

印刷電路板受熱狀態之振動模態分析與驗證

王栢村¹許富翔²賴逸少³葉昶麟³李英志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

摘要

本文利用有限元素分析與實驗模態分析進行印刷電路板(PCB)有無受熱狀態之模型驗證,首先進行自由邊界之模型驗證,包含PCB板、PCB板於封裝體貼附加熱片及加熱片給予固定熱源施於PCB之封裝體,以確認分析模型之正確性。其次進行PCB板固定邊界之模型驗證,包含PCB板於封裝體貼附加熱片及PCB板封裝體於不同輸入電壓狀態,確認模擬固定邊界的彈簧元素之彈簧參數,並探討PCB板受熱前後之振動模態特性差異性,結果顯示PCB板於固定邊界時,整體結構自然頻率有稍微降低,分析與實驗模態振型比對良好,故未來可引用此模型進行隨機激振實驗之驗證分析。

關鍵詞: 印刷電路板(PCB)、熱傳分析、模態分析、有限元素分析、模態參數。

1. 前言

在電子構裝產業中,印刷電路板(Printed Circuit Board, PCB)在體積日益縮小的情況下,除了由高溫所產生之破壞以外,在組裝、運輸及使用過程中,經由振動所產生的破壞亦為印刷電路板之設計關鍵,因此必須進行振動與熱傳複合試驗,由實驗模態分析可得實際結構有無受熱之模態參數及頻率響應函數,理論由有限元素分析可得印刷電路板有無受熱之理論振動模態及頻率響應函數,兩者比對得到足夠代表實際結構之等效模型。

Gonald[1]在印刷電路板上所採用之材料都屬於複合材料,並且加強電路板之結構強度,讓電路板受振動所產生的損壞降到最少。Gibson et al[2]此篇利用三種不同複合材料之平板進行實驗模態分析,在實驗方面利用兩種不同方法來模擬結構在自由邊界上之結果作比較。Kao et al[3]設計印刷電路板時,封裝擺放位置會產生不同的應力分佈,由於做彎曲試驗必須也要考慮晶片抗壓程度所以在設計晶片也要增強晶片之抗壓。Liou et al[4]本文探討結構之材料受到負荷所產生變動之振幅,材料之應力壽命是根據累積規則所進行的循環,而在隨機振動的分析中及可說明材料的此項特性,經由本篇論述疲勞壽命的預測,對理論上之典型疲勞壽命方程式及如何求取疲勞壽命之流程進行瞭解。王等人[5]本文主要針對電路板之封裝結構進行模型驗證,並利用有限元素分析與實驗模態分析,所求得之模態參數進行比對,已確認實際結構之等效有限元素模型。王等人[6]針對兩塊同規格之印刷電路板進行振動試驗之重複性

探討,並利用有限元素分析與實驗模態分析所求得之模態參數進行比對驗證,並得到足以代表實際結構之等效分析模型。王等人[7]探討不同封裝體數量印刷電路板之振動特性與響應預測模擬比較分析,自然頻率比對結果單一封裝體PCB於固定邊界下自然頻率之值都比多封裝體PCB自然頻率較小。鄭等人[8]探討利用晶片封裝之散熱評估,利用熱阻值或熱傳值進行實驗量測,最後由實驗與理論的數值模擬進行驗證。余等人[9]在cisp之設計流程上,說明如何改善製成之良率,並利用雷射鑽孔技術作微孔,讓封裝時候可以得到較好的對位,在分析方面把熱傳傳遞至晶片表面上與把熱傳遞到在晶片下表面兩種方法,並探討何種方法熱傳效率較好。黃等人[10]探討兩種不同晶片疊合封裝晶片之功率大小與溫度耦合循環測試之影響,並看溫度曲線偏離純粹溫度循環曲線的程度,最後結果可得知不管功率加在那個晶片上,VFBGA的晶片接點溫度會比SPBGA還要來的高。黃等人[11]探討具雙層堆疊晶片之上板薄型細間距球柵陣列晶片尺寸封裝在功率與溫度耦合循環測試下,結果顯示加入功率循環後,晶片結點溫度與溫度循環曲線及產生差異,功率關閉時,溫度及回歸溫度循環的溫度曲線。黃等人[12]利用有限元素分析裸晶型晶圓級封裝迴錫於測試電路板後在加速溫度循環測試下之疲勞可靠度,結果顯示可以有效增長此類封裝體之溫度循環疲勞壽命。黃等人[13]利用有限元素分析疊合封裝結構迴錫於測試電路板後進行,加速度溫度循環測試下之疲勞可靠度,溫度循環為0~100°C兩個完整溫度循環週期,結果顯示影響最大為基板厚度、晶片厚度及錫球接點高度。

