

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.04.022

并列游动仿生鱼自主推进数值模拟分析

成彦兵, 李钰杰, 解寅星

(南京航空航天大学 航空学院, 江苏 南京 210016)

摘要:通过在开源软件 OpenFoam 平台植入清晰界面浸入边界法,对三条并列同相位游动的仿生鱼在不同初始间距下的自主推进过程进行了模拟和分析。通过将每条成员鱼简化为一个可变形的二维 NACA0012 翼型,从集群和个体的角度出发,探讨并列运动对游动速度、功率系数及能耗的影响。结果显示:游动速度和功率系数均低于单独游动的水平,且随着初始间距的增大而逐渐增加,而能耗系数则高于单独游动时的值,随初始间距增大而降低。此外,模拟结果显示,处于内侧的仿生鱼的游动特性与其他鱼明显不同。这些发现为理解鱼类游动行为提供新的视角,并为水下自主推进机器人设计提供理论基础。

关键词:仿生自推进; OpenFoam; 浸入边界法; 能量消耗; 自主推进水下机器人

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2026)04-0116-06

Numerical Simulation Analysis of Self-Propelled Locomotion for Side-by-Side Bionic Fish

Cheng Yanbing, Li Yujie, Xie Yinxing

(College of Aeronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: By implementing the sharp interface immersed boundary method through the open-source software platform OpenFoam, this paper simulated and analyzed the self-propelled locomotion process of three bionic fish swimming side-by-side in the same phase at different initial spacings. By simplifying each member fish into a deformable two-dimensional NACA0012 airfoil, this study investigates the impact of side-by-side motion on swimming speed, power coefficient, and energy consumption from both the cluster and individual perspectives. The results show that both the swimming speed and power coefficient are lower than those of solitary swimming, and gradually increase with the increase in initial spacing, while the energy consumption coefficient is higher than that of solitary swimming and decreases with the increase in initial spacing. Additionally, the simulation results reveal that the swimming characteristics of the bionic fish positioned in the middle are significantly different from those of the other fish. These findings provide a new perspective for understanding fish swimming behavior and offer a solid theoretical basis for the design of underwater self-propelled robotic vehicles.

Keywords: bionic self-propulsion; OpenFoam; immersed boundary method; energy consumption; underwater self-propelled robotic vehicles

0 引言

鱼类群游是自然界中极为普遍的现象。生物学家发现,大约 80% 的鱼类表现出群游特性,尤其是小型鱼类。鱼类之所以形成群游,是基于生物学上增强抵御天敌的能力、降低被捕食的风险、提高觅食效率以及促进交流和繁殖等原因;从物理学的角度来看,更重要的是群游有助于节约能量和提高游动效率。鱼群的水动力学特性极其复杂,且依赖于个体间的相互作用,实验方法难以给出确切答案。随着计算机科学技术和复杂流体计

算方法的发展,研究人员开始运用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)方法分析鱼类游泳的节能机制。Khalid 等^[1]基于 CFD 仿真数据,使用模态叠加法分析了两条原地不动且串列排列的鱼的流体动力侧向力和阻力系数的非线性力学特性;Dai 等^[2]通过研究 2 个、3 个以及 4 个鱼状游泳者的自推进运动的数值模拟,检验了 Lighthill 的猜想,并提出了最优游动阵型;Yang 等^[3]对两个串列运动的柔性 NACA0012 翼型的能量特性进行了分析,并提出了游泳过程中的标度律。Dong 等^[4]利用有限元法对 3 条并列原地摆

第一作者简介: 成彦兵(1998—),男,湖南益阳人,硕士研究生,研究方向为仿生自推进及数值模拟,1094996161@qq.com。

动的鱼进行了数值模拟,发现同相位摆动可以节省功耗,而反相位可以增大推力。然而以上研究结果多基于给定来流速度的稳态分析。但鱼类的运动通常是瞬态的,其游动速度随着流体对鱼的作用而变化,这并未真实反映自然界鱼类的自推进状态。因此,为了深入探究鱼类在流体中的瞬态特性,研究其自推进行为变得尤为重要。本研究特别关注数值模拟在仿生鱼游动仿真中的应用。

