

具簡諧倍頻音鐵琴組之打擊樂器聲音品質探討

Study on Sound Quality of Percussion Instrument Made by Metal Plates with Harmonic Sound

王栢村¹ 黃家賢² 張家豪² 徐秀娟³ 李之光⁴

¹教授/ 國立屏東科技大學機械工程學系

²研究生/ 國立屏東科技大學機械工程學系

³副教授/ 台南應用大學音樂系

⁴副教授/ 國立屏東科技大學幼兒保育系

摘 要

本文針對一組具備簡諧倍頻音聲音特性之等距型鐵琴片組，進行聲音品質評估，透過聲音量測程式進行聲音量測，針對每一鐵琴片分別敲擊，可量測得不同音階鐵琴片之時間域響應，並透過快速傅立葉轉換取得頻率域之聲音頻譜圖，由聲音量測結果探討等距型鐵琴片組之音準、音色及持續度，作為聲音品質之客觀評估依據。在客觀評估等距型簡諧倍頻音鐵琴組之打擊聲音結果顯示，在音準部分，由鐵琴片組各個音階的基音頻率與音階標準頻率比較，各琴片誤差大致在容許誤差範圍內，但仍有部分琴片因加工誤差有明顯的差異，各個音階的音準為打擊樂器最重要的品質指標，因此有需要進一步改善。音色則在探討基音頻率與泛音頻率間之頻率比值，本文探討的鐵琴片組，均具有整數倍之簡諧倍頻音比例關係，打擊聲音有其和諧性；另外，不同音階鐵琴片的音色相互和諧以及明亮度的一致性，也是樂器聲音品質之考量因素。持續度則以聲音時間域之衰減率的工程指標進行評估，各音階琴片宜能有相近的持續度，才有音感之調和性。本文所探討聲音品質之方法，在未來也可應用於其他打擊樂器的製作與評估。

關鍵字；等距型鐵琴片、簡諧倍頻音、聲音品質、打擊樂器

Abstract

This work aims to evaluate sound quality of a new type of percussion instrument that contains a series of metal plates with about the same width and producing harmonic sound. Each metal plate is stricken and measured for its radiated sound pressure in time domain response as well as auto spectrum in frequency domain by fast Fourier transform. From the measurement results, the fundamental frequency, tone color and continuity of percussion sound from each metal plate are obtained to perform the objective evaluation for its sound quality. Results show that the fundamental frequency for each metal plate is about within the allowable frequency error with respect to the standard frequency of musical note. However, several plates exceed the frequency error limit and need to be improved, because the accuracy of fundamental frequency is the most crucial factor. The tone color for each metal plate is calibrated by its fundamental frequency and overtone frequencies and found harmonic sound effects very well, i.e. the frequency ratios between overtone frequencies and the fundamental frequency are near integer values. The continuity of percussion sound is evaluated by the engineering index, the decay rate of time domain sound pressure response, and should be consistent for each metal plate. The proposed method in discussing the sound quality of percussion instrument will be helpful in manufacture and evaluation for the development of new musical instrument.

Keywords: same width metal plate, harmonic sound, sound quality, percussion instrument.

一、前言

一般市面上的打擊樂器為了讓打擊者能輕鬆演奏，琴片與琴片之間的距離皆為相等，最早王與簡[1]有以特殊設計並製作出簡諧倍頻音鐵琴組，則鐵琴組在間距方面，因為以整體比例縮放來進行調音，導致琴鍵中間距不等，使打擊者不習慣其鐵琴樂器，Wang and Tsai [2]進而想到以等寬度的方式設計琴組，不影響打擊者習慣的情況下，讓打擊者能夠輕易上手，並設計製作 F5~B6 之音階的等寬度簡諧倍頻音鐵琴。

簡諧倍頻音鐵琴片之設計方法，透過Wang and Tsai [2]應用有限元素分析軟體(ANSYS)之最佳化分析，針對等寬度簡諧倍頻音鐵琴之設計方法建立一套分析流程，找出其標準音階。王與簡[1]已知製作出具簡諧倍頻音鐵琴之實體外型，並擬定一套設計之方法。

同時也有其他特殊樂器，王等人[3]了解如何應用貝茲曲線方程式之控制節點與座標方法設計出鐵琴片的外型，搭配有限元素分析軟體ANSYS之最佳化設計方法，建構出一套C和弦鐵琴片形狀最佳化設計方法與流程，結果顯示，透過分析可求得適當的結構模態頻率比例符合和弦音階特性，可初步達到具和弦音階之鐵琴片設計。

