

## 蝠鲼交错排布集群游动水动力性能\*

高鹏骋<sup>1)2)#</sup> 田徐顺<sup>1)2)#</sup> 黄桥高<sup>1)2)†</sup> 潘光<sup>1)2)</sup> 褚勇<sup>1)2)</sup>

1) (西北工业大学航海学院, 西安 710072)

2) (西北工业大学宁波研究院, 无人航行技术研究中心, 宁波 315048)

(2024年3月20日收到; 2024年4月28日收到修改稿)

为了探究蝠鲼“前上后下”交错排布集群游动时的水动力性能, 首先根据生物观测建立了蝠鲼形态学及运动学模型, 然后基于浸入边界法和球函数气体动力学格式 (IB-SGKS) 建立了鱼类集群游动数值计算方法. 系统研究了垂直间距固定为 0.1 倍体厚, 流向间距 0—1.5 倍体长 (BL) 下的双蝠鲼集群游动过程, 并结合全局三维涡结构和特征截面二维涡结构对集群系统以及集群中各单体的平均推力/效率进行分析. 数值结果表明: 当单体间流向间距较小时, 相比于单独游动, 推进性能急剧下降; 随着流向间距增加, 领航蝠鲼推进性能基本同单体游动保持一致; 但当  $D_x = 0.4BL$  时由于领航蝠鲼尾涡恰好越过跟随蝠鲼前缘直接作用在跟随蝠鲼初始脱落鳍尖涡处, 大幅提升其旋涡能量, 因此此时系统平均推力和效率提升均最大, 分别为 29.69% 和 6.77%.

**关键词:** 蝠鲼, 集群游动, 交错排布, 水动力特性, 涡结构**PACS:** 47.63.-b, 47.85.lb**DOI:** 10.7498/aps.73.20240399

## 1 引言

经过亿万年自然选择, 鱼类进化出非凡的运动控制能力, 能完成倒游、原地悬停、紧急制动和快速启动等高机动动作<sup>[1-3]</sup>. 此外, 鱼类通常选择集群游动以此来提高捕食能力和规避天敌成功率<sup>[4-6]</sup>. 仿生航行器是新型无人自主水下装备, 其兼具长续航、高机动、高隐蔽及高生物亲和四项能力需求, 适用于海洋环境/生物监测、军事侦察等场景. 为完成更复杂的水下作业任务, 往往需要多个航行器协同工作、编队航行, 因此有必要开展生物集群运动学和节能机理研究, 以期实现仿生航行器高效节能集群运动. CFD 仿真方法可更加精准地计算出鱼群中各单体水动力参数以及更精细地显示出尾涡演变规律, 且随着仿真技术和计算机性能的提升, 鱼类集群仿真也从两条到多条, 二维到三维<sup>[7-11]</sup>.

Deng 和 Shao<sup>[12]</sup> 以及 Chung<sup>[13]</sup> 先后采用浸入边界法对菱形鱼群中的 3 条鱼单元进行了数值模拟. 结果均表明, 跟随鱼可从领航鱼脱落的反卡门涡街受益, 实现推进效率提高及功耗降低. Dai 等<sup>[14]</sup> 分别数值模拟了 2—4 条仿真鱼组成的编队自主游动过程, 并用运输成本来量化稳定编队的游动效率, 结果表明集群游动相对于单体游动最多可减少 16% 的运输成本, 但相较于其他编队, 菱形编队并没有表现出任何节能优势. Chao 等<sup>[15,16]</sup> 借助 Fluent 软件对两平行 D 形圆柱以及两 naca0012 翼型在串联、并联、交错队形下的非定常流动进行了数值模拟, 结果表明流向和展向间距影响了前后翼型的旋涡脱落形式, 从而导致推力变化.

当前关于鱼类集群游动的研究主要集中在二维翼型, 但也有部分学者开展了三维生物集群水动力数值模拟. Li 等<sup>[17]</sup> 通过扫描金枪鱼获得形状参数并完成结构建模, 然后在 Fluent 中对不同编队

\* 国家自然科学基金 (批准号: 52201381, 52371338) 和国家重点研发计划 (批准号: 2022YFC2805200) 资助的课题.

# 同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: [huangqiaogao@nwpu.edu.cn](mailto:huangqiaogao@nwpu.edu.cn)

金枪鱼进行了数值模拟, 结果表明, 垂直分布的鱼群游动时, 个体推力和推进效率更高. 我们对蝠鲼群体滑翔进行了研究, 模拟了两条蝠鲼以串联、平行和垂直排布变攻角滑翔, 以及 3 条蝠鲼以三角形排布变攻角滑翔<sup>[18-21]</sup>. 结果表明, 集群滑翔时攻角和间距对个体和系统的推进性能影响较大, 推力主要受压力分布的影响. 随后, Gao 等<sup>[22]</sup>还开创性地进行了鱼类跨种群集群游动研究, 借助 IB-SGKS 方法数值模拟了金枪鱼和蝠鲼在串联队形下集群游动. 结果表明, 在串联群游状态下, 蝠鲼推力和效率在大多数间距下都得到了增强, 且间距越小, 增强幅度越大; 金枪鱼推力和效率曲线随间距波动较大, 与金枪鱼所处的蝠鲼尾流场位置有关.

综上所述, 目前关于鱼类集群水动力特性的数值研究存在以下不足. 首先, 数值模式通常采用降阶模型 (NACA 翼型或是细线模型) 来代替真实鱼类, 运动形式单一, 忽略了三维流场结构对集群水动力影响. 其次, 主要针对身体/尾鳍推进模式 (BCF) 鱼类开展了集群水动力研究, 忽略了胸鳍/对鳍推进模式 (MPF) 鱼类的研究. 最后, 当前研究通常将集群队形设置为串联及并联排布, 但鱼类在真实集群游动过程中通常采用上下交错排布 (如图 1 所示) 以此来保证集群中各单体拥有极佳的视野范围和遭遇突发情况时有足够空间完成快速逃逸.



图 1 真实蝠鲼集群游动

Fig. 1. Real manta rays group swimming.

