

## 具加熱晶片之印刷電路板於隨機振動與熱效應之耦合分析

王栢村<sup>1</sup>、李曜成<sup>2</sup>、梁秀璋<sup>2</sup>、賴逸少<sup>3</sup>、葉昶麟<sup>3</sup>、李英志<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>日月光集團高雄廠應力可靠度實驗室

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

### 摘要

印刷電路板受到隨機振動與熱效應之耦合分析為重要之課題，利用加熱晶片於印刷電路板以探討其熱效應為一新設計，本文針對具有 4 個加熱晶片之印刷電路板，提出配合 JEDEC 隨機振動試驗及考慮有無加熱效應之分析方法。首先建立具有加熱晶片之印刷電路板有限元素模型，分別考慮有無加熱效應，進行印刷電路板於自由邊界之模態分析，可求得其模態參數，包括：自然頻率及模態振型。同時也針對根據 JEDEC 振動試驗規範之固定挾持邊界印刷電路板分別進行有無加熱效應之振動特性分析與比較探討，受加熱效應之印刷電路板其自然頻率明顯提高。最後，也進行有無加熱效應的印刷電路板之隨機振動耦合分析，求得印刷電路板之隨機振動響應，包括：印刷電路板之加速度功率頻譜密度函數以及應力分佈，進而探討有無加熱效應之差異比較。本文提出系統化之模擬分析技術，特別探討具有加熱晶片之印刷電路板於加熱效應之溫度場分析以求得溫度分佈及熱變形與熱應力，也探討有無熱效應與隨機振動之耦合分析，本文建立了印刷電路板同時受隨機振動與熱效應之分析能力。

**關鍵字：**加熱晶片、印刷電路板、隨機振動、熱效應

### 1. 前言

在科技的快速躍進下，近年來電子產業的製程技術逐漸提高，相對減少印刷電路板 (printed circuit board, PCB) 所需佔用的體積，但對印刷電路板所能承受之要求愈趨嚴格，其中最重視的是因高功率之電子晶片產生之熱能所導致的高溫破壞，而除了高溫導致的破壞外，在組裝、運輸及使用環境等過程對印刷電路板之使用壽命也有極大的影響；有鑑於此就必需先瞭解結構系統之特性，但印刷電路板在不同熱邊界情況下其振動特性也不一定相同，故需對不同熱邊界之印刷電路板於振動環境下進行探討。

對於印刷電路板過去已有相關研究，王等人[1]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模型，並延伸到固定邊界上並確認電路板於固定邊界下之有限元素模型是否與實際結構等效，驗證完成後並發展結構在隨機激振下之響應預測，經由頻譜響應分析可求得最大主應力及麥西斯應力之平方平均根值，利用隨機激振為常態分佈之假設，取得最大主應力及麥西斯應力來推斷電路板於隨機激振下可能破壞位置。王等人[2]

主要利用加速度計在有限元素分析中模擬實際結構，由加速度計對電路板進行質量效應之驗證，在實驗及理論方面所求得之模態參數進行比對，來探討加速度計於有限元素分析中之較好的模擬方式。Wong *et al.* [3]針對球閘陣列封裝 (BGA) 焊錫接點透過 FEA 進行疲勞壽命預測與理論公式相互驗證。藉由先前資料得到之 FE 模型並在軍用振動測試下，觀察 BGA 焊錫接點有無覆蓋底膠疲勞壽命預測。Yang *et al.* [4-5]對塑膠球閘陣列封裝 (PBGA) 的 PCB 進行實驗模態分析，將不同邊界條件下的分析結果進行探討，瞭解結構之振動特性。更進一步探討 PCB 有無 PBGA 模組，透過實驗模態與有限元素法比較振動特性對結構之影響。Pitarresi *et al.* [6]針對個人電腦主機板受機械式振動及隨機振動測試之響應進行分析。鄭等人[7]針對晶片封裝模組，以實驗與數值模擬分析之結果相互驗證，藉以評估其散熱效能之熱阻值，可從實驗結果得知在晶片上方黏貼熱擴散板可以發現熱阻值明顯降低。黃等人[8]針對疊合封裝晶片模組，經熱傳及應力循序耦合分析，由結果發現純粹溫度循環測試引致之疲勞壽命最長。余等人[9]則提出降低基板厚度可提升內藏封裝體的散熱特性，增加散熱通孔可增加熱傳導係數，大幅增加散熱效果。王等人[10]透過加熱片建立 PCB 振動與熱傳進行耦合分析，可協助瞭解 PCB 具熱效應於振動測試，探討 PCB 有無受熱破壞分析之參考。

圖 1 為本文進行探討之印刷電路板，透過建立一等效於實際結構之有限元素模型進行結構振動分析，並對整體結構之有限元素模型進行結構振動分析，並對整體結構進行疲勞破壞分析探討。圖 1 為印刷電路板外部尺寸，圖 2 為 PCB 板實際結構圖，圖 3 為印刷電路板振動流程分析，分別以加熱晶片具熱邊界之印刷電路板及加熱晶片不具熱邊界之印刷電路板兩種形式進行振動分析，皆以自由邊界及實際鎖固邊界方式模擬邊界狀態。從 JEDEC 制定之振動規範進行印刷電路板隨機激振之響應預測，可由分析得到加速度之功率頻譜密度函數 (power spectrum density, PSD)，再求得最大主應力及麥西斯應力，進一步預測 PCB 於隨機激振下可能發生疲勞破壞之位置。本次分析，皆使用有限元素套裝軟體 ANSYS 來做以下分析。綜合以上討論，本文分析目標如下：

