

文章编号: 1007-7294(2026)05-0671-13

自推进仿生机器鲨鱼 C 型转向性能数值模拟

谢 鸥, 罗继平, 张陈波

(苏州科技大学 机械工程学院, 江苏 苏州 215009)

摘要: 为了提高仿生机器鲨鱼的 C 型转向性能, 本文采用计算流体动力学仿真方法开展了自推进机器鲨鱼 C 型转向的运动学和水动力学研究。建立了机器鲨鱼仿真模型及其转向运动学与动力学方程, 同时数值研究了鱼体弯曲最小曲率半径 R_0 、尾鳍非对称系数 R_s 和靠壁距离 dh 等参数对转向速度和水动力参数的影响规律, 分析了 C 型转向过程中流场结构的演变过程。结果表明, 减小 R_0 可缩短转向距离、增大转向角度; 尾鳍的非对称性有助于改善转向效果, 但 R_s 过大会导致转向稳定性下降; 适当的靠壁距离能够提升转向速度、减小转向距离。

关键词: 仿生机器鲨鱼; C 型转向; 非对称尾鳍; 壁面效应; 数值模拟

中图分类号: TP242 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1007-7294.2026.05.002

Numerical simulation of C-type turning performance of a self-propelled biomimetic robotic shark

XIE Ou, LUO Ji-ping, ZHANG Chen-bo

(School of Mechanical Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: To improve the C-type turning performance of a biomimetic robotic shark, the kinematics and hydrodynamics of the C-type turning motion of a self-propelled robotic shark were studied using Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation method. A simulation model of the robotic shark and its turning kinematic and dynamic equations were established. The influences of parameters such as the minimum curvature radius R_0 of fish body bending, the asymmetry coefficient R_s of caudal fin, and the distance between fish and wall (dh) on turning velocity and hydrodynamic parameters were numerically studied, and the evolution process of flow field structure during C-type turning process was analyzed. The results indicate that the smaller R_0 is, the shorter the turning distance becomes and the larger the turning angle is. The asymmetric caudal fin can contribute to improving turning performance, but excessive R_s will lead to a decrease in turning stability. The wall effect is conducive to increasing turning speed and reducing turning distance.

Key words: biomimetic robotic shark; C-type turning; asymmetric caudal fin; wall effect; numerical simulation

0 引 言

根据推进器官的不同, 鱼类的推进模式可分为身体/尾鳍推进模式 BCF (Body and/or Caudal Fin) 和

收稿日期: 2025-08-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51875380; 51975394)

作者简介: 谢 鸥 (1983-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 通讯作者, E-mail: hnxieou@126.com;

罗继平 (2001-), 男, 硕士研究生; 张陈波 (1999-), 男, 硕士研究生。

中央鳍/对鳍推进模式 MPF(Median and/or Paired Fin)两大类。鲨鱼是 BCF 推进模式鱼类中的佼佼者,具有游动速度快、机动性强等特点。为了捕食猎物和逃避敌害,鲨鱼进化出了优越的 C 型转向能力,可实现快速启动和短距离、大角度转弯。目前关于鱼类 C 型转向的研究通常采用高速摄像机进行活体观测,以揭示其运动学和水动力学规律。陈宏等^[1]通过高速摄像技术建立了鱼形机器人快速转向的运动学方程,并揭示了鱼体中线运动步态和质心的运动规律。韩珍等^[2]基于序列图像处理法研究了机器鱼的转向性能,分析了 C 型转弯效果的影响因素。刘元森等^[3]采用数字图像处理技术对斑马鱼 C 型机动运动数据进行重构和性能分析,揭示了作用于鱼体的流体动力和机械能的变化规律。

敬军等^[4]利用高速摄像机定量研究了鲫鱼从静止状态到逃逸反应的运动过程,通过软件分析得到了鱼体的速度和转动角速度分布,并从力学角度定性解释了机动过程。随着计算流体动力学技术 CFD(Computational Fluid Dynamics)的发展,CFD 仿真技术被逐渐应用到鱼类 C 型转向的数值模拟中。Wang 等^[5]建立了新的曲率模型,采用优化算法拟合模型参数并通过自主运动数值模拟揭示了斑马鱼 C 型转弯和 C 型逃逸的力学特性。Borazjani 等^[6]采用三维仿真和实验测试的方法研究了太阳鱼 C 型启动逃逸反应的水动力学机制,揭示了整个运动过程中力的动态变化。冯亿坤等^[7-8]以金枪鱼为研究对象,建立了 C 型转弯运动模型,提出了一种鱼体与流体相互作用的耦合求解方法,并通过开发 UDF 程序实现了金枪鱼的大变形运动,详细揭示了金枪鱼在 C 型转向过程中的运动性能、水动力性能和尾涡结构。Li 等^[9]数值模拟了金枪鱼在 C 型转向中背鳍对水动力学的影响特性。以上工作主要集中在鱼类 C 型转向中鱼体躯干的运动学及水动力学研究方面。然而,尾鳍作为 C 型转向的主要器官却很少有人关注。此外,鲨鱼拥有特殊的非对称尾鳍,已有研究表明尾鳍的外形结构对其稳态游动的水动力产生影响^[10],而对其 C 型转向性能的影响有待进一步研究。

鲨鱼通常在浅海的珊瑚礁岛或深海的海沟中栖息和捕猎,海底复杂的地面及其附着物所形成的壁面效应对其游动性能有影响。研究人员采用实验和数值模拟的方法对机器鱼的近壁面稳态游动进行了广泛的研究^[11-13],揭示了壁面对机器鱼水动力及流场结构的影响机制。但关于壁面对鱼类瞬态转向运动的影响研究鲜有报道。本文以机器鲨鱼为研究对象,采用 CFD 仿真分析最小曲率半径、尾鳍结构及壁面对其转向性能的影响,研究结果为仿生水下机器人运动控制提供理论基础。

1 物理模型及运动学建模

1.1 物理模型

巨齿鲨是曾经占据顶级掠食者地位的大型鲨鱼,其能够在复杂的海洋环境中捕获各类猎物,主要得益于其具备的快速 C 型转向运动能力。本文以巨齿鲨为仿生对象研究机器鲨鱼 C 型转向的运动特性,如图 1(a)所示,其外形呈长纺锤形且鳍肢发达。图 1(b)所示为仿生机器鲨鱼的三维几何模型。为了描述机器鲨鱼的运动,建立了两个坐标系:全局坐标系 $O-XYZ$ 和鱼体坐标系 $o-xyz$,分别用于描述机器鲨鱼在流场中的运动和自身的变形运动。机器鲨鱼的具体几何特征参数如表 1 所示。

