

不同銅鐘之振動模態與發聲機制探討

王栢村^{1*}、楊昶昱¹、張博鈞¹、黃家賢¹、吳盈輝²

¹ 國立屏東科技大學 機械工程系

² 國立內埔高級農工職業學校 機械科

(MOST105-2622-E-020-001-CC3)

*Email: wangbt@mail.npust.edu.tw

摘要

銅鐘其幾何形狀隨著世界各地之文化背景不同而有所差異，而銅鐘結構的幾何外型是影響其聲音特性的重要參數之一。本文針對不同銅鐘包括地鐘、韓國鐘與法華鐘應用實驗模態分析(EMA)來探討幾何結構之振動特性，並對不同銅鐘進行振動模態與聲音特性之關聯性探討。首先，對不同銅鐘進行實驗模態分析，以衝擊錘為驅動器，加速度規與麥克風為感測器，透過訊號擷取卡擷取訊號，經由快速傅立葉轉換得其不同銅鐘之頻率響應函數，再經由軟體進行曲線嵌合得其實驗之模態參數，包含自然頻率、模態振型與模態阻尼比；同時對銅鐘進行聲音量測取得時間域響應，透過快速傅立葉轉換求得聲音自身功率頻譜密度函數，或簡稱聲音頻譜，以觀察不同銅鐘之聲音特性，並由實驗之頻率響應函數及模態參數進行探討。結果顯示銅鐘之聲音頻譜，可以瞭解不同銅鐘之基音與泛音之特性，並得知銅鐘之聲音特性與結構振動模態之自然頻率的關聯性，銅鐘環形模態為主要的發聲模態；而阻尼比相當小，顯示銅鐘聲音的持續性。本文透過實驗模態分析探討不同銅鐘之振動特性，並透過聲音量測實驗，探討不同銅鐘聲音之自然頻率與模態振型特性，可作為其他鐘樂器之振動與聲音特性研究。

關鍵字：銅鐘、頻率響應函數、模態參數、聲音頻譜

1. 前言

銅鐘在古代即已存在，主要作用為報時與宗教精神慰藉所用，銅鐘可以傳達當地特有文化理念，表現出別具風格的藝術氣息，隨著世界各地之文化背景不同而有所差異，影響聲音的主要因素為材料、幾何結構等，不同幾何結構經由不同方式的激振振動而產生不同的聲音，在銅鐘結構的幾何外型是影響其聲音特性的重要參數之一。

本文利用實驗模態分析來了解結構之振動特性，王等人[1]針對縮小模型鐘的振動特性與聲音特性進行探討，運用有限元素分析與實驗模態分析，建立等效於實體結構之有限元素模型；此外也對縮小模型鐘進行聲音量測分析，由結構振動模態瞭解鐘的發聲機制，並探討不同敲擊棒對鐘聲之差異影響，王與張[2]利用

有限元素分析探討鐵磬結構對聲音之影響，並從聲音量測結果中，可以發現尾端部分是鐵磬最佳敲擊位置，最佳的琴槌為硬度最硬的琴槌，在理論與實驗模態分析結果進行比對，發現兩者模態振型對應良好，頻率誤差主要可能發生原因為加工誤差所造成。王與余[3]利用釣魚線懸吊模擬自由邊界情形，以小型衝擊槌為驅動器，精密麥克風為感測器，求得古鈸的聲音壓力與外力的頻率響應函數，嵌合軟體擷取出實驗之模態參數，並將理論分析與實驗模態分析之模態參數進行比對，進而確定古鈸材料參數(楊氏係數)。

許多樂器的發聲機制都與結構振動特性有相關，Lee et al.[4]主要利用有限元素與實驗模態分析來驗證韓國鐘的振動模態響應，並預測新的韓國鐘振動特性與聲音特性，來提升韓國鐘敲擊時的聲音特性。在振動特性上常常與聲音特性有關，王等人[5]利用理論分析與實驗分析所得到的模態參數進行比對驗證，確認其振動模態特性，並對西藏頌鉢進行聲音量測，以瞭解振動特性與聲音間之關聯性。