本研究简化自主推进的仿生鱼为变形运动的 NACA0012 翼型,并在开源软件 OpenFoam 中通过求解纳维-斯托克斯方程并植入清晰界面浸入边界法。利用该方法数值模拟了中低雷诺数下 3 条并列游动的仿生鱼的自主推进运动,包括游动速度、输入功率和能量消耗,并将结果与单独游动的鱼进行比较。研究还分析了成员鱼之间的相互作用机制,为鱼群游动和水中自主推进器集群设计提供了理论依据。

1 数值方法

1.1 控制方程

非定常不可压缩的纳维-斯托克斯方程为

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u = -\nabla p + \mu \nabla^2 u \quad (2)$$

式中: u 为速度; p 为压力; μ 为动力黏性系数。式(1)为连续性方程,式(2)为运动方程;对式(2)取散度,并利用连续性方程,可得求解压力的 Poisson 方程

$$\nabla^2 p = -\nabla \cdot (u \cdot \nabla u) \quad (3)$$

联立式(2)与式(3),即可采用 OpenFoam 中的 PISO^[5] 算法开展迭代求解。

1.2 运动边界处理

对于运动边界,本文采用清晰界面 (sharp-interface) 浸入边界法进行处理,不同于经典的连续力法,边界的影响是通过在计算过程中强制施加边界条件产生的。为了精确的施加边界条件,必须精确的区分网格节点,将边界内部的点标记为固体点 (solid-point),在边界外部的点标记为流体点 (fluid-point),而边界附近的点需要进行特殊标记,对于边界附近的固体点,如果一个固体点的所有相邻点中至少包含一个流体点,该点则被称为虚拟点 (ghost-point);同理,对于边界附近的流体点,若一个流体点的所有相邻点中至少有一

个固体点,这个点则被称为力点 (force-point),如图 1 所示。

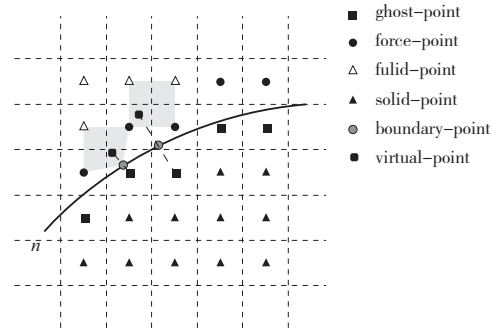


图 1 边界附近的关键点及其插值点

通过边界附近流体点的流场数据,并将其与物体表面的边界条件结合起来对虚拟点 (ghost-point) 处的流场变量进行重构^[6-7],即可将边界的影响施加于流体。

2 物理模型

2.1 仿生鱼摆动规律

本研究采用的是在仿生学中常见的鳗科模式的摆动规律,鱼体中线在 y 方向的摆动规律为

$$\begin{cases} h(x, t) = A(x) \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda^*} \left(\frac{x}{L} \right) - 2\pi f t + \varphi_i \right] \\ A(x) = L \left[a_0 + a_1 \left(\frac{x}{L} \right) + a_2 \left(\frac{x}{L} \right)^2 \right] \end{cases} \quad (4)$$

