

含激振器動態效應之振動平台更新模型驗證

王栢村¹，李坤鴻²，李昆達³
屏東科技大學機械工程系 教授¹
屏東科技大學機械工程系 研究生²
金頓科技股份有限公司 研發處處長³
*E-mail: M9832037@mail.npust.edu.tw

摘要

本文將應用有限元素分析及實驗模態分析對含激振器動態效應之垂直輔助平台進行模型更新及驗證，更新後的振動平台有限元素模型，是藉由理論及實驗之模態參數比較，而得到驗證良好的有限元素模型。首先說明模型更新之理念，敘述如何從實際結構建立數學模型，藉由數學模型化假設，應用分析軟體建立實際有限元素模型。接著，應用分析軟體建立激振器結構之有限元素模型與實驗進行模型驗證，確認激振器有限元素模型之正確性，再將完成模型驗證後的激振器結構分析模型與振動平台分析模型結合完成模型更新與驗證，最後，期望得到比原始平台分析模型更能等效於實際結構之更新模型，確認更新模型之有效性。

關鍵字：垂直輔助平台、激振器、模型更新

Updated Model Verification for Vibration Table with Shaker Dynamic Effects

Bor-Tsuen Wang¹，Kun-Hung Lee²，David Lee³

Department of Mechanical Engineering, National Pingtung University of Science and Technology
No.1 Shuehfu Rd., Neipu, Pingtung, Taiwan
³Director, King Design

Abstract

This work adopts finite element analysis (FEA) and experimental modal analysis (EMA) techniques to update the mathematical model of vibration table including the dynamic effects of shaker. The calculated modal parameters of the update FE model of vibration table show good agreement with the experimental data and this makes validation of the recommended FE model. The updated model is first introduced. The mathematical model derived from the real structure and the FE models of the shaker and vibration table for software applications are, respectively, presented and discussed under some assumptions. Both FEA and EMA on the shaker can then be conducted to perform model verification. The validated shaker FE model incorporated with the vibration table model is used to study its dynamic effects on the vibration characteristics of the table with the shaker included. It is shown that the new model is much better and more effective in revealing the dynamic properties of the vibration table than the original one.

Keywords : vertical auxiliary table, shaker, model updating

一、前言

隨著現代科技的進步，無論是電子精密產品或是傳統產業，對於產品的品質要求也越嚴格，在產品檢測中環境試驗的振動測試也相當重要，而振動測試常使用振動試驗機進行振動試驗，振動試驗機可分垂直式及水平式方向的振動測試，利用振動試驗機長時間對待測物進行激振，由於垂直式的振動測試面積較小，一般而言，若欲進行垂

直式振動測試，則需在振動試驗機激振器(可簡稱音圈)上加裝垂直輔助平台擴大測試面積，所以振動平台之選用及設計就相當重要。

環境試驗包含了自然(氣候)環境試驗、複合試驗及動態(機械)環境試驗，而振動試驗則是動態(機械)環境試驗重要的一環，由林[1]環境試驗的介紹中，振動試驗的重點在於待測物固定方式、共

振頻率搜尋及試驗治具。固定方式影響試驗結果，共振頻率導致結構破壞之主因，經由振動頻譜分析，方能進一步規範環境篩選中找出潛在疾病。

過去探討過許多實驗模態分析及有限元素分析技術，由謝[2]介紹了振動量測中所必須使用的感測器種類，並說明整個實驗模態分析進行的步驟，說明每個步驟的涵義及其應用。Wang and Li[3]以有限元素法(finite element method, FEM)進行數值求解，及 ANSYS 軟體建構船之有限元素模型進行振動分析，並以等比例建造一縮小的實際模型進行實驗模態分析，針對隔振系統進行模型驗證，以得到等效實際結構的有限元素模型。在王和王[4]應用壓電片為驅動器進行實驗模態分析，並推導樑之理論方程式進行理論振動分析，包含了懸臂樑的自由振動分析及懸臂樑壓電片的強制振動分析，驗證顯示使用壓電片亦可求得懸臂樑之自然頻率、模態振型及阻尼比。

