

文章编号: 1007-7294(2024)10-1559-11

鱼类自主游动推进机理与游动性能 二维数值模拟研究

贾瑞^a, 杨光^a, 万字^b, 张鹏^b, 杜洪波^b, 李文杰^{a,b}

(重庆交通大学 a. 水利水运工程教育部重点实验室; b. 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074)

摘要: 推进机理及游动性能研究对鱼类洄游通道建设具有重要意义。利用计算流体动力学方法结合重叠网格技术, 通过编译控制鱼体摆动的UDF程序, 对二维鱼类自主游动进行模拟, 分析鱼体压力场分布及反卡门涡街结构演化过程与参数变化情况, 开展不同摆尾频率、摆尾幅度、鱼体体形及尾鳍尺寸等参数下鱼类游动性能及鱼体受力的变化情况, 揭示鱼类自主游动过程中的游动机理。研究表明: (1) 鱼体尾鳍周期性往复摆动下漩涡脱落形成反卡门涡街, 是鱼体前进推力的主要来源, 且随着摆尾频率、摆尾幅度的增加, 鱼体尾部涡街长度、涡街强度逐渐增加, 而摆尾幅度对涡街宽度的影响较大; (2) 随着摆尾频率、摆尾幅度的增加, 纵向平均合力系数和最大侧向力系数均增大, 使得鱼类获得较大的游动速度, 但摆尾频率改变时平均合力系数和游动速度的增加更为明显, 摆尾幅度改变时最大侧向力系数的增加更为明显; (3) 随着体宽指数的增加, 纵向平均合力系数逐渐减小, 需克服的游动阻力增加, 使得鱼类游动速度逐渐减小, 而最大侧向力系数逐渐增加; (4) 随着尾鳍指数的增加, 纵向平均合力系数和最大侧向力系数均增大, 使得鱼类游动速度逐渐增大。研究成果可为鱼类生境恢复营造提供支撑。

关键词: 推进机理; 游动性能; 摆尾频率; 摆尾幅度; 体宽指数; 尾鳍指数

中图分类号: TV131.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1007-7294.2024.10.009

Numerical simulation of propulsion mechanism and swimming performance of 2D fish autonomous swimming

JIA Rui^a, YANG Guang^a, WAN Yu^b, ZHANG Peng^b, DU Hong-bo^b, LI Wen-jie^{a,b}

(a. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education; b. National Inland Waterway Regulation Engineering Research Center, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The propulsion mechanism and swimming performance are of great significance to the construction of fish migratory channels. By using computational fluid dynamics method combined with overlapping mesh technology, the two-dimensional fish autonomous swimming was simulated by compiling the UDF program for controlling fish body swing, analyzing the evolution process and parameter changes of fish body pressure field distribution and inverse Carmen vortex street structure, carrying out the changes of fish swimming performance and fish body force under different parameters of tail swing frequency, tail swing amplitude, fish body shape and tail fin size, etc., and revealing the swimming mechanism of fish in the process of autonomous swimming. The results show that: (1) the fish body's tail fin periodically swings back and forth under the formation of anti-Carmen vortex street, which is the main source of the fish body forward thrust, and with the increase of tail swing frequency and tail swing amplitude, the fish body tail vortex street length and vortex street

收稿日期: 2024-04-21

基金项目: 重庆市自然科学基金资助项目(cstc2021jcyj-jqX0009); 重庆交通大学研究生科研创新基金资助项目(2023B0006); 长江航道局科研资助项目(KY2022-01)

作者简介: 贾瑞(1995-), 男, 博士研究生; 李文杰(1984-), 男, 博士, 教授, 通讯作者, E-mail: li_wj1984@163.com。

strength gradually increase, while the effect of tail swing amplitude on the vortex street width is greater;(2) with the increase of swinging frequency and swinging amplitude, the horizontal mean coefficient of synergy and the maximum lateral force coefficient increase, which makes the fish obtain a larger swimming speed, but the increase of mean coefficient of synergy and swimming speed is more obvious when the swinging frequency has been changed, and the increase of maximum lateral force coefficient is more obvious when the swinging amplitude has changed; (3) with the increase of body width index, the horizontal average coefficient of force gradually decreases, and the swimming resistance to be overcome increases, which makes the swimming speed of fish gradually decrease, while the maximum lateral force coefficient gradually increases; (4) and with the increase of caudal fin index, both horizontal mean coefficient of force and maximum lateral force coefficient increase, which leads to the gradual increase of swimming speed of fish. The results of the study can provide a support for fish habitat restoration.

Key words: propulsion mechanism; swimming ability; tail swing frequency; tail swing amplitude; body width index; caudal fin index

0 引言

鱼类游动涡流结构及游动性能对揭示其高效推进机理至关重要^[1]。目前,常用的分析方法有粒子图像测速技术(Particle Image Velocity, PIV)和数值模拟。其中,余英俊^[2]、王福君等^[3]、杨国党等^[4]、张奔等^[5]利用PIV技术分别对拉萨裸裂尻幼鱼、斑马鱼和草鱼幼鱼游动时的压力分布、尾涡结构、受力特征及推进效率等水动力性能进行了分析。而在数值模拟方面,王亮等^[6]利用浸没边界法分析了鱼类自主游动过程中推力、阻力和推进效率与游动雷诺数间的关系;王文全等^[7]将反馈力法与浸没边界法结合分析了鱼类自主游动过程中的流场特征;严惠云等^[8]采用Fluent软件结合动网格技术分析了鱼类巡游状态中的受力状态;周建军等^[9-10]采用计算流体力学方法(Computational Fluid Dynamics, CFD)并结合动网格技术分析了鱼类自主游动的机理及鱼体受力情况;冯亿坤等^[11-13]基于CFD方法分析了鱼体自主游动过程中的游动性能、鱼体表面压力变化和流场涡结构。研究表明,鱼类游动过程中两侧产生的压力差是鱼体前进的主要推力。但大部分研究仅对尾鳍摆动形成的反卡门涡街进行了定性分析,尚缺乏对涡街尺度及形态的定量分析,且更侧重于从流体力学角度对鱼类运动模型及推进机理开展研究,未结合鱼类的体形特性进行深入分析,对鱼类游动性能影响因素的分析也不够全面。此外,上述数值模拟多采用动网格方法和浸没边界法进行研究,但该方法需要的计算成本较高,且大部分针对的是低雷诺数或未考虑流体粘性的游动。

