

## 縮小模型鐘之振動模態與發聲機制探討

王栢村<sup>1</sup>、張博鈞<sup>1</sup>、楊昶昱<sup>1</sup>、黃家賢<sup>1</sup>、吳盈輝<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 國立屏東科技大學機械工程系

<sup>2</sup> 國立內埔高級農工職業學校 機械科

### 摘要

鐘為金屬製之打擊樂器，形狀為上窄下寬之中空碗狀，其音色渾厚莊嚴的特性常用於寺廟或教堂之演奏。本文應用有限元素分析(FEA)和實驗模態分析(EMA)，對縮小模型鐘進行模型驗證及聲音特性與振動模態之關聯性探討。首先，對縮小模型鐘建構有限元素模型，並進行理論模態分析，求得鐘的自然頻率及其對應的模態振型，同時結合實驗模態分析，以衝擊槌為驅動器，加速規為感測器，透過訊號擷取卡擷取訊號做快速傅立葉轉換，可量測求得鐘的頻率響應函數，再經由曲線嵌合軟體擷取實驗的模態參數，透過模型驗證之程序更新分析模型系統參數，當 FEA 及 EMA 所得模態參數相互對應時，可確認有限元素模型等效於實際結構。此外也針對縮小模型鐘進行聲音頻譜量測分析，可由結構振動模態瞭鐘的發聲機制，同時探討不同敲擊棒對鐘聲之差異影響。本文針對縮小模型鐘的聲音與振動探討，所採用的分析與實驗手法及模型驗證理念，可以作為解析其他打擊樂器發聲機制的參考。

**關鍵字：**縮小模型鐘、有限元素分析、模型驗證、聲音頻譜

### 1. 前言

在古代中國民族樂器裡，依製作材料可劃分八類，又稱八音，打擊樂器的鐘常以金屬製成，在八音之鐘屬於金類，而位於東亞地區處處可見鐘的蹤跡，然而在不同國家裡，鐘的幾何外型也略有不同，位於韓國慶州博物館，有一只用於紀念聖德王成就的巨鐘，命為聖德大王神鐘(Bell of King Seongdeok)，又稱韓國鐘，像似雞蛋外型是韓國鐘的主要特色，宏偉的外觀上刻有精緻的裝飾與銘文，其外型與本文探討之縮小模型鐘極為像似，音色上具有沉穩厚實的特性，一般而言無論是材料或外型皆會影響鐘的發聲頻率及音色與持續度，因此在製作鐘的同時，須充分了鐘的發聲機制及振動特性。

王與張[1] 利用有限元素分析，對打擊樂器石磬以鐵材質進行材質轉換，建立幾何參數化的分析模型，且取一組幾何參數進行鐵磬的加工製作，並對實際鐵磬進行實驗模態分析，最終比對實驗與分析之模態數，確認分析模型與實際結構的等效性，同時也對實際鐵磬結構做不同硬度之敲擊鉗做聲音特性探討，瞭解鐵磬聲音特性與振動模態之關聯性。王與張

[2]利用有限元素分析建構京鈔理論分析模型，並進行理論模態分析，同時對實際京鈔結構進行實驗模態分析，將獲得的頻率響應函數經由曲線嵌合軟體擷取實驗之模態參數，最後將理論與實驗分析之模態參數進行比對驗證，藉此確認京鈔之材料參數與發聲機制，此外也對京鈔進行兩兩對撞的聲音量測，經由聲音頻譜探討京鈔最主要的發聲機制與振動模態之關聯性，王與蔡[3]探討台灣民俗打擊傳統樂器平鑼之振動與聲音特性，運用模型驗證的流程進行了有限元素分析與實驗模態分析，將所得模態參數相互對比對，確認有限元素模型等效於實際結構，進而量測平鑼之敲擊聲音特性，與實驗之頻率響應函數進行探討，確認平鑼之聲音特性與振動之關聯性，王等人[4]對古鈸做聲音的量測，求得古鈸之聲音頻譜與峰值頻率，並針對鼓鈸聲音之音高、音色、持續度個別比較，內文也利用有限元素法建構古鈸之理論模型，進行理論模態分析求得理論模態參數，並將實驗量測的峰值頻率作為修正有限元素模型之依據，獲得等校實際結構之分析模型，未來可進一步探討鼓鈸之聲音與振動模態之關聯性。

Kim[5]對韓國著名的聖德大王神鐘進行實驗量測，以加速規和麥克風量測鐘的立體聲全息成像，並求得鐘之相對振福和感測器相位的關係，並擷取模態振型以模擬鐘的振動型態，最後探討整體結構對鐘聲之影響及用途。

