

小提琴有琴弦張力效應之振動模態實驗

王栢村^{1,*}、龍暉²、馬凱齡¹、蘇秉翔¹、吳盈輝³

¹ 屏東科技大學機械工程系, 屏東, 台灣

² 屏東科技大學木材科學與設計系, 屏東, 台灣

³ 國立內埔高級農工職業學校 機械科, 屏東, 台灣

E-mail: wangbt@mail.npust.edu.tw (通訊作者*)

摘要: 小提琴是一種弦樂器, 其演奏方式為由琴弓與琴弦摩擦振動並帶動琴橋、琴頸、面板、側板、背板振動產生聲音, 為了探討有琴弦張力之小提琴效應之振動特性, 本文針對琴弦調整為標準音階之小提琴琴身進行實驗模態分析(Experimental Modal Analysis, EMA), 目的是取得有琴弦張力之小提琴整體模態參數, 模態參數包括自然頻率、模態振型、模態阻尼比。實驗方法是在保持整支小提琴條件下, 分為琴橋、琴頸、面板、側板、背板五個部件進行自由邊界固定加速規移動衝擊錘實驗, 並由實驗量測之頻率響應函數(Frequency Response Function, FRF)執行曲線嵌合後處理求得五個部件之實驗模態參數, 後續將各部件 FRF 重疊, 透過模態振型觀察整體振動特性, 由 FRF 及整體模態比較有無琴弦張力對小提琴模態參數影響, 從比較結果可以確認小提琴加入琴弦張力會提高結構自然頻率及增加自然頻率數量。本文所量測實驗模態參數將助於小提琴裝設並調整琴弦前, 結構自然頻率初步預測。

關鍵詞: 小提琴、琴弦張力、實驗模態分析、模態參數、振動特性

1. 前言

小提琴的歷史已經相當悠久, 標準音階頻率也隨著時代跟著變化, 而琴弦張力會對小提琴結構自然頻率產生影響, 本文探討方向主要以在有琴弦張力之小提琴振動模態特性, 透過振動模態特性的探討結果與[1]無琴弦小提琴之實驗模態分析進行比較。

王等人[1]透過應用在複雜的組合結構實驗模態分析方法, 再不拆解將組合結構下, 分為不同部件進行 EMA, 以獲得整體結構與部件結構之振動模態, 並探討了解小提琴結構之振動模態特性, 結果發現各部件之模態特性與整體之模態特性有良好的對應, 驗證了針對複雜之組合結構可以使用將其分為不同組件進行 EMA 的方法。

王與林[2]以衝擊錘當輸入源, 加速度計與麥克風當感測器, 對自由邊界鐵琴片進行實驗模態分析獲得實驗模態參數, 同時實施鐵琴片有限元素分析求得理論模態參數, 以實驗模態參數為目標修正理論模態參數達成模型驗證, 由自然頻率、模態振型、MAC 比對結果得知模型驗證是成功的。王與廖[3]探討木琴條之模型驗證, 先針對木琴條進行有限元素分析及佈點規劃, 完成後再進行木琴條實驗模態分析, 實驗以中型衝擊錘為驅動器輸入, 加速規及麥克風當感測器輸出, 並以實驗模態參數為目標修正有限元素模型達成等效, 結果顯示麥克風與加速度計所量得的自然頻率及模態振型均相當的對應, 因此

以麥克風當感測器進行實驗模態分析是可行的。Duerinck et al. [4]應用衝擊錘及加速規對六把複合材料製作的小提琴進行實驗模態分析, 並成功求得 2200Hz 以內之 FRF, 發現 A0 頻率與對應之 B1 頻率明顯低於傳統小提琴, 最後在透過振動計與振動器實驗得知相同頻率間誤差很小。Bissinger[5] 對 17 種等級之不良到良好聲音品質小提琴進行聲學輻射模態測量, 以對比良好與不良小提琴, 研究出拉伸模態與彎曲模態相關趨勢, 結果顯示聲音品質良好與亥姆霍茲共振與總阻尼有一定的關係。Skrodzka[6] 針對不同背板厚度兩個小提琴, 探討自然頻率是否為線性關係, 實驗方式分為兩種, 第一種為固定傳統加速規量測, 第二種為移動雷射位移計量測, 由實驗結果顯示小提琴背板厚度變化與自然頻率是呈現性關係。

