

# 某型仿生鱼自主直线巡游速度的影响因素研究\*

郝栋伟, 王文全

(昆明理工大学 工程力学系, 昆明 650500)

**摘要:** 深入开展鱼游等生物运动力学机理的研究对日益增长的仿生技术需求具有重要的意义。为此,该文以某型仿生鱼自主游动为研究对象,基于浸入边界法的流固耦合建模思想,以鱼体肌肉提供的主动动力为原动,建立了鱼体内力、鱼体运动和外界流体耦合作用的自主游动柔性鱼模型。分别对不同长度尾鳍、不同弹性模量鱼体以及鱼肌肉提供不同作用力下仿生鱼的自主直线巡游进行了数值模拟。分析了鱼自主游动的水动力学特征和鱼体运动特征,揭示了影响鱼游动速度的关键因素及其力学机理。

**关键词:** 仿生鱼; 流固耦合; 浸入边界法; 自主游动; 游动速度

**中图分类号:** Q692; O35      **文献标志码:** A

**doi:** 10.3879/j.issn.1000-0887.2014.06.009

## 引 言

对游动生物耦合运动特性的研究,通常应用到仿生学当中,以揭示生物运动的力学、变形学等机理<sup>[1-3]</sup>。鱼游动的内在机理是非常复杂的,不仅要考虑鱼的主动控制、与流体相互耦合作用等问题,还要考虑到不同鱼类在不同生活环境中的漫长进化而形成的不同鱼体外形及游动特点。研究某种鱼游动的水动力学特性,最关心的是鱼游动与流体耦合作用问题<sup>[4-5]</sup>。传统的流固耦合计算方法在处理生物组织的大变形运动、复杂外形结构及计算效率上具有一定的局限性。自上世纪70年代发展起来的浸入边界法<sup>[6]</sup>是求解流固耦合问题的方法之一。它最主要的优点是网格生成简单,计算效率较高,适用于复杂结构外形,且在大变形结构的处理上容易实现,此方法在生物流体力学领域得到广泛的应用<sup>[7]</sup>。

对鱼游动的流体动力学特性进行研究就需要建立较真实的鱼游动物理模型。以往建立的鱼游动模型没有充分考虑鱼游动时的多场耦合情况<sup>[8-10]</sup>,如鱼体肌肉产生的能量等。为此,本文以某型仿生鱼作为研究对象,建立了自主游动的柔性鱼模型,该模型较为完整地考虑了鱼体运动受外界环境流体,以及鱼体结构参数和鱼体肌肉提供能量的影响。基于此仿生鱼模型,结

\* 收稿日期: 2013-11-28; 修订日期: 2014-04-06

基金项目: 国家自然科学基金(11262008;11002063)

作者简介: 郝栋伟(1987—),男,河北邯郸人,硕士(E-mail: 1987hdw@163.com);

王文全(1977—),男,四川蓬安人,教授,博士(通讯作者, E-mail: wwqquan@126.com)。

合传统的反馈力方法<sup>[11]</sup>和混合有限元浸入边界方法<sup>[12]·①</sup>,对鱼自主游动速度的主要影响因素进行了研究.

## 1 自主游动鱼模型的建立

本文为了模拟鱼游动时鱼体内力、鱼运动和流体相互耦合的物理状况,在鱼体内附加一个随鱼体运动不断变化的体积力,此力即是鱼运动时肌肉收缩产生的内力.在此体积力作用下鱼开始运动.同时,使用浸入边界法实现鱼运动与外界流场相互作用,这样更能真实地反应鱼体运动时的生理状况.鱼体考虑成各向同性超弹性体,其本构关系为

$$\mathbf{P}(\mathbf{s}, t) = \mu(\mathbf{D} - \mathbf{D}^{-T}), \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{P}(\mathbf{s}, t)$  为第一 P-K 应力张量,  $\mathbf{D}(\mathbf{s}, t)$  是弹性体变形梯度张量,  $\mu = E/(2(1 + \nu))$  为弹性材料参数,  $\nu$  为 Poisson(泊松)比,  $E$  为弹性模量.

