

逢 甲 大 學
電 聲 碩 士 學 位 學 程
碩 士 論 文

以心理聲學建立主觀聲音品質評價方法

Psychoacoustic Methodology for Subjective
Audio Sound Quality Evaluation

指導教授：黃錦煌 (Dr. Jin H. Huang)

研 究 生：蔡鈺鼎 (Yu-Ting Tsai)

中 華 民 國 九 十 九 年 七 月

逢 甲 大 學
電聲碩士學位學程碩士學位論文

以心理聲學建立主觀聲音品質評價方
法

Psychoacoustic Methology for Subjective
Audio Sound Quality Evaluation

研究生：蔡鈺鼎

經碩士學位考試合格特此證明

評審委員

黃錦煌

吳育祥

唐國平

指導教授

黃錦煌

所 長

黃錦煌

考試日期：中華民國九十九年六月二十九日

逢甲大學 博碩士論文電子檔案 授權書

本授權書所授權之論文為授權人 蔡鈺鼎 在逢甲大學 電聲碩士學位學程 研究所
98 學年度第 二 學期取得 ☐ 博士 ☒ 碩士 學位之論文。

論文名稱： 以心理聲學建立主觀聲音品質評價方法

指導教授： 黃錦煌

茲同意將授權人擁有著作權之上列論文全文電子檔(含摘要) 無償、非專屬性授權逢甲大學，
登載於逢甲大學授權執行單位所建置之資料庫內，並得從事下列行為：

- 一、提供讀者不限地域、時間及次數之免費線上檢索、閱覽、下載或列印，並得將資料庫重製成微縮、光碟或其他數位化載體以及其他學術機構之資料庫交換。
- 二、提供付費之線上全文下載及列印，並得將該資料庫重製成光碟或其他數位化載體販售發行，或交由非學術組織出版，惟線上收費及販售所得應視為專款作為執行單位營運及系統維持之用。

全文電子檔使用權限授權（請勾選下列一項授權選項）：

- ☐ 立即公開
☐ 一年後公開 *
☒ 五年後公開 *

* 表示因參與指導教授國科會計畫研究或向經濟部智慧財產局申請專利審查中等因素，
需延後公開者。

立授權書人保證對上述授權之著作擁有著作權，且尚未專屬授權予其他法人或自然人。
本件授權並不影響著作人對原著作之著作權及衍生著作權，著作權人得為其他之專屬授權。

立授權書人保證授權使用之作品及相關資料，並無侵害他人智慧財產權、隱私權之情事，
如有侵害他人權益及觸犯法律之情事發生，立授權書人願自行負責一切法律責任，被授權人
一概無涉。

授權人： <u>蔡鈺鼎</u> (親筆簽名)	被授權人：逢甲大學
身份證字號： <u>S123361066</u>	地址：台中市西屯區文華路 100 號
戶籍地址： <u>402 台中市南區興大路 41 號 3 樓</u>	電話：(04)24517250
電話： <u>(04)22618153</u>	
學號： <u>M9707718</u>	
e-Mail： <u>richallen1688@gmail.com</u>	

民國 99 年 8 月 2 日

誌謝

首先感謝授業恩師 黃錦煌教授這兩年來的悉心教導，在諄諄教誨的過程中，適時指點我為學的態度，也啟蒙了我對電聲學術領域的研究樂趣。老師除了在課業及學問的指導，也時常鼓勵並給予我多次與學術界及業界交流、學習的機會，讓我在碩士研究生涯中獲益匪淺。此外，由於恩師不厭其煩的指正，使本論文更臻於完備，在此謹致上衷心的謝意。

口試期間，感謝唐國豪教授、夏育群教授對論文之審閱簽正，使得本論文更臻於完備。還要感謝這兩年來教導過我的師長，包括黃雲芳老師、廖祿立老師、吳維忠老師、丁德勝老師、劉顯光老師、楊瑞彬老師、汪龍飛老師、徐森煌老師…等，悉心教導，令我受益匪淺。

本論文的完成亦得感謝美律實業股份有限公司 廖祿立董事長的大力支持及指引，魏文傑副董事長、何鴻鈞副總經理以及美律的工程師們給予的機會及建議，使本研究更貼近於實際層面的應用。此外，感謝美隆工業股份有限公司 吳維忠董事長的提攜，開創我對揚聲器領域的廣大新視野，讓我了解其中的奧秘及樂趣。

感謝學長 Pawar 及佳培、同學梓濬、崐耀、姝蓓，還有學弟碩晏，感謝你們的協助。在實驗室兩年的日子裡，因為有你們共同營造的生活點滴，學術上的討論、言不及義的閒扯，讓研究生活變得絢麗多彩，是我很寶貴的回憶。當然，還有人因工程實驗室的詩婷同學也不能忘記，妳的幫忙，讓我銘感在心。

更感謝我摯愛的爸爸、媽媽和弟弟，你們引領出我獨特的天賦與熱情，驅使我創造自己的成就，找到自己的生命價值，讓我的天賦自由。家人背後的支持是我前進的動力，沒有的家人的關愛、體諒和包容，相信我的人生將是很不一樣的光景。謹此論文，致上最深的謝意。

蔡鈺鼎 謹誌

中華民國九十九年七月二十日

中文摘要

聲音品質為研究聲音的一門重要課題，其中隱含了人耳對於音樂及噪聲等聲音聽覺感受。對於聲音品質的評估，現今已發展出許多，以響度及頻率為主的各種量測技術，能客觀地表現出聲音的物理品質。本文以心理聲學的響度、尖銳度、粗糙度等參數，從主觀聽覺的層面來量化人耳對聲音的聽覺特性，並衍伸出，符合人耳對音樂聽感的主觀量化數據，分析、建立出一種評估聲音品質的模型。此外，以往對於聽覺粗糙度的計算，並沒有考量人耳聽覺頻帶的特性。因此，本文將臨界頻帶，加入聽覺粗糙度計算中，進而獲得人耳在各種不同頻帶的聽覺粗糙度感受。實驗分析方面，本文以主觀聽測來了解受測群對其音樂的各種聽感及聽覺喜好程度，並透過相關分析及多元迴歸分析，驗證人耳主觀聽感與主觀量化數據之間的對應關係，及評估該受測群對其之聽覺喜好度。分析結果表明，本文所提出的評估模型可用於評估由耳機所錄下來的聲音，表示此聲音品質評估模型，能充分地表達出主觀的音質感受。

關鍵詞：心理聲學、聲音品質、聽覺喜好、多元迴歸分析

Abstract

Sound quality is an important issue in sound production today, covering a range of fields from music performance, movies, concerts, household music system, and mechanical noise. It is related to human aural response which is subjective to individual's ear physiology, preferences, and predilection. Many measurement assessment metrics for sound quality have been defined including frequency and loudness that objectively demonstrate the physical quality of sound. Alternately, based on psychoacoustic studies, this thesis presents loudness, sharpness and roughness to quantify subjective auditory characteristics, and then proposes a sound quality evaluation model. The model incorporates subjective quantity hearing data analysis.

In the past, there was no consideration of auditory roughness characteristics of human auditory frequency bands. It is believed auditory roughness has a strong influence on the hearing perception, therefore, the model adds critical-band rate to auditory roughness evaluation. Consequently, the auditory roughness can be clearly illustrated various frequency bands. For experimental analysis, the subjective listening tests were conducted to obtain the hearing satisfaction score and hearing perception preference of individuals for music. The correlation analysis and multiple regression analysis are also used in this work. It may assess the preference of hearing satisfaction score and the relationship between hearing sensation and subjective quantity data. Experimental results verify that the present assessment model can be successfully applied to

以心理聲學建立主觀聲音品質評價方法

assess sound quality of audio signals from earphones.

Keywords: Psychoacoustics, Sound quality, Auditory preferences,
Multiple regression



目錄

第一章 緒論.....	1
1.1 研究背景及動機.....	1
1.2 研究目的及方法.....	2
1.2.1 研究目的.....	2
1.2.2 研究方法.....	4
1.3 文獻探討.....	10
1.3.1 揚聲器聲音品質的評估方法.....	10
1.3.2 心理聲學與信號分析.....	11
1.3.3 音高與音階.....	13
1.3.3-1 音高理論.....	13
1.3.3-2 音階.....	16
1.3.4 合音之探討.....	17
1.3.5 音色與聲音和諧度.....	18
1.3.6 多元迴歸分析方法.....	19
1.4 論文組織.....	20
第二章 心理聲學的基本理論	27
2.1 離散短時傅立葉轉換.....	27

2.2 比響度分析.....	30
2.3 各聽覺頻段指標分析.....	33
2.4 音質粗糙浮動度分析.....	34
2.5 整體音調和諧度分析.....	38
第三章 多元迴歸分析	49
3.1 主觀聽覺量化分析.....	49
3.2 複迴歸分析.....	54
3.2.1 數據標準化.....	56
3.2.2 建立迴歸分析模型.....	57
3.2.3 迴歸模型檢定.....	58
第四章 聲音品質實驗分析	62
4.1 聲音品質評估模型.....	62
4.1.1 評估模式建立.....	62
4.1.2 音訊錄製.....	63
4.1.3 主觀聽測實驗.....	64
4.2 實驗結果與分析.....	68
4.2.1 主觀聽覺量化分析.....	69
4.2.2 相關分析.....	70
4.2.3 迴歸分析.....	71

4.3 實驗結論.....	72
第五章 總結.....	101
5.1 結論.....	101
5.2 其他發展及應用.....	104
參考文獻.....	105



圖目錄

圖 1.2.1 Mel Scale 與頻率對應圖	21
圖 1.2.2 人耳在評量聲音品質的示意圖	21
圖 1.2.3 主觀聽感圖	22
圖 1.2.4 人耳的主觀聽感及客觀的數據量化關係圖	22
圖 1.2.5 研究流程圖	23
圖 1.3.1 聲壓對於音高的影響圖	24
圖 1.3.2a Multitone 時間信號圖	24
圖 1.3.2b FFT 頻率分析圖	25
圖 1.3.3 音階循環表示圖	25
圖 2.1.1 訊號頻譜轉換與逆轉換流程圖	42
圖 2.2.1 宋(Sone)與分貝(dB)的關係圖	42
圖 2.2.2(a) 頻譜圖	43
圖 2.2.2(b) 比響度圖	43
圖 2.4.1 和諧度與臨界頻帶的關係圖	44
圖 2.4.2 Plomp-Levelt curves 圖	44
圖 2.4.3 Vassilakis 的不和諧度曲線圖	45
圖 2.4.4 Helmholtz 的不和諧度曲線圖	45
圖 2.5.1 音色和諧度計算流程圖	46

圖 2.5.2 聽覺粗糙度計算流程圖	46
圖 2.5.3 聽覺粗糙度總值圖(總合法).....	47
圖 2.5.4 聽覺粗糙度總值圖(平均法).....	47
圖 3.1.1 主觀聽覺量化數據步驟流程圖	61
圖 3.2.1 複迴歸分析之進行流程圖	61
圖 4.1.1 聲音品質評估模式之實施流程	74
圖 4.1.2 美律實業股份有限公司所提供之六支耳機圖	74
圖 4.1.3 人工頭(HATS)照片圖	75
圖 4.1.4 音訊錄製示意圖	75
圖 4.1.5 主觀聽測實驗的流程圖	76
圖 4.2.1 主觀量化分析結果圖。測試曲目為大編制古典樂。	77
圖 4.2.2 主觀量化分析結果圖。測試曲目為小編制古典樂。	78
圖 4.2.3 主觀量化分析結果圖。測試曲目為輕搖滾樂。	79
圖 4.2.4 主觀量化分析結果圖。測試曲目為重金屬樂。	80
圖 4.2.5 主觀量化分析結果圖。測試曲目為鼓擊樂。	81
圖 4.2.6 主觀量化分析結果圖。測試曲目為靈魂流行樂。	82
圖 4.2.7 主觀量化分析結果圖。測試曲目為重節拍舞曲。	83
圖 4.2.8 群體預測評分值散佈圖	84
圖 4.2.9 離散個體預測評分值散佈圖	84

圖 4.3.1 各支耳機(含原始音訊)喜好分數統計比較圖	85
圖 4.3.2 比響度圖。	85
圖 4.3.3 尖銳度圖。	86
圖 4.3.4 聽覺粗糙度圖	86



表目錄

表 1.2.1 主觀聽覺量化項目表	26
表 1.3.1 十二平均律表，以 A=440 Hz 起始為例	26
表 2.3.1 聽覺頻段響度計算公式表	48
表 2.5.1 聽覺粗糙度計算流程表	48
表 4.1.1 主觀聽測標準表	87
表 4.1.2 喜好聽覺評價尺度表	87
表 4.2.1 整體主觀聽感量化數據測試。曲目為大編制古典樂	88
表 4.2.2 整體主觀聽感量化數據測試。曲目為小編制古典樂	89
表 4.2.3 整體主觀聽感量化數據測試。曲目為輕搖滾樂	90
表 4.2.4 整體主觀聽感量化數據測試。曲目為重金屬樂	91
表 4.2.5 整體主觀聽感量化數據測試。曲目為鼓擊樂	92
表 4.2.6 整體主觀聽感量化數據測試。曲目為靈魂流行樂	93
表 4.2.7 整體主觀聽感量化數據測試。曲目為重節拍舞曲	94
表 4.2.8 主觀聽測評分表(原始數據：取小數點後 2 位)	95
表 4.2.9 主觀聽測評分表(標準化數據：取小數點後 2 位)	95
表 4.2.10 主觀聽覺量化評分表(原始數據：取小數點後 2 位)	96
表 4.2.11 主觀聽覺量化評分表(標準化數據：取小數點後 2 位)	96

表 4.2.12 為相關分析數據表	97
表 4.2.13 為變數項目對照表	97
表 4.2.14 數據資料表	98
表 4.2.15 各自變數的顯著性表	99
表 4.3.1 聲音品質聽覺喜好綜合評分表	100



第一章 緒論

1.1 研究背景及動機

子曰：「衣服容貌者，所以悅目也；聲音應對者，所以悅耳也。」，聲音之所以悅耳，乃由好的樂者所奏、好的歌者所頌，樂音之所以賞心，乃聽者共鳴、感動也，而能結合兩者讓聆聽者感受到好的樂音是現今音響設備的設計原則及目的。音響設備的發展，從 1861 年貝爾發明電話機，1930 年代人們發展為視聽家用的音響系統，至今音響仍然不斷在發展且品質日益更新。隨著人們對物質生活與精神文化生活的需求不斷提升，對生活環境的聲音質量、對藝術欣賞的樂音質量，要求變得越來越高，這也是促進與推動音響的研究及進步，使得人們越來越有更多的選擇，聲音的品質越來越受到重視。因此，聲音品質的研究對於推動電聲產業技術水準及提高電聲產品的品質與競爭力，具有重要意義。

以往對聲音品質的客觀量測上，皆以頻率響應(Frequency Response)、總諧波失真(THD：Total harmonic distortion)、互調失真(IMD：Inter-modulation distortion)等指標來表達它在聲學特性上的設計是否達到預期的品質。但電聲產品的好壞是以人的喜好為最終依據，

單從儀器的客觀量測數據未必能完整的呈現出人對聲音品質的感受，且儀器的量測亦不能反映出人耳的喜好聽感。若能將人耳聽覺上的各種感官加以主觀量化，在檢測上能呈現人耳的主觀聽感，對電聲產品的設計及提升聲音品質將會有著極大的幫助。

1.2 研究目的及方法

1.2.1 研究目的

聲音品質(Sound quality)是從人的聽覺心理發展而來的名詞，表示人對噪音、樂音與語音的喜好聽感。然而，心理聲學是聲音品質研究的理論基礎，所謂心理聲學，就是研究與人聽覺相關的一門學科。聽覺是主觀的，它因人種、文化、環境及區域不同，可能有不同的感受及反應。而客觀的量測與人耳聽覺的主觀感受之間存在著明確的對應關係，例如，聲音的頻率不同，主觀感受上會有聲音高低、尖細、渾厚的差異；聲音的聲壓級不同，主觀感受上會有響度大小的差異；聲音的頻率組合不同。主觀感受上會有音色、音質的差異。這些客觀的檢測，可以將各種聽感指標分而治之，單獨獲得。但對於聲音品質的主觀評價來說，人對於聲音質量的感受(Perception)與認知(Cognitive)

是非常複雜的，很難藉由未加入人耳特性的客觀量測數據上來判斷人對聲音的聽感。所以心理聲學理論上，如響度 (Loudness)、臨界頻帶(Critical Band)、音高 (Pitch) 及音調(Tonality)...等反映人耳主觀聽感的名詞，以及度量人耳對聲音的某些特定聽感，如比響度(Specific Loudness)、尖銳度 (Sharpness)、粗糙度 (Roughness)、浮動強度 (Fluctuation Strength)...等主觀量化參數，可將人耳的主觀聽感數據量化，為聲音品質主觀評價工作提供可靠的量測數據。

傳統上，聲音品質的好壞仍以主觀問卷的形式來評定。以聽感的角度來說，人的聽覺喜好包含了音頻的平衡性、音色的感覺及音質的表現，然而每個人的”聽覺喜好”及其喜好的音樂未必相同，因此對聲音品質的判定也就不盡相同。例如，有的人覺得高音越清亮越好，但亦有人喜歡高音平順適中。換言之，正常的聽覺感官對於各音頻的響度、音調的聽感是幾乎相同的，但對聲音的品質感受就各有所好。因此，本文以心理聲學理論將人耳的主觀聽感量化成數據，由數據分析來探討人的聽覺喜好，藉以了解大眾對音樂的喜好習性及解釋、分析各種音樂的聽覺感受。

1.2.2 研究方法

為能將人耳的主觀聽感量化成數據，本文將以心理聲學理論，結合數位信號分析方法，建立符合人耳聽覺喜好的聲音品質評估方法。

近代著名的心理聲學家 Fastl [1]以主觀聽測實驗建立人耳針對噪音上的各種心理聲學聽感項目，經由分析各項數據獲得人耳針對噪音的感官愉悅度(Sensory Pleasantness)。感官愉悅度是表示人耳對聲音的聽覺喜好度，當時 Fastl 用以表示人耳對噪音的接受程度，其主觀聽測與所對應的心理聲學參數有：

1. 響度(Loudness)

所謂響度(Loudness)是指人耳主觀地對聲音振幅(amplitude)的感覺，與物理學對聲音振幅的定義是不相同的。雖然振幅與響度基本上兩者有一定的關連，例如：聲音振幅愈大，則響度愈大，但是由於人耳本身對聽力的非線性特性，導致兩者之間有相當的差異性。

對頻率相同的聲音而言，響度的大小將取決於聲音振幅的大小，當頻率不同的兩種聲音，即使其分貝(dB)值相同，具有相同的聲音振幅，其響度卻未必相同，乃因人耳的特性所致。對此人耳聽覺現象，Stevens [2] 提出響度與聲壓並不是成線性比例關係，而是

大致與聲壓的指數成正比，這個指數大約是 0.23。對此聽覺響度特性，稱為史蒂文指數定律(Stevens' power law)。

因此，響度分析主要為表示人耳於聽覺頻帶上各頻段的聲音強弱感受程度，它在音頻(Audio)及噪音音量檢測上有極大的應用價值。為了對響度進行定量計算，研究學者利用心理聲學的研究成果建立了響度的計算公式。1965 年，Zwicker [3, 4] 以 24 個臨界頻帶來劃分，並計算人耳對不同頻率的聽覺響度感受，而所提出的模式(Model)被 ISO532 及 DIN45631 採用作為計算響度的國際標準。1997 年，Moore [5] 對 Zwicker 的模式作了重要改進，將 24 個臨界頻帶(Bark)改為 128 個等效矩形頻帶(ERB : Equivalent rectangular bandwidth)的方式來計算響度值，此模式被 2005 年版美國國家標準所採用，但兩者皆可表現出響度值會隨著頻率及強度的改變而改變。

在響度計算的計算基礎上，後來學者提出許多反映聽覺感受的心理聲學參數用以評價聲音品質，如尖銳度(Sharpness)、粗糙度(Roughness)、音調(Tonality)等。

2. 尖銳度(Sharpness)

尖銳度是描述高頻成份在聲音頻譜中所佔比例的參數，應用在噪音研究上，它反映了聲音信號的刺耳程度。由於人耳對高頻聲

音比較敏感，尖銳度值越高，給人的感覺就越刺耳。尖銳度過高不但會使人產生厭惡或不舒服的現象，且長期在充斥著高尖銳度聲音的工作場合下工作，亦會造成人耳的聽力傷害。由於人耳對高頻聲音的敏感程度與音量大小有關，所以響度是影響尖銳度值大小的關鍵。尖銳度也可以用來定量描述信號高頻成分所佔的比例。

3. 粗糙度(Roughness)

聲音的瞬時起伏主要是由於信號的調變(modulation)所產生，調變的聲音給人兩種不同的聽覺感受：當調變頻率在 0.25 Hz 至 32 Hz 之間時，聲音響度隨時間緩慢地上下起伏變化，讓人有聲音波動的感覺，心理聲學稱之為浮動強度(Fluctuation Strength)，其中以 20 Hz 的調變頻率所產生的浮動強度最大；當調變頻率在 15 Hz 至 300 Hz 之間時，聲音響度隨時間快速地起伏變化，讓人有聲音粗糙的感覺，心理聲學稱之為粗糙度(Roughness)，其中以 70 Hz 的調變頻率所產生的粗糙度最大。所以在噪音檢測的應用上，浮動強度與粗糙度都可用來表示人耳感受到的聲音浮動量與粗糙量。

大部分語音或樂音都不是單一頻率，而是由好幾種頻率的聲音信號所組成的。因此，每一種聲音各有其獨特的聲音頻譜，稱為該語音或樂音的音色(Timbre)。所以在音樂應用上，粗糙度可用來

解釋當樂音是由多個頻率所組成的合音時，人耳所能感受到該樂音是否和諧。

4. 音調(Tonality)

人耳對聲音高低的感覺稱為音調。音調主要與聲音的頻率有關，同時也與聲壓級和聲音的持續時間有關。音調隨頻率的增大而提高，但不與頻率成線性關係。音調的單位為 Mel，定義 40 dB、1000 Hz 純音的音調為 1000 Mel。比 1000 Mel 高一倍的音調為 2000 Mel，比 1000 Mel 低一半的音調為 500 Mel。音調與頻率的關係可以用主觀評價方法來確定，圖 1.2.1 所示為用純音測得的音調與頻率的關係曲線，圖中頻率和音調均採用線性座標。由圖看出，在頻率小於 500 Hz 時，音調和頻率基本上成線性關係；當頻率大於 500 Hz 以後，音調和頻率不成線性關係。

其他影響音調的因素還有聲音的聲壓級及聲音的持續時間。低頻的純音，聲壓級高時要比聲壓級低時感到音調變低；頻率在 1000 Hz~5000 Hz 範圍的純音，音調與聲壓級幾乎無關；頻率再高的純音，聲壓級升高時會感到音調變高。複音的音調由複音中頻率最低的聲音決定，即由基音決定。複音的聲壓級高低對音調的影響比純音的要小得多。

聲音持續時間在 0.5 s 以下要比 1 s 以上感到音調較低，持續時

間再短，為 10 ms 左右時，會使人耳感覺不出它的音調，只能聽到咔嚓聲。使人耳能明確感覺出音調所必需的聲音持續時間，會隨聲音頻率不同而不同，頻率低的聲音要比頻率高的聲音需要較長的持續時間。

由上述可知，藉由分析響度、尖銳度、浮動強度、粗糙度及音調等數值，可了解人耳的聽覺感受。因此，人耳聽覺喜好感受可藉由心理聲學的數據分析，來獲得人對噪音的感官愉悅度。而本文的目的在如何評估人對音樂信號的聽覺愉悅度，並探討人是否滿意音響設備所播放的聲音，所以評估音樂就比評量噪音來的複雜許多。以耳機為例，人耳在評量該耳機的好壞可用圖 1.2.2 的方法作為判斷的依據。

此外，圖 1.2.3 表示人對音樂品質的主觀想法，由此可知，人在評判音樂的好壞，會將聲音的聽覺感受細分為各種聽測項目，如音頻的平衡性、音色的感覺及音質的表現。就人耳的聽覺喜好而言，一般講求音頻表現平衡及音色表現和諧；舉例來說，當聲音的低頻響應高於高頻響應時，人會感覺聲音較沉悶；反之，高頻響應高於低頻響應時，人會感覺較響亮。此外，通常人對好的音樂，第一個印象是評斷聲音是否突出、聲音響應是否柔和、均衡。如果各個頻率互相干擾嚴重，聲音就會產生讓人聽感不合諧的現象，使得人對它的喜好下降。

對於噪音的主觀聽感測試，心理聲學提供了良好的聽感指標，但應用在分析音樂品質的方法上，受測者很難直接以比響度、尖銳度、粗糙度及音調等參數來表示自己的聽感。為了能使受測者能明白地表達音樂的聽感，進而評量音樂的聲音品質，本文將根據心理聲學的響度、尖銳度、粗糙度(包含音調和諧度)等參數衍伸出符合音樂的聽感項目，如此可建立人耳的主觀聽感與主觀量化數據的關係，如圖 1.2.4 及表 1.2.1 所示。

對於音樂的聲音品質，主觀聽測皆以分數來表現喜好度，所以本文將此八項聽感分析項目為自變項(Independent variables)，主觀聽測所獲得的分數為應變項(Dependent variable)，經多元回歸分析來建立人耳的聽覺喜好模型，並藉此模型來解釋、分析各種音樂的聲音品質。綜合上述，圖 1.2.5 代表本文的研究流程。

1.3 文獻探討

本文將針對以下六大類：

1. 揚聲器聲音品質的評估方法。
2. 心理聲學與信號分析。
3. 音高與音階。
4. 合音。
5. 音色與聲音和諧度。
6. 多元迴歸分析方法

來作重要的文獻回顧，茲分述如下：



1.3.1 揚聲器聲音品質的評估方法

在揚聲器品質的評估方面，以往揚聲器聲音品質有客觀與主觀上的分析，Leong [6] 與 Hirahara [7] 以儀器所量測的頻響來討論揚聲器的聲音品質；Kallinen [8] 將儀器所量測的頻響配合主觀的聽覺測試來探討聲音品質；Sung [9] 則發展出一種以客觀量測數據來探討人對音色的感知狀況；Voinle [10] 等人建立數學的人耳轉換函數 (transfer function) 來對聲音品質作主觀探討。與以上不同的是，Fastl

[11-13] 研究人耳感知及心理聲學的關係，進而發展出一套心理聲學的理論，更能表示人對聲音品質的感受，證實客觀的數據再加上人耳實驗的感知加權曲線確能表達出主觀的一些特性現象。因此，心理聲學可以表達出人的聽覺感受，但以往皆應用於噪音的量測上，例如 Chatterley [14] 將心理聲學的參數用於機械噪音的主觀及客觀測試的比較，Lee [15] 等人以類神經網路建立心理聲學噪音的評估模式。

1.3.2 心理聲學與信號分析

由上述聲音品質的評估方法，可知客觀的聲音品質量測可藉由量測待測物的發聲信號，分析其聲音信號表示此待測物的聲音品質。而對於信號分析，法國數學家 Fourier 於 1822 年提出傅立葉轉換 (Fourier Transform)，將時域信號以傅立葉轉換 (Fourier Transform) 至頻率域，且於頻域上的信號亦可以經過逆向傅立葉轉換 (Inverse Fourier Transform) 轉換到時域。對於數字音頻信號處理，計算機是一種數字處理設備，只能存儲離散數字數據，此離散數據本文將以離散傅立葉轉換 (Discrete Fourier Transform) [16-18] 來實施時頻轉換。

傅立葉轉換只分析音頻信號的時頻轉換，因於人耳的特性使得聽覺頻帶上的各個頻率聲壓大小感覺並非相同，所以針對人耳感度的音壓大

小，在聲學上定義為響度(Loudness)，即是聲音的響亮程度，係屬個人聽覺的主觀認定特性。響度是根據 Fechner [19] 於 1860 年的論說提出響度的主觀測試實驗，表示對頻率相同的聲音而言，響度的大小將取決於聲音強度的高低，當頻率不同的兩種聲音，即使其分貝值相同，具有一樣的聲音強度，其響度卻未必相同，此乃因人耳的特性所致。因此，為表示人耳於各個臨界頻帶的響度感受量，Zwicker [20] 提出的比響度(Specific Loudness)頻譜分析方法，獲得近似於人耳的聽覺響度感受量。Klippel [21] 、 Ronald [22] 亦利用比響度來分析各種不同的信號品質，並以粉紅噪音(Pink Noise)信號來建立整體頻率響應的標準值。

