

仿生鱿鱼俯仰姿态下水动力学数值模拟

黄小双, 孙翁杰, 王静峰, 孔祥洪, 刘必林, 陈新军

Numerical simulation of hydrodynamics of bionic squid in pitching posture

HUANG Xiaoshuang, SUN Wengjie, WANG Jingfeng, KONG Xianghong, LIU Bilin, CHEN Xinjun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12024/jsou.20201103228>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[仿生鱿鱼流体形态建模与数值模拟](#)

Fluid morphology modeling and numerical simulation of biomimetic squid

上海海洋大学学报. 2021, 30(5): 884 <https://doi.org/10.12024/jsou.20201103225>

[仿生鱿鱼肉鳍扑动推进机理数值研究](#)

Numerical research on the fin flapping propulsion mechanism of bionic squid

上海海洋大学学报. 2021, 30(1): 163 <https://doi.org/10.12024/jsou.20191002821>

[主要经济大洋性鱿鱼资源渔场生产性调查与渔业概况](#)

Productive survey and fishery for major pelagic economic squid in the world

上海海洋大学学报. 2019, 28(3): 344 <https://doi.org/10.12024/jsou.20181202467>

[我国鱿鱼加工利用技术研究进展](#)

Research progress of squid processing and utilization technology in China

上海海洋大学学报. 2019, 28(3): 357 <https://doi.org/10.12024/jsou.20190102498>

[海洋性动物水解蛋白对珍珠龙胆石斑鱼生长、饲料利用及体组成的影响](#)

Effects of marine animal protein hydrolysates on growth, feed utilization and body composition of hybrid grouper (*Epinephelus fuscoguttatus* ♀ × *Epinephelus lanceolatus* ♂)

上海海洋大学学报. 2021, 30(4): 624 <https://doi.org/10.12024/jsou.20200503046>

文章编号: 1674-5566(2022)01-0252-09

DOI:10.12024/jsou.20201103228

仿生鱿鱼俯仰姿态下水动力学数值模拟

黄小双¹, 孙翁杰², 王静峰³, 孔祥洪^{1,4}, 刘必林^{1,4,5,6}, 陈新军^{1,4,5,6}

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 信息学院, 上海 201306; 3. 上海海洋大学 工程学院, 上海 201306; 4. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306; 5. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306; 6. 农业农村部大洋渔业开发重点实验室, 上海 201306)

摘要: 鱿鱼作为海洋高等软体动物, 其软体特征与腕部特点为其机动性奠定了基础。为研究仿生鱿鱼软体触腕在不同俯仰角度下的弯曲特性, 选择茎柔鱼(*Dosidicus gigas*)为仿生对象, 建立仿生鱿鱼不同俯仰角度下的简化三维模型, 并根据不同俯仰角度假设触腕不同弯曲特性。根据三维简化模型, 采用数值模拟方法, 分析比较仿生鱿鱼在不同俯仰姿态下与触腕弯曲下的水动力特性。研究认为: 仿生鱿鱼采用软体触腕协调游动时, 为其俯仰姿态的完成提供了有利的转矩, 俯仰角最大为 45° 时其力矩系数达到 -0.001 7, 更有利于其高速游动时俯仰姿态的调整与游动方向的改变; 仿生鱿鱼在完成俯仰姿态时可以通过改变腕部的弯曲程度, 更及时高效地调整姿态与改变游动方向, 且所需能耗较小。研究结果对仿生鱿鱼软体触腕的控制提供了依据与参考, 同时为研究其高机动性游动行为与材料的选取奠定了基础。

关键词: 仿生; 鱿鱼; 俯仰游动; 软体特征; 机动性; 数值模拟

中图分类号: S 951.2 **文献标志码:** A

海洋鱼类经过数百万年的自然进化获得了优异的水动力性能。鱼类作为仿生学最重要的研究对象之一, 研究其运动行为与游动机理逐步成为当今的发展趋势^[1-2]。鱿鱼作为游动行为最为复杂多样、游动姿态丰富的海洋生物^[3], 可以通过触腕体态的改变在游动过程中迅速改变游动方向与游动行为, 具有低游动阻力、高效、高机动性的特点^[4]。俯仰运动一般指鱼类的上升游动或下潜游动行为^[5], 因此其俯仰行为是评价机动性的重要指标之一^[6]。

相关研究^[7]表明, 鱿鱼运动是肉鳍、漏斗与腕部三者之间的协调运动。头足类生物的最高游速可达 40 ~ 55 km/h, 此时其肉鳍与触腕均呈现为聚合收拢状态, 这样的形体结构特征更利于鱿鱼在高速游动时保持优异的水动力特性, 降低航行阻力^[8-9]。对于部分头足类而言, 俯仰游动在其昼夜垂直移动的行为习性中尤为重要^[10]。

鱼类在进行捕食、避敌等高机动行为时, 快速启动与变向是其一种高能量、爆发式的非稳态运动^[11]。在机器鱼俯仰的行为研究中, 刘鹏^[12]以海豚为仿生对象设计其游动机构并实现浮潜运动但未对水动力特性进行分析, 宋武超等^[13]对水下航行器俯仰过程中的微气泡结构进行了数值模拟但其模型为刚性体结构, 李瑞环等^[14]利用高机动的仿生蝠鲼进行俯仰运动以实现水环境要素检测但研究并未体现机器鱼的俯仰机动性。

