

## 吉他弦之振動與聲音特性探討

### Discussion on vibration and sound characteristics of guitar strings

王栢村<sup>1</sup>、◎蘇集銘<sup>2</sup>

<sup>1</sup>屏東科技大學機械工程系教授

<sup>2</sup>屏東科技大學機械工程系大學部學生

#### 摘要

本文旨在由理論與實驗量測探討吉他弦之振動模態特性，並進行理論分析模型之驗證，首先建構吉他弦之有限元素模型，據以進行模態分析求得吉他弦之自然頻率與模態振型，同時也進行實驗模態測試以求得實際吉他弦之實驗模態參數，並進行模型驗證。本文也量測探討吉他弦撥動之聲音頻譜，觀察確認吉他弦之主頻率及其聲音頻譜特性，以及與振動模態之關連性探討，也針對有、無音箱之吉他弦聲音頻譜特性探討其差異。本文建立之分析與實驗方法有助於對弦樂器振動與聲音特性之了解，以期作為吉他設計之參考。

關鍵字：吉他弦、振動模態、聲音頻譜、模態分析

#### Abstract

This work performs theoretical analysis and experiments to characterize the vibration modal properties of guitar's string and verify the analytical model. The finite element (FE) model of a guitar's string is first constructed to perform theoretical modal analysis so as to obtain string's natural frequencies and mode shapes. Experimental modal testing is then carried out to determine the string's modal parameters that are used to validate the FE model. This work also experimentally measures the string sound spectra to observe and identify the string fundamental frequency as well as the spectrum distribution and the relation to the string vibration modes. The string sound spectra with and without the resonance box are also discussed. This work establishes the analytical and experimental approaches to study the sound and vibration response of guitar strings and will be beneficial to the guitar design.

Keyword: guitar string, vibration mode, sound spectrum, modal analysis

## 壹、前言

琴弦樂器有很多，如小提琴、鋼琴、吉他及多種中國傳統樂器都以琴弦振動的特性來發出聲音，而木吉他則是靠著琴弦與共鳴箱的互動關係來產生聲音，但由於聲音小，於是創造出電子功能之音箱來改變其擴音大小，更是發展出電吉他這種無音箱之電子產品，在此吉他弦振動與聲音以及有、無音箱之間的關係正是本文所要探討之範圍。

吉他的聲音是由吉他弦線的振動與音箱結構振動耦合所產生的綜合效應。Boullosa[1]發現音箱板材質會對聲音振動帶來寬窄、回響時間長短之影響，其次在更高之頻率散發容易受吉他聲音屬性干擾。Bissinger[2]於無響室環繞，敲擊小提琴表面，同時透過一旋轉麥克風陣列接收聲音，找出聲音較有效率之放射方向。French and Hosler[3]談到樂器架構和空氣之間產生共振稱之赫姆霍爾茲共振，容易影響實驗，儘可能在無共振空間中進行。而 French and Bissinger[4]說明一台儀器做實驗時架構的方式也是一種關鍵的要素，因會與外在空氣有所互動，好的樂器能在一個動態範圍內保持聲音的一致性。French and Bissinger[5]實驗中音提琴，低阻尼裝置之聲音量測，鉗打在琴橋上觀察其響應，以鑑定其聲音模式。McLachlan[6]利用有限元素分析方法，分析鐘的自然頻率，找出模態振型，及使用實驗模態分析在不同固定邊界產生之效應，成功驗證兩者之模態振型吻合。王和黃[7]實驗吉他結構模態振型與理論振型且相互對應，吉他結構經由曲線嵌合求出實驗與合成實驗頻率響應函數曲線也相當吻合。王等人[8]敲擊銅鑼及利用有限元素分析探討其聲音與振動之關聯性，振動方面找出理論與實驗吻合之模態，聲音可從頻譜得到對應之模態振型，即可確認此為結構主頻率。現今各種樂器均有其複雜性，想要完美控制製造出美妙音色仍然不是那麼容易。

