

響鈴板之音場分析及其振動與聲音模態特性探討

Vibro-acoustic Analysis of Bell Plate for its Vibration and Acoustic Modal Properties

王栢村¹、溫儒琳^{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 學士研究生

³ 國立內埔高級農工職業學校機械科

摘要

響鈴板是一種由不鏽鋼製成的打擊樂器，其聲音產生來自琴板振動和輻射聲波。本文主要探討響鈴板的結構振動與聲音耦合分析，採用有限元素分析(Finite Element Analysis, FEA)進行聲振耦合分析，並獲得結構模態參數。響鈴板在自由邊界下進行實驗模態分析(Experimental Modal Analysis, EMA)得到模態參數，包括自然頻率、模態阻尼比及模態振型。針對有無空氣音場對響鈴板振動之影響，因此分別進行結構和聲振耦合分析，來研究空氣對響鈴板振動以及輻射聲壓的影響。結果顯示，可經由實驗與分析來完整描述響鈴板的振動模態；特別是實驗無法觀察的聲音壓力模態振型，則可透過有限元素分析來求得，且預測聲音壓力的響應與實驗結果亦合理地吻合。本文所提出的實驗和數值分析的方法，可有效用來校準響鈴板的敲擊聲音頻譜與結構振動和聲音壓力模態。

關鍵字：實驗模態分析、聲振耦合分析、模態分析、自然頻率、模態振型。

Abstract

Bell plate is a kind of percussion instrument made of stainless. The sound generation is from plate vibration and radiated sound wave. This work aims to discuss vibration and acoustic coupling analysis for the bell plate. Finite element analysis (FEA) is adopted to perform vibro-acoustic coupling analysis and obtain structural modal parameters. The bell plate in free-free boundary is also carried out experimental modal analysis (EMA) to get the plate's modal parameters, including natural frequencies, modal damping ratios and mode shapes. For the bell plate with and without air interaction, both structural and vibro-acoustic coupling analyses are, respectively, proceeded to investigate the effect of air loading on the plate vibration as well as the radiated sound pressure. Results show the plate vibration modes can be well interpreted from analysis and experiment. In particular, the sound pressure mode shapes, not possible to get experimentally, can be visualized by FEA. The predicted sound pressure response agrees reasonably with

experimental results. This work conveys the experimental and numerical approaches to calibrate the structural vibration and acoustic modes as well as the percussion sound spectrum of the bell plate.

Keyword : Experimental modal analysis, vibro-acoustic coupling system, modal analysis, natural frequency, mode shape.

一、前言

響鈴板為打擊樂器的一種，材質為不鏽鋼，其聲音清脆響亮，因外型簡單，可依照不同大小形狀排列出音階且價格不貴，是一種普遍的樂器。圖 1 為響鈴板琴組，由數個大小不同的琴片排列出音階，其簡諧倍頻音的外型演奏起來非常悅耳動聽。本文參考樂器相關之文獻，研究背景為對響鈴板的聲音產生以及創新改良的設計外型感興趣，欲了解影響響鈴板的聲音與振動的特性、空氣模態及主要的發聲頻率，因此對響鈴板做音場分析，藉由分析與實驗比對，預期能得出有趣的結果。Lavan et al.[1] 探討響鈴板拿在手中敲擊時的發聲特性，進行克拉尼金屬板實驗(Chladni plate experiment)，觀察受音頻影響的沙子分布情況，發現響鈴板在特定位置上有一個不會產生振動的區塊，稱為節點或節線，是造成手持位置不影響發聲特性的原因。Wang et al. [2]對 C6 音階的響鈴板變更幾何設計，採用最佳化分析取得優化的幾何尺寸，並對優化後的響鈴板進行實驗模態分析與有限元素分析，獲得模態參數進行模型驗證比對，最後進行聲音量測分析，可研究其聲音與振動的特性，發現前兩個峰值是預期的設計目標頻率，未來也可做為其他打擊樂器設計開發之參考。本文引用參考文獻[2]響鈴板的實驗數據，進行聲振耦合分析，並探討響鈴板聲場模態特性與進行聲音響應預測。

