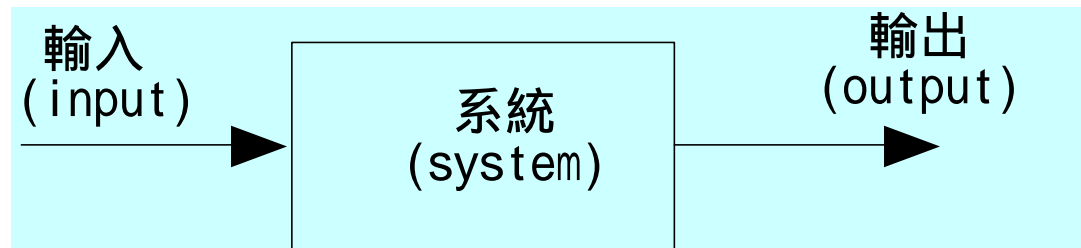
(PZT actuator) (PVDF sensor)

簡支板 + 壓電驅動器 + 壓電薄膜感測器

B. 智慧型材料結構系統應用於結構測試

結構測試理念

信號分析(signal analysis)：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。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之狀態。

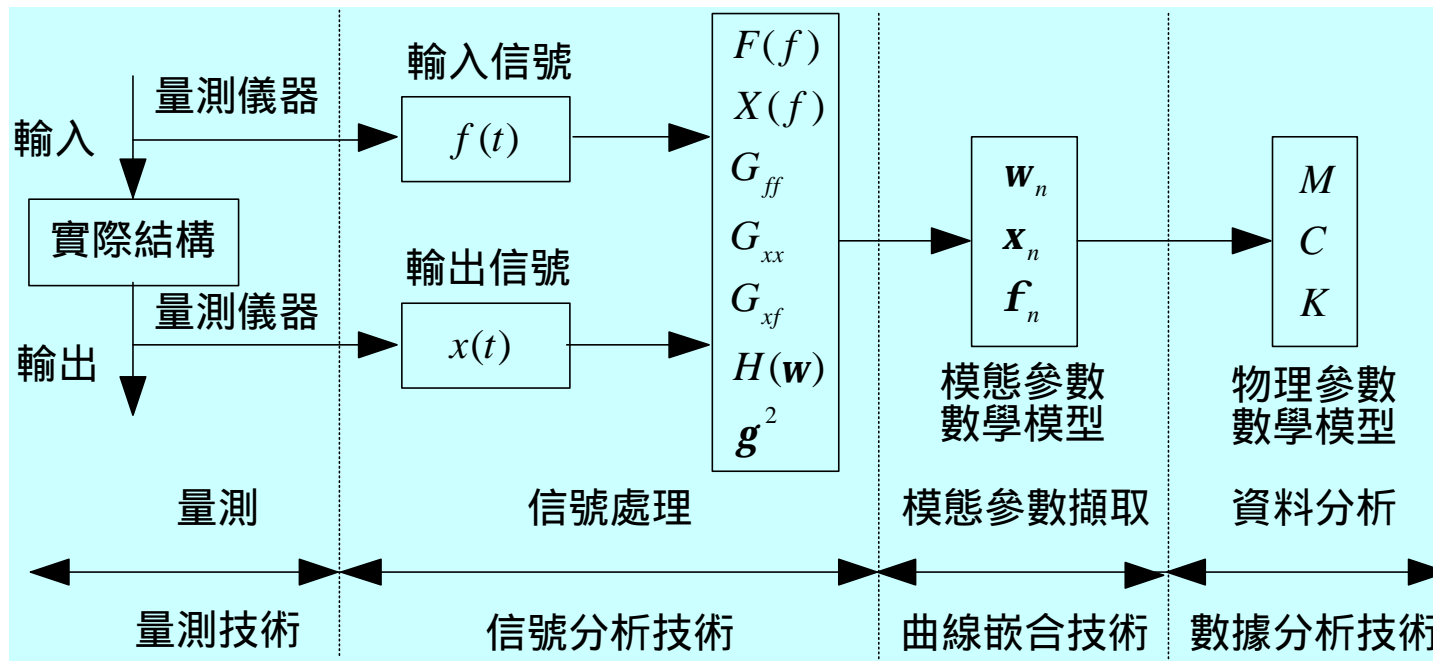


系統分析(system analysis)：在了解系統的內涵，也就是求得輸入與輸出間之關係