1. 印刷電路板具熱邊界於自由邊界及實際鎖固邊界模擬下，經熱傳溫度場分析及熱傳應力場分析結果探討。
2. 比較印刷電路板具熱邊界及印刷電路板不具熱邊

界於自由邊界及實際鎖固邊界下之模態參數及頻率響應函數，並對兩者進行比較探討。

3. 在實際鎖固邊界情況下，依照 JEDEC 振動測試規範進行頻譜響應分析，由分析可得到加速度之 PSD。
4. 利用頻譜分析可求得 PCB 於隨機激振之下最大主應力及麥西斯應力，進而計算應力之平均平方根值 (Root Mean Square, RMS)，預測印刷電路板於隨機激振下可能發生疲勞破壞之位置。

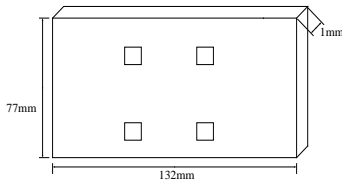


圖 1 PCB 板尺寸圖

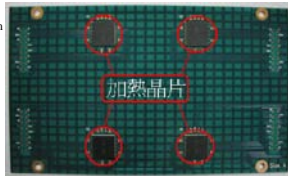


圖 2 PCB 板實際結構圖

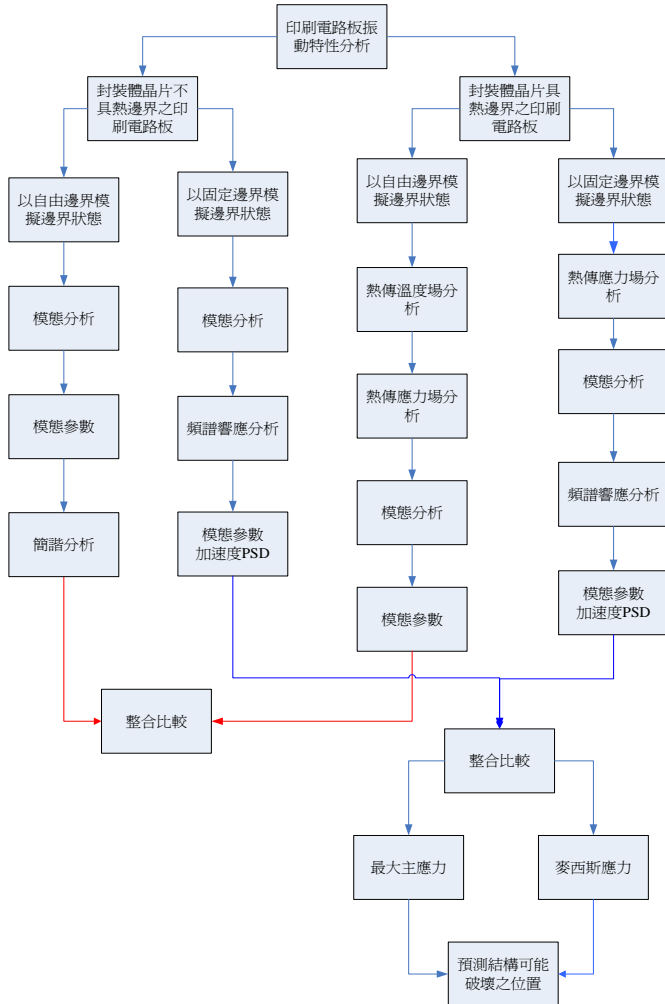


圖 3 PCB 振動分析流程示意圖

## 2. 印刷電路板於自由邊界之振動分析

本節利用有限元素分析進行 PCB 有無受熱效應之振動分析，首先進行自由邊界之模型分析，包含 PCB 及給予一固定溫度於加熱晶片，並進一步討論 PCB 於自由邊界有無受熱效應之差異比較。假設電路板為正向性材

料，封裝體為等向性材料，表 1 為材料參數總表。

表 1 材料參數表

材料參數	電路板	封裝體
楊氏系數 (N/m <sup>2</sup> )	$E_x = 6.9 \times 10^9$ $E_y = 16 \times 10^9$ $E_z = 16 \times 10^9$	$27 \times 10^9$
剪力系數 (N/m <sup>2</sup> )	$G_{xy} = 3.5 \times 10^9$ $G_{yz} = 3.5 \times 10^9$ $G_{xz} = 3.5 \times 10^9$	$10.37 \times 10^9$
蒲松比 $\nu_{xy} = \nu_{xz} = \nu_{yz}$	0.25	0.4
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	2066	2958
熱膨脹係數 (1/K)	$14.5 \times 10^{-6}$	$2.8 \times 10^{-6}$
熱傳導係數 (W/m × °K)	19.27	$150 \times \left(\frac{K}{300}\right)^{-4/3}$
加速度計質量 (Kg)	0.0015	

