

# 應用計算流體力學模擬岸壁效應教學之探討

## 摘要

當不對稱流產生於船舶或船岸之間，船舶六個自由度(6 DOF)的互制耦合運動將導致偏離既定的航線，這種現象的經驗值在船舶操縱的書本裡都有很明確的敘述。本文目的在於探討應用計算流體力學(computational fluid dynamics, CFD)模擬岸壁效應(bank effects)教學，使用 CFD 最大的意義就在於節省實驗成本與預測結果。隨著電腦計算能力的增強、網格生成技術的提高以及數值演算法的改進，目前 CFD 對流動的數值模擬已達到了相當高的精度，可以運用於船舶與流體數值計算的各個步驟中，通過利用直觀的圖形、動畫，幫助研究與學習人員分析和理解計算過程中所產生的數值結果。Flow-3D 為眾多計算流體套裝軟體中的一種，適合做為學術研究的虛擬實驗室，因此本文介紹 Flow-3D 做為岸壁效應模擬分析的工具，並以船舶岸壁間的距離做比較。

關鍵字 岸壁效應 耦合運動 CFD Flow-3D

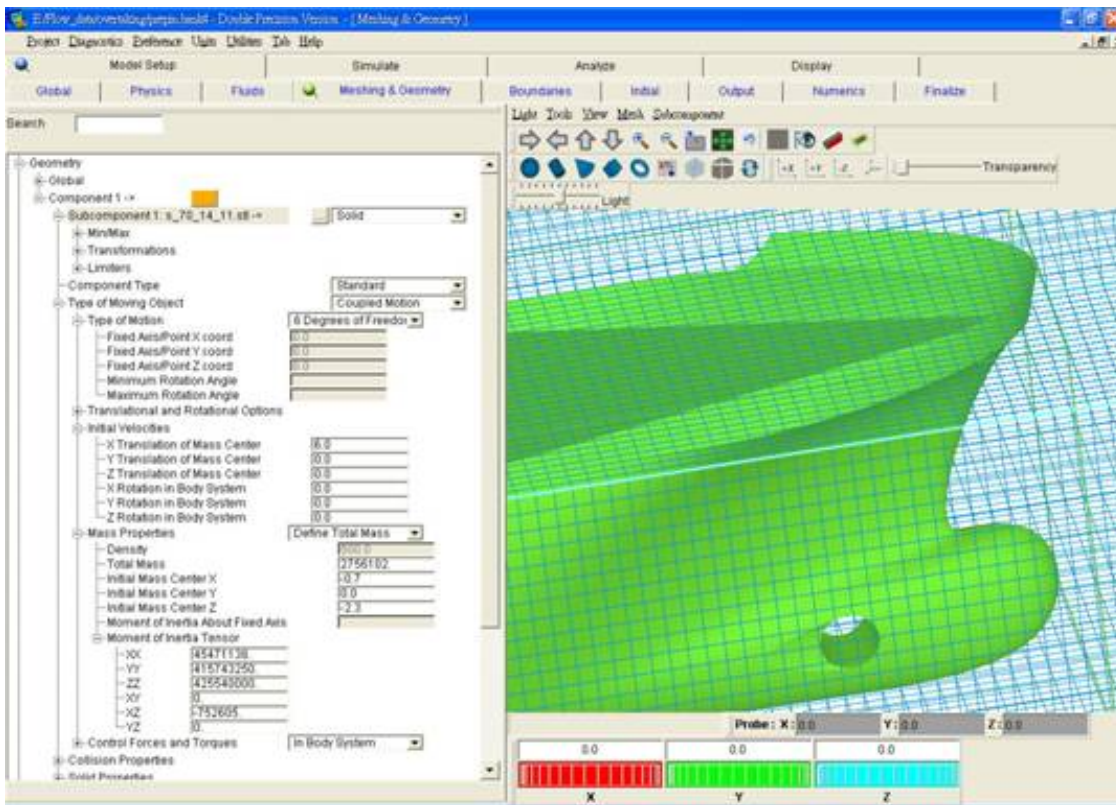


圖 1、 CFD 商用套裝軟體 Flow-3D 使用者介面

## 一、Flow-3D 及其理論簡介

Flow-3D 流體分析軟體(圖 1)係美國國家實驗室(Los Alamos National Laboratory, LANL)研發用於處理計算流體力學 (CFD), 1980 年部分研究人員創立了 Flow Science Inc., 開發 Flow-3D 流體分析軟體, 提供液體及氣體在流體動力行為上面的研究, 藉由不同的物理狀態模擬流體流動過程。Flow-3D 的理論基礎在於質量守恆方程式、動量方程式以及能量不減方程式等, 因此它可以應用在絕大部分的、任何型態的流動過程。

