

鐵磬打擊樂器之聲振耦合分析

Vibro-Acoustic Coupling Analysis for Steel Chime Percussion Instrument

王栢村¹、張宏名²、黃家賢^{2*}、余冠德²、吳盈輝³

¹屏東科技大學機械工程系教授

²屏東科技大學機械工程系研究生

³國立內埔高級農工職業學校 機械科

摘要

打擊樂器的敲擊聲音響應是評估打擊樂器聲音品質的重要依據，因此預測結構聲音響應有其需要性。本文主要針對可作為打擊樂器的鐵磬結構進行聲振耦合分析，首先運用有限元素分析(FEA)商業軟體建構空氣結構耦合系統的有限元素模型，進行系統的聲振耦合模態分析，以獲得空氣結構系統的模態參數。系統模態參數，包括自然頻率及模態振型，其中模態振型又可以分為結構位移模態振型及聲場聲壓模態振型。透過對實際結構進行實驗模態分析，可求得實際結構之模態參數當作基準，進行模態參數之驗證。最後進行簡諧響應分析求得頻率響應函數(FRF)，完成聲音響應預測分析，並與實驗量測所得之聲音頻率響應函數進行比對，驗證評估理論之聲音頻譜預測方法具有相當的可靠度，也進而探討結構在有無空氣耦合之結構自然頻率差異，就本文探討的鐵磬而言此差異在0.1%以內。本文建立的結構音場分析技術，將有助於未來在打擊樂器設計階段即可預測結構的聲音響應，以進行樂器的聲音品質特性評估。

關鍵字：鐵磬、聲振耦合分析、空氣結構耦合系統、聲場模態參數、聲音頻譜

Abstract

The sound response of percussion instrument is of interest for the evaluation of sound quality; therefore, the prediction of structural sound radiation characteristics is desired. This work aims to perform vibro-acoustic coupling analysis on the steel chime that is used to construct a set of percussion instrument. The finite element (FE) base commercial software is applied to construct the FE model containing the steel chime structure and surrounding air and to perform theoretical modal analysis so as to obtain air-structural system modal parameters, including natural frequencies and mode shapes. The mode shapes can be categorized as two parts, i.e. structural displacement mode shapes and acoustic sound pressure mode shapes. By conducting experimental modal analysis (EMA) on the steel chime structure, the experimental modal parameters can be determined and used as the reference to verify the theoretical FE model. Through harmonic response analysis, the frequency response function (FRF) between the sound pressure response and the impact force can be obtained and compared with that obtained from experiments. Results show the sound spectrum prediction is very good. The natural frequency difference between the structure-only and coupled air-structure is also

investigated and shown only 0.1% for the steel chime. This work establishes the structural vibro-acoustic analysis technique and predicts the sound pressure response for percussion instrument such that the sound quality evaluation can be feasible at design stage.

Keywords: steel chime, vibro-acoustic coupling analysis, air-structure coupling system, acoustic modal parameter, sound spectrum

一、前言

市面上樂器種類繁多，演奏起來也都有各自的聲音特色，本文將從振動噪音實驗室所研發出的新型打擊樂器來作為本次探討的主題，王與張[1]將古代打擊樂器石磬進行改良設計與材質轉換進而發展成一種新型打擊樂器，其基本外形為 L 型，具有長股與短股以及其間夾角的幾何特徵，稱之為鐵磬，並透過理論與實驗之模態參數的比對驗證，確認分析模型與實際結構之等效性，也針對實際製作的鐵磬以不同硬度之敲擊槌探討打擊聲音特性，了解鐵磬敲擊聲音之音色與振動模態關聯性。本文將針對此種打擊樂器進行聲振耦合之結構音場分析，經由聲場分析可預先得知聲音發出之位置，能更有效的了解結構主要發聲位置，並參考王與張[2]應用 ANSYS、VL-ACOUSTICS 及一套訊號擷取裝置得知，透過發展建立良好聲音品質的評價方法及全理論分析之高爾夫球具擊球聲音預測模式，並發展基於良好聲音品質之高爾夫球頭結構逆向設計分析之技術，由結果可看出，VL-ACOUSTICS 聲學模擬軟體，應用於全理論方法之聲音預測模式，並針對其聲音預測分析之結果進行評估，驗證了此軟體的音場分析能力其可靠度相當高，且發現當有限元素模型越等效於實際結構，所預測之聲音頻譜越有其可靠度。

