

銅鑼模型更新及其聲音與振動特性探討

Model Updating of Copper Gong and Its Sound and Vibration Characteristic Study

王栢村¹、◎吳銘峰²

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碩士班研究生

E-mail : wangbt@mail.npust.edu.tw

摘要

精確可靠的數值模型在結構分析相當重要，本文探討銅鑼的模型更新，以能明確解析銅鑼之聲音與振動特性的關聯性。首先建立銅鑼的有限元素模型，並進行理論模態分析，以求得模態參數，包括自然頻率與對應的模態振型。同時也對銅鑼進行實驗模態分析，獲得實際結構的模態參數，基於實驗數據，更新模型對銅鑼不同區域分別設定三種材料性質，以符合實際結構特性，結果顯示更新模型分析結果與實驗模態分析所得之模態參數能夠合理對應，些微之差異主要源自銅鑼為手工打製的幾何誤差所致。銅鑼在不同位置的敲擊聲音也透過聲音頻譜分析，由結構模態振型特性可以明確解釋銅鑼聲音的主頻率與泛音頻率特性。本文藉由模型更新獲得更精準的銅鑼分析模型，可作為特殊音效銅鑼之新型幾何設計。

關鍵字：銅鑼、有限元素分析(FEA)、自然頻率、實驗模態分析(EMA)、聲音頻譜。

Abstract

An accurate and reliable numerical model is desired for structural analysis. This work presents the model updating of a copper gong in studying the sound and vibration characteristics. First, the finite element (FE) model for the copper gong is established to perform theoretical modal analysis so as to obtain modal parameters, including natural frequencies and their corresponding mode shapes. The copper gong is also carried out experimental modal analysis (EMA) to get experimental modal parameters. Base on the experimental data, the updated FE model for the copper gong is divided into three regions with different material properties to fit the real structure property. Results show the gong's modal parameters obtained from EMA and FEA agree reasonably and reveal a slight difference due to the handmade effect on the geometry variation of the gong. The sound spectrum analysis of the copper gong struck at different locations is also presented. The fundamental frequency and its overtone frequencies can be predicted and interpreted from mode shape characteristics. This work presents the model updating procedure and obtains a refined numerical model for the copper gong suitable for further design modification with respect to new geometry design of gong for producing special sound characteristics.

Keywords : copper gong, finite element analysis (FEA), natural frequency, experimental modal analysis (EMA), sound spectrum.

壹、前言

銅鑼為典型的中國傳統樂器之一，一般用於廟宇慶典活動或節慶助樂之用，在張[1] 林午銅鑼的製作與調查中，說明「鑼」為中國樂器中，極為重要的敲擊樂器，而鑼之厚薄、大小與外觀形狀等均會影響其聲音音質。王和林[2] 理論分析與實驗所得的模態參數有相當程度的吻合性，且由模態保證指標(MAC)比對結果中，實驗得知的模態振型與有限元素分析得到的模態振型吻合程度相當高，因此在振動分析方面，模型驗證是成功的。王等人[3]藉由有限元素分析軟體與實驗模態分析來探討銅鑼之振動與聲音特性，實驗量測結果與有限元素分析軟體之結果均相當吻合，因此證實有限元素分析軟體進行分析的方法是可行的。王和陳[4]針對鑼臍形式銅鑼之聲音與振動特性作關連性的探討，運用有限元素分析方法，對該銅鑼進行理論之簡諧分析，以獲得銅鑼之聲音頻率響應函數，其所的之峰值頻率與實驗結果均相當吻合。更進一步瞭解到鑼臍形銅鑼之聲音與振動模態特性的相關連性。王等人[5]以吉他弦之振動特性與聲音頻譜做一關聯性的探討，並確認吉他弦音與弦振動之彼此的關聯性。王等人[6,7]以實際吉他結構模態振型與有限元素軟體之振型互相對應，且實驗與合成實驗之頻率響應函數曲線也相當吻合。

