

## 應用手提式振動示範機與 CAE 軟體於振動教學示範

王栢村<sup>1</sup> 湯昀哲<sup>2</sup> 李昆達<sup>3</sup>

<sup>1</sup>屏東科技大學機械工程系教授

<sup>2</sup>屏東科技大學機械工程系研究生

<sup>3</sup>金頓科技股份有限公司研發處處長

[wangbt@mail.npust.edu.tw](mailto:wangbt@mail.npust.edu.tw) [聯絡人：王栢村]

### 摘要

機械振動或結構振動在工業界中是一重要的議題。結構振動教學困難之處包括：實際結構振動的現象不容易證明，以及涉及大量的數學，以致於振動問題比較不被大眾熟悉。本文將介紹攜帶式振動示範機以此做為振動教學和示範結構的振動特性，如自然頻率及模態振型。本文也分別對試驗片以及含基座之試驗片做有限元素分析，並將其分析結果與實際試驗片之自然頻率與模態振型互相對應，可以使得振動教學更有可信度與活潑性。由於攜帶式振動示範機的操作所能觀看的模態數有限，所以有限元素分析軟體能將無法觀看之模態振型以動畫顯示。本文在有限元素分析分別探討單一試驗片在固定邊界下之自然頻率與相對應之模態振型與試驗片固定於基座之固定邊界下之自然頻率與相對應之模態振型，並探討不同模擬方式之異同。

**關鍵詞：**攜帶式振動示範機、自然頻率、模態振型、有限元素分析

### 1. 前言

振動測試約在四、五十年前開始萌芽，理論建立時，並無助於人們相信它的重要性，直到二次大戰時，許多的飛行器、艦艇、車輛及器材在使用後，意外現機件失效的比例當高，經研究的結果發現，大都由於其結構無法承受其本身所產生的長時間共振，當搭載物品承受運送共振所引起之，元件鬆脫、崩裂，而致機件失效甚而造成巨大損失，因此，振動測試受到各界重視，紛紛投入大筆經費、人力去研究。對於振動量測分析以至模擬分析的近代理論建立後，對振動測試的方法及邏輯亦不斷改進，尤其現今貨物的流通頻繁，使振動測試更形重要，也因此更需要將振動教學能更普及於工業界。

由於現今社會的科技高速發展，技術不斷的創新，各種產品的結構組成日趨精細複雜，一個系統需要無數個零件所組成，但是如果系統在運作的過程中發生了零件的損毀，可能會導致系統的功能發揮不完全，或是造成整個系統的功能癱瘓而造成無法預測的結果。所以無論任何產品都需要可以經得起各種的環境的試驗，像是振動、衝擊、落下、溫濕度、冷熱衝擊、鹽霧等試驗，並要確認產品在正式生產使用後可以經安全、可靠的讓客戶使用，因此必須在產品研發階段將可靠度設計在其中，以確保產品的品質。假使能利用電腦軟體模擬分析產品受振動、衝擊與掉落之響應，可使設計者於開發初期預估產品品質性能與發掘及改善問題，如此可減少實

驗次數及縮短開發時間與成本。因此電腦輔助工程分析 (Computer Aided Engineering, CAE) 在設計初期已經扮演著相當重要的角色。所以本文將利用 CAE 分析軟體於振動教學，使振動教學能更活潑。

林[1]隨著產品不斷的推陳出新，而使用者對產品品質的要求也逐漸升高，因此在產品的量產前，廠商會對產品執行環境應力測試以確保產品在運送和使用中的可靠度，環境應力試驗主要分成環境振動試驗、衝擊試驗、落下試驗三大部分。許和廖[2]指出執行環境測試的目的是為了要瞭解產品對於環境外在所激發出的影響，並在設計的階段進行改善，其中會遭受到的環境因子有振動、衝擊和落下效應等。楊[3]說明以生產製造商的觀點來探討電機產品執行可靠度測試內容，其中有振動測試(vibration test)、衝擊測試(shock test)、落下測試(drop test)，執行可靠度之目的在於考驗電機產品品質，確保電機產品可以在嚴苛的使用環境下之運作能力。

