

# 異型微穿孔板性能改良

## Performance Improvement of Special-Shaped Micro-Perforated Panel

吳邦彥<sup>\*</sup>，張智堯<sup>\*\*</sup>，邱進東<sup>\*\*</sup>

**Bang-Yenn Wu<sup>\*</sup>， Chih-Yao Chang<sup>\*\*</sup>， Jinn-Tong Chiu<sup>\*\*</sup>**

<sup>\*</sup>宏國德霖科技大學 機械工程系助理教授

Assistant Professor

Department of Mechanical Engineering

HungKuo Delin University of Technology

<sup>\*\*</sup>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

微穿孔板之吸音表現具全頻特性，吸音頻寬優於傳統吸音材料；且微穿孔板為金屬材質，具有重複使用、易清潔、堅固等優點，為吸音材料的一大創舉。

本文利用田口方法對吸音性能進行優化與探討，目標如下：單頻垂直入射吸音率優化、微穿孔板之噪音降低係數優化、微穿孔板控制因子影響力排名。為探討控制因子影響程度，設計一個兩水準以及五個三水準的控制因子並利用 L18 直交表設計出 18 種微穿孔板消音系統，經由阻抗管實驗求取其全頻域之吸音率。實驗結果經田口方法分析後，得知顯著因子之影響貢獻由大至小依序為：空腔厚、板厚、孔高、孔行距、孔間距與孔寬。經參數最適化後預測之吸音係數表現優於原先直交表所設計 18 組之值，垂直入射吸音率之預測值與實驗值趨勢接近。

關鍵詞：微穿孔板、聲學、田口方法、阻抗管。

### Abstract

The sound absorption performance of the micro-perforated panel has full frequency characteristics, and the bandwidth is better than traditional sound-absorbing materials. Furthermore, the micro-perforated panel is made of metal, which is a great innovation for sound-absorbing materials.

This paper uses Taguchi's method to improve single-frequency normal incident sound absorption coefficient and noise reduction coefficient, and ranks the influence of the micro-perforated panel factors. In order to explore effecting degree of factors, 18 kinds of micro-perforated panel systems were designed using a two-level and five three-level factors with an L18 orthogonal array, and the sound absorption coefficient in the whole frequency

band was obtained through impedance tube experiment. After Taguchi's method analysis, the order of factors is: cavity thickness, panel thickness, and height, row spacing, column spacing, width of hole. The predicted sound absorption coefficient after parameter optimization is better than the 18 groups of values designed by the original orthogonal table, and the trend of the predicted sound absorption rate at normal incidence is close to the experimental value.

Keywords: special-shaped micro-perforated panel, acoustic, Taguchi's method, impedance tube.

## 1.前言

微穿孔板照片如圖 1，是利用背後空腔形成共振吸音結構，不同的是孔徑通常為 0.5 至 1mm，而穿孔率為 1 至 5%[1]。因為較大的吸音頻帶，因此其後方不需搭配多孔吸音材料，但也由於孔徑較小，在工法上較為困難，成本較高。金屬微穿孔板因為具有環保、易清潔、防塵、防火等特性，使用壽命高於傳統吸音材，是適用於各種環境的綠色建材。