本文基于CFD的重叠网格方法对二维鱼类自主游动过程进行数值模拟,分析压力场分布及反卡门涡街结构演化过程与参数变化情况,并开展不同摆尾幅度、摆尾频率、鱼体体宽及尾鳍尺寸等运动与体型参数下鱼体受力状态及游动性能的研究,以期更为深入地揭示鱼类自主游动机制,为鱼类洄游通道建设和生境营造提供理论支撑。

1 鱼类游动数值模拟

1.1 鱼游数值模型

流体运动控制方程为二维不可压缩Navier-Stokes方程组:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \\ \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \end{cases} \quad (1)$$

式中, \mathbf{u} 为流体速度, ρ 为流体密度, p 为流体压力, ν 为流体运动粘度。

对于二维鱼体自主游动状态,其受力控制方程为

$$F_x = m \frac{dU}{dt} \tag{2}$$

式中, m 为鱼体质量, U 为鱼体游动速度, F_x 为鱼体沿水流方向上的合力。

采用鲹科推进模式的鱼体中线摆动规律^[14]:

$$h(x, t) = a(x) \sin(kx - \omega t) \tag{3}$$

式中: $h(x, t)$ 为鱼体中心线的侧向位移; x 表示鱼体中心线沿长度方向上的位置坐标; $a(x)$ 为鱼体摆动幅度, $a(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2$; k 为鱼体波的数量, $k = 2\pi/\lambda$, λ 为摆动波长; ω 为鱼体尾鳍摆动的角速度, $\omega = 2\pi f$, f 为摆尾频率。其中 $a_0 = 0.02L$ (L 为鱼体全长), $a_1 = -0.08$, $a_2 = 0.16/L$, 即鱼体摆尾幅度 $A = 2a(x)_{\max} = 0.2L$, $\lambda = 0.95L$ ^[15]。相关研究表明, 采用最大厚度为 13% 弦长的 NACA 0013 翼型作为鱼体的简化模型可以有效模拟出鱼类的游动特性^[16-17]。

二维鱼体水动力学系数分别定义为

$$\bar{C}_d = \frac{\bar{F}_x}{0.5\rho U^2 L}, C_{l_{\max}} = \frac{F_{y_{\max}}}{0.5\rho U^2 L} \tag{4}$$

式中, \bar{C}_d 为轴向平均合力系数, $C_{l_{\max}}$ 为垂直方向最大侧向力系数, \bar{F}_x 为鱼体沿轴线方向的平均力, $F_{y_{\max}}$ 为鱼体沿侧向的最大瞬时力。

本文以鱼头为坐标原点, 沿鱼体体干方向为 x 轴, 垂直体干方向为 y 轴, 如图 1 所示。鱼体全长均取为 $L = 0.1$ m, 计算域大小为 $15L \times 6L$, 其中入口边界距鱼头 $10L$, 出口边界距鱼尾 $4L$, 左右两侧边界距鱼体中线各为 $3L$, 加密区尺寸为 $3L \times 1.5L$ 。计算域入口设置为速度边界条件, 出口设置为自由出流边界条件, 两侧设置为无滑移光滑壁面。采用重叠网格方法, 其中背景域采用结构化网格, 前景域采用三角形非结构网格, 并采用弹簧平滑和重构法来更新网格。基于公式 (3), 编写用户自定义函数 (User Defined Functions, UDF) 对鱼体运动进行控制, 实现鱼体波状摆动推进过程中相应网格的动态变化。计算采用 SST $k-\omega$ 湍流模型, 利用双精度求解器对连续方程中的压力和速度进行耦合。

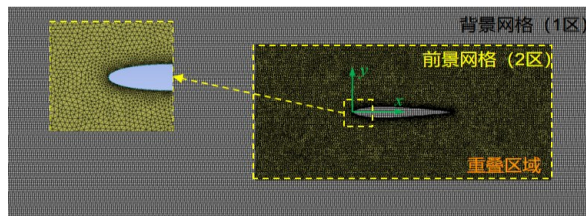


图 1 网格划分示意图

Fig.1 Schematic diagram of grid division

1.2 数值模型验证

为确定网格和时间步的收敛性, 采用摆尾频率 $f = 1.0$ Hz 进行游动模拟, 选用网格数为 114 161、245 713 和 442 113 来研究网格收敛性, 选用时间步为 $\Delta t = T/100$ (T 为鱼体摆动周期)、 $T/200$ 和 $T/400$ 来研究时间步收敛性, 结果如图 2 所示。由图可知计算结果最终均收敛, 彼此间差值较小, 对时间成本和精度进行折衷, 选用网格数为 245 713, 时间步为 $\Delta t = T/200$ 进行计算。

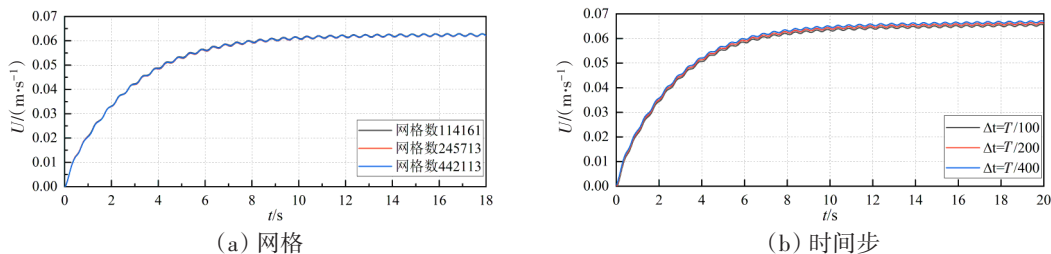


图 2 收敛性验证

Fig.2 Convergence verification

为验证所建模型在模拟鱼类自主游动时的精确性,本文计算了鲹科鱼游动实例^[18],鱼体全长 $L=0.1$ m,摆尾摆幅 $A=0.2L$,摆动波长 $\lambda=0.95L$,周期 $T=1$ s,入口来流流速 $U_0=0.04$ m/s,水的运动粘度 $\nu=1.062\times 10^{-6}$ m²/s,密度 $\rho=998.7$ kg/m³,结果如图3所示。由图可知,本文计算得出的鱼类游动速度最终趋于收敛,表明鱼类最终能够达到稳定游动状态,即推力与阻力相平衡,且与文献中的计算结果相接近。因此,本文所建模型中的参数设置是准确的。

