

文章编号: 1674-5566(2025)04-0875-12

DOI: 10.12024/jsou. 20250504874

仿生蝠鲼型水下观测装置的设计

李炳麟¹, 王其伟¹, 黄小双¹, 张英¹, 孔祥洪^{1,2}, 韩东兴¹

(1. 上海海洋大学 海洋生物资源与管理学院, 上海 201306; 2. 国家远洋渔业工程技术研究中心, 上海 201306)

摘要: 为提升水产养殖水下观测的生态兼容性与数据获取效率,设计一种低扰动、高稳定性的仿生水下观测装置。实验采用仿生蝠鲼形态设计,基于计算机视觉提取生物标本轮廓并构建NACA0013翼型外形态模型,结合Lighthill理论建立展向运动学模型;通过动水槽试验验证水动力性能并开展实际水域试验,评估对鱼群的扰动程度及图像传输能力。结果显示:仿生本体轮廓与NACA0013翼型的拟合优度达0.944,具备优良流体动力特性;动水槽试验中,在 $\theta=50^\circ, f=0.830\text{ Hz}$ 时推力值、升力值、俯仰力矩值达到最大,呈规律振荡,表明运动平稳性;经测试,鱼群平均跟随率最高达36.5%,证实装置对鱼群干扰极小,环境兼容性优异,同时可实时传输仿生蝠鲼和自然鱼群共融的高清图像,完全满足生态观测需求。研究表明,NACA0013翼型具有显著的流线型拟合优势;仿生蝠鲼的推力、升力和俯仰力矩随运动振幅及频率的增大而增强,但受环境流速影响显著;当仿生蝠鲼运动速度为0.3 m/s时,鱼群跟随率达到峰值;该装置在水产养殖中可实现无扰检测,为养殖管理提供有效数据支撑。本研究为水产养殖提供了新型生态友好型水下观测装备,其仿生设计与智能控制方法可扩展至海洋生态监测、水下机器人等领域,推动低干扰水下技术的发展。

关键词: 仿生蝠鲼; 形态轮廓提取; 动水槽试验; 环境共融性; 机器鱼; 鱼群观测

中图分类号: S 951.2; TP 242.6 文献标志码: A

中国是世界上最大的水产养殖国家,具有悠久的鱼类养殖历史,2022年水产品产量为6 869万t^[1-2],规模化养殖对鱼类健康监测的精准性和效率提出了更高要求。在水产养殖领域,观测鱼类游动状态和反应行为是养殖人员获取鱼类信息的重要手段,有利于降低养殖风险,为水产养殖品质和经济效益提供帮助^[3]。传统鱼群观测方法有两种,一是由人工在池塘养殖现场观察,二是潜水员入水观察,但两种方法都需凭借人工经验进行判断或采取措施,此过程存在不连续、不稳定、观测结果主观性强等缺陷,其次潜水员观测存在溺水风险且人工成本高昂。近年来,随着人工智能技术和机器人技术的融合创新,水产养殖装备与技术不断发展^[4-5],自主式水下机器人(Autonomous underwater vehicle, AUV)是水产养殖装备领域内的热门方向^[6-9]。

大多数的AUV因配备螺旋桨推进器、电子

标签等,在进行鱼类行为观测时,会对水下环境和鱼群造成严重干扰,易引发鱼群应激反应并影响观测结果^[10]。为了解决上述问题,一些国内学者开始研究仿生机器鱼的研发和应用^[11-13]。仿生机器鱼凭借机动性高和环境共融性强等优势,可以更好地接近鱼群并实现观测功能。周梦园等^[11]设计了一款集成循迹避障模块、定位模块和实时图像采集模块的仿生鱼系统,实现自主性较高的移动监测;王懿偲等^[12]设计了一款面向全水域实时监测的水产养殖机器鱼,建立了机器鱼三维空间路径跟踪误差模型,具有良好的控制精度和鲁棒性。孔祥洪等^[13]设计了一款基于美国国家航空咨询委员会(National advisory committee for aeronautics, NACA)翼型方程的仿生江豚样机,进行多次鱼群共融性试验,均观察到有集鱼和鱼群跟随游动的现象,但因装置尺寸局限未能实现摄像传感器的搭载。在与鱼群共融的基础

收稿日期: 2025-05-26 修回日期: 2025-05-29

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFD2401302); 国家自然科学基金(41876141)

作者简介: 李炳麟(1999—),男,硕士研究生,研究方向为智能渔业装备。E-mail: 353450379@qq.com

通信作者: 孔祥洪, E-mail: xhkong@shou.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydxxb.com>

上,考虑水下观测传感器的稳定搭载和图像画面的稳定观测,根据相关研究^[14-16],身体/尾鳍推进(Body and/or caudal fin propulsion, BCF)模式的仿生机器鱼,鱼体波动幅度大,力矩变化范围大,在鱼群游动观测方面稳定性较差;而以蝠鲼为代表的中间鳍对鳍(Median and/or paired fin, MPF)模式鱼类,具有宽大而又扁平的身体结构,挂载能力强^[17],且凭借大胸鳍扑翼获得推力和升力,运动稳定性强。IVERSON等^[18]基于柔性箔片设计,探究了弦向柔性和俯仰运动学对扑翼推进装置的影响,发现柔性具有提高蝠鲼推进装置推力和稳定性优势;CAI等^[19]设置不同变量的拖曳水池试验,研究发现,蝠鲼装置具有较好的推力和升力性能。为此,本研究针对水产养殖中水下

鱼群观测的需求,提出了一款基于仿生蝠鲼的水下观测装置,基于生物标本进行弦向轮廓提取,利用NACA翼型进行拟合优化,建立形态模型;基于Lighthill理论,建立仿生蝠鲼运动学模型;构建鱼群观测系统和通信控制系统,进行样机总体设计;通过动水槽试验和池塘试验验证装置的稳定性、共融性,研究装置和思路可为水产养殖中新型水下观测装置的研制提供参考。

1 材料与方法

1.1 鱼体形态模型的建立

1.1.1 仿生对象

本研究所采用的蝠鲼样本来自上海海洋大学水生生物科技馆(图1)。

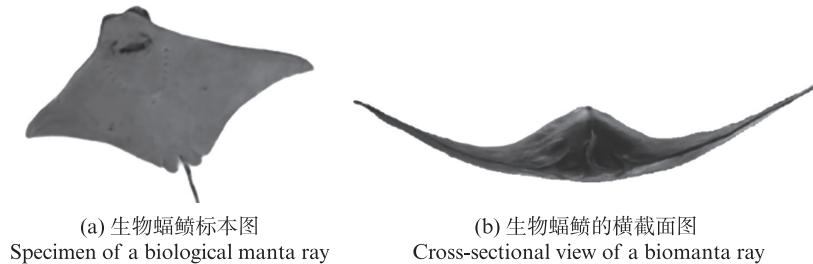


图1 上海海洋大学蝠鲼标本

Fig. 1 Manta ray specimen from Shanghai Ocean University

1.1.2 形态轮廓提取

根据Cannny边缘检测算法和最大连通域算法^[20]编制Matlab程序。其步骤如下:先利用高斯滤波平滑图像,去除噪声;对图形进行均值灰度化处理;提取图像的边缘轮廓;应用双阈值的方