透過弦樂器之相關文獻作為實驗量測之參考，Šali and Kopač [3]發展一種用於測量古典吉他的頻率響應函數之方法，其實驗方法不是利用量測結構所得之響應訊號，而是利用敲擊吉他並距離其一米的位置來量測其聲壓值，並利用其所得知的頻率響應函數量測結果來判斷吉他的好壞，此量測方法與結果可作為吉他音色修改之依據。Bissinger [4]研究拉小提琴產生的聲音，內部空氣和振動產生耦合模式，由能量的轉變產生聲音，這個系統是一次自動化的實驗數據收集系統，在低阻尼、零質量的固定設備隔絕阻尼干擾和無回聲寢室，掃描小提琴全部表面，透過一個旋轉的麥克風在一個陣列的區域，同時選出有效率的模式和放射的方向，對弦樂器作一精準的量測，小提琴取得至少四個材料元素的方法，並創建一個準確的實體模型，以了解小提琴的振動聲音輸出。Yu[5]針對小提琴頂板進行有限元素分析，透過頂板之厚度尺寸的變更，對特定振動模態之節線特性進行探討，並推導出靈敏度分析之目標與限制條件方程式，目標為取得各個模態需求之節線特性及利用小提琴頂板之質量、厚度、材質為設計變數用以取得目標之最佳結果。Hutchins [6]研究小提琴板材之頂部和背部板材的振動特性測試，從每個組裝頂部和背部板材的音色和演奏素質比較板材的本徵模式。實驗方式為在板材於自由邊界下水平放置了一個揚聲器，一正弦波信號（一單頻信號）被引導通過揚聲器，收尋整個感興趣的頻率範圍，並粉末灑在平板上。小提琴頂部和背面板材施加振動產生特徵振動，支承板和封閉的空氣質量，它們響應產生的作用力，會影響振動的耦合。Rossing et al. [7]利用全息照相的方法來進行干涉計量，是一種高精度、無損、全場的檢測方法，將物體資訊(拍

攝)記錄於感光介質中，透過雷射光或白光讀取出立體影像，利用雷射光作為拍攝光源，以分光鏡分為兩個光路。一個光路攜帶物體資訊，另一光路當作參考光。藉由感光介質(底片)將兩個光路在空間中產生的干涉(條紋)記錄下來所以是一種運用光波干涉現象的技術。而在吉他方面，Ezcurra [8]因為古典吉他板塊之間的幾何無顯著差異，相對來說木材的材料性質就占了很重要的一部分，主要對其材料性質來進行探討，發現浦松比為影響吉他頻率最大之變數。

本文將以此種打擊樂器做為聲音響應預測之目標，利用實驗模態分析進行實驗量測得到實際結構之模態參數與頻率響應函數，並利用實際之模態參數建構出音場分析之模型，並進行驗證，確認模型之等效性，最後進行簡諧響應分析，求得理論之頻率響應函數，並與實際結構求得頻率響應函數做驗證，完成聲音響應預測分析，此外本文也將針對有無空氣耦合結構時，模態參數的比對，並從比對結果中得知有無音場效應的差異。

二、鐵磬之聲振耦合有限元素分析

本節主要針對理論之聲振耦合分析來進行探討，圖 1 為空氣耦合結構之物理域系統方塊圖，從方塊圖得輸入→系統→輸出三大部分來看，在進行模態分析時，輸入的部分，模擬不受外力負荷，系統的部分，將進行結構之幾何、材料、邊界之各項設定，輸出的部分，圖 2 為空氣耦合結構之模態域系統方塊圖，在模態分析的結果中，將會求得模態域之結構與空氣耦合結構的模態參數包含自然頻率與模態振型，而在簡諧分析的部分，圖 3 為空氣耦合結構之頻率域系統方塊圖，從方塊圖得輸入→系統→輸出三大部分來看，在進行簡諧分析時，輸入部分，將會設定一外力作用於結構上，而輸出的部分將會模擬聲場之效果，在距離結構 10 公分之位置利用麥克風來接收響應訊號，藉以求得頻率域之頻率響應函數，後續將與實驗量測得到之模態參數與頻率響應函數做驗證，確認模態分析與聲音響應預測分析的正確性。

