

振動試驗機垂直輔助平台之模型驗證

王栢村¹ 陳志成²

¹國立屏東科技大學機械工程學系教授

²國立屏東科技大學機械工程學系研究生

國科會計畫編號：NSC-93-2622-E-020-003-CC3

摘要

本文目的為結合有限元素分析及實驗模態分析，對振動試驗機之垂直輔助平台結構進行模型驗證。首先，對發展的有限元素模型進行理論模態分析及收斂性分析；其次，說明模擬自由邊界之實驗架構及方法，即以衝擊錘為驅動器、加速度計為感測器之傳統實驗量測方式，並應用模態參數擷取技巧求得模態參數形式之實驗模態模型。最後，對兩者分析所得的系統內涵進行比對驗證，而得到足以代表實際結構之等效分析模型。結果顯示有限元素分析與實際模態分析結果相當吻合，平台結構模態特性可以被確認且有助於設計考慮，所發展之等效分析模型可以應用於設計變更，諸如尺寸最佳化分析等。

關鍵字：有限元素分析，實驗模態分析，振動試驗機

1. 前言

垂直輔助平台(Vertical Auxiliary Table)或激振器擴充平台(Shaker Head Expander) (以下簡稱平台)為振動試驗機主要組件之一。由於激振器之性能參數，如最大推力、最大加速度或行程極限皆為固定，為達到有效之振動試驗，平台之選用相當重要，其動態特性影響激振器效能及振動試驗機品質甚大。

美國軍方 MIL-STD-810F[1]規範中指出對於平台及其夾具應進行模態評估，也就是提供平台結構之模態參數，包括：自然頻率、模態振型、及阻尼比等。不論何種型式平台，皆在以擴大測試面積為主要考慮，環境科學技術學會(IEST)發展了衝擊振動夾具手冊[2]，探討各種振動及衝擊試驗用之夾具設計問題。如前述由於激振器音圈直徑較小，一般為了擴大可供測試面積，因此可以加上垂直輔助平台。待測物則可置於平台上，分析考慮事項應包括：平台含夾具之自然頻率、傳輸比，以確保在測試頻率範圍避免共振。

典型之平台為具有肋骨之平板結構，固然有諸多

理論分析文獻[3-5]探討其振動分析問題，但因肋骨形狀具多變化性，不易於進行理論解析，所以本研究將使用有限元素分析軟體進行理論模態分析。

模型驗證之目的在確認分析模型之合理性、正確性。對於這方面的研究，已有許多學者提出，王和曹[6] 探討一自由邊界板結構，首先進行有限元素分析並以實驗模態分析數據為依據來進行模型驗證。王等人[7] 以實驗模態分析配合有限元素分析，對振動試驗機之音圈結構進行模型驗證。Spruit et al.[8] 針對一簡支薄金屬板結構進行模型驗證，並透過多種技巧的使用來評斷實驗模態及有限元素模型之間的模型確認程度。Lucas et al.[9] 探討阿帕契直升機飛彈發射測試平台結構的有限元素模型及模態實驗之間的模型確認，其目的是發展一個飛彈發射台的動態模型以用來預測飛彈發射時的暫態情況。

本文將應用有限元素分析軟體建立理論分析模式，及實驗模態分析技術於實際平台結構之振動特性檢測，分別由理論及實驗探討平台結構之振動特性，以符合振動試驗機之測試規格要求。

2. 問題定義與分析目標

2.1 問題定義

常見之平台有方形、圓形、八角或其他特殊需求之測試面形狀，以適應於不同產品之測試需求。如圖一所示，為測試面 450 mm 見方之正方形平台，製造方式採鋁鎂合金鑄造後以 T6 時效處理，表面有棋盤式螺紋孔分佈，側邊以肋加強結構強度，其幾何參數及材料性質如表一。

