

編鐘打擊聲音特性及振動模態探討

Discussions on Chime Bell's Percussion Sound Characteristics and Vibration Modes

王栢村¹、曹文昌¹、邱薪亦^{1*}、林谷樺¹、吳盈輝²

¹作者一，國立屏東科技大學機械工程系

²作者二，國立內埔高級農工職業學校

摘要

編鐘是中國古代打擊樂器之一，也稱為雙音鐘，透過敲擊不同的位置，可以產生兩種不同音階的聲音。本文旨在探討縮小型編鐘的敲擊聲音特性，並進行實驗模態分析 (experimental modal analysis, EMA) 以獲得編鐘的振動模態。編鐘以懸掛方式，並以不同打擊棒分別敲擊編鐘的正面和側面，可以量測得到正鼓音和側鼓音的聲音頻譜，並觀察其音高和泛音頻率，可以得知一個編鐘會有特殊的雙音階效果，區別出兩種不同音階的聲音。由於敲擊聲音與結構振動模態有關聯性，透過對編鐘進行 EMA，可以得到結構的振動模態參數，包括自然頻率、模態振型和模態阻尼比。經由比較編鐘的敲擊聲音頻譜和振動模態，發現正鼓音和側鼓音的音高頻率，分別對應於振動模態的第一個和第二個自然頻率，而那些較高的振動模態，則是組成了泛音頻率，代表了編鐘聲音的音色。這也指出編鐘的模態特性會影響敲擊聲音的樂音特性。特別的是，如果編鐘幾何結構有適當的設計，是可以調校出理想的正鼓音和側鼓音之音高頻率，使得具有所想要的音階聲音。本文介紹了編鐘的聲音測量和振動模態辨識方法，藉以瞭解敲擊聲音和振動模態的關係，未來可以採用此實驗和分析方法對編鐘進行設計變更之評估。

關鍵字：編鐘、實驗模態分析、振動模態、聲音特性

Abstract

Chime bell is one of ancient Chinese percussion instruments and known as the so called dual-tone bell that can produce two different musical scales by striking different locations. This work aims to investigate the percussion sound characteristics of a mini chime bell and perform experimental modal analysis (EMA) to obtain vibration modes of the chime bell. The chime bell is suspended and stroked by different sticks at the face and side of chime bell, respectively. The sound spectra of face-tone and side-tone are obtained and examined for their pitch and overtone frequencies. There reveals two different musical scales sound and have the special dual-tone effect. As known, the percussion sound is related to structural vibration modes. Via EMA on the chime bell, vibration modal parameters, including natural frequencies, mode shapes and modal damping ratios, can be identified. By comparison of percussion sound spectra and vibration modes of the chime bell, the pitch frequencies of face-tone and side-tone are shown to correspond to the first and second natural frequencies of vibration modes, while those

higher vibration modes consist of the overtone frequencies, representing the tonality of chime bell. This implies that the modal properties of bell chime can affect the musical sound quality. In particular, the pitch frequencies of the face-tone and side-tone can be adjusted to have the desired musical pitch sound when the chime bell geometry has the proper design. This work presents the sound measurement and vibration modes identification of chime bell as well as calibrates the relation of percussion sound and vibration modes. The experimental methodology and analysis approach can be adopted for the evaluation of design modification of chime bell. Keywords : chime bell, experimental modal analysis (EMA), vibration modes, sound characteristics

一、前言

編鐘最早可追溯於青銅器時代，是中國文化的資產，在八音之中屬「金」，因為有「最高雅的聲音」美譽，而被稱為「金石之聲」，有著清脆明亮的音響。本研究以既有縮小模型編鐘，研究其打擊聲音特性，並對編鐘結構，進行實驗模態分析，探討編鐘打擊聲音與振動模態之關聯性。Yan *et al.* [1]比較了中國編鐘及西方鐘琴，雖然同為青銅製成，但因外觀形狀設計不同，所產生的振動機制也不一樣，並說明編鐘因橢圓狀的特性，因而有其聲音的特殊性。Wu *et al.* [2]對一套曾侯乙編鐘的複製品進行聲音分析與紀錄，並探討基音頻率，利用編鐘聲音合成建構模型，創造出類似鐘聲的聲音。以時頻分析比較了合成和錄製聲音之間的相似性，結果顯示模型編鐘可生成近似於實體編鐘的聲音品質。王等人[3] 主要探討了五個編鐘組的打擊聲音特性，分析編鐘聲音之音高、音色與衰減率，也評估五組編鐘各別的設計理念，瞭解其正鼓音與側鼓音的音高準確度，以及一個編鐘組中不同編鐘的音高關係。王等人[4]進行古鈸打擊聲音量測與特性分析，探討其聲音品質；透過敲擊音的聲音量測，分析古鈸聲音之音高、音色與衰減率，得知其音色有聲音音階比例的倍頻，主要來自古鈸結構具有簡諧倍頻的自然頻率。