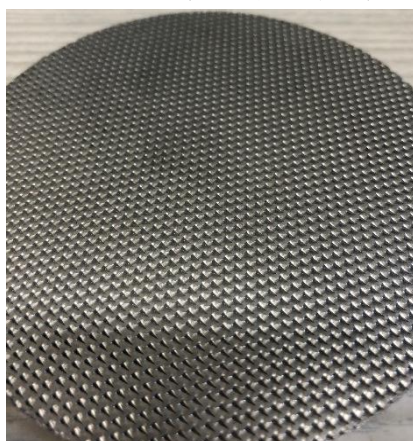


圖 1 微穿孔板孔洞近照圖

微穿孔板的吸音表現通常會先藉由阻抗管的方式進行初步量測，優點是能夠利用體積較小之樣品獲取該產品的垂直入射吸音率及噪音降低係數，便於後續產品研究與優化。蔡夏生[2]利用模擬與實驗進行比對，對應到 ASTM 規範[3]所提之阻抗管內部表面需為光滑面，管內不光滑處越接近麥克風，將造成越大的結果誤差；另外在阻抗管不同管徑連接處加裝吸音棉，比對頻率響應結果並無太大差別，可推測為聲波遇干擾後，經足夠距離傳播仍可回復波形，不影響阻抗管特性。Wenjie Wang 等人[4]基於阻抗管中不同位置之頻率響應，提出新型阻抗管法，並於靜水壓力條件下延伸，拓展至水下聲學領域。J. Hald 等人[5]利用雙層麥克風陣列，改善阻抗管只能量測垂直入射之情形，其結果顯示，在較大的斜入射角下具良好一致性。馬大猷[6]以微穿孔板結構提出等效電路圖，進一步延伸出微穿孔板的準確理論，穿孔板常數  $k$  與相對聲阻抗  $r$ ，兩者共同影響微穿孔板的頻率特性與性能表現： $k$  值小於 1 時，吸音頻帶較寬，空腔厚度需為波長  $1/4$ ； $r$  值增加時，最大吸音係數下降且吸音頻帶增寬。

$$k = d \sqrt{\frac{f_0}{10}} \quad (1)$$

其中  $d$ :穿孔直徑,  $f_0$ :共振頻率

$$r = \frac{0.147t}{(pd^2)} k_r \quad (2)$$

$$k_r = \sqrt{1 + \frac{k^2}{32}} + \frac{\sqrt{2}}{8} \frac{kd}{t} \quad (3)$$

其中  $t$ :板厚,  $p$ :穿孔率,  $k_r$ :相對聲阻常數

江仲傑[7]比較傳統微穿孔板與斜向微穿孔板,並探討不同因子對於斜向微穿孔板吸音率造成的影響,結果表示增加穿孔之孔側面積、穿孔斜度與孔深均對吸音率有明顯影響。R. Brandão 與 Ory Schnitzer[8]探討穿孔板之孔徑縱橫比與板厚對流體黏性造成之影響。劉克等人[9]基於馬大猷教授之微穿孔板理論,衍生出新型吸音結構—管束微穿孔板,因軟性管束可彎曲,故空腔厚度可超出原先限制,其吸音係數與吸音頻寬皆優於一般微穿孔板,甚至超越雙層微穿孔板結構,適用於小空間限制之場合。孫文娟等人[10]整理馬大猷教授所提理論並提供更完整的比對,除了穿孔直徑與空腔厚度外,也針對微穿孔板板厚與穿孔率進行性能影響分析。馬大猷[11]提出微穿孔板之結構不需安裝多孔材料,並提出與驗證微穿孔板聲阻抗公式,根據結果,各頻率之誤差皆在 5% 以內,證實其可靠度。Zhixiang Chen 等人[12]利用三維之時域計算流體力學方法,探討不同馬赫數之偏流通過孔洞之分布情形等影響,確認穿孔板的聲阻抗。Z. Tao 等人[13]利用穿孔之傳輸阻抗,進而整理出傳遞矩陣,改善穿孔板之孔洞在不同孔徑甚至不同穿孔形狀時的性能預測,依吸音結果顯示不論是單一穿孔板或是多種穿孔板所組成的空間系統皆能準確預測其效果。St. Marburg 與 H. J. Hardtke[14]提出聲學邊界導納可以表現出空間周圍之結構剛度、質量與阻尼情形。除了利用邊界元素法驗證已知聲場之導納外,聲場邊界導納還可以利用節點速度除上聲壓求取,並延伸出邊界導納對結構與流體的相互作用。吳邦彥等人[15]利用異型微穿孔板垂直入射吸音率與修正公式,求取異型微穿孔板聲阻抗,並代入聲學有限元素法模擬風管消音箱之插入損失值,對比實驗結果誤差皆在 3dB 以內,證實其聲阻抗之正確性。

## 2. 研究方法

### 2.1 聲阻抗與聲導納

聲導納是聲波  $x$  正向分量區隔,以  $A'$  標示與聲阻抗為一體兩面的概念,兩者互為倒數關係[16]。當聲波傳播時,若受阻而反射稱之為聲阻抗;反之,當聲能被吸收並且傳