針對有琴弦張力之小提琴振動模態特性實驗方法, 參考[1]無琴弦小提琴之實驗分為五個部件: 面板、背板、側板、琴頸、琴橋, 由部件頻率響應函數數 (frequency response function, FRF) 模態振型可以探討出有琴弦張力之小提琴模態特性, 應用部件組合的整體模態振型可以與無琴弦張力小提琴比較出弦張力對小提琴結構自然頻率影響, 後續將應用實驗結果進行有琴弦張力效應之小提琴模型驗證。

2. 有琴弦張力之小提琴實驗方法與步驟

2.1. 小提琴實驗步驟流程

本節主要介紹實驗模態分析方法及佈點方法, 圖 1 為有琴弦張力之小提琴實驗模態分析流程圖, 為了取得有效的小提琴振動特性, 在執行實驗模態分析前, 需先進行實驗量測之佈點規劃, 透過佈點的振動量測獲得小提琴模態振型, 藉由實驗預測式確認實驗架設與量測設定, 在完成實驗量測後透過曲線嵌合完成實驗後處理, 求得實驗模態參數及完成實驗模態分析。

小提琴因阻尼較大, 輸入源及量測點距離過遠會導致量測振動訊號太小, 影響振型判斷, 本文使用之小提琴實驗模態分析方法, 主要應用在組合結構或大型結構, 透過對整把小提琴分成不同部件進行實驗, 應用實驗後處理技術將量測數據合併, 以合併結果可觀察小提琴整體模態振型, 圖 2 為實驗儀器與有琴弦張力之小提琴架設示意圖, 為了模擬自由邊界條件下進行小提琴實驗分析, 小提琴架設是以釣魚線吊掛琴頭於架子, 並由振動噪音實驗室所開發的頻譜分析儀軟體 SVM, 配合擷取卡 NI-9234, 以衝擊錘及加速規為感測器, 固定加速規移動衝擊錘進行實驗。

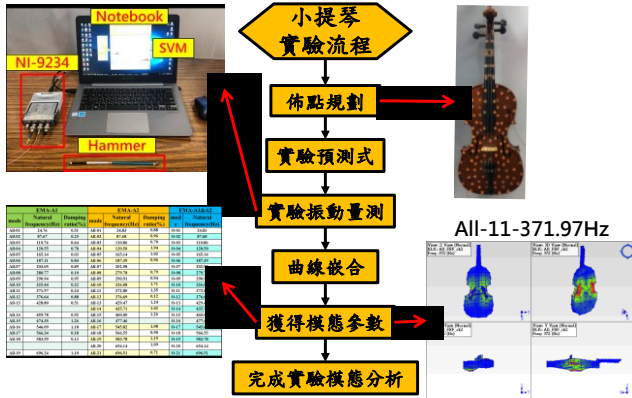
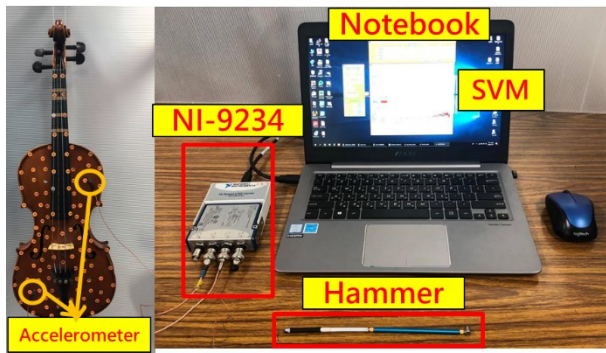


圖 1 有琴弦張力之小提琴實驗模態分析流程圖



(a) 實體圖

圖 2 實驗儀器與有琴弦張力之小提琴架設示意圖

2.2. 小提琴實驗架設及量測設定

為了避免加速規黏貼於小提琴節點,導致量測不到小提琴振動模態,經由實驗預測式結果判斷,EMA 使用兩顆加速規進行量測分別為 A1、A2,量測位置如圖 3 有琴弦張力之小提琴各部件量測點示意圖,在保持圖 2 整支小提琴條件下進行圖 3 各部件實驗模態分析,各部件佈點規劃分別為面板佈點 93 點、背板 45 點,皆採從外至內環狀排列,面板點數間距約為 2.5cm,背板點數間距約為 4cm,側板以兩排間距 4cm 共 58 點進行佈點,琴頸因琴弦原顧以佈點在背面共 4 點,琴橋以 5x3 方式平均佈點 15 點。加速規黏貼於面板佈點之 A1:55、A2:69 號點,背板於 A1:186、A2:198 號點,側板 A1:156、A2:123 號點,琴頸 A1:205、A2:207 號點,琴橋 A1:220、A2:234 號點,而衝擊錘預測式結果小型錘量測頻寬高於中型錘,因此以小型錘作為實驗選擇。