为弥补上述不足, 本文开展了双蝠鲼在交错排布队形下集群游动的数值模拟, 旨在获得流向间距对集群中各单体水动力特性和涡结构影响规律, 为仿生水下航行器的群体编队设置提供理论指导. 第 2 节完成了蝠鲼形态学及运动学建模, 并给出了交错队形的定义; 第 3 节给出了数值计算方法和相关验证, 并给出了单个计算结果以便于后续比较; 第 4 节给出了不同流向间距下推力和推进效率表现, 并结合尾流结构对推进性能差异背后的流体机理进行解释; 第 5 节给出了本研究的结论和展望.

## 2 计算模型及队形设置

### 2.1 形态学及运动学建模

在之前的研究<sup>[18]</sup>中, 我们对真实蝠鲼进行了观察和测量, 建立了简化计算模型 (忽略蝠鲼尾鞭、脸鳍等附体小鳍) 如图 2 所示, 体长 (BL)、展长 (SL)、最大体厚 (TL) 分别为 2900 mm, 1800 mm, 350 mm.

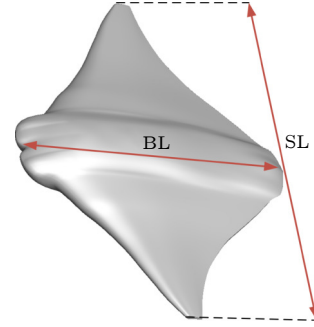


图 2 计算模型<sup>[18]</sup>

Fig. 2. Computational model<sup>[18]</sup>.

之前研究表明<sup>[23-25]</sup>, 蝠鲼运动可看作展向变形和弦向变形的耦合 (图 3), 运动方程如 (1) 式所示.

当  $y_f \geq 0$  时:

$$\begin{aligned} x(x_f, y_f, t) &= x_f, \\ y(x_f, y_f, t) &= y_f(1 - (1 - k) |\theta(t, x_f)| y_f/SL) \\ &\quad \times \cos[\theta_{\max} y_f/SL \cdot \theta(t, x_f)], \\ z(x_f, y_f, t) &= z_f + y_f(1 - (1 - k) |\theta(t, x_f)| y_f/SL) \\ &\quad \times \sin[\theta_{\max} y_f/SL \cdot \theta(t, x_f)], \\ \theta(x_f, t) &= \sin(\omega t - 2\pi W x_f/BL). \end{aligned} \quad (1a)$$

当  $y_f \leq 0$  时:

$$\begin{aligned} x(x_f, y_f, t) &= x_f, \\ y(x_f, y_f, t) &= -(-y_f)[1 - (1 - k) |\theta(t, x_f)| (-y_f)/SL] \\ &\quad \times \cos[\theta_{\max} (-y_f)/SL \cdot \theta(t, x_f)], \\ z(x_f, y_f, t) &= z_f + (-y_f)[1 - (1 - k) |\theta(t, x_f)| \\ &\quad \times (-y_f)/SL] \sin[\theta_{\max} (-y_f)/SL \cdot \theta(t, x_f)], \\ \theta(x_f, t) &= \sin(\omega t - 2\pi W x_f/BL). \end{aligned} \quad (1b)$$

式中,  $t$  为时间;  $(x_f, y_f, z_f)$  为蝠鲼初始位置坐标;  $(x, y, z)$  为  $t$  时刻的位置坐标; SL 为展长; BL 为体长;  $W$  为无量纲波数;  $\omega$  为胸鳍拍动角频率;  $\theta(x_f, t)$  用于调节弦向变形;  $k$  和  $\theta_{\max}$  用于调节展向变形.

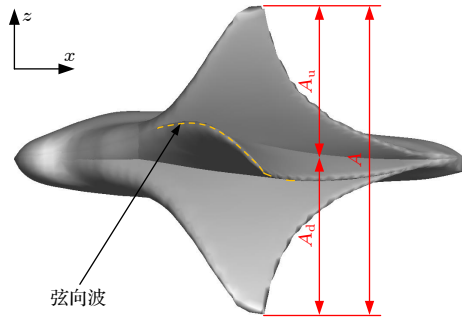


图 3 蝠鲼运动模型图

Fig. 3. Manta ray motion model view.

## 2.2 集群队形设置

基于生物游动的实际情况, 本文将集群队形设置为交错排布, 即集群中两单体间同时存在流向 ( $x$  方向) 和垂向 ( $z$  方向) 间距, 且保持领航蝠鲼在上, 跟随蝠鲼在下, 如图 4 所示. 将两蝠鲼上表面垂向间距定义为  $D_z$ , 两蝠鲼尾尾间距定义为  $D_x$ , 在本文研究中, 将  $D_z$  固定为 0.1 TL,  $D_x$  选取范围为 0—1.5BL 共计 16 种流向间距. 值得注意的是, 当  $D_x = 0$  时, 两蝠鲼游动队形为垂向排布.

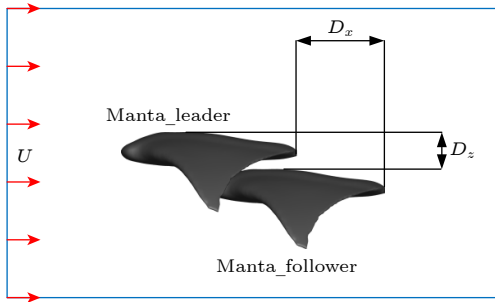


图 4 交错队形示意图

Fig. 4. Staggered formation schematic.