McLachlan[6]提出對音樂鐘新的分析及設計方法，從模態分析的量測手法可顯示橫軸方向之模態和鐘的發聲頻率間相關性，結果顯示橫向軸的參數變化以及剛性皆會影響鐘的發聲頻率，而影響音色最主要因素有鐘壁曲率、鐘錐角度、高度及寬度鐘壁厚度，基於此依據可做為音樂鐘最佳化設計之參考的依據，Bulen[7]探討喇叭的發聲特性，以及喇叭之自然頻率，並從音階頻率比對音準，並以自身功率頻譜密度函數來探討音色，並引用明亮度、響度等心理聲學指標作為設計喇叭之參考。

本文運用有限元素分析與實驗模態分析，對縮小模型鐘進行理論與實驗量測分析，本文主要目標如下所示：

1. 以小模型鐘為分析對象進行實驗模態分析與有限元素分析，且運用模型驗證之流程進行模型驗證，建立模型鐘之等效有限元素模型。
2. 對縮小模型鐘進行聲音頻譜量測分析，由結構振動模態瞭鐘的發聲機制，並探討不同敲擊棒對鐘聲之差異影響。

## 2. 縮小模型鐘之有限元素分析

本節主要說明對縮小模型鐘進行有限元素分析之設定與分析流程，透過有限元素分析軟體建構有限元素模型，進行理論模態分析求得理論之模態參數，包括自然頻率、模態振型，圖 1 為實驗與分析模型示意圖，其中圖 1(a) 為縮小模型鐘實際結構圖，其中縮小模型鐘之幾何尺寸如下述說明，頂徑為 50.7 mm，底徑 76.3 mm，總高 126.8 mm，壁厚 2 mm，並假設材料具有等向性、均值等特性。

圖 1(b) 為縮小模型鐘之有限元素模型圖，包含自然頻率、模態振型；材料部份以單一材料進行設定，其參數設定為楊氏係數  $E=110$  GPa，蒲松比  $\nu=0.34$ ，密度  $\rho=8300$  kg/m<sup>3</sup>，元素採用二次四面體元素(Solid 187)進行建構，且進行收斂性分析使誤差值在 3% 以內，元素分割總共有 124896 個元素與 218654 個節點；邊界設定模擬自由邊界不做任何設定；負荷條件部分因模態分析時不需設定負荷，此外在簡諧響應分析時，設定外力  $F_x$ 、 $F_y$  為 -1N，個別求得  $x$ 、 $y$  方向之頻率響應函數。

## 3. 實驗方法與步驟

本節旨在說明縮小模型鐘之實驗模態分析實驗流程與架設與敲擊縮小模型鐘之聲音量測方法，並探討振動特性與聲音特性之關聯性。

### 3.1 實驗模態分析

透過上節所述對縮小模型鐘之有限元素模型進行模態分析求得理論之模態參數，將上述所得理論模態振型特性作為實驗之佈點依據，圖 1(c) 為縮小模型鐘實驗量測點示意圖，將縮小模型鐘圓周方向分成 12 等份，高度分成 5 等份，其頂部分成 4 個部份各佈 1 個點，總共有 64 個敲擊點。

圖 2 為實驗模態分析之實驗架構示意圖，利用釣魚線將縮小模型鐘進行懸吊以模擬自由邊界，其衝擊錘作為驅動器，加速規作為感測器，將訊號擷取卡(NI-9234)之 Channel 1 連接衝擊錘(PCB 9001)，Channel 2、3 則連接加速規(27AM1-10)，並將加速規固定於 1 號、61 號點上，以移動衝擊錘、固定加速規之方法進行實驗，利用訊號擷取卡獲得頻率響應函數(Frequency Response Function, FRF)與關連性函數，將實驗求得之頻率響應函數匯入 ME'scope VES 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、模態阻尼比。

### 3.2 聲音量測

本小節主要探討縮小模型鐘以釣魚線懸吊下的自由邊界下，利用不同錘敲擊之聲音特性，測得其聲音之時間域響應，透過短時傅立葉轉換，求得聲音頻譜圖，探討聲音特性與振動特性之關聯性。

圖 3 為縮小模型鐘聲音量測圖，測量設備有筆記型電腦、麥克風、訊號擷取卡與縮小模型鐘，以釣魚線懸吊模型鐘來模擬自由邊界，利用聲音量測軟體進行量測，探討敲擊模型鐘之發聲機制，透過麥克風(130E20)為感測器進行量測，測得其聲音之時間域響應，透過快速傅立葉轉換，求得聲音頻率域之自身功率頻譜密度函數圖；另外本文也針對不同敲擊棒敲擊

縮小模型鐘，進行聲音特性探討。

圖 4 為不同軟硬度敲擊錘之示意圖，主要分為鋼錘、黑色敲擊棒(ME-101/VH)與紅色敲擊棒(ME-104/MS)三種不同敲擊棒作為敲擊工具，以硬度大小作排列應為：鋼錘、黑色敲擊棒、紅色敲擊棒；而在聲音量測軟體設定部分取樣時間為 5.1(sec)，頻寬範圍為 0 至 20000(Hz)，頻率域截斷有效條數(Nc)為 12800，頻率解析度為 1.5625Hz。

