

印刷電路板實驗模態分析之重現性探討

王栢村¹ 蔡岳穎² 李英志² 賴逸少³ 葉祖麟³

¹ 國立屏東科技大學機械工程系教授

² 國立屏東科技大學機械工程系研究生

³ 日月光集團高雄廠應力可靠度實驗室

國立屏東科技大學機械工程學系

wangbt@mail.npust.edu.tw

摘要

實驗模態分析或是模態測試常用以獲得結構模態參數，透過模態特性可與分析模型作驗證，本文探討針對環境振動測試所設計之印刷電路板進行實驗模態分析之重現性，採用之實驗方法步驟與前文相同，並重複執行兩次實驗，以求得模態模型，並作相互比較，也針對有限元素分析結果與三次獨立實驗進行模型驗證。結果顯示，就模態參數而言，實驗模態分析之實驗相當可靠，除了實驗之些微差異，可能原因來自加速度計對印刷電路板之質量效應。實驗模態分析之重現性測試可確保所驗證分析模型的適應性。

關鍵詞：實驗模態分析、印刷電路板、有限元素分析。

1. 前言

近年來電子產品趨勢皆往高功能及高攜帶性方向快速進展，在這兩方面強力驅使下，環境應力篩選更是品質與可靠度保證方法[1-5]，印刷電路板(Printed Circuit Boards, PCB)的設計隨著微機電科技進步而日新月異，其最重視的是因日益縮小的體積而帶來的高溫破壞，惟除了高溫破壞外，隨著其組裝、運輸，使用環境等各因素所帶來的破壞也將對 PCB 的使用壽命產生極大影響，故對 PCB 進行振動分析設計是很重要的。常利用有限元素法(Finite Element Analysis, FEA)架構有限元素模型(FE Model)，利用軟體模擬分析來簡化過程；而實驗模態分析(Experimental Modal Analysis, EMA)可在不知材料性質下，獲得實際結構體的實際振動參數，然而在實驗上難免有人為差異，本文旨在探討進行 EMA 對擷取模態參數差異性之探討。

王等人[6]結合 FEA 與 EMA，對 PCB 進行模型驗證，由理論與實驗之振動模態特性參數進行比對。實驗採用傳統模態分析方式，以衝擊錘當驅動器，施加點力於 PCB 以產生結構激振，再利用固定在 PCB 上之加速度計量測 PCB 之響應，由 FEA 可得理論的自然頻率、模態振型、頻率響應函數，EMA 可得實際的自然頻率、模態振型、頻率響應函數與阻尼比，藉由理論與實驗之振動模態特性參數進行比對。透過頻譜分析儀求得結構之頻率響應函數(Frequency Response Function, FRF)，經由參數估測方法，將頻率響應函數藉由曲線嵌合(curve

fitting)軟體擷取出結構之自然頻率、模態振型、阻尼比等模態參數，由於 FEA 與 EMA 能夠相互彌補其被限制處，故結合兩種分析，將 FEA 的理論分析結果與 EMA 實驗分析數據作比較，以實驗結果為基準不斷修正 FE 模型的設定參數，最後即可獲得與實際受測物等效的 FE 模型，並可將此等效 FE 模型運用在其分析設計。

Yang et al.[7]提到在有限元素分析值得注意的三個重要因素，分別為幾何模型的建立、材料的材料特性和結構的邊界問題，利用這三種不同的方法做模態測試，並且用不同固定邊界條件的模擬方式；在文中所使用不同固定邊界條件的模擬方式即利用橡皮筋將 PCB 四個角懸吊起來的方式模擬自由邊界，而作模態測試時，利用了三種不同的方法，分別為正常的模態測試(normal modal testing)、衝擊錘測試(impact hammer testing)和振動搖晃測試(vibration shaker testing)。Gibson and Wen[8]提到尼龍棉線懸吊方式較不易造成受測物重量上的改變，使得實驗的準確性可增加，對不同的材料性質(isotropic/orthotropic)來說，尼龍棉線懸吊的模擬方式可獲得較佳的模擬結果。Gibson[9]將 EMA 分析複合材料結構的成果作整理，發現具有非線性性質的 PCB，透過適當設計的 EMA 仍可獲得趨近線性結果的實驗結果。由以上文獻探討可知進行實驗模態分析，有諸多不可避免之人為差異性，又本文採用之 PCB 已使用於實驗相關測試一段時間，對於 PCB 內部結構是否有無變異，不確知，因此本文將重複 EMA 探討 PCB 之模態重現性差異，並評估所建構之等效有限元素分析模型之適應性。

2. 問題定義與分析目標

圖 1 為本文所探討之受測 PCB 實際結構體及外部尺寸，受測 PCB 是無鉛化封裝之晶片用於針對聯合電子裝置工程協會(Joint Electronic Device Engineering Council, JEDEC)動力試驗規範中制定之測試件規格所製造。由於 PCB 經過時間及多種實驗測試，為了解其變異，本文分析目標如下：

