

## 半圓型管打擊樂器之聲振耦合分析

王栢村<sup>1\*</sup>、楊昶昱<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  
(MOST 105-2221-E-020-016)

\*E-mail: wangbt@mail.npust.edu.tw

### 摘要

打擊樂器的聲音傳遞方式與特性是令人感到好奇的，本文針對具簡諧倍頻音半圓型管打擊樂器進行聲振耦合分析，探討半圓形管的聲音傳遞之模態振型特性。簡諧倍頻聲音係指樂器發出的泛音與基音有整數倍率的關係。首先透過有限元素分析之COMSOL分析軟體建構半圓型管結構與空氣結構耦合系統之有限元素模型，分別進行模態分析與簡諧響應分析，求得理論之自然頻率、模態振型與頻率響應函數，同時針對半圓型管進行實驗模態分析，求得空氣結構耦合實際結構系統之自然頻率、模態振型與模態阻尼比，並且透過聲音量測分析求得聲音頻譜。結果顯示，空氣耦合對結構自然頻率僅有微小的影響，聲振耦合分析不僅可以預測空氣結構耦合系統之特性，也可以透過分析手法得到頻率響應函數，半圓型管實際之結構模態振型與聲場之模態振型有合理的對應，成功預測聲場之模態振型，並且可以合理的預測半圓型管之聲音頻譜與實際量測互相吻合。本文針對半圓型管進行空氣結構耦合系統之模態分析與簡諧響應分析，此分析方法可應用於其他打擊樂器進行研究與開發設計。  
**關鍵詞：**半圓型管、簡諧倍頻音、聲振耦合分析、實驗模態分析、模態參數、聲音頻譜

### 1. 前言

市面上常見的竹風鈴與竹製打擊樂器其幾合外型結構特殊，為瞭解半圓型結構之聲音傳遞方式，王與張[1]探討京鈔之振動模態與聲音特性，首先透過理論分析與實驗模態分析之手法，探討其振動模態特性，同時進行聲音量測分析，結果顯示，京鈔主要以面模態與環型模態為主，而京鈔主要的發聲機制與京鈔結構外環之振動模態有極大的關聯性。王等人[2]探討民俗敲擊樂器古鈸之發聲機制，針對古鈸利用聲音量測分析、有限元素分析與實驗模態分析聲音，探討古鈸之音高、音色、持續度三大部分各別進行探討，其理論與實驗所得的模態參數相當吻合，得知古鈸每個音階的比例呈現接近倍頻特性，推論此古鈸樂器造形。

國外也有針對空氣音場的相關研究，Fortune-Todd [3]利用真耳測試針對不同耳道深度測量其對聲源方向性敏感度之研究，但其目的著重於對外來音源

位置之定位及語音的辨識率來做探討，結果顯示麥克風放置區域會影響聲源之方向性，相對於收聽者方向，靈敏度也可以控制信號與噪聲源的位置。Mathew et al. [4]主要透過音頻製作與空間設計，進而操作空間與音頻，透過記錄的方法，了解分析與實驗之間的關聯性。Singh and Kumar [5]透過選擇合適的調音方法於音高較高的樂器聲音分析，進而收集與研究高頻率的樂器聲音，王等人[6]透過實際的量測與分析之聲振耦合分析，探討銅鐘的聲振耦合之模態特性與聲音頻之特性，並且了解銅鐘在空氣中的聲音指向性。

本文針對半圓型管打擊樂器進行模態分析、聲振耦合分析與實驗模態分析，透過聲振耦合分析可了解空氣對結構系統之影響，並藉由實驗模態分析與聲音量測分析驗證分析模型的合理性與準確性，並探討半圓型管之振動特性。