印刷電路板之熱源採用加熱片對印刷電路板之封裝體進行受熱,理論方面先以印刷電路板進行熱傳分析再進行振動分析,進行熱應力場分析時必須先把溫度場分析所得各節點溫度值帶入進行熱應力場分析,最後由熱變形之位移量進行含熱效應之振動耦合分析,實驗方面先以實驗模態分析對印刷電路板求得模態參數,得知印刷電路板之振動特性,最後PCB板於封裝體所貼附加熱片給予固定熱源,再進行實驗模態分析可得PCB板受熱之模態參數,結果可得知印刷電路板受熱前後之差異性。

2. PCB板於自由邊界下有無受熱之模型驗證與模態特性比較

本文利用有限元素分析及實驗模態分析,對PCB板進行模型驗證,由有限元素分析進行模態分析之結果可得理論振動模態參數,利用實驗模態分析可求得實際

結構之振動模態參數，經由理論與實驗模態參數比對後，可得足以代表實際結構之等效分析模型。

2.1 有限元素分析

整體模型如圖 1 分別為電路板、封裝體及銅片，並假設電路板為正向性材料，封裝體及銅片為等向性材料，加熱片與銅片為一體進行建構，而 PCB 板材料參數採用自由邊界最佳化之參數進行設定，在對材料進行最佳化求得合理參數如表 1 所示，PCB 板模型建構無包含加熱效應與銅片，PCB 板貼附銅片之模型建構無包含加熱效應，本文以 PCB 板具熱效應進行建構說明如下：

1. 元素選用：PCB 板底層為正向性材料，封裝層為等向性材料，銅片為等向性材料，皆選用線性立方體元素(SOLID45)，加速度計以三維質量元素(MASS21)進行模擬，PCB 板具熱效應之熱傳溫度場分析時 PCB 板使用線性立方體熱傳元素(Solid70)，進行熱應力場分析時由溫度場分析結果帶入節點對應溫度值轉換為靜力元素，線性立方體元素(SOLID45)。
2. 元素分割：使用 mapped mesh 將模型分割為 1387 元素，2904 個節點。
3. 位移限制：自由邊界不需設定任何位移限制，進行 PCB 具熱效應時之溫度場分析於銅片表面上給予穩態定溫度 75°C ，PCB 板表面設定週界熱對流係數 $h_f = 50(\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{K})$ 及週界溫度 $T_{\infty} = 27^{\circ}\text{C}$ 。熱傳應力場分析時，以全自邊界模擬無須設定任何位移限制。
4. 負荷條件：進行模態分析不需設定負荷，進行簡諧響應分析則對應實驗模態分析量測點之衝擊點位置給予 1 單位 Z 方向外力。進行 PCB 板具熱效應時必須選擇以預應力(presstress,on)選項使其熱應力場之熱變形效應進行模態分析。

2.2 實驗模態分析

主要對 PCB 板、PCB 板貼附加熱片及印刷電路板貼附加熱片具熱效應，三種不同狀態進行實驗，實驗方法皆相同本內容以 PCB 板貼附加熱片具熱效應進行說明，實驗架構圖 2(a)所示，由電源供應器提供固定電壓 $10\text{V}(^{\circ}\text{C})$ 使加熱片產生熱源並分佈於印刷電路板上，熱電偶貼附於封裝體與加熱片中間隨時得知溫度狀況，並以衝擊錘為驅動器，加速度器為感測器固定於印刷電路板上，經由衝擊錘施加點力於印刷電路板上產生結構激振，加速度計可量測板子上受熱之振動響應。圖 2(b)為量測點規劃，左至右長邊為兩條 20 點，短邊為兩條 34 點，扣除同點總共量得 70 點，而 PCB 板及 PCB 板貼附加熱片量測點規劃為圖 2(b)黑點所示僅敲擊 4 點，只可得到 FRF 作比較分析。

2.3 結果與討論

利用有限元素分析及實驗模態分析，對三種不同狀態下 PCB 板進行模型驗證，可得等效於實際結構之有限元素模型，經由此模型可延伸至固定邊界之振動分析，綜合討論如下。

表 2 為 PCB 板於自由邊界在不同狀態之頻率響應函數及關聯性函數圖，頻率響應函數圖之縱座標為振幅，橫座標為頻率，由實驗及曲線嵌合之頻率響應函數之比對，由三種不同狀態下都可觀察相當吻合，應此可以判斷曲線嵌合是非常成功的，故由嵌合所得之模態參數是準確的。而虛線為有限元素模型分析之頻率響應函數曲線與實驗曲線比對，在 PCB 板可觀察相當吻合，PCB 貼附於加熱片整體比對上 800Hz 之前頻率響應函數比對相當吻合，800Hz 以上有較明顯差異，主要推測在有限元素分析時 PCB 板與加熱片視為一體，但實際結構是利用耐熱膠黏貼附著於 PCB 板故造成比對有些微誤差。

