



第十二屆中國造船暨輪機工程研討會暨國科會成果發表會 桃園大溪 中華民國 88 年 11 月 19-20 日

含吸音邊界之室內噪音主動控制研究

A Study for Active Noise Control in An Enclosure with Absorptive Boundary Surface

計劃編號：NSC 88-2611-E-019-017

執行期限：87 年 8 月 1 日至 88 年 7 月 31 日

主持人：劉德源 國立海洋大學系統工程暨造船學系

一、摘要

本計劃進行室內含吸音邊界脈衝響應的計算與實測，以脈衝點聲源的頻帶和表示法做為輸入，使用含吸音邊界之三維聲壓場的奇異邊界積分方程，求時間域脈衝響應。邊界吸音材阻抗利用阻抗管以雙麥克風轉換函數法求得。本研究在長方體透明壓克力模型內邊界加吸音材，以自適應控制法則，經數位信號處理系統做快速計算，進行噪音主動控制研究。

關鍵詞：邊界元素法、阻抗、自適應主動控制

Abstract

The aim of this project is to study an acoustic computation theory and experimental verification techniques of impulse response in an enclosure with absorptive boundary surface. A method of band summation is proposed to simulate an impulse at a point and is then used as an input to the sound pressure boundary integral equation for calculating the impulse response in time domain. The impedance value of the materials is determined by using two microphone transfer function algorithm by impedance tube. A rectangular model made of six transparent acrylic plates with absorptive boundary are being used for experimental verification. The fast calculation of the adaptive control algorithms will be finished and the noise will be controlled in DSP board.

Keywords : BEM, impedance, adaptive active control

二、緣由與目的

本研究為一延續性的計劃[1]探討波動聲學求解，採用具有吸音邊界之室內聲場脈衝響應邊界元素法計算與實驗兩種方法，其中吸音材的特性由阻抗管實驗求得。結合控制理論以進行室內為刚性邊界與含吸音邊界之噪音主動控制之比較。經由實際的操作可以說明聲場環境的複雜性關係著控制成效，其次對於數位信號處理器更能充分的掌握其功能與應用，期能增加分析與解決相關的物理或工程問題的能力。

三、脈衝函數的模擬

3-1 脈衝的時間域表示

工程上以頻帶的觀念來模擬 $\delta(t)$ 函數，具有振盪的行為，因此以餘弦函數與高斯函數的乘積來表示，基於實用的觀點可適當的假設 $\delta(t)$ 函數為 $\delta(t) = \sum_{j \in N} B_j \frac{a_j}{\sqrt{\pi\alpha}} \cos(2\pi a_j^j f_0 t) e^{-\frac{a_j^2 t^2}{2\alpha}} H(t)$ 其中 N 為正整數， $H(t)$ 為 Heaviside 函數， $a_j^j f_0 = 2^{(j-1)/m} f_0$ 表示為 $1/m$ 倍頻 (one m -th octave band) 的第 j 個頻帶的中心頻率[2]。以倍頻帶 ($m=1$) 為例，在耳聞的範圍內，取 $f_0 = 31.5$ Hz，共 10 個頻帶，最高頻率為 16 kHz。有關參數 α 、 B_j 的決定參考[1]：

3-2 脈衝的頻率域表示

由上一小節音源 $f_s(\hat{t} - \frac{r_s}{c})$ 以 $\delta(\hat{t} - \frac{r_s}{c})$ 來模擬經傅立葉轉換可得頻率域表示式 $F_s(\hat{x}, x_s)$ 為

$$F_s(\hat{x}, x) = \frac{e^{-ikr_s}}{2} \sum_{j \in N} W_j \left\{ \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\gamma}} \exp\left(-\frac{\alpha^2}{4\alpha}\right) - \left[\frac{\alpha}{2\gamma} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(2k-1)!!} \left(-\frac{\alpha^2}{2\gamma}\right)^{k-1} \right] i \right\}$$

$$+\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\pi}{\gamma}}\exp(-\frac{\alpha_+^2}{4\alpha}) - \left[\frac{\alpha_+}{2\gamma} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(2k-1)!!} \left(-\frac{\alpha_+^2}{2\gamma}\right)^{k-1} \right] i \} \quad (1)$$

