

# 自适应攻角摆翼推进的水动力性能分析

潘小云, 周军伟, 李明阳, 张国政

(哈尔滨工业大学(威海), 威海, 264200, Email:17862702201@163.com)

**摘要:** 本文采用数值方法研究了自适应攻角摆翼在不同水平摆幅、摆动频率下的推力、效率特性, 并对流场特征进行了分析。采用二维平板水翼, 并在水翼前缘位置施加一个弹性力来模拟弹簧以实现自适应攻角。对不同水平摆幅情况下的分析发现, 水平摆幅越大, 峰值效率越高, 最高可达 76.89%。对不同摆动频率情况下的分析发现, 随着水翼摆动频率的增加, 峰值推进效率也在增加。对比水翼不同水平摆幅下峰值效率和较低效率工作点的涡量场发现, 水翼推进效率与其尾涡形状以及尾涡集散特性有关, 尾迹涡越分散且形状越狭长, 水翼的推进效率就越高。

**关键词:** 自适应攻角水翼; 水动力性能; 仿生推进; 涡量场

## 1 引言

摆翼推进从生物学角度融合了鸟类飞行和鱼类游动两种运动特性, 具有灵活性高、噪声低<sup>[1]</sup>、涡流利用率高、姿态控制独特等优点<sup>[2]</sup>。若能在生物原型基础上研究前肢水翼摆翼推进的运动机理和操纵方式, 对于研究水下机器人新型驱动方式, 降低噪声, 提高机动性和隐蔽性<sup>[3]</sup>, 具有重要的研究意义<sup>[4]</sup>。

摆动水翼很早就有相关研究, 其中一些水动力方面的研究例如, 2003 年, Read<sup>[5]</sup>等设计了水翼主动摆动装置并进行了实验的模拟, 分析了水翼的主动摆动和升沉运动对水翼水动力性能的影响; 2005 年, 在 MIT 的拖曳水池 Schouveiler 等<sup>[6]</sup>对水翼升沉运动和主动摆动运动进行了实验, 得出了最佳推进效率时的斯特哈尔数范围; 2014 年, Xie 等<sup>[7]</sup>采用二维的水翼数值计算模型, 研究了水翼俯仰振幅和摆动频率对水翼能量提取效率的影响。发现摆动频率和俯仰振幅适当增大可以提高能量的获取效率。同时, Xie 等还分析了水翼运动参数对水翼前缘涡的影响; 2016 年, Andersen 等<sup>[8]</sup>通过对比水翼主动摆动和主动垂荡两种运动模式下的流场, 得出两种运动模式下水翼尾流场相似的结论。

但是这些研究者都是先预设了水翼最大攻角后做的一系列的性能分析, 对于自适应攻角水翼的水动力性能研究很少。本文所研究的自适应攻角水翼机构是单自由度系统, 只需控制水翼的升沉运动, 与之相适应的水翼首摇通过施加的扭转弹簧实现运动且扭转弹簧可

以在水翼运动过程中为水翼提供恢复力。水翼采用自适应攻角方式产生推力，使得水翼在运动过程中可根据所受的力时刻灵活改变水翼推进方向，方便的调整摆幅和摆动频率，因而具有广阔的应用前景。本文研究了自适应攻角水翼的水动力性能，鉴于几何相似和动力相似，分别对水平摆幅和摆动频率做了无量纲处理。

## 2 数值计算模型

### 2.1 参数定义

水翼进速系数、平均推力系数、推进效率、频率比分别定义如下，相关变量见表 1 与表 2。

$$J = \frac{V_A}{fH} K_T = \frac{\overline{F_x}}{\rho f^2 H^2 C B} \eta = \frac{\overline{F_x} \cdot V_A}{\int_0^T (F_y \cdot V_y + M_z \cdot \omega_z) dt} \tilde{f} = \frac{2\pi f}{\sqrt{K/I}}$$

表 1 水翼几何参数

$V_A$	水翼与来流的相对速度	$f$	水翼摆动频率	$H$	$H=2Y$
$B$	展长	$C$	弦长	$Y$	水平摆幅
$t$	水翼厚度	$T$	水翼运动周期	$\rho$	流体密度