### 2. 半圓型管之有限元素分析

本文採用 COMSOL 有限元素分析軟體對半圓型管進行模態分析與聲振耦合分析，聲振耦合分析可分為結構系統與空氣結構耦合系統，以求得理論之模態參數，包含自然頻率與模態振型，並且透過簡諧響應分析求得理論之頻率響應函數，圖一為半圓型管之實體圖，半圓型管長度為 232.6 mm，管徑為 25.4 mm，厚度為 0.6 mm，圖二為半圓型管之有限元素模型圖，圖三為半圓型管與空氣結構耦合系統之有限元素模型圖，首先建構半圓型管結構與空氣球體，與假設材料為等向性材料，最後於空氣球體表面設定為無限音場，以模擬實際聲音傳遞狀況；半圓型管結構元素形式採用線性四面體元素(Solid)建構有限元素模型，材料參數設定分別為楊氏係數(E)為 186 GPa、蒲松比( $\nu$ )為 0.34，密度( $\rho$ )為 7795.101 kg/m<sup>3</sup>；空氣之元素形式採用空氣元素，材料參數設定空氣聲速為 343 m/s；邊界條件於半圓型管結構設定自由邊界，空氣與結構邊界設定為結構與空氣之耦合邊界，表面空氣設定為自由音場表面，不需設定負荷條件；負荷條件於模態分析與聲振耦合分析時不需設定，而在簡諧分析中，需設定外力作用於半圓型管，以求得半圓型管分析之頻率響應函數。

### 3. 半圓型管之實驗模態分析

透過實驗模態分析得到實驗之模態參數，包含自然頻率、模態振型，進而探討半圓型管之振動模態特性，首先對半圓型管之有限元素模型進行模態分析，求得理論之模態參數，將上述所得之理論模態振型特性作為實驗之佈點依據，圖四為半圓型管之實驗量測點示意圖，將半圓型管依等距離的方式佈點，共計有121個量測敲擊點，圖五為半圓型管實驗模態分析與聲音量測實驗儀器架設圖，實驗模態分析之實驗設備有振動噪音量測軟體(SVM)、訊號擷取卡(NI-9234)、衝擊錘(PCB 9001)與加速規(27AM1-10)，將訊號擷取卡連接衝擊錘與加速規，利用釣魚線將半圓型管進行懸吊以模擬自由邊界，以移動衝擊錘，固定加速規之方法進行實驗，利用訊號擷取卡擷取訊號輸入於振動噪音量測軟體進行快速傅立葉轉換(FFT)，求得頻率響應函數與關聯性函數，將實驗求得之頻率響應函數匯入ME'scopeVES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。

因黏貼加速規會產生質量效應影響自然頻率，所以改使用麥克風(130E20)進行聲音量測分析，並結合有限元素分析與實驗模態分析之結果，探討半圓型管聲音特性與振動特性之關聯性。透過圖五顯示半圓型管以釣魚線懸吊的方式進行量測，以模擬自由邊界，將衝擊錘與麥克風連接於訊號擷取卡，透過振動噪音量測軟體進行量測，求得聲音頻譜與頻率響應函數，將其聲音量測分析結果進行聲音特性之探討。聲音量測軟體設定部分取樣時間為3.8 sec，頻寬範圍為0 Hz至10000 Hz，頻率域截斷有效條數(Nc)為12800 Hz，頻率解析度為0.78125 Hz。

### 4. 結果與討論

透過有限元素分析進行空氣結構耦合系統對結構自然頻率之影響探討，表一為半圓型管結構與空氣耦合系統之理論自然頻率總表，其自然頻率誤差以空氣耦合系統為基準進行計算，最大頻率誤差為 $F_{s\_01}$ -701.24 Hz/ $F_{sA\_01}$ -699.25 Hz，其誤差為0.285%，顯示空氣耦合系統對結構自然頻率影響微小。

透過簡諧分析求得聲場之頻率響應函數，進而探討半圓型管實驗與分析之頻率響應函數的合理性與吻合性，圖六為半圓型管之實驗與聲場頻率響應函數圖，其中實線為實驗之頻率響應函數，虛線為理論之聲場頻率響應函數，由圖中可發現其峰值頻率波形相似；表二為半圓型管之有限元素分析與聲音量測分析自然頻率總表，空氣結構耦合系統與實驗之比對結果，自然頻率誤差平均( $\bar{\epsilon}$ )為1.799%，誤差平方平均根值( $\epsilon_{rms}$ )為2.277%，其中除了 $F_{sA\_07}$ 與 $S\_07$ 有-3.77%較大的誤差外，其餘皆在3%以內，推測造成此誤差之原因為有限元素模型與實際結構有些微差距所造成。

