

仿生鱿鱼流体形态建模与数值模拟

黄小双, 刘帆, 孙翁杰, 孔祥洪, 刘必林, 陈新军

Fluid morphology modeling and numerical simulation of biomimetic squid

HUANG Xiaoshuang, LIU Fan, SUN Wengjie, KONG Xianghong, LIU Bilin, CHEN Xinjun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12024/jsou.20201103225>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

节能型拖网渔船数值模拟建模及网格划分

Numerical simulation and grid division for energy-saving trawler

渔业现代化. 2013, 40(2): 45 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-9580.2013.02.009>

基于CFD的进水管布设位置对沉降式固体颗粒排污影响的数值模拟

Numerical simulation on influence of inlet pipe location on the discharge rate of settling solid particles based on computation fluid dynamics

大连海洋大学学报. 2021, 36(4): 620 <https://doi.org/10.16535/j.cnki.dlhyxb.2021-112>

基于CFD-EDM的自动投饵饲料颗粒气力输送数值模拟

Simulation of automatic pneumatic conveying process of automatic feeding system based on computational fluid dynamics-discrete element method

南方水产科学. 2019, 15(3): 113 <https://doi.org/10.12131/20180219>

基于Fluent的射流式增氧装置的数值模拟与试验研究

Numerical simulation and experiment in the design of a jet aerator based on Fluent

大连海洋大学学报. 2011, 26(3): 247 <https://doi.org/10.16535/j.cnki.dlhyxb.2011.03.010>

水流作用网衣过程的数值模拟

Numerical simulation of dynamic process of cylinder nets in current

南方水产科学. 2011, 7(3): 56 <https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-0780.2011.03.010>

文章编号: 1674-5566(2021)05-0884-09

DOI:10.12024/jsou.20201103225

仿生鱿鱼流体形态建模与数值模拟

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

(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. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306; 4. 大洋渔业资源可持续开发教育部重点实验室, 上海 201306; 5. 农业农村部大洋渔业开发重点实验室, 上海 201306)

摘要: 随着人工智能与科技手段的逐步发展与提升, 鱼类形态特征的研究与鱼类游动减阻机制对于仿生机器鱼设计与复杂游动行为至关重要。以茎柔鱼(*Dosidicus gigas*)为研究对象, 通过对茎柔鱼样本进行视觉图像采集, 利用计算机视觉技术提取生物样本形态特征, 根据生物特征长度建立生物形态外轮廓方程与三维简化模型, 采用数值模拟与四面体非结构网格的方法, 计算分析仿生鱿鱼在高速游动过程中的流场特性。分析表明: 基于轮廓方程的仿生鱿鱼简化模型在高速游动时具有较低的游行阻力, 速度达 13.89 m/s 且俯仰角度在 $\pm 30^\circ$ 内, 其阻力系数为 0.000 4~0.001 1, 揭示了生物游动时其形态在减阻机制中的重要性; 鱿鱼在高速游动时该种姿态为其完成俯仰、转向等奠定了流体形态基础。因此基于生物形态的外轮廓特征与计算流体力学方法为仿生鱿鱼进一步的设计与研究提供了参考依据。

关键词: 形态特征; 仿生; 鱿鱼; 形态建模; 数值模拟; 计算流体力学

中图分类号: S 951.2 **文献标志码:** A

我国拥有着 470 万 km² 的海洋面积, 海洋生物种类繁多, 鱼类、虾蟹类和头足类是我国主要的渔业资源^[1-2]。鱿鱼隶属软体动物门(Mollusca)头足纲(Cephalopoda), 触腕位于头部前端, 不仅是头足类捕食与交配等的行为器官, 也是其完成水中滑行的重要运动器官之一^[3]。触腕在鱿鱼游动过程中聚拢合并, 使其在高速航行与加速瞬间可以与胴体及尾部形成优异的流体外形结构, 充分利用了水动力学特性, 大大减少了航行阻力, 同时为其完成急加速、俯仰等动作提供了有力、高效的保障与支持^[4]。

鱿鱼因脱离海水便会死亡, 所以活体试验较难进行^[5]。因此, 计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)的研究方法对于研究鱿鱼游动行为与游动机理至关重要^[6]。鱿鱼的游动行为十分复杂: 流体动力学的理论分析是流体力学分析的一种高级形式, 并为仿生鱿鱼模型提出合

理的理论模型; 而数值模拟方法不仅快速便捷, 并且可以较为直观地研究生物游动的流体动力学机理^[7]。吴文广等^[8]对鲷科(Carangidae)鱼类建立了简化仿生模型并定性分析了流场信息和尾迹涡街的形成耗散过程。李瑞环等^[9]基于流体形态较好的蝠鲼(Mobula)机器鱼平台进行水环境要素检测, 但并未进行形态学流体分析。张募群等^[10]针对鱼体形态特征, 研究其表面减阻机理。

鱿鱼的生活海域垂直分布十分广阔, 其一天在同一海域内可以实现昼夜垂直洄游^[11-12], 并在湍流中保持稳定的上升姿态。相关研究^[13]表明, 鱿鱼具有很高的机动性, 也是目前研究发现的水生生物中机动性最好的^[14]生物体。茎柔鱼(*Dosidicus gigas*)隶属柔鱼科(Ommastrephidae)茎柔鱼属(*Dosidicus* sp.), 是柔鱼科中个体最大的种类^[1]。渔业资源相关调查^[3]发现, 茎柔鱼是

