

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

以模式匹配法則應用於管路噪音設計與實驗研究 Model Matching Controller Design and Experimental Study of One-dimensional Active Attenuation Systems in Ducts

計畫編號：NSC 87-2218-E-009-027

執行期限：86年8月1日至87年7月31日

主持人：胡竹生教授 國立交通大學電機與控制工程系

一、中文摘要(關鍵詞：主動噪音控制，參數適應調制，模式匹配法則，數位訊號處理器)

本計畫乃針對一維之管路系統進行主動式控制器設計研究。有別於傳統之離散化方法，乃是利用模式匹配法則，結合偏微分方程所建構之系統方塊圖進行分析。考量實際工程應用，我們引入參數適應調制法則，線上調整傳感器參數，最後並利用高速之數位訊號處理器實現整個實驗架構。

英文摘要(Keywords: Active noise control, Parameter adaptive algorithm, Digital signal processor)

In this project, an active controller design study is proposed for a one-dimensional noise attenuation system in ducts. A general model matching technique is constructed to characterize the active controller structure by block diagram framework. However, the performance of this controller degenerates due to the aging or uncertainty of sensor's dynamics. To alleviate this influence, a parameter adaptive algorithm is designed. Finally, Experimental results realized by high-speed DSP show that PAA control is feasible in this project and effectively remedies these uncertainties.

二、計畫緣由與目的

主動式控制系統發展至今，其模型建立與與控制器設計多以聲波傳遞性質為著眼點，但是主動式噪音控制所面臨之系統穩定性分析穩健性探討與消音效能之評估，傳感器動態之

識別等，皆需借助現代控制理論以提昇現有之消音性能[1]。

絕大部分的物理系統都屬於分布參數系統，現有的控制理論則以有限維的聚合式參數系統(Lumped-parameter system)近似之。將系統模式近似成為常微分方程式的架構下所開展的控制技術至今已十分成熟，然後再根據此簡化系統加以設計，這在許多領域上已証明其實用性與可行性。近年來，這種控制技術已逐漸主動式噪音控制與結構振動控制中。但是 Balas [2] 提出所謂"Spill-over"現象仍是此類工程應用所遭遇之重要瓶頸。

為有效解決此一問題，本計畫從模式匹配的設計出發，以 closed-form 轉移函數為基礎建構全系統之系統方塊圖。由此推導出滿足消音條件之控制器通解，並探討全系統之穩定性。考量傳感器於實際應用時特性會隨時間改變之特性，本計畫適當的安排一組麥克風的位置，並對其訊號做特殊的組合與處理，可將管路之聲場動態(含聲場迴授)與傳感器之特性分離出來。同時，利用組合處理後的訊號，以線上適應參數調整之方式計算出傳感器動態之補償值，再輸出適當的控制訊號至傳感器，而達到主動式消音消除之目的。

三、研究方法及成果

3.1 主動式噪音控制架構建立

首先利用上年度(87)對於一維二階分布參數系統所推演出之 closed-form 轉移函數解(Transfer function)，建立一個全系統之方塊圖(Block diagram)。對控制工程研究者而言，系統(Plant)最自然的表示法是經由拉式

(Laplace)轉換得到的轉移函數。並將它應用在控制系統的方塊圖，以利於各種控制法則之應用。以下節錄(87)一維管路系統所推演出之 closed-form 轉移函數解：

當 $x < a$ 時 (如圖一)

$$\bar{R}(x, s) = \frac{[G_U^+(x, a, s) + G_U^-(x, a, s)]}{1 - \theta_0(s)\theta_1(s)e^{\lambda_2 x - \lambda_1 a}} \bar{Q}_a(s)$$

當 $x > a$ 時

$$\bar{P}(x, s) = \frac{[G_D^+(x, a, s) + G_D^-(x, a, s)]}{1 - \theta_0(s)\theta_1(s)e^{\lambda_2 x - \lambda_1 a}} \bar{Q}_a(s)$$

其中

$$G_D^+(x, a, s) = \frac{1}{(\lambda_1 - \lambda_2)\Delta} [-e^{\lambda_2(x-a)} + \theta_0(s)e^{\lambda_2 x - \lambda_1 a}]$$

$$G_D^-(x, a, s) = \frac{1}{(\lambda_1 - \lambda_2)\Delta} [\theta_1(s)e^{\lambda_2(1-a) - \lambda_1(1-x)} - \theta_0(s)\theta_1(s)e^{\lambda_2 - \lambda_1(1+a-x)}]$$

$$G_U^+(x, a, s) = \frac{1}{(\lambda_1 - \lambda_2)\Delta} [\theta_0(s)e^{\lambda_2 x - \lambda_1 a} - \theta_1(s)\theta_1(s)e^{\lambda_2(1+x-a) - \lambda_1}]$$

$$G_U^-(x, a, s) = \frac{1}{(\lambda_1 - \lambda_2)\Delta} [-e^{-\lambda_1(a-x)} + \theta_1(s)e^{\lambda_2(1-a) - \lambda_1(1-x)}]$$

