

語音聲學

說話聲音的科學

國立高雄師範大學聽力學與語言治療研究所 曾進興 教授 推薦

作者 鄭靜宜



心理出版社

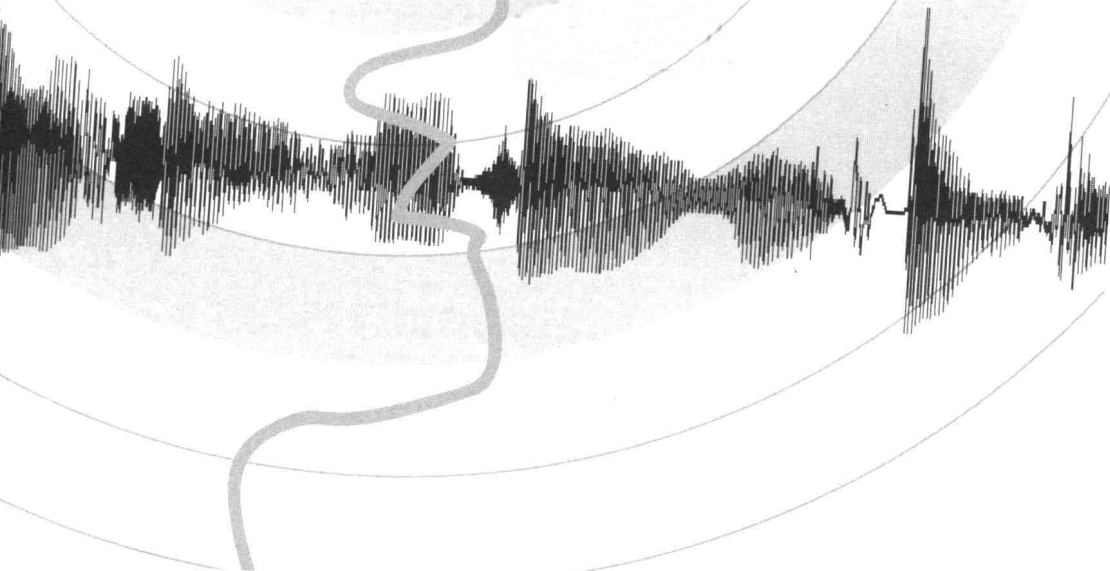
作者圖

University of Toronto
Communication Disorders Program

語音聲學

說話聲音的科學

鄭靜宜著



國家圖書館出版品預行編目 (CIP) 資料

語音聲學——說話聲音的科學／鄭靜宜著.--初版--

臺北市：心理，2011.03

面；公分.--（溝通障礙系列；65022）

ISBN 978-986-191-406-0（平裝）

1.語音學 2.聲韻學

801.3

99024674

溝通障礙系列 65022

語音聲學——說話聲音的科學

作 者：鄭靜宜

執行編輯：李 晶

總 編 輯：林敬堯

發 行 人：洪有義

出 版 者：心理出版社股份有限公司

地 址：台北市大安區和平東路一段 180 號 7 樓

電 話：(02) 23671490

傳 真：(02) 23671457

郵撥帳號：19293172 心理出版社股份有限公司

網 址：<http://www.psy.com.tw>

電子信箱：psychoco@ms15.hinet.net

駐美代表：Lisa Wu (Tel: 973 546-5845)

排 版 者：龍虎電腦排版股份有限公司

印 刷 者：正恒實業有限公司

初版一刷：2011 年 3 月

I S B N：978-986-191-406-0

定 價：新台幣 500 元

■有著作權・侵害必究■

作者簡介

◎ 鄭靜宜 ◎

- 學歷** | 美國威斯康辛大學麥迪遜校區溝通障礙學博士
(University of Wisconsin-Madison, Department of
Communicative Disorders, Ph.D.)
- 現職** | 國立高雄師範大學聽力學與語言治療研究所副教授
- 經歷** | 國立台南大學特殊教育系副教授
國立台北護理學院聽語障礙科學所兼任教授

