

振動板與平面揚聲器之研發

賴峯民¹ 范凱涵² 陳裕偉² 吳孟諭²

¹大葉大學材料科學與工程學系

²大葉大學工業工程與科技管理學系

51591 彰化縣大村鄉學府路 168 號

摘要

本文主要以振膜開發、激振器製作、懸邊選用、最佳化設計來開發一全音域三明治結構平面揚聲器。以預浸材碳纖維（或奈米碳管）為上下層與珍珠板（或巴沙木）為夾心層來製造成三明治振膜，可應用於大型平面揚聲器上，其振膜加勁花樣、重量、剛性會影響高頻音域與整體感度，尤其最佳振膜花樣設計可讓平面揚聲器的音頻範圍變更廣。本文使用有限元素分析與 Fortran 軟體撰寫最佳化程式，針對三明治結構平面揚聲器在 20 Hz ~ 20 KHz 之範圍來尋找最佳設計參數值（激振長度、振膜材質、塗佈面積、懸邊系統材質，振膜塗佈樣式），使得聲壓曲線達到平滑。最後由實驗測試的聲壓曲線與理論分析進行比較，以實驗結果證明理論分析模型及最佳化設計的正确性。

關鍵詞：三明治振膜，製造參數，花樣，聲壓曲線，平滑，最佳化方法

Development of Vibrating Plates and Planar Loudspeakers

FENG-MIN LAI¹, KAI-HAN FAN², YU-WEI CHEN² and MENG-YU WU²

¹Department of Material Science & Engineering, Da-Yeh University

²Department of Industrial Engineering & Technology Management, Da-Yeh University

No. 168, University Rd., Dacun, Changhua 51591, Taiwan, R.O.C.

ABSTRACT

The primary purpose of this paper is to determine the optimal design method for manufacturing gamut planar loudspeakers by developing a membrane, producing the exciter, and selecting the surround. We used carbon fiber prepreg layers (or carbon nanotubes) and foam boards (or Balsa) to combine the sandwich membranes, which were then applied to the large planar loudspeakers. An optimal sandwich membrane, which includes a stiffed pattern, minimum weight, and stiffness, affects the high-frequency sound quality and sound pressure curve. We employed optimizing programs that used finite element analysis and Fortran software to determine the optimal design parameters (excitation length, diaphragm materials, coating areas, surround system materials, and membrane coating patterns) to ensure optimal sound quality and smooth sound pressure curves at 20 Hz to 20 KHz. The optimized manufacturing parameters were subsequently used to manufacture sandwich planar loudspeakers. During experiments, we measured the sound pressure curves to verify the value of the proposed theory. The experimental results were used to verify the accuracy of the proposed

analysis and optimizing methods.

Key Words: manufacturing parameter, optimal method, pattern, sandwich membrane, sound pressure curve, smooth

一、概論

本文主要分為實體組裝、成品量測以及模擬分析；本文首先會進行最佳化的模擬分析，利用模擬分析結果將實體組裝完成，並進行聲壓曲線量測，最後再將量測曲線與模擬分析曲線進行比對驗證，看看模擬與實驗數據是否趨於一致。

而在聲壓計算與演算法方面，Morse [4] 推導出了聲源在空氣中傳遞之聲壓方程式，Takeo [5] 引用出有限元素之聲壓方程式，吳家宏 [1] 將有限元素法應用在 Rayleigh 一次積分聲壓方程式，並應用在平板揚聲器的揚聲板之聲傳行為分析，粒子群演算法最佳化 (particle swarm optimization, PSO) 是由 Kennedy 與 Eberhart [2] 所提出。在這演算法應用中，Mingsian 與 Bowen [3] 運用基因演算法套用於平面式揚聲器之全音域揚聲效果研發，可求得最佳的製造參數並使得揚聲器效果更佳優異。

二、研究方法

本文的研究方法在實作部分主要包含花樣振膜設計與製作、懸邊治具的開發、揚聲器組裝與量測，軟體方面有 ANSYS 軟體模擬分析、Fortran 最佳化設計，從這幾方向進行花樣式平面揚聲器的設計與開發。首先，利用電腦輔助設計分析軟體 ANSYS 建立模型分析，主要是為了計算出各 Node 點上的振幅與相位角，並帶入聲壓公式運算，最後，經由 Fortran 軟體撰寫粒子群演算法程式，並找出本文最佳製造參數 (不同振膜花樣、中心塗佈面積尺寸、不同激振長度大小、振膜加勁材料性質、不同懸邊材料性質)，進而求解模擬之聲壓位準值 (sound pressure level, SPL)。

在實體製作方面，將平面揚聲器各零件組裝完成，並使用 CLIO 聲壓頻譜儀量測 20 Hz ~ 20 KHz 的 SPL 值，再利用 ORIGIN6.0 軟體繪製理論值與實驗值的聲壓曲線進行比對，驗證其理論值之正確性。

