

头鳍姿态对蝠鲼滑翔水动力性能影响*

黄桥高¹⁾²⁾ 王明东¹⁾ 潘光¹⁾²⁾ 高鹏骋^{1)†} 罗扬¹⁾²⁾ 褚勇¹⁾ 李鑫¹⁾

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, 浙江“全省自主仿生水下机器人”重点实验室,
宁波 315103)

摘要

为填补蝠鲼滑翔过程中头鳍姿态对其水动力性能影响的研究空白, 本文首先根据生物观测构建四种不同头鳍姿态的形态学模型, 基于浸入边界法和球函数气体动理学格式(IB-SGKS)的数值计算方法, 开展 $-20^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 攻角范围内9种攻角状态的数值计算, 结合三维涡结构及特征截面压力云图等, 对比分析不同头鳍姿态下蝠鲼滑翔阻力系数、升力系数及升阻比参数的变化规律, 揭示头鳍姿态对滑翔水动力性能的影响机制。结果表明, 头鳍姿态变化对升力作用微弱, 升阻比的变化主要源于阻力差异; 头鳍姿态通过两种不同机理影响阻力大小: 攻角小于 10° 时头鳍姿态对阻力影响显著, 卷曲姿态未出现涡脱引起的尾部低压区后移及外形导致的头部高低压区融合, 具有最优的减阻效果; 当攻角大于 10° 时, 四种头鳍姿态均未引起尾部低压区后移, 滑翔阻力变化受头部高压区隔断及低压区扩张的共同作用, 变化较小。本研究为仿蝠鲼潜水器滑翔性能优化及执行机构多场景作业性能提升提供了新思路与理论指导。

关键词: 蝠鲼, 头鳍姿态, 水动力性能, 涡结构

PACS: 47.63.-b, 47.85.1b

基金: 中央高校青年教师科研创新能力支持项目、国家重点研发计划项目

(2022YFC2805200)、博士后创新人才支持计划(BX20250494)和中国博士后科学基金面上资助(2025M774366)。

同等贡献作者。

† 通信作者.E-mail: gaopengcheng@nwpu.edu.cn

第一作者.E-mail: huangqiaogao@nwpu.edu.cn

1 引言

海洋蕴藏着丰富的资源，对其探索与开发依赖于先进的水下作业平台，无人水下航行器（Unmanned Underwater Vehicle, UUV）凭借其低成本、高自持、长续航与低风险等优势^[1]，已成为海洋环境观测及水下作业等领域的关键装备^[2]。但环境扰动大、推进效率低的问题制约了 UUV 在复杂海洋环境中的进一步应用，而鱼类的推进方式兼具高效性、高机动性、高隐蔽性的特点^[3]，为破解传统技术瓶颈提供了参考。受此启发，研究人员通过模仿鱼类外形及运动特征，开展了各类仿生潜水器的研究^[4-9]。

根据鱼类推进部位的不同，可将鱼类推进模式分为两种类型，即身体/尾鳍（Body and/or caudal fin, BCF）和中鳍/对鳍（Median and/or paired fin, MPF）模式，BCF 模式主要借助鱼身体波动或尾鳍摆动产生推力，MPF 模式则通过胸鳍或对鳍的运动产生推力。蝠鲼作为一种典型的 MPF 模式鱼类，它独特的扁平身体赋予其大载荷空间与优异的滑翔升阻比，是一种理想的仿生原型^[10]。Marshall 等^[11]完成了双吻前口蝠鲼（*Mobula birostris*）和珊瑚礁蝠鲼（*Mobula alfredi*）外形参数的测量，明确了其体长、体盘宽、头鳍形态等关键结构的尺寸比例特征，为蝠鲼数值计算模型构建提供了形态学基础。目前，研究人员通过数值模拟对蝠鲼水动力性能展开了大量研究。Menzer 等^[12, 13]采用关节骨骼结构驱动多边形表面网格的方法构建了包含附鳍的蝠鲼模型，计算分析胸鳍扑动参数对水动力性能影响；Wang 等^[14]基于牛鼻蝠鲼模型^[15]模拟不同弓形角与攻角组合下的滑翔过程，发现胸鳍向上变形能有效降低滑翔阻力并具有更高的升阻比；Xu 等^[16]研究不同胸鳍刚度被动变形对蝠鲼滑翔的水动力学性能影响，结果表明，胸鳍的被动变形能够稳定滑翔运动，会增加阻力与升力，同时减小俯仰力矩；Gao 等^[17, 18]对串联、三角、钻石等排布下蝠鲼集群滑翔的计算结果表明，群体滑翔时攻角和间距对个体和系统的水动力性能影响显著，阻力主要受压力分布的影响。

上述研究揭示了蝠鲼胸鳍对水动力性能的影响规律，但忽视了头鳍的贡献。目前针对头鳍的研究多通过生物学观测方法，探究其在摄食^[19, 20]、求偶^[21]、互动^[22]等过程中的作用，而关于头鳍水动力作用的研究仍停留在推测和简化验证阶段。生物学观测中，Giuseppe 等^[23]发现，蝠鲼头鳍会出现展开、卷曲等姿态；Ari 等^[24]在蝠鲼觅食行为研究时，将头鳍姿态作为摄食意愿的评价指标，摄食时蝠鲼头鳍多呈环抱姿态，而头鳍卷曲姿态对应低摄食意愿；Perryman 等^[25]研究蝠鲼头鳍在不同社交情境下的姿态时发现，头鳍存在复杂多变的姿态，并推测头鳍的卷曲可能有助于减小游动阻力，然而该推测尚未得到水动力学验证。水动力计算方

面, Zhao 等^[26]将蝠鲼简化为柔性平板, 头鳍简化为刚性平板, 通过施加垂向简谐振荡实现蝠鲼自推进运动, 考察了头鳍间距对推进性能的影响。结果表明, 头鳍可生成流向涡结构, 诱导负压分布, 使平均巡航速度提升 62.8%。

综上所述, 对蝠鲼头鳍的研究仍存在明显不足: (1) 模型失真, 多数研究忽略蝠鲼头鳍或将头鳍简化为二维刚性平板, 未能反映头鳍的三维形态; (2) 计算降维, 现有头鳍研究基于二维简化模型开展, 难以通过三维数值模拟对头鳍引发的流场变化进行准确描述, 导致对头鳍作用机理的认识尚不充分; (3) 姿态缺失, 现有研究未涉及头鳍在生物观测中出现的姿态变化, 而头鳍位于蝠鲼最前端的迎流区域, 其姿态变化对水动力性能的影响规律尚未明确, 生物在不同场景下选择特定姿态的水动力学原理亦有待揭示。

为弥补上述不足, 本文首次构建不同头鳍姿态的三维形态学模型, 区别于现有仅关注胸鳍姿态的滑翔研究, 将头鳍姿态作为研究重点, 采用 IB-SGKS 数值计算方法, 系统研究不同头鳍姿态对蝠鲼滑翔水动力性能的影响, 旨在阐明头鳍姿态影响滑翔性能的机制, 为仿蝠鲼潜水器的滑翔姿态调节提供依据, 为参考头鳍设计的执行机构提供理论指导。本文在第 2 节给出形态学模型并完成数值计算方法验证; 第 3 节完成网格无关性及时间步长无关性验证; 第 4 节对比分析不同头鳍姿态的水动力性能, 并结合涡结构等分析其机理; 第 5 节给出本研究的总结与展望。

