



基於計算流體力學 CFD 之水下載具線型最佳化設計

江易秦／國立成功大學系統及船舶機電工程學系 研究生

洪翊菁／國立成功大學系統及船舶機電工程學系 研究生

邱睦翔／國立成功大學系統及船舶機電工程學系 研究生

蔡欣邦／國立成功大學系統及船舶機電工程學系 研究生

陳永裕*／國立成功大學系統及船舶機電工程學系 教授

在進行水下載具外型設計時需要考量到許多部份，包含能夠降低水阻的流線型外型、耐水壓結構、重心與平衡、防水密封及能源儲存分佈等項目。為了達成降低水阻力並提高水下載具運動效率以節省能源消耗，水下載具外型的設計必須透過流場分析來了解水下載具在各種航行條件下的受力狀態。為了完成此受力分析，本研究採用 ANSYS Fluent 軟體計算流體力學（Computational Fluid Dynamics, CFD）來進行載具流場模擬與受力分析。水下載具流場採用 CFD 模擬具備多項便利的分析優點。例如，CFD 模擬能夠評估不同外型的水下載具對流場的影響，包含流場壓力、流場速度、流場溫度及流體的力學特性等。透過調整各種的測試場景及操作條件，便能夠評估水下載具在不同場景中的性能變化。此外，CFD 模擬還提供了結構耐水壓的評估，以確認水下載具在不同場景中所承受相應的水壓。這有助於確保水下載具的結構在實際應用中的安全性和可靠性。總的來說，運用 CFD 除了有效節省實驗成本與時間外，同時能夠透過 CFD 模擬結果分析水下載具的操作性能變化，確保水下載具的整體航行性能及可靠度。本研究旨在運用 CFD 模擬進行水下載具外型設計分析，以取得外型最佳化設計，並獲取水下載具之系統模型參數供後續水下載具之控制系統設計。

關鍵詞：水下載具、最佳化設計、計算流體力學、網格細化

前言

本研究預計藉由水下載具線型設計，介紹運用 CFD 軟體進行模擬的流程。此次水下載具線型設計將參考現今服役之多功能型水下載具，如波音 Echo Seeker 以及瑞典紳寶集團（SAAB）-Double Eagle 系列遙控潛水器（ROV）-MKIII PVDS 等，作為主要參考對象，直接根據其外型進行相似性繪圖與流場分析。本研究將使用 ANSYS Fluent 軟體進行 CFD 模擬。研究目標則是透過數值研究來提高水下載具在特定航速下的最佳船體性能，例如：低阻力及高體積效率等。

最佳化水下載體性能的完成，最為重要的設計標的為水下載具所受到的阻力須盡量降低。因水下載具裸船阻力佔總阻力的 70% 左右，故本研究水下載具的線型效能分析將會著重於水下載具裸船外型與阻力間的關係建立。考慮到加工成本和難易度，且多數海軍潛艇及 ROV 皆使用 PMB 型^[1]，因此本研究以此船型方程式為基礎來拉伸圓柱狀 PMB 型水下載具，以達到相似外觀設計的需求。本研究經由改變水下載具方程式中的參數獲得不同的船體外型後，再針對船體進行流體力學模擬，以驗證水下載具在特定線形下之船體性能。本研究將使用 ANSYS Fluent 軟體內建之不可壓縮、三維且穩態的納維爾史托克方程式（Navier-Stokes Equation）來模擬流場環境，輔以 SST $k-\omega$ 模型產

* 通訊作者，yungyuchen@mail.ncku.edu.tw

生紊流，再透過有限體積法（Finite Volume Method, FVM）計算水下載具在水下運動時之受力情形。本計畫預計設計的水下載具外型規格參考對象為瑞典紳寶集團（SAAB）—Double Eagle 系列遙控潛水器（ROV）—MKIII PVDS：「長度 3 m、寬度 1.2 m 及高度 1.3 m」，如圖 1。



圖 1 SAAB Double eagle ROV-MKIII PVDS

由於此款水下載具於前端部分外加裝了偵搜水雷之聲納系統模組，安裝於水下載具船艙的模組會造成載具線型阻力的不易模擬分析，故於以下之研究介紹中將以平滑船艙代替。此款水下載具著重於模組化設計，為了增加艙體空間並兼顧阻力最佳化設計，採參考^[2]之水下載具的長寬比：7-10 為阻力長寬比，並選擇 PMB 水下載具長寬比 7 作為設計基礎做拉伸，以形成扁平化水下載具。

標準水下載具運動數學模型

為了完整描述及分析如圖 2 之水下載具於水中航行時所承受阻力之狀況及其穩定性。於此研究中，將採國際水下載具標準運動數學模型^[1]來探討此次預計開發之水下載具運動行為，設計完成後再進行實體加工製作與拖航水槽阻力實測驗證。此水下載具模型因水阻力係數的不同，其代表之載具外型也不同。

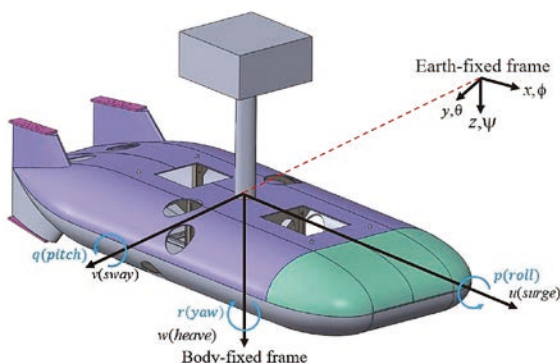


圖 2 水下載具位置與姿態說明

根據前文所定義的水下載具座標系統，可將水下載具的三維運動狀態變數定義為：

$$\mathbf{v} = [v_1 \ v_2]^T = [u \ v \ w \ p \ q \ r]^T \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\eta} = [\boldsymbol{\eta}_1 \ \boldsymbol{\eta}_2]^T = [x \ y \ z \ \phi \ \theta \ \psi]^T \quad (2)$$

