

邀 稿

計算流體力學在評估船舶水動力性能上之應用

林 正 文

美國海軍水面戰情中心

關鍵詞：計算流體力學、船舶水動力、數值模擬

摘 要

本文將應用於評估船舶流體特性的計算流體技術進行重點式的回顧，並對於描述船舶流體特性相關的數學方程式做一簡要的敘述與分類，藉由瞭解其分類原則而對運用不同數學方程式而產生的數值方法能有一初步的認識，尤其是所代表的重要物理意義及其應用上之限制；文中對馬力需求、波浪中之運動性能及操縱性能等三個領域所採用之數值方法的發展現況及實際應用的情形加以說明，並探討未來計算流體力學在船用水動力上的發展趨勢與研究重點。

前 言

雖然以數值方法來模擬流體力學的現象已有很久的歷史，計算流體力學的發展一直要到1980年代初才開始有明顯而快速的進步(這一方面正與電腦的進步及普及化時間相當一致)；歷經了這三十年的演進，研究將計算流體力學應用於船舶流體特性之分析與評估的發展工作，也已經累積了許多重要的成果，由於這些數值分析的方法與技術目前已經普遍地應用於船舶設計的實務工作中，計算流體力學的影響業已深遠到改變了整個船舶設計的流程。以往在船舶設計尤其是新船型的線形開發過程中，船舶流體特性的評估大多要仰賴船模試驗所提供的數據，現在許多重要的流體特性已經可以經由適當的數值分析技術而獲得，而這些參考資料與船模試驗的結果又可以相互佐證運用；由於設計人員擁有了這些能驗核其設計概念的方法與工具，使得其有更大的自由度來發揮自己設計的創意，因此在相同的時間內，造船工程師更有機會與把握創造出性能優異的船舶。

在這篇文章中，作者嘗試以一個船舶領域研究人員的觀點，將應用於評估船舶流體特性的計算流體技術進行重點式的回顧，首先是對於描述船舶流體特性相關的數學方程式做一簡要的敘述與分類，並且藉由瞭解其分類原則而對運用不同數學方程式而產生的數值方法能有一初步的認識，尤其是其所代表的重要物理意義及其應用上之限制；不同的流場現象固然需採用不同的數值方法來進行評估，同樣的流場現象亦可選擇不同的數值技巧方法來進行分析，其所依循的原則是需求的精確度與計算所耗費資源之間的平衡。如果以應用的領域來區分則可分為馬力需求、波浪中之運動性能及操縱性能三類，文中對各個領域所採用的數值方法的演進歷程、發展現況及實際應用的情形都會加以說明，最後也會探討未來計算流體力學在船用水動力上的發展趨勢與研究重點。

數值計算方法

在評估船舶的流體動力性能時，流場現象可以兩種不同的數學公式而進行說明，一為勢流(Potential flow)流場，而另一種則為黏性流

(Navier-Stokes Flow)流場。勢流流場為黏性流流場在假設流體沒有黏性(inviscid)、沒有壓縮性(incompressible)及具有非旋性(irrotational)時的簡化版本，在這些假設條件下，原本描述流場現象的控制方程式就簡化成爲Laplace方程式 $\Delta\phi = 0$ ，由於Laplace方程式爲線性方程式，再配合上適當的線性化邊界條件，整個流場的現象就可以求解邊界值問題(boundary value problem)的方法來進行計算；由於此類邊界值問題屬於古典的數學問題，應用數學家亦分析出許多型式優美的數學解析解，例如Wehuasen與Laitone[1]所推導出包含自由液面效應的解析解就一直影響著後續數值分析方法的發展，這些滿足線性化邊界條件的數學解析解稱爲格林函數(Green Function)，一般格林函數型式都相當複雜而不容易計算，必須採用特殊的數值技巧來處理，其中針對興波阻力(wave-making resistance)問題所顯現的格林函數而推導發展成爲Havelock源點(Havelock Source)法，其發展及應用的歷史相當久遠，而相關參考文獻亦非常完整[2][3]。在勢流計算領域中的另一方向則是採用簡化之格林函數，稱爲Rankine源點(Rankine Source)，發展出其他的數學計算模式[4][5]，以避開計算Havelock源點所遭遇的困難。然而，此種數學模式的問題在於如何滿足所需的自由液面邊界條件。Dawson[4]在自由液面邊界上再分布一組的小板，以四階上風差分法計算滿足自由液面邊界條件的限制條件。此外，亦有其他學者使用不同的數值技巧成功的分析了考慮自由液面的流場計算工作[6][7]。

