

穿孔板吸音參數最佳化研究

Research on Optimization of Sound Absorption Parameters of Perforated Panel

吳邦彥* 邱進東** 邱冠詠**

Bang-Yenn Wu*, Jinn-Tong Chiu**, Guan-Yong Chiu**

*德霖技術學院機械工程系助理教授

Assistant Professor

*Department of Mechanical Engineering

De-Lin Institute of Technology

**國立臺灣海洋大學系統工程暨造船學系

**Department of Systems Engineering and Naval Architecture

National Taiwan Ocean University

摘要

本文透過穿孔板聲音阻抗理論，亥姆霍茲空腔共振原理，聲學有限元素模型理論及幾何特性，建立穿孔板不同頻率的聲音阻抗模型。再規劃一田口方法以出口孔形狀、穿孔角度、穿孔密度、入口孔徑大小及板厚為控制因子。透過聲學有限元素模擬找出最佳吸音係數的穿孔板控制因子組合，模擬入口端與出口端計算出聲壓差，最後再將聲壓差乘上入口孔洞截面積，得到力差做為田口法的輸出。在穿孔板特性分析以市面上最常見之 5mm 孔徑穿孔板，由結果得知控制因子的水準效應依序為孔洞數量、入口圓孔大小、出口孔洞形狀、孔洞角度、板厚。

關鍵字:穿孔板、噪音、田口法、聲學

Abstract

Through the acoustic impedance theory of the perforated panel, the Helmholtz cavity resonance principle, the acoustic finite element model theory and the geometric characteristics, the acoustic impedance model of the perforated panel at different frequencies is established in this paper. Then plan a Taguchi method, the exit hole shape, perforation angle, perforation density, entrance aperture size and plate thickness are taken as control factors. Through acoustic finite element simulation to find the best sound absorption coefficient of the perforated panel control factor combination. The sound pressure difference is calculated by simulating the inlet and outlet ends, and the sound pressure difference is multiplied by the cross-sectional area of the entrance hole to obtain the force difference as the output of Taguchi method. In the perforated panel characteristics analysis, the most common 5mm aperture perforated plate on the market is used. From the results, the influence of control factors in orders are the number of holes, the size of the entrance hole, the shape of the exit hole, the hole angle and the plate thickness.

Keywords: Perforated Panel, noise, Taguchi method, Acoustic

1.前言

穿孔板一般使用各種材質的薄板，例如銅板、鋁板、塑膠板等，在上面依孔徑及穿孔率打上多個圓孔，而在穿孔板後搭配一定厚度的空氣層(空腔)，就構成穿孔板共振吸音系統。普通穿孔板孔徑較粗，所以音阻較小吸音頻帶較窄，一般穿孔板搭配空氣層，形成的結構主要是吸收低頻音，所以要在穿孔板後填充多孔的吸音材料，如玻璃纖維棉、岩棉等，以吸收中高頻音。工程中，常用穿孔板厚為 2~5 mm，孔徑 2~10 mm，穿孔率 1% ~ 10%，空腔厚度 100~250 mm。

1975 年馬大猷[1]利用 Rayleigh 對微管中聲波分析結果，Crandall 的簡化推導，建立了定義於微管之聲阻抗率，作者於文中提出穿孔板之聲阻抗、相對聲阻抗公式，以及正入射條件下之吸音率、共振頻率以及半吸收頻率。1983 年馬大猷[2]由於決定微穿孔板之吸音率為相對聲阻抗，提出直接量測穿孔板聲阻抗之方法，使用 BK 4002 駐波管設備，而結果顯示聲壓級於 100dB 以下，也就是穿孔內質點速度於 1m/s 以下聲阻抗遵守線性規律。2005 年 Zhang 等[3]提出了預測微穿孔板的方法，轉移微孔的阻抗並採用傳遞矩陣方法進行預測單個面板的吸音性能，結果表明該方法可用預測吸音能力，也可用於有不同直徑的孔，甚至是不規則孔形狀。2010 年 Bolton 等[4]，利用 CFD 計算穿孔板單孔的流體行為，使用單一微穿孔建立之有限元素模型，文獻使用漢寧窗為流體速度之邊界條件，計算出孔所造成之轉移函數，並計算出動力流阻及流抗，接著計算出穿孔板之吸音係數，建立一修正係數公式。2011 年 Bolton 等[5]利用此方法探討斜向穿孔之 CFD 計算，圖 1.2.2 為 CFD 有限元素模，而文獻中有限元素模型之網格大小設置為小於 0.005mm，若本文以此方法建立有限元素模型，加上阻抗管之空氣部分，網格負擔會相當大。2014 年 Cheng 等[6]提出結構模態對微穿孔吸音共振系統之影響，並得出耦合對評估微穿孔吸音共振系統之重要性。Herrin 等[7]文獻中解釋了馬大猷穿孔板公式應用於設計穿孔板消音器之需注意事項，及各項參數在其中的影響。Cheng 等 [8]提出結構模態對微穿孔吸音共振系統之影響，並得出耦合對評估微穿孔吸音共振系統之重要性。2015 年 Guo 等[9]通過仿真方法分析不同深度之空腔複合，得出複合空腔吸音效果較單空腔好，但與其尺寸有密切關係。2015 年 Iman 等文獻中 [10]，利用馬大猷等校電路之方式計算出多空腔微穿孔板之相對聲阻抗，並利用阻抗管法進行多空腔穿孔板阻抗管實驗與理論進行比對，證實多空腔對於穿孔板結構能有更良好的吸音頻寬。Guo 等文獻中[11]，用仿真方法研究不同厚度空腔之複合文穿孔板消音箱之消音吸音性能，及共振峰值分佈。Wang 等[12]，文獻中探討隔音牆表面的不均勻性來改變聲音的傳播路徑，以雙隔音牆間的反射進行探討，與在結構內設計緊密的管道陣列，來達到降造的效果，本文參考其邊界之設定來進行模擬。2018 年胡文信[13]在馬大猷穿孔板的理論基礎下，針對微穿孔板的穿孔孔徑、穿孔率、空腔深度及多空腔做聲學有限元素法分析，並與文獻進行比對及驗證。模擬結果顯示本文建立之有限元素模型與馬大猷理論與 Iman Falsafi and Abdolreza Ohadi 之文獻比對相當接近。在田春雨[14]，文獻中以穿孔板共振吸聲結構為研究對象，考察了其模態特性及影響吸聲性能的因素。首先，利用有限元軟件 COMSOL 對穿孔板共振吸聲結構進行模態分析，得出其共振頻率的影響因素及影響規律。其次，通過模擬建立了平面波垂直入射時的穿孔板共振吸聲結構聲場模型，並利用傳遞函數法計算得到其吸聲係數，建立了孔排列方式、穿孔率、孔徑、板厚和空腔深度對吸聲性能的影響。最後，在阻抗管內採用傳遞函數法，測試了穿孔板共振吸聲結構的法向入射吸聲係數。通過實驗，了解孔洞排列方式、穿孔率、孔徑、板厚和空腔深度對穿孔板共振吸聲結構吸聲性能的影響。2019 年李昱緯 [15]利用阻抗管實驗量測出微穿孔板共振吸音構造正入射吸音率，並使用模擬分析與消音箱插入損失實驗值作比對以找出修正之聲阻抗，利用此聲阻抗模擬出微穿孔消音箱的消音性能推斷出其插入損失。

