

具簡諧倍頻音之L型板結構

一、源起

本計劃以特殊外型打擊樂器為出發點，進行一系列之研究，以充分瞭解外型設計的方法與原則，在外型設計方面，王與謝[1]利用ANSYS最佳化設計方法，以結構對稱性進行模型建構，設計出兩種具C和弦鐵琴片。並用麥克風作為感測器，進行敲擊之聲音量測分析。並探討不同敲擊位置之發聲效果和使用不同材質的敲擊工具，和弦鐵琴片之聲音頻率與振幅比較。最後再利用有限元素分析，將C和弦鐵琴片進行幾何形狀結構之變更，以瞭解其變化對自然頻率的影響。

模型驗證為打擊樂器開發設計的重要技術，王與蘇[2]藉由理論分析與實驗量測所得之模態參數比較，進行模型驗證，確認吉他弦的分析模型與實際結構之等效性，並比對其模態振型、自然頻率，在實驗的部分，也利用了兩種不同的感測器，分別為麥克風與加速規來進行量測，探討有無質量效應之關係，

並進行了木吉他與電吉他的實驗量測，探討有無音箱對吉他弦所造成之影響。

針對特殊外型打擊樂器石編鐘之設計與振動模態探討，Yoo and Thomas [3]研究其振動模式下的石編鐘，探討其頻率對應下的模態振型，討論石編鐘形狀的設計並進行了有限元素分析，從結果中可以發現夾角之變化會影響此結構之自然頻率與模態振型，古代中國與韓國石編鐘可能由此為依據選定可得到的最佳聲音之外型，本文將利用此篇文獻所提到的這些結構外型之特性對石磬進行材質的轉換與外型之設計並驗證其結果之等效性。

本計劃運用有限元素分析法與實驗模態分析所求得之模態參數進行比對驗證，確認其分析模型與實際結構之等效性，並設計製作出一套鐵磬打擊樂器，也提出了專利的申請[4]。

二、設計概念

石編鐘又稱為石磬，為數個世紀亞洲的珍貴樂器。自古以來有許多種形式，中國古代石磬的基本形式是相似於兩條腿交會而成的頂角所勾勒出的幾何外型，中國石磬的長腿的部分稱為長鼓，亦是演奏敲擊處，短腿部分則稱之為股鼓或大腿，觀察多數的石磬其頂角度數範圍為 142° ~ 155° ，而韓國石磬的基本形式為頂邊較長的部分為頂邊較短部分的1.5倍，且由16個倒L型的石頭組成，懸掛於木架上，除了最上排的石頭，其餘石頭幾乎都有相同的形狀，進行比例縮放厚度。

本設計以此外型構想為出發點，設計出一種具有簡諧倍頻音的打擊音效之鐵磬。藉由材質的轉換，可以改善其本來體積大不易搬運的特性，而透過外型幾何尺寸之最佳化設計，可使得藉由敲擊長邊尾端點時，可以使鐵磬結構激發出數個自然頻率，其最低之自然頻率為基音，即為某一音符之標準頻率，而其他數個高頻之自然頻率形成泛音，此泛音頻率與基音頻率形成接近整數倍之簡諧倍頻音關係，使得打擊聲音有悅耳之效果，未來此設計方法也可應用在產品外型或其它樂器之外觀作改良設計。

三、技術開發

本設計為具有簡諧倍頻音打擊音效之鐵磬設計方法與製作，利用多條線段組成一鐵磬結構之外形，並配合角度的變異與圓角的變異，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，圖1為F5音階之理論頻率響應函數圖，表1為F5音階之分析頻率總表，藉由敲擊長邊尾端點的位置，可以使該結構激發出數個自然頻率，其最低之自然頻率為基音，即為某一音符之標準頻率，而其他數個高頻之自然頻率形成泛音，此泛音頻率與基音頻率形成接近整數倍之簡諧倍頻音關係。

