

小提琴結構振動模態與空氣音場模態之解析

王栢村¹、龍暉²、溫儒琳¹、楊彥哲¹、馬凱齡¹

¹ 國立屏東科技大學機械工程系

² 國立屏東科技大學木材科學與設計系

科技部計畫編號：MOST 107-2221-E-020-018

摘要

小提琴屬於弓弦樂器，其發聲方式為拉弓與琴弦接觸摩擦產生琴弦振動，進而傳遞至琴橋，由琴橋傳遞振動到接觸之面板再傳遞到音柱及共鳴箱，傳遞之振動與共鳴箱內外之空氣波動產生出聲音。本文著重在探討小提琴結構與空氣耦合的分析，採用有限元素分析對僅單獨琴身結構進行模態分析，以及考慮空氣包覆小提琴共鳴箱結構之聲振耦合系統分析，可獲得模態參數，包括自然頻率及模態振型。探討在自由邊界下之小提琴結構與空氣耦合之振動情況，針對有無空氣音場對結構振動之影響。由單獨的小提琴結構系統的結構模態分析，以及空氣結構耦合系統的音場模態分析，可以了解小提琴與空氣耦合系統的模態類型與特性，包括：(1)兩種系統有相互對應的結構振動模態：除了結構位移模態振型，也可由音場分析觀察解析對應的空氣音場模態之聲音壓力模態振型。(2)沒有結構振動模態的音場模態：例如在低頻處有兩個僅空氣壓力分佈於腔體內部的共鳴箱腔體模態，以及共鳴箱外部的空氣音場模態，此音場模態在純結構之模態分析是無法解析。本文對小提琴結構與空氣結構系統耦合之分析，利用有限元素分析軟體，可求得理論之自然頻率與模態振型，更嘗試解析實驗難以量測的空氣腔體模態及外部空氣音場模態之聲音壓力模態振型。未來可進一步解析小提琴聲音品質的探討，希望有助於小提琴之設計與開發。

關鍵字：有限元素分析、聲振耦合系統分析、模態分析、自然頻率、模態振型。

1. 前言

古人云「工欲善其事，必先利其器」欲演奏一首好的曲子，若能搭配一把好琴，勢必事半功倍，自古音色絕美的小提琴其特點在於渾厚的音色及寬廣的音域，普遍的小提琴皆為手工製作，每把琴音色具有獨特性，因此也有聲音高低優劣之差異，在追求小提琴完美音色之前，需了解結構與其發聲機制之關聯性，研究影響其聲音之振動特性，王等人[1]對拇指琴樂器進行聲音量測分析與有限元素分析，並探討拇指琴發聲與振動的關聯性及彈奏時之聲音特性。針對演奏方式不同探討聲音特性，王等人[2]透過聲音量測分析進行小提琴之聲音特性探討，並探討拉奏與撥奏的發聲頻率差異是否相同，結果顯示兩者差異主要為聲

音持續時間的長短以及衰減率之差異。Gough[3]探討拉動弓弦的振動對小提琴聲音之影響，利用有限元素分析建立模型，並在自由邊界下做實驗模態分析，求得模態參數，研究有無拉弓之振動模態，並比較拉弓的方向及位置的不同，弓弦的振動對於小提琴聲音振動之影響。

探討音箱結構之振動分析，王與蘇[4]使用有限元素分析與實驗模態分析，對木吉他弦與電吉他弦進行模態振型之驗證，藉上述方法得到兩種吉他弦撥動之聲音頻譜，並觀察吉他弦的主頻率、聲音頻譜特性及振動模態之關聯性，也針對有、無音箱對吉他弦聲音之影響做差異性探討。王與黃[5]應用有限元素分析以及實驗模態分析兩種方法，對含琴柄及共鳴箱之整體吉他結構進行分析，以求得吉他之振動動態分析，可作為吉他設計及音響特性分析之參考。

藉由改變結構外型之設計，研究其對聲音振動之影響，Torres and Boullosa[6]使用雷射振動測量儀量測吉他面板上的琴橋形狀，呈現了兩種不同琴橋配置對古典吉他頂板振動模態的影響，結果顯示特定形狀琴橋對 300Hz 以上的面板模態振型具有相當大的影響。針對小提琴不同材料參數對振動特性之影響，江[7]利用有限元素軟體 ANSYS 進行小提琴的有限元素分析，探討改變面、背板材料參數對小提琴品質的影響，結果顯示改變面、背板的木材纖維方向對小提琴之模態特性具有一定的影響。