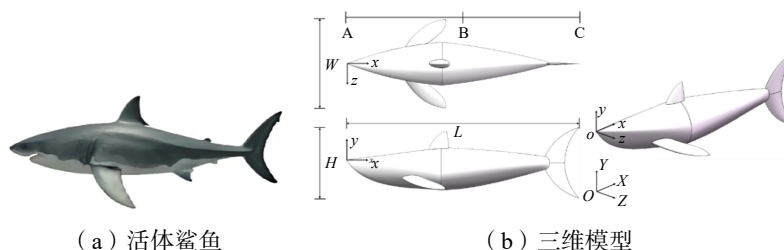


图1 鲨鱼活体及三维几何模型

Fig.1 Real shark and 3D geometric model

表 1 机器鲨鱼的具体几何参数

Tab.1 The specific geometric parameters of the robotic shark

名称/单位	数值
鱼体总长 L/m	0.8
最大宽度 W/m	0.3
最大高度 H/m	0.24

1.2 运动学建模

研究人员通过活体观测发现鱼类的 C 型转向运动可分为三个阶段: 弯曲阶段(S1), 保持阶段(S2) 和伸展阶段(S3)^[7]。为了方便运动学建模, 将转向运动过程中保持平直状态的鱼体前半部分定义为 AB 段, 而产生柔性大变形的鱼体后半部分及尾鳍定义为 BC 段(如图 1(b)所示俯视图), 其中 $AB=BC=0.5L$ 。鱼体 AB 段中心线的运动方程可表示为

$$\begin{cases} x(l, t) = l \\ z(l, t) = 0 \end{cases} \quad (l < l_s) \quad (1)$$

式中: l 为鱼体中心线的坐标; l_s 为鱼体 BC 段的起始坐标, t 为时间。

在转向的弯曲阶段, 鱼体 BC 段中心线可近似看成为以 $R(t)$ 为曲率半径的圆弧, 表示为

$$R(t) = \frac{R_0}{\theta(t)} \quad (2)$$

式中: R_0 表示最小曲率半径; $\theta(t)$ 表示曲率变化函数, 定义为

$$\theta(t) = 1 - \frac{2}{1 + 10^{at}} - \frac{1}{1 + 10^{(b-t)c}} \quad (3)$$

式中: b 表示整个 C 型转向的持续时间系数, a 、 c 分别表示弯曲阶段及伸展阶段的持续时间系数, 基于文献[14]对真实鲨鱼转向运动过程的观察结果, 并结合仿生机器鲨鱼的转向操控需求, 确定选取 $a=3$, $b=1.2$, $c=10$, 则弯曲阶段、保持阶段及伸展阶段的持续时间分别为 0.6 s、0.4 s、0.5 s。

根据方程式(2), 鱼体 BC 段中心线的运动方程可表示为

$$\begin{cases} x(l, t) = l_s + R(t) \cdot \sin[(l - l_s)/R(t)] \\ z(l, t) = R(t) - R(t) \cdot \cos[(l - l_s)/R(t)] \end{cases} \quad (l > l_s) \quad (4)$$

2 数值计算

2.1 控制方程及参数设置

本文基于 ANSYS Fluent 2021 仿真平台进行数值模拟, 计算域控制方程为三维粘性不可压缩连续性方程和 (RANS) 方程, 表示如下^[15-16]

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \\ \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \rho f_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \end{cases} \quad (5)$$

式中: u_i 表示流体的速度分量 ($i=1, 2, 3$ 分别表示为 x, y, z 三个方向), p 表示压力, f_i 表示沿 u_i ($i=1, 2, 3$) 方向的体力分量, μ 和 μ_t 表示流体动力粘度和湍流粘度。采用标准 $k-\varepsilon$ 模型来模拟流体的湍流特性且在机器鲨鱼表面施加无滑移壁面条件

$$u_s = (u_1, u_2, u_3) = u_r + u_y + u_d \quad (6)$$

式中: u_s 为鱼体表面运动速度; u_r 为鱼体平移速度; $u_y = \omega_y \times r$ 为鱼体绕质心的转动速度, 其中 r 为相对于质心的位置向量, ω_y 为转动角速度; u_d 为鱼体柔性变形速度。

机器鲨鱼的转向运动可看作是在 $X-Z$ 平面上的 3 自由度运动: 沿 X 轴的纵向平移运动, 沿 Z 轴的

侧向平移运动和绕 Y 轴转动运动。运动方程表示为^[17]

$$\begin{cases} m \frac{du_r}{dt} = F \\ \frac{d(w_y I_y)}{dt} = I_y \frac{dw_y}{dt} + w_y \frac{dI_y}{dt} = M_y \end{cases} \quad (7)$$

式中: m 为鱼体质量; $u_r=(u_x, u_z)$, 其中 u_x 和 u_z 分别为 X 轴和 Z 轴方向的平移速度; $F=(F_x, F_z)$, 其中 F_x 和 F_z 分别为 X 方向和 Z 方向的水动力; I_y 转动惯量; M_y 为转动力矩。

在鱼体表面对压力和粘性力及它们关于质心的矩进行积分, 可求得 F_x 、 F_z 、 M_y 分别为

$$F_x = \int_S (-pn_1 + \tau_{1j}n_j) dS \quad (8)$$

$$F_z = \int_S (-pn_3 + \tau_{3j}n_j) dS \quad (9)$$

$$M_y = \int_S (r \times ((-pn_1 + \tau_{1j}n_j)n_1 + (-pn_3 + \tau_{3j}n_j)n_3)) dS \quad (10)$$

式中: p 为表面单元 dS 的压力, n_j 为第 j 个单元的单位法向矢量, τ 为粘性应力张量。

此外, 为了揭示尾鳍非对称性对翻滚力矩 M_x 的影响, 采用以下方程对 M_x 进行求解

$$M_x = \int_S (r \times ((-pn_2 + \tau_{2j}n_j)n_2 + (-pn_3 + \tau_{3j}n_j)n_3)) dS \quad (11)$$

为实现机器鲨鱼的柔性大变形及其自主推进运动^[18], 如图 2(a) 所示, 采用四面体非结构化网格对鱼体及其周围部分流域空间进行离散, 并对鱼体表面进行局部网格加密 ($Y^+ = 2.45$), 以确保计算精度。同时, 对外部流场区域使用六面体结构化网格进行离散 (见图 2(b)), 提高计算效率。在数值计算过程中, 鱼体网格与外部流域空间网格通过重叠网格技术进行信息交互。整个流场计算域的尺寸为 $4L \times 4L \times 3L$ (L 为鲨鱼长度) (见图 2(c)), dh (靠壁距离) 为鱼头顶点到底部边界壁面的距离, 流域入口边界处的速度与出口边界处的压力梯度均设置为 0, 其余边界均设置为无滑移壁面。

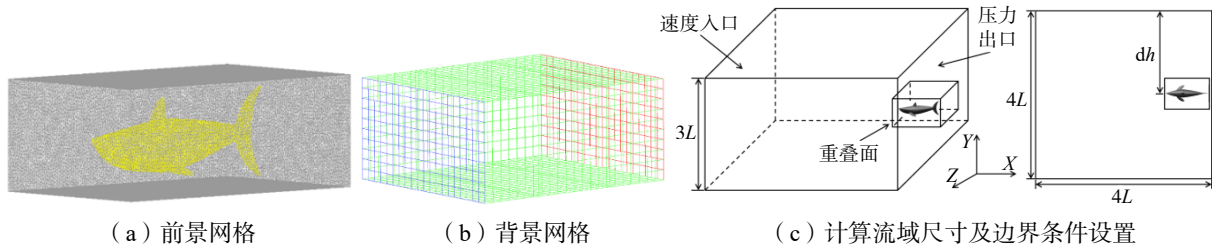


图 2 网格划分和计算模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of grid division and calculation model