藉由預測結果也確認量測設定,在頻寬及解析頻率部分以 5000Hz 及 1.28 KHz 進行設定,其目的是在量測到有興趣頻寬內,能確保頻寬夠細的率解析度,量測結果平均次數設定為 3 次使量測結果更具有正確性,在單次量測 2.56 秒內,加速規訊號都有減弱至 0,因此在衝擊錘及加速規不做任何加權補正。



圖 3 有琴弦張力之小提琴各部件量測點示意圖

3. 有琴弦小提琴各零組件模態特性探討

3.1. 小提琴整體與部件頻率響應函數與自然頻率

本節將應用實驗後處理技巧,針對小提琴各部件實驗量測結果,合併至完整小提琴結構,藉由此方法可探討整把小提琴模態參數,本文將 5 個部件分別建構實驗模態分析軟體 ME'scopeVES 模型模態振型,及整體實驗模型之模態振型,圖 4 為有琴弦張力之小提琴各部件之實驗模型,小提琴整體模型為各部件模型組合而成,藉由此種方式可將五部件模態振動共同顯示,圖 5 為有琴弦張力之小提琴全部件 A1、A2 加速規之 FRF 振幅部重疊圖,由圖內觀察出琴橋在 2000Hz 內自然頻率較少,因此與其他部件有較少的共同峰值,琴頸、側板 FRF 量值(g/n)在 400Hz 後隨著頻率愈高貢獻愈小,透過上述結果可以推論面板、背板對小提琴振動有較明顯的影響。

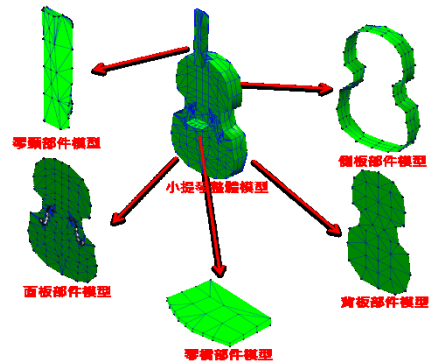


圖 4 有琴弦張力之小提琴各部件之佈點模型

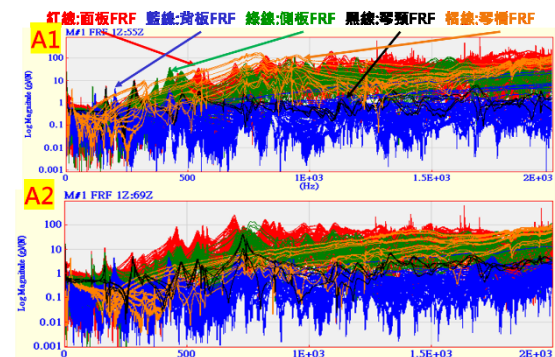


圖 5 有琴弦張力之小提琴全部件頻率響應函數之振幅部重疊圖

3.2. 小提琴在不同頻率之振動特性

表 1 為 1000Hz 內整體自然頻率總表, 小提琴因結構較複雜且零組件較多, 模態較不易以(X,Y)方向物理意義進行解讀, 故透過表 1 自然頻率總表對應模態振型進行特性分類, 模態振型分類類型可以分為自由邊界整體模態(Global mode)與四周固定局部模態(Local mode), 圖 8 為有琴弦張力之小提琴整體模態振型, 在頻率 110.74Hz、165.14Hz 從右半部小提琴整體振型與左半部各部件振型, 可以看出在自由邊界影響下有共同振動方向, 此種模態分類為整體模態。

