

具簡諧倍頻音之圓板結構、 設計方法及打擊樂器

08-7703202#7017 wangbt@mail.npust.edu.tw

(一) 源起

本計劃透過特殊外型打擊樂器為出發點，王與謝[1]透過有限元素軟體之最佳化設計方法，設計出兩種具有C和弦特殊音效之鐵琴片外型。王等人[2]設計一組兩個八度音之不鏽鋼管打擊樂器，以線性四邊形薄殼元素(SHELL63)建構其有限元素模型，進行理論模態分析，求得理論的模態參數，同時進行實驗模態分析求得實驗之模態參數，並以實驗模態分析之結果為基準，確認有限元素模型可行性與不鏽鋼管材料參數之驗證。

在模型驗證的部分，王與蔡[3]針對平鑼進行聲音特性探討，利用麥克風和聲音量測程式進行量測，探討不同軟硬度之琴槌分別敲擊於平鑼之中心點位置、中間點位置、邊緣點位置之聲音特性，結果顯示在敲擊中心點時，主要發聲模態皆為面 (r, θ) 模態，其中面 $(1, 0)$ 、面 $(2, 0)$ 、面 $(3, 0)$ 為其主要發聲模態。而另一方面王與張[4]探討民俗敲擊樂器京鈔之振動模態與聲音特性，首先運用理論與實驗之模態分析，分別求得理論與實驗之模態參數，探討其振動模態特性，同時進行聲音量測分析，結果顯示，京鈔之模態振型之物理意義，主要分為面模態 (r, θ) 及環模態 (r, θ) 。

針對打擊樂器古鈸之設計與振動模態探討，王等人[5]探討民俗敲擊樂器古鈸之發聲機制，針對古鈸聲音的音高、音色、持續度三大部分各別進行探討，利用頻譜分析儀對古鈸進行聲音量測分析，並運用有限元素分析，建構古鈸之有限元素模型，進行理論模態分析，求得古鈸之理論模態參數，同時進行實驗模態分析，求得實驗模態參數，結果顯示，其理論與實驗所得的模態參數相當吻合，得知古鈸每個音階的比例呈現接近倍頻特性。透過參考以上文獻瞭解銅製樂器之聲音特性，進而想要研發出具有簡諧倍頻音之古鈸打擊樂器。

(二) 設計概念

本文針對古鈸之設計構想進行說明，具簡諧倍頻音古鈸之外型設計構想源自於王等人[5]之文獻中的外形結構，主要探討民俗敲擊樂器古鈸之發聲機制，針對古鈸聲音的音高、音色、持續度等部分進行探討，透過有限元素分析與實驗模態分析，求得實驗模態參數，結果顯示，其理論分析與實驗量測所得模態參數相當吻合，得知古鈸每個音階的比例呈現接近倍頻特性，推論此古鈸樂器造形，應該是前人經驗累積之智慧結晶，值得運用科學分析方法，進一步解析，得到精準簡諧倍頻音之古鈸樂器組，並具有簡諧倍頻的效果，因其階級圓外型具有簡諧倍頻的效果，而進一步進行古鈸之外型設計，以設計出具備簡諧倍頻音聲音特性之古鈸打擊樂器。各音階皆有所產生的標準頻率，稱為基音頻率，音色為多個泛音頻率所組成，而泛音與基音頻率具備整數倍之比例關係可產生和諧悅耳之音效，稱為簡諧倍頻音，事實上，常見的弦樂器如大、小提琴、吉他等其弦之振動模態自然頻率具有特殊的倍頻特性，故本研究將倍頻音加入於古鈸打擊樂器中。

(三) 技術開發

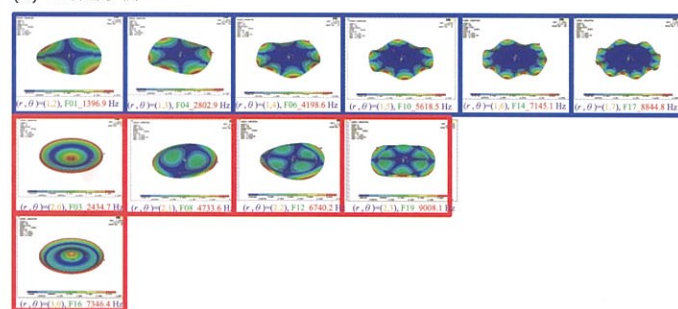
本設計為具有簡諧倍頻音打擊音效之古鈸設計方法與製作，利用不同外徑之階級圖組成一古鈸打擊樂器，並更變外徑大小與階級厚度，再透過幾何尺寸最佳化設計，可以得到各項主要之結構參數，在分析設計部分，已經完成了兩個八度音之設計分析，且每個音階之古鈸打擊樂器皆具有簡諧倍頻音之特性，並與目標音階之頻率誤差都在容許誤差範圍內，而在模型驗證方面，圖1為F6音階理論分析與實驗量測之模態振型整體圖，表1為F6音階理論分析與實際結構之自然頻率總表，從表1、圖1中可發現，分析與實驗所得之各模態自然頻率比較，頻率誤差最低之模態振型為F-03，其頻率誤差百分比為-0.28%；頻率誤差最高之模態振型為F-17，其頻率誤差百分比為1.65%，自然頻率誤差平均值為0.8004%，自然頻率誤差平方平均根為0.979%，模態數F-01及E-01分別代表分析與實際之第一個模態，模態振型及物理意義以 (r, θ) 表示， r 為徑向之節線數， θ 為周向之節線數，在聲音量測方面，圖2為F6音階聲音頻譜圖，從結果中可以發現，雖然基音頻率是準確的，但泛音部份誤差有偏大的趨勢，推測也是屬於加工誤差之問題，後續也可在進行修正並克服加工誤差之問題。