2.2 数值方法验证

采用三种不同尺寸的网格, 粗网格 (网格大小 $0.013L$ 、网格数量 2.7×10^6)、中等网格 (网格大小 $0.01L$ 、网格数量 5.2×10^6) 和细网格 (网格大小 $0.007L$ 、网格数量 1.47×10^7), 并在相同仿真条件 ($R_0 = 0.3$ 、空旷水域) 下进行网格密度的无关性验证。如图 3(a) 所示为不同网格密度下的侧向力 F_z , 提取误差最大时刻 (见局部放大图) 的数据进行分析可知, 中等网格与细网格、粗网格仿真结果的相对误差分别为 0.24%、0.53%。同理, 选取中等网格, 分别对 $\Delta t_1 = 0.5 \times 10^{-3}$ s、 $\Delta t_2 = 1 \times 10^{-3}$ s 和 $\Delta t_3 = 1.5 \times 10^{-3}$ s 三种时间步长进行了无关性验证, 如图 3(b) 所示, 提取误差最大时刻 (见局部放大图) 的数据进行分析可知, Δt_2 与 Δt_1 、 Δt_3 仿真结果的相对误差分别为 0.18% 和 0.51%。综合考虑到计算精度及计算时间成本, 选择中等网格尺寸和中等时间步长进行计算。进一步, 图 3(c) 给出了本文的数值计算方法在不同频率 f 下的平均阻力系数, 并与文献 [19] 中的试验结果进行了对比, 可以看出, 本文的计算结果与试验结果吻合较好, 表明本文数值计算方法能够对仿生机器鲨鱼的 C 型转向运动进行有效模拟。

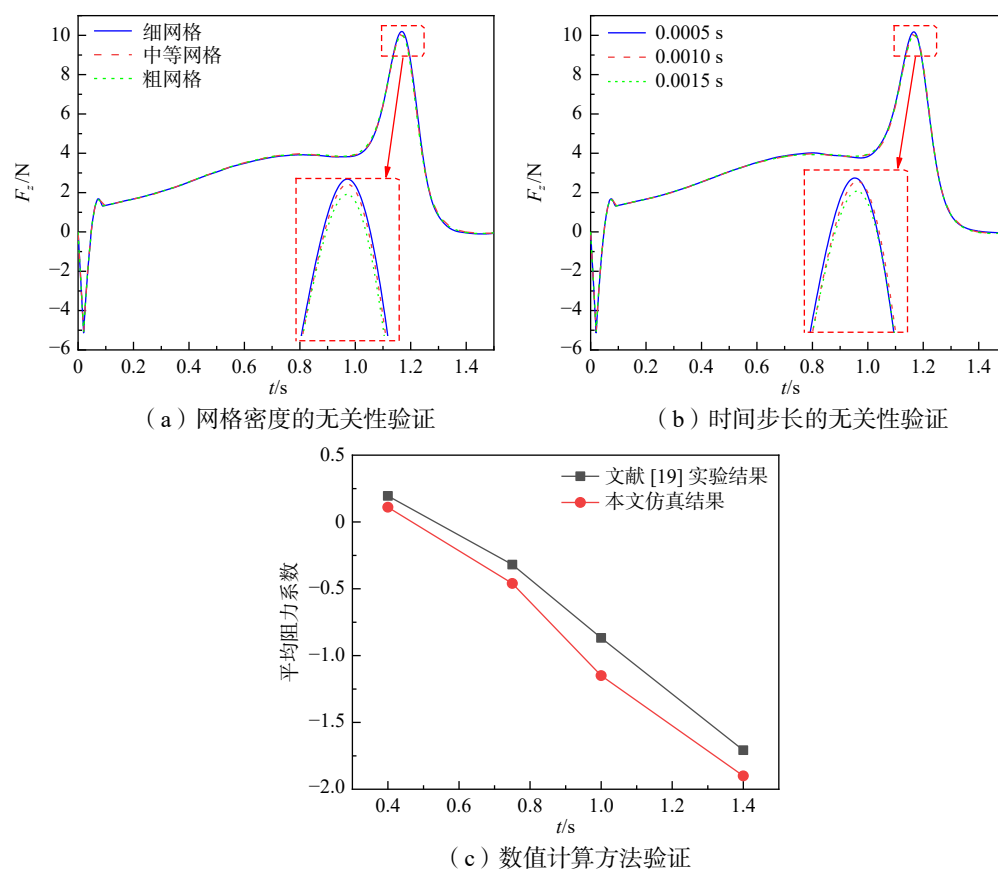


图3 网格、时间步及数值方法验证

Fig.3 Grid, time step and numerical method validation

3 仿真结果分析

3.1 R_0 对机器鲨鱼转向性能的影响

为了探究鱼体 BC 段柔性变形程度对机器鲨鱼转向运动的影响, 本节选取不同的最小曲率半径 ($R_0=0.2, 0.3, 0.4$) 对机器鲨鱼的 C 型转向过程进行了数值模拟。

3.1.1 水动力性能分析

图 4 所示为机器鲨鱼 C 型转向过程中 F_x 和 M_y 的时变曲线, 其相应的位姿变化如图 5 所示。由图 4(a) 可知, 在弯曲阶段(S1)启动时, 鱼体的 BC 段由平直状态朝 Z 轴正方向快速偏转, 类似船舶回转初期因舵叶对水流的作用而受到反作用力, 从而在鱼体上产生一个突变的 F_x ; 随着偏转幅度增大, 尾鳍受到沿 X 轴正方向的流体反作用分力 (见图 5 中 $t=0.15$ s 时刻), 这导致 F_x 出现了一个小幅度的下降, 这与船舶回转过程中因舵面偏转角度变化而导致的推力变化相似。之后鱼体 AB 段朝 Z 轴正方向快速偏转, 带动 BC 段沿 X 轴正方向推动流体 (见图 5 中 $t=0.6$ s 时刻的位姿), 从而产生沿 X 轴负方向呈快速增长趋势的 F_x 直到保持阶段(S2)结束。进入伸展阶段(S3)时, 鱼体的 AB 段偏转到与 X 轴呈现出大夹角 (见图 5 中 $t=1.05$ s 时刻), 此时 BC 段快速回摆将受到沿 X 轴正方向的流体反作用力, 从而使 F_x 出现下降。待 BC 段伸展到接近平直状态时, 伸展运动变缓慢, 鱼体在流体的惯性力作用下 F_x 出现反弹, 最后鱼体伸展到平直状态并保持 (见图 5 中 $t=1.5$ s 时刻), 此时 F_x 回落并趋于稳定。此外, R_0 越小, 鱼体 BC 段偏转的幅度和速度越大, 从而在转向过程中产生的 F_x 越大, 这类似于船舶中舵角越大, 船体所受横向力越大, 从而对船舶的回转性能影响越显著。由图 4(b) 可知, 在弯曲阶段(S1)启动时, 鱼

