

曾侯乙編鐘之聲音特性探討

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

王栢村 李柏駿 黃博彰 邱薪亦 林谷樺

Bor-Tsuen Wang, Bo-Jun Li, Po-Chang Huang, Hsin-I Chiu, Gu-Hua Lin

國立屏東科技大學機械工程系

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

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。本文旨在量測和分析在國家自然科學博物館展示的複製版曾侯乙編鐘之打擊聲音。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，即聲音的持續度。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。

關鍵字：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

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 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

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] 對三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，由於三口銅鐘幾何形狀大小相近，故發聲頻率差異較小，透過時頻圖 (spectrogram) 的觀察，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 (fundamental frequency) 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，建構的有限元素模型可等效於實際結構，且頻率響應對應良好，並進行主觀與客觀指標之關聯探討，發現普遍性的主觀會認為，聲音的尖銳度越高，其基音頻率越高，而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，實驗的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高頻率的峰值頻率 (peak frequencies)。Hibbert et al. [5] 敲擊教堂鐘的邊緣位置，所激發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模式，產生多個模擬音，能夠模擬出實際敲擊聲音。

樂器聲音的發音機制也可以發現和結構的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。且利用不同硬度的槌子進行實驗，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 (frequency error) 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，對五邊形板進行尺寸優化設計，目的在於設計出泛音頻率可為基音頻率的兩倍，意味有好的和聲。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板設計，並透過振動模態、頻率響應函數進行設計驗證，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，此模型透過調整參數，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，再對照音階標準頻率 (pitch frequency)，來觀察其音高與音色，最後討論不同編鐘之音階、音程差之關係，推論整組編鐘之設計理念。

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其打擊聲音，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高水準，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布位置圖，外觀細節則如圖 2 不同類型之編鐘照片。

本文探討之曾侯乙編鐘為雙音編鐘，如圖 3 所示，依據形狀及枚的長短分類，總共量測 25 口鐘。在敲擊量測時分別敲擊編鐘中央及側面，圖 4 為敲擊

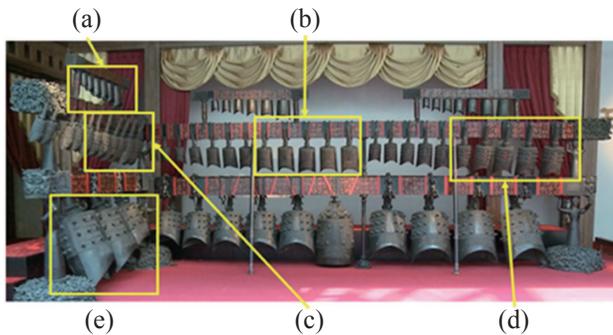


圖 1 不同種類編鐘之分布位置圖 [11]。
(a) 鈕鐘；(b) 無枚甬鐘；(c) 短枚甬鐘；(d) 長枚甬鐘；
(e) 大型長枚甬鐘

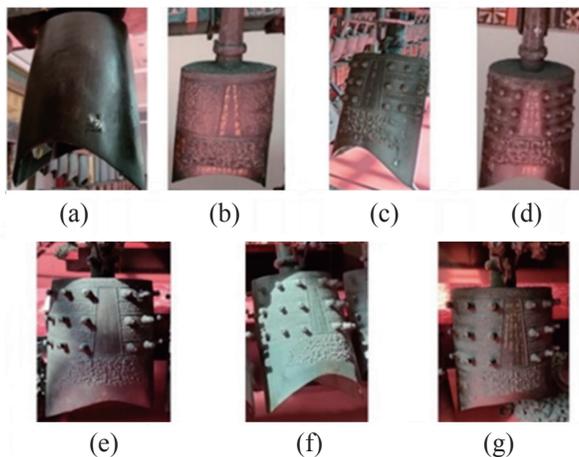


圖 2 不同類型之編鐘照片。
(a) 鈕鐘；(b) 無枚甬鐘；(c) 短枚甬鐘；(d) 長枚甬鐘；(e) 大型長枚甬鐘 (最左邊)；(f) 大型長枚甬鐘 (中間)；
(g) 大型長枚甬鐘 (最右邊)

