

引用格式: 孙聪, 隆贤秋, 王崇磊, 等. 仿生航行器鳍-艇几何参数对推进性能的影响 [J]. 中国舰船研究, 2026, 21(2): 256-265.

SUN C, LONG X Q, WANG C L, et al. Effects of fin-hull geometric parameters on propulsion performance in bionic vehicles[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2026, 21(2): 256-265 (in Chinese).

仿生航行器鳍-艇几何参数 对推进性能的影响



扫码阅读全文

孙聪¹, 隆贤秋², 王崇磊², 方斌³

1 哈尔滨工程大学 船舶工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

2 哈尔滨工程大学 船舶工程学院, 山东 青岛 266000

3 海军工程大学 舰船与海洋学院, 湖北 武汉 430033

摘要: [目的] 旨在系统化鳍-艇几何构型对仿生波动鳍(MPF)推进性能的影响机制, 以解决现有研究对不同仿生航行器几何参数缺乏统一分析的问题。[方法] 首先, 建立包含艇体与一对波动鳍的通用参数化几何模型, 并引入鳍宽与艇宽之比 β 作为核心无量纲几何参数; 然后, 基于此模型, 通过高保真CFD数值模拟, 分析不同 β 值下航行器的推进性能与流场结构。[结果] 结果显示, β 值对推进性能具有显著的非线性影响: 存在一个最优的 β 值范围可使推进效率最大化, β 值过小会导致推力不足, 过大则会因鳍-艇间的强干扰诱发流动分离而增加阻力; β 值能显著调控纵倾力矩的大小, 对航行器姿态稳定性构成关键约束。[结论] 所做研究明确了 β 参数在效率与稳定性之间的设计权衡关系, 所建立的参数化模型与揭示的影响规律可为仿生航行器的外形设计提供定量的理论依据, 并为后续多参数耦合优化及自航性能研究奠定坚实的基础。

关键词: 自主水下航行器; 仿生航行器; 仿生波动鳍; 鳍-艇几何参数; 推进性能

中图分类号: U674.941

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.04783

0 引言

所谓仿生波动鳍(media and/or paired fin propulsion, MPF), 是指鱼类利用胸鳍、背鳍、臀鳍的拍动或波动提供推力的游动模式^[1], 因具有机动性高、效率高以及承载能力高等优点^[2-3], 成为热门仿生航行器的设计原型。有学者建立了多种几何外形显著不同的仿生航行器, 如仿蝠鲼型^[4-7]、仿刀鱼型^[8-10]和仿海扁虫型^[11-16]等(图1), 并给出了这些仿生水下航行器在水动力性能方面的差异。造成这些差异的根本原因在于鳍-艇几何关系的不同, 因此, 建立鳍推进仿生航行器的几何参数化模型, 并研究鳍-艇几何关系对其推进性能的影响机理, 这对于高效率的仿生航行器设计具有重大意义。

仿蝠鲼型水下航行器是通过三角形鳍的拍动

来产生推力, 鳍的宽度大于艇体宽度, 艇体多为扁平形。仿蝠鲼型水下航行器的典型样机有 Festo 公司研制的水鳐型航行器(Aqua Ray)^[4]、北京航空航天大学研制的北航鳐型航行器^[6]以及国防科技大学研制的牛鼻鲢仿生航行器^[7]。其中, 北航鳐型航行器样机的水动力实验结果表明, 推力与波动幅值成正比, 与入口流速成反比, 样机航行的最大速度为 0.9 m/s; 牛鼻鲢仿生航行器样机的航行实验研究了不同运动参数下潜水器的推进性能, 结果显示, 其可以在 1 Hz 的扑动频率下以 0.18 m/s 的速度游动。

仿刀鱼型水下航行器是通过单条胸鳍/背鳍的波动来产生推力, 鳍的长度接近于艇体长度。仿刀鱼型水下航行器的典型样机有国防科技大学研制的格尼洛斯(Gnilos)机器鱼^[8]、浙江大学研制的机器鱼^[9]以及 Florida Atlantic University 研制的刀

收稿日期: 2025-11-03 修回日期: 2026-01-26 网络首发时间: 2026-02-04 15:24

基金项目: 海南省重点研发项目资助(ZDYF2024GXJS011)