對於人耳的聽覺臨界頻帶， Zwicker 和 Terhardt [23] 提出人的聽覺系統就像是一個頻率分析器，可將人的聽覺系統經由 24 個不等頻寬的帶通濾波器(Band-pass Filter)來做分析處理，對於每一組濾波器，稱為臨界頻帶(Critical Band)或巴克(Bark)。依據 Zwicker [24] 的研究，人耳在每一個 Bark 裡，對音頻的分辨率很小，但不表示無法察覺區別。而 Nordmark [25] 由主觀實驗證實在每一個 Bark 上的頻率的確對人耳而言，有相似的音高判別與區分能力，但人耳對各個頻率的辨別還是以該臨界頻帶的中心為其主要的音高感受。

1.3.3 音高與音階

本節主要是針對音高(Pitch)及音階(Scale)，來探討這二種音樂聲學上的專門名詞作解釋，並將其必要的認知及理論以簡要的方式作介紹。

1.3.3-1 音高理論

人耳對聲音頻率(Frequency)的主觀直接感覺稱之為音高(Pitch)，它與物理學上所定義的聲音頻率是不相同的。雖然音高與聲音頻率有很密切的關係(頻率高，聲音聽起來高而細，頻率低，則聲音聽起來低而粗)；但是音高也和聲音強度有關，它們通常有以下的關係：(1) 頻率 $f < 500\text{Hz}$ 時，聲音需愈響，才可感受到低的音高；(2) $500 < f < 4000\text{Hz}$ 時，音高的感受度與響度較無關；(3) $f > 4000\text{Hz}$ 時，聲音需愈響，才可感受到高的音高；(4) 頻率愈高，音高愈高。

對於音高的感覺認知，通常可用以下二種理論來說明：

1. 第一種是音高區域理論(Pitch Place Theory)，強調頻率域信號的音高辨別。
2. 第二種是音高周期理論(Pitch Periodicity Theory)，強調時間域

信號的週期對於音高的辨認。

對於音高區域理論，Plomp [26] 於 1968 年首先提出對於頻率域上的音高分析方法，此法使用傅立葉轉換作時頻轉換，求得自低頻至高頻的各種頻率的能量頻譜(Power Spectrum)。而對於音高的敏感度分析，Chatterjee 和 Zwislocki [27, 28] 於 1997 年實測人耳在不同的音量下的音高敏感度，如圖 1.3.1 所示；圖中使用掃頻信號作為激勵信號 (Bandwidth ≤ 3.5 kHz)，並分別以 30 dB 與 80 dB 的兩種不同音壓進行人耳的比較測試。由圖中可見，聲壓的大小會影響人耳對於不同頻率上的音高感覺。而對於人耳這方面的音高感知則說明了音樂這種寬頻的複雜訊號；在小聲時，會讓我們難以感覺出極高頻與極低頻的存在；而大聲時，反倒讓我們覺得頻率分布較為平坦。這也是在播放音樂時，往往要到一定的音量下才能明顯感受到低音的原因。

對於音高周期論，是以時間週期性來表示聲音可由不同波長的弦波所組成，又稱合成波。理論上，聲音波形的基頻所產生的判別最清楚的音高稱為基音(Fundamental Sound)，各次諧波的微小振動所產生的聲音稱泛音(Harmonic Sound)。單一頻率的音稱為純音(Pure Tone)，具有諧波的音稱為複音(Complex Tone)，包含基音及複音的信號稱為多音(Multitone)。每種聲音都有一個基音及其 N 倍頻泛音，人耳可藉

此基音與泛音來區別其他具有相同響度與音調的聲音。如圖 1.3.2 (a) 及圖 1.3.2 (b)所示，聲音波形及各次諧波的比例將決定各種聲音的音色特徵，。

Schouten [29] 於 1938 年提出聲音傳到人的耳內經耳蝸處理後，除了基音外，還會產生各種諧音及它們的和音和差異音感覺，且並非所有和音內的頻率都能被人耳察覺。而根據 Schouten [30] 於 1970 年的實驗及其他文獻[31，32] 得知，人耳對於周期性的時間信號，可由以下二點作詮釋：

1. 每個由各種不同頻率所組成的合成弦波，人耳會感覺此複雜弦波是一個和音的聲音，對於只有一個頻率的弦波，則會感覺此弦波是一個音高的純音。
2. 任何形式上的空氣振動所產生的聲音，都能被分解成正弦諧波能量。這些諧波中的每頻率成份只要有足夠的強度，就可以被人耳分辨。

此表示人耳對聲音具有接收、分析音高和集合聲音的功能。而音高的感覺會取決於基音的頻率，其他倍頻諧波則是扮演著改變聲音音色的角色。然而音樂是由複雜的信號所組成的，常見的樂器，如小提琴，鋼琴，長笛或吉他所發出的聲音，不僅是由一個頻率的弦波所構成的，

因樂器本身的共鳴會造成本身的共振頻率與其倍數諧波所合成的弦波。而一段音樂可能包含許多樂器，使得音樂信號包含著很多複雜的弦波，但人耳能經由不同頻率的周期特性來分辨信號裡所包含的樂器聲、音調及節奏所產生的音樂聽感，所以人的聽覺系統可以說是一個非常複雜的頻率分析儀，包括了語言、文化的認知、情感的傳達和音樂的素養，讓聲音與人的心理、心靈、情感結合產生絕妙的美感。

1.3.3-2 音階

音階(Scale)最早是由 Pythagoras 發現音符可以轉化為數學級數。有一天，Pythagoras 在鑄鐵鐘時，無意間發現鐵鐘被鐵鎚被擊中時，聲音的音高會因鐵鐘大小比率而改變，並產生美麗與和諧之聲。音樂之父-巴哈於 17 世紀時以十二平均律編寫了十二種調性的古典樂曲，為十二平均律完整樂曲之始。十二平均律將八度間（倍頻），刻劃成平均的十二個音階，以 $\sqrt[12]{2}$ 為基數為音階間格，這樣完整的十二個平均音階就可以滿足十二個調性圓滿轉換，每個音階都可以吻合應用。在聲學量測上，十二平均律的音高頻寬又等同於 1/12 Octave，如表 1.3.1 所示。

另外，對於音階可週而復始的方式呈現，如圖 1.3.3 所示。根據

Shepard [33]的文獻，人耳會將音階的聽覺感受由此 12 個音程間距以迴旋的方式分佈在聽覺頻帶上。而音樂的調性轉換，亦通用在此規則上。

1.3.4 合音之探討

合音(Summation tone)是各種不同頻率所組成的合成弦波，並廣泛的運用於音樂上，當經由樂器的各個聲部彈奏時，會讓人對聲音產生感情及鼓舞的效果。在音樂上的定義，合音常用以下術語表示；

1. 兩個音的區隔合音，稱 Intervals。
2. 三個音的區隔合音，稱 Triads。
3. 四個音(或以上)的區隔合音，稱 Arpeggios。

十二平均律雖然解決了轉調音階的問題，卻產生了和音與和絃(Chord)的問題。因十二平均律雖說明了在八度音內的全音及半音點，但在某些音的調變合成下，人耳會感受到音與音之間的不和諧性或不協調性。尤其發生於 Jazz、Fusion 等融合樂上，各種音符被廣泛的使用導致某些音樂區段讓人產生不明白或不能理解的音樂型態。Holland [34]在 2006 年所執導的電影 Copying Beethoven，描述貝多芬晚年譜寫出許

多音程上不合諧的樂句，令當時的人們無法接受。所以音樂上的和諧與不和諧度是影響音色的重要因素。

1.3.5 音色與聲音和諧度

音色(Timbre)是人耳區別具有相同響度的兩個聲音之主觀感覺。每個人講話都有自己的特色，不同樂器演奏相同曲調時，人耳也能區別它們各自的音色。對於音色之和諧度方面，可由單音與合音來探討，而各種音與音之間的合音及諧波合音(Harmonic interval)會影響聽覺的和諧度。最早，Pythagoras [35] 發現和諧的音程是以 1:1、1:2、2:3、3:4 的比例發生。後來 Helmholtz [36] 於 1885 年提出音樂信號可以由頻率分析來計算音高的和諧度。Plomp 和 Levelt [37] 於 1965 年依據 Helmholtz 的理論針對人耳的臨界頻帶來判斷音頻和諧度。以聽感而言，Roberts 及 Mathews [38] 提出和弦的組成音(Chord Note)對於人耳的聽感上是聽起來比較和諧的，而且延伸音(Tension Note)與和弦組成音的搭配亦會造成某種程度上的諧調聲響，會增加音樂的動態起伏和曲調的擴張。另外，延伸音也是影響音樂的音色上的重要因素，由 Pressnitzer [39] 從研究樂曲的延伸音及音色上的關聯性，表示音色的表現可由聽覺粗糙度(Auditory Roughness)來分析音樂音色的張力

(Tension) [40-42]。因此，本文以聽覺粗糙度來分析音樂的音色表現，並在第二章理論分析有詳細的推導及說明。

1.3.6 多元迴歸分析方法

在研究人對聲音的喜好滿意度問題中，由於自變項(Independent variables)包括表1.2.1的八項客觀品質分析項目：「低頻響度聽覺平衡度」、「中低頻響度聽覺平衡度」、「中高頻響度聽覺平衡度」、「高頻響度聽覺平衡度」、「尖銳度」、「人聲音色表現」、「整體音調和諧度」、「整體聲壓大小表現」，而應變項(Dependent variable)只有「喜好滿意度」一項，所以可採用「多元迴歸分析法」(Multiple regression) [43-45] 或稱「複迴歸法」建立多變項線性方程式。此方法在各種計量及預測的領域均有廣泛的應用及貢獻。

1.4 論文組織

本文包含五個章節，各章內容簡述如下：

1. 第一章緒論：主要是聲音品質的研究緒論，包含研究動機、研究目的、研究方法、文獻探討以及專門名詞介紹。
2. 第二章心理聲學的基本理論：主要介紹理論分析的方法，包含基本信號分析、離散傅立葉轉換、比響度分析、各聽覺指標分析、音質粗糙浮動度分析以及聽覺粗糙度分析等；各種分析方法的理論。
3. 第三章多元迴歸分析：將介紹主觀聽覺量化的分析流程，及複迴歸分析法來建立人的聽覺喜好度與其相依的聽感二者之關係，內容包含相關性分析、迴歸分析及迴歸模型檢定。
4. 第四章聲音品質實驗分析：以實驗建立聲音品質的評估模型，並介紹音訊之錄製流程及主觀聽測實驗，而結果包含主觀聽覺量化分析、主觀聽測的相關性分析及喜好度迴歸及預測分析，並以實驗結果來討論聲音品質。
5. 第五章總結：將本文各章節作一系列的討論及總結，以及未來研究展望來探討此系統模型擬改進之方向及其應用。

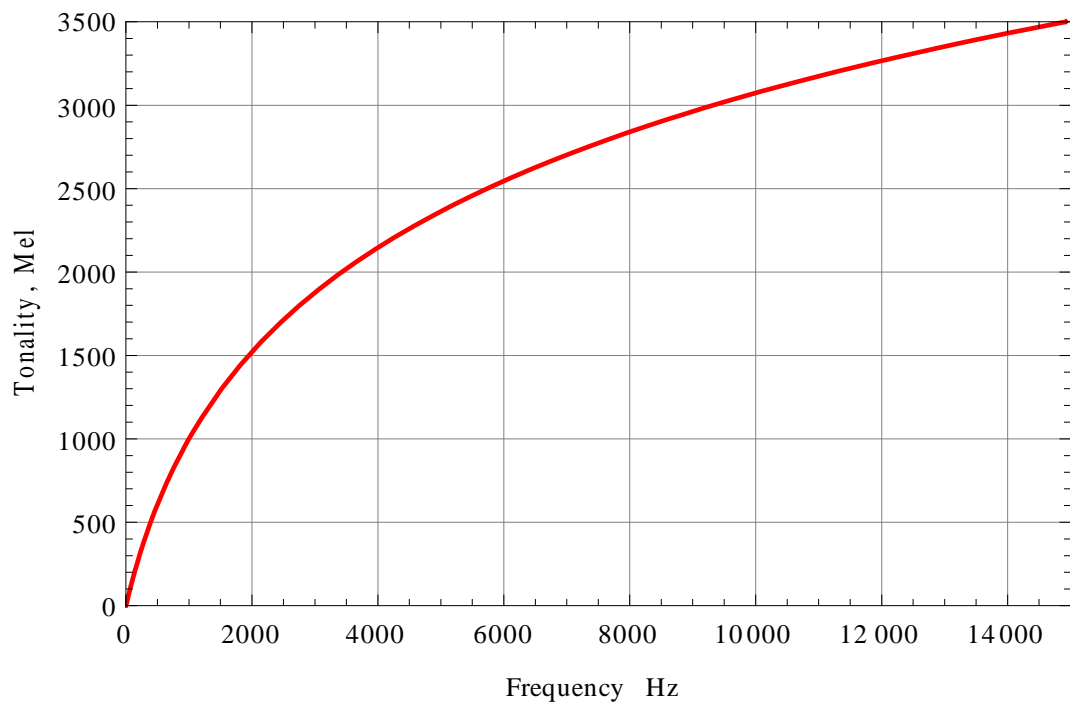


圖 1.2.1 Mel Scale 與頻率對應圖

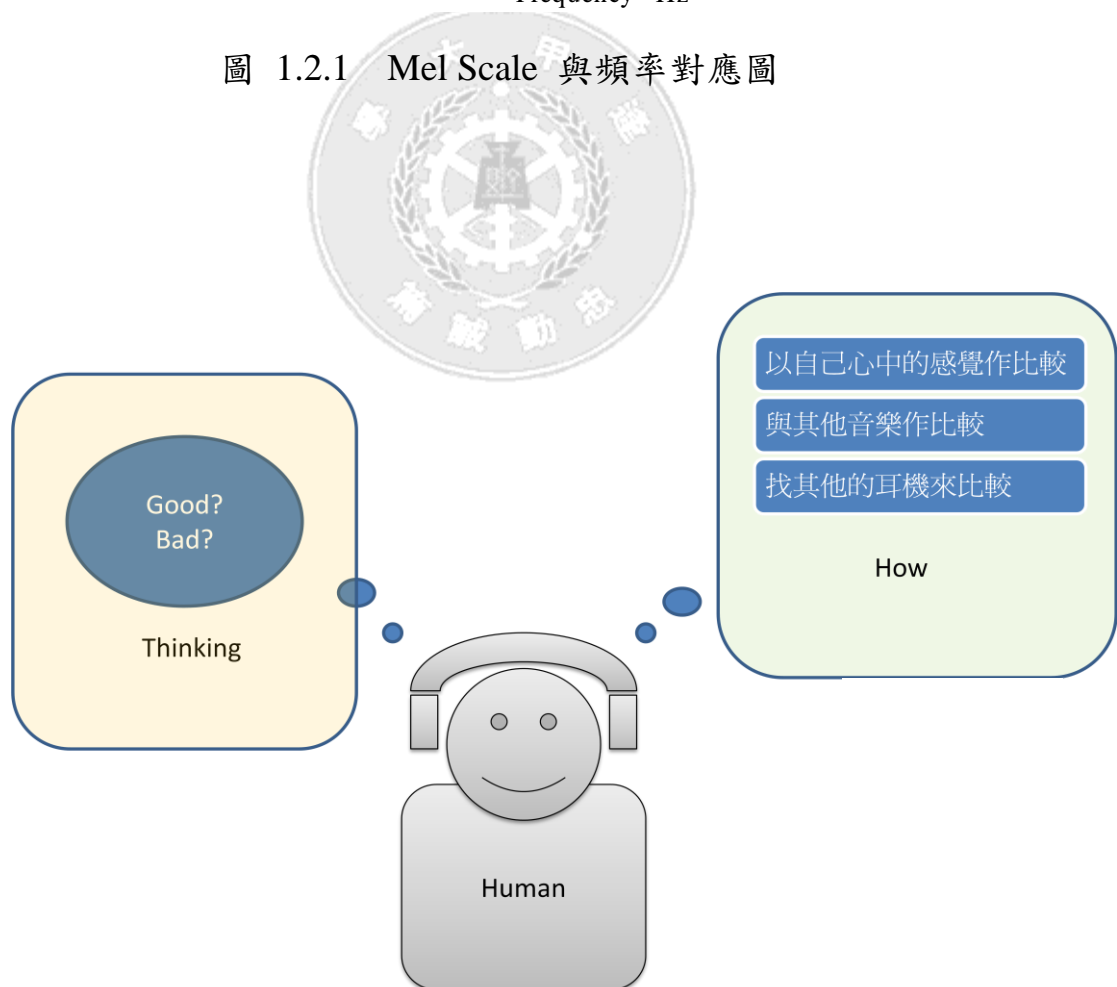


圖 1.2.2 人耳在評量聲音品質的示意圖



圖 1.2.3 主觀聽感圖

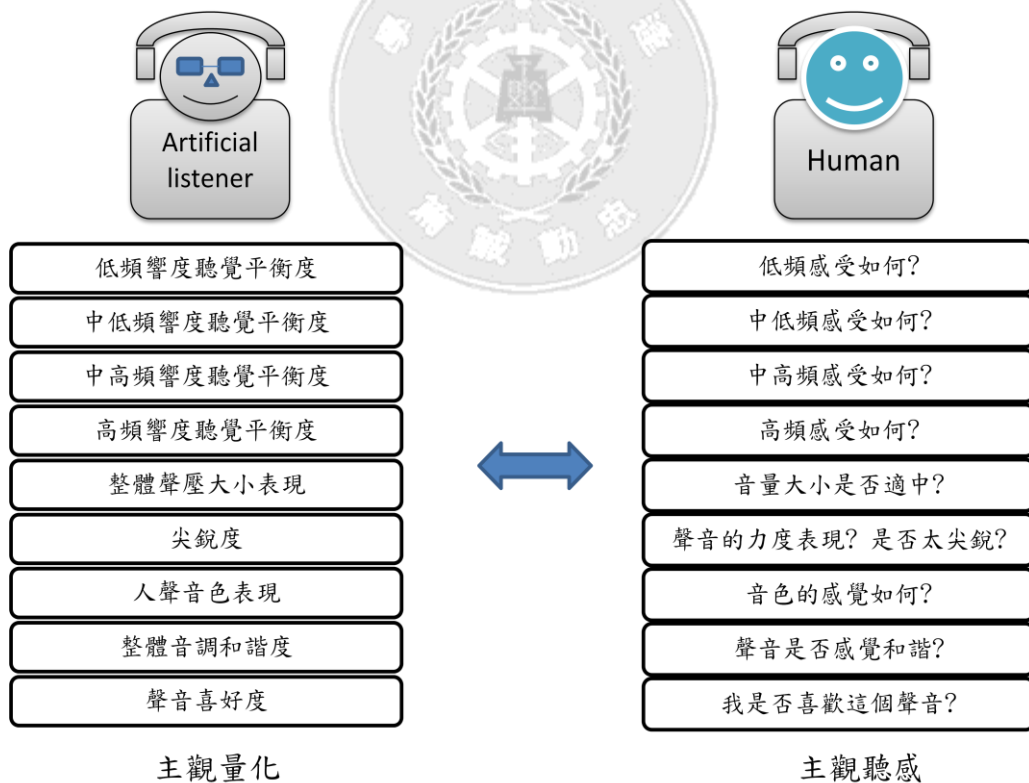


圖 1.2.4 人耳的主觀聽感及客觀的數據量化關係圖

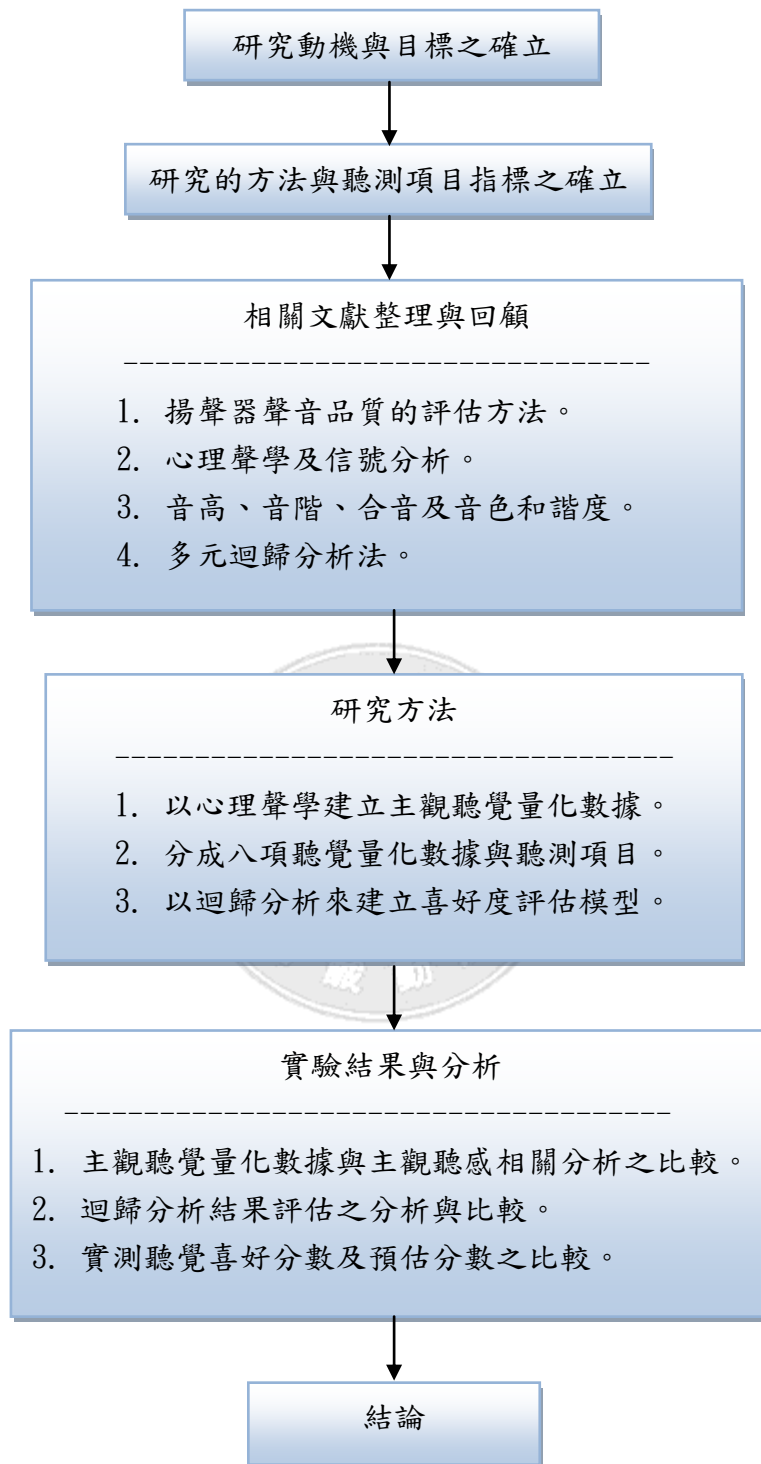


圖 1.2.5 研究流程圖

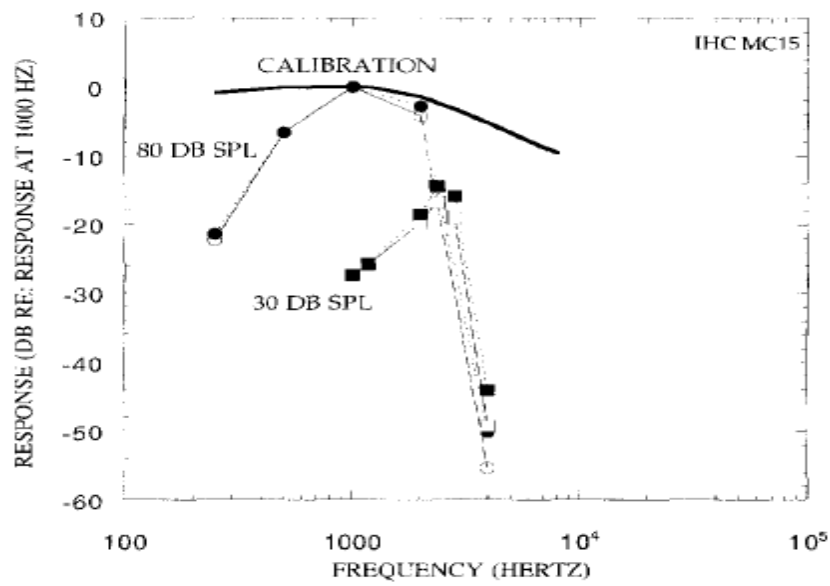


圖 1.3.1 聲壓對於音高的影響圖。(Chatterjee 和 Zwislocki [27])

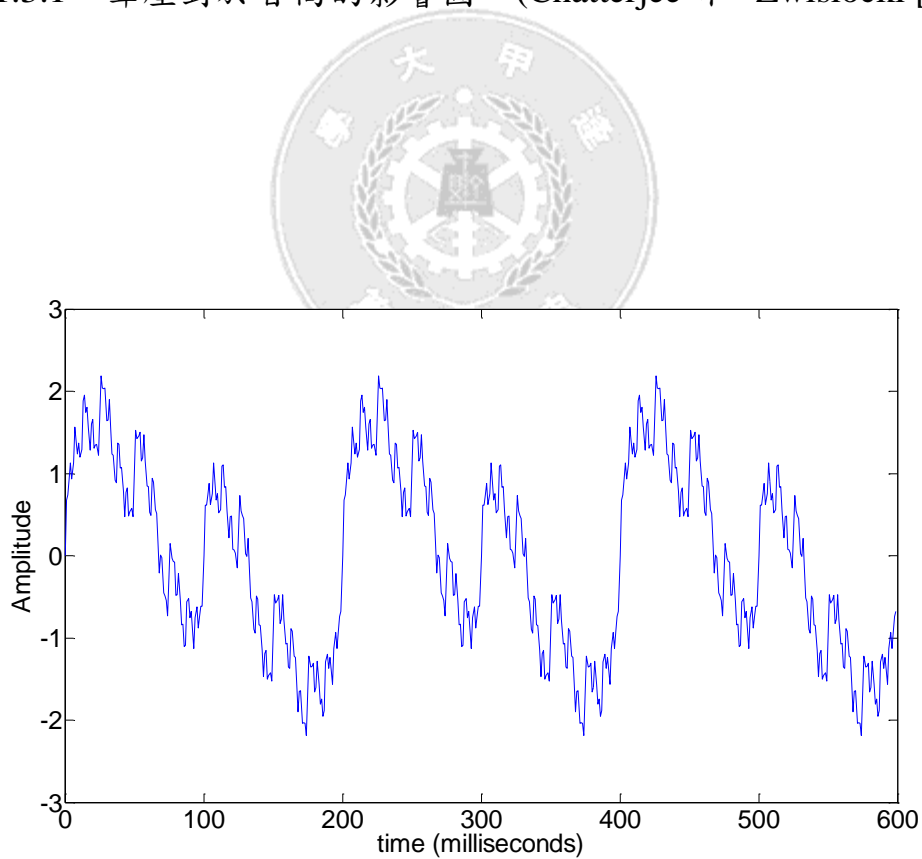


圖 1.3.2a Multitone 時間信號圖。包含一個 50 Hz 的基頻及其 7 個倍頻諧波。

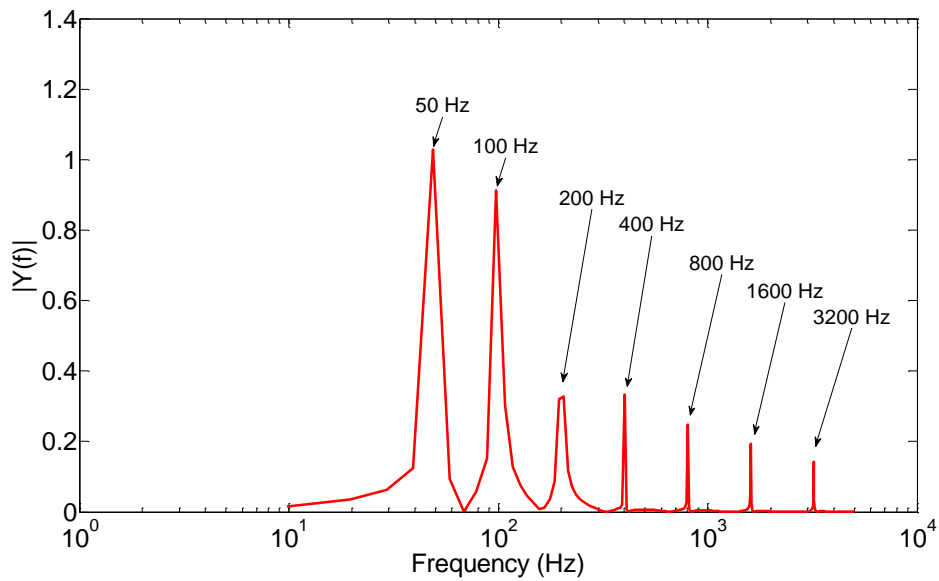


圖 1.3.2b FFT 頻率分析圖。包含 1 個 50 Hz 的基頻及其 7 個倍頻諧波。

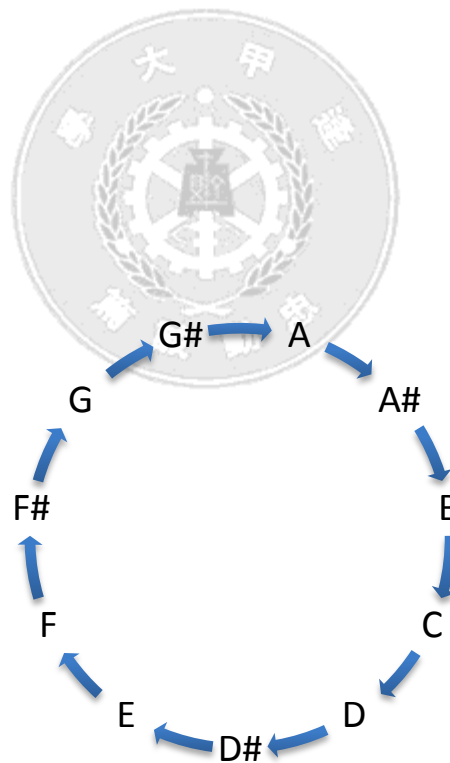


圖 1.3.3 音階循環表示圖

表 1.2.1 主觀聽覺量化項目表

編號	分析項目內容
1	低頻響度聽覺平衡度
2	中低頻響度聽覺平衡度
3	中高頻響度聽覺平衡度
4	高頻響度聽覺平衡度
5	尖銳度
6	音色和諧度
7	整體音調和諧度
8	整體聲壓大小表現