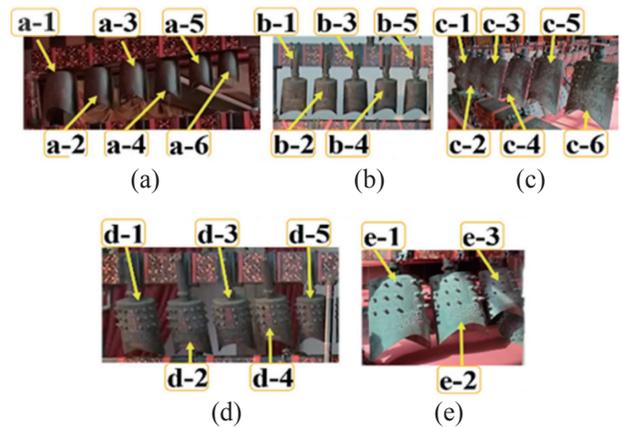


圖 3 不同編鐘系列照片。
(a) 鈕鐘系列；(b) 無枚甬鐘系列；(c) 短枚甬鐘系列；
(d) 長枚甬鐘系列；(e) 大型長枚甬鐘系列

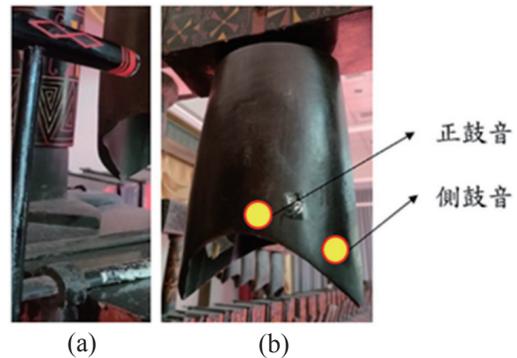


圖 4 敲擊設備與敲擊位置。
(a) 敲擊槌；(b) 敲擊位置

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。

本文的聲音量測，對每一個編鐘的中央及側面分別敲擊三次，利用行動裝置取得聲音 MP4 檔，由聲音量測軟體 (Sound Measure Software, SM) [12] 進行音檔分割，並轉換成 wav 檔。在本次實驗中參數設定，取樣頻率為 48000 Hz，當取樣點數為 48,000 點、頻率解析度為 1 Hz、平均次數為 2 次、重疊率為 90%、自動選取峰值點之聲音壓力位準閾值為 35 dB。

3. 聲音特徵分析流程

本節將介紹實驗分析流程，如圖 5 聲音特徵分析流程圖所示，輸出參數 f_r 為編鐘之自然頻率、 p_r 為對應該頻率之聲音壓力、 ζ_r 為對應之阻尼比，透過讀

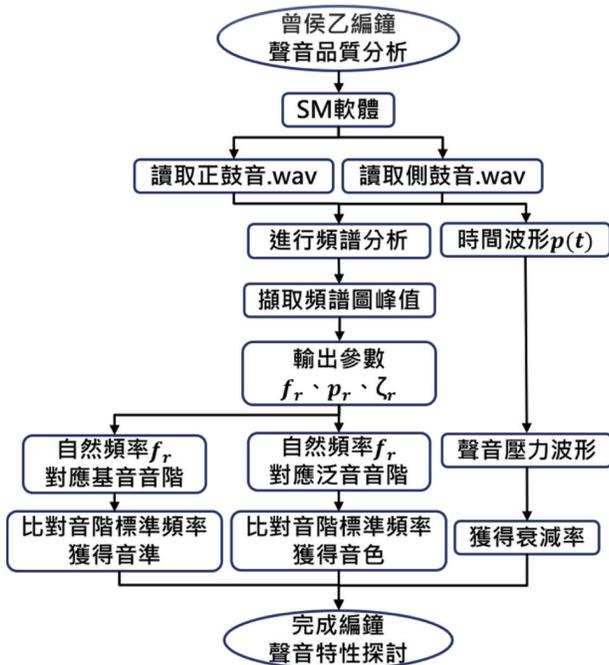


圖 5 聲音特徵分析流程圖

取音檔進行時頻分析 (spectrogram analysis)、頻譜分析 (spectral analysis)，而頻譜圖 (spectrum) 中的峰值頻率即為該聲音的發聲頻率也會是該結構自然頻率 f_r ，其中 $r = 1$ ，或 $r = 2$ 之峰值頻率，聲音壓力位準較高者，視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及其音色。