- (1) 對 PCB 進行 2 次獨立之 EMA 實驗，分別求得 PCB 實際之自然頻率、模態振型與阻尼比。

- (2) 就 2 次 EMA 之結果與文獻[6]相比較，探討實驗結果之差異性。
- (3) 針對不同 EMA 結果於模型驗證，對於等效有限元素模型可靠性之評估。

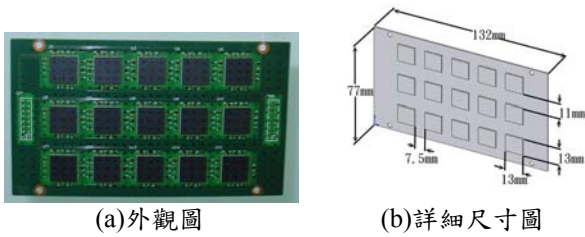


圖 1 受測 PCB 外觀及尺寸圖

軟體擷取出結構之自然頻率、模態振型、阻尼比等模態參數，由所得結果以驗證 PCB 實驗模態參數重現性之正確性及合理性。

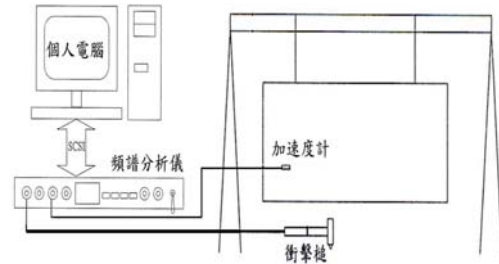


圖 3 實驗模態儀器設備架構[6]

3. 有限元素分析

理論分析是利用套裝軟體 ANSYS 對受測 PCB 進行有限元素分析，本文引用王等人[6]所建構之 PCB 有限元素模型，如圖 2，將整體 PCB 板分為底板層及底板上的封裝體兩種不同材質物體，本研究的模型架構，如同該文獻[6]元素的選用是採線性立方體元素 Solid45，將整體模型分割為 1153 個元素，位移限制條件採以全自由邊界(free-free)模擬之。表 1 為利用最佳化分析模型驗證後所得之 FE 模型材料性質。

表 1 材料性質[6]

| 種類 | 材料參數最佳化結果 |
|--------------------|--|
| 底層楊氏係數 $E_{X,B}$ | 9.42×10^9 (N/m ²) |
| 底層楊氏係數 $E_{Y,B}$ | 9.25×10^9 (N/m ²) |
| 底層剪力係數 $G_{XY,B}$ | 3.12×10^9 (N/m ²) |
| 底層浦松比 $\nu_{XY,B}$ | 0.25 |
| 底層密度 ρ_B | 2050 (Kg/m ³) |
| 晶片層楊氏係數 E_C | 20×10^9 (N/m ²) |
| 晶片層浦松比 ν_C | 0.4 |
| 晶片層密度 ρ_C | 1840 (Kg/m ³) |

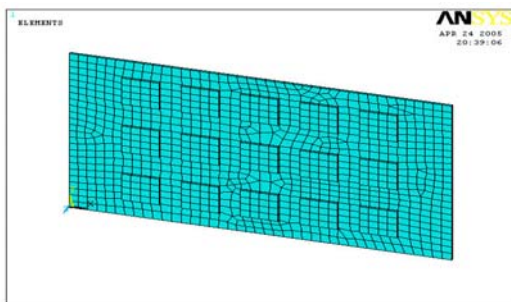


圖 2 PCB 有限元素分割示意圖[6]

4. 實驗模態分析

實驗方法及儀器架構採用之如圖 3 所示，依傳統實驗模態分析方式，以衝擊錘為驅動器，施加點力於 PCB 上以產生結構激振，利用固定在 PCB 上之加速度計量測 PCB 之響應，本研究以相同程序步驟，對 PCB 執行兩次獨立實驗，透過頻譜分析儀求得結構之 FRF，經由參數估測方法 (Modal Parameter Estimation Method)，將頻率響應函數藉由曲線嵌合 (curve fitting)

實驗量測點規劃如圖 4，於 PCB 背面劃分量測點，依文獻[6]有相同之規劃，長邊規劃 29 點，而在短邊規劃 17 點，總共可得 493 點進行實驗分析；根據文獻[6]得知，定義 PCB 左上方為點 1，由左至右，由上而下編號，右下為點 493。又因為 PCB 正面有晶片層，為避免晶片層內部複雜結構影響實驗結果，所以敲擊 PCB 背面來做實驗，而加速度計固定位置為最左下角的量測點，該點編號為第 465 號量測點(圖 6 ■處)。