且對於聲音的合成，Wu and Huang[4]透過創新的方法來實現中國編鐘的聲音合成，中國編鐘具有各種引人入勝的聲學特性，它能單獨產生兩種音調，為了進一步了解其聲音特性，本文獻對曾侯乙編鐘做聲音複製及採樣分析。其結果表明邊鐘的聲音是可以合成的。透過了解王與簡[5]建立一個參數化鐵琴片有限元素模型，並藉由模型驗證流程的比對驗證，同時對實驗量測的數據進行探討，來了解鐵琴片的聲音特性，並針對不同音階鐵琴片進行敲擊測試，並由王等人[6]針對簡諧倍頻音鐵琴座進行聲音評估，並了解在各音階鐵琴片均發現良好的音準，同時具備擁有三個簡諧倍頻的基音與泛音之特性，此泛音頻率與音階之基礎頻率呈現整數比。

應用聲音量測分析於其他打擊樂器上，如王等人[7]對古鈸進行聲音量測分析，透過頻譜分析儀，求得古鈸之聲音頻譜及峰值頻率。同時運用有限元素分析，以線性立體元素建構其有限元素模型，進行理論模態分析，求得古鈸之模態參數，包括自然頻率及所對應之模態振型。王與吳[8]探討銅鑼之聲音與振動特性的關聯性，首先建立銅鑼的限元素模型，並進行理論分析，求得理論之模態參數，同時對銅鑼進行實驗模態分析，並求得實際結構的模態參數，並以實驗模態參數為準則，對有限元素模型進行模型更新。

透過評量二胡音質並參考其客觀與主觀之聲音品質評估方式，徐與吳[9]透過頻譜分析儀進行實驗分析探討止音布與狼音抑制器之聲音品質影響，運用B&K3560頻譜分析儀量測聲音訊號，並使用自動拉弦機以固定拉弓力道、拉弓速度與按壓深度等參數，求得狼音之發生位置，結果在琴碼與琴皮之間，放置狼音抑制器以抑制琴皮的共振頻率，能成功消除狼音，且經過對客觀樂音指標之分析，了解音量均衡度、純淨度、亮度、穿透力、悶音之影響。鐘等人[10]針對長期令人困惑之穿透力做一嘗試性之探討，初步推斷影響二胡「穿透力」的主要因素為2000與4000Hz之間的聲壓大小，並據以製定「穿透力」之樂音指標。結果成功定義出穿透力之客觀指標，並獲得主觀評價之一致肯定。

透過 Wang and Tsai [2]之設計方法製作出一組 F5~B6 之音階的等距型簡諧倍頻音鐵琴，並對鐵琴組透過聲音特性分析，進而探討音準、音色、持續度，並經由對一組 F5~B6 之音階的等距型簡諧倍頻音鐵琴進行客觀評估與主觀評估進行聲音品質的探討，未來能提供作為打擊樂器的主客觀之評估依據。

二、等距型簡諧倍頻鐵琴片之聲音特性

圖 1 為 C6#、D6、F6 之等距型簡諧倍頻鐵琴片實體圖，本節透過聲音量測分析主要探討其鐵琴片之聲音特性，其琴片因等距之關係造成形狀之主要分為 C6#、D6、F6 這 3 種。圖 2 為聲音量測之實驗架構圖，透過釣魚線懸吊鐵琴片模擬自由邊界，並利用筆記型電腦(含聲音量測程式)、敲擊槌與麥克風，以敲擊槌敲擊鐵琴片之中心點並進行聲音量測。

表一為 C6#、D6、F6 簡諧倍頻音鐵琴片量測之時間域與頻率域圖，透過敲擊鐵琴片之中心點得到其量測結果，以實驗測得之時間域透過聲音量測程式進行快速傅立葉轉換求得頻率域及衰減率，並由頻率域可以明顯看出主要三個發聲頻率，並具有整數之倍頻關係，表示有達到簡諧倍頻之效果。圖 3 為 C6#理論之頻率響應函數，透過模擬敲擊鐵琴片之中心點測得主要發聲之頻率，並與實驗量測之結果進行比對，表 2 為 C6#、D6、F6 鐵琴片之聲音頻率比較表，以目標頻率與分析頻率及實驗量測之自然頻率比對結果，透過分析頻率進行調音以致基音之頻率誤差有符合樂理之頻率誤差標準 $\pm 0.34\%$ 內，並獲得衰減率為 1.25、2.18、1.03。