圖 6 為典型的時頻分析介面，包含時間域波形圖、響度圖、頻譜圖、時頻圖。

本次分析取得五種不同型式編鐘之自然頻率 f_r 、聲音壓力位準 dB、衰減率 σ ，透過比對音階標準頻率，來判斷其音階及音準，最後進行綜合比較，探討之間的差異及聲音特性。

3.1 聲音量測系統 (SM) 之應用

以下以圖 3(a) 的鈕鐘 a-4 敲擊側鼓音所得到的時間域波形做分析，所以本節將以此鈕鐘之側鼓音為例，展示完整的分析過程。

時頻圖，也可以說是時頻譜，就是可以透過對時間域波形信號 $p(t)$ ，進行短時傅立葉轉換 (short time Fourier transform, STFT) 的時頻分析 [13]，可以求得其時頻函數 $P(t, f)$ ，可以同時觀察時間域和頻譜域信號特徵。圖 6 為典型的時頻分析介面，其說明如下：

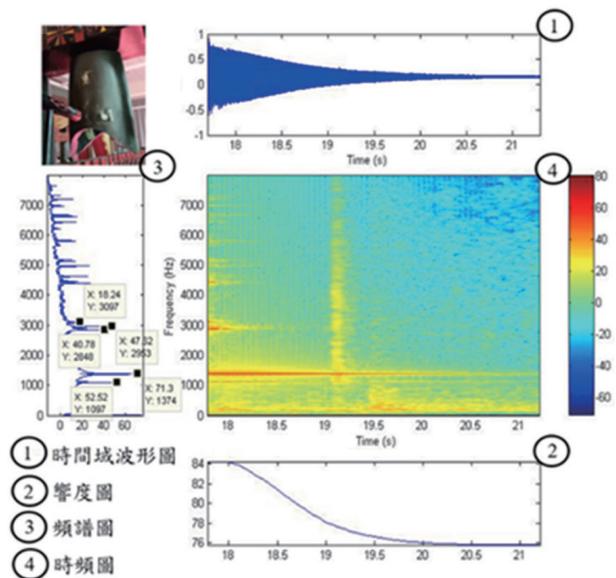


圖 6 典型的時頻分析介面：以圖 3(a) 的鈕鐘 a-4 之側鼓音為例

- (1) 時間域波形圖：x 軸為時間 s、y 軸為聲音壓力 Pa，觀察其時間域波形 $p(t)$ ，聲音壓力會隨著時間遞減，即為聲音的衰減現象。
- (2) 響度圖：x 軸為時間 s、y 軸為聲音壓力位準 dB，而聲音壓力位準 dB 即是分貝，是常用於計量聲音大小的單位，由響度圖，可觀察聲音壓力位準值 dB 隨著時間衰減的狀況。
- (3) 頻譜圖：x 軸為聲音壓力位準值 dB、y 軸為頻率 Hz，可得知該聲音訊號在各個頻率的聲音壓力位準 dB，可以發現數個明顯的峰值頻率，就是對應的自然頻率 f_r 及聲音壓力位準 dB。
- (4) 時頻圖：x 軸為時間 s、y 軸為頻率 Hz、z 軸為聲音壓力位準值 dB，圖示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。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，反之聲音持續時間較短，透過此關係，可以判斷此敲擊音是由哪些頻率所主導。

頻譜分析 [14] 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 7 為典型的頻譜分析介面，由圖 7(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 ~ 20000 Hz，所以時頻分析及頻譜分析最初以 24000 Hz 為頻率量測上限，但是在圖 7(b) 可見聲音壓力位準於 8000 Hz 後幾乎衰減至低於 0 dB，故圖 7(c) 僅討論 8000 Hz 以前之峰值，其中典型的側鼓音，第二個峰值頻率會是其基音頻率，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 7(c) 中的紅圈為 35 dB 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，皆可標示觀察出明顯的峰值頻率。

3.2 鈕鐘的聲音特徵分析

在獲取聲音 wav 檔後，經由聲音量測軟體 (SM) 進行時頻分析及頻譜分析，取得如圖 8 的典型聲音頻譜圖，可瞭解峰值頻率與聲音壓力位準之關係。如圖 8(a) 正鼓音之聲音頻譜圖及圖 8(b) 側鼓音之聲音頻譜圖，圖中發現正鼓音之基音頻率會出現在第一個峰值

