

曾侯乙編鐘之聲音特性探討

王栢村¹ 李柏駿¹ 黃博彰¹ 邱薪亦¹ 林谷樺¹

¹ 國立屏東科技大學 機械工程系

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

摘要

編鐘是中國的傳統打擊樂器，曾侯乙編鐘是迄今已發現的古代編鐘中規模最大、音域最廣的樂器。本文旨在測量和分析在國家自然科學博物館展示的複製版曾侯乙編鐘。本研究探討五組編鐘，包括：鈕鐘、無枚、短枚、長枚甬鐘、以及大型長枚甬鐘。編鐘的特殊設計在能發出兩個音階(Musical Scale)，可稱為雙音編鐘，分別是正鼓音與側鼓音。正鼓音是敲擊編鐘打擊區的中央，而側鼓音是敲擊側面。編鐘的敲擊聲音以行動裝置錄製，並進行了頻譜分析、時頻分析和衰減率分析，進而可確認編鐘之音準、音色(Tonality)與聲音衰減效應。由聲音頻譜及時頻圖(Spectrogram)分析，可以區別出基音頻率(Fundamental Frequency)和泛音頻率(Overtone Frequencies)，分別據以評估樂音的音準和探討其音色的組成，並由時間波形的衰減率來代表衰減效應，即連續性。本文探討了對鈕鐘聲音特性分析的詳細過程，也評估了五組編鐘的設計理念。結果顯示，各個編鐘的正鼓音與側鼓音之間的音程差，主要是大三度或小三度。同一組編鐘，是可以產生一系列的音階，然而有些音高與標準頻率的對應不良，不過仍可辨識其音階。不同組的編鐘顯示出較低和較高的音高，但是在頻率響應的基本特徵是相似的。本文主要探討了五個編鐘組的打擊聲音特性，也瞭解其正鼓音與側鼓音的音高準確度，以及一個編鐘組中的音高關係，未來還可以深入探討編鐘的發聲物理機制及設計原理。

關鍵詞：曾侯乙編鐘、聲音特徵、頻譜分析、時頻分析、基音頻率、泛音頻率。

1. 前言

編鐘由青銅所鑄成，具有不同大小及圓扁的形狀，因可產生不同的音階並且有著雙音的特性，又稱雙音編鐘。本文主要探討目前保存外型、音域最完整的曾侯乙編鐘，它由許多不同型式編鐘組成，因此具備各種音色。本文將對編鐘進行聲音特性探討，討論不同編鐘之音準、音色及聲音衰減率效應；王等人[1]利用 3 種不同銅鐘進行聲音特性探討，利用指向性分析了解空氣聲音傳遞特性並探討與結構模態振型的關聯性，結果顯示由於 3 口銅鐘幾何形狀大小相近，故發聲頻率差異較小，透過時間頻率圖發現發聲頻率以低頻率為主且有明顯的聲音持續度。王等人[2]對有無鑲面的表面結構及不同融銅溫度及降溫方式的熱處理所製作的地鐘進行聲音特性探討，透過懸掛地鐘並敲擊，以麥克風進行量測，取得對應的時頻圖與聲音頻譜。經分析比較後發現有鑲面之地鐘基音頻率相對較高、融銅溫度較高之地鐘有較低的基音頻率、降溫方

式也確實影響著地鐘的聲音持續度。王等人[3]對不同外形及不同表面結構銅鈴進行有限元素分析與實驗模態分析，其中得出有限元素模型等效於實際結構且頻率響應對應良好，並進行主觀與客觀指標之關聯探討，發現普遍主觀會認為聲音的尖銳度越高其基音頻率越高、持續度越久則衰減率越小。王等人[4]建立縮小模型鐘之有限元素模型，透過實驗模態分析與驗證進行比對並利用不同材質之敲擊錘來探討縮小模型鐘的聲音特性。結果顯示，實驗模態與分析有良好的對應，故可確定實際結構等效於有限元素模型。在聲音特性上發現鋼錘較能激發出較多的峰值頻率。Hibbert *et al.*[5] 敲擊教堂鐘的邊緣部分並產生敲擊音之音高及音色，高的泛音頻率對於鐘的音色有重大影響，發現在鐘的邊緣峰值頻率較少，後續利用修改後之邊緣非伸展徑向 (RIR) 模式產生多個模擬音，模擬實際敲擊聲音。

樂器聲音的發音機制也可以發現模態振型與自然頻率(Natural Frequency)有一定的關聯性，王等人[6]對平滑表面之銅鐘進行振動模態與發聲機制探討，並發現敲擊中點能激發出的發聲模態較多，故中間的敲擊位置較佳。且利用不同硬度的錘子進行實驗，觀察出槌子越硬衰減率越大，反之材質越軟衰減率越小。王等人[7]針對不同銅鐘進行實驗模態分析及聲音量測分析，探討振動模態與聲音特性之關聯，結果顯示，兩者實驗的自然頻率誤差皆在 $\pm 0.3\%$ 以內，表示分析結果具有可靠度；銅鐘之阻尼比相當小，故聲音有較長持續度的特性。Wang *et al.*[8]以打擊樂器的泛音頻率為參考對五邊形版進行尺寸優化設計，目的在於設計出泛音頻率可為基音頻率的兩倍，意味和聲。透過建立有限元素模型、理論模態分析，得出具有兩個諧波的五邊形版設計，並透過模態、頻率響應進行設計驗證，確定設計可靠度。王等人[9]針對銅鐘空氣結構耦合系統進行聲振耦合分析，並利用實驗量測來驗證聲音響應預測技術之可靠度，成功解析銅鐘聲場之模態特性與聲音頻譜，其建立之分析手法也可應用於其他打擊樂器之聲音特性研究與開發設計。Wu *et al.*[10]以非諧音數位波導為基礎，建構一組中國編鐘聲音合成模型，此模型通過調整參數能實現非常接近真實的鐘聲。

