

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2021.04.005

二维振荡超空化水翼水动力性能分析

王永九^{1,2}, 杜特专^{1,2*}, 黄晨光^{1,2}

(1. 中国科学院力学研究所 流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190,

E-mail: dutezhuan@imech.ac.cn;

2. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049)

摘要: 该文以 ys 930 超空化水翼和 NACA 65410 水翼作为研究对象, 采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型、Zwart - Gerber - Belamri 空化模型以及动网格技术, 对比两种翼型在俯仰、升沉以及俯仰升沉复合运动情况下的水动力性能。结果表明: 运动幅值的增加会使得升力系数和阻力系数曲线峰值明显提高; 水翼在俯仰和复合运动情况下的升力系数和阻力系数会产生明显的尖峰, 而尖峰主要是由下翼面气泡溃灭造成的。为进一步研究两种翼型的水动力性能, 将升力系数和阻力系数的平均值和方差进行对比分析。结果表明: 在升沉运动中, ys 930 水翼的升阻力系数平均值始终高于 NACA 65410 水翼; 但在俯仰和复合运动中, 运动幅值的提高会使得 NACA 65410 水翼的升阻力系数平均值高于 ys 930 水翼; 在三种运动模式下, ys 930 水翼升阻力系数的方差较大, 稳定性较低。从升阻比来看: ys 930 水翼在升沉运动中获得较高升阻比; 但在复合运动情况下, 随着俯仰角度的增加, NACA 65410 的水动力性能明显提高。

关键词: 超空化; 振荡; 动网格技术; 气泡溃灭

中图分类号: O352

文献标志码: A

Analysis of hydrodynamic performance of two-dimensional oscillating supercavitating hydrofoil

WANG Yong-jiu^{1,2}, DU Te-zhuan^{1,2*}, HUANG Chen-guang^{1,2}

(1. Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In this paper, the ys 930 supercavitating hydrofoil and NACA 65410 hydrofoil are taken as the research objects. The RNG $k-\epsilon$ turbulence model, Zwart-Gerber-Belamri cavitation model and dynamic mesh technology are used to compare the hydrodynamic performance of the two hydrofoils under the pitching, heaving and compound motion. The results show that the increase of the motion amplitude will significantly increase the peak value of the lift coefficient and drag coefficient curves. The lift coefficient and drag coefficient of the hydrofoil in pitching and compound motion will produce obvious spikes, and the spikes are mainly caused by the collapse of the cavitation on the lower wing surface. In order to further research the hydrodynamic

收稿日期: 2021-01-11(2021-03-12 修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金(11872065)

作者简介: 王永九(1997-), 男, 辽宁大连人, 满, 硕士.

Received: January 11, 2021 (Revised March 12, 2021)

Project supported by foundation: Supported by the National Natural Science Foundation of China(11872065)

Biography: WANG Yong-jiu (1997-), Male, Master.

performance of the two hydrofoils, the average value and variance of the lift coefficient and drag coefficient are used for comparative analysis. The results show that in heaving motion, the average lift coefficient and drag coefficient of the ys 930 hydrofoil is always higher than NACA 65410 hydrofoil. However, in pitching and compound motion, the increase in motion amplitude will make the average lift coefficient and drag coefficient of NACA 65410 hydrofoil higher than the ys 930 hydrofoil. In the three moving patterns, the ys 930 hydrofoil has a large variance in lift coefficient and drag coefficient and low stability. From the perspective of lift-to-drag ratio: the ys 930 hydrofoil can obtain a higher lift-to-drag ratio in heaving motion. But in the case of compound motion, as the pitching angle increases, the hydrodynamic performance of NACA 65410 is significantly improved.

Key words: Supercavitation; Oscillation; Dynamic mesh technique; Bubble collapse

引言

水翼船的航速远高于普通舰船,而水翼是为其提供升力和提高航速的主要构件之一。随着水翼船航行速度的增加,在水翼表面会产生低压区,当低压区内的压力降至临界压力以下时,液相就会变成气相,由此产生空化现象。当船体航行速度继续增加,空化区域就会继续增大,最终产生一个可以完全包裹水翼的较大气泡,从而发生超空化现象。空化现象是制约水面稳定高速航行的重要因素,因此,通过数值模拟研究水翼在俯仰、升沉以及俯仰升沉复合运动情况下自身流体动力学特性的变化情况,对于高速水翼船升力部件的设计优化具有较好的实际参考价值 and 工程应用价值。

对于水翼的超空化问题,最早Wu等^[1]采用自由流线理论对超空泡进行计算;为解决该方法无法预测水翼前缘的压力局限性,Furuya等^[2]提出了奇点摄动理论。随着数值计算的发展,钟诚文等^[3]通过引入混合密度函数发展了一种新的空化模型,运用Navier-Stokes方程和 $k-\varepsilon$ 两方程湍流模型对两种不同类型水翼的空化流动进行了数值模拟,得到了从空化到超空化一系列变化过程的数值模拟结果,并与实验结果较好地吻合;Brizzolara等^[4]提出了一种新型超空泡翼型截面的CFD表征方法,并通过数值计算结果证实了该新型水翼在超空泡条件下能获得较高的升力;为更好了解水汽混合物在超空化流动中的特性,李向宾等^[5]结合修正的RNG $k-\varepsilon$ 湍流和空化模型,发现了在超空化阶段,气蚀区均存在水汽混合物的反向运动,并指出逆压力梯度是导致水汽两相界面反向运动的原因。

