

## 古鈸打擊聲音特性之探討

王栢村<sup>1</sup>、吳祥瑞<sup>2</sup>、徐秀娟<sup>3</sup>、高正賢<sup>4</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 研究生

<sup>3</sup> 台南應用科技大學音樂系 副教授

<sup>4</sup> 台南應用科技大學音樂系 助理教授

E-mail : [wangbt@mail.npust.edu.tw](mailto:wangbt@mail.npust.edu.tw)

### 摘要

古鈸屬於有調打擊樂器之一，由不同大小的金屬製小圓鈸組成，並按照音高鍵盤次序排列，有兩組八度音12個音階，其每個古鈸尺寸約為4英吋，構造為圓形頂面與底面中心則為中心孔，材料為青銅或黃銅。本文旨在描述一套古鈸打擊樂器，首先，利用精密麥克風做為感測器，對古鈸進行敲擊之聲音量測分析，透過頻譜分析儀，求得古鈸之聲音頻譜及峰值頻率，並針對古鈸聲音的音高、音色、持續度三大部分分別進行探討，同時運用有限元素分析，將古鈸以立體元素建構其有限元素模型，並設定固定邊界，以進行理論模態分析，求得該古鈸之模態參數，包括自然頻率及所對應之模態振型，並將實驗所求得之峰值頻率為基準修正於有限元素模型，經由有限元素分析運算所得知結果顯示，其理論有限元素與實驗所得知模態參數相當吻合。因此，可以進一步了解到古鈸的聲音與振動模態特性的相關聯性與聲音品質，未來可提供其他樂器設計之聲音與振動特性間之關連性的研究。

**關鍵詞：**打擊樂器、古鈸、自然頻率、阻尼比

### 1. 前言

在國內樂團中打擊樂器可說是經常可見的樂器，而打擊樂器在樂團中往往只單純跟著節奏敲擊，隨著樂曲不同，打擊樂器扮演著不同角色，製造出激動、急躁、灰諧、恐怖、氣勢滂沱等等的戲劇性效果，吸引觀眾的注意，直接震撼人們情緒，而打擊樂器分為有調打擊樂器與無調打擊樂器，文中挑選有調打擊樂器古鈸進行敲擊實驗量測。

由王與林[1]運用不同的感測器對鐵琴片進行實驗模態分析之比較與驗證，從驗證結果得知麥克風與加速度計所量測之模態參數十分吻合，因此確認麥克風可運用在感測器之可行性。王與林[2]探討了不同材質之敲擊鉞與不同的敲擊位置對鐵琴片模態特性之影響，從結果中看到結構之自然頻率振幅被激發出的程度會隨著敲擊鉞的材質而有所變化，且發現當敲擊點偏移中心點時，便會激發出較多的模態，偏移的距離越大，被激發出的模態數也會越多。

王與簡[3]對鐵琴片進行實際邊界下之模型驗證，並建構出參數化之鐵琴片有限元素模型，運用此參數化模型便能在未來快速的進行鐵琴片模態特性之預測與設

計分析。Bork[4]藉由調整木琴片之外形以改變結構本身之自然頻率，探討敲擊之聲音變化，同時對共鳴器之探討有以下幾點發現，單一共鳴器之效果是主要造成調音效果的主因，而當同時加裝二支共鳴器時，其效果為造成延遲時間的延長。Chaigne and Doutaut[5]主要在探討運用木棒敲擊木琴片於時間域下之振動情形，並應用Euler-Bernoulli方程式作為理論基礎及使用Hertz's法則來敘述連接之線性彈性體。

王等人[6]對一中國傳統樂器銅鑼進行完整的模型驗證流程，藉此探討銅鑼振動與聲音特性之關連性，王與陳[7]對鑼臍形式銅鑼做一完整的模型驗證，並運用麥克風做為感測器，藉此了解鑼臍形式銅鑼振動與聲音之間的關連性，Jing[8]主要在模擬古代國鐘之聲音及振動特性，針對單音及雙音之古代中國鐘進行模擬，同時也對古代中國鐘之形狀進行探討，以了解古代中國鐘之設計方法。

