

電動車用驅控器電路板熱與振動分析

何政翰, 呂銘宏

財團法人工業技術研究院

摘要

本研究探討車用驅控器系統電路板失效主因，使用有限元素法模擬熱負載和振動負載對電路板之影響。本研究以工業技術研究院 CPEV 電動車第二代驅控器為研究對象，藉由文獻回顧和公式計算，代入電路板材料熱傳和機械性質等參數，建立驅控器有限元素模型，模擬工作溫度下之熱膨脹應力與道路隨機振動下之振動量，最後提出建議和改善設計。

關鍵字：驅控器、電路板、熱膨脹分析、模態分析、隨機振動分析、有限元素法

ABSTRACT

The critical causes of inverters for vehicles were investigated in this study. Finite element method was applied to simulate thermal loads and vibrations on printed circuit boards. This study focuses on second generation of inverter for ITRI's CPEV car. From literatures and equation calculations, thermal and mechanical properties were accessed and imported to the model of printed circuit boards. Building finite element model first, then simulating thermal expansion stress and random vibration analysis from the roads for the inverter. Finally, suggestions and design improvements were proposed.

Keywords: inverter, printed circuit board, thermal expansion analysis, modal analysis, random vibration analysis, finite element method

一、緒論

隨著電動車發展和車輛系統朝電子化發展，越來越多車輛搭載輔助駕駛之主動安全系統，使得車輛上搭載越來越多的電子元件成為趨勢。

一台車動輒使用超過十萬公里的里程數，加上車輛系統的失效與否攸關人命安全，因此車規等級之產品需滿足可靠度和耐久度，要求和限制遠比一般 3C 產品高出許多。而車規等級的系統和零件面臨複雜且嚴苛的考驗，包含氣候、惡劣路面傳遞振動和衝擊、防水防塵等環境負載。

二、文獻回顧

文獻[1][2][3]探討電子設備常見的失效模式，經整理包含機械應力、熱應力、工作環境條件、腐蝕、製造瑕疵、電源供應等失效。

德國 ZVEI 出版之手冊[4]，整理歸納電子設備所需承受的功能性負載包含電磁兼

容性(EMC)、化學效應、防水(潑濺、高壓水柱)、熱傳、機械、輻射、灰塵、濕度等項目。

文獻[5]將失效原因歸納為熱效應影響、振動、濕度和灰塵等四大項。其中熱效應佔全部的 55%，振動和濕度分別各佔 20%，塵土為 5%

綜合上述文獻資料，電子設備約四分之三(75%)之失效模式由熱與機械兩大類負載造成。

三、驅控器模型建立與參數迴歸

3.1 驅控器有限元素模型建立

圖 1 為驅控器 CAD，在有限元素模型中則經過適當簡化，省略非主要支撐之結構如 busbar 等零件，大電容等以質量點代替。電子元件質量若低於 0.5 g 則以等效密度方式加進電路板；質量高於 0.5g 則設質量點。

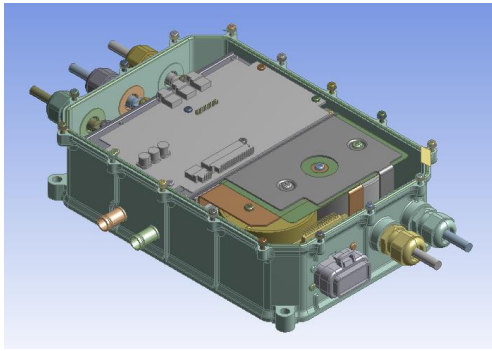


圖1 驅控器CAD

最終之有限元素模型包含：外殼、上蓋、control board、driver board、shielding plate、IGBT 模組，如圖 2 所示。

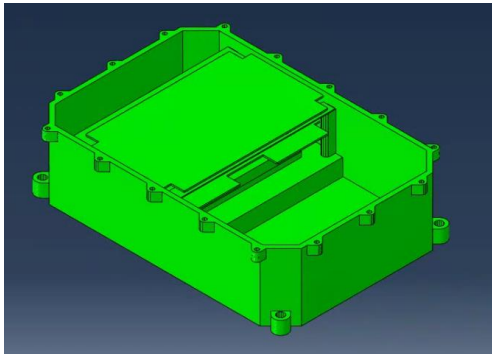


圖2 驅控器有限元素模型

3.2 電路板材料參數迴歸

電路板為FR4基板，由銅箔層、環氧樹脂組成，為orthotropic材料，需以模態測試之自然頻率值為標的，反推電路板各方向之楊氏係數，圖三、圖四分別為control board、driver board模態敲擊測試與模擬值得比對。

