

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

加勁複合材料板的揚聲特性研究 研究成果報告(精簡版)

計畫類別：個別型
計畫編號：NSC 97-2221-E-009-013-
執行期間：97年08月01日至98年07月31日
執行單位：國立交通大學機械工程學系(所)

計畫主持人：金大仁

計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理人員：黃琮鍾
博士班研究生-兼任助理人員：王崧任

報告附件：國外研究心得報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 98 年 12 月 09 日

※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※
※
※
加勁複合材料板的揚聲特性研究
※
※
※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※※

執行期間：97 年 8 月 1 日至 98 年 7 月 31 日

碩士班研究生-兼任助理人員：黃建順

1

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

加勁複合材料板的揚聲特性研究

Sound radiation characteristics of stiffened composite plates

計畫編號：NSC 97-2221-E-009-013

執行期限：97 年 8 月 1 日至 98 年 7 月 31 日

主持人：金大仁 國立交通大學機械工程學系(所)

計畫參與人員：王崧任、黃琮鍾、陳昌毅、黃建順

一、中文摘要

本報告為研究利用複合材料設計具加勁結構的圓形複合材料平板，來改善加勁複合材料平板的聲傳效果，透過有限元素數值模擬方法，建構加勁複合材料平板的有限單元模型，以此模型模擬並探討加勁複合材料平板的聲傳行為，由此數值方法可以得到加勁複合材料平板的聲壓位準 (Sound pressure level) 曲線，同時由聲壓位準曲線來觀察不同加勁設計下，聲壓位準曲線的變化，結合數值最佳化方法理論，對部分加勁的幾何大小尺寸、厚度進行最佳化設計，找出最佳的加勁設計，以達到圓形加勁複合材料平板之聲壓位準曲線平滑化之目標，同時也透過實驗量測圓形加勁複合材料平板之聲壓位準曲線的方式，來驗證此數值模擬方法的正確性。

關鍵詞：圓形平板、複合材料、有限單元法、聲壓位準、數值最佳化。

Abstract

Composite materials are used to design stiffened circular composite flat panels for improving the sound radiation of the panels. Finite element model of the stiffened circular composite flat panels are constructed for the finite element analyses of the panels. The dynamic responses of the flexibly supported panel obtained in the finite element analysis are used in the first Rayleigh integral to construct the sound pressure level (SPL) curve of the radiating panel. The thicknesses of the laminated composite stiffeners are designed using an optimization technique to minimize the sound pressure level drop in the mid frequency range. In the proposed optimization method, a sound level difference function which measures the squared differences among the SPLs of a set of given frequencies is established. A

multi-start global minimization method is then used to minimize the sound level difference function to search for the optimal solution. Experimentally measured SPL curves have been used to validate the suitability of the finite element models of the stiffened circular composite flat panel.

Keywords: Circular flat panel, composite material, finite element method, global minimization method, sound pressure level.

二、前言

目前大多數的數位影音產品，例如電視、音響、隨身聽等等，都是使用傳統錐盆式揚聲器，傳統錐盆式揚聲器是藉由錐盆狀振動板來激振揚聲，這種錐盆狀振動板擁有質輕且高剛性的優點，可以得到不錯的揚聲效果。到目前為止，也有許多研究文獻報告[1-5]針對傳統錐盆式揚聲器的聲傳行為，作相當深入且廣泛的研究討論。因此被廣泛地運用在各種需要揚聲的產品設備之上，但也因其錐盆狀的設計影響，若要達到不錯低頻聲音表現，其揚聲器的體積將會變的相當且相當笨重。而現今主流的影音設備產品都訴求體積小、重量輕以及易於隨身攜帶的特性之下，傳統錐盆式揚聲器在這方面，就會因其缺點而較難應用在這類設備產品之上。

平面揚聲器揚聲方式與傳統錐盆式揚聲器差不多，以激振磁迴組產生電磁力使音圈產生推力推動振動板，進而推動空氣發出聲音，但平面揚聲器由於其振動板為平板，使其體積厚度較傳統錐盆式揚聲器

小了許多。因此平面振動板對於平面揚聲器而言，是一個非常重要的結構，平面振動板必須達到高剛性以及質輕的機械特性，才能有不錯的揚聲效果，故採用複合材料來設計製作平面振動板，複合材料即具有揚聲器振動板所需要的高剛性以及質輕的機械特性，在過去就被廣泛地應用在各種不同領域的工程設計上。有圓形平板的研究上，過去有學者 Suzuki and Tichy [6] 探討過具彈性支撐的圓形平板的聲傳行為，Kam [7-9] 也提出數種不同複合材料平板設計的平面揚聲器。在平面揚聲器的聲傳行為方面，邊緣具有彈性支撐的平面振動板，受到電磁激振器所產生之激振力的推動而發出聲音，而其揚聲的效果好壞則受到在有效揚聲頻率範圍內的平板振動變形影響，在低頻的揚聲範圍內，平面振動板是以活塞運動的方式揚聲，在中高頻的揚聲範圍內，平面振動板則會產生彎曲變形，並以此方式揚聲，也因為這種彎曲變形的產生，有時候會對揚聲器產生不良揚聲影響，本報告將會提出一種平面振動板的設計方法來改善或抑制這種彎曲變形所產生的影響。

在最佳化設計方法方面，最佳化設計的概念，在過去已應用在許多不同領域，利用最佳化設計方法，以一種比較有效率的方式，來解決各種不同需求的問題。在複合材料的部分，也有許多最佳化設計的方法[10-12]被提出來，用來找出複合材料最佳的幾何形狀、大小尺寸、疊層角度以及層數厚度等最佳設計，以達到滿足各種不同工程設計上，對結構強度的需求。

最近幾年複合材料平板的聲傳研究，是一種相當熱門的研究，並且其研究結果被應用去解決在許多相關的工程問題，例如噪音控制以及揚聲器設計等等。在一些複雜結構的振動行為數值分析研究上，例如邊緣具有懸邊，中間有音圈結構的平板問題，有學者[13]提出以有限單元法來探討這類的問題。本文將藉由有限單元軟體

ANSYS[14]來建構一個具彈性支撐的圓形複合材料平面揚聲器的有限單元模型，並以此有限單元模型來模擬圓形複合材料平面揚聲器的揚聲行為，透過此數值模擬所得到的結果，並結合以 Rayleigh 積分法所得到的聲壓計算方程式[15]，則可以獲得圓形複合材料平面揚聲器的聲壓位準(Sound pressure level)曲線，以下均簡稱為聲壓曲線或 SPL 曲線，本文即透過探討平面揚聲器之 SPL 曲線以及其相關之振動變形，並以最佳化方法，來設計具加勁結構的圓形加勁複合材料平板，作為平面揚聲器的揚聲振動板，以達到聲壓曲線平滑化，揚聲器揚聲效果較佳的目標。同時利用聲壓量測實驗[16-17]獲得平面揚聲器之聲壓實驗曲線，並與數值分析之結果相互驗證比較，以證明本文所建立的有限單元模型以及數值模擬分析方法的正確性。

