

平板揚聲器的軟性振動板開發

賴峯民¹ 楊宸賢² 施煒聖² 陳政宏² 周伯諺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管理學系

51591 彰化縣大村鄉學府路 168 號

摘要

本文主要以框架設計、振膜開發、激振器製作、來開發一全音域B5平板揚聲器。傳統揚聲器的振膜材質多採用紙的材質，容易因環境溫度以及濕度變化使振膜產生變形，利用PU發泡技術來開發新振膜素材，其PU發泡振膜具有良好的耐氣候變化性、機械性質，在增加最小的質量之下大幅提高剛性，使得平面揚聲器的聲壓曲線更加平滑，藉此生產出優於紙類振膜的PU發泡振膜。

探討PU發泡振膜作為平板揚聲器振膜之可行性，以不同厚度、密度為製程參數，改善發泡條件提高製作良率，並藉由拉伸試驗取得不同製程參數的PU發泡振膜之機械性質，將PU發泡振膜實際組裝到平板揚聲器及量測聲壓曲線，對聲壓曲線進行探討，並針對聲壓曲線量測結果改善製程參數，獲得最佳製程參數及平滑聲壓曲線。在有限元素分析方面，利用有限元素ANSYS模擬分析及實體組裝的B5平板揚聲器進行理論分析與實驗量測的聲壓曲線比對，證實ANSYS分析模型的正確性，最後利用田口品質工程方法來取得最佳聲壓變異數之參數組合。

關鍵詞：PU 發泡，平板揚聲器，振膜，有限元素 ANSYS 模擬分析，田口品質工程方法。

Developing Flexible Vibrating Plates for Flat-panel Speakers

FENG-MIN LAI¹, CHEN-MAO YANG², WEI-SHENG SHIH², CHUNG-HUNG CHEN² and PO-YEN CHOU²

¹Department of Materials Science and Engineering, Da-yeh University

²Department of Industrial Engineering and Management, Da-yeh University

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

ABSTRACT

In this study, a full-range B5 flat-panel speaker was developed and a framework was designed, developing diaphragms, and producing exciters. Traditionally, speaker diaphragms are manufacturing using paper, which easily deforms because of ambient temperature and humidity changes; PU foam technology was used to develop a new diaphragm material. PU foams diaphragms exhibit excellent weather resistance and mechanical properties, at increase minimum weight under significantly raise rigid, make flat-panel speaker of the sound pressure curve getting smoother that the PU foams diaphragm is superior compared with the paper diaphragm.

To explore the feasibility of using PU foam diaphragms as flat-panel speaker diaphragms, varying thicknesses and densities were used as the processing parameters to improve the foaming



conditions and production yields. The mechanical properties of the PU foam diaphragms were analyzed by conducting tensile tests to determine various processing parameters. PU foam diaphragms were used to assemble flat-panel speakers and the resulting sound-pressure-volume curves were measured. Exploring the sound pressure curves facilitated determining the optimal processing parameters and generating smooth sound-pressure curves. In the limited element analysis, ANSYS simulation was used to conduct a finite element analysis and entity assembly B5 panel speaker sound pressure curves were compared for a theoretical analysis; subsequently, the validity of the ANSYS analysis model was confirmed. Finally, the Taguchi method was used to attain the optimal parameter combinations of sound pressure variation.

Key Words: PU foam, flat-panel speakers, diaphragm, ANSYS, Taguchi method.

一、概論

揚聲器是由磁鐵、線圈、振膜組成，利用物理原理將電流頻率轉化為聲音[11,12]，其中推動空氣振動的就是振膜。本文針對 B5 尺寸的平板揚聲器的振膜，使用 PU 發泡技術，探討不同的厚度、密度、加勁方式等製程參數對中低音頻率的影響，利用田口品質工程方法最佳化找出最佳製造設計參數[10]，並與一高音喇叭結合[1]，研發出一全音域之 B5 平板揚聲器。

振膜（又稱振動板）是揚聲器的主要零件之一，它對揚聲器的性能和音質，有著決定性的影響[7]。視揚聲器性能及各種不同的用途與特性，因此要求振動板的條件不盡相同。優良的振動板必須質量輕、堅韌並有適當的彈性，就物理條件比較其性能如下：

1. 質量輕：能夠以較小之推力產生相同或是更高的輸出功率來提高揚聲器的敏感度。
2. 楊氏係數（Young's Modulus）大：可以擴展頻寬，高音域亦可獲得擴展。
3. 勁度高：避免振動板變形過大在不同音頻之間的聲壓值有過大的起伏落差，表現出平穩之聲壓。

本文針對 B5 平板揚聲器上的振膜進行改質，傳統揚聲器的振膜材質多採用紙的材質，容易因環境溫度以及濕度變化使振膜產生變形，本文使用聚氨酯發泡體（Polyurethane Foams）作為揚聲器的振膜基材[5]；激振結構採用交通大學金大仁教授所研發的 K 型激振器（K-Exciter）[13]，此激振裝置的優點為穩定性佳、厚度薄、可任意改變激振器形狀、位置及大小，適合應用於平板揚聲器之開發[15]。以下為本文的研究目的：

1. 開發 PU 發泡技術及質量輕的平板揚聲器振膜，增加其振

膜勁度。

2. 利用拉伸實驗了解不同密度的 PU 發泡材質之 PU 發泡振膜楊氏係數的差異性。
3. 利用有限元素 ANSYS 套裝軟體計算 B5 平板揚聲器的聲壓曲線，並與實驗聲壓曲線比對，證實 ANSYS 分析的正確性。
4. 利用田口品質工程方法找出最佳製程參數，使得聲壓曲線變異數最小，達到平滑度最佳。
5. 採用加勁材料（生物纖維、長纖碳纖維、平纖碳纖維）以增加振膜剛性以及勁度，使聲壓曲線平滑[8][9]。

