

## 平滑表面銅鐘之振動模態與發聲機制探討

王栢村<sup>1</sup> 蔡俊郎<sup>2</sup> 葉明遠<sup>2</sup> 李致緯<sup>2</sup> 張博鈞<sup>2</sup> 吳盈輝<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 國立屏東科技大學 機械工程系 教授

<sup>2</sup> 國立屏東科技大學 機械工程系 大學生

<sup>3</sup> 國立內埔高級農工職業學校 機械科

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

### 摘要

鐘聲宏亮而悠揚，常被用為寺院的法器或報時之用途。本文主要探討平滑表面銅鐘振動模態與發聲機制。利用 ANSYS 有限元素分析(FEA)軟體建構平滑表面銅鐘之有限元素模型，進行理論模態分析，求得銅鐘之理論模態參數，包含自然頻率與模態振型，接著對平滑表面銅鐘進行實驗模態分析(EMA)，實驗中以衝擊錘為驅動器，加速規為感測器，量測訊號經頻譜分析儀求得量測點之頻率響應函數，透過 ME'scopeVES 曲線嵌合軟體進行曲線嵌合，可求得銅鐘之實際模態參數，包括自然頻率、模態振型與模態阻尼比，最後將理論與實驗之模態參數進行比較驗證，可明確了解銅鐘之振動模態特性。此外，亦利用麥克風與頻譜分析儀，量測平滑表面銅鐘經敲擊後之聲音頻譜，由對應實際結構之模態振型，可找出銅鐘發聲頻率與振動模態之關聯性。並對銅鐘之不同敲擊位置與不同敲擊錘進行聲音量測，得到銅鐘之聲音頻譜，結果顯示，銅鐘敲擊位置與敲擊錘的軟硬度，分別與聲音頻譜之發聲模態數量與聲音之衰減率有很大的關聯性。本文結合有限元素分析與實驗模態分析手法，探討平滑表面銅鐘之振動模態與發聲機制，銅鐘之有限元素分析模型若經適當校正後，將可應用於銅鐘之設計變更。

**關鍵字：**平滑表面銅鐘、有限元素分析、實驗模態分析、振動模態、發聲機制

### 1. 前言

鐘，為中空之打擊樂器，其擁有久遠歷史，由古至今種類非常豐富，以佛教為主的寺院，常將其作為法器，鐘發聲宏亮而悠揚，在過去鐘常被用來報時，隨著人們生活水準提升，也將鐘帶入生活當中。要使鐘成為音樂性樂器，必須對其進行音頻調整，並且經過聲音特性評估，才能產生悅耳與和諧的鐘聲。

本文以了解平滑表面銅鐘之振動模態分析為出發點，在分析上常採用有限元素分析與實驗模態分析而以 EMA 實際探討。王等人[1]針對鐵琴片進行有限元素分析與實驗模態分析，所得的模態參數有相當之吻合性，且於模態保證指標(modal assurance criterion, MAC)比對結果中，實驗分析所得之模態振型吻合程度相當高，求出比擬實際結構之有限元素模型。王等人[2]透過模型驗證，獲得銅鐘實際結構之模態參數後，對銅鐘不同區域進行三種材料參數變更，結果顯示，更新模型後有限元素分析與實驗模態分析所得之模態參數吻合。王等人

[3]經由理論與實驗量測探討吉他撥弦後之振動特性，將有限元素分析與實驗模態分析之模態參數做比對驗證，確認理論與實際之吻合性，並探討吉他有無音箱之聲音特性差異。王與廖[4]先建構木琴條的有限元素模型，進行有限元素分析得到理論參數後再進行實驗模態分析量測，經由曲線嵌合得到實際結構的模態參數，將兩者進行參數比對，確認是否吻合，如不吻合可修正元素模型直到吻合為止。Ansari [5]對鐘進行實驗模態分析與有限元素分析，利用實驗模態分析所量測出的自然頻率比例為基準，比對有限元素分析所得知的自然頻率比例，求出有限元素分析之基音頻率。Spiess *et al.* [6]探討鐘之有限元素分析中，有無吊環其在分析上的差異，比較結果發現，有無吊環對分析之自然頻率差異不大。

許多樂器的發聲機制都與結構振動的效應相關。Boullosa [7]進行多把古典吉他之實驗模態分析，量測其聲音頻譜圖，並且比較音板材質不同之聲音特性。王等人[8]透過實驗模態分析取得不同打擊樂器之聲音功率頻譜密度函數圖，對其音高、音色及持續度進行探討。徐等人[9]透過濾波器取得二胡之純淨度、厚實度與聲音均衡度，並與問卷調查做比對以建立正確之樂音指標。Ezcurra [10]透過有限元素分析，對不同材料參數設立標準值後，對不同模態振型的吉他音板之材料參數進行改變，觀察其與固定頻率之關係。王與蔡[11]探討平鑼之振動與聲音特性，結合實驗模態分析和聲音量測進行探討，將有助於瞭解平鑼的發聲機制，也可以用於其他樂器之振動與聲音特性探討。王等人[12]利用有限元素分析與實驗模態分析，將兩者取得數據進行比對討論是否吻合，並且用麥克風為感測器，對古鈸進行敲擊之聲音量測分析，針對古鈸之聲音音高、音色、持續度三大部分各別進行探討。

本篇針對銅鐘進行振動模態與發聲機制探討，運用有限元素分析和實驗模態分析，求得實際結構之有限元素模型以及模態參數，包含自然頻率、模態振型，接著進行銅鐘聲音量測分析，對應聲音頻譜與結構振動模態，並探討銅鐘敲擊不同點、不同敲擊錘，其聲音差異性。

### 2. 有限元素分析

本文進行平滑表面銅鐘之有限元素分析，內容包含模態分析 (Modal Analysis) 與簡諧分析 (Harmonic Analysis)，其中模態分析求得銅鐘之理論模態參數、簡諧分析求得理論之頻率響應函數，圖 1 為銅鐘實體結構與敲擊點示意圖，銅鐘外型尺寸為高 121mm、底部直徑為 126mm，本文利用 ANSYS 分析軟體進行有限元素

