

帶有雜質的樂音——聽覺模型及「泛音-噪音比」

蔡振家（國立臺灣大學音樂學研究所助理教授）

摘要

在西方古典音樂裏面，帶有雜質的音色似乎不如純淨的樂音來得悅耳，因此音樂家通常會刻意避免產生這類音色，但在某些音樂文化中，嘈雜不純的音色卻是音樂風格中不可分割的一環。本文從音景分析(auditory scene analysis)理論來建立嘈雜音色的聽覺模型，並以頻譜圖與「泛音-噪音比」(harmonic-to-noise ratio)來分析器樂與聲樂裏的各種嘈雜音色。

關鍵字

音色、泛音-噪音比、音景分析、吼音、尺八、電吉他、京胡

Impure musical sounds: auditory model and harmonic-to-noise ratio

Abstract: In western classical music, the impure timbre is more unpleasant than the timbre without any impurity. Therefore, musicians usually intentionally avoid the production of the former timbre. In other musical cultures, however, the impure timbre is an integral part of musical styles. The present paper proposes an auditory model for the impure timbre on the theoretical basis of auditory scene analysis. Examples of the impure timbre in instrumental and vocal music are analyzed with spectrograms and harmonic-to-noise ratios.

Keywords: Timbre, harmonic-to-noise ratio, auditory scene analysis, growl voice, shakuhachi, electric guitar, jinghu

一、前言：noise control 或 well-controlled noise?

音色在樂曲的進行中經常佔有舉足輕重的地位，然而，它卻是一個難以分析的音樂面向。相較於音高與音量，音色的量化分析無法由一個參數來完整描述，¹而必須用到頻譜分析(spectral analysis)、包絡分析(envelope analysis).....等工具，與此相關的研究方法已經跨出了人文、藝術學科，而屬於音樂聲學(music acoustics)的範疇。音樂聲學是一門探討樂音的產生(production)、傳播(transmission)、知覺(perception)的學科。由於音樂與文化、歷史密不可分，音樂聲學與聲學的其他次領域相較之下，實具有不易捉摸、浪漫縹緲的特質。舉例而言，聲學中的次領域之一：噪音控制(noise control)，旨在減低噪音與不必要的振動，目標清楚，但音樂聲學家在追求性能更佳的樂器時，卻常常連自己也說不清楚：什麼樣的音色是好聽的、什麼樣的振動才是演奏者想要的？雖然噪音總是帶給聽眾不舒服的感覺，但音樂家並沒有完全抹除這些噪音，相反的，有些音樂家特別擅長使用嘈雜不純的音色，因此，音樂聲學裏面的 noise control 似乎也有著另一層積極的意義：well-controlled noise，意即「隨心所欲地控制噪音的產生、並在樂曲中巧妙使用」。

本文所要探討的，便是一些帶有雜質的沙棱音色，以及它們在音樂中的運用。當樂器或歌手發出一個穩定、純淨的音時，頻譜上只會出現一系列的泛音，其頻率為音高 f 的整數倍；當聲音變得嘈雜不純時，相鄰泛音之間會出現雜質。頻譜分析可以進一步區分這些雜質：對稱出現在泛音譜線兩側的稱為旁帶(sideband)、在相鄰泛音之間等距分佈者（頻率為 f/m 的整數倍， $m = 2, 3, 4...$ ）稱為次泛音(subharmonic)、在相鄰泛音之間連續分佈的稱為噪音。本文除了提出此類音色的聽覺模型之外，亦將舉出各種樂器與音樂文化中的實例，探討樂音雜質的產生機制(production mechanism)與量化分析的方法。本文將指出，原本用以分析語音之「泛音-噪音比」(harmonic-to-noise ratio)的計算軟體，也適用於分析音樂，對於有志於研究音色的音樂工作者而言，是個便於使用的研究工具。

二、嘈雜音色的聽覺模型

嘈雜度(roughness)泛指聲音中不悅耳、不乾淨的音質，十九世紀的科學家 Hermann von Helmholtz (1885/1954)把嘈雜度歸因於頻率相近的頻譜成份之間所產生的「拍」(beating)。1960 年代之後，嘈雜度理論進一步與臨界頻帶(critical band)的觀念相結合。臨界頻帶的聽覺模型告訴我們，耳蝸對聲波所作的頻譜分析，是將聽覺範圍（從 20 Hz 至 22000 Hz）分割為二十幾個頻道(channel)，每個頻道就是一個臨界頻帶，只有當兩個音落在同一個臨界頻帶中才會產生嘈雜音質，該臨界頻帶中所接收的聲音訊息是忽強忽弱的「拍」(Plomp and Levelt 1965)。

一個音高為 100 Hz 的低音，若其音質明亮，會有豐富的高頻泛音，根據臨界頻帶的聽覺模型，超過 2000 Hz 的泛音將造成嘈雜的音質，因為這些泛音之間的頻率差只有 100

