

二胡的悶之客觀指標的探討

鍾欣樺¹、徐茂濱²、李十三³

摘要

有鑑於演奏者或製琴師常以「悶」與否來描述二胡之琴音，然而在目前已建立的二胡樂音指標中(純淨度、渾厚度、音量均衡度與尖銳度)尚無任何指標可客觀評量樂音之「悶」與「不悶」，本研究發現較「悶」的琴音與在 1500 至 2500Hz 頻帶間之音量有關，進而訂定出二胡之「悶」的樂音指標。

關鍵詞：二胡、聲音品質、樂音指標、悶、弦樂器

Abstract

Musical performers or instrument makers often describe the musical sound of an erhu (Chinese two-stringed fiddle) with “stiffness”. However, currently a suitable sound quality index to evaluate the “stiffness” of musical sound has not existed yet. The “stiffness” is found to be strongly related to the sound between 1500Hz and 2500Hz. A new objective index to properly describe the “stiffness” of musical sound was established and proved to be satisfactory subjectively.

keywords: erhu, sound quality, musical sound index, stiffness, stringed musical instruments.

¹台灣科技大學機械工程研究所碩士研究生

²台灣科技大學機械工程研究所副教授

³民族樂器有限公司製琴師

前言

二胡是中國傳統樂器家族中主要的擦弦樂器之一，二十世紀初期，民族音樂家劉天華(1985-1932)先生借鑑西洋樂器小提琴，將中、西弓擦弦樂器技法融匯並加以創造，大大提高和豐富了二胡的表現力，使二胡提高到可供獨奏的地位，因而激勵有志民族音樂的人不斷地去研製改良，使得中國樂器在實際演奏中能夠保有原來的特色，同時具備西方樂器的優點。

近年來大陸與台灣雖然已有不少製琴師漸漸投入對二胡改良之研究，但受限於許多人不願將其改良結果公諸於世，在各自的領域單打獨鬥，造成單方向的專業能力不足，而未能整合各自領域的專長來加以改良，以致於許多很好的概念流失。使得二胡在改良方面遲滯，未能有突破性的發展。

國外對於小提琴之研究已有三百五十年之歷史，與中國傳統樂器胡琴家族最為接近。1977年時Hutchins[1]蒐集1975年至1993年間關於小提琴之相關文獻加以分類整理，提供後人豐富的參考資料。小提琴聲音品質方面，1991年Dünnwald[2]所提出的文獻中，他錄製了七百多把不同品質的小提琴，並利用濾波器將其濾掉雜音而保留純音的部份，而且定義出三個樂音指標，分別為聲音乾淨、鼻音現象、聲音刺耳三個樂音指標，再利用問卷調查方式進行評估琴的好壞。

國內對於二胡之研究至今已將近八十年，劉天華先生是最早借鑒西洋樂器的演奏技巧帶入國樂，且進行二胡的研究與改良。鄭德淵[3~4]將中國樂器的沿革與發展、製作方法與改良技術作有系統之整理，其中有關二胡的部份包括不同琴筒的形式、琴碼的形式、千斤的形式之改良與四弦二胡等等，提供未來的改良方向；同時整合二胡、中胡及高胡，將其音色與型制統一起來，之後又將國內外對於樂器的改良與相關論文之研究加以歸納整理。林昱廷[5]首位利用科學分析的方式，比較不同弦長的音色差異，找出適合南胡的空弦弦長；同時利用電腦軟硬體等工具，藉由頻譜分析方式進行樂器之聲學研究[6]；除此之外還匯集了幾位專業二胡演奏家，試圖找出主觀與客觀之間的關係[7]。田英志[8]利用問卷調查方式從受測聆聽者中得到主觀評價，並且聯結客觀分析之數據，建立出二胡的樂音指標(包括純淨度、厚實度與音量均衡度)，且提出二胡狼音的產生原因與改良方法。莊肯堯[9]建立出二胡的尖銳度指標，並將厚實度指標改良而建立出渾厚度指標，此外也利用建立的樂音指標，探討不同特性的蟒皮與琴碼對二胡樂音品質之影響。翁榮源[10]建立出二胡的亮度指標，同時利用心理聲學理論中Zwicker銳度指標，建立出Zwicker響度均衡度指標。此外也利用建立的樂音指標及現有的二胡樂音指標，去評估二胡在各種客觀因素下(包括:時間因素、濕度因素…等)與不同地方特色琴之音色表現。

在樂器上聲學與心理聲學的結合已開始受到重視，Fletcher[11]將所有西洋樂器的聲學特性詳細歸納與解釋；Howard[12]嘗試利用心理聲學的角度來闡述音色與樂器特性。Zwicker[13]除了探討心理聲學的基本理論(包括遮蔽效應、時間效應等)，也整理了各種用來描述人對聲音的心理感受指標，這些指標包括響度(Loudness)、銳度(Sharpness)、粗糙度(Roughness)、變動強度(Fluctuation Strength)與純音調(Tonality)等。

1 建立客觀的樂音指標

在建立客觀的樂音指標前，首先必須先成立聆聽評審團(Jury)，其成員應包括演奏家、製琴師、音樂老師及本研究團隊等，對其進行訪談與問卷調查，並整理目前對二胡聲音的一些主觀評價意見，重點在於要儘可能詳實調查主觀評價方面的敘述，將資料整理以有意義的方式呈現出主觀評價，才能為尋找及定義客觀的樂音指標，提供明確的方