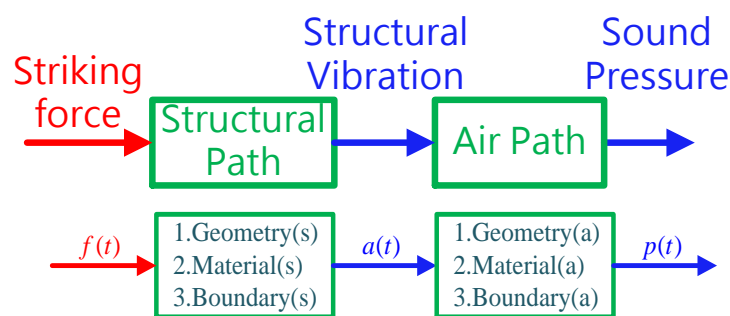


圖 1 空氣結構耦合之物理域系統方塊圖

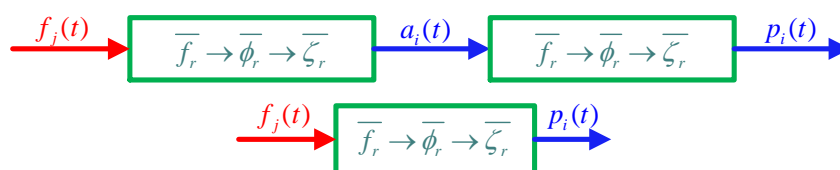


圖 2 空氣耦合結構之模態域系統方塊圖

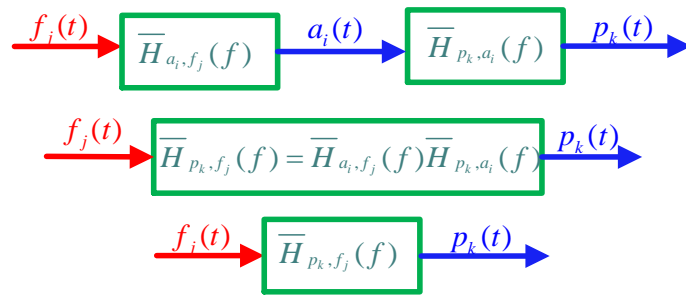
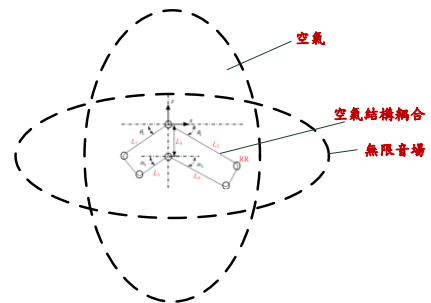


圖 3 空氣耦合結構之頻率域系統方塊圖



(a) 實際結構



(b) 數學模型

圖 4 鐵磬結構示意圖

由圖 4(a)的鐵磬之實際結構圖與圖 4(b)的鐵磬結構之數學模型，在空氣耦合結構之模態分析方面，其中幾何部分設定了 10 個幾何變數，材料部份則假設結構材料為等向性材料並假設空氣聲速與空氣密度，邊界部分則是設定空氣與結構耦合，最外層空氣設定為無限音場以模擬實際音場效應，結構部分皆設定為自由邊界情況；在空氣耦合結構之簡諧分析方面，圖 5 為空氣耦合結構之有限元素模型，進行簡諧分析時將負荷條件的部分設定一外力 $F=-1(N)$ 施加於鐵磬結構上，並輸出於空氣中之 k 點，模擬敲擊與聲場的實際情況，藉此求得理論空氣耦合結構之頻率響應函數。