本文針對曾侯乙編鐘之其中五種不同編鐘進行聲音量測分析，探討發聲機制並判別基音、泛音頻率，再對照音階頻率(Pitch Frequency)對照表來觀察其音色，最後討論不同編鐘之音階、音程差之關係，推論其發音設計原理。



2. 編鐘簡介與聲音量測

本文使用國家自然科學博物館展示之複製曾侯乙編鐘進行量測分析，曾侯乙編鐘為戰國時代所製，為古代編鐘中規模最大、音域最廣的樂器，代表禮樂文明與青銅器鑄造技術的最高水平，其組成一套共 65 件，在本研究中選用五種不同種類編鐘，包括鈕鐘、無枚甬鐘、短枚甬鐘、長枚甬鐘和大型長枚甬鐘，如圖 1 為不同種類編鐘之分佈位置圖。

2.1 編鐘敲擊音及種類介紹

本文探討之曾侯乙編鐘為雙音編鐘，依據形狀及枚的長短可分為圖 2(a)鈕鐘、(b)無枚甬鐘、(c)短枚甬鐘、(d)長枚甬鐘和(e)大型長枚甬鐘，共量測 25 口鐘。在敲擊量測時分別敲擊編鐘中央及側面，圖 3 為敲擊設備與敲擊位置圖，在敲擊正面及側邊時會分別發出正鼓音及側鼓音。

2.2 聲音量測方法

在本節中將介紹聲音量測方法，經由編鐘的中央及側面分別敲擊三次後，利用行動裝置取得聲音 Mp4 檔，由聲音量測軟體(Sound Measure Software, SM)進行音檔分割並轉換成 wav 檔。在本次實驗中參數設定，如取樣點數為 48,000 點、頻率解析度為 1Hz、平均次數為 2 次、重疊率為 90%、自動抓點之聲音壓力位準閾值為 35 分貝。

3. 聲音特徵分析流程

本節將介紹實驗分析流程，如圖 4 聲音特徵分析流程圖所示，其中以圖 2(a-4)鈕鐘之第二下敲擊側鼓音為例，進行時頻分析、頻譜分析，而頻譜圖(Spectrum)中的峰值頻率(Peak Frequencies)即為該聲音的自然頻率 f_r ，其中前 1、2 峰值頻率中，聲音壓力位準較高者為主導聲音的基音頻率，其餘峰值頻率則為泛音頻率。後續可藉由基音頻率及泛音頻率判別音準、音色。如圖 5 典型的時頻分析介面中的①，觀察其時間域波形 $p(t)$ ，可發現聲音壓力位準會隨著時間遞減，即為聲音的衰減率。

本次分析取得五種不同形式編鐘之自然頻率 f_r 、聲音壓力位準 dB、衰減率 σ ，透過表 2 音階頻率對照表來判斷其音準及音階，最後進行綜合比較，探討之間的差異及聲音特性。

3.1 時頻分析介紹

時頻圖可以觀察出隨時間變化的頻譜特性，圖 5 典型的時頻分析介面中的④，X 軸為時間軸、Y 軸為頻率軸、Z 軸為聲音壓力位準值，圖示中的時頻圖是以等高線圖(Contour Plot)方式呈現，紅色區域是聲音壓力位準值較大，藍色則較小。由圖 5 典型的時頻分析介面中的①時間域波形圖及②響度圖可以發現該聲音最終在約 20 秒時其聲音壓力位準衰減趨近於 0 dB。由③頻譜圖可以發現數個明顯的峰值頻率，與其對應的自然頻率 f_r 及聲音壓力位準 dB。可由④時頻圖紅色線條的部分觀察該頻率的聲音持續度，線條較長則為聲音持續時間較久，否則聲音持續時間較短，透過此關係可以判斷此敲擊音由哪個頻率進行主導。

3.2 頻譜分析介紹

頻譜分析(Spectral Analysis)主要是應用快速傅立葉轉換(Fast Fourier Transform, FFT)的數學運算，將時間域信號轉換至頻率域，得到此信號的傅立葉頻譜(Fourier Spectrum) $p(f)$ ，再取其共軛複數(Complex Conjugate) $p^*(f)$ ，推算得到自身功率頻譜 $G_{pp}(f)$ ，其計算公式如下：

$$G_{pp}(f) = p^*(f)p(f) \quad (1)$$

圖 6 為典型的頻譜分析介面，由圖 6(a)可以發現聲音壓力位準隨著時間逐漸衰減，由於人耳的聽覺範圍為 20 至 20,000Hz，所以時頻分析及頻譜分析最初以 24,000Hz 為頻率量測上限，但是在圖 6(b)可見聲音壓力位準於 8,000Hz 後幾乎衰減至低於 0dB，故圖 6(c)僅討論 8,000Hz 以前之峰值，其中典型的側鼓音常以第二個峰值頻率為基音頻率，聲音壓力位準也明顯高於第一個峰值頻率，而其餘的頻率即為泛音頻率。圖 6(c)中的紅圈為 35dB 聲音壓力位準閾值以上之系統自動抓點的記號，標註點位的黃框則是手動補足數據的記號，皆表示明顯峰值頻率。

