

双鱼集群水动力和游动性能研究¹⁾

徐康康^{*,†} 银波^{†,**,2)} 石艳柯^{*,3)} 郭迪龙^{†,**} 黄顺^{†,**}

^{*}(华北水利水电大学土木与交通学院, 郑州 450045)

[†](中国科学院力学研究所流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190)

^{**}(中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

摘要 为探索鱼类在群聚游动中水动力相互作用以及游动性能的影响, 采用基于虚拟单元的锐利界面浸没边界法对双鱼以不同横向间距、纵向间距和尾摆相位差游动的问题进行了数值研究, 并对双鱼的水动力性能和流场进行了综合分析。研究结果表明, 在适当的位置和相应的尾摆相位差下, 跟随鱼的游动性能可以得到显著提高, 同时影响领头鱼的游动性能。本文建议横向间距的最佳选择不小于 0.3 倍体长。此外, 通过考虑流场压力来探究双鱼间的水动力相互作用机制, 发现双鱼间推力的产生同时受贴体压力和尾流动力的影响。分析表明, 这两种影响的主导地位会随着双鱼间的位置变化而改变, 当流向间距小于 0.4 倍的体长时, 由贴体压力主导, 当流向间距大于 0.4 倍的体长时, 则改为由尾流动力所主导。这项研究可以为生物的集群游动力学机理提供一些见解, 并支撑仿生潜航器的研制。

关键词 双鱼游动, 浸没边界法, 水动力, 游动性能

中图分类号: O353.4, Q811.6 文献标识码: A doi: 10.6052/1000-0879-24-025

RESEARCH ON HYDRODYNAMIC AND SWIMMING PERFORMANCE OF TWO-FISH SWIMMING¹⁾

XU Kangkang^{*,†} YIN Bo^{†,**,2)} SHI Yanke^{*,3)} GUO Dilong^{†,**} HUANG Shun^{†,**}

^{*}(School of Civil Engineering and Communication, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

[†](Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^{**}(School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The motivation of this research is to explore the hydrodynamic interactions and swimming performance of fish school swimming. The paper used a sharp interface immersed boundary method based on virtual cells to numerically investigate the swimming of two fish with different lateral and longitudinal distances and phase differences of tail beats. The hydrodynamic performance and flow fields of the two fish were comprehensively analyzed. The research results indicate that, under appropriate positions and corresponding tailbeat phase differences, the trailing fish can significantly enhance its swimming performance, while also affecting the leading fish's swimming performance. This article suggests that the optimal choice for lateral spacing should not be less than 0.3 time of the body length. In addition, by considering the pressure in the flow field, the hydrodynamic interaction mechanism between the two fishes is understood. It is found that the

2024-01-11 收到第 1 稿, 2024-07-08 收到修改稿。

1) 国家自然科学基金项目 (12272383), 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类) (XDA22040203) 和国家自然科学基金重大项目 (12293000, 12293004) 资助。

2) 银波, 博士, 副研究员, 研究方向为计算流体力学、仿生模拟和多相流。E-mail: yinbo@imech.ac.cn

3) 石艳柯, 博士, 副教授, 研究方向为结构和材料的宏微观力学行为和工程结构计算分析。E-mail: shianke@ncwu.edu.cn

引用格式: 徐康康, 银波, 石艳柯等. 双鱼集群水动力和游动性能研究. 力学与实践, 2024, 46(5): 919-929

Xu Kangkang, Yin Bo, Shi Yanke, et al. Research on hydrodynamic and swimming performance of two-fish swimming. *Mechanics in Engineering*, 2024, 46(5): 919-929

generation of thrust between the two fishes is simultaneously influenced by both the body pressure and the wake-induced forces. Analysis shows that the dominance of these two influences will change with the position between the two fishes. When the streamwise distance is less than 0.4 time of the body length, it is dominated by the body pressure. When the streamwise distance is greater than 0.4 time of the body length, it switches to being dominated by the wake-induced forces. This study provides insights for the understanding of the collective swimming behavior and supports the development of biomimetic underwater vehicles.

Keywords two-fish swimming, immersed boundary method, hydrodynamics, swimming performance

长期以来, 鱼类集群游动一直是人们关注的焦点。普遍认为, 鱼类的集体行为能够提高群体中个体的水动力性能, 包括更快的游动速度和更低的能量消耗^[1-2]。随后的研究发现, 游动性能的提升与鱼类集群的复杂流体动力学相互作用密切相关^[3-4], 并引起了广泛的关注和研究, 旨在揭示其背后的基本原理。因此, 鱼类集群如何利用水动力相互作用来提高游动能力成为了研究的关键。

研究人员对单鱼进行了广泛的有针对性研究^[5-8], 对鱼类的游动机理有了较为全面的认识。与此同时, 双鱼系统也被广泛研究, 因为它被认为是最简单的集群游动形式, 是一个可以揭示两条鱼之间水动力相互作用基本机制的理想模型。众多学者的研究^[9-12]表明, 在串联的队列中, 处于理想位置的跟随鱼能够提高速度和效率。此外, 在这种结构中, 领头鱼的游动性能可能会受到跟随鱼游动的影响, 其结果具体取决于它们之间的纵向间隔^[13-14]。类似的水动力学优势也存在于并排式^[15-17]和交错层次^[18-19]的集群形态中。很明显, 水动力性能的改变是多种因素综合作用的结果, 包括个体之间的空间距离^[16,20]、个体的运动学特征^[21]、相位差^[19,22]等。半个世纪前, Weihs^[3,23]提出了一种开创性的分析模型, 该模型考虑了鱼体的运动, 通过改变自身位置从与其最近的两条鱼产生的尾流中获益^[16], 并逐渐发展成为两种主流假说。一种猜想被称为涡流假说^[24]。根据这个假说, 跟随鱼可以通过在领头鱼的尾流中游动来有效地降低自身的能量消耗, 并从涡流中获益^[25]。Deng等^[26]的研究表明, 在前一列两条鱼之间的侧面位置的鱼还能从领头鱼形成的反向卡门涡街中获益, 不仅提高推进效率, 还降低功耗。Hemelrijk等^[4]的研究结果加强了这一观点。Park等^[27]对柔性鳍

