

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

主動振動控制在障板透過損失改善研究

計畫編號：NSC 89-2611-E-002-002

執行期限：88 年 08 月 01 日至 89 年 07 月 31 日

主持人：陳國在 國立台灣大學造船及海洋工程學系

一、 中文摘要

本研究旨在探討 ” 主動振動控制在障板透過損失改善之研究 “。因此本研究可包括障板共振頻率理論解析、體速度相消法及相關適應性控制演算式理論推演與結合上述體速度相消法及相關適應性控制演算式之主動振動控制的障板透過損失改善實驗測定。

根據研究結果利用體速度相消法及相關適應性控制演算式結合進行障板的振動主動控制於其最低共振頻率 132Hz 之最大透過損失改善效果可達六分貝。上述之透過損失改善效果將隨頻率之增加而遞減且共振頻率位置之改善效果亦較非共振者理想。

二、 計畫緣由及目的

論及過去聲學於噪音控制之應用，採取被動控制策略中之障板，以阻絕高噪音源之擴散，即為一甚為常用之方式。根據相關研究成果，障板對噪音之阻絕效果與其所選取材料種類、厚度、高度以及所涉及聲音頻率，有相當密切關係。傳統的應用聲學研究者，對上述障板隔音性能改善所採取方法，大都以增加障板厚度、高度或加裝穿孔面板與結合高吸音率之吸音材料，以期加強其透過損失，並減緩聲波的繞射效應。上述障板隔音性能之改善方法，於低頻率時，效果不彰且不合經濟實用性。為改善以上缺點，國外相關聲學家自 1990 年後，乃開始尋求利用主動振動控制構想，由控制低階振動模態貢獻量，以降低障板聲功率輻射(acoustic power radiation)，而達到其透過損失改善之目的。本研究重點，期望結合適應性主動控制演算(adaptive active control algorithm)與體速度相消法則(volume velocity cancellation)，以陶瓷壓電片(PZT, Piezoelectric Transducer)有效控制受迴響聲場入射之障板，其最低模態之聲音輻射，而達到障板透過損失之增加。

三、 結果與討論

(一)、理論解析

1. 圖一為本研究所採用之正方形障板座標系統，當其受外力激振時可由模態解析經相關推導而得一具阻尼特性之模態位移振幅運動方程式為：

$$[M] \left[\ddot{W}_p(t) \right] + [C] \left[\dot{W}_p(t) \right] + [K] \left[W(t) \right] = \left[F_p(t) \right] \quad (1)$$

上式中模態位移振幅之相關係數矩陣分別為障板之質量線性比例與勁度等相關矩陣若外力為一遠小於障板之正方形壓電片的激振力，則此激振力可視為作用於壓電片各邊中點之四個大小相等之集中彎矩，如圖二所示。根據相關文獻，可求出上述等值彎矩之模態力振幅矩陣，並進而求出上式之模態位移振幅。

2. 針對受上述諸類外力激振之障板，其輻射總聲音能量，可視為甚多之基本輻射元(elemental radiator)所輻射聲音的總能量。因此如圖三，若將障板分割成 N 個基本輻射元，則第 i 個基本輻射元可視為一活塞聲源(piston source)。根據基本聲學理論，其強度滿足：

$$Q_i e^{j\omega t} = j\omega W(x_i, y_i) \Delta S e^{j\omega t} \quad (2)$$

上式中之聲源強度，亦可稱為其體積速度(volume velocity)。經由相關之理論推導，可得自由空間任一點，於垂直障板方向之聲音強度可表為：

$$I_z = \text{Re} \left[\frac{j\omega r}{2} \left(\sum_i^N \frac{Q_i}{2\rho} \frac{e^{-jkr_i}}{r_i} \sum_i^N \frac{Q_i^*}{2\rho} Z r_i^{-2} (r_i^{-1} + jk) e^{-jkr_i} \right) \right] \quad (3)$$