3.3 編鐘的聲音特徵分析

在獲取聲音檔後，經由聲音量測軟體(SM)進行時頻分析及頻譜分析取得聲音頻譜，表 3 基音頻率與泛音頻率總表，單一位置各有三個音檔，判斷該鐘之基音頻率、泛音頻率與音準、音色之關聯性，根據聲音持續度及聲音壓力位準分別判斷正鼓音頻譜圖及側鼓音頻譜圖，會發現正鼓音之基音頻率會出現在第一個峰值頻率，而側鼓音之基音頻率會出現在第二個峰值頻率，如圖 7(a)正鼓音之聲音頻譜圖及圖 7(b)側鼓音之聲音頻譜圖所示，其基音頻率個別為 1099Hz 與 1376Hz。最後經由觀察表 3 基音頻率與泛音頻率總表後發現三次敲擊所得到的基音頻率相同，故用此判斷基音頻率的方法為標準，也作為後續音準與音色關係之依據，而本文藉由時間域波形圖較良好的圖 2(a-4)鈕鐘之第二下敲擊側鼓音為例。

3.3.1 基音頻率與音準之關係

將基音頻率與表 2 音階頻率對照表進行比較，可得該鐘設計音與音階頻率之頻率誤差及音名(Note Name)。

3.3.2 基音、泛音頻率與音色之關係

在表 3 基音頻率與泛音頻率總表中的頻率比，可以觀察出部分泛音頻率具有與基音頻率之倍頻關係，其倍頻關係會影響該鐘的音色組成，雖然其他泛音頻率仍會影響聲音特色的組成，但音色最主要組成為基音頻率與其倍頻關係之泛音。

3.3.3 聲音之衰減率

藉由聲音量測軟體(SM)分析後取得聲音衰減率，由於敲擊位置的不同發現正鼓音之衰減率明顯小於側鼓音，而衰減率會影響敲擊後的聲音持續時間，在進行衰減率分析後會發現聲音會隨時間逐漸衰減。

4. 不同編鐘之聲音探討

本文利用聲音量測軟體(SM)對五種不同形式編鐘進行聲音特徵分析，對基音頻率、音階頻率、頻率誤差、衰減率、音名、簡譜、音程差進行整理，得出表3及表5~表8聲音音準表。經觀察可發現影響不同編鐘的因素有幾何尺寸大小、敲擊音位置、衰減率，進而探討出該鐘的基音頻率所對應的音階即為音準，也可說明其音色及音名，再判斷出相互之間的音程差之關係。經觀察整體編鐘頻率後綜合結果與討論得出以下結論：

- (1) 除了無枚甬鐘第三口之正鼓音頻率誤差為 4.32%，其餘編鐘階介於±3%以內。
- (2) 正鼓音與側鼓音之間的音程差具有大三度與小三度的特性。
- (3) 正鼓音之衰減率明顯小於側鼓音。
- (4) 編鐘的尺寸越小與基音頻率越高。

特殊案例討論：

可由表 7(b)長枚甬鐘之正鼓音音準表發現長枚甬鐘的音為 do(1)、re(2)、mi(3)、sol(5)、la(6)，完全符合中國音樂五聲音階(Pentatonic Scale)宮、商、角、徵、羽。

5. 結論

此次聲音特徵分析，實際以行動裝置錄製編鐘之敲擊音，並進行了頻譜分析、時頻分析和衰減率分析，確認編鐘之音準、音色與聲音衰減效應後整理出各類型編鐘之聲音音準表。在探討了對鈕鐘聲音特性分析的詳細過程後，也評估了五組編鐘的設計理念，得出以下五點結論：

- (1) 除了無枚甬鐘第三口之正鼓音之頻率誤差為 4.32%，其餘編鐘的頻率誤差皆介於±3%以內，推測可能為複製品及環境音的關係，影響音準品質。
- (2) 正鼓音與側鼓音之間的音程差具有大三度與小三度的特性，故推測此特性即可能為編鐘的設計原理。
- (3) 正鼓音之基音頻率與衰減率普遍小於側鼓音之基音頻率與衰減率，故推測正鼓音因頻率較低，所以聲音維持較久。
- (4) 編鐘的尺寸越小，普遍峰值頻率越高，符合生活中小鈴鐺清脆的聲音，與大笨鐘低沉的聲音特性。
- (5) 可由長枚甬鐘之正鼓音音準表發現長枚甬鐘的音為 do(1)、re(2)、mi(3)、sol(5)、la(6)，完全符合中國音樂五聲音階宮、商、角、徵、羽，故推論此研究方法具一定的可靠度。