對於過去諸多研究中，已探討過振動試驗機激振器結構及不同型式之振動平台，王等人[5]對振動試驗機之激振器音圈進行實驗模態分析及有限元素分析，驗證了所建構之有限元素模型等效於實際結構。在王和陳[6],[7]對 450 型垂直輔助平台進行自由邊界與夾持邊界之模型驗證，分別應用實驗模態分析(experimental modal analysis, EMA)與有限元素分析(finite element analysis, FEA)得到結構之振動特性，進行模態參數比對驗證，確認所建構之有限元素模型等效於實際結構。王等人[8]對 600 型垂直輔助平台進行實驗模態分析、操作模態分析及有限元素分析，了解平台於靜態及動態時之振動特性，並驗證了有限元素模型與實際結構是等效的。王等人[9]探討 750 型垂直輔助平台之分析模型更新與驗證，建立比原始分析模型更符合實際結構之更新模型(音圈結構與平台)，並分別對音圈結構與平台含音圈結構模型進行模型驗證，得到等效實際結構之分析模型。Wang *et al.* [10]應用了 FEA 及 EMA 對 450 型垂直輔助平台進行自由邊界及固定邊界之模型驗證，並將以上驗證流程步驟建立垂直輔助平台設計驗證作業流程，並以範例確認此流程之可行性。

本文主要應用 FEA 及 EMA 將振動平台更新模型並進行模型驗證，在原始平台以彈簧模擬螺栓鎖固的情況時，模型驗證的結果並不理想，故將有限元素模型進行模型更新，求得到比原始平台分

析模型更等效於實際結構之分析模型。

二、振動平台之模型更新理念

本節要探討振動平台模型更新(model updating)[9]之理念，圖 1(a)平台實際鎖固於試驗機，圖 1(b)振動試驗機內部激振器與板片彈簧結合之情形，圖 1(c)為實際激振器結構，由以上圖說可略知振動試驗機激振器結構與振動平台結合之情形，有助於後續數學模型化假設及建立有限元素模型。

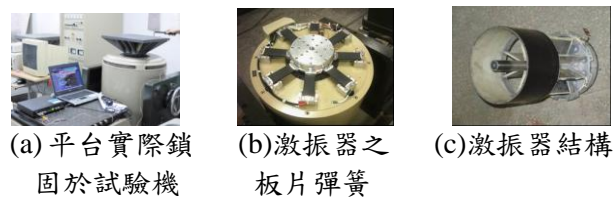


圖 1 振動試驗機激振器結構及平台架設於試驗機之情形[9]

在過去所探討之原始夾持邊界平台為圖 2(a)平台以彈簧模擬邊界情況，主要模擬平台實際鎖固於試驗機之情形，但此模型不包含激振器結構之效應，只針對平台與激振器結構之螺栓鎖固(k_1)及接觸面(k_2)設定不同之彈簧常數值。由於王和陳[7]夾持邊界平台之模型驗證結果並不理想，為了讓原始平台更能等效於實際結構，故將對此夾持邊界平台數學模型進行模型更新，圖 2(b)為激振器結構之簡易模型為模擬圖 1(b)、(c)之實際激振器結構，係以 8 個板片彈簧鎖固於試驗機上而假設，並設定模擬於板片彈簧之彈簧常數(k_1)。圖 2(c)為平台含激振器結構效應模型，彈簧常數(k_1)為板片彈簧之勁度，彈簧常數(k_2)則模擬螺栓鎖固之勁度，要建立平台含激振器結構分析模型之前，需確認圖 2(b)激振器結構模型之正確性。確認完後，才能將平台含激振器結構效應模型之假設套入理論振動分析，並進行實驗模態分析完成更新模型之模型驗證。

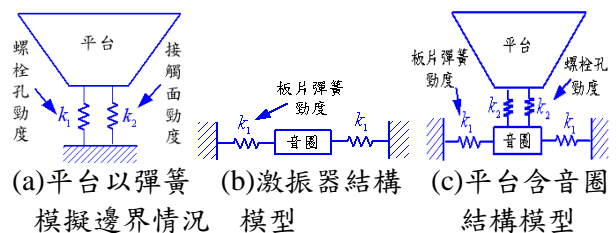


圖 2 原始夾持邊界平台模型及更新模型[9]