其中， $\boldsymbol{\eta}$ 為透過大地參考座標系統描述之水下載具位置以及姿態的狀態向量，而 $\mathbf{v}$ 為水下載具以船體座標系統描述之載具本身速度以及角速度量值的狀態向量。

本研究所採用的國際水下載具標準 6 個維度的運動模型為 Fossen 所提出並表示如下^[2]：

$$M\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) = \boldsymbol{\tau} + \boldsymbol{\tau}_{ocean} \quad (3)$$

其中， M 是系統的慣性矩陣， $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ 為科氏力和向心力的矩陣， $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ 為水阻尼矩陣， $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$ 為系統回復力以及重力， $\boldsymbol{\tau}$ 為輸入水下載具的控制力，而 $\boldsymbol{\tau}_{ocean}$ 則是水下載具航行於海中所受的隨機擾動，如海流。

以下，本研究將說明上述水下載具運動模型中需藉設計與實際量測之流體動力係數有哪些。

模擬目的

運用 CFD 可以模擬水下載具受水阻力之影響，也可以藉由拖航水槽架設力計量測水阻力在各速度下水下載具之受力狀況，即可估算水阻尼矩陣 $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ 中之水阻力係數。實務上，水下載具六自由度運動行為，其阻尼特性呈現高度非線性和耦合。假設水下載具上述之運動行為可拆解為非耦合運動，擁有三個對稱平面，並且水阻尼矩陣 $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ 中之參數高於二次項的階次可以被忽略。則 $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ 將具備對角結構性質，亦即僅在對角線上存在線性一次和二次項阻尼項。

$$\mathbf{D}(\mathbf{v}) = -\text{diag}\{X_u, Y_v, Z_w, K_p, M_q, N_r\} - \text{diag}\{X_{u|u}|u|, Y_{v|v}|v|, Z_{w|w}|w|, K_{p|p}|p|, M_{q|q}|q|, N_{r|r}|r|\} \quad (4)$$

由 (3) 之水下載具六自由度非線性運動可知 $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ 矩陣為系統模型中扮演重要的角色。故由 CFD 模擬與估算出各條件下的 $\mathbf{D}(\mathbf{v})$ 矩陣參數，可以了解水下載具於巡航階段之受力狀況，並根據分析出之效能進行載具外型修正。

統御方程式

CFD 模擬水下載具於流體中運動的行為，必須符合基本的物理定律，如：質量守恆定律、動量守恆定律和能量守恆定律。因船模水槽拖航實驗通常在等溫情況下進行，故不將能量方程式納入考量。

以下為水下載具於流場中受力分析模擬必須考慮之方程式組合，包含連續方程式、動量方程式及紊流模型等。

連續方程式

連續方程式描述一個流場中的質量守恆，假設一個固定的控制體積，則控制體積內質量隨時間變化率等於控制體積中流體的淨流入率，如式(5)所示：

∂ρ/∂t + ∂(ρu)/∂x + ∂(ρv)/∂y + ∂(ρw)/∂z = 0

其中，u、v、w 分別為 x、y、z 方向的速度分量，t 表示時間而 ρ 為流體密度。於此研究的流場模擬程序中，合理假設流場為不可壓縮且定常流，且流體密度不隨時間變化。故，上式可簡化如式(5)所示：

∂u/∂x + ∂v/∂y + ∂w/∂z = 0

式(6)可進一步改寫成式(7)之向量表示式，

∇ · V = 0

其中，V = ui + vj + wk 而 ∇ ≡ i ∂/∂x + j ∂/∂y + k ∂/∂z。

動量方程式

根據牛頓第二運動定律可得動量方程式描述之控制體積的流體動量時變率等於控制體積上的合力。若流體為不可壓縮流，則可以表示如式(8)：

ρ [∂V/∂t + (V · ∇)V] = -∇P + ρg + μ∇²V

其中，μ 為黏滯係數，P 為壓力，以及

g = gx i + gy j + gz k

∇² ≡ ∂²/∂x² + ∂²/∂y² + ∂²/∂z²

方程式(8)也就是著名的納維爾史托克方程式，其各項之物理意義如下：

ρ [∂V/∂t + (V · ∇)V]：單位體積之慣性力

∇P：單位體積之壓力

ρg：單位體積之物體力

μ∇²V：單位體積之黏滯力

紊流模型

當雷諾數逐漸增大時，流體慣性力的影響會逐漸主導流場特性，從而發生流場在固定位置上的物理量（如

速度、壓力等）隨著時間改變而不規則變動，此現象為紊流。為了更精準的模擬各種流場狀況，研究人員根據觀察到的不同情形，開發出了多款的紊流模型。

本研究模擬條件之雷諾數皆大於 10⁷，故流場為紊流，因此需要使用適當的紊流模型來模擬實際的流場狀況。於此研究中，吾人將採用雷諾平均納維爾史托克方程式（Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equation, RANS）作為流場模擬用之紊流模型，並使用 SST k-ω 剪應力傳輸模型求解雷諾應力項。根據文獻 [3] 所述，RANS 紊流模型對於 PMB 型水下載具的阻力預測最適合且精準。於 ANSYS Fluent 軟體設定中，本研究紊流模型選定後，相關參數與環境設定如圖 3 所示。

雷諾平均納維爾史托克方程式（RANS）

如式(10)所示，RANS 是對納維爾史托克方程式做時間平均處理，亦即將物理量 ϕ 表示成平均物理量 ϕ̄ 與瞬時物理變動量 ϕ' 之和，而平均物理量的定義如式(11)所示。

ϕ = ϕ̄ + ϕ'