2 数值计算方法

2.1 仿真模型设置

基于对蝠鲼的生物学观测, 其头鳍在巡游、摄食等行为中常保持一定姿态持续一段时间^[25], 参考图1的四种头鳍姿态作为本文的研究对象: (1) 环抱姿态: 左右两侧头鳍对称的向身体中轴线靠拢, 头鳍尖端相接近; (2) 展开姿态: 头鳍以根部为轴向从环抱姿态外侧张开, 并向斜下方伸展, 与水平面形成一定夹角; (3) 外翻姿态: 在展开姿态基础上, 头鳍尖端进一步向远离身体中轴线的方向翻折, 呈现外扩形态; (4) 卷曲姿态: 头鳍尖端继续翻折收紧, 形成柱状并保持向正前方伸直。上述四种姿态涵盖了蝠鲼头鳍的主要空间构型, 为系统研究头鳍姿态对滑翔水动力性能的影响提供了建模基础。

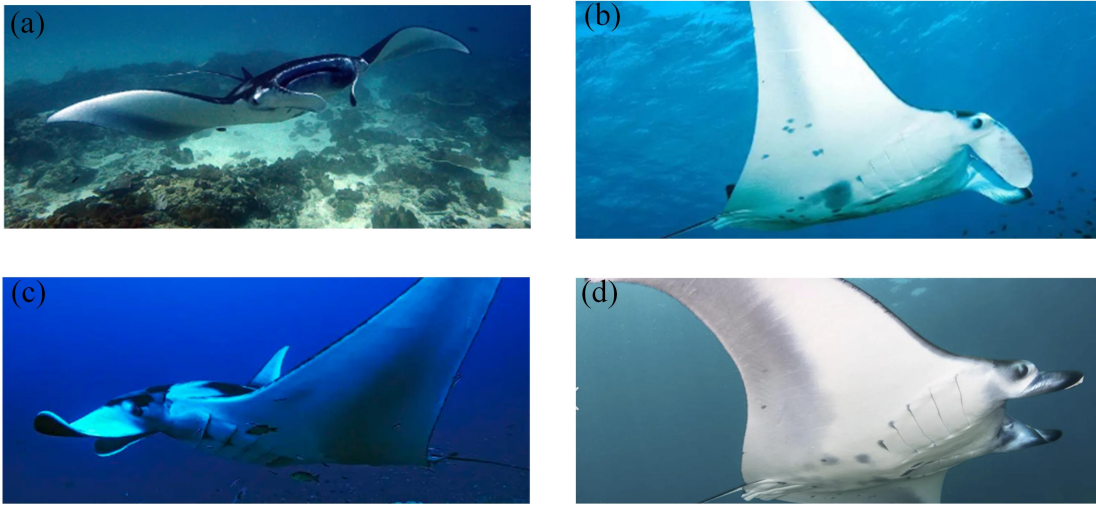


图1 蝠鲼头鳍姿态 (a) 环抱姿态; (b) 展开姿态; (c) 外翻姿态; (d) 卷曲姿态
 Fig. 1. Manta ray cephalic fin postures: (a) embracing posture; (b) spreading posture; (c) outwardly turned posture; (d) curling posture.

针对上述四种蝠鲼头鳍常见姿态, 本文构建四个仿真模型, 各模型间除头鳍区域外, 其余区域均保证一致, 计算模型如图2所示, 图2(a)为环抱姿态、图2(b)为展开姿态、图2(c)为外翻姿态、图2(d)为卷曲姿态。在本文所有建模中进行下列简化: 不考虑由于生物生长发育等因素导致的左右头鳍不对称的情况, 仅针对两侧头鳍对称姿态展开建模与计算分析。

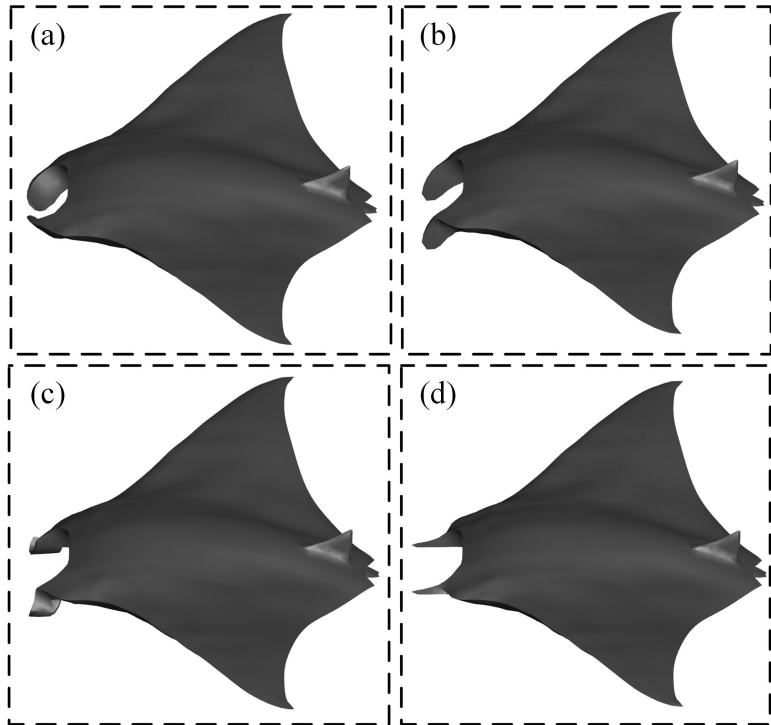


图2 不同头鳍姿态计算模型 (a) 环抱姿态; (b) 展开姿态; (c) 外翻姿态; (d) 卷曲姿态
 Fig. 2. Different calculating models for cephalic fin postures: (a) embracing posture; (b) spreading posture; (c) outwardly turned posture; (d) curling posture.

以头鳍环抱姿态展示该模型尺寸, 其各区域尺寸定义如图3(a)所示: 体长

$BL=1130\text{mm}$ ，展长 $SL=1240\text{mm}$ ，头鳍长 $CL=200\text{mm}$ 。定义攻角 α 为蝠鲼中心轴线与水平线的夹角，当蝠鲼中心轴线位于水平线上方时，如图 3(b)所示，攻角为负值，当蝠鲼中心轴线位于水平线下方时攻角为正值。定义贴体的局部坐标系 x_0y_0 ， $y_0=0SL$ 的截面为中轴面， $x_0=0BL$ 的截面为头轴面，如图 3(c)所示。

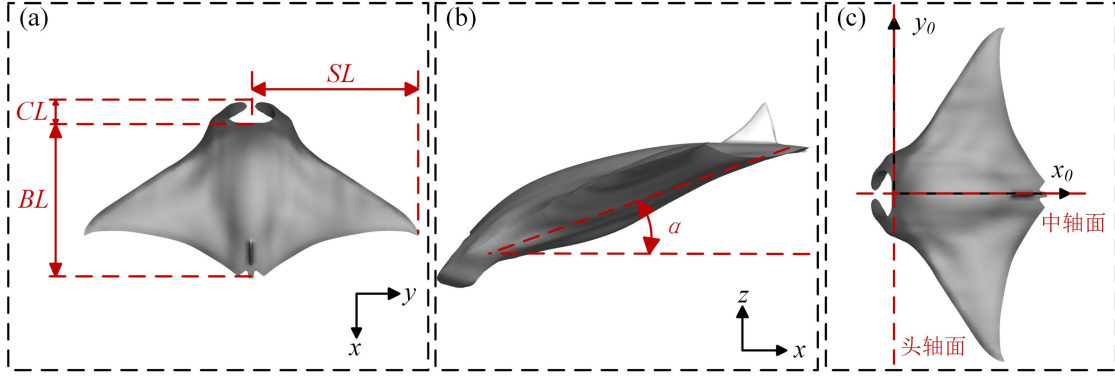


图 3 计算模型参数定义 (a) 尺寸定义；(b) 攻角定义；(c) 局部坐标系定义

Fig. 3. Definition of calculation model parameters: (a) size definition; (b) definition of angle of attack; (c) definition of local coordinate system.

