

鱼类自主游动时摆频与摆幅的最优组合研究

王亮^{1,2}, 王丙^{3*}, 江召兵¹

(1. 南京欧帕提亚信息科技有限公司, 江苏 南京 211100; 2. 三江学院土木工程学院, 江苏 南京 210012;

3. 联勤保障部队工程大学, 天津 300161)

摘要: 鱼的游速可以通过摆频和摆幅两种方式进行调节, 如何确定具体游速下摆频和摆幅的最优节能组合, 对理解鱼游机理和提高机器鱼等仿生航行器的续航能力具有重要意义。本文采用自适应网格下的ghost-cell浸没边界方法, 数值模拟了鱼类在不同摆频和摆幅下的自主游动, 分析了摆频和摆幅对单位能耗的影响。研究表明: 在相同摆幅条件下, 游速与摆频近似呈线性关系; 在相同游速条件下, 以不同摆幅游动单位距离所需能耗差异显著, 最大差值可达2.5倍, 且能耗随摆幅不是单调变化的, 存在着最节能的最优摆幅, 当游速为1.5无量纲单位时, 最优摆幅为0.07倍鱼体长度; 最优摆幅随着游速的增大而减小, 但在一定游速范围内, 最优摆幅可以看作常值, 如游速在1.0~2.0无量纲单位时, 最优摆幅维持在0.05~0.07倍鱼体长度之间。因此, 鱼类最节能的游动方式为: 基于游速区间的分段调节策略, 在不同游速范围内匹配对应的最优摆幅, 再通过摆频调节具体游速。

关键词: 自主游动; 单位能耗; 游速; 摆频; 摆幅

中图分类号: Q811

文献标识码: A

doi: 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2025.04.0022

引用格式: 王亮, 王丙, 江召兵. 鱼类自主游动时摆频与摆幅的最优组合研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2026, 47(4): 440-448.

Wang Liang, Wang Bing, Jiang Zhaobing. Research on the optimal combination of tail-beat frequency and swing of fish during self-propelled swimming [J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2026, 47(4): 440-448.

Research on the Optimal Combination of Tail-Beat Frequency and Swing of Fish During Self-Propelled Swimming

Wang Liang^{1,2}, Wang Bing^{3*}, Jiang Zhaobing¹

(1. Nanjing Opatiya Information Technology Co., Ltd., Nanjing 211100, China;

2. College of Civil Engineering, Sanjiang University, Nanjing 210012, China;

3. PLA Joint Logistics Support Force University of Engineering, Tianjin 300161, China)

Abstract: The swimming velocity of fish can be adjusted by tail-beat frequency and swing, how to determine the optimal tail-beat frequency and swing of specific swimming velocity is of great significance for understanding the swimming mechanism of fish and improving the range of bionic vehicles such as robotic fish. Using the ghost-cell immersed boundary method with adaptive mesh, the self-propelled swimming of fish under different tail-beat frequencies and swings is numerically simulated, and the effects of frequency and swing on the unit energy consumption are analyzed. The results show that the relationship between swimming velocity and tail-

收稿日期: 2025-04-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(11572351)

作者简介: 王亮(1979—), 男, 讲师, 博士, 主要从事计算流体力学的研究。

* 通信作者: 王丙(1986—), 男, 讲师, 博士, 主要从事国防交通工程和流固耦合方面的研究。E-mail: wangbingouc@163.com。

beat frequency is approximately linear under the same tail-beat swing. Under the condition of the same swimming velocity, the energy consumption required per unit distance with different tail-beat swings varies significantly, with a maximum difference of 2.5 times, the energy consumption does not change monotonously with tail-beat swing and there is an optimal tail-beat swing of energy-saving. When the swimming velocity is 1.5 non-dimensional units, the optimal tail-beat swing is 0.07 times the body length. The optimal tail-beat swing decreases with the increase of swimming velocity, being regarded as a constant value in a certain range of swimming velocity. For example, when the swimming velocity is between 1.0 and 2.0 non-dimensional units, the optimal tail-beat swing remains between 0.05 and 0.07 times the body length. Therefore, the most energy-efficient swimming mode for fish is as follows: based on a segmented regulation strategy for swimming velocity intervals, the corresponding optimal tail-beat swing is matched within different velocity ranges, and the specific swimming velocity is adjusted by tail-beat frequency.

Key words: self-propelled swimming; unit energy consumption; swimming velocity; tail-beat frequency; tail-beat swing

0 引 言

自然界的鱼类靠尾鳍产生推力向前游动,不仅速度快而且效率高,因此,鱼类的游动机理一直都是学者们研究的热点。从研究发展脉络来看,早期研究主要聚焦于鱼类游动的运动学描述。例如:Berenshtein 等^[1]利用游动指数分析了波形、摆动频率等参数对鱼体-尾鳍(Body-Caudal Fin, BCF)推进的鱼游动行为的影响,为后续研究奠定了基础。随着计算技术的发展,研究者将传统数值方法与深度学习算法相结合来研究鱼的游动行为,这种方法具有鲁棒性强、费用少、自动化程度高等优点,推动了鱼类游动研究从单纯的实验观测向数值模拟与理论分析相结合的方向发展^[2-5]。胡瑞南等^[6]基于动网格技术对机器鱼不同运动模式下的受力情况和流场压力进行了研究。冯亿坤等^[7]采用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)方法建立鱼类模型来模拟机器鱼的游动行为,并分析了鱼游过程中的受力情况和反卡门涡街的变化,这些研究进一步深化了人们对鱼类游动水动力特性的理解。