向。

收集完主觀評價之資料後，便可根據主觀評價之好壞，找出數把在性能上差異性較大的胡琴來進行客觀評價，以便找出主客觀評價之間的關係。而在進行初步的樂音指標定義時，這些待量測的胡琴，其主觀評價的差距越大越好，如此才易於找到主客觀之間的關係。樂音指標定義完成後，仍須再利用問卷調查的方式來驗證初步擬訂的樂音指標是否與主觀評價相符，如果有不盡完善的地方，則須進一步修正，讓樂音指標能更精確地表達出主觀的感受。

2 「悶」之樂音指標

演奏者或製琴師經常以音色「悶」與否來描述聽覺感受，依據莊肯堯[9]所述的悶指標，較好的胡琴在任何一個音上，都能保有足夠的高頻泛音；而較差的胡琴之高頻泛音則會顯得不足。從音量的角度來看，當高頻的音量佔整體音量的比重過少(低於百分之五)，將使得高頻之音色無法完全表現出來，這類型的聲音稱之為「悶」。

本研究延續莊肯堯所述，首先選用編號A、B兩把差異較大的琴，其中主觀上認為A琴極悶、B琴極不悶，並以 d_1 音至 $c_3^{\#}$ 音(共14個音)進行分析比對。

以 d_1 音為例，如圖1-1所示，從頻譜中可發現B琴原音之中高頻泛音音量明顯比A琴高，且從頻譜中可發現B琴之雜音明顯比A琴高出許多；利用濾波器將雜音濾除，只留下純音的部份，如圖1-2所示。由以上客觀數據可知，A、B兩琴不僅可在聲音上聽出兩把琴之「悶」與否，且在頻譜中亦可看出明顯的差別，這跟莊肯堯之敘述相符。至於那是那個頻帶所造成，或是那幾個泛音所造成的，將在下面進一步做探討。

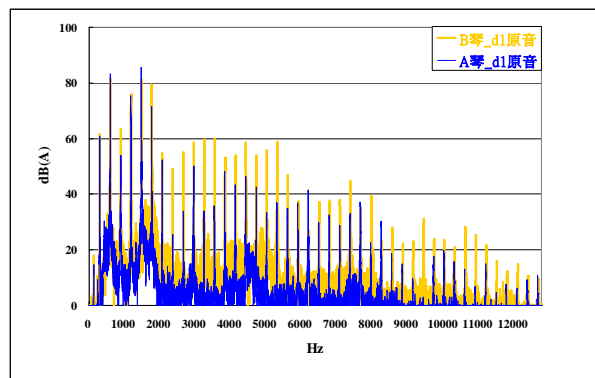


圖 1-1 兩把琴在 d_1 音之原音頻譜圖

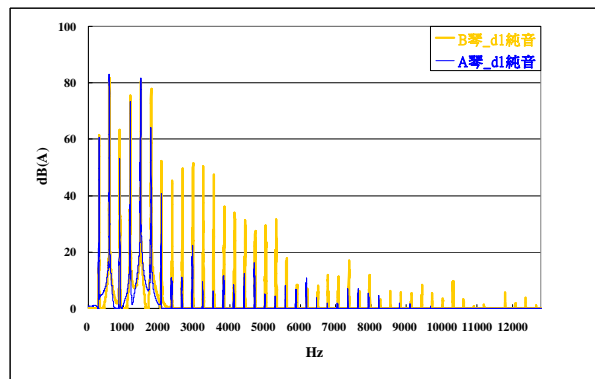


圖 1-2 兩把琴在 d_1 音之純音頻譜圖

將A、B兩琴之 d_1 音的頻譜利用濾波器來濾波；依下面步驟來找出影響音色(悶與否)

的問題所在：

(1) 首先由圖 1-2 中觀察 A、B 琴之 d_1 音的整體頻譜，可以發現兩把琴在第 7 個(含)及其後的各泛音上之聲壓明顯下降很多，所以我們應先考慮中低頻的部份(基音與前 6 個泛音)對整體音色之影響有多大，故將兩把琴的中低頻濾掉(本來打算濾除基音與前 6 個泛音，但因基音與第一泛音的聲壓值幾乎相同，所以保留這兩個頻率的音，只濾除第 2 個至第 6 個泛音)，看是否就無法分辨出悶與不悶，如圖 1-3 所示。

濾波完成後聆聽這兩把琴的聲音，可以聽出這兩把琴的聲音與原來之琴音不同，此時這兩把琴聽起來，卻變得不像二胡的聲音；由以上之濾波動作可以發現中低頻這塊區域對整體音色是有影響的，至於是否為影響整體音色的主要來源，我們將在以下繼續探討。

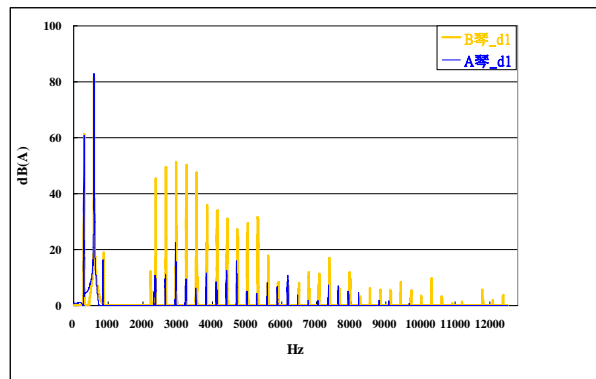


圖 1-3 d_1 音在濾除部份中低頻泛音後的頻譜圖

(2) 由於考慮中低頻之泛音對主要音色影響甚鉅，故須將 A、B 琴之 d_1 音的中低頻部份(基音與前 6 個泛音)保留，然後濾除其他全部泛音，如圖 1-4 所示；濾波完後聽這兩把琴的聲音，發現兩把琴僅在中低頻部份(基音與前 6 個泛音)，就能明顯聽出這兩把琴音色(悶與否)之間的差別。

