

## 衝擊試驗機滑動平台之模型驗證

王栢村<sup>1</sup> 陳克強<sup>2</sup> 李昆達<sup>3</sup>

<sup>1</sup>國立屏東科技大學機械工程學系教授

<sup>2</sup>國立屏東科技大學機械工程學系研究生

<sup>3</sup>金頓科技股份有限公司 研發處處長

國科會計畫編號：NSC-94-2622-E-020-002-CC3

### 摘要

本文主要利用實驗模態分析結合有限元素分析的方式來對衝擊試驗機滑動平台做模型驗證，首先進行模態分析，並探討有限元素模型收斂情況以確定元素分割合理性。實驗採用衝擊鏈配合加速度計的方式對平台頂面做量測，之後經由曲線嵌合以求得模態參數，經實驗與有限元素分析結果比對進行模型修正後相當吻合，可以確認分析模型之正確性，代表模型驗證相當成功，所發展出等效分析模型可應用於衝擊響應之分析，及探討與衝擊平台設計變更之參考。

關鍵字：有限元素分析，實驗模態分析，衝擊試驗機

### 1. 前言

隨 IC 產業蓬勃發展，電子產品銷量日益居多，品質要求也愈來愈高。產品出廠前須經過環境試驗以確保其可靠度。在相關產品環境試驗研究方面林 [1] 指出振動及衝擊測試是電子連接器與線纜組之環境試驗項目中的一環。楊 [2] 也由電機產品製造商的品質觀點探討：振動測試(vibration test)、衝擊測試(shock test)、落下測試(drop test)，以考驗產品品質。由於產品在使用、搬運及運輸過程中皆會遭遇衝擊環境所累積之損害，因此衝擊測試為環境試驗中重要的一環。

在有關衝擊環境測試中，ASTM D3332 設計規範指出衝擊滑動平台即必須有足夠之勁度與剛性以保持水平之平整度(flatness)，同時自由落下時不能有平移或翻轉。而美國軍方 MIL-STD-883E (1996) [3] 規範指出衝擊試驗設備必須提供 500-3000g(peak)之半正弦衝擊脈波(half sine pulse)，衝擊時間在 0.1-1ms 之間，此半正弦波僅允許 20% 以內之誤差，每個軸向必須承受 5 次衝擊波，包括正負方向。

本文主要利用模型驗證(Model Verification)的理念來對衝擊試驗平台(以下簡稱平台)做模型驗證，模型驗證主要在求的系統內涵，方法主要運用理論分析與實驗模態分析來求得結構模態參數如自然頻率與阻尼比等，並將其互相比對，目的在於確認理論分析模型的合理性正確性。由於平台形狀複雜不易以理論分析，因此理論研究方面以有限元素分析作為基礎配合實驗模態分析來完成模型驗證。

在相關模型驗證研究方面，王和曹[4]探討了自由

邊界版結構，首先進行有限元素分析並以實驗數據來完成模型驗證。王和陳[5]對一振動試驗機垂直平台做模型驗證。文獻[6-8]也都運用了實驗模態分析結合有限元素分析理念來做模型驗證。而 Ren et al. [9] 利用模型驗證來發展出斜張橋之等效分析模型(analytical model)，之後將其利用隨機機振的方式來預測橋樑的響應(response prediction)並且將其應用在健康監測上(health monitoring)，可作為日後維護橋樑的參考。

有鑑於此，本文利用實驗模態分析結合有限元素分析來對自由邊界下的衝擊平台做模型驗證，目標為得到衝擊平台之等效有限元素模型。未來可將進行響應預測分析(response prediction)，模擬實際挾持邊界情況下之衝擊響應探討，以作為變更平台設計的依據。

### 2. 有限元素分析

衝擊平台如圖 1 所示，頂面方正部分為測試面積並附有螺紋孔可用來挾持受測物，兩端突出圓孔部分(Guide)則為平台夾持於衝擊試驗機滑軌上所用。平台幾何尺寸與材料性質如表 1 所示。平台實體模型主要利用 SolidWorks 軟體來架構並轉入 ProE 存成 IGES 圖檔再讀入 ANSYS 來建立有限元素模型。元素分割選用 SOLID45 線性立體元素並採用 FreeMesh 方式來進行元素分割。元素分割時省略螺紋孔以避免元素分割量過大導致求解不便，再者考慮圓孔體積與整體體積之差異頗大，故省略螺紋孔產生之效應。