法来决定可能的边界;然后通过最大连通域算法获得边缘图像中的最大连通域,去除Cannny造成的双边缘;最后在图像平面二维坐标系下,采用迭代遍历的方法得出所有的边缘像素点的坐标,翼缘灰度图如图2所示。



图2 翼缘二值图
Fig. 2 Binary diagram of wing edge

将得出像素点的坐标输入到Matlab软件CurveFitting工作区当中,再利用最小二乘法进行曲线拟合。通过计算求解出各个参数的最优估计值范围,取平均值为最优估计值,得出上、下边界翼缘拟合曲线分别如图2a,2b所示。

根据生物学观察研究表明,生物蝠鲼的展向轮廓和弦向轮廓与翼型形状相似^[21]。基于NACA四位数族对称翼型,进行适当变换后,与轮廓方程进行回归分析,选择拟合优度最高所对应的翼型方程。NACA四位数族对称翼型方程

由上下两个翼缘方程组成^[22],对称翼型NACA0013如图3所示,红色曲线表示翼型包络线。

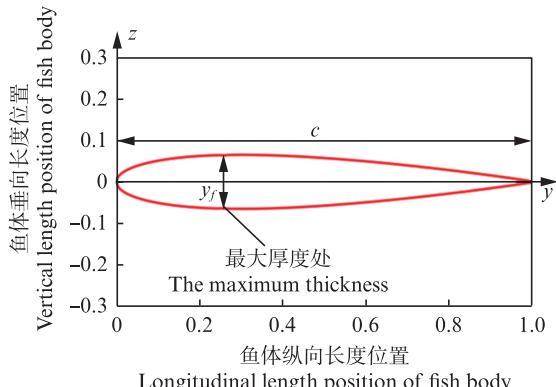


Fig. 3 NACA 四位数族对称翼型
Fig. 3 Four-digit family symmetric airfoil of NACA

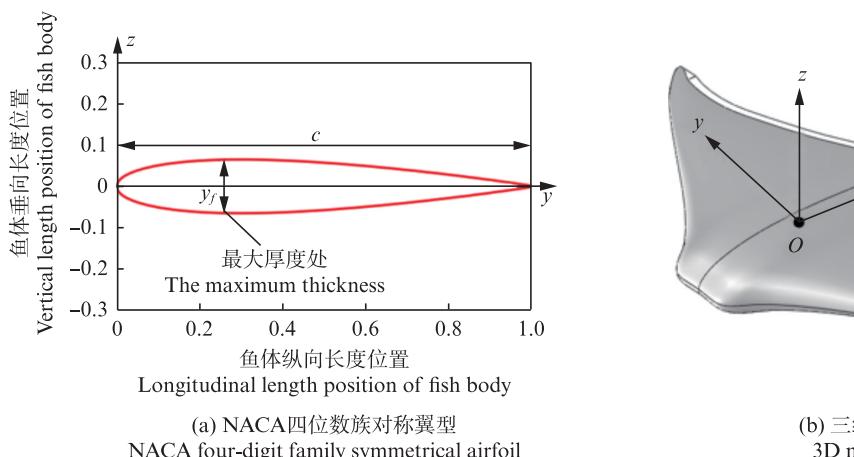


图4 蝙鲼翼型及三维模型
Fig. 4 Manta ray airfoil and 3D model

1.2 仿生蝠鲼设计

根据生物形态学建模和运动学建模,设计了一款具备鱼群观测功能的软体仿生蝠鲼样机。装置主要由仿生蝠鲼本体结构、通信和智能控制系统、鱼群观测系统组成(图5)。仿生蝠鲼装置鱼群观测原理:依靠鱼体结构的驱动骨架,在不惊扰鱼群的情况下接近鱼群,利用搭载的网络摄像头实时跟踪采集鱼群运动状况,通过通信控制系统传输到工控机。仿生蝠鲼型水下观测装置的样机参数如表1所示。

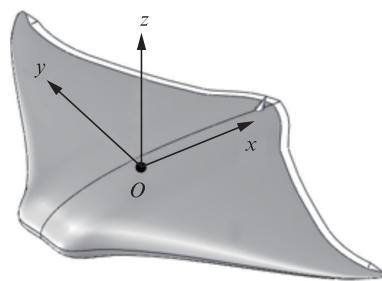
1.3 动水槽实验工况

水下移动装置的运动稳定性是获取清晰、稳定鱼群图像的关键^[23]。为分析仿生蝠鲼的空间六分力情况,设置循环动水槽进行水动力测试。

1.1.3 轮廓数据优化

根据生物学观察研究表明^[21],生物蝠鲼的展向轮廓和弦向轮廓与翼型形状相似^[19](图4a)。为便于建模和提高运动学模型的水动力性能,对提取的轮廓方程进行优化,最后利用软件建模得到蝠鲼三维模型(图4b)。展向形态建模主要过程:(1)将展向轮廓进行中心对称处理,使展向轮廓关于鱼体坐标系的原点对称;(2)基于NACA四位数族对称翼型,进行适当变换后,与轮廓方程进行回归分析,选择拟合优度最高对应的翼型方程。

NACA四位数族对称翼型方程也是由上下两个翼缘方程组成,转换到胸鳍坐标系对称翼型NACA0020如图4a所示,红色曲线表示翼型包络线。



(b) 三维模型
3D model

测试设备主要包括循环动水槽、六分力传感器、仿生蝠鲼样机、水槽行车(图6)。六分力传感器安装于水槽行车架上,水槽行车架安装于循环动水槽上方,仿生蝠鲼样机通过固定卡柱与六分力传感器连接。蝠鲼样机通过缆线连接至岸上上位机,通过PWM信号控制蝠鲼样机的驱动关节,使软体胸鳍发生柔性摆动。据相关研究^[19],蝠鲼弦向体干线应与水槽来流方向水平。为减少水面波的影响,模型距水面高度应大于0.5 m。