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

适应性和自主洄游性相对较强的头足类生物。相关研究^[15]表明,在水下深度约 600 m 时,茎柔鱼在高速游动过程中肉鳍呈现合拢姿态,腕部呈现收缩状态。因此,本文在上海海洋大学机器鱼创新实验室团队所设计研发的机器鱼基础上,通过计算机生物测量的方法确定优化仿生鱿鱼的流体外形,构造其外轮廓曲线与三维简化模型,将鱿鱼胴体部分进行曲线拟合并对该形态特征下三维模型进行外流场数值模拟分析,研究其生物形态及其形态减阻机制,旨在为研究游动过程中腕部行为特性与水动力学特性奠定基础。

1 材料与方 法

1.1 仿生对象

茎柔鱼样本采自东太平洋赤道外海,捕获后经冷冻储藏带回实验室进行生物学试验。样本形态参数测量在微冻状态下进行,测量其胴长、胴宽、腕长、头宽。为获取基本形态特征,按其个体大小选取了 39 尾茎柔鱼样本。

1.2 形态特征建立

首先针对鱿鱼形态特征^[16-21],确定鱿鱼采集图像中的特征点,采集时沿图像二维方位放置刻度尺,并标记出确定鱿鱼形态的 10 个特征点(图 1),10 个特征点的定义见表 1。利用计算机技术对边缘进行数值运算分析,通过不断地迭代扫描确定特征点的像素坐标。鱿鱼外形特征数值化是由特征点坐标得到的图像特征,主要包括鱿鱼的胴长、鳍宽等特征,然后得到鱿鱼形态主要特征在胴体方向所占比例,最后根据特征点进行鱿鱼轮廓曲线拟合,得到外轮廓曲线函数。

在研究头足类生物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^[3],确定游动时的坐标方位与视图方向(图 2)。区别于大多数海洋生物,鱿鱼在游动过程中可以以腕在前游动,还会以尾在前运动,并且在俯仰高速游动时多以尾在前的姿态。如图 2 所示,图中为本研究中所定义的仿生鱿鱼形态方位示意图,仿生鱿鱼以尾在前游动前行时沿 X 轴正向及 Z 轴正向,上方为鱿鱼背视图,反之则为腹视图。研究中所进行的形态特征确立与数值仿真模拟均以鱿鱼尾在前的姿态。

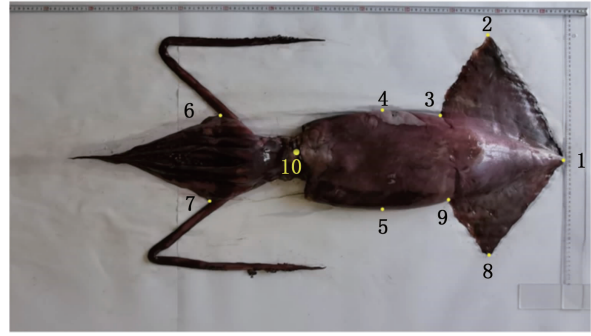


图 1 茎柔鱼形态特征测量图

Fig. 1 Morphological characteristics measurement of *Dosidicus gigas* Orbigny

表 1 特征点的定义

Tab. 1 Definition of feature points

特征点 Feature point	定义 Definition
1	位于胴体尾端最长点 Longest point at tail of mantle
2	左侧肉鳍最宽点 Widest point of the left fin
3	左侧肉鳍基部末端 Basal end of the left fin
4	胴体第一最宽点 The first widest point of the mantle
5	胴体第二最宽点 The second widest point of the mantle
6	头部第一最宽点 The first widest point of the head
7	头部第二最宽点 The second widest point of the head
8	右侧肉鳍最宽点 Widest point of the right fin
9	右侧肉鳍基部末端 Basal end of the right fin
10	外鞘第二最前端 Second most anterior of the gladius

1.3 轮廓提取

为了便于后续图像的分割与识别,首先将图片进行灰度化处理。如图 1 所示为茎柔鱼形态特征测量图,即对图 1 进行灰度化处理。样本拍摄的过程中,由于背景高光反光、茎柔鱼湿表高光反光与背景污染等原因,在灰度化图片边缘提取的过程中会将周围噪声作为连通域,因此利用连通域分析函数过滤经 Canny 算法提取鱿鱼样本外轮廓,并去除鱿鱼样本轮廓特征外的连通域。

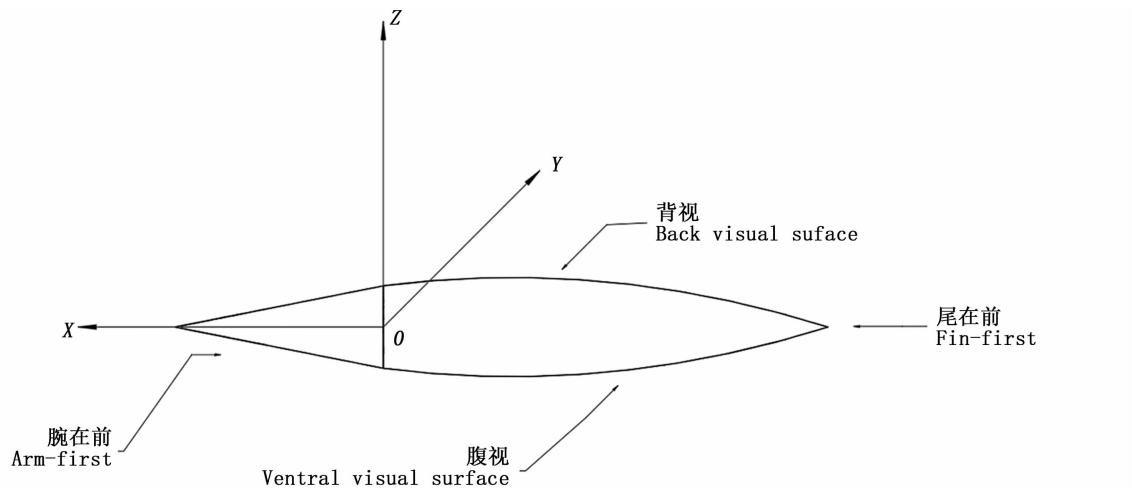


图2 仿生鱿鱼形态方位示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the shape orientation of bionic squid

