仿胸鳍推进系统的水动力实验研究

王兆立，苏玉民，王晓飞，于宪钊，秦再白

（哈尔滨工程大学 水下智能机器人技术国防科技重点实验室，哈尔滨 150001，wangzhaoli_heu@163.com）

摘 要：为了研究仿生力学在非定常流动中的应用，针对刚性胸鳍建立了二自由度运动模型，设计了实现二自由度运动模式的仿胸鳍操纵系统的实验装置. 胸鳍推进系统主体由两个伺服电机控制系统组成，能够产生限定范围内的各种预定的摇翼运动和前后拍翼运动的组合. 研究耦合运动的相位差、摆动频率、滚转幅值、拍动幅值、滚转偏角、拍翼偏角等参数对胸鳍水动力性能的影响，得到各水动力系数在一个周期内随时间的变化趋势. 实验结果为研发高机动仿生水下机器人奠定了技术基础.

关键词：仿生推进系统；胸鳍；二自由度；水动力性能

中图分类号：U661.313 **文献标志码**：A **文章编号**：0367－6234(2010)07－1141－04

Experimental study on the hydrodynamic performance analysis of a pectoral-fin propulsive system

WANG Zhao-li, SU Yu-min, WANG Xiao-fei, YU Xian-zhao, QIN Zai-bai

(State Key Laboratory of Autonomous Underwater Vehicle, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China, wangzhaoli_heu@163.com)

Abstract: In order to research the bionic mechanics in unsteady flow, a two-degree of freedom (DoF) motion model was established for a rigid pectoral fin, and the experimental device named imitating pectoral fin system for the propulsive system was developed. This fin propulsive system consists of two servomotors and can realize various demanded feathering lead-lag coupling motions within the system limitation. During the experiment, the effects of phase difference, oscillating frequency, oscillating amplitudes and angular bias on the hydrodynamic performances were studied. The hydrodynamic coefficients against time in a cycle were obtained and analyzed. The study provides a foundation for the development of small underwater bio-robot.

Key words: bionic propulsion system; pectoral fin; 2-DoF; hydrodynamic performance

目前，水下仿生技术研究集中于尾鳍/鱼体推进，但在低速情况下，以摆动尾鳍推进的水下机器人不能很好地实现良好的动力定位和机动，在大自然中许多鱼类利用胸鳍进行操纵，可很好地实现悬浮、前进、倒退. 因此，研究鱼类胸鳍的推进机理和性能，探讨利用胸鳍实现仿生水下机器人灵活操纵的方法具有重要的理论意义和实际应用价值.

日本的 N. Kato[1-2] 计算分析了黑鲈鱼的一对胸鳍做二自由度运动时的水动力，并做出了第一个胸鳍驱动的仿鱼机器人 Fishrob. Hiroyoshi Suzuki 等[3] 用基于非定常、复式、重叠分区的动网格 N－S 方程计算粘性流场中刚性胸鳍的水动力性能；James L. Tangorra[2] 等建立了一个用于智能水下机器人的仿生胸鳍；中国科学技术大学竺长安等[5] 建立了仿生水下机器人 Robo-Mackerel 在胸鳍摆动模式下游动的物理模型，并给出了机械胸鳍摆动的运动方程. 利用库达－儒柯夫斯基定律和二维叶素理论，分析了 Robo-Mackerel 巡游时受到的流体作用力. 苏玉民[6] 等在敞水情况下用 UVLM 方法（非定常涡格法）计算分析了胸鳍的水动力性能；王兆立[7-9] 等利用 CFD 方法数值模拟了胸鳍的运动规律并分析了其水动力性能. 张振山等[10] 针对小型水下航行器设计了仿胸鳍推进系统，进行了初步试验，并探讨了仿生水下航行

收稿日期：2009－03－05.
基金项目：国家自然科学基金资助项目(50579007;50879014).
作者简介：王兆立(1983—)，男，博士研究生；
苏玉民(1960—)，男，教授，博士生导师.

器运动的基本性能.

目前,仿生推进器的水动力实验研究一般是针对仿尾鳍推进装置[11-12],而关于胸鳍推进水动力性能的研究一般集中于数值模拟上,本文设计了仿胸鳍操纵系统的实验装置;建立了刚性胸鳍的二自由度运动模型;对该模式下的水动力性能进行了试验研究,分析了改变不同运动参数对胸鳍的水动力性能影响.