其中 $\alpha_- = f - a_0^j f_0$, $\alpha_+ = f + a_0^j f_0$, $\gamma = \frac{a_0^{2j}}{4\alpha}$, $(2k-1)!! = 1 \cdot 3 \cdot 5 \cdots (2k-1)$ 。 $F_s(\hat{x}, x_s)$ 代入下一節頻率域邊界積分方程之輸入音源項，即可得到頻率域頻率響應函數 $H(\hat{x})$ 。

四、邊界積分方程

頻率域之邊界積分方程為

$$\Omega(\hat{x})H(\hat{x}) = \frac{F_s(\hat{x}, x_s)}{4\pi r_s} \quad (2)$$

$$+ \int_B \left[\frac{\partial G(\hat{x}, x)}{\partial n} H(x) + G(\hat{x}, x) \frac{\partial H(x)}{\partial n} \right] dB$$

上式 $\Omega(\hat{x})$ 為場點 \hat{x} 處之固體角對 4π 之比值，依場點 \hat{x} 不同之位置而有不同之值。 $r_s = |x_s - \hat{x}|$, $r = |x - \hat{x}|$, $\tau = \hat{t} - \frac{r}{c}$ 。 $F_s(\hat{x}, x_s)$ 如式 (1)。且 $G(\hat{x}, x) = \frac{e^{-ikr}}{4\pi r}$ 與 $\frac{\partial G(\hat{x}, x)}{\partial n} = \frac{e^{-ikr}}{4\pi r} \frac{\partial r}{\partial n} (1 + ikr)$ 。本文採用四邊形二次面等參數元素離散化進行數值計算， $H(\hat{x})$ 求得後再以逆傅立葉轉換得脈衝響應 $h(\hat{x}, t)$ 。

五、阻抗管吸音材垂向聲學阻抗實驗

邊界積分方程考慮吸音邊界即 $\frac{\partial H(x)}{\partial n} = -i\omega\rho_0 H(x)/Z(\omega)$ ，其中阻抗 $Z(\omega) = \rho c \frac{1+R}{1-R}$ 。 ρ 是空氣的密度， c 是聲速。複數反射係數 $R(f)$ 說明如下：基於線性聲學理論與平面波的假設，並依據雙麥克風轉移函數法所建立之聲學阻抗管量測裝置，如圖 1 所示，待測吸音材料試件置於管道尾端，兩個垂直固定管上之雙麥克風間距為 s ，若求得對應於雙麥克風間入射波脈衝響應之轉移函數 H_i ，與反射波脈衝響應之轉移函數 H_r ，以及位置 1 與位置 2 的音壓轉換函數 $H_{12}(f)$ ，則可求得 $R(f)$ 為 [3]

$$R(f) = \frac{H_{12}(f) - H_i(f)}{H_r(f) - H_{12}(f)} \quad (3)$$

六、控制模式

本文實驗採用有限脈衝響應 (FIR) 模式說明如下：多個偵測點 (p_d) (如麥克風

)，多個控制源 (f_{s_i}) (如揚聲器) 與控制器參數 ($a_{ijk}(n)$) 之間的關係表示如下 [4, 5]

$$f_{s_i}(n) = \sum_{j=1}^{n_d} \sum_{k=0}^{m_{ij}-1} a_{ijk}(n) p_{d_j}(n-k) \quad (4)$$

第 0 個控制點的聲壓 p_o 受到噪聲源 p_{o_d} 與控制源 f_{s_i} 的影響表示為 $p_o(n) = p_{o_d}(n) + \sum_{i=1}^{n_s} \sum_{\tau=0}^{n-1} h_{os_i}(\tau) f_{s_i}(n-\tau)$ 其中 h_{os_i} 為控制點與控制源之間的脈衝響應函數，在進行控制前可由聲場理論或以實測的方法事先求得。有限脈衝響應參數之求解，選擇以聲場位能為目標函數，以 J_p 表示為 $J_p = \frac{1}{4\rho c^2 n_o} \sum_{o=1}^{n_o} w_o p_o^2(t)$ ，其中 $p_o(t)$ 為第 o 個控制點的聲壓， w_o 為第 o 個控制點的權重， ρ 為空氣的密度， c 為聲音速度。以正規化最小均方根方法，NLMS 控制器參數計算式以指標的形式寫為