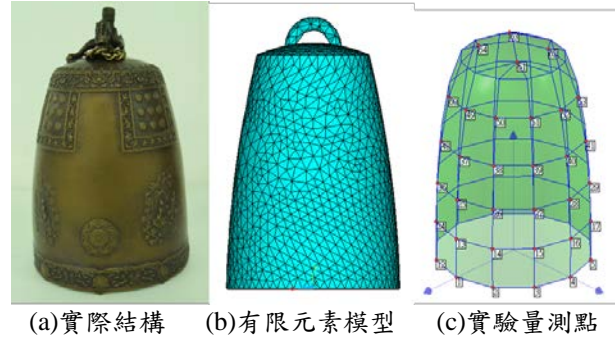


圖 1 實驗與分析模型示意圖

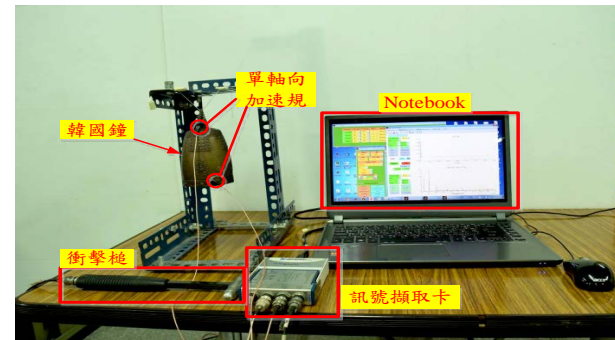


圖 2 實驗模態分析之實驗架構示意圖

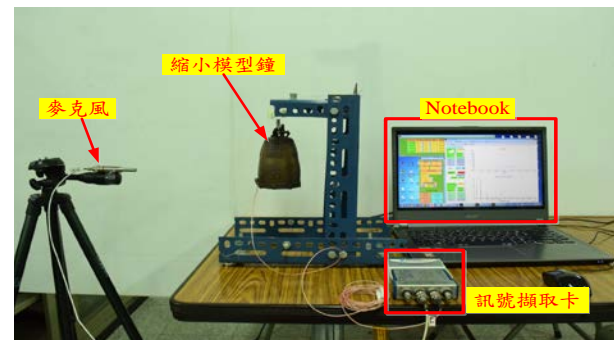


圖 3 縮小模型鐘聲音量測圖



圖 4 不同敲擊棒示意圖

### 4. 結果與討論

為驗證等效於實際縮小模型鐘結構之有限元素模型，透過有限元素分析與實驗模態分析，來比較頻率響應函數、自然頻率與模態振型進行驗證，確認結果是否吻合，圖 5 為模型驗證流程圖，在有限元素分析時，進行模態分析求取理論模態參數，而實驗模態分析時，首先規劃量測方式，透過量測頻率響應函數，進行曲線嵌合擷取實驗模態參數，進一步比對理論與實驗模態參數，經過修正模型達到相互吻合，方可獲得等效於實際結構之有限元素模型，最後利用聲音量測程式進行聲音量測，探討小模型鐘敲擊聲音與結構振動之關聯性。

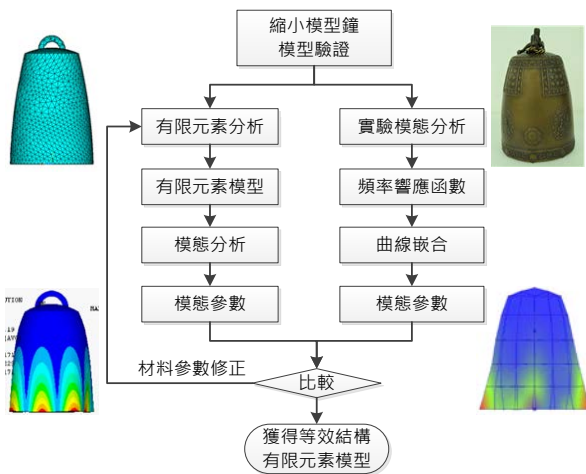


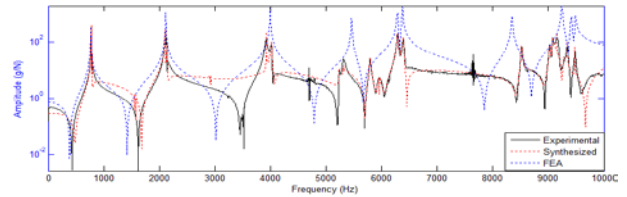
圖 5 模型驗證流程圖

#### 4.1 縮小模型鐘之振動模態特性分析

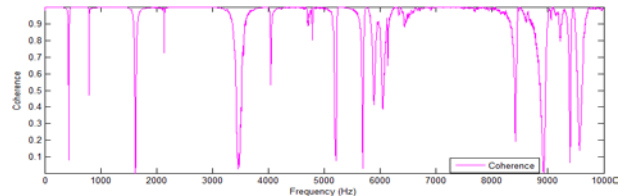
本節針對縮小模型鐘之振動模態特性進行探討，在頻率響應函數中  $j$  為外力輸入， $i$  為加速度輸出，有可分為同點與不同點，同點表示外力輸入點與輸出點位置一致；不同點則是離輸出位置最遠的激振位置為不同點。