6. 致謝

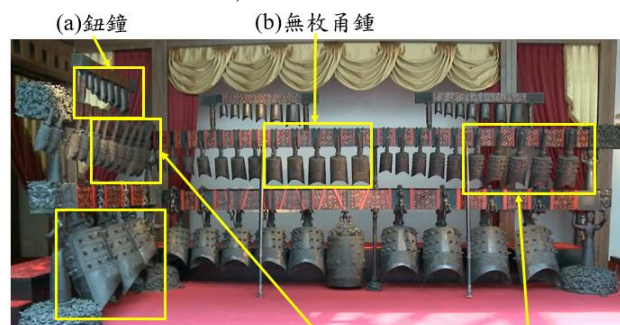
感謝臺中國立自然科學博物館提供錄製，得以完成本研究，特此感謝。

7. 參考文獻

- [1] 王栢村、楊昶昱、黃家賢、吳盈輝，「不同銅鐘

之聲音特性與指向性探討」，臺灣聲學學會第 29 屆學術研討會，論文編號：A-04，雲林，臺灣，2016。

- [2] 王栢村、劉得江、陳聖霖、楊昶昱、吳盈輝，「地鐘有無鑲面與不同熱處理方式之聲音特性探討」，第二十四屆中華民國振動與噪音工程學術研討會，高雄，臺灣，論文編號：A-05，2016。
- [3] 王栢村、劉得江、黃家賢、吳盈輝，「不同銅鈴之振動模態與發聲機制探討」，精密機械與製造科技研討會論文集，屏東，臺灣，2016。
- [4] 王栢村、張博鈞、楊昶昱、黃家賢、吳盈輝，「縮小模型鐘之振動模態與發聲機制探討」，精密機械與製造科技研討會論文集，屏東，臺灣，2016。
- [5] A. H. William, B. S. David, T. Shahram and P. Robert, "Partial Frequencies and Chladni's Law in Church Bells," *Open Journal of Acoustics*, vol. 4, pp 70-77, 2014.
- [6] 王栢村、蔡俊郎、葉明遠、李致緯、張博鈞、吳盈輝，「平滑表面銅鐘之振動模態與發聲機制探討」，第二十四屆中華民國振動與噪音工程學術研討會，高雄，臺灣，第 270-277 頁，2016。
- [7] 王栢村、楊昶昱、張博鈞、黃家賢、吳盈輝，「不同銅鐘之振動模態與發聲機制探討」，中國機械工程學會第三十三屆全國學術研討會，論文編號：C-1490，臺北，臺灣，2016。
- [8] B. T. Wang, P. C. Chen and Y. G. Tsai, "Development of Pentagonal Plates with Harmonic Sound as Percussion Instrument," *International Congress on Sound and Vibration*, Montreal, pp 1-8, 2019.
- [9] 王栢村、蔡俊郎、黃崇閔、黃家賢、吳盈輝，「銅鐘聲振耦合分析之模態特性與聲音頻譜」，臺灣聲學學會第 29 屆學術研討會，論文編號：A-01，雲林，臺灣，2016。
- [10] C. W. Wu, C. F. Huang and Y. W. Liu, "Sound Analysis and Synthesis of Marquis Yi of Zeng's Chime-Bell Set," *Proceedings of Meetings on Acoustics*, vol. 19, pp 1-7, 2013.
- [11] <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=dEPJAr9jNTQ>(查詢日期：2022.04.11)
- [12] https://en.wikipedia.org/wiki/Musical_note(查詢日期：2022.04.11)



(a)鈕鐘 (b)無枚甬鐘
(c)短枚甬鐘 (d)長枚甬鐘
(e)大型長枚甬鐘
圖 1 不同種類編鐘之分佈位置圖[11]