## 3 数值方法及验证

### 3.1 数值方法及验证

鱼类在运动过程中, 鱼鳍会发生较大变形, 这种现象在蝠鲼上尤为明显, 蝠鲼在运动过程中胸鳍变形模式复杂, 包括展向扑动、弦向波动和扭转变形. 若采用传统附体网格进行数值模拟, 必然会带来严重网格畸变, 而若在每一步求解中都进行网格重构, 计算效率将大大降低. 浸入边界法<sup>[26]</sup> (immersed boundary method, IBM) 基本原理是让流体充满复杂结构所在空间 (包含内部), 在 NS 方程中用一个附加力项来代替边界效应, 因此被广

泛应用于生物游动模拟. 浸入边界法的实施需要一种有效的求解方法, 本文采用一种基于球函数的气体动理学格式 (sphere function-based gas kinetic scheme, SGKS), 采用有限体积法 (finite volume method, FVM) 对控制微分方程进行离散化, 通过对连续玻尔兹曼方程解的局部重构, 同时求解了单元界面处的无黏通量和黏性通量, 最后采用共轭梯度法 (conjugate gradient, CG) 进行线性方程组求解<sup>[27-29]</sup>, 边界条件设置为速度入口, 其他边界采用零梯度条件. 在开始计算前, 需要检验本数值方法在解决鱼类游动问题的可行性和可靠性, 进行了金枪鱼单体游动验证, 计算域设置及网格细节展示如图 5 所示. 保持雷诺数  $Re = 2000$  不变, 在不同斯特劳哈尔数 ( $St$ ) 下开展了数值计算, 并与 Zhang 等<sup>[30]</sup> 的数值计算结果进行对比, 在他们的研究中将金枪鱼所受流向力分为了鱼体和鱼尾受力两部分, 本文仅计算了金枪鱼整体受力, 故与 Zhang 等<sup>[30]</sup> 两部分力相加和进行了对比 (如图 6 所示), 本文计算结果与参考值趋势吻合较好, 说明本计算方法进行鱼类游动问题模拟具有较高的可信性. 此外, 该求解器还被证明可有效用于蝠鲼游动和集群游动模拟<sup>[22-25]</sup>.

### 3.2 网格无关性及时间步长验证

(2) 式给出了单体和集群系统水动力参数定义, 其中效率定义由文献<sup>[31]</sup> 给出:

$$C_T = \frac{F_T}{0.5\rho U^2 BL^2}, \quad C_P = \frac{P}{0.5\rho U^3 BL^2},$$

$$P = \int_{\Omega} F_{Lagrangian} \cdot U_{body} ds, \quad \eta = \frac{\bar{C}_T}{\bar{C}_T + \bar{C}_P},$$

$$\bar{C}_{T-group} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \bar{C}_{T(i)}, \quad \eta_{group} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \eta_{(i)}, \quad (2)$$

式中,  $F_T$  为蝠鲼所受推力,  $\rho$  是密度,  $U$  是入口速度,  $BL$  是体长,  $\Omega$  为模型曲面,  $F_{Lagrangian}$  为拉格朗日力,  $U_{body}$  为模型在各边界单元  $ds$  处的变形速度.

蝠鲼表面网格划分采用非结构化网格划分方法, 网格类型选择三角形, 节点总数为 3350 个, 将计算域设置为  $16.2BL \times 16.2BL \times 15.5BL$  矩形, 加密区域大小为  $1.6BL \times 1.9BL \times 1.0BL$ , 选择  $0.016BL$ ,  $0.0135BL$  和  $0.0115BL$  三种网格尺寸. 选取加密区网格尺寸为  $0.0135BL$  时的网格进行展示, 如图 7 所示.

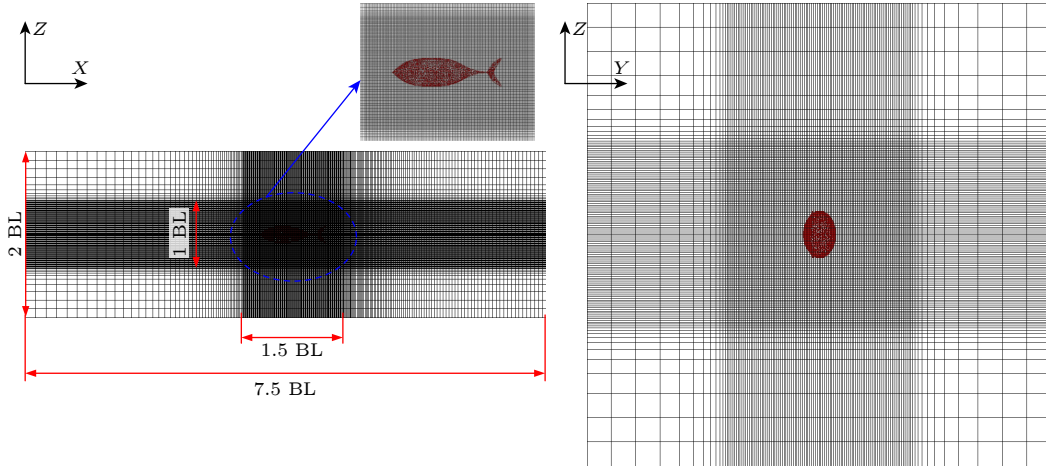


图 5 金枪鱼计算域设置及网格细节图

Fig. 5. Tuna computational domain setup and mesh details.

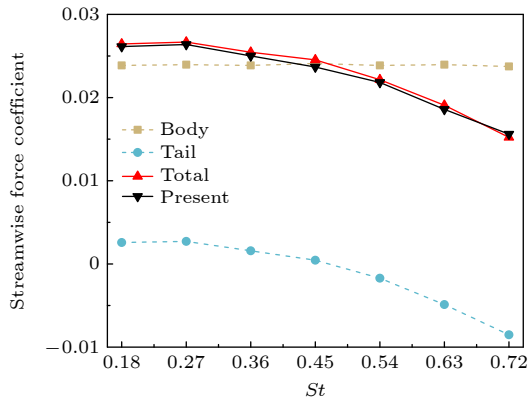


图 6 流向力系数曲线

Fig. 6. Streamwise force coefficient curve.

无关性要求, 为提升计算速度, 在后续计算中时间步长设置为 0.5.

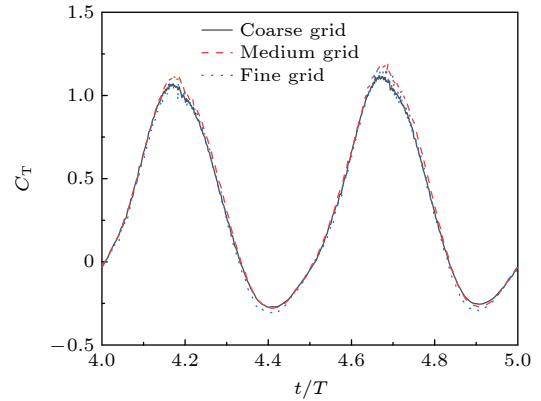


图 8 不同网格下推力系数曲线

Fig. 8. Thrust coefficient curves for different meshes.

