

京鈔之模態參數與打擊聲音特性

Modal Parameters and Percussion Sound Characteristics of Folk Cymbals

王栢村¹、◎張家豪²

¹ 國立屏東科技大學機械工程學系教授

² 國立屏東科技大學機械工程學系研究生

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

摘要

本文探討民俗敲擊樂器京鈔之發聲機制與聲音特性。首先利用殼元素建構京鈔之有限元素分析模型，並設定為自由邊界，進行理論模態分析，求得京鈔之理論模態參數；同時也對京鈔進行實驗模態分析，以衝擊錘為輸入，麥克風為輸出，透過頻譜分析儀求得京鈔之聲音壓力與外力的頻率響應函數，再經由曲線嵌合軟體擷取出實驗之模態參數，包含自然頻率、模態振型與阻尼比，最後將理論與實驗分析之模態參數進行比對驗證，藉以確認京鈔之材料參數與發聲機制，此外本文也對京鈔進行聲音量測，探討京鈔兩兩對撞下之聲音特性。結果顯示由京鈔敲擊後之聲音頻譜特性發現，京鈔主要的發聲機制與京鈔結構外環之振動模態有極大的關聯性，本文結合理論與實驗分析方法，探討得知京鈔的聲音特性，並可將所採用的分析與實驗方法應用於瞭解不同樂器之聲音相關特性。

關鍵字：京鈔、模態參數、模態分析、自然頻率、模態振型、聲音頻譜。

Abstract

This work aims to discuss the sound radiation mechanism and percussion sound characteristics of traditional percussion instrument, folk cymbals. The shell elements are used to construct the finite element model of the cymbal in free boundary condition for performing modal analysis to obtain theoretical modal parameters. The experimental modal analysis (EMA) is also conducted for the cymbal by using the hammer as the roving actuator and the microphone as the fixed sensor. The frequency response functions (FRFs) between the sound pressure and force can then be obtained and applied to the curve fitting software to extract experimental modal parameters, including natural frequencies, modal damping ratios and mode shapes. Both theoretical and experimental modal parameters are compared to validate the modal properties and useful for identifying the generated sound mechanism due to

the percussion on the cymbal. The percussion sound of folk cymbals is finally measured in both free boundary and direct impact for two cymbals, respectively. Results show the dominant sound spectrum is related to those coming from the circular edge modes. The theoretical analysis and experimental approaches are presented to calibrate the sound spectrum of folk cymbals and can be applied to other percussion instruments as well.

Keywords : folk cymbal, modal parameter, modal analysis, natural frequency, mode shape, sound spectrum.

一、前言

京鈔屬於中國傳統樂器之一，於民俗宗教表演場合常發現京鈔之身影，雖然京鈔此類樂器顯少人知道，但於民俗傳統樂器中占有著重要的角色，京鈔有著特殊之樂音特性，聲音清脆響亮，使得民俗樂曲更佳的活潑、熱鬧，一般而言影響京鈔之聲響頻率主要為外型尺寸，尺寸越小所發出之聲響頻率越高，尺寸越大所表現出來的聲音頻率越低，視樂曲表現與詮釋而選用，材質與製作方式也會影響其延音長短。判斷樂器音高、音色與持續度等之優劣，對於樂手而言為一項重要的判斷能力，過去許多樂手運用自身經驗以耳聽方式來辨識，但以耳聽方式判斷較容易受到主觀意識影響，而失去準確性，因此以此種做法較不符合經濟效益，而以往經驗，有諸多文獻探討各種樂器發聲之物理機制及其相關振動特性。

王等人[1] 探討中國傳統樂器銅鑼之振動與聲音特性，藉由理論有限元素分析與實驗模態分析探討銅鑼之振動與聲音特性，並以實驗模態分析之結果作為有限元素模型修正之依據，達到模型驗證之效果。王與黃[2]針對含琴柄及共鳴箱之整體吉他結構，忽略吉他內部支撐結構不加琴弦進行分析，分析方法為利用有限元素分析搭配實驗模態分析，以得到含琴柄及共鳴箱之整體吉他結構之模態參數。王與蘇[3]針對吉他弦之振動模態特性，以實驗模態分析與理論有限元素分析進行模型驗證，同時也探討電吉他與木吉他之吉他弦聲音頻譜分析。王等人[4]利用有限元素分析搭配實驗模態分析，對吉他共鳴箱振動模態進行模型驗證，以瞭解吉他共鳴箱之振動特性，並根據田口法對吉他共鳴箱之材料參數進行最佳化及模型驗證分析，以確認最佳之材料參數。