因此利用上式，對圍繞障板之任意半空間曲面，進行積分即可求得其輻射聲功率。至於實驗測定上，則可利用聲音強度法進行實驗室測定，而求得障板之輻射聲功率。

3. 根據結構聲學之相關理論障板輻射聲功率取決其輻射阻抗(radiation impedance)，此輻射阻抗與障板相關之所有輻射模態(即其共振模態)的輻射效率有極密切的關係。根據障板之相關輻射模態理論解析，可得其前四階輻射模態之輻射效率如圖四所示。顯然障板輻射模態之輻射效率與其邊界條件與材料特性無關，且其最低階者幾乎為一固定常數，而可視為與障板之淨體速度成正比，因此吾人只要有效消減障板之淨體速度，即可達及其輸出聲功率大幅衰減之控制目的。根據結構振動主動控制相關研究，吾人可利用體速度相消法則之主動控制技術，設定陶瓷壓電片之最佳控制力，滿足以下與障板淨體速度之關係時，即可完成本研究提昇障板透過損失之目標：

$$g^c = - \frac{[q][v^i]}{[q][v^c]} \quad (4)$$

上式中 $[q]$ 為各輻射元面積所組成之列矩陣，而 $[v^i]$ 、 $[v^c]$ 則分別為障板之表面速度分佈矩陣與陶瓷壓電片單位力距所產生之速度分佈矩陣。

4. 針對圖一之障板座標系統，若其做 $w(x, y)e^{j\omega t}$ 之位移的單頻率簡諧運動，則其表面淨體速度可表為：

$$V_{total} = j\omega \int_0^{l_y} \int_0^{l_x} w(x, y) dx dy \quad (5)$$

其次考慮障板之遠區音場其聲壓大小可利用 Rayleigh 氏積分式表為：

$$p(r, J, q) = \frac{j\omega r e^{-jkr}}{2\rho r} \int_0^{l_y} \int_0^{l_x} j\omega w(x, y) e^{j(k_x x + k_y y)} dx dy \quad (6)$$

比較上兩式，若吾人考慮障板中心點垂直方向遠區之聲場，則顯然與障板表面淨體速度成正比，因此吾人可在障板中心點垂直方向遠區，放置一麥克風當做感測器，即可對障板淨體速度作即時控制。

5. 以上之理論推論，顯示吾人可於障板後方遠區擺置一誤差麥克風，做為適應性控制感測器，並結合體速度相消法，讓陶瓷壓電片發出最適激振訊號，致障板達及最小淨體速度之狀態，即可大幅降低障板之輻射效率，而改善其透過損失。

圖五顯示本研究所採用之閉迴路適應性系統，其相關 LMS(Least mean square)演算式可表為：

$$\hat{q}_{k+1} = \hat{q}_k + 2mE[X_k^T]E[e_k] \quad (7)$$

上式中， Θ 為系統參數行矩陣， μ 為與系統收斂有關之步階參數(step-size parameter)， e_k 為系統期望及估測輸出間之誤差訊號函數。

(二)、實驗測定：

1. 根據結構聲學之相關理論，於障板共振頻率時，陶瓷壓電片可發出最適激振訊號，而造成最佳之振動主動控制。經由模態解析，本研究所選取障板(每邊 115cm，厚度 2mm 之正方形鋼板)之自然頻率(125~300Hz)計有 126、132、178、223、300Hz 等。本研究針對障板穿透聲場之主動振動控制實驗，所選取之頻率(500Hz 以下)為 132、178、240、350、400、450、500Hz 等七個頻率，其中前三個屬障板之共振頻率，而後三者為非共振頻率者。如圖六所示為本研究實驗測定現場之主要設備佈置圖，而圖七則為本研究利用適應性演算(adaptive active control algorithm)結合體速度相消法所作主動振動控制障板聲穿透實驗之相關儀具設備佈置圖。根據上圖之配置，可進行上述選取之任意頻率，於有無主動振動控制條件之障板透過聲音強度實驗測定。圖八顯示入射音頻率為 132 Hz 所得之聲穿透控制前後之音強度分佈。至於所有頻率之主動控制前後障板之透過損失測定結果，如表一所示。