1 仿胸鳍推进系统的设计

推进装置主要由伺服电机 A 和 B、减速器 A 和 B、转动轴和连接节等部分组成. 伺服电机 A 控制转动体转动实现胸鳍部分的拍翼运动,伺服电机 B 控制接头转动实现胸鳍部分的滚转运动. 各部分的装配情况如图 1 所示:

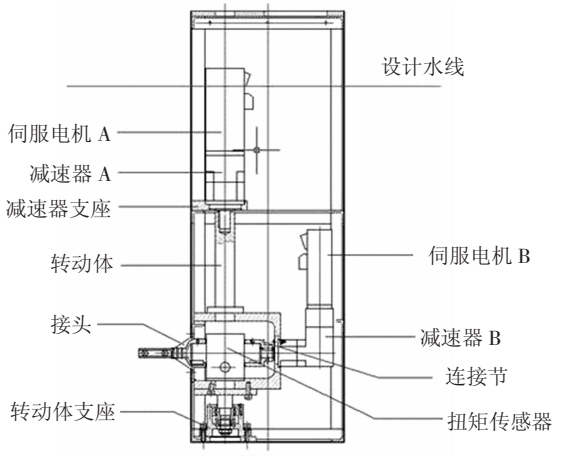


图 1 推进装置装配情况

2 机械胸鳍的模型

本实验装置有两套测量系统,分别为联结固定梁与箱体的五分力天平和联结胸鳍安装轴与减速器之间的扭矩传感器. 本实验的坐标系统定义如图 2. 五分力天平的静校中心为 O',胸鳍转动中心为 O,各自坐标系定义分别定义为 $O'-X'Y'Z'$、$O-XYZ$,并且 O' 与 O 同轴距离为600 mm.

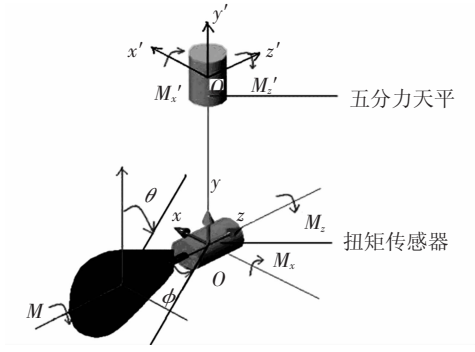


图 2 测量系统的坐标定义

基于目前国际上对于胸鳍运动规律的研究总结和实验观测基础[13-16],考虑坐标系统、空间欧拉角度的定义方式,以及机械设计过程中对胸鳍运动模型的简化,本文只考虑机械胸鳍在水平面内的前后拍翼和滚转两种耦合运动,则其运动规律的数学模型为

$$\begin{cases}\phi = \phi_A \sin(\omega_{\text{fin}} \cdot t) + \phi_{\text{bias}}, \\ \theta = \theta_A \sin(\omega_{\text{fin}} \cdot t + \Delta\varphi) + \theta_{\text{bias}}.\end{cases} \tag{1}$$

其中:ϕ_A,θ_A 分别为前后拍翼和滚转运动的幅值,$\Delta\varphi$ 为滚转运动与前后拍翼的相位差,ω_{fin} 为胸鳍的运动频率、ϕ_{bias} 前后拍翼偏角、θ_{bias} 滚转运动偏角.

定义胸鳍运动过程中的推力系数 C_x、侧向力系数 C_z 和力矩系数 C_m 分别为

$$C_x = \frac{F_x}{1/2\rho v^2 S},$$

$$C_z = \frac{F_z}{1/2\rho v^2 S},$$

$$C_m = \frac{M}{1/2\rho v^2 SC}.$$

其中:F_x,F_z,M 分别为测试到的推力、侧向力、力矩,S 为翼型面积,C 为特征弦长,v 为来流速度,ρ 是水的密度.

3 实验结果分析

结合公式(1)得知,改变某些参数设置可能会使其摆动模式和水动力性能发生改变,影响胸鳍水动力性能的参数主要有胸鳍摇翼运动与前后拍翼运动的相位差、运动频率、拍动幅值、摇翼幅值、拍翼偏角、摇翼偏角等. 本文试验依次探讨了上述各参数对胸鳍水动力性能的影响.