針對結構與空氣結構耦合之分析，王等人[8]為了解銅鐘聲音傳遞的聲音壓力位準與聲音指向性，並探討銅鐘空氣耦合對結構自然頻率的影響，針對銅鐘進行模態分析與空氣結構耦合系統之簡諧響應分析。探討音箱結構的腔體模態之自然頻率與其結構之共振頻率可以達到渾實飽滿的音色，王等人[9]對拇指琴樂器進行聲音量測分析與有限元素分析，透過變更音箱孔結構探討腔體模態是否因音箱孔徑大小而影響空氣結構耦合系統之模態參數。

綜合上述觀點，欲了解小提琴結構與空氣耦合之聲音壓力分佈的影響，需做兩種系統分析，分別為結構系統分析和結構與空氣耦合系統分析，因此，本文的目的為針對小提琴結構系統分析和結構與空氣耦合系統分析進行探討，主要目標如下所示：

1. 對小提琴做結構系統分析，獲得結構之模態參數，包括模態振型、自然頻率，並比對音場分析之結構的模態參數，觀察兩種系統並解析對應的空氣音場模態之聲音壓力模態振型。

2. 找出沒有結構對應的音場模態，應是空氣壓力僅分佈於腔體內部的共鳴箱內之腔體模態，以及共鳴箱外部的空氣音場模態，此音場模態在純結構之模態分析是無法解析的。

2. 小提琴之結構與音場模擬分析

2.1 結構系統分析

本文採用有限元素分析 COMSOL 對小提琴做聲振耦合分析，首先，進行結構系統之模態分析，圖 1 小提琴結構之分解圖[7]，可以看到小提琴構成之各部件，其中選擇幾個主要的結構做分析模型，包括琴面、背板以及側板組合的琴身；指板、漩渦狀琴頭與弦軸組合的琴頭；並且在琴面上刻出兩個對稱外型之 *f* 孔以及裝置琴橋在兩者中間，利用 SolidWorks 依照上述琴身外觀進行繪製，建立圖 2(a) 小提琴之數學模型，為一把約長 692.5 mm、寬 238 mm、高 47.5 mm 的小提琴。將模型載入到分析軟體中，並設定小提琴結構的木材材質為美國紅欖樹(American red oak)，為了分析的準確性與可靠性，採用實際結構之材料參數，選用木材密度為 630 kg/m^3 、楊氏係數為 12.4 GPa、蒲松比 0.3。在自由邊界和無接觸介面的情況下，分析小提琴特徵頻率的模態，圖 2(b) 小提琴的有限元素模型，分割元素的大小為預設值三角形較細化分割，接著對小提琴進行模態與簡諧響應分析。

在模態分析設定上，模態數求解 20 個模態，設立完後便得到結構的模態參數，包括自然頻率、模態振型；在簡諧響應分析設定上，頻寬設定為 2000 Hz，取樣點數為 400 個，等向結構損失係數為 0.0087，圖 3 為小提琴受力方向與加速度計黏貼位置，輸入一個大小為 1N 向下之力在琴橋上，進行簡諧響應分析，獲得小提琴結構之頻率響應函數(Frequency response function, FRF)。

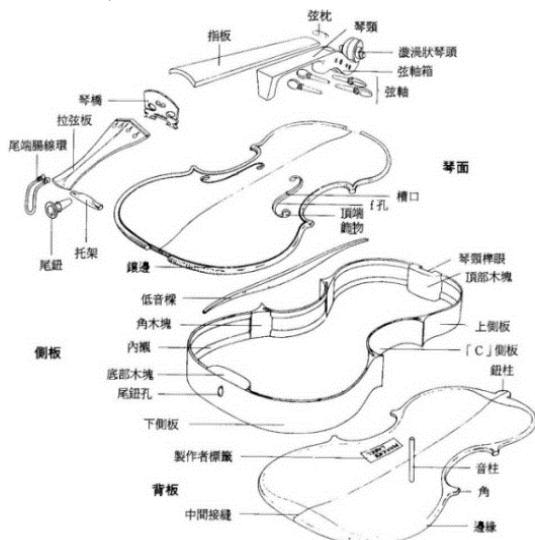


圖 1 小提琴結構之分解圖[7]