以實驗模態分析的方式探討振動特性，並與理論分析做模型驗證比對，確認等效模型後，應用到音場分析。王等人[3]針對縮小模型鐘發聲機制研究，利用有限元素分析與實驗模態分析，取得模態參數比對模型驗證，也對結構進行聲音頻譜量測，做為解析其他打擊樂器發聲機制的參考。Wang and Burroughs[4]別對三種小提琴進行實驗量測，比較多平面(multiplanar)與單平面(planar) NAH 建立耦合系統模型，取得外部聲場模態，並用麥克風量測蒐集信號，取得聲音壓力後並調整變形參數，觀察小提琴主要發聲位置與強度，發現低頻模態皆出現在面板上，在面板上的振動強度也較為明顯。在取得樂器的發聲模態時，因實驗仍無法顯示空氣壓力模態，因此通常由有限元素分析取得。以空氣耦合系統做為參考，利用聲振耦合分析，取得結構位移模態、聲音壓力模態與響應，並加入實驗量測的聲音響應進行驗證，可確認聲音特性，Wang et al. [5]對簡諧倍頻音鐵琴片進行聲振耦合特性探討，利用模態分析與簡諧響應分析，得到模態參數與聲音頻譜，並與實驗進行比對，結果顯示理論分析與實驗均有良好對應性，可作為樂器音場分析之參考依據。王等人[6]對古鈸的聲振耦合分析研究，進行實驗模態分析與聲音量測，得到結構、結構與空氣耦合系統之模態參數、聲音頻譜與頻率響應函數，研究結

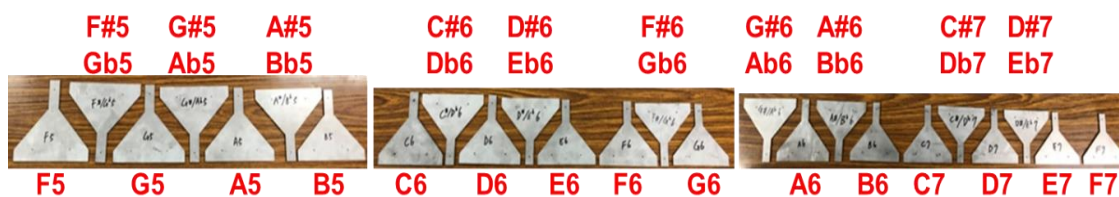


圖 1 響鈴板琴組[2]

果指出，空氣對結構之振動影響甚微，也確認空氣模態與響應之關聯性。王等人[7]針對鐵磬的響應進行探討，進行空氣耦合特性研究，利用實驗模態分析與聲振耦合分析，取得模態參數進行模型的驗證，也針對結構、耦合系統的自然頻率比較，結果顯示自然頻率差異不大，表示空氣對結構振動的影響不大，此手法也可應用到其他樂器進行耦合分析探討。王等人[8]探討銅鐘聲音特性及發聲模態，採用有限元素法，將系統分成結構系統和空氣耦合系統，分別進行模態分析與簡諧響應分析，求得理論之模態參數，並比對實驗模態分析的結果，也進行預測銅鐘的聲音指向性，發現空氣對結構自然頻率僅有微小的影響，結構模態與聲音壓力模態有相同的物理意義。王等人[9] 探討半圓形管的聲音傳遞特性，利用模態分析與簡諧響應分析，結果表示具簡諧倍頻音之半圓型管的實際結構模態振型與聲場模態振型有相同物理意義，確認了分析能顯示出實驗難以表達的空氣模態。

綜合上述實驗與分析方式，欲取得響鈴板結構與空氣耦合的振動、聲音特性及發聲模態，須對系統進行模型驗證，確認等效模型方可進行聲振耦合分析，以取得聲音壓力模態及響應，比較實驗與分析模態參數之差異，研究聲音與振動特性，可用來作為樂器設計與開發之參考。