### 1. Flow-3D 的三個基本核心技術：

#### 1.1 Multi-Block Grids

多塊分區結構性網格劃分, 減少網格數目, 網格與幾何現狀自動耦合, 精確、穩定、可以加快運算的收斂性。

#### 1.2 FAVOR(Fractional Area / Volume Ratios)

針對複雜的幾何外型以結構性網格表現出來的技術, 一般流體分析軟體的解析方法可分為有限元素法(Finite Element Method, FEM)與有限差分法(Finite Difference Method, FDM), 而 Flow-3D 所採用的數值方法為改良式有限差分控制體積法(Finite-Difference Control Volume Method), 並以 FAVOR(Fractional Area / Volume Ratios)來定義矩形網格內一般幾何形狀的區域, 利用四邊形磚塊元素所構成的網格定義一般障礙物形體, 定義每一個磚塊元素的六個面能夠被流體通過的比例面積, 以及出入自由的體積。這些部分面積與體積將會結合到有限體積的運動方程式中, 例如, 在兩個元素的公共面上, 對流的質量、動量與能量通量必須包含此面可讓流體自由通過的面積當作一個乘數, 若沒有可讓流體自由通過的面積, 則不可能有對流的通量。FAVOR 的優越之處在於它提供建立模型時的彈性, 對於流體與固體間的熱傳, FAVOR 法以在每個磚塊元素中, 提供了一個良好的流體與障礙物交界面面積的決定方法, 而能夠給予高精度的解。對於不可壓縮、黏性流而言, FAVOR 以下列方程組表示：

$$\nabla \cdot (\overline{A}u) = 0$$

$$\frac{\partial \overline{u}}{\partial t} + \frac{1}{V} (\overline{A}u \cdot \nabla) \overline{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho V} (\nabla \overline{A}) \cdot (\mu \nabla) \overline{u} + g$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{1}{V} (\overline{A}u \cdot \nabla) H = \frac{1}{\rho V} (\nabla \overline{A}) \cdot (k \nabla T)$$

其中

$$\overline{A}u = (A_x u_x, A_y u_y, A_z u_z)$$

$$(\nabla \overline{A}) = \left( \frac{\partial}{\partial x} A_x, \frac{\partial}{\partial y} A_y, \frac{\partial}{\partial z} A_z \right)$$

$$H = \int C(T) dT + (1 - f_s) \cdot L$$

這些方程式中的  $i A$  是相關於流體在第  $i$  個方向可自由通過的部分面積， $V$  表示可自由進出的部分體積， $\rho$  是密度， $p$  是壓力， $u$  表示  $i$  方向的速度， $\mu$  是流體的黏滯係數， $g$  表重力， $H$  是流體的焓， $T$  是溫度， $f_s$  是固相率， $L$  是潛熱，以及  $C$  與  $k$  分別表示流體的比熱和熱傳導係數。

### 1.3 VOF (Volume-of-Fluid)

針對追蹤自由液面流動的技術，預測自由表面流體的運動，表面張力和其他複雜的流動，利用這些特殊方法的結合，可以使得網格建立容易、減少記憶體的使用量、減少電腦計算時間，也可以使得網格元素可以有效的適應一般的幾何形狀。VOF 提供了，經由固定網格追蹤明顯流體界面的方法，其非常重要的部分為動態準確的建立了界面的邊界條件，換句話說，流體體積法是對自由表面或兩種流體界面的一種數值處理方法。

流體體積法的基礎在於部分流體體積  $F$ ，它包含在每一個控制體積之中，控制體積可以是空的、部分充填或完全充填，部分充填的元素通常包含自由表面。對於界面的處理必須相當小心，才可免於雜亂，為了達到這一個目標，使用所謂的捐贈者-接受者對流的方式來處理得到

F。根據這些方法，在計算的元素中，界面的形態是從其中以及周圍元素的 F 值來計算的，然而贈與元素或接受元素的對流方式，是根據相關正交於界面的對流方向來應用的。方程式 F 為：

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V} \nabla \cdot (\dot{A} u F) = 0$$

雖然 Flow-3D 有上述的各種優點，但是還是無法突破矩形網格以及有限差分法的一些缺點，對於複雜的、微細的幾何模型必須增加網格的數目以降低失真的情形，但相對的也增加了運算的時間，為了滿足精度、縮短計算時間，網格分割需儘量均勻。

2. Flow-3D 所使用的統御及離散方程式[1]：

2.1 連續方程式(Continuity Equation)

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{RSOR}{\rho}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u\rho) + \frac{\partial}{\partial y}(v\rho) + \frac{\partial}{\partial z}(w\rho) = RSOR + RDIF$$

