

單一封裝PCB板之簡易模型與精細模型於模型驗證之比較分析

王栢村¹ 陶致均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

*Email: wangbt@mail.npust.edu.tw

摘要

本文利用有限元素分析與實驗模態分析，對單一封裝印刷電路板進行模型驗證，首先建構簡易與精細的單一封裝印刷電路板之有限元素分析模型，並進行模態分析以求得模態參數及簡諧響應分析求得頻率響應函數，而在實驗模態分析也可取得實體結構之模態參數與頻率響應函數，並且進行理論與實驗模態參數比對，利用最佳化運算可獲得合理的有限元素模型，同時對理論與實驗兩種分析所得之印刷電路板模態參數進行比對驗證，以得到足以代表結構之等效分析模型，最後經模型驗證後之精細與簡易模型，進行兩者自然頻率及模態振型之比對，可觀察精細模型之自然頻率誤差較小，而模態振型之模態保證指標比較上，簡易模型雖對應較良好，但兩者模型在物理意義上皆與實驗結果一致，所以在整體比對上，不管精細模型或者簡易模型都可足以代表實際結構模型，未來可就兩者模型進行後續的振動響應預測分析。
關鍵詞：印刷電路板、模型驗證、實驗模態分析、有限元素分析。

1. 前言

隨著微機電科技之進步，近年來電子產品皆往高功能及高攜帶性方向快速進展，由於印刷電路板(Printed Circuit Boards, PCB)之設計因日益縮小的體積而帶來高溫、組裝、運輸及使用環境等各因素所帶來的破壞將對PCB的使用壽命產生極大影響，故對PCB進行振動分析設計是非常重要的，而要瞭解及解決振動相關之問題，必需先瞭解結構系統之特性，藉由基礎理論分析及有限元素分析(Finite Element Analysis, FEA)對應軟體進行模擬分析，並配合實驗

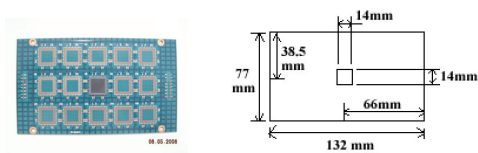
模態(Experimental Modal Analysis, EMA)，可獲得實際結構體之振動參數，為常見擷取振動參數方法。由前述理論配合實驗分析手法之運用，利用EMA擷取之數據與FEA資料進行比對，即可驗證於有限元素分析軟體內建構之有限元素模型(FE modal)是否為等效於實際結構體的模型。

對微小體積之物品，王等人[1]利用FEA配合EMA之分析方法，在實驗部份將加速度計替換為麥克風進行量測，合理的取得封裝體受振動下之結構特性，並完成封裝體之模型驗證。由Gibson and Wen [2]探討以不同線材懸吊受測物之模擬方式，經由不同材質之彈性係數、阻尼比及自然頻率比對，可獲得到以尼龍線懸吊4邊來模擬為合理之自由邊界模擬方法。Yang *et al.* [3]利用EMA來擷取印刷電路板於不同邊界下之振動特性，首先以橡皮筋懸吊來模擬自由邊界，再來利用夾具固定PCB兩邊模擬固定邊界，透過實驗，找出加速度計、加質量之衝擊鉅對PCB振動特性的影響。Pitarresi [4]探討PCB由於封裝體配置方式不同，因此將PCB做區塊性的分隔，以便探討PCB之振動行為，並利用FEA及EMA來進行模型驗證以找出實驗分析與理論分析之關連性。在對FEA與EMA於其它應用方面，Shorthill *et al.* [5]利用EMA尋找不同滑雪板的振動特性，並由此步驟讓使用者瞭解滑雪板之老化與破壞。Alampalli [6]利用EMA手法分別對三種不同橋樑之模型進行探討，並使用模態保證指標(Modal Assurance Criteria, MAC)來比對模態振型是否與實際結構有相關性，並可由模態振型找出振幅之變化。Singhal *et al.* [7]對薄壁圓管進行FEA及EMA之驗證，並由結果瞭解經由驗證