美國軍方 MIL-STD-810F[4]514.5 節振動規範說明，振動試驗之目的在於開發產品使產品在製造、運輸、維修和操作週期內可以承受振動效應，並完成產品之功能。並列出產品受到振動效應後會有電器短路、密封變形、元件失效、結構破裂或斷裂等現象產生。且說明振動試驗時需考量到夾具需求、量測儀器之能力等。現代產品都會經過可靠度測試，瞭解其產品壽命。經過這些可靠度測試可以加速產品的故障、機械變形、材料加速疲勞等現象，因此廠商能針對這些破壞因素加以改善，使產品能更完美。而在可靠度測試中，振動測試佔了很重要的部分，因此可以知道振動學在此領域的重要性，因此本文之應用攜帶式振動示範機 (portable shaker demo kits, PSDK) 搭配 CAE 軟體於振動學教學將會是一項利器。

Wang and Li [5]以有限元素分析方法(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。Galvin and Dominguez [6]使用實驗模態分析及有限元素分析對巴爾克塔大橋進行有限元素模型的驗證，以得到等效的有限元素模型，以利於後續做抗震的結構補強。有限元素分析軟體雖然能在設計初期減低許多的開發成本，但是其分析模型也要能符合實際物體，這樣分析出來的結果才會符合實際結構，因此在有限元素分析模型都會進行模型驗證，證明其有限元素分析模型的正确性。由於已有手提式振動示範機的實體振動系統，因此可以將有限



元素分析結果與手體式振動示範機做比較，證明有限元素分析模型的正確性。

在有效 FEA 的應用，需要的是一個正確的有限元素分析模型，因此在 FEA 中都會搭配 EMA 的使用，使分析型與實驗的模型進行模型驗證，證明分析模型的正確性。McCann et al. [7]因巴士座椅在行駛中產生破壞，進而對結構進行實驗模態分析，再由 FEA 軟體分析及變更設計。在實驗模態分析中，由巴士運行中對座椅進行量測，其感測器主要由加速度計與應變規所組成，並記錄座椅在行進中可能遇到的各種振動響應，包含座椅振動的自然頻率、地板及側板附近的工作頻率，由 EMA 量測結果顯示椅背與巴士地板有接近的振動頻率，為造成共振的原因。故應用 FEA 軟體對座椅進行分析，並提高座椅的鋼骨結構強度，增加椅背之自然頻率，使座椅自然頻率避開巴士之激振頻率。

在 FEA 軟體應用中，Low et al. [8]為了得知 mini audio 底板在運送過程受衝擊之變形情況，藉由有限元素分析軟體分析得知結構破壞發生處，且說明 mini audio 結構內部之微小結構在 FEA 裡不能省略，其結構材料參數由拉伸試驗得知，由分析結果進一步改變結構之材料參數與厚度等加以設計補強，結果發現改變底板楊氏係數與變壓器質量，能有效提高結構強度。使用有限元素分析確實能分析解所多結構應力問題，且能大大縮短測試時間及成本。相關研究[9,10,11]也都運用了有限元素分析方法對結構進行靜態分析，以得到結構最佳設計。

Spruit et al.[12] 針對烘乾機 (dryer cabinet) 之金屬薄板結構，進行模型驗證。透過模擬得到之參數來評斷實驗及有限元素模型之間的對應程度，並根據驗證的結果，更新並修正有限元素模型以增進與實驗模態模型之間的對應程度。實際結構有許多因為結構之間的組裝或是接和，而使得有限元素模型與實際結構不符合的情況，也因此在本文的含基座之試驗片有限元素模型中，以接觸元素模擬試驗片因基座螺絲鎖固的鎖固效應。

結構振動的現象不容易呈現，因此將應用 PSDK 的振動教學和示範各種結構振動的特性，並建立相對應的有限元素分析模型，利用有限元素分析，探討不同邊界條件對自然頻率及模態有何影響，並能夠利用此有限元素分析結果與實際結構的模態振型進行搭配，使其成為一套輔助教具。

