

仿蝠鲼水下航行器前置推进器的布局优化*

李子程, 罗莹莹, 雷梓铎, 詹杰民

中山大学应用力学与工程系, 广东 深圳 518107

摘要: 引入前置推进器作为动力辅助, 设计不同前置推进器布局并分析了其对仿蝠鲼水下航行器航行效率的影响。文中采用螺旋桨体积力法与重叠网格技术, 对搭载前置推进器的仿蝠鲼水下航行器进行二自由度自航模拟, 研究了前置推进器安装位置、角度等参数对水下航行器整体水动力性能的影响; 同时, 对水下航行器启动加速到稳定航行的速度、升力系数、阻力系数、升阻比和俯仰力矩系数以及稳定航行中的速度场、压力场和涡结构进行了分析。研究结果显示, 通过优化仿蝠鲼水下航行器的前置推进器的安装位置和角度, 可显著提升其航行效率; 改变推进器的安装角度可有效提高水下航行器的升阻比和稳定性。

关键词: 仿蝠鲼水下航行器; 前置推进器; 体积力法; 航行效率

中图分类号: U661.71 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2026)01-0052-12

Forward propeller layout optimization for a Manta ray-inspired UUV

LI Zicheng, LUO Yingying, LEI Zihua, ZHAN Jiemin

Department of Applied Mechanics and Engineering, Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China

Abstract: This study introduces a front-mounted thruster as an auxiliary propulsion mechanism, multiple front thruster configurations were designed and systematically analyzed to evaluate their impact on the vehicle's propulsion performance. A propeller body-force method combined with an overset grid approach was employed to perform two-degree-of-freedom self-propulsion simulations of the vehicle equipped with these thrusters. Based on this, a comprehensive investigation was conducted into the effects of thruster installation position and angle on the vehicle's hydrodynamic performance. The analysis encompassed the entire operational process from start-up acceleration to steady cruising, focusing on velocity, lift coefficient, drag coefficient, lift-to-drag ratio, and pitching moment coefficient, as well as flow field, pressure distribution, and vortex structures during steady-state operation. The results demonstrate that optimizing the placement and orientation of front thrusters can significantly improve the vehicle's sailing efficiency. Notably, adjusting the thruster installation angle effectively enhances the lift-to-drag ratio and stability of the underwater vehicle.

Key words: Manta ray-inspired underwater vehicle; front-mounted thruster; body-force method; sailing efficiency

水下航行器 (UUV, unmanned underwater vehicle) 是人类探索海洋、开发海洋资源的核心装备。近年, 随着应用场景的日益复杂化和任务需求

的多元化, 对 UUV 的机动性、隐蔽性、环境适应性等方面都提出了更高要求 (钟朝廷等, 2015)。受自然界灵活游动生物的启发, 通过模仿水生生物高效、

* 收稿日期: 2025-09-13

录用日期: 2025-10-14

网络首发日期: 2026-01-02

基金项目: 深圳市科技计划 (JCYJ20220818102012024)

作者简介: 李子程 (2000 年生), 男; 研究方向: 水动力学; E-mail: lizch23@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 詹杰民 (1963 年生), 男; 研究方向: 水动力学; E-mail: stszjm@mail.sysu.edu.cn



ZR20250197

灵活、低噪的运动方式,制备高机动性、低噪声和强隐蔽性的仿生水下机器人成为了研究热点。其中,越来越多学者开始关注仿蝠鲼水下航行器的研究(Cai et al., 2012; Deakos, 2012; Wei et al., 2018)。

Wang et al. (2016)参照真实蝠鲼建立了仿蝠鲼水下航行器的外形,给出了仿蝠鲼水下航行器的运动学模型,并对仿蝠鲼UUV的水动力特性进行了分析。研究表明,仿蝠鲼水下航行器相比传统的水下滑翔机具有更大的升阻比和滑翔速度。朝黎明(2019)对仿蝠鲼自主变形翼的水动力性能进行深入研究,并在此基础上成功研制出用于海底巡航作业的仿蝠鲼水下航行器。Cai et al. (2020)基于动态网格技术构建了仿蝠鲼水下航行器的多区域耦合模型。结合对照性弹射滑翔试验,该研究揭示了当UUV质心配置于其几何中心前倾20 mm时,初始攻角在 $[-5^\circ, -2.5^\circ]$ 的区间能够获得最佳的滑翔效能。鲁建华等(2025)对仿蝠鲼水下航行器滑翔过程中的压力场与涡结构进行了分析。研究显示,当以正攻角滑翔时,最佳滑翔攻角为 6° ;以负攻角滑翔时,最佳滑翔攻角为 -9° ;当以大攻角或 0° 攻角滑翔时,采用弓形弯曲机翼可显著提升升阻比。

然而,传统仿蝠鲼UUV主要依赖胸鳍波动实现推进与转向,在突发任务响应、高速航行或负载状态下常表现出推力不足、响应滞后等问题(曹勇等, 2023)。为此,引入辅助推进器(如螺旋桨、泵喷推进器等)作为动力补充。同时,对于螺旋桨、涵道螺旋桨等的数值模拟,目前大多采用全叶片计算法和激励盘模型方法。全叶片计算方法是指包含螺旋桨叶片的内外流域均采用精细化网格的方法,其计算耗时长、效率低(Zachariadis et al., 2011)。一些学者使用了更简单的体积力模型,该模型仅需要将螺旋桨叶片、性能参数等转化为源项输入,极大简化了建模过程(Li et al., 2022; Cai et al., 2022)。

Fu et al. (2010)基于Fluent开发了一种通过简化螺旋桨体积力模型实现对船舶自航性能快速高效预测的方法。吴召华等(2013)采用Hough-Ordway模型对船舶的回转运动进行了数值模拟,结果表明:即使不考虑扭矩,得到的水动力性能参数等数据都较为准确。王太友等(2018)基于体积力模型计算了水下机器人的各项水动力性能和周围的流场,并与已有的试验数据进行对比,验证了可行性和准确性。Lee et al. (2021)采用Hough-

Ordway模型对船舶在规则波中的推进问题进行了预测。相比高保真模型,网格量降低了50%,静水中推进系数计算结果与高保真模型结果相近,同时计算时间缩短了3倍。Yu et al. (2021)开发了一种基于改进OUM体积力模型的方法用于对KCS的全尺寸自推进模拟。薛顺等(2025)基于STAR-CCM+采用重叠网格和螺旋桨体积力法相结合,对一种新型首尾对称肥大型船舶的回转性能进行了数值模拟。结果表明,该船具有优良的回转能力,其回转半径较小,但在转向初期响应缓慢,表现出较差的初始转首性,并且其回转性能受波浪的影响较小。

这些方法显著降低了计算复杂度,使得在相对合理的计算成本下,对包含螺旋桨推进系统的复杂水下航行器进行长时间的流体动力学分析和大规模的参数化研究成为可能。尽管其精度在近场细节上略逊于直接模拟,但在捕捉螺旋桨对主体流场的宏观影响、评估推进性能等方面,已被证明具有足够的可靠性(周芳等, 2025)。因此,本文基于商业软件STAR-CCM+,采用螺旋桨体积力法和重叠网格相结合对带推进器的仿蝠鲼水下航行器进行了二自由度自航模拟,对前置推进器的布局优化进行研究,探究了安装位置、角度等参数对UUV整体水动力性能的影响。