二、研究方法

在研究流程中，首先探討 PU 發泡技術，找出最適當的實驗參數，提高發泡板的良率，接下來分兩部分，在揚聲器製作與量測方面，利用 Solid Works 繪圖軟體設計 B5 平板揚聲器的框架（如圖 1），接著生產各部分重要零件，進行組裝及測量其聲壓曲線，對聲壓曲線進行探討，並針對聲壓曲線量測結果改善製程參數，獲得最佳製程參數及平滑聲壓曲線；在有限元素分析方面，利用 ANSYS 模擬分析及實體組裝的揚聲器進行理論分析與實驗量測的聲壓曲線比對，以確實 ANSYS 分析模型的正確性，最後利用田口品質工程方法，獲得聲壓曲線變異數最低的製造參數（如圖 2）。在變異數方面，取 $f_0 \sim 20\text{kHz}$ 之間的聲壓值來當作比較依據，公式如下所示：

$$VAR = \frac{\sum(x - \bar{x})^2}{(n-1)} \quad (1)$$



其中 x 為樣本平均數，而 n 為樣本大小。

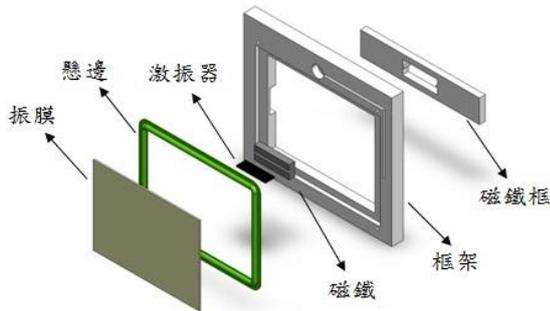


圖1. B5 平板揚聲器構造示意圖

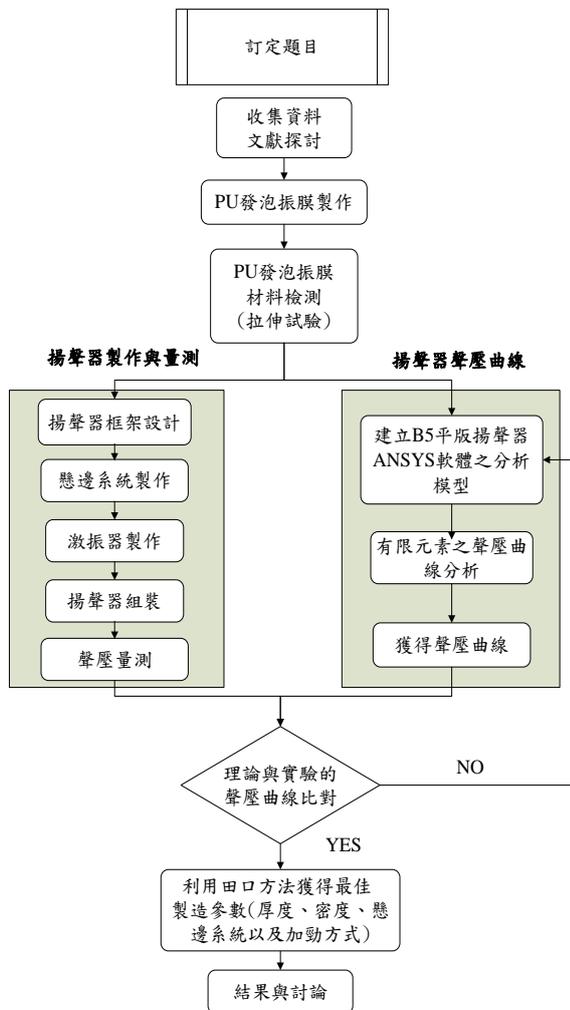


圖2. 研究流程

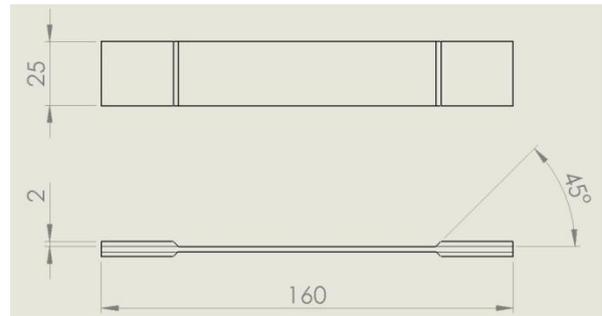


圖3. 大葉大學拉伸機拉伸試片規格 (mm)



圖4. HT-2402 材料試驗機

(一) 拉伸試片製作

本文使用大葉大學工業工程與科技管理學系之拉伸試驗機進行拉伸試驗。裁切試片所需規格，圖3則為大葉大學拉伸試驗機之試片規格。黏貼保護片以減少試片在拉伸實驗中產生的應力集中現象，最後黏貼應變規，完成拉伸試片製作。

(二) 楊氏係數檢測

使用弘達 HT-2402 材料試驗機如圖4所示來檢測發泡體之楊氏係數 (Young's Modulus)，楊氏係數是指彈性材料承受正向應力時會產生正向應變，在形變數沒有超過對應材料的一定彈性限度時，定義正向應力與正向應變的比值，其中，應力為單位面積所受到的作用力，以 (2) 式表示，應變為物體受到應力或剪應力作用，所引起的型變相對改變量，以 (3) 式表示。

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2)$$



$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (3)$$

楊氏係數為應力與應變之比值，以 (4) 式表示。

$$E = \frac{\sigma_x}{\varepsilon_x} \quad (4)$$

卜易淞比 (Poisson's Ratio) 為物體受力產生變形，其橫向變形量與縱向應變之比值，以 (5) 式表示。

$$\nu = \left| \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \right| \quad (5)$$

測試時以荷重-等速度進行拉伸，定速度速率設定為 0.5mm/min，利用電腦控制系統以及擷取拉伸數據；試片上黏貼之應變規連結至 KYOWA PCD-300A 取值系統，以獲取試片在拉伸時軸向以及縱向之應變數據。

(三) 音圈推力的量測

本文將探討音圈推力的實驗值與理論值，首先必須得到磁通密度，其儀器使用高斯計。B5 磁鐵框的磁鐵縫隙為 3mm，將高斯計探測棒置於磁鐵中心位置，量測出磁通密度約為 120 毫特斯拉 (mT) (圖 5)，其 B5 平板揚聲器共有四個音圈並聯，一個音圈長度為 4.5m，因此推力 $F=0.12 \times 4.5 \times 0.5 \times 4 = 1.08 (N)$ 。

