

指鈸振動特性與敲擊聲音之探討

Discussions on Vibration Characteristics and Percussion Sound of Finger Cymbals

王栢村¹、郭紋利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班研究生

摘要

一對指鈸通常以手持水平方式，並輕輕互相敲擊鈸之外緣，其敲擊聲音呈現銳利和清晰特性，本文旨在探討指鈸的振動和聲音特性。首先以聲音量測程式來測量指鈸之敲擊聲音，使用不同材質敲擊棒，對單一個指鈸敲擊所產生的敲擊聲音，測量記錄其時間域響應，並透過快速傅立葉轉換以分析取得聲音頻譜，可以求得高峰值的基音頻率和泛音之諧波頻率組成，本文也探討兩個指鈸相互敲擊之撞擊聲音特性。另外，也建立指鈸的有限元素模型，並進行模態分析，以得到指鈸之自然頻率及其相對應的模態振型，以聲音量測得到的結構共振自然頻率為基準，修正指鈸有限元素模型，使得得到等效於實際結構之分析模型，並完成模型驗證。從有限元素分析可以明確辨識指鈸結構的振動特性，也可以探討敲擊聲音和振動模態之間的關聯性。本文以有限元素分析以及聲音測量來進行模型驗證，以確定指鈸的振動特性，並了解其敲擊發聲機制，所建立方法並可以應用到其他樂器之研究。

關鍵字：指鈸，敲擊聲音，自然頻率，模態振型

Abstract

A pair of finger cymbals is played by hanging them horizontally and gently striking the outer edge of cymbals together. The percussion sound reveals sharp and clear. This work aims to study the vibration and sound characteristics of finger cymbal. First, the sound measurement program is used to measure the percussion sound of small cymbals. Single cymbal is struck by different stick heads to produce the percussion sound that is measured to record the time domain response and analyzed by fast Fourier transform (FFT) to obtain the frequency spectrum. The peak amplitudes of frequency contents can be identified for the fundamental frequency and overtone. The impact sound between two cymbals is also studied. The finite element (FE) model for the finger cymbal is then constructed to perform modal analysis so as to obtain natural frequencies and their corresponding mode shapes. Base on the measured resonant frequencies from the sound measurement, the FE model can be updated to be equivalent to the real structure for model verification. The vibration characteristics can be identified from finite element analysis (FEA) and shown the relation between the percussion sound and vibration modes. This work shows the application of model verification by FEA and sound measurement to identify the vibration characteristics of finger cymbal and correlate

to its percussion sound .The analgfical approach can be applied to other musical instrument as well.

Keywords : finger cymbal, percussion sound, natural frequency, mode shape

前言

指鈸，打擊樂器之一，形狀似對盅，以黃銅鑄造加工製成，兩頂端各有一小孔，以繩穿繫在一起，兩個為一副，演奏時互擊發音。而指鈸屬無調的打擊樂器，無法敲擊出特定音高或音階變化，節奏變化不多。