分析，圖 2 為銅鐘之有限元素模型，模型省略銅鐘吊環部份，元素形式採用線性立方體元素(SOLID 187)建構有限元素模型，元素分割共有 37201 個元素與 66094 個節點數；材料參數假設蒲松比  $\nu=0.34$ ，密度  $\rho=7326(\text{kg}/\text{m}^3)$ ，楊氏係數  $E=39.1727(\text{GPa})$ ；位移限制因模擬自由邊界，故不需設定。負荷條件方面於模態分析時不需設定，而在簡諧分析中，需設定單位力作用於銅鐘鐘身底部。最後進行簡諧分析，求得銅鐘分析之頻率響應函數，並與實驗模態分析所得之頻率響應函數比較，觀察理論與實驗的吻合性。

### 3. 實驗量測分析

本文進行平滑表面銅鐘實驗量測分析，實驗量測包含實驗模態分析與聲音量測分析。

#### 3.1 實驗模態分析

實驗模態分析探討銅鐘之振動模態，求得自然頻率、模態振型與模態阻尼比，圖 3 為銅鐘實驗模態分析量測點示意圖，銅鐘佈點為每單位高度之圓周 12 點，6 個單位高度，總共 72 個量測點，加速規固定在第 1 點位置量測訊號，每個敲擊點對應一筆頻率響應函數，可獲得 72 筆頻率響應函數與關聯性函數；實驗器材使用振動噪音量測軟體(SVM)與訊號擷取卡(NI-9234)進行實驗模態分析，圖 4 為銅鐘實驗模態分析儀器架設圖，表 1 為實驗儀器型號表，進行實驗模態分析使用釣魚線將銅鐘懸吊，模擬自由邊界，以衝擊錘為驅動器，加速規為感測器，利用移動衝擊錘，固定加速規進行實驗量測。振動噪音量測軟體量測設定如下，頻寬設定為 10000Hz，頻率解析度為 0.78125Hz，將衝擊錘與加速規連接於訊號擷取卡，擷取訊號輸入於振動噪音量測軟體進行快速傅立葉轉換(FFT)，求得頻率響應函數與關聯性函數，最後利用曲線嵌合軟體 ME'scopeVES 進行曲線嵌合(Curve Fitting)，求得銅鐘實驗模態參數，包含自然頻率、模態振型與模態阻尼比。

#### 3.2 聲音量測分析

聲音量測分析探討銅鐘之不同敲擊位置與敲擊錘敲擊後其聲音特性，量測求得時間頻譜圖、聲音頻譜圖與聲音衰減率，圖 1 為敲擊位置示意圖(圖中標示黃點為敲擊處)、圖 5 為銅鐘聲音量測分析使用之敲擊錘實體圖，紅錘硬度最小、鋼錘硬度最大，而黑錘介於兩者之間，圖 4 為聲音量測儀器架設圖，聲音量測分析使用釣魚線將銅鐘懸吊，模擬自由邊界，以麥克風為感測器，架設於銅鐘前 20cm 處，將麥克風接於訊號擷取卡，擷取信號後傳入聲音量測軟體(SVM)進行聲音量測分析，分別進行快速傅立葉轉換與短時傅立葉轉換(STFT)，求得聲音頻譜圖與時間頻譜圖，並求得聲音衰減率。

### 4. 結果與討論

本文對平滑表面銅鐘進行有限元素分析與實驗模態分析，將理論與實驗之結果進行比較驗證，其中包含自然頻率、模態振型、頻率響應函數與關聯性函數，並

探討平滑表面銅鐘振動模態特性。亦運用聲音量測軟體量測銅鐘經敲擊後之聲音頻譜，其中包含時間頻譜圖、聲音衰減率圖與聲音頻譜圖，分別對銅鐘之不同敲擊錘與不同敲擊點進行發聲機制探討。

#### 4.1 平滑表面銅鐘之振動模態分析

表 2 為銅鐘之有限元素分析(FEA)與實驗模態分析(EMA)之自然頻率與模態振型對照總表，因篇幅關係本文只列出自然頻率 5000Hz 以前之比對結果，其中模態數編號 F-01 及 E-01 分別代表分析與實驗之第一個模態，因 F-01~F-06 為剛體模態，故不列入比較。表 3 為銅鐘模態振型物理意義對照表，模態振型物理意義分別以表 3(a)有限元素分析之鐘身局部模態  $(z, \theta)$ 、表 3(b)實驗模態分析之鐘身局部模態  $(z, \theta)$ 、表 3(c)有限元素分析之頂部整體模態  $(\theta, r)$ 、表 3(d)有限元素分析之整體模態頂部  $(r, \theta)$  與鐘身  $(\theta, z)$  表示，其中  $\theta$  為周向節線數、 $z$  為軸向節線數、 $r$  為徑向節線數，以下為銅鐘之振動模態特性及自然頻率綜合結果討論：

1. 有限元素分析與實驗模態分析之模態振型比對結果，除了 F-15/E08 之自然頻率誤差為 14.02% 以外，其餘皆在 5.42% 以內，推測造成此原因為銅鐘實際結構之鐘身曲率與有限元素模型略有差異。
2. 銅鐘本身為對稱結構，故在有限元素分析中，模態振型會產生對稱模態，其特性為自然頻率兩兩相近，且物理意義相同，僅有 Z 軸 45 度或 90 度之相位差；在實驗模態分析中，因鐘身非真圓，故實驗模態分析之對稱模態其自然頻率兩兩稍有差異，但趨勢仍與有限元素分析相同。
3. 銅鐘之有限元素分析中，在自然頻率 4069.1Hz 後，產生頂部整體模態，而實驗模態分析中，因本文佈點規劃僅佈點鐘身部分，以致於頂部整體模態無法經由本次實驗模態分析求得，但整體之理論與實驗比對仍可明確了解銅鐘之振動模態特性。

圖 6 為銅鐘之頻率響應函數與關聯性函數圖，圖 6(a)同點、圖 6(b)不同點，同點為  $H_{i,j}, (i, j)=(1,1)$ ，不同點為  $H_{i,j}, (i, j)=(1,67)$ ，其中  $i$  為加速規位置， $j$  為衝擊錘敲擊位置，圖中黑色實線、紅色虛線與藍色虛線，分別為實驗模態分析、實驗模態分析之合成及有限元素分析之頻率響應函數，由圖可觀察出實驗、合成與分析之頻率響應函數曲線在自然頻率 563.85~2000Hz 有良好對應性，而 2000Hz 以後頻率峰值有前後偏移現象，其原因推測為有限元素模型與實際結構幾何有差異所造成的影響；關聯性函數中，可以觀察出數值除了反共振點以外皆約為 1，表示實驗品質良好。圖 7 為銅鐘進行簡諧分析所得頻率響應函數  $(H_{1,1})$  比對分析與實驗之模態振型圖，由圖可知，分析與實驗之模態振型兩兩對應，比對結果良好。