(一) 粒子群演算法

粒子群演算法是根據自然界生物群體活動的現象，如鳥群、魚群的集體搜尋食物及移動行為來開發最佳化的技術，此方法能有效縮短搜尋最佳目標的時間，引用至今都具有不

錯的效果。粒子群演算法最佳化由 Kennedy 與 Eberhart 於 1995 年所提出，其概念主要是觀察鳥群及魚群集體捕食行為而衍生。

其搜尋過程是利用每一個粒子在解空間對一個最佳的粒子來進行搜索，來趨近最佳解的目的，其原理為粒子 (鳥) 在搜尋的過程中，並不知道目標值 (食物) 的位置，但粒子可以知道目標值距離自己多遠，而粒子群知道目前距離目標值最近的一個粒子，只要跟隨距離目標值最近的粒子，即能更接近目標值，圖 1 為粒子搜尋示意圖。

在求解時，每一粒子都會產生初始位置 (X) 及移動距離 (V) 來決定其行走方向及目標位置，每個粒子計算所求得的適應值 (fitness value)，即為目前最佳粒子，並跟隨目前最佳的粒子進行搜尋，其搜尋步驟如下：

步驟一：設定參數，決定粒子數、慣性權重、學習因子，並隨機產生初始位置及初始速度。

步驟二：計算每個粒子的適合度，找出群體中的 *PBest* 及 *GBest*，並代入粒子速度與位置更新 (1) 式。

$$V_{id}^{new} = W \times V_{id}^{old} + C_1 \times rad_1 \times (P_{id} - X_{id}^{old}) + C_2 \times rad_2 \times (P_{gd} - X_{id}^{old})$$

$$X_{id}^{new} = X_{id}^{old} + V_{id}^{new} \cdot \Delta t \quad (1)$$

(1) 式中參數 V_{id}^{new} 為粒子更新後的移動速度， V_{id}^{old} 為粒子上一次的移動速度， X_{id}^{new} 為粒子目前的位置， X_{id}^{old} 為粒子上一次的位置， W 為慣性權重， C_1 、 C_2 為學習因子，

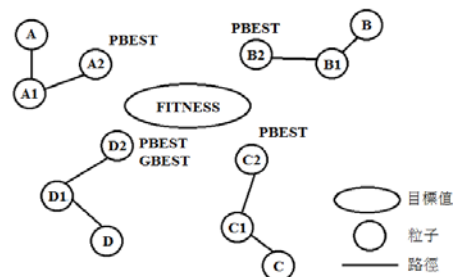


圖 1. 粒子群演算法搜尋示意圖

rad_1 、 rad_2 為 0~1 的隨機亂數， P_{id} 為 P_{Best} ，即為單一粒子之最佳解， P_{gd} 為 G_{Best} ，即是全域解之最佳解， Δt 為時間（本文設定為 1）。

步驟三：判斷是否達到終止條件（迭代數），若未達終止條件即重覆步驟二。

步驟四：達到終止條件即停止搜尋。

(二) 有限元素分析

本文採用有限元素分析法 (finite element method, FEM) 來建構與模擬分析，將 ANSYS 模擬分析的結果與實驗結果進行比對，驗證模型建構與邊界條件設定是否正確。在有限元素建立模型與邊界條件的設定，本文利用有限元素分析法可將一模型由複雜至簡化來進行模擬分析，不僅可以減少建模時間，且電腦運算的時間也會大大減少。

而元素的選用上，振膜以平面元素 (shell99) 表示，懸邊部份則是以彈簧元素 (combin14) 表示，激振器質量使用質量節點元素 (mass21) 表示，Shell99 (圖 2) 是用於建立複合材料與三明治結構模型，主要用來建立疊層板的元素，可輸入疊層數、角度及厚度等，此元素為 8 節點元素 (NODE)，每節點有 6 個自由度，Combin14 (圖 3) 為彈簧元素，此元素由 2 個節點所構成，可輸入彈簧的彈性係數 (K 值)，可進行 2D 及 3D 的模擬，Mass21 (圖 4) 為質量元素，套用在懸邊與音圈上所負載的質量，並可輸入單一節點的質量，圖 5 為有限元素模型示意圖。

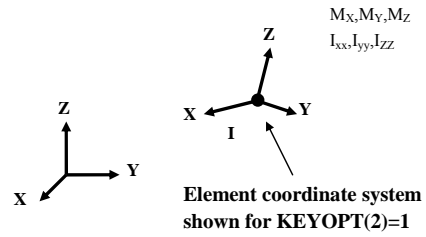


圖 4. Mass21 元素

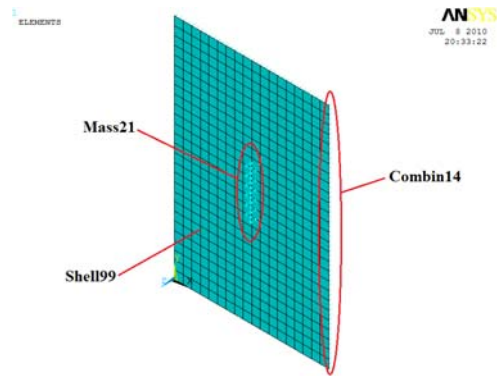


圖 5. 有限元素分析模型示意圖

複合材料的振膜在邊界條件設定方面，定義短邊為 X 方向，長邊為 Y 方向，短邊固定 UX、UY、ROTX、ROTZ，長邊固定 UX、UY、ROTY、ROTZ，激振面積固定 UX、UY、ROTX、ROTY、ROTZ，如圖 6 所示。假設整體結構的阻尼在所有的分析頻率內阻尼比為 0.06，激振區域設定同時位移，進行簡諧頻率響應分析，求解振膜每個節點的振幅與相位角，再將結果帶入聲壓公式計算出聲壓值。