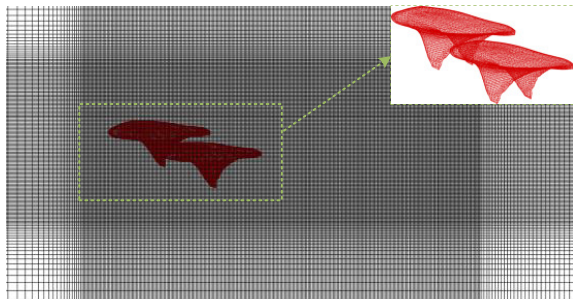


图 7 网格细节图

Fig. 7. Mesh detail view.

计算了蝠鲼在频率  $f = 1 \text{ Hz}$ , 振幅  $A_u = A_d = 0.35BL$ , 波数  $W = 0.4$  时的推力系数, 如图 8 所示. 中等网格计算结果达到了网格无关性要求, 为节约计算资源, 提升计算速度, 在后续计算中加密区域网格大小选取  $0.0135BL$ . 进一步开展了时间步长验证, 选择了  $0.5848 \text{ ms}$  ( $CFL = 0.5$ ) 和  $0.3509 \text{ ms}$  ( $CFL = 0.3$ ) 两种时间步长, 推力系数如图 9 所示,  $CFL = 0.5$  的计算结果达到, 时间步

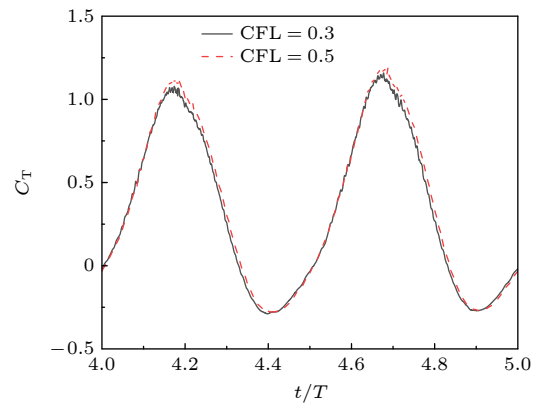


图 9 不同时间步长下推力系数曲线

Fig. 9. Thrust coefficient curves for different time steps.

#### 4 数值计算结果与分析

本节首先展示了领航蝠鲼、跟随蝠鲼和集群系

统推力系数及推进效率随流向间距 ( $D_x$ ) 的变化情况. 在 3.2 节进行数值验证时, 已经进行了单体计算, 直接给出单体水动力结果 ( $C_T = 0.3256$ ,  $\eta = 0.1043$ ). 本节第 2 部分将结合全局三维涡结构和特征截面二维涡结构对蝠鲞在集群队形下水动力特性随间距变化的原因进行解释.

#### 4.1 水动力特性

将集群系统和集群中各单体推力系数、推进效率随流向间距的变化规律绘制在图 10 中. 从图 10(a) 中可看出, 当  $D_x \leq 0.2BL$  时, 领航蝠鲞、跟随蝠鲞以及集群系统推力接近, 且都低于单体游动时所产生的推力, 尤其是在  $D_x = 0$  (即垂向排布) 时, 集群中两单体推力均大幅下降, 集群系统推力相比单体游动下降达 74.46%. 当  $D_x \geq 0.3BL$  时, 领航蝠鲞推力始终大于单体游动, 在  $D_x = 0.4BL$  时提升最大达 11.24%, 随着两蝠鲞流向间距进一步增大, 领航蝠鲞推力提升效果减弱, 当  $D_x = 1.5BL$  时, 几乎等于单体游动所产生的推力.

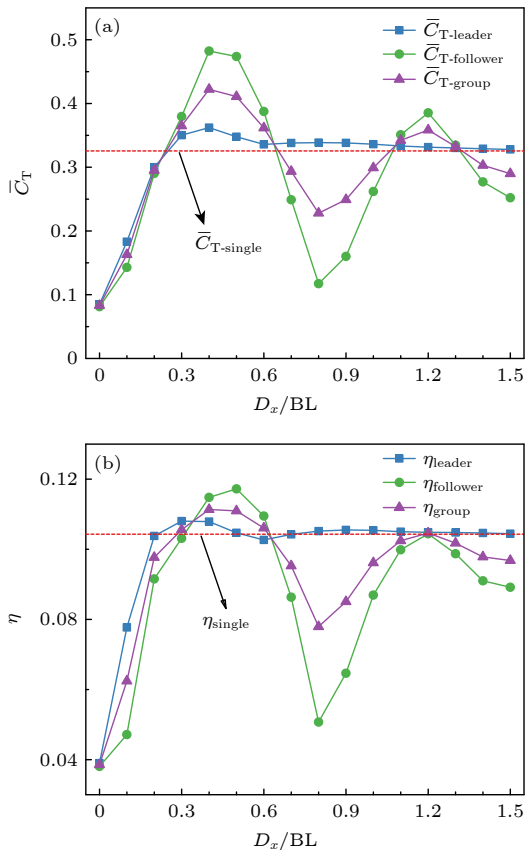


图 10 不同流向间距下水动力性能表现 (a) 推力系数; (b) 推进效率

Fig. 10. Hydrodynamic performance at different streamwise spacings: (a) Thrust coefficient; (b) propulsion efficiency.

当  $D_x \geq 0.3BL$  时, 跟随蝠鲞和集群系统推力曲线出现波动性, 在  $0.3BL \leq D_x \leq 0.6BL$  时, 推力优于单体游动, 当  $D_x = 0.4BL$  时, 跟随蝠鲞推力提升最大达 48.14%, 系统推力提升最大达 29.69%; 在  $0.7BL \leq D_x \leq 1.0BL$  时, 推力低于单体游动; 在  $1.1BL \leq D_x \leq 1.3BL$  时, 推力优于单体游动; 在  $1.4BL \leq D_x \leq 1.5BL$  时, 推力低于单体游动.

