

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

潛艦幾何外型設計與最適化之研究(1/2)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC92-2611-E-002-024-

執行期間：92 年 08 月 01 日至 93 年 07 月 31 日

執行單位：國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系暨研究所

計畫主持人：郭真祥

共同主持人：趙修武

報告類型：精簡報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 5 月 31 日

潛艦關鍵性技術之基礎研究 -

潛艦幾何外型設計與最適化之研究 (1/2)

計畫編號：NSC 92-2611-E-002 -024 -

執行期限：92 年 08 月至 93 年 07 月

主持人：	郭真祥	台灣大學工程科學及海洋工程學系
共同主持人：	趙修武	中原大學機械工程學系
計畫參與人員：	陳彥均	台灣大學工程科學及海洋工程學系
	蔡昇佑	台灣大學工程科學及海洋工程學系

摘要

本研究探討了一艘真實柴油潛艦的幾何外形與其流場特性，首先仿製出德國 209-1400 型潛艦（含帆罩與控制翼）之三維幾何外形，並利用計算流體力學方法研究此潛艦之流場，分別針對實船尺寸與模型尺寸雷諾數，進行仿德國 209 型潛艦之穩態紊流場計算。從計算所得的結果，本文針對與潛艦性能相關的幾個重要課題加以分析，其中包含了潛艦之阻力成份、不同雷諾數下的形狀因子、潛艦帆罩對阻力之影響、潛艦螺旋槳跡流、潛艦帆罩之接面渦旋等，以便因應未來開發先進潛艦之相關關鍵性技術之需求。

ABSTRACT

The geometry and flow characteristics of a practical diesel submarine are studied in this paper. First, the 3D geometry of Germany type 209-1400 submarine, including its sail and control fins, is imitated. Furthermore, computational fluid dynamics method is applied to analyze the flow around the submarine. The steady turbulent flow is computed at both model-scale and full-scale Reynolds numbers. According to the CFD results, several important topics, such as the resistance components, the form factor at different Reynolds numbers, the influence of the sail on the submarine's resistance, the propeller wake, and the juncture vortex induced by the sail, are investigated. This will be helpful for developing key technologies of modern submarine in the future.

1. 前言

由於台灣過去並無實際設計與建造潛艦之經驗，基於國艦國造之理念，以及受到向美國採購潛艦政策之衝擊，相關設計之能力、知識與資料之建立，自有其重要性與急迫性。潛艦許多部份的幾何外形都對其性能有顯著的影響，例如船體幾何外形與潛艦阻力、螺旋槳幾何外形與潛艦噪音等等之間都有密切的關係，然而國外先進潛艦在這些部分的詳細幾何外形資料，以及藉由調整幾何外形以改善潛艦性能的相關技術，皆視為軍事機密，不易取得詳細的內容，再加上國內過去缺乏深入的研究，所以對於潛艦許多關鍵技術之突破造成極大的障礙，因此，本研究針對一艘實際的柴油潛艦進行流場分析，建立潛艦幾何外形與流場特性的基礎知識，以便於未來進行相關性能研擬改進之參考。

在考慮我國海軍之作戰需求與台灣海峽之地形後，本研究決定採用德國 209-1400 型柴油動力潛艦做為研究之對象。二次世界大戰之後，德國於 1962 年發展出 205 型潛艦，並於 1971 年開發出 206 型與 209 型潛艦，其中 209 型潛艦成為國際間知名的柴油潛艦，三十餘年來，德國總共建造了數十艘此型潛艦，分別售予南韓、土耳其、秘魯、希臘、印度等十餘個國家，在世界上各大海域中執行軍事任務，因此，此型潛艦可以算是這一個時代的代表性作品。近年，德國開發出最新的 212 型與 214 型潛艦，預計將會在 2003 年底之後，陸續汰換在德國海軍中服役的 209 型潛艦。

2. 潛艦幾何外形之建立

2.1 潛艦船體

德國 209 型潛艦曾先後進行數次改良，且針對各國之特殊作戰需求略加調整，因此在某些幾何外形參數之數值（如船長、排水量等）上並不統一，依據所蒐集到的潛艦構造圖（圖 1）等資料，建立出一艘 209-1400 型潛艦之三維幾何外形（圖 2），其主要尺寸如表一所示。

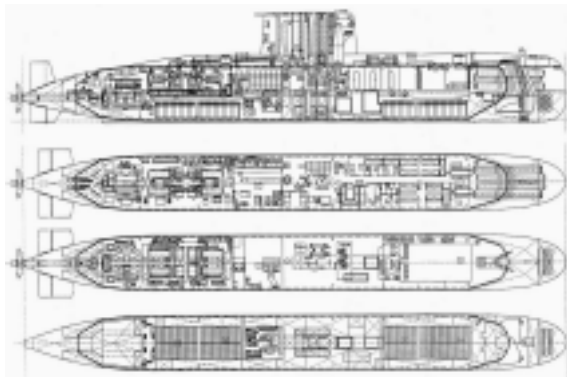


圖1 德國209-1400型潛艦之構造圖

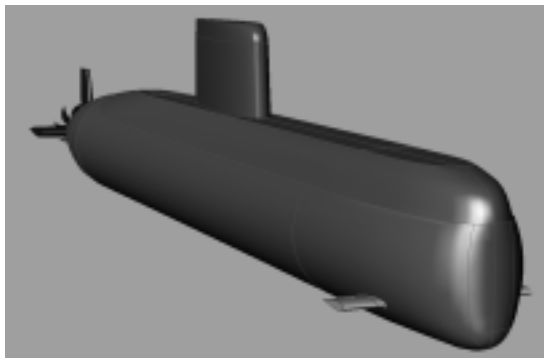


圖2 仿製之德國209-1400型潛艦

表一 仿德國209-1400型潛艦之主要尺寸

全長 (L)	60.08 m
全寬 (B)	6.20 m
全高 (H)	11.75 m
排水體積 (∇)	1789.26 m ³
浸水表面積 (S)	1295.45 m ²

在潛艦的船體部分，其幾何外形主要是受到壓力殼之限制，一般柴油潛艦大多採用圓筒型的壓力殼，並將平衡水櫃等裝備安置於壓力殼的上方，因此柴油潛艦的橫剖面大

多呈現圓形。德國 209 型潛艦內部具有一個直徑為 6.2 公尺的壓力殼，依此便可以建立 209 型潛艦的船體中段，再依據構造圖中的輪廓，仿製出船體前段、艉段與上層船體，便可以得到完整的 209 型潛艦船體。

2.2 潛艦帆罩

在潛艦帆罩部分，在所蒐集的資料中，雖然沒有 209-1400 型潛艦帆罩的剖面形狀，然而從 205 型潛艦的構造圖中，發現 205 型潛艦帆罩的剖面形狀與二維 NACA 翼形接近，所以推斷 209-1400 型潛艦之帆罩斷面應該也是 NACA 翼形，因此本研究選用 NACA 0018 翼形建構潛艦帆罩。

