

室內聲場模擬之研究(3/3)

Research on room acoustic simulation (3/3)

計畫編號：NSC 88-2211-E-002-001

執行期限：87年8月1日至88年7月31日

計畫主持人：洪宏基 教授

研究助理：蔡志隆 謝炎龍

執行機構：台灣大學土木工程學研究所

1 中文摘要

關鍵字：噪音主動控制、響度、聲音品質

室內聲場模擬之研究的第三年計畫研究主題為考慮響度效應之噪音主動控制。本研究將人所聽的感覺與噪音控制做一適當的結合，嘗試以響度(loudness)作為控制的標的，採用有限脈衝響應的控制方法，來進行室內聲場噪音主動即時控制。參考 60 phon 的等響曲線，建立在時間域上的響度加權函數，利用卷積做聲壓的時間域加權，得時間域的響度加權聲壓，納入主動即時控制運算。採用擬人頭設備進行噪音主動即時控制，擬人頭雙耳收錄的控制結果經由原音重現步驟，進行陪審團主觀評估實驗，藉以比較一般聲壓主動控制與考慮響度效應之主動控制的差異。

2 英文摘要

keywords : active noise control, loudness, sound quality, jury test.

This paper is to report the third-year progress of the project "Research on room acoustic simulation". One of the main studies of the current project is the loudness weighted active noise control (ANC) in a room. By the convolution integral between the sound pressure and the scaling function referred to the 60 phon equal-loudness curve, the loudness weighted pressure was defined. The parameters of FIR control-rule could be calculated from the minimization of the loudness weighted acoustic energy.

The ANC results measured by dummy head were recorded and reproduced to the members of jury test by equalization procedure. By comparing the controlled sound pressure data with subjective evaluation results from jury test, the differences between the sound pressure ANC and the loudness ANC could be found.

3 計畫目的

室內聲場模擬之研究的第三年計畫研究主題為考慮響度效應之噪音主動控制。在以往的噪音控制研究中都是對聲壓做控制[3-8] (詳細的文獻回顧可參見[8,9])，以降低控制點的聲音能量為目標，但是忽略了人的主觀感官是最後評估的標準，因此必須要考慮心理聲學的因素，由於人對低頻聲音較不敏感，在對一多頻的噪音，可以不需要對各頻率成分一視同仁的做控制，對於較低頻的部分以較少的能量給予控制即可，此即本研究主要想探討的主題。本研究將控制目標放在聲音的響度上，探討其噪音控制效果，目前較多人採用 A-Weighting 的方法來考慮穩定且微小擾動噪音的響度效應[1]，本研究亦是採用類似方法作為評估的工具，採用較接近一般實際噪音環境的 60 phon 的曲線當作加權的曲線，進而以此考慮響度效應的聲音來做噪音主動即時控制。

4 研究方法

4.1 噪音主動控制方法

4.1.1 響度在時間域內的求解

本研究中 60 phon 的曲線是以參考文獻[2] 所建議的回歸公式為基礎，將得到的 60 phon 的曲線做尺度調整，將最小的頻率加權值調整為 0，並將加權值等量縮小，使其最大加權值等於 1，這最後的曲線即是在頻率域的加權函數，配合後續的噪音主動控制實驗，頻率範圍取 50Hz~600Hz，如圖 1(a)所示。

考慮時間域內的聲壓訊號 $p(t)$ ，加權函數為 $\log S(\omega)$ ，由卷積定理便可得到在時間域上的響度 $L(t)$ 如下：

$$L(t) = \int_{t_1}^{t_2} s(\tau)p(t-\tau)d\tau \quad (1)$$

其中 $s(t)$ 為時間域的加權函數，如圖 1(b) 所示。

4.1.2 噪音主動控制方法

參考文獻[3-9]，本文採用有限脈衝響應 (Finite Impulse Response, FIR) 理論，配合考慮響度效應的聲場位勢的目標函數，以最小均方根 (Least Mean Square, LMS) 方法求解 FIR 參數。

以矩陣的方式表示如下：

$$\begin{aligned} \mathbf{L}_o(n) &= \bar{\mathbf{h}}\mathbf{a} + \mathbf{d} \\ \bar{\mathbf{h}} &= \mathbf{s}\mathbf{h}_o(n)\mathbf{P}_d \\ \mathbf{d} &= \bar{\mathbf{h}}_{op}(n)\mathbf{f}_p \\ \bar{\mathbf{h}}_{op}(n) &= \mathbf{s}\mathbf{h}_{op}(n) \end{aligned} \quad (2)$$