各類樂器的發聲機制都與結構振動所產生的效應相關。王等人[5]對平滑表面之銅鐘進行振動模態與發聲機制探討，利用有限元素軟體建構模型，求得理論模態參數，並進行實驗以驗證分析模型，最終比較實驗與理論之模態參數，從而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，量測取得銅鐘敲擊後之聲音頻譜，藉由對應實際結構的模態振型，得知銅鐘的發聲頻率與其振動模態有直接的關聯性。王等人[6]進行縮小模型鐘之有限元素分析和實驗模態分析，並探討聲音特性與振動模態之關聯性，也利用不同材質之敲擊鎚來探討縮小模型鐘的聲音特性。結果顯示，實驗與分析得到的振動模態有良好的對應，故可確定有限元素模型等效於實際結構。而在聲音特性上發現，鋼鎚比其它槌更能激發出較多的峰值頻率。王等人[7]發展聲振耦合分析技術，以理論驗證發聲頻率與振動模態關聯性，透過分析軟體，建構半圓型管結構與空氣結構耦合系統之有限元素模型，分別進行模態與簡諧響應分析，獲得理論之自然頻率、模態振型與頻率響應函數，並與實際結構有合理的對應，成功預測聲場之模態振型，其聲音頻譜也與實際量測互相吻合。

本文針對縮小模型編鐘進行打擊聲音的量測與分析，並透過實驗模態分析

(experimental modal analysis, EMA)，取得編鐘結構的模態參數，瞭解振動模態的物理意義，並對比於麥克風所量測之聲音頻譜，探討聲音與振動模態的關聯性。

二、縮小模型編鐘之打擊聲音特性

本文使用縮小模型編鐘探討其打擊時的聲音特性，編鐘在敲擊正面或側面位置時會分別發出正鼓音及側鼓音，故又稱雙音編鐘(dual-tone chime)。以兩種不同硬度的金屬和橡膠打擊槌，分別探討兩者在聲音頻譜，其基音頻率(fundamental frequency)及泛音頻率(overtone frequency)與衰減率(decay rate)上的差異。在編鐘的聲音頻譜中，基音頻率為聲音持續度最長、聲音壓力最大的發聲頻率，其餘發聲頻率則為泛音頻率，泛音頻率會影響打擊聲音的音色(tonality)。本節利用不同硬度的槌打擊編鐘以獲得基音與泛音頻率探討該編鐘之聲音特性包括：音準、音色及衰減率。

2.1 打擊聲音量測方法

本節說明縮小編鐘打擊聲音量測方法，圖 1 為編鐘聲音量測實驗儀器架設，所需量測設備有麥克風(130D20)、訊號擷取卡 NI-9234、筆記型電腦、以及客制化振動噪音量測系統 SVM (Sound and Vibration Measurement)和聲音量測軟體 SM (Sound Measurement)。使用棉線懸吊編鐘本體，以模擬縮小模型編鐘在自由邊界下，分別以圖 2 橡膠(軟)與金屬(硬)兩種不同材質的打擊槌敲擊。圖 3 為編鐘敲擊位置示意圖，分別標示了正鼓音及側鼓音的敲擊位置，正鼓音敲擊於編鐘下緣中央位置，而側鼓音敲擊於編鐘下緣右側位置。

圖 4 為聲音特徵分析流程圖，透過 SVM 和 SM 軟體，進行聲音的時間波形(time waveform)分析與頻譜分析(spectral analysis)，可獲得基音的音準(pitch)、泛音頻率組成的音色、以及聲音的衰減率等聲音特性。透過時間波形信號，進行短時傅立葉轉換(short time Fourier transform, STFT)的時頻分析，可以求得其時頻函數(spectrogram)，並同時觀察時間域和頻譜域信號特徵。可以由聲音之自身功率頻譜圖，判斷出縮小模型編鐘的基音頻率與泛音頻率，在時頻分析及頻譜分析，可以獲得該聲音之音準、音階與衰減率。

2.2 編鐘聲音特徵探討

圖 5(a)及圖 5(b)分別是以金屬槌敲擊縮小模型編鐘，所得到的聲音頻譜圖，圖中標示 F-01 代表正鼓音的第 1 個發聲頻率，而 S-01 代表側鼓音的第 1 個發聲頻率。量測的頻率範圍最高 20,000 Hz，在 10,000 Hz 以下的峰值頻率都有標示。同時，表 1 彙整了編鐘以金屬和橡膠槌打擊的峰值頻率總表，而表 2 為金屬與橡膠槌打擊聲音之頻譜圖、時頻圖及衰減率分析，綜合討論如下：