$$\text{系統內涵} = \frac{\text{輸出}}{\text{輸入}}$$

B. 智慧型材料結構系統應用於結構測試

實驗模態分析具體步驟

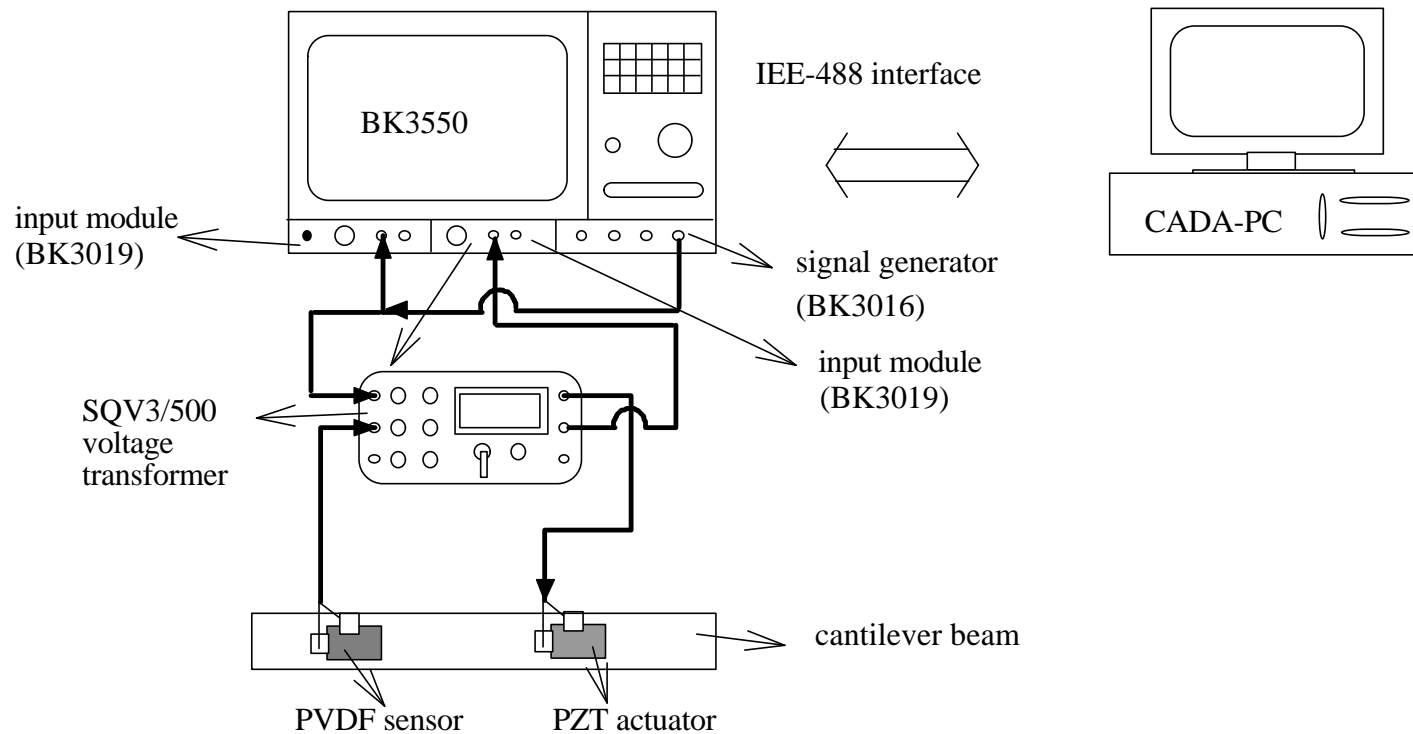


模態參數：

- 自然頻率
- 模態振型
- 阻尼比

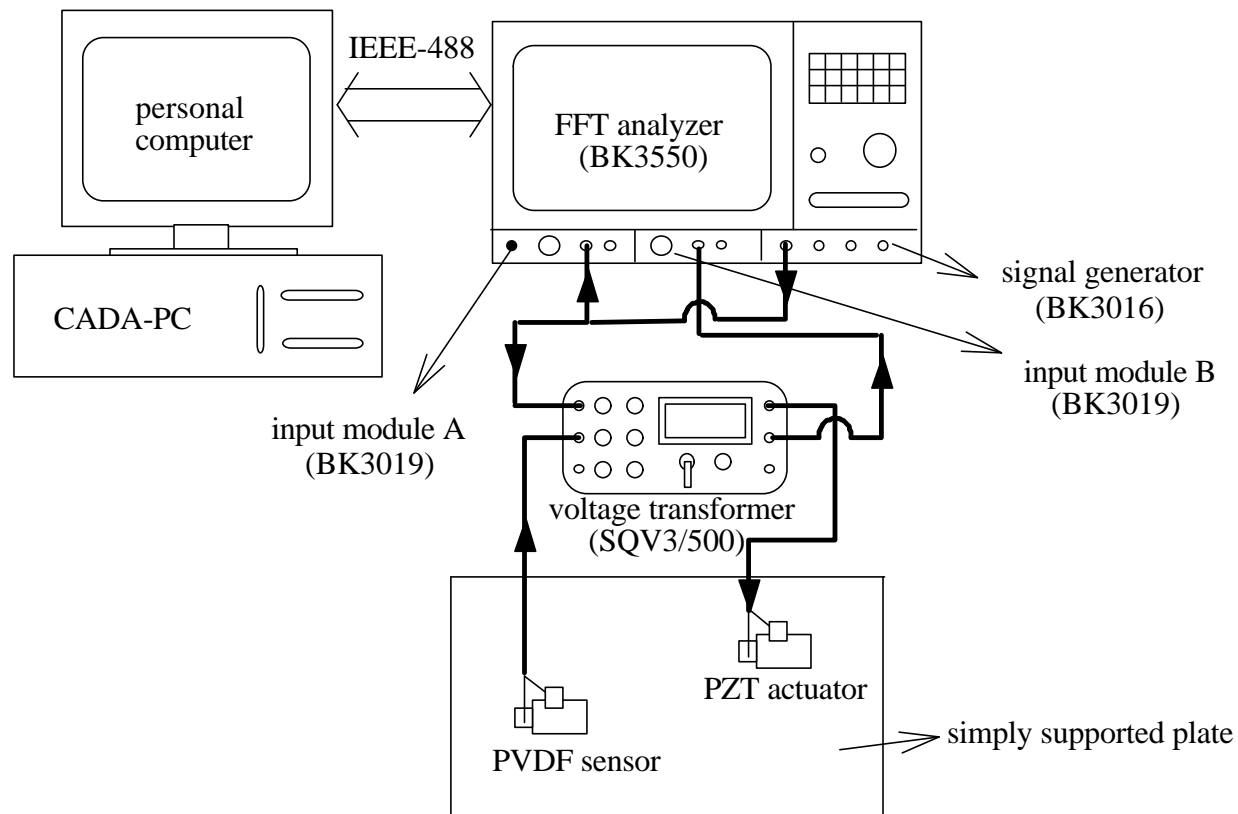
壓電材料應用於實驗模態分析

懸臂梁之模態分析



壓電材料應用於實驗模態分析

簡支板之模態分析



壓電材料應用於實驗模態分析

結論

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

成功的應用壓電驅動器(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