導，就稱為聲導納；聲導納單位為  $\text{m/Pa s}$ 。

$$A' = \frac{1}{Z} = \frac{V}{P} \quad (4)$$

## 2.2 吸音係數與噪音降低係數

吸音係數(Absorption Coefficient)又稱吸音率，可進一步求得噪音降低係數，噪音降低係數(Noise Reduction Coefficient)簡稱為 NRC[17]，用於評量吸音材料之表現，為商業流通之主要指標參數，是將頻率 250、500、1000、2000Hz 之吸音係數(吸音率)以平均數表示，將數值取至小數點後兩位，再將末位取 0 或 5。由於 NRC 來源為吸音係數，因此在求取吸音係數時，無論是材料特性、厚度，甚至實驗的安裝方法等均會對 NRC 產生影響。吸音係數  $\alpha$  需要利用聲阻抗  $z$  求出反射係數  $R$ ，反射係數與吸音係數之關係為：

$$R = \frac{z-1}{z+1} \quad (5)$$

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (6)$$

因此 NRC 計算方式為：

$$NRC = \frac{\alpha_{250\text{Hz}} + \alpha_{500\text{Hz}} + \alpha_{1000\text{Hz}} + \alpha_{2000\text{Hz}}}{4} \quad (7)$$

## 2.3 阻抗管法實驗原理

在聲學實驗中，關於材料的吸音係數測量，可以利用阻抗管方法求取，優點是只需阻抗管管徑大小的試片即可，可免去大型產品的真實體積搬運，增加了便利性與成本。阻抗管的構造[3]如圖 2，由圖中右側的聲源段(揚聲器)、麥克風 A、麥克風 B 與圖中左側的空腔(可手動調整厚度)所組成。

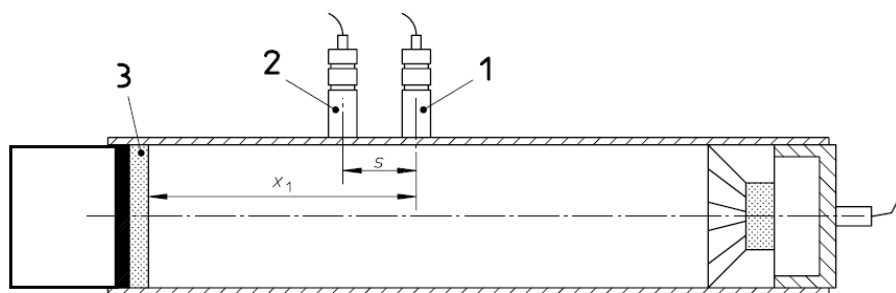


圖 2 阻抗管示意圖

其中

位置 1：麥克風 A、

位置 2：麥克風 B、

位置 3：試片安裝位置。

關於阻抗管量測方法可以參考國際標準 ASTM E1050-08[17]以及 ISO 10534 -2[18]，阻抗管法的實驗理論是基於傳遞函數方法，原理是由圖 2 中右側的聲源段發射寬帶穩態的聲波，聲波經過麥克風 A 與麥克風 B 並到達試片位置，此時部分聲波將被吸音材料(或穿孔板與空腔所組成的共振結構)吸收後反射回傳，因此兩支麥克風將各自接收到入射波 $P_i$ 與反射波 $P_r$ 之聲壓，如式(8)至式(11)。

$$P_i = P_I e^{jkx} \quad (8)$$

$$P_r = P_R e^{-jkx} \quad (9)$$

$$P_A = P_I e^{jkx_1} + P_R e^{-jkx_1} \quad (10)$$

$$P_B = P_I e^{jk(x_1-s)} + P_R e^{-jk(x_1-s)} \quad (11)$$

其中

$P_i$ ：入射波聲壓、

$P_r$ ：反射波聲壓、

$P_I$ ：麥克風接收之入射聲波分量、

$P_R$ ：麥克風接收之反射聲波分量、

$P_A$ ：麥克風 A 所測得聲壓(Pa)、

$P_B$ ：麥克風 B 所測得聲壓(Pa)。

接著將麥克風 A 與 B 位置互換再量測一次，第二次量測之 A、B 麥克風聲壓標示為  $P_A'$ 、 $P_B'$ ，即可計算校正因子與總聲場轉移函數，進而推算反射係數  $R$  與吸音係數  $\alpha$ 。

$$H_1 = \frac{P_B}{P_A} \quad (12)$$

$$H_2 = \frac{P_A'}{P_B'} \quad (13)$$

$$H_c = (H_1 \times H_2)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

$$H_{12} = \frac{H_1}{H_c} = H_r + jH_i \quad (15)$$

$$R = \frac{H_{12} - e^{-jks}}{e^{jks} - H_{12}} e^{j2kx_1} = R_r + jR_i \quad (16)$$