推薦序

好多年前，當我還在英語系念大二時，我開始接觸語音學。那時，我讀了 Peter Ladefoged (1975) 的 *A Course in Phonetics*，其中有一章 Acoustic Phonetics，是我最早接觸到頻譜圖等語音聲學的概念。那時，讀這方面的材料有很大的困難，主要原因是我的周圍沒有人有聲紋分析儀，也沒有人懂得夠多來幫我排難解惑，所以看著書裡的頻譜圖就只能憑想像「紙上談兵」了。

後來進了台大念心理研究所，黃榮村老師剛從美國麻省理工學院進修回來，那裡也買了一台 KAY 的聲紋分析儀。我趁勢央求他幫我開一門「語音聲學」，記得他也答應了；只不過或許只有我一個學生，大概只上了一次課，就停開了。更要命的是，黃老師在那僅有的一節課裡，好像都在演算數學，黑板上寫滿了微分方程式，讓我這個數學很差的學生不知所云。既然課沒了，聲紋分析儀也沒去碰了。

到了威斯康辛大學念博士時，第二年幫老師做資料分析，就開始有機會操作 KAY 的聲紋分析儀。更好的是，我們有大師 Ray Kent 為我們開語音聲學，因此就有了比較扎實的訓練。當然，這門課談到許多物理學的知識，缺乏數理背景的我，念起來還是感到有些吃力。幸好，我有實作的機會，經常在 Ray Kent 的實驗室把預先錄好的錄音帶輸入儀器裡，然後用碳紙「燒出」聲紋圖來；燒的時候，味道嗆鼻，必須戴著口罩才能忍受，而且做一張圖，大概也要好幾分鐘，十分費事。

我們那一屆的博士班學生算是滿幸運的，因為所裡開的言語科學系列，除了語音聲學外，還有語音知覺以及言語發聲等兩門課。若把碩士班的 Motor Speech Disorders 加起來，我們的言語科學訓練應該是相當堅強的。但必須知道，如果沒有語音聲學做基礎，這些科目的學習效果都會大打折扣的。雖然我自己的興趣偏向於語言心理學，但感謝語音聲學的訓練，讓我後來的學術研究有了更多的機會做別人做不到的事。

到了我博士班的最後兩年，我們實驗室的論文也和聲學分析有關，後來和指導教授聯名發表了一篇論文，討論 *apraxia of speech* 和 *conduction aphasia* 等患者說話的計時控制。那時，我也用 Ray Kent 實驗室裡一台萃取機頻的儀器（PM Pitch Analyzer）分析中文的句調如何受字調的影響，這篇文章後來發表在中正大學的學報裡。

1990 年我博士班畢業後，回到中正大學服務，幸運的接收了一台學校新購的 KAY 的聲紋分析儀，我已經忘了型號，但肯定的是，那台機器的製圖機已經不必燒碳了。不過機器仍是獨立的裝置，不能和電腦相連，而且機器又笨重又昂貴，大約要價 80 萬台幣。這台機器的使用者除了我之外，還有我的第一位碩士班學生曹峰銘（目前在台大心理系任教），相信他還記得這個經驗。不過，我所建立的語音實驗室其實設置了好幾套語音分析工作站，都是當時國外採購的語音分析軟體和個人電腦的結合，其中使用率最高的是威斯康辛大學電機系教授 Milenkovic 所寫的 CSpeech（即現在的 TF32 的始祖），我的第二、三位碩士生黃國祐（現任中山醫大語聽系助理教授）、鄭靜宜（本書作者）無不精於操作這套系統。當時，一套這樣的系統要有這些配備：外接的濾波器、插在電腦主機裡的 A-to-D Card、音響器材、PC，整套設施至少要 20 萬台幣。機器固然昂貴，但是訓練人才更不容易，所幸前面這三位高足都能從語音聲學的訓練中得益。

1994 年我轉任高雄師大特殊教育系，很幸運的是，當時系裡也新買了一套 KAY 最新版的聲紋分析儀，也就是進入電腦時代的聲學分析儀器，除了有一台體積不算太大的硬體外，其餘的工作都在電腦上進行。這個時代，同我一起和「機器」奮戰的又多了一位生力軍——特教系第一屆碩士班學生劉惠美（現任台灣師大特教系副教授），她和當時我的助理曹峰銘每天都在語音實驗室中「分析聲音」，最後竟然譜出戀曲來，這應該是語音聲學為他們所結出的緣分吧。這個實驗室的過客還包括：黃國祐、王文容（目前是紐約市立大學聽語系博士候選人）、張秀雯（目前是陽明大學醫工所博士候選人）、吳淑華、徐靜音。