在收斂性分析[10]探討方面，分割元素量約從 1 萬增至 2 萬個，分為 6 組 case 如表 2 所示，圖 2 為各模態收斂情形，可看出 case D ~ F 中各模態自然頻率均已收斂至 3% 以下。由於考慮元素量不宜過多，故以 case E(元素量 17464 個)之模型來進行求解，圖 3 為 case E 之分析有限元素模型。ANSYS 求解方面假設平台在自由邊界狀態進行模態分析，故不須設定邊界條件及外力負荷，求解頻寬設定為 0~6000Hz。

### 3. 實驗模態分析

實驗量測主要以平台頂面做為量測面，來量取垂直(Z)方向響應。圖 4 為實驗量測規劃點，可將平台頂面視為平板，於理論分析時發現有(3,3)模態，經四倍原則將量測點分為 190 點，實驗時將加速度計固定於第 1 點，移動衝擊鏈依序激振各點且每點敲擊 3 次取

平均，並搭配 4 頻道 SigLab 頻譜分析儀來做訊號擷取分析得到頻率響應函數(FRF)。

圖 5 為實驗架設方式圖，可看出實驗儀器架設與平台支撐的方式，模擬自由邊界的方法是將平台置於兩根木材上，因木材相對於鋁鎂合金勁度來得小，實驗時不易激振出地面勁度效應。分析儀頻寬設為 0~5000Hz，實驗後將所量測的 FRF 資料則使用 ME'Scope 軟體來做曲線嵌合並採用多自由度的曲線嵌合方法來求得模態參數。

## 4. 結果與討論

### 4.1 頻率響應函數與關聯性函數探討

實驗時採用固定加速度計於第 1 點而移動衝擊錘的方式來量測 190 個規劃點，衝擊錘激振時採用敲擊 3 次取平均。圖 6 為同點與不同點之頻率響應函數(FRF)與關聯性函數圖形，綜合討論如下：

1. 同點頻率響應函數(Point FRF)於本實驗中為  $i=1, j=1$  代表輸出與輸入為同一點。而不同點頻率響應函數(Transfer FRF)；稱為轉移函數，實驗中  $i=1, j=28$  代表響應輸出為第 1 點，衝擊輸入為第 28 點。
2. 由圖中可看出同點與不同點合成頻率響應函數曲線(Synthesized)與實驗測得的頻率響應函數曲線(Experimental)均相當的吻合，代表曲線嵌合結果相當理想。
3. 實驗採用敲擊 3 次取平均，關聯性函數若越接近 1 表示所得之頻率響應函數可信度越高。由圖 6 看出關聯性函數除了在低頻響應較差處與反共振點處有下降外其餘均保持在 1，整體而言可見實驗品質相當理想。

### 4.2 模態參數驗證

本文以實驗模態分析結合有限元素分析來完成模型驗證，圖 7 為衝擊平台模型驗證流程圖。驗證方法分為實驗模態分析與有限元素分析兩種方法；其分別可求得自然頻率、模態振型等模態參數。將兩者結果互相比對，若成功則完成模型驗證。本文以最佳化的理念，定義分析目標為使理論與實驗所得之自然頻率誤差減到最小、設計變數為材料楊氏係數值與密度來修正分析模型以完成模型驗證。

#### 4.2.1 自然頻率比對

自然頻率比對方面，同時配合表 3 與表 4 來說明。表 3 為未更新有限元素模型材料係數前(FEA1)的分析結果及經最佳化更新材料係數後之結果(FEA2) 與實驗結果比較，表中模態編號 R-1 代表理論分析剛體模態，F-01 代表理論分析的第 1 個彈性模態，E-01 代表實驗求得的第 1 個模態。表 4 為平台測試面模態振型比對，在振型物理意義代號方面；表中對應模態如 F-01 與 E-03，其振型物理意義為 F(3,1)，意思是將平台頂面視為平板，為整體的(3,1)模態，而 F 07 其振型物理意義為 PLANE，代表平台頂面 XY 方向平面運動。