圖 3 為模型驗證之流程圖，分為理論(FEA)及實驗(EMA)兩部分，首先進入理論分析部分，利用有限元素分析軟體建構有限元素模型，並進行模態分析求得模擬後的模態參數，模態參數包含：自然頻率、模態振型，為了讓有限元素分析結果更具正確性，有必要對有限元素模型進行收斂性分析[11]，觀察求解精度及網格分佈是否合理，若收斂不理想則進行模型修正。理論模型若已達收斂，則進行實驗部分，實驗部分大致上有實驗模態分析或操作模態分析兩種，兩者都是量測其頻率響應函數，再利用模態參數擷取方法求得結構模態參數，實驗模態參數包含：自然頻率、模態振型、阻尼比，最後比較理論與實驗之模態參數，確認有限元素模型之正確性，倘若驗證結果不理想，最後將回到有限元素分析進行模型更新，再一次的循環理論部分與實驗做驗證，直到分析模型等效於實際結構才算完成。

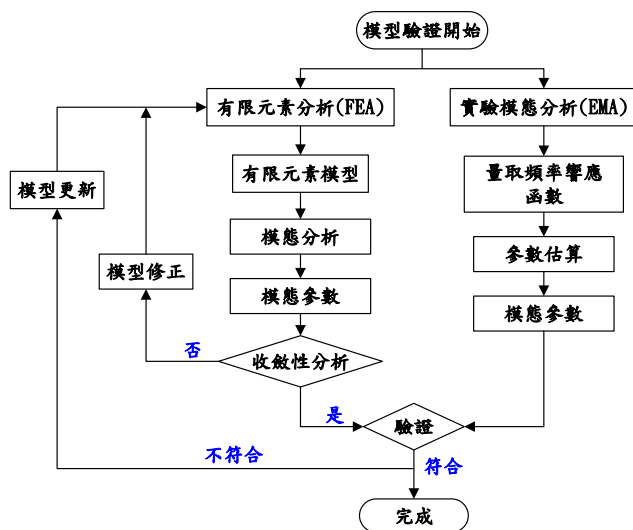


圖 3 模型驗證流程圖

三、振動試驗機激振器結構之模型驗證

藉由圖 2(b)激振器結構模型之假設，應用 ANSYS 分析軟體建構實際有限元素分析模型，進行模態分析並求得理論之模態參數，而實驗(EMA)部分則引用王等人[9]之激振器結構模態參數，最後比較兩者之模態參數完成模型驗證。

3.1 有限元素分析

過去研究之激振器結構[9]已完成模型驗證，故理論分析模型已達到等效，為了往後與平台結合，激振器結構分析模型由平台底部幾何形狀建立激振器結構幾何模型，而不同型式之平台有不同底面幾何形狀，受限於由平台底面建構激振器結構幾何模型之方法，必要建立不同激振器結構之

幾何模型，然而板片彈簧常數(k_1)是未知，已知的參數有重量、體積等條件，故必要調整材料參數達到目標，表 1 為激振器結構參數設定表，圖 4 為激振器結構之有限元素模型，敘述說明如下：

1. 元素型式：選用線性立體元素(solid45)建立不同以往激振器結構之幾何模型，並使用彈簧元素(comdin14)設定彈簧常數(k_1)於模擬板片彈簧之彈簧常數，因激振器結構動作只能單一往復運動，故彈簧元素自由度只設定 UZ 方向，並以 4 個彈簧元素來顯現實際板片彈簧之效應。
2. 分割形式：將對螺栓鎖固之孔徑大小設定元素大小為 5，其它元素大小皆設定為 8，採 free-mesh，總共使用了 68395 個節點，及 385389 個元素。
3. 負荷條件：只進行模態分析故無外力設定。
4. 邊界設定：將邊界固定於模擬下之板片彈簧末端，設定所有自由度為 0。

表 1 激振器結構參數設定表

參數	數值
質量(m)	12 kg
體積(V)	$1.2363 \times 10^{15} \text{ m}^3$
密度(ρ)	7980 kg/m^3
楊氏係數(E)	$111477 \times 10^6 \text{ N/m}^2$
浦松比(ν)	0.29
彈簧常數(k_1)	20365636 N/m