1. 金屬槌敲擊的聲音頻譜特徵：由圖 5(a)及圖 5(b)，是以金屬槌敲擊的聲音頻譜，可以觀察出正鼓音和側鼓音的頻譜特徵，略有不同。由表 1，F-01 及 F-02 的峰值頻率，只有側鼓音有，而正鼓音並沒有激發出來。
2. 金屬槌與橡膠槌敲擊的聲音頻譜特徵：由表 2 之頻譜圖，金屬槌可有效的激發高頻率的聲音，特別是高於 10,000 Hz 的峰值頻率。同時，各個峰值頻率對應的聲音壓力 dB 值，金屬槌也比橡膠槌高，主要是金屬與金屬的接觸時間短，可激發接近白噪音

(white noise)的寬頻外力頻譜。



圖 1 聲音量測實驗儀器架設圖



圖 2 不同種類敲擊槌圖



圖 3 編鐘敲擊位置

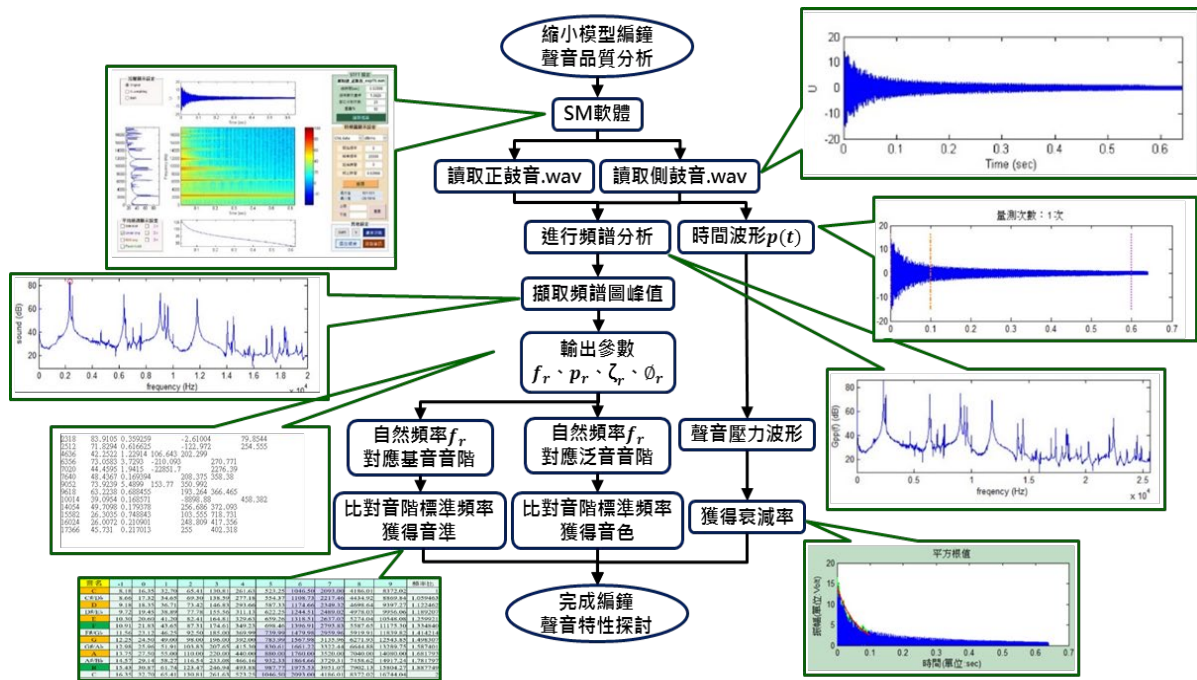
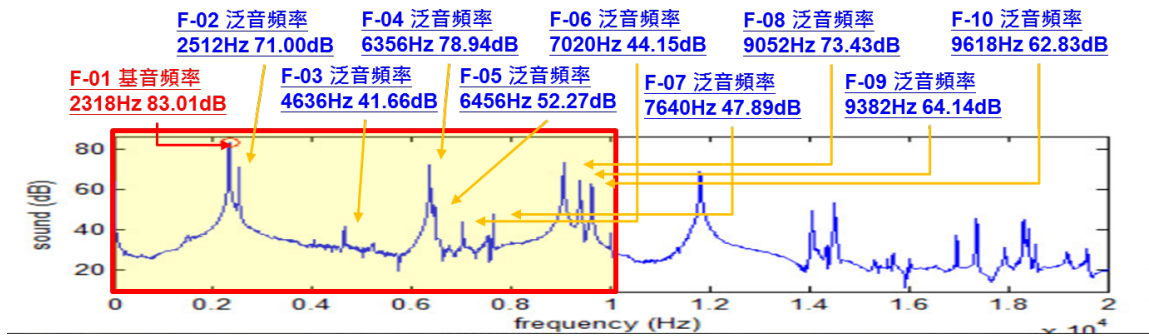


