

不同銅鐘之聲音特性與指向性探討

Discussions on Sound Characteristics and Directivity Patterns for Different Copper Bells

王栢村¹、楊昶昱^{2*}、黃家賢²、吳盈輝³

¹國立屏東科技大學機械工程系 教授

²國立屏東科技大學機械工程系 碩士生

³國立內埔高級農工職業學校 機械科

摘要

銅鐘為圓柱形中空之打擊樂器，隨著世界各地之文化背景不同而有所差異，其敲擊聲音特性主要影響因素為材料、幾何結構等，銅鐘的幾何外型則是影響其聲音特性的重要參數之一。本文針對不同的銅鐘包括地鐘、韓國鐘與法華鐘，採用實驗方法進行聲音特性與指向性探討，將銅鐘以懸掛方式進行敲擊實驗，分別進行聲音量測與聲音指向性實驗，使用麥克風量測聲音訊號，透過頻譜分析儀與聲音量測軟體取得銅鐘聲音之時間域響應以及聲音頻譜，由聲音頻譜可以觀察發聲的基音頻率及泛音頻率，進而比較不同銅鐘的差異；也透過短時傅立葉轉換得到時頻圖，可探討不同發聲頻率的衰減效應。在銅鐘敲擊聲音的指向性實驗，以銅鐘為中心點沿著圓周方向路徑，將麥克風均分 12 點進行量測，由各量測點之聲音壓力自身功率頻譜密度函數可繪製不同發出聲音模態的指向性圖，以觀察銅鐘的聲音頻譜與聲音指向性分佈之關聯性。由於三個銅鐘幾何形狀及大小相近，其主要的發聲頻率僅有些許的差異，而結構模態振型與對應的指向性圖有相似的特徵，由時頻圖可看出基音頻率有明顯的持續度。本文以實驗方法探討了不同銅鐘的聲音特性，特別由銅鐘的聲音指向性圖可以了解銅鐘不同的發聲頻率模態在空間的聲音輻射特徵，未來可作為銅鐘及相關樂器之發聲機制與聲學特性研究的參考。

關鍵字：銅鐘、時間域響應、聲音頻譜、指向性。

Abstract

Copper bells are hollow cylindrical percussion instruments and can have different shapes and materials worldwide. The percussion sound of copper bells may be affected by materials and structural geometry. Especially, the geometry of bell is one of the major factors influencing the sound characteristics. This work aims to experimentally explore the sound characteristics and radiation directivity of different copper bells, including Di Bell, Korean bell and Fa-Hua bell. The bells are suspended and stricken by the hammer. The microphone is used to capture the sound signal and processed by FFT analyzer to obtain time domain response and sound spectrum, respectively. The fundamental frequency as well as overtone frequencies of the bells can be observed from sound spectrum and compared among different

bells. The time-frequency plots of percussion sound can also be obtained from short time Fourier transforms (STFT) to study the decay effect of different contributed modes of sound. Sound radiation directivity measurement is then carried out by applying microphones at 12 points along the circumferential path around the bell. The directivity patterns of bells can be found related to structural mode shapes. Since the size and geometry of bells are similar, the radiated sound frequencies of major contributed modes reveal slightly different but with similar mode shapes and directivity patterns. This work shows the experimental approach in studying sound characteristics of different bells, in particular the directivity of bells that can visualize spatially how the sound radiates for different modes. The experimental methods can be adopted for sound generation mechanism study of bells and other musical instruments as well.

Keywords: copper bell, time domain response, sound spectrum, directivity.

一、前言

銅鐘為中空之打擊樂器，隨著世界各地之文化背景不同而有所差異，銅鐘傳達當地特有文化理念，表現出當地藝術風格，其敲擊聲音特性主要影響因素為材料、幾何結構等，不同幾何外形結構經由敲擊後產生激振而產生不同的聲音，聲音透過空氣傳遞至人耳中，因此銅鐘的幾何外型是影響其聲音特性的重要參數之一。

許多打擊樂器與銅鐘敲擊模式相似，而幾何外型所產生之振動特性與聲音特性息息相關，王等人[1]利用麥克風與頻譜分析儀針對不同打擊樂器進行聲音特性探討，打擊樂器之聲音特性分為三大方向(音高、音色、持續度)，而主要影響發聲的要素相當多，如樂器的結構、形狀、尺寸及材質等。徐與田[2]利用問卷調查分析二胡樂音的三個客觀聲音指標(純淨度、厚實度與音量均衡度)，經由主觀與客觀的結果符合性來評估一把二胡之樂音特性。Boullosa [3]對吉他弦與共鳴板進行研究，利用量測得到之頻率響應函數與聲音譜頻來進行探討，可看出低頻時有較強烈的模態激發。J. Pan [4] 主要探討中國鐘，在聲學上有獨特的聲音特性與振動模態特性，對兩個不同的鐘進行敲擊實驗，透過聲音特性分析得到自然頻率與鐘的幾何外型之關聯性，並探討敲擊所得特徵頻率(基音與泛音)之聲音特性。P. Kičák [5]利用砂礫放置木箱鼓之共鳴板上，進行敲擊實驗而產生激發之模態振型，並透過聲音量測儀器進行聲音特性探討，木箱鼓聲音特性是隨敲擊點變化而變化。

