

## 響鈴板振動自動化分析模組開發與應用

王栢村<sup>1</sup> 潘昱豪<sup>1</sup> 邱昱勳<sup>1</sup> 趙佐晨<sup>1</sup> 薛聿蒨<sup>1</sup> 楊茂川<sup>1</sup> 吳盈輝<sup>2</sup>

國立屏東科技大學 機械工程系<sup>1</sup>

國立內埔高級農工職業學校 機械科<sup>2</sup>

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

### 摘要

響鈴板為不銹鋼板製作的一種打擊樂器，目前已開發一系列音階的響鈴板，並且皆具有 2 倍或 3 倍的簡諧倍頻音設計。為快速進行設計分析，本文運用 MATLAB 的人機介面(Graphical User Interface, GUI)來開發自動化分析程式，結合 ANSYS 有限元素分析(Finite Element Analysis, FEA)軟體對響鈴板進行模態分析與簡諧響應分析。首先說明響鈴板的基本結構，以及其打擊聲音特性與振動模態關聯性。為設計分析響鈴板，需要進行模態分析求得結構的振動模態，包含：自然頻率與模態振型。同時，也需要進行簡諧響應分析，以求得結構的頻率響應函數。針對響鈴板的形狀尺寸設計分析需求，規劃發展了振動分析自動化程式人機介面。透過人機介面可以設定響鈴板的幾何尺寸、材料參數與 FEA 分析選項等，以參數化的方式寫入 ANSYS 軟體的操作執行檔，不必開啟 ANSYS 分析軟體，就可以完成響鈴板的振動分析。在程式模組中，能夠依照不同需求來做任意的設計變更。本文對 F4 音階響鈴板結構，以自動化程式模組進行分析，並與實驗結果做比較驗證。結果顯示，程式模組可以成功快速的自動完成模態分析與簡諧響應分析。未來可應用此程式於響鈴板的設計變更。

**關鍵詞：**響鈴板、有限元素分析、模態分析、簡諧響應分析、自動化程式、人機介面

### 1. 前言

響鈴板為一種打擊樂器，設計樂器往往需參照前人之設計經驗，而其傳統設計方法為透過有限元素分析及實驗模態分析，再經比對結果證明分析模型等效於實際結構，與確認音準為設計目標後即完成設計，但此方法較繁瑣，因此本文開發響鈴板振動自動化分析模組，用以縮短響鈴板之開發時間。

響鈴板的音階與幾何尺寸有比例關係，王等人[1]利用簡諧倍頻音可增加樂音共鳴的特性，透過改變響鈴板的幾何尺寸，開發不同音階之響鈴板，並探討不同音階響鈴板之發聲頻率之間的比例關係。

響鈴板之聲音特性與模態參數具關聯性，王等人[2]透過數值方法取得每個音名對應的音階頻率，並以工程聲學的角度，說明音階、音高與音名及音階頻率物理意義，發現可由音階頻率之頻率比關係，設計打擊樂器。Wang *et al.*[3]以 C6 音階響鈴板作為基礎，進行模型驗證，根據其音階頻率與模態參數之關係，開發出一套由數種音階響鈴板組成之樂器組。王等人[4]

為了解幾何參數對自然頻率之影響，針對不同幾何大小之矩形平板進行理論模態分析，發現自然頻率與平板厚度成正比，與平板的長度及寬度為平方成反比。王等人[5]為了解材料參數對自然頻率之影響，對不同楊氏係數與不同密度之矩形平板進行理論模態分析，發現自然頻率與楊氏係數成正比，與密度成反比。

以理論模態振型對比實驗模態振型的方式更容易解讀物理意義，可藉由比對驗證取得等效分析模型，並透過有限元素分析取得更精確之數據，進一步解讀模態參數，Tsai *et al.*[6]欲探討銅鑼之幾何尺寸與材料特性對聲音特性和結構振動特性之影響，針對銅鑼進行模型驗證，取得等效於實際結構之分析模型，並測量其聲音頻譜，確定主要發聲頻率，透過對模型進行不同參數設定，發現幾何尺寸與自然頻率成正比關係，材料之密度越大則自然頻率越低。Ramesha *et al.*[7]使用自由邊界觀察曲軸受預應力影響之彎曲與扭轉現象，並比對不同激振頻率下的應力及壓力振幅大小，其透過模態分析取得曲軸自然頻率與對應模態振型，再進行簡諧響應分析得到頻率響應函數，並檢視激振頻率的分布與影響，結果顯示曲軸不會有共振情形。Yu *et al.*[8]針對開溝機零組件進行模態分析與簡諧響應分析，判斷運轉頻率下結構是否會因應力導致變形，結果表明其所受之應力與變形位移很小。Yu *et al.*[9]欲研發複合材料圓柱滾子軸承，透過有限元素分析探討複合材料占比對模態參數的影響，發現填充度 40%與 50%之複合材料圓柱滾子軸承的自然頻率趨近於實心軸承，而填充度 65%之自然頻率則較實心軸承低。Ahiwale *et al.*[10]欲探討裂縫位置與大小對懸臂樑之自然頻率的影響，發現頂部與底部的裂縫會使自然頻率降低，裂縫大小會影響模態振型。