### 2-1 PCB 於自由邊界之有限元素模型

首先考慮 PCB 板於自由邊界無熱效應之結構場振動分析，整體模型如圖 4 分別為電路板與封裝體，建構有限元素模型，PCB 底層為正向性材料，封裝層為等向性材料，皆選用線性立體元素 (solid45) 並以三維質量元素 (MASS21) 設置數個質量元素節點模擬實際加速度計之質量效應，材料參數如表 1。元素分割如圖 4 所示，使用 mapped mesh 將模型分割為 1162 元素，2428 個節點；因為自由邊界不需設定任何位移限制；進行模態分析時不須設定負荷，而進行簡諧響應分析時，則模擬實際量測點之衝擊點位置給予一單位 Z 方向外力。

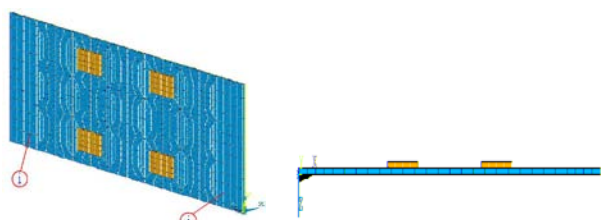
接著考慮 PCB 於自由邊界具熱效應之振動分析，透過建立溫度場分析得到 PCB 溫度分佈，由溫度場分析得到的結果代入熱應力場分析得 PCB 之熱變形及熱應力，最後進行振動與熱傳耦合分析。首先，必須先建立 PCB 溫度場分析，討論整體 PCB 之溫度分佈，建構熱傳溫度場分析時印刷電路板使用線性立方體熱傳元素 (Solid70)，再以三維質量元素 (MASS21) 設置數個質量元素節點模擬實際加速度計之質量效應並設定熱膨脹係數  $\alpha = 14.5 \times 10^{-6}$ 。而元素分割同結構場分析。在進行熱溫度場時，假設加熱晶片為固定溫度 75°C，故於加熱晶片上設定所有節點為穩態溫度 75°C，而 PCB 表面均為對流邊界，需設定週界溫度 25°C、對流係數  $h_f = 50 (W/m^2 \cdot K)$ 。在熱負荷條件設定方面，PCB 除了加熱晶片設定固定溫度 75°C 之外，並無其他熱源產生，所以不用設定定熱產生率或熱通量。

由完成 PCB 於自由邊界溫度場分析後，經由溫度場分析結果再延伸至熱應力場分析，所建構熱應力場之有限元素模型之元素選用需注意的是，因熱傳溫度場分析時印刷電路板使用線性立方體熱傳元素 (Solid70)，於熱應力場分析時須轉換元素為線性立方體元素 (Solid45)，再以三維質量元素 (MASS21) 設置數個質量

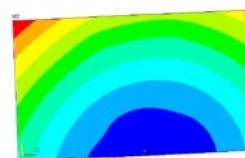
元素節點模擬實際加速度計之質量效應。而元素分割同結構場分析。在熱應力場分析時，以全自由邊界模擬無須設定任何位移限制。最後，進行熱應力場分析，須先由溫度場分析結果帶入節點對應溫度值，可得到熱變形及熱應力，當完成熱應力場分析可再進行振動與熱傳之耦合分析。當進行振動與熱傳之耦合分析則須考慮熱應力場分析之結果，選擇預應力(presstress, on)選項，使 PCB 具有熱應力場之熱變形效應進行模態分析，在進行簡諧響應分析與模態分析相同，唯一不同的是需要模擬實際量測點之衝擊點位置給予一單位 Z 方向外力。

態特性幾乎相同；表 3 為 PCB 於自由邊界有無熱邊界之頻率響應函數圖，分為有/無熱效應的同點頻率響應函數與有/無熱的不同點頻率響應函數四種分析，實線為無熱效應 FRF，虛線為具熱效應 FRF，由頻率響應函數看到具熱邊界與不具熱邊界的頻率響應函數幾乎重合，此乃模態特性相近之故。

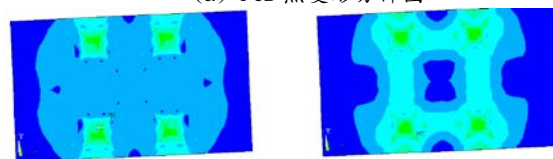
利用有限元素法完成 PCB 於自由邊界有無熱效應之振動與熱傳耦合分析，經由此模型可延伸至 PCB 實際鎖固邊界之振動與熱傳之耦合分析。



(a) PCB 有限元素模型 (b) PCB 側視示意圖  
圖 4 PCB 板於自由邊界之有限元素模型



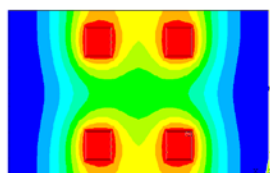
(a) PCB 熱變形分佈圖



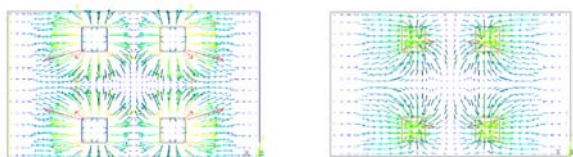
(b) PCB 最大主應力  $\sigma_1$  分佈圖 (c) PCB 麥西斯應力  $\sigma_{eqv}$  分佈圖  
圖 6 PCB 於自由邊界熱應力場之各分佈圖