本篇是運用實驗模態分析的方式，對銅鑼進行實驗量測與理論分析，以衝擊錘為驅動器激振銅鑼，並以加速度計為感測器，透過頻譜分析儀 SigLAB 擷取信號，經過傅立葉轉換獲得結構頻率響應函數，再利用曲線嵌合獲得該銅鑼之模態參數，包括自然頻率及所對應之模態振型，以提供有限元素分析的模態參數進行比對，確認有限元素模型的正確性，並進一步了解其模態特性與振動特性。

貳、模型驗證理念與步驟

一般模型驗證之流程圖，主要分成有限元素分析與實驗模態分析，如圖 1 所示。有限元素分析是用假設的材料參數進行模擬，進而求得自然頻率與模態振型。實驗模態分析則是由實際結構進行實驗，可以求得實際結構的模態參數，因此進行驗證時須以實驗模態分析的結果作為基準，利用實驗模態分析的結果修改有限元素分析中的材料參數，使得有限元素模型可以代表實際結構。

圖 2 為模型變更流程圖，應用有限元素分析於設計變更，需取得等效實際結構的有限元素模型，也就是模型驗證。接著定義試驗對應分析的響應標準，依其標準來判斷結構的聲音特性。進行設計變更後再次進行響應預測，若不符合標準將再次進行結構的變更，往復進行，直到結構符合所訂定的標準為止，本文之模型變更目標，在使分析模型能準確預測銅鑼之敲擊聲音特性。

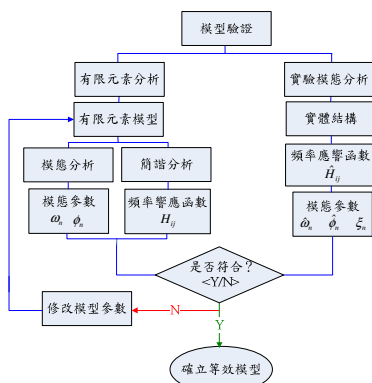


圖 1 模型驗證流程圖

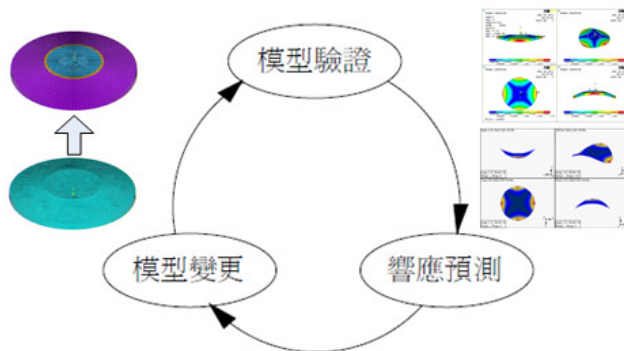


圖 2 模型變更流程圖

參、銅鑼模型更新與實驗模態分析

本節分別說明對銅鑼之有限元素模型更新與實驗模態分析。圖 3 為銅鑼的實體圖、圖 4 為銅鑼的尺寸標註示意圖，對應表 1 的標注尺寸代號。



圖 3 銅鑼實體圖

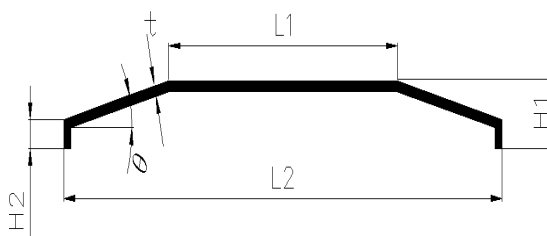


圖 4 尺寸標註示意圖

表 1 實際量測之尺寸對照表

項目	H1(m)	H2(m)	L (m)	L2(m)	t(m)	θ(角度)
尺寸	0.0375	0.0159	0.144	0.3175	0.0017	13.98°

一、銅鑼之模型更新

本文主要使用 ANSYS 軟體為求解工具，使用線性四邊形殼元素(Shell 63)建立銅鑼之有限元素模型。在材料參數設定方面，首先以單一材料參數進行分析，楊氏係數 $E = 48.9 \times 10^9 \text{Pa}$ ，