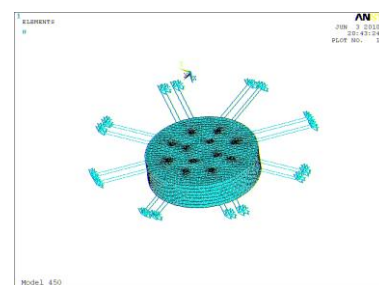


圖 4 激振器結構有限元素模型

3.2 結果與討論

表 2 為激振器 FEA 與 EMA 之模態參數比較表，引用王等人[9]實驗之激振器結構模態參數，由表可觀察出無論是激振器結構 FEA 之模態參數或是新激振器結構 FEA 之模態參數，皆與 EMA 實驗模態振型吻合且以(2,2)彈性模態呈現，由於 F-07 之前皆為剛體模態，在此暫時不做討論，而自然頻率誤差也皆在 1% 以內，表示新建立的激振器結構分析模型已為等效模型。

表 2 激振器 FEA 與 EMA 之自然頻率誤差表

激振器結構 FEA[9]		EMA 實驗[9]		新激振器結構 FEA		頻率誤差 (%)
模態數/ 自然頻率	模態振型	模態數/ 自然頻率	模態振型	模態數/ 自然頻率	模態振型	
F-07/ 4254		E-15/ 4222.2		F-07/ 4237		0.35
F-08/ 4262		E-16/ 4278.9		F-08/ 4246		-0.77

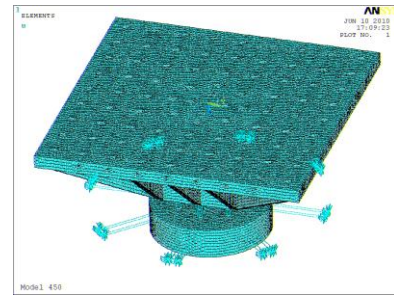


圖 5 振動平台更新之有限元素模型

四、振動平台含激振器結構之模型驗證

由第 3 節已模型驗證完成之激振器結構分析模型，將激振器結構分析模型結合平台以得到更新後之結構模型，並進行模態分析及簡諧分析，以及更新模型之模型驗證探討。

4.1 有限元素分析

為了驗證模型更新之理念與確認平台正確性，再一次對振動平台進行模型更新，藉由圖 2(c)平台含激振器結構模型之數學假設，將圖 4 之激振器結構有限元素模型與平台結合建立更新模型，圖 5 為振動平台更新之有限元素模型，更新模型建立的說明如下：

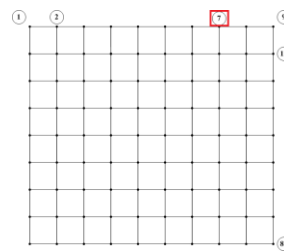
1. 元素型式：選用線性立體元素(solid45)建立平台與激振器結合之分析模型，並使用線性彈簧(Combin14)元素模擬螺栓鎖固與實際板片彈簧固定之情形，分別設定板片彈簧(k_1)值及螺栓鎖固(k_2)值，由於激振器結構只能往復一種方向運動，故彈簧元素只設定 UZ 方向之自由度。
2. 分割形式：將對螺栓鎖固之孔徑大小設定元素大小為 5，其餘部分皆為 6，採 free-mesh，總共使用了 79670 個節點，及 344846 個元素。
3. 負荷條件：進行模態分析無外力設定，若進行簡諧響應分析則模擬實際量測點之衝擊點位置給予一單位 Z 方向之簡諧外力。
4. 邊界設定：將邊界固定於模擬下之板片彈簧末端，設定所有自由度為 0。

表 3 平台結構參數設定表

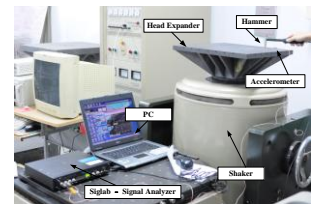
參數	數值
長	0.45(m)
寬	0.45(m)
高	0.15(m)
肋寬	0.012(m)
鋁鎂合金楊氏係數	$7 \times 10^{10}(\text{N/m}^2)$
密度(ρ)	$2650(\text{kg/m}^3)$
浦松比(ν)	0.29

4.2 實驗模態分析

本實驗主要針對振動試驗機之垂直輔助平台，如圖 1(a)所示進行實驗模態分析，首先對平台進行量測點規劃，如圖 6(a)所規劃之 81 點。如圖 6(b)所示為實驗模態分析的儀器架設圖，為瞭解平台結構垂直方向的動態特性，將振動平台鎖固於振動試驗機上，在測試面上進行量測點數規劃，取每等分長 56.25mm 將平台每邊劃分為八等分總共 81 點。以單軸向加速度計固定於第 7 點，並移動衝擊錘來進行實驗，每點敲擊 3 次取其平均，總共可獲得 81 個頻率響應函數。



