

文章编号: 1672-9897(2008)01-0027-05

# 一种新型的仿生双尾推进器模型实验

于凯, 黄胜, 王超

(哈尔滨工程大学船舶工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**针对单尾鳍摆动存在的机器鱼的摇艏问题, 设计出双尾鳍仿生推进器, 并将其应用于小水线面双体船, 制作了仿生双尾推进的实验平台, 在水池进行了双尾推进试验研究。结果表明: 双尾推进作为一种新型的仿生推进器, 不仅解决了单尾机器鱼游动时鱼体的晃动问题, 而且还具有优良的推进和操纵性能。笔者还采用计算流体力学软件 FLUENT 计算摆动尾鳍非定常流动的流场特性, 结合单尾鳍和双尾鳍的不同流场特性分析了双尾鳍在摆动过程中的相互干扰问题, 通过尾鳍流场的数值模拟, 表明仿生双尾推进器的两个尾鳍在低频摆动时其相互干扰是利大于弊。

**关键词:** 机器鱼; 双尾推进; 数值模拟

**中图分类号:** O811.6 **文献标识码:** A

## The model experiment of a new-type double tail-fin robotic fish propulsion

YU Kai, HUANG Sheng, WANG Chao

(College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** To avoid the swing of forebody of robotic fish with single tail-fin, a kind of robotic fish with double tail-fin was designed and was used in SWATH. The experimental platform of double tail-fin propulsion was produced and the experimental research of the double tail-fin propulsion was made in a pond. As a result, the double tail-fin propulsor as a new-type propulsor not only can solve the shakable problem of the single tail-fin robotic fish when it's swimming, but also has excellent propulsive efficiency and maneuverability. The CFD software FLUENT was used to calculate the unsteady flow characteristic of the swinging tail-fin. According to the different flow characteristic between the single tail-fin and the double tail-fin, the author analyzed the mutual interferential problem during the swing process of the double tail-fin. The numerical simulation of the tail-fin field shows that it is beneficial that the two tail-fins of double tail-fin robotic fish propulsion interfere with each other while swinging in the low frequency.

**Key words:** robotic fish; double tail-fin thrust; numerical simulation

## 0 引言

由于仿鱼推进的效率较高, 并且较螺旋桨推进有更多的优点, 同时, 具有优良的操纵性能, 越来越受到人们的关注<sup>[1]</sup>。目前国内外都进行了大量的仿生模型试验研究, 例如, 麻省理工学院海洋工程实验室的仿生“机器金枪鱼”<sup>[2]</sup>、日本东京工业大学研制的双结点海豚型自主式机器人<sup>[3]</sup>、哈尔滨工程大学水下机器人技术实验室研制的仿生水下机器人“仿生-I”号<sup>[4]</sup>和北航机器人研究所机器鱼课题组设计的 SPC-II 系统<sup>[5]</sup>等等。正是这些研究的不断深入, 才使得仿生学获得新的推动力, 并展示着强大的应用前景。文献[6]实验测量了大型自航模机器鱼推进性能及耗能等

方面相关数据, 制作了自航模机器鱼(与真实金枪鱼尺寸相仿), 并进行了实验, 同时, 还进行了机器鱼的“自我推进”测试。在仿生推进的研究方面, 实验测量了机器鱼推进性能、消耗功率和效率。同时, 对仿生推进的机理进行了分析。

现在已经清楚地知道了海洋鱼类, 特别是大型高速游动鱼类的高效推进机理。利用月牙尾的动态过失速特性产生高升力, 获得高推力; 利用尾涡控制使尾迹呈现反卡门涡街, 形成向后的喷流, 从而获得最佳推进效率<sup>[7]</sup>。

## 1 仿生推进实验装置

在单尾机器鱼的实验过程中观察到机器鱼在摆

\* 收稿日期: 2007-02-12; 修订日期: 2007-07-25

基金项目: 国防基础研究重点资助项目(j1900c003)