1 模型和数值方法

1.1 仿蝠鲼模型

参照真实蝠鲼的外形(Zhan et al., 2017)对蝠鲼的吻鳍、眼睛、背鳍、尾鞭等各个部位进行简化,使用真实蝠鲼外形的下视投影轮廓并采用NACA0020翼型曲线构建UUV机身截面实现上下对称,如图1所示。仿蝠鲼水下航行器的身体布局为翼身融合式,将等比例缩放的NACA0020翼型曲线截面分别放置在蝠鲼投影轮廓的中部,头部,翼身结合部,翼中部及翼尖后进行放样实现翼身融合,体长 B_L 为1 065 mm,展长 S_L 为1 000 mm,最大厚度 A 为20 mm,头部宽度 B 为385 mm。以仿蝠鲼UUV头部为原点,以头部和尾部顶点连线为 x 轴,机翼展向方向为 y 轴(左侧为正)建立坐标系 xyz 。

1.2 推进器布局

在仿蝠鲼水下航行器头部仿造头鳍添加前置推进器提供牵引力,同时在两侧胸鳍部位添加推进器提供升力,如图2所示。推进器采用

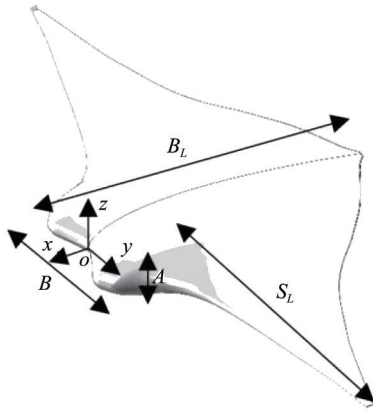


图1 仿蝠鲼水下航行器模型

Fig. 1 Bionic Manta ray UUV model

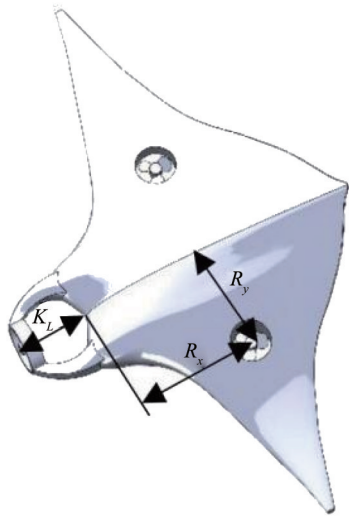


图2 简化后带前置及两侧升力推进器的仿蝠鲼 UUV 模型

Fig. 2 Simplified Manta ray UUV model featuring forward and lateral lift propellers

T200 水下推进器, 仿真模型中将其外壳、卡扣等复杂部件简化, 前置支架及推进器离头部长 \$K_L\$ 为 250 mm, 两侧推进器离头部长 \$R_x\$ 为 450 mm, 离机体轴长度 \$R_y\$ 为 350 mm。为进一步提高计算效率, 在简化模型基础上使用虚拟盘体模型代替推进器螺旋桨。

1.3 流体控制方程及湍流模型

对于水下航行器的水动力进行分析, 其过程为不可压缩的流动, 与周围环境的热交换很小, 可以忽略不计。因此, 在构建基本控制方程时可以省略能量方程。流体流动的连续性方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0,$$

式中 \$\rho\$ 是流体密度, \$t\$ 是时间, \$u, v, w\$ 是流体流速在 \$x, y, z\$ 3 个方向上的速度分量。

流体的动量方程为

$$\frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_x \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + \rho f_x,$$

$$\frac{\partial(\rho u_y)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_y \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + \rho f_y,$$

$$\frac{\partial(\rho u_z)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_z \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z,$$

式中 \$p\$ 是流体微元压力, \$\tau_{ij}\$ 是流体微元在 \$i\$ 和 \$j\$ 方向的表面黏性应力分量, \$f_i\$ 是 \$i\$ 方向的单位质量力。

采用 Realizable \$k-\varepsilon\$ 模型进行模拟 (Shih et al., 1995)。模型的湍动能及其耗散率输运方程为

$$\rho \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M,$$

$$\rho \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b,$$

其中 \$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \eta = \frac{Sk}{\varepsilon}\$。上述方程中,

\$G_k\$ 表示由于平均速度梯度引起的湍动能产生, \$G_b\$ 是用于浮力影响引起的湍动能产生; \$Y_M\$ 是可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响, 不可压流动中可忽略; \$S\$ 是平均应变率张量的模, 表示从主流平均流动中提取能量并转化为湍流能量的速率。\$C_2, C_{1\varepsilon}\$ 和 \$C_{3\varepsilon}\$ 是常数, 流动与重力方向平行时, \$C_{3\varepsilon}\$ 取值为 1; 流动与重力方向垂直时, \$C_{3\varepsilon}\$ 取值为 0。\$\sigma_k, \sigma_\varepsilon\$ 分别是湍动能及其耗散率的湍流普朗特数。湍流系数公式和常数取值如下: \$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, C_\mu = 0.09, C_{1\varepsilon} = 1.44, C_2 = 1.9, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.2\$。

1.4 激励盘模型

对于水下航行器自推进的运动过程, 通常采用激励盘模型中的描述型体积力法。该方法的核心思想是将螺旋桨的流体动力效应通过源项等效引入流体控制方程中, 从而避免直接模拟螺旋桨的几何细节和旋转运动。目前, 最普遍使用的是以 Goldstein 最佳分布为分布模型描述型体积力法, 即 Hough-Ordway 模型 (Hough et al., 1964), 该模型将体积力沿圆柱形虚拟盘轴向均匀分布, 径向分布

遵循 Goldstein 最优化分布:

$$f_{bx} = A_x r^* \sqrt{1 - r^*},$$

$$f_{b\theta} = A_\theta \frac{r^* \sqrt{1 - r^*}}{r^* (1 - r'_h) + r'_h},$$

其中

$$A_x = \frac{105}{8} \frac{T}{\pi \Delta (3R_H + 4R_p)(R_p - R_H)},$$

$$A_\theta = \frac{105}{8} \frac{Q}{\pi \Delta (3R_H + 4R_p)(R_p - R_H)},$$

$$r^* = \frac{r' - r'_h}{1 - r'_h}, \quad r'_h = \frac{R_H}{R_p}, \quad r' = \frac{r}{R_p},$$

式中 $f_{bx}, f_{b\theta}$ 分别为体积力的轴向分量和切向分量; r 为径向坐标; R_H 为桨毂半径; R_p 为梢圆半径; Δ 为虚拟盘厚度; T, Q 分别为螺旋桨推力和扭矩。

1.5 计算域、边界条件及网格划分

计算域需要设置足够的尺寸来消除壁面效应和回流造成的影响, 因此整个计算域长度为 30 m, 宽度为 6 m, 高度为 6 m, 仿蝠鲼 UUV 尾部距离计算域后表面为 2 m, 距离下表面为 3 m, 如图 3 所示。后表面设置为压力出口, 前表面设为速度入口, 上下表面均设为速度入口, 侧面设置为对称平面, UUV 表面设为无滑移壁面条件。