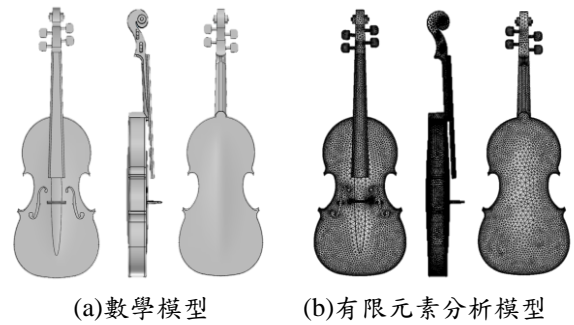


圖 2 小提琴結構模型

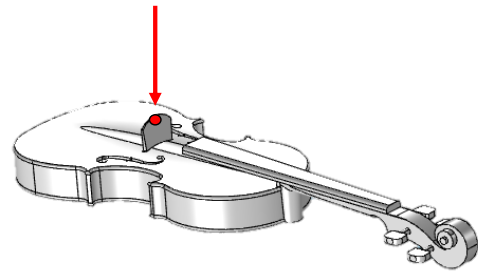


圖 3 小提琴受力方向與加速度計黏貼位置

2.2 結構與空氣耦合系統分析

利用有限元素 COMSOL 對小提琴做結構與空氣耦合之振動分析，將 SolidWorks 繪製的圖 2 小提琴之數學模型載入軟體後，圖 5 (a) 為小提琴空氣音場數學模型，距離半徑為 800mm 之大小，建立一個包覆小提琴的空氣音場，將小提琴結構與空氣球體耦合為一件，設定小提琴木材材質為美國紅欖樹(American red oak)，密度為 630 kg/m^3 、楊氏係數為 12.4 GPa、蒲松比 0.3，材料參數均與結構系統分析相符；球體材料為空氣元素(air)，外部空氣設定為自由音場表面(即為無限音場)，邊界條件為自由邊界且接觸介面為結構模型與空氣模型耦合，對小提琴進行聲固交互作用的聲振耦合分析。圖 5 (b) 小提琴與空氣元素之有限元素分析模型，元素分割的大小為三角形較細化是一種預設值的分割，在多重物理量的情況下，接著對小提琴與空氣進行模態分析與簡諧響應分析。

在模態分析設定上，模態數求解 200 個聲音模態，分析後便得到結構與空氣耦合的模態參數，包括自然頻率、模態振型；在簡諧響應分析設定上，頻寬設定為 2000 Hz，取樣點數為 400 個，等向結構損失係數為 0.0087，圖 6 結構與空氣耦合簡諧分析示意圖，輸入一個施力大小為 1N 向琴身之力在琴橋上，加速度計黏貼在琴橋中間的位置，麥克風架設在空氣球體半徑上距離琴身 200 mm、400 mm、600 mm 為三個麥克風位置，進行簡諧響應分析，獲得小提琴結構與空氣之頻率響應函數。

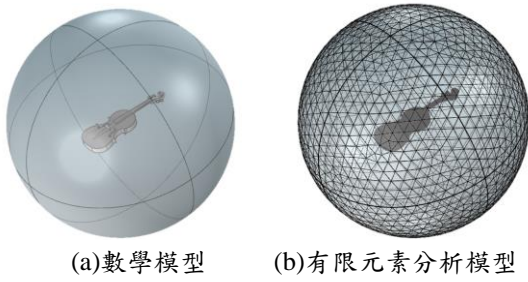


圖 5 小提琴空氣音場模型

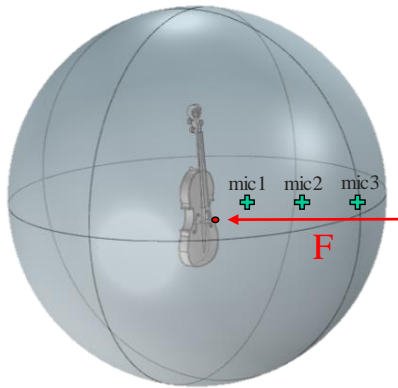


圖 6 結構與空氣耦合簡諧分析示意圖

2.3 結構與空氣振動分析流程

圖 7 為小提琴有限元素分析系統流程圖，將小提琴分析劃分為兩種系統分別為：結構系統分析(以下稱結構分析)、結構與空氣耦合系統分析(以下稱音場分析)。對結構與音場做振動分析設定，做模態分析可以求得理論之結構的模態參數，包括自然頻率與模態振型；做簡諧響應分析可以求得頻率響應函數。接著將結構分析與音場分析所獲得的模態參數進行比較，觀察物理意義是否合理對應。做簡諧分析得到頻率響應函數，比較是否有僅在結構振動的振動模態或者僅在空氣振動的聲音模態。

