

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2022.02.004

## 绕弹性水翼空化流动及其流激振动特性研究

丘润荻<sup>1,3</sup>, 支玉昌<sup>4</sup>, 张珍<sup>5</sup>, 黄仁芳<sup>1\*</sup>, 王一伟<sup>1,2,3</sup>, 杜特专<sup>1,2</sup>

- (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: hrenfang@imech.ac.cn;  
2. 中国科学院大学 工程科学学院, 北京 100049;  
3. 中国科学院大学 未来技术学院, 北京 100049;  
4. 中山大学 航空航天学院, 广州 510275;  
5. 石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 石家庄 050043)

**摘要:** 该文采用基于径向基函数的流固耦合方法, 对不同空化数下绕刚性水翼/弹性水翼的空泡形态及其流激振动特性进行了数值模拟。结果表明, 绕弹性水翼空泡形态具有三个典型特征: ①靠近翼尖前缘的附着空泡形态为三角形; ②翼尖出现梢涡空化, 梢涡空化随着空化数的降低而逐渐明显; ③回射流作用下水翼存在云状空泡的周期性脱落。对不同空化数下弹性水翼的振动特性进行分析发现, 随着空化数的下降, 水翼振动的平均振幅及振幅波动值先增大再减小, 平均振幅和振幅波动由大到小依次是: 云空化>超空化>片空化。

**关键词:** 弹性水翼; 流固耦合; 空化; 流激振动

**中图分类号:** O352

**文献标志码:** A

## Investigations into cavitating flows and flow-induced vibration characteristics around flexible hydrofoil

Run-di Qiu<sup>1,3</sup>, Yu-cang Zhi<sup>4</sup>, Zhen Zhang<sup>5</sup>, Ren-fang Huang<sup>1\*</sup>, Yi-wei Wang<sup>1,2,3</sup>,  
Te-zhuan Du<sup>1,2</sup>

- (1. Key Laboratory 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;  
3. School of Future Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;  
4. School of Aeronautics and Astronautics, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China;  
5. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** In this paper, the fluid-structure coupling strategy based on the radial basis function (RBF) is used to numerically simulate the cavitating flows and the flow-induced vibration characteristics around the rigid/flexible hydrofoil at different cavitation numbers. The results show that there are three typical features of the cavitating flows around the flexible

**收稿日期:** 2021-07-14(2021-09-26 修改稿)

**基金项目:** 国家自然科学基金(52006232, 11772340)

**作者简介:** 丘润荻(1997-), 男, 广西南宁人, 博士研究生。

**Received:** July 14, 2021 (Revised September 26, 2021)

**Project supported by foundations:** Supported by the National Natural Science Foundation of China(52006232, 11772340)

**Biography:** Run-di Qiu (1997-), Male, Doctoral candidate.

hydrofoil, i.e., (a) The attached cavity near the leading edge of the hydrofoil tip is triangular, (b) Tip vortex cavitation appears on the hydrofoil tip, and the tip vortex cavitation becomes gradually obvious with the decrease of cavitation number, and (c) The cloud cavities periodically shed off due to the re-entrant jet. Based on analyses of the vibration characteristics of the flexible hydrofoil under different cavitation numbers, as the cavitation number decreases, both the average amplitude and the amplitude fluctuation of the hydrofoil vibrations firstly increase and then decrease, which are in descending order as cloud cavitation > supercavitation > sheet cavitation.

**Key words:** Flexible hydrofoil; Fluid-structure interaction; Cavitation; Flow-induced vibration

## 引言

空化是一种特殊的物理现象, 常见于各类高速水动力学问题中, 即当液体的局部压力低于饱和蒸汽压时, 液体发生相变的过程。自然空化往往发生在水下高速航行器周围, 其生成与溃灭伴随着短时的压力波动, 会对航行器的平稳运行和姿态精确控制产生影响, 并干扰航行器内部电子元器件的正常运行, 进而破坏航行体表面的结构<sup>[1-5]</sup>。空化现象往往涉及多相流动、传热传质以及湍流等问题, 且具有强烈的非定常和非线性特点, 是高速水动力学基础研究和工程应用中的关键问题。国内外学者对空化领域已经进行了广泛而深入的研究, 阐明了空化的基本性质与流态分类, 为各类工程应用提供了参考<sup>[6-10]</sup>。

随着船舶、海洋工程与高速水动力学领域的发展, 人们对航行器与水下结构的安全和稳定性要求日趋严格。原先针对刚性物体的分析方法已不能满足现有的工程需要, 流激振动与水弹性问题开始受到重视。水下结构的流激振动问题会导致严重的后果, 外部流场频率与结构固有频率接近时发生的锁频现象, 会导致结构的振动幅度被突然放大, 这使得结构更易被破坏, 并严重威胁结构安全<sup>[11-12]</sup>。国内外对典型工程结构如弹性水翼的空化流激振动问题进行了大量的实验与数值模拟研究<sup>[13-14]</sup>。Ducoin等<sup>[15-16]</sup>使用高速摄影机与激光多普勒测距仪分别测量了弹性水翼在非空化流场与空化流场中的空泡形态与振动位移。实验结果表明, 不发生空化时, 水翼的振动情况受液体的黏性效应与失速攻角影响, 空化的出现会增加水翼的振动幅度, 并导致水翼的振动模态发生变化。Akcabay等<sup>[17-19]</sup>研究了空化流激振动对NACA66弹性水翼动力学响应的影响。结果表明, 降低水翼的刚度会导致流激振动的阻力升高, 前缘部分空化的条件下, 空泡的最大长度增加且空泡脱落频率下降; 当空泡脱落频率贴近系统的响应频率时, 将发生频率聚焦现象(frequency focusing), 而在频率远离系统的响应频率时, 空泡脱落将引发水翼的高次震动, 使水翼系统的频率谱被拓宽。高远等<sup>[20]</sup>对NACA66弹性水翼的空穴形态与振动特性进行了系统研究, 采用多普勒

