

複合層板吸音材料之聲場模擬與數值分析 The Numerical Analysis and Simulation of Acoustic Field in Composite Sound-Absorbing Materials

李昌崙¹、楊旭光²、邱世明²、余秉憲¹、林宜賢²、鄭錦文²

¹國防部中山科學研究院航空研究所航空材料組

²國立中山大學機械與機電工程學系

國立中山大學機械與機電工程學系

804 高雄市鼓山區蓮海路 70 號

電話：07-5252000 Fax：07-5254299

E-mail：skyang@mail.nsysu.edu.tw

摘要

輕質吸音抑制材料具有質量輕及良好彎曲強度的機械性質，是為實用的隔音材料；透過其材料的聲學特性，能改變聲波傳遞路徑抑或隔離接收者與噪音源。為提升吸音材料之穿透損失量，以達到更理想的吸隔音效果，本文特將此輕質吸音材料設計成三明治結構形式的複合層板吸音材料供業界參考採用。本研究乃將複合層板吸音材料中，以多層介質間反射、透射聲壓之計算，配合聲阻抗遞移原理，進一步估算其穿透損失；並利用邊界元素法所建立之數值模擬模式，預測此材料於一點聲源下，模擬其穿透聲場與反射聲場之分布情況，組合設計出一種符合經濟效益，且達到穿透損失為 50dB 之輕質複合層之吸音材料。

關鍵字：邊界元素法、穿透損失、吸音材料

Abstract

The light-weighted sound absorbing materials, that have low density and good bending strength of mechanical properties, are applied as sound insulation materials in practical noise control field. The path of sound propagation could be changed or isolated between the location of sound source and receiver due to its acoustic characteristics of sound absorbing material. To increase the transmission loss of sound absorbing material, it is designed as a composite layer of sandwich structure for industrial used. The reflected and transmitted sound pressure are calculated by the impedance method in this paper. The transmission loss is also evaluated for the multi-layer of composite sound absorbing material. Furthermore, the numerical simulation of acoustic field is studied by boundary element method (BEM) for a point source. The results show that the transmission loss is 50 dB for the designed sandwich structure of sound absorbing material.

Keywords : boundary element method, transmission loss, sound-absorbing materials

壹、前言

任何噪音之防治問題均是以噪音源 (Source)、傳播路徑 (Path) 以及接收者 (Receiver) 三個基本要素所構成。在噪音防治中針對前三者間之關係主要分為兩大類：一種是主動式噪音控制 (Active Noise Control)，另一種是被動式噪音控制 (Passive Noise Control)。前者主要的原理是提供一種以人為產生的能量去抵銷 (破壞性) 干涉主要的噪音源系統的輸出結構，達到控制噪音目的。而後者是改變傳播路徑或隔離接收者及噪音源，主要作用是阻隔聲波的直接傳遞路徑，進而達到控制的效果。

輕質吸音材料即屬於後者的噪音防制工程，本研究已成功建立一輕量吸音材料的資料庫，依此發展 MATLAB 數值分析模組，此模組可以公式化地預測各種吸隔音效果。最後，於本研究中使用 BEASY 邊界元素法模擬軟體，可以預測多層材料組合於空氣中的吸隔音特性。

貳、複合層板吸音材料之相關理論與數值模擬

2-1 聲阻抗傳遞法

穿透損失的計算，必須先行求得聲強的穿透係數或是聲壓的反射係數，本節以多層介質中計算聲壓反射係數，進而求出穿透損失值。

今假設編號 1 與編號 $n+1$ 兩半無窮域間夾有 $n-1$ 層之層板，編號分別為 2, 3, ..., n ，如圖 1 所示。

令一平面波以一入射角度 θ_{n+1} 入射至最後一層，此節則討論其反射係數。

當討論編號 2 之層板時，利用其聲學參數 $Z_{in}^{(1)} = Z_1$ ， $d = d_2$ ， $\alpha = \alpha_2 = k_2 \cos \theta_2$ ，可以求得層板 2 上邊界的輸入聲阻抗 $Z_{in}^{(2)}$ 。若進一步將 $Z_{in}^{(1)}$ 換成 $Z_{in}^{(2)}$ ， Z_2 換成 Z_3 ， α 換成 α_3 ， d 換成 d_3 ，則可得到層板 3 上邊界的輸入聲阻抗 $Z_{in}^{(3)}$ ，依此類推至最後一層，可得：

$$Z_{in}^{(n)} = \frac{Z_{in}^{(n-1)} - iZ_n \tan \alpha_n d_n}{Z_n - iZ_{in}^{(n-1)} \tan \alpha_n d_n} Z_n \quad (1)$$