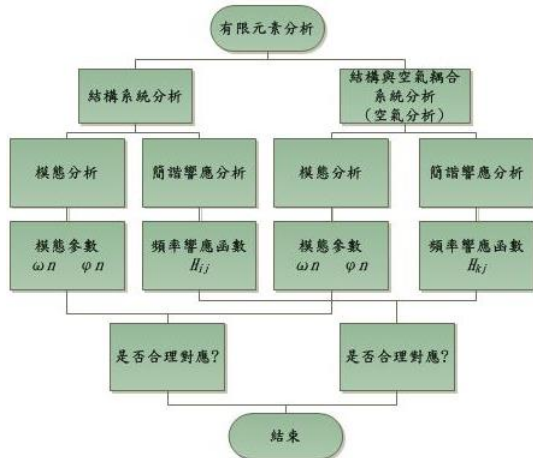


圖 7 小提琴有限元素分析系統流程圖

表 1 小提琴結構模態振型總表

結構系統模態分析(對數化)							
mode	F _S -07	F _S -08	F _S -09	F _S -10	F _S -11	F _S -12	F _S -13
自然頻率 (Hz)	185.9	254.7	267.6	610.4	722.7	772.4	843.5
模態振型							
物理意義	Global mode 1st Z-bend	Global mode 1st X-bend	Local mode 指板 Z-bend	Local mode 1st 面擺動	Local mode 指板 X-bend	Global mode 2nd Z-bend	Global mode 1st Y-Torsional
mode	F _S -14	F _S -15	F _S -16	F _S -17	F _S -18	F _S -19	F _S -20
自然頻率 (Hz)	866.8	923.4	10071.0	1081.1	1176.4	1212.0	1376.0
模態振型							
物理意義	Global mode 3rd Z-bend	Local mode 琴頸 Y-Torsional	Local mode 2nd 面擺動	Global mode 4th Z-bend	Global mode 2nd X-bend	Global mode 5th Z-bend	Global mode 3rd X-bend

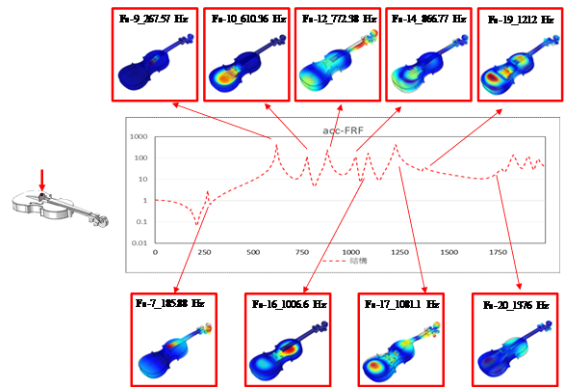


圖 8 小提琴結構之模態域與響應函數關係比對

3. 僅小提琴結構之振動特性探討

3.1 結構之振動模態分析

本小節主要說明單純結構表 1 為小提琴結構模態振型總表，可以看到模態數目為 20 個振動模態，進行小提琴分析為自由邊界環境下，前 6 個模態為剛性體模態，因此不再討論範圍內；因為小提琴為多個組件組合而成，在振動模態特性上預期會有局部 Local mode、整體 Global mode 的擺動模態，因此由小提琴結構模態振型總表得知，此分析結果也具有相同的現象，表示小提琴結構模態分析模擬方法合理。

3.2 結構之振動簡諧響應分析

簡諧響應分析可獲得結構頻率域之頻率響應函數，圖 8 為小提琴結構之模態域與頻率域關係比對圖，由頻率域與模態域的相互比對可確認模態振型皆有對應到 FRF 峰值頻率，由下圖 FRF 圖顯示，其 x 軸為頻率、y 軸為對數單位(N/m²)，其中幾個較明顯的峰值皆與模態分析中的振動模態相互對應，代表分析設定合理。