為求得激振力實驗值儀器包含電源供應器與電子秤，首先將激振器固定於電子秤並且歸零，再架上磁鐵框架使音圈部分置於磁鐵間隙中心 (圖 6)，經由電源供應器輸出 0.35A 之電流至激振器 (圖 7)，推力的量測結果為 100g 左右，經換算為 0.98N，實驗質與理論值及相對之誤差為 10.2%，如表 1 所示。

(四) 聲壓曲線量測

本文在評估揚聲器方法除了用聽測判斷以外，還會以聲壓曲線以及失真曲線做為分析指標，本文 B5 平面揚聲器聲壓曲線量測，使用 CLIO 聲壓頻譜儀 (圖 8)，於大葉大學之簡易無響室進行量測。將揚聲器固定於載台上，接上兩電壓端子，接著調整揚聲器與麥克風距離 30cm (圖 9)，並在 CLIO 軟體內設定取點數、頻寬、電壓 (圖 10)，在正弦參數分析法中選擇 dB SPL，測量阻抗曲線則選擇 Ohm，量測結束後可取得聲壓與失真曲線以及阻抗曲線。



圖5. 磁通密度量測



圖6. 揚聲器激振力量測



圖7. 電源供應器

表1. 激振力比對

平板揚聲器之激振力		
實驗值 (A)	理論值 (B)	誤差 $\frac{A-B}{A} \times 100\%$
0.98N	1.08N	10.2%





圖8. CLIO 聲壓頻譜儀

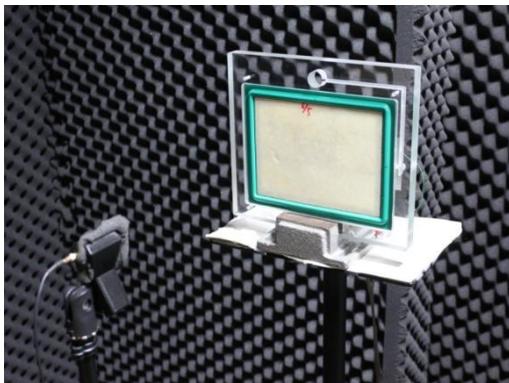


圖9. B5 揚聲器量測示意圖

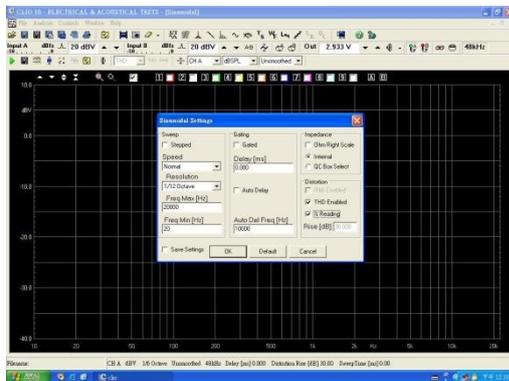


圖10. CLIO 參數設定

(五) 聲壓曲線量測

本文採用有限元素法 (Finite Element Method, FEM) 進行簡諧運動 (Harmonic) 分析, 該方法為電腦輔助工程分析 (Computer Aided Engineering, CAE) 中最為重要的數值分析方法之一, 而 ANSYS 軟體屬於泛用型的有限元素分析軟體 (General Purpose Finite Element Software), 它使有限元素之分析軟體困難度大幅的降低, 因此本文採用此軟體來進行 B5 平板揚聲器之聲壓模擬分析, 其原理是利用有限元素法

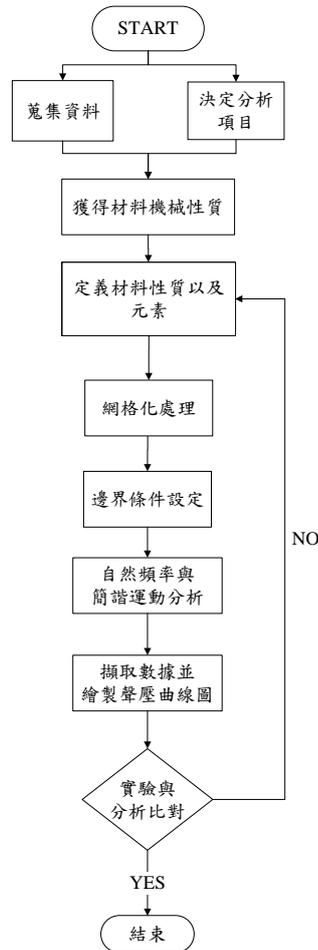


圖11. 電腦輔助工程分析流程圖

透過電腦的高速運算核心來進行數值化求解, 是現代產品開發設計與製造所必備、不可缺少的流程。

首先要建立有限元素模型與元素選用, 必須先取得材料參數、機械性質接著是網格化處理, 最後設定邊界條件與聲壓求解, 將實驗值以及分析值之揚聲器頻率響應分析進行比對, 以確認模型建構之正確性, 加速研究與驗證之進行, 圖 11 為 B5 平板揚聲器之電腦輔助工程分析流程圖。

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 是用於建立發泡體結構模型, 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 (NODE) 元素, 每節點 (NODE) 有 6 個自由度, COMBIN14 為彈簧元素, 此元素由 2 個節點 (NODE) 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 為質量元素, 套用在懸邊與



音圈片上所負載的質量，並可輸入單一節點 (NODE) 的質量，圖 12 為有限元素模型示意圖。

發泡體材料的振膜在邊界條件設定方面，定義長邊為 X 方向，短邊為 Y 方向，長邊固定 UX、UY、ROTY、ROTZ，短邊固定 UX、UY、ROTX、ROTZ，激振面積固定 UX、UY、ROTX、ROTY、ROTZ，如圖 13 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 (NODE) 的振幅與相位角，再將結果代入聲壓公式計算出聲壓值[4][16]。

