

DOI: 10.13973/j.cnki.robot.2017.0333

## 2 自由度振荡水翼推进性能分析及实验研究

徐建安, 孔德慧, 高新

(哈尔滨工程大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 为了研究仿生水翼推进性能, 设计了一种 2 自由度振荡水翼推进装置. 实现了基于升力/阻力模式的 2 种振荡水翼推进方式. 研制了振荡水翼推进性能实验平台, 在循环水池环境下完成了不同参数耦合情况下振荡水翼推进性能实验. 利用 6 轴力传感器测量水翼振荡时产生的推力/升力, 并将实验结果与数值模拟结果对比, 分析不同参数对推进性能的影响. 实验结果表明, 在升力推进模式下, 增加拍旋运动幅值和振荡频率可以提高平均推力; 随着位旋运动幅值的增加, 平均推力呈现先增大后减小的趋势; 随着来流速度的增大, 平均推力逐渐减小. 在阻力推进模式下, 增加拍旋运动幅值和振荡频率均可提高平均推力.

**关键词:** 振荡水翼; 仿生推进; 耦合运动; 数值模拟; 实验测试

中图分类号: T24

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2017)-03-0333-07

### Performance Analysis and Experimental Study on 2-Degree-of-Freedom Oscillating Hydrofoil Propulsion

XU Jian'an, KONG Dehui, GAO Xin

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** In order to study the bionic hydrofoil propulsion performance, a 2-degree-of-freedom oscillating hydrofoil propulsion device is designed. The lift force propulsion mode and the drag force propulsion mode are realized. An experiment platform of oscillating hydrofoil propulsion performance is built and a series of experiments are performed with different parameters coupling in the circulating water tunnel. In order to analyze the influence of different parameters on the propulsion performance, thrust and lift forces generated by oscillating hydrofoil are measured with a 6-axis force sensor, and compared with numerical simulation results. Experimental results show that the average thrust can be raised by increasing the heaving amplitude and oscillating frequency under the lift force propulsion mode. With the increase of pitching amplitude, the average thrust increases at first and then decreases. With the increase of oncoming flow speed, the average thrust decreases. Under the drag propulsion mode, the average thrust can be raised by increasing the heaving amplitude or oscillating frequency.

**Keywords:** oscillating hydrofoil; bionic propulsion; coupling motion; numerical simulation; experimental test

## 1 引言 (Introduction)

在漫长的进化过程中, 海龟、企鹅等水生动物形成了独特的水翼推进方式, 它们在游动过程中, 通过水翼的周期性挥动, 形成了特定的振荡规律, 从而产生推动身体运动的推力和升力. 水翼具有基于升力和基于阻力 2 种推进方式, 可以实现水生动物在水中的 6 自由度运动<sup>[1-2]</sup>. 对于升力推进模式, 通过水翼上下往复挥拍产生方向正交的推力和升力, 每个周期的运动包括下拍、俯旋、上挥和仰旋 4 个阶段, 同时水翼在振荡过程中不断改变前缘的上翘与下沉姿态以调节击水攻角, 从而获得不同的升阻比, 使得身体获得前进的推力<sup>[3]</sup>. 对于阻力推

进模式, 在推力产生阶段, 水翼翼面垂直于本体运动方向向后划水, 水对水翼运动的阻力作为推力, 推进本体运动; 回复阶段, 水翼翼面转换方向, 与本体运动方向平行, 以减少运动回复阻力. 振荡水翼推进方式作为水中生物主要的推进方式, 具有推进效率高、灵活性好、噪声小等优点, 可以很好地适应水中生物游动过程中的各种复杂情况<sup>[4]</sup>.

对于振荡水翼推进性能的研究, 主要从理论计算、数值仿真分析和实验研究等 3 个方面展开. 刘晓白等通过对海龟生物实体进行观察, 对海龟前肢水翼推进和水翼骨骼肌肉力学特性进行了详细的分析, 获取了海龟形态学和运动学参数, 深入研究了海龟柔性水翼在仿海龟水翼推进技术中的重要地

位<sup>[5]</sup>. Blake 运用叶素理论对天使鱼的胸鳍在阻力模式下的推进力进行分析, 同时将附加质量力的作用考虑其中, 对胸鳍在 1 个周期内需要的能量以及推进效率进行了研究<sup>[6]</sup>. Chiu 搭建了仿鱼鳍 AUV (自治水下机器人) 实验平台, 在建立鱼鳍动力学模型的基础上, 利用叶素理论对胸鳍做前后拍动和翻转 2 自由度运动时的推力和升力进行了水动力分析, 并将分析结果与实验结果做了对比, 证明了叶素理论在仿胸鳍推进水动力理论分析中的正确性<sup>[7]</sup>.