本文是運用有限元素分析與頻譜分析儀，對一古鈸打擊樂器進行理論與實驗量測分析，由理論得到的模態參數與所對應到的模態振型，並與實驗的所得的模態參數作為有限元素的修正基準，進而確定有限元素模型之等效性，接著對古鈸進行聲音量測分析，而由實驗量測敲擊後得到聲音功率頻譜密度函數，由古鈸聲音的音高、音色、持續度三大方向進行探討，探討古鈸的聲音與振動模態特性的關聯性。

### 2. 實驗量測方法

本文主要頻譜分析儀與架設麥克風進行實驗量測，求得古鈸聲音頻譜進行聲音探討。

圖1為古鈸結構實體圖，其中圖2為聲音量測示意圖，將麥克風感測器架設於古鈸樂器前，利用鼓棒激振器對古鈸邊緣進行敲擊，其量測設定為頻寬0~10000Hz，時間點數為8192點，取樣頻率為25600Hz，取樣時間間距為 $3.91 \times 10^{-5}$  sec，總取樣時間為0.32sec，有效解析條數為4096，透過頻譜分析儀(SigLab)將量測振動訊號由快速傅立葉轉換，以可得到結構自身功率頻譜密度函數(autospectrum)，即為古鈸之聲音線性頻譜，最後利用曲線嵌合軟體(ME'Scope VES)求得古鈸結構模態參數，包含自然頻率與模態阻尼比。





圖 1 古鈸樂器結構實體圖



圖 2 古鈸樂器聲音量測示意圖

### 3. 古鈸有限元素分析

本節將建構古鈸之有限元素模型，並進行有限元素分析，由分析所得到的模態參數與實驗求得的模態參數進行比較探討。

#### 3.1 有限元素模型

圖 3 為古鈸模型示意圖，表 1 為古鈸之材料參數表，本文運用 ANSYS 11.0 軟體對古鈸進行有限元素分析，首先採用線性立方體元素(Solid45)建構古鈸有限元素模型，在元素分割方面，以極座標方式來表示，將徑向方向分成 25 等份，圓周方向分成 164 等份，以 Mapped mesh 方式進行分割。位移限制方面，模擬古鈸之實際邊界下，則將古鈸底面所有節點設定完全鎖固(UX=UY=UZ=0)。負荷條件方面，在模態分析中不用設定負荷條件，而在簡諧分析中，則必須設依各單位力作用於古鈸邊緣位置，因此，首先進行模態分析(Model Analysis)，以求得古鈸之模態參數與模態振型，並將實驗中所求得的模態參數做為基準，以修正有限元素模型，使理論分析與實驗分析所得到的自然頻率誤差率為最小，進而確定有限元素模型與實際模型之等效性。

最後在進行簡諧分析(Harmonic Analysis)，其頻率範圍取 8000Hz 以下，頻率解析度為 4000Hz，以求得古鈸之頻率響應函數，並與實驗敲擊測得之聲音頻譜進行比較，以找出聲音與振動的關聯性。

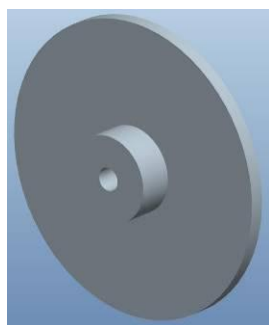


圖 3 古鈸模型示意圖

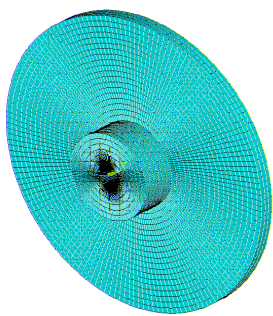


圖 4 古鈸有限元素模型

表 1 古鈸材料參數表

楊氏係數 (N/mm <sup>2</sup> )	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	蒲松比	厚度 (mm)
1.0627×10 <sup>5</sup>	8.6×10 <sup>3</sup>	0.34	5.00