ϕ̄ = 1/Δt ∫_t^{t+Δt} ϕ(t) dt

將紊流的速度及壓力以式(11)及式(12)的方式改寫並代入連續方程式及動量方程式則可得到雷諾平均納維爾史托克方程式如下式：

ρ ∇ · (ū V̄) = -∂P̄/∂x + μ ∇² ū - ρ [∂u'u'/∂x + ∂u'v'/∂y + ∂u'w'/∂z]

ρ ∇ · (v̄ V̄) = -∂P̄/∂y + μ ∇² v̄ - ρ [∂u'v'/∂x + ∂v'v'/∂y + ∂v'w'/∂z]

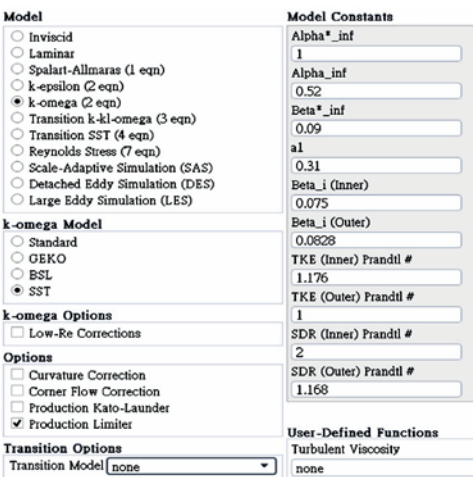


圖 3 紊流模型設定

$$\rho \nabla \cdot (\bar{w} \bar{\mathbf{V}}) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial z} + \mu \nabla^2 \bar{w} - \rho \left[\frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{w'w'}}{\partial z} \right] \quad (15)$$

RANS 相較於納維爾史托克方程式，額外多出的項為紊流的瞬時物理變動量造成的影響，稱之為雷諾應力，可以矩陣表示如下：

$$\mathbf{R}_{ij} = \begin{bmatrix} \overline{u'u'} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{u'v'} & \overline{v'v'} & \overline{v'w'} \\ \overline{u'w'} & \overline{v'w'} & \overline{w'w'} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式 (16) 之雷諾應力可透過 SST $k-\omega$ 模型求解。其優勢在於結合了 $k-\varepsilon$ 模型的完全發展紊流和 $k-\omega$ 模型流固邊界紊流之優點^[4]。這使得 SST $k-\omega$ 模型具備在遠場及流固邊界皆能很好的描述紊流現象的性質。

數值方法及求解器

本研究使用 ANSYS Fluent 模擬水下載具的流場和受力狀況。Fluent 使用有限體積法 (Finite Volume Method, FVM) 將控制方程式先離散化，以利於電腦計算。其優點在於網格適應性佳，且有良好的守恒性^[5]，因此可有效地解決複雜的工程問題。然而，在流場的數值模擬中，可能出現因離散化的操作，形成截斷誤差進而產生數值擴散。根據國際拖航水槽會議 (International Towing Tank Conference, ITTC) 的建議，二階迎風法 (Second Order Upwind, SOU) 在準確性和穩健性方面具有良好的表現，故在求解對流離散化時被廣泛運用^[6]。

在 ANSYS Fluent CFD 軟體中，常用的流體力學求解演算法，包含 SIMPLE (semi implicit method for pressure linked equations)、SIMPLEC (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations-Consistent)、PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators) 及 Coupled。

以下介紹較常被運用於求解的方法：SIMPLE 與 SIMPLEC。

SIMPLE 與 SIMPLEC 演算法

SIMPLE 為計算流體力學中常用的求解流場的數值方法。流體力學的基本控制方程式是基於質量守恒定律、動量守恒定律及能量守恒定律。連續方程式代表質量守恒定律，納維爾史托克方程式代表動量守恒定律，能量方程式代表能量守恒定律。

SIMPLEC 演算法的核心概念是從連續方程和動量守恒方程推導出壓力項，並通過修正速度場以滿足連續方程，其演算流程如下：

1. 速度場求解：求解動量守恒方程以得到速度場，此速度場尚未完全滿足連續方程。
2. 壓力場求解：接著，將求解得到的速度場代入帕松方程，進行壓力場的求解。
3. 速度場修正：利用求解得到的壓力場，修正速度場，以確保速度場滿足連續方程。
4. 迭代收斂：如果修正後的速度場仍未滿足動量守恒方程，則進行迭代，返回至第一步，繼續優化速度場，直至速度場收斂。

本研究採用 SIMPLEC 演算法，SIMPLEC 是一種源於 SIMPLE 演算法的改進版本。通過有限體積法將計算域離散為網格，然後使用 SIMPLEC 演算法解出離散的雷諾平均納維爾史托克方程式 (RANS)。SIMPLEC 和 SIMPLE 的流程相同，差別在於壓力修正的處理方式。SIMPLEC 的壓力修正因子 (pressure correction under relaxation factor) 固定為 1，而 SIMPLE 的壓力修正式為

$$p = p^* + \alpha_p p' \quad (17)$$

其中 p 為壓力， p^* 為壓力估計值， α_p 為壓力修正因子， p' 為壓力修改項。SIMPLEC 的優勢在於迭代收斂速度較快，但相對而言對網格的偏度 (skewness) 要求較高。簡單來說，SIMPLEC 以一個固定的壓力修正因子為基礎，能夠更有效地推進流場解的收斂，但同時對於網格的結構要求較為嚴格。

本研究壓力速度耦合求解器使用的是 SIMPLEC。使用的原因為提高流體動力模擬的效率及準確性。透過 SIMPLEC 能夠克服傳統壓力速度耦合方法常面臨的數值不穩定性、高計算成本及對非結構網格的適應性不足等限制，並在處理不同流場情境時取得更穩健的結果。其穩定性確保了模擬結果在動態環境中的收斂性和準確性。於梯度離散計算上使用基於網格中心的最小平方法 (Least Square Cell Based)；壓力離散計算則使用二階 (Second Order)；而動量、紊流動能及比耗散率的離散計算皆使用 SOU。相關設定如圖 4 所示。