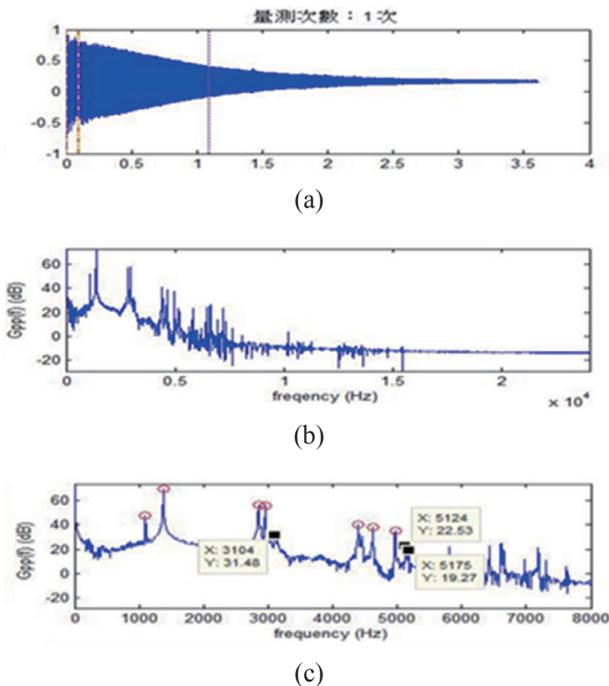


圖 7 典型的頻譜分析介面：以圖 3(a) 的鈕鐘 a-4 之側鼓音為例。(a) 時間域波形圖；(b) 自身功率頻譜圖 (24000 Hz)；(c) 自身功率頻譜 (8000 Hz)

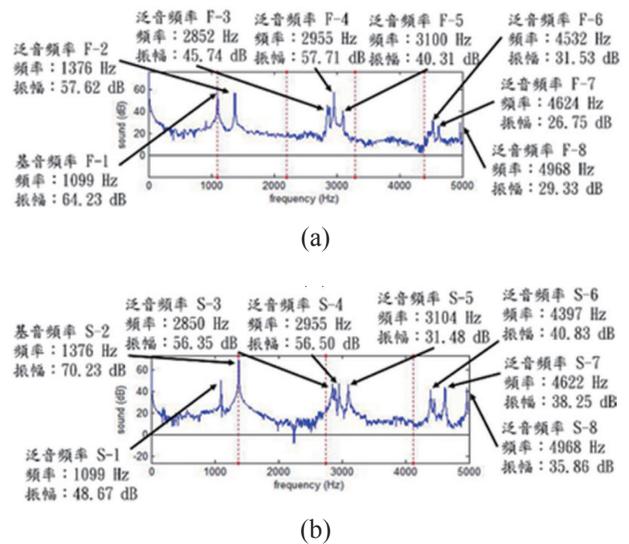


圖 8 典型的聲音頻譜圖：以圖 3(a) 的鈕鐘 a-4 為例。(a) 正鼓音之聲音頻譜圖；(b) 側鼓音之聲音頻譜圖

頻率，例如 F-1 為 1099 Hz，則其餘頻率皆為泛音頻率，如 F-2 與 F-3，分別為 1376 Hz 與 2852 Hz；而側鼓音之基音頻率會出現在第二個峰值頻率，例如 S-2 為 1376 Hz，則其餘頻率皆亦為泛音頻率，如 S-1 與 S-3，分別為 1099 Hz 與 2850 Hz。

經由觀察圖 8 典型的聲音頻譜圖，可以將基音頻率與泛音頻率數據，彙整成表 1 是圖 3(a) 的鈕鐘 a-4 之基音頻率與泛音頻率總表。可以區分為正鼓音及側鼓音，分別有三次敲擊的聲音分析結果，判斷該鐘之基音頻率、泛音頻率與音準、音色之關聯性。

