

Correlation Study on Subjective and Objective Sound Quality Evaluation of Percussion Instruments

Bor-Tsuen Wang^{1,*} Chia-Hsien Huang¹ Ying-Huei Wu² Tze-Kuang Lee¹
Sho-Chuan Hsu³

¹ Department of Mechanical Engineering, National Pingtung University of Science and
Technology

² National Nei-Pu Senior Agricultural-Industrial Vocational School of Machinery Division

³ Department of Music, Tainan University of Technology

Abstract

There are many types of percussion instruments that reveal different sound characteristics. The proper evaluation methodology is desired to evaluate the sound quality. This work aims to discuss the correlation between the subjective evaluation and objective indices. Objective evaluation indices including fundamental frequency, overtone frequencies, decay rate, spectrum centroid and spectrum irregularity are presented from literature survey. The application of objective indices to sound quality study is shown to investigate their physical meanings regarding subjective sound perception. The objective indices are then used to study the sound quality of percussion instruments. Subjective evaluation is carried out by using Sound Measurement (SM) and Sound Generation (SG) modules, respectively, to measure the percussion sound and reproduce the sound wave according to the contributed sound spectrum. The sound wave is played to randomly selective persons who will respond the subjective feel regarding to sharpness, brightness, continuity and etc. The objective metrics can also be obtained and related to subjective evaluation, so as to discuss the feasibility of sound quality evaluation method. The subjective and objective evaluation method is then applied to evaluate the sound quality of different percussion instruments with different types of mallets. Results show the sharpness, brightness and continuity from subjective evaluation are related to those objective metrics, i.e. spectrum centroid, spectrum irregularity and decay rate. The sound quality evaluation method is shown potentially applicable to percussion instruments.

Keywords: Percussion Instrument; Sound Quality Evaluation; Objective Index/Metric; Subjective Evaluation.

*Corresponding author: Bor-Tsuen Wang / Address: 1, Shuefu Road, Neipu, Pingtung 91201, TAIWAN (R.O.C.)
/ Phone: +886-8-7703202 ext. 7017/ E-mail: wangbt@mail.npust.edu.tw

打擊樂器主客觀聲音品質評價之關聯性探討

王栢村^{1,*} 黃家賢¹ 吳盈輝² 李之光¹ 徐秀娟³

¹國立屏東科技大學機械工程系

²國立內埔高級農工職業學校機械科

³台南科技大學音樂系

摘 要

打擊樂器種類相當多種，由於每種樂器皆有其獨特之聲音特性，為能了解並評估其聲音品質的特性，因此需建立一套評估打擊樂器優劣性之聲音品質評價模式。本文主要針對打擊樂器建立其聲音品質之主觀評價及客觀指標的關聯性探討，首先透過文獻回顧了解各個客觀指標，分別有基音頻率(音準)、泛音頻率(音色)、衰減率、頻譜質心、頻譜不規則度等客觀指標之物理意義，以及與主觀聲音感受的關聯性，藉以探討各項客觀指標之應用，並建立適用於打擊樂器之主客觀評價方式。主觀評價係透過聲音量測分析程式與聲音模擬程式模組，分別進行實體打擊樂器之聲音量測與模擬其實際聲音頻譜之聲音，透過隨機問卷調查，探討音色、尖銳度、亮度、持續度等主觀感受，同時由客觀指標探討與主觀評價之關聯性，以探討樂器聲音品質評價模式之可行性。最後將建立之主客觀評價模式，透過量測不同打擊樂器搭配不同琴槌之聲音頻譜，探討打擊樂器聲音品質之主客觀評價關聯性，結果顯示其尖銳度、亮度與持續度等主觀評價，與客觀指標的頻譜質心、頻譜不規則度與衰減率有明顯對應之關聯性，所建立之主客觀評價模式可應用於探討打擊樂器之聲音品質。

關鍵字：打擊樂器；聲音品質評價；客觀指標；主觀評價。

*通訊作者：王栢村 / 地址：91201 屏東縣內埔鄉老埤村學府路 1 號 / 電話：08-7703202 ext. 7017 / E-mail: wangbt@mail.npust.edu.tw

一、前言

打擊樂器種類相當多種，由於每種樂器皆有其獨特之聲音特性，為能了解並評估其聲音品質的特性，本文透過文獻回顧收集大量與聲音品質評價指標相關之文獻，並訂定聲音品質評價之客觀指標並與主觀評價進行連結，建立一套評估打擊樂器優劣性之聲音品質評價模式。

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[1]利用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，透過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[2]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 之間的聲音壓力大小，並據以製定「穿透力」之樂音指標。其結果成功定義穿透力之客觀指標，並由主觀評價獲得肯定。