二、實驗模態分析

本文目的為研究響鈴板的振動與聲音特性，藉由分析與實驗取得振動、發聲模態和聲音響應結果。圖 2 模型驗證流程圖，由實驗量測後進行曲線嵌合取得模態參數，包含自然頻率、模態振型、模態阻尼比，可以了解主要的振動模態與發聲頻率，再與純結構系統模態分析比對，藉由模型驗證來確認模型等效實際結構。

欲了解響鈴板的振動特性，對響鈴板進行模型驗證，從實驗模態分析做聲音量測比對分析結果，可以確認響鈴板的振動模態，本文的響鈴板採用標準音階頻率 C6 作為量測目標。圖 3 為響鈴板實驗架設圖，本文引用參考文獻[2]之實驗數據，採用實驗量測的方式對響鈴板進行振動量測，首先對響鈴板做佈點規劃，確認敲擊點的位置與數目，使用釣魚線以垂吊方式吊掛響鈴板用來模擬自由邊界，量測頻寬範圍為 0 至 20,000(Hz)，頻率域截斷有效條數(Nc)為 12,800，頻率解析度為 1.56Hz，架設量測儀器有 1 個小型衝擊錘、2 個加速規及 1 個麥克風，利用移動衝擊錘;固定加速規的方式，對響鈴板的佈點進行敲擊。其衝擊錘作為驅動器，量測力的時間域訊號 $f(t)$;加速規作為感測器黏貼在第 1 號點，經由加速規量測結構的加速度響應 $a(t)$;麥克風用以量測聲音，放置在距離結構 5 公分處，以獲取聲音壓力自

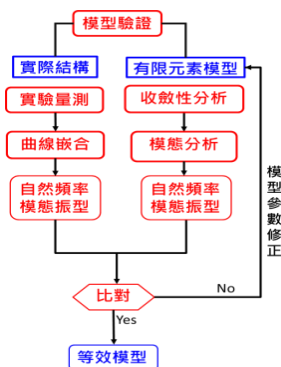


圖 2 模型驗證流程圖

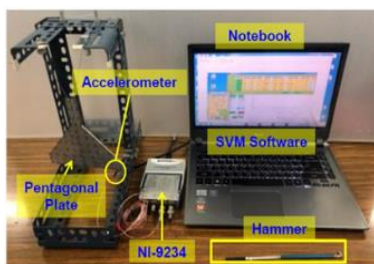
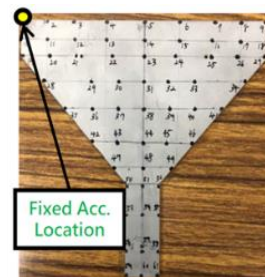


圖 3 響鈴板實驗架設圖[2]



身功率頻譜。透過 NI9234 訊號擷取卡傳輸訊號至筆記型電腦，使用頻譜分析軟體 (SVM) 對接收到的力及加速度時間域訊號透過快速傅立葉轉換，得到響鈴板的傅立葉頻譜，再經由數值轉換得到自身功率頻譜，由取得的功率頻譜，可求得 $H(f)$ 頻率響應函數 (frequency response function, FRF)，並匯入 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、模態阻尼比。後續再建立結構與空氣耦合系統做音場分析，探討響鈴板空氣耦合系統的振動與聲音模態特性，此手法未來可應用到各種打擊樂器的聲音量測與音場分析。

三、有限元素分析

本文使用有限元素法對響鈴板進行聲振耦合分析，探討聲音與振動特性，圖 4 為有限元素分析架構圖，聲振耦合分析可分為結構系統、空氣耦合系統，藉由模態分析求得理論之模態參數，包含自然頻率與模態振型，透過簡諧響應分析求得理論之頻率響應函數，並且考慮有無空氣音場的影響以及聲音響應預測。