$$a_{ijk}(n+1) = a_{ijk}(n) - \eta_1 (\nabla J_p)_{ijk} \quad (5)$$

上式表示第 $n+1$ 時刻 $a_{ijk}(n+1)$ 的計算。其中 $(\nabla J_p)_{ijk}$ 表示如下

$$(\nabla J_p)_{ijk} = \frac{1}{2\rho c^2 n_o} \sum_{o=1}^{n_o} w_o p_o(n) \cdot \sum_{\tau=0}^{n-k} h_{os_i}(\tau) p_{d_j}(n-k-\tau) \quad (6)$$

收斂係數 η_1 分別表示為 $\eta_1 = \frac{2\mu_1}{N\sigma_1^2}$, $0 < \mu_1 < 1$ ，其中 σ_1^2 為信號 $\sqrt{w_o} h_{os_i}(n-k)$ 的平均能量。

七、計算與實驗結果

本節說明系統識別與主動控制的結果，其中系統識別採用兩種方法，第一種方法是以數值計算控制源與控制點之間的脈衝響應。第二種是以純實驗法求得整個系統 (聲場 + 儀器) 的脈衝響應。採用第二種方法的結果做為控制理論中之系統特性，然後再進行 FIR 模式主動控制實驗。聲場尺寸為 (0.75 m, 0.945 m, 1.19 m)，聲源位置為 $x_p = (0.375 \text{ m}, 0.4725 \text{ m}, 0.595 \text{ m})$ ，控制點的位置分別為 $x_{o1} = (0.28 \text{ m}, 0.4025 \text{ m}, 0.595$

m), $x_{o2}=(0.28\text{ m}, 0.5425\text{ m}, 0.595\text{ m})$, 控制源的位置為

$x_{s1}=(0.1875\text{ m}, 0.4725\text{ m}, 0.595\text{ m})$, 偵測點靠近聲源附近。

7.1 阻抗實驗

測量吸音材芬蘭玻璃纖維, 厚 50mm 之垂向聲學阻抗值, 頻率範圍: 50Hz 至 5kHz。採用 Burst Chirp+Uniform Window 的輸入信號, 測量吸音材之特性, 如吸音率, 阻抗值等, 可由實驗所得之量測值繪出各吸音材之吸音率圖, 阻抗及其相位角圖, 與以阻抗值之實數為 x 軸, 虛數為 y 軸, 繪出其相對應圖, 結果如圖 2, 圖 3, 圖 4。觀察吸音材之吸音率與阻抗值之相位角, 發現其在頻率 100Hz 以下, 吸音率皆呈現負值, 而相位角則有跳動之現象, 又觀察阻抗值 ($Z = \frac{p}{\rho c}$) 實數 ζ_r 與虛數 ζ_i 相對應圖, 可明顯看出呈現一圓形狀, 其圓形線分別與實數軸交於最大最小值兩點, 若對應於阻抗值圖分別為其峰谷值, 由此可知在頻率 100Hz 以上, 實驗所求之量測值較為可信。因此將吸音材量測所得之阻抗值代入邊界積分方程, 可得頻率響應函數, 最後求得室內聲場含吸音邊界之脈衝響應。

7.2 系統識別

圖 5 為取前述長方體 1/2 尺寸的聲場, 以邊界元素法計算剛性邊界與吸音邊界所得的脈衝響應。具有吸音邊界之脈衝響應有衰減較快的趨勢。圖 6 為實驗的方法求得數位類比轉換器至控制點之間的脈衝響應。兩者的趨勢仍有差異。

7.3 主動控制實驗

進行單一與兩個控制點實驗, 圖 7 為單一控制點單頻信號控制結果, 圖 8 為兩個控制點單頻信號控制結果, 在實驗的過程, 發現控制理論最加適應參數值 μ_1 仍需以嘗試法求得, 對單一或兩個控制點的控制, 在 250 Hz 至 630 Hz 之間皆有明顯的控制效果。其中在 500 Hz 處甚至下降量達到 40 dB。

