

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.03.005

# 仿生鳍形状与运动模式对推进性能的影响

何建慧<sup>1</sup>, 章永华<sup>2</sup>

(1. 台州职业技术学院 机电工程学院, 浙江 台州 318000; 2. 台州技师学院, 浙江 台州 318000)

**摘要:**为探究仿生鳍形状与其运动模式间的内在关系,采用非耦合隐式求解器求解非定常不可压缩 NAVIER-STOKES 方程和连续性方程。分析相同运动学参数和面积时,菱形、正方形、长方形和三角形 4 种形状仿生鳍在波动和摆动 2 种运动模式下产生的推进力大小;从压力分布、涡街结构等方面给出差异存在的原因,并找出鳍面形状和推进模式之间的内在联系。结果显示:相同运动学参数和鳍面形状时,不同推进模式产生的推进力存在较大差异;同样,相同运动学参数和推进模式时,鳍面形状对推进力也有较大影响。该研究为仿鱼推进器选择合适的鳍面形状和匹配的推进模式以实现较优推进性能提供参考。

**关键词:**仿生鳍;推进性能;非耦合隐式求解器;非定常不可压缩 NAVIER-STOKES 方程;鱼鳍形状;运动模式  
中图分类号:TP242.6 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2018)03-0024-07

## Effect of Shape and Motion Patterns on Propulsion Performance of Biomimetic Fin

HE Jianhui<sup>1</sup>, ZHANG Yonghua<sup>2</sup>

(1. Department of Mechatronics Engineering, Taizhou Vocational and Technical College, Taizhou, Zhejiang 318000, China;  
2. Taizhou Technician College, Taizhou, Zhejiang 318000, China)

**Abstract:**In order to illustrate the inner relationship between shape and motion patterns of the biomimetic fin, the unsteady incompressible N-S equation and continuity equation were solved by an uncoupled implicit solver. The forces generated from four kinds of fin shapes (diamond, square, rectangle and triangle) in undulating and oscillating propulsion patterns under the same kinematic parameters and area were analyzed. From aspects of the pressure distribution and the structure of vortex street, the reasons of the differences were presented, the inner relationship between the fin shape and propulsion mode was also illustrated. The results show that the different propulsion modes have different propulsion forces when the kinematics parameters and fin shapes are the same. Similarly, when the same kinematic parameters and propulsion modes are used, the fin shapes have a great influence on propulsion forces. The study provides a reference for the selection of suitable fin shape and matching propulsion mode for bionic fish thrusters to achieve better propulsion performance.

**Keywords:** bionic fin; propulsion performance; uncoupled implicit solver; unsteady incompressible NAVIER-STOKES equation; fin shape; motion pattern

仿生学是近几十年里随着科技发展出现的新兴学科,其“源于生物而高于生物”的定位促使一大批科技工作者投入其中,在相关领域尤其是仿生机器人领域取得了显著成果。诸如:仿人形机器人<sup>[1]</sup>、仿生机器狗<sup>[2]</sup>、仿生蜻蜓<sup>[3]</sup>和仿生机器鱼<sup>[4]</sup>等,并且在仿真程

度和智能化程度方面获得了突飞猛进的发展。

以仿生机器鱼为例,目前研究对象主要集中于身体/尾鳍(BCF)和奇鳍/对鳍(MPF)2种推进模式上,出现了大量依赖鱼鳍波动和摆动来推进的推进器。其中具有代表性的有美国麻省理工学院的机器金枪

收稿日期:2017-12-28;修回日期:2018-03-20

基金项目:浙江省自然科学基金项目(LY15E060001);台州职业技术学院校级课题(2017YB01)。

第一作者简介:何建慧(1981),女,浙江台州人,硕士,副教授,主要从事仿生机器人研究。E-mail:11123439@qq.com

鱼<sup>[5]</sup>,哈佛大学的机器太阳鱼<sup>[6]</sup>,新加坡南洋理工大学的机器刀鱼<sup>[7]</sup>,国防科技大学的机器魔鬼鱼<sup>[8]</sup>及南京航空航天大学机器鳐鱼<sup>[9]</sup>等。近年来,研究者在复合推进<sup>[10]</sup>以及柔性推进<sup>[11]</sup>方面做了一些新的探索。