1.3 工况设置

为深入探索鱼类游动推进机理,分析鱼类游动性能,在上述计算模型的基础上,设置以下计算工况:

(1) 分别将摆尾频率 f 设置为0.16 Hz、0.24 Hz、0.32 Hz、0.40 Hz、0.48 Hz、0.56 Hz、0.64 Hz、0.72 Hz、0.80 Hz和1.00 Hz,摆尾幅度 A 设置为0.1 L 、0.2 L 、0.3 L 和0.4 L ,通过调节摆幅系数 A_c 来改变鱼体的整体摆动幅度,即 $a(x)=A_c(a_0+a_1x+a_2x^2)$,具体计算过程如下:

当摆尾幅度 $A=0.2L$ 时,本文拟合所得的关系为 $a(x)_2=a(x)=0.02L-0.08x+(0.16/L)x^2$,当摆尾幅度 $A=0.1L$ 时, $a(x)_1=0.5a(x)_2=0.01L-0.04x+(0.08/L)x^2$,将体长 $L=0.1$ m代入,得 $a(x)_1=0.001-0.04x+0.8x^2$,同理可分别计算出 $A=0.3L$ 、 $A=0.4L$ 时所对应的 $a(x)$,拟合公式如式(5)所示,计算在相同体长下的游动情况。

$$\begin{aligned} a(x)_1 &= 0.001 - 0.04x + 0.8x^2 \\ a(x)_2 &= 0.002 - 0.08x + 1.6x^2 \\ a(x)_3 &= 0.003 - 0.12x + 2.4x^2 \\ a(x)_4 &= 0.004 - 0.16x + 3.2x^2 \end{aligned} \quad (5)$$

(2) 基于NACA翼型模型将鱼体体宽指数(表示体宽相对体长的形态, $\gamma=b/L$)分别设为0.13、0.14、0.15、0.18和0.24,计算在相同体长($L=0.1$ m)、摆尾幅度($A=0.2L$)与摆尾频率($f=1$ Hz)下的游动情况。

(3) 一般情况下,将鱼体分成3段: L_1 鱼头段(0~0.2 L)、 L_2 躯干段(0.2 L ~0.7 L)和 L_3 尾鳍段(0.7 L ~ L)^[19],基于NACA 0013翼型将鱼体尾鳍指数(表示尾鳍相对体长的发育程度, $\delta=L_3/L$)分别设为0.22、0.26、0.30、0.33和0.36,计算在相同摆尾幅度($A=0.2L$)与摆尾频率($f=1$ Hz)下的游动情况。

2 鱼类推进机理分析

通过分析鱼体摆动过程中的流场分布及涡系结构的演化过程,可以更加直观地解释鱼类的受力情况及游动机理^[20]。图4给出了摆尾频率 $f=1$ Hz、摆尾幅度 $A=0.2L$ 时,一个摆动周期内不同特征时刻鱼体附近流场压力及涡量分布的数值模拟结果。由图可知,在鱼体摆动过程中,鱼体头部始终为高压区,鱼体上下表面交替出现正、负压力分布,尾鳍产生两个方向相反的涡。从 $t=(10+1/4)T$ 鱼体后三分之一处开始逐渐向下弯曲,在鱼体两侧形成两个压力中心,压力梯度从上方指向下方,当 $t=(10+1/2)T$ 时,尾鳍的摆动幅度从零到正的最大,顺时针的涡逐渐脱落;当 $t=(10+1)T$ 时,鱼体两侧压力中心的正负发生变化,压力梯度从下方指向上方,逆时针的涡逐渐脱落。鱼体与尾鳍在同一旋转方向上产生的漩涡相互融合,随着尾鳍的周期性摆动而脱落,在尾流场中形成反卡门涡街,并形成一系列连续的射流,从而推动鱼类向前游动。