F-15 與 E-16 振型物理意義中 M(3,2)與  $G1^{st}B$  代表

此時將平台分成中央方正部份(M)與兩旁 Guide(G)部份來探討模態振型，M(3,2)代表平台頂面中央方正部份為平板 (3,2)模態， $G1^{st}B$  代表平台兩旁 Guide 為第一個 Bending 模態，在振型物理意義中 G-ST 與 G-AT 則分別代表 Guide 部分為同向扭轉與反向扭轉運動模態。表 3 配合表 4 自然頻率比對結果綜合討論如下：

1. 表 3 中有反白的部份為實驗與理論無對應到的模態，而未反白者為實驗與理論有對應到的模態，首先在 FEA1 與 FEA2 編號 R-1~6 為理論分析的前 6 個剛體模態，實驗中 E-01~02 為實驗所得的剛體模態，由於 R-1~6 為頻率接近 0 的剛體模態與 E-01~02 因邊界所造成之剛體模態有所不同，故此部份模態無對應。
2. 在理論分析的 F-07、F-09、F-10、F-17、F-18、F-19、F-23 模態與實驗並無對應，原因為這些模態之振型均屬於 X-Y 平面伸張模態，因為在理論分析中所求得之振型是三軸向耦合的，而實驗只量測平台頂面 Z 方向之響應，故此部份模態與實驗無對應。
3. 在實驗分析中，E-08 與 E-12 兩模態與理論分析無對應，原因為 E-08 與 E-07 其自然頻率相當接近，其模態振型相似所以為對稱模態，故和理論分析無對應，而 E-12 與 E11 也有相同的現象，因此實驗 E-12 模態與理論也無對應到。
4. 自然頻率比對誤差方面；可以從表 3 中發現 FEA1 與實驗所求得的自然頻率誤差均相當的大，因此考慮以最佳化更新材料係數來修正有限元素模型使與實驗有良好之對應結果。
5. FEA2 為經最佳化後之分析結果，其與實驗結果比對方面可以看出頻率在 3700Hz 內之自然頻率誤差均在正負 4.24% 以下，明顯比 FEA1 分析的結果誤差小。
6. FEA2 在更新材料係數後多增加了 F-28~31 之模態，此部份模態並無與實驗結果對應，原因在於理論分析求解頻寬設為 0~6000Hz，而實驗分析頻寬為 0~5000Hz，而導致此部分模態與實驗無對應到。

#### 4.2.2 模態振型比對

比對模態振型方式主要以 MAC 值做為比對指標，MAC 值愈接近 1 代表兩模態振型愈相似；若 MAC 數值低於 0.005 則代表實驗與理論分析之振型具有正交性。由表 3 與表 4 平台測試面的振型比對及 MAC 值可看出在模態有對應的情況下大部分 MAC 值均接近於 1，但有些對應模態 MAC 值偏低，其相關振型比對探討如下：

1. 首先在有對應到的振型中；「F-01~05 與 E-03~07」、「F-06 與 E-09」、「F-08 與 E-10」、「F-11 與 E-11」、「F-12 與 E-13」、「F-14 與 E-15」由表 4 中可以看出均為的整體 Z 方向平板模態，此部份的 MAC 值均非常接近 1，如「F-01 與 E-03」其振型物理意義為 F(3,1)，F 代表將平台頂面視為一