2.2 分析目標

以有限元素分析軟體進行理論模態分析；另外也進行完整之實驗模態分析，求得實際平台結構之模態參數，以作為對理論分析模型從事驗證工作的參考依據。

3. 有限元素分析

利用 CAD 軟體 Solid Works 建立平台結構之 3D 模型並藉由 IGES 介面輸出至 Pro/E, 最後透過 ANSYS 與 Pro/E 之間的親和界面, 在 ANSYS 中得到完整之幾何模型。考慮平台為一體結構雖左右對稱, 但為求得實際結構的振動特性, 所以使用整體分析, 元素型式為線性立體元素(SOLID45), 如圖二(a)所示, 圖中(b)則說明有限元素模型的更新(Update)。位移限制及負荷條件因只進行自由邊界(free-free) 模態分析, 所以不用設定。

4. 實驗模態分析

主要目的為瞭解平台結構垂直方向的動態行為, 故僅在測試面進行量測點規劃如圖三, 平台每邊分十等分, 每等分長 50mm 共 100 點。將平台置於海綿墊並擺放於桌上來模擬自由邊界如圖四。實驗方法為固定敲擊平台第 30 點, 敲擊 3 次取平均, 因同時移動三粒單軸向加速度計來拾取響應信號, 故敲擊一次可得三筆資料, 透過四頻道頻譜分析儀(SigLab)將輸入、輸出信號經訊號處理後, 總共獲得 34 組、100 個頻率響應函數。最後以 MEscope 軟體, 使用 SDOF 方法進行曲線嵌合(Curve-fitting), 即可獲得系統模態參數, 如自然頻率、模態振型及阻尼比。

5. 結果與討論

5.1 收斂性分析

對有限元素分析過程, 最重要的莫過於確認分析結果之正確性。除了探討結構響應之合理性外, 也相當必要的就是對有限元素模型進行收斂性分析[10]。因此在對分析模型進行模態分析時, 亦需針對網格大小、元素數目與分析數據進行收斂測試, 其結果分別如表四及圖五所示。在考慮求解精度、求解時間及網格分佈等因素下, 判斷分析模型在 D 狀況(元素數目為 203093, 自然頻率誤差百分比已在 3% 以下)時, 已達收斂。

5.2 頻率響應函數與關聯性函數探討

實驗量測(Experimental)與合成曲線(synthesized)的頻率響應函數比對結果, 如圖六(a)、(b)所示。綜合討論如下:

(1) 實線為實驗量取到的頻率響應函數, 虛線為合成曲線是藉由曲線嵌合技術得到, 驗證兩曲線間的吻合

程度來判斷模態參數擷取結果的正確程度。圖 6(a) 為 $i=30$ 、 $j=30$, 即輸入點與輸出點同為第 30 點所得之頻率響應函數, 稱為同點頻率響應函數(Point FRF); 圖 6(b) 為 $i=98$ 、 $j=30$, 即輸入點為第 30 點, 輸出點為第 98 點所得之頻率響應函數, 稱為轉移頻率響應函數(Transfer FRF)。觀察兩曲線在自然頻率位置與曲線軌跡上均有相當程度地吻合, 顯示曲線嵌合結果甚佳。

(2) 對應於頻率響應函數之關聯性函數結果如圖中所示。關聯性函數愈接近於 1, 代表實驗所得之頻率響應函數可信度越高, 圖中之關聯性函數值大約接近於 1, 但在反共振點附近數值偏低, 此乃因為響應較小的緣故。就整體而言, 大致上均保持為 1, 表示實驗品質不錯。

5.3 模態參數驗證

一般模型驗證之流程圖, 如圖七所示。

5.3.1 自然頻率比對

初次分析(Base)與實驗的自然頻率值比對, 如表二。編號 R 為有限元素分析之剛體模態(rigid body mode), 編號 F 為有限元素分析之彈性模態(flexible body mode), 編號 E 為實驗模態分析之模態。其中發現一個問題, 分析模態 F-03 與實驗模態 E-05 的振型一致, 它們之間的 MAC 值達 0.94, 但分析較實驗提前 3 個模態出現且頻率值差異達 191Hz。考慮可能為自由邊界模擬(平台置於海綿墊並擺放在桌上)產生的勁度效應。解決方法乃將有限元素模型於底面處加上線性彈簧元素(COMBIN 14)如圖二(b), 透過 K 值的設定來代替可能發生的勁度影響; 此外也調整分析模型之材料性質, 經由此更新(Update)重新確認有限元素模型。又表二, 為 K 值設定為 1000 N/m 時, 再次分析及實驗的比對結果, 所有模態對的自然頻率誤差皆在正負 5.78% 以內, 明顯可感受到更新後之有限元素模型除了解決模態順序平移問題之外, 其自然頻率分佈更接近實驗結果。