由表當 2PCB 貼附於加熱片受熱效應實驗與理論之頻率響應函數比對下，800Hz 之前頻率響應函數比對相當吻合，800Hz 以上比對較不吻合但皆有相同趨勢，主要影響原因可能為進行實驗時周圍環境溫度會造成電路板四週溫度有些微波動，影響實驗精準度。最後由關聯性函數圖瞭解，在共振點以外，其餘值接近於 1，表示實驗品質良好，代表實驗之頻率響應函數可靠度高。

表 3 為 PCB 板於自由邊界在不同狀況之實驗頻率比對表，整體自然頻率誤差皆在 $\pm 5\%$ 內，而自然頻率比對誤差小表示與實際結構自然頻率非常相近。觀察 PCB 板有無貼附加熱片之自然頻率比對上在低頻並沒有太大差異，而 PCB 板貼附加熱片有無熱效應之自然頻率比對上受熱效應在低頻可觀察自然頻率有略高趨勢。

表 4 為 PCB 板於自由邊界在不同狀況下之模態振型比對表，PCB 板有無貼附加熱片振型並沒有明顯差異，PCB 板貼附加熱片受熱效應與理論分析比對，可觀察 MAC 值在部分振型雖然低 (0.3 及 0.7 左右)，但絕大多數也都不錯 (0.9 左右)，自然頻率及模型驗振對應相當吻合，代表印刷電路板受熱效應於自由邊界之模型驗證相當成功。

表 5 為 PCB 板於自由邊界在不同狀況之實驗阻尼比，經由實驗模態分析獲得實際結構印刷電路板之結構阻尼，進行實驗量測時時間域響應已趨近於零，故不需進行加權函數，經過累計平均計算過後 PCB 板之阻尼比為 0.634%，PCB 板貼附加熱片阻尼有略高趨勢 0.957%，受熱效應有稍微略低 0.836%，可將此結果作為有限元素模型輸入阻尼比為依據。

3. PCB 板於固定邊界下有無受熱之模型驗證與模態特性比較

由驗證完成自由邊界之有限元素模型，並延伸至固定邊界狀態下進行模型驗證，並將分析結果與實驗模態分析結果進行模態特性參數比對，將可確認螺絲鎖固之設定值，並可得等效於實際結構之有限元素模型。

3.1 有限元素分析

套用 PCB 板貼附加熱片於自由邊界已驗證完成之有限元素模型，並以彈簧元素模擬實際螺絲鎖固狀況，如圖 3(a)(b)所示，PCB 板貼附銅片具熱效應於固定邊界之有限元素模型建構與自由邊界建構相似，唯一不同則

是固定邊界進行彈簧元素設定，故本節以 PCB 板貼附加熱片具熱效應於固定邊界之模型建構進行說明如下：

1. 元素選用：印刷電路板底層為正向性材料，封裝層為等向性材料，銅片為等向性材料，皆選用線性立方體元素(SOLID45)，加速度計以三維質量元素(MASS21)進行模擬，PCB 板具熱效應之熱傳溫度場分析時 PCB 板使用線性立方體熱傳元素(Solid70)，進行熱應力場分析時由溫度場分析結果帶入節點對應溫度值轉換為靜力元素，線性立方體元素(SOLID45)。
2. 元素分割：使用 mapped mesh 將模型分割為 1387 元素，2904 個節點。
3. 位移限制：固定邊界以彈簧元素(Combin14)模擬螺絲鎖固，進行 PCB 板具熱效應時之溫度場分析於銅片表面上給予穩態定溫度 75°C 及 125°C 兩種不同溫度，PCB 板表面設定週界熱對流係數 $h_f = 50(\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{K})$ 及週界溫度 $T_\infty = 27^\circ\text{C}$ 。熱傳應力場分析時，以固定邊界模擬螺絲鎖固。
4. 負荷條件：進行模態分析不需設定負荷，進行簡諧響應分析則對應實驗模態分析量測點 34 點之衝擊點位置給予 1 單位 Z 方向外力，進行 PCB 板具熱效應時必須選擇以預應力(presstress,on)選項使具熱應力場之熱變形效應進行模態分析。

