

鐵磬之模型驗證與聲音特性探討

王栢村¹張宏名²

¹ 國立屏東科技大學 機械工程系教授

² 國立屏東科技大學 機械工程系碩士生

wangbt@mail.npust.edu.tw

摘要

石磬為石製的一種古代打擊樂器，在中國與韓國都有發現，石磬基本外形為 L 型板塊，具有長股與短股以及其間夾角的幾何特徵。本文利用有限元素分析技術，以鐵質材料進行材質轉換，建立幾何參數化的分析模型，進行理論模態分析，可求得理論之模態參數，包括鐵磬結構的自然頻率與模態振型；也取一組幾何參數設計，進行鐵磬加工製作，並對實際鐵磬結構進行實驗模態分析，以衝擊錘為輸入，麥克風為輸出，透過頻譜分析儀擷取信號經由快速傅立葉轉換，求得鐵磬之頻率響應函數，再利用曲線嵌合軟體擷取出鐵磬的實驗模態參數；經比對驗證有限元素分析與實驗之模態參數，可確認分析模型與實際結構之等效性，未來可應用此分析模型做特殊音效鐵磬之設計。本文也對實際製作的鐵磬以不同硬度之敲擊槌探討打擊聲音特性，了解鐵磬敲擊聲音之音色與振動模態關聯性。本文結合理論與實驗分析方法所建構之設計開發流程，將可應用於各類打擊樂器之設計與製作。

關鍵詞：、石磬、鐵磬、有限元素分析、打擊樂器、模型驗證、聲音特性

1. 前言

本文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，分別比較和弦鐵琴片之聲音頻率與振幅。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；Yoo and Thomas [2]研究振動模式下的石編鐘，探討其頻率對應下的模態振型，探討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，推測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；而王與吳[3]主要對銅鑼進行形狀的更新跟聲音與振動特性的探討，在理論分析方面，因為量測之銅鑼為手工製的，且有加工硬化的現象，所以與實驗比對時發現其結果不佳。因此對銅鑼進行模型的更新，將銅鑼分成三個部份來進行設定，再進行比對一次，發現頻率之誤差明顯下降了，證明此種模型更新法可以適用於銅鑼上。接著探討不同敲擊點，對於頻率域的變化，發現若敲擊中心點只會得到對應之主要發聲模態，而敲擊中心點以外的地方則會有其他泛音被激發出來。

在結構模型驗證的部分，王與蘇[4]主要藉由理論分析與實驗量測所得到之結果，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，分別以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，而另一方面王與黃[5]則是針對去除吉他弦及忽略共鳴箱之支撐結構之後的吉他整體構造進行探討，藉由比對其模態參數(包含自然頻率、模態振型與阻尼比)，以及分析與實驗求得之頻率響應函數，來確認其實際結構與分析模型的等效性，以利後續對吉他做其他特性之探討。

本文運用有限元素分析與實驗模態分析所求得之模態參數進行模型比對驗證，確認其分析模型與實際結構之等效性，並對鐵磬進行聲音量測分析，探討不同軟硬敲擊槌敲擊不同位置時，對鐵磬聲音特性所造成的影響。

2. 鐵磬之外型設計構想

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 $142\sim 155^\circ$ ，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，本文將利用此文獻所提到的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。

3. 鐵磬之模型驗證

本章節將完成設計之鐵磬結構，進行實體加工製作，並針對鐵磬進行模型驗證，確認理論與實驗模態參數之吻合性，確認理論分析之可靠度、外型加工之精準度，驗證本次設計理念之可行性。

3-1.鐵磬之有限元素分析

圖 1 為鐵磬之數學模型示意圖，本文主要使用 ANSYS 軟體為求解工具，假設材料為等向且為均質，並符合虎克定律之假設。以單一材料參數進行分析，其楊氏係數 $E=199.31\text{ GPa}$ ，蒲菘比 $\nu=0.26$ ，而密度 $\rho=7862.93\text{ kg/m}^3$ 。圖 2 為鐵磬之有限元素模型，元素採用線性四邊形殼元素(Shell 63)進行建構；元素分割共有 13114 個元素與個 12845 節點；邊界條件採自由邊界(free-free)，不設定邊界條件；負荷條件於模態分析時不須設定負荷。