2.3 船艏控制翼

在船艏控制翼、水平舵與垂直舵的部分，本研究也是採用 NACA 0018 翼形，並且依據構造圖中的輪廓建立其外形。潛艦所使用的控制翼有兩種，其中一種位於船艏處，且控制翼能夠收藏於船體之內，其主要功能是提供潛艦俯仰運動時所需要的力矩。另一種控制翼位於帆罩上，且不具有收藏的機制，此種控制翼可以提供適當的垂向力，平衡潛艦之重力與浮力。209 型潛艦具有一組船艏控制翼，與其他潛艦之船艏控制翼所不同的是，其幾何外形並非傳統的三維翼，反而比較類似魚類的胸鰭，從同系列德國潛艦的船艏控制翼更可以發現其演進過程，漸漸地從三維翼改變至魚鰭狀，這種船艏控制翼是此系列潛艦的一大特點。經過訪談實際參與 209 型潛艦建造之德國工程師，得知 209 型潛艦採用一對弦拱（camber）相反之船艏控制翼，當潛艦上浮與下潛時，只會伸出單側的控制翼，來提供潛艦俯仰運動所需之力矩。

2.4 潛艦用螺槳

潛艦所使用的螺槳由於涉及軍事機密，其幾何外形等資料都無法從一般管道取得，在文獻[8]之中，美國國家歷史博物館對於數艘美國核動力潛艦的螺槳，有粗略的介紹，從此文獻中珍貴的螺槳照片上，可以窺知其演進過程與設計理念。50 年代時，美國首艘核動力潛艦鸚鵡螺號（Nautilus）採用了五葉

螺槳（圖 3），其外觀與商船用螺槳大致相同；至於 60 年代所開發的兩型核動力潛艦海狼級（Seawolf）與鱈魚級（Sturgeon），則是改用七葉螺槳，螺槳葉片外形則大致上呈現香蕉狀（圖 4 與圖 5）；到了 70 年代開發洛杉磯級潛艦時，利用七葉高歪斜螺槳（圖 6）達到翼端減荷（tip unload）的目的，以降低翼端渦漩（tip vortex）並減低螺槳之噪音，此時螺槳葉片之外觀則呈現鐮刀狀。至於本研究的研究對象 209 型潛艦，其螺槳也是依循與洛杉磯級潛艦之相同設計理念，採用七葉高歪斜螺槳（圖 7）。



圖3 美國鸚鵡螺號核動力潛艦之螺槳

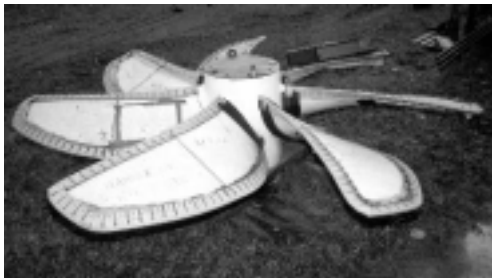


圖4 美國舊型海狼級核動力潛艦之螺槳

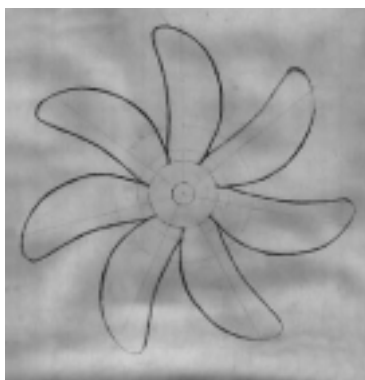


圖5 美國鱈魚級核動力潛艦之螺槳

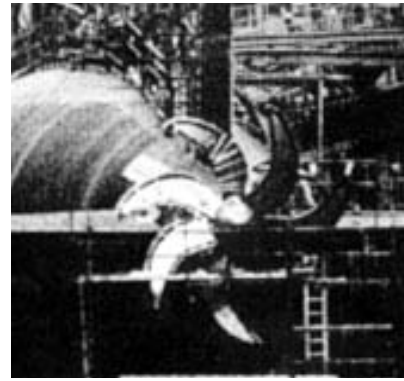


圖6 美國洛杉磯級核動力潛艦之螺槳



圖7 德國209型柴油動力潛艦之螺槳

潛艦之螺槳除了要具有高推進效率之外，還需要有良好的靜音效果等要素，由於台灣過去並無潛艦設計之經驗，而相關幾何外形與設計理念等重要資料之取得又有困難，因此只能從極為有限的資料之中，進行初步的研究。在螺槳的設計理念方面，Björheden [1]依據了不同的設計理念建立圖 8 中的螺槳，圖 8 左上角的螺槳（480-B）加大了葉端區域的弦長，使葉端處產生二維效應，以避免葉端渦漩的發生，然而在實驗中卻發現此種外型會造成推進效率的降低。圖 8 右上角的螺槳（545-B）則是採用了解除葉端負荷（tip unload）的設計理念，使葉端區域不需要提供推力，藉此避免葉端渦漩，並增加中央區域所必須提供的推力，來達到相同的總推力，因此並不會影響原有之推進效率。至於圖 8 下方的螺槳（615-B）除了採用了解除葉端負荷的設計理念外，還加上了高歪斜的分佈，在實驗中發現此螺槳不但可以減低葉端渦漩，還可以改善噪音與振動的現象。



圖8 依據不同設計理念建立的螺槳

本研究依據現有之資料，利用一種以參數表示法為基礎之螺槳外形建構方法[19]，建立潛艦螺槳之幾何外形，並藉由調整翼斷面之弦長與歪斜兩個幾何外形參數，仿製潛艦用螺槳之幾何外形。首先針對一顆由韓國船舶及海洋研究所（Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering，簡稱KRISO）所設計的貨櫃船用螺槳 KP 505（圖9）加以修改，除了葉片數由五葉增加至七葉之外，還將翼斷面之弦長減半，歪斜量放大50%，便可以得到一顆與60年代美國潛艦螺槳相似的 Model-A 螺槳（圖10）。將此螺槳與文獻[8]中鰐魚級潛艦螺槳之投影圖相比，發現兩者在投影面上的弦長分佈相當接近，至於歪斜量則有些許不同，由於螺槳之歪斜取決於船舶之艤跡流，水面船舶與潛艦之艤跡流特性應有顯著之不同，所以在歪斜量的分佈上，商船用螺槳與潛艦用螺槳自然會有所不同。除此之外，本研究亦參考文獻[1]中之螺槳幾何外形參數，所產生一個類似70年代以後之潛艦用七葉高歪斜螺槳 Model-B（圖11），由於缺乏適當的資料進行定量上的比對，所以只能將此螺槳與洛杉磯級潛艦螺槳之照片進行定性上的比較，比較結果發現在兩者在歪斜與弦長兩個幾何外形特徵上大致相似。

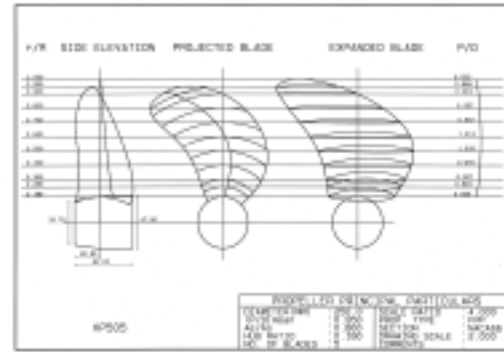


圖9 五葉商船用螺槳KP 505



圖10 七葉潛艦用螺槳Model-A



圖11 七葉潛艦用高歪斜螺槳 Model-B

3. 潛艦之靜水性能計算

完成潛艦幾何外形的建立之後，接著進行了潛艦的靜水性能計算分析。潛艦與水面船舶的靜水性能計算並不相同，在計算水面船舶之時，其重點是必須要保留一定的「預備浮力」，以確保水面船舶的安全；然而潛艦的重點則是要讓重力與浮力完全相等，讓潛艦能夠懸浮在特定的水深，因此，在靜水性能計算上，潛艦對於精確度的要求遠較水面船舶更高。基於上述的原因，水面船舶在計算時可以不將某些附屬物列入考慮，一方面是因為它並不需要非常高的精確度，另一方面則是這些