許多樂器利用實驗模態分析來了解幾何結構之振動特性，並探討其樂器發聲機制，王等人[6]透過實驗模態分析對不同銅鐘進行振動特性探討，並利用聲音量測分析探討其聲音特性，以了解不同銅鐘基音與泛音之特性，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，而阻尼比相當小，顯示銅鐘聲音的持續性，王與蔡[7]探討平鑼之振動與聲音特性，運用實驗模態分析與聲音量測分析進行振動特性之探討，並利用有限元素分析進行模型驗證，將有助於了解平鑼的發聲機制。林等人[8]探討銅磬振動特性與聲音特性之關聯性，利用有限元素分析與實驗模態分析進行振動模態特性之探討，並對3種不同尺寸銅磬進行相同實驗，以獲得不同幾何結構之銅磬的模態參數，並進行

不同銅磬之振動模態特性與聲音品質之探討。Boullosa [9]利用有限元素分析來求得木條條之振動模態特性，再利用固定截面、凹陷等來求得木條結構之特徵模態和隨機響應，了解形狀特徵對樂器之影響，再與實驗得到之結果互相比較，來找出其關聯性。McLachlan et al. [10]透過有限元素分析了解幾何外型與振動特性之關聯性，得知鐘主要是以鐘裙擺動模態振型為主，並利用改變擺裙斜率將鐘進行最佳化調整，以預測鐘的自然頻率與模態振型。

本文針對不同的銅鐘包括地鐘、韓國鐘與法華鐘進行聲音特性與指向性探討，利用聲音量測分析所求得的聲音頻譜來觀察其聲音特性，並以銅鐘為中心點沿著圓周方向路徑進行量測，將各量測點之聲音壓力自身功率頻譜密度函數繪製出不同發出聲音頻率的指向性圖，藉此來觀察銅鐘之聲音頻譜與聲音指向性分佈之關聯性。

二、實驗方法與步驟

本章節主要說明不同銅鐘聲音量測分析與聲音指向性之實驗方法。圖 1 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，由圖 1 可看出不同銅鐘之幾何結構外型差異與敲擊位置，紅點處為敲擊點位置，表 1 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，主要可分為底徑(D_1)、頂徑(D_2)、鐘高度(H_1)、敲擊點高度(H_2)、厚度(t)、楊氏係數(E)、蒲松比(ν)與密度(ρ)。

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 2 為銅鐘聲音量測之實驗儀器架設圖，聲音量測分析利用釣魚線懸掛銅鐘，來模擬實際銅鐘吊法，將不同銅鐘於相同邊界與敲擊鉗之條件下進行聲音量測分析實驗，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，將麥克風連接於訊號擷取卡擷取時間響應訊號，將時間響應訊號輸入至振動噪音量測軟體進行聲音量測分析，圖 3 為時間響應訊號處理流程圖，將時間響應訊號分別進行快速傅立葉轉換與短時傅立葉轉換，求得聲音頻譜圖與時間頻譜圖，衰減率圖是利用平方根運算將時間響應訊號進行運算所得。圖 4 分別為(a)聲音頻譜、(b)時間頻率與(c)衰減率之聲音量測軟體設定介面，本次實驗量測設定取樣點數 51200，平均次數 2 次，重疊率 90%。

圖 5 為銅鐘之指向性麥克風量測實驗佈點規劃示意圖，聲音指向性實驗以衝擊鉗(PCB--086C03)為驅動器，加速規(27AM1-10)與麥克風(PCB--130E20)為感測器，以固定衝擊鉗與加速規在 1 號點位置，移動麥克風進行量測實驗，麥克風量測高度依不同銅鐘敲擊點的高度(H_2)而有所不同，以銅鐘為中心點沿著圓周方向路徑，將麥克風量測點均分為 12 等分並進行量測，透過量測後得到加速度自身功率頻譜密度函數與各點之聲音壓力自身功率頻譜密度函數，利用加速度自身功率頻譜密度函數校正聲音壓力自身功率頻譜密度函數，使各量測點有相同之施力數值，將各量測點之聲音壓力自身功率頻譜密度函數匯入 ME' scopeVES 軟體中，並運用內差法運算求得各相鄰量測點之中點值，即原為 12 筆量測數據，經由運算成為 24 筆量測數據繪製出不同發出聲音模態之指向性圖，藉此來觀察銅鐘的聲音頻譜與聲音指向性分佈之關聯性。