表 1.3.1 十二平均律表，以 A=440 Hz 起始為例

Note	A	A#	B	C	C#	D	D#	E	F	F#	G	G#	A'
Hz	440	466	493	523	554	587	622	659	698	739	783	830	880

第二章 心理聲學的基本理論

本章將介紹心理聲學的理论分析與推導，將人耳的主觀聽覺參數，分為聽覺響度頻譜、音質粗糙度及音調和諧度等三個部份來探討。關於聽覺響度頻譜的部分，由 2.1 節來探討訊號的採樣及離散訊號的短時傅立葉頻譜(Short-time Fourier transform)轉換，並以 2.2 節延伸 2.1 節的訊號基礎來分析人耳的聽覺聲壓與響度的關係及探討比響度的計算方法，而 2.3 節將 2.2 節所介紹的比響度分析，再細分為各聽覺響度頻段及尖銳度的計算分析方法。對於音質粗糙度及音調和諧度的部分，則由 2.4 節探討音質粗糙浮動度計算及流程，以及 2.5 節來探討整體音調和諧度的分析計算方法。

2.1 離散短時傅立葉轉換

計算機是數字處理設備，只能運算、儲存離散的數字數據，所以類比式的連續音頻信號無法於計算機儲存，因此必須將類比連續信號轉換到數字離散信號，轉換過程中取樣 (Sampling)是得到離散信號的一個重要方式。而取樣方法是以一個固定的時間區間 (time interval)，將類比式的連續信號 $X(t)$ 以離散數字的方式記錄下來，此時採樣後的

離散信號 $X(n)$ 可由下式獲得:

$$X(n) = X(t)p(t) \quad (2.1.1)$$

在此， $p(t)$ 代表一系列的脈衝信號:

$$p(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(n - kT_s) \quad (2.1.2)$$

$\delta(\cdot)$ 為 Dirac delta 函數， T_s 為取樣周期。定義一個離散時間信號 $X(n)$

的離散傅立葉轉換為:


$$X(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} X(n)e^{-j\omega n} \quad (2.1.3)$$

其中 ω 為角頻率。(2.1.3)式是假設弦波信號 $X(n)$ 的頻率是不隨時間的改變而改變，換句話說，不管時間序列的長度多長，信號的性質從開頭到結尾都不會改變。然而在語音或音樂信號中，如頻率、振幅大小及相位等，都會隨著時間的改變而改變，則必須用一個非穩定性的模型來描述它們。因此，一個單獨穩定的離散傅立葉轉換是不足以描述這類的信號，須以短時傅立葉轉換(Short-time Fourier transform)的方式作頻譜轉換。在短時傅立葉轉換的作法上，須定義一個窗序列

$w(.)$ (Window sequence)，並將原點固定在 $x[n]$ 的序列原點上移動窗序列 $w(.)$ ，表示式如下：

$$F(n, m) = X(n)W(n - m) \quad (2.1.4)$$

將(2.1.4)式作離散傅立葉轉換可得下式：

$$F(\omega, m) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} X(n)W(n - m)e^{j\omega n} \quad (2.1.5)$$

由上式可知 $F(.)$ 是包含每個時間長度 m 的能量頻譜。事實上，任何信號 $X(n)$ 長度都是有限的，若長度 $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$ ，則(2.1.5)式可改寫成：

$$F(\omega, m) = X(f) = \begin{cases} \sum_{n=0}^{N-1} X(n)W(m-n)e^{-j\frac{2\pi f}{N}n}, & 0 \leq f \leq N-1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.1.6)$$

當採樣頻率 $F_s = \frac{1}{T_s}$ 時，頻率 $f = \frac{N}{2}$ 時正好能對應 $\frac{F_s}{2}$ 。況且，對於音頻訊號採樣頻率為 44100 (Samples per second) 時其對應頻寬為 20000 Hz，對於人耳的聽覺頻帶約從 20 Hz 到 20000 Hz，所以在頻譜分析上只要觀察 $0 \leq f \leq \frac{N}{2}$ 的頻域區間即可。

而傅立葉逆轉換式如下：

$$X(n) = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{f=0}^{N-1} X(f) W(m-n) e^{j \frac{2\pi f}{N} n}, & 0 \leq n \leq N-1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.1.7)$$

上式可將(2.1.6)式再轉換回時間信號。圖 2.1.1 為本文中離散時間傅立葉轉換分析的流程，將應用於比響度及音調和諧度的分析方法中。

2.2 比響度分析

一般麥克風所接受到的聲音大小與音源所發出的聲音大小是呈線性比例的關係，但人耳所感受到的聲音大小與音源所發出的聲音大小並非呈線性比例的關係，原因是複雜的人耳器官結構特性所導致的。由於傅立葉轉換並未加入人耳的聽覺特性，所以在數據分析上並不能表示出人耳在聲音的各頻段上所感受到的響度。為此，Zwicker [3, 4, 20] 提出了比響度(Specific Loudness)頻譜分析方法來獲得近似於人耳的聽覺響度。

人耳所感受到的聲壓大小，在聲學上稱之為響度(Loudness)，其單位為 Sone，可將聲壓位準(Sound pressure level, SPL):

$$L = 20 \cdot \text{Log}_{10} \left(\frac{p}{2 \cdot 10^{-5}} \right) \quad (dB) \quad (2.2.1)$$

代入下式即可獲得響度 N :

$$N = 2^{0.1 \cdot (L-40)} \quad (\text{sone}) \quad (2.2.2)$$

聲壓位準與響度的關係如圖 2.2.1 所示，圖中顯示人耳感受的響度與聲壓位準為對數關係。

當人耳感受到聲音時，在一個臨界頻帶(Bark)內的響度值稱之為比響度。因此，比響度值的計算上須考量人耳的臨界頻帶(Bark)、激勵聲壓 $L(f)$ 及安靜狀況下對應的激勵聲壓閾 $Ltq(f)$ 來表示人耳的聽覺特性，其計算式如下:

$$N'(f) = 0.0635 \cdot 10^{0.025 \cdot Ltq(f)} \cdot [11 + (\frac{1}{4} \cdot 10^{0.1 \cdot L(f) - a_0 - Ltq(f)})^{0.25} - 1] \quad (2.2.3)$$

此處， a_0 為衰減係數(DIN 45631, [20])， $Ltq(f)$ 為安靜狀況下對應的激勵聲壓閾 (Excitation threshold in quiet):

$$LTq(f) = 3.64 \cdot (\frac{f}{1\text{kHz}})^{-0.8} - 6.5 \cdot e^{-0.6 \cdot (\frac{f}{1\text{kHz}} - 3.3)^2} + 10^{-3} \cdot (\frac{f}{1\text{kHz}})^4 \quad (2.2.4)$$

$L(f)$ 為要計算之聲音所對應的激勵聲壓(Excitation level):

$$L(f) = \begin{cases} \left(\frac{D(f)}{40} \right)^{2.642} & , \text{ if } D(f) < 40 \\ 2^{0.1 \cdot (D(f) - 40)} & , \text{ if } D(f) \geq 40 \end{cases} \quad (2.2.5)$$

上式中， $D(f)$ 為每個頻率所對應的聲壓位準能量值：

$$D(f) = 10 \cdot \text{Log}_{10} \left\{ |X(f)|^2 \right\} \quad (2.2.6)$$

上式括號 $\{.\}$ 內的 $X(f)$ 須由 2.1 節所提到的短時傅立葉轉換(2.1.6)式計算而得。

人的聽覺系統就像是一個頻率分析器，因此可將人的聽覺系統分成 24 個不等頻寬的帶通濾波器(Band-pass Filter)來做分析處理，對於每一組濾波器可以臨界頻帶(Critical Band)的計算方法劃分成 24 個 Bark 來表示。Bark Scale $z(f)$ 的定義為：

$$z(f) = 13 \cdot \tan^{-1} \left(0.76 \cdot \frac{f}{1\text{kHz}} \right) + 3.5 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{f}{7500} \right)^2 \quad (2.2.7)$$

所以每一頻率都可由上式對應到一個 Bark，如此(2.2.3)式的 $N'(f)$ 就可以寫成 $N'(z)$ ，如此一來就可將比響度對應到每個 Bark 上來表示之。

最後，在 0 至 24 Bark 上對 $N'(z)$ 積分即可獲得響度：

$$N = \int_0^{24\text{Bark}} N'(z) dz \quad (\text{sone}) \quad (2.2.8)$$

圖 2.2.2 為一般傅立葉所轉換獲得的聲壓頻譜與比響度的比較。

當測試信號為 1 kHz 的純音，聲壓位準音壓範圍從 40 dB 至 90 dB 的情況下，聲壓頻譜結果顯示，當音壓增大時，FFT 曲線成長的趨勢是呈線性成長，而比響度曲線則是以非線性成長，較符合人耳的聽覺特性。

2.3 各聽覺頻段指標分析

各聽覺頻段指標分析包含「低頻響度聽覺程度」、「中低頻響度聽覺程度」、「中高頻響度聽覺程度」、「高頻響度聽覺程度」以及「尖銳度」等五項。由文獻[21，22]的探討，人耳的聽覺感受在主觀測試上可分為低頻、中低頻、中高頻及高頻等四項來代表聽覺響度的程度。因比響度 N' 可用來表示人耳的聽覺響度，所以對於人耳的整體聽覺頻帶響度，可分為「低頻響度聽覺程度」、「中低頻響度聽覺程度」、「中高頻響度聽覺程度」、「高頻響度聽覺程度」等四項，此四項計算公式列於表 2.3.1。

尖銳度(Sharpness)是描述高頻成份在聲音頻譜中所佔比例的參數，它反映了聲音信號的刺耳程度。由於人耳對高頻聲音比較敏感，因此尖銳度值越高，給人的感覺就越刺耳。尖銳度在量化上是響度的面積

一次加權矩，計算公式如下[1]：

$$S = 0.11 \cdot \frac{\int_0^{24\text{Bark}} N' g(z) z dz}{\int_0^{24\text{Bark}} N' dz} \quad (\text{acum}) \quad (2.3.1)$$

式中 N' 為比響度， z 為臨界頻帶(critical band)， $g(z)$ 為加權函數 (Weighting function)。

$$g(z) = \begin{cases} 1 & z \leq 16 \\ 0.066e^{0.171z} & z > 16 \end{cases} \quad (2.3.2)$$

2.4 音質粗糙浮動度分析

從 Helmholtz、Terhardt、Plomp 和 Levelt 等人的學說可知聽覺粗糙感(Auditory Roughness)可分析表示聲音的聽感和諧度。以 Plomp 和 Levelt 為例，人耳在某些物理條件的聽感和諧度如下：

1. 當兩個音高之間的合音，如五度，八度音(倍頻)一起出現時，是屬於和諧音程的表現，聽起來非常悅耳、舒服。不諧和音程(如大二度、大七度)的兩個音一起出現時，會感到非常刺耳。通常頻率為小整數比的音程聽起來較為諧和。
2. 臨界頻帶隨著頻率越高則頻寬越寬廣，人耳會感到越和諧；意

指高頻的臨界頻帶頻寬較寬，在高頻時人耳會對和諧度的感覺則較不敏銳，如圖 2.4.1 所示。

根據以上論點，可歸納出低頻的 Intervals 會讓人有較多的不和諧聽感，越高頻時人耳對不和諧聽感會較不敏銳。Sethares [46] 將人耳的不和諧聽感度以 Plomp-Levelt curves 來表示，如圖 2.4.2，圖中顯示頻率從 75 to 2kHz 的不和諧曲線，低頻的 Intervals 會使人有較多的不和諧聽感，越高頻時則人耳對不和諧聽感較不敏銳。

Sethares 的 The Plomp-Levelt curves 公式如下：

$$d(x) = e^{-3.5x} - e^{-5.75x}, \quad x = |f_1 - f_2| \quad (2.4.1)$$

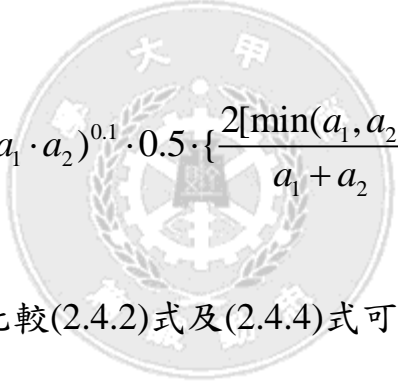
上式表示人耳對不同頻率下的合成音會感受不同的和諧度。然而每個頻率的能量表現並不相同，所以需將振幅浮動率 (Amplitude Fluctuation Rate) 對和諧度的影響考量進去。振幅浮動率指的是在單位時間信號振幅的變化率，可以頻率能量比來表示，所以(2.4.1)式可以改寫成：

$$d(x) = d(f_1, f_2, a_1, a_2) = a_1 \cdot a_2 \cdot (e^{-3.5x \cdot s} - e^{-5.75x \cdot s}) \quad (2.4.2)$$

a_1, a_2 分別代表 f_1, f_2 的振幅，而 s 為

$$s = \frac{0.24}{0.021 \cdot f_1 + 19} \quad (2.4.3)$$

由(2.4.2)式可得到一個具有不同振幅能量諧波的和諧度值。但是 Sethares 的公式並未納入振幅浮動程度(Amplitude Fluctuation Degree)以及振幅浮動深度(Amplitude Fluctuation Depth)，所以 Vassilakis [40，41] 將振幅浮動程度及振幅浮動深度加入至(2.4.2)式，使其能更完整的表示音高 Intervals 的和諧度。Vassilakis 的修正公式如下：


$$R_{Vassilakis} = (a_1 \cdot a_2)^{0.1} \cdot 0.5 \cdot \left\{ \frac{2[\min(a_1, a_2)]}{a_1 + a_2} \right\}^{3.11} \cdot d(x) \quad (2.4.4)$$

R 是指聽覺粗糙度。比較(2.4.2)式及(2.4.4)式可發現，Vassilakis 對振幅浮動程度的影響比例作出修正，並加入 $\{.\}$ 中的式子來加強振幅浮動程度及振幅浮動強度對聽覺和諧度的影響。

Helmholtz [36] 於 1885 年提出的聽覺粗糙度計算公式如下：

$$R_{Helmholtz} = \frac{10000 \cdot x^2}{(33^2 + x^2)^2}, x = |f_1 - f_2| \quad (2.4.5)$$

由上式得知，Helmholtz 也未將振幅浮動程度及振幅浮動深度納入考慮。而將(2.4.4)式及(2.4.5)式之頻率自 250 Hz 至 500 Hz 以 1/12

Octave 當作輸入，且頻率能量值隨著 Harmonic Intervals 隨之遞減 $1/2$ ，則可分別得到圖 2.4.3 及 2.4.4，圖中的曲線的各波谷，是人耳聽起來和諧感較強的和音，而曲線中的各個波峰則是人耳聽起來不和谐感較強的和音。由曲線上來看基音、五度音和八度音會是曲線較低落的點，這符合在音樂上的聽覺和諧聽感。此外，對於 Vassilakis 的不和諧度曲線對於計算每個音高 Intervals 的和諧度，從低頻至高頻的各個波峰各有不同的和諧程度表現，但由於 Helmholtz 並未考量振幅浮動的影響，所以在計算聽覺粗糙度上，無法呈現由振幅浮動程度及強度所影響的和諧度聽感。

此外，在聽測上如果當兩個頻率間距越小時，會有聲音調變 (Modulation) 的聽覺效果。這種聲音會類似於警報器呼大呼小的浮動聲，或稱顫抖聲 (Tremble)。Fastl [1] 提出這種聽覺現象會在 1 kHz 的基音以 70 Hz 的頻率調變 (Frequency Modulation) 下，顫抖音的表現是最強的，Fastl 就此實驗結果來說明這種現象是由於振幅浮動深度 (Amplitude Fluctuation Depth) 所影響的，並將此種聽感稱為粗糙度 (Roughness)。振幅浮動深度的定義為：

$$\Delta L_E = |L_1 - L_2| \quad (2.4.6)$$

式中 L_1, L_2 分別代表最大與最小的振幅值，然後將此振幅浮動深度帶

入以下公式，即可獲得 Fastl 的粗糙度表示式：

$$R_{Fastl} = 0.3 \frac{f_{\text{mod}}}{\text{kHz}} \int_0^{24\text{Bark}} \frac{\Delta L_E(z) dz}{\text{dB} / \text{Bark}} \quad (\text{asper}) \quad (2.4.7)$$

其中 f_{mod} 為調變頻率(modulation frequency)， $\Delta L_E(z)$ 為調變振幅浮動深度對頻率的函數， ΔL_E 的變化量越大時，Fastl 的粗糙度的表現會越高。而(2.4.7)式中的積分項可近似於下式：

$$\int_0^{24\text{Bark}} \frac{\Delta L_E(z) dz}{\text{dB} / \text{Bark}} \approx \sum_{B=1}^{24} 10 \log_{10} \left(\frac{\text{Max}[N'(\Delta f_B)]}{\text{Min}[N'(\Delta f_{B-1})]} \right) \quad (2.4.8)$$

在此 Δf_B 為所對應的每個 Bark 上臨界頻寬， N' 為比響度。

2.5 整體音調和諧度分析

如 1.3.5 節所述，聽覺粗糙度(Auditory Roughness)可以表示音色和諧度。此一聽覺粗糙度，可用 Vassilakis 所提出的方法(2.4.4)式來獲得，其計算流程如圖 2.5.1 所示。但 Vassilakis 的聽覺粗糙度分析方法，並未將人耳在各種不同頻帶的聽覺特性考慮進去，為符合人耳的聽覺特性，在粗糙度的分析上，本文修正 Vassilakis 的方法，將人耳的 24

個聽覺頻帶納入，如圖 2.5.2 及表 2.5.1 所示，以獲得更接近人耳的音色和諧度的評估方法。

根據 Sethares 的加總方法，Vassilakis 提出以下公式來計算聽覺的整體粗糙度：

$$R_{t-Vassilakis} = \frac{1}{\Delta T} \sum_{t=T}^{T'} \sum_{j=1}^i R_{Vassilakis}(f_j, f_{j+1}, a_j, a_{j+1}) \quad (2.5.1)$$

式中變數 j 為頻率的 Peaks，範圍從第一個到第 i 個； t 表信號 $X(n)$ 的離散時間點，沿著時間軸範圍從 T 到 T' ，並獲得時間軸上的平均音色粗糙度。

與(2.5.1)式不同的是，本文在聽覺粗糙度的計算上，先經由臨界頻帶的劃分，計算每個臨界頻帶內的聽覺粗糙度值，然後將各個臨界頻帶上的聽覺粗糙度值加總起來再取平均值代表該臨界頻帶的聽覺粗糙度：

$$R_t(i) = \frac{1}{\Delta T} \sum_{t=T}^{T'} \left[\frac{1}{\Delta f_B} \sum_{j=f_L}^{f_L'} R_{Vassilakis}(f_j, f_{j+1}, a_j, a_{j+1}) \right] \quad (2.5.2)$$

$R_t(i)$ 為第 i 個臨界頻帶的聽覺粗糙度值 $i=1 \sim 24$ ， Δf_B 為所對應的每個 Bark 上的臨界頻寬，範圍從 $f_L \sim f_L'$ 。

本文將 Vassalakis 的聽覺粗糙度劃分成 24 臨界頻帶，然後個別地作計算，因此，若以(2.5.1)式來作計算，高頻方面的聽覺粗糙度可能會因為高頻的臨界頻寬較寬，所包含的頻率數較多，而被過分估算，因此，對此問題可由(2.5.2)式的計算平均數的方法來解決。

對於比較加總及平均此兩種方式所計算的結果差異，若以 74 dB 的 Pink Noise 和 White Noise 作為輸入信號，結果可分別以圖 2.5.3 及圖 2.5.4 所示。之所以會以 Pink Noise 和 White Noise 作為輸入信號，係由於此兩種信號在各頻率上都有相同的能量強度表現，其中 Pink Noise 的能量強度是以 1/3 Oct. 的頻帶來劃分，且兩者的整體頻寬皆可定義為 20 Hz 至 20 kHz，符合人耳的聽覺頻帶寬，因此，這兩種信號為實驗量測上常用的標準激勵信號。而本文以此兩種信號來代表各頻率的音色量表現是一致的。

由圖 2.5.3 及圖 2.5.4 所示。如圖 2.5.4 的結果顯示，聽覺不和諧度會隨著頻率增高而下降，在聽覺上較符合人耳的聽覺特性，而圖 2.5.3 的結果顯示，聽覺不和諧度會隨著頻率越高而上升。由音高理論得知，當音高越高時，人耳對於音高的區別能力會變小，導致聽覺上對於音色和諧的聽感會較不敏銳，因此，若本文以臨界頻帶來劃分計算聽覺粗糙度值，則以聽覺粗糙度平均值的計算方法所獲得的結果較符合人耳的聽覺特性，不會有高頻被過分估算的情形產生。

此外，如圖 2.5.4 顯示，對於 Pink Noise 和 White Noise 信號於各臨界頻帶上的聽覺粗糙度會以線性的趨勢來表示該信號在音色和諧度的強弱表現一致。因此，音色強弱可以此為依據，判別音色表現的好與壞。



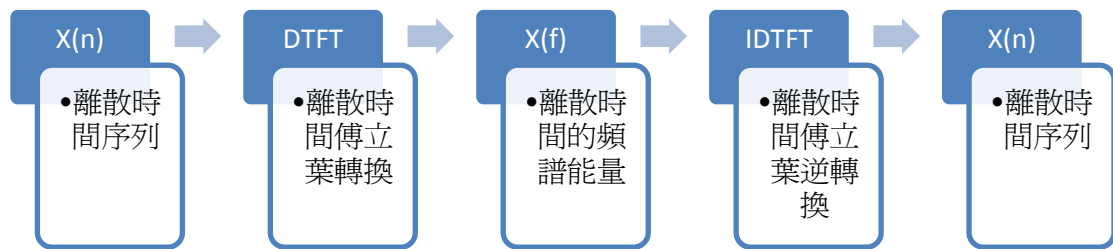


圖 2.1.1 訊號頻譜轉換與逆轉換流程。

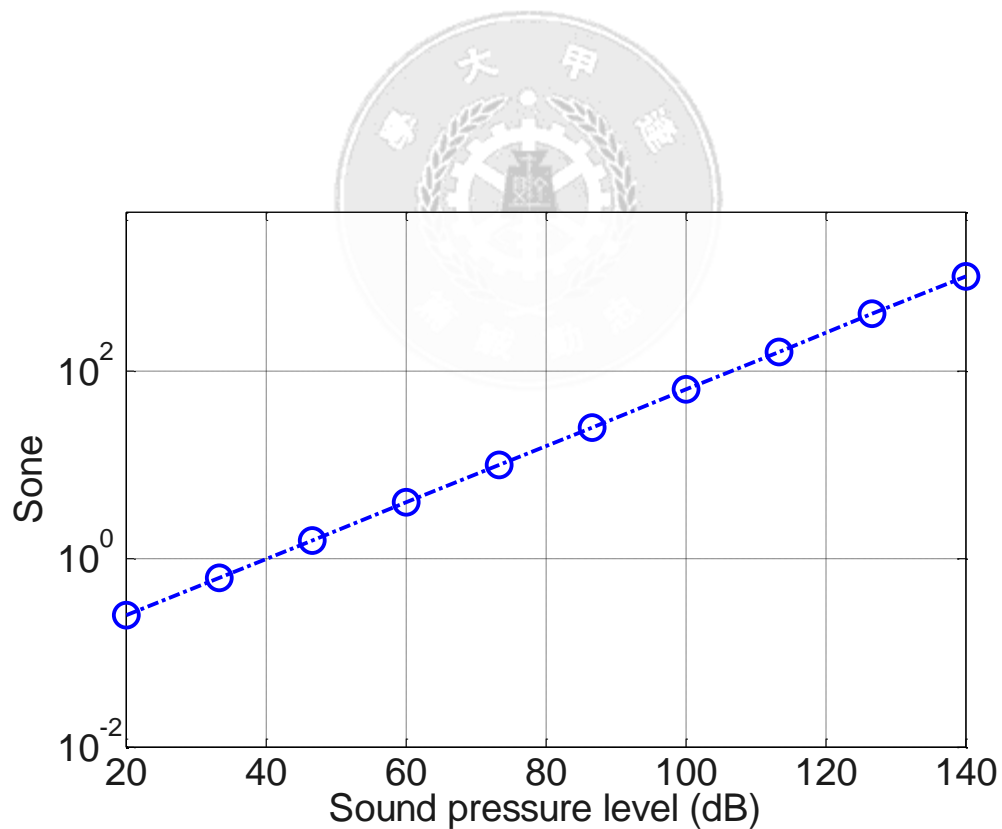


圖 2.2.1 宋(sone)與分貝(dB)的關係圖

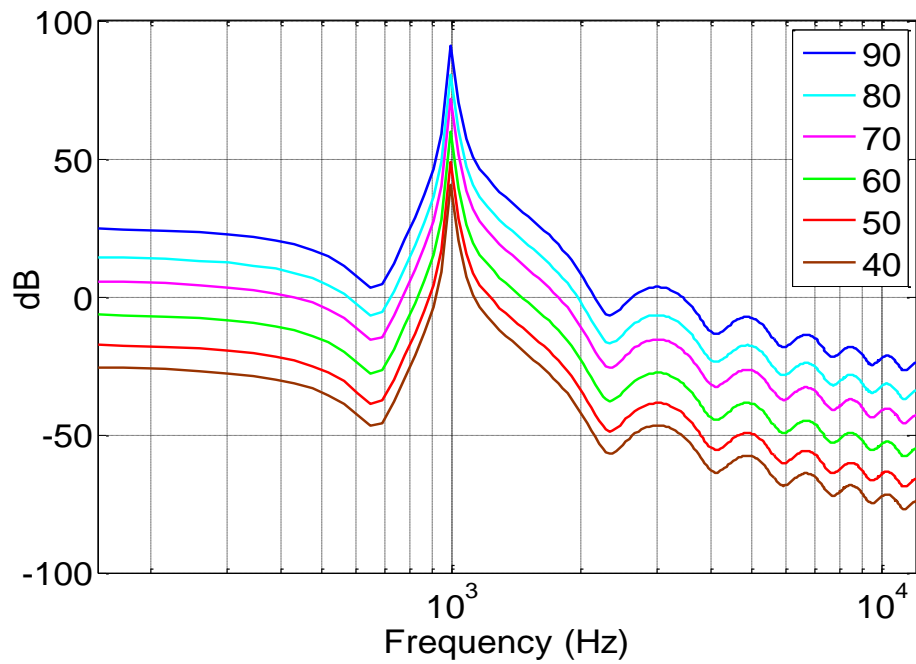


圖 2.2.2(a) 頻譜圖。測試信號為 1 kHz 的純音、音壓範圍從 40 dB 至 90 dB

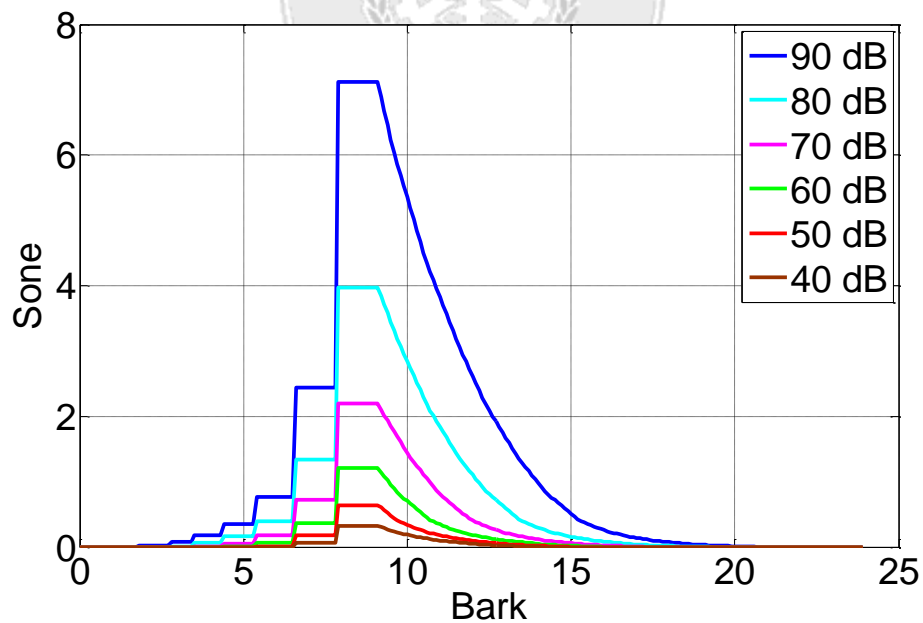


圖 2.2.2(b) 比響度圖。測試信號為 1 kHz 的純音、音壓範圍從 40 dB 至 90 dB

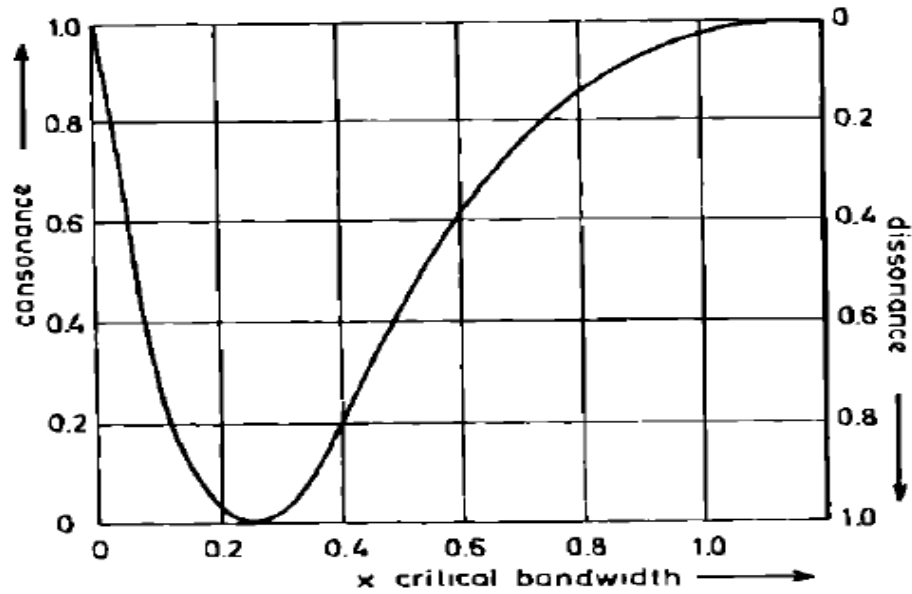


圖 2.4.1 和諧度與臨界頻帶的關係圖。(Plomp[33])