动水槽试验于2023年3月完成,试验工况环境温度为20 °C。根据ROSENBERGER^[21]的蝠鲼生物运动参数研究,设置运动参数及工况如表2所示。

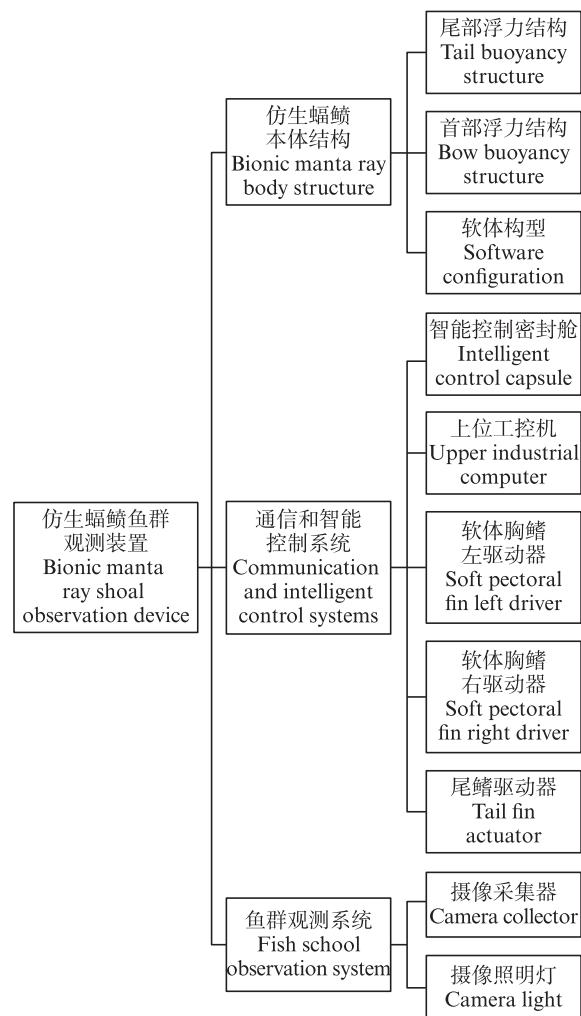


图5 仿生蝠鲼鱼群观测装置结构框图

Fig. 5 Structure diagram of biomimetic manta ray school observation device

表1 仿生蝠鲼样机主要设计参数
Tab. 1 Main design parameters of biomimetic manta ray prototype

项目 Project	参数 Parameter	项目 Project	参数 Parameter
总质量 Total mass	10.5 kg	通信距离 Communication distance	100 m
尺寸(长×宽×高) Size (length × width × height)	55 cm×93 cm×11 cm	最大游动速度 Maximum propulsion speed	0.6 m/s
展弦比 Aspect ratio	1.69	摄像传感器 Image sensor	1 176×664(画质) 2.8 mm 定焦(镜头)
驱动电机 Drive motor	伺服电机(5 V)	照明灯 Illumination sensor	90%(光效)
控制模式 Control model	电力载波通信		

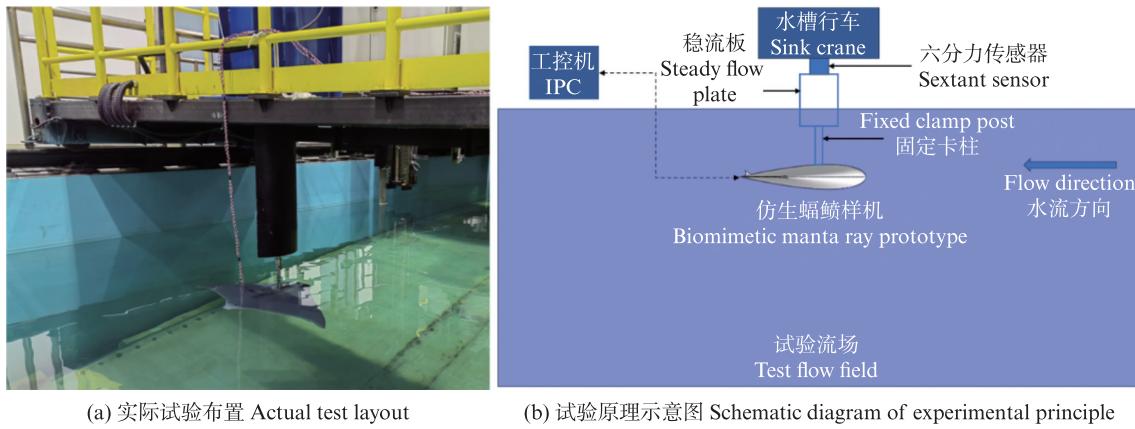


Fig. 6 Schematic diagram of hydrodynamic test principle

表2 动水槽试验变量及变化范围
Tab. 2 Variable and variation range of dynamic water tank test

变量 Variable	变化范围 Variation range
摆动幅度 A Flapping amplitude A	10~50 ($\Delta A=0.1$)
摆动周期 T Flapping period T	1.2~2.8 ($\Delta T=0.4$)
来流速度 V Incoming flow velocity V	0.2~0.6 ($\Delta V=0.1$)

1.4 水下鱼群观测实验

1.4.1 试验设置

试验水池尺寸为长1.50 m×宽1.25 m×高0.55 m,池壁涂覆黑色吸光材料以减少反射干扰。试验时间为白天。

实验鱼类选取鲫(*Carassius auratus*)与锦鲤

(*Cyprinus carpio*)两类典型淡水趋流性鱼种,鲫30尾,锦鲤30尾,均购自养殖场并经两周适应性驯养。实验前24 h停止投喂以减少摄食行为干扰。

图7是实验场地布置示意图。数据采集系统由1台高清摄像机(Nikon D3500, ISO感光度为100~25 600, 图像分辨率为4 496×3 000, 帧率60 fps)构成,摄像机通过L形支架固定在水域正上方,使得摄像机的视角能覆盖全景视野,通过数据线连接至电脑,读取并存档视频数据。本次实验规划机器鱼指令路线,使机器鱼进行长距离的直线游动,通过无线控制器控制机器鱼的定速航行。游泳速度梯度为0.1、0.2、0.3、0.4 m/s,采用单因素对照法,每组实验重复5次,每次实验机器鱼进行往返运动,实验组间隔20 min以消除疲劳效应。

