[研究・设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2019.06.008

尾鳍面积对摆动推进力大小的影响

章永华

(台州技师学院自动化系,浙江台州 318000)

摘 要:目前,尾鳍面积对游动性能影响的研究大多采用鳍面整体缩放而鲜有通过设置漏空区域来改变面积的方法。笔 者以新月形尾鳍为研究对象,建立尾鳍三维运动学模型。选择矩形和圆形2种漏空区域,在漏空区域面积不变的前提 下,利用计算流体动力学原理,研究了漏空区域形状和分布对推力的影响。给出了尾鳍表面压力分布和无量纲阻力系数 变化情况,结合尾鳍不同切面涡结构,揭示通过在尾鳍表面设置漏空区域调节推进力的规律。该研究成果为优化尾鳍摆 动推进力提供了参考。

关键 词:衍生学;尾鳍;漏空区域;推进力;摆动
 中图分类号:TP242.6 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2019)06-0039-05

Influence of Caudal Fin Area on Thrust Generation During Oscillating Motion

ZHANG Yonghua

(Department of Automation, Taizhou Technician College, Taizhou, Zhejiang 318000, China)

Abstract: Nowadays, most studies on the influence of caudal fin area on swimming performance adopt the method of overall fin surface scaling and rarely change the area by setting the leakage area. A three dimensional kinematic model of crescent shaped caudal fin was established. The rectangular and circular leaking areas were selected. By taking the advantage of computational fluid dynamics (CFD), the influences of shape and distribution of the leaking area on the thrust were investigated under the premise of the same total leaking area. The pressure distribution of the caudal fin surface and the non-dimensional drag coefficient were presented. According to the vortex structure on the different slices of the caudal fin, the regularity of adjusting propulsion force by setting a leaking area to the fin surface were revealed. The research provides a reference for the optimization of propulsion thrust of a caudal fin during oscillating motion. **Keywords**: bionics ; caudal fin; leaking area; thrust; oscillation

尾鳍是鱼体结构上用于产生推进力的最重要部位 之一,尾鳍摆动推进作为鱼类最简单的推进模式,在上 世纪初便受到科学家的关注^[12]。最早用于研究尾鳍 摆动各参数与推进力大小关系的是 Taylor 在 1952 年 建立的适用于低雷诺数的"抗力水动力学模型"^[3]。 Lighthill 首次将"二维波动板理论"应用于新月形尾 鳍,提出大展弦比鲹科鱼类的尾鳍能够提供高效的游 动表现^[4]。程健宇提出的"三维柔性波动板模型"进 一步阐明和完善了新月形尾鳍推进力产生的机理^[5]。 此外,苏玉民利用"三维面元法"计算了刚性和柔性金 枪鱼尾鳍非定常水动力学性能^[6]。

随着科技的发展,仿真技术和试验手段在尾鳍的 研究中得以广泛应用,如尾鳍刚度^[7-8]、形状^[9]、面 积^[10-11]、鳍条运动^[12]和摆动相位^[13]等对尾鳍推进力、 速度和效率的影响。结果表明,尾鳍形状、面积等均会 对鱼类的运动能力和运动方式产生影响。Flammang 对蓝鳃太阳鱼尾鳍在加速、制动和后退过程中通过改 变面积实现调节与控制的机理进行了研究^[14]。Zhang 通过数值和实验研究相结合的方式研究了鲸鱼、海豚 和金枪鱼的尾鳍对扑动推进性能的影响,发现金枪鱼

收稿日期:2019-04-25;修回日期:2019-08-15

基金项目:浙江省自然科学基金项目(LY15E060001)。

第一作者简介:章永华(1980),男,浙江台州人,博士,副教授,从事仿生机器人研究。E-mail: 11123439@ qq. com

尾鳍产生的推进力虽然不是最大的,但是推进效率却 是最高的^[15]。Xin 研究了鱼类自由推进时尾鳍形状对 游动速度和效率的影响,发现不同游动方式下的最佳 尾鳍形状不尽相同^[16]。在中低游速条件下,新月形尾 鳍产生最佳的游动速度,其效率和操控性也优于其他 形状的尾鳍。Liu 等研究了一种新型变面积尾鳍,发 现在尾鳍摆动过程中,恰当的改变迎水面面积,可以提 高推进力^[17]。杨晗等研究了尾鳍缺失对鳊鱼幼鱼游 动能力、能量效率与行为的影响,统计实验鱼游动过程 中的摆尾频率及单侧最大摆尾幅度,揭示尾鳍的缺失 对实验鱼运动能力的影响规律^[18]。