參考不同的實驗方法進行振動特性之探討，J. Pan[6]主要探討中國鐘在聲學上獨特的聲音特性與振動方式，對兩個不同的鐘進行敲擊實驗，透過聲音分析得到自然頻率與鐘的外型之關係，並對聲音特性來進行探討。N. McLachlan[7]探討鈴鐺的聲音特性與外型幾何特徵之關聯性，利用有限元素分析與聲音量測實驗，將理論與實際之自然頻率互相比對，藉此瞭解鈴鐺之發聲機制。王等人[8]對鐵琴片進行聲音品質之客觀與主觀評估，求得鐵琴片客觀指標探討其發聲之物理機制，並做聲音量測分析，可觀察出鐵琴片有倍頻關係，其容許誤差也在範圍內，故音準相當準確。J. Ansari[9]鐘在傳統製造方法裡，通常無法達到理想的對稱結構，由於在鑄造過程中的幾何形狀、材料特性與局部缺陷而產生不規則性，運用廣義數學式表達鐘的振動，並透過實驗方法進行振動模態特性比對。Moore et al.[10]利用電子散斑干涉法來觀察喇叭型結構之振動模態，在消音室放置喇叭型結構，利用連續波之光線照射產生投影，在振動隔離光學台上投影出振動模態並觀察其特性。

本文主要針對不同銅鐘包括地鐘、韓國鐘與法華鐘應用實驗模態分析(EMA)求得銅鐘的模態參數，包括自然頻率、模態振型與阻尼比，探討不同銅鐘之

振動特性，並進行不同銅鐘之聲音量測分析，探討不同銅鐘之發聲機制；藉由不同銅鐘振動特性與發聲機制結果，探討不同銅鐘之間振動特性與發聲機制的關聯性。

2. 實驗模態分析與聲音量測分析

本章節主要在說明不同銅鐘之實驗模態分析(Experimental Modal Analysis, EMA)，與聲音量測方法，探討不同銅鐘振動特性與聲音特性之關聯性，並瞭解銅鐘之發聲機制。

在不同銅鐘之幾何外型與材料性質上，圖一分別為(a)地鐘、(b)法華鐘及(c)韓國鐘等3種不同銅鐘之幾何外型示意圖，因地鐘在幾何外型上其表面特徵，例如乳釘、表面花紋等，比法華鐘與韓國鐘來的明顯，故單獨將地鐘進行振動特性之探討，表一為不同銅鐘之幾何外型尺寸表，主要說明不同銅鐘之幾何尺寸與材料參數，主要可分為高度(H)、底徑(D₁)、頂徑(D₂)、厚度(t)、楊氏係數(E)、蒲松比(ν)與密度(ρ)。

由於須取得銅鐘適當之實驗量測佈點位置，故先針對不同銅鐘進行模態分析，透過理論分析的結果，觀察其模態振型之物理意義來作為EMA之佈點參考依據，圖二分別為(a)地鐘、(b)法華鐘及(c)韓國鐘的EMA量測點示意圖，不同銅鐘實驗量測點數規劃依序為地鐘共有80個量測點，可獲得80筆頻率響應函數，法華鐘共有68個量測點，可獲得68筆頻率響應函數，韓國鐘共有64個量測點，可獲得64筆頻率響應函數；實驗採用本實驗室自行開發的振動噪音量測軟體(SVM)與訊號擷取卡(NI-9234)進行實驗，圖三為不同銅鐘之量測儀器架設圖，利用釣魚線懸吊銅鐘的方式，來模擬全自由邊界，以衝擊錘(PCB 9001)為驅動器，加速規(27AM1-10)為感測器，將加速規固定於1號點上，利用移動衝擊錘，固定加速規方式進行實驗模態分析，將衝擊錘與加速規連接至訊號擷取卡，透過振動噪音量測軟體來獲得頻率響應函數(Frequency Response Function, FRF)與關聯性函數(Coherence function)，再將求得之頻率響應函數匯入ME'scopeVES軟體中進行曲線嵌合，最後獲得銅鐘之實驗模態參數，包含自然頻率、模態振型與模態阻尼比。振動噪音量測軟體(SVM)量測設定如下，頻寬設定為10000(Hz)，頻率解析度為0.78125(Hz)，為避免在量測時間內振幅無法衰減趨近於零，可能產生洩漏之現象，故利用指數加權函數(Exponential window)來防止洩漏產生。

本文透過探討不同銅鐘的聲音特性，故將不同銅鐘於相同邊界及敲擊錘的條件下來進行聲音量測實驗，進而了解不同銅鐘之聲音特性，以麥克風(130E20)為感測器進行量測，將麥克風連接訊號擷取卡，擷取訊號後匯入聲音量測軟體進行聲音量測分析，將所測得時間域的聲音響應，透過快速傅立葉轉換，進而得到自身功率頻譜密度函數，簡稱聲音頻譜，藉此來探討不同銅鐘之聲音特性與發聲機制。