2000年我們的聽語所成立，配備也升級了，拜陳小娟教授之賜，我們又有更新的聲紋分析儀，在使用上更方便。不過時代的巨輪從未停止運轉，語音聲學的教育日益普及，不只是本系的學生願意來修課，就是英語系、台語所、華語所的學生都開始加入語音聲學的行列，或旁聽或選課，像英語系博士班陳雪珠（目前已是大學老師）、賴怡秀（高雄大學英語系助理教授）就是兩個例子。更重要的是，網路時代已經把「貴族化」的語音聲學「平民化」了。我要說的就是：**Praat**的誕生已經宣告語音聲學的教學跨入嶄新的一頁，因為它是免費的軟體，又無需額外的配備，再加上目前各種數位器材的普及，任何一個窮學生都可以在家裡研究語音的聲學特性了。不過，儀器只是資料蒐集的工具，究竟資料的意義何在，仍有賴理論的解釋，因此，深厚的理論基礎仍然不可或缺。

長久以來，語音聲學的參考書籍都以英文為主，中文的著作難覓。現在，鄭靜宜教授肯在公餘之暇寫出這本佳作來，令人欣喜。我在四年前生了一場病之後，就把語音聲學的課交棒給鄭老師了，原因是我的知識和技術已經落伍了，以鄭老師的積極勤勉，才能寫出這麼一本嘉惠於中文讀者的書來。讀者可以發現，這本書深入淺出，觀念的解釋又很清楚，若配合 **Praat** 的實作練習，相信未來中文語音的聲學探究必能更上一層樓，且讓我們拭目以待。

曾進興

2011年

自序

這本書一共包括十八章，由聲學的基礎知識開始，之後介紹語音的數位化，中間的章節則是對於各類子音、母音的語音產生原理以及這些語音的聲學特性做一些介紹，之後幾章是屬於應用部分，如臨床的應用、嗓音分析和語音的合成，最後兩章討論有關語音知覺和產生的議題。由於西文的語音聲學書籍一向多以英語語音為主，本書試圖擺脫這樣的偏頗，希望盡量加入一些本土語言語音的聲學特性資料，然而，因為本土語言方面的研究本就不多，只能以一些筆者之前所做的相關研究和一些博、碩士論文資料供作參考。希望以後本土語言語音的研究能陸續出來，日後就會有較多的題材可資運用。

記得當初和語音聲學結下「不解之緣」，要回溯到十幾年前念碩士班時，一次在曾進興老師的語音實驗室（中正大學心理研究所），他興致高昂地用麥金塔電腦秀了用視覺來觀賞語音的「魔術」，當時看到螢幕上出現的縱橫錯雜的頻譜圖只覺得很新奇，還很天真地說：「哇！原來語音的樣子就像是一條條的毛毛蟲。」之後就一直待在那個實驗室做語音分析的工作，切著那似乎永遠也分析不完的聲音。有時遇到週末假日，想到有些同學都不知道到哪裡去快活了，自己竟還待在那個空無一人的「鬼音實驗室」切音，甚至不免開始自怨自艾，惋惜自己的青春隨著那些螢幕上川流的聲譜圖漸漸地流逝。

回首來時路，沒想到從那時一頭栽進這個領域至今也有十七、八年的光景，碩士班畢業之後就出國念書，當時覺得自己也沒有什麼一技之長，若要勉強說有的話只有語音分析這項，於是自己跑去向後來的指導教授 Gary Weismer 毛遂自薦，問他的實驗室是否需要一位「刻苦耐勞」（diligent）的語音分析工人（worker），沒想到他居然錄用了我，一開始計時領薪（part-time），之後由兼時轉為兼任助理，就這樣待在威斯康辛大學 Waisman Center 的語音實驗室中，又做了好幾年的語音分析工