而对于二维水翼的振荡问题,Tuncer等^[6]采用基于Navier-Stokes的方法,对升沉运动的NACA 0012翼型进行数值模拟;俞国华等^[7]利用带转捩修正的 $k-\omega$ SST湍流模型,对绕S809翼型周围的流场进行求解,证明了CFD方法是预测风力机翼型动态失速特性的有效途径之一;为分析二维翼型在非定常状态下的水动力性能,王俊芳^[8]采用FLUENT软件对二维振荡水翼非定常情况进行数值模拟,研究分析了水翼在不同工况下的升阻力系数、速度场、压力场和尾涡流场等水动力特性;而徐佩等^[9]则基

于RANS方法并运用重叠网格技术,研究了NACA 0020翼型复合运动与单一运动的区别。因此,目前对于二维水翼的振荡问题,从单运动形式到复合运动形式都做了较为系统的研究。但不论何种运动形式,对振荡水翼的研究大多集中在对低速水翼流场发展与演化的分析。

随着水下高速航行体的迅速发展,准确研究并获得二维超空化水翼在振荡情况下的水动力性能,就显得格外重要。因此,本文利用Fluent商业软件,采用动网格技术,对二维水翼在超空化流动下的俯仰、升沉以及俯仰升沉复合运动进行数值模拟研究。并将ys 930超空化水翼和NACA 65410水翼的水动力学性能进行对比分析,对研究二维水翼在超空化流振荡作用下的流体动力学特性有着重要的实际意义。

1 数学模型

1.1 基本控制方程

根据均质平衡流理论,通过质量守恒方程和动量守恒方程来对超空化流场进行描述

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot [(\mu + \mu_t) \nabla \mathbf{v}] + \frac{1}{3} \nabla [(\mu + \mu_t) \nabla \cdot \mathbf{v}] \quad (2)$$

式中: ρ 为混合密度, μ 为混相介质的动力黏性系数, μ_t 为湍流黏性系数, \mathbf{v} 为速度, P 为压强。

1.2 多相流模型

多相流方法是目前处理空化问题的主要方法。本文采用的VOF计算模型可以很好地进行界面跟踪,并精准预测空泡界面形态^[10]。该模型假设流场各相之间互不掺混,引入简单的单流体模型,求解跟踪混合场动量方程和体积分,并利用体积分对界面进行重构。相的体积分 α_q 的取值可以为

0-1 之间的任何数字, 具体可能存在以下三种情况:

- $\alpha_q = 0$ 单元内不存在第 q 相流体
 $\alpha_q = 1$ 单元内充满了第 q 相流体
 $0 < \alpha_q < 1$ 单元包含了第 q 相流体与一种或多种其他流体之间的界面

1.3 空化模型

本文采用基于简化Rayleigh-Plesset^[11-12]方程推导得到的Zwart-Gerber-Belamri^[13]空化模型。该模型是目前应用范围较广的空化模型, 能够更好地捕获空泡界面的形成与演化发展(Zwart, Gerber & Belamri 2004; LI Xiang-bin 2016), 其蒸发和凝结源项分别表示为

$$\dot{m}^+ = F_{\text{cond}} \frac{3r_v \rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p - p_v}{\rho_l}}, \quad p > p_v \quad (3)$$

$$\dot{m}^- = F_{\text{vap}} \frac{3r_{\text{nuc}}(1-r_v)\rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_v - p}{\rho_l}}, \quad p < p_v \quad (4)$$

式中: \dot{m}^+ 和 \dot{m}^- 分别为蒸发和凝结的源项; 一般取 $F_{\text{vap}} = 50$; $F_{\text{cond}} = 0.01$; r_{nuc} 为成核部位的体积分; r_v 为气泡体积分; p_v 为饱和蒸气压; ρ_l 为液体水的密度; ρ_v 为蒸汽密度。

1.4 湍流模型

湍流模型的选择在很大程度上决定了能否准确预测水翼的超空化现象。针对目前研究现状而言, 经过修正的 $k-\varepsilon$ 模型仍然是人们在模拟空化流动时的主要选择。其中, RNG $k-\varepsilon$ 模型是基于 N-S 方程重整化群分析理论提出的, 考虑了平均应变率的影响, 可以更好地处理高应变率以及流线弯曲较大的流动^[14-15]。RNG $k-\varepsilon$ 模型的 k 公式和 ε 公式具体形式如下

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho k \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\alpha_k \mu_{\text{eff}} \nabla k) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \nabla \varepsilon) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

2 数值计算模型验证

2.1 计算域与网格划分

本章节对 NACA 65410 水翼进行数值模拟分析。水翼弦长 $L=1$ m, 水翼攻角为 5° , 利用 ICEM 软件建立 NACA 65410 水翼计算模型。该计算域在水

翼前方取 $15L$, 上下两侧各取 $15L$, 尾流场取 $20L$ 。本次计算采用 C 型结构化网格进行划分, 计算模型的入口和上下两侧的边界条件设置为速度入口, 出口设置为压力出口。图 1 和图 2 分别为计算域及边界条件和水翼网格划分示意图。

