

DOI: 10.7511/jslx20230613003

# 振动障碍物型式对摆动尾鳍水动力性能影响研究

舒蒋鹏<sup>1</sup>, 杨文俊<sup>2</sup>, 石小涛<sup>1</sup>, 陈小龙<sup>1</sup>, 胡晓<sup>1</sup>, 谭均军<sup>1</sup>, 张立胜<sup>\*1</sup>

(1. 三峡大学 水利与环境学院, 宜昌 443002; 2. 长江科学院, 武汉 430010)

**摘要:** 基于计算流体力学(CFD)方法并结合 Fluent 的动网格技术, 对不同振动障碍物产生的尾流场中摆动尾鳍的水动力性能进行了研究。通过改变尾鳍前缘与障碍物中心点距离( $S$ )、障碍物大小( $d$ )和来流速度( $U$ )获得了摆动尾鳍的平均推力系数、功率消耗以及推进效率的变化趋势, 并结合流场的压力分布云图以及涡量云图进行了分析。计算结果表明, 障碍物的存在可以提升摆动尾鳍的推进性能。在固定  $S, d$  和  $U$  下, 在振动方柱尾流中摆动尾鳍的最大平均推力和最大推进效率均高于其在振动 D 形柱和圆柱尾流中的最大平均推力和最大效率。障碍物为 D 形柱、圆柱以及方柱时, 旋向相反的 D 形柱涡、圆柱涡以及方柱涡与尾鳍前缘涡产生挤压作用, 提升尾鳍前缘涡的强度。

**关键词:** 摆动尾鳍; 振动障碍物型式; 动网格; 水动力性能; 数值模拟

**中图分类号:** TP24; O35

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1007-4708(2024)06-1037-08

## 1 引言

自然界中的大多数鱼类能够在尾鳍的推进下进行快速高效游动, 其称为 BCF 模式。特别在复杂流场下, 鱼类可以通过改变自身的运动形态来保持高效的游动<sup>[1]</sup>。研究学者针对其在复杂流场下的游动机理, 都是通过实验、数值模拟以及仿生原型的手段进行研究, 如 MIT 研究小组于 1998 年研制出了可以利用漩涡来提升推进性能的仿鱼类水下机器人 VCUUV<sup>[2]</sup>。Liao 等<sup>[3-5]</sup>发现虹鳟鱼在 D 形圆柱后方发生卡门步态的区域运动的几率最高, 并利用卡门涡街减少其自身能量的消耗以及胸鳍维持平衡。Gopalkrishnan 等<sup>[6]</sup>通过改变实验参数研究振动 D 形柱对摆动水翼尾涡的影响, 观察到了漩涡跟摆动水翼的尾涡相互作用的多种模式。Streitlien 等<sup>[7]</sup>通过模拟得到了跟 Gopalkrishna 实验结果一致的漩涡相互作用模式。Anderson<sup>[8]</sup>研究大振幅、大迎角的摆动水翼运动跟离散涡之间的相互作用。潘定一<sup>[9]</sup>数值模拟振动 D 形柱尾流场中摆动水翼的推进特性。张曦等<sup>[10]</sup>数值模拟发现了摆动水翼可以从漩涡中吸收能量提高其推进效

率。Yan 等<sup>[11]</sup>通过数值模拟重现了鱼在实验中的现象。ZHU 等<sup>[12]</sup>采用面元法数值研究尾鳍脱落涡与身体脱落涡之间的相互作用。YANG 等<sup>[13]</sup>数值模拟发现仿生金枪鱼尾柄处脱落的尾涡与尾鳍产生的尾涡相互合并, 提高了尾鳍的推进性能。冯亿坤等<sup>[14]</sup>数值模拟研究双体干扰对摆动水翼水动力性能的影响, 结果表明前置翼的存在可以提升摆动水翼的推进性能。李永成等<sup>[15]</sup>数值计算发现涡流场中的鱼形体可以获得更大的推力。王凯辉等<sup>[16]</sup>采用实验跟数模相结合的方法研究鲫鱼在圆柱绕流形成的涡流场中的游泳行为。另外, 障碍物形成的流场会影响不同鱼的游泳行为<sup>[17-18]</sup>。

对于鱼类在复杂流场下的研究可以应用到鱼道设计, 有研究表明鱼类通过鱼道上溯时, 鱼道内部障碍物形成的夹带漩涡的复杂流场会影响鱼的上溯成功率<sup>[19]</sup>。并且障碍物(鹅卵石)形成的夹带漩涡的复杂流场会影响鱼的下行行为<sup>[20-21]</sup>。另外鱼道中的流速、漩涡、障碍物的形状均是鱼类是否成功通过鱼道的重要因素<sup>[22-23]</sup>。

上述研究表明漩涡会对鱼类尾鳍的水动力性能以及鱼类的游泳行为有较大影响, 在合适的运动

收稿日期: 2023-06-13; 修改稿收到日期: 2023-09-05.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52279069); 国家自然科学基金(52179070)资助项目.

作者简介: 张立胜\* (1984-), 男, 博士, 讲师(E-mail: zhanglisheng@ctgu.edu.cn).

引用本文: 舒蒋鹏, 杨文俊, 石小涛, 等. 振动障碍物型式对摆动尾鳍水动力性能影响研究[J]. 计算力学学报, 2024, 41(6): 1037-1044.

SHU Jiang-peng, YANG Wen-jun, SHI Xiao-tao, et al. Study on the influence of vibration obstacle type on the hydrodynamic performance of flapping caudal fin[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2024, 41(6): 1037-1044.