作者简介: 于凯(1974-), 男, 黑龙江富锦人, 讲师。研究方向: 船舶推进与节能技术。E-mail: yukai-0451@yahoo.com.cn

尾推进过程中鱼体前部也随尾鳍同频率、反相位周期性摇动。作为刚性物理模型在尾鳍摆动产生推力的过程中,必然产生较大的侧向力<sup>[8]</sup>。国内外的仿生工作者一般通过增加机器鱼的关节数、尾部的侧向投影面积,减少侧向力的影响,但也不能根本解决摇鳍问题。同时,增加了机器鱼结构的复杂性和增大了机器鱼的航行阻力。例如,麻省理工学院海洋工程实验室的仿生机器鱼采用了液压作为驱动方式,柔性尾柄采用透水方式,由于关节数较多,能够较好地模拟黄鳍金枪鱼的游动形态,此外也能够得到比较小的转弯半径,但是由于尾柄必须是柔性结构,所以耐压是个问题。采用液压驱动,该方案难以达到更高的驱动频率,并且在1Hz时出现了驱动波形失真的问题。北航机器人研究所机器鱼课题组设计的SPC-II系统,鱼体横截面采用边缘处带有尖缘的纺锤形,在鱼体和尾鳍边缘的过渡上,采用大后掠角的三角形前缘。这样设计的优点是可以显著提高鱼体抵抗策动力的能力,提高鱼体的稳定性,但增加了机器鱼的湿表面积,增大了航行阻力。

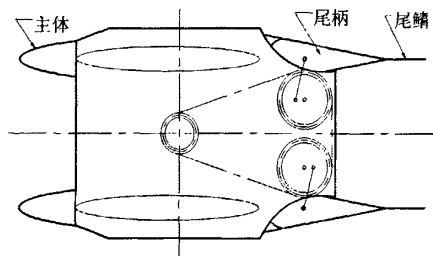


图1 仿生双尾推进器

Fig.1 Double tail-fin robotic fish propulsor

针对单尾仿鱼推进器存在的问题,本文设计仿生双尾推进器,其水下部分利用小水线面双体船的设计思想。小水线面双体船是一种综合了浮力和水动力作用原理提出的排水型船型。它由深潜于水中的鱼雷状主体、高出水面的上船体以及连接上船体和水下主体的薄翼状支柱三部分组成。去掉双体船水下主体后端的螺旋桨和舵,铰链由尾柄和尾鳍组成的仿生推进器,这样就完成了仿生双尾推进器水上试验平台,如图1所示。模型由左右两组对称布置的水下主体、支柱和储备浮体刚性连接而成的车体、两个弹性连接的尾柄和尾鳍、一台电机和一套传动机构组成。试验平台长度为1.5m,主体中心距为0.8m,尾鳍展长为12cm,尾鳍弦长为24cm。利用直流电机(250W)、链轮副带动后链轮转动时,后链轮圆盘借助连杆运动带动左右两个尾鳍左右摆动。调节电机的

输入电压,改变尾柄的摆动频率(最大频率3Hz);调整连杆在后链轮圆盘上的安装位置和长度,改变尾柄的摆动幅度(15°~25°);调整后链轮的初始位置,改变尾柄摆动的相位差。尾鳍与尾柄借助弹性材料连接,随尾柄被动摆动。

仿生双尾推进器试验平台设计的特点:(1)当两尾鳍反相摆动时,抵消了尾鳍的侧向力作用,避免了机器鱼的摇鳍运动,这样有利于开发出效率最佳、运动稳定的新型仿生推进器;(2)仿生双尾推进器试验平台结构简单合理,运转稳定,可以测量不同摆动频率、不同摆幅时尾鳍的推进性能;(3)双尾鳍可以实现一个尾鳍固定在最大摆幅位置,作为双体船的舵,另一尾鳍摆动推进,这样试验平台水平面内的机动性能大大改善。