圖 5 為響鈴板與空氣耦合有限元素模型，響鈴板主要的尺寸為 141mm、139mm、3mm 分別為長度、寬度、厚度，本文採用有限元素分析軟體對響鈴板做聲振耦合分析，首先對響鈴板實際結構做尺寸量測，再使用繪圖軟體對響鈴板結構外觀進行模型繪製，最後考慮邊界、接觸等問題建構有限元素模型。分析以幾何、材料、邊界、接觸介面做為系統設定，響鈴板的材料為鋼材，其密度為 7886.5 kg/m^3 、楊氏係數為 194.6 GPa、蒲松比 0.34。邊界條件為自由邊界且無接觸介面，因模態分析不考慮外力負荷，所以不設定施力。網格經過收斂性分析，採用六立方體之網格型式，元素分割的大小為 5 mm，取樣頻率 0 到 5,000 Hz，總共求解出 9 個模態。以上建立純結構的模態分析，可以獲得模態參數，包含自然頻率、模態振型。為了取得加速度響應與實驗進行比較，對結構進行簡諧響應分析，輸入實驗取得的平均阻尼比 0.338271%，輸入外力 1 牛頓在響鈴板的第 23 號點，且輸出一個加速度在第 1 號點，可得出理論的頻率響應函數 (FRF)。經比對實驗與分析完成模型驗證後，確認等效模型的結構再加入空氣成為耦合系統。