計算域及邊界條件

根據 ITTC 所提出的計算域建議^[6]，船艏至入流邊界至少需要一到兩倍的船模長度，以保證均勻入流；船艉到出流邊界至少需要三到五倍的船長，其餘四邊皆需要一到兩倍船長，避免受到邊界效應的影響。根據^[7]之研究，水下載具在深度大於 5 倍直徑時，可忽略自由液面效應對水下載具的影響。本實驗之計算域如圖 5 所示。

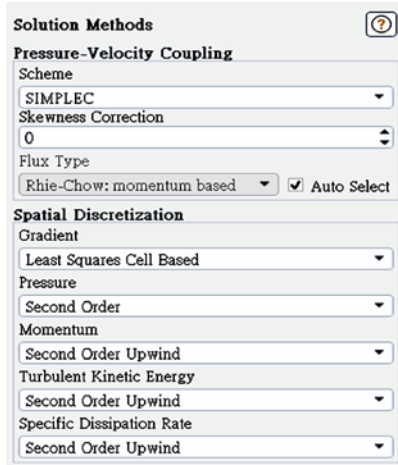


圖 4 ANSYS Fluent 求解器設定

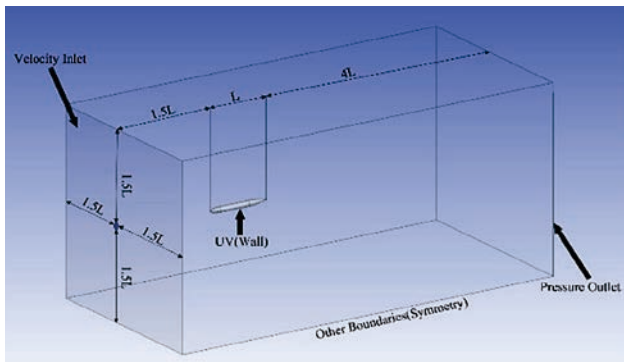


圖 5 計算域及邊界條件示意圖

邊界條件設定在節省計算時間，且不影响模擬準確性的前提下，欲使模擬數據近似於實際物理現象，吾人做以下假設：

1. 流場中流體為水，為一穩態 (Steady)、均勻 (Uniform)、不可壓縮 (Incompressible) 之流體，密度恆定為 $\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3$ ，黏度為 $\mu = 0.001003 \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$ ；
2. 船模實驗為等溫情況，無溫度變化；
3. 船模為剛體；
4. z 方向重力加速度 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 。

本研究之邊界條件設定如下：水下載具為無滑動之壁面 (No-Slip Wall)，其流體與固體邊上速度為零；圖 5 中左側邊界為速度入流速度定為設計目標 5.144 m/s (10 節)；圖 5 中右側邊界為壓力出口，錶壓力定為零；其餘四邊設置為對稱 (Symmetry) 邊界，以模擬無限水深下之環境。

網格劃分

在流場模擬前處理過程中，網格劃分是相當關鍵的步驟。網格品質不佳或網格密度不夠，都有可能造成計算無法收斂亦或是無法準確描述實際物理狀況。所以如何依照不同的模擬條件使用適當的網格劃分技巧，都需

要研究人員的經驗累積及不斷的嘗試。網格主要分為兩類：(1) 結構性網格與 (2) 非結構性網格。在本計畫的阻力模擬中與實際實驗阻力數據相比，使用非結構性網格的阻力計算較比結構性網格的阻力計算準確 [8]。因此，本研究選擇非結構性網格將計算域進行分割。

網格獨立性分析

有限體積法在相同計算域內計算結果受網格數量多寡的影響甚大。正常情況下，網格數量增加有助於提升計算結果的正確性，但是隨著網格數量的增加，計算時間也隨之增加。因此，為了選出對本研究最合適的網格大小及數量，於參考 [9] 及 [10] 的作法後，透過調整 Face Sizing 的 Element Size，漸漸縮小水下載具周圍網格平均邊長，進而達到增加網格數量的目的。於考量時間成本下，上述網格獨立性分析，在確認網格數增加不再使計算結果有顯著的改變後，流場模擬程式即停止運算。

使用本次獨立性分析設計的水下載具，於期望目標航速 5.144 m/s 進行模擬。藉由上述 CFD 設定，再分別以 200 萬、300 萬、...、1,000 萬之網格數進行模擬。可得水下載具所受的阻力在不同網格數下的變化結果，如圖 6 所示。

由圖 7 可以看到，當網格數高於 600 萬後，相鄰網隔間阻力差異斜率降低，並呈現收斂之趨勢。而 690 萬網格與 940 萬網格阻力誤差僅為 0.36%。最後選擇 690 萬做為後續阻力分析標準。水下載具 600 萬網格分佈如圖 7 至圖 10。