機械振動或結構振動在工業界中是一個重要的議題，然而振動課程在大多數工程相關部門一般都提供給本科和研究生學習。結構振動學習困難之處包括，涉及大量的數學，以及實際結構振動的現象不容易證明。本文將介紹攜帶式振動示範機以此做為振動教學和示範各種重要結構的振動特性，如自然頻率，模態振型和阻尼效應。PSDK 工具是裝載於精良的便攜式手提箱中，包含了振動激振器以及四個可獨立調整激振源，其中可調整的包含振動頻率、振幅大小以及三種可選的振動模式，即正弦波、掃描正弦波以及隨機振動。本文將採用 PSDK 工具展示一些典型的實驗課題，包括：(1) 尋找結構的共振頻率，即結構之自然頻率 (2) 可視化的模態，(3) 比較幾何長度的不同對於自然頻率有何影響，

(4) 多重簡諧波的激振。PSDK 工具容易攜帶，操作而且還有數字顯示。振動實驗因此可以很方便地進行，減少攜帶繁鎖的工具，如加速度計和 FFT 的分析儀。設計的實驗與實驗課題的 PSDK 工具顯示有效教學的解釋振動的振動特性。

由於已有試驗片之半邊模型之有限元素分析[13]，因此本文將建立試驗片完整模型，並模擬試驗片中央實際鎖固情形進行有限元素分析。並與試驗片半邊模型進行比較。本文並建立試驗片含基座之模型，進行有限元素分析，並與實際手提式振動示範機之實際振動模態進行比較。由以上分析未來可以應用此分析結果，發展成手提式振動示範機以及對應的有限元素分析模擬教具。

## 2. 攜帶式振動示範機簡介與特點

PSDK 為電磁式振動系統，由電磁激振器及高功率放大器以及多功能控制器組成。具有(1)振動教學。(2)容易操作。(3)高信賴度等特點。符合各種振動測試要求，為現代化產品設計必備之利器。

PSDK 可以產生 3~500Hz 或 3000~4000Hz 的正弦波，手提式振動示範機有 4 組控制系統，該系統擁有可調整掃描功能，自動掃描或手動掃描。手動調整頻率。放大器強度可調(振幅大小)。使用可調整頻率激振找出試驗片之自然頻率，搭配閃頻儀將可以清楚的看出試片於此頻率下的模態振形。

在 PSDK 之試驗片於固定邊界下之有限元素分析與實際懸臂樑模態振型之比較。有限元素分析結果將可與實際教學影片做一對應，亦可當成一套 CAE 輔助教學對應影片，將使得振動課程能更生動活潑化。



(a) 手提式振動示範機實體圖



(b) 試驗片含基座實體圖

圖 1 攜帶式振動示範機實體示意圖

## 3. 有限元素分析說明

本文將建立與 PSDK 之試驗片與含基座之試驗片

模型，由於已有做過試驗片之半邊模型[13]，因此本文將建立一完整試驗片模型將其分析結果與半邊模型分析結果做為比對。檢驗有限元素模型之正確性，後續將建立完整含基座之試驗片，並將此模型分析結果與 PSDK 之自然頻率與模態振型做比對，比較分析模型是否符合實際振動頻率與模態振型。如有符合代表分析模型的精確性達到要求。

本文並利用試驗片含基座之有限元素模型進行簡諧分析。利用簡諧分析模擬試驗片含基座之模型於實際激振器上之激振狀態。由簡諧分析所得振幅圖搭配頻率掃描式模態動畫與 PSDK 實際模態振型搭配作為教學使用。

### 3.1 數學模型

對手提式振動試驗機之試驗片與試驗片固定於基座做一完整有限元素分析。比較其分析結果並與實際手提式振動示範機做自然頻率與模態振型比較。

- 幾何：試驗片與試驗片含基座兩種模型。
- 材料：試驗片材質為鐵。表 1 為 ANSYS 分析設定之材料參數。
- 邊界：試驗片中央圓孔與基座固定位置為鎖固，因此在分析時將以接觸元素模擬鎖固情形，並於基座底部設為固定邊界。

表 1 ANSYS 分析之材料參數

楊氏系數	$175 \times 10^9$ (Pa)
蒲松比	0.3
密度	7850 (Kg/m <sup>3</sup> )