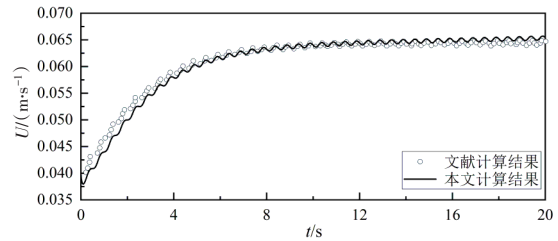


图3 鱼类自主游动数值计算方法验证

Fig.3 Validation of numerical calculation method for fish autonomous swimming

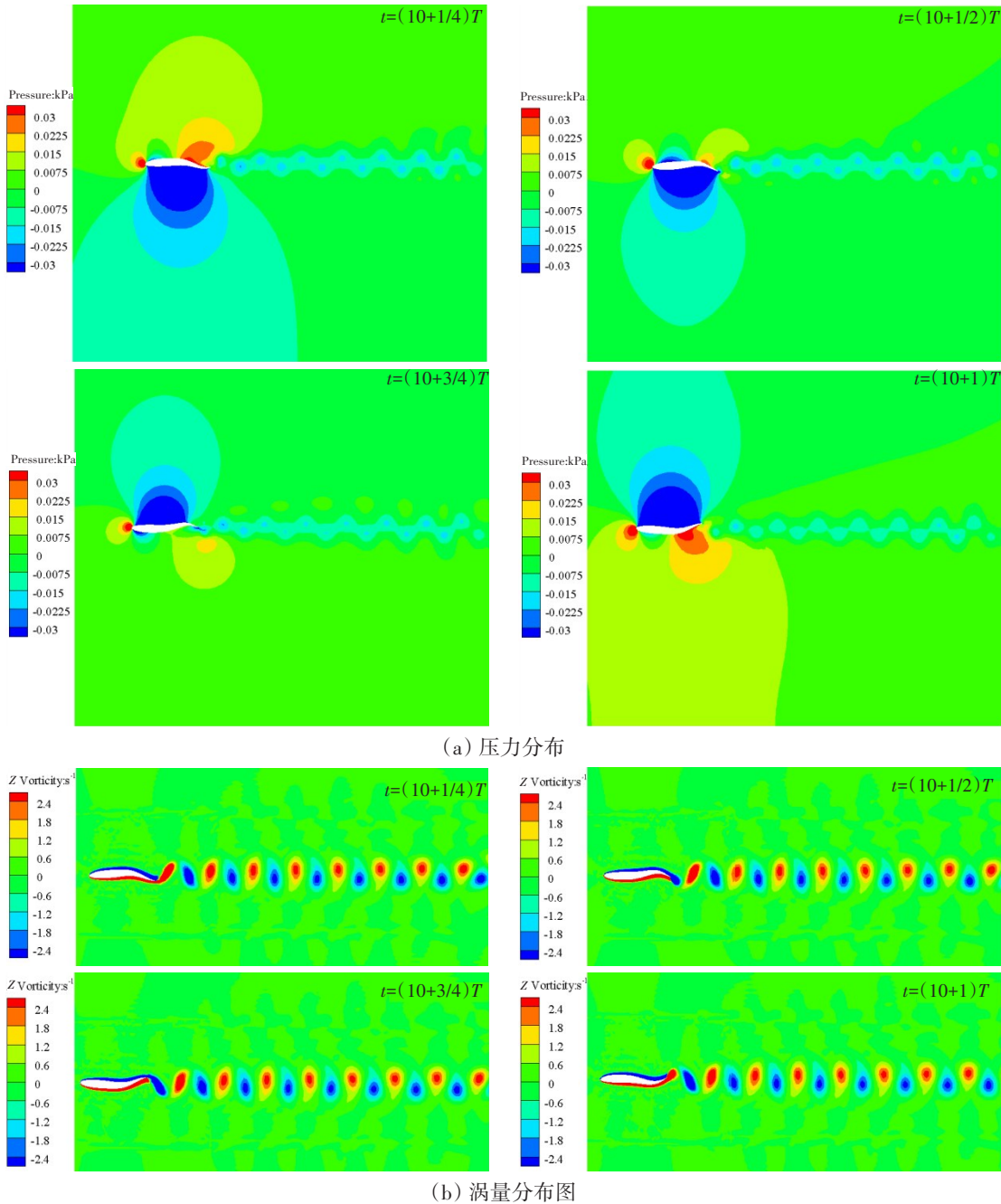


图4 不同时刻流场中的压力和涡量分布(T 为尾鳍摆动周期)

Fig.4 Pressure and vortex distribution in the flow field at different moments (T is the tail fin oscillation period)

为深入探究鱼类游动推进机理,图5给出了不同摆尾频率、摆尾幅度下鱼体尾部涡结构分布图,表1给出了不同摆尾频率、摆尾幅度下鱼体尾部涡街尺度(通过涡街宽度 h 和涡街长度 x 来描述)。由图表可知,随着摆尾频率的增加,鱼体尾部涡街长度 x 、涡街强度 Γ 逐渐增加,但反卡门涡街宽度 h 基本不变;随着摆尾幅度的增加,鱼体尾部反卡门涡街长度 x 、涡街宽度 h 、涡街强度 Γ 逐渐增加。同时,摆尾频率、摆尾幅度所导致的反卡门涡街长度 x 变化幅度相接近,而摆尾幅度所引起的反卡门涡街宽度 h 变化幅度约为摆尾频率的2倍。Yu^[21]、崔祚等^[22]的研究结果表明,反卡门涡街结构特征的改变将导致推力的增加,而随着摆尾频率、摆尾幅度的增加,鱼体尾部涡街宽度 h 、涡街强度 Γ 逐渐增加,使得游动推力逐渐增加。

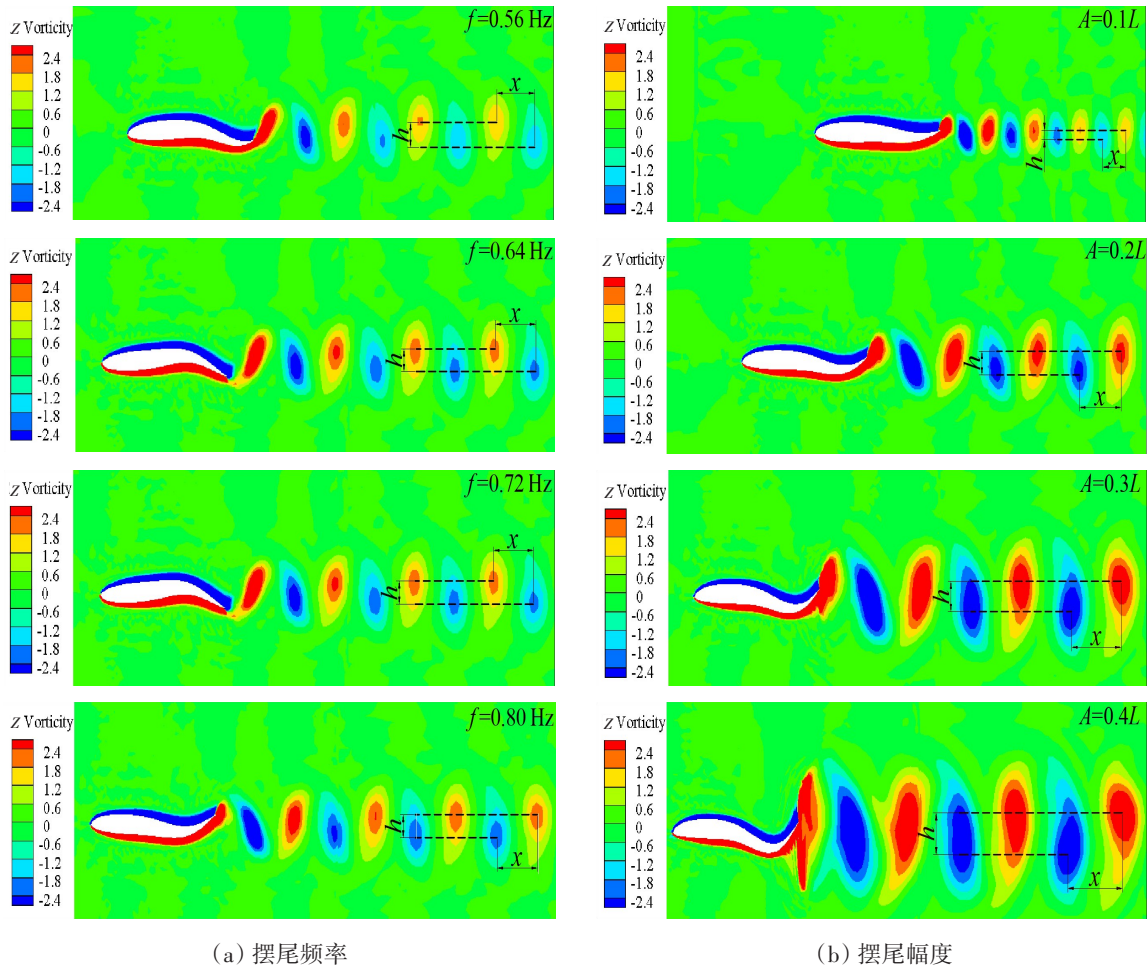


图 5 不同游动参数下鱼体尾部涡结构分布图(色标单位: s^{-1})