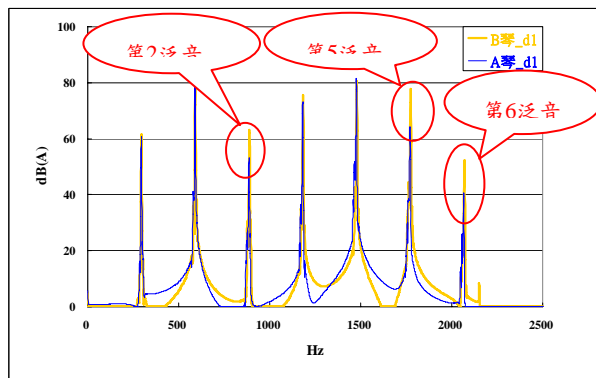


圖 1-4 d_1 音僅保留中低頻(基音與前 6 個泛音)之純音頻譜圖

(3) 接著我們將 A、B 琴之高頻部分(第 14 個泛音及其之後的所有泛音)全部濾除，只觀察基音與前 13 個泛音，如圖 1-5 所示；濾波完後聽這兩把琴的聲音，結果也可以明顯聽出兩把琴在聲音上明顯不同。若將「基音與前 13 個泛音」與中低頻部份「基音與前 6 個泛音」。兩部份相比較，可發現「基音與前 13 個泛音」不僅可明顯聽出兩把琴之聲音不同，且加劇兩把琴之間有關「悶與不悶」之聲音的差別。

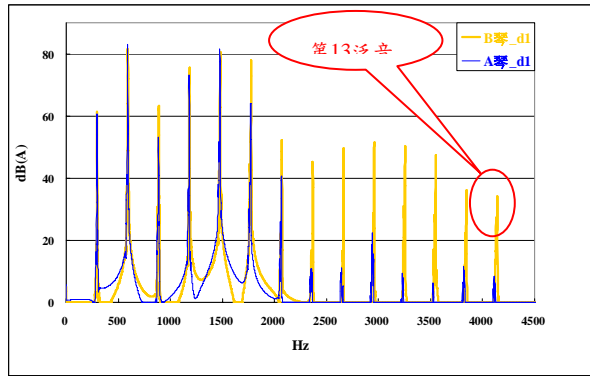


圖 1-5 di 音中濾除高頻(保留基音與前 13 個泛音)後之純音頻譜圖

(4) 最後再將 A、B 琴之中頻部分濾掉，亦即保留「基音與前 6 個泛音及第 14 個泛音之後的所有泛音」，如圖 1-6 所示。濾波完後將 A 琴之「基音與前 6 個泛音及第 14 個泛音之後的所有泛音」與 A 琴之中低頻「基音與前 6 個泛音」兩者的聲音相比較，結果發現兩者的聲音幾無差別，推論第 14 個泛音之後的泛音對整體音色之「悶與否」影響不大。同理，將 B 琴也以同樣的方式分析比較，發現與 A 琴一樣，在第 14 個泛音之後的泛音對整體音色之「悶與否」影響不大。

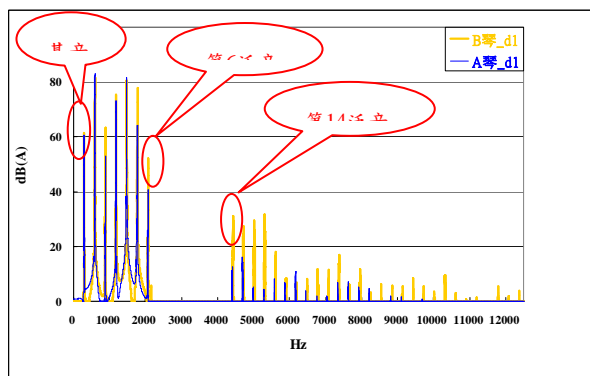


圖 1-6 di 音中濾除中頻(第 7 至第 13 個泛音)後之純音頻譜圖

(5) 由以上步驟我們可以發現 A、B 琴在 di 音之高頻部份，亦即第 14 個泛音之後的泛音對整體音色之「悶與否」影響不大，而中低頻的部份(基音與前 13 個泛音)則對整體音色之「悶與否」影響甚鉅。

由以上之實驗結果可以推斷出琴音之「悶與否」在「基音與前 6 個泛音」部份即足以分辨出其不同，而「第 7 至第 13 個泛音」則會將其差別拉大，而「第 14 個泛音以後之諸泛音」對悶與不悶則幾無差別；所以我們可將範圍縮小，進一步探討「基音與前 6 個泛音」之所以會影響音色之「悶與否」，是否與特定的頻率範圍有關或是與那幾個泛音有關。

(6) 首先我們可以由「基音與前 6 個泛音」之頻譜(圖 1-4)發現，兩把琴在「第 2、第 5 與第 6 個泛音」上之聲壓有明顯的不同，所以我們可針對這三個泛音進行濾波，找出影響音色「悶與否」之問題所在。