考量時間成本與阻力差值，因為載具計算流場較大的原因，水下載具另外使用 Body Sizing 加密載具四周之網格，大幅減少網格數。

表面網格加密分析

透過在水下載具表面使用膨脹層 (Inflation) 功能，向外生成數層薄柱狀網格，可更精準地計算出邊界

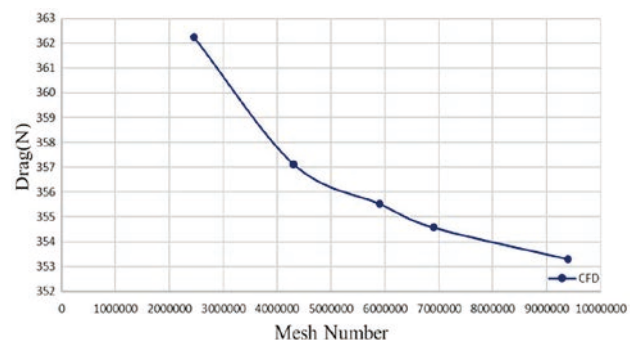


圖 6 水下載具阻力隨網格數變化圖

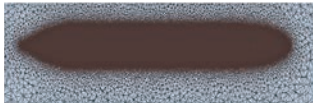


圖 7 水下載具 600 萬網格分佈

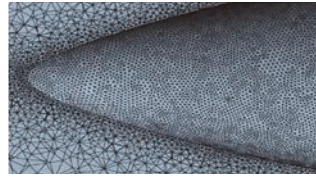


圖 8 艙部細節

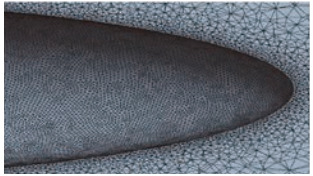


圖 9 艙部細節

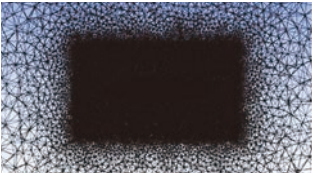


圖 10 增加 Body Sizing 加密載具四周流場

層內流場情形。此外，膨脹層高度必須高於邊界層，如圖 11。以確保能完全的模擬邊界層內物理量變化的特性。膨脹層的控制方法是根據邊界層厚度、期望 y^+ 和總層數 (Maximum Layers, N)。使用式 (18) 及式 (19)，可計算出第一層網格厚度 (First Layer Height, $2y_p$) 及網格生長率 (Growth Rate, G)。將求出值，輸入 Fluent 軟體後即可生成出滿足邊界層厚度的膨脹層加密網格。

$$y^+ = \frac{\rho u_\tau y_p}{\mu} \quad (18)$$

$$\delta_{99} = 2y_p \frac{1-G^N}{1-G} \quad (19)$$

其中， u_τ 為摩擦速度， δ_{99} 為邊界層厚度， y_p 為表面外第一個網格節點與表面的距離如圖 12，而 y^+ 為 y_p 的無因次化，可作為表面網格加密程度的指標。選擇適當的 y^+ 可以細緻捕捉邊界層內真實的流場速度及壓力的梯度。

表面網格加密分析需要有實際拖航實驗的數據進行比對，礙於目前尚未有相同尺度及相同航速的拖航實驗數據。如表 1，DARPA SUBOFF Model 5470 之構型 1 (Bare Hull) 的阻力實驗相關實驗數據。在相近

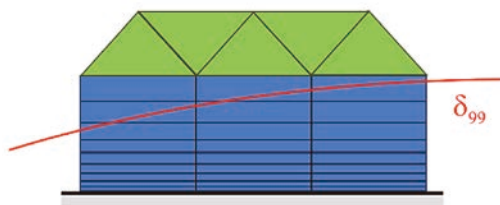
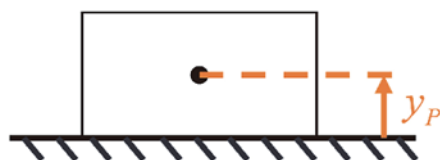


圖 11 膨脹層示意圖

圖 12 y_p 示意圖表 1 DARPA SUBOFF Model 5470 構型 1 阻力實驗結果^[12]

速度 (節)	速度 (m/s)	雷諾數	阻力 (N)
5.92	3.045	1.32×10^7	87.4
10.00	5.144	2.23×10^7	242.2
11.84	6.091	2.64×10^7	332.9
13.92	7.150	3.10×10^7	451.5
16.00	8.230	3.57×10^7	576.9
17.99	9.254	4.01×10^7	697.0

的雷諾數情況下，會有雷諾相似性 (Reynolds' Law of Similarity)^[11]。

也就是在相似形狀的物體，在相近的雷諾數情況下，會有相近的流場情況。本研究的條件下雷諾數為 1.28×10^7 ，與速度為 5.92 節的 SUBOFF 的雷諾數誤差僅為 3%，故選擇 DARPA SUBOFF Model 5470 之構型 1 作為驗證對象，並以 5.92 節的航速進行網格獨立性分析和表面網格加密分析。

SUBOFF 的網格獨立性分析如圖 13 所示，由此圖可看出在網格數大於 600 萬時，阻力差異趨於收斂。於此同時也能清楚觀察到：「隨著網格數的增加，模擬結果越接近實測結果」。考量時間成本因素，本研究後續分析將選擇以 600 網格數進行表面網格加密分析。

由於上述測試並未對表面進行加密，以致於 SUBOFF 表面附近流場的模擬結果並非最佳。為了能準確模擬與計算 SUBOFF 的阻力，研究團隊需再進一步探討在不同期望 y^+ 下，所劃分出的網格進行模擬時與真實拖航實驗阻力結果比較之相似性。考量此因素之模擬結果如圖 14 所示，在期望 y^+ 為 30 時阻力與拖航實驗阻力最為接近；於此分析中，測試期望 y^+ 分別為：1、5、11、20、30、40、50、80、100 及 300。經觀察， y^+ 為 30 附近可能存在最佳結果。故，後續多進行了期望 y^+ 為 29 和 31 的模擬。經此驗證，更能確定期望 y^+ 30 為最佳。