表 2 水翼性能参数

$\overline{F_x}$	平均推力	$V_y$	水翼沿 $y$ 方向的瞬时速度分量	$K$	弹簧扭转刚度系数
$F_y$	侧向力	$I$	水翼转动惯量	$M_z$	绕 $Z$ 轴的扭矩
$F_x$	瞬时推力	$\omega_z$	水翼绕 $Z$ 轴的角速度		

### 2.2 几何模型

采用弦长  $C=0.2\text{m}$ ， $C/t=10$  的二维平板水翼模型，设置流场区域为边长  $50C \times 30C$  的长方形区域，采用六面体非结构网格，水翼表面  $Y+$  值取为 1。对水翼尾迹区域进行了网格的加密。水翼模型及其网格划分情况见图 1。

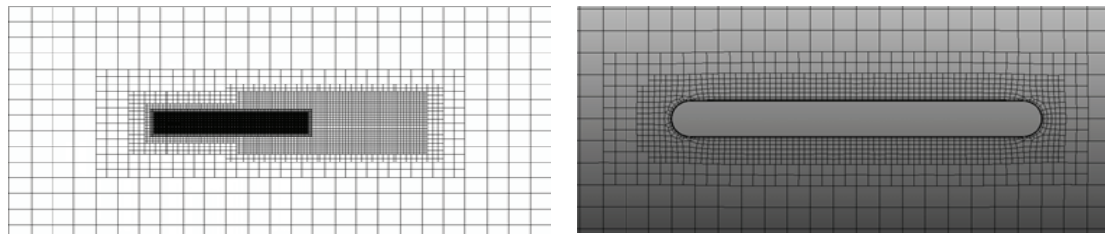


图 1 计算网格划分

计算采用 SST  $k-\omega$  湍流模型。水翼表面设为无滑移壁面条件，计算域：上下侧边界及

后方边界均设置为零压力梯度条件，水翼运动前方边界设为速度远场条件，如图 2 所示。

以静态水翼 NACA0012 在不同攻角下的升力系数为验证对象，结果见图 3 所示。水翼的升力系数与公开的实验数据在 8 度攻角以下基本一致<sup>[9]</sup>。

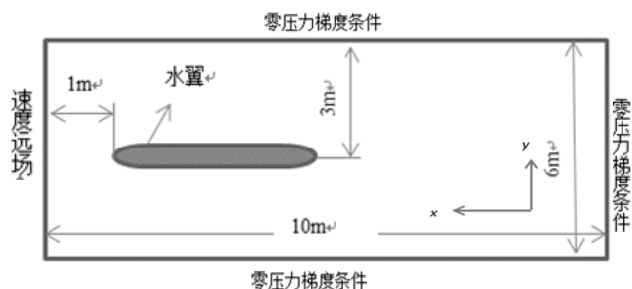


图 2 计算域边界条件示意图

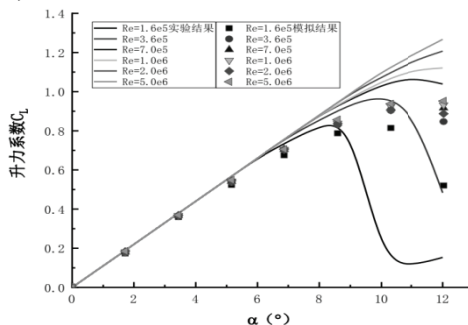


图 3 水翼升力系数模拟结果与实验结果

### 3 结果与分析

#### 3.1 水平摆幅对推进性能的影响

改变水平摆幅大小，得到了不同水平摆幅比  $Y/C$  下的摆翼性能，如图 4 和图 5 所示，分别为水翼推进效率随进速系数的变化曲线，以及水翼的平均推力系数随进速系数的变化曲线，此时水翼摆动频率比为 0.042。不同水平摆幅比  $Y/C$  下的最优推进效率和推力系数见表 3。