其中 \mathbf{L}_o 為控制點的響度， \mathbf{P}_d 表示偵測點的聲壓， \mathbf{a} 為控制器脈衝響應函數的參數， \mathbf{h}_{op} 與 \mathbf{h}_o 分別是控制點 o 與聲源 f_p 及控制源 f_s 之間的脈衝響應函數， \mathbf{s} 為加權函數。

本研究採用的目標函數和聲場位勢的形式相似，其表示式如下

$$J_p = \frac{1}{4\rho c^2} \int_V |L_o|^2 dV = \frac{V}{4\rho c^2} J_q \quad (3)$$

$$J_q = \sum_{o=1}^{n_o} \frac{L_o^2}{n_o} \quad (4)$$

上式中 V 為聲場的體積， ρ 為空氣的密度， c 為聲音的速度， J_p 為目標函數， L_o 為第 o 點的響度， n_o 為控制點的總數。

以 LMS 的方法，經由目標函數最小化的推導，可以得到控制器參數計算式表示為

$$\mathbf{a}(n+1) = \mathbf{a}(n) - \frac{2\mu}{N\sigma^2} \bar{\mathbf{h}}^T(n)\mathbf{L}_o(n) \quad 0 < \mu < 1$$

一般而言， μ 值影響收斂的速度，其絕對值越小，收斂速度越慢，越不容易發散。

4.2 噪音主動控制實驗

本研究實驗主要分為四部分，分別是系統識別實驗、噪音主動控制實驗、原音重現實驗 (reproducing test) 及陪審團主觀評估實驗 (jury test)。先由系統識別實驗識別控制源及控制點之間的關係，提供脈衝響應函數給噪音主動控制實驗使用，再將噪音主動控制後的結果錄音，經由原音重現實驗的放音步驟，進行陪審團主觀評估實驗，統計評估陪審團成員對噪音主動控制結果的主觀反應，並與實際聲壓量測值比較，討論兩者異同之處。以下簡述各實驗內容：

4.2.1 系統識別實驗

系統識別是在決定控制源及控制點之間的脈衝響應函數。由分析儀輸出白色噪音訊號，經由控制源喇叭放音，由擬人頭 (控制點) 接收訊號，再由分析儀輸出頻率響應函數，計算求取脈衝響應函數。由於控制源置於擬人頭中央的對稱面上，所以將左、右兩耳所收到的訊號資料作算術平均，嚴格說來算是單一頻道的控制，因此對於脈衝響應函數的資料我們亦以兩耳個別得到的脈衝響應函數作算術平均。

4.2.2 噪音主動控制實驗

考慮一寧靜且較遠離週圍反射面的室內空間地點，以減低聲場的複雜性，將控制源正對控制點 (擬人頭) 佈置，實驗佈置示意如圖 2。實驗為一個噪音源及一個控制源，噪音原有兩種，一種是頻率為 500Hz 的單頻正弦噪音，另一種為相位隨機的多正弦寬頻噪音 (random multi-sine noise)，頻率範圍介於 50Hz ~ 600Hz，如圖 3 所示。控制器運算是以數位訊號處理器 TMS320C44-S4 來處理，控制理論與輸入、輸出資料擷取的程式皆以 TMS320C44 的組合語言撰寫，個人電腦的介面程式以 C 語言撰寫。為了探討本研究與聲壓主動控制的差異，我們分別就不同的噪音源對聲壓主動控制及響度主動控制各做一次，以比較其效果。

實驗流程大致如下：首先由分析儀輸出噪音到噪音源，當噪音源前方的麥克風收到噪音源的訊號後，傳至個人電腦內的數位訊號處理系統作運算，然後將計算出的訊號經由喇叭功率放大器傳至控制源，而此控制源與噪音源的聲音被擬人頭收錄並傳回數位訊號處理系統，形成即時控制迴路，同時擬人頭的訊號也輸入分析儀做即時監視，當擬人頭的訊號顯示被控制下來時，即可透過分析儀或個人電腦加以儲存，以便做後續的分析處理。

