

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

仿生型自主式水下載具阻力推進性能之研究(3/3) (Study on the Resistance and Propulsion Performance of Biomimetic Autonomous Underwater Vehicle)

計畫編號：NSC 90-2611-E-002-003

執行期限：90年8月1日至91年7月31日

主持人：蔡進發 國立台灣大學造船及海洋工程學系

一、中文摘要

本研究經由三年的實驗與計算結果得到魚體尾鰭擺動推進的機制，是由其擺動的橫向速度所引起的效應。第一個效應是魚體尾鰭擺動時會在迎水面，亦即魚體的凸面(Convex Side)產生停滯高壓魚體，而在背水面產生低壓而造成推力的產生。尾鰭擺動速度的第二個效應是由於其所產生的橫向速度會將因黏性效應與壁面效應所產生高渦度區(High Vorticity Region)帶離魚體的表面，因而造成邊界層內靠壁面的渦度減少，而使得其雷諾應力降低，因而使得靠近壁面的流速趨於緩和，而有減阻的效應產生。

關鍵詞：仿生型自主式水下載具、減阻、推力的產生

Abstract

The the mechanism of thrust generated by the caudal fin of fish is due to its swing velocity deduced from the experimental and computation results conducted in this three year's research. The first effect is that the swing velocity induces a stagnation high pressure at the upwind side(Convex side) and low pressure at the following side. The induced pressure difference results a thrust. The second effect is that the swing velocity will sweep out the high vorticity region

generated by the viscous effect and wall effect from the wall. The vorticity is then reduced in the boundary near the wall. Then, the Reynolds stress is reduced. Also, the vorticity distribution is more smooth near the wall and cause a drag-reduction.

Keywords: biomimetic autonomous underwater vehicle, Drag-reduction, Thrust production

二、緣由與目的

從事仿生型水下載具阻力與推進性能之研究，事實上即是要從事撓性體往復運動的流體動力研究。而水中生物的運動與目前人造的水下載具有幾點最大的區別：(1)生物體為撓性(Flexible)，而一般的水下載具為剛體。(2)生物體的推進是採往復式的擺動推進(Fanning or Oscillation)，而人造的水下載具採用螺槳推進是連續旋轉式。(3)生物體的推進與運動是互相耦合，而一般的水下載具是各種機構的互相配合。因為人造物均為剛體所以所有目前已有的相關科技在理論、計算及實驗上均以剛體為主。所以有關仿生的研究也是如此，對水中生物推進的模擬也是以振盪翼(Oscillating Foil)的研究[1-3]為入門。振盪

翼的研究發現在高攻角(10 至 25 度)時，會有高效率的升力產生。有關生物的撓性推進的研究則以實驗[4-6]及勢流場的計算[7]為主。實驗上的觀察與量測發現魚體的推進相較於相同幾何的剛體性能時，有兩個主要的結論：(1)魚體的擺動推進有非常高的效率，可以大於 0.8；(2)魚體的擺動推進會在尾跡流中產生一反向的馮卡曼渦流 (Reverse Von Karman Vortex)，因而產生推力。同時由高推進效率也推論出相對於剛體的流場，撓性體擺動的流場可能有層流化的傾向而使得其阻力降低，因此若使用由剛體計算或是量測而得的阻力當基準去評估其推進效率時，才導致超高效率的結果。

本研究利用Tsai[8]所發展的二維雷諾式平均那維爾史托克求解程式(Reynolds Averaged Navier-Stokes Solver)求解二維魚體波動推進(Undulatory Propulsion)流場的似穩態解(Quasi-Steady Solution)，並由計算與實驗結果來探討魚體減阻及推進的機制。