#### 3.2 理論分析與實驗分析比較

表 2 為古鈸採用有限元素分析進行模態分析，所得之自然頻率與模態振型的結果，由模態分析可發現，頻率在 8000Hz 以下總共有 10 個模態振型，其 1~3 與 5 為剛體模態，圖 5 為假設作用力施加於古鈸外緣，而位移響應輸出也在同點之頻率響應函數，從圖 5 可發現有 3 個峰值頻率所對應之模態振型，其物理意義為環(1,2)、面(1,3)、面(1,4)為位移振動響應頻率，也是主導結構振動響應的模態振型。

圖 6 為實際古鈸敲擊時，所量測到之聲音功率頻譜密度函數圖，在頻率 8000Hz 以下之主頻率為  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$ 、 $f_4$  與 FEA 所對應之主頻率相近，其物理意義乃指頻率在 8000Hz 以下有三個聲音峰值，並與 FEA 比對後，可確認此四個聲音為結構振動之模態振型，因此也可以確認古鈸之有限元素模型的正確性，表 2 為 C7 音階自然頻率對照表，可發現實驗所量測到的自然頻率在 2000Hz 以上無量測到頻率峰值，推測有限元素分析進行簡諧分析設力的位置與實際敲擊位置不同，激發出不同的峰值頻率，在 FEA 與實驗量測的自然頻率誤差最大為 0.47%，可確認古鈸之有限元素模型正確性，未來可運用此有限元素模型做為結構變更的基礎，可進一步的預測其聲音的變化。

表 2 古鈸自然頻率對照表

古鈸 C7 音階 FEA			古鈸 C#7/Db7 音階 FEA			物理意義 (r,θ)
模態數 (mode)	模態振型	Frequency (Hz)	模態數 (mode)	模態振型	Frequency (Hz)	
F-01		1577.2	F-01		1648.2	剛體模態
F-02		1583.6	F-02		1667.0	剛體模態
F-03		1704.7	F-03		1784.9	剛體模態
F-04		2044.1	F-04		2154.6	面(1,2)
F-05		2109.3	F-05		2216.3	面(1,2)
F-06		3233.2	F-06		3391.1	面(1,0)
F-07		3981.3	F-07		4189.2	面(1,3)
F-08		3987.2	F-08		4191.4	面(1,3)
F-09		6790.9	F-09		7136.4	面(1,4)
F-10		6792.0	F-10		7138.9	面(1,4)

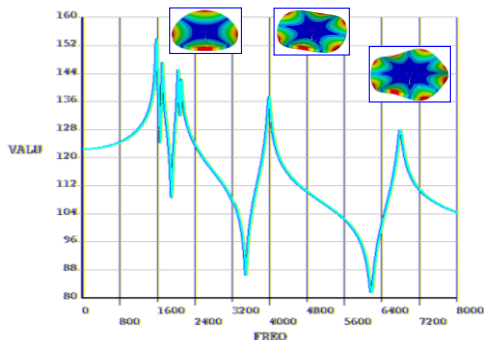


圖 5 古鈸 C7 音階 FEA-頻率響應函數(FRF)

