

拖航水槽量測船舶聲納球艏流體噪音技術建立

吳柏賢* 吳真一**¹ 陳永裕* 李穎承* 王郁嬭*

*國立成功大學 系統及船舶機電工程學系
**海軍造船發展中心

¹E-mail: kpssi3006@gmail.com

關鍵詞：拖航水槽、聲納球艏、流體噪音、水中聽音器、特定中低頻範圍、噪音源分離分析

摘要

本研究之重點在於建立拖航水槽量測船舶聲納球艏流體噪音技術，做為評估船艏聲納安裝及船型選擇參考。由於國內水槽無論是空蝕水槽或拖航水槽都均有機器運轉的背景噪音，而拖航水槽是具備拖航及造波功能，更能貼近實況，惟拖航水槽的背景噪音較多，包括台車噪音、造波機噪音及水槽自身背景噪音等，在技術上需逐項量測測試，在逐項噪音源分析後再結合複合式拖航與造波試驗量測，以獲取分離噪音所需的噪音頻率及聲壓位準依據，比較後進而獲得可靠的量測評估結果。透過本研究整體結果評估，已成功分離出特定噪音區間的比較，後續可將試驗數據納入設計階段，提供具聲納球艏船型設計之進一步改良參考，以提高聲納探測需求目標。另外，由本研究之結果可以得知，經拆解噪音源分析技術建立，在拖航水槽於特定的中低頻範圍是可做比較及評估，技術之建立將提供未來不同噸位、不同聲納球艏船型設計時，拖航水槽流體噪音量測技術參考依據。

前言

本研究目標為使用拖航水槽，實施船舶航行時聲納球艏的流體噪音性能進行量測與分析，建立可靠的量測技術與能量，以獲取聲納幾何外型在各航速下經水流衝擊的噪音量測成果，分析流體噪音及機械噪音干擾頻率與聲壓位準。

本研究將具有聲納球艏船型納入量測評估，實驗設計是在浸水的聲納球艏內安裝 B&K 8104 水中聽音器，在水槽內也分別放置水中聽音器，逐次量測由不同的機械運轉產生的背景噪音頻與及強度，本研究採用適合於試驗之縮小尺度船模，於拖航水槽實施船模航行在靜水狀態及波浪狀態下之聲納球艏噪音量測試驗，獲取具有聲納球艏設計船型之各種船速及海況的流體噪音數據。

本研究發展聲納球艏表面激發流體噪音性能量測技術，主要目的是在複雜水中環境下，據以評估聲納球艏噪音強度，可作為降低聲納球艏表面幾何之流體噪音設計依據，並且可靠的量測數據將可作為模擬分析的比對驗證依據，進一步可作為船艏線形設計精進與修正參考。

文獻回顧

一般船舶之船艏形狀設計，主要是為減少船身水中阻力，降低海浪沖擊作用來改善船舶的耐海性能，典型減阻例子即為球狀船艏，而隨著各種理論、設計方法與試驗工具的不斷演進，如[1]-[6]，且一般船艏形狀設計是以減少船身水中阻力及改善船舶的耐海性能為主要目的，但由於海洋研究船或軍事船舶依其任務性，會在船艏水線下方安裝聲納球艏，因此球艏的幾何構形上不同於一般商船。球艏幾何形狀所造成的水流流體噪音，對於聲納音鼓的背景噪音影響，將直接影響聲納的偵測距離。

在船舶螺槳的水中噪音研究中，有較多關於水中聲學量測的文獻可供參考，包含荷蘭海洋研究應用機構(MARIN)、德國漢堡船模水槽(HSVA)皆有相關研究[7]-[12]。此外，2009年，美國海軍水面戰中心(NSWCCD)與荷蘭(MARIN)有針對水面艦的船速、船體外形產生的流體噪音，於 NSMB 船模水槽進行相關的水聲實驗[13]，該研究的目標是確定並量化船體表面在不同航速下所產生的流體噪音，文中提到船體表面的流體噪音涉及水動力學與聲學，可能的水動力包括：湍流邊界層壓力波動與氣泡，並透過流動驅動船體外殼與結構，以直接或間接方式