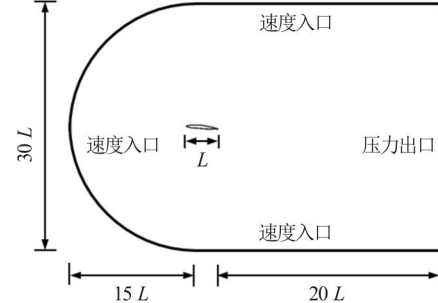


图 1 计算域及边界条件

Fig.1 Computing domain and boundary condition

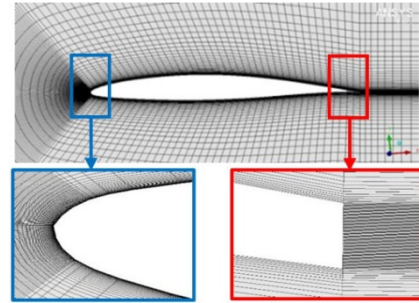


图 2 (网上彩图) NACA 65410 水翼网格划分

Fig.2 (Color online) NACA 65410 hydrofoil mesh partition

2.2 数值计算方法

基于 Fluent 商业软件对二维水翼的超空化现象进行数值模拟, 具体参数设置如下: 采用基于压力的耦合求解器; 求解算法采用适用于可压缩流体的 SIMPLE 算法; 采用 VOF 多相流模型以及 Zwart-Gerber-Belamri 空化模型来进行模拟; 计算介质采用 20°C 的水, 密度为 998.2 kg/m^3 , 动力黏度系数为 $0.001 \ 003 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ 以及密度为 $0.554 \ 2 \text{ kg/m}^3$, 动力黏度系数为 $0.000 \ 013 \ 4 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ 的水蒸汽; 湍流模型采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型, 模型中其他参数设置保持默认; 为提高计算精度, 计算时间步长取为 0.001 s ; 需要根据空化数来设置来流速度, 具体计算公式如下

$$\sigma = \frac{p_\infty - p_v}{0.5 \rho_l U_\infty^2} \quad (7)$$

式中: p_∞ 为无穷远处压强; U_∞ 为无穷远处来流速度。

为研究水翼的水动力性能, 其升力系数和阻力系数的计算公式如下

$$C_L = \frac{F_L}{0.5 \rho_l U_\infty^2 S} \quad (8)$$

$$C_D = \frac{F_D}{0.5 \rho_l U_\infty^2 S} \quad (9)$$

式中： F_L 和 F_D 分别为水翼受到的升力和阻力； S 为参考面积(对于二维问题， S 为水翼弦长)

2.3 结果对比分析

通过数值计算，得到不同空化数情况下NACA 65410水翼升力系数和升阻比的相关数据，并与现有公开数据进行对比。图3为升力系数、升阻比与Brizzolara等^[4]的数据对比结果。表1和表2则给出升力系数和升阻比的相对误差。对于升力系数而言，当空化数低于0.3时，模拟结果略低于参考值；而模拟的升阻比则略高于相应的参考值。但从曲线的变化趋势以及相对误差来看，都与Brizzolara的结果吻合得较好，从而验证了本文所采用的计算模型的准确性。

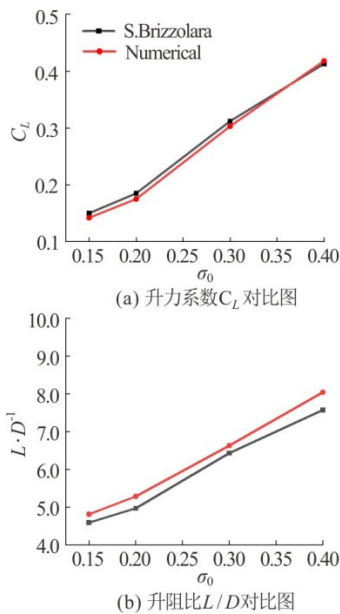


图3 (网上彩图) 不同空化数的升力系数和升阻比对比图

Fig.3 (Color online) Comparison of lift coefficient and lift-to-drag ratio for different cavitation numbers

表1 升力系数相对误差对比

Table 1 Comparison of relative error of lift coefficient

空化数 σ	0.15	0.2	0.3	0.4
参考数据	0.155	0.187	0.312	0.413
模拟结果	0.142	0.175	0.303	0.418
相对误差	8.4%	6.4%	2.9%	1.2%

表2 升阻比相对误差对比

Table 2 Comparison of relative error of lift-to-drag ratio

空化数 σ	0.15	0.2	0.3	0.4
参考数据	4.60	4.99	6.43	7.59
模拟结果	4.81	5.28	6.63	8.04
相对误差	4.6%	5.8%	5.1%	5.9%

3 二维振荡翼型数值分析

3.1 运动控制方程

将水翼俯仰运动的攻角变化和升沉运动的位置变化均设置为余弦函数型，通过UDF程序实现水

翼运动。其攻角及位置与时间的函数表达式分别为

$$\alpha(t) = \alpha_0 + \alpha_m \cos(2\pi ft) \quad (10)$$

$$y(t) = y_0 \cos(2\pi ft) \quad (11)$$

式中： α_0 为平均攻角； α_m 为俯仰运动幅值； y_0 为升沉运动幅值； f 为运动频率； t 为运动时间。

3.2 计算域与网格划分

对计算域尺寸参数进行设置。在水翼前方取 $15L$ ，上下两侧各取 $15L$ ，尾流场取 $20L$ ，水翼周围为直径 $5L$ 的圆形网格区域。多域网格交界面处利用interface进行数据传递，其他边界条件如图4所示。图5为水翼计算网格划分示意图。NACA 65410水翼和ys 930超空化水翼划分的网格总数分别为57 292和61 355。对内部网格，采用结构化的四边形网格进行划分；外部网格则采用非结构化的三角形网格。内部网格随水翼做振荡运动，而外部网格相对静止。为更好捕捉水翼近壁面附近的空泡形态、提高计算精度以及适应湍流模型的需要，对水翼近壁面进行加密处理。而外部静止网格区域全部为三角形网格，并在交界面位置处进行加密，以减小界面之间数值传递造成的误差。