使用 NACA0012 翼型代表鱼体,总长为  $L$ ,如图 1 所示.将鱼体分成 3 段:  $L_1$  鱼头段( $0 \sim 0.5L$ )、 $L_2$  鱼尾段( $0.5L \sim 0.96L$ )和  $L_3$  尾鳍段( $0.96L \sim L$ ).在鱼体上选取两点  $A$  和  $B$  输出鱼运动位移及速度结果,  $A$  点坐标为  $(0.2L, 0)$ ,  $B$  点坐标为  $(0.95L, 0)$ .假设鱼沿  $-x$  方向直线巡游,对鱼体进行如下控制:

### 1) $L_1$ 鱼头段(游动方向控制段)

假设  $L_1$  鱼头段只在  $x$  方向运动,采用反馈力浸入边界法在  $L_1$  段鱼体的  $y$  方向上添加弹性约束,反馈力为

$$F(s_y, t) = \kappa(s_y)(s_y - X(s_y, t)), \quad (2)$$

上式中,  $\kappa(s_y)$  为弹性系数,  $s_y$  为鱼体原始状态下  $y$  方向坐标,  $X(s_y, t)$  表示鱼体运动过程中计算得到的鱼头外形的  $y$  方向坐标.此段鱼体的弹性模量设为  $E_1$ .

### 2) $L_2$ 鱼尾段(鱼游动能产生段)

在  $L_2$  段鱼体  $y$  方向上附加一个作用力,模拟鱼肌肉提供的能量.作用力密度呈正弦分布:

$$F_y = F_{y_{\max}} \times \sin(2\pi \times (s_x - 0.5L)), \quad (3)$$

式中,  $F_{y_{\max}}$  为最大作用力密度,  $s_x$  为鱼体在  $x$  方向的坐标.

通过鱼肌肉提供的能量控制鱼尾摆动的方式为

(i) 从 0 时刻开始至鱼尾  $B$  点  $(0.95L, 0)$  (如图 1 所示),  $y$  坐标摆动到  $0.1L$  位置,作用力密度为

$$F_y = F_y, \quad 0 \leq t \leq t(X(s_{By}) = 0.1L). \quad (4)$$

(ii) 从鱼尾  $B$  点  $y$  坐标为  $0.1L$  位置开始,作用力密度为

$$\begin{cases} F_y = -F_y, & t(X(s_{By}) = 0.1L) \leq t < t(X(s_{By}) = 0.1L) + T/2, \\ F_y = F_y, & t(X(s_{By}) = 0.1L) + T/2 \leq t < t(X(s_{By}) = 0.1L) + T, \end{cases} \quad (5)$$

上式中,  $T$  为鱼尾摆动的某个周期,  $t(X(s_{By}) = 0.1L)$  是在鱼尾某个摆动周期内,鱼体  $B$  点  $y$  坐标运动到  $0.1L$  位置时的时间.此段鱼体弹性模量取  $E_2$ .

### (iii) $L_3$ 尾鳍段

此段鱼体不加控制,其弹性模量取为  $E_3$ .

① Griffith B E, Luo X Y. Hybrid finite difference/finite element version of the immersed boundary method[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 待发表.

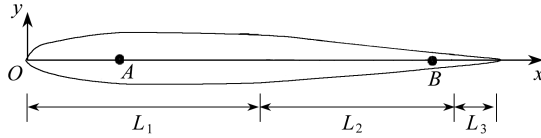


图1 仿生鱼模型

Fig.1 The robotic fish model

## 2 鱼游动速度影响因素研究

### 2.1 不同长度尾鳍对鱼游动速度的影响

尾鳍对鱼的游动至关重要,此节对不同长度尾鳍的鱼游动特性进行研究.建立了4类鱼游动模型,分别是正常鱼模型、短尾鳍鱼模型、柔性长尾鳍鱼模型和近刚性长尾鳍鱼模型.这4类模型鱼体  $L_1$  鱼头段在  $y$  方向的弹性约束系数都取为  $\kappa = 1.0 \times 10^9$ ,最大作用力密度都取为  $F_{y\_max} = 1.5 \times 10^6 \text{ N/m}^3$ .

流体密度为  $\rho_f = 1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,运动粘度系数为  $\nu_f = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ .计算域使用4层 Cartesian(笛卡尔)自适应加密网格,加密率为4,最小的网格间距为  $0.0045L$ .鱼体使用了三边形有限元网格,如图2所示.这4类鱼模型  $L_1$  鱼头段弹性模量为  $E_1 = 2.4 \times 10^6 \text{ Pa}$ ;  $L_2$  鱼尾段弹性模量为  $E_2 = 1.2 \times 10^6 \text{ Pa}$ .4类鱼模型不同的是尾鳍的长度和尾鳍的弹性模量.