参数下能够获得较大的推进性能,但目前选用的大多是单一的振动或者静止障碍物,振动障碍物可以改变漩涡位置和漩涡强度,其对尾鳍的推进性能不容忽视且特定流场结构研究较少。因此,选用不同振动特性的障碍物研究复杂流场下摆动尾鳍的推进性能研究具有重要意义。本文基于 CFD 方法并结合 Fluent 动网格技术和 UDF 建立计算模型,数值模拟摆动尾鳍在不同振动障碍物型式下构成的复杂流场中的水动力性能,为优化鱼道中障碍物设计参数和鱼类仿生技术提供一定参考。

## 2 计算模型与数值方法

### 2.1 运动模式

在计算模型中,摆动尾鳍的运动可以看作是同时做俯仰-升沉两个分运动的合运动。D 形柱、圆柱、方柱均沿着  $y$  轴方向做升沉运动。以摆动尾鳍跟 D 形柱的运动为例,如图 1 所示。D 形柱、圆柱、方柱以及摆动尾鳍的运动方程分别为

$$\begin{aligned} y_d(t) &= h_d \sin(2\pi ft) \\ y_f(t) &= h_f \sin(2\pi ft) \\ \theta_f(t) &= \theta_0 \sin(2\pi ft - \varphi) \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $h_d$  为 D 形柱、圆柱以及方柱的升沉运动振幅,  $h_f$  为尾鳍升沉运动振幅,  $\theta_0$  为尾鳍俯仰运动振幅,  $f$  为运动频率,定义 D 形柱、圆柱、方柱以及摆动尾鳍的运动频率相等,  $\varphi$  为相位差,取  $\varphi = \pi/2$ 。

### 2.2 水动力性能参数

为便于研究,本文对摆动尾鳍在复杂流场下摆动过程的推力、侧向力以及力矩进行无量纲转换,其尾鳍的瞬时推力系数  $C_t$ 、瞬时侧向力系数  $C_l$  以及瞬时力矩系数  $C_m$  为

$$C_t = \frac{2F_x(t)}{\rho c U^2}, C_l = \frac{2F_y(t)}{\rho c U^2}, C_m = \frac{2M(t)}{\rho c^2 U^2} \quad (2)$$

式中  $F_x(t)$ ,  $F_y(t)$ ,  $F_z(t)$  分别为摆动尾鳍瞬时推力、瞬时侧向力和瞬时力矩,  $\rho$  为水的密度,  $c$  为尾鳍弦长,  $U$  为来流速度。

尾鳍一个运动周期的平均推力系数  $C_T$ , 平均侧向力系数  $C_L$  和平均力矩系数  $C_M$  分别为

$$C_T = \frac{\int_0^T C_t}{T}, C_L = \frac{\int_0^T C_l}{T}, C_M = \frac{\int_0^T C_m}{T} \quad (3)$$

式中  $T$  为一个运动周期。

尾鳍的平均输入功率  $\bar{P}$  为

$$\bar{P} = \left( \int_0^T F_y(t) y'_f(t) dt + \int_0^T M(t) \theta'_f(t) dt \right) / T \quad (4)$$

尾鳍平均输入功率系数  $C_P$  和推进效率  $\eta$  为

$$C_P = \frac{2\bar{P}}{\rho c U^3}, \eta = \frac{C_T}{C_P} \quad (5)$$

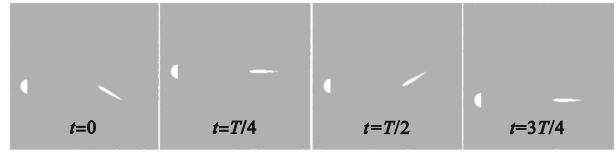


图 1 D 形柱和摆动尾鳍的周期运动

Fig. 1 Schematic diagram of the periodic motion of D-shaped cylinder

### 2.3 计算域网格划分及计算设定

计算域尺寸为  $10c \times 8c$ , 以振动 D 形柱跟摆动尾鳍为例,如图 2 所示,整个流体域分为左右两个域,左右两个域又分为内外域,外域采用结构化网格划分,内域采用非结构化网格划分,在障碍物和摆动尾鳍边界处加密网格,第一层网格高度为  $10^{-4}c$ ,时间步长设为  $T/200$ ,以保证计算过程中库朗数小于 1,计算模拟时间为 15 s。入口为速度入口,出口为压力出口,上下两侧壁面为对称边界,内外域交界处设为 interior,左右域交界处设置为 interface。采用 SST  $k-\omega$  湍流模型并利用 Fluent 的动网格技术中的弹簧光滑和局部网格重构的方法来对网格进行更新,以便更好地控制网格的更新质量。通过 UDF 实现 D 形柱、圆柱、方柱以及摆动尾鳍的运动,并选用 SIMPLE 算法对连续方程中的压力和速度进行耦合<sup>[24]</sup>,采用二阶迎风对动量项离散。

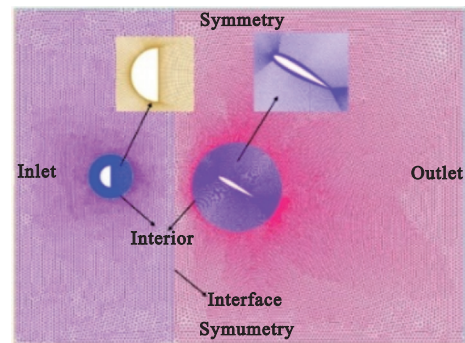


图 2 计算域及网格划分

Fig. 2 Computational domain and mesh division

### 2.4 计算方法有效性验证

为验证计算方法有效性,将计算结果与文献[25]的实验结果进行比较,如图 3 所示,实验结果相对于计算结果来说存在一定误差,原因是为获取水翼近似二维流场的流动,在水翼两端增设了固定端板,为保证水翼的俯仰运动,在水翼与两侧端板之间保留了约 2 mm 的间隙,但该间隙的存在会带来一定三维效应影响,因此导致实验与计算存在一