浦松比 $\nu = 0.34$ 而密度 $\rho = 6382.38\text{kg/m}^3$ 。元素分割採用 free mesh 進行，共 4168 個元素。邊界為自由邊界且無外力輸入狀態下進行模態分析。分析頻寬為 0~1000 Hz 之間取得 20 個模態。由分析結果發現與實體結構系統不吻合，是因為銅鑼在加工製作過程中產生了加工硬化，故進而以三種材料參數模擬銅鑼的三個部分，如圖 6 所示，圖中 $a=0.068\text{ m}$ 、 $b=0.075\text{ m}$ 、 $c=0.158\text{ m}$ ，分別為內圓、折環、外圓三個部分。

更新後之有限元素模型，元素一樣是使用線性四邊形殼元素(Shell 63)，如圖 7 為銅鑼模型更新後之有限元素模型，由顏色可明確的分辨出是以三種不同的材料參數組合成的有限元素模型。而材料參數設定對應表 2 之材料參數設定，元素分割採 Mapped mesh 方式，共有 7380 個元素。邊界是以自由邊界且無外力輸入狀態下進行模態分析。

表 2 銅鑼三部分之材料參數

	內圓	折環	外圓
楊氏係數(Pa)	25.2×10^9	76.8×10^9	51.0×10^9
浦松比	0.34	0.34	0.34
密度(kg/m^3)	6382.381	6382.381	6382.381

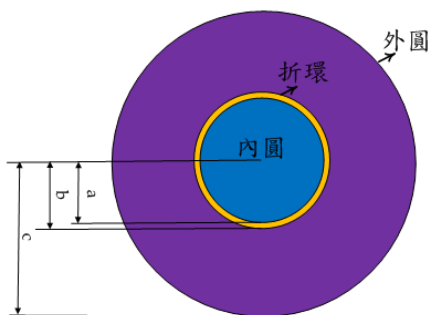


圖 6 銅鑼之三部分

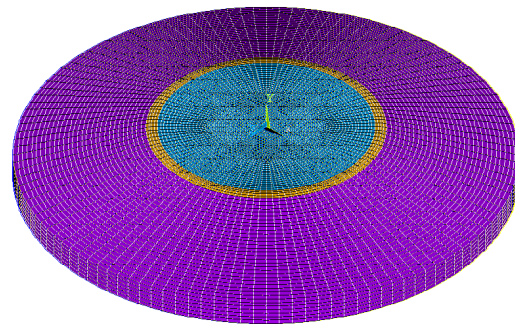


圖 7 模型更新後之有限元素模型

二、實驗模態分析

本文以實驗模態分析來獲得實際結構的模態參數，以衝擊錘為驅動器，加速度規為感測器進行實驗，透過 SigLAB 訊號分析儀求得頻率響應函數、關聯性函數。再將頻率響應函數匯入 ME scopeVES 進行曲線嵌合，最後求得實際結構之模態參數。圖 8 為實際實驗進行架構，利用彈性繩懸掛銅鑼模擬自由邊界。在實驗儀器方面，首先將衝擊錘經由導線連接於訊號分析儀 Channel 1，同樣將加速度規由導線連接於訊號分析儀，本實驗使用一單軸向加速度規連接於 Channel 2。在訊號分析儀的設定方面，使用頻寬為 1000 Hz，解析條數為 4096 條，解析頻率為 0.625 Hz。本文使用固定加速度規，移動衝擊點的方式進行實驗。使用移動衝擊錘的方式進行實驗，最後將實驗的數據彙整，以便進行模態比對。如圖 9 所示，銅鑼結構分為 121 個敲擊點，感測器位置固定於點 114，驅動器則依序移動，共獲得 121 筆頻率響應函數。



圖 8 實驗架構圖

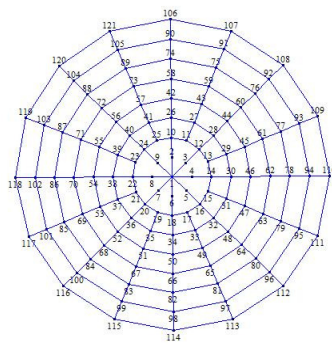


圖 9 銅鑼分割及編號情形

肆、結果與討論

一、模型更新之比較與討論

模型更新前後之分析與實驗模態分析量測得之自然頻率誤差百分比比較，如表 3。更新前，分析與實驗量測的自然頻率比較，在第 5~9 模態的頻率差都相當大，最高有 23 % 的誤差值，而在更新模型後，分析與實驗量測所得的自然頻率誤差百分比，除第 6 模態有 9 % 的差異，其他模態的頻率誤差都有在 5 % 以內。