4类鱼模型的外形及尾鳍段弹性模量如下:

1) 正常鱼模型:鱼体总长为  $L = 1 \text{ m}$ ,  $L_3$  尾鳍段取弹性模量为  $E_3 = 2.4 \times 10^6 \text{ Pa}$ .

2) 短尾鳍鱼模型:尾鳍缩短  $0.03L$ ,鱼体总长为  $0.97L$ .  $L_3$  尾鳍段取弹性模量为  $E_3 = 2.4 \times 10^6 \text{ Pa}$ .

3) 柔性长尾鳍鱼模型:在鱼体  $0.99L$  处将尾鳍切开,其断面沿  $x$  方向延长  $0.07L$ ,为图2(b)所示的长尾鳍鱼模型的外形.尾鳍弹性模量方程为

$$\begin{cases} 2 \times 10^6 \text{ Pa}, & 0.96L \leq s_x < 0.98L, \\ 2 \times 10^6 \times (1 - 10 \times (s_x - 0.98L)) \text{ Pa}, & 0.98L \leq s_x < 1.06L, \\ 0.4 \times 10^6 \text{ Pa}, & 1.06L \leq s_x. \end{cases}$$

4) 近刚性长尾鳍鱼模型:尾鳍弹性模量方程为

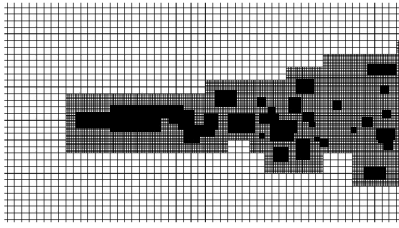
$$\begin{cases} 2 \times 10^6 \text{ Pa}, & 0.96L \leq s_x < 0.98L, \\ 2 \times 10^6 \times (2 - 12.5 \times (s_x - 0.98L)) \text{ Pa}, & 0.98L \leq s_x < 1.06L, \\ 2 \times 10^6 \text{ Pa}, & 1.06L \leq s_x. \end{cases}$$

初始时刻,鱼体呈直线型,肌肉提供的作用力沿  $+y$  方向.

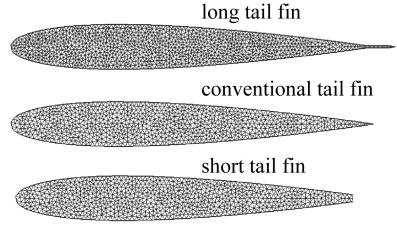
图3是不同长度尾鳍鱼模型巡游阶段流场速度云图.由图可见,短尾鳍鱼游动形成的反 Kármán(卡门)涡街中的一个涡由一个主涡和几个极小的涡组成,其涡旋也较集中.而柔性长尾鳍鱼游动形成的反 Kármán 涡街中的一个涡旋由多个分散的涡组成,使得反 Kármán 涡街并不明显,直接影响鱼自主推进的速度.

图4是不同长度尾鳍仿生鱼从初始时刻开始的运动轨迹图.从图中可以看出正常尾鳍和长尾鳍鱼自主游动时鱼体会呈“C”型和类“S”型往复变换运动.而短尾鳍鱼模型游动时鱼体几乎呈“C”型运动.

图5是不同长度尾鳍鱼模型游动前3s鱼体A点  $x$  方向运动速度曲线图.可以看出,在启



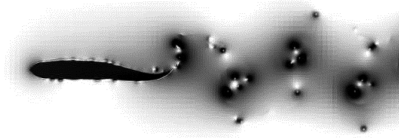
(a) 流体计算域自适应加密网格  
(a) Adaptive mesh refinement for the computational fluid field



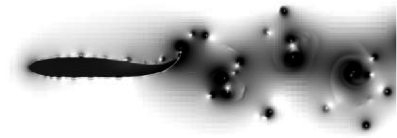
(b) 鱼体计算域的有限元网格  
(b) Finite element mesh for the computational fish body