三、鐵磬之實驗模態分析

圖 6 為聲場實驗儀器架設圖，針對實際結構進行實驗量測，本次實驗使用 SigLab 頻譜分析儀進行實驗模態分析，以小型衝擊錘為驅動器，麥克風為感測器，來進行實驗量測，頻譜分析儀(SigLab)設定參考如下，頻寬設定為 20000Hz，時間點數 8192 個點，頻率解析度為 6.25Hz，在整體實驗流程中，針對鐵磬進行佈點規劃，並在鐵磬結構上佈了 30 個量測點，利用小型衝擊錘敲擊實際結構，並將麥克風放置於距離實際結構 20 號量測點 10 公分之位置上，以模擬聲場的方式進行實驗量測，並將量測所得之響應訊號輸入頻譜分析儀中，對輸入訊號進行快速傅立葉轉換，求得實際結構之頻率響應函數與關聯性函數。再將頻率響應函數匯入 MEscopeVES 進行曲線嵌合，求得實際結構之模態參數，後續將與理論分析求得模態參數進行比對驗證，確認其空氣耦合結構分析與實際結構之模型等效性。

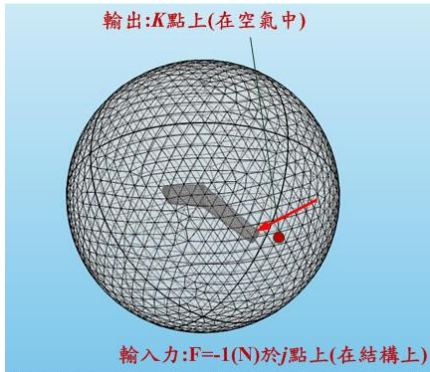


圖 5 空氣耦合結構之有限元素模型



圖 6 聲場實驗儀器架設圖

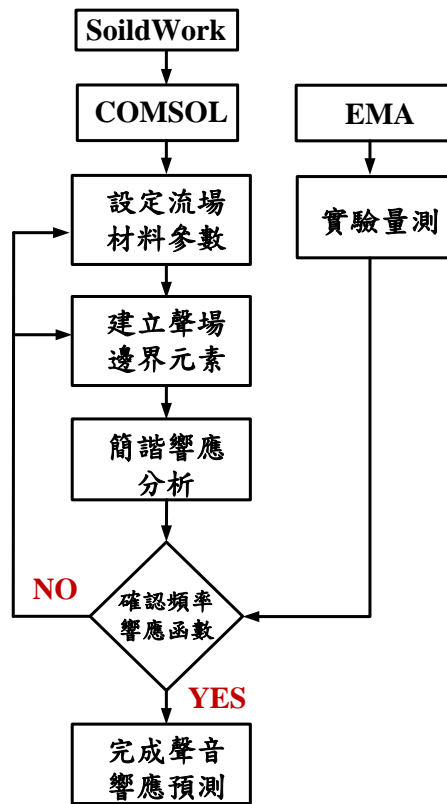


圖 7 整體架構驗證流程圖

四、鐵磬聲振耦合之模型驗證

圖 7 為整體架構驗證流程圖，主要分為理論分析與實驗量測兩大部分，在分析端建構模型的部分採用 SolidWorks 建模，並匯入聲場分析軟體 COMSOL 進行聲振耦合之模態分析與簡諧響應分析，求得聲場之模態參數與頻率響應函數，而在實驗端則對實際結構進行實驗量測，並將實驗與分析之模態參數與頻率響應函數進行驗證，確認分析與實驗之等效性，以利後續進行模型變更與響應預測時，可以有效的預測出聲場之響應並減少時間與人力成本的消耗，另外本次也將進行單純結構分析與空氣耦合結構時，模態參數的比對，並從比對結果中得知有無音場效應的差異。

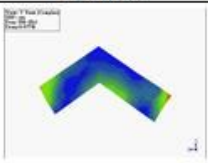
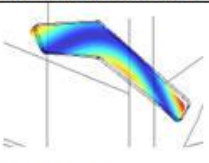

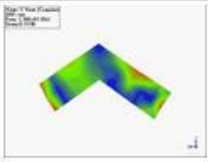
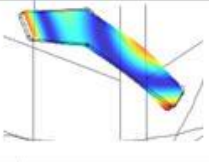

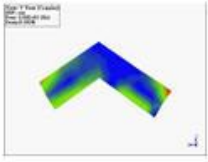
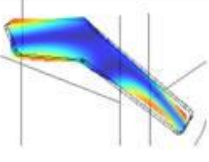