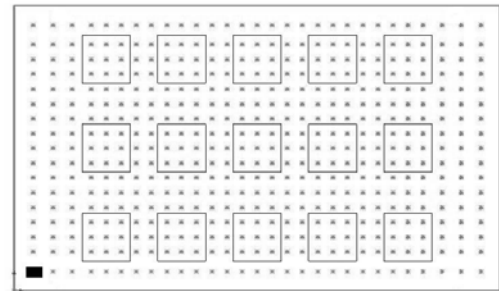


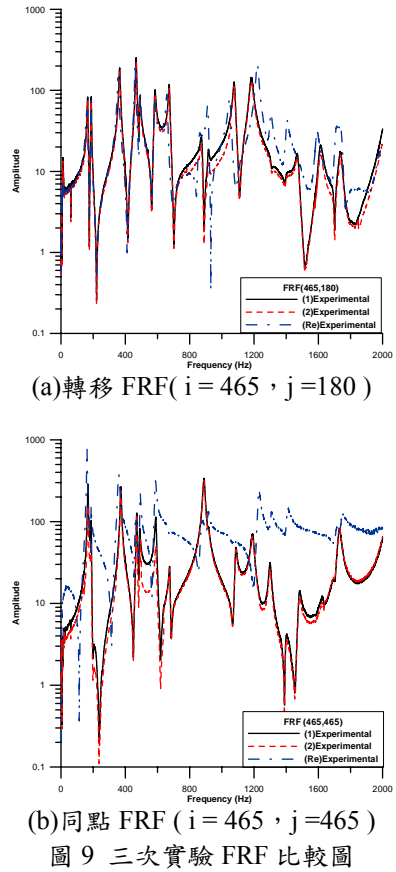
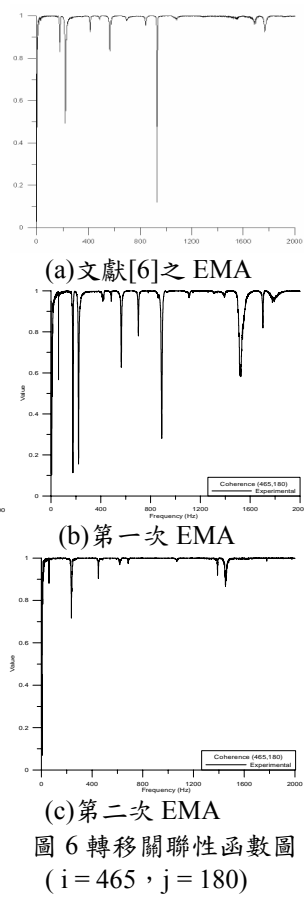
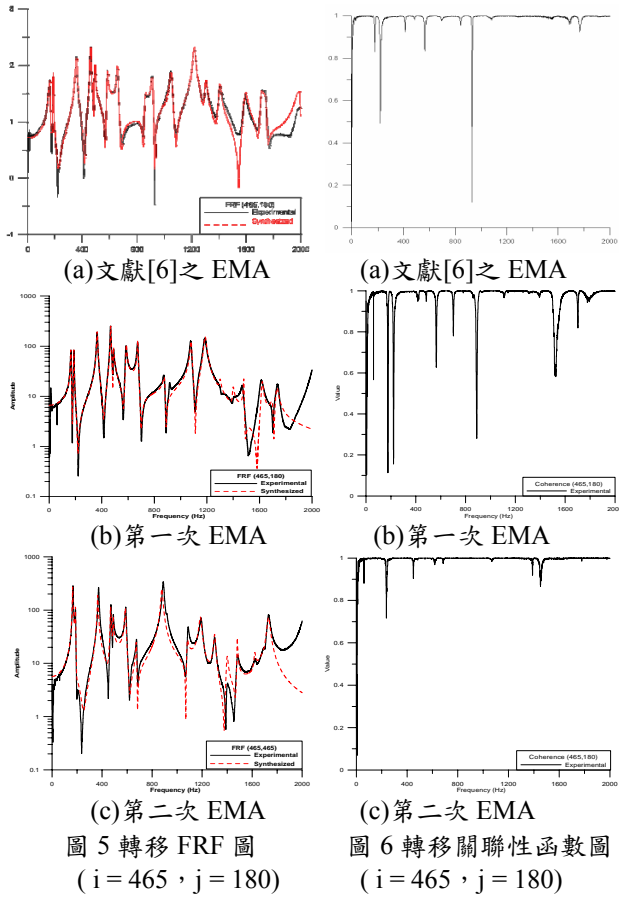
圖 4 PCB 背面量測點劃分示意圖[6]

5. 結果與討論

5.1 頻率響應函數與關聯性函數探討

圖 5 至圖 8 為三次獨立實驗、曲線嵌合合成之頻率響應函數(Frequency Response Function, FRF)曲線及對應之關聯性函數圖。不論是同點(輸入與輸出位置相同)或是轉移(輸入與輸出不同位置) FRF 曲線，實驗與合成曲線皆有很高的吻合度，顯示曲線嵌合具有極高的正確性。對應 FRF 之關聯性函數圖形中，除對應反共振點處因響應較小而導致關聯性函數偏低外，其餘部分皆接近於 1，因此三次獨立 EMA 實驗所得到的結構 FRF 量測數據是合理，且曲線嵌合亦是可靠的。