上述研究涉及鳍面形状和运动模式对推进性能影响的较少。Salume等<sup>[12]</sup>研究了摆动模式下不同形状鱼鳍鳍面刚度变化对推进力的影响。张曦等<sup>[13]</sup>研究了尾鳍形状对摆动尾鳍推进性能的影响,结果表明仿金枪鱼尾鳍的平均推力系数和输入功率系数最小,推进效率最高。Zhang等<sup>[14]</sup>研究了波动模式与鳍面形状的关系,指出鳍面形状分布与波幅包络线分布相协调时产生的推进力最佳。

在前期研究基础上,笔者研究了相同运动学参数和相同面积时,菱形、正方形、长方形和三角形4种形状仿生鳍在波动和摆动2种运动模式下产生的推进力大小,并找出鳍面形状和推进模式之间的内在联系,为仿鱼推进器选择合适的鳍面形状和匹配的推进模式提供参考。

## 1 建模

### 1.1 仿生鳍形状与参数

数值计算时选择菱形、正方形、长方形和三角形4种典型的鳍面形状,鳍面面积恒定为36 mm<sup>2</sup>。

### 1.2 仿生鳍运动学建模

设计仿生鳍摆角遵从正(余)弦运动规律,当摆动角度处于正向最大时,角速度为零,角加速度为反向最大;当角度为零时,角速度为最大值,角加速度为零。则建立摆动方程:

$$\theta(t) = \theta_{\max} \sin(2\pi t/T - \theta_0) \quad (1)$$

式中: $\theta(t)$ 为 $t$ 时刻仿生鳍摆角; $\theta_{\max}$ 为最大摆动幅度; $T$ 为摆动周期; $\theta_0$ 为初始角度。

对于从平衡位置开始摆动,则 $\theta_0 = 0$ 。由此得到仿生鳍摆动角速度 $\omega(t)$ 和角加速度 $\beta(t)$ 分别为:

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} = \frac{2\pi\theta_{\max}}{T} \cos(2\pi t/T); \quad (2)$$

$$\beta(t) = \frac{d\omega(t)}{dt} = -\frac{4\pi^2\theta_{\max}}{T^2} \sin(2\pi t/T) \quad (3)$$

同理,建立仿生鳍三维运动的波动方程:

$$f(x) = A \sin[2\pi(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T})] \quad (4)$$

式中: $A$ 为最大波动幅度; $T$ 为波动周期; $\lambda$ 为波长; $x$ 为鳍面上任意点横坐标。

各运动学参数取值如表1所示。

表1 运动学参数取值

Table 1 Values of kinematic parameters

运动模式	最大幅度 $A/m$	波长 $\lambda/m$	周期 $T/s$	摆动角度 $\theta/(^\circ)$			
				菱形	矩形	正方形	三角形
波动	0.001	0.008	0.25				
摆动		$\infty$	0.25	13.3	12.5	18.4	12.5

## 2 数值计算

### 2.1 控制方程

采用非耦合隐式求解器求解非定常不可压缩 Navier-Stokes 方程(5)和连续性方程(6)<sup>[15]</sup>:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla)V = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 V; \quad (5)$$

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (6)$$

式中: $\rho$ 为流体密度; $V$ 为流体速度; $p$ 为流体压力; $\nu$ 为流体动力黏性系数。

### 2.2 计算条件

基于有限体积法,使用 SIMPLE 算法求解压力/速度耦合项,对流项为二阶迎风格式。 $V_x, V_y, V_z$ 分别为流体沿 $x, y, z$ 方向的速度分量。其中: $V_x = 0.01$  m/s,  $V_y = V_z = 0$ 。边界条件为速度入口和压力出口,其余为无滑移壁面,该模型为层流模型。重要的计算参数设置如表2所示。