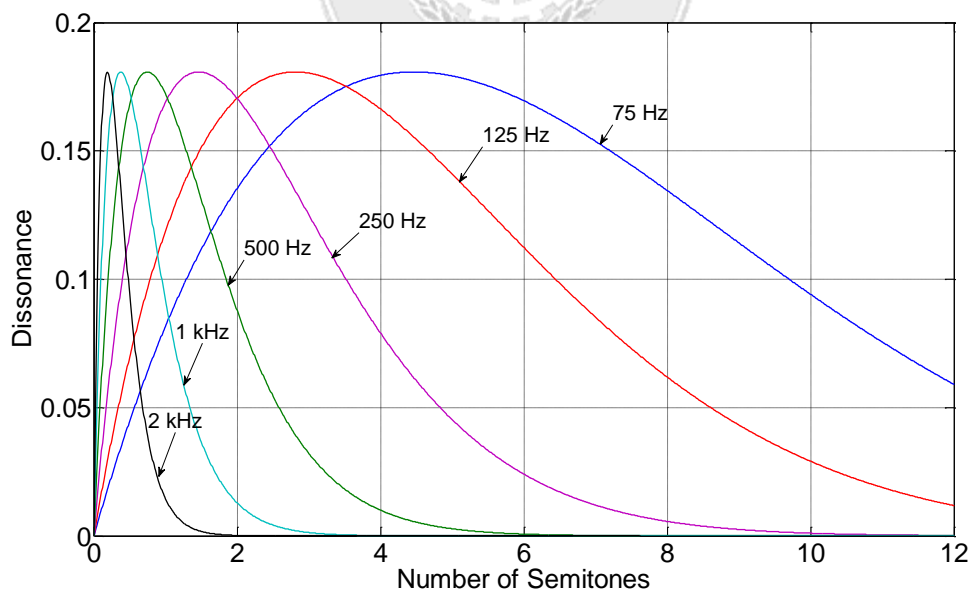


圖 2.4.2 Plomp-Levelt curves。

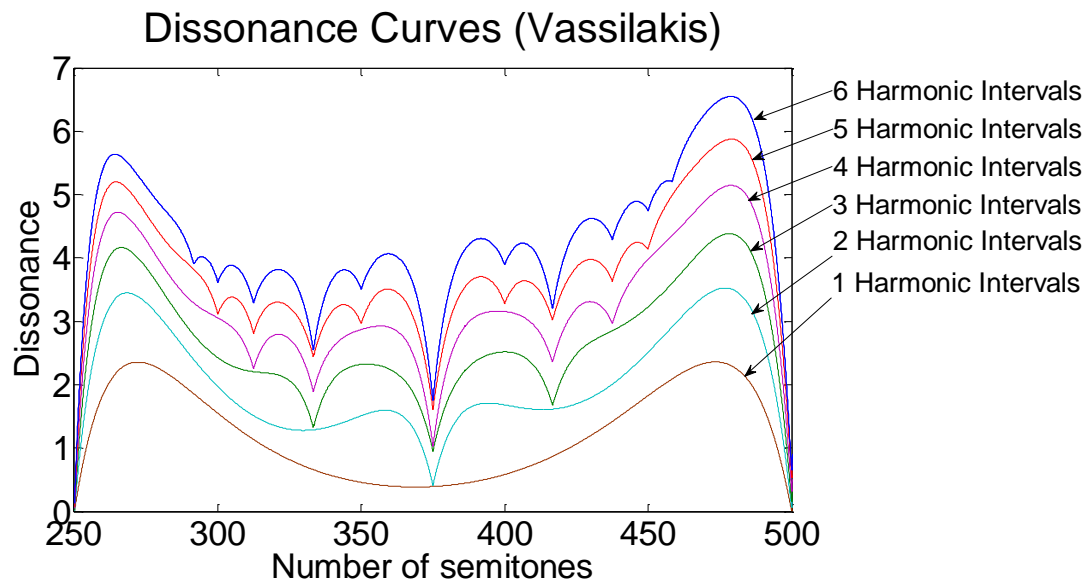


圖 2.4.3 Vassilakis 的不和諧度曲線圖。(1 Harmonic Intervals 意指兩個 tone 音的和成波，並依序列推)。

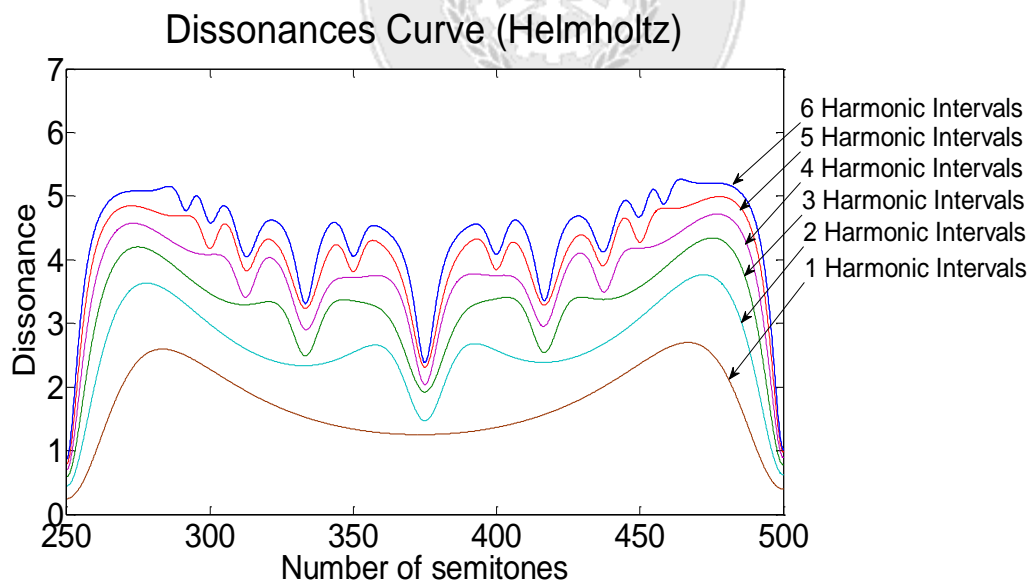


圖 2.4.4 Helmholtz 的不和諧度曲線圖。(1 Harmonic Intervals 意指兩個 tone 音的和成波，並依序列推)。



圖 2.5.1 音色和諧度計算流程

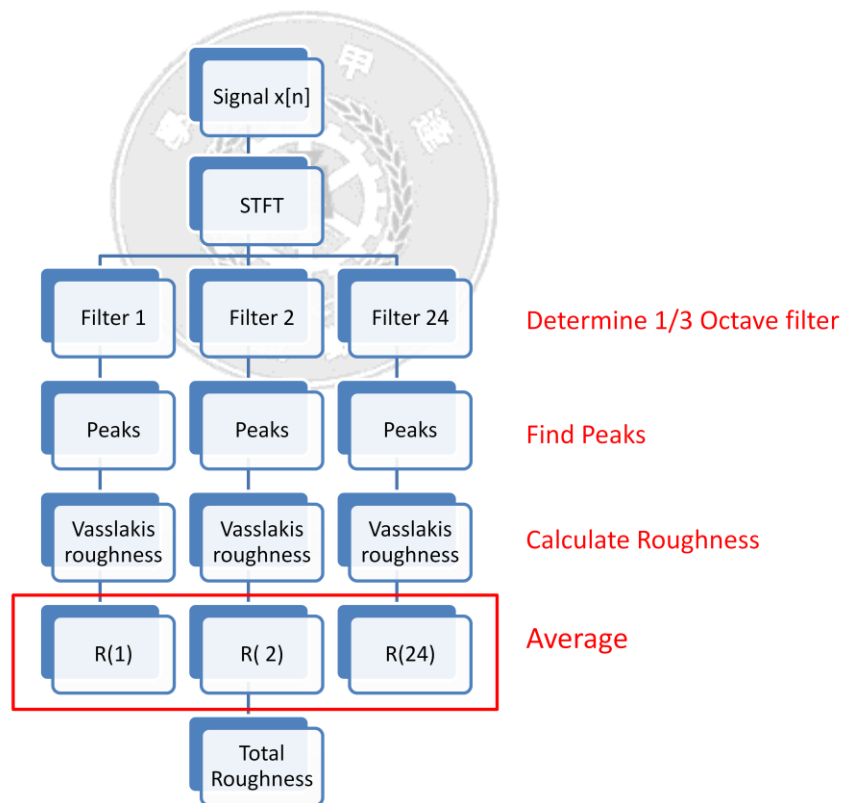


圖 2.5.2 聽覺粗糙度計算流程圖

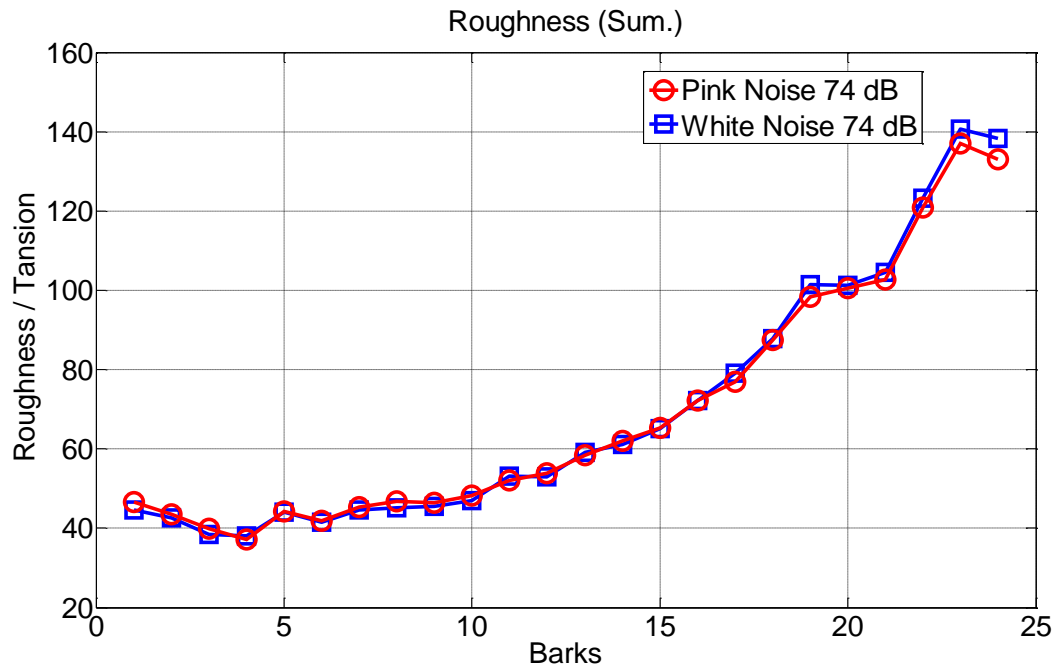


圖 2.5.3 使用(2.5.1)式以總和法來計算聽覺粗糙度值

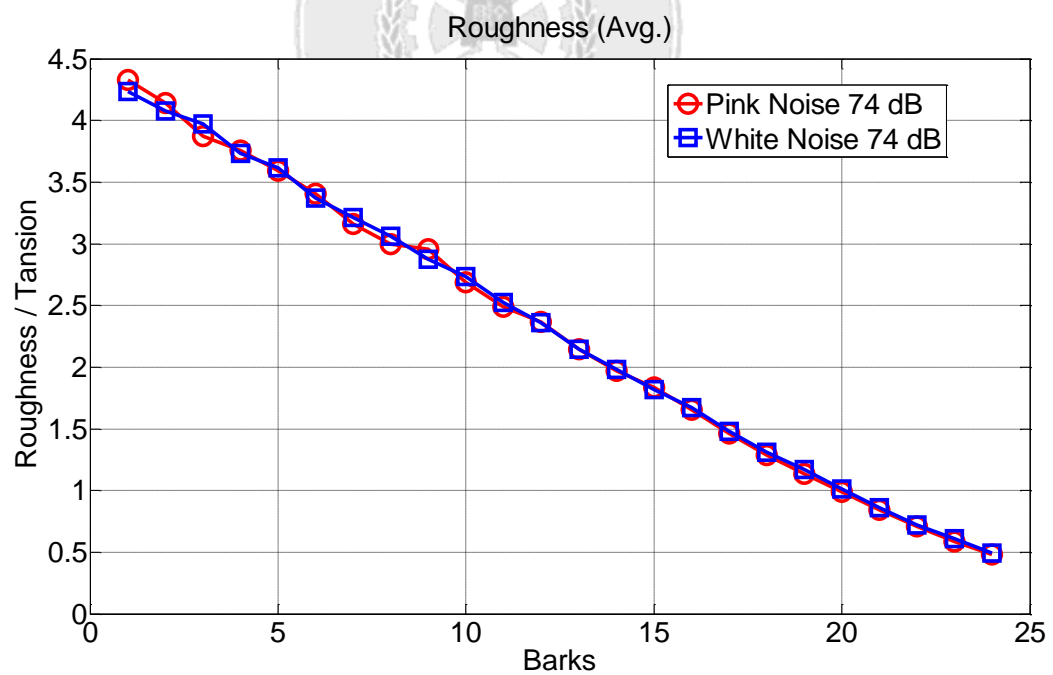


圖 2.5.4 使用(2.5.2)式以平均法來計算聽覺粗糙度值

表 2.3.1 聽覺頻段響度計算公式表

聽覺頻段項目	聽覺頻段響度計算公式
低頻響度聽覺程度	$N'_{Bass} = \frac{1}{\Delta f_G} \sum_{f=50}^{350} N'(f) , \Delta f_G = 300 \text{ Hz}$
中低頻響度聽覺程度	$N'_{Midbass} = \frac{1}{\Delta f_G} \sum_{f=350}^{1370} N'(f) , \Delta f_G = 1020 \text{ Hz}$
中高頻響度聽覺程度	$N'_{Midhigh} = \frac{1}{\Delta f_G} \sum_{f=1370}^{4000} N'(f) , \Delta f_G = 2630 \text{ Hz}$
高頻響度聽覺程度	$N'_{High} = \frac{1}{\Delta f_G} \sum_{f=4000}^{13500} N'(f) , \Delta f_G = 9500 \text{ Hz}$

表 2.5.1 聽覺粗糙度計算流程表

步驟	步驟內容
1	讀取離散時間信號 $X(n)$
2	短時傅立葉轉換，(2.1.6)式
3	劃分人耳臨界頻帶，(2.2.7)式
4	找出各頻帶上的 Peaks 值 $(f_i, f_{i+1}, a_i, a_{i+1})$
5	計算 Roughness 值，(2.4.4) 式
6	對每個頻帶所計算的 Roughness 值取平均，(2.5.2) 式

第三章 多元回歸分析

本章 3.1 節將介紹主觀聽覺量化的分析流程，研究方法是以第二章所介紹的心理聲學參數加以推導並對應至主觀聽測項目來獲得主觀聽覺量化數據。3.2 節將建立人耳的聽覺喜好度與主觀聽覺量化數據之間的關係，以複迴歸分析法來獲得聽覺喜好方程式，並以回歸模型檢定來檢驗此方程式之適合性。

3.1 主觀聽覺量化分析

主觀聽覺量化分析係基於第二章所介紹的心理聲學基本理論，將測試音訊解析成各種聽測項目來表達出人耳對聲音的某些特定的聽覺感受，如各個音頻的平衡度、音色的和諧度、聲音的動態強弱等聽覺感受作為聲音品質評估的依據，來獲得主觀聽覺量化分析的評估數據。計算聽測項目的步驟流程，如圖 3.1.1 所示，可分為以下 3 大步驟來說明：

1. 輸入聲音信號：

此訊號為如噪音、音樂、語音等各種聲音信號，而信號檔案格式為.wav、.mp3、.aiff...等電腦音樂格式。

2. 動態音量校正:

以耳機為例，不同的耳機阻抗值會使得每一支耳機在同一電壓的驅動下表現出不同的音量，所以比較不同耳機前，需作音量校正，以固定的音量來衡量各支耳機。因此，在分析、比較各種聽感項目上，動態音量校正的作用是針對每一組輸入信號的整體音量大小作調整，使分析的信號音量大小一致，讓各種數據能在同樣的音量基準下進行分析。

動態音量校正的方法步驟上，須先求得信號的均方根值來代表該信號的整體音量，再設定某一音量值來調整信號的音量大小，而信號的整體音量 X_{Level} 可由下式獲得：

$$X_{Level} = 20 \cdot \text{Log}_{10} \left\{ \sqrt{\frac{\sum_n |X(n)|^2}{n}} \cdot \frac{1}{2 \cdot 10^{-5}} \right\} \quad (3.1.2)$$

在此， $X(n)$ 為輸入信號。在求得信號的整體音量後，可使用下式來獲得所想要調整的信號音量：

$$X'(n) = X(n) \cdot 10^{L_{Cal}/X_{Level} \cdot 0.05} \cdot 2 \cdot 10^{-5} \quad (3.1.3)$$

式中 $X'(n)$ 為調整音量後的信號， L_{Cal} 為預期的設定音量。對於標準音量的設定，本文採用一般錄音室的音量監聽標準，約為 74 dB 左右，

當作標準音量。

3. 計算各項聽感

於校正信號的音量後，便可以使用第二章所闡述的各種心理聲學的方法來計算各個聽測項目。聽測分析項目分有：「低頻響度聽覺平衡度」、「中低頻響度聽覺平衡度」、「中高頻響度聽覺平衡度」、「高頻響度聽覺平衡度」、「尖銳度」、「人聲音色表現」、「整體音調和諧度」、「整體聲壓大小表現」等八項，茲將逐類說明：

(a) 聽覺頻段響度聽覺平衡度

對於「低頻響度聽覺程度」、「中低頻響度聽覺程度」、「中高頻響度聽覺程度」、「高頻響度聽覺程度」這四項，在聽感上是屬於各聽覺頻段的響度分析，表示低音、中低音、中高音、高音，這四種常用的聽感術語。在聽音的評價上，各頻段感覺狀態與人耳的聽覺感受，可用聲頻過低、豐滿、適中、過高來表示聲音的音頻是否表現平衡，例如，高音表現過低時，會使人耳感到韻味失落，表現過高又會產生尖噪、嘶啞刺耳；而低音表現過低時會使聲音表現蒼白單薄，表現過高又會使得聲音渾濁不清，所以要使音色有美感，讓聽眾聽起來悅耳動聽，則各頻段的表現不易過強，以調整適中為優。因此，在分析「低

頻響度聽覺平衡度」、「中低頻響度聽覺平衡度」、「中高頻響度聽覺平衡度」及「高頻響度聽覺平衡度」，則需要一個音頻平衡的參考值，讓電腦能藉此參考值來比較各頻率響度聽覺程度來判斷音頻表現是否平衡。本文以粉紅噪音(Pink Noise)當作是整體音頻平衡的參考值[47]，使用粉紅噪音的理由如下，聲音是由聲帶振動所產生，經過聲道(Vocal tract)濾波後，再加上來自口部的發散作用，形成了語音，而聲帶的振動以及口部的發散作用，使得語音的聲能量在本質上是與頻率成反比的。而粉紅噪音就是聲能量與頻率成反比關係的聲音，且該聲音在每一個音程的輸出皆是等聲能量級(Equal sound energy level)，因此，在測試揚聲器、環境聲場頻率特性中，常選用粉紅噪音來模擬音樂信號，並作為標準信號源作為整體音頻平衡的參考值。

「低頻響度聽覺程度」、「中低頻響度聽覺程度」、「中高頻響度聽覺程度」及「高頻響度聽覺程度」可由本文 2.3 節所介紹的各聽覺頻段指標分析計算獲得，並比較由粉紅噪音所計算的參考值來反映聽覺的平衡程度，如下所示：

$$\text{低頻平衡度} : N'_{Bass} - N'_{Bass(pink_noise)} \quad (3.1.4)$$

$$\text{中低頻平衡度} : N'_{Midbass} - N'_{Midbass(pink_noise)} \quad (3.1.5)$$

$$\text{中高頻平衡度} : N'_{Midhigh} - N'_{Midhigh(pink_noise)} \quad (3.1.6)$$

$$\text{高頻平衡度} : N'_{High} - N'_{High(pink_noise)} \quad (3.1.7)$$

由以上各式即可獲得各聽覺頻段響度聽覺平衡度。

(b) 尖銳度

尖銳度主要是描述人耳對於聲音的尖銳、刺耳程度，可由本文 2.3 節所介紹的尖銳度計算式獲得，並比較由粉紅噪音所計算的參考值來反映聽覺的尖銳度，如下式所示。

$$\text{尖銳度} : S - S_{pink_noise} \quad (3.1.8)$$

(c) 主音音色表現

通常音樂的人聲、或是各種能讓人感受強烈的主要聲部，這些會是聲音信號的主要成分(Major component)，而信號的主音成分會因為與其他成份互相調變(Inter-modulation)，導致信號整體的振幅浮動深度 ΔL 產生變化，而 ΔL 的變化量是影響信號的音色的關鍵之一。理論上， ΔL 的變化量越小，聽覺粗糙感就越小、音色就越好，因此本文 2.4 節所探討的粗操度乃是針對信號的振幅浮動深度作計算，所以主音的表現可藉由 Fastl 的粗操度來表示音色的好與壞。粗操度計算方法由(2.4.7)是計算獲得，並比較由粉紅噪音所計算的參考值來反映聽覺的尖銳度，如下式所示。

$$\text{主音音色表現： } R - R_{pink_noise} \quad (3.1.9)$$

(d) 整體音調和諧度

整體音調和諧度在本文的 2.4 及 2.5 節中有完整的探討，以聽覺粗糙度來計算獲得整體音調和諧度，如下式所示。

$$\text{整體音調和諧度： } \sum_{i=1}^{24} R_t(i) \quad (3.2.0)$$

式中 $R_t(i)$ 為聽覺粗糙度，可由表 2.5.1 所整理的計算流程來得到。

(e) 整體聲壓大小表現

主要是以(3.1.2)式及(3.1.3)式來調整所有分析信號的整體音量，並在此項表示該信號調整後的音量大小，作為該信號的音量大小。

4. 獲得主觀聽感量化數據

經上述各項的計算，即可獲得該聲音信號的各項主觀聽感量化分數。

3.2 複回歸分析

對於音樂的喜好聽感，由於聽覺是主觀的，每個人對其音樂各頻

段的聲音表現是否均衡及音色是否突出、悅耳，都有其個人的見解及看法，因此，每個人的”聽覺喜好”及其喜好的音樂則未必相同，所以對聲音品質的判定也就不盡相同，但如針對某特定的人群或個人對音樂的聽感及喜好度作調查，則可將聽覺喜好度歸因於不同的聽覺數據所影響的結果，簡單的說，就是幾個原因與結果的關聯。例如天氣預報是藉由今天所量測到的氣象資料來比對台灣地區以往的氣象資料來預測明天是否會下雨，但同樣的氣象資料，不一定能預測美國地區的氣候型態，因為用來預測美國地區是否會下雨的氣象資料不一定與台灣地區的氣象資料相符。同理，對於某人群的聽覺喜好度亦是如此，該人群的聽覺喜好度是相依其各自的聽感，所以喜好度與每個人對每一項聽測項目的關係必須以複回歸分析來建立之。

在數學上，聽覺喜好分數相當於應變數 y (結果)與影響它的 n 個自變數:如各種主觀聽感量化數據 x_1, x_2, \dots, x_n (原因)，兩者之間的關係可由以下的線性方程式來表示:

$$y = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n + a_0 \quad (3.2.1)$$

式中 a_1, a_2, \dots, a_n 為待定係數， a_0 為常數項。使用上式可獲得應變數 y 的方法，稱為多元迴歸分析，或稱複迴歸分析。以往此分析法在實務應用較不普遍，但隨著桌上型電子計算機的極速進步，多元迴歸分析法

已成功應用於經營、醫學、工業、行銷、氣象、旅遊...等各行各業作為統計估算、判別分析的方法。所謂的多元迴歸分析法，乃包含了平均數(Mean)、標準差(Standard deviation)、變異數(Variance)、數據標準化(Standardization)、共變異數(Covariance)、相關分析(Correlation analysis)、迴歸分析(Regression analysis)及判定係數(Coefficient of determination)等統計數學的總合分析法，這些對於建立本文的聲音品質評估模型，是或不可缺的必要工具。

如圖 3.2.1 所示，複迴歸分析之進行流程，包括輸入變數、數據標準化、建立迴歸模型、迴歸模型檢定、顯著性檢定與評估解釋能力等步驟。



3.2.1 數據標準化

因各項主觀聽感之量化數據的單位不一，使得每個變量的平均與變異數有甚大的差異，所以在主觀聽感量化數據輸入迴歸方程式之前，必須對輸入變數作標準化(Standardization)。所謂數據的標準化，是將每個自變數的平均值變換為 0，變異數為 1。

$$\text{Standardization } (x_n) = \frac{x_n - \bar{x}}{\sqrt{S_x^2}} \quad (3.2.2)$$

x_n 為自變數， \bar{x} 為各變數的平均值， S_x^2 為自變數的變異數：

$$S_x^2 = \frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (3.2.3)$$

3.2.2 建立迴歸分析模型

設 y_i ($i=1 \sim n$) 代表第 i 個樣本音樂的平均聽覺喜好分數，而 x_{ij} ($j=1 \sim k$) 為第 i 種音樂的第 j 項主觀聽感量化數據，則(3.2.1)式可寫為一個含 n 個方程式、 $n \times k$ 個變數之線性系統：

$$\begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_k \end{Bmatrix} \quad (3.2.4)$$