图 2 计算网格

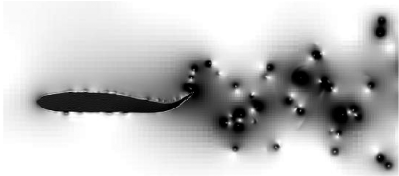
Fig.2 Computational mesh



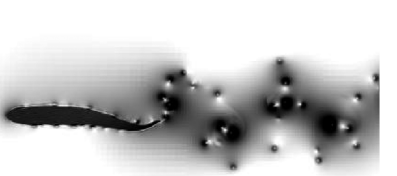
(a) 正常尾鳍  
(a) Conventional tail fin



(b) 短尾鳍  
(b) Short tail fin



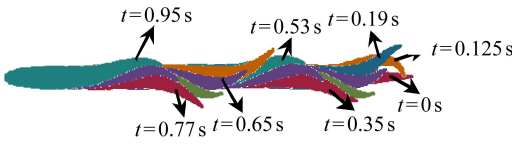
(c) 柔性长尾鳍  
(c) Flexible long tail fin



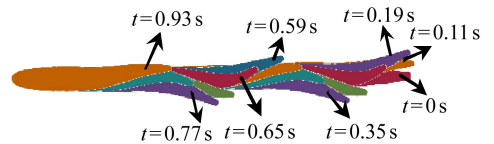
(d) 近刚性长尾鳍  
(d) Rigid long tail fin

图 3 不同长度尾鳍仿生鱼巡游阶段流场速度大小分布

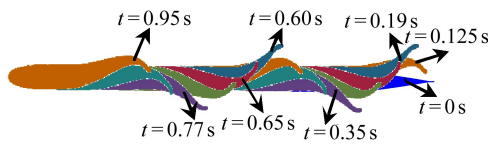
Fig.3 Velocity distribution of the fluid field around the cruising robotic fishes with different-length tail fins



(a) 正常尾鳍  
(a) Conventional tail fin



(b) 短尾鳍  
(b) Short tail fin



(c) 柔性长尾鳍  
(c) Flexible long tail fin

图 4 不同长度尾鳍仿生鱼自主运动轨迹图

Fig.4 Body outlines of the swimming robotic fishes with different-length tail fins at different moments

动阶段初始时刻,鱼尾向远离中轴线方向摆动,鱼体开始后退运动.当到 0.07 s 左右时,正常尾鳍和长尾鳍鱼开始向前加速运动,而短尾鳍鱼仍在加速后退运动.在图 4 中可以发现此时刻鱼尾正向远离中轴线方向摆动,正常尾鳍和长尾鳍鱼会变成类“S”型,这种类“S”型可以在弯曲的尾鳍处产生向前的推力.而短尾鳍鱼不会产生类“S”型鱼体,整个鱼尾一直呈“C”型运动,因此,鱼尾向远离中轴线方向摆动时,一直是加速后退过程.以此可以说明鱼体呈“C”型和类“S”型的往复变换对鱼自主游动有重要的影响.

在 0.14~0.25 s 阶段的鱼启动快速加速阶段,不同长度尾鳍的鱼模型鱼体呈“C”型状态,并且提供的加速度基本相同,说明在鱼启动阶段,尾鳍的长短对提供的加速度影响较小.在 2.5 s 后鱼游动基本进入稳定的巡游阶段.

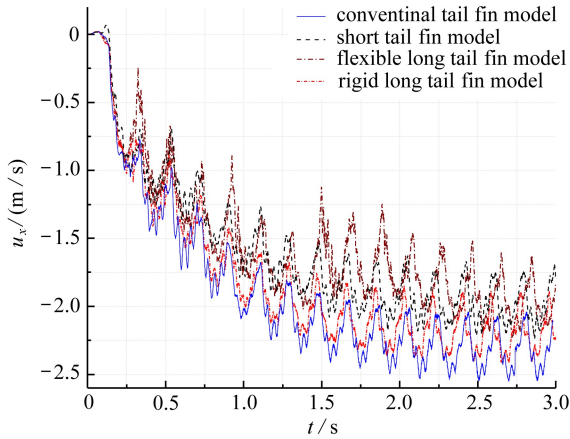


图 5 不同长度尾鳍仿生鱼游动鱼体 A 点 x 方向运动速度

Fig.5 x-velocities at point A of the swimming robotic fishes with different-length tail fins