#### 4.2 振動模態與發聲機制探討

在發聲機制方面，本文運用聲音量測軟體，針對不同敲擊位置與敲擊錘進行發聲機制探討，圖 8 為紅色敲擊錘敲擊銅鐘不同位置之聲音時頻圖，由圖可知，第二

主要發聲頻率 1533Hz，中點持續時間最長；圖 9 為紅色、黑色敲擊錘敲擊銅鐘中點之聲音時間域圖，由結果可觀察利用紅、黑錘敲擊中點之振幅有忽大忽小具下降趨勢之現象，且在聽覺上能感受到音量有週期性強弱變化，其為兩個正弦簡諧波頻率相近所產生之現象，稱為重擊(beat)效應，表示式如下：

$$f_b = \frac{f_2 - f_1}{2} \quad (1)$$

其中， $f_b$  為重擊現象之重擊頻率， $f_1$ 、 $f_2$  為兩相近之聲音頻率；圖 9(a) 為紅錘敲擊中點之聲音時間域圖，由時間域響應表示式如下：

$$T_b = t_2 - t_1 \quad (2)$$

$$f_b \approx \frac{1}{T_b} \quad (3)$$

其中， $t_1$ 、 $t_2$  分別為一個正弦波之起始與終止時間， $T_b$  為重擊現象之重擊週期，經由圖 9(a) 可得  $t_1$ 、 $t_2$ ，由式(2) 可得  $T_b=0.334$  (sec)；表 4 為銅鐘聲音量測之不同敲擊位置自然頻率與聲音壓力總表，由表可知  $f_1$ 、 $f_2$  分別為敲擊銅鐘中點的第 1、2 個聲音頻率，由式(1) 可得  $f_b=2.9$ Hz，將上述結果代入式(3) 可滿足此式，可知第一發聲頻率與第二發聲頻率為造成重擊效應之發聲頻率；圖 10 為紅錘敲擊銅鐘不同位置之聲音頻譜圖，將其分成三部份，由左至右分別為高響應模態區、次響應模態區與低響應模態區，以下分別使用 A、B、C 區表示，與表 4 比對可知，在 A 部分，上與下敲擊點並無激發出對稱模態，在 B 部分則可看出敲擊中點所激發出的發聲模態最多，峰值分貝數最大聲為響應最好之敲擊點，而在下敲擊點的部分，S-05(2617Hz) 激發之峰值分貝量相對較小，在 C 部分中，峰值分貝數普遍偏小；由表 4 可知，聲音量測與 EMA 之自然頻率有些許誤差，其原因為加速規與麥克風兩種感測器不同所造成的結果。

圖 11 為不同敲擊錘敲擊銅鐘中點之時頻圖，由圖可知紅錘較不易激發高頻部分；圖 12 為不同敲擊錘敲擊銅鐘中點之聲音頻譜圖，表 5 為不同敲擊錘敲擊銅鐘中點之自然頻率與聲音壓力表，由圖表比對可知，使用鋼錘敲擊時較不能激發出對稱模態，在 A 部分，紅錘最能激發主要發聲頻率，在 C 部分，鋼錘最能激發出高頻，整體來看，鋼錘之聲音頻譜峰值最明顯，推斷其原因為鋼錘所激發出的能量最高所造成的效果。

聲音衰減率為探討響應時間長短的指標之一，圖 13 為紅錘敲擊銅鐘中點之衰減率示意圖，表 6 為不同敲擊位置與不同敲擊錘敲擊銅鐘之衰減率與時間常數對照表，時間常數為衰減率之倒數，衰減率越大聲音衰減越快，由表可知，紅錘與黑錘敲擊上點衰減率最小，下點最大，但鋼錘則是中點最大，下點最小，推測其為敲擊錘之材質不同所致，若以正常敲擊位置(中點)觀察，敲擊錘的軟硬度與衰減率成正比。

圖 14 為紅錘敲擊銅鐘中點之聲音頻譜圖與實驗模態分析模態振型對應圖，由圖可知，聲音頻譜與模態振型在自然頻率 4069.1Hz 以前可完全對應，但在 4069.1Hz 後，開始出現整體模態(Global mode)，本文因實驗未佈量測點於頂部，以致於整體模態之峰值無法對應其模態振型，但整體對應仍可明確了解銅鐘之聲音頻

譜與振動模態特性。

## 5. 結論

本文目的為探討平滑表面銅鐘之振動模態與發聲機制，透過建立有限元素模型並進行分析，取得理論模態參數，再與實驗模態分析所獲得之模態參數進行比較，以探討銅鐘之振動模態特性，同時也透過聲音量測軟體量測銅鐘在不同敲擊位置與敲擊錘之聲音，探討其發聲機制，可得以下結論：

1. 自然頻率在 F-15/E08 誤差為 14.02% 以外，其餘皆在 5.42% 以內，推測為有限元素模型與實際銅鐘幾何差異所致。
2. 經由紅、黑錘敲擊中點之時間域圖可看出振幅忽大忽小具下降趨勢，在聽覺上亦能感受到聲音呈週期性強弱，此為重擊現象。
3. 敲擊中點所能激發之發聲模態較多，藉此推斷中點為較佳之敲擊位置。
4. 鋼錘敲擊時較不能激發出對稱模態且衰減率較高、黑錘對主要發聲頻率貢獻度較小，而紅錘則最能激發出主要發聲頻率且衰減率較低，故推斷紅錘為較佳之敲擊錘。