八、結論與討論

經由計算與實驗之結果, 歸納如下:

1. 文中以頻帶和的表示求剛性與具有吸音邊界的聲場脈衝響應, 主要發現是以數值計算高頻率大空間的聲場仍有待努力, 吸音邊界比剛性邊界的聲場脈衝響應如預期的一樣, 振幅較小, 衰減較快。
2. 以實驗方式求得的聲場脈衝響應較符合實際的聲場環境(包括儀器的脈衝響應), 較有良好的控制效果。
3. 本研究進行具有吸音邊界聲場, 單一控制源對一個與兩個控制點的噪音控制實驗, 發現有些頻率無法控制, 但是在可以控制的頻率範圍, 比較全部是剛性邊界的聲場, 其噪音下降量大得多, 以 500 Hz 為例, 單一控制點下降量達到 41 dB。兩個控制點下降量達到 39 dB。依前述計劃剛性邊界聲場的下陷量僅 13 dB, 由此結果顯示幾何聲場的特性與控制的成效有密不可分的关系, 具有吸音邊界聲場反射音的貢獻量降低, 故較有利於控制。
4. 為了能做即時主動控制, 控制程式皆以組合語言撰寫, 進行本研究的人員對於數位控制處理器 (DSP) 軟應體的功能與應用, 有了更深一層的認識與收穫。

九、參考文獻

- [1] 劉德源, 多控制源室內噪音主動控制研究, 國科會, 1997。
- [2] A.D. Pierce, *Acoustics, An Introduction to Its Physical Principles and Applications*, McGraw-Hill, New York, 1981.
- [3] 謝志忠, 平均流下消音器性能之實驗研究, 碩士論文, 國立台灣大學造船暨海洋工程研究所, 1997。
- [4] R.R. Leitch and M.O. Tokhi, Active Noise Control Systems, *IEE Proceedings*, Vol.134, pp.525-545, 1987.
- [5] S.J. Elliott, C.C. Boucher and P.A. Nelson, The Behavior of a Multiple Channel Active Control System, *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol.40, pp.1041-1051, 1992.