(a)實驗點數規劃

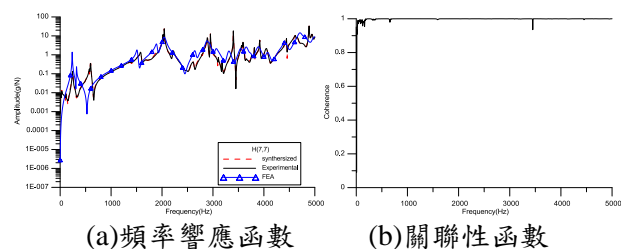


(b)實驗儀器架設

圖 6 振動平台實驗量測規劃

4.3 模型驗證結果與結論

圖 7 為頻率響應函數及關聯性函數圖，分別為同點 $H_{07,07}$ 及不同點 $H_{01,07}$ 的頻率響應函數及關聯性函數，可看到實驗的 FRF，除了低頻的實驗及 FEA 之峰值無法對應到之外，高頻區域對應良好，然而合成曲線與實驗則是完全吻合，關聯性函數幾乎都趨近於 1，只有在反共振點處會有趨近於零的結果，表示實驗品質相當良好。



(a)頻率響應函數 (b)關聯性函數

圖 7 同點頻率響應函數 $H_{07,07}$ 及關聯性函數

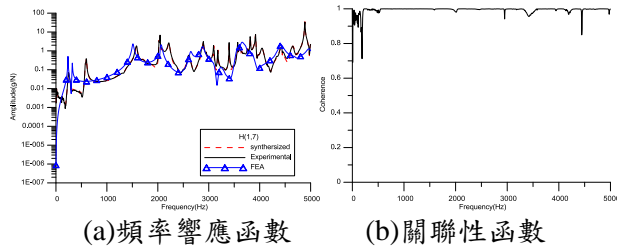


圖 8 不同點頻率響應函數 $H_{01,07}$ 及關聯性函數

應用 ANSYS 軟體建立出更新模型並求得理論之模態參數，與實際平台架設情形進行實驗模態分析所量測之實驗模態參數進行比較，首先觀察表 4 原始夾持邊界模型、EMA 實驗及更新模型之模態振型比對表，分別有原始夾持邊界模型、EMA 實驗及更新模型(New)三大項。

從原始夾持邊界模型[7]與 EMA 實驗之模態參數的比較，原始夾持邊界的模態振型 O-1、O-2、O-3、O-6、O-9、O-10、O-11、O-13、O-17、O-18、O-20、O-21、O-22、O-31、O-32、O-37 有與實驗對應 E-2、E-7、E-8、E-10、E-11、E-13、E-14、E-15、E-16、E-17、E-21、E-22、E-24、E-25，而其它模態振型則無法與實驗相對應。

另外，從表 5 的原始夾持邊界模型與 EMA 實驗自然頻率比較，低頻部分 O-01、O-02 自然頻率誤差極大，雖然 O-10、O-11、O-37 自然頻率誤差在 3% 以內，但在高頻 O-03、O-20、O-32 誤差也高達 11%~15% 內，其餘自然頻率皆在 3~9% 之間，總觀看來雖然有部分模態相對應，但自然頻率誤差偏高，代表原始夾持邊界之模態參數未能與實驗之模態參數相吻合。

接著比較模型更新(NEW)與實驗之模態參數，藉此觀察出模態振型對應還不錯，除 N-13、N-16、N-23 無法對應之外，其中有一模態之模態保證指標(modal assurance criterion, MAC)值為趨近於 0 的情況則屬於軸對稱模態。由表 5 原始夾持邊界模型、EMA 實驗及更新模型之自然頻率總表可觀察出，雖然 N-01、N-02、N-03、N-20 自然頻率誤差 19% 以上，甚至低頻時還有 108% 的極大誤差量，但其餘自然頻率皆在 0.01%~2.70% 之間，且 MAC 值介於 0.437~0.959 之間，與原始夾持邊界模型比較之下，更新模型也較能與實驗相符合，故更能確認更新模型比原始夾持邊界模型等效於實際結構。