為了縮短有限元素分析前處理與後處理之操作耗時，張等人[11]運用 MATLAB 小波分析工具，建立風洞信號小波分析軟體，軟體可對風洞信號進行高低頻分辨、特徵描述與降噪處理，排除環境因素帶來的影響，最終得出完整分析數據。王等人[12]開發圓盤自動化振動分析模組，透過 MATLAB 串聯有限元素分析軟體於計算機後台進行模態分析與簡諧響應分析，僅需於模組介面定義參數，即可獲取分析結果，節省前處理與後處理的時間。

聲音的產生是因空氣的振動，透過複製聲音頻譜可重現聲音，Brahim *et al.*[13]建立樂器聲音重建系統，該系統使用離散傅立葉轉換量測訊號，可去除背景噪音，並利用音頻質量感知評估算法最佳化聲音。鄧等人[14]以數值推導取得古箏的合成聲音曲線，並將其



與實驗比較，成功驗證此聲音合成方法。

綜上所述，瞭解響鈴板設計原理與聲音特性之關係，即可以數值分析進行不同音階響鈴板之設計與製造，本文將著重於振動自動化分析模組開發，並進行聲音合成設計，以提高設計響鈴板之效率。

## 2. 響鈴板之設計與開發

本章探討響鈴板的設計流程，圖 1 為響鈴板設計開發流程圖，Function 為設計特定音階之響鈴板，CAE 為電腦輔助工程，以電腦進行模擬分析，取得理論數據，本模組可呼叫有限元素軟體進行有限元素分析，Analysis 為分析類型，本模組可執行模態分析、簡諧響應分析與聲音合成分析，執行模態分析得到自然頻率  $f_r$  與模態振型  $\phi_r$ ，簡諧響應分析得到重力加速度頻率響應函數  $H_{(i,j)} = A_i/F_j$ ， $i$  為輸出點， $j$  為輸入點， $A_i$  為重力加速度，單位為 g， $F_j$  為外力負荷，單位為牛頓(N)，聲音合成分析得到模擬敲擊之音訊檔(\*.wav)、時間域波型  $P(t)$  與聲音壓力自身功率頻譜  $G_{pp}(f)$ ，其中基音為主要發聲頻率，泛音為次要發聲頻率，Index 為評估指標，響鈴板之發聲頻率與簡諧倍頻數量，Value 為指標數值，響鈴板之音階，也就是基音頻率，Criterion 為允收標準，須確保基音頻率與標準音階頻率之百分比誤差於  $\pm 0.34\%$  內，以及頻率響應函數與聲音頻譜特性是否相近，若分析結果均合格即可製成成品，反之則須修改分析模型參數重新評估。

此設計開發流程中，耗時較長之步驟無非是 CAE 與 Analysis，因此本文針對這兩個步驟，開發響鈴板振動自動化分析模組，降低有限元素軟體的前處理與後處理時間，提升設計效率。

## 3. 響鈴板振動自動化分析模組開發理念

本章將有限元素分析軟體介面，採參數化方式設計成響鈴板振動自動化分析模組，此模組能對響鈴板快速進行模態分析、簡諧響應分析與聲音合成分析，並將分析結果，包含模態分析得到自然頻率與對應之

模態振型，簡諧響應分析得到重力加速度頻率響應函數以及聲音合成分析得到聲音頻譜，顯示於 GUI 人機介面並合成聲音。

### 3.1 振動自動化分析模組開發理念

振動自動化分析模組應用了振動分析的技巧，圖 2 為振動自動化分析模組之分析過程介紹，圖 2(a) 為模態分析過程，透過模態分析可以了解結構模態振動特性，用於響鈴板之設計。

振動分析包含模態分析與簡諧響應分析，模態分析需輸入響鈴板的幾何參數(Geometry)、材料參數(Material)與邊界條件(Boundary)進行分析，Geometry 需定義響鈴板之幾何尺寸(a, b, c, d, e, T)，單位為 cm，Material 需定義響鈴板的密度( $\text{kg/m}^3$ )、楊氏係數(GPa)與泊松比，而 Boundary 由於本模組僅支援自由邊界無須定義，輸出為響鈴板之自然頻率  $f_r$  與位移模態振型  $\phi_r$ ，其中控制變數(Control Variable)需定義有限元素模型之分割元素大小、欲求解的模態數量與有效頻率  $F_{nyq}$ ，分割元素大小將影響結果之精確度，若分割元素過小會導致分析時間過長，分割元素過大則會造成模型不精確，因此需取適當大小進行分析，而愈求解模態數量受有效頻率影響，當有效頻率提高，欲求解模態數量也須一併提高，避免遺漏模態的可能性。

簡諧響應分析可取得特定点之頻率響應函數，其為輸出點重力加速度與輸入點負荷的比值，圖 2(b) 為簡諧響應分析過程，簡諧響應分析相較於模態分析需定義阻尼比  $\zeta$  與外力負荷，阻尼比可由實驗模態分析取得，而外力負荷的大小由於頻率響應函數為比值，故通常為單位負荷，即 1 牛頓(N)，而位置與方向須由使用者依實際情況定義，圖中間之折線圖為重力加速度頻率響應函數，X 軸為頻率(Hz)，Y 軸為重力加速度與外力負荷的比值，單位為 g/N，Control Variable 為解析係數  $N_f$  與  $F_{nyq}$ ，透過頻率響應函數可以看出峰值頻率對整體的貢獻度。