Liu 等通过求解 N-S 方程对天蛾悬停状态和飞行状态时翼的 3 维流场进行了分析计算<sup>[8]</sup>. Anderson 等对斯特劳哈尔数 ( $St$ ) 在 0.25 ~ 0.4 范围内, 最大攻角在 15° ~ 25° 之间的振荡水翼推进性能进行了实验测试, 利用数字粒子影像测速技术 (digital particle image velocimetry, DPIV) 对振荡水翼在流场中运动时的流场速度矢量进行测量和显示<sup>[9]</sup>. Polidoro 等利用 6 轴力传感器对振荡水翼在不同展弦比时产生的推力进行测量, 分析了不同展弦比对振荡水翼推进性能的影响, 结果表明振荡水翼在展弦比为 4 时可以获得最佳的推力, 为振荡水翼推进装置的研制提供了重要的参考<sup>[10]</sup>.

本文在分析振荡水翼推进机理的基础上, 设计了一种 2 自由度振荡水翼推进装置, 利用流体数值仿真软件对振荡水翼推进性能进行了数值仿真分析, 研制了 2 自由度振荡水翼实验平台, 在循环水槽环境下开展了振荡水翼推进性能实验研究, 分析了不同来流速度、拍旋运动幅值、位旋运动幅值以及振荡频率对振荡水翼推进性能的影响, 并对振荡水翼推进性能的实验结果和数值仿真结果进行了对比分析.

## 2 振荡水翼推进机理 (Propulsion mechanism of the oscillating hydrofoil)

### 2.1 水翼运动规律分析

通过观察海龟在水中游动时水翼的运动规律可知, 水翼运动分为升力推进模式和阻力推进模式. 海龟正常游动时, 水翼运动在升力推进模式下, 当海龟在静止状态下急速上浮或下潜时, 水翼一般在阻力推进模式下.

当振荡水翼基于升力运动模式推进时, 振荡水翼的运动由拍旋运动和位旋运动耦合而成. 拍旋运动是以振荡水翼装置中轴线为转轴, 水翼翼片绕该轴旋转运动, 如图 1(a) 所示; 位旋运动是以水翼翼片为旋转轴, 水翼翼片绕该轴旋转运动, 如图 1(b)

所示.  $X-Y-Z$  为惯性坐标系,  $x-y-z$  为随体坐标系,  $x$  轴为振荡水翼装置中轴线,  $y$  轴为水翼翼片轴, 来流方向为沿  $X$  轴方向. 水翼在该模式下运动时, 产生的推力与来流方向一致, 产生的升力与  $z$  轴方向平行.

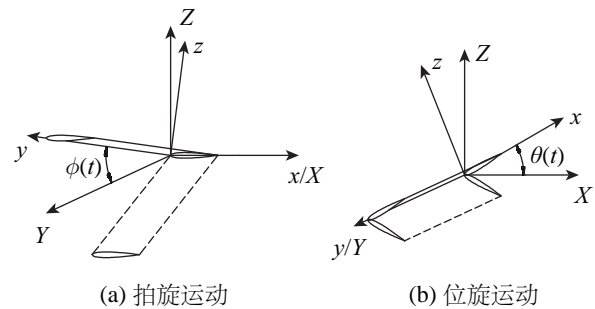


图 1 升力模式下振荡水翼运动描述

Fig.1 Description of oscillating hydrofoil motion in lift force propulsion mode

定义水翼拍旋运动和位旋运动分别为<sup>[11]</sup>:

$$\phi(t) = \phi_0 \sin(\omega t) + \phi_{\text{bias}} \quad (1)$$

$$\theta(t) = \theta_0 \sin(\omega t + \psi) + \theta_{\text{bias}} \quad (2)$$

式中,  $\phi_0$  为拍旋运动幅值,  $\theta_0$  为位旋运动幅值,  $\omega$  为振荡频率,  $\phi_{\text{bias}}$  为拍旋运动初始偏角,  $\theta_{\text{bias}}$  为位旋运动初始偏角,  $\psi$  为拍旋运动和位旋运动间相位差,  $t$  为时间. 本文中  $\theta_{\text{bias}}$  和  $\phi_{\text{bias}}$  取为 0,  $\psi$  取为 90°.

当振荡水翼基于阻力运动模式推进时, 振荡水翼的运动分为击水阶段和恢复阶段. 击水阶段是水翼翼面与水面平行, 翼翼片绕  $x$  轴旋转拍击水产生推力, 如图 2(a) 所示. 恢复阶段是水翼翼面与水面垂直, 以最小阻力回到击水阶段初始位置, 准备下一次击水, 如图 2(b) 所示. 水翼在该模式下运动时产生的推力与  $z$  轴方向平行.