4.2.3 原音重現實驗

由於要做控制後的聲音品質評估，將聲音收錄後再放音，訊號有失真的可能，必須適當的處理校正此失真部份，才能重現原始的聲音[10]。圖 4 簡單地說明此原音重現的原理。在一般情況下，聲音傳入耳道之前，人頭、外耳會有所謂 HRTF (Head Related Transfer

Function)的影響效應，此方面我們使用擬人頭(B&K 4100)來模擬。而錄、放音過程中實驗儀器(如麥克風、放大器、錄音設備、耳機)的電器響應函數所引致失真，則利用 winamp 軟體的 Equalizer(EQ)功能來補償抵銷，實驗佈置如圖 5。

4.2.4 陪審團主觀評估實驗

聲音品質評估的目的是要定量描述人類聽覺系統的知覺感受。本文採用的是陪審團評估[11]，其方法及說明如下：由一群人所組成的類似陪審團性質的音質主觀評估團，每個成員都對一組經由錄音然後再生重現的聲音進行主觀感受評估，而主觀評估結果再經由統計分析達到最後屬於客觀的結果。為使陪審團人員容易判斷聲音品質優劣，利用音質配對比較評估法，將一組不同形式的聲音互相配對，陪審團人員只要在每一配對中決定兩者響度的大小分別。

5 研究成果

依 4.2 節所述之噪音主動控制實驗的方法與步驟，分別進行兩種噪音源的響度主動控制與聲壓主動控制，其實驗結果與控制前的噪音源聲音同時經由原音重現步驟進行陪審團主觀評估，獲得初步的研究結果，細節可參見參考文獻[9]。

實驗所用的噪音源不做控制時其聲壓約為 80dB，以模擬一般吵雜的環境。而陪審團主觀評估實驗由七位同學參與評估，評估人員的年齡都在 23~27 歲之間，且擁有良好之聽覺。評估的標準完全以個人聽覺的大小聲作為配對評估的標準。

由初步的結果顯示，主觀評估結果與主動控制結果一致，有控制下來的單項實驗結果，同時也獲得較多評審者認定為較小聲(較原始未控制前的聲音來得小)。其中相位隨機的多正弦寬頻噪音做響度控制時所降下的聲壓值並不多，但主觀評估結果卻得到全部評審者的認定，即物理量的控制效果不多，而人感官上的控制效果很好，顯示考慮響度效應有其噪音控制效果。

6 結論

本研究發展了考慮響度效應的噪音主動控制方法，整合各項適當的軟、硬體儀器設

備，建立系統識別實驗、噪音主動控制實驗、原音重現實驗及陪審團主觀評估實驗的技術，並由初步的實驗結果顯示考慮響度效應的噪音主動控制是屬可行。

未來將對各種不同數量的控制源、噪音源的環境進行響度噪音主動控制，探討不同控制源數量的控制效果，同時也探討控制源在不同位置的影響，另外也要考慮雙耳不同的脈衝響應函數的效應，以期進一步了解響度效應在多頻道噪音主動控制的效果。

7 參考文獻

- [1] S. Kuwano, S. Namba, Advantages and Disadvantages A-Weighted Sound Pressure Level in Relation to Subjective Impression of Environmental Noise, *Noise Control Engineering Journal*, **33**, 107-115, 1989.
- [2] D. W. Robinson, and R. S. Dadson, A Re-Determination of The Equal-Loudness Relations for Pure Tones, *British Journal of Applied Physics*, **7**, 166-181, 1956.
- [3] E. F. Berkman and E. K. Bender, Perspectives on Active Noise and Vibration Control, *Sound and Vibration*, **31**(4), 80-94, 1997.
- [4] S. E. Wright and B. Vuksanovic, Active Control of Environmental Noise, *Journal of Sound and Vibration*, **190**(3), 565-585, 1995.
- [5] S. D. Sommerfeldt and P. J. Nashif, An Adaptive Filtered-X Algorithm for Energy-Based Active Control, *Journal of Acoustical Society of America*, **96**, 300-306, 1994.
- [6] L. J. Eriksson, Development of the Filtered-U Algorithm for Active Noise Control, *Journal of Acoustical Society of America*, **40**, 2904-2920, 1992.
- [7] 伍昊炯，單點自適應控制，台灣大學土木工程學研究所碩士論文，台北，1994。
- [8] 劉德源，室內噪音主動控制，台灣大學土木工程學研究所博士論文，台北，1996。
- [9] 謝炎龍，考慮響度效應之噪音主動即時控制，台灣大學土木工程學研究所碩士論文，台北，1999。
- [10] *3&K magazine*, **2**, 16-19, 1997.
- [11] M. G. Kendall and B. B. Smith, On the Method of Paired Comparisons, 324-345.