## 6. 致謝

本文感謝三希典藏有限公司許萬全總經理提供銅鐘，以及科技部專題研究計畫的部分經費補助，計畫編號：MOST 105-2622-E-020-001-CC3。

## 7. 參考文獻

- [1] 王栢村，林怡馨，「鐵琴片振動特性與聲音關聯性之探討」，2007 中華民國音響學會年會暨第二十屆論文發表會，臺北，論文編號：C5，2007。
- [2] 王栢村，吳銘峰，「銅鑼模型更新及聲音特性探討」，中華民國音響學會第二十四屆學術研討會，臺北，論文編號：C-11，2011。
- [3] 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，臺灣，台南，論文編號：A7，2006。
- [4] 王栢村，廖偉廷，「木琴條之實驗模態分析與模型驗證」，第十七屆中華民國振動與噪音工程學術研討會，臺北，第 146-152 頁，2009。
- [5] J. Ansari, "Finite Element Vibration Analysis and Modal Testing of Bells," *Proceedings of the 2006 IJME-INTERTECH Conference*, Union, NJ, USA, 2006.
- [6] H. Spiess, B. Lau, P. Wriggers, A. Schneider, R. Bader, M. Wiggenhagen, "Analysis of Bell Vibration," Available: <http://gid.cimne.upc.es/2004/papers/p199.pdf> (accessed on 2016/04/30)
- [7] R. R. Boullosa, "Vibration Measurement in the Classical Guitar," *Applied Acoustics*, Vol. 63, pp. 311-322, 2002
- [8] 王栢村，吳祥瑞，徐秀娟，高正賢，「不同打擊樂器聲音特性探討」，中華民國音響學會第二十四屆學術研討會論文集，臺灣，臺北，論文編號：C10，2011。



- [9] 徐茂濱, 田英志, 「二胡樂音之聲音品質分析」, 中華民國音響學會第十七屆學術研討會論文集, 臺灣, 高雄縣, 2004。
- [10] A. Ezcurra “Influence of the Material Constants on the Low Frequency Modes of a Free Guitar Plate,” *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 194, pp.640-644, 1996.
- [11] 王栢村, 蔡有倫, 「平鑼聲音特性與振動分析之探討」, 中華民國力學學會第三十六屆全國力學會議, 臺灣, 桃園, 論文編號:F-002, 2012。
- [12] 王栢村, 吳祥瑞, 徐秀娟, 高正賢, 「古鈸打擊聲音特性之探討」, 中華民國振動與噪音工程學會第19屆學術研討會, 彰化, 論文編號:B-09, 2011。



圖 5、敲擊鈸之實體圖



圖 1、銅鐘實體結構與敲擊點示意圖

圖 2、銅鐘之有限元素模型

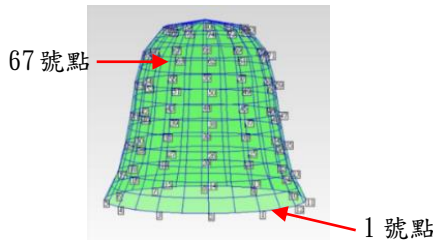
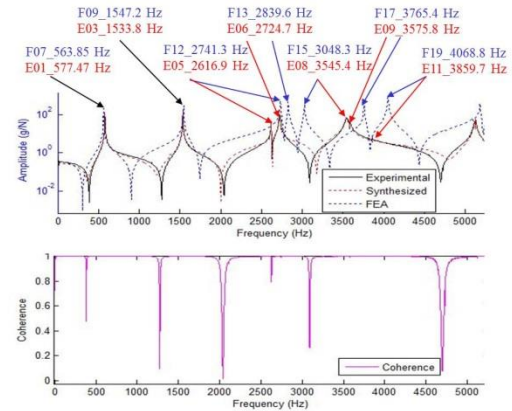
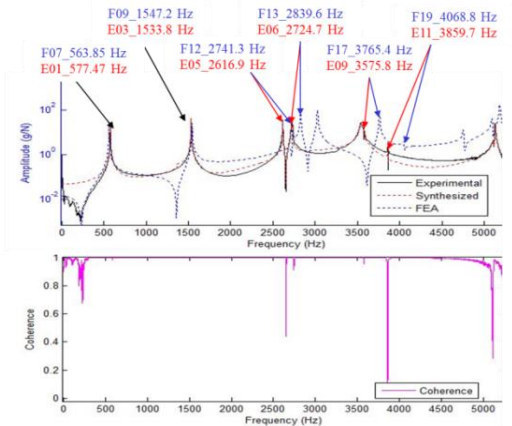


圖 3、銅鐘實驗模態分析量測點示意圖



(a)同點( $H_{1,1}$ )



(b)不同點( $H_{1,67}$ )