圖 1、C6#、D6、F6 等距型簡諧倍頻音鐵琴片實體圖

圖 2、聲音量測之實驗架構

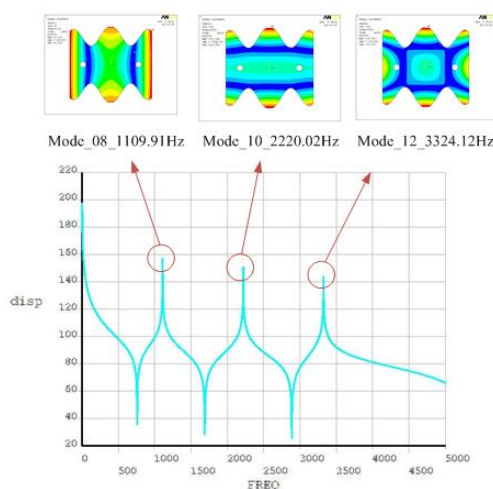


圖 3、C6#簡諧倍頻音鐵琴片之頻率響應函數圖

表 1、C6#、D6、F6 簡諧倍頻音鐵琴片量測之時間域與頻率域圖

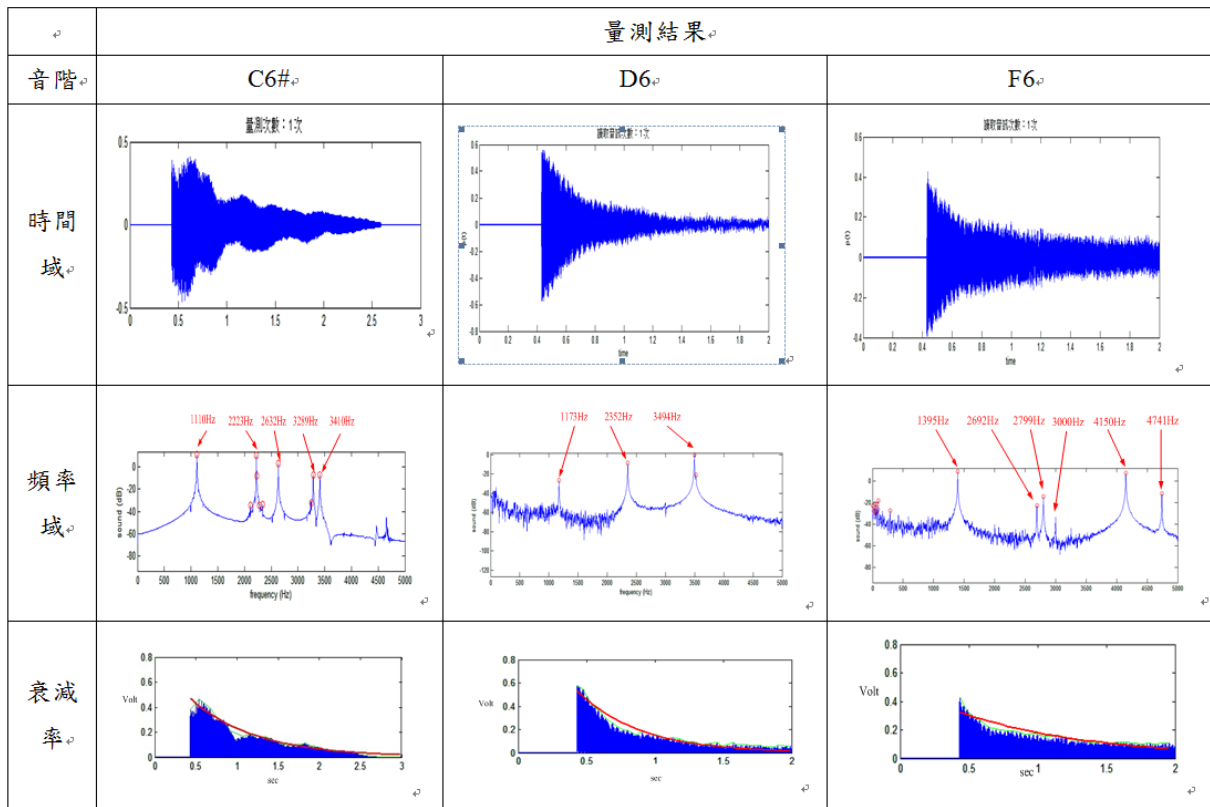


表 2、量測 C6#、D6、F6 鐵琴片之聲音頻率比較表

音階	頻率數	目標頻率(Hz)	分析頻率(Hz)	測得頻率(Hz)	測得頻率比值	目標與測得誤差(%)	分析與測得誤差(%)	容許誤差百分比(%)	衰減率
C6#	f01	1108.73	1109.91	1110	1	0.11	0.11	±0.346	1.25
	f02	2217.46	2220.02	2223	2	0.24	0.12	±0.346	
	f03	--	--	2632	2.37	--	--	±0.346	
	f04	3326.19	3324.12	3289	2.95	-1.17	-0.06	±0.346	
	f05	--	--	3410	3.07	--	--	±0.346	
D6	f01	1174.66	1180.75	1173	1	-0.14	0.52	±0.346	2.18