表2 计算参数取值

Table 2 Values of calculation parameters

弹簧常数因子	边界节点松弛因子	收敛公差	迭代次数
0.08	0.5	0.001	50
最大单元畸变	时间步长/s	时间步数	每时间步迭代次数
0.8	0.005	400	60

### 2.3 计算区域与网格划分

图1所示计算区域为长方体区域,模型位于计算区域中心,距离入口边界长度为 $L$ ,距离出口边界长度为 $1.5L$ ,保证模型运动产生的漩涡能够充分发展。设置模型距四周壁面距离为 $L$ ,以减少壁面效应(wall effect)的影响。采用四面体非结构网格对计算区域进行划分,并对模型四周区域及尾迹区域进行局部网格加密。

### 2.4 无量纲阻力系数

无量纲阻力系数 $C_d$ 定义如下:

$$C_d = \frac{2F_d}{\rho V^2 S} \quad (7)$$

式中: $F_d$ 为流体的作用力; $S$ 为迎水面面积。

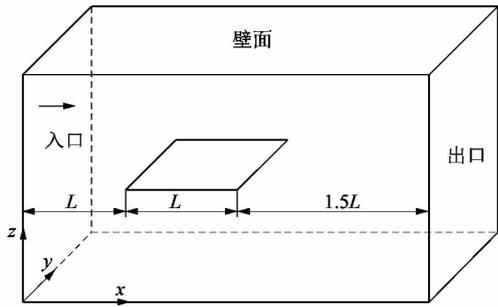


图1 计算区域

Figure 1 Computational domain

无量纲阻力系数时间平均值可用式(8)计算:

$$\bar{C}_d = \frac{\int_{mt}^{(m+j)t} \frac{2F_d(t)}{\rho V^2 S} dt}{jt} \quad (8)$$

式中: $m$ 和 $j$ 取值 $0, 1, 2, 3, \dots, n$ 等自然数,其中 $n$ 为采样点个数。

当模型运动产生的推进力小于流体阻力时,阻力系数值大于零。反之,当模型运动产生的推进力大于流体阻力时,阻力系数值小于零,且负值越小,表明推进力越大。

### 2.5 涡量计算

三维涡量(3D-Vortex):

$$V_{\text{vortex}} = \frac{\partial V_x}{\partial x} \cdot \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial y} \cdot \frac{\partial V_z}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \cdot \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{\partial V_x}{\partial x} \cdot \frac{\partial V_z}{\partial z} - \frac{\partial V_y}{\partial y} \cdot \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{\partial V_z}{\partial z} \cdot \frac{\partial V_y}{\partial y} \quad (9)$$

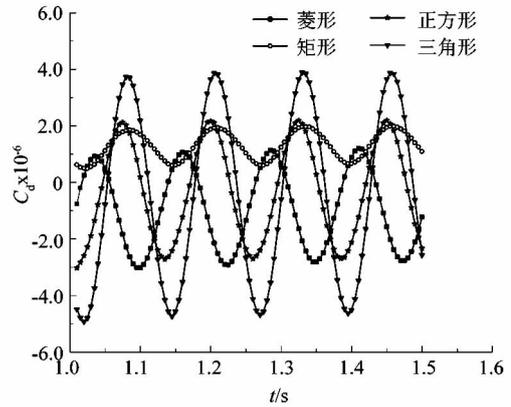
### 3 结果与讨论

如表2所示参数,将仿生鳍波动和摆动2种运动模式的频率设定为4 Hz,并控制摆幅包络线所包含的流体质量相同,比较相同面积时,菱形、正方形、长方形和三角形4种形状下产生的推进力大小。