作者简介: 孙聪, 男, 1988年生, 博士, 副教授。研究方向: 推进器优化设计。E-mail: suncong@hrbeu.edu.cn

隆贤秋, 男, 1999年生, 硕士生。研究方向: 波动耦合泵喷推进。E-mail: kingachilles@hrbeu.edu.cn

王崇磊, 男, 1989年生, 博士, 实验师。研究方向: 仿生航行器总体设计。E-mail: chonglei.wang@hrbeu.edu.cn

方斌, 男, 1978年生, 博士, 副教授。研究方向: 仿生航行器总体设计。E-mail: robin_fb@163.com

*通信作者: 王崇磊

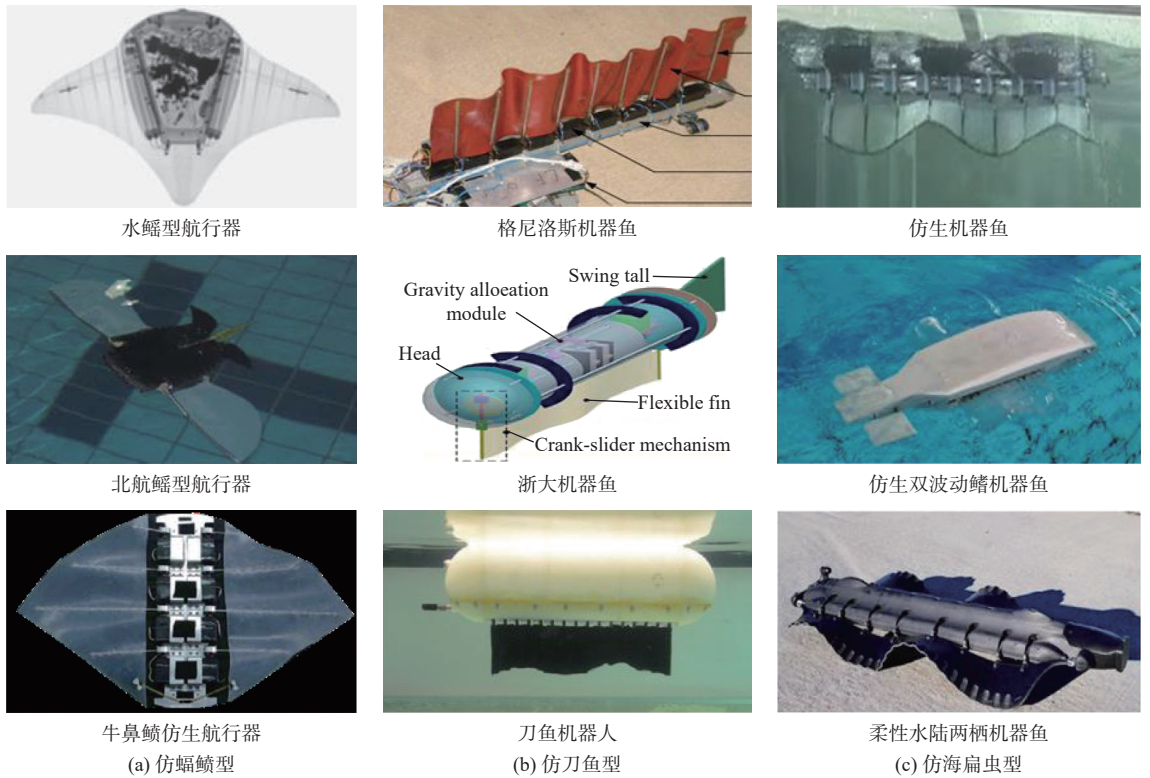


图1 水下飞行器样机

Fig. 1 Prototype photos of bionic underwater vehicles

鱼机器人^[10]。格尼洛斯机器鱼长 0.17 m, 该样机的一维导轨实验结果表明, 其最大航速可达 0.4 m/s, 最大效率约为 0.1。浙江大学研制的 Robotic fish 的回转体艇长 1.2 m、直径 0.14 m、胸鳍长 0.7 m、尾鳍长 0.18 m, 实验结果表明, 该样机的最大航速可达 0.25 m/s。Knife Bot 的扁平艇体长 0.462 m、宽 0.077 m、高 0.125 m, 波动鳍长 0.3 m、高 0.07 m, 该样机的水动力实验结果表明, 其最大航速可达 0.33 m/s, 最大效率为 0.6。

仿海扁虫型水下航行器是通过分布于艇体两侧的波动鳍来产生推力。仿海扁虫型水下航行器的艇体多为扁平体, 典型的样机有 Pliant Energy Systems^[16] 公司研制的柔性水陆两栖仿生水下航行器和国防科技大学研制的仿生机器鱼^[13]。后者艇长 0.8 m、宽 0.156 m、高 0.126 m, 波动鳍长 0.8 m、高 0.2 m, 样机的实验结果表明, 航行器的最大航速为 0.761 m/s。

采用数值模拟方法可以获取随时间变化的流场细节, 模拟鱼类游动的真实环境, 有助于研究人员理解生物游动的机理。Candelier 等^[17-18] 最早建立了鳍的 CFD 模型并与理论模型进行了验证, 结果显示, 两者间的误差不超过 10%。自此, 数值模拟计算得到更多学者的认可与应用。Sun 等^[9] 设计搭建了波动鳍水动力实验平台, 所用波动鳍长 0.7 m、高 0.15 m, 通过实验, 验证了 CFD 的可靠性, 结果显示鳍的最大推力为 8.093 N, 最大误差

为 0.127 9。此外, 还计算了不同频率所对应推力的大小, 结果显示推力与频率呈正相关。上述研究采用 CFD 方法对波动鳍的推进进行了分析, 但未考虑艇体对鳍推进的影响。Liu 等^[9] 建立了仿刀鱼型水下航行器的 CFD 模型并进行了水下实验, 实验模型的回转体艇体长 1.2 m、半径 0.09 m, 鳍长 0.5 m、高 0.15 m, CFD 计算结果显示, 其最大航速为 0.25 m/s, 最大推力为 3.78 N, 最大误差为 0.082。Li 等^[11] 建立了仿海扁虫型水下航行器的 CFD 模型, 该模型采用的是平行双波动鳍, 其数值模拟结果表明, 反相位、低波数、小间距模式可为平行双波动鳍系统提供最大效率 0.664 5。冯亿坤等^[14-15] 建立的仿生双波动鳍机器鱼的数值 CFD 模型如图 2(a) 所示, 其将波动鳍鳍长与波长的比值作为变参数进行了数值计算, 结果显示波长与速度呈正相关, 其最大航速为 0.19 m/s, 最大推力为 0.584 N。机器鱼的压力云图如图 2(b) 所示。研究表明, 波动鳍推力的产生源自波动鳍上、下表面的压力差, 胸鳍表面的低压区和高压区分别位于波峰和波谷的前半段, 分别产生斜向前上方和斜向前下方的压力差, 在前进方向上的分力即共同组成了胸鳍的推力, 使得机器鱼迅速向前游动。

综上所述, 现有的仿生水下航行器具有不同的几何特征, 仿蝠鲼型航行器的波动鳍为三角形且鳍的宽度通常大于艇体宽度; 仿刀鱼型及仿海

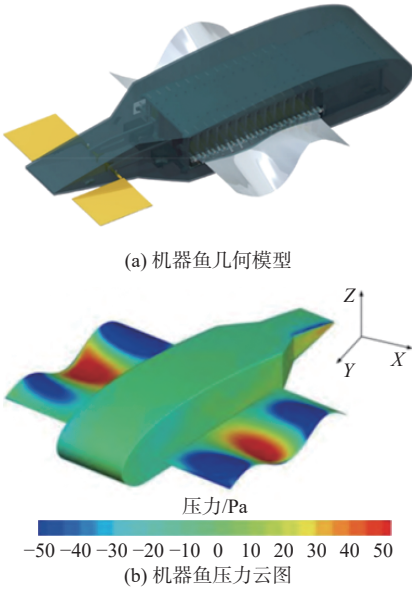


图2 仿生双波动鳍机器鱼数值模型图
Fig. 2 Numerical model of the bionic double-oscillating-fin robotic fish

扁虫型航行器的波动鳍为矩形且鳍的宽度通常小于艇体宽度。造成这些模型水动力性能差异的根本原因是,它们具有不同的鳍-艇几何关系,但是,描述这一几何关系的物理模型尚未建立,鳍-艇几何关系对推进性能的影响机理尚不清楚。

1 几何模型

根据现有文献所述,MPF 仿生水下航行器的艇体具有扁平体、回转体等外形,波动鳍有单鳍、双鳍等方式。以仿海扁虫型水下航行器为原型,本文建立的几何模型如图3所示。由图3(a)的俯视图可见,波动鳍波行进的方向为 X 轴负方向,其中 L_f 为波动鳍的长度, L 为艇体长度。由图3(b)的前视图可见,波动鳍于艇体两侧对称分布,其中 W_f 为波动鳍的宽度, W_b 为艇体宽度,艇体横截面的中间是宽为 W_b 、高为 h 的矩形,且 $W_b = h/2$,两侧是半径为 $h/2$ 的半圆。Myring 船体剖面被称为在给定体长和直径比率下最小化阻力系数的最佳外形轮廓^[20],因此,将其选为中纵截面轮廓(图3(c))。仿生水下航行器按流体流动方向可分为3个部分,分别为依次连接形成主体的艇首段、艇鳍段和艇尾段,其中艇首段的长度为 L_h ,艇鳍段的长度为 L_f ,艇尾段的长度为 L_t 。