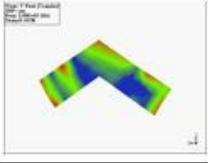
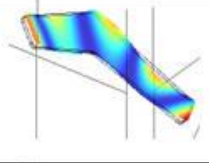
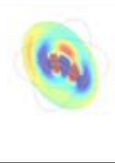
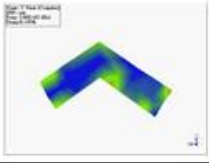
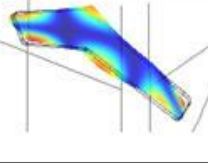
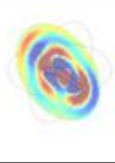
4.1 具簡諧倍頻音鐵磬之聲振耦合模態參數驗證

從上述模態域之模態參數比對驗證中，將藉由進行空氣耦合結構之模態分析，求得之理論之模態參數，並與實驗所得到之模態參數來進行比對驗證，得知下列結果，表 1 為空氣耦合結構分析與實際結構之自然頻率總表，表 2 為空氣耦合結構分析與實際結構之模態振型總表，從表 1、表 2 中可發現，分析與實驗所得之各模態自然頻率比較，頻率誤差最低之模態振型為 F-13，其頻率誤差百分比為 0.1446%；頻率誤差最高之模態振型為 F-28，其頻率誤差百分比為 1.0438%，從上述結果中可得知分析與實驗所得之各模態自然頻率比較總體誤差為 1.05% 以下，表示兩者模態振型對應良好，初步判斷主要造成頻率誤差之原因為加工誤差。

表 1 為空氣耦合結構分析與實際結構之自然頻率總表

EMA		FEA		自然頻率誤差(Hz)	自然頻率誤差(%)
模態數	自然頻率(Hz)	模態數	自然頻率(Hz)		
E-01	697.86	F-08	695.14	2.7194	0.3896
E-02	1383.4	F-13	1385.40	-2.0011	-0.1446
E-03	2021.5	F-28	2042.60	-21.1024	-1.0439
E-04	2686.8	F-57	2687.70	-0.9025	-0.0335
E-05	3660.7	F-142	3691.51	-30.8136	-0.8417

表 2 空氣耦合結構分析與實際結構之模態振型總表

EMA		FEA		
模態數	模態振型	模態數	模態振型(結構顯示)	模態振型(空氣顯示)
E-01		F-08		
E-02		F-13		
E-03		F-28		
E-04		F-57		
E-05		F-142		

4.2 具簡諧倍頻音鐵磬之頻率響應函數驗證

從上述頻率域之頻率響應函數比對驗證中，將藉由進行空氣耦合結構之簡諧響應分析，求得理論之頻率響應函數，並與實驗之頻率響應函數進行比對驗證，圖 8 為理論與實驗之頻率響應函數圖，從圖中可以發現(a)理論之頻率響應函數與(b)實驗之頻率響應函數，其頻率之峰值有對應的趨勢，藉以驗證本次分析與實驗之可靠度。

4.3 具簡諧倍頻音鐵磬有無空氣耦合結構之差異

本節將針對具簡諧倍頻音之鐵磬結構進行結構模態分析，求得理論之結構模態參數，並與上述所提到之空氣與結構耦合之模態參數，進行模態參數的比對，藉此確認結構本身與空氣耦合結構之差異，表 3 為結構與空氣耦合結構之理論分析自然頻率總表，表 4 為結構與空氣耦合結構之理論分析模態振型總表，從表 3、表 4 中可以發現，兩者差異不大，故推論空氣耦合結構，對結構自然頻率只會有些微的影響。