激光测振仪测量了水翼振动速度, 并采用小波分析方法对水翼振动数据的时域-频域特性进行了分析, 结果指出, 随着空化数的降低, 流场从无空化演化至云状空化时水翼的振动强度逐渐增大, 水翼振动的频率与空穴脱落的频率相同。Wu等<sup>[21]</sup>研究了不锈钢与POM Polyacetate制成的NACA66水翼在不同空化状态下流激振动特性, 结果表明, 弹性水翼的最大振幅在空化初生与片状空化时较小, 在云状空化时显著增大, 而在超空化时减小; 由于POM Polyacetate水翼扭转变形使得有效攻角增大, POM Polyacetate水翼的振动频率要大于不锈钢水翼。Smith等<sup>[22-23]</sup>在变压水洞中使用高速摄影与同步测力技术研究了绕不锈钢水翼的片空化、云空化和超空泡流动特性, 实验观测到了冲击波诱导的空泡脱落和回射流诱导的空泡脱落, 研究表明水翼弹性加速了空化流态之间的转变, 结构的力学行为会影响空化初生、发展和溃灭等物理过程。

绕弹性水翼空化实验研究为数值模拟提供了大量可靠的数据, 随着计算资源的丰富和理论模型的逐步完善, 空化流场与结构耦合的数值模拟日渐成熟。吴钦等<sup>[24]</sup>基于完全耦合算法对二维NACA0009水翼的流固耦合特性进行了数值模拟研究, 采用Theodorsen模型和Munch模型对刚性和弹性水翼的水弹性响应进行了数值计算, 分析了流体与结构的相互作用关系, 研究了影响结构水弹性响应和流固耦合特性的关键因素。Lee等<sup>[25]</sup>使用开源软件平台OpenFOAM与其团队开发的非线性有限元求解器FEANL进行了弹性水翼涡激振动的紧耦合计算, 计算的水翼受力、翼尖位移、速度场与水洞实验数据吻合得较好, 说明该方法的有效性。姚志峰等<sup>[26]</sup>以NACA0009弹性水翼为研究对象, 采用SST  $k-\omega$ 湍流模型和Zwart-Gerber-Belamri (ZGB)空化模型来预测流场特性, 利用分离式双向迭代的流固耦合方法计算空化条件下水翼的预设激振响应, 获得了弹性水翼水中固有频率与附加阻尼比。Münch等<sup>[27]</sup>提出了一种绕水翼非定常流动的水弹性响应预测模型, 通过建立流体惯性、阻尼和刚度系数的经验表达式, 准确预测了流固耦合作用下的水动力学系数。

由于空化流固耦合问题计算量大且计算流程复杂, 目前数值模拟仍侧重于二维刚性水翼, 但是, 空化在接近翼尖部位会受梢涡空化的影响, 二维水

翼数值模拟对小展弦比的三维水翼不再适用。因此,改进针对三维水翼空化流激振动的数值模拟方法,对于研究三维水翼在空化载荷作用下的振动特性具有重要意义。

基于前期的研究基础<sup>[28]</sup>,本文通过基于悬臂梁模态的三维水翼结构,通过径向基函数的插值方法进行非定常空化流固耦合计算,得到三维水翼的结构振动特性和空化流动规律,为实际工程中水翼的水弹性响应分析提供进一步参考。

本文的具体内容安排如下:在第1节中,主要介绍了非定常空化流固耦合数值计算方法,包括控制方程、空化模型、湍流模型、流固耦合策略以及计算模型、网格与边界条件;在第2节中,对非定常空泡演变规律及水翼水动力性能进行了分析;在第3节中,对研究内容进行了总结。

## 1 数值计算方法

### 1.1 控制方程

本文采用均质平衡流模型,假设空化流动中汽相与液相之间没有相对运动,那么,汽相与液相共用一套连续性方程和动量方程,公式如下

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

式中:  $u_i$  为速度在  $i$  方向上的分量,  $p$  为压力,  $\mu$  为混合相的黏度,  $\rho$  为混合相的密度,混合相的密度和黏度可写成如下式子

$$\rho = \alpha_v \rho_v + (1 - \alpha_v) \rho_l \quad (3)$$

$$\mu = \alpha_v \mu_v + (1 - \alpha_v) \mu_l \quad (4)$$

下标  $l$  和  $v$  分别为液态水和水蒸汽,  $\alpha$  为汽相所占的体积分数。

### 1.2 空化模型

本文采用 Schnerr 等<sup>[29]</sup>基于 Rayleigh-Plesset 方程提出的空化模型,其汽相输运方程如下

$$\frac{\partial(\rho_v \alpha_v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_v \alpha_v u_j)}{\partial x_j} = \dot{m}^+ - \dot{m}^- \quad (5)$$

式中:  $\dot{m}^+$  与  $\dot{m}^-$  分别为相变所导致的蒸发与凝结源项,表达式如下

$$\dot{m}^+ = \frac{3}{R_B} \frac{\alpha_v (1 - \alpha_v) \rho_l \rho_v}{\rho} \sqrt{\frac{2 \max(p_v - p, 0)}{3 \rho_l}} \quad (6)$$

$$\dot{m}^- = \frac{3}{R_B} \frac{\alpha_v (1 - \alpha_v) \rho_l \rho_v}{\rho} \sqrt{\frac{2 \max(p - p_v, 0)}{3 \rho_l}} \quad (7)$$