表 4 原始夾持邊界模型、EMA 實驗及更新模型之模態振型比對表

原始夾持邊界模型[7]		EMA 實驗		更新模型(New)		MAC/ 頻率 誤差 (%)	
模態數/ 自然頻率	模態振型	模態數/ 自然頻率	模態振型	模態數/ 自然頻率	模態振型		
O-01		E-02 113.52		N-02		0.959 /108.43	
558				236.61			
O-02				N-01		0.001 /108.23	
564			236.39				
		E-03		N-03		0.006 /30.80	
		245.54		321.17			
		E-05					
		576.72					
O-03		E-07		N-04		0.593 /-4.85	
1354		1588.5		1511			
O-06		E-08		N-05		0.853 /0.16	
2100		2023.6		2027			
		E-09 2044.7		N-06		0.679 /0.01	
				2045			
				N-07		0.268 /0.01	
O-09		E-10		N-08		0.918 /-6.93	
2396		2219.6		2066			
O-10		E-11 2613.8		N-09		0.085 /1.27	
2548				2647			
O-11				N-10		0.794 /1.46	
2554			2652				
		E-12		N-11		0.760 /0.75	
		2779.9		2759			
O-13		E-13		N-12		0.802 /0.41	
2768		2891.3		2879			
O-12				N-13			
2766				2883			
O-17		E-14		N-14		0.842 /-1.04	
3155		2951.2		2921			
O-18		E-15		N-15		0.519 /-0.27	
3353		3099.6		3091			
O-20		E-16		N-20		0.799 /19.77	
3542		3178.2		3807			

表 4 原始夾持邊界模型、EMA 實驗及更新模型之模態振型比對表(續)

原始夾持邊界模型		EMA 實驗		更新模型(New)		MAC 誤差 誤差(%)	
模態數/ 自然頻率	模態振型	模態數/ 自然頻率	模態振型	模態數/ 自然頻率	模態振型		
O-21		E-17		N-17		0.937 /-2.7 0	
3561		3401.6		3310			
		E-18 3588.0		N-18		0.040 /-1.2 0	
				3545			
				N-19			3545
				3545			
		E-19		N-20		0.892 /-0.2 3	
				3815.2			3807
		E-20		N-21		0.757 /-0.7 2	
				3919.2			3891
O-22		E-21		N-22		0.537 /8.96	
3699				4050.9			4414
O-31		E-22		N-24		0.480 /0.34	
4209				4446.8			4462
		E-23		N-27		0.693 /3.56	
				4624.7			4789
O-37		E-24		N-25		0.437 /1.18	
4650				4632.4			4707
		E-26		N-26		0.437 /1.21	
				4789			4707
O-32		E-25					
4226				4886.5			
O-39		E-26		N-27		0.616 /-3.2 5	
4732				4950.2			4789
		E-28		N-28		0.639 /0.48	
				4974			4974
		E-27		N-29		0.453 /0.05	
				4990.9			4993