式中:参数 a_0 , 参数 a_1 , 参数 a_2 及 λ^* 的取值分别为 0.02, 0.08, 0.16 和 0.95。参数取值与 Wang 等^[8] 的研究相同; φ_i 为鱼的初始相位; L 为鱼体长度; f 为鱼尾部摆动的频率。鱼体沿 x 方向的运动速度受以下方程控制

$$M \cdot \frac{dU}{dt} = F_x \quad (5)$$

式中: F_x 为鱼体在 x 方向上受到流体的总作用力; U 为鱼体沿 x 方向的整体速度; M 为鱼体质量。研究表明,鱼体进入稳定游动状态的速度与其质量 M 无关,而 M 只与达到该稳定状态的时间相关。在本研究中,假设鱼体的密度与流体密度相等,因此鱼体的质量可通过公式 $M = \rho \cdot V_{\text{fish}}$ 来计算。雷诺数 Re 的计算定义如下

$$Re = \frac{L^2 f}{\nu} \quad (6)$$

2.2 计算区域及参数选取

本研究考察了 3 条并列游动的仿生鱼在初始静止流场中的自主推进运动,如图 2(a) 所示。鱼

头之间的距离 h 定义为横向初始间距。根据文献[2]的生物学证据,真实鱼群在运动时成员鱼的横向间距 h 通常介于 $0.16 \leq (h/L) \leq 0.7$ 之间。较小的间距可能导致成员鱼发生碰撞,而较大的间距则可能导致计算网格数量显著增加,甚至可能无法在有限计算域内达到稳定游动状态。因此,本研究选择了 $0.3 \leq (h/L) \leq 0.7$ 作为横向初始间距的范围。计算所用的雷诺数定为 1.0×10^4 ,本研究继续采用 Weihs^[9] 的假设,即所有成员鱼均以相同的相位运动。

在本文的计算中,计算区域均选取为 $72L \times 10L$ 。仿生鱼所经过的区域网格均采用等间距的笛卡儿网格,网格尺寸为 $\Delta x = 10^{-3}L$,其中 L 为鱼的体长,外部边界均取为 Neumann 边界条件,即 $\partial u_i / \partial x_j = 0$,初始流场静止。计算区域和计算网格如图 2 所示。

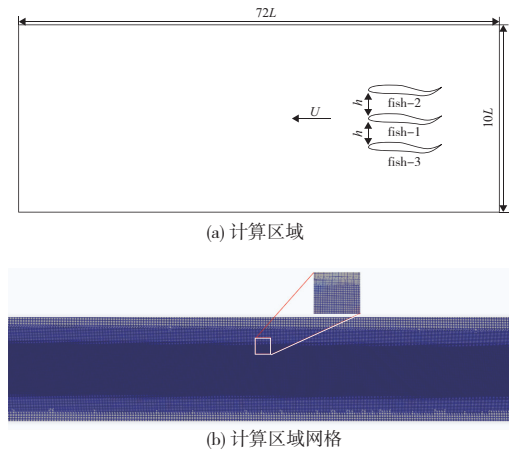


图 2 计算示意图

2.3 运动参数

在并列仿生鱼自推进模拟中,定义成员鱼稳定游动时的平均速度为

$$\bar{U} = \int_0^T U(t) dt \quad (7)$$

鉴于鱼群在达到稳定游动状态后,其中所有成员鱼的平均速度相等(不相等的情况会导致无法维持稳定队形),因此仅需关注鱼群作为一个整体的速度即可。定义无量纲化速度 U^* 和无量纲平均速度 $\bar{U}^*$ 如下

$$\begin{cases} U^* = \frac{U}{Lf} \\ \bar{U}^* = \frac{\bar{U}}{Lf} \end{cases} \quad (8)$$

为了计算鱼在游动过程中的能量消耗,一个周期内的平均功率定义为

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \left[\oint_{\partial D} f_x u_x ds + \oint_{\partial D} f_y u_y ds \right] dt = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} F_x U dt + \int_t^{t+T} P_{\text{side}} dt \quad (9)$$

式中: D 为鱼所占的区域; f_x, f_y 分别为单位面积上在 x 方向, y 方向的受力; $u_x = U; u_y$ 为的微元 ds 上沿 y 方向摆动的速度; P_{side} 为瞬时侧向功率。当鱼进入稳定游动状态时,式(9)中第 1 项远远小于第 2 项,可以忽略不计^[10],即

$$\bar{P} \approx \int_t^{t+T} P_{\text{side}} dt = \bar{P}_{\text{side}} \quad (10)$$