式中: 气泡半径  $R_B$  与气泡密度  $N_B$  和汽相体积分数有关

$$R_B = \left( \frac{\alpha_v}{1 - \alpha_v} \frac{3}{4\pi} \frac{1}{N_B} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

空化模型的经验参数采用 Schnerr 等<sup>[29]</sup>的推荐值:  $p_v$  为饱和蒸汽压,取值为 3 540 Pa;  $N_B$  取  $10^{13}$ 。

### 1.3 湍流模型

为了保证空化流激振动的计算精度,本文采用大涡模拟(Large Eddy Simulation, LES)方法<sup>[30]</sup>对空化流动进行数值模拟。本文使用的滤波器为盒式滤波器,在可压缩流动的条件下还使用了 Farve 平均对物理量进行了处理。对 Navier-Stokes (NS)方程进行滤波后得到 LES 控制方程如下

$$\frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial(\tilde{\rho} \tilde{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\tilde{\rho} \tilde{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\tilde{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (10)$$

式中:  $\tau_{ij}$  为亚格子应力(Subgrid-Scale, SGS)张量,定义如下

$$\tau_{ij} = \rho (\overline{u_i u_j} - \overline{u_i} \overline{u_j}) \quad (11)$$

SGS 模型采用壁面自适应局部涡黏模型(Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity, WALE),该模型中 SGS 应力与滤波速度等物理量的关系如下

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = -2 \mu_t \overline{S_{ij}} \quad (12)$$

$$\mu_t = \rho \Delta_s^2 \frac{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^{3/2}}{(\overline{S_{ij}} \overline{S_{ij}})^{5/2} + (S_{ij}^d S_{ij}^d)^{5/4}} \quad (13)$$

$$\overline{S_{ij}} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (14)$$

$$S_{ij}^d = \frac{1}{2} (\overline{g_{ij}^2} + \overline{g_{ij}^2}) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \overline{g_{kk}^2} \quad (15)$$

$$\overline{g_{ij}} = \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} \quad (16)$$

$$\Delta_s = \min(\kappa d, C_s V^{1/3}) \quad (17)$$

式中:  $\Delta_s$  为亚格子混合长度,  $\kappa$  为冯·卡门常数,  $d$  为网格距离壁面最近的距离,  $V$  为当前网格的体积,  $C_s$  为根据各向同性湍流确定的系数, 取值为 0.325 [31]。

#### 1.4 流固耦合策略

本文的流固耦合计算通过商业软件 Fluent 的用户自定义模块(User Defined Function, UDF)来实现, 分别求解结构方程与流场方程, 迭代求解步骤如下 [28]:

①采用 1.1-1.3 节的控制方程计算水翼周围流场及所受的水动力;

②根据虚功等效原理, 采用径向基函数方法 [32] 将流体网格点的受力插值到固体网格点上, 使固体计算域内的网格发生变形。为了减少动网格的计算量, 提高计算效率, 引入了贪婪算法来减少物面插值控制点的数量;

③弹性水翼上各处的物理量使用悬臂梁方程求解。弹性水翼的固有频率以及对应的归一化模态如下

$$\omega_i = (\beta_i l)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho_s S l^4}}, (i=1, 2, 3, \dots) \quad (18)$$

$$\varphi_i(x) = \cos \beta_i x - \cosh \beta_i x + \theta_i (\sin \beta_i x - \sinh \beta_i x) \quad (19)$$

$$\theta_i = \frac{\cos \beta_i l + \cosh \beta_i l}{\sin \beta_i l + \sinh \beta_i l} \quad (20)$$

式中:  $\beta_1 l = 1.875$ ,  $\beta_2 l = 4.694$ ,  $\beta_3 l = 7.855$ 。弹性水翼的模量  $E$  为  $7.375 \times 10^5$  kPa,  $I$  为水翼沿着轴的转动惯量, 水翼密度  $\rho_s$  为  $1480$  kg/m<sup>3</sup>, 泊松比为 0.35, 水翼展长  $l$  为  $0.191$  m, 水翼截面积  $S$  为  $0.00265$  m<sup>2</sup>;

④基于固体网格点与流体网格点的插值关系更新流体网格点的坐标;

⑤基于空化流动计算控制方程更新当前时间步的空化数值模拟结果;

⑥重复上述步骤, 依次迭代直至满足预设数据交换次数时, 确认完成一个物理时间步的计算; 当所述物理时间步达到预设数量时, 得到三维水翼结构振动特性与非定常空化流动规律。

#### 1.5 计算模型、网格与边界条件

本文以 NACA66 水翼为研究对象, 计算域及边界条件如图 1 所示。水翼的弦长为  $C=0.15$  m, 展长为  $l=0.191$  m, 翼尖间隙为  $0.109$  m, 水翼攻角为  $8^\circ$ , 来流速度为  $U_\infty=5$  m/s。计算域长为  $14C$ 、高为  $10C$  和宽为  $2C$ 。该工况的雷诺数为  $Re=5.59 \times 10^7$ , 空化数为  $\sigma=0.8$ 。

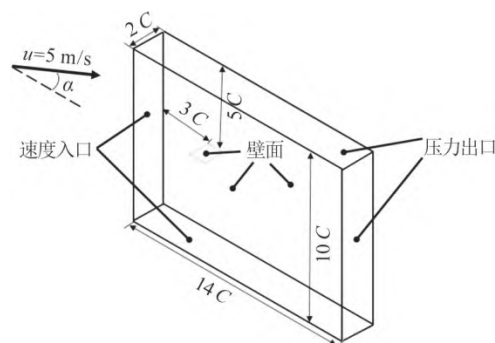


图 1 NACA66 水翼的计算域及边界条件  
Fig.1 Computation domain and boundary conditions for NACA66 hydrofoil