本文針對吉他弦線結構之研究，以不同的分析方法探討其振動與聲音特性，利用 ANSYS 軟體進行有限元素分析(Finite Element Analysis, FEA)和實驗模態分析(Experimental Modal Analysis, EMA)，以得到模態參數，分別對聲音及振動個別進行分析，探討弦和音箱之間的關係及聲音放大所產生的效果，再對吉他之有、無音箱個別量測，探討音箱的影響，最後將以振動及聲音之實驗模態分析所得到之結果與理論分析結果做比較，以探討其差異性。

## 貳、有限元素分析

本文為探討吉他弦之振動模態特性首先進行有限元素分析[9]，採用 ANSYS 軟體以二維樑元素模擬弦線，因弦線固定在吉他兩端，故模擬弦兩端的位移限制為固定，配合實驗截斷頻率分析求得 2000Hz 以下之模態，利用有限元素分析，以獲得理論之模態參數，包括自然頻率及模態振型。

有限元素模型採用二維樑元素(BEAM3)，元素分割如圖 1，共有 29 個節點，兩端固定，設定所有自由度為零，進行模態分析免設定外力。為模擬吉他弦之張力效應，以初始應變  $\varepsilon_0$  設定於每一元素如下：

$$\varepsilon_0 = \frac{\delta}{L} \quad (1)$$

$$\delta = \frac{PL}{AE} \quad (2)$$

$$T = \frac{P}{A} \quad (3)$$

其中， $P$  為弦之張力(N)， $T$  為弦之拉應力(N/m<sup>2</sup>)， $L$ 、 $A$ 、 $E$  分別為弦之長度，截面積及楊氏係數，分析與實驗之模型驗證流程如圖 2。

## 參、實驗方法

本文的實驗架構如圖 3，分別對木吉他及電吉他第一弦進行實驗模態分析。將衝擊錘及加速度計接於 SIGLAB 頻譜分析儀，再將頻譜分析儀連接至 PC 個人電腦。吉他則使用背帶懸吊於架上形成自由懸吊如圖 3(a)、(b)所示，弦線則安置在吉他上，使用加速度計為感測器量測，為了避免加速度計質量效應過大，實驗為固定加速度計接近邊界第一琴格處如圖 4(a)所示，移動衝擊錘之敲擊方式輸入訊號至頻譜分析儀(SIGLAB)，可求得頻率響應函數及關聯性函數。頻譜分析儀取樣頻率設定 0~2000Hz，經由量測到訊號傳輸到頻譜分析儀，進行快速傅立葉轉換，求得頻率響應函數及關聯性函數，再使用後處理軟體 ME'scope 進行模態分析對頻率響應函數作曲線嵌合，求得合成頻率響應函數與模態參數及自然頻率、振型及阻尼比等。

聲音量測方面利用麥克風接收到衝擊錘所驅動之訊號，也可經由頻譜分析儀得到聲音頻譜，據以觀察吉他弦振動之聲音主頻率及其諧振頻率，實驗架構方法如圖 4(b)所示，將感測器改為麥克風，麥克風距離弦線約 1cm 以內為基準，而頻譜分析儀頻寬設定為 0~2000Hz，可與振動分析相互對應比較。

為探討有無音箱對吉他弦聲音之影響，分別對木吉他以及電吉他進行第一條弦之量測，經由頻譜分析儀得到頻率響應函數，比較兩者之差異，預期可先看出木吉他弦聲音之主頻率的出現以及音箱造成擴音之影響。

## 肆、結果與討論

### 一、弦振動模態特性分析

首先探討有限元素分析與實驗模態分析結果作模型驗證，詳細流程如圖 2 所示，透過與實驗模態分析求得之實驗自然頻率為比較基準，可求得  $P=5722.03\text{N}$ ， $T=1394\text{GPa}$ ， $\epsilon_0=0.006735$  時，有很好之自然頻率對應。先以 EMA 獲得實驗模態參數及振型，MAC 指標，阻尼比來做探討，而後再將 FEA 所求得弦線之振型、自然頻率做比對，確定實驗模態分析之正確性，並確認理論與實驗結果之對應關係。

理論與實驗分析所得相對應自然頻率之比對如表 1 所示，討論如下：

1. 吉他弦之 FEA 與 EMA 自然頻率相當吻合，除了在木吉他 mode2 為 3.22%，全部的模態自然頻率誤差都在 3% 以內。
2. 本實驗之第一弦空弦時為 330Hz(E4)，因為實驗量測時為使用加速度計為感測器，因