(7) 首先利用濾波器先將「第 5 與第 6 個泛音」濾除，如圖 1-7 所示，只看「基音與前 4 個泛音」，此時只有「第 2 個泛音」在聲壓上有明顯不同，濾波完後聆聽兩把琴的聲音，發現雖然兩把琴在「第 2 個泛音」在聲壓上有 10.2dB(A)=(63.3-53.1)之明顯不同，但聽起來卻沒什麼差別，可見第 2 泛音對整體音色影響不大。

(8) 再將「基音與前 6 個泛音」之頻譜中的「第 6 個泛音」濾除，如圖 1-8 所示，只留下「基音與前 5 個泛音」，此時「第 2 與第 5 個泛音」在聲壓上有明顯不同，濾波完後聆聽這兩把琴的聲音，可以聽出有明顯的不同，可見第 5 泛音對整體音色之「悶與否」影響極大。

(9) 最後將「基音與前 6 個泛音」之頻譜中的「第 5 個泛音」濾除，如圖 1-9 所示，此時「第 2 與第 6 個泛音」在聲壓上有明顯不同，濾波完後聆聽其兩把琴的聲音，雖然可以聽出不同，但差別不大，可見第 6 泛音對整體音色亦有相當程度之影響。

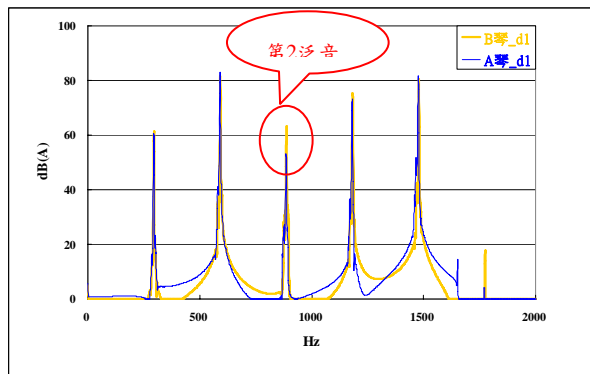


圖 1-7 di 音在「基音與前 4 個泛音」之純音頻譜圖

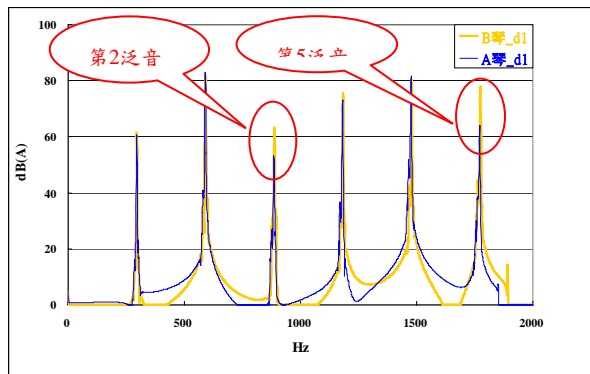


圖 1-8 di 音在「基音與前 5 個泛音」之純音頻譜圖

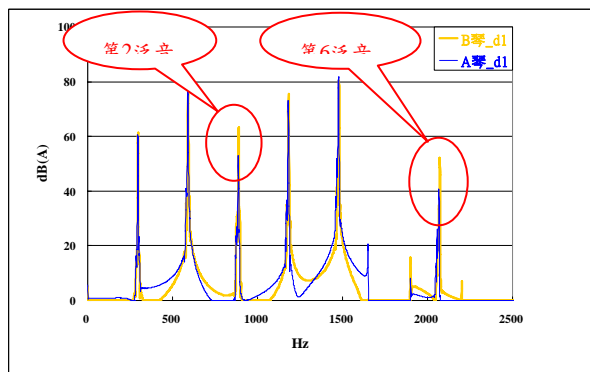


圖 1-9 di 音在濾除「第 5 個泛音」後之純音頻譜圖

(10) 由步驟(6)~(9)中可以發現「第 5 個泛音」影響最大，「第 6 個泛音」之影響則居次；另外，兩把琴之「第 2 個泛音」在聲壓值上雖然相差 10.2dB(A)，但反而對音色影響不大。其中，影響最大的「第 5 個泛音」之頻率與聲壓值如表 1-1 所示。

表 1-1 d₁音第 5 個泛音之頻率與聲壓

	A 琴	b 琴
Hz	1771	1775
dB(A)	64.1	77.9

(11) 我們將其他的音(以 e₁、f₁[#]、g₁、a₁、b₁、c₂[#]、d₂、e₂音為例)以相同的做法，重覆步驟(1)~(5)，同樣發現僅就前面幾個泛音(約 2500Hz 以下)即可明顯聽出兩把琴之「悶」與否。至於是那個頻率範圍或是那幾個泛音會影響音色之「悶與否」，將由重覆步驟(6)~(10)中得到結果。

最後將結果整理如下：

(A) 由 e₁音的「基音與前 5 個泛音」之頻譜中可發現，只有「第 2、第 4 與第 5 個泛音」在聲壓上有明顯不同，如圖 1-10 所示，故僅須對這三個泛音進行濾波聆聽；結果發現兩把琴之「第 2 個泛音」雖然在聲壓上相差 5.5dB(A)，但對音色之「悶與否」幾乎相同；而由「第 5 個泛音」可以聽出兩把琴音之差別，但其差別並不算很大；但「第 4 個泛音」則可明顯聽出音色之「悶與否」的不同，影響最大。「第 4 個泛音」之頻率與聲壓值如表 1-2 所示。