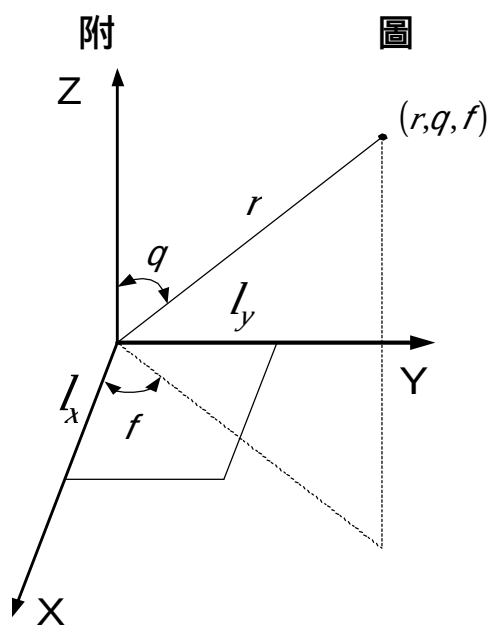
三) 結論

根據本計畫之研究結果可得以下之結論：

1. 利用適應性演算(adaptive active control algorithm)結合體速度相消法，對障板聲穿透所作之主動振動控制，於頻率 132Hz 時，可改善障板透過損失最大值達六分貝。
2. 以上障板透過損失之改善幅度，隨頻率之增加而迅速遞減。
3. 於障板共振頻率，進行體速度相消法之主動振動控制，其障板透過損失改善效益較非共振頻率佳。

表一 主動控制前後障板聲音強度及其透過損失

頻率(Hz)	L1 _N	L2 _N	TL _N	L2 _A	TL _A	Δ TL
132	97.3	64.75	26.55	58.98	32.32	5.77
178	95.3	71.65	17.65	67.46	22.68	5.03
240	90.23	67.02	17.21	62.33	21.90	4.69
350	91.95	59.01	26.94	57.23	28.72	1.76
400	93.00	54.14	32.86	56.84	30.16	-2.68
450	92.86	66.37	20.49	63.38	23.48	2.99
500	90.24	55.94	28.30	58.76	25.48	-2.82