圖 9 為本文與文獻[6]共 3 次獨立 EMA 所得之 FRF 比較圖，在不同點轉移 FRF 函數部份，頻率在 800Hz 之前 FRF 曲線所對應相當吻合，而在 800Hz 之後對應還滿吻合的；而在同點部份，頻率在 600Hz 之前 FRF 曲線所對應還算吻合，而在 600Hz 之後 FRF 曲線僅有相似的趨勢，而高頻區域有較顯著明顯上的差異，可能的原因是在實驗時操作者對加速度計所黏貼的位置略有不同而產生變異，綜合而言，各共振模態之重現有一致性，更明確之比較應由模態參數觀察之。



5.2 模態參數比較

5.2.1 自然頻率比較

表 2 為本文兩次 EMA 和文獻[6]之 EMA 所獲得之自然頻率與理論 FEA 所獲得之自然頻率誤差比較，由表可知本文所執行 2 次 EMA 所得自然頻率之差異，幾乎相同，最大差異在 Mode 11 約 3%，與文獻[6]EMA 相比較，第一次 EMA 實驗的最大誤差為 3.39%、最小誤差為 -3.01% 及平均誤差為 -0.61%，而在第二次 EMA 實驗中最大誤差為 2.5%、最小誤差為 -2.78% 及平均誤差為 -0.62%，EMA 實驗之重現性相當不錯。

在與 FEA 結果比較，除了在第 1 個、第 2 個及第 5 個自然頻率與理論 FEA 之自然頻率誤差比較大(約 5% 左右)，其餘皆在(4% 以下)，3 次 EMA 所得自然頻率的平均誤差比也在 $\pm 1\%$ 以下，因此可以說等效 FE 模型有其適應合理性且相當吻合。

5.2.2 模態振型比對

實驗在 0~2000Hz 頻率內，由 EMA 可獲得 PCB 實際之自然頻率、模態振型與阻尼比，兩次 EMA 皆獲得 16 個自然頻率及對應模態振型，與文獻[6]之實驗與理論所得模態振型進行比較。表 3 即為 EMA 模態振型圖之比較，兩次獨立 EMA 與文獻[6]之理論 FE 模態振型相比皆在第 9 個模態振型與第 18 個模態振型沒對應到，其他皆對應吻合；而與文獻[6]之 EMA 模態振型相比，除了在第 14 個模態振型及第 18 個模態振型沒有對應，其它模態都有明確對應，雖然兩次獨立 EMA 實驗加速度計黏貼位子皆在第 465 點，但因人為之因素關係

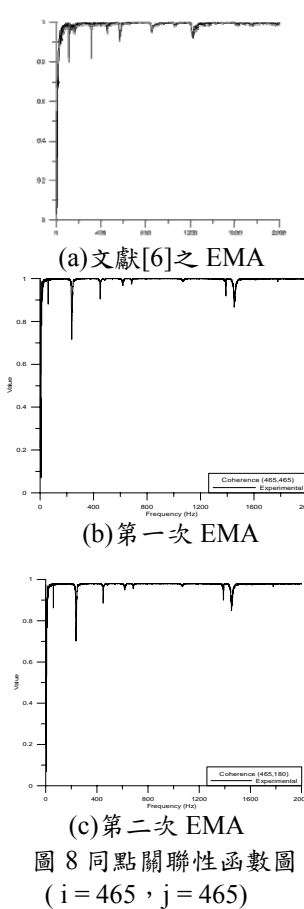
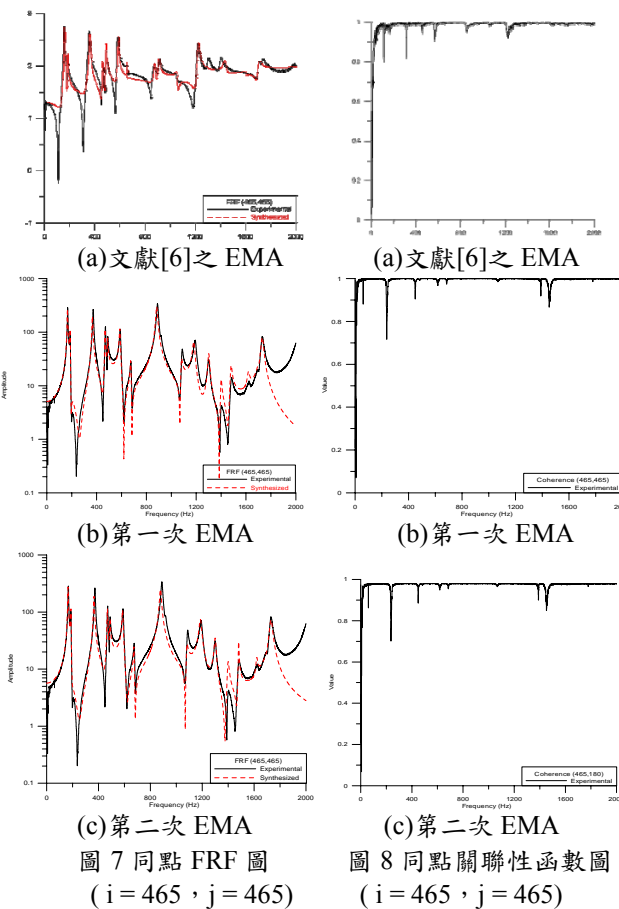