流体区域为结构化网格, 如图 2 所示, 绕水翼的网格满足  $y^+ \approx 1$ 。通过网格无关性分析, 最终的网格量约为 393 万。

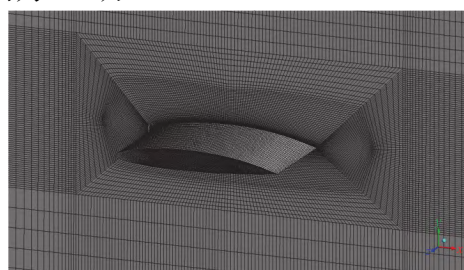


图 2 (网上彩图) 流体域的网格  
Fig.2 (Color online) Mesh in the fluid domain

控制方程在时间与空间上均为隐式离散, 瞬态项采用二阶隐式格式, 采用 PRESTO 格式求解压力方程, 对流-扩散项采用二阶迎风格式, 速度-压力耦合关系采用 SIMPLEC 算法进行求解。为了使库朗数接近于 1, 时间步长设置为  $1 \times 10^{-4}$  s。

## 2 结果与讨论

### 2.1 非定常空泡演变规律

本小节将分析绕刚性水翼和弹性水翼的空泡随时间的演变规律及成因。

图 3(a)描述了刚性水翼和弹性水翼空泡体积随时间变化的曲线, 图 3(b)给出了两种水翼空泡体积变化的频谱图。由图 3(a)和图 3(b)可以看出, 无论是刚性水翼还是弹性水翼, 空泡体积都呈现出准周期性变化的特征。随着空化数的降低, 空泡平均体积逐渐增加, 且空泡体积的波动愈发剧烈。与刚性水翼相比, 绕弹性水翼的空泡体积和空泡脱落频率发生了明显的改变, 这说明水翼的弹性变形会影响空泡的演变规律。

图 4 给出了弹性水翼在不同空化数下空泡形态的演变过程, 可以发现绕弹性水翼空泡形态具有以

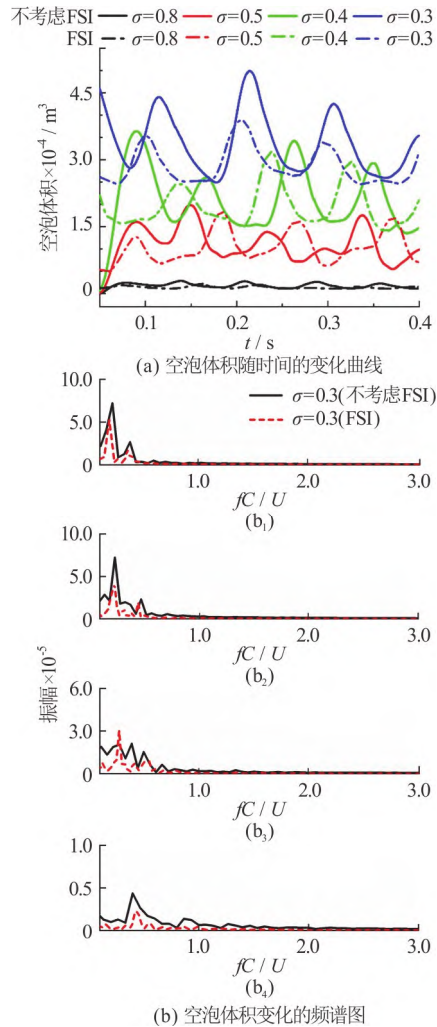


图3 (网上彩图) 空泡体积随时间的变化曲线和空泡体积变化的频谱图

Fig.3 (Color online) Time-dependent vibrations of cavity volume and Frequency spectra of cavity volume

下特征：①靠近翼尖前缘的附着空泡呈现为三角形；②翼尖存在梢涡空化；③回射流作用下水翼有云状空泡脱落。具体说明如下。

翼尖前缘的附着空泡边界在图4(a)-图4(d)中用红色虚线标注，可以发现，随着空化数的不断降低，空泡边界与水翼前缘的夹角不断增大，当 $\sigma = 0.3$ 时几乎成 $90^\circ$ 。其成因为水翼的三维效应，有限翼展的水翼在来流中，由于压力面的压力高于吸力面，在翼尖附近气流具有从压力面向吸力面卷起的趋势，进而形成翼尖涡。翼尖涡会在展向剖面形成下洗速度，使得当地实际有效攻角减小，并改变了水翼吸力面的压力分布，从而形成三角形的附着空泡。

水翼梢涡空化与翼尖涡之间有密切关系。受水翼翼尖处速度环量的影响，翼尖附近水流会绕过翼尖流向吸力面，因此在翼尖附近存在低压低速的分离区，更容易发生空化。对比数值模拟结果时发现，当空化数下降到 $\sigma = 0.5$ 时，水翼翼尖出现梢涡空化。梢涡空化的位置在图4中使用浅蓝色虚线标出。

周期性的空泡脱落是水翼空化流动中的重要现象，我们在图中使用灰色虚线标出。由图4(a)和图4(d)可以发现，周期性空泡脱落主要分为三个过程：

①空泡生长：空泡在水翼前缘生成，并沿着流向发展到最大空泡体积，空泡形态表现为稳定的片空化；

②回射流发展：在逆压梯度的驱动下，贴近水翼吸力面附近形成一股逆流而上的回射流；

③空泡脱落和再生长：当回射流与主流相遇时，两股方向相反的流动相互作用，随即产生了空泡的断裂和大尺度空泡的脱落。脱落的空泡随着主流向下游运动，并不断缩小，最终发生溃灭。与此同时，水翼前缘空泡再次生成，如此循环发展。