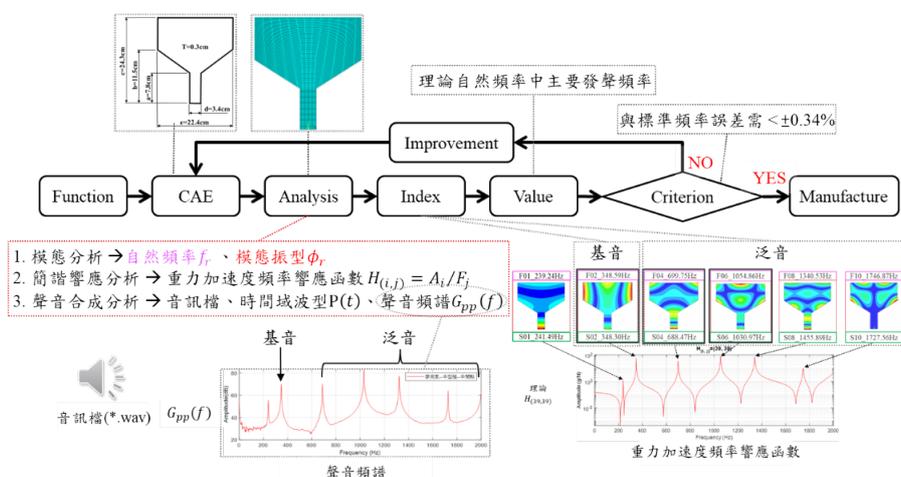
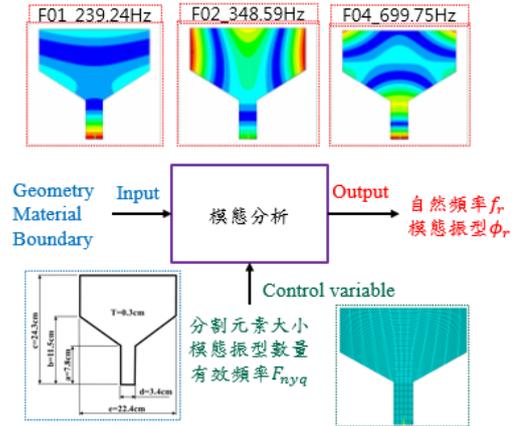


圖 1 響鈴板設計開發流程圖[15]

比起數據表示，樂器設計以人耳聽感作為標準更具信服力，故本模組開發聲音合成分析之功能，可將振動分析的結果合成為音訊，圖 2(c)為聲音合成分析過程，透過模態分析得到的自然頻率，配合簡諧響應分析得到的重力加速度頻率響應函數，取得各模態之自然頻率對應的重力加速度頻率響應函數峰值振幅，將其視為聲音壓力頻譜  $P_k$ ，根據阻尼效應設定阻尼比，定義控制變數中的頻率點數  $N_f$  與總時間長度  $T$ ， $N_f$  依簡諧響應分析所設定， $T$  可控制合成聲音之時間長度。

從時間域波形中可以觀察聲音衰減之過程，若聲音衰減過快可適當地降低阻尼比，最後即可輸出合成音訊檔(\*.wav)，其為模擬敲擊聲音之音訊，與實際敲擊聲音進行比對，可作為初步的設計參考。