或以簡便的矩陣形式表示

$$\mathbf{y} = \mathbf{X}\mathbf{a} \quad (3.2.5)$$

其中行向量 $\mathbf{a} = \{a_0, a_1, \dots, a_k\}^T$ 為待定係數。若 $n > k$ ，即方程式數目大於待定係數數目，則此一過定系統(over-determined system)可用最簡單的最小平方法(Least square method)來求得最佳近似解 $\hat{\mathbf{a}}$ 。

令最小平方誤差函數 $E(\hat{\mathbf{a}})$ 為:

$$E(\hat{\mathbf{a}}) = (\mathbf{y} - \mathbf{X}\hat{\mathbf{a}})^T (\mathbf{y} - \mathbf{X}\hat{\mathbf{a}}) \quad (3.2.6)$$

為求 $E(\hat{\mathbf{a}})$ 的極小值，對 $\hat{\mathbf{a}}$ 作微分並令之為零可得:

$$\left. \frac{\partial E(\hat{\mathbf{a}})}{\partial \hat{\mathbf{a}}} \right| = -2\mathbf{X}^T \mathbf{y} + 2\mathbf{X}^T \mathbf{X} \hat{\mathbf{a}} = 0 \quad (3.2.7)$$

即可獲得最佳近似解:

$$\hat{\mathbf{a}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (3.2.8)$$

解出上式並代入(3.2.1)式即可獲得回歸方程式。

3.2.3 回歸模型檢定

回歸模型檢定是以統計檢定來檢驗所獲得回歸方程式的合適性，茲探討如下。

1. 回歸方程式的合適性

在估計出回歸模型後，須進一步的檢視迴歸模型中的自變項及應變項是否具有解釋能力，才可判定此回歸模型是否可被接受，而回歸方程式的合適性，可根據估計的迴歸模型可進行變異數分析(ANOVA:

Analysis of Variance)。所謂變異數分析是探討實測值的變異數與預測值的變異數之間的相關分析，假設實測值的變異數為 $y_i - \bar{y}$ ，模型所預測的預測值的變異數為 $\hat{y}_i - \bar{y}$ ， \bar{y} 為實測值與預測值的樣本平均數，則此迴歸模型的合適性判定可用判定係數 R^2 (Coefficient of determination) 來解釋實測值的變異數與預測值的變異數之間的相關性。判定係數 R^2 可以下式來計算得到：

$$R^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2} \quad (3.2.9)$$

當 $R^2 = 1$ 表示實測值與預測值有完全線性關係，當 $R^2 = 0$ 則表示估計的迴歸模型不能被用來作為預測之用，因此，若 R^2 越大，則表示此迴歸模型的解釋能力越強。

此外，如要衡量實測值與預測值之間的關係程度與方向時，則可用相關分析的統計技術來獲得相關係數 R (Coefficient of correlation):

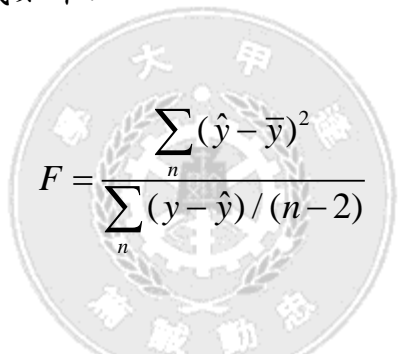
$$R = \frac{\sum (y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (y_i - \bar{y})^2} \sqrt{\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2}} \quad (3.2.10)$$

同樣地，當 $R = 1$ 則表示實測值與預測值為線性相依關係 (Linearly dependent)，當 $R = 0$ 則表示估計值與實際值完全無關 (Linearly independent)，因此，若 R 越大，則表實測值與預測值間的關聯性越強。

2. 迴歸係數的假設檢定

對於迴歸係數的假設檢定，一般是用 F 檢定(F -test)來檢定迴歸模型是否具有解釋能力，並以虛無假設(Null hypotheses)來表示該迴歸模型無解釋能力。在檢定的判別上，通常是以 F 檢定之右尾機率值(P-Value)來判斷變異數是否存有顯著差異性，對於結論的判斷很簡單，只須看此 P-Value 是否小於所指定顯著水準值，若小於，則可否決虛無假設，證明此迴歸模型具有解釋能力。

而 F 檢定的計算式如下：


$$F = \frac{\sum_n (\hat{y} - \bar{y})^2}{\sum_n (y - \hat{y}) / (n - 2)} \quad (3.2.11)$$

由上式得出 F 值後可由 F 分配臨界表來查詢顯著值(P-Value)。此外，通常指定的顯著水準值為 0.05，當 P-Value 小於 0.05，則表示此迴歸模型具有正面的顯著影響，即表示此迴歸模型具有解釋分析能力。

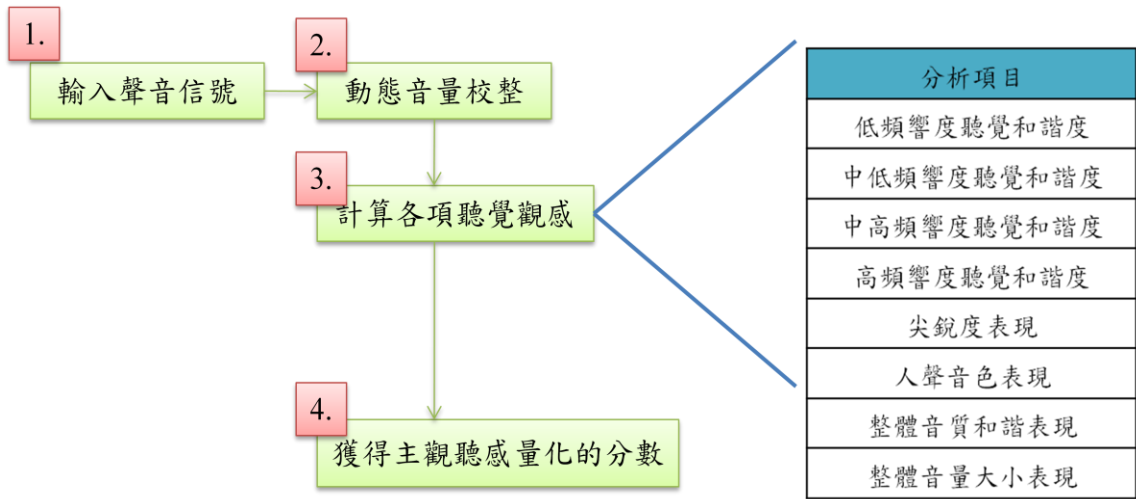


圖 3.1.1 主觀聽覺量化數據步驟流程

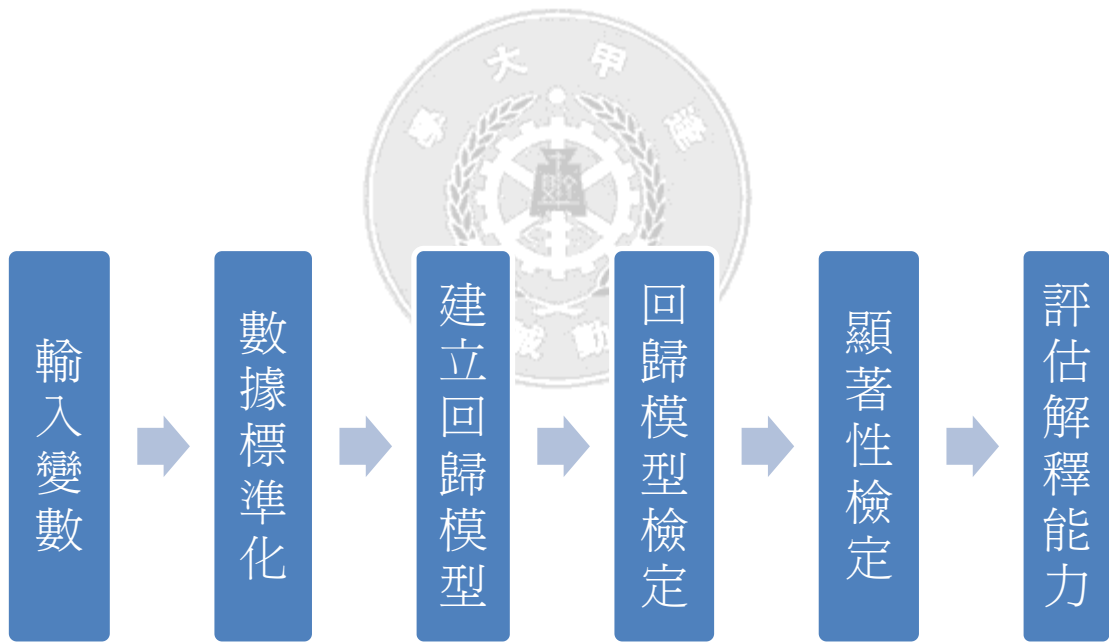


圖 3.2.1 複迴歸分析之進行流程

第四章 聲音品質實驗分析

本章 4.1 節將說明如何結合心理聲學參數(Metrics or Parameters)與各種聽測項目來建立聲音品質的評估模型，並介紹音訊之錄製流程及如何以含 9 項聽測項目之聽測問卷對 30 位受測者實施主觀聽測實驗。4.2 節為對實驗結果的探討，包含主觀聽覺量化分析、主觀聽測的相關性分析及喜好度迴歸及預測分析。4.3 節以實驗結果來討論聲音品質並作結論。



4.1 聲音品質評估模型

4.1.1 評估模式建立

本章所提出之聲音品質評估模型主要係以心理聲學參數結合各種聽測項目，來表達出人耳對聲音的聽感並量化之，以作為聲音品質評估的依據。聽測項目包含各個音頻的平衡度及突顯度、音質的和諧度、聲音的動態強弱等。

聽測方面是以美律實業股份有限公司所提供的六種不同的耳道式耳機所錄下來的聲音，分別對 20 至 25 歲對音樂有鑑賞力的 30 名學生進行問卷調查，取受測者對各項聽測項目分數之平均值作為該受

測群對該聽測項目的喜好程度。於計算平均數及標準化後，對於該受測群的主觀聽測結果及主觀聽覺量化的數據上，可藉由相關分析(Correlation analysis)來了解主觀聽測結果與主觀聽覺量化數據的相關程度。若經由相關分析而得到的主觀聽測結果與主觀聽覺量化數據有正相關性且關係程度高，則可推斷主觀聽覺量化的數據可符合主觀聽測的結果，更進一步以回歸分析(Regression analysis)來探討主觀聽覺項目對於該受測群的聽覺喜好的因果關係，並獲得代表該受測群的主觀聽覺喜好數學方程式，以建立預估模型。

聲音品質評估之實施流程如圖 4.1.1 所示，施測項目分為音訊錄製、主觀聽覺量化分析、主觀聽測實驗、相關分析及喜好度回歸分析等來說明之。

4.1.2 音訊錄製

研究對象是以上述美律實業股份有限公司所提供的 6 支不同型號、不同揚聲器單體的耳塞式耳機作為實驗載具(如圖 4.1.2)，分別播放相同的曲目音樂並以逢甲大學美律電聲實驗室的錄音設備錄製下來，而曲目依照音樂的類型分為:大編制古典樂、小編制古典樂、輕搖滾樂、重金屬樂、鼓擊樂、靈魂流行樂及重節拍舞曲等七大類。因

此，所有的測試曲目共分為 7 大類音樂類型，而每一種音樂類型包含 6 支耳機的音樂品質，外加原始音訊，共 7 首，則總共的測試音訊共有 49 首。

在錄製聲音上，內耳式(in-ear)及耳塞式(ear-bud)耳機是以人工頭(Head and Torso Simulator, HATS)作為雙聲道收音麥克風(如圖 4.1.3 所示)，可以在耳機播放音樂的同時正確的收錄音訊。錄製過程中，人工頭配戴耳機密合與否，將直接影響到錄製後的音訊失真，所以在實施聽測前，需先比對該耳機原來的頻響曲線與總諧波失真(THD)，確定量測後的左右聲道頻響是否吻合，藉以確認耳機是否配戴良好。錄製流程如圖 4.1.4 所示。



4.1.3 主觀聽測實驗

所欲評估的音訊是取自上述耳機播放而錄製的聲音及原始音訊，讓受測者以問卷上的聽測問項來評判這些音訊的聽覺表現。此外，受測者須對這些聲音作喜好程度的評分，然後將於迴歸分析中以受測者們的喜好分數來計算出各聽測項目的權重(weighting factor)，以瞭解受測者的聽覺感受與喜好之關係。

主觀聽測問卷，如表 4.1.1 所示，共含 9 項聽測項目，除第九項(喜

好聽感分數)外，前八項都以”非常低落(-10)←標準(0)→非常強烈(+10)”來給予評分，標準分數(0)為受測者心中所認為的該項聽覺標準，如果認為該項聽感程度較標準低落，則往低落(-10)的層面評分；反之，則往強烈(+10)的層面評分。上述聽測項目之說明如下：

1. 低頻響度聽覺程度：低音頻段約落在 40 Hz 至 150 Hz 左右。
低音猛烈，會讓聲音聽感有震撼、延展的效果，但低音過猛，會使人煩躁、難受；反之，低音衰弱，會使感覺聲音乾澀、缺乏魅力。
2. 中低頻響度聽覺程度：中低音頻段約落在 200 Hz 至 800 Hz 左右。中低音猛烈，會讓聲音聽感呈現粗糙、模糊的效果；反之，中低音衰弱，會使聲音過於細緻、缺乏魅力。中低音以適中為佳，可讓聲音聽起來飽滿、舒服。
3. 中高频響度聽覺程度：中高音為人耳敏感的頻段，約為 1 kHz 至 8 kHz 左右。中高音過於猛烈，會讓聲音聽感呈現尖銳、激烈的效果；反之，中高音衰弱，會使聲音缺乏動態、沉悶不活潑。中高音以適中為佳，可讓聲音聽起來扎實、有響亮力度。
4. 高频響度聽覺程度：高音頻段約落在 10 kHz 至 16 kHz 左右。
高音過於猛烈，會使聲音呈現不協調及刺耳的感受；反之，高

音衰弱，會使聲音缺乏美感、不清晰。高音以適中為佳，可讓聲音聽起來清晰及明亮的關鍵。

5. 尖銳度表現：尖銳度表示整體聲音帶給人耳的尖銳聽感，主要是描述聲音的尖銳、刺耳程度。在音樂評論上，尖銳度過高，會使人感覺聲音不細緻、頻率感不協調，聲音聽起來解析度不高，令人感覺音質不佳，產生聽感上的混淆。
6. 主音音色表現：關於樂曲的主音音色表現，以人聲為例[48]，人聲音源的頻譜分佈比較特殊，就其發音方式而言，可分為三個部分：一是由聲帶震動所產生的樂音，此部分的發音量為靈活，不同音高、不同發音方式所產生的頻譜變化也大；二是鼻腔共鳴所產生的低頻諧音，由於鼻腔的形狀相對比較穩定，因而其共鳴所產聲的諧音頻譜分佈變化不大；三是口腔氣流在齒縫間的摩擦聲。人聲的音色表現大致以這三部分來作為評分的依據。人聲的表現如果音感很明亮，但蒼白無力，缺乏穿透感，或是音感狹窄，缺乏厚度及清晰感，都是不佳的人聲表現；反之，人聲飽滿，咬字清晰，音律表現沉穩但曲式動態又明顯，這是好的人聲表現。
7. 整體音質和諧表現：音質的和諧表現為整體音樂素質聽覺程度，代表整體音素質表現，和諧度、敏感力度，喜好音程解析

表現。在頻率上的和諧表現，如果低頻音表現均衡，音色就表現得混厚；中頻音的表現均衡，音色就表現得圓潤、自然、和諧；高頻音的表現均衡，音色就表現得明亮、清透、解析力強。此外，音樂的解析、動態感亦是評估整體音質和諧的項目之一。

8. 整體聲壓大小表現：音樂的整體聲壓大小表與人耳聽音樂的習慣有關。如錄音室的混音師在聆聽音樂時大約是 70 dB 至 80 dB 左右，正常的耳機聆聽音量約在 60 dB 至 75 dB 之間，因人而異，而一般演唱會的音量約在 90 dB 以上，這就不符合一般居家的聆聽環境，亦不在本文的考量範圍。
9. 喜好聽感分數：喜好聽感分數是依據受測者的喜好來評分，受測者可由自己的喜好依據來排列測試曲目的喜好順序，並給予適當的分數。而對於喜好聽覺分數的評價尺度，可由表 4.1.2 作為評價基準。

主觀聽測實驗的流程，如圖 4.1.5 所示，將 5 至 10 位受測者分為一組，於逢甲大學電聲聆聽室(規格： $4.5 \times 10.8 \times 8.1 \text{ m}^3$ ，混響時間：0.7 s)將每一支耳機所錄製的音訊(含原始音訊)，經由音響播放給受測者評分，而每首音樂的播放時間為 10 秒鐘。除此之外，為使受測者

能明確的了解主觀問卷中的問項所表示的各種聲音聽感，在受測者評分該項目前，先播放該評分項目的音樂特徵，使受測者能記憶其聽感特性後，再播放各種測試音訊讓受測者評定該項的分數。由於主觀聽感問項共有 9 項之多，且反覆的播放測試音訊，所以在長時間的問卷測試下，受測者難免會因為反覆的測試而產生聽覺疲勞的狀況，而聽覺疲勞會影響專注力而導致測試問項的評分誤差，故為避免此狀況，在評分完該項目的分數後，立即詢問受測者的精神狀況並評估是否休息一小段時間後再繼續實施聽測。

主觀聽測後，須標準化(Standardized)所有的受測者的問卷數據。於受測者給予每種聽覺項目所之評分後，取其平均值來代表該項目對此受測群的整體表現值，而主觀聽測結果及主觀聽覺量化數據之相關性，可藉以相關分析來了解兩者的相關程度。

4.2 實驗結果與分析

經由上述的主觀聽測及實驗模型，實驗結果與分析分為以下三部分作說明及討論：

1. 主觀聽覺量化分析：

根據第二章所分析心理聲學參數代入 3.1 節的主觀聽覺量化分析，來了解該音樂信號的聲音品質。

2. 相關分析:

根據 3.2.3 節中的(3.2.9)及(3.2.10)式代入各聽測項目的分數及主觀聽覺量化的數據，便可獲得相關係數 R 、判定係數 R^2 及 P 值。

3. 迴歸分析:

根據章節 3.2.2 的迴歸分析模型建立受測者的聽覺喜好的迴歸模型，並由迴歸分析所建立的聲音品質評估方程式，來預測該受測族群的聽覺喜好度，並檢定其合適性。

4.2.1 主觀聽覺量化分析

根據第二章所分析心理聲學參數代入 3.1 節的主觀聽覺量化分析，可獲得各項聽感。測試曲目以大編制古典樂、小編制古典樂、輕搖滾樂、重金屬樂、鼓擊樂、靈魂流行樂及重節拍舞曲等七大類作分析。分析結果分別列於圖 4.2.1 至圖 4.2.7。另外，若將各項主觀聽感量化數據對時間取平均，則可得到表 4.2.1 至表 4.2.7 的平均數據。

實驗結果顯示，除了原始信號外，對於各耳機的表現程度，其中較特別的是，以大編制古典樂及小編制古典樂來說，編號 E2 的耳機的中低頻的表現比其他耳機強，但在低頻，中高頻、高頻及尖銳度方面的表現則比其他耳機弱。在主音音色表現方面及整體音調和諧度方

面，E2 耳機也屬於表現較弱的一群，而聽覺感受音量，因動態校正的關係，使得各耳機的表現都很接近。

對於各耳機在其他音樂類型的主觀量化數據表現，在主音音色表現及整體音調和諧度方面以 E6 的表現為佳，尖銳度以 E3 耳機表現為佳，但在頻響平衡度方面，各耳機會有不同程度的表現，係由於各耳機不同的結構設計所導致的差異，使得各耳機有不同的特質表現，此外，各耳機的表現也會因為音樂類型的變化，而些微改變彼此的強弱差異。



4.2.2 相關分析

主觀聽測實驗是根據 4.1 節的主觀聽測流程統一對各種測試音訊作問卷評估。在評比結果方面，是以 30 位受測者對 49 首測試音訊的平均分數與主觀聽覺量化的數據做比較，並以其標準化數據作相關分析，分析結果以相關係數 R 、判定係數 R^2 及 P 值來了解兩者的相關程度。

結果方面，表 4.2.8 及 4.2.9 為主觀聽測評分的原始數據及標準化數據，表 4.2.10 及 4.2.11 為主觀聽覺量化的原始數據及標準化數據，相關分析的結果以表 4.2.12 所示。結果顯示相關係數 R 約莫在 0.78

至 0.92 之間，判定係數 R^2 約莫在 0.61 至 0.84 之間， P 值均小於 0.05。

因此，由以上數據顯示，主觀聽覺量化及主觀聽測擁有一定的相關程度，表示本文所提出的主觀聽覺量化法可以反映人耳對此八項的聽覺感受量。

4.2.3 迴歸分析

由於 4.2.3 節的實驗結果驗證人耳的聽覺喜好是相依於主觀聽覺量化的數據，因此，本文以第三章所介紹的複迴歸分析法來建立該受測族群的聽覺喜好模型，進一步探討人耳的喜好度與各聽覺感受量的關係。

聽覺喜好模型之建立流程，包括輸入變數、建立迴歸方程式、迴歸模型檢定、顯著性檢定與評估解釋能力等步驟。在輸入變數方面如表 4.2.13 所示，應變數 \hat{y} 為平均 30 位受測者的主觀聽覺喜好分數，自變數為八項主觀聽感量化數據 x_1, x_2, \dots, x_8 ，共 49 筆資料如表 4.2.14 所示，而將這些測試數據代入迴歸分析可獲得迴歸方程式如下：

$$\begin{aligned}\hat{y} = & -1.7389 \cdot x_1 - 11.4937 \cdot x_2 - 5.3352 \cdot x_3 - 9.3089 \cdot x_4 \\ & 15.7732 \cdot x_5 + 3.8280 \cdot x_6 - 0.3143 \cdot x_7 - 2.5998 \cdot x_8 + 351.4917\end{aligned}\quad (4.2.1)$$

上式是由 49 筆數據資料所迴歸出的方程式，可代表 30 位年輕受測者的聽覺喜好度預估方程式。對於各自變數的顯著性，可由表 4.2.15 所示，其中第 1、7、8 項的變數顯著性較高。

在評估此聽覺喜好度預估方程式的合適性檢定上，可將 49 筆數據資料代入(4.2.1)式可得出預估結果，其與主觀實測評分數比較之散佈圖，如圖 4.2.8 所示。結果上，相關係數 R 為 0.91，判定係數 R^2 為 0.83， P 值為 3.11×10^{-13} 遠小於 0.05，表示此模型能充分表現此受測群的聽覺喜好度。

另外，如將其餘離散個體的受測者數據資料代入(4.2.1)式可得出其預估結果與主觀實測評分數比較之散佈圖，如圖 4.2.9 所示。結果上，相關係數 R 為 0.7558，判定係數 R^2 為 0.5712， P 值為 7.18×10^{-9} 亦遠小於 0.05，但由於判定係數表示此模型只有 50% 的能力預估，因此，對於離散個體的受測者的聽覺喜好度，並不完全適用。

4.3 實驗結論

上述實驗數據顯示，在主觀聽覺量化及主觀聽測比較方面，彼此擁有很多的相關程度，表示主觀聽覺量化可以反映出人耳的聽覺感受。在探討迴歸聽覺喜好的實驗方面的評估結果上，結果顯示此預估模型

能充分表現該受測族群的聽覺喜好度，也驗證了此八項主觀聽覺項目對於聽覺喜好是有強烈的因果關係，因此，對於往後不同的受測者及音樂評估都可以此聲音品質分析流程進行評估及預測，而預估方面，也大致上符合實測的結果，所以就整體性的評估而言，此聲音品質評估模型是值得信賴的。

此外，對於各支耳機的聲音品質表現，如圖 4.3.1 及表 4.3.1 所示。假設原始音訊不列入評估考量的範圍，在實測喜好分數上，結果顯示各支耳機以 E3、E5、E6 表現較優，E2 耳機表現較差，在預估喜好分數方面則顯示，E3 耳機表現較優，E2 耳機表現較差，其他耳機則表現平平。如果以播放靈魂流行樂作為比較，如圖 4.3.2 至圖 4.3.4 所示，各圖分別為 E3 與 E2 此兩支耳機的比響度、尖銳度及聽覺粗糙度的比較圖。由聽測結果而知，比響度(圖 4.3.2)可顯示此受測群不喜歡中頻(4 至 13 Bark)過於突出的音色，由於 E2 耳機在此表現上過於突兀，所以無法獲得此受測群的喜愛。另在尖銳度(圖 4.3.3)的比較中，顯示 E2 耳機在中頻突兀且高頻低落，由此可知，此受測群會認為 E2 耳機在這樣的尖銳度表現上是不好的，此外，聽覺粗糙度方面(圖 4.3.4)，亦顯示 E3 耳機的表現較為線性，表示各頻段的音質表現較為一致、平穩，因此，整體而言，E3 耳機可從這些數據來評斷其聲音品質的表現，且從中了解該受測群的喜好標準。