随着空化数的降低，云状空化的厚度不断增加，空泡附着区域不断增大，空泡脱落的尺度也不断变大，这与图3(a)中空泡体积的变化趋势相一致。

图5展示了回射流对空泡形态的影响( $\sigma = 0.4$ )。其中，橙色箭头是回射流的流向，黑色虚线为脱落的小尺度空泡，红色实线圆圈为前缘断裂后脱落的大尺度空泡。从图5(a<sub>1</sub>)和图5(b<sub>1</sub>)可以看出，回射流不断向上游运动，在空泡内部诱导产生复杂的漩涡结构；同时，空泡尾缘发生一次脱落；脱落后的空泡随主流向下游运动。由于回射流与主流的相互作用，在水翼前缘产生局部高压，进而诱导空泡的二次脱落，如图5(b<sub>1</sub>)-图5(b<sub>3</sub>)所示。

## 2.2 水动力特性分析

空化数是描述空化程度的一个重要无量纲数，当空化数由大到小变化时，水翼的空泡形态呈现出不同的空泡特征。本节主要分析不同空化数下刚性水翼和弹性水翼的水动力性能。

图6给出了不同空化数下升力系数的变化曲线以及对应的频谱曲线，图7为水翼升力系数的统计信息。通过分析不同空化数下刚性水翼和弹性水翼的频率响应特性，可以得到如下结果：

①由图6(a)和图6(b)可知，弹性水翼与刚性水翼升力系数的变化具有明显的周期性，且与空泡演变周期变化一致，这是因为空泡的形态变化直接影响了水翼吸力面的压力分布。

②由图7可知，云状空化出现时弹性水翼的升力系数标准差大于刚性水翼的升力系数标准差，这是由于空泡的准周期性脱落引起弹性水翼的弯曲和扭转变形，使得水翼的有效攻角增加，进而增大了水动力载荷波动程度，同时水翼的弹性变形也会使空泡的演化过程更加复杂，造成水翼吸力面和压力面的压力差发生变化。

③水翼升力系数随时间的变化趋势与空泡形态相关：当空化数较大( $\sigma = 0.8$ )时，空泡形态主要以片状空化为主，空泡结构稳定，对水翼水动力行为的影响较小，因此，水翼升力系数波动较小；当

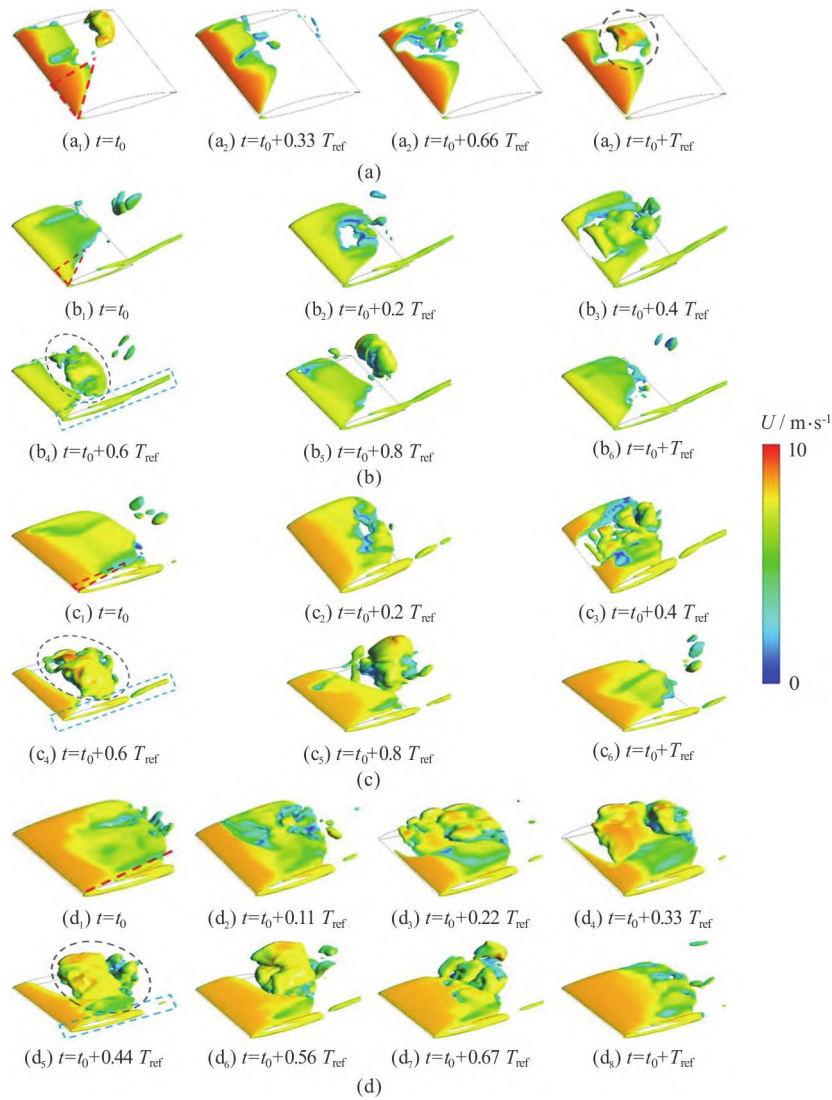


图 4 (网上彩图) 弹性水翼在不同空化数下空泡形态变化, 其中  $T_{ref}$  为空泡脱落周期

Fig.4 (Color online) The cavitation evolution for the flexible hydrofoil at different cavitation numbers, where  $T_{ref}$  is the cavity shedding cycle