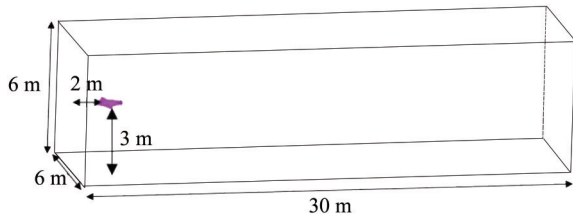


图3 计算域

Fig. 3 Computational domain

采用重叠网格对数值计算域进行离散, 仿蝠鲼 UUV 周围设置 2 m×3 m×1 m 的前景网格, 前景网格采用多面体网格进行划分; UUV 推进运动属于高雷诺数湍流运动, 需要对边界层进行精确求解, 因此在蝠鲼表面处设置边界层 $y^+ = 30$; 推进器区域进行局部加密; 背景网格采用切割体网格进行划分, 计算域及蝠鲼表面网格划分如图 4 所示。

1.6 无量纲参数

水下航行器的动力系数包括阻力系数 $C_d = \frac{F_d}{0.5\rho U^2 S_m}$, 升力系数 $C_l = \frac{F_l}{0.5\rho U^2 S_m}$, 升阻比 $K =$

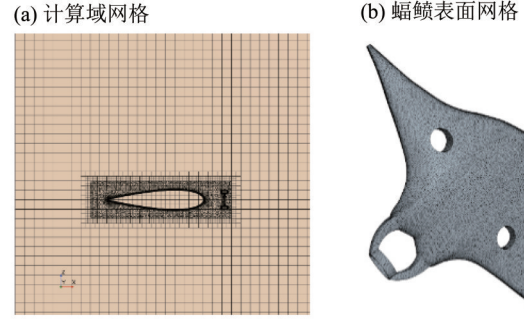


图4 计算域及蝠鲼表面网格

Fig. 4 Computational domain and Manta ray surface mesh

$\frac{C_l}{C_d}$, 俯仰力矩系数 $C_{my} = \frac{M_y}{0.5\rho U^2 S_m B_L}$, 俯仰力矩系数以逆时针方向为正。其中, F_d 为水下航行器受到的阻力; F_l 为水下航行器受到的升力; M_y 为水下航行器受到的俯仰力矩; U 为水下航行器的前进速度; S_m 为水下航行器的浸水面积。

2 数值方法验证

2.1 推进器敞水性能

本文选取了 PPTC VP1304 型螺旋桨进行数值模型精度验证, 该螺旋桨的仿真计算值与实验值之间误差均在 10% 以下 (Siemens Digital Industries Software, 2024), 说明通过 CFD 仿真计算得到的螺旋桨敞水性能具有一定参考性。计算得到的 T200 水下推进器敞水性能曲线, 如图 5 所示。图 5 中, J 为进速系数。

2.2 网格无关性验证

通过调整网格基础尺寸、网格增长率、网格最大尺寸等参数得到了 3 套计算网格, 对 3 套网格的

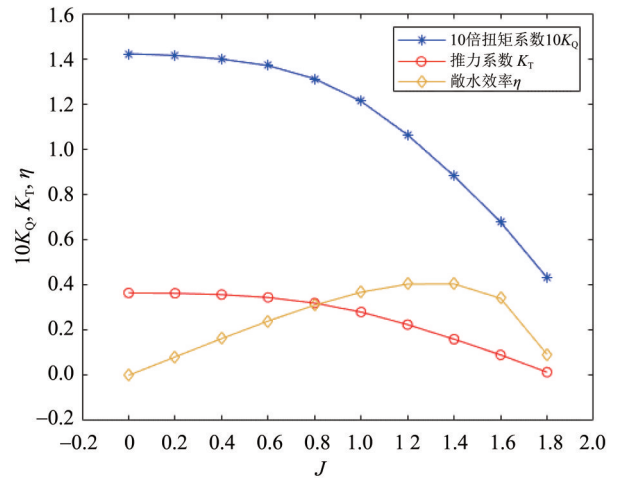


图5 T200水下推进器敞水性能

Fig. 5 T200 underwater thruster open water performance

网格量、不同网格量之间波动阶段的航速和波动周期等计算结果进行对比,如表 1 所示。综合考虑计算精度和时间成本,选择了中等网格进行本文的数值计算。

表 1 不同密度的网格数量及其计算结果对比

Table 1 Comparison of mesh count and numerical results for different mesh densities

网格	稀疏	中等	加密
总网格量	1 139 249	2 311 759	4 408 069
背景网格量	460 000	891 890	1 594 176
前景网格量	679 249	1 419 869	2 813 893
最大航速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	1.239	1.273	1.311
最大航速相对误差	5.5%	2.8%	
最小航速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	1.184	1.218	1.263
最小航速相对误差	6.3%	3.6%	
$t=15\text{ s}$ 航速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	1.190	1.252	1.270
$t=15\text{ s}$ 质心位置(x, z)/m	(17.831, 0.205)	(18.051, 0.197)	(18.715, 0.179)
周期/s	1.767	1.739	1.717
周期相对误差	2.9%	1.3%	

3 推进器布局优化

在水下航行器正前方添加前置推进器(下称结构一)后发现前置推进器产生的尾流对 UUV 头部产生较大影响。因此,进一步对前置推进器提出 2 种布局,一种为将前置推进器下移,使其推力作用线与机身不发生交接(下称结构二);另一种在前置推进器下移的基础上改变方向,使其推力作用线穿过

UUV 质心(下称结构三)。3 种前置推进器的布局如图 6 所示。

3 种前置推进器布局的仿蝠鲮水下航行器均从 0 s 开始启动,仅直行(X)和沉浮(Z)两个自由度,前置推进器给定转速 13.7 rad/s,输出推力为 40 N,两侧推进器均设为只在 UUV 升力为负时启动,根据升力变化实时调整,单个推进器大小设为升力的一半,波动阶段两侧推进器实时输出力如图 7 所示。