实验中用到的刚性胸鳍模型在外形轮廓上以所观测到的鲈鱼(Bass)胸鳍为母型,材料为铝制材料的平板翼型,尺寸的选择为鲈鱼胸鳍尺寸的 6.2 倍,最大展长为 188 mm,最大弦长为 155 mm,厚度为 2 mm,实验用到的胸鳍模型如图 3 所示.

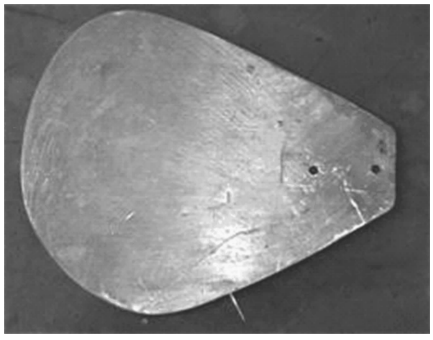


图 3 胸鳍模型

3.1 相位差对水动力性能的影响

胸鳍摇翼运动与前后拍翼运动的相位差 $\Delta\varphi$ 是一个重要的参数,改变两种耦合运动的相位差

胸鳍运动模式产生本质的变化，因此改变相位差直接影响胸鳍的水动力特性.

测试工况：来流速度为 0.25 m/s，ω_{fin} 为 0.5 Hz，θ_A 为 45°、ϕ_A 为 35°，θ_{bias} 和 ϕ_{bias} 为 0°，$\Delta\varphi$ 分别取 30°，60°，90°.

从图 4 中可以看出，在一个周期内阻力在相位差 60°和 90°时的峰值相当，只是出现的位置不同，相位差为 30°时阻力出现最大峰值，并且发现阻力最大值基本产生在胸鳍运动 1/2 个周期位置处；相位差为 30°、60°时侧向力系数在一个周期内变化趋势基本一致；力矩的测量值基本变化不大.

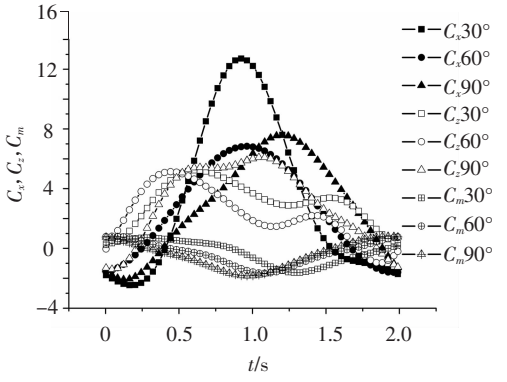


图 4　相位差对胸鳍水动力性能的影响

3.2　频率对水动力性能的影响

由于胸鳍运动一般为低速低频的运动，因此在考虑频率影响时选择的运动频率 ω_{fin} 分别为 0.25，0.50，0.80 及 1.00 Hz，其他条件为来流速度取 0.25 m/s，θ_A = 45°、ϕ_A = 35°，θ_{bias} = ϕ_{bias} =0°，$\Delta\varphi$ = 60°.

由图 5 得知，随着频率改变阻力系数在各自周期内总的变化趋势基本一致，随着胸鳍摆动频率的增加，阻力峰值也随之增长即增加胸鳍摆动频率值使阻力的效果加强；侧向力受频率变化的影响较大，分析是由于频率增加，运动增强对系统的侧向受力影响较大；扭矩系数随频率改变幅值发生变化.

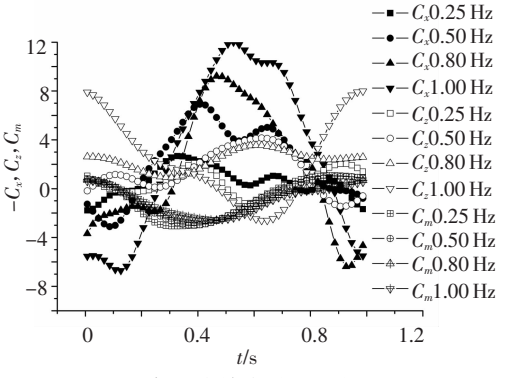


图 5　频率对胸鳍水动力性能的影响

3.3　拍翼幅值对水动力性能的影响

测试工况：来流速度为 0.3 m/s，ω_{fin} 为 0.5 Hz，θ_A 为 45°，θ_{bias} 和 ϕ_{bias} 为 0°，$\Delta\varphi$ 取 60°，ϕ_A 分别为 25°，35°，45°.