在響鈴板的結構模型中，繪製一個包覆在結構外的球體其直徑 20 公分，空氣球體的大小仍需比響鈴板還大，以解析結構周圍空氣模態的影響，將空氣的邊界

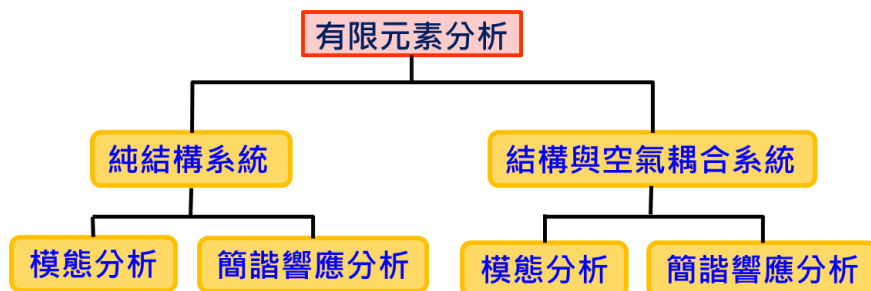


圖 4 有限元素分析架構圖

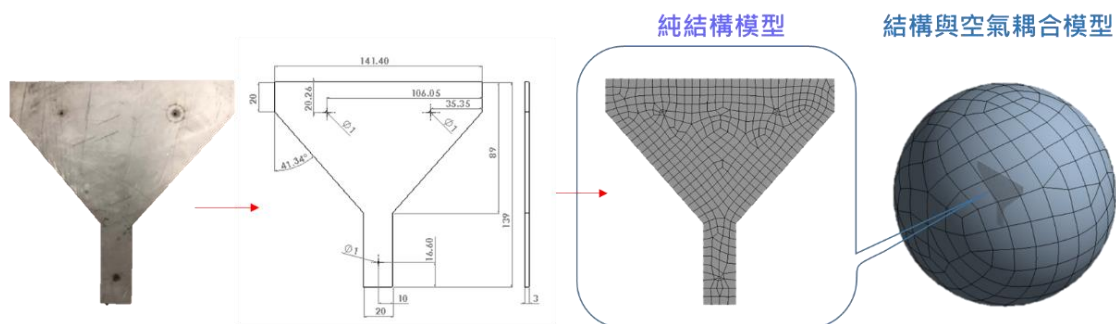


圖 5 響鈴板與空氣耦合有限元素模型

設定為 Absorption Element 以模擬自由音場，因遠輻射邊界不會產生反射，因此球體選取範圍不會影響模態結果。模擬大氣壓力 20 度環境下的狀態，空氣的密度為 1.21 kg/m^3 、聲速為 340 m/s ，並設定響鈴板的接觸介面 Fluid Solid Interface。球體的網格式為六立方體且元素大小為 40 mm ，同純結構的分析設定，獲得耦合系統之模態參數，包含自然頻率、結構位移模態振型以及空氣壓力模態振型。針對耦合系統進行簡諧響應分析，頻寬範圍為 0 到 $5,000 \text{ Hz}$ ，取樣點數為 3205 個，欲求加速度頻譜和聲音壓力頻譜，輸出聲壓級在距結構中心 5 公分處，取得頻率響應函數，進行後續振動與聲音特性研究。

本文目的為探討響鈴板之振動與聲音模態特性，因此對結構系統、空氣耦合系統進行模態分析與簡諧響應分析；求得理論之模態參數並比對實驗，以探討空氣對結構振動的影響，空氣耦合簡諧響應分析輸出的聲音壓力用以比對實驗所量測的聲音頻譜，以對後續耦合系統聲音響應特性研究。

四、結果討論

經由前面所敘述的實驗與分析所得出的結果進行解析，考量空氣耦合對結構之影響，並透過聲振耦合分析來研究聲音壓力模態，以達到探討響鈴板的振動與聲音特性之目的。

本文目的是透過理論分析與實驗量測的結果比對，確認響鈴板的振動與聲音特性，表 1 為響鈴板實驗與分析自然頻率差異比較表，從實驗模態分析、純結構模態分析比對模態參數後發現，自然頻率差異在 2% 以下，顯示出實驗量測的自然頻率與分析模型取得的自然頻率非常接近，表 2 為響鈴板實驗與分析模態參數比

表 1. 響鈴板實驗與分析自然頻率差異比較表

實驗模態分析(EMA)			有限元素模態分析(FEA)				自然頻率差異比較					
實際結構			純結構系統		空氣耦合系統		實驗、純結構		純結構、空氣耦合		實驗、空氣耦合	
模態	自然頻率 (Hz)	模態阻尼比 (%)	模態	自然頻率 (Hz)	模態	自然頻率 (Hz)	自然頻率差異(Hz)	自然頻率差異(%)	自然頻率差異(Hz)	自然頻率差異(%)	自然頻率差異(Hz)	自然頻率差異(%)
E-01	724.5	0.0597	F _S -07	730.5	F _{SA} -01	730.2	6.0	0.828	-0.3	-0.041	5.7	0.79
E-02	1029.8	0.1278	F _S -08	1036.2	F _{SA} -03	1035.7	6.4	0.621	-0.5	-0.048	5.9	0.57
E-03	1300.1	0.3823	F _S -09	1319.2	F _{SA} -07	1318.8	19.1	1.469	-0.4	-0.030	18.7	1.44
E-04	2029.8	0.7746	F _S -10	2052.7	F _{SA} -25	2051.9	22.9	1.128	-0.8	-0.039	22.1	1.09
E-05	2566.0	0.5977	F _S -11	2576.1	F _{SA} -57	2575.0	10.1	0.394	-1.1	-0.043	9.0	0.35
E-06	3096.6	0.7997	F _S -12	3068.2	F _{SA} -111	3067.6	-28.4	-0.917	-0.6	-0.020	-29.0	-0.94
E-07	3468.5	1.2570	F _S -13	3514.3	F _{SA} -166	3512.7	45.8	1.320	-1.6	-0.046	44.2	1.27
E-08	4400.4	0.1081	F _S -14	4404.0	F _{SA} -331	4409.5	3.6	0.082	5.5	0.125	9.1	0.21
E-09	4408.7	1.2157	F _S -15	4411.2	F _{SA} -327	4402.8	2.5	0.057	-8.4	-0.190	-5.9	-0.13