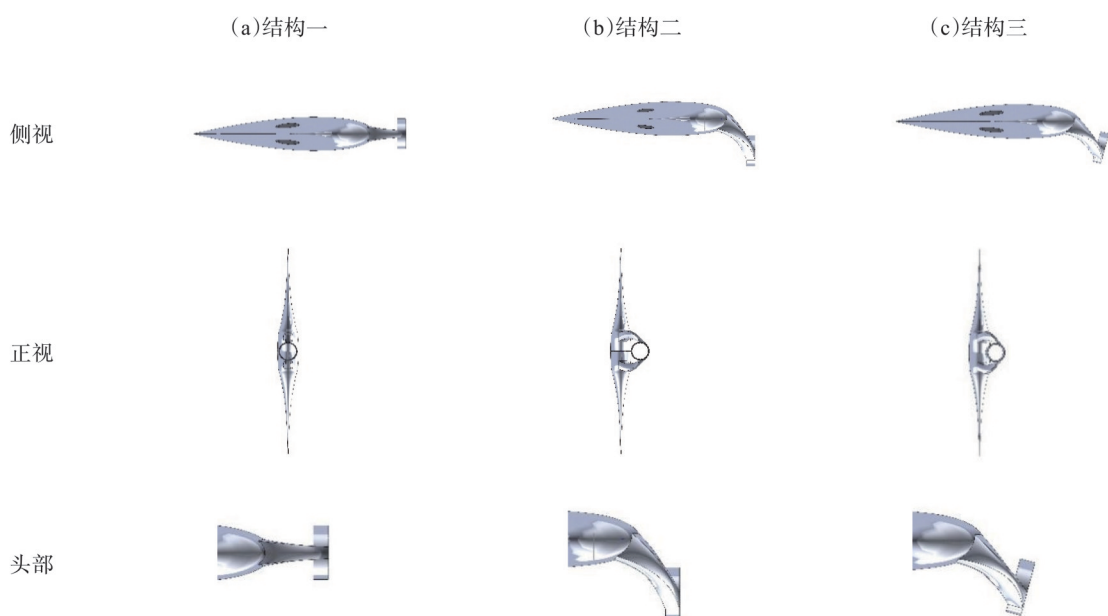


图 6 3 种前置推进器布局

Fig. 6 Three forward propeller layout

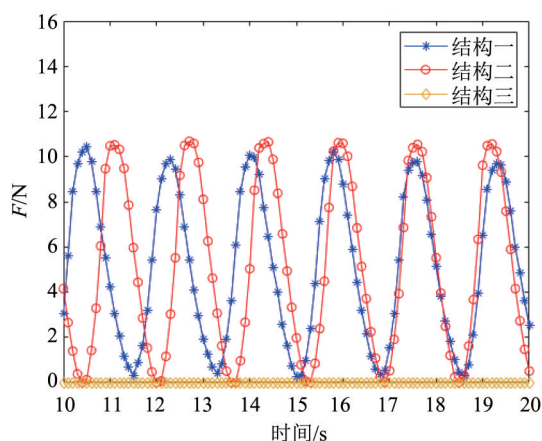


图7 波动阶段两侧推进器输出力

Fig. 7 Output force of bilateral thrusters during flapping phase

图8为3种前置推进器布局的仿蝠鲼水下航行器从0 s开始启动,加速到巡航阶段并航行一段时间的速度图。从速度图可知,结构一在9.43 s时达到最大速度1.326 m/s,随后进入巡航阶段,速度在1.227~1.279 m/s之间波动,波动周期为1.739 s;结构二在9.62 s时达到最大速度1.367 m/s,随后进入巡航阶段,速度在1.32~1.366 m/s之间波动,波动周期为1.628 s;结构三在12 s后速度基本趋于稳定,在14 s时达到最大速度1.469 m/s。结构二和三加速阶段比结构一加速更快;且在前置推进器提供相同推力作用下,结构三达到的速度最大,结构二次之,结构三速度最小。传统通过胸鳍摆动推进的仿蝠鲼水下航行器最大航速为每秒1.07倍体长的游动速度(Meng et al., 2022),本文仿蝠鲼水下航行器最大航速达到了每秒1.3~1.4倍体长的速度,最大航速提升了20%~30%。

图9为巡航阶段1个波动周期内3种前置推进

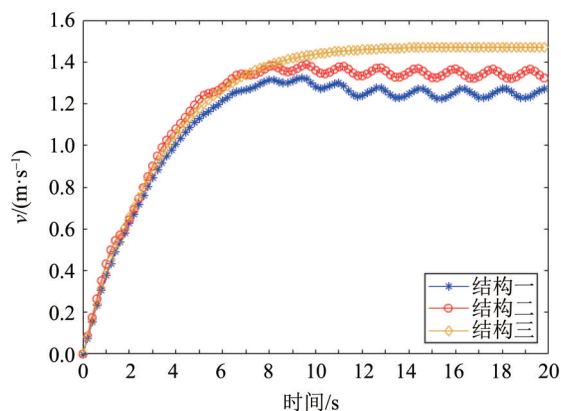


图8 三种前置推进器布局的自航速度对比

Fig. 8 Comparison of self-propulsion speeds for three forward propeller layouts

器布局的UUV升力系数、阻力系数、升阻比和俯仰力矩系数,其中结构一和结构二的波动周期分别为1.739、1.628 s,结构三在巡航阶段速度趋于稳定,取巡航阶段中2 s进行分析。对升力系数、阻力系数、升阻比和俯仰力矩系数进行对比,如表2所示。

由表2可知,结构三的升力系数为正值0.004 6,结构一和结构二均为负值,分别在-0.0119~0和-0.112~0之间且呈周期性波动,平均升力系数分别为-0.005 8和-0.006 3;结构二相较于结构一,平均阻力系数从0.024 6减小至0.021 8,结构三的阻力系数最小,只有0.017 1;结构三的升阻比为正值,结构一和结构二均为负值,以上结果说明在相同推进器相同功率作用下,结构二和结构三提升了UUV的航行效率。另外,结构一和结构二的俯仰力矩系数分别在-0.002 1~0.004 7和0.002 3~0.008 8的范围内呈周期性波动,而结构三基本稳定在0.003 8,在巡航中更容易保持姿态。

图10、图12和图14分别为巡航阶段1个波动周期内3种前置推进器布局的UUV周围流场的速度云图。图11、图13和图15分别为巡航阶段1个波动周期内3种前置推进器布局的仿蝠鲼水下航行器上下表面及正面的速度云图。图16~18分别为巡航阶段1个波动周期内3种前置推进器布局的仿蝠鲼水下航行器的上下表面和正面的压力云图。其中,结构一的波动周期为1.739 s,故取0.4、0.8、1.2、1.6及1.8 s进行分析;结构二的波动周期为1.628 s,故取0.4、0.8、1.2、1.6 s进行分析;结构三在巡航阶段速度趋于稳定,同样取0.4、0.8、1.2、1.6 s进行分析。

从UUV周围流场速度和表面速度云图可知,前置推进器尾流产生的高速射流会对UUV本身及周围的流场造成巨大影响,结构一前置推进器的尾流冲击UUV头部,一定程度上阻碍了UUV的前行,结构二和结构三推进器的尾流主要集中在UUV下方,UUV头部、上下表面两侧及机身部位形成低速区,有效提升了推进器的推进效率和UUV的加速效率,且结构三推进器的尾流紧贴UUV下部曲线,能有效增加UUV的稳定性。

从水下航行器表面的压力云图可知,结构一的高压区集中在头部位置,即前置推进器正后方,前置推进器的尾流对UUV头部产生了较大的影响,也是其航速较低的原因。结构二和结构三头部位置所受压力对比结构一降低较为明显。结构二和结