表 1-2 e₁音第 4 個泛音之頻率與聲壓

	A 琴	b 琴
Hz	1667	1673
dB(A)	80.8	88.7

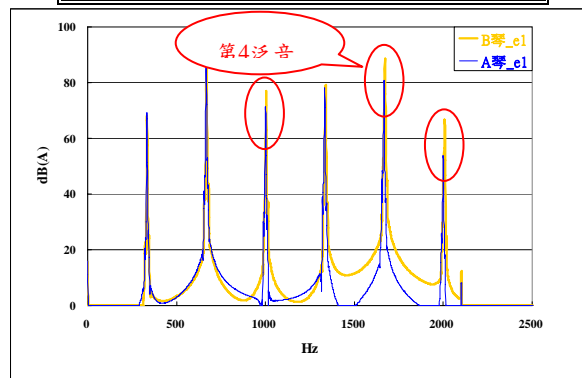


圖 1-10 e₁音之「基音與前 5 個泛音」的 純音頻譜圖

(B) 對 f₁[#]音的「基音與前 5 個泛音(如圖 1-11)」進行相同的濾波與聆聽之步驟，結果得知「第 1 個泛音」雖然在聲壓上相差 17.5dB(A)，但卻對音色影響不大；而「第 3 與第 5 個泛音」雖可聽出不同，但差別並不算很大；影響最大的為「第 4 個泛音」，可以明顯聽出其差別。「第 4 個泛音」之頻率與聲壓值如表 1-3 所示。

表 1-3 f₁[#]音第 4 個泛音之頻率與聲壓

	A 琴	b 琴
Hz	1883	1891
dB(A)	76.8	82.2

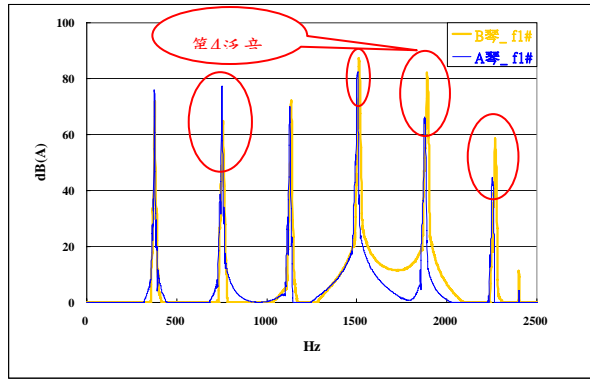


圖 1-11 $f_1^\#$ 音之「基音與前 5 個泛音」的 純音頻譜圖

(C) 同理得知， g_1 音的「第 1 個泛音」與音色無關，而「第 4 個泛音」雖可聽出不同，但差別不是很大；但「第 3 個泛音」則可明顯聽出差別，影響最大。「第 3 個泛音」之頻率與聲壓值如表 1-4 所示， g_1 音之純音頻譜如圖 1-12 所示。

表 1-4 g_1 音第 3 個泛音之頻率與聲壓

	A 琴	b 琴
Hz	1575	1573
dB(A)	81.9	88.8

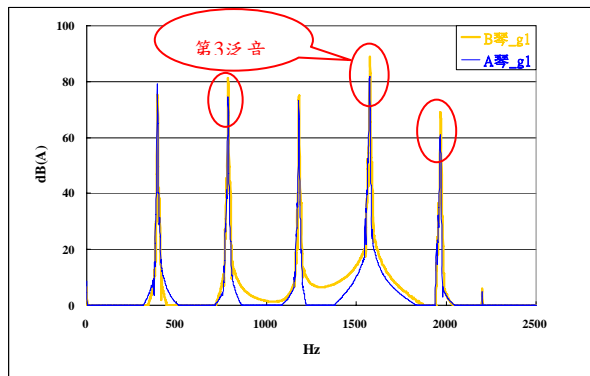


圖 1-12 g_1 音之「基音與前 4 個泛音」的 純音頻譜圖

(D) 同理得知， a_1 音的「第 1 個泛音」與音色無關，而「第 2 個泛音」雖可聽出有差別，但差別不是很大；但「第 3 個泛音」則可明顯聽出差別，影響最大。「第 3 個泛音」之頻率與聲壓值如表 1-5 所示， a_1 音之純音頻譜如圖 1-13 所示。

表 1-5 a_1 音第 3 個泛音之頻率與聲壓

	A 琴	b 琴
Hz	1774	1774
dB(A)	70.8	74.8

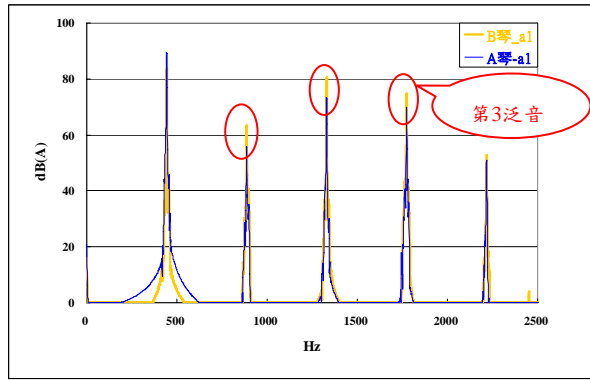


圖 1-13 a₁ 音之「基音與前 4 個泛音」的純音頻譜圖

(E) 同理得知，b₁ 音的「第 1 個泛音」與音色無關，而「第 3 個泛音」雖可聽出不同，但差別不是很大；但「第 4 個泛音」則可明顯聽出差別，影響最大。「第 4 個泛音」之頻率與聲壓值如表 1-6 所示，b₁ 音之純音頻譜如圖 1-14 所示。