圖一 障板座標系統

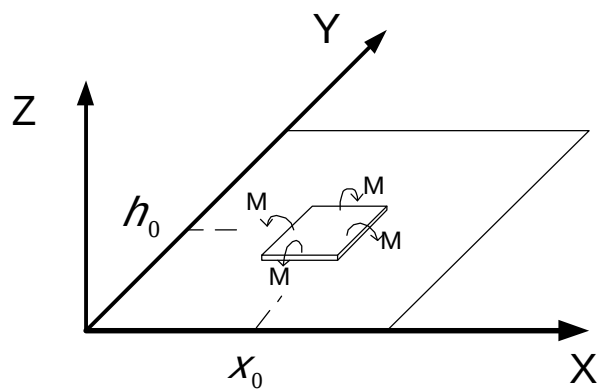
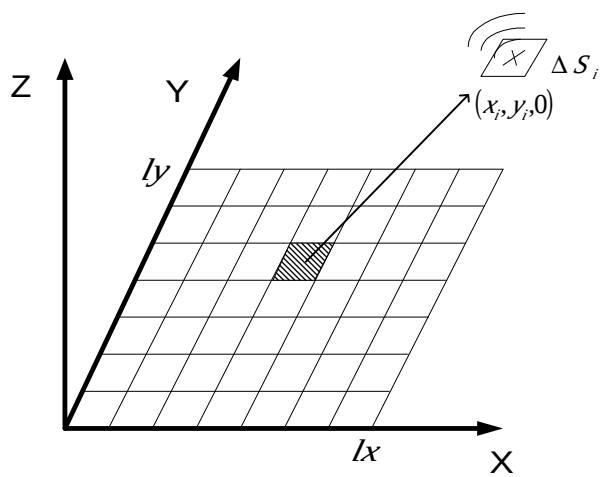
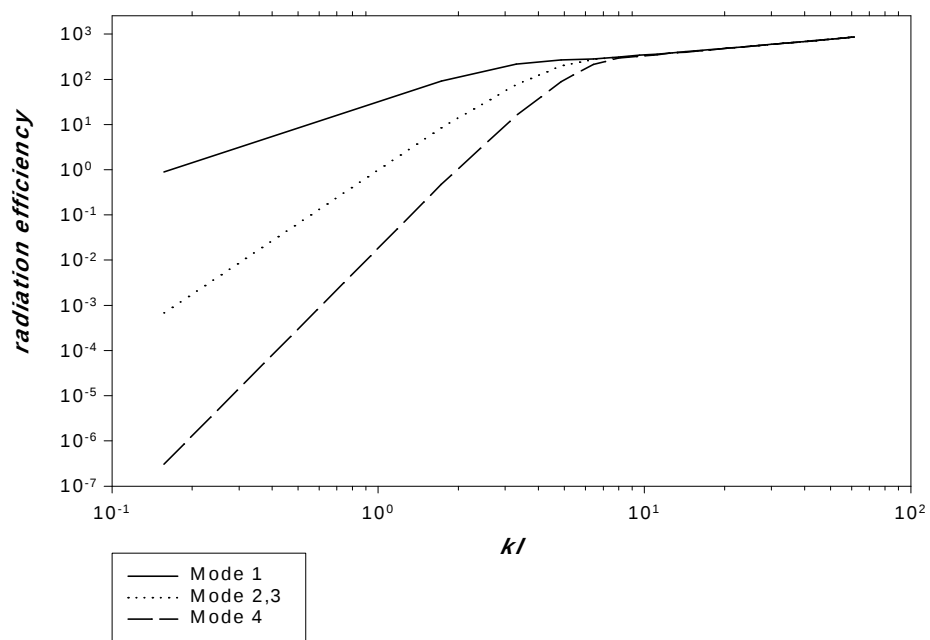