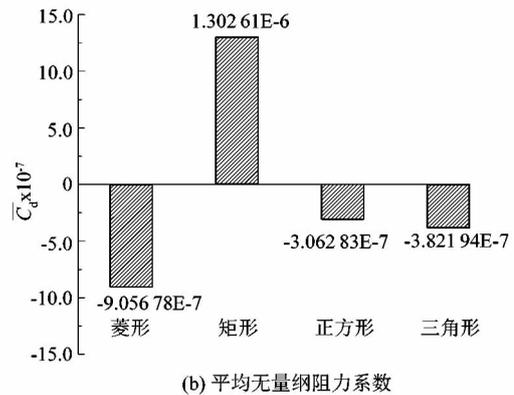
图2所示为仿生鳍波动时4种鳍面形状产生的推进力情况。无论哪种鳍面形状,其无量纲阻力系数随时间变化均呈现类似正弦波动。值得注意的是:①4种鳍面形状无量纲阻力系数曲线波动幅度存在明显差异,波动幅度由大到小依次为三角形、正方形、菱形和矩形;②波幅峰值出现时间并不完全一致,特别是菱形鳍面,波幅峰值超前其它3种鳍面形状峰值约1/4周期;③4种鳍面形状无量纲阻力系数曲线的波动频率一致,大小均为仿生鳍运动频率的2倍。

图2(b)给出了波动模式下4种鳍面形状运动产生的平均无量纲阻力系数值。在此计算条件下,矩形

鳍面平均无量纲阻力系数最大,其值为 $1.30261 \times 10^{-6}$ ,而菱形鳍面最小,其值为 $-9.05678 \times 10^{-7}$ 。这说明4种鳍面形状波动时产生的推进力由大到小依次为菱形、三角形、正方形和矩形。



(a) 无量纲阻力系数随时间变化



(b) 平均无量纲阻力系数

图2 4种鳍面形状推进力情况(波动)  
Figure 2 Propulsion forces among four kinds of fin shapes (undulating motion)

图3所示为仿生鳍摆动时4种鳍面形状产生的推进力情况。从图3(a)看,与图2(b)波动情况类似,4种鳍面形状无量纲阻力系数随时间变化均呈现类似正弦变化。无量纲阻力系数曲线的运动频率一致,数值为仿生鳍运动频率的2倍。所不同的是:①4种鳍面形状的无量纲阻力系数曲线的幅度最大为正方形,矩形和菱形次之,三角形则最小;②无量纲阻力系数曲线波幅的峰值一致。

图3(b)为摆动模式下4种鳍面形状运动产生的平均无量纲阻力系数值。其中,三角形鳍面平均无量纲阻力系数最大,为 $5.37876 \times 10^{-7}$ ,而正方形鳍面最小,为 $-6.75666 \times 10^{-6}$ 。这说明4种鳍面形状摆动时产生的推进力由大到小依次为正方形、菱形、矩形和三角形。

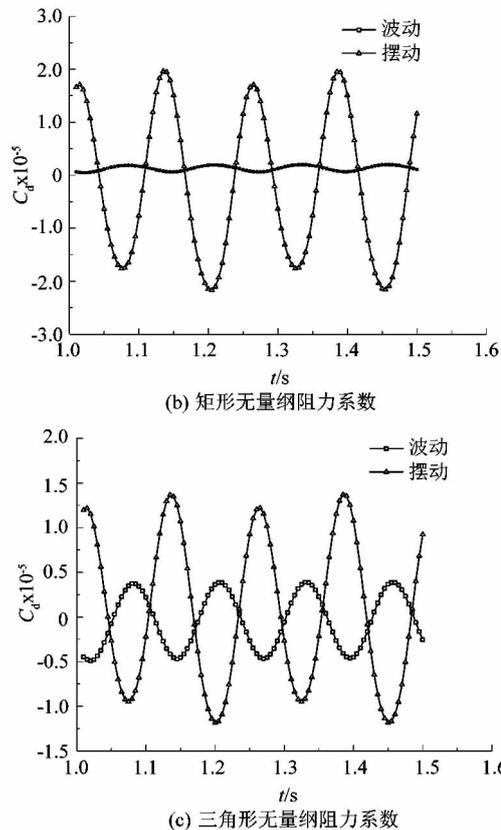
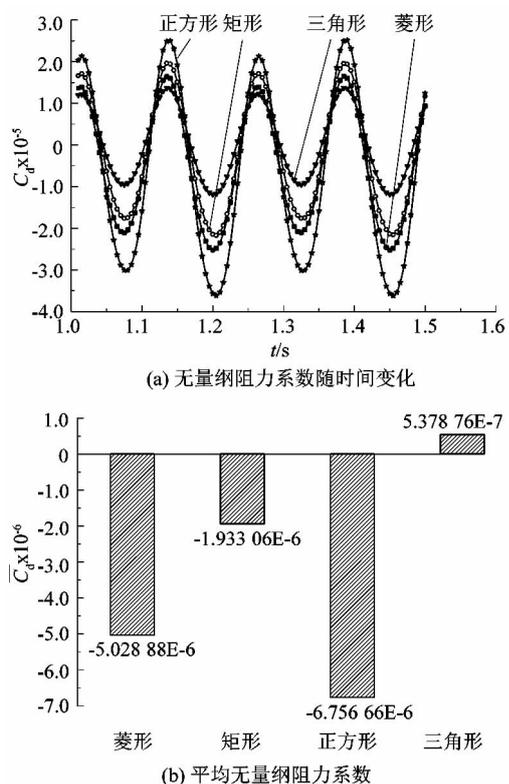