RSOR：質量進出 RDIF：密度散佈

2.2 動量方程式(Momentum Equations)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + \left\{ u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right\} \\ & = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + G_x - \frac{1}{\rho} \Delta \tau_x - K u - \frac{RSOR}{\rho} u - F_x \end{aligned}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \left\{ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right\}$$

$$= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + G_y - \frac{1}{\rho} \Delta \tau_y - K v - \frac{RSOR}{\rho} v - F_y$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \left\{ u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right\}$$

$$= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + G_z - \frac{1}{\rho} \Delta \tau_z - K w - \frac{RSOR}{\rho} w - F_z$$

$\rho$  : 密度  $t$  : 時間  $U = (123)$  : 流體 456 方向之速度

$P$  : 壓力  $G$  : 重力加速度  $\tau$  : 黏度

$Ku$  : drag(porous baffles · obstacles · mushy zone)

$RSOR U/\rho$  : accelerations caused by mass injection at zero velocity

$F$  : other forces:surface tension · electric forces  
· mass/momentum source

## 二、模擬方法及步驟

### 1. 建立模組

#### 1.1 流動類體總體設定

不包含空氣之單項不可壓縮流體，邊界設定自由液面追蹤，模擬運算時間 30 秒，全部模擬及輸出的設定單位採用 SI(MKS)制。

#### 1.2 物理類型設定

重力設定-9.81，船模為剛流耦合運動體，採隱性(Implicit)數值運算。

### 1.3 輸入流體性質

流體密度=1000Kg/m<sup>3</sup> · 流體黏度=0.001Kg/m/s · 流體表面張力係數=0.073Kg/s<sup>2</sup> 。

### 1.4 流動區域及物件幾何網格設定

#### 1.4.1 輸入船模

本模擬中的船舶模型(圖 2)採用 CAD 匯出的 STL 格式 · 先在 FlowVU 確認再進行網格建置 · 模擬船舶的屬性如表 1 。

圖 2 · 模擬船舶模型(L70m\*B14m\*D4.92m)

表 1 模擬船舶屬性表

屬性	數值	單位
Total Mass	2756102	Kg
Length Overall	70	m
Beam Overall	14	m
Draught (even keel)	4.92	m
Velocity	6 (11.66)	m/s(knots)
Initial Mass Center X	-0.7	m
Initial Mass Center Y	0.0	m
Initial Mass Center Z	-2.3	m
Moment of Inertia Tenser		
XX	0.45471138E08	Kg-m/s
YY	0.415743250E09	Kg-m/s
ZZ	0.425540560E09	Kg-m/s
XY	0.0	Kg-m/s
YZ	0.0	Kg-m/s
ZX	-0.752605E06	Kg-m/

### 1.4.2 建立數值船模試驗槽(towing tank)

數值船模試驗槽(圖 3) , X 軸設為長度 , 總長 166m(-36~130) , Y 軸設為寬度 , 總寬 49m(-14~35) , Z 軸設定水深 7m(-7~0) , 無風無流。

### 1.4.3 幾何網格設定

有限差分網格屬磚塊網格 , 很難以少數的網格數將模型呈現得很好 , 雖然 Flow-3D 使用了所謂的 FAVOR 法 , 來提升模型的精確度 , 但在實際的使用中 , 還是必須增加網格的密度 , 才能夠精確的呈現船模的外觀。本文範例依照 Flow-3D 所建議的建置方式 , 整個虛擬船模試驗槽流場模型分割 1002000 個均勻網格 , 在 FlowVU 處理器的視窗內可以即時判斷網格疏密度。FlowVU 處理器的主要任務就是把建立的網格顯示出來 , 以便讓研究人員檢驗區域劃分與網格生成是否合適 , 特別是檢驗各網格線之間的局部正交性和網格的疏密程度 , 以往的網格生成過程主要是非互動式的 , 而 FlowVU 則採用互動式的網格生成方法 , 取捨和伸縮格線 , 以形成較理想的網格 , 再以 FAVOR 顯示器顯示船模在網格切割後的造型是否合乎期待值 , 即船模各部分的幾何尺寸是否合理 , 部件間是否留有縫隙 , 表面是否光滑等。

Flow-3D 流場計算必須在一定的座標系中定義三維空間物體及物體的幾何形狀及尺寸 , 本模擬設定卡氏座標系(Cartesian)作為船模和網格的幾何座標系統 , 即長寬高分別以 XYZ 表示之 , 則相對於系統(space system)原點(0 , 0 , 0) , 船舶(body system)的重心為(-0.7m , 0 , -2.3m)。

### 1.5 邊界條件設定

X Min : Outflow X Max : Outflow

Y Min : Symmetry Y Max : Symmetry

Z Min : Symmetry Z Max : Symmetry

## 1.6 初始流體區域及性質設定

流體速度(U、V、W) = 0 m/s，流體水面高度 = 0 m，大氣壓力 = 1.013e+05(Pa)