8 附圖

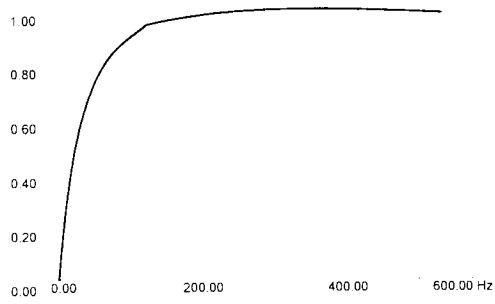


圖 1(a) 頻率域之加權函數

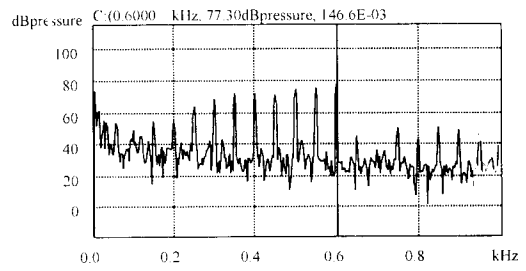


圖 3 random multi-sine 噪音之頻譜

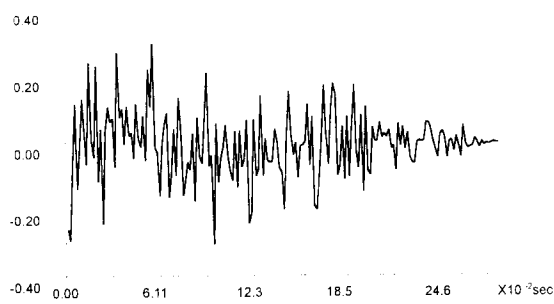
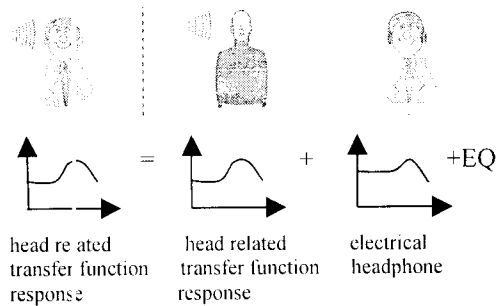


圖 1(b) 時間域之加權函數



(a)一般情況 (b)經由擬人頭收音，耳機收音

圖 4 真實聲音與收放聲音比較圖(錄自 *B&K magazine*, 2, 16-19, 1997.)

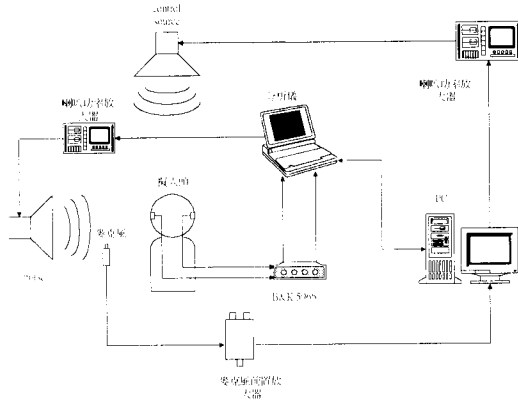


圖 2 主動控制實驗儀器示意圖

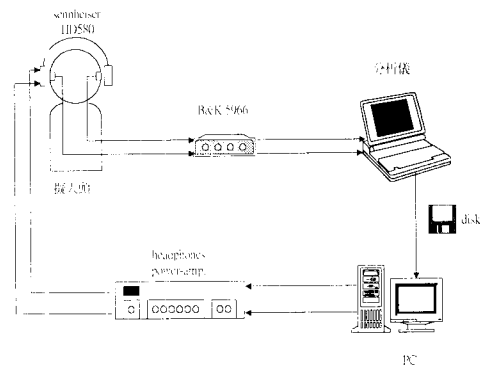


圖 5 原音重現實驗之等化校正示意圖