緊貼在弦上會產生質量效應，在實驗上會有些許誤差。在第一個模態自然頻率呈現負誤差外，其他模態皆呈正誤差的趨勢，

將吉他弦有限元素分析與實驗模態分析兩種方法所求得之模態振型，進行比較驗證，表 2 為吉他弦模態振型之對應結果，因截斷頻率為 2000Hz，故會出現 5 個模態振型，而表 3 為木吉他實驗振型與理論振型之模態保證指標(MAC)，表 4 為阻尼比。綜合討論如下：

1. 由 FEA 之弦線模態振型可看出與預期相符，mode 越高則節點越多，而與 EMA 互相比較，雖然自然頻率很接近，但振型卻僅有趨勢吻合，此情況是因為加速度計之質量效應所造成不穩定狀態，以及弦在實驗上以衝擊錘敲擊相當困難，會有敲擊所造成之效應而難以控制。
2. 在吉他弦 EMA 主要模態如圖 5 為量測之頻率響應函數虛數部重疊圖，可以看出雖然有質量及敲擊效應所產生的影響，但主要自然頻率還是明顯觀察，而第一與第二模態間出現峰值，應是吉他音箱結構產生之結構模態。
3. 吉他弦 MAC 保證指標值並不理想，木吉他只有在 mode1、mode3 出現達到 0.49 代表模態振型之相似性，而電吉他在 0.2~0.37 之間，雖然實驗所得振型比對未如預期，不過可確認弦之模態特性。
4. 阻尼比方面，只有在木吉他弦 mode3、電吉他弦 mode2 為 0.1 左右，其他模態阻尼比都很微小，當阻尼比愈小時，聲音之衰減率就愈慢，有助於吉他弦聲音之傳播。

## 二、 吉他弦聲音頻譜分析

吉他弦聲音量測使用麥克風為感測器，為測量出其主頻率為何，以及配合振動模態找出對應頻率，結果如圖 6(a)為木吉他與電吉他聲音比較，圖 6(b)為木吉他與其音箱之比較，綜合探討如下：

1. 兩把吉他第一弦主頻率如圖 6(a)所示均為 330Hz 此與調音結果相吻合，在 660Hz、990Hz 等諧振頻率，均出現峰值，此峰值聲音頻率係弦之振動自然頻率如表 1 所示。
2. 由圖 6(a)在木吉他弦發現會有許多音箱結構頻率如 104Hz、179Hz，而電吉他並無音箱影響，表示此等頻率為木吉他音箱振動造成之聲音頻率。
3. 圖 6(b)為敲擊音箱量得之振動頻譜與木吉他第一弦聲音頻譜之比較，330Hz 及其倍頻為吉他弦振動主頻率，而如 104Hz、179Hz 實為音箱結構之共振頻率，再與木吉他弦頻率對應發現依然是存在著，而電吉他並未產生如此現象，證明如 104Hz、179Hz 等非吉他弦之振動自然頻率的聲音峰值，確是音箱所產生出來之結構頻率。

## 伍、 結論

本研究利用有限元素分析以及實驗模態分析兩種方法，對吉他弦進行振動及聲音分析，針對吉他弦模態振型之驗證，也確認有、無音箱對吉他弦聲音之影響，探討理論分析與實驗結果之吻合性，綜合結論如下：

- 一、從 EMA 中可以確認弦之聲音主頻率與振動 mode1 頻率吻合，mode2 以後質量效應增加，造成振動頻率較聲音頻率偏高之情形。

- 二、弦之聲音量測中，發現從主頻率 330Hz 產生倍數諧振頻率之聲音，此為弦振動較高模態之自然頻率，可確認吉他弦音與弦振動之關聯性。
- 三、從聲音量測中，木吉他弦之聲音頻譜包含了音箱結構之振動模態效應，證明木吉他靠著音箱結構來產生擴音的效果，及音箱之特性頻率，在演奏能展現出有別於電吉他的音色。
- 四、本次實驗使用加速度計為感測器不易明確獲得模態振型驗證，但可確認其模態特性，未來可以對吉他音箱結構及弦同時探討其交互影響。