對於樂器的模態分析與特性以及聲音與振動間之關聯性，王與吳[1]運用理論有限元素分析對銅鑼進行模態分析求得模態參數包含自然頻率及模態振型，同時對銅鑼進行實驗模態分析獲得實際結構模態參數，基於實驗數據，對銅鑼不同區域分別設定三種模態參數，以符合實際結構特性，並探討銅鑼聲音與振動特性。王與廖[2]對木琴條之聲音與振動作探討。模型驗證方面，以敲擊木琴聲音頻譜為基準修正有限元素模型，求得木琴條等效實際結構，再以等效木琴條實際結構之有限元素模型變更形狀及比例作分析，可作為設計木琴條的參考。在木琴條聲音與振動的探討上，由敲擊木琴聲音進行量測，以不同敲擊鉗及不同敲擊位置對聲音的影響。對照鋼琴頻率，可知道木琴條第一模態為木琴主要發聲頻率，在不同材質敲擊，不會影響聲音主頻率，但泛音會不同。在敲擊不同位置比較，敲擊中心點時，可明顯敲出木琴發聲的第一模態，其他點敲擊時，也可敲出第一模態，但會出現較多其他模態，影響主要發聲。因此不同位置敲擊時，人耳均能聽到木琴基音，差別在泛音不同。也就是說不同敲擊位置會出現不同音色。王與林[3]以實驗分析為基準，修正有限元素模型，確立有限元素模型正確性，並探討不同材質敲擊鉗與不同的敲擊位置對鐵琴片聲音特性。不同材質敲擊鉗從結果中看到鋼鉗敲擊時發聲分貝數最高落在高頻率且其他頻率發聲分貝數也接近，影響主要發聲。塑膠鉗則有兩頻率發聲分貝數較高，人耳聆聽時有兩個頻率聲音。由於鐵琴片設計本身由 C 音階音調，以鐵琴棒激發出第一振動模態與 C 音階鋼琴一致，且發聲分貝數為最高，因此可得知用鐵琴棒敲擊時可以激發鐵琴主要發聲頻率。而以不同位置敲擊時，發現當敲擊點偏移中心時，便會激發出較多的模態，偏移距離越大，被激發出的模態數也越多。因此得知敲擊鐵琴中間點，可明確激出第一振動模態之聲音頻譜。王與陳[4]主要發展一聲音模擬方程式，針對結構振動引發之結構聲音幅射之聲音效果，提出一簡易便捷的模擬方法。

為了解指鈸結構振動與發聲之關係，本文運用 ANSYS 軟體進行有限元素分析與聲音頻譜量測程式來探討指鈸之聲音與振動之間的關係。藉由理論分析與量測分析所得到之模態參數進行驗證，依量測所得到模態參數作為有限元素模型的修正基準，確認有限元素模型之等效性及有限元素分析聲音與振動特性的可行性。因指鈸敲擊時，無固定音高且無節奏變化，故以不同敲擊方式來探討指鈸發聲機制與結構模態振動的變化並掌握不同敲擊的聲音特性。本文主要目的在探討指鈸振動特性與不同敲擊聲音特性。

模型驗證與振動探討

為了探討指鈸聲音與振動特性之關連性，本章以有限元素分析方法的理論為基礎，進行指鈸分析模型之模型驗證，驗證指鈸有限元素模型與實體之等效性，確認實驗分析的可靠性。模型驗證程序如圖 1 模型驗證程序圖。首先將指鈸以立體元素建構有限元素模型，進行模態分析及簡諧分析，從中得到模態參數包括自然頻率(f_n)及模態振型(ϕ_n)及頻率響應函數($H_{ij}(f)$)，最後再進行指鈸實驗聲音量測，求得指鈸之聲音頻譜及峰值頻率，並以實體敲擊聲音量測所求得之峰值頻率，作為有限元素模型之修正基準，修改有限元素材料參數，直到峰值頻率與實驗分析之結果均相當吻合，驗證有限元素模型的正確性。