3. 不同銅鐘之振動模態探討

本文針對不同銅鐘進行實驗模態分析，求得模態參數，包括自然頻率、模態振型與阻尼比，探討不同銅鐘振動特性之關聯性，表二為不同銅鐘EMA之模態參數對照表，利用相同物理意義來進行振動模態之比對，圖四分別為(a)地鐘、(b)法華鐘及(c)韓國鐘三種不同銅鐘之EMA模態振型對照圖，模態振型之物理意義以(θ, Z)代表， θ 為圓周方向之節線數， Z 為軸向之節線數；由王等人[1]利用實驗模態分析探討縮小模型鐘之振動特性，經縮小模型鐘之振動特性得知有模態耦合效應之產生，模態耦合效應主要是因為在物理意義上同時出現(2,1)與(3,1)的特性，主要發生在薄殼圓柱體上，特別是在低頻率範圍內；在觀察結果後可列出以下幾點：

1. 由表二可以看出阻尼比有產生負值之現象，主要原因為使用指數加權函數後需要進行阻尼比校正，因而造成校正後阻尼小於指數加權函數之衰減率的負值現象。
2. 除了地鐘E-09，法華鐘E-09，韓國鐘E-05、E-10、E-13、E-15、E-17等阻尼比大於0.1%之外，其他不同銅鐘之阻尼比皆小於0.07%，推測原因可能為銅鐘對於該頻率振幅有較大的衰減現象，進而使阻尼比有增加之現象。
3. 由不同銅鐘之幾何外型可觀察出地鐘比其他兩個銅鐘在外型上有較多與明顯的花紋裝飾，易增加模態振型物理意義判別上的困難度，因此將地鐘以1(Hz)至4000(Hz)來作為主要振動模態特性之探討區域，較容易觀察其振動模態特性；地鐘於E-03 1874.78(Hz)時所產生的頂部模態，推測可能為幾何外型的差異所造成的，使得該頻率有明顯之振動模態特性產生。
4. 由圖四可發現法華鐘與韓國鐘之振動模態特性對應結果大致相似，除了法華鐘在模態振型上多出E-17環形模態，與E-07、E-15、E-18之頂部模態，而韓國鐘則多出E-08模態耦合效應之模態振型之外，其餘模態振型對應相似，可能原因為幾何外型或材料性質的差異而導致振動模態特性有所差異。
5. 由表二得知除了頂部模態與模態耦合效應之模態振型外，其實驗模態分析E-10之前的自然頻率百分比誤差皆在4.5%以內，推測原因為因其幾何外型與材料性質不同，在兩個參數交互影響下，使得自然頻率有相近結果之現象產生。

4. 不同銅鐘之聲音特性探討

本章節運用聲音量測軟體針對不同銅鐘進行聲音量測，探討不同銅鐘之發聲機制，聲音量測求得之聲音壓力位準(dB)為參考值，聲音壓力位準(dB)為負值較不易觀察其聲音特性，故將量測之聲音壓力位準(dB)數值均加上100(dB)，觀察其聲音特性，除了以

具有較大聲音壓力位準(dB)之峰值來作為自然頻率之基準值，並以聲音壓力位準在20(dB)以內之自然頻率作為主要聲音特性探討之峰值頻率，圖五分別為(a)地鐘、(b)法華鐘及(c)韓國鐘三種不同銅鐘聲音頻譜的發聲頻率對應之結構模態振型圖，由圖五(a)可發現地鐘共有八個發聲峰值，主要發聲頻率為2686(Hz)，由圖五(b)可發現法華鐘共有六個主要發聲峰值，主要發聲頻率為2212(Hz)，由圖五(c)可發現韓國鐘共有三個主要發聲峰值，主要發聲頻率為774(Hz)，對應其實驗模態分析之模態特性得知銅鐘是以產生環型模態為主要發聲模態之頻率為主要發聲頻率；表三為不同銅鐘聲音量測與EMA之自然頻率對照表，結果顯示不同銅鐘在聲音量測分析與實驗模態分析之自然頻率誤差百分比皆在0.3%以內，表示聲音量測分析與實驗模態分析之結果具有一定的可靠度。