推力曲线变化规律同之前研究<sup>[32]</sup> (保持领航蝠鲞在下, 跟随蝠鲞在上) 相似, 但集群中各单体推力随流向间距变化数值不同, 尤其是跟随蝠鲞推力变化波动性更大, 推力最大提升也更大 ( $D_x = 0.4BL$  时), 这表明领航蝠鲞运动产生尾涡对其影响更强. 这是由于蝠鲞外形呈现背部隆起, 腹部平坦, 并非完全关于  $XOY$  平面对称, 因此跟随蝠鲞处于领航蝠鲞上方或下方时所受尾涡作用强度也不同. 生物天性趋利避害, 因此在自然界中真实蝠鲞更喜欢采用前上后下的交错队形进行游动, 如图 1 所示.

从图 10(b) 可看出, 效率曲线随流向间距变化趋势与推力曲线相似. 当  $D_x \leq 0.2BL$  时, 领航蝠鲞推进效率低于单体, 垂向排布 ( $D_x = 0$ ) 下效率下降最大达 62.6%; 随着流向间距增大, 领航蝠鲞推进效率呈现出先增后减的趋势, 当  $D_x = 0.3BL$  时, 提升最大达 3.58%, 当  $D_x \geq 0.5BL$  时, 领航蝠鲞推进效率基本同单体游动保持一致. 当  $D_x \leq 0.3BL$  时, 跟随蝠鲞推进效率低于单体, 随着流向间距增加, 跟随蝠鲞推进效率曲线出现波动性, 当  $D_x = 0.5BL$  时, 提升最大达 12.39%, 当  $D_x \geq 0.7BL$  时, 跟随蝠鲞推进效率基本低于单体游动. 集群系统推进效率随流向间距同样呈波动性变化, 当  $D_x = 0.4BL$  时, 提升最大达 6.77%.

#### 4.2 流场特性

由图 10 可看出, 蝠鲞集群在流向间距为  $0.4BL$  和  $0.8BL$  时取得推进性能极值, 本节将结合全局三维涡结构和特征截面二维涡结构对其进行解释.

为便于对比单体游动和集群游动流场结构差异性, 首先在图 11 中显示了蝠鲞单体游动时不同视角下的三维涡结构、特征截面定义以及特征截面二维涡结构. 图 11(a), (b) 展示了蝠鲞单体游动状态下三维涡结构的俯视图及侧视图, 采用  $Q$  准则对三维涡结构进行识别, 其中  $Q = 90$ . 图 11(c) 对特征截面进行定义, 将距离蝠鲞尾部  $0.15BL$  处命

名为 Slide- $x$ , 将蝠鲼胸鳍 0.8SL 处命名为 Slide- $y$ , 将蝠鲼中截面命名为 Slide- $z$ . 图 8(d)–(f) 则分别展示了 3 个特征截面处的二维涡结构 ( $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ ). 值得注意的是, 后续蝠鲼集群游动状态下  $Q$  取值以及特征截面涡结构取值范围同此时保持一致.

将  $D_x = 0.4BL$  时集群流场结构绘制在图 12 中, 图 12(a)–(c) 分别展示了三维涡结构以及特征截面的  $\omega_x, \omega_z$ . 从图 11(b) 可看出蝠鲼游动过程中, 尾涡呈正弦轨迹向后传播, 因此当两蝠鲼在交错队形下集群游动时, 位于上前方的领航蝠鲼尾涡在沿流向传播过程中恰巧汇入跟随蝠鲼尾涡, 但尾涡交汇位置对两蝠鲼推进性能产生重要影响, 尤其是对跟随蝠鲼. 从图 12(a) 可看出, 当  $D_x = 0.4BL$  时, 领航蝠鲼尾涡越过跟随蝠鲼前缘和后缘涡直接汇入其初始脱落的鳍尖涡, 大幅提升了跟随蝠鲼鳍尖涡强度, 势必带来跟随蝠鲼推进性能大幅提升, 这与图 10 相契合 (由文献 [24] 可知, 蝠鲼 3 种涡结构中仅有鳍尖涡对其推进性能起积极作用). 与此同时, 跟随蝠鲼尾涡在向上传播 ( $z$  轴) 过程中也加强了领航蝠鲼鳍尖涡能量, 且两蝠鲼尾涡沿流向传播距离相比于单体有明显提升, 因此在此间距下两蝠鲼推进性能均明显提升.

对比图 11(d) 和图 12(b) 可看出, 在此间距下, 领航蝠鲼上方弦向涡强度显著提升, 下方弦向涡强度稍有提升, 但涡结构完整性提升, 碎涡数量减少.

跟随蝠鲼上下两侧弦向涡能量均大幅提升, 涡结构完整性相比于领航蝠鲼进一步提升, 这有助于旋涡在沿流向传播过程中能量长时保存, 不易消散, 有利于提升推进性能.

对比垂向涡结构可看出 (图 11(f)、图 12(c)), 领航蝠鲼初始脱落鳍尖涡能量同单体保持一致, 但沿流向传播过程中由于受到跟随蝠鲼尾涡影响, 能量提升, 但碎涡数量同样提升, 且在沿流向继续传播过程中, 碎涡数量进一步增加, 且两侧旋涡向中轴扩散, 旋涡间发生干扰, 导致推进性能提升效果的下降. 领航蝠鲼垂向涡越过跟随蝠鲼前缘, 促进跟随蝠鲼鳍尖涡脱落, 提高了初始脱落旋涡能量, 使其以高能量涡团形式沿流向传播, 且在远场处并未发现涡间干扰现象, 因此跟随蝠鲼推进性能大幅提升.

同之前一样, 将  $D_x = 0.8BL$  时集群流场结构绘制在图 13 中. 从图 13(a) 可看出, 随着流向间距增大, 领航蝠鲼近场高能尾涡几乎不再受到跟随蝠鲼影响, 仅远场低能尾涡能量稍有提升, 因此其推进性能也稍有提升. 但此时, 领航蝠鲼高能尾涡直接作用在跟随蝠鲼前缘, 增强了跟随蝠鲼前缘涡能量, 破坏了跟随蝠鲼初始脱落鳍尖涡完整结构, 导致流场中碎涡数量提升, 从而旋涡沿流向传播过程中消散速度加快, 因此其推进性能大幅下降.