表三為半圓型管之模態振型物理意義對照表，圖七為半圓型管之聲音頻譜與相應之聲場模態振型示意圖，經由實驗模態分析與有限元素分析之結果探討半圓型管之振動模態特性，本文主要探討低頻率模態之結果，因此針對0 Hz至3000 Hz的頻率範圍進行討論，模態振型之物理意義分別以 $\theta$ 與 $Z$ 表示，其中 $\theta$ 為圓周方向之節線數、 $Z$ 為軸方向之節線數，依 $S\_01$ 為例，圓周方向之節線數為3，軸方向之節線數為1，因此空氣結構耦合系統之模態振型物理意義為 $(\theta, Z)=(3, 1)$ ，故得知實驗、結構系統與空氣結構耦合系統之模態振型互相對應，且由發聲頻率對應聲場之模態振型，驗證聲音響應預測的結果具有相當的可靠度。

### 5. 結論

本文主要針對半圓型管進行實驗模態分析與有限元素分析之聲振耦合分析，求得理論與實驗之模態參數與頻率響應函數，探討半圓型管結構與空氣耦合系統振動特性，且透過有限元素分析探討結構與空氣耦合系統之影響，綜合以上之實驗與分析結果可得下列幾點結論：

1. 空氣結構耦合系統與實驗之比對結果，自然頻率誤差平均( $\bar{\epsilon}$ )為1.799%，誤差平方平均根值( $\epsilon_{rms}$ )為2.277%，除了 $F_{sA\_07}$ 與 $S\_07$ 有-3.77%較大的誤差外，其餘皆在3%以內，推測造成此誤差之原因為有限元素模型與實際結構有些微差距所造成。
2. 實驗模態分析之頻率響應函數與有限元素分析之聲場頻率響應函數峰值頻率波形相似，其對應之模態振型完全對應，驗證聲音響應預測具有相當的可靠度。
3. 本文針對半圓型管進行有限元素分析之聲振耦合分析，並透過實際的量測來進行驗證聲音響應預測技術之可靠度，成功解讀半圓型管之振動特性與聲音頻譜，並了解空氣耦合系統對結構的影響相當的小。

### 6. 誌謝

本論文為科技部編號MOST-105-2221-E-020-016之計畫，由於科技部的支持，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。

### 7. 參考文獻

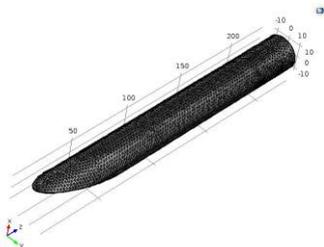
1. 王栢村，張家豪，京鈔之模態參數與打擊聲音特性，中華民國音響學會第二十五屆學術研討會，論文編號：D-002-A1，台中，台灣，2012。
2. 王栢村、吳祥瑞、徐秀娟、高正賢，古鈸打擊聲音特性之探討，中華民國振動與噪音工程學會第19屆學術研討會，論文編號：B-09，彰化，台灣，2011。
3. W. Fortune-Todd, "Real-ear Polar Patterns and Aided Directional Sensitivity," The Journal of American Academy of Audiology, Vol. 8, No. 2, pp. 119-131, 1997.

4. J. Mathew, S. Huot and A. Blum, "A Morphological Analysis of Audio Objects and their Control Methods for 3D Audio," NIME 14th International Conference on New Interfaces for Musical Expression, 2014.
5. C. P. Singh and T. K. Kumar, "Efficient Pitch Detection Algorithms for Pitched Musical Instrument Sounds: a Comparative Performance Evaluation," Advances in Computing, Communications and Informatics, pp. 1876-1880, 2014.