表 2 自然頻率誤差比

| Mode | FEA[6] 頻率 Hz | EMA[6] 頻率 Hz | 誤差% | E1-EMA 頻率 Hz | FEA[6] 誤差% | EMA[6] 誤差% | E2-EMA 頻率 Hz | FEA[6] 誤差% | EMA[6] 誤差% |
|---------|-----------------|-----------------|-------|-----------------|---------------|---------------|-----------------|---------------|---------------|
| 1 | 154 | 161 | -4.35 | 166 | -7.23 | -3.01 | 165 | -6.67 | -2.42 |
| 2 | 200 | 187 | 6.95 | 188 | 6.38 | -0.53 | 188 | 6.38 | -0.53 |
| 3 | 357 | 356 | 0.28 | 366 | -2.46 | -2.73 | 365 | -2.19 | -2.47 |
| 4 | 457 | 461 | -0.87 | 468 | -2.35 | -1.50 | 468 | -2.35 | -1.50 |
| 5 | 467 | 492 | -5.08 | 488 | -4.30 | 0.82 | 488 | -4.30 | 0.82 |
| 6 | 574 | 582 | -1.37 | 587 | -2.21 | -0.85 | 586 | -2.05 | -0.68 |
| 7 | 684 | 660 | 3.64 | 674 | 1.48 | -2.08 | 674 | 1.48 | -2.08 |
| 8 | 857 | 858 | -0.12 | 882 | -2.83 | -2.72 | 878 | -2.39 | -2.28 |
| 9 | 921 | 913 | 0.88 | - | - | - | - | - | - |
| 10 | 1075 | 1050 | 2.38 | 1080 | -0.46 | -2.78 | 1080 | -0.46 | -2.78 |
| 11 | 1192 | 1220 | -2.30 | 1180 | 1.02 | 3.39 | 1190 | 0.17 | 2.52 |
| 12 | 1278 | 1300 | -1.69 | 1300 | -1.69 | 0.00 | 1300 | -1.69 | 0.00 |
| 13 | 1349 | 1400 | -3.64 | 1400 | -3.64 | 0.00 | 1400 | -3.64 | 0.00 |
| 14 | 1429 | - | - | 1480 | -3.45 | 0.00 | 1480 | -3.45 | 0.00 |
| 15 | 1596 | 1590 | 0.38 | 1620 | -1.48 | -1.85 | 1620 | -1.48 | -1.85 |
| 16 | 1739 | 1710 | 1.70 | 1700 | 2.29 | 0.59 | 1700 | 2.29 | 0.59 |
| 17 | 1759 | 1740 | 1.09 | 1730 | 1.68 | 0.58 | 1730 | 1.68 | 0.58 |
| 18 | 1974 | 1980 | -0.30 | - | - | - | - | - | - |
| 最大誤差(%) | - | - | 6.95 | - | 6.38 | 3.39 | - | 6.4 | 2.5 |
| 最小誤差(%) | - | - | -5.08 | - | -7.23 | -3.01 | - | -6.67 | -2.78 |
| 平均誤差(%) | - | - | 0.24 | - | -1.01 | -0.61 | - | -0.95 | -0.62 |

表 3 模態振型比較圖


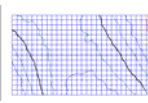
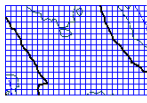
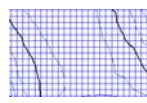
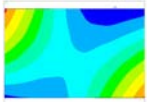
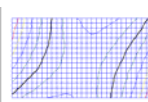
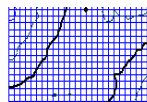
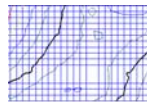
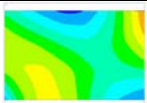
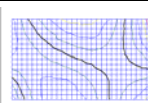
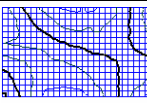
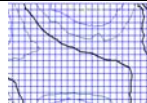
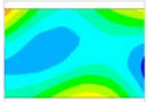
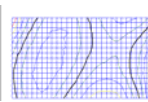
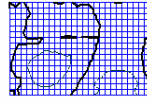
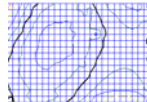
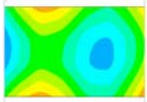
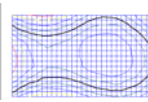
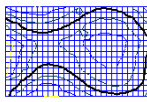
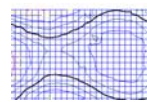
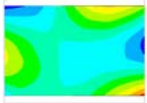
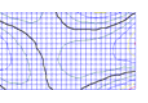
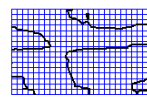
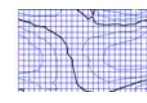