表 1 不同长度尾鳍仿生鱼巡游阶段游动参数计算结果

Table 1 Simulation results of swimming parameters of the cruising robotic fishes with different-length tail fins

case	$\Delta x_{\min} / \text{m}$	$\Delta t / \text{s}$	$u_x(A) / (\text{m/s})$	$T_{u_x} / \text{s}$	$v_y(B) / \text{m}$	$T_B / \text{s}$
conventional tail fin	0.004 5	5.0E-5	2.291±0.239	0.189	0.000 19±0.128 2	0.376
short tail fin	0.004 5	5.0E-5	1.955±0.253	0.188	0.000 14±0.130 9	0.376
flexible long tail fin	0.004 5	5.0E-5	1.945±0.272	0.191	0.000 45±0.138 0	0.382
rigid long tail fin	0.004 5	5.0E-5	2.142±0.240	0.186	0.000 25±0.132 2	0.372

表 1 是不同长度尾鳍的鱼巡游阶段平均计算结果.表中  $\Delta t$  为时间步长; $u_x(A)$  是鱼头 A 点(见图 1)在 x 方向运动速度; $T_{u_x}$  是速度  $u_x(A)$  的变化周期; $v_y(B)$  是鱼尾 B 点(见图 1)在 y 方向位移; $T_B$  是  $v_y(B)$  的变化周期.由于计算结果数值是随时间周期波动变化的,其值可通过中间值和波幅值表示成  $V_{\text{me}} \pm V_{\text{am}}$ .若一个振动周期内的最大值为  $V_{\text{max}}$ ,最小值为  $V_{\text{min}}$ ,则

$$V_{\text{me}} = \frac{1}{2}(V_{\text{max}} + V_{\text{min}}), V_{\text{am}} = \frac{1}{2}(V_{\text{max}} - V_{\text{min}}).$$

由图 5 可见,正常尾鳍鱼巡游的平均速度最大,其次是刚度较大的长尾鳍,游动速度最慢的是柔性长尾鳍.而且速度的波动幅度也是正常尾鳍和刚度较大的长尾鳍鱼较小,柔性长尾鳍的最大.通过以上分析可知,对于某种鱼,缩短和延长尾鳍都会影响巡游的速度,其尾鳍长度必有最佳值.且当尾鳍较长时,尾鳍的刚度过小,不利于鱼的高速游动,反而对鱼的游动会起到阻碍作用.



## 2.2 鱼体运动不同形状对游动速度的影响

本小节建立的鱼游动模型,在保持鱼体产生的内力大小及分布不变的情况下,通过改变鱼尾和尾鳍的弹性模量,从而影响鱼游动时的鱼体形状,达到分析鱼体运动形状对鱼游动速度影响的目的.其鱼体外形都为正常鱼,鱼体作用力密度分布形式仍为公式(3),最大作用力密度为  $F_{y\_max} = 0.5 \times 10^6 \text{ N/m}^3$ .这3个鱼模型鱼尾和尾鳍的弹性模量如下:

### 1) 近刚性正常鱼模型

$$\begin{cases} 1.2 \times 10^6 \text{ Pa}, & 0.5L \leq s_x < 0.75L, \\ 9.6 \times 10^6 \text{ Pa}, & 0.75L \leq s_x \leq L; \end{cases}$$

### 2) 正常鱼模型

$$\begin{cases} 1.2 \times 10^6 \text{ Pa}, & 0.5L \leq s_x < 0.75L, \\ 2.4 \times 10^6 \text{ Pa}, & 0.75L \leq s_x \leq L; \end{cases}$$

### 3) 柔性正常鱼模型

$$\begin{cases} 1.2 \times 10^6 \text{ Pa}, & 0.5L \leq s_x < 0.75L, \\ 0.24 \times 10^6 \text{ Pa}, & 0.75L \leq s_x \leq L. \end{cases}$$

图6是巡游阶段近刚性正常鱼模型和柔性正常鱼的流场涡量图.从图中可以看出近刚性正常鱼模型鱼尾和尾鳍刚度较大,鱼运动时,基本呈“C”型运动.而柔性正常鱼模型鱼尾和尾鳍刚度较小,鱼尾摆动呈“C”型和“S”型变换运动.由于两种鱼模型的运动形状不同,可以看出,外部流场涡量场也不相同,从而影响到鱼的游动特性.