涅維爾-史托克(Navier-Stokes)方程式是一組完整描述船隻周圍流體黏性效應的數學方程式。這組方程式除了在非常簡單的流場外，解析解幾乎是無法求得的，但是其數值解是可以求出的。近年來，電腦科技的蓬勃發展帶動了解決涅維爾-史托克方程式的相關數值解析方法的進步。所謂狹義的計算流體力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)即是基於求解涅維爾-史托克方程式所衍生出的數值計

算應用技術。在評估船隻的流體動力特性方面，黏性流計算扮演了相當重要的角色。然而，在評估船隻的流體動力特性時，黏性流計算並不是唯一可以使用的工具。勢流計算的結果也可以提供評估船隻性能所需的相關資訊。兩種方法相較之下，黏性流計算需要耗費更多的時間與精力。因此，對於船用流力的應用而言，對於勢流計算及黏性流計算的本質充分了解是相當重要的。

將求解涅維爾-史托克方程式的數值技術應用在評估船隻的流體動力特性時有些特質是需要特別注意的，例如船舶周圍的流場假設流體是不可壓縮的，但大多數用於求解涅維爾-史托克方程式的數值模式都是在可壓縮流的條件下發展出來的，因此數值模式就需要進行修改，一種被稱爲人工壓縮係數[8]的數值技巧就架構於可壓縮流的數值模式[9]上，成功地解決了不可壓縮流的流場問題。

不同的數值計算模式，自然便發展出不同的電腦計算程式，但在研發過程中有兩項重要的考慮因素是必須確認的，一是數值方法的準確性，另一是數值解的收斂性。一般而言，大多數廣泛應用的數值模式都經過上述兩點的驗證。因此，在評估船隻的流體動力特性時，採用何種數值模式應以運用範圍爲考量重點，數值計算技巧本身的優劣比較倒不需多加討論。進行黏性流流場的數值模擬時，要達到計算的準確性重點則是網格的品質以及紊流模式的優劣。在以數值方法求解涅維爾-史托克方程式時，必須先將計算區域離散化，因此需建立一組包圍船體表面的三維網格。當船艏形狀複雜或船隻具附屬物時，網格的建立就變得相當複雜且困難。這是相當耗費時間的工作，且若產生的網格品質不佳，計算的準確性也會因此而受到影響。目前黏性流的計算以紊流流場的應用爲主，絕大部分的控制方程式則是採用雷諾平均化的涅維爾-史托克方程式(Reynolds Average Navier-Stokes Equation, RANS)，由於採用時間平均化的方式求解，就需要以紊流模型來描述流場中的細微紊流現象，直至今日，

對於進行船舶的流體動力性能的計算所應該採用的紊流模型仍然存在很大的爭議，這部分相關的研究一直在持續中，在短時間內應該還不會有定論。另一方面，不採用紊流模型而直接模擬紊流流場(direct simulation of turbulent flow)的計算法目前仍處於起步期而離實用的階段還有相當的距離。

船舶水動力性能評估

將計算流體力學應用於船舶流體特性的分析評估上的發展工作在這幾年進展快速，也已經累積了許多重要的成果，雖然現今船舶線型的設計工作仍以船模試驗所提供的數據作為研判船舶流體特性的標準，以計算流體力學為基礎之數值方法的地位亦愈來愈重要，以應用的領域來區分則可分為馬力需求、波浪中之運動性能及操縱性能三類，各個領域所採用的數值方法與處理技巧自然存在著部分差異，有的較為簡易而容易計算，有的相形之下就屬於複雜而難解，因此各個數值方法的發展現況及實際應用的情形都有所不同，以下就對計算流體力學應用於船舶流體特性的評估工作依類別加以說明。

馬力需求

估算船舶的馬力需求必須進行兩項工作，一為船舶阻力的預估，而另一部份為推進效率的評估。

就阻力預估的部分，可以直接求解涅維爾-史托克方程式而計算不考慮自由液面效應下的潛體總阻力，相關數值技巧的發展已經有相當的基礎，而對裸船殼(bare hull)阻力的計算精度亦已達到一定的水準[10]，例如表1為計算軸對稱體阻力的數值結果及其與試驗值之比對；至於考慮附屬物(appendage)的船殼阻力計算則需要比較好的幾何處理能力以產生適當的計算網格，另外搭配的紊流模型對模擬結果亦有重要的影響，這些細緻的數值技巧一直在持續發展與進步中，其中組合式網格系統就是一種處理複雜幾何的技巧[11](圖1)。