图3 4种鳍面形状推进力情况(摆动)

Figure 3 Propulsion forces among four kinds of fin shapes (oscillating motion)

将2种运动模式下4种鳍面形状无量纲阻力系数进行对比,由图4(a)~(d)可知,相同条件下,摆动模式的无量纲阻力系数曲线幅度比波动模式要大,说明该条件下仿生鳍在摆动模式运动稳定性要差于波动模式。图4(e)对4种鳍面形状仿生鳍摆动模式和波动模式产生的无量纲阻力系数平均值进行对比,发现:三角形鳍面波动模式下产生的推进力要大于摆动模式的推进力,而其它3种鳍面形状摆动模式产生的推进力要更大些。特别是正方形鳍面,2种运动模式下的推进力差距尤为明显。

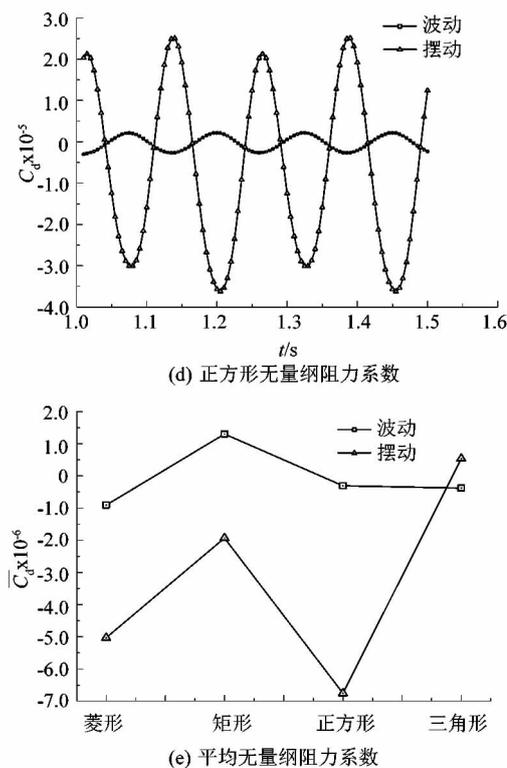
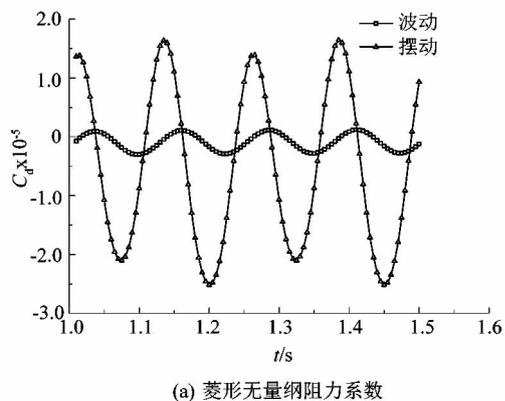


图4 4种鳍面形状推进力对比(波动和摆动)

Figure 4 Comparison of propulsion forces among four kinds of fin shapes (undulating motion vs oscillating motion)