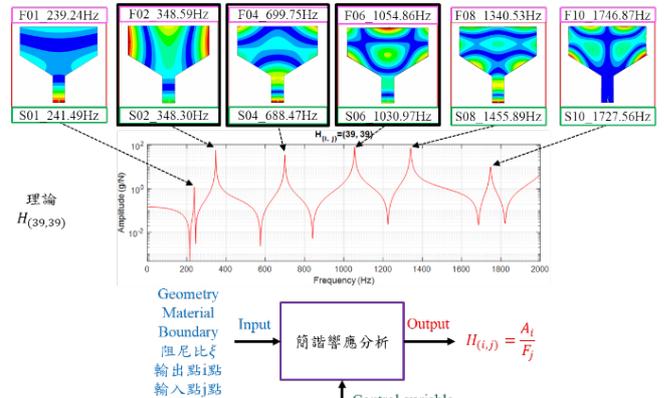


(a) 模態分析過程

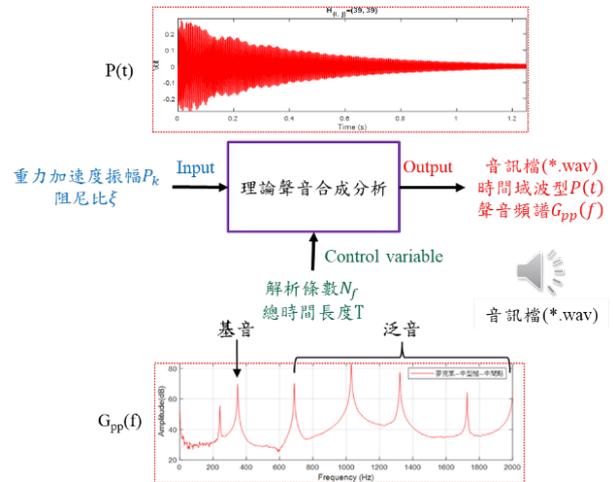
### 3.2 振動自動化分析模組介面說明

本節將介紹振動自動化分析模組之操作流程，圖 3 為響鈴板振動自動化分析模組介面圖，操作大致分析為 6 個步驟，以下為步驟之功能介紹：

- (1) 步驟 1：設定模組路徑、檔案名稱：輸入 ANSYS 軟體之路徑，可直接輸入路徑或選擇程式捷徑，並定義工作目錄與檔案名稱。
- (2) 步驟 2：設定幾何參數、材料參數與分析參數：幾何參數需定義響鈴板之幾何尺寸(cm)，依照左上角之幾何尺寸示意圖，分為 a, b, c, d, e 與厚度等六種參數，材料參數需定義密度( $\text{kg/m}^3$ )、楊氏係數(GPa)與蒲松比，分析參數需定義分割元素大小(cm)、欲求解模態數、頻率範圍(Hz)、頻率解析係數及總時間長度(sec)。
- (3) 步驟 3：設定輸入力之大小(N)、方向、作用點與名稱，以及響應點之位置。
- (4) 步驟 4：執行文字執行檔與輸出命令提示字元，模組將輸入之各項參數，輸出成 ANSYS 文字執行檔與可進行分析之命令提示字元。接著執行模態分析與簡諧響應分析，即以命令提示字元呼叫 ANSYS 於後台求解，並自動讀取輸出結果顯示於介面中。
- (5) 步驟 5：其分析所得之自然頻率、模態振型、頻率響應函數、聲音頻譜及聲音時間域圖，將顯示於模組介面右方供使用者解讀，可透過點選列表中的內容查看數據。
- (6) 步驟 6：完成案例分析後可於模組介面右上角進行存檔，副檔名為\*.mat，日後可利用讀檔功能重現分析設定與結果。



(b) 簡諧響應分析過程



(c) 聲音合成分析過程

圖 2 振動自動化分析模組之分析過程介紹

## 4. 響鈴板振動自動化分析模組應用

本章將以響鈴板振動自動化分析模組針對 F4 音階響鈴板進行案例實測，首節將利用實驗模態分析結果驗證本模組之可靠性，末節將以設計 A4 音階響鈴板為例，說明本模組於響鈴板設計之過程與邏輯。

### 4.1 響鈴板振動自動化分析模組之驗證

實驗模態分析可取得結構之模態參數，包含自然頻率、模態振型與阻尼比，本節將實驗模態分析取得之阻尼比輸入模組，並以游標卡尺量測 F4 音階響鈴板之各項尺寸，接著輸入其材料參數，最後以模組進行