附屬物也會產生浮力，對於船舶的安全性而言是正面的影響。至於潛艦的靜水性能計算，則有必要將所有的附屬物都考慮在內，算出準確的排水量與浮心位置等資料，如此在操控潛艦之時，才能夠正確地控制潛艦內的壓載水箱，讓潛艦能夠達到預定的深度位置與姿勢。

本研究利用一個建構於網路環境之船舶靜水性能與穩度計算系統[18]，進行 209-1400 型潛艦之靜水性能與穩度之計算分析工作。在這個系統之中，採用了一個成熟的單機版計算程式 (Archimedes II [12]) 當作核心計算引擎，並且使用 Java 語言撰寫新的網路操作介面，以及相關之中央控制系統，使其成為一個可供多人同時上線執行計算工作之線上計算程式。利用這個線上計算程式，使用者可以進行多重船體、海洋結構物等物體之靜水性能與交叉穩度計算，並可在線上直接顯示計算結果之表格與曲線圖形。

本研究將 209-1400 型潛艦分割成裸船殼、帆罩、左右艏控制翼、水平舵與垂直舵等共八個物件，分別進行裸船殼與完整潛艦之靜水性能計算，計算所得的潛艦排水體積、每公分吃水差噸數 (TPC) 與縱向浮心位置 (L.C.B.) 分別繪於圖 12~圖 14。在圖 12 與圖 13 之中，當潛艦吃水小於 6.9 公尺，即帆罩尚未浸水之前，有無附屬物兩者間的計算結果並無明顯的差異，由此可見艏控制翼與舵對於潛艦排水量的影響極小，只有在帆罩浸水之後，潛艦的排水量才会有顯著的改變，根據計算結果，在潛艦完全下潛之後，帆罩與其他附屬物佔潛艦排水量的 3.31%。圖 13 中的縱向浮心位置是以船艏為原點，指向船艏為正向，209-1400 型潛艦的帆罩大約位於船艏的位置，由於潛艦船體是屬於前鈍後尖的流線型，而且採用了一般的二維翼形做為帆罩的剖面形狀，所以船體與帆罩的縱向浮心均會略為偏向船艏方向。

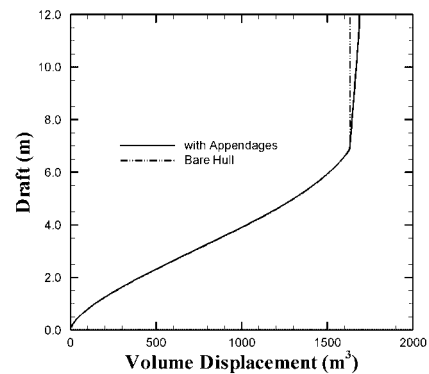


圖 12 潛艦之排水體積

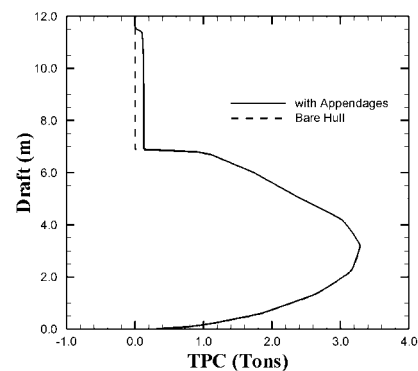


圖 13 潛艦之每公分吃水差噸數

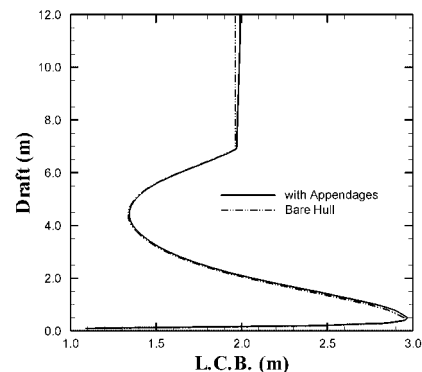


圖 14 潛艦之縱向浮心位置

4. 潛艦流場之研究方法

本研究使用了一套商用 CFD 軟體進行潛艦流場特性之研究，是由 Institute of Computational Continuum Mechanics GmbH (ICCM) 所發展的 Comet。此軟體藉由求解 Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) 方程組來模擬潛艦之穩態紊流場，以有限體積法 (FVM) 進行數值離散工作，並選用一個

可靠且廣泛使用的標準 $k-\epsilon$ 紊流模型。

現階段之中，本研究將螺旋槳與船體（含帆罩與其他附屬物）分開解析，暫時不考慮兩者間的整合問題，等待將來相關技術成熟之後，再將螺旋槳與船體結合，進行所謂的自推（self-propulsion）計算。在船體的計算部份，由於船艏控制翼只會在潛艦上浮與下潛時伸出，在一般航行時皆收納於船體之內，因此本研究並沒有將其列入考慮，只考慮了帆罩、船艏之水平舵與垂直舵三項附屬物。進行潛艦流場計算時，本研究採用多區塊（multi-block）的結構化計算網格，將整個計算域分割成 32 個區塊，以結構化網格建立每一個區塊的數值計算網格。

5. 潛艦流場之研究方法

5.1 潛艦之總阻力

在此，本研究以四組不同密度的網格進行德國 209-1400 型潛艦（含帆罩與控制翼）的流場計算，其網格點總數為 66 萬、100 萬、200 萬以及 400 萬點，分別進行了實船尺寸與模型尺寸（縮小比例為 1/15）之流場計算，計算條件如表二所示。以這四組網格所計算出的潛艦總阻力係數（ C_T ）列於表三，在模型尺寸狀態下，隨著網格點由 66 萬點增加至 400 萬點，總阻力係數呈現震盪的情況，這表示本研究所使用的計算網格已經具有足夠的密度，能夠捕捉相關的物理現象，因此總阻力係數達到「收斂」的狀態，不會隨著網格點密度的增加而有明顯的改善。至於實船尺寸部分，由於邊界層之厚度會隨著雷諾數之增加而變薄，因此在計算實船尺寸之流場時，將會需要更密的計算網格，才能得到與模型尺寸相同品質之計算結果，所以表三之中除了最粗糙的網格（66 萬點）之外，隨著網格點密度的增加，計算所得之總阻力係數呈現持續下降的趨勢，而沒有像模型尺寸一樣，呈現「收斂」的情況。若要計算出「收斂」的實船尺寸阻力，必須再度大幅度地增加網格密度，然而受到相關計算資源的限制，無法進行此項工作，因此本研究採用 Richardson 外插法[11]來預估實船尺寸的與網格無關之解（Grid-Independent Solution），