至於水面船舶的阻力預估，尚有一重要的成分需要評估，也就是興波阻力的計算工作，

表1 軸對稱體於零攻角下阻力的數值結果及其與試驗值之比對

L/D	計算值($\times 10^{-3}$)			試驗值($\times 10^{-3}$)	
	C_{vp}	C_f	C_D	C_D	差異(%)
4	0.746	2.467	3.213	3.208	0.2
5	0.431	2.517	2.948	2.988	1.3
6	0.354	2.504	2.858	2.848	0.4
7	0.257	2.504	2.761	2.758	0.1
8	0.199	2.492	2.691	2.718	1.0
10	0.132	2.497	2.629	2.703	2.7

以往考慮自由液面效應的流場多是以勢流流場進行模擬與計算，這部分的研究與發展相當完整，無論是採用Havelock源點法[2][3]或是採用Rankine源點法[4][5]，都能找到相當豐富的參考文獻。由這二十年的發展趨勢及實際應用的情形來說，採用Rankine源流為基本函數的小板法(panel method)逐漸已為興波阻力計算法的主流，而且由於其擴展性較不受限制，許多以迭代技巧(iterative scheme)處理非線性自由液面邊界條件[7]的實用計算法也已經真正應用於船舶設計的工作中。

理論上，如果一開始就求解涅維爾-史托克方程式而且將自由液面條件亦列入邊界條件，數值計算所得的阻力自然就是包含興波阻力在

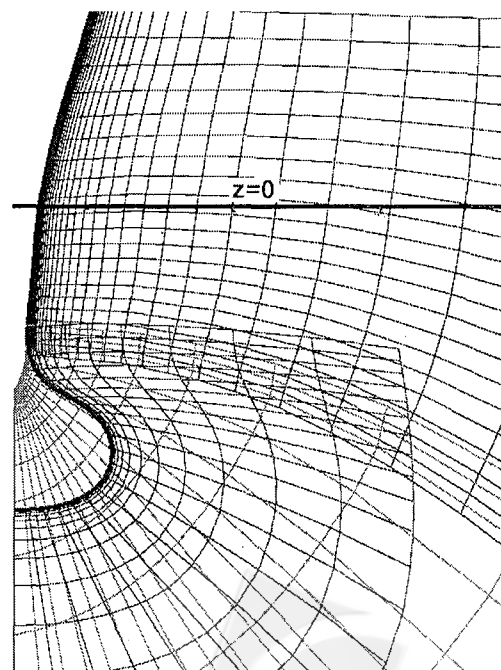


圖1 典型自由液面黏性流計算所採用的組合式網格系統

內的船舶總阻力，由於控制方程式已將流體的黏性效應與流場的自由液面效應完整的考慮進去，模擬的流場亦應該比較接近真實的船舶流場，自由液面黏性流計算法亦應該是比較適合做為船舶總阻力的數值分析工具；但是由於自由液面邊界本身就是流場未知條件的一部份，如何處理自由液面邊界條件就成為黏性流計算法中最有變化的一部份，例如VOF(Volume Of Fluid) 法、boundary fitting法與level set[15]法等數值技巧都有其各自的擁護者，雖然自由液面黏性流計算法這幾年進步很迅速，但是由於處理自由液面邊界的困難度，這類計算法精度仍嫌不足，而且當流場內由行進中的船舶所產生自由表面波也要正確的模擬時，自由液面上計算範圍(computational domain)與網格解析度(grid resolution)的限制亦較不考慮自由液面效應時嚴格許多，兩者對進行數值計算所需的電腦資源造成沉重的負擔。

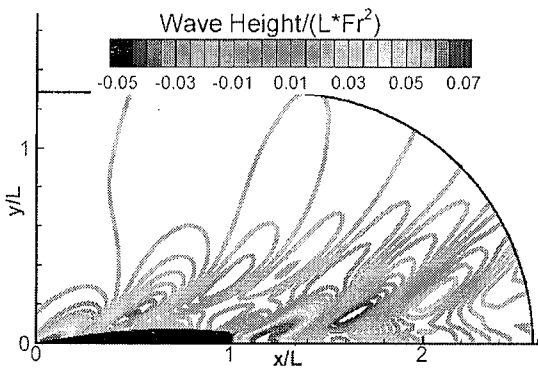


圖2 DTMB Model 5365自由液面黏性流之表面波形計算結果(Fn=0.35)