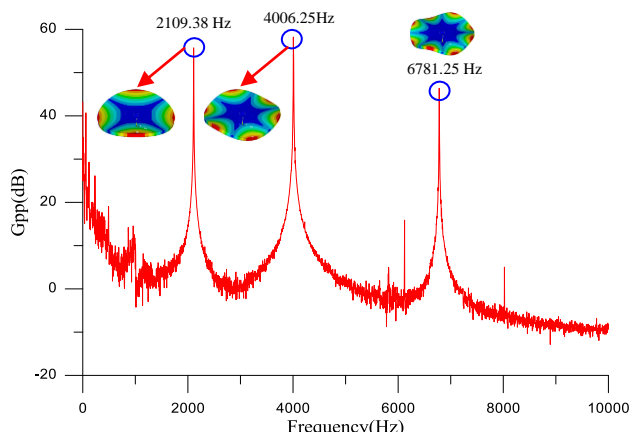


圖 6 C7 音階聲音功率頻譜密度函數

表 3 古鈸 C7 音階自然頻率對照表

mode	FEA-Freq (Hz)	Exp-Freq (Hz)	Err(%)
1	1577.2	-	-
2	1583.6	-	-
3	1704.7	-	-
4	2044.1	-	-
5	2109.3	2109.38	-0.004
6	3233.2	-	-
7	3981.3	-	-
8	3987.2	4006.25	-0.478
9	6790.9	6781.25	0.142
10	6792	-	-

#### 4. 古鈸聲音特性探討

本節將針對古鈸打擊樂器的進行聲音特性,由人耳主觀所聽到古鈸的聲音特性,探討聲音的音高、音色、持續度這三大方向進行探討。

##### 4.1 針對古鈸音高進行探討

由於古鈸打擊樂器聲音的音準也是重要一環,本節將探討實際量測古鈸聲音頻率的音高比,並與標準音高比進行比較分析,表 4 及 5 為古鈸各音階音高比比較表,討論如下:

1. 由表 4 可看到各音階目標頻率的標準音高、

相對音高與兩者自然頻率值得比較,絕對音高比為 1.059,相對音高比則為 1.054~1.073,表示相對音高的音準尚未標準,並對兩者自然頻率進行比較誤差,兩者誤差不超過  $\pm 3\%$ ,表示量測到的自然頻率是可在許可之內,一般樂器接是運用調音器做為音準的確認,而調音器所發出之音頻也有容許誤差量 [10],其一各單音音高,可辨別的音分範圍,5-6 cents,其最大誤差量為  $\pm 13.72\text{Hz}$ ,可發現頻率差值誤差最大誤差卻超過容許誤差,表示古鈸的音準仍有改善空間。

2. 表 5 為調整後相對音高表,由實驗量測到的第一個峰值頻率乘上標準音高比 1.059,可以得到調整後的量測頻率,調整後的相對音高誤差不超過  $\pm 2\%$ ,可觀察到相對音高比普遍都比目標頻率低,頻率差值也降低至 63.86Hz,卻沒有在容許誤差內,表示相對音高比的音是不準確的。
3. 由結果得知古鈸的相對音高沒有在容許差異內,表示古鈸的音準沒有達到標準,未來可對古鈸樂器可進行調整音準。

表 4 各音階標準音高與古鈸自然頻率比較表

音階	目標頻率 (Hz)	絕對音高比	量測頻率 (Hz)	量測相對音高比	頻率誤差 (%)	頻率差值 (Hz)
C <sub>7</sub>	2093.00	1.00	2109.38	1.00	0.78	16.38
C#7/Db7	2217.46	1.059	2240.63	1.062	1.03	23.17
D <sub>7</sub>	2349.32	1.059	2387.50	1.066	1.60	38.18
D#7/Eb7	2489.02	1.059	2528.13	1.059	1.55	39.11
E <sub>7</sub>	2637.02	1.059	2671.88	1.057	1.30	34.86
F <sub>7</sub>	2793.83	1.059	2850.00	1.067	1.97	56.17
F#7/Gb7	2959.96	1.059	3000.00	1.053	1.33	40.04
G#7/Ab7	3135.96	1.059	3218.75	1.073	2.57	82.79
G <sub>7</sub>	3322.44	1.059	3375.00	1.049	1.56	52.56
A <sub>7</sub>	3520.00	1.059	3612.50	1.070	2.56	92.50
A#7/Bb7	3729.31	1.059	3818.75	1.057	2.34	89.44
B <sub>7</sub>	3951.07	1.059	4025.00	1.054	1.84	73.93