## 2-2 PCB 於自由邊界有無熱效應之振動特性比較

由前節所定義完成有限元素模型，可以探討 PCB 有無熱效應之振動特性，首先由完成 PCB 於自由邊界溫度場分析進行討論，圖 5 為自由邊界於溫度場分析，由圖 5(a)可以觀察到溫度分佈，而溫度最低的地方則是出現在 PCB 左右兩邊，其溫度為 39.75°C；再由圖 5(b)、(c)熱通量與熱梯度分佈圖，可以觀察到四個加熱晶片為熱源中心，向 PCB 四周傳遞。



(a) PCB 溫度分佈圖



(b) PCB 熱通量分佈圖 (c) PCB 熱梯度分佈圖

圖 5 PCB 於自由邊界溫度場之各分佈圖

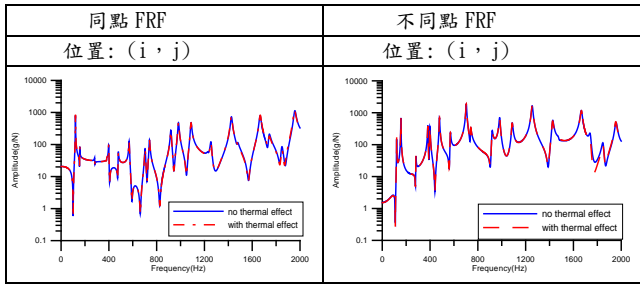
接著由完成 PCB 於自由邊界溫度場分析結果延伸至熱應力場分析，圖 6 PCB 為熱應力場之各分佈圖，由最大主應力分佈圖得知，應力最大值出現在晶片與 PCB 接合的四個角，其值為 1.01kpa；再由麥西斯應力分佈圖得知，應力最大值也是出現於晶片與 PCB 接合的四個角，其值為 0.824kpa。

最後，進行 PCB 於自由邊界有/無熱效應之振動分析探討，表 2 為 PCB 於自由邊界下有/無熱效應之模態振型與自然頻率比對表，兩種狀況之自然頻率差異在 1%內，也就是在自由邊界條件，PCB 板有無熱效應之模

表 2 印刷電路板以自由邊界模擬之模態參數比對表

模態	無熱效應		具熱效應		自然頻率比較 (%)
	模態振型	自然頻率(Hz)	模態振型	自然頻率(Hz)	
1		120.245		120.487	0.2
2		155.606		156.132	0.34
3		281.642		281.678	0.012
4		381.608		381.659	0.013
5		398.8		398.791	-0.003
6		478.779		479.036	0.05
7		570.21		569.677	-0.1
8		703.133		703.308	0.025
9		739.65		739.183	-0.063
10		919.239		919.247	0.0008

表 3 印刷電路板自由邊界之 FRF 比對表



### 3. 印刷電路板於實際鎖固邊界之振動分析

本節利用有限元素分析進行 PCB 有無受熱效應之振動分析，首先利用已完成自由邊界之模型延伸至實際鎖固邊界之模型分析，包含 PCB 及給予一固定溫度於加熱晶片，並進一步討論 PCB 於實際鎖固邊界有無受熱效應之差異比較。

#### 3-1 PCB 於實際鎖固邊界有限元素分析

首先考慮 PCB 於實際鎖固邊界無熱效應之結構場振動分析，圖 7 為 PCB 實際鎖固狀態，圖 8 為整體模型，分別為電路板與封裝體，於實際鎖固邊界無熱效應之結構場分析有限元素模型建構方法同自由邊界無熱效應之結構場分析，不同的是為了模擬螺絲鎖固 PCB 於治具上，所以選用三維彈簧元素 (Combin14) 並設定  $K = 9.7 \times 10^9 \text{ N/m}$  來模擬螺絲鎖固處的 K 值 [10]; 位移限制則是以三維彈簧元素 (Combin14) 模擬實際螺絲鎖固，因彈簧元素一邊連接 PCB，另一邊則是模擬螺絲鎖固於治具上，故設定彈簧元素所有自由度為零。

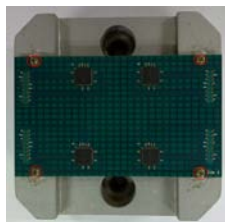


圖 7 PCB 實際鎖固圖

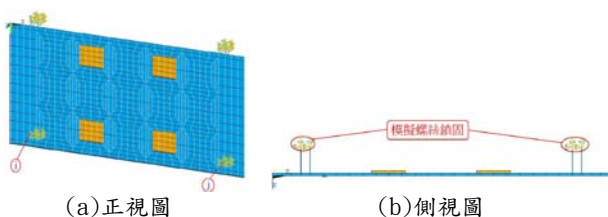


圖 8 PCB 板於實際鎖固邊界之有限元素模型

再來為進行 PCB 於實際鎖固邊界具熱效應之振動分析，首先，先建立 PCB 溫度場分析模型，討論整體 PCB 之溫度分佈，再由溫度場分析所得到的溫度分佈結果帶進熱應力場，得到 PCB 於實際鎖固邊界之熱變形及熱應力場分佈，建構有限元素模型方法同自由邊界溫度場分析，不同的是於元素選用要加入三維彈簧元素 (Combin14)，其彈簧元素設定同 PCB 於實際鎖固邊界無熱效應之結構場振動分析。