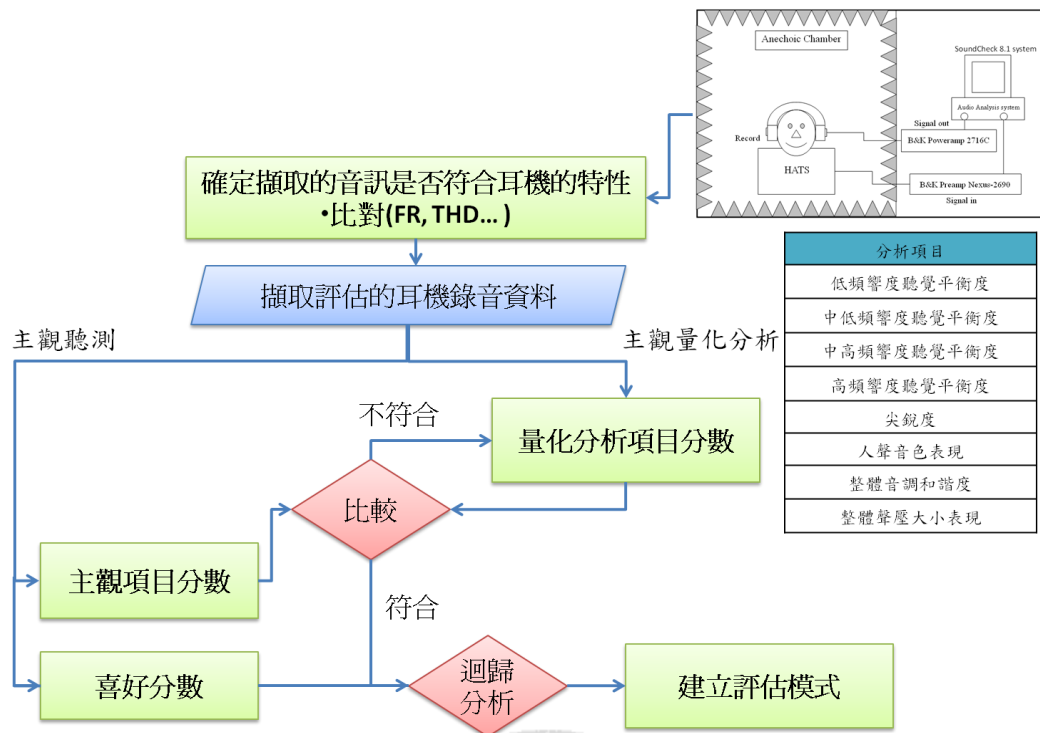


圖 4.1.1 聲音品質評估模式之實施流程

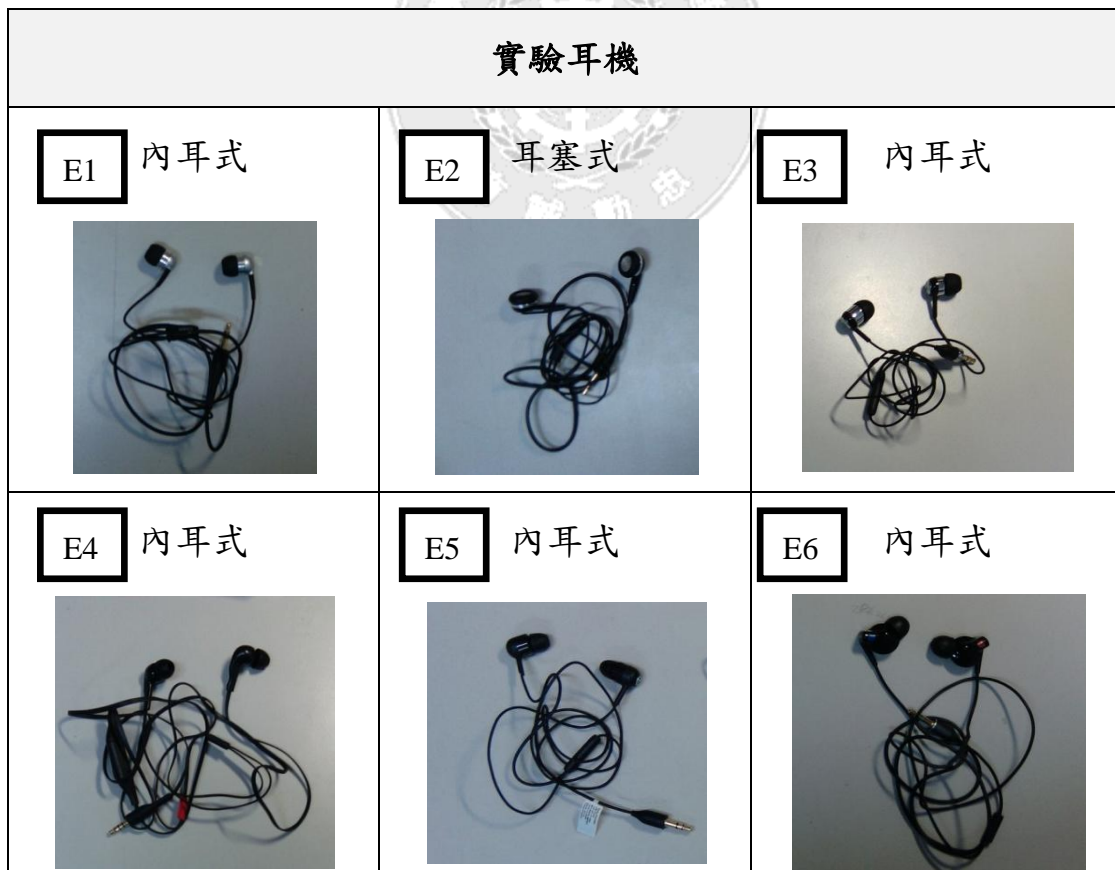


圖 4.1.2 美律實業股份有限公司所提供之六支耳機

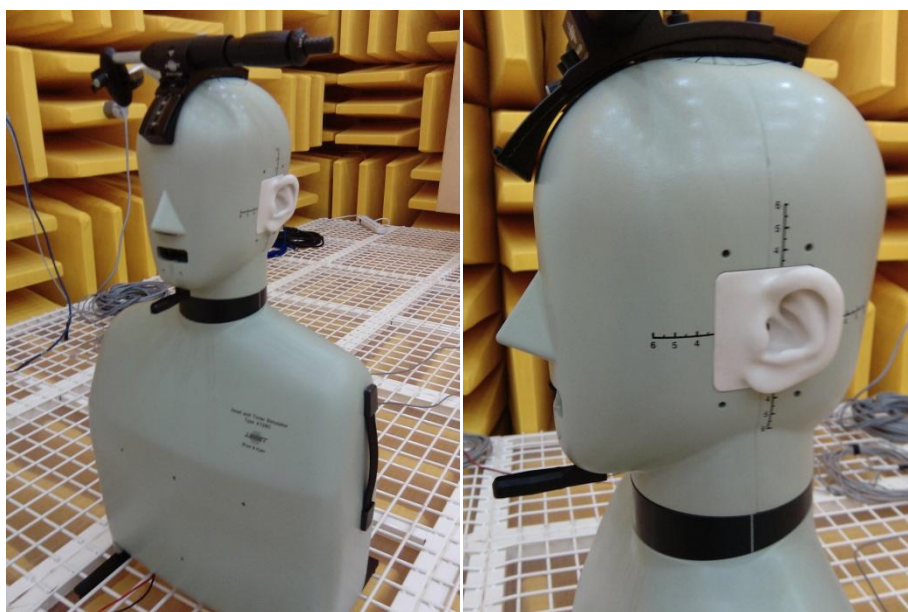


圖 4.1.3 人工頭(HATS)照片圖

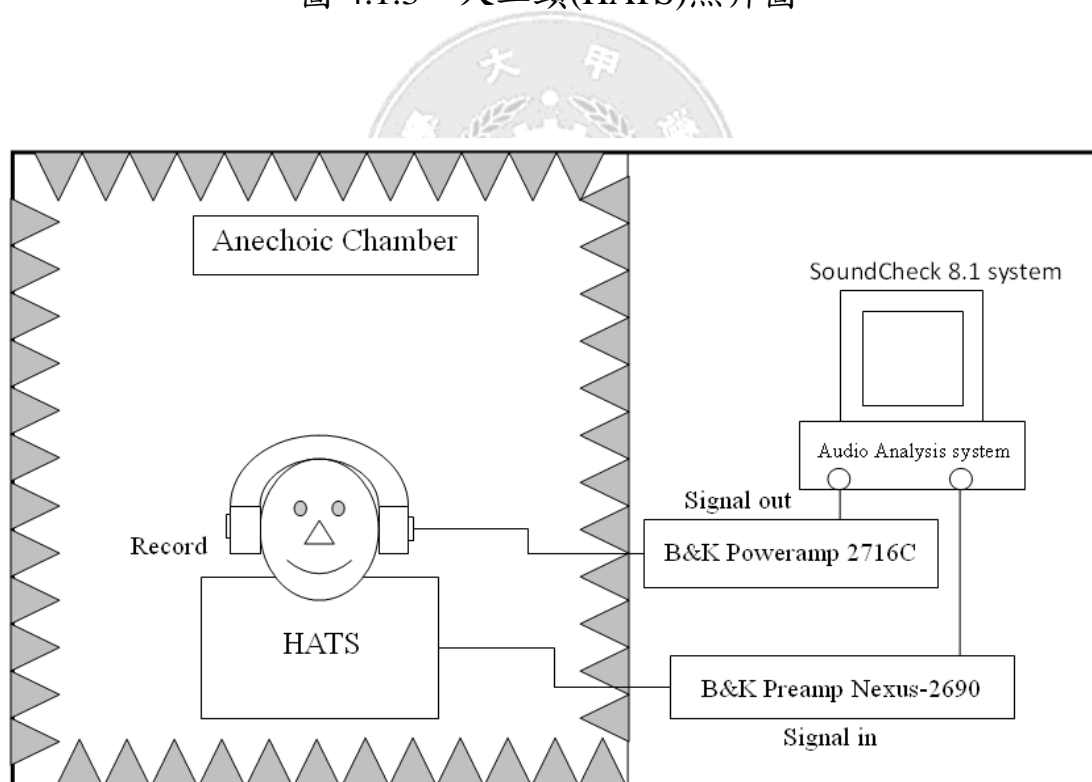


圖 4.1.4 音訊錄製示意圖

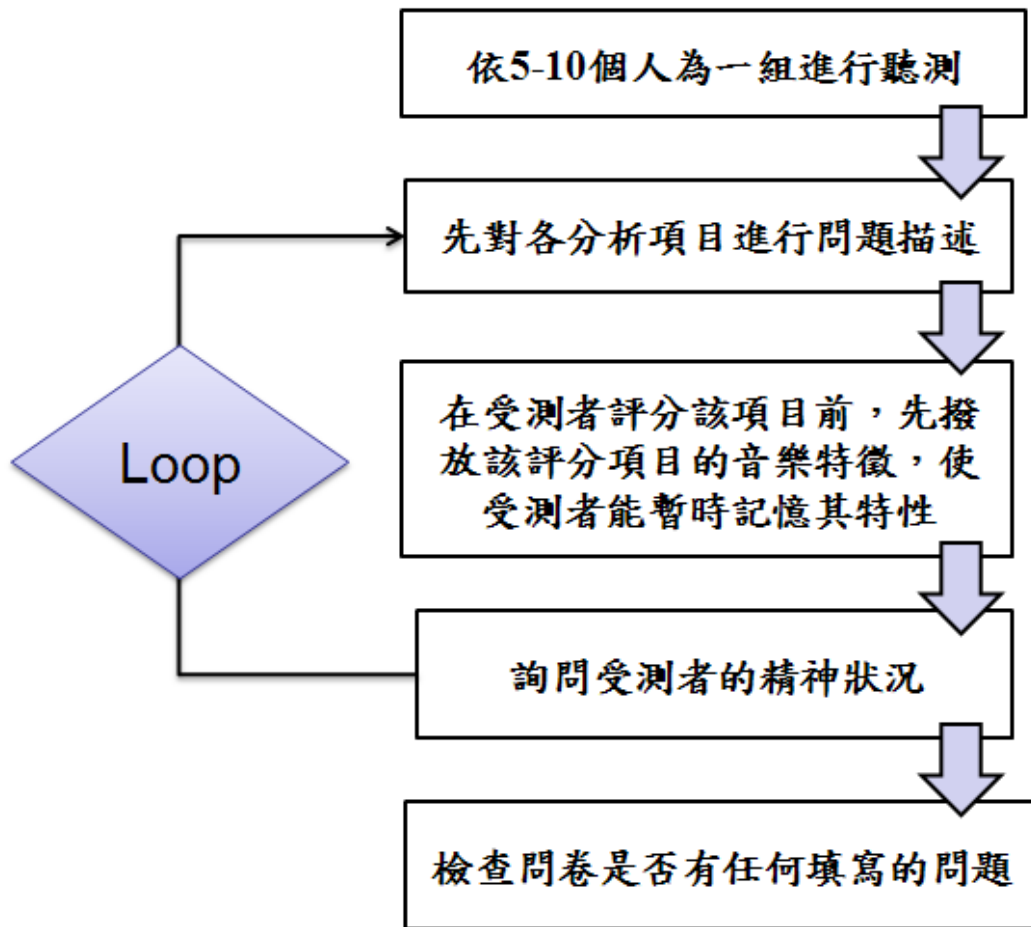


圖 4.1.5 主觀聽測實驗的流程

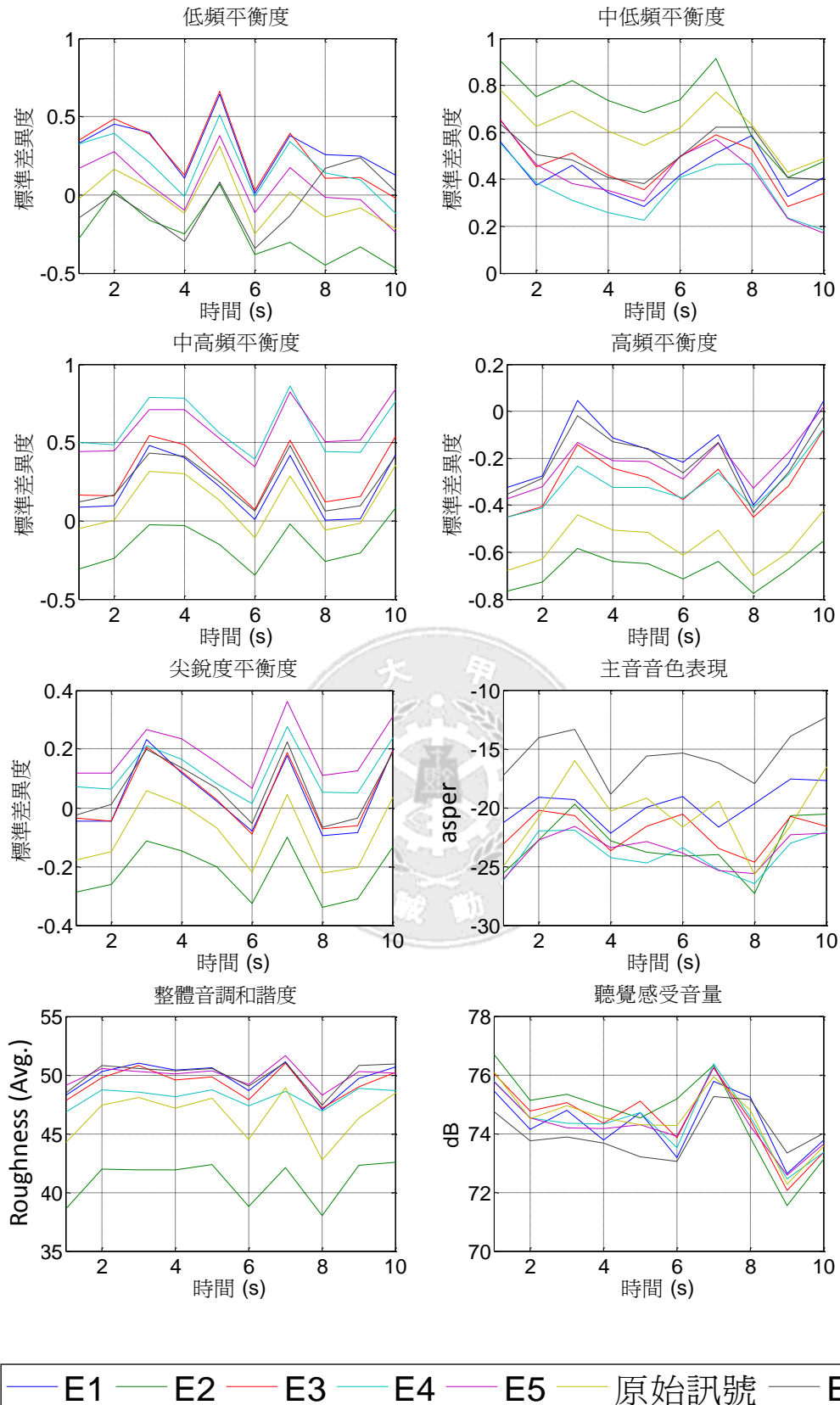


圖 4.2.1 主觀量化分析結果圖。測試曲目為大編制古典樂。

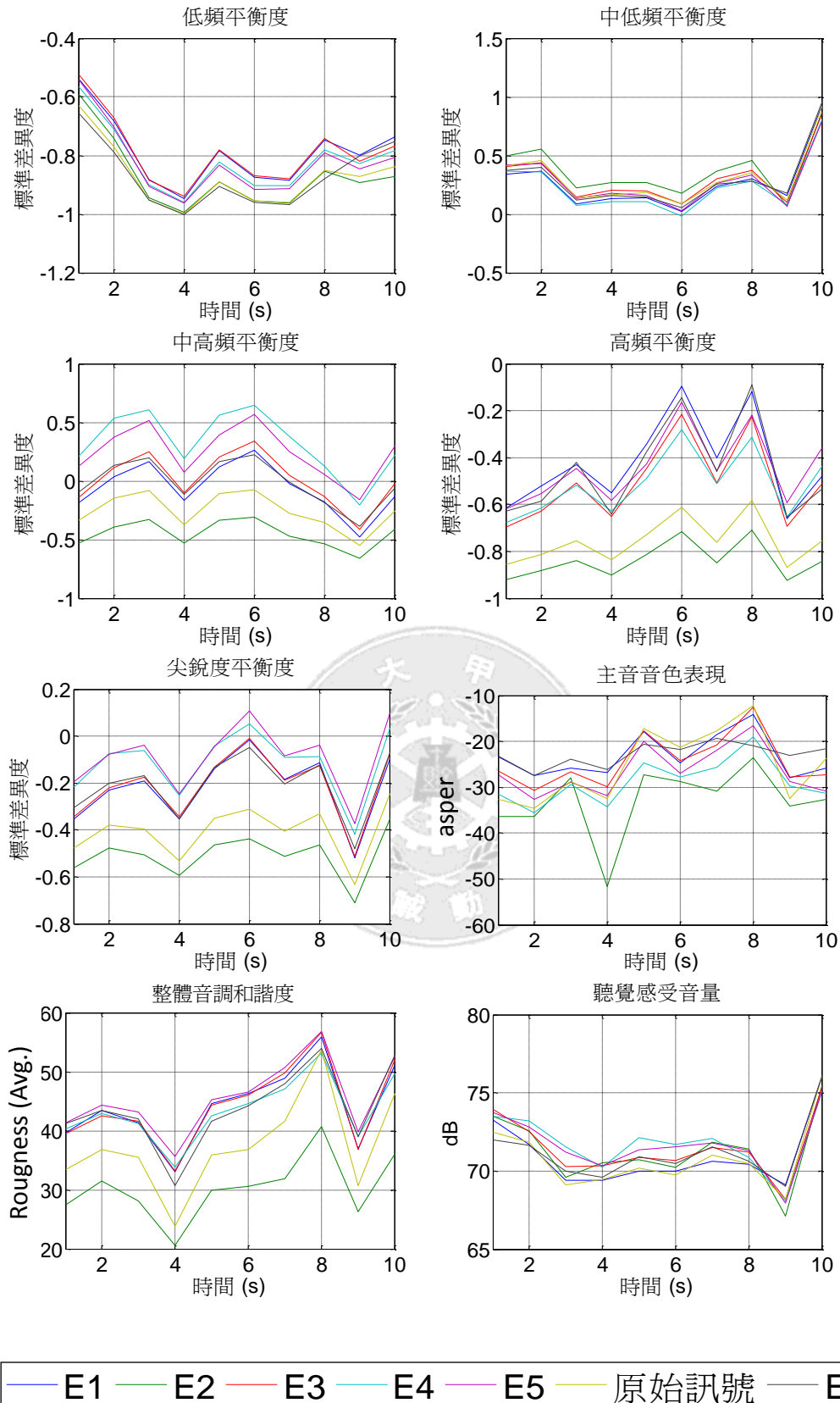


圖 4.2.2 主觀量化分析結果圖。測試曲目為小編制古典樂。

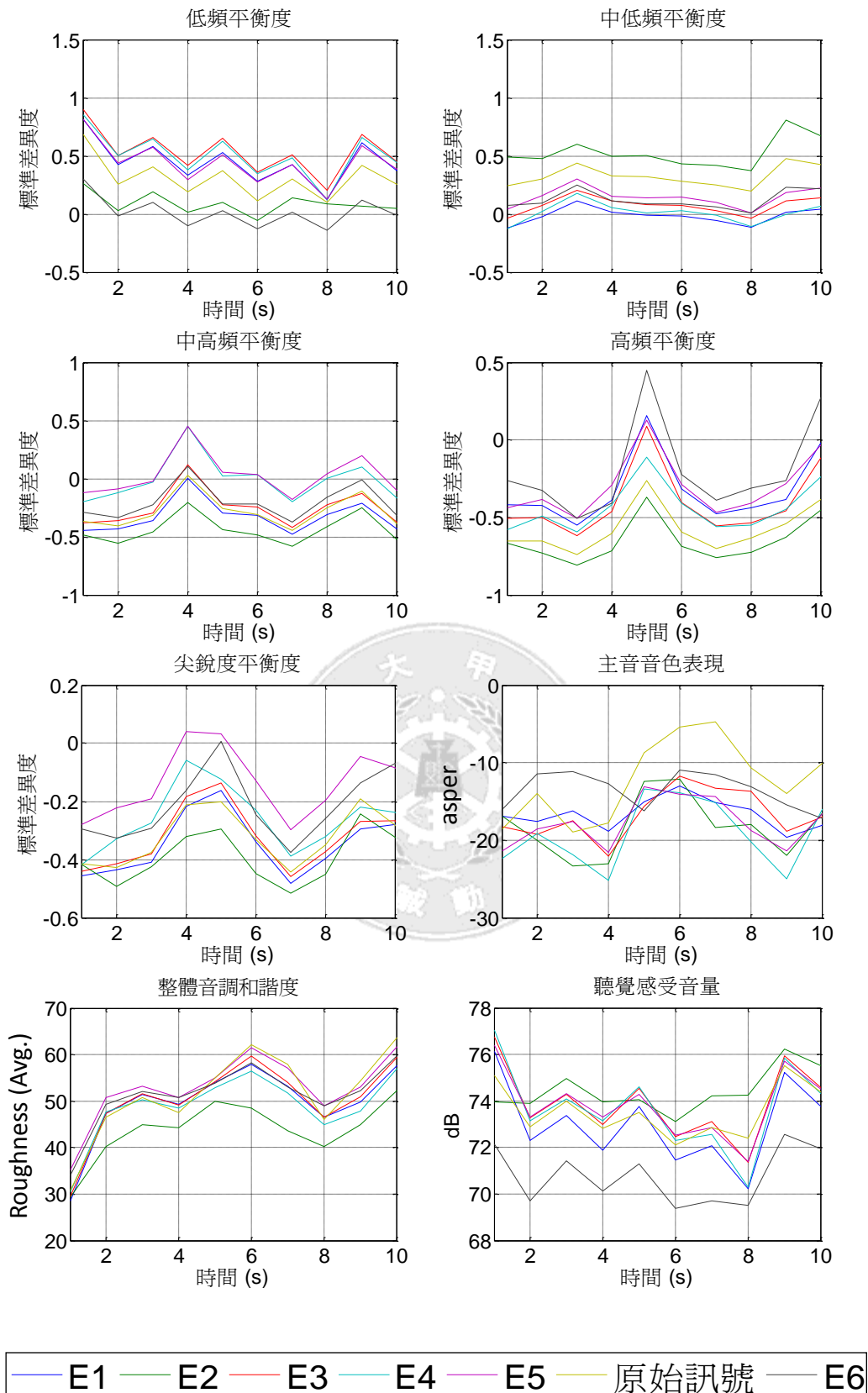


圖 4.2.3 主觀量化分析結果圖。測試曲目為輕搖滾樂。

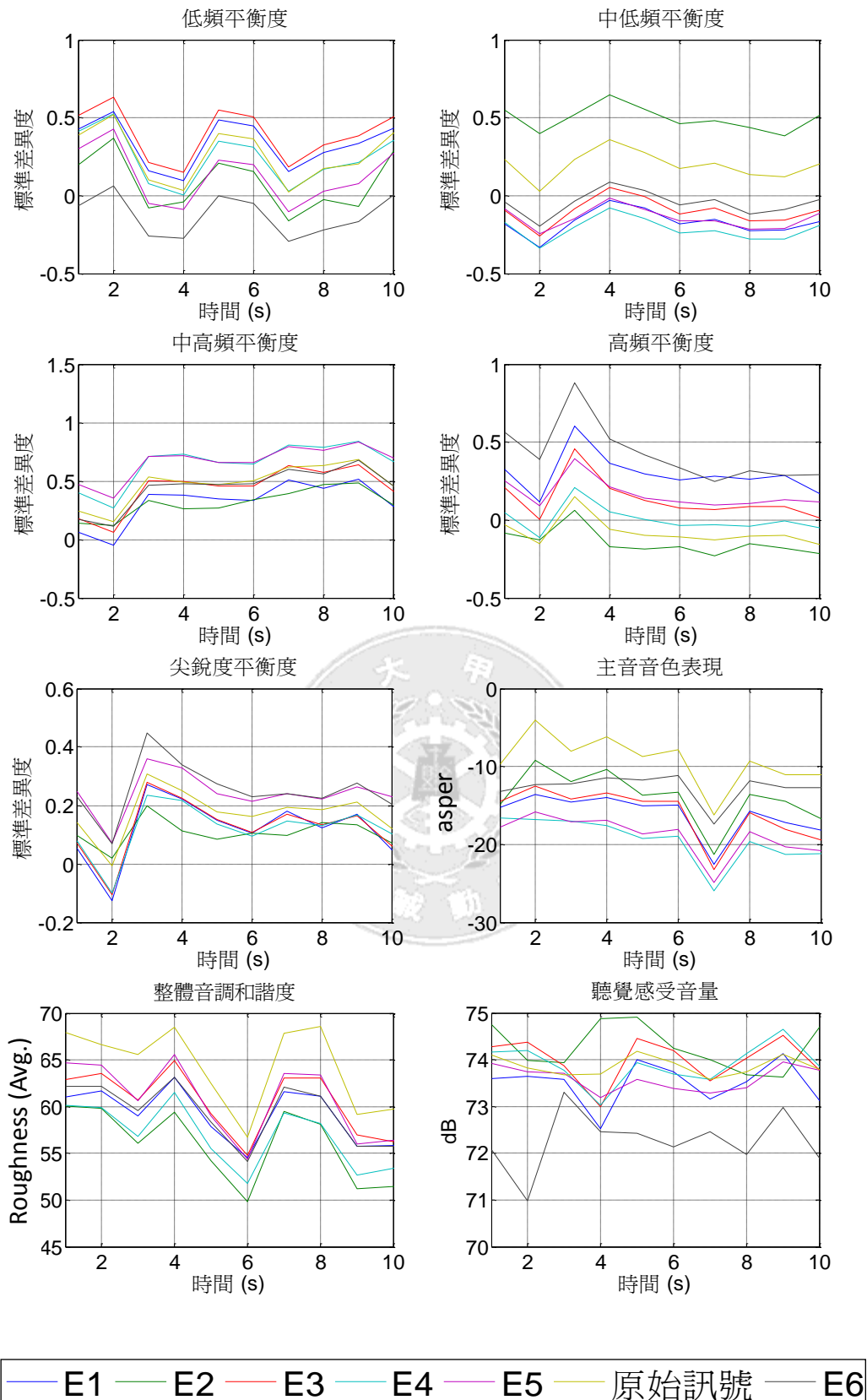


圖 4.2.4 主觀量化分析結果圖。測試曲目為重金屬樂。

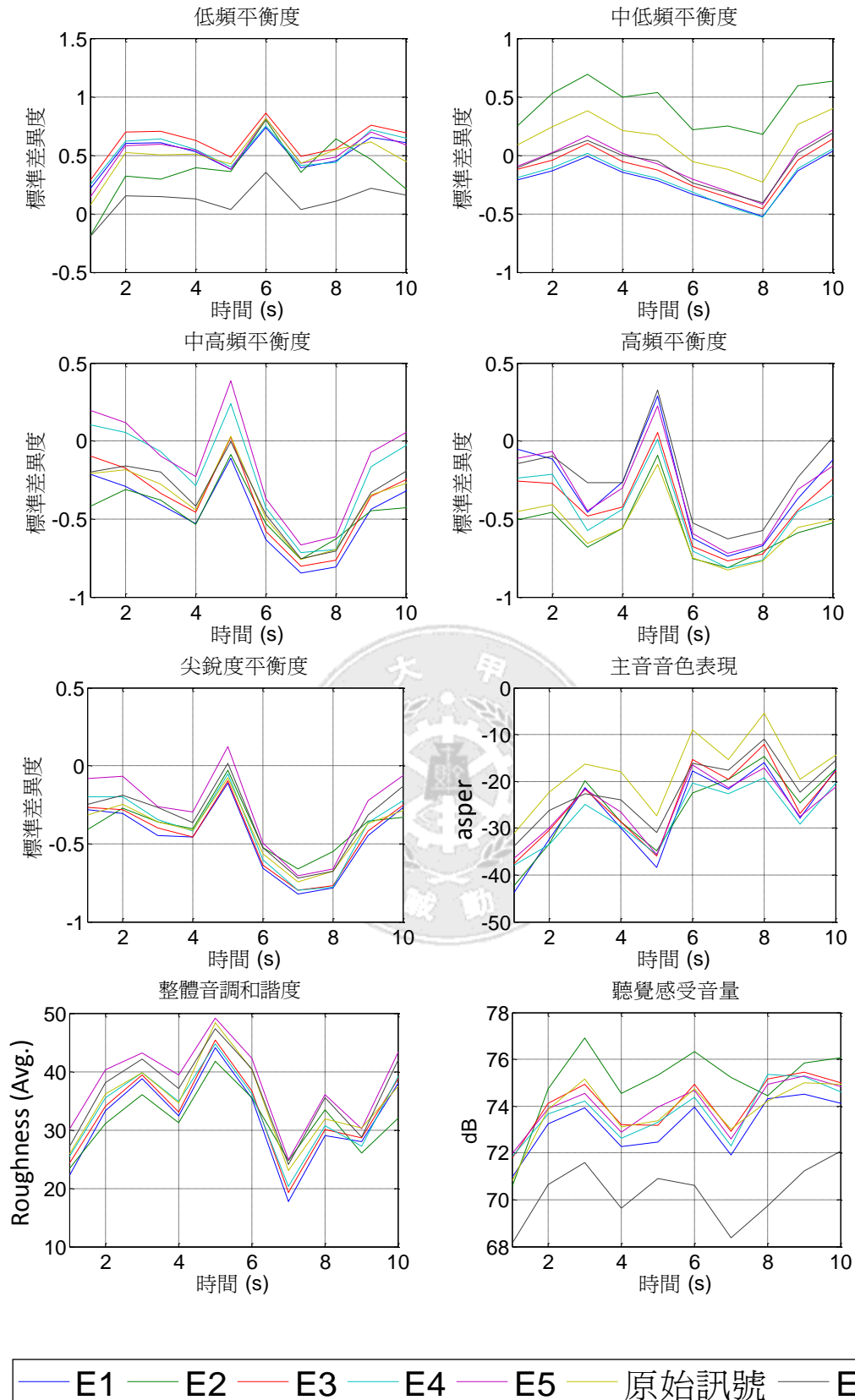


圖 4.2.5 主觀量化分析結果圖。測試曲目為鼓擊樂。

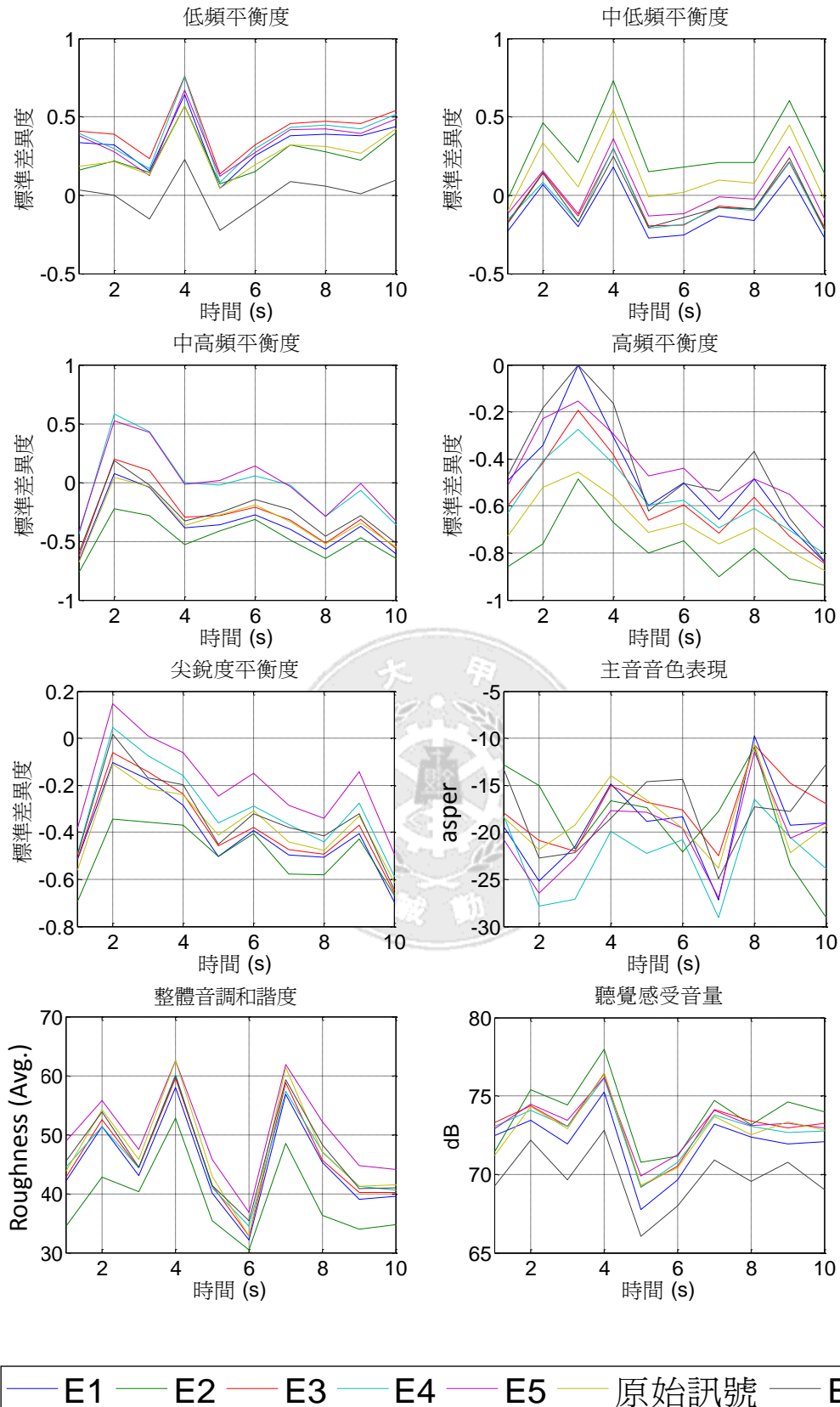


圖 4.2.6 主觀量化分析結果圖。測試曲目為靈魂流行樂。

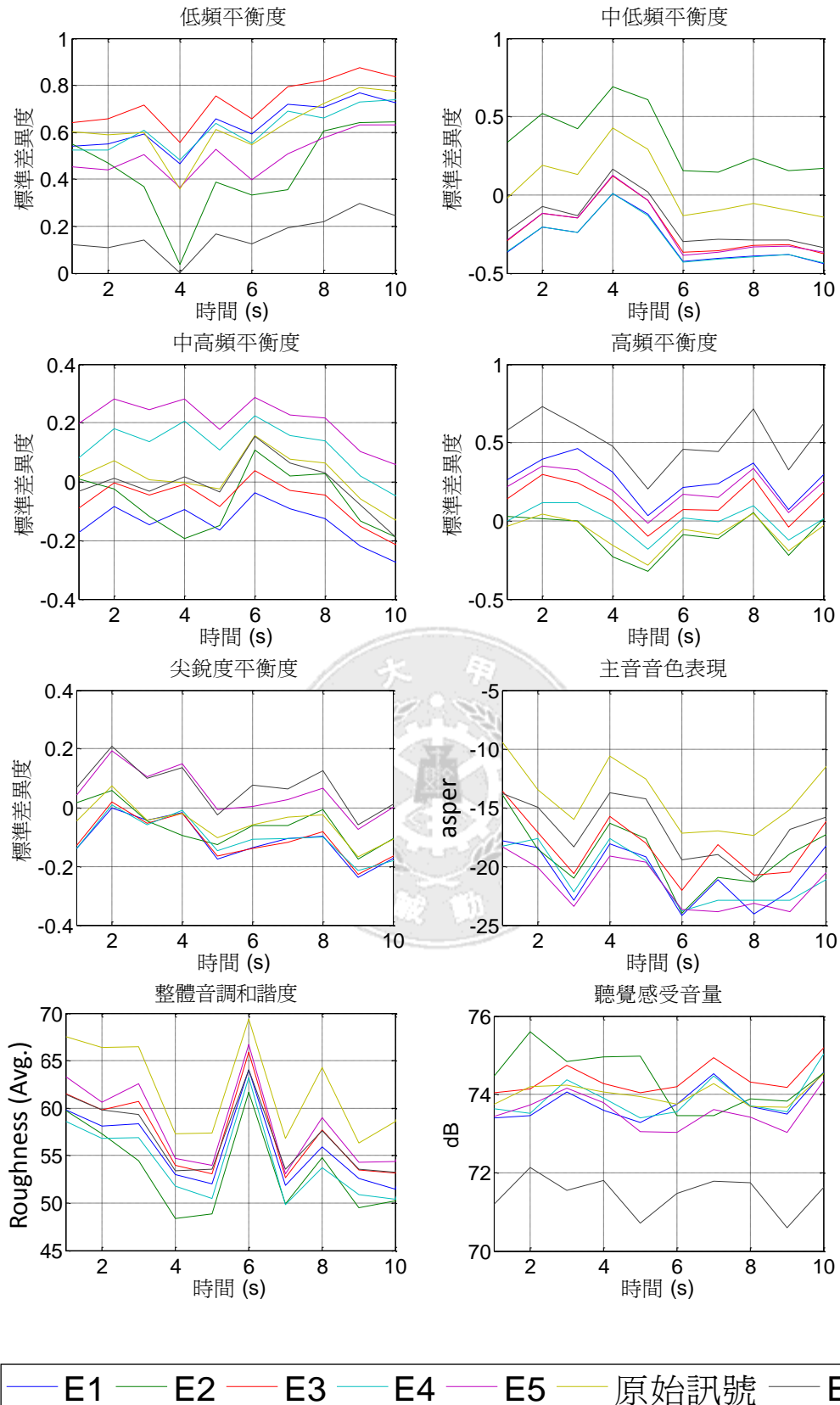


圖 4.2.7 主觀量化分析結果圖。測試曲目為重節拍舞曲。

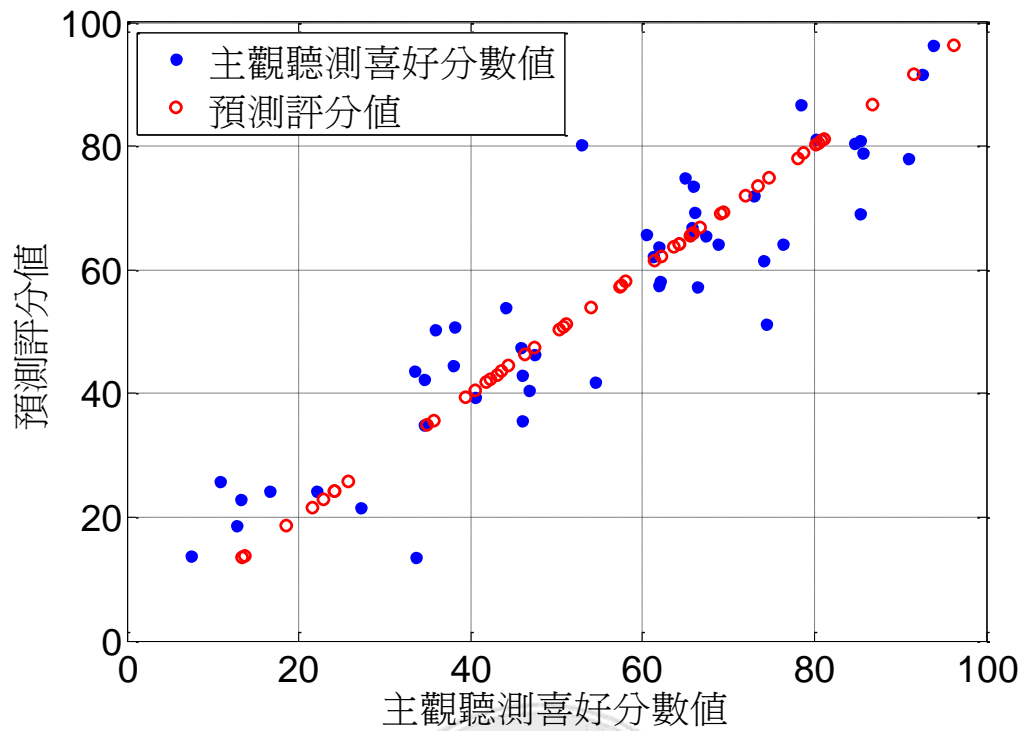


圖 4.2.8 群體預測評分值散佈圖

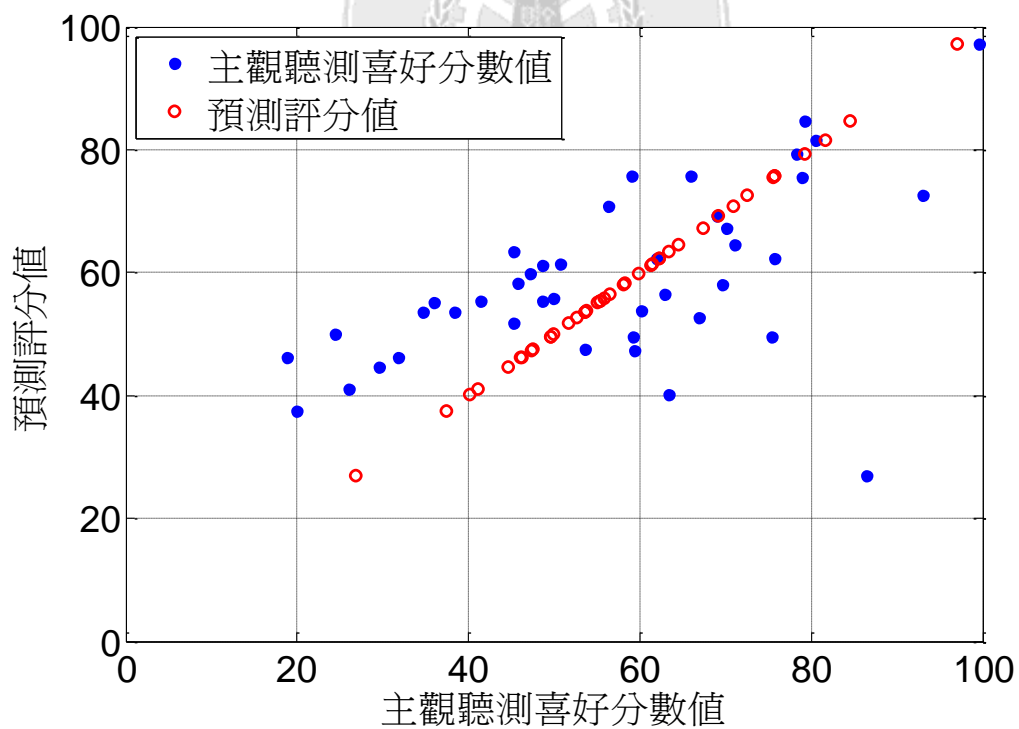


圖 4.2.9 離散個體預測評分值散佈圖

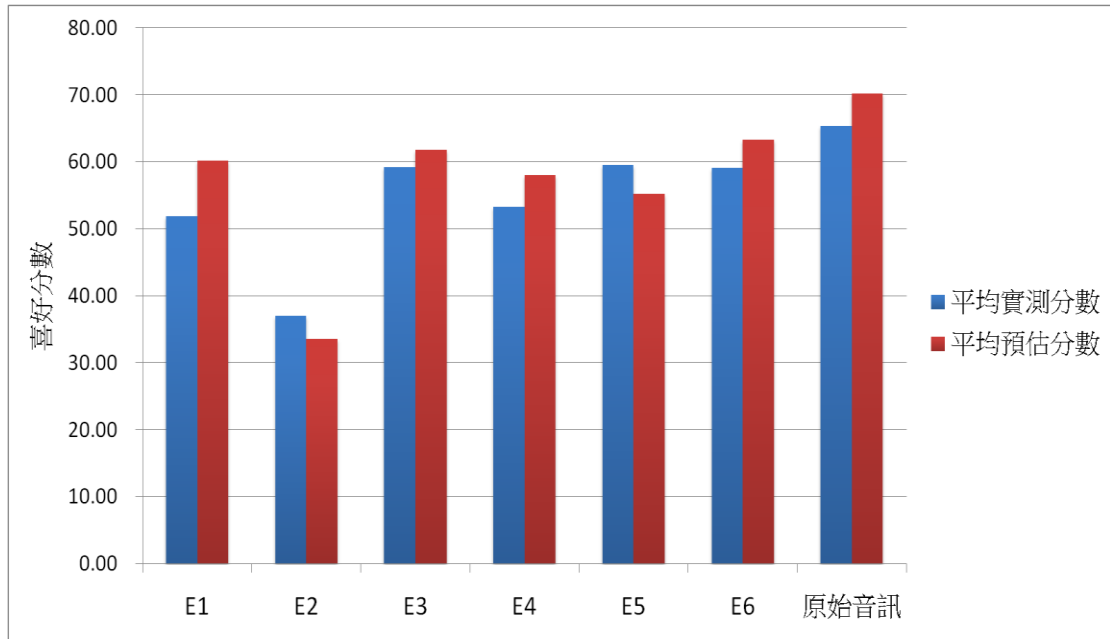


圖 4.3.1 各支耳機(含原始音訊)喜好分數統計比較圖

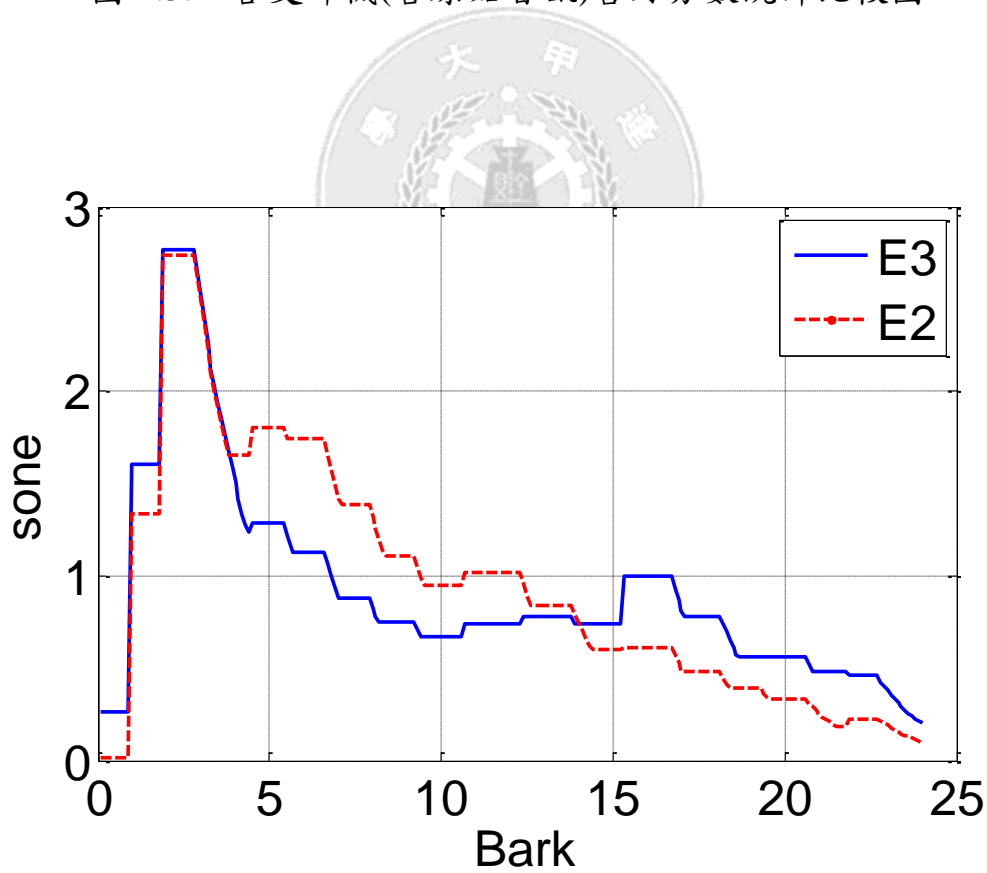


圖 4.3.2 比響度圖。圖為比較 E3 與 E2 此兩支耳機的比響度。

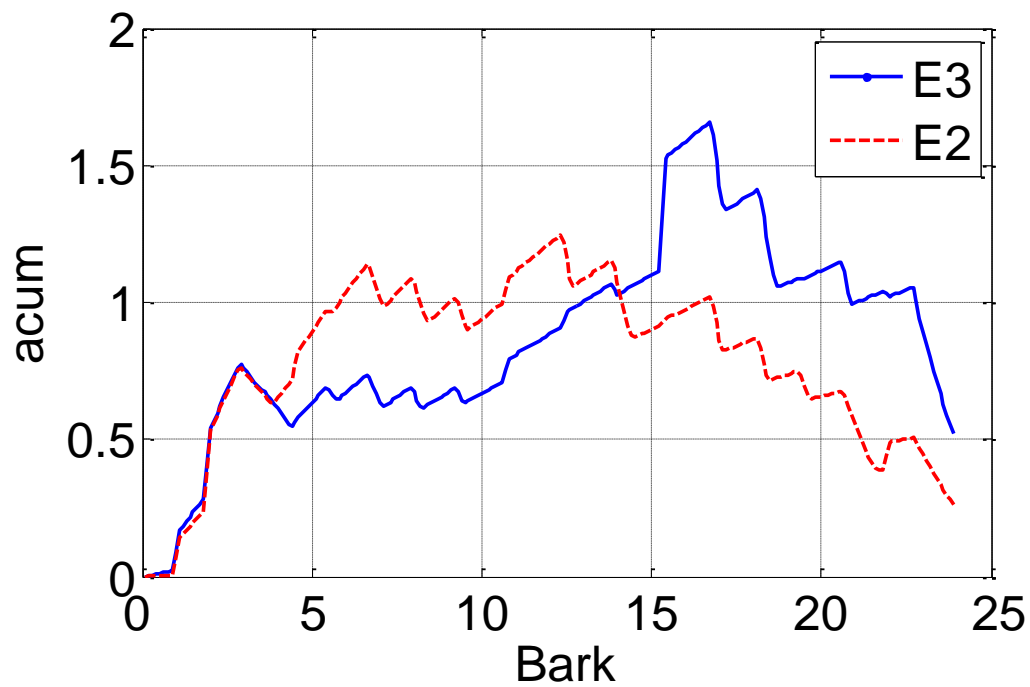


圖 4.3.3 尖銳度圖。圖為比較 E3 與 E2 此兩支耳機的尖銳度。

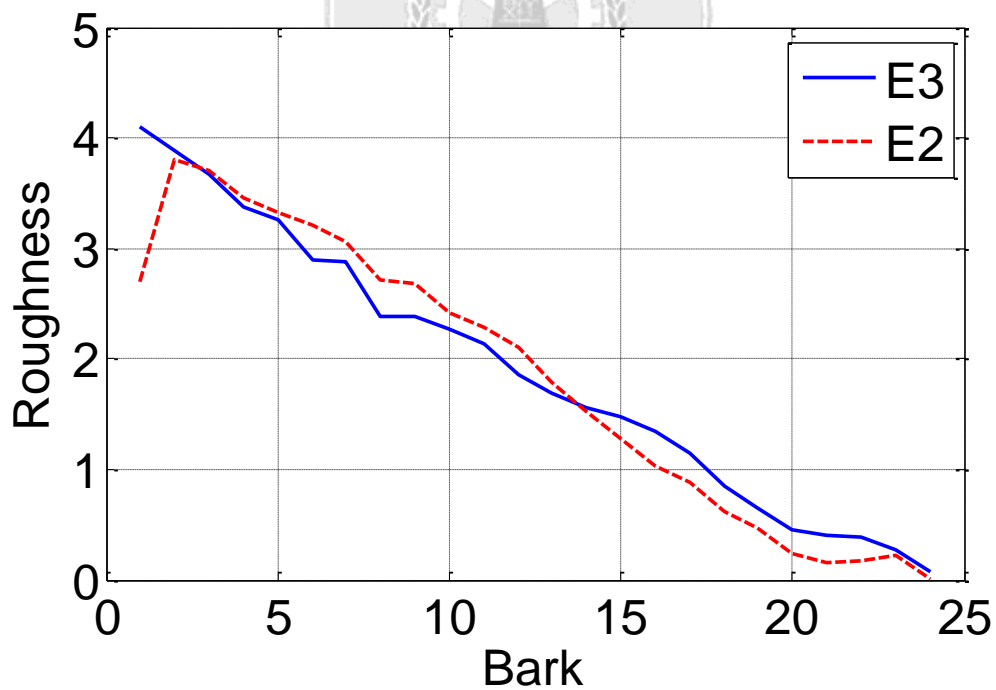


圖 4.3.4 聽覺粗糙度圖。圖為比較 E3 與 E2 此兩支耳機的聽覺粗糙度。

表 4.1.1 主觀聽測標準表

No	分析項目	評分標準	A	B	C	D	E	F	G
1	低頻響度聽覺程度	-10<0<10							
2	中低頻響度聽覺程度	-10<0<10							
3	中高頻響度聽覺程度	-10<0<10							
4	高頻響度聽覺程度	-10<0<10							
5	尖銳度表現	-10<0<10							
6	主音音色表現	-10<0<10							
7	整體音質和諧表現	-10<0<10							
8	整體聲壓大小表現	-10<0<10							
9	喜好聽感分數	依分數， 排序名次							

備註: A-G 分別為聽測的音訊

表 4.1.2 喜好聽覺評價尺度表

分數尺度	評價基準
0 - 20	最差 (聲音扭曲，變形失真，樂音不清晰)
20 - 40	不好 (音色稍差，整體聲音朦朧)
40 - 60	普通 (音色普通，尚可接受的範圍)
60 - 80	很好 (整體表現佳，但略有些缺點)
80 - 100	極好 (各方面極出色的聲音)

表 4.2.1 整體主觀聽感量化數據測試。曲目為大編制古典樂

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	原始訊號
低頻響度 聽覺平衡 度	2.9935	-2.4269	2.7597	1.96365	0.679175	-0.67599	-0.21402
中低頻響 度聽覺平 衡度	4.1993	7.16265	4.63555	3.457	4.12455	4.91885	6.22995
中高頻響 度聽覺平 衡度	2.26165	-1.415	3.12905	6.1163	5.9338	2.6493	1.2749
高頻響度 聽覺平衡 度	-1.58585	-6.6402	-2.898	-3.07395	-2.0618	-1.9137	-5.52205
尖銳度表 現	0.469835	-2.1263	0.50201	1.2726	1.9376	0.74755	-0.79629
主音音色 表現	-19.8943	-23.0328	-21.8164	-23.8733	-23.5283	-15.6082	-20.3693
整體音調 和諧度	49.8912	41.12365	49.39885	48.19225	50.0623	50.12685	46.73265
整體聲壓 大小表現	74.413	74.7954	74.6363	74.4911	74.4524	74.03225	74.60295

表 4.2.2 整體主觀聽感量化數據測試。曲目為小編制古典樂

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	原始訊號