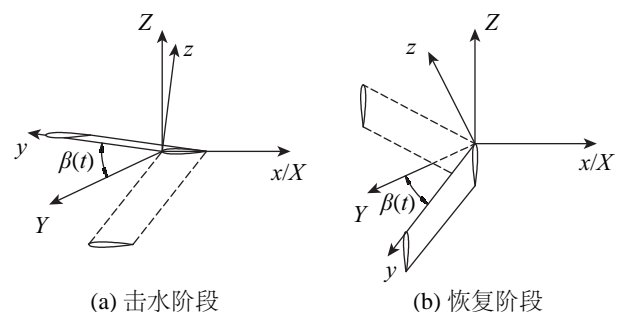


图 2 阻力模式下振荡水翼运动描述

Fig.2 Description of oscillating hydrofoil motion in drag force propulsion mode

定义阻力运动模式下水翼运动规律为

$$\beta(t) = \beta_0 \cos(\omega t) \quad (3)$$

式 (3) 中,  $\beta_0$  为水翼击水阶段运动幅值. 在  $nT$  ( $n = 0, 1, 3, 5, 7, \dots$ ) 时刻, 水翼运动进入击水阶段, 产生推力. 在  $0.5nT$  ( $n = 1, 3, 5, 7, \dots$ ) 时刻, 水翼绕位旋轴转动  $90^\circ$ , 水翼翼面由与水面平行变为与水面垂直, 此时水翼运动进入恢复阶段. 上述 2 个阶段交替运行, 从而实现基于阻力运动模式的水翼推进.

### 2.2 振荡水翼推进性能影响参数

影响振荡水翼推进性能的参数有拍旋/位旋运动幅值及初始偏角、振荡频率、来流速度、水翼翼型等. 本文主要探讨拍旋/位旋运动幅值、振荡频率和来流速度对振荡水翼在 2 种运动模式下的推力/升力的影响, 同时引入攻角这一概念来描述水翼在不同振荡频率和位旋运动幅值下的运动状态. 拍旋/位旋耦合运动下的水翼攻角沿着展长方向是变化的, 在振荡水翼展向某一位置的攻角与升沉/俯仰运动的攻角是一致的, 水翼展向某一位置攻角如图 3 所示,  $\theta(t)$  为水翼位旋角度,  $\alpha(t)$  为水翼攻角,  $\Phi(t)$  为水翼升沉速度与来流速度的合成速度与水流速度的夹角. 本文对距离水翼底端 0.7 倍展长处攻角变化进行研究, 这个位置接近水翼水动力中心, 用  $r_{0.7}$  表示该位置<sup>[10]</sup>, 定义  $r_{0.7}$  为

$$r_{0.7} = r_0 + 0.7s \quad (4)$$

式中,  $r_0$  为水翼根部与拍旋运动轴线的距离,  $s$  为水翼展长.

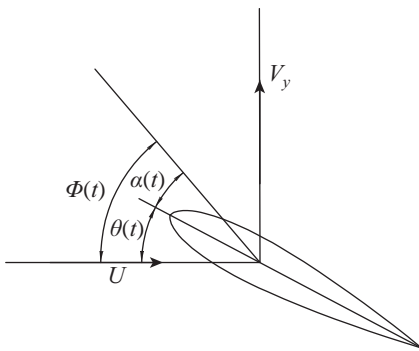


图 3 水翼展向某一位置攻角

Fig.3 Angle of attack at a span location

定义攻角为

$$\alpha(t) = \arctan \frac{\omega r_{0.7} \phi_0 \cos(\omega t)}{U} - \theta_0 \cos(\omega t) \quad (5)$$

定义无量纲量  $Sr$  数:

$$Sr = \frac{2r_{0.7}\phi_0 f}{U} \quad (6)$$

$Sr$  数描述了机器人本体运动速度与水翼振荡速度的相对影响关系, 同时也描述了振荡水翼在推进过程中的尾涡动力学特征以及尾涡脱落特性<sup>[12-13]</sup>.

### 3 振荡水翼实验平台设计 (Design of the oscillating hydrofoil experiment platform)

基于振荡水翼运动规律和推进机理设计的 2 自由度振荡水翼推进装置如图 4 所示. 该装置包括拍旋运动单元和位旋运动单元, 对于拍旋运动单元, 拍旋运动电机固定在 C 形支架上, 驱动位旋运动单元转动, 利用电位计检测拍旋轴旋转角度. 对于位旋运动单元, 通过位旋运动电机经过锥齿轮副驱动水翼, 实现位旋运动, 利用电位计检测位旋轴转动角度. 水翼与位旋轴连接, 从而实现振荡水翼的拍旋/位旋耦合运动.