体 BC 段快速偏转会使 M_y 产生一个大的波动,随后鱼体缓慢偏转直至最后保持 C 形姿态(保持阶段(S2)), M_y 基本保持稳定,这类似于船舶在回转过程中,舵面初始快速偏转产生较大转船力矩,随着船体逐渐回转,转船力矩趋于稳定。进入伸展阶段(S3)后,鱼体 BC 段快速回摆,从而使 M_y 产生一个相反方向的波动。最后鱼体伸展到平直状态, M_y 回落并保持稳定。同理, R_0 越小, M_y 的波动幅值越大。进一步,由图 5 可知, R_0 越小,机器鲨鱼转向结束时沿 X 轴方向的移动距离(即转向距离)越小,且转过的角度越大,这与船舶的“舵面积越大或舵角越大,则转船力矩越大,进而回转角速度越大,转过角度越大”的原理相一致^[20]。

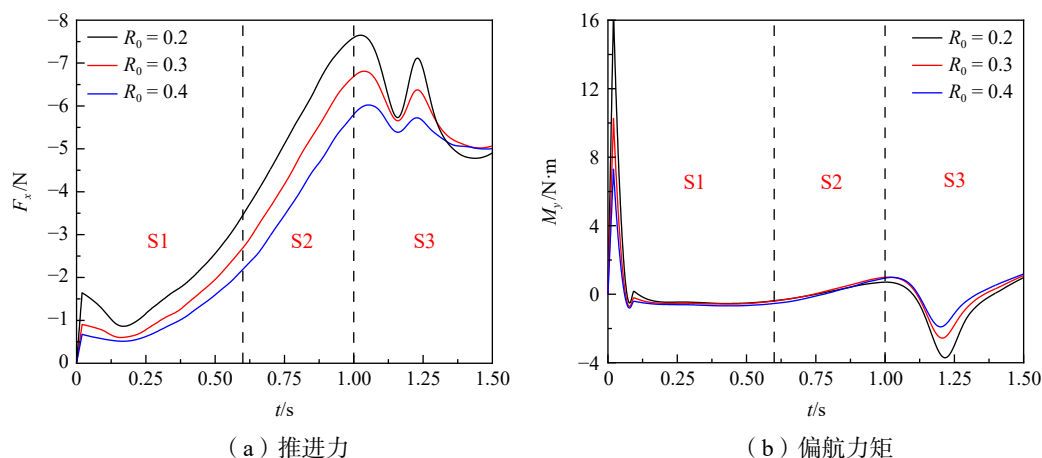


图 4 不同最小曲率半径 R_0 下的水动力

Fig.4 Hydrodynamics under different minimum curvature radii R_0

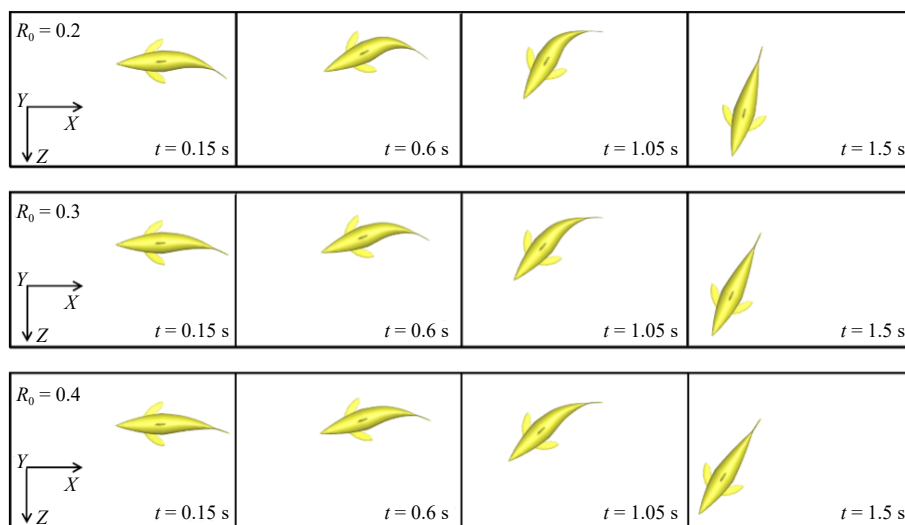
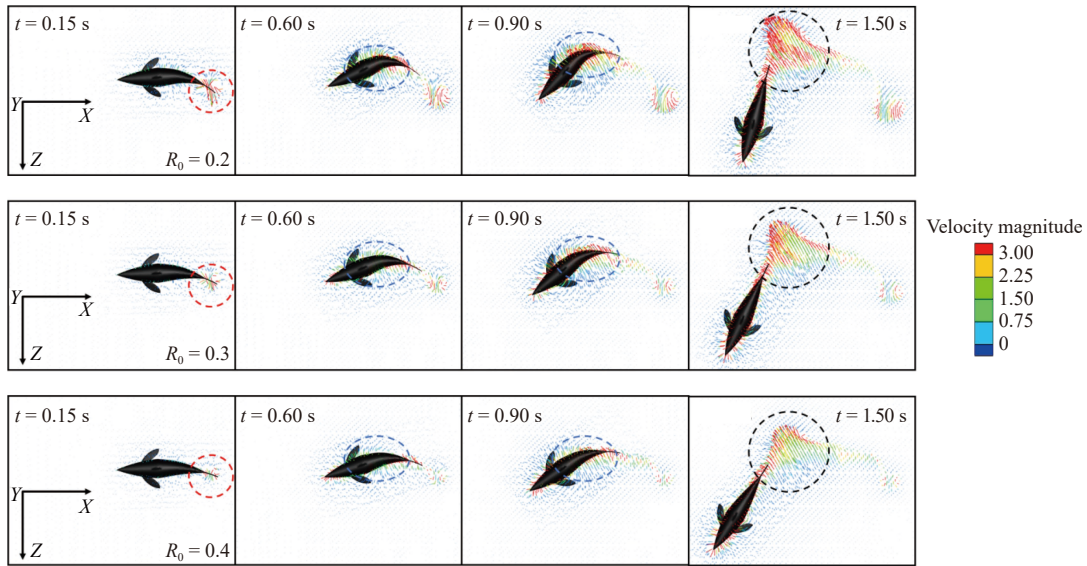


图 5 不同最小曲率半径 R_0 下的转向位姿(俯视图)