## 陸、參考文獻

1. Boullosa, R.R., 2002, "Vibration Measurements in the Classical Guitar," *Applied Acoustics*, Vol. 62, pp. 311-322.
2. Bissinger, G., 2001, "Modern Vibration Measurement Techniques for Bowed String Instruments," *Experimental Techniques*, Vol. 25, No. 4, pp. 43-46.
3. French, M., and Hosler, D., 2001, "The Mechanics of Guitars," *Experimental Techniques*, Vol. 25, No. 3, pp. 45-48.
4. French, M. and Bissinger, G., 2001, "Testing of Acoustic Stringed Musical Instruments-an Introduction," *Experimental Techniques*, Vol. 25, No. 1, pp. 40-43.
5. French, M. and Bissinger, G., 2001, "Mechanics of Stringed Instruments," *Experimental Techniques*, Vol. 25, No. 2, pp. 34-37.
6. McLachlan, N., 2004, "The Application of New Analyses and Design Methods to Musical Bells," *75<sup>th</sup> Acoustical Society of America conference*, New York, pp. 1-8.
7. 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 197-204 頁。
8. 王栢村，李雨軒，張志偉，2002，「銅鑼振動與聲音特性之探討」，*第十一屆中華民國振動與噪音工程學術研討會*，台北，第 245-252 頁。
9. 王栢村，2001，*電腦輔助工程與應用之實務與應用*，全華科技圖書，第 9-1~9-61 頁。



圖 1、吉他弦模型分割圖



(a) 木吉他

(b) 電吉他

圖 3、實驗設備架構

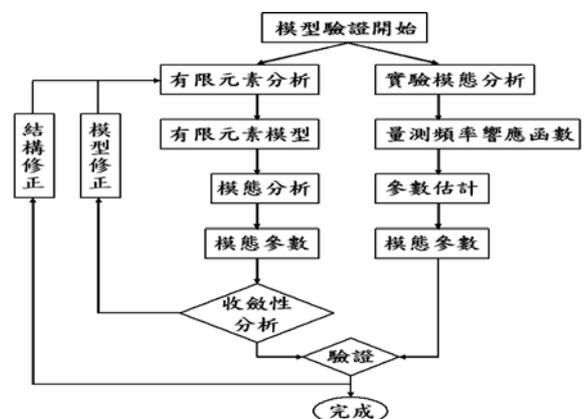
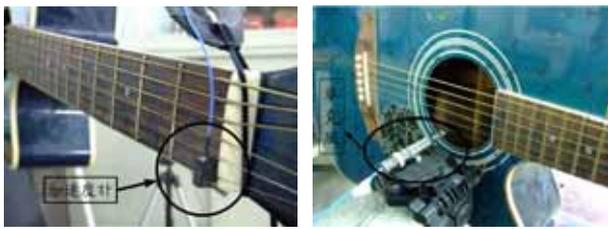
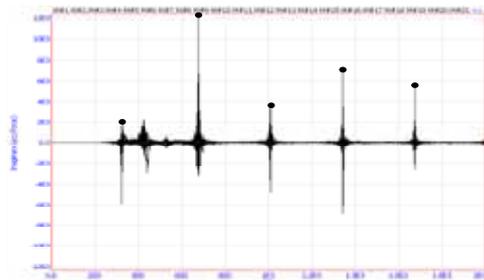