圖 6 為同點之頻率響應函數與關聯性函數圖，在圖 6(a) 頻率響應函數 ( $i=1, j=1$ ) 中可以看出黑色實線為實驗所得之頻率響應函數，紅色虛線為合成頻率響應函數，藍色虛線則為理論頻率響應函數，在峰值比對上可看出實驗與合成對應之良好，代表曲線嵌合是成功的，在理論曲線的部分，由於在分析部分的頻率未達準確，因此峰值會有前後偏移的現象，但趨勢為大致相同的，圖 6(b) 為關聯性函數 ( $i=1, j=1$ )，由圖中可見除了反共振點外，其餘值皆接近於 1，代表實驗品質是可靠的。

圖 7 為不同點之頻率響應函數與關聯性函數圖，圖 7(a) 為頻率響應函數圖 ( $i=49, j=1$ )，實驗與合成曲線有良好的對應，在理論曲線比對實驗曲線的部分，相對於同點的頻率響應函數來說，峰值對應趨勢較為良好，表示在不同點位置的響應較趨近於實際結構的響應；圖 7(b) 為關聯性函數 ( $i=49, j=1$ )，圖中除了反共振點外，其餘值皆接近於 1，代表實驗品質是可靠的。

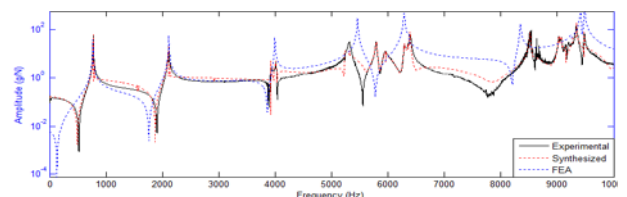


(a) 頻率響應函數 ( $i=1, j=1$ )

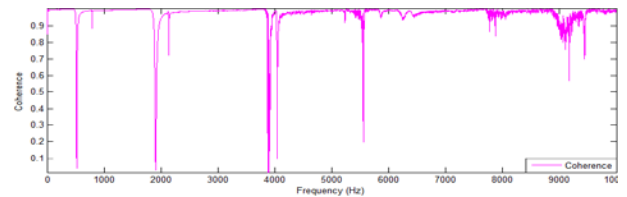


(b) 關聯性函數 ( $i=1, j=1$ )

圖 6 同點之頻率響應函數與關聯性函數圖



(a) 頻率響應函數 ( $i=49, j=1$ )



(b) 關聯性函數 ( $i=49, j=1$ )

圖 7 不同點之率響應函數圖與關聯性函數圖

表 1 為理論與實驗之模態參數比較總表，表 2 為縮小模型鐘之理論模態振型總表，模態振型之物理意義以  $(\theta, Z)$  代表， $\theta$  代表圓周方向之節線數， $Z$  代表軸向的節線數，圖 8 為模態振型與頻率響應函數之比較圖，期觀察結果結果綜合如下：

1. 分析與實驗所得的自然頻率，除了 F-09/E-13 為 -8.48%，F-10/E-14 為 5.66%，F-17/E-19 為 7.52%，其他模態自然頻率誤差大約在 5% 以內，表示模型驗證成功。
2. 縮小模型鐘屬於對稱結構，自然頻率無論是實驗或分析皆是以頻率相近的方式成對出現，除了分析的第 15 模態為鐘體上方的鐘鈕做來回的擺動模態。
3. 頻率誤差值最大為 F-17&E-19，頻率誤差為 7.52%，最小為 F-09&E-13 誤差值為 -8.48%；頻率誤差之平均值 AVG 為 -0.65%，頻率誤差之平方平均根 RMS 為 -0.65%。
4. 實驗的第 3、4、7、8 模態在理論分析之中並沒有出現，推測可能是聲音與振動耦合產生的峰值頻率，此現象推測是模態耦合效應的影響。
5. 觀察圖 8 模態振型與頻率響應函數之比較圖可發現，模態振型皆有對應到 FRF 峰值頻