¹ 例如頻率可以完整描述音高、聲壓(sound pressure level)可以完整描述音量。

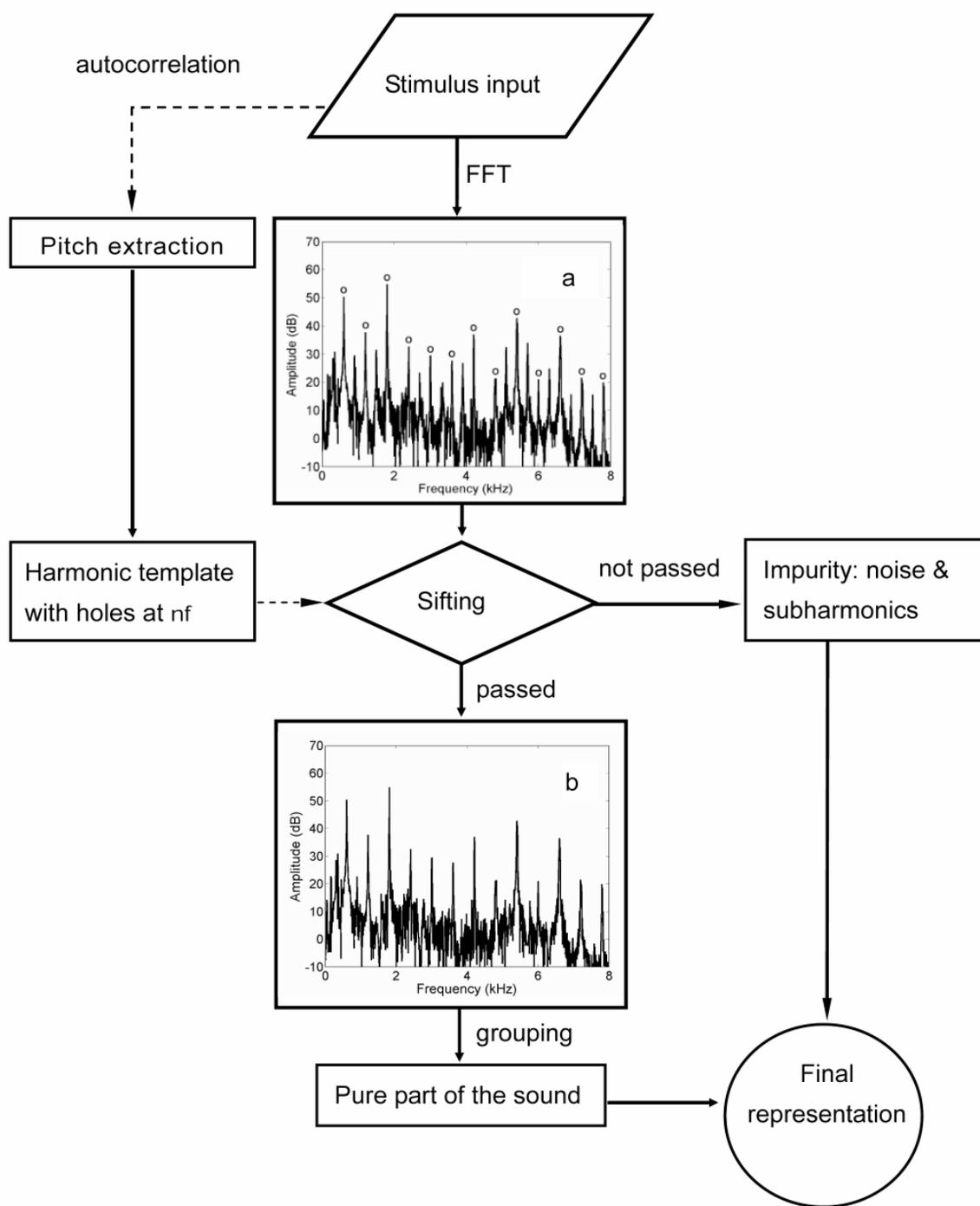
Hz。有趣的是，音質明亮的低音（例如男、中低音的歌聲）並不會給人特別嘈雜的感覺，我們也不會在這類樂音中聽到「拍」的現象，由此可見傳統嘈雜度聽覺模型的缺失。筆者曾經根據 de Cheveigné (1997)所提出的泛音干擾消去(harmonic interference cancellation)模型，提出一個對於傳統嘈雜度聽覺模型的修正：當一個音的音高 f 清晰可聞時，頻率為 nf 的泛音會被整合在一起($n = 1, 2, 3, \dots$)，並不會彼此干擾而造成嘈雜音質(Tsai 2004)。

週期性的聲波在自然界十分普遍，雖然頻譜分析可以發現它們包含許多泛音，但我們卻總是聽不到個別的泛音，聽覺系統似乎是把所有的泛音整合為同一個音。²將傳入耳中的聲音予以分解為許多元素、再將可能來自於同一聲源的元素整合在一起，這樣的機制稱為音景分析(auditory scene analysis)。整合聲音元素的規則(grouping rule)包括了：(1) 頻率比呈整數關係的泛音傾向於被整合在一起(harmonicity)，(2)同時出現的聲音元素傾向於被整合在一起(common onset)，(3)一齊變化的聲音元素傾向於被整合在一起(common modulation).....等(Bregman 1990)。本文所探討的嘈雜不純音色，主要都是源自於泛音之間的頻譜成份，包括次泛音、旁帶、噪音等，由於這些頻譜成份無法被上述的第一條規則 harmonicity 所整合，因此會被聽覺系統判斷為雜質。本節所提出的聽覺模型，將以含有次泛音的中國笛笛音為例，逐步說明音景分析的原理。