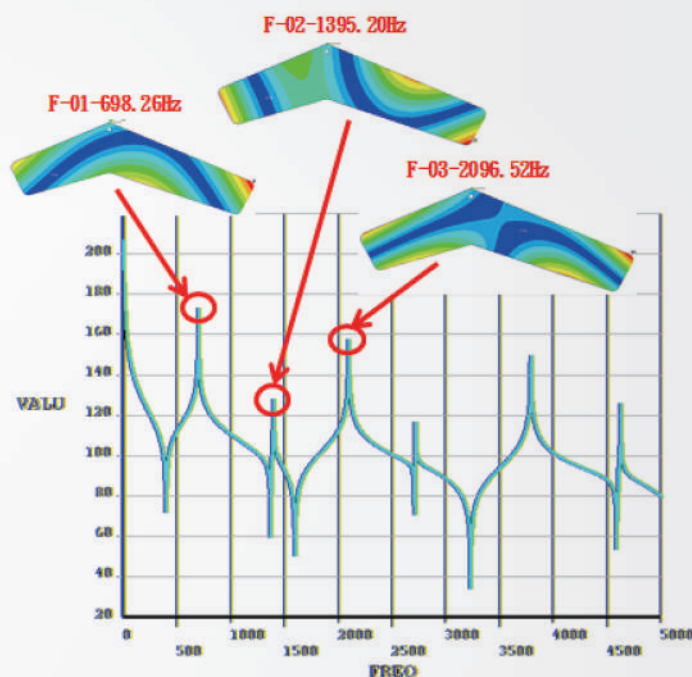


圖1、F5音階之理論頻率響應函數圖

Mode number	Target Frequency (Hz)	Analytical Frequency (Hz)	Frequency ratio	Frequency error (Hz)	Frequency error (%)	Allowable Frequency error (%)
F-01	698.46	698.26	1.00	-0.20	-0.03	±0.34
F-02	1396.92	1395.20	2.00	-1.72	-0.12	
F-03	2095.38	2096.52	3.00	1.14	0.05	

表1、F5音階之分析頻率表

四、技術競爭力

目前市場上只見過石磬這種樂器，且其製作方法是利用石頭當作材質來製作，並採用懸吊的方式來進行敲擊演奏，且不具簡諧倍頻音之特性。而本發明是利用材質的轉換設計，使其體積輕量化，而音色方面則是利用

外型之設計變更，使敲擊鐵磬打擊樂器之長邊尾端點，即可激發出對應於某一音階之基音頻率及泛音頻率，而其基音頻率與泛音頻率具有整數倍之關係即稱為簡諧倍頻音，此特性會使得打擊的聲音有悅耳之效果。