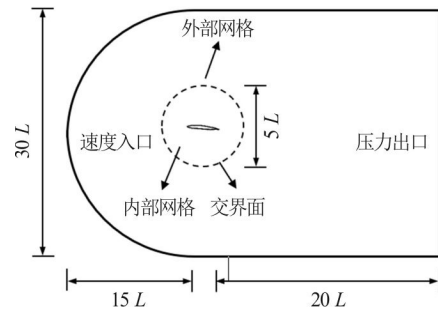


图4 计算域及边界条件

Fig.4 Computing domain and boundary condition

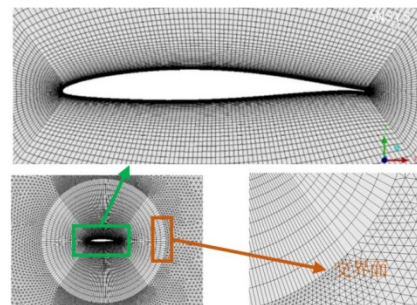


图5 (网上彩图) 水翼网格划分

Fig.5 (Color online) Hydrofoil mesh partition

3.3 数值计算方法及细节

Fluent中的动网格重构主要有三种方法：①动态层技术；②弹簧光顺法；③局部网格重构法。为实现水翼的俯仰和升沉运动，本文采用弹簧光顺法和局部网格重构法对动网格进行重构，具体实现过程参见Fluent帮助文档^[16]。

在本次数值模拟过程中, 将俯仰幅值和升沉幅值作为主要变化参量; 水翼的初始攻角保持为 0° ; 来流速度保持恒定, 即在空化数 $\sigma=0.2$ 情况下进行数值模拟; 运动周期为1 s; 振荡运动具体幅值参考文献[9]进行计算, 具体参数如表3所示。

表3 数值模拟实际工况设置

Table 3 Numerical simulation actual work condition setting			
振荡形式	俯仰运动	升沉运动	复合运动
运动幅值	10°	0.1 m	$10^\circ+0.1$ m
	20°	0.2 m	$20^\circ+0.2$ m
	30°	0.3 m	$30^\circ+0.3$ m

3.4 ys 930超空化翼型分析

图6给出了超空化翼型俯仰运动的升力系数和阻力系数变化情况。整体而言, 超空化翼型在不同俯仰角度情况下运动时, 升力系数和阻力系数曲线均表现出周期性变化。但由于该翼型是非对称翼型, 所以在一个周期内的上行和下行区间没有表现出对称性。而且随着俯仰角度的增加, 曲线对应峰值明显提高。

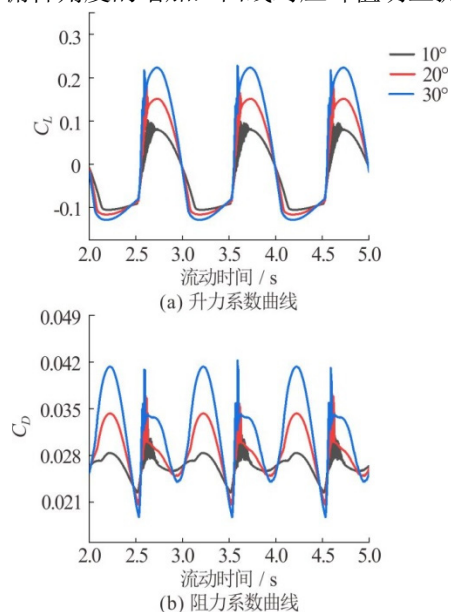
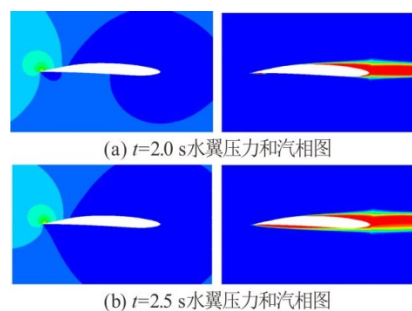


图6 (网上彩图) ys 930 翼型俯仰运动曲线

Fig.6 (Color online) Pitching motion curves of ys 930 hydrofoil

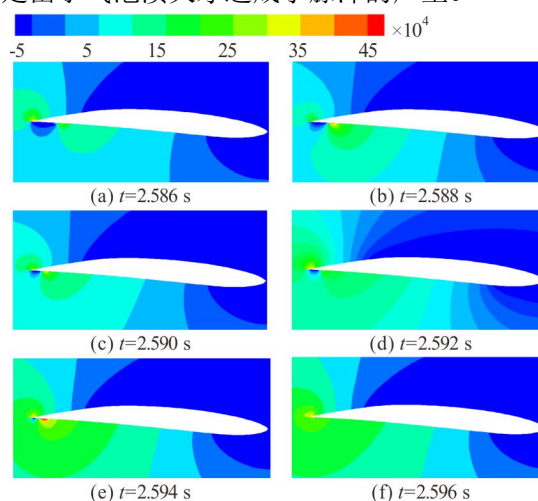
尽管水翼在 $t=2.0$ s和 $t=2.5$ s 均处于水平位置, 但不同时刻对应的升力系数和阻力系数存在明显的差异。这主要与水翼的运动状态有关。在上行区间和下行区间的运动过程中, 水翼表面的空泡形态变化情况明显不同。图7显示了从不同运动区间达到水平位置的压力分布和气体体积分数分布。从图中可以发现: 水翼从上行区间运动到水平位置时, 下翼面存在大量气泡, 导致下翼面压力相对较低, 从而使得水翼获得较低的升力; 若水翼从下行区间运动到水平位置时, 水翼周围的空泡形态发生明显变化。因此在水翼位置处的升力系数和阻力系数数值并不相同。同时这也是在上行区间和下行区间内

图7 (网上彩图) ys 930 翼型在水平位置处的对比图
Fig.7 (Color online) Comparison of ys 930 hydrofoil at the horizontal position