5.3.2 模態振型比對

表三為分析頻寬 5000 Hz 以內, 10 對實驗振型與理論分析振型吻合的模態對。重要模態特性說明如下:

(1) 編號 R1~R6 為剛體模態, 其頻率皆為 0Hz, 此乃自由邊界平台合理之物理現象。
(2) F-01 與 E-01 為對角同向運動的 Torsion mode 模態

對。

- (3) F-02 與 E-02 為米字型振型，其對角同向運動但垂直邊振型反相的模態對。
- (4) F-03 與 E-03 為對邊同向上下運動的模態對。
- (5) F-04、F-05 與 E-04 為對角線同向運動的模態對，F-04、F-05 為軸對稱模態，兩者頻率相近但振型相反，而實驗中無法明確辨別而僅得一個模態。
- (6) F-06 與 E-05 為四角落同向 bending 的模態對。
- (7) F-07 與 E-06 皆為對角線同向運動而對邊同向上下運動的模態。
- (8) F-07、F-08；E-06、E-07 皆為軸對稱模態，它們在有限元素分析與在實驗模態分析中皆可明確辨別且同時對應的模態。

一般而言，若實驗與理論分析振型有良好相關性，則模態保證指標(MAC)數值會接近於 1；若 MAC 數值低於 0.05，則代表實驗與理論分析振型之間具有正交性。因分析中所得的振型為所有自由度耦合行為的振型，而實驗中只得垂直方向單自由度行為的振型，預期 MAC 值可能不佳。但結果顯示，只有軸對稱的模態對其 MAC 值不甚理想外(介於 0.58~0.68 之間)，其餘模態對之 MAC 值都很不錯，且從分析與實驗振型的實際觀察發現，它們之間確實擁有相當良好的吻合程度。

5.3.3 阻尼比探討

實驗進行中，因為在量測加速度響應時加了對數加權函數(Exponential Window)，故量測所得之響應會有阻尼加重之效應，必須加以修正[11]。表五為實驗與修正後之阻尼值，介於 0.02%~0.1%之間。一般而言，結構之阻尼比會隨著模態數增加而減少，因此修正之幅度也會較少，主要是因為模態數越高、阻尼之影響越小。針對其修正之幅度而言，大致符合模態數越高修正幅度越小之情形。

6. 結論

本文是利用實驗模態分析結合有限元素分析對振動試驗機之垂直輔助平台結構進行模型驗證、其目的是希望瞭解平台之系統內涵及確認分析模型之合理性、正確性，且得到足以代表實際結構之等效分析模型，除探討平台結構動態特性對振動試驗之影響程度，也可作為設計變更之參考。重要結果如下：

- (1) 根據結果顯示，自由邊界平台的模態驗證是成功

的，亦謂所發展出的等效分析模型是合理的且可信的。

- (2) FRF 量測時不適當的自由邊界模擬方式影響了模態的出現順序，而造成驗證上極大的困擾，而最好的解決方法乃是預測試階段即時觀察並就地排除。
- (3) 平台本身的第一個共振頻率出現在 1323 Hz，其對應的振型為對角同向運動的扭轉模態，乃結構及加強肋分佈形態下合理的現象。

實際情況下，平台結構係以螺栓鎖固於激振器上來擴大可供測試面積，因此平台結構的動態特性將因邊界條件的改變而有所不同。後續將進行螺栓鎖固邊界下平台結構的模型驗證，希望能透過分析預測方式即可進行振動分析等，期能不用透過實驗手段以達到節省實驗成本與縮短交貨時間。