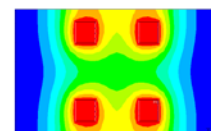
最後完成 PCB 於實際鎖固邊界溫度場分析後，經由溫度場分析結果再延伸至熱應力場分析，得到 PCB 於實際鎖固邊界至整體的熱變形以及熱應力分佈，建構有限元素模型同實際鎖固邊界溫度場分析，唯一需要注意的是須要先由溫度場分析完成的結果檔帶入節點所對應的溫度值，可得到熱變形及熱應力，當完成熱應力場分析可再進行振動與熱傳之耦合分析。當進行振動與熱傳之耦合分析則須以熱應力場分析之結果選擇以預應力 (prestress, on) 選項，使其熱應力場之熱變形效應進行模態分析，在進行簡諧響應分析與模態分析相同，唯一不同的是簡諧響應分析需要模擬實際量測點之衝擊點位置給予一單位 Z 方向外力。

#### 3-2 PCB 於實際鎖固邊界有無熱效應之振動特性比較

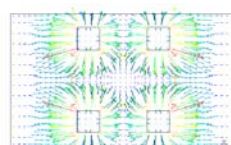
由上節完成 PCB 於實際鎖固邊界有無熱效應之振動與熱傳耦合之有限元素模型與分析，首先由 PCB 於實際鎖固邊界溫度場分析進行討論，圖 9 為實際鎖固邊界於溫度場分析，由圖 9(a) 可以觀察到溫度分佈，而溫度最低的地方則是出現在 PCB 左右兩側，溫度為  $39.75^\circ\text{C}$ ; 再由圖 9(c)、(d) 熱通量與熱梯度分佈圖，可以觀察到四個加熱晶片為熱源中心，向 PCB 四周傳遞，此結果與自由邊界相同，因為熱邊界的熱負荷條件均相同之故。

接著由完成 PCB 於實際鎖固邊界溫度場分析結果帶入至熱應力場分析，圖 10 為熱應力場之各分佈圖，由最大主應力分佈圖得知，應力最大值出現在晶片與 PCB 接合的四個角，其值為  $1.02\text{kpa}$ ; 再由麥西斯應力分佈圖得知，應力最大值也是出現在晶片與 PCB 接合的四個角，其值為  $0.83\text{kpa}$ ，與圖 6 自由邊界比較，由於是實際鎖固邊界，熱變形分佈有明顯差異，但熱應力分析大致相同，為應力值略高。

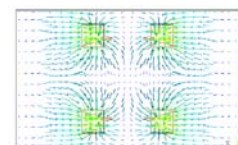
最後由完成 PCB 於實際鎖固邊界有/無熱效應之振動分析，看到表 4 印刷電路板以實際鎖固邊界模擬之自然頻率與模態振型表，可以觀察到以實際鎖固邊界模擬鎖固情況下，具熱邊界之 PCB 之自然頻率與無熱邊界時之 PCB 之自然頻率最大差異為第四模態 4.5%，而各模態振型皆相近。再從表 5 以實際鎖固邊界模擬印刷電路板之 FRF 比對表，實線為無熱效應 FRF，虛線為具熱效應 FRF，以實際鎖固邊界模擬時，可以看出在有無熱效應之 FRF，自然頻率對應峰值差異外，都有相同的趨勢。



(a) PCB 溫度分佈圖



(b) PCB 熱通量分佈圖



(c) PCB 熱梯度分佈圖

圖 9 PCB 於實際鎖固邊界溫度場之各分佈圖

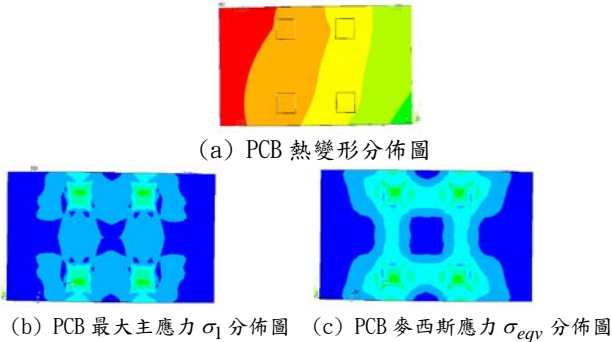
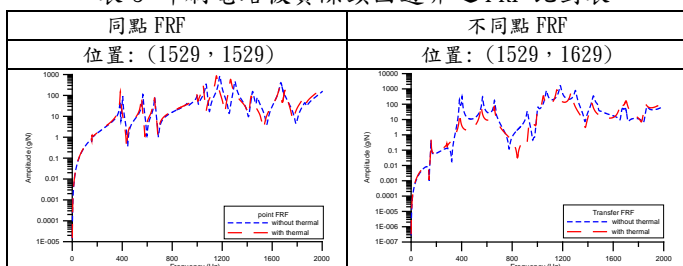