### 3.2 有限元素模型

本文使用套裝軟體 ANSYS 11.0 版本進行有限元素分析，幾何外形依實際量測再以 Pro/E 建立 CAD 模型。分別建立試驗片與含基座之試驗片模型，以利分別進行分析。有限元素模型建構說明如下。

圖 3 為中心孔固定之試驗片有限元素模型建構說明如下：

1. 元素選用：試驗片分析選用三維立體元素(SOLID 45)。
2. 元素分割：採用每個元素 1mm 為單位，以 free-mesh 的方式分割，試驗片有限元素模型共分為 7735 個元素。
3. 位移限制：試驗片有一中心孔，將圓孔周圍的附近節點設為固定邊界，所有自由度均為 0。
4. 負荷條件：模態分析，所以沒有設外力。

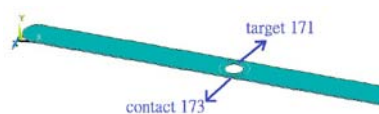
圖 4 為含基座之試驗片有限元素模型，說明如下：

1. 元素選用：試驗片及基座選用三維立方體(solid 45)元素。試驗片與基座接觸面則設為接觸(contact 171 與 173)元素，如圖 4(a)所示，接觸元素之設定採用 ANSYS 軟體本身內定值。
2. 元素分割：採用每個元素 1mm 為單位，以 free-mesh 的方式分割。含基座之試驗片有限元素模型共分為 73005 個元素。

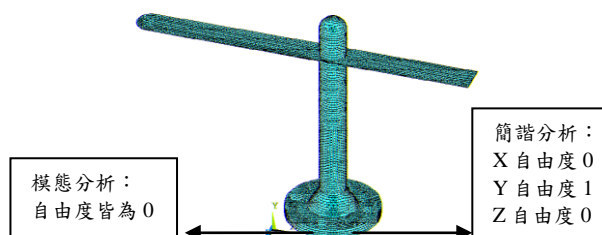
3. 位移限制：模態分析因為基座鎖固於激振器，所以將基座底面設為固定邊界，所有自由度均設為 0。簡諧分析將基座底面 X、Z 方向自由度設為 0。Y 方向為激振方向，自由度設為 1。模擬機振效應。如圖 4(b)所示。
4. 負荷條件：模態分析，沒有設外力。簡諧分析在底面中心點輸入向上 1 單位的外力。



圖 3 試驗片有限元素模型



(a) 含基座之試驗片接觸元素設定位置示意圖



(b) 試驗片含基座之有限元素分割模型圖

圖 4 試驗片含基座有限元素模型

## 4. 結果與討論

由於已有做過試驗片半邊模型之模態分析[13]，本文將以整片試驗片進行分析，

整片試驗片分析中，在試驗片中央圓孔區域節點設定為固定邊界，模擬試驗片實際鎖固情形。將整片試驗片模擬分析結果與半邊試驗片分析結果做比較。含基座之試驗片有限元素模型

由表 2 試驗片長邊與整個試驗片模態分析比較表及表 3 試驗片短邊之模態分析比較表可以觀察得到，兩種分析模型所得之自然頻率與相對應之模態振型皆相當接近，表示其有限元素模型有達到一定的精確性。本文所探討之整片試驗片有限元素模型中央圓孔周圍因模擬鎖固效應，所以將其周圍設為固定邊界，因此幾何狀態與半邊模型類似，所以分析結果也會相同。

表 2 試驗片長邊之模態分析比較表

mode	頻率 (Hz)	模態振型	頻率 (Hz)	模態振型
1	56.36		56.97	
2	352.0		354	

表 3 試驗片短邊之模態分析比較表

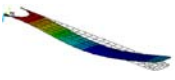

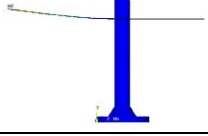

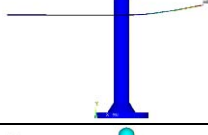
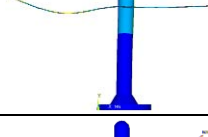
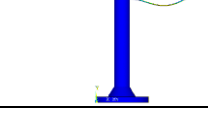
mode	頻率 (Hz)	模態振型	頻率 (Hz)	模態振型
1	114.5		114.2	
2	715.3		709.8	