5. 結論

本文針對不同銅鐘進行實驗模態分析，來探討不同銅鐘之振動模態特性，並進行聲音量測分析，探討不同銅鐘之聲音特性，進而瞭解不同銅鐘之振動模態與聲音特性的關聯性與發聲機制。藉由分析結果可得到以下結論：

1. 在聲音量測分析與實驗模態分析之結果，可得知自然頻率誤差百分比皆在0.3%以內，表示聲音量測分析與實驗模態分析之結果具有一定的可靠度。
2. 在阻尼比上有產生負值之現象，主要原因為使用指數加權函數後需要進行阻尼比校正，因校正後阻尼小於指數加權函數之衰減率，進而發生阻尼比出現負值的現象，由於銅鐘之阻尼比都相當小，顯示銅鐘聲音具有較長持續度的特性。
3. 銅鐘主要以環型模態為主要發聲模態，而地鐘與法華鐘則有產生頂部模態，主要是幾何結構的差異所造成。
4. 法華鐘與韓國鐘振動模態特性對應相似，除了頂部模態、模態耦合效應與韓國鐘(4,2)模態振型外，其餘振動模態特性皆相對應，可能造成原因為頻率響應較小導致無法測得，再加上幾何外型與材料性質有所差異進而造成振動模態無法完全對應的結果。

6. 誌謝

本論文為科技部計畫編號MOST105-2622-E-020-001-CC3之計畫，由於三希典藏有限公司許萬全總經理與科技部的支持，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。

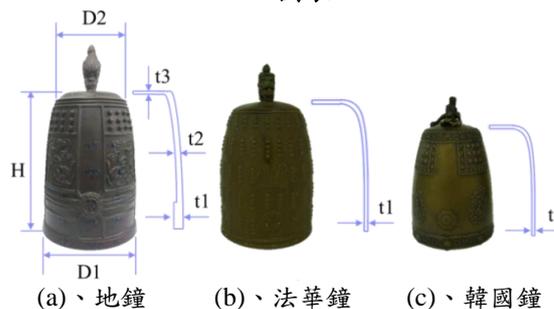
7. 參考文獻

1. 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

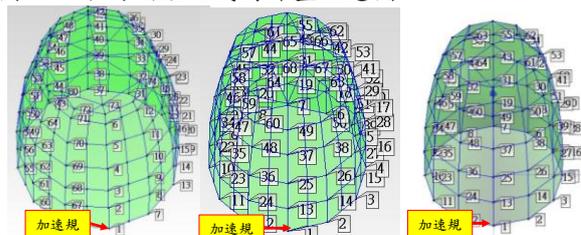
與製造科技研討會，精密機械與製造科技，A-047，屏東，台灣，2016。

2. 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，模態辨識與分析，D-02，高雄，台灣，2015。
3. 王栢村，余冠德，古鈸之模型驗證與聲音特性探討，中國機械工程學會第三十一屆全國學術研討會，固力與設計/振動學，論文編號:3188，台中市，台灣，2014。
4. J.M. Lee, S.H. Kim, S.J. Lee, J.D. Jeong, and H.G. Choi, "A study on the vibration characteristics of a large size Korean bell," Journal of Sound and Vibration, Vol. 257, No. 4, pp. 779-790, 2002.
5. 王栢村，藍怡成，黃家賢，吳毓珊，張家豪，西藏頌鉢之振動模態與聲音特性探討，台灣聲學學會第26屆學術研討會，C5，台北，台灣，2013。
6. J. Pan, "Acoustical properties of ancient Chinese musical bells," The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 84, No. S1, 2009.
7. N. McLachlan, "The application of new analyses and design methods to musical bells," 75th ASA Conference, pp. 1-8, 2002.
8. 王栢村，董時沛，徐秀娟，高正賢，特殊設計簡諧倍頻鐵琴組之聲音品質評估，中華民國振動與噪音工程學會第二十屆學術研討會，結構聲學與振動，B-04，彰化，臺灣，2012。
9. J. Ansari, "Finite element vibration analysis and modal testing of bells," IJME Intertech 2006 International Conference, Vol. 204, No. 113, 2006.
10. T.R. Moore, J.D. Kaplon, G.D. Mcdowall, and K.A. Martin, "Vibrational modes of trumpet bells," Journal of Sound and vibration, Vol. 254, No. 4, pp. 777-786, 2002.