本文將對穿孔板進行聲學有限元素模擬，並利用田口法以板厚、入口端孔洞直徑、出口端孔洞形狀、孔洞角度、孔洞數量為控制因子，了解影響穿孔板吸音特性的重要控制因子，並求出最佳參數組合。

2. 研究方法

2.1 共振吸音結構吸音原理

穿孔板及微穿孔板主要的差別在於吸音板材上穿孔孔徑的大小，穿孔板一般使用各種材質的薄板，在上面依孔徑及穿孔率打上多個圓孔，而在穿孔板後搭配一定厚度的空氣層(空腔)，就構成穿孔板共振吸音結構。一般穿孔板搭配空氣層，形成的結構主要是吸收低頻音，所以要在穿孔板後填充多孔的吸音材料，如玻璃纖維棉、岩棉等，以吸收中高頻音。而穿孔板為了加寬吸音頻率，可用板厚、孔徑均在 1 mm 以下穿孔率為 1%~5%的薄板材與背後的空氣層組成穿孔板共振吸音結構。

穿孔板的音阻比微穿孔板大很多，其吸音頻率寬度也大的多，所以穿孔板在使用時不用搭配多孔吸音材料，更適合用在高溫、高風速、潮濕等特別環境。共振吸音結構為一片穿孔板(穿孔板)搭配空氣層組合而成，如果相鄰兩孔孔中心距離至少為孔徑 5 倍，其可看成多個共振腔並聯而成互不干涉，圖 1 右端為穿孔板(微穿孔板)，孔洞中空氣柱可看為活塞，後方空腔類似空氣彈簧，二者組成共振結構，當音波傳至開口處時，音壓 P 作用下空氣柱振動，由於摩擦使音能轉化為熱能耗散掉。當音波頻率與共振腔固有頻率匹配時，會發生共振吸音量達最大，隨著頻率遠離吸音量又逐漸減少。

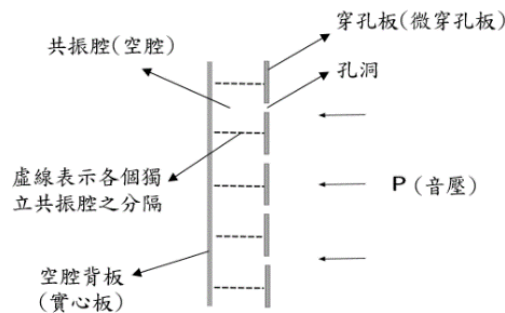


圖 1 穿孔板(微穿孔板)共振吸音示意圖

2.2 平面音波特性阻抗理論

聲場中某點的聲壓除介質振動速度為特定聲阻抗(specific acoustic impedance)，本文中簡稱聲阻抗，如式(1)

$$Z = \frac{P}{u} \quad (1)$$

Z = 聲阻抗 ($\text{Pa} \cdot \text{s/m}$)

P = 聲場中某點的聲壓 (N/m^2)

u = 聲場中某點的介質質點振動速度 (m/s)

聲阻抗比吸音率更能表達材料吸音特性，吸音率會隨入射聲波角度影響改變，而相同之吸音率卻可能有不同之聲阻抗。

在理想流體介質中平面音波的音壓只隨 x 座標變化，在垂直 x 軸的平面上不論 y 、 z 軸如何變化，音壓都不變，三維問題變為一維問題，即一維音壓波動方程式(2)[16]。

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} \quad (2)$$

上式單一頻率一般解為：

$$P(x,t) = Ae^{j(\omega t - kx)} + Be^{j(\omega t + kx)} \quad (3)$$

式中：

P = 音壓 (N/m^2)

x = 位置 (m)

c = 聲速 (m/s)

t = 時間 (s)

f = 頻率 (Hz)