後之有限元素模型與實際結構之模態參數的誤差皆在 5% 以內，代表有限元素模型對應良好。Kao *et al.* [8] 針對 PCB 受到風扇振動的影響進行以 FEA 軟體之分析與探討，其中發現風扇轉動頻率越高，PCB 內部錫球應力就越大，若要降低應力，可以使用增加阻尼的方法。再由 Kao *et al.* [9] 利用 FEA 手法對 PCB 內之錫球在不同尺寸之變化探討，瞭解錫球及球視的尺寸越大，影響錫球壽命也就越久。而在應用影像觀測及光學觀測進行 PCB 振動特性預測方面，Taniguchi [10] 利用影像觀察技術來觀測 PCB 的振動響應，並精準的量測到 PCB 於振動下表面之位移響應。

2. 系統定義與分析目標

圖 1(a) 為實驗用印刷電路板，其細部尺寸如圖 1(b) 所示，本次印刷電路板為針對聯合電子裝置工程協會 (Joint Electronic Device Engineering Council, JEDEC) 動力試驗規範制定之測試件規格所製造，若建立與實際結構等效之有限元素模型，將可簡化相關振動模擬測試所花費之時間，並能對整體結構進行快速之振動特性分析。



(a) 單一封装體印刷電路板實體 (b) 細部尺寸圖
圖 1 實際結構外觀及尺寸圖

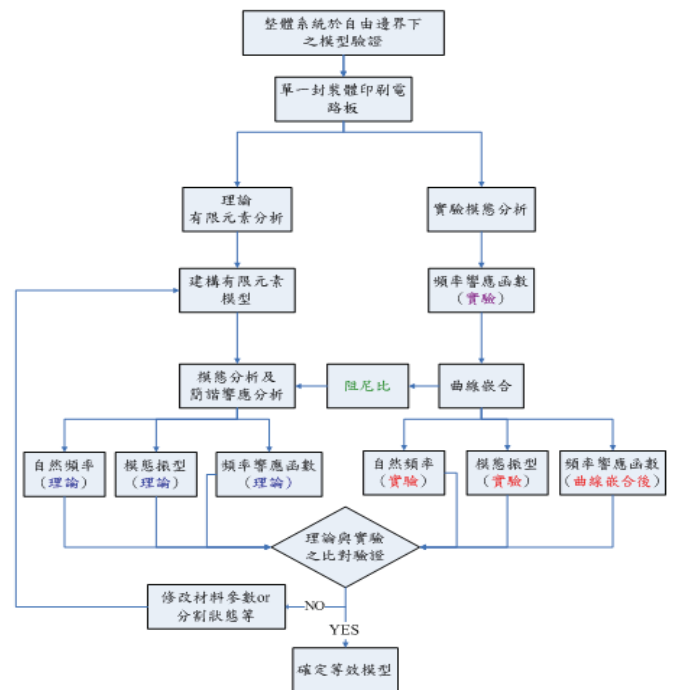


圖 2 模型驗證流程圖

表 1 簡易模型及精細模型之最佳化材料參數表

材料參數種類	楊氏係數 E	剪力係數 G	泊松比 ν	密度 ρ	加速度計質量 m	
單位	GPa	GPa	-	(g/cm^3)	kg	
封装層	簡易模型	9.15	3.889	0.35	2.17	
	精細模型	封膠	18.04	6.681	0.35	1.89
		晶片層	131	53.252	0.23	2.33
		基板層	$E_x = E_y = 10.82$ $E_t = 4.89$	$G_x = G_y = 7.59$ $G_{xy} = 3.31$	$\nu_x = \nu_y = 0.39$ $\nu_{xy} = 0.11$	1.91
減量 (%)	-	-	-	-	-	
電路板	簡易模型	$E_x = E_y = 14.17$ $E_t = 12.76$	$G_x = G_y = 3.31$ $G_{xy} = 3.319$	$\nu_x = \nu_y = 0.36$ $\nu_{xy} = 0.36$	1.91	
	精細模型	$E_x = E_y = 19.6$ $E_t = 8.14$	$G_x = G_y = 8.5$ $G_{xy} = 3.64$	$\nu_x = \nu_y = 0.39$ $\nu_{xy} = 0.11$	1.91	
	減量 (%)	$E_x = E_y = 27$ $E_t = 56.7$	$G_x = G_y = 60$ $G_{xy} = 8.8$	$\nu_x = \nu_y = 8.3$ $\nu_{xy} = 27.2$	0	
	簡易模型	K=53e15				
錫球	精細模型	39.5	14.522	0.36	7.44	
	減量 (%)	-	-	-	-	