间的流动相互作用进行了研究, 并表明菱形排列的平均效率比单独游动高14%~19%。Han等^[15]的研究也表明, 与简单的串联模式相比, 菱形排列更有效, 可能是因为在复杂的排列中, 个体受益于与其横向单位的游动。另一个备受关注的猜想是通道效应假说^[3,28]。鱼类的集群通过增强单体之间沿游动方向的流动来降低相对速度^[29]。Liao^[1]的研究报告指出, 鱼群中的单体可以从距离不到一个体长的单位产生的通道效应中获益。这些效应有望在不增加能量消耗的情况下提高个体的推力。Daghooghi等^[30]对各种矩形编队排列进行了研究, 结果显示水动力性能得到了改善。当以相同功率消耗时, 通过改变横向距离, 这些单体可以实现比单独游动高出20%的巡航速度。Li等^[31]通过数值模拟发现, 较大间距的矩形编队比菱形编队能够产生更强、更大的尾流, 因此矩形编队具有最高效率。

以上的数值研究和实验表明, 特定编队的集群运动可以显著提高鱼群的游动效率。相关研究还有待进一步开展。当前国内外关于集群水动力特性的研究主要集中在二维构型而非真实的三维构型和航行器上。同时, 要想更好地研制仿生潜航器, 还需要更多的数据支撑, 而这方面的数据目前仍有不足。为了补充这方面的研究数据, 本文采用基于虚拟单元的锐利界面浸没边界法对三维双鱼系统进行了数值模拟。在研究中, 着重讨论了横向间距 G , 流向间距 D 和尾摆相位差 ϕ 对双鱼游动性能的影响。深入研究了该系统的水动力性能和尾流动力学, 同时考虑了流场压力对鱼体流体动力学的影响^[16,20,32]。本文旨在获取双鱼游动时的水动力相互作用的数据, 以为仿生潜航器编队的设计提供参考。

1 数值方法

1.1 鱼体模型

本文研究使用的 3D 鱼类模型是基于实验中所用到的鱼类水下机器人，仿真的对象为常见的黄鳍金枪鱼 (thunnus albacares)。为了简化模型，忽略了所有次要鳍，如腹鳍、背鳍和臀鳍。这个鱼类模型由流线形的身体和新月形的尾鳍组成，具体可见图 1。在建模过程中，将躯干长度设定为模型总长度 (L) 的 80%，而尾鳍则被建模为零厚度膜^[33]。

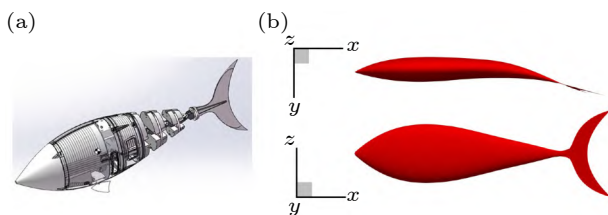


图 1 (a) 仿生机器鱼模型；(b) 3D 数值模型平面图
Fig. 1 (a) Bionic robotic fish model; (b) 3D numerical model

黄鳍金枪鱼的游动方式是从头部到尾部以向后行波的形式不断变化^[34-35]。本文采用了此前一些数值研究中已经应用的表达式来描述其横向波动运动^[35-36]

$$y(x) = A(x) \sin(kx - 2\pi ft + \phi) \quad (1)$$

$$A(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 \quad (2)$$

式中， $y(x)$ 为 t 时刻中线的横向偏移量， x 为从头部到尾尖测得的轴向坐标， f 为尾拍频率， ϕ 为相位， $A(x)$ 为横向运动的振幅包络，系数 $a_0 = 0.02$ ， $a_1 = -0.08$ ， $a_2 = 0.16$ ，这些系数是根据金枪鱼游动模式的实验数据精心确定的，以达到规定的波幅值。 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为身体波动的波数， λ 为波长，选择为 $1.25L$ ^[37]，雷诺数 $Re = \frac{U_\infty L}{\nu} = 3000$ ， ν 为运动黏度。

1.2 数值模拟方法

浸没边界法 (immersed boundary method, IBM) 由于其无需生成贴体网格同时避免了每一次物理时间步后需要进行的网格重新生成，在求解固体边界复杂、大变形以及动边界的流固耦合问题方面表现出了极强的优越性和广泛的适用性。本文将 3D 鱼体模型浸入笛卡尔网格中，通过求

解黏性不可压缩的三维非定常 Navier-Stokes 方程进行数值模拟，控制方程如下

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (4)$$

式中， $i, j = 1, 2, 3$ ， u 表示流体速度的笛卡尔分量， x 表示笛卡尔坐标方向， ρ 表示流体密度， p 表示压力， Re 表示雷诺数。方程的空间离散采用二阶中心差分格式，并对初始变量进行并置排列；同时，在时间积分方面，使用 Chorin 投影校正方法和 Crank-Nicolson 方法进行离散，以消除黏性稳定性约束，从而保证计算结果的准确性和稳定性。

图 2(a) 中黑色曲线为固体边界，边界内部为固体 (solid)，外部为流体 (fluid)。在使用中心差分法计算更新流体节点的流体物理量时，将会使用到边界内第一层固体节点的物理量，即虚拟节点 GN (ghost node)。之后，在边界上找出距离 GN 最近的边界节点 BI (boundary intercept)，以 GN 和 BI 的连线向流场方向延伸一段距离，得到一段流场探针，该处的流场物理量可以由周围流体节点的物理量插值得到，从而可以根据探针处的插值以及 BI 点的边界条件来确定 GN 点的物理量。此外，为了抑制在求解移动边界问题时可能发生的数值振荡，在流体区域内定义了图 2(a) 所示的混合节点 HN (hybrid node)，在该区域内，流体节点的物理量是线性插值和方程解的加权平均值。如图 2(b) 所示，通过人为引入厚度 h 来解决零厚度膜无法正常计算的问题。该方法将流场探针的位置取到 BI 和 GN/HN 延伸线上 $h/2$ 处，即 BI 点，其余步骤同正常固体结构计算。由于 h 很小，则可以假设 BI 处的边界条件与相应 BI 处的边界条件相同。在本求解器中， h 取 3 倍的单元宽度。因此，随着网格的细化， h 会自动减小。关于求解器的更详细描述可以在文献 [38-40] 中找到。这种方法已经成功地应用于模拟低到中等雷诺数流动的流体动力学^[12,37,41-42]。

该计算域大小设置为 $8L \times 5.3L \times 5L$ ，并将中心区域围绕鱼体模型进行细化处理如图 3(b) 所示。其中鱼体模型复杂的浸没体表面采用三角形非结构化单元组成的网格来表示，躯干共有 4862

个节点和 9720 个单元，尾鳍共有 744 个节点和 1380 个单元。左边入口 (inflow) 设置为常速度边界条件，压力使用 Neumann 边界条件；右边出