三、具彈性支撐圓形複合材料平板之簡諧激振分析

在探討具彈性支撐圓形複合材料平板之簡諧激振分析前，必須要先瞭解平面揚聲器的結構以及其各主要結構所負責的功能，如圖一所示，為一平面揚聲器的細部構造圖解，其中平板受到電磁激振器所產生的激振力激振之下，而產生活塞運動推動空氣達到揚聲的效果，懸邊以及彈波位於平板的邊緣和中間位置，為平板的彈性支撐，電磁激振器則為平板產生簡諧激振力，使平板開始作活塞運動，在這些主要結構的功能相互配合之下，平面揚聲器即可發出悅耳的聲音。在數值模擬分析方面，可以將前述之圓形平面揚聲器的一些主要結構的功能，以數學模型來模擬其功能，如圖二所示，其中懸邊以及彈波主要功能為提供平板彈性支撐，在數學模型下，則可以利用兩組環狀排列的彈簧(k_e 、 k_i)分別來模擬在平板邊緣以及中間位置的彈性支撐的功能；電磁激振器所產生的簡諧激振力，使平板進行活塞運動而達到揚

聲的目的，在數學模型中，藉由一環狀排列的簡諧施力($f(t)$)來模擬在平板中間所受到的激振力。

在簡諧激振分析方面，將上述的平面揚聲器的數學模擬模型藉由有限單元商用軟體 ANSYS 建構為具彈性支撐圓形複合材料平板的有限單元模型，並利用此有限單元模型來模擬分析具彈性支撐圓形複合材料平板的聲傳行為，並可以得到圓形複合材料平板在不同激振頻率之下，其平板上每個節點的相位角(θ)和振幅(A)之數值分析結果，將此數值分析結果與稍後會介紹之聲壓計算方程式結合，即可獲得具彈性支撐圓形複合材料平板在有效激振頻率範圍內的 SPL 曲線。如圖三所示，為以有限單元軟體 ANSYS 所建構之具彈性支撐圓形複合材料平板的有限單元模型。首先所使用的元素型態為元素 SHELL91 以及 SHELL99，此種元素為兩種二維模擬三維問題的殼元素，且可設定複材板之疊層數目及各疊層之纖維角度及各疊層之材料常數，其中 SHELL91 與 SHELL99 不同之處，為 SHELL91 有三明治結構模擬的功能，可以藉此功能來模擬具三明治結構之圓形平板，因此以兩種元素相互配合下，模擬上述之具彈性支撐圓形複合材料平板中的各種不同結構設計之圓形平板；圓形複合材料平板的彈性支撐則是以用彈簧元素 COMBIN14 來模擬，並設定此彈簧元素為單一方向運動，藉此來模擬彈性支撐運動行為；因音圈及懸邊實體結構對圓形平板所產生振動變形影響較小，所以僅用 MASS21 元素來模擬音圈及懸邊在平板邊緣以及中間位置所存在的等效質量效應。上述的有限單元模型之建立，藉此模擬圓形複合材料平板在簡諧激振行為下的平板振動行為，並計算圓形振動板在每個不同的激振頻率之下，圓板上每個節點的相位角以及振幅，將其結果以及每個節點的座標資料輸出，以稍後將介紹的聲壓計算方

程式，進行數值運算，最後即可得到具彈性支撐圓形複合材料平板之聲傳模擬分析的聲壓曲線。

在彈性支撐模擬半圓形懸邊方面，則是參考文獻[14-16]中，將懸邊視為半圓形懸臂樑，如圖四所示，在自由端施加集中負荷，則可以得到樑之任意截面所受之彎矩以及作用力，可以表示為

$$\begin{aligned} M &= Ar(1 - \cos\theta) + Br\sin\theta \\ F_r &= A\sin\theta + B\sin\theta \\ F_\theta &= A\cos\theta - B\cos\theta \end{aligned} \quad (1)$$

其中 r 為半圓形懸臂樑之半徑， M 為彎矩， F_r 、 F_θ 為集中負荷的合力，則樑之總應變能 U 為

$$U = \frac{r}{2EI} \int_0^\pi M^2 d\theta + \frac{r}{2AE} \int_0^\pi F_\theta^2 d\theta - \frac{1}{2AE} \int_0^\pi M F_\theta d\theta + \frac{Cr}{2AG} \int_0^\pi F_r^2 d\theta \quad (2)$$

其中 A 為懸臂樑截面面積， E 為楊氏係數， G 為剪力模數， $I = bt^3/12$ 為轉動慣量， b 為懸邊總長度， $C = 1.5$ 懸臂梁之應變能修正係數，與懸臂梁的截面形狀有關。由卡氏定理可求得樑自由端在 x 、 y 方向之位移 δx 、 δy 如下

$$\delta x = \frac{\partial U}{\partial B} = \frac{r^3}{EI} (2A + \frac{\pi}{2}B) + \frac{\pi r}{2AE} (A + B) + \frac{\pi Pr}{4AE} + \frac{Cr}{2AG} (A + B) \quad (3)$$

$$\delta y = \frac{\partial U}{\partial A} = \frac{r^3}{EI} (\frac{3\pi}{2}A + 2B) + \frac{\pi r}{2AE} (A + B) + \frac{\pi Vr}{4AE} (2A + B) + \frac{Cr}{2AG} (A + B) \quad (4)$$

由於 x 方向之位移 δx 為 0，由式(6-3)可以得到集中負荷 P 、 Q 之關係式為

$$B = -1.272A \quad (5)$$

將上式代入式(6-4)中，接者可以得到樑之勁度 K_L 為平移彈性支撐，如下列所示

$$K_L = \frac{A}{\delta y} = \left(\frac{2.168r^3}{EI} + \frac{0.145r}{AE} - \frac{0.427Cr}{AG} \right)^{-1} \quad (6)$$

由上述之方法即可得到彈性支撐的等效彈

性常數，另外半圓形彈性懸邊的材料楊氏係數，則可藉由實驗在具彈性懸邊的圓形平板上施加單一方向負荷，並利用位移計量測平板的位移量，再將施加負荷以及位移值代入式(6)，即可求得懸邊的材料楊氏係數，其值為 122.174 MPa。

三、聲傳分析

在前述的具彈性支撐圓形複合材料平板之簡諧激振分析之後，可以獲得在圓形平板的有限單元模型上，每個節點的相位角以及振幅之數值模擬分析結果，並可藉此分析結果與本節所介紹之聲壓計算方程式，即可計算得到具彈性支撐圓形複合材料平板的聲壓曲線。如圖五所示，點 Q 為圓形平板中心軸上的聲壓量測點，以 Rayleigh 積分法則可得到聲壓計算方程式，如式(7)所示。

$$p(r,t) = \frac{-\omega^2 \rho_{air}}{2\pi} \sum_i A_i e^{j(\omega t + \theta_i - kr)} \frac{\Delta S_i}{r_i} \quad (7)$$