虽然针对鱼类游动行为的研究已经很多,但鱼类的游动机理是非常复杂的,当鱼类游动时,游动速度既可以通过改变摆频也可以通过改变尾部摆幅来调节游动速度,对于某一具体游速,摆频与摆幅有无数种组合,但何种组合最节能目前尚无明确结论,这阻碍了人们对鱼类游动机理的理解,也制约了仿生航行器的技术发展。

在交通领域,汽车在行驶过程中,可以通过调节油门来改变行驶速度,但在不同的速度范围内需

要换成不同的挡位,从而达到高效节能的目的。类比可知,鱼类经过亿万年的进化,形成了低能耗、高效率的游弋机制,但其在游动速度改变时对摆频和摆幅的具体调整机制仍不明确,是否存在类似汽车换挡的优化机制也有待研究。随着机器鱼和水下仿生航行器的快速发展和深入研究^[8-10],如何确定不同游动速度下最节能的摆频和摆幅组合,从而达到增强续航能力的目的,成为当前交叉学科研究的重要课题,具有十分重要的科学和应用价值。

在鱼类游动和鸟类飞行的研究中,常用无量纲量斯特劳哈尔数(St)来表征运动特征,其定义为

$$St = \frac{2fA}{U}, \quad (1)$$

式中: f 为摆频; A 为尾部单侧摆幅; U 为游动速度。文献[11]的实验研究表明,当 $0.2 < St < 0.4$ 时,俯仰振荡翼型可以获得最高的推进效率,许多水生动物巡游时的 St 数也处于该范围内^[12-13]。但是,根据鱼类游动的最优 St 数仍无法确定具体游速下鱼类摆频和摆幅的最优组合。

此外,高推进效率并不意味着低能耗^[14],并且鱼类自主游动时的推力无法确定,因此,Schultz^[15]建议用类似汽车性能中“英里每加仑(Miles Per Gallon, MPG)”的指标来衡量鱼类的游动性能。本文引入了单位能耗 γ 的概念,将其定义为鱼类自主游动单位距离时所消耗的功。摆频与摆幅的最优组合指的是最节能的组合,即单位能耗最小的组合。

本文通过分析二维仿生鱼在不同摆频和摆幅下自主游动时的单位能耗,得到了最优摆频和摆幅随游速的变化规律,提出了一种类似于汽车换挡的鱼类游速调节机制,能够有效加强对鱼游机理的理解

以及提高机器鱼等水下仿生航行器的续航能力。

1 物理模型

本研究在开源流体动力学求解器Basilisk^[16]的基础上进行了深度二次开发,具体包括以下改进:

1) 浸没边界方法(IBM)模块:添加 Ghost-cell 浸没边界法以处理鱼体与流体的动态耦合。

2) 自适应网格模块:优化四叉树网格的自适应策略,提升鱼体边界附近的网格分辨率。

3) 鱼体运动控制模块:集成鲹科鱼摆动规律的数值模型,支持摆频与摆幅的动态调节。

1.1 数值方法

本文求解的二维不可压 Navier-Stokes 方程组为

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{U} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{U}, \quad (3)$$

式中: p 为压力; μ 为动力学黏性系数。

时间离散采用经典的分数步投影法,在任意给定时间步 n ,假定该时刻的速度场 $\mathbf{U}^n$ 和分数步压力 $p^{n-1/2}$ 已知。首先,利用式(4)计算速度的临时值 $\mathbf{U}^*$,具体为

$$\frac{\mathbf{U}^* - \mathbf{U}^n}{\Delta t} + \nabla p^{n-1/2} = [-(\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{U}]^{n+1/2} + \frac{\mu}{2} \nabla^2 (\mathbf{U}^* + \mathbf{U}^n). \quad (4)$$

然后,将投影算子作用于 $\mathbf{U}^*$ 就可以计算出新的速度场 $\mathbf{U}^{n+1}$ 以及分数步压力 $p^{n+1/2}$ 。

计算区域采用四叉树结构进行网格划分,该结构适用于自适应网格加密,可动态提升鱼体边界附近的网格分辨率。具体参数设置为:区域尺寸 $40L \times 20L$ ($L=1$ 为无量纲鱼体长度),初始网格 521×256 ,最小网格自适应加密至 $L=200$ 。求解泊松方程时采用多重网格法(V-cycle, 3层网格);对流项的离散采用二阶迎风格式^[17],扩散项采用中心差分;动边界采用 Ghost-cell 浸没边界方法^[18]来处理。时间步长通过库朗数(Courant-Friedrichs-Lewy, CFL)条件动态控制,定义为 $\text{CFL} = \frac{u_{\max} \Delta t}{\Delta x} \leq 0.5$,其中, $u_{\max}$ 为流场最大速度, Δx 为最小网格尺寸。自适应时间步长确保计算稳定性与精度。该数值算法在空间和时间上都具有二阶精度,其详细描述和验证可参考文献[19-20]。