整體的平板，而平板振型為(3,1)模態，在此部分的模態在理論分析與實驗求得之振型均是明顯的垂向運動，因此MAC值會很高，表示理論與實驗的振型相當一致。

2. 在「F-13與E-14」、「F-16與E-17」、「F-24與E-21」、「F-27與E-24」四組對應模態中，其模態振型可看出均分為M(中央方正部份)與G(平台Guide部份)，在比對整體模態振型時(F)，發現MAC值均很低，因此另外探討只比對衝擊平台Guide部分之振型。
3. 在比對Guide部分之振型後，結果顯示F-16與E-17、F-27與E-24的Guide部分MAC值均比原先整體模態振型MAC值高，代表在Guide處其振形式相似的，然而「F-13與E-14」、「F-27與E-24」的Guide部分MAC值不如預期高，從表4中可看出F-13、F-16、F-24、F-27其模態振型均為平面運動之效應，而造成與實驗振型比對MAC值偏低的主因。
4. 由於在有限元素分析中結構的模態振型是三軸向耦合性的，而實驗所量測的方向為平台頂面Z方向之響應，因此經曲線嵌合後所得模態振型結果只為Z方向之響應，所以若當理論分析有XY方向平面運動模態時，其MAC值便會較低。
5. 表4理論分析的彈性模態；F-07、F-09、F-10、F-17、F-18、F-19、F-23均可看出為X-Y平面拉伸模態故與實驗無對應。而實驗的E-08與E-12則為E-07與E-11的對稱模態故也與理論分析無對應。
6. 理論分析的F-28~31模態與實驗並無對應，因理論求解頻寬設為0~6000Hz，而實驗分析頻寬為0~5000Hz，因此部分模態與實驗無對應到。

#### 4.3.3 阻尼比探討

在進行實驗量測時由於加了對數加權函數(Exponential Window)，因此會有加重阻尼比的情形發生，所以必需對實驗所得的阻尼比加以修正，一般而言結構之阻尼會隨著模態數增加而減少，因模態數愈高阻尼影響愈小，所以阻尼比修正的幅度也會跟著變小，由表5大致符合此特性。而在E-01與E-02其阻尼比偏高原因可能是邊界所造成之影響，故不將其考慮在累計平均阻尼比內。

### 5. 結論

本文以實驗模態分析配合有限元素分析方式來對衝擊平台做模型驗證，模態參數比對方面以實驗結果為依據來最佳化更新分析模型完成模型驗證。目的在於了解平台之系統內涵及確認分析模型之合理性與正確性，得到代表實際結構之等效分析模型，可做為平台衝擊時響應分析與設計變更之參考，主要結論如下：

1. 本次的模態參數比對發現在自由模態下其實驗結果與分析結果相當吻合，可確認有限元素模型的正確性，代表模型驗證相當成功。
2. 在模態振型比對中因實驗使用單軸向加速度計故只能量測到平台垂直方向之振型，而使用理論分

析所得的振型為三軸向耦合的型態。故造成某些對應模態其MAC值偏低，實驗可考慮以三軸向加速度計來量測使比對結果更好。

### 誌謝

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。國科會計畫編號NSC 94-2622-E-020-002-CC3。

### 參考文獻

1. 林明儀，「電子連接器與線纜組測試分析概要」，電子檢測與品管，第49期，第39~41頁，2002。
2. 楊長江，「以使用者的品質觀點談振動測試」，電子檢測與品管季刊，第四十五期，第58~59頁，2001。
3. MIL-STD-883E, Test Method Standard Microcircuits, US Department of Defense, 1996.
4. 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。
5. 王栢村，陳志成，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論文集，高雄，第2423-2436頁，2004。
6. Singhal, R. K., Guan, W., and Williams, K., Modal Analysis of a Thick-Walled Circular Cylinder, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.16, No.1, pp.141-153, 2002.
7. Karpel, M., and Riccetti, S., Experimental Modal Analysis of Large Structures by Substructuring, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 11, No. 2, pp. 245-256, 1997.
8. Ma, C. C., and Huang, C. H., Experimental Whole-field Interferometry for Transverse Vibration of Plates, Journal of Sound and Vibration, Vol. 271, pp. 493-506, 2004.
9. Ren, W. X., and Peng, X. L., and Lin, Y. Q., Experimental and Analytical Studies on Dynamic Characteristics of a Large Span Cable-Stayed Bridge, Engineering Structures, Vol. 27, pp. 535-548, 2005.
10. 王栢村，電腦輔助工程分析之實務與運用，全華科技圖書股份有限公司，第4-20~4-48頁，2001。

## Model Verification of the Carriage for Free-Fall Shock Testing Machine

Bor-Tsuen Wang, Ko-Chiang Chen  
Department of Mechanical Engineering  
National Pingtung University of Science and Technology  
David Lee  
King Design Company  
NSC-94-2622-E-020-002-CC3

**Abstract**

The work adopts finite element analysis (FEA) and experimental modal analysis (EMA) to perform model verification for the carriage of shock 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 carriage 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 are compared to validate the FE modal via modal up-dating. The comparison of modal parameters appears reasonably well agreement. The equivalent FE model can then be verified. The validated analytical model can be used for the shock response analysis or further design modification.

