

## 聲音模擬程式之發展與應用 Development and Application of Sound Generation Program

王栢村<sup>1</sup>、陳品豪<sup>2</sup>、吳銘峰<sup>2</sup>、董時沛<sup>2</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碩士班研究生

國立屏東科技大學機械工程系

912 屏東縣內埔鄉學府路一號

電話：08-770-3202 轉 7017 Fax：08-774-0142

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

### 摘要

打擊樂器之樂音或工程結構如高爾夫球桿之揮擊音，音樂人或球友對聲音響應相當敏感，因此系統化之探討結構聲音為重要議題。本文發展一聲音模擬方式，特別針對結構振動引發之結構聲音輻射之聲音效果，提出一簡易便捷的模擬方法，並能以個人電腦通用的 WAV 格式儲存便於重複播放評估。由於如打擊樂器或高爾夫球頭等結構，均有其結構振動自然模態，而主要發聲機制即為振動模態之自然頻率，尤其以低頻率之模態數主導了結構之聲響特性。本文由單自由度振動系統響應特性，界定結構各模態之聲音振幅、頻率、衰減率及相位角等參數，進而由實驗或分析求得之多個模態特性參數，以模擬合成結構之聲音輻射聲音，可藉以做為聲音品質特性之評估。文中以銅鑼為例，首先探討聲音模擬方式之可行性，可確認得到與實際銅鑼聲音相似之聽覺感受效果，再應用所發展之親和性聲音模擬人機介面程式，做為銅鑼結構變更之聲音特性預測與試聽，可免於實際製作銅鑼即可快速預測其聲音特性。本文所發展之模擬方法簡易且方便於程式化，可供樂器製作或基於聲音品質特性考慮之工程結構設計，具有實務應用價值。

關鍵字：聲音模擬、模態、自然頻率、聲音振幅、衰減率

### Abstract

The induced sound of percussion instruments or the impact sound of golf clubs is crucial for musicians and golfers. The systematic study of structural sound for such structures is of interest. This work aims to develop the simulation method for sound generation, in particular for the structural induced sound radiation. The generated sound can be saved in typical WAV formats and easily replayed for evaluation. For the structures such as percussion instruments or golf club heads, there are natural modes of structural vibration that contribute to the sound field response. The structural natural frequencies dominate the radiated sound spectrum, especially those lower frequency modes. This paper first shows the response characteristics of single degree-of-freedom (SDOF) vibration system that is used to simulate the sound field response. The individual modal properties, including the sound amplitude, frequency, decay rate and phase angle, can then be specified or obtained from experiments or analysis. The combination of multiple mode responses can be determined to synthesize the structural radiated sound in

time domain and to evaluate the sound response quality by hearing. The copper gong is selected and used to verify the feasibility of the developed sound simulation method. The reproduced sound according to the extraction of modal response from the measured actual sound can be found having the same hearing sensation as the real ones. The developed graphics user interface (GUI) sound simulation program can then be applied to predict and listen to the sound response of copper gongs after structural geometry modifications without actually making the gongs. The developed method is simple and easy to be implemented and can be useful and applicable to musical instrument manufacturing as well as for the structural design considering sound characteristics.

**Keywords:** sound simulation, mode, natural frequency, sound amplitude, decay rate

## 一、前言

就過去的做法，在聲音的分析方面，僅以耳聽的方式來判定音階的高低與音色的好壞，然而面對現今科學技術的進步與創新，對於過去這樣的作法，似乎不符合經濟效益，因而就以往的經驗而言，在王等人[1]以理論分析與實驗所得的模態參數有相當程度的吻合性，且由MAC比對結果中，實驗模態振型與理論模態振型吻合程度相當高，因此在振動分析方面，模型驗證是成功的。由於模型驗證成功，故可藉由有限元素模型對其它不同音階的鐵琴片做振動分析與鐵琴片基礎頻率之預測。以敲擊鐵琴片的中間點，可明確激出第一個振動模態之聲音頻率。王等人[2]利用有限元素分析與實驗模態分析來探討銅鑼之聲音與振動之間的特性，藉由理論分析與實驗量測分析所得到之頻率響應函數，在低頻的部份相當吻合，証明了藉由有限元素分析的方法對銅鑼來探討聲音與振動特性的可行性。Bretos *et al.*[3]是運用有限元素分析木琴之木條結構的模態振型，並且探討木條截面對於自然頻率與模態振型的影響，從中可發現木條在非均勻的材料特性下，其楊氏係數對側向振動模態影響最大。Elejabarrieta *et al.*[4]則提出運用有限元素分析方法與實驗模態分析技術，來研究吉他共鳴箱之振動情形，並且將兩種結果作為模型驗證的方法，成功地驗證有限元素的可行性。由模型驗證可得知理論有限元素模型與實際模型是等效的，因此可進一步對模型進行響應預測，王等人[5]以實驗模態分析所得之數據為依據，並配合有限元素分析，對振動試驗機之音圈結構進行模型驗證，並進一步預測音圈之振動模態。