	f02	2349.31	2363.15	2352	2	0.11	0.59	±0.346	
	f03	3523.97	3545.32	3494	2.97	-0.85	0.61	±0.346	
F6	f01	1396.91	1405.42	1395	1	-0.13	0.61	±0.346	1.03
	f02	2793.82	2808.18	2799	2	0.18	0.51	±0.346	
	f03	4190.73	4209.30	4150	2.97	-0.91	0.44	±0.346	

透過表 2 所示 C6#、D6、F6 鐵琴片之聲音頻率比較，探討其 C6#、D6、F6 之音階聲音品質，在音準的部分明顯看出基音頻率皆有符合樂理規範之誤差範圍±0.34%以內；音色之部分可看得出基音頻率與泛音頻率皆有接近整數倍之關係，確認有達到簡諧倍頻之效果；持續度方面為聲音所持續的時間，並經由衰減率而改變，其衰減率愈大聲音持續度就愈短，則 C6#、D6、F6 之音階衰減率為 1.25、2.18、1.03。

三、等距型簡諧倍頻鐵琴組之聲音品質評估

圖 4 為已製作完成的一組 F5~B6 之音階等距型簡諧倍頻音鐵琴組，將對其鐵琴組進行實驗量測，並將其實驗數據統整進行一系列的聲音頻譜比較，比較結果作為聲音品質之客觀評估依據，再請音樂老師對整組琴進行試敲，並將其意見做為主觀評估之依據。