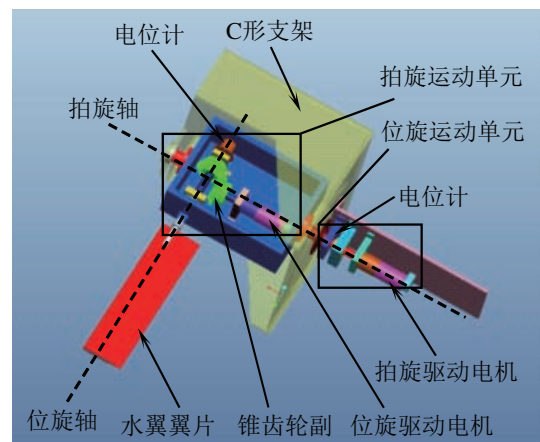


图 4 推进装置 3 维模型

Fig.4 3-dimensional model of the propulsion device

为检测振荡水翼运动时产生的推力、升力和阻力, 在振荡水翼推进装置与固定板之间安装有 6 轴力传感器, 实现振荡水翼运动时的推力、升力和阻力实时检测.

### 4 振荡水翼推进性能数值分析 (Numerical analysis on the oscillating hydrofoil propulsion)

#### 4.1 模型建立与网格划分

为了使流场中的流体能充分流动, 并综合考虑收敛时间问题, 将流场区域设定为  $8\text{ m} \times 8\text{ m} \times 12\text{ m}$  的长方体. 本文采用刚性水翼, 为了提高网格划分质量和计算精度, 采用动网格方式, 中间的球形区域与翼壁面固连在一起, 球形区域与振荡水翼同步运动. 采用尺寸函数对翼型附近的网格进行细化, 逐渐过渡到稀疏网格, 采用尺寸函数有利于减少数值抖动, 捕获有利信息. 球形区域半径为  $2\text{ m}$ , 相对翼的体积足够大, 保证了交界面内外参数的稳定传递. 网格划分方式选择四面体/混合划分方式.

## 4.2 边界条件选取

来流速度方向沿  $X$  轴方向, 设定计算区域的入口为速度入口边界条件, 区域出口设定为压力出口边界条件. 水翼翼面以及长方体其他面定义为壁面条件. 球形动区域与长方体交界面处设定为交界面边界条件, 拍动翼面和球形区域运动规律由用户定义函数 (UDF) 给出. 模型建立与网格划分结果如图 5 所示.

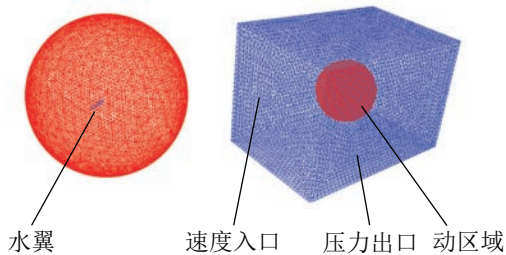


图 5 模型建立与网格划分

Fig.5 Model establishment and mesh generation

## 4.3 计算模型选取

流体仿真软件 Fluent 提供了基于压力的求解器和基于密度法的求解器, 本文采用基于压力的求解器方式. 基于压力的求解器增加了耦合算法, 可以自由地在分离求解和耦合求解之间转换, 适合于低速不可压缩流场的求解.

## 4.4 湍流模型选取

本文选取重组化群模型 RNG  $k-\epsilon$ , 该模型针对标准  $k-\epsilon$  模型的失真情况进行了修正, 通过修正湍流黏度, 克服了计算量大、收敛性差等问题, 提高了计算精度.

## 4.5 动网格参数设定

本文采用动网格模型, 其目的在于防止网格在运动过程中出现挤压或拖拽等现象. 水翼在流场中运动幅度大, 动网格可以有效保证网格在运动时的质量, 防止出现畸变, 甚至网格重组失败. 网格划分选择弹簧光滑模型和局部网格重画模型 2 种划分方式. 弹簧光滑模型仅对小位移情况可以保持良好的网格质量, 当运动范围过大或者运动出现扭转时, 配合局部网格重画模型可以根据预先设置好的尺寸变形要求和网格畸变率, 对网格运动时不满足这些要求的网格进行重新划分, 保证网格变形过大时可以自动调节网格.

## 4.6 控制参数设定

采用压力耦合方程的半隐式算法 (SIMPLEC), 可以很快得到收敛解. 为了提高求解精度, 采用标准方式作为压力插值方式, 并采用 2 阶迎风格式对动量方程及湍流动能方程和湍流耗散率进行离散

化. 在完成模型建立和相关参数设定后, 即可进行振荡水翼在不同参数组合下的数值仿真计算, 从而获得振荡水翼在不同参数下振荡时的推力、升力和阻力.

## 5 振荡水翼推进性能实验 (Experiments on oscillating hydrofoil propulsion)

为了分析不同参数对振荡水翼推力、升力和阻力的影响, 在循环水池环境下通过设定不同来流速度, 不同拍旋、位旋运动幅值和不同振荡频率进行了振荡水翼推进性能实验. 水翼以升力模式和阻力模式 2 种方式运动, 利用 6 轴力传感器对推力、升力和阻力进行测量, 6 轴力传感器  $Z$  轴垂直于实验平台固定板. 实验环境如图 6 所示.