率，表示縮小模型鐘之分析模型相當可靠，並且貼近於實際結構。

表 1 理論與實驗之模態參數比較總表

FEA		EMA		Frequency Error(%)	Damping Ratio (%)	物理意義 (θ,Z)
mode	Natural frequency(Hz)	mode	Natural frequency(Hz)			
F-01	769.41	E-01	774.06	0.60%	0.132	(2,1)
F-02	769.69	E-02	791.02	2.70%	0.114	(2,1)
--	--	E-03	1547.83	--	0.098	(2,1)-(3,1)
--	--	E-04	1581.59	--	0.081	(2,1)-(3,1)
F-03	2117.40	E-05	2109.99	-0.35%	0.213	(3,1)
F-04	2117.43	E-06	2135.81	0.86%	0.094	(3,1)
--	--	E-07	2909.64	--	0.083	(3,1)-(4,1)
--	--	E-08	2926.46	--	0.074	(3,1)-(4,1)
F-05	3995.19	E-09	3922.38	-1.86%	0.082	(4,1)
F-06	3995.23	E-10	4017.30	0.55%	0.143	(4,1)
F-07	5461.38	E-11	5234.95	-4.33%	0.074	(3,2)
F-08	5461.38	E-12	5315.45	-2.75%	0.003	(3,2)
F-09	6281.63	E-13	5790.81	-8.48%	0.163	(2,2)
F-10	6282.09	E-14	5945.44	-5.66%	0.005	(2,2)
F-11	6288.81	E-15	6287.92	-0.01%	0.163	(4,2)
F-12	6288.90	--	--	--	--	(4,2)
F-13	6375.37	E-16	6349.88	-0.40%	0.028	(5,1)
F-14	6375.58	E-17	6387.58	0.19%	0.116	(5,1)
F-15	6721.17	--	--	--	--	鐘鈕擺動
F-16	8346.01	E-18	8516.71	2.00%	0.093	(5,2)
F-17	8346.26	E-19	9025.31	7.52%	0.115	(5,2)
F-18	9243.26	E-20	9074.56	-1.86%	0.092	(6,1)
F-19	9243.66	E-21	9151.88	-1.00%	0.003	(6,1)
F-20	9411.70	E-22	9340.19	-0.77%	0.089	(4,3)
F-21	9411.75	E-23	9479.28	0.71%	0.082	(4,3)

\*頻率誤差 AVG: -0.65%    \*頻率誤差 RMS: 3.31%

表 2 縮小模型鐘之理論模態振型總表

θ \ Z	1			2			3		
	1			2			3		
1	[振型圖]			[振型圖]			[振型圖]		
2	F-01_769.41 Hz F-02_769.69 Hz			F-09_6281.63 Hz F-10_6282.09 Hz					
3	F-03_2117.40 Hz F-04_2117.43 Hz			F-07_5461.38 Hz F-08_5461.38 Hz					
4	F-05_3995.19 Hz F-06_3995.23 Hz			F-11_6288.81 Hz F-12_6288.90 Hz			F-20_9411.70 Hz F-21_9411.75 Hz		
5	F-13_6375.37 Hz F-14_6375.58 Hz			F-16_8346.01 Hz F-17_8346.26 Hz			頂部鐘鈕擺動 F-15_6721.17 Hz		
6	F-18_9243.26 Hz F-19_9243.66 Hz								

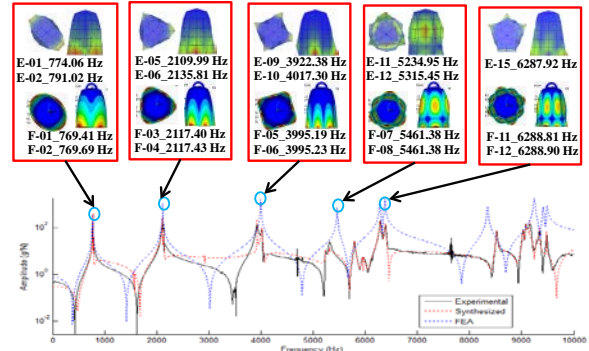


圖 8 模態振型與頻率響應函數之比較圖

圖 9 為實驗之頻率響應函數虛數部圖，圖中可以看到 E-03、E-04、E-07、E-08 峰值頻率，並且對應實驗所求得的模態振型，在模態振型特性上以 E-03、E-04 的模態特性相近，物理意義上具有(2,1)的模態特性又同時具有(3,1)的特性；而 E-07 則是與 E-08 模態特性相近，物理意義則是具有(3,1)伴隨(4,1)的特性，此種具有兩種物理意義的現象可能是受到模態耦合效應(Modal Coupling Effect)的影響，而導致理論模態分析上沒有出現此模態參數。

表 3 為模態耦合自然頻率表，由於受到模態耦合效應的影響，模態 E-03 的組成為模態 E-01 的兩倍，E-04 的組成為模態 E-02 的兩倍，模態 E-07 的組成為 E-01 與 E-06 的耦合，模態 E-07 為 E-02 與 E-06 的耦合，此種現象常出現於薄殼圓柱體，特別是在最低頻率範圍內。