运动时, 升力系数和阻力系数曲线并不呈现对称分布的另一个主要原因。

由于曲线呈现出周期性的特点, 所以接下来均在2.0 s-3.0 s的一个周期内对升力系数和阻力系数变化情况进行分析。

从图6中不难发现, ys 930翼型在下行区间运动过程中, 升力系数和阻力系数变化较为明显, 特别是在2.50 s-2.60 s时间段内产生明显的脉动特性。同时随着俯仰角度的增加, 尖峰峰值明显提高。图8是超空化翼型在俯仰幅值为 30° 时不同时刻所对应的压力云图。从图中可以看出: 水翼尖端附近高压区范围逐渐变大, 产生压力突增, 从而造成了升力系数和阻力系数曲线出现尖峰。图9显示了其下翼面尖端附近的气体体积分数变化情况, 随着运动时间的增加, 水翼尖端0-0.12 m位置处的气体体积分数逐渐减小, 直至在 $t=3.596$ s完全消失。由此可见, 正是由于气泡溃灭才造成了脉冲的产生。

图8 (网上彩图) ys 930 翼型俯仰幅值为 30° 时不同时刻的压力云图Fig.8 (Color online) The ys 930 hydrofoil pressure profile at different moments when the pitch amplitude is 30°

超空化翼型在不同升沉幅值下的变化情况如图10所示。升力系数和阻力系数曲线也表现出周期性变化。水翼在上行区间和下行区间运动过程中, 升力系数曲线表现出对称性, 与俯仰运动一致, 升沉

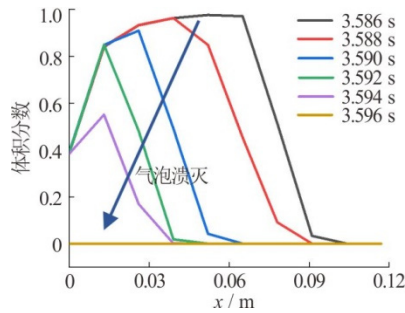


图9 (网上彩图) ys 930 翼型下翼面气体体积分数曲线
 Fig.9 (Color online) The gas volume fraction curve of the lower surface of the ys 930 hydrofoil

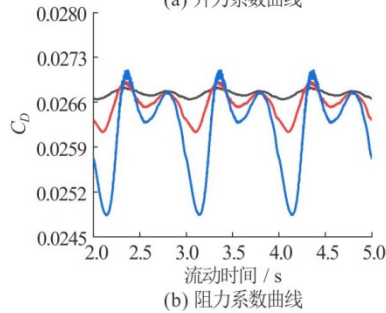
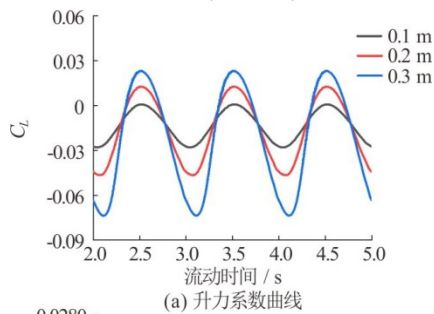


图10 (网上彩图) ys 930 翼型升沉运动曲线
 Fig.10 (Color online) Heaving motion curves of the ys 930 hydrofoil

运动幅值越大,水翼的升力系数曲线对应的峰值越高。水翼在平衡位置处的升力系数会达到最大值。但是阻力系数曲线并不对称,水翼在上行区间运动过程中的阻力系数变化较快。同时升力系数和阻力系数没有出现明显的尖峰,可见升沉运动有利于水翼水动力性能的相对稳定。

将俯仰运动和升沉运动进行复合,即可获得水翼在复合运动下的升力系数和阻力系数曲线,如图11所示。从曲线变化趋势来看,在复合运动情形下的升力系数和阻力系数曲线与水翼在俯仰运动情况下基本保持一致,而且在数值上差别不大。可见在本文设计的工况下进行复合,升沉运动对水翼的水动力性能影响不大,俯仰运动则是主要影响因素。

3.5 NACA 65410翼型分析

NACA 65410水翼在俯仰运动过程中的升力系数和阻力系数曲线如图12所示。与超空化翼型相比,曲线也会在相同的时间段内产生较大的尖峰,但相比而言,升力系数和阻力系数峰值明显提高,分别增加150%和20%。

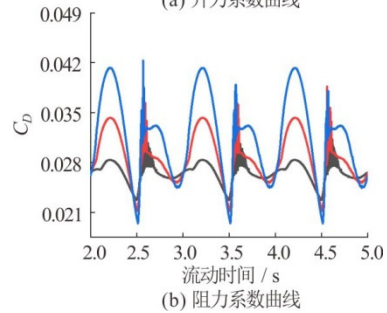
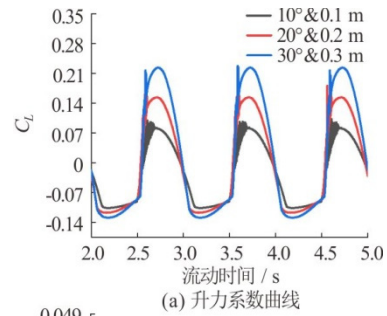


图11 (网上彩图) ys 930 翼型复合运动曲线
 Fig.11 (Color online) Compound motion curves of the ys 930 hydrofoil

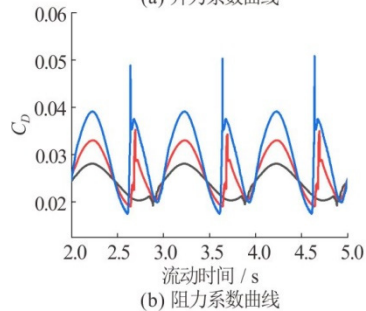
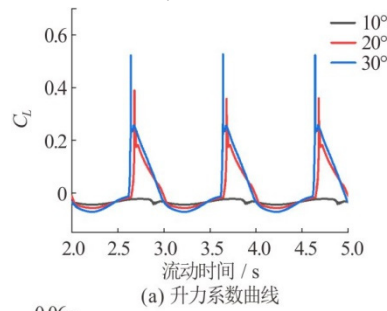