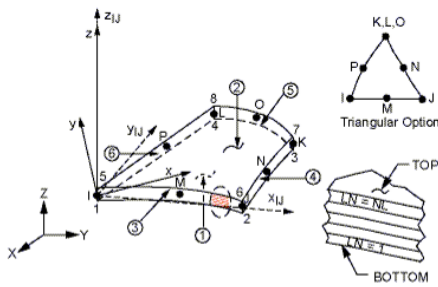


圖 2. Shell99 元素

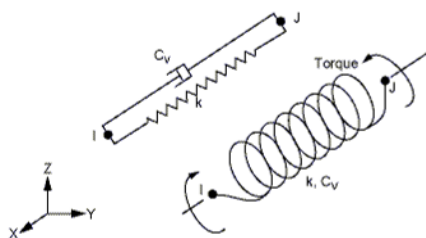


圖 3. Combin14 元素

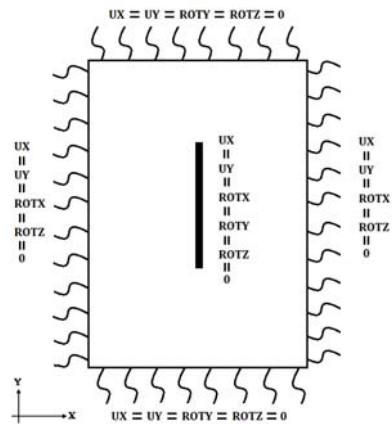


圖 6. 振膜邊界條件設定

三、研究步驟

(一) 零件製作

實體製作主要有第一部分為懸邊系統，第二部分為振膜，最後是激振器製作。以下為平面揚聲器之製作過程說明：

1. 懸邊系統之製作

懸邊系統主要功能在於支撐振膜之振動，將振膜黏貼於固定的位置，使其上下振幅時不致產生不規則的擺動，而且還必須能穩定在大功率之下的振動，如此一來便可降低第一共振頻率 f_0 值，懸邊系統製作流程如下說明：

步驟一：將三種懸邊材質剪成揚聲器所需要的尺寸。

步驟二：將懸邊材質放置模具，置入烤箱以 100°C 烘烤，時間 40 分鐘。

步驟三：烘烤完畢熱壓成型，將模具放於陰涼處，自然降溫。

步驟四：冷卻後取出懸邊，並修邊、裁剪即完成（圖 7）。

2. 複合材料三明治結構振膜製作

本文採用的振膜有兩種製程，第一種是使用珍珠板作為基材，將珍珠板試片裁剪尺寸約為 $265\text{ mm}\times 18\text{ mm}\times 1.8\text{ mm}$ ，再將預浸材碳纖維裁成 $265\text{ mm}\times 18\text{ mm}\times 1.8\text{ mm}$ 的大小，上下使用鋼板將預浸材碳纖維壓住，送進烤箱烘烤，烘烤的主要目的是為了將預浸材碳纖維本身的膠，烘乾並靠著壓板將膠擠出邊緣，完成預浸材碳纖維烘烤後，將珍珠板均勻塗上 AB 膠，再將預浸材碳纖維貼合於珍珠板上，並用重物壓製 2 小時左右，即可完成（圖 8）。

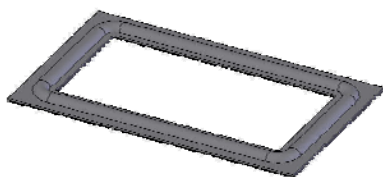


圖 7. 成形之懸邊示意圖

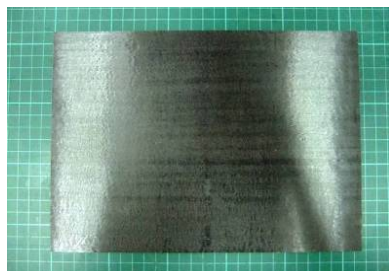


圖 8. 完成碳纖維振膜

第二種製作方法主要是針對巴沙木做塗佈，以奈米碳管及環氧樹脂作為強化材料，以下是奈米碳管塗佈步驟：

步驟一：將奈米碳管混合入環氧樹脂，經由攪拌機攪拌約 20 分鐘，使其混合均勻，並加入適當比例的硬化劑，均勻攪拌。

步驟二：裝釘紗網，放置巴沙木，並將紗網覆蓋上。

步驟三：把調配好的奈米碳管塗抹在紗網上，利用刮板將奈米碳管順著方向來回均勻塗佈一次。

步驟四：放進烤箱，設置溫度 120°C 與烘烤時間 60 分鐘。

步驟五：完成烘烤後，裁切所需的尺寸（圖 9）。

3. 激振器之製作

激振器是揚聲器重要的零件之一，可以稱為揚聲器之心臟，主要是由音圈以及激振板所組合而成的，激振器所製作的材質必須要能耐高溫且不易損毀，本文激振板材質是選用編織碳纖維預浸材，藉由碳纖維複合材料剛性高、質量輕優異的機械性質，一方面可以降低重量，另一方面則是具有高强度不易毀壞，以下為激振器製作流程與激振器位置說明：