表 2 小提琴結構、音場分析的模態振型總表

音場模態分析					
mode	Fsa-10	Fsa-12	Fsa-13	Fsa-14	Fsa-23
自然頻率(Hz)	185.56	252.15	254.97	266.53	396.95
模態振型					
模態振型					
mode	Fsa-47	Fsa-83	Fsa-86	Fsa-145	Fsa-192
自然頻率(Hz)	612.86	722.83	769.69	916.52	1017.4
模態振型					
模態振型					

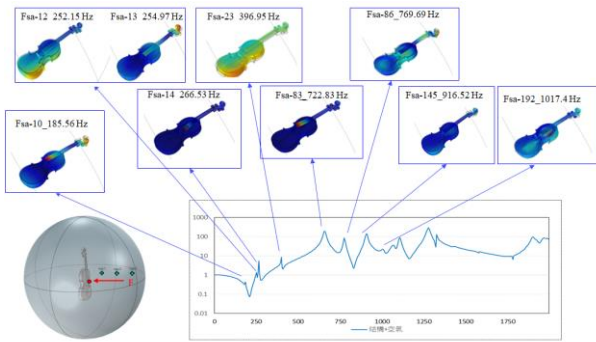


圖 9 小提琴結構與空氣耦合系統之模態域與響應函數關係比對

4. 小提琴結構與空氣耦合之振動特性探討

4.1 音場結構的模態分析

本節主要探討音場的模態分析中的結構模態與聲音模態振型比對，表 2 小提琴結構、音場分析的模態振型總表，由表中可以看到結構模態與聲音模態皆有對應。在音場分析中的聲音模態大部分皆在面板、背板上的較寬的地方，僅有少部分在琴頸的部分，代表小提琴主要的發聲位置在面板與背板上。

4.2 音場的簡諧響應分析

簡諧響應分析的分析目的為模擬結構受外力激振時，在頻率域的頻率峰值及振幅。圖 9 為小提琴結構與空氣耦合系統之模態域與頻率域關係比對圖，由下圖 FRF 圖顯示，其 x 軸為頻率、y 軸為對數單位 (N/m²)，簡諧響應分析會與模態分析之自然頻率互相吻合。其模態分析與簡諧響應分析之結果對應到 1017Hz，自然頻率較大的模態振型與空氣系統的耦合較為複雜，導致不好判斷其模態參數是否有互相吻合。而圖中較明顯的幾個峰值最大的峰值頻率 1276Hz，顯示此頻率為小提琴在空氣系統耦合時主要的發聲頻率。

表 3 小提琴結構、音場分析自然頻率比較總表

FEA(結構)模態分析		FEA(空氣結構)模態分析		自然頻率差異 (Hz)	自然頻率差異 (%)
mode	自然頻率 (Hz)	mode	自然頻率 (Hz)		
Fs-07	185.88	Fsa-10	185.56	0.32	0.17
Fs-08	254.72	Fsa-13	254.97	-0.25	-0.10
Fs-09	267.57	Fsa-14	266.53	1.04	0.39
Fs-10	610.36	Fsa-47	612.86	-2.50	-0.41
Fs-11	722.65	Fsa-83	722.83	-0.18	-0.02
Fs-12	772.38	Fsa-86	769.69	2.69	0.35
Fs-13	843.51	--	--	--	--
Fs-14	866.77	--	--	--	--
Fs-15	923.37	Fsa-145	916.52	6.85	0.74
Fs-16	1006.60	Fsa-192	1017.40	-10.80	-1.07

表 4 結構、音場分析自然頻率與模態振型比對總表

FEA結構振動之模態分析			FEA音場振動之模態分析			
自然頻率	結構模態振型	物理意義	自然頻率	結構模態振型	音場模態振型	物理意義
Fs-07_185.88Hz		Global mode 1st Z-bend	Fsa-10_185.56 Hz			(Ie)
--	--	--	Fsa-12_252.15 Hz			(III)
Fs-08_254.72Hz		Global mode 1st X-bend	Fsa-13_254.97 Hz			(II&IIe)
Fs-09_267.57 Hz		Local mode 指板Z-bend	Fsa-14_266.53 Hz			(II)
--	--	--	Fsa-23_396.95 Hz			(III)
Fs-10_610.36Hz		Local mode 1st面擺動	Fsa-47_612.86 Hz			(Ie)
Fs-11_722.65 Hz		Local mode 指板X-bend	Fsa-83_722.83 Hz			(II&IIe)
Fs-12_772.38Hz		Global mode 2nd Z-bend	Fsa-86_769.69 Hz			(Ie)
Fs-13_843.51 Hz		Global mode 1stY-Torsional	--	--	--	--
Fs-14_866.77Hz		Global mode 3rd Z-bend	--	--	--	--
Fs-15_923.37Hz		Local mode 琴頸Y-Torsional	Fsa-145_916.52 Hz			(Ie)
Fs-16_1006.60 Hz		Local mode 2nd面擺動	Fsa-192_1017.40 Hz			(Ie)