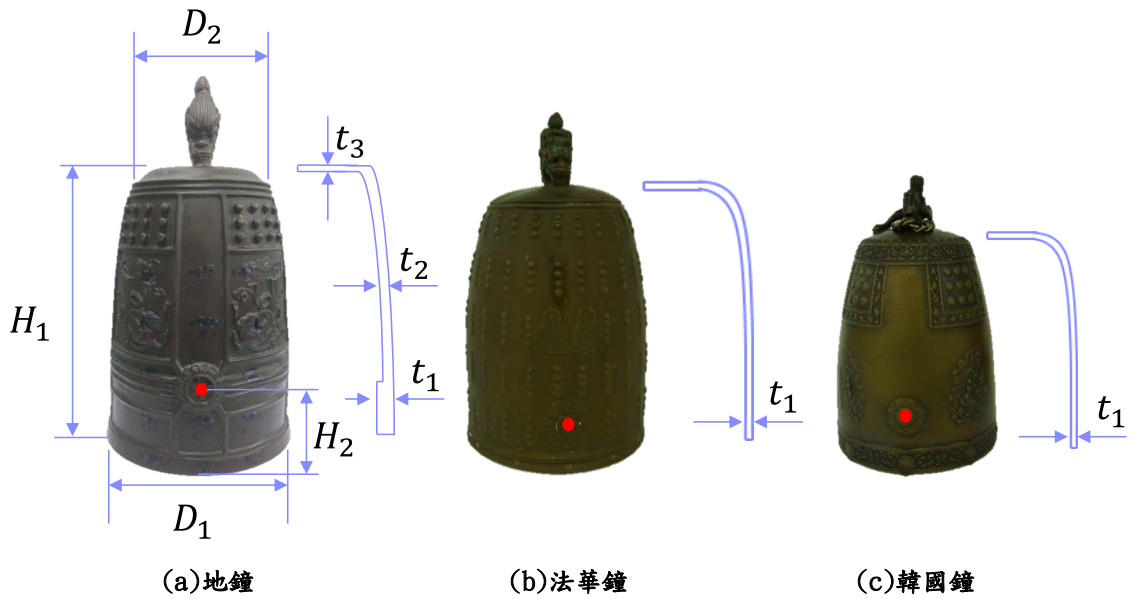


圖 1 不同銅鐘之幾何外型示意圖

表 1 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
鐘高度(H ₁)	143.7mm	121.5mm	96.1mm
敲擊點高度(H ₂)	4.0mm	3.0mm	2.5mm
厚度(t)	t ₁ =5mm t ₂ =4mm t ₃ =1.2mm	t ₁ =3mm	t ₁ =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