步驟一：將一層編織預浸材放置於平板上，並強力壓制，放進烤箱烘烤 120°C 、60 分鐘。

步驟二：冷卻後，將壓制後的編織預浸材取出，並剪裁所需大小，即完成激振板。

步驟三：將完成的線圈，使用 AB 膠黏貼於激振板。

步驟四：將線圈外漆刮乾淨，銲接錦織線，並使用 AB 膠將線固定於激振板（圖 10）。

(二) 平面揚聲器實體組裝

首先，將懸邊內邊四周黏貼雙面膠並點上白膠，再把製作完成的振膜緊貼於懸邊內側，接著將磁鐵塞進磁鐵框，在磁鐵框附近鑿兩個小洞（穿線使用），把組合好的懸邊與振膜黏貼於外框架，在框架與懸邊接合處點上白膠，待膠乾

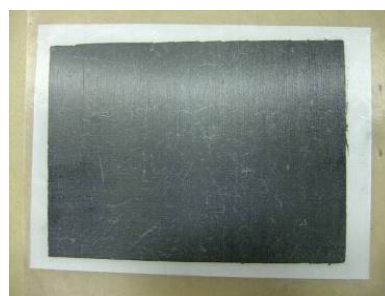


圖 9. 完成奈米碳管塗佈振膜

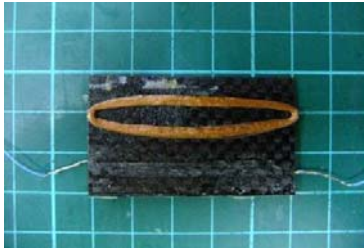


圖 10. 激振器完成圖

後，調配 AB 膠將激振器與振膜做黏合，黏貼前需先在振膜量測出中心點，才能準確將激振器黏貼於中間，最後將磁鐵框架準確地定位，讓線圈不與磁鐵摩擦且兩邊的距離需均勻，定位完成後，在磁鐵框架與外框架間點上保麗龍膠，全部檢查接合處後，放置約 1 天讓全部的膠能完全凝固，完成平面揚聲器，圖 11 為組裝示意圖。

(三) 平面揚聲器量測

三明治結構平面揚聲器之聲壓曲線量測，環境空間須於無響室內，使用 CLIO 聲壓頻譜儀進行，其量測步驟如下說明：

- 步驟一：開啟 CLIO，接上麥克風及兩電壓端子。
- 步驟二：設定電壓、頻寬、取點數（圖 12）。
- 步驟三：儲存圖檔與數據檔案。
- 步驟四：將麥克風對準振膜之中心點，量測距離為 50 cm（圖 13）。

四、結果與討論

(一) 有限元素模型收斂性分析

此揚聲器的振膜分為兩種材質與兩種加勁材質，基材非常輕但剛性不足，而加勁的材料剛性強也具有質量輕的優點。平面揚聲器聲壓模擬，使用 ANSYS 建立有限元素模型



圖 11. 平面揚聲器實體完成圖

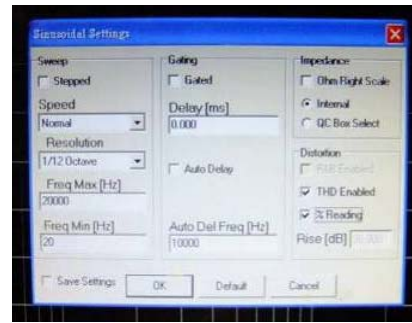


圖 12. 各參數設定



圖 13. 平面揚聲器量測示意圖

進行分析，設定邊界條件與相關參數，找出較符合的模擬方式，驗證出實驗與分析數據之正確性。

各材料性質振膜為巴沙木、珍珠板之參數如表 1 所示，加勁材料為碳纖維複合材料、奈米碳管之參數如表 2 所示，三種懸邊材質如表 3 所示。

本文先使用珍珠板當基材與碳纖維的組合，懸邊材質採用聚氨酯來做網格收斂曲線，本文採用線段切割大小來做網格 (mesh)，以此來證明 ANSYS 模擬分析網格切割之收斂性，線段切割大小分別為 0.01、0.007、0.006、0.005 四種，發現切割大小為 0.006 有較佳的壓聲曲線，因此未來分析都將會以 0.006 來做切割，各元素數量如表 4，收斂情況如圖 14 所示。