本文目的旨在發展聲音頻譜分析程式，利用簡易的錄音設備，並配合各種不同的敲擊工具，針對鑼臍型銅鑼在敲擊後所發出的聲音加以錄製，再透過聲音頻譜分析程式，以求得其銅鑼之聲音頻譜變化。並發展具多頻率對數衰減正弦波之聲音模擬程式，將鑼臍型銅鑼進行外觀幾何形狀之變更，經由多頻率具對數衰減正弦波之聲音模擬程式，以瞭解鑼臍型銅鑼之幾何形狀對聲音的影響。

## 二、聲音模擬之理論基礎

### (一)聲音頻譜之理論基礎

本文主要發展出一個具聲音頻譜之分析程式，如圖1所示，為其程式架構流程圖，就聲音錄製量測方面，可分為直接量測(NB+麥克風)與間接量測

(錄音筆、MP3 隨身聽)；在聲音分析程式方面，則將其所錄得聲音之\*.WAV檔，透過聲音數位化之信號轉換，並運用聲音頻譜分析，以得到各種聲音頻譜，最後將聲音分析所得之相關參數，再藉由聲音模擬程式，來得到其聲音模擬之音效。



圖 1 聲音頻譜分析程式之系統流程圖

本文所編寫的聲音分析程式為聲音頻譜分析，以得到其聲音之頻譜與聲音模擬音效之變化，而該程式主要是運用 MATLAB 5.3 軟體之系統架構下編寫，本程式之關聯性架構，如以下之討論：

### 1. 正弦波

圖 2 為正弦波之波形圖，圖中代號  $p(t)$  為聲音時間域函數、 $P$  為正弦波之聲音振幅、 $T$  為正弦波之聲音週期、 $f$  為聲音頻率(Hz)、 $\omega$  為聲音頻率(rad/sec)，並考慮其相位角  $\phi$ ，如下所示：

$$p(t) = P \sin(\omega t - \phi) = P \sin(2\pi f t - \phi) \quad (1)$$

### 2. 具對數衰減率的波形

如圖 3 為具對數衰減率的波形圖，圖中  $\sigma$ 、 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  分別不同代表衰減率，可比較看出衰減率大響應衰減越快之變化情形，考慮衰減率  $\sigma$  與阻尼比  $\xi$ ，可得圖 3 波形表示式如下：

$$p(t) = e^{-\sigma t} = e^{-\xi \omega t} = e^{-\xi (2\pi f) t} \quad (2)$$

### 3. 一個具對數衰減的聲音正弦波形

圖 4 為一個具對數衰減的聲音正弦波形圖，並考慮其相位角  $\phi$ ，以單自由度具阻比特性之響應[6]，可得

$$p(t) = P e^{-\xi \omega t} \sin(\omega t - \phi) \quad (3)$$

其中，參數  $\omega = 2\pi f$

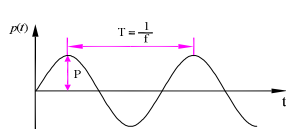


圖 2 正弦波之波形圖

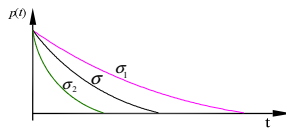


圖 3 具對數衰減率的波形圖

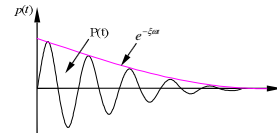


圖 4 對數衰減的聲音正弦波形圖

## (二) 聲音模擬程式之理論基礎

本文所編寫的聲音模擬程式，為具多頻率對數衰減正弦波之聲音模擬程式，其程式理論基礎是以得到其聲音之頻譜與聲音音效之變化，而本程式主要是運用 MATLAB 5.3 軟體之系統架構下編寫，如圖 5 所示，為聲音模擬程式之系統流程圖。其中， $p(t)$  為聲音時間域之函數、 $P_i$  為聲音之振幅、 $f_i$  為聲音之頻率(Hz)、 $\xi_i$  為聲音之阻尼比、 $\omega_i$  為聲音之頻率(rad/sec)、 $\phi_i$  為聲