表 1-6 b₁ 音第 4 個泛音之頻率與聲壓

	A 琴	b 琴
Hz	2509	2510
dB(A)	46.6	63.7

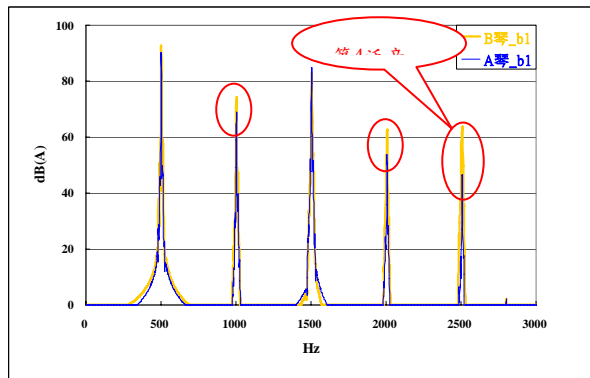


圖 1-14 b₁ 音之「基音與前 4 個泛音」的純音頻譜圖

(F) 同理得知，c₂[#] 音的「第 3 個泛音」雖可聽出不同，但差別不是很大；但「第 2 個泛音」則可明顯聽出差別，影響最大。「第 2 個泛音」之頻率與聲壓值如表 1-7 所示，c₂[#] 音之純音頻譜如圖 1-15 所示。

表 1-7 c₂[#] 音第 2 個泛音之頻率與聲壓

	A 琴	b 琴
Hz	1702	1689
dB(A)	82.6	87.2

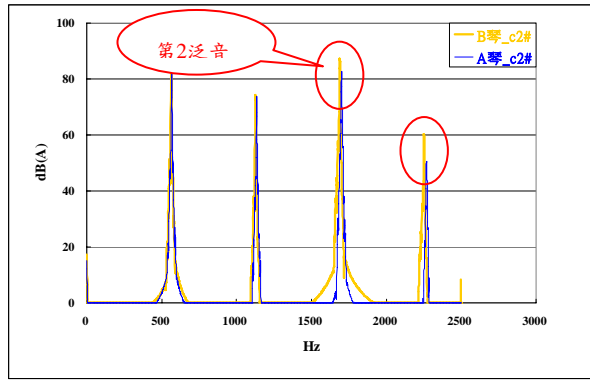


圖 1-15 c_2^\sharp 音之「基音與前 3 個泛音」的純音頻譜圖

(G) 同理得知， d_2 音的「第 3 個泛音」雖然在聲壓上相差 14dB(A)，但聽起來的差別並不算大；而「第 2 個泛音」在聲壓上相差只有 6.7dB(A)，卻可明顯聽出有差別，影響最大。「第 2 個泛音」之頻率與聲壓值如表 1-8 所示， d_2 音之純音頻譜如圖 1-16 所示。

表 1-8 d_2 音第 2 個泛音之頻率與聲壓

	A 琴	b 琴
Hz	1786	1771
dB(A)	76.3	83

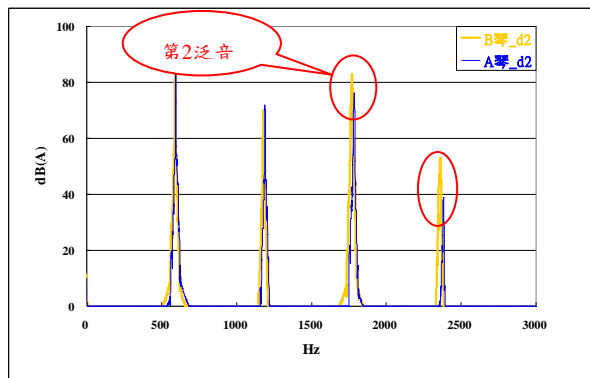


圖 1-16 d_2 音之「基音與前 3 個泛音」的純音頻譜圖

(H) 同理得知， e_2 音的「第 3 個泛音」雖可聽出不同，但差別不是很大，但「第 2 個泛音」則可明顯聽出差別，影響最大。「第 2 個泛音」之頻率與聲壓值如表 1-9 所示， e_2 音之純音頻譜如圖 1-17 所示。