口 (outflow) 设置为速度和压力的零梯度边界条件；其他边界设置为零应力边界条件。

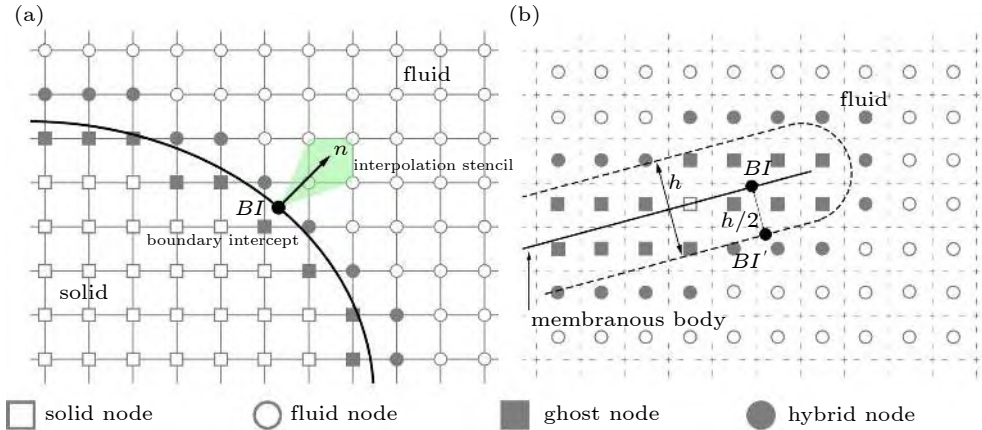


图 2 浸没边界法 (a) 二阶中心差分模板 (b) 膜结构

Fig. 2 IBM (a) second order central difference template (b) membrane structure

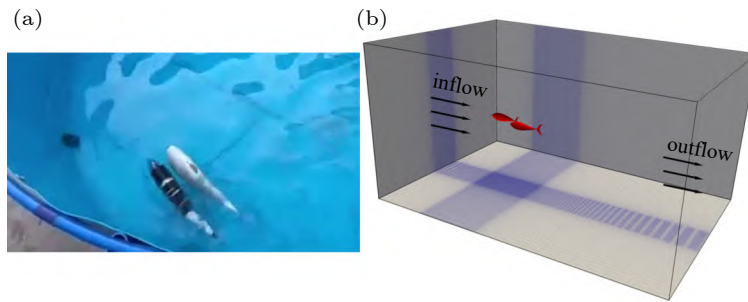


图 3 (a) 机器鱼实验；(b) 数值模拟鱼体空间位置示意图

Fig. 3 (a) Experimental study of robotic fish; (b) numerical simulation of fish body spatial position diagram

1.3 数值模拟方法的验证

本文模拟了固定薄板在恒流中的流场运动，用来验证该计算方法的可靠性。 $AR = S/C$ 为展弦比。取 $\alpha = 30^\circ$ ， $AR = 2$ ， $Re = 300$ 。三维模拟在 $9C \times 8C \times 8C$ (流向、横向和展向) 计算域中进行。升力和阻力系数计算公式为 $C_{L,D} = F_{y,x} / (\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 A)$ 。图 4(a) 所示给出了升力系数和阻力系数与文献数据对比结果，可以看出模拟得到的结果与文献 [43-44] 中的数值结果吻合较好，且通过 Q 准则可视化得到的三维瞬时涡结构 (图 4(b)) 也非常一致。验证了本文所采用的数值计算方法的可靠性。

1.4 网格收敛性验证

为了确保模拟结果与网格无关，本文对鱼体

网格进行了收敛性检查。图 5 展示了不同网格 (分别是 $\Delta = 1/150$ $\Delta = 1/200$ 和 $\Delta = 1/250$) 下尾鳍的流向力系数。此时模拟所选时间步长为 $\Delta t = 1 \times 10^{-3}$ 。从图 5 中可以清晰地看出，不同网格的流向力系数的平均值或峰值之差小于 5%。基于这一观察结果，在模拟中选择了 $\Delta = 1/200$ ，以确保计算精度和经济性的平衡。

1.5 数值指标

一旦流场被求解，模型躯干和尾鳍上的表面压力和剪切力即可从金枪鱼模型周围的流动变量投影并积分计算得到。功率消耗 P 是沿模型表面积分计算得到的，定义为

$$P = - \iint (\boldsymbol{\sigma} \cdot \boldsymbol{n}) \cdot \boldsymbol{V} ds \quad (5)$$

式中， $\boldsymbol{\sigma}$ 是应力张量， \boldsymbol{n} 表示模型表面上每个点

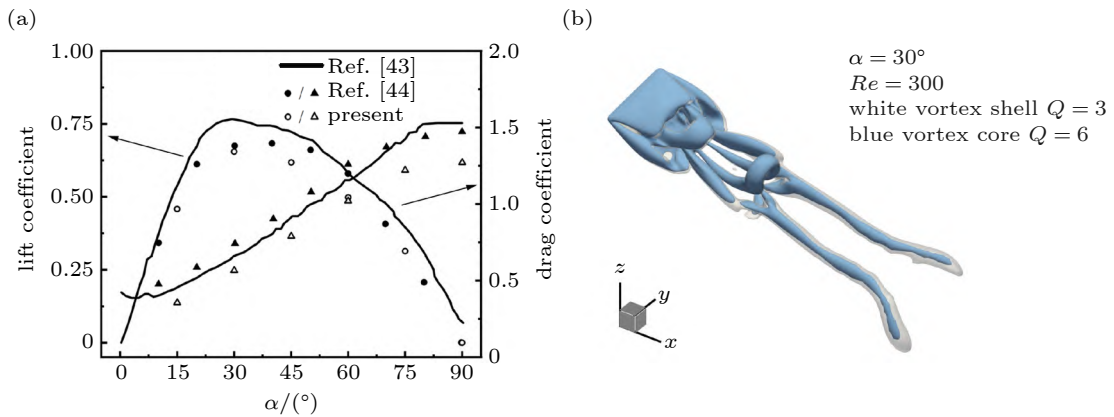


图 4 (a) 阻力系数和升力系数与文献数据对比; (b) Q 准则可视化三维瞬时涡流结

Fig. 4 (a) Comparison of drag coefficient and lift coefficient with the literature data; (b) the 3D instantaneous vortex structures visualized by the Q -criterion