音之相位角。 $P_i$ 、 $f_i$ 、 $\xi_i$ 、 $\phi_i$ 為系統輸入參數，具多個頻率對數衰減正弦波波形圖，可寫出關係式如下：

$$p(t) = \sum_{i=1}^{N_s} P_i e^{-\xi_i \omega_i t} \sin(\omega_i t - \phi_i) \quad (4)$$

其中， $N_s$ 為不同正弦波之數目。

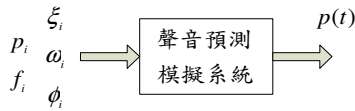


圖 5 聲音模擬程式之系統流程圖

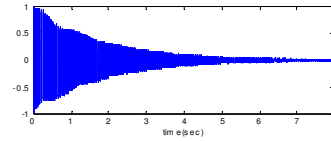


圖 6 具多個頻率具對數衰減正弦波波形圖

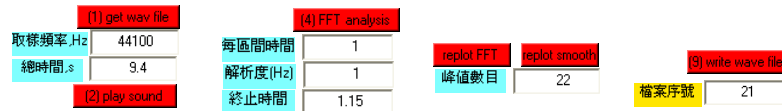
### 三、 模擬程式之發展

#### (一) 聲音頻譜分析程式的建立

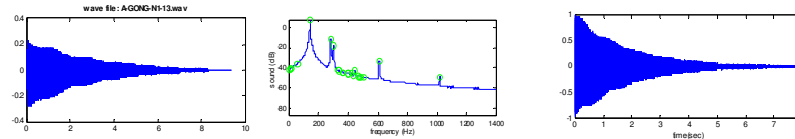
本小節是將所錄得聲音之\*.WAV 檔，利用聲音頻譜分析程式，來得到其聲音之頻譜與聲音模擬之音質效果；如圖 7(a)所示，首先須輸入系統參數的部份，包括時間點數(Hz)、輸出視窗的選擇、取樣開始時間長度(sec)、平均次數、重疊百分比、平滑化次數、閾值(dB)、頻譜顯示之最低頻率(Hz)、頻譜顯示之最高頻率(Hz)、頻譜取樣時間長度(sec)及聲音之阻尼比；其中「平滑化次數」所代表的意義，為頻譜中其 3 個相鄰峰值頻率取其平均值，而「閾值 dB」所代表的意義，為取樣之 dB 範圍。如圖 7(b)與 7(c)所示，為系統輸出之部份，包括取樣頻率(Hz)、所錄得聲音\*.WAV 檔之總時間(sec)、每區間之時間(sec)、頻率解析度(Hz)、終止時間(sec)、聲音頻譜之峰值數目，以及模擬分析後其聲音\*.WAV 檔之儲存、所錄得之聲音時間域函數  $x(t)$ 、聲音分析之頻率域函數  $X(f)$  及聲音模擬之聲音時間域函數  $x(t)$  等結果。



(a) 輸入系統之參數的部份



(b) 模擬分析結果之部份-1



(c) 模擬分析結果之部份-2

圖 7 聲音頻譜分析程式

## (二) 聲音模擬程式的建立

本小節說明具多頻率對數衰減正弦波之聲音模擬程式，以模擬鑼臍型銅鑼模型聲音變化之音質效果；首先須輸入系統參數的部份，如圖 8(a)所示，包括輸入頻率數、第  $i$  個聲音之振幅  $P_i$ 、第  $i$  個聲音之頻率  $f_i$ 、第  $i$  個聲音之相位角  $\phi_i$ 、第  $i$  個聲音之阻尼比  $\xi_i$ ；在設定系統參數的部份，如圖 8(b)所示，包括設定取樣時間長度(sec)、取樣頻率(Hz)及輸出視窗的選擇等結果；在輸出系統的部份，如圖 8(c)與 8(d)所示，包括頻率點數、頻率解析度(Hz)、模擬分析後之聲音檔儲存、時間域函數  $x(t)$ 、頻率域函數  $X(f)$ 、及衰減率  $\sigma_i$  等結果。