表 1-9 e_2 音第 2 個泛音之頻率與聲壓

	A 琴	b 琴
Hz	2004	1995
dB(A)	51.3	62.2

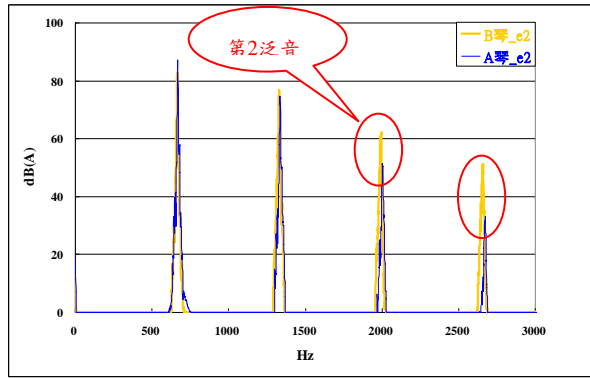


圖 1-17 e₂ 音之「基音與前 3 個泛音」的純音頻譜圖

歸納對諸音(d₁、e₁、f₁[#]、g₁、a₁、b₁、c₂[#]、d₂、e₂ 音)之實驗結果可知，前幾個泛音(在 2500Hz 以內之中低頻)即足以分辨出兩把琴音的不同，而中高频部份(在 2000 至 5000Hz 間)之泛音則會將差別拉大，但高频之泛音(約在 6000Hz 以上)則幾無影響。由步驟(11)可知每個音之所有泛音中對音色影響較大之泛音都不盡相同，我們歸納出影響「悶」之音色的泛音主要集中在 1500 至 2500Hz 之頻帶，如圖 1-18 所示，影響音色較大的泛音頻率以黑色表示，影響較次要的以灰色表示。

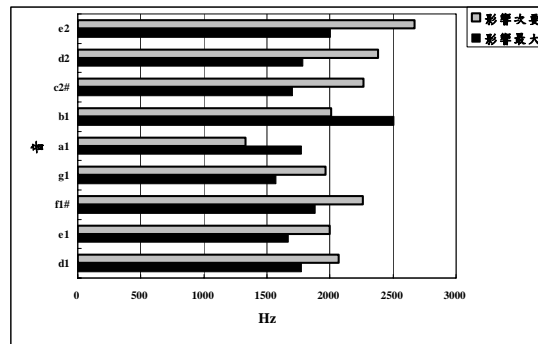


圖 1-18 各音中影響「悶」音色的泛音頻率

2.1 「悶」樂音指標之建立

由以上客觀數據反覆分析比對得知，「不悶」的琴在 1500 至 2500Hz 頻帶間的聲壓明顯比「較悶」的琴還要來得大，因此琴音在 1500 至 2500Hz 頻帶間的聲壓值係主導聆聽者感覺「悶」與「不悶」的關鍵所在。

本研究定義「悶」之樂音指標的方法如下：首先以「較悶」的 A 琴作為參考琴，並令「較悶」的 A 琴在 1500 至 2500Hz 頻帶間的聲壓值為參考值。先求出兩把琴之特定一個單音(如 d₁ 音)在 1500Hz 至 2500Hz 頻帶間的聲壓差值(SPL)_{B-A}，再將此聲壓差值除以在 1500Hz 至 2500Hz 頻帶之間的泛音數，得到一個單音之平均聲壓差值 $\Delta SPL_{avg}(A)$ ，然後再將其他各個音(f₁[#]~e₂)之平均聲壓差值加總後除以全部單音之數目，而得到「悶」之樂音指標。

$$\Delta SPL_{avg}(A) = \frac{(SPL)_B - (SPL)_A}{N_{ovr}} \quad (1-1)$$

$$\text{悶值} \Delta SPL_{stf}(A) = \frac{\sum_{i=d_1}^{e_2} [\Delta SPL_{avg}(A)]_i}{9} \quad (1-2)$$

$\Delta SPL_{avg}(A)$: 一個單音在 1500 至 2500Hz 頻帶間之平均聲壓差值。

$(SPL)_B$: 待測琴在 1500 至 2500Hz 頻帶間之聲壓值。

$(SPL)_A$: 參考琴在 1500 至 2500Hz 頻帶間之聲壓值。

N_{ovr} : 在 1500 至 2500Hz 頻帶間之泛音數目。

2.2 主觀評價

本研究進行聆聽測試過程中，受測成員的專業背景攸關主觀評價的準確性，為了避免測試結果的誤差過大，評審團成員除了本研究團隊外，以從事音樂相關工作者為佳，因此在進行「悶」的聆聽測試時，評審團的成員主要有樂器演奏者、音樂老師、製琴師及本研究團隊[14]。

進行「悶」的問卷調查前，首先將兩把實驗中使用的琴做成聲音樣本，而受測地點選擇在一般實驗室中進行，受測者利用耳機聆聽各個音的聲音樣本，根據受測者聆聽後的感受，將評判結果填入問卷調查表中[14]。此步驟主要是確認我們在客觀分析中挑選的兩把琴是否可明確分辨出「悶與否」。結果顯示評審團隊兩把琴的主觀評價相當一致，可明確的分辨出「悶與否」，如圖 1-19 所示。

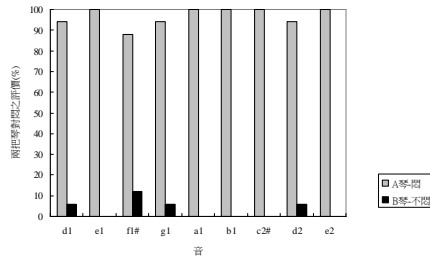


圖 1-19 「悶」之主觀評價的百分比(%)

由客觀分析中之結論可得知在 1500 至 2500Hz 頻帶間的聲壓差值是影響「悶與否」的主要因素，我們利用聲音品質分析軟體(Sound Quality)將較「悶」的 A 琴之各個音在 1500 至 2500Hz 頻帶間之泛音聲壓值調高約 7dB(A)，將其製作成聲音樣本，受測者再利用耳機聆聽這些音的聲音樣本，並將評判結果填入問卷調查表中[14]。這種做法的目的是為了進一步確認是否調高 1500 至 2500Hz 頻帶間之聲壓值即可聽出影響音色之「悶與否」，其主觀評估的結果非常肯定我們的想法，如圖 1-20 所示。