而上式中 $\theta_0(s)$ 與 $\theta_1(s)$ 為邊界的反射係數，根據以上所述管路前饋式噪音控制架構如圖二：

其中

$$T_1(s) = \frac{G_D^+(y, d, s) + G_D^-(y, d, s)}{X(s)}$$

$$T_2(s) = \frac{G_D^+(y, a, s) + G_D^-(y, a, s)}{X(s)}$$

$$\bar{M}(s) \equiv \begin{bmatrix} M_1(s) \\ M_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{G_D^+(x_1, d, s) + G_D^-(x_1, d, s)}{X(s)} \\ \frac{G_D^+(x_2, d, s) + G_D^-(x_2, d, s)}{X(s)} \end{bmatrix}$$

$$\bar{F}(s) \equiv \begin{bmatrix} F_1(s) \\ F_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{G_U^+(x_1, a, s) + G_U^-(x_1, a, s)}{X(s)} \\ \frac{G_U^+(x_2, a, s) + G_U^-(x_2, a, s)}{X(s)} \end{bmatrix}$$

$$X(s) = 1 - \theta_0(s)\theta_1(s)e^{\lambda_2 - \lambda_1}$$

控制的目的是選擇適當的控制器 $C_1(s)$ ， $C_2(s)$ 使得消音誤差 e 變小，以模式匹配(Model Matching)的方法而言，所選擇的控制器必須滿足下式：

$$T_1 + \frac{T_2 \bar{C}_T \bar{M}}{1 - \bar{C}_T \bar{F}} = 0$$

將上式進行簡化，我們可以得到

$$\frac{c}{2Ls} \left(e^{-\frac{Ls}{c}(x_1-a)} - e^{-\frac{Ls}{c}(a-x_1)} \right) C_1 + \frac{c}{2Ls} \left(e^{-\frac{Ls}{c}(x_2-a)} - e^{-\frac{Ls}{c}(a-x_2)} \right) C_2 = 1 \quad (1)$$

3.2 前饋式控制器特殊解

從式(1)可以得知，滿足主動式消音的控制器有無限多解，並且滿足控制器與邊界條件 (Boundary condition) 無關的特性，其通解表示如下：

$$C_1(s) = \frac{Ls}{c} \frac{e^{-\frac{Ls}{c}(a-x_1)}}{1 - e^{-\frac{2Ls}{c}(a-x_1)}} (1 + 2Q) \quad (2)$$

$$C_2(s) = \frac{Ls}{c} \frac{e^{-\frac{Ls}{c}(a-x_2)}}{1 - e^{-\frac{2Ls}{c}(a-x_2)}} (1 - 2Q) \quad (3)$$

注意到只要 Q 是因果的(Causal)而且與邊界條件無關，那麼這樣的通解也是因果的，而且與邊界條件無關。

3.2.1 特殊解一

在式(2)(3)中，令 $Q = \frac{1}{2}$ ，則控制器變成

$$C_1(s) = \frac{2Ls}{c} \frac{e^{-\frac{Ls}{c}(a-x_1)}}{1 - e^{-\frac{2Ls}{c}(a-x_1)}} \quad (4)$$

$$C_2(s) = 0 \quad (5)$$

亦即簡化成為只有一個麥克風的情形。這個控制器的結構，亦與利用聲學模型所推導出的控制器吻合[4]。

3.2.2 特殊解二

令 $Q = \frac{1 - e^{-\frac{2Ls}{c}(a-x_1)}}{1 - e^{-\frac{2Ls}{c}(x_2-x_1)}} - \frac{1}{2}$ ，則控制器變成

$$C_1(s) = \frac{2Ls}{c} \frac{e^{-\frac{Ls}{c}(a-x_1)}}{1 - e^{-\frac{2Ls}{c}(x_2-x_1)}} \quad (6)$$

$$C_2(s) = -\frac{2Ls}{c} \frac{e^{-\frac{Ls}{c}(a-2x_1+x_2)}}{1 - e^{-\frac{2Ls}{c}(x_2-x_1)}} \quad (7)$$