二、流場計算方法

本研究採用非壓縮性黏性流體的運動方程式雷諾氏平均那維爾史托克方程式 (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equation) 為基本方程式，此方程式如下：

$$\underline{\mathbf{E}}\mathbf{q}_t + \underline{\mathbf{F}}_x + \underline{\mathbf{G}}_y = \mathbf{0} \quad (1)$$

$$\underline{\mathbf{E}} = \begin{bmatrix} \beta^{-2} & 0 & 0 \\ (1 + \alpha)\beta^{-2}\mathbf{u} & 1 & 0 \\ (1 + \alpha)\beta^{-2}\mathbf{v} & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\underline{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}^* = \frac{\mathbf{p}}{\rho} \\ \mathbf{u} \\ \mathbf{v} \end{bmatrix}$$

$$\underline{\mathbf{F}} = \begin{bmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{u}^2 + \mathbf{p}^* - \tau_{xx} \\ \mathbf{uv} - \tau_{xy} \end{bmatrix}$$

$$\underline{\mathbf{G}} = \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \mathbf{vu} - \tau_{yx} \\ \mathbf{v}^2 + \mathbf{p}^* - \tau_{yy} \end{bmatrix} \quad (3)$$

α 和 β^{-2} 稱為前條件參數 (Preconditioned Parameters)[27]， u 、 v 為對應座標軸 x 、 y 的流速分量， τ_{ij} 為剪應力的分量、 p 為壓力， ρ 為流體密度。上述方程式為疊代式雷諾氏平均那維爾史托克方程式求姐法所構成的方程式，方程式採用人工壓縮係數法 (Artificial Compressibility)[9] 求解非穩態壓縮方程式，當疊代至非穩態項趨近於零時即可得到穩態非壓縮方程式的解。

方程式的求解在空間的離散採用格點中央 (Cell-Centered) 有限體積法 (Finite Volume Formulation)，在時間的向度的求解採用顯示一步五階的倫矩庫達時間步進法 (Explicit one-step five-stage Runge-Kutta time stepping scheme)，並採用多重格點 (Multigrid) 來加速收斂速度[10]。

在魚體上邊界條件為：

$$\vec{\mathbf{u}} = \vec{\mathbf{v}} \quad (4)$$

其中 \vec{u} 是流場流體的速度， \vec{v} 是魚體擺動的速度。上游入流的邊界條件為：

$$\vec{u} = U_0 \vec{i} \quad (5)$$

$$\nabla p = 0 \quad (6)$$

下游的邊界條件為：

$$\nabla u_j = 0 \quad (7)$$

壓力則採用無反射邊界條件。

流場計算首先以二維翼為計算測試的對象，計算領域的格點採用 C-H 格點，其示意圖如圖一所示。目前程式正進行測試魚體邊界條件。

三、魚體幾何及運動方程式

有關錦鯉魚體的幾何資料如圖 1 所示為其上視圖[11]，魚體運動時身體的擺動方程式：

$$Y = H(x) \times \sin(kx + \omega t + 1.5\pi) \quad (8)$$

其中：

$$H(x) = (0.553x^3 - 0.928x^2 + 0.623x - 0.122)$$

$$k = 2\pi / \lambda \quad (\lambda = 0.674 \times 2)$$

$$\omega = 2\pi / T \quad (T = 0.3003)$$

魚體變化的幾何如圖 2 所示。計算格點密度為 224×64 ，計算格點的示意圖如圖 3 所示。計算時依上一年度 CCD 的攝錄影像的時間間距每一周期用九張影像兩張影像約距離 1/30 秒的時間，計算時收斂標準為流場無因次壓力平均剩餘值小於 10^{-4} 。

四、魚體擺動的物理效應

魚體沒有擺動時的壓力分佈如圖 4 所示，此與一般的翼形的壓力分佈類似，在物體表面的凸面會誘導一低壓，而在凹面會誘導一高壓，壓差是由高壓至低壓所產生的力量其方向向尾鰭的方向因此造成魚體遭受阻力。在圖 4 中即是由黃顏色的高壓區向綠顏色的低壓區。當魚體有擺動速度時其會在迎水面產生停滯高壓，在背水面產生低壓，如圖 5 所示，由黃顏色的高壓在魚體的上方，綠顏色的低壓在魚體的下方，因此壓差產生的力量是由又上往左下，因此產生往前的推力。因此可以明確的得到魚體擺動產生推力的機制。

