

摘要

本文係利用無人巴士底盤實體結構進行實驗模態分析，透過比對實驗模態分析與有限元素分析之模態參數，進而驗證有限元素模型。於實驗模態分析中，透過衝擊錘對結構施予脈衝激勵，以其具有寬頻的特性，激發欲觀測頻寬內之模態。於有限元素分析中，吾人採用接觸條件取代整車的鎖固件，包含了螺栓及鉚釘，以降低有限元素之數量進而提升運算效率。獲得實際與模擬之模態參數後，利用實驗與模擬的比對結果判斷有限元素模型的可靠性。

研究方法

本文利用有限元素分析及實驗模態分析進行相互比對，以驗證底盤結構之幾何模型：

1.有限元素分析(Finite Element Analysis, FEA)

FEA使用ANSYS Workbench之商用軟體進行模態參數計算，並利用簡諧響應分析求解系統於簡諧外力下不同頻率的位移響應，以獲取結構之頻率響應函數；同時利用FEA求得之模態振型作為實驗模態分析之實驗規劃參考。

表一、模態振型總表

No. of Mode	1	2	3	4
自然頻率 (Hz)	23.72	31.61	33.50	51.45
模態振型				
No. of Mode	5	6	7	
自然頻率 (Hz)	56.63	61.92	72.97	
模態振型				

2.實驗模態分析(Experimental Modal Analysis, EMA)

經規劃量測點後，針對實際結構進行動態信號量測，利用關聯性函數判斷激勵訊號與響應訊號之相關程度，透過激勵與響應信號經由頻譜分析軟體各自進行快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform, FFT)，進而計算出頻率響應函數(Frequency Response Function, FRF)，最後經由模態分析軟體進行曲線嵌合，以估測實際底盤結構的模態參數。

最終規劃出49個量測點，合計共147個量測自由度，獲取個自由度中不同方向之動態信號，如圖二所示。

3.模態保證指標(Modal Assurance Criteria, MAC)

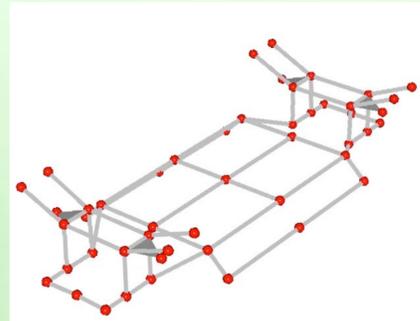
比對FEA與EMA之模態參數，透過自然頻率和模態振型的比對，判斷兩者是否一致，然而模態振型的比對吾人利用MAC做為量化指標進行比對。模態保證指標的定義如式(1)所示：

$$MAC(A,X) = \frac{|(\phi_{iA})^T(\phi_{jX})|^2}{(\phi_{iA})^T(\phi_{iA}) * (\phi_{jX})^T(\phi_{jX})} \quad (1)$$

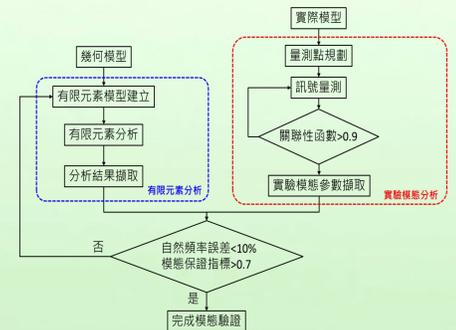
其中上標T代表轉置運算子(transpose matrix operator)，上標*代表共軛複數運算子(conjugate complex operator)， ϕ_{iA} 及 ϕ_{jX} 分別為簡諧分析與實驗模態分析所得之模態振型。當兩振型相關性高時，MAC值將接近於1；反之，若兩模態振型相關性較低，MAC值將趨近於0。

4.模態驗證

一般傳統的模態驗證量化標準，大部分係以EMA與FEA所得之自然頻率誤差不大於5%及模態保證指標不小於0.9作為驗證門檻。然而，由於本次模態驗證對象為無人巴士底盤結構之大型結構物，係由許多零組件鎖固及鉚接而成，因此在模態參數的識別過程及成效上，較不如單一零組件單純及精確。因此，本研究訂自然頻率誤差不大於10%及模態保證指標不小於0.7，作為驗證標準量化的依據，以判定有限元素模型的可靠性。



圖二、實驗模型點位圖



圖三、模態測試與驗證流程圖

結果與討論

將不同激勵方向實驗之自然頻率誤差及模態保證指標進行彙整，並篩選出對應的模態至總表中，如表1所示。在自然頻率方面，第一、第二及第五模態之誤差偏大，其餘模態之誤差皆低於10%；在模態保證指標僅第七模態低於標準值0.7，由於此模態屬二階X-Z平面扭轉模態，因此MAC值偏低可能源自於量測自由度數量不足，導致未能完整描述該模態的振動行為。

表2、模態參數比對總表

No. of mode	Mode shape	Modal Parameters	
		EMA	FEA
1	1st X-Y Plane Twist Mode	21.14 Hz	23.72 Hz
		Freq. Error: 12.20%	
		MAC:0.77	
2	1st X-Z Plane Bending Mode	23.23 Hz	31.61 Hz
		Freq. Error: 36.07%	
		MAC:0.78	
3	1st X-Y Plane Bending Mode	32.81 Hz	33.50 Hz
		Freq. Error: 2.10%	
		MAC:0.96	
4	2nd X-Y Plane Twist Mode	49.10 Hz	51.45 Hz
		Freq. Error: 4.79%	
		MAC:0.84	
5	1st X-Z Plane Twist Mode	40.33 Hz	56.63 Hz
		Freq. Error: 40.42 %	
		MAC: 0.75	
6	2nd X-Y Plane Bending Mode	61.74 Hz	61.92 Hz
		Freq. Error: 0.29%	
		MAC: 0.83	
7	2nd X-Z Plane Twist Mode	69.43 Hz	72.97 Hz
		Freq. Error: 5.10%	
		MAC: 0.58	

結論

本文針對無人巴士底盤結構進行模態驗證，其驗證結果彙整如下：

1. 在底盤Y方向懸吊實驗中，模態保證指標的部分高於0.7，代表實驗所激發之模態振型與分析具有一定的相似度，但於第一模態之頻率誤差較高，可能原因為去除螺栓及鉚釘改變系統質量，進而影響自然頻率比對結果。
2. 在底盤Z方向懸吊實驗中，第二及第五模態的頻率誤差較高，可能原為懸掛方式導致系統剛性改變，後續將針對模型之邊界條件修正以符合懸吊之效應。
3. 綜合以上結果得知，有限元素分析與實驗模態分析的模態振型具有相似度；但於少數模態之自然頻率比對中，誤差高於目標值，於往後需進行模型更正 至驗證結果一致。