图 6 振荡水翼推进实验

Fig.6 Experiment on oscillating hydrofoil propulsion

## 5.1 升力模式推进

### 5.1.1 来流速度对振荡水翼推进性能的影响

图 7 和图 8 分别是拍旋运动幅值为  $60^\circ$ , 位旋运动幅值为  $40^\circ$ , 振荡频率为 0.25 Hz, 来流速度为 0.3 m/s ~ 1.1 m/s 时推力/升力峰值和平均推力/升力随来流速度变化的情况.

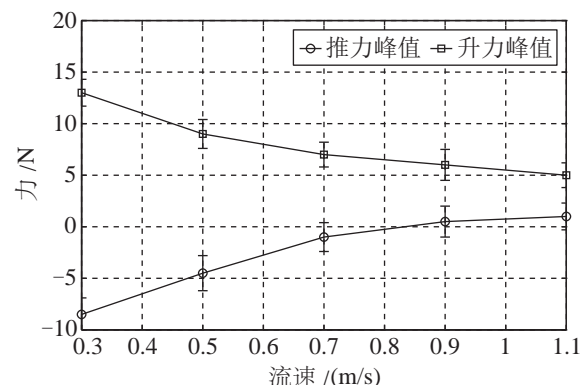


图 7 推力/升力峰值随流速变化

Fig.7 Maximum thrust/lift forces with flow speed changing

从图 7 看出, 随着来流速度的增大, 在振荡水翼运动参数不变的情况下, 由于水翼升沉速度与来流速度合成速度方向角  $\Phi(t)$  逐渐变小, 导致水翼翼攻角  $\alpha(t)$  逐渐变小, 因此推力和升力的峰值都

呈现出逐渐减小的趋势, 并且在来流速度较小时, 推力的峰值变化幅度大, 随着流速增大, 变化的速度越来越缓慢. 当来流速度为 0.3 m/s 时, 推力峰值为 -8.4 N, 当来流速度增大到 0.5 m/s 时, 推力峰值为 -4.2 N, 增大流速到 0.7 m/s, 推力峰值为 -1.5 N. 对于升力, 有着相似的规律, 来流速度小时, 升力的峰值减小较快.

从图 8 看出, 随着来流速度增大, 平均升力逐渐由负值变化到正值, 同时推力逐渐减小, 并向阻力过渡, 当来流速度达到 0.9 m/s 时, 平均推力变为正值, 推力成为阻力. 此时振荡水翼由推力产生模式转变为流场能量获取模式.

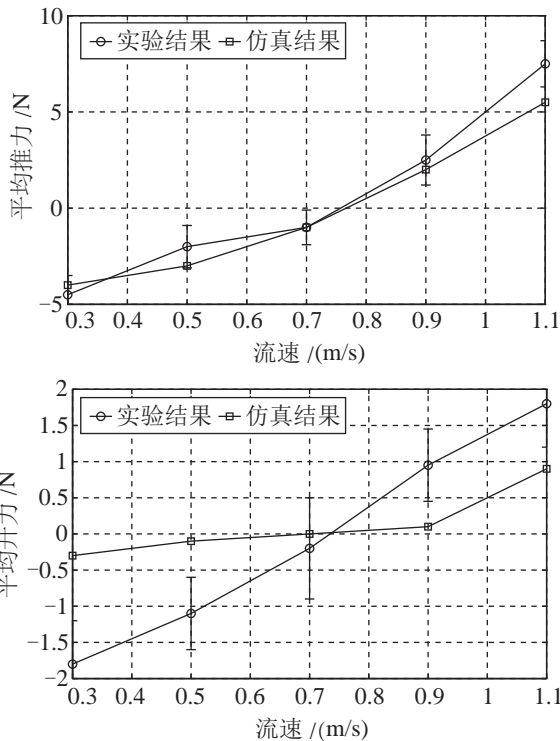


图 8 平均推力/升力与来流速度关系

Fig.8 Relation between mean thrust/lift forces and flow speed

### 5.1.2 拍旋运动幅值对振荡水翼推进性能的影响

图 9 是位旋运动幅值为 20° ~ 25°, 振荡频率为 0.25 Hz, 来流速度为 0.5 m/s, 拍旋运动幅值为 20° ~ 60° 时, 平均推力/升力随拍旋运动幅值变化的情况.

从图 9 看出, 随着拍旋运动幅值的增加, 平均推力和平均升力的变化趋势基本相同, 拍旋运动幅值对于平均推力影响较大, 而对于平均升力的影响相对较小, 当拍旋运动幅值小于 20° 时, 平均推力为正值, 此时推力为阻力, 水翼以流场能量获取模式运动, 随着拍旋运动幅值的增大, 平均推力向负值过渡, 且越来越大, 水翼进入推力产生模式.