受上述研究的启发,笔者以新月形尾鳍为研究对象,通过设置漏空区域来改变尾鳍面积,研究漏空区域 形状和分布对尾鳍摆动推进力的影响,为优化尾鳍摆 动推进力提供参考。

1 运动学建模

尾鳍坐标系如图1所示。



图1 尾鳍坐标系



尾鳍作等幅往复周期性摆动,其运动学方程为

 $\omega(t) = 2\pi f \theta_{\max} \cos \left(2\pi t f - \theta_0 \right)_{\circ}$ (1) 式中: $\omega(t)$ 为角速度; θ_{\max} 为最大摆幅;f为摆动频率; θ_0 为初始相位。

在整个研究过程中: $\theta_0 = 0$; θ_{max} 值为 0.2 倍尾鳍宽 度;f = 4 Hz。

2 数值计算

2.1 模型种类

如图 2 所示,选择矩形和圆形 2 种漏空区域,分别 计算了尾鳍无漏空、矩形漏空对称分布、圆形漏空居中 分布以及矩形漏空不对称分布 4 种情况。尾鳍模型总 面积为 982 mm²,其中漏空区域面积 180 mm²。

2.2 控制方程

在计算域内求解笛卡尔坐标系下不可压缩的黏性 纳维-斯托克斯方程和连续性方程表达式:

$$\nabla \cdot U = 0;$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (U \cdot \nabla) U = F - \frac{1}{\rho} \nabla p + U \nabla^2 \mu_{\circ} \bigg\}$$
(2)



(a)无漏空与矩形漏空 (b)矩形漏空与圆形漏空 (c)矩形漏空不同分布

图 2 尾鳍漏空区域的形状及分布 Figure 2 Shape and distribution of

caudal fin surface empty area

式中:U 为水流速度; ρ 为流体密度;p 为压力;F 为物体对流体的作用力; μ 为流体动力黏性系数。

2.3 计算条件

来流速度设置为0.1 m/s,入口为速度入口,出口 为压力出口,其余为无滑移壁面边界条件。利用有限 体积法对模型及计算区域进行离散,使用非耦合隐式 求解器求解式(2)。黏性项采用标准模态离散,压力/ 速度耦合项为 SIMPLE 算法,对流项和时间离散为一 阶迎风格式。采用动网格技术,当单元畸变超过最大 单元畸变0.6 时,网格被自动重新划分,从而改善网格 质量,提高计算精确度。硬件配置为 CPU i5-6500,主 频率为3.2 GHz,内存为8 GB。计算时间步长0.01 s, 总步数 200,每时间步迭代次数为50,每个算例用时约 16 h。

2.4 计算区域与网格划分

计算区域如图 3 所示,为长方体三维空间。为减 少壁面效应对计算结果的影响,模型前沿离入口边界 1.5 个模型长度,模型后边沿离出口边界 3 个模型长 度,模型距离四周壁面 1.5 个模型长度,使尾鳍运动形 成的漩涡能够充分发展。



采用四面体非结构网格划分计算域,并对模型周 边及尾迹区域进行网格加密,其目的不仅有利于提高 核心区域的计算质量,而且可以减少计算时间。

2.5 无量纲阻力系数

尾鳍受到的力是通过所设定的长度、面积和速度 等特征参数在整个尾鳍表面的积分转化得到的。一般 而言,研究鱼鳍推进力的方法有2种:①模型自由推进 模式,即模型在一定的参数下按照给定的规律运动;根 据牛顿定律计算出推进力,常以推力系数表示。②模 型固定模式,即模型在固定位置运动;设定来流速度后 计算模型产生的综合推进力,常以阻力系数表示。当 阻力系数为负时,表示模型产生的推进力大于流体阻 力,综合推力方向与推进方向一致,否则为相反。此处 采用的无量纲阻力系数 *C*_d 及其平均值*C*_d定义如 下^[19]:

$$C_{d} = \frac{F_{x}(t)}{0.5\rho U^{2}S};$$

$$\overline{C_{d}} = \frac{\int_{mt}^{(m+n)t} C_{d}(t) dt}{nt}_{\circ}$$
(3)

式中:F(t)为 x 方向的分力;S 为鳍面迎水面面积;m 和 n 为自然数。

3 计算结果

3.1 压力分布

如图 4 所示,鱼鳍在摆动过程中受到流体的作用 力,使其表面产生高低压区。迎水面一侧呈现高压,背 水面一侧为低压。



Figure 4 Contour of pressure distribution

对于完整鱼鳍,压力随着尾鳍的摆动由前往后传 递。*t*=*T*时,压力在表面呈对称分布,强度由中间往 两侧逐渐减弱。在边缘区域存在局部压力损失现象。研究表明,该压力损失是由边缘的涡翻滚引起的^[19]。对于有漏空区域的尾鳍,漏空区域使表面压力的分布发生变化,最直接的影响是使压力差变小。在减少尾鳍击水过程推力的同时也减少了尾鳍回缩过程流体阻力。同样,在漏空区域边缘也有局部压力损失情况。周期性的压力变化也体现在无量纲阻力系数随时间作周期性波动上。