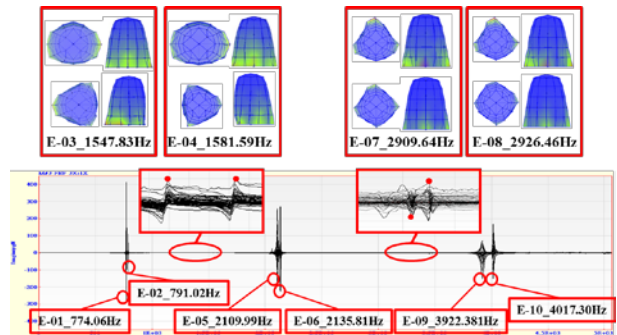


圖 9 實驗之虛數部頻率響應函數圖

表 3 模態耦合自然頻率表

Mode	Natural frequency(Hz)	Modal coupling effect	(θ,Z)
E-03	1547.83	E-03 = E-01 X 2	(2,1) 、(3,1)
E-04	1581.59	E-04 = E-02 X 2	(2,1) 、(3,1)
E-07	2909.64	E-07 = E-01 + E-06	(3,1) 、(4,1)
E-08	2926.46	E-08 = E-02 + E-06	(3,1) 、(4,1)

E-01: 774.06 Hz 、 E-02: 791.02 Hz 、 E-06: 2135.81 Hz

#### 4.2 縮小模型鐘之聲音特性分析

利用不同鎚敲擊縮小模型鐘來進行聲音量測，探討縮小模型鐘在自由邊界下利用不同敲擊棒敲擊之聲音特性，測量其聲音之頻率域圖與時頻圖以及衰減率圖，圖 10 為不同敲擊棒之時頻圖與時間域圖。

縮小模型鐘之聲音持續度與衰減率有關，而用以表示聲音的持續度長短常以時間常數(Time Constand)為量化的指標，時間常數為衰減率之倒數，圖 11 為不同敲擊棒之衰減率圖。針對結果顯示做以下說明：

1. 觀察衰減率圖與時間域圖可以發現，若以紅色敲擊棒為敲擊器具，可敲出較長的聲音持續度，以鋼鎚做敲擊則是有較短的聲音持續度。
2. 由圖 11(a)、(b)、(c)之衰減率圖可發現，衰減率大小的排列是以鋼鎚最大其次是黑色敲擊棒，最小的則是紅色敲擊棒。