作，直到我博士畢業回國。記得當時「哀怨」已不復存在，只剩下感激與認命，慶幸自己還有那麼一點「一技之長」。

所謂「百聞不如一見」，對我而言，語音聲學即是如此的一門學問，對於聲音的感受總覺得較為主觀，一縱即逝、較不真確，若將聲音視覺化的呈現就簡單許多，聲波可以任我用各種方式加以分析檢視，甚至可用再合成加以改變。聲學分析讓我的所見（視覺）和所聞（聽覺）得以交會，對於語音信號的感知得到雙重的認證，是一種實實在在的感覺。每當夜闌人靜時，不小心由電腦喇叭重複地傳出那些正在分析的聲音，就會被我女兒抗議：「媽媽，你又在放那些聲音了，很吵耶！」不知曾幾何時，語音分析已經如同吃飯、睡覺，成為我生活中的一部分了，電腦中永遠有一堆分析不完的音檔等著我。

語音聲學對於一般人其實是相當陌生的學科，希望本書的出版能帶給大家一些探索語音的樂趣，去發掘那些隱藏在那一條條毛毛蟲之中的奧秘。這本書的出版要感謝曾進興老師的鼓勵和促成，尤其是當初對我語音聲學知識的啟蒙。另外，也很感謝碩士班的張智婷同學能在忙碌的生活中，抽出時間來為本書做校對工作。還要感謝我那可愛的女兒——睿琪，能體諒她的媽媽沒辦法在週末假日時常帶她出去玩，還需常常忍受那些怪音的干擾。最後要感謝我的雙親給我永遠的支持和鼓勵。

寫了這本書之後，才體會到之前指導教授提到的「做研究難，寫書更難」的道理。這本書由起筆開始，到目前快完稿了，也又過了七、八年的光景。想寫的內容似乎愈來愈多，好像永遠也沒辦法在最後畫上一個句點。當書愈寫愈厚，字數愈來愈多時，發現錯誤似乎也隨之愈來愈多，雖再三修改，仍不免惶恐。在此匆忙付梓之際，疏漏筆誤在所難免，希望各位讀者不吝指正。有關語音聲學的課題也可多多交流溝通與討論，期盼能拋磚引玉，請各位多賜教了。

鄭靜宜

2011年春於高師大

目 錄

CHAPTER 1	聲波	001
CHAPTER 2	聲音信號與系統	029
CHAPTER 3	聲學共振系統的理論模式	041
CHAPTER 4	語音信號的數位處理	057
CHAPTER 5	語音聲學分析科技的演進	081
CHAPTER 6	母音的聲學理論	089
CHAPTER 7	母音的聲學特性	101
CHAPTER 8	塞音的聲學特性	145
CHAPTER 9	摩擦音的聲學特性	171
CHAPTER 10	塞擦音與華語捲舌音的聲學特性	203
CHAPTER 11	鼻音、鼻化母音與邊音等其他語音的聲學特性	229
CHAPTER 12	超音段的聲學特性——聲調和語調	259
CHAPTER 13	超音段的聲學特性——音段時長、言語速度和節律性	289
CHAPTER 14	噪音音質的聲學分析	317
CHAPTER 15	語音聲學的臨床應用	337
CHAPTER 16	語音的合成	361
CHAPTER 17	由語音聲學推論語音的製造	375
CHAPTER 18	當語音知覺遇到語音聲學	385
附錄 1	華語子音表	421
附錄 2	台語子音表	422
附錄 3	音階 (musical note)、半音 (semitone) 和頻率 (Hz) 的對應表	423