C. 智慧型材料結構系統應用於外力預測

外力預測理念

任意結構之外力預測模式

實例分析

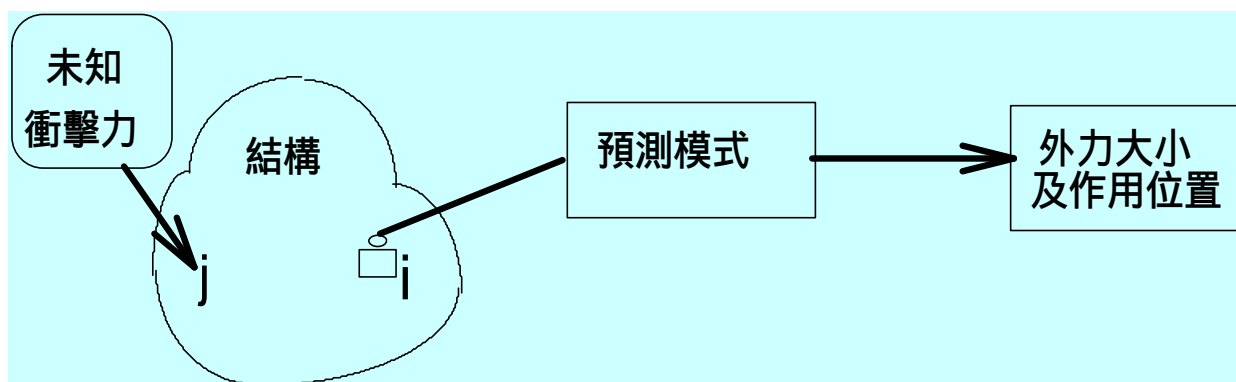
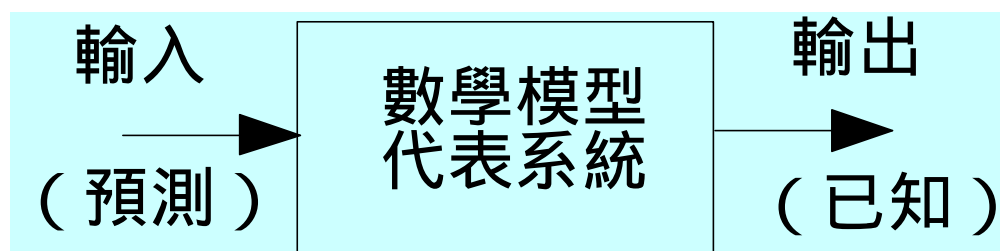
簡支樑 + 加速度計 + 理想衝擊外力

簡支樑 + 壓電薄膜 + 三角型衝擊外力

懸臂樑 + 加速度計 + 理想衝擊外力

C. 智慧型材料結構系統應用於外力預測

外力預測理念



C. 智慧型材料結構系統應用於外力預測

發展可應用於任意結構之未知衝擊外力之預測模式

感測器形式：

加速度計

壓電薄膜(PVDF film)

結構資訊：模態參數(modal parameters)

自然頻率

模態振型

阻尼比

外力形式：衝擊點力(impact point force)