為了將上述分析之最佳期望 y^+ 應用於本研究之水下載具流場模擬之可能性，吾人將進一步探討流場的

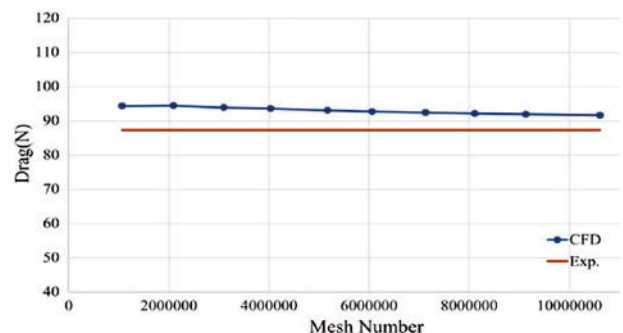


圖 13 DARPA SUBOFF Model 5470 構型 1 模擬阻力隨網格數變化圖

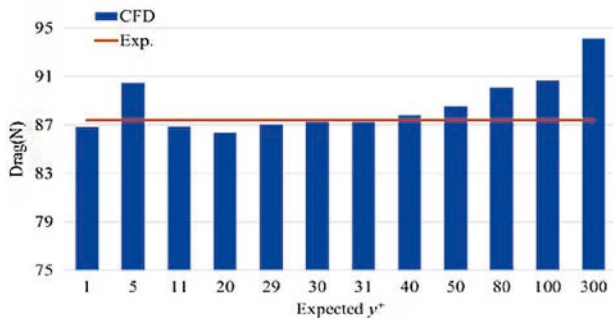


圖 14 DARPA SUBOFF Model 5470 構型阻力隨期望 y^+ 變化圖

相似度。將本研究之 10 節期望航速的水下載具與 5.92 節航速的 SUBOFF 以不同期望 y^+ 進行阻力模擬。由圖 15 可知，隨著期望 y^+ 變化，水下載具與 SUBOFF 之阻力有著相近的變動趨勢。由此可得知，在相近雷諾數的條件下，邊界層流場情形也會相近。因此，SUBOFF 在期望 y^+ 為 30 時有最接近實驗之阻力，則本研究預計開發之水下載具也選擇期望 y^+ 為 30 進行模擬設定。可以預期的，以此條件進行之模擬結果會與後續拖航實驗的阻力結果相近。期望 y^+ 為 30 的水下載具網格分佈如圖 16 至圖 19 所示。

網格品質檢查

網格品質的好壞對模擬的計算結果精準度有明顯的影響，甚至過於不良的網格會導致計算發散。因此，每次網格劃分後，皆須要透過不同的度量標準分析網格。ANSYS Fluent 軟體提供幾個檢查項目，供使用者檢查網格的品質，例如：正交品質（Orthogonal Quality）、單元傾斜度（Skewness）等。

正交品質（Orthogonal Quality）^[13]，依據網格法向量進行分析的標準，對每個面的法向量（ $\vec{A}_i$ ）和從該單元重心到該面重心的法向量（ $\vec{f}_i$ ）進行正交計算，並對每個面的法向量（ $\vec{A}_i$ ）和該單元重心到共享該面的相鄰單元重心的法向量（ $\vec{c}_i$ ）進行正交計算，再取最小值就是正交品質。正交品質其值介於 0 到 1 之間。網格正交計算向量

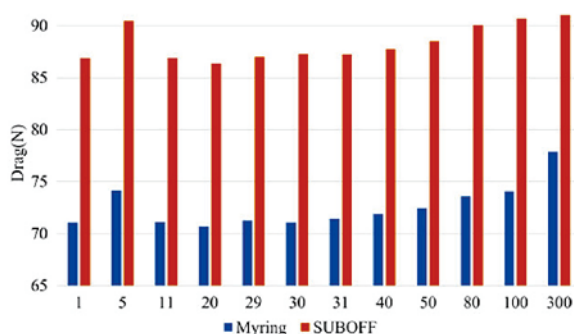


圖 15 阻力隨期望 y^+ 變化圖

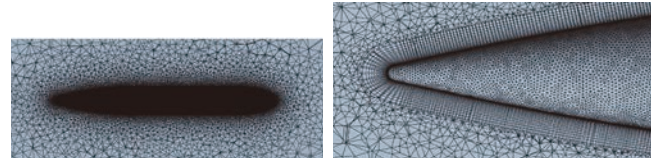


圖 16 水下載具期望 y^+ 網格分佈

圖 17 艉部細節

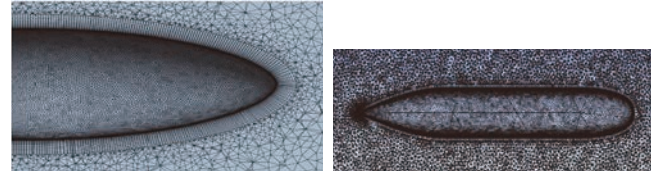


圖 18 艏部細節

圖 19 水下載具生成邊界層之網格分佈

示意圖如圖 20 所示。而單元傾斜度（Skewness）^[14]，由式(20)及圖 21 所定義，其值亦介於 0 到 1 之間。

$$\text{Skewness} = \frac{\text{Optimal cell size} - \text{Actual cell size}}{\text{Optimal cell size}} \quad (20)$$

一般來說，最小正交品質（Orthogonal Quality）必須大於 0.1，且最大單元傾斜度（Skewness）要小於 0.95。其參考標準如圖 22 所示。本研究的網格品質皆在標準的 Acceptable 以上。

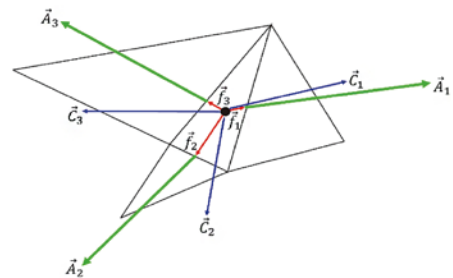


圖 20 網格正交計算向量示意圖^[13]

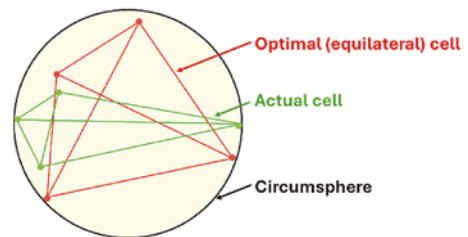


圖 21 網格傾斜度檢驗^[14]