2.2 数值计算方法

本文旨在系统研究四种不同头鳍姿态对蝠鲼滑翔水动力性能的影响，若采用贴体网格进行数值计算，针对每一种姿态均需重新构建几何边界并生成计算网格，过程繁琐且效率低下。浸入边界法 (Immersed Boundary Method, IBM) 作为一种虚拟边界处理方法，被广泛应用于生物游动模拟^[27-29]。因此本文采用 IBM 方法作为数值计算方法展开研究。

该方法在计算过程中采用两套网格：整个计算域由均匀笛卡尔网格离散，同时使用拉格朗日点构成面网格来表征浸入流体中的固体边界。IBM 方法的核心思想在于，流体区域贯穿固体边界及其内部所占据的全部空间，固体边界对流动的影响通过在 Navier-Stokes 方程中增加力源项来体现，从而保证浸没边界处满足无滑移条件。基于 IBM 改写的 NS 方程可表示为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u} + p \mathbf{I}) = \nu \nabla \cdot [\nabla (\rho \mathbf{u}) + \nabla (\rho \mathbf{u})^T] + \mathbf{f} \quad (2)$$

其中， ρ 、 \mathbf{u} 、 p 和 ν 分别为流体的密度、速度、压力和运动粘度。 \mathbf{I} 是单位张量， \mathbf{f} 是由 IBM 确定的力源项。

浸入边界法需要一个合适的求解方法，本文采用基于球函数的气体动理学格式 (Sphere function-based Gas Kinetic Scheme, SGKS) 进行求解，通过有限体积法

(Finite Volume Method, FVM)对控制方程进行离散化, 局部求解玻尔兹曼方程完成通量计算, 并采用共轭梯度法(Conjugate Gradient, CG)求解线性方程组^[30, 31]。

2.3 水动力参数定义

将蝠鲮滑翔过程中的受力无量纲化:

$$C_{l,d} = \frac{F_{l,d}}{0.5\rho U^2 BL^2} \quad (3)$$

式中, $C_{l,d}$ 为升力系数、阻力系数, $F_{l,d}$ 为升力、阻力, ρ 为密度, U 为入口速度, BL 为体长。定义升阻比为升力系数与阻力系数的比值, 即 C_l / C_d 。

将蝠鲮滑翔过程中的压力系数定义为:

$$C_p = \frac{p - p_{in}}{0.5\rho U^2} \quad (4)$$

其中 p_{in} 是自由流压力^[32]。

2.4 数值计算方法验证

为检验本数值计算方法的可行性和可靠性, 本文通过经典圆球绕流算例对该计算方法及三维求解器进行验证, 在验证中, 雷诺数定义为 $Re = UD/\nu$, 其中 U 为来流速度, D 为圆球直径。计算域设置为 $20D \times 20D \times 20D$, 均匀加密区域大小为 $1.3D \times 1.3D \times 1.3D$, 加密区域网格尺寸为 $0.025D$, 计算域设置及网格细节展示如图 4 所示。在 $Re=100$ 、 250 时计算圆球所受阻力系数, 其计算公式为:

$$C_d = \frac{F_x}{0.5\rho U^2 S} \quad (5)$$

式中, S 为圆球投影面积, $S = \pi D^2/4$ 。将本方法计算结果与文献中结果进行对比, 误差通过本文计算结果与文献结果对比获得, 如表 1 所示, 当 $Re=100$ 时, 本文计算结果与文献结果最大相差 1.35%, 当 $Re=250$ 时, 本文计算结果与文献结果最大相差 2.14%。

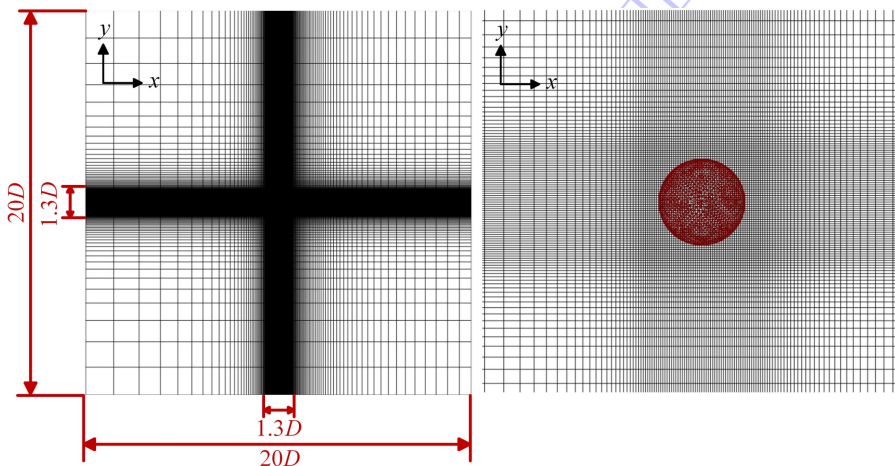


图4 数值计算方法验证设置图

Fig. 4. Setting diagrams for the verification of numerical calculation method.

表1 圆球绕流阻力系数计算结果对比

Table 1. Comparison of calculation results for the drag coefficient of circular sphere flow.