表 1. 振膜基材之材料參數

	巴沙木	珍珠板
E_1	3.18 Gpa	1.89 Gpa
$E_2=E_3$	0.15 Gpa	1.89 Gpa
$\nu_{12}=\nu_{13}$	0.02	0.25
ν_{23}	0.5	0.25
$G_{12}=G_{13}$	0.02 Gpa	0.756 Gpa
G_{23}	0.0033 Gpa	0.756 Gpa
ρ	218.853 Kg/m ³	46.2 Kg/m ³

表 2. 加勁之材料參數

	奈米碳管	預浸材碳纖維
E_1	8.46 Gpa	147.503 Gpa
$E_2=E_3$	8.46 Gpa	9.223 Gpa
$\nu_{12}=\nu_{13}$	0.3	0.306
ν_{23}	0.3	0.25
$G_{12}=G_{13}$	3.25 Gpa	6.8533 Gpa
G_{23}	3.25 Gpa	1.1229 Gpa
ρ	1053.86 Kg/m ³	1747 Kg/m ³

表 3. 懸邊之材料參數

懸邊形狀	懸邊材料	K 值 (N/m)
	3M (聚對苯二甲酸乙二酯)	39613
	橡膠 (聚氧乙烯)	59431
	皮革 (聚氨酯)	37500

表 4. 切割大小與元素量

切割大小 (m)	元素數量 (個)
0.010	486
0.007	988
0.006	1350
0.005	1908

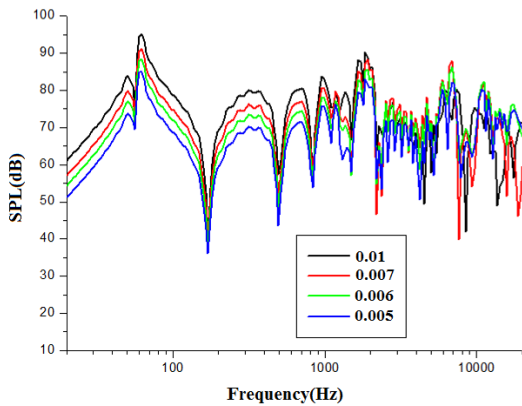


圖 14. 網格收斂聲壓曲線

(二) 模擬聲壓曲線分析與實驗聲壓曲線比較

為了驗證模擬聲壓曲線分析結果的正確性，使用複合材料做出三明治結構平面揚聲器，揚聲器懸邊系統使用聚氧乙烯，振膜採用珍珠板當基材、奈米碳管當加勁強化材料振膜大小為 265 mm×180 mm×1.8 mm (長×寬×厚)。圖 15 為實驗與分析的聲壓曲線比對，由此圖可看出實驗與分析的聲壓曲線 f_0 值與整體曲線走勢相當相近，因此證明本文的理論分析模型是可行的。

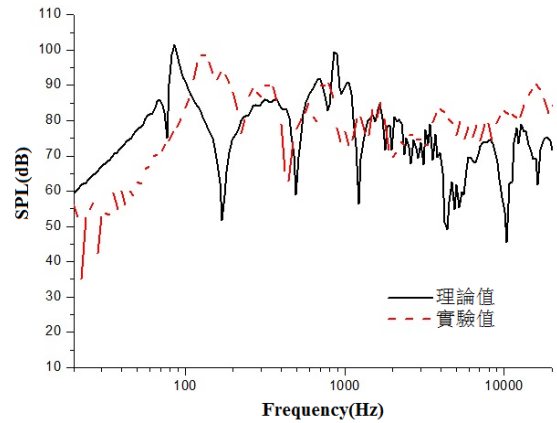


圖 15. 實驗與分析聲壓曲線之驗證

(三) 平面揚聲器的聲壓曲線之最佳製造參數設計

本文最佳製造參數主要包含不同振膜花樣、中心塗佈面積尺寸、不同激振長度大小、振膜加勁材料性質、不同懸邊材料性質，藉由以上五種製造參數，搭配振膜基材為珍珠板，並採用粒子群演算法最佳化來尋找出揚聲器最佳製造參數，以達到最佳聲壓曲線平滑度。表 5-表 9 為各製造參數因子編碼，圖 16 為振膜花樣塗佈樣式。