圖 2 銅鐘聲音量測之實驗儀器架設圖

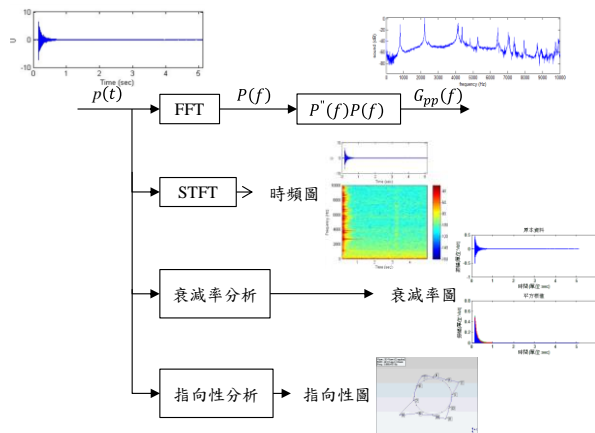


圖 3 時間響應訊號處理流程圖

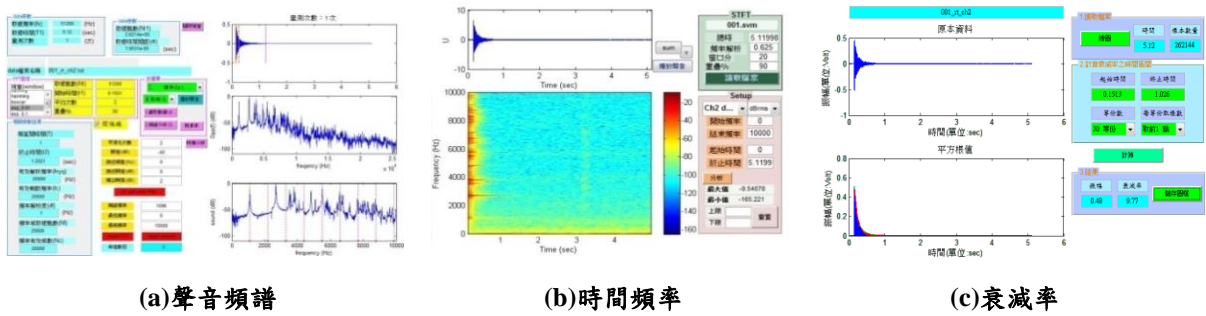


圖 4 聲音量測軟體設定介面

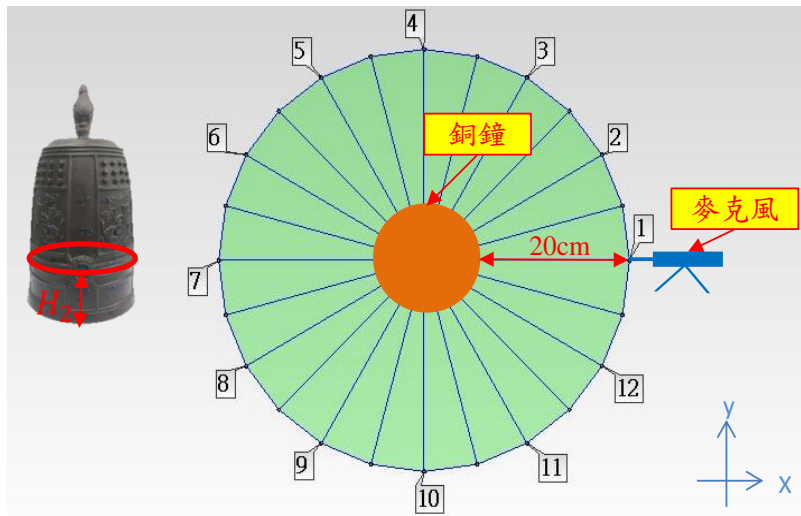


圖 5 銅鐘之指向性麥克風量測實驗佈點規劃示意圖

三、結果與討論

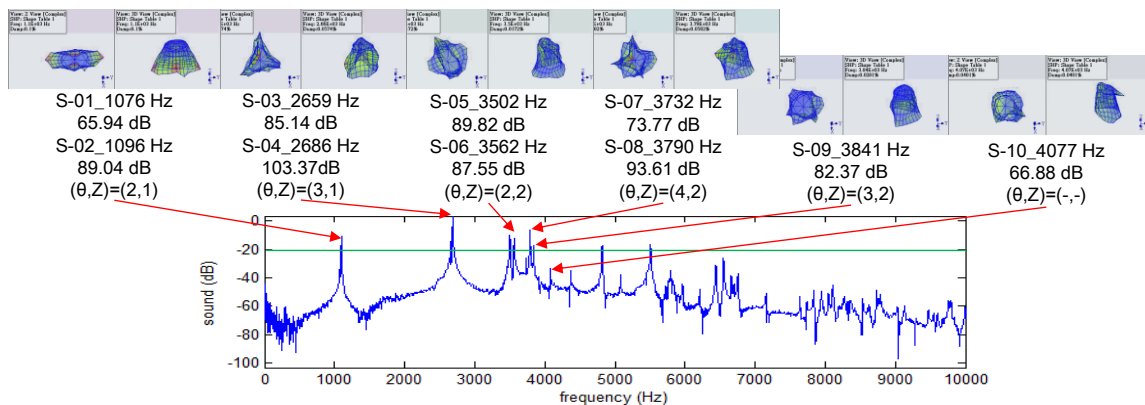
本文針對不同銅鐘進行聲音量測分析，求得不同銅鐘之聲音頻譜圖、時間頻率圖與衰減率圖，探討不同銅鐘之聲音特性，並利用指向性分析所得到的指向性圖，了解銅鐘在不同的發聲頻率模態在空間的聲音輻射特徵。以聲音量測分析求得之聲音壓力位準為參考值，為便於觀察將量測之聲音壓力位準數值均加上 100dB，藉此以觀察其聲音特性，分述如下：