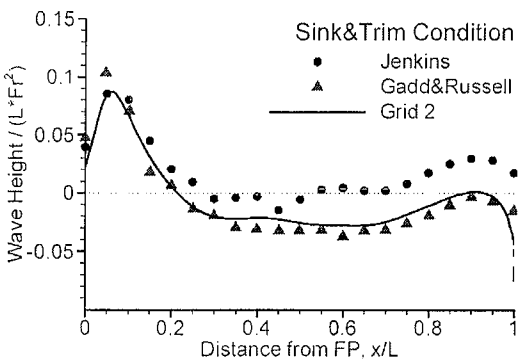


圖3 DTMB Model 5365船側波形計算值與試驗數據之比較(Fn=0.35)

在靜水中定速前進的船舶，於不同的船速下亦會達到與靜止狀態時不同的航行姿態(sinkage and trim)，進而引起船舶阻力的改變，由於一般的船模阻力試驗並不限制模型的垂向運動量，因此船模試驗忠實反映了航行姿態的變化以及對應的船舶阻力，所以模擬計算中亦應該具備考慮航行姿態變化的能力，否則數值計算就只能與拘束船模(captive model)阻力試驗相比對，實用性亦大為降低了，圖2及圖3為以DTMB Model 5365為研究對象，於Fn等於0.35時自由液面黏性流計算結果[14]。目前勢流與自由液面黏性流兩種計算法皆能以力平衡的條件迭代計算出航行姿態的變化，與船模阻力試驗的數據相比，趨勢也相當一致(表2至表4)；由於考慮航行姿態的變化涉及自由液面邊界與船殼交界面的變化，在自由液面黏性流計算法中數值技巧的難度較勢流計算法要高出許多。

表2 DTMB Model 5365在無束縛狀態下總阻力計算值與試驗數據之比較

Froude No.	C _T x 1000	
	試驗值	計算值
0.28	5.531	5.432
0.35	5.030	5.020
0.48	5.774	5.516
0.65	4.924	3.962

表3 DTMB Model 5365在無束縛狀態下沉量計算值與試驗數據之比較

Froude No.	$\Delta T_m/L \times 100$	
	試驗值	計算值
0.28	0.105	0.135
0.35	0.200	0.209
0.48	0.245	0.389
0.65	0.095	0.251

表4 DTMB Model 5365在無束縛狀態下伏仰角計算值與試驗數據之比較

Froude No.	$(\Delta T_f - \Delta T_a)/L \times 100$	
	試驗值	計算值
0.28	0.060	0.224
0.35	0.095	0.392
0.48	1.240	1.249
0.65	1.760	2.250

誠如本節一開始的說明，估算船舶馬力需求的第二項工作為推進效率的評估；勢流計算法在分析推進器效能的工作上早已是成熟的設計工具，尤其在計算單獨螺槳在均勻入流狀態下的效能(open water performance)方面已經幾乎取代了部分模型試驗的功能，而以黏性流計算法進行評估螺槳在均勻入流狀態下效能的研究工作也已有了初步的成果，有些已經能模擬出葉尖渦(tip vortex)及艀部渦(root vortex)的生成現象，也可以計算出勢流計算法無法模擬的流場現象，但是由於螺槳的幾何形狀十分複雜，產生計算網格的難度很高，研究人員們還處於摸索的過程中，所以黏性流計算法在這部分的應用仍未達到實用的階段。

另一方面，由於推進效率是船艏部流場與推進器之間交互作用造成的結果，而船艏流場受到流體黏性的影響很大，勢流計算法並不適合做為評估推進效率的數值方法。在進行自推實驗模擬時，通常採用黏性流計算，並將真實螺槳幾何以作動圓盤(actuator disk)模型取代[16]，在計算中以船體流場加入考慮螺槳作動之物體力(body force)模擬自推實驗，藉以評估船舶推進效率。聯設中心亦發展出一套結合螺槳勢流計算及船舶周圍三維黏性流計算的自推實驗數值模擬程式[17]，以螺槳勢流計算獲得的等效物體力(equivalent body force)以調整螺槳轉速的方式平衡螺槳推力與船模阻力，獲得螺槳在船艏跡流中作動時的各項推進參數，成功地模擬自推實驗。

波浪中運動性能

1971年Salvesen等人[18]運用二維截片法(Two-Dimensional Strip Method)解析波浪中之船舶運動，此數值技巧以勢流理論計算船體二維斷面流體動力，進而求解船舶運動量，於傳統船型之耐海性能分析，可獲致不錯之計算結果。而後續發展之細長體理論(slender body theory)，將原本侷限於二維之流場計算推展至三維空間中的流場計算。隨著科技日新月異，電腦運算能力不斷提昇，三維小板法(Three-Dimensional Panel Method)於船舶運動分析上

