

# 應用多重尺度模型與多重物理耦合分析於電子連接器溫昇檢視

呂劭霖、廖國基\*

國立臺灣大學生物產業機電工程學系

E-mail: kokki@ntu.edu.tw

## 摘要

電子連接器溫度過高可能影響其功能表現，然匹配金屬彈片接觸區域溫度不易量測。本研究執行金屬彈片表面輪廓量測，所得資訊經快速傅立葉轉換獲致接觸模型所需頻率與其相對應振幅。藉由有限元素分析商用軟體 ABAQUS，搭配 MATLAB 計算程式，導入多重尺度正弦波粗糙表面接觸模型，探討匹配 Micro USB 連接器採用不同金屬彈片材料之接觸電阻。進行連接器溫昇實驗，檢視金屬彈片於特定負載電流之溫升值。進一步利用 ABAQUS/CFD 進行熱-電-固-流多重物理耦合分析，獲致包含金屬彈片與塑膠基底之匹配連接器達到穩態後之溫度分布場。數值分析結果分別與熱耦及紅外線熱像儀量測所得相較，皆具備良好一致性。

**關鍵詞：**多重尺度模型、多重物理耦合分析、溫昇、電子連接器、有限元素分析

## 1. 前言

部分連接器，如 Micro USB 與電池連接器，於公、母匹配通入電流後，可能產生溫度過高現象，究其原因可能係端子結構設計不良、材料選擇不當、亦或接觸電阻值過高有關。本研究以有限元素分析軟體 ABAQUS [1] 進行公、母連接器三維模型之匹配分析，傳送接觸節點之正向力至 MATLAB [2] 程式，採用多重尺度正弦波粗糙表面接觸模型(multi-scale sinusoidal rough surface contact model)，輸入實際量測所得金屬表面輪廓，自行撰寫程式，計算節點位移量與接觸面積，將計算所得節點位移量回傳至 ABAQUS [1]，調整節點位移量並再次進行匹配分析，藉以探討匹配 Micro USB 金屬彈片之接觸電阻值。接續將匹配分析所得接觸電阻值與相對應接觸壓力輸入 ABAQUS [1] 與其計算流體動力學 (computational fluid dynamics, CFD) 模組，進行熱-電-固-流多重物理耦合分析，獲致包含金屬彈片與塑膠基底之匹配連接器三維模型達到穩態後之溫度分布場。數值模擬結果並與根據規範執行匹配 Micro USB 連接器通入電流後之溫度量測值進行比較，驗證分析之合宜性。

## 2. 文獻回顧

Hertz [3] 致力於接觸力學之領域，提出兩彈性體曲面接觸模型，奠定接觸力學基礎。過往已有數學模型進一步將 Hertz 接觸模型，由表面上單一突起(asperity)，發展至多個突起之接觸模型，更加精確描述粗糙面之接觸行為。Archard [4] 利用摩擦力與接觸面積關係，提出較小突起堆疊於較大突起上，且同一尺度突起具備相同半徑之假設，並進行一具備曲面與一平坦表面玻璃之接

觸實驗，量測摩擦力，藉以計算其相對應接觸面積，實驗結果顯示接觸面積與其負載關係趨近線性。Jackson 與 Streater [5] 遵循 Archard [4] 之概念，提出正弦波之堆疊描述二維粗糙面多重尺度突起輪廓之粗糙表面計算模型，結合 Hertz 接觸模型，將量測所得表面輪廓經由快速傅立葉轉換(fast Fourier transform)獲致接觸模型所需頻率與其相對應振幅，進而計算相對應接觸面積。Angadi 等人[6] 藉由有限元素分析，考慮多重尺度正弦波粗糙表面，施加多種電流於車用連接器之二維模型，進行熱-固-電多重物理耦合分析，分析結果顯示溫升值與負載電流呈現正相關，金屬彈片狹窄處為主要熱源，具備最高溫度，然無實驗量測驗證其數值結果。Angadi 等人[7] 進一步利用前述方法，分析一大電流車用連接器之二維模型，分析結果顯示接觸區域附近具備最高溫昇，然將實驗與分析所得接觸電阻值與溫昇進行比較，接觸電阻值差異達十餘倍，溫升值差異甚或高達千餘倍，推測此顯著差異可能與簡化分析模型為二維相關。Jackson 等人[8] 利用原子力顯微鏡獲得微開關突起之表面輪廓，匯入有限元素分析軟體，預測微開關(micro-switch)三維模型接觸面積值。並進一步量測二維方向金屬表面輪廓，利用快速傅立葉轉換，取此二維方向轉換所得頻率與其相對應振幅平均值為多重尺度模型所需參數。有限元素分析與多重尺度模型預測之接觸面積值具備良好一致性，然無實驗量測驗證此些分析結果。