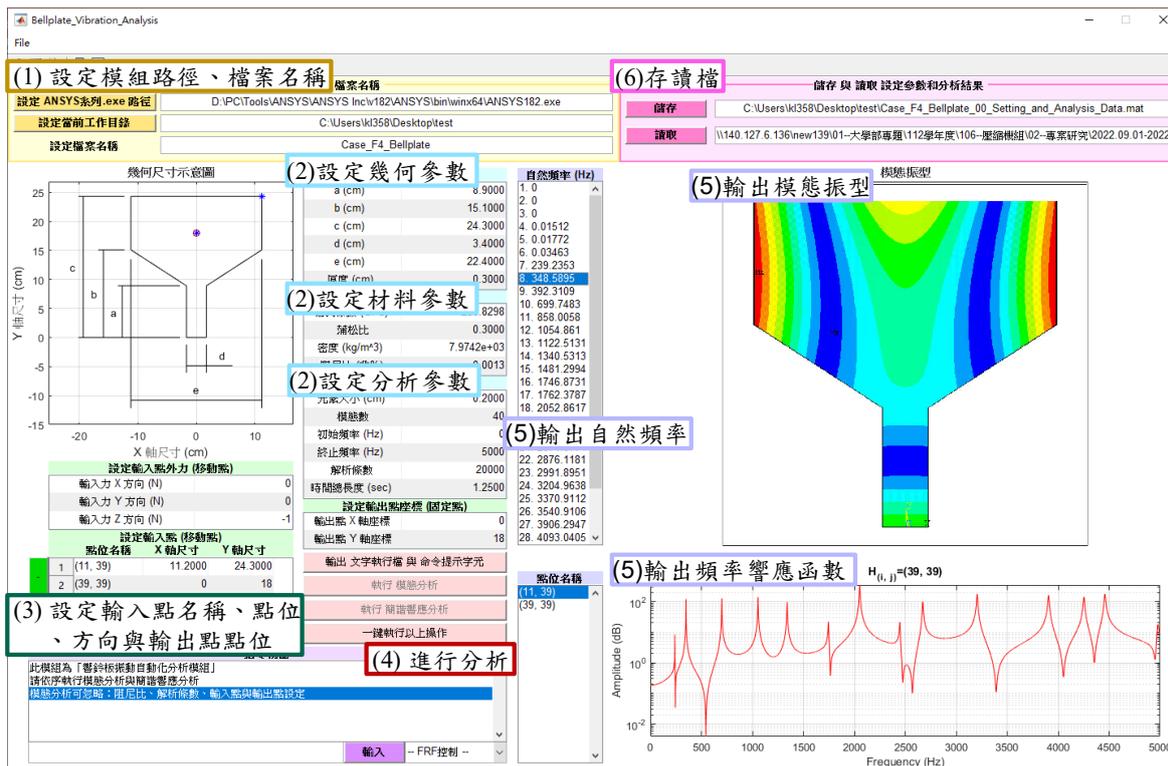


圖 3 響鈴板振動自動化分析模組介面圖

理論模態分析與理論簡諧響應分析，取得理論模態參數。

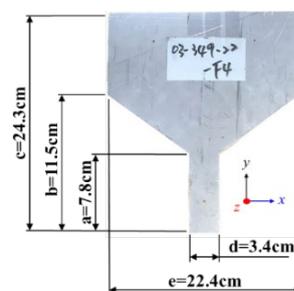
取得理論模態參數後與實驗模態參數比較，並以聲音量測系統進行頻譜分析取得聲音頻譜，以得知發聲頻率與簡諧倍頻音關係，並由頻率誤差判斷理論分析之合理性，藉此驗證模組之理論分析結果是否正確。

圖 4 為 F4 音階響鈴板，圖 4(a) 為實際結構，為 F4 音階響鈴板之幾何尺寸與基音頻率，圖 4(b) 為佈點規劃，共 77 點，39 號點為 F4 音階響鈴板之中間點，佈點方法為透過理論模態分析取得理論模態振型，解讀其物理意義後規劃，其中響鈴板之演奏方式為敲擊正中間，故將 39 號點作為實驗量測點。

使用激音槌敲擊響鈴板，利用精密麥克風量測可取得響鈴板之聲音頻譜，可由其中得知響鈴板之發聲頻率、音階與簡諧倍頻的數量，圖 5 為實驗量測架設圖，首先將 F4 音階響鈴板以棉繩懸吊，模擬自由邊界，使用激音槌敲擊響鈴板之 39 號點，接著以精密麥克風 (130E20-LW03326) 量測響鈴板之 39 號點的聲音輻射訊號，為避免聲音訊號受環境變數影響，麥克風距離響鈴板約 10 公分，並以訊號擷取卡 (NI-9234) 將類比訊號轉換為數位訊號，最後以客製化振動噪音量測系統將數位訊號轉換成時間點數與振幅，單位為電壓 (Volt)。

由聲音量測系統進行頻譜分析取得聲音頻譜，其中有效頻率為 5000Hz，頻率解析條數為 20000，頻率解析度為 0.25Hz，表 1 為 F4 音階響鈴板之自然頻率總表，左欄至右欄依序為模態數、理論自然頻率、聲音頻譜之峰值頻率、頻率比與頻率誤差，兩者頻率平均誤差為 1.03%，方均根誤差為 1.47%，頻率比為基

音頻率與其它峰值頻率之比值，紅字表示模態具簡諧倍頻音特性，二倍頻模態 F04、三倍頻模態 F06 與基音頻率模態 F02 之頻率比呈整數倍關係，而基音頻率為 348.59Hz，與 F4 標準音階頻率 349.23Hz，誤差為 -0.18%，說明分析模型等效於實際結構。



(a) 實際結構



(b) 佈點規劃

圖 4 F4 音階響鈴板

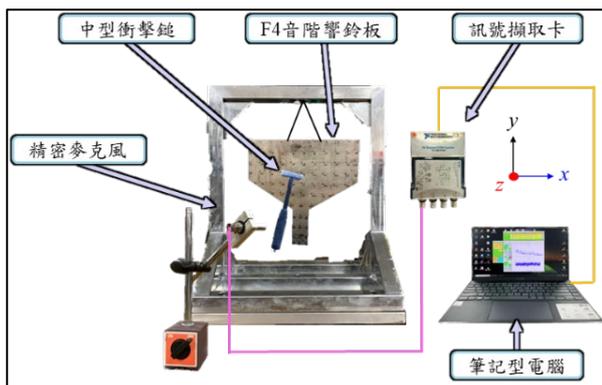


圖 5 實驗量測架設圖

表 1 F4 音階響鈴板之自然頻率總表

模態數	自然頻率(Hz)		頻率比	頻率誤差
	F4=349.23Hz			
	基音誤差: -0.18%			
	理論	實驗		
F01	239.24	241.49	0.686	-0.93%
F02	348.59	348.30	1.000	0.08%
F03	392.31	391.26	1.125	0.27%
F04	699.75	688.47	2.007	1.64%
F05	858.01	856.82	2.461	0.14%
F06	1054.86	1030.97	3.026	2.32%
F07	1122.51	1094.82	3.220	2.53%
F08	1340.53	1322.38	3.846	1.37%
F09	1481.30	1455.89	4.249	1.75%
F10	1746.87	1727.56	5.011	1.12%

圖 6 為 F4 音階響鈴板理論與實驗之頻率響應函數比對，上方為理論模態分析得到之自然頻率與模態振型，模態振型上方 F01 為理論分析之第一個自然頻率，下方 S01 為實驗量測之第一個聲音頻率，中間的折線圖為理論  $H_{(39, 39)}$ ，X 軸為頻率(Hz)，Y 軸為重力加速度，單位為 g/N，下方的折線圖為實驗得到之  $G_{pp}(f)$ ，X 軸為頻率(Hz)，Y 軸為聲音壓力位準，單位為 dB。