ω = 圓頻率 $2\pi f$

k = 波數 ω/c

$j = \sqrt{-1}$

式(3)第一項表示沿 x 正方向行進波(正向波)，第二項表示沿 x 負方向的行進波(反射波)。若討論無限介質中平面聲波的傳播，則可假設波傳播路徑上沒有反射體，即不會有反射波($B=0$)，上式可簡化為

$$P(x,t) = Ae^{j(\omega t - kx)} \quad (4)$$

再假設音源在源點($x=0$)振動時，在鄰近介質之產生 $P_a e^{j(\omega t - kx)}$ 的音壓，求得 $A = P_a$ ，即可得平面聲波音壓方程式(5)

$$P(x,t) = P_a e^{j(\omega t - kx)} \quad (5)$$

再利用運動方程式(6)，可求得質點振動速度(7)

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = -\left(\frac{\partial P}{\partial x} i + \frac{\partial P}{\partial x} j + \frac{\partial P}{\partial z} k\right) \quad (6)$$

$$u(x,t) = \frac{P_a}{\rho c} e^{j(\omega t - kx)} \quad (7)$$

式中： $u_a = P_a / \rho c$

ρ = 介質密度 (kg/m^3)

將式(5)和式(7)代入式(1)可得特性阻抗公式(characteristic impedance)如下：

$$Z_a = \rho c \quad (8)$$

此公式代表理想介質中，平面聲波傳播聲場之均勻介質特性。

3. 穿孔板共振吸音結構模擬

3.1 模擬目的

穿孔板的聲阻值較低，本文設計五項控制因子來增加其聲阻值，分別為板厚、入口端孔洞直徑、出口端孔洞形狀、孔洞角度、孔洞數量。板厚的部分影響到穿孔板結構中孔洞的長度，由；入口端孔洞直徑影響到聲音進入穿孔板的大小；出口端孔洞形狀影響想通過量之多寡，結構中孔洞由圓形接到三角型呈現不規則造成漫射；孔洞角度，音源正入射時若無角度會有部分直接通過，在結構中增加孔洞角度增加聲阻值；孔洞數量影響到的就是穿孔率的部分。

此研究對穿孔板各控制因子品質特性以力之差值做為表現，理想機能皆設定為望大取向。

3.2 田口方法

田口式品質工程是田口玄一(Taguchi Genichi)博士於 1950 年代所開發倡導。利用簡單的直交表實驗設計與簡潔的變異數分析，以少量的實驗數據進行分析，可有效提昇產品品質。遂於日本工業界迅速普及，稱之為品質工程(Quality Engineering)。其並於 1962 年獲得品質界最高榮譽之一的品質應用戴明(Deming)獎，1951、1953、1984 獲得品質論文戴明獎。1980 年代後，美國 AT&T、Ford、Xerox、Motorola、Kodak 等公司亦陸續採用，歐美一般稱之為田口方法(Taguchi Method) [17]。田口方法最大的特點在於以較少的實驗組配，取得有用的資訊。雖不如全因子法真正找出確切的最佳化位置，但能以少數實驗便能指出最佳化趨勢，可行性遠大於全因子法。

田口方法有以下特點：

- (1) 基於品質損失函數之品質特性
- (2) 實驗因子的定義與選擇
- (3) S/N 比
- (4) 田口直交表。

3.3 直交表建立與各水準設計參數

直交表本文在此章節選擇了 L18 直交表， $L18(2^1 \times 3^7)$ 表共有 18 組，其中最多可容納 2 個水準的因子 1 個，3 個水準的因子 7 個(在全因子試驗中需有 $2^1 \times 3^7 = 4,374$ 組)，以規劃出 18 組。本文控制因子為 2 個水準的因子 1 個，3 個水準的因子 4 個，按照因子與水準數量直交表為 $L18(2^1 \times 3^4)$ 。

出口孔洞大小皆固定在 2mm，考慮到加工問題與模型計算上的效率，孔洞角度為出口與入口孔洞中心連線，與法線之夾角，如圖 2，孔洞數量則以倍數成長，方便模擬以對稱進行，入口圓孔大小與板厚則以市售之穿孔板進行設計，結果如表 1。

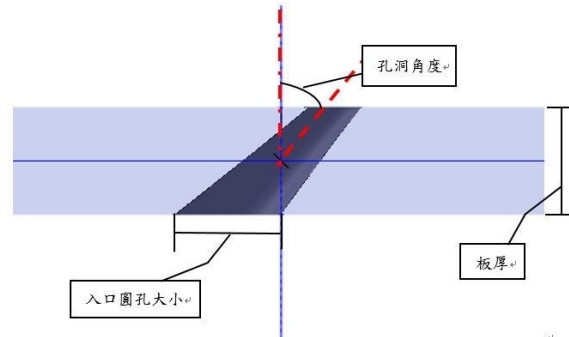


圖 2 孔洞角度示意圖

表 1 控制因子與各水準

Level effect	A 出口端孔洞形狀	B 孔洞角度	C 孔洞數量	D 入口圓孔大小	E 板厚
1	圓形	30 度	1 個	4mm	4mm
2	三角形	45 度	2 個	5mm	5mm
3		60 度	4 個	6mm	6mm

3.4 有限元素模型

本文穿孔板結構模型，首先在 CAD 畫出實體，再匯入前處理進行網格劃分，而網格在聲學有限元軟體裡模擬是需要頻率的波長大於 6 個網格邊長，例如模擬 1000Hz 波長為 34cm，網格邊常要小於 5.67cm，用此大小的網格模擬

出來才夠精確，但是有些結構較複雜或銜接處可能劃分精度不足，軟體最後模擬出結果可以檢查其精確度，如果沒達到預期之精度則需要在將網格細分，本文在此研究計算範圍為 100Hz~4000Hz 採用網格大小為 2mm，在孔洞位置加密至 0.5mm，圖 3 至圖 5 為孔洞數量 1、2、4 之孔洞位置圖。