¹通訊作者:吳真一(kpssi3006@gmail.com)

輻射水中噪音。該研究也針對比例模型修正至全尺寸實船之數據後處理給出建議，在相同的弗勞德數(Froude number)，可正確修正波浪的運動模式，但由於無法正確縮放所有參數，因此無法對水中的流體噪音進行直接的縮放處理。雖然如此，該研究仍透過在水動力拖航水槽進行船體表面流體噪音量測3實驗，確認船體表面波破裂產生的氣泡與船體紊流激發(turbulent excitation)，是產生水中噪音的主要機制。

2015年，德國漢堡空蝕水槽(HYKAT)針對扁平板在湍流邊界層(turbulent boundary layer)下所激發的流體噪音進行研究[14]，文中提到船舶聲納所面對的背景噪音，很大一部分來自於此類噪音模式，實驗結果表明，扁平板的局部壁面壓力波動所造成的非局部模態響應，是實驗中流體噪音的主要源頭，該項結論也在光譜相干分析與平板有限元素模擬中得到驗證。2017年，中國海軍工程大學針對舵翼在不同舵角下的水動力噪音特性進行分析[15]，研究中提到船舶運動之水動力噪音大致可區分為流體噪音與流體激振下的振動噪音，一般而言，船型結構上突出部分，會破壞流場與壓力場，進而產生水中噪音。模擬結果顯示，其流體噪音為寬頻且無明顯主頻，流體激勵之振動噪音則在520~530Hz具有明顯峰值，並對應於舵翼的第一模態頻率。此外，舵尾與舵翼前緣的聲壓強度較大，並且與渦度(vorticity)分析結果一致，可以確定渦流(eddy)是形成流體噪音主要原因。

2019年，哈爾濱工程大學水聲工程學院針對縮模潛艇的流體噪音的產生機制進行探討[16]，文中提到潛艇的流體噪音主要來自於船艙、帆罩、船艙和螺旋槳，且噪音頻率為寬頻帶、無明顯主頻。研究於重力水洞隧道(gravity water tunnel)進行實驗，結果顯示帆罩區會形成馬蹄渦流(horseshoe vortex)、邊界層分離(boundary layer separation)與尾渦脫落(tail vortex shedding)三種非穩定流場。其中，馬蹄渦流會產生低頻噪音，邊界層分離引起的噪音則會分布於整個頻率範圍，尾渦則在與週期相關的頻率上出現噪音。2021年，中國南海科學與工程實驗室使用立體粒子影像測速法(SPIV)對三體船艙部的流場速度進行觀測與分析[17]，文中提到船艙流場直接影響船舶阻力性能、抗浪性能與水中噪音，分析船艙周圍流場特性有助於了解水中噪音的形成機制。實驗針對大、小兩型不同球型艙進行比較，結果顯示，船艙流場分布受自由表面、船體水平與縱向曲率、安裝於艙部附屬物的影響，並且船浪高度與破浪範圍是影響自由表面流場的重要因素。小球形艙的中線於自由表面，與自由表面的交互作用形成了一定範圍的低速尾流區域，大球形艙對自由表

面周圍流場分布無影響，僅在艙部區域底部形成流場分布。

本研究主要研究內容為於針對採用聲納球艙的船艙線形，在拖航水槽分別於靜水和波浪下進行聲納球艙內噪音性能試驗，可獲取船模聲納球艙內部的噪音性能資料，本研究可由聲納球艙的噪音量測與分析，建立有效量測航行中波浪噪音之技術，對具聲納球艙之船舶的聲學性能提供重要的參考價值。