定误差,经计算得到,平均推力系数最大相对误差为 11.9%,推进效率最大相对误差为 13.2%,误差在许可范围内,并且数值计算值跟实验值吻合很好,具有相同的变化趋势,说明该数值计算方法是有效的。

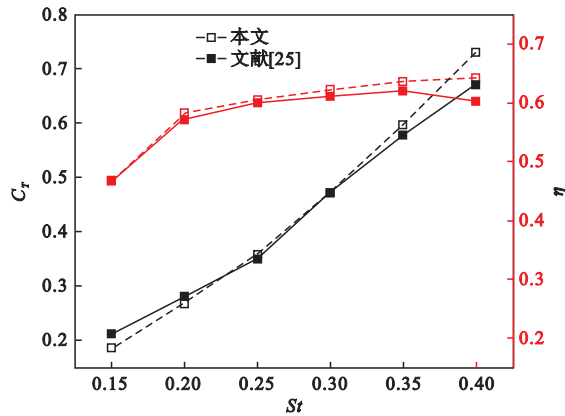


图3 数值方法验证  
Fig.3 Numerical method validation

### 3 计算结果与分析

#### 3.1 振动障碍物型式对摆动尾鳍推进性能的影响

为研究障碍物型式对摆动尾鳍推进性能的影响,选取  $S=4d, h_d=h_f=d, f=0.5$  Hz 进行计算。

图4给出了三种振动障碍物型式后方和自由来流中摆动尾鳍在一个运动周期内的瞬时推力系数  $C_i$ 。从图4可以看出,在计算参数一致的情况下,摆动尾鳍的  $C_i$  均表现出较好的周期性,在一个周期内  $C_i$  均变化两次,并且存在两个峰值,其中一个出现在二分之一周期附近,另一个在周期结束处。

另外,摆动尾鳍在 D形柱、圆柱、方柱和自由来流中的平均推力系数  $C_T$  分别为 0.5106, 0.3823, 0.9711 和 0.2191,说明障碍物的存在可以

提高摆动尾鳍的推进力。

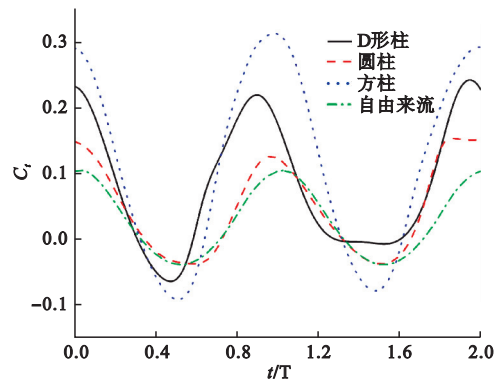


图4 摆动尾鳍瞬时推力系数  
Fig.4 Flapping caudal fin instantaneous thrust coefficient

#### 3.2 摆动尾鳍前缘与障碍物中心点距离(S)对摆动尾鳍推进性能的影响

为研究  $S$  对摆动尾鳍推进性能的影响,选取  $d=0.5c, h_d=h_f=d, f=0.5$  Hz 进行计算。

图5给出了三种振动障碍物型式后方摆动尾鳍在一个运动周期内的瞬时推力系数  $C_i$  和平均推力系数  $C_T$ 。从图5(a)可知,摆动尾鳍的  $C_i$  在一个周期内的变化特征与 3.1 节中的变化特征一致,不再叙述。从图5(b)可知,障碍物为 D形柱,摆动尾鳍的平均推力随着  $S$  的增加先增加后减少,障碍物为方柱时反之。障碍物为圆柱时,摆动尾鳍的平均推力随着  $S$  的增加而减少。当障碍物为 D形柱时,在  $S=5d$  时取得的最大  $C_T$  比  $S=7d$  时高出约 94%。当障碍物为圆柱时,在  $S=4d$  时取得的最大  $C_T$  比  $S=7d$  时高出约 70.2%。当障碍物为方柱时,在  $S=4d$  时取得的最大  $C_T$  比  $S=6d$  时高出约 88.3%。

三种振动障碍物型式后摆动尾鳍的平均输入功率系数  $C_P$  和推进效率  $\eta$  如图6所示。由图6(a)可知,障碍物D形柱(方柱)时,摆动尾鳍的  $C_P$

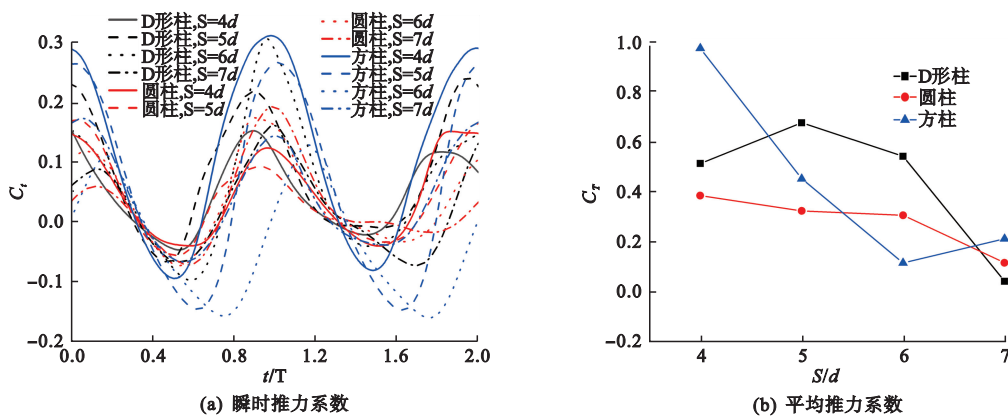


图5 摆动尾鳍瞬时推力系数和平均推力系数  
Fig.5 Instantaneous thrust coefficient and mean thrust force coefficient of flapping caudal fin