因此, 研究鱿鱼的俯仰运动机制以及其高效低耗机制对于仿生鱿鱼的研发至关重要。本文基于上海海洋大学机器鱼实验室所设计的柔性仿生鱿鱼, 在鱿鱼外轮廓拟合曲线所构造的三维简化模型与俯仰姿态下仿生鱿鱼腕部弯曲特性的基础上, 针对仿生鱿鱼不同俯仰姿态下腕部不同弯曲特性, 对其进行数值模拟, 并分析其不同行为姿态下的瞬时水动力特性, 为仿生鱿鱼实现

收稿日期: 2020-11-24 修回日期: 2021-07-06

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFD0901404); 国家自然科学基金(41876141); 上海市科技创新行动计划(10DZ1207500); 2020年地方院校能力建设项目(20050501800)

作者简介: 黄小双(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为渔业海洋学及仿生机器鱼。E-mail: xiaoshuanghuang@yeah.net

通信作者: 孔祥洪, E-mail: xhkong@shou.edu.cn

高机动性俯仰与转弯控制奠定了基础。

1 材料与方法

1.1 仿生对象

实验样本为 2019 年 11 月在东太平洋赤道外海海域所捕获的茎柔鱼 (*Dosidicus gigas*), 捕获后的样本经冷冻后储存, 带至实验室进行相关生物学参数的测定。

1.2 测量方法与游动姿态

在微冻状态下测量样本胴长、胴宽、腕长、头宽。为获取基本形态特征, 减少测量误差与剔除样本异常值^[15-16], 共测量 30 尾茎柔鱼的上述生物学形态特征。

在研究头足类的生活习性与形态特征过程中, 为了统一标准与专业术语, 特规定其形态方位及术语。区别于大多数鱼类, 鱿鱼在游动过程中可以以腕在前游动, 也可以以尾在前运动, 并且在俯仰高速游动时多以尾在前的姿态^[17]。如图 1 所示为运动姿态示意图, 研究中设定鱿鱼均以尾在前方式向前游动: 当俯仰角 $\alpha > 0$ 时, 鱿鱼为仰角上升游动; 当俯仰角 $\alpha < 0$ 时, 鱿鱼为俯角下潜游动。头足类生物游动方式为复合游动, 以漏斗喷射推进、肉鳍摆动推进与腕部协调游动组成, 其依靠漏斗射流提供强大的推进力。因此在研究中通过高速来流模拟漏斗射流高速推进, 且在高速游动状态下左右侧肉鳍均与胴体合拢, 形成类纺锤型的良好流体形态。

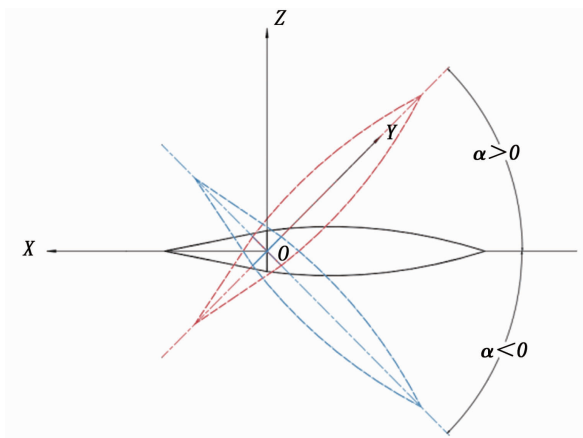


图 1 鱿鱼运动姿态示意图
Fig.1 Morphological motion map of cephalopods

1.3 数值方法与基本理论

基于 SolidWorks 三维建模软件完成仿生鱿鱼模型的三维建模, 对鱿鱼生物模型进行简化。根据视频资料与相关文献调研, 鱿鱼在高速游动过程中, 肉鳍与胴体呈现合拢姿态, 头部近似与胴体平滑过渡。因此在仿生鱿鱼模型进行简化时, 简化准则为 (1) 不改变鱿鱼外轮廓曲线曲率; (2) 忽略鱿鱼头部与胴体连接部分的曲率变化; (3) 不改变鱿鱼身体比例特征。

为提高仿生鱿鱼模型俯仰姿态仿真时模型网格的生成效率与求解时的计算精度, 对整个计算域进行如下处理: (1) 整体计算域采用圆柱形流场, 图 2 所示, 尺寸设置为 $H = 6L, D = 6L$ (L 为仿生鱿鱼模型特征长度); (2) 采用非结构三角形网格^[17]来提高网格划分时的灵活性与自适应性; (3) 仿生鱿鱼模型触腕发生弯曲时存在一定的曲率变化, 因此对模型表面进行局部网格加密来保证触腕弯曲的部分网格顺利平滑过渡^[17]; (4) 高级尺寸函数选择可适用于比较复杂的模型的方法 Proximity and Curvature, 可以对局部表面曲率变化部分进行网格优化^[18]。