3-1 不同銅鐘之聲音特性探討

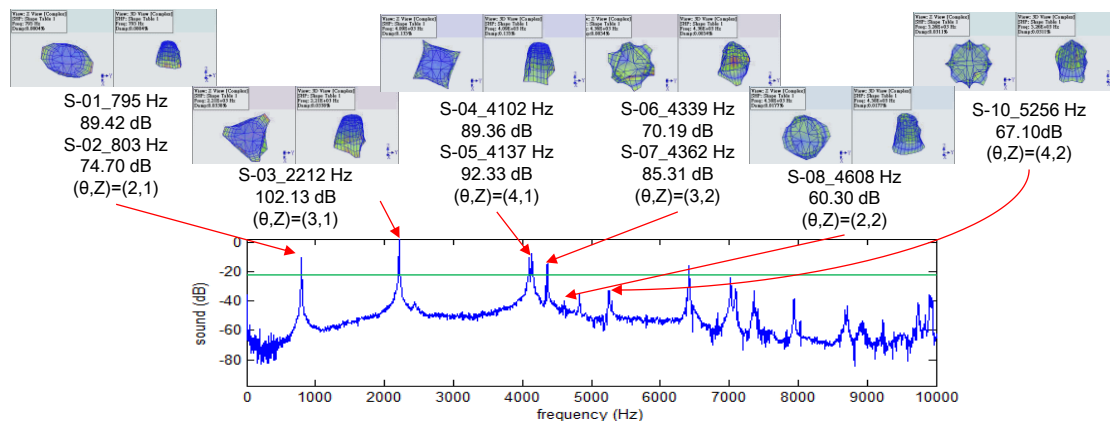
透過聲音量測分析來求得聲音頻譜圖、時間頻率圖與衰減率圖，圖 6 為不同銅鐘聲音頻譜的發聲頻率對應之結構模態振型圖，透過王等人[6]利用實驗模態分析所探討不同銅鐘之振動特性結果，經實驗模態分析得到不同銅鐘之模態振型，模態振型之物理意義以 (θ, Z) 代表， θ 為圓周方向之節線數， Z 為軸向之節線數，圖 7 為不同銅鐘之時間頻率圖與衰減率圖，圖 7 為不同銅鐘之時間頻率圖與衰減率圖，不同銅鐘之聲音持續度與時間常數(Time Constant)有關，時間常數與衰減率為倒數關係，故時間常數越大聲音持續時間越長，反之則越短，在觀察結果後綜合討論如下：

1. 由圖 6 可以發現不同銅鐘在 1 至 5000Hz 的發聲頻率波型相似，可能原因為三個銅鐘幾何形狀及大小相近，其主要的發聲頻率僅有些許的差異。

- 由圖 6 可得知地鐘 S-04 有最大聲音壓力位準之發聲頻率，其數值為 103.37dB，但在圖 7 時間頻率圖可發現地鐘 S-02 有較長之聲音持續度，故地鐘 S-02 發聲頻率 1096Hz 為主要發聲頻率，物理意義 (θ, Z) 為(2,1)；法華鐘 S-03 為最大聲音壓力位準與持續度之發聲頻率，其數值為 102.13dB，故法華鐘 S-03 發聲頻率 2212Hz 為主要發聲頻率，物理意義 (θ, Z) 為(3,1)；韓國鐘 S-01 為最大聲音壓力位準與持續度之發聲頻率，其數值為 88.51dB，故韓國鐘 S-01 發聲頻率 774Hz 為主要發聲頻率，物理意義 (θ, Z) 為(2,1)，不同銅鐘之主要發聲頻率以低頻率為主要發聲頻率，時間頻率圖顯示基音頻率有明顯的持續度。
- 銅鐘為圓柱結構，因此模態振型主要以兩兩一組之軸對稱模態，由圖 6 可以發現不同銅鐘模態振型之物理意義前兩個相同，物理意義 (θ, Z) 分別為(2,1)與(3,1)，而後地鐘出現之模態振型與法華鐘跟韓國鐘不同，推測是因為地鐘的外型表面特徵較其他銅鐘多所導致。
- 由不同銅鐘之對稱模態發聲頻率差值可發現法華鐘最大差值較小，其差值為 35Hz，推測是因為不同銅鐘在製作上無法產生真圓的圓周剖面，因此在法華鐘圓周剖面之真圓度有較高的現象。
- 由不同銅鐘之時間常數可發現法華鐘有較大之時間常數，因此發聲之持續度較長，相反的韓國鐘有較小之時間常數，發聲之持續度較短。