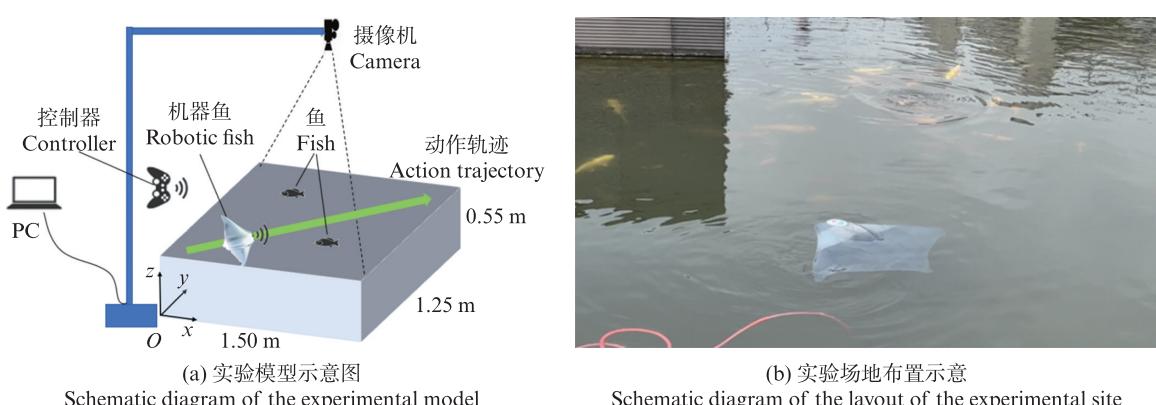


图7 实验设置图
Fig. 7 Diagram of the experimental setting

1.4.2 试验机器鱼

考虑不同鱼类的趋光性^[24]有所不同,为避免蝠鲼机器鱼体色对本实验结果的影响,结合相关研究发现,锦鲤更趋向于白光、红光,故利用白色涂料将本次试验机器鱼体色调至灰黑色,减少因颜色偏好性造成实验结果的偏差。

1.4.3 鱼群追踪与计量方法

整个追踪算法的流程^[25]如图8所示,包括视频输入、图像获取与预处理、目标检测、数据关联、数据输出和人工校正6大模块,算法实现的功能是输入视频文件(包括mp4、avi等不同格式),经过图像获取及预处理、目标检测和数据关联等操作,最后输出视频中目标群体的位置、速度等信息,输出的信息保存在视频和文本文件中,以便后续分析和处理,同时提供人工校正程序对结果进行校正。

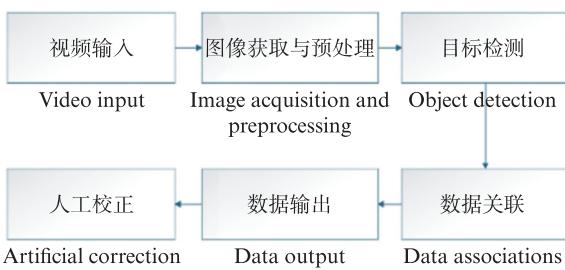


图8 鱼群追踪算法主要步骤

Fig. 8 Main steps of fish swarm tracking algorithm

为衡量有多少比例的鱼群对机器鱼的运动产生反应,利用平均跟随率评估机器鱼对实验鱼群的吸引能力,平均跟随率(Following rate, FR)表达式如下:

$$FR = 1/T \sum_{t=1}^T [N_f(t)/N] \times 100\% \quad (1)$$

式中: $N_f(t)$ 为在第 t 个时间周期或观测点的某一特定事件或状态的次数; N 为在所有时间周期或观测点中,该特定事件或状态的总次数; T 为总的时间周期数或观测次数。

平均跟随距离(Average following distance, AFD)表示鱼类在跟随过程中与机器鱼的空间接的程度,计算为所有跟随个体在实验全程中与机器鱼质心的欧氏距离的均值,表达式如下:

$$AFD = 1/N_f \sum_{i=1}^{N_f} \left[\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \|P_i(t) - P_{robot}(t)\| \right] \quad (2)$$

式中: N_f 为特征点的总数; T 为时间步长或帧数;

$\|P_i(t) - P_{robot}(t)\|$ 为在时间 t 时,第 i 个特征点的真实位置与预测位置之间的欧几里得距离; $P_i(t)$ 为第 i 个特征点在时间 t 的真实位置; $P_{robot}(t)$ 为仿生蝠鲼在时间 t 预测的特征点位置。

2 结果

2.1 鱼体形态建模

通过对样本的展向轮廓进行特征提取,上轮廓拟合优度为0.98,下轮廓拟合优度为0.99,达到高精度拟合。为优化展向轮廓曲线,通过对比多种翼型的拟合优度检验(表3),发现NACA0013的拟合优度最高,故选取其标准化包络线方程作为建模基础,最终得到上轮廓建模方程 $z_{up}(y)$ 与下轮廓建模方程 $z_{down}(y)$ 。其优化后的展向轮廓曲线与展向中心线如图9所示。

表3 与对称翼型拟合结果对比

Tab. 3 Comparison results with symmetric airfoil fitting

翼型类型 Airfoil type	t_0	拟合度 R-squared
NACA0010	0.10	0.853
NACA0012	0.12	0.929
NACA0013	0.13	0.944
NACA0014	0.14	0.937
NACA0015	0.15	0.912

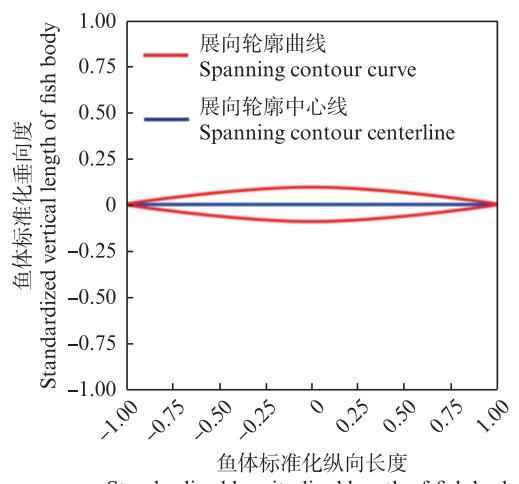


图9 展向轮廓曲线及中心线

Fig. 9 Spanning contour curve and centerline

2.2 空间动力学分析

2.2.1 推力分析

平均推力的数值曲线均随摆动幅度的增加

而显著上升,在 $\theta=50^\circ$ 时,平均推力值最大(图10a);在相同摆动频率下,平均推力的增长率随摆动幅度的增加也逐渐增加,在 $\theta=50^\circ$ 时增长率最大,平均为35%。除 $\theta=10^\circ$ 时,在其他摆动频率下,平均推力的数值曲线均随摆动频率的增加而缓慢上升,在 $f=0.830\text{ Hz}$ 时,平均推力最大(图