(六) 模型網格化處理

為了避免過多的網格造成增加計算的時間，也要避免在 ANSYS 分析模型中的網格不夠細密，會影響分析結果的誤差，必須先確認 ANSYS 分析模型的網格大小是否達到網格收斂曲線範圍。本文驗證網格收斂性所使用的分析模型材料參數在振膜方面以 PU 發泡為夾心，上下 0 度長纖碳纖維加勁的三明治復合板，懸邊使用聚氯乙烯 (PVC) 所組成的 B5 平板揚聲器分析模型。本文採用控制線段切割大小來做 Mesh，線段 Mesh 大小分別為 12mm、11mm、10mm、9mm、8mm 共 5 種尺寸。在變異數方面，取 $f_0 \sim 20\text{kHz}$ 之間的標準差來當作比較依據。表 2.為各種網格尺寸的總節點(NODE)

數以及聲壓曲線的變異數，圖 14 為聲壓曲線變異數的收斂曲線，各種網格尺寸的聲壓曲線收斂分析如圖 15 所示。

從圖 14 可以明顯發現當網格節點 (NODE) 數為 971 的聲壓曲線變異數收斂已達一致，而且從聲壓曲線之趨勢也可以察覺到曲線在網格節點 (NODE) 數為 971 也達到一致性，故本文之 B5 揚聲器聲壓曲線分析將採用網格大小為 9mm 總節點 (NODE) 數為 971 的模型來進行分析。

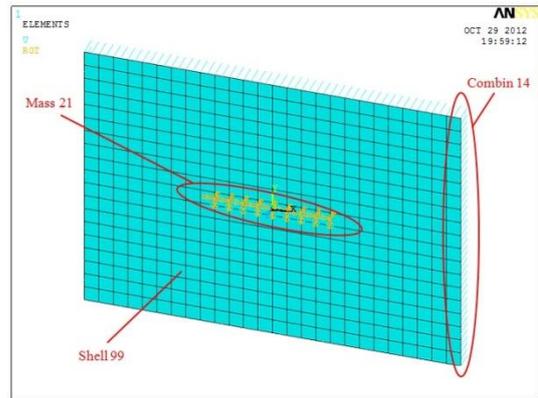


圖12. 有限元素模型示意圖

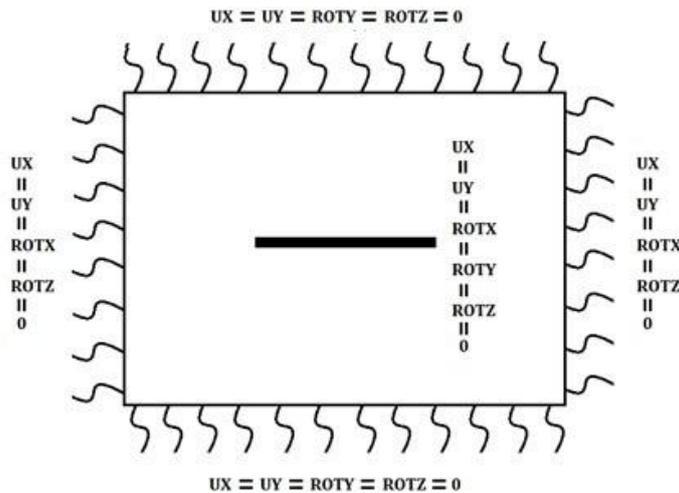


圖13. 振膜邊界條件設定



表2. 網格尺寸總節點 (NODE) 數及聲壓曲線的變異數

網格大小 (mm)	節點 (NODE) 數	變異數 (dB)
12	548	131.79
11	671	129.08
10	821	133.62
9	971	115.59
8	1254	115.81

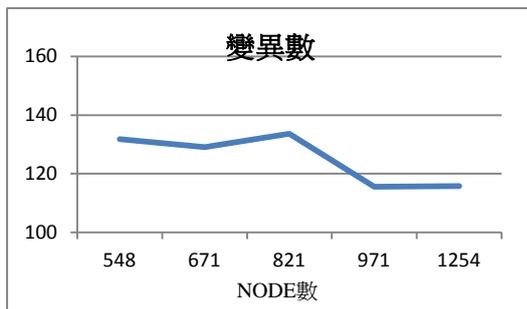


圖14. 聲壓曲線變異數收斂曲線

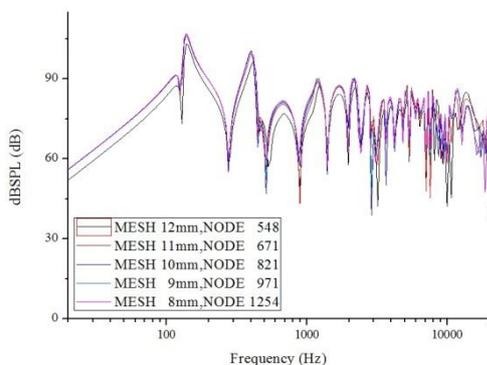


圖15. 各種網格尺寸的聲壓曲線

(七) 田口品質工程方法

本文使用田口品質工程方法進行揚聲器振動板的製程參數最佳化，目標為製作出 f_0 落在 100Hz 左右且變異數最低的製造參數。

1. 選擇因子與水準數

田口品質工程方法的特色是在於使用直交表的配置來進行分析，以了解各因子之間哪一個因子的影響效果最大，所以第一步驟就是先決定該實驗總共有幾個因子與水準。

本文設定了四個重要參數分別是懸邊材質、密度、發泡厚度以及加勁方式，水準方面除了懸邊材質有 2 個水準之外其他因子都各有 3 個水準，依據先前所組裝出來的揚聲器表

現發現 PU 材質的懸邊擁有較佳的支撐性，而且低頻的表現也較佳，所以將懸邊材質的第三個水準也設定為 PU，設定結束之後總共有 4 個因子 3 個水準，故本文使用 $L_9 (3^4)$ 直交表。若就全因子的實驗計畫而言，本文設定的 4 因子與 3 水準採用田口品質工程方法的直交表只需進行 9 次實驗，若全部進行需要 $3^4=81$ 次實驗，可節省的時間與成本相當可觀。

2. 目標函數

本文使用田口品質工程方法進行揚聲器振動板的製程參數最佳化，當聲壓曲線變異數越小代表聲壓曲線越平滑，在取得平滑聲壓曲線的過程中，也不希望 f_0 會過度的向右移，影響到低頻的表現，也就是說要控制 f_0 能落在 100Hz 左右，故本文以田口品質工程方法之望小特性進行最佳化分析，望小特性的信號雜訊比 (S/N) 可定義為：