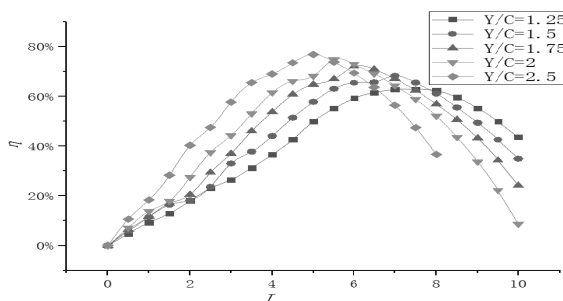


图 4 推进效率  $\eta$  随进速系数  $J$  的变化曲线

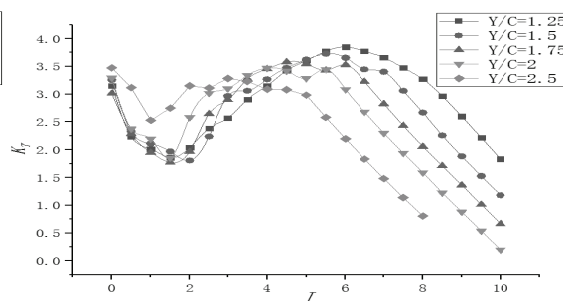


图 5 平均推力系数  $K_T$  随进速系数  $J$  的变化曲线

表 3 不同的  $Y/C$  下的最优推进效率  $\eta$

$Y/C$	最优推进效率 $\eta$	推力系数 $K_T$
1.25	62.86%	3.47
1.5	68.25%	3.40
1.75	72.09%	3.53
2	74.77%	3.45
2.5	76.89%	2.98

从图 4 可以看出，水平摆幅的大小直接影响到水翼的推进效率，推进效率峰值随着水平摆幅比的增大而增大。当  $Y/C=2.5$  时，推进效率最高可达 76.89%。

随着进速系数的逐渐增加，水翼的推进效率整体趋势均为先增大后减小，且峰值效率出现的位置集中在  $J=5$  附近。当进速系数较低时， $Y/C$  较大的水翼取得的效率较大且对应的平均推力系数也较大。由于推进器通常工作在特性曲线的左边，因此可以通过增大水平摆幅来适当提高水翼的推进效率和平均推力。

### 3.2 摆动频率对推进性能的影响

根据前面的分析，选取水翼水平摆幅比  $Y/C=2.5$  进行分析。水翼在不同频率比下的推进效率和平均推力系数如图 6 和图 7 所示。最大推进效率和所对应的平均推力系数见表 4。

如图 6 所示，水翼摆动频率对推进效率有较大影响。推进效率的峰值随着水翼摆动频率的增大而增大。水翼摆动频率越高，可以在相对较低的进速系数下取得较大的推进效率。由图 7 可得，水翼摆动频率越高，在较低的进速系数下得到的平均推力系数比较大。

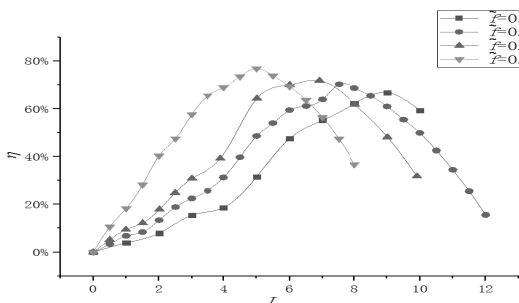


图 6 推进效率  $\eta$  随进速系数  $J$  的变化曲线

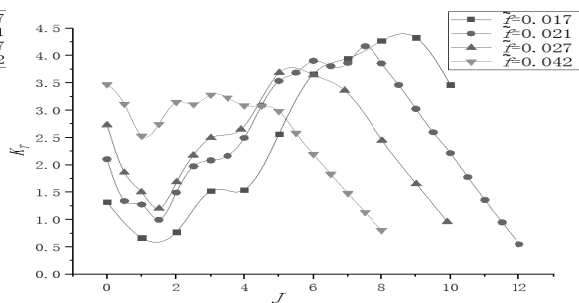


图 7 平均推力系数  $K_T$  随进速系数  $J$  的变化曲线

表 4 不同频率比下的水翼推进性能

$\tilde{f}$	最大推进效率 $\eta$	推力系数 $K_T$
0.017	66.78%	4.33
0.021	70.26%	4.17
0.027	71.81%	3.36
0.042	76.89%	2.98