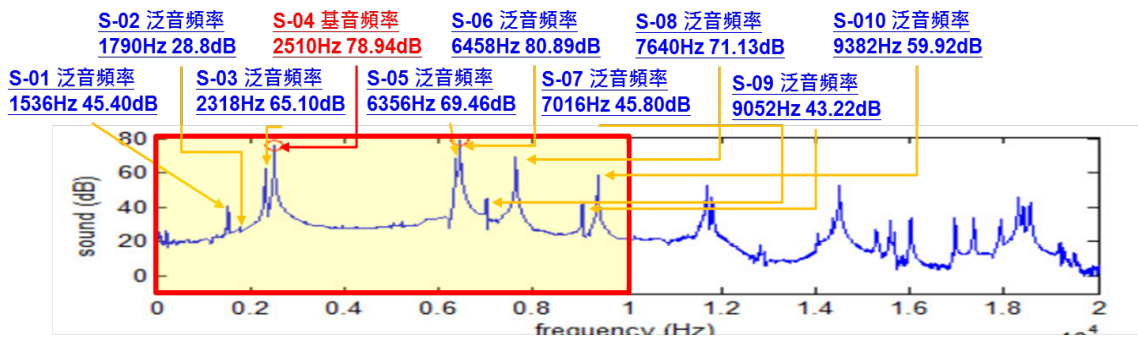
圖 4 聲音特徵分析流程圖

3. 基音頻率特徵：由表 1，正鼓音是 F-03，2318 Hz，而側鼓音是 F-04，2512 Hz，不同敲擊位置，會有不同的基音頻率，是因為其振動模態的模態振型物理意義不同，正鼓音是(1,1)模態，而側鼓音是(2,1)模態。在第 3 節的 EMA 實驗結果，再補充說明。
4. 音準：由表 1 得知基音頻率，對應的就是這個打擊聲音的音準，要與音階的標準頻率比較，經比對並沒有完全對應於標準音階，接近的音階頻率是 C#7=2217.46 Hz，D7=2349.32 Hz，D#7=2489.02 Hz，由於這個縮小模型編鐘，並不是真實的編鐘，因此，本文未做比對，可知要有準確的音階頻率，仍需要結構的變更調校。
5. 泛音頻率特徵：除了基音頻率外，其他的峰值頻率都稱為泛音頻率，組成了編鐘的聲音音色，從頻譜圖可以看出有分散式的峰值頻率，而由表 1 看出，標示綠色網底是有接近倍數頻率的特徵，這種簡諧倍頻特徵，會使得聲音有更和諧的感受。
6. 衰減率：由表 2，金屬槌敲擊正鼓音的衰減率=17.44 最大，雖然是有比較寬頻的外力頻譜，但是，接觸時間短，使得聲音快速的衰減，不過，由表 2 時頻圖，可看出高頻率的峰值呈現紅色的時間長，也就是聲音的持續度，是比較長。另外，也可由表 2 衰減率分析圖，正鼓音的衰減比較慢，持續時間略長於側鼓音。



(a) 正鼓音

圖 5 編鐘打擊聲音頻譜圖：以金屬槌為例



(b) 側鼓音

圖 5 編鐘打擊聲音頻譜圖：以金屬槌為例

表 1 編鐘軟硬槌之基因泛音總表

材質	金屬槌						橡膠槌						物理意義 (θ, Z)
	正鼓音			側鼓音			正鼓音			側鼓音			
Mode	頻率 (Hz)	聲音 壓力 (dB)	倍頻 關係	頻率 (Hz)	聲音 壓力 (dB)	倍頻 關係	頻率 (Hz)	聲音 壓力 (dB)	倍頻 關係	頻率 (Hz)	聲音 壓力 (dB)	倍頻 關係	
F-01	--	--	--	1536	45.40	0.61	--	--	--	1534	44.01	0.61	(1,1)
F02	--	--	--	1790	28.8	0.71	--	--	--	--	--	--	(1,2)
F-03	2318	83.01	1	2318	65.10	0.92	2318	58.52	1	2318	58.36	0.92	(1,1)
F-04	2512	71	1.08	2510	78.94	1	2512	41.14	1.08	2510	57.87	1	(2,1)
F-05	4636	41.66	2	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
F-06	6356	72.37	2.74	6358	69.46	2.53	6358	56.57	2.74	6360	48.19	2.53	(3,1)
F-07	6456	52.27	2.78	6458	80.89	2.57	6460	42.36	2.78	6456	57.67	2.57	(2,1)
S-08	7020	44.15	3.02	7016	45.80	2.79	7022	27.53	3.02	7008	23.39	2.79	(1,2)
S-09	7640	47.89	3.29	7640	71.12	3.04	7640	23.07	3.29	7640	49.35	3.04	(2,2)
S-10	9052	73.43	3.90	9052	43.22	3.60	9054	41.35	3.90	9054	28.41	3.60	(3,2)
S-11	9382	64.14	4.04	9382	59.92	3.73	9382	42.24	4.04	9382	49.58	3.73	(1,2)
S-12	9618	62.83	4.14	11696	53.74	4.65	9618	34.05	4.14	9618	27.11	3.83	(3,2)