(a)地鐘



(b)法華鐘

圖 6 不同銅鐘聲音頻譜的發聲頻率對應之結構模態振型圖

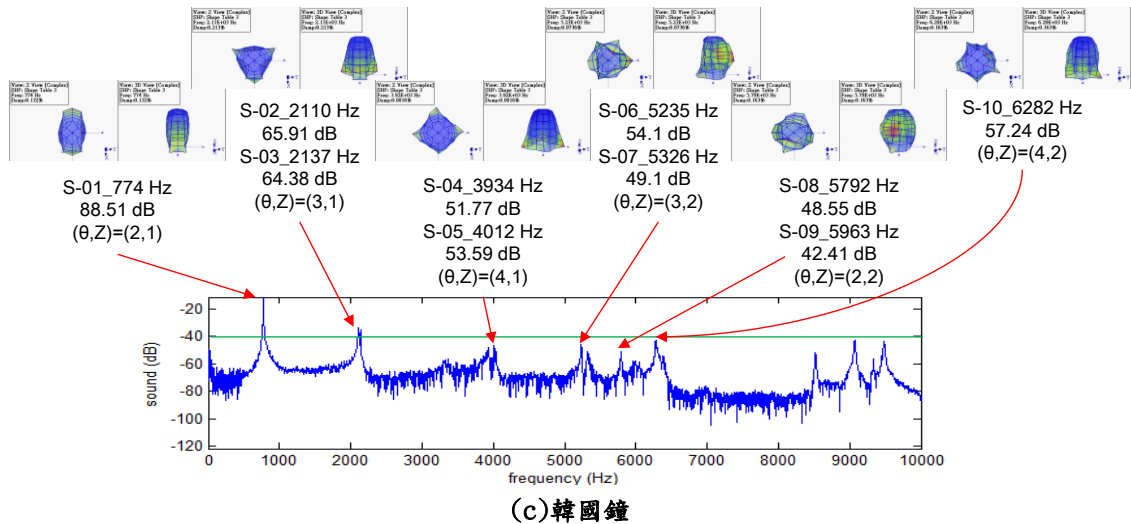


圖 6 不同銅鐘聲音頻譜的發聲頻率對應之結構模態振型圖(續)

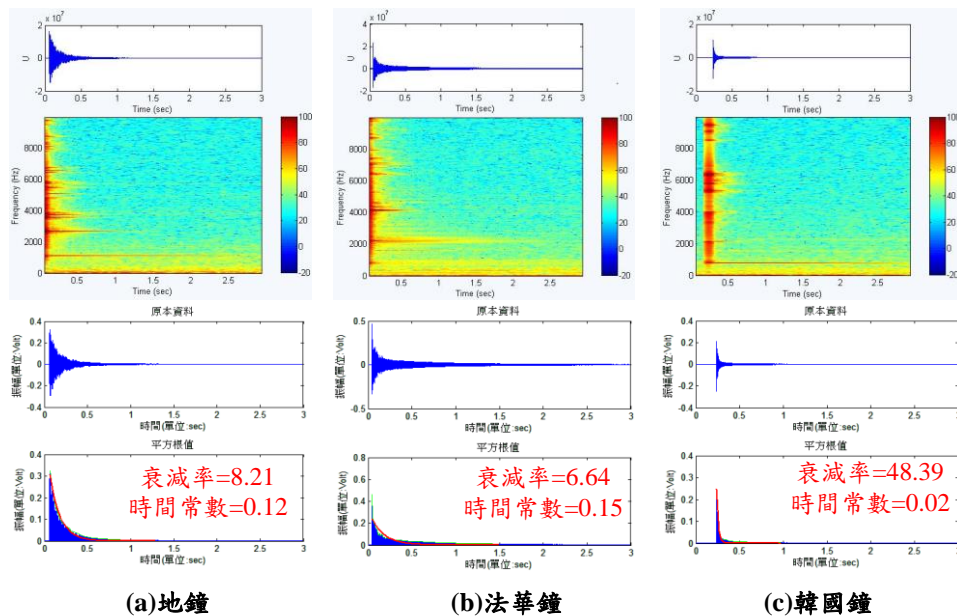


圖 7 不同銅鐘之時間頻率圖與衰減率圖

3-2 不同銅鐘之指向性探討

透過聲音指向性分析實驗求得指向性圖，搭配聲音頻譜圖進行結構模態振型與指向性之探討，圖 8 為不同銅鐘聲音頻譜的發聲頻率對應之指向性圖，表 2 為不同銅鐘敲擊之發聲頻率與物理意義總表，利用相同結構模態振型之物理意義進行指向性特性比對，經由指向性分析得到不同銅鐘之指向性圖，指向性圖之物理意義以 (θ) 代表， θ 為圓周方向之峰值數；由表 2 可以看出由結構模態振型與對應的指向性圖有相似的特徵，除了法華鐘 S-06 與 S-07 結構模態振型之物理意義 (θ, Z) 為(3, 2)，指向性分析產生之物理意義 (θ) 為(4)，在韓國鐘 S-03 結構模態振型之物理意義 (θ, Z) 為(3, 1)，指向性分析產生之物理意義 (θ) 為(3)，與 S-10 結構模態振型之物理意義 (θ, Z) 為(4, 2)，指向性分析產生之物理意義 (θ) 為(5)，未對應之物理意義可能原因為銅鐘之指向性麥克風量測點不足，或在結構模態振型之物理意義較複雜，因此難以判別。