变化趋势随  $S$  的增加先增加后减少(先减少后增加),在  $S=5d$  时,  $C_p$  值最大,说明在此情况下, D形柱进行振动时,摆动尾鳍消耗的能量增加。障碍物为圆柱时,摆动尾鳍的  $C_p$  变化趋势随  $S$  的增加而减少;由图 6(b)可知,障碍物为 D形柱或圆柱,  $\eta$  变化趋势一致,最大效率均在  $S=6d$  时取得,分别为 188.0%和 213.5%,并且圆柱尾流中摆动尾鳍的  $\eta$  始终高于 D形柱尾流中摆动尾鳍的  $\eta$ ;障碍物为方柱时,摆动尾鳍的  $\eta$  随  $S$  的增加先增加后减少,最大效率在  $S=5d$  时取得,为 221.0%。说明在  $S=5d$  时,摆动尾鳍在振动方柱尾流中的推进效率最高。

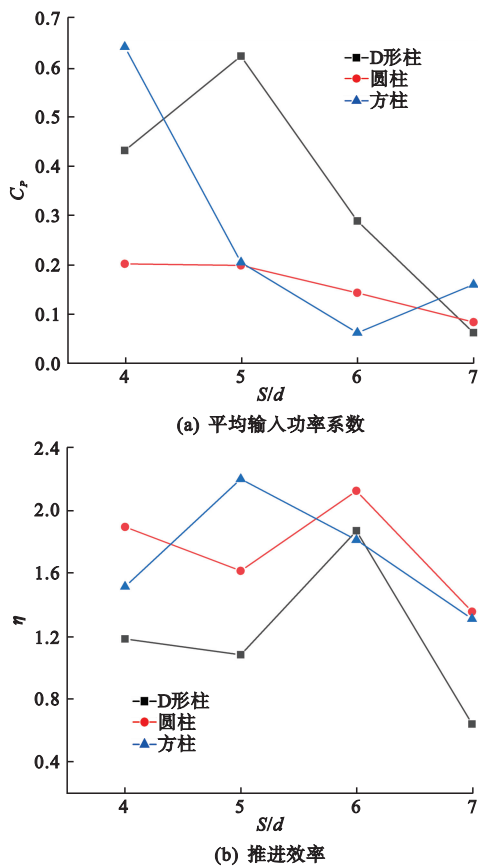


图6 摆动尾鳍的平均输入功率系数和推进效率  
Fig. 6 Input power coefficient and propulsive efficiency of flapping caudal fin

图 7 给出了三种振动障碍物型式后摆动尾鳍同一时刻( $t=T/2$ )下的压力分布云图以及涡量云图。由图 5(b)可知,  $S=4d$  时,摆动尾鳍在振动方柱尾流中的平均推力最大,从图 7(a)看出,与在 D形柱和圆柱的相比,在方柱尾流中的摆动尾鳍的前缘上表面存在一个明显突起的低压区,下表面靠近前缘的区域存在高压区,之间的压差都比前两者大,此时的摆动尾鳍以低头的姿势向下运动,另外在图 7(b)显示,此方柱产生的负涡在摆动尾鳍的

下表面,对摆动尾鳍在下表面生成的正涡有挤压作用,并且可以看出方柱生成的负涡强度明显比摆动尾鳍前缘涡强度大,最后导致摆动尾鳍两侧的压差大,推力也随之变大,而且摆动尾鳍尾流场中存在多个涡对,诱导作用更强,其侧向射流增加。

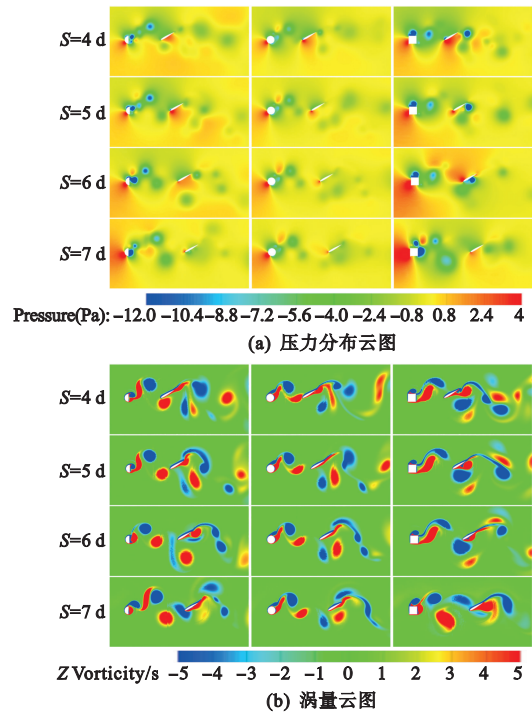


图7 摆动尾鳍的压力分布云图和涡量云图  
Fig. 7 Pressure contour and vortex contour of flapping caudal fin

### 3.3 障碍物尺寸( $d$ )对摆动尾鳍推进性能的影响

为研究障碍物尺寸( $d$ )对摆动尾鳍推进性能的影响,选取  $S=5d, h_d=h_f=d, f=0.5$  Hz 进行计算。

图 8 给出了三种振动障碍物型式后方摆动尾鳍在一个运动周期内的瞬时推力系数  $C_i$  和平均推力系数  $C_T$ 。从图 8(a)可知,摆动尾鳍  $C_i$  的变化特征与 3.1 节变化特征一致,不再叙述。从图 8(b)可以看出,障碍物为 D形柱,摆动尾鳍的平均推力  $C_T$  随着  $d$  的增加先增加后减少,并在  $d=0.7c$  时取得最大值。障碍物为圆柱(方柱),摆动尾鳍的平均推力  $C_T$  随  $d$  的增加而减少(增加)。当  $d > 0.7c$ ,摆动尾鳍在振动圆柱尾流中受的力为阻力。综上,摆动尾鳍在障碍物为方柱且  $d=0.8c$  时取得最大推力。