3.2 无量纲阻力系数

如图5所示,计算中尾鳍摆动频率为4Hz,无量纲 阻力系数曲线在尾鳍一个摆动周期内出现2次波峰和 波谷。波动幅度最大的是无漏空区域尾鳍,尤其在击 水过程,相比存在漏空区域的尾鳍,幅度变化非常显 著,说明该过程产生较大的推进力。



图5 无量纲阻力系数 C_d 变化规律

Figure 5 Change of non-dimensional $C_{\rm d}$

3.3 平均无量纲阻力系数对比

根据式(3),求得平均无量纲阻力系数大小,如图 6 所示。

3.3.1 有无漏空区域对比分析

从图 6(a)可知:无漏空区域尾鳍的平均无量纲阻 力值约为 1.98×10⁻⁴,矩形对称漏空时的平均无量纲 阻力值约为 5.76×10⁻⁴。这表明漏空区域的存在减 少了尾鳍有效面积,从而降低了平均推进力。该结论 与早期李龙等的实验研究结果相类似^[20],即无论以何 种方式减少鱼鳍面积都将导致推进力的降低。

3.3.2 漏空区域形状对比分析

从图 6(b) 可以看出:相比矩形对称漏空的平均无量纲阻力系数 5.76×10⁻⁴,圆形漏空的平均无量纲阻





力系数约为4.78×10⁻⁴,其推进力提升约17%。

3.3.3 漏空区域分布对比分析

从图 6(c)可知:当矩形漏空不对称分布时,平均 无量纲阻力系数约为 4.40 × 10⁻⁴,推进力比对称分布 时提升约 23.6%。

综上所述,漏空区域的存在减少了尾鳍有效面积, 降低了综合推进力。但是推进力周期变化幅度也随之 减小,使得推进稳定性得以提升。可从涡街结构进一 步阐述其原理。

3.4 涡街分布

尾鳍摆动形成三维流场结构比较复杂,因此在2

个主要平面上选择切面来观察分析涡街结构,分别为 XOZ 平面和 XOY 平面,如图 7 所示。

旋涡中心 流体反 作用力



边界层 (a) XOZ平面无漏空区域涡量







(c) XOZ平面矩形不对称漏空区域涡量 (d) XOZ

局量 (d) XOZ平面圆形漏空区域涡量





(e) XOY平面无漏空区域涡量

(f) XOY平面矩形对称漏空区域涡量





(g) XOY平面矩形不对称漏空区域涡量 (h) XOY平面圆形漏空区域涡量

图7 尾鳍不同截面涡街分布 Figure 7 Vortices distribution of caudal fin in different slices

三维涡量计算公式如式(4)所示: $\frac{\partial U_x}{\partial x} \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial U_y}{\partial y} \frac{\partial U_z}{\partial z} + \frac{\partial U_x}{\partial x} \frac{\partial U_z}{\partial z} - \frac{\partial U_y}{\partial x} \frac{\partial U_x}{\partial y} - \frac{\partial U_z}{\partial x} \frac{\partial U_z}{\partial z} - \frac{\partial U_y}{\partial z} \frac{\partial U_z}{\partial y} \circ$ (4)

式中 U_x, U_y, U_z 分别为流体沿 x, y, z 方向速度分量。 与圆柱绕流形成的卡门涡街不同, 尾鳍摆动形成 反卡门涡街,且在不同雷诺数下涡街形态、结构和分布 会不同。在 XOZ 平面作 2 个切面(t = T):一个切面位 于尾鳍中间位置,另一个切面接近尾鳍一侧边缘。对 于无漏空区域尾鳍,2 个切面上涡街结构差异并不显 著,当涡的脱落和发展在尾迹区域形成反卡门涡对,涡 对间的射流反作用于鳍面,成为另一个产生推进力的 原因。当漏空区域存在时,2 个切面上的涡结构差异 显著,不漏空区域有新的涡街形成和脱落,破坏了涡对 结构,不仅影响推进力的产生,也增加了流体阻力。这 一点从 XOY 平面方向切面涡量图也可以发现:漏空区 域存在对涡街有明显的影响,主要是漏空区域处附近 流体结构比较混乱,扰动的流体进而进入尾迹,干扰了 尾鳍无漏空区域稳定的反卡门涡街。

4 结论

笔者利用计算流体动力学原理,通过在尾鳍设置 漏空区域来改变面积,研究了漏空区域形状和分布对 推进力的影响得出如下结论:

 漏空区域的形状、大小和分布对推进力有一定 的影响。初步研究结果显示:漏空区域的存在减少了 尾鳍的有效面积,降低了综合推进力,但是推进稳定性 却得以提升。相同面积下,圆形漏空比矩形漏空对推 进力的影响要小,矩形漏空不对称分布比矩形漏空对 称分布对推进力的影响要小。

2)从涡动力学角度看,漏空区域的存在使其附近的流体变得混乱,这些紊乱的流体进入尾迹,干扰了尾 鳍尾迹区域反卡门涡街的脱落和发展,破坏了涡对结构,不仅影响推进力的产生,也增加了流体阻力。

今后将进一步研究其它形状漏空区域以及它们的 分布对游动效果的影响。在此基础上,分析在摆动过 程中,尾鳍面积恰当改变对推进力、游动速度和效率等 的影响。

参考文献:

- $\label{eq:shared} \begin{array}{ll} \mbox{[1]} & \mbox{NABRIT S M. The role of the fin rays in the regeneration in the tailfins of fishes [J]. The Biological Bulletin, 1929, 56(4):235-266. \end{array}$
- [2] THOMPSON F L, GILRUTH R R. Notes on the stalling of vertical tail surfaces and on fin design [J]. NASA Technical Reports Server, 1940,778:1-11.
- [3] TAYLOR G I. Analysis of the swimming of long and narrow animals
 [J]. The Royal Society: Mathematical, Physical and Engineering Science, 1952, 214(1117):158 - 183.

Annual Review of Fluid Mechanics, 1969, 1:413-446.

- [5] 程健宇,庄礼贤,董秉纲. 新月形尾鳍推进的流体力学分析[J]. 力学学报,1992,24(4):458-465.
- [6] 苏玉民,黄胜,庞永杰,等. 仿鱼尾潜器推进系统的水动力分析
 [J].海洋工程,2002,20(2):54-59.
- [7] ROOT R G, LIEW C W. Computational and mathematical modeling of the effects of tail beat frequency and flexural stiffness in swimming fish
 [J]. Zoology, 2014, 117(1):81.
- [8] ZHU Qiang, BI Xiaobo. Effects of stiffness distribution and spanwise deformation on the dynamics of a ray-supported caudal fin [J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2017, 12(2):026011.
- [9] 张德欣,安伟光,张永顺. 微机器鱼尾鳍形状的结构优化[J]. 哈尔滨工程大学学报,2008,29(9):912-917.
- [10] 闫冠杰,曹振东,彭姜岚,等.运动锻炼对鲤鱼幼鱼形态参数的 影响[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2011,28(3):18-21.
- [11] PON L B, HINCH S G, WAGNER G N, et al. Swimming performance and morphology of juvenile sockeye salmon, oncorhynchus nerka: comparison of inlet and outlet fry populations [J]. Environmental Biology of Fishes, 2007, 78(3):257 - 269.
- [12] REN Ziyu, YANG Xingbang, WANG Tianmiao, et al. Hydrodynamics of a robotic fish tail: effects of the caudal peduncle, fin ray motions and the flow speed [J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2016, 11(1):016008.
- [13] YUN D, KIM K S, KIM S. Thrust characteristic of a caudal fin with spanwise variable phase [J]. Ocean Engineering, 2015, 104:344 – 348.
- [14] FLAMMANG B E, LAUDER G V. Caudal fin shape modulation and control during acceleration, braking and backing maneuvers in bluegill sunfish, lepomis macrochirus [J]. Journal of Experimental Biology, 2009, 212(2):277 - 286.
- [15] ZHANG Xi, SU Yumin, WANG Zhaoli. Numerical and experimental studies of influence of the caudal fin shape on the propulsion performance of a flapping caudal fin [J]. Journal of Hydrodynamics, 2011, 23 (3):325-332.
- [16] XIN Zhiqiang, WU Chuijie. Shape optimization of the caudal fin of the three-dimensional self-propelled swimming fish [J]. Science China Physics, Mechanics and Astronomy, 2013, 56(2):328-339.
- [17] LIU Bo, WANG Lei, CHEN Buyao, et al. Experimental research on a novel design of variable area caudal fin[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 461:206-212.
- [18] 杨晗,曹振东,付世建. 尾鳍缺失对鳊鱼幼鱼游泳能力、能量效率与行为的影响[J]. 水生生物学报,2013,37(1):157-163.
- [19] 章永华,何建慧. 鳍条运动模式对仿生波动鳍推进力影响的研究[J]. 工程设计学报,2017,24(1):89-99.
- [20] 李龙,尹协振. 鲹科类鱼尾模型的巡游推进特性实验研究[J]. 实验流体力学,2008,22(1):1-6.