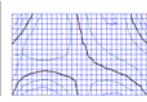
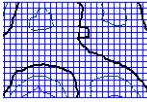
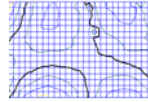

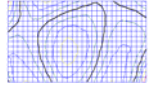
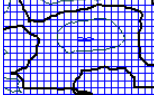
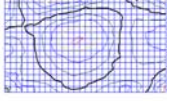
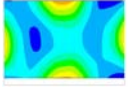
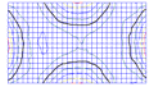
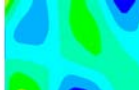
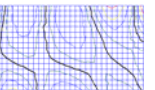
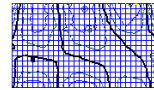

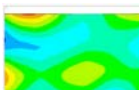
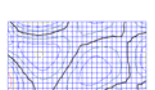
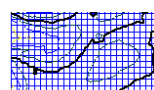

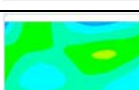
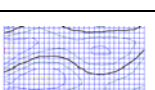
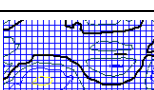
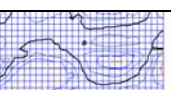
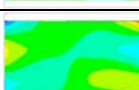
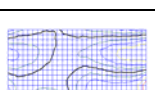
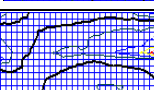
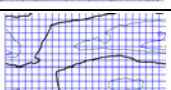
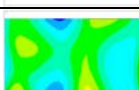

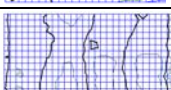

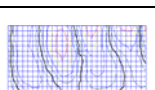
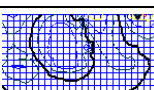


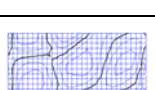
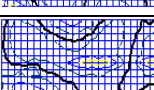
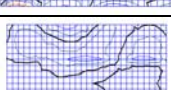
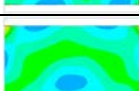
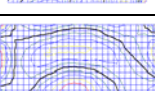
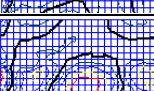
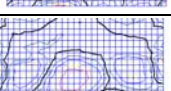
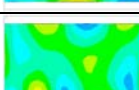

| Mode | 文獻[6]部分 | | | | 重現性部分 | | | |
|------------|------------|---|------------|---|------------|--|------------|---|
| | 頻率 (Hz) | FEA 振型 | 頻率 (Hz) | EMA 振型 | 頻率 (Hz) | 第一次 EMA 振型 | 頻率 (Hz) | 第二次 EMA 振型 |
| 1 (3,1) | 154 |  | 161 |  | 166 |  | 165 |  |
| 2 (3,1) | 200 |  | 187 |  | 188 |  | 188 |  |
| 3 (3,2) | 357 |  | 356 |  | 366 |  | 365 |  |
| 4 (4,1) | 457 |  | 461 |  | 468 |  | 468 |  |
| 5 (1,3) | 467 |  | 492 |  | 488 |  | 488 |  |
| 6 (2,3) | 574 |  | 582 |  | 587 |  | 586 |  |
| 7 (4,2) | 684 |  | 660 |  | 674 |  | 674 |  |

表 3 模態振型比較圖(續)

| Mode | 文獻[6]部分 | | | | 重現性部分 | | | |
|-------------|---------|---|---------|---|---------|--|---------|---|
| | 頻率 (Hz) | FEA 振型 | 頻率 (Hz) | EMA 振型 | 頻率 (Hz) | 第一次 EMA 振型 | 頻率 (Hz) | 第二次 EMA 振型 |
| 8 (5,1) | 857 |  | 858 |  | 882 |  | 878 |  |
| 9 (3,3) | 921 |  | 913 |  | - | X | - | X |
| 10 (5,2) | 1075 |  | 1050 |  | 1080 |  | 1080 |  |
| 11 (4,3) | 1192 |  | 1220 |  | 1180 |  | 1190 |  |
| 12 (1,4) | 1278 |  | 1300 |  | 1300 |  | 1300 |  |
| 13 (2,4) | 1349 |  | 1400 |  | 1400 |  | 1400 |  |
| 14 (4,1) | 1429 |  | - | X | 1480 |  | 1480 |  |
| 15 (4,1) | 1596 |  | 1590 |  | 1620 |  | 1620 |  |
| 16 (5,3) | 1739 |  | 1710 |  | 1700 |  | 1700 |  |
| 17 (3,4) | 1759 |  | 1740 |  | 1730 |  | 1730 |  |
| 18 (6,2) | 1974 |  | 1980 |  | - | X | - | X |