	$Re=100$	误差	$Re=250$	误差
Yang ^[31]	1.130	0.62%	0.723	0.97%
Brown D L ^[33]	1.112	0.99%	---	---
Wang ^[34]	1.108	1.35%	0.746	2.14%
IB-LBFS ^[35]	1.128	0.44%	0.722	1.11%
本文	1.123	---	0.730	---

3 网格无关性及时间步长验证

3.1 网格无关性验证

本文采用的四个蝠鲼模型表面网格均采用非结构化网格划分方法，通过 Ansys Fluent Meshing 软件生成，网格类型选择三角形，保证其可以捕捉蝠鲼表面特征，并将表面网格保存为三维坐标点格式供数值计算方法读取。将计算域设置为矩形计算域，其尺寸为 $26.6BL \times 26.6BL \times 26.6BL$ ，均匀加密区整体尺寸为 $2.66BL \times 2.66BL \times 1.77BL$ ，保证所有边界距离蝠鲼中心大于 $10BL$ 。边界条件设置为速度入口，其他边界采用零梯度条件。选取 $0.018BL$ 、 $0.016BL$ 、 $0.014BL$ 的三种加密区网格尺寸进行网格无关性验证，其网格总量分别为：670W、853W、1145W，选取加密区网格尺寸为 $0.016BL$ 的网格细节展示如图5所示。

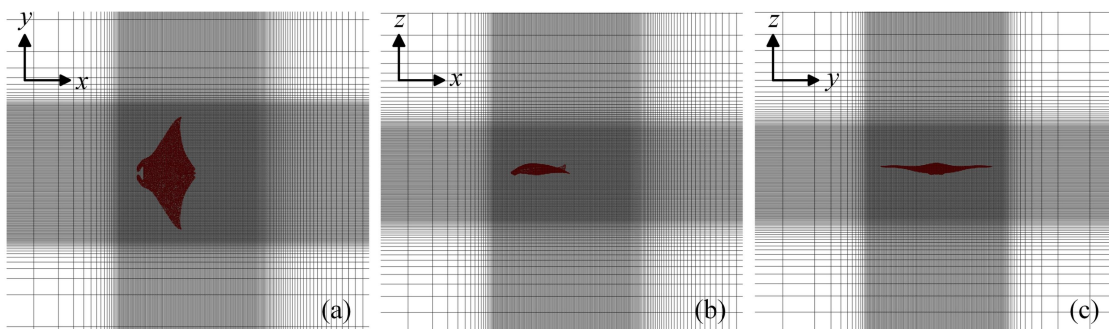


图5 加密区网格细节图 (a) 俯视图; (b) 侧视图; (c) 前视图

Fig. 5. Detail diagrams of the refined region grid: (a) top view; (b) side view; (c) front view.

计算了三种加密区网格尺寸下头鳍环抱姿态蝠鲼在 0° 攻角时的阻力系数及其误差，误差通过当前网格结果与细网格计算结果对比获得，如表2所示。中等网格尺寸的计算结果已经达到网格无关性要求，为了节约计算资源并且保证计算效率，在后续计算中采用 $0.016BL$ 的加密区网格尺寸。

表2 不同加密区网格尺寸计算结果对比

Table 2. Comparison of calculation results for different grid sizes in refined region.

网格尺寸	阻力系数 C_d	阻力系数误差
粗网格	0.2260532	3.72%
中网格	0.2200511	0.97%
细网格	0.2179388	---

3.2 时间步长无关性验证

进一步开展了时间步长无关性验证，选择 $\Delta t = 0.3899\text{ms}$ ($CFL=0.4$)、 $\Delta t = 0.4873\text{ms}$ ($CFL=0.5$) 及 $\Delta t = 0.5848\text{ms}$ ($CFL=0.6$) 三种时间步长，计算头鳍环抱姿态下蝠鲼的阻力系数及误差，误差通过当前时间步长与 $CFL=0.4$ 的计算结果对比获得，如表 3 所示。结果表明， $CFL=0.5$ 的计算结果已经达到时间步长无关性要求，为保证计算效率，在后续计算中采用 $\Delta t = 0.4873\text{ms}$ ($CFL=0.5$) 的时间步长开展计算。

表 3 不同时间步长计算结果对比

Table 3. Comparison of calculation results for different time steps.

CFL	阻力系数 C_d	阻力系数误差
0.6	0.2202043	0.08%
0.5	0.2200511	0.01%
0.4	0.2200283	---

4 数值计算结果与分析

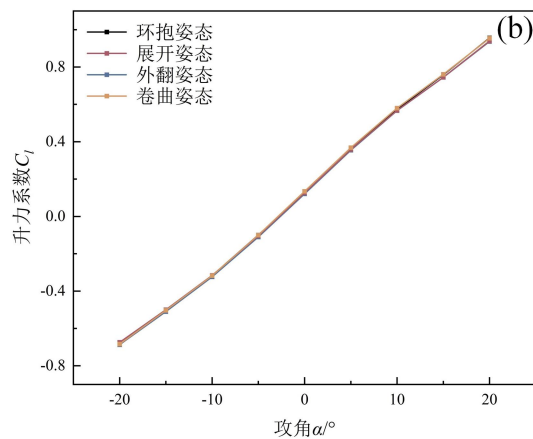
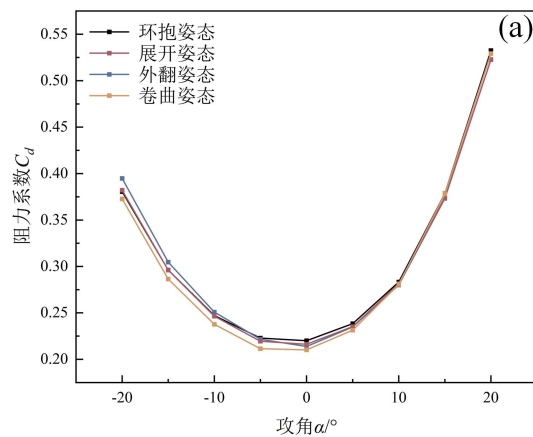
本节首先总结在不同头鳍姿态下，蝠鲼阻力系数、升力系数、升阻比随攻角的变化规律，进而结合三维涡结构、压力云图及展向涡量等流场信息进行对比分析，以揭示头鳍姿态影响蝠鲼滑翔水动力性能的机理。

4.1 水动力性能

阻力系数、升力系数和升阻比随攻角变化的曲线如图 7 所示。在阻力系数方面，图 6(a)表明，四种头鳍姿态滑翔阻力随攻角的变化均呈现抛物线形式，该结论与现有蝠鲼滑翔研究中阻力系数变化的形式类似^[36-38]，头鳍作为蝠鲼头部处的附体结构，其几何尺寸相对于躯干占比较小，因此不足以改变整体阻力随攻角变化的基本趋势；然而在相同攻角下，不同头鳍姿态的阻力系数存在区别，在攻角 $\alpha < 10^\circ$ 时，头鳍姿态对阻力系数的影响较大，且卷曲姿态阻力最小，在攻角 $\alpha = -20^\circ$ 时，头鳍卷曲姿态相较于外翻姿态可使得滑翔阻力减小 5.6%，这与 Perryman 等^[25]在生物观测时对头鳍卷曲实现减阻的推测相吻合；而在攻角 $\alpha \geq 10^\circ$ 时，头鳍姿态

对阻力系数的影响较小，展开姿态阻力最小，环抱姿态阻力最大，在攻角 $\alpha=20^\circ$ 时两者相差 1.8%。

由图 6(b)可见，滑翔升力系数随攻角的增加而近似线性增加，但头鳍姿态对升力系数的影响在 $-20^\circ\sim 20^\circ$ 攻角范围内均较为微弱，四种姿态下升力系数最大区别不足 1%。这表明在滑翔过程中，胸鳍和躯干的姿态是升力的主要影响因素，头鳍姿态对升力的作用微弱。图 6(c)表明，升阻比在 $-10^\circ\sim 10^\circ$ 攻角范围内变化明显，而在 $\alpha < -15^\circ$ 及 $\alpha > 15^\circ$ 的攻角范围内变化平缓，正负攻角下的最大升阻比出现在 10° 及 -20° 时；对比不同头鳍姿态对升阻比的影响，升阻比受到阻力与升力的共同作用，根据图 6(a)和图 6(b)的分析结果，由于头鳍姿态对升力作用微弱，因此不同头鳍姿态的升阻比受到阻力系数影响，在攻角 $\alpha < 10^\circ$ 时存在明显区别，卷曲姿态最优而外翻姿态最差，在 $\alpha=-20^\circ$ 时可提高升阻比达 5.9%；当攻角 $\alpha \geq 10^\circ$ 时，不同头鳍间的区别同样较小。