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (17)$$

其中

$H_1$ ：第一次測量之轉移函數(麥克風 A 位於位置 1，麥克風 B 位於位置 2)、

$H_2$ ：第二次測量之轉移函數(麥克風 B 位於位置 1，麥克風 A 位於位置 2)、

$H_c$ ：轉移函數之校正因子、

$H_{12}$ ：總聲場之轉移函數、

$H_r$ ：聲場轉移函數( $H_{12}$ )之實部、

$H_i$ ：聲場轉移函數( $H_{12}$ )之虛部、

$R_r$ ：反射係數( $R$ )之實部、

$R_i$ ：反射係數( $R$ )之虛部。

## 2.4 實驗直交表建立

在控制因子的設計中，由文獻回顧[10]可以得知穿孔率之影響甚大，但因穿孔率在製作工法上較難控制，本文最後選擇之控制因子及水準如表 1，包含 1 個 2 水準與 5 個 3 水準之控制因子，控制因子示意如圖 3，圖 3 左圖 PL1 為孔間距、PL0 為孔行距；圖 3 右圖 DL1 為孔高、DL0 為孔寬。本章使用之微穿孔板，微孔形狀為三角形漏斗狀，最底部之微孔開洞為方形，此設計可以讓吸音頻寬較傳統直圓孔更廣。考慮到實驗因子數與水準數，直交表選擇以 L18 形式呈現，可建立 18 組微穿孔板消音系統實驗，控制因子及各水準對應表 1。

表 1 控制因子及各水準

水準 / 控制因子	A 孔間距	B 孔行距	C 孔高	D 孔寬	E 板厚	F 空腔厚
Level 1	2	1.1	0.03	0.35	0.9	25
Level 2	3	1.15	0.04	0.4	1	30
Level 3		1.2	0.05	0.45	1.1	35

單位:mm

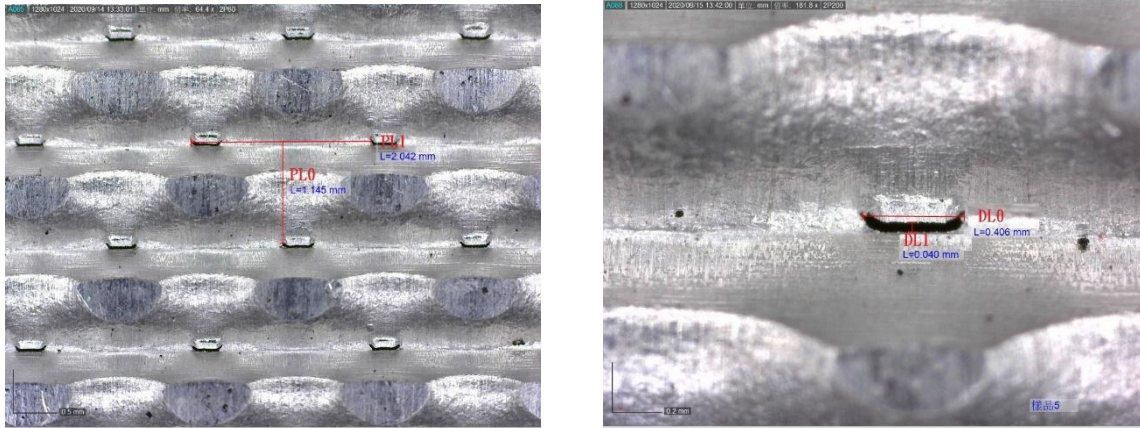


圖 3 控制因子

## 2.5 阻抗管實驗流程

微穿孔板的阻抗管實驗流程如下：

- (1) 麥克風校正。
- (2) 將校正後的麥克風及微穿孔板放入阻抗管中如圖 4，樣品管底部空腔可由拉桿手動調整，形成共振吸音結構。
- (3) 聲源段揚聲器放出白噪音 10 秒，量測聲壓值。
- (4) 將麥克風位置互換，並再次量測。
- (5) 將兩麥克風於兩次測量之結果代入公式中計算，即可獲得微穿孔板共振吸音結構之垂直入射吸音率。
- (6) 依實驗頻率之不同，卸下大樣品管及微穿孔板後，換上小樣品管並重複步驟(1)~(4)。