圖 6 是沒有魚體擺動速度的渦黏度分佈，其中深顏色代表高渦黏度值的區域均集中於魚體的表面，顯示靠近魚體表面時速度變化很大，造成很大的速度梯度而造成較大的黏性阻力。當魚體有擺動速度時，其渦度分佈如圖 7 所示，魚體表面的顏色變淡顯示其渦度不大，此意謂著速度梯度變小，因此其遭受的阻力會變小。因此可以得到魚體的擺動速度將渦度帶離魚體表面而產生減阻的效果。

五、結論

由本研究的計算結果可以得到以下的結論：

1. 魚體的橫向擺動速度會造成其尾部迎水面為高壓，背水面為低壓，由壓差產生的力量會形成推力，使魚體前進獲得前進的力量。
2. 魚體的擺動速度會造成邊界層內的渦黏度往邊界層外移，而使得邊界層內的速度分佈較為和緩，因此造成魚體表面的速度梯度減少，因而造成摩差阻力減少，而產生減阻的效應。

六、參考文獻

1. Anderson JM, Streitlien K, Barrett DS, MS, Triantafyllou "Oscillating foils of high propulsive efficiency," Journal of

- Fluid Mechanics,360:41-72.1998
2. Oshima Y. Coutanceau M, Loc TP, Dulieu A."Vortex Formation around an oscillating and translating airfoil at large angle incidence,"JFM,211:37-60,1990.
 3. Triantafylloy MS, Triantafyllou GS, Gopalkrishnan R, "Wake mechanics for thrust generation in oscillating foils," Physics Fluids A 3:2835-37, 1991.
 4. Wolfgang M. Tolkoﬀ S. Techet A. Barrett A, Triantafyllou MS,et al,"Drag reduction and turbulence control in swimming fish-like bodies," Proc. Int. Symp. Sea-water Drag Reduction, Newport, RI,pp463-69, July, 1998.
 5. Wolfgang M.," Hydrodynamics of flexible body swimming motions," PhD thesis, MIT, Cambridge, MA, 1999.
 6. Wolfgang M., Triantafyllou MS Yue DKP,"Visualization of complex near-body transport processes in flexible-body propulsion," Journal of visualization, 2(2),1999.
 7. Wu T. "Hydrodynamics of swimming propulsion. Part 1. Swimming of two dimensional flexible plate at variable forward speeds in an inviscid fluid,"JFM,46:337-55, 1971.
 8. J.F.Tsai,C.H. Sung,M.J.Griffin and T.T. Huang," Effects of Grid Resolution on Axisymmetric Stern Flows Computed by an Incompressible Viscous Flow Solver," Journal of the Chinese Institute of Engineers, Vol.19, No.4,pp.429-438,1996.
 9. Chorin, A. J., " A Numerical Method for Solving Incompressible Viscous Flow Problems", Journal of Computational Physics, Vol.2, pp.12-26 (1976).
 10. C.H.Sung, J.F. Tsai, T.T. Huang and W.E. Smith,"Effects of Turbulence Models on Axisymmetric Stern Flows Computed by an Incompressible Viscous Flow Solver", The Sixth International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Iowa City, Iowa, Aug., 1993.
 11. 蔡進發"仿生型自主式水下載具阻力推進性能之研究"第三屆水下技術研討會,2000。