綜合上述文獻回顧，本研究以有限元素分析軟體進行匹配分析，將實驗量測之金屬彈片表面輪廓以快速傅立葉轉換獲致接觸模型所需頻率與其相對應振幅，輸入多重尺度粗糙表面接觸模型，計算接觸面積，藉以探討匹配 Micro USB 金屬彈片之接觸電阻值。進一步執行熱-電-固-流耦合分析，分析匹配連接器達到穩態後之溫度分布場，並與實驗量測結果進行比較。

## 3. 實驗量測

### 3.1 金屬彈片表面輪廓量測

金屬彈片表面輪廓量測之樣品係取自連展科技公司生產之 Micro USB。本研究採用不同導電率之母端金屬彈片，分別為導電率較低之 C5191 磷青銅合金，與導電率較高之 C18400 銅鎳鎢合金；公端金屬彈片則採用 C5191 磷青銅合金。

將拆除外部鐵殼後之公、母端連接器分別置於型號為 WLI LAB- AUTO 之掃描式共軛焦望白光干涉量測儀之載台，利用 20 倍之物鏡量測公、母端金屬彈片表面輪廓，並用 WLI Lab [9] 程式截取量測所得影像。根據 Jackson 等人[10] 方法，截取量測所得結果二維方向表面輪廓，利用 MATLAB [2] 執行快速傅立葉轉換，並取此

二維方向表面輪廓轉換所得頻率與其相對應振幅平均值為接觸模型所需。

### 3.2 連接器接觸電阻量測與溫昇實驗

以型號為 HP 4338B 之微歐姆表量測匹配狀態連接器之電阻值，再分別單獨量測公端 C5191、母端 C5191 與 C18400 金屬彈片電阻值，最後將匹配狀態電阻值扣除公端 C5191、母端 C5191 與 C18400 金屬彈片電阻值，即為匹配狀態接觸電阻值。

Micro USB 產品規格書中規範此產品最高溫昇值不得超過  $30^{\circ}\text{C}$ 。本研究因此參考規範 EIA-364-70B 架設實驗架構，利用兩長度 25 公分之電線焊於公端彈片，與一相同長度之電線串聯母端彈片。以熱耦連接於公、母端金屬彈片尾端裸露區域，並以兩區域量測所得溫度扣除環境溫度為溫昇值。為量測 Micro USB 接觸區域附近溫度，去除母端區域部分鐵殼與塑膠使部分母端金屬彈片裸露。為進一步確認金屬彈片之溫度分布，本研究採用型號為 P384-20 之紅外線熱像儀，測試樣品為公端 C5191 金屬彈片及去除部分鐵殼與塑膠之母端 C18400 金屬彈片連接器。於初始溫度為  $24.2^{\circ}\text{C}$  之環境，將 Micro USB 置於紅外線熱像儀之載台。依照前述溫昇實驗架設方法，施加 3 安培電流，並截取母端金屬彈片達穩態後之溫度分布圖。

## 4. 數值分析

將量測所得金屬表面粗糙度經快速傅立葉轉換，獲致每一尺度突起之頻率與對應之振幅，輸入採用之多重尺度粗糙表面接觸模型，結合 Hertz 接觸模型，假設突起具備彈塑性質，撰寫程式計算接觸區域相對應節點位移量與接觸面積。於公、母連接器匹配分析過程，傳送接觸節點位移量與正向力量至多重尺度粗糙表面接觸模型，進行尺度  $i=1$  至  $i=i_{\max}$  突起之位移量迴圈計算，並將各尺度所得結果加總，獲致相對應節點位移量，回傳至 ABAQUS [1]，進行相對應節點位移之調整，將調整所得位移量與正向力量傳送至多重尺度粗糙表面接觸模型計算。比較前後兩次迭代分析之相對應節點位移量，倘若差異值於接受範圍內，則持續匹配增量；反之則將計算之節點位移量傳至 ABAQUS [1]，再次進行相對應節點位移調整迭代分析，重複執行匹配分析達最終匹配量。截取匹配分析所得接觸電阻值與接觸壓力，進行熱-固-電-流耦合分析。輸出因熱應力造成之節點位移量與正向力量，傳至多重尺度粗糙表面接觸模型，仿照匹配分析，重複執行熱-固-電耦合分析達最終電流增量，獲致一匹配連接器之溫度分布。進一步考慮連接器周圍流場效應，採用 ABAQUS/CFD 模組進行計算流體動力學模擬，將熱-固-電耦合分析模型置於流場中央，並匯入熱-固-電耦合分析結果之溫度分布與熱通量，最終獲得包含金屬彈片、連接電線、塑膠基座、與金屬外殼達至穩態後之溫度分布場。