表 4 實際與分析之自然頻率比較表

mode	實際(Hz)	分析(Hz)
1	53	53.44
2	104	107.23
3	無法觀看	347.44
4	無法觀看	664.49

表 5 實際與分析之模態振形比較表

mode	實際	分析
1		
2		
3	無法觀看	
4	無法觀看	

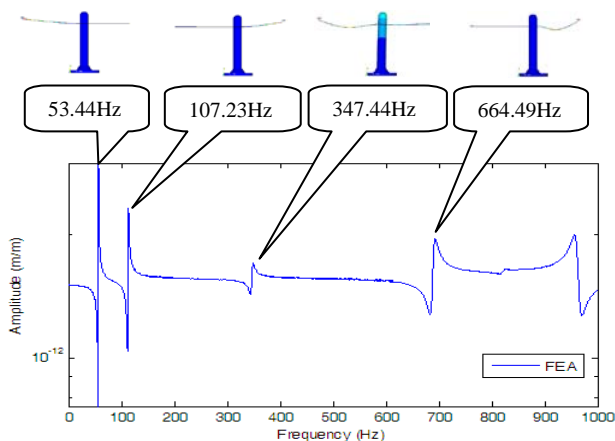


圖 5 頻率響應函數與各模態對應之模態振型示意圖

由於肉眼所能觀看的模態數為結構的前幾個模態而已，因此本文只討論含基座之試驗片前 4 個模態之自

然頻率比較與模態振型。由表 4 手提式振動示範機與分析結果與實際振動示範機之自然頻率比較表發現，其自然頻率值誤差很小，表示其有限元素分析模型與實際模型符合，代表有限元素模型的正確性。

由於本文所探討之 PSDK 只探討一種試驗片，所以用肉眼所能觀看的模態振型只為兩個模態，但是由於加入了 CAE 軟體的搭配，將能有效瞭解該結構在高頻所產生的模態振型與共振頻率，因此也說明了 CAE 在工程設計中能有效的發揮出功能，減低開發成本。PSDK 尚有其他幾何形狀之試驗片，更換試驗片將可以看到更多的模態振型，再搭配 CAE 分析軟體的動畫將能更有效的顯示結構振動的特性，會使學生對結構振動擁有更多之吸引力。

ANSYS 軟體中除了可以顯示各自然頻率所對應之模態之外，亦可以使用頻率掃描的方式，顯現結構在自然頻率所產生的共振現象。只要能避開自然頻率就會避開共振點，讓設計者能更重視共振的問題，使得結構或是商品在設計時能避開產品本身的運轉頻率，避開共振點。

手動調整 PSDK 之激振頻率，結合 ANSYS 頻率掃描之動畫檔，將可以變成一套生動的振動教學教具。使得振動不再只是文字或是理論，有了這些實際的教具搭配分析的動畫，也使人更容易了解結構的振動特性。

因為模擬基座激振，因此進行簡諧分析，圖 5 為頻率響應函數與各模態對應之模態振型示意圖。由分析結果顯示，由頻率 0Hz 至 1000Hz 的振幅圖中，在經過自然頻率的頻率值時的振幅量會有相當大的改變。由此可以顯示結構在這些頻率值即為結構的自然頻率，也將會有其對應的模態振形。

由圖 5 的表示可以對應 PSDK 之 SWEPT SINE 掃描式收尋自然頻率之激振模式。設定激振頻率範圍，由低頻至高頻，當頻率經過結構之自然頻率時將會產生共振，由振動顯示的結果即可知道自然頻率的值。

## 5. 結論

結構振動雖然多為振動理論與數學，大多數人往往無法了解。但是如果利用 PSDK 示範工具將結構在自然頻率下的模態振型顯現出來，並且搭配 CAE 軟體的介紹，將會使人能輕易的瞭解結構的振動特性。由本文藉由有限元素分析軟體的模態動畫，以及使用頻率掃描找出自然頻率之模態動畫，與 PSDK 所顯示的頻率與模態振型做為呼應，與振動教學做一整套的教學影片，讓振動教學不再枯燥乏味，使學生能有更多的興趣於振動課題。有了這些生動的振動教具，除了與振動相關的工作人員，也使得一般大眾能夠對結構振動能有更進一步的認識，應用 PSDK 介紹簡單的模態，搭配 CAE 的振動模態動畫檔，就算不是本科系相關之人員，也能夠清楚了解結構振動的基本概念。