理想衝擊點力

三角形式衝擊點力

任意結構之外力預測模式

系統之模態參數

自然頻率

模態振型

阻尼比

系統受外力之響應

時間域

頻率域

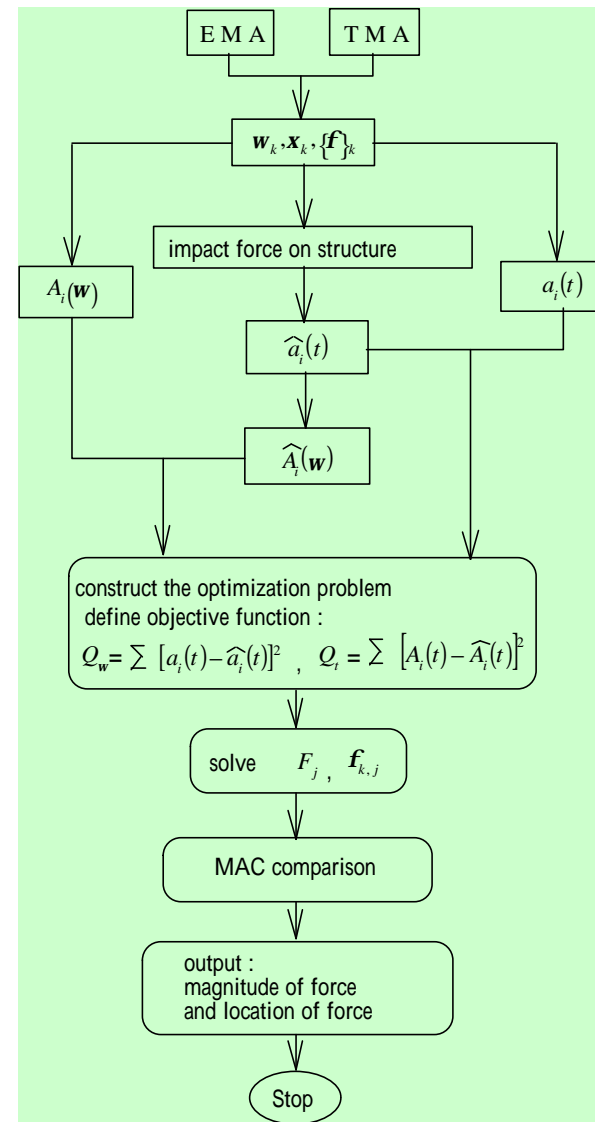
定義及求解最佳化問題

目標函數：預測響應與實測響應之最小平方誤差

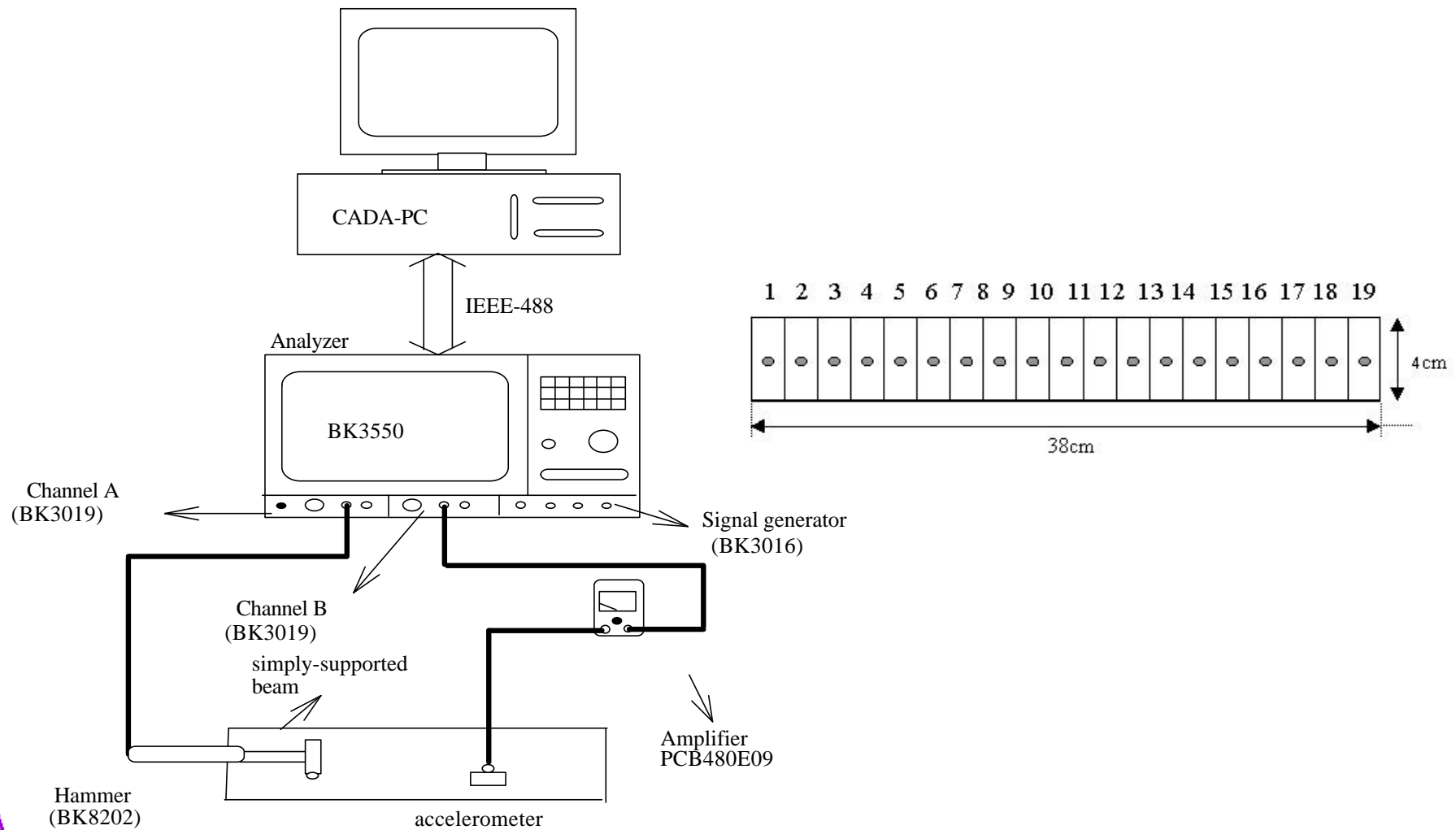
設計變數：外力大小、及外力作用位置之模態振型

模態保證指標(MAC)比對：

求得作用力位置



簡支樑結構受未知衝擊外力之預測



簡支樑結構受未知衝擊外力之預測

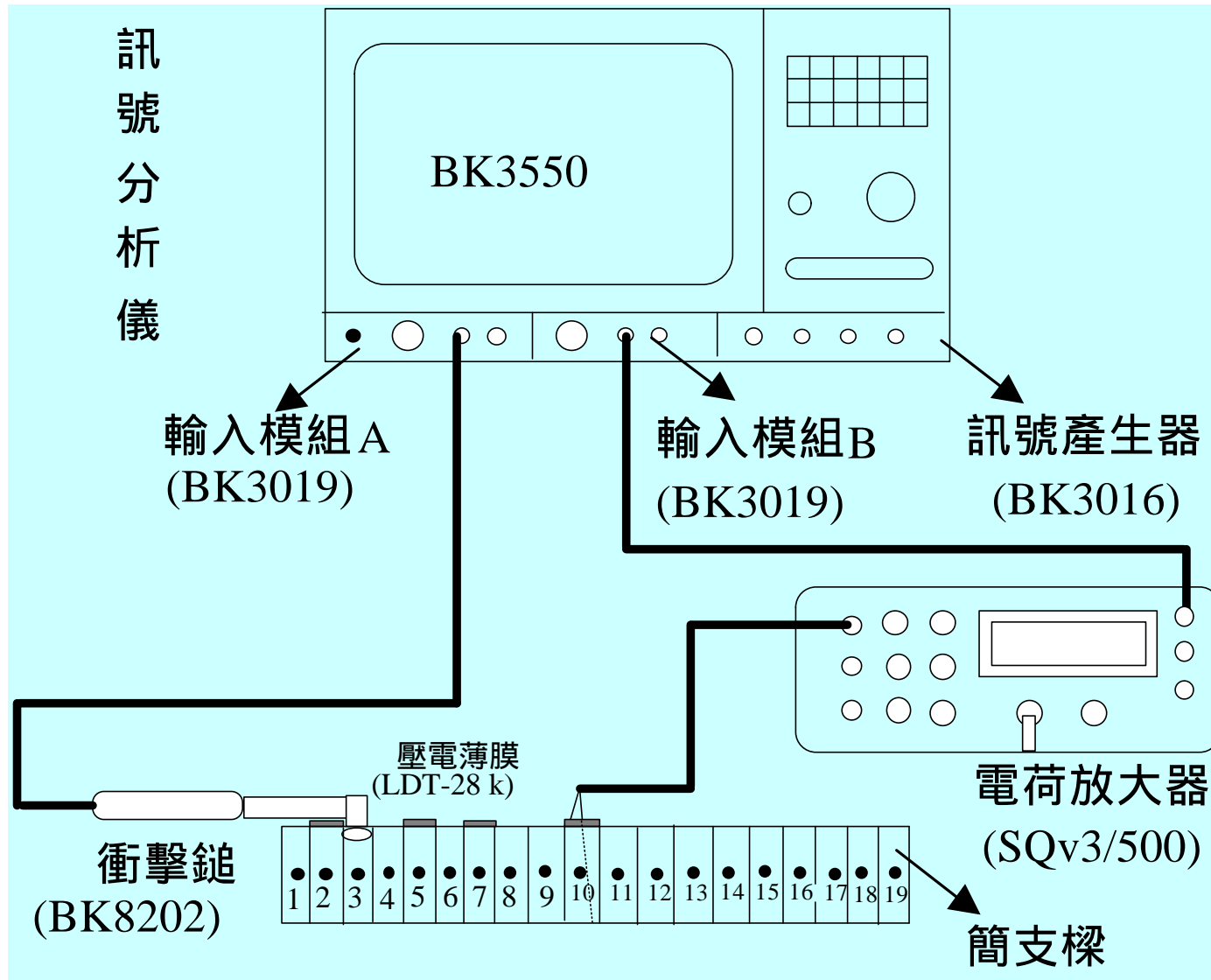
發展了適用於任意結構之未知衝擊力預測模式，可求得外力振幅及其作用位置

外力預測模式以簡支樑結構分別由理論與實驗分析探討預測模式之可行性與正確性

對不同作用力位置、不同作用力大小、不同量測位置，所發展外力模式有很好之適應性，尤其在預測作用力位置比外力大小有較佳之預測結果