## 5. 結果與討論

### 5.1 連接器接觸阻抗分析與實驗結果比較

本研究首先執行網格敏感度分析。將一對使用材料皆為 C5191 之公、母端金屬彈片模型，劃分多種網格尺寸，比較不同網格尺寸下獲致之接觸電阻，藉此驗證網格尺寸之合宜性。當總接觸點數超過 58 個時，預測接觸電阻值漸趨達  $2.21\text{m-}\Omega$ ，因此選擇此總接觸節點數目進行接觸分析。模擬結果與前述實驗量測平均所得接觸電阻值進行比對，如表 1 與表 2 所列。公、母端金屬彈片使用材料皆為 C5191，與公端使用 C5191，母端使用 C18400 之金屬彈片，其分析所得接觸電阻值皆小於實驗量測平均所得，然兩者差異並不顯著。

### 5.2 連接器溫昇分析

#### 5-2-1 應用多重尺度模型於溫昇分析與實驗結果比較

圖 1(a)與圖 2(a)分別顯示使用公、母端 C5191 金屬彈片與公端 C5191 金屬彈片、母端 C18400 金屬彈片之連接器於  $24.0^{\circ}\text{C}$  之環境，輸入 3 安培電流，達穩態之溫度分布圖，其中圖 1 (b)與圖 2(b)為公、母端金屬彈片之溫度分布圖。比較上述兩分析結果，公、母端皆為 C5191 金屬彈片之溫昇值高於公端 C5191 金屬彈片與母端 C18400 金屬彈片，此趨勢與實驗結果一致，亦證實使用高導電率之材料可有效降低溫昇值。圖 3 顯示紅外線熱像儀量測與分析所得母端 C18400 金屬彈片部分區域之溫度分布圖，所得最高溫皆位於接觸區域附近。由圖 1(b)與圖 2(b)可知，各別金屬彈片之最高溫皆發生於接觸區域。

表 3 顯示熱耦量測與分析所得公端 C5191 金屬彈片與母端 C5191 金屬彈片溫度值，其中兩種方式所得公端金屬彈片尾端溫度差異僅約 0.2%；母端金屬彈片尾端溫度值，熱耦量測較模擬分析所得高  $1.4^{\circ}\text{C}$ ，兩者差異約為 3.4%，推測可能與母端金屬彈片尾端焊接電線之品質有關。熱耦量測平均所得接觸區域附近溫度與多重尺度模型分析所得差異約 4.3%，推測可能因熱耦量測需去除部分鐵殼與塑膠，導致熱無法藉由傳導至鐵殼與塑膠所致。表 4 顯示熱耦量測與分析所得公端 C5191 金屬彈片與母端 C18400 金屬彈片之溫度值，兩種方式所得公端金屬彈片尾端溫度差異僅約 1.7%；母端金屬彈片尾端溫度值，熱耦量測較模擬分析所得高  $1.1^{\circ}\text{C}$ ，兩者差異約為 3.2%。熱耦量測平均所得接觸區域附近溫度與多重尺度模型分析所得差異約 4.6%。綜合以上實驗與模擬結果，母端採用 C5191 金屬彈片之最高溫昇值高於  $30^{\circ}\text{C}$ ；然母端採用 C18400 金屬彈片之最高溫昇值則略低於  $30^{\circ}\text{C}$ ，因此施加 3 安培電流母端採用 C18400 金屬彈片可滿足客戶需求。

#### 5-2-2 應用多重尺度模型與傳統手法於溫昇分析之比較

金屬端子之溫度分布亦可作為分析結果是否合理之判斷標準，接觸區域具備最高電阻值，為主要熱源，推測具備最高溫度；且金屬端子尾端距熱源較遠，推測具備較低溫度。由表 3 與表 4 可知傳統手法所得溫度顯著較多重尺度模型低，推測可能為將接觸區域結合，忽

略接觸電阻造成之積熱所致。圖 4 與圖 5 顯示公端 C5191 金屬彈片分別與母端 C5191 金屬彈片及 C18400 金屬彈片，傳統手法所得溫度分布圖，由圖可知，傳統手法所得最高溫於公端金屬彈片中間區域，且公端金屬彈片尾端溫度較母端金屬彈片尾端溫度低，此結果與熱耦量測及多重尺度模型分析所得相違背；傳統手法所得接觸區域非為最高溫。綜合以上兩點，推論傳統手法所得溫度分布較不合理。