圖 10 PCB 於實際鎖固邊界熱應力場之各分佈圖

表 4 印刷電路板以實際鎖固邊界模擬之模態參數比對表

模態	無熱效應		具熱效應		自然頻率比較 (%)	
	模態振型	頻率 (Hz)	模態	模態振型		頻率 (Hz)
1		156.797	1		157.72	0.6
2		290.81	2		284.25	-2.3
3		382.49	3		385.36	0.8
4		403.416	4		385.40	-4.5
5		565.747	5		553.88	-2
6		660.066	6		640.74	-2.9
7		671.619	7		658.45	-2
8		920.47	8		934.32	1.5
9		1003	9		998.25	-0.5
10		1072	10		1046	-2.4

表 5 印刷電路板實際鎖固邊界之 FRF 比對表



#### 4. 印刷電路板具熱效應之頻譜響應分析與預測

本節主要探討 PCB 有無受熱效應之隨機激振與響應預測。圖 11 為 JEDEC 所制定 JESD-B110 振動試驗規範示意圖，規範中有 A 到 I 九種用於不同的情況下之 PSD 輸入設定，其中 D 至 I 是規範建議電子零組件使用情況。首先，利用已完成實際鎖固邊界振動分析之 PCB 有限元素模型來進行頻譜響應分析，求得加速度功率頻譜密度函數(PSD)，本文採用 JEDEC E Level 規範進行對應之分析，最後延伸至疲勞破壞分析探討。

##### 4-1 PCB 於隨機振動分析

首先，由頻譜響應分析可求得 PCB 上任一點之加速度 PSD ( $G_{aa}$ )，而由加速度 PSD 可計算取得加速度平方平均根值(root mean square, rms)  $a_{rms}$ ，算式如下：

$$a_{rms} = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} G_{aa}(f)df} = SD_a \quad (1)$$

其中， $f_1$ 、 $f_2$  為頻率範圍之上下限，同時，已知平均值為零時，rms 值等於標準差 ( $SD_a$ ) 由式(1)也可求得 PCB 之應力 rms ( $\sigma_{rms}$ ) 及應力標準差 ( $SD_\sigma$ )。

圖 12 為高斯分佈圖，假設隨機振動過程為高斯分佈之機率分佈，在一個標準差  $\pm\sigma_x$  範圍內，具有 68.2% 之數值，兩個標準差  $\pm 2\sigma_x$  則有 95.4% 之數值，三個標準差  $\pm 3\sigma_x$  則占有 99.6% 之數值，故可得最大、最小應力為三倍應力標準差如下：

$$\sigma_{max} = 3SD_\sigma = 3\sigma_{rms} \quad (2)$$

$$\sigma_{min} = -3SD_\sigma = -3\sigma_{rms} \quad (3)$$

而應力振幅  $\sigma_a$  及平均應力  $\sigma_m$  如下式：

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} = 3SD_a = 3\sigma_{rms} \quad (4)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} = 0 \quad (5)$$

經由上式可得知應力振幅  $\sigma_a$  為  $+3SD_a$ 、平均應力  $\sigma_m$  值為零。

圖 13 為 Goodman 疲勞分析示意圖，縱軸為應力振幅，橫軸為平均應力， $Se$  為材料之疲勞限， $Sut$  為材料極限強度，由式(4)可知，3 倍標準差為應力振幅，因此應力振幅小於疲勞極限範圍則為無破壞，反之大於疲勞極限範圍則會產生破壞。

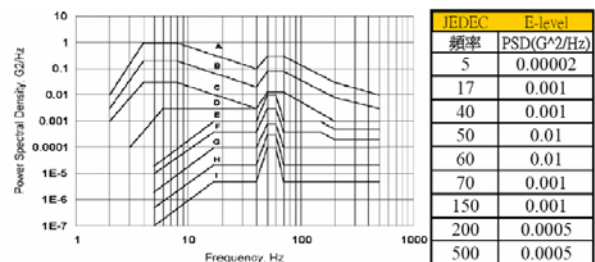


圖 11 隨機激振試驗規範 JESD22-B103-B[11]

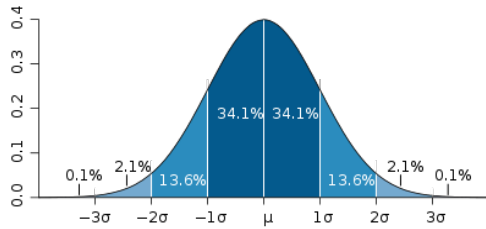


圖 12 高斯分布圖 [12]