低頻響度 聽覺平衡 度	-7.9852	-8.84635	-7.99945	-8.2807	-8.36025	-8.7661	-8.84025
中低頻響 度聽覺平 衡度	3.16675	4.0765	3.514	2.6935	3.1183	3.2336	3.47765
中高頻響 度聽覺平 衡度	-0.13759	-4.11725	0.647865	3.7581	3.0388	0.255225	-2.21935
高頻響度 聽覺平衡 度	-3.6223	-8.1484	-4.5519	-4.5569	-3.83775	-4.02225	-7.29035
尖銳度表 現	-1.61145	-4.692	-1.55515	-0.62296	-0.33126	-1.58805	-3.6354
主音音色 表現	-22.7581	-32.0319	-23.8362	-28.5821	-26.0615	-22.4116	-24.3059
整體音調 和諧度	45.0424	30.93015	45.09955	44.17835	46.38525	44.33595	38.1937
整體聲壓 大小表現	71.7224	72.0715	72.21935	72.50925	72.4398	71.89345	71.6111

表 4.2.3 整體主觀聽感量化數據測試。曲目為輕搖滾樂

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	原始訊號
低頻響度 聽覺平衡 度	5.0366	1.39658	5.40675	4.89215	4.36155	2.213955	3.8605
中低頻響 度聽覺平 衡度	-0.57057	5.24795	0.094581	-0.69716	0.517485	1.092435	2.934
中高頻響 度聽覺平 衡度	-2.76	-2.83625	-1.8588	0.172975	1.1638	-1.22698	-1.72445
高頻響度 聽覺平衡 度	-2.41435	-5.35795	-3.0656	-3.62735	-1.7572	-0.52645	-4.71535
尖銳度表 現	-2.8685	-2.725	-2.5786	-2.22505	-0.60961	-1.14055	-2.1986
主音音色 表現	-15.6532	-16.5464	-15.0485	-18.6098	-17.6294	-14.1646	-10.8389
整體音調 和諧度	53.01995	48.181	54.10735	51.69655	56.22985	55.06185	57.34665
整體聲壓 大小表現	73.5361	74.1909	73.9504	73.7978	73.8314	72.25855	73.7898

表 4.2.4 整體主觀聽感量化數據測試。曲目為重金屬樂

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	原始訊號
低頻響度 聽覺平衡 度	3.6047	0.35948	3.7251	2.30375	1.108735	0.2696	2.54265
中低頻響 度聽覺平 衡度	-1.4793	4.59155	-0.94724	-2.1114	-1.52885	-0.22177	1.98805
中高頻響 度聽覺平 衡度	3.33295	3.46555	4.75305	6.7481	7.17995	4.60445	5.0709
高頻響度 聽覺平衡 度	3.06605	-1.34415	1.5212	0.494736	2.0888	4.09805	-0.76724
尖銳度表 現	1.3261	1.17705	1.48865	1.46545	2.68965	2.62065	1.83685
主音音色 表現	-16.3923	-15.0535	-16.9172	-20.3036	-19.758	-12.8228	-10.5449
整體音調 和諧度	58.4875	55.43165	59.6972	56.32725	59.8669	58.9257	63.85395
整體聲壓 大小表現	73.6282	74.0686	73.90175	73.88415	73.7674	73.00205	73.8636

表 4.2.5 整體主觀聽感量化數據測試。曲目為鼓擊樂

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	原始訊號
低頻響度 聽覺平衡 度	5.16405	2.19425	5.61455	5.0932	4.6532	2.648145	4.35065
中低頻響 度聽覺平 衡度	-1.7338	4.08365	-1.04996	-1.7794	-0.64369	-0.38576	1.62825
中高頻響 度聽覺平 衡度	-4.5368	-4.355	-3.66505	-1.82185	-1.17435	-3.33495	-3.4861
高頻響度 聽覺平衡 度	-1.61305	-4.8469	-2.67155	-3.07165	-1.50445	-0.71901	-4.62175
尖銳度表 現	-3.86885	-3.5809	-3.70185	-3.34005	-2.1016	-2.6449	-3.5187
主音音色 表現	-25.1312	-24.9515	-23.1919	-26.3767	-24.1722	-21.972	-17.0088
整體音調 和諧度	37.2078	35.3821	38.39415	38.37015	42.87175	40.9987	40.4482
整體聲壓 大小表現	73.2247	74.0592	73.67695	73.55975	73.621	71.67275	73.562