其中 $p(r,t)$ 為在點 Q 處的聲壓值； r 為圓形平板中心點到點 Q 處的距離； ω 為激振頻率； $\rho_{air}(1.1614 \text{ kg/m}^3)$ 為空氣密度； A_i 為圓形平板上每個單位面積 i 的振幅； θ_i 為圓形平板上每個單位面積 i 的相位角； r_i 為圓形平板上每個單位面積 i 到點 Q 處的距離； j is $\sqrt{-1}$ ； k 波數； ΔS_i 為圓形平板上每個單位面積 i 的面積。

就實際應用而言，量測聲音用的尺度為對數尺度(log scale)，因為人耳對於聲音的感受比較接近對數尺度，因此大多數都是以對數尺度量測聲音，其單位為分貝(decibel)。且定義聲壓位準(Sound Pressure Level)為

$$SPL = 20 \log\left(\frac{P_{rms}}{P_{ref}}\right) \quad (8)$$

其中 P_{ref} 為聲壓參考值 $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ ， P_{rms} 為量測點聲壓之均方根值，如式(3)所示

$$P_{rms} = \left[\frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} |p(r,t)|^2 dt \right]^{1/2} \quad (9)$$

將式(1)代入式(3)，可得

$$P_{rms} = \sum_i \sum_j \frac{1}{\sqrt{2}} [P_i P_j \cos(\tilde{\theta}_i - \tilde{\theta}_j)]^{1/2} \quad (10)$$

其中

$$P_i = \frac{\omega^2 \rho}{2\pi} \frac{A(x_i, y_i)}{r_i} \Delta S_i; \quad \tilde{\theta}_i = kr_i - \theta_i; \quad k = \frac{\omega}{c} \quad (11)$$

由上述之聲壓計算方程式即可得到複合材料平板之頻率響應曲線即為聲壓曲線，縱軸為(dB)，橫軸為激振頻率。

四、圓形複合材料平面揚聲器之聲傳實驗

藉由圓形複合材料平面揚聲器的聲傳實驗，可以建立一個平面揚聲器的製作流程，並且透過聲壓量測系統，進行實驗量測平面揚聲器的聲壓曲線，將其實驗結果與前述的數值模擬分析方法所得之結果相互比較，驗證數值模擬方法的正確性。

在圓形複合材料平面揚聲器的實驗部分，可分為兩個部分，平面揚聲器製作以及聲壓曲線量測。在揚聲器製作方面，圓形複合材料平面揚聲器所常用的平板設計，如圖四所示，其材料為達到高剛性以及質輕的機械特性，選用碳纖維預浸材以及輕質木板(巴爾沙木：Balsa Wood)，在單一材質結構平板，會分別者兩種材料製作成巴爾沙木平板以及碳纖維積層板，或是以巴爾沙木作為心層材料，碳纖維預浸材作為面層材料，製作成具三明治結構之圓形平板，以三明治平板為例，將碳纖維預浸材以及巴爾沙木裁切為所需的尺寸大小之後，由於兩種材料均為異向性材料，不同方向的材料強度不同，故在兩種材料作對稱疊層時，兩種材料的材料主軸方向以正交的方式排列，最後將疊層好的三明治平板藉由熱壓機以高溫高壓的製作程序，即可獲得具三明治結構之圓形複合材料平板，之後將製作好的圓形平板與其他平面揚聲器零件，如懸邊、彈波、音圈、電磁激振器以及外框等，進行組合，即可製作完成圓形複合材料平面揚聲器。

在聲壓曲線實驗量測方面，將上述所製作完成之圓形平面揚聲器，固定在一個大形標準障板上，並置於無響室中，以聲壓量測系統 LMS，進行圓形平面揚聲器的聲壓曲線實驗量測，即可獲得圓形複合材料平面揚聲器的聲壓曲線。其實驗示意圖，如圖六所示。

五、最佳化設計方法之建立

本文的最佳化設計方法，是以圓形平板加勁最佳設計，使其在有效頻率範圍內之聲壓曲線平滑化為目標。首先建立目標函數，以在有效頻率範圍內之數個選定之頻率的聲壓值與平均聲壓值的差值平方作為最佳化目標函數，以總域極小值演算法搜尋此目標函數之總域極小值的方式進行。

圓形平板最佳化設計之數學模式，可以表示為

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & e(\mathbf{x}) = (\mathbf{P}^*)'(\mathbf{P}^*) \\ \text{Subject to} \quad & x_i^L \leq x_i \leq x_i^U \quad i = 1, \dots, N \end{aligned} \quad (12)$$

其中 $e(\mathbf{x})$ 為最佳化之目標函數， $\mathbf{x}$ 為最佳化設計程序之設計變數，考慮平板的加勁最佳設計問題，其設計變數為加勁條的厚度或是幾何尺寸大小；由於在實際平板加勁時，是用複合材料碳纖維預浸材，裁切為條狀或是塊狀，並黏貼在平板上，由於預浸材單層厚度為固定，因此在進行最佳化程序時，其設計變數若為加勁條之厚度，最後所得到之最佳設計厚度，需要以實際單層預浸材厚度做為參考基礎，將最佳數值結果調整為實際平板在加勁時，所需要的黏貼疊層之層數以及實際加勁厚度。 x_i^L 、 x_i^U 為設計變數之下限以及上限，以隨機多起始點搜尋方法，在下限與上限範圍內，產生一組設計變數之起始值，並開始搜尋數值最佳化之總域極小值。

由於平板揚聲系統的有效設計頻率範圍，通常都是設定為 20~20K Hz，因此最佳化目標為就是將此範圍內的聲壓曲線平滑化，所以目標函數就是在此有效頻率範

圍內，選擇數個頻率的聲壓值與平均聲壓值的差值平方，如式(13)所示，頻率的選擇方式為參考尚未加勁之平板的聲壓曲線，有出現較大聲壓值差異的數個頻率區間，由這些區間中，選定數個頻率的聲壓值，代入目標函數中，進行最佳化程序。

$$P_i^* = \frac{P_i - P_{avg}}{P_{avg}} \quad i = 1, \dots, N \quad (13)$$

其中 N 為所選擇之頻率數量， P_i 為第 i 個頻率之聲壓值， P_{avg} 為 N 個頻率之平均聲壓值。

在完成目標函數建立之後，利用廣義拉格蘭吉乘子方法(A.L.M.)將上述之有限制條件之最佳化問題，轉變為無限制條件之最佳化問題，同時可以得到一個新的目標函數 $\bar{\Psi}$ ，如式(14)所示，同時以此新目標函數，來搜尋無限制條件之總域極小值。

$$\bar{\Psi}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\eta}, \mathbf{r}_p) = e(\mathbf{x}) + \sum_{j=1}^N [\mu_j z_j + r_p z_j^2 + \eta_j \phi_j + r_p \phi_j^2] \quad (14)$$