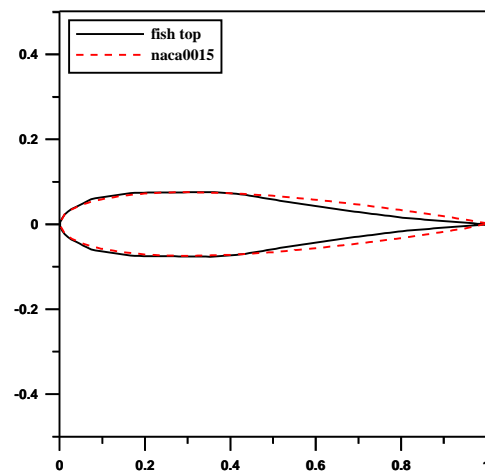


圖 1：魚體上視圖

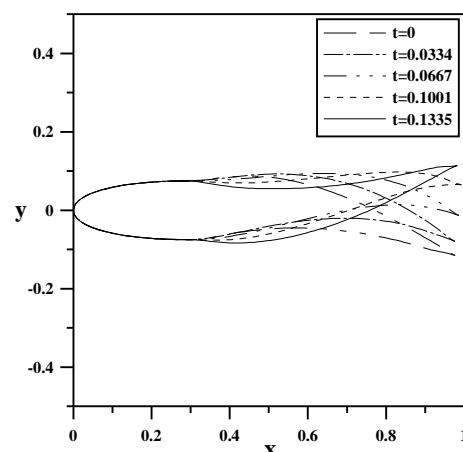


圖 2a：魚體擺動模式(上擺)

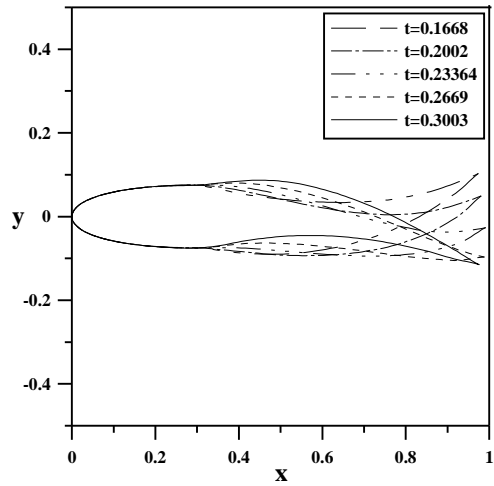


圖 2b：魚體擺動模式(下擺)

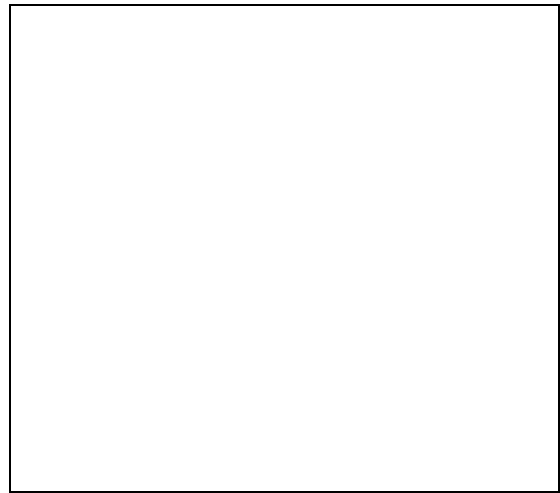


圖 5：有擺動速度的壓力分佈(推力狀態)

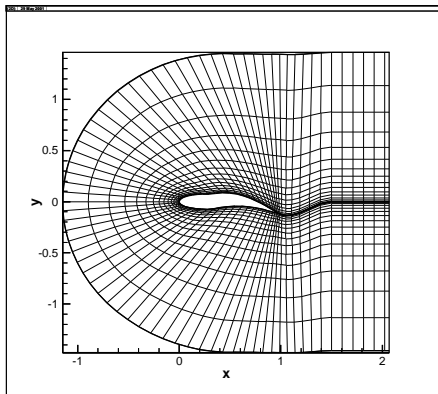


圖 3：流場計算格點示意圖



圖 6：沒有擺動速度邊界層內渦黏度變化



圖 4：沒有擺動速度的壓力分佈(阻力狀態)



圖 7：有擺動速度邊界層內渦黏度變化