具簡諧倍頻音之L型板結構

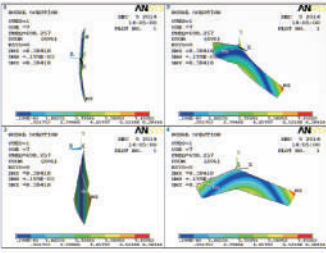
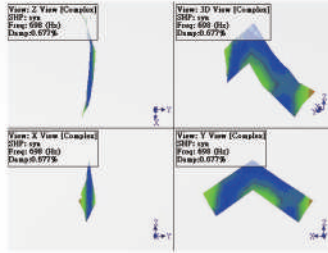
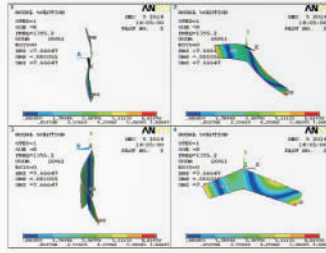
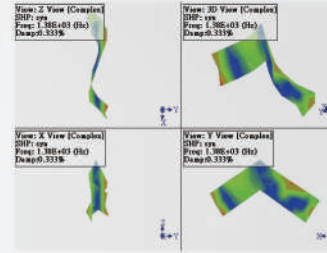
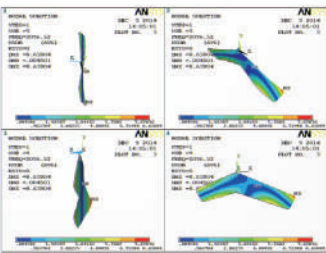
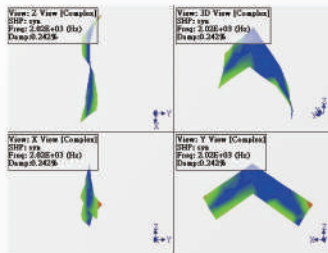
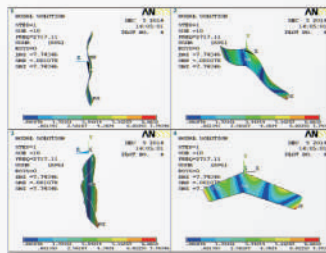
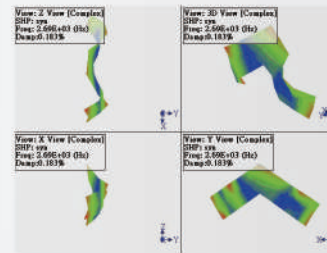
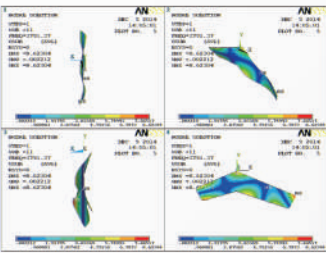
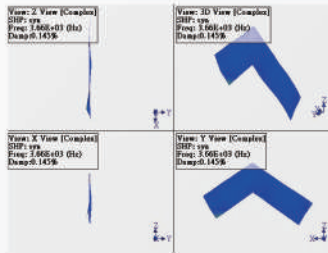
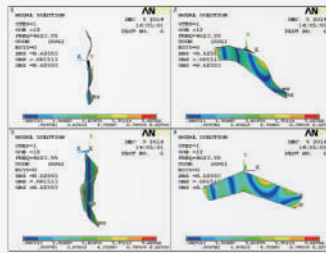
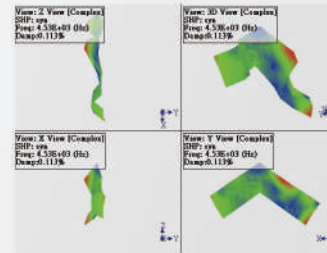
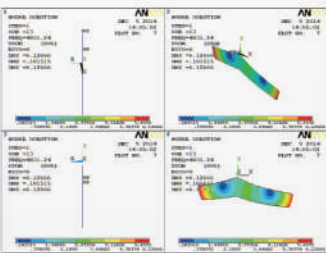
五、研發成果

在分析設計部分，已經完成了兩個八度音之設計分析，且每個音階之鐵磬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，表2為F5音階理論分析與實際結構之自然頻率總表，表3為F5音階理論分析與實際結構之模態振型總表，從表2、表3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-01，其頻率誤差百分比為-0.0573%；頻率誤差最高之模態振型為F-10，其頻率誤差百分比為-3.8414%，從上述結果中可得知分析與實驗所得之各模態自然頻率比較總體差為4%以

下，兩者模態振型對應良好，初步判斷主要造成頻率誤差之原因為加工誤差，因為委外進行雷射加工可能無法正確的得知其加工狀況以及精確的控制尺寸。在聲音量測方面，圖2為F5音階聲音頻譜圖，表4為F5音階之聲音頻率對照表，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。總結來說，新設計的鐵磬已完成雛形的試作與測試，並達到預定的設計目標，有潛力成為商品化的打擊樂器。

EMA		FEA		自然頻率 誤差(%)	阻尼比(%)	累計平均 阻尼比(%)
模態	自然頻率(Hz)	模態	自然頻率(Hz)			
E-01	697.86	F-01	698.26	-0.0573	0.67696	0.6770
E-02	1383.4	F-02	1395.2	-0.8458	0.33304	0.5050
E-03	2021.5	F-03	2096.52	-3.5783	0.24202	0.4173
E-04	2686.8	F-04	2717.11	-1.1155	0.18286	0.3587
E-05	3660.7	F-05	3791.37	-3.4465	0.14508	0.3160
E-06	4529.2	F-06	4623.99	-2.0500	0.11269	0.2821
—	—	F-07	4831.24	—		
E-07	5660.2	F-08	5854.06	-3.3116	0.09115	0.2548
E-08	6640.4	F-09	6792.77	-2.2431	0.09888	0.2353
E-09	7915.6	F-10	8231.82	-3.8414	0.08403	0.2185
E-10	9035.8	F-11	9354.4	-3.4059	0.11885	0.2086
E-11	10260	F-12	10605.48	-3.2576	0.08529	0.1974
—	—	F-13	11154.75	—		