圖 2、模型驗證流程

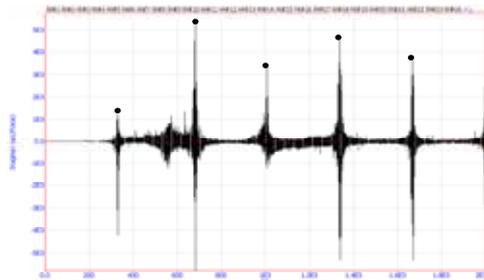


(a) 加速度計放置位置 (b) 麥克風放置位置

圖 4、感測器放置位置

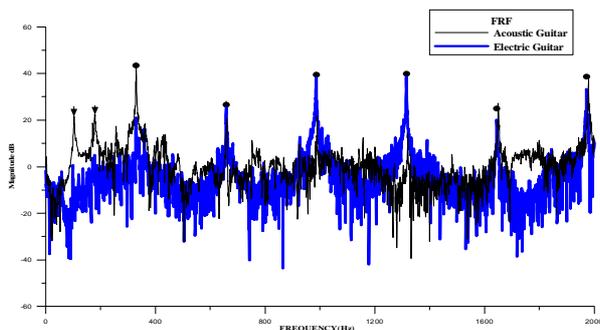


(a) 電吉他頻率響應函數虛數部重疊顯示

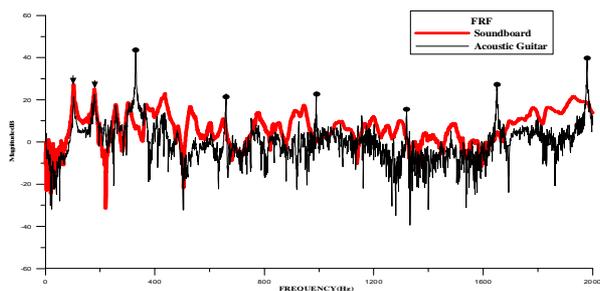


(b) 木吉他頻率響應函數虛數部重疊顯示

圖 5、實驗頻率響應函數



(a) 木吉他與電吉他第一條空弦



(b) 木吉他音箱板與木吉他之第一條空弦

圖 6、聲音實驗量測

表 1、吉他弦自然頻率對照表

模態	木吉他		誤差 (%)	電吉它		誤差 (%)
	FEA	EMA		FEA	EMA	
1	330.02	328	-0.62	330.02	322	-2.49
2	660.03	682	3.22	660.03	675	2.21
3	990.04	1000	0.99	990.04	1010	1.97
4	1320.0	1340	1.49	1320.0	1340	1.49
5	1650.0	1670	1.19	1650.0	1670	1.19

表 2、吉他弦模態振型之對應

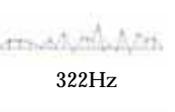
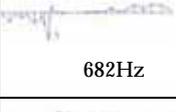
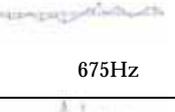
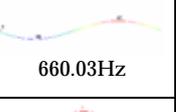
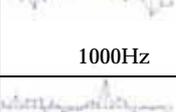
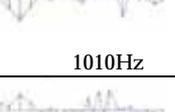
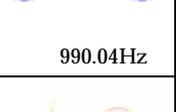
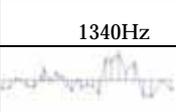
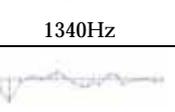
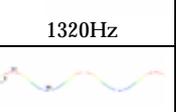
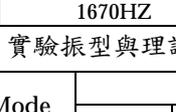
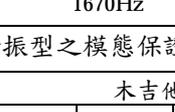
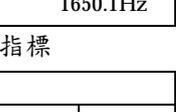
mode	木吉他	電吉它	FEA
1	 328Hz	 322Hz	 330.02Hz
2	 682Hz	 675Hz	 660.03Hz
3	 1000Hz	 1010Hz	 990.04Hz
4	 1340Hz	 1340Hz	 1320Hz
5	 1670Hz	 1670Hz	 1650.1Hz

表 3、實驗振型與理論振型之模態保證指標

Mode	木吉他				
	1	2	3	4	5
1	0.4934	0.0012	0.1738	0.0069	0.0022
2	0.0202	0.0633	0.0313	0.2217	0.0165
3	0.0208	0.0565	0.4705	0.0341	0.0707
4	0.0324	0.0277	0.0411	0.1167	0.0402
5	0.0215	0.0130	0.0379	0.0193	0.1411
Mode	電吉它				
	1	2	3	4	5
1	0.3700	0.0093	0.0226	0.0234	0.0670
2	0.0433	0.2006	0.0508	0.0613	0.1027
3	0.0114	0.0022	0.2212	0.0582	0.0988
4	0.0500	0.0115	0.0916	0.2010	0.0634
5	0.0335	0.0018	0.0586	0.1651	0.2193

表 4、阻尼比

Mode	木吉他實驗阻尼比(%)	電吉它實驗阻尼比(%)
1	0.0248	0.0777
2	0.00327	0.139
3	0.103	0.00962
4	0.0121	0.00626
5	0.035	0.00069