研究方法及步驟

本研究為一具聲納球艙的船舶噪音的量測，研究方法主要為製作出適當船模來量取船舶在變換不同船速下及不同海況下之流體噪音狀況，進行聲納球艙內部噪音的量測。

聲納球艙噪音量測試驗，是規劃安裝水聽器於船艙聲納艙內，紀錄船模運動時的船艙水流噪音。將針對三種航速(10\14\18節)、三種海況(0\4\5\6級)等條件下進行量測，所蒐錄之水聲訊號將透過平均週期頻譜分析及1/3八度音分析兩種方式，評估船艙水流噪音之頻率分布情況，並討論於不同航速、海況條件下之聲納球艙內部噪音受情況，架構如圖1所示。

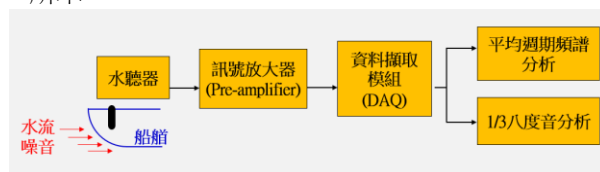


圖1 聲納球艙流體噪音量測與分析流程圖

本研究採集的水中噪音時域訊號，是經由傅立葉轉換獲得噪音於頻域中的分布情況，使用有限時域長度的噪音訊號樣本進行分析，為了降低誤差使轉換後的頻譜更加平滑，可將有限長度訊號分割成M組訊號，每組訊號具有N個取樣點數，各組訊號可完成獨立或具有一定比例重疊，之後對每組訊號進行傅立葉轉換計算其頻譜及聲壓位準，再將各組進行平均計算，此訊號處理流程稱為平均週期頻譜分析。

本研究使用取樣頻率51.2kHz採集水中噪音，每51.2k個取樣點數分割成一組訊號，各組訊號間的樣本重疊率為50%，總分割組數M取決訊號取樣時間長度，取樣時間則根據實驗目的與量測物進行設定，所獲得之平均週期頻譜其頻率解析度為1Hz，如圖2所示。

1/3八度音分析(one third octave band)也是一種頻譜分析方式，一般而言，平均週期頻譜分析其頻率軸為線性頻譜，1/3八度音分析則為對數頻譜，其頻率軸定義如下：

$$f_c = \sqrt{2^n} f_L = f_U / \sqrt{2^n}$$

上式中， $n = 1/3$ 表示為 1/3 八度音階， f_c 為中心頻率， f_L 為下限頻率， f_U 為上限頻率。工業應用中，通常將 20~20kHz 頻寬範圍分成 31 個頻帶，各頻帶的中心頻率與頻率上、下限如表 1 所式。根據各頻帶的頻率上、下限，累加該頻帶內的功率頻譜能量，可獲得該中心頻率下之聲壓位準 (Sound pressure level)。