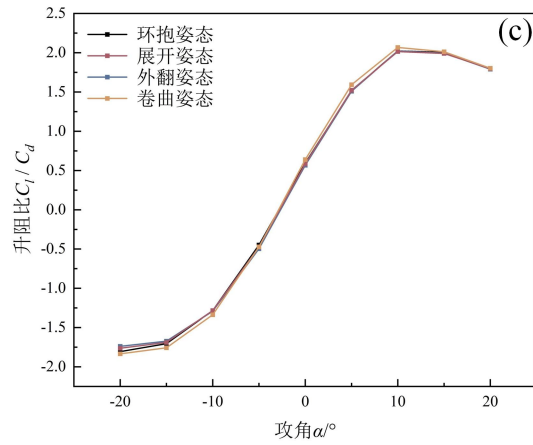


图 6 不同头鳍姿态水动力参数 (a) 阻力系数 C_d ; (b) 升力系数 C_l ; (c) 升阻比 C_l / C_d
 Fig. 6. Diagrams of hydrodynamic parameters for different cephalic fin postures: (a) drag coefficient C_d ; (b) lift coefficient C_l ; (c) lift-to-drag ratios C_l / C_d .

4.2 流场结构

为进一步探究不同头鳍姿态影响滑翔性能的原因，首先揭示攻角 $\alpha < 10^\circ$ 时头鳍卷曲实现减阻并提高升阻比的机理，本文选取四种头鳍姿态在攻角 $\alpha = -20^\circ$ 时滑翔的流场信息进行展示分析，如图 7 所示，其中图 7(a)、图 7(b)、图 7(c)、图 7(d) 分别代表尾流三维涡结构仰视图、三维涡结构侧视图、流场压力分布、展向涡量 w_y ，从左至右分别代表环抱姿态、展开姿态、外翻姿态、卷曲姿态。尾流涡结构采用 Q 准则进行显示，选取 $Q=8$ ，流场压力分布及展向涡量 w_y 均选取中轴面(截面定义见图 3(c))处进行展示。

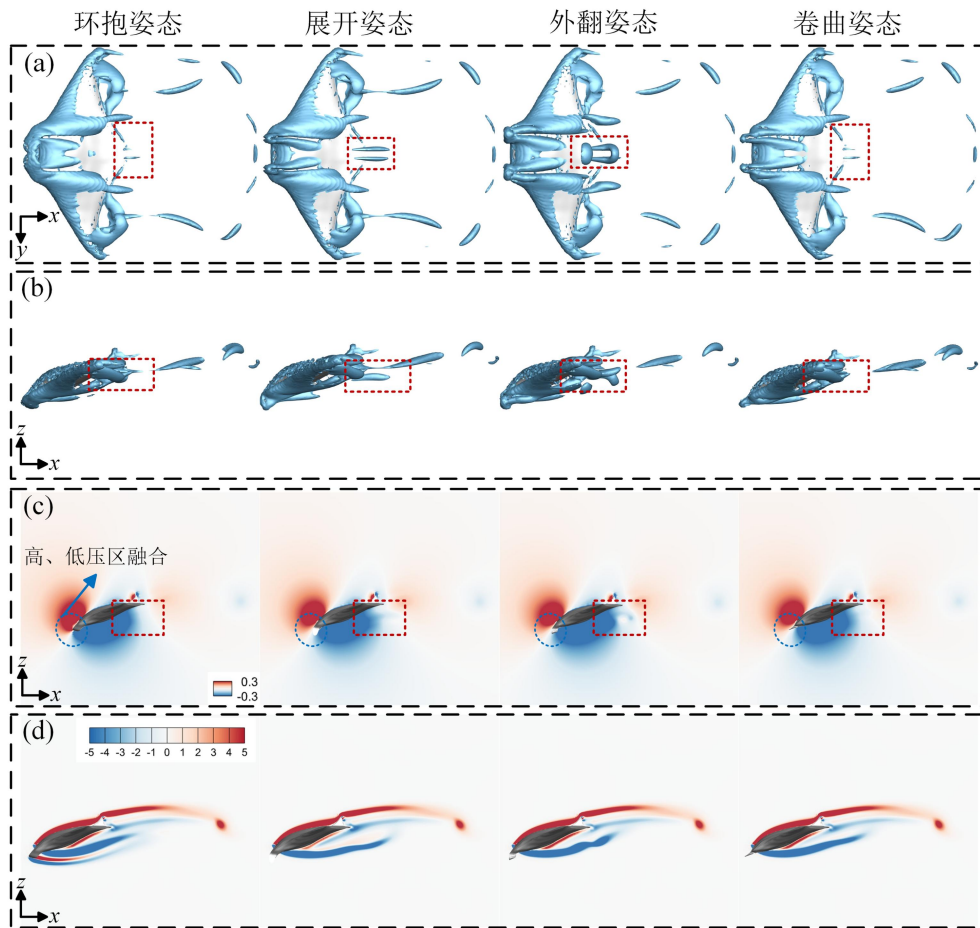


图 7 攻角 $\alpha=-20^\circ$ 时不同头鳍姿态流场信息图 (a) 三维涡结构仰视图；
 (b) 三维涡结构侧视图；(c) 中轴面流场压力云图；(d) 中轴面展向涡量云图
 Fig. 7. Flow field information diagrams for different cephalic fin postures when $\alpha=-20^\circ$: (a)
 bottom view of 3D vortex; (b) side view of 3D vortex; (c) pressure contour of flow field on the
 mid-longitudinal plane; (d) spanwise vorticity contour on the mid-longitudinal plane.

图 7(a)、图 7(b)可以看出胸鳍产生的尾流涡形态保持一致，水动力性能变化是由不同头鳍姿态导致的。图 7(a)中红色虚线框显示出不同头鳍姿态涡脱结构存在的差异：环抱、卷曲姿态并未产生明显涡脱，展开姿态涡脱呈两列带状平行排布，外翻姿态的两列涡脱出现融合且沿流向传播时轨迹更加曲折，不同涡脱形态导致了尾部低压场的不同分布形式：图 7(c)红色框中，环抱、卷曲姿态因没有涡脱，并未出现低压场后移的情况，展开姿态因涡脱强度较低而出现轻微压力场后移，外翻姿态因涡脱融合而出现较为明显的低压场后移；同时图 7(c)蓝色圈中展开、外翻、卷曲姿态的头部高压场并未出现明显变化，表明低压场的后移是导致外翻、展开姿态阻力大于卷曲姿态的核心原因；对比图 7(c)中环抱和卷曲姿态，虽然两者均未出现低压场的后移，但环抱姿态蓝色圈中头部高低压区均出现融合，增大了高低压区的作用范围，而高压区的前移下压及作用范围增大更为显著，因此在两者共同影响下，头鳍环抱姿态阻力相对于卷曲姿态略大。环抱姿态头部