三种振动障碍物型式后摆动尾鳍的平均输入功率系数  $C_p$  和推进效率  $\eta$  如图 9 所示。由图 9(a)可知,障碍物为圆柱且  $0.6c \leq d \leq 0.8c$  时,摆动尾鳍的  $C_p$  为负值,说明摆动尾鳍的输入功率并没有转化为推力,而是在圆柱涡的影响下损失了能量,这与图 8中摆动尾鳍在圆柱尾流中的  $C_T$  为负

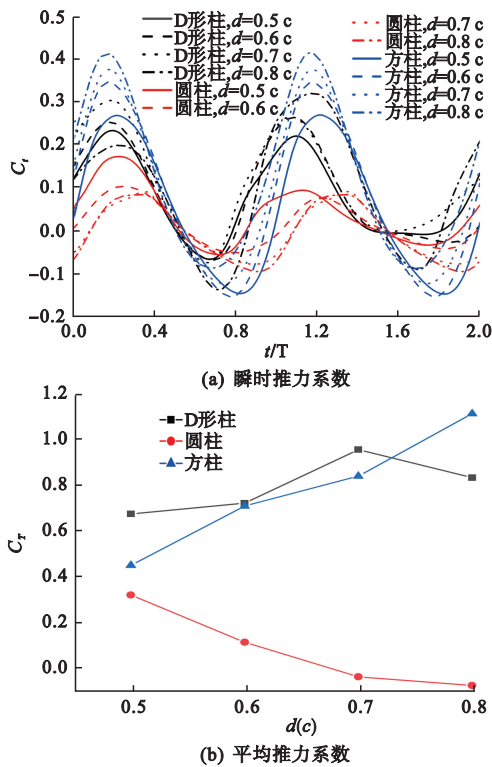


图8 摆动尾鳍瞬时推力系数和平均推力系数  
Fig. 8 Instantaneous thrust coefficient and mean thrust force coefficient of flapping caudal fin

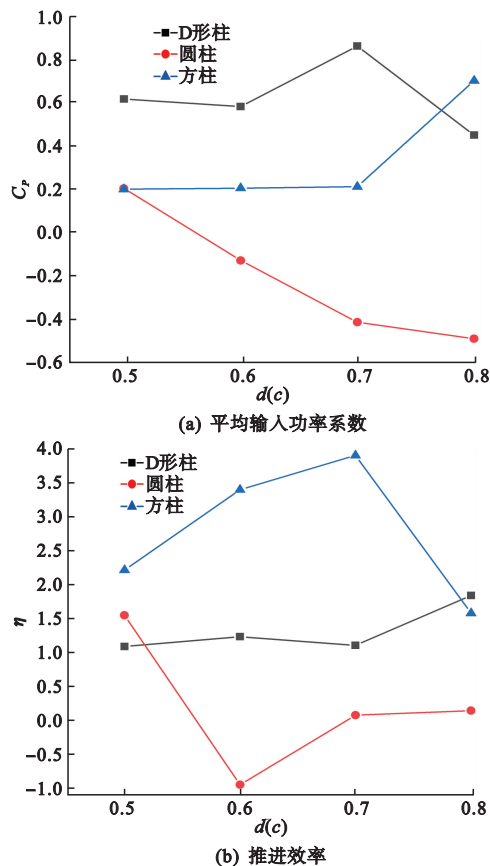


图9 摆动尾鳍的平均输入功率系数和推进效率  
Fig. 9 Input power coefficient and propulsive efficiency of flapping caudal fin

值是相关的。由图 9(b)可知,障碍物为 D 形柱时,摆动尾鳍的  $\eta$  随着  $d$  的增加先增加后减少再增加,最高推进效率为 183.8%;障碍物为圆柱(方柱)时,摆动尾鳍的推进效率随着  $d$  的增加先减少后增加(先增加后减少),最高推进效率为 154.7% (389.1%)。

图 10 给出了三种振动障碍物型式后摆动尾鳍同一时刻( $t=T/2$ )下的压力分布云图以及涡量云图。由图 8 可知, $d=0.8c$  时,摆动尾鳍在振动方柱尾流中的平均推力最大,从图 10(a)可以看出,位于方柱尾流中的摆动尾鳍的前缘下表面附近区域存在一个明显突起的低压区,并且强度较大,正是由于低压的分布,导致其推力比摆动尾鳍在 D 形柱和圆柱尾流中受到的推力更大。另外图 10 (b)显示,此时从方柱上脱落的负涡正与尾鳍前缘涡发生作用,并且随着尾鳍向下运动过程中,此负涡跟尾鳍尾缘涡一同脱落,说明摆动尾鳍除了自身提供的推力外,又可以从方柱涡中吸收能量,提高推力。

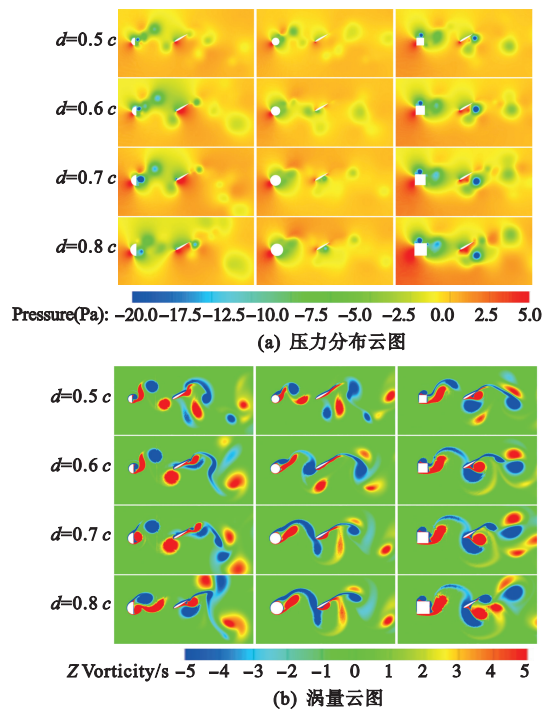


图 10 摆动尾鳍的压力分布云图和涡量云图  
Fig. 10 Pressure contour and vortex contour of flapping caudal fin