圖 9 為有琴弦張力之小提琴部分部件模態振型, 圖 9(a)、(b)、(c)分別為不同頻率下部件局部區域模態(Local mode), 由圖 9(a)右半部各部件模態看似皆有模態振型, 但經由組合後左半部小提琴整體振型顯示主要振動貢獻在面板, 且由受到面板四周固定影響產生側腹振動, 因此歸類為面板部件 Local mode, 圖 9(b)可判斷由背板四周固定影響之局部模態, 圖 9(c)為面板、背板同時四周固定產生之局部模態。

表 1 有琴弦張力之小提琴整體自然頻率總表

EMA-A1		EMA-A2			EMA-A1&A2		
模態、自然頻率 (Hz)、阻尼比(%)		模態、自然頻率 (Hz)、阻尼比(%)			模態、自然頻率(Hz)		
All-01	24.76	0.51	All-01	24.83	0.88	O-01	24.83
All-02	87.67	0.25	All-02	87.68	0.96	O-02	87.68
All-03	110.74	0.64	All-03	110.86	0.70	O-03	110.86
All-04	120.55	0.78	All-04	120.50	1.94	O-04	120.50
All-05	165.14	0.03	All-05	165.14	1.02	O-05	165.14
All-06	187.11	0.84	All-06	187.39	0.96	O-06	187.39
All-07	203.05	0.89	All-07	202.98		O-07	202.98
All-08	280.77	0.10	All-08	279.78	0.79	O-08	279.78
All-09	290.94	0.95	All-09	290.91	0.94	O-09	290.91
All-10	325.44	0.22	All-10	326.08	1.71	O-10	326.08
All-11	371.97	0.24	All-11	372.80	1.35	O-11	372.80
All-12	376.64	0.88	All-12	376.69	0.12	O-12	376.69
All-13	428.80	0.51	All-13	429.47	1.24	O-13	429.47
			All-14	435.71	1.02	O-14	435.71
All-14	459.78	0.92	All-15	460.00	1.26	O-15	460.00
All-15	474.35	1.26	All-16	477.46		O-16	477.46
All-16	546.09	1.18	All-17	545.82	1.08	O-17	545.82
All-17	566.34	0.18	All-18	566.55	0.50	O-18	566.55
All-18	583.59	0.13	All-19	583.78	1.19	O-19	583.78
			All-20	654.14	1.09	O-20	654.14
All-19	696.24	1.10	All-21	696.51	0.71	O-21	696.51
All-20	735.81	0.74	All-22	732.21		O-22	732.21
All-21	761.76	0.14	All-23	762.28	1.02	O-23	762.28
			All-24	774.69	1.23	O-24	774.69
All-22	796.34	0.07			1.94	O-25	796.34
All-23	823.76	1.11	All-25	823.79	1.02	O-26	823.79
			All-26	861.60	0.96	O-27	861.60
All-24	874.92	0.08				O-28	874.92
			All-27	881.37	0.79	O-29	881.37
All-25	915.27	1.21	All-28	917.27	0.94	O-30	917.27
All-26	940.23	0.09			1.71	O-31	940.23
All-27	981.65	1.36	All-29	983.37		O-32	983.37

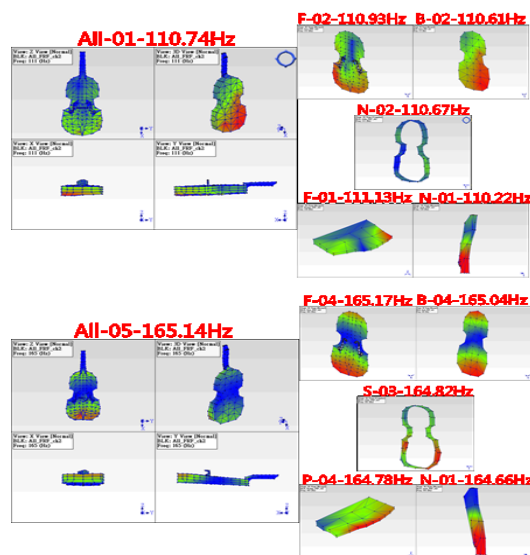
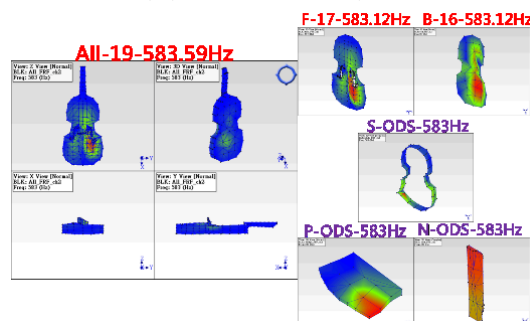
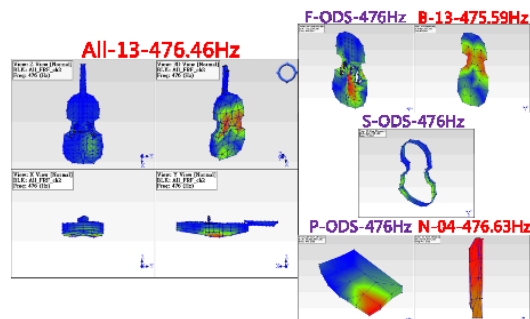