表2、F5音階之理論分析與實際結構自然頻率總表

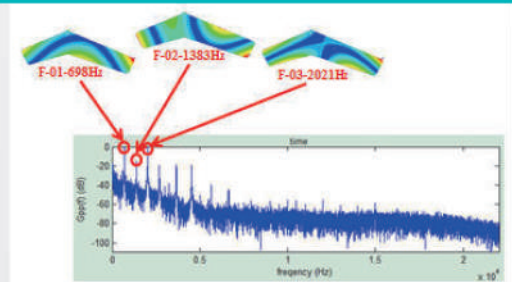
FEA(Hz)	EMA(Hz)	FEA(Hz)	EMA(Hz)																										
																													
模態數：F-01	模態數：E-01	模態數：F-02	模態數：E-02																										
																													
模態數：F-03	模態數：E-03	模態數：F-04	模態數：E-04																										
																													
模態數：F-05	模態數：E-05	模態數：F-06	模態數：E-06																										
	◀◀ 表3、F5音階之理論分析與實際結構模態振型總表 <table><thead><tr><th>Mode number</th><th>Target Frequency (Hz)</th><th>Analytical Frequency (Hz)</th><th>Frequency ratio</th><th>Frequency error (Hz)</th><th>Frequency error (%)</th><th>Allowable Frequency error (%)</th></tr></thead><tbody><tr><td>F-01</td><td>698.46</td><td>698.26</td><td>1.00</td><td>-0.20</td><td>-0.03</td><td rowspan="3">±0.34</td></tr><tr><td>F-02</td><td>1396.92</td><td>1395.20</td><td>2.00</td><td>-1.72</td><td>-0.12</td></tr><tr><td>F-03</td><td>2095.38</td><td>2096.52</td><td>3.00</td><td>1.14</td><td>0.05</td></tr></tbody></table> 表4、F5音階之實測聲音頻率對照表			Mode number	Target Frequency (Hz)	Analytical Frequency (Hz)	Frequency ratio	Frequency error (Hz)	Frequency error (%)	Allowable Frequency error (%)	F-01	698.46	698.26	1.00	-0.20	-0.03	±0.34	F-02	1396.92	1395.20	2.00	-1.72	-0.12	F-03	2095.38	2096.52	3.00	1.14	0.05
Mode number	Target Frequency (Hz)	Analytical Frequency (Hz)	Frequency ratio	Frequency error (Hz)	Frequency error (%)	Allowable Frequency error (%)																							
F-01	698.46	698.26	1.00	-0.20	-0.03	±0.34																							
F-02	1396.92	1395.20	2.00	-1.72	-0.12																								
F-03	2095.38	2096.52	3.00	1.14	0.05																								
模態數：F-07																													

致謝

感謝學校研發處提供非專利之研發成果商品化之經費補助，使得本研究可以順利的進行特此致上感謝之意。作者也感謝科技部計畫：MOST103-2221-E-020-020，部分經費之補助。

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，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論文集，台南，論文編號：A7。
- [3] Yoo, J., and Thomas, D., R., 2006, "Geometrical Effects on the Tuning of Chinese and Korean Stone Chimes," Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 120, No. 6, pp. 78-83.
- [4] 王栢村，張宏名，2014，「具簡諧倍頻音之磬、該磬的設計方法及具有磬的擊樂器」，中華民國發明專利，申請案號第103143419號。(專利申請日期：2014年12月12日)



▲ 圖2、F5音階聲音頻譜圖