1.4 流体基本理论

流体力学相关研究方法包括实验验证方法、理论分析法和数值模拟法^[22],本文采用数值模拟法进行流体力学计算。在计算机技术的不断发展中,新兴的流体力学计算方法不断出现,其模拟与仿真结构是设计与研究中的重要参考。另外,数值模拟的优势在于过程简单便捷、数值有效。常用的流体动力学仿真软件有 Fluent 与 CFX (compulation fluid X),本文采用 Fluent 软件进行计算求解。对水下航行器水动力特性进行数值模拟时,一般不考虑水的压缩性,把水环境看作是不可压缩流场。在流体力学中,所有的流体流动都遵循三大基本守恒定律^[23],即质量守恒定律、动量守恒定律与能量守恒定律。三者对应的基本控制方程分别为质量守恒方程、动量守恒方程与能量守恒方程。常见的数值求解方法包括有限差分法、有限元法和有限体积法三类^[24]。因为流场对守恒有严格要求,有限差分法和有限元法不具有很好的守恒性,前两种方法在水动力计算中很少采用,本文基于有限体积法进行求解。

1.5 仿真计算模型

1.5.1 计算域与边界条件

仿生鱿鱼模型通过 SolidWorks 三维软件对其外形进行简化建模,流域成圆柱形,半径和母线均为模型的 6 倍,减少了流体中边缘效应对结果的影响^[25],进出水口分别为圆柱的两个底面,形

成了类似风洞的测试环境(图3)。模型在其中是静止的,而流体是运动的。入口设置流速为 13.89 m/s,出口压强设置为 101.325 kPa,在流速设置方面,相关研究与调查^[15,26]表明,其在捕食、避敌等高速游动时最大速度可达 13.89 m/s。

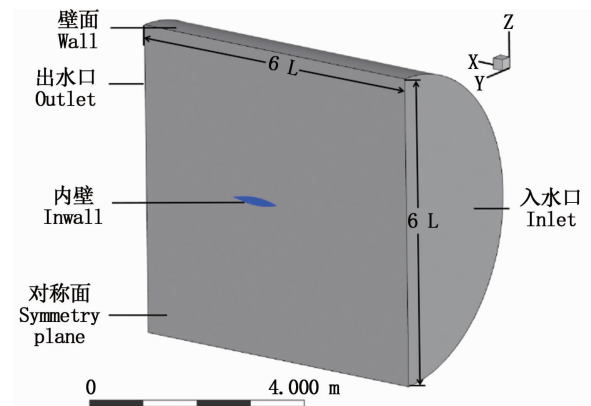


图3 计算域流场设置

Fig. 3 Computational domain flow field settings

1.5.2 网格划分及参数设置

细密的网格可以使结果更精确,但是会增加 CPU 计算时间和需要更大的存储空间,特别是有些不必要的细节会大大增加分析需求。有些地方,如复杂应力梯度区域需要高密度的网格,因此采用非结构网格生成方法。图4所示为网格划分效果图,图中仿生鱿鱼呈水平状态时,网格数为 526 109。