8. 圖表



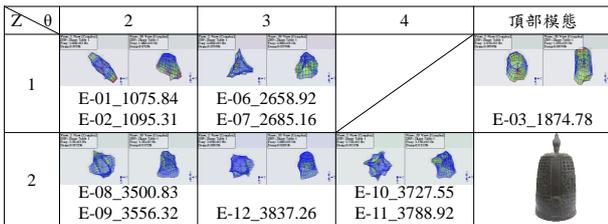
圖一：不同銅鐘之幾何外型示意圖



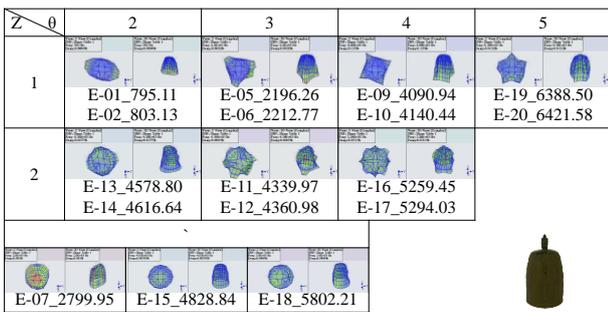
圖二：不同銅鐘 EMA 量測點示意圖



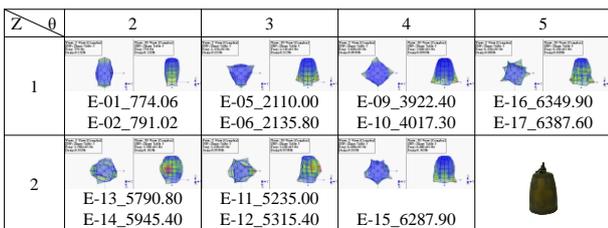
圖三：不同銅鐘之量測儀器架設圖



(a)地鐘

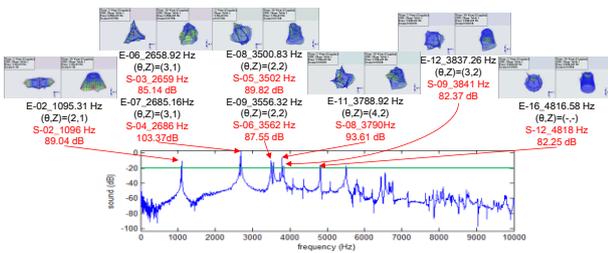


(b)法華鐘



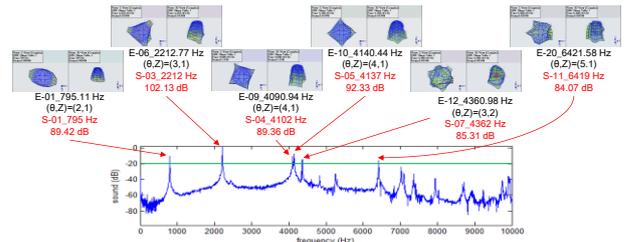
(c)韓國鐘

圖四：不同銅鐘之 EMA 模態振型對照圖

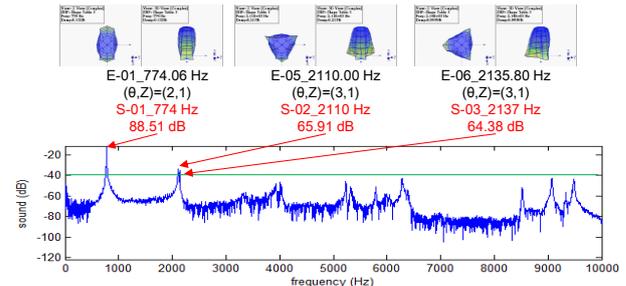


(a)地鐘

圖五：不同銅鐘聲音頻譜的發聲頻率對應之結構模態振型圖



(b)法華鐘



(c)韓國鐘

圖五：不同銅鐘聲音頻譜的發聲頻率對應之結構模態振型圖(續)

表一：不同銅鐘之幾何外型尺寸表

不同銅鐘	地鐘	法華鐘	韓國鐘
底徑(D ₁)	104.7mm	103.5mm	76.3mm
頂徑(D ₂)	75.0mm	74.0mm	50.7mm
高度(H)	143.7mm	121.5mm	96.1mm
厚度(t)	t ₁ =5mm t ₂ =4mm t ₃ =1.2mm	t=3mm	t=2mm
楊氏係數(E)	95.97GPa	118.26GPa	110.00GPa
蒲松比(ν)	0.34	0.34	0.34
密度(ρ)	8210Kg/m ³	7850Kg/m ³	8300Kg/m ³