之應用及發展漸趨於成熟，運用小板分佈之技巧，可具體有效處理船體線型，而其流體動力之求解上，依其小板分佈方式之不同，可區分為採用包含自由液面效應的解析函數為基本流函數的格林函數法(Green Function Approach)及Rankine源點法(Rankine Source Approach)，現階段格林函數法發展上，以三維平移脈動源點(Translating-Pulsating Source)於頻域中進行計算為其主要的方向[19]，而Rankine源點法之發展主要著眼於船舶興波阻力之估算，然亦可擴展運用至船舶耐海性能之推估[20]。一般而言，在船舶小振幅運動量預估上，二維截片法之運算快速，已可提供合理、良好的估算，而三維小板法的計算，耗時費力，其估算結果與二維法相較，並無明顯差異，故三維小板法之計算應較適用於大振幅運動量估算上。

近來，雷諾平均化湍維爾-史托克方程式(RANS)於船舶運動計算上的應用[21]，已進入初期開發階段。眾所週知，除橫搖運動反應外，大部分之波浪中船舶運動分析上，皆可透過勢流理論來加以解析，並獲致合理之結果，而RANS之流場計算所耗費之運算量，即使相較於三維勢流理論之計算，仍顯得相當可觀，雖可透過平行運算技術之引進，可有效縮短計算所費時間，然應用RANS流場計算於船舶運動估算上，其運算時間仍嫌過長，尚無法達到工程實用之階段，然而，為能改善橫搖運動之估算，RANS計算可提供明確之橫搖值估算[22]。在可預期的未來發展，藉著RANS計算及三維小板法之結合，可更為合理估算、分析船舶在波浪中之運動反應。

操縱性能

由於船舶在進行操舵航行時，船體與周圍流場交互作用相當複雜，因此評估船舶操縱性能本來就是一項具有相當難度的工作，尤其當船隻以操控裝置進行非穩定的操縱運動(unsteady maneuver)時，其引起的流場現象更形複雜，使得發展以數值模擬做為評估操縱性能方法的工作更具有挑戰性。目前探討船舶操縱性能是由研究標準的運動方程式開始著手，這組

六自由度的運動方程式係由牛頓運動定律推導而得，方程式中將所有的力和力矩表示成爲各種流體動力係數的形式，由於處理運動方程式本身並不需要特別艱難的數值技巧，求解這些流體動力係數就成了評估船舶操縱性的主要工作。傳統上，必須以進行特殊船模試驗[24]的方式來量測這些流體動力係數，但由於這些船模試驗必須耗費大量的時間與費用，因此在一般商船的設計流程中，並不考慮以這樣的方式進行船型設計；僅有部分特定的軍用艦艇才可能需要進行這些試驗，藉以獲得詳細的流體動力係數，進而據以評估其操縱性能。

近年來，計算流體技術的進展使得運動方程式中的流體動力係數可以用數值計算的方式求得。計算上通常採用考慮流體黏性效應的RANS方程式爲流場控制方程式，模擬特定的船模試驗狀態，計算出相關的流體動力係數。

舉例來說，斜航試驗可以由固定入流攻角的計算方式模擬[11]，流體動力係數即可由計算出的力和力矩而求得，圖4爲一裝有控制翼面的水下潛體，圖5爲考慮不同控制翼面之外型示意圖，圖6爲各種組合下數值模擬與斜航試驗的數據之比較。

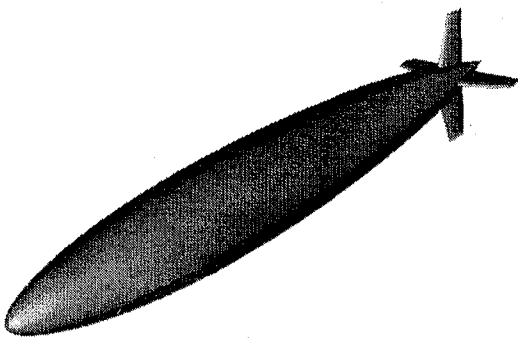


圖4 裝有控制翼面的水下潛體

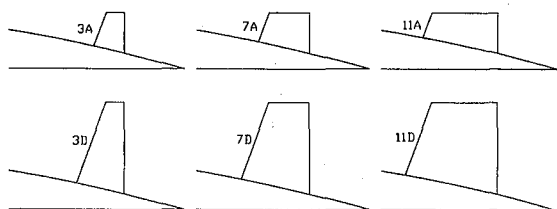


圖5 不同控制翼面之外型

其他兩項主要的實驗，迴旋臂(rotating arm)及平面運動裝置(planar motion mechanism)，也可以仿照上述的方式以黏性流計算模擬之。一般而言，上述這些數值模擬計算的結果尚稱合理。舉例來說，計算流體的模擬結果與斜航試驗的數據在攻角小於十度時相當一致，但是在角度大時，例如十六度，數值計算的誤差就會加大。由於計算流體的技術，一直不斷在進展中，因此未來以數值計算的方式來求得流體動力係數應是一個相當可行的方法。