表 5 調整後相對音高與古鈸自然頻率比較表

音階	量測頻率 (Hz)	調整頻率 (Hz)	調整後相對音高	頻率誤差 (%)	頻率差值 (Hz)
C <sub>7</sub>	2109.38	2109.38	1.00	0.00	0.00
C#7/Db7	2240.63	2234.88	1.0595	0.26	-5.74
D <sub>7</sub>	2387.50	2367.86	1.0595	0.57	-19.64
D#7/Eb7	2528.13	2508.75	1.0595	-0.05	-19.38
E <sub>7</sub>	2671.88	2658.02	1.0595	-0.25	-13.86
F <sub>7</sub>	2850.00	2816.17	1.0595	0.68	-33.83
F#7/Gb7	3000.00	2983.73	1.0595	-0.65	-16.27
G#7/Ab7	3218.75	3161.26	1.0595	1.25	-57.49
G <sub>7</sub>	3375.00	3349.36	1.0595	-1.04	-25.64
A <sub>7</sub>	3612.50	3548.64	1.0595	1.02	-63.86
A#7/Bb7	3818.75	3759.79	1.0595	-0.22	-58.96
B <sub>7</sub>	4025.00	3983.50	1.0595	-0.52	-41.50

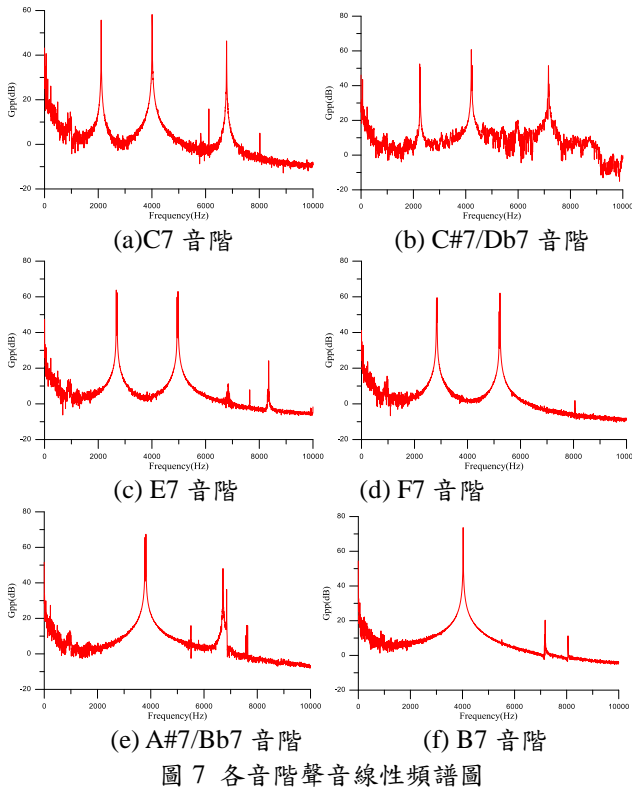
##### 4.2 針對古鈸音色進行探討

本文對一古鈸打擊樂器進行打擊聲音實驗量測,由實驗所得聲音線性頻譜如圖 7 做一討論,並將量測到模態自然頻率彙集成表 6 為各音階古鈸之主要發聲的聲音頻率表,討論如下:

- 圖 7 為各音階聲音線性頻譜圖，以圖 7(a) C7 音階為例可觀察到聲音頻譜都有很明顯的峰值頻率，可以觀察到 C7 音階有三個明顯峰值頻率被激發出，分別為 2109.38Hz、4006.25Hz、6781.25 Hz，所對應的分貝值分別為 55.72dB、58.22dB、46.37 dB，可以得知敲擊古鈸時，人耳可同時聽到這三個峰值頻率產生的聲音。
- 在圖 4(b)也可以看三個明顯的基音，泛音雜訊也明顯的變多，但主要還是可以聽到三個主要的頻率，而在圖 4(c)、(d)發現在 6000Hz 前有兩個明顯的峰值頻率，在 8000Hz 時也有激發出峰值頻率，但由分貝值可觀察到，第三個峰值頻率與前兩個頻率相差  $\pm 20$ dB 以上，若以人耳的聽覺是無法聽辨到第三個峰值頻率所激發的聲音。
- 由量測到的聲音頻率值彙整為表 6，可看出越高音的音階，相對的自然頻率也越高，由人耳所聽到敲擊的聲音，而越高音的音階，產生的聲音頻率也越高，人耳聽到的聲音的感受也越尖銳。
- 由表 6 可看出各音階聲音自然頻率趨勢與比例關係，由音階比例可以很清楚的看到，每個音階比例普遍呈現接近倍頻的關係為 1:2:3，推論古鈸打擊樂器有簡諧倍頻的關聯性。
- 雖然有些音階比例結果不盡理想，未來可對有限元素模型進行調整，進一步改善自然頻率誤差，設計具有簡諧倍頻音的古鈸樂器。