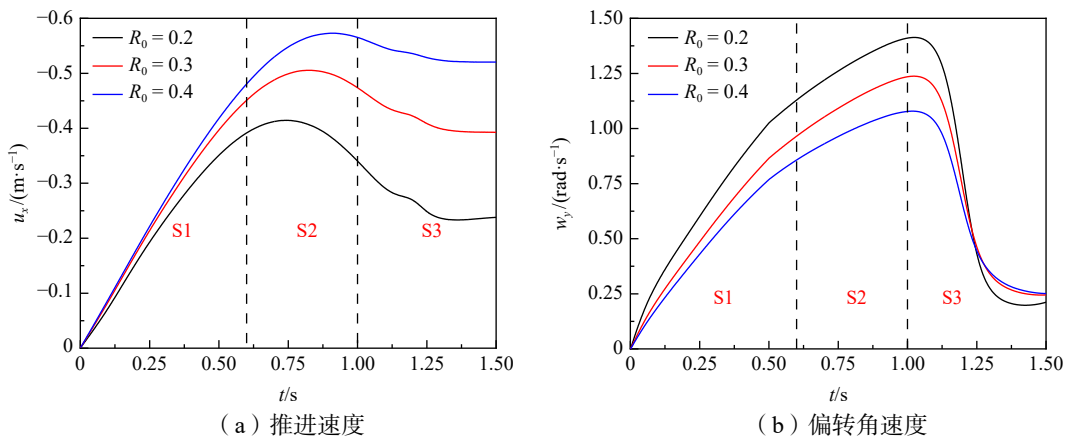
Fig.5 Turning poses under different minimum curvature radii R_0 (Top view)

进一步,图 6 所示为仿生机器鲨鱼在 C 型转向过程中 X - Z 平面的速度矢量分布。由图可见,在弯曲阶段($t=0.15$ s)时,鱼体末端开始向 Z 轴正方向弯曲,产生射流 1(红色虚线),接着在鱼体周围形成射流 2(蓝色虚线),如图中 $t=0.6$ s 所示,依据动量守恒定理,鱼体受到射流的反方向(Z 轴负方向)的偏航力矩。进入保持阶段($t=0.9$ s)后,作用于鱼体的射流 2 强度变得更大,为鱼体转向提供了沿 X 轴和 Z 轴负方向所需的推进力,这也进一步解释了保持阶段鱼体上 F_x 和 M_y 为何提升。之后,鱼体 BC 段开始回摆直至伸展阶段结束($t=1.5$ s),射流 2 逐渐离开鱼体并沿着 Z 轴负方向发展成一个强推进射流 3(黑色虚线)。此外, R_0 越小,鱼体尾部形成射流强度越大,产生的水动力值也越大。

图6 不同最小曲率半径 R_0 下的 X - Z 平面速度矢量 (俯视图)Fig.6 X - Z plane velocity vector under different minimum curvature radii R_0 (Top view)

3.1.2 转向速度分析

图7所示为仿生机器鲨鱼在C型转向过程中 u_x 和 w_y 的时变曲线。由图可知,在弯曲阶段(S1),借助鱼体BC段快速偏转产生的流体动力, u_x 和 w_y 都随时间呈增长趋势。进入保持阶段(S2)后, w_y 仍保持增长趋势,但 u_x 在持续增长一段时间后开始下降。其主要原因是在保持阶段鱼体AB段与 X 轴的夹角越来越大,受到 X 轴方向的流体阻力快速增大,同时伴随着鱼体尾部朝 X 轴负向转动,也会受到沿 X 轴正方向的流体反作用分力。在伸展阶段(S3),由于鱼体BC段经历了快速回摆($t=1\sim 1.25$ s)和缓慢舒展($t=1.25\sim 1.5$ s)过程, u_x 由缓慢下降逐渐平稳,而 w_y 则由快速下降逐渐趋于平稳。进一步,在转向过程中 R_0 越小,则 u_x 越小,而 w_y 越大,进一步说明减小 R_0 可减小转向距离,提高转向速度和最终转向角度。

图7 不同最小曲率半径 R_0 下的转向速度Fig.7 Turning speeds under different minimum curvature radii R_0

3.1.3 流场结构分析

如图8所示为仿生机器鲨鱼在转向过程中尾涡的演变过程,为清晰展示尾涡的结构,图中局部放大的视角为黑色箭头方向。由图可知,在弯曲阶段($t=0.3$ s),鱼体BC段快速朝 Z 轴正向弯曲,在尾鳍末端形成了一个涡环(红色圆圈)。随着弯曲运动的进行,涡环逐渐扩大并从尾部脱落,可以发现,此

涡的产生并不随着鱼体发生显著平移,而是随着鱼体的弯曲快速转向。进入保持阶段后($t=0.9\text{ s}$),鱼体胸鳍和背鳍产生的涡流向尾部扩散并作用于鱼体BC段为其提供持续的转向动力。之后鱼体BC段开始回摆,进入伸展阶段,尾鳍末端再次产生一个涡环(黑色圆圈),随着时间推移,涡环逐渐增大并与尾部涡流分离(1.5 s)。因此,涡环的反作用力为机器鲨鱼沿Z轴正向(也即转向后的鱼体推进方向)运动提供了动力。对比图8中不同 R_0 的尾涡可知, R_0 越小,鱼体转向过程中形成的两个涡环强度越大,从而提供的转向动力也越强。进一步解释了机器鲨鱼转向过程的水动力和速度特性。

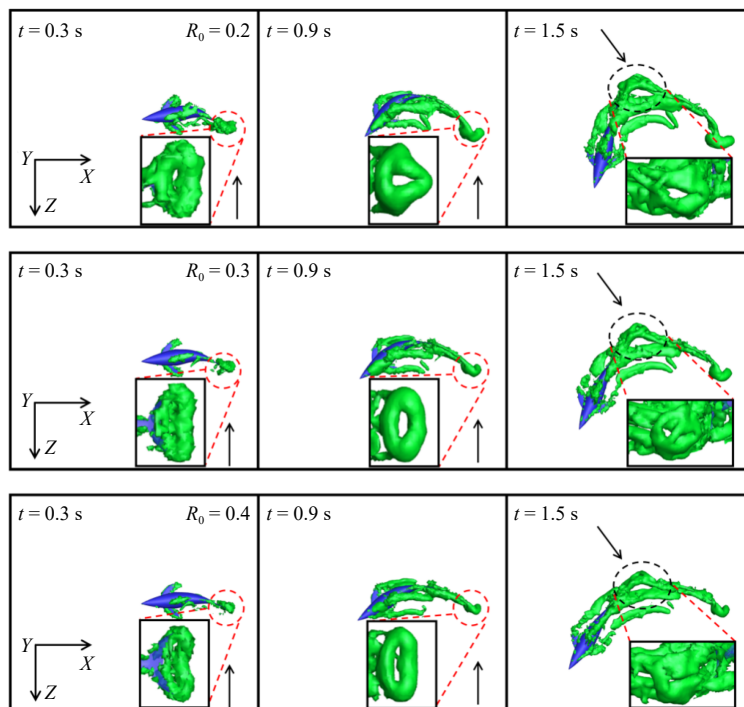


图8 不同最小曲率半径 R_0 下的尾涡演变过程(俯视图)

Fig.8 Evolution process of wake vortex under different minimum curvature radii R_0 (Top view)