仿真流程图如图1所示。

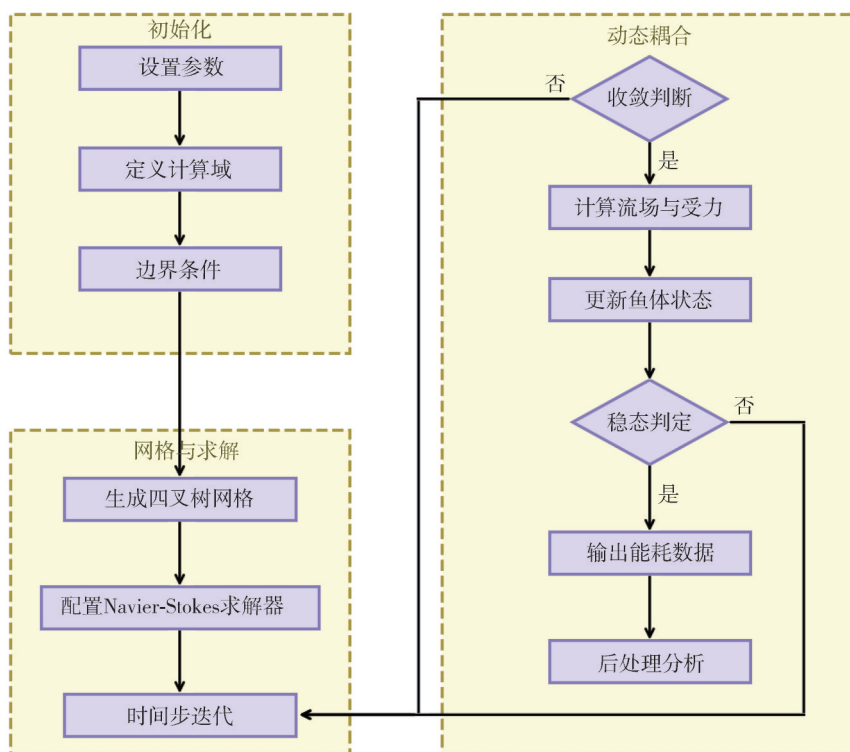


图1 仿真流程图

Fig. 1 Simulation flowchart

1.2 鱼游控制方程

本文采用鲹科模式的摆动规律^[21-23], 鱼体摆动的运动学模型由中线波动方程描述, 鱼体中线侧向位移为

$$h(x, t) = \beta a(x) \sin(kx - \omega t), \quad (5)$$

式中: $a(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2$ ($0 \leq x \leq 1$) 为鱼体沿体长方向的摆幅分布函数, $a_0 = 0.02$, $a_1 = -0.08$, $a_2 = 0.16$; β 为调整鱼体整体摆幅大小的常数; k 为波数; 圆频率 $\omega = 2\pi f$ 。

鱼体作为柔性体, 其各点的横向位移由上述中线波动方程驱动, 通过幅值函数和波动参数的组合, 实现从头部到尾部的周期性摆动变形, 进而与流体相互作用产生推进力。

本文仅考虑二维鱼的直线自主游动, 其控制方程为

$$M \frac{dU_x}{dt} = F_x, \quad (6)$$

式中: M 为鱼的质量; U_x 和 F_x 分别为鱼在 x 方向上的瞬时游动速度和所受的合力。

本文采用无量纲计算, 特征长度取鱼体长度 L_0 , 特征时间取 $1s$, 特征速度为 $1L_0/s$ 。因此, 鱼体无量纲长度 L 为 1, 无量纲流体密度 $\rho = 1.0$, 无量纲黏性系数 $\nu = 10^{-4}$ 。初始速度为 0 表示鱼从静止启动, 无量纲游速(以下简称游速) U 由自主游动稳态速度和特征速度定义。雷诺数定义为 $Re = UL/\nu$, 由于不同游动参数下 U 不同, 所以雷诺数也不同。鱼身厚度模型为 NACA0012 翼型(最大厚度 $0.12L$), 鱼体运动模型参数设置为: 无量纲摆幅(以下简称摆幅) $A = 0.025 \sim 0.150$, 无量纲摆频(以下简称摆频) $f = 0.5 \sim 0.4$, $k = 2\pi/\lambda$, $\lambda = 0.95L$ 。

计算区域边界均为第二类边界条件, 即 $\partial U_i / \partial n_j = 0$, 其中 n_j 为边界的外法线方向。初始时刻速度为零, 即鱼在静水中游动。 $F_x(t) = \int_A (-pn_i + \tau_{ij}n_j) dA$ 。

1.3 推进效率

二维鱼沿 X 轴负向运动, 则 X 方向上受到的合力为

$$F_x(t) = \int_A (-pn_i + \tau_{ij}n_j) dA, \quad (7)$$

式中: n_i 为面元 dA 上单位法向量的第 i 个分量; τ_{ij} 为黏性应力张量。

合力分解为推力和阻力两部分, 即

$$-T(t) = -(T_p + T_v) =$$

$$\frac{1}{2} \int_A (-pn_i - |pn_i|) dA + \frac{1}{2} \int_A (\tau_{ij}n_j - |\tau_{ij}n_j|) dA, \quad (8)$$

$$D(t) = D_p + D_v =$$

$$\frac{1}{2} \int_A (-pn_i + |pn_i|) dA + \frac{1}{2} \int_A (\tau_{ij}n_j + |\tau_{ij}n_j|) dA, \quad (9)$$