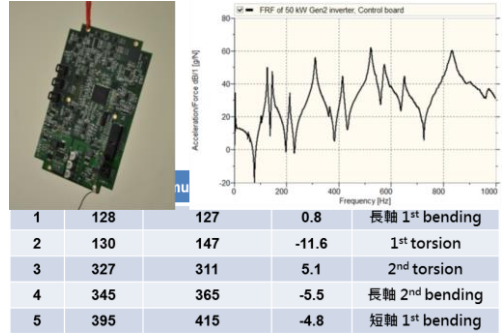


圖3 control board模態測試

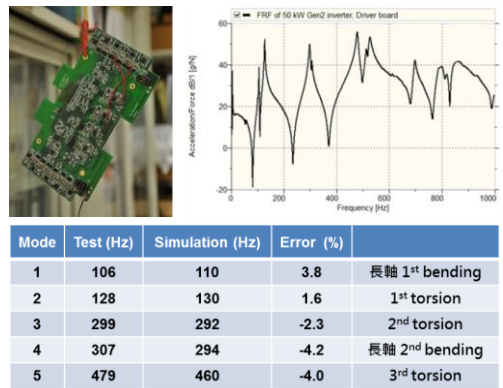


圖4 driver board模態測試

四、驅控器等效熱傳分析

4.1 使用溫度邊界法求解溫度分布

本研究之對象驅控器採用水冷式循環，IGBT和電子元件均會產熱，再由水道帶走熱，經熱傳分析軟體模擬驅控器在工作狀態下之溫度分布如圖5。

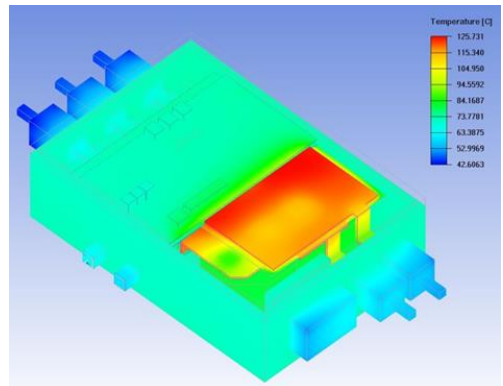


圖5 熱傳CAE模型溫度分布

在Abaqus中建立之有限元素模型省略busbar熱傳導之元件，也省略水道結構，無法直接進行熱傳分析。因此，以建立溫度邊界的方式再進行熱傳分析，近似並重現熱傳模分析的溫度分布，如圖6。

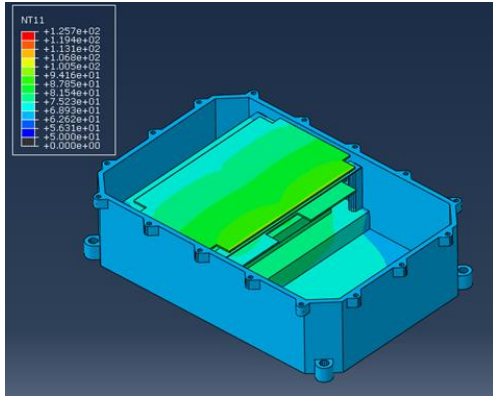


圖6 結構CAE模型(無busbar)溫度分布

4.2 熱膨脹之影響

驅控器由室溫升溫至工作溫度下之熱變形如圖7，control board之應力分布如圖8；driver board之應力分布如圖9。control board和driver board熱膨脹之最大應力分別為11.45 MPa和38.62 MPa，位置皆集中於鎖孔附近，兩者皆遠低於FR4強度(345 MPa)，疲勞限取FR4強度的一半，仍不至產生破壞或疲勞。