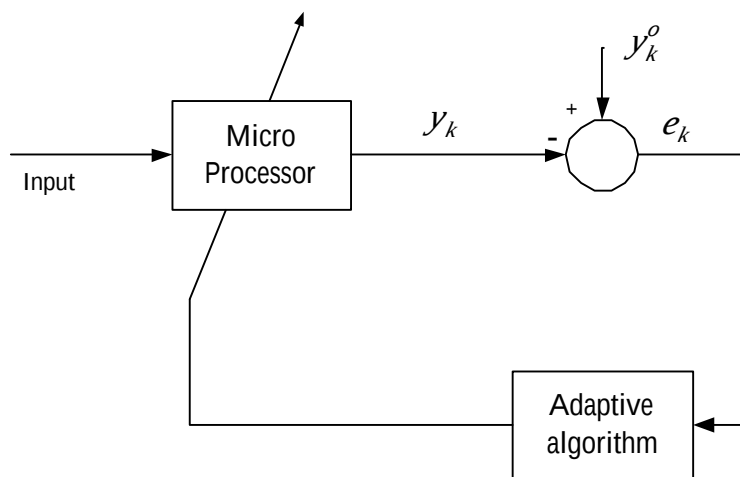
圖 二 四個集中彎距模擬壓電片激振力



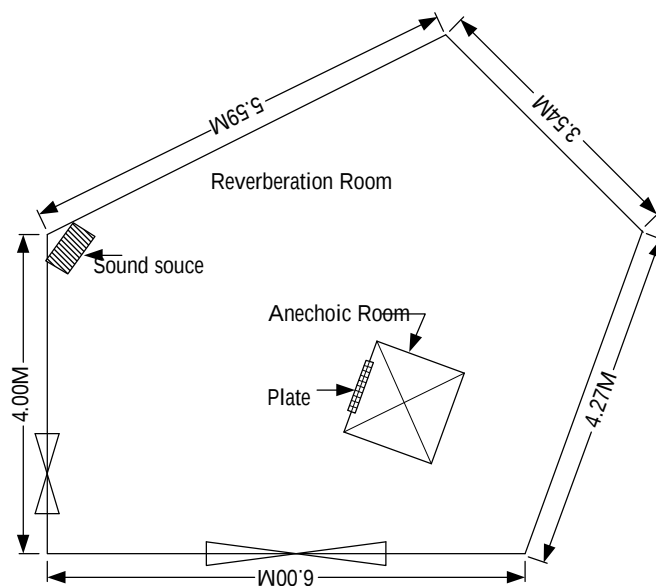
圖三 基本輻射元



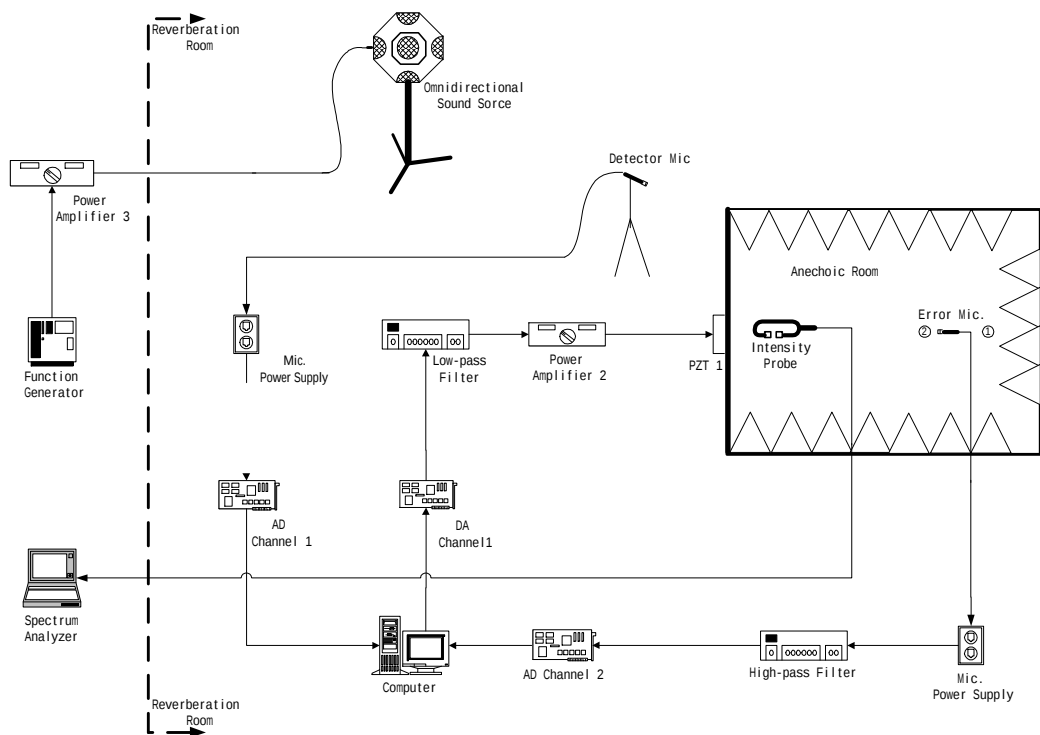
圖四 前四個輻射模態之輻射效率



圖五 閉迴路之適應性系統