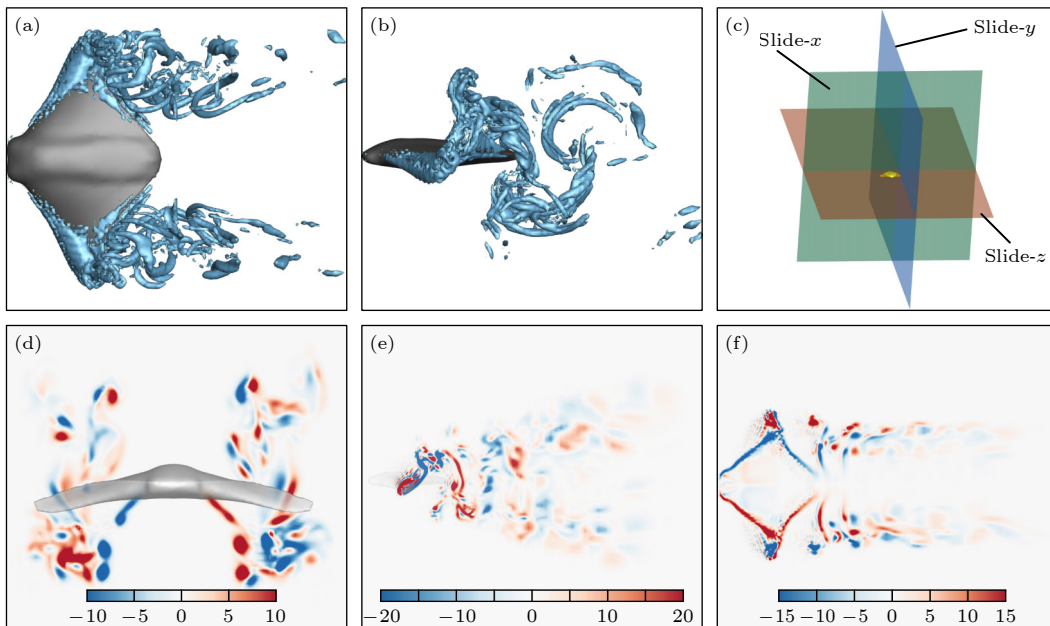


图 11 蝠鲼单体游动状态流场结构及特征截面定义

Fig. 11. Wake structure and the definition of characteristic cross sections for the single swimming state of manta rays.

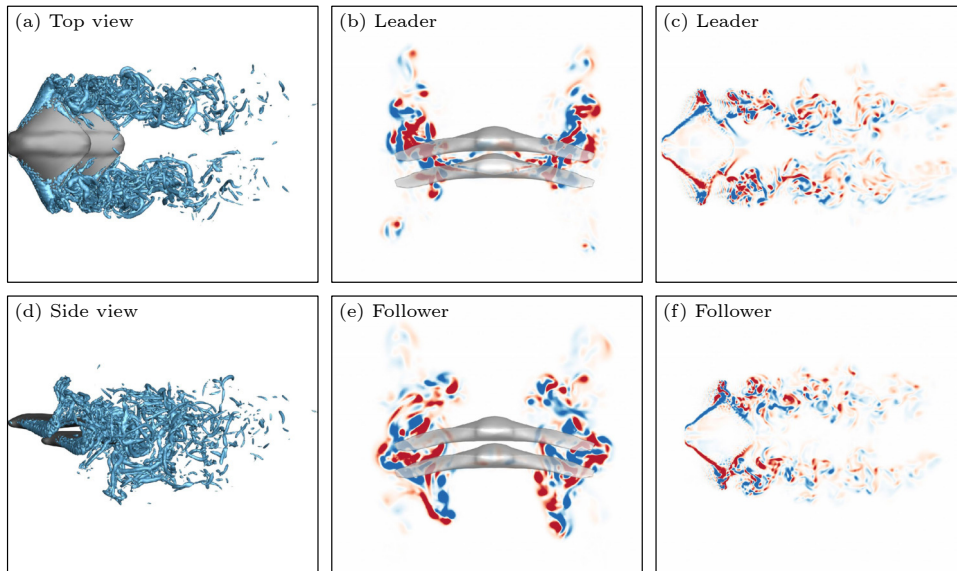


图 12 蝠鲼交错排布集群游动时流场结构 ( $D_x = 0.4BL$ )

Fig. 12. Wake structures of manta rays during swimming in staggered arranged group ( $D_x = 0.4BL$ ).

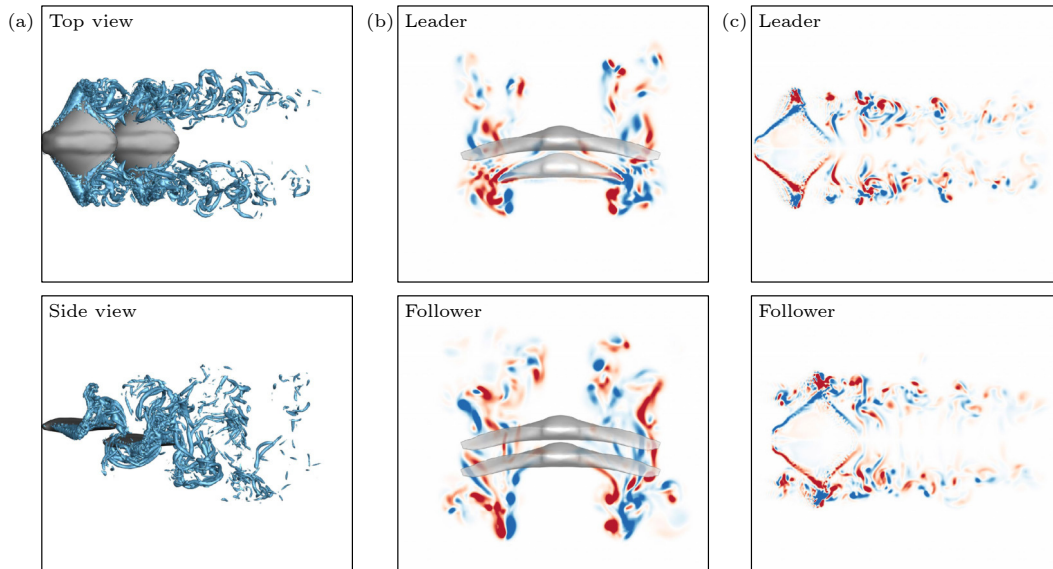


图 13 蝠鲼交错排布集群游动时流场结构 ( $D_x = 0.8BL$ )

Fig. 13. Wake structures of manta rays during swimming in staggered arranged group ( $D_x = 0.8BL$ ).