以黑框表示之模態振型為主要發聲頻率之模態，其中 F02 為全域彎曲模態，左右兩側與柄部具有較大振幅值，且均向中間彎折，屬於基音頻率對應之模態振型，F04 同為全域彎曲模態，以橫向振動為主，是為二倍頻模態，F06 與 F02 模態相似，周圍呈較大振幅值且均朝中間彎折，為三倍頻模態，其餘則為泛音頻率對應之模態振型。

#### 4.2 A4 音階響鈴板之應用

本小節將進行響鈴板之設計分析案例應用，目標音階為 A4，利用振動自動化分析模組進行設計分析，圖 7 為 A4 音階響鈴板之數學模型，其幾何參數是根據 F4 音階響鈴板之音階頻率、幾何尺寸與材料參數間之關係推算出，因音階頻率與平板厚度成正比，與幾何尺寸之關係為平方成反比，及音階頻率與楊氏係數

之關係為根號成正比，與密度之關係為根號成反比。

確認完 A4 音階響鈴板之幾何尺寸，即可進入振動自動化分析模組進行理論分析，採用與 F4 音階響鈴板相同之材料參數和分析參數，其中僅需調整響應點位置與欲求解的模態數量與有效頻率，此案例同樣採六個模態振型作為探討，圖 8 為 A4 音階響鈴板之分析結果人機介面，輸入以上參數後，可成功進行分析。

為了驗證 A4 音階響鈴板之分析正確性，表 2 為 A4 音階響鈴板之理論自然頻率表，由左欄至右依序為模態數、理論自然頻率(Hz)與頻率比，可以發現 A4 音階響鈴板之基音頻率 439.06Hz，與 A4 標準音階頻率 440.00Hz，誤差為 0.21%，於合理誤差範圍內，紅字同 F4 音階響鈴板具有簡諧倍頻音，表示透過 F4 音階響鈴板之音階頻率、幾何尺寸與材料參數做設計變更之方法是正確的。

另外以主要發聲頻率及該頻率之重力加速度頻率響應函數峰值振幅，確認其物理意義的明確性，並比較與 F4 音階響鈴板之差異，圖 9 為 A4 音階之理論頻率響應函數圖，上方為自然頻率與對應之模態振型，0~2500Hz 中共有 6 個自然頻率與 6 個反共振點，且每個峰值皆有相對應之模態振型，其均與圖 6 之 F4 音階響鈴板模態振型相同，理論  $H_{(39, 39)}$  與理論  $G_{pp}(f)$  之峰值皆有對應，表示自然頻率數值與聲音頻率相同，其中雖聲音頻譜受傅立葉轉換而有些許小峰值，屬於假象波，不影響發聲頻率的表示，即可忽略。