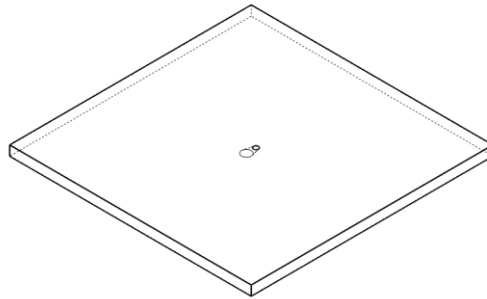


圖 3 單孔位置示意圖

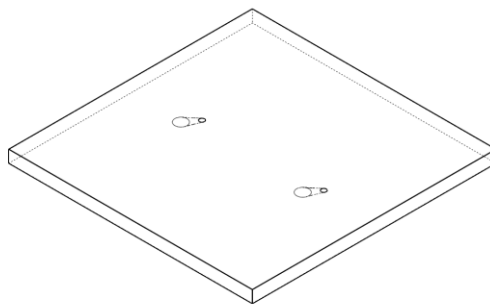


圖 4 雙孔位置示意圖

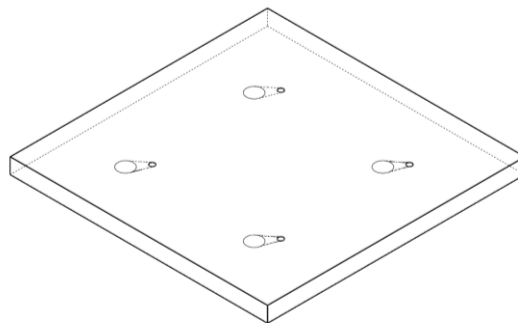


圖 5 四孔位置示意圖

3.5 邊界設置

在邊界條件的設置上，本文模擬穿孔板位於迴響室與無響室之間，把結構網格四邊約束住，類似固定於迴響室與無響室之間的窗口，迴響室定義上反射邊界，無響室定義上吸收邊界，設置如圖 6 所示，依照此邊界條件建立出聲學網格，長寬皆為 100mm 長出 50mm 厚度，如圖 7 所示，聲源採用單極子點(monopole)聲源。

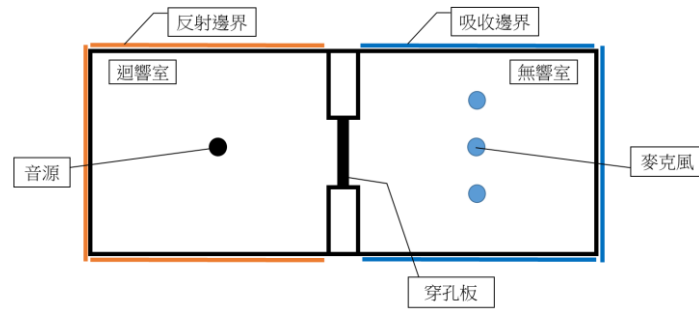


圖 6 邊界設置示意圖

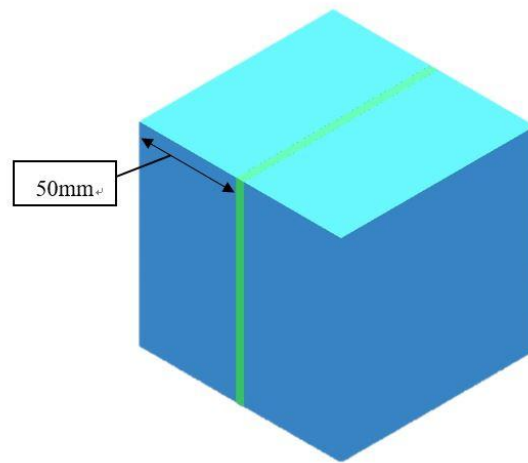


圖 7 聲學網格示意圖

3.6 模擬結果與分析

3.6.1 穿透損失分析

將 18 組模擬進行直接聲振耦合模擬計算，計算範圍為 100Hz~4000Hz 步階為 20Hz，本文將模擬後得到之聲壓值，提取入口端和出口端之聲壓值做穿透損失(TL 值)，出口端因有角度問題所以取三個麥克風位置做平均，麥克風位置如圖 8 所示，黃點為麥克風位置。

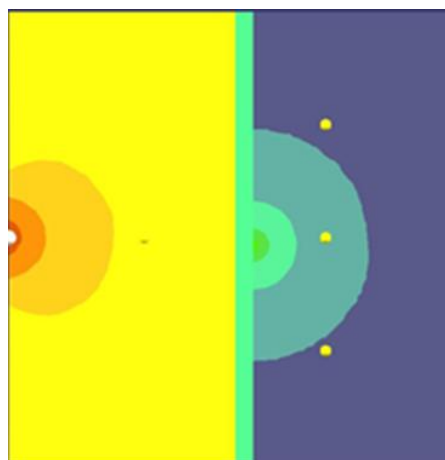


圖 8 出口端麥克風位置示意圖

穿透損失(Transmission Loss)定義隔音是希望將兩個空間中聲音的傳遞進行阻隔，隔音材料的使用能夠將空氣中的聲音，從隔音材料的一端通過進入另一個空間時受到限制，減低受音端的噪音，穿透損失(TL)是用來表示材料在隔音上的性質，其定義如下：

$$TL = 10 \log \left(\frac{1}{\tau} \right) = 10 \log \left(\frac{I_i}{I_t} \right) \quad (9)$$