## 2. 模擬程序

### 圖 4、Flow-3D 模擬求解器運算視窗

本模擬採用 Windows XP 32 位元作業系統，Intel Core 2 Quad Q6600 CPU 及 2G RAM，執行運算時間 4 小時 15 分。模擬求解器運算視窗(圖 4)在類比運行時會提供很多類比資訊，如點擊選項"穩定限度"(stability limit and dt)，就會顯示當前的穩定限度和這個圖上的當前時間，這個圖顯示了類比運行的有效性，最有效的解是時間步(紅線)在穩定限度(黑線)，即紅線和圖上的黑線重疊。另一個很有用的圖是"體積錯誤 (%lost)"(Volume error)，這個圖給我們提供模擬平流時能阻止流動體積出現錯誤的意見。在類比的任何時間可以點擊結果按鈕，製作類比結果圖。

## 3. 模擬結果分析與顯示

Flow-3D 的後置處理工具程式包含文字、圖形和動畫，可以調整視窗大小、改變視點角度和調色板的色調等功能，以本範例而言，能夠清晰明瞭地觀察與分析船舶岸壁效果流場中各種物理量的分佈情況(如興波、渦流、船速、水壓、偏向、自由液面等)。(圖 5~12)表示模擬船舶沿著 X 軸方向以 11.66 節行駛 30 秒，岸壁距離半個船寬與距離一個船寬的航跡比對，直接呈現船舶的航行狀況：「當船舶在狹窄航道的一側平行路岸航行時，其左右舷將受到不均勻的水壓。船體與岸壁之間的流速增大，形成低壓區；同時，螺旋槳盤面前後吸入流與排出流的作用，在靠岸的一邊前面的水來不及補充，水位下降，其壓力較外舷低，推船艏向岸壁，產生岸吸現象，稱為岸吸力(Bank Suction)。另一方面，船前進時推水向左右兩側，靠岸一側受岸壁阻擋，擴散不開，形成高水位；而另一側水流擴散快水位較低，造成船艏外偏現象，稱為岸推力(Bank Cushion)，此岸吸力與岸推力合稱為河岸效應(Bank Effect)。



Flow-3D 的 Probe 工具可以進一步擷取更詳細的數值分析資料，本模擬的虛擬船模試驗槽流場模型總共分割 1002000 個網格，每個網格就是一個 mesh cell，每個 mesh cell 分別提供 15 項物理量的文字(表 2)或圖形(圖 14)的選擇性輸出，方便分析比對或提供其他工具軟體(如 Tecplot、Grapher 等)後置處理。

例如 mesh cell(168, 21, 17)作數值比對，相同的時間相同的 mesh cell，距離半個船寬的水壓值是距離一個船寬的 1.0125 倍(表 2、圖 14)，有了量化的數值，直觀和經驗值更得以肯定。以此類推，同一個 mesh cell 還可以比對船舶前後左右的水流速度、水位、---等其他資料，而整個虛擬船模試驗槽流場模型內的 1002000 個 mesh cell 都可以依照需求擷取數值做進一步的分析比對。

表 2、Probe mesh cell (168, 21, 17)水壓數值文字

time	距離半個船寬	距離一個船寬
0.0000000E+00	1.0130000E+05	1.0130000E+05
1.0021981E+00	1.0130000E+05	1.0130000E+05
1.9971455E+00	1.0130000E+05	1.0130000E+05
3.0011258E+00	1.0257434E+05	1.0130000E+05
4.0018611E+00	1.0286152E+05	1.0277795E+05
4.9952736E+00	1.0315412E+05	9.9229508E+04
5.9981880E+00	9.9995742E+04	9.9709164E+04
7.0024796E+00	1.0130000E+05	1.0130000E+05
7.9989285E+00	1.0130000E+05	1.0130000E+05
9.0029964E+00	1.0130000E+05	1.0130000E+05
9.9987535E+00	1.0130000E+05	1.0130000E+05
1.1006718E+01	1.0130000E+05	1.0130000E+05
1.1998255E+01	1.0130000E+05	1.0130000E+05

#### 4、模擬結果與討論

因為受到環境與時間的侷限，船舶操縱技術的訓練困難，經驗的累積緩不濟急，即使是資深的航海者在進出港口水域或狹窄航道時，也因雇用當地引水人員領航而缺乏實際操船的機會，因此許多國家的船員訓練機構紛紛引進操船模擬機，期能藉由模擬機的訓練提高操船技術，以增進船舶的航行安全。但操船模擬機的功能是否合乎需求，常受到採購時的預算、規範乃至時機和設計版本等因素的影響，而且多數的操船模擬機的模擬方式大都採用第一人稱，想要寓操船理論於操船模擬機之中有其困難。

根據本模擬的顯示，船舶的受限水域效應，如淺水區域航行、船體的下沉和縱傾、船舶間的相互作用等，都可運用 CFD 的模擬以彌補經驗值教學的不足，不但合乎教學效益，而且也是一個趨勢。