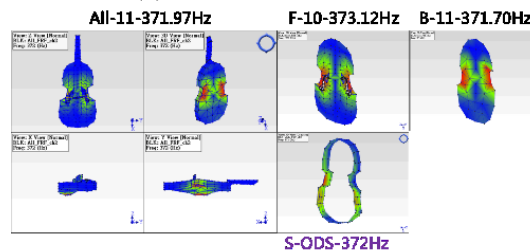
圖 6 有琴弦張力之小提琴整體模態振型



(a) 局部模態振型-面板



(b) 局部模態振型-背板



(c) 局部模態振型-面板、背板

圖 7 有琴弦張力之小提琴部件局部區域模態振型

4. 有琴弦小提琴各零組件模態特性探討

本節主要比較小提琴在有琴弦張力與[1]無琴弦張力實驗模態參數, 透過實驗比較結果可確認琴弦張力對小提琴結構模態參數影響, 表 3 為有琴弦與無琴弦整體自然頻率總表, 由圖表內有琴弦與無琴弦自然頻率比對, 可辨識出有琴弦張力自然頻率比無琴弦張力高, 推測為琴弦張力引起自然頻率偏移, 且自然頻率明顯也多於無琴弦張力, 可能原因為琴橋及拉弦板(Tailpiece)會影響小提琴琴身自然頻率, 在有琴弦小提琴實驗 O-01 為琴橋模態 O-02~O-04 為剛體模態, 因此在無琴弦小提琴實驗無對應模態, 圖 8 為有無琴弦張力小提琴實驗頻率響應函數全頻寬比較, 由實驗 0~5000Hz 內比較結果可觀察出實驗有效解讀頻寬約在 0~2000Hz, 可清晰辨識出頻率峰值約在 0~1000Hz, 後續以 0~1000Hz 探討有無琴弦小提琴實驗量測比較, 圖 9 為小提琴有無琴弦效應琴身之實驗頻率響應函數比對結果, 可以觀察出有無琴弦峰值及趨勢比對相當良好, 大部分頻率皆有對應, 其中在有琴弦小提琴前三模態為剛體模態, 判斷琴弦張力會大大提高剛體模態頻率, 且高頻率趨勢有增大的現象, 推測為琴弦張力所影響。

表 3 有琴弦與無琴弦整體自然頻率總表

小提琴 EMA			無琴弦 EMA		
mode	Natural frequency (Hz)	Damping ratio(%)	mode	Natural frequency (Hz)	Damping ratio(%)
O-01	24.83	0.88			
O-02	87.68	0.96			
O-03	110.86	0.70			
O-04	120.50	1.94			
O-05	165.14	1.02	O-01	158.47	0.88
O-06	187.39	0.96			
O-07	202.98	0.89	O-02	199.83	0.96
O-08	279.78	0.79	O-03	268.28	0.70
O-09	290.91	0.94	O-04	280.61	1.94
O-10	326.08	1.71			
O-11	372.80	1.35			
O-12	376.69	0.12	O-05	344.65	0.96
O-13	429.47	1.24	O-06	419.62	0.96
O-14	435.71	1.02			
O-15	460.00	1.26	O-07	458.02	0.79
O-16	477.46	1.26	O-08	475.50	0.94
O-17	545.82	1.08			
O-18	566.55	0.50			
O-19	583.78	1.19	O-09	549.44	1.71
O-20	654.14	1.09			
O-21	696.51	0.71	O-10	680.44	1.35
			O-11	691.65	0.12
O-22	732.21	0.74	O-12	725.68	1.24
O-23	762.28	1.02	O-14	760.41	1.26
			O-15	769.34	1.08
O-24	774.69	1.23			