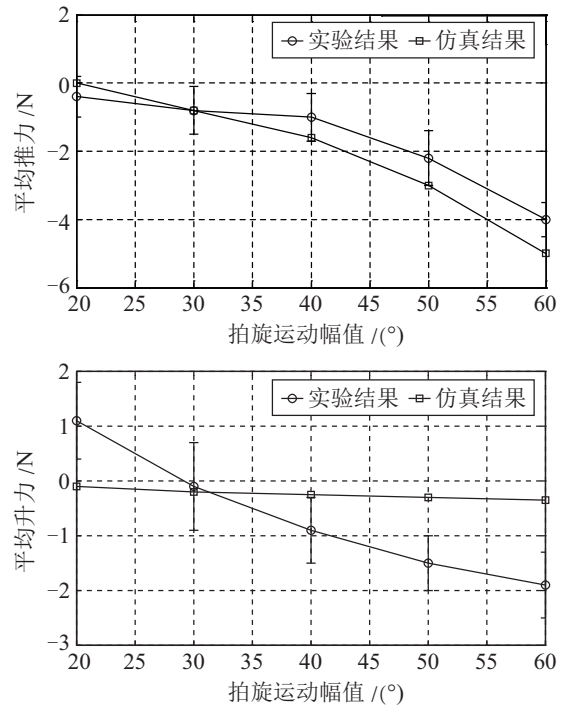


图 9 平均推力/升力与拍旋运动幅值关系

Fig.9 Relation between mean thrust/lift forces and heaving amplitude

### 5.1.3 位旋运动幅值对振荡水翼推进性能影响

图 10 为拍旋运动幅值为 60°, 运动频率为 0.2 Hz, 来流速度为 0.5 m/s, 位旋运动幅值为 20° ~ 60° 时, 平均推力/升力随位旋运动幅值变化的情况.

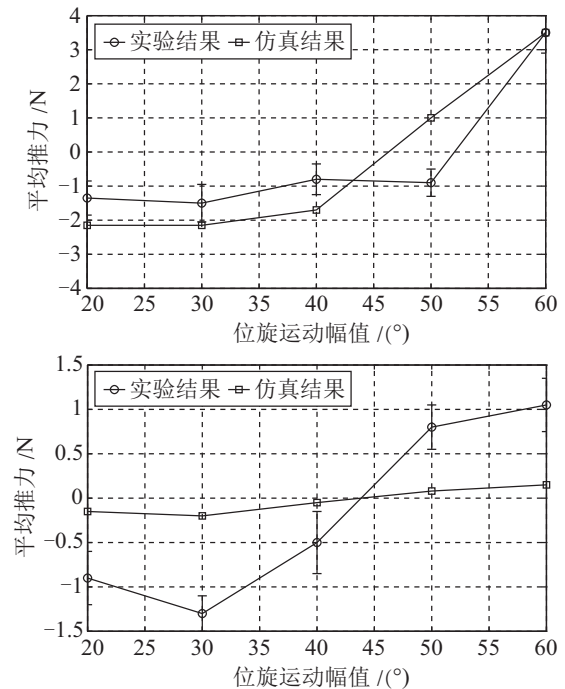


图 10 平均推力/升力与位旋运动幅值关系

Fig.10 Relation between mean thrust/lift forces and pitching amplitude

水翼位旋运动主要是调节水翼攻角的大小, 位旋运动幅值对于推力/升力的影响与拍旋运动幅值不同. 从图 10 看出, 当位旋运动幅值为 30° 时平均推力会达到最大值, 继续增大位旋运动幅值到 45° 时, 推力转变为阻力, 此时振荡水翼由推力产生模式转变为流场能量获取模式. 对于平均升力来说, 整体变化趋势与平均推力相同.

5.1.4 振荡频率对振荡水翼推进性能的影响

振荡频率是影响振荡水翼推进性能的重要参数. 图 11 是在拍旋运动幅值为 60°, 位旋运动幅值为 40°, 来流速度为 0.5 m/s, 振荡频率为 0.1 Hz ~ 0.3 Hz 时, 平均推力/升力随振荡频率的变化情况.