謝誌

本研究承蒙國科會計畫與金頓科技股份有限公司經費支助，特以誌謝，國科會小產學計畫編號 NSC93-2622-E-020-003-CC3。

參考文獻

1. MIL-STD-810F, Test Method Standard for Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests, US Department of Defense, 2000.
2. IEST-DTE-RP-013, Shock and Vibration Fixturing, DRAFT, Institute of Environmental Sciences and Technology, 940E, Northwest Highway, Mount Prospect, IL 60056.
3. Holopainen, T. P., Finite Element Free Vibration Analysis of Eccentrically Stiffened Plates, Computers and Structures, Vol. 56, pp. 993-1007, 1995.
4. Barik, M. R., and Mukhopadhyay, M., Finite Element Free Flexural Vibration Analysis of Arbitrary Plates, Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 29, pp. 137-151, 1998.
5. Barik, Mukherjee, A, and Mukhopadhyay, M., Finite Element Free Vibration of Eccentrically Stiffened Plates, Computers and Structures, Vol. 30, pp. 1303-1317, 1988.
6. 王栢村，曹文昌，應用有限元素分析與實驗模態分析之結構模型驗證，中華民國振動與噪音工程

學會第十屆學術研討會論文集，第 131-138 頁，2002。

7. 王栢村，林政煌，李昆達，激振器音圈結構之實驗模態分析與模型驗證，中華民國第二十屆機械工程研討會論文集，台北，論文編號：C03-14，第 529-536 頁，2003。
8. Spruit, M. J., Karsen, C. V., and Vilmann, C. R., Modal Tseting & Modeling Considerations for a Thin Simply Supported Plate, Proceeding of the 22th International Modal Analysis Conference, Dearborn, Michigan, Paper No.s38p03, 2004.
9. Lucas, L. D., Garner, R., and Birdsong, B., Helicopter Missile Launcher Dynamics Prediction with Model Updating and Correlation, Proceeding of the 22th International Modal Analysis Conference, Dearborn, Michigan, Paper No.s14p01, 2004.
10. 王栢村，電腦輔助工程分析之實務與應用，全華科技圖書股份有限公司，第 4-20 ~ 4-48 頁，2001。
11. Trethewey, M. W., and Cafeo, J. A., Tutorial:Signal Processing Aspects of Structural Impact Testing, The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis, Vol. 7, No. 2, pp.129-149 ,1992.

Model Verification of Vertical Auxiliary Table for Vibration Testing Machine

Bor-Tsuen Wang , Chih-Cheng Chen
Department of Mechanical Engineering
National Pingtung University of Science and
Technology

NSC-93-2622-E-020-003-CC3

Abstract

The work adopts finite element analysis (FEA) and experimental modal analysis (EMA) to perform model verification for the vertical auxiliary table of vibration testing machine. First, modal analysis is performed to obtain modal parameters, and convergence analysis for the FE model is also studied. Second, the conventional EMA is applied to the auxiliary table in free boundary condition with the use of impact hammer and

accelerometer to obtain frequency response function (FRF). The experimental modal parameters can then be determined by the curve fitting process. Both FEA and EMA results agree reasonably well. In particular, modal characteristics of the vertical auxiliary table structure can be identified and beneficial to design consideration. The developed analytical model can also be used for further design modification such as the dimension optimization.

Keywords : Finite element analysis, Experimental modal analysis, Vibration testing machine