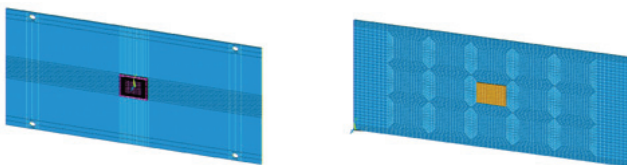
圖 2 為印刷電路板模型驗證流程圖，本次分析以自由邊界狀態下進行邊界模擬。在理論方面，利用有限元素分析進行有限元素模型之建構，將建構完成之模型進行模態分析、簡諧響應分析，可求得結構之模態參數，包含自然頻率、模態振型、阻尼比及頻率響應函數。在實驗方面，利用衝擊錘當作驅動器，加速度計當做感測器，擷取結構系統參數，由頻譜分析

儀所獲得之頻率響應函數及關聯性函數，將此結果進行曲線嵌合，可求得實際結構之模態參數，最後將實驗及與理論進行模態參數比對及模態保證指標(MAC)比對，若自然頻率誤差小，模態振型一致，MAC 值接近於 1，表示模型驗證成功。

3. 有限元素分析

在有限元素分析部份同採用套裝軟體 ANSYS 進行 FEA，而材料參數為使用最佳化分析完成所取得之材料參數，精細電路板及整體假設為正向性材料，封膠層、晶片層及錫球部份假設為等向性材料進行分析，而簡易電路板主要假設為正向性材料，等向性材料為封裝層與錫球部分，圖 3(b)為簡易與(a)精細印刷電路板之有限元素模型示意圖，模型建構說明如下：

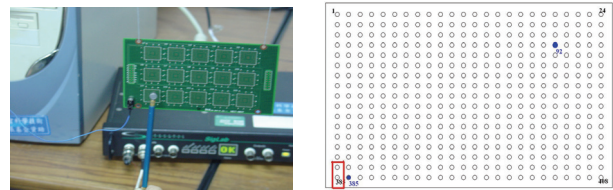
1. 元素選用：簡易與精細整體模型皆使用線性六面體元素(SOLID45)，並以三維質量元素(MASS21)及設置數個質量元素節點來模擬加速度計，簡易模型在錫球部分則以彈簧元素(combin14)建構。
2. 元素分割：簡易與精細模型分割使用 mapped mesh 方法將，精細整體模型分割為 128448 個元素簡易分割為 4929 個元素，加速度計模擬位置如圖 4(b)紅色框出的地方。
3. 位移限制條件：以全自由邊界(free-free)模擬，故無須設定任何位移限制。
4. 負荷條件：模態分析不須設定負荷；簡易與精細模型進行簡諧響應分析時，需在對應實驗模態分析時之衝擊點位置，如圖 4(b)藍點所示，在節點 92 號及 385 號設定 1(N)之單位力，並以 Mode superposition 方法求解。



(a) 精細模型之 PCB 板 (b) 簡易模型之 PCB 板
圖 3 簡易與精細之印刷電路板有限元素模型示意圖

4. 實驗模態分析

圖 4 (a)實驗架構，量測點規劃如圖 4 (b)所示，點數編號由左至右，在長邊規劃 27 點，短邊規劃 17 點，總得 408 點，左下靠近 385 點處之長方體部份為加速度計固定處；在確認量測點規劃及實驗架設完成後，敲擊結果可透過頻譜分析儀取得結構之頻率響應函數，並由曲線嵌合軟體取得結構之自然頻率、模態振型、阻尼比及頻率響應函數。