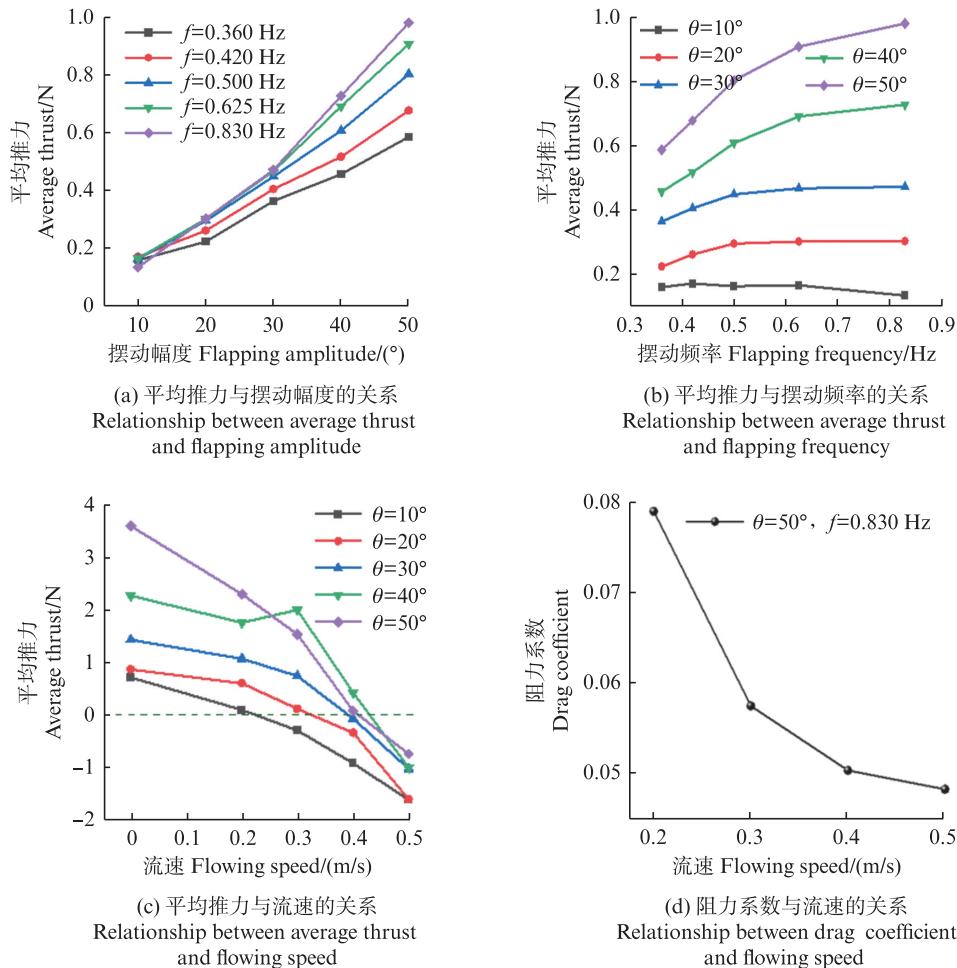


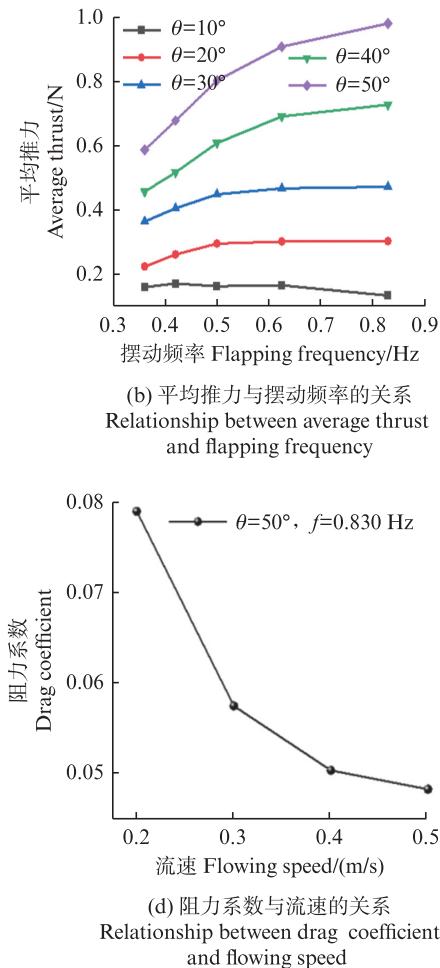
图10 推力与运动学参数的关系

Fig. 10 Relationship between propulsion force and flapping amplitude

2.2.2 升力分析

由图11可知,最大升力曲线的变化趋势与平均推力非常相似,整体上都随着摆动幅度、摆动频率的增加而上升。在 $\theta=50^\circ, f=0.830\text{ Hz}$ 处最大升力值为最大。在相同摆动频率情况下,摆动幅度从 0° 增至 50° ,最大升力的平均值为 7.31 N 。由图11c可知,水流速度为0时,升力值最小。随着流速增大,最大升力值逐渐升高,升力值的波动范围也在变小。图11d为 $f=0.830\text{ Hz}, \theta=50^\circ$ 条

10b)。变流速水池模拟了鱼类真实游泳环境,随着流速增大,平均推力逐渐降低(图10c)。图10d为 $f=0.830\text{ Hz}, \theta=50^\circ$ 时的流速对阻力系数的影响,发现在实验范围内,阻力系数随着流速增大而减小,在 0.2 m/s 处阻力系数取最大,且为0.08,说明此刻鱼体整体表现为推力。



件下流速对升力系数的影响。

2.2.3 俯仰力矩

由图12a和图12b可知,最大俯仰力矩曲线的变化趋势与推力、升力一致,整体上都随着摆动幅度和摆动频率的增加而上升。在 $\theta=50^\circ, f=0.830\text{ Hz}$ 处最大俯仰力矩值最大。流速为0时,最大俯仰力矩处于最大值,随着流速增大,最大俯仰力矩逐渐变小,并出现负值(图12c)。

