

基于尾鳍攻角的机器海豚推进控制研究

沈飞 曹志强 徐德 周超

(中国科学院自动化研究所复杂系统智能控制与管理国家重点实验室(筹), 北京 100190)

摘要 研究了尾鳍攻角对机器海豚推进的影响,以绕有限翼展机翼不可压缩流动理论为基础,将机器海豚的尾鳍建模为有限翼展机翼并进行了受力分析,得出了尾鳍攻角变化律与推进力及推进效率之间的关系,将两关节的机器海豚视为一个多刚体系统,给出了在不考虑机器海豚头部垂直晃动情况下的动力学方程.基于尾鳍攻角变化律得到动力学方程的迭代求解形式,通过正弦和斜齿波尾鳍攻角变化律的仿真对不同攻角规律下的推进效果进行了验证.仿真结果表明:在速度和推进力方面正弦波的攻角变化有一定优势.

关键词 机器海豚; 机翼; 动力学方程; 尾鳍攻角; 推进效率

中图分类号 TP24 文献标志码 A 文章编号 1671-4512(2011)S2-0302-04

Propulsive control for robotic dolphin based on fluke's attack angle

Shen Fei Cao Zhiqiang Xu De Zhou Chao

(State Key Laboratory of Intelligent Control and Management of Complex Systems,
Institute of Automation of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract The effect of the fluke's attack angle on the robotic dolphin's propulsion was studied. The robotic dolphin's fluke was modeled as the finite span airfoil based on the theory of the finite span airfoil in incompressible flow, and the force acting on the robotic dolphin was analyzed. The relationship between the variation of the fluke's angle of attack and the thrust force as well as the propulsive efficiency was established. The dynamic equations without considering the vertical shaking were given for the robotic dolphin with two joints which is seen as a multi-rigid-body system. Also, the iterative solution form of the dynamic equations based on the fluke's attack angle was obtained. The propulsion under different fluke's attack angle was verified by the simulations of the sine and sawtooth profiles. Simulation results show that it has certain advantages in terms of speed and propulsion force when the fluke's attack angle changes in the profile of sine wave.

Key words robotic dolphin; airfoil; dynamic equations; fluke's attack angle; propulsive efficiency

尾部波动是大多数鱼类和鲸豚类产生推进力的主要方式.生物力学家将鱼类摆尾的方式以身体摆动的范围分为4大类^[1]:鳃模式,亚鳃科模式,鳃科模式,鲔行模式(或鳃科及月牙尾模式).鲸豚类属于鲔行模式,其特点是具有高展弦比的尾鳍(如月牙尾),在快速运动中效率最高^[2].

为了研究鲔行式鱼类的推进机理,可以用大展弦比的刚性翼做相同频率的沉浮运动和俯仰运

动的组合来模拟^[3].研究发现影响刚性翼推进性能的主要参数有沉浮运动幅度与翼弦长度之比、名义攻角、沉浮运动与俯仰运动的相位差、无量纲频率 St 数以及俯仰轴在翼弦上的相对位置.另外,柔性翼的弦向柔性及展向柔性也会影响其推进效率^[4-5].

关于如何优化各个参数以提高翼型的推进效率,吸引了众多学者的注意.例如,文献^[3]给出了

收稿日期 2011-07-15.

作者简介 沈飞(1986-),男,博士研究生, E-mail: fei.shen@ia.ac.cn.

基金项目 国家高技术研究发展计划资助项目(2009AA043901);国家自然科学基金资助项目(60725309, 60805038).

翼型高效率推进 3 个参数(沉浮振幅, St 数, 最大攻角)满足的条件, 文献[6]在雷诺数和沉浮幅度一定的情况下研究了推进力、推进效率与 St 数和最大攻角的关系. 文献[7]指出翼型攻角的变化律也对推进效率有影响. 与上述针对特定翼型开展研究不同, 文献[8]通过对 6 种鲸豚类的研究, 得出了游动效率随 St 数的变化关系.

以绕有限翼展机翼不可压缩流动理论为基础, 本文将机器海豚的尾鳍建模为有限翼展机翼, 研究攻角变化律对推进力及推进效率的影响, 给出了两关节机器海豚基于尾鳍攻角的控制方法, 并对正弦波和斜齿波两种攻角变化律进行了仿真验证.