3.2 實驗模態分析

實驗儀器設備架設如圖 4 所示，主要將 PCB 板以螺絲鎖固於治具上，實驗方法與自由邊界相同，以電源供應器提供固定電壓使加熱片產生熱源並分佈於印刷電路板上，並分別對 PCB 板施加兩種等溫加熱於電壓 10V(75°C)及 15V(125°C)，PCB 板受兩種不同電壓之熱效應進行量測，點規劃與自由邊界相同左至右長邊為兩條 20 點，短邊為兩條 34 點，扣除同點總共量得 70 點，PCB 板貼附加熱片無熱效應量測點規劃為與自由邊界相同，僅敲擊 4 點。

3.3 結果與討論

利用有限元素分析及實驗模態分析，對三種不同狀態下 PCB 板進行模型驗證，可得知 PCB 板有無受熱及不同電壓之等溫加熱條件下之影響，綜合討論如下。

表 6 為 PCB 板於固定邊界在不同狀態之頻率響應函數及關聯性函數圖，頻率響應函數圖之縱座標為振幅，橫座標為自然頻率，由實驗及曲線嵌合之頻率響應函數之比對，由三種不同狀態下都可觀察相當吻合，應此可以判斷曲線嵌合是非常成功的，故由嵌合所得之模態參數是準確的。

觀察表 6 之 PCB 板貼附加熱片實驗與理論頻率響應函數比對時，1000Hz 之前頻率響應函數相當吻合，1000Hz 以上皆有相同趨勢。於電壓 10V 即 75°C 等溫加熱之熱效應，800Hz 以下實驗與理論之頻率響應函數與理論比對非常吻合，於電壓 15V 即 125°C 等溫加熱之熱效應，500Hz 以下實驗與理論之頻率響應函數與理論比對非常吻合，在電壓 10V 及 15V 之熱效應 800Hz 及 500Hz 以上，實驗與理論之頻率響應函數與理論對應不

太吻合，可能原因為周圍環境溫度可能會造成電路板周圍溫度有些微波動，導致無法吻合與分析對應。最後在關聯性函數可看出在共振點以外，其餘值接近於 1，表示實驗品質良好，其餘值接近於 1，代表實驗之品質是不錯的。

表 7 為 PCB 板於固定邊界在不同狀況之實驗頻率比對表，無受熱效應之整體自然頻率誤差皆在 $\pm 5\%$ 內，而 PCB 板受熱效應整體在 500Hz 以下自然頻率誤差皆在 $\pm 5\%$ 。PCB 板貼附加熱片有無熱效應之自然頻率比對上，在低頻可觀察受熱後自然頻率有略低趨勢，等溫加熱下，溫度越高自然頻率越低。

表 8 為 PCB 板於固定邊界在不同狀況下之模態振型比對表，PCB 板有貼附加熱片有無熱效應可觀察觀察振型在 500Hz 以下第 4 個模態大致相同高頻率模態即有些差異，第五模態受熱狀態之 EMA 均未求得，乃因敲擊點恰在節線上之故。PCB 板貼附加熱片受熱效應與理論分析比對，可觀察於電壓 10V 及 15V 之 MAC 值在 500Hz 以下比對良好(0.9 左右)，在 500Hz 以上 MAC 值有略低，對於後續之隨機激振實驗在 5~500Hz 頻寬範圍具實務應用價值。

表 9 為 PCB 板於固定邊界在不同狀況之實驗阻尼比，經由實驗模態分析獲得實際結構印刷電路板之結構阻尼，進行實驗量測時時間域響應已趨近於零，故不需進行加權函數，經過累計平均計算過後 PCB 板貼附加熱片之阻尼比為大約為 0.9 左右%，具熱效應後阻尼有略低現象 0.666%，故可將此結果作為有限元素模型輸入阻尼比為依據。

4. 結論

本文將 PCB 板、PCB 板貼附加熱片及 PCB 板貼附加熱片受熱效應，模擬自由邊界並利用有限元素分析與實驗模態分析各別求得模態參數，經參數比對則完成模型驗證，將可得代表實際結構之有限元素模型，利用等效於實際結構之有限元素模型延伸至固定邊界之振動分析，並完成固定邊界模型驗證，本文綜合討論如下：

1. PCB 板於自由邊界在不同狀態之頻率響應函數，以實務應用 0~800Hz 自然頻率可觀察 PCB 板實驗與理論比對良好，而實驗與理論之自然頻率誤差皆在 $\pm 5\%$ 內，模態振型及 MAC 比對上大部分都比對皆比對良好，故完成 PCB 板於自由邊界之模型驗證。
2. PCB 板於固定邊界三種不同狀態下，實驗與理論模態參數比對，PCB 板貼附加熱片無加熱時，自然頻率誤差皆在 $\pm 5\%$ ，PCB 板貼附加熱片受熱效應後，自然頻率在低頻比對前三個模態誤差貼在 4% 內，MAC 值在 500Hz 以下比對良好(0.9 左右)，未來進行隨機激振實驗之驗證分析時，由 JEDEC 試驗規範，激振頻率為 0~500Hz，故 PCB 板受熱效應於固定邊界之模型驗證尚可應用。
3. 未來可由驗證成功之夾持邊界分析模型進行基座激振之頻譜響應分析，藉由 JEDEC 環境振動試驗規範下，對印刷電路板進行含熱效應之隨激振動