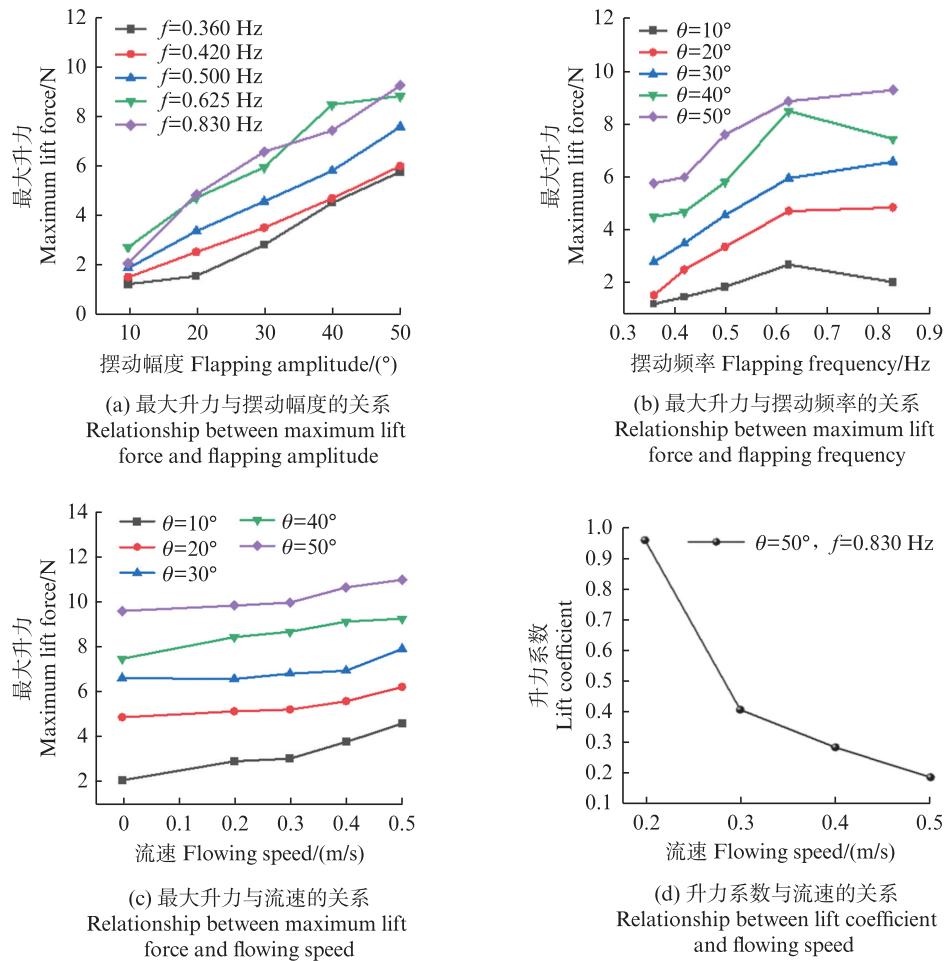


图11 升力与运动学参数的关系
Fig. 11 Relationship between lift and kinematic parameters

2.3 应用试验

2.3.1 鱼群跟随率

由图13可知,当仿生蝠鲼处于低速运动阶段(0.1 m/s)时,跟随率中位数为15.2%,I均值(16.1%)略高于中位数,表明数据分布轻微右偏。随着游泳速度增加,平均跟随率逐渐增长,当速度达到0.2 m/s时,平均跟随率的增长量为9.6%;当速度达到0.3 m/s时,平均跟随率达到最大,为36.5%,对应的增长量为10.1%;当速度达到0.4 m/s时,平均跟随率骤降至16.9%。

2.3.2 鱼群平均跟随距离

由图14可知,当速度达0.2 m/s时,平均跟随距离最短,为33.3 cm,表明低速下鱼群与机器鱼保持较远距离,且个体间跟随行为差异较小。随着仿生蝠鲼游泳速度的增加,鱼群对0.3 m/s速度的响应最积极,但数据离散程度也随之增大。当速度达到0.4 m/s时,平均跟随距离继续增加,数据离散度开始降低,反映高速运动可能引发鱼群

行为的不确定性。

3 讨论

3.1 鱼体形态建模的优化与局限

仿生蝠鲼形态与动力学参数的协同作用对其水下推进效能及鱼群交互行为^[26]具有显著影响。本研究选用NACA0013标准化包络线方程进行鱼体形态建模,主要基于其高拟合优度。从生物学角度看,鱼类进化出流线型身体以适应水生环境,NACA0013翼型曲线可能部分契合这种自然进化的结果,为仿生设计提供了可靠的形态基础。但此建模方法存在局限,自然界鱼类形态多样,受生活环境、食性等因素影响显著。本研究仅采用单一翼型曲线建模,难以涵盖所有鱼类形态特征。未来可考虑融合多种翼型曲线优势,或采用更灵活的建模方法,如基于机器学习的参数化建模,提高建模的准确性与普适性,以适应不同仿生场景需求。

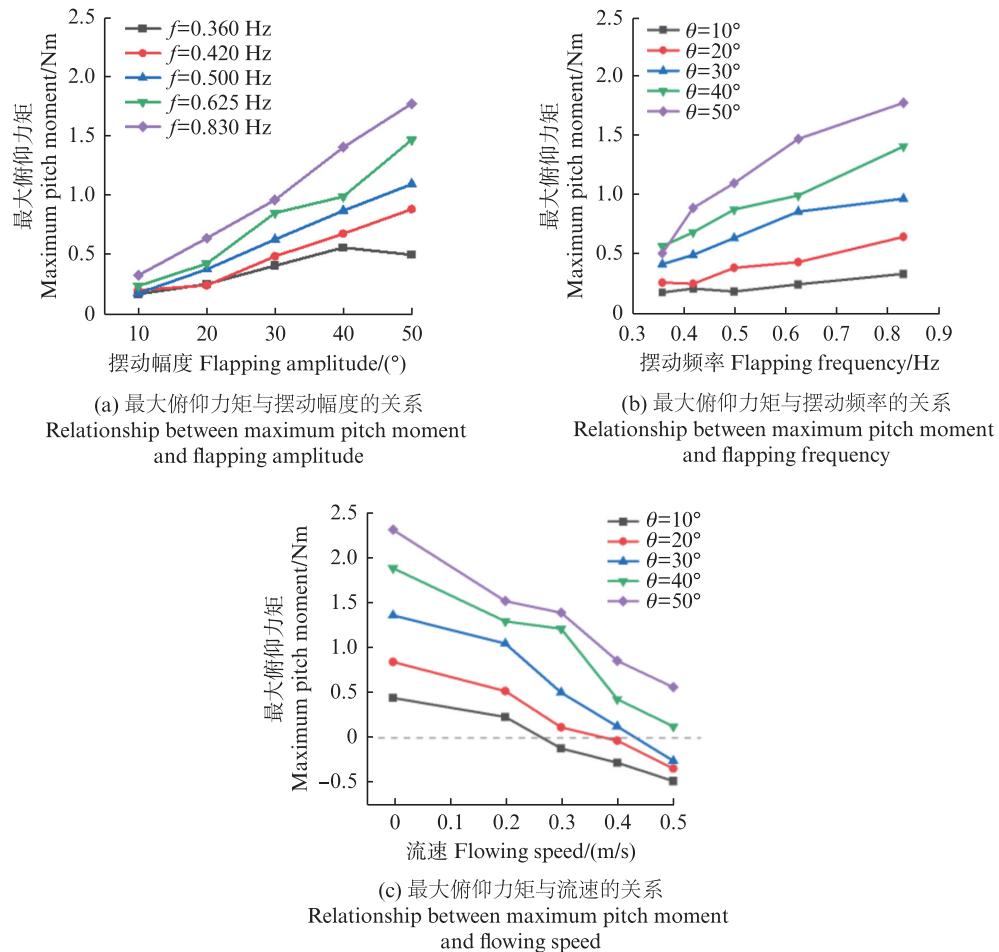


图 12 俯仰力矩与运动学参数的关系

Fig. 12 Relationship between pitch moment and kinematic parameters

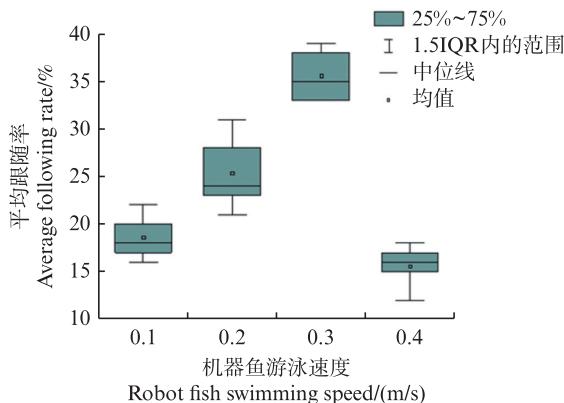


图 13 锦鲤平均跟随率与机器鱼游泳速度的关系

Fig. 13 Relationship between the average following rate of koi carp and the swimming speed of robotic fish