1 机器海豚尾鳍建模

生物海豚的形态特点概括为纺锤流线型的身体, 光滑紧贴的皮肤, 肌肉发达的梗尾部, 高纵横比的尾鳍以及带有后掠角的胸鳍^[9]. 海豚高度发达的尾部肌肉和尾鳍为其提供了游动的主要动力. 根据上述形态特点采用有限翼展机翼模型(以下简称尾鳍机翼)对机器海豚的尾鳍进行分析.

如图 1 建立尾鳍机翼坐标系, 其中 $oxyz$ 为惯

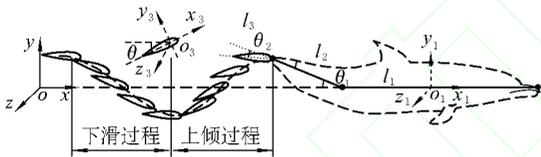


图 1 机器海豚尾鳍建模

性坐标系, $o_1x_1y_1z_1$ 为机器海豚头部的联体坐标系, $o_3x_3y_3z_3$ 为尾鳍机翼的联体坐标系, o_3 为尾鳍机翼的流体动力中心, o_3x_3 轴与弦线重合, 方向从后缘指向前缘, o_3y_3 轴与弦线垂直向上. l_1 , l_2 和 l_3 是组成机器海豚的 3 个连杆, θ_1 和 θ_2 分别为 l_2 和 l_3 的关节角(连杆轴间的夹角), θ 为 o_3x_3 轴与 ox 轴的夹角(当 o_3x_3 轴位于 ox 轴上方为负, 相反为正). 这里不考虑海豚头部沿 y 轴的晃动. 将尾鳍的运动分解为沿 x 轴的平动、沿 y 轴的沉浮运动和绕 o_3z_3 轴的俯仰运动, 可表示为

$$\begin{cases} x_3 = \int_0^t U dt + h(\omega t); \\ y_3 = f(\omega t); \\ \theta = \theta_0 g(\omega t + \psi), \end{cases} \quad (1)$$

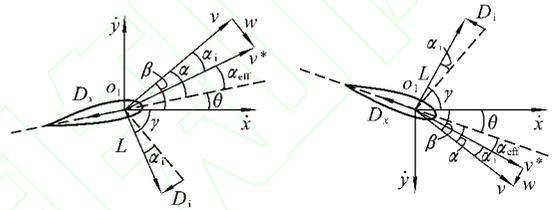
式中: U 为机器海豚的游动速度; θ_0 为俯仰运动的幅度; ψ 为沉浮运动和俯仰运动的相位差; ω 为波动周期的角频率; $g(\omega t)$ 为俯仰变化律; $h(\omega t)$ 和

$f(\omega t)$ 分别为尾鳍机翼由于拍动在 ox 和 oy 轴产生的位移分量. 沉浮运动和俯仰运动的周期为 $T=2\pi/\omega$.

2 基于尾鳍攻角变化律的推进

2.1 推进力及推进效率的计算

首先记 $\alpha, \alpha_{\text{eff}}$ 和 α_i 分别为几何攻角、有效攻角和诱导攻角, β 为沉浮速度 \dot{y} 和平动速度 \dot{x} 的合速度 v 与 ox 轴的夹角, γ 为升力 L 与 ox 轴的夹角. 依照几何攻角的正负性将尾鳍的运动分为上倾和下滑 2 个过程. 图 2 为尾鳍在 2 个过程中某一时刻的受力分析图. 在上倾过程中 $\gamma = -\pi/2 - \theta - \alpha_{\text{eff}}$, 在下滑过程中 $\gamma = \pi/2 - \theta - \alpha_{\text{eff}}$, 在整个过程中 $\beta = \arctan(\dot{y}/\dot{x}) = -\alpha - \theta$.



(a) 上倾过程 (b) 下滑过程

图 2 海豚尾鳍受力分析图

考虑流体对尾鳍机翼翼梢附近的卷动作用, 会产生下洗速度 w , 从而会产生诱导阻力 D_i , D_i 成为尾鳍机翼阻力的重要组成部分. 另外, 由流体的黏性作用而产生的型阻 D_x , 方向为沿 o_3x_3 轴负方向.