上式中，TL 為穿透損失(dB)，表示穿透音功率和入射音功率之比值， I_i 為入射音功率(Watt)， I_t 為穿透音功率(Watt)。圖 9 至圖 14 為 18 次模擬之穿透損失頻譜圖。

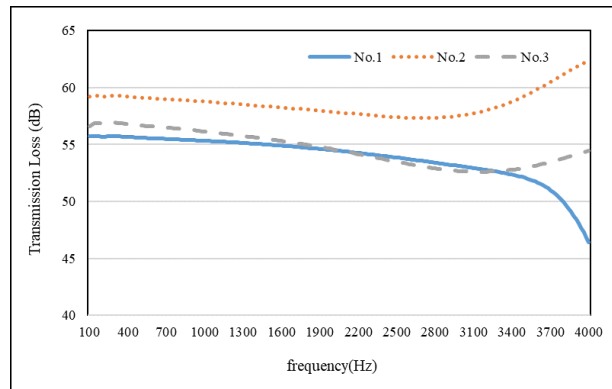


圖 9 No.1~No.3 穿透損失頻譜圖

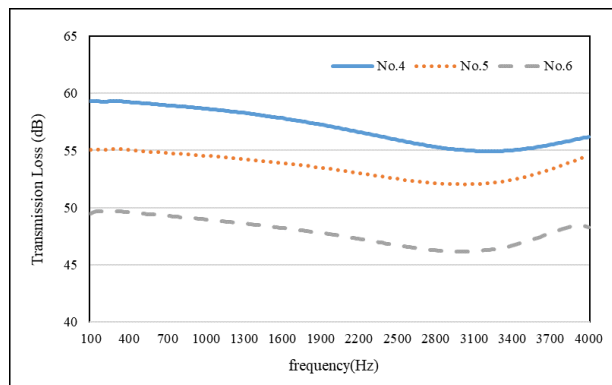


圖 10 No.4~No.6 穿透損失頻譜圖

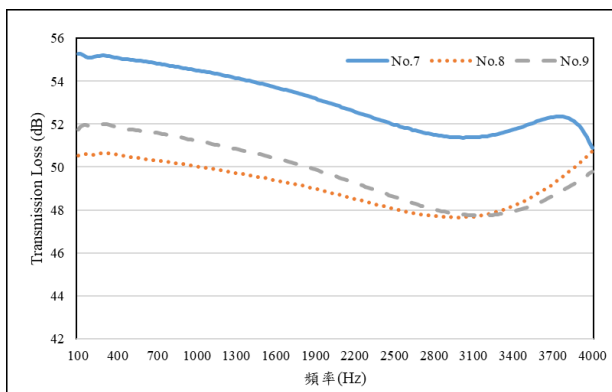


圖 11 No.7~No.9 穿透損失頻譜圖

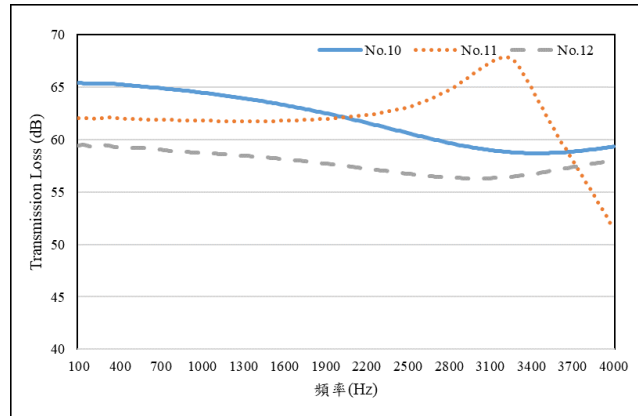


圖 12 No.10~No.12 穿透損失頻譜圖

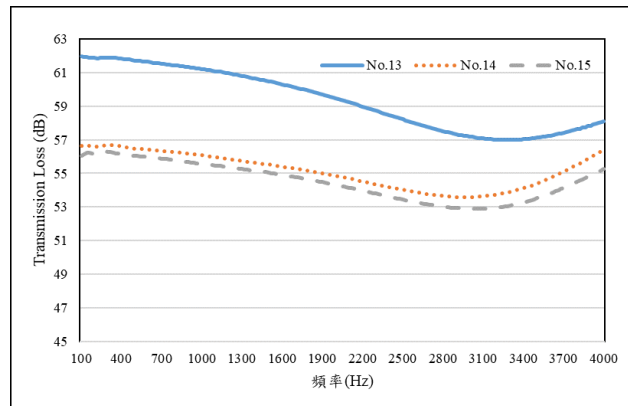


圖 13 No.13~No.15 穿透損失頻譜圖

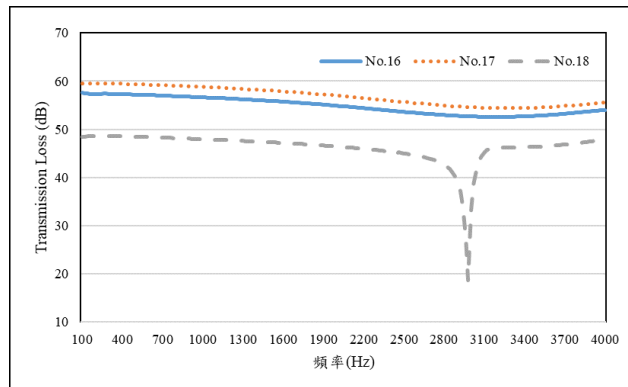


圖 14 No.16~No.18 穿透損失頻譜圖

3.6.2 田口因子水準效應分析

在此模擬中 TL 值不能充分表達其穿孔板參數特性，TL 值大小無法判定此控制因子對穿孔板之水準效應，本文將 18 次模擬入口端與出口端計算出聲壓差，最後再將聲壓差乘上入口孔洞截面積，得到 dF 值，並將 dF 值以 1/3 倍頻做分析，如表 2 至表 4 所示，dF 值公式如下：

$$dF = dP \times A \quad (10)$$

dF 為力差(force difference)單位為 N，dP 為入口端與出口端之壓力差單位為 Pa，A 為入口端之孔徑面積 m^2 。

表 2 1/3 倍頻 dF 值(1)