表 2 軟硬槌之時間頻譜圖、時頻圖及衰減率分析

		頻譜圖	時頻圖	衰減率分析圖	衰減率
金屬槌	正鼓音				17.44
	側鼓音				6.11
橡膠槌	正鼓音				4.59
	側鼓音				6.19

三、編鐘之實驗模態分析

實驗模態分析為利用加速規結合衝擊錘量測獲得頻率響應函數(frequency response function, FRF)與關連性函數(coherence)後，可經由轉檔匯入 ME'scopeVES 軟體中進行曲線嵌合，獲得實驗之模態參數，包含自然頻率、模態振型及模態阻尼比，在軟體中將繪製好的結構模型，可以觀察實際結構的模態振型。

3.1 實驗模態分析架構

本節旨在說明縮小模型編鐘之實驗模態分析實驗架構，圖 6(a)為縮小模型鐘實驗儀器架構示意圖，利用棉線將縮小模型編鐘以懸吊方式模擬自由邊界，驅動器為小型衝擊錘、感測器為加速規，並將加速規固定於側鼓音位置反面，以移動衝擊錘、固定加速規之方法進行實驗，最後經由圖 6(b)實驗模態分析介面，進行量測數據處理，可同步顯示時間域與頻率域訊號。圖 7(a)為縮小模型編鐘實驗與圖 7(b)為實體佈點示意圖，將縮小模型編鐘在圓周方向分成上半部 14 等份、下半部為 16 等份，高度分成 6 等份，編鐘甬柱在 XY 軸分別為 X 軸 8 點 Y 軸 8 點，總共有 109 個敲擊點，平均敲擊：3 次，以求得頻率響應函數。

3.2 編鐘之振動模態探討

圖 8(a)為加速規位於正鼓音點 H_{ij} ， $(i,j)=(66,64)$ 之頻率響應函數與關聯性函數，圖 8(b)為側鼓音點 H_{ij} ， $(i,j)=(66,68)$ 之頻率響應函數與關聯性函數，其中 i 為加速規位置， j 為衝擊錘敲擊位置，在關聯性函數中，由圖中可以知道除了反共振點外，其餘值接近於 1，代表此次實驗品質是可靠的。表 3 為編鐘實驗模態參數總表，將實驗第一模態以 E-01 所示，共取得 11 組模態參數，模態振型物理意義以 (θ,Z) 表示，其中 θ 代表圓周向

之節線數；Z 代表垂直軸方向之節線數。

圖 9 為縮小模型編鐘所有的頻率響應函數重疊圖，各峰值頻率對應之模態振型在圖示上方，經由比較編鐘的自然頻率和模態振型，發現 E01、E02 模態屬於整體與甬柱作動，E-03 模態之模態振型 $(\theta,Z)=(1,1)$ ，在敲擊正鼓音的位置有明顯的振型擺動，頻率為 2274.5Hz，而 E-04 模態之模態振型 $(\theta,Z)=(2,1)$ ，位於敲擊側鼓音的位置有明顯振型擺動，頻率為 2435.9Hz，所以分別是正鼓音和側鼓音的基音頻率。其餘 E-05~E-11 之模態振型，都是編鐘的振動模態，皆有貢獻到編鐘的發聲頻率，而不同的模態振型有不同的貢獻度，也稱為發聲頻率中的泛音頻率。在實驗模態分析中，因編鐘本身結構是近似於對稱並非完全對稱，因此其對稱模態振型與頻率略有差異，但仍有相同趨勢。