表 4.2.6 整體主觀聽感量化數據測試。曲目為靈魂流行樂

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	原始訊號
低頻響度 聽覺平衡度	4.42265	3.21875	4.8577	4.199	4.0283	2.202	4.08465
中低頻響度 聽覺平衡度	-2.07505	3.76395	-1.5173	-2.0177	-1.10999	-0.78243	0.996105
中高頻響度 聽覺平衡度	-3.35535	-2.20685	-2.38565	-0.33035	0.57178	-1.80545	-1.9484
高頻響度 聽覺平衡度	-2.01525	-3.9617	-2.7554	-3.65595	-1.64005	0.032525	-4.22875
尖銳度表現	-3.24385	-2.2317	-2.9455	-2.73375	-1.10855	-1.5333	-2.34455
主音音色 表現	-16.507	-15.6923	-14.6277	-19.5008	-17.0671	-16.0925	-11.5054
整體音調 和諧度	39.51295	39.098	40.9234	40.22895	45.4025	43.67715	44.41665
整體聲壓 大小表現	73.36725	74.0581	73.81495	73.67885	73.7822	72.18745	73.63685

表 4.2.7 整體主觀聽感量化數據測試。曲目為重節拍舞曲

	E1	E2	E3	E4	E5	E6	原始訊號
低頻響度 聽覺平衡 度	1.63615	-4.7376	1.93295	-1.5438	0.55921	0.346615	1.2565
中低頻響 度聽覺平 衡度	-1.43985	2.218	-0.82249	2.2565	-1.1839	0.023946	2.4243
中高頻響 度聽覺平 衡度	-0.36921	7.0621	0.64216	7.7121	4.0284	0.618365	1.35185
高頻響度 聽覺平衡 度	0.370005	0.9224	-0.38024	2.1703	1.9338	1.94925	-2.34985
尖銳度表 現	-1.04742	3.08565	-0.73555	3.6472	1.51855	0.387485	-0.0611
主音音色 表現	-16.8542	-14.793	-15.7965	-19.2415	-19.6769	-13.6532	-11.5589
整體音調 和諧度	53.02335	55.971	54.40735	56.25195	56.14205	54.30795	58.2815
整體聲壓 大小表現	72.45585	73.923	72.8293	74.2981	73.28735	72.2532	73.33595

表 4.2.8 主觀聽測評分表(原始數據：取小數點後 2 位)

主觀聽測評分項目	E1	E2	E3	E4	E5	E6	原始訊號
低頻響度聽覺程度	0.18	-4.64	2.18	0.55	0.36	-1.45	0.55
中低頻響度聽覺程度	-0.63	5.10	0.32	-0.59	0.53	2.10	0.81
中高頻響度聽覺程度	-2.60	-1.21	-1.80	-0.32	2.60	-1.10	1.60
高頻響度聽覺程度	1.09	-2.64	-0.64	-0.55	1.55	2.91	-0.09
尖銳度表現	-2.36	-1.55	-0.18	-1.18	2.45	2.09	-3.23
主音音色表現	5.45	3.73	5.91	3.45	6.09	6.55	8.27
整體音質和諧表現	3.27	0.55	6.27	3.64	5.45	5.09	7.55
整體聲壓大小表現	0.25	0.56	0.56	0.56	0.56	0.25	0.56

表 4.2.9 主觀聽測評分表(標準化數據：取小數點後 2 位)

主觀聽測評分項目	E1	E2	E3	E4	E5	E6	原始訊號
低頻響度聽覺程度	-0.39	-2.06	0.31	-0.26	-0.32	-0.95	-0.26
中低頻響度聽覺程度	-0.67	1.32	-0.34	-0.65	-0.26	0.28	-0.17
中高頻響度聽覺程度	-1.35	-0.87	-1.07	-0.56	0.45	-0.83	0.11
高頻響度聽覺程度	-0.07	-1.36	-0.67	-0.64	0.09	0.56	-0.48
尖銳度表現	-1.27	-0.99	-0.51	-0.86	0.40	0.28	-1.57
主音音色表現	1.45	0.85	1.60	0.75	1.67	1.82	2.42
整體音質和諧表現	0.69	-0.26	1.73	0.81	1.45	1.32	2.17
整體聲壓大小表現	-0.36	-0.28	-0.28	-0.28	-0.26	-0.36	-0.28

表 4.2.10 主觀聽覺量化評分表(原始數據：取小數點後 2 位)

主觀聽覺量化項目	E1	E2	E3	E4	E5	E6	原始訊號
低頻響度聽覺平衡度	2.12	-1.26	2.33	1.23	1.00	-0.25	1.01
中低頻響度聽覺平衡度	0.01	4.45	0.56	0.26	0.47	1.13	2.81
中高頻響度聽覺平衡度	-0.79	-0.63	0.18	3.19	2.96	0.25	-0.24
高頻響度聽覺平衡度	-1.12	-4.20	-2.11	-2.19	-0.97	-0.16	-4.21
尖銳度表現	-1.55	-1.58	-1.36	-0.36	0.28	-0.45	-1.53
主音音色表現	-19.03	-20.30	-18.75	-22.36	-21.13	-16.67	-15.16
整體音調和諧度	48.03	43.73	48.86	47.89	50.99	49.63	49.90
整體聲壓大小表現	73.19	73.88	73.58	73.75	73.60	72.47	73.49

表 4.2.11 主觀聽覺量化評分表(標準化數據：取小數點後 2 位)

主觀聽覺量化項目	E1	E2	E3	E4	E5	E6	原始訊號
低頻響度聽覺平衡度	-0.36	-0.48	-0.36	-0.39	-0.40	-0.44	-0.40
中低頻響度聽覺平衡度	-0.44	-0.28	-0.42	-0.43	-0.42	-0.40	-0.34
中高頻響度聽覺平衡度	-0.46	-0.46	-0.43	-0.33	-0.34	-0.43	-0.44
高頻響度聽覺平衡度	-0.47	-0.58	-0.51	-0.51	-0.47	-0.44	-0.58
尖銳度表現	-0.49	-0.49	-0.48	-0.45	-0.43	-0.45	-0.49
主音音色表現	-1.08	-1.13	-1.07	-1.20	-1.15	-1.00	-0.95
整體音調和諧度	1.20	1.05	1.22	1.19	1.30	1.25	1.26
整體聲壓大小表現	0.19	0.88	0.58	0.75	0.60	-0.53	0.49

表 4.2.12 為相關分析數據表

主觀聽測評分項目	主觀聽覺量化項目	R	R 平方	P 值
低頻響度聽覺程度	低頻響度聽覺平衡度	0.921939	0.849972	0.003134
中低頻響度聽覺程度	中低頻響度聽覺平衡度	0.867054	0.751783	0.011508
中高頻響度聽覺程度	中高頻響度聽覺平衡度	0.786702	0.618901	0.035843
高頻響度聽覺程度	高頻響度聽覺平衡度	0.843889	0.712149	0.016971
尖銳度表現	尖銳度表現	0.799449	0.639119	0.030952
主音音色表現	主音音色表現	0.8483	0.719613	0.015837
整體音質和諧表現	整體音調和諧度	0.866939	0.751583	0.011532
整體聲壓大小表現	整體聲壓大小表現	0.838184	0.702552	0.018505

表 4.2.13 為變數項目對照表

項目	變數名稱
低頻響度聽覺程度	x_1
中低頻響度聽覺程度	x_2
中高頻響度聽覺程度	x_3
高頻響度聽覺程度	x_4
尖銳度表現	x_5
主音音色表現	x_6
整體音調和諧度	x_7
整體聲壓大小表現	x_8
主觀聽覺喜好分數	\hat{y}

表 4.2.14 數據資料表

編號	變數項目								
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	\hat{y}
1	5.164	-1.7338	-4.5368	-1.6131	-3.8688	-25.1312	37.2078	73.2247	34.5145
2	2.1943	4.0836	-4.355	-4.8469	-3.5809	-24.9514	35.3821	74.0592	33.6942
3	5.6145	-1.05	-3.6651	-2.6716	-3.7018	-23.1919	38.3942	73.677	45.9027
4	5.0932	-1.7794	-1.8219	-3.0717	-3.34	-26.3767	38.3702	73.5598	37.9377
5	4.6532	-0.64369	-1.1743	-1.5045	-2.1016	-24.1722	42.8717	73.621	46.861
6	4.3507	1.6282	-3.4861	-4.6217	-3.5187	-17.0088	40.4482	73.562	61.2495
7	2.6481	-0.38575	-3.335	-0.71901	-2.6449	-21.972	40.9987	71.6728	38.192
8	3.6047	-1.4793	3.3329	3.066	1.3261	-16.3923	58.4875	73.6282	68.7114
9	0.35948	4.5916	3.4655	-1.3442	1.177	-15.0535	55.4316	74.0686	46.06
10	3.7251	-0.94724	4.7531	1.5212	1.4886	-16.9172	59.6972	73.9018	76.3129
11	2.3038	-2.1114	6.7481	0.49474	1.4654	-20.3035	56.3273	73.8842	65.71
12	1.1087	-1.5289	7.1799	2.0888	2.6896	-19.758	59.8669	73.7674	67.2951
13	2.5427	1.988	5.0709	-0.76723	1.8368	-10.5449	63.8539	73.8636	85.2473
14	0.26959	-0.22177	4.6045	4.0981	2.6206	-12.8228	58.9257	73.0021	64.9179
15	-7.9852	3.1668	-0.13759	-3.6223	-1.6115	-22.7581	45.0424	71.7224	35.9099
16	-8.8463	4.0765	-4.1172	-8.1484	-4.692	-32.0319	30.9302	72.0715	22.0462
17	-7.9995	3.514	0.64787	-4.5519	-1.5551	-23.8362	45.0996	72.2193	47.4973
18	-8.2807	2.6935	3.7581	-4.5569	-0.62296	-28.5821	44.1783	72.5093	45.9241
19	-8.3603	3.1183	3.0388	-3.8377	-0.33125	-26.0615	46.3853	72.4398	54.4568
20	-8.8402	3.4776	-2.2194	-7.2904	-3.6354	-24.3059	38.1937	71.6111	62.1148
21	-8.7661	3.2336	0.25523	-4.0223	-1.588	-22.4116	44.336	71.8935	44.0366
22	6.4484	-3.0245	-1.7503	2.1334	-1.402	-19.7328	56.2007	73.8025	66.3244
23	4.181	2.9869	-0.31213	-0.86057	-0.47517	-17.6118	54.398	74.0813	34.6408
24	6.9234	-2.4873	-0.84715	1.0142	-1.2354	-17.468	57.5737	74.1304	65.9169
25	6.0296	-3.166	0.93403	0.2239	-1.0722	-20.4698	55.0082	73.8937	60.3712
26	5.0309	-2.4919	2.1101	2.3114	0.59973	-21.0064	58.9184	73.7208	61.9178
27	6.2305	0.20726	0.077582	-0.93336	-0.57235	-11.9215	62.012	73.9338	52.8411
28	3.4576	-1.6326	-0.1985	4.7349	0.62781	-15.9872	57.5812	72.3755	61.9137
29	5.0366	-0.57057	-2.76	-2.4143	-2.8685	-15.6532	53.02	73.5361	65.8134
30	1.3966	5.248	-2.8362	-5.358	-2.725	-16.5464	48.181	74.1909	40.4683
31	5.4068	0.094579	-1.8588	-3.0656	-2.5786	-15.0485	54.1073	73.9504	73.0098

32	4.8922	-0.69716	0.17298	-3.6273	-2.2251	-18.6097	51.6966	73.7978	65.988
33	4.3616	0.51748	1.1638	-1.7572	-0.60961	-17.6294	56.2299	73.8314	74.0929
34	3.8605	2.934	-1.7245	-4.7153	-2.1986	-10.8389	57.3466	73.7898	90.967
35	2.214	1.0924	-1.227	-0.52645	-1.1405	-14.1645	55.0619	72.2585	85.295
36	4.4226	-2.0751	-3.3554	-2.0153	-3.2439	-16.507	39.513	73.3673	78.3808
37	3.2188	3.7639	-2.2069	-3.9617	-2.2317	-15.6923	39.098	74.0581	74.3734
38	4.8577	-1.5173	-2.3856	-2.7554	-2.9455	-14.6277	40.9234	73.8149	92.5882
39	4.199	-2.0177	-0.33035	-3.656	-2.7338	-19.5008	40.2289	73.6789	80.2304
40	4.0283	-1.11	0.57178	-1.6401	-1.1085	-17.0671	45.4025	73.7822	84.7421
41	4.0846	0.99609	-1.9484	-4.2288	-2.3446	-11.5053	44.4166	73.6368	93.8722
42	2.202	-0.78241	-1.8054	0.032524	-1.5333	-16.0925	43.6772	72.1874	85.6342
43	2.9935	4.1993	2.2616	-1.5859	0.46984	-19.8943	49.8912	74.413	13.3
44	-2.4269	7.1626	-1.415	-6.6402	-2.1263	-23.0327	41.1236	74.7954	7.522
45	2.7597	4.6355	3.1291	-2.898	0.50201	-21.8164	49.3989	74.6363	12.78956
46	1.9637	3.457	6.1163	-3.074	1.2726	-23.8733	48.1923	74.4911	16.69305
47	0.67919	4.1246	5.9338	-2.0618	1.9376	-23.5282	50.0623	74.4524	27.1436
48	-0.21402	6.23	1.2749	-5.522	-0.79628	-20.3692	46.7327	74.603	10.8028
49	-0.67599	4.9189	2.6493	-1.9137	0.74755	-15.6082	50.1268	74.0323	33.5131

表 4.2.15 各自變數的顯著性表

	係數	標準誤差	T 統計	P 值
截距	351.4917	314.0173	1.119339	0.269672
X ₁	-1.73899	1.08029	-1.60975	0.115318
X ₂	-11.4937	3.11831	-3.68589	0.000676
X ₃	-5.33523	5.474962	-0.97448	0.335676
X ₄	-9.30893	4.74634	-1.96128	0.056833
X ₅	15.7732	13.18897	1.195939	0.238762
X ₆	3.828007	0.624309	6.131594	3.09E-07
X ₇	-0.31431	0.378595	-0.8302	0.411351
X ₈	-2.59975	4.360001	-0.59627	0.554353

備註：(1). T 統計為係數/標準誤

表 4.3.1 聲音品質聽覺喜好綜合評分表

項目	曲目	E1	E2	E3	E4	E5	E6	原始音訊
主觀聽測	小編制古典樂	35.91	22.05	47.50	45.92	54.46	44.04	62.11
	大編制古典樂	13.30	7.52	12.79	16.69	27.14	33.51	10.80
	輕搖滾樂	65.81	40.47	73.01	65.99	74.09	85.30	90.97
	重金屬樂	68.71	46.06	76.31	65.71	67.30	64.92	85.25
	鼓擊樂	34.51	33.69	45.90	37.94	46.86	38.19	61.25
	靈魂流行樂	78.38	74.37	92.59	80.23	84.74	85.63	93.87
	重節拍舞曲	66.32	34.64	65.92	60.37	61.92	61.91	52.84
	平均分數	51.85	36.97	59.15	53.26	59.50	59.07	65.30
預估模型	小編制古典樂	50.27973	24.12519	46.22884	35.67282	41.80876	53.97009	58.03888
	大編制古典樂	46.752	28.7349	44.9571	42.5052	38.9202	45.5716	41.8351
	輕搖滾樂	73.48483	39.41077	71.91964	69.40197	61.39008	69.16015	78.12018
	重金屬樂	64.27111	43.07421	64.21366	66.75258	65.58162	80.81785	74.79988
	鼓擊樂	42.3725	13.4411	47.4415	44.4498	40.5162	50.7613	62.2668
	靈魂流行樂	86.8015	51.1934	91.6442	81.2156	80.5577	78.7998	96.2784
	重節拍舞曲	57.33518	34.9631	65.94778	65.66286	57.48282	63.67255	80.18535
	平均分數	60.19	33.56	61.76	57.95	55.18	63.25	70.22

第五章 總結

5.1 結論

以心理聲學理論來探討人耳的聽覺感受已發展多年，並廣泛地運用於振動噪音的量測領域。從 Fastl 等人將其擴展應用於判別人耳對聲音的喜好習性之後，便有為數眾多的學者致力於探討聲音的補償及音樂方面的評估研究。因此，本文以心理聲學為理論根基，結合數位信號處理，將心理聲學參數加以推導並對應至主觀聽測項目進而獲得主觀聽覺量化數據，以此作為聲音品質評估的依據，並解釋、分析人耳對聲音的品質聽覺感受，及喜好取向。

對於本文的重要研究結果及貢獻，茲整理如下：

1. 以往電聲產品的檢測是以客觀的量測值來表示它在聲學特性上的設計是否達到預期的品質，而與其不同的是，本文的研究方法是以心理聲學的理論，將人耳的主觀聽感數據量化，為聲音品質主觀評價工作提供可靠的主觀量化數據。
2. 由於人耳在每一個臨界頻帶上亦有不一樣的音高判別及區分能力，且音高越高時，人耳對於音高的區別能力會變小，導致聽覺上對於音色和諧的聽感會較不敏銳，因此在粗糙度的分析上，本文修

正 Vassilakis 的方法，將人耳的 24 個聽覺頻帶納入，如圖 2.5.2 及表 2.5.1 所示，以獲得更接近人耳的音色和諧度的評估方法。

3. 對於噪音的主觀聽感測試，心理聲學提供了良好的聽感指標，但在分析音樂品質的應用上，為了能使聽測者能明白地表達音樂的聽感，並確實的評量音樂的聲音品質，本文以心理聲學的響度、尖銳度、粗糙度及音調和諧度等參數衍伸出符合人耳的各聲音頻帶平衡感及音樂的音質聽感等項目來分析、建立人耳的主觀聽感與主觀量化數據之間的對應關係。
4. 在實例驗證研究方面，相關分析的結果顯示，本文的主觀聽覺量化可反映出人耳的聽覺感受量。除此之外，本文的另一重點在於探討人的聽覺喜好度，並根據線性迴歸分析的結果顯示，此預估模型可充分表現出某受測群的聽覺喜好方數。就整體性的評估而言，此聲音品質評估模型是值得信賴的。
5. 在比較耳機的聲音品質表現方面，如圖 4.3.2 至圖 4.3.4 所示，分別例舉 E3 與 E2 此兩支耳機的比響度、尖銳度及聽覺粗糙度的比較圖。從聽測結果可得知該受測群的聽覺喜好標準，便可藉此來評斷比響度、尖銳度及聽覺粗糙度等數據結果的好與壞，為耳機的設計提供良好的指標。
6. 本文的聲音品質分析模型是藉由數位信號來評估各種聲音的品質，

因此，只要藉由信號擷取的方式將任何型式的揚聲器、麥克風及音訊產品的聲音特徵錄製下來，即可使用此模型來分析及評斷其聲音的品質。

7. 對此聲音品質分析模型，不只可探討某特定喜好的主觀聽測項目，也可用於解釋、預測及分析的工具，分析客戶喜好的模式，並建立與客戶間的溝通橋樑。在產品設計方面，亦可運用在開發階段時之設計目標，更能對於音訊產品的品質發展，掌握明確的聲音品質方向。

除此之外，對於探討個體的聽覺喜好度，由於人與人之間的主觀喜好度變異甚高，例如同一首音樂，某甲給 90 分，某乙卻只給 20 分，在此情況下，由於迴歸樣本資料過於發散，會導致線性迴歸模型所預估的結果殘差值提高，而影響此模型的能力預估。因此，針對此類的統計問題，現有的線性迴歸模式可能無法得到符合此情況的最佳解答，此即須仰賴新的求解方法，而這方面已有許多學者發展出各種不同的迴歸模式，如模糊理論、類神經網路等非線性數值模型來解決迴歸樣本過於發散的情況，因此，對於此研究問題，值得未來再深入研究，亦是本文未來的研究方向及方法改進之處。

5.2 其他發展及應用

在其他的聲學應用方面，如醫學上的心臟聽音科學，可由聽音來診斷心臟跳動節奏，或音色聽感來判斷、分析心臟各方面的疾病。而相較於 X 光分析儀、超音波掃描診斷等昂貴儀器，由於聽音診斷成本低廉，因此，可應用於遠距醫療，為患者即時提供更好的醫療品質，為人類的健康與生命提供更完善的健診服務。此外，聽音醫學也可運用於醫學的教育上，使年輕的醫師更能以心臟聽音來掌握患者的病況。對此之運用，可為聲學與醫學領域的一大預期貢獻及創新。



參考文獻

- [1] E. Zwicker and H. Fastl, “Psychoacoustics — Facts and Models”,
2nd Updated Ed., Springer Verlag, Berlin, (1999).
- [2] Stevens S.S., “On the psychophysical law”, *Psychol. Rev.*, Vol. 64,
Issue 3, 153-181, (1957).
- [3] Appell J.-E., "Loudness models for rehabilitative audiology,"
BIS-Verlag, Oldenburg, (2002).
- [4] J. Timoney, T. Lysaght, M. Schoenwiesner., “Implementing
Loudness Models in Matlab,”, *DAFx'04*, pp. 177-180, Naples, (Italy,
2004).
- [5] B. Moore, B. Blasberg, T. Baer, “A model for the prediction of
thresholds, loudness and partial loudness”, *J. Audio Eng. Soc.*, Vol.
45, pp. 224-240, (1997).
- [6] P.H.W. Leong, Y.S. Moon, W.K. Sim ,“Sound Quality
Measurements in Headphones”, *AES the 106th Convention*, Munich,
(1999).
- [7] T.Hirahara, “Physical characteristics of headphones used in
psychophysical experiments”, *Acoust. Sci. & Tech.*, 25, 4 (2004).
- [8] K. Kallinen and N. Ravaja, “Comparing Speakers Versus
Headphones in Listening to News from a Computer – Individual
Differences and Psychophysiological Responses”, *Computers in
Human Behavior*, Vol. 23, Issue 1, pp. 303 – 317, (2007).
- [9] H. Y. Sung, J. Kim and S. Jang, “A Method for Objective Sound
Quality Evaluation of Headphones”, *AES 32nd International*

- Conference, Hillerød, Denmark*, pp. 83 - 87, (2007).
- [10] T. Voinle and B. Françoise “Transfer Function and Subjective Quality of Headphones: Part 1, Transfer Function Measurements,” *11th International AES Conference, Audio Test & Measurement, Portland, Oregon*, pp 248 - 253, (1992).
- [11] H. Fastl, "Psychoacoustics and Sound Quality", *Communication Acoustics, Blauert, J. (ed.)*, Springer, (2005).
- [12] H. Fastl, “Comparison of DT48, TDH49 and TDH39 earphones”, *J.Acoust. Soc. Am.*, 66, 702–703 (1979).
- [13] H. Fastl, “The Psychoacoustics of Sound-Quality Evaluation”, *Acustica*, Vol. 83, No. 5, (1997).
- [14] J. J. Chatterley, “Sound Quality Analysis of Sewing Machines”, Master of Science Thesis, Brigham Young University, *Department of Mechanical Engineering, Provo, UT, USA*, (2005).
- [15] S.K.Lee, T.G. Kim and U. Lee, “Sound Quality Evaluation Based on Artificial Neural Network”, *Lecture Notes in Computer Science*, 4221, pp. 545-554, Springer Verlag, Berlin, (2006).
- [16] J.W.Cooley, P.A.W.Lewis and P.D. Welch, “The Fast Fourier Transform and Its Applications”, *IEEE Transactions on Education*, VOL. 12, NO. 1, (1969).
- [17] J. W. Cooley and J. W. Tukey, “An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series”, *Math. Computer* 19:297-301, (1965).
- [18] J.W.Cooley, P.A.W.Lewis and P.D. Welch, “Historical Notes on the Fast Fourier Transform”, *IEEE Rransactions Audio Electroacoustic*,

- Vol. AU-15, pp.76-79, (1967).
- [19] Fechner G.T. , “Elemente der Psychophysik”, *Leipzig: Breitkopf and Hartel.*, (1860).
- [20] Zwicker E., Fastl H., Widmann U., Kurakata K, Kuwano S. and Namba S., “Program for calculating loudness according to DIN45631 (ISO 532B)” , *J. Acoust. Soc. Jpn.* (E)12, 1 (1991).
- [21] W. Klippel, “Assessing the Subjectively Perceived Loudspeaker Quality on Basis of Objective Parameters”, in *AES the 88th Convention*, (1990).
- [22] R.M. Aarts., ”Calculation of the loudness of loudspeakers during listening tests.”, *J. Audio Eng. Soc.*, 39(1/2):27-38 (1991).
- [23] Zwicker E., E. Terhardt, “Analytical expressions for critical-band rate and critical bandwidth as a function of frequency.”, *J. of Acoust. Soc. of Am.*, (1980).
- [24] Zwicker E.,”Masking and Psychological excitation as consequences of the ear’s frequency analysis”, *Frequency Analysis and Periodicity Detection in Hearing. Leiden: Sijthoff*, 376-396, (1970).
- [25] Nordmark J.O., ”Mechanisms of frequency discrimination”, *J. of Acoust. Soc. of Am.*, 44, 1533-1540, (1968).
- [26] Plomp R., “The ear as a frequency analyzer”, *J. of Acoust. Soc. of Am.*, 36, 1628-1636, (1964).
- [27] Chatterjee M. and Zwislocki J.J., "Cochlear Mechanisms of Frequency and Intensity Coding. I The Place Code for Pitch", *Hear Research*, 111, 65-75, (1997).
- [28] Chatterjee M. and Zwislocki J.J., "Cochlear Mechanisms of

- Frequency and Intensity Coding. II. Dynamic range and the code for loudness", *Hear Research*, 124, 170-181, (1998).
- [29] Schouten J.F., "The Perception of Subjective tones", *K Akademie van Wetenschappen, Amsterdam. Afdeling Natuurkunde (Proceedings)*, 41, 1086-1093, (1938).
- [30] Schouten J.F., "The Residue Revisited", *Frequency Analysis and Periodicity Detection in Hearing. Leiden: Sijthoff*, 41-58, (1970).
- [31] Warren R.M., "Auditory Perception: An Analysis and Synthesis", *The third Edition, Cambridge University Press*, (1999).
- [32] Plomp R., "Pitch of Complex Tones", *J. of Acoust. Soc. of Am., Vol. 41, 6*, 1526-1533, (1967).
- [33] Shepard R.N., "Circularity in Judgments of Relative Pitch", *J. of Acoust. Soc. of Am.*, 35, 2346-2353, (1929).
- [34] WIKIPEDIA, http://en.wikipedia.org/wiki/Copying_Beethoven
- [35] WIKIPEDIA, <http://en.wikipedia.org/wiki/Pythagoras>
- [36] Helmholtz G.L.F., "On the Sensations of Tones as a Physiological Basis for the Theory of Music", *2nd English edition*, New York : Dover, (1885)
- [37] Plomp R. and Levelt W.J.M., "Tonal Consonance and Critical Bandwidth", *J. of Acoust. Soc. of Am.*, 38, 548-560, (1965).
- [38] Roberts, L.A., & Mathews, M.V., "Intonation sensitivity for traditional and nontraditional chords", *J. of Acoust. Soc. of Am.*, Vol. 75, pp. 952-959, (1984).
- [39] Daniel P., Stephen M., Suzanne W. and Joshua F., "Perception of Musical Tension for Nontonal Orchestral Timbres and its Relation

- to Psychoacoustic Roughness”, *Perception & Psychophysics*, 62 (1), 66-80, (2000).
- [40] Vassilakis P.N., “Auditory Roughness as a Means of Musical Expression”, *Select Reports in Ethnomusicology Perspectives in Systematic Musicology*, Vol. 12, (2005).
- [41] Vassilakis P.N., “SRA: A Web-based Research Tool for Spectral and Roughness Analysis of Sound Signals”, *Proceedings SMC'07, 4th Sound and Music Computing Conference*, 11-13, (2007).
- [42] Terhardt, E. "On the perception of periodic sound fluctuations (roughness)," *Acustica*, 30(4): 201-213. (1974).
- [43] 陳耀茂，“多變量分析導論”，全威圖書出版，91年1月。
- [44] 林惠玲、陳正倉，”基礎統計學-觀念與應用”，雙葉書廊出版，93年9月。
- [45] 謝坤龍，”台灣公債殖利率預測模型之建構-調適性網路模糊推論系統與灰預測之應用”，東吳大學經濟系碩士論文，95年6月。
- [46] Sethares W.A., "Local Consonance and the Relationship between Timbre and Scale", *J. of Acoust. Soc. of Am.* 94 (3), Pt. 1, (1993).
- [47] Jedi, <http://jedi.org/blog/archives/004936.html>
- [48] 音燈光音響網, http://emusicman.myweb.hinet.net/record_09.html