表 3 有琴弦與無琴弦整體自然頻率總表(續)

小提琴 EMA			無琴弦 EMA		
mode	Natural frequency (Hz)	Damping ratio(%)	mode	Natural frequency (Hz)	Damping ratio(%)
			O-16	785.37	0.50
O-25	796.34	1.94	O-13	735.80	1.02
O-26	823.79	1.02	O-17	817.46	1.19
			O-19	854.46	0.71
O-27	861.60	0.96			
O-28	874.92	0.08			
O-29	881.37	0.79			
O-30	917.27	0.94	O-20	869.29	1.02
O-31	940.23	1.71	O-21	896.63	1.23
O-32	983.37	1.36			
平均阻尼比%	1.04		平均阻尼比%	1.13	

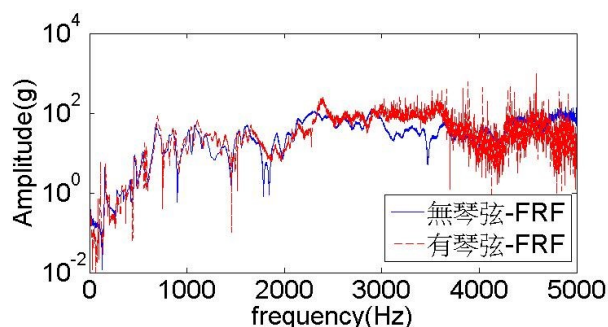


圖 8 有無琴弦張力小提琴實驗頻率響應函數全頻寬比較

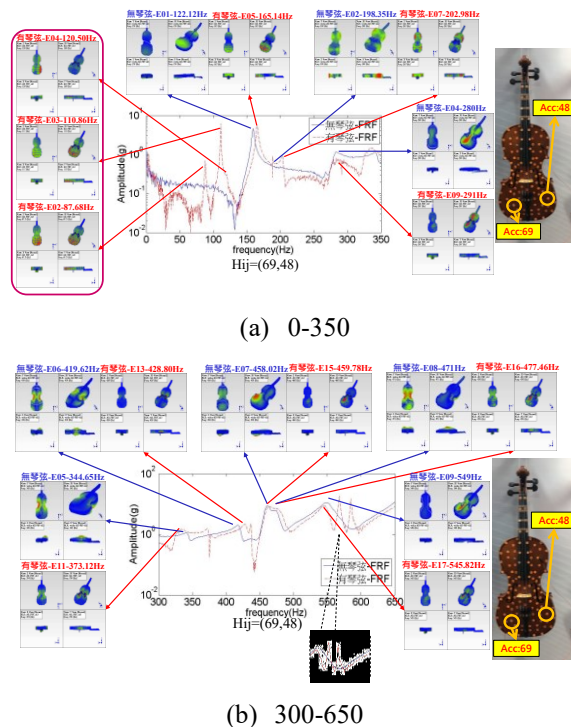


圖 9 有無琴弦張力小提琴實驗頻率響應函數比對

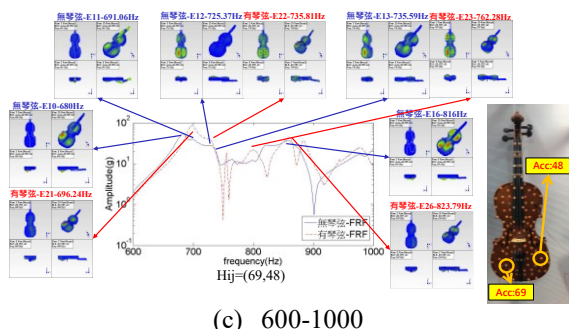


圖 9 有無琴弦張力小提琴實驗頻率響應函數比對(續)

5. 結論

本文對整支有琴弦張力之小提琴進行實驗模態分析, 並探討其振動特性, 後續再與小提琴無琴弦張力實驗模態參數進行比較, 得到結果如下:

1. 有琴弦張力之小提琴琴橋在 2000Hz 內自然頻率較少, 因此與其他部件有較少的共同峰值, 琴頸、側板 FRF 量值(g/n) 貢獻較小, 推論面板、背板對小提琴振動有較明顯的影響。
2. 小提琴因結構較複雜且零組件較多, 模態較不易以 (X,Y) 方向物理意義進行解讀, 因此分類為整體模態(Global mode)、面板局部區域模態(face Local mode)、背板局部區域模態(back Local mode)、面板 & 背板局部區域模態(Face&Back Local mode)。
3. 應用有琴弦與無琴弦實驗與分析自然頻率比對, 可辨識出有琴弦張力之小提琴結構自然頻率比無琴

弦張力時高, 可確認琴弦張力確實會提高琴身自然頻率, 且自然頻率明顯也多於無琴弦張力, 可能原因為琴橋及系弦板(Tailpiece)會影響小提琴琴身自然頻率, 其中在有琴弦小提琴前三模態為剛體模態, 可判斷琴弦張力會提高剛體模態頻率。

研究經費: 本研究經費由科技部提供, 計畫編號 MOST108-2221-E-020-018。(若無研究經費贊助, 請刪除此節)

參考文獻

- [1] 王栢村, 龍暉, 潘忠岳, 林偉智, 李哲綸, 馬凱齡, “小提琴之實驗模態分析與振動模態特性探討”, 應用聲學與振動學刊, 19-29 (2019)。
- [2] 王栢村, 林怡馨, “以加速度計與麥克風為感測器之鐵琴片實驗模態分析比較”, 中華民國力學學會第三十一屆全國力學會議 (2007)。
- [3] 王栢村, 龍暉, 馬凱齡, 李易緯, 楊彥哲, 溫儒琳, “應用 CAE 與 EMA 於小提琴面板素材之機械性質測定”, 精密機械與製造科技研期刊, 9, 27-37 (2019)
- [4] T. Duerinck, M. Kersemans, E. Skrodzka, M. Leman, G. Verberkmoes, P. W. Van, “Experimental Modal Analysis of Violins Made from Composites,” *International Conference of Experimental Mechanics*, 2, 5457 (2018).
- [5] G. Bissinger, “Structural acoustics of good and bad violins,” *J. Acoust. Soc. Am.*, 124, 1764–1773 (2008).
- [6] E. Skrodzka, A. Krupa, E. Rosenfeld, B. B. J. Linde, “Mechanical and optical investigation of dynamic behavior of violins in modal frequencies,” *Appl. Opt.*, 48, 165–170 (2009).

Vibration Modal Testing on Violin with String Tension Effect

Bor-Tsuen Wang^{1,*}, Way Long², Kai-Ling Ma¹, Bing-Shiang Su¹, Ying-Hui Wu³

¹ Department of Mechanical Engineering, National Pingtung University of Science and Technology, Pingtung, Taiwan

² Department of Wood Science and Design, National Pingtung University of Science and Technology Pingtung, Taiwan

³ Machinery Division, National Senior Agricultural-Industrial Vocational School, Pingtung, Taiwan

E-mail: wangbt@mail.npust.edu.tw (Corresponding author^{*})

Abstract: Violin is a kind of string instrument which sound generation mechanism is from playing bow rubbing string vibration inducing neck, bridge, face-plate, side-plate and back-plate vibration and producing sound. For calibrating vibration characteristics of violin with strings in tension condition, this work performs experimental modal analysis (EMA) on the violin, which is tuned for all four strings in standard tuning and subjected to string tension, to obtain structural modal parameters, including natural frequencies, mode shapes and modal damping ratios. The violin is tested for the whole structure in free boundary and divided by five parts, i.e. neck, bridge, face-plate, side-plate and back-plate, to measure frequency response functions (FRFs) by fixing the accelerometer and roving the impact hammer. The measured FRFs in five parts are individually performed curve-fitting process to obtain structural modal parameters. In particular, the violin mode shapes for the individual part and whole structure can be visualized to identify their modal characteristics. Results show vibration modes of top-plate and back-plate, particularly of interest, can be categorized as the global modes with free edges and the local modes with fixed edges. The experimental approach for modal testing on the violin with string tension effect is developed to successfully calibrate modal properties. This will not only be beneficial to better understand the sound generation mechanism of violin but also realize the modal difference before and after adjusting violin strings for string tuning effect.

Keywords: Violin, String Tension, Experimental Modal Analysis (EMA), Modal Parameters, Vibration Characteristi

科技部工程科技推展中心

ENGINEERING & TECHNOLOGY PROMOTION CENTER,