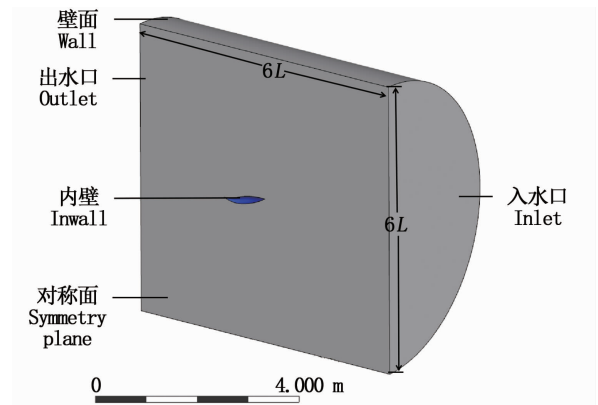


图 2 流场计算域设置
Fig.2 Flow field calculation domain settings

仿真模拟, 假设条件: 流体水为不可压缩流体, 且忽略水下压强与鱿鱼胴体收缩时对形体产生的形变。流速设置为 13.89 m/s , 流体密度设置为 998 kg/m^3 , 黏度为 $8.899 \times 10^{-4} \text{ kg/ms}$ 。根据计算工况设置, 估算出模型的雷诺数约为 10^6 。

$$R_e = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (1)$$

描述仿生鱿鱼俯仰过程的水动力性能的参数主要有游动阻力系数 C_D 、升力系数 C_L 与力矩

系数 C_M 计算公式^[17-18]如下:

$$C_D = \frac{F_D}{0.5\rho U^2 S} \quad (2)$$

$$C_L = \frac{F_L}{0.5\rho U^2 S} \quad (3)$$

$$C_M = \frac{F_M}{0.5\rho U^2 S^3} \quad (4)$$

式中: F_D 为游动阻力, N; F_L 为游动升力, N; F_M 为转动力, N; ρ 为流体介质密度, kg/m^3 ; U 为来流速度, m/s ; S 为鱼体模型湿体表面积, m^2 。

2 结果

2.1 仿真模型

鱿鱼通过喷射、肉鳍等多个器官的相互配合实现俯仰姿态游动。本研究主要针对仿生鱿鱼在俯仰姿态下高速行进过程中其流体外形的建模对其游动性能的影响。因此,在计算过程中,选取俯仰角分别为 15° 、 30° 、 45° 和 -15° 、 -30° 、 -45° 状态下的水动力特性。其不同俯仰姿态下网格划分效果图如图 3 所示,采用非结构网格划分,并利用 Proximity and Curvature 对模型局部表面进行网格优化^[17-18]。

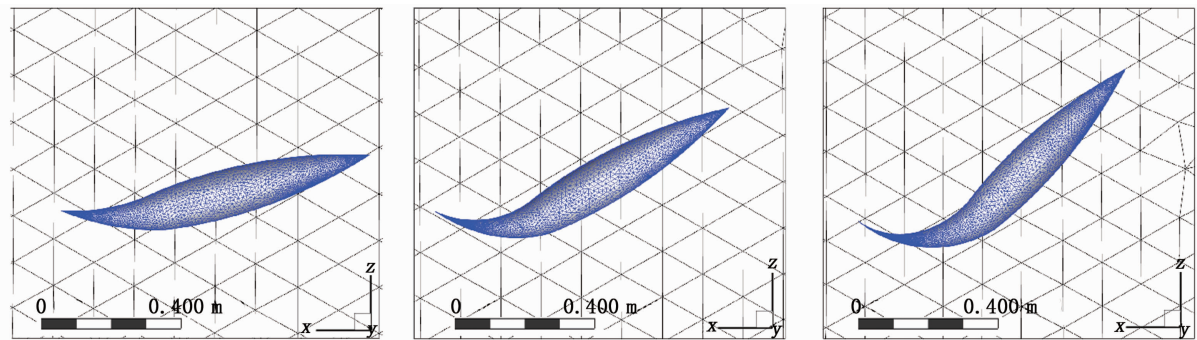


图 3 不同俯仰姿态下仿生鱿鱼模型网格划分效果图

Fig.3 Effect of grid division at different pitching attitudes

2.3 俯仰姿态对尾涡形态的分析

相关研究^[9]表明,不同的鱼类采用不同的游动方式与不同的水域环境,其尾部所产生的尾流场形态也存在明显的差异。在仿生鱿鱼模型不同俯仰角度的姿态下触腕不同的弯曲程度,得到的尾流场同样有所差异。为了探究不同的俯仰姿态下触腕弯曲程度所对于鱼体尾流场的影响,本文针对同一雷诺数下不同俯仰姿态与不同触

2.2 柔性触腕静力学分析

鱿鱼在完成俯仰运动时,软体腕部发生弯曲对于其在快速转向时降低能耗至关重要。分析比较不同姿态时模型与模型流场内的压力分布更为重要。

通过观察图 4 可以发现,当仿生鱿鱼模型腕部不发生弯曲,随着仰角大小的增大,尾部下方的迎流压强逐步增大,即迎流阻力逐步增大;在图 5 中,随着俯角的增大以及触腕的弯曲,在仿生鱿鱼模型头部下方出现了较为明显的低压区域,证明了当触腕发生弯曲时对于其俯仰运动的完成是有益的。在鱼体的弯曲阶段,鱼体腕部由梭形姿态突然变为 C 型弯曲,相关研究表明^[19],在 C 形变所提供的转向力矩作用下,鱼体快速转向目标方向。

图 6 中,升力系数更好地为实验结果提供参考依据,反映出不同姿态下升力变化情况。随着俯仰角逐步地增大,升力系数随之升高,俯仰角梯度变化为 15° 。当仰角为 15° 时,其升力系数约为 0.000 9;当仰角为 30° 时,其升力系数为 0.001 5;当仰角为 45° 时,升力系数达到 0.001 7。