3.2 尾鳍形状对机器鲨鱼转向性能的影响

为了探究尾鳍形状对机器鲨鱼转向性能的影响,定义尾鳍的非对称系数为

$$R_s = \frac{S_1}{S_2} \quad (12)$$

其中, S_1 和 S_2 分别表示尾鳍上叶和下叶的面积。

如图9所示,本文建立了5种非对称鲨鱼尾鳍模型并对其C型转向过程进行了数值仿真。

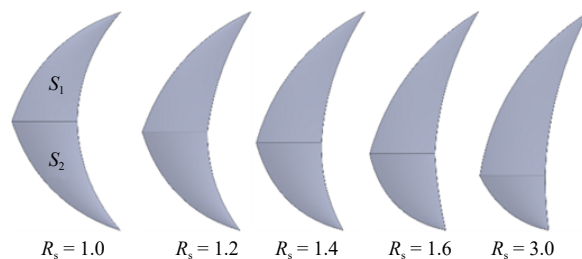


图9 不同非对称系数的尾鳍模型

Fig.9 Caudal fin models with different asymmetric coefficients

3.2.1 水动力性能分析

如图10所示为仿生机器鲨鱼在C型转向过程中 F_x 和翻滚力矩 M_x 的时变曲线。由图10(a)可知,

尾鳍结构对 F_x 的影响较小且主要体现在伸展阶段。由相应的局部放大图可知, 在伸展阶段(S3), 随着 R_s 增大, F_x 的幅值会随之减小, 从而缩短了转向距离, 但 $R_s=3$ 时其幅值反而增大。此结果表明, 增大尾鳍的非对称性有助于改善转向效果, 但过大的非对称性反而带来不利影响。进一步, 由图 10(b) 可知, M_x 主要出现在鱼体 BC 段快速弯曲和快速回摆阶段, R_s 越大, M_x 的波动幅值越大, 表明机器鲨鱼的尾鳍结构非对称性越大, 转向稳定性越差。

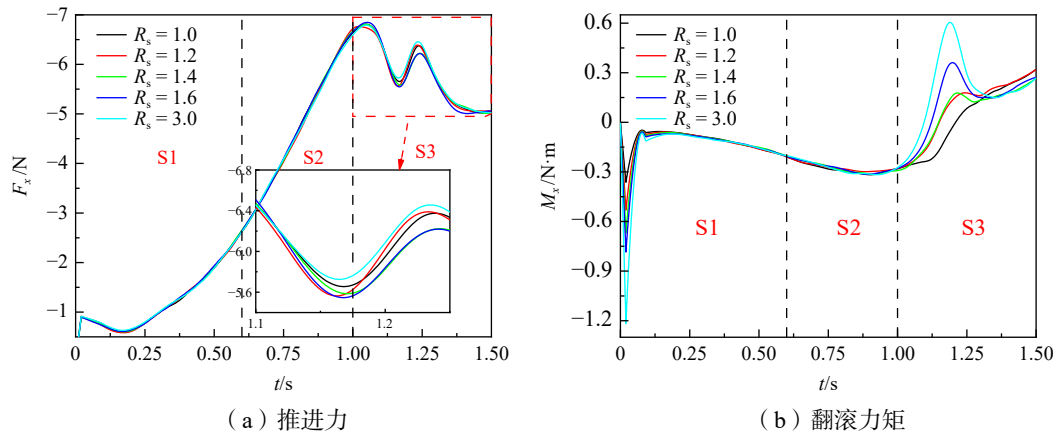


图 10 不同尾鳍结构下的水动力

Fig.10 Hydrodynamics under different caudal fin structures

3.2.2 转向速度分析

图 11 所示为仿生机器鲨鱼在 C 型转向过程中推进速度 u_x 和偏转角速度 w_y 的时变曲线。由图可知, 在弯曲阶段(S1)和保持阶段(S2), R_s 对 u_x 没有明显的影响, 但进入伸展阶段(S3)后期时, 随着 R_s 的增大 u_x 会略有下降, 而 $R_s=3$ 时, u_x 又会出现相对明显提升。同理, 非对称尾鳍能提高 w_y , 但过大的非对称性($R_s=3$)反而降低了 w_y 。由此可知, 适当增加尾鳍的非对称性能够提高仿生机器鱼 C 型转向的性能。

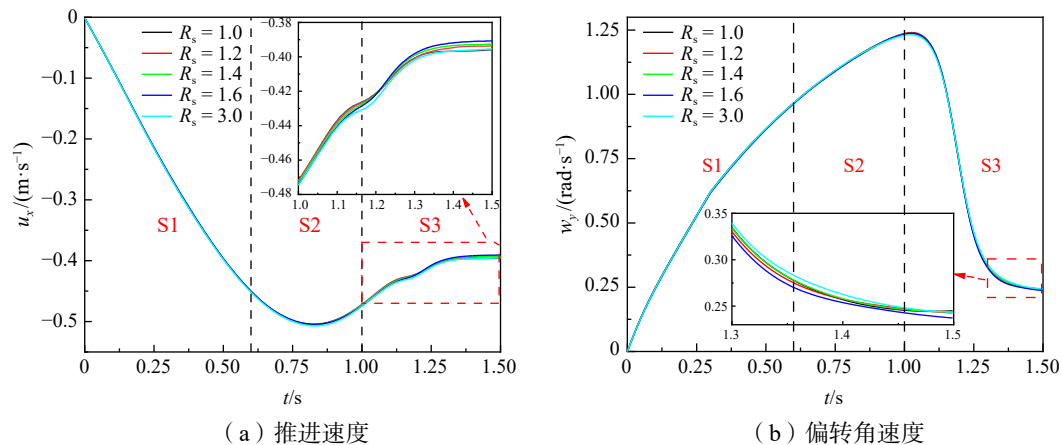


图 11 不同尾鳍结构下的转向速度

Fig.11 Turning speeds under different caudal fin structures

3.2.3 流场结构分析

图 12 为具有不同结构尾鳍的仿生机器鲨鱼 C 型转弯结束时刻($t=1.5$ s)的尾涡结构。由图可知, 鱼体后部产生的尾涡主要由上层涡(红色圆圈)和下层涡(黑色圆圈)两个部分构成。随着 R_s 增大, 上层涡和下层涡的体积比也逐渐增大, 也即上层涡与下层涡的强度比增大。这种尾涡强度的差异导致仿生机器鲨鱼尾鳍的上叶和下叶鳍面受力不平衡, 从而降低了转弯过程中的稳定性。

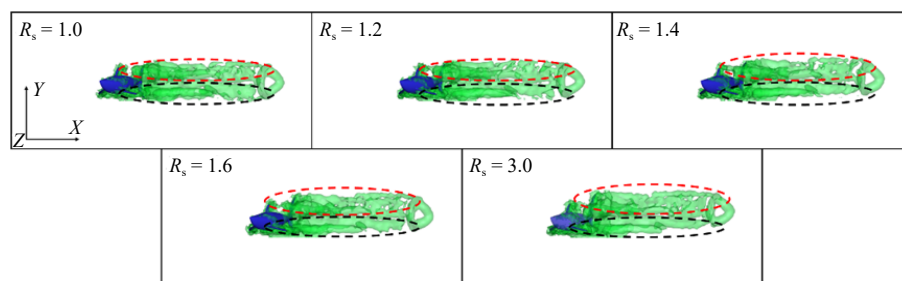


图 12 不同尾鳍结构下的尾涡结构分布 (正视图)