響應預測，探討可能破壞之位置。

5. 參考文獻

1. Lai, Y. S., Yang, P. F., Yeh, C. L., and Tsai, C. I., 2004, "Board-Level Drop Performance of Lead-Free Chip-Scale Packages with Different Soldermask Openings and Solder Compositions" *Proceedings of the 6th International Conference on Electronics Materials and Packaging*, China, pp. 56-60.
2. 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*, pp. 19-27.
3. Ma, C. C., and Huang, C. H., 2004, "Experimental Whole-Field Interferometry for Transverse Vibration of Plate," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 271, pp. 493-506.
4. Liou, H. Y., Wu, W. F., and Shin, C. S., 1999, "A Modified Model for the Estimation of Fatigue Life Derived from Random Vibration Theory," *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 14, pp. 281-288.
5. 王栢村, 陶致均, 賴逸少, 葉昶麟, 李英志, 2008, 「上級封裝體於自由邊界下之模型驗證」, 中華民國振動與噪音工程學術研討會第十六屆, 台北, 論文編號: C-6。
6. 王栢村, 陶致均, 李沛緯, 2007, 「印刷電路板模型驗證與響應預測之重複性探討」, ANSYS應用研討會, 台北, 第15-30頁。
7. 王栢村, 許富翔, 陶致均, 賴逸少, 葉昶麟, 李英志, 2008, 「不同封裝體數量印刷電路板之振動特性與響應預測模擬比較分析」, 中華民國振動與噪音工程學會第十六屆學術研討會, 台北, 論文編號: C-5。
8. 鄭宗杰, 余致廣, 2005, 「FC-PBGA之熱流模擬簡介」, 奈米通訊, 第11卷, 第4期, 第17-21頁。
9. 余致廣, 鄭宗杰, 2005, 「內藏式晶片封裝之熱傳研究」, 奈米通訊, 第12卷, 第3期, 第30-33頁。
10. 黃東鴻, 李長祺, 賴逸少, 王靜君, 2007 「疊合封裝結構受功率與溫度耦合循環測試之熱傳特性與疲勞可靠度評估」, 專題報導, 第42期, 第4-8頁。
11. 黃東鴻, 李長祺, 王靜君, 賴逸少, 2006 「推疊晶片尺寸受功率與溫度耦合循環測試的熱特性與疲勞可靠度表現」, 中華民國力學學會第三十屆全國力學會議, 彰化, 第8-10頁。
12. 黃東鴻, 賴逸少, 2006 「裸晶型晶圓級封裝溫度循環疲勞可靠度之最佳化設計」, 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5789-5794頁。
13. 黃東鴻, 王靜君, 賴逸少, 2005 「疊合封裝結構溫度循環疲勞可靠度之最佳化設計」, 中華民國力學學會第二十九屆全國力學會議, 新竹市, L015-1-7。

Vibration Modal Analysis and Verification of Printed Circuit Board with Thermal Effect

Bor-Tsuen Wang¹, Fu-Xiang Hsu²
Yi-Shao Lai³, Chang-Lin Yeh³, Ying-Chih Li³
¹Professor
²Graduate student
^{1,2}Department of Mechanical Engineering
National Pingtung University of Science and Technology

³ASE GROUP Kaohsiung Stress-Reliability Lab

ABSTRACT

This work applies finite element analysis (FEA) and experimental modal analysis (EMA) to perform model verification of a printed circuit board (PCB) with and without thermal effects. First, the model verification of free boundary PCB structures, including the PCB, the PCB with the attached heating pad without heating and with heating, is carried out to validate the analytical FE model. The fixed boundary PCB is then considered for model verification. The PCB with the thermal heating at different levels is investigated to discuss the difference of vibration modal properties and verified the spring constants at the fixed boundaries. Results show that for the PCB in the fixed boundary subject to the heating thermal effect, the structural natural frequencies generally increase. The analytical and experimental mode shapes match very well. The FE model with the thermal effect is experimentally verified and can be adopted for the verification analysis in comparison to random vibration tests in the future.