對於這組控制器有其物理意義，首先利用一對麥克風偵測噪音源(Noise Source)的噪音，其排列組合類似於 Swinbank Type，組合

後之量測訊號經過控制器轉換後，可以達到單向麥克風(Unidirectional Microphone)的效應(如圖三)，有效去除聲場迴授(Acoustic Feedback)，增加系統穩定性。所設計的主動噪音控制器(Active Noise Controller)與邊界條件(Boundary Condition)無關。換言之，在邊界條件發生改變時，相同的主動噪音控制器依然有效，可大幅增加系統穩健性(Robustness)。

3.3 系統穩定性分析(Stability Analysis)與控制器修正

本節主要探討 3.2.2 所求出的控制器穩定性問題，一般而言，前饋式控制為目前管路主動噪音的主要架構，主要使用全向性(Omni-directional)控制喇叭以抵消噪音。但是我們知道控制喇叭不但抵消了傳至管路上游的噪音，聲波亦同時朝管路上游行進，進而使得麥克風藉由路徑感測到控制喇叭的聲波，造成了所謂聲場迴授的問題。因此必須適當選擇控制器才能使系統穩定。

全系統閉迴路穩定性問題可以用下列定理加以判別

定理 3.1：圖二之全系統閉迴路為內部穩定 (Internal Stable) 若且為若

$$[1 - \bar{C}_r(s)\bar{F}(s)]^{-1}\bar{C}_r(s)$$

為穩定(Stable)。

從定理 3.1 得知 3.2.2 所求得的控制器為臨界穩定(Marginally stable)，必須加以修正以符合全系統閉迴路內部穩定的要求。

為解決穩定性問題，我們將 3.2.2 所求出之控制器(最佳解)加入 'Notch filter'，亦即

$$\begin{aligned} \bar{C}_m(s) &= [C_{1m}(s) \quad C_{2m}(s)] \\ &= [C_1(s)R_\varepsilon(s) \quad C_2(s)R_\varepsilon(s)] \end{aligned} \quad (8)$$

其中 'Notch filter' $R_\varepsilon(s)$ 為

$$R_\varepsilon(s) = \frac{1 - e^{(\lambda_2 - \lambda_1)(x_2 - x_1)}}{1 - (1 - \varepsilon)e^{(\lambda_2 - \lambda_1)(x_2 - x_1)}} \quad -\varepsilon = \{\varepsilon > 0, \varepsilon \ll 1\}$$

經過修正後之全系統閉迴路，其內部穩定的充分條件如以下定理所述：

定理 3.2：將控制器修正為如式(8)後，全系統

閉迴路內部穩定的充分條件為

- (a) $\cdot \text{Sup}_{\omega>0} \{\text{Im}^{-1}|\theta_0(j\omega)\} + \text{Sup}_{\omega>0} \{\text{Im}^{-1}|\theta_1(j\omega)\theta_0(j\omega)\} = \alpha_1 + \alpha_2 < \frac{\pi}{2}$.
- (b) $\cdot 0 < \varepsilon < \bar{\varepsilon}, \varepsilon < \bar{\varepsilon} = \text{Inf}_{\omega>0} \{2 \text{Re}\{S(j\omega)\}\} = \text{Inf}_{\omega>0} \{S(j\omega) + S(-j\omega)\}$

其中

$$S(j\omega) = \frac{1 - \theta_0(j\omega)e^{(\lambda_2 - \lambda_1)a}}{1 - \theta_0(j\omega)\theta_1(j\omega)e^{(\lambda_2 - \lambda_1)a}}$$

3.4 實驗結果

圖四為主動噪音控制於消音前與消音後之頻域響應圖，其邊界條件為兩端開口(open)，由圖四可知此種參數適應調制發揮功能，改進了主動式噪音控制的消音效果，有效達到寬頻的消音效果。

四、結論與討論

本研究首先討論為利用模式匹配法則(Model Matching)設計出全反射主動消音的通解，控制器滿足此一條件有無限多組解，為求滿足系統強健性(Robustness)需求，所挑選的控制器具具有與管路邊界條件無關之特性，但是全系統閉迴路為臨界穩定，本計畫進一步將 'Notch filter' 加入控制器中以滿足全系統閉迴路內部穩定之條件。所設計之控制器於一維聲場實驗獲得良好之主動消音效果。

五、計畫成果自評

項目	完成情況
與原計畫相符程度	100%
達成預期目標	90%
研究成果學術價值	新型控制器設計
研究成果應用價值	具實用性
學術期刊發表合適否	投稿中
申請專利合適否	適合
主要發現 或 其他價值	適合一維聲場之主動式噪音控制