其中

$$\begin{aligned} z_j &= \max \left[g_j(\tilde{x}_j), \frac{-\mu_j}{2r_p} \right] \quad g_j(\tilde{x}_j) = \tilde{x}_j - \tilde{x}_j^U \leq 0 \\ \phi_j &= \max \left[H_j(\tilde{x}_j), \frac{-\eta_j}{2r_p} \right] \\ H_j(\tilde{x}_j) &= \tilde{x}_j^L - \tilde{x}_j \leq 0 \quad j = 1 \sim N \end{aligned} \quad (15)$$

其中 μ_j 、 η_j 、 r_p 為拉格蘭吉乘子； $\max[*]$ 表示取括號中之最大值；而拉格蘭吉乘子迭代方程式為

$$\begin{aligned} \mu_j^{k+1} &= \mu_j^k + 2r_p^k z_j^k \\ \eta_j^{k+1} &= \eta_j^k + 2r_p^k \phi_j^k \quad j = 1 \sim N \\ r_p^{k+1} &= \begin{cases} \gamma_0 r_p^k & \text{if } r_p^{k+1} < r_p^{\max} \\ r_p^{\max} & \text{if } r_p^{k+1} \geq r_p^{\max} \end{cases} \end{aligned} \quad (16)$$

而 μ_j^0 、 η_j^0 、 r_p^0 、 γ_0 以及 $r_p^{\max}$ 之各值，則可依經驗設定為

$$\begin{aligned} \mu_j^0 &= 1.0 \quad \eta_j^0 = 1.0 \quad j = 1, \dots, N \\ r_p^0 &= 0.4 \quad \gamma_0 = 2.5 \quad r_p^{\max} = 100 \end{aligned} \quad (17)$$

綜合上述之平板加勁最佳化設計方法、聲壓計算方程式以及實驗方法和分析，可以建立一套平板加勁最佳設計之程序，以此找出使加勁平板的最佳設計，達到聲壓曲線平滑最佳化之目標。

藉由有限單元套裝軟體 ANSYS 所建

立之圓形平板有限單元之簡諧激振模擬模型。接著用 FORTRAN 編寫之最佳化數值計算程式，所產生的設計變數匯入圓形加勁平板的 ANSYS 有限單元模型，進行分析，接著在將其分析結果載入聲壓計算程式計算聲壓值，最後以最佳化數值計算程式找出改善聲壓值的最佳化結果，達到聲壓曲線平滑化之最佳化設計目標。

六、結果與討論

在開始進行圓形複合材料平板的加勁設計之前，必須先瞭解圓形平面揚聲器的揚聲行為，先觀察圓形平面揚聲器的聲壓曲線對揚聲效果的影響，首先分析研究兩種在圓形平面揚聲器常用的圓形平板，巴爾沙木平板以及三明治平板，以前述的數值模擬分析方法，對這兩種常見的圓形平板設計分析其聲傳行為；在巴爾沙木平板的外型設計方面，其圓形直徑為 61.7mm，厚度為 2mm；在三明治平板設計上，其外型尺寸直徑為 61.7mm，上下面層為碳纖維材質，厚度為 0.125mm，心層為巴爾沙木材質，厚度則為 1mm，面層與心層的疊層排列為兩種材料主軸方向正交排列對稱疊層，分析所使用的材料常數如表一所示。

模擬平面揚聲器上，在平板邊緣以及中間位置之懸邊和彈波的彈簧，其彈性常數則分別為 $k_e = 512.55 \text{ N/M}$ 以及 $k_i = 768.825 \text{ N/M}$ 。在簡諧激振分析方面，考慮有效激振頻率範圍為 20 Hz 至 20K Hz，因為此範圍的聲音是大部分人耳可以聽見聲音頻率範圍，在此頻率範圍外的聲音，大多人耳均無法聽見。在數值分析所需的各種參數設定均以給定之後，即可開始進行數值模擬分析，同時也以前述的實驗步驟，進行平面揚聲器的製作以及聲壓實驗量測。圖七為巴爾沙木平板的數值分析與實驗量測之聲壓曲線，其中橫軸為激振頻率，單位為 Hz，縱軸為聲壓位準，單位為 dB，在圖中紅色曲線為數值分析的結果，黑色曲線則為實驗量測結果，兩條曲線相

互比較之後，可以發現兩者均有相當接近，均有相同的趨勢，同時發現曲線中，在 600 至 10KHz 的激振頻率範圍內，有很明顯的音谷產生，這種音谷會明顯影響揚聲器的揚聲效果，由簡諧激振分析結果中，發現在音谷激振頻率位置的平板振動變形，如圖八所示，圖中可以發現在 800Hz 和 5950Hz 之平板振動變形均為對稱的彎曲變形，根據分析結果顯示此種彎曲變形會造成音谷產生。

在三明治平板聲傳行為分析結果中，圖九為圓形三明治平板的數值分析與實驗量測之聲壓曲線圖，其中紅色曲線為數值分析的聲壓曲線，黑色為聲壓實驗量測的結果，兩條曲線相互比較之後，同樣可以發現兩者均有相同的曲線趨勢，綜合巴爾沙木的數值分析與實驗結果，可以發現藉由聲壓實驗量測節過的驗證比較，本文所提出的圓形複合材料平面揚聲器之數值模擬分析方法，的確可以用來模擬圓形平板的聲傳行為。在三明治平板的聲壓曲線圖中，同樣可以發現明顯的音谷產生，但因為三明治結構改變了平板的結構強度，使得音谷產生的激振頻率範圍縮小，音谷產生在激振頻率 1K 至 5KHz 範圍內，聲壓曲線也較巴爾沙木平板的聲壓曲線平滑些，觀察三明治平板的聲壓曲線，可以發現音谷發生在 1540Hz 與 3700Hz 的激振頻率下，觀察其平板振動變形，發現三明治平板也有與巴爾沙木平板相似的平板彎曲變形，如圖十所示，由分析結果發現此類型的平板彎曲變形，會造成平面揚聲器的聲壓曲線中，產生會影響揚聲效果的音谷。

在比較三明治平板與巴爾沙木平板的聲壓曲線，如圖十一所示，可以發現平板的結構強度若有增加，如以三明治結構補強方式，其聲壓曲線會有較為平滑的改善效果，但自圖十三的結果，發現三明治結構補強效果有限，因此如果利用其他的平板結構補強方式，獲許可以增加改善效

果，因此本文提出一種平板加勁設計，來補強平板的結構強度，改善其揚聲效果，綜合上述之巴爾沙木以及三明治平板的分析結果，提出一種平板加勁的設計為 No.S01，如圖十二所示，使用碳纖維材料作為寬 3mm 的加勁條，在厚度為 1mm 的巴爾沙木平板上下面，進行結構補強加勁，其平板直徑同樣為 61.7mm。以此種加勁設計進行圓形平板的聲傳數值模擬分析，並得到其聲壓曲線結果，如圖十三所示，其中藍色曲線為 No.S01 加勁平板的聲壓曲線，黑色曲線為巴爾沙木平板之聲壓曲線，兩者在比較觀察之間差異，可以發現 No.S01 加勁平板的聲壓曲線中，音谷的問題與巴爾沙木平板的聲壓曲線比較之下，有相當明顯的改善，同時觀察 No.S01 加勁平板在 1350Hz 與 8500Hz 激振頻率下，有出現音谷處的平板振動變形，如圖十四所示，發現其彎曲變形與巴爾沙木平板的彎曲變形有明顯的改變，表示以加勁設計的方式，可以明顯改變平板的振動變形，同時可以達到改善平板之聲壓曲線中，音谷對其揚聲效果的影響，雖然 No.S01 加勁平板的加勁設計，可以有效地改善音谷的問題，在其聲壓曲線中，尚有一些音谷出現，因此參考 No.S01 加勁平板的數值分析結果，對其平板加勁設計進行調整，同時藉由最佳化方法來改善揚聲效果。