表 2. 響鈴板實驗與分析模態參數比對總表

實驗模態分析(EMA)										
模態	E-01	E-02	E-03	E-04	E-05	E-06	E-07	E-08	E-09	
自然頻率(Hz)	724.54	1029.8	1300.1	2029.8	2566.0	3096.6	3468.5	4400.4	4408.7	
模態振型										
物理意義	(x,y)=(1,3)	(x,y)=(3,1)	(x,y)=(2,2)	(x,y)=(1,4)	(x,y)=(4,1)	(x,y)=(2,3)	(x,y)=(3,4)	(x,y)=(2,4)	(x,y)=(5,3)	
純結構模態分析(FEA)										
模態	F _S -07	F _S -08	F _S -09	F _S -10	F _S -11	F _S -12	F _S -13	F _S -14	F _S -15	
自然頻率(Hz)	730.5	1036.2	1319.2	2052.7	2576.1	3068.2	3514.3	4404	4411.2	
模態振型										
物理意義	(x,y)=(1,3)	(x,y)=(3,1)	(x,y)=(2,2)	(x,y)=(1,4)	(x,y)=(4,1)	(x,y)=(2,3)	(x,y)=(3,4)	(x,y)=(2,4)	(x,y)=(5,3)	
結構與空氣耦合系統模態分析(FEA)										
模態	F _{SA} -01	F _{SA} -03	F _{SA} -07	F _{SA} -25	F _{SA} -57	F _{SA} -111	F _{SA} -166	F _{SA} -331	F _{SA} -327	
自然頻率(Hz)	730.2	1035.7	1318.8	2051.9	2575.0	3067.6	3512.7	4409.5	4402.8	
結構位移模態										
空氣壓力模態										
物理意義	(x,y)=(1,3)	(x,y)=(3,1)	(x,y)=(2,2)	(x,y)=(1,4)	(x,y)=(4,1)	(x,y)=(2,3)	(x,y)=(3,4)	(x,y)=(2,4)	(x,y)=(5,3)	

對總表，觀察彼此之間的關聯性及比對其模態振型擺動的情況後，發現節線的位置、擺動的方向均有相同的現象，作為解釋物理意義的現象，可以認同它為具相同振動物理特性的模態。從實驗與分析結果中發現，無論是自然頻率還是模態振型，均有合理的對應，可以判定有限元素模型等效實際結構。聲振耦合分析的自然頻率有兩個模態振型，分別為結構位移模態、空氣壓力模態。經觀察發現空氣會從響鈴板由內往外發散，在響鈴板結構的節線位置上並無空氣發散的現象，其結構位移擺動的趨勢與對應的空氣壓力模態一致，解釋兩者模態的物理意義具有關聯性。

針對結構、空氣耦合系統進行簡諧響應分析，獲得頻率響應函數(FRF)進行比對探討。圖 6 為響鈴板振動模態與頻率響應函數圖，針對實驗量測、純結構分析、結構與空氣耦合分析的加速度 FRF 進行比較，曲線上每一峰值代表一個模態其對應一個自然頻率、模態振型，從圖上觀察發現實驗的第 7 個峰值振幅量比純結構分析與耦合分析都還要小，推測原因為分析中採用平均阻尼比所造成的影響，其餘峰值皆有對應的趨勢且模態域、頻率域的模態參數亦吻合。圖 7 為響鈴板空氣