仿生水下航行器宽度方向上对推进性能影响显著的是鳍与艇的总宽度,因此,定义如下无量纲数描述宽度方向上鳍-艇的几何相对关系,也即鳍宽与艇宽的比值 β 。

$$\beta = \frac{2W_b}{W_f} \quad (1)$$

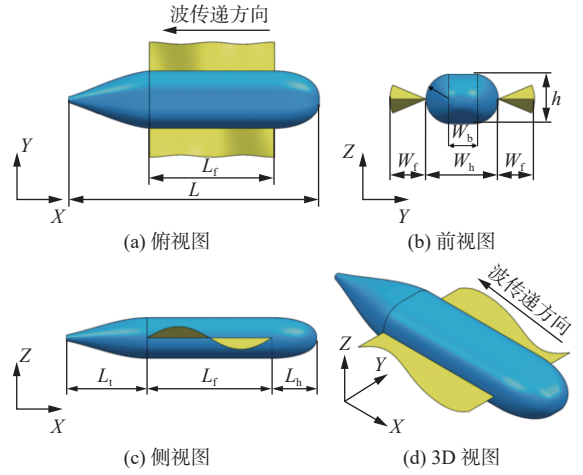


图3 仿生水下航行器几何模型示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the bionic underwater vehicle geometric model

MPF 的游动模式是通过波动鳍沿鳍部产生行波来推进^[21],推进波传播的方向与身体运动的方向相反。波动鳍推进波建模为基本正弦曲线,其运动学特性由沿 X 轴传播的行波方程控制。将推进波设定为沿 X 轴方向的行波,即波动鳍表面的任意一点围绕 X 轴转动,并沿 Y 轴和 Z 轴振荡。该运动学模型的公式源自文献[22],其波动鳍实验结果表明,改变鳍推进波的频率、振幅和波长会对推力产生显著影响。Liu 等^[10]将此模型用于控制水下仿生航行器并进行了实验,结果表明,水下仿生航行器最优效率对应的斯特劳哈尔数 St 与鱼类相同。上述文献均表明了此运动学模型公式的有效性和可靠性,具体表达式如下:

$$\begin{cases} x = k_x \\ y = r \cos \left[\theta_{\max} \sin \left(2\pi \frac{k_x}{\lambda} + \omega t + \phi_0 \right) \right] \\ z = r \sin \left[\theta_{\max} \sin \left(2\pi \frac{k_x}{\lambda} + \omega t + \phi_0 \right) \right] \end{cases} \quad (2)$$

式中: k_x 为鳍的长度参数; r 为鳍的宽度参数; θ_{\max} 为最大摆角; λ 为波长; ω 为圆频率; t 为时间; ϕ_0 为初始相位角。

推力系数是评价推进性能的核心无量纲参数。本文将波动鳍的力系数分为了 X 、 Y 、 Z 三个方向,即推力系数 C_{T_x} 、侧向力系数 C_{T_y} 和升力系数 C_{T_z} ,力系数的 C_T 定义见式(3)^[23]。

$$C_T = \frac{T}{0.5\rho f^2 A^2 L_f^2} \quad (3)$$

式中: T 为力; ρ 为流体密度; f 为波动频率; A 为波动幅值。

推进效率是衡量能量转换有效性的关键指标,本文定义为输出推进功率与输入功率的比值,可表示为^[24-26]

$$\eta = \frac{T_x V}{\pi f \theta_{\max} \int M(x) dx} \quad (4)$$

式中: $T_x V$ 为推进功率; $M(x)$ 为 X 轴方向单位长度扭矩上的平均值。

2 数值模型

2.1 数值方法

仿生水下航行器航行于水中, 而水是一种黏性不可压缩的流体, 其运动由纳维-斯托克斯方程控制。本文采用基于有限体积法的数值策略求解流体流动, 并通过商用 CFD 软件 ANSYS Fluent 进行系统模拟。在仿生水下航行器的航行过程中, 由于波动鳍始终处于运动状态, 因此需要采用动网格模型来处理随波动鳍运动变化的计算网格。针对动网格, 控制方程如下^[27]:

$$\nabla \cdot (u - u_g) = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \nabla (u - u_g) = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 u \quad (6)$$

式中: u 为流体速度; u_g 为动网格的网格速度; p 为压力; ν 为水的运动黏度。

本文由波动鳍推进波模型控制波动鳍的运动变形, 并通过用户自定义函数 (UDF) 程序 DEFINE_GRID_MOTION 定义波动鳍的运动。

雷诺数 Re 为黏性力与惯性力的比值, 雷诺数越小, 意味着黏性力的影响越显著, 越大则意味着惯性的影响越显著。本文中 Re 的定义如下^[23, 28]:

$$Re = \rho \frac{f A L_f}{\mu} \quad (7)$$

式中, μ 为动力黏度。

将上述控制方程基于有限体积法进行离散化处理, 并选用压力基求解器。时间项采用一阶隐式格式, 对流项采用二阶迎风格式, 弥散项采用二阶中心差分格式, 压力与速度通过 SIMPLE 算法耦合, 近壁流动采用标准壁面函数法处理。根据式 (7), 本文研究模型的 Re 约为 $10^5 \sim 10^6$, 因此, 湍流模拟采用 SST $k-\omega$ 双方程模型。该湍流模型有效融合了 $k-\omega$ 模型在近壁区的鲁棒性和精确性, 以及 $k-\varepsilon$ 模型在远场的自由流无关性特征, 能够合理、有效地求解流体中运动物体的外流场。 k 与 ω 的方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k + G_b \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + G_{\omega b} + S_\omega \quad (9)$$

式中: G_k 为时均速度梯度产生的湍动能; G_ω 为比耗散率生成项; Γ_k, Γ_ω 分别为 k 和 ω 的有效扩散系数; Y_k 和 Y_ω 为湍流耗散项; S_k 和 S_ω 为自定义源项; G_b 和 $G_{\omega b}$ 为考虑浮力项。

2.2 数值验证

如图 4 所示, 三维计算域的左侧为速度入口, 右侧为压力出口, 前后、上下两侧设为对称边界, 计算域沿 X 轴 (流向)、 Y 轴 (横向) 和 Z 轴 (纵向) 的尺寸分别为 $3.5L_f, L_f$ 和 $1.2L_f$ 。波动鳍前缘计算域 $0.5L_f$ 与尾流计算域 $2L_f$ 确保了流场的充分发展, 可最大限度地降低计算域边界对结果的影响。有关鳍厚度的设置, 需注意以下两个方面: 一是波动鳍的厚度相对其弦长极小; 二是非零厚度波动鳍求解可能存在数值不稳定性。因此, 本文采用二维零厚度波动鳍进行数值计算, 该方案与 Sun 等^[19] 的研究方案一致。