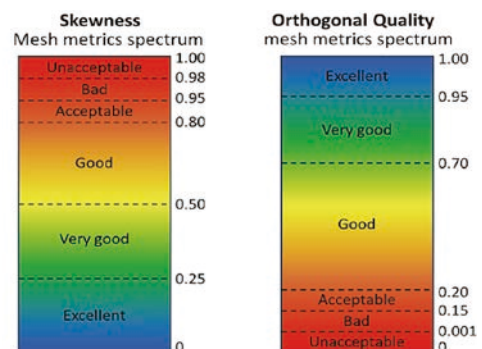


圖 22 網格品質度量標準^[14]

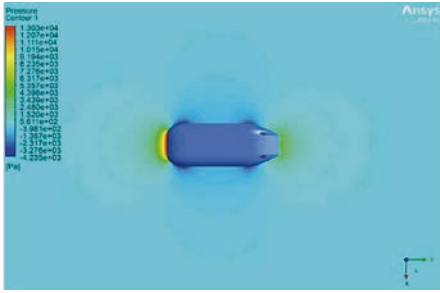


圖 23 載具四周流場壓力圖

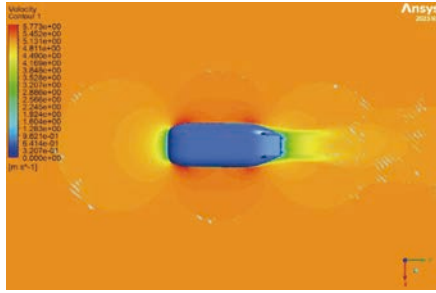


圖 24 載具四周流場速度圖

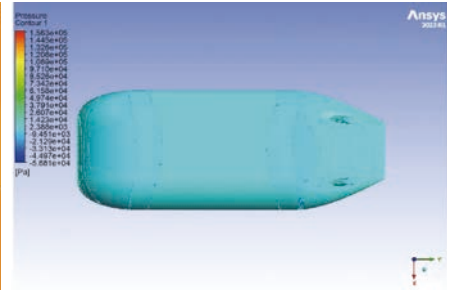


圖 25 載具外壓力圖

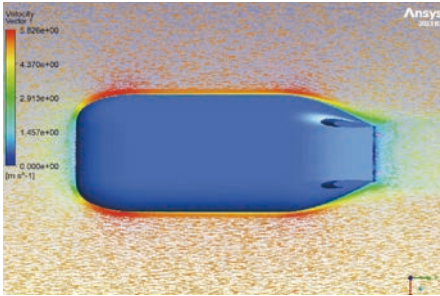


圖 26 載具四周流場速度向量圖

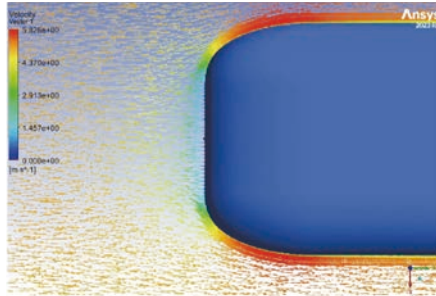


圖 27 載具船艙速度向量圖

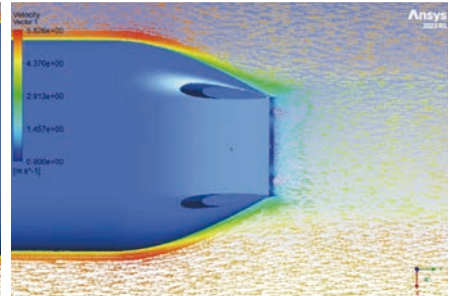


圖 28 載具尾部流場速度向量圖

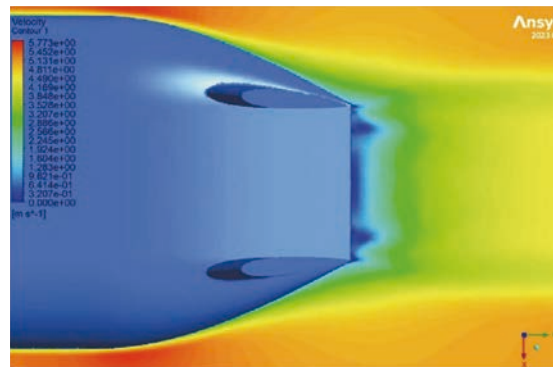


圖 29 載具尾部流場速度圖

水下載具模擬結果與分析

以下為本研究對水下載具，包含流場壓力、流場速度、外壓力、流場速度向量圖等的相關模擬成果。

圖 23 至圖 29 為本研究預計開發載具之 CFD 模擬結果。由上述結果模擬可看出，此水下載具的流場平滑，並無特殊壓力及速度流場現象發生。圖 29 模擬顯示回收型載具尾部之流場變化。在增加翼板後，載具尾部之低壓區，呈現不規則狀。仔細確認可發現翼板影響載具尾部流場，其低壓面積之形狀與翼板之區域相關。流場壓力過渡平順且連續性高。據此，可評估此 CFD 流場模擬結果應為正確。

模擬數據後處理

以 CFD 模擬水下載具於各速度下的阻力後，考量

水下載具模型之阻尼矩陣：

$$D(v) = -diag\{X_u, Y_v, Z_w, K_p, M_q, N_r\} \\ -diag\{X_{u|u}|u|, Y_{v|v}|v|, Z_{w|w}|w|, K_{p|p}|p|, M_{q|q}|q|, N_{r|r}|r|\} \quad (21)$$

此式中水阻尼與速度方向為非耦合，因此可以分別模擬水下載具六自由度下之各方向水阻力，並分別以單一自由度運動計算其水阻尼矩陣內係數。以水下載具 surge 運動為例，其水阻尼矩陣單一自由度運動可分解如下式。

$$\tau_{Dx} = -X_u u - X_{u|u}|u|u \quad (22)$$

其中， τ_{Dx} 為 CFD 模擬水阻力。

經過 n 次 CFD 模擬於不同速度之 surge 自由度運動狀況，可得 n 組水下載具於不同速度下之阻力變化

並表示為：

$$\begin{bmatrix} \tau_{Dx1} \\ \tau_{Dx2} \\ \vdots \\ \tau_{Dxn} \end{bmatrix} = -X_u \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} - X_{|u|} \begin{bmatrix} |u_1|u_1| \\ |u_2|u_2| \\ \vdots \\ |u_n|u_n| \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (23)$$