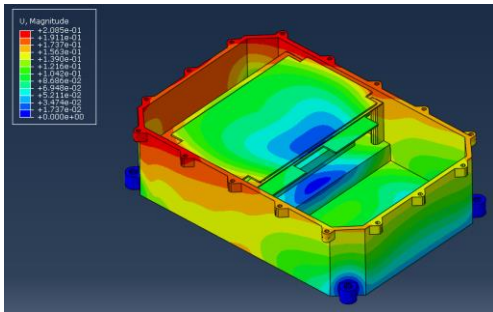


圖7 驅控器熱膨脹變形量

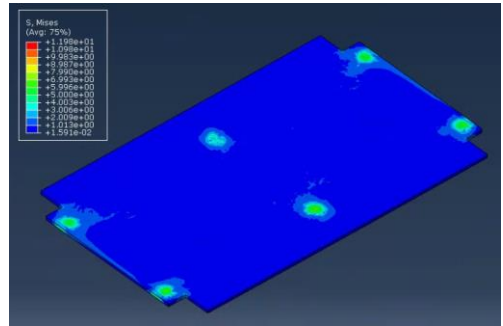


圖8 control board熱膨脹應力分布

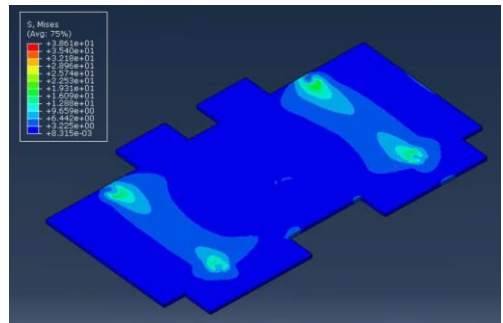


圖9 driver board熱膨脹應力分布

五、驅控器模態分析

驅控器與車體結構之鎖固點固定，進行模態分析求取自然頻率值。表1為無溫升下各模態與自然頻率；表2為由室溫(攝氏25度)升溫至工作溫度下各模態與自然頻率。

Mode	Freq. (Hz)	Mode shape
1	228.7	
2	234.8	

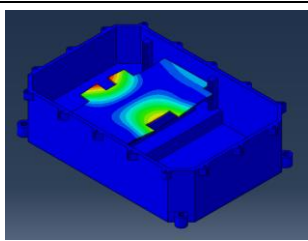
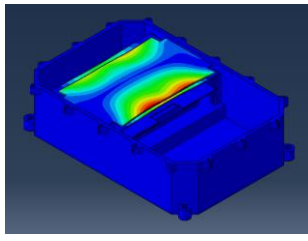
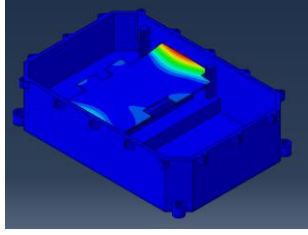
3	327.4	
4	341.2	
5	374.1	

表1 驅控器無升溫下之模態與自然頻率值

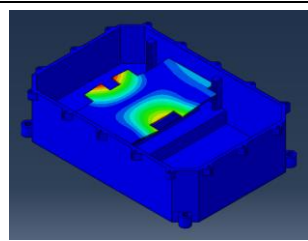
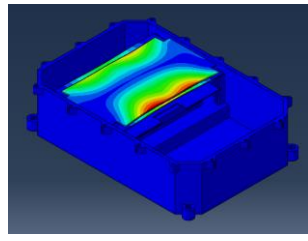
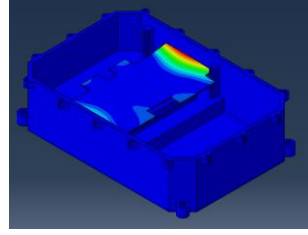
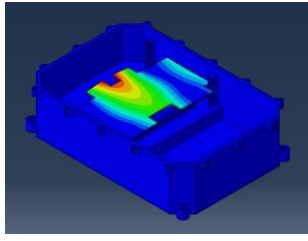
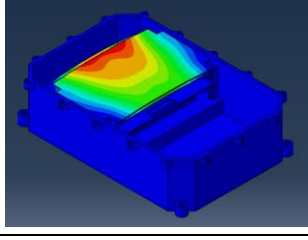
3	316.4	
4	339.1	
5	373.1	

表2 驅控器由室溫(攝氏25度)升溫至工作溫度下之模態與自然頻率值

受熱膨脹變形的影響，各模態的自然頻率值會變低，又以第一模態自然頻率值降低最多，降低的幅度也最大(-7.65%)。

六、驅控器隨機振動分析

CNS 15481為道路車輛-電機電子配備環境條件與試驗的規範，第3部為機械負載，其中試驗VII-商用車，簧上承載件隨機振動負載的功率譜密度如圖10和表3所示。

Mode	Freq. (Hz)	Mode shape
1	211.2	
2	234.3	

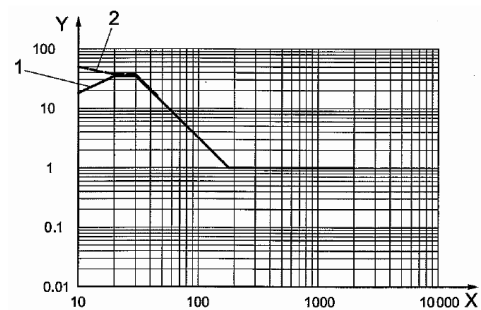


圖10 加速度功率頻譜密度與頻率

頻率 Hz	功率頻譜密度 (m/s ²) ² /Hz
10	18
20	36
30	36
180	1
2,000	1

備考：加速度均方根值=57.9 m/s²。

表3 功率頻譜密度與頻率

本研究依CNS-15481-3規範，針對驅控器X、Y、Z三方向進行隨機振動分析。表4為無升溫情況下之隨機振動模擬結果；表5為由室溫(攝氏25度)升溫至工作溫度下之隨機振動模擬結果。