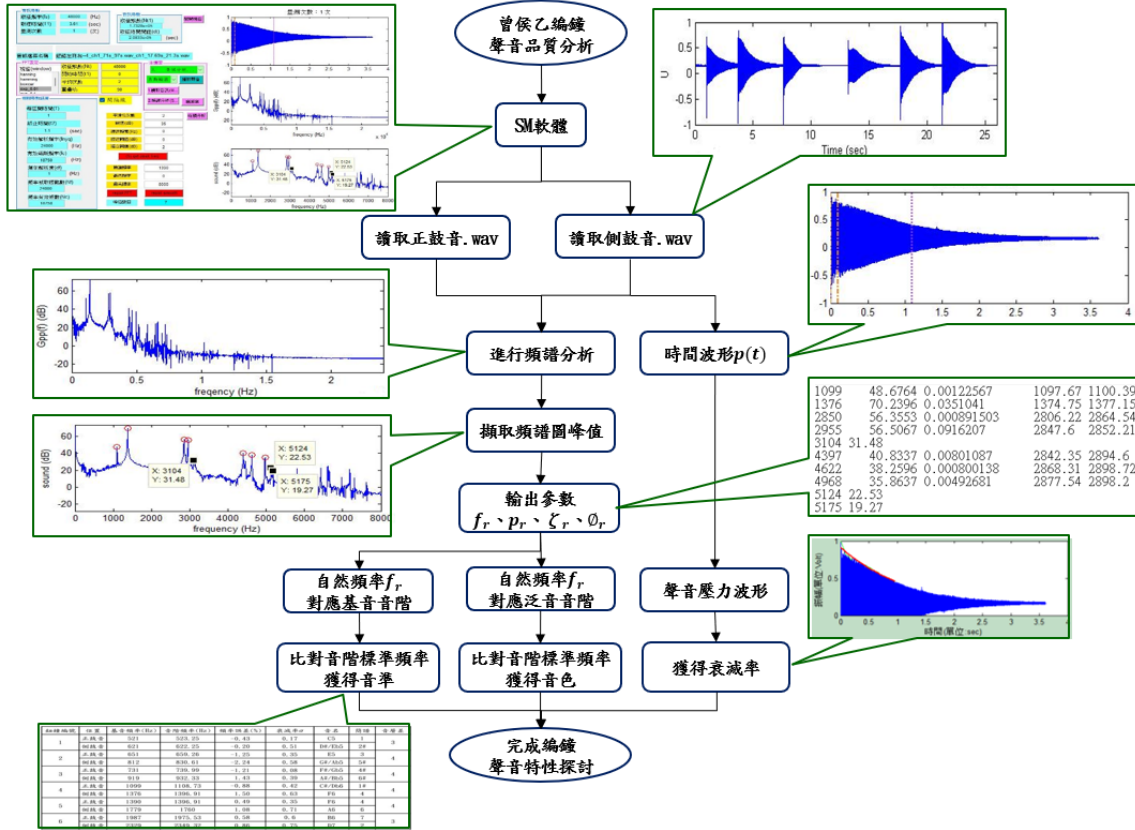
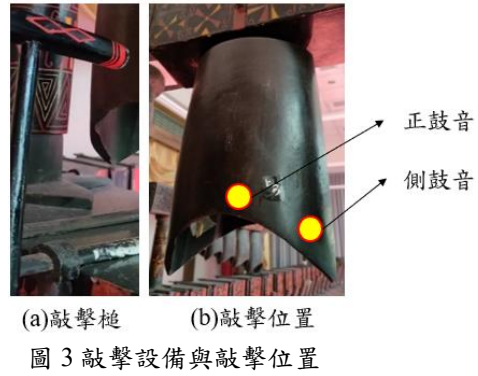
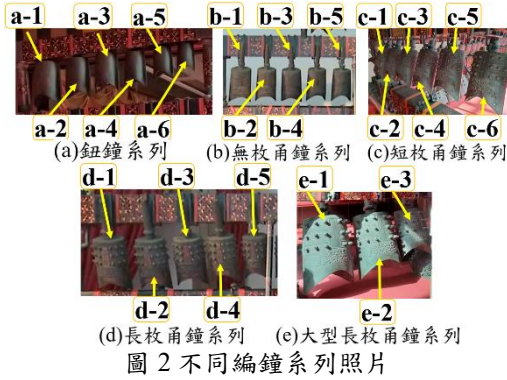