**Keywords :** Finite element analysis, Experimental modal analysis, Shock testing machine

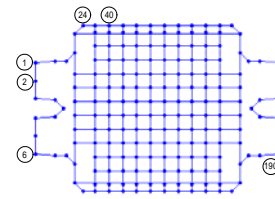


圖 3. 測試面量測規劃點示意圖

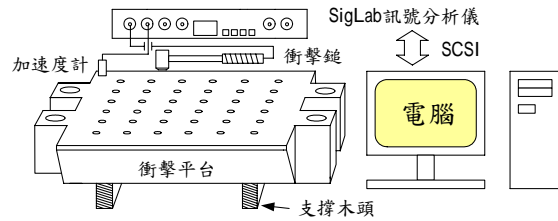


圖 5. 自由邊界模擬之實驗架設示意圖



(a) 實際照片圖 (b) 幾何模型圖

圖 1. 衝擊試驗平台實體圖

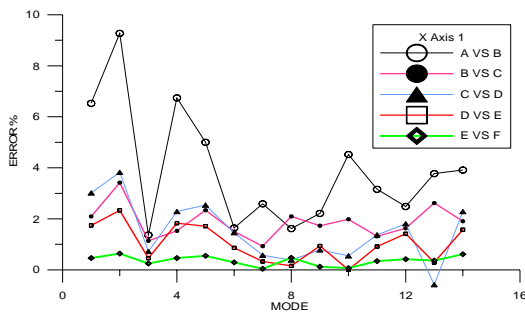


圖 2. 各模態之自然頻率值誤差百分比分佈

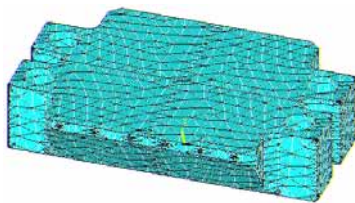
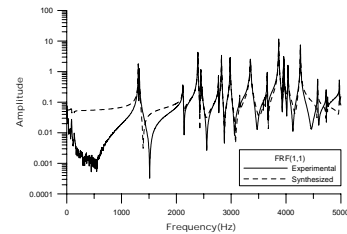
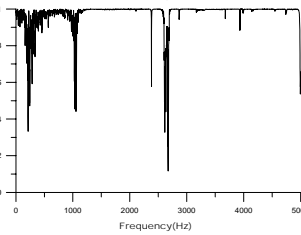
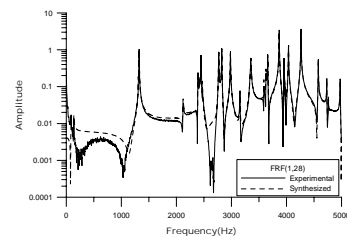
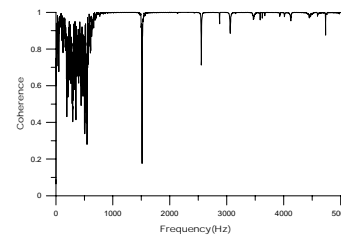


圖 3. 有限元素模型示意圖



(a) 同點  $H_{ii}$ ,  $i=1$ 、 $j=1$



(b) 不同點  $H_{ij}$ ,  $i=1$ 、 $j=28$

圖 6. 衝擊平台頻率響應函數與關聯性函數

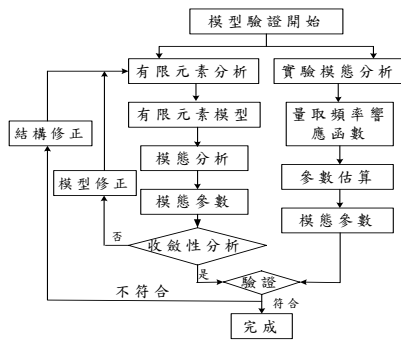


圖 7. 衝擊平台模型驗證流程圖

表 1. 衝擊試驗平台幾何參數與材料性質

項目	600 型
總長	600(mm)
平台面寬	600(mm)
總寬	880(mm)
總高	200(mm)
鋁鎂合金楊氏係數 $E$	$4.5 \times 10^4$ (MPa)
密度 $\rho$	1.79(Kg/m <sup>3</sup> )
浦松比 $\nu$	0.35