表 次

表 1-1	正弦波 $\sin(2\pi ft)$ 和餘弦波 $\cos(2\pi ft)$ 在時間向度上的變化值。.....	006
表 1-2	分貝和音壓比、音強比之間的關係。.....	020
表 5-1	幾個常用的聲學分析工具的比較。.....	088
表 6-1	口道緊縮點與前三共振峰的消長關係。.....	097
表 7-1	Peterson 和 Barney (1952) 以及 Hillenbrand 等人 (1995) 研究各母音三共振峰值與基頻值 (F_0) 比較。.....	111
表 7-2	位於華語單音節詞中母音第一和第二共振峰平均值 (Hz) 與標準差。.....	113
表 7-3	華語的母音第一和第二共振峰平均值 (Hz) 與標準差。 ..	118
表 7-4	Jeng (2000) 研究中單音節詞的母音第一和第二共振峰平均值 (Hz)。	119
表 7-5	台語各母音的平均 F_1 和 F_2 共振峰值 (Hz)。	121
表 7-6	客語各母音的平均 F_1 和 F_2 共振峰值 (Hz)。	122
表 7-7	四種聲調詞首音節的母音平均時長 (ms) 與標準差。 ..	132
表 7-8	CV 音節中四種聲調空韻 /ɿ/ 平均時長 (ms) 和標準差。	132
表 7-9	五種語速下的雙母音和單母音的平均時長 (ms) 與標準差。	137
表 7-10	華語韻母對比的頻譜特徵。.....	138
表 8-1	母音和子音的一些特性比較。.....	146
表 8-2	華語六類塞音於三種語速下的平均靜默時長 (ms)。 ..	149
表 8-3	華語六種塞音於五種語速下的 VOT 時長 (ms)。	153
表 8-4	台語、客語和華語的三部位塞音平均 VOT 時長 (ms)。	155
表 9-1	華語各摩擦音於五種語速下的平均噪音音段時長 (ms)。	183
表 10-1	塞音、摩擦音與塞擦音的聲學頻譜特徵比較。.....	205
表 10-2	華語塞音和塞擦音於三種語速下的平均靜默時長 (ms)。	206
表 10-3	華語各塞擦音於五種語速下的音段時長 (ms)。	207
表 10-4	華語的捲舌音與非捲舌音。.....	214

表 10-5	三位說華語男性的捲舌音與非捲舌音的平均頂峰頻率和截斷頻率 (Hz) 與標準差。	216
表 10-6	三十位男女說話者念讀雙音節詞語時捲舌和非捲舌摩擦音段的四種動差參數平均數 (kHz) 。	220
表 10-7	三十位說話者詞語念讀和問答情境下的摩擦音段的四種動差參數平均數 (kHz) 和標準差。	220
表 10-8	男女說話者念讀詞語時各語音摩擦音段的四個動差值 (kHz) 和時長 (ms) 。	221
表 10-9	不同捲舌程度下 M1、M2、M3 和 M4 的平均數 (kHz) 和標準差。	222
表 10-10	念讀詞語時各韻母音節中摩擦、塞擦語音摩擦音段的第一動差值 (kHz) 。	223
表 11-1	華語五種語速下的鼻音喃喃時長 (ms) 。	237
表 11-2	聲隨韻母的鼻音平均音段時長 (ms) 。	237
表 11-3	台語鼻化母音的第一和第二共振峰值 (Hz) 。	242
表 11-4	母音鼻化和非鼻化母音/a/的平均共振峰值，括弧內為標準差。	246
表 11-5	華語子音對比或是類別的頻譜特徵。	255
表 12-1	Tseng (1990) 測量一位女性念華語單音節母音的基頻 (Hz) 。	267
表 12-2	Howie (1976) 測量一位男性念華語單音節母音的基頻 (Hz) 。	267
表 12-3	各種雙音節聲調連結類型中，第一音節首、末與第二音節首、末的基頻平均值 (Hz) 與標準差。	274
表 12-4	第一音節末尾與第二音節起始基頻的差異值 (Hz) 。 . .	278
表 12-5	第一音節末尾與第二音節起始基頻的差異絕對值 (Hz) 。 . .	278
表 12-6	第一音節聲調與第二音節聲調間的和諧度。	279
表 13-1	各語速下的平均母音時長 (ms) 以及相對於中速的比值。 . .	291
表 13-2	五種語速下各類子音的時長 (ms) 以及相對於中速的時長比值。	296
表 13-3	短文中的音節在五種語速下的平均音節時長 (ms) 和	