由於衝擊點力實際上呈現三角力形式，未來可修正預測模式，以改善預測效果

含壓電薄膜簡支樑受衝擊外力之預測



含壓電薄膜簡支樑受衝擊外力之預測

本文成功的發展一外力預測模式，當簡支樑結構物受衝擊外力作用時，衝擊外力型式假設成三角力型式，以符合實際衝擊外力型式。

外力預測模式中，適當參數之選取，對外力作用位置、時間歷程或作用力大小之預測結果都有相當高的準確度，可證實以壓電薄膜為感應器進行外力預測之可行性。

改善假設外力型式為衝擊點力所發展出之預測模式對外力預測的不準確。

成功的將智慧型材料之壓電薄膜導入本預測模式中，有助於智慧型材料結構系統於外力預測研究發展。

D. 智慧型材料結構系統應用於破壞檢測

破壞檢測理念

破壞檢測之預測模式

實例分析

懸臂樑之結構缺陷預測

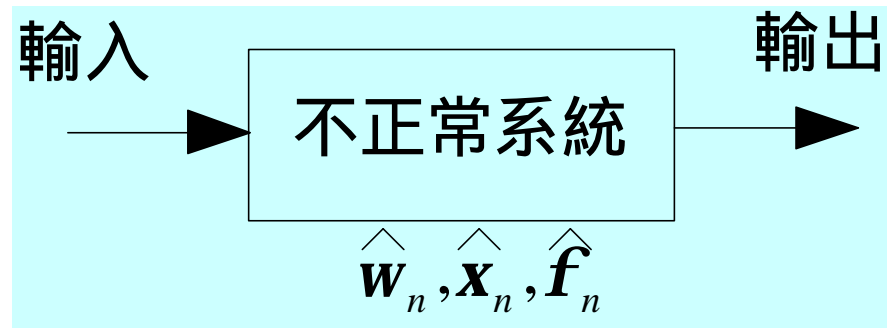
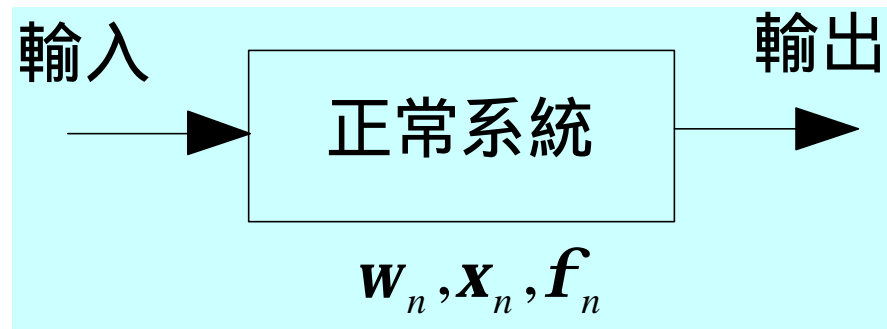
壓電材料懸臂樑之結構缺陷預測