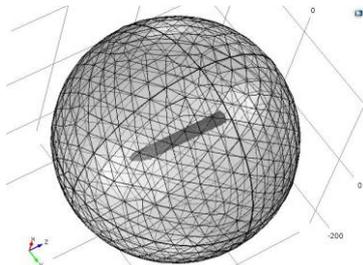
### 8. 圖表



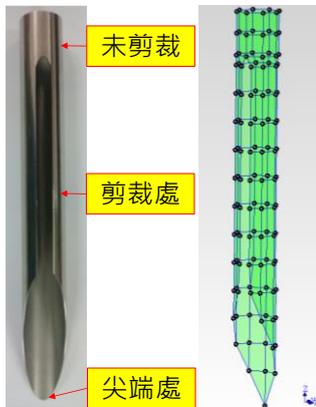
圖一：半圓型管之實體圖



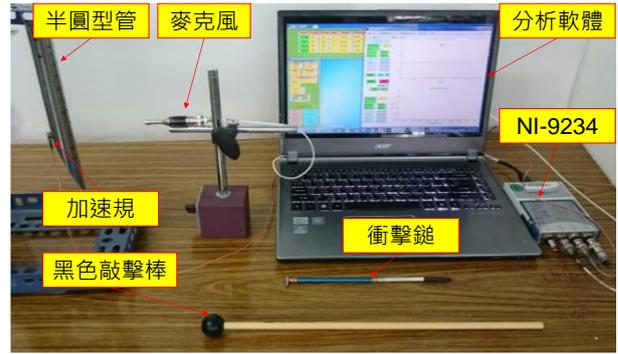
圖二：為半圓型管之有限元素模型圖



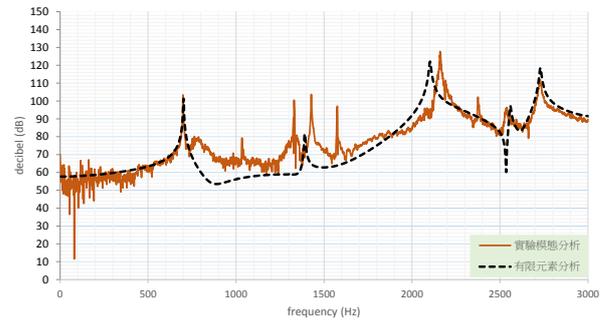
圖三：半圓型管與空氣結構耦合系統之有限元素模型圖



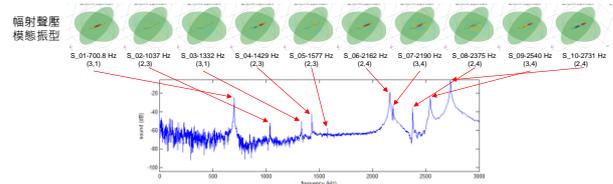
圖四：半圓型管之實驗量測點示意圖



圖五：半圓型管實驗模態分析與聲音量測實驗儀器架設圖



圖六：半圓型管之實驗與聲場頻率響應函數圖



圖七：半圓型管之聲音頻譜與相應之聲場模態振型示意圖

表一：半圓型管結構與空氣耦合系統之理論自然頻率總表

有限元素分析		頻率 誤差 (Hz)	頻率 誤差 (%)	物理 意義 (0,Z)		
結構系統	空氣耦合系統					
Mode	頻率 (Hz)	Mode	頻率 (Hz)			
F <sub>S</sub> _01	701.24	F <sub>SA</sub> _01	699.25	1.99	0.285	(3,1)
F <sub>S</sub> _02	1009.1	F <sub>SA</sub> _02	1008.6	0.5	0.050	(2,3)
F <sub>S</sub> _03	1304.8	F <sub>SA</sub> _03	1303.2	1.6	0.123	(3,1)
F <sub>S</sub> _04	1391	F <sub>SA</sub> _04	1388.9	2.1	0.151	(2,3)
F <sub>S</sub> _05	1539.7	F <sub>SA</sub> _05	1538.1	1.6	0.104	(2,3)
F <sub>S</sub> _06	2105.1	F <sub>SA</sub> _06	2098.5	6.6	0.315	(2,4)
F <sub>S</sub> _07	2110.3	F <sub>SA</sub> _07	2108.4	1.9	0.090	(3,4)
F <sub>S</sub> _08	2348.1	F <sub>SA</sub> _08	2345.2	2.9	0.124	(2,4)
F <sub>S</sub> _09	2558.3	F <sub>SA</sub> _09	2553.6	4.7	0.184	(3,4)
F <sub>S</sub> _10	2730.3	F <sub>SA</sub> _10	2738.6	-8.3	-0.303	(2,4)