Keywords: Printed circuit board (PCB), thermal analysis, modal analysis, modal parameter

6. 圖表彙整

表 1、印刷電路板最佳化材料性質表

材料參數	楊氏係數	剪力係數	蒲松比	密度	熱膨脹係數	熱傳導係數	加速度計質量
單位	(N/m ²)	(N/m ²)		(kg/m ³)	(1/°K)	(W/m·°C)	Kg
電路板	$E_x = 13.87 \times 10^9$ $E_y = 13.23 \times 10^9$ $E_z = 12.49 \times 10^9$	$G_x = G_y = G_z = 3.25 \times 10^9$	0.36	2066	14.5×10^{-6}	19.27	0.15
封裝體	$E_x = E_y = E_z = 9.15 \times 10^9$	-	0.4	2958	2.8×10^{-6}	$150 \left(\frac{temp}{300}\right)^{-2}$	
銅片	$E_x = 96 \times 10^9$	-	0.34	8374	16.7×10^{-6}	385	

表 2、PCB 板於自由邊界在不同狀態之頻率響應函數及關聯性函數圖

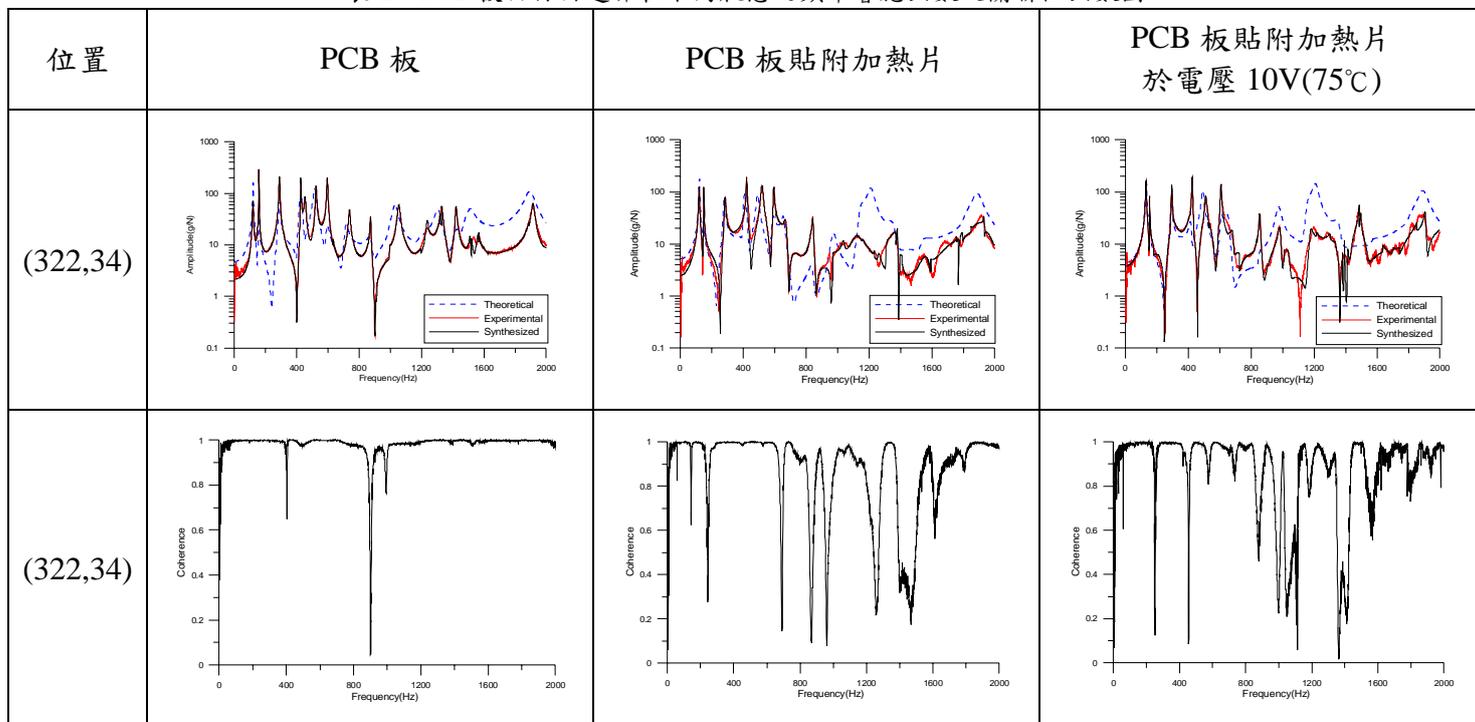


表 3、PCB 板於自由邊界在不同狀況之實驗自然頻率比對

模態	PCB 板			PCB 板之封裝體貼附加熱片			PCB 板之封裝體貼附加熱片於電壓 10V(75°C)		
	理論頻率 (Hz)	實驗頻率 (Hz)	誤差 (%)	理論頻率 (Hz)	實驗頻率 (Hz)	誤差 (%)	理論頻率 (Hz)	實驗頻率 (Hz)	誤差 (%)
1	120.95	118.08	2.69	122.01	118.6	3.39	132.57	129.53	1.97
2	155.15	157.38	-1.29	147.42	149.16	-0.66	152.66	152.78	-0.22
3	288.88	289.85	0.14	279.49	283.62	-0.95	291.27	293.70	-0.92
4	416.74	426.01	-2.63	403.06	421.39	-4.54	414.35	424.08	-2.27
5	435.08	454.34	-4.79	414.67	-	-	416.97	-	-