由前述的加勁平板分析中可以發現，不良的變形主要分佈在平板中間以及邊緣，因此加勁條的位置可以選擇在平板中央以及邊緣，以局部加勁的方式，加強平板的結構強度，來達到改善音谷的影響，如圖十五所示，其中 t_1 的加勁條纖維方向與心層的纖維方向平行， t_2 的加勁條纖維方向與心層的纖維方向垂直， t_3 加勁條纖維方向與心層的纖維方向夾 45° 以及 135° 。以圖十五的平板加勁位置，藉由數值最佳化方法，將加勁條的厚度以及心層平板的厚度作為設計變數，設計變數的上、下限，

如式(6-1)所示，

$$\begin{aligned} 0 \leq t_1, t_2, t_3 &\leq 0.3 \times 10^{-3} m \\ 0 \leq t_c &\leq 4 \times 10^{-3} m \end{aligned} \quad (6-1)$$

其中 t_1 、 t_2 、 t_3 為加勁條厚度之設計變數， t_c 為心層平板厚度的設計變數。

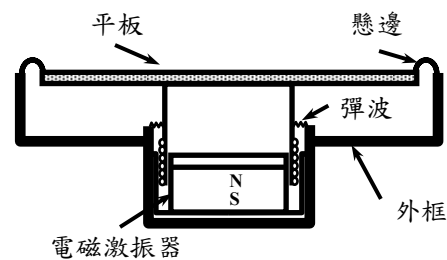
選擇激振頻率為 1000、2000、3000、4000、5000 Hz 的聲壓值與其平均聲壓值之差值平方達極小作為設計目標，利用隨機多起始點搜尋方法，可以找到此最佳化問題之目標函數的總域極小值，如表二所示，由表中之結果可以發現，四組以隨機方式產生的起始點，經過總域極小值演算法的搜尋，最後可以找到一組總域極小值的設計變數之最佳化結果，將此最佳化結果進行聲傳模擬分析，則可以得到圓形平板加勁最佳設計的頻譜聲壓曲線，並與未加勁圓形平板的聲壓曲線作比較，如圖十六所示，自圖中可以發現，經過最佳化方法搜尋，所得到之圓形平板加勁厚度最佳化結果的聲壓曲線(a)，其中音谷的影響已經獲得明顯地改善，在有效頻率範圍內的聲壓曲線，整體也較未加勁平板的聲壓曲線平滑許多，並觀察加勁後在 1650 Hz 以及 5250 Hz 處，受到改善的音谷之平板激振變形，如圖十七所示，其中加勁後的平板變形，與未加勁的平板變形有明顯的改變，表示本文所使用的數值最佳化方法，的確可以改善音谷在聲壓曲線的影響，並且同時達到聲壓曲線平滑化之目標。由於作為加勁條的碳纖維預浸材，單層實際厚度為 0.1mm，為了實驗製作方便，必須將其最佳化結果，以預浸材單層實際厚度為基礎，進行適度的調整，調整過後的加勁條以及心層厚度，如表二所示，先將調整過後的厚度值，用來作聲傳模擬分析，並比較分析所得之聲壓曲線與調整前的最佳化結果之聲壓曲線之間的差異，如圖十八所示，其中調整後之聲壓曲線(b)與調整前之聲壓曲線(a)的差異並不大，因此可以將調整後的厚度，用於製作圓形加勁平板揚

聲系統，並進行頻譜聲壓曲線的量測，可以得到其實驗量測之聲壓曲線，與聲傳模擬分析之聲壓曲線作比較，如圖十九所示，可以發現聲傳分析(a)與實驗量測(b)的聲壓曲線，有相當近似的趨勢，其中差異之處為受到圓形加勁平板在經過高溫高壓製程時，材料特性產生一些變化，以及聲壓量測環境的影響。經過上述的分析結果與實驗結果比較，可以發現本文所使用的聲傳模擬分析以及數值最佳化設計方法是可以以最佳化設計方法，來設計圓形平板揚聲系統的加勁方式，使其聲壓曲線達到音谷改善以及曲線平滑化之目標。

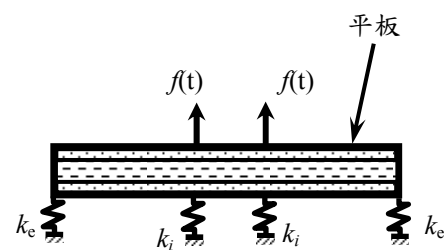
六、結論

本報告提出一種圓形複合材料平面揚聲器之聲傳模擬數值分析方法，利用有限單元軟體 ANSYS 建構圓形平面揚聲器的有限單元模型，藉由此有限單元模型，以簡諧激振分析研究圓形平板在有效激振頻率範圍內，其圓形平板振動變形，與揚聲效果之間的關係，同時將簡諧激振分析，所獲得圓形平板頻率響應結果，與聲壓計算方程式結合，即可得到圓形平板的聲壓曲線，並發現其聲壓曲線在某些激振頻率下，會有音谷產生，並影響平板的揚聲品質，觀察其音谷產生處的平板振動變形，發現某些平板彎曲變形，會造成音谷產生，因此藉由平板加勁設計的方式，改變圓形平板的結構與強度，同時圓形平板的彎曲變形也有明顯的變化，也因為這種改變使得聲壓曲線中音谷問題獲得改善，藉由聲傳模擬數值分析以及數值最佳化方法，可以獲得一種圓形加勁平板的加勁最佳設計，此設計能夠改善圓形平板的結構強度，同時也改變圓形平板的振動變形，使其聲壓曲線中出現不良音谷問題獲得改善，其聲壓曲線也較為平滑，此種加勁設計的圓形平板可以因此得到較佳揚聲品質，接者藉由實驗步驟，製作圓形複合材料平面揚聲器，並以聲壓量測系統 LMS，

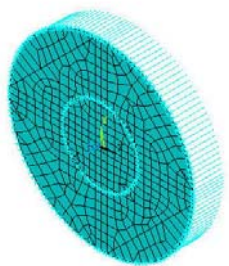
進行平面揚聲器的聲壓曲線量測，將實驗量測所得之聲壓曲線與數值分析之聲壓曲線，相互比較，發現實驗結果與數值分析結果相當接近，此結果表示本報告所提出的聲傳模擬數值分析方法以及數值最佳化設計方法經由實驗結果驗證之後，可以準確模擬圓形複合材料平面揚聲器的聲傳行為，利用本文數值分析方法可以減少實驗的次數，並有效率地設計圓形加勁平板，以獲得圓形加勁複合材料平面揚聲器的最佳揚聲品質。