No	100Hz	125Hz	160Hz	200Hz	250Hz
1	5.55E-04	5.59E-04	5.70E-04	5.76E-04	5.84E-04
2	1.92E-03	1.92E-03	1.99E-03	2.03E-03	2.03E-03
3	5.59E-03	5.61E-03	5.71E-03	5.77E-03	5.87E-03
4	6.17E-04	6.16E-04	6.28E-04	6.38E-04	6.48E-04
5	1.89E-03	1.91E-03	1.98E-03	2.00E-03	2.02E-03
6	5.46E-03	5.51E-03	5.70E-03	5.74E-03	5.81E-03
7	9.65E-04	9.68E-04	9.85E-04	9.97E-04	1.01E-03
8	2.79E-03	2.80E-03	2.85E-03	2.88E-03	2.92E-03
9	2.49E-03	2.48E-03	2.52E-03	2.56E-03	2.61E-03
10	1.40E-03	1.40E-03	1.43E-03	1.44E-03	1.47E-03
11	1.23E-03	1.24E-03	1.28E-03	1.29E-03	1.31E-03
12	3.96E-03	3.97E-03	4.03E-03	4.07E-03	4.14E-03
13	9.76E-04	9.80E-04	9.97E-04	1.01E-03	1.02E-03
14	2.80E-03	2.80E-03	2.89E-03	2.95E-03	2.95E-03
15	2.46E-03	2.47E-03	2.51E-03	2.54E-03	2.59E-03
16	1.39E-03	1.41E-03	1.45E-03	1.46E-03	1.48E-03
17	9.64E-04	9.68E-04	9.86E-04	9.96E-04	1.01E-03
18	3.83E-03	3.84E-03	3.91E-03	3.95E-03	4.02E-03

表 3 1/3 倍頻 dF 值(2)

No	315Hz	400Hz	500Hz	630Hz	800Hz
1	5.92E-04	5.91E-04	5.84E-04	5.85E-04	5.86E-04
2	2.06E-03	2.08E-03	2.05E-03	2.02E-03	2.03E-03
3	5.96E-03	5.94E-03	5.85E-03	5.85E-03	5.83E-03
4	6.54E-04	6.52E-04	6.46E-04	6.43E-04	6.40E-04
5	2.05E-03	2.06E-03	2.02E-03	2.01E-03	2.02E-03
6	5.93E-03	5.93E-03	5.82E-03	5.80E-03	5.82E-03
7	1.03E-03	1.03E-03	1.01E-03	1.01E-03	1.01E-03
8	2.97E-03	2.96E-03	2.92E-03	2.91E-03	2.90E-03
9	2.63E-03	2.63E-03	2.60E-03	2.59E-03	2.58E-03
10	1.49E-03	1.48E-03	1.46E-03	1.46E-03	1.45E-03
11	1.33E-03	1.34E-03	1.31E-03	1.30E-03	1.31E-03
12	4.20E-03	4.19E-03	4.13E-03	4.12E-03	4.10E-03
13	1.04E-03	1.04E-03	1.02E-03	1.02E-03	1.02E-03
14	2.99E-03	3.02E-03	2.97E-03	2.94E-03	2.95E-03
15	2.63E-03	2.62E-03	2.58E-03	2.58E-03	2.57E-03
16	1.51E-03	1.51E-03	1.48E-03	1.47E-03	1.48E-03
17	1.03E-03	1.03E-03	1.01E-03	1.01E-03	1.01E-03
18	4.08E-03	4.07E-03	4.01E-03	4.01E-03	4.00E-03

表 4 1/3 倍頻 dF 值(3)

No	1000Hz	1250Hz	1600Hz	2000Hz	2500Hz
1	5.71E-04	5.46E-04	5.13E-04	4.71E-04	4.05E-04
2	1.97E-03	1.85E-03	1.70E-03	1.52E-03	1.27E-03
3	5.63E-03	5.32E-03	4.90E-03	4.38E-03	3.66E-03
4	6.19E-04	5.85E-04	5.39E-04	4.81E-04	4.03E-04
5	1.95E-03	1.83E-03	1.69E-03	1.51E-03	1.27E-03
6	5.64E-03	5.28E-03	4.88E-03	4.40E-03	3.68E-03
7	9.73E-04	9.17E-04	8.46E-04	7.57E-04	6.34E-04
8	2.80E-03	2.65E-03	2.44E-03	2.18E-03	1.83E-03
9	2.50E-03	2.36E-03	2.18E-03	1.95E-03	1.63E-03
10	1.40E-03	1.32E-03	1.22E-03	1.09E-03	9.10E-04
11	1.26E-03	1.18E-03	1.09E-03	9.77E-04	8.16E-04
12	3.96E-03	3.73E-03	3.44E-03	3.07E-03	2.56E-03
13	9.81E-04	9.25E-04	8.52E-04	7.60E-04	6.35E-04
14	2.86E-03	2.68E-03	2.46E-03	2.21E-03	1.85E-03
15	2.49E-03	2.35E-03	2.17E-03	1.94E-03	1.63E-03
16	1.43E-03	1.34E-03	1.23E-03	1.10E-03	9.21E-04
17	9.72E-04	9.16E-04	8.45E-04	7.56E-04	6.32E-04
18	3.87E-03	3.66E-03	3.39E-03	3.04E-03	2.54E-03