图12 (网上彩图) NACA 65410 翼型俯仰运动曲线
 Fig.12 (Color online) Pitching motion curves of NACA 65410 hydrofoil

针对升阻力系数曲线尖峰更为明显的特点,分析最大俯仰角度为30°的情况。图13显示了运动时间在3.636 s-3.646 s所对应的水翼压力场分布图。通过压力云图不难发现,随流动时间的增加,在水翼下翼面0.4 m-0.8 m附近处正压区范围逐渐变大,直至负压区全部消失后保持相对稳定,在升力系数和阻力系数曲线上对应于尖峰峰值。而对应于气体体积分数曲线,明显看到气泡体积的迅速减小,从而对水动力性能造成突变影响。同时图14显示了在3.636 s-3.642 s运动时间内,水翼下翼面位置处空泡体积的变化情况。随着运动时间的增加,水翼下翼

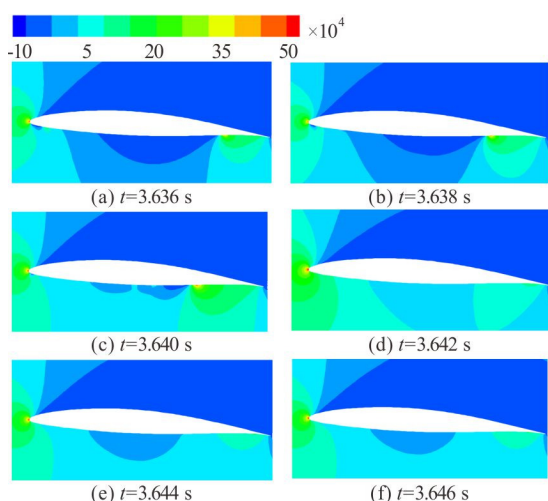


图 13 (网上彩图) NACA 65410 翼型俯仰幅值为 30° 时不同时刻的压力云图

Fig.13 (Color online) NACA 65410 hydrofoil pressure cloud profile at different moments when the pitch amplitude is 30°

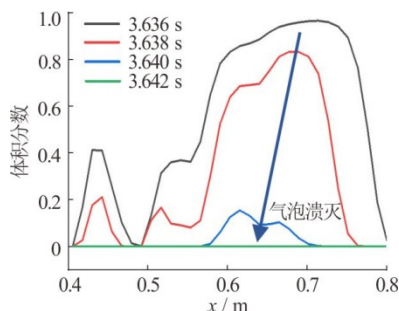


图 14 (网上彩图) NACA 65410 翼型下翼面气体体积分数曲线
Fig.14 (Color online) The gas volume fraction curve of the lower surface of the NACA 65410 hydrofoil

面0.5 m-0.8 m位置处的气体体积分数逐渐减小, 直至在t=3.642 s完全消失。

图15为NACA 65410水翼在升沉运动过程中的升力系数和阻力系数曲线。其变化特点与超空化翼型类似, 但升力系数恒为负值。相比于俯仰运动而言, 在俯仰升沉复合运动时, 升沉运动对于升力系数和阻力系数的影响是较小的, 曲线变化趋势和数值大小与俯仰运动几乎保持一致, 如图16所示。

3.6 两种翼型对比分析

为了对比分析两种翼型在俯仰、升沉以及俯仰升沉复合运动情况下的水动力性能, 给出了在不同运动形式和不同运动幅值下的平均值, 以及用来反映数据离散程度的方差。

图17给出了计算得到的两种翼型在不同升沉运动幅值情况下的升力系数和阻力系数的平均值以及方差。可以发现: 不论是升力系数还是阻力系数的平均值, 超空化翼型平均值始终高于NACA翼型; 但同时超空化翼型的方差也要高于NACA翼型。

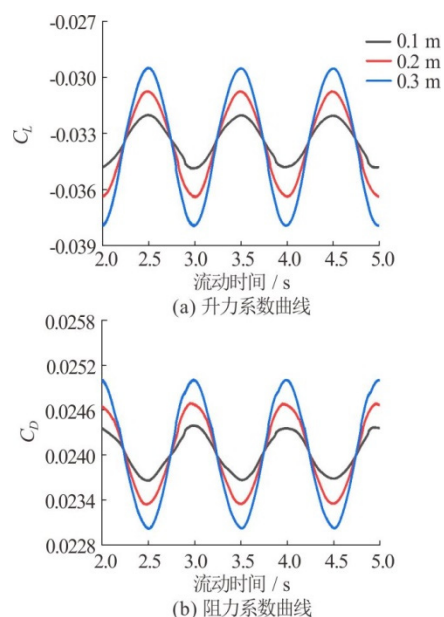


图 15 (网上彩图) NACA 65410 翼型升沉运动曲线
Fig.15 (Color online) Heaving motion curves of NACA 65410 hydrofoil

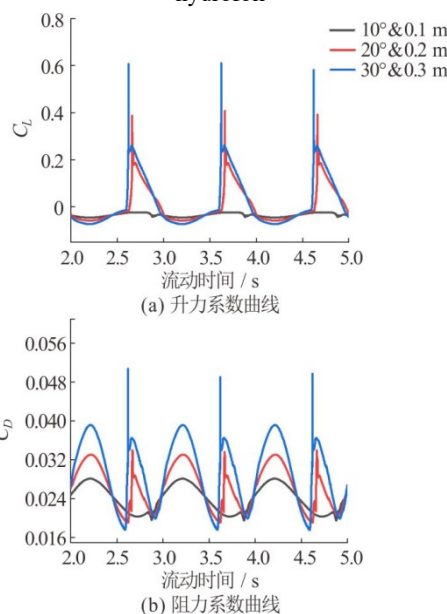


图 16 (网上彩图) NACA 65410 翼型复合运动曲线
Fig.16 (Color online) Compound motion curves of NACA 65410 hydrofoil