圖一為嘈雜音色的聽覺模型示意圖。聲波傳入聽覺系統之後，由快速傅立葉轉換(fast Fourier transform; FFT)之類的運算得到此音的頻譜圖(圖一 a)，此笛音的頻譜特色是次泛音分佈於兩個相鄰泛音的正中央。而在另一方面，聲波經由 autocorrelation 之類的運算可得到其週期 T (Licklider 1951, Meddis and O'Mard 1997)，以及音高 $f = 1/T$ 。下一步驟為最重要的篩選(sifting)，根據 f 所建立的泛音範本(harmonic template)可以視為有許多洞的篩子，各個洞皆位於 f 的整數倍，因此，泛音可以通過此一篩子，次泛音或噪音則無法通過此一篩子。頻譜成份經過篩選之後，通過篩子的泛音(圖一 b)將被整合在一起，是此音的純淨成份(pure part)；未通過篩子的次泛音與噪音，則被視為此音的雜質。

在這個聽覺模型中，特別值得注意的是提取音高(pitch extraction)此步驟所扮演的關鍵角色。若此笛音的音高是 $f/2$ ，則原本的次泛音便可通過泛音範本的篩選，被整合為此音的純淨成份。然而，此笛音的次泛音在低頻範圍(< 2 kHz)十分微弱，容易被相鄰的泛音所遮蔽(mask)，因此由低頻的頻譜成份來提取音高時，次泛音可以忽略，得到的音高不是 $f/2$ 而是 f 。雖然次泛音在高頻範圍(> 5 kHz)的強度已與相鄰泛音不相上下，能夠影響音色，然而它們的頻率太高，故無法影響音高的知覺。

² 當某個泛音特別突出時，它可以被獨立聽到，於是造成新的音高，這種情形僅會發生在少數樂器上面，例如：口簧琴(Jew's harp)、弓琴(mouth bow).....等，此外還有泛音唱法(overtone singing)所產生的歌聲。



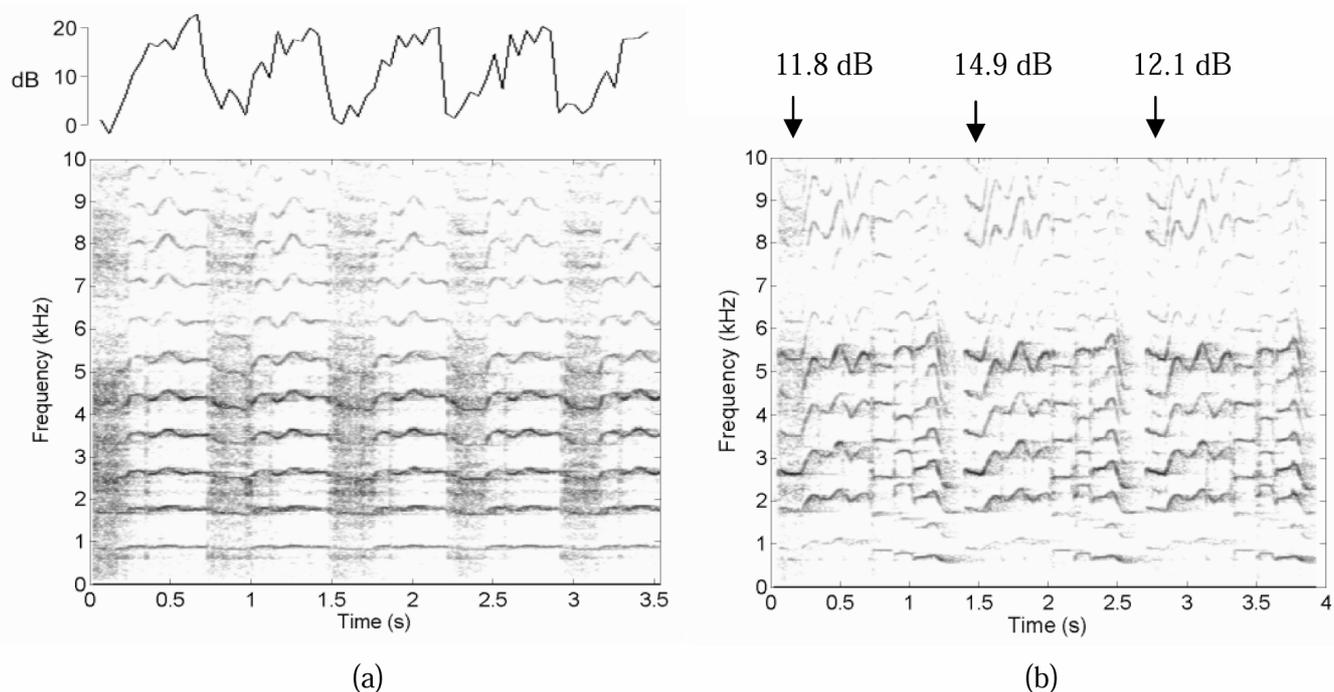
圖一：嘈雜音色的聽覺模型示意圖，詳見本文的說明。(a)含有次泛音的笛音頻譜圖，橫軸為頻率，縱軸為分貝，標上“。”記號的是頻率為 nf 的泛音譜線，在這些譜線的之間可以觀察到次泛音譜線。此笛音取自俞遜發演奏的 CD 專輯《寒江殘雪》(琴園出版社)，第八曲《妝臺秋思》的 3 分 20 秒處。(b)含有次泛音的笛音經過泛音範本篩選之後，次泛音會被去掉，此為近似的頻譜圖。