表 2. 不同元素分割下自然頻率值收斂情況

元素分割等級	case A	case B	case C	case D	case E	case F	D vs.E
元素量	10388	11700	13700	15088	17464	20092	Diff(%)
模態							
1	1609	1504	1472	1428	1403	1396	1.74
2	1788	1623	1567	1507	1472	1463	2.34
3	2447	2413	2386	2368	2358	2352	0.46
4	3048	2843	2799	2735	2685	2673	1.82
5	3053	2900	2832	2760	2713	2698	1.72
6	3219	3166	3119	3073	3047	3038	0.86
7	3363	3276	3246	3227	3216	3215	0.33
8	3413	3358	3288	3275	3270	3254	0.16
9	3468	3392	3333	3307	3276	3272	0.94
10	3569	3408	3340	3322	3322	3319	0.003
11	3700	3584	3537	3488	3456	3444	0.91
12	4115	4013	3948	3876	3821	3805	1.42
13	4298	4135	4027	4051	4039	4024	0.29
14	4575	4396	4313	4214	4148	4122	1.56
求解時間 (sec)	9.05	9.10	9.13	10.88	11.26	16.28	

表 3. 理論 FEA 分析與實驗之自然頻率值比對

編號	FEA		EMA		FEA 與 EMA 頻率 Diff(%)	
	FEA 1	FEA 2	編號	頻率	FEA1	FEA2
	頻率	頻率				
R-1~6	0	0	×	×	×	×
×	×	×	E-01	88	×	×
×	×	×	E-02	136	×	×
F-01	1400	1254	E-03	1310	6.86	-4.24
F-02	1452	1301	E-04	1320	10.03	-1.41
F-03	2349	2105	E-05	2120	10.80	-0.72
F-04	2660	2383	E-06	2390	11.29	-0.28
F-05	2688	2409	E-07	2450	9.73	-1.68
×	×	×	E-08	2470	×	×
F-06	3071	2751	E-09	2770	10.85	-0.68
F-07	3208	2874	×	×	×	×

表 3. 理論 FEA 分析與實驗之自然頻率值比對(續)

編號	FEA		EMA		FEA 與 EMA 頻率 Diff(%)	
	FEA 1	FEA 2	編號	頻率	FEA1	FEA2
	頻率	頻率				
F-08	3239	2902	E-10	2820	14.85	2.91
F-09	3297	2954	×	×	×	×
F-10	3344	2997	×	×	×	×
F-11	3411	3056	E-11	2980	14.45	2.55
×	×	×	E-12	3150	×	×
F-12	3856	3455	E-13	3350	15.11	3.14
F-13	4038	3618	E-14	3590	12.48	0.78
F-14	4119	3691	E-15	3630	13.47	1.67
F-15	4172	3739	E-16	3660	14.00	2.14
F-16	4738	4246	E-17	3870	22.44	9.71
F-17	4792	4294	×	×	×	×
F-18	4804	4304	×	×	×	×
F-19	5027	4504	×	×	×	×
F-20	5041	4517	E-18	3960	27.29	14.06
F-21	5218	4675	E-19	4040	29.15	15.73
F-22	5309	4757	E-20	4260	24.62	11.67
F-23	5322	4769	×	×	×	×
F-24	5396	4835	E-21	4580	17.81	5.56
F-25	5599	5017	E-22	4730	18.37	6.07
F-26	5660	5072	E-23	4760	18.92	6.55
F-27	5856	5247	E-24	4970	18.07	5.79
F-28	×	5432	×	×	×	×
F-29	×	5450	×	×	×	×
F-30	×	5520	×	×	×	×
F-31	×	5664	×	×	×	×