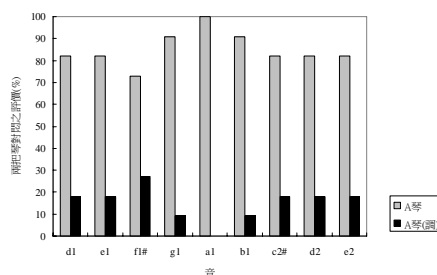


圖 1-20 A 琴調整在 1500 至 2500Hz 頻帶間之聲壓值後的主觀評價

經由上述的問卷調查結果，讓我們更加確定 1500 至 2500Hz 之頻帶確實影響「悶與不悶」的感覺。接下來我們另取三把琴代入我們所定義的「悶」之指標公式中，將三把琴之「悶」的指標值彙整，取客觀數據中差異較大的兩把二胡製作聲音樣本，受測者聆聽後之結果(圖 1-21)顯示出兩把琴之主觀評價與客觀分析的結果(S3 琴之悶值為 3.6dBA, S1 為 14.1dBA)相當一致，證明了「悶」的樂音指標確實可以客觀的描述人們

對聲音「悶」的感覺。

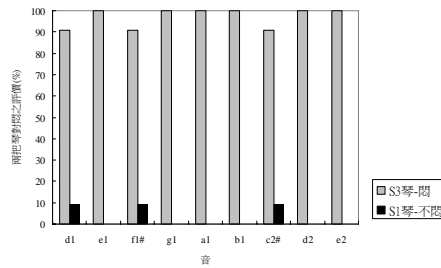


圖 1-21 S3 琴與 S1 琴之主觀評價

2.3 客觀評價標準

在悶之指標方面，以 A 琴為參考琴，其餘四把把琴的「悶」之指標值在 3.6 至 14.1 之間，因此本研究將評價標準暫分為 5 個等級，指標值在 3dB(A) 以下者列為極悶，指標值在 15.1dB(A) 以上者列為極不悶，如表 1-10 所示。但因此次受測琴的數量不多，未來可測試更多把琴，而評定等級也可視這些琴的悶值而另做調整。

表 1-10 「悶」樂音指標之評價標準

主觀說明	「悶」之指標值	等級
極不悶	15.1 以上	5
不悶	11.1~15	4
適中	7.1~11	3
微悶	3.1~7	2
極悶	3 以下	1

結論

根據本研究之結果，我們提出以下結論：

1. 本研究指出影響「悶」與「不悶」的主要頻率範圍在 1500Hz 至 2500Hz 之間，而在 1500Hz 至 2000Hz 頻帶間為影響最主要，且在 2000 至 2500Hz 頻帶間為影響次要。最後再利用問卷調查的方式建立「悶」之指標，該指標具有獨立性且可以客觀地描述人們對聲音「悶」與「不悶」的感覺，且能充分反應出主觀的看法。
2. 亮度較佳的琴，在 2000Hz 至 8000Hz 頻帶間的音量佔總音量的比重會大於亮度較差的琴，[10]，本研究觀察出影響「悶」與「亮度」的主要頻帶，只有在 2000 至 2500Hz 頻帶之間有所重疊。
3. 本研究將悶指標分為五個等級，分別為等級 5(極不悶)、等級 4(不悶)、等級 3(適中)、等級 2(微悶)及等級 1(極悶)。

參考文獻

- [1] Hutchins, C. M., *Research Papers in Violin Acoustics, 1975-1993*, Published by the Acoustical Society of America through the American Institute of Physics, New York, 1997.
- [2] Dünwald, H., "Deduction of Objective Quality Parameters on Old and New Violins," *J. Catgut Acoust. Soc.* 2nd ser, Vol.1, No.7, pp. 1-5, 1991.
- [3] 鄭德淵，中國樂器學，生韻出版社，1984。
- [4] 鄭德淵，音樂音響學（上冊），樂韻出版社，1981。
- [5] 林昱廷，南胡空弦弦長的科學分析研究，學藝出版社，1995。
- [6] 林昱廷，中國傳統樂器聲學特性之分析研究，行政院國家科學委員會專題研究計劃成果報告，1997。
- [7] 林昱廷，南胡聲頻之研究與樂器改良計劃，行政院國家科學委員會補助專題研究計劃成果報告，2001。
- [8] 田英志，二胡樂音之聲音品質與狼音改良，台灣科技大學機械工程研究所碩士論文，2004。
- [9] 莊肯堯，二胡樂音指標之建立與蟒皮對於音色之影響，台灣科技大學機械工程研究所碩士論文，2005。
- [10] 翁榮源，以樂音指標評價不同因素對二胡音質之影響，台灣科技大學機械工程研究所碩士論文，2006。
- [11] Fletcher, N. H., and Rossing, T.D., *The Physics of Musical Instruments*, Spring, New York, 1998.
- [12] Howard, D. M., and Angus, J., *Acoustics and Psychoacoustics*, Focal Press, Boston, 2001.
- [13] Zwicker, E., and Fastl, H., *Psychoacoustics: Facts and Models*, Springer, New York, 1999.
- [14] 鍾欣樺，二胡的穿透力與悶之客觀指標的探討，台灣科技大學機械工程研究所碩士論文，2009。