(a)量測架設圖 (b)量測點規劃圖

圖 4 印刷電路板實驗示意圖

表 2 單一封裝 PCB 自由邊界實驗阻尼比修正表

單一封裝體 PCB			
Mode	實驗阻尼(%)	修正阻尼(%)	累積平均值(%)
1	1.7786	1.3899	1.3899
2	0.5635	0.2528	0.8214
3	0.6783	0.5154	0.7194
4	0.3834	0.2684	0.6066
5	0.7515	0.6475	0.6148
6	0.1461	0.0562	0.5217
7	0.4690	0.3896	0.5028
8	0.5225	0.4602	0.4975
9	-	-	-
10	0.3691	0.3127	0.4770
11	0.2864	0.2381	0.4218
12	1.1320	1.0879	0.4824
13	0.3703	0.3356	0.4701
14	0.3799	0.3484	0.4608
15	0.2200	0.1899	0.4414
16	1.3489	1.3239	0.5003
17	0.3763	0.3520	0.4910

5. 單一封裝 PCB 板之簡易模型與精細模型比較分析

本文探討針對環境振動測試所設計之印刷電路板進行模擬自由邊界下之模型驗證，經由本研究，可以確認簡易與精細有限元素模型之材料參數最佳化後，進行變異性比對探討。綜合本章節分析結果討論如下：

1. 單一封裝體 PCB 之最佳化材料參數及結合有限

元素模型進行模型驗證，由自然頻率及模態振型之比對可確認誤差較小，而在 FRF 比對之振幅及頻率稍有誤差之原因可能為有限元素模型分割較細，而加速度計放置為佔有一面積並非單個節點，因此量取單一節點會產生些許誤差，但整體趨勢上皆有對應，因而完成單一封装體 PCB 於自由邊界之模型驗證。

2. 表 3 單一封装體 PCB 精細模型及簡易模型同點及異點 FRF 圖總表，由表中可瞭解簡易模型之振幅部份對應較佳，但頻率部份則屬精細模型對應較為精準，而兩種模型皆與實驗有相同趨勢，代表簡易模型電路板理論求得之 FRF 對應良好。
3. 表 4 為單一封装體 PCB 精細模型及簡易模型之自然頻率比對總表，由表中可瞭解仍屬簡易模型於自然頻率部份與實驗之頻率比對變異性較大，但整體比對來說仍屬對應良好。
4. 表 5 為單一封装體 PCB 精細模型及簡易模型模態振型比對及 MAC 總表，由表中可瞭解簡易模型與精細模型在物理意義上皆與實驗一致，而在 MAC 方面，由簡易模型於前 11 個模態之值皆有在 0.9 以上，表示以簡易模型與精細模型之模型驗證為非常合理的，表示以彈簧元素代替錫球進行簡易模型之模型驗證為非常成功。

表 3 單一封装 PCB 精細模型及簡易模型同點及異點 FRF 圖總表

印刷電路板		
位置	FRF(Refined)	FRF(Simple)
(385,92)		
(385,385)		