	標準差。.....	298
表 14-1	女性歌者和男性歌者發出中音和高音/a/音的頻率擾動參數 和振幅擾動參數。.....	335

圖 次

圖 1-1	一個頻率 100Hz 正弦波波形。	002
圖 1-2	一個含有 500Hz、1000Hz、1500Hz 成分的複雜波之波形。	004
圖 1-3	一個含有 500Hz、1000Hz、1500Hz 成分的複雜波之振幅 頻譜。	005
圖 1-4	$x(t) = 3 \sin(2\pi 60 t + \pi/2)$ 的波形。	007
圖 1-5	一個聲波的波長。	011
圖 1-6	在頻譜中一複雜波的諧波成分。	016
圖 1-7	一個簡單波的「頂振幅」和「頂對頂振幅」。	017
圖 1-8	簡單週期波的波形與相位的關係。	022
圖 1-9	語音「兒童相見不相識」的波形圖（上）和聲譜圖（下）。	024
圖 1-10	鋼琴聲的波形圖（上）和聲譜圖（下）。	025
圖 2-1	白噪音的波形、頻譜圖和頻譜。	031
圖 2-2	脈衝圖示（上）和頻譜（下）。	032
圖 2-3	信號進入系統的轉換輸出歷程。	034
圖 2-4	帶通濾波器轉變功能的頻譜曲線。	036
圖 2-5	高通濾波器、低通濾波器、帶通濾波器和帶拒濾波器的 轉變功能曲線。	037
圖 2-6	口道的濾波作用與母音的共振峰。	039
圖 3-1	駐波現象。	048
圖 3-2	一端封閉管子的共振示意圖。	050
圖 3-3	Hemholtz 共鳴器模型圖示。	052
圖 3-4	雙 Hemholtz 共鳴器模型圖示。	053
圖 3-5	多管式的共鳴模式。	054
圖 4-1	一離散訊號舉例。	058

圖 4-2	連續性類比信號轉換為離散式的數位信號。.....	059
圖 4-3	CSL (KAY) 中頻譜分析的解析度選項。.....	066
圖 4-4	寬頻聲譜圖和窄頻聲譜圖的比較。.....	068
圖 4-5	四種常見的加窗 (windowing) 函數的形狀。.....	070
圖 4-6	母音 /i/ 的聲譜圖、FFT 量能頻譜和 LPC 頻譜的比較。..	072
圖 4-7	有「事先加強」和「無事先加強」的白噪音頻譜比較。..	075
圖 4-8	有「事先加強」和「無事先加強」的 /i/ 音頻譜比較。..	076
圖 4-9	運用 CSL 進行「倒頻譜分析」實例。.....	078
圖 6-1	一位女性笑聲的聲學分析。.....	090
圖 6-2	一位男性發出 /i/、/e/、/ə/ 聲音的波形和聲譜圖。....	091
圖 6-3	聲源濾波理論的示意圖。.....	092
圖 6-4	模擬喉頭三角波之脈衝波形、聲譜圖和頻譜。.....	094
圖 6-5	口道共振的節點和反節點。.....	096
圖 6-6	母音製造時口道的三參數圖示。.....	099
圖 7-1	國際音標 (IPA) 系統中母音的標音符號。.....	102
圖 7-2	華語母音構音位置圖示。.....	104
圖 7-3	華語空韻母音 /ɪ/ 的兩同位音的共振峰。.....	105
圖 7-4	英語和華語各母音的 $F1$ 、 $F2$ 共振峰型態。.....	108
圖 7-5	華語男、女性說話者各母音的平均 $F1$ 、 $F2$ 共振峰值。..	114
圖 7-6	華語母音的 $F1$ 、 $F2$ 空間的母音四邊形。.....	115
圖 7-7	三個共振峰相加之母音共振峰峰度變化。.....	123
圖 7-8	母音聲學空間面積和說話的語音清晰度關係。.....	126
圖 7-9	各母音環境 (音節結構) 和聲調以及五種語速下的母音時長 (ms)。.....	130
圖 7-10	雙母音 /ai/、/ei/、/au/ 的聲譜圖。.....	134
圖 7-11	「白」 (/pai/) 音的聲譜圖和 $F2$ 的走勢。.....	136
圖 8-1	塞音 /p ^h / 的波形、聲譜圖與頻譜。.....	148
圖 8-2	華語句子「他低頭看地上」的波形和聲譜圖。.....	149