表二：半圓型管之有限元素分析與聲音量測分析自然頻率總表

有限元素分析		聲音量測		頻率誤差 (Hz)	頻率誤差 (%)	物理意義 ( $\theta, Z$ )
Mode	自然頻率 (Hz)	Mode	發聲頻率 (Hz)			
F <sub>SA_01</sub>	699.25	S_01	701.6	-2.35	-0.33	(3,1)
F <sub>SA_02</sub>	1008.6	S_02	1037	-28.40	-2.74	(2,3)
F <sub>SA_03</sub>	1303.2	S_03	1333	-29.80	-2.24	(3,1)
F <sub>SA_04</sub>	1388.9	S_04	1430	-41.10	-2.87	(2,3)
F <sub>SA_05</sub>	1538.1	S_05	1577	-38.90	-2.47	(2,3)
F <sub>SA_06</sub>	2098.5	S_06	2162	-63.50	-2.94	(2,4)
F <sub>SA_07</sub>	2108.4	S_07	2191	-82.60	-3.77	(3,4)
F <sub>SA_08</sub>	2345.2	S_08	2377	-31.80	-1.34	(2,4)
F <sub>SA_09</sub>	2553.6	S_09	2541	12.60	0.50	(3,4)
F <sub>SA_10</sub>	2738.6	S_10	2733	5.60	0.20	(2,4)
自然頻率誤差平均值( $\bar{\epsilon}$ )						-1.799%
自然頻率誤差平方平均根值( $\epsilon_{rms}$ )						2.277%

表三：半圓型管之模態振型物理意義對照表

模態數	EMA 模態振型	FEA 模態振型	音場 模態振型	物理 意義 ( $\theta, Z$ )
S_01 701.6 Hz				(3,1)
S_02 1037 Hz				(2,3)
S_03 1333 Hz				(3,1)
S_04 1430 Hz				(2,3)
S_05 1577 Hz				(2,3)
S_06 2162 Hz				(2,4)
S_07 2191 Hz				(3,4)
S_08 2377 Hz				(2,4)
S_09 2541 Hz				(3,4)
S_10 2733 Hz				(2,4)

## Vibro-Acoustic Coupling Analysis for Half Cylindrical Tube Percussion Instrument

Bor-Tsuen wang<sup>1\*</sup>, Chang-Yu Yang<sup>1</sup>,  
Ying-Hui 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

(MOST105-2622-E-020-016)

\*E-mail: wangbt@mail.npust.edu.tw

### Abstract

The sound radiation characteristics for percussion instrument are of interest. This work aims to perform vibro-acoustic coupling analysis to visualize the radiated sound pattern of half cylindrical tube. The half cylindrical tube is designed with harmonic sound effect, i.e. the overtone frequencies over the fundamental frequency are with integer ratios. The finite element analysis (FEA) commercial software (COMSOL) is adopted to construct the finite element model of the tube geometry as well as the surrounding air. Both modal analysis and harmonic response analysis are conducted, respectively, to obtain the tube's natural frequencies and mode shapes as well as the percussion sound spectrum. The half cylindrical tube is also performed experimental modal analysis (EMA) to get modal parameters, including natural frequencies, mode shapes and modal damping ratios. The percussion sound spectrum of the tube can also be measured. Results show the air-structure coupling effect has only minor effect on natural frequencies in comparison to structure-only system. The air-structural coupling system analysis can predict not only the structural vibration characteristics but also the sound spectrum response. From numerical model, the tube's modal parameters can be well predicted and verified between FEA and EMA. The radiated acoustic mode shapes that are difficult to obtain by experiments can be visualized through simulation. The sound spectrum of the half cylindrical tube can be reasonably predicted and agrees with the measured one. This work presents the air-structure coupling for modal and harmonic response analysis, in particular for the half cylindrical tube with harmonic sound effects. The methodology can also be adopted for other structures or percussion instruments as well.

*Keywords:* half cylindrical tube, harmonic sound, vibro-acoustic coupling analysis, experimental modal analysis (EMA), modal parameters, sound spectrum