為探討樂器聲音品質，需要有客觀之量化指標藉以評量，也需要結合主觀意見之回饋，Labuschagne 及 Hanekom [3]透過使用在音色感知的研究中，在心理試驗中有呈現個別音色特性，須確保音色特性不會有共同變化的產生，並透過一種數學助劑的合成方法，提出可以完全控制頻譜之參數，如頻譜質心(spectral centroid)、頻譜不規則度(spectral irregularity)、對數上升時間(log rise time)、持續衰減度(sustain/decay properties)等，並以 6 名聽眾進行主觀評估，得知以上 4 個音色特性之影響。Gwak et al. [4]探討電動汽車動力傳動系統之音場設計，因為 EV 電動車輛之內部聲音，因為大量降低了引擎噪音，沒有傳統車輛，隨著引擎高速運轉的操作感受，所以有加入虛擬聲音設計(virtual sound design)的構想；並以音樂諧和理論(musical harmonics theory) 也就是產生倍頻音效果，使得駕駛人，有較佳的聽覺感受；也考慮傳統心理聲學(psychoacoustics)指標，例如：響度(loudness)、尖銳度(sharpness)、粗糙度(roughness)、調性(tonality)等。運用在電動車內產生一個最佳簡谐波，以高頻分量的簡谐波概念，插入一個虛擬聲進行模擬，並以 6 種主觀評價之語意描述進行評估，包括：宜人/令人不快(pleasant/unpleasant)、平靜/動感(calm/dynamic)、平滑/粗略(smooth/rough)、響亮的/寧靜的(loud/quiet)、尖銳/沉悶的(sharp/dull)、豪華/廉價(luxury/cheap)，其主觀評價結果得知其內部聲音的主觀印象，可以透過以上方法做音場設計，透過主客觀的評價意見確實增加了可信度，也證明該方法的有效性。Bulen [5]以明亮度(brightness)探討喇叭的音色(timbre)，從喇叭的發聲特性，主要觀察聲音頻譜(sound spectrum)，並由音階頻率(pitch frequency)檢視音準，從頻譜看音色，引用明亮度(brightness)、響度(loudness)等心理聲學指標連結喇叭的設計。Zicari et al. [6] 針對不同的喇叭吹嘴形狀設計，探討對小喇叭的音色影響，也進行流場分析，預測聲音壓力及其頻譜。並與實驗量測結果做吹嘴形狀之評估，以音色(timbre)、語調(intonation)、攻擊角(attack)、靈活度(flexibility)、響應度(responsiveness)等面向對樂器本身之評估，在樂器聲音品質的主觀問卷調查則以清晰(clear)，明亮(bright)，亮麗(brilliant)，圓潤(round)，深沉(dark)，黯淡(gloomy)。對於探討樂器的演奏性(playability)，以及感知

聲音品質(perceived sound quality)，以能評估得到較佳的樂器品質，在主觀評價方法，還是需要轉化屬於本土文化、語言認知上的轉化，並能夠與音樂專業人士感知用語相結合。

本文主要針對打擊樂器建立其聲音品質之主觀評價及客觀指標的關聯性探討，透過文獻回顧收集大量與聲音品質評價指標相關之文獻，建立客觀之聲音品質評價指標，並透過實驗室所開發之聲音量測與模擬程式探討主觀評價與客觀指標之關聯性，最後應用在實際打擊樂器上了解主觀評價與客觀指標之關聯性。

二、聲音品質客觀評價指標之訂定

本文針對打擊樂器之聲音品質客觀評價指標進行建立與探討，首先透過文獻回顧收集大量與樂器客觀指標之相關文獻，並了解各個客觀評價指標之物理意義，分別有音準、音色、持續度、頻譜質心、頻譜不規則度，且客觀指標又分為質化指標與量化指標，透過打擊樂器與弦樂器之特性作為範例探討各項客觀評價指標之應用，建立適用於打擊樂器之客觀評價指標。

每個音階頻率皆有對應之標準頻率，透過 D6 音階為例，圖 1 為 D6 音階之聲音頻譜圖，(a)單一發聲頻率，(b)基音頻率與泛音頻率，主要發聲頻率由頻譜中具有明顯峰值之第一頻率為基音頻率，而其餘發聲頻率則作為泛音頻率；每個音階之標準頻率主要透過音高[7]定義，並由 MIDI(Musical Instrument Digital Interface)標準，並推算下列方程式：

$$P_n = P_a \times 2^{(n-a)/12} \quad (1)$$

其中 P_n 為任意音階之標準頻率，並以 P_a 為基準頻率。

由董[8]論文得知，在任意發聲結構所產生聲音其對應之音階頻率，其精確度無法與標準頻率完全一致，且每個音階頻率皆有其容許誤差範圍，一個半音為 100 cents，一個八度音則為 1200 cents，假設 a 為已知音階頻率，為求得未知音階頻率 b 之方程式為：

$$b_1 = a \times 2^{n/1200} \quad (2)$$

其中 b 為音階頻率， a 為已知音階頻率， n 為間格的分音，而人所能分辨的音分範圍約為 $\pm 5 \sim 6$ cents 左右。其基音頻率之容許誤差值可計算如下列關係式：