王等人[5] 應用貝茲曲線方程式來控制節點與座標，設計出鐵琴片的外型，並搭配形狀最佳化分析建構出一套C 和弦鐵琴片形狀最佳化設計流程。王與林[6]應用麥克風與加速度計對鐵琴片實施一系列之振動分析，結果顯示麥克風所得到之聲音頻譜響應，與加速度計量測得到之振動模態為相互呼應的。

王與廖[7] 建構與實際結構相符合之木琴條有限元素模型，並變更幾何形狀比例，達到不同音階之設計變更效果，結果顯示敲擊木琴條中心點，可明確激發出第一個模態，且木琴條之自然頻率與長度縮放比例平方成反比。Doutaut *et al.*[8]針對木琴於時間域中之聲音輻射進行計算，利用有限元素分析與數學模型分析進

行比較。Petrolito and Legge[9]應用最佳化之方法達到設計變更之目的，藉由改變木琴條底部之面積來調整自然頻率。

本文運用有限元素分析法搭配實驗模態分析，針對京鈔進行理論與實驗量測分析，本文主要目標如下所示：

1. 京鈔發聲機制探討：運用有限元素分析軟體 ANSYS 對京鈔進行模態分析 (Modal Analysis)，得到理論之模態參數，如自然頻率與模態振型，同時搭配實驗模態分析，利用衝擊錘敲擊佈點處，將量測得到之聲音訊號輸入頻譜分析儀進行分析，得到聲音功率頻譜密度函數，以及聲音壓力與外力之間的頻率響應函數，接著經由曲線嵌合得到實驗之模態參數，包含自然頻率、模態振型與阻尼比，並與理論之模態參數進行振型與順序之比對，以確認有限元素模型之合理性，並據以探討京鈔之發聲機制。
2. 京鈔敲擊聲音特性探討：運用聲音量測程式，針對京鈔兩兩對撞進行聲音特性探討。

二、有限元素分析

圖 1 為京鈔之實體圖發現京鈔結構之厚度遠小於直徑，故採用薄殼元素 (shell 63) 架構京鈔之有限元素模型。本文採用 ANSYS 有限元素軟體進行分析，假設材料為等向性且均質；圖 3 為京鈔之有限元素模型，材料參數設定浦松比 $\nu=0.34$ 和密度 $\rho=6387$ (kg/m^3)，由於實驗量測敲擊時，發現各區域敲擊之聲音有明顯的不同，故進而以四種材料參數模擬京鈔的四個部分，如表 1 所示，表中 E_A 為最內圈之楊氏係數，依序設定至最外圈；元素分割方面以極座標方式將徑向分割成 13 等份，圓周方向分割成 60 等分，位移限制和外力負荷因採用自由邊界進行模態分析，因此可不用做設定。



圖 1、京鈔實體結構示意圖

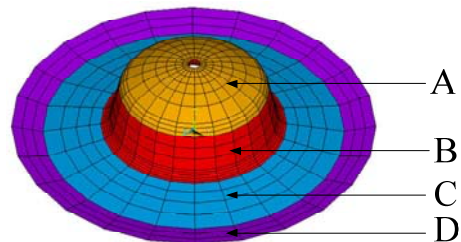


圖 2、京鈔有限元素模型

表 1、楊氏係數之總表

| 楊氏係數 | E_A | E_B | E_C | E_D |
|---------|-------|-------|-------|-------|
| 數值(GPa) | 101.3 | 106.1 | 75.3 | 61.0 |

三、實驗分析

本節主要分為兩部分，分別為實驗模態分析與聲音量測分析，圖 3 為實驗儀器架設圖，圖 4 為聲音量測架設照片。首先進行實驗模態分析，量測得到京鈔之聲音頻譜以及聲音壓力與外力之間的頻率響應函數，經由曲線嵌合，得到實驗之模態參數，包含自然頻率、模態振型與阻尼比，並與理論分析結果比較，進行京鈔之發聲機制探討，接著利用聲音量測程式進行量測，探討京鈔於兩兩對撞下之聲音頻譜特性。

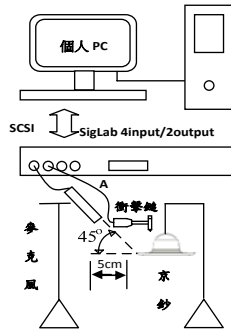


圖 3、實驗儀器架設圖

(a) 自由懸吊實體量測架構圖

(b) 實際對撞實體量測架構圖

圖 4、聲音量測架構照片

四、結果與討論

本節探討以有限元素分析與實驗模態分析結果作比較，探討京鈔之發聲機制，包括自然頻率、阻尼比和模態振型之比對。接著針對聲音量測結果，探討京鈔在自由懸吊與兩個京鈔實際對撞下之聲音特性。