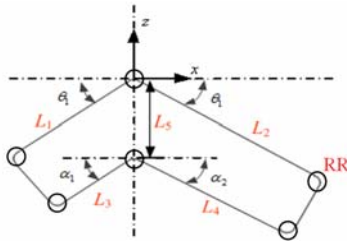


圖 1、鐵磬之數學模型示意圖

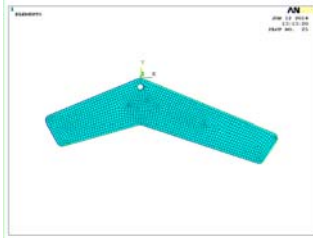


圖 2、鐵磬之有限元素模型



圖 3、鐵磬之實際結構圖



圖 4、鐵磬之佈點規劃示意圖

3-2. 實驗量測敲擊點規劃

圖 3 為鐵磬之實際結構圖，圖 4 為鐵磬之佈點規劃示意圖，本實驗將鐵磬整體部分總共規劃了 30 個量測點，來進行實驗量測。

3-3. 實驗儀器之設定與架設

本次實驗使用 SigLab 頻譜分析儀進行實驗模態分析，圖 5 為鐵磬之實驗架構示意圖，將鐵磬使用釣魚線懸吊來模擬自由邊界，並以小型衝擊錘為驅動器，麥克風為感測器，來進行實驗量測。

頻譜分析儀(SigLab)設定參考如下，頻寬設定為 20000Hz，時間點數 8192 個點，頻率解析度為 6.25Hz，整體實驗流程為，以小型衝擊錘敲擊鐵磬之佈點處，並將麥克風放置於 30 號點，透過固定感測器移動衝擊錘的方式進行實驗量測，並將量測所得的響應訊號輸入頻譜分析儀中，對輸入訊號進行快速傅立葉轉換，求得實際結構之頻率響應函數與關聯性函數。再將頻率響應函數匯入 MEscopeVES 進行曲線嵌合，求得實際結構之模態參數。



圖 5、鐵磬之實驗架構示意圖

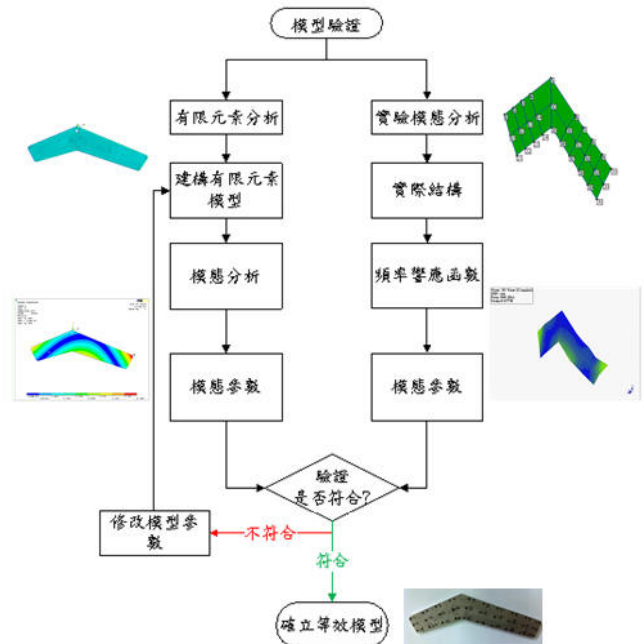


圖 6、模型驗證流程圖

3-4. 鐵磬之模型驗證

圖 6 為模型驗證流程圖，利用有限元素分析軟體 ANSYS 建構鐵磬之有限元素模型，並進行理論模態分析，求得鐵磬之理論模態參數；同時也對鐵磬進行實驗模態分析，以衝擊錘為輸入，麥克風為輸出，透過頻譜分析儀擷取信號經由快速傅立葉轉換，求得鐵磬之頻率響應函數，再利用曲線嵌合軟體擷取出實驗之模態參數，並比對分析與實驗的結果，確認分析模型與實際結構之等效性。

表1為理論分析與實際結構之自然頻率總表，表2為理論分析與實際結構之模態振型總表，從表1、表2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，表示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。

表1、理論分析與實際結構之自然頻率總表

FMA		FEA		自然頻率誤差(%)	阻尼比(%)	相對平均阻尼比(%)
模態	自然頻率(Hz)	模態	自然頻率(Hz)			
F-01	697.86	F-01	698.26	-0.0573	0.67696	0.6770
F-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	--	--	--
F-07	5660.2	F-08	5854.06	-3.3116	0.09115	0.2548
F-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
L-10	9035.8	F-11	9354.1	-3.4059	0.11885	0.2086
F-11	10760	F-12	10605.48	-3.2576	0.08529	0.1974
--	--	F-13	11154.75	--	--	--