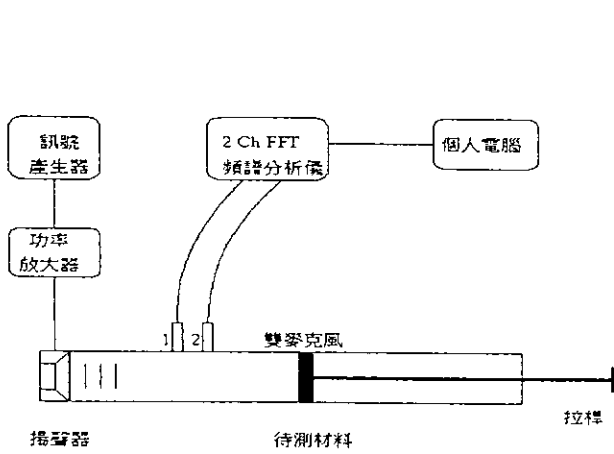


圖 1 阻抗管量測系統架構配置圖

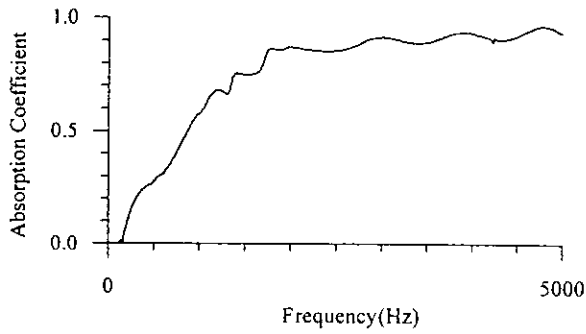


圖 2 吸音率

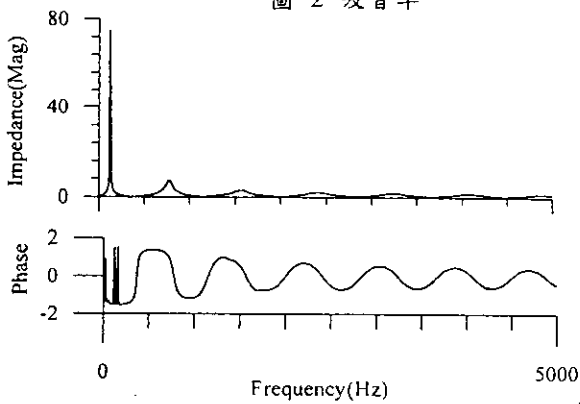


圖 3 阻抗值與相位角

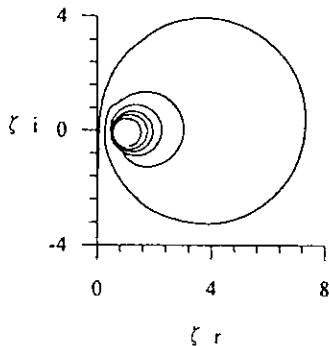


圖 4 阻抗管實部 ζ_r 與虛部 ζ_i 對應圖

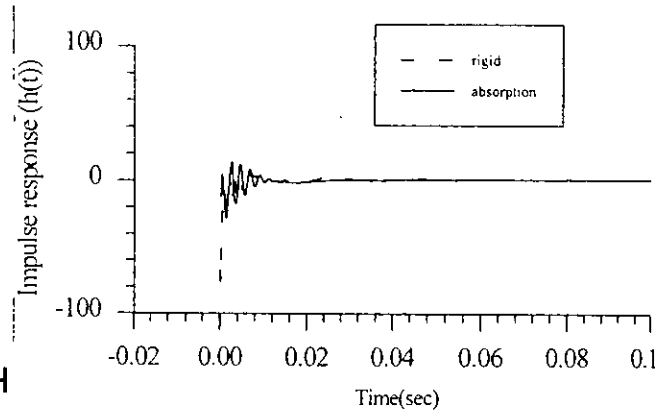


圖 5 數值計算刚性邊界與吸音邊界之脈衝響應

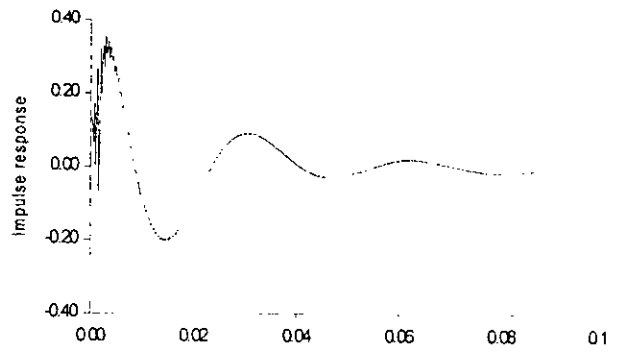


圖 6 實驗方法求得之脈衝響應

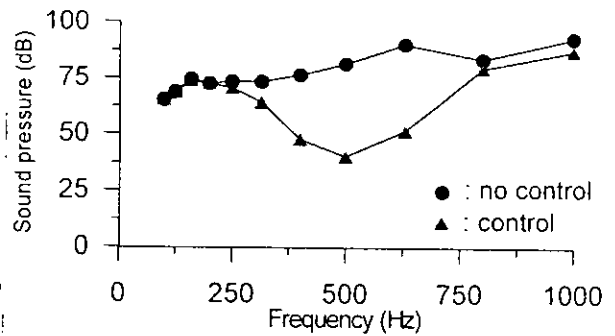


圖 7 單一控制點單頻之控制結果

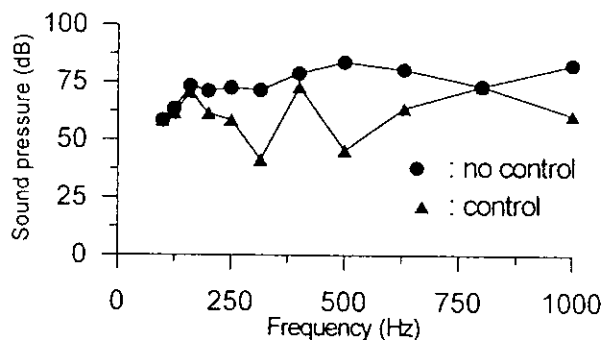


圖 8 兩個控制點單頻之控制結果