Fig.5 Distribution of vortex structure in the tail of the fish with different swimming parameters (Color scale unit: s^{-1})

表 1 不同游动参数下鱼体尾部涡街尺度

Tab.1 Vortex scales of fish tail under different swimming parameters

序号	摆尾频率 f/Hz	涡街宽度 h/L	涡街长度 x/L	序号	摆尾幅度 A/m	涡街宽度 h/L	涡街长度 x/L
1	0.56	0.1037	0.2328	5	0.01	0.0408	0.1361
2	0.64	0.1032	0.2419	6	0.02	0.1037	0.2554
3	0.72	0.1005	0.2474	7	0.03	0.1494	0.3099
4	0.80	0.1032	0.2527	8	0.04	0.2173	0.3344

3 鱼类游动性能分析

3.1 摆动参数对游动性能的影响

研究成果^[23-24]表明,鱼类游动能力与摆尾频率、摆尾幅度相关。图 6~7 给出了不同摆尾频率、摆尾幅度下鱼类相对游动速度及作用力系数变化情况。由图 6 可知:鱼类游动过程分为加速游动和稳定巡游两个阶段,由于开始阶段鱼类尾鳍摆动产生的推力较大,而此时需克服的阻力较小,鱼类呈加速游动状态;随着相对游动速度的增加,鱼游阻力逐渐增加,最终达到推力与阻力平衡,即稳定巡游状态。在稳定巡游阶段,鱼类相对游动速度呈周期性变化,且随着摆尾频率、摆尾幅度的增加而增大。因此增加摆尾频率、摆尾幅度均能够使鱼类获得更大的相对游动速度,有利于鱼类的快速游动,但改变摆尾频率时相对游动速度的变化更为明显。由图 7 可知,鱼体水平向纵向合力系数和最大侧向力

系数均随摆尾频率、摆尾幅度的增加而增大,但摆尾频率改变时平均合力系数的增加更为明显,摆尾幅度改变时最大侧向力系数的增加更为明显,这也解释了为什么图6中相对游动速度随摆尾频率、摆尾幅度的增加而增大。

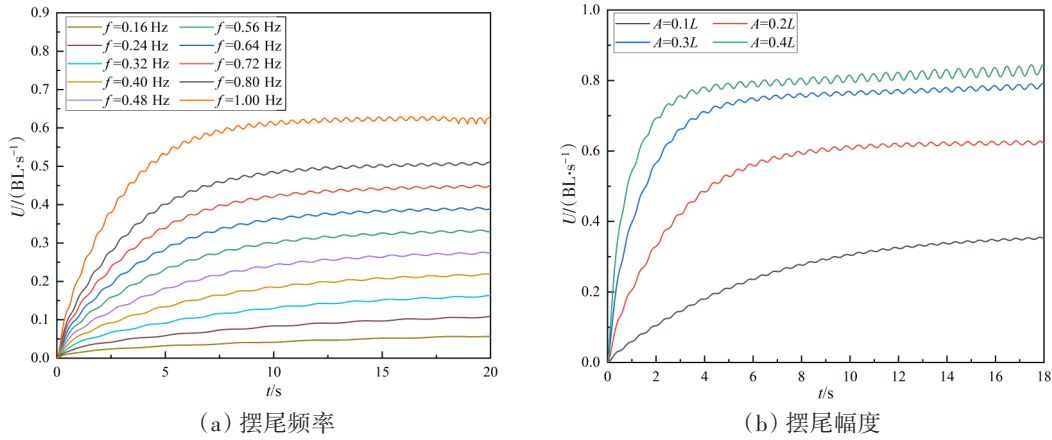


图6 不同游动参数下相对游动速度的变化曲线

Fig.6 Variation of swimming speed under different swimming parameters

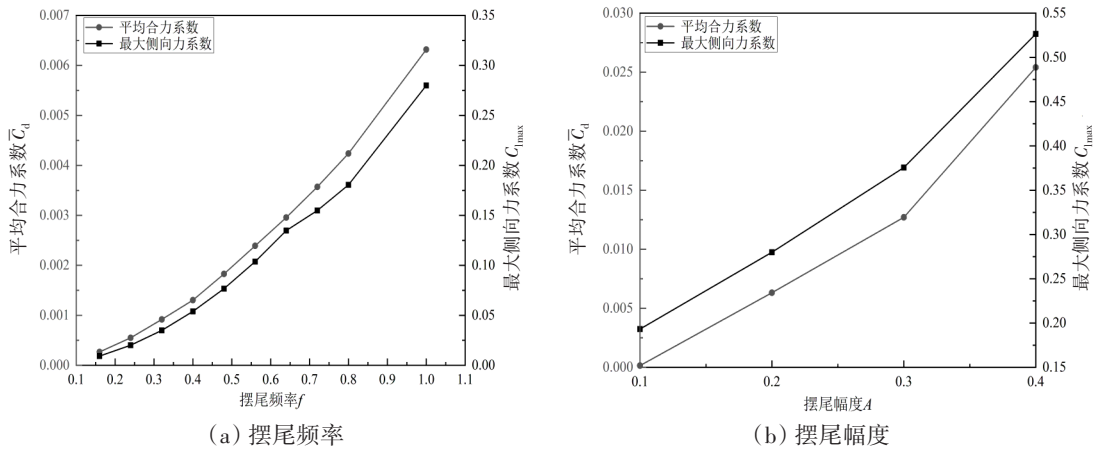


图7 不同摆动参数下作用力系数的变化曲线

Fig.7 Variation of force coefficients under different swing parameters

3.2 鱼体体形对游动性能的影响

(1) 鱼体宽度

相关研究表明,鱼类游动能力取决于体形^[25-26],大多数快速游动的鱼类具有良好的流线型,以减少阻力^[27]。本文建立不同体宽指数的鱼体数值模型来代表不同体形的鱼类(图8),以此分析鱼体体形对其游动行为的影响规律。图9分别给出了鱼类相对游动速度及作用力系数随体宽指数的变化情况。