$$[(b_{1,2} - a) \div a] \times 100 = \pm 0.347\% \quad (3)$$

並由式 3 之計算式得知頻率之容許誤差為 $\pm 0.347\%$ ，其計算方程式用於其他音階頻率，並定義下列方程式為音準客觀之量化指標：

$$\varepsilon = \frac{f_1 - f_s}{f_s} \times 100\% < \pm 0.347\% \quad (4)$$

其中 ε 為基音頻率與標準頻率之誤差百分比， f_1 為基音頻率， f_s 為音階標準頻率。

音色在每樣樂器中佔了相當重要的地位，本節針對音色之客觀指標進行探討，並透過範例了解其音色在客觀指標上之物理意義，音色主要影響人耳主觀之感覺，並由泛音之發聲頻率與頻率振幅之變化來影響其感覺，透過泛音頻率對基音頻率之比值，推算下列方程式：

$$R_r = \frac{f_r}{f_1} \quad (5)$$

其中， R_r 為泛音頻率與基音頻率之頻率比， f_1 為基音頻率， f_r 為第 r 個模態之泛音頻率。

其計算出頻率比，若成整數比該特性為簡諧倍頻音，其該特性為弦樂器固有之聲音特性，其聲音特性會有和諧、令人悅耳之感覺，透過不同之頻率比，也會有不同之音色感覺，透過簡[9]論文得知，大三和弦音主要由 C-E-G 三個音階所組成之聲音頻率；音色之客觀指標除了頻率比為主要影響之因素，其泛音頻率之振幅與泛音頻率之衰減率皆會影響音色感覺之差異，如高頻泛音之聲音振幅大於基音頻率時，聲音很明顯較尖銳，泛音之頻率振幅小於基音頻率之振幅時則反之，不同衰減率也會對音色造成影響。

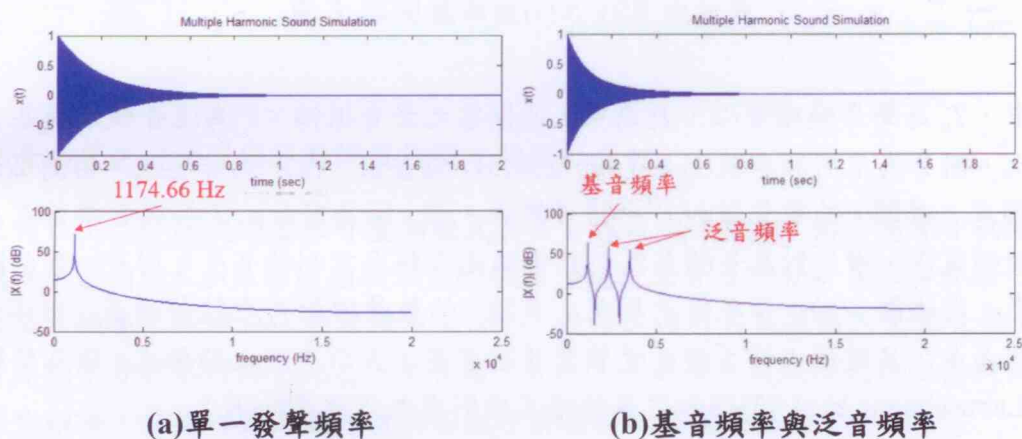


圖 1 D6 音階之聲音頻譜圖

本小節針對持續度之客觀指標進行探討，持續度為敲擊樂器聲音響應之時間長短，由陳[10]論文中得知，一個具有對數衰減之聲音正弦波行圖，考慮其相位角 ϕ ，得到下列方程式：

$$p_r(t) = P_r e^{-\sigma_r t} \sin(\omega_r t + \phi_r), \quad \sigma_r = \xi_r \omega_r = \xi_r 2\pi f_r = \frac{1}{\tau_r} \quad (6)$$

其中， $p_r(t)$ 為第 r 個模態之聲音時間函數， P_r 為第 r 個模態之聲音振幅， f_r 為第 r 個模態之聲音頻率(Hz)， t 為時間域之響應時間， ξ_r 為第 r 個模態之阻尼， ϕ_r 為第 r 個模態之相位角， ω_r 為第 r 個模態之聲音頻率(rad/sec)， σ_r 為第 r 個模態之衰減率， τ_r 為第 r 個模態之時間常數。

透過以上方程式，得知故聲音頻譜具有多頻率之特性時，其整體聲音時間函數將透過累加單一具有對數衰減之聲音正弦波，透過式 6 推導其下列關係式：

$$p(t) = \sum_{r=1}^n P_r e^{-\sigma_r t} \sin(\omega_r t + \phi_r) = \sum_{r=1}^n p_r(t) \quad (7)$$

其中 $p(t)$ 為整體聲音時間函數。

本小節針對頻譜質心(spectral centroid)與不規則度(spectral irregularity)分別進行客觀指標之探討，透過 Labuschagne et al. [3] 定義其關係式，並利用範例了解其客觀指標之物理意義，由 Jensen, K. K. [11] 定義頻譜質心又稱為亮度(brightness)，其方程式如下：