在上倾过程中, 由于攻角为负, 则尾鳍机翼受到的升力 L 的方向垂直 v^* (v 与 w 合成为 v^*) 向下. 在下滑过程中, 由于攻角为正, 则其受到的升力 L 的方向垂直 v^* 向上. 将以上各力在 ox 轴和 oy 轴投影分别得到尾鳍机翼的推进力 F_T 和 oy 轴方向的合力 F_y , 进而得到在 1 个波动周期 T 内的平均推进力 \bar{F}_T :

$$F_T = L \cos \gamma - D_i \cos \beta - D_x \cos \theta;$$

$$F_y = L \sin \gamma - D_i \sin \beta + D_x \sin \theta;$$

$$\bar{F}_T = \frac{1}{T} \int_0^T F_T dt.$$

升力 L 和诱导阻力 D_i 通常用升力系数 C_L 和诱导阻力系数 C_{D_i} 的形式表达为 $C_L = L/(q_\infty A)$ 和 $C_{D_i} = D_i/(q_\infty A)$, 其中: $q_\infty = \rho v^*{}^2/2 \approx \rho v^2/2$ 为单位动能; ρ 为流体密度; A 为尾鳍机翼面积. 由升力线理论可以得到有限展翼的升力与几何攻角的关系, 诱导阻力系数与升力系数的关系^[10].

计算尾鳍的输入功率时, 将尾鳍的平均输入

功率近似为整个机器海豚的平均输入功率 \bar{P} ,

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_0^T \left(\sum_{i=1}^n Q_i(t) \frac{d\theta_i(t)}{dt} \right) dt,$$

式中: $Q_i(t)$ 为驱动第 i 关节的电机的输出力矩; $\theta_i(t)$ 为第 i 关节的关节角. 将平均推进力和平均输入功率分别表达为推进力系数 $C_T = 2\bar{F}_T / \rho A \bar{U}^2$ 、推进功率系数 $C_P = 2\bar{P} / \rho A \bar{U}^3$, 得到推进效率为

$$\eta = \bar{F}_T \bar{U} / \bar{P} = C_T / C_P,$$

式中 \bar{U} 为一个波动周期的平均速度.

2.2 基于尾鳍攻角的两关节机器海豚控制方法

本文以两关节机器海豚为例, 介绍使其尾鳍攻角呈一定规律变化的实现方法. 将机器海豚视为一个多刚体系统, 建立 ox 和 oy 轴方向的动力学方程如下

$$\begin{cases} F_{x2} + F_{x3} + f(U) = m_1 \dot{U} + m_2 \ddot{x}_2 + m_3 \ddot{x}_3; \\ F_{y3} + F_{y2} = m_2 \ddot{y}_2 + m_3 \ddot{y}_3, \end{cases} \quad (2)$$

其中: F_{x3} 为 l_3 在 ox 轴方向的推进力; F_{y3} 为 l_3 在 oy 轴方向的合力; F_{x2} 为 l_2 在 ox 轴方向的推进力; F_{y2} 为 l_2 在 oy 轴方向的合力; \dot{U} 为 l_1 的加速度; \ddot{x}_2 和 \ddot{x}_3 分别为 l_2 和 l_3 在 ox 轴方向上的加速度; \ddot{y}_2 和 \ddot{y}_3 分别为 l_2 和 l_3 在 oy 轴方向的加速度; $f(U) = 0.5\rho C_f U^2 A_1$ 为 l_1 的截面阻力; C_f 为阻力系数, 取 $C_f = 0.295$; A_1 为 l_1 的迎流截面积; m_1, m_2 和 m_3 分别这 l_1, l_2 和 l_3 的质量.

由式(1)知尾鳍机翼的运动可描述为

$$\begin{cases} \dot{x}_3 = U + L_2 S_1 \dot{\theta}_1 + L_3 S_{12} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) / 4; \\ \dot{y}_3 = L_2 C_1 \dot{\theta}_1 + L_3 C_{12} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) / 4; \\ \theta = \theta_1 + \theta_2, \end{cases} \quad (3)$$

式中: $C_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2)$; $S_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2)$; $C_1 = \cos \theta_1$; $S_1 = \sin \theta_1$; L_1, L_2 和 L_3 分别为杆 l_1, l_2 和 l_3 的杆长.