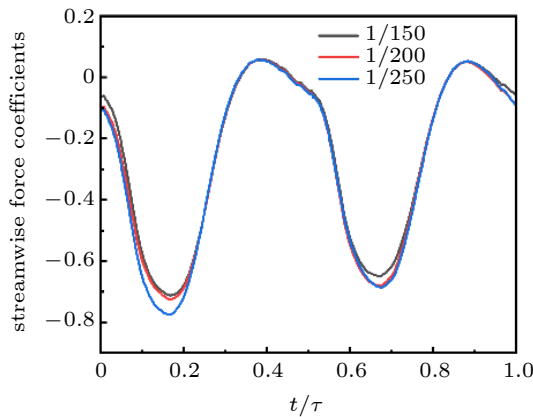


图 5 不同网格尾鳍流向力系数比较

Fig. 5 Comparison of the streamwise force coefficients on caudal fin for different grid

的法向矢量， \mathbf{V} 表示基于静止流体参考系下邻近鱼体的流体速度矢量。

本文采用两个无量纲系数来表示流向力和功率消耗，定义为

$$C_F = \frac{F}{1/2\rho U_\infty^2 S_{CF}} \quad (6)$$

$$C_P = \frac{P}{1/2\rho U_\infty^3 S_{CF}} \quad (7)$$

式中， ρ 表示流体密度， S_{CF} 为尾鳍面积。此外定义与来流正方向相同的流向力为正，因此，对于面对来流的模型来说正向和负向流向力分别是阻力和推力。即 $C_D = C_F$ ， $C_T = -C_F$ 。

另外，游动效率定义为

$$\eta = \frac{\overline{C_T} \tilde{U}}{\overline{C_P}} \quad (8)$$

式中， $\overline{C_T}$ 和 $\overline{C_P}$ 分别表示平均推力系数和平均功率系数， \tilde{U} 为平均速度。

三维涡流结构通过 Q 准则进行等值面可视化^[45]。

2 结果分析

通过改变双鱼之间的横向距离 G ，流向距离 D 及尾摆运动的相位差 ϕ ，进行了一系列模拟实验。图 6 展示了在选定条件下获得的涡流结构。

本文选择其中一组数据 ($G = 0.31L$) 与 Seo 等^[46] 的模拟结果进行对比，如图 7 所示。从图中可以看出，本文的计算结果与文献中的数据呈现相似的曲线趋势。图 7(a) 是领头鱼数据对比，两者的推力与功率消耗的数值差异在 2% 以内，几乎没有区别，但阻力明显降低了 5%，这一差异可能是由于三维鱼体模型的差异所导致的阻力等比例差异。而图 7(b) 是跟随鱼数据对比，同样两者的曲线趋势相符，数值差异波动在 5% 以内。

2.1 横向间距 G 的影响

为了研究横向间距 G 对水动力干扰的影响，本文在 y 方向上分别选择 $0.21L$ ， $0.26L$ ， $0.31L$ 和 $0.36L$ 共 4 个间距进行了一系列模拟计算。

模拟结果如图 8 所示，本文对数据进行了与单鱼游动数值的对比处理。值得注意的是，图中正值表示阻力，负值则表示推力，以下内容遵循同样的表示方法。

从图 8(a) 可以看出，横向间距 G 对领头鱼躯干的阻力有显著影响。当横向间距 G 为 $0.21L$

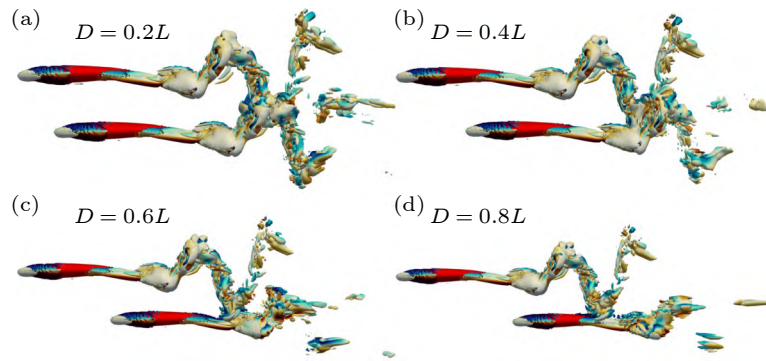


图6 双鱼模拟结果,通过 Q 准则($Q=150$)可视化的瞬时涡流结构($\phi=0, G=0.31L$)

Fig. 6 Simulation results of the minimal fish school, vortical structures are visualized by the iso-surface of Q -criterion ($Q=150$) ($\phi=0, G=0.31L$)

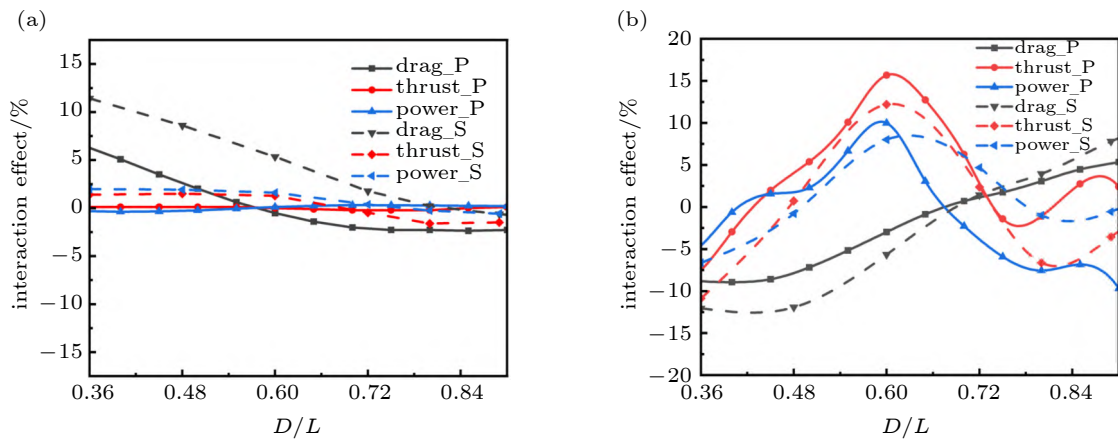


图7 同文献数据进行对比: (a) 领头鱼; (b) 跟随鱼 (P 为当前计算结果, S 为文献数据)

Fig. 7 Compare with the literature data: (a) leader; (b) follower (P: present results, S: literature results)