三、器樂與聲樂中的嘈雜音色

本節舉出一些帶有雜質的樂音例子，並簡述其發聲原理。由於上節的聽覺模型強調了聲音中的純淨成份與雜質，因此，本節亦將嘗試以「泛音-噪音比」(以下簡稱 HNR)作為量化分析的指標，這個指標的定義為「泛音的能量總和除以其他頻譜能量的總和」，單位通常為分貝(decibel)。本研究中的計算方法，是使用語音分析軟體 Praat 5.0.23 (Institute of Phonetics Sciences of the University of Amsterdam. <http://www.praat.org>)中的 short term HNR analysis(在該軟體中被歸類為 harmonicity 方面的處理)，其運算基礎為 autocorrelation (Boersma 1993)。以語音分析軟體來處理樂音，其適用性如何？「泛音-噪音比」是否為樂音雜質的良好指標？這都是以下音樂實例中所要探討的議題。

(一) 京胡的開花音

京胡演奏技法中的開花音又稱虛實音、虎音、炸音、人工噪音.....等，在京劇老生、青衣、淨角、老旦唱腔的伴奏中具有渲染情緒的作用。其奏法是讓左手手指放鬆、輕觸琴弦(稱為「泛按」)，同時右手用力拉出音頭，如此便能奏出強勁的噪音。由於左手手指與琴弦之間僅有微小的距離，故琴弦振動時會不斷碰撞左手手指，在琴弦上行進的波也會受到不規則的干擾，因此能產生豐富的高頻噪音(蔡振家 2008)。



圖二：京胡開花音的 spectrogram (圖下方) 與 HNR (圖上方)。此段音樂取自光碟《京胡古今名段》(中國青年出版社)，由京胡名家燕守平講解並演奏。

演奏開花音時，左手可以用一根指頭泛按琴弦，待右手拉弓到一半時，左手指頭再按實，右手回弓、左手揉弦，此一奏法又稱為虛實音，意即左手按弦「先虛後實」。如此拉推弓連續數次，可在同音反覆中做出音色變化，圖二 a 顯示了這種虛實音的 spectrogram，此音的特色是噪音與泛音列交替出現：當左手食指緊按琴弦時，頻譜上可看到一系列的泛音；而當食指稍微離開琴弦產生開花音時，頻譜上的泛音變得模糊，取而代之的是散成一片的噪音。HNR 隨時間變化的情形如圖二 a 上方曲線所示，當左手食指緊按琴弦時，HNR 大致高於 15 dB，而當左手食指泛按琴弦時，HNR 則驟降至 10 dB 以下。

圖二 b 為一段旋律在京胡上連續演奏三次的 spectrogram，京胡演奏家講究的是：第一個音要略帶雜質（稱為「小開花」），而雜質的多寡可由左手手指輕觸琴弦的方式來微調。圖二 b 的三次演奏中，第一次演奏的開花音含有最多的噪音，第二次演奏的開花音最純淨，第三次演奏的開花音則有幾個次泛音出現在頻率為 $5f/2$ 、 $7f/2$ 、 $9f/2$ 之處。這三次演奏的開花音 HNR 也隨著雜質的多寡而規律變化，但變化幅度不大。

（二）膜笛的幽咽音色

中國笛能發出類似沙啞嗓音的幽咽音色，這類聲音的特徵是含有次泛音，例如頻率為 $f/2$ 、 $3f/2$ 、 $5f/2$ 、 $7f/2$等的音，其中 f 為該音的音高。中國笛的笛音中存在次泛音的現象，跟人聲的情形有點類似，也就是次泛音會使音色變得嘈雜不純，不過中國笛的物理原理與人聲畢竟相當不同，中國笛只在特定的音域才會產生次泛音。以 C 調曲笛為例，在吹奏第一個八度，也就是從 G4（最低音）到 F5 時，並不會有次泛音產生，在吹奏 G5、A6、B6、C6 等音時，則會出現次泛音。這樣的笛音可以視為在該音中混入了一些低八度音的成份，這些成份就是頻率為 $(2n-1)f/2$ 的次泛音 ($n = 1, 2, 3, \dots$)。因此，具有次泛音的音可視為「八度雙音」(octave multiphonics)，它也會發生在長笛初學者的演奏之中，在西方古典音樂中通常會刻意避免這類不乾淨的音色。反之，貼有笛膜的中國笛，則因為笛膜的非線性特質而具有更強的高頻次泛音（蔡振家 2005），這也就成了中國笛曲的聲響特點之一，特別是低音笛。