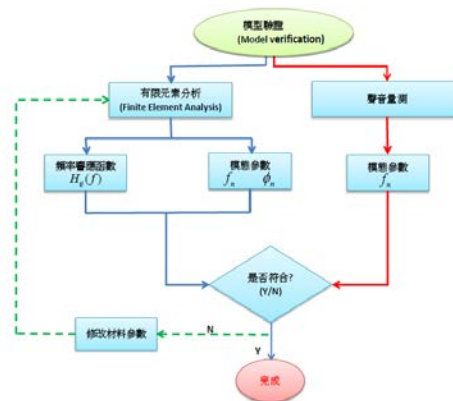


圖 1 模型驗證流程圖

(一)、指鈸敲擊聲音量測

本實驗使用筆電執行聲音頻譜方程式，以麥克風為感測器，分別以敲擊鎚對指鈸 A、B 進行敲擊，進行聲音量測及頻譜分析。指鈸量測在聲音頻譜方程式系統輸入部分，設定取樣頻率為 40kHz、取樣時間為 5 秒、開始時間 0.5 秒、平均次數 2 次、從疊率 90%。在聲音頻譜輸出設定部分，設定平滑次數 2 次、dB 閾值設-80、分析頻率 0-20kHz；進行敲擊量測，可得到聲音時間域函數 $x(t)$ 、頻率域函 $X(f)$ ，表 1 為指鈸 A、B 聲音量測輸出結果、表 2 指鈸主要發聲頻率彙整表，可知道指鈸有四個主要發聲頻率。而從表 2 為指鈸發聲頻率彙整表中可發現指鈸發聲頻率有倍頻之現象。

表 1 指鈸 A、B 聲音量測輸出結果

表 2 指鈸主要發聲頻率彙整表

名稱 項目	指鈸 A	指鈸 B	名稱 頻率 (Hz)	指鈸 A	指鈸 B	指鈸 B 峰值頻率比例
時間域函 數 $x(t)$			第一峰值頻率	3216	3154	1
頻率域函 數 $X(f)$			第二峰值頻率	7141	7039	2.23
			第三峰值頻率	9975	10010	3.17
			第四峰值頻率	12540	12580	3.98

(二)、指鈸有限元素分析

主要應用 ANSYS 軟體對指鈸如圖 2 為指鈸實體圖，進行有限元素模態及簡諧響應分析。在分析前處理方面 (1)有限元素建立:首先運用繪圖軟體繪製指鈸實體模型，再以

ANSYS 軟體 SOLID186 建構有限元素模型如圖 3 為指鉞有限元素模型，(2)材料參數建立:指鉞製作材質為銅合金，其密度為 8500kg/m^3 、楊氏係數為 103GPa 、浦松比為 0.316 (3)有限元素分割:以間距 0.003m 對有限元素模型進行分割，分割完成後如圖 4 指鉞有限元素分割圖，模型分割成 10441 個元素，節點數 17431 點。

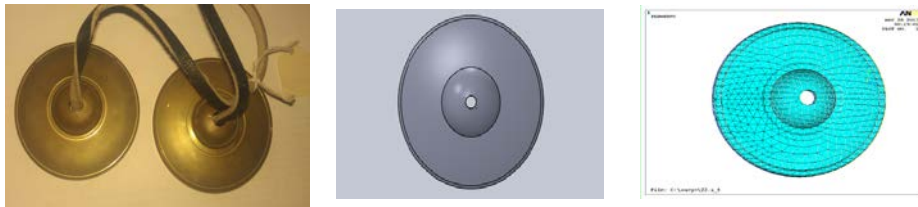


圖 2 為指鉞實體圖 圖 3 為指鉞有限元素模型 圖 4 指鉞有限元素分割圖

在模態分析 (Modal Analysis) 中不用設定負荷及位移限制條件，分析頻率設 $0\text{-}20\text{kHz}$ ，總共 13 個模態參數，其模態參數包含自然頻率及模態振型如表 4 為指鉞自然頻率與模態振型表。並將實驗分析所求得之模態參數作為基準，以修正有限元素之模型，使理論分析與實驗分析得到的自然頻率之誤差率為最小，進而確定有限元素模型與實體物之等效性。而簡諧響應分析(Harmonic Analysis) 中，則必須設一個單位力，本實驗分別以位置 1 設定作用點位置如圖 5 作用力 1 設置，位移限制設定為自由邊界，分析頻寬設 20kHz ，求得頻率響應函數如圖 6 頻率響應函數輸出圖。從模態分析及簡諧分析結果得知，在 20kHz 以下主導結構振動主要有七個模態振型，在與其聲音量測所得之峰值頻率比較，可發現於 6235Hz 、 10872Hz 、 16620Hz 三個頻率與 3134Hz 頻率模態振型相近，振型相互抵消無振動產生聲音。