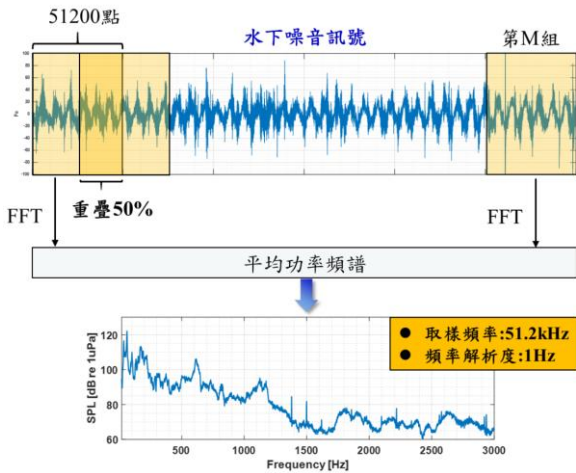


圖 2 平均週期頻譜分析流程圖

表 1、1/3 八度音階參數表

頻帶	f_c	f_L	f_U	頻帶	f_c	f_L	f_U
No.01	20	17.8	22.3	No.17	800	712.7	890.9
No.02	25	22.3	28.1	No.18	1000	890.9	1113.6
No.03	31.5	28.1	35.6	No.19	1250	1113.6	1425.4
No.04	40	35.6	44.5	No.20	1600	1425.4	1781.8
No.05	50	44.5	56.1	No.21	2000	1781.8	2227.2
No.06	63	56.1	71.3	No.22	2500	2227.2	2806.3
No.07	80	71.3	89.1	No.23	3150	2806.3	3563.6
No.08	100	89.1	111.4	No.24	4000	3563.6	4454.5
No.09	125	111.4	142.5	No.25	5000	4454.5	5612.7
No.10	160	142.5	178.2	No.26	6300	5612.7	7127.2
No.11	200	178.2	222.7	No.27	8000	7127.2	8909
No.12	250	222.7	280.6	No.28	10000	8909	11136.2
No.13	315	280.6	356.4	No.29	12500	11136.2	14254.4
No.14	400	356.4	445.4	No.30	16000	14254.4	8909
No.15	500	445.4	561.3	No.31	20000	17818	22449.2
No.16	630	561.3	712.7				

依試驗水槽之規模 (165m×8m×4m) 船模縮尺比例採用 1/28，並在船艙的聲納球艙內適當的沒水位置，安裝水聽器，以量測在不同的航速及運動狀況下之水流產生之噪音。整個研究之進行步驟及研究內容大綱敘述如下：

1. 蒐集國內外有關海洋研究及軍事船舶船艙聲納球艙相關資料。

2. 設計聲納球艙船模，並委託廠商製作船模。
3. 設計船模試驗周邊安裝系統。
4. 量測背景噪音，包含造波機、拖航台車及水槽自身背景噪音。
5. 組裝船模之周邊安裝系統及測試。
6. 執行船舶拖航試驗，並同時聲納球艙噪音量測。
7. 執行航行狀態之不同海況、不同船速的聲納球艙噪音量測。
8. 執行背景噪音與聲納球艙噪音分析，分解出合適的評估頻域。
9. 確認於拖航水槽量測船舶聲納球艙流體噪音操作程序與分析技術。

本研究船型為具有聲納球艙船型，本船構型之主要尺寸如下。

模寬 (B MLD)	約	15	m
模深 (D MLD)	約	10	m
設計吃水	約	4	m
全長 (LOA)	約	130	m
垂線間長 (LBP)	約	122	m
排水體積	約	3800	m ³

船模整備

本研究船模為了符合聲納球艙噪音量測的試驗需求，其附屬的聲納球艙採取 FRP 材質製造。主船體使用木頭材質製作，在船艙內部，配置了一個艙間位置如下圖 3，用以裝設水聽器以便進行噪音試驗使用，該水密艙間在試驗期間將會注滿水，並且配置 2 支水聽器執行量測作業。

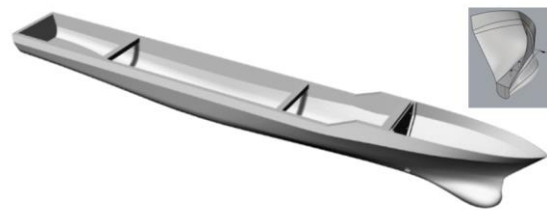


圖 3 船模及水聽器安裝示意圖

聲納球艙的 FRP 積層工法使用玻璃纖維布及樹脂手工積層，經表面加工完成後之總厚度約為 4 至 5 mm，此厚度可確保設置於該區域的水聽器能量測到目標噪音，如下圖 4。



圖 4 聲納球艙 FRP 模型積層過程

試驗器材整備

1. 拖航水槽

本研究船模試驗於國立成功大學拖航水槽（如圖 5）實施，本水槽總長度為約 165 公尺，寬 8 公尺，深 4 公尺，一端設有造波機，另一端則為消波設施，水槽水位一般在約 3.5 公尺深。



圖 5 國立成功大學拖航水槽

2. 臺車

臺車採用直流馬達，分別控制軌道上 4 個車輪，控制系統於臺車平台右側之控制台，可藉由輸入設定速度與拖航距離，計算出等速區間及時間來調整試驗流程。臺車移動速度可設定範圍為 0.1m/s~5.6m/s，如下圖 6。