腕弯曲程度的游动行为进行分析探讨。分别选取仰角为 15° 、 30° 、 45° 与俯角为 -15° 、 -30° 、 -45° 的俯仰姿态。

观察图 7a、7b、7c 可以发现,当仿生鱿鱼模型仰角逐步增大时,触腕部分尾流涡核心区域体积逐渐减小,进一步表明了随着仰角的增大,涡街耗散更明显,其上升时所需的能量耗散也越大。从生物游动低能耗的角度考虑,这也说明了

当其仰角上升时鱿鱼上升游动时其触腕不发生弯曲并不符合能耗损失的原则。进一步观察图 7d、7e、7f 发现,当仿生鱿鱼模型以仰角上升时,触腕发生一定程度的弯曲,触腕尾流部分的涡核心区区域体积显著增大,且涡核心区与仿生鱿鱼模型表面相连,即流体在仿生鱿鱼表面涡街脱落较晚。

比较图 7a 与 7d、7b 与 7e、7c 与 7f,仿生鱿鱼模型以不同仰角姿态上升时,假设触腕发生不同程度的软体弯曲,其生物以最低能耗游动的原则并不会改变,而当仰角为 45°时,腕部尾流部分涡核心区发生散落,但是说明了鱿鱼在高速俯仰游动时,其方向的瞬间改变对于能量的消耗增大。

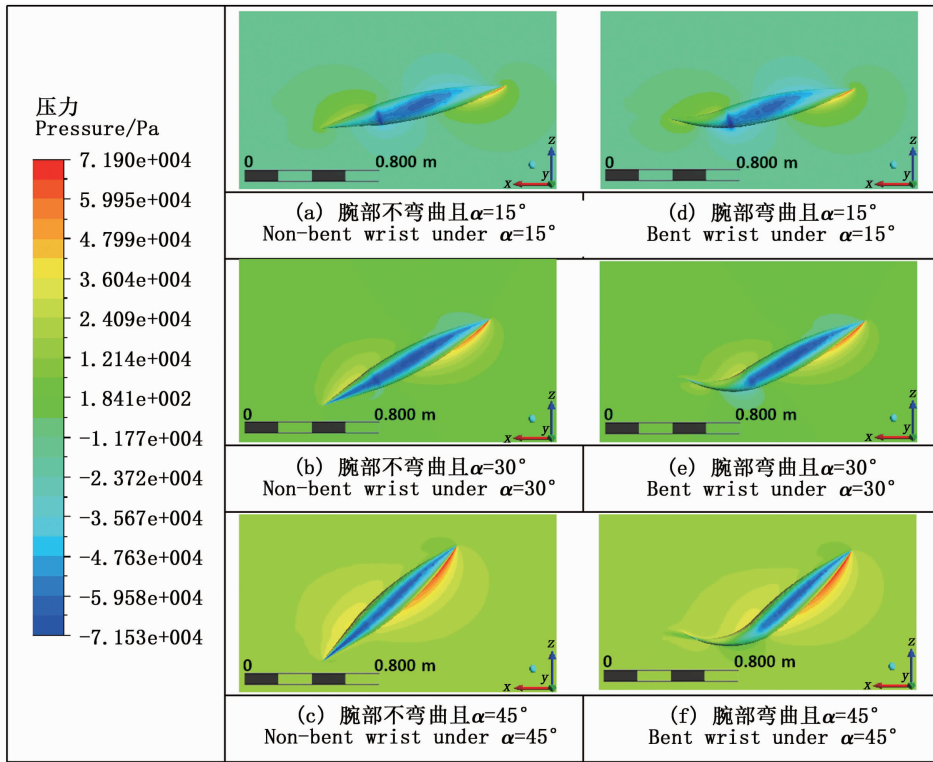


图 4 仰角姿态流场压力云图

Fig. 4 Pressure cloud diagram of elevation attitude flow field

为了进一步探讨仿生鱿鱼模型俯仰姿态下的水动力特性,选取俯角分别为 -15°、-30°与 -45°的游动姿态,同时与仰角上升姿态时相互印证对比。观察图 8 发现,当仿生鱿鱼俯冲姿态且触腕部分不发生弯曲时,不同俯角下其腕部尾流区域附近的涡结构分布与发展相近,随着俯角的

逐步增大,涡核心区面积减小,即涡量强度逐步减小,与仰角上升时仰角增大的变化规律一致。相应地,当仿生鱿鱼触腕部分发生一定程度的柔性弯曲时,尾迹区内在触腕前端尚未发生分离,同样与仰角姿态的尾迹变化一致。