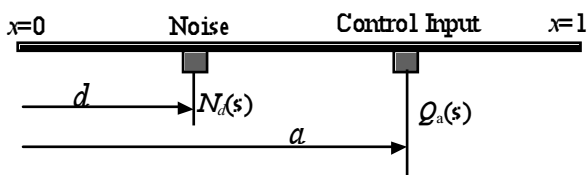
六、參考文獻

1. Bodson, M., "Emerging Technologies in

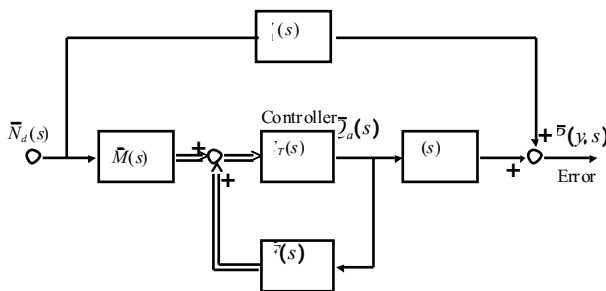
Control Engineering," *IEEE Control System Magazine*, pp.6-8, Dec. 1995

2. Balas, M.J., 1982, "Trends in Large Space Structure Control Theory: Fondlest Hopes, Wildest Dreams", *IEEE Trans. Automatic Control*, AC-27, pp.15-33.
3. Munjal, M.L. and Eriksson, L.J., "Analysis of a Linear One-dimensional Active Noise Control System by Means of Block Diagrams and Transfer Functions," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 129, No. 3, pp.443-455, 1989
4. Tichy, J., Warnaka, G.E. and Poole, L.A., 1984, "Active Noise Reduction Systems In Ducts," *ASME Journal*, Nov., pp.1-7
5. Widrow, B. and Walach, E., *Adaptive Inverse Control*, Prentice-Hall, Inc, 1996
6. Widrow, B and Plett, G.L., "Adaptive Inverse Control based on Linear and Nonlinear Adaptive Filtering", *Proceeding of International Workshop on Neural Networks for Identification, Control, Robotics and Signal/Image Processing*, Venice, Italy, pp.30-38, 1996

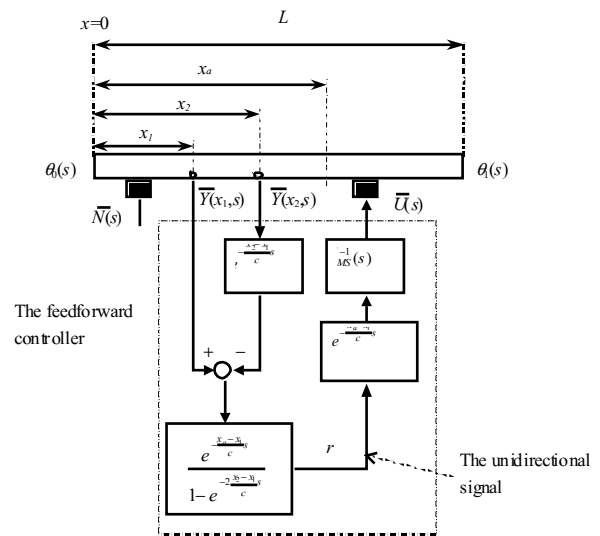
七、圖表



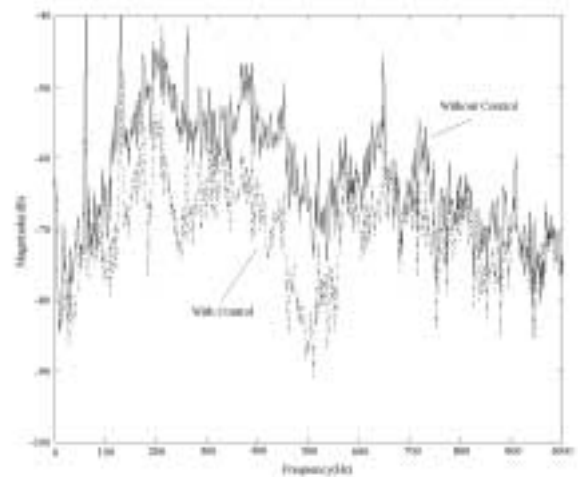
圖一：一維二階分布參數系統



圖二：一維管路前饋式主動式控制方塊圖



圖三：等效單向式麥克風系統架構圖



圖四：主動噪音控制器消音效果（兩端開口）