### 6. 結論

本研究進行金屬彈片表面輪廓量測，以快速傅立葉轉換獲致接觸模型所需頻率與其相對應振幅。透過有限元素分析，搭配自行撰寫含多重尺度正弦波粗糙表面接觸模型之 MATLAB 計算程式，導入前述實驗量測轉換所得頻率與其相對應振幅，有效預測 Micro USB 採用母端 C5191、C18400 金屬彈片材料於連接器匹配狀態之接觸電阻值；連接器接觸電阻實驗量測平均所得與多重尺度模型分析所得接觸電阻值相較，具備良好一致性。以熱耦量測公、母端金屬彈片尾端與母端金屬彈片接觸區域附近溫昇，並進一步利用紅外線熱像儀量測部分母端 C18400 金屬彈片溫度分布。導入分析所得接觸電阻值與接觸壓力於熱-固-電-流多重物理耦合分析，獲致包含金屬彈片與塑膠基底之匹配連接器達到穩態後之溫度分布場；結果顯示多重尺度模型分析與實驗量測所得具備良好吻合度，且母端採用 C18400 金屬彈片之最高溫昇值低於 30°C，可滿足規範要求。傳統手法與多重尺度模型分析相較，前者所得公端金屬彈片尾端溫度較母端金屬彈片尾端低；金屬彈片溫度偏低且分布較不合理。傳統手法與實驗所得較不相符，因此採用多重尺度模型應用於溫昇分析較為合宜。本研究改善前人研究不足處，採用連接器三維模型，利用多重尺度粗糙表面接觸模型計算金屬彈片之接觸面積，考慮連接器周圍之流場效應，預測連接器輸入電流後之溫昇變化，並與相對應實驗量測比較，獲致良好一致性。

### 7. 參考文獻

[1] Hibbit, H. D., B. I. Karlsson, and E. P. Sorensen. 2012. ABAQUS User Manual. Version 6.12. USA.

[2] MATLAB (R2010a). 2010. MATLAB User Manual, Release 7.10.0. USA.

[3] Hertz, H. 1882. On the Contact of Elastic Solids. J. Reine Angew. Math. 92: 156-171.

[4] Archard, J. F. 1957. Elastic Deformation and the Laws of Friction. Proceeding of the Royal Society of London. 243: 190-205.

[5] Jackson, R. L. and J. L. Streater. 2006. A Multi-Scale Model for Contact between Rough Surfaces. Wear 261(11-12): 1337-1347.

[6] Angadi, S. V., W. E. Wilson, R. L. Jackson, G. T. Flowers, and B. I. Rickett. 2008. A Multi-Physics Finite Element Model of an Eletrical Connector Considering Rough Surface Contact. Proceedings of the 54<sup>th</sup> IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Orlando, FL: 168-177.

[7] Angadi, S. V., R. L. Jackson, S. Choe, G. T. Flowers, B. Lee, and L. Zhong. 2012. A Multi-Physics Finite Element Model of a 35A Automotive Connector Including Multi-Scale Rough Surface Contact. Journal of Electronic Packaging 134: 1-12.

[8] Jackson, R. L., H. Liu, and D. Leray. 2013. A Comparison of the Predictions of a Finite Element Model and Multi-Scale Model for a Rough MEMS Electrical Contact. Proceeding of the 59<sup>th</sup> IEEE Holm Conference on Electrical Contacts: 1-9.

[9] B reitmeier Messtechnik GmbH. 2002. WLI Lab Manual. Version 09. 02. Ettlingen.

[10] Jackson, R. L., H. Liu, and D. Leray. 2013. A Comparison of the Predictions of a Finite Element Model and Multi-Scale Model for a Rough MEMS Electrical Contact. Proceeding of the 59<sup>th</sup> IEEE Holm Conference on Electrical Contacts: 1-9.