由以上證明該模組具有正確分析響鈴板之模態參數、頻率響應函數與聲音合成的功能，並可用於設計開發不同音階之響鈴板。

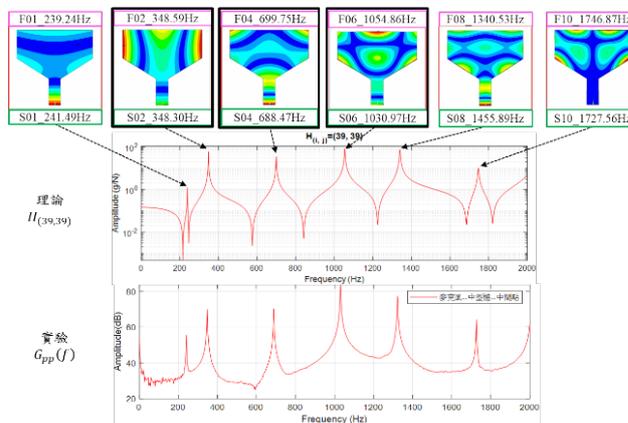


圖 6 F4 音階響鈴板理論與實驗之頻率響應函數比對

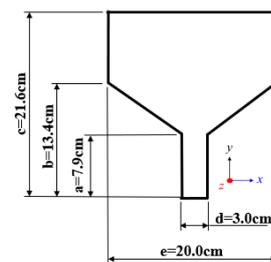


圖 7 A4 音階響鈴板之數學模型

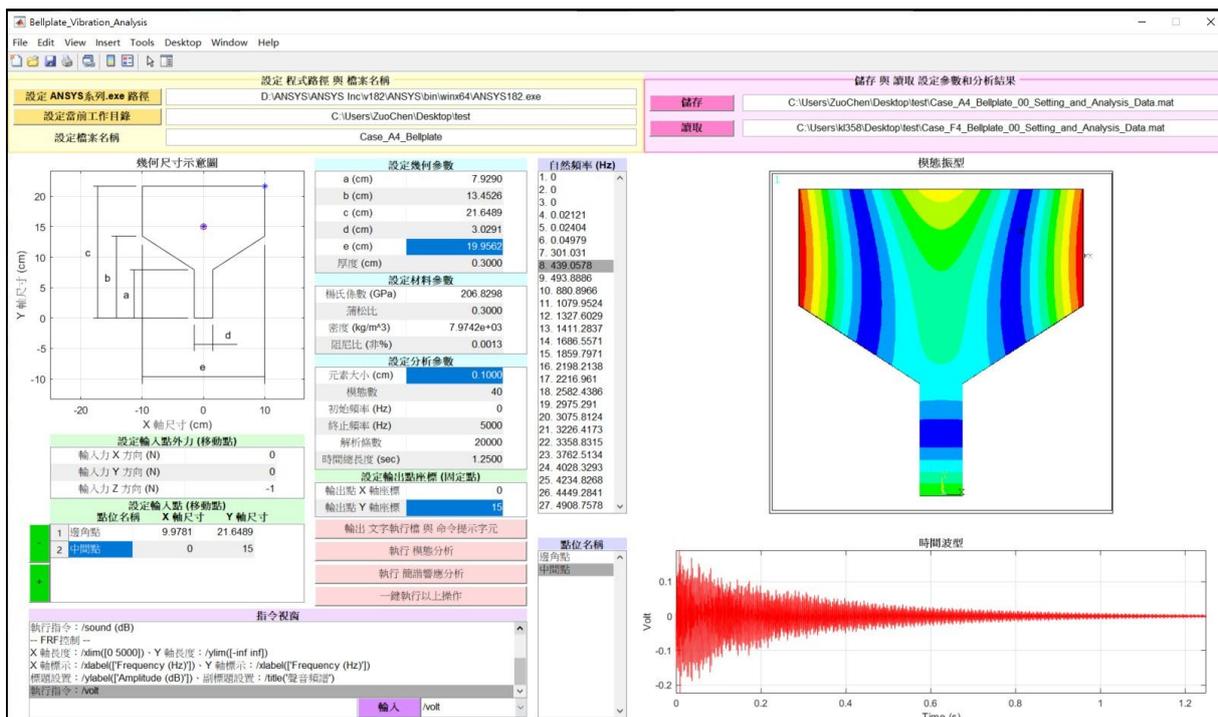


圖 8 A4 音階響鈴板之分析結果人機介面

表 2 A4 音階響鈴板之理論自然頻率表

模態數	理論自然頻率(Hz)		頻率比
	A4=440.00Hz 基音誤差：0.21%		
A01	301.03	0.686	
A02	439.06	1.000	
A03	493.89	1.125	
A04	880.90	2.006	
A05	1079.95	2.460	
A06	1327.60	3.024	
A07	1411.28	3.214	
A08	1686.56	3.841	
A09	1859.80	4.236	
A10	2198.21	5.007	
A11	2216.96	5.049	

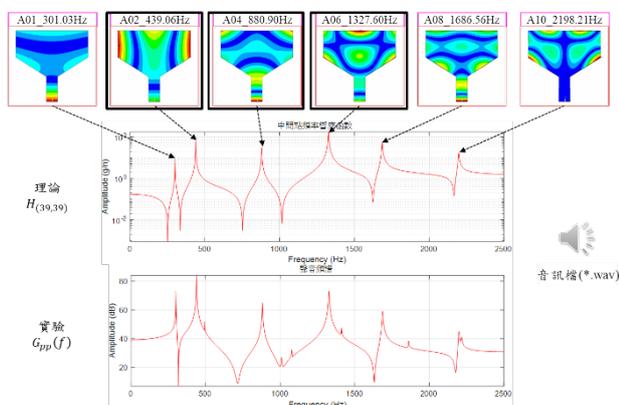


圖 9 A4 音階之理論頻率響應函數圖

## 5. 結論

為快速設計與分析具有簡諧倍頻音之不同音階響鈴板，本文針對 F4 音階響鈴板開發振動自動化分析模組，採用 MATLAB 與 ANSYS 進行人機介面建立與振動分析之串聯，並以實驗結果驗證可靠性，結果顯示其主要發聲頻率皆於合理誤差範圍內，進而應用於不同音階之設計案例，以 A4 音階為例，透過推算取得分析所需參數，進行求解與驗證，結果表示其誤差與簡諧倍頻音之特性皆與 F4 音階響鈴板相符，由此確定該模組可應用於響鈴板之開發與設計變更，本文獲致結論如下：

- (1) 藉由 MATLAB 串聯 ANSYS 開發響鈴板振動自動化分析模組，以參數化方式進行設定，並於後台進行求解，實現自動化分析。
- (2) 使用響鈴板振動自動化分析模組對 F4 音階響鈴板進行振動分析，並與實驗結果做比對，結果發現其主要發聲頻率皆於合理誤差範圍內，以此確定該模組之可靠性。
- (3) 對 A4 音階進行響鈴板進行設計分析案例應用，在僅有音階頻率與 F4 音階響鈴板之幾何尺寸與材料參數的情況下，完成 A4 音階響鈴板之振動分析，並成功驗證其誤差與簡諧倍頻音之正確性。
- (4) 此程式模組可以快速自動完成模態分析、簡諧響應分析與聲音合成分析，未來可應用此程式於響鈴板之開發與設計變更。