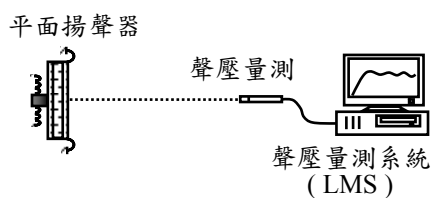
圖一：圓形平面揚聲器之構造



圖二：圓形平面揚聲器之數學模型



圖三：具彈性支撐圓形複合材料平板之有限單元模型

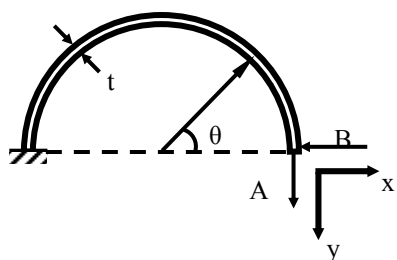


a. 聲壓量測示意圖

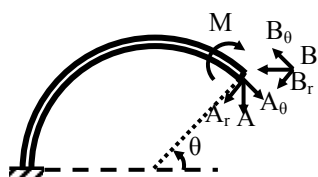


b. 無響室

圖六：聲壓量測實驗

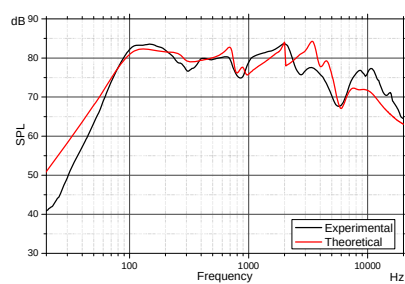


a. 在自由端施加集中負荷

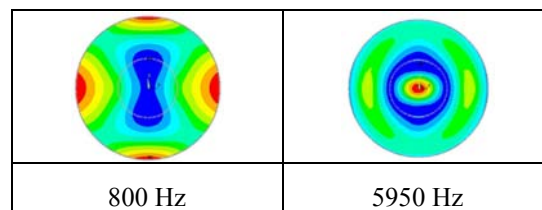


b. 任意截面上作用力

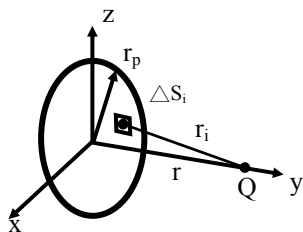
圖四：半圓形懸臂樑



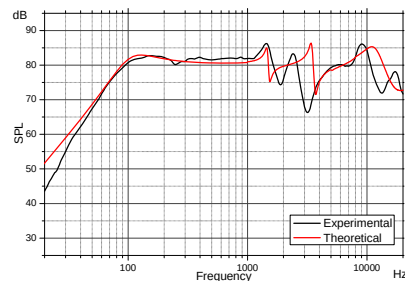
圖七：圓形巴爾沙木平板的實驗與分析之聲壓曲線



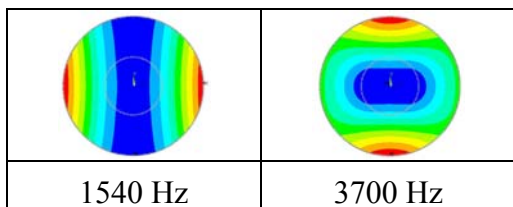
圖八：圓形巴爾沙木平板之振動變形



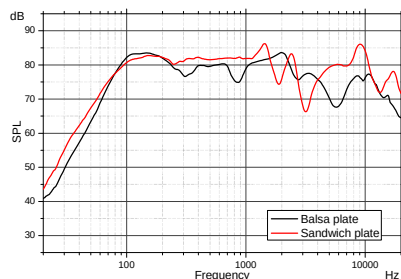
圖五：圓形平板的聲傳示意圖



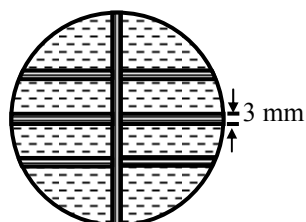
圖九：圓形三明治平板的實驗與分析之聲壓曲線



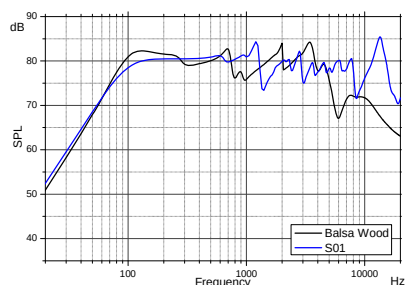
圖十：圓形三明治平板的振動變形



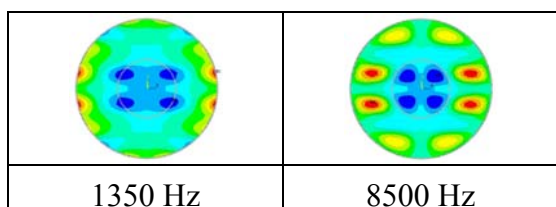
圖十一：三明治平板與巴爾沙木平板之實驗量測聲壓曲線



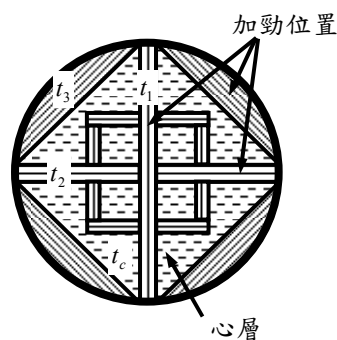
圖十二：圓形加勁平板(No.S01)