表 4 單一封装 PCB 精細模型及簡易模型自然頻率比對總表

印刷電路板							
EMA		FEA(Refined)		FEA(Simple)		error(%)	
模態	頻率 (Hz)	模態	頻率 (Hz)	模態	頻率 (Hz)	ER	ES
E-01	117.85	F-01	126.74	F-01	115.06	7.543	-2.367
E-02	147.44	F-02	147.82	F-02	148.28	0.258	0.570
E-03	281.31	F-03	284.87	F-03	280.64	1.266	-0.238
E-04	398.45	F-04	391.38	F-04	412.07	-1.774	3.418
E-05	440.53	F-05	438.1	F-05	423.17	-0.552	-3.941
E-06	509.87	F-06	506.49	F-06	498.81	-0.663	-2.169
E-07	576.53	F-07	557.56	F-07	571.74	-3.290	-0.831
E-08	734.76	F-08	684.81	F-08	687.43	-6.798	-6.442
E-09	812.31	F-09	824.25	F-09	839.29	1.470	3.321
E-10	947.91	F-10	926.24	F-10	969.4	-2.286	2.267
E-11	1038.90	F-11	974.44	F-11	1004.3	-6.205	-3.330
-	-	F-12	1196.6	F-12	1182.1		
-	-	F-13	1238.7	F-13	1280.3		
E-12	1319.90	F-14	1335	F-14	1398.7	1.144	5.970
-	-	F-15	1390.4	F-15	1429.1		
E-13	1454.90	F-16	1426	F-16	1475	-1.986	-1.773
E-14	1522.30	F-17	1468.5	F-17	1544.6	-3.534	-3.107
E-15	1831.60	F-18	1781.9	F-18	1801	-2.713	-1.671
E-16	1887.20	F-19	1908.4	F-19	1998.2	1.123	5.882
EMA 及 FEA 頻率比對平均值						-0.423	-0.277
EMA 及 FEA 頻率比對標準差						2.782	3.577
EMA 及 FEA 頻率比對平方平均根值						2.816	3.474

表 5 單一封装 PCB 精細模型及簡易模型振型比對及 MAC 總表

印刷電路板								
Mode	物理意義	FEA 模型		EMA 模型		MAC		
		振態模型及頻率(Hz)		Mode	物理意義	振態模型及頻率(Hz)		
		Refined	Simple			ER	ES	
F-01	(2,2)			E-01	(2,2)		0.84	0.97
		頻率(Hz)	126.74	115.06	頻率(Hz)	117.85		
F-02	(3,1)			E-02	(3,1)		0.87	0.95
		頻率(Hz)	147.82	148.28	頻率(Hz)	147.44		
F-03	(3,2)			E-03	(3,2)		0.87	0.97
		頻率(Hz)	284.87	280.64	頻率(Hz)	281.31		
F-04	(4,2)			E-04	(4,2)		0.91	0.94
		頻率(Hz)	391.38	412.07	頻率(Hz)	398.45		
F-05	(1,3)			E-05	(1,3)		0.74	0.96
		頻率(Hz)	438.09	423.17	頻率(Hz)	440.53		

表 5 單一封裝 PCB 精細模型及簡易模型振型比對及
MAC 總表(續)

F-06	(2,3)			E-06	(2,3)		0.68	0.95
頻率(Hz)		506.48	498.81	頻率(Hz)		509.87		
F-07	(4,2)			E-07	(4,2)		0.86	0.95
頻率(Hz)		557.56	571.14	頻率(Hz)		576.53		
F-08	(3,3)			E-08	(3,3)		0.91	0.97
頻率(Hz)		684.81	687.43	頻率(Hz)		734.56		
F-09	(5,1)			E-09	(5,1)		0.89	0.94
頻率(Hz)		824.25	839.29	頻率(Hz)		812.31		
F-10	(5,2)			E-10	(5,2)		0.84	0.91
頻率(Hz)		926.24	969.4	頻率(Hz)		947.91		
F-11	(4,3)			E-11	(4,3)		0.9	0.95
頻率(Hz)		974.44	1004.3	頻率(Hz)		1038.9		
F-12	(1,4)			-	-	-	-	-
頻率(Hz)		1196.6	1182.1	頻率(Hz)		-		

6. 結論

本文將系統利用單一封裝體印刷電路板，並模擬自由邊界利用 FEA 配合 EMA 方法進行各別振動參數之擷取，並完成模型驗證，進而取得等效於實際結構之有限元素模型，最後進行簡易印刷電路板與精細印刷電路板進行兩者比對，而由本章利用最佳化分析所求得之材料參數亦為往後進行相同分析時之輸入材料參數參考依據。對各節結論描述如下：

1. 經由實驗模態分析結合有限元素分析方式，完成簡易模型與精細模型於自由邊界之模型驗證，並對材料參數進行變異性之探討，提供未來進行相同研究時，合理材料參數範圍之依據。
2. 經由實驗配合理論在自然頻率、模態振型、MAC 及頻率響應函數之比對，可證明本次實驗之成功，並取得等效於實際結構之有限元素模