低压区的增大有助于引导食物流向口腔部位，从水动力角度印证了 Ari 等^[24]以环抱姿态的头鳍对应高摄食意愿这一评估标准的合理性。图 7(d)中外翻姿态的 w_y 沿流向传播时轨迹更加曲折也与其在图 7(a)中的涡脱情况相对应，反映出外翻姿态会导致更大的阻力。

攻角 $\alpha = -20^\circ$ 时，蝠鲼表面压力采用上下表面压力组合的方式如图 8 进行展示。此时，在上表面头部区域，四种头鳍姿态均不能提供有效的迎流面积，仅通过影响胸鳍前缘根部上表面压力分布及尾部压力分布而影响升力：虽然图 8(b)、图 8(c) 胸鳍前缘根部上表面的红色高压区相较于图 8(a)、图 8(d) 出现减弱，但图 8(b)、图 8(c) 中上表面蓝色低压区范围也同样减小；在尾部区域，其上下表面高压区同步变化且变化较弱，因此在高压区减弱与低压区范围减小的综合作用下对升力的影响趋于一致。而升阻比受到阻力与升力的共同作用，由于头鳍对升力的作用微弱，因此升阻比也与阻力变化一致，呈现出卷曲头鳍升阻比最大，外翻头鳍升阻比最小的特点。

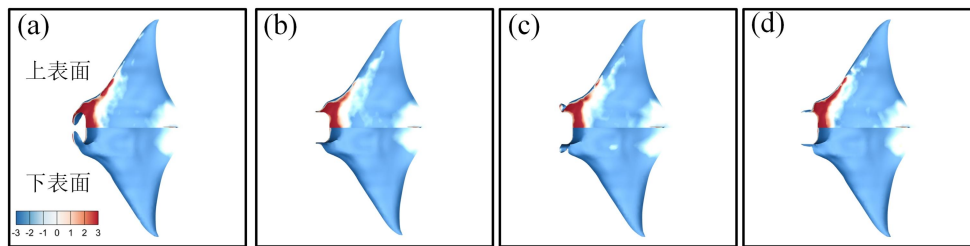


图 8 攻角 $\alpha = -20^\circ$ 时不同头鳍姿态表面压力云图 (a) 环抱姿态；(b) 展开姿态；(c) 外翻姿态；(d) 卷曲姿态

Fig. 8. Surface pressure contour for different cephalic fin postures when $\alpha = -20^\circ$: (a) embracing posture; (b) spreading posture; (c) outwardly turned posture; (d) curling posture.

为进一步揭示攻角 $\alpha \geq 10^\circ$ 时，头鳍姿态对阻力及升阻比影响较小，且环抱姿态阻力较大的原因，图 9 选取攻角 $\alpha = 20^\circ$ 时四种头鳍姿态的流场信息进行展示分析，图 9(a)、图 9(b)、图 9(c)、图 9(d)、图 9(e) 分别代表俯视三维涡结构、侧视三维涡结构、中轴面及头轴面(截面定义见图 3(c))压力场、展向涡量 w_y 。图 9(a)、图 9(b) 所展示的涡结构均未出现攻角 $\alpha = -20^\circ$ 时在尾部产生的不同涡脱形态，因此图 9(c) 各头鳍姿态中轴面处尾部压力场形态保持一致，头鳍姿态仅影响头部压力场的分布；而展开、外翻、卷曲姿态头部压力场分布也基本相同，故三者的阻力系数基本相同。图 9(c) 中环抱姿态头部高压区被隔断成两个部分，出现该隔断的原因在于头鳍的几何构型：环抱姿态下两侧头鳍向身体中轴线靠拢并接近，在头部前端形成通道结构，来流在该区域被分割为沿头鳍外侧表面的绕流与头鳍内侧的通道流，从而使得高压区呈现隔断特征，相较而言，其他三种姿态下头部迎流

面连续完整，高压区得以保持整体分布。高压区的隔断与图 9(a)中环抱姿态红色框部分的明显带状尾涡，对其头部压力场分布产生影响，为更清晰说明该影响，在图 9(d)中采用头轴面展示压力场分布：环抱姿态头部高压区范围相较于其他姿态出现明显扩大，虽然低压区范围由于带状尾涡的出现略有向上凸起增大，但头部高压区范围扩大更为显著，两者整体作用仍使得环抱姿态滑翔阻力略有增大。环抱姿态展向涡量 w_y 向头鳍部分延伸也显示出与其他姿态的明显区别。