同理，反射係數可表示如下：

$$R = \frac{Z_{in}^{(n)} - Z_{n+1}}{Z_{in}^{(n)} + Z_{n+1}} \quad (2)$$

利用聲強透射係數 (Intensity transmission coefficient)：

$$T_l = \frac{I_t}{I_i} = \frac{\frac{|P_t|^2}{2Z_3}}{\frac{|P_i|^2}{2Z_1}} = \frac{Z_1|P_t|^2}{Z_3|P_i|^2} = 1 - |R|^2 \quad (3)$$

其中， P_i 為入射聲壓， P_t 為穿透聲壓， I_t 為穿透聲強， I_i 為入射聲強。

穿透損失 (Transmission loss) 公式：

$$TL = 10 * \log_{10} \left(\frac{1}{T_l} \right) \quad \text{dB} \quad (4)$$

2-2 MATLAB 軟體模組開發

有鑒於噪音防治中，吸音材料穿透損失計算的重要性，以及其繁雜的計算過程，於本研究中擬採用 MATLAB 軟體設計一套模組，此模組可隨著不同的吸音材料特性，像是聲阻抗、厚度、密度等，自行輸入而不需另外新寫程式，省掉許多麻煩和時間。於此初衷下，使用前一節所推導之聲阻抗傳遞法，計算穿透損失值，進一步繪出全頻域之穿透損失圖。

研究中利用 MATLAB 中 GUI 介面功能，設計出的模組介面形式如圖 2 所示。此模組大大節省了使用者重新編撰程式的時間，以往每次變更不同吸音材料時，使用者都必須進入原程式碼中，修改其中的聲學參數，從程式中找出所對應參數的位置，因此必須對程式內容極度熟悉，如稍有差錯，很容易在執行程式時發生錯誤。目前模組使用基本對話互動式環境，直接滿足使用者需求。

圖 3 為模組執行時，在 MATLAB 主視窗下出現的對話內容；圖 4 為模組估算鋁板、水泥層、鋼板組合之三明治結構，其全頻域穿透損失。

2-3 BEASY 邊界元素法軟體之模擬

BEASY 軟體與一般常用的有限元素法軟體，為達到更人性化之介面，其操作順序大同小異，唯兩者之計算原理不同。BEASY 軟體先由建立模型開始，點、線、面的搭配與組合以建立欲分析之模型；建立完模型之後，進一步檢驗所建立模型的法向量方向是否正確，再進行元素切割；定義區域編號，針對所建模的實體或是實體外的無窮域作區域編號，以便配置內部分析點；定義材料性質，在已存在的區域中定義流體的性質；建立內部分析點，是步驟中較重要的一環，主要功能為設定產生結果的分析點，藉由這些點的結果可以繪製聲場分布圖。

圖 5 為模擬單一層板之聲阻抗與空氣相同時，會產生全穿透現象；圖 6 表示聲阻抗大小為 47 MPa*s/m 時，因層板聲阻抗和空氣不匹配的緣故，造成聲場穿透層板後，有明顯的聲

強衰減效果。

參、結論

使用 MATLAB 軟體開發模組化程式，以達使用者易於操作軟體的目的。程式的編撰採用聲阻抗遞移原理，並配合 MATLAB 中的 GUI 介面，設計出一套功能強大的模組。目前僅設計三層板的穿透損失計算，繪出全頻域穿透損失圖，可以先行各別計算單層板的穿透損失大小，進而計算三層板組合之後的穿透損失值。

研究中欲搭配 BEASY 軟體來驗證本研究中所開發模組的合理性與實用性。

肆、誌謝

本研究承國防部中山科學研究院計畫經費補助，特此致謝。計畫編號 (XW93166P094P00)。

伍、參考文獻

1. 白明憲，聲學理論與應用：主動式噪音控制，全華科技圖書公司，臺北市，1999。
2. Harold Lord, William S. Gatley, and H.A. Evensen, Noise Control For engineers, 虹橋出版社，臺北市，1985。
3. 蘇德勝，噪音原理及控制，臺隆書店，臺北市，1999。
4. Randall F. Barron, Industrial Noise Control and Acoustics, Marcel Dekker, New York, 2003.
5. 鍾耀仁，發泡鋁板在噪音防治上之應用研究，國立中山大學機械工程研究所碩士論文，高雄市，2000。
6. E. Haaren, P. H. Tol, "Validation of Acoustic Applied For The Modelling of Noise Barriers," J. Sound Vib. Vol. 231, pp. 681-688, 2000.
7. J. S. Bolton, N. M. Shiau and Y. J. Kang, "Sound Transmission Through Multi-Panel Structures Lined With Elastic Porous Materials, " J. Sound Vib. Vol.191, pp.317-347, 1996.
8. P.M. Morse and K.U. Ingard, Theoretical Acoustics, Princeton University Press, New Jersey, 1986.