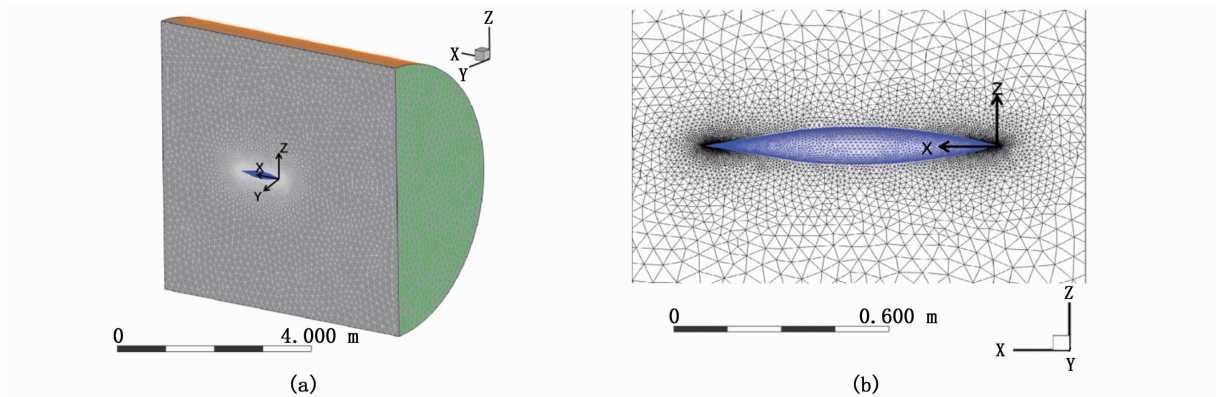


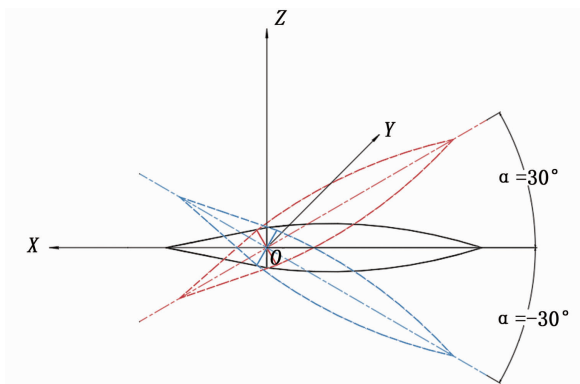
图4 网格划分效果

Fig.4 Meshing effect

网格划分中物理方法使用 CFD,求解方法使用 CFX,划分方法使用默认的 Automatic,高级尺寸函数选择可使用比较复杂的模型的方法 Proximity and Curvature。由于仿生鱿鱼的模型存在弯曲过渡部分,需要对局部表面进行网格优化,以达到较为理想的效果,图 4b 为计算模型表面与局部网格划分情况。

1.5.3 计算工况设置

鱿鱼通过喷射、肉鳍等多个器官的相互配合实现俯仰姿态。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 30° 和 -30° 状态下的水动力性能。俯仰姿态高速游动过程中俯仰角 α 定义如图 5 所示。

图5 俯仰角 α 参数定义Fig.5 Definition of pitch angle α

对于仿真模拟而言,数值模拟环境的设置,如初始条件、假设条件对于结果的产生至关重要^[27]。其数值模拟具体设置与假设条件:(1)水

域为不可压缩流体,且暂不考虑兴波的影响;(2)水环境温度与密度均为定值;(3)忽略水下压强与鱿鱼胴体收缩时所带来的形体改变。

具体设置参数:假设流体为不可压缩,流速 V 设置为 13.89 m/s ,壁面设置为光滑,流质密度 ρ 设定为 997 kg/m^3 ,动力黏度 μ 设置为 112.035×10^{-4} ,因此根据如下公式计算数值模拟中雷诺数大小:

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

式中: R_e 为雷诺数; ρ 流体密度, kg/m^3 ; V 为流速, m/s ; L 为仿生鱿鱼模型特征长度, m ; μ 为流体黏滞系数(动力黏度), m^2/s 。由此可估算出模型的雷诺数约为 10^6 ,故为湍流。在湍流模型方面,仅需考虑流动的物理情况和壁面的处理,选择 SST 湍流模型,设置收敛残差为 0.00001 ,保证了求解准确性。

2 结果

2.1 建模分析

对于仿生鱿鱼形态建模,将模型进行简化处理,且只针对仿生鱿鱼高速游动时的形态阻力特征,即仿生鱿鱼肉鳍假设为合拢的状态。根据研究中选取的 10 个特征点(表 1),并通过得到的特征点平面坐标,对样本的胴长、胴宽、头长、头宽特征等进行数值化,最后得到各部分在胴长方向所占的比例。

鱿鱼样本形态特征描述用于确定鱿鱼身体各部分形态比例,6 个形态特征参数均利用图 1 拍摄计算所得(表 2)。

表2 莖柔鱼形态主要特征描述
Tab.2 Description of main characteristics of the shape of *Dosidicus gigas*

特征名 Characteristics	特征值 Eigenvalue/mm	比例关系 Proportional relationship/%
胴长 Mant lelength	549	100.00
头宽 Head width	184	33.52
头长 Head length	104	18.94
鳍长 Fin length	236	42.99
胴宽 Mantle width	169	30.78
鳍宽 Fin width	397	72.31

在仿生鱿鱼模型建立时,为了得到较为光滑的外轮廓曲线,通过对所测量的生物样本外轮廓特征点进行曲线拟合。生物鱿鱼测量拟合中发现,忽略肉鳍平展时的姿态,对于胴体部分采用二次样条曲线进行曲线拟合。二次样条曲线的参数化表达式为

$$P(x) = C_1x^2 + C_2x + C_3 \quad (2)$$

在样本照片中,选取胴体部分外部轮廓上3个特征点,分别为胴体前端点、胴体后端点与胴体最宽点。通过3个点进行插值计算,拟合为一元二次函数。胴体外轮廓曲线拟合函数为 ($-619.338 < x < 0$)

$$|P(x)| = 0.000358x^2 - 0.129x + 57.442 \quad (3)$$

鱿鱼在高速游动时,其触腕部分每条腕均紧密贴合,因此在本文中将其腕部与头部近似为一次函数模型。通过选取头宽点与触腕前端点为特征点,拟合为所需直线。头部与腕部轮廓线拟合函数 ($0 < x < 290.03$) 为

$$|P(x)| = 0.198x - 57.425 \quad (4)$$

因此,得到仿生鱿鱼简化模型外轮廓曲线函数

$$|P(x)| = \begin{cases} 0.000358x^2 - 0.129x + 57.442 & (-619.338 < x < 0) \\ 0.198x - 57.425 & (0 < x < 290.03) \end{cases} \quad (5)$$

2.2 流场分析

分别针对仿生鱿鱼模型水平放置 0° 、仰角为 30° 与俯角为 -30° 的游动情况进行流体数值模拟仿真与分析。以3种不同状态的俯仰角为例,对比其速度流场的分布变化。