从图 6 可以得到，在一个周期内，不同拍翼幅值下的阻力系数和侧向力系数的变化规律基本一致，其幅值均随着拍翼幅值的增加而增大；改变拍翼的幅值对扭矩系数的影响很小.

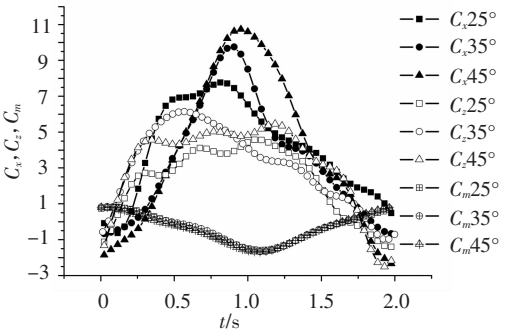


图 6　拍翼幅值对胸鳍水动力性能的影响

3.4　摇翼幅值对水动力性能的影响

测试工况：来流速度为 0.3 m/s，ω_{fin} 为 0.5 Hz，ϕ_A 为 45°，θ_{bias} 和 ϕ_{bias} 为 0°，$\Delta\varphi$ 取 60°，θ_A 分别为 35°，45°，55°.

从图 7 中得知，在一个周期内阻力系数和侧向力系数在不同摇翼幅值下总的变化趋势一致，侧向力系数随摇翼幅值变化较大，而阻力系数随摇翼幅值变化较小，在此运动规律和来流速度条件下阻力占主要地位；扭矩系数随着摇翼角幅值增大而增大，使运动的效果增强.

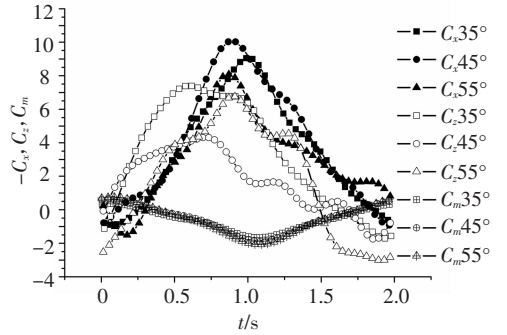


图 7　摇翼幅值对胸鳍水动力性能的影响

3.5　拍翼偏角对水动力性能的影响

测试工况：来流速度为 0.3 m/s，ω_{fin} 为 0.25 Hz，ϕ_A 为 25°，θ_A 为 35°，θ_{bias} 为 30°，$\Delta\varphi$ 取 60°，考虑 ϕ 的最大值，ϕ_{bias} 分别为 5°，10°，15°.

由图 8 结果可以得知，拍翼偏角的变化时阻力系数随变化较大，而侧向力系数表现出很好的一致性，说明受到的影响较小；扭矩系数变化随拍翼偏角影响较小.

3.6　摇翼偏角对水动力性能的影响

测试工况：来流速度为 0.3 m/s，ω_{fin} 为 0.25 Hz，ϕ_A 为 25°，θ_A 为 35°，ϕ_{bias} 为 30°，$\Delta\varphi$ 取 60°，考虑

ϕ 的最大值，ϕ_{bias} 为 20°，θ_{bias} 分别为 10°，20°，30°.

由图 9 中可分析得知，随着摇翼偏角的增加，扭矩系数向 y 轴负向偏移、阻力系数峰值随之减小；摇翼偏角改变，阻力系数和侧向力系数的峰值出现的时刻随之发生变化，但在各自周期内的变化趋势基本相同.