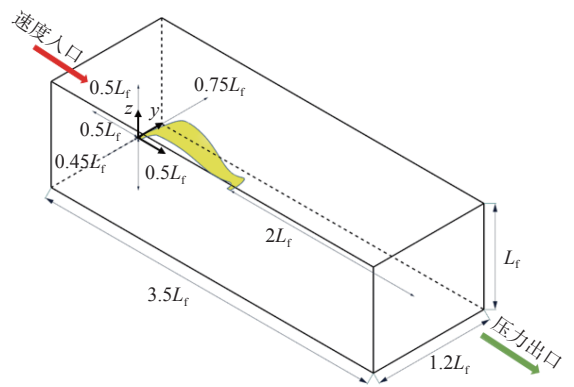


图4 波动鳍的计算域

Fig. 4 Computational domain for the undulating fin

对波动鳍的数值模拟面临两大挑战: 一是波动鳍的推进模式涉及复杂的流体动力学问题, 需应用动态网格技术处理波动的动态边界, 调整计算域的空间分辨率, 从而精确捕捉波动产生的涡旋结构; 二是需要调用用户自定义函数建立精确的运动方程来描述波动鳍的运动, 但这会增加数值模拟的难度。

因此, 将采用混合网格划分计算域: 外部区域使用结构化网格, 用以减少计算网格量和计算负荷, 网格尺寸为 0.02 m ; 内部区域采用非结构化网格, 以实现局部网格重构, 网格尺寸为 0.01 m ; 对波动鳍表面及周围流场进行网格细化, 细化的网格尺寸为 0.005 m 。采用扩散法与局部单元重划技术生成动态网格, 通过粗、细网格的结合调整

计算域的空间分辨率,从而精准捕捉波动产生的涡旋结构。计算域的网格总量为 500 万,最大偏斜度小于 0.75,具有良好的正交性。网格的划分如图 5 所示。

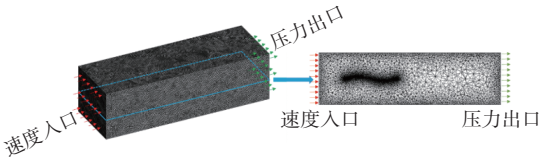


图 5 波动鳍网格模型示意图

Fig. 5 Schematic of the undulating fin mesh model

本文 CFD 模型数值计算结果与文献 [19] 中有关波动鳍推力实验数据的比较如表 1 所示。

表 1 实验与数值计算的推力结果比较

Table 1 Experimental and numerical simulation results of thrust

f/Hz	波动鳍的推力/N		误差/%
	实验值	CFD	
0.50	1.206	1.192	1.16
0.75	2.454	2.698	9.58
1.00	4.782	4.829	0.98

由表 1 可知,CFD 模拟结果与实验结果吻合较好,平均误差低于 5%,但在频率 $f=0.75\text{ Hz}$ 时误差较高。

该误差水平在基于 CFD 的波动鳍推进研究中属于可接受范围。例如,Liu 等^[9]在对仿刀鱼型水下航行器的 CFD 研究中,数值模型与实验验证结果间的最大误差为 26.8%。Sun 等^[19]关于波动鳍的水动力研究报告显示,其最大误差为 12.79%。这些研究表明,对于涉及复杂非定常流和动态边界的波动鳍 CFD 模拟,由于湍流模型、网格分辨率以及实验系统本身(如文献 [18] 中指出的,在高频下可能存在舵机堵转风险)的不确定性,15% 的误差是常见且合理的。

针对本文中有关在 $f=0.75\text{ Hz}$ 工况下误差较高的情况,经分析认为,在该频率下,流动分离与涡旋脱落现象更为剧烈,对网格分辨率以及时间步长更为敏感。尽管已经过独立性验证,但当前的全局网格设置有可能在捕捉此类瞬态强涡结构时存在轻微的不足之处。综上所述,尽管存在局部误差,但本文所建立的 CFD 模型在整体趋势和多数工况下均表现出较高的精度,足以用于系统性的参数影响分析。

2.3 网格和时间步独立性

在正式进行数值计算之前,需要完成对数值计算模型网格数量和时间步长的双重独立性验

证。选取典型的数值计算模型工况为:频率 $f=1\text{ Hz}$,最大摆角 $\theta=22.5^\circ$ 。设置 3 种不同数量的网格模型,分别命名为网格 A、网格 B 和网格 C,用于网格无关性验证,相关的网格参数和计算结果如表 2(表中, T 为波动周期, T_x 为波动鳍沿 X 轴方向产生的推力。)所示。不同的网格数量产生的推力有所差别的原因在于鳍梢处的边界层网格。表 2 中结果表明,网格 A、网格 B 和网格 C 这 3 种网格数量数值模型的推力计算结果比较相近,在计算中其推力变化周期相同,在单个周期内其平均推力相似,与实验值间的最大误差为 1.401%,表明网格 C 的计算结果满足网格独立性要求,且因网格 C 的计算效率较高,故选择网格 C 作为数值计算网格模型。

表 2 不同网格数量及时间步长计算结果

Table 2 Calculation results of varied mesh resolutions and time increments

网格	网格数量/万	$\frac{dt}{T}/\text{s}$	T_x/N	误差/%
A	317.7	3/2 000	4.820	0.795
B	76.3	3/2 000	4.849	1.401
C	142.1	3/2 000	4.829	0.983
D	142.1	1/2 000	4.961	3.473
E	142.1	5/2 000	4.833	1.066

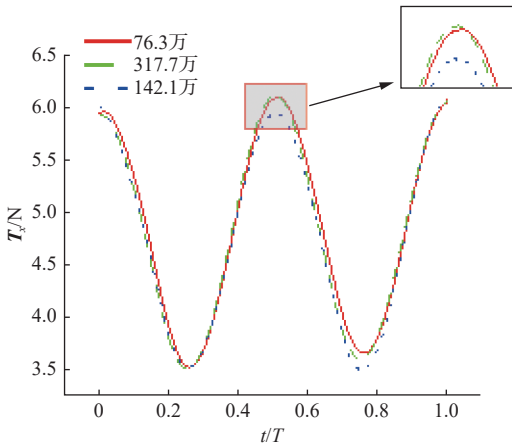
基于网格 C 验证时间步的独立性,将时间步分别设置为 $dt/T=1/2\ 000$, $3/2\ 000$ 和 $5/2\ 000\text{ s}$,瞬时推力计算结果如图 6 所示。运动中, $dt/T=1/2\ 000$, $3/2\ 000$ 和 $5/2\ 000\text{ s}$ 时的推力变化周期相同,在单个周期内其平均推力相似,与实验值间的最大误差为 3.743%,表明 $dt/T=3/2\ 000\text{ s}$ 时满足时间步的独立性要求,且其计算效率也较高。综上,本文采用网格数量为 142.1 万和时间步长 $dt/T=3/2\ 000\text{ s}$ 的情况进行数值计算。