圖 4 聲音特徵分析流程圖：以圖 2(a-4) 鈕鐘之第二下敲擊側鼓音為例

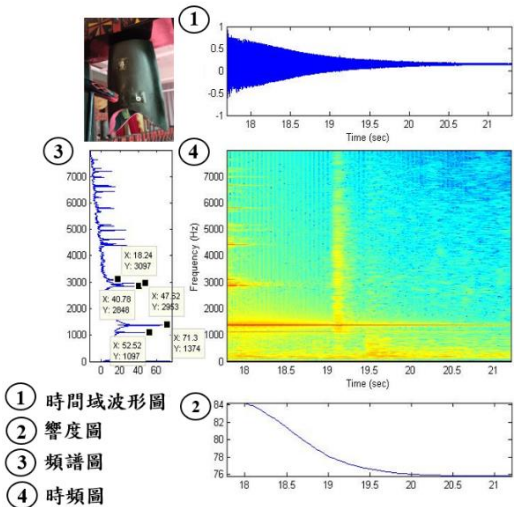


圖 5 典型的時頻分析介面：
以圖 2(a-4) 鈕鐘之第二下敲擊側鼓音為例

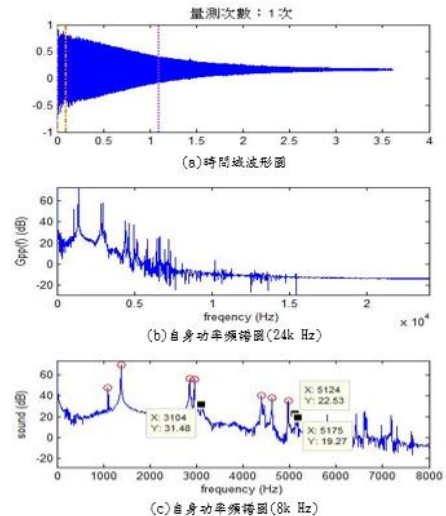


圖 6 典型的頻譜分析介面：
以圖 2(a-4) 鈕鐘之第二下敲擊側鼓音為例

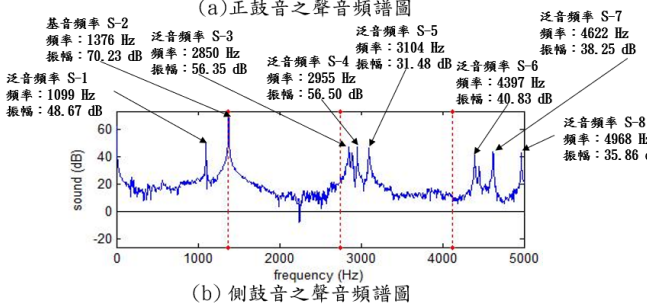
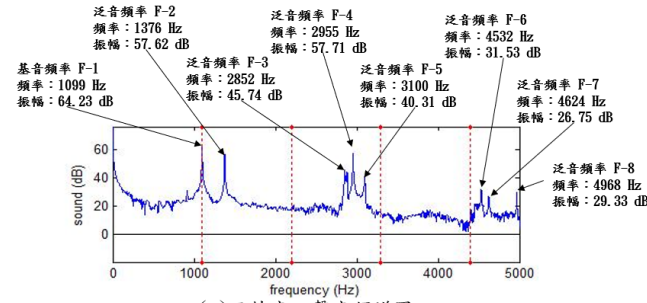


圖 7 典型的聲音頻譜圖：

以圖 2(a-4) 鈕鐘之第二下敲擊側鼓音為例

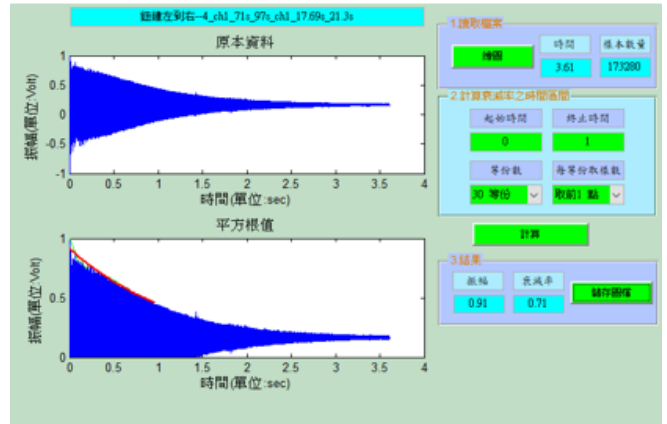


圖 8 典型的衰減率分析結果圖示：

以圖 2(a-4) 鈕鐘之第二下敲擊側鼓音為例

表 1 不同類型之編鐘照片



表 2 基音頻率與泛音頻率總表：以圖 2(a-4) 鈕鐘之第二下敲擊側鼓音為例

	圖 2(a-4) 鈕鐘正鼓音						圖 2(a-4) 鈕鐘側鼓音					
	#4-1	頻率比	#4-2	頻率比	#4-3	頻率比	#4-1	頻率比	#4-2	頻率比	#4-3	頻率比
基音	1099 Hz 64.23 dB	1.00	1099 Hz 67.27 dB	1.00	1099 Hz 67.24 dB	1.00	1376 Hz 70.68 dB	1.00	1376 Hz 70.23 dB	1.00	1376 Hz 69.68 dB	1.00
泛音	1376 Hz 57.62 dB	1.25	1376 Hz 58.69 dB	1.25	1377 Hz 36.69 dB	1.25	1099 Hz 51.38 dB	0.80	1099 Hz 48.67 dB	0.80	1099 Hz 48.56 dB	0.80
	2852 Hz 45.74 dB	2.60	2852 Hz 51.73 dB	2.60	2852 Hz 49.25 dB	2.60	2853 Hz 46.94 dB	2.07	2850 Hz 56.35 dB	2.07	2850 Hz 51.09 dB	2.07
	2884 Hz 44.48 dB	2.62	2883 Hz 39.94 dB	2.62	2883 Hz 43.58 dB	2.62	2894 Hz 42.63 dB	2.10	2896 Hz 36.40 dB	2.10	2898 Hz 36.99 dB	2.11
	2955 Hz 57.71 dB	2.69	2955 Hz 58.49 dB	2.69	2955 Hz 56.25 dB	2.69	2955 Hz 47.70 dB	2.15	2955 Hz 56.50 dB	2.15	2955 Hz 54.20 dB	2.15
	3100 Hz 40.31 dB	2.82	3099 Hz 35.55 dB	2.82	3100 Hz 38.61 dB	2.82	3099 Hz 46.38 dB	2.25	3104 Hz 31.48 dB	2.26	3096 Hz 39.98 dB	2.25
	4532 Hz 31.53 dB	4.12	4531 Hz 35.1 dB	4.12	4532 Hz 29.49 dB	4.12	4396 Hz 41.41 dB	3.19	4397 Hz 40.83 dB	3.20	4396 Hz 42.92 dB	3.19
	4624 Hz 26.75 dB	4.21	4623 Hz 28.11 dB	4.21	4625 Hz 17.57 dB	4.21	4452 Hz 32.53 dB	3.24	4454 Hz 33.05 dB	3.24	4451 Hz 34.35 dB	3.23
	4968 Hz 29.33 dB	4.52	4968 Hz 31.82 dB	4.52	4967 Hz 19.54 dB	4.52	4622 Hz 44.25 dB	3.36	4622 Hz 38.25 dB	3.36	4622 Hz 42.87 dB	3.36
5174 Hz 43.31 dB	4.71	5175 Hz 29.58 dB	4.71	5174 Hz 35.93 dB	4.71	4968 Hz 43.55 dB	3.61	4968 Hz 35.86 dB	3.61	4968 Hz 41.30 dB	3.61	