經由觀察表 1 基音頻率與泛音頻率總表，得出以下結論：

- (1) 發現三次敲擊所得到的基音頻率相同，例如正鼓音為 1099 Hz，側鼓音為 1376 Hz，故以此作為判斷基音頻率的方式，也作為後續探討音準與音色關係之依據。
- (2) 泛音頻率之誤差大多數小於 3 Hz，可見實驗數據具有一定的可靠度；只有側鼓音 #4-2 與 #4-3 之第五個泛音頻率，分別為 3104 Hz 與 3096 Hz 相差 8 Hz。
- (3) 側鼓音之基音頻率與泛音頻率數值，都普遍高於正鼓音之基音頻率與泛音頻率。
- (4) 表中的頻率比，為基音頻率與泛音頻率的比值，由此可以觀察出部分泛音頻率與基音頻率具有倍頻關係，例如側鼓音之第二個泛音頻率，其頻率

表 1 基音頻率與泛音頻率總表：以圖 3(a) 的鈕鐘 a-4 為例

類別	圖 1(a) 的鈕鐘 a-4 正鼓音						圖 1(a) 的鈕鐘 a-4 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

比為 2.07；倍頻關係會影響該鐘的音色組成，因為音色最主要由基音頻率與具有倍頻關係之泛音頻率構成。

表 1 為基音頻率與泛音頻率總表，其正鼓音之基音頻率為 1099 Hz，與表 2 音階標準頻率對照表比較後，可得出最接近該鐘設計音之音階標準頻率及音名 (note name)，即為 1108.73 Hz 與 Db6，並計算基音頻率 f_f 與音階標準頻率 f_p 之頻率誤差 f_e ，其計算如下：

$$f_e = (f_f - f_p) / f_p \quad (2)$$

此外，音程為兩個音階之間音高的距離，如 C5 與 D#/Eb5 對照表 2 為音階標準頻率對照表，可以發現兩者之間相差三個半音，即為三度音程差。

藉由聲音量測軟體 (SM) 分析後，可以取得聲音之衰減率，如圖 9 為典型的衰減率分析結果圖示，編鐘在受到敲擊後，所產生的振幅因為自身的阻尼效應，而隨著時間衰減，如圖中所見之曲線特徵，呈現標準的阻尼衰減效應；如圖 9 中的衰減率為 0.63，其

中衰減率越大，聲音衰減的越快，反之衰減率越小，聲音衰減的越慢，故常以衰減率代表聲音的持續度。

4. 不同編鐘之聲音探討

本文利用聲音量測軟體 (SM) 對五種不同型式編鐘進行聲音特徵分析，由表 1 可得到編鐘的基音頻率，表 2 為音階標準頻率及音名、簡譜，故可計算音程差與頻率誤差，以及圖 9 得到的衰減率，綜合上述資訊，可彙整得到表 3 鈕鐘之基音頻率與音名特性總表。

表 3 係以圖 1(a) 的鈕鐘組分析結果，鈕鐘總共有六口鐘，並區分為正鼓音與側鼓音，標註了鈕鐘基音頻率與音名特性總表，以編號 a-1 為例，觀察以下重點：

- (1) 正鼓音之基音頻率為 521 Hz，對應音階標準頻率為 523.25 Hz，可推算頻率誤差為 -0.43%；側鼓音之基音頻率為 621 Hz，對應音階標準頻率為 622.25 Hz，可推算頻率誤差為 -0.20%。
- (2) 正鼓音之音名為 C5，簡譜為 1，側鼓音之音名為 Eb5，簡譜為 2#，推算音程差為 3 個半音。

表 2 音階標準頻率對照表 [15]

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	1.000000
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	2.000000