圖 8-3	華語送氣塞音和非送氣塞音於中等語速的 VOT 次數分配。	153
圖 8-4	前出聲、有聲與送氣塞音的聲譜圖。	155
圖 8-5	華語六種塞音（送氣／不送氣）爆破頻譜型態比較。	158
圖 8-6	三個構音部位塞音共振峰轉折方向的變化。	160
圖 9-1	在「色彩」、「書包」、「蝦仁」音中摩擦音的頻譜和聲譜圖。	177
圖 9-2	/s/ 和 /f/ 的聲譜圖和頻譜的比較。	179
圖 9-3	華語摩擦音於中等語速的噪音時長次數分配。	184
圖 9-4	統計上四個動差參數的圖示。	187
圖 9-5	摩擦音的頻譜動差分析與頻譜動差曲線。	188
圖 9-6(a)	男性說話者摩擦音 /s/ 的噪音段每隔 10 毫秒的四個動差數值變化。	190
圖 9-6(b)	男性說話者摩擦音 /ɕ/ 的噪音段每隔 10 毫秒的四個動差數值變化。	191
圖 9-7	/s/、/z/ 的聲譜圖和頻譜的比較。	198
圖 10-1	華語於中等語速下送氣塞擦音和不送氣塞擦音噪音時長次數分配。	208
圖 10-2	摩擦音與送氣塞擦音的噪音增強時長比較。	209
圖 10-3	句子語音中摩擦音與塞擦音的噪音增強時長。	210
圖 10-4	男性說話者「小」和「撕」音中噪音段每隔 10 毫秒的四個動差值變化。	211
圖 10-5	女性說話者「錢」音中 /tɕʰ/ 噪音段每隔 10 毫秒的四個動差值變化。	212
圖 10-6	女性說話者「巢」音中 /tɕʰ/ 噪音段每隔 10 毫秒的四個動差值變化。	213
圖 10-7	非捲舌音「絲」和捲舌音「獅」的 FFT 量能頻譜和動差頻譜曲線的比較。	218
圖 10-8	非捲舌音「蘇」和捲舌音「書」的 FFT 量能頻譜和動差	

	頻譜曲線的比較。.....	219
圖 10-9	念詞時各韻母環境中的捲舌音和非捲舌音的平均 M1 (kHz)，橫軸最左邊的一項為空韻韻母 /ɿ/，/ɤ/ 為 央母音。.....	224
圖 10-10	在各後接母音類別下的四種不同捲舌程度的摩擦噪音之 M3、M4 比較。.....	225
圖 11-1	鼻音構音時上呼吸道圖示。.....	230
圖 11-2	鼻音 /m/ 的波形圖和聲譜圖。.....	232
圖 11-3	兩種部位鼻音 (/m, n/) 頻譜的共振峰型態。.....	233
圖 11-4(a)	四個非鼻化母音和鼻化母音的聲譜圖與頻譜比較。.....	244
圖 11-4(b)	四個非鼻化母音和鼻化母音的聲譜圖與頻譜比較。.....	245
圖 11-5	一位女性華語說話者的「慢」音中母音鼻化聲譜圖和 頻譜。.....	247
圖 11-6	英語 /r/ 音的波形圖和聲譜圖。.....	249
圖 11-7	華語 /l/ (ㄌ) 音的波形、聲譜圖和頻譜。.....	251
圖 11-8	一位女性華語說話者的「瑞」音中介音 /u/ 之波形、 聲譜圖和頻譜。.....	254
圖 12-1	華語具有四聲的 /i/ 音節的基頻曲線圖。.....	263
圖 12-2	Chao (1948) 提出的華語四聲聲調的音高型態圖。.....	264
圖 12-3	四種聲調音節後輕聲音節的基頻曲線圖。.....	266
圖 12-4	華語男性 (上圖) 和女性 (下圖) 說話者的單音節四聲調 (經時間正規化) 的基頻走勢。.....	268
圖 12-5	八種聲調連接型態的雙音節詞語的基頻走勢曲線。.....	273
圖 12-6	四種聲調在不同音節順序情況下的起始基頻平均值 (Hz)。.....	275
圖 12-7	在鄰近四種聲調與不同音節情況下的基頻起始值 (Hz)。.....	276
圖 12-8	在鄰近四種聲調與不同音節情況下的音節末尾值 (Hz)。.....	277
圖 12-9	華語直述句和疑問句的基頻曲線比較。.....	281
圖 12-10	華語直述句的基頻曲線。.....	283