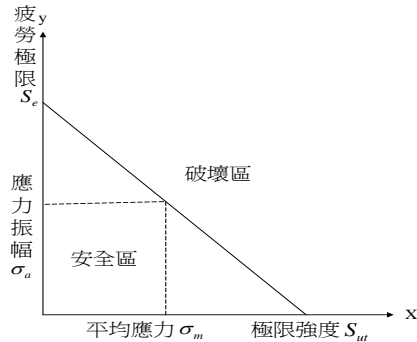


圖 13 Goodman 疲勞分析示意圖

#### 4-2 PCB 之頻譜響應分析

本節利用 ANSYS 進行頻譜響應分析。進行頻譜響應分析頻寬為 5~500Hz，PCB 於實際鎖固邊界總共進行 PCB、PCB 於 75°C 兩種不同狀態下分析。建立有限元素模型方法與實際鎖固邊界相同，不同的是負荷條件需利用 ANSYS 內基座激振設定方式來進行頻譜響應分析，基座激振設定是拘束彈簧元素所有水平方向節點之位移，而我們只考慮垂直響應，故只設定 Z 方向之單位力激振輸入來進行頻譜響應分析。

經由 PCB 之有限元素模型進行頻譜響應分析求得加速度 PSD，再次由頻譜響應分析求得應力較大區域之 PSD rms 值，經由三倍原則求得最大主應力，並評估是否為疲勞破壞之關鍵。

圖 14 為頻譜分析輸入點位置示意圖，由於振動試驗規範之頻寬為 5 至 500Hz，從模擬 PCB 於實際鎖固邊界之振動分析後，所得到前 3 個模態於 PCB 中央、上下及左右處振幅變化量較大，故於此 5 處進行點數規劃。

首先，表 6 為加速度 PSD 圖形總表，實線為 JEDEC 規範，虛線為無熱效應 PCB 的 PSD，破折號則為具熱效應 PCB 之 PSD，綜合討論如下：

1. 由預測點 A 的第一個峰值正好對應到第一模態的自然頻率，再看到模態振型，預測點 A 正好位於振幅最大的位置，故響應較為明顯。
2. 由預測點 B、D 觀察到第一個峰值不明顯，再對應至第一、第二模態的模態振型，點 B、D 正位於節線上，故第一、二模態的響應不明顯；而第三模態振幅最大的位置正好是預測點 B、D，故響應較為明顯。
3. 預測點 C、E 第一、二個峰值對應至第一、第四模態，可以發現第一、二個峰值正好對應到第一、第四模態的自然頻率；再由模態振型發現預測點

C、E 正好位於振幅較大的位置上，故響應較明顯。

最後，表 7 為固定邊界下最大主應力 PSD 及 rms 比對表，實線為 JEDEC 規範，虛線為具熱效應 PCB 的 S1 PSD，破折號則為無熱效應 PCB 之 S1 PSD，於 PCB 有無熱效應之疲勞破壞分析，於 PCB 中心的區域之應力 rms 值略大於 PCB 其他區域，可推測 PCB 若受疲勞應力時，必定先由 PCB 中心的區域開始產生破壞。

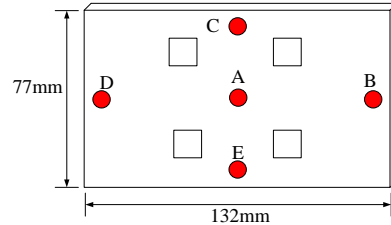
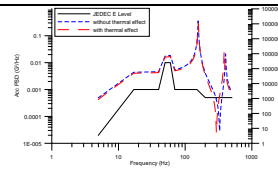
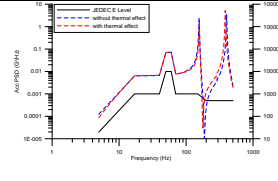
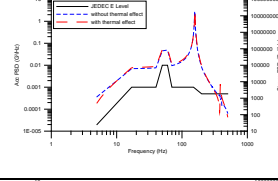
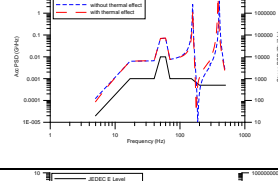
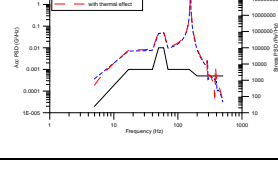


圖 14 頻譜分析輸入點位置示意圖

表 6 固定邊界下 RMS 圖型總表

預測點	無熱效應加速度 RMS(g)	具熱效應加速度 RMS(g)	加速度 PSD graph
A	5.207	4.971	
B	4.285	4.529	
C	5.099	5.332	
D	4.314	4.34	
E	5.207	5.33	

表 7 固定邊界下最大主應力 rms 總表

預測點	無熱效應加速度 RMS(g)	$\sigma_{1,rms}$ (KPa)		$\pm 3\sigma_{1,rms}$ 應力範圍 (KPa)	
		具熱效應	無熱效應	具熱效應	無熱效應
A		9.97	20.9	29.9	62.7
B		2.79	5.87	8.37	17.6
C		11	23.3	33	69.9
D		2.78	5.84	8.34	17.5
E		11	23.3	33	69.9

## 5. 結論

本文主要探討對一具四顆加熱晶片具熱效應之印刷電路板於隨機振動環境下之印刷電路板之振動特性相互比較；遵照 JEDEC 振動規範進行頻譜響應分析得到有無熱效應之印刷電路板之響應及應力值，進而預測隨機激振下具熱效應之印刷電路板疲勞破壞之位置。本文綜合結論如下：