，使得實驗結果有了些許差異，推論影響原因與加速度計黏貼的位置有極大的關係。

模態振型物理意義表示法是定義長邊為 X 軸，可有正、負兩個方向變化；短邊為 Y 軸，亦可有正、負兩個方向變化，若一模態振型在 X 軸向方向變化 m 次，在 Y 軸向變化 n 次，則稱為(m,n)-mode，因為 X 與 Y 軸都各有兩個變化，故稱為(2,2)-mode。因此可以從表 3 得知相對應的模態振型之物理意義，除了有幾個模態振型沒對應到以外，其他振型皆相當吻合。

表 4 為模態保證指標(Modal Assurance Criterion, MAC)值比對，兩次 EMA 結果與文獻[6]之理論 FEA

結果進行 MAC 比對，在部份振型雖較低(約 0.6 左右)，但大多數都還不錯(0.85)，且從理論與實驗模態振型的實際圖形比較觀察，發現他們之間確實也有相當的吻合程度，因此可以驗證其 EMA 重現性之結果為合理、正確的。在此注意文獻[6]有限元素模型係依其 EMA 結果做修正，其加速度計質量效應係依該實驗配置，所以本文在振型 MAC 比較上有較大差異，因此於未來實驗及分析，加速度計質量效應須正確加入考慮。

5.2.3 阻尼比探討

表 5 為 EMA 實驗獲得之 PCB 的結構阻尼比，由

於透過加速度計所量測到的訊號是包含指數加權影響，會有加重阻尼之效應，故需要經過修正才能獲得真實 PCB 結構阻尼比，而在修正阻尼比方法是以單自由度次阻尼響應作說明， $x(t) = e^{-\xi_n \omega_n t} \sin \omega_d t$ ，當加入對數視為時， $\hat{x}(t) = e^{-(\xi_n \omega_n + \sigma)t} \sin \omega_d t$ ，於曲線嵌合時，將 $-(\xi_n \omega_n + \sigma)$ 視為 $-\hat{\xi}_n \omega_n$ ，故曲線嵌合阻尼比為 $-\hat{\xi}_n$ ，故可得修正後之阻尼比為 $\xi_n = \frac{\hat{\xi}_n \omega_n - \sigma}{\omega_n}$ 。

而在 FEA 模擬中則無法獲得結構阻尼比參數，故此處僅列出實驗獲得之阻尼比。由實驗獲得之結構阻尼比經過累積平均計算後，可作為 FEA 簡諧分析所需的阻尼比設定輸入值的依據。本文兩次 EMA 之累積平均阻尼比非常相近，0.558% 及 0.555% 與文獻 [6] 0.787%，就分析而言，此差異影響很小。

6. 結論

本文旨在探討 PCB 於實驗模態分析之重現性，分別進行兩次獨立 EMA 實驗與文獻 [6] 共三次作相互比較，結果顯示三次實驗所得之模態參數除了兩個模態未實際對應外，其於皆有相當高吻合性，顯示 EMA 之可靠性，而此差異性應係來自加速度計黏貼位置人為因素之變異所致。另外就三次實驗與 FEA 結果之模型驗證也有一致性，惟加速度計之質量效應於未來分析與實驗應適當依實驗狀況修正，以確保後續響應分析之正確性。

表 4 與 FEA 比較之 MAC 值

| Mode | 文獻[6]EMA | 第一次 EMA | 第二次 EMA |
|------|----------|---------|---------|
| 1 | 0.91 | 0.84 | 0.83 |
| 2 | 0.83 | 0.96 | 0.95 |
| 3 | 0.91 | 0.72 | 0.72 |
| 4 | 0.68 | 0.67 | 0.65 |
| 5 | 0.70 | 0.77 | 0.72 |
| 6 | 0.97 | 0.84 | 0.81 |
| 7 | 0.97 | 0.90 | 0.90 |
| 8 | 0.97 | 0.64 | 0.63 |
| 9 | 0.94 | X | X |
| 10 | 0.92 | 0.83 | 0.83 |
| 11 | 0.75 | 0.71 | 0.71 |
| 12 | 0.72 | 0.66 | 0.65 |
| 13 | 0.68 | 0.52 | 0.45 |
| 14 | X | 0.72 | 0.73 |
| 15 | 0.93 | 0.76 | 0.68 |
| 16 | 0.78 | 0.45 | 0.42 |
| 17 | 0.84 | 0.67 | 0.63 |
| 18 | 0.91 | X | X |