时,相较于单鱼,领头鱼的阻力增加了近20%。另一方面,从图8(b)可以观察到,横向间距对领头鱼尾鳍的流向力变化影响不大,其幅值一直维持在4%以内。双鱼游动中,从图8(c)可以明显观察到,横向间距对跟随鱼躯干流向力的影响较为显著。适当的横向间距可以使跟随鱼的推力提高近15%。此外,横向间距也对跟随鱼尾鳍的流向力产生明显影响,如图8(d)所示,当横向间距减小时,跟随鱼尾鳍的流向力变化幅值达到了35%。综上所述,双鱼游动过程中,减小横向间距 G 会明显增加领头鱼的阻力,同时也会增加跟随鱼的推力。

2.2 流向间距 D 的影响

为了研究流向距离对水动力干扰的影响,本文选择了沿 x 方向从0到 $0.85L$ 的流向间距 D ,并以 $0.05L$ 为间隔进行模拟。模拟结果如图8所示。由于横向间距 G 对流向力的影响主要体现在

峰值上,整体趋势相同,因此本文仅以横向间距 $G=0.31L$ 为基准进行分析。

通过观察图8(a),可以看出领头鱼躯干所受阻力随着流向间距的增加而增大,先达到峰值,然后逐渐减小,最后趋于平缓,并接近单鱼游动的数值。而领头鱼尾鳍受力情况如图8(b)所示,几乎不受流向间距的影响。跟随鱼躯干所受流向力与领头鱼躯干受力相反,如图8(c)所示。这是因为尾流的相互作用对领头鱼躯干没有干扰,而双鱼游动的相互作用使得领头鱼躯干所受阻力增加,必然伴随着跟随鱼躯干所受推力增加。图8(d)显示了跟随鱼尾鳍流向力随流向距离的变化。与阻力的单调变化不同,推力呈现周期性的变化,这与Seo等^[46]的研究结果相一致。

2.3 尾摆相位差的影响

为了研究尾摆相位差对双鱼的影响,本文先模拟了双鱼尾部同向摆动情况,并观察了相应

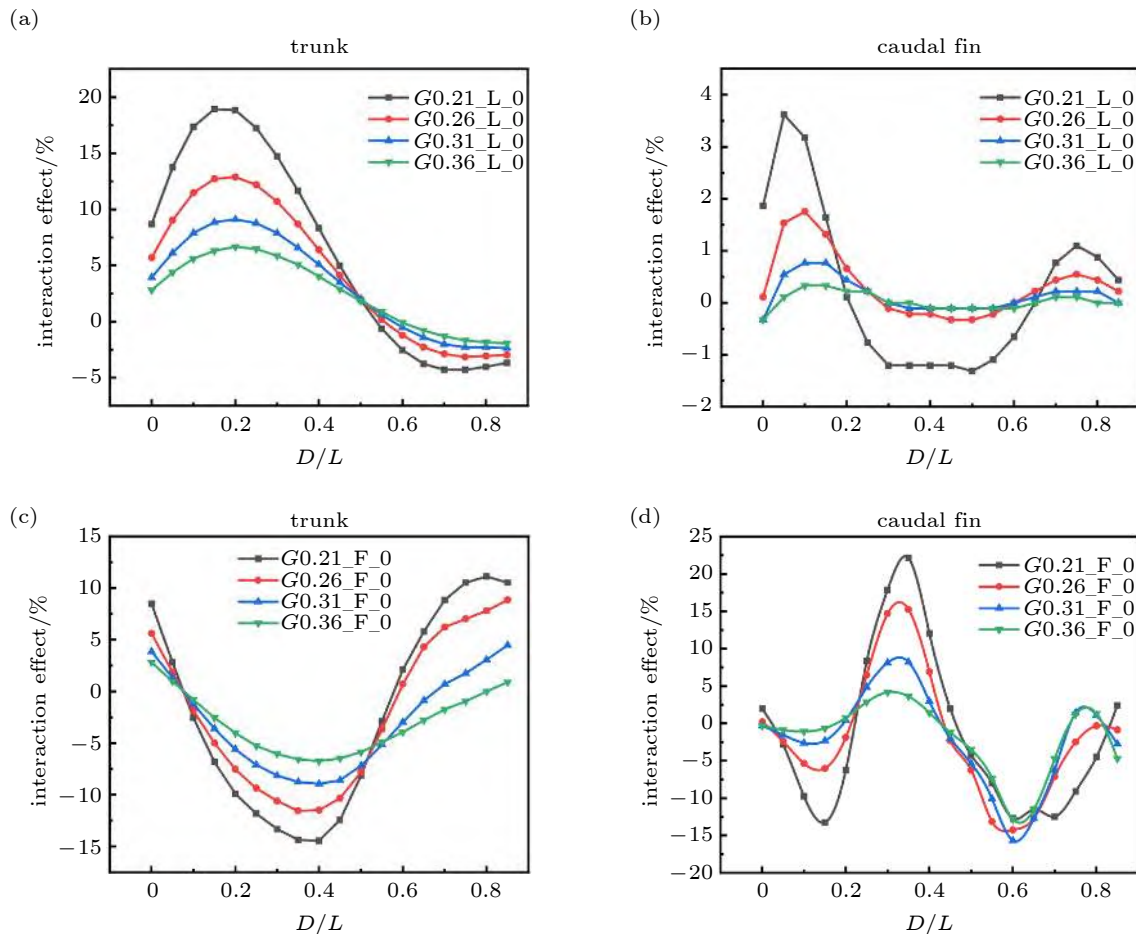


图 8 水动力相互作用对双鱼流向力的影响, G 为横向间距, L 为领头鱼, F 为跟随鱼, 0 为相位差。

(a) 领头鱼躯干; (b) 领头鱼尾鳍; (c) 跟随鱼躯干; (d) 跟随鱼尾鳍

Fig. 8 Effects of hydrodynamic interactions on the minimal fish school, G : lateral distance, L : leader, F : follower, 0 : phase difference. (a) Leader trunk; (b) leader caudal fin; (c) follower trunk; (d) follower caudal fin

的涡流结构。为了更全面地探究这一问题, 文章进一步模拟了反向摆动的情況, 并获得了相应的涡流结构 (如图 9 所示)。

从模拟计算结果 (图 10) 可以看出, 尾摆相位差对领头鱼和跟随鱼躯干受力的影响不大, 变化幅值都在 3% 以内。然而, 对于跟随鱼的尾鳍流向力来说, 尾摆相位差的影响却不可忽略, 其变化幅值达到了 30%。这主要是因为跟随鱼的尾鳍正处于领头鱼的尾涡内部, 两者之间发生相互作用, 导致了跟随鱼尾鳍流向力的变化。一旦尾摆相位差确定, 两鱼的尾涡结构也将被确定。当两鱼的尾涡反向作用时, 尾流脱落涡就会增强, 从而增加了尾鳍的推力; 反之, 则抑制了推力的产生。这也解释了为什么尾鳍的流向力会随流向位置的改变而呈周期性变化。进一步分析发现, 不同的尾摆相位差对应着一个特定的流向位置,