在更新後之頻率誤差百分比，最高有 9 % 的誤差，但因為本文討論之銅鑼為手工打造製成，在銅鑼表面具有許多大小、凹凸不一的打製痕跡，除第 6 模態的頻率誤差較大以外，其餘模態頻率誤差都在 5 % 以內，所以更新後的有限元素模型算合理。

表 3 更新前後 FEA 與 EMA 之自然頻率誤差百分比比較

模態	EMA(Hz)	更新前 FEA(Hz)	頻率誤差(%)	更新後 FEA(Hz)	頻率誤差(%)	模態物理意義(r, θ)
1	93.97	94.95	-1.04	95.871	2.02	軸對稱-環(1,2)
2		94.96	-1.05	95.871	2.02	
3	305.38	302.3	1.01	306.44	0.35	軸對稱-環(1,3)
4	313.2	302.31	3.48	306.44	-2.16	
5	320.25	371.54	-16.02	306.89	-4.17	面(1,0)
6	509.91	628.02	-23.16	556.5	9.14	軸對稱-頂(1,1)
7	538.84	628.03	-16.55	556.5	3.28	
8	626.82	680.45	-8.56	631.94	0.82	軸對稱-環(1,4)
9	635	680.54	-7.17	631.91	-0.49	

二、銅鑼聲音與振動特性探討

透過頻譜分析儀量測，當敲擊銅鑼正中央時，如圖 10(a)所示，圖中可以看到被激發出的自然頻率與對應的模態振型，可以明顯看出銅鑼在 320.25 Hz 的振幅值最大， $(r, \theta)=(1,0)$ 是主要的發聲模態。圖 10(b)為當打擊位置偏離中央點時，可以發現除了主要發聲模態 320.25 Hz 以外，有其他振幅較大的泛音出現。同時也利用模型驗證後之銅鑼模型，模擬在敲擊中央點與偏離中央點的頻率響應函數圖，如圖 11(a)為敲擊中央點時的響應，可以發現只有主要的發聲模態被激發出來，相較於圖 11(b)，當偏離中央點後，會有其他泛音被激發出來。