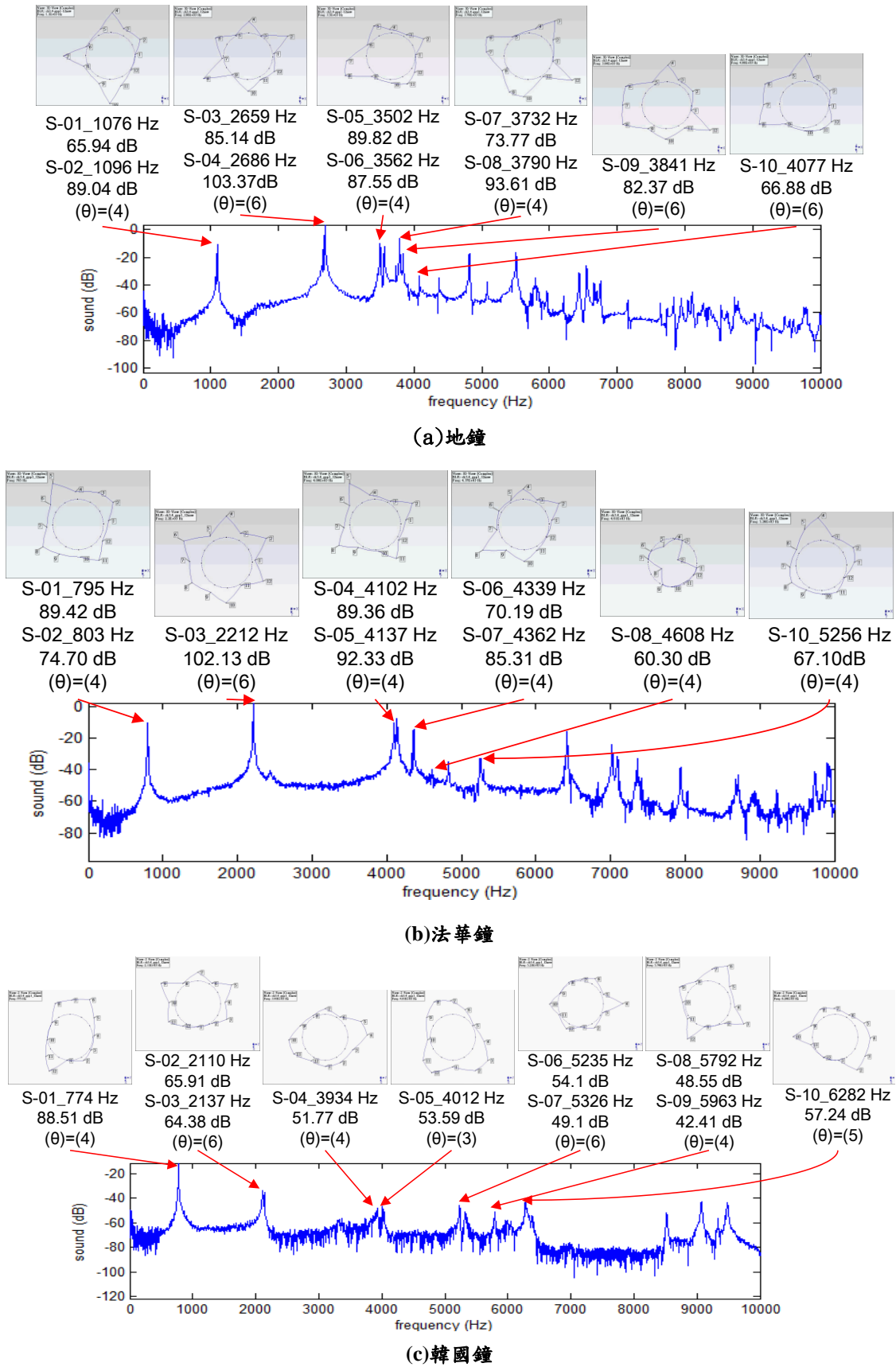


圖 8 不同銅鐘聲音頻譜的發聲頻率對應之指向性圖

表 2 不同銅鐘敲擊之發聲頻率與物理意義總表

地鐘				法華鐘				韓國鐘				模態振 型之物 理意義 (θ, Z)
峰 值 數	發聲 頻率 (Hz)	聲音 壓力位準 (dB)	指向 性之 物理 意義 (θ)	峰 值 數	發聲 頻率 (Hz)	聲音 壓力位準 (dB)	指向 性之 物理 意義 (θ)	峰 值 數	發聲 頻率 (Hz)	聲音 壓力位準 (dB)	指向 性之 物理 意義 (θ)	
S-01	1076	65.94	(4)	S-01	795	89.42	(4)	S-01	774	88.51	(4)	(2,1)
S-02	1096	89.04	(4)	S-02	803	74.70	(4)	--	--	--	--	
S-03	2659	85.14	(6)	--	--	--	--	S-02	2110	65.91	(6)	(3,1)
S-04	2686	103.37	(6)	S-03	2212	102.13	(6)	S-03	2137	64.38	(6)	
--	--	--	--	S-04	4102	89.36	(4)	S-04	3934	51.77	(4)	(4,1)
--	--	--	--	S-05	4137	92.33	(4)	S-05	4012	53.59	(3)	
--	--	--	--	S-06	4339	70.19	(4)	S-06	5235	54.1	(6)	(3,2)
--	--	--	--	S-07	4362	85.31	(4)	S-07	5326	49.1	(6)	
S-05	3502	89.82	(4)	S-08	4608	60.30	(4)	S-08	5792	48.55	(4)	(2,2)
S-06	3562	87.55	(4)	--	--	--	--	S-09	5963	42.41	(4)	
--	--	--	--	S-09	4828	65.01	(4)	--	--	--	--	(頂部模態)
S-07	3732	73.77	(4)	S-10	5256	67.10	(4)	S-10	6282	57.24	(5)	(4,2)
S-08	3790	93.61	(4)	--	--	--	--	--	--	--	--	
S-09	3841	82.37	(6)	--	--	--	--	--	--	--	--	(3,2)
S-10	4077	66.88	(6)	--	--	--	--	--	--	--	--	--

四、結論

本文透過聲音量測分析進行不同銅鐘之聲音特性探討，並利用指向性分析了解空氣聲音傳遞特性，進而探討結構模態振型與對應的指向性圖之關聯性。藉由分析結果可得到以下結論：

1. 由聲音頻譜可以發現不同銅鐘在 1 至 5000Hz 的發聲頻率波型相似，可能原因為三個銅鐘幾何形狀及大小相近，其主要的發聲頻率僅有些許的差異。