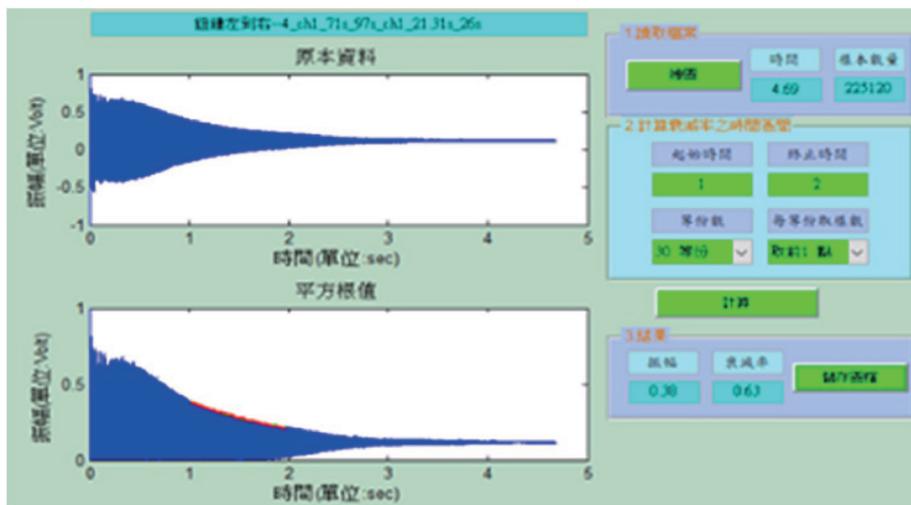


圖 9 典型的衰減率分析結果圖示：以圖 3(a) 的鈕鐘 a-4 之側鼓音為例

(3) 正鼓音之衰減率為 0.17，側鼓音之衰減率為 0.51。

其餘四種編鐘，可透過相同的分析程序，取得如表 3 鈕鐘之基音頻率與音名特性總表，分別有表 4 無枚甬鐘之基音頻率與音名特性總表、表 5 短枚甬鐘之基音頻率與音名特性總表、表 6 長枚甬鐘之基音頻率與音名特性總表、表 7 大型長枚甬鐘之基音頻率與音名特性總表。

表 3 至表 7 之基音頻率與音名特性總表，有各組編鐘數量，分別有兩種敲擊方式：正鼓音與側鼓音，以及其對應的聲音頻率與音階標準頻率之對照，包含

兩者之間的頻率誤差，和對應的音名，如 C、D、E、F、G、A、B，與簡譜音名，如 1、2、3、4、5、6、7，並分別呈現正鼓音與側鼓音的音程差，以及衰減率。

經觀察表 3 至表 7 之基音頻率與音名特性總表，綜合結論如下：

- (1) 可以發現正鼓音與側鼓音所對照的音階標準頻率有明顯差異，都能發出兩個音階的聲音，且在敲擊正鼓音時，也會激發側鼓音的基音頻率，形成兩者之合成音，故稱為雙音編鐘。
- (2) 在音準比較的部分，一般認為頻率誤差低於 ±

表3 鈕鐘之基音頻率與音名特性總表

鈕鐘編號	敲擊音	基音頻率 (Hz)	音階標準頻率 (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	1760.00	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 無枚甬鐘之基音頻率與音名特性總表

無枚編號	敲擊音	基音頻率 (Hz)	音階標準頻率 (Hz)	頻率誤差 (%)	衰減率 σ	音名	簡譜	音程差
b-1	正鼓音	286	293.66	-2.61	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	2.21	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	-0.54	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	-2.30	1.38	G4	5	3
	側鼓音	477	466.16	2.33	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	-1.51	0.90	C#/Bb5	1#	

表5 短枚甬鐘之基音頻率與音名特性總表

短枚編號	敲擊音	基音頻率 (Hz)	音階標準頻率 (Hz)	頻率誤差 (%)	衰減率 σ	音名	簡譜	音程差
c-1	正鼓音	286	293.66	-2.61	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	-1.52	1.17	G#/Ab4	5#	
c-3	正鼓音	383	392.00	-2.30	1.55	G4	5	3
	側鼓音	475	466.16	1.90	0.74	A#/Bb4	6#	
c-4	正鼓音	425	415.30	2.34	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	1.99	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	-0.50	1.38	F5	4	

表 6 長枚甬鐘之基音頻率與音名特性總表

長枚編號	敲擊音	基音頻率 (Hz)	音階標準頻率 (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	-1.19	0.89	B3	7	
d-2	正鼓音	216	220.00	-1.82	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	-1.77	0.89	C4	1	3
	側鼓音	305	311.13	-1.97	1.53	D#/Eb4	2#	
d-4	正鼓音	285	293.66	-2.95	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	

表 7 大型長枚甬鐘之基音頻率與音名特性總表

大型長枚編號	敲擊音	基音頻率 (Hz)	音階標準頻率 (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	

0.34% 者，為音準良好；但由上述編鐘之基音頻率與音名特性總表觀察後，得知所有編鐘之頻率誤差皆介於 $\pm 3.00\%$ 以內，而此推測可能為複製品及環境音的關係，影響音準品質；因此，將頻率誤差大於 $\pm 2.50\%$ 者，視為較不準確之音階頻率，並以粗體標示。