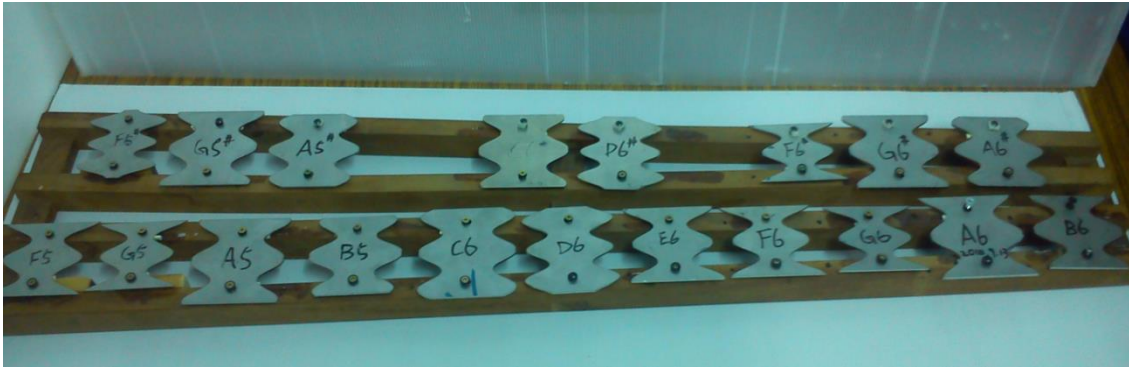


圖 4 一組 F5-B6 之音階等距型簡諧倍頻音鐵琴組

3.1 客觀之聲音品質評估

藉由量測 F5~B6 各音階鐵琴片之聲音頻率，逐一探討所製作之等距型簡諧倍頻音鐵琴組音準、音色、持續度等，並作為聲音品質客觀評估之方式。

- ◇ 音準：各個音階之基音頻率有達到樂理所容許之誤差百分比，透過表 3 等距型簡諧倍頻音鐵琴組之自然頻率比對總表可以看出 G5#、A5、B5~D6#、F6、G6 之基音頻率誤差皆有在聲音頻率誤差百分比 ± 0.346 範圍內。
- ◇ 音色：透過表 4 等距型簡諧倍頻音鐵琴組之各音階聲音頻率及衰減率總表，可明顯發現第一個自然頻率與第二自然頻率比值約為 1.91~2.13、第三個自然頻率比值則約為 2.88~3.11，透過以上結果得知各音階之自然頻率比值皆有接近 1、2、3 之倍數關係，固有達到簡諧倍頻音之效果。
- ◇ 持續度：依據表 4 等距型簡諧倍頻音鐵琴組之各音階聲音頻率及衰減率總表所示，各音階之衰減率在模擬自由邊界下的情況約為 0.40~2.51 之間，衰減率越大聲音的持續時間就越短。

3.2 主觀之聲音品質評估

本文所製作一組 F5~B6 音階具備簡諧倍頻音聲音特性之等距型鐵琴組，並由專業打擊樂教師與音樂老師，分別對此組鐵琴組進行主觀之聲音品質評估，表 5 為 F5~B6 音階等距型鐵琴片之聲音品質主觀評估表，主要以討論下列幾點：

- ◇ 以音準整體上 C6~G6 在音準上較佳，其他音階則音準不佳，但如果只單敲擊 F5~G5、G6#~B6 在相對音準上是較佳的。
- ◇ 在音色方面 C6~G6 音階相較於一般打擊樂器上比較乾淨、清脆、明亮。以單一片敲擊演奏有其可行性，但部分鐵琴片聲音持續度長短不一，如果需敲擊和弦音會比較不適合。後續可在琴架上加裝共鳴管可提升琴組的聲音效果。
- ◇ 敲擊等距型鐵琴組進行演奏與敲擊一般傳統樂器上的差異，在間距上相等但因形狀關係無法達到一般傳統打擊樂器的間距大小，可能並非所有演奏者都能容易上手演奏。

- ◇ 在敲擊距型鐵琴組，敲擊位置不同聲音特性也會不同，需固定其敲擊位置，主觀音色較佳。
- ◇ 以整體而言，整座琴的質感、聲音穩定性、外觀一致性，都需改善、克服。

四、結論

本文透過完成製作等距型簡諧倍頻音鐵琴組，並對敲擊鐵琴片之音準、音色、聲音持續度進行一系列的探討。

- ◇ 音準的部分，G5#、A5、B5~D6#、F6、G6 音階其目標頻率與量測頻率之頻率誤差皆有在 0.34% 以內，符合樂理之需求表示音準良好。其餘音階還需再校正調音。
- ◇ 音色的部分，整體上透過基音與第二、三泛音的發聲頻率約有呈現 1 比 2 比 3 簡諧倍頻之整數的比例關係。表示在鐵琴組整體有達到簡諧倍頻之效果。
- ◇ 其聲音持續度的部分，由整體結果發現在自由邊界下約 0.40~2.51 之間有部分琴片持續度不一，可能因琴片厚度不同或是其他因素所造成，後續可能會再做實際邊界下的持續度探討。

透過客觀之聲音品質評估中，大部分音階皆有達到樂理之容許誤差範圍內，音色是有達到簡諧倍頻之效果，持續度在自由邊界下衰減率之數據大部分呈現良好；則主觀聲音品質評估中，C6~G6 音階之聲音品質良好，但整體琴組之質感、聲音穩定性皆需要再做加強，同時需再克服外觀一致性的問題。