表 5 1/3 倍頻 dF 值(4)

No	3150Hz	4000Hz
1	3.15E-04	2.46E-04
2	1.06E-03	1.18E-03
3	3.03E-03	3.38E-03
4	3.35E-04	3.71E-04
5	1.05E-03	1.17E-03
6	3.02E-03	3.36E-03
7	5.29E-04	5.91E-04
8	1.52E-03	1.68E-03
9	1.35E-03	1.50E-03
10	7.57E-04	8.38E-04
11	6.76E-04	7.53E-04
12	2.13E-03	2.36E-03
13	5.30E-04	5.90E-04
14	1.54E-03	1.72E-03
15	1.35E-03	1.50E-03
16	7.66E-04	8.54E-04
17	5.25E-04	5.84E-04
18	2.11E-03	2.31E-03

將 18 次模擬結果之 dF 值以各控制因子的水準平均做為表，經直交表計算可得水準效應(Level effect)，可觀察出此穿孔板結構共振吸音模擬水準效應之高低。藉由觀察水準效應代表該項目變化對分析對象產生影響的程度，水準效應越高影響越大，水準效應分析結果可作為調整穿孔板參數的參考依據，根據觀察得出 100Hz~4000Hz 控制因子水準效應高低皆相同，本文擷取 100Hz、400Hz、1000Hz、2000Hz、4000Hz 做為範例，如表 6 至表 10，水準效應比較如下：

水準效應：C > D > A > B > E

分別為孔洞數量、入口圓孔大小、出口孔洞形狀、孔洞角度、板厚

表 6 100Hz 控制因子水準效應

Levels	A	B	C	D	E
Level 1	2.48E-03	2.44E-03	9.82E-04	1.47E-03	2.41E-03
Level 2	2.11E-03	2.37E-03	2.13E-03	2.07E-03	2.19E-03
Level 3		2.07E-03	3.96E-03	3.24E-03	2.30E-03
Effect	3.64E-04	3.71E-04	2.98E-03	1.77E-03	2.17E-04

表 7 400Hz 控制因子水準效應

Levels	A	B	C	D	E
Level 1	2.65E-03	2.60E-03	1.05E-03	1.56E-03	2.59E-03
Level 2	2.26E-03	2.55E-03	2.29E-03	2.21E-03	2.33E-03
Level 3		2.20E-03	4.23E-03	3.47E-03	2.46E-03
Effect	3.96E-04	4.00E-04	3.18E-03	1.91E-03	2.58E-04

表 8 1000Hz 控制因子水準效應

Levels	A	B	C	D	E
Level 1	2.52E-03	2.47E-03	9.93E-04	1.49E-03	2.46E-03
Level 2	2.14E-03	2.42E-03	2.17E-03	2.10E-03	2.21E-03
Level 3		2.09E-03	4.02E-03	3.29E-03	2.33E-03

Effect	3.80E-04	3.77E-04	3.02E-03	1.81E-03	2.51E-04
--------	----------	----------	----------	----------	----------

表 9 2000Hz 控制因子水準效應

Levels	A	B	C	D	E
Level 1	1.96E-03	1.92E-03	7.74E-04	1.16E-03	1.93E-03
Level 2	1.66E-03	1.88E-03	1.68E-03	1.63E-03	1.72E-03
Level 3		1.63E-03	3.13E-03	2.56E-03	1.81E-03
Effect	3.02E-04	2.88E-04	2.36E-03	1.40E-03	2.10E-04

表 10 4000Hz 控制因子水準效應

Levels	A	B	C	D	E
Level 1	1.50E-03	1.46E-03	5.82E-04	8.73E-04	1.45E-03
Level 2	1.28E-03	1.45E-03	1.30E-03	1.26E-03	1.32E-03
Level 3		1.25E-03	2.40E-03	1.97E-03	1.40E-03
Effect	2.18E-04	2.08E-04	1.82E-03	1.10E-03	1.26E-04

田口法的最佳組配通常不在模擬組中，必須透過反應圖才能找到，如圖 15 所示，由於其水準效應高低皆相同則以 100Hz 為範例，再來觀察出各控制因子於 1/3 倍頻中有較高之水準效應，如表 11。

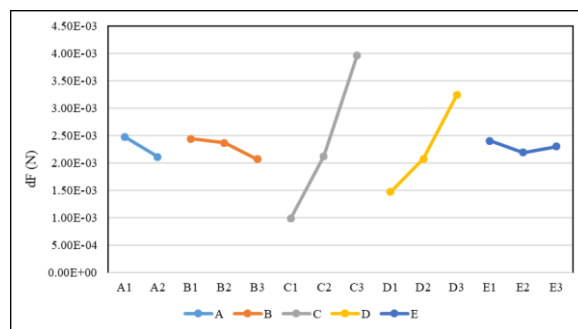


圖 15 田口方法反應圖

表 11 控制因子水準效應最大之頻率

控制因子	A	B	C	D	E
頻率	125Hz	400Hz	315Hz	400Hz	400Hz

根據田口法規則，本文方向為望大，分析出的 dF 值較大為佳，及選擇能產生全頻率最大結果的組配，如表 12。水準分析的結果可以做為調整穿孔板參數的參考依據，最佳設計參數組配僅為設計水準範圍內的最佳組配，是一個參考指標並非絕對最佳組配。

表 12 最佳設計參數組配(望大)