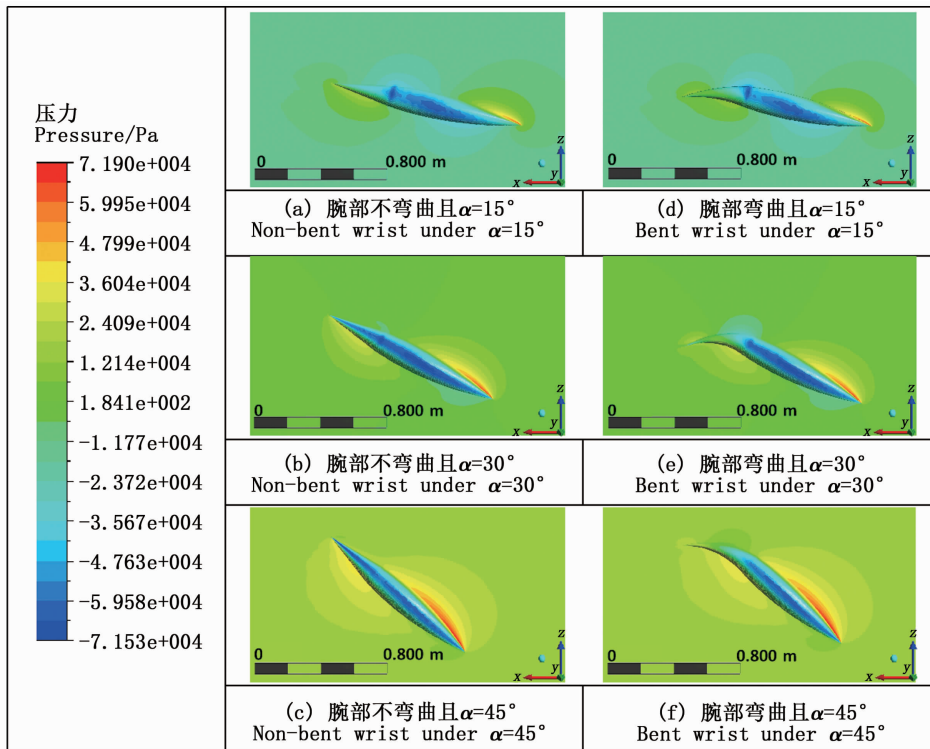


图 5 俯角姿态流场压力云图

Fig. 5 Pressure cloud diagram of depression attitude flow field

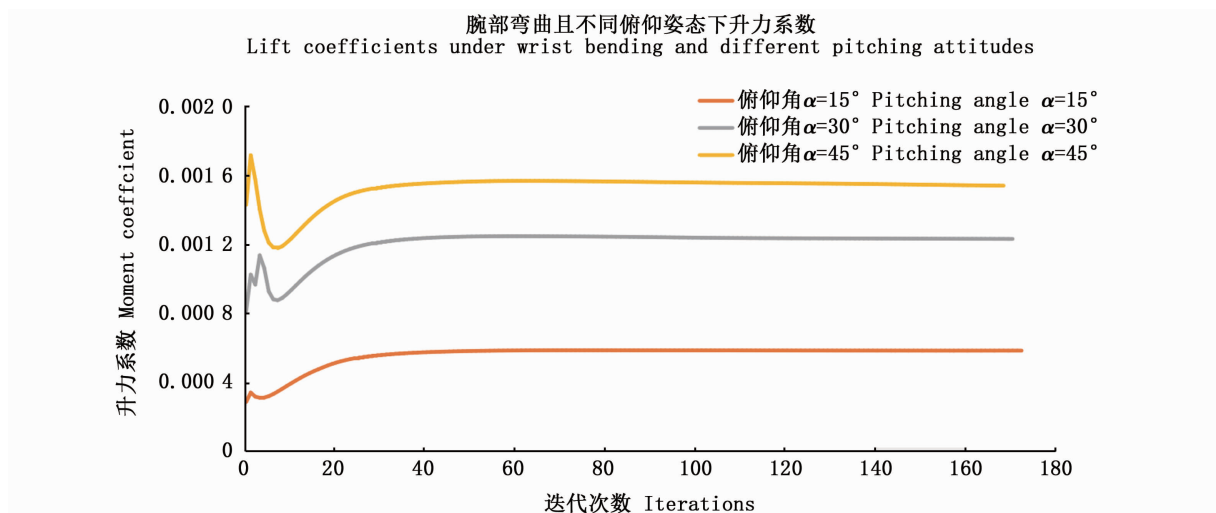


图 6 腕部弯曲且不同俯仰姿态下升力系数

Fig. 6 Lift coefficients with bending tentacle and at different pitching attitudes