(一)、京鈔之振動模態特性分析

表 2 為京鈔 FEA 與 EMA 之模態振型對照表，其中模態數編號 F-01 及 E-01 分別代表分析與實際之第一個模態，模態振型物理意義，分別以面(r, θ)，及環(r, θ)表示，「面」指京鈔整體結構，「環」指如圖 4 京鈔之 CD 區域的環狀結構， r 為徑向之節線數， θ 為週向之節線數，以下就京鈔之振動模態特性及模型驗證結果綜合如下：

1. 分析與實驗所得之各模態自然頻率比較，除了 F-03 為 12.27%，F-08 為 8.15%，其他模態自然頻率誤差大約在 5% 以內。
2. 京鈔之幾何模型，在分析上為軸對稱結構，F-01/F-02、F-03/F-04、F-06/F-07、F-08/F-09、F-10/F-11 均為軸對稱模態，其兩兩理論自然頻率相等，模態振型大體呈現相同，僅有 45 度之相位角差異。
3. 實體結構之京鈔，並非真正之軸對稱結構，而是接近於軸對稱，故 EMA 所得之自然頻率，兩兩之間略有差異，兩兩軸對稱模態之模態振型皆有相同趨勢。

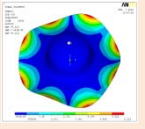
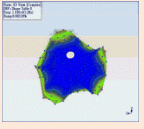

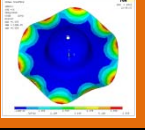
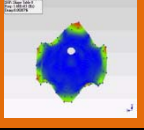

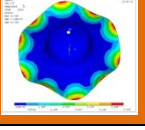
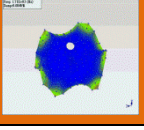
4. 觀察模態振型可發現，F-05之模態振型的節線範圍僅在區域C中且為環狀，代表此模態經敲擊後除了節線範圍之外，其它區域皆會產生振動，因此初步判定，物理意義為面(2,0)之模態為京鈔第一個主要的發聲模態。

FEA與EMA頻率比較方面，可看出在分析及實驗之頻率對應良好，除了第3個、第8個與第9個模態之頻率誤差百分比大於5%之外，其餘的皆在5%以內，頻率之最大誤差為12.27%；最大阻尼比出現在第5模態為0.038157%，累計平均阻尼比為0.018277%。

表2、京鈔FEA與EMA之模態振型對照表

| FEA 模態數 | 模態振型 | 自然頻率(Hz) | EMA 模態數 | 模態振型 | 自然頻率 (Hz) | 物理意義 (r, θ) | 誤差 (%) | 阻尼比(%) | 累積平均阻尼比(%) |
|---------|---|----------|---------|---|-----------|--|--------|-----------|------------|
| F-01 |  | 493.06 | E-01 |  | 493.06 |  環(1,2) | 0 | 0.01439 | 0.014394 |
| F-02 |  | 493.06 | E-02 |  | 499.68 | | -1.32 | 0.01489 | 0.014645 |
| F-03 |  | 786.25 | E-03 |  | 700.27 |  環(1,3) | 12.27 | 0.0056623 | 0.011651 |
| F-04 |  | 786.25 | -- | -- | -- | -- | -- | -- | -- |
| F-05 |  | 844.17 | E-05 |  | 843.84 |  面(2,0) | 0.039 | 0.038157 | 0.018277 |
| F-06 |  | 1011.4 | E-06 |  | 1008.5 |  面(1,1) | 0.28 | 0.012886 | 0.017199 |
| F-07 |  | 1011.4 | E-07 |  | 1012.1 | | -0.06 | 0.018126 | 0.017353 |
| F-08 |  | 1254.4 | E-08 |  | 1159.8 |  環(1,4) | 8.15 | 0.003243 | 0.015337 |

表2、京鈔FEA與EMA之模態振型對照表(續)

| FEA 模態數 | 模態振型 | 自然頻率(Hz) | EMA 模態數 | 模態振型 | 自然頻率 (Hz) | 物理意義 (r, θ) | 誤差 (%) | 阻尼比(%) | 累積平均阻尼比(%) |
|---------|---|----------|---------|---|-----------|--|--------|----------|------------|
| F-09 |  | 1254.4 | E-09 |  | 1186.2 |  環(1,4) | 5.74 | 0.002182 | 0.013693 |
| F-10 |  | 1731.3 | E-10 |  | 1676.3 |  環(1,5) | 3.2 | 0.002667 | 0.012468 |
| F-11 |  | 1731.3 | E-11 |  | 1705.3 | | 1.52 | 0.004596 | 0.011681 |

(二)、京鈔之聲音特性分析

本章節利用聲音量測程式，針對京鈔兩兩對撞之聲音特性進行探討。

圖 5 為京鈔兩兩對撞之聲音頻譜圖可發現，量測得到的峰值頻率之物理意義皆為環之模態，因為手持京鈔於區域 A 中，導致京鈔受到邊界效應之影響，因此面之模態的頻率峰值無法被激發出來為合理的。