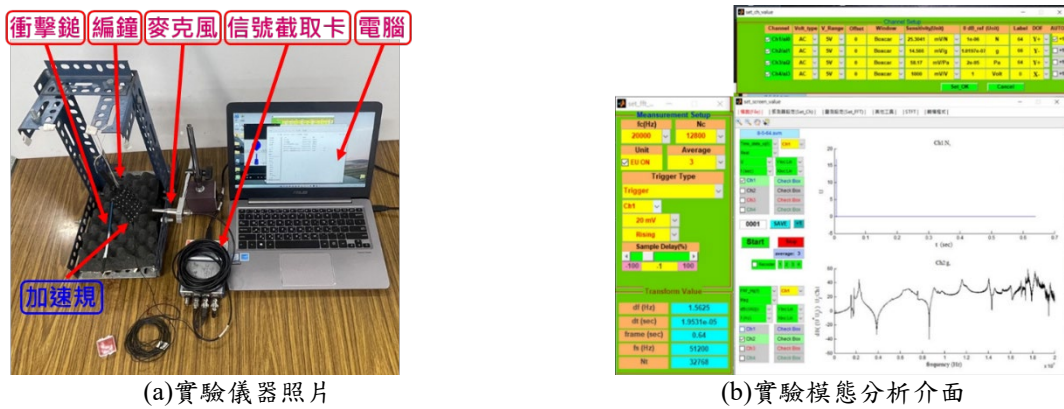
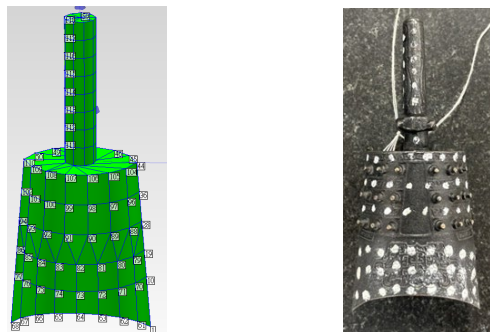
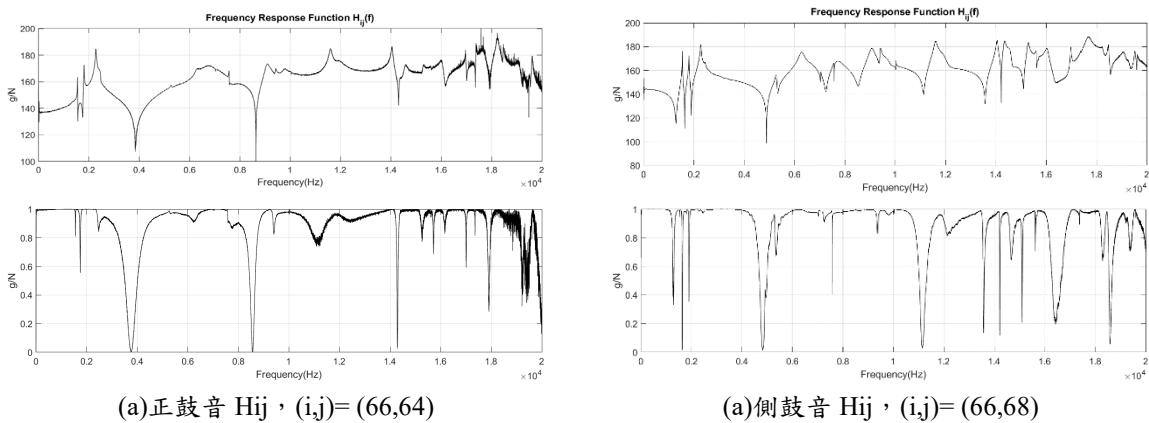