表 3 為指鉞自然頻率與模態振型表

模態數 (mode)	模態振型	自然頻率 (Hz)	物理意義 (r, θ)	模態數 (mode)	模態振型	自然頻率 (Hz)	物理意義 (r, θ)
F-01		3134.4	(0,2)	F-08		10872	(0,4)
F-02		3136.2	(0,2)	F-09		10873	(0,4)
F-03		6235.2	(0,3)	F-10		14018	(0,4)
F-04		6236.1	(0,3)	F-11		14040	(0,4)
F-05		7668.9	(1,0)	F-12		16620	(0,5)
F-06		10182	(0,1)	F-13		16622	(0,5)
F-07		10198	(0,1)				

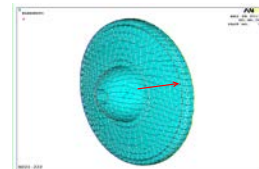


圖 5 作用力 1 設置圖

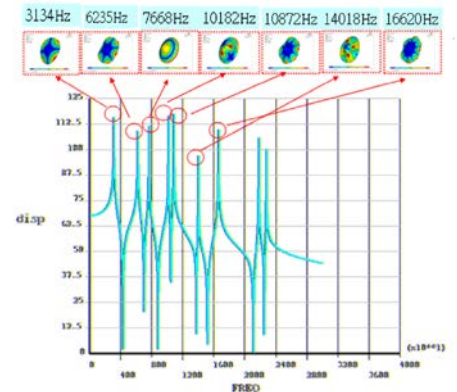


圖 6 頻率響應函數輸出圖

(三)、模型驗證與振動特性探討

模型驗證主要以指鉞聲音頻譜量測分析求得之峰值頻率與有限元素分析模態分析

求得之模態參數包含自然頻率及模態振型及簡諧分析求得之頻率響應函數進行比對，確認有限元素結構之正確性，並對指鈸聲音與振動模態的關連性進行探討。

振動模態大致可分成整體模態及局部模態如表 4 為振動模態分類表，而指鈸局部模態區分成鈸臍及鈸環模態如圖 7 為指鈸局部模態區分示意圖，由表 5 有限元素分析與聲音頻譜量測結果比較表中，可觀察在頻率 20kHz 以下總供有 13 個模態振型，與指鈸敲擊聲音量測所得峰值自然頻率比較，主要發聲頻率誤差值在±3%以內，顯示自然頻率的比對是符合的，因此可確認有限元素模型的正確性。

表 4 為振動模態分類表

	模態分類	物理意義
振動模態	整體模態 Global mode	(r, θ)
	局部模態 Local mode	鈸臍 (r, θ)
		鈸環 (r, θ)

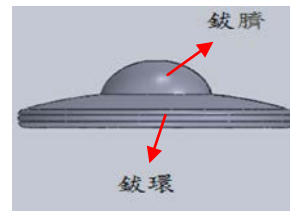


圖 4-9 為指鈸局部模態區分示意圖


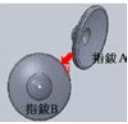
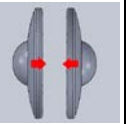
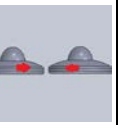
表 5 有限元素分析與聲音頻譜量測結果比較表