即網格點密度趨近於無限密之計算值，其計算結果如表三中所示。

表二 潛艦之流場計算條件

	模型尺寸	實船尺寸
船長（ L ）	4.00 m	60.08 m
船速（ U ）	1.00 m/s	11.32 m/s (22 knots)
雷諾數（ Re ）	4.00×10^6	6.79×10^8

表三 不同網格計算所得之潛艦總阻力係數

網格點總數	模型尺寸	實船尺寸
66 萬	4.83×10^{-3}	2.77×10^{-3}
100 萬	4.93×10^{-3}	2.80×10^{-3}
200 萬	4.87×10^{-3}	2.70×10^{-3}
400 萬	5.02×10^{-3}	2.67×10^{-3}
與網格無關之解	N/A	2.66×10^{-3}

5.2 阻力成份與形狀因子

完成潛艦的阻力計算之後，本研究接著探討阻力成份與形狀因子（form factor）的相關問題。在此，本研究針對最密網格（400 萬點）計算所得的潛艦阻力進行分析，在模型尺寸與實船尺寸下，潛艦表面所受到之壓力與摩擦力佔總阻力的百分比列於表四，在模型尺寸中，摩擦力佔有極大的比例，但是隨著雷諾數的增加，壓力所扮演的角色也會愈來愈重要，因此在實船尺寸中，壓力項佔潛艦總阻力的比例提升至四成，與流體力學理論相符。如表五所示，利用 ITTC 1957 的平板摩擦阻力公式，即可算出德國 209 型潛艦的形狀因子，在實船尺寸與模型尺寸的狀態下，其形狀因子分別為 0.66 與 0.42。

表四 模型與實船尺寸狀態之阻力分量比較

阻力分量	模型尺寸	實船尺寸
壓力	13.39%	40.00%
摩擦力	86.61%	60.00%

表五 德國209型潛艦之形狀因子

	模型尺寸	實船尺寸
總阻力係數 (C_T)	$5.02 \cdot 10^{-3}$	$2.67 \cdot 10^{-3}$
平板摩擦係數 (C_{FP})	$3.54 \cdot 10^{-3}$	$1.61 \cdot 10^{-3}$
形狀因子 (k)	0.42	0.66

5.3 形狀因子之尺度效應

當 ITTC 於 1987 年訂定船模試驗準則之時，假設形狀因子只與船舶的幾何外形有關，並不會受到雷諾數的影響，然而近年來有許多研究卻提出不同的看法。所謂的形狀因子便是壓力與摩擦力兩者的比值，理論上，當雷諾數增加時，壓力項的比重也會隨著升高，因此對於一般船舶而言，實船尺寸的形狀因子應該會比模型尺寸更大。Bruzzzone 等人[2]的實驗顯示形狀因子的確會受到雷諾數的影響，在某些範圍中，形狀因子隨著雷諾數的增加而增加，但在某些範圍則相反；Kasahara 與 Masuda [9]的實驗中發現，當船模長度大於七公尺時，形狀因子隨著雷諾數的增加而增加，當船模長度小於七公尺時，則量測到相反的結果。除了以實驗方法所進行的研究之外，Gothenburg 2000 研討會中，八個研究單位利用 CFD 方法計算一艘 Kriso VLCC 在實船尺寸與模型尺寸的流場，在形狀因子的問題上，八個研究單位有一致的計算結果，都顯示實船尺寸的形狀因子較大。基於以上的研究結果，在第 22 屆 ITTC 會議的報告中，阻力委員會確認了形狀因子的確會受到雷諾數的影響，至於形狀因子與雷諾數之明確關係，則有待進一步的研究才能確定。

探討形狀因子之尺度效應前，本研究進行平板摩擦阻力之計算，以確定本研究所使用的分析方法能夠準確地解析不同雷諾數之阻力。本研究以 CFD 方法計算所得之平板摩擦阻力係數如圖 15 所示，和 ITTC 與 ATTC 之平板摩擦阻力係數相比，除了在雷諾數最低的一點之外，其餘各點都非常接近。由於在本研究所採用的 CFD 方法中，假設物體附

近均達到紊流狀態，並沒有將層流與紊流間的轉換過程列入考慮，在雷諾數較低的形況下，此一假設與真實物理狀況有較大的差距，因此，計算所得的平板摩擦阻力自然也會有較大的誤差。雖然如此，在模型尺寸(約 10^7)與實船尺寸(約 10^9)雷諾數之間，本研究所採用的 CFD 方法都能夠準確地解析平板摩擦阻力，誤差均小於 3%。

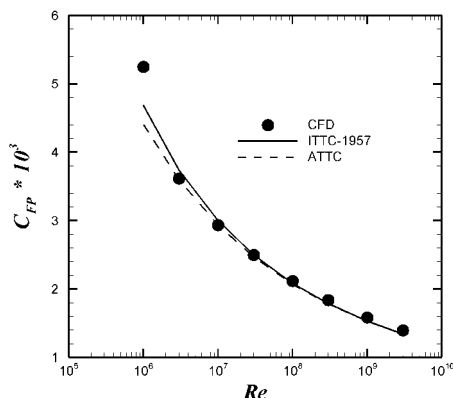


圖15 平板摩擦阻力之計算結果

完成平板摩擦阻力的驗證之後，本研究便開始進行形狀因子尺度效應之計算。在此，本研究依照(1)式計算潛艦的形狀因子，所使用的平板摩擦阻力是由 CFD 計算所得，而不是採用 ITTC 或 ATTC 之平板摩擦公式。由於總阻力係數(C_T)與平板摩擦阻力係數都是由 CFD 方法計算所得，因此應該能夠將計算誤差消除，以避免圖 15 中的誤差影響了形狀因子的計算結果。圖 16 是在不同雷諾數之下，計算所得的 209-1400 型潛艦阻力及其成份，隨著雷諾數之增加，壓力項微幅下降，剪力項大幅度減少，壓力項佔總阻力的比例不斷地上升。計算所得的潛艦形狀因子如圖 17 所示，從圖中可知形狀因子會隨著雷諾數之增加而增加，這個趨勢與其他研究的結果大致吻合。由於實船尺寸雷諾數下的形狀因子較大，實際潛艦的阻力將會比從模型試驗得到的預估值更大，因此，現行的船模試驗方法有必要在這個方面進行改善。