表1、F6音階理論分析與實際結構之自然頻率總表

EMA			FEA			修正後 自然頻率 誤差 (%)	物理 意義
模態	自然頻率 (Hz)	自然頻率 比值	模態	自然頻率 (Hz)	自然頻率 比值		
E-01	1395.1	1	F-01	1396.9	1	0.12	$(r, \theta) = (1, 2)$
--	--	--	F-02	1396.9	1	--	$(r, \theta) = (1, 2)$
E-02	2441.6	1.75	F-03	2434.7	1.74	-0.28	$(r, \theta) = (2, 0)$
E-03	2793.3	2.00	F-04	2802.9	2.01	0.34	$(r, \theta) = (1, 3)$
--	--	--	F-05	2802.9	2.01	--	$(r, \theta) = (1, 3)$
E-04	4135.5	2.96	F-06	4198.6	3.01	1.52	$(r, \theta) = (1, 4)$
--	--	--	F-07	4198.6	3.01	--	$(r, \theta) = (1, 4)$
E-05	4693.3	3.36	F-08	4733.6	3.39	0.85	$(r, \theta) = (2, 1)$
--	--	--	F-09	4733.6	3.39	--	$(r, \theta) = (2, 1)$
E-06	5563.3	3.98	F-10	5618.5	4.02	0.98	$(r, \theta) = (1, 5)$
--	--	--	F-11	5618.5	4.02	--	$(r, \theta) = (1, 5)$
E-07	6715.2	4.81	F-12	6740.2	4.83	0.37	$(r, \theta) = (2, 2)$
--	--	--	F-13	6740.2	4.83	--	$(r, \theta) = (2, 2)$
E-08	7046.7	5.05	F-14	7145.1	5.11	1.39	$(r, \theta) = (1, 6)$
--	--	--	F-15	7145.1	5.11	--	$(r, \theta) = (1, 6)$
E-09	7302.6	5.23	F-16	7346.4	5.26	0.59	$(r, \theta) = (3, 0)$
E-10	8700.7	6.23	F-17	8844.8	6.33	1.65	$(r, \theta) = (1, 7)$
--	--	--	F-18	8844.8	6.33	--	$(r, \theta) = (1, 7)$
E-11	8957.3	6.42	F-19	9008.1	6.45	0.56	$(r, \theta) = (2, 3)$
--	--	--	F-20	9008.1	6.45	--	$(r, \theta) = (2, 3)$
$(\bar{\epsilon})$ 自然頻率誤差平均值						0.8004	
(ϵ_{rms}) 自然頻率誤差平方平均根						0.9779	

圖2為F6音階古鈸之理論頻率響應函數圖，表2為F6音階古鈸之頻率比較表，針對理論分析前3個發聲模態之頻率與目標頻率進行比對可發現，基音頻率與目標頻率之誤差百分比在容許誤差範圍 $\pm 0.34\%$ 以內，基音與泛音頻率之比例為1.00 : 2.00 : 3.02，近似簡諧倍頻音之比例關係。將輸入與輸出定義於古鈸之邊緣點，前三個頻率峰值之頻率比值亦接近簡諧倍頻音聲音特性之比例。透過工具機加工一片F6古鈸之實體，並進行聲音量測驗證其基音頻率是否有達到目標頻率，圖3為F6音階實際聲音頻譜圖，可發現主要發聲頻率皆有激發，由表2中驗證古鈸實體實驗與分析結果基音頻率誤差有0.34%以內。