图 5 所示为 2 种运动模式时,4 种鳍面形状在 1 个周期内表面压力分布变化的情况。从图中看,无论仿生鳍采用何种运动模式,在一个周期内,其上下表面高低压区域交替分布且随着仿生鳍运动作周期性变化,其强度由鳍面中间向两侧逐渐减弱。迎水面一侧呈现高压区域,背水面一侧呈现低压区域,从而在仿生鳍两侧形成压力差,这种压力差的存在被认为是仿生鳍产生推力的主要动力来源之一。在不同的运动模式

时,鳍表面压力分布形态存在若干差异:①波动模式产生的表面高低压区域随着仿生鳍运动由前部往尾部传递,而摆动模式产生的表面高低压区域并未出现这种情况;②波动模式在仿生鳍表面的压力分布由前部往尾部等值分布,摆动模式鳍面压力则由前部往尾部逐渐递增。此外,对于摆动模式,其尾部存在小范围内的压降区域,引起该区域压降的主要原因是摆动产生的漩涡与仿生鳍脱离导致的<sup>[16]</sup>。

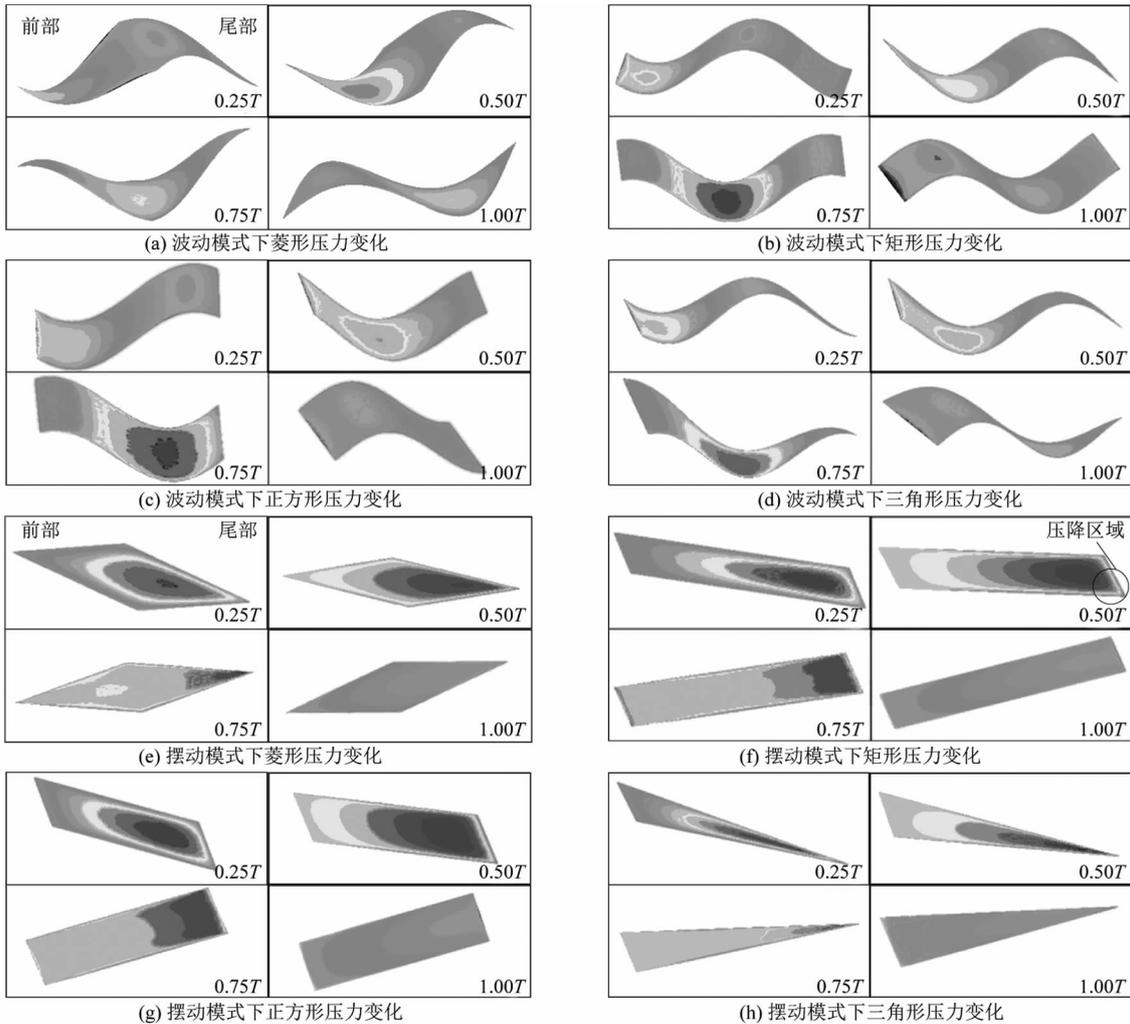


图 5 4 种鳍面形状 1 个周期内表面压力分布(波动和摆动)

Figure 5 Distribution of surface pressure among four kinds of fin shapes within a cycle (undulating motion vs oscillating motion)

绘制仿生鳍 4 种鳍面形状在波动和摆动时 2 个截面(截面 I 和截面 II)涡量图,如图 6 所示。由图 6 可知,2 种运动模式均在仿生鳍前缘、周边及尾部区域形成明显的漩涡,这种旋转方向相反的涡对在尾部区域的两侧对称排列,涡对间形成射流,射流在鳍面产生的流体反作用力被认为是仿生鳍产生推力的另一重要动力来源。对比同时刻 2 个截面的漩涡,发现靠近鳍面

中间的截面 II 涡量强度要明显大于靠近鳍面边沿的截面 I 上的涡量强度。所不同的是:①波动模式前缘涡随着仿生鳍运动由前往后逐渐传播,并和仿生鳍周边漩涡一起进入尾部区域;摆动模式前缘涡则驻留在前沿并附着在仿生鳍上。②涡对在尾部区域两侧排列方向存在差异,波动模式为平行分布,而摆动模式则为两侧扩散分布。