$$k = \frac{C_{T,CFD}}{C_{FP,CFD}} - 1 \quad (1)$$

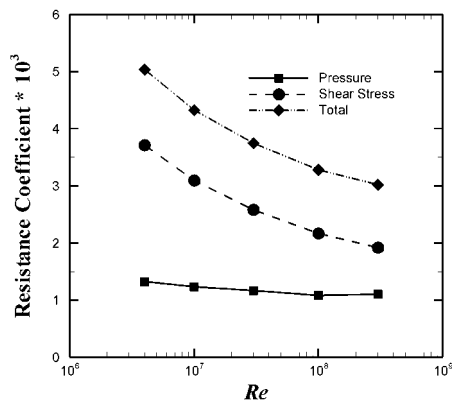


圖16 不同雷諾數下之潛艦阻力成份

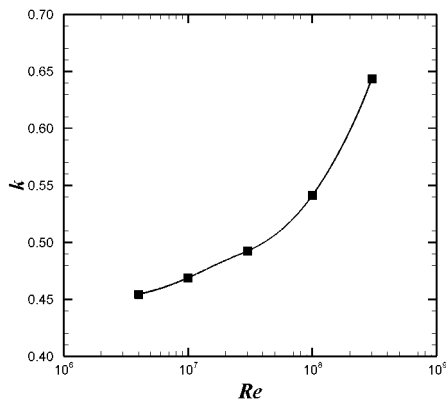


圖17 不同雷諾數下之潛艦形狀因子

5.4 帆罩對潛艦阻力之影響

現今的歐美潛艦大多使用直筒式帆罩，帆罩的剖面形狀則是採用傳統的二維翼形，此種帆罩在歐美國家已經沿用五十年以上，在外形上並沒有重大的改變。過去之所以使用此種形式的帆罩，應是受限於流體力學的分析技術，無法在設計過程中，將潛艦船體與帆罩一起分析，因此將帆罩視為一個獨立的物件，單獨設計並分析其流力性能。然而就流體力學之觀點，這種直筒式的帆罩並不是良好的設計，根據 CFD 的計算結果，德國 209 型潛艦在全速（22 節）航行時，其潛艦表面的壓力分佈如圖 18 中所示，船體與帆罩前緣會因為停滯點而產生高壓區，是船形阻力的兩個主要來源。對於 209 型潛艦為言，雖然帆罩之表面積只佔了潛艦總浸水面積的 8.84%，但是在本研究的計算結果中，當潛

艦全速航行之時，帆罩所造成的船形阻力佔總船形阻力的 12.71%，是一個必須重視的阻力成分。

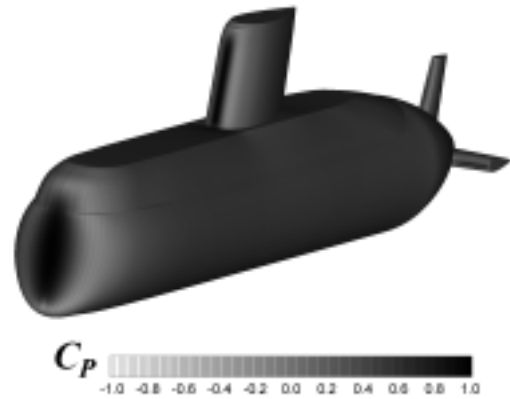


圖18 潛艦表面之壓力分佈（實船尺寸）

如上段所述，帆罩的形狀阻力是潛艦阻力重要成分之一，因此潛艦船身與帆罩兩者外形之整合設計具有高度的重要性，例如前蘇聯於 1970 年所發展之 705 型 Lira 潛艦（北約之代號為 Alfa 級），此潛艦之帆罩外形即與直筒型帆罩有所的差異，應是經過整合而設計出的帆罩外形（圖 19），Lira 潛艦在水下的最高航速可達 42 節，大幅超越同期之歐美潛艦（約 20~30 節），由此再度印証帆罩外形在潛艦阻力性能上的確具有重要的地位。此外，美國近年來所進行的先進帆罩開發計劃，也是基於相同的理由，要捨棄傳統的直筒式帆罩，透過帆罩與船體的整合分析與設計，並利用 CFD 技術進行最佳化，發展出一種新型的潛艦帆罩（圖 20），以降低潛艦之航行阻力，此新型帆罩預計將從 2005 年開始，實際應用於新型的維吉尼亞級（Virginia）核動力潛艦之上。對於我國操作環境而言，由於台灣海峽的地形並不適合大型潛艦活動，因此較小型的潛艦（例如本研究所研究的德國 209 型潛艦）比較能夠我國的需求。然而相對於核動力潛艦，一般柴油潛艦的體積較小，帆罩在整體比例上也相對較大，以 209 型潛艦為例，其帆罩的高度為 4.43 公尺，佔全高的 37.67%，帆罩所導致的船形阻力會在小型潛艦中比較顯著，因此在減低潛艦阻力的方面，藉由帆罩外形最佳化來減低船形阻力是一個值得投入研究的項目。



圖19 前蘇聯Lira潛艦（Alfa級）帆罩之外形



圖20 美國之先進潛艦帆罩之外形

5.5 潛艦螺槳之推進性能分析

在此,本研究利用非穩態的CFD方法[15]模擬螺槳之單獨試驗,以此分析潛艦螺槳的推進性能。圖 10 與圖 11 中潛艦用七葉螺槳的 K_T - J 圖分別繪於圖 21 與圖 22 之中,比較兩者的計算結果,發現七葉高歪斜螺槳 Model-B 可以產生較大的推力,不僅如此,在較大的前進係數 (J) 範圍中,Model-B 螺槳都維持著高推進效率,意味著此螺槳具有較大的最佳操作範圍。

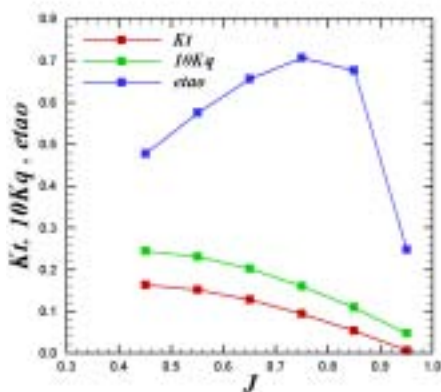


圖21 Model-A七葉螺槳之推進性能

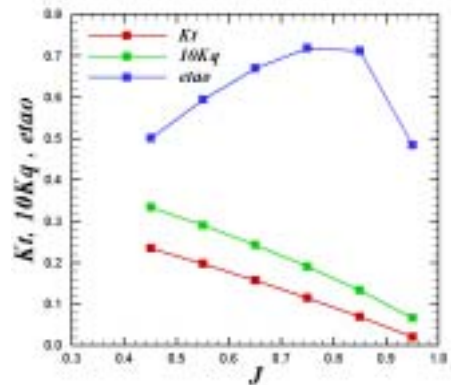


圖22 Model-B七葉高歪斜螺槳之推進性能

除了比較推進效率之外,本研究進一步分析螺槳葉片上的負荷分佈,將參考螺槳 KP 505 與兩顆潛艦用螺槳之計算結果繪於圖 23 之中。為了減低螺槳的噪音,螺槳必須進行葉端減荷以減低葉端渦漩,如圖中所示, KP505 螺槳在葉端與轂部並不承受負荷,藉此避免葉端渦漩與轂部空化之發生,是一個非常理想的負荷分佈。香蕉型葉片的 Model-A 螺槳並沒有葉端減荷的現象,因此該螺槳在運轉時會產生較嚴重的葉端渦漩;至於鏟刀型葉片的 Model-B 螺槳,則是藉由縮短葉端的翼斷面弦長,以達到葉端減荷的效果,並且藉由增加其他部份的負荷,以彌補葉端減荷所喪失的推力,所以 Model-B 螺槳是一種適合潛艦使用的螺槳。由於本研究只針對螺槳的弦長與歪斜量進行調整,因此 Model-B 螺槳無法產生與 KP 505 螺槳一樣理想的負荷分佈,此部份必須藉由調整螺距 (pitch) 弦拱等螺槳外型參數來達成。