6	515.3	524.69	-1.92	491.93	520.52	-5.01	491.43	510.28	-3.64
7	593.6	596.69	0.08	588.4	594.12	-0.45	607.48	606.6	0.07
8	714.36	738.02	-3.04	657.08	672.63	-1.81	653.2	682.22	-4.22
9	875.49	873.73	0.43	837.33	843.54	-0.23	849.98	852.73	-0.35
10	987.84	995.13	-0.38	949.29	957.17	-0.31	960.38	982.1	-2.20

表 4、PCB 板於自由邊界在不同狀況下之模態振型比對表

模態	PCB 板	PCB 板之封裝體貼附加熱片	PCB 板貼附加熱片於電壓 10V(75°C)	PCB 板貼附加熱片於電壓 10V(75°C)	
	FEA	FEA	FEA	EMA	MAC
1					0.94
2					0.93
3					0.97
4					0.73
5				-	-
6					0.78
7					0.94
8					0.57
9					0.89
10					0.34

表 5、PCB 板於自由邊界在不同狀況之實驗阻尼比

模態	PCB 板		PCB 板貼附加熱片		PCB 板之封裝體貼附加熱片於電壓 10V(75°C)	
	實驗阻尼	累積平均值(%)	實驗阻尼	累積平均值(%)	實驗阻尼	累積平均值(%)
1	1.59	1.590	1.66	1.66	1.648	1.648
2	0.352	0.971	0.426	1.043	0.356	1.002
3	0.754	0.899	1.139	1.075	0.433	0.812
4	0.299	0.749	0.595	0.955	1.14	0.894
5	1.01	0.8	1.279	1.019	0.497	0.814
6	0.56	0.760	0.527	0.937	1.024	0.849
7	0.394	0.708	1.468	1.013	0.427	0.789
8	0.651	0.7	0.542	0.954	0.752	0.784
9	0.332	0.66	0.956	0.954	1.184	0.829
10	0.406	0.634	0.981	0.957	0.903	0.836