式中: $T(t)$ 和 $D(t)$ 分别为推力和阻力; T_p 、 T_v 和 D_p 、 D_v 分别为它们的压力分量和黏性力分量。那么, X 方向上的合力可表示为

$$F_x(t) = D(t) - T(t), \quad (10)$$

式中: F_x 为净力, 如果 $D > T$, F_x 称作净阻力, 反之则称为净推力。

鱼游的推进效率(Froude 效率)可以定义为

$$\eta = \frac{\overline{T}\overline{U}}{\overline{T}\overline{U} + \overline{P}_L}, \quad (11)$$

式中: $\overline{T}$ 为平均推力; $\overline{U}$ 为平均游动速度; $\overline{P}_L$ 为平均侧向力功率。

$P_L(t)$ 为瞬时侧向力功率, 即鱼类在自主游动过程中所输出的总功率, 其定义为

$$P_L(t) = \int_S (-pn_2 + \tau_{2j}n_j) \dot{h}(x, t) dS, \quad (12)$$

式中: n_2 为面元 dS 上单位法向量的侧向分量; τ_{2j} 为黏性应力张量的侧向分量; $\dot{h}(x, t)$ 为侧向摆动速度。

从推进效率的定义可以看出, 高推进效率并不意味着游动单位距离所需的功就少。

1.4 单位能耗

为了定量分析鱼类自主游动过程中的能耗, 将 γ 定义为

$$\gamma = \frac{\overline{P}_L}{U}, \quad (13)$$

式中: $\overline{P}_L$ 为平均侧向力功率, 其定义为

$$\overline{P}_L = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} P_L(t) dt, \quad (14)$$

式中: T 为摆动周期; t_0 为达到自主游动状态的时刻。

单位能耗 γ 值越小则越节能, 但由于高推进效率并不意味着低能耗, 而鱼类在长途巡游过程中低能耗比高推进效率更重要。因此, 摆频与摆幅的最优组合应该是最节能的组合, 即 γ 值最小的组合。

下面对仿真结果进行验证与收敛性分析。方法验证方面, 对比文献[19-20]浸没边界算例, 流场误差 $< 2\%$ 。网格无关性方面, $L/128$ 、 $L/256$ 与 $L/512$ 网格的鱼体所受合力差异 $< 0.5\%$ 。时间步

收敛性方面, Δt 为 0.001 s 与 0.005 s 时的能耗差异 $< 1\%$ 。图 2 给出了 3 个不同网格下, 鱼体所受合力随时间变化的曲线, 其中 t 为无量纲时间, T 为无量纲周期。从图中可以看到, 3 个不同尺寸网格下的模拟结果非常吻合。图 3 给出了鱼自主游动时的尾涡以及相应的自适应网格, 从图中可以看到, 鱼游尾迹中涡量最大的区域对应网格最密的区域, 验证了自适应算法的有效性。

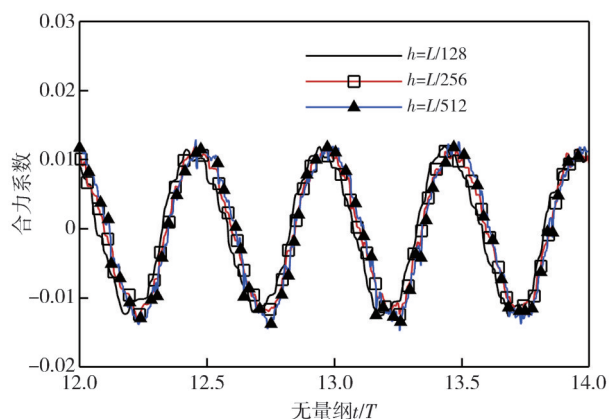
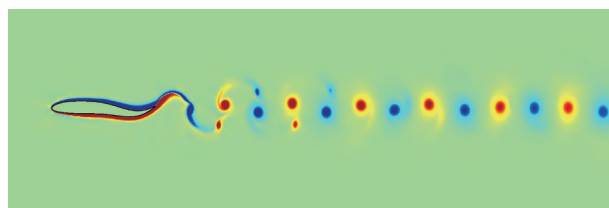
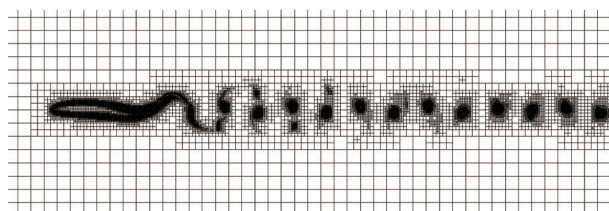


图 2 不同网格下鱼体所受合力随时间变化的曲线

Fig. 2 Net force change of fish with time at different grid sizes



(a) 涡量云图



(b) 自适应网格

图 3 鱼游尾涡与相应的自适应网格

Fig. 3 Vorticity contour and the corresponding adaptive grids of self-propelled fish swimming