圖 4 微穿孔板於管中位置

## 3. 結果與討論

實驗之觀察頻率，選用 NRC 計算頻率(250Hz、500Hz、1000Hz、2000Hz)下限 0.5 倍與上限 2 倍，即最小 125Hz、最大 4000Hz。將直交表中 18 組微穿孔板消音系統各進行 3 次阻抗管實驗後，可以觀察其垂直入射吸音率。其中第 1 至 3 組實驗結果如圖 5，

圖中頻率皆取 1/3 倍頻，因 18 組微穿孔板消音系統之各頻垂直入射吸音率皆包含 3 次實驗數據，圖中曲線為 3 次實驗平均結果。

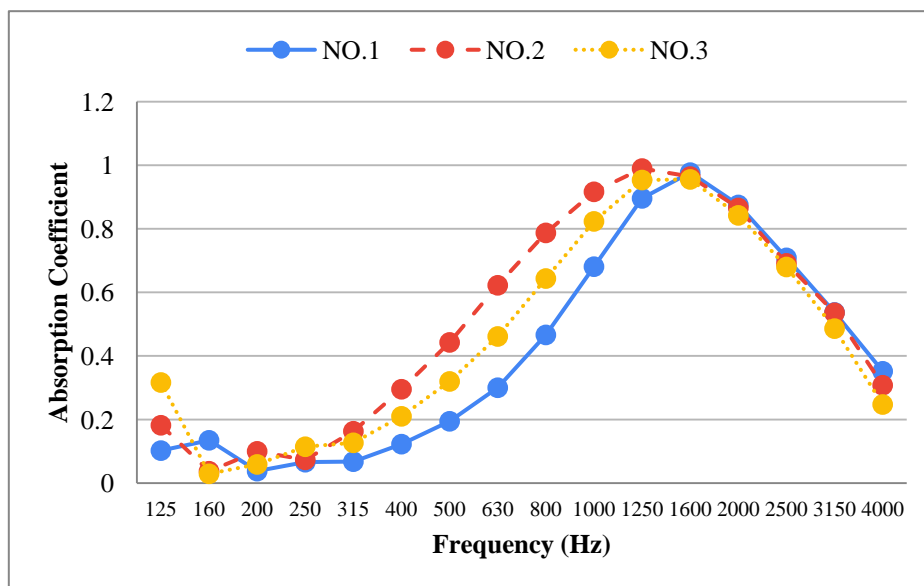


圖 5 直交表之 1/3 倍頻垂直入射吸音率

藉由式(7)可以求得 18 組微穿孔板消音系統之 NRC 值，其中 NRC 值最大為第四組的 0.60、最小為第六組的 0.30，詳細結果如表 2。

表 2 直交表之 NRC 數值

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
NRC	0.45	0.55	0.55	0.60	0.55	0.30	0.55	0.50	0.55
No.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
NRC	0.50	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.50	0.50	0.40

將實驗結果以 S/N 比望大公式計算，可以整理出各頻率因子反應表。以 L18 表中第一組微穿孔板為例，以 125Hz 為例其垂直入射吸音率 S/N 比計算過程，3 次實驗之吸音率結果為 0.10131、0.10245、0.10329，則 S/N 比望大為

$$-10 \times \log\left(\frac{\frac{1}{0.10131^2} + \frac{1}{0.10245^2} + \frac{1}{0.10329^2}}{3}\right) = -19.7991 \quad (18)$$

因子反應表，為田口方法中最重要的環節，本文依 NRC 計算頻率 250Hz、500Hz、1000Hz、2000Hz 繪圖，其中 250Hz 因子反應圖如圖 6 所示。