在評估船舶操縱性能時，另一個重點是船隻在不使用操控裝置時的直進穩定性(control-fixed stability)。船舶運動穩定性的不等式可由線性的穩定性分析[24]推得，並作爲船隻航行軌跡穩定性的評估依據。船舶穩定性不等式中的流體動力係數以及船舶的迴轉半徑同樣可由計算流體的方式求得，在設計初期作爲船舶運動穩定性的評估工具，以及輔助控制翼面的設計工作。

對一般的船舶操縱運動而言，分析運動方程式的方式已經足以擔當評估船舶操縱性能的工作；但是對劇烈的操船運動(extreme maneuver)而言，流場狀態隨時在變化，作用在船體上的流體力也一直在變動，爲掌握船隻的即時狀態，必須採用時間域的數值模擬計算法。但由於這樣的數值極爲耗時，所涉及的流體動力現象又相當複雜，如何以數值模擬反應真實流場的特殊行爲十分困難，結果亦不容易達到要求的精確度，計算的難度相當高。現有的數值模擬方式多架構在儲存有各種船模及實船測試數據的資料庫之上，由於此種模擬方式僅針對單一船型而發展，並無法應用於一般設計評估工作，但可用於開發操船訓練的模擬系統。近年來，一種被稱爲以物理現象爲基礎的模擬法(Physics-based simulation)的新方法正在發展中，希望建立一套不需要量測資料庫就可以評估船舶操縱性能的方法，要達成上述的目標當然就必須藉助數值計算法的幫助；目前有幾種發展中的數值方法也值得注意，例如渦流法(vortex method)[25]應用了勢流計算中的昇力