D. 智慧型材料結構系統應用於破壞檢測

破壞檢測理念

modal-based method

non-modal-based method



D. 智慧型材料結構系統應用於破壞檢測

破壞檢測之預測模式

自然頻率變化預測指標

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

自然頻率變化最小的模態數，其對應之模態振型的節點附近，為缺陷可能發生之位置

位移振型差預測指標

位移振型差在缺陷處有極值出現

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

D. 智慧型材料結構系統應用於破壞檢測

破壞檢測之預測模式

$$D = D_1 + D_2$$

D_1 為以位移振型差預測缺陷之指標

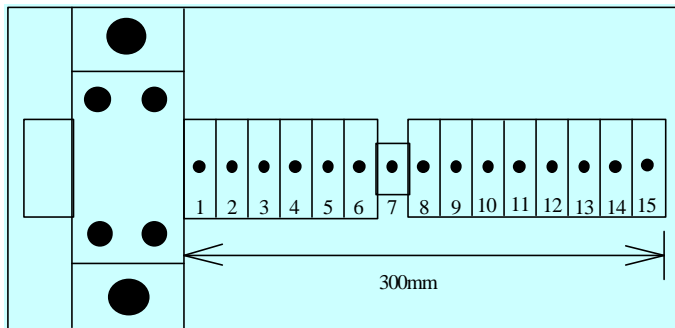
D_2 為以自然頻率變化特性預測之缺陷位置指標

D 則稱之為缺陷指標，缺陷指標最大處對應之位置即為缺陷位置

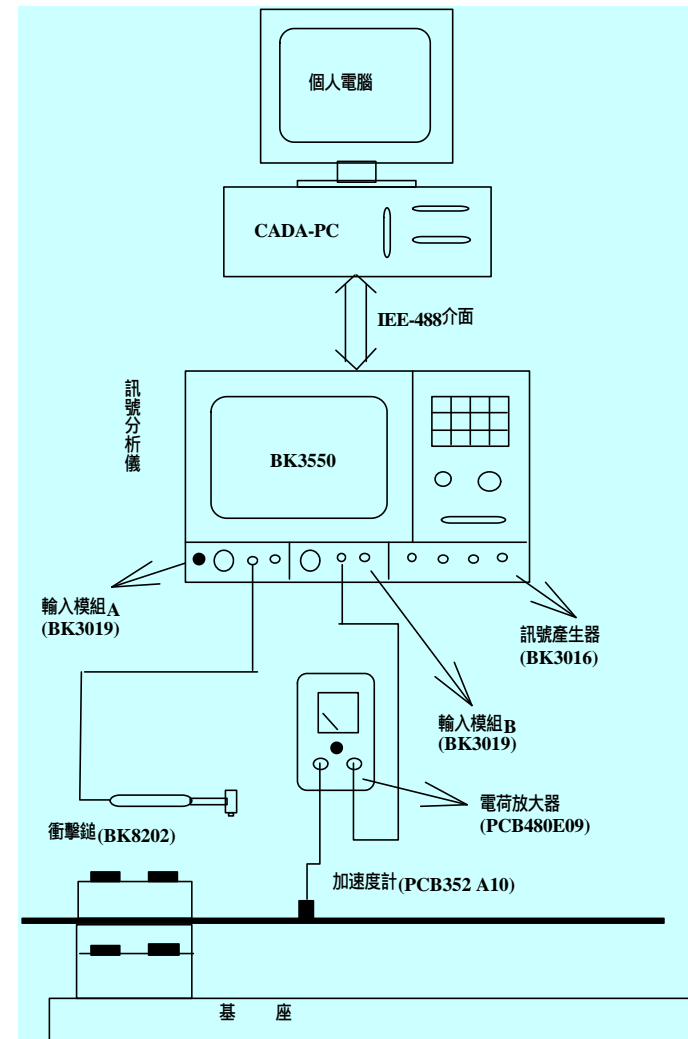
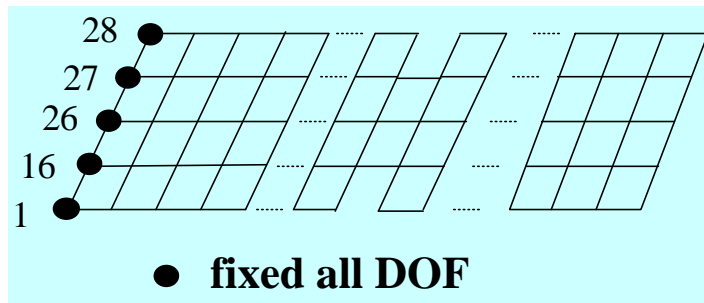
D. 智慧型材料結構系統應用於破壞檢測