在仿生鱿鱼模型在水平游动过程中可以发现,仿生鱿鱼的前方与后方均有一部分流速较低的区域,仿生鱿鱼头部与胴体部分流速最大(图6a),并在该图中可以看出触腕的前端为整个流场中流速最低的区域。根据计算形状阻力,由此可以推断该仿生鱿鱼以尾鳍在前的游动方式情况下,该模型流体外形结构具有较好的水动力学特性。当鱿鱼以仰角上升或俯角下潜的姿态时,由于较高的流速,迎流会在鱿鱼尾部上方与腕部下方产生一对流速差较大的区域,更利于鱿鱼快速、高效、低耗地完成上升或下潜动作(图6b, 6c)。

通过比较流场中仿生鱿鱼不同游动姿态速度分布变化,其数据散点图可以直观地表征不同姿态下仿生鱿鱼表面速度情况(图7)。当仿生鱿鱼成水平姿态高速游动时,仿生鱿鱼表面速度升高,高于 13.89 m/s ,最大速度为 14.28 m/s 。当俯仰角为 $\pm 30^\circ$ 时,其速度分布区间一致,且梯度变化明显,最大速度为 14.15 m/s ,流场平均速度值为 12.23 m/s 。

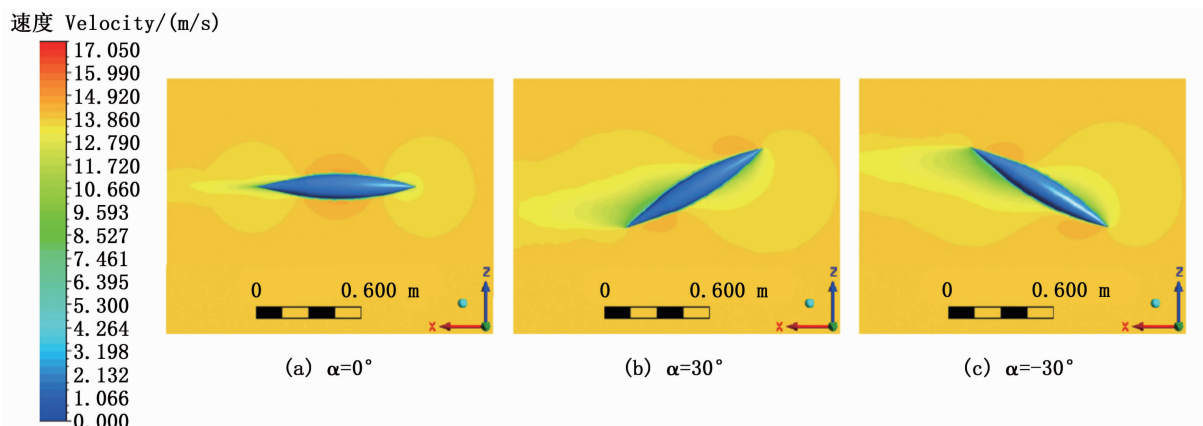


图6 不同姿态下模型表面速度分布

Fig.6 Surface velocity distribution of the model at different pitch attitudes

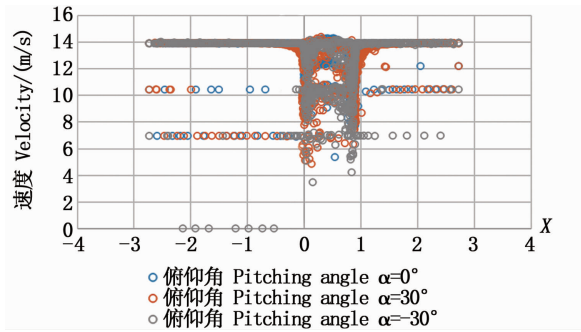


图7 仿生鱿鱼不同游动姿态速度分布变化散点图
Fig.7 Variation of velocity distribution of biomimetic squid at different swimming attitudes

研究鱿鱼的水动力特性,分析瞬态压力分布至关重要。为分析鱿鱼在俯仰姿态下流场压力分布状态,绘制了鱿鱼在不同游动姿态下流场的压力云图。图8a为鱿鱼尾在前、水平姿态下的游动情况,其尾部后方存在明显的压力集中区域,

即鱿鱼前后存在明显的压差;鱿鱼背部与腹部在胴体周围分布较为均匀对称,证明鱿鱼肉鳍、触腕聚拢时,其平衡状态与流体阻力性能较好。当仿生鱿鱼模型以仰角为 30°模拟高速上升时,其尾部腹面存在明显的高压区,头部与触腕背面存在压力集中区域(图8b);相应地,当仿生鱿鱼模型以俯角为 30°模拟俯冲时,其尾部背面存在明显的高压区,头部与触腕腹面压力集中(图8c)。

当仿生鱿鱼模型处于水平姿态时,模型周围流线分布较为均匀,且平行流线分布区域较广(图9)。生物鱿鱼在急加速游动过程中肉鳍与触腕均为合拢姿态,便于整个胴体部分构成了良好的梭形流体结构。进一步分析发现,其周围流场流线分布较为均匀时,姿态发生轻微改变,其俯仰效率便会大大提高。从图9可以看到,当仿生鱿鱼模型为俯仰姿态时,触腕前端流线发生明显的集中变化。