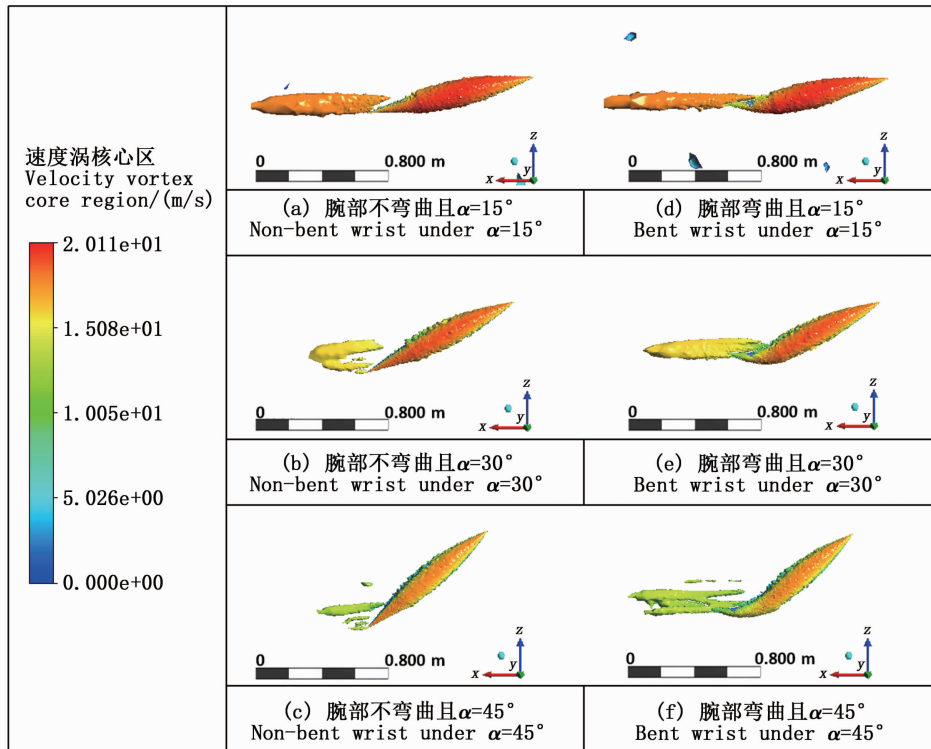


图7 仰角姿态尾涡结构

Fig. 7 Elevation attitude wake vortex structure

通过仿生鱿鱼模型触腕弯曲状态,以仰角姿态为例,分析其不同姿态下的力矩系数。如图9所示,随着仰角的升高,力矩系数的绝对值逐步增大,由公式3知其力矩值逐步增大。当仰角为 15° 时, C_M 值为 -0.0012 ;当仰角为 30° 时, C_M 值为 -0.0015 ;当仰角为 45° 时, C_M 值为 -0.0017

3 讨论

本文基于计算流体力学方法,对仿生鱿鱼模型在不同俯仰姿态下进行了数值模拟,研究其在高速俯仰过程中的游动性能、水动力性能和尾流涡结构特性。对鱼体在高速俯仰瞬态时游动性能、水动力性能和尾流涡结构特性进行分析,并对其俯仰姿态下的高机动性或快速启动性能进行了探讨。

在仿生鱿鱼的设计与制作中,触腕的摆动是影响其升沉、俯仰与转向等多种机动性行为的重要运动协调器官。本文通过探索和实践,利用计

算流体力学的方法初步模拟了鱿鱼俯仰姿态对其高机动行为的推进性能的影响,同时有效的计算模拟出该影响的作用机制。同时,由于计算流体力学方法为理想化模型的数值模拟,仅是从理论上对运动行为进行仿真参考,其有效性与作用效率仍需对实际模型进行实验验证。鱿鱼在进行俯仰运动过程中,通过柔性触腕的摆动实现与周围水流之间的耦合作用,触腕上下摆动时,鱼体背腹面分别出现大面积的涡流,导致了背腹相应区域的流场压力降低或升高,进而形成了鱼体不同身体部位的明显压力差。当触腕向上摆动时,背腹面压力差向上;当触腕向下摆动时,背腹面压力差向下:仿生鱿鱼在该压力差的作用下实现游动过程中的俯仰行为。实验结果中的力矩系数为该结论奠定了数据依据,随着仰角 $15^\circ \sim 45^\circ$ 逐步升高,最大游速为 13.89 m/s 时,其力矩系数绝对值依次从 0.0012 增大至 0.0017 。