5. 小提琴結構振動與空氣結構振動之比較

5.1 結構、音場振動模態分析比較

本節主要在說明結構分析與音場分析模態參數之比較，表 3 為小提琴結構分析與音場分析自然頻率比較總表，其中結構分析之第 7 個模態的與音場分析第 10 個模態的振型相互對應，其分別的自然頻率為 185.88 Hz、185.56 Hz，頻率非常接近，自然頻率差異在 -1.07%~0.74% 以內，結果顯示結構分析與音場分析對應良好，其於的模態也有相同的趨勢。表 4 為結構分析與音場分析的自然頻率與模態振型比對總表，由表可以看到結構分析之振動模態的與音場分析之聲音模態的振型物理意義相同，代表其模態振型對應良好。而結構分析中，第 13、14 模態的自然頻率為 843.51 Hz、866.77 Hz 在音場分析中找不到相同物理意義之模態，表示結構的位移模態振型僅出現在小提琴結構上。在音場分析中第 12、23 模態頻率分別為 252.12 Hz、396.95 Hz，在結構分析上找不到模態振型物理意義相近且無位移之等高面，因此判斷此模態為空氣聲音壓力模態，是一種僅出現在音箱內部的腔體模態。

5.2 音場分析的聲壓模態分類方法

本小節將小提琴在音場分析下求得之聲音模態加以分類，以利後續討論空氣模態的物理意義，圖 10 為小提琴音場模態分類圖，討論說明如下：

1. 第一類、純結構的振動模態：結構與空氣耦合系統分析和結構系統分析比對相近之物理意義的模態振型、自然頻率，其模態參數數目會等於或小於結構系統分析的取樣模態數目。
2. 第二類、僅空氣波動之模態：在小提琴結構上無等高面位移，等高面聲音壓力位移只會出現在小提琴內部與外部之音場範圍內，並沒有結構上的結構位移模態振型。此類模態是一種向外部分發散之空氣模態，小提琴音箱內部出現這種模態，極有可能為腔體模態，此腔體模態來自亥姆霍茲共振(Helmholtz resonance)理論，指的是空氣在腔體中產生共振之現象，可以藉由音場分析來得知。
3. 第三類、結構與空氣耦合振動之模態：只要是非前兩項之模態分類，同時具有空氣音場模態的結構位移模態與聲音壓力位移模態，或是僅具有琴身內、外部空氣音場聲音壓力模態，皆為此分類之項目。