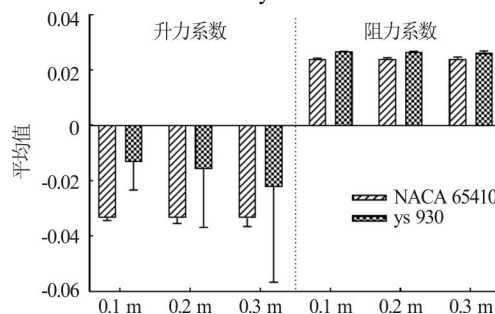


图 17 两种翼型在升沉运动下升阻力系数平均值和方差
Fig.17 The average value and variance of the lift coefficient and drag coefficient of two hydrofoils in heaving motion

图18和图19给出了计算得到的两种翼型在不同俯仰和复合运动幅值情况下的升力系数和阻力系数的平均值以及方差。可以发现：无论何种运动形式，超空化翼型的阻力系数平均值始终高于NACA翼型；对于升力系数而言，对于较低的运动幅值，超空化翼型平均值较高，随着运动幅值的增加，NACA翼型升力系数明显提高；超空化翼型在不同的运动形式和运动幅值下方差均高于NACA翼型，可见其水动力性能变化较大，稳定性较低。

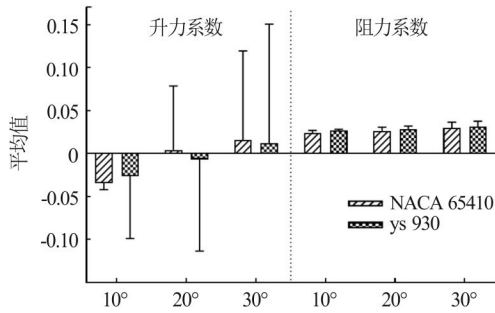


图 18 两种翼型在俯仰运动下升阻力系数平均值和方差
Fig.18 The average value and variance of the lift coefficient and drag coefficient of two hydrofoils in pitching motion

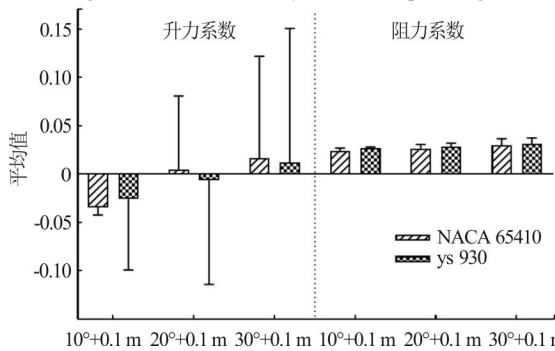
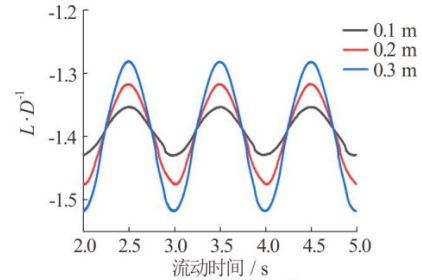


图 19 两种翼型在复合运动下升阻力系数平均值和方差
Fig.19 The average value and variance of the lift coefficient and drag coefficient of two hydrofoils in compound motion

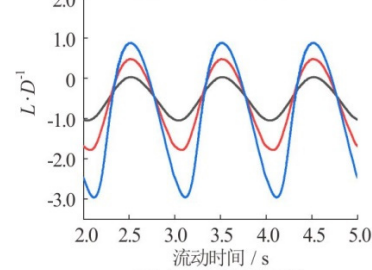
从升力系数和阻力系数的平均值以及方差数据中，可以看到对于俯仰和复合运动而言，不同的运动形式情况下的数值差别不明显，这与升阻力系数曲线变化特点保持一致。因此我们只关注在升沉运动和复合运动的情况，给出两种翼型升阻比的变化特点，如图20和图21所示。

从升阻比曲线来看，超空化翼型在升沉运动中可以获得较高升阻比。但在复合运动情况下，运动幅值较低时，超空化翼型的升阻比较高，随着俯仰角度的增加，NACA的水动力性能明显提高，在计算工况为20° & 0.2 m和30° & 0.3 m的情况下，NACA翼型升阻比高于超空化翼型。

通过上述分析可以发现，超空化翼型在升沉运动和低俯仰角度情况下的性能较好。随着俯仰角度的增加，NACA翼型性能明显提高，升力系数和阻力系数方差较低，稳定性较好。这主要是因为超空化阶段，NACA翼型上下表面均产生超空泡，有利于翼型的稳定。

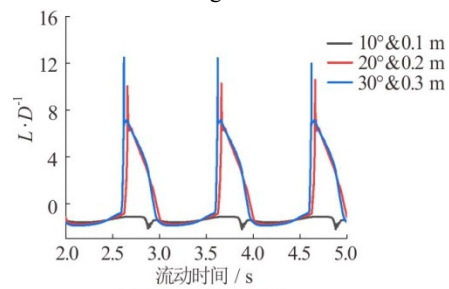


(a) NACA翼型升阻比

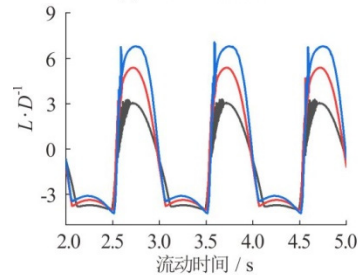


(b) 超空化翼型升阻比

图 20 (网上彩图) 两种翼型升沉运动升阻比曲线
Fig.20 (Color online) Two hydrofoils pitching motion of lift-to-drag ratio curves