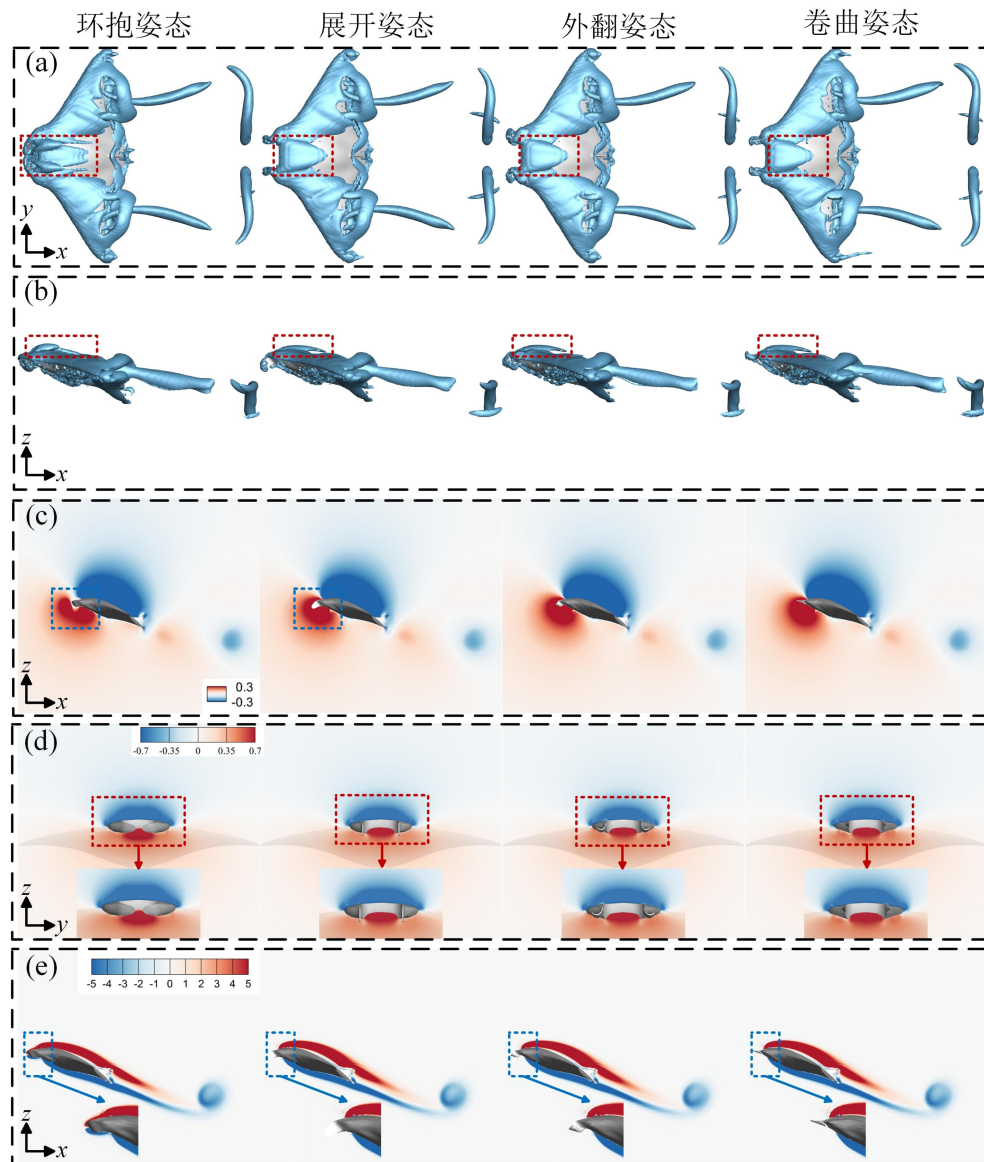


图 9 攻角 $\alpha=20^\circ$ 时不同头鳍姿态流场信息图 (a) 三维涡结构仰视图；(b) 三维涡结构侧视图；(c) 中轴面流场压力云图；(d) $x=0BL$ 流场压力云图；(e) 中轴面展向涡量云图 w_y

Fig. 9. Diagrams of flow field information for different cephalic fin postures when $\alpha=20^\circ$: (a) top view of 3D vortex structure; (b) side view of 3D vortex structure; (c) pressure contour of flow field on the mid-longitudinal plane; (d) pressure contour of flow field when $x=0BL$; (e) spanwise vorticity contour w_y on the mid-longitudinal plane.

攻角 $\alpha=20^\circ$ 时，蝠鲼表面压力采用上下表面压力组合的方式如图 10 进行展示。在下表面头部区域，图 10(a)中环抱姿态头鳍作为迎流表面，使得下表面高压区

位置向前延伸，更为贴近头鳍，而图 10(b)、图 10(c)、图 10(d)中由于没有头鳍作为迎流面，下表面压力分布基本一致；并且在上表面尾部区域，四种头鳍姿态下的高低压区分布均未见明显差异，表明上表面尾部压力分布未受头鳍姿态变化的影响。因此综合攻角 $\alpha=20^\circ$ 时上下表面压力云图可以直观发现，头鳍姿态并未改变表面压力的整体分布，对升力的影响较小。与 -20° 攻角相似，头鳍姿态对升力的微弱作用使得升阻比变化与阻力变化一致。

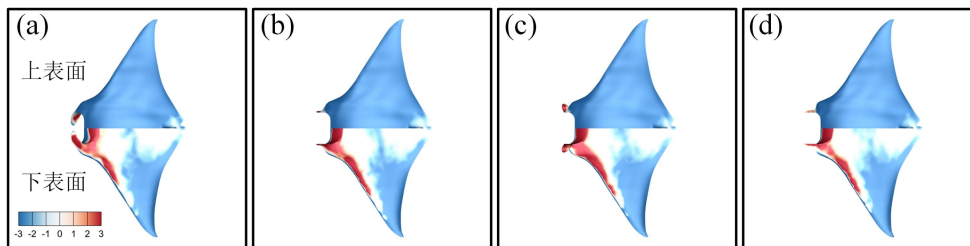


图 10 攻角 $\alpha=20^\circ$ 时不同头鳍姿态水动力参数 (a) 环抱姿态；(b) 展开姿态；(c) 外翻姿态；(d) 卷曲姿态

Fig. 10. Surface pressure contour for different cephalic fin postures when $\alpha=20^\circ$: (a) embracing posture; (b) spreading posture; (c) outwardly turned posture; (d) curling posture.

5 结 论

在本文中，首次针对蝠鲮头鳍的环抱、展开、外翻、卷曲四种特征姿态构建三维模型，聚焦头鳍姿态对蝠鲮滑翔水动力性能的影响，借助通过经典算例验证的 IB-SGKS 方法，开展四种头鳍姿态在 $-20^\circ\sim 20^\circ$ 攻角范围内的滑翔水动力性能数值计算，揭示了头鳍姿态对水动力性能的影响规律及作用机理。主要结论及展望如下：

(1) 在攻角 $\alpha < 10^\circ$ 时，头鳍姿态能够有效影响滑翔阻力，在 -20° 攻角下，头鳍卷曲姿态阻力相较外翻姿态减小 5.6%；在攻角 $\alpha \geq 10^\circ$ 时，头鳍姿态对阻力的影响相对较小，展开姿态阻力相较环抱姿态阻力减小 1.8%；升力基本不受头鳍姿态的影响；升阻比则与阻力类似，在 -20° 攻角时，卷曲姿态相较外翻姿态提升 5.9%；

(2) 头鳍姿态通过两种不同机理影响阻力大小：展开、外翻、卷曲姿态的头鳍通过诱导差异化的涡脱结构影响尾部压力场分布进而影响阻力，在 -20° 攻角时区别明显，而在 20° 攻角时差异较小；环抱姿态的头鳍则通过头部压力场的融合隔断影响阻力，在 -20° 攻角时表现为压力场融合，在 20° 攻角时则表现为高压区隔断；

(3) 对于仿蝠鲮潜水器中参考头鳍设计的执行机构，非作业时保持卷曲柱状以减小滑翔阻力；作业时应避免出现外翻姿态，减少涡脱对水动力性能的不利影响；捕获目标时可切换至环抱姿态，借助头部增强的低压区实现微小物体的低能

耗牵引。为实现上述不同姿态间的切换，可采用由舵机主动控制与材料柔性被动控制相结合的混合控制方式；

(4) 上述结论为提升仿蝠鲼潜水器水下作业性能提供了理论指导。未来将在此基础上，进一步将研究攻角范围拓展，探究头鳍姿态在极限工况下或跨介质航行中的水动力特性及减阻规律，同时更全面分析头鳍、胸鳍、尾鳍耦合作用下的多鳍协同推进机制，系统性的揭示多鳍耦合对扑动、转弯等运动模态水动力性能的影响机理，同时阐明多鳍耦合对蝠鲼机动性的作用规律。