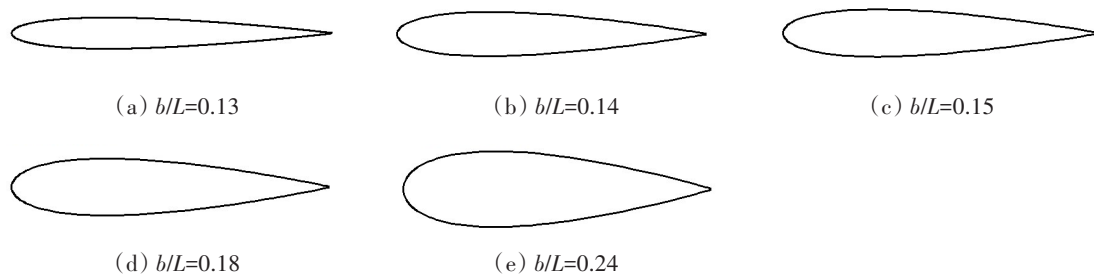


图8 不同体宽指数下的鱼体模型

Fig.8 Fish body models under different body width indices

由图9(a)可知,随着体宽指数 γ 的增加,鱼类加速游动阶段的加速度逐渐减小,达到的稳定相对游动速度也逐渐减小。由图9(b)可知:在相同摆尾频率与摆尾幅度下,纵向平均合力系数随鱼体体宽指数 γ 的增加而逐渐减小,表明鱼体体宽指数 γ 较大的鱼类需要克服更高的游动阻力;最大侧向力系数随鱼体体宽指数 γ 的增加而逐渐增加,但变化幅度较小。

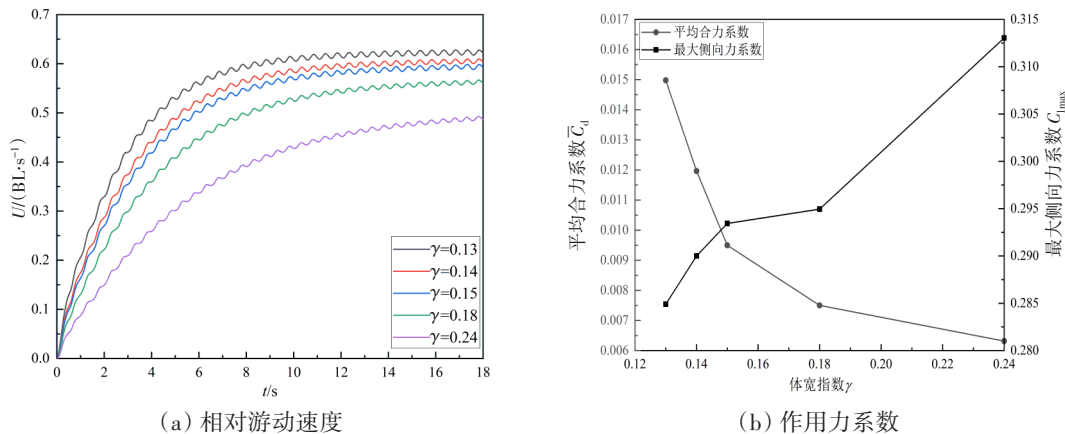


图9 不同体宽指数下鱼类游动性能变化曲线
Fig.9 Variation of fish swimming performance under different body width indices

(2) 尾鳍尺寸

据统计85%的鱼类采用身体/尾鳍(Body/Caudal Fin, BCF)推进模式^[28],通过身体及尾鳍的波状摆动来产生反作用力并形成向后传播的推进波,以实现快速高效的游动。部分研究开展了尾鳍形状对推进性能的影响^[29-30],而本文建立不同尾鳍指数的鱼类数值模型,如图10所示,以此分析鱼类尾鳍尺寸对其游动行为的影响规律。图11分别给出了鱼类相对游动速度及作用力系数随鱼体尾鳍指数的变化情况。

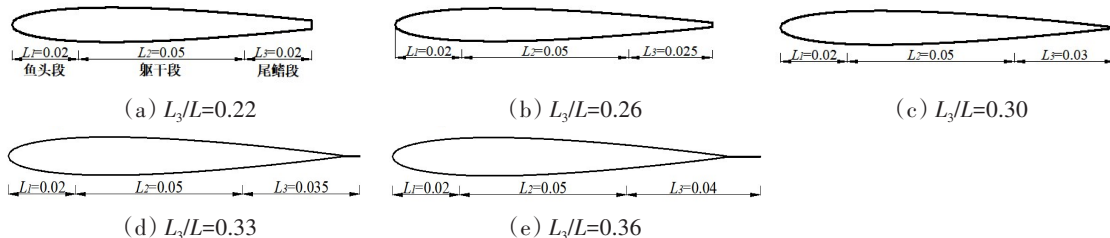


图10 不同尾鳍指数下的鱼体模型(单位:m)
Fig.10 Fish body models with different caudal fin indices(Unit:m)

由图11(a)可知,随着尾鳍指数 δ 的增加,鱼类加速游动阶段的加速度逐渐增大,达到的稳定相对

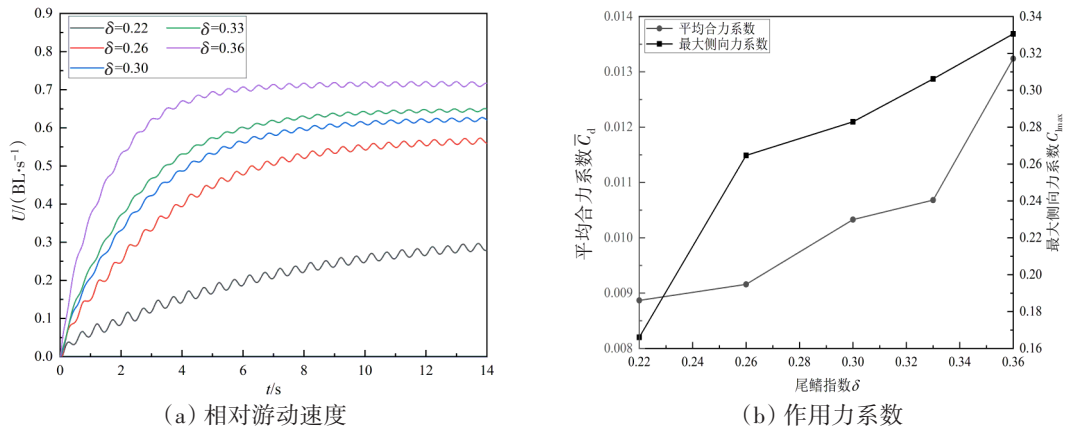


图11 不同尾鳍指数下鱼类游动性能变化曲线
Fig.11 Variation of swimming performance under different caudal fin indices