2.4 参数化仿生航行器数值模型

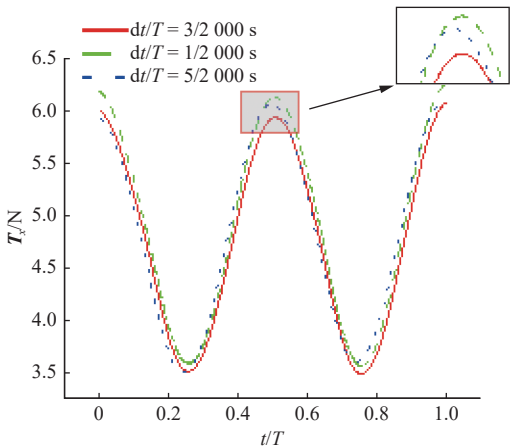
基于图 3 所示的参数化仿生航行器模型,其中基础模型(鳍宽与艇宽之比 $\beta=1.00$)的鳍长度 $L_f=0.7\text{ m}$,艇体总长度 $L=1.5\text{ m}$,艇体高度 $h=0.22\text{ m}$,波动鳍宽度 $W_f=0.16\text{ m}$,艇体宽度 $W_h=0.16\text{ m}$,探究了宽度方向上鳍-艇几何关系的影响机理,通过修改波动鳍的宽度,建立了 6 种不同 β 取值的工况模型,如图 7 所示。如表 3 所示, β 的取值范围为 0.50~1.75,与当前主流 MPF 游动模式仿生水下型航行器 β 的取值范围相符。

3 结果

基于上述参数化模型以及经过验证的 CFD 方



(a) 不同网格数量图



(b) 不同时间步图

图 6 网格数量及时间步长独立性示意图

Fig. 6 Independence study of mesh and time step sizes

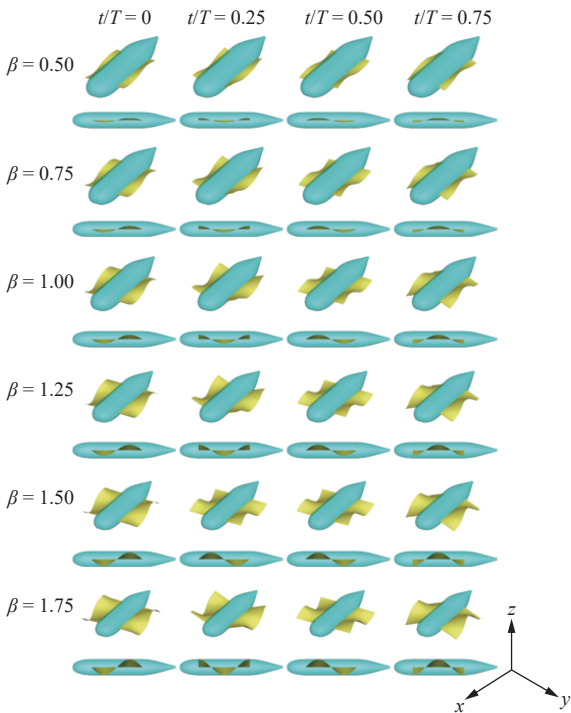


图 7 不同 β 下的仿生飞行器模型

Fig. 7 Bionic vehicle models at different β values

法,研究了鳍-艇几何关系在宽度方向($\beta = 0.50 \sim 1.75$)上对推进性能的影响机理,如图 7 和表 3 所

表 3 不同 β 下仿生飞行器模型的几何尺寸及运动参数
Table 3 Geometric dimensions and kinematic parameters of the bionic vehicle for different varying β values

β	W_f	A	Re
0.50	0.08	0.031	21 327.71
0.75	0.12	0.046	31 991.57
1.00	0.16	0.062	42 655.43
1.25	0.20	0.077	53 319.29
1.50	0.24	0.092	63 983.14
1.75	0.28	0.107	74 647.01

示。下面,将详细分析不同 β 取值工况下的数值模拟结果,揭示其与推进性能之间的规律以及机理。

本文中的波动鳍推力指由双波动鳍产生的净推进力,其方向与飞行器的前进方向一致,为 X 轴负方向;阻力指航行体(即飞行器艇体)所受的流体阻力,其方向与航行体前进的方向相反,为 X 轴正方向。这里的推力不包括艇体贡献,阻力不包括波动鳍的贡献,用以隔离推进和阻力效应。在 CFD 仿真中,波动鳍推力通过对双波动鳍表面进行应力积分来计算,并使用软件中的“面积分”功能,其中积分变量为压力和剪切应力在前进方向的分量;阻力通过对航行体表面(排除鳍区域)进行类似的积分获得。为方便直观解读数据,推力(波动鳍产生的净推进力)报告为正值,表示其作用方向与航行方向一致(负 X 轴);阻力(航行体所受流体阻力)报告为负值,表示其作用方向与航行方向相反(正 X 轴)。

图 8 所示为仿生飞行器在 6 个不同 β 值下艇体阻力及波动鳍推力变化曲线。图中, F_{hull} 为艇体阻力, F_{fin} 为波动鳍推力,负号表示阻力的方向与运动相反。

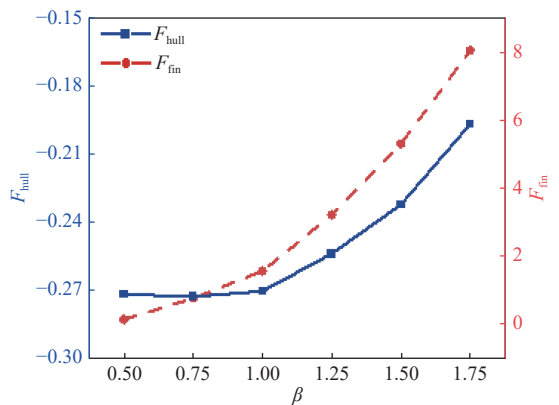


图 8 不同 β 下艇体阻力及波动鳍推力

Fig. 8 Hull resistance and undulating-fin thrust performance of the bionic vehicle versus β

由图 8 可知,随着 β 从 0.50 增加到 1.75,艇体阻力由 0.27 N 减小到 0.19 N。艇体阻力分压差阻

力和摩擦阻力2种。随着 β 的增大,艇鳍段长度不变,也即摩擦阻力不变;而压差阻力则随着 β 的增大而减小(详情见后面对不同 β 值下仿生航行器压力云图的分析)。因此,随着 β 的增大,艇体总阻力减小。另由图还可知,随着 β 从0.50增加到1.75,波动鳍推力由0.8 N增大到8 N。表面推力是应力张量在波动鳍表面的积分,应力张量与 β 的大小无关,波动鳍表面积在长度不变的条件下与 β 呈正相关,可见推力是随着 β 的增加而增加的。因此,就造成了波动鳍推力增大而艇体阻力减小的情况,可见, β 增加会增大艇体的净推力。