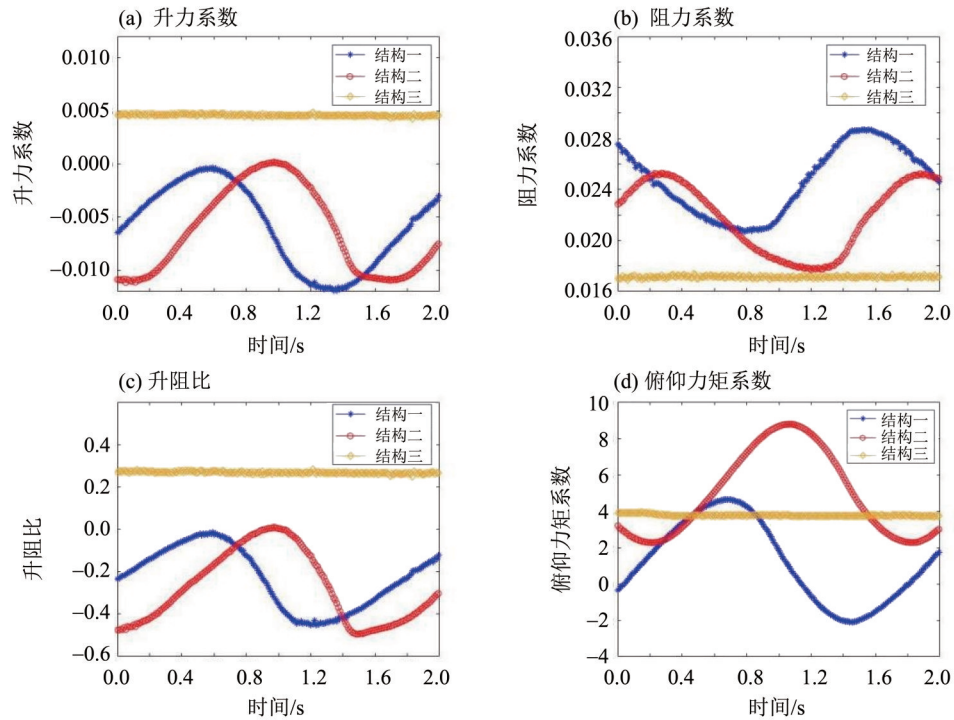


图9 巡航阶段的水动力系数

Fig. 9 Hydrodynamic coefficients during cruise phase

表2 巡航阶段的平均水动力系数对比

Table 2 Comparison of average hydrodynamic coefficients during cruise phase

结构	最大速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	平均升力系数	平均阻力系数	平均升阻比	平均俯仰力矩系数
结构一	1.326	-0.005 8	0.024 6	-0.228 7	0.001 2
结构二	1.367	-0.006 3	0.021 8	-0.276 5	0.004 9
结构三	1.469	0.004 6	0.017 1	0.269 0	0.003 8

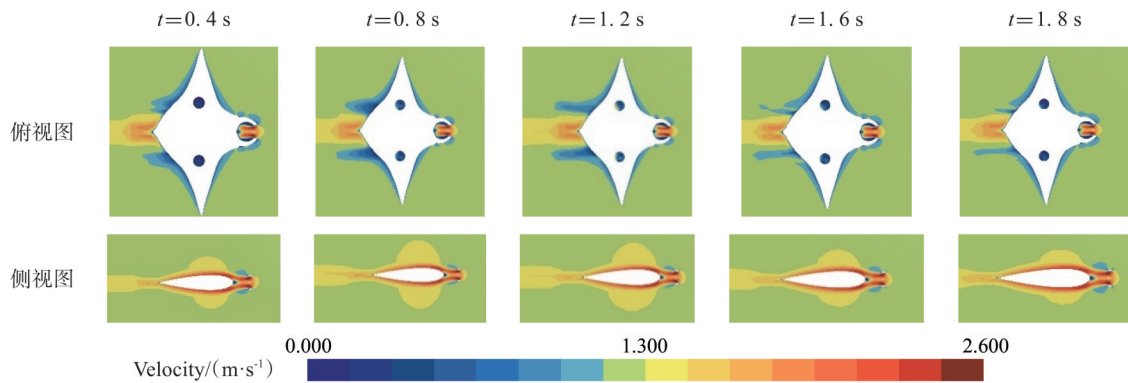


图10 UUV周围流场的速度云图(结构一)

Fig. 10 Velocity contour of flow field around UUV with structure 1

构三下表面受到的压力均比上表面更大,而结构三因前置推进器方向有所调整,导致其下表面压力更大,上下表面由压差产生的合力主要为UUV提供了升力,这也是相较于结构二和结构一,结构三升力为正的原因。

图19~21为巡航阶段1个波动周期内3种前置推进器布局的UUV的 Q 准则涡结构图($Q = 0.005$)。结构二产生的翼尖涡的涡量比结构一和结构三均有所增大,结构三推进器产生的涡尾迹集中在UUV下方,涡量增大,由于推进器的尾流

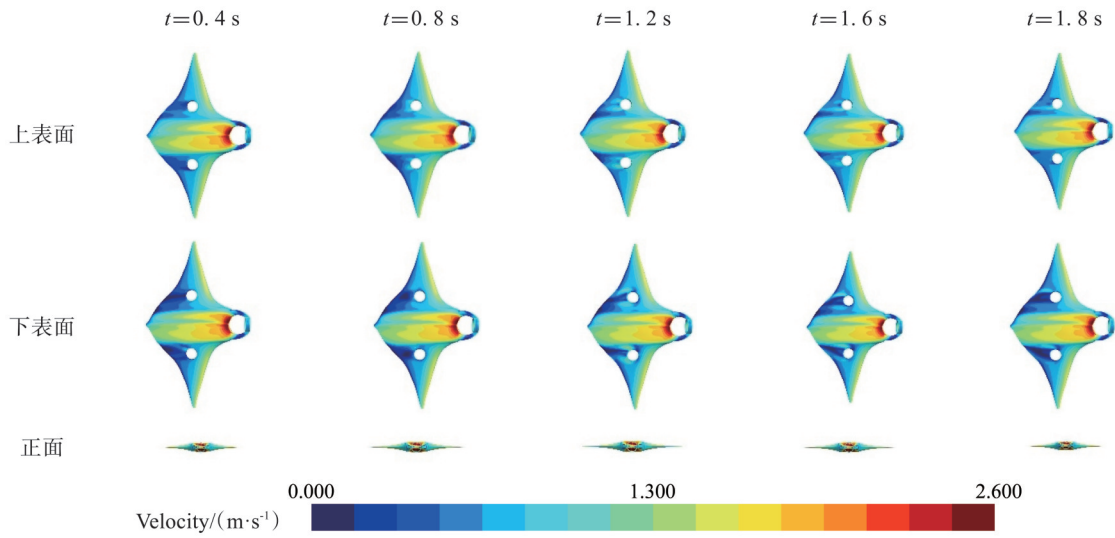


图 11 UUV 表面流场的速度云图(结构一)

Fig. 11 Velocity contour of flow field on the surface of the UUV with structure 1

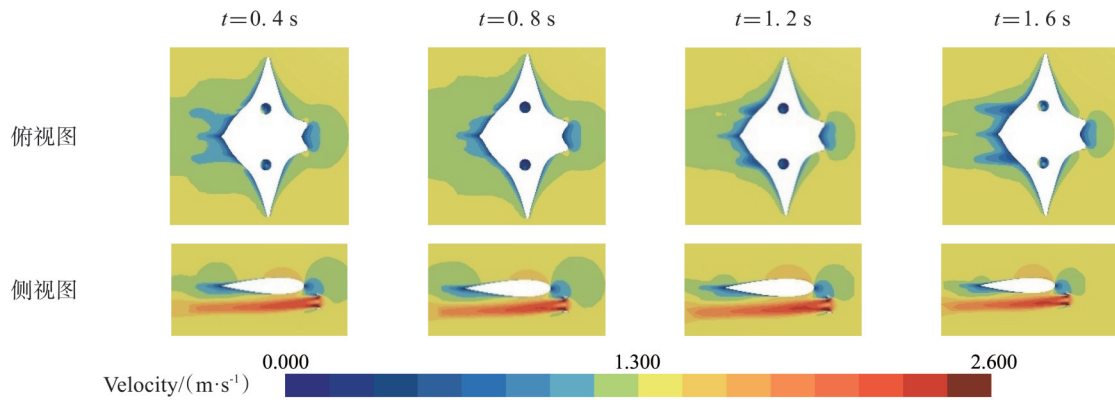


图 12 UUV 周围流场的速度云图(结构二)