2. 在聲音量測分析之結果，可以得知地鐘主要發聲頻率為 1096Hz，物理意義(θ, Z)為(2,1)，法華鐘主要發聲頻率為 2212Hz，物理意義(θ, Z)為(3,1)，韓國鐘主要發聲頻率為 774Hz，物理意義(θ, Z)為(2,1)，不同銅鐘之主要發聲頻率以低頻率為主要發聲頻率，時間頻率圖可看出基音頻率有明顯的持續度。
3. 由不同銅鐘之時間常數可發現法華鐘有較大之時間常數，因此發聲頻率的持續度較長，相反的韓國鐘有較小之時間常數，發聲頻率的持續度較短。
4. 由結構模態振型與對應的指向性圖有相似的特徵，未對應之物理意義可能原因為銅鐘之指向性麥克風量測點不足，或在結構模態振型之物理意義較複雜，因此難以判別。

五、參考文獻

1. 王栢村, 吳祥瑞, 徐秀娟, 高正賢, 中華民國音響學會第二十四屆學術研討會論文集, 「不同打擊樂器聲音特性探討」, 論文編號: C10, 2011。
2. 徐茂濱, 田英志, 中華民國音響學會第十七屆學術研討會, 「二胡樂音之聲音品質分析」, pp.69-77, 2004。
3. R. Boullosa, "Vibration Measurement in The Classical Guitar" Applied Acoustics, vol.63, pp.311-322, 2002.
4. J. Pan, "Acoustical Properties of Ancient Chinese Musical Bells" The Journal of the Acoustical Society of America, vol.84, no.S1, 2009.
5. P. Kičák, "Frequency and Dynamics Analysis of Bass Tone of Cajon Box Drum" 34th International Acoustical Conference - EAA Symposium, 2009.
6. 王栢村, 楊昶昱, 張博鈞, 黃家賢, 吳盈輝, 中國機械工程學會第三十三屆全國學術研討會論文集, 「不同銅鐘之振動模態與發聲機制探討」, 論文編號: 1490, 2016。
7. 王栢村, 蔡有倫, 中華民國力學學會第三十六屆全國力學會議, 「平鑼聲音特性與振動分析之探討」, 論文編號: F-002, 2012。
8. 林鴻裕, 吳昱岱, 劉吉峯, 機械技師學刊, 「不同尺寸銅鑿之振動特性分析與聲音測試」, 第4卷, 第2期, pp.1-6, 2011。
9. R. Boullosa, "Vibration Measurement in The Classical Guitar" Applied Acoustics, vol.63, pp.311-322, 2002.
10. N. McLachlan, B. K. Nigjeh and A. Hasell, "The design of bells with harmonic overtones" The Journal of the Acoustical Society of America, vol.114, no.1, 2003.