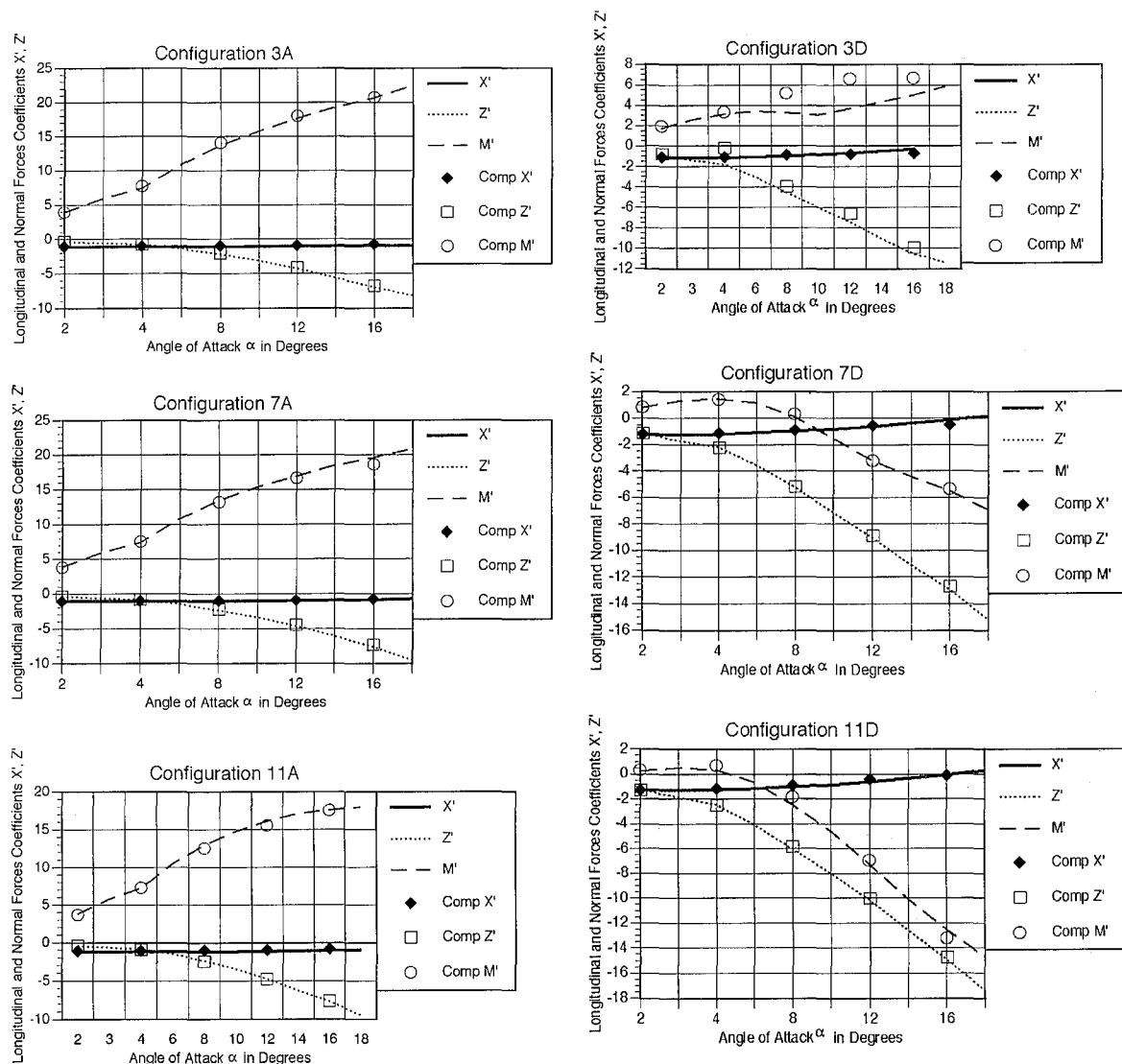


圖6 各種組合下數值模擬與斜航試驗的數據之比較

理論，同時配合了一些試驗資料做為修正，在小角度的操縱運動的數值模擬上也獲致了一些不錯的成果，但對於劇烈的操船運動模擬，最終仍是需要引入Navier-Stokes方程式的計算，而這些數值模擬的方法，在這幾年內應該會有相當快速的進展。

結 論

船舶流力特性的評估工作以往必須要仰賴船模試驗所提供的數據，現在以先進的計算流體力學為基礎之數值方法在近年來亦已有了重要的進展，已經達到足以作為船型開發的輔助工具的程度；造船工程師在這兩種能驗核設計

概念與創意的工具之交互運用與協助下，一定更能設計出性能優異的船舶。

本文首先將應用於評估船舶流力特性的計算流力技術進行重點式的回顧，由於觀察的流場重點不同，當然採用的數學方程式及其所衍生的數值方法也存在著明顯的差異，藉由瞭解這些數值方法的發展背景，尤其是其所代表的物理意義及其應用上之限制，相信對如何適當而有效的運用這些數值評估技術會有很大的幫助；文中對於各個領域所採用的數值方法的發展現況及實際應用的情形亦有所說明，希望對有志從事計算流力研究或應用工作者能有所協助；雖然計算流力在評估船舶水動力性能上之

應用仍然存在著許多挑戰，尤其是定量上的精確度與電腦資源上的需求，但這些也就是未來計算流體力學的發展趨勢與研究重點，數值評估技術一定會不斷改進而且所扮演的角色也會愈來愈重要。