### 3.3 水翼尾涡对推进性能的影响

为了探究水翼在运动过程中尾涡的变化对于摆动水翼的推进性能的影响，初选频率比为 0.042，对  $Y/C=1.75$ 、 $Y/C=2$ 、 $Y/C=2.5$  三种情况下选取最高效率点和  $J=2$  的较低效率点进行涡量场的对比分析，涡量云图见图 8。

对比  $J=2$  下不同水平摆幅的涡量图，发现随着  $Y/C$  的增大，尾迹涡越分散，水翼的推进效率越高。说明水翼水平摆幅的增大会影响尾涡的集散特性，且尾涡越分散，推进性能越好；对比同一水平摆幅下的高低效率点涡量图，发现在低效率点水翼尾涡脱落均呈现出反卡门涡街形式，最高效率点的水翼尾涡形状明显变得狭长，均呈流线型。通过对比说明尾迹涡的狭长特征对水翼推进性能的提高有明显的影。综合以上分析，调整水翼的运动参数以期获得最优推进效率从尾迹涡分析的角度看实质上是通过控制水翼尾迹涡的形状特

征和集散程度来实现。

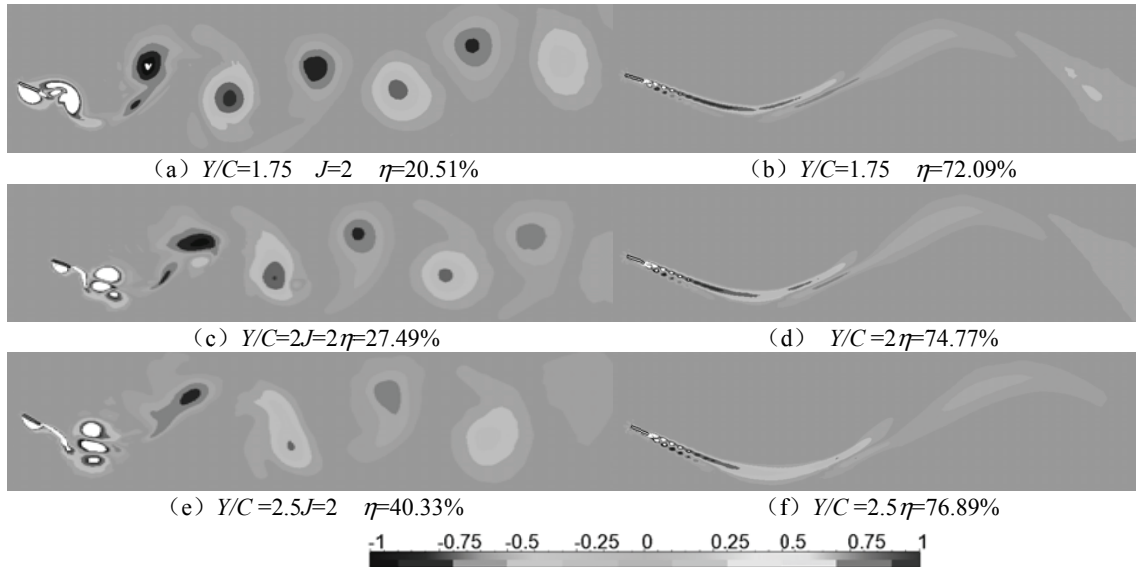


图8 涡量图

## 4 结论

本文以自适应攻角水翼为研究对象，对水翼在不同工况下的水动力性能进行了计算分析，得到如下主要结论。

(1) 利用 FINE/Marine 软件实现了对自适应攻角水翼在不同工况下的水动力模拟，弹性网格技术能够很好的适应翼型的大幅度运动，采用在水翼上施加弹性力来模拟弹簧是可行的，并能够使水翼实现自适应攻角工作，获得推力。