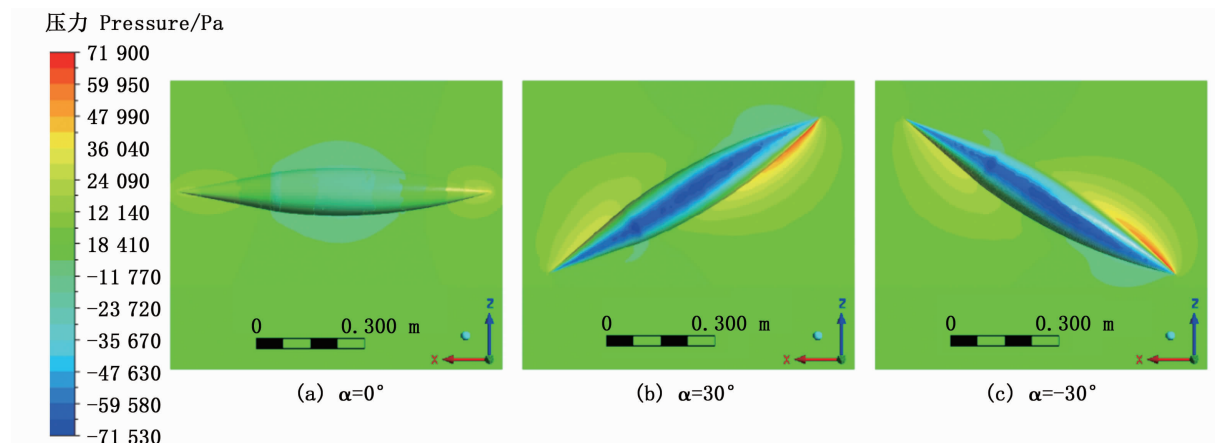


图8 不同姿态下模型表面压力分布
Fig.8 Surface pressure distribution of the model at different pitch attitudes

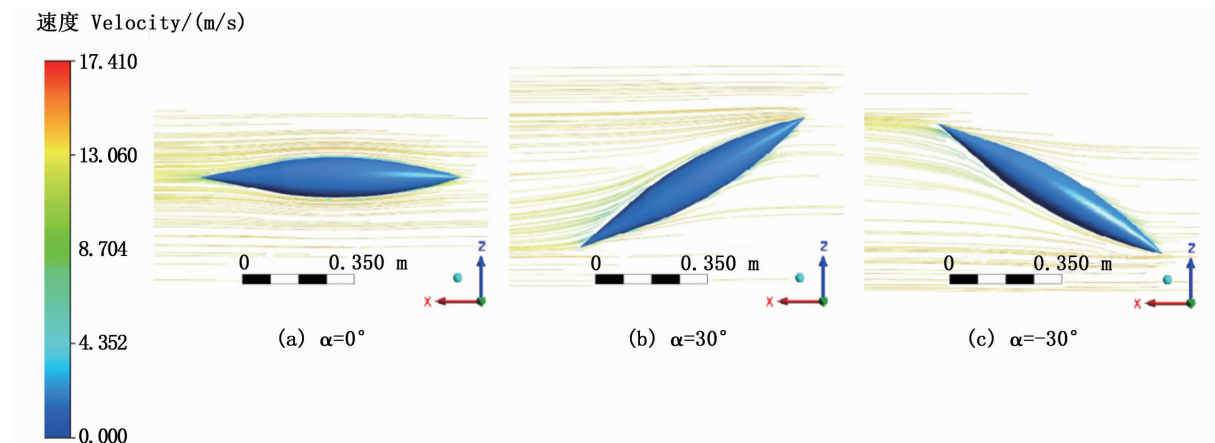


图9 不同姿态下流场流线分布情况
Fig.9 Streamline distribution of flow field at different pitch attitudes

流场流线体现模型周围水流变化,同时为更直观地评价其流体形态,需要比较其游动阻力系数^[28]。如图10,当仿生鱿鱼模型呈水平高速航

行时,其阻力系数约为0.0004;俯仰角为 $\pm 30^\circ$ 时,阻力系数基本一致,约为0.0011。

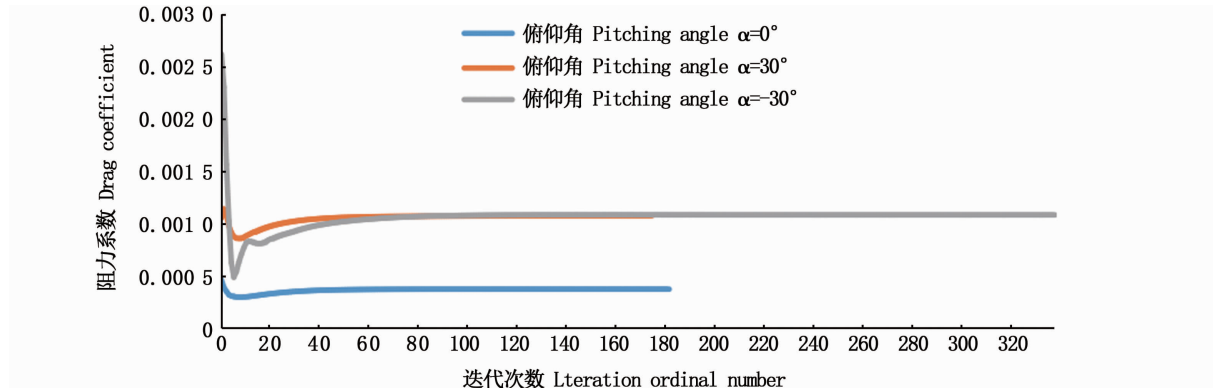


图10 仿生鱿鱼不同运动姿态下阻力系数

Fig. 10 Resistance coefficient of biomimetic squid under different motion posture