图7是不同鱼尾和尾鳍弹性模量的鱼游动前7s鱼体A点沿x方向运动速度曲线图.由图可见,在启动阶段初始时刻,当鱼尾向远离中轴线方向摆动,近刚性正常鱼模型鱼体近似呈直线摆动,而运动速度也一直是减速.而正常鱼和柔性正常鱼模型由于鱼体刚度较小,向远离中轴线摆动时,鱼体呈类“S”型,当到0.1s左右时,产生推力,开始加速前进.近刚性正常鱼模型,鱼尾向中轴线方向摆动时可以获得较大的加速度,而向远离中轴线摆动时,产生的推力较小,其减速也较大.

表2是不同鱼尾和尾鳍弹性模量的鱼直线巡游阶段平均计算结果,表中的符号含义同表1.可以看出,近刚性正常鱼运动速度最大,但其速度波动幅度也较大;柔性正常鱼运动速度最小,但其速度波动幅度也较小.说明当鱼尾向中轴线方向摆动时,鱼尾和尾鳍弯曲度越小,产生的推力较大;而当鱼尾向远离中轴线方向摆动时,鱼尾和尾鳍呈“S”型摆动,可以产生较大推力.同时,通过图6和表2可以看出,鱼模型中鱼尾和尾鳍刚度越小,鱼尾摆动频率越高,而其鱼尾的摆动幅度也越大.

表2 不同鱼尾和尾鳍弹性模量下仿生鱼巡游阶段游动参数计算结果

Table 2 Simulation results of swimming parameters of the cruising robotic fishes with different tail elasticities

case	$\Delta t / \text{s}$	$u_x(A) / (\text{m/s})$	$T_{u_x} / \text{s}$	$v_y(B) / \text{m}$	$T_B / \text{s}$
rigid conventional tail fin	5.0E-5	1.268±0.128	0.431	0.001 4±0.105 9	0.862
conventional tail fin	5.0E-5	1.237±0.123	0.375	0.001 0±0.109 2	0.750
flexible conventional tail fin	5.0E-5	1.176±0.101	0.301	0.002 0±0.117 8	0.602

## 2.3 肌肉提供不同能量对鱼游动速度的影响

鱼在不同物理环境下,需要不同的速度或加速度进行游动,此时,鱼尾摆动中肌肉产生的能量也不同.而鱼尾摆动肌肉产生的能量与本文鱼模型的作用力密度是相关的.本小节针对正

常尾鳍鱼模型,研究不同作用力密度对鱼游动的影响。

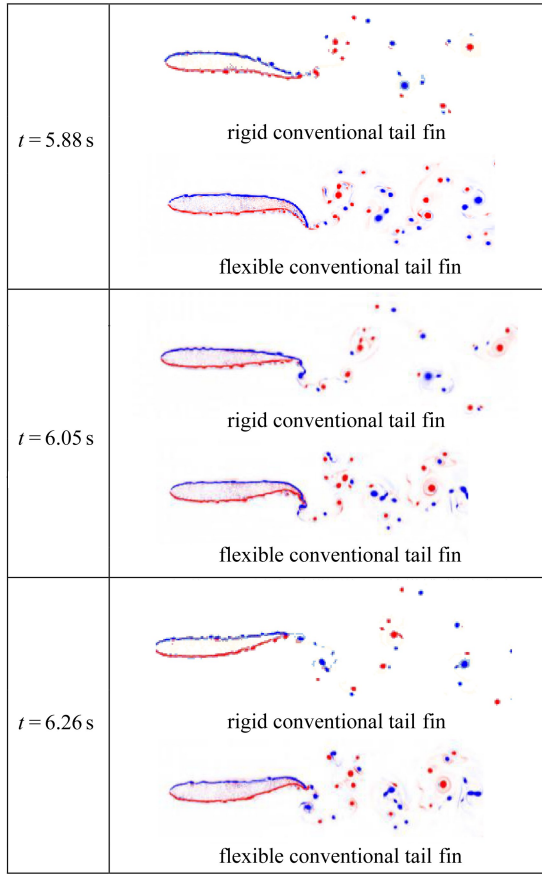


图6 仿生鱼巡游阶段的流场涡量图

Fig.6 Vorticity distribution of the fluid field around the cruising robotic fishes