圖 6、銅鐘之頻率響應函數與關聯性函數

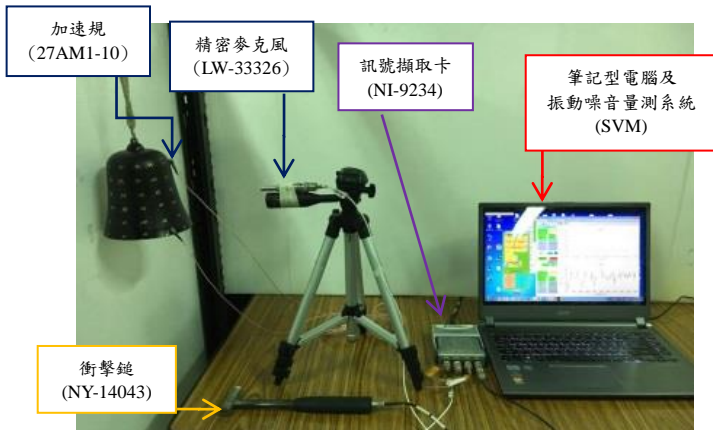


圖 4、銅鐘實驗模態分析與聲音量測分析儀器架設圖

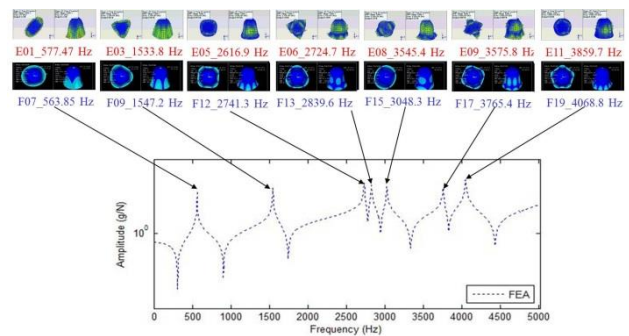


圖 7、銅鐘頻率響應函數比對有限元素分析與實驗模態分析之模態振型圖

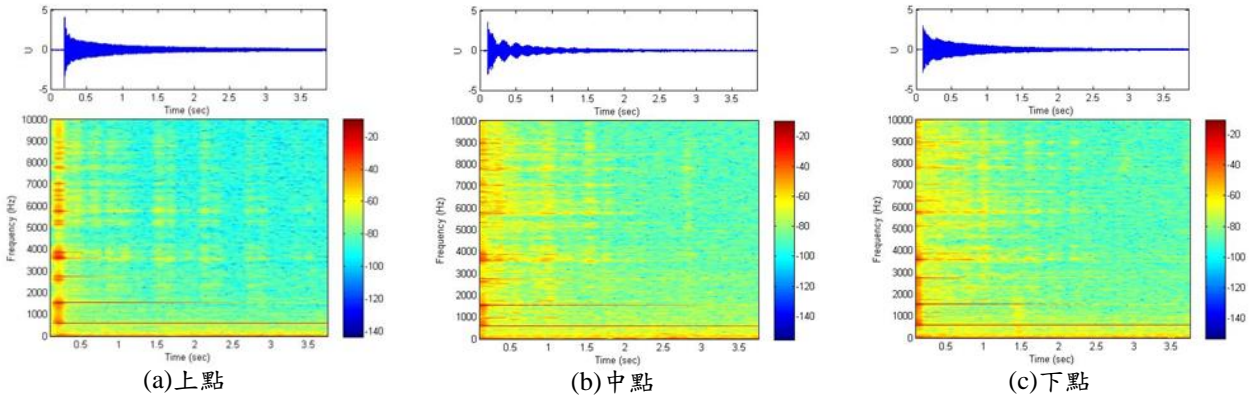


圖 8、紅色敲擊鉞敲擊銅鐘上、中、下點之聲音時頻圖

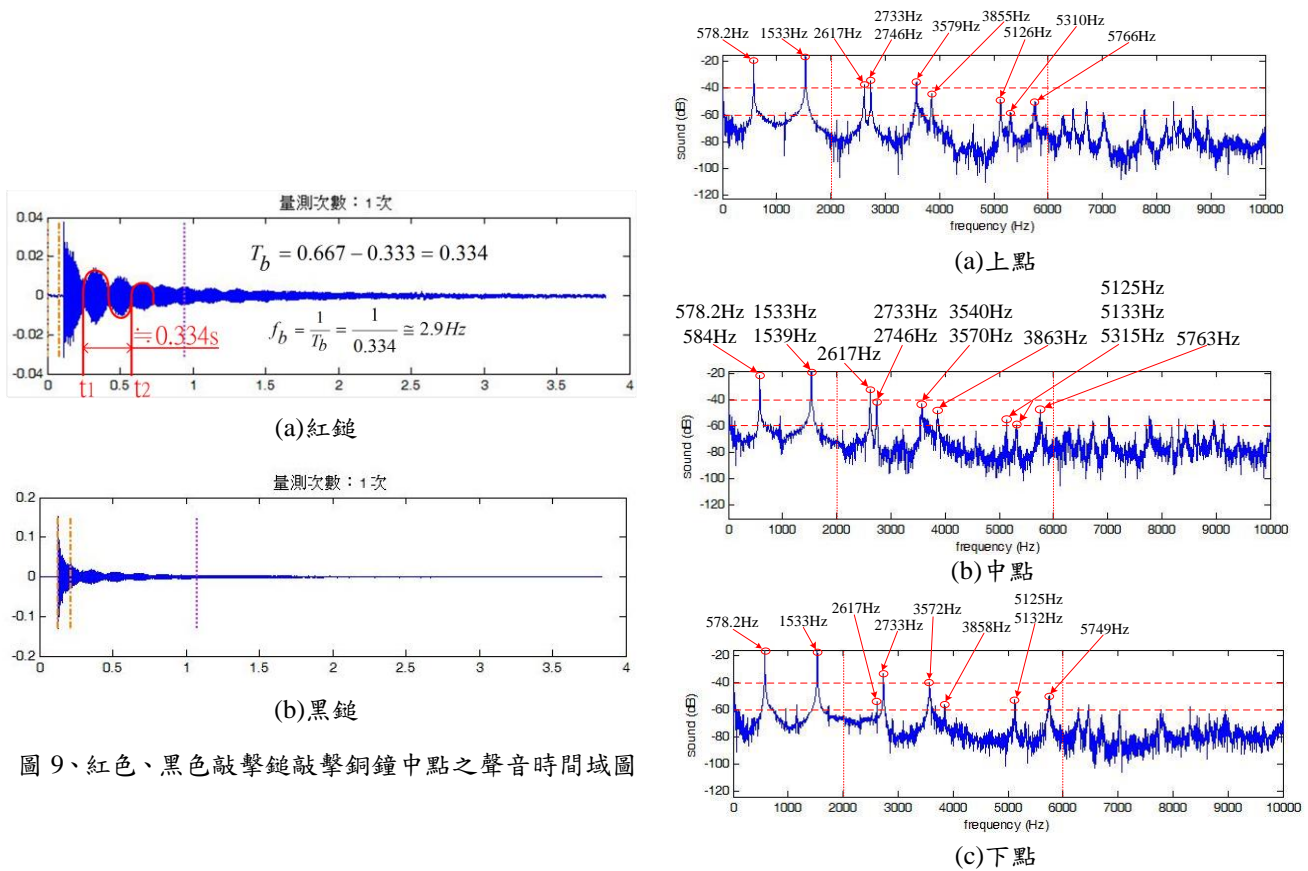


圖 9、紅色、黑色敲擊鉞敲擊銅鐘中點之聲音時間域圖

圖 10、紅鉞敲擊銅鐘上、中、下點之聲音頻譜圖

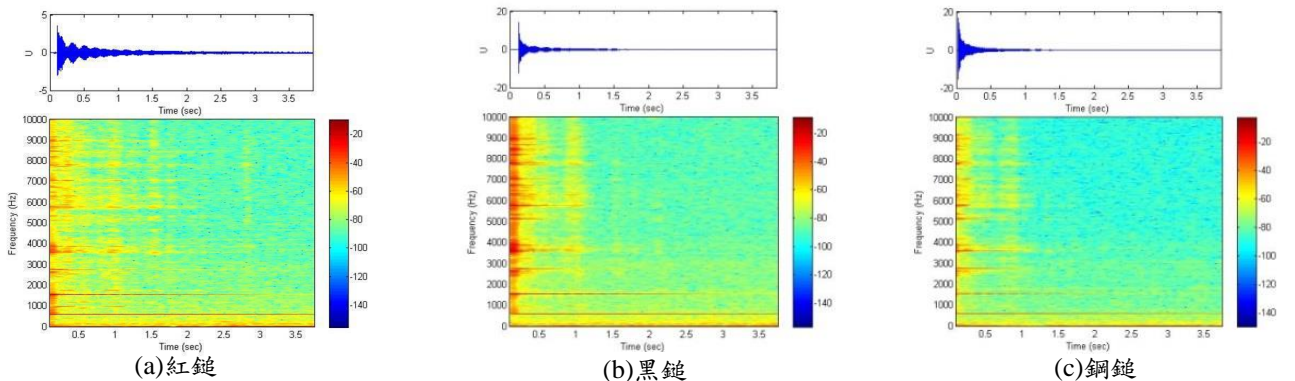


圖 11、不同敲擊鉞敲擊銅鐘中點之聲音時頻圖

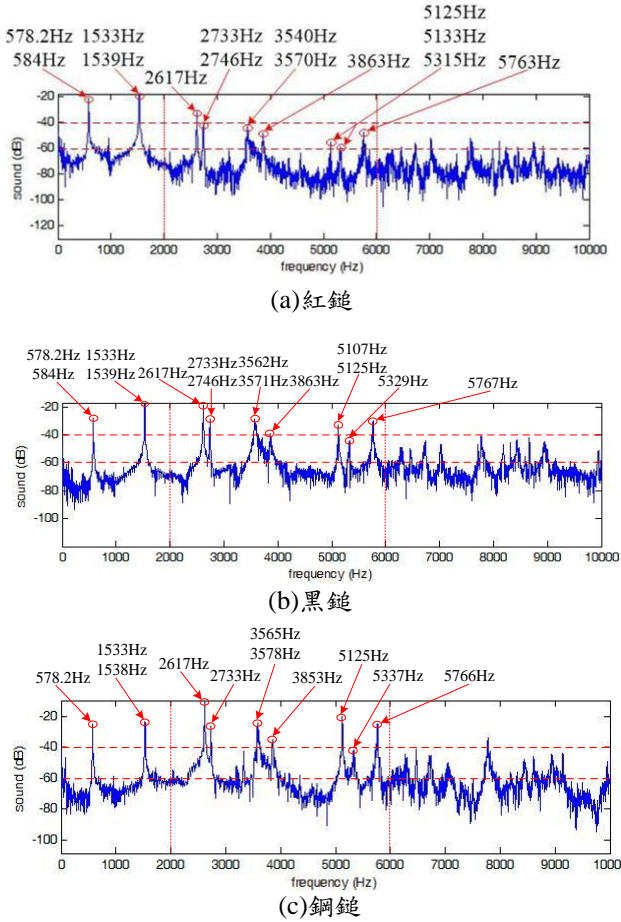


圖 12、不同敲擊鉦敲擊銅鐘中點之聲音頻譜圖

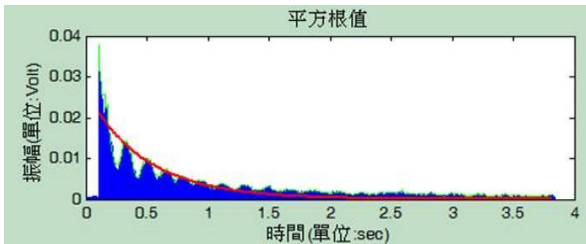


圖 13、紅鉦敲擊銅鐘中點之衰減率示意圖