2 结果分析

2.1 摆频、摆幅与游速之间的关系

摆频、摆幅与游速之间的关系是揭示摆频与摆幅最优组合随游速变化规律的基础。本文分别模拟了单侧摆幅 $A=0.025, 0.050, 0.075, 0.100$ 和 0.150 时仿生鱼在不同摆频 f 下的自主游动, 结

果如图 4 所示。由图 4 可知, 当摆幅 A 一定时, U 随着 f 的增大而增大, 二者近似呈线性关系, 且 $\Delta U/\Delta f$ 随着 A 的增大趋于稳定值。

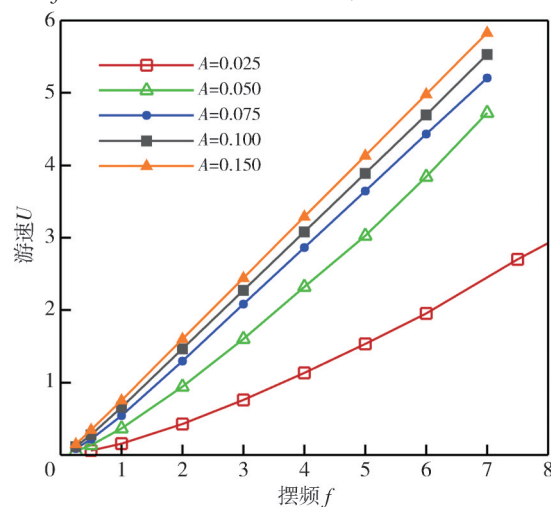


图 4 摆频与游速之间的关系

Fig. 4 The relationship between tail-beat frequency and swimming velocity

为了揭示游速与摆幅之间的变化规律, 本文分别模拟了摆频 $f=0.5, 1.0, 2.0$ 和 4.0 时仿生鱼在不同摆幅条件下的自主游动, 结果如图 5 所示。由图 5 可知, 当摆频 f 一定时, U 随着 A 的增大而增大, 但当 A 增大到一定程度时, U 随着 A 的增大近似保持不变, 甚至还会有所减小。

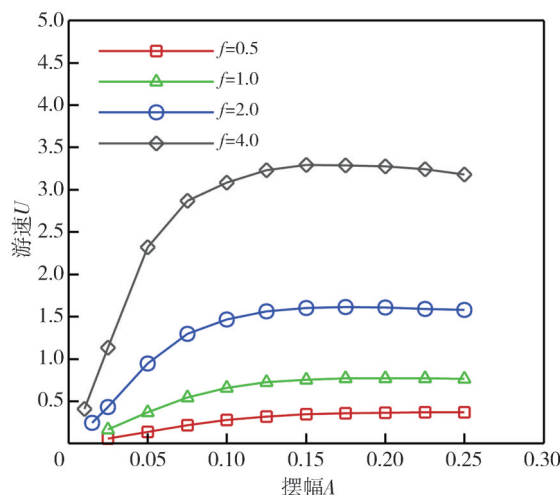


图 5 摆幅与游速之间的关系

Fig. 5 The relationship between tail-beat swing and swimming velocity

上述分析说明鱼在游动过程中既可以通过 f 也可以通过 A 来调整 U , 但通过 A 调整的幅度是有限的, 无法通过调整摆幅来无限制增加游速。

2.2 摆频、摆幅与单位能耗之间的关系

图 6 给出了摆幅 $A=0.025, 0.050, 0.075,$

0.100 和 0.150 时,单位能耗 γ 随摆频 f 的变化规律。从图 6 中可以看到, γ 随 f 的增大而增大; 对于不同的 A , A 越大, γ 随 f 增长的速率越快。对于固定的 A , 通过 γ 随 f 变化的曲线可以看到, f 越大, γ 增长越快, 二者之间呈非线性关系。

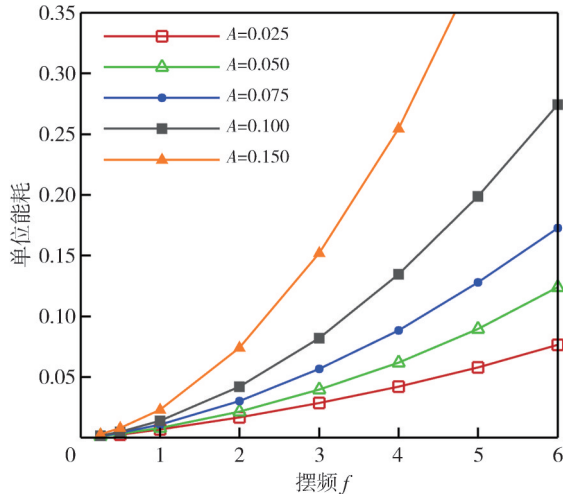


图 6 摆频与单位能耗之间的关系

Fig. 6 The relationship between tail-beat frequency and unit energy consumption

图 7 给出了摆频 f 固定时,单位能耗的对数 $\lg \gamma$ 随摆幅 A 的变化规律。从图 7 中可以看到,当 f 固定时, γ 随着 A 几乎呈指数增长; 结合图 5 可见,在 f 固定的条件下,摆幅 A 增大到一定程度后,流速趋于饱和,但 γ 仍随摆幅急剧上升。因此,鱼在游动过程中,依靠增大摆幅来提高流速是不经济的。