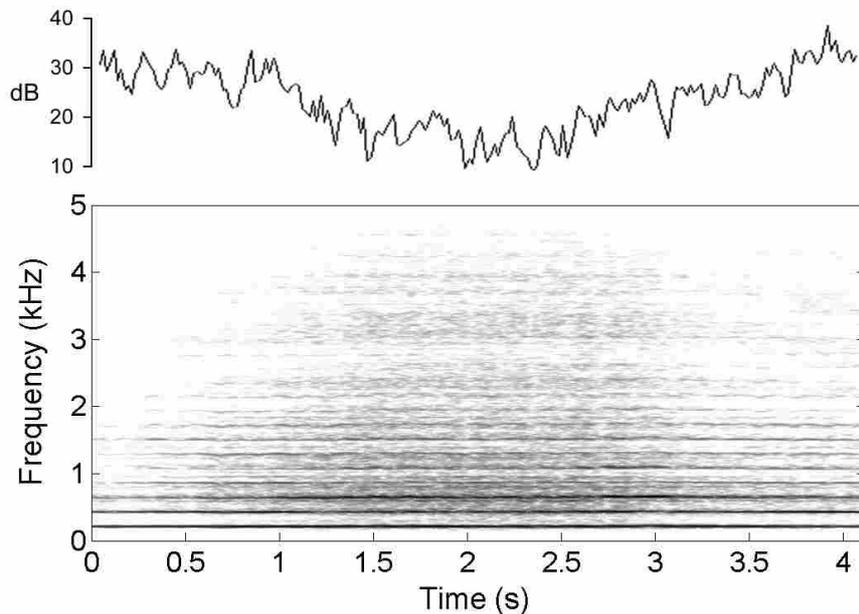
圖一 a 與圖一 b 所示的兩個的笛音，去掉次泛音的結果是讓 HNR 從 19.3 dB 上升到了 19.8 dB，可見 HNR 的值對於頻率為 $(2n-1)f/2$ 的次泛音之存在與否並不敏感，這個現象與圖二 b 的京胡開花音之 HNR 值變化甚微大致類似。

（三）尺八的氣音

日本的尺八源於中國唐宋時期的尺八，它與近代中國的洞簫雖然系出同源，但在演奏風格上卻有很大的差異，其中最明顯的差異可能就是：日本尺八非常強調口風的變化，並以此產生紊流噪音(turbulence noise)，尺八的演奏者以「ムラ息」來指稱這種可以發出豐富噪音的技巧，意即「不均勻的氣息」。這種演奏技巧一般是讓嘴唇靠近吹孔、吹出強勁的氣流，樂譜上通常記為  等，³其音色可以讓人聯想到自

³ 參考網頁 <http://www.shakuhachichambermusic.net/pages/notatingwm.html>，瀏覽日期 2008/12/16。

然界的風聲。由於近年日本電影、卡通中會以尺八來陪襯武士、忍者的打鬥，「ムラ息」也似乎便成為代表「肅殺之氣」的聲音。⁴



圖三：尺八的「ムラ息」，樂音的 spectrogram（圖下方）與 HNR（圖上方）。此音取自美籍音樂家 Elizabeth Reian Bennett 的尺八 CD 專輯 *Song of the True Hand*，第七曲《遍路》的 2 分 55 秒至 3 分 0 秒。

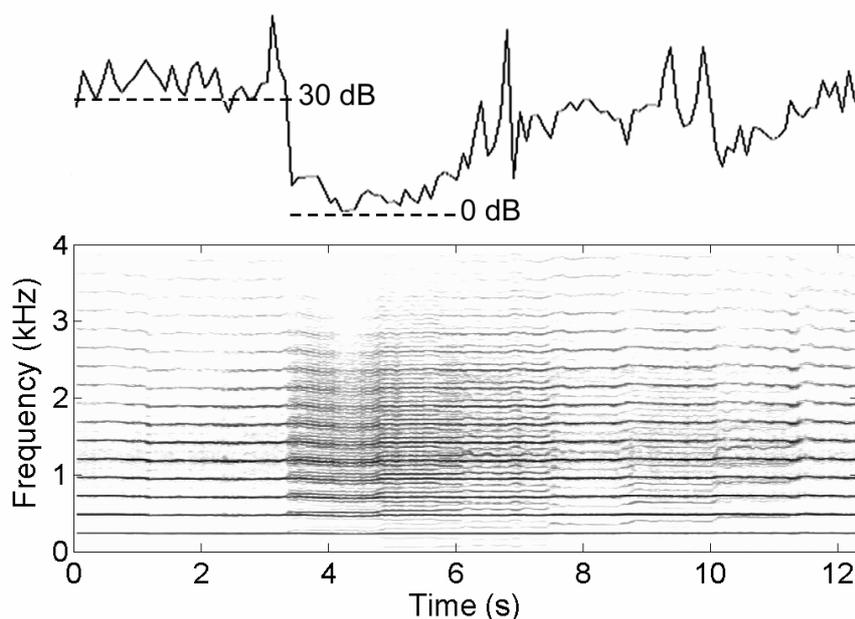
除了傳達殺氣之外，尺八的「ムラ息」也可以用來象徵肉體與精神上的力量，例如在枅屋正邦所譜作的尺八獨奏曲《遍路》(Henro)裡面，「ムラ息」便常用來表現朝聖者在艱難旅途中的奮鬥力量(Keister 2008)。圖三分析了《遍路》曲中的一個「ムラ息」，從頻譜圖中可以看到，此音中間有顯著的寬頻噪音，而該處的 HNR 也降到了最低點。