表 1 實驗量測與多重尺度模型(MSRS)分析所得公端 C5191 與母端 C5191 接觸電阻值

	ECR
measurement average	2.30
MSRS	2.21

Unit : m-Ohm

表 2 實驗量測與多重尺度模型(MSRS)分析所得公端 C5191 與母端 C18400 接觸電阻值

	ECR
measurement average	2.26
MSRS	2.20

Unit : m-Ohm

表 3 熱耦量測、多重尺度模型(MSRS)分析、與傳統手法(convention)所得公端 C5191 金屬彈片與母端 C5191 金屬彈片之溫度值

	initial	tail of C5191_P	tail of C5191_R	near contact region
measurement average	24.3	44.3	42.9	74.5
MSRS	24.0	44.2	41.5	71.4
convention	24.0	32.9	34.1	43.1

Unit : °C

表 4 熱耦量測、多重尺度模型(MSRS)分析、與傳統手法(convention)所得公端 C5191 金屬彈片與母端 C18400 金屬彈片之溫度值

	initial	tail of C5191_P	tail of C18400_R	near contact region
measurement average	24.0	36.7	35.6	51.9
MSRS	24.0	36.1	34.5	49.6
convention	24.0	31.3	31.6	41.2

Unit : °C

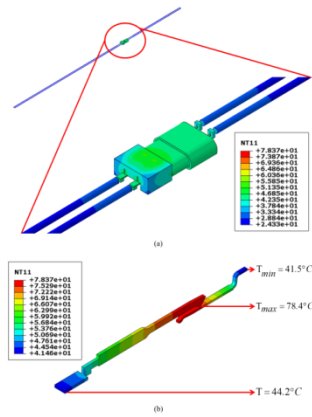


圖 1 多重尺度模型分析所得公端 C5191 金屬彈片與母端 C5191 金屬彈片(a)連接器與(b)內部金屬彈片達穩態之溫度分布圖

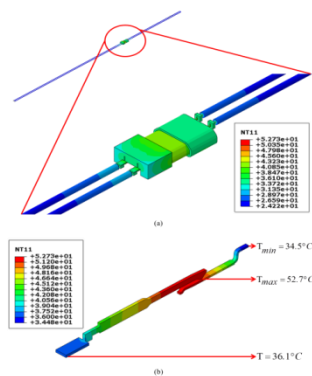


圖 2 多重尺度模型分析所得公端 C5191 金屬彈片與母端 C18400 金屬彈片(a)連接器與(b)內部金屬彈片達穩態之溫度分布圖

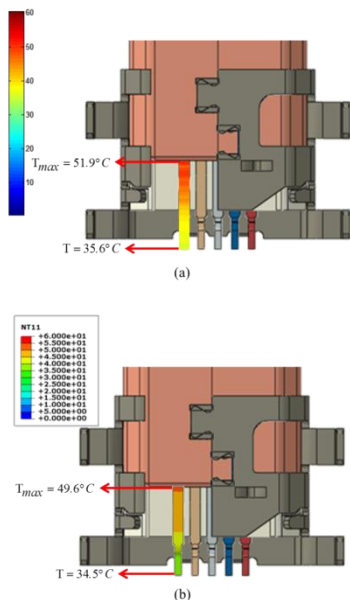


圖 3 (a)紅外線熱像儀量測與(b)多重尺度模型分析所得部分母端 C18400 金屬彈片達穩態之溫度分布圖

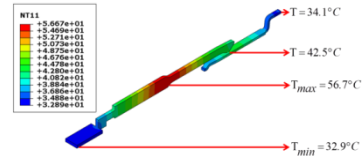


圖 4 傳統手法所得公端 C5191 金屬彈片與母端 C5191 金屬彈片達穩態之溫度分布圖

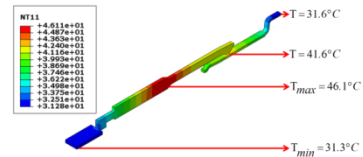


圖 5 傳統手法所得公端 C5191 金屬彈片與母端 C18400 金屬彈片達穩態之溫度分布圖

## Applications of Multi-scale Model and Multi-physics Coupling Analysis to Temperature Rise of Electronic Connectors

H.-L. Lu<sup>1</sup>, K.-C. Liao<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Bio-Industrial Mechanical Engineering, National Taiwan University

### Abstract

Temperature rise could be a crucial issue for some electronic connectors subjected to the relative large electrical current. A non-statistical multi-scale sinusoidal rough surface model is adopted to estimate the contact area between matched metallic terminals as a function of contact load. A fast Fourier transform is conducted to characterize the measured surface topology of the terminals. Multi-physics three-dimensional finite element analysis is then carried out to evaluate the temperature rise of mated micro USB connectors. Temperature distributions of the terminal based on the numerical simulations are in good agreement with those based on the measurements using a thermal couple and an infrared thermal camera as well.

**Keywords:** multi-scale model, multi-physics analysis, temperature rise, electronic connector, finite element analysis