9. L. Brekhovskikh and Yu. Lysanov, Fundamentals of Ocean Acoustics, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1982.

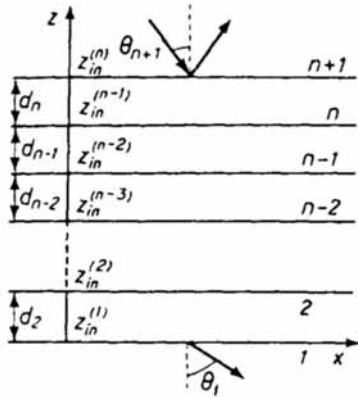


圖 1 多層介質幾何示意圖

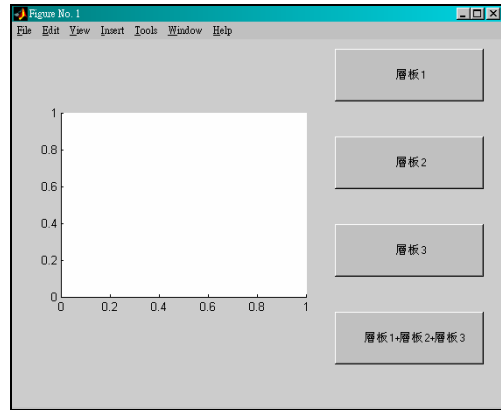


圖 2 MATLAB 軟體下所設計的模組介面

```

Command Window
File Edit View Web Window Help
Using Toolbox Path Cache. Type "help toolbox_path_cache" for more info.
Warning: Directory permission denied: f:\.

To get started, select "MATLAB Help" from the Help menu.

>> composite
請輸入層板1的聲阻抗 (Pa*s/m) = 47e6
請輸入層板1的厚度 (m) = 0.01
請輸入層板1的密度 (kg/m^3) = 7700
>>
    
```

圖 3 MATLAB 主視窗下出現的對話與要求使用者輸入層板 1 的聲學參數

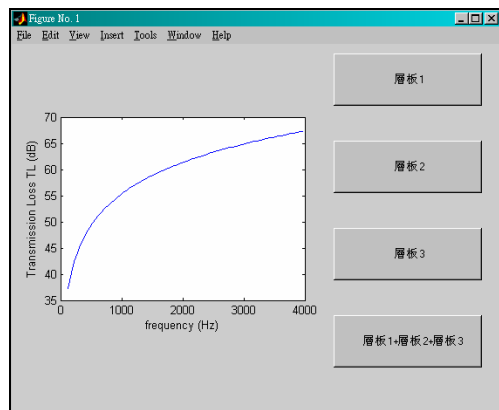


圖 4 鋁板、水泥層、鋼板組合之三明治結構全頻域穿透損失圖

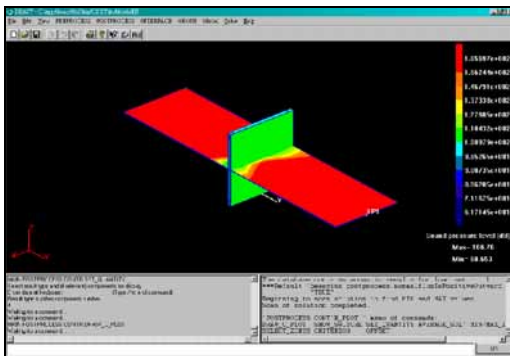


圖 5 單一層板聲阻抗為 415 Pa*s/m 時，由聲場分布可發現有全穿透現象產生

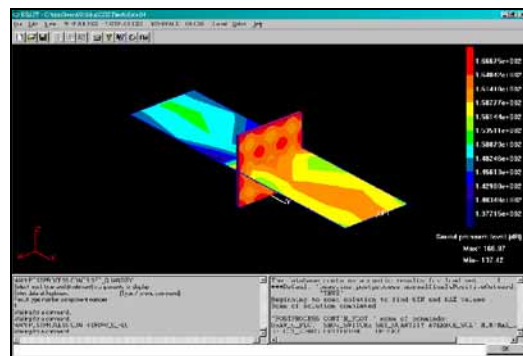


圖 6 單一層板聲阻抗為 47 MPa*s/m，聲場分布的情況