表 6 各音階聲音頻率表

音階	Frequency(Hz)	G <sub>pp</sub> (dB)	音階比例
C7	2109.38	55.72	1.00
	4006.25	58.22	1.90
	6781.25	46.37	3.21
C#7/Db7	2240.63	52.50	1.00
	4212.50	60.72	1.88
	7159.38	51.47	3.20
D7	2387.50	64.76	1.00
	4465.63	69.31	1.87
	7565.63	29.99	3.17
D#7/Eb7	2528.13	59.75	1.00
	4768.75	60.17	1.89
	7990.63	23.32	3.16
E7	2671.88	63.80	1.00
	4971.88	63.01	1.86
	8350.00	24.15	3.13
F7	2850.00	59.53	1.00
	5218.75	42.79	1.83
	8053.13	1.86	2.83
F#7/Gb7	3000.00	59.93	1.00
	5509.38	68.55	1.84
	9178.13	32.84	3.06
G7	3218.75	72.28	1.00
	5718.75	47.19	1.78
	9618.75	29.68	2.99
G#7/Ab7	3375.00	68.50	1.00
	6043.75	58.30	1.79
	6781.25	8.05	2.01
A7	3612.50	57.01	1.00
	6443.75	54.51	1.78
	8553.12	3.95	2.37
A#7/Bb7	3818.75	67.39	1.00
	6712.50	48.09	1.76
	7603.13	16.03	1.99
B7	4025.00	73.64	1.00
	7175.00	20.32	1.78
	8050.00	11.29	2.00



#### 4.3 針對古鈸聲音持續度進行探討

由於打擊後聲音的持續度對音樂人的角度是非常注重，本節將探討古鈸聲音頻率的持續度，利用實驗求得阻尼比代入單自由度振動系統假設，計算求得衰減率。

圖 8 為 C7 音階古鈸之時間域波形圖，其聲音特性組成可由擴充原理(expansion theorem)探討，實際古鈸聲音之各模態響應所組成如下：

$$P(t) = \sum_{r=1}^{\infty} P_r(t) \quad (1)$$

其中， $P(t)$  為古鈸聲音， $P_r(t)$  為第  $r$  個模態響應，單自由度系統假設可得：

$$P_r(t) = P_r e^{-\xi_r \omega_r t} \sin \omega_{dr} t \quad (2)$$

$$\omega_{dr} = \omega_r \sqrt{1 - \xi_r^2} \quad (3)$$

$$\omega_r = 2\pi f_r \quad (4)$$

$$\sigma_r = \xi_r \omega_r \quad (5)$$

其中， $\omega_r$  及  $\omega_{dr}$  分別為無阻尼及阻尼自然頻率， $\xi_r$  為模態阻尼比， $\sigma_r$  則為第  $r$  個模態之衰減率(decay rate)，圖 9 為前三個模態響應  $P_r(t)$  之示意圖，由式(1)可知，各模態響應之累加之組合成如圖 8 之聲音特性。