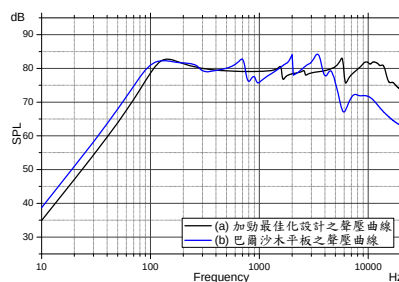
圖十三：No.S01 與巴爾沙木平板的聲壓曲線比較



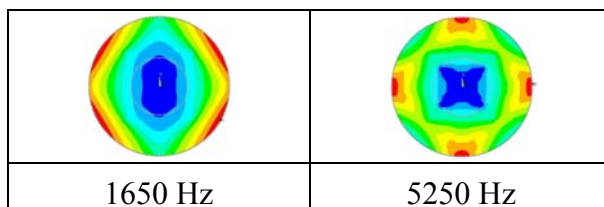
圖十四：No.S01 加勁平板之振動變形



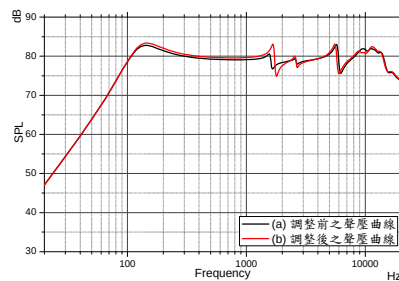
圖十五：圓形平板最佳化設計之加勁位置



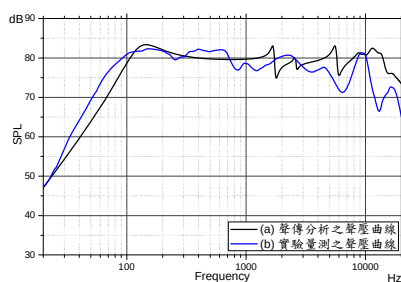
圖十六：加勁最佳化設計與巴爾沙木平板之聲壓曲線比較



圖十七：圓形平板受改善音谷之振動變形



圖十八 加勁厚度最佳化結果調整前後之聲壓曲線比較



圖十九 圓形加勁平板之聲壓曲線

表一：圓形平面揚聲器所用材料之材料常數

	E_1	E_2	G_{12}	ν_{12}	P
	(GPa)	(GPa)	(GPa)		(Kg/m ³)
碳纖維預浸材	147.503	9.223	6.8355	0.306	1525
巴爾沙木	3.7	0.055	0.01	0.02	198.83
絹布	0.8	-	-	0.3	700

表二：圓形加勁平板之厚度最佳化設計結果

		t_c (mm)	t_1 (mm)	t_2 (mm)	t_3 (mm)
No.1	Initial	2.875	0.154	0.195	0.139
	Final	1.758	0.083	0.139	0.145
No.2	Initial	3.009	0.211	0.113	0.059
	Final	1.721	0.081	0.135	0.141
No.3	Initial	2.789	0.179	0.186	0.239
	Final	1.723	0.079	0.133	0.141
No.4	Initial	0.853	0.031	0.124	0.157
	Final	1.723	0.079	0.133	0.141
Global Minimum		1.723	0.079	0.133	0.141
Adjusted		1.7	0.1	0.1	0.1

七、參考文獻

[1] F. J. M., Frankort, Vibration Patterns and Radiation Behaviour of Loudspeaker Cones, Philips Tech. Rev., Vol. 36, No. 1, 1976.

[2] H. Suzuki, J. Tichy, Sound Radiation from Convex and Concave Domes in an Infinite Baffle, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 65, No. 1, pp.106-111, 1979. K. Suzuki, I. Nomoto, Computerized Analysis and Observation of the Vibration Modes of a Loudspeaker Cone, Journal of The Audio Engineering Society, Vol. 30, No. 3, pp.98-106, 1982.

[3] D. Featherston, M. Barabasa, Loudspeaker Response Improvement Using Cone Thickness Variation, J. Audio Eng. Soc., Vol. 48, No. 12, pp.1216-1220, 2000.

[4] K. Satoh, H. Takewa, and Mikio Iwasa, A High Fidelity Small-Size Loudspeaker, IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol.43, No.3, 1977

[5] H. Suzuki, J. Tichy, Sound Radiation from an Elastically Supported Circular Plate, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 69, No. 1, pp.41-49, 1981.

[6] T. Y. Kam, Rectangular Panel-Form Loudspeaker and Its Radiating Panel, US Patent No. US7010143.

[7] T. Y. Kam, Laminated composite panel-form loudspeaker, US Patent No. US6478109B1.

[8] T. Y. Kam, Piston-type panel-form loudspeaker, US Patent No. US006934399B2.

[9] T. Shindo, O. Yashima, and H. Suzuki, Effect of voice-coil and surround on vibration and sound pressure response of loudspeaker cones, J. Audio Eng. Soc., Vol. 28, No. 7/8, pp.490-498, 1980.

[10] Tauchert T. R. and Adibhatla S., "Design of Laminated Plates for Maximum Stiffness," J. Composite Material, 18, pp. 58-69, 1984.

[11] Park W. J., "An Optimal Design of Simple Symmetric Laminates Under First Ply Failure Criterion," J. Composite Material, 16, pp. 341-345, 1982.

[12] Kam T. Y. and Snyman J., "Optimal Design of Laminated Composite Structures Using a Global Optimization Technique," J. Composite Structure, 19, pp. 351-370, 1991.

[13] "The ANSYS Release 7.5 User's Manual", ANSYS Inc., 1997

[14] P. M. Morse and K. U. Ingard, Theoretical Acoustics, McGraw-Hill, NY, 1968; rpt. Princeton University Press, NJ, pp. 375-379, 1986.

[15] International Standard IEC60268-5, Sound system equipment—part 5:Loudspeakers. 3rd edition, 2003

[16] W. Leach JR., R. Schafer. T., Barnwell, Time-Domain Measurement of Loudspeaker Driver Parameters, IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing Vol. 27, No.6, pp. 734-739, 1979.

- [17] K. Satoh , H. Takewa , and M. Iwasa ,
“A High Fidelity Small-Size Loudspeaker” ,
IEEE Transactions on Consumer
Electronics , Vol.43 , No.3 , AUGUST 1977.
- [18] J. E. Shigley and C. R. Mischke,
“Mechanical engineering design”, 6th
Edition, McGraw-Hill, 2001.
- [19] Hopkins and R. Bruce, “Design analysis of
shafts and beams”, 1970.

赴國外出差或研習心得報告

計畫編號	NSC 97-2221-E009-013
計畫名稱	加勁複合材料板的揚聲特性研究
出國人員姓名 服務機關及職稱	金大仁，交通大學機械系
會議時間地點	98 年 5 月 10-15 日，美國阿拉斯加州安哥拉治市
會議名稱	2009 先進材料與設計國際會議
發表論文題目	Fabrication of nano-particles reinforced foam-filled composite materials

一、參加會議經過

本人於 5 月 9 日自台北前往美國洛杉磯，然後轉機於下午 2 時到安哥拉治的會議場地，並下榻會場所在之旅館。第二天 (5/10) 到會場報到並出席歡迎茶會。第三天 (5/11) 8:30 會議正式開始，由主席致歡迎詞，隨後由美國 Pacific Northwest National Laboratory 的 Dr Moe Khaleel 發表演講，講題為: Material design issues for electrocatalytic and mult-phase materials in high temperature fuel cells, 介紹電催化劑及多相材料用於高溫燃料電池中的行為及設計考量，內容豐富有趣，具知識性。當天參與的論文分組研討以先進材料為主，論文題目如下：

1. Influence of cerium nano-particles on corrosion behaviour of plasma polymerized organosilicon coatings, D. Ruch (Luxembourg)
2. Carbon, Boron, Nitride, Zinc Oxide, and Silicon Nanotubes, Y. K. Yap (USA)
3. Development of hybrid material composites--an overview, D Weber (Germany)
4. Realistic three-dimensional microstructure simulations for simulations based materials design, A. Gokhale (USA)
5. Fatigue life of GRP heavily loaded components in relation with some manufacture aspects and material microstructure, I. Cerny (Czech Republic)
6. The FHWA role in advancing fiber-reinforced polymer composites for highways and bridges, L. N. Triandafilou (USA)
7. Haptically enabled interactive virtual reality for knowledge capture, transfer, and visualization, S. Nahavandi (Australia)
8. On-site sodium production with seawater electrolysis as alternative energy for fossil fuels by offshore wind power generation, M. Murahara (Japan)