Fig. 12 Velocity contour of flow field around UUV with structure 2



图 13 UUV 表面流场的速度云图(结构二)

Fig. 13 Velocity contour of flow field on the surface of the UUV with structure 2

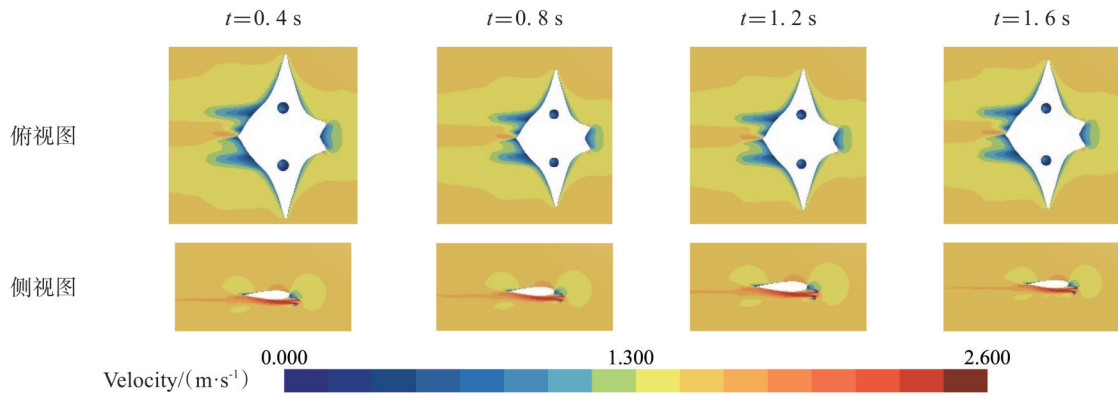


图 14 UUV 周围流场的速度云图(结构三)

Fig. 14 Velocity contour of flow field around UUV with structure 3

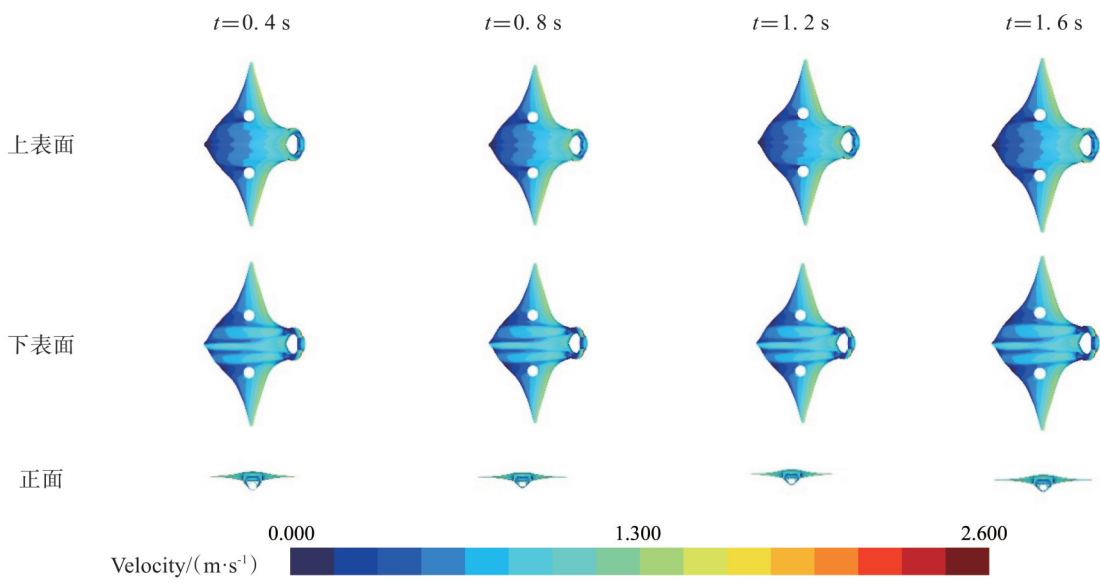


图 15 UUV 表面流场的速度云图(结构三)

Fig. 15 Velocity contour of flow field on the surface of the UUV with structure 3

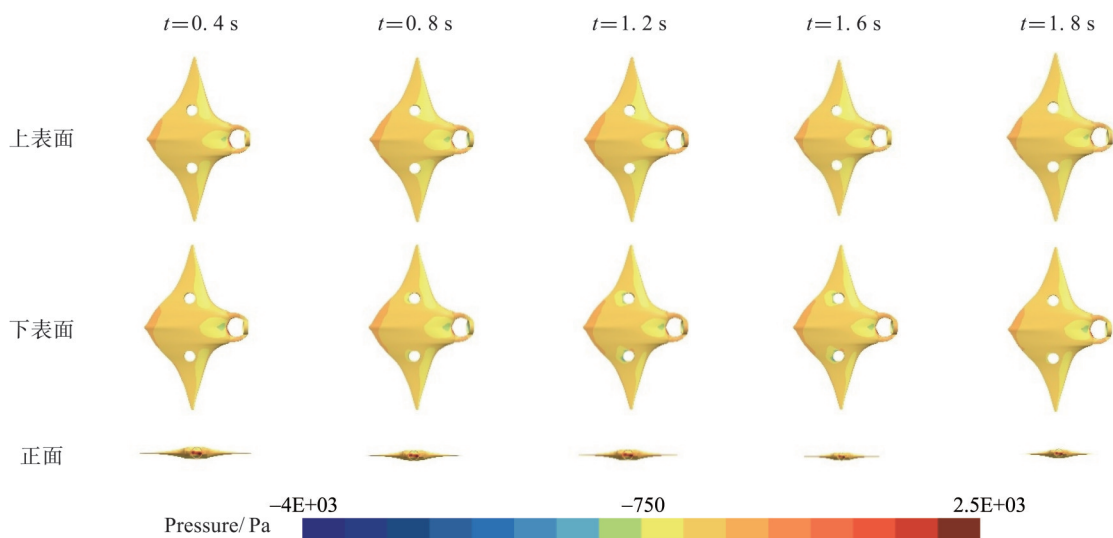


图 16 UUV 的压力云图(结构一)