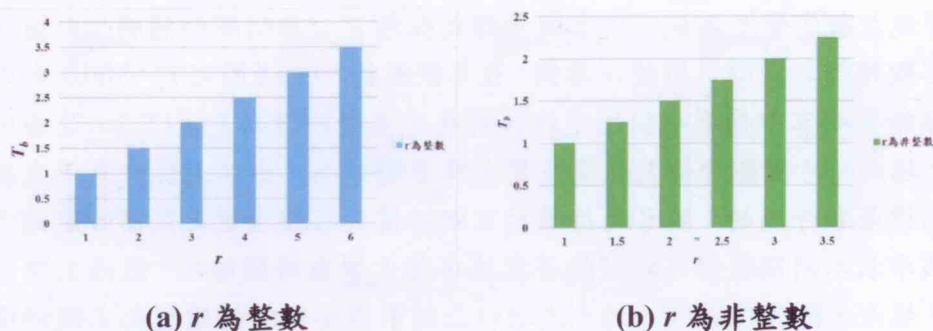
$$T_b = \frac{\sum_{r=1}^n r P_r}{\sum_{r=1}^n P_r} \quad (8)$$

其中， T_b 為聲音頻譜質心， P_r 為第 r 個模態之聲音振幅， r 為泛音頻率與基音頻率之頻率比。圖 2 為不同頻率數(r)之 T_b 比較圖(a) r 為整數，(b) r 為非整數，由圖 2(a)可發現當 P_r 固定，且隨 r 的數量增加 T_b 也隨著增長，且 r 須為整數，了解說當樂器在人耳觀感之有效頻寬內，增加對基音頻率之整數倍頻泛音頻率有利於亮度之增長，且主觀感覺較於宏亮。透過圖 2(b)，發現當 P_r 固定，且隨 r 的數量增加 T_b 也隨著增長，但不如 r 為整數增長之多，且透過人耳主觀感覺聲音並不宏亮，表示亮度之關係式 r 須為整數。

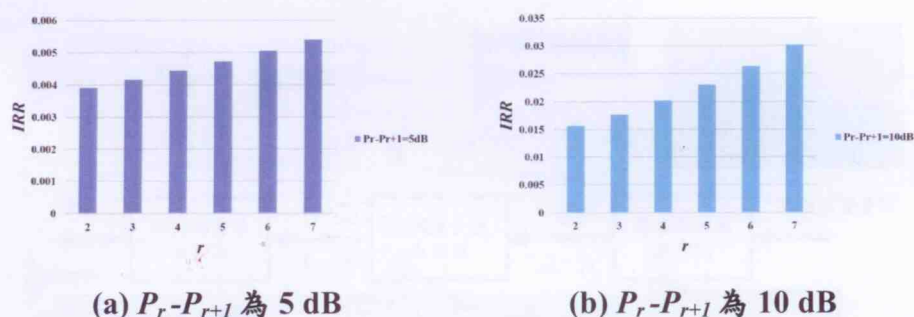
以 Labuschagne et al. [3] 得知定義頻譜不規則度之方程式如下：

$$IRR = \frac{\sum_{r=1}^n (P_r - P_{r+1})^2}{\sum_{r=1}^n P_r^2} \quad (9)$$

其中， IRR 為聲音頻譜不規則度， P_r 為第 r 個模態之聲音振幅， r 為泛音頻率與基音頻率之頻率比。

圖 2 不同頻率數(r)之 T_b 比較圖

由圖 3 為不同頻率數(r)之 IRR 比較圖，(a) $P_r - P_{r+1}$ 為 5 dB，(b) $P_r - P_{r+1}$ 為 10 dB，可發現 $P_r - P_{r+1}$ 越大其 IRR 越大，隨著 r 越多其 IRR 也越大。

圖 3 不同頻率數(r)之 IRR 比較圖

三、聲音品質主觀評價與客觀評價指標之關聯性探討

透過以上小節所說明之聲音量測程式與聲音模擬程式模組，圖 4 為聲音模擬程式模組之應用示意圖，本小節將透過敲擊實際鐵琴片進行聲音量測分析並求得實際之客觀數據包含聲音頻率之振幅 P_r 、聲音頻率 f_r (Hz)，後續透過將其數據匯入至聲音量測程式，進行自然頻率分析求得阻尼比 ξ_r 、聲音檔(*.wav)，並由聲音模擬程式模組模擬其客觀數據之聲音頻譜，並探討其主觀評價與客觀評價指標之關聯性。

本小節透聲音模擬程式模組模擬聲音頻譜對應用於上小節所定義之客觀指標(音色、衰減率、頻譜質心)進行探討，並與主觀評價進行連結，透過主觀問卷調查之方式進行，針對隨機選取 8 人進行問較調查，並將其結果由 5 等地進行劃分，分為非常好=5 分、好=4 分、普通=3 分、差=2 分、非常差=1 分，並進行加權平均獲得其主觀感覺數據值，透過四種不同頻率振幅之聲音頻譜，探討主觀評價尖銳度之差異性，圖 5 為尖銳度主觀評價與客觀指標之關聯性雷達示意圖，透過主觀問卷調查結果發現在 case2 時最尖銳，由圖 5 發現高泛音頻率且頻率振幅較高時主觀評價尖銳感覺也較高，反之當基音頻率之振幅高時，在主觀評價感覺則較為沉悶，並透過頻譜質心與衰減率等客觀指標，進