未來將持續克服以上各種問題，收集相關音樂老師、樂器廠商之建議，作為新型打擊樂器之評估指標，期盼等距型簡諧倍頻音之打擊樂器能作為市面上常見的打擊樂器。

五、參考文獻

- [1] 簡孝名，2010，具和弦音與簡諧倍頻音鐵琴片之設計分析，碩士論文，國立屏東科技大學，機械工程學系，屏東。
- [2] Wang, B. T., and Tsai, Y.L., 2014, "Modification Design of Harmonic Sound Plate with Equal Width for Metallophone," *International Symposium on Musical Acoustics (ISMA2014)*, Le Mans, France, pp. 71-75.
- [3] 王栢村，謝明憲，趙天麒，2008，「基於聲音特性之鐵琴片形狀設計」，2008 中華民國音響學會第二十一屆學術研討會，台北，論文編號：A1-3。
- [4] Wu, C. W., and Huang, C. F., 2012, "An Innovative way to Implement Chinese Chime-Bell Sound Synthesis," *National Chiao Tung University*, Vol. 7, No. 06., pp. 22-26.
- [5] 王栢村，簡孝名，2010，「鐵琴樂器之聲音特性分析與驗證」，*機械技師學刊*，第3卷，第2期，第1-7頁。
- [6] 王栢村，董時沛，徐秀娟，高正賢，2012，「特殊設計簡諧倍頻鐵琴組之聲音品質評估」，*中華民國振動與噪音工程學會第20屆學術研討會*，彰化，論文編號：B-04。
- [7] 王栢村，吳祥瑞，徐秀娟，高正賢，2011，「古鈸打擊聲音特性之探討」，*第十九屆中華民國振動與噪音工程學術研討會*，大葉大學。
- [8] 王栢村，吳銘峰，2011，「銅鑼模型更新及其聲音與振動特性探討」，*中華民國音響學會第十九屆學術研討會論文集*，新北市，第327-333。
- [9] 徐茂濱，吳佳宗，2010，「以客觀法評量狼音之改良對二胡音質的影響」，*中華民國音響學會第二十三屆學術研討會*，台中市，第153-158頁。
- [10] 鍾欣樺，徐茂濱，林昱廷，李十三，2009，「二胡穿透力客觀指標的探討」，*中華民國音響學會第二十二屆學術研討會*，新北市，論文編號：A008。

表 3、等距型簡諧倍頻音鐵琴組之自然頻率比對總表

音階 _o	目標頻率 (Hz) _o	量測頻率 (Hz) _o	頻率誤差 值(Hz) _o	頻率容許 誤差值 (Hz) _o	頻率誤差 百分比 (%) _o	厚度 _o
F5 _o	698.46 _o	677 _o	-21.46 _o	±2.42 _o	-3.07 _o	1mm _o
F# _o /G _b _o	739.99 _o	717 _o	-22.99 _o	±2.56 _o	-3.10 _o	1mm _o
G5 _o	783.99 _o	759 _o	-24.99 _o	±2.71 _o	-3.18 _o	1mm _o
G# _o /A _b _o	830.61 _o	830 _o	-0.61 _o	±2.87 _o	-0.07 _o	1.5mm _o
A5 _o	880.00 _o	883 _o	3.00 _o	±3.04 _o	0.34 _o	1.5mm _o
A# _o /B _b _o _2 _o	932.33 _o	937 _o	4.67 _o	±3.23 _o	0.50 _o	1.5mm _o
B5_2 _o	987.77 _o	990 _o	2.23 _o	±3.42 _o	0.22 _o	1.5mm _o
C6_1 _o	1046.50 _o	1043 _o	-3.50 _o	±3.62 _o	-0.33 _o	2mm _o
C# _o /D _b _o _1 _o	1108.73 _o	1110 _o	3.27 _o	±3.84 _o	0.11 _o	2mm _o
D6_1 _o	1174.66 _o	1173 _o	-1.66 _o	±4.06 _o	-0.14 _o	2mm _o
D# _o /E _b _o _1 _o	1244.51 _o	1241 _o	-3.51 _o	±4.31 _o	-0.28 _o	2mm _o
E6_2 _o	1318.51 _o	1310 _o	-8.51 _o	±4.56 _o	-0.64 _o	2mm _o
F6_2 _o	1396.91 _o	1395 _o	-1.91 _o	±4.83 _o	-0.13 _o	2mm _o
F# _o /G _b _o	1479.98 _o	1453 _o	-26.98 _o	±5.12 _o	-1.82 _o	2mm _o
G6 _o	1567.98 _o	1569 _o	1.02 _o	±5.42 _o	0.06 _o	2mm _o
G# _o /A _b _o	1661.22 _o	1610 _o	-51.22 _o	±5.75 _o	-3.08 _o	3mm _o
A6 _o	1760.00 _o	1706 _o	-54.00 _o	±6.09 _o	-3.06 _o	3mm _o
A# _o /B _b _o	1864.66 _o	1805 _o	-59.66 _o	±6.45 _o	-3.19 _o	3mm _o
B6 _o	1975.53 _o	1912 _o	-63.53 _o	±6.83 _o	-3.21 _o	3mm _o