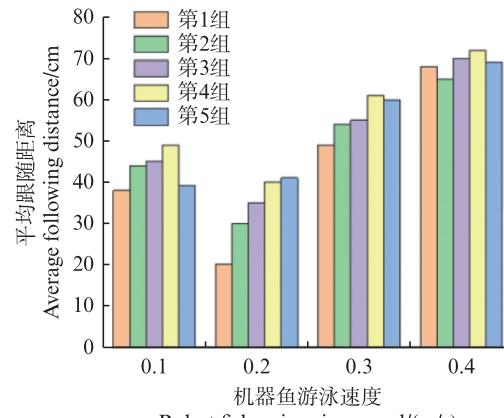


图 14 锦鲤平均跟随距离与机器鱼游泳速度的关系

Fig. 14 Relationship between the average following distance of koi carp and the swimming speed of robotic fish

3.2 空间动力学特性影响因素分析

空间动力学分析显示,推力、升力和俯仰力矩均随摆动幅度和摆动频率的增加而上升。从流体力学原理讲,摆动幅度和摆动频率的增大使鱼体与水体相对运动更剧烈,产生更大作用力。这为仿生蝠鲼设计提供了理论依据,即通过调整摆动幅度和摆动频率可主动控制游动性能。流速对水动力特性影响复杂,推力随流速增大而降低,可能是流速增加使水体反作用力增大,阻碍鱼体摆动;升力在水流速度为0 m/s时最小,随流速增大而增大且波动范围变小,与流速改变水流压力分布有关;俯仰力矩在水流速度为0 m/s时最大,随流速增大而变小并出现负值,影响俯仰姿态稳定性。实际应用中需充分考虑流速影响,设计控制系统时根据不同流速环境实时调整参数,确保仿生蝠鲼稳定游动和姿态控制,还可进一步研究流速与其他参数的交互作用。

3.3 鱼群响应机制研究

应用试验表明,鱼群跟随率和平均跟随距离随仿生蝠鲼游泳速度变化呈现特定规律。跟随率起初随速度增加而上升,在0.3 m/s时达峰值后骤降,这表明一定速度范围内提高速度可提升跟随率,但过高速度会引发鱼群警惕或逃避。从生物学来看,可能是较高速度使仿生蝠鲼更具吸引力或接近领航鱼速度。平均跟随距离方面,低速时鱼群保持较远距离且数据离散程度较小;中等速度下鱼群响应积极但数据离散度大;高速时跟随距离回升且离散度降低。低速时警惕性高,中等速度个体反应差异大,高速时行为不确定致跟混乱。这种非单调变化规律揭示,单纯提升推进速度并非是增强鱼群引导效果的有效途径,需构建基于鱼群行为特征的动态运动模式调控策略。例如,根据鱼群跟随率和平均跟随距离等指标,实时调整仿生蝠鲼的游泳参数。同时,跟随距离的离散度变化暗示鱼群内部可能存在领导者-跟随者的角色分化机制,这为后续开发群体智能引导算法提供了生物学依据。

3.4 在水产养殖中的应用

在水产养殖中,该仿生蝠鲼型水下观测装置具有广阔的应用前景。它能在不惊扰鱼群的情况下,实时采集并传输水下图像,帮助养殖人员准确掌握鱼群的活动状况、健康状态和分布情况。通过分析这些数据,养殖人员可及时调整养

殖策略,如优化投喂量、改善水质环境等,从而降低养殖成本,提高养殖效益^[2]。此外,该装置还可用于监测鱼群的生长过程,为研究鱼类的生长规律提供数据支持,助力水产养殖向智能化、精准化方向发展。但在实际应用中,还需进一步优化装置的续航能力和数据处理能力,以更好地满足复杂多变的养殖环境需求。

作者声明本文无利益冲突。

参考文献:

- [1] 高宏泉,高翔. 2022年全国渔业经济状况概述及分析[J]. 中国渔业经济, 2023, 41(2): 14-22.
GAO H Q, GAO X. The survey and analysis of the national fishery economy in 2022 [J]. Chinese Fisheries Economics, 2023, 41(2): 14-22.
- [2] 张文博,马旭洲. 2000年来中国水产养殖发展趋势和方向[J]. 上海海洋大学学报, 2020, 29(5): 661-674.
ZHANG W B, MA X Z. China's aquaculture development trends since 2000 and future directions [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2020, 29 (5) : 661-674.
- [3] 侯晓娇. 基于计算机视觉的鱼群行为检测与结构特征研究[D]. 太原:太原科技大学, 2014.
HOU X J. Research on fish behavior detection and structural features based on computer vision [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2014.
- [4] 胡庆松,郑波,曹佳瑞,等. 船载投饵装置平衡抖料系统设计与试验[J]. 上海海洋大学学报, 2020, 29(6): 928-937.
HU Q S, ZHENG B, CAO J R, et al. Design and test of balanced shaking system for boat-borne bait feeding device [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2020, 29 (6): 928-937.
- [5] 李俊,陈普坤,陈雷雷,等. 水质监测与采样一体化无人船设计与试验[J]. 上海海洋大学学报, 2023, 32 (2): 405-416.
LI J, CHEN P K, CHEN LL, et al. Design and experiment of water quality monitoring and sampling integrated unmanned boat [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2023, 32(2): 405-416.
- [6] WHOI. Oceanographic system lab (OSL) [EB/OL]. (2020-09) [2023-06-15]. <https://www2.whoi.edu/site/osl/vehicles/remus-100>.
- [7] DODGE K L, KUKULYA A L, BURKE E, et al. TurtleCam: a “smart” autonomous underwater vehicle for investigating behaviors and habitats of sea turtles [J]. Frontiers in Marine Science, 2018, 5: 90.