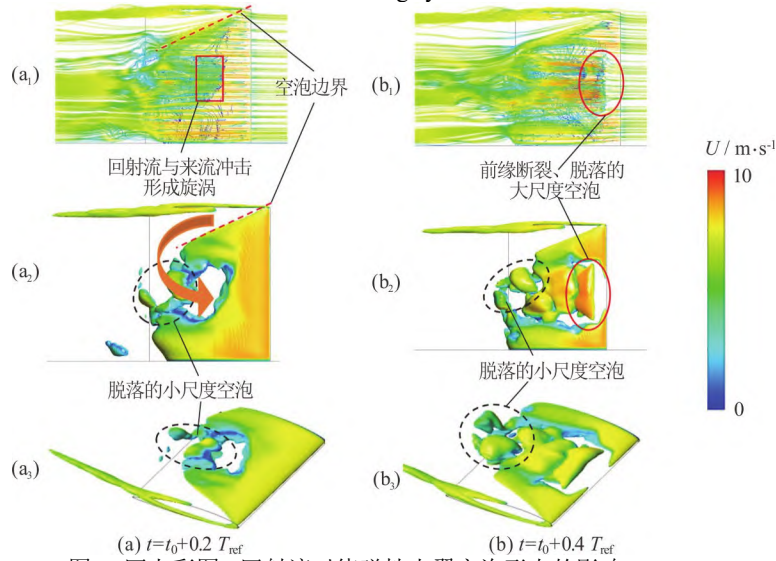


图 5 (网上彩图) 回流流对绕弹性水翼空泡形态的影响 ( $\sigma = 0.4$ )

Fig.5 (Color online) The effects of the re-entrant jet on the cavity shape ( $\sigma = 0.4$ )

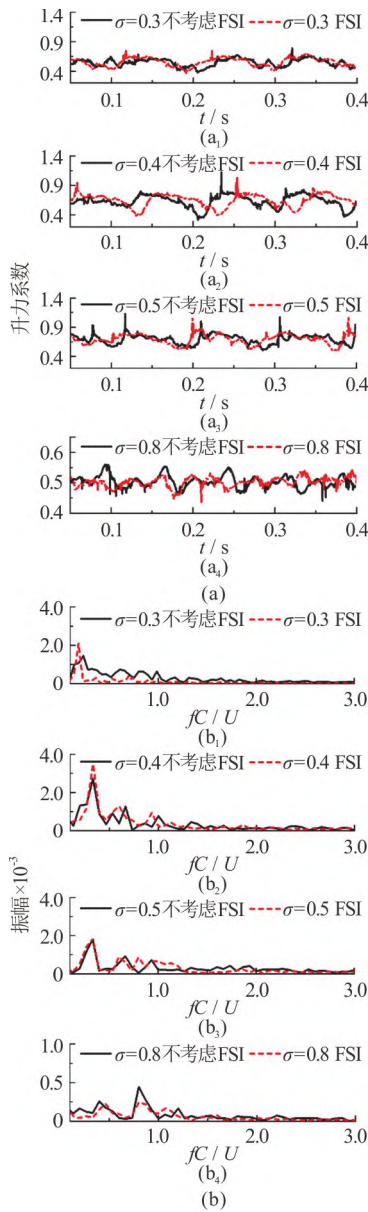


图 6 (网上彩图) 水翼升力系数随时间变化曲线及对应的频率谱

Fig.6 (Color online) Variations of lift coefficient over time and the corresponding frequency spectra

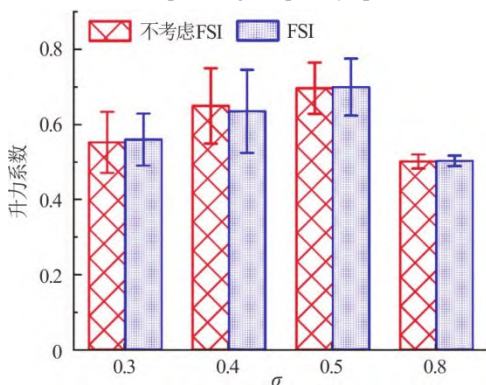


图 7 (网上彩图) 水翼升力系数的平均值与标准差

Fig.7 (Color online) Average values and standard deviations of the lift coefficient

空化数减小时, 例如  $\sigma=0.5$  和  $\sigma=0.4$  工况, 空泡形态主要表现为云状空化, 由于空泡的脱落溃灭及空泡-旋涡相互作用, 水翼升力系数波动剧烈; 当空化数小到一定程度时, 比如  $\sigma=0.3$  工况, 空泡形态发展为超空泡, 水翼吸力面完全被包裹在空泡内部, 空泡结构相对稳定, 因此水翼的升力系数标准差减小。

④由图 6(b)给出的频谱信息可知, 频谱主峰对应的是空泡演变周期。弹性水翼频谱波峰较刚性水翼的波峰多, 这说明水翼的弹性变形会使空泡流动更加复杂, 空泡形态的变化又会引起水翼升力的波动。这种波动在各个空化数下均存在, 不随工况的变化而发生变化。

### 2.3 振动特性分析

水翼在不同工况下的振动状态关系到水翼在各种复杂工况下能否正常工作, 本节探讨了空泡与振动位移之间的影响, 并分析了水翼振动特性在不同空化数下的具体表现。

通过比较不同工况下弹性水翼振动曲线的平均值, 可以评估水翼在一段时间内的平均振幅; 通过比较标准差, 则可以横向对比不同工况下水翼振幅波动大小。图 8 为弹性水翼在不同空化数下的振动特性, 其中图 8(c)为水翼位移随时间变化曲线的平均值与标准差。水翼振动位移按空化数大小由小到大排列的值依次为: 0.001 93、0.002 27、0.002 39 和 0.001 6, 如图 8(c)所示。水翼振动位移在云空化( $\sigma=0.5$  和  $\sigma=0.4$ ) 时较大, 其次为超空化阶段( $\sigma=0.3$ ), 在片空化( $\sigma=0.8$ ) 时最小。