表 5 原始夾持邊界模型、EMA 實驗及更新模型之自然頻率總表

原始夾持邊界模型			EMA 實驗		更新模型(New)			MAC
模態數	自然頻率 (Hz)	自然頻率 誤差(%)	模態數	自然頻率 (Hz)	模態數	自然頻率 (Hz)	自然頻率 誤差(%)	
O-01	558	391.54	E-02	113.52	N-02	236.61	108.43	0.959
O-02	564	396.82			N-01	236.39	108.23	0.001
			E-03	245.54	N-03	321.17	30.80	0.006
			E-05	576.72				
O-03	1354	-14.76	E-07	1588.5	N-04	1511	-4.85	0.593
O-06	2100	3.78	E-08	2023.6	N-05	2027	0.16	0.853
			E-09	2044.7	N-06	2045	0.01	0.679
					N-07	2045	0.01	0.268
O-09	2396	7.95	E-10	2219.6	N-08	2066	-6.93	0.918
O-10	2548	-2.52	E-11	2613.8	N-09	2647	1.27	0.085
O-11	2554	-2.29			N-10	2652	1.46	0.794
			E-12	2779.9	N-11	2759	-0.75	0.760
O-13	2768	-4.26	E-13	2891.3	N-12	2879	-0.41	0.802
O-12	2766				N-13	2883		
O-17	3155	6.91	E-14	2951.2	N-14	2921	-1.04	0.842
O-18	3353	8.18	E-15	3099.6	N-15	3091	-0.27	0.519
O-20	3542	11.45	E-16	3178.2	N-20	3807	19.77	0.799
O-21	3561	4.69	E-17	3401.6	N-17	3310	-2.70	0.937
			E-18	3588.0	N-18	3545	-1.20	0.040
					N-19	3545	-1.19	0.655
			E-19	3815.2	N-20	3807	-0.23	0.892
			E-20	3919.2	N-21	3891	-0.72	0.757
O-22	3699	-8.69	E-21	4050.9	N-22	4414	8.96	0.537
O-31	4209	-5.35	E-22	4446.8	N-24	4462	0.34	0.480
			E-23	4624.7	N-27	4789	3.56	0.693
					N-25	4707	1.18	0.437
O-37	4650	-0.05	E-24	4652.4	N-26	4707	1.21	0.437
O-32	4226	-13.52	E-25	4886.5				
O-39	4732	-4.41	E-26	4950.2	N-27	4789	-3.25	0.616
					N-28	4974	0.48	0.639
			E-27	4990.9	N-29	4993	0.05	0.453

五、結論

本文應用 FEA 與 EMA 將振動平台更新模型並進行模型驗證，為了再次驗證模型更新之可靠度，故套用不同平台進行模型更新，並得到比原始平台分析模型更等效於實際結構之更新模型，結論統整如下：

1. 在有限元素分析，對應不同型之振動平台所建立的激振器幾何模型也不同，由實驗與理論之模態參數比對，排除剛體模態不探討，彈性模態對應良好，自然頻率誤差也在正負 1% 以內，代表所建立之激振器有限元素模型已達等效。
2. 藉由模型更新之理念與模態參數之驗證，更新模型之模態振型比對比原始夾持邊界模型對應良好，自然頻率誤差也降低很多，故確認了更新模型比原始夾持邊界模型更能等效於實際結構，且更能顯現出符合實際結構之振動特性。

誌謝

本文感謝金頓科技股份有限公司產學交流合作，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。

參考文獻

- [1] 林育堯，1997，「環境試驗與可靠度試驗概述」，*電子檢測與品管季刊*，第 30 卷，第 17-24 頁。
- [2] 謝華棟，1994，「振動量測技術及其應用」，*機械月刊*，第 20 卷，第 12 期，第 229-236 頁。
- [3] Wang, G., and Li, L., 2001, “Finite Element Analysis and Experimental Research on the Reduction of Vibration and Structural Noise in Ship”, *The 8th International Congress on Sound and Vibration*, Hong Kong, China, pp. 1373-1380.
- [4] 王栢村，王重杰，1997，「應用壓電驅動器於懸臂樑之實驗模態分析」，*技術學刊*，第 12 卷，第 3 期，第 419-425 頁。
- [5] 王栢村，林政煌，李昆達，2004，「激振器音圈結構之實驗模態分析與模型驗證」，*中國機械工程學會第二屆全國學術研會*，台北，第 529-536 頁。
- [6] 王栢村，陳志成，2004，「振動試驗機垂直輔助平台之模型驗證」，*中國機械工程學會第二十一屆全國學術研討會*，高雄，論文編號：C0300666。
- [7] 王栢村，陳志成，2004，「夾持邊界下垂直輔助平台之模型驗證」，*2004 中國航太學會 / 中華民航學會聯合學術研討會*，台中，論文編號：13-1。
- [8] 王栢村，李沛緯，陳郁伶，2005，「振動試驗機垂直輔助平台之模型更新」，*2005 Taiwan ANSYS Users Conference*，花蓮，第 4-27~4-34 頁。
- [9] 王栢村，黃俞憲，李昆達，2009，「振動平台之更新模型與平坦度驗證」，*第二十六屆中國機械工程學會 CSME 全國學術研討會*，台南，論文編號：B10-021。
- [10] Wang, B.T., Zhuang, F. R., and Lee, D., 2007, “Development of Design Process for Auxiliary Table of Vibration Testing Machine,” *The 15th Conference on Sound and Vibration*, Taipei, No. A-11.
- [11] 王栢村，2001，*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，台北。