參考文獻

1. Wehausen, J.V. and E.V. Laitone, "Surface Wave," *Handbuch der Physik*, Vol.IX, Springer Verlag, (1960).
2. Newman, J.N., "The Evaluation of Free-Surface Green Functions", *4th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics* (1985).
3. Noblesse, F., W.M. Lin and R. Mellish, "Alternative Mathematical Expressions for the Steady Wave Spectrum of a Ship," *Journal of Ship Research*, Vol.34(3), pp.33-49 (1990).
4. Dawson, C.W., "A Practical Computer Method for Solving Ship-Wave Problems," *2nd International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics* (1977).
5. Jensen, G., Z.X. Mi and H. Soding, "Ranking Source Methods for Numerical Solution of the Steady Wave Resistance Problem," *16th Symposium on Naval Hydrodynamics* (1986).
6. Sclavounos, P.D. and D.E. Nakos, "Stability Analysis of Panel Methods for Free-Surface Flows with Forward Speed," *17th Symposium on Naval Hydrodynamics* (1988).
7. Raven, H.C., "Variation on a Theme by Dawson," *17th Symposium on Naval Hydrodynamics* (1988).
8. Chorin, A.J., "A Numerical Method for Solving Incompressible Viscous Flow Problems," *Journal of Computational Physics*, Vol.2, pp.12-26 (1967).
9. Ferziger, J.H., "Simulation of Incompressible Turbulent Flows," *Journal of Computational Physics*, Vol.69, pp.64-76 (1987).
10. Lin, C.W., S. Percival and E.H. Gotimer, "Viscous Drag Calculations for Ship Hull Geometry," *9th International Conference on Numerical Methods in Laminar and Turbulent Flow* (1995).
11. Lin, C.W., S. Percival and L. Fisher, "Validation of Computational Forces and Moments on an Appended Body," *International Maritime Association of Mediterranean IX Congress* (2000).
12. Nichols, B.D. and C.W. Hirt, "Improved Free-Surface Boundary conditions for Numerical Incompressible Flow Calculations," *Journal of Computational Physics*, Vol.8, pp.434-448, (1971).
13. Farmer, J., L. Martinelli and A. Jameson, "A Fast Multigrid Method for solving the Non-linear Ship Wave Problem with a Free Surface," *6th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics* (1955).
14. Lin, C.W. and S. Percival, "Free Surface Viscous Flow Computation around a Transom Stern Ship by Chimera Overlapping Scheme," *23rd Symposium on Naval Hydrodynamics* (2000).
15. Iafrati, A., A.D. Mascio and E.F. Campana, "A Level Set Technique Applied to Unsteady Free Surface Flows," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.35, pp. 281-297 (2001).
16. Stern, F., Y. Toda and H.T. Kim, "Computation of Viscous Flow Around Propeller-Body Configurations: Iowa Axisymmetric Body," *Journal of Ship Research*, Vol.35, No.2 (1991).
17. Chou, S.K., C.Y. Hsin, S.W. Chau and W. C. Chen, "Simulating the Self-propulsion Test by A Coupled Viscous/Potential Flow Computation," *Proceedings of Practical Design of Ships and Other floating Structures 2001*,

- (2001).
18. Salvesen, N., E.O. Tuck and O. Faltinsen, "Ship Motions and Sea Loads," *Trans. SNAME* 1971. (1971).
 19. Chan, H.S., "A Three-Dimension Technique for Predicting First and Second Order Hydrodynamic Forces on a Marine Vehicle Advancing in Waves," *Ph.D. Thesis*, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Glasgow (1990).
 20. Sclavounos, P.D., D.E. Nakos, and Y.F. Huang, "Seakeeping and Wave Induced Loads on Ships with Flare by a Rankine Panel Method," *6th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics* (1993).
 21. Sato, Y., H. Miyata, and T. Sato, "CFD Simulation of 3-Dimensional Motion of a Ship in Waves: Application to an Advancing Ship in Regular Heading Waves," *Journal of Marine Science and Technology*, SNAJ, (1999).
 22. Salui, K.B., T. Sarkar, and D. Vassalos, "An Improved Method for Determining Hydrodynamic Coefficients in Roll Motion Using CFD Technology," *Ship Technology Research*, Vol.47, pp.161-174 (2000).
 23. Abkowitz, M.A., "Lectures on Ship Hydrodynamics-Steering and Maneuverability," *Hydro and Aerodynamics Laboratory Report*, Hy-5, p.113 (1964).
 24. Mandel, P., "Ship Maneuvering and Control," *Principles of Naval Architecture*, Chapter VIII, SNAME (1967).
 25. Mendenhall, M.R. and S.C. Perkins, "Prediction of the Unsteady Hydrodynamic Characteristics of Submersible Vehicles," *4th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics* (1985).

CFD PREDICTIONS ON SHIP HYDRODYNAMIC PERFORMANCES

C.W. Lin

Naval Surface Warfare Center, USA

Keywords: *Computational Fluid Dynamics, Ship Hydrodynamics, Numerical Prediction*

ABSTRACT

In this paper, the CFD technology used in predicting ship hydrodynamics is reviewed in details. Fundamental mathematic formulations are described to understand the limitations of various CFD numerical prediction techniques. The computations of ship hydrodynamic performances can be carried out through different numerical methods. The importance is to evaluate those hydrodynamic performances with reasonable accuracy and computational effort. Three major hydrodynamic performances, ship powering, ship motion responses and ship maneuvering are investigated. The evolutions of various numerical prediction techniques are reviewed and the current status of their applications is described. The future development of CFD prediction technology in ship hydrodynamics is also discussed.

(Manuscript received Aug. 28, 2001,

Accepted for publication Feb. 22, 2002)