聲音數 (Hz)	4	振幅	01.9	振幅	02.9	振幅	76.4	振幅	61.9	振幅	0	振幅	0		
頻率 (Hz)	142	頻率 (Hz)	302	頻率 (Hz)	610	頻率 (Hz)	1017	頻率 (Hz)	0	頻率 (Hz)	0	頻率 (Hz)	0		
相位角 (degree)	0	相位角 (degree)	0	相位角 (degree)	0	相位角 (degree)	0	相位角 (degree)	0	相位角 (degree)	0	相位角 (degree)	0	相位角 (degree)	0
阻尼比 (%)	0.03	阻尼比 (%)	0.03	阻尼比 (%)	0.03	阻尼比 (%)	0.03	阻尼比 (%)	0	阻尼比 (%)	0	阻尼比 (%)	0		

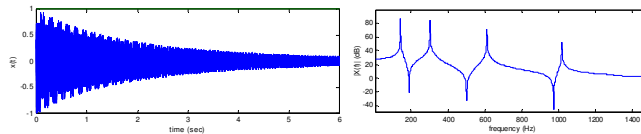
(a) 輸入系統之參數的部份



(b) 設定系統參數的部份



(c) 模擬分析結果之部份-1



衰減率	0.26766	衰減率	0.56926	衰減率	1.1498	衰減率	1.917	衰減率	0	衰減率	0
終點值	0.2	終點值	0.033	終點值	0.001	終點值	1e-005	終點值	1	終點值	1

(d) 模擬分析結果之部份-2

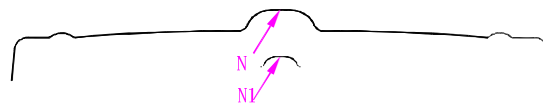
圖 8 具多頻率對數衰減正弦波之聲音模擬程式

## 四、銅鑼聲音之模擬

圖 9(a)為本文探討之銅鑼，圖 9(b)為其幾何示意圖，本節首先由實際銅鑼聲音量測，進行頻譜分析及產生模擬聲音之預測與確認。其次，就銅鑼之幾何形狀變更，由有限元素分析求得銅鑼之自然頻率，並據以預測得到其聲音，有助銅鑼於聲音特性需求之幾何設計變更。



(a) 銅鑼實際照片



(b) 鑼臍區之鑼臍大小 N 剖面示意圖

圖 9 銅鑼實際照片與鑼臍剖面示意圖

### (一) 聲音模擬之分析









表一為使用本文發展之頻譜分析與聲音模擬結果，運用聲音頻譜分析程式，來分析鑼臍型式銅鑼在敲擊後所發出的聲音；而其聲音頻譜分析程式之系統設定部份，則依據不同情況下，來設定其變化參數，分別包括平均次數、重疊百分比、平滑化次數、閾值，以進行聲音頻譜分析，並作進一步之聲音音效的判讀，如下所示。變化參數：avg=1\_OL=0\_SM=1\_dB=-60；設定系統之變化參數，包括平均次數設定為 1、重疊百分比設定為 0%，平滑化次數設定為 1、閾值(dB)設定為-60。使用鑼鉞敲擊鑼臍型銅鑼後所發出的聲音，加以錄製成聲音檔為 A-GONG-N1.WAV，並再透過聲音頻譜分析程式，以進行聲音頻譜分析，表 1 之上圖為原聲音之時域圖，中圖為以 t=1.06(s) 之後數據所得之頻率域圖示，以多個頻率正弦波模擬之聲音時域為下圖，可看出與上圖相當一致，可知聲音模擬之可靠度。

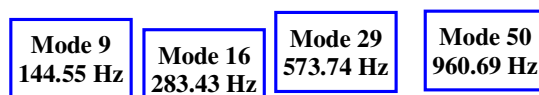
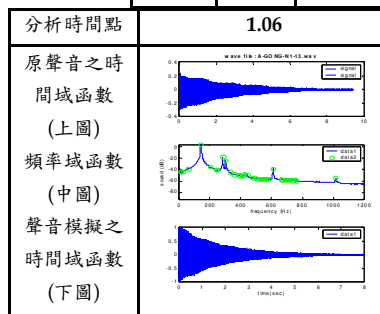
### (二) 不同造型銅鑼之聲音預測模擬

由過去研究[7]以知，銅鑼之敲擊與發聲機制，與結構之徑向模態相關，就模態物理意義  $(r, \theta)$ ，主要之發生模態為(1,0)、(2,0)、(3,0)及(4,0)，本節僅就此銅鑼之鑼臍大小作變更，以有限元素分析求得銅鑼自然頻率，表 2 為原銅鑼及變更鑼臍為 0.5 倍時，所得到之自然頻率及模態振型，可看出(3,0)及(4,0)模態頻率變化差異較大。圖 10 為有限元素分析得到之頻率響應函數，可看出在前述徑向模態頻率有較高之響應，也是主要發聲之頻率。