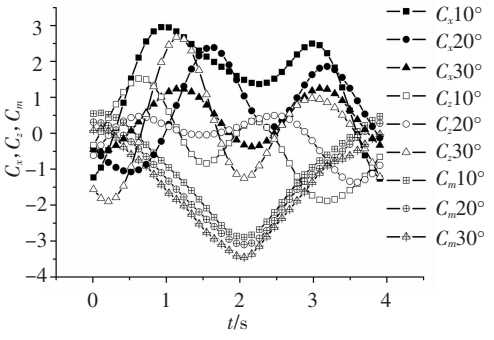


图 8 拍翼偏角对胸鳍水动力性能的影响

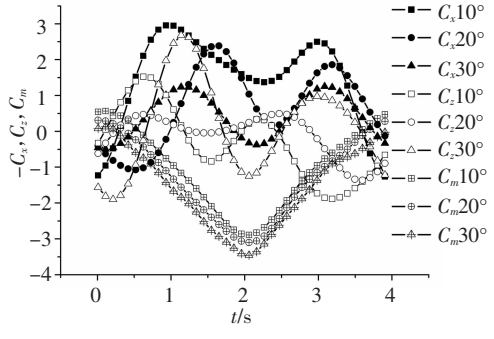


图 9 摇翼偏角对胸鳍水动力性能的影响

4 结 论

1）控制胸鳍运动的各参数中，耦合运动的相位差、拍翼运动偏角、摇翼（滚转）运动偏角对在在一个运动周期中的水动力系数变化趋势影响较大；而摆动频率、拍翼幅值和摇翼幅值对水动力的变化趋势影响较小，主要是使运动的效果增强.

2）实验中的多数工况下得到的阻力系数较大，一方面是由于当前胸鳍模型在对称摆动情况下产生的推力较小，另一方面限于拍翼最大幅值及摆动频率的限制而没有完全发挥其主要优势.

3）本文的实验结果为研发高机动仿生水下机器人奠定技术基础，同时为进一步的数值模拟提供了研究方向.

参考文献：

[1] KATO N, FURUSHIMA M. Pectoral fin model for maneuver of underwater vehicles[C]//Proceedings of 1996 Symp on Autonomous Underwater Vehicle Technology. Monterey, CA:[s. n.], 1996:49 – 56.

[2] KATO N. Hydrodynamic characteristics of a mechanical pectoral fin[J]. Journal of Fluids Engineering, 1999, 121:605 – 613.

[3] SUZUKI H, KATO N. Anumerical study on flow around a mechanical pectiral fin[J]. Internaltional Journal of Offshore and Polar Engineering, 2005, 15(3):161 – 167.

[4] TANGORRA J L, DAVIDSON S N, MADDEN P G, *et al.* A Biorobotic Pectoral Fin for Autonomous Undersea Vehicles[C]//Proceedings of the 28th IEEE EMBS Annual International Conference. New York: IEEE, 2006: 2726 – 2729.

[5] 陈宏，竺长安，尹协振. 机械胸鳍式仿生水下机器人的动力学特性研究[J]. 机械设计, 2006, 23(10): 24 – 27.

[6] 苏玉民，曹庆明，赖伟成. 仿胸鳍推进系统的水动力分析[J]. 哈尔滨工程大学学报，2007，28(1)：727 – 733.

[7] 王兆立，苏玉民，杨 亮. 黏性流场中鱼类胸鳍的水动力性能分析[J]. 水动力研究与进展 A 辑，2009，24(2)：141 – 149.

[8] 王兆立，苏玉民，李彦亮，等. 非定常流场中的机械胸鳍的水动力性能分析[J]. 哈尔滨工程大学学报，2009，30(5)：536 – 541.

[9] WANG Zhao-li, SU Yu-min, YANG Liang, *et al.* A numerical Study on Viscous Flow Around a Pectoral Fin Propulsor[C]//Proceeding of the 2nd national Conference of Bionic Engineering. Changchun: Jinlin University, 2008: 190 – 198.

[10] 张振山，王志东，李瑞宏，等. 仿胸鳍/尾鳍推进水下航行器方案设计与模型试验[J]. 江苏科技大学学报：自然科学版，2006，20(6)：1 – 4.

[11] KODATI P, DENG Xinyan. Experimental Studies on the Hydrodynamics of a Robotic Ostraciiform Tail Fin [C]//Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ, International Conference on Intelligent Robots and Systems. Beijing: IEEE, 2006: 5418 – 5423.

[12] 苏玉民，杨 亮，赵士奇，等. 仿鱼尾鳍推进系统的水动力性能实验研究[J]. 华中科技大学学报，2009，37(9)：82 – 85.

[13] DRUCKER E G, LAUDER G V. Locomoter forces on a swimming fish: three-dimensional vortex wake dynamics quantified using digital particle image velocimetry[J]. The Journal of Experimental Biology, 1999,202:2392 – 2412.

[14] SFAKIOTAKIS M, LANE D M, DAVIES J B C. Review of fish swimming modes for aquatic locomotion[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1999,24(2):237 – 252.

[15] BLAKE R W. Fish functional design and swimming performance[J]. Journal of Fish Biology, 2004,65(5): 1193 – 1222.

[16] LIU Hao, KAWACHI K. A numerical study of undulatory swimming[J]. Journal of Computational Physics, 1999,155:223 – 247.

（编辑 杨 波）