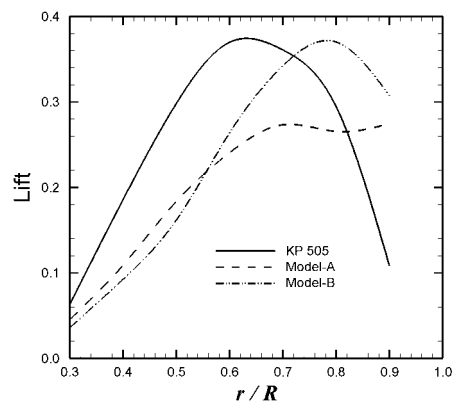


圖23 三顆螺槳之葉片負荷比較

6. 艤跡流與接面渦流

6.1 潛艦之艤跡流

艤跡流是一個重要的船舶流場特性，它對於螺槳的許多流體動力性能有密不可分的影響，對於潛艦螺槳的振動噪音也是如此。由於潛艦本身並非一個十足的軸對稱體，流體通過潛艦船體之後，會產生一個不均勻的艤跡流，尤其加上艤舵附屬物的影響，更強化其不均勻之程度。螺槳在這個不均勻的跡流中運轉時，當螺槳葉片轉動到不同角度時，葉片表面的壓力也會隨著變化，這個不穩定的壓力便會造成螺槳葉片的振動，進一步引起噪音。因此對於潛艦而言，螺槳跡流是一個重要指標，可以用來評估潛艦的靜音性能。然而由於雷諾數對於船舶的跡流有不可忽視的影響，就本研究針對的 209 型潛艦而言，在實船尺寸與模型尺寸雷諾數之下，由 CFD 計算所得的中央對稱面軸向速度分布繪於圖 24 與圖 25 之中，比較二者的計算結果可知，在潛艦後方的跡流區中有很明顯的差別。在實船尺寸狀態下，由於雷諾數較高，黏性效應較弱，所以船體後方的低速區較小，不像模型尺寸狀態下，會在船體及帆罩後方，產生一個明顯且大範圍的低速區

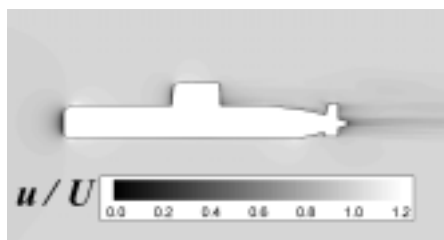


圖24 中央對稱面之軸向速度分佈（實船）

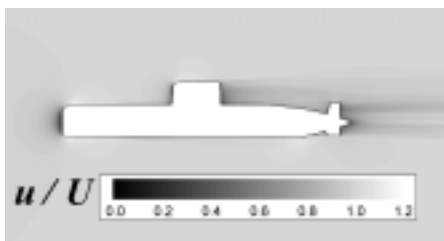


圖25 中央對稱面之軸向速度分佈（模型）

至於螺槳平面的軸向速度，則如圖 26 所示，受到潛艦船體的影響，在中央區域的流速較低，而且因為螺槳平面前方的水平舵與垂直舵，所以會出現十字型的跡流形式。

比較實船尺寸與模型尺寸下的計算結果，可以發現在螺槳半徑（圖中虛線）內部，實船尺寸的螺槳跡流在角度方向較不均勻，這代表當螺槳轉動時，葉片表面的壓力隨旋轉角度而產生之變化將會較大，螺槳的振動噪音也會略大於模型尺寸之情形。

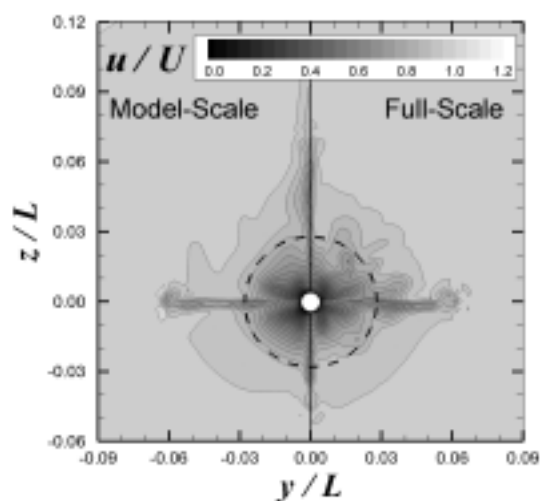


圖 26 潛艦螺槳平面之軸向流速分布

6.2 潛艦帆罩之渦漩流場

除了上述的螺槳跡流外，當潛艦相關附屬物所造成的渦漩進入螺槳區域時，也會造成螺槳的振動噪音，此部分以潛艦帆罩所引發的渦漩最為重要。基本上，潛艦帆罩是一個凸出於船體外的物體，當流體通過這種凸出物時，會產生複雜的渦漩流場，稱為髮簪形渦漩（hairpin vortex），從圖 27 中 Tufo 等人[14]針對半球形凸出物的 CFD 計算結果便可看出，潛艦帆罩等凸出物會對後方的流場，造成很大的影響。髮簪形渦漩是由兩個部分所組成，第一個部分是流體繞過凸出物上方所造成的垂向渦漩，然而由於柴油潛艦的帆罩頂端與螺槳之間具有一定的垂向距離，舉 209 型潛艦為例，兩者的垂向距離約為 5.85 公尺，因此這個垂向渦漩應不會對潛艦螺槳造成太大的影響。至於另一個渦漩則是發生於帆罩與船體之間的連接點前方，稱為接面渦漩（junction vortex），由於此渦漩發生於船體表面，因此容易流入螺槳區域，是造成螺槳噪音的一個重要因素。

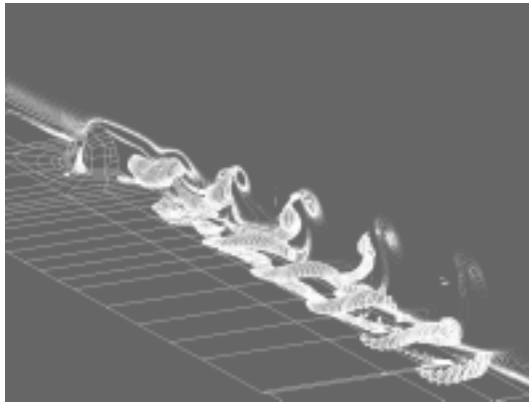


圖27 半球形凸出物後方之髮簪形渦流[14]

接面渦流的發生機制如圖 28 所示,圖中的底部區域是物體表面,由於邊界層的效應,因此會有一組水平方向的低速區,然而在圓柱的前方,則會因為停滯點或者是圓柱表面邊界層的緣故,產生另一組垂直方向的低速區。當流體往圓柱處流動時,底部區域(水平邊界層內)的流體一直都在低速區內,速度並無顯著的改變,然而上層區域(水平邊界層之外)的流體則會由高速區流至低速區(停滯點或垂直邊界層內),由於水平邊界層內外流體的速度變化不同,因此會在圓柱前方產生向下的流速,並且產生一個渦流,這就是接面渦流。接面渦流在障礙物的前方產生後,會由兩側繞過障礙物,因為其移動路徑接近馬蹄鐵之形狀,所以也稱為馬蹄形渦流(horseshoe vortex)。根據 Praisner [10]的量測結果,接面渦流的架構如圖 29 所示,除了一個主要的渦流之外,還會在主要渦流的前方,產生次要的渦流結構。