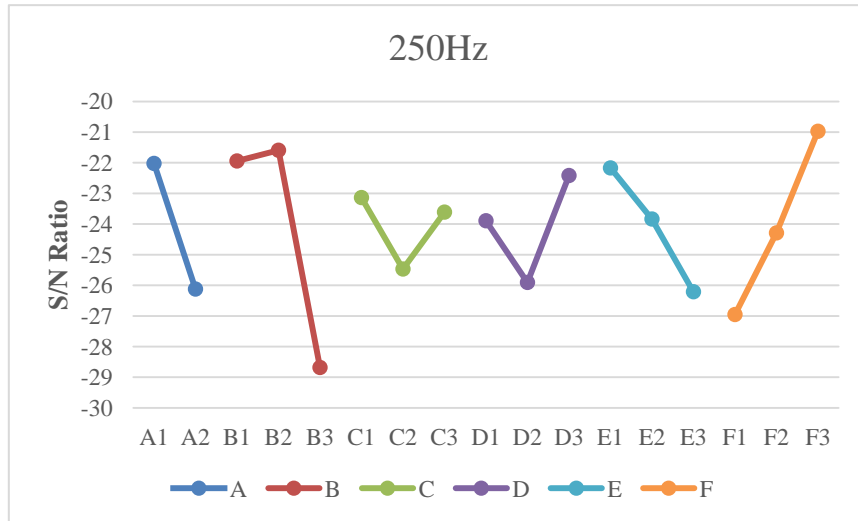


圖 6 250Hz 因子反應圖

由因子反應圖選擇出各因子的望大水準後，即可獲得最佳組配，例如：由 125Hz 之最佳組配為 A2、B3、C2、D1、E3、F2；其預測值  $\eta_{125Hz}$  可經由式(20)在逆運算後得出垂直入射吸音率為 0.5162。式(20)為式(18)之逆運算式，是反向以 S/N 比( $\eta$ )推算實驗值(y)。

$$\eta_{125Hz} = \bar{\eta} + (\bar{\eta}_{A2} - \bar{\eta}) + (\bar{\eta}_{B3} - \bar{\eta}) + (\bar{\eta}_{C2} - \bar{\eta}) + (\bar{\eta}_{D1} - \bar{\eta}) + (\bar{\eta}_{E3} - \bar{\eta}) + (\bar{\eta}_{F2} - \bar{\eta}) \quad (19)$$

$$\alpha_{125Hz} = 10^{\frac{\eta_{125Hz}}{20}} \quad (20)$$

表 3 可以觀察到各頻垂直入射吸音率預測值皆優於直交表 18 組的表現，證實 1/3 倍頻帶各頻最佳組合有效。

表 3 1/3 倍頻最佳組合分析

最佳組合分析	最佳組配	吸音率預測值
125Hz	A2+B3+C2+D1+E3+F2	0.5162
160Hz	A2+B3+C1+D1+E1+F2	0.3580
200Hz	A2+B3+C1+D2+E3+F2	0.4269
250Hz	A1+B2+C1+D3+E1+F3	0.2527
315Hz	A1+B3+C2+D2+E3+F2	0.2107
400Hz	A1+B1+C1+D1+E3+F3	0.3662
500Hz	A1+B1+C1+D1+E3+F3	0.5565
630Hz	A1+B1+C1+D1+E3+F3	0.7572
800Hz	A1+B1+C1+D1+E3+F3	0.9818
1000Hz	A2+B1+C1+D1+E3+F3	1.1430
1250Hz	A2+B1+C1+D1+E3+F3	1.2249
1600Hz	A2+B3+C2+D1+E3+F2	1.1459
2000Hz	A1+B3+C2+D2+E3+F1	1.0247

2500Hz	A1+B3+C3+D2+E3+F1	0.9576
3150Hz	A1+B3+C1+D2+E3+F1	0.7826
4000Hz	A1+B3+C3+D2+E3+F1	0.5508

由上表可以觀察到 1/3 倍頻範圍內的 16 個頻率結果，挑選各因子在 16 個單頻中的顯著次數進行統計，例如 A2 水準在 125Hz、160Hz、200Hz、1000Hz、1250Hz、1600Hz 這 6 個頻率下影響力大於 A1，則將 A2 之顯著數量計為 6。統計完成後如表 4，可進一步挑出整體最佳組合，並同樣預測出該組合的微穿孔板垂直入射吸音率如圖 7。

表 4 預測最佳組配

	A	B	C	D	E	F
Level 1	10	6	10	9	2	4
Level 2	6	1	4	6	0	5
Level 3		9	2	1	14	7
預測最佳組合:A1+B3+C1+D1+E3+F3						