FEA			EXP (指鈸 B)		頻率誤差 (%)	模態物理意義 (r, θ)	FEA			EXP (指鈸 B)		頻率誤差 (%)	模態物理意義 (r, θ)
模態數 (mode)	模態振型	自然頻率 (Hz)	聲音頻譜頻率	聲音頻譜頻率			模態數 (mode)	模態振型	自然頻率 (Hz)	聲音頻譜頻率	聲音頻譜頻率		
F-01		3134.4			3154	0.6%	局部模態 鈸環(0,2)	F-08				10872	-
F-02		3136.2	F-09					10873					
F-03		6235.2	-	-	局部模態 鈸環(0,3)	F-10		14018	12580	10.2%	-	-	局部模態 鈸臍(0,2) 鈸環(0,2)
F-04		6236.1				F-11		14040					
F-05		7668.9	7039	-8.2%	整體模態 (1,0)	F-12		16620	-	-	-	-	局部模態 鈸環(0,5)
F-06		10182	10010	-1.68%	局部模態 鈸環(0,1)	F-13		16622					
F-07		10198											

指鈸敲擊聲音之探討


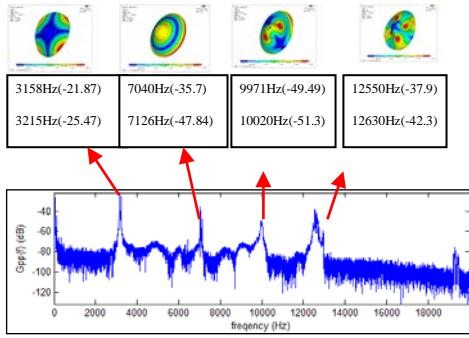
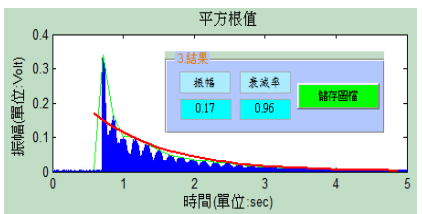

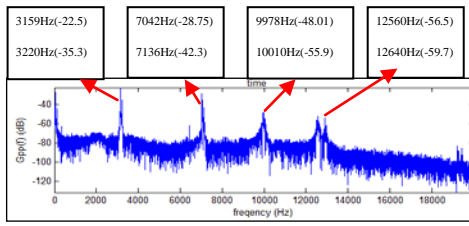
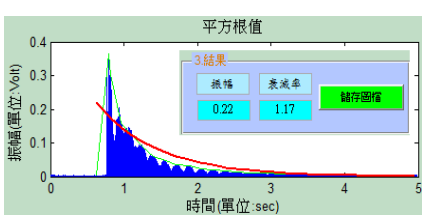
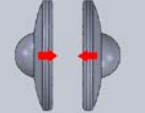
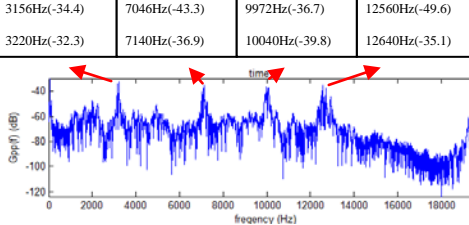
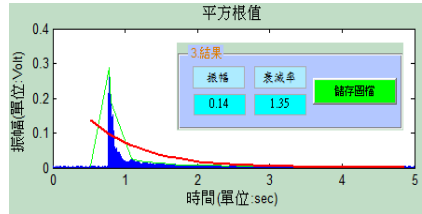
由於指鈸僅單一結構體，無固定音高且無節奏性變化，屬於無調打擊樂器，為了表現指鈸聲音特色及增加音色的多樣化，因此本節以不同互擊方式如表 6 不同擊方式規畫表，對指鈸進行聲音頻譜量測，探討不同方式敲擊的聲音特性。由不同敲擊方式所得聲音特性，從中可找出適合表現指鈸聲音特色的敲擊方式，對未來可增加演奏時聲音的豐富性。