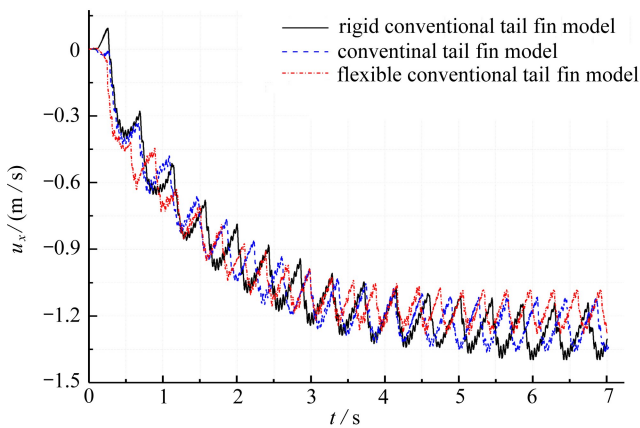


图7 不同鱼尾和尾鳍弹性模量下仿生鱼游动鱼体A点x方向运动速度

Fig.7 x-velocities at point A of the swimming robotic fishes with different tail elasticities

图8是不同作用力密度的鱼模型鱼体A点x方向运动速度曲线图,由图可见, $F_{y_{max}}$ 越大,其游动的速度越大,速度波动幅度也越大,同时,鱼尾摆动频率越高(图中标示的最大作用力密度单位为  $N/m^3$ )。图9是不同作用力密度的鱼直线巡游阶段鱼体游动平均速度曲线图,可以

看出,在鱼正常巡游下,鱼体肌肉提供的作用力密度  $F_{y\_max}$  越小,鱼游动的效率越高.通过曲线的分布也可以看出,当  $F_{y\_max}$  增大到某一值时,再增大  $F_{y\_max}$  并不能明显提高鱼游动的速度.

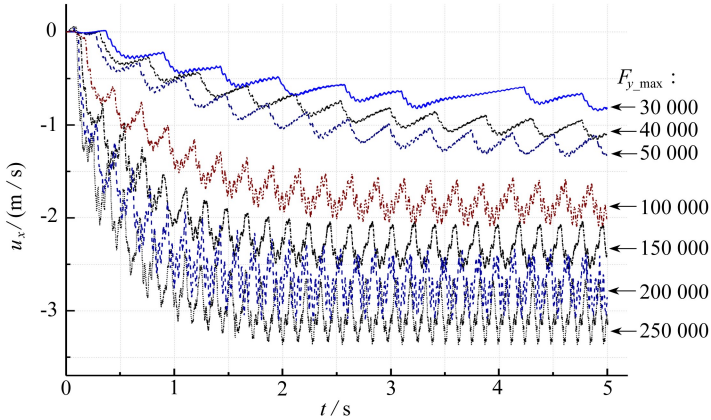


图 8 不同作用力密度下仿生鱼游动鱼体 A 点 x 方向运动速度

Fig.8  $x$ -velocities at point A of the cruising robotic fishes with different force densities

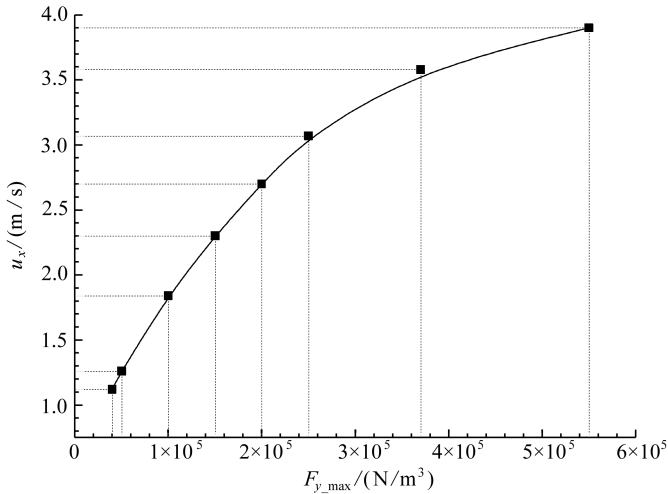


图 9 不同作用力密度的仿生鱼巡游阶段鱼体 A 点 x 方向运动平均速度曲线图

Fig.9  $x$ -direction average velocities at point A of the cruising robotic fishes with different force densities