（四）薩克斯風與銅管樂器的吼音

在爵士樂與搖滾樂裏面，薩克斯風、小號、長號都可以使用吼音(growling)的技巧來增加樂音的雜質，方法是在吹奏的同時由喉部唱出聲音。當聲帶與嘴唇同時振動時，兩者有可能同步化(synchronization)而以呈簡單整數比的頻率振動(Gibiat and Castellengo 2000)，或是以 torus 為吸子而產生旁帶，或是以混沌式(chaotic)的振動行為產生寬頻噪音。以上這三種可能性的發生，取決於聲帶與簧片（或嘴唇）的彈性、氣流大小、共鳴管……等因素，所造成的聲音雜質也有多種變化。圖四所示的 spectrogram 是在小號上運用吼音技巧的例子，可以發現，此音開頭較為純淨的音色，其 HNR 大致高於 30 dB，而在雜質

⁴ 十六世紀日本出現普化宗，尺八成了普化宗虛無僧的法器，到了德川幕府時代，政府利用普化宗作為「勇士浪人之隱家，武人修行之宗門」，武士們也連帶吸收了普化宗的尺八藝術，此後，尺八便與武士結下了不解之緣。

較明顯的 3.4 秒至 6 秒之間，HNR 則低於 10 dB。



圖四：小號的吼音技巧，樂音的 spectrogram（圖下方）與 HNR（圖上方）。此音由趙彥婷示範演奏。

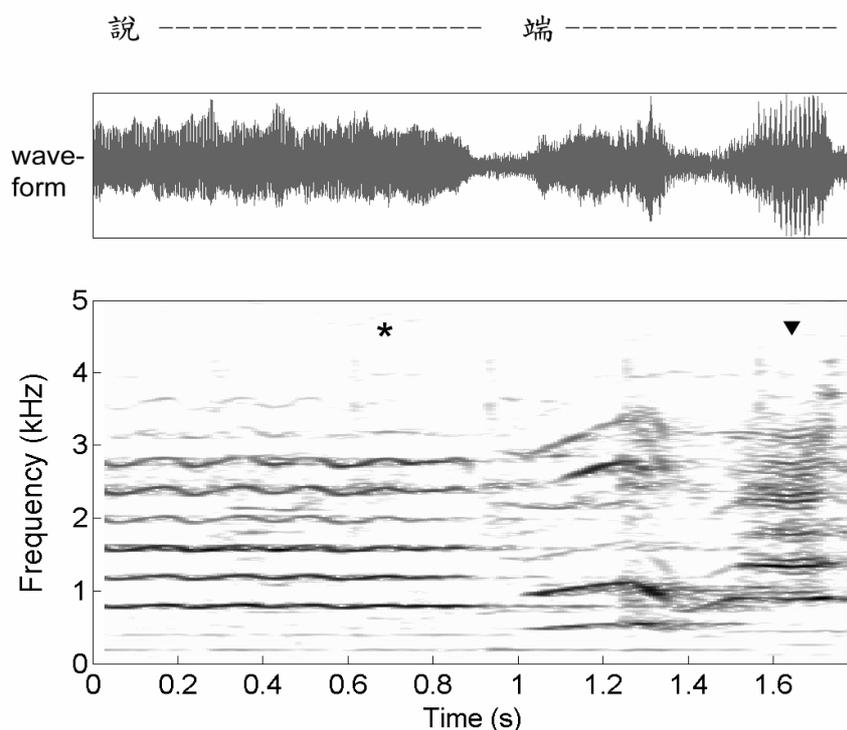
（五）歌聲中的雜質

在多采多姿的歌聲中，也有一些帶有雜質的沙棱音色。撇開喉部組織病變的情形不談，專業歌手的沙棱音色常常源於聲門上結構(supraglottic structures)的振動。嗓音的發生是由於肺部呼出空氣、聲帶靠攏，氣流通過聲帶間的狹縫（稱為聲門）導致聲帶振動。在喉部組織中，除了聲帶可以振動之外，聲帶上方的一些聲門上結構偶爾也會振動，在發聲時佔有一席之地。聲門上結構包括了一對假聲帶(false vocal fold)與杓狀會厭軟骨皺褶(aryepiglottic fold)等。從生物演化的角度來看，聲門與聲門上結構原本可能都是阻擋食物或水進入氣管的關卡，但它們剛好也可以用來振動發聲，其中聲帶進一步演化為極有效率的發聲器官，在上皮與韌帶之間有個富含液體的空間，稱為 Reinke's space，是聲帶中振動最劇烈的區域，其豐富的含水量讓聲帶更柔軟、振動更為容易。聲帶可以在骨骼肌的牽引之下改變張力、形狀與振動頻率，發出不同的音高。聲門上結構在一般的發聲狀態中並不會振動，但在咳嗽或吼叫等情形，它們會向中央靠攏，當氣流通過其間的狹縫時，便會引起表面黏膜的振動。不過聲門上結構裏面沒有骨骼肌，因此無法隨心所欲地改變它的彈性。

在發出吼叫式的嗓音時，聲帶與聲門上結構可以同時振動，但兩者的振動頻率卻不一樣，這種情形與薩克斯風、銅管樂器的吼音類似，也會產生次泛音、旁帶、噪音。在爵士樂壇中，有不少歌手以沙質嗓音唱出韻味醇厚的歌曲，而搖滾音樂、重金屬音樂的表現益趨激烈，醫學研究證實，搖滾歌手的嘶吼常伴隨著聲門上結構的振動(Borch et al.