懸臂梁之結構缺陷預測

實體模型示意圖



有限元素模型示意圖



D. 智慧型材料結構系統應用於破壞檢測

壓電材料懸臂樑之結構缺陷預測

嘗試以壓電轉換器取代傳統轉換器，從事實驗模態分析

即以壓電片取代衝擊鎚為驅動器

而以壓電薄膜取代加速度計為感測器

進行實驗量測以得到頻率響應函數

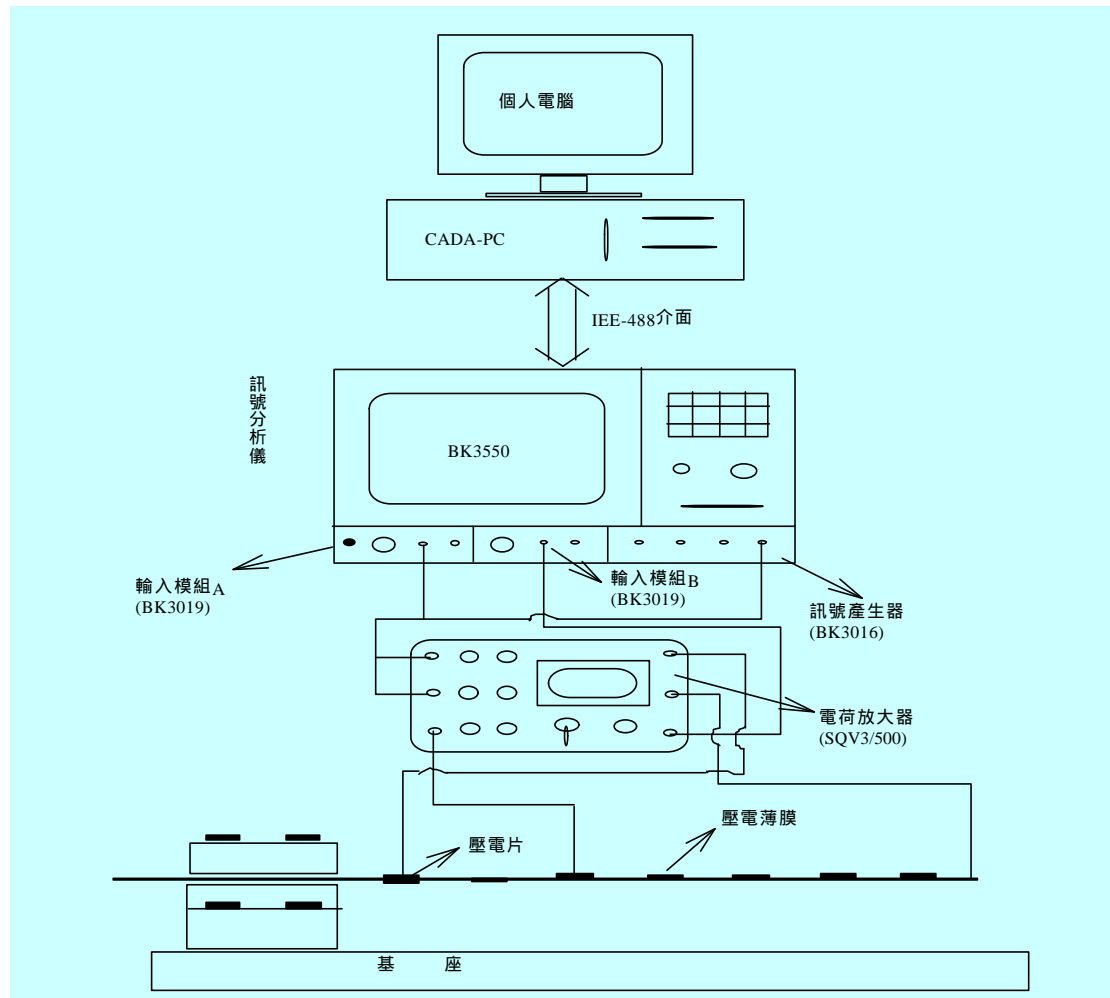
及結構模態參數

藉由自然頻率的變化及斜率振型差找出懸臂樑結構缺陷的位置

發展一套自動缺陷偵測的方法，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。

D. 智慧型材料結構系統應用於破壞檢測

壓電材料懸臂梁之結構缺陷預測



D. 智慧型材料結構系統應用於破壞檢測

以壓電轉換器進行結構模態分析，以得到之模態參數作為非破壞檢測之依據

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模式，預測缺陷發生之位置。

成功地驗證以壓電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。

V.未來發展趨勢

智慧型材料驅動器與感測器之發展

材料與製程技術

新形式設計

結合機構設計：X-frame, bimorph, thunder, C-block, rotary motor

形狀之設計：

動態數學模型化

耐久性、疲勞、可靠度之考慮

電控系統整合

電能與機械能轉換

信號分析與處理

因應不同技術領域需求及個別產業之應用

V.未來發展趨勢

智慧型材料結構與系統之應用技術領域

振動與噪音控制

阻尼與隔振

破壞檢測

外力預測

健康監測

智慧型材料結構與系統之應用產業

航空太空工業：飛機、衛星等

交通工具業：船艦、汽機車等

土木工業：建築物、橋樑等

電子相關產業：電腦及其週邊設備、與相關產品

微機電工業：

V.未來發展趨勢

多重技術領域之結合

主動控制模式

信號分析與處理

振動與噪音分析技術

阻尼與隔振技術

最佳化設計

破壞檢測技術

外力預測技術

健康監測技術

系統整合與實用化（商業化）

system-subsystem-device-materials

VI. 結語

智慧型材料結構與系統之發展已有十餘年，逐漸走向商業化。

智慧型材料結構與系統之應用可謂相當廣泛，也有很大的發展空間，如何結合學術界之研究能力與工業界之產品應用需求，將是帶動智慧型材料結構發展之重要課題。

國內之相關研究較缺乏整體性之整合規劃，或計畫性之目標導向，如何將此課題納入國家科技發展規劃，以厚植國內於此課題之技術能力值得深思。

如何突破有限經費資源限制，以及人力資源培育與研究團隊之整合，應是國內研究者應有之共識。

VII. 參考文獻

1. Wang, B. T., and Rogers, C. A., 1991, "Modeling of Finite-Length Spatially Distributed Induced Strain Actuators for Laminate Beams and Plates," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 2, No. 1, pp. 38-58.
2. Wang, B. T., and Rogers, C. A., 1991, "Laminate Plate Theory for Spatially Distributed Induced Strain Actuators," *Journal of Composite Materials*, Vol. 25, No. 4, pp. 433-452.
3. Wang, B. T., Fuller, C. R., and Dimitriadis, E. K., 1991, "Active Control of Structurally Radiated Noise Using Multiple Piezoelectric Actuators," *AIAA Journal*, Vol. 29, No. 11, pp. 1802-1809.
4. Wang, B. T., Fuller, C. R., and Dimitriadis, E. K., 1991, "Active Control of Noise Transmission Through Rectangular Plates Using Multiple Piezoelectric or Point Force Actuators," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 90, No. 5, pp. 2820-2830.
5. Wang, B. T., and Fuller, C. R., 1992, "Near-Field Pressure, Intensity, and Wave-Number Distributions for Active Structural Acoustic Control of Plate Radiation: Theoretical Analysis," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 92, No. 3, pp. 1489-1498.
6. Wang, B. T., 1993, "A Feasible Study of Hybrid Structural Vibration Control," *Bulletin of National Pingtung Polytechnic Institute*, Vol. 2, pp. 9-27.
7. Wang, B. T., Burdisso, R. A., and Fuller, C. R., 1994, "Optimal Placement of Piezoelectric Actuators for Active Structural Acoustic Control," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 5, No. 1, pp. 67-77.

VII. 參考文獻

8. Wang, B. T., and Fuller, C. R., 1994, "The Effect of Distributed or Discrete Pressure and Acceleration Sensors on Active Structural Acoustic Control Systems," *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 30-39.
9. Wang, B. T., 1994, "The Performance of Accelerometers and PVDF Sensors in Active Structural Vibration Control," *Bulletin of National Pingtung Polytechnic Institute*, Vol. 3, pp. 81-92.