### 3 结 论

本文分别对不同长度尾鳍的仿生鱼模型,不同鱼尾和尾鳍弹性模量的仿生鱼模型及不同作用力密度大小的仿生鱼模型的自主游动进行了数值模拟.揭示了鱼游动速度的相关影响因素及其内在机理,其主要结论如下:

- 1) 鱼游动物体呈“C”型和类“S”型的不断转换对鱼自主游动速度影响极大,鱼尾和尾鳍刚度越小,鱼尾摆动频率越高,且鱼尾摆动幅度越大,但其游动的平均速度最低;
- 2) 缩短和延长尾鳍都会影响巡游的速度,其尾鳍长度必有最佳值;
- 3) 鱼体肌肉提供的作用力密度  $F_{y\_max}$  越小,鱼游动的效率越高.



## 参考文献(References):

- [1] 童秉纲, 孙茂, 尹协振. 飞行和游动生物流体力学的国内研究进展概述[J]. 自然杂志, 2005, **27**(4): 191-198. (TONG Bing-gang, SUN Mao, YIN Xie-zhen. A brief review on domestic research developments in biofluid dynamics of animal flying and swimming[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2005, **27**(4): 191-198. (in Chinese))
- [2] 潘定一. 基于沉浸边界法的鱼游运动水动力学机理研究[D]. 博士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2011. (PAN Ding-yi. Studies on the hydrodynamic mechanism of fish-like swimming with immersed boundary methods[D]. PhD Thesis. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese))
- [3] Liao J C, Beal D N, Lauder G V, Triantafyllou M S. Fish exploiting vortices decrease muscle activity[J]. *Science*, 2003, **302**(5650): 1566-1569.
- [4] Tytell E D, Hsu C Y, Williams T L, Cohen A H, Fauci L J. Interactions between internal forces, body stiffness and fluid environment in a neuromechanical model of lamprey swimming[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, **107**(46): 19832-19837.
- [5] WU Chui-jie, WANG Liang. Numerical simulations of self-propelled swimming of 3D bionic fish school[J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2009, **52**(3): 658-669.
- [6] Peskin C S. The immersed boundary method[J]. *Acta Numerica*, 2002, **11**: 479-517.
- [7] Griffith B E, Hornung R D, McQueen D M, Peskin C S. An adaptive, formally second order accurate version of the immersed boundary method[J]. *Journal of Computational Physics*, 2007, **223**(1): 10-49.
- [8] Bowtell G, Williams T L. Anguilliform body dynamics: modeling the interaction between muscle activation and body curvature[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B*, 1991, **334**(1271): 385-390.
- [9] Cheng J Y, Pedley T J, Altringham J D. A continuous dynamic beam model for swimming fish [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B*, 1998, **353**(1371): 981-997.
- [10] Pedley T J, Hill S J. Large-amplitude undulatory fish swimming: fluid mechanics coupled to internal mechanics[J]. *The Journal of Experimental Biology*, 1999, **202**(23): 3431-3438.
- [11] Lai M C, Peskin C S. An immersed boundary method with formal second-order accuracy and reduced numerical viscosity[J]. *Journal of Computational Physics*, 2000, **160**(2): 705-719.
- [12] Boffi D, Gastaldi L, Heltai L, Peskin C S. On the hyper-elastic formulation of the immersed boundary method[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2008, **197**(25/28): 2210-2231.

# Parametric Study on the Straight-Line Cruising Velocity of an Auto-Swimming Robotic Fish

HAO Dong-wei, WANG Wen-quan

*(Department of Engineering Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, P.R.China)*

**Abstract:** Study on the kinetic & kinematic mechanisms of fish-like swimming is of cardinal significance for increasing needs of bionic technologies. Therefore, an auto-swimming robotic fish model was established with a flexible body and muscular self-propelling force, involving the interactions between fish-body internal forces, fish-body motions and surrounding fluid dynamics. Then, respectively, the effects of different-length tail fins, different tail elasticities and different muscular self-propelling force densities on the robotic fish's straight-line auto-swimming state were numerically simulated respectively. The hydrodynamics and kinematics of the auto-swimming robotic fish are analysed to reveal the key factors on the cruising velocity and clarify the related mechanisms. The key factors influence on swimming efficiency is shown by analysis of hydrodynamic performance.

**Key words:** robotic fish; fluid-structure interaction; immersed boundary method; auto-swim; cruising velocity

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China(11262008;11002063)