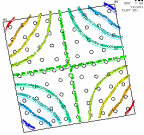
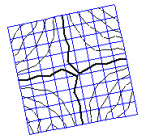
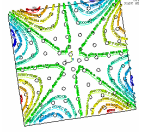
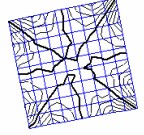
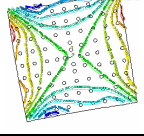
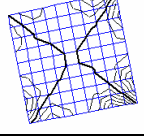
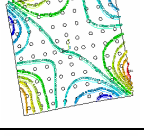
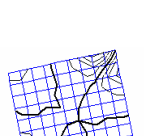
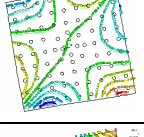
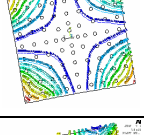
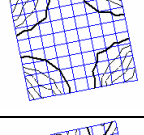
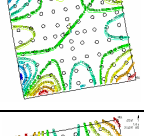
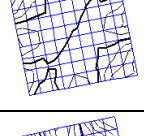
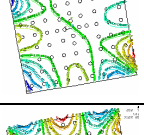
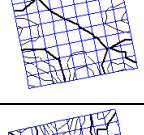
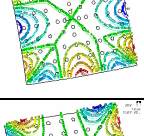
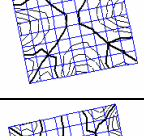
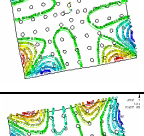
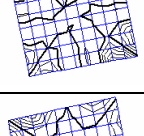

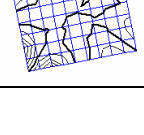
表一 450 型平台幾何參數及材料性質

種類	450 型
長	450 (mm)
寬	450 (mm)
高	150 (mm)
肋寬	12 (mm)
鋁鎂合金楊氏係數 (E)	7×10^4 (N/mm ²)
密度 (ρ)	2.65×10^{-9} (kg/mm ³)
蒲松比 (ν)	0.29

表二 分析與實驗的自然頻率值比對

FEA				EMA		Diff (%)	
Base		Update		編號	頻率 (Hz)	Base	Update
編號	頻率	編號	頻率				
R-1~6	0	R-1~6	0	×	×		
F-01	1325	F-01	1313	E-01	1323	0.13	-0.78
F-02	2003	F-02	1964	E-02	1873	6.93	4.85
F-03	2037			×	×		
F-04	2100	F-03	2061	E-03	2006	4.70	2.77
F-05	2125	F-04	2087	E-04	2033	4.54	2.68
F-06	2129	F-05	2091		2033	4.73	2.86
		F-06	2099	E-05	2228		-5.78
F-07	2531	F-07	2493	E-06	2494	1.82	-0.01
F-08	2539	F-08	2500	E-07	2520	0.41	-0.82
F-09	2753	F-09	2708	×	×		
F-10	2754	F-10	2710	×	×		
F-11	2776	F-11	2725	E-08	2662	4.29	2.37
F-12	3044	F-12	2985	E-09	2843	7.07	4.99
×	×	×	×	E-10	2888		
×	×	×	×	E-11	2904		
F-13	3127	F-13	3073	×	×		
F-14	3155	F-14	3096	E-12	2938	7.41	5.39
×	×	×	×	E-13	3085		
F-15	3354	F-15	3289	×	×		
F-16	3359	F-16	3297	×	×		
F-17	3435	F-17	3435	×	×		
×	×	×	×	E-14	3118		
F-18	3543	F-18	3478	×	×		
×	×	×	×	E-15	3131		

表三 平台測試面的振型比對及其 MAC 值(Update)

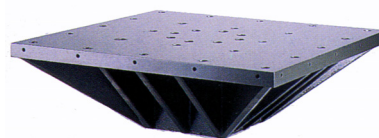
FEA (Update)		EMA		MAC
編號	振型	編號	振型	
F-01		E-01		0.9823
1313		1323		
F-02		E-02		0.9552
1964		1873		
F-03		E-03		0.7624
2061		2006		
F-04		E-04		0.6804
2087				
F-05		2033		0.6804
2091				
F-06		E-05		0.9441
2099		2228		
F-07		E-06		0.5855
2493		2497		
F-08		E-07		0.5991
2500		2520		
F-11		E-08		0.7127
2725		2662		
F-12		E-09		0.8146
2985		2843		
F-14		E-12		0.7312
3096		2938		