图9所示为仿生航行器在6个不同 β 值下波动鳍推力系数及推进效率的变化曲线。图中, η 为推进效率,绿色线条为辅助线。

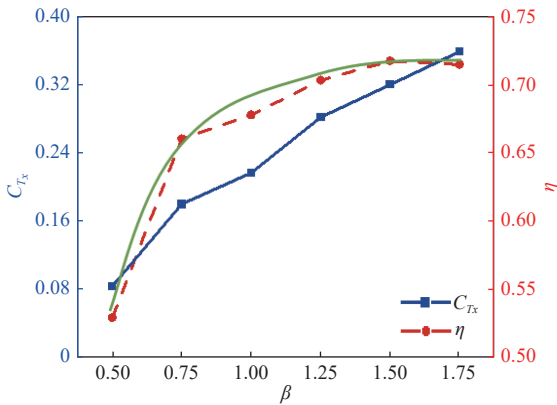


图9 不同 β 下波动鳍推力系数及推进效率

Fig. 9 Thrust coefficient and propulsive efficiency of the undulating fin of the bionic vehicle versus β

由图9可知,随着 β 从0.50增加到1.75,波动鳍推力系数由0.08增加到0.36,推力的增加大于特征阻力的增加,有益于推进性能。另由图还可知,随着 β 由0.50增加到1.75,推进效率由0.53增加到0.72。由效率公式(4)可知,其分子为推进功率,分母为输入功率。为获得一个简洁的物理表达式,引入了等效输入力 F_{input} 的概念,其核心思想是:将波动鳍整体在运动过程中所受到的平均流体阻力效应凝聚为一个作用在波动传播方向上的等效力。

根据输入功率 P_{input} 的定义,可得

$$P_{input} = F_{input} \cdot V_{wave} \quad (10)$$

式中: F_{input} 为一个推导出的等效力,代表驱动鳍波动所需的“合力”; V_{wave} 为波动鳍的合速度。

在本文所有工况中,航行器的偏航角与倾角均为0,航行器的合速度与推力方向一致。那么,效率可简化为

$$\eta \approx T_x / F_{input} \quad (11)$$

随着 β 的增大,推力在合力中的占比系数增大,在输出能量中,推力的占比增加。

图10所示为 $t/T=0$ 时仿生航行器在6个不同 β 值下的横视图,同时还示出了截面 $S(x, y, z=0)$ 和艇体表面的压力分布云图。

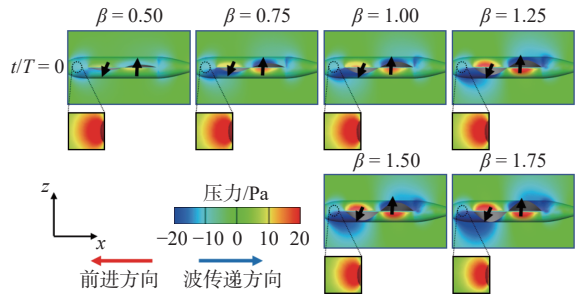


图10 不同 β 下仿生航行器的压力云图

Fig. 10 Pressure contours of the bionic vehicle at varying β values

由图10可知,随着 β 从0.50增大到1.75,艇首和艇尾处的压力值无明显变化,而艇鳍段上、下表面的压力差则在增加,导致压差力随之增大,进而指向 X 轴负方向的压差力分量增大。所以,艇体的总压差阻力减小,因艇体的摩擦阻力与 β 无关,故艇体的总阻力在减小。

图11所示为仿生航行器在6个不同 β 值下波动鳍波动一个周期的横视图。

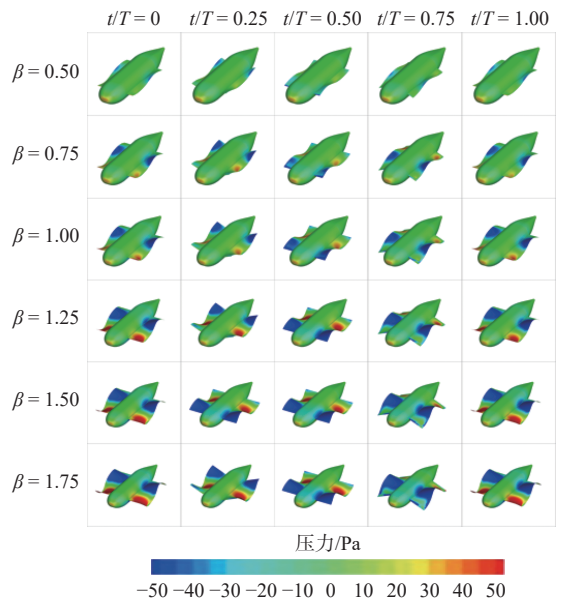


图11 不同 β 单周期仿生航行器压力云图

Fig. 11 Single-cycle pressure contours of the bionic vehicle at varying β values

由图11可知,对于任意的 t/T ,随着 β 从0.50增加到1.75,波动鳍表面压力增大,所以鳍上、下表面的压差力随之增大。根据上述对图8的分析,表明波动鳍的压差力在 X 轴方向分量的合力为波动鳍的推力。因此,随着 β 的增大,波动鳍的推力随之增大。

4 讨论与分析

在仿生航行器的行进过程中, 艇体提供阻力, 波动鳍提供推力, 效率则是评价推进模式重要的参考量, 因此, 将从阻力、推力以及效率这3个角度来分析仿生航行器。

从阻力的角度来看, 艇体阻力在 $\beta = 0.50 \sim 1.00$ 范围时变化不大, 但随着 β 从1.00继续增大, 则会减小。因此, 在进行艇鳍几何设计时, 应考虑最小为1.00的 β 值, 因此时艇体的阻力比较小。

从推力的角度来看, 波动鳍的推力和推力系数与 β 呈正相关。推力系数的大小反映了波动鳍将流体动能转换为推力的有效性, 因此在进行艇鳍几何设计时, 应考虑较大的 β 值, 因此时波动鳍的推力和推力系数较大。

从推进效率的角度来看, 效率在 β 值较小时快速增长, 但随着 β 的增大, 增速降低, 至驻点($\beta = 1.50$)时效率曲线的增长几乎停滞, 效率接近于峰值; 当 $\beta > 1.50$ 时, 输入功率的持续增长主要转化为加剧的流体能耗散。当 β 值过大时, 过大的波幅使得鳍表面局部区域的波动更易诱发大尺度的流动分离。分离流过程伴随着强烈的剪切和涡旋生成, 这些涡旋的破碎与黏性耗散将大量机械能不可逆地转化为了内能。因此, 在进行艇鳍几何设计时, 应考虑合适的 β 值。