表 1 銅鑼聲音頻譜分析與模擬聲音時間域

表 2 不同大小鑼臍 N 之結構振動響應峰值頻率表

項目	GONG-N1(0.5N)			GONG-N(原鑼臍型銅鑼 N)		
	mode	模態振型	自然頻率 f	mode	模態振型	自然頻率 f
面(1,0)	9		144.55	9		143.75
面(2,0)	16		283.43	16		300.28
面(3,0)	29		573.74	31		612.57
面(4,0)	50		960.69	54		1047.8



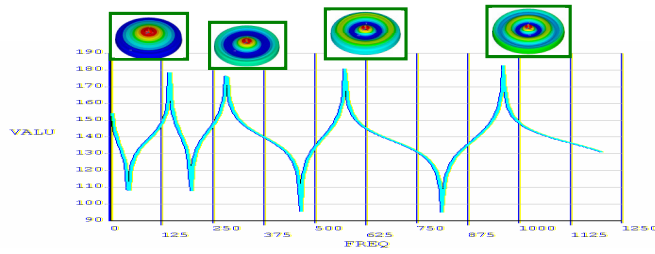


圖 10 鑼臍 GONG-N1 -FEA-頻率響應函數(FRF)

表 3 為變化鑼臍為 0.5 倍之前 4 個發生頻率彙整，將之輸入聲音模擬程式，可得表 4 之時間域  $x(t)$  及頻率域  $X(f)$  函數及其圖示，並據以產生能重複播放聲音之\*.WAV 檔案格式，由此可預測此幾何造型變更銅鑼敲擊後之發聲效果模擬。

表 3 鑼臍區鑼臍大小 N 之聲音模擬輸入參數

設定項目	模型名稱 GONG-N1 (0.5N)
第一個峰值頻率(Hz)	144.55
第二個峰值頻率(Hz)	283.42
第三個峰值頻率(Hz)	573.74
第四個峰值頻率(Hz)	960.69

表 4 不同大小之鑼臍 N 變化

名稱	GONG-N1 (0.5N)
項目	
時間域函數 $x(t)$	
頻率域函數 $X(f)$	
衰減率 $\sigma_i$	0.54494、1.0685、2.1629、3.6217

## 五、 結論

本文以單自由度之系統，假設發展簡易之時域訊號之模擬方式，並透過實際打擊樂器銅鑼之聲音量測進行驗證，可得到近似之聲音聽覺效果，同時也發展了親和性之人機介面模式，可應用於樂器設計分析之聽覺效果之改進，本文介紹了聲音模擬理念與程式架構方法，並以銅鑼聲音進行驗證分析，可知模擬方法之可靠性，並將之應用於幾何結構變更之銅鑼聲音預測模擬，可供尚未製作實際銅鑼前，即可預先聽到銅鑼之聲音，此將有助於未來打擊樂器之設計分析。

## 六、 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。

## 七、 參考文獻

1. 王栢村，林怡馨，「鐵琴片振動特性與聲音關聯性之探討」，*中華民國振動與噪音工程學會第二十屆學術研討會論文集*，論文編號：C5(2007)。
2. 王栢村，李雨軒，張志偉，「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(2002)。
3. Bretos, J., Santamaria, C., and Moral, J. A., "Finite Element Analysis and

- Experimental Measurements of Natural Eigenmodes and Random Responses of Wooden Bars Used in Musical Instruments,” *Applied acoustics*, Vol. 56, pp. 141-156(1999).
4. Elejabarrieta, M. J., Ezcurra, A., and Santamaria, C., “Coupled Modes of the Resonance Box of the Guitar,” *Acoustical Society of America*, Vol. 111, No. 5, pp. 2283-2292(2002).
  5. 王栢村，林政煌，李昆達，「激振器音圈結構之實驗模態分析與模型驗證」，*中華民國第二十屆機械工程研討會論文集*，台北，論文編號：C03-14(2003)。
  6. 王栢村，*振動學*，修訂二板，全華圖書股份有限公司(2008)。
  7. 王栢村，陳品豪，*鑼躑型式銅鑼之聲音及振動特性的探討與設計分析*，碩士論文，國立屏東科技大學機械工程系，屏東(2007)。