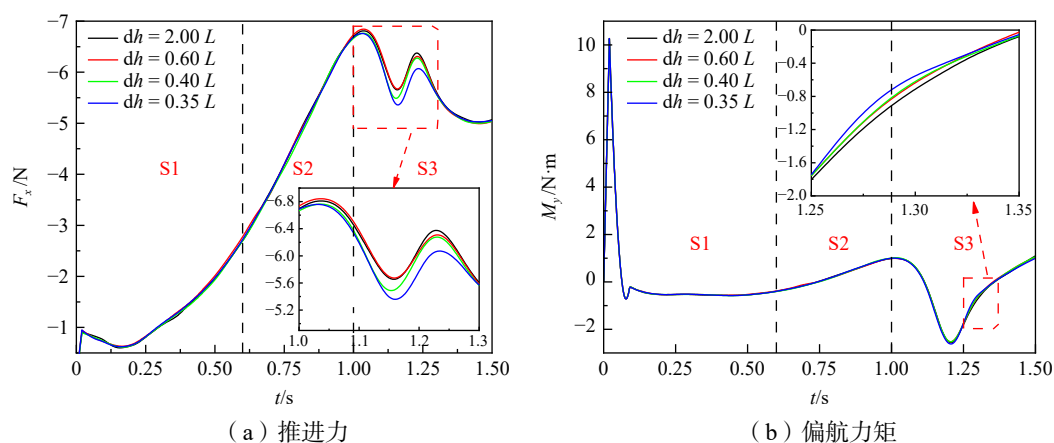
Fig.12 Distribution of wake vortex structures under different caudal fin structures (Front view)

3.3 壁面对机器鲨鱼转向性能的影响

为了揭示壁面对仿机器鲨鱼 C 型转向性能的影响, 本文通过改变靠壁距离 ($dh=2L, 0.6L, 0.4L, 0.35L$) 开展了一系列数值仿真实验。

3.3.1 水动力性能分析

图 13 所示为仿机器鲨鱼在不同靠壁距离 dh 下实现 C 型转向过程中推进力 F_x 与偏航力矩 M_y 的时变曲线。由图可知, F_x 和 M_y 的取值在弯曲阶段(S1)和保持阶段(S2)基本不随 dh 变化, 而在伸展阶段(S3)有所差异。其主要原因是在弯曲阶段鱼体 BC 段远离壁面弯曲, 不受壁面影响, 而在伸展阶段鱼体 BC 段靠近壁面回摆, 与壁面产生了交互作用。进一步由局部放大图可知, dh 越小, F_x 的幅值越小, 而 M_y 的幅值越大。

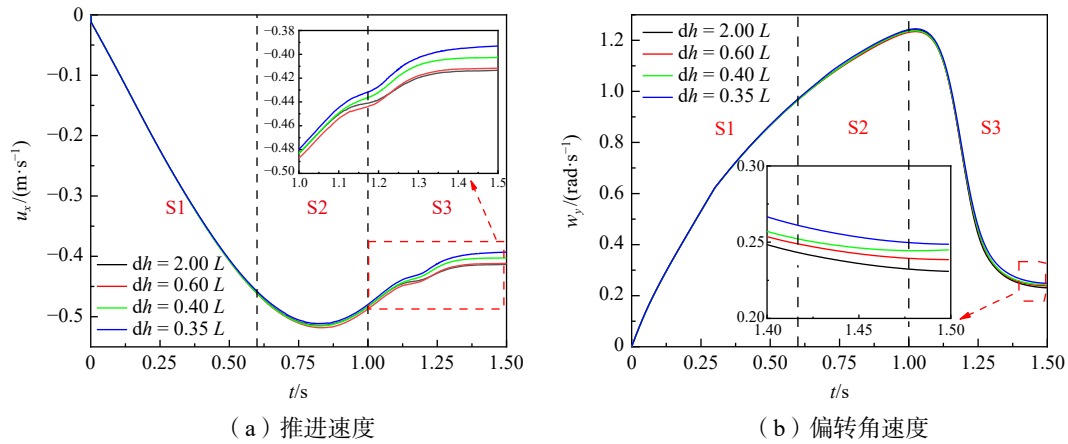
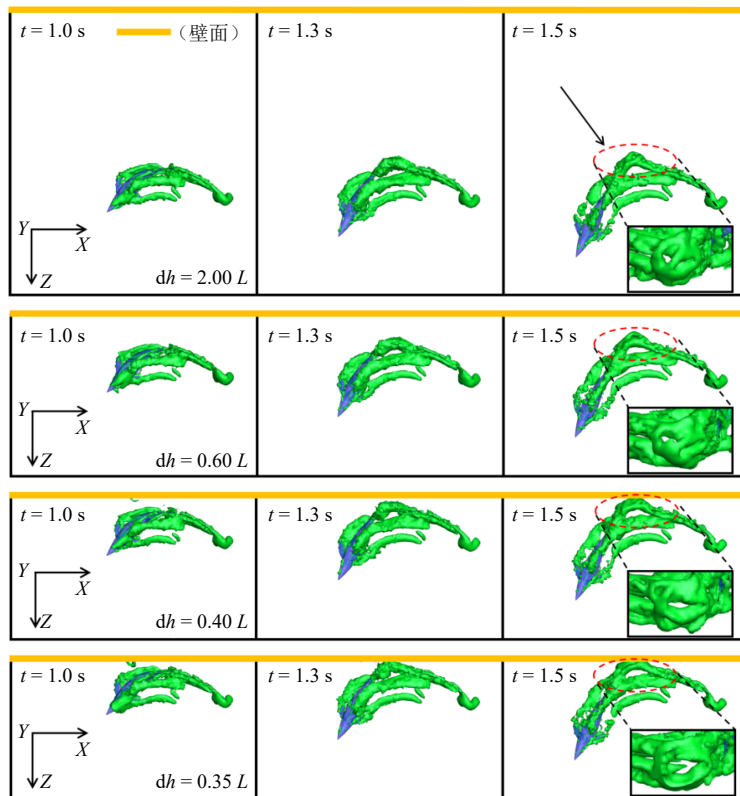
图 13 不同靠壁距离 dh 下的水动力曲线Fig.13 Hydrodynamic curves at different wall distances dh

3.3.2 转向速度分析

图 14 所示为仿机器鲨鱼在不同 dh 下的推进速度 u_x 和偏转角速度 w_y 的时变曲线。由图 14(a) 可知, 壁面对 u_x 的影响从保持阶段(S2)持续到伸展阶段(S3), 且 dh 越小, u_x 的幅值越小, 转向距离越小。而壁面对 w_y 的影响仅发生在伸展阶段(S3)的后半期, 且 dh 越小, w_y 的幅值越大, 转向速度越快(见图 14(b))。此结果表明, 靠近壁面能有效改善机器鲨鱼的转向性能。

3.3.3 流场结构演变过程分析

进一步, 图 15 所示为仿机器鲨鱼在不同 dh 下伸展阶段(S3)尾涡结构的演变过程。由图可知, 随着 dh 减小, 机器鲨鱼伸展摆尾形成的尾涡在沿 Z 轴负方向扩散演变过程中会与壁面接触交互。受到壁面的阻碍作用后, 尾涡被压缩变形, 强度增大, 从而使鱼体受到沿 Z 轴正方向的反作用力增强, 提升了转向速度。此外, 尾涡与壁面黏附阻碍了其在 X 轴方向的脱落过程, 降低了 X 轴方向的动能, 从而使机器鲨鱼在 X 轴方向的推进力减小, 缩短了转向距离。