3 讨论

由于头足类肌肉组织柔性程度较高,因此在实验台测量时会发生较大误差,通过选取特征点进行曲线拟合的方法可以减小测量时由于不同部位肌肉脱水所带来的误差。但是在对生物样本进行形态特征测量时,其形态特征与三维模型建立仍具有差距,但是建立三维模型的过程中对部分形态特征进行了简化,为进一步精确优化鱿鱼样本与三维模型的一致性,可利用对鱿鱼活体游动视频进行特征识别,更精确模拟鱿鱼高速游动时形态特征。

在柔性仿生鱿鱼的设计研究中,俯仰姿态是其基本的游动行为之一,为减少其游动过程中的航行阻力,构造其流体外形至关重要。通过探索与实践,发现利用生物测量的方法对茎柔鱼进行形态参数特征的确定,拟合其外轮廓曲线,以及利用三维软件进行模型建造,初步验证了生物测量与计算流体力学的方法可以对仿生鱿鱼流体形态参数及游行阻力进行较为有效的计算模拟。但是数值模拟方法所得到的结果仅是从理论分析上得到仿真结果的参考,为了进一步地验证其有效性,还需进行相关的模型设计进行实验验证。

鱿鱼游动过程中,其游动行为是多个器官之间的相互配合协调共同完成的。因此从上述分析可以看出,通过生物测量拟合的轮廓曲线所构

造的流体形态在水平高速游动时,其上下表面速度差、压力差较小,并在高速游动时速度达13.89 m/s,其水平姿态阻力系数为0.0004;当仿生鱿鱼模型发生俯仰姿态变化(俯仰角仅以 $\pm 30^\circ$ 为例)时,模型头部与尾部速度差、压力差迅速发生变化,梯度明显,阻力系数均为0.0011,该数值较规则几何形体小,为其完成俯仰姿态获得更高的效率。因此在对仿生鱿鱼整体进行设计,完成俯仰姿态时,需要对其触腕、肉鳍等部分进行运动的协调耦合与设计,在今后的设计制作中,仿生鱿鱼加速阶段时控制腕部合拢,并通过改变腕部摆动方向,推测会产生空间内不同方向的转动力矩,有利于其俯仰、转向等动作的完成。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 陈新军. 世界头足类资源开发现状及我国远洋鱿钓渔业发展对策[J]. 上海海洋大学学报, 2019, 28(3): 321-330.
CHEN X J. Development status of world cephalopod fisheries and suggestions for squid jigging fishery in China [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2019, 28(3): 321-330.
- [3] 刘金立,陈新军. 世界大洋性鱿钓渔业研究评述[J]. 上海海洋大学学报, 2019, 28(3): 331-343.
LIU J L, CHEN X J. Bibliometrics research of document on

- the theme of oceanic squid jigging fishery in the world [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2019, 28(3): 331-343.
- [4] ANDERSON E J, DEMONT M E. The mechanics of locomotion in the squid *Loligo pealei*: locomotory function and unsteady hydrodynamics of the jet and intramantle pressure [J]. The Journal of Experimental Biology, 2000, 203(Pt18): 2851-2863.
- [5] BARTOL I K, PATTERSON M R, MANN R. Swimming mechanics and behavior of the shallow-water brief squid *Lolliguncula brevis* [J]. The Journal of Experimental Biology, 2001, 204(Pt21): 3655-3682.
- [6] 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.
- [7] 杭观荣, 王振龙, 王扬威, 等. 肌肉性静水骨骼原理的仿乌贼鳍推进器 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(11): 59-64.
- HANG G R, WANG Z L, WANG Y W, et al. Squid fin-like propeller based on the principle of muscular hydrostat [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(11): 59-64.
- [8] 吴文广. 仿鲂科机器鱼推进性能实验研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010.
- WU W G. Experimental research on the propulsion performance of Carangiform robotic fish [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010.
- [9] 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.
- [10] 张募群. 仿生机器鱼非光滑表面减阻性能研究 [D]. 济南: 山东大学, 2017.
- ZHANG M Q. Study on non-smooth surface drag reduction performance of biomimetic robot fish [D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [11] BARTOL I K, KRUEGER P S, YORK C A, et al. New approaches for assessing squid fin motions: coupling properorthogonal decomposition with volume TRiC particle tracking velocimetry [J]. Journal of Experimental Biology, 2018, 221(14): jeb176750.
- [12] 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.
- [13] 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(Pt9): 1317-1326.
- [14] NIGMATULLIN C M, NESIS K, ARKHIPKIN A I. A review of the biology of the jumbo squid *Dosidicus gigas* (Cephalopoda: Ommastrephidae) [J]. Fisheries Research, 2001, 54(1): 9-19.
- [15] 刘丙宝. 第二代全海深作业型无人潜水器完成 3 500 米级阶段性海试 [EB/OL]. [2020-07-15]. <https://hyxy.shou.edu.cn/2020/0715/c7379a272946/page.htm>.
- LIU B B. The second generation of deep-sea unmanned underwater vehicle (UAVS) has completed the stage sea test of 3 500 m [EB/OL]. [2020-07-15]. <https://hyxy.shou.edu.cn/2020/0715/c7379a272946/page.htm>.
- [16] 陈新军, 方舟, 苏杭, 等. 几何形态测量学在水生动物中的应用及其进展 [J]. 水产学报, 2013, 37(12): 1873-1885.
- CHEN X J, FANG Z, SU H, et al. Review and application of geometric morphometrics in aquatic animals [J]. Journal of Fisheries of China, 2013, 37(12): 1873-1885.
- [17] 吴一全, 殷骏, 戴一冕, 等. 基于蜂群优化多核支持向量机的淡水鱼种类识别 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(16): 312-319.
- WU Y Q, YIN J, DAI Y M, et al. Identification method of freshwater fish species using multi-kernel support vector machine with bee colony optimization [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(16): 312-319.
- [18] 葛德燕, 夏霖, 吕雪霏, 等. 几何形态学方法及其在动物发育与系统进化研究中的应用 [J]. 动物分类学报, 2012, 37(2): 296-304.
- GE D Y, XIA L, LYU X F, et al. Methods in geometric morphometrics and their applications in ontogenetic and evolutionary biology of animals [J]. Acta Zootaxonomica Sinica, 2012, 37(2): 296-304.
- [19] 谭昱, 张炫, 和绍禹, 等. 云南东方蜜蜂的形态特征数值分类研究 [J]. 中国养蜂, 2003, 54(3): 4-6.
- TAN K, ZHANG X, HE S Y, et al. Morphometric and biogeography of Yunnan *A. cerana* [J]. Apiculture of China, 2003, 54(3): 4-6.
- [20] 王鑫, 杨延红, 陈胜勇. 人体几何建模方法综述 [J]. 计算机科学, 2015, 42(11A): 104-108.
- WANG X, YANG Y H, CHEN S Y. Survey of human body geometry modeling methods [J]. Computer Science, 2015, 42(11A): 104-108.
- [21] 王建平, 张香伟. 一类二次保形拟插值函数的研究 [J]. 大学数学, 2010, 26(2): 135-142.
- WANG J P, ZHANG X W. Study on a class of quadratic shape-preserving quasi-interpolation functions [J]. College Mathematics, 2010, 26(2): 135-142.
- [22] 方达宪, 王艳华, 王伟, 等. 流体力学 [M]. 南京: 东南