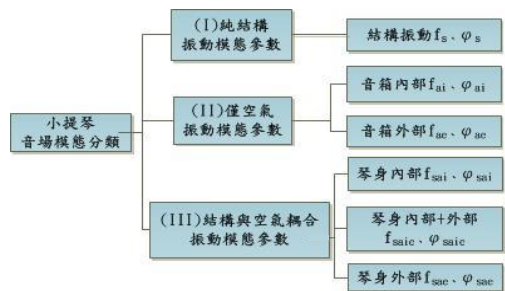


圖 10 小提琴音場模態分類圖

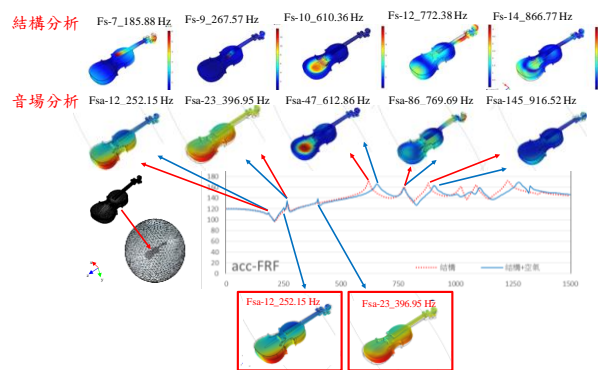


圖 11 結構的頻率響應函數與振動模態關係比對

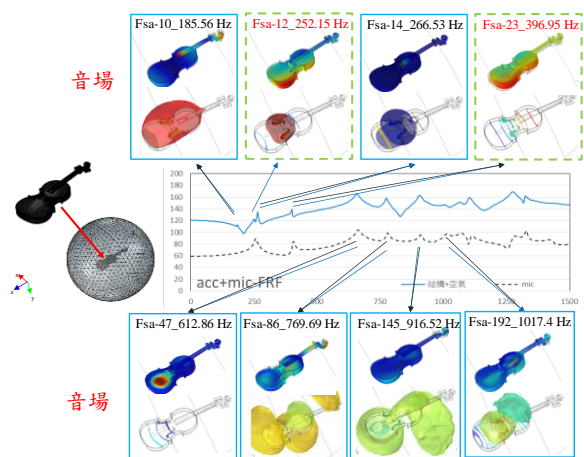


圖 12 音場分析的結構與聲音 FRF 的關聯性

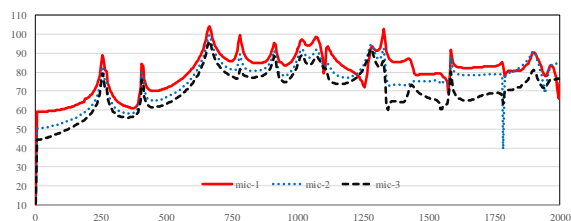


圖 13 麥克風不同位置聲音響應的差異比較

5.3 結構、音場簡諧響應分析比較

本節主要對結構與音場做模態振型與頻率響應函數比對，圖 11 為小提琴結構的頻率響應函數與振動模態關係比對，由圖中顯示 x 軸為頻率值(單位：Hz)、y 軸為分貝(單位：dB)，音場分析之 FRF 在自然頻率 252.15 Hz 及 396.95 Hz 有峰值，但在結構分析的 FRF 中是平滑無起伏峰值的，其原因可能是空氣元素在小提琴內部之音箱空間有聲音壓力的腔體模態，在音場分析中可以看到有兩個峰值是結構分析裡沒有的，判定其為第二類模態：僅空氣波動之模態，是由小提琴腔體內部發散的空氣模態。在結構模態分析中第 10 模態及音場分析中第 47 模態的模態振型之物理意義相近，但其對應的峰值誤差較大，推測為音場分析中空氣元素對結構的振動有所影響。其餘的結構分析與音場分析之頻率響應函數、模態參數均有良好對應。

對結構與空氣耦合做簡諧響應分析，圖 12 為音場分析的結構與聲音 FRF 的關聯性，由圖中可以得知麥克風的頻率響應函數與音場分析之波峰比對吻合，代表分析設定合理；在頻率 252.15 Hz 的音場分析中 FRF 有峰值，但麥克風量測的 FRF 並沒有對應到其峰值，其原因是在音場分析的空氣與結構耦合或外力施加在琴橋，造成在音場分析裡有響應，因此在聲音壓力的情況下該頻率是量測不到的；在麥克風 FRF 最後一個峰值，對應結構與空氣耦合 FRF 曲線並無峰值，因為在音場分析中，藉由麥克風量測到聲音壓力變化，在音場分析中看不見結構位移的模態，其模態為第二類：僅空氣波動之模態，而且是結構外部發散而來的，因此在結構與空氣耦合 FRF 並沒有出現該頻率；圖 13 為麥克風不同位置聲音響應的差異比較，利用不同麥克風的位置架設，觀察音場分析中 FRF 在相同自然頻率下，具有不同的峰值，其原因是空氣元素在傳遞聲音壓力時能量衰減，導致在小提琴外部的麥克風所量測的波峰值不相同，通常距離加倍會導致聲音壓力衰減 6 dB。距離小提琴較近的麥克風，在對應的頻率下具有較高的分貝峰值，因為距離小提琴越近的麥克風可以量測到較高的分貝數，代表分析設定合理。

6. 結論

本文對小提琴結構系統、結構與空氣耦合系統之模態分析、簡諧分析，利用有限元素分析軟體，可求得理論之自然頻率與模態振型，更嘗試解析實驗難以量測的空氣腔體模態及外部空氣音場模態之聲音壓力模態振型。藉由結構系統分析、結構與空氣耦合系統分析得出以下幾點結論：

1. 結構、音場分析之結構模態參數有良好對應，表示空氣對結構之振動特性影響甚微。
2. 經比對純結構模態分析與音場分析的自然頻率結果，進而得到音場分析所對應的結構與空氣振