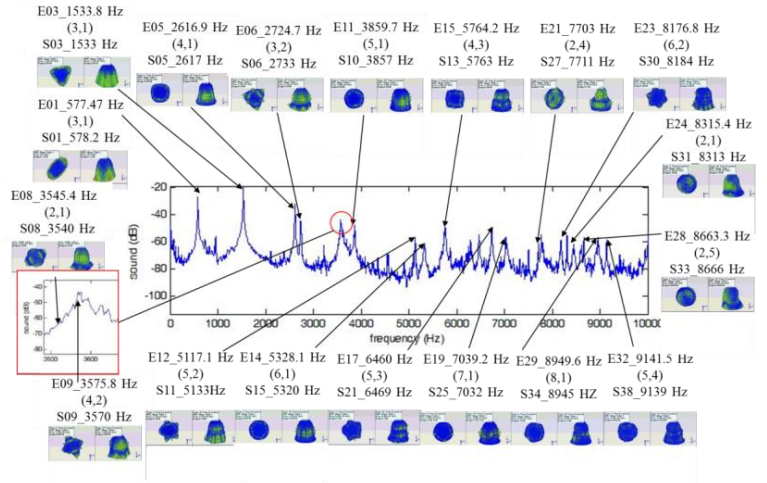


圖 14、銅鐘之聲音頻譜圖與實驗模態分析模態振型對應圖

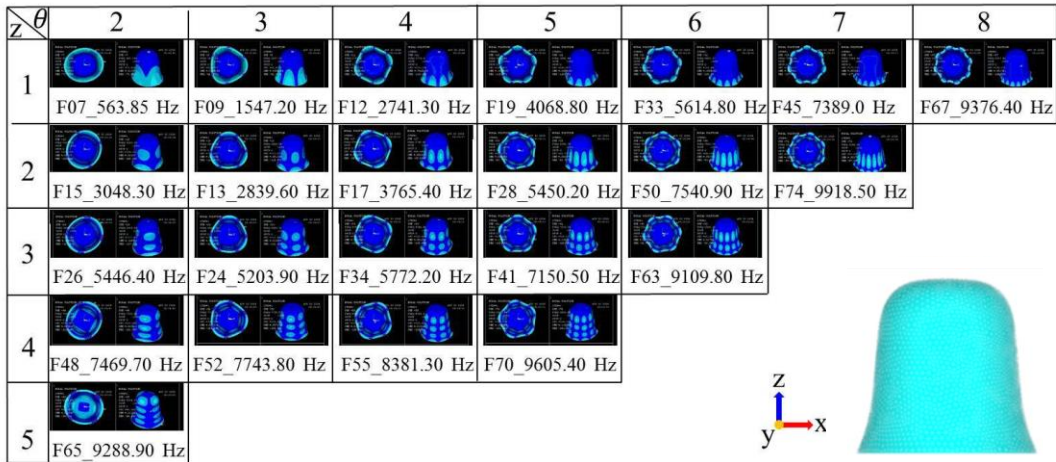
表 1、實驗儀器型號表

使用儀器	型號
衝擊鉦	NY-14043
加速規	27AM1-10
精密麥克風	LW-33326
訊號擷取卡	NI-9234

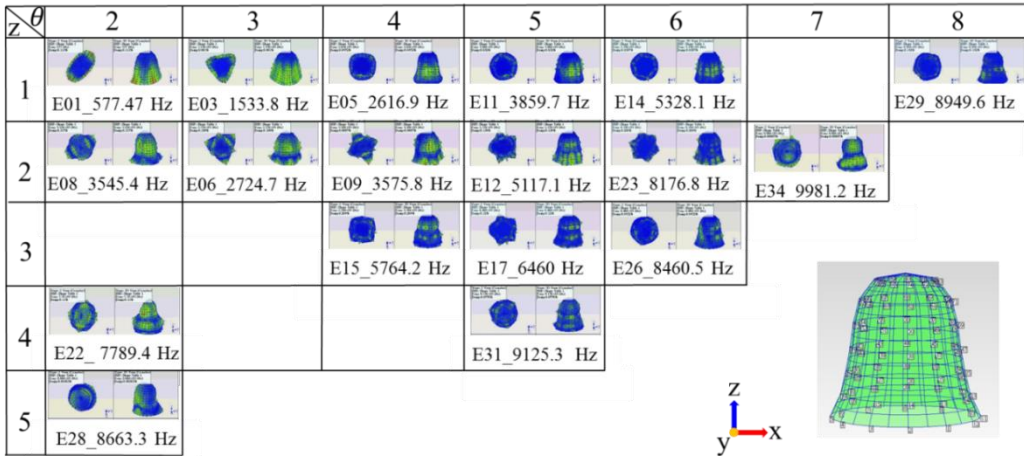
表 2、銅鐘之自然頻率與模態振型對照總表

模態數	FEA		EMA		誤差(%)	模態阻尼比 (%)	物理意義 (z, θ)
	自然頻率(Hz)	模態數	自然頻率(Hz)	模態數			
F-07	563.85	E-01	577.47	-	-2.36	0.113	(1,2)
F-08	563.85	E-02	582.63	-	-3.22	0.107	(1,2)
F-09	1547.2	E-03	1533.8	-	0.87	0.061	(1,3)
F-10	1547.2	E-04	1539.0	-	0.53	0.0406	(1,3)
F-11	2741.2	-	-	-	-	-	(1,4)