将式(3)代入 $\arctan(\dot{y}_3/\dot{x}_3) = -\alpha - \theta_1 - \theta_2$ 并联立式(2)得迭代方程组

$$\begin{cases} \dot{\theta}_2 = z_1 / z_2; \\ \ddot{\theta}_2 = 4(F_{y3} + F_{y2} - m_3 z_3 - m_2 z_4) / (m_3 L_3 C_{12}); \\ \dot{U} = [F_{x2} + F_{x3} + f(U) - m_3 z_5 - m_2 z_6] / (m_1 + m_2 + m_3), \end{cases} \quad (4)$$

式中:

$$\begin{aligned} z_1 &= -L_2 C_1 \dot{\theta}_1 - L_3 C_{12} \dot{\theta}_1 / 4 + \\ &\tan \theta [L_2 S_1 \dot{\theta}_1 + L_3 S_{12} \dot{\theta}_1 / 4 + U]; \\ z_2 &= L_3 (C_{12} - S_{12} \tan \theta) / 4; \\ z_3 &= -L_2 S_1 \dot{\theta}_1^2 + L_2 C_1 \ddot{\theta}_1 - L_3 S_{12} (\dot{\theta}_1 + \\ &\dot{\theta}_2)^2 / 4 + L_3 C_{12} \ddot{\theta}_1 / 4; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} z_4 &= -L_2 S_1 \dot{\theta}_1^2 / 2 + L_2 C_1 \ddot{\theta}_1 / 2; \\ z_5 &= L_2 C_1 \dot{\theta}_1^2 + L_2 S_1 \ddot{\theta}_1 + L_3 C_{12} (\dot{\theta}_1 + \\ &\dot{\theta}_2)^2 / 4 + L_3 S_{12} (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) / 4; \\ z_6 &= L_2 C_1 \dot{\theta}_1^2 / 2 + L_2 S_1 \ddot{\theta}_1 / 2; \\ \tan \theta &= \tan(\theta_1 + \theta_2 + \alpha); \end{aligned}$$

F_{y2}, F_{y3}, F_{x2} 和 F_{x3} 均是 $\theta_1, \theta_2, \alpha(t), U, \dot{\theta}_1$ 和 $\dot{\theta}_2$ 的函数. 由式(4)知, 若给定攻角 $\alpha(t)$ 和 θ_1 的变化律, 则可以通过迭代求解 θ_2 和 U 的变化律.

3 仿真结果

为了验证不同的攻角变化律对推进力及推进效率的影响, 选取了具有代表性的 2 组规律进行验证, 正弦波变化律和斜齿波变化律如下所示

$$\begin{aligned} \alpha_1(t) &= \alpha_{amp} \sin(\omega t) \quad (0 \leq t \leq T); \\ \alpha_2(t) &= \begin{cases} 4\alpha_{amp}(t/T) & (0 \leq t < T/4), \\ -\alpha_{amp}(4t/T - 2) & (T/4 \leq t < 3T/4), \\ 4\alpha_{amp}(t/T - 1) & (3T/4 \leq t \leq T), \end{cases} \end{aligned}$$

式中 α_{amp} 为攻角变化幅度. 取 $\theta_1 = \pi / (6\cos(\omega t))$ 并将 $\alpha_1(t)$ 和 $\alpha_2(t)$ 分别代入式(4), 经过迭代得出在 2 种不同攻角变化律下的游动速度 U 、关节角控制规律 θ_2 和推进力 F_{x3} 的变化情况.

仿真中采用的参数为: $m_1 = 7.23 \text{ kg}$, $m_2 = m_3 = 0.0845 \text{ kg}$, $L_1 = 0.36 \text{ m}$, $L_2 = 0.065 \text{ m}$, $L_3 = 0.12 \text{ m}$, $s = 0.28 \text{ m}$, $A_3 = 0.027 \text{ m}^2$, $\alpha_{amp} = 15^\circ$, $T = 1 \text{ s}$, 步长 $h = 1 \text{ ms}$. 根据型阻 D_x 与攻角关系的实验与理论结果图^[10], 此处将 D_x 与攻角的关系近似为 $D_x = 0.0893\rho\alpha^2 U^2 A_3$.

图 3 为在 3 个波动周期下 l_3 的关节角 θ_2 的

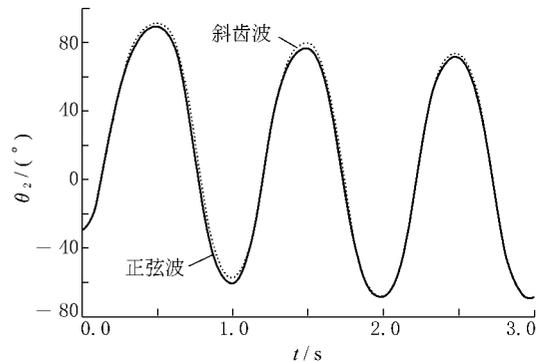
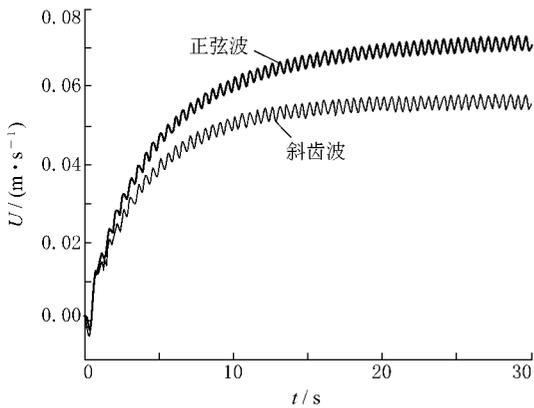