(a) NACA翼型升阻比



(b) 超空化翼型升阻比

图 21 (网上彩图) 两种翼型复合运动升阻比曲线
Fig.21 (Color online) Two hydrofoils compound motion of lift-to-drag ratio curves

4 结论

本文以ys 930超空化水翼和NACA 65410水翼为研究对象，在数值模拟过程中通过改变运动的幅值，对比分析了两种翼型在俯仰、升沉以及俯仰升沉复合运动情况下的水动力性能。探究了对水动力性能变化特点及其主要原因。主要结论如下：

(1) 在俯仰运动过程中，升力系数和阻力系数产生的脉冲是由下翼面位置处的气泡溃灭造成的。对不同翼型而言，气泡溃灭位置略有差异，NACA翼型受影响较大，脉冲峰值更高。但在升沉运动过

程中, 两种翼型的水动力性能变化不明显, 能够保持相对的稳定。

(2) 在升沉运动情况下, ys 930翼型的升阻力系数平均值始终高于NACA翼型; 而在俯仰和复合运动中, 运动幅值逐步提高会使得NACA翼型平均值高于ys 930翼型; 不论何种运动状态, ys 930翼型升阻力系数的方差较大, 稳定性较低。

(3) 从升阻比曲线来看, ys 930翼型在升沉运动可以获得较高升阻比。但在复合运动情况下, 随着俯仰角度的增加, NACA的水动力性能明显提高。

(4) 从模拟结果上来看, 超空化翼型比NACA翼型具有更高的升阻比, 更适用于高速航行。但是超空化翼型在振荡过程中稳定性较低, 水动力性能有待于进一步研究和提高, 后期将会对超空化翼型的稳定性优化开展更深入的研究。

参 考 文 献:

- [1] WU Y T, WANG D P. A wake model for free-streamline flow theory. Part 2. Cavity flows past obstacles of arbitrary profile[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1963, 18(1): 65-93.
- [2] FURUYA O, ACOSTA A J. A note on the calculation of supercavitating hydrofoils with rounded noses[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1973, 95(2): 221-227.
- [3] 钟诚文, 汤继斌. 二维空化、超空化流动的数值模拟[J]. *计算力学学报*, 2006, 23(6): 772-777.
ZHONG Cheng-wen, TANG Ji-bin. A numerical simulation of the cavity, supercavity flow[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2006, 23(6): 772-777.
- [4] BRIZZOLARA S, BONFIGLIO L. Comparative CFD investigation on the performance of a new family of super-cavitating hydrofoils[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2015, 656, 012147.
- [5] LI Xiang-bin, LI Nan, WANG Guo-yu, et al. Reverse motion characteristics of water-vapor mixture in supercavitating flow around a hydrofoil[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2016, 28(5): 757-766.
- [6] TUNCER I H, PLATZER M F. Thrust generation due to airfoil flapping[J]. *AIAA Journal*, 1996, 34(2): 324-331.
- [7] 俞国华, 竺晓程, 杜朝辉. 俯仰风力机翼型动态失速数值模拟[J]. *太阳能学报*, 2011, 32(11): 1571-1579.
YU Guo-hua, ZHU Xiao-cheng, DU Zhao-hui. Numerical simulation of pitching wind turbine airfoil dynamic stall[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2011, 32(11): 1571-1579.
- [8] 王俊芳. 二维振荡水翼的水动力特性分析[D]. 中国海洋大学, 青岛, 中国, 2013.
WANG Jun-fang. Hydrodynamic analysis of two-dimensional oscillating hydrofoil[D]. *Ocean university of China, Qingdao, China*, 2013.
- [9] 徐佩, 郭春雨, 王超, 等. 二维振荡翼型俯仰和升沉耦合运动的水动力性能分析[J]. *船舶力学*, 2020, 24(3): 271-281.
XU Pei, GUO Chun-yu, WANG Chao, et al. Hydrodynamic performance analysis of pitching and heaving coupling motion for two dimensional oscillating airfoil[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2020, 24(3): 271-281.
- [10] 陈鑫, 鲁传敬, 李杰, 等. VOF 和 Mixture 多相流模型在空泡流模拟中的应用[C]. 第九届全国水动力学学术会议暨第二十二届全国水动力学研讨会, 成都, 中国, 2009.
CHEN Xin, LU Chuan-jing, LI Jie, et al. Application in simulating cavitating flows by using VOF and mixture multiphase models[C]. *Proceedings of the 9th National Congress on Hydrodynamics and 22nd National Conference on Hydrodynamics*. Chengdu, China, 2009.
- [11] RAYLEIGH L. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity[J]. *Philosophical Magazine Series 6*, 1917, 34(200): 94-98.
- [12] PLESSET M S. The dynamics of cavitation bubbles[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1949, 16: 228-231.
- [13] ZWART P J, GERBER A G, BELAMRI T. A two-phase flow model for predicting cavitation dynamics[C]. *ICMF 2004 International Conference on Multiphase Flow*. Yokohama, Japan, 2004.
- [14] 钱忠东, 黄社华. 四种湍流模型对空化流动模拟的比较[J]. *水科学进展*, 2006, 17(2): 203-208.
QIAN Zhong-dong, HUANG She-hua. Comparison and analysis of computed results for cavitating flow with four turbulence models[J]. *Advances in Water Science*, 2006, 17(2): 203-208.
- [15] 杨敏官, 尹必行, 康灿. 绕水翼超空化流场的数值模拟[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2012, 33(1): 39-43.
YANG Min-guan, YIN Bi-xing, KANG Can. Numerical simulation of supercavitating flow around hydrofoil[J]. *Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition)*, 2012, 33(1): 39-43.
- [16] ANSYS Inc. ANSYS Fluent 14.5 User's Guide[M]. PA, USA: ANSYS Inc, 2012.