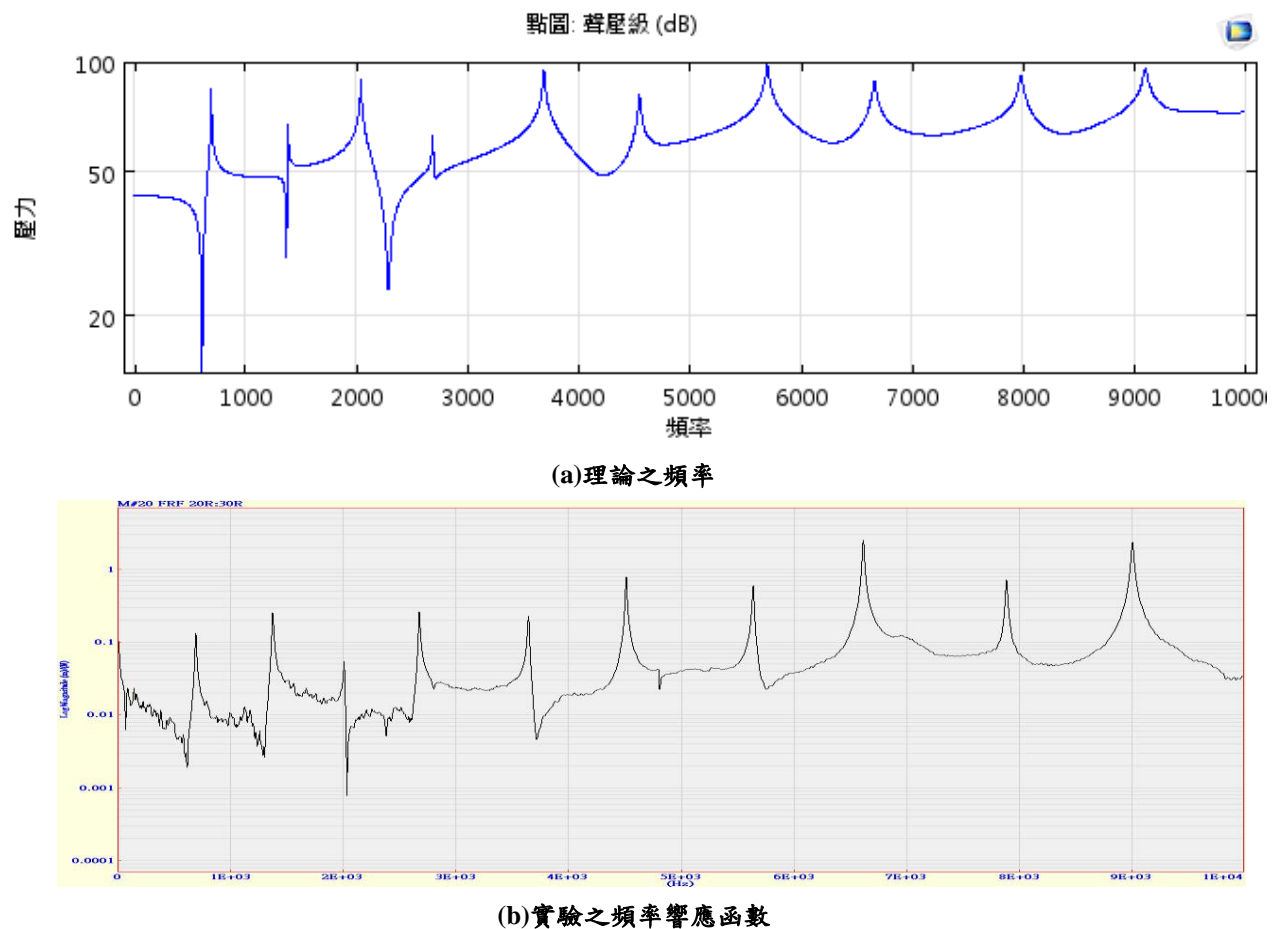
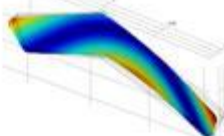
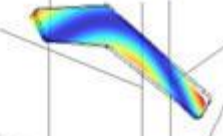
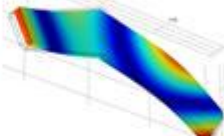
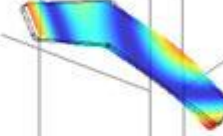
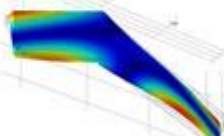
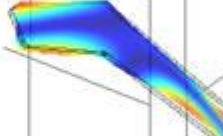
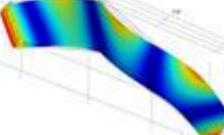
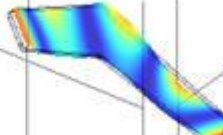
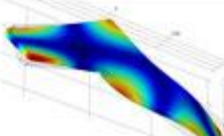
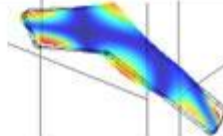