- (3) 在音色比較的部分，正鼓音與側鼓音之間的音程差普遍為 3 個半音或 4 個半音，具有大三度與小三度的特性，即為不完全協和音程，其特性是聲音較為豐滿，另外有三組編鐘具 5 個半音的音程差，即為完全協和音程之純五度，特性是聲音帶有愉悅情緒，但推測可能為複製品之關係，導致音程差較大。
- (4) 由衰減率討論聲音持續度的部分，因為正鼓音是第一個振動模態，所以驗證正鼓音之衰減率會明顯小於側鼓音，而衰減率較小時，聲音蕩漾回音的效果較好，故推測奏樂時，可能會以正鼓音為主，側鼓音為輔。
- (5) 由表 6 長枚甬鐘之基音頻率與音名特性總表，長

枚甬鐘的簡譜為 5、6、1、2、3，其對照音名為 So、La、Do、Re、Mi，完全符合中國音樂五聲音階 (pentatonic scale) 徵、羽、宮、商、角。

- (6) 編鐘的尺寸越小與基音頻率越高，符合結構聲學原理，小鈴鐺的清脆聲，與大笨鐘低沉的聲音特性。

透過表 3 至表 7 之重要資訊擷取，彙整成表 8 不同型式編鐘之綜合比較表，其中包含表 8(a) 不同型式編鐘之頻率誤差與衰減率特性總表，和表 8(b) 不同型式編鐘之音名與音程差特性總表。

表 8 為不同型式編鐘之綜合比較表，彙整了各組編鐘的頻率誤差、衰減率、音名與音程差，其中頻率誤差與衰減率，分別以最大值 (MAX)、最小值 (MIN)、平均值 (AVG) 及標準差 (SD) 表示，而音名與音程差則是依序彙整成表。

觀察表 8 的不同型式編鐘之綜合比較表，討論如下：

- (1) 大型長枚甬鐘之音程差的部分，並無觀察出特別意義，且衰減率明顯較小，故推測可能為裝飾音的用途，可加強音樂的旋律及節奏感。
- (2) 所有類型的甬鐘在平均頻率誤差與平均衰減率方

表 8 不同型式編鐘之綜合比較表

編鐘型式	頻率誤差 (%)					衰減率 (%)			性總表		
	最大 (MAX)	最小 (MIN)	最大 (MAX)	最小 (MIN)	平均 (AVG)	標準差 (SD)	平均 (AVG)	標準差 (SD)	音名	音程差	
鈕鐘	-1.25	0.6	0.08	0.33	0.17	-0.43	-0.61	0.68	C5/E5/Gb5/Db6/F6/B6	3/4/4/4/4/3	
	-2.24	0.75	0.39	0.60	0.12	-0.20	-0.86	1.17	Eb5/Ab5/Bb5/F6/A6/D7		
無枚甬鐘	-2.61	1.89	0.94	1.39	0.37	-0.54	-1.15	2.06	D4/Eb4/Gb4/G4/A4	3/5/4/3/4	
	-2.48	2.17	0.90	1.23	0.47	0.82	-0.58	2.07	F4/Ab4/Bb4/Bb4/Bb5		
短枚甬鐘	-2.61	2.84	0.67	1.29	0.75	0.45	-0.31	2.29	D4/E4/G4/Ab4/B4/D5	3/4/3/5/3/3	
	-2.41	1.41	0.74	1.11	0.26	-0.50	-0.29	1.84	F4/Ab4/Bb4/Db5/D5/F5		
長枚甬鐘	2.95	2.92	0.49	1.26	0.89	-1.53	-2.08	0.56	G3/A3/C3/D4/E4	4/4/3/3/3	
	-2.55	1.53	0.76	1.17	0.29	-1.19	-1.80	0.51	B3/Db4/Eb4/F4/G4		
大型長枚甬鐘	2.11	0.53	0.28	0.41	0.10	-0.57	-0.03	1.92	Bb2/D2/Gb3	5/3/1	
	-1.50	0.59	0.09	0.34	0.20	0.51	-0.66	1.05	Eb3/F2/G3		