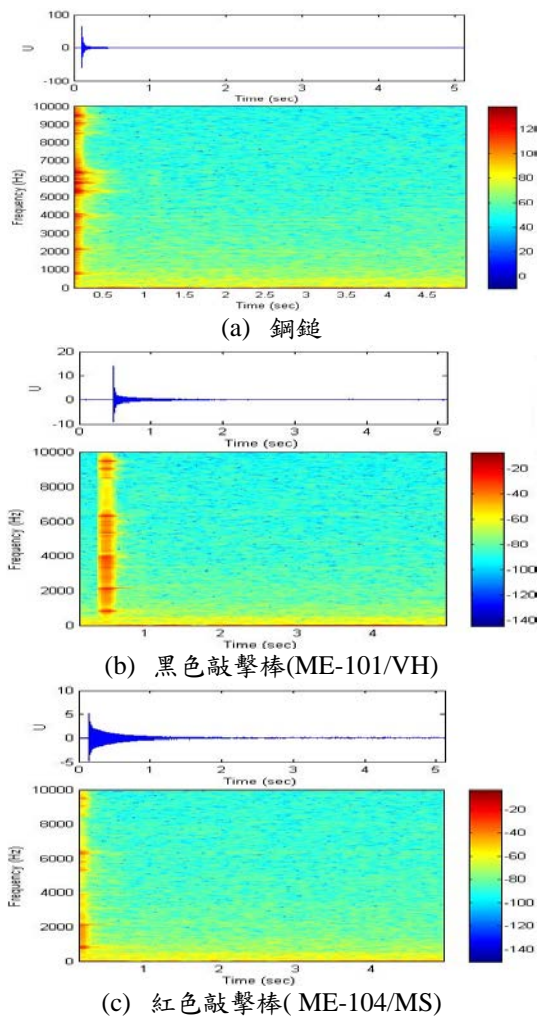


圖 10 不同敲擊棒之時頻圖與時間域圖

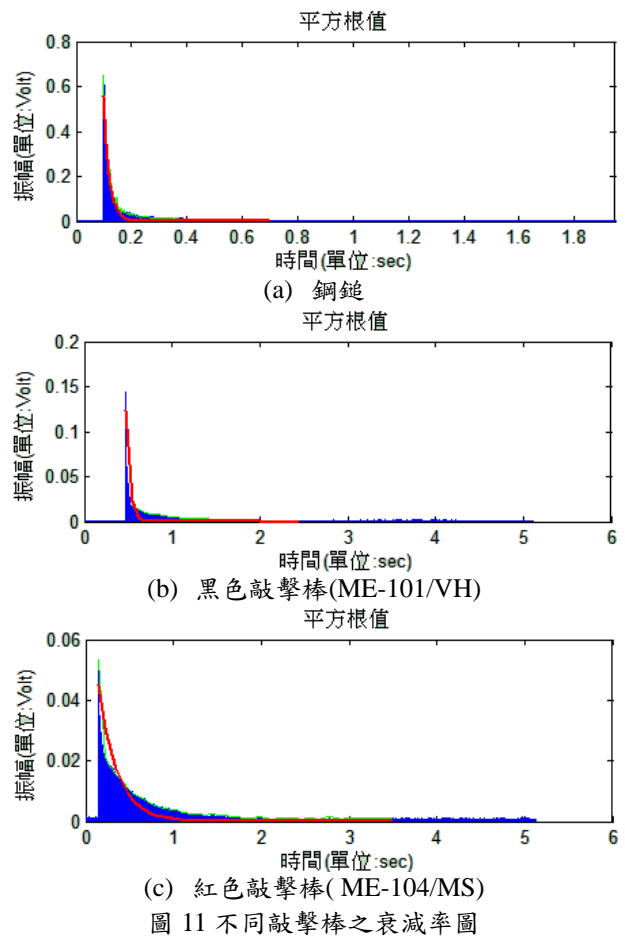


圖 11 不同敲擊棒之衰減率圖

獲得等校實際結構之分析模型後，則利用聲音量測程式進行聲音量測，以鋼鎚對縮小模型中進行敲擊求得縮小模型鐘之聲音頻譜圖，並比對理論模態分析求得的模態振型，來探討聲音與結構振動之間的關聯性，解此了解縮小模型鐘的發聲機制，圖 12 縮小模型鐘之聲音頻譜圖，表 4 則是為敲擊之自然頻率與聲音壓力比較表，觀察以下結果做幾點推論：

1. 由此結果可看出，每個峰值頻率與模態振型皆有良好的對應，表示分析與結構聲音具有明顯的關聯性。
2. 從聲音頻譜圖可以看出，每個峰值頻率所對應的態振型都同時具有縮小模型鐘之下圍擺動模態，由此推論敲擊縮小模型鐘之下圍的部分，可以激發出縮小模型鐘較多的音頻。
3. 從圖 12 聲音頻譜的振幅值來看，第一模態的振幅值較大，表示 F-01 與 F-02 為縮小模型鐘最主要的發聲模態。
4. 從表 4 中看出鋼鎚所激發的振幅值比黑色敲擊棒與紅色敲擊棒來得大，且不論在高低頻所激發的峰值頻率皆比其他兩種敲擊鎚來的明顯。
5. 由表 4 看出模態 E-01、E-05、E-15 自然頻率的峰值較高，為縮小模型鐘之主要發聲模態。

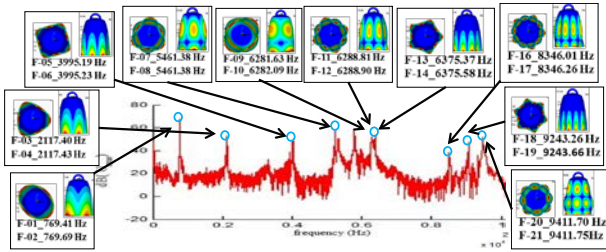


圖 12 縮小模型鐘之聲音頻譜圖

表 4 敲擊之自然頻率與聲音壓力比較表

	銅鐘		黑色敲擊棒 (ME-101/VH)		紅色敲擊棒 (ME-104/MS)	
衰減率	48.17		22.59		4.68	
時間常數	0.02		0.04		0.21	
Mode	Natural frequency (Hz)	dB	Natural frequency (Hz)	dB	Natural frequency (Hz)	dB
E-01	775	67.69	775	61.09	775	68.94
E-02	790.6	43.45	--	--	792.2	37.71
E-03	1552	25.27	1478	21.75	1550	27.12
E-04	--	--	--	--	--	--
E-05	2111	49.3	2108	43.64	2019	41.92
E-06	2136	52.47	2138	36.2	2136	38.06
E-07	--	--	--	--	--	--
E-08	--	--	--	--	--	--
E-09	3922	38.85	3923	35.24	3927	16.75
E-10	4016	47.25	4014	36.69	4013	15.7
E-11	5236	58.16	5233	28.4	5234	26.83
E-12	5327	50.64	5328	32.91	5328	26.05
E-13	5789	57.96	5789	31.1	5791	28.24
E-14	5956	41.55	5956	23.88	5941	16.03
E-15	6280	52.01	6288	39.67	6286	32.13
E-16	6355	50.11	--	--	6350	25.36
E-17	6391	53.42	6388	31.03	6392	30.26
E-18	8505	38.24	8520	28.09	8520	23.4
E-19	9039	33.76	--	--	9022	11.23
E-20	9070	47.46	9072	37.27	9073	27.66
E-21	9172	29.28	9159	19.02	9156	9.268
E-22	9330	36.17	9334	24.71	9334	18.37
E-23	9472	51.57	9481	39.05	9475	31.26