最佳組配	A1	B1	C3	D3	E1
參數	圓孔	30 度	4 孔	6mm	4mm

要確認最佳參數組配正確性，方法就是進行確認，首先以式(11)計算出品質的預測值，若預測品質的結果大於

L18 表當中的組配，代表最佳參數組配符合品質所假設的望大方向，此外，將最佳參數組配以聲學模擬軟體模擬計算，若模擬值和預測值夠接近，則我們可以認定的模式與預估結果是可靠的，本文以 1000Hz 之結果進行預測值與驗證值比對如表 13。

$$Y = \bar{Y} + (\bar{Y}_{A1} - \bar{Y}) + (\bar{Y}_{B1} - \bar{Y}) + (\bar{Y}_{C3} - \bar{Y}) + (\bar{Y}_{D3} - \bar{Y}) + (\bar{Y}_{E1} - \bar{Y}) \quad (11)$$

表 13 控制因子水準效應最大之頻率

	預測值	模擬值	相對誤差(%)
dF(N)	5.45E-03	5.08E-03	6.74

相對誤差(Relative Error)的計算方式為預測值扣除驗證值在除以預測值，經驗證比對預測值與模擬值的品質誤差在 6.74%，說明各穿孔板的結構參數是有一定的相依性存在的，但此方法仍然可以用於快速評估穿孔板參數及特性，如果將 dF 值轉換使用壓力差單位 dB 來進行評估，模擬與預測值準確度相差為 0.001dB 以下，誤差非常的小，也證明田口設計法適合應用在穿孔板參數設計。

4. 結論

- (1) 本文利用聲學有限元素法模擬穿孔板孔洞性值，以局部小面積來快速評估其穿孔板聲阻特性，進行田口直交表模擬，找出控制因子對穿孔板共振吸音結構之水準效應。
- (2) 探討孔洞變化對整體穿孔板聲阻值變化，以 TL 值是無法判定其好壞，出口端孔洞越小得到之 TL 值就會越大，TL 值最高為無孔洞的情況下，因此本文採用力差(force difference)值來判斷其控制因子之水準效應。
- (3) 在直交表分析得知在 100Hz~4000Hz 以 1/3 倍頻下觀察，其控制因子水準效應不會因頻率有變化。
- (4) 從結果得之穿孔板的水準效應(Level effect)大小依序為：孔洞數量、入口圓孔大小、出口孔洞形狀、孔洞角度、板厚
- (5) 從各控制因子 dF 值貢獻最大頻率表中可得知，最有影響之頻率範圍為 125Hz~400Hz，根據控制因子來設計穿孔板之結構參數，能提升其頻率範圍聲阻值。
- (6) 在針對 dF 值做預測值與模擬值之驗證時得知其相對誤差為 6.74%，代表各個控制因子有相依性的存在，但將 dF 值轉換使用壓力差單位 dB 來進行評估，模擬與預測值準確度相差約 0.001dB 以下，此差距在非常的低，此方法可以做為快速評估各參數使用。

5. 參考文獻

1. 馬大猷，微穿孔板吸聲結構的理論和設計，中國科學 vol.18, pp.55~71, 1975.
2. 馬大猷，微穿孔板聲阻抗的直接準確量測，聲學聲報 vol.05, pp.257~262, 1983.
3. Zhang, B. Z. Tao, Pre-diction of Sound - Absorbing Performance of Micro-Perforated Panels using the Transfer Matrix Method, University of Kentucky, 2005.
4. Bolton, J. Stuart, Nicholas Kim, Use of CFD to Calculate The Dynamic Resistive End Correction For Micro-perforated Materials, Acoustics Australia, pp.2~7, 2010.
5. Bolton, J. Stuart, Ray W. Herrick Laboratories, Nicholas Kim, Use of CFD to Calculate the Transfer Impedance of Micro-perforated Materials Having Round-Edged Holes, Portland, Oregon NOISE-CON, pp.11~22, 2011.
6. Cheng, Y., C. Li, Micro-Perforated Panel Absorber In Small scale Cavity, ICSV 21, pp.13~17, 2014.
7. Herrin, D. W., X. Hua, J. Liu, Micro-perforated Panel Absorber Design: A Tutorial, ICSV 21, pp.1~8, 2014.
8. Cheng Yang, Li Cheng, Micro-Perforated Panel Absorber In Smallscale Cavity, 21st International Congress on Sound and Vibration (ICSV21), 2014.
9. Guo, Wencheng, Hequn Min, Micro-Perforated Panel Sound Absorbers With An Array Of Partitioned Cavities Of Different Dimensions, 2015 International Conference on Noise and Fluctuations (ICNF), 2015.
10. Iman Falsafi, Abdolreza Ohadi, Improving Absorption Bandwidth of Micro-Perforated Panel By Stepping The Cavity, The 22nd International Congress on Sound and Vibration, 2015.
11. Guo Wencheng, Hequn Min, Micro-Perforated Panel Sound Absorbers With An Array Of Partitioned Cavities Of Different Dimensions, ICNF, pp.3~4, 2015.

12. Wang, X., D. Mao, W. Yu, Z. Jiang Sound barriers from materials of inhomogeneous impedance, Institute of Acoustics, Tongji University, No. 1239, pp.3190~3197, 2015.
13. 胡文信, 多空腔微穿孔板吸音特性研究, 國立臺灣海洋大學碩士論文, 2018.
14. 田春雨, 穿孔板共振吸聲結構吸聲性能研究, 大連交通大學, 2018.
15. 李昱緯, 異型微穿孔板特性研究極再銷音箱應用分析, 國立臺灣海洋大學碩士論文, 2019.
16. 白明憲, 工程聲學, 全華圖書有限公司, 第七版, pp1-5~1-49、2-3~2-21, 2016。
17. 李輝煌, 田口方法: 品質設計的原理與實務, 高立圖書有限公司, pp.8~33, 2008.