表2、理論分析與實際結構之模態振型總表

模態數	FEA(Hz)	模態數	EMA(Hz)
F-01		E-01	
F-02		E-02	
F-03		E-03	
F-04		E-04	
F-05		E-05	
F-06		E-06	
F-07		--	--

4. 鐵磬之聲音特性探討

本章節將針對製作完成之鐵磬進行聲音量測，探討鐵磬在自由邊界下利用不同軟硬琴槌敲擊中間點及尾端點之聲音特性，並測得其聲音之時間域響應，並透過快速傅立葉轉換，求得頻率域之聲音頻譜圖，探討數個發聲模態之頻率峰值是否與理論模態分析結果相互對應。

圖 7 為不同軟硬琴槌之示意圖，主要區分成軟(紫色)、軟硬適中(橘色)、硬(黑色)三種琴槌，圖 8 為敲擊位置示意圖，敲擊位置為中間點及尾端點，圖 9 為實際自由邊界下之聲音量測儀器架設圖。將鐵磬以釣魚線懸吊來模擬實際自由邊界，分別由不同軟硬度之琴槌敲擊鐵磬之中間點及尾端點，並透過麥克風為感測器進行量測，透過聲音量測程式，進行聲音量測分析，量測得鐵磬之頻率域聲音頻譜圖；儀器設定部分取樣時間為 2(sec)，頻率解析度為 1Hz，頻寬範圍為 0~10000Hz。

針對不同軟硬之琴槌敲擊鐵磬中間點與尾端點來進行聲音量測，探討實際自由邊界下利用不同軟硬度之琴槌敲擊鐵磬之聲音特性，測得其聲音之頻率域響應，並從結果中得出以下結論：

圖 10 為實際自由邊界下利用軟硬度適中之琴槌敲擊鐵磬(a)中間點及(b)尾端點之聲音頻譜圖，由聲音頻譜圖可發現，敲擊尾端點，可激發出較多之模態且模態峰值也比較明顯，反之敲擊中間點則有些模態未被激發且模態峰值也較不明顯，藉此可推斷尾端點為最佳敲擊

位置。

圖11為實際自由邊界下不同軟硬琴槌敲擊鐵磬尾端點之聲音頻譜圖，由聲音頻譜圖可發現，當(a)硬槌敲擊時，不論在高低頻之聲音峰值頻率都比(b)軟硬適中、(c)軟槌，兩種槌來的清楚與明顯，證明硬槌較易激發出鐵磬之頻率，藉此可推斷最佳之琴槌為硬度最硬之琴槌。