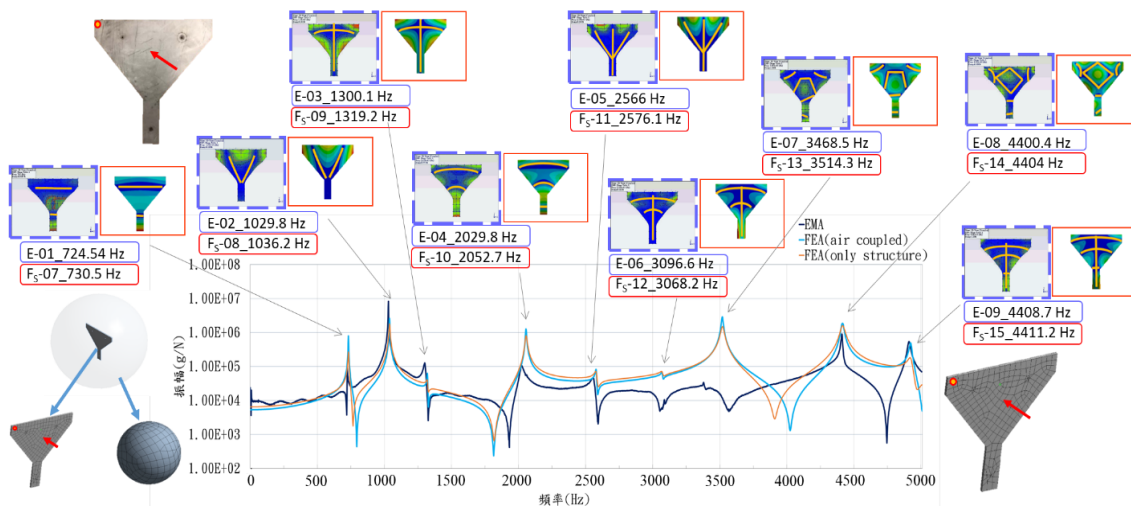


圖 6 響鈴板振動模態與頻率響應函數圖

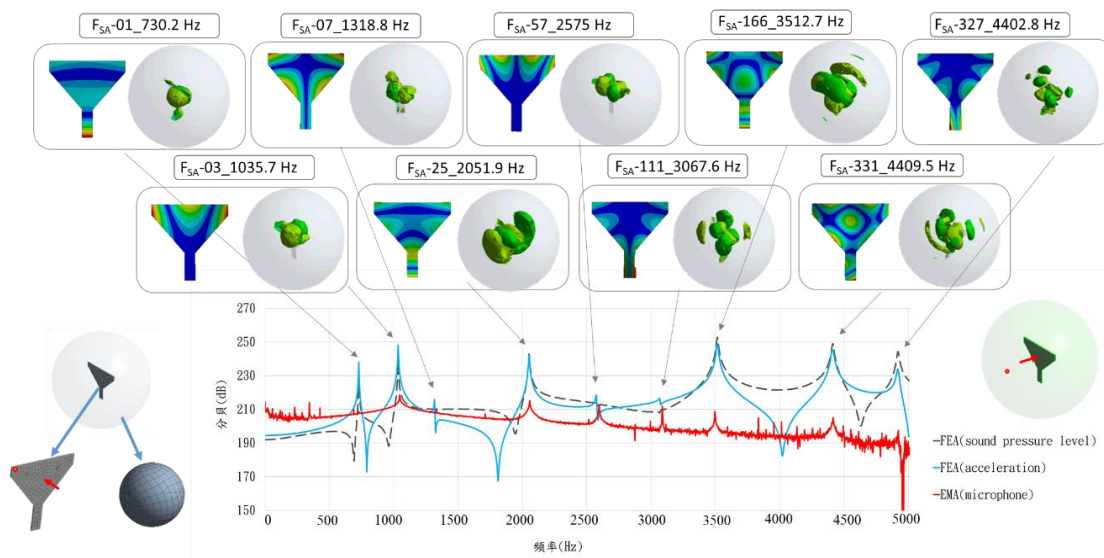


圖 7 響鈴板空氣壓力模態與頻率響應函數圖

壓力模態與頻率響應函數圖，FRF 分別為實驗麥克風所量測的聲音響應、耦合分析的加速度及耦合分析的聲音壓力，加速度 FRF 經由單位轉換成分貝(dB)，用來比較振動與聲音壓力的差異。將分析得到的聲音壓力頻譜與實驗的麥克風所量測得聲音頻譜比較，觀察峰值的趨勢均有對應，但整體的實驗的 FRF 之分貝量值無法納入比較，其原因為輸入的外力為平均值，而分析輸入的力較為理想，因此分貝量值略為不同，但仍不影響研究結構、空氣振動與聲音特性的目標，經觀察發現耦合分析系統的加速度 FRF 明顯在 1318 Hz、2575 Hz、3067 Hz 有振動模態，但耦合分析系統的聲音壓力 FRF 並無峰值，原因是因為輸入的外力位置在節線上，造成耦合系統分析中聲音壓力的 FRF 沒有響應的現象。

本文的目的為探討響鈴板的振動與聲音特性，利用實驗與聲振耦合分析來取得模態參數及響應，確認分析軟體於音場分析之可行性，了解響鈴板之空氣壓力模態，後續可應用在其他打擊樂器的設計與開發。

五、結論

本文的目的是了解響鈴板的振動與聲音特性，透過實驗模態分析，來取得模態參數，針對有無空氣音場對響鈴板振動之影響，分別進行結構和聲振耦合分析，來研究空氣對響鈴板振動以及輻射聲壓的影響。經過實驗量測與分析結果，可以得出以下結論：

1. 實驗與音場分析，可以取得耦合系統中結構、空氣的振動與聲音模態，了解樂器主要振動與聲音特性，此分析與實驗的驗證方法也可應用到其他樂器上。
2. 實驗與模態分析可完整描述響鈴板的振動模態；特別是實驗無法觀察的聲音壓力模態，則可透過有限元素分析來獲得，分析與實驗的模態參數均有吻合的對應，可以確認響鈴板之振動特性。
3. 由簡諧響應分析中，可以確認振動與聲音之 FRF 有對應的趨勢，頻率域與模態域對應良好，也確認結構位移模態與空氣壓力模態之關聯性。
4. 本文經由理論分析與實驗量測，可以得到響鈴板之振動、聲音的模態與響應，確認有無空氣音場對結構的振動影響不大。

六、參考文獻