行比對，發現主觀感覺之尖銳度與客觀指標之頻譜質心有明顯的關聯性；圖 6 為亮度主觀評價與客觀指標之關聯性雷達示意圖，在客觀數據中透過固定 $P_r=80\text{dB}$ 由式 8 進行運算，並由頻譜質心客觀指標之特性了解其對應之主觀評價為亮度(T_b)，透過主觀問卷調查發現當 r 越大時，主觀評價之亮度感覺也隨著越響亮，由以上現象表示亮度之主觀評價與客觀指標是有呼應的；圖 7 為持續度主觀評價與客觀指標之關聯性雷達示意圖，利用更改衰減率表示時間響應之時間隨著衰減率越大響應時間越短，透過主觀問卷調查發現，衰減率越大主觀評價感覺越短，透過以上結果成功驗證持續度之主觀評價與衰減率之客觀指標是有明確應對的，最後訂定尖銳度、亮度及持續度等主觀評價，由主觀問卷調查之結果了解各個主觀評價指標之最合適之等地，表 1 為主觀指標最合適等地分級表，透過以上結果得知尖銳度在客觀案例中 case2 所對應之主觀評價等第 3.25 為最合適、其亮度之主觀評價在客觀指標 $T_b=2\sim 2.5$ 最合適、持續度主觀評價則在客觀指標 $\sigma=2\sim 3$ 為最合適。