圖 6 拖航水槽-臺車

3. 造波機

造波機為板式造波機，由電動馬達連結曲柄軸，配合油壓單元帶動造波板，使用造波室裡的控制平台便能控制所需之週期、波高及次數，藉其調整馬達轉速，製造某一固定頻率之週期性規則波，如下圖 7。



圖 7 拖航水槽-造波機

4. 水聽器與水聲訊號擷取系統

本研究採用 Brüel & Kjær 公司的 8104 型水聽器，靈敏度(Sensitivity)：205 dB re 1 V/ μ Pa \pm 3 dB，工作頻率範圍：0.1 (Hz)至 120 (kHz)，符合實驗需求。

為確保可準確量測水聲壓力值，實驗前使用 Brüel & Kjær 公司的 4229 校正器進行水聽器靈敏度校正，針對 8104 型水聽器可輸出 251Hz、162dB 正弦波，如圖 所示，並使用 Teledyne Reson 公司的 VP2000 訊號放大器進行前置類比訊號放大，並採用 NI 公司的 cDAQ-9171 機箱與 NI-9232 聲音與振動輸入模組，組成水聲訊號擷取系統，全系統設備皆使用電池供電，有效降低交流電源 60Hz 及諧波干擾。校正方式使用 NI LabVIEW 自行開發水聽器校正軟體，可即時顯示單通道訊號在全頻寬與 251Hz 頻率之聲壓位準，校正過程如圖 8 所示。

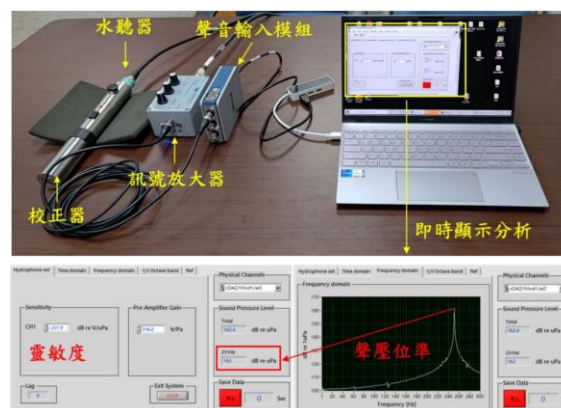


圖 8 水聲訊號擷取系統與水聽器校正軟體介面

拖航水槽運作之水中背景噪音量測

本研究量測目的主要在確認拖航水槽之在運作時，各項水中背景噪音頻率及噪音等級，以分離實驗程序及頻譜分析下，獲得聲納球艙內的噪音頻率及噪音等級，拖航水槽之在運作的各項水中背景噪音，分別有拖航水槽水中背景噪音、臺車工作噪音及造波機工作噪音，量測過程及結果敘述如下。

1. 拖航水槽水中背景噪音量測

首先須確認拖航水槽之水中背景噪音等級，實驗室將船模靜置於水面下，水聽器安裝於船艙聲納球艙內，在無任何設備運轉下，連續紀錄 1 小時水中背景噪音，如圖 9 所示。根據 1/3 八度音分析結果，水槽背景噪音集中在中心頻率 63~800Hz，最大聲壓值約 105dB、中心頻率 125Hz，如圖 10 所示。根據平均頻譜分析結果，水中背景噪音集中在低頻，並且無任何高頻噪音，