不同发展阶段下空泡与水翼的接触面积决定了弹性水翼平均受力的大小, 受力的差异导致不同工况下位移平均值的大小不同。在弹性范围内, 水翼总体上仍遵循胡克定律, 位移与受力成正比, 这表明, 弹性水翼振幅平均值的变化规律与其所受升力大小的变化规律是一致的。弹性水翼的平均振幅由大到小依次是: 云空化>超空化>片空化, 这与图 7 中给出的平均升力变化规律是一致的。

对比水翼振幅波动, 可以发现, 随着空化数的下降, 水翼振动的平均振幅及水翼振幅波动值先增大再减小。本文中水翼振幅的波动值使用标准差计算, 该值按空化数从小到大排列的值依次为:  $2.862 \times 10^{-4}$ 、 $4.303 \times 10^{-4}$ 、 $4.214 \times 10^{-4}$  和  $6.018 \times 10^{-5}$ ; 这说明振幅波动从大到小依次是: 云空化>超空化>片空化。空泡的脱落与溃灭使得水翼表面的压力波动增加, 压力波作用在结构上使得水翼发生了弯曲与扭转, 进而影响到流场。超空化的空泡脱落一般发生在尾部, 对结构整体振动情况的影响较小; 云空化的空泡脱落发生在结构的前端, 对结构整体振动情况的影响较大。

图 9 比较了弹性水翼的振动位移与空泡体积变化规律, 可以看到空泡体积变化趋势与水翼振动位移的变化规律相吻合, 两者具有一致性。

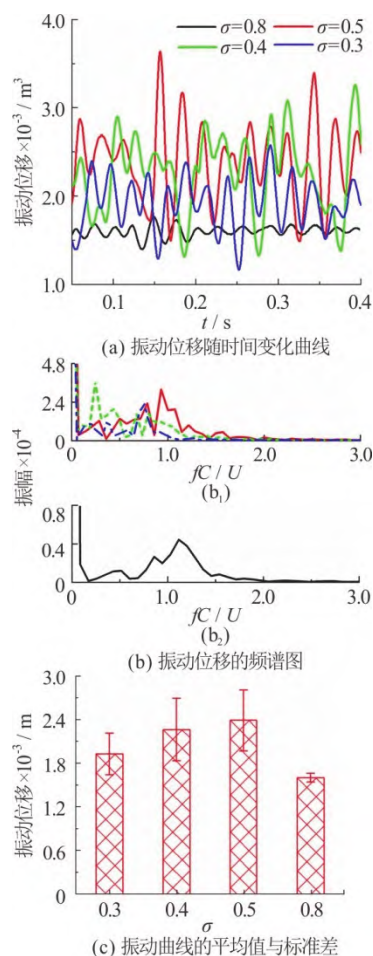


图8(网上彩图) 不同空化数下弹性水翼的振动特性  
Fig.8 (Color online) The vibration characteristics of the flexible hydrofoil under different cavitation numbers

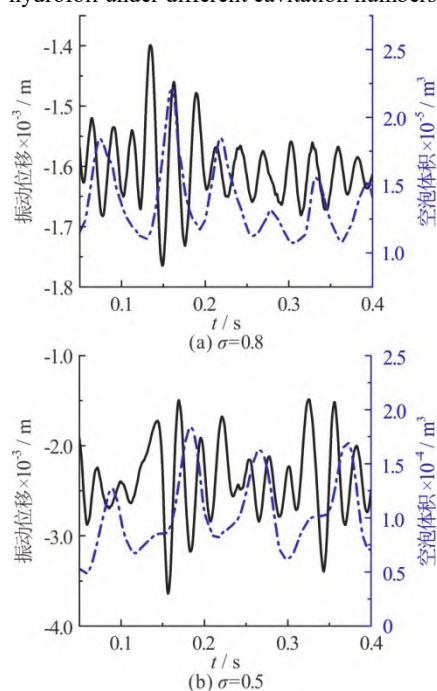


图9(网上彩图) 弹性水翼的振动位移与空泡体积的比较  
Fig.9 (Color online) Comparisons between the vibration displacement and the cavity volume for the flexible hydrofoil

### 3 结论

本文采用基于径向基函数的流固耦合方法, 对不同空化数下绕刚性水翼/弹性水翼的空泡形态、水动力特性和振动特性进行了数值模拟。

本文主要结论如下:

(1) 绕弹性水翼空泡形态具有以下特征: ①靠近翼尖前缘的附着空泡形态为三角形; ②翼尖出现梢涡空化, 梢涡空化随着空化数的降低而逐渐明显; ③回射流作用下水翼发生云状空泡的周期性脱落。

(2) 弹性水翼与刚性水翼升力系数的变化具有明显的周期性, 且与空泡演变周期一致。片空化和超空化时, 空泡结构相对稳定, 水翼升力系数波动较小。云状空化时, 由于空泡的脱落溃灭及空泡-旋涡相互作用, 水翼升力系数波动剧烈。

(3) 对不同空化数下弹性水翼的振动特性进行分析发现, 随着空化数的下降, 水翼振动的平均振幅及水翼振幅波动值先增大再减小。水翼平均振幅按空化数由小到大排列的值依次为: 0.001 93、0.002 27、0.002 39和0.001 6, 平均振幅由大到小依次是: 云空化>超空化>片空化; 水翼振幅波动按空化数从小到大排列的值依次为:  $2.862 \times 10^{-4}$ 、 $4.303 \times 10^{-4}$ 、 $4.214 \times 10^{-4}$ 和 $6.018 \times 10^{-5}$ ; 振幅波动从大到小依次是: 云空化>超空化>片空化。