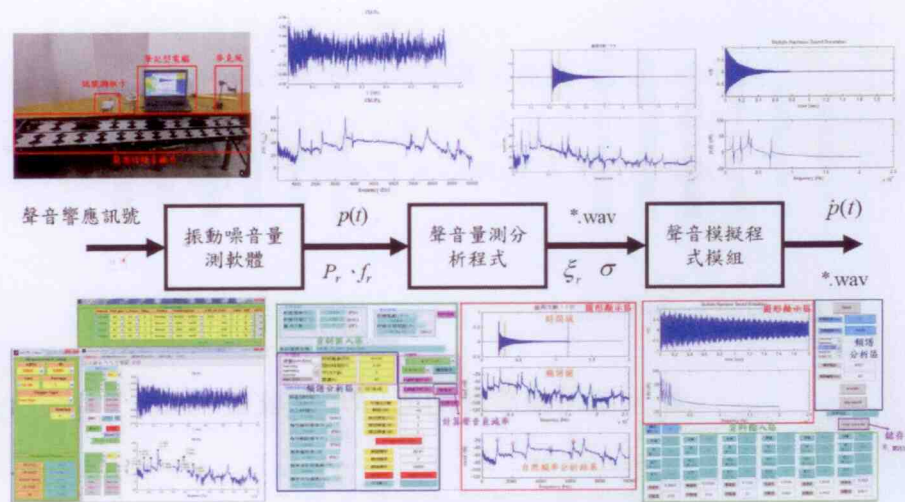


圖 4 聲音模擬程式模組之應用示意圖

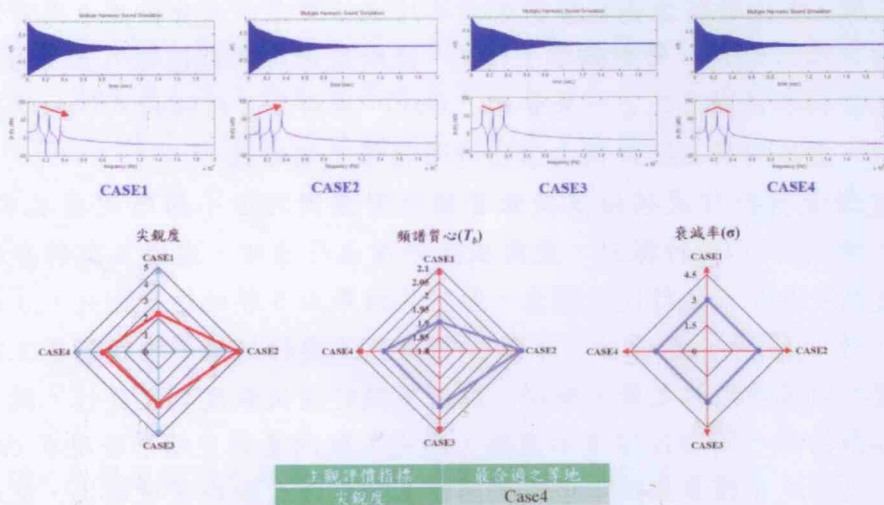


圖 5 尖銳度主觀評價與客觀指標之關聯性雷達示意圖

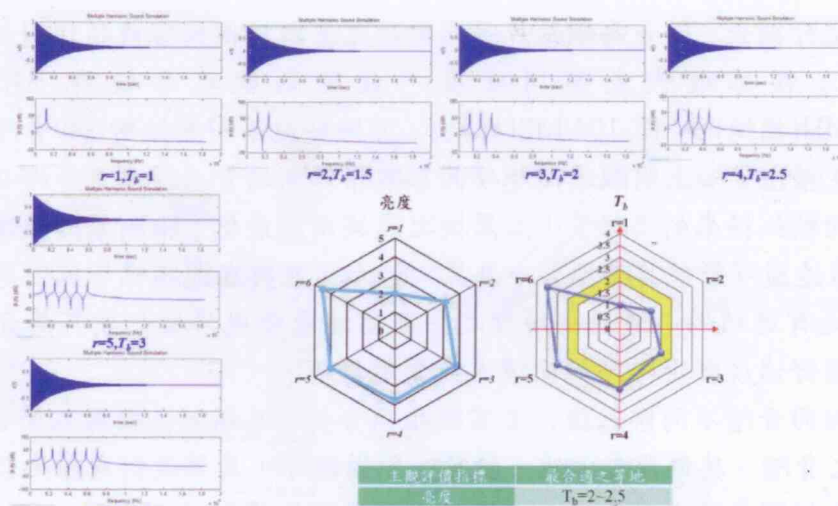


圖 6 亮度主觀評價與客觀指標之關聯性雷達示意圖

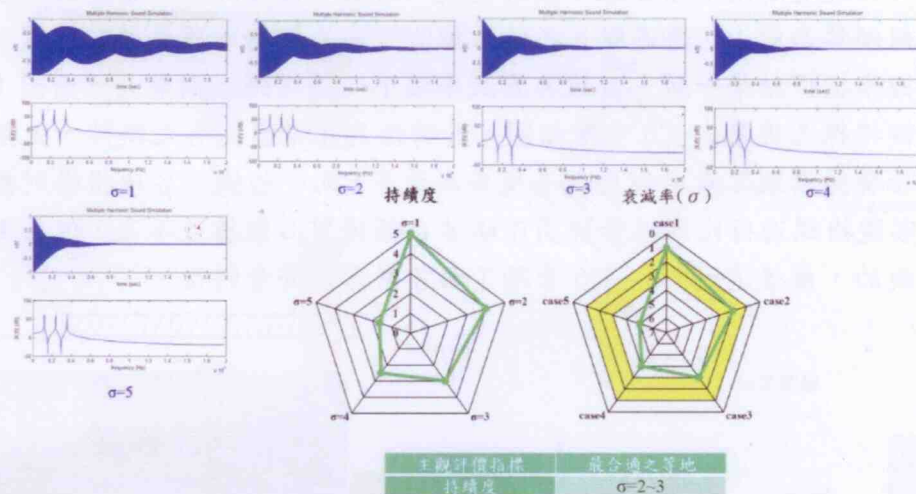


圖 7 持續度主觀評價與客觀指標之關聯性雷達示意圖

表 1 主觀評價與客觀指標對應最合適等地分級表

主觀評價	最合適之等地
尖銳度	Case4
亮度	$T_b=2\sim2.5$
持續度	$\sigma=2\sim3$

四、打擊樂器主觀評價與客觀評價指標之應用

本節針對簡諧倍頻音鐵琴片 D6 音階進行聲音量測，並得知其聲音頻譜，透過主觀問卷調查其不同琴槌敲擊實際鐵琴片之聲音影響，以尖銳度、亮度、持續度及整體舒適

度等主觀評價進行調查，圖 8 為鐵琴片不同琴槌之主觀評價與客觀指標對照示意圖，由圖中所示有三種琴槌代表不同硬度，最硬到軟之琴槌為 ME-101/VH(黑槌)→ME-103/MH(橘槌)→ME-104/MS(紅槌)，可以發現不同琴槌對 D6 音階鐵琴片之客觀指標特性，在頻譜質心上明顯琴槌越硬其客觀指標頻譜質心就越大，而在衰減率上發現橘槌衰減率相較紅槌來的高很多，且黑槌之衰減率為最低，推測琴槌硬度會影響其衰減率大小，由雷達圖可發現其亮度大小為黑>橘>紅，並與客觀指標皆能對應表示主觀評價與客觀指標是有連結的，透過持續度之主觀雷達圖發現琴槌越硬其聲音持續度就越長，最後以整體舒適度發現琴槌越軟讓人感覺越舒適。

本節針對相同音階不同樂器進行主客觀指標分析，並探討各樂器之聲音特性，主要採用 C6、D6 之音階，其樂器為古鈸、鐵琴、簡諧鐵琴，其琴槌對應該樂器之琴槌並進行探討，圖 9 為相同音階不同樂器之主觀評價與客觀指標對照示意圖(a)C6 音階、(b)D6 音階，由客觀數據顯示發現在頻譜質心中古鈸為最大，其鐵琴為最小，因鐵琴之聲音頻譜沒有明顯的泛音頻率導致頻譜質心最小，透過持續度發現古鈸其衰減率最小而簡諧鐵琴則最大，其尖銳度簡諧倍頻音鐵琴較為尖銳，而鐵琴較為沉悶，亮度的部分為簡諧鐵琴為最大一般鐵琴為最小，透過圖 8 之結果推測可能原因為不同琴槌之影響，在持續度的部分與客觀指標探結果一致，古鈸其衰減率最小而簡諧鐵琴則最長，由圖 10(b)D6 音階發現在客觀指標之現象與 C6 音階相同，其特性為該樂器特有之特性，主觀評價之問卷調查結果發現簡諧鐵琴在尖銳度與亮度皆為最高，而一般鐵琴各項指標則較於古鈸來的大，在與客觀指標進行比對時發現簡諧鐵琴在頻譜質心數據並不高，但在主觀感覺明顯是最為尖銳的，最後透過 C6、D6 音階了解各樂器之聲音特性。