1. 在熱傳導分析封裝體晶片是印刷電路板最高溫度處，其餘底層、晶片下方處則是溫度次高的地方；轉換為熱應力後其最大主應力及麥西斯應力發生的位置皆在封裝體晶片與底層連接處，顯示當 PCB 之封裝體晶片受到一固定溫度時，首先可能破壞之位置位於晶片與底層連接處。
2. 進行隨機激振及頻譜響應分析，所量得 PCB 有無熱效應之加速度 PSD 符合 JEDEC 隨機激振試驗規範，故分析有一定準確性。
3. 由頻譜響應分析得到加速度 PSD 可計算出各節點加速度 rms 值，在 PCB 有無熱效應之加速度 rms 比對上，整體上的趨勢相似，但 PCB 不同位置之  $a_{rms}$  分布略有差異。
4. PCB 有無熱效應之疲勞破壞分析，PCB 中心的區域

應力 rms 遠大於其他區域，故推測 PCB 若受疲勞破壞時，必定先由 PCB 中心的區域開始產生破壞。

5. 未來可以應用實驗模態分析獲得實際結構之振動特性，再搭配有限元素分析得到的振動分析進行模型驗證。

## 6. 參考文獻

1. 王栢村，陶致均，李沛緯，賴逸少，葉昶麟，李英志，2007，「印刷電板模型驗證與響應預測之重複性探討」，*ANSYS/Fluent 年度應用研討會與用戶聯誼大會*，桃園，第 15-30 頁。
2. 王栢村，陶致均，賴逸少，葉昶麟，李英志，2007，「加速度計質量效應模擬分析之評估與驗證」，*中華民國振動與噪音工程學會第十五屆學術研討會*，台北，論文編號：B-12。
3. Wong, T. E., Palmieri, F. W., and Fenger, H. S., 2002 Inter Society, "Under-filled BGA solder joint vibration Fatigue Damage," *Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*, California, pp. 961-966.
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, Vol. 40*, San Jose, USA, pp. 1097-1107.
5. Yang, Q. J., Lim, G. H., Lin, R. M., Yap, F.F., Pang, H. L. J. and Wang, Z. P., "Experimental Modal Analysis of PBGA Printed Circuit Board Assemblies," *IEEE/CPMT Electronic Packaging Technology conference*, pp. 290-296, 1997.
6. Pitarresi, J., Geng, P., Beltman W., and Ling Y., 2002, "Dynamic Modeling and Measurement of Personal Computer Motherboards," *Electronic Components and Technology Conference*, San Diego, pp. 597-603.
7. 鄭宗杰，余致廣，劉君愷，蔡伯晨，鄭明欣，2004，「FC-PBGA 之熱流模擬簡介」，*奈米通訊*，第 4 期，第 11 卷，第 17-21 頁。
8. 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」，*筋訊專文*，10 月號，第 42 號，第 4-8 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 3 期，第 12 卷，第 30-33 頁。
10. 許富翔，2009，*具封裝體 PCB 於熱效應及振動複合試驗之響應預測*，碩士論文，國立屏東科技大學，屏東。
11. JEDEC (2001) JESD22-B103-B: Vibration, Vibration Frequency. JEDEC Solid State Technology Association.
12. <http://zh.wikipedia.org/zh-tw/File:Standard>

[deviation\\_diagram.svg](#), 2010/04/06.

## **Coupling Analysis of Random Vibration and Thermal Effect for PCB with Heating ICs**

**Bor-Tsuen Wang<sup>1</sup>, Yau-Chang Lee<sup>2</sup>, Xiu-Wei Liang<sup>2</sup>, Yi-Shao Lai<sup>3</sup>, Chang-Lin Yeh<sup>3</sup>, Ying-Chih Lee<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Professor

<sup>2</sup>Graduate student

<sup>1,2</sup>Department of Mechanical Engineering  
National Pingtung University of Science and Technology

<sup>3</sup>ASE GROUP Kaohsiung Stress-Reliability Lab

### **ABSTRACT**

The printed circuit board (PCB) subject to random vibration and thermal effect is of interest. The heating IC embedded onto the PCB is the new design for the study of PCB thermal effect. This work presents the analytical approach for the PCB containing four heating ICs considering the thermal effect induced by heating ICs and random vibration analysis base on JEDEC vibration testing standard. First, the finite element model of the PCB with heating ICs is constructed for both with and without heating to perform modal analysis in free boundary condition. The structural modal parameters, including natural frequencies and mode shapes can be obtained and compared to study the thermal effect on the vibration characteristics of the PCB. The PCB in fixed boundary conditions according to the JEDEC standard is also simulated to identify and study the vibration characteristics for both with and without heating effects. The PCB with the heating effect results in higher natural frequencies than those without heating. Finally, the coupling analysis of random vibration with and without heating effects on the PCB is also performed to characterize the random response of the PCB. The output response of the PCB acceleration power spectral density (PSD) function as well as the stress distribution due to both random vibration and heating coupling effects can be determined and compared to those without heating. This work lays out the analytical technique for the PCB with heating ICs in considering the thermal effect due to the heating ICs for thermal field analysis to obtain the temperature distribution on the PCB as well as the thermal deformation and stress. The random vibration simulations with and without the heating IC thermal effects are also carried out. This work thus enhances the simulation ability for the PCB subject to random vibration and thermal effects simultaneously.