根据前文有关压力云图的分析可知, 艇体因波动鳍的波动而受一个周期性的纵倾力矩, 此力矩与艇体表面压力差呈正相关, 随 β 值的增大而增大。这一力矩对于航行器的工程应用具有双重影响: 其一, 过大的平均力矩会导致不利的静态纵倾, 从而改变航行姿态、增加阻力并挑战静稳定性; 其二, 力矩的周期性波动会直接激励艇体做俯仰运动, 若其频率与艇体的固有频率接近, 则会引发共振, 放大姿态振荡, 危害航行安全与任务执行。

从控制系统设计的角度来看, 该纵倾力矩构成了一个固有的动态扰动, 因而要求控制器具备更强的抗干扰或前馈补偿能力, 从而增加了系统复杂性和能耗。然而, 其与波动参数的可预测关联性也暗示了将其开发为一种辅助姿态控制手段的潜在可能。

因此, 在艇-鳍集成系统设计中, 必须进行频率匹配与裕度分析以规避共振, 并利用CFD工具对纵倾力矩进行早期预报与综合评估, 以便在高效推进与可控载荷间取得平衡。最终, 应将此力矩的特性输入控制系统设计流程, 从而开发出适应性更强、鲁棒性更高的航行器运动控制策略。

综上, 在进行艇-鳍几何设计时, 应通过CFD方法对 β 进行性能预报, β 也应考虑效率曲线的驻点($\beta = 1.50$)。此时, 艇体阻力在减小, 而波动鳍推力及推力系数则均较大, 由艇体表面压力差引起的纵倾力矩对艇体的失稳性影响较小。需要指出的是, 为揭示鳍-艇几何参数对推进性能的影响, 将聚焦于宽度方向的核心无量纲参数 β 进行分析, 这使得我们可以深入探讨 β 对推进效率、尾流结构以及艇体受力的独立作用机制。然而, 在实际仿生航行器的一体化设计中, 鳍长比(鳍长与艇长之比)、翼型剖面形状、三维展向弯曲变形等参数同样是决定系统性能的关键因素, 且其与 β 之间存在复杂的耦合关系。这些参数对推进效率、纵倾力矩以及流动分离特性的联合影响机制, 是未来需要深入探索的重要研究方向。

5 结论

为了研究MPF游动模式仿生航行器的鳍-艇几何关系对其推进性能的影响机制, 本文建立了仿生航行器的参数化几何模型, 并将 β 作为几何特征参数, 推导了仿生航行器的推进性能(推力、推进效率等)与 β 的理论关系。随后, 采用CFD方法进一步分析了不同 β 值对应的鳍-艇几何关系对推进性能的影响机制, 揭示了仿生航行器艇体与波动鳍之间的相互作用机理。主要得到如下结论:

- 1) 存在一个最优的 β 值($\beta = 1.50$), 使得在推进效率达到准峰值时, 若小于此 β 值则推进效率随 β 值的增加而增大, 在超过此 β 值之后, 推进效率的增长几乎停滞。

- 2) 波动鳍产生的纵倾力矩与艇体表面压力差呈正相关, 并随参数 β 的增大而增大。为避免由力矩引发的共振失稳风险及操控性问题, 在艇-鳍设计阶段应规避波动频率与艇体固有频率重合, 并采取CFD与实验相结合的方法优化 β 的取值, 从而控制力矩幅值。

本文采用固定姿态的航行器模型进行了模拟, 该设定有效隔离了因航行器运动带来的复杂耦合效应, 从而能专注分析 β 在推进水动力与艇体干扰载荷方面的独立作用规律。然而, 这也意味着自航状态(推力与阻力动态平衡)下的真实性能未被直接揭示。

基于此, 后续工作将从以下3个层面展开, 用以推动波动鳍推进技术向工程实用化迈进:

- 1) 多参数耦合设计机理研究。基于本文所得 β 的影响规律, 引入鳍长比、翼型剖面等关键

设计变量,系统研究这些参数与 β 之间的耦合作用机制,旨在建立更完备的设计参数空间,揭示多目标竞争下的水动力性能演变规律。

2) 自航性能验证与评估。开展带自由度的自航CFD数值模拟以及缩比模型水池实验,在真实的推力-阻力平衡状态下,对基于固定状态结论所设计的波动鳍系统的实际推进效率、航速控制能力以及姿态稳定性进行验证与评估,完成从机理研究到性能验证的闭环。

3) 智能化多目标优化设计探索。依托本文建立的参数化模型与性能数据库,结合代理模型(如Kriging、神经网络)与多目标优化算法(如NSGA-II),构建一套高效的“仿真-优化”设计流程,通过以同时最大化推进效率、最小化纵倾力矩波动等为目标,实现波动鳍-艇体集成系统的自动化和智能化协同设计。

参考文献:

- [1] SFAKIOTAKIS M, LANE D M, DAVIES J B C. Review of fish swimming modes for aquatic locomotion[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1999, 24(2): 237–252.
- [2] LINDSEY C C. Form, function, and locomotory habits in fish[J]. Fish Physiology, 2024, 40: 125–212.
- [3] 张磊, 张智勇, 苗洋, 等. 基于软性跨介质的仿生潜空飞行器设计[J]. 中国舰船研究, 2025, 20(6): 169–179.
ZHANG L, ZHANG Z Y, MIAO Y, et al. Design of biomimetic aerial-aquatic vehicle based on soft cross-medium technology[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2025, 20(6): 169–179 (in Chinese).
- [4] Aqua_ray[EB/OL]. [2025-07-07]. https://www.festo.com.cn/cn/zh/search/?tab=SUPPORT_PORTAL&q=Aqua_ray&documentTypeGroup=PRODUCT_INFORMATION&documentTypes=.
- [5] CHEW C M, LIM Q Y, YEO K S. Development of propulsion mechanism for robot manta ray[C]//Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). Zhuhai: IEEE, 2015: 1918–1923. DOI: 10.1109/ROBIO.2015.7419053.
- [6] XU Y C, ZONG G H, BI S S, et al. Initial development of a flapping propelled unmanned underwater vehicle (UUV)[C]//Proceedings of 2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). San-ya: IEEE, 2007: 524–529. DOI: 10.1109/ROBIO.2007.4522217.
- [7] 杨少波. 牛鼻鲢泳动动力学分析与仿生机器鱼研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
YANG S B. Hydrodynamic analysis of cownose ray's swimming and research of bionic robotic fish[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010 (in Chinese).
- [8] HU T J, SHEN L C, LIN L X, et al. Biological inspirations, kinematics modeling, mechanism design and experiments on an undulating robotic fin inspired by *Gymnarchus niloticus*[J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44(3): 633–645.
- [9] LIU F F, LEE K M, YANG C J. Hydrodynamics of an undulating fin for a wave-like locomotion system design [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 17 (3): 554–562.
- [10] LIU H L, CURET O. Swimming performance of a bio-inspired robotic vessel with undulating fin propulsion[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2018, 13(5): 056006.
- [11] LI S J, HU Q, ZHANG T J, et al. Bionic parallel undulating fins: influence of unsteady coupling effect on robot propulsion performance[J]. Ocean Engineering, 2024, 312: 119075.
- [12] 罗自荣, 夏明海, 殷谦, 等. 复合波提升仿生机器鱼推进性能研究[J]. 中国机械工程, 2024, 35(11): 1901–1908.
LUO Z R, XIA M H, YIN Q, et al. Research on compound wave propulsion performance improvement for bionic fish robots[J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(11): 1901–1908 (in Chinese).
- [13] XIA M H, WANG H, YIN Q, et al. Design and mechanics of a composite wave-driven soft robotic fin for biomimetic amphibious robot[J]. Journal of Bionic Engineering, 2023, 20(3): 934–952.
- [14] 冯亿坤, 邹腾安, 张国卿, 等. 基于自主游动的仿生双波动鳍机器鱼操纵运动数值研究[J/OL]. 工程力学. (2024-03-07) [2025-11-02]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.o3.20240304.1616.044>.
FENG Y K, ZOU T A, ZHANG G Q, et al. Numerical study on maneuvering motion of a bionic robotic fish with twin-fin based on self-propelled swimming[J/OL]. Engineering Mechanics. (2024-03-07) [2025-11-02]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.o3.20240304.1616.044> (in Chinese).
- [15] FENG Y K, ZOU T, XU X J. Numerical simulation of the self-propelled swimming performances and mechanisms of a biomimetic robotic fish with undulating fins under different fin waveforms[J]. Physics of Fluids, 2024, 36(12): 121917.
- [16] Pliant Energy Systems. Robotics[EB/OL]. [2025-07-07]. <https://www.pliantenergy.com/robotics>.
- [17] CANDELIER F, BOYER F, LEROYER A. Three-dimensional extension of Lighthill's large-amplitude elongated-body theory of fish locomotion[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2011, 674: 196–226.
- [18] CANDELIER F, POREZ M, BOYER F. Note on the swimming of an elongated body in a non-uniform flow [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2013, 716: 616–637.
- [19] SUN G H, WANG Z D, LING H J, et al. Investigation on the propulsive efficiency of undulating fin propulsor [J]. Ocean Engineering, 2024, 312: 119113.
- [20] 赵磊, 陈博, 田桂中, 等. 一种 Myring 型水下航行器的仿生优化设计方法: 中国, 116108583A[P]. 2023-05-12.
ZHAO L, CHEN B, TIAN G Z, et al. Bionic optimization design method for Myring type underwater vehicle: CN, 116108583A[P]. 2023-05-12 (in Chinese).

- [21] MACIVER M A, SHARABASH N M, NELSON M E. Prey-capture behavior in gymnotid electric fish: motion analysis and effects of water conductivity[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2001, 204(3): 543–557.
- [22] EPSTEIN M, COLGATE J E, MACIVER M A. Generating thrust with a biologically-inspired robotic ribbon fin[C]//*Proceedings of 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Beijing: IEEE, 2006: 2412–2417. DOI: 10.1109/IROS.2006.281681.
- [23] THEKKETHIL N, SHARMA A, AGRAWAL A. Self-propulsion of fishes-like undulating hydrofoil: a unified kinematics based unsteady hydrodynamics study[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2020, 93: 102875.
- [24] 白亚强, 张军, 丁恩宝, 等. 静水中长鳍扭波推进的水动力数值研究 [J]. *水动力学研究与进展*, 2016, 31(4): 402–408.
BAI Y Q, ZHANG J, DING E B, et al. Numerical study for the hydrodynamics of torsional wave propulsion with long fin in stationary water[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2016, 31(4): 402–408 (in Chinese).
- [25] 苏博越, 白亚强, 张军, 等. 长鳍波动推进水动力效率计算分析 [J]. *水动力学研究与进展*, 2019, 34(5): 577–584.
SU B Y, BAI Y Q, ZHANG J, et al. Numerical calculation of hydrodynamic efficiency of long undulating fin [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2019, 34(5): 577–584 (in Chinese).
- [26] 王佳茂, 杨鹏, 李静茹. 蝠鲼仿生型多模块 UUV 的水动力分析及能量捕获效能研究 [J]. *中国舰船研究*, 2023, 18(6): 106–118.
WANG J M, YANG P, LI J R. Hydrodynamic analysis and energy capture efficiency of multi-module bionic manta ray UUV[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2023, 18(6): 106–118 (in Chinese).
- [27] WEI C, HU Q, SHI X D, et al. A comparison for hydrodynamic performance of undulating fin propulsion on numerical self-propulsion and tethered models[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 265: 112471.
- [28] 石伏龙, 黎仁杰, 欧传中, 等. 多排列形式下仿生航行体水动力性能与尾流结构演变规律 [J]. *中国舰船研究*, 2025, 20(增刊 1): 44–55.
SHI F L, LI R J, OU C Z, et al. Research on the hydrodynamic performance and wake structure evolution of bionic vehicles with various arrangement configurations [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2025, 20(Supp 1): 44–55 (in Chinese).

Effects of fin-hull geometric parameters on propulsion performance in bionic vehicles

SUN Cong¹, LONG Xianqiu², WANG Chonglei², FANG Bin³

¹ College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

² College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Qingdao 266000, China

³ College of Naval Architecture and Ocean Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

Abstract: [**Objective**] This study aims to systematically quantify the effects of fin-hull geometric configuration on the propulsion performance of bionic undulating-fin vehicles employing media and/or paired fin propulsion (MPF). It addresses the lack of a unified analysis of geometric parameters across different bionic underwater vehicles in existing research. [**Methods**] To this end, a universal parametric geometric model incorporating the hull and a pair of undulating fins was developed. The model innovatively introduces the ratio of fin width to hull width β as the core dimensionless geometric parameter. Based on this model, high-fidelity CFD numerical simulations were conducted to analyze the propulsion performance and flow field structure of the vehicle under different β values. [**Results**] The results indicate that β has a nonlinear and significant influence on propulsion performance, and that an optimal range of β values exists for maximizing propulsion efficiency. Excessively small β values lead to insufficient thrust generation, whereas excessively large β values increase drag due to intensified fin-hull interactions that induce flow separation. Furthermore, β significantly modulates the magnitude of the pitching moment, imposing a critical constraint on the vehicle's attitude stability. [**Conclusions**] This study clarifies the design trade-off between efficiency and stability governed by the β parameter. The established parametric model and the identified underlying mechanisms provide a quantitative theoretical basis for the shape design of bionic underwater vehicles and lay a solid foundation for future research on multi-parameter coupling optimization and self-propulsion performance.

Key words: autonomous underwater vehicles; bionic vehicles; media and/or paired fin propulsion (MPF); fin-hull geometric parameters; propulsion performance