式中 $\bar{P}_{\text{side}}$ 为平均侧向功率。定义无量纲的平均功率系数为

$$\bar{C}_p = \frac{\bar{P}}{\frac{1}{2} \rho (Lf)^3 L} \quad (11)$$

在研究仿生鱼群时,最受关注的因素之一是能量消耗。然而,较低的功率系数并不一定意味着较低的能量消耗。Schultz 等^[11] 以及文献[2]通过定义“单位距离输运成本”(C_{OT})来衡量鱼的能量消耗

$$C_{\text{OT}} = \frac{\bar{P}}{U} \quad (12)$$

C_{OT} 可以类比于汽车的“百公里油耗”,其表示鱼在达到稳定游动状态时,每行进单位距离所消耗的能量。 C_{OT} 数值越小,表明其能效越高。同理,无量纲的能耗系数 C_E 定义为

$$C_E = \frac{\bar{C}_p}{\bar{U}^*} = C_{\text{OT}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{2} \rho (Lf)^2 L} \quad (13)$$

鱼的阻力系数 C_x 和侧向力系数 C_y 分别定义为

$$\begin{cases} C_x = 2F_x / \rho L^3 f^2 \\ C_y = 2F_y / \rho L^3 f^2 \end{cases} \quad (14)$$

式中 F_x 和 F_y 分别为 x 方向和 y 方向上受到流体对鱼的合力。

3 分析与讨论

3.1 平均速度

图 3 展示了当横向初始间距比 (h/L) 分别为 0.3 和 0.7 时,3 条并排游动的仿生鱼的无量纲速度 U^* 如何随时间变化的。如图 3(a) 所示,在

$h=0.3L$ 的条件下,1 号鱼和 3 号鱼的速度波动幅度在一个周期内相对于中间的 2 号鱼更为明显。尽管如此,这 3 条鱼的无量纲速度平均值 $\bar{U}^*$ 在整个周期内总体保持一致。如图 3(b) 所展示,在 $h=0.7L$ 时,1 号鱼和 3 号鱼在一个周期内的速度波动幅度相对于 $h=0.3L$ 的条件显著减小。此外, $h=0.7L$ 时的平均无量纲速度 $\bar{U}^*$ 明显高于 $h=0.3L$ 的情况。(本刊为黑白印刷,相关疑问请咨询作者)

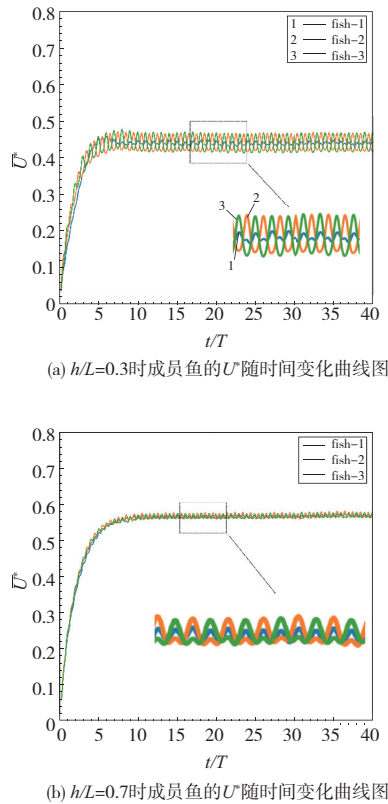


图 3 不同间距下无量纲速度 U^* 变化曲线图

图 4 给出了其他间距下,平均速度 $\bar{U}^*$ 随初始横向间距 h 的变化折线图。其中虚线代表 Re 数相同时鱼单独游动达到自主推进后 $\bar{U}^*$ 的值。