### 3.4 来流速度(U)对摆动尾鳍推进性能的影响

为研究来流速度( $U$ )对摆动尾鳍推进性能的影响,选取  $S=5d, h_d=h_f=d, f=0.5$  Hz 进行计算。

图 11 给出了三种振动障碍物型式后方摆动尾鳍在一个运动周期内的瞬时推力系数  $C_t$  和平均推力系数  $C_T$ 。从图 11(a)可知,摆动尾鳍  $C_T$  的变化

特征与 3.1 节变化特征一致,不再叙述。从图 11(b) 可以看出,随着  $U$  的增加,其推力都随之减少,说明障碍物型式对摆动尾鳍的推力影响较小。

三种振动障碍物型式后方摆动尾鳍的平均输入功率系数  $C_p$  和推进效率  $\eta$  如图 12 所示。由图 12(a)可知,随着  $U$  的增加,摆动尾鳍的  $C_p$  变化趋势跟  $C_T$  的相同,不再叙述。由图 12(b)可知,障碍物为 D 形柱和方柱时,摆动尾鳍的  $\eta$  随着  $U$  的增

加而增加,在  $U = 1.5c$  时取得最大值分别为 73.3% 和 89.2%;障碍物为圆柱时,摆动尾鳍的  $\eta$  随着  $S$  的增加是先增加后减少,在  $U = 1.2c$  时取得最大值为 56.3%;综上所述,振动方柱后方摆动尾鳍的推进效率在  $U = 1.5c$  时取得最大值。

图 13 给出了三种振动障碍物型式后摆动尾鳍同一时刻( $t=T/2$ )下的压力分布云图以及涡量云图。从图 13(b)可知, $U=0.5c$  时,在三种振动障

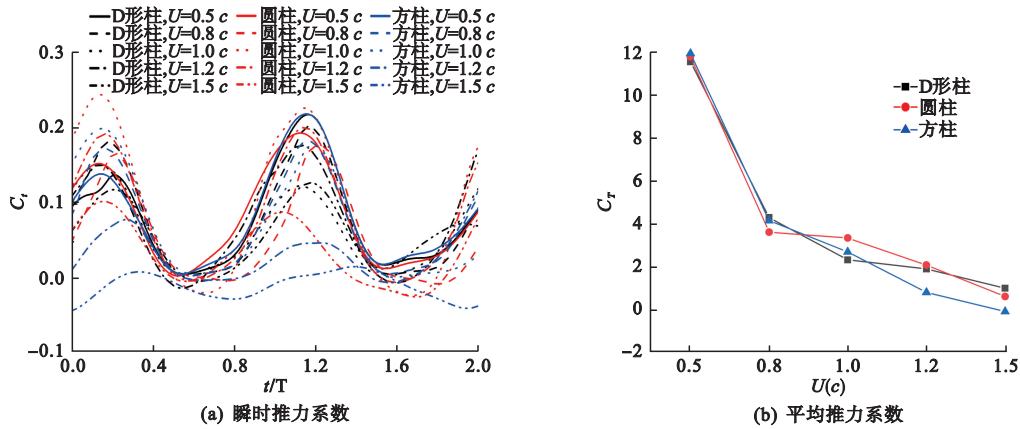


图 11 摆动尾鳍瞬时推力系数和平均推力系数  
Fig. 11 Thrust coefficient and mean thrust force coefficient of flapping caudal fin

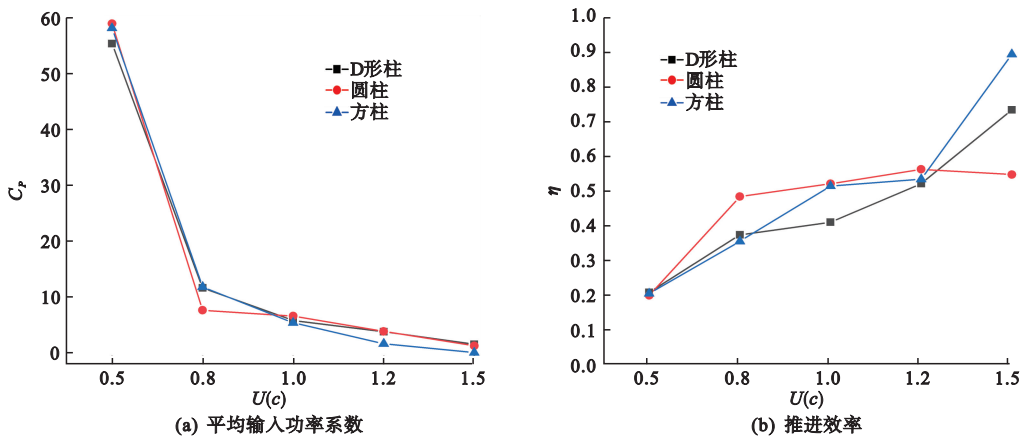


图 12 摆动尾鳍的平均输入功率系数和推进效率  
Fig. 12 Input power coefficient and propulsive efficiency of flapping caudal fin