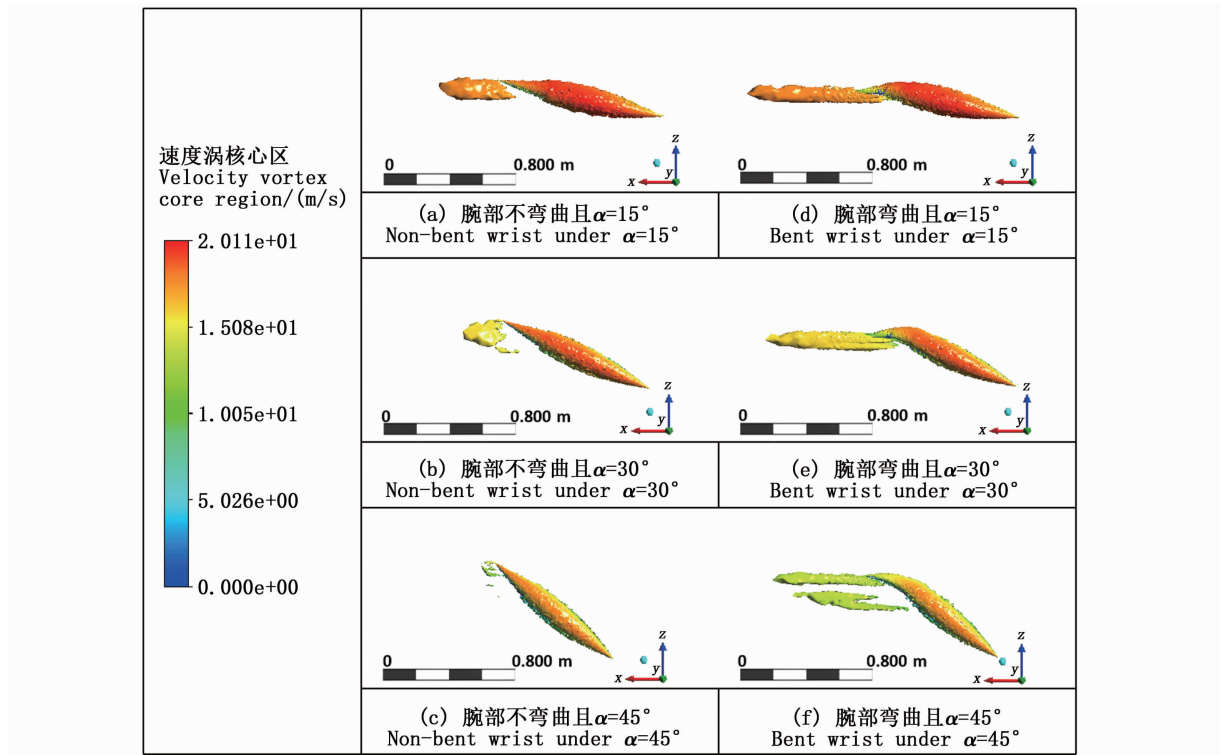


图 8 俯角姿态尾涡结构

Fig. 8 wake vortex structure at depression attitude

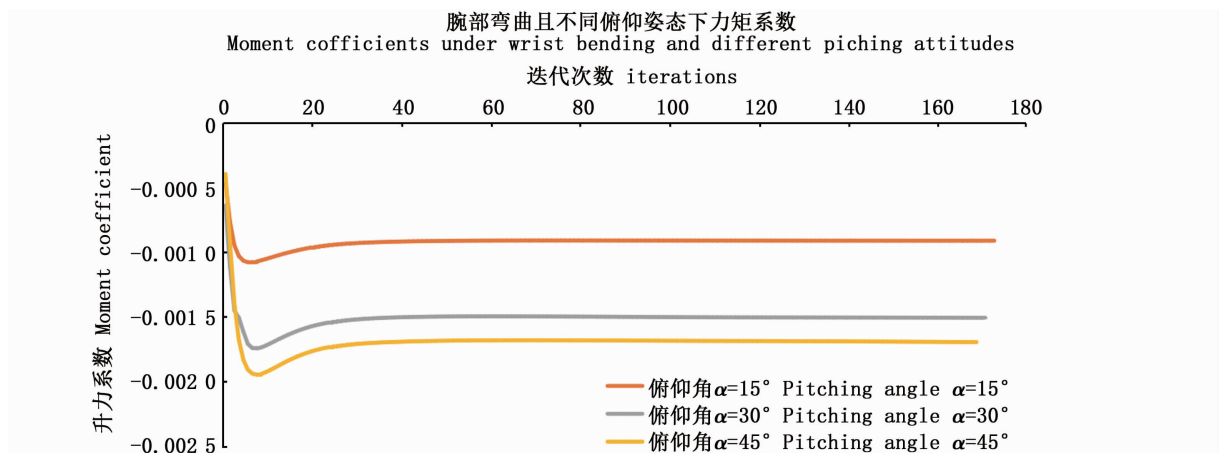


图 9 腕部弯曲且不同俯仰姿态下力矩系数

Fig. 9 Moment coefficients with tentacle bending and at different pitching attitudes

因此,在仿生鱿鱼的设计与制作过程中,触腕的运动行为是其提升机动性的关键之处。对于柔性仿生材料的逐步应用,软体材料的特性对于其动作与姿态的完成至关重要。如图 1 所示,本研究团队基于数值模拟仿真结果,对仿生鱿鱼进行设计并制作仿生鱿鱼机器鱼样机,将腕部简化并合拢设计,为后续俯仰机动性测试提供

了测试平台,同时需要根据数值模拟结果选取不同材料的柔性材质来模拟其俯仰或转弯过程中腕部对其姿态改变的舵向作用。

另外,在研究头足类生物柔性触腕对其俯仰行为的作用关系时,设计的触腕为沿背腹方向进行摆动,若其左右摆动还可以起到辅助转向的作用,实现俯仰与转向等多种运动形式的切换。仿

生鱿鱼在同一运动姿态时,随着触腕弯曲程度的不断提升,其产生的升力系数明显提升,在尾流结构中明显看到其压差区域增强。

参考文献:

- [1] 钱卫国,孔祥洪. 新型水下航行器——仿生机器鱼的设计与制作[M]. 北京:科学出版社,2018:1-156.
QAIN W G, KONG X H. Design and manufacture of a new underwater vehicle-bionic robotic fish[M]. Beijing: Science Press, 2018: 1-156.
- [2] 贺威,崔荣鑫, AHN C K, 等. 仿生机器人系统:建模、设计、控制和感知专题简介[J]. 中国科学:信息科学, 2020, 50(7): 1125-1126.
HE W, CUI R X, AHN C K, et al. Bionic robotic systems: introduction to modeling, design, control and perception[J]. Scientia Sinica Informationis, 2020, 50(7): 1125-1126.
- [3] 陈新军,刘必林,王尧耕. 世界头足类[M]. 北京:海洋出版社,2009:1-357.
CHEN X J, LIU B L, WANG Y G. Cephalopods of the world [M]. Beijing: China Ocean Press, 2009: 1-357.
- [4] JASTREBSKY R A, BARTOL I K, KRUEGER P S. Turning performance in squid and cuttlefish: unique dual-mode, muscular hydrostatic systems [J]. The Journal of Experimental Biology, 2016, 219(Pt 9): 1317-1326.
- [5] 周应祺. 应用鱼类行为学[M]. 北京:科学出版社, 2011: 83-121.
ZHOU Y Q. Applied fish behaviour science[M]. Beijing: China Ocean Press, 2011: 83-121.
- [6] 周超,曹志强,王硕,等. 仿生机器鱼俯仰与深度控制方法[J]. 自动化学报, 2008, 34(9): 1215-1218.
ZHOU C, CAO Z Q, WANG S, et al. Study on the pitching and depth control of biomimetic robot fish [J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(9): 1215-1218.
- [7] OLCAY A B, MALAZI M T. The effects of a longfin inshore squid's fins on propulsive efficiency during underwater swimming[J]. Ocean Engineering, 2016, 128: 173-182.
- [8] O'DOR R, STEWART J, GILLY W, et al. Squid rocket science: how squid launch into air[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2013, 95: 113-118.
- [9] BARTOL I K, KRUEGER P S, YORK C A, et al. New approaches for assessing squid fin motions: coupling proper orthogonal decomposition with volumetric particle tracking velocimetry[J]. The Journal of Experimental Biology, 2018, 221(Pt 14): jeb176750.
- [10] 刘必林,林静远,方舟,等. 头足类角质颚稳定同位素研究进展[J]. 海洋渔业, 2018, 40(2): 242-248.
LIU B L, LIN J Y, FANG Z, et al. Review on the stable isotopes in cephalopod beaks[J]. Marine Fisheries, 2018, 40(2): 242-248.
- [11] 吴正兴,喻俊志,苏宗帅,等. 仿生机器鱼S形起动的控制与实现[J]. 自动化学报, 2013, 39(11): 1914-1922.
WU Z X, YU J Z, SU Z S, et al. Control and implementation of S-start for a multijoint biomimetic robotic fish[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(11): 1914-1922.
- [12] 刘鹏. 一种仿生机器海豚的机械设计及其运动分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
LIU P. Mechanical design and motion analysis of the biomimetic robotic dolphin[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [13] 宋武超,王聪,魏英杰,等. 水下航行体俯仰运动微气泡流形态及减阻特性试验研究[J]. 兵工学报, 2019, 40(6): 1216-1225.
SONG W C, WANG C, WEI Y J, et al. Experimental Study of microbubble flow and drag reduction characteristics of underwater vehicle in pitching movement [J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(6): 1216-1225.
- [14] 李瑞环,张小宇,孔祥洪,等. 基于仿生航行器的养殖水环境要素检测分析系统设计[J]. 上海海洋大学学报, 2020, 29(5): 650-660.
LI R H, ZHANG X Y, KONG X H, et al. Design of detection and analysis system for aquaculture water environment factors based on bionic vehicle[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2020, 29(5): 650-660.
- [15] 邱厥. 生物统计的应用[J]. 四川农业科技, 1983(5): 29-33.
QIU J. Application of biometrics [J]. Science and Technology of Sichuan Agriculture, 1983(5): 29-33.
- [16] 陈新军,刘必林,方舟,等. 头足纲[M]. 北京:海洋出版社, 2019: 1-389.
CHEN X J, LIU B L, FAGN Z, et al. Cephalopod outline [M]. Beijing: China Ocean Press, 2019: 1-389.
- [17] BARTOL I K, KRUEGER P S, JASTREBSKY R A, et al. Volumetric flow imaging reveals the importance of vortex ring formation in squid swimming tail-first and arms-first[J]. The Journal of Experimental Biology, 2016, 219(Pt 3): 392-403.
- [18] 王成杰,杨震,许舟洲. 汽车外流场特性分析[J]. 科技风, 2015(9): 32.
WANG C J, YANG Z, XU Z Z. Analysis of characteristics of automobile outflow field[J]. Technology Wind, 2015(9): 32.
- [19] 彭晓清,初文华,姚佳玲,等. 仿生鱿鱼肉鳍扑动推进机理数值研究[J]. 上海海洋大学学报, 2021, 30(1): 163-170.
PENG X Q, CHU W H, YAO J L, et al. Numerical research on the fin flapping propulsion mechanism of bionic squid[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2021, 30(1): 163-170.

Numerical simulation of hydrodynamics of bionic squid in pitching posture

HUANG Xiaoshuang¹, SUN Wengjie², WANG Jingfeng³, KONG Xianghong^{1,4}, LIU Bilin^{1,4,5,6}, CHEN Xinjun^{1,4,5,6}

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. College of Information Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 4. National Engineering Research Center for Ocean in Fisheries, Shanghai 201306, China; 5. Key Laboratory of Sustainable Development of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China; 6. Key Laboratory of Oceanic Fisheries Exploration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China;)

Abstract: In the design and research of bionic squid, it is very important to study the hydrodynamic characteristics in the pitching posture, and the completion of pitching motion is the foundation for the realization of its behavior bionics, basic swimming motion and function. In order to study the hydrodynamic characteristics of the bionic squid's flexible tentacles in its pitching posture, the bionic squid was selected as the biomimetic object, and the flexible tentacle bending model at different pitching angles was established through the biomimetic squid simplified model. According to the 3D model, the hydrodynamic characteristics of biomimetic squid in different pitching postures and different bending degrees of tentacle were analyzed and compared by numerical simulation method. Through analysis; when the biomimetic squid uses flexible tentacle to coordinate swimming, it provides a favorable moment for the completion of its pitching posture, which is more conducive to the change of its pitching posture and swimming direction when it swims at high speed. When the bionic squid completes the pitching posture, it can adjust the posture and swimming direction more timely and efficiently by changing the bending degree of the tentacle, and it requires less energy consumption. The results may lay a foundation for the research on the flexibility and swimming behavior of biomimetic squid.

Key words: bionics; squid; pitching; flexible characteristics; maneuverability; numerical simulation