(a) 理論分析



(b) 實驗量測

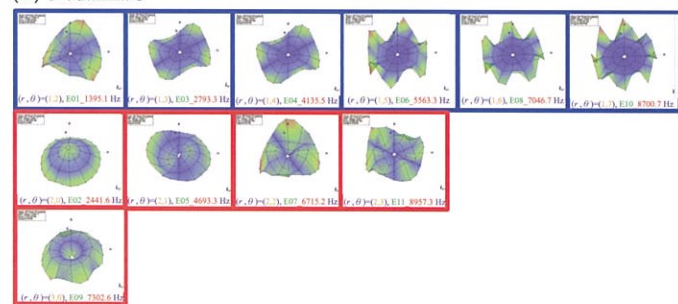


圖1、F6音之模態振型整體圖

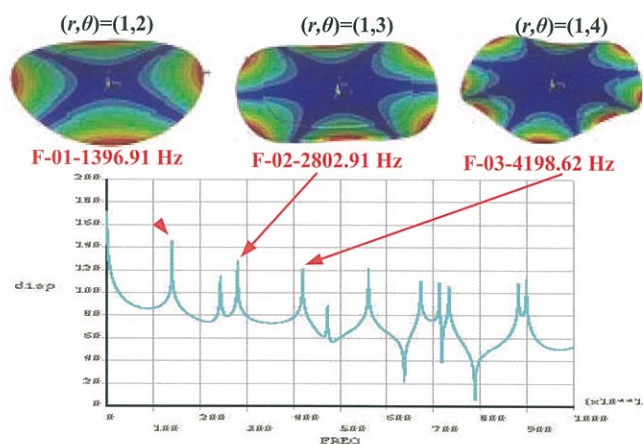


圖2、F6音階古鈸之理論頻率響應函數圖

表2、F6音階古鈸之頻率比較表

音階	目標 頻率 (Hz)	分析 頻率 (Hz)	分析 頻率 比值	量測 頻率 (Hz)	分析與目 標頻率之 誤差(Hz)	分析與目 標頻率之 誤差(%)	分析與量 測頻率之 誤差(Hz)	分析與量 測頻率之 誤差(%)	容許 誤差 (%)
F-01	1396.91	1396.91	1.00	1395	0.00	0.00	-1.91	-0.13	±0.34
F-02	2793.82	2802.91	2.01	2793	-9.09	0.33	-9.91	-0.35	
F-03	4190.73	4198.62	3.01	4176	-7.89	0.19	-22.62	-0.53	

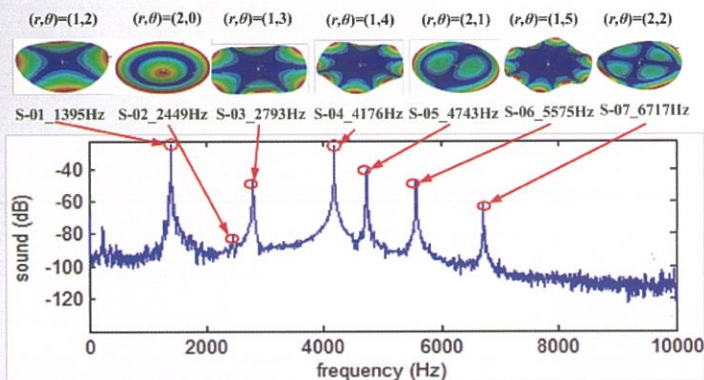


圖3、F6音階實際聲音頻譜圖

(四) 技術競爭力

本發明是利用幾何更變設計，使敲擊古鈸打擊樂器之外徑邊緣點，即可激發出對應於某一音階之基音頻率及泛音頻率，在音準之基音頻率與目標頻率之誤差有達到±0.34%內，而音色方面則有簡諧被頻音之效果，此特性會使得打擊的聲音有悅耳之效果。

(五) 研發成果

透過分析設計，已經完成了兩個八度音之設計分析，且每個音階之古鈸打擊樂器皆具有簡諧倍頻音之特性，並與目標音階之頻率誤差都在±0.34%容許誤差範圍內，透過針對單一片古鈸打擊樂器進行實驗模態分析，獲得實驗模態參數，利用分析與實驗結果進行比對完成模型驗證，將理論之頻率響應函數與實驗之頻率響應函數進行比對驗證，完成響應預測，再針對古鈸進行實體加工，並加工完成兩個八度音之古鈸實體，圖4為2個八度音之古鈸琴組示意圖，本研發技術透過幾何結構之最佳化設計與實驗量測技術研發出兩個八度音之古鈸打擊樂器，且古鈸打擊樂器具有準確的基音頻率以及簡諧被頻音特性，未來能夠可推廣上至國家音樂廳演奏，推向專業級國際化發展，下至民間戲曲使用，使得此具簡諧倍頻音古鈸打擊樂器組可更為普及。



圖4、2個八度音之古鈸琴組示意圖

參考文獻

- [1] 王栢村，謝明憲，2009，「和弦鐵琴片之聲音特性與設計分析」，中華民國音響學會九十八年會員大會暨第二十二屆學術研討會，台北，論文編號：A006，第26-34頁。
- [2] 王栢村，施旻穎，徐鈴育，劉軒廷，蕭信宏，張家豪，2013，「不鏽鋼管打擊樂器之設計與製作」，台灣聲學學會第26屆學術研討會，台北，論文編號C4。
- [3] 王栢村，蔡有倫，2012，「平鑼聲音特性與振動分析之探討」，中華民國力學學會第三十六屆全國力學會議，桃園，編號:F-002。
- [4] 王栢村，張家豪，2012，「京鈔之模態參數與打擊聲音特性」，中華民國音響學會第二十五屆學術研討會，台中，論文編號：D-002-A1。
- [5] 王栢村，吳祥瑞，徐秀娟，高正賢，2011，「古鈸打擊聲音特性之探討」，中華民國振動與噪音工程學會第19屆學術研討會，彰化，論文編號：B-09。