表 4. 平台測試面的振型比對及 MAC 值

FEA2		EMA		MAC		
編號	頻率	振型	編號	頻率	振型	整體
R1~6	0		E-01	88		Guide 部份
Rigid			Rigid			
			Rigid			
			Rigid			
F-01	1254		E-03	1310		0.9842
F(3,1)			F(3,1)			
F-02	1301		E-04	1320		0.9735
F(2,2)			F(2,2)			
F-03	2105		E-05	2120		0.9502
F(3,2)			F(3,2)			
F-04	2383		E-06	2390		0.9895
F(3,2)			F(3,2)			
F-05	2408		E-07	2450		0.9736
F(4,1)			F(4,1)			
			F(4,1)			
			E-08	2470		0.6943
			F(4,1)			



表 4. 平台測試面的振型比對及 MAC 值(續)

FEA2		EMA		MAC
編號	頻率	編號	頻率	整體
物理意義	振型	物理意義	振型	Guide 部份
F-06	2751	E-09	2770	0.8138
F(1,3)		F(1,3)		
F-07	2874			
Plane				
F-08	2902	E-10	2820	0.9741
F(4,2)		F(4,2)		
F-09	2954			
Plane				
F-10	2997			
Plane				
F-11	3065	E-11	2980	0.9681
F(4,2)		F(4,2)		
		E-12	3150	0.0051
F-12	3455	E-13	3350	0.8595
F(2,3)		F(2,3)		
F-13	3618	E-14	3590	0.0131
Plane		G-AT		0.0167
F-14	3691	E-15	3630	0.7373
F(3,3)		F(3,3)		
F-15	3739	E-16	3660	0.9485
M-(3,2) G-1 <sup>st</sup> B		M-(3,2) G-1 <sup>st</sup> B		
F-16	4246	E-17	3870	0.3860
M-(3,2) G-AT		M-(3,2) G-AT		0.7616
F-17	4294			
M-Plane G-AT				
F-18	4304			
Plane				
F-19	4504			
Plane				
F-20	4517	E-18	3960	0.7498
M-(2,2) G-ST		M-(2,2) G-ST		
F-21	4675	E-19	4040	0.8981
M-(2,3) G-AT		M-(2,3) G-AT		
F-22	4757	E-20	4260	0.8709
M-(3,2) G-ST		M-(3,2) G-ST		

表 4. 平台測試面的振型比對及 MAC 值(續)

FEA2		EMA		MAC
編號	頻率	編號	頻率	整體
物理意義	振型	物理意義	振型	Guide 部份
F-23	4769			
M-Plane G-AT				
F-24	4835	E-21	4580	0.1063
M-Plane G-AT		M-(2,3) G-AT		0.0019
F-25	5017	E-22	4730	0.65
M-(3,3) G-AT		M-(3,3) G-AT		
F-26	5072	E-23	4760	0.426
F(1,4)		F(1,4)		
F-27	5274	E-24	4970	0.2676
F(4,1)		M-(2,1) G-1 <sup>st</sup> B		0.5482
F-28	5432			
M-(3,3) G-AT				
F-29	5450			
F(2,4)				
F-30	5520			
M-(3,2) G-ST				
F-31	5664			
Plane				

表 5. 實驗阻尼比及其修正值

	實驗值 (%)	修正值 (%)	累計平均 阻尼比 (%)		實驗值 (%)	修正值 (%)	累計平均 阻尼比 (%)
E-01	3.7100	3.0593	3.0593	E-13	0.1410	0.1239	0.0765
E-02	2.3800	1.9590	1.9590	E-14	0.0652	0.0492	0.0742
E-03	0.1260	0.0823	0.0823	E-15	0.0663	0.0505	0.0724
E-04	0.1230	0.0796	0.0810	E-16	0.0491	0.0335	0.0696
E-05	0.2260	0.1990	0.1203	E-17	0.0412	0.0264	0.0667
E-06	0.0774	0.0534	0.1036	E-18	0.0435	0.0290	0.0644
E-07	0.1040	0.0806	0.0990	E-19	0.0533	0.0391	0.0629
E-08	0.0684	0.0452	0.0900	E-20	0.0379	0.0245	0.0608
E-09	0.0649	0.0442	0.0835	E-21	0.0363	0.0238	0.0588
E-10	0.0538	0.0335	0.0772	E-22	0.0357	0.0236	0.0571
E-11	0.0690	0.0498	0.0742	E-23	0.0605	0.0485	0.0566
E-12	0.0680	0.0498	0.0718	E-24	0.0356	0.0241	0.0552