该位置能够使推力得到最大增强。这个发现与 Li 等^[47]在其研究中发现的漩涡相位匹配机制是一致的。

2.4 流场压力的影响

为了更清晰地了解双鱼之间的相互影响, 本文考虑了流场压力的因素。图 11 为同一横向间距 G 和尾摆相位差 ϕ 下, 不同流向间距 D 在同一时刻的压力分布情况。通过图 11 可以清楚地看到, 在双鱼之间存在着明显的贴体负压区域。这种负压区的存在导致双鱼之间产生了压力差, 与单个鱼游动相比, 这种压力差会在流向上给鱼体带来拖曳的作用。具体来说, 它一方面增加了领头鱼躯干部分的阻力, 另一方面降低了跟随鱼躯干的阻力, 甚至可能产生推力的效应。进一步观察图 11(a)~图 11(c) 部分, 可以看到双鱼间的贴体负压区逐渐增大, 这与图 8(a) 中阻力上升部

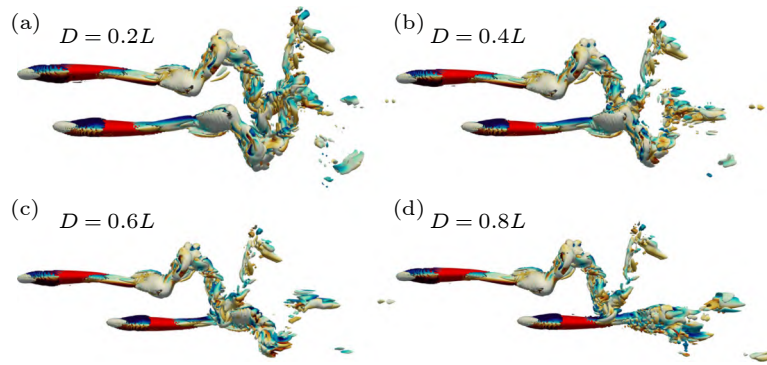


图9 双鱼模拟结果, 通过 Q 准则 ($Q=150$) 可视化的瞬时涡流结构 ($\varphi=\pi$, $G=0.31L$)
 Fig. 9 Simulation results of the minimal fish school. vortical structures are visualized by the iso-surface of Q -criterion ($Q=150$) ($\varphi=\pi$, $G=0.31L$)