表 3 正鼓音與側鼓音比較之聲音音準表：以圖 2(a-4) 鈕鐘之第二下敲擊側鼓音為例

鈕鐘編號	敲擊音	基音頻率 (Hz)	音階頻率 (Hz)	頻率誤差 (%)	衰減率 σ	音名	簡譜	音程差
a-1	正鼓音	521	523.25	-0.43	0.17	C5	1	3
	側鼓音	621	622.25	-0.20	0.51	D#/Eb5	2#	
a-2	正鼓音	651	659.26	-1.25	0.35	E5	3	4
	側鼓音	812	830.61	-2.24	0.58	G#/Ab5	5#	
a-3	正鼓音	731	739.99	-1.21	0.08	F#/Gb5	4#	4
	側鼓音	919	932.33	1.43	0.39	A#/Bb5	6#	
a-4	正鼓音	1099	1108.73	-0.88	0.42	C#/Db6	1#	4
	側鼓音	1376	1396.91	1.50	0.63	F6	4	
a-5	正鼓音	1390	1396.91	0.49	0.35	F6	4	4
	側鼓音	1779	1760	1.08	0.71	A6	6	
a-6	正鼓音	1987	1975.53	0.58	0.60	B6	7	3
	側鼓音	2329	2349.32	0.86	0.75	D7	2	

表 4 音階頻率對照表(查詢日期:2022.04.11) [12]

音名	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	頻率比
C	8.18	16.35	32.70	65.41	130.81	261.63	523.25	1046.50	2093.00	4186.01	8372.02	1
C#/Db	8.66	17.32	34.65	69.30	138.59	277.18	554.37	1108.73	2217.46	4434.92	8869.84	1.059463
D	9.18	18.35	36.71	73.42	146.83	293.66	587.33	1174.66	2349.32	4698.64	9397.27	1.122462
D#/Eb	9.72	19.45	38.89	77.78	155.56	311.13	622.25	1244.51	2489.02	4978.03	9956.06	1.189207
E	10.30	20.60	41.20	82.41	164.81	329.63	659.26	1318.51	2637.02	5274.04	10548.08	1.259921
F	10.91	21.83	43.65	87.31	174.61	349.23	698.46	1396.91	2793.83	5587.65	11175.30	1.334840
F#/Gb	11.56	23.12	46.25	92.50	185.00	369.99	739.99	1479.98	2959.96	5919.91	11839.82	1.414214
G	12.25	24.50	49.00	98.00	196.00	392.00	783.99	1567.98	3135.96	6271.93	12543.85	1.498307
G#/Ab	12.98	25.96	51.91	103.83	207.65	415.30	830.61	1661.22	3322.44	6644.88	13289.75	1.587401
A	13.75	27.50	55.00	110.00	220.00	440.00	880.00	1760.00	3520.00	7040.00	14080.00	1.681793
A#/Bb	14.57	29.14	58.27	116.54	233.08	466.16	932.33	1864.66	3729.31	7458.62	14917.24	1.781797
B	15.43	30.87	61.74	123.47	246.94	493.88	987.77	1975.53	3951.07	7902.13	15804.27	1.887749
C	16.35	32.70	65.41	130.81	261.63	523.25	1046.50	2093.00	4186.01	8372.02	16744.04	2

表 5 無枚甬鐘之聲音音準表

無枚編號	敲擊音	基音頻率 (Hz)	音階頻率 (Hz)	頻率誤差 (%)	衰減率 σ	音名	簡譜	音程差
b-1	正鼓音	286	293.66	-2.60	1.71	D4	2	3
	側鼓音	342	349.23	-2.07	1.03	F4	4	
b-2	正鼓音	318	311.13	2.20	1.04	D#/Eb4	2#	5
	側鼓音	405	415.30	-2.48	2.17	G#/Ab4	5#	
b-3	正鼓音	368	369.99	4.32	0.94	F#/Gb4	4#	4
	側鼓音	470	466.16	0.82	1.00	A#/Bb4	6#	
b-4	正鼓音	383	392.00	-2.29	1.38	G4	5	3
	側鼓音	477	466.16	2.32	1.03	A#/Bb4	6#	
b-5	正鼓音	429	440.00	-2.50	1.89	A4	6	4
	側鼓音	546	554.37	-1.50	0.90	C#/Bb5	1#	