F-12	2741.3	E-05	2616.9	-	4.75	0.0472	(1,4)
F-13	2839.6	E-06	2724.7	-	4.22	0.199	(2,3)
F-14	2839.7	E-07	2741.5	-	3.58	0.0601	(2,3)
F-15	3048.3	E-08	3545.4	-	-14.02	0.317	(2,2)
F-16	3048.3	-	-	-	-	-	(2,2)
F-17	3765.4	E-09	3575.8	-	5.30	0.0687	(2,4)
F-18	3765.5	E-10	3586.2	-	5.00	0.126	(2,4)
F-19	4068.8	E-11	3859.7	-	5.42	0.032	(1,5)
F-20	4069.1	-	-	-	-	-	(1,5)
F-21	4782.4	-	-	-	-	-	Global 頂部 (r, θ)=(1,0)

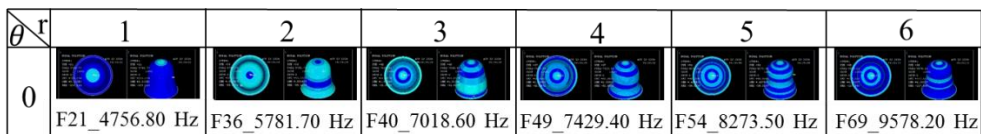
表 3、銅鐘模態振型物理意義對照表  
 (a)有限元素分析鐘身局部模態(local mode):  $(z, \theta)$