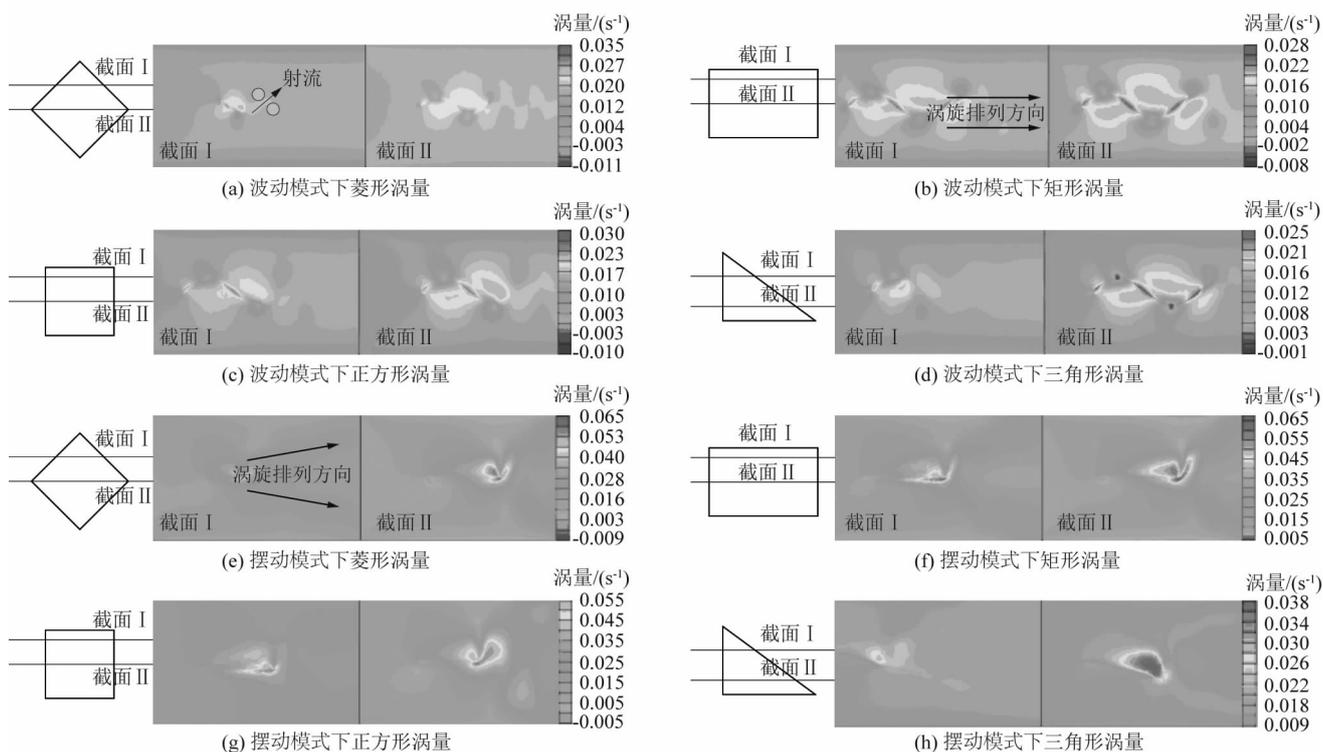


图6 不同截面涡量图

Figure 6 Vortices in different slices

#### 4 结论

采用数值计算方法,在运动学参数和面积不变时,研究4种鳍面形状仿生鳍在波动和摆动2种运动模式下产生的推进力大小。得出以下几点结论:

1) 相同运动学参数和鳍面形状时,不同推进模式产生的推进力存在较大差异。一般而言,摆动模式产生的推进力要大于波动模式,但摆动模式运动稳定性较差。

2) 相同运动学参数和推进模式时,鳍面形状对推进力也有较大影响。波动时菱形鳍面产生的推进力最大,矩形鳍面产生的推进力最小。摆动时正方形鳍面产生的推进力最大,三角形鳍面产生的推进力最小。

3) 从压力分布看,仿生鳍波动模式时表面压力由前部往尾部传递,而摆动模式未出现这种情况,故波动模式仿生鳍表面的压力为均匀分布,摆动模式鳍面压力则由前部往尾部逐渐递增。从涡街分布看,波动模式前缘涡随着仿生鳍运动由前往后逐渐传播,并和仿生鳍周边涡一起进入尾部区域,而摆动模式未出现这种情况;另外,波动模式涡对在尾部区域两侧平行排列,摆动模式则为两侧扩散分布。这些差异都是造成2种运动模式推进力不同的因素。

进一步研究需要分析三维涡流结构的差别,同时

考虑运动学参数变化对推进力以及推进效率等因素的影响。

#### 参考文献:

- [1] NISHIWAKI K, CHESTNUTT J, KAGAMI S. Autonomous navigation of a humanoid robot over unknown rough terrain [J]. Robotics research, 2017; 619-634.
- [2] TAN Y G, LI Z, CHEN Y H, et al. Bionic mechanism and kinetic characteristic for quadruped robot dog [C]//The 5th Asia International Symposium on Mechatronics. Guilin, China: IET, 2016: 1-5.
- [3] 严忠, 王坤. 基于四杆机构对仿生蜻蜓扑翼飞行器的设计优化与仿真[J]. 科技资讯, 2012(27): 59-61.
- [4] SUEBSAIPROM P, LIN C L, ENKANINAN A. Undulatory locomotion and effective propulsion for fish-inspired robot[J]. Control engineering practice, 2017, 58: 66-77.
- [5] TRIANTAFYLLOU M S, TRIANTAFYLLOU G S, GEORGE S. An efficient swimming machine[J]. Scientific American, 1995, 272(3): 64-70.
- [6] TANGORRA J L, DAVIDSON S N, HUNTER I W, et al. The development of a biologically inspired propulsor for unmanned underwater vehicles[J]. IEEE journal of oceanic engineering, 2007, 32(3): 533-550.
- [7] LOW K H. Modelling and parametric study of modular undulating fin rays for fish robots [J]. Mechanism and machine theory, 2009, 44(3): 615-632.

(下转第45页)