## 2 实验结果及分析

在哈尔滨工程大学船模试验水池(108m×7m×4m)中对仿生双尾推进器实验平台进行了直航和回转试验。

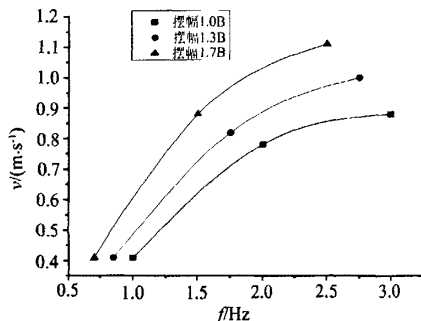


图2 实验模型的速度

Fig.2 The velocity of experimental model

改变尾鳍的摆动频率和摆动幅值,让实验平台在水池中作直航运动,记录实验平台稳定的直航速度,试验结果见图2。从速度曲线可以看出,当双尾鳍以一定摆幅相对摆动时,随着摆动频率的增加速度不断增大。当摆动频率较低时,速度增幅较大,几乎和频率成线性关系;当摆动频率较高时,速度增幅逐渐降低。试验平台航行非常平稳,解决了单尾推进机器鱼的摇鳍问题。通过实验模型的速度曲线可以得到随着尾鳍摆动频率和幅值增加,模型的前进速度增大,其中幅值较频率对尾鳍推进性能的影响更加明显。

当左右尾鳍一个处于最大摆角,另一尾鳍正常摆动时,可以测量推进器的水平面内的回转性能。一个尾鳍固定在最大摆幅位置,另一个尾鳍以3Hz正常摆动,仿生双尾推进器试验平台由静止状态开始作回转

运动,其回转半径为1倍体长,回转角速度为 $30^\circ/\text{s}$ ,回转航行速度 $0.78\text{m/s}$ ,见图3仿生双尾推进器回转实验照片,仿生双尾机器鱼表现出卓越的回转性能。



图3 仿生双尾推进器的回转试验

Fig.3 Rotatory experiment of double tail-fin robotic propulsor

### 3 尾鳍非定常流场的数值模拟分析

利用计算流体力学软件 FLUENT 计算摆动尾鳍非定常流动的流场特性。采用弹簧近似原理实现了二维非结构网格的变形移动。所采用的方法是以网格变形为基础,根据边界运动的苛刻程度以及位移大小,适当加入光滑操作,一般就可以得到较满意的动网格实现。这样,网格数保持不变,无需大范围插值,保证了计算的精度,而且方法简单,计算效率高。为了使网格在变形以后仍能保持合理的疏密分布,弹簧倔强系数  $K$ ,有多种选择。大量数值实验表明,在  $0 \sim 0.5$  之间能够得到比较满意的结果。

上述弹簧近似原理并不能保证在较大位移时网格线不相交。位移较大时,即使网格仍然有效,由于严重拉伸,局部网格也已不能满足 Delaunay 准则,影响流场计算的精度。为改善变形后网格质量并保证位移继续增大时网格仍然有效,增加光滑操作是非常必要的。FLUENT 的光滑操作包括基于 Delaunay 准则的对角线交换和节点松弛操作。经过大量的数值实验,对于采用一阶隐式格式方法离散时间项的方法而言,必须采用相对较大的时间步长。此外,为了保证在时间步的整数倍时尾鳍正好处在摆幅的极限位置,本文采用每周期 400 步进行计算。

尾柄和尾鳍为在无界流场中运动的刚体,其摆动频率都为常量,对于单尾鳍忽略尾鳍随躯体的横移运动,仿生推进尾鳍的运动是尾柄与尾鳍同频率摆动的耦合运动,且相位差为  $\phi_0$ ,其运动规律为

$$\begin{cases} \theta_z(t) = \theta_z \sin(2\pi ft) \\ \theta(t) = \theta_0 \sin(2\pi ft - \phi_0) \end{cases} \quad (1)$$

尾柄与尾鳍摆动的速度为

$$\begin{cases} \omega_z(t) = 2\pi f \theta_z \cos(2\pi ft) \\ \omega_z(t) = 2\pi f \theta_0 \cos(2\pi ft - \phi_0) \end{cases} \quad (2)$$