面，側鼓音皆小於正鼓音，推測可能是受到甬柱所影響，因為鈕鐘與甬鐘在外觀最大的區別，主要鈕鐘沒有甬柱，而甬鐘有甬柱。

- (3) 鈕鐘的正鼓音之平均頻率誤差與平均衰減率為所有編鐘組之正鼓音中最小；而大型長枚甬鐘之側鼓音之平均頻率誤差與平均衰減率為所有編鐘之側鼓音中最小。代表相當接近於現代音樂理論的音階頻率。
- (4) 不同類型編鐘也具有不同的音域，若音域由高到低排序，則依序為鈕鐘、短枚、無枚、長枚至大型長枚甬鐘。顯示此曾侯乙編鐘組有寬廣的音域範圍。

5. 結論

本文探討了編鐘聲音特徵分析，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，彙整如表 3 至表 7 個別編鐘之綜合比較表，與表 8 不同編鐘之綜合比較表。並以鈕鐘為例，展示了完整的聲音特徵分析過程，也以此方式評估所有的編鐘之設計理念，得出以下幾點結論：

- (1) 編鐘的特殊在於，可由一個結構發出兩種聲音，即正鼓音與側鼓音，且在敲擊正鼓音時，亦會激發側鼓音的基音頻率，形成兩者之合成音，故稱為雙音編鐘。
- (2) 在距今久遠的技術，就能製作編鐘等如此樂器，雖然可能因複製品的關係所影響，導致音準欠佳但仍可辨識音階頻率，且能相當接近對應於現代音樂的音階頻率。
- (3) 每組編鐘都有雙音的設計，皆可當作主音階演奏，也能發出和諧的音色，且大多具有大三度與小三度的特性。
- (4) 在基音頻率、泛音頻率與衰減率方面，正鼓音的衰減率普遍小於側鼓音，且衰減率較小時，聲音蕩漾回音的效果較好，故推測奏樂時，可以以正鼓音為主，側鼓音為輔。
- (5) 編鐘的尺寸越小，普遍峰值頻率越高，符合結構聲學發聲機制，若由音域高到低排序，則依序為鈕鐘、短枚、無枚、長枚至大型長枚甬鐘。
- (6) 所有類型的甬鐘在平均頻率誤差與平均衰減率方

面，側鼓音皆小於正鼓音，推測是受到鈕鐘與甬鐘在外觀最大區別的甬柱所影響。

致謝

感謝臺中國立自然科學博物館提供編鐘聲音之錄製及相關資訊，得以完成本研究，以及科技部經費補助，計畫編號：MOST 111-2221-E-020-016，特此感謝。

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。雲林，2016；論文編號：A-04。
- [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，2016；論文編號：A-05。
- [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，2016；論文編號：J-031。
- [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，2016；論文編號：A-047。
- [5] Hibbert W A, Sharp D B, Taherzadeh S, Perrin R. Partial frequencies and Chladni's law in church bells. *Open J Acoust*, 2014; 4: 70-77. doi:10.4236/oja.2014.42007
- [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，2016；270-277 頁。
- [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。新竹，2016；論文編號：C-1490。
- [8] Wang B T, Chen P C, Tsai Y G, Wu Y H. Development of pentagonal plates with harmonic sound as percussion instrument. in 26th International Congress on Sound and Vibration. Montreal. Canada, 2019; 458.
- [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。雲林，2016；論文編號：A-01。
- [10] Wu C W, Huang C F, Liu Y W. Sound analysis and synthesis of Marquis Yi of Zeng's chime-bell set. *Proc Mtgs Acoust*. 2013; 19: 035077. doi:10.1121/1.4800059
- [11] 國立自然科學博物館。【科博銅樂】單元二：王者之音。2021。檢自 <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=dEPJAr9jNTQ>
- [12] 王栢村。SM 聲音量測系統 (Sound Measurement System, SM)。2017。檢自 <http://aitanhv.blogspot.com/2017/10/sm.html>
- [13] 王栢村。頻譜分析與時頻分析有甚麼差別呢？2019。檢自 <http://aitanhv.blogspot.com/2019/06/blog-post.html>
- [14] 王栢村。傅立葉頻譜與自身功率頻譜有甚麼不同？2018。檢自 https://aitanhv.blogspot.com/2018/09/blog-post_24.html
- [15] Musical note. From https://en.wikipedia.org/wiki/Musical_note