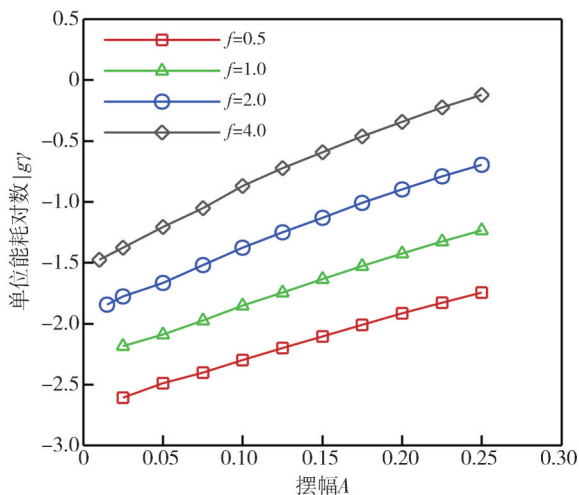


图 7 摆幅与单位能耗之间的关系

Fig. 7 The relationship between tail-beat swing and unit energy consumption

当 $A/L > 0.05$ 时,尾部涡街强度随摆幅的增大而增强,推动力提升;但 $A/L > 0.10$ 后,尾迹

涡脱体频率与摆频失谐,导致推力饱和,见图 5,同时阻力功率随摆幅的平方增长,见图 7。瞬时流场对比显示, $A/L = 0.10$ 时反卡门涡街稳定,而 $A/L = 0.15$ 时涡结构破碎,能量耗散加剧。

通过分析摆频、摆幅、流速、单位能耗之间的关系,同时结合图 5 中不同摆频条件下流速随摆幅变化曲线的斜率变化,本文认为鱼在自主游动过程中的最大单侧摆幅不应超过 0.15 倍身长,最好控制在 0.1 倍身长以下,这与 Videler 等^[24] 的实验观测结果相一致。

2.3 流速与单位能耗之间的关系

通过上述分析可以看出,鱼的流速既可以通过改变摆频也可以通过改变摆幅来进行调节。那么,对于特定流速下摆频与摆幅的组合中到底哪一种最节能,可以通过分析单位能耗与流速之间的关系,来确定摆频和摆幅最优组合随流速的变化规律。在不同摆幅条件下,单位能耗 γ 随流速 U 的变化曲线如图 8 所示,图 9 是局部放大图。从图 8 中可以看到,相同流速条件下,摆频与摆幅的不同组合所对应的单位能耗相差非常大,例如,当 $U = 3.0$ 时, $A = 0.150$ 的单位能耗约为 $A = 0.050$ 时的 2.5 倍。从图 8 中还可以看到,当 U 相同时, γ 不是 A 的单调函数,因此存在着一个最节能的摆幅,本文称之为最优摆幅,记为 A^* 。

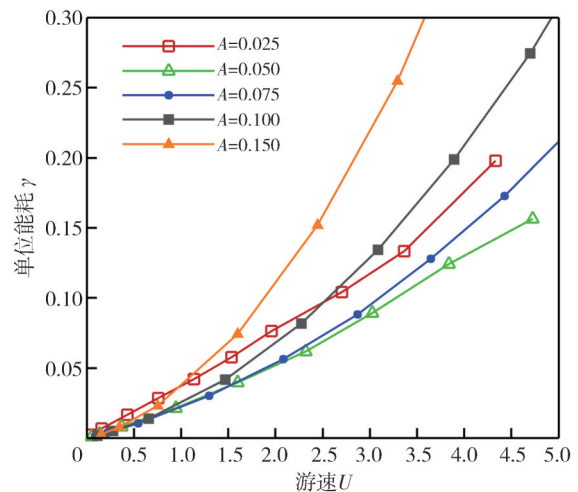


图 8 流速与单位能耗之间的关系(全局图)

Fig. 8 The relationship between swimming velocity and unit energy consumption(global graph)

图 9 中用“*”标注的点 p_1 是 $A = 0.050$ 和 $A = 0.075$ 所对应曲线的交点,点 p_2 是 $A = 0.075$ 和 $A = 0.100$ 所对应曲线的交点。因此,在不同的流速范围内最优摆幅 A^* 是不同的。

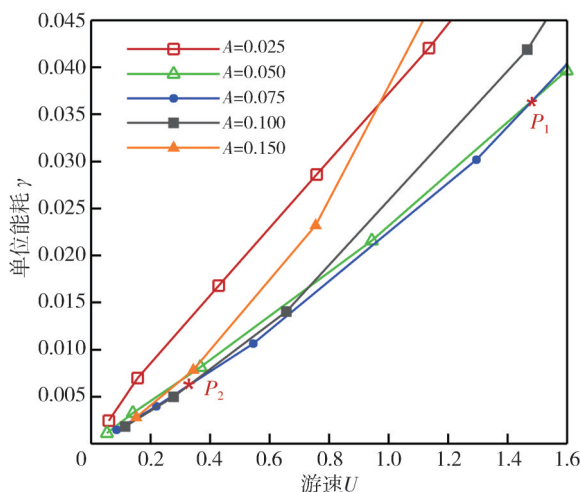


图9 游速与单位能耗之间的关系(局部放大图)

Fig. 9 The relationship between swimming velocity and unit energy consumption(localized graph)