10. Wang, B. T., 1994, "Hybrid Active and Passive Control for Structural Sound Radiation," *The Journal of the Acoustical Society of the Republic of China*, Vol. 2, No. 2, pp. 1-16.
11. Wang, B. T., 1994, "The Performance of Accelerometers, Microphones and PVDF Sensors in Active Structural Acoustic Control," *The Chinese Journal of Mechanics*, Vol. 10, No. 3, pp.191-199.
12. Wang, B. T., 1994, "Active Control of Far-Field Sound Radiation by a Beam Physical System Analysis," *Smart Materials and Structures*, Vol. 3, pp. 476-484.
13. Wang, B. T., 1995, "Optimal Placement of Piezoceramic Transducers for Active Sound Radiation Control of Baffled Simply-Supported Beam," *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers*, Vol. 16, No. 4, pp. 383-393..
14. Wang, B. T., 1996, "Optimal Placement of Microphones and PZT Actuators for Far-Field Sound Radiation Control," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 99, No. 5, pp. 2975-2984.

VII. 參考文獻

15. Wang, B. T., 1996, "Optimal Placement of Microphones and PZT Actuators for Far-Field Sound Radiation Control," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 99, No. 5, pp. 2975-2984.
16. 王柏村，曾文饒，1996，「壓電材料樑之靜態響應分析」，*技術學刊*，第十一卷，第四期，第495-500頁。
17. Wang, B. T., 1996, "Characterization of Transfer Functions for Piezoceramic and Conventional Transducers," *Journal of Intelligent Material Structures and Systems*, Vol. 7, No. 4, pp. 390-398.
18. Wang, B. T., 1996, "The Evaluation of Cost Functions for Active Sound Radiation Control of a Simply-Supported Beam," *Journal of Acoustical Society of Republic of China*, Vol. 4, No. 1, pp. 39-61.
19. 王重杰，王柏村，1997，「應用壓電驅動器於懸臂樑之實驗模態分析」，*技術學刊*，第十二卷，第三期，第419-425頁。
20. Wang, B. T., 1997, "Feasibility Analysis of Using Piezoceramic Transducers for Cantilever Beam Modal Testing," *Journal of Smart Materials and Structures*, Vol. 6, pp.106-116.
21. 王柏村，陳榮亮，1997，「簡支板之實驗模態分析」，*國立屏東科技大學學報*，第六卷，第四期，第273-281頁。
22. Wang, B. T., 1998, "The PVDF Based Wavenumber Domain Sensing Techniques for Active Sound Radiation of a Simply-Supported Beam," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 103, No. 4, pp. 1904-1915.

VII. 參考文獻

23. 王柏村，陳榮亮，1998，「應用壓電晶片感應器於簡支板之實驗模態分析」，*力學期刊*，第十四卷，第二期，第147-154頁。
24. Wang, B. T., 1998, "Structural Modal Testing with the Use of Various Forms of Actuators and Sensors," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.12, No.5, pp. 627-639.
25. Wang, B. T., and Chen, R. L., "Smart Structural Modal Testing for Piezoceramic Beams," submitted to *Journal of Vibration and Acoustics*.
26. Wang, B. T., and Chui, T. S., "Determination of Unknown Impact Force for Arbitrary Structures," submitted to *Mechanical Systems and Signal Processing*.
27. Wang, B. T., and Chen, R. L., "The Use of Piezoceramic Transducers for Smart Structural Testing," submitted to *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*.
28. 王柏村，梁偉光，1998，「基於模態參數之結構缺陷預測」，*中華民國第二十二屆全國力學會議論文集*，第469-476頁。
29. 王柏村，吳德和，吳建德，1999，「樑結構受衝擊力之外力預測」，*中國機械工程學會第16屆全國學術研討會論文集*，第273-280頁。
30. 王柏村，梁偉光，2000，「應用智慧型材料結構系統於結構缺陷預測」，*中華民國振動與噪音工程學會第八屆學術研討會論文集*，第65-73頁。