Fig. 16 Pressure contour of the UUV with structure 1

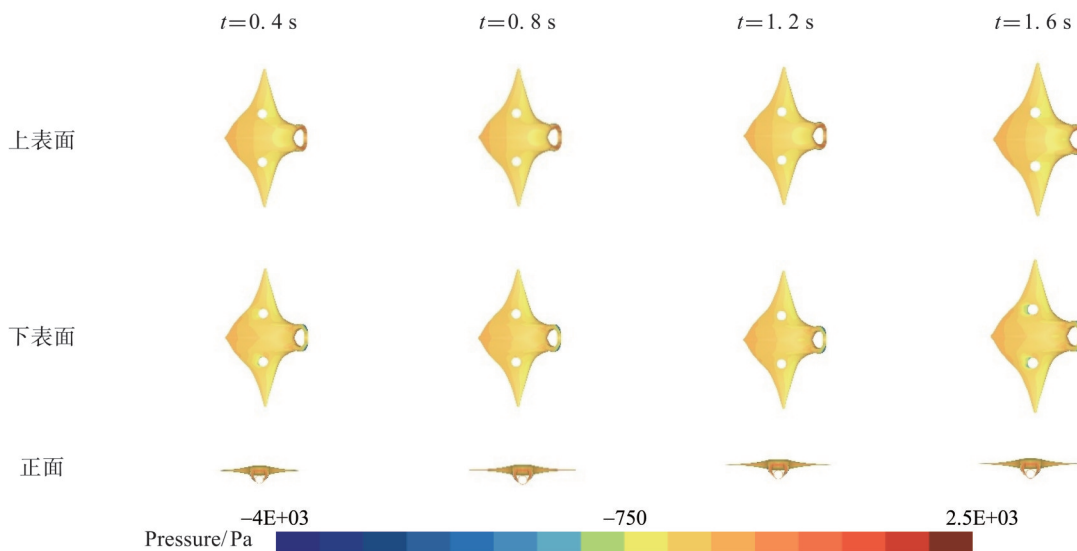


图 17 UUV 的压力云图(结构二)

Fig. 17 Pressure contour of the UUV with structure 2

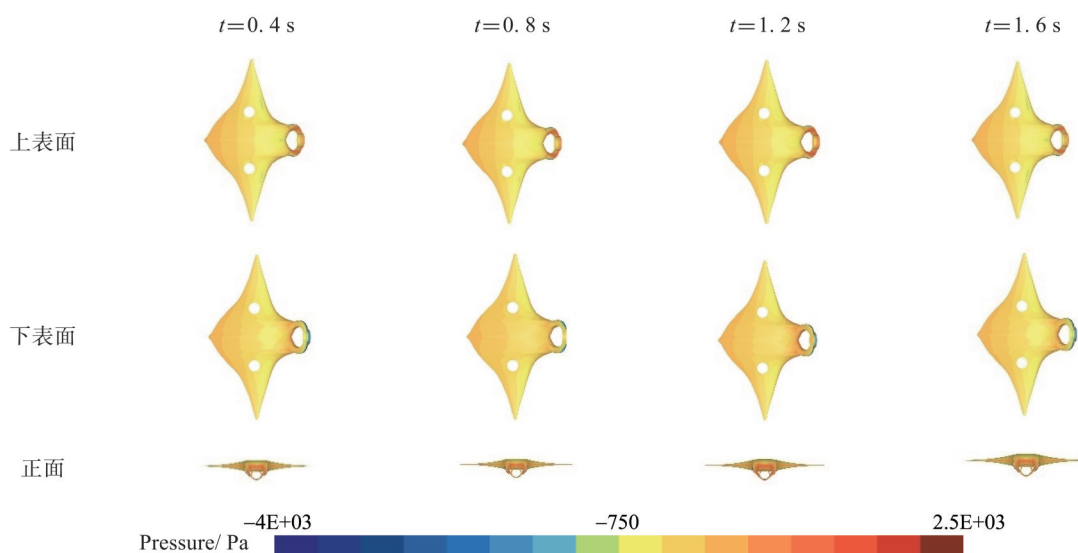


图 18 UUV 的压力云图(结构三)

Fig. 18 Pressure contour of the UUV with structure 3

紧贴 UUV 下部曲线,与尾部产生的尾缘涡尾迹有合并趋势,因此结构三具备更大更稳定的升阻比。

4 结 论

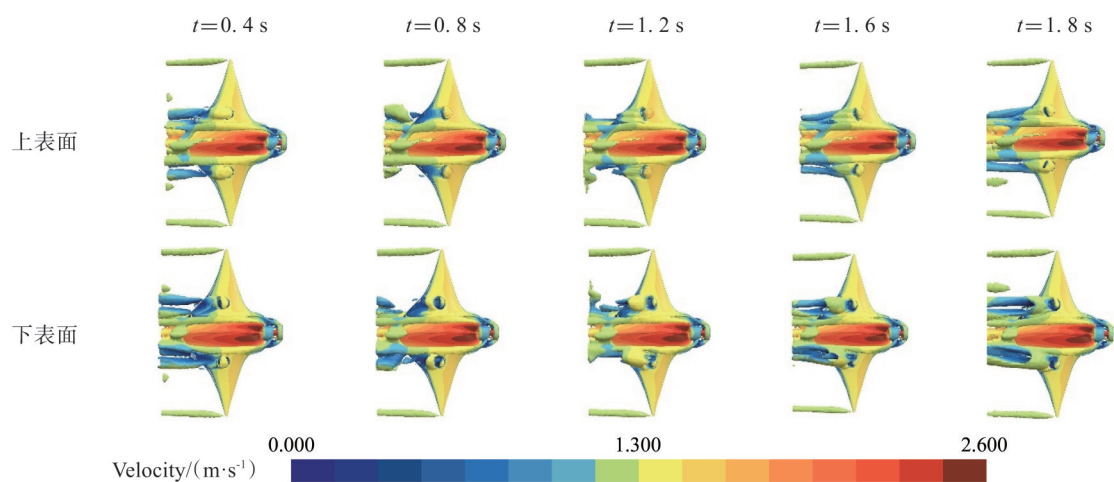
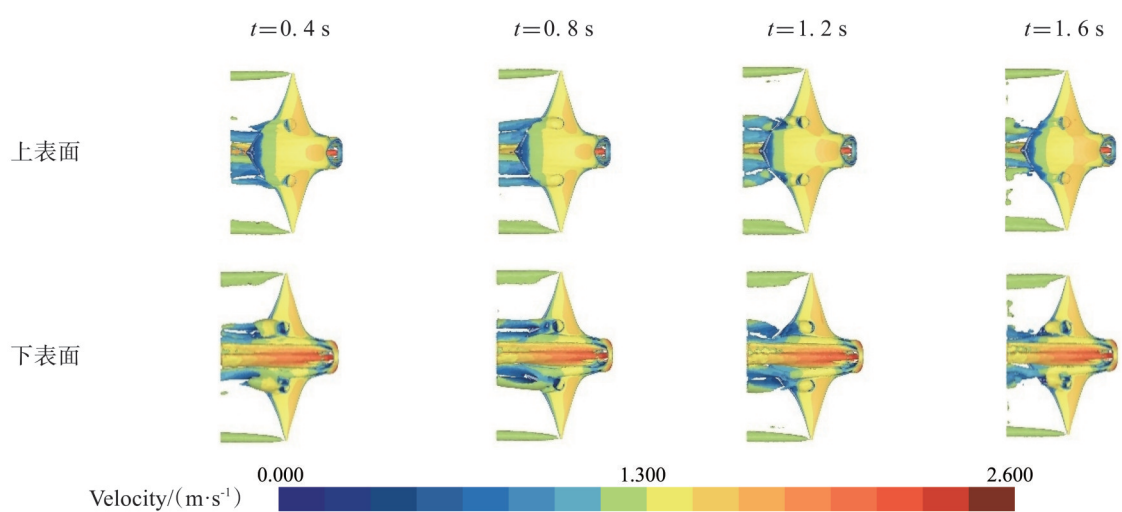
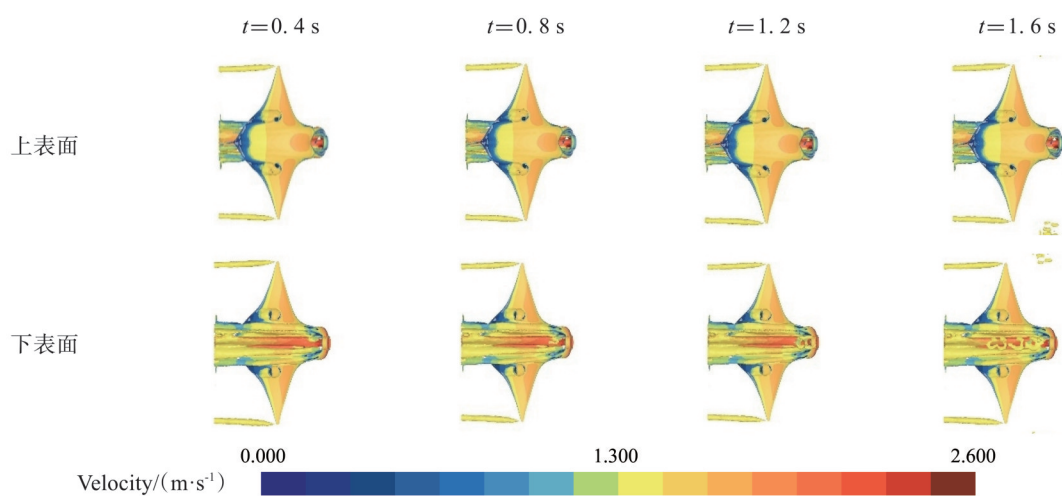
本文基于螺旋桨体积力和重叠网格法,将推进器部分简化后,对不同前置推进器布局的仿蝠鲼 UUV 进行了二自由度自航数值仿真。结论如下:

1) 在启动加速阶段,不同的前置推进器布局会对其加速过程和达到最大速度的时间和最大速度产生影响。结构二和结构三加速更快,其中结构三可达最大航速。

2) 在巡航阶段,不同的前置推进器布局会对其巡航过程中的速度产生影响,结构一和结构二的速度均处于波动状态,而结构三的速度趋于稳定。前置推进器给定转速为 13.7 rad/s 时,结构三最大速度为 1.469 m/s 。

3) 结构三的前置推进器对航行速度和上浮速度有显著提升,并具有较好的稳定性。

4) 改变前置推进器的布局方式有效提高了推进器的推进效率,同时降低了推进器尾流对 UUV 主体的影响,为后续仿蝠鲼水下航行器的优化设计提供了参考。

图 19 Q 准则涡结构(结构一)Fig. 19 Q -criterion vortex structures(structure 1)图 20 Q 准则涡结构(结构二)Fig. 20 Q -criterion vortex structures(structure 2)图 21 Q 准则涡结构(结构三)Fig. 21 Q -criterion vortex structures(structure 3)

参考文献:

- 曹勇,曹永辉,黄桥高,等,2023.水下仿生扑翼机器人的发展现状综述[J].数字海洋与水下攻防,6(4):380-405.
- 鲁建华,周东辉,2025.仿蝠鲼水下滑翔机的水动力性能研究[J].中阿科技论坛(中英文),6:59-66+60.
- 王太友,胡以怀,张宝吉,等,2018.考虑螺旋桨体积力的水下机器人水动力特性仿真[J].船舶工程,40(1):12-16.
- 吴召华,陈作钢,代焱,等,2013.基于体积力法的船舶回转运动水动力数值研究[J].中国舰船研究,8(4):12-19.
- 薛顺,杨旺林,陆晔,等,2025.基于体积力法的艏艉对称型船舶回转操纵数值研究[J].舰船科学技术,47(3):25-31.
- 朝黎明,2019.仿蝠鲼自主变形翼水动力性能研究[D].西安:西北工业大学.
- 钟朝廷,张印桐,张永祥,等,2015.ROV水动力特性试验研究[J].科技与创新,17:13-14.
- 周芳,王庆勇,秦宇奇,等,2025.叶片源项模型的研究回顾与进展[J].航空学报,46(10):212-232.
- CAI B, MAO X, XU Q, et al, 2022. Simulation of the interaction between ship and ducted propeller with a modified body force method [J]. Ocean Eng, 249: 110950.
- CAI W H, ZHAN J M, LUO Y Y, 2020. A study on the hydrodynamic performance of Manta ray biomimetic glider under unconstrained six-DOF motion [J]. PLoS One, 15(11): e0241677.
- CAI Y R, BI S S, ZHENG L, 2012. Design optimization of a bionic Fish with multi-joint fin rays [J]. Adv Robot, 26 (1/2):177-196.
- DEAKOS M H, 2012. The reproductive ecology of resident Manta rays (*Manta alfredi*) of Maui, Hawaii, with an emphasis on body size [J]. Environ Biol Fishes, 94(2): 443-456.
- FU, H P, MICHAEL T J, CARRICA P M, 2010. A method to perform self-propulsion computations with a simplified body-force propeller model [C]// Proceedings of Gothenburg 2010: A Workshop on CFD in Ship Hydrodynamics. Gothenburg, Sweden:541-546.
- HOUGH G R, ORDWAY D E, 1964. The generalized actuator disk [R]. Ithaca, NY: Therm Advanced Research Inc.
- LEE S H, PAIK K J, HWANG H S, et al, 2021. A study on ship performance in waves using a RANS solver, Part 1: Comparison of power prediction methods in regular waves [J]. Ocean Eng, 227:108900.
- LI S L, LIU C G, CHU X M, et al, 2022. Ship maneuverability modeling and numerical prediction using CFD with body force propeller [J]. Ocean Eng, 264: 112454.
- MENG Y, WU Z X, DONG H J, et al, 2022. Toward a novel robotic Manta with unique pectoral fins [J]. IEEE Trans Syst Man Cybern Syst, 52(3):1663-1673.
- SHIH T H, LIOU W W, SHABBIR A, et al, 1995. A new k -epsilon eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows [J]. Comput Fluids, 24(3): 227-238.
- SIEMENS DIGITAL INDUSTRIES SOFTWARE, 2024. STARCCM+ userguide_19.02 [M]. Plano, State of Texas, USA: Siemens Digital Industries Software:11861-11880.
- WANG Z Y, YU J C, ZHANG A Q, 2016. Hydrodynamic performance analysis of a biomimetic Manta ray underwater glider [C]// IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Qingdao, China:1631-1636.
- WEI W, XIA D, LIANG L, et al, 2018. Three-dimensional modeling of a fin-actuated robotic fish with multimodal swimming [J]. IEEE/ASME Trans Mechatron, 23 (4) : 1641-1652.
- YU J W, YAO C B, LIU L W, et al, 2021. Assessment of full-scale KCS free running simulation with body-force models [J]. Ocean Eng, 237: 109570.
- ZACHARIADIS A, HALL C A, 2011. Application of a Navier-Stokes solver to the study of open rotor aerodynamics [J]. J Turbomach, 133(3):031025.
- ZHAN J M, GONG Y J, LI T Z, 2017. Gliding locomotion of Manta rays, killer whales and swordfish near the water surface [J]. Sci Rep, 7(1): 406.

(责任编辑 王海蓉)