(2) 通过分析计算结果得到水平摆幅越大，推进效率的峰值也越大，水翼推进效率最高可达 76.89%。在低进速区间，大的水平摆幅的水翼平均推力系数也较大。

(3) 水翼摆动频率越高，最优推进效率也越大。高的摆动频率使得水翼可以在相对较低的进速系数下得到较大的推进效率和推力。

(4) 通过分析涡量图可得：水平摆幅主要控制水翼尾迹涡集散特性。水平摆幅越大，尾迹涡越分散，推进效率越高；尾迹涡形状越狭长，推进效率也越高。

本文对自适应攻角摆翼的水动力性能做了初步的研究。摆动频率和摆动幅度的范围选取的不够大，一些参数的选取还有待于进一步深入探讨。除了本文所涉及的水翼水平摆幅和运动频率外，影响自适应攻角摆翼水动力性能的参数还有水翼旋转轴、水翼形状、摆动攻角以及弹性系数等。课题组接下来会针对这几个参数对自适应攻角摆翼水动力性能的影响

响做深入研究并将参数无量纲化，为将来自适应攻角水翼在工程应用中提供技术支持。

## 参 考 文 献

- 1 .HYDRODYNAMICS OF A FLAPPING FOIL IN THE WAKE OF A D-SECTION CYLINDER[J].Journal of Hydrodynamics,2011,23(04):422-430.
- 2 张国政.二维刚性翼摆动推进的水动力分析与实验研究[D].哈尔滨工业大学,2018
- 3 张晓庆,王志东,张振山.二维摆动水翼仿生推进水动力性能研究[J].水动力学研究与进展(A辑),2006(05):632-639.
- 4 刘军考,陈在礼,陈维山,王力刚.水下机器人新型仿鱼鳍推进器[J].机器人,2000,22(5):427-432.
- 5 D.A. Read,F.S. Hover,M.S. Triantafyllou. Forces on oscillating foils for propulsion and maneuvering[J]. Journal of Fluids and Structures,2003,17(1).
- 6 L. Schouveiler,F.S. Hover,M.S. Triantafyllou. Performance of flapping foil propulsion[J]. Journal of Fluids and Structures,2005,20(7).
- 7 YonghuiXie,KunLu,Di Zhang. Investigation on energy extraction performance of an oscillating foil with modified flapping motion[J]. Renewable Energy,2014,63.
- 8 A. Andersen,T. Bohr,T. Schnipper,J. H. Walther. Wake structure and thrust generation of a flapping foil in two-dimensional flow[J]. Journal of Fluid Mechanics,2016,812.
- 9 Shi G, Zhenpeng L I. Effects of Reynolds Number on Low Speed Symmetrical Airfoil Aerodynamic Performance[J]. New Technology & New Process, 2013.

## Hydrodynamic performance analysis of adaptive angle of attack swing propulsion

PAN Xiao-yun, ZHOU Jun-wei, LI Ming-yang, ZHANG Guo-zheng

(Harbin Institute of Technology, Weihai, Weihai, 264200, Email: 17862702201@163.com)

**Abstract:** In this paper, the thrust and efficiency characteristics of the adaptive angle of attack pendulum wing at different horizontal swings and swing frequencies are studied numerically, and the flow field characteristics are analyzed. A two-dimensional flat hydrofoil is used and an elastic force is applied at the leading edge of the hydrofoil to simulate the spring to achieve an adaptive angle of attack. The analysis of different horizontal swings shows that the higher the horizontal swing is, the higher the peak efficiency is, and the maximum is 76.89%. The analysis of different swing frequencies shows that the peak propulsion efficiency increases with the increase of the swing frequency of the hydrofoil. Comparing the vorticity fields of peak efficiency and low efficiency working points under different horizontal swings, it is found that the propulsion efficiency of hydrofoil is related to its wake shape and wake distribution characteristics. The more dispersed and narrow the wake vortex is, the higher the propulsion efficiency of hydrofoil is.

**Key words:** adaptive angle of attack hydrofoil; hydrodynamic performance; bionic propulsion; vorticity field