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) = -10 \log (\bar{y}^2 + S^2) \quad (6)$$

信號雜訊比 (Signal to Noise Ratio) 為田口品質工程方法的品質計量指標，此值本為通訊工程裡所應用，值越大表示通訊品質越佳，在「田口品質工程方法」中，無論其工程本質是否與信號或雜訊有關，皆沿用「信號雜訊比」，簡稱為 S/N 比，這個名詞作為「品質」的同義字，但不同工程問題有不同的品質計量方式，亦即其 S/N 比計算方式有所不同，常見的品質特性可區分為 3 種型態：(1) 望目特性、(2) 望小特性、(3) 望大特性[3][6]。

三、結果與討論

(一) 加勁材料製作

本文利用 PU 發泡取代傳統紙質的振膜，並利用不同材料加勁，使用的材料有長纖碳纖維 (厚度 0.125mm)、平纖碳纖維 (厚度 0.25mm) 以及生物纖維膜薄，下面將介紹加勁材料的壓製與製作過程。

1. 碳纖維加勁材料壓製

長纖碳纖維與平纖碳纖維製作過程相同，將一層預浸材平纖碳纖維平貼在鋼板上，利用熱壓機施以 10kg 的壓力，第一階段由常溫升至 150°C 耗時 60 分鐘，第二階段恆溫 150°C 持續 60 分鐘，待冷卻後將碳纖維取出並裁剪所需尺寸，完成本文所使用之振膜加勁材料。



2. 生物纖維薄膜製作

本文之生物纖維薄膜[17]製作過程，須經過純化流程處理後再予以乾燥。純化流程為將收集的纖維薄膜以清水清洗後，將其置於適當濃度的 KOH 溶液中，然後在於清水清洗至 pH7[2]。

經過處理之生物纖維薄膜利用 30°C 以恆溫烘烤 2 小時以及自然乾燥方式進行乾燥，乾燥後之生物纖維薄膜裁剪所需尺寸，即為本文使用之揚聲器振膜加勁材料[14][18]。

(二) 振膜與懸邊材料係數

本文針對 PU 發泡試片以及各種加勁材料進行拉伸實驗以檢測其機械性質，使用弘達 HT-2402 材料試驗機，並將應變規連結 PCD-300A 取值系統，取得其橫軸與縱軸之應變值，由拉伸數據可求得楊氏係數 (Young’s Modulus) 及卜易淞比 (Poisson’s Ratio)。表 3. 為振膜基材 PU 發泡板 3 種不同密度材料參數。表 4. 為長纖碳纖維 (0 度)、平纖碳纖維 (平織) 以及生物纖維 (SBC) 的材料參數。表 5. 為利用非破壞性檢測兩種懸邊材質的彈簧係數 K 值。

(三) 平板揚聲器聲壓曲線驗證

本文製作 PU 發泡板振膜、雙面加勁振膜，提升平板揚聲器振膜剛性，並且利用有限元素進行最佳化節省時間，最終目的為製作出具備質量輕、剛性強之平板揚聲器振膜。本節將進行揚聲器之有限元素模型驗證。

1. 聲壓曲線之量測實驗與理論分析比對

第一組揚聲器聲壓曲線的量測實驗以及理論分析比對的揚聲器製造參數如表 6. 所示，聲壓曲線如圖 16 所示。

理論與實驗聲壓曲線比對，理論與實驗之 f_0 差距在 10Hz 之內，中頻部分趨勢一致，在 20kHz 之前的 dip，理論與實驗表現一致，高頻部份曲線趨勢也相符。

第二組揚聲器聲壓曲線的量測實驗以及理論分析比對的揚聲器製造參數如表 7 所示，聲壓曲線如圖 17 所示。

表3. 振膜材料係數

	PU 發泡		
	0.485	0.4	0.306
E (Gpa)	0.485	0.4	0.306
ν	0.3	0.3	0.3
ρ (g/cm ³)	0.45	0.43	0.4

表4. 加勁材料係數

	長纖碳纖維 (0 度)	平纖碳纖維 (平織)	生物纖維 (SBC)
E ₁ (Gpa)	147.5	50.25	6.87
E ₂ =E ₃ (Gpa)	9.22	50.25	6.87
$\nu_{12}=\nu_{13}$	0.31	0.3	0.29
ν_{23}	0.25	0.3	0.29
G ₁₂ =G ₁₃ (Gpa)	6.85	19.33	2.66
G ₂₃ (Gpa)	1.12	19.33	2.66
ρ (g/cm ³)	1.457	1.508	0.984

表5. 懸邊的彈簧係數 K 值

	PVC	PU
K 值 (N/m)	4390.33	2038.46

表6. 第一組聲壓曲線驗證之製造參數

振膜材質	PU 發泡板
密度 (g/cm ³)	0.45
加勁	無
厚度 (mm)	2
懸邊材質	PVC

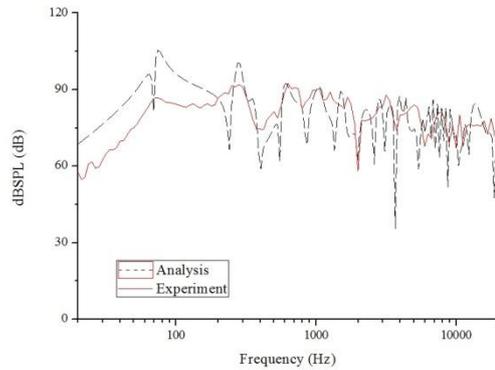


圖16. 第一組聲壓曲線分析與實驗比對

表7. 第二組聲壓曲線驗證之製造參數

振膜材質	PU 發泡板
密度 (g/cm ³)	0.45
加勁	雙面 0 度破織
厚度 (mm)	2
懸邊材質	PVC



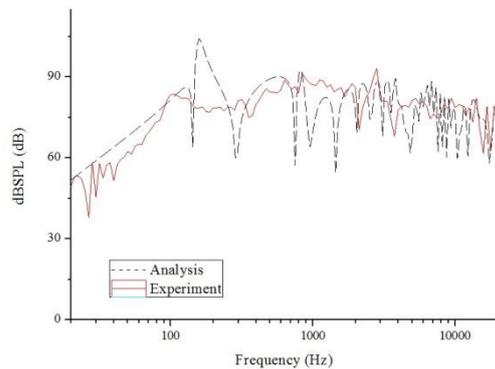


圖17. 第二組聲壓曲線分析與實驗比對

第二組在加勁方面利用了上下 0 度碳纖製成三明治複合板，在實驗聲壓曲線比對，理論與實驗之 f_0 也差距在 10Hz 之內，中高頻部分趨勢一致。在上下加勁碳纖之後可以看到因為整體剛性增強，所以在中高頻部份曲線相對於無加勁之振膜更為平滑，而且加勁過後之 dB 值還能維持在無加勁時的程度，所以雙面加勁的方向是可行的。