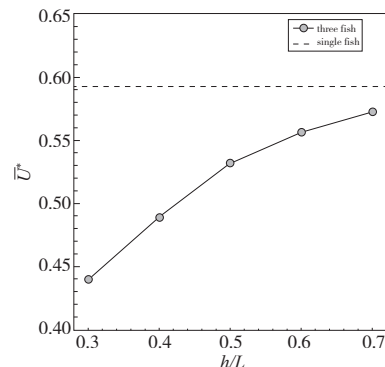


图 4 $\bar{U}^*$ 随横向间距 h 变化折线图

图 4 显示了仿生鱼群在不同初始横向间距 h 下达到稳定游动状态时的平均无量纲速度 $\bar{U}^*$ 。从图 4 中可以很清楚的看到,这 3 条鱼的速度 $\bar{U}^*$ 都随着 h 的增加而增加,但是始终低于单条鱼单独游动时的速度。值得注意的是,在较为紧凑的横向间距下(如 $h/L=0.3$),鱼群的速度明显低于单独游动,这可能是由于鱼群中不同成员鱼之间的相互干扰在较小的间距下较为明显,文献[9]提出的“槽道效应”较好的解释了这一现象。然而随着间距的增大,成员之间的相互干扰减弱,使得每条成员鱼的游动速度趋向于单独游动时的值。

3.2 功率系数

图 5 给出了不同间距下,平均功率系数 $\bar{C}_p$ 随初始横向间距 h 的变化折线图。

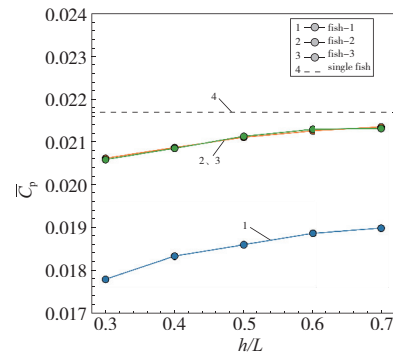


图 5 $\bar{C}_p$ 随横向间距 h 变化折线图

结果表明随着初始间距的增加,每条成员鱼的平均功率系数 $\bar{C}_p$ 呈现出上升的趋势。其中,内侧的 1 号鱼以及外侧的 2 号鱼和 3 号鱼的平均功率系数与单独游动的仿生鱼相比,均显示出显著差异。在较小的初始间距下,外侧的 2 号鱼和 3 号鱼的平均功率系数 $\bar{C}_p$ 相同,且略低于单独游动;而内侧的 1 号鱼的 $\bar{C}_p$ 则明显低于单独游动,所有成员鱼的功率系数均随着初始横向间距 h 的增加而增加,成员鱼的平均功率系数的关系可以表示为 $\bar{C}_{p,1} < \bar{C}_{p,2} = \bar{C}_{p,3}$ 。这一现象可能和成员鱼之间的特有的压力周期性变化有关。

当单条仿生鱼进入稳定的自主推进状态时,鱼体的两侧会周期性地交替出现低压区和高压区。这种现象是鱼尾摆动的直接结果,即鱼尾向某一侧摆动时,该侧便形成低压区。因此,在鱼稳定游动的状态下,侧向力系数呈现出一种关于零

值的对称周期性变化。然而,当3条鱼并列同相位游动时,情况发生变化,成员鱼各自两侧的高压区和低压区都会受到相邻成员鱼的影响,如图6所示。

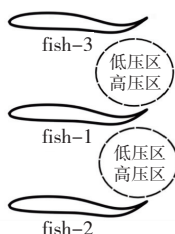


图6 3条鱼同相位并列游动相互作用示意图

外侧的2号鱼和3号鱼的高压区和低压区因1号鱼的影响而发生改变,导致两鱼的侧向力系数上下偏移,不再保持零值对称^[12]。同理,内侧的1号鱼的高压区受3号鱼的影响而压力降低,而低压区受2号鱼影响压力升高。这种相互作用虽然保持了1号鱼侧向力系数围绕零值的对称性,但显著减弱了其峰值。如图7所示。