表四 不同元素分割下自然頻率值收斂情況

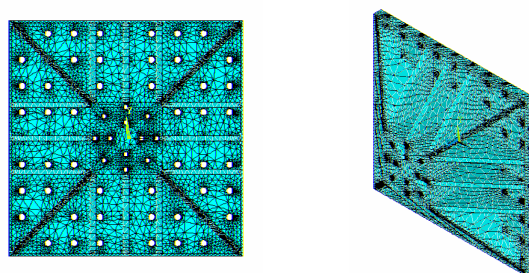
情況 模態	A	B	C	D	E	C vs. D Diff(%)
	元素數目					
	58267	91245	133693	213093	288980	
1	1429	1391	1334	1325	1316	1.13
2	2151	2107	2059	2003	1963	2.71
3	2278	2207	2073	2037	2023	1.75
4	2323	2213	2140	2100	2078	1.89
5	2325	2245	2168	2125	2099	1.99
6	2360	2251	2172	2129	2103	1.99

表五 實驗阻尼比及其修正值

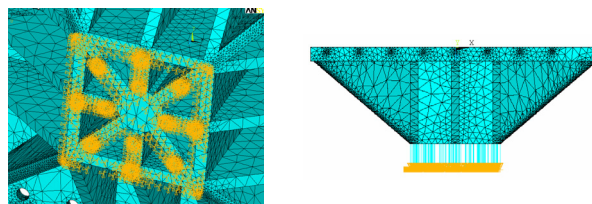
	實驗值 (%)	修正值 (%)		實驗值 (%)	修正值 (%)
E-01	0.1910	0.1042	E-12	0.0752	0.0362
E-02	0.1370	0.0758	E-13	0.0723	0.0352
E-03	0.1010	0.0440	E-14	0.0849	0.0482
E-04	0.1050	0.0486	E-15	0.0693	0.0327
E-05	0.1190	0.0676	E-16	0.0562	0.0225
E-06	0.0998	0.0538	E-17	0.0687	0.0363
E-07	0.1130	0.0676	E-18	0.0677	0.0358
E-08	0.0930	0.0499	E-19	0.1290	0.0981
E-09	0.0974	0.0571	E-20	0.1210	0.0903
E-10	0.0774	0.0378	E-21	0.0739	0.0436
E-11	0.0769	0.0374	E-22	0.0719	0.0423



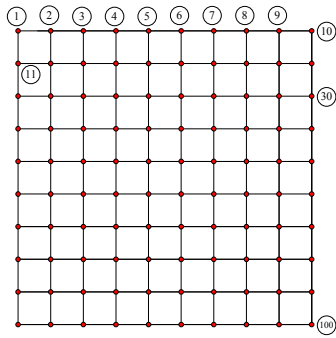
圖一 450 型平台實體圖



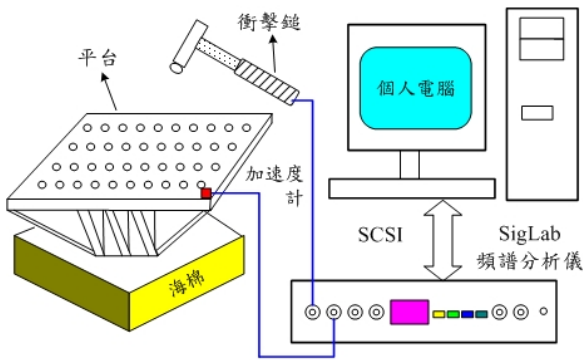
(a) 元素分割



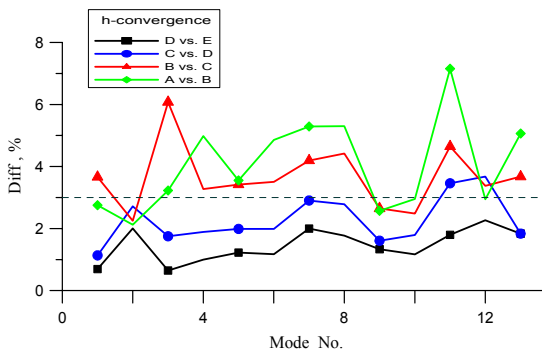
(b) 有限元素模型更新(Update)--線性彈簧元素的設定
圖二 平台有限元素模型及其更新(Update)