第三組揚聲器聲壓曲線的量測實驗以及理論分析比對的揚聲器製造參數如表 8. 所示，聲壓曲線如圖 18 所示。

第三組在製造參數與前 2 組不同的地方是更換了懸邊材質，理論與實驗之 f_0 差距在 10Hz 之內，中頻部份趨勢也相符，高頻部份在 10kHz 的 dip 表現，理論與實驗表現一致。

2. 聲壓曲線之變異數比對

本文在聲壓曲線之量測實驗與理論分析比對除了利用曲線趨勢來做驗證之外，並利用變異數比對來輔佐驗證結果。變異數計算方式為 $f_0 \sim 20\text{kHz}$ 該區段之變異數。表 9. 為前驗證聲壓曲線的 3 組樣本之量測實驗與理論分析變異數比對。

由表 9. 可以得知量測實驗的聲壓曲線變異數與理論分析的聲壓曲線變異數趨勢相符，故本文將使用有限元素分析配合田口品質工程方法進行製造參數的最佳化分析。

(四) 田口品質工程方法使用

本文利用電腦輔助工程結合田口品質工程方法來分析，在先前已經驗證了聲壓曲線之量測實驗與理論分析的結果趨勢一致，固本節將進行田口品質工程方法最佳化。

表 10. 為本文平板揚聲器的四個重要參數分別是懸邊材質、密度、發泡厚度以及加勁方式，依據先前所組裝出來的揚聲器表現發現 PU 材質的懸邊擁有較佳的支撐性以及較低的 K 值，所以將懸邊材質的第三個水準也設定為 PU，故本文使用 $L_9 (3^4)$ 直交表如表 11. 所示。表 12. 為分析結果的變

異數以及利用公式 (6) 算出各組別的望小特性之 S/N 比。

表 13 及圖 19 為各因子與水準的反應表以及反應圖，在反應表中，因子的特性為各水準加總後將最大值減去最小值做為衡量，例如厚度的特性為 $(-117.723) - (-125.589) = 7.8656$ ，結束後將各因子的特性依大小設定排名。圖 20 為各因子的影響百分比，厚度為 57.4%，加勁材料為 36.6%，密度為 5.2%，懸邊材質因為特性值只有 0.459，與其他因子比起來小得多，故其影響量為 0%。

表8. 第三組聲壓曲線驗證之製造參數

振膜材質	PU 發泡板
密度 (g/cm^3)	0.45
加勁	無
厚度 (mm)	2
懸邊材質	PU

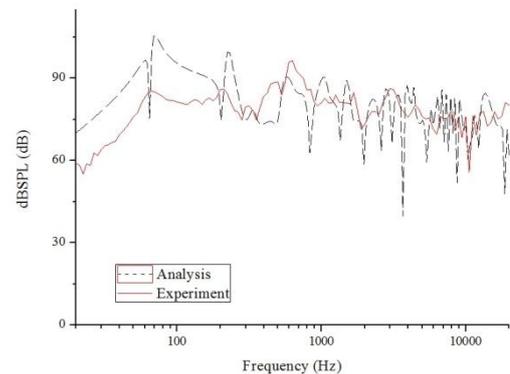


圖18. 第三組聲壓曲線分析與實驗比對

表9. 量測實驗與理論分析變異數比對

組別 \ 數值	量測實驗 (dB)	理論分析 (dB)
第一組	41.58	130.5
第二組	24.89	93.35
第三組	38.55	117.74

表10. B5 平板揚聲器之因子與水準

因子 水準	懸邊材質	密度 (水)	厚度 (mm)	加勁材料
水準一	PVC	(0) wt%	2	0 度
水準二	PU	(0.5) wt%	1.5	SBC
水準三	PU	(1) wt%	1	平織



表11. 田口品質工程方法 L₉表

因子 編號	懸邊材質	密度 (水)	厚度 (mm)	加勁材料
1	PVC	(0) wt%	2	0 度
2	PVC	(0.5) wt %	1.5	SBC
3	PVC	(1) wt %	1	平織
4	PU	(0) wt %	1.5	平織
5	PU	(0.5) wt %	1	0 度
6	PU	(1) wt %	2	SBC
7	PU	(0) wt %	1	SBC
8	PU	(0.5) wt %	2	平織
9	PU	(1) wt %	1.5	0 度

表12. 分析結果 S/N 比

編號	變異數 (dB)	Ve	S/N
1	93.35	8714.07	-39.4022
2	123.28	15198.94	-41.8181
3	114.34	13073.75	-41.164
4	103.25	10660.93	-40.278
5	113.90	12973.8	-41.1307
6	106.13	11263.83	-40.5169
7	146.12	21349.91	-43.294
8	85.86	6031.076	-37.8039
9	113.9	12973.16	-41.1305

表13. 特性要因表

因子 水準	懸邊材質	密度 (水)	厚度(mm)	加勁材料
水準一	-122.384	-122.974	-117.723	-121.663
水準二	-121.925	-120.753	-123.227	-125.629
水準三	-122.228	-122.811	-125.589	-119.246
影響量	0.4588596	2.22136965	7.86561631	6.38305517
排名	4	3	1	2