圖7、不同軟硬琴槌之示意圖



圖8、敲擊位置示意圖



圖9、實際自由邊界下之聲音量測儀器架設圖

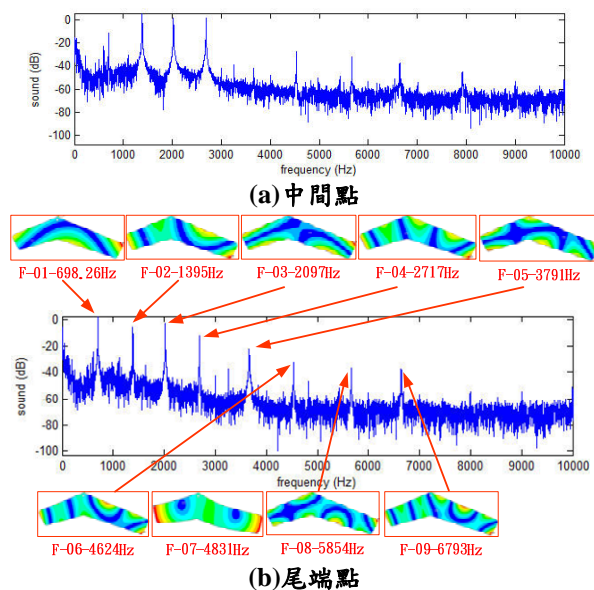


圖10、為實際自由邊界下利用軟硬度適中之敲擊槌敲擊鐵磬(a)中間點及(b)尾端點之聲音頻譜圖

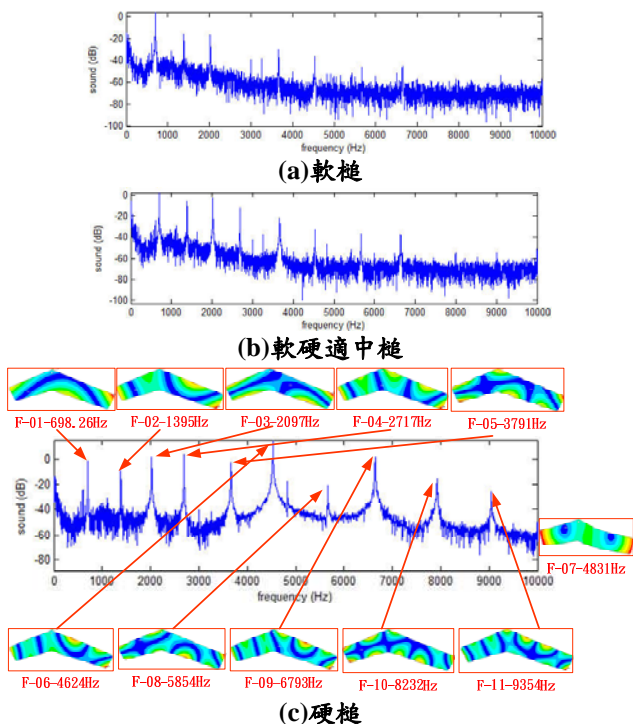


圖11、實際自由邊界下不同軟硬琴槌敲擊鐵磬尾端點之聲音頻譜圖

5. 結論

本文建立一套完整的鐵磬打擊樂器設計與製作之流程，首先建構鐵磬之有限元素模型，並藉由實驗模態分析進行比對驗證，探討鐵磬之發聲機制，同時也進行聲音量測分析，探討敲擊鐵磬不同位置之聲音特性，以及探討不同軟硬之琴槌敲擊鐵磬之聲音特性，綜合本文之探討可得下列幾點結論：

- (1) 將理論與實驗之模態分析結果進行比對發現，兩者模態振型對應良好，頻率誤差百分比皆在3.85%內，初步判斷造成頻率誤差之主要原因為加工誤差。
- (2) 從聲音量測分析中，敲擊尾端點，可激發出較多之模態，反之敲擊中間點則有些模態沒有被激發出來，藉此可推斷尾端點為最佳敲擊位置。
- (3) 從聲音量測分析中，當硬槌敲擊時，不論在高低頻之聲音峰值頻率都比軟槌來的明顯，證明硬槌較易激發出鐵磬之頻率，藉此可推斷硬槌最佳之琴槌。
- (4) 從聲音量測之結果中，發現尾端點為鐵磬之最佳敲擊位置、也發現最佳之琴槌為硬度最硬之琴槌。

6. 誌謝

本論文為科技部計畫編號103-2221-E-020-020之計畫，由於科技部的支持，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。

7. 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] 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.
- [3] 王栢村，吳銘峰，2011，「銅鑼模型更新及其聲音與特性探討」，中華民國音響學會第二十四屆學術研討會，臺北，論文編號：C-11。
- [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論文集，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。

Mode Verification and Percussion Sound Characteristics of Steel Chime

Bor-Tsuen Wang¹, Hung-Ming Chang²

¹ Professor ² Graduate Student
Department of Mechanical Engineering
National Pingtung University of Science and Technology

Abstract

Chimes are made of stone a kind of ancient percussion instrument found in China and Korea. The basic shape of chime is the L plate with the geometry characteristics forming an angle between the long and short legs. This work applies finite element analysis (FEA) to build the parametric geometry model considering the change of material from stone to steel and to perform theoretical modal analysis (TMA) so as to obtain the steel chime's natural frequencies and mode shapes. A set of geometry parameters is chosen to manufacture for the chime. Experimental modal analysis (EMA) by using the impact hammer as the exciter and the microphone as the sensor is conducted on the steel chime. The frequency response function can be measured and used to extract experimental modal parameters of the steel chime. By the comparison between theoretical and experimental modal parameters, the analytical FE model can be updated and equivalent to the real steel chime; therefore, the FE model can be adopted for design analysis in obtaining special sound effect of steel chimes. This work also examines the percussion sound response of the steel chime by different hardness of mallets to study the relationship between the percussion sound tonality and structural vibration characteristics. This work layouts the design and experimental approaches that will be useful in developing percussion instrument.

Keywords: stone chime, steel chime, finite element analysis, percussion instrument, model verification, sound characteristics