1. Lavan, D., Hogg, S., & Wolfe, J. (2003). Why Do Bell Plates Ring, *Acoustics Australia*, 31, 2-1.
2. Wang, B. T., Chen, P. C., Tsai, Y. G., & Wu, Y. H. (2019). Development of Pentagonal Plates with Harmonic Sound as Percussion Instrument, *The 26th International Congress on Sound and Vibration (ICSV26)*, Montreal, 458.
3. 王栢村，張博鈞，楊昶昱，黃家賢，吳盈輝 (2016) 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，論文編號:A047。
4. Wang, L. M., & Burroughs, C. B. (2001). Acoustic Radiation from Bowed Violins, *Acoustical Society of America*, 110, 543-555.
5. Wang, B. T., Huang, C. H., & Wu, Y. H. (2016). Vibro-Acoustic Coupling Analysis for Harmonic Sound Plate, *The 23rd International Congress on Sound and Vibration (ICSV23)*, Athens, Greece, 440-448.
6. 王栢村，余冠德，黃家賢，吳盈輝 (2015) 古鈸打擊樂器之聲振耦合分析，中國機械工程學會 104 年度年會暨第 32 屆全國學術研討會，論文編號:B07-2198。
7. 王栢村，張宏名，黃家賢，余冠德，吳盈輝 (2015) 鐵磬打擊樂器之聲振耦合分析，台灣聲學學會第 28 屆學術研討會，論文編號:A-03。
8. 王栢村，蔡俊郎，黃崇閔，黃家賢，吳盈輝 (2016) 銅鐘聲振耦合分析之模態特性與聲音頻譜，台灣聲學學會 105 年會員大會暨第 29 屆學術研討會，論文編號:A-01。
9. 王栢村，楊昶昱，吳盈輝 (2017) 半圓型管打擊樂器之聲振耦合分析，中國機械工程學會第三十四屆全國學術研討會，論文編號:12188。