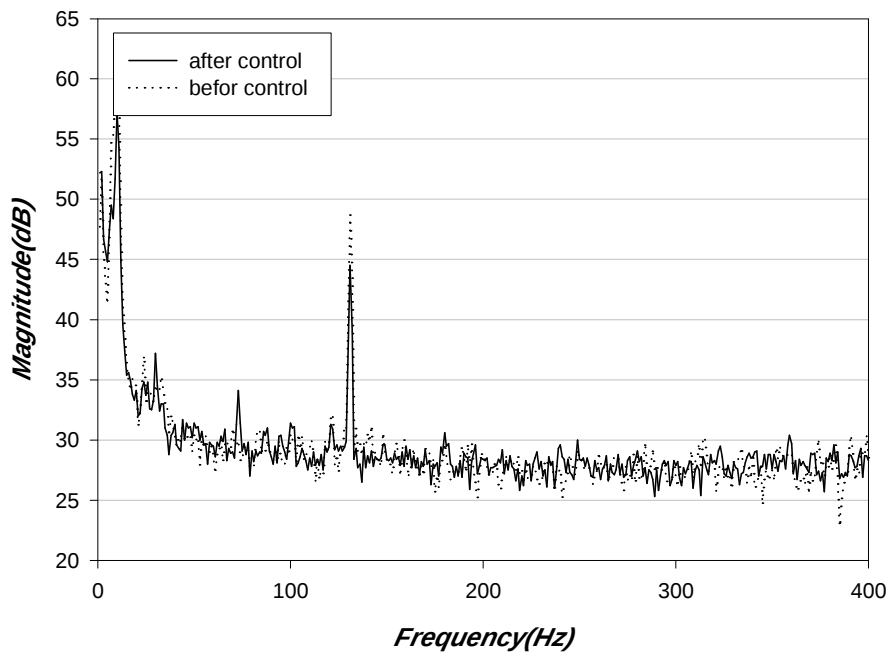


圖六 台大造船研究所音響實驗室之
迴響室與無音箱幾何示意圖

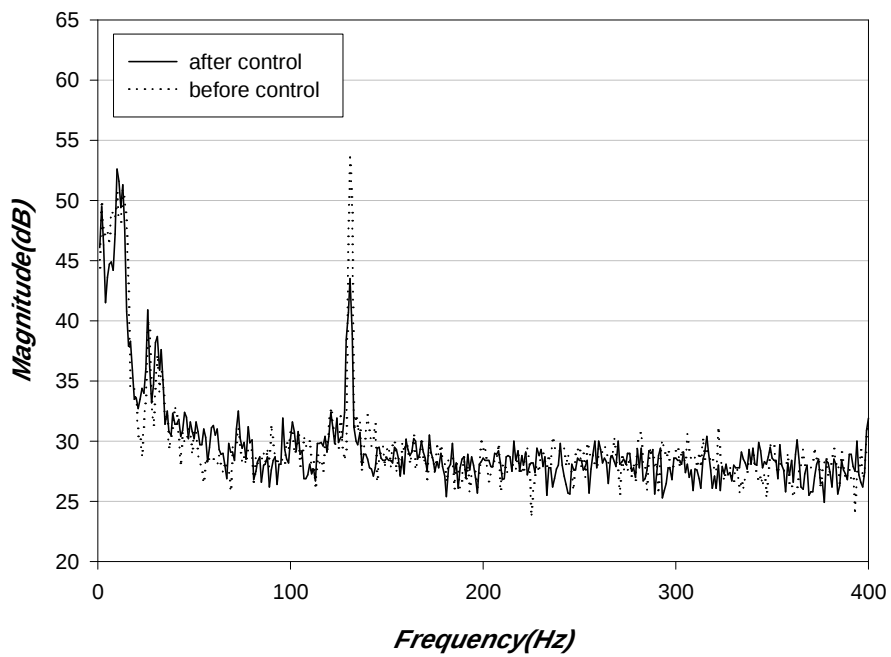


圖七 聲穿透之適應性控制實驗佈置圖

(a)



(b)



圖八 `132Hz 誤差麥克風聲輻射控制前後聲壓頻譜圖