- 大学出版社, 2018; 1-258.
- FANG D X, WANG Y H, WANG W, et al. Fluid mechanics [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2008; 1-258.
- [23] 吴德阳, 唐勇, 刘浩阳, 等. 基于物理的不可压缩流体模拟技术综述[J]. 高技术通讯, 2020, 30(11): 1189-1204.
- WU D Y, TANG Y, LIU H Y, et al. A survey of incompressible fluid simulation techniques based on physics [J]. Chinese High Technology Letters, 2020, 30(11): 1189-1204.
- [24] 郭泽宇, 陈作钢. 基于复杂柔性运动流场数值求解的动网格方案及应用[J]. 上海交通大学学报, 2018, 52(4): 403-409.
- GUO Z Y, CHEN Z G. A dynamic grids method for numerical simulation of complicated flexible movement flow field and its application[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2018, 52(4): 403-409.
- [25] 李慧明. 水下航行器减阻技术数值模拟及机理分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- LI H M. Direct numerical simulation of drag reduction of underwater aircraft and drag reduction mechanism analysis [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [26] 陈芃, 方舟, 陈新军. 菱鳍乌贼渔业生物学研究进展[J]. 海洋渔业, 2015, 37(2): 187-196.
- CHEN P, FANG Z, CHEN X J. Review on fishery biology of diamond squid (*Thysanoteuthis rhombus*) [J]. Marine Fisheries, 2015, 37(2): 187-196.
- [27] 潘德凯. 基于水下运动体绕流场的探测原理研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- PAN D K. Principle of detection based on flow field of underwater moving object [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [28] 秦立果, 孙红江, 杨浩, 等. 鲨鱼皮盾鳞结构减阻性能数值模拟[J]. 中国科技论文, 2019, 14(12): 1271-1277.
- QIN L G, SUN H J, YANG H, et al. Numerical simulation on drag reduction performance of shark skin with denticles structures [J]. China Science Paper, 2019, 14(12): 1271-1277.

Fluid morphology modeling and numerical simulation of biomimetic squid

HUANG Xiaoshuang¹, LIU Fan¹, SUN Wengjie², KONG Xianghong^{1,3}, LIU Bilin^{1,3,4,5}, CHEN Xinjun^{1,3,4,5}
(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. College of Information Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai 201306, China; 4. Key Laboratory of Sustainable Development of Oceanic Fisheries Resources, Ministry of Education, Shanghai 201306, China; 5. Key Laboratory of Oceanic Fisheries Exploration, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201306, China)

Abstract: In the process of building a maritime power, the study of fish morphological characteristics and fish swimming drag reduction mechanism is crucial to the design and complex swimming behaviour of bionic robotic fish. In this study, taking *Dasidicus gigas* as the research object, through the visual image acquisition of the samples of the fish, the external contour equations and 3D simplified model of the fish body were established based on the length of the biological characteristics. The analysis shows that the curve fitting method reduces the measurement error caused by the relaxation and deformation of the muscles in different body parts; the analysis shows that the simplified model of bionic squid based on contour equation has lower travel resistance when swimming at high speed, and the drag force coefficient is between 0.000 4 and 0.001 1 at a speed of 13.89 m/s, and the importance of morphology in the mechanism of drag reduction is revealed; this posture of the squid at high speed provides a fluid morphological basis for the squid. The biomorphic external profile and CFD methods provide reference for further design and research of the biomimetic squid.

Key words: morphological characteristics; biomimetic; *Dasidicus gigas*; morphology modeling; numerical simulation; CFD