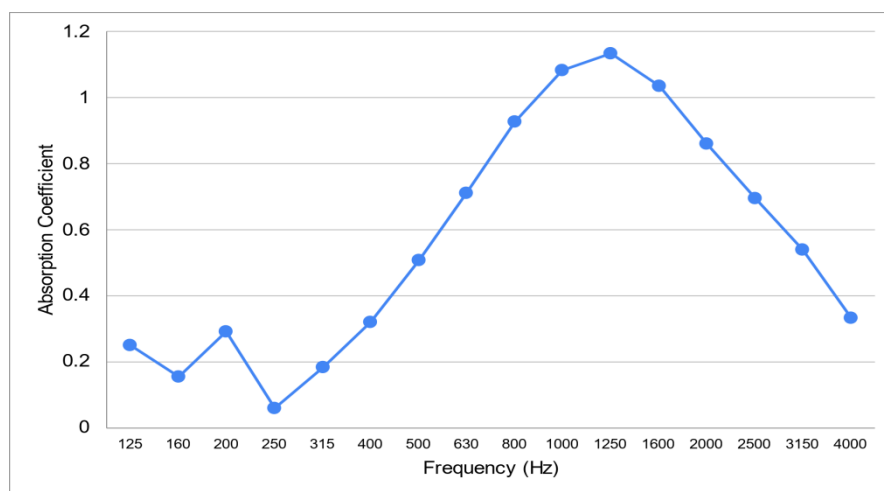


圖 7 預測最佳組合之 1/3 倍頻垂直入射吸音率

由表 4 與圖 7 可以發現，些許數據的表現超過了原有吸音率範圍的 0~1 之間，該情形在 ASTM C423-07a [17]中提到，吸音率的量測結果可以允許單頻超過 1，而 NRC 的計算結果不可超過 1。計算過後，預測最佳組合的 NRC 值為 0.65，表現優於直交表所設計之 18 組，證實該組合確實為整體最佳。推測出整體最佳組合及其吸音率後，依其規格組合，將整體最佳組合之微穿孔板試片同樣進行阻抗管實驗，進一步驗證預測效果，圖 8 為整體最佳組合之垂直入射吸音率實驗與預測對比圖。

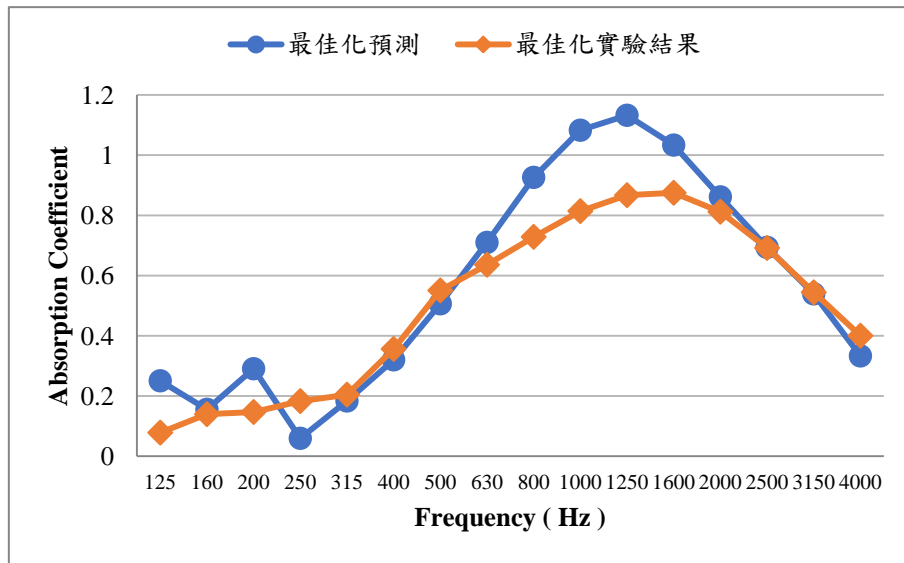


圖 8 整體最佳組合之 1/3 倍頻實驗結果

實驗之 NRC 值計算結果為 0.6，比起預期值 0.65 略低，原因就在於 NRC 計算所使用的 1000Hz 也涵蓋在高峰理想段內，撇除田口法理想化所導致的落差後，仍以實際結果進行探討。與表 2 比較可以發現，最佳化組合的 NRC 值與直交表第四組相同，皆為 0.6，而實際觀察 NRC 計算的初始數據可以發現，第四組為 0.5750，而整體最佳組合為 0.5898，確實有所優化。