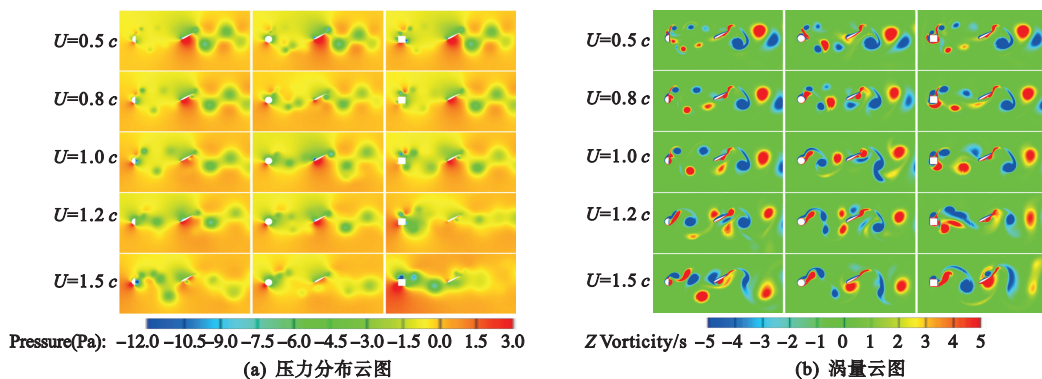


图 13 摆动尾鳍的压力分布云图和涡量云图  
Fig. 13 Pressure contour and vortex contour of flapping caudal fin

碍物型式下,摆动尾鳍尾流中脱落的尾涡强度更高,涡对之间的诱导作用更强,推力也较大。但在对比过程中可以看出,摆动尾鳍在振动方柱尾流中脱落的涡强度更高且更集中,涡对之间的诱导作用更强,其推力产生得也更大,并且也可以从图 13(a)看出,摆动尾鳍两侧分别由高低压覆盖,摆动尾鳍尾缘处的低压区脱落于尾流场中。

## 4 结 论

本文基于 CFD 方法数值计算了摆动尾鳍在 D 形柱、圆柱、方柱的水动力性能,并通过流场压力分布云图以及涡量云图分析了  $S, d, U$  对摆动尾鳍的水动力性能影响,最终得到以下结论。

(1)在相同的控制参数下,与均匀流场中的摆动尾鳍相比,处于复杂流场下的摆动尾鳍可以获得更多的推进力,提高其推进性能。

(2)在固定  $d$  和  $U$  下,随着  $S$  的增加,摆动尾鳍在振动方柱尾流中最大平均推力为 0.97(最大推进效率为 221.0%),远高于摆动尾鳍在振动 D 形柱和圆柱尾流中的 0.67 及 0.38(188.0% 及 213.5%)。

(3)在固定  $S$  和  $U$  下,随着  $d$  的增加,摆动尾鳍在振动方柱尾流中最大平均推力为 1.11(最大推进效率为 389.1%),远高于摆动尾鳍在振动 D 形柱和圆柱尾流中的 0.95 及 0.32(183.8% 及 154.7%)。

(4)在固定  $S$  和  $d$  下,随着  $U$  的增加,摆动尾鳍在振动方柱尾流中最大平均推力为 11.91(最大推进效率为 89.2%),远高于摆动尾鳍在振动 D 形柱和圆柱尾流中的 11.53 及 11.76(73.3% 及 56.3%)。

(5)障碍物为 D 形柱、圆柱以及方柱时,旋向相反的 D 形柱涡、圆柱涡以及方柱涡与尾鳍前缘涡产生挤压作用,提升尾鳍前缘涡的强度。

## 参考文献(References):

[1] Lauder G V, Drucker E G. Morphology and experimental hydrodynamics of fish fin control surfaces[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2004, **29**(3): 556-571.

[2] Anderson J M, Kerrebrock P A. The vorticity control unmanned undersea vehicle (VCUUV): An autonomous robot tuna[A]. Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology[C]. 1999.

[3] Liao J C, Beal D N, Lauder G V, et al. Fish exploiting vortices decrease muscle activity[J]. *Science*, 2003, **302**(5650): 1566-1569.

[4] Liao J C. Neuromuscular control of trout swimming in a vortex street: Implications for energy economy

during the Kármán gait[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2004, **207**(20): 3495-3506.

[5] Liao J C. The role of the lateral line and vision on body kinematics and hydrodynamic preference of rainbow trout in turbulent flow[J]. *Journal of Experimental Biology*, 2006, **209**(20): 4077-4090.

[6] Gopalkrishnan R, Triantafyllou M S, Triantafyllou G S, et al. Active vorticity control in a shear flow using a flapping foil[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1994, **274**: 1-21.

[7] Streitlien K, Triantafyllou M S. Force and moment on a Joukowski profile in the presence of point vortices[J]. *AIAA Journal*, 1995, **33**(4): 603-610.

[8] Anderson J M, Institution W H O, Technology M I O, et al. Vorticity control for efficient propulsion[J]. *Massachusetts Institute of Technology*, 1996. DOI: <http://dx.doi.org/>.

[9] 潘定一. 基于沉浸边界法的鱼游运动水动力学机理研究[D]. 浙江大学, 2011. (PAN Ding-yi. Study on Hydrodynamic Mechanism of Fish Swimming based on Immersed Boundary Method[D]. Zhejiang University, 2011. (in Chinese))

[10] 张 曦, 苏玉民, 王兆立. 振动半圆柱尾流中的二维摆动水翼推进性能研究[J]. *船舶力学*, 2012, **16**(4): 333-341. (ZHANG Xi, SU Yu-min, WANG Zhao-li. Research on the propulsion performance of a two dimensional flapping hydrofoil in the wake of an oscillating semicircular cylinder[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2012, **16**(4): 333-341. (in Chinese))

[11] Yan L, Chang X H, Wang N H, et al. Computational analysis of fluid-structure interaction in case of fish swimming in the vortex street[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2021, **33**(4): 747-762.

[12] Zhu Q, Wolfgang M J, Yue D K P, et al. Three-dimensional flow structures and vorticity control in fish-like swimming[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2002, **468**(1): 1-28.