表 7 為古鈸各音階聲音特性所得之前三個模態阻尼比  $\xi_r$  與模態衰減率  $\sigma_r$  總表，模態阻尼比大都在 0.05~0.2%之間，而模態衰減率大都在 20~50 之間，由各模態之阻尼與衰減特性，並無具體之相同性，未來可針對如圖 8 之時間域聲音特性求得整體之等效阻尼比及衰減率特性，也可比較探討不同打擊樂器之聲音持續度。

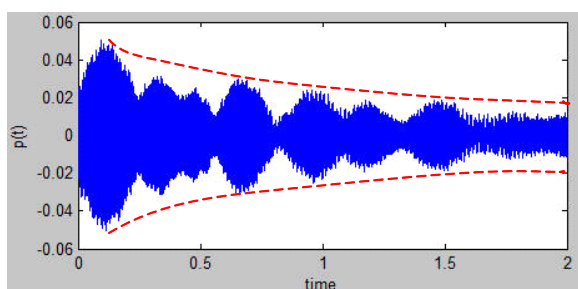


圖 8 C7 音階時間域衰減率波形圖

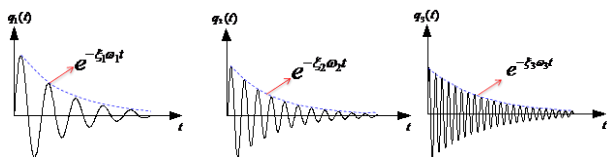


圖 9 不同時間週期衰減率

表 7 各音階阻尼比與衰減率表

古鈸	自然頻率			阻尼比(%)			衰減率		
	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$\xi_1$	$\xi_2$	$\xi_3$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$
C7	2109.38	4006.3	6781.25	0.207	0.060	0.064	27.439	15.164	27.328
C#7/Db7	2240.63	4212.5	7159.38	0.166	0.087	0.055	23.417	23.074	24.908
D7	2387.50	4465.6	7565.63	0.127	0.103	0.052	19.037	29.037	24.762
D#7/Eb7	2528.13	4768.8	7990.63	0.148	0.356	0.094	23.460	106.74	47.247
E7	2671.88	4971.9	8350.00	0.156	0.080	0.055	26.173	24.895	29.030
F7	2850.00	5218.8	8053.13	0.055	0.094	0.055	9.908	30.968	27.998
F#7/Gb7	3000.00	5509.4	9178.13	0.086	0.075	0.061	16.163	26.088	35.305
G7	3218.75	5718.8	9618.75	0.117	0.081	0.041	23.599	29.219	24.525
G#7/Ab7	3375.00	6043.8	6781.25	0.130	0.077	0.045	27.471	29.254	19.039
A7	3612.50	6443.8	—	0.070	0.047	—	15.949	19.180	—
A#7/Bb7	3818.75	6712.5	7603.13	0.074	0.113	0.071	17.651	47.733	33.698
B7	4025.00	7175	8050.00	0.110	0.037	0.063	27.754	16.629	32.001

## 5. 結論

本文主要建立古鈸的有限元素模型，並透過有限元素分析來探討其結構模態之物理意義，同時也藉由實驗量測分析，求得聲音頻譜之特性，再有限元素模型與比較，從中了解到聲音與振動之間的關聯性。由以上之分析可得以下幾點結論：