## 4. 結論

本文以田口方法建立 18 組微穿孔板消音系統並進行阻抗管實驗，接著運用因子反應表預測各頻率與整體微穿孔板參數最佳組合，最後以實驗驗證整體最佳組合預測結果。

- (1) 1/3 倍頻帶之單頻最佳組合皆優於直交表 18 組之表現，且整體最佳組合之噪音降低係數也優於直交表 18 組的表現，證實最佳化有效。
- (2) 1/3 倍頻帶上影響力排名大致符合「空腔厚、板厚、孔高、孔行距、孔間距與孔寬」的順序，些許控制因子會在特定頻帶具明顯影響力而排名往前，或影響力驟減而排名下降。
- (3) 依設計之控制因子，空腔厚對於 1/3 倍頻帶皆佔重要影響地位，尤其在頻率 2500 至 4000 範圍內，影響明顯大於其他因子。
- (4) 低頻頻帶 125Hz 至 315Hz 中，板厚的影響力與空腔厚接近，為該頻帶最重要的控制因子。
- (5) 孔高在低頻帶影響力小，卻在 315Hz 至 1600Hz 與板厚、空腔厚影響力接近，而在 2000Hz 至 4000Hz 中，則影響力迅速下降。
- (6) 田口法最佳化預測是以理想環境作為基礎，並以直交表實驗數據進行分析，依實驗結果，垂直入射吸音率之預測值與實驗值趨勢接近，說明本文田口法實驗是有效的。

## 誌謝

本論文感謝國科會產學計畫編號 109-2622-E-019-006-與青鋼應用材料的的支持，使計畫得以順利進行及完成論文，特此致上感謝之意。

## 參考文獻

- [1] 盧博堅、劉嘉俊，噪音控制與防制，滄海書局，頁 2-55、306-405，2011。
- [2] 蔡夏生，聲學阻抗管之內部聲場模擬及設計參數評估，逢甲大學電聲碩士學位學程碩士論文，2009。
- [3] ASTM E1050-08: Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and a Digital Frequency Analysis System, 2008.
- [4] Wenjie Wang, P. J. Thomas & Tongqing Wang, A frequency-response-based method of sound velocity measurement in an impedance tube, Measurement Science and Technology, Vol. 28(4), 2017.
- [5] J. Hald, Wookeun Song, Karim Haddad, Cheol-Ho Jeong & Antoine Richard, In-situ impedance and absorption coefficient measurements using a double-layer microphone array, Applied Acoustics, Vol. 143, pp. 74-83, 2019.
- [6] 馬大猷，微穿孔板吸聲體的準確理論和設計，聲學日報，第 22 卷，第 5 期，1997。
- [7] 江仲傑，斜向微穿孔板構造吸音特性之研究，國立成功大學建築研究所碩士論文，2008。
- [8] R. Brandão & Ory Schnitzer, Acoustic impedance of a cylindrical orifice, Cornell University, 2020.
- [9] 劉克、田靜、焦風雷、呂亞東，微穿孔板吸聲體的研究進展，聲學學報，第 30 卷，第 6 期，2005。
- [10] 孫文娟、孔德義、尤暉、段秀華、劉英、錢玉潔、趙湛，微穿孔板吸聲體聲學性能的仿真研究，儀表技術，第 3 期，2012。
- [11] 馬大猷，微穿孔板結構的設計，聲學學報，第 13 卷，第 3 期，1988。
- [12] Zhixiang Chen, Zhenlin Ji & Hongpu Huang, Acoustic impedance of perforated plates in the presence of bias flow, Journal of Sound and Vibration, Vol. 446, pp. 159-175, 2019.
- [13] Z. Tao, Zhang B, Herrin D & Seybert A, Prediction of Sound-Absorbing Performance of Micro-Perforated Panels Using the Transfer Matrix Method, University of Kentucky, 2005.
- [14] St. Marburg & H. J. Hardtke, A study on the acoustic boundary admittance. Determination, results and consequences, Engineering Analysis with Boundary Elements,

Vol. 23, pp. 737-744, 1999.

- [15] 吳邦彥、邱進東、李昱緯，異型微穿孔板在消音箱之應用，德霖學報第 34 期，2021。
- [16] 盧博堅、徐俊偉，LMS Virtual Lab 虛擬仿真以及應用——從精簡到入門，西北工業大學出版社，2013。
- [17] ASTM C423-07a: Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method, 2008.
- [18] ISO 10534-2: Acoustics—Determination of Sound Absorption Coefficient and Impedance in Impedance Tubes—Transfer-Function Method, 1998.