表 4、等距型簡諧倍頻音鐵琴組之各音階聲音頻率及衰減率總表

音階	第一聲音頻率(f_1)		第二聲音頻率(f_2)		第三聲音頻率(f_3)		衰減率
	量測頻率(Hz)	音階比例(f_1/f_1)	量測頻率(Hz)	音階比例(f_2/f_1)	量測頻率(Hz)	音階比例(f_3/f_1)	
F5	677	1	1372	2.02	1992	2.94	2.11
F#^b/G^b	717	1	1530	2.13	2231	3.11	0.55
G5	759	1	1624	2.13	2338	3.08	0.40
G#^b/A^b	830	1	1666	2.00	2462	2.96	1.07
A5	883	1	1769	2.00	2615	2.96	1.16
A#^b/B^b_2	937	1	1860	1.98	2756	2.94	1.57
B5_2	990	1	1965	1.98	2936	2.96	0.67
C6_1	1043	1	2073	1.98	3078	2.95	1.61
C#^b/D^b_1	1110	1	2223	2.00	3287	2.95	1.25
D6_1	1173	1	2352	2.00	3494	2.97	2.18
D#^b/E^b_1	1241	1	2476	1.99	3679	2.96	2.09
E6_2	1310	1	2619	1.99	3890	2.96	1.24
F6_2	1395	1	2799	2.00	4150	2.97	1.03
F#^b/G^b	1453	1	2941	2.02	4982	2.99	0.88
G6	1569	1	3135	1.99	4661	2.97	1.04
G#^b/A^b	1610	1	3081	1.91	4652	2.88	1.12
A6	1706	1	3272	1.91	4923	2.88	1.43
A#^b/B^b	1805	1	3466	1.92	5211	2.88	1.56
B6	1912	1	3682	1.92	5508	2.88	2.51

表 5、F5~B6 音階等距型鐵琴片之聲音品質主觀評估表

音階 [◦]	音準 [◦]	音色 [◦]	明亮度 [◦]	備註 [◦]
F5 [◦]	△ [◦]	△ [◦]	△ [◦]	1. 音準：C6~G6 之音階敲擊以人耳聽起來有其準確性。 [◦] 2. 音色、明亮度：具簡諧倍頻音之鐵琴組相較一般鐵琴，聽起來簡諧倍頻音鐵琴組聲音比較乾淨較純、較亮、音不容易跑掉、不意受干擾。 [◦] 3. 尖銳度：依照敲擊方式的不同，如敲擊速度快慢、敲擊槌重量、敲擊高度，所發出的聲音就有所不同。 [◦] 4. 和諧性：以敲擊三和弦的方式去做測試，因每一片琴的持續度不同，導致和弦音效果不是很理想。 [◦] 5. 整體評估：琴片質感、聲音穩定性、外型一致性，後續需再做加強及修改。 [◦]
F# [◦] /G ^b [◦]	△ [◦]	△ [◦]	△ [◦]	
G5 [◦]	△ [◦]	△ [◦]	△ [◦]	
G# [◦] /A ^b [◦]	△ [◦]	△ [◦]	△ [◦]	
A5 [◦]	△ [◦]	△ [◦]	○ [◦]	
A# [◦] /B ^b [◦] _2 [◦]	△ [◦]	△ [◦]	△ [◦]	
B5_2 [◦]	△ [◦]	△ [◦]	○ [◦]	
C6_1 [◦]	◎ [◦]	◎ [◦]	◎ [◦]	
C# [◦] /D ^b [◦] _1 [◦]	○ [◦]	○ [◦]	○ [◦]	
D6_1 [◦]	◎ [◦]	◎ [◦]	◎ [◦]	
D# [◦] /E ^b [◦] _1 [◦]	○ [◦]	○ [◦]	○ [◦]	
E6_2 [◦]	◎ [◦]	◎ [◦]	◎ [◦]	
F6_2 [◦]	◎ [◦]	◎ [◦]	◎ [◦]	
F# [◦] /G ^b [◦]	○ [◦]	○ [◦]	○ [◦]	
G6 [◦]	◎ [◦]	○ [◦]	◎ [◦]	
G# [◦] /A ^b [◦]	△ [◦]	△ [◦]	△ [◦]	
A6 [◦]	△ [◦]	△ [◦]	△ [◦]	
A# [◦] /B ^b [◦]	△ [◦]	△ [◦]	△ [◦]	
B6 [◦]	△ [◦]	△ [◦]	△ [◦]	

備註：音準、音色、明亮度使用：◎：好、○：一般、△：不好