## 6. 參考文獻

- [1] 林壯超，1998，「環境條件與環境試驗之國際標準」，工業財產權與標準，第 95~100 頁。
- [2] 許凱超、廖建義，「產品研發之環境輪廓及效應分

析」，品質管制月刊，2002，第32卷，第8期，第70~74頁。

- [3] 楊長江，2001，「以使用者的品質觀點談振動測試」，電子檢測與品質季刊，第45期，第58~59頁。
- [4] MIL-STD-810F, 2000, *Test Method Standard for Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests*, US Department of Defense.
- [5] 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.
- [6] Galvin, P., and Dominguez, J., 2007, "Dynamic Analysis of a Cable-Stayed Deck Steel Arch Bridge," *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 63, pp. 1024-1035.
- [7] McCann, D. M., Weaver, B. T., Smith, S. J., and Meacham, E. M., 2004, "Modal Testing Diagnosis of Bus Seat Failures," *Proceeding of the 22nd International Modal Analysis Conference*, Dearborn, Michigan, Paper No. s20p07.
- [8] Low, K. H., Yang, A., Hoon, K. H., Zhang, X., Lim, J. K. T., and Lim, K. L., 2001, "Initial study on the Drop-Impact Behavior of Mini Hi-Fi Audio Products," *Advances in Engineering Software*, Vol. 32, pp. 683-693.
- [9] Wong, T. E., Reed, B. A., Cohen, H. M., and Chu, D. W., 1999, "Development of BGA Solder Joint Vibration Fatigue Life Prediction Model," *Electronic Components and Technology Conference*, pp. 149-154.
- [10] Kao, C. L., Yeh, C. L., and Lai, Y. S., 2004, "Steady-State Vibration for Printed Circuit Boards of Different Package Layout," *Taiwan Ansys Conference*, pp. 67-70.
- [11] Lucas, L. D., Garner, R., and Birdsong, B., 2004, "Helicopter Missile Launcher Dynamics Prediction with Model Updating and Correlation," *Proceeding of the 22th International Modal Analysis Conference*, Dearborn, Michigan, Paper No.s14p01。
- [12] Spruit, M. J., Karsen, C. V., and Vilmann, C. R., 2004, "Modal Tseting & Modeling Considerations for a Thin Simply Supported Plate," *Proceeding of the 22th International Modal Analysis Conference*, Dearborn, Michigan, Paper No.s38p03。
- [13] 王栢村，2006，手提式展示型振動機實習教材，屏東。

**Department of Mechanical Engineering**  
**National Pingtung University of Science and Technology**  
**<sup>3</sup>Director, King-Design Company**

## ABSTRACT

Mechanical or structural vibration is an important issue for industry and thus the Vibration course is generally offered in both undergraduate and graduate levels in most engineering related departments. The difficulties for study structural vibration are involved with lots of mathematics and not easy to demonstrate the practical vibration phenomenon. This paper presents the use of the Portable Shaker Demo Kit (PSDK) for vibration teaching and demonstration on various important structural vibration characteristics, such as natural frequencies, mode shapes, and damping effects. Finite element analysis (FEA) is also adopted to obtain the modal parameters of test specimens. Both analytical and experimental demonstrations will help teaching vibration. PSDK can be used to visualize the structural mode shapes, while FEA simulation results can also be shown for mode shape animation, even for those can not be observed in experiments. This work presents different modeling techniques for a test specimen, which is a twin cantilever beams at both sides and fixed in the middle. Results show the comparison among different models and reveal good agreement.

**Keywords:** vibration, Portable Shaker Demo Kit (PSDK), natural frequency, mode shape, damping

## Application of Portable Shaker Demo Kit and CAE Software to Vibration Demonstration

Bor-Tsuen Wang<sup>1</sup>, Yun-Je Tang<sup>2</sup>, David Lee<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Professor, <sup>2</sup>Graduate student