从图 13(b) 可看出, 领航蝠鲼上方弦向涡强度相比于单体游动稍有提升, 下方弦向涡强度同单体游动相似, 因此其推进性能相比于单体游动略微提升. 跟随蝠鲼弦向涡强度同单体游动相似, 但其旋涡完整性遭到破坏, 且两侧旋涡向中轴扩散, 产生涡间干扰, 因此其推进性能大幅下降. 从图 13(c) 可看出, 领航蝠鲼垂向涡沿流向传播距离相比于单体游动明显提升, 流场结构演变规律同单体相似, 因此其推进性能有所提升. 跟随蝠鲼前缘由于受到领航蝠鲼尾涡影响产生大量碎涡, 碎涡沿流向传播

在跟随蝠鲼鳍尖处堆积, 不利于鳍尖涡脱落且破坏了初始脱落鳍尖涡完整结构, 导致初始脱落鳍尖涡能量降低, 因此在沿流向传播过程中快速消散, 导致其推进性能下降.

## 5 结 论

本文首先建立了蝠鲼形态学及运动学模型, 随后借助 IB-SGKS 方法对交错排布的双蝠鲼集群游动状态进行了数值模拟, 获得了推力系数、效率曲

线,并结合全局三维涡结构和特征截面二维涡结构进行分析,得到了如下有益结论:

1) 当  $0 \leq D_x \leq 0.2BL$  时,集群中两蝠鲼推进性能均大幅下降;随着流向间距略微增加,领航蝠鲼推进性能始终优于单体游动,当  $D_x = 0.4BL$  时推力提升最大达 11.24%,当  $D_x = 0.3BL$  时,效率提升最大达 3.58%,跟随蝠鲼推力/效率曲线出现波动性,当  $D_x = 0.4BL$  时推力提升最大达 48.14%,当  $D_x = 0.5BL$  时,效率提升最大达 12.39%

2) 当  $0.3BL \leq D_x \leq 0.6BL$  时,系统推进性能得到提升,且当  $D_x = 0.4BL$  时提升最大,平均推力和效率分别提升 29.69% 和 6.77%,这是由于领航蝠鲼尾涡恰好越过跟随蝠鲼前缘作用在跟随蝠鲼初始脱落鳍尖涡处,大幅提升其旋涡能量.

3) 随着流向间距进一步增加,当  $D_x \geq 0.5BL$  时,领航蝠鲼推进性能基本同单体游动保持一致,初步估计当  $D_x \geq 2BL$  时,领航蝠鲼尾涡将不再影响跟随蝠鲼,跟随蝠鲼推进性能将接近单体游动状态.

4) 双蝠鲼在“前上后下”交错队形下集群游动时推进性能随流向间距的变化规律同“前下后方”队形相似,但“前上后下”队形中两蝠鲼涡结构相互作用更强,在相同间距下 ( $D_x = 0.4BL$ ) 推进性能提升也更大,也是蝠鲼生物广泛选用的一种排布方式.

## 参考文献

- [1] Walker J A, Westneat M W 1997 *J. Exp. Biol.* **200** 1549
- [2] Borazjani I, Sotiropoulos F, Tytell E D, Lauder G V 2012 *J. Exp. Biol.* **215** 671
- [3] Wohl S, Schuster S 2007 *J. Exp. Biol.* **210** 311
- [4] Li L, Ravi S, Xie G, Couzin I D 2021 *Proc. R. Soc. A-Math. Phys. Eng. Sci.* **477** 20200810
- [5] Weihs D 1973 *Nature* **241** 290
- [6] Chen S Y, Fei Y H J, Chen Y C, Chi K J, Yang J T 2016 *Ocean Eng.* **122** 22
- [7] Wei C, Hu Q, Li S J, Shi X D 2023 *Ocean Eng.* **267** 113258
- [8] Tian F B, Luo H, Zhu L, Liao J C, Lu X Y 2011 *J. Comput. Phys.* **230** 7266
- [9] Tian F B, Wang W, Wu J, Sui Y 2016 *Comput. Fluids* **124** 1
- [10] Li Y F, Chang J T, Kong C, Bao W 2022 *Chin. J. Aeronaut.* **35** 14
- [11] Wang L 2007 *Ph. D. Dissertation* (Nanjing: Hehai University) (in Chinese) [王亮 2007 博士学位论文 (南京: 河海大学)]
- [12] Jian D, Shao X M 2006 *J. Hydrodyn.* **18** 438
- [13] Chung M H 2011 *J. Mech.* **27** 177
- [14] Dai L Z, He G W, Zhang X, Zhang X 2018 *J. R. Soc. Interface* **15** 20180490
- [15] Chao L M, Zhang D, Cao Y H, Pan G 2018 *Mod. Phys. Lett. B* **32** 1850034
- [16] Chao L M, Pan G, Zhang D, Yan G X 2019 *Ocean Eng.* **183** 167
- [17] Li X H, Gu J Y, Su Z, Yao Z Q 2021 *Phys. Fluids* **33** 121905
- [18] Gao P C, Liu G S, Huang Q G, Pan G, Ma Y L 2023 *Chin. J. Theor. Appl. Mech.* **55** 62 (in Chinese) [高鹏骋, 刘冠杉, 黄桥高, 潘光, 马云龙 2023 力学学报 **55** 62]
- [19] Gao P C, Huang Q G, Song D, Pan G, Ma Y L 2023 *Journal of Northwestern Polytechnical University* **41** 595 (in Chinese) [高鹏骋, 黄桥高, 宋东, 潘光, 马云龙 2023 西北工业大学学报 **41** 595]
- [20] Gao P C, Huang Q G, Pan G, Ma Y L, Song D 2022 *Phys. Fluids* **34** 111908
- [21] Gao P C, Huang Q G, Pan G, Cao Y, Luo Y 2023 *Ocean Eng.* **278** 114389
- [22] Gao P C, Huang Q G, Pan G, Song D, Cao Y 2023 *Phys. Fluids* **35** 061909
- [23] Zhang D 2020 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Northwestern Polytechnical University) (in Chinese) [张栋 2020 博士学位论文 (西安: 西北工业大学)]
- [24] Zhang D, Huang Q G, Pan G, Yang L M, Huang W X 2022 *J. Fluid Mech.* **930** A28
- [25] Zhang D, Huang W X 2023 *J. Fluid Mech.* **963** A16
- [26] Taira K, Colonius T 2007 *J. Comput. Phys.* **225** 2118
- [27] Yang L M, Shu C, Wu J 2015 *J. Comput. Phys.* **295** 322
- [28] Yang L M, Shu C, Wang Y, Sun Y 2016 *J. Comput. Phys.* **319** 129
- [29] Yang L M, Shu C, Yang W M, Wang Y, Wu J 2017 *Phys. Fluids* **29** 083605
- [30] Zhang J D, Sung H J, Huang W X 2020 *Phys. Fluids* **32** 111902
- [31] Han P, Pan Y, Liu G, Dong H B 2022 *J. Fluids Struct.* **108** 103422
- [32] Gao P C, Tian X S, Huang Q G, Pan G 2024 *Phys. Fluids* **36** 0180621