圖 8 理論與實驗之頻率響應函數圖

表 3 為結構與空氣耦合結構之理論分析自然頻率總表

結構自然頻率		空氣耦合結構之自然頻率		自然頻率誤差(Hz)	自然頻率誤差(%)
模態數	自然頻率(Hz)	模態數	自然頻率(Hz)		
F-07	695.42	F-08	695.14	0.28	0.0402
F-08	1386.3	F-13	1385.40	0.9	0.0649
F-09	2043.4	F-28	2042.60	0.8	0.0391
F-10	2691.2	F-57	2687.70	3.5	0.1300
F-11	3693.3	F-142	3691.51	1.79	0.0484

表 4 為結構與空氣耦合結構之理論分析模態振型總表

結構		空氣耦合結構	
模態數	模態振型	模態數	模態振型
F-07-695.42Hz		F-08-695.14Hz	
E-08-1386.3Hz		F-13-1385.40Hz	
E-09-2043.4Hz		F-28-2042.60Hz	
E-10-2691.2Hz		F-57-2687.70Hz	
E-11-3693.3Hz		F-142-3691.51Hz	

五、結論與未來建議

本文首先利用實際結構來進行實驗量測，並將所得到之各項模態參數套入 COMSOL 音場分析軟體，進行結構之音場模態分析，並將結果進行驗證，確認分析模型等效於實際結構，接著再進行結構音場之簡諧響應分析進而得到理論預測之結構聲音響應，最後透過實驗量測所得之聲音響應進行比對，以驗證評估理論之聲音預測方法之

可靠度，接著針對單純結構進行理論模態分析，並探討有無空氣耦合之結構自然頻率的差異，其重要結果如下：

1. 從模型驗證之結果中，可以得知自然頻率比較總體誤差為 1.05% 以下，且兩者模態振型皆對應良好，初步判斷主要造成頻率誤差之原因為加工誤差，代表本次驗證之結果是良好的。
2. 從簡諧響應分析結果中可得知，理論分析之頻率響應函數與實驗之頻率響應函數，其頻率之峰值有對應的趨勢，藉以驗證本次分析與實驗之可靠度。
3. 在鐵磬有無空氣耦合結構之自然頻率比較結果中，可以得知自然頻率比較總體誤差為 0.13% 以下，且兩者模態振型皆對應良好，故推論空氣耦合結構，對結構自然頻率只有些微的影響。
4. 針對聲振耦合驗證方法設計了一套完整的流程，後續可以當作一個好的聲振耦合驗證之參考。

六、誌謝

本論文為科技部計畫編號 MOST104-2221-E-020-033 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。

七、參考文獻

- [1] 王栢村，張宏名，2015，「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。
- [2] 張年華，2010，「基於良好聲音品質之高爾夫球頭結構逆向工程設計分析」，屏東科技大學機械工程研究所碩士論文。
- [3] Šali, S., and Kopač, J., 2000, "Measuring a Frequency Response of a Guitar," *18th International Modal Analysis Conference*, Ljubljana, pp. 1-6.
- [4] Bissinger, G., 2001, "Modern Vibration Measurement Techniques for Bowed String Instruments," *Experimental Techniques*, Vol. 25, No. 4, pp. 43-46
- [5] Yu, Y., Jang, I. G., Kim, I. K., and Kwak, B. M., 2010, "Nodal Line Optimization and Its Application to Violin Top Plate Design," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 329, pp. 4785-4796.
- [6] Hutchins, C. M., 1981, "The Acoustics of Violin Plates," *Scientific American*, Vol. 245, No.4, pp. 170-180.
- [7] Rossing, T. D., Roberts, M., Bynum, E., and Nickerson, L., 1998, "Modal Analysis of Violins and Cellos," *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 36, pp. 1473-1474.
- [8] Ezcurra, A., 1996, "Influence of the Material Constants on the Low Frequency Modes of a Free Guitar Plate," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 194, No. 4, pp. 640-644.