其中  $\theta_z$  为尾鳍前缘点(尾柄后端点)摆动幅值,  $\theta_0$  为尾鳍后缘点摆动幅值,  $f$  为频率,  $\phi_0$  为尾柄与尾鳍摆动运动的相位角。

在尾柄和尾鳍的摆动过程中,尾柄是主动的,取  $\theta_0 = 20^\circ$ 。尾鳍随尾柄被动摆动,以二维 NACA0018 翼型机翼作为尾鳍,其弦长与尾柄的长度相同,其中  $\theta_0 = 20^\circ$ ,尾柄和尾鳍的摆动频率为  $f = 1.0\text{Hz}$ ,来流速度为  $0.5\text{m/s}$ ,与模型实验速度值相当。两尾鳍的间距为 2 倍尾鳍弦长。尾柄与尾鳍摆动运动的相位差为  $\phi_0$  为  $\pi/2$ ,数值计算 6 个周期。计算结果见图 4 不同时刻尾柄和尾鳍的压力分布云图,其中  $t = 0$  为数据采集开始时刻,  $T$  为尾鳍摆动周期。

从图 4 数值模拟的尾柄和尾鳍摆动过程中压力分布云图中可以看出,单尾鳍在一次往复摆动过程中形成两个低压区,这样保证尾鳍始终产生向前的推力,同时,也产生较大的侧向力。双尾鳍在一次往复摆动过程中形成四个低压区,当尾鳍分开摆动过程中,两尾鳍内侧的低压区相互耦合,相对单尾鳍得到加强,在两尾鳍流场中形成一个较弱的低压区,随着双尾鳍的分开,低压区逐渐减小;当尾鳍合拢摆动过程中,两尾鳍外侧的低压区相互不影响,两尾鳍内侧的高压区相互影响,并相对单尾鳍得到减弱。这样两尾鳍反相摆动过程中产生向前的推力,同时,两尾鳍摆动过程中的侧向力始终相互抵消,这和理论计算及实验现象是相符的。

根据鱼类的推进机理可以更好地理解上述结果,双尾鳍合拢摆动过程中,尾鳍各自形成尾涡,不断加强并相互耦合,形成“反卡门涡街”,产生向后的喷流,提高尾鳍的推进效率。双尾鳍分开摆动过程中,尾鳍各自形成的尾涡相互影响减弱。

### 4 结论

仿生双尾推进既利用了仿鱼推进的优点,又克服了单尾推进模式存在的摇艏问题,保证了仿生推进机器鱼航行的稳定性,提高了仿生推进机器的推进性能,同时,和单尾机器鱼相比大大改善了机器鱼的回转性能。仿生双尾推进器应用于小水线面双体船上,拓展了仿生推进的应用领域,使其具有深入研究的价值和更加广阔的应用前景。结合单尾鳍和双尾鳍的不同流场特性,定性分析了仿生推进器双尾鳍在摆动