游动速度也逐渐增大。由图 11(b)可知:在相同摆尾频率与摆尾幅度下,纵向平均合力系数随鱼体尾鳍指数 δ 的增加而逐渐增大,表明鱼体尾鳍指数 δ 较大的鱼类可以获得更高的游动推进力;最大侧向力系数随鱼体尾鳍指数 δ 的增加而逐渐增加,变化幅度也较大,表明尾鳍长度对鱼类的游动至关重要。

4 结 论

本文采用CFD方法结合重叠网格技术对二维鱼类自主游动进行了模拟,分析了压力场分布及反卡门涡街结构演化过程与参数变化情况,深入探究了鱼类游动的推进机理,并通过改变摆尾幅度及鱼体体形,分析了鱼体受力状态及游动性能的变化,主要结论如下:

(1) 鱼体尾鳍周期性往复摆动下,其两侧流场形成压力差并向后移动,在尾鳍产生两个旋转方向相反的漩涡,脱落形成反卡门涡街,并形成一系列连续的射流,是鱼体前进推力的主要来源。且随着摆尾频率的增加,鱼体尾部涡街长度、涡街强度逐渐增加,但反卡门涡街宽度基本不变;随着摆尾幅度的增加,鱼体尾部反卡门涡街长度、涡街宽度、涡街强度均逐渐增加。

(2) 鱼类游动开始阶段尾鳍摆动产生的推力较大,而此时需克服的阻力较小,鱼类呈加速游动状态;随着游动速度的增加,鱼游阻力逐渐增加,最终达到稳定巡游状态。随着摆尾频率、摆尾幅度的增加,纵向平均合力系数和最大侧向力系数均增大,使得鱼类获得较大的游动速度,但摆尾频率改变时平均合力系数和游动速度的增加更为明显,摆尾幅度改变时最大侧向力系数的增加更为明显。

(3) 随着体宽指数的增加,纵向平均合力系数逐渐减小,鱼类游动过程中需克服更高的游动阻力,使得游动速度逐渐减小,而最大侧向力系数逐渐增加,但变化幅度较小。随着尾鳍指数的增加,纵向平均合力系数逐渐增大,鱼类游动过程中可以获得更高的推进力,使得游动速度逐渐增大,而最大侧向力系数逐渐增加,变化幅度也较大,表明尾鳍尺寸对鱼类的游动至关重要。

参 考 文 献:

- [1] 韦喜忠,沈泓萃,陈伟政. 仿生水动力学研究进展综述[J]. 船舶力学, 2020, 24(7): 962-970.
Wei Xizhong, Shen Hongcui, Chen Weizheng. Review on the research of bio-hydrodynamics[J]. Journal of Ship Mechanics, 2020, 24(7): 962-970. (in Chinese)
- [2] 余英俊,胡 晓,石小涛,等. 基于PIV的拉萨裸裂尻摆尾压力场特征分析[J]. 实验力学, 2019, 34(2): 289-300.
Yu Yingjun, Hu Xiao, Shi Xiaotao, et al. Analysis on the pressure field characteristics of schizopygopsis younghusbandi Regan tail swinging based on PIV[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(2): 289-300. (in Chinese)
- [3] 王福君,王洪平,高 琪,等. 鱼游动涡结构PIV实验研究[J]. 实验流体力学, 2020, 34(5): 20-28.
Wang Fujun, Wang Hongping, Gao Q, et al. PIV experimental study on fish swimming vortex structure[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2020, 34(5): 20-28. (in Chinese)
- [4] 杨国党,胡 晓,张 奔,等. 基于粒子图像测速技术(PIV)的自由游动草鱼动力学特征分析[J]. 大连海洋大学学报, 2021, 36(5): 833-841.
Yang Guodang, Hu Xiao, Zhang Ben, et al. Analysis of hydrodynamic characteristics of grass carp *Ctenopharyngodon idellus* juveniles under free-swimming status based on Particle Image Velocimetry (PIV)[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2021, 36(5): 833-841. (in Chinese)
- [5] 张 奔,胡 晓,杨国党,等. 基于压力场的草鱼幼鱼巡游动力学研究[J]. 水力发电学报, 2021, 40(6): 79-88.
Zhang Ben, Hu Xiao, Yang Guodang, et al. Hydrodynamics of juvenile grass carp (*ctenopharyngodon idellus*) in steady swimming based on pressure field[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(6): 79-88. (in Chinese)
- [6] 王 亮,陈宗芳,付 强,等. 鱼类自主游动水动力学特性的数值模拟[J]. 力学学报, 2012, 44(1): 179-183.
Wang Liang, Chen Zongfang, Fu Qiang, et al. Numerical simulation of the hydrodynamic of self-propelled fish swimming[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2012, 44(1): 179-183. (in Chinese)