[13] Yang L, Su Y M. CFD simulation of flow features and vorticity structures in tuna-like swimming[J]. *China Ocean Engineering*, 2011, **25**(1): 73-82.

[14] 冯亿坤, 徐小军, 刘博龙, 等. 前置水翼对摆动翼水动力性能影响机理研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2023, **51**(4): 10-17. (FENG Yi-kun, XU Xiaojun, LIU Bo-long, et al. Study on the influence mechanism of front hydrofoil on the hydrodynamic performance of a flapping fin[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2023, **51**(4): 10-17. (in Chinese))

[15] 李永成, 陈纪军, 闫 朋. 涡流场中波动鱼形体推进特性数值模拟[J]. *船舶与海洋工程*, 2021, **37**(3): 23-28, 86. (LI Yong-cheng, CHEN Ji-jun, YAN Peng. Numerical investigation on propulsive performance of travelling wavy foil in the vortex field[J]. *Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2021, **37**(3): 23-28, 86. (in Chinese))

[16] 王凯辉, 纪茹莹, 刘哲恒, 等. 鲫鱼在圆柱绕流尾迹中的卡门步态[J]. *生态学杂志*, 2019, **38**(12): 3771-3778. (WANG Kai-hui, JI Ru-xuan, LIU Zhe-heng, et al. Kármán gait of a *Carassius auratus* swimming in



- the wake of a circle cylinder[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, **38**(12): 3771-3778. (in Chinese))
- [17] 罗金梅, 石小涛, 陶宇, 等. 障碍物对鳊幼鱼游泳行为的影响[J]. *生态学杂志*, 2023, **42**(2): 352-360. (LUO Jin-mei, SHI Xiao-tao, TAO-Yu, et al. Effect of obstacles on swimming kinematics in juvenile big-head carp[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, **42**(2): 352-360. (in Chinese))
- [18] 石小涛, 姜泽文, 涂志英, 等. 障碍物对鲢幼鱼游泳动力学的的影响[J]. *水产学报*, 2021, **45**(8): 1406-1414. (SHI Xiao-tao, JIANG Ze-wen, TU Zhi-ying, et al. Effect of an obstacle on swimming kinematics in juvenile silver carp, *Hypophthalmichthys molitrix*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2021, **45**(8): 1406-1414. (in Chinese))
- [19] Guay J C, Boisclair D, Rioux D, et al. Development and validation of numerical habitat models for juveniles of Atlantic salmon[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2000, **57**(10): 2065-2075.
- [20] Coutant C C, Whitney R R. Fish behavior in relation to passage through hydropower turbines: A Review[J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2000, **129**(2): 351-380.
- [21] Kemp P S, Williams J G. Response of migrating Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) smolts to in-stream structure associated with culverts[J]. *River Research and Applications*, 2008, **24**(5): 571-579.
- [22] Franklin A E, Haro A, Castro-santos T, et al. Evaluation of nature-like and technical fishways for the passage of alewives at two coastal streams in new England[J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 2012, **141**(3): 624-637.
- [23] 谭均军, 高柱, 戴会超, 等. 竖缝式鱼道水力特性与鱼类运动特性相关性分析[J]. *水利学报*, 2017, **48**(8): 924-932, 944. (TAN Jun-jun, GAO Zhu, DAI Hui-chao et al. The correlation analysis between hydraulic characteristics of vertical slot fishway and fish movement characteristics[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, **48**(8): 924-932, 944. (in Chinese))
- [24] 杨国党, 胡晓, 石小涛, 等. 草鱼幼鱼周身压力与曲率相关性数值模拟研究[J]. *计算力学学报*, 2022, **39**(5): 623-632. (YANG Guo-dang, HU Xiao, SHI Xiao-tao, et al. Numerical simulation on the correlation between body pressure and curvature of juvenile *Ctenopharyngodon idellus* [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2022, **39**(5): 623-632. (in Chinese))
- [25] Read D A, Hover F S, Triantafyllou M S. Forces on oscillating foils for propulsion and maneuvering[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2003, **17**(1): 163-183.

## Study on the influence of vibration obstacle type on the hydrodynamic performance of flapping caudal fin

SHU Jiang-peng<sup>1</sup>, YANG Wen-jun<sup>2</sup>, SHI Xiao-tao<sup>1</sup>, CHEN Xiao-long<sup>1</sup>,  
HU Xiao<sup>1</sup>, TAN Jun-jun<sup>1</sup>, ZHANG Li-sheng<sup>\* 1</sup>

(1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** Based on computational fluid dynamics (CFD) methods combined with Fluent's dynamic mesh technology, the hydrodynamic performance of a flapping caudal fin in its wake fields generated by different vibration obstacles was studied. The average thrust coefficient, power consumption and propulsion efficiency of the flapping caudal fin were obtained by changing the distance between the leading edge of the caudal fin and the center point of the obstacle ( $S$ ), the size of the obstacle ( $d$ ) and the incoming flow velocity ( $U$ ), and the analysis was conducted based on the pressure distribution contour and vortex contour of the flow field. The calculation results show that the presence of obstacles can improve the propulsion performance of the flapping caudal fin. Under fixed  $S$ ,  $d$  and  $U$ , the maximum average thrust and maximum propulsion efficiency of the flapping caudal fin in the wakes of a vibrating square cylinder were higher than its maximum average thrust and maximum efficiency in the wakes of a vibrating D-shaped cylinder and cylinder wake. When the obstacles are of a D-shaped cylinder, cylinder and square cylinder, the vortex of the opposite D-shaped cylinder, cylindrical vortex and square cylinder vortex and the leading edge vortex of the caudal fin produce an extrusion effect to increase the strength of the leading edge vortex of the caudal fin.

**Key words:** flapping caudal fin; vibration obstacle type; dynamic mesh; hydrodynamics performance; numerical simulation