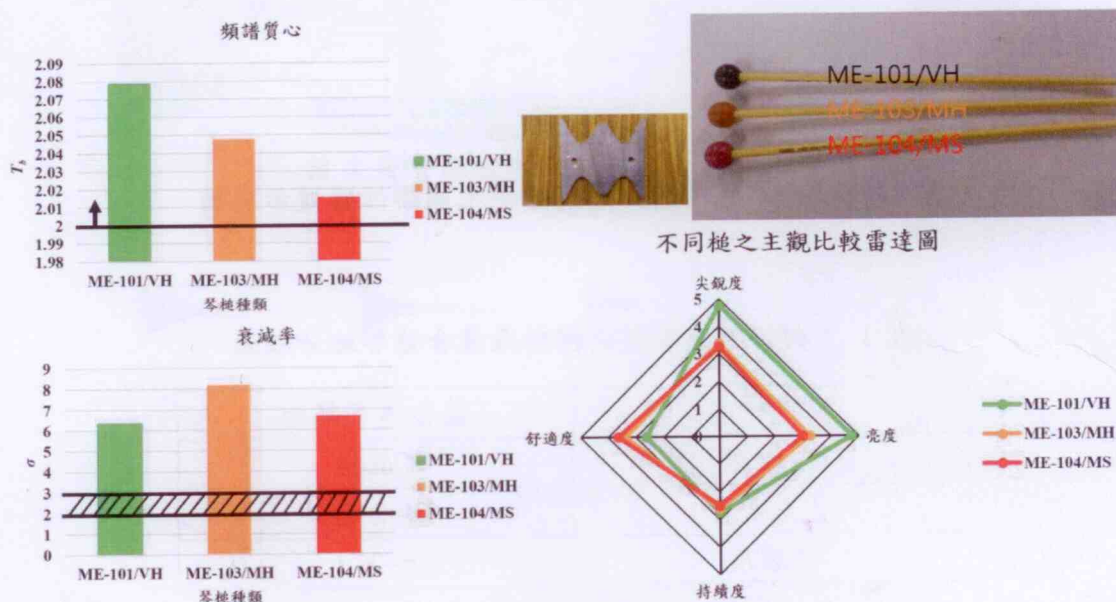


圖 8 鐵琴片不同琴槌之主觀評價與客觀指標對照示意圖

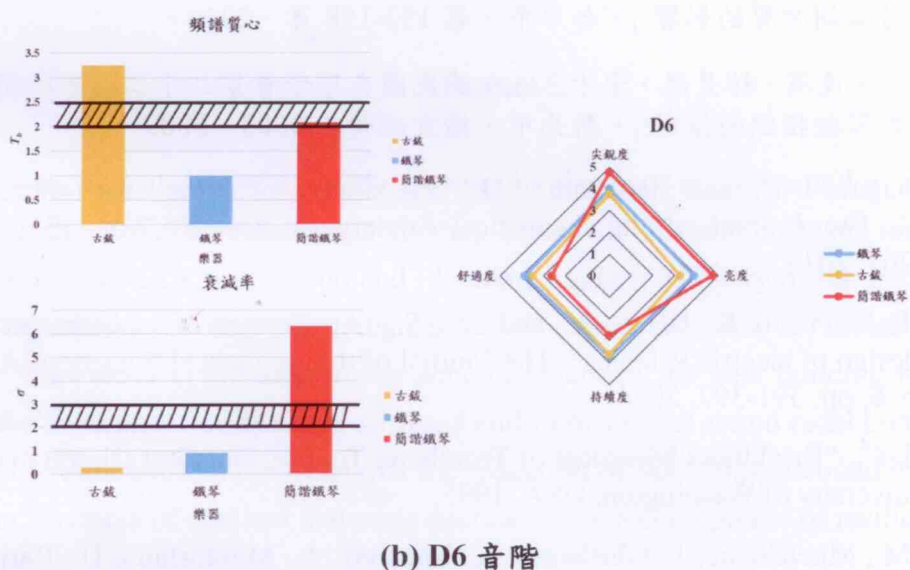
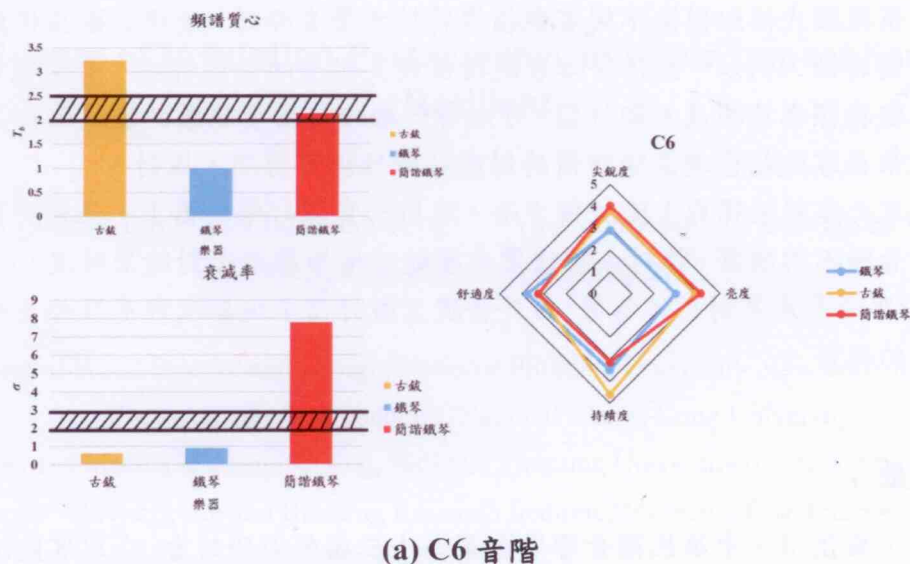