2004)。除了搖滾歌手之外，科學家也曾研究過俄羅斯傳統歌樂(Mazo et al. 1995)、朝鮮傳統民間歌樂(Lee et al. 1998)裡面的歌聲雜質。

在中國戲曲裏面，京劇的架子花臉經常會發出炸音，成為其唱腔的特色之一（蔡振家 2005）。圖五所示的例子中，架子花臉的唱腔由純淨的音色轉為炸音，聲波的包絡可以看到調幅(amplitude modulation)的現象（1.65 秒附近），調幅頻率約為 89 Hz，此即聲門上構造的振動頻率，而聲帶的振動頻率約為 445 Hz。純淨歌聲與炸音的 HNR 值分別為 19.8 dB 與 3.6 dB，可見 HNR 確實能反映歌聲中雜質的多寡。



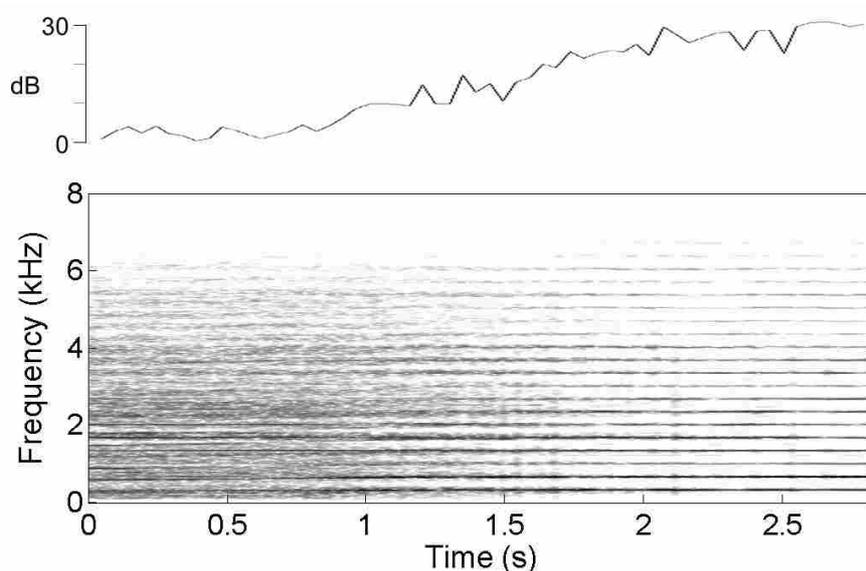
圖五：京劇《李逵探母》唱段中的炸音。架子花臉由楊赤飾演，唱詞為「老娘不必珠淚降，細聽孩兒說端詳」，此例中僅分析「說端」二字。計算結果顯示：純淨歌聲（*）與炸音（▼）的 HNR 值分別為 19.8 dB 與 3.6 dB。

（六）電吉他的破音

破音是許多人對於電吉他的第一印象，從電吉他的發展史來看，破音的起源可能是吉他手 Paul Burlison 於 1956 年使用損壞的擴大機所得到的意外效果，後來也有吉他手故意把喇叭單體刺穿以扭曲音色(Walser 1993:42)。有鑒於電吉他演奏者對於破音的需求，製造音箱的公司也在產品中發展「以信號過度增益造成失真」(clipping)的效果，如今，電吉他的效果器可以做出 distortion/overdrive 等破音。

同時彈奏電吉他的數根弦，能夠凸顯效果器所產生的破音音色，因為原本訊號中的

頻譜成份在非線性扭曲之下，可產生許多組合音(combination tone)，其頻率為原本頻譜成份的整線性組合(integer linear combination)。⁵可惜的是，這類的樂音雖然富含雜質，但卻不適合進行 HNR 分析，因為 HNR 分析基本上只適用於單音音樂。電吉他中有一種「同音推弦」的技巧，適合進行 HNR 分析，因為這種音是同時在兩根弦上彈奏音高接近的兩個音（通常差一個全音），然後左手手指將音較低的弦向外推，讓兩根弦的音高漸趨吻合。這種音的開頭富含雜質，其為「拍」加上破音效果的產物，而當兩個音逐漸接近時，雜質便會越來越少。圖六顯示了電吉他「同音推弦」的頻譜圖與 HNR，圖中可以觀察到 HNR 隨著頻譜雜質的遞減而遞增，從原本的 0 dB 增加到約 30 dB。這種富含雜質的音頭可以製造音樂的張力，而雜質的逐漸消失，則可以導致張力的解決，因此，「同音推弦」似乎可以視為一種「音色的終止式」。



圖六：電吉他的扭曲效果，樂音的頻譜圖（下方）與 HNR（上方）。此音取自 Troy Stetina 所著 *Metal Lead Guitar Vol.1* 所附的 CD。

四、結論

在西方古典音樂裏面，帶有雜質的音色似乎不如純淨的樂音來得悅耳，因此音樂家通常會刻意避免產生這類音色；但在中國戲曲、爵士樂、搖滾樂等音樂文化中，嘈雜不純的音色卻是音樂風格中的「蒜酪之味」，雖為點綴性質，在許多樂曲中都少不了它的「調味」。本文根據音景分析的理論指出，這些樂音的雜質未能通過由音高 f 所建立的泛音範本篩檢，所以才被當作雜質。