- [7] 王文全, 郝栋伟, 闫妍, 等. 基于浸入边界法的鱼体自主游动的数值模拟[J]. 计算力学学报, 2014, 31(5): 646–651.
Wang Wenquan, Hao Dongwei, Yan Yan, et al. Numerical investigation of freely self-propelled flexible fish using immersed boundary method[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2014, 31(5): 646–651. (in Chinese)
- [8] 严惠云, 张浩磊, 刘小民. 一种仿生鱼体自主游动的水动力学特性分析[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(2): 138–144.
Yan Huiyun, Zhang Haolei, Liu Xiaomin. Numerical analysis of hydrodynamics characteristics for autonomous swimming of bionic tunas[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(2): 138–144. (in Chinese)
- [9] 周建军, 毛璋亮, 石小涛, 等. 仿生鱼自主游动的水动力学模拟及其影响因素分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2018, 43(3): 1003–1012.
Zhou Jianjun, Mao Zhangliang, Shi Xiaotao, et al. Numerical analysis of hydrodynamics characteristics and influence factors for self-propelled swimming of bionic fish[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2018, 43(3): 1003–1012. (in Chinese)
- [10] 周建军, 袁显宝, 毛璋亮, 等. 逆流条件下仿生鱼自主游动行为研究[J]. 应用力学学报, 2022, 39(5): 908–914.
Zhou Jianjun, Yuan Xianbao, Mao Zhangliang, et al. Numerical analysis about hydrodynamics characteristics for autonomous swimming of bionic fish in counter flow[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2022, 39(5): 908–914. (in Chinese)
- [11] 冯亿坤, 刘焕兴, 宿原原, 等. 仿生机器鱼快速启动的水动力性能数值模拟[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(7): 33–39.
Feng Yikun, Liu Huanxing, Su Yuanyuan, et al. Numerical simulation on hydrodynamic performance of fast-start for bionic robotic fish[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 48(7): 33–39. (in Chinese)
- [12] 冯亿坤, 苏玉民, 宿原原, 等. 仿生机器鱼自主游动的数值计算方法与机理[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(12): 18–24.
Feng Yikun, Su Yumin, Su Yuanyuan, et al. Study on numerical simulation method and mechanism of bionic robot fish's self-propelled swimming[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(12): 18–24. (in Chinese)
- [13] 冯亿坤, 苏玉民, 宿原原, 等. 仿鱼类游动模式下的摆动翼水动力性能研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(3): 38–43.
Feng Yikun, Su Yumin, Su Yuanyuan, et al. Numerical simulation of hydrodynamic performance of flapping foil in fish-like swimming[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(3): 38–43. (in Chinese)
- [14] Videler J J, Hess F. Fast continuous swimming of two pelagic predators, saithe (*pollachius virens*) and mackerel (*scomber scombrus*): A kinematic analysis[J]. Journal of Experimental Biology, 1984, 109: 209–228.
- [15] 王亮. 基于摆频控制的鱼群自主游动数值模拟研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2013, 28(3): 324–330.
Wang Liang. Numerical simulating of self-propelled bionic fish swimming based on tail-beat frequency control method[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2013, 28(3): 324–330. (in Chinese)
- [16] 丁淑荃, 祖国掌, 韦众, 等. 草·鲢·鳙和青鱼形态及其生长发育的比较研究[J]. 安徽农业科学, 2005, 33(9): 1660–1662.
Ding Shuquan, Zu Guozhang, Wei Zhong, et al. Study on the growth and development of grass carp, silver carp, bighead and black carp[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2005, 33(9): 1660–1662. (in Chinese)
- [17] Sun Xiaojing, Zhang Jihua, Huang Diangui. Energy harvesting characteristics of an inward-type flow device undulating in a fish-like motion[J]. European Journal of Mechanics/B Fluids, 2020, 79: 419–427.
- [18] Wang L, Wu C J. An adaptive version of ghost-cell immersed boundary method for incompressible flows with complex stationary and moving boundaries[J]. Science China (Physics, Mechanics & Astronomy), 2010, 53(5): 923–932.
- [19] Lucas K N, Lauder G V, Tytell E D. Airfoil-like mechanics generate thrust on the anterior body of swimming fishes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117(19): 10585–10592.
- [20] 王志东, 丛文超, 李力军. 二维波状摆动式鱼类自主航行推进性能研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2010, 24(3): 217–222.

- Wang Zhidong, Cong Wenchao, Li Lijun. Research on propulsion performance of autonomous navigation of 2D fish under the undulatory mode[J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2010, 24(3): 217–222. (in Chinese)
- [21] Yu Y L, Huang K J. Scaling law of fish undulatory propulsion[J]. *Physics of Fluids*, 2021, 33(6): 061905–061912.
- [22] 崔 祚, 汪阳生, 周后村. 基于水平集和浸入边界方法的鳗鲡科鱼类游动模拟研究[J]. *船舶力学*, 2022, 26(10): 1409–1419.
- Cui Zuo, Wang Yangsheng, Zhou Houcun. Numerical simulations of swimming anguilliform fish based on level-set and immersed boundary methods[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2022, 26(10): 1409–1419. (in Chinese)
- [23] 初文华, 员 庆, 孔祥洪, 等. 鱼类尾鳍推进机理及游动能力影响参数分析[J]. *上海海洋大学学报*, 2022, 31(5): 1224–1234.
- Chu Wenhua, Yuan Qing, Kong Xianghong, et al. Analysis of swimming mechanism of the caudal fin and influencing parameters of fish swimming ability[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2022, 31(5): 1224–1234. (in Chinese)
- [24] Li G, Liu H, Müller U K, et al. Fishes regulate tail-beat kinematics to minimize speed-specific cost of transport[J]. *Proceedings of the Royal Society B*, 2021, 288(1964): 20211601.
- [25] Yu Jianfei, Zhou Yangen, Guo Yongkang, et al. Effects of air replenishers on the growth and body morphology of four fish species in an underwater aquaculture system[J]. *Aquaculture*, 2022, 559: 738377.
- [26] Katopodis C, Gervais R. Ecohydraulic analysis of fish fatigue data[J]. *River Research and Applications*, 2012, 28(4): 444–456.
- [27] Bensing Katharina, Tuhtan Jeffrey A, Toming Gert, et al. Fish body geometry reduces the upstream velocity profile in sub-critical flowing waters[J]. *Aquatic Sciences*, 2022, 84(3): 32.
- [28] Wei Chang, Hu Qiao, Liu Yu, et al. Performance evaluation and optimization for two-dimensional fish-like propulsion[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 233: 109191.
- [29] Ghommem M, Bourantas G, Wittek A, et al. Hydrodynamic modeling and performance analysis of bio-inspired swimming [J]. *Ocean Engineering*, 2020, 197: 106897.
- [30] 张 曦, 苏玉民, 王兆立. 尾鳍形状对摆动尾鳍推进性能的影响[J]. *上海交通大学学报*, 2012, 46(2): 296–300.
- Zhang Xi, Su Yumin, Wang Zhaoli. The effects of caudal fin shape on the propulsion performance of flapping caudal fin[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2012, 46(2): 296–300. (in Chinese)