實際量測與理論分析被激發出來的自然頻率有些許誤差，可是因為在理論分析的銅鑼模型，並非完全與實際銅鑼完全一致，但在特性上，主要的模態振型還是有被激發出來。

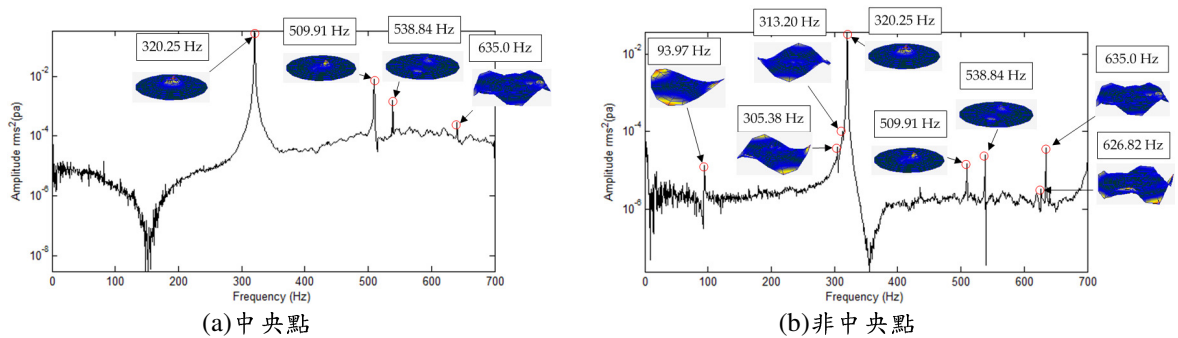


圖 10 實際量測之聲音頻譜與對應模態振型示意圖

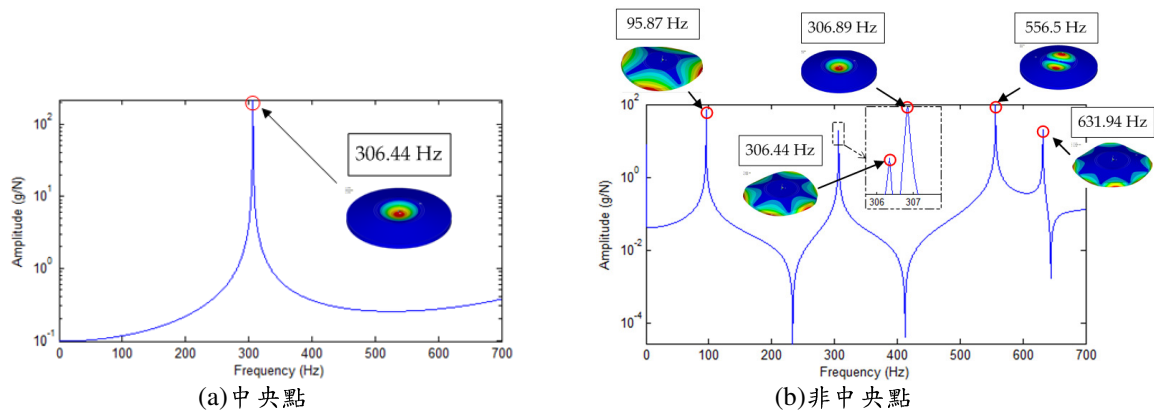


圖 11 理論分析之聲音頻譜與對應模態振型示意圖

伍、 結論

本文利用有限元素分析以及實驗模態分析兩種方法，針對銅鑼模態更新之驗證，也確認有、無加工硬化效應之影響，探討理論分析與實驗結果之吻合性，並且對銅鑼進行聲音與振動特性探討，綜合結論如下：

- (一)、由模型更新後之分析結果中，在自然頻率的誤差上比更新前準確，但因為手工製作的銅鑼，所以頻率的誤差上沒有辦法對到很好，頻率誤差百分比還是有 9% 的誤差。同時也確定銅鑼在加工時，會有加工硬化效應的影響，供未來分析銅鑼型樂器時具有參考之依據。
- (二)、從振動特性探討中，得知激發出的自然頻率會因打擊位置不同而有所變化，而主要的發聲模態在 320.25 Hz 為 $(r, \theta)=(1,0)$ 模態；當打擊位置不在中央點時，銅鑼的其他自然頻率就會被激發出來，而這可照演奏者的需求，打擊不同位置以達到演奏時需要的不同效果。
- (三)、藉由模型更新獲得更精準的銅鑼分析模型，並針對打擊位置不同，而推論出銅鑼的主要發聲模態與及其它泛音，並且對銅鑼之有限元素模型進行響應預測，結果也對應的還不錯，可供未來作為特殊音效銅鑼之新型幾何設計。

陸、 參考文獻

1. 張藝生，「林午銅鑼的製作與調查」，佛光大學人文社會學院藝術研究所。(2004)
2. 王栢村，林怡馨，「鐵琴片振動特性與聲音關聯性之探討」，中華民國振動與噪音工程學會第二屆學術研討會論文集，論文編號：C5。(2007)
3. 王栢村，李雨軒，張志偉，「銅鑼振動與聲音特性之探討」，中華民國振動與噪音工程學會第十屆學術研討會論文集，台北，第 245-252 頁。(2002)
4. 王栢村，陳新正，「鑼臍形式銅鑼之聲音及振動特性的探討」，2008 中華民國音響學會第二十一屆學術研討會，台北，論文編號：A1-4。(2008)
5. 王栢村，蘇集銘，「吉他弦之振動與聲音特性探討」，中華民國音響學會第十九屆學術研討會論文集，台南，論文編號：A7。(2006)
6. 王栢村，黃國棟，「吉他之振動特性與模態分析」，中華民國音響學會第十七屆學術研討會論文集，高雄，第 197-204 頁。(2004)
7. 王栢村，胡惠文，蘇敬翔，「吉他共鳴箱之振動特性分析」，AN SYS 2003 台灣區用戶大會暨論文發表會，雲林，第 71-84 頁。(2003)