樂音中雜質的多寡，可用 HNR 值來估計。在各種雜質裡面，噪音與旁帶較能影響

⁵ 例如若原本有兩個頻譜成份之頻率為 f_1 與 f_2 ，經過非線性扭曲之後，會產生頻率為 $|mf_1 + nf_2|$ 的頻譜成份，其中 m 與 n 為整數。

HNR，反之，HNR 的值對於頻率為 $(2n-1)f/2$ 的次泛音之存在與否並不敏感。一般而言，純淨樂音的 HNR 都大於 15 dB，而泛音豐富的銅管樂器聲，其 HNR 甚至可以高達 30 dB。帶有雜質的樂音，其 HNR 通常低於 15 dB，而當 HNR 低於 5 dB 時，音色聽起來便十分沙稜。此結果與一項針對犬吠聲的研究大致吻合，該研究發現，泛音特別豐富的嘹亮犬吠聲，HNR 大於 20 dB；而聲帶病變的犬隻，其吠聲富含雜質，HNR 低於 10 dB (Riede et al. 2001)。

音樂家在演奏（演唱）時添加雜質的手法，背後有各種不同物理機制，端視所使用的樂器而定。簧片樂器、唇振樂器與人聲通常是讓兩個非線性振盪系統產生耦合，擦絃樂器可以運用手指輕觸琴弦的技巧，而電吉他則是在電子訊號處理中製造失真，產生扭曲效果。從傳統音樂到電子時代，樂音的雜質即使不一定直接由演奏技法產生，但在演奏時「妥善控制噪音、予以巧妙運用」的原則，並沒有基本上的改變，由此可見雜質在樂音之中的重要地位。

參考文獻

- Boersma, P. (1993). Accurate short-term analysis of the fundamental frequency and the harmonics-to-noise ratio of a sampled sound. *Proceedings of the IFA*, 17: 97-110.
- Borch, D. Z., Sundberg, J., Lindestad, P. A., and Thalén, M. (2004). Vocal fold vibration and voice source aperiodicity in 'dist' tones: a study of a timbral ornament in rock singing. *Logopedics, Phoniatrics, Vocology*, 29(4): 147-153.
- Bregman, A. S. (1990). *Auditory Scene Analysis*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- de Cheveigné, A. (1997). Concurrent vowel identification. III. A neural model of harmonic interference cancellation. *Journal of Acoustical Society America*, 101: 2857-2865.
- Gibiat, V., and Castellengo, M. (2000). Period doubling occurrences in wind instruments musical performance. *Acustica*, 86: 746-754.
- von Helmholtz, H. L. F. (1885). *On the Sensations of Tone as the Physiological Basis for the Theory of Music*. 2nd ed. trans. A. J. Ellis, from German 4th ed. (1885), Reprinted, Dover, New York (1954).
- Keister, J. (2008). Song of the True Hand (Audio Recording Reviews). *Asian Music*, 39(2): 194-197.
- Lee, M. H., Lee, J. N., and Soh, K. S. (1998). Chaos in segments from Korean traditional singing and Western singing. *Journal of Acoustical Society America*, 103(2): 1175-1182.
- Licklider, J. C. R. (1951). A duplex theory of pitch perception. *Experientia*, 7(4): 128-134.
- Mazo, M., Ericson, D., and Harvery, T. (1995). Emotion and expression: temporal data on voice quality in Russian lament. In: *Vocal Fold Physiology: Voice Quality Control*, ed. O. Fujimura, and M. Hirano, San Diego: Singular, pp. 173-187.

- Meddis, R., and O'Mard, L. (1997). A unitary model of pitch perception. *Journal of the Acoustical Society of America*, 102: 1811-1820.
- Plomp, R., and Levelt, W. (1965). Tonal consonance and critical bandwidth. *Journal of the Acoustical Society of America*, 38: 548-560.
- Riede, T., Herzel, H., Hammerschmidt, K., Brunberg, L., and Tembrock, G. (2001). The harmonic-to-noise ratio applied to dog barks. *Journal of Acoustical Society America*, 110(4): 2191-2197.
- Tsai, C. G. (2004). Auditory grouping in the perception of roughness induced by subharmonics: empirical findings and a qualitative model. *Proceedings of the International Symposium on Musical Acoustics (March 31-April 3, Nara, Japan)*, pp. 257-260.
- Walser, R. (1993). *Running with the Devil: Power, Gender and Madness in Heavy Metal Music*. Hanover, NH: University Press of New England.
- 蔡振家 (2005)〈表演者的混沌嗓音—吼音的跨領域探討〉。《戲劇學刊》，第 2 期，頁 39-62。
- 蔡振家，Auhagen, W. (2005)〈中國笛的音準、音域與音色：笛膜的 Duffing 振子模型〉 (<http://homepage.ntu.edu.tw/~gim/gia/pub/dizi6.pdf>)。傳統樂器學術研討會，2005 年 9 月 10-11 日，臺北，臺灣。
- 蔡振家 (2008)〈具有非線性邊界條件的琴弦振動：京胡“開花音”的聲學研究〉。《黃鍾—武漢音樂學院學報》2008 年 4 期，頁 168-173。