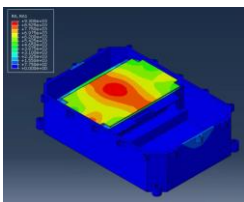
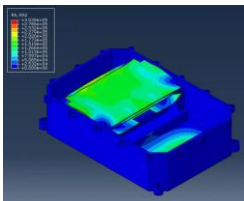
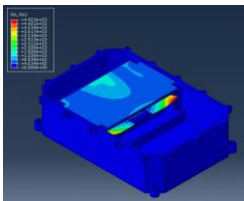
Direction	RMS acceleration	Contour
X (長軸)	9.3 m/s ²	
Y (垂直)	303.9 m/s ²	
Z (短軸)	4.8 m/s ²	

表4 驅控器無升溫下之隨機振動模擬結果

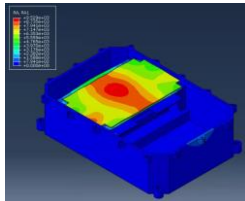
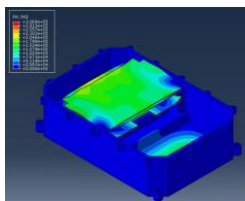
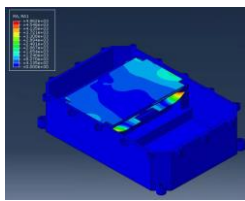
Direction	RMS acceleration	Contour
X (長軸)	9.5 m/s ²	
Y (垂直)	306.9 m/s ²	
Z (短軸)	4.9 m/s ²	

表5 驅控器由室溫(攝氏25度)升溫至工作溫度下之隨機振動模擬結果

由表4、表5可得，驅控器三方向的振動中，以Y(垂直)向的振動會激發最大響應，其方均根加速度值為原先負載的5倍；而有無熱膨脹應力對振動影響微乎其微。

分析結果中，control board和shielding plate 為振動最大的兩個區域；而在實際上振動台進行試驗時發現，control board上之焊錫在垂直上振動測試時因產生鬆脫。以圖11解釋說明原因，由於control board(綠色)鎖固於shielding plate(灰色)上，shielding plate再鎖到外殼結構(黃色)上，又該系統大部分質量集中在電路板，造成垂直向振動會被放大。

電路板若振動加速度過大(一般需低於20 G)，會存在電子元件損壞之風險。因此將分析結果回饋給設計人員，並提出改善建議供參考：

- 電路板與鋁板、鋁板與外殼之鎖點位在同一垂直線上
- shielding plate折角處加肋(剛性)

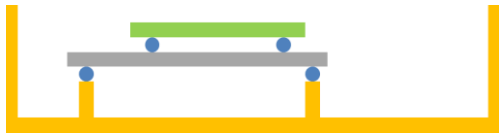


圖11 驅控器剖視示意圖

七、結論與未來展望

本研究以車用驅控器為對象，模擬工作狀態下之溫度負載，以及路面隨機振動負載對驅控器內電路板的影響。工作溫度下之熱膨脹並不至於使電路板產生疲勞的現象；而隨機振動中垂直方向的振動過大，可能造成電路板上電子元件損壞，該分析結果也與實際振動台試驗時焊點鬆脫的情況吻合。

溫度會影響材料楊氏係數等機械性質，若能取得材料在不同溫度參數下之參數，可以使模擬分析結果更為準確。

由於電路板上焊錫為最脆弱的結構，多數失效是由於焊點鬆脫或斷裂造成，未來可建立錫球模型，將驅控器振動分析得到之振動加速度代入錫球模型中，計算振動造成錫球之應力。

八、致謝

本論文為科技部計畫編號G353CC2230之計畫，由於科技部的支持，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。也感謝工業技術研究院機械所智慧車輛組協助測試之同仁。

九、參考文獻

- [1] Derek Snider, Printed circuit board failures an overview of common defects. SAE Japan, 2011. Accessed on 04/06/2016.
- [2] Ensil, Most common causes of printed circuit board failure. Electronic Blog, 2011. Online Blog. Accessed on 04/06/2016.
- [3] Dale Lee, Root cause failure analysis of printed circuit board assemblies through analysis of product and tooling design. Surface Mount Technology Association, 2010.
- [4] ZVEI, Handbook for Robustness Validation of Automotive Electrical/Electronic Modules. Elektronikindustrie e.V. Electronic Components and Systems Division
- [5] Banu Aytakin, Vibration analysis of pcbs and electronic components, Apr 2008.