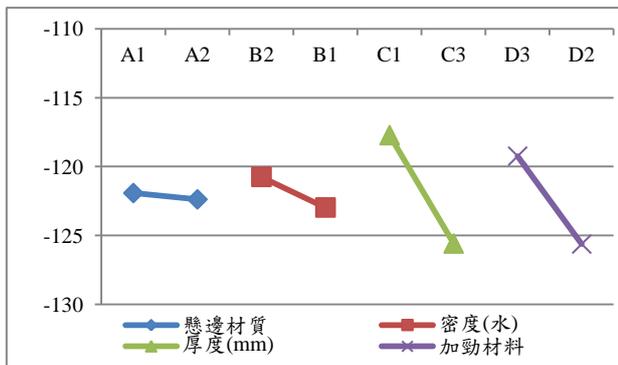


圖19. 特性要因圖

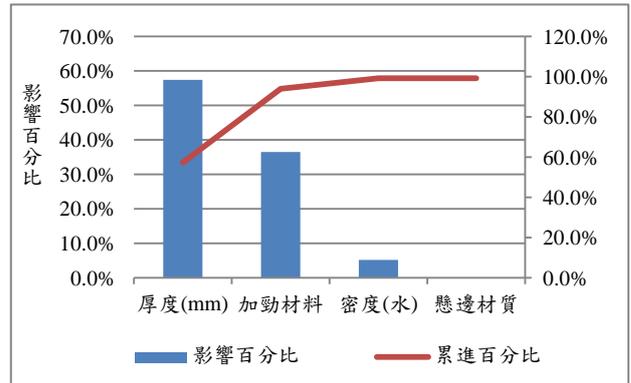


圖20. 柏拉圖-平均值

目前經由田口品質工程方法最佳化所得到的最佳製造參數，懸邊材質為 PU，密度方面為 0.5wt% (水)，振膜厚度為 2mm，加勁材料為平織碳纖維。為了確定結果的準確性，須進行各因子的交互作用比較，所謂交互作用指的是一個因子無法在另一個因子的不同水準對回應變異數產生相同的效果時，當因子間存在著交互作用時，即各因子的效果非疊加性質，必須將各因子組合獨立出來觀察，否則易造成錯誤的結果，圖 21 為密度與厚度的交互作用圖，兩條線呈現接近平行狀態，顯示這兩種因子並無交互作用。

圖 22 為密度與加勁材料的交互作用圖，在密度 0wt%(水)的情況，加勁材料為 0 度碳纖以及加勁材料為平織相比，0 度碳纖維的表現較好，但是當密度改成 0.5wt% (水)的時候情況又相反，變成平織碳纖維表現好，可是以變異數的差距來評估，在密度 0.5wt% (水)的變異數差距大於密度為 0wt% (水)的變異數差距，故在密度的水準依舊是選擇 0.5wt% (水)，加勁材料依舊是平織碳纖維。

接著圖 23 為厚度與加勁材料的交互作用圖，可以發現厚度在 2mm 時加勁材料有明顯差異，表現較好的加勁材料是平織碳纖維，但當厚度換成 1mm 時 2 種材料的變異數差距很小，故在厚度方面一樣維持在 2mm 的厚度。

綜合以上結果，最佳製程參數組合的懸邊材質為 PU、發泡密度為 5wt% (水)、振膜厚度為 2mm、加勁材料為平織碳纖維如表 14 所示。



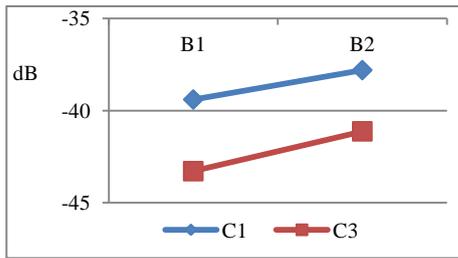


圖21. 密度與厚度交互作用圖

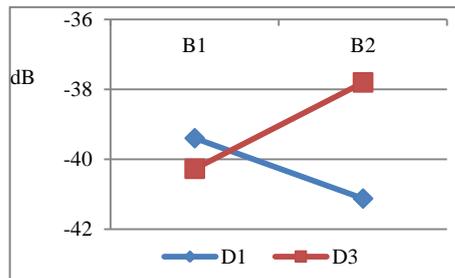


圖22. 密度與加勁材料交互作用圖

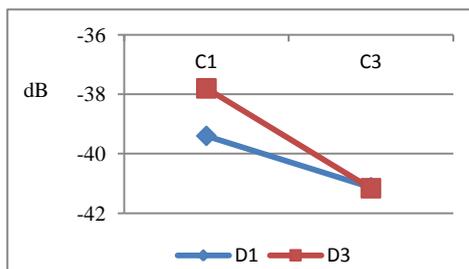


圖23. 厚度與加勁材料交互作用圖

表14. 田口品質工程方法最佳化製程參數組合

組合	因子	水準
A2	懸邊材質	PU
B2	密度 (水)	0.5wt%
C1	厚度 (mm)	2
D3	加勁材料	平織碳纖維

(五) 平板揚聲器之最佳化分析結果與量測實驗比對

本文以 B5 平板揚聲器利用田口品質工程方法最佳化找出最佳製程參數，並以實際製作 B5 平板揚聲器與分析曲線做驗證，圖 24 顯示分析結果大致上皆能反映出實驗值的趨勢，並且實驗量測聲壓曲線的 f_0 值為 103Hz (圖 25)，在追求中高頻平滑的聲壓曲線也能兼顧到低頻不會往右偏移太多，以免頻寬變窄，證實田口品質工程方法最佳化具有一定的成效。

圖 26 為實際製作的 B5 平板揚聲器與結合高音喇叭的

B5 平板揚聲器聲壓曲線比對，在 10kHz 之後的聲壓值明顯提升了許多，代表與高音喇叭結合的 B5 平板揚聲器能彌補高頻部分的不足，能達成一全音域之 B5 平板揚聲器。