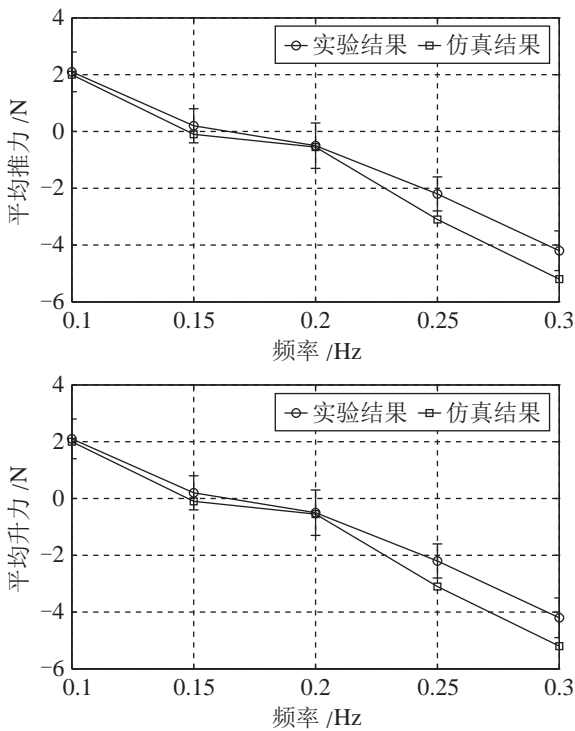


图 11 平均推力/升力与振荡频率关系

Fig.11 Relation between mean thrust/lift forces and oscillating frequency

从图 11 可以看出振荡频率对于平均推力有着较大的影响. 随着振荡频率的增大, 平均推力迅速增大, 在振荡频率为 0.1 Hz 时, 平均推力为 2.3 N, 此时推力为阻力, 当振荡频率增大到 0.3 Hz 时, 平均推力增大到 -4.7 N, 振荡频率的改变对于平均升力也有着同样的影响.

5.1.5  $Sr$  和  $\alpha_{max}$  对振荡水翼推进性能的影响

为了更好地描述最大攻角  $\alpha_{max}$  和  $Sr$  数对推进性能的影响, 在完成相关参数的推进实验后, 利用式 (5) 和 (6) 计算  $\alpha_{max}$  和  $Sr$ , 拍旋运动幅值为 60°

时的推力随  $Sr$  和  $\alpha_{max}$  变化的等值线图如图 12 所示.  $Sr$  的变化范围是 0.3 ~ 0.9,  $\alpha_{max}$  变化范围是 10° ~ 45°. 从图 12 可以看出,  $Sr$  和  $\alpha_{max}$  共同决定了振荡水翼的推进性能, 同时提高  $Sr$  和增大  $\alpha_{max}$  对于提高推力有着积极的作用.

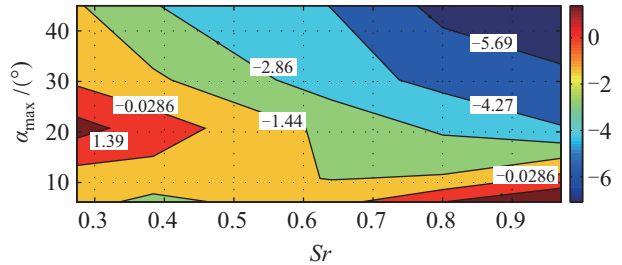


图 12 推力和  $\alpha_{max}$  及  $Sr$  间变化等值线图

Fig.12 Thrust force contour map with  $Sr$  and  $\alpha_{max}$

水翼在升力推进模式下运动, 对于振荡水翼产生的推力/升力测量误差, 由 6 轴力传感器测量误差引起. 针对平均升力实验测量数值与平均升力仿真输出偏差较大的现象, 分析实验装置安装情况, 应在循环水槽实验时来流速度方向与振荡水翼装置拍旋轴线不平行和拍旋运动对称面与铅垂面有微小夹角而引起, 该误差可以通过在水下仿生机器人上设计基准面精确定位振荡水翼装置和设置位旋运动初始偏角进行修正.

5.2 阻力模式推进

图 13 是振荡频率为 0.2 Hz, 来流速度为 0.5 m/s, 拍旋运动幅值为 20° ~ 65° 时平均推力与拍旋运动幅值间的关系, 图 14 是拍旋运动幅值为 40°, 来流速度为 0.7 m/s, 振荡频率为 0.15 Hz ~ 0.4 Hz 时平均推力与运动频率间的关系. 综合图 13 和图 14, 增大拍旋运动幅值、提高振荡频率都可以提高基于阻力运动模式的振荡水翼推力.