表 6 短枚甬鐘之聲音音準表

短枚編號	敲擊音	基音頻率 (Hz)	音階頻率 (Hz)	頻率誤差 (%)	衰減率 σ	音名	簡譜	音程差
c-1	正鼓音	286	293.66	-2.60	0.67	D4	2	3
	側鼓音	345	349.23	-1.21	1.41	F4	4	
c-2	正鼓音	323	329.63	-2.01	1.07	E4	3	4
	側鼓音	409	415.30	-1.5	1.17	G#/Ab4	5#	
c-3	正鼓音	383	392.00	-2.29	1.55	G4	5	3
	側鼓音	475	466.16	1.89	0.74	A#/Bb4	6#	
c-4	正鼓音	425	415.30	2.33	0.89	G#/Ab4	5#	5
	側鼓音	541	554.37	-2.41	0.78	C#/Db5	1#	
c-5	正鼓音	505	493.88	2.25	2.84	B4	7	3
	側鼓音	599	587.33	1.98	1.18	D5	2	
c-6	正鼓音	590	587.33	0.45	0.70	D5	2	3
	側鼓音	695	698.46	-0.49	1.38	F5	4	

表 7 長枚甬鐘之聲音音準表

(a) 正鼓音與側鼓音比較之聲音音準表

長枚編號	敲擊音	基音頻率 (Hz)	音階頻率 (Hz)	頻率誤差 (%)	衰減率 σ	音名	簡譜	音程差
d-1	正鼓音	193	196.00	-1.53	0.58	G3	5	4
	側鼓音	244	246.94	-1.11	0.89	B3	7	
d-2	正鼓音	216	220.0	-1.81	2.92	A3	6	4
	側鼓音	273	277.18	-1.51	1.39	C#4/Db4	1#	
d-3	正鼓音	257	261.63	-1.76	0.89	C3	1	3
	側鼓音	305	311.13	-1.97	1.53	D#/Eb4	2#	
d-4	正鼓音	285	293.66	2.82	1.44	D4	2	3
	側鼓音	343	349.23	-1.78	0.76	F4	4	
d-5	正鼓音	322	329.63	-2.31	0.49	E4	3	3
	側鼓音	382	392.00	-2.55	1.26	G4	5	

(b) 正鼓音之聲音音準表

長枚編號	敲擊音	基音頻率 (Hz)	音階頻率 (Hz)	頻率誤差 (%)	衰減率 σ	音名	簡譜	音程差
d-1	正鼓音	193	196.00	-1.53	0.58	G3	5	2
d-2	正鼓音	216	220.0	-1.81	2.92	A3	6	
d-3	正鼓音	257	261.63	-1.76	0.89	C3	1	2
d-4	正鼓音	285	293.66	2.82	1.44	D4	2	
d-5	正鼓音	322	329.63	-2.31	0.49	E4	3	2

表 8 大型長枚甬鐘之聲音音準表

大型 長枚 編號	敲擊音	基音頻率 (Hz)	音階頻率 (Hz)	頻率誤差 (%)	衰減率 σ	音名	簡譜	音程差
e-1	正鼓音	119	116.54	2.11	0.28	A#/Bb2	6#	5
	側鼓音	154	155.56	-1.00	0.09	D#/Eb3	2#	
e-2	正鼓音	73	73.42	-0.57	0.41	D2	2	3
	側鼓音	86	87.31	-1.50	0.35	F2	4	
e-3	正鼓音	182	185.00	-1.62	0.53	F#/Gb3	4#	1
	側鼓音	197	196.00	0.51	0.59	G3	5	

Discussions on Percussion Sound Characteristics of Chime-bells of Marquis Yi of Zeng

Bor-Tsuen Wang¹, Bo-Jun LI¹, Po-Chang Huang¹, Hsin-I Chiu¹, Gu-Hua Lin¹

¹Department of Mechanical Engineering
National Pingtung University of Science and Technology

ABSTRACT

Chime-bell is a kind of traditional Chinese percussion instrument, and Chime-bells of Marquis Yi of Zeng is the largest and most wide-ranging musical instrument among the ancient chimes. This work aims to measure and analyze sound characteristics of the reproduced Chime-bells exhibited in National Museum of Natural Science. This study includes five sets of Chime-bells, i.e. Nui Bell, Yong Bells without the protrusion, short and long protrusions as well as Large Yong Bell with long protrusions. The Chime-bell is designed for two-tone chimes that can be named as Face-tone and Side-tone. While the Face-tone sound is struck at the middle of drum area, the Side-tone is at the side. The percussion sound is recorded by mobile device and carried out for spectral analysis, spectrogram analysis and decay rate analysis so as to examine the pitch, tonality and decay effect of Chime-bell sound. From the sound spectrum and its time-frequency plot, one can categorize the fundamental frequency that is for the pitch evaluation and other overtone frequencies that compose of tonality of percussion sound. The decay rate of time waveform is determined to characterize the decay effect, namely the continuity. This work shows the detailed analysis for a Nui-Bell and evaluate the design philosophy of the five sets of Chime-bells. Results show the interval differences between the Face-tone and Side-tone are mostly with major third or minor third. The same set of Chime-bell can produce a series of musical notes, though some of the pitch are not quite match with the standard frequencies, but identifiable. Different sets of Chime-bells reveal lower and higher pitches; however, their basic patterns in terms of frequency

response are similar. This work primarily investigates the percussion sound characteristics of five Chime-bell sets and calibrates the pitch of Face-tone and Side-tone as well as the pitch relation in a Chime-bell set. There are much more sound generation mechanisms and design philosophy for the Chime-bells to explore in the future.

Keywords: Chime-bells of Marquis Yi of Zeng, sound characteristics, spectral analysis, time-frequency analysis, fundamental frequency, overtone frequency