针对本文所选取的摆幅参数空间,最优摆幅 A^* 与游速 U 之间的关系如下:

$$A^* = \begin{cases} 0.100, & U < 0.3, \\ 0.075, & 0.3 \leq U \leq 1.5, \\ 0.050, & U > 1.5. \end{cases} \quad (15)$$

由式(10)可以发现,最优摆幅 A^* 随着游速 U 的增大而减小,即鱼在高速游动时采用小摆幅,在低速游动时采用大摆幅比较节能。由于不同游速范围内 A^* 的存在,使得鱼在游动过程中可以根据不同的 U 切换不同的 A^* ,就像汽车换挡一样,而摆频就像汽车的油门一样可用来调节具体的游速。

值得注意的是,对于不同外形的鱼,最优摆幅与对应的游速范围可能有所不同,但在不同游速条件下的最优摆幅是存在的,即本研究在所选参数范围内观察到的鱼类游动换挡机制具有一定代表性,而图8给出了确定鱼类游动挡位(最优摆幅)的方法。

3 讨论

本研究通过二维数值模拟,建立了鲹科鱼自主游动时最优摆幅与游速的分段函数关系(式10)。需要指出的是,该公式的具体参数($A^* = 0.100, 0.075, 0.050$)与鲹科鱼的身体摆动特征直接相关,包括摆幅沿体长的分布函数($a(x) = 0.02 - 0.08x + 0.16x^2$)、二维刚性体假设及生理可行的摆幅范围($A/L = 0.025 \sim 0.150$),因此其直接结论适用于具有相似BCF游动模式的中高速鱼类,如金枪鱼、梭鱼等^[20-22]。

对于摆动模式不同的鱼类,最优摆幅对应的游速范围可能显著变化。例如:

1) 鳗鲡目鱼类(Anguilliform): 因身体柔性好,摆幅沿全长均匀分布,低速时可通过更大摆幅(如 $A/L > 0.150$)有效利用全身体波推进,其最优摆幅的低速区间可能更宽;

2) 箱鲀科鱼类(Ostraciidae): 受限于刚性躯干,摆幅调节范围较小,高速游动时需更早采用小摆幅以减少阻力,导致最优摆幅的切换点向低速区偏移。

尽管存在物种特异性,本研究揭示的“随游速增大最优摆幅减小”的核心机制具有普适性。从流体力学本质看,低速时大摆幅通过增强尾流涡街(如反卡门涡街)提升推力效率^[7,11],高速时小摆幅可降低流体阻力与能量耗散,这符合“ St 数优化”的生物推进共性^[12-13]。实验观测也表明,多种水生动物(如文献[24]中的鲭鱼和鳕鱼)在高速巡游时自然采用小摆幅策略,与本研究结论一致。

在仿生应用层面,本文提出的摆幅区间切换节能策略,不依赖于具体鱼类种类,而是基于摆频、摆幅与能耗的内在关联,为机器鱼等水下仿生航行器的参数优化提供了统一的分析框架。未来研究可进一步扩展:

1) 三维柔性体建模: 考虑鱼体侧扁、尾鳍三维变形及柔性摆动,分析体型对最优摆幅的影响;

2) 跨物种参数空间扩展: 针对鳗鲡目、AFC(Amphibian-Fin-Combined)等不同游动模式,建立专属的摆幅-摆频优化模型;

3) 生理约束整合: 结合鱼类肌肉能耗模型与生理极限(如最大摆频、摆幅),完善节能策略的生物力学基础。

4 结论

本文采用数值模拟方法,系统分析了二维仿生鱼自主游动时的摆频、摆幅、游速与单位能耗之间的关系。结论如下:

1) 相同摆幅条件下,游速随摆频的增大而增大,二者近似呈线性关系。

2) 相同摆频条件下,当摆幅较小时,游速随摆幅的增大而增大。当摆幅增大到一定程度时,游速随摆幅的增大几乎保持不变,但单位能耗仍随摆幅几乎呈指数增长。

3) 对于某一具体游速,存在一个单位能耗最

低的最优摆幅,最优摆幅随着游速的减小而增大;在一定游速范围内,最优摆幅可视为常值,不同游速范围对应不同的最优摆幅。本研究基于离散摆幅工况识别出最优摆幅的分区特性,实际鱼类游动的摆幅调节可能存在连续变化,但核心规律“随游速增大最优摆幅减小”与离散工况下的发现一致。未来可通过连续参数空间的优化分析进一步验证该机制的普适性。

综上所述,可以得出鱼类最节能的游动方式:基于游速区间的分段调节策略,在不同游速范围内匹配对应的最优摆幅,通过摆频实现该区间内具体游速的精细调节。对于不同种类的鱼,最优摆幅与对应的游速范围可能会有所差异,但摆频、摆幅、游速与单位能耗之间的关系是相似的。本文的研究结果可用于确定机器鱼等水下仿生航行器的最优摆动参数组合,从而能够通过鱼类游动中的换挡机制达到提高续航能力的目的。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献:

- [1] Berenshtein I, Paris C B, Gildor H, et al. Auto-correlated directional swimming can enhance settlement success and connectivity in fish larvae[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2018, 439: 76-85.
- [2] Verma S, Novati G, Koumoutsakos P. Efficient collective swimming by harnessing vortices through deep reinforcement learning[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(23): 5849-5854.
- [3] Zhu Y, Tian F B, Young J, et al. A numerical study of fish adaption behaviors in complex environments with a deep reinforcement learning and immersed boundary-lattice Boltzmann method [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 1691.
- [4] Lin Y C, Zhang D N. Experimental and numerical investigations on undulatory motion of a soft-fin-based underwater robot[J]. *Journal of Mechanics*, 2022, 38: 273-283.
- [5] Eloy C, Schouveiler L. Optimisation of two-dimensional undulatory swimming at high Reynolds number [J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2011, 46(4): 568-576.
- [6] 胡瑞南,梅杰,程正树,等. 尾鳍摆动驱动仿生机器鱼的水动力性能仿真分析[J]. *武汉科技大学学报*, 2020(6): 463-470.
- [7] 冯亿坤,苏玉民,宿原原,等. 仿生机器鱼自主游动的数值计算方法与机理[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(12): 18-24.
- [8] Yu J Z, Wang M, Dong H F, et al. Motion control and motion coordination of bionic robotic fish: a review [J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2018, 15(4): 579-598.
- [9] Verma S, Shen D, Xu J X. Motion control of robotic fish under dynamic environmental conditions using adaptive control approach [J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2018, 43(2): 381-390.
- [10] Wang C C, Lu J, Ding X L, et al. Design, modeling, control, and experiments for a fish-robot-based IoT platform to enable smart ocean [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(11): 9317-9329.
- [11] Anderson J M, Streitlien K, Barrett D S, et al. Oscillating foils of high propulsive efficiency [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1998, 360: 41-72.
- [12] Taylor G K, Nudds R L, Thomas A L R. Flying and swimming animals cruise at a Strouhal number tuned for high power efficiency [J]. *Nature*, 2003, 425(6959): 707-711.
- [13] Eloy C. Optimal Strouhal number for swimming animals [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2012, 30: 205-218.
- [14] Tytell E D. Do trout swim better than eels? Challenges for estimating performance based on the wake of self-propelled bodies [J]. *Experiments in Fluids*, 2007, 43(5): 701-712.
- [15] Schultz W W, Webb P W. Power requirements of swimming: do new methods resolve old questions? [J]. *Integrative and Comparative Biology*, 2002, 42(5): 1018-1025.
- [16] Kenneally P W, Piggott S, Schaub H. Basilisk: a flexible, scalable and modular astrodynamics simulation

- framework[J]. Journal of Aerospace Information Systems, 2020, 17(9): 496-507.
- [17] Popinet S. Gerris: a tree-based adaptive solver for the incompressible Euler equations in complex geometries [J]. Journal of Computational Physics, 2003, 190(2): 572-600.
- [18] Mittal R, Dong H, Bozkurtas M, et al. A versatile sharp interface immersed boundary method for incompressible flows with complex boundaries[J]. Journal of Computational Physics, 2008, 227(10): 4825-4852.
- [19] Wang L, Wu C J. An adaptive version of ghost-cell immersed boundary method for incompressible flows with complex stationary and moving boundaries [J]. Science China Physics, Mechanics and Astronomy, 2010, 53(5): 923-932.
- [20] Xin J J, Li T Q, Shi F L. A radial basis function for reconstructing complex immersed boundaries in ghost cell method [J]. Journal of Hydrodynamics, 2018, 30(5): 890-897.
- [21] Borazjani I, Sotiropoulos F. Numerical investigation of the hydrodynamics of carangiform swimming in the transitional and inertial flow regimes [J]. Journal of Experimental Biology, 2008, 211(10): 1541-1558.
- [22] 张祺, 姚志刚, 陈奇, 等. 基于虚拟样机的仿鲹科机器鱼游动姿态仿真研究[J]. 机械, 2019, 46(1): 68-72.
- Zhang Qi, Yao Zhigang, Chen Qi, et al. Research on robotic Carangidae fish swimming posture simulation based on virtual prototype [J]. Machinery, 2019, 46(1): 68-72. (in Chinese)
- [23] 高天宇, 余永亮, 鲍麟. 鲹科模式鱼体自主前游的标度律研究[J]. 力学学报, 2023, 55(4): 858-873.
- Gao Tianyu, Yu Yongliang, Bao Lin. Study on the scaling law of fish-like body self-propulsion with carangiform undulation [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2023, 55(4): 858-873. (in Chinese)
- [24] Videler J J, Hess F. Fast continuous swimming of two pelagic predators, saithe (*Pollachius virens*) and mackerel (*Scomber scombrus*): a kinematic analysis [J]. Journal of Experimental Biology, 1984, 109(1): 209-228.

(上接第 439 页)

- [19] 赵俊英, 李云龙, 邵欣, 等. 基于数字孪生的机器人实验平台设计[J]. 制造技术与机床, 2022(7): 5-10.
- Zhao Junying, Li Yunlong, Shao Xin, et al. Design of robot experiment platform based on digital twin [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2022(7): 5-10. (in Chinese)
- [20] 罗明坤, 邓三鹏, 薛强, 等. 基于数字孪生的工业机器人状态监测技术研究[J]. 机器人技术与应用, 2022(6): 15-17.