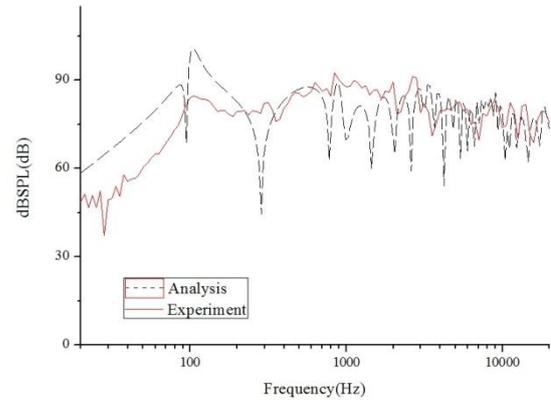


圖24. 田口品質工程方法最佳化驗證

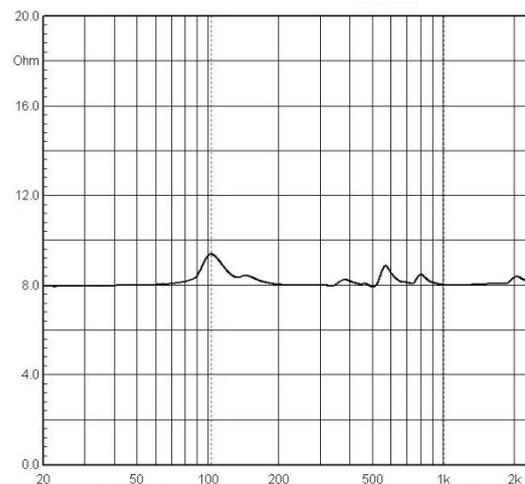
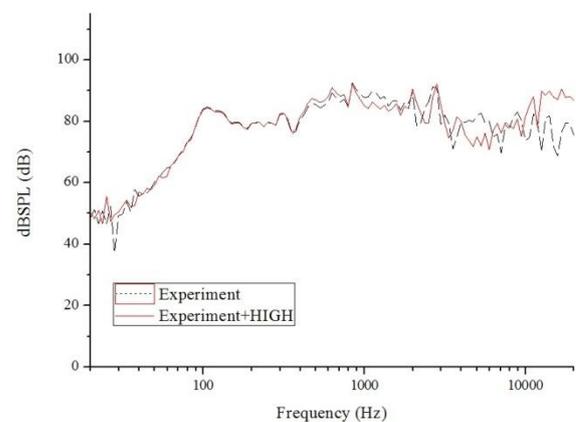
圖25. 最佳化結果量測實驗 f_0 值

圖26. 結合高音喇叭的揚聲器比對



四、結論

本文運用 ANSYS 有限元素分析軟體開發 B5 平板揚聲器模型進行頻率響應分析，並與實驗量測的聲壓曲線做比對，驗證該模型之正確性並且能有效預測揚聲器的特性，並配合田口品質工程方法最佳化找出最佳製造設計參數，確定結果有一定的成效。本文綜合以上各項分析可得到以下幾點結論：

1. 本文證實平板揚聲器的軟性振動板材料使用 PU 發泡是可行的，以加勁碳纖或生物纖維方式，改善高音衰減問題，增加音域。
2. 在懸邊材質部分發現 PU 的懸邊的頻寬表現優於 PVC。
3. ANSYS 有限元素分析在分析與實驗量測具有一致性的趨勢，代表建構分析模型的正確性。
4. 在加勁材料方面，碳纖維的效果遠高過於生物纖維，但低音表略遜於純發泡板，因此碳纖維發泡振膜可以利用 PU 材質配合振膜，增加音域。
5. 加勁 SBC 生物纖維之振膜並無法有效的改善聲壓曲線，研判是薄膜厚度太薄，無法有效的對發泡板產生加勁的效果。
6. 田口品質工程方法與傳統的設計方法，大大的減少了實驗次數，且不失其可靠性。
7. 本文獲得的最佳製造參數，懸邊材質為 PU，密度方面為 0.5wt% (水)，振膜厚度為 2mm，加勁材料為平織碳纖維。
8. 最佳化結果的揚聲器聲壓曲線與實際製作的聲壓曲線，證實田口品質工程方法最佳化具有一定的成效。
9. 與高音喇叭結合的 B5 平板揚聲器能彌補高頻部分的不足，能達到一全音域之 B5 平板揚聲器。

參考文獻

1. 王怡婷 (民 99)，奈米碳管加勁複合材料雙振膜平板揚聲器最佳化設計與研製，大葉大學工業工程與科技管理研究所碩士論文。
2. 王寶惠 (民 99)，小型生物纖維振膜之圓形平面揚聲器最佳化設計與研製，大葉大學工業工程與科技管理研究所碩士論文。
3. 田口玄一 (民 79)，品質設計與實驗計畫法，中國生產力中心，台北。

4. 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。
5. 何蓓心 (95)，聚氨基甲酸酯/黏土奈米複合發泡體之製作與其性質研究，逢甲大學紡織工程研究所碩士論文。
6. 李輝煌 (民 89)，田口方法品質設計的原理與實務，高立圖書，台北。
7. 徐才維 (民 91)，微型喇叭之研製，國立交通大學機械工程研究所碩士論文。
8. 范凱涵 (民 100)，液晶電視平板揚聲器與音箱之最佳化設計與研製，大葉大學工業工程與科技管理研究所碩士論文。
9. 陳裕偉 (民 100)，振動板與平面揚聲器之研發，大葉大學工業工程 與科技管理研究所碩士論文。
10. 楊建明 (民 93)，田口方法應用於連續纖維補強押出發泡三明治結構之製程最佳化分析，國立成功大學工程科學系碩士論文。
11. Bell, A. G. (1876), U.S. Patent No.174465.
12. Baldwin, N. (1908), U.S. Patent No. 905781.
13. Kam, T. Y. (2004), U.S. Patent No. US006681026B2.
14. Keshk, S. (2002) *Gluconacetobacter xylinus*: a new resource for cellulose. *Egypt Journal of Biotechnology*, 11, 305-310.
15. Lai, F. M., M. Y. Wu, C. M. Yang and W. S. Shih (2012) Development high stiffness ratio of stiffened membranes for small flat speakers. *Advanced Materials Research*, 538(541), 44-47.
16. Mühlethaler, K. (1949) The structure of bacterial cellulose. *Biochimica et Biophysica Acta*, 3, 527-535.
17. 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.
18. Yoshinaga, F., N. Tonouchi and K. Watanabe (1977) Research progress in production of bacterial cellulose by aeration and agitation culture and its application as a new industrial material. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry*, 61(2), 219-224.

收件：102.10.09 修正：102.11.22 接受：103.01.27