5 月 12 日參與的論文分組研討如下：

1. A nano-bio-hybrid material for energy applications, C. Friedrich (USA)
2. Micromechanical modeling and prediction of the mechanical and conducting properties in polymer nano-composites, S. Ahzi (France)
3. In-situ nano-mechanical characterization of nano-materials, R. Shahbazian-Yassar (USA)
4. Characterization of composite layers and single-fiber composites for the development of

magnetoelastic sensors, D. Weber (Germany)

5. Analysis of a MEMS-based ring-disc electrode system for stabilization of microbubbles in aqueous solution using dielectrophoretic force, S. Chowdhury (Canada)

6. Methods of prolonging 'structural fatigue life, B. Farahmand (USA)

7. Combined usage of different knowledge generating processes in the high tech industry, R. Montino (Germany)

本人的論文發表安排在 5 月 13 日，當天發表的論文如下：

1. Cyclic viscoelastic behavior of high-density polyethylene with evolution of microstructure, Y. Remond (France)

2. Statistical homogenization relations for microstructure design, H. Garmestani (USA)

3. Simulated annealing in manufacturing process planning optimization of multiple parts flow lines, F. Musharavati (Qatar)

4. Fabrication of nano-particles reinforced foam-filled composite materials, T. Y. Kam (Taiwan)

5. Customer-driven micro and nano production by knowledge-based process development, R. Bruck (Germany)

6. Knowledge management application on risk assessment in industry knowledge management and data mining for IC industry, R. S. Chen (Taiwan)

7. Opposition-based computing, H. R. Tizhoosh (Canada)

參與本次會議的學者專家近一百人，彼此都有很好的研討與交流。大會的晚宴在 5 月 12 日晚上舉行，會中亦有各國代表表演，賓主盡歡。本人於 5 月 14 日會議結束後返台。

二、與會心得

本人曾多次參加本會議，與其他各國參加人員及主辦人員已建立良好的友誼，每次都獲益良多，一方面可與各國學者敘舊，增進彼此的情誼，另一方面可多瞭解目前的研究方向及重點，增進本人的研究內涵及成效。本會議的研討重心多偏向奈米材料及技術，不少論文探討此領域的研究成果及方向，本人對奈米材料的應用亦甚感興趣，目前正進行一些應用的研究，所以從分組研討中亦獲益良多。

赴國外出差或研習心得報告

計畫編號	NSC 97-2221-E009-013
計畫名稱	加勁複合材料板的揚聲特性研究
出國人員姓名 服務機關及職稱	金大仁，交通大學機械系
會議時間地點	98 年 5 月 10-15 日，美國阿拉斯加州安哥拉治市
會議名稱	2009 先進材料與設計國際會議
發表論文題目	Fabrication of nano-particles reinforced foam-filled composite materials

一、參加會議經過

本人於 5 月 9 日自台北前往美國洛杉磯，然後轉機於下午 2 時到安哥拉治的會議場地，並下榻會場所在之旅館。第二天 (5/10) 到會場報到並出席歡迎茶會。第三天 (5/11) 8:30 會議正式開始，由主席致歡迎詞，隨後由美國 Pacific Northwest National Laboratory 的 Dr Moe Khaleel 發表演講，講題為: Material design issues for electrocatalytic and mult-phase materials in high temperature fuel cells, 介紹電催化劑及多相材料用於高溫燃料電池中的行為及設計考量，內容豐富有趣，具知識性。當天參與的論文分組研討以先進材料為主，論文題目如下：

1. Influence of cerium nano-particles on corrosion behaviour of plasma polymerized organosilicon coatings, D. Ruch (Luxembourg)
2. Carbon, Boron, Nitride, Zinc Oxide, and Silicon Nanotubes, Y. K. Yap (USA)
3. Development of hybrid material composites--an overview, D Weber (Germany)
4. Realistic three-dimensional microstructure simulations for simulations based materials design, A. Gokhale (USA)
5. Fatigue life of GRP heavily loaded components in relation with some manufacture aspects and material microstructure, I. Cerny (Czech Republic)
6. The FHWA role in advancing fiber-reinforced polymer composites for highways and bridges, L. N. Triandafilou (USA)
7. Haptically enabled interactive virtual reality for knowledge capture, transfer, and visualization, S. Nahavandi (Australia)
8. On-site sodium production with seawater electrolysis as alternative energy for fossil fuels by offshore wind power generation, M. Murahara (Japan)

5 月 12 日參與的論文分組研討如下：

1. A nano-bio-hybrid material for energy applications, C. Friedrich (USA)
2. Micromechanical modeling and prediction of the mechanical and conducting properties in polymer nano-composites, S. Ahzi (France)
3. In-situ nano-mechanical characterization of nano-materials, R. Shahbazian-Yassar (USA)
4. Characterization of composite layers and single-fiber composites for the development of

magnetoelastic sensors, D. Weber (Germany)

5. Analysis of a MEMS-based ring-disc electrode system for stabilization of microbubbles in aqueous solution using dielectrophoretic force, S. Chowdhury (Canada)

6. Methods of prolonging 'structural fatigue life, B. Farahmand (USA)

7. Combined usage of different knowledge generating processes in the high tech industry, R. Montino (Germany)

本人的論文發表安排在 5 月 13 日，當天發表的論文如下：

1. Cyclic viscoelastic behavior of high-density polyethylene with evolution of microstructure, Y. Remond (France)

2. Statistical homogenization relations for microstructure design, H. Garmestani (USA)

3. Simulated annealing in manufacturing process planning optimization of multiple parts flow lines, F. Musharavati (Qatar)

4. Fabrication of nano-particles reinforced foam-filled composite materials, T. Y. Kam (Taiwan)

5. Customer-driven micro and nano production by knowledge-based process development, R. Bruck (Germany)

6. Knowledge management application on risk assessment in industry knowledge management and data mining for IC industry, R. S. Chen (Taiwan)

7. Opposition-based computing, H. R. Tizhoosh (Canada)

參與本次會議的學者專家近一百人，彼此都有很好的研討與交流。大會的晚宴在 5 月 12 日晚上舉行，會中亦有各國代表表演，賓主盡歡。本人於 5 月 14 日會議結束後返台。

二、與會心得

本人曾多次參加本會議，與其他各國參加人員及主辦人員已建立良好的友誼，每次都獲益良多，一方面可與各國學者敘舊，增進彼此的情誼，另一方面可多瞭解目前的研究方向及重點，增進本人的研究內涵及成效。本會議的研討重心多偏向奈米材料及技術，不少論文探討此領域的研究成果及方向，本人對奈米材料的應用亦甚感興趣，目前正進行一些應用的研究，所以從分組研討中亦獲益良多。