图 3 θ_2 的变化结果图

变化结果图, 可以看出在斜齿波攻角变化律下 θ_2 的幅度比正弦波攻角变化律下略微大一些. 图 4 为在 30 个波动周期下机器海豚的游动速度 U 的变化结果图, 可以看出随着时间的推移速度 U 变化趋于稳定, 且正弦波攻角变化律下的速度 U 要大于斜齿波. 图 5 为在 3 个波动周期下尾鳍机翼

图4 U 的变化结果图

的推进力系数变化结果图,即 $C_F = 2F_{x3} / (\rho A_3 \bar{U}^2)$, $\bar{U} = 0.06$ m/s,反映了 l_3 产生的推进力 F_{x3} 的变化情况,可以看出正弦波变化律下的 F_{x3} 的幅度大于斜齿波的.所以,在速度和推进力方面正弦波的攻角变化律有一定的优势.

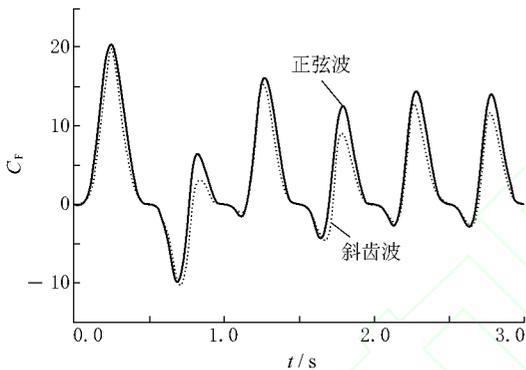


图5 推进力系数变化结果图

本文对机器海豚的尾鳍进行建模,利用绕有限翼展机翼不可压缩流动理论分析了尾鳍在一个波动周期内的受力情况,给出了推进力及推进效率的计算方法.同时以两关节机器海豚为例,介绍了基于尾鳍攻角的控制方法.仿真结果表明在不同的攻角变化律下机器海豚的推进效果是不同的.下一步准备对整个机器海豚系统进行动力学建模求取各关节的输出力矩,从而求得机器海豚的输入功率来验证尾鳍攻角对整个机器海豚推进

效率的影响.

参 考 文 献

- [1] Colgate J E, Lynch K M. Mechanics and control of swimming: a review[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2004, 29(3): 660-673.
- [2] Bose N, Lien J. Propulsion of a fin whale (Balaeonoptera physalus) why the fin whale is a fast swimmer[J]. Proceedings of the Royal Society London, 1989, 237: 175-200.
- [3] Triantafyllou M S, Triantafyllou G S, Yue D K P. Hydrodynamics of fishlike swimming[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2000, 32: 33-53.
- [4] Prempraneerach P, Triantafyllou M S. The effect of chordwise flexibility on the thrust and efficiency of a flapping foil[C]// 13th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology. Durham: Autonomous Undersea Systems Institute, 2003: 24-27.
- [5] Liu P, Bose N. Propulsive performance from oscillating propulsors with spanwise flexibility[J]. Proceedings of the Royal Society London, 1997, 453: 1763-1770.
- [6] Schouveiler L, Hover F S, Triantafyllou M S. Performance of flapping foil propulsion[J]. Journal of Fluids and Structures, 2005, 20(7): 949-959.
- [7] Hover F S, Haugsdal O, Triantafyllou M S. Effect of angle of attack profiles in flapping foil propulsion[J]. Journal of Fluids and Structures, 2004, 19: 37-47.
- [8] Rohr J J, Fish F E. Strouhal numbers and optimization of swimming by odontocete cetaceans[J]. Journal of Experimental Biology, 2004, 207: 1633-1642.
- [9] Fish F E, Rohr J J. Review of dolphin hydrodynamics and swimming performance[R]. San Diego: United State Navy, 1999.
- [10] 李凤蔚. 空气与气体动力学引论[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007.