表 5. 中心塗佈面積比例編碼

塗佈區塊	1	2	3
中心塗佈面積比例	0.5	0.45	0.4
編碼	0	1	2

表 6. 振膜塗佈花樣編碼

塗佈花樣	中心	中心井字	八塊	井字	九塊	無
代號	1	2	3	4	5	6
編碼	0	1	2	3	4	5

表 7. 懸邊 K 值編碼

懸邊形狀			
懸邊材料	PVC	3M	皮革
K 值(N/m)	59431	39613	37500
編碼	0	1	2

表 8. 激振比例長編碼

激振長度	1	2	3	4	5
長度比例	0.5	0.45	0.4	0.35	0.3
編碼	0	1	2	3	4

表 9. 加勁材料性質編碼

加勁種類	1	2
加勁材料	奈米碳管	預浸材碳纖維
編碼	0	1

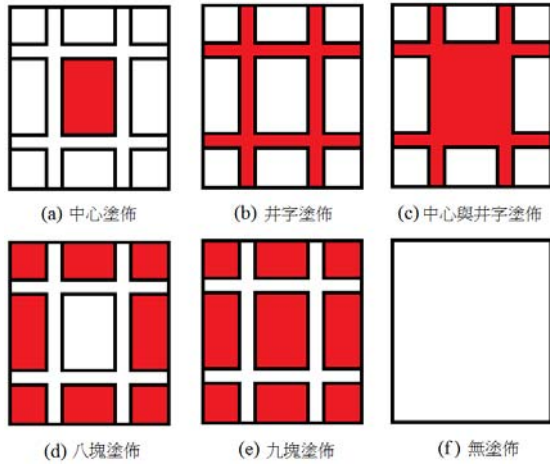


圖 16. 花樣塗佈樣式

1. 不同振膜塗佈比例長為變數之最佳化結果（3 個設計變數）

三明治結構平面揚聲器之振膜長為 265 mm，寬為 180 mm，利用粒子群演算法最佳化，尋找出最佳製造參數因子。主要是以不同中心塗佈面積比例、不同懸邊 K 值與不同的塗佈花樣為製造參數，而中心塗佈面積以振膜原長與原寬比值方式編碼，由此即可推算出中心塗佈之面積大小。並將本文所探討的三種懸邊系統設定為製造參數，表 10 為初始解與第十代之 G_{Best} 解碼後數值與其目標值，其平滑度提昇 20.97%，表 11 為最佳製造參數之解。

表 10. 初始解與第十代結果比較

結果	中心塗佈面積比例	振膜塗佈樣式	懸邊 K 值 (N/m^2)	目標值 (變異數) (dB)
初始解(A)	1	1	1	78.438
最佳化(B)	0	1	1	61.992
差異 $\frac{ A-B }{A} \times 100\%$	---	---	---	20.97%

表 11. 最佳製造參數之規格

製造參數	中心塗佈面積比例	振膜塗佈樣式	懸邊 K 值
最佳規格	0.45	中心井字	採用 3M

由圖 17 結果顯示，迭代十次後之製造參數跟初始解製造參數所模擬出的聲壓曲線在高頻部分有提升的現象，在 3K~5K 音頻也相對提升，由圖 18 粒子群演算法最佳化收斂曲線可看出此次收斂非常穩定，在第三次迭代之後即收斂。

2. 不同激振比例長為變數之最佳化結果（4 個設計變數）
 三明治結構平面揚聲器之振膜長一樣為 265 mm，寬為 180 mm，四種製造參數有不同中心塗佈面積比例、不同懸邊 K 值與不同的塗佈花樣，再加上不同激振比例長，以中心塗佈面積與激振長度均以比例方式編碼，激振長度以原始平行長度乘上比例長，即可推算激振長度。其餘參數比照先前設定，表 12 為初始解與第十次迭代之 G_{Best} 解碼後數值與其目標值，其平滑度提昇 6.32%，表 13 為最佳製造參數之解。

由圖 19 的結果顯示，可看出迭代十次後之製造參數跟初始解製造參數所模擬出的聲壓曲線較為平滑，整體的音頻也相對有提升，由圖 20 粒子群演算法最佳化收斂曲線也可

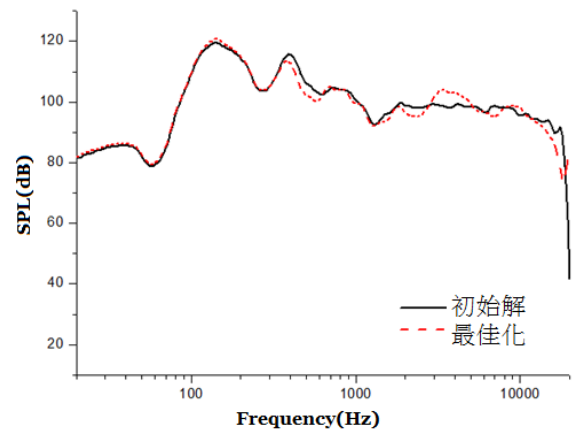


圖 17. 粒子群演算法之初始解與最佳化結果

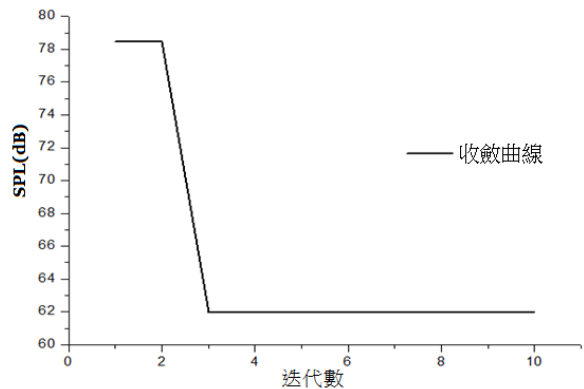


圖 18. 粒子群演算法最佳化之收斂曲線

表 12. 初始解與第十代結果比較

結果	中心塗佈面積比例	振膜塗佈樣式	懸邊 K 值 (N/m ²)	激振長度比例	目標值 (變異數) (dB)
初始解	2	1	2	2	58.223
最佳化	2	0	0	1	54.545
差異 $\frac{ A-B }{A} \times 100\%$	---	---	---	---	6.32%