表 6、PCB 板於固定邊界在不同狀態之頻率響應函數及關聯性函數圖

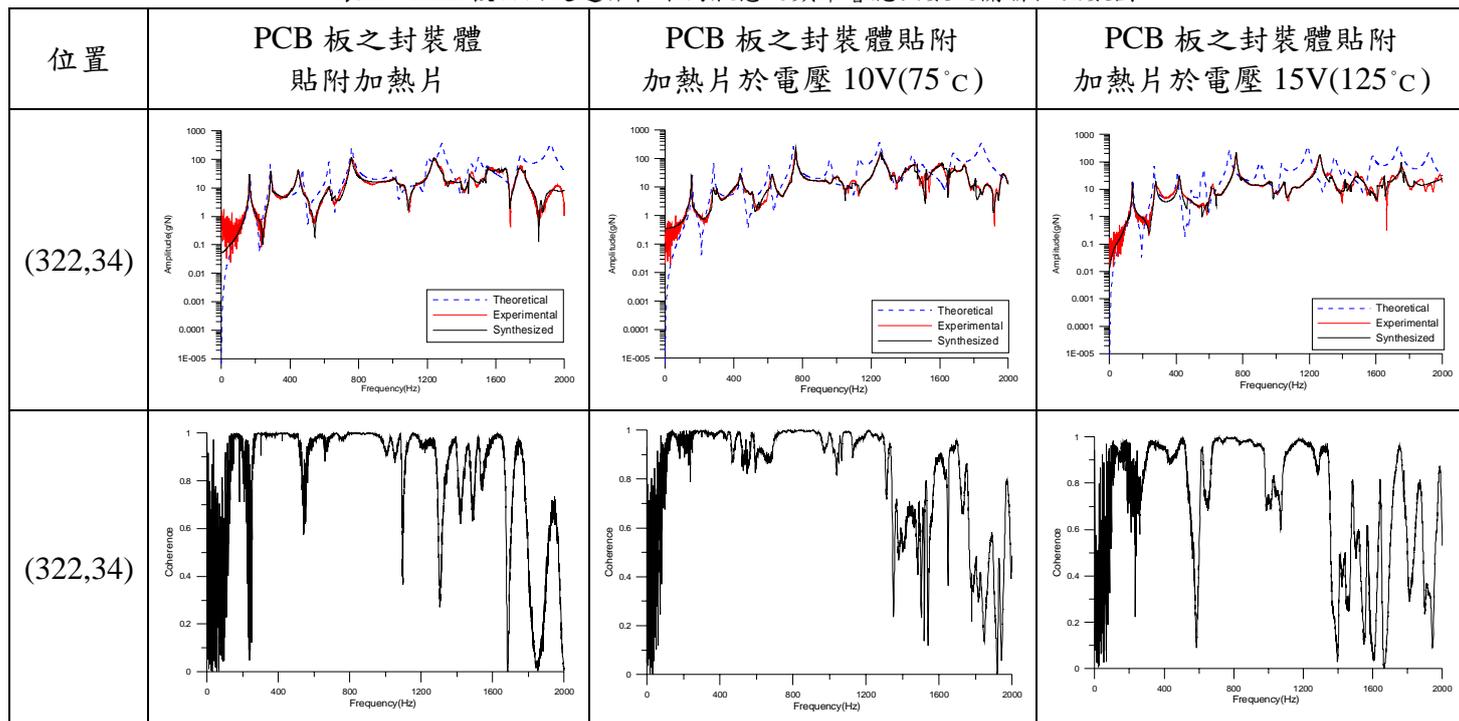


表 7、PCB 板於固定邊界在不同狀況之實驗自然頻率比對表

模態	PCB 板之封裝體貼附加熱片			PCB 板之封裝體貼附加熱片於電壓 10V(75 c)			PCB 板之封裝體貼附加熱片於電壓 15V(125 c)		
	理論頻率 (Hz)	實驗頻率 (Hz)	誤差 (%)	理論頻率 (Hz)	實驗頻率 (Hz)	誤差 (%)	理論頻率 (Hz)	實驗頻率 (Hz)	誤差 (%)
1	169.05	162.99	3.71	158.04	152.5	3.60	142.17	136.22	4.36
2	285.94	287.93	-0.69	281.1	280.49	0.19	269.17	276.48	-2.64
3	473.11	447.71	5.67	445.16	436.13	2.04	408.69	419.55	-2.58
4	526.04	514	2.34	512.96	509.23	0.70	489.5	524.43	-6.66
5	626.41	630.71	-0.68	595.8	-	-	546.83	-	-
6	633.28	-	-	603.62	622.84	-3.11	567.59	620.95	-8.59
7	760.36	756.47	0.51	748.24	760.37	-1.62	719.86	760.44	-5.33
8	992.88	1012.5	-1.93	957.95	1049.5	-8.74	894.15	975.68	-8.35
9	1015.1	1070.7	-5.19	968.5	-	-	914.71	1048.6	-12.76
10	1201.4	1244.6	-3.47	1127.3	1257.2	-10.37	1033.1	-	-

表 8、PCB 板於固定邊界在不同狀況下之模態振型比對表

模態	PCB 板之封裝體貼附加熱片	PCB 板之封裝體貼附加熱片於電壓 10V(75°C)			PCB 板之封裝體貼附加熱片於電壓 15V(125°C)		MAC
	FEA	FEA	EMA	MAC	FEA	EMA	
1				0.93			0.91
2				0.91			0.89
3				0.95			0.93
4				0.67			0.65
5			-	-		-	-
6				0.56			0.58
7				0.95			0.96
8				0.45			0.43
9			-	-			0.51
10				0.22		-	-

表 9、PCB 板於固定邊界在不同狀況之實驗阻尼比

模態	PCB 板之封裝體貼附加熱片		PCB 板之封裝體貼附加熱片於電壓 10V(75 c)		PCB 板之封裝體貼附加熱片於電壓 15V(125 c)	
	實驗阻尼	累積平均值 (%)	實驗阻尼	累積平均值 (%)	實驗阻尼	累積平均值 (%)
1	0.736	0.736	0.66	0.66	0.867	0.867
2	0.667	0.701	1.218	0.939	1.196	1.031
3	1.29	0.897	1.271	1.049	0.96	1.007
4	0.753	0.861	0.939	1.022	0.763	0.946
5	0.779	0.845	1.047	1.027	0.769	0.911
6	0.805	0.838	0.315	0.908	0.429	0.830
7	1.08	0.872	0.424	0.839	0.564	0.792
8	1.78	0.986	0.302	0.772	0.469	0.752
9	1.1	0.998	0.473	0.738	0.5	0.724
10	0.729	0.971	0.015	0.666	0.015	0.653