圖 9 相同音階不同樂器之主觀評價與客觀指標對照示意圖

五、結論

本文分別透過文獻回顧與主觀問卷調查訂定打擊樂器之客觀評價指標與主觀評價；利用聲音量測軟體與聲音模擬程式模組對打擊樂器進行客觀評價指標之探討，再與主觀問卷調查之主觀評價進行連結，探討主觀評價與客觀評價指標之關聯性；最後以訂定一套評估打擊樂器優劣性之聲音品質評價模式，綜合以上結果與討論結論如下：

1. 由訂定音色之聲音品質客觀指標得知，音色對人耳主觀感覺之影響，由泛音頻率與頻率振幅及衰減率，皆會影響音色之客觀指標。
2. 由頻譜質心與頻譜不規則度的客觀指標，了解到由多個倍頻泛音頻率組成的聲音會影響其音色，由於多個倍頻泛音頻率聲音偏向於弦樂器之特性，其指標可適用於於簡諧倍頻音之打擊樂器。

3. 透過聲音模擬程式模組模擬不同客觀指標特性之聲音頻譜，發現客觀指標與主觀評價有明顯之關聯性，例如：頻譜質心客觀指標與尖銳度的主觀評價，有直接的關聯性；衰減率客觀指標與持續度主觀評價，可以有一較佳持續度聽感的衰減率為 2~3 之量值範圍。未來在客觀指標與主觀評價的對應關聯性仍可再深入探討。
4. 透過已訂定之客觀指標與主觀評價方法，應用於實體打擊樂器上，係分別利用不同琴槌與相同音階不同樂器，探討主觀評價與客觀評價指標之比對結果發現，亮度/頻譜質心持續度/衰減率是有對應的趨勢，另外發現主觀評價中尖銳度與亮度越高則主觀舒適度有較差的趨勢。

六、參考文獻

1. 徐茂濱，吳佳宗，中華民國音響學會第二十三屆學術研討會，「以客觀法評量狼音之改良對二胡音質的影響」，台中市，第 153-158 頁，2010。
2. 鍾欣樺，徐茂濱，林昱廷，李十三，中華民國音響學會第二十二屆學術研討會，「二胡穿透力客觀指標的探討」，新北市，論文編號：A008，2009。
3. Labuschagne, I. B., and Hanekom, J. J., "Preparation of stimuli for timbre perception studies", The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 134, No. 3, pp. 2256-2267, 2013.
4. Gwak, D. Y., Yoon, K., Seong, Y., and Lee, S., "Application of subharmonics for active sound design of electric vehicles", The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 136, No. 6, pp. 391-397, 2014.
5. Bules, J. C., "Brightness Measures of Trombone Timbre, Doctoral Dissertation" Musical Arts, University of Washington, USA, 1995.
6. Zicari, M., MacRitchie, J., Ghirlanda, L., Vanchieri, A., Montorfano, D., Barbato, M. C., and Soldini, E., "Trumpet Mouthpiece Manufacturing and Tone Quality", The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 135, pp. 3872-3887, 2013.
7. [https://en.wikipedia.org/wiki/Pitch_\(music\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Pitch_(music)) (Wikipedia search "pitch")
8. 董時沛，「具簡諧倍頻音銅鑼組之設計」，碩士論文，國立屏東科技大學，機械工程學系，屏東，2012。
9. 簡孝名，「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，2010。
10. 陳品豪，「鑼臍型式銅鑼之聲音及振動特性的探討與設計分析」，碩士論文，國立屏東科技大學，機械工程學系，屏東，2009。
11. Jensen, K. K., "Timbre Models of Musical Sound: From the model of one sound to the model of one instrument", København: DIKU, University of Copenhagen, 1999.