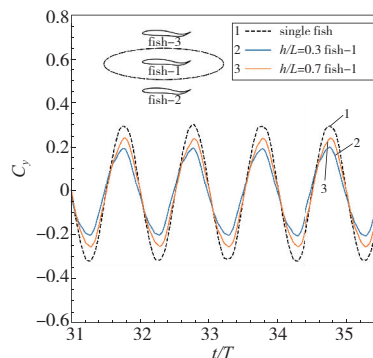
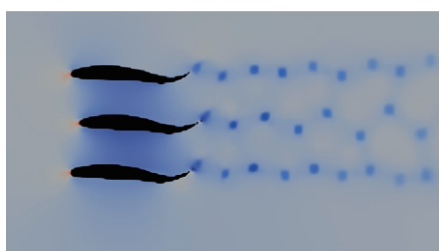


图7 1号鱼侧向力系数随时间变化曲线图

侧向力系数的峰值大小直接决定了侧向力功率的大小,因此1号鱼的功率系数显著低于其单独游动时的值。根据图7,随着初始横向间距的增加,侧向力系数的峰值出现回升。这是由于鱼之间的相互作用减弱所致,这一现象在稳定游动时的压力云图8和涡量云图9中尤为明显。这解释了为何在图5中观察到,随着横向间距的增大,则1号鱼的平均功率系数有所上升。

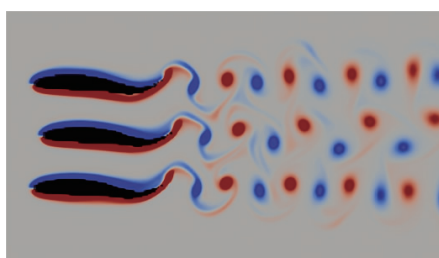


(a) $h/L=0.3$

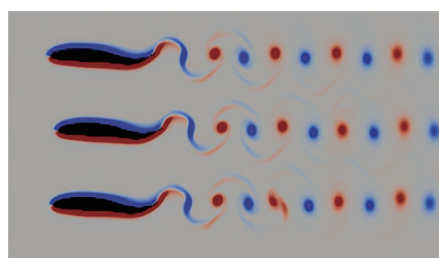


(b) $h/L=0.7$

图8 压力云图



(a) $h/L=0.3$



(b) $h/L=0.7$

图9 涡量云图

3.3 能耗系数

对于鱼群中成员鱼的能耗系数 C_E ,图10展示了成员鱼的能耗系数随初始横线间距 h 变化的折线图。

从总体上看,鱼群中每条成员鱼的能耗系数随着初始横向间距 h 的增大而降低,这一趋势与成员鱼的平均功率系数的变化趋势完全相反。在

计算范围内,位于外侧的2号鱼和3号鱼的能耗系数均显著高于它们单独游动时的数值。然而,对于内侧的1号鱼,当初始横向间距 h 小于 $0.5L$ 时,其能耗系数超过单独游动时的值;只有当 h 大于 $0.5L$ 时,其能耗系数才略低于单独游动的水平。

在3.1节对无量纲平均速度 $\bar{U}^*$ 的分析中,已

经指出当初始横向间距 h 减小时,无量纲平均速度 $\bar{U}^*$ 会减小。图 5 显示,在 $h/L=0.3$ 时,3 条成员鱼的平均功率系数均达到最小且低于单独游动时的值,但此时的稳定游动时无量纲速度 $\bar{U}^*$ 也是最低的。尽管在较小的横向初始间距 h 下,单位时间内的做功量最少,但由于速度较慢,行进单位距离所需时间较长,因此较小的横向间距反而导致更高的能耗系数,这一现象得到了合理解释。