圖 6 EMA 量測架構



(a)EMA 佈點編號示意 (b)實體編鐘佈點

圖 7 編鐘佈點規劃



(a)正鼓音 H_{ij} , $(i,j)=(66,64)$

(a)側鼓音 H_{ij} , $(i,j)=(66,68)$

圖 8 加速規於點(x,y)之頻率響應函數與關聯性函數比較

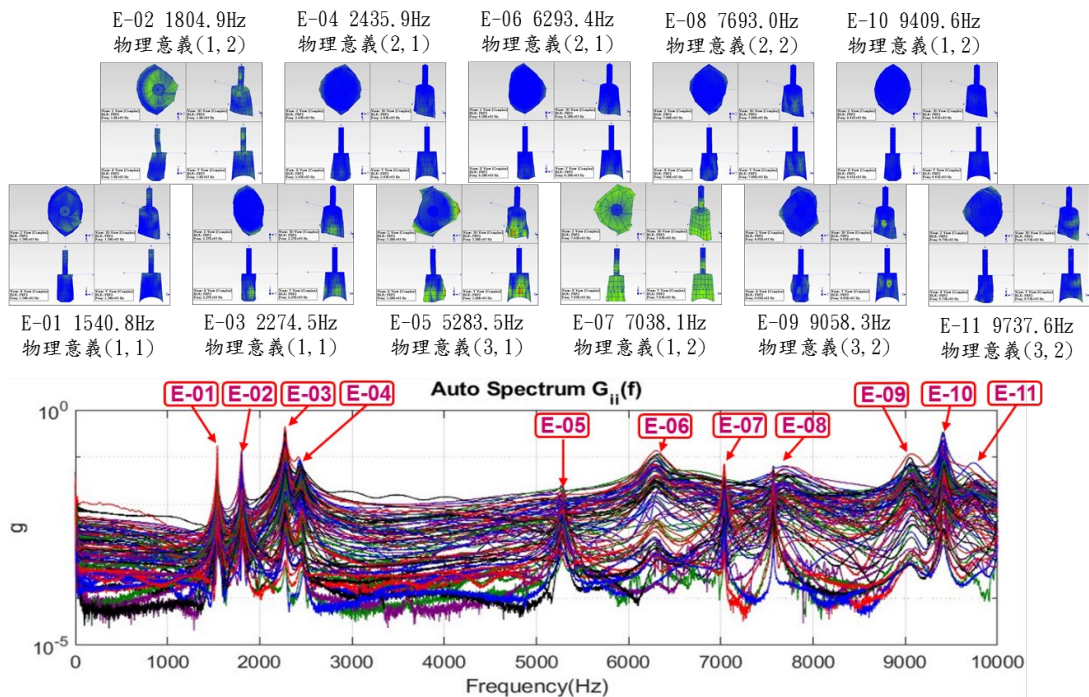


圖 9 縮小模型編鐘頻率響應函數比對實驗模態分析之模態振型圖

表 3 編鐘實驗模態參數總表

模態數	自然頻率(Hz)	阻尼比(%)	物理意義(θ, Z)
E-01	1540.8	0.10	(1,1)
E-02	1804.9	0.25	(1,2)
E-03	2274.5	0.39	(1,1)
E-04	2435.9	1.01	(2,1)
E-05	5283.5	0.43	(3,1)
E-06	6293.4	1.37	(2,1)
E-07	7038.1	0.11	(1,2)
E-08	7693.0	2.13	(2,2)
E-09	9058.3	0.74	(3,2)
E-10	9409.6	0.21	(1,2)
E-11	9737.6	0.47	(3,2)

四、編鐘振動模態與打擊聲音之關聯性

由第 2 節之聲音特性分析，所獲得之發聲頻率與第 3 節之實驗模態分析，進行對照可以發現，在圖 10(a) 縮小模型編鐘正鼓音之聲音特性，與實驗模態關聯性中正鼓音的基音頻率，與實驗模態分析之自然頻率相近，且 E-03 模態最為明顯處與實際敲擊之正鼓音位置相符，故推測實驗模態分析之 E-03 模態為正鼓音、E-04 模態為側鼓音之基音頻率，後續 E-05 到 E-11 模態振型為泛音頻率之對應模態，並彙整出表 4 編鐘聲音量測與 EMA 頻率差異，並探討縮小模型編鐘之聲音特性與實驗模態關聯性比較，推論如下：

1. EMA 量測的自然頻率與發聲頻率略有差異，主要來自縮小模型編鐘受到加速規質量效應影響，但是模態振型的物理意義是可靠的，未來可進行有限元素分析比較驗證。
2. 正鼓音於 F-05 的泛音頻率，在 EMA，並未出現對應模態，可能是 E-03 模態的倍頻效應。
3. 圖 10(b) 縮小模型編鐘之側鼓音聲音特性，會出現振動模態的 E-01 及 E-02，而在正鼓音中，並不會出現，這是因為正鼓音敲擊位置，無法激發此振動模態。

五、結論

本文對編鐘打擊聲音特性及振動模態探討，發展了編鐘打擊聲音量測與特性分析方法，並進行了編鐘實驗模態分析，可瞭解編鐘的基音頻率、泛音頻率、聲音壓力(dB)、泛音的倍頻關係、結構自然頻率、模態振型及模態阻尼比等特性，藉以瞭解聲音特性與振動模態之關聯性，綜合如下：

1. 由振動模態比對，在敲擊正鼓音時，基音頻率是來自模態振型 $(\theta, Z)=(1, 1)$ 的 E-03 模態，而敲擊側鼓音時，基音頻率是來自模態振型 $(\theta, Z)=(2, 1)$ 的 E-04 模態。
2. 敲擊正鼓音時，較不容易出現 E-01 及 E-02 的振動模態，在敲擊側鼓音時模態振型較為完整，後續可藉由敲擊側鼓音，快速驗證實際編鐘結構。
3. 不同硬度槌敲擊正鼓音及側鼓音時，會因為敲擊頭材質不同，導致激發出縮小模型編鐘之有效發聲頻率範圍，而且聲音量值金屬槌會較高。
4. 在編鐘幾何結構適當的設計下，可以將編鐘調校出理想的正鼓音和側鼓音之音高頻率，使得具有所想要的音階聲音。未來可以採用本文的實驗和分析方法對編鐘進行設計變更之評估。

六、致謝

感謝科技部研究計畫的經費補助，計畫編號：111-2221-E-020-016，特此致謝。

七、參考文獻

1. Y. L. Yan, K. G. Chai, H. H. Liang and L. G. Kong, "Physics Involvement in Ancient Chinese Chime Bells," *American Institute of Physics Conference Proceedings*, vol. 1517, pp. 43-48, 2013.
2. 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.
3. 王栢村，李柏駿，黃博彰，邱薪亦，林谷樺，「曾侯乙編鐘之聲音特性探討」，第 29 屆中華民國振動與噪音工程學術研討會，基隆，論文編號：H5，2022。
4. 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。
5. 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，第 270~277 頁，2016。
6. 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。
7. 王栢村，楊昶昱，吳盈輝，「半圓型管打擊樂器之聲振耦合分析」，中國機械工程學會第三十四屆全國