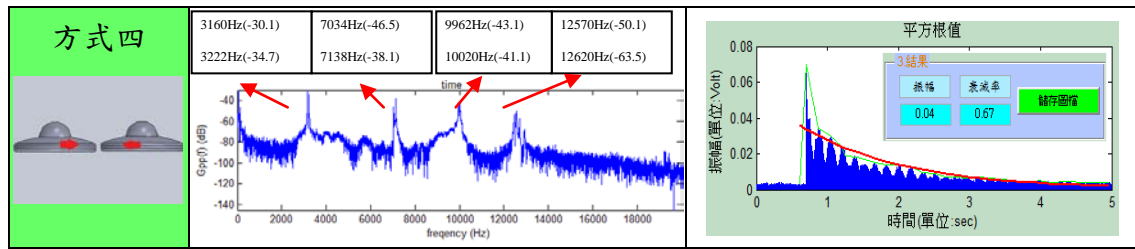
表 6 不同擊方式規畫表

方式 型式	方式一	方式二	方式三	方式四
互相 敲擊				

從探討指鈸的聲音特性，可得知指鈸聲音有清脆嘹亮、綿延不絕、倍頻的特色。因此本小節以四種常用敲擊方式進行聲音頻譜方程式量測，從中探討其敲擊方式之聲音特性，是否可表現出指鈸聲音特色。由表 7 為指鈸不同互擊方式聲音量測之輸出結果，從中可發現不同的敲擊方式，均可敲出指鈸主要發聲頻率且均可表現出指鈸聲音特色，但方式三主要第一發聲峰值頻率與其他峰值頻率振幅相當，且衰減率明顯大於其他三者，聲音的特色較不易被突顯。而其他三種敲擊方式聲音的振幅呈正弦波非線性漸小的狀態，且衰減率小，均可明顯表現出指鈸聲音特色，但以方式四為最佳敲擊方式。

表 7 為指鈸不同互擊方式聲音量測之輸出結果

輸出 方式	頻率域函數 $X(f)$	衰減率 σ																
方式一 	 <table border="1"> <tr> <td>3158Hz(-21.87)</td> <td>7040Hz(-35.7)</td> <td>9971Hz(-49.49)</td> <td>12550Hz(-37.9)</td> </tr> <tr> <td>3215Hz(-25.47)</td> <td>7126Hz(-47.84)</td> <td>10020Hz(-51.3)</td> <td>12630Hz(-42.3)</td> </tr> </table>	3158Hz(-21.87)	7040Hz(-35.7)	9971Hz(-49.49)	12550Hz(-37.9)	3215Hz(-25.47)	7126Hz(-47.84)	10020Hz(-51.3)	12630Hz(-42.3)	 <table border="1"> <tr> <td>3 結果</td> <td>振幅</td> <td>衰減率</td> <td>儲存圖像</td> </tr> <tr> <td></td> <td>0.17</td> <td>0.96</td> <td></td> </tr> </table>	3 結果	振幅	衰減率	儲存圖像		0.17	0.96	
3158Hz(-21.87)	7040Hz(-35.7)	9971Hz(-49.49)	12550Hz(-37.9)															
3215Hz(-25.47)	7126Hz(-47.84)	10020Hz(-51.3)	12630Hz(-42.3)															
3 結果	振幅	衰減率	儲存圖像															
	0.17	0.96																
方式二 	 <table border="1"> <tr> <td>3159Hz(-22.5)</td> <td>7042Hz(-28.75)</td> <td>9978Hz(-48.01)</td> <td>12560Hz(-56.5)</td> </tr> <tr> <td>3220Hz(-35.3)</td> <td>7136Hz(-42.3)</td> <td>10010Hz(-55.9)</td> <td>12640Hz(-59.7)</td> </tr> </table>	3159Hz(-22.5)	7042Hz(-28.75)	9978Hz(-48.01)	12560Hz(-56.5)	3220Hz(-35.3)	7136Hz(-42.3)	10010Hz(-55.9)	12640Hz(-59.7)	 <table border="1"> <tr> <td>3 結果</td> <td>振幅</td> <td>衰減率</td> <td>儲存圖像</td> </tr> <tr> <td></td> <td>0.22</td> <td>1.17</td> <td></td> </tr> </table>	3 結果	振幅	衰減率	儲存圖像		0.22	1.17	
3159Hz(-22.5)	7042Hz(-28.75)	9978Hz(-48.01)	12560Hz(-56.5)															
3220Hz(-35.3)	7136Hz(-42.3)	10010Hz(-55.9)	12640Hz(-59.7)															
3 結果	振幅	衰減率	儲存圖像															
	0.22	1.17																
方式三 	 <table border="1"> <tr> <td>3156Hz(-34.4)</td> <td>7046Hz(-43.3)</td> <td>9972Hz(-36.7)</td> <td>12560Hz(-49.6)</td> </tr> <tr> <td>3220Hz(-32.3)</td> <td>7140Hz(-36.9)</td> <td>10040Hz(-39.8)</td> <td>12640Hz(-35.1)</td> </tr> </table>	3156Hz(-34.4)	7046Hz(-43.3)	9972Hz(-36.7)	12560Hz(-49.6)	3220Hz(-32.3)	7140Hz(-36.9)	10040Hz(-39.8)	12640Hz(-35.1)	 <table border="1"> <tr> <td>3 結果</td> <td>振幅</td> <td>衰減率</td> <td>儲存圖像</td> </tr> <tr> <td></td> <td>0.14</td> <td>1.35</td> <td></td> </tr> </table>	3 結果	振幅	衰減率	儲存圖像		0.14	1.35	
3156Hz(-34.4)	7046Hz(-43.3)	9972Hz(-36.7)	12560Hz(-49.6)															
3220Hz(-32.3)	7140Hz(-36.9)	10040Hz(-39.8)	12640Hz(-35.1)															
3 結果	振幅	衰減率	儲存圖像															
	0.14	1.35																