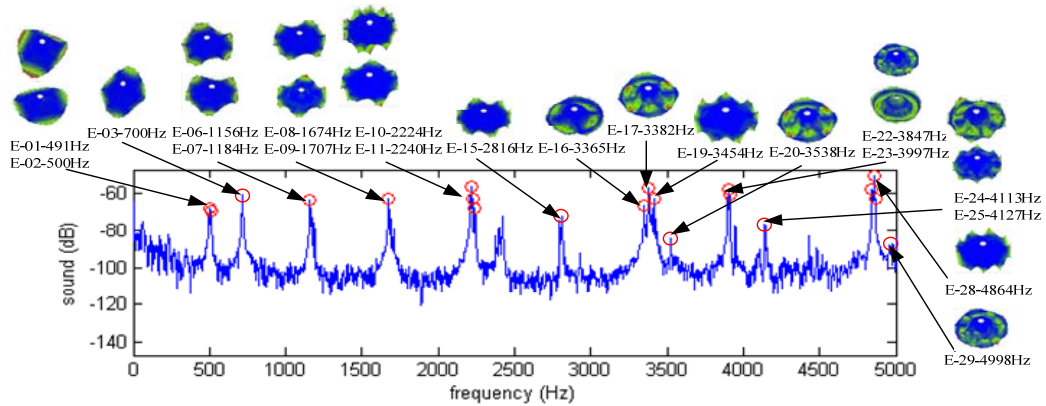


圖 5 為京鈔兩兩對撞之聲音頻譜圖

五、結論

本文建立京鈔之有限元素模型，並藉由實驗模態分析比對驗證，探討京鈔之發聲機制，同時也進行聲音量測分析，探討不同邊界下京鈔之聲音特性，綜合本文之分析可得下列幾點結論：

- (一)、將理論與實驗之模態分析結果進行比對發現，兩者模態振型對應良好，低頻率之誤差大部分皆在 $\pm 5\%$ 內，僅有少數3個環(1, θ)模態之自然頻率誤差較大，推測原因可能為京鈔在每一個圓弧轉折處厚度均不一致，造成有限

元素模型與實際結構有些誤差。

- (二)、將理論與實驗之模態振型進行比對發現，京鈔之模態振型主要以環之模態為主，面之模態數量較少，代表環之模態振型為京鈔主要模態，藉由模態振型判斷可發現，面(2,0)模態振型之節線範圍僅在C區內，代表此模態除了節線以外其它區域皆產生振動，再由頻率響應函數圖形判斷發現，843Hz為最振幅最高之頻率峰值，因此可判定面(2,0)為第一個主要發聲模態。
- (三)、量測京鈔兩兩對撞之聲音頻譜可發現，物理意義為面之模態的頻率峰值不明顯，峰值較明顯的頻率皆為環之模態，原因為以手持方式握取會使京鈔受到邊界效應之影響，導致無法激發出物理意義為面之模態的頻率峰值。

六、參考文獻

- 1.王栢村，李雨軒，張志偉，2002，「銅鑼振動與聲音特性之探討」，*中華民國振動與噪音第十屆學術研討會*，台北，第245-252頁，論文編號：NO-34。
- 2.王栢村，黃國棟，2004，「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197-205頁。
- 3.王栢村，蘇集銘，2006，「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。
- 4.王栢村，胡惠文，蘇敬翔，2003，「吉他共鳴箱之振動特性分析」，*ANSYS 2003 台灣區用戶大會暨論文發表會*，雲林，第71-84 頁
- 5.王栢村，謝明憲，趙天麟，2008，「基於聲音特性之鐵琴片形狀設計」，*中華民國音響學會第二十一屆學術研討會*，台北，論文編號：A1-3。
- 6.王栢村，林怡馨，2007，「以加速度計與麥克風為感測器之鐵琴片實驗模態分析比較」，*中華民國力學學會第三十一屆全國力學會議*，高雄，論文編號：H31。
- 7.王栢村，廖偉廷，2009，「木琴條聲音與振動關聯性及形狀變更之設計分析」，2009『*屏東科技大學*』暨『*北京科技大學*』*第四屆學術交流研討會*，屏東，論文編號：C-14，第C-72--C-78 頁
- 8.Doutaut V., Matignon, D., and Chaigne, A., 1998, "Numerical Simulations of Xylophones. II Time-Domain Modeling of the Resonator and of the Radiated Sound Pressure," *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 104, No.3, pp. 1633-1647.
- 9.Petrolito, J., and Legge, K. A., 1997, "Optimal Undercuts for the Tuning of Percussive Beams," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 102, No. 4, pp. 2432-2437.