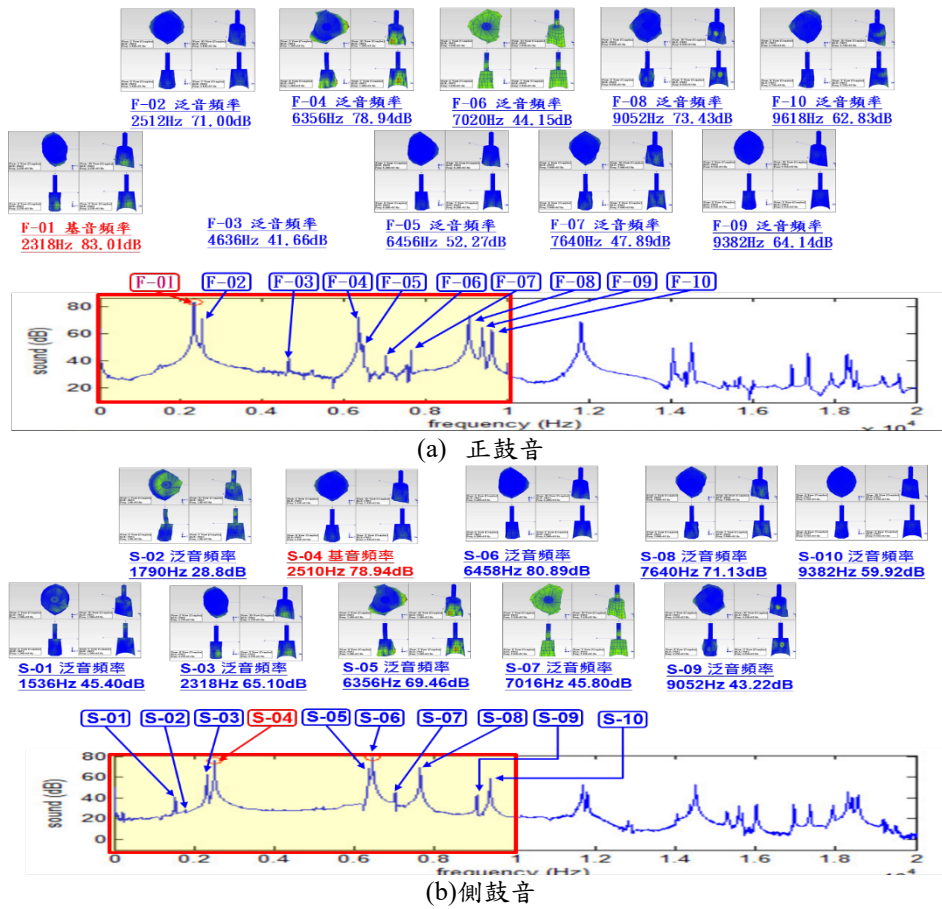


圖 10 縮小模型編鐘之聲音特性與實驗模態關聯性：以金屬槌為例

表 4 編鐘聲音量測與 EMA 頻率誤差表

聲音量測			實驗模態分析			正鼓音 差異 (%)	側鼓音 差異 (%)			
Mode	發聲頻率 (Hz)	聲音壓力 位準(dB)	Mode	發聲頻率 (Hz)	聲音壓力 位準(dB)			Mode	自然頻率 (Hz)	物理意義 (0,Z)
F-01	--	--	S-01	1536	45.40	E-01	1540.8	(1,1)	--	0.31
F-02	--	--	S-02	1790	28.8	E-02	1804.9	(1,2)	--	0.83
F-03	2318	83.01	S-03	2318	65.10	E-03	2274.5	(1,1)	-1.88	-1.88
F-04	2512	71.00	S-04	2510	78.94	E-04	2435.9	(2,1)	-3.03	-2.95
F-05	4636	41.66	S-05	--	--	--	--	--	--	--
F-06	6356	78.94	S-06	6358	69.46	E-05	5283.5	(3,1)	-16.9	-16.9
F-07	6456	52.27	S-07	6458	80.89	E-06	6293.4	(2,1)	-2.52	-2.55
F-08	7020	44.15	S-08	7016	45.80	E-07	7038.1	(1,2)	0.26	0.31
F-09	7640	47.89	S-09	7640	47.89	E-08	7693.0	(2,2)	0.69	0.69
F-10	9052	73.43	S-10	9052	73.43	E-09	9058.3	(3,2)	0.07	0.07
F-11	9382	64.14	S-11	9382	64.14	E-10	9409.6	(1,2)	0.29	0.29
F-12	9618	62.83	S-12	--	--	E-11	9737.6	(3,2)	1.24	--