参考文献

- [1] Liu X D, Hu Y L, Mao Z Y, Tian W L 2022 *Appl. Sci.* **12** 6975
- [2] Salazar R, Fuentes V, Abdelkefi A 2018 *Ocean Eng.* **148** 75
- [3] Gao P C, Tian X S, Huang Q G, Pan G, Chu Y 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 134702 (in Chinese) [高鹏骋, 田徐顺, 黄桥高, 潘光, 褚勇 2024 物理学报 **73** 134702]
- [4] Hang H T, Heydari S, Costello J H, Kanso E 2022 *J. Fluid Mech.* **932** A35
- [5] Zhou J, Seo J H, Mittal R 2025 *J. Fluid Mech.* **1014** A32
- [6] Zhang D, Huang W X 2023 *J. Fluid Mech.* **963** A16
- [7] Castellano-González G, Macena B, Bartolomeu T, Passos A, Afonso P, Fontes J 2025 *Mar. Ecol.: Prog. Ser.* **752** 117
- [8] Xue Z B, Li L L, Song Y X 2021 *Appl Bionics Biomech.* **2021** 4203914
- [9] Xu T S, Luo Y, Hou Z X, Huang Q G, Pan G 2025 *Phys. Fluids* **37** 061909
- [10] Bai J Y, Huang Q G, Gao P C, Wen X, Chu Y 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 104701 (in Chinese) [白靖宜, 黄桥高, 高鹏骋, 问昕, 褚勇 2025 物理学报 **74** 104701]
- [11] Marshall A D, Compagno L J, Bennett M B 2009 *Zootaxa.* **2301** 1
- [12] Menzer A, Gong Y C, Fish E. F, Dong H B 2022 *Biomimetics* **7** 45
- [13] Huang Z H, Menzer A, Guo J C, Dong H B 2024 *Bioinspiration Biomimetics* **19** 026004
- [14] Wang S, Gao P C, Huang Q G, Pan G, Tian X S 2024 *Ocean Eng.* **294** 116799
- [15] Huang Q G, Zhang D, Pan G 2020 *IEEE Access.* **8** 30410
- [16] Xu T S, Luo Y, Hou Z X, Huang Q G, Cao Y, Pan G 2023 *Phys. Fluids* **35** 121905
- [17] 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]
- [18] Gao P C, Huang Q G, Pan G, Cao Y, Luo Y, 2023 *Ocean Eng.* **278** 114389
- [19] Mulvany S, Motta P J 2013 *J. Morphol.* **274** 1070

- [20] Porsiel N, Hernandez S, Cordier D, Heidemeyer M 2021 *Rev. Biol. Trop.* **69** S256
- [21] Setyawan E, Heinrichs S, Erdmann M 2024 *Diversity* **16** 319
- [22] Stevens G M W, Hawkins J P, Roberts C M 2018 *J. Fish Biol.* **93** 344
- [23] Notarbartolo-di-Sciara G, Hillyer E V 1989 *Copeia* 607
- [24] Ari C, Correia J P 2008 *Zoo Biol.* **27** 294
- [25] Perryman R J Y, Carpenter M, Lie E, Sofronov G, Marshall A D, Brown C 2021 *Behav Ecol Sociobiol.* **75** 51
- [26] Zhao J Z, Mao Q, Pan G, Huang Q G, Sung H J 2021 *Phys. Fluids* **33** 081906
- [27] Liu, G, Ren Y, Dong H B, Akanyeti O, Liao J C, Lauder G V 2017 *J. Fluid Mech.* **829** 65
- [28] Zhang J D, Sung H J, Huang W X 2020 *Phys. Fluids* **32** 111902
- [29] Han P, Lauder G V, Dong H B 2020 *Phys. Fluids* **32** 011902
- [30] Yang L M, Shu C, Wu J 2015 *J. Comput. Phys.* **295** 322
- [31] Yang L M, Shu C, Yang W M, Wang Y, Wu J 2017 *Phys. Fluids* **29** 083605
- [32] Zhang D, Huang Q G, Pan G, Yang L M, Huang W X 2021 *J. Fluid Mech.* **930** A28
- [33] Brown D L, Cortez R, Minion M L 2001 *J. Comput. Phys.* **168** 464
- [34] Wang X Y, Yeo K S, Chew C S, Khoo B C 2008 *Comput. Fluids* **37** 733
- [35] Wang Y, Shu C, Teo C J, Yang L M 2016 *Comput. Fluids* **124** 54
- [36] 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)]
- [37] Xu T S, Luo Y, Huang Q G, Pan G 2025 The 35th International Ocean and Polar Engineering Conference Seoul, Korea, June, 2025 ISOPE-I-25-594
- [38] Xu T S 2023 *M.S. Thesis* (Xi'an:Northwestern Polytechnical University) (in Chinese) [徐同轼 2023 硕士学位论文 (西安:西北工业大学)]

The influence of cephalic fin postures on manta ray's gliding hydrodynamic performance*

Huang Qiaogao¹⁾²⁾ Wang Mingdong¹⁾ Pan Guang¹⁾²⁾ Gao Pengcheng^{1)†} Luo Yang¹⁾²⁾ Chu Yong¹⁾ Li Xin¹⁾

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

Abstract

To fill the research gap concerning the influence of cephalic fin posture on the hydrodynamic performance of manta rays during gliding, this study first developed three-dimensional morphological models of four typical cephalic fin postures based on biological observations, namely embracing, spreading, outwardly turned, and curling. In contrast to previous studies that either ignored the cephalic fins or simplified them as two-dimensional rigid plates, the present work preserves the realistic three-dimensional geometry and systematically investigates the effect of posture variations on gliding performance.

This study adopts the immersed boundary method and the sphere function-based gas kinetic scheme (IB-SGKS) to perform numerical simulations, with nine angles of attack ranging from -20° to 20° covering the typical gliding envelope of manta rays. Prior to the simulations, the numerical method was first validated against the classical flow around a sphere, confirming its reliability for resolving pressure fields and vortex structures. A rigorous grid-independence and time-step independence verification was also conducted to ensure that numerical discretization errors were well controlled.

The results reveal that the change in cephalic fin posture has a negligible influence on the lift coefficient, with a variation of less than 1% among the four postures at all angles of attack. Consequently, the variation in the lift-to-drag ratio is primarily determined by drag differences. Depending on the angle of attack range, cephalic fin postures affect drag through two distinct mechanisms, and its effect is significant when the angle of attack is below 10° . Specifically, the curling posture does not cause the rear low-pressure region to shift downstream due to vortex shedding, nor does it lead to the fusion of high- and low-pressure regions near the head caused by the shape, thus achieving the best drag reduction effect. When the angle of attack is -20° , the curling posture reduces drag by 5.6% compared with the outwardly turned posture. When the angles of attack exceed 10° , none of the four postures cause a rearward shift of the low-pressure region. The differences among the postures are mainly affected by the joint action of the isolation of the head

high-pressure zone and the expansion of the low-pressure zone, leading to a maximum drag variation of only 1.8% between the embracing and spreading postures when the angle of attack is 20°.

This study provides novel insights into the hydrodynamic mechanisms by which cephalic fin postures influence manta ray gliding. From a biological perspective, the results quantitatively confirm the hypothesis that curling the cephalic fins reduces drag during routine cruising, and show that the embracing posture facilitates feeding. From an engineering perspective, the findings offer direct theoretical guidance for optimizing the gliding performance of manta ray like vehicles and for designing cephalic-fin-inspired actuators in multi-scenario underwater operations: gliding with curled fins for energy saving and switching to the embracing posture for low-energy traction of small objects.

Keywords: manta ray, cephalic fin postures, hydrodynamic performance, vortex structure

* Project supported by the Scientific Research Innovation Capability Support Project for Young Faculty, the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2022YFC2805200), the certificate certifies its holder is awarded the fellowship of China National Postdoctoral Program for Innovative Talents (Grant No. BX20250494), and the Project supported by the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No.2025M774366) .

These authors contributed equally.

† Corresponding author. E-mail: gaopengcheng@nwpu.edu.cn
The first author E-mail: huangqiaogao@nwpu.edu.cn