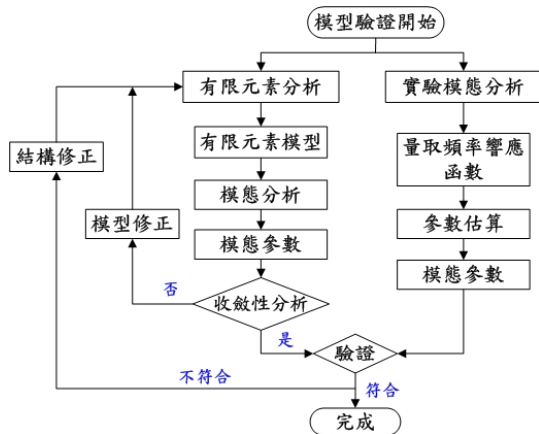
圖三 測試面量測點規劃



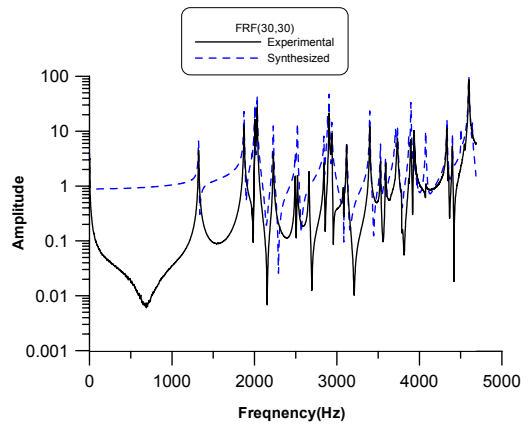
圖四 自由邊界模擬之實驗架構及方法



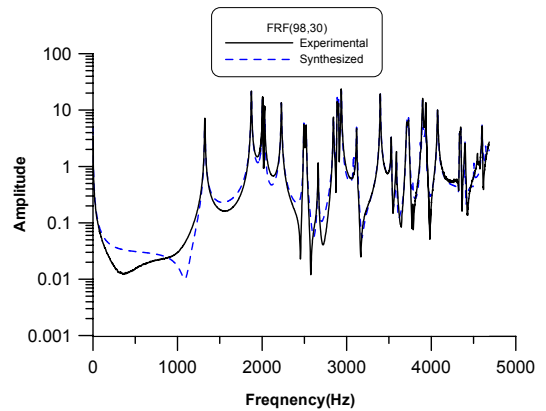
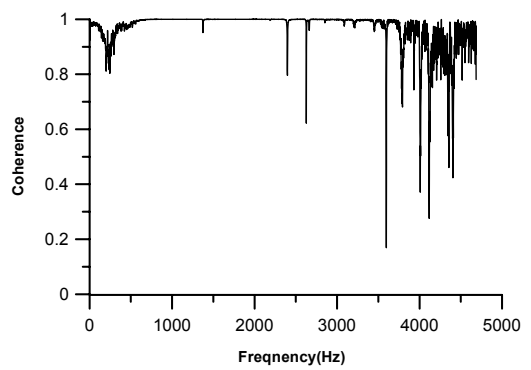
圖五 各模態之自然頻率值誤差百分比分佈



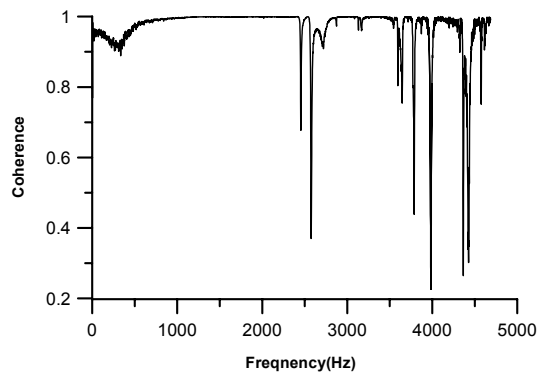
圖七 模型驗證流程



(a) 同點 H_{ii} , $i=30$ 、 $j=30$



(b) 不同點 H_{ij} , $i=98$ 、 $j=30$



圖六 平台頻率響應函數與關聯性函數