### 参 考 文 献:

- [1] Brennen C E. Cavitation and bubble dynamics [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2014.
- [2] Qiu R D, Huang R F, Wang Y W, et al. Dynamic mode decomposition and reconstruction of transient cavitating flows around a Clark-Y hydrofoil [M]. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2020, 10(5): 327-332
- [3] Arndt R E A. Cavitation in fluid machinery and hydraulic structures [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 1981, 13(1):273-326.
- [4] 王一伟, 黄晨光. 高速航行体水下发射水动力学研究进展 [J]. *力学进展*, 2018, 48(1): 259-298.
- [5] 郭文璐, 李泓辰, 王静竹, 等. 单空泡与自由液面相互作用规律研究进展 [J]. *力学学报*, 2019, 51(6): 1682-1698.
- [6] Huang B, Qiu S C, Li X B, et al. A review of transient flow structure and unsteady mechanism of cavitating flow [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2019, 31(3): 429-444.



- [7] Luo X W, Huang R F, Ji B. Transient cavitating vortical flows around a hydrofoil using  $k-\omega$  partially averaged Navier-Stokes model [J]. *Modern Physics Letters B*, 2016, 30(1): 1550262.
- [8] Arndt R E A. Cavitation in vortical flows [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2002, 34: 143-175.
- [9] Huang R F, Shao S Y, Arndt R E A, et al. Numerical study of the behaviors of ventilated supercavities in a periodic gust flow [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2020, 142(6): 061403.
- [10] Ji B, Cheng H, Huang B, et al. Research progresses and prospects of unsteady hydrodynamics characteristics for cavitation [J]. *Advances in Mechanics*, 2019, 49(1): 428-479.
- [11] Wang Y W, Liao L J, Du T Z, et al. A study on the collapse of cavitation bubbles surrounding the underwater-launched projectile and its fluid-structure coupling effects [J]. *Ocean Engineering*, 2014, 84: 228-236.
- [12] Zhang W W, Li X T, Ye Z Y, et al. Mechanism of frequency lock-in in vortex-induced vibrations at low Reynolds numbers [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2015, 783: 72-102.
- [13] 吴钦, 郭一梦, 刘韵晴, 等. 非定常空化流动及其诱导振动特性研究综述 [J]. *空气动力学学报*, 2020, 38(4): 746-760.
- [14] Wu Q, Wang C C, Huang B, et al. Measurement and prediction of cavitating flow-induced vibrations [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2018, 30(6): 1064-1071.
- [15] Ducoin A, Astolfi J A, Sigrist J F. An experimental analysis of fluid structure interaction on a flexible hydrofoil in various flow regimes including cavitating flow [J]. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 2012, 36: 63-74.
- [16] Ducoin A, Young Y L. Hydroelastic response and stability of a hydrofoil in viscous flow [J]. *Journal of Fluids Structures*, 2013, 38: 40-57.
- [17] Akcabay D T, Young Y L. Influence of cavitation on the hydroelastic stability of hydrofoils [J]. *Journal of Fluids Structures*, 2014, 49: 170-185.
- [18] Akcabay D T, Chae E J, Young Y L, et al. Cavity induced vibration of flexible hydrofoils [J]. *Journal of Fluids Structures*, 2014, 49: 463-484.
- [19] Akcabay D T, Young Y L. Parametric excitations and lock-in of flexible hydrofoils in two-phase flows [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2015, 57: 344-356.
- [20] 高远, 黄彪, 吴钦, 等. 绕水翼空化流动及振动特性的实验研究 [J]. *力学学报*, 2015, 47(6): 1009-1016.
- [21] Wu Q, Wang Y N, Wang G Y. Experimental investigation of cavitating flow-induced vibration of hydrofoils [J]. *Ocean Engineering*, 2017, 144: 50-60.
- [22] Smith S M, Venning J A, Pearce B W, et al. The influence of fluid-structure interaction on cloud cavitation about a stiff hydrofoil. Part 1 [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2020, 896: A1.
- [23] Smith S M, Venning J A, Pearce B W, et al. The influence of fluid-structure interaction on cloud cavitation about a flexible hydrofoil [J]. *Part 2. Journal of Fluid Mechanics*, 2020, 897: A28.
- [24] 吴钦, 黄彪, 王国玉, 等. 基于完全耦合算法的绕水翼流固耦合特性研究 [J]. *船舶力学*, 2017, 21(7): 804-813.
- [25] Lee A H, Campbell R L, Craven B A, et al. Fluid-structure interaction simulation of vortex-induced vibration of a flexible hydrofoil [J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2017, 139(4): 041001.
- [26] 姚志峰, 赖桂桦, 刘婧, 等. 前缘空化对弹性水翼振动特性影响数值模拟 [J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2021, 61(11): 1325-1333.
- [27] Münch C, Ausoni P, Braun O, et al. Fluid-structure coupling for an oscillating hydrofoil [J]. *Journal of Fluids Structures*, 2010, 26(6): 1018-1033.
- [28] Huang R F, Du T Z, Wang Y W, et al. Numerical investigations of the transient cavitating vortical flow structures over a flexible NACA66 hydrofoil [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2020, 32(5): 865-878.
- [29] Schnerr G H, Sauer J. Physical and numerical modeling of unsteady cavitation dynamics [C]. *Proceedings of the Fourth International Conference on Multiphase Flow*, New Orleans, USA, 2001.
- [30] Fox R O. Large-eddy-simulation tools for multiphase flows [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2012, 44: 47-76.
- [31] Nicoud F, Ducros F. Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor [J]. *Flow Turbulence and Combustion*, 1999, 62(3): 183-200.
- [32] Huang C D, Liu W, Yang G W. Numerical studies of static aeroelastic effects on grid fin aerodynamic performances [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2017, 30(4): 1300-1314.