表 13. 最佳製造參數之規格

製造參數	中心塗佈面積比例	振膜塗佈樣式	懸邊 K 值	激振長度比例
最佳規格	0.4	中心	採用 PVC	0.45

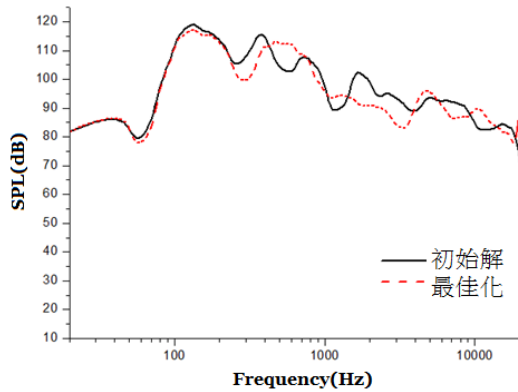


圖 19. 粒子群演算法之初始解與最佳解之聲壓曲線

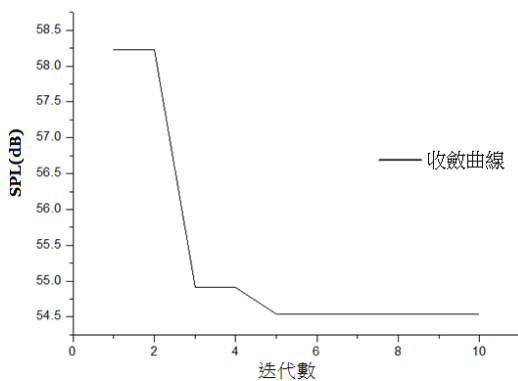


圖 20. 粒子群演算法最佳化之收斂曲線

看出此次迭代較為不穩定，大概在第五次迭代之後才出現收斂性。

3. 設計不同振膜材料性質之最佳化結果 (5 個設計變數)

由於加勁材料影響振膜頗大，在質量、強度等因素上，

質量輕高頻比較能提升，振膜強化不僅可以防止板材大變形，也可以保護基材本身，剛性較佳振幅相對較穩定，如此一來在激振過程當中，激振器才不會摩擦磁鐵產生異音；平面揚聲器之振膜長為 265 mm，寬為 180 mm，五種製造參數有不同中心塗佈面積比例、不同懸邊 K 值與不同的塗佈花樣，再加上不同激振比例長，以中心塗佈面積與激振長度均以比例方式，最後再加上奈米碳管與預浸材碳纖維兩種作編碼，表 14 為初始解與第十次迭代之 *GBest* 解碼後數值與其目標值，其平滑度提昇 68.10%，表 15 為最佳製造參數之解。

由圖 21 的結果顯示，可看出迭代十次後之製造參數跟初始解製造參數所模擬出的聲壓曲線在高頻往上提升 30 dB 左右，而 *f_o* 也往前到將近 100 Hz，整體的曲線也較平滑，由圖 22 粒子群演算法最佳化收斂曲線大概在第四次迭代之後才出現收斂性，此次搜尋粒子增加為 6 個。

表 14. 初始解與第十代結果比較

結果	中心塗佈面積比例	振膜塗佈樣式	懸邊 K 值 (N/m)	激振長度比例	加勁材質	目標值 (變異數) (dB)
初始解	1	2	0	2	1	152.48
最佳化	2	0	2	1	0	48.638
差異 $\frac{ A-B }{A} \times 100\%$	---	---	---	---	---	68.10%

表 15. 最佳製造參數之規格

製造參數	中心塗佈面積比例	振膜塗佈樣式	懸邊 K 值	激振長度比例	加勁材質
最佳規格	0.4	中心	採用皮革	0.45	奈米碳管

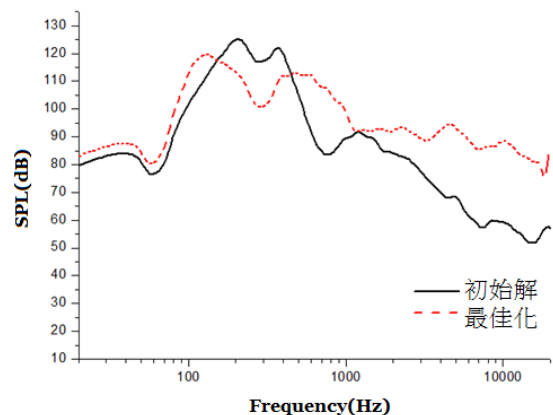


圖 21. 粒子群演算法之初始解與最佳解之聲壓曲線

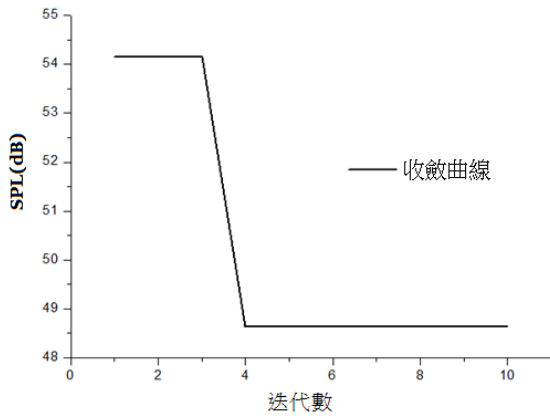


圖 22. 粒子群演算法最佳化之收斂曲線

本文利用粒子群演算法最佳化方法依據不同設計變數 (3、4、5 個變數)，以聲壓曲線平滑度為目標可成功的尋找最佳製程參數，在表 16 中可看出設計變數越多，3 變數、4 變數、5 變數的差異越大，其聲壓曲線變異數之差異性效果越明顯。