过程中的相互干扰问题,表明仿生双尾推进器的两个尾鳍在低频摆动时其相互干扰是利干扰。

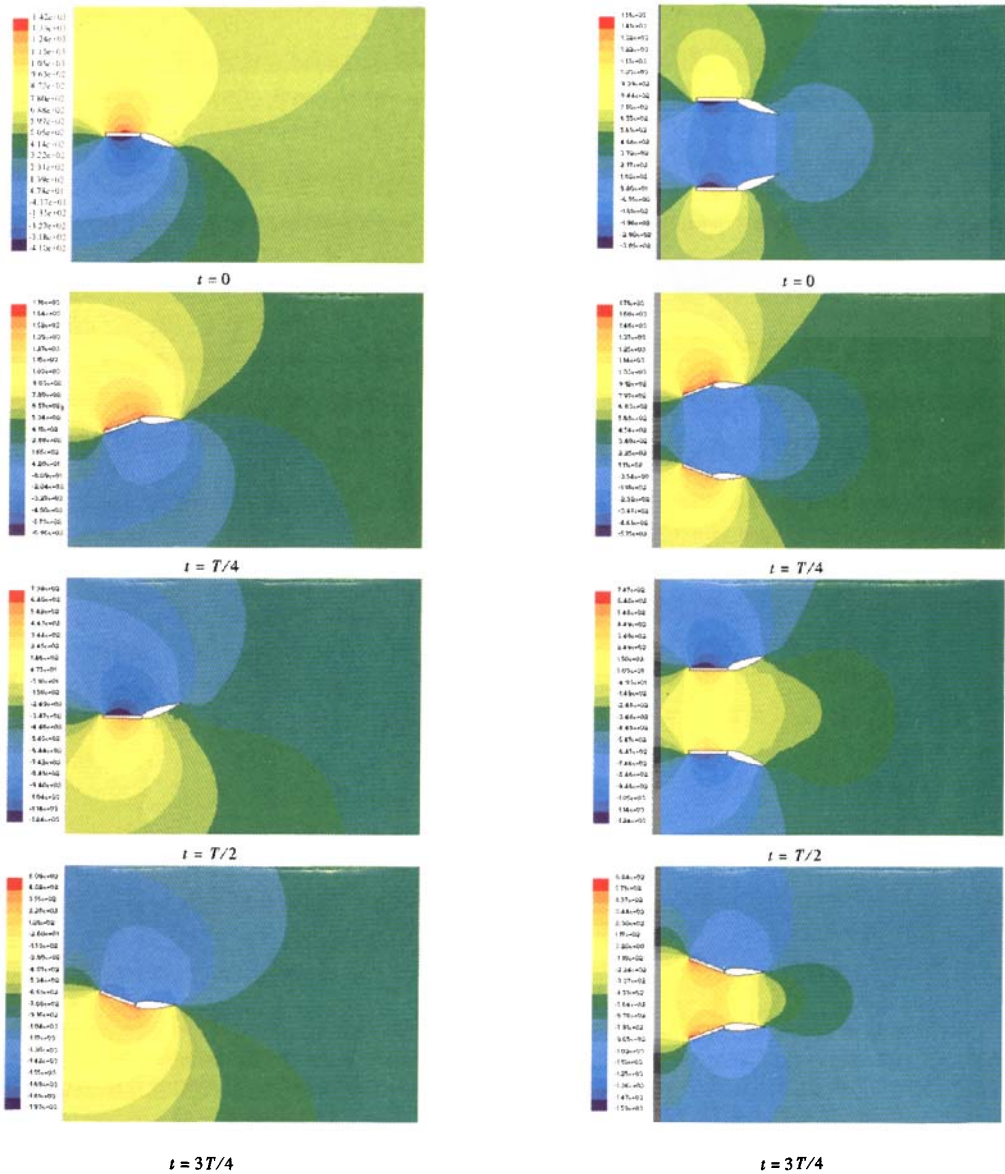


图4 不同时刻尾柄和尾鳍的压力分布云图

Fig.4 The pressure distribution of the double tail-fin in different time

#### 参考文献:

- [1] 黄胜. 关于仿鱼游动水中推进器的研究的现状与展望. [R]大阪府立大学共同研究报告, 2001.
- [2] ANDERSON J M, KERREBROCK P A. The vorticity control unmanned undersea Vehicle (VCUIV) performance results [A]. Papers of 11th International symposium on UUS technology [C]. Autonomous Undersea Systems Institute, 1999:360-369
- [3] 水下仿生学译文集 [C]. 哈尔滨工程大学, 2000.
- [4] 成巍. 仿生水下机器人仿真与控制技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2004.
- [5] 梁传秋. SPC-II 推进系统设计及仿鱼推进器研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学工学, 2004.
- [6] 于凯. 仿鱼推进的理论分析与实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学工学, 2001.
- [7] 童秉纲. 鱼类波状游动的推进机制 [J]. 力学与实践, 2000, 22(3): 69-73.
- [8] 于凯, 黄胜, 等. 仿鱼推进器的水动力性能研究 [J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(5): 69-72.