表二：不同銅鐘 EMA 之模態參數對照表

地鐘				法華鐘				韓國鐘			
Mode	自然頻率 (Hz)	物理意義 (θ,Z)	Damping (%)	Mode	自然頻率 (Hz)	物理意義 (θ,Z)	Damping (%)	Mode	自然頻率 (Hz)	物理意義 (θ,Z)	Damping (%)
E-01	1075.84	(2,1)	0.01878	E-01	795.11	(2,1)	0.00838	E-01	774.06	(2,1)	0.05803
E-02	1095.31	(2,1)	0.04772	E-02	803.13	(2,1)	-0.03010	E-02	791.02	(2,1)	0.04161
E-03	1874.78	(頂部模態)	0.03686	--	--	--	--	--	--	--	--
E-04	2151.65	(2,1)(3,1)	0.02949	E-03	1590.14	(2,1)(3,1)	0.00859	E-03	1547.80	(2,1)(3,1)	0.06071
E-05	2190.65	(2,1)(3,1)	0.02716	E-04	1606.31	(2,1)(3,1)	0.01565	E-04	1581.60	(2,1)(3,1)	0.04490
E-06	2658.92	(3,1)	0.03586	E-05	2196.26	(3,1)	0.05713	E-05	2110.00	(3,1)	0.18586
E-07	2685.16	(3,1)	0.00608	E-06	2212.77	(3,1)	0.00792	E-06	2135.80	(3,1)	0.06679
--	--	--	--	E-07	2799.95	(頂部模態)	0.06255	--	--	--	--
--	--	--	--	E-08	3007.77	(3,1)(4,1)	0.00906	E-07	2909.60	(3,1)(4,1)	0.06312
--	--	--	--	--	--	--	--	E-08	2926.50	(3,1)(4,1)	0.05443
--	--	--	--	E-09	4090.94	(4,1)	0.12100	E-09	3922.40	(4,1)	0.06700
--	--	--	--	E-10	4140.44	(4,1)	0.04007	E-10	4017.30	(4,1)	0.12875
--	--	--	--	E-11	4339.97	(3,2)	0.07111	E-11	5235.00	(3,2)	0.06266
--	--	--	--	E-12	4360.98	(3,2)	0.07227	E-12	5315.40	(3,2)	-0.00773
E-08	3500.83	(2,2)	0.00084	E-13	4578.80	(2,2)	0.00519	E-13	5790.80	(2,2)	0.15311
E-09	3556.32	(2,2)	0.24690	E-14	4616.64	(2,2)	0.05840	E-14	5945.40	(2,2)	-0.00456
--	--	--	--	E-15	4828.84	(頂部模態)	-0.00608	--	--	--	--
E-10	3727.55	(4,2)	-0.00006	E-16	5259.45	(4,2)	0.02021	E-15	6287.90	(4,2)	0.15389
E-11	3788.92	(4,2)	0.03509	E-17	5294.03	(4,2)	-0.00406	--	--	--	--
E-12	3837.26	(3,2)	0.00518	E-18	5802.21	(頂部模態)	0.03103	--	--	--	--
E-13	4074.96	--	0.02605	E-19	6388.50	(5,1)	0.00224	E-16	6349.90	(5,1)	0.01898
E-14	4357.56	--	-0.00481	E-20	6421.58	(5,1)	0.02058	E-17	6387.60	(5,1)	0.10704

表三：不同銅鐘聲音量測與 EMA 之自然頻率對照表
(a)地鐘

聲音量測			EMA			誤差 (%)
Mode	發聲頻率 (Hz)	聲音壓力位準 (dB)	Mode	自然頻率 (Hz)	物理意義 (θ,Z)	
S-01	1076	65.94	E-01	1075.84	(2,1)	0.01
S-02	1096	89.04	E-02	1095.31	(2,1)	0.06
S-03	2659	85.14	E-06	2658.92	(3,1)	0.00
S-04	2686	103.37	E-07	2685.16	(3,1)	0.03
S-05	3502	89.82	E-08	3500.83	(2,2)	0.03
S-06	3562	87.55	E-09	3556.32	(2,2)	0.16
S-07	3732	73.77	E-10	3727.55	(4,2)	0.12
S-08	3790	93.61	E-11	3788.92	(4,2)	0.03
S-09	3841	82.37	E-12	3837.26	(3,2)	0.10