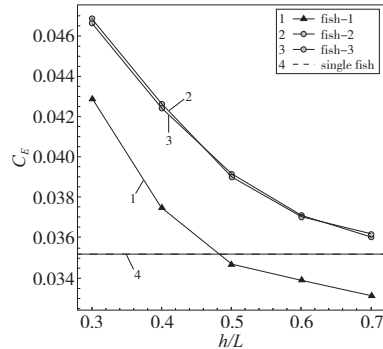


图 10 能耗系数 C_E 随初始横向间距 h 变化折线图

4 结语

本文利用开源软件 OpenFoam 植入浸入边界法,并应用此方法模拟了 3 条并列游动的仿生鱼在不同初始横向间距下的自主推进运动。同时,将此结果与相同参数下单条仿生鱼的模拟结果进行比较,从而得出以下结论:

1) 当 3 条并列游动的仿生鱼达到稳定的自主推进状态时,它们的平均无量纲速度 $\bar{U}^*$ 低于单独游动时的速度,并且随着初始横向间距 h 的减小而降低。

2) 平均功率系数 $\bar{C}_p$ 的分析表明,鱼群中每条成员鱼的功率系数都低于单独游动,特别是内侧的成员鱼,其平均功率系数 $\bar{C}_p$ 相比单独游动降低幅度更大。同时,整个鱼群中每条成员鱼的 $\bar{C}_p$ 随着初始横向间距的增加而升高。

3) 在能耗系数 C_E 的分析中,每条成员鱼的能耗系数 C_E 随着 h 的增加而减小。外侧的两条成员鱼的能耗系数始终高于单独游动,而内侧的成员鱼在初始横向间距 h/L 小于 0.5 时能耗系数高于单独游动,但当 h/L 超过 0.5 时略低于单独游动。

参考文献:

- [1] Khalid M S U, Akhtar I, Dong H B. Hydrodynamics of a tandem fish school with asynchronous undulation of individuals[J]. Journal of Fluids and Structures, 2016, 66: 19-35.
- [2] Dai L Z, He G W, Zhang X, et al. Stable formations of self-propelled fish-like swimmers induced by hydrodynamic interactions[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2018, 15(147): 20180490.
- [3] Yang D W, Wu J. Hydrodynamic interaction of two self-propelled fish swimming in a tandem arrangement[J]. Fluids, 2022, 7(6): 208.
- [4] Dong G J, Lu X Y. Characteristics of flow over traveling wavy foils in a side-by-side arrangement[J]. Physics of Fluids, 2007, 19(5): 057107.
- [5] Jasak H. OpenFOAM: open source CFD in research and industry[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2009, 1(2): 89-94.
- [6] Mittal R, Dong H, Bozkurtas M, et al. A versatile sharp interface immersed boundary method for incompressible flows with complex boundaries[J]. Journal of Computational Physics, 2008, 227(10): 4825-4852.
- [7] Cui Z, Yang Z X, Jiang H Z, et al. A sharp-interface immersed boundary method for simulating incompressible flows with arbitrarily deforming smooth boundaries[J]. International Journal of Computational Methods, 2018, 15(1): 1750080.
- [8] 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 and Astronomy, 2010, 53(5): 923-932.
- [9] Weihs D. Hydromechanics of fish schooling[J]. Nature, 1973, 241(5387): 290-291.
- [10] Yu H Y, Lu X Y, Huang H B. Collective locomotion of two uncoordinated undulatory self-propelled foils[J]. Physics of Fluids, 2021, 33: 011904.
- [11] Schultz W W. Power requirements of swimming: do new methods resolve old questions? [J]. Integrative and Comparative Biology, 2002, 42(5): 1018-1025.
- [12] 王亮, 王明, 付强, 等. 并列仿生鱼自主游动的数值模拟研究[J]. 计算力学学报, 2014, 31(1): 103-109.

收稿日期: 2024-01-31