图 14 不同靠壁距离 dh 下的转向速度Fig.14 Turning speeds at different wall distances dh 图 15 不同靠壁距离 dh 下伸展阶段的尾涡结构演变图 (俯视图)Fig.15 Evolution diagram of vortex structure during the extension stage at different wall distances dh (top view)

4 结 论

本文通过数值仿真研究了仿生机器鲨鱼在 C 型转向过程中鱼体尾部弯曲程度、尾鳍非对称性、靠壁距离等对其运动速度和水动力参数的影响,得出的主要结论如下:

(1) 减小 R_0 能够减小推进力 F_x 和推进速度 u_x , 同时增大偏航力矩 M_y 和偏转角速度 w_y , 从而提高转向速度和转向角度, 减小转向距离。通过调整机器鲨鱼转向过程中的 R_0 , 可获得不同的转向角度和转向速度, 以适应不同的水下工况。

(2) 提高 R_s 能够降低推进力 F_x 和推进速度 u_x , 从而改善转向性能, 但 R_s 过大会导致伸展阶段(S3)的翻滚力矩 M_x 的幅值变大, 从而导致转向运动稳定性下降。因此, 设计仿生机器鲨鱼的尾鳍时, 应对 R_s 进行优化, 以实现高效且稳定的转向性能。

(3) 靠近壁面转向能减小推进力 F_x 和推进速度 u_x , 同时增大偏航力矩 M_y 和偏转角速度 w_y , 有利于改善机器鲨鱼的转向性能。在工程应用中, 可通过引导机器鲨鱼利用环境中的壁面效应来提升其转向性能, 以适应复杂的水下作业环境。

参 考 文 献:

- [1] 陈宏, 竺长安, 尹协振, 等. 鱼形机器人快速转向的运动特性研究[J]. 应用力学学报, 2008, 2: 229–234+355.
Chen H, Zhu C A, Yin X Z, et al. Study on the kinematic characteristics of fast turning of fish-shaped robot[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2008, 2: 229–234+355. (in Chinese)
- [2] 韩 珍, 颜 钦, 张世武, 等. 基于序列图像处理法的机器鱼转向机动性能研究[J]. 机器人, 2010, 32(5): 586–591.
Han Z, Yan Q, Zhang S W, et al. Study on the turning maneuverability of robot fish based on sequential image processing method[J]. Robot, 2010, 32(5): 586–591. (in Chinese)
- [3] 刘元森, 余永亮, 鲍 麟, 等. 斑马鱼 C 型机动运动数据重构与性能分析[J]. 实验流体力学, 2023, 37(2): 25–35.
Liu Y S, Yu Y L, Bao L, et al. Data reconstruction and performance analysis of C-type maneuver movement of zebrafish[J]. Experimental Fluid Mechanics, 2023, 37(2): 25–35. (in Chinese)
- [4] 敬 军, 李 晟, 陆夕云, 等. 鲫鱼 C 形起动的运动学特征分析[J]. 实验力学, 2004(3): 276–282.
Jing J, Li S, Lu X Y, et al. Analysis of the kinematic characteristics of C-shaped start-up of crucian carp[J]. Experimental Mechanics, 2004(3): 276–282. (in Chinese)
- [5] Wang Z W, Yu Y L. Comparative study on the force and energy of C-type turning and escape of zebrafish based on curvature model (English)[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2019, 36(4): 467–480.
- [6] Borazjani I, Sotiropoulos F, Tytell E D, et al. Hydrodynamics of the bluegill sunfish C-start escape response: Three-dimensional simulations and comparison with experimental data[J]. The Journal of Experimental Biology, 2012, 215(Pt 4): 671–684.
- [7] Feng Y K, Liu H X, Su Y Y, et al. Numerical study on the hydrodynamics of C-turn maneuvering of a tuna-like fish body under self-propulsion[J]. Journal of Fluids and Structures, 2020, 94(18): 102954.
- [8] 冯亿坤, 苏玉民, 刘焕兴, 等. 仿生机器鱼转向机动的水动力性能数值研究[J]. 海洋工程, 2023, 41(1): 93–100+178.
Feng Y K, Su Y M, Liu H X, et al. Numerical study on hydrodynamic performance of turning maneuver of bionic robot fish[J]. Marine Engineering, 2023, 41(1): 93–100+178. (in Chinese)
- [9] Li X, Gu J, Yao Z. Numerical study on the hydrodynamics of tuna morphing median fins during C-turn behaviors[J]. Ocean Engineering, 2021, 236: 109547.
- [10] Hiroaki S, Yoshikazu N, Yunosuke O, et al. Fluid dynamic properties of shark caudal fin morphology and its relationship to habitats[J]. Ichthyological Research, 2023, 71(2): 294–304.
- [11] Xue G, Bai F G, Guo L, et al. Research on the effects of complex terrain on the hydrodynamic performance of a deep-sea fishlike exploring and sampling robot moving near the sea bottom[J]. Frontiers in Marine Science, 2023, 10: 1091523.
- [12] 谢 鸥, 朱其新, 蒋全胜, 等. 仿生机器鱼靠壁游动的壁面效应特性研究[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2018, 46(11): 59–63.
Xie O, Zhu Q X, Jiang Q S, et al. Study on wall effect characteristics of bionic robot fish swimming near wall[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2018, 46(11): 59–63. (in Chinese)
- [13] Ma H W, Ren S, Wang J X, et al. Research on the influence of ground effect on the performance of robotic fish propelled by oscillating paired pectoral fins[J]. Industrial Robot: the International Journal of Robotics Research and Application, 2021, 48(1): 133–141.
- [14] Trujillo J E, Bouyoucos I, Rayment W J, et al. Escape response kinematics in two species of tropical shark: Short escape latencies and high turning performance[J]. Journal of Experimental Biology, 2022, 225(22): jeb243973.

- [15] Lighthill M J. Note on the swimming of slender fish[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1960, 9(2): 305–317.
- [16] Liu J, Hu H. Biological inspiration: from carangiform fish to multi-joint robotic fish[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2010, 7(1): 35–48.
- [17] Wang Z W, Yu Y L, Tong B G. An energetics analysis of fish self-propelled swimming[J]. *Science China: Physics, Mechanics & Astronomy*, 2018, 61(7): 74721.
- [18] Xie O, Zhang C B, Shen C. Study on the hydrodynamic performance of a self-propelled robot fish swimming in pipelines environment[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 309(P1): 118356.
- [19] 张 雁. 鲨鱼摆尾动力学特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
Zhang Y. Study on dynamic characteristics of shark tail waving[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020. (in Chinese)
- [20] 王栋宇. 舵鳍联合控制对船舶回转特性的影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
Wang D Y. Study on the influence of rudder and fin combined control on ship's turning characteristics[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013. (in Chinese)