備註：原始聲音壓力位準(dB)均+100(dB)

表三：不同銅鐘聲音量測與 EMA 之自然頻率對照表
(續)

聲音量測			EMA			誤差 (%)
Mode	發聲頻率 (Hz)	聲音壓力位準 (dB)	Mode	自然頻率 (Hz)	物理意義 (θ,Z)	
S-01	795	89.42	E-01	795.11	(2,1)	-0.01
S-02	803	74.70	E-02	803.13	(2,1)	-0.02
S-03	2212	102.13	E-06	2212.77	(3,1)	-0.03
S-04	4102	89.36	E-09	4090.94	(4,1)	0.27
S-05	4137	92.33	E-10	4140.44	(4,1)	-0.08
S-06	4339	70.19	E-11	4339.97	(3,2)	-0.02
S-07	4362	85.31	E-12	4360.98	(3,2)	0.02
S-08	4608	60.30	E-14	4616.64	(2,2)	-0.19
S-09	4828	65.01	E-15	4828.84	(頂部模態)	-0.02
S-10	5256	67.10	E-16	5259.45	(4,2)	-0.07
S-11	6419	84.07	E-20	6421.58	(5,1)	-0.04

備註：原始聲音壓力位準(dB)均+100(dB)

表三：不同銅鐘聲音量測與 EMA 之自然頻率對照表
(續)

(c)韓國鐘

聲音量測			EMA			誤差 (%)
Mode	發聲頻率 (Hz)	聲音壓力位準 (dB)	Mode	自然頻率 (Hz)	物理意義 (θ,Z)	
S-01	774	88.51	E-01	774.06	(2,1)	-0.01
S-02	2110	65.91	E-05	2110.00	(3,1)	0.00
S-03	2137	64.38	E-06	2135.80	(3,1)	0.06
S-04	3934	51.77	E-09	3922.40	(4,1)	0.30
S-05	4012	53.59	E-10	4017.30	(4,1)	-0.13
S-06	5235	54.10	E-11	5235.00	(3,2)	0.00
S-07	5326	49.10	E-12	5315.40	(3,2)	0.20
S-08	5792	48.55	E-13	5790.80	(2,2)	0.02
S-09	5963	42.41	E-14	5945.40	(2,2)	0.30
S-10	6282	57.24	E-15	6287.90	(4,2)	-0.09
S-11	6383	45.94	E-17	6387.60	(5,1)	-0.07

備註：原始聲音壓力位準(dB)均+100(dB)

accelerometer and microphone as the sensor, respectively. The bell's frequency response functions (FRFs) can be measured and processed for curve fitting to obtain structural modal parameters, i.e. natural frequencies, mode shapes and modal damping ratios. The bell's percussion sound is also measured its time domain response as well as the auto power spectral density function or simply sound spectrum via fast Fourier transform (FFT). The sound characteristics can be interpreted and correlated to FRFs and modal parameters. Results show the bell's sound spectrum can be characterized for its fundamental and overtones frequencies that are related to the bell structural vibration modes. In particular, the natural frequencies of circular modes of bell dominate the sound spectrum. The small damping ratios result in the long existing sound. This work applies EMA to obtain vibration modes of different bells and investigate the sound and vibration correlation of bells. The techniques can also be applied to other instruments as well.

Keywords: Bells, Frequency response function (FRF), Modal parameter, Sound spectrum

Discussions on Vibration Modes and Sound Generation Mechanism of Different Bells

Bor-Tsuen Wang^{1*}, Chang-Yu Yang¹,

Bo-Jun Zhang¹, Chia-Hsien Huang¹,

Ying-Huei Wu²

¹Department of Mechanical Engineering

National Pingtung University of Science and
Technology

²National Nei-Pu Senior

Agricultural-Industrial Vocational School of
Machinery Division

(MOST105-2622-E-020-001-CC3)

*Email: wangbt@mail.npust.edu.tw

Abstract

Bells can be found worldwide and may have different geometry that will affect the sound characteristics. This work aims to examine the structural geometry of different bells, including Di bell, Korean bell and Fa-Hua bell by adopting experimental modal analysis (EMA) to investigate vibration characteristics of different bell structures. The percussion sound of bell correlated to the structural vibration modes will also be studied. First, three types of bells are performed EMA by using the hammer as the actuator and both the