## 6. 參考文獻

- [1] 王栢村, 吳盈輝, 陳伯晉, 蔡曜光, 蘇秉翔, 「具簡諧倍頻音之響鈴板、具有該響鈴板的擊樂



器及該響鈴板的設計方法」，*中華民國發明專利*，高雄、台灣，I762856，2022。

- [2] 王栢村，[音階標準頻率，振動噪音產學技術聯盟，振動噪音科普專欄；2018](#)
- [3] B. T. Wang, P. C. Chen, Y. G. Tsai and Y. H. Wu, "Development of Pentagonal Plates with Harmonic Sound as Percussion Instrument," *26th International Congress on Sound and Vibration (ICSV26)*, Montreal, Canada, no. 458, 2019.
- [4] 王栢村，[結構的幾何形狀尺寸如何影響結構的「自然頻率」？](#)，振動噪音產學技術聯盟，振動噪音科普專欄；2019
- [5] 王栢村，[結構的材料參數如何影響結構的「自然頻率」？](#)，振動噪音產學技術聯盟，振動噪音科普專欄；2019
- [6] G. C. Tsai, B. T. Wang, S. Lee and Z. W. Chang, "Study of Vibration and Sound Characteristics of Copper Gong," *J. Chin. Inst. Eng.*, vol. 28, no. 4, pp. 713-719, 2005.
- [7] C. M. Ramesha, K. G. Abhijith, A. Singh, A. Raj and C. S. Naik, "Modal Analysis and Harmonic Response Analysis of a Crankshaft," *Int. J. Emerging Technol. Adv. Eng.*, vol. 5, no. 6, pp. 323-327, 2015.
- [8] Y. Yu, S. Zhang, H. Li, X. Wang and Y. Tang, "Modal and Harmonic Response Analysis of Key Components of Ditch Device Based on ANSYS," *Procedia. Eng.*, vol. 174, pp. 956-964, 2017.
- [9] J. Yu, L. Xiang, W. Yang, C. Li, Y. Deng and Q. Yao, "Modal and Harmonic Response Analysis of a Rolling Bearing Coupled by Rigid and Flexible Materials," *Mater. Express.*, vol. 9, no. 9, pp. 1017-1024, 2019.
- [10] D. Ahiwale, H. Madake, N. Phadtare, A. Jarande and J. Deepak, "Modal Analysis of Cracked Cantilever Beam Using ANSYS Software," *Mater. Today. Proc.*, vol. 56, part 1, pp. 165-170, 2022.
- [11] 張鵬，劉晨雨，曹宇晴，「基於Matlab GUI的風洞信號小波分析處理軟體」，*兵工自動化*，第37卷，第1期，第61-63頁，2018。
- [12] 王栢村，黃彥綸，吳盈輝，「圓盤結構振動自動化分析模組之開發與應用」，*機密機械與製造科技期刊*，第12卷，第1期，第1-10頁，2022。
- [13] H. B. Brahim and E. C. Ifeakor, "Intelligent and Perceptual-Based approach to Musical Instruments Sound Design," *Expert. Syst. Appl.*, vol. 39, pp. 6476-6484, 2012.
- [14] 鄧小偉，「民族樂器古箏的結構振動聲學特性分析」，碩士論文，上海交通大學工程力學系，上海、中國，第1-90頁，2015。
- [15] 王栢村，[如何應用FCAIVCI及FSMIVCI於響鈴板的設計分析與實驗驗證？](#)，振動噪音產學技術聯盟，振動噪音科普專欄；2021

## Plate Vibration Analysis

Bor-Tsuen Wang<sup>1</sup>, Yu-Hao Pan<sup>1</sup>, Yu-Xun Qiu<sup>1</sup>,  
Zuo-Chen Chao<sup>1</sup>, Yu-Chien Xue<sup>1</sup>, Mao-Chuan 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>Machinery Division, National Nei-Pu Senior  
Agricultural-Industrial Vocational School

### ABSTRACT

The bell plate is a percussion instrument made of stainless steel. A series of bell plates with different musical scales have been developed, and all of them have 2 times or 3 times harmonics design. In order to conduct design analysis quickly, this paper uses the Graphical User Interface (GUI) of MATLAB to develop an automatic analysis program, and combines ANSYS finite element analysis (FEA) software to perform modal analysis and harmonic response analysis on the bell plate. Firstly, the basic structure of the bell plate and the correlation between its percussion sound characteristics and vibration modes are explained. In order to design and analyze the bell plate, it is necessary to conduct modal analysis to obtain the vibration modes of the structure, including natural frequencies and mode shapes. In addition, harmonic response analysis is also required to obtain the frequency response function of the structure. In response to the design and analysis requirements of the shape and size of the bell plate, the GUI of the vibration analysis automation program was planned and developed. Through the GUI, one can set the geometric dimensions, material parameters, FEA analysis options, etc. of the bell plate, and write it into the operation execution file of the ANSYS software in a parameterized manner. One can complete the vibration analysis of the bell plate without opening the ANSYS analysis software. In the program module, arbitrary design changes can be made according to different needs. This paper analyzes the structure of the F4 scale bell plate by using the automatic program module, and compares and verifies it with the experimental results. Results show that the program module can successfully and quickly complete the modal analysis and harmonic response analysis automatically. This procedure can be applied to the design modification of the bell plate in the future.

**Keywords:** bell plate, finite element analysis, modal analysis, harmonic response analysis, automation program, Graphical User Interface (GUI)

## Development and Application of Automation Program for Bell