- [8] HAWKES L A, EXETER O, HENDERSON S M, et al. Autonomous underwater videography and tracking of basking sharks [J]. *Animal Biotelemetry*, 2020, 8(1): 29.
- [9] EICHHORN M, AMENT C, JACOBI M, et al. Modular AUV system with integrated real-time water quality analysis[J]. *Sensors*, 2018, 18(6): 1837.
- [10] RENDA F, GIORGIO-SERCHI F, BOYER F, et al. A unified multi-soft-body dynamic model for underwater soft robots [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2018, 37(6): 648-666.
- [11] 周梦园, 吴君钦, 夏乐, 等. 智能仿生鱼系统的设计与实现[J]. *计算机工程与设计*, 2022, 43(5): 1467-1476.
ZHOU M Y, WU J Q, XIA L, et al. Design and implementation of intelligent bionic fish system [J]. *Computer Engineering and Design*, 2022, 43(5): 1467-1476.
- [12] 王懿偲, 夏英凯, 朱明, 等. 水产养殖机器鱼设计与三维路径跟踪控制[J]. *华中农业大学学报*, 2022, 41(4): 259-270.
WANG Y C, XIA Y K, ZHU M, et al. Design and three-dimensional path tracking control of robotic fish in aquaculture [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2022, 41(4): 259-270.
- [13] 孔祥洪, 黄小双, 刘帆, 等. 基于仿生江豚鱼群共融型装置的设计与实现[J]. *渔业现代化*, 2021, 48(5): 18-25.
KONG X H, HUANG X S, LIU F, et al. Design and implementation of a fish symbiotic device based on bionic porpoise [J]. *Fishery Modernization*, 2021, 48(5): 18-25.
- [14] WOLF Z, LAUDER G V. A soft robotic model to study the effects of stiffness on fish-like undulatory swimming [M]//PALEY DA, WERELEY NM. *Bioinspired Sensing, Actuation, and Control in Underwater Soft Robotic Systems*. Cham: Springer, 2021: 153-169.
- [15] SCARADODZI D, PALMIERI G, COSTA D, et al. BCF swimming locomotion for autonomous underwater robots: a review and a novel solution to improve control and efficiency[J]. *Ocean Engineering*, 2017, 130: 437-453.
- [16] WEI C, HU Q, LIU Y, et al. Performance evaluation and optimization for two-dimensional fish-like propulsion [J]. *Ocean Engineering*, 2021, 233: 109191.
- [17] 胡举喜, 王平, 吴均云, 等. 胸鳍推进模式仿生推进器研究进展及前景[J]. *船舶工程*, 2020, 42(S1): 14-17.
HU J X, WANG P, WU J Y, et al. Research Progress and Prospect of Bionic Thruster in Pectoral Fin Propulsion Mode [J]. *Naval Architecture Engineering*, 2020, 42(S1): 14-17.
- [18] IVERSON D, RAHIMPOUR M, LEE W, et al. Effect of chordwise flexibility on propulsive performance of high inertia oscillating-foils [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2019, 91: 102750.
- [19] CAI Y R, LING L K, SHU SS, et al. Bionic flapping pectoral fin with controllable spatial deformation [J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2019, 16(5): 916-930.
- [20] 黄小双, 刘帆, 孙翁杰, 等. 仿生鱿鱼流体形态建模与数值模拟[J]. *上海海洋大学学报*, 2021, 30(5): 884-892.
HUANG X S, LIU F, SUN W J, et al. Fluid morphology modeling and numerical simulation of biomimetic squid [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2021, 30(5): 884-892.
- [21] ROSENBERGER L J. Pectoral fin locomotion in batoid fishes: undulation versus oscillation [J]. *Journal of Experimental Biology*, 2001, 204(2): 379-394.
- [22] ABBOTT I H, VON DOENHOFF A E. *Theory of wing sections: including a summary of airfoil data* [M]. New York: Dover Publications, 1959.
- [23] 许裕良, 杜江辉, 雷泽宇, 等. 水下机器人在渔业中的应用现状与关键技术综述[J]. *机器人*, 2023, 45(1): 110-128.
XU Y L, DU J H, LEI Z Y, et al. Review: applications status and key technologies of underwater robots in fishery [J]. *Robot*, 2023, 45(1): 110-128.
- [24] 俞文钊. *鱼类趋光生理* [M]. 北京: 农业出版社, 1980: 1-90.
YU W Z. *Phototaxis physiology of fish* [M]. Beijing: Agriculture Press, 1980: 1-90.
- [25] 张琪, 韩战钢. 一种简单有效的鱼群轨迹追踪算法[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(4): 406-411.
ZHANG Q, HAN Z G. A fast and effective algorithm to track fish school [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science Edition)*, 2017, 53(4): 406-411.
- [26] ZHANG F H, PANG J H, WU Z D, et al. Effects of different motion parameters on the interaction of fish school subsystems [J]. *Biomimetics*, 2023, 8(7): 510.
- [27] SU G S, SHEN H L, LI NY, et al. Numerical investigation of the hydrodynamics of stingray swimming under self-propulsion [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2021, 106: 103383.

Design and implementation of a biomimetic manta ray fish observation device

LI Binglin¹, WANG Qiwei¹, HUANG Xiaoshuang¹, ZHANG Ying¹, KONG Xianghong^{1,2}, HAN Dongxing¹

(1. College of Marine Living Resource Sciences and Management, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. National Engineering Research Center for Oceanic Fisheries, Shanghai 201306, China)

Abstract: In order to improve the ecological compatibility and data acquisition efficiency of aquaculture underwater observation, a bionic underwater observation device with low disturbance and high stability was designed. In this experiment, the morphological design of bionic manta rays was adopted, the outline of biological specimens was extracted based on computer vision, the external morphological model of the NACA0013 airfoil was constructed, and the radial kinematic model was established by combining the Lighthill theory. The hydrodynamic performance was verified by the moving tank test, and the actual water area test was carried out to evaluate the degree of disturbance to the fish population and the image transmission ability. The results show that the goodness of fit between the biomimetic body contour and the NACA0013 airfoil is 0.944, which has excellent hydrodynamic characteristics, and the thrust, lift and pitch moment values reach the maximum when $\theta=50^\circ$ and $f=0.830$ Hz in the moving tank test, and the oscillation is regular, indicating the stability of the motion. After testing, the average tracking rate of fish schools is as high as 36.5%, which proves that the device has minimal interference with fish schools and excellent environmental compatibility, and can transmit high-definition images of the integration of bionic manta rays and natural fish in real time, which fully meets the needs of ecological observation. The results show that NACA0013 airfoil has a significant streamlined fitting advantage. The thrust, lift and pitching moments of the bionic manta rays increased with the increase of motion amplitude and frequency, but were significantly affected by the environmental flow velocity. When the movement speed of the bionic manta ray was 0.3 m/s, the fish follow-up rate reached the peak. The device can realize non-disturbance detection in aquaculture and provide effective data support for aquaculture management. This study provides a new eco-friendly underwater observation equipment for aquaculture, and its bionic design and intelligent control methods can be extended to the fields of marine ecological monitoring and underwater robots, so as to promote the development of low-interference underwater technology.

Key words: biomimetic manta rays; shape contour extraction; dynamic water tank test; environmental compatibility; robotic fish; observation of fish schools