結論

本文主要進行指鈸有限元素模型驗證，確認有限元素模型的正確性，並對指鈸結構振動與聲音特性進行探討，從理論分析及實際量測資料進行探討，其結論歸納如下：

1. 在理論有限元素分析所得自然頻率與實際量測所得峰值頻率，比對大致符合，可確認模型驗證是成功的，因此可確認有限元素分析模型與實體模型相近對指鈸聲音的預測有實質上幫助，在未來可應用於探討不同結構模型的聲音預測。
2. 從指鈸主要發聲模態振型可發現，主要發聲均屬於周向變形，而變形最大位移量均在離中心最遠的地方。因此敲擊指鈸最外側時，可得最大響應。
3. 在不同敲擊鎚敲擊不同位置，一樣可發出指鈸的聲音特性，但聲音被激發出的響應卻差很多，因此敲擊鎚材質應選用較硬材質，有益表現指鈸的聲音特性。而不同的互相敲擊方式，均可表現指鈸聲音特性，但音色會有些許不同。因此可依演奏的需求，以方式一、方式二、方式四這三種不同敲擊方式，可增加指鈸聲音的變化性。
4. 從指鈸發聲頻率彙整表中可發現指鈸發聲頻率有倍頻之特色，因此爾後可針對不同樂器形狀產生倍頻的特色進行探討，可增加不同樂器之特色。

參考文獻

1. 王栢村，吳銘峰，2011，「銅鑼模型更新及聲音特性探討」，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。
2. 王栢村，廖偉廷，2009，「木琴條聲音與振動關聯性及形狀變更之設計分析」，2009『屏東科技大學』暨『北京科技大學』第四屆學術交流研討會，屏東，論文編號：C-14，第C-72-C-78頁
3. 王栢村，林怡馨，2007，「鐵琴片振動特性與聲音關聯性之探討」，2007中華民國音響學會年會暨第二屆論文發表會，臺北，論文編號：C5。
4. 王栢村，陳品豪，吳銘鋒，董時沛，2010，「聲音模擬程式之發展與應用」，中華民國振動與噪音工程學會第二十三屆學術研討會論文集，台北，第205-211頁。