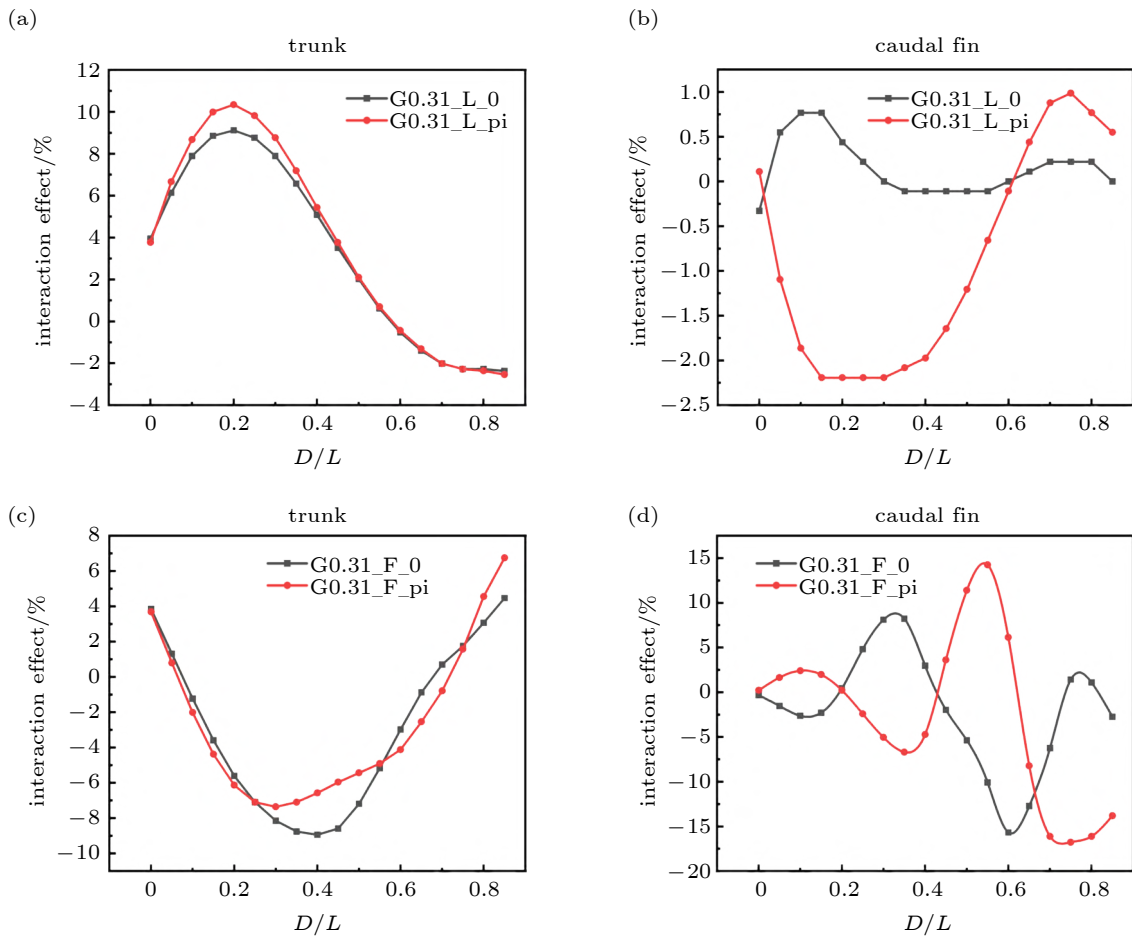


图10 水动力相互作用对双鱼流向力的影响, G 为横向间距, L 为领头鱼, F 为跟随鱼, $0/\pi$ 为相位差。

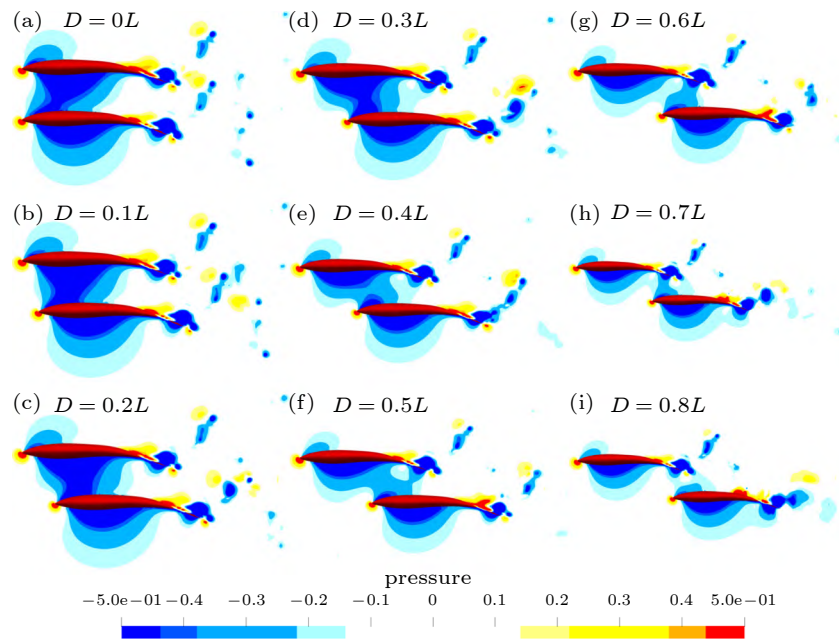
(a) 领头鱼躯干; (b) 领头鱼尾鳍; (c) 跟随鱼躯干; (d) 跟随鱼尾鳍

Fig. 10 Effects of hydrodynamic interactions on the minimal fish school, G : lateral distance, L : leader, F : follower, $0/\pi$: phase difference. (a) Leader trunk; (b) leader caudal fin; (c) follower trunk; (d) follower caudal fin

分以及图8(c)中阻力下降部分是一致的。随着流向间距 D 的不断增大, 这一贴体负压区逐渐减小, 最终趋于独立游动的状态。

此外, 通过观察图10(c)和图10(d)中的黑

色实线数据可以发现, 当 D 取 $0 \sim 0.4L$ 时, 跟随鱼的推力主要由躯干部分提供, 而尾鳍提供的推力微乎其微。结合图11(a)~图11(d)的数据, 可以得出这种推力的产生是由贴体压力主导的。当

图 11 压力等值线 ($\varphi=0, G=0.31L$)Fig. 11 Pressure contours ($\varphi=0, G=0.31L$)

D 大于 $0.4L$ 时，躯干部分提供的推力逐渐减小，与此同时尾鳍提供的推力开始增加，这与图 11 (e) ~ 图 11(i) 中贴体负压区逐渐减少的趋势相吻合。因此可以得出，此时推力的产生是由尾流动力所主导的。

3 结论

本文对三维双鱼游动的水动力相互作用进行了详细的探讨，着重从横向间距 G ，流向间距 D ，尾摆相位差 ϕ 以及压力分布等多个方面进行了分析。根据研究结果，得出以下几点结论。

首先，横向间距对领头鱼阻力有着显著的影响。随着间距的减小，阻力会成倍增加。因此，在集群游动的训练中，选择合适的横向间距尤为重要。建议横向间距 G 的最佳选择不应小于 $0.3L$ ，当间距小于这个值时，阻力过大会导致游动所耗能量过高。

其次，流向间距对跟随鱼尾鳍的流向力有着主要的影响。跟随鱼尾鳍的流向力随着间距的增加而呈现周期性变化，而躯干部分的阻力则呈单调变化。因此，在集群设计中，可以考虑找到一个既具备较小阻力又具备良好推力性能的流向位置。

此外，尾摆相位差对领头鱼和跟随鱼阻力的影响较小，可以忽略不计。但是，它对跟随鱼的

推力有着重要的影响。在合适的流向位置上，选择合适的尾摆相位差，才能使双鱼游动的效益达到最大化。

最后，从流场压力来看，双鱼间的阻力主要是由于贴体压力区产生的压力差所引起的。而推力的产生则同时受贴体压力和尾流动力的共同作用，当 D 小于 $0.4L$ 时，由贴体压力主导，当 D 大于 $0.4L$ 时，则改变为尾流动力主导。

参 考 文 献

- 1 Liao JC. A review of fish swimming mechanics and behaviour in altered flows. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2007, 362(1487): 1973-1993
- 2 Trenchard H, Perc M. Energy saving mechanisms, collective behavior and the variation range hypothesis in biological systems: a review. *Biosystems*, 2016, 147: 40-66
- 3 Weihs D. Hydromechanics of fish schooling. *Nature*, 1973, 241(5387): 290-291
- 4 Hemelrijk C, Reid D, Hildenbrandt H, et al. The increased efficiency of fish swimming in a school. *Fish and Fisheries*, 2015, 16(3): 511-521
- 5 徐新生, 孙发明. 智能机器鱼游动机理与一种设计理念. *力学与实践*, 2010, 32(1): 91-97
- 6 Zhu Y, Pang JH, Tian FB. Stable schooling formations emerge from the combined effect of the active control and