# Hydrodynamic performance of manta rays swimming in staggered arranged group\*

Gao Peng-Cheng<sup>1)2)#</sup> Tian Xu-Shun<sup>1)2)#</sup> Huang Qiao-Gao<sup>1)2)†</sup>  
Pan Guang<sup>1)2)</sup> Chu Yong<sup>1)2)</sup>

1) (*School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China*)

2) (*Unmanned Vehicle Innovation Center, Ningbo Institute of Northwestern Polytechnical University, Ningbo 315048, China*)

( Received 20 March 2024; revised manuscript received 28 April 2024 )

## Abstract

To investigate the hydrodynamic performance of manta rays swimming in staggered arranged group, a morphological and kinematic model of manta rays is developed based on biological observations, and then a numerical calculation method is established for group swimming of manta rays based on the Immersed Boundary Method and the Sphere function-based Gas Kinetic Scheme (IB-SGKS). The group swimming of two manta rays with a fixed vertical spacing of 0.1 times the body thickness, and a flow direction spacing of 0–1.5 times the body length is systematically investigated. The average thrust/efficiency of the group system and each individual in the group are analyzed by combining the global three-dimensional (3D) vortex structure and the characteristic cross-section two-dimensional (2D) vortex structure. The numerical results are shown below. When the streamwise spacing between individuals is small, the propulsive performance decreases sharply compared with swimming alone; as the streamwise spacing increases, the propulsive performance of the leader manta ray is consistently better than that of swimming alone, with the maximum thrust enhanced up to 11.24% when  $D_x = 0.4BL$ , and the maximum efficiency is enhanced up to 3.58% when  $D_x = 0.3BL$ ; with the increase of the streamwise spacing, in the thrust/efficiency curves of the follower manta ray appears volatility, with the maximum thrust enhanced to 48.14% when  $D_x = 0.4BL$  and the maximum efficiency reached to 12.39% when  $D_x = 0.5BL$ ; the system average thrust and efficiency enhancement both reach their corresponding maximum values, specifically, 29.69% and 6.77%, when  $D_x = 0.4BL$ , which is because the tail vortex of the leading manta ray just passes through the front edge of the follower manta ray and directly acts on the tip vortex that initially falls off from the follower manta rays, thus substantially increasing their vortex energy.

**Keywords:** manta rays, group swimming, staggered arrangement, hydrodynamic performance, vortex structure

**PACS:** 47.63.-b, 47.85.lb

**DOI:** [10.7498/aps.73.20240399](https://doi.org/10.7498/aps.73.20240399)

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 52201381, 52371338) and the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2022YFC2805200).

# These authors contributed equally.

† Corresponding author. E-mail: [huangqiaogao@nwpu.edu.cn](mailto:huangqiaogao@nwpu.edu.cn)

## 蝠鲼交错排布集群游动水动力性能

高鹏骋 田徐顺 黄桥高 潘光 褚勇

### Hydrodynamic performance of manta rays swimming in staggered arranged group

Gao Peng-Cheng Tian Xu-Shun Huang Qiao-Gao Pan Guang Chu Yong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 134702 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240399

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240399>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 超声速混合层涡结构内部流体的密度分布特性

Density distribution characteristics of fluid inside vortex in supersonic mixing layer

物理学报. 2020, 69(14): 144701 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200255>

#### 交错跃迁Hofstadter梯子的量子流相

Current phases in Hofstadter ladder with staggered hopping

物理学报. 2020, 69(8): 080501 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191964>

#### 计入粗糙峰的微纳结构表面水润滑流体动力学仿真

Fluid dynamics simulation on water lubricating performance of micro-/nano-textured surfaces considering roughness structures

物理学报. 2024, 73(11): 114601 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240333>

#### 基于直角网格法的单个和阵列布置下柔性水翼绕流数值模拟

Numerical simulation of flows around single and multiple flexible hydrofoils in array arrangement by a Cartesian grid method

物理学报. 2020, 69(4): 044702 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191711>

#### 流动隐身衣的均匀化设计与减阻特性

Homogenization design and drag reduction characteristics of hydrodynamic cloaks

物理学报. 2022, 71(13): 134703 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20220346>

#### ITER 第一类边界局域模对排布位错偏滤器靶板钨/铜瓦片腐蚀程度的数值模拟

Numerical simulation of erosion of misaligned W/Cu monoblocks caused by ITER-like type-I edge localized modes

物理学报. 2023, 72(18): 185202 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230281>