其中， ε 為各個速度下之水阻力偏差。

整理上式得：

$$\begin{bmatrix} \tau_{Dx1} \\ \tau_{Dx2} \\ \vdots \\ \tau_{Dxn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 & |u_1|u_1| \\ u_2 & |u_2|u_2| \\ \vdots & \vdots \\ u_n & |u_n|u_n| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_u \\ X_{|u|} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (24)$$

運用最小二平方法（ ε 最小化）計算向量 $\begin{bmatrix} X_u \\ X_{|u|} \end{bmatrix}$ ，可得以之結果：

$$\begin{bmatrix} X_u \\ X_{|u|} \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} u_1 & |u_1|u_1| \\ u_2 & |u_2|u_2| \\ \vdots & \vdots \\ u_n & |u_n|u_n| \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} u_1 & |u_1|u_1| \\ u_2 & |u_2|u_2| \\ \vdots & \vdots \\ u_n & |u_n|u_n| \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} u_1 & |u_1|u_1| \\ u_2 & |u_2|u_2| \\ \vdots & \vdots \\ u_n & |u_n|u_n| \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \tau_{Dx1} \\ \tau_{Dx2} \\ \vdots \\ \tau_{Dxn} \end{bmatrix} \quad (25)$$

此方法可計算載具巡航時各姿態下之阻力方程式。在設計水下載具的外型時，阻力和體積皆為相當重要的考量，可以同時描述這兩個參數的「Semnan Coefficient」定義如下^[2]：

$$\text{Semnan Coefficient} = \frac{(\text{Volume})^{1/3}}{\text{Drag Coefficient}} \quad (26)$$

Semnan Coefficient 也可以被稱之為體積效率（Volume Efficiency）。設計良好的水下載具時，此係數的最佳化是相當重要的，因為它同時將阻力及體積進行了最佳化。此係數越大代表在相同的體積下有越小的阻力，也是越佳的設計。

結論

此研究旨在揭露，新型水下載具開發的初期，水下載具外型不同下，流場模擬已取得最佳設計之水下載具線型是不可或缺的設計步驟。尤其設計前期，於尚未有

實體水下載具外型可進行水槽測試的情況下，使用 CFD 準確模擬出水下載具在不同方向，所受的水下阻力與水阻力係數，相當於找出水下載具阻力矩陣，在 x 、 y 、 z 方向的速度分量所相應係數。故，善用 CFD 流場模擬工具能夠達成水下載具初期設計的規格跟最佳化設計成果，故可以節省大量的時間與花費。本文藉由 ANSYS 軟體的 Fluent 功能，可模擬出水下載具在水中航行時所受的流場壓力、外壓力、流場速度、及流場速度的向量圖，這些訊息可以觀察出水流作用在水下載具上的情況。此外，於相同的求解器、計算域與邊界條件的情況下，可以匯入各式相似外型的水下載具進入流場模擬環境內。亦或是在確定外型的水下載具外型上進行區域性的部件的微調，與於外型上的不同設計尺寸進行變化，再由 CFD 模擬出該狀態形成的水下阻力與水阻力係數。根據不同參數形成的結果，進行比對後可以決定出最終的最佳化外型設計。

參考文獻

1. M. Moonesun and Y. Korol (2017). Naval submarine body form design and hydrodynamics. (Fossen) LAP LAMBERT Academic Publishing.
2. M. Moonesun, Y. Korol, and H. Dalayeli (2015). "CFD analysis on the bare hull form of submarines for minimizing the resistance," International Journal of Maritime Technology, Vol. 3, pp. 1-16.
3. Thor I. Fossen (1994). Guidance and Control of Ocean Vehicles, Wiley.
4. F.X. Song, L.H. Zhang, Z.L. Wu, and L. P. Wang, "On resistance calculation for autonomous underwater vehicles," in Advanced materials research, 2011, Vol. 189: Trans Tech Publ, pp. 1745-1748.
5. F.R. Menter (1994). "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications," AIAA journal, Vol. 32, No. 8, pp. 1598-1605.
6. F. Moukalled, L. Mangani, M. Darwish, F. Moukalled, L. Mangani, and M. Darwish (2016). The finite volume method. Springer.
7. ITTC (2014). "Recommended Procedures and Guidelines: Practical guidelines for ship CFD applications," ITTC Report: 7.5-03 02-03.
8. M. Moonesun, M. Javadi, P. Charmdooz, and K.U. Mikhailovich (2013). "Evaluation of submarine model test in towing tank and comparison with CFD and experimental formulas for fully submerged resistance".
9. M. Karim, M. Rahman, and M. Alim (2009). "Computation of turbulent viscous flow around submarine hull using unstructured grid," J. Ship Technol, Vol. 5, No. 1, pp. 973-1423.
10. 曹翔皓 (2019).「潛體阻力之三維數值模擬與紊流場特性之分析」，成功大學系統及船舶機電工程學系學位論文，第 1-93 頁。
11. H.-L. Liu and T.T. Huang (1998). "Summary of DARPA SUBOFF experimental program data," Naval Surface Warfare Center Carderock Div Bethesda MD Hydromechanics
12. K. Alam, T. Ray, and S.G. Anavatti (2012). "A new robust design optimization approach for unmanned underwater vehicle design," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, Vol. 226, No. 3, pp. 235-249.
13. H. Schlichting and J. Kestin, (1961). Boundary layer theory. Springer.
14. A. Inc. (2013). "ANSYS fluent user's guide," Ansys Fluent, Vol. 15317, 2498p. 