4. 初始解與最佳解之實驗量測比較

依據模擬分析所獲得初始製造參數與最佳製造參數分別製作一三明治結構平面揚聲器，並量測其聲壓曲線比較其差異結果，如圖 23。

表 16. 不同設計變數提升聲壓曲線平滑度之比較

比較參數 \ 最佳解	無最佳化 (3 變數初始值) (A)	3 變數 最佳解 (A1)	4 變數 最佳解 (A2)	5 變數 最佳解 (A3)
變異數	78.438	61.992	54.545	48.638
差異 $\frac{ A-B }{A} \times 100\%$	---	20.97%	30.46%	37.99%

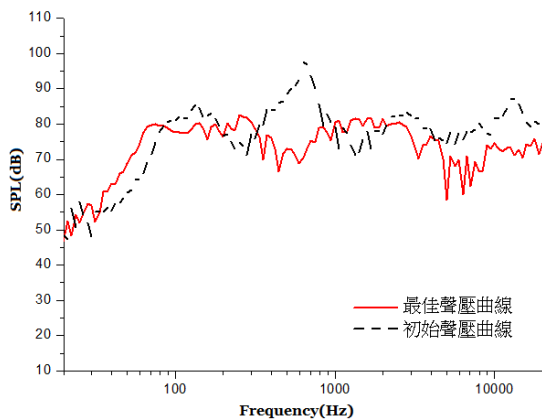


圖 23. 初始解與最佳化聲壓曲線之比較

由圖 23 可得知，在初始聲壓曲線有明顯異音，也就是中頻聲壓過高，大約在 670 Hz 左右，從量測來看，波峰跟波谷相差約 30 dB，而實際聽測，更可以明顯聽到尖銳刺耳的聲音，而在低頻方面，最佳化聲壓曲線 f_0 在 60 Hz，表示所聽到的低音效果更好，相對的也較震撼；變異數方面，最佳解變異數為 75.35，初始解變異數為 118.33，因此，最佳化聲壓曲線平滑度較好，也不會有太大的異音產生。

5. 三明治結構平面揚聲器之應用

三明治結構平面揚聲器之應用構想，主要是將揚聲器放至於相框或者是畫作等平面裝飾品，讓空間美觀的同時，還可以撥放音樂，讓人不僅可以欣賞作品的美，更可以聽到清澈而響亮的歌曲 (圖 24)。

五、結論

綜合各項模擬分析與實驗製作、量測，從聲壓量測曲線、模擬分析與實驗比對，得到以下幾點結論：

1. 電腦輔助模擬分析網格收斂最佳的結果是線段切割 0.006 大小，元素數量 1350 個是較好的情況。
2. 在電腦輔助分析方面，聲壓曲線模擬值與實驗值有一致性的趨勢，可模擬模型驗證正確性，即可以模擬的方式改變設計需求以減少分析時間，並可搭配最佳化搜尋出最佳製程參數。
3. 粒子群演算法最佳化程式結果是使用皮革當作懸邊以及奈米碳管塗佈、塗佈花樣中心區塊所獲得的聲壓曲線最平滑。
4. 最佳化分析聲壓曲線與實驗量測聲壓曲線比對，實驗較為平滑，而聲壓曲線趨勢一致，分析曲線 f_0 效能較高。



圖 24. 三明治結構平面揚聲器應用

5. 採用 5 個變數之粒子群演算法最佳化結果，其曲線平滑度越佳。

參考文獻

1. 吳家宏 (民 94), 有限元素法在 Rayleigh 一次積分聲壓方程式之應用, 台灣虛擬產品研發技術論壇論文集, 台北。
2. Kennedy, J. and R. C. Eberhart (1995) Particle swarm optimization. *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks*, 4, 1942-1948.
3. Mingsign, R. and L. Bowen (2004) Determination of optimal exciter deployment for panel speakers using the genetic algorithm. *Journal of Sound and Vibration*, 269, 727-743.
4. Morse, P. M. and K. U. Ingrad (1986) *Theoretical Acoustics*, 375-379. McGraw-Hill, New York, NY.
5. Takeo, S., Y. Osamu and S. Hideo (1980) Effect of voice-coil and surround on vibration and sound pressure response of loudspeaker cones. *Journal of the Audio Engineering Society*, 28(7-8), 490-499.

收件：100.07.07 修正：100.08.29 接受：100.12.01