型，未來可將此模型進一步進行其他振動相關分析。

3. 經由本文驗證後，不管簡易模型或者精細模型，都可以足夠於實際等效模型，未來在微機電領域而言，由簡易模型能夠在設計過程中採用快速有效的設計分析。

參考文獻

- [1] 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。中華民國第二十九屆全國力學會議論文集，新竹，第 H013-1-H013-8 頁。
- [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*, Detroit, pp.19-27.
- [3] Yang, Q, J., Lim, G, H., Yap, F, F., Pang, H, L, J., and Wang, Z, P., 1997, "Experimental Modal Analysis of PBGA Printed Circuit Board Assemblies," *1997 IEEE/CPMT Electronic Packaging Technology Conference*, Singapore , pp.290-296.
- [4] Pitarresi, J. M., 1990, "Modeling of Printed Circuit Cards Subject to Vibration," *Institute of Electrical and Electronic Engineers International Symposium*, Vol. 3, pp. 2104-2107.
- [5] Shorthill, R. W., Decker, R. A., and Rice, B., 1996, "Modal Analysis of Segmented, Laminated, Anisotropic, Inhomogeneous Beams," *Proceeding of the Aerospace Applications Conference*, San Diego, pp. 231-240.
- [6] Alampalli, S., 2000, "Effects of Testing, Analysis, Damage, and Environment on Modal Parameters," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 14, pp. 63-74.
- [7] Singhal, R. K., Guan, W., and Williams, K., 2002, "Modal Analysis of a Thick-Walled Circular Cylinder," *Mechanical Systems and Signal*

processing, Kaohsiung, Vol.16, No.1, pp. 141-153.

- [8] Kao, C, L., Yeh, C, L., and Lai, Y, S., 2004, "Steady-State Vibration for Printed Circuit Boards of Different Package Layout," *Proceeding of the Taiwan ANSYS Conference*, Nan-tou, pp. 67-70.
- [9] Kao, N., Wang, Y. P., and Hsiao, C. S., 2002, "Mechanical Reliability Improvement with Proper Package Design in CSP," *Proceedings of the 4th International Symposium on Electronic Materials and Packaging*, pp. 239-244.
- [10] Taniguchi, M., Takagi, T., and Akasaki, I., 1994, "An Experimental Study on the Application of Stroboscopic Holography to Impulsive Vibration Analysis of Printed Circuit Board," *Proceeding of 10th instrumentation and Measurement Technology Conference*, Hamamatsu, Vol. 1, pp. 204-207.

Comparable Study of Simplified and Refined Models of PCB with Single Package for Model Verification

Bor-Tsuen Wang¹, Chung-Chih Tao²

Yi-Shao Lai³, Chang-Lin Yeh³, Ying-Chih Li³

3ASE GROUP Kaohsiung Stress-Reliability
Lab

1 Professor, Department of Mechanical Engineering, National Pingtung University of Science and Technology.

**2 Department of Mechanical Engineering
National Pingtung University of Science and
Technology.**

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

ABSTRACT

This work adopts finite element analysis (FEA) and experimental modal analysis (EMA) to perform model verification of a printed circuit board (PCB) with single package. First, both simplified and refined FE models are, respectively, constructed for the PCB and carried out for modal analysis and harmonic response analysis to obtain modal parameters and frequency response functions (FRFs). Through optimum solution the reasonable FE models can be validated. The two models are then compared in terms of natural frequencies and mode shapes and also verified to obtain the equivalent theoretical models. Results show that the refined model results in less discrepancy for natural frequency comparison, while the simplified model reveals better mode shape comparison in terms of modal assurance criterion (MAC). Nevertheless, both models are well interpreted for their modal characteristics in comparison to the experimental results. Both of the validated models can be adopted for further response prediction.

Keywords: printed circuit board (PCB), model verification, experimental modal analysis (EMA), finite element analysis (FEA)