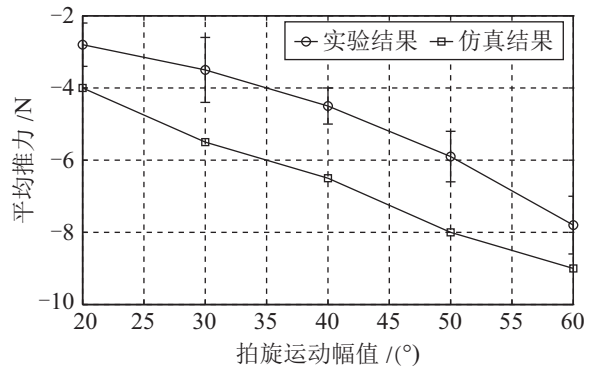


图 13 平均推力与拍旋运动幅值关系

Fig.13 Relation between mean thrust force and heaving amplitude

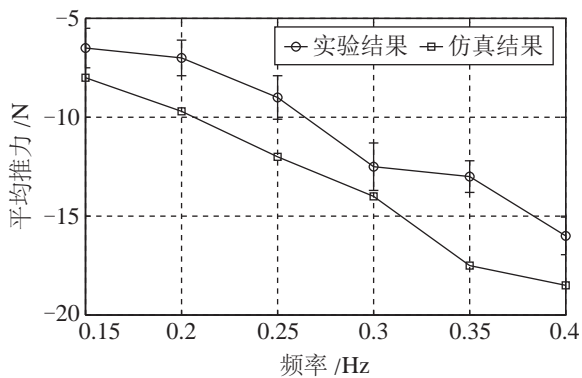


图 14 平均推力与振荡频率关系

Fig.14 Relation between mean thrust force and oscillating frequency

## 6 结论 (Conclusion)

本文在分析振荡水翼的升力/阻力运动规律基础上, 设计了 2 自由度振荡水翼推进装置. 在循环水池环境下, 通过设定不同运动参数组合, 实现了振荡水翼的升力、阻力模式推进, 并将实验结果与数值仿真结果对比, 分析不同参数对振荡水翼推力、升力和阻力的影响. 结果表明, 在升力推进模式下, 提高拍旋运动幅值、振荡频率均能够提高振荡水翼产生的推力, 而来流速度的变化, 更多的是对推力幅值以及幅值变化速度的影响, 当来流速度大于  $0.7 \text{ m/s} \sim 0.9 \text{ m/s}$  时推力变成阻力, 当位旋运动幅值为  $30^\circ$  时, 推力会达到最大值. 在阻力推进模式下, 提高拍旋运动幅值、提高振荡频率均能够提高振荡水翼装置产生的推力.

### 参考文献 (References)

- [1] Low K H, Zhou C L, Ong T W, et al. Modular design and initial gait study of an amphibian robotic turtle[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, USA: IEEE, 2007: 535-540.
- [2] Fish F E. Transitions from drag-based to lift-based propulsion in mammalian swimming[J]. *American Zoologist*, 1996, 36(6): 628-641.
- [3] 张铭钧, 刘晓白, 徐建安, 等. 海龟柔性前肢仿生推进研究[J]. *机器人*, 2011, 33(2): 229-236.  
Zhang M J, Liu X B, Xu J A, et al. Bionic research on turtle's flexible forelimb propulsion[J]. *Robot*, 2011, 33(2): 229-236.
- [4] 杨清海, 喻俊志, 谭民, 等. 两栖仿生机器人研究综述[J]. *机器人*, 2007, 29(6): 601-608.  
Yang Q H, Yu J Z, Tan M, et al. Amphibious biomimetic robots: A review[J]. *Robot*, 2007, 29(6): 601-608.
- [5] 刘晓白. 仿海龟柔性水翼推进技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.  
Liu X B. Study on flexible bionic turtle hydrofoil propulsion technology[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011.
- [6] Blake R W. Mechanics of labriform locomotion - Part I. Labriform locomotion in the angelfish (*pterophyllum eimekei*): Analysis of the power stroke[J]. *Journal of Experimental Biology*, 1979, 82: 255-271.
- [7] Chiu F C, Chen C K, Guo J. A practical method for simulating pectoral fin locomotion of a biomimetic autonomous underwater vehicle[C]//4th International Symposium on Underwater Technology. Piscataway, USA: IEEE, 2004: 323-329.
- [8] Liu H, Ellington K, Kawachi C K. A computational fluid dynamic study of hawkmoth hovering[J]. *Journal of Experimental Biology*, 1998, 201(4): 461-477.
- [9] Anderson J M, Streitlien K, Barrett D S, et al. Oscillating foils of high propulsive efficiency[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1998, 360(1): 41-72.
- [10] Polidoro V. Flapping foil propulsion for cruising and hovering autonomous underwater vehicles[D]. Cambridge, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- [11] Read D A. Oscillating foils for propulsion and maneuvering of ships and underwater vehicles[D]. Cambridge, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2001.
- [12] Shyy W, Lian Y, Tang J, et al. Aerodynamics of low Reynolds number flyers[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [13] Triantafyllou M S, Triantafyllou G S, Yue D K P. Hydrodynamics of fishlike swimming[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2000, 32(1): 33-53.

### 作者简介:

徐建安 (1977-), 男, 博士, 副教授. 研究领域: 海洋机电系统, 水下仿生推进技术.

孔德慧 (1991-), 男, 硕士生. 研究领域: 水下仿生推进技术.