動模態，經觀察其物理意義相近，表示結構與空氣模態有良好的關聯性。

3. 由上述結果與討論中提到，音場分析第三類型的振動模態唯空氣音場條件下僅有，表示欲瞭解小提琴整體的發聲機制，仍有需要探討空氣條件之影響。
4. 王等人[1]提及，內部腔體模態確實會影響樂器的發聲頻率，因此未來則可針對小提琴的內部腔體模態進行探討，做為樂器幾何設計優化的依據。
5. 音場分析中第 12 個模態自然頻率為 252.12 Hz、第 23 個模態之自然頻率為 396.95 Hz，兩者在結構模態分析裡頭皆找不到對應之模態參數，其振型僅在小提琴音箱內部做等高線位移，小提琴結構上並無位移之作動，因此合理解讀它為腔體模態。

7. 誌謝

感謝科技部研究計畫的經費補助，得以完成本研究，計畫編號：107-2221-E-020-018，特此致謝。

8. 參考文獻

1. 王栢村，黃柏翔，楊昶昱，吳盈輝，2018，「拇指琴之聲音特性探討」，2018 精密機械與製造科技研討會，屏東，論文編號：A032
2. 王栢村，張釗銘，楊昶昱，吳盈輝，2018，「小提琴拉弓演奏與撥奏之聲音特性探討」，第二十六屆中華民國振動與噪音工程學術研討會，新竹，論文編號：024
3. Gough, C. E., Violin Bow Vibrations, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 131, No. 5, pp. 4152-4163, 2012
4. 王栢村，蘇集銘，2006，「吉他弦之振動與聲音特性探討」，中華民國音響學會第十九屆學術研討會，台南，論文編號：A7
5. 王栢村，黃國棟，2004，「吉他之振動特性與模態分析」，中華民國音響學會第十七屆學術研討會論文集，高雄，第 197-205 頁
6. Torres, J. A., and Boullosa, R. R., Influence of the bridge on the vibrations of the top plate of a classical guitar, Applied Acoustics, Vol.70, pp. 1371-1377, 2009
7. 江家旂，2013，面板與背板的剛性對小提琴振動之影響，碩士論文，國立成功大學，台南
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，雲林，論文編號：A-01
9. 王栢村，黃柏翔，楊昶昱，吳盈輝，2018，「拇指琴音箱孔對琴片聲音之影響」，第二十六屆中華民國振動與噪音工程學術研討會，新竹，論文編號：025

Simulation of Violin Structural Vibration Modes and Air Acoustic Modes

Bor-Tsuen Wang¹, Way Long², Ru-Lin Wen¹,
Yan-Zhe Yang¹, Kai-Ling Ma¹

¹Department of Mechanical Engineering,

²Department of Wood Science and Design

National Pingtung University of Science and
Technology

MOST Project No. : MOST 107-2221-E-020-018

Abstract

The violin is a kind of string instrument. The sound generation mechanism is from the frictional vibration between the bow and string. The string vibration can then transfer the vibration energy through the bridge to the sound box that consists of top plate, back plate and the ribs. The sound radiation is due to the air pulsation around the sound box. This work aims to simulate the structure and air coupling of violin by finite element analysis (FEA). The violin structure-only system and the violin structure surrounded by air for vibro-acoustic coupling system are, respectively, considered to conduct modal analysis. With the use of FEA software, the system modes including natural frequencies and mode shapes can be obtained. The violin is in free boundary, and the air-structure coupling effect is included. From the violin structure-only system modal analysis and the air-structure system vibro-acoustic modal analysis, the system modal properties are examined and categorized as followings. (1) Structural vibration modes appear in both systems. Other than the structural displacement mode shape, the acoustic sound pressure mode shapes can be visualized to interpret its physical mechanism. (2) Acoustic sound pressure modes without structural vibration effect can be identified for two types of acoustics modes. One is interior cavity mode of sound box, and the other is the exterior air mode outside of sound box. These types of acoustic modes cannot be obtain in the structure-only system. This work applies FEA software to perform modal analysis on both structure-only and air-structure systems and obtain theoretical natural frequencies and mode shapes. In particular, those acoustic mode shapes that are difficult to measure in practice can be visualized numerically. The simulation techniques can help to discuss the sound quality as well as the design and fabrication of violin.

Keywords : finite element analysis (FEA),

vibro-acoustic coupling system analysis,

modal analysis, natural frequency, mode

shape