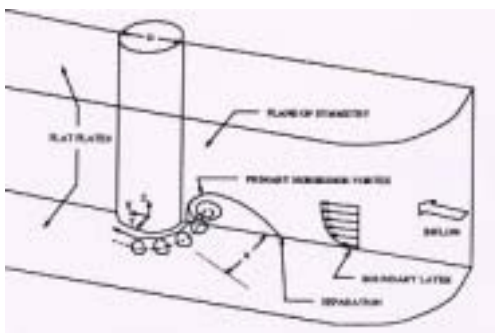


圖28 接面渦流的發生機制

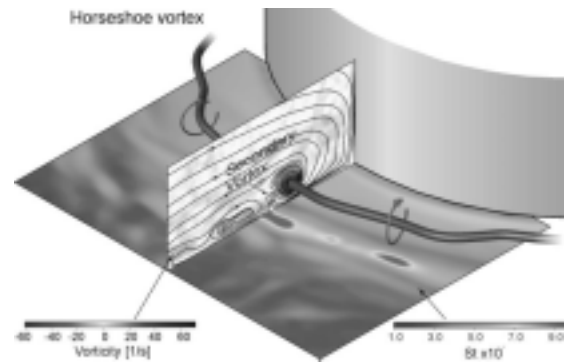


圖 29 實驗量測所得之接面渦流架構[10]

6.3 整艘潛艦之帆罩接面渦流

在本研究的潛艦流場計算結果中,也能夠看出潛艦帆罩接面渦流的存在,實船尺寸與模型尺寸下的接面渦流分別繪於圖 30 與圖 31,圖中右側是潛艦帆罩,底部是潛艦船體,圖中所繪的是中央對稱面上之速度向量,即與圖 41 中相同位置之平面。根據三維翼葉端渦流的數值計算經驗[20],在渦流中每一個軸向的網格點必須高達 20 點,甚至 30 點以上,CFD 之計算結果方能夠達到定量分析所需之準確度。由於接面渦流在空間上的尺寸極小,即使本研究使用了 400 萬點的計算網格,仍然無法在接面渦流內分佈足夠的網格點,在主要渦流中,每一個座標軸方向上的網格點不到 10 點,因此本研究只能對接面渦流進行定性上的探討,無法進行定量分析。在本研究的計算結果之中,除了主要渦流之外,在其前方也可以約略看出次要渦流的存在,與實驗量測所得[10]的接面渦流架構大致相符。由於接面渦流是由於邊界層效應所引起,因此雷諾數對於接面渦流將會有所影響,比較圖 30 與圖 31 可以發現,在實船尺寸(高雷諾數)下接面渦流的尺寸略小,這因為接面渦流是由邊界層內外的速度差所引起,在高雷諾數時邊界層的厚度較薄,接面渦流的尺寸自然也較小。

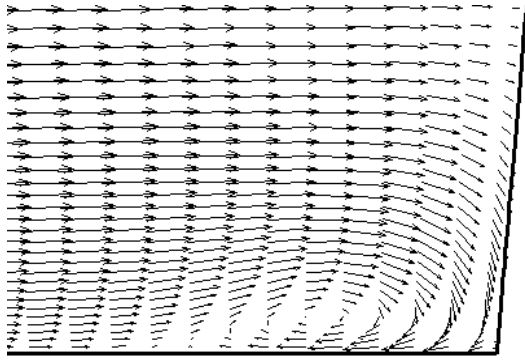


圖30 潛艦帆罩之接面渦漩（實船尺寸）

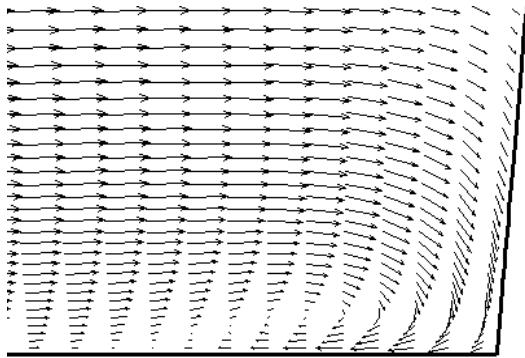


圖31 潛艦帆罩之接面渦漩（模型尺寸）

6.4 單獨帆罩之接面渦漩

由於目前無法在整艘潛艦的流場解析中，分佈足夠密度的網格點，因此，本研究進行了簡化外形的接面渦漩解析，只解析單獨帆罩的接面渦漩。如圖32所示，實船尺寸之209型潛艦帆罩安裝於一個平板之上，藉此解析帆罩前緣的接面渦漩特性。本研究利用一組200萬點之數值網格，以CFD方法進行單獨帆罩之接面渦漩計算分析，根據三維翼葉端渦漩的數值計算經驗[20]，此網格之密度已經達到準確解析渦漩流場的標準。

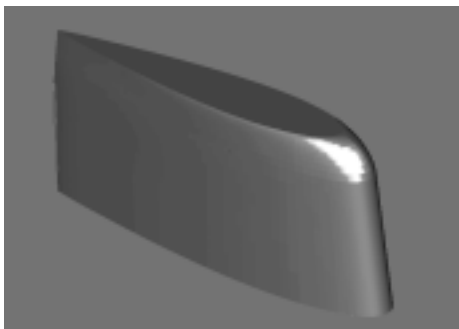


圖32 單獨帆罩接面渦漩之計算

由於接面渦漩可以透過局部外形的調整來加以改善，然而若是船速對接面渦漩有顯著的影響，則針對某一特定船速所產生的最佳帆罩外形，在其他船速時可能無法有效地改善接面渦漩，甚至可能會產生反效果。因此，在研究接面渦漩的抑制方法之前，必須先確定潛艦航行速度是否會對接面渦漩造成明顯的影響。在不同潛艦船速下，帆罩接面渦漩之計算結果分別繪於圖33至圖36之中，這些圖中的長度是以帆罩長度進行無因次化，為了能夠清楚地顯示出接面渦漩，圖33至圖36中並未顯示所有網格點的速度向量。比較圖33至圖36中的結果可知，潛艦航行速度並不會對帆罩接面渦漩產生明顯的影響，因此，針對巡航速度所設計的接面渦漩抑制機構，在其他船速時也會有良好的效果。