### 5. 結論

本文首先建立一只縮小模型鐘之有限元素模型，並藉由實驗模態分析比對驗證，並探討縮小模型鐘的振動模態特性，也針對縮小模型鐘之聲音特性，來瞭解鐘的發聲機制，同時探討不同敲擊棒對鐘聲之差異影響。綜合以上之分析結果可得下列幾點結論：

1. 將理論與實驗之模態分析結果進行比對，無論在自然頻率或是模態振型皆有良好的對應，且頻率誤差大多皆在5%以內，表示模型驗證成功。
2. 模態 F-09/E-13、F-10/E-14、F-17/E-19 誤差值之所以高，推測可能在有限元素分析模型之幾何忽略了外觀裝飾的關係，導致理論與實驗結果略有誤差。
3. 實驗所求得的 3、4、7、8 模態在理論模態分析之中並沒有出現，且具有兩種物理意義的現象產生，推測可能是受到常發生於薄殼圓柱體結構的模態耦合效應影響，所產生的峰值頻率。
4. 聲音特性分析上，可以看出以銅鎚為敲擊器具可激發縮小模型鐘較多的峰值頻率；以紅色敲擊棒做敲擊可激發縮小模型鐘較長的聲音持續度。

5. 在聲音與振動之關聯性探討中，縮小模型鐘之聲音頻譜皆有對應實驗與分析之模態振型，表示分析與結構聲音具有明顯的關聯性，故得知樂器的聲音特性可經由振動分析的結果預先推測
6. 由本文分析結果推論，在模態分析求得的模態振型皆以下為擺動的模態居多，推測下圍的擺動模態為縮小模型鐘最主要的振動與聲音之主要模態。

### 6. 參考文獻

1. 王栢村，張宏名，鐵磬之模型驗證與聲音特性探討，第四屆海峽兩岸動力學、振動學與控制學術會議，高雄，論文編號：D-02，2015
2. 王栢村，張家豪，京鈔之模態參數與打擊聲音特性，中華民國音響學會第二十五屆學術研討會，台中，論文編號：D-002-A1，2012
3. 王栢村，蔡有倫，平鑼聲音特性與振動分析之探討，中華民國力學學會第三十六屆全國力學會議，桃園，論文編號：F-002，2012
4. 王栢村，吳祥瑞，徐秀娟，高正賢，古鈸打擊聲音特性之探討，第十九屆中華民國振動與噪音工程學術研討會，彰化，論文編號：B-09，2011
5. Y. H. Kim, Sound of King Song-Dok Bell, Journal of the Acoustical Society of Japan, (E)Vol. 19 No. 5 P 305-313,1998
6. N. Mclachlan, The Application of New Analyses and Design Methods to Musical Bells, 75thASA Conference, New York, pp. 1-8, 2002
7. J. C. Bules, Brightness Measures of Trombone Timbre, Doctoral Dissertation, Musical Arts, University of Washington, USA, 1995

## **Discussions on Sound Generation Mechanism and Vibration Modes of Miniature Bell**

Bor-Tsuen Wang<sup>1</sup>, Bo-Jun Zhang<sup>1</sup>, Chang-Yu

Yang<sup>1</sup> Chia-Hsien Huang<sup>1</sup>, Ying-Huei Wu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering  
National Pingtung University of Science and  
Technology

<sup>2</sup> National Nei-Pu Senior  
Agricultural-Industrial Vocational School of  
Machinery Division

### **Abstract**

Bell is a kind of metal-made percussion instrument with an empty bowl shape, producing deep and solemn tone sound, and frequently used at temples or churches. This work applies finite element analysis (FEA) and experimental modal analysis (EMA) to perform model verification (MV) on the miniature bell, so as to discuss the correlation of sound and vibration characteristics of the bell. The finite element (FE) model of the miniature bell is constructed and conducted for theoretical modal analysis (TMA) to obtain bell's natural frequencies and corresponding mode shapes. By using the impact hammer as the actuator and the accelerometer as the sensor, the frequency response functions (FRFs) of the bell can be measured and processed to determine experimental modal parameters via curve-fitting software. Through the MV procedure by updating system parameters, the bell FE model can be verified equivalent to the real structure when both modal parameters from FEA and EMA, respectively, agree to each other's. The percussion sound spectrum from the bell is also measured and interpreted by structural vibration modes to realize the sound generation mechanism. The sound effects for different percussion sticks are compared, and the proper stick can be suggested. The analytical and experimental approaches in analyzing and measuring the bell's sound and vibration are presented and can be adopted for other percussion instruments as well.

**Keywords:** Miniature Bell, Finite Element Analysis (FEA), Experimental Modal Analysis (EMA), Model Verification, Sound Spectrum