(b)實驗模態分析鐘身局部模態(local mode):  $(z, \theta)$



(c)有限元素分析整體模態(global mode):  $(\theta, r)$



(d)有限元素分析整體模態(global mode):頂部(top)  $(r, \theta)$ , 鐘身(body)  $(\theta, z)$

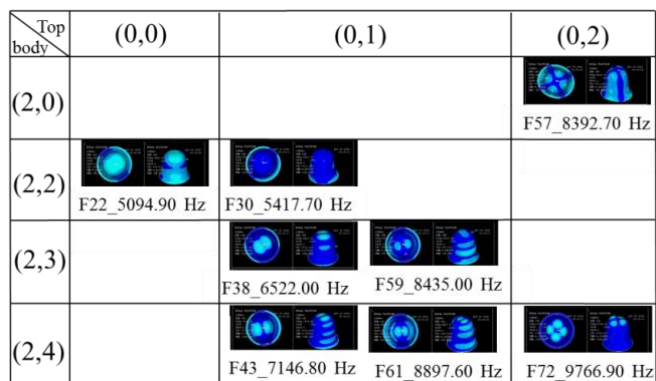


表 4、銅鐘聲音量測之不同敲擊位置自然頻率與聲音壓力總表

峰值數	聲音量測(紅鎚)						EMA		物理意義 (z, θ)	聲音量測與EMA自然頻率誤差(%)		
	上點		中點		下點		模態數	自然頻率 (Hz)		上點	中點	下點
	峰值 頻率 (Hz)	峰值 分貝 (dB)	峰值 頻率 (Hz)	峰值 分貝 (dB)	峰值 頻率 (Hz)	峰值 分貝 (dB)						
S-01	578.2	81.14	578.2	78.26	578.2	81.58	E-01	577.47	(1,2)	0.126	0.126	0.126
S-02	-	-	584	67.68	-	-	E-02	582.63	(1,2)	-	0.235	-
S-03	1533	84.97	1533	81.9	1533	82.21	E-03	1533.8	(1,3)	-0.052	-0.052	-0.052
S-04	-	-	1539	75.91	-	-	E-04	1539	(1,3)	-	0.000	-
S-05	2617	62.74	2617	67.98	2617	44.33	E-05	2616.9	(1,4)	0.004	0.004	0.004
S-06	2733	65.25	2733	56.21	2733	63.67	E-06	2724.7	(2,3)	0.305	0.305	0.305
S-07	2746	53.76	2746	59.44	-	-	E-07	2741.5	(2,3)	0.164	0.164	-
S-08	-	-	3540	46.56	-	-	E-08	3545.4	(2,2)	-	-0.152	-
S-09	3579	65.05	3570	56.6	3572	52.60	E-09	3575.8	(2,4)	0.089	-0.162	-0.106
S-10	-	-	-	-	-	-	E-10	3586.2	(2,4)	-	-	-
S-11	3855	56.12	3863	47.94	3858	41.67	E-11	3859.7	(1,5)	-0.122	0.085	-0.044
S-12	5126	51.21	5125	33.45	5125	47.38	E-12	5117.1	(2,5)	0.174	0.154	0.154
S-13	-	-	5133	44.85	5132	42.71	E-13	5127.1	(2,5)	-	0.115	0.096

表 5、銅鐘聲音量測之不同敲擊鎚自然頻率與聲音壓力總表

峰值數	聲音量測(中點)						EMA		物理意義 (z, θ)	聲音量測與EMA自然頻率誤差(%)		
	紅鎚		黑鎚		鋼鎚		模態數	自然頻率 (Hz)		紅鎚	黑鎚	鋼鎚
	峰值 頻率 (Hz)	峰值 分貝 (dB)	峰值 頻率 (Hz)	峰值 分貝 (dB)	峰值 頻率 (Hz)	峰值 分貝 (dB)						
S-01	578.2	78.26	578.2	67.48	578.2	74.06	E-01	577.47	(1,2)	0.126	0.126	0.126
S-02	584	67.68	584	54.38	-	-	E-02	582.63	(1,2)	0.235	0.235	-
S-03	1533	81.9	1533	82.84	1533	76.28	E-03	1533.8	(1,3)	-0.052	-0.052	-0.052
S-04	1539	75.91	1539	79.83	1538	75.75	E-04	1539	(1,3)	0.000	0.000	-0.065
S-05	2617	67.98	2617	81.29	2617	90.39	E-05	2616.9	(1,4)	0.004	0.004	0.004
S-06	2733	56.21	2733	64.61	2733	73.51	E-06	2724.7	(2,3)	0.305	0.305	0.305
S-07	2746	59.44	2746	71.53	-	-	E-07	2741.5	(2,3)	0.164	0.164	-
S-08	3540	46.56	-	-	-	-	E-08	3545.4	(2,2)	-0.152	-	-
S-09	-	-	3562	69.37	3565	62.39	E-09	3575.8	(2,4)	-	-0.386	-0.302
S-10	3570	56.6	3571	71.25	3578	75.87	E-10	3586.2	(2,4)	-0.452	-0.424	-0.229
S-11	3863	47.94	3863	60.81	3853	64.69	E-11	3859.7	(1,5)	0.085	0.085	-0.174
S-12	5125	33.45	5107	53	-	-	E-12	5117.1	(2,5)	0.002	-0.198	-
S-13	5133	44.85	5125	67.09	5125	80.10	E-13	5127.1	(2,5)	0.115	-0.041	-0.041

表 6、不同敲擊位置與不同敲擊鎚敲擊銅鐘之衰減率與時間常數對照表

比對組合	衰減率	時間常數
紅鎚敲擊上點	1.28	0.78
紅鎚敲擊中點	2.07	0.48
紅鎚敲擊下點	2.32	0.43
黑鎚敲擊上點	3.51	0.28
黑鎚敲擊中點	6.82	0.15
黑鎚敲擊下點	15.2	0.07
鋼鎚敲擊上點	5.73	0.17
鋼鎚敲擊中點	11.77	0.08
鋼鎚敲擊下點	6.03	0.17

## Discussion on Vibration Modes and Sound Generation Mechanism for Smooth Surface Bell

Bor-Tsuen Wang<sup>1</sup>, Jiun-Lang Tsai<sup>2</sup>,  
Ming-Yuan Yeh<sup>2</sup>, Chih-Wei Li<sup>2</sup>, Bo-Jun Zhang<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Professor, <sup>2</sup>Student  
Department of Mechanical Engineering  
National Pingtung University of Science and  
Technology  
Ying-Hui Wu<sup>3</sup>  
<sup>3</sup>Machinery Division National Nei-Pu Senior  
Agricultural-Industrial Vocational School

### ABSTRACT

Bell sound is bright and melodious and used as religious purpose in temple or just for reporting time. This work is to discuss the vibration modal properties of a smooth surface bell and its sound generation mechanism. The finite element analysis (FEA) software, ANSYS, is adopted to construct the bell FE model and perform theoretical modal analysis (TMA), so as to obtain theoretical modal parameters, including natural frequencies and mode shapes. Experimental modal analysis (EMA) is also conducted on the bell by using the impact hammer and accelerometer as the actuator and sensor, respectively. The frequency response functions (FRFs) can be measured and processed by the curve-fitting software, ME'scopeVES, to obtain the structural modal parameters, i.e. natural frequencies, mode shapes and modal damping ratios. Both theoretically and experimentally obtained modal parameters are compared, respectively, and verified to characterize the bell's vibration modes. The percussion sound of the bell is also measured by using the microphone to get the sound spectrum that can be interpreted with those vibration modes. Different percussion mallets acting on the bell and the hardness of mallet material will affect the induced vibration modes and the decay rate of percussion sound. This work integrates FEA and EMA to investigate the vibration characteristics and sound generation of the smooth surface bell. The bell FE model can be applied to the design modification after the proper calibration.

**Keywords:** smooth surface bell, finite element analysis (FEA), experimental modal analysis (EMA), vibration mode, sound generation mechanism.