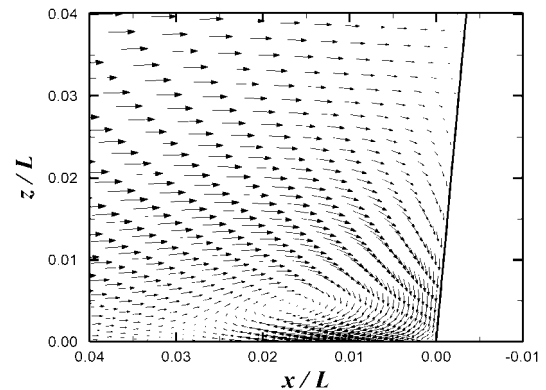


圖33 船速4節之帆罩接面渦漩

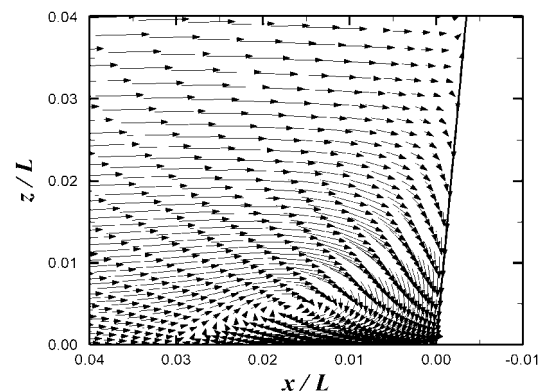


圖34 船速8節之帆罩接面渦漩

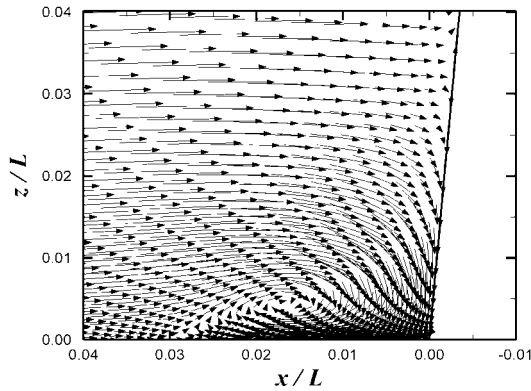


圖35 船速12節之帆罩接面渦旋

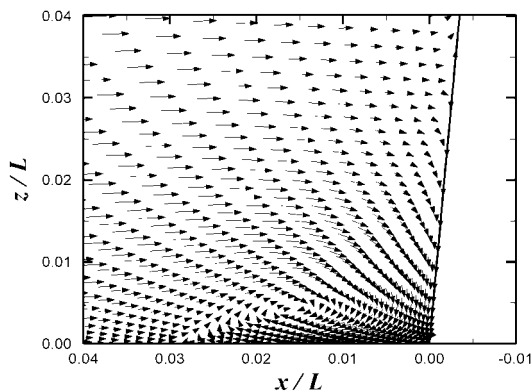


圖 36 船速 22 節之帆罩接面渦旋

7. 計劃成果自評

本研究將潛艦阻力推進領域的初步研究成果做了整理與分析，首先針對德國 209 型與其同系列柴油潛艦的構造圖，仿製出 209 型潛艦含帆罩與控制翼的幾何外形，並進一步利用 CFD 方法研究潛艦之紊流場。

在潛艦阻力性能方面，發現在實船尺寸雷諾數下，潛艦的形狀因子較模型尺寸下之值大，此外，帆罩對於柴油潛艦的阻力具有一定程度的影響，可以藉由調整帆罩外形來降低阻力。在螺旋槳之推進性能方面，七葉高歪斜螺旋槳具有葉端減荷的效果，但是其外形參數仍然需要進一步的調整，方能得到理想的負荷分佈。在潛艦的艤跡流方面，本研究發現實船尺寸下的艤跡流較模型尺寸下更不均勻，如此對於螺旋槳振動導致噪音的抑制更為不利。在潛艦帆罩所造成的渦旋流場方

面，本研究計算所得的接面渦旋結構大致與實驗量測結果相符。

參考文獻

1. Björheden, O., "The Advantages of a High Skewed Controllable Pitch Propeller", Naval Architect, No.3, 1979, pp.105-107.
2. Bruzzone, D., Cassella, P., Miranda, S., Pensa, C., Zotti, I., "The Form Factor by Means of Multiple Geosim Model Tests", Proc. NAV'97, International Conference on Ships and Marine Research, Sorrento, Italy, 1997.
3. Chang, H. Y., Tsai, J. J., Shen, C. Y., Huang, K. C., Chou, C. Y., "The Use of PC Cluster in Scientific Computing", 6th National Conference on Computational Fluid Dynamics, Tai-Tung, 1999.
4. Chau, S. W., Chen, Y. J., Kouh, J. S., "Parallelization of a RANS Code for Computing Hydrofoil Flows on a PC-Based System", 7th National Conference on Computational Fluid Dynamics, Ping-Tung, 2000.
5. Chau, S. W., Kouh, J. S., Chen, Y. J., "Speed-Up of CFD for Marine Industry Using PC-Cluster", Proc. New S-Tech, Kobe, Japan, 2002.
6. El Moctar, O. M., "Numerical Computations of Flow Forces in Ship Maneuvering", Ship Technology Research, Vol. 48, 2001, pp. 98-123.
7. Elizabeth, M. D., "Static Stability Characteristics of a Systematic Series of Stern Control Surfaces on a Body of Revolution", David W. Taylor Naval Research and Development Center Bethesda, Report 77-0085, 1977.
8. Johnston, P. F., "The Taming of the Screw", National Museum of American History, 2000.
9. Kasahara, Y., Masuda, S., "Verification of Simulated Flow Field around Ships by

- Using CFD Code”, 3rd Osaka Colloquium Advanced CFD Applications to Ship Flow and Hull Form Design, Osaka, Japan, 1998.
10. Praisner, T. J., “Investigation of Turbulent Juncture Flow Endwall Heat Transfer and Flow Field”, Ph.D. Thesis, Lehigh University, 1998.
 11. Richardson, L. F., “The Approximate Arithmetical Solution by Finite Differences of Physical Problems Involving Differential Equations with an Application to the Stresses in a Masonry Dam”, Transaction of Royal Society London Series A, Vol. 210, 1910, pp. 307-357.
 12. Söeding, H., Tonguc, E., “Archimedes II - A Program for Evaluating Hydrostatics and Space Utilization in Ships and Offshore Structures”, Ship Technology Research, Vol. 36, No. 2, 1989, pp. 97-104.
 13. Tahara, Y., Longo, J., Stern, F., “Comparison of CFD and EFD for the Series 60 $C_B=0.6$ in Steady Drift Motion”, Journal of Marine Science and Technology, No. 7, 2002, pp. 17-30.
 14. Tufo, H. M., Fischer, P. F., Papka, M. E., Blom, K., “Numerical Simulation and Immersive Visualization of Hairpin Vortex Generation”, Supercomputing Conference, Portland, U.S.A., 1999.
 15. 金尚聖、郭真祥、陳彥均、趙修武, “以非穩態 CFD 方法模擬單獨螺槳實驗之研究”, 第 15 屆中國造船暨輪機工程研討會, 高雄, 2003。
 16. 邱逢琛、陳宣宏, “軸對稱潛體流體動力係數之模型試驗分析”, NTU-NAOE-Tech. Report 487, 1995。
 17. 周朝宜、黃國展、鄭守成、張西亞, “高效能電腦叢集在計算流力的應用”, 第 8 屆全國計算流體力學學術研討會, 宜蘭, 2000。
 18. 郭真祥、陳彥均、史貴竹、王勝明、陳昭銘, “網路環境之船舶靜水性能與穩度計算系統的開發”, 第 15 屆中國造船暨輪機工程研討會, 高雄, 2003。
 19. 郭真祥、韓卓軒, “螺槳三維幾何模型建立方法改進之研究”, NTU-NAOE-Tech. Report 680, 2001。
 1. 黃正利、蔡進發、陳紀川, “翼端渦漩流場數值解析”, NTU-NAOE Tech. Report 677, 2001。