頻域範圍 1~800Hz 之噪音值低於 100dB，800Hz 後之噪音值皆低於 80dB 如圖 11 所示。

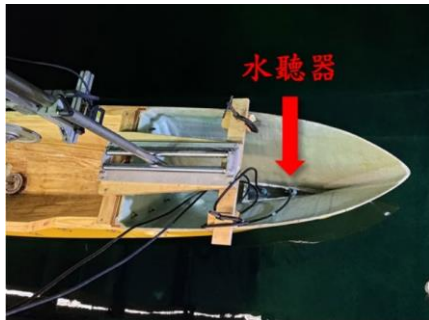


圖 9 拖航水槽之水中背景噪音量測方式

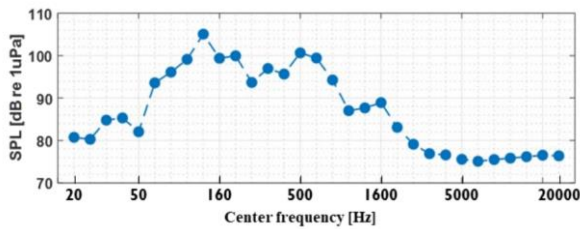


圖 10 拖航水槽之水中背景噪音-1/3 八度音分析

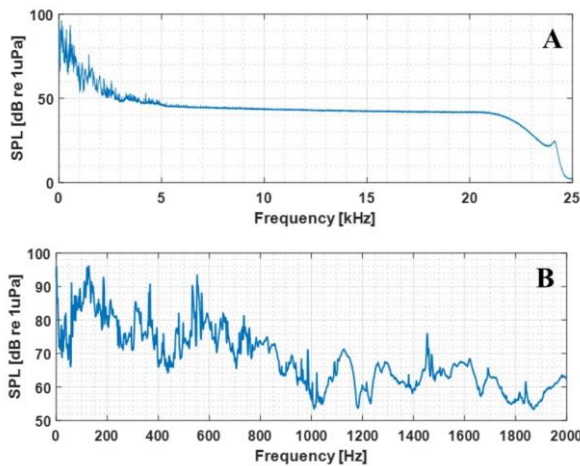


圖 11 拖航水槽之水中背景噪音-平均週期頻譜分析。
A. 頻寬範圍：0~25kHz，B. 頻寬範圍：0~2kHz。

2. 臺車工作噪音量測

本實驗目的在確認水槽臺車工作時產生之水中噪音等級，實驗中，水聽器透過水面浮台進

行佈放，水聽器放置於水下 20cm(同聲納艙內水聽器安裝深度)，浮台位於水道中央位置，如圖 12 所示。

臺車由準備區啟動出發後，會加速至 10/14/18 節並通過浮台上方，臺車工作時產生之水中噪音如圖 13 所示。實驗全程錄音，並取臺車通過浮台上方的前後 5 秒訊號(共 10 秒)進行計算，結果如圖 14 及圖 15 所示。結果顯示，臺車工作時所產生的振動噪音，影響範圍幾乎涵蓋全部頻寬，影響最大區域集中在中心率 630Hz，並且臺車移動速度越快、振動噪音越大。



圖 12 水槽臺車工作噪音量測方式

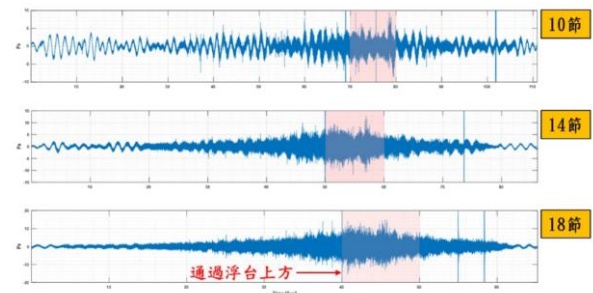


圖 13 水槽臺車水中噪音訊號

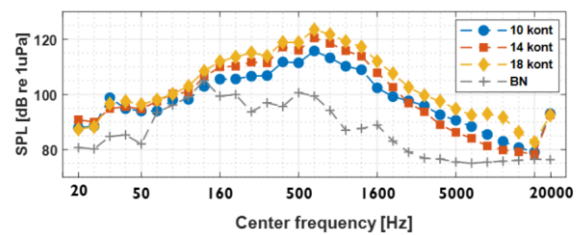


圖 14 水槽臺車水中噪音-1/3 八度音分析