1. 透過有限元素分析，由模態分析，可求得古鈸之自然頻率與模態振型，以了解其結構模態之物理意義，在簡諧分析中，主要獲得理論之結構振動頻率響應函數。

2. 由實際的實驗量測，可得到古鈸的聲音功率頻譜密度函數圖，可斷定此古鈸打擊聲音特性，大致上有三個聲音主頻率，並與有限元素分析結果相互比對，可了解到古鈸敲擊聲音之主頻率的物理意義為面(1.2)、面(1.3)、面(1.4)之模態。
3. 可透過實驗量測所得之聲音峰值頻率校正古鈸分析所得之自然頻率，並更新有限元素模型，以得到等效之模型；在有限元素模型分析結果顯示，在 2000Hz 以上無峰值頻率產生，其造成原因可能是因為打擊位置不同，導致與有限元素模型在低頻域中有所差異，因此，往後可運用標準化的製作古鈸方式，來提昇古鈸的穩定性，以降低模型分析的誤差率。
4. 由實驗量測分析成功的驗證有限元素模型的等效性，且同時了解到聲音的特性與振動分析所得之模態參數均有密切的關連性，因此，未來可利用此有限元素模型，作為結構外觀設計之變更，並且有效地、迅速地掌握聲音與結構間之變化，以降低製造古鈸的成本與方便性。
5. 對敲擊後所發出的聲音進行聲音特性探討，以古鈸的音色、音高、聲音持續度三大方向進行探討，得知古鈸每各音階的比例呈現倍頻，推論古鈸樂器具有簡諧倍頻的效果，在音高方面，發現相對音高比標準音高較無準確，表示古鈸的音準是不準確的，未來可以對古鈸進行調音，改善音準問題，並可由模態阻尼比及衰減率探討打擊樂器之聲音持續度。

## 6. 致謝

本研究承蒙國科會計畫經費支助，特以致謝，國科會計畫編號 NSC-99-2221-E-020-004。

## 7. 參考文獻

- [1] 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。
- [2] 王栢村，林怡馨，2007，「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，台北，論文編號：C5。
- [3] 王栢村，簡孝名，2009，「實際邊界下之鐵琴片模型驗證」，中華民國音響學會九十八年會員大會暨第二十二屆學術研討會，台北，論文編號：A006，第 A-35--A-45 頁。
- [4] Bork I., 1995, "Practical Tuning of Xylophone Bars and Resonators," *Applied Acoustics*, Vol. 46, pp. 103-127.
- [5] Chaigne A. and Doutaut V., 1997, "Numerical Simulations of Xylophones. I. Time-domain Modeling of the Vibrating Bars," *Journal of*



*Acoustical Society of America*, Vol. 101, No. 1, pp. 539-557.

- [6] 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工程學會第十屆學術研討會論文集, 第 245-252 頁。
- [7] 王栢村, 陳新正, 「鑼臍形式銅鑼之聲音及振動特性的探討」, 中華民國音響學會第二十一屆學術研討會論文集, 論文編號: A1-4。
- [8] M. Jing, "A theoretical study of the vibration and acoustics of ancient Chinese bells," *Journal of the Acoustical Society of America* 114(3), 1622-1628 (2003).
- [9] [http://en.wikipedia.org/wiki/Cent\\_\(music\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Cent_(music))

interpreted for the relation between the sound and vibration characteristics. Therefore, the percussion sound quality of crotales is calibrated. The presented analytical approach can be applied to other percussion instruments in the future.

**Keywords:** percussion instruments、Crotales、natural frequencies、damping

## Discussions on Percussion Sound Characteristics of Crotales

Bor-Tsuen Wang<sup>1</sup>, Shiang-Ruei Wu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Professor, <sup>2</sup>Graduate student

Department of Mechanical Engineering  
National Pingtung University of Science and Technology

Shiou-Jiuan Shiu<sup>3</sup>, Jeng-Shian Gau<sup>4</sup>

<sup>3</sup>Associate Professor, <sup>4</sup>Assistant Professor  
Music Department and Graduate Institute  
Tainan University of Technology

### ABSTRACT

Crotales or antique cymbals are tuned percussion instruments. Each crotale is about 4 inches in diameter with a flat top surface and a nipple on the center base and made of bronze or brass. This paper aims to characterize the percussion sound of a set of crotales. The sound measurement is carried out by using the precision microphone mounted to the commercially available FFT analyzer to obtain the percussion sound spectrum and peak resonances. The pitch, timber and decay effects for each crotale are discussed. Finite element analysis (FEA) is also applied to perform theoretical modal analysis on the crotale in real boundary. The numerically obtained modal parameters, including natural frequencies and mode shapes, can be compared with those from experimental data for validating the FE model. Results show the modal properties and percussion sound spectrum can be well