- passive self-organization. *Fluids*, 2022, 7(1): 41
- 7 Chao LM, Mahbub Alam Md, Cheng L. Hydrodynamic performance of slender swimmer: effect of travelling wavelength. *Journal of Fluid Mechanics*, 2022, 947: A8
- 8 Huang S, Guo D, Wang Y, et al. Hydrodynamics of morphology for thunniform swimmers: effects of the posterior body shape. *Ocean Engineering*, 2023, 272: 113866
- 9 Kurt M, Moored KW. Flow interactions of two- and three-dimensional networked bio-inspired control elements in an in-line arrangement. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2018, 13(4): 045002
- 10 Verma S, Novati G, Koumoutsakos P. Efficient collective swimming by harnessing vortices through deep reinforcement learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(23): 5849-5854
- 11 Ren K, Yu J, Li H, et al. Numerical investigation on the swimming mode and stable spacing with two self-propelled fish arranged in tandem. *Ocean Engineering*, 2022, 259: 111861
- 12 Han P, Pan Y, Liu G, et al. Propulsive performance and vortex wakes of multiple tandem foils pitching in-line. *Journal of Fluids and Structures*, 2022, 108: 103422
- 13 Novati G, Verma S, Alexeev D, et al. Synchronisation through learning for two self-propelled swimmers. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2017, 12(3): 036001
- 14 Saadat M, Berlinger F, Sheshmani A, et al. Hydrodynamic advantages of in-line schooling. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2021, 16(4): 046002
- 15 Han J, Zhang Y, Chen G. Effects of individual horizontal distance on the three-dimensional bionic flapping multiwings in different schooling configurations. *Physics of Fluids*, 2019, 31(4): 041903
- 16 Li G, Kolomenskiy D, Liu H, et al. On the energetics and stability of a minimal fish school. *PLOS ONE*, 2019, 14(8): e0215265
- 17 Newbolt JW, Zhang J, Ristroph L. Lateral flow interactions enhance speed and stabilize formations of flapping swimmers. *Physical Review Fluids*, 2022, 7(6): L061101
- 18 Ashraf I, Bradshaw H, Ha TT, et al. Simple phalanx pattern leads to energy saving in cohesive fish schooling. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, 114(36): 9599-9604
- 19 Ma Q, Ding L, Huang D. A study on the influence of schooling patterns on the energy harvest of double undulatory airfoils. *Renewable Energy*, 2021, 174: 674-687
- 20 Peng ZR, Huang H, Lu XY. Collective locomotion of two closely spaced self-propelled flapping plates. *Journal of Fluid Mechanics*, 2018, 849: 1068-1095
- 21 Khalid MSU, Akhtar I, Imtiaz H, et al. On the hydrodynamics and nonlinear interaction between fish in tandem configuration. *Ocean Engineering*, 2018, 157: 108-120
- 22 Dewey PA, Quinn DB, Boschitsch BM, et al. Propulsive performance of unsteady tandem hydrofoils in a side-by-side configuration. *Physics of Fluids*, 2014, 26(4): 041903
- 23 Weihs D. Some hydrodynamical aspects of fish schooling// Wu TYT, Brokaw CJ, Brennen C. *Swimming and Flying in Nature*. Boston, MA, US: Springer, 1975: 703-718
- 24 Fish FE, Fegely JF, Xanthopoulos CJ. Burst-and-coast swimming in schooling fish with implications for energy economy. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*, 1991, 100(3): 633-637
- 25 Liao JC. The role of the lateral line and vision on body kinematics and hydrodynamic preference of rainbow trout in turbulent flow. *Journal of Experimental Biology*, 2006, 209(20): 4077-4090
- 26 Deng J, Shao XM. Hydrodynamics in a diamond-shaped fish school. *Journal of Hydrodynamics, Series B*, 2006, 18(3): 438-442
- 27 Park SG, Sung HJ. Hydrodynamics of flexible fins propelled in tandem, diagonal, triangular and diamond configurations. *Journal of Fluid Mechanics*, 2018, 840: 154-189
- 28 Webb PW. The effect of solid and porous channel walls on steady swimming of steelhead trout *Oncorhynchus Mykiss*. *Journal of Experimental Biology*, 1993, 178(1): 97-108
- 29 Fish FE, Lauder GV. Passive and active flow control by swimming fishes and mammals. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2006, 38(1): 193-224
- 30 Daghooghi M, Borazjani I. The hydrodynamic advantages of synchronized swimming in a rectangular pattern. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2015, 10(5): 056018
- 31 Li S, Li C, Xu L, et al. Numerical simulation and analysis of fish-like robots swarm. *Applied Sciences*, 2019, 9(8): 1652
- 32 Wei C, Hu Q, Zhang T, et al. Passive hydrodynamic interactions in minimal fish schools. *Ocean Engineering*, 2022, 247: 110574
- 33 Collette BB, Nauen CE, FIR. An annotated and illustrated catalogue of tunas, mackerels, bonitos and related species known to date. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1983
- 34 Dewar H, Graham JB. Studies of tropical tuna swimming performance in a large water tunnel: I energetics. *Journal of Experimental Biology*, 1994, 192(1): 13-31
- 35 Zhang JD, Sung HJ, Huang WX. Specialization of tuna: a numerical study on the function of caudal keels. *Physics of Fluids*, 2020, 32(11): 111902
- 36 Borazjani I, Sotiropoulos F. Numerical investigation of the

- hydrodynamics of carangiform swimming in the transitional and inertial flow regimes. *Journal of Experimental Biology*, 2008, 211(10): 1541-1558
- 37 Khalid MSU, Wang J, Akhtar I, et al. Larger wavelengths suit hydrodynamics of carangiform swimmers. *Physical Review Fluids*, 2021, 6(7): 073101
- 38 Luo H, Yin B, Dai H, et al. A 3D computational study of the flow-structure interaction in flapping flight. AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando, Florida, 2010
- 39 Luo H, Dai H, Ferreira De Sousa PJSA, et al. On the numerical oscillation of the direct-forcing immersed-boundary method for moving boundaries. *Computers & Fluids*, 2012, 56: 61-76
- 40 Yin B, Yang G, Prapamonthon P. Finite obstacle effect on the aerodynamic performance of a hovering wing. *Physics of Fluids*, 2019, 31(10): 101902
- 41 赫连勃勃, 张权, 周锟. 基于浸入边界法的扑翼飞行数值模拟. *力学与实践*, 2023, 45(5): 1079-1090
- Helian Bobo, Zhang Quan, Zhou Kun. Numerical simulation of flapping wing flight based on immersion boundary method. *Mechanics in Engineering*, 2023, 45(5): 1079-1090 (in Chinese)
- 42 李燕玲, 胡进, 周锟. 风力机气动特性的浸入边界法模拟. *力学与实践*, 2021, 43(4): 512-520
- Li Yanling, Hu Jin, Zhou Kun. Numerical simulation of wind turbine with the immersed boundary method. *Mechanics in Engineering*, 2021, 43(4): 512-520 (in Chinese)
- 43 Dickson WB, Dickinson MH. The effect of advance ratio on the aerodynamics of revolving wings. *Journal of Experimental Biology*, 2004, 207(24): 4269-4281
- 44 Taira K, Colonius T. Three-dimensional flows around low-aspect-ratio flat-plate wings at low Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, 2009, 623: 187-207
- 45 Hunt JCR, Wray AA, Moin P. Eddies, streams, and convergence zones in turbulent flows. Center for Turbulence Research, 1988
- 46 Seo JH, Mittal R. Improved swimming performance in schooling fish via leading-edge vortex enhancement. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2022, 17(6): 066020
- 47 Li L, Nagy M, Graving JM, et al. Vortex phase matching as a strategy for schooling in robots and in fish. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 5408

(责任编辑: 胡 漫)