表 5 三次 EMA 之實驗阻尼比

| Mode | 文獻[6] EMA | | 第一次 EMA | | 第二次 EMA | |
|------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|
| | 修正 阻尼 (%) | 累積 平均值 (%) | 修正 阻尼 (%) | 累積 平均值 (%) | 修正 阻尼 (%) | 累積 平均值 (%) |
| 1 | 2.139 | 2.139 | 1.104 | 1.104 | 0.992 | 0.992 |
| 2 | 0.577 | 1.358 | 0.482 | 0.793 | 0.491 | 0.742 |
| 3 | 1.30 | 1.339 | 0.808 | 0.798 | 0.800 | 0.761 |
| 4 | 0.541 | 1.139 | 0.446 | 0.710 | 0.471 | 0.689 |
| 5 | 0.475 | 1.001 | 0.487 | 0.665 | 0.490 | 0.649 |
| 6 | 0.675 | 0.951 | 0.613 | 0.657 | 0.631 | 0.646 |
| 7 | 0.620 | 0.904 | 0.386 | 0.618 | 0.387 | 0.609 |
| 8 | 0.840 | 0.896 | 0.700 | 0.628 | 0.721 | 0.623 |
| 9 | 0.549 | 0.857 | - | - | - | - |
| 10 | 0.722 | 0.844 | 0.474 | 0.611 | 0.489 | 0.608 |
| 11 | 0.675 | 0.828 | 0.713 | 0.621 | 0.767 | 0.624 |
| 12 | 0.518 | 0.803 | 0.446 | 0.605 | 0.488 | 0.612 |
| 13 | 0.563 | 0.784 | 0.327 | 0.582 | 0.435 | 0.597 |
| 14 | - | - | 0.427 | 0.570 | 0.132 | 0.561 |
| 15 | 0.760 | 0.782 | 0.571 | 0.570 | 0.398 | 0.549 |
| 16 | 0.577 | 0.769 | 0.423 | 0.560 | 0.579 | 0.551 |
| 17 | 0.601 | 0.758 | 0.523 | 0.558 | 0.607 | 0.555 |
| 18 | 1.251 | 0.787 | - | - | - | - |

7. 參考文獻

- [1] 馮克林，1990，「封裝元件可靠度加速測試及失效評估」，工業材料，第158期，第90-98頁。
- [2] 廖德銘，「認識環境應力篩選與其在產品研製過程中各階段之意義」，品質管制月刊，第27卷，第9期，第48-55頁。
- [3] Yang, Q. J., Wang, Z. P., Lim, G. H., Pang, J. H. L., Yap, F. F., and Lin, R. M., 2002, "Reliability of PBGA Assemblies Under Out-of-Plane Vibration Excitations," *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, Vol. 25, No. 2, pp. 293-300.
- [4] Yang, Q. J., Pang, H. L. J., Wang, Z. P., Lim, G. H., Yap, F. F., and Lin, R. M., 2000, "Vibration Reliability Characterization of PBGA Assemblies," *Microelectronics Reliability*, Singapore, Vol. 40, pp. 1097-1107.
- [5] 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*, California, pp. 149-154.
- [6] 王栢村，林鴻裕，李英志，2005，「環境振動試驗用印刷電路板之模型驗證」，中華民國力學學會第29屆全國力學會議，新竹，第H013-1-H013-8頁。
- [7] Yang, Q. J., Lim, G. H., Lin, R. M., Yap, F. F., Pang, H. L. J. and Wang, Z. P., 1997 "Experimental

- Modal Analysis of PBGA Printed Circuit Board Assemblies,” *IEEE /CPMT Electronic Packaging Technology Conference*, Singapore, pp. 290-296,
- [8] Gibson, R. F., and Wen, Y. F., 1993, “Evaluation of boundary conditions for a composite plate vibration test,” *Proceeding of the Spring Conference on Experimental Mechanics*, Detroit, pp. 19-27.
- [9] Gibson, R. F., 2000, “Modal Vibration Response Measurements for Characterization of Composite Materials and Structures,” *Composites Science and Technology*, Vol. 60, pp. 2769-2780.

Reproducibility of Experimental Modal Survey on a Printed Circuit Board

Bor-Tsuen Wang¹, Yue-Ying Tsai², Ying-Chih Li², Yi-Shao Lai³, Chang-Lin Yeh³

^{1,2}**Department of Mechanical Engineering
National Pingtung University of Science and
Technology**

³**ASE GROUP Kaohsiung Stress-Reliability
Lab**

ABSTRACT

Experimental modal analysis (EMA) or modal testing is frequently adopted to obtain structural modal parameters. The modal model can then be compared with the analytical one. This work addresses the repeatability of EMA on a printed circuit board (PCB) that is designed to be used for environmental vibration test. The experiments are carried out exactly the same as the preview work. Two repeat tests are performed to experimentally extract the modal model, respectively, and tested results are compared to each others. In particular, the finite element solution is also verified by the three independent experiments. Results show that the repetitiveness of EMA is quite reliable in terms of modal parameters, besides of the human error in carrying out experiments. The possible cause of the difference may be the mass effect of accelerometer. The test of repeatability on EMA can ensure the proper use of the validated analytical model.

Keywords: Experimental modal analysis, Printed circuit boards, Finite element analysis