

翼型表面仿生特殊构型对空化抑制影响的研究

王燕燕¹, 赵伟国¹, 韩向东², 范鹏军³, 刘在伦¹, 胡建启³

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 730050, 兰州; 2. 南昌理工学院建筑工程学院, 330044, 南昌;
3. 机械工业兰州石油化工设备检测所有限公司, 730070, 兰州)

摘要: 为探究翼型表面仿生特殊构型对空化抑制的影响,本文采用修正的 SST $k-\omega$ 湍流模型并结合 Zwart-Gerber-Belamri 空化模型对常规与表面含仿生特殊构型的 NACA0015 翼型的非定常空化绕流进行数值仿真,确定仿生特殊构型的影响且揭示相应的机理。研究表明:对于表面含仿生特殊构型的翼型,相同频率下的升阻力幅值明显小于常规翼型下的且幅值整体波动较弱,同时平均升阻比增大;与常规翼型下的相比,空泡周期性演化发展过程变弱且空泡体积也减小;表面含仿生特殊构型翼型下的空化柔度在正负值间变化的程度较常规翼型下的弱,空化柔度小于 0 所对应的时间显著减少仿生特殊构型显著抑制空化。低压区与涡旋分布范围均小于常规翼型下的,湍动能分布范围减小且强度减弱,在其综合影响下实现抑制空化的目的,流场因而变稳定。

关键词: NACA0015 翼型;空化;仿生特殊构型;机理

中图分类号: O359 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202209002 **文章编号:** 0253-987X(2022)09-0010-10



OSID 码

Effects of Bionic Special Configuration on Hydrofoil Surface on Cavitation Suppression

WANG Yanyan¹, ZHAO Weiguo¹, HAN Xiangdong², FAN Pengjun³, LIU Zailun¹, HU Jianqi³

(1. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. School of Civil Engineering, Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330044, China;

3. Machine Industry Lanzhou Petrochemical Equipment Inspection Institute Co., Ltd., Lanzhou 730070, China)

Abstract: To investigate effects of bionic special configuration on hydrofoil surface on cavitation suppression, unsteady cavitating flow around general NACA0015 hydrofoil and the hydrofoil with bionic special configuration on the surface is numerically simulated via the combination of modified SST $k-\omega$ turbulence model and Zwart-Gerber-Belamri cavitation model. Effects of bionic special configuration are determined and corresponding mechanisms are revealed. The results show that compared with the general hydrofoil, the hydrofoil with bionic special configuration on the surface has obviously lower amplitudes of lift and drag under the same frequency, weaker overall amplitude fluctuation, and greater average lift-drag ratio, that compared with the general hydrofoil, the hydrofoil with bionic special configuration on the surface has weaker periodic evolution of cavitation and smaller volume of cavitation, that compared with the general hydrofoil, the hydrofoil with bionic special configuration on the surface has a weaker variation flexibility of cavitation between positive and negative values and significantly fewer moments that cavitation flexibility was less than 0. Cavitation is remarkably suppressed by bionic special

收稿日期: 2022-05-02。 作者简介: 王燕燕(1988—),女,博士生;韩向东(通信作者),男,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52169018);甘肃省教育厅产业支撑计划资助项目(2021CYZC-27)。

网络出版时间: 2022-06-13

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220613.0856.002.html>

configuration. Low-pressure regions and distribution scopes of vortices are smaller than those of the general hydrofoil. For turbulent kinetic energy, the distribution range becomes smaller and the intensity is weaker. Under the comprehensive effects, aim of suppression on cavitation is achieved and therefore, the flow fields become stable.

Keywords: NACA0015 hydrofoil; cavitation; bionic special configuration; mechanism

空化是流体动力学领域液体特有的流动现象,本质是液体与蒸汽间的相变。空化是指液体内部局部压强降低到饱和蒸汽压之下时,液体内部或液固交界面上出现的空泡形成、发展、脱落和溃灭的过程^[1],常发生于泵与阀等水力机械内^[2-4]。空泡破裂会形成激波与微射流,引起水力机械不同程度的振动、冲击与噪声;空泡破裂会产生很高的局部压力,加剧物体表面空蚀,使结构提早发生疲劳破坏^[5]。

由于空化现象的存在严重影响水力机械的水动力性能,因而对其抑制一直备受国内外学者广泛关注,大多通过改变物理模型结构来实现。Kawanami等^[6]提出在翼型表面设置障碍物阻挡回射流来控制云空化的方法,可显著改变空化演化过程。王巍等^[7]通过在水翼吸力面布置凹槽的方法改变表面结构实现对空化流动的调节。Choi等^[8]通过在靠近叶顶的壳体壁上布置J型沟槽,并配合后掠诱导轮,使得在标准流量与设计流量下,均可显著改善涡轮泵的吸入性能;另一方面,可完全抑制小流量下的旋转回流空化和最佳效率点附近的空化喘振。类似的,Liu等^[9]在Clark-Y翼型上开槽抑制因空化所形成的不稳定性。恰当的几何结构可阻挡回射流,从而抑制非定常空化发展。郭伟等^[10]采取在翼型表面设置一段拱弧对回射流进行阻挡,经证明该拱弧对云状空化的抑制作用较为明显。Fujii等^[11]通过在诱导轮上方布置8个喷嘴并沿周向喷射射流,研究对空化的抑制得到,改变喷嘴轴向位置、射流速度与喷射方向,在射流流量约占总流量10%时,与轴旋转方向相同的射流可显著减少诱导轮内空化不稳定性的发生范围。Yang等^[12]数值研究喷嘴挡板伺服阀内空化流动的抑制,相较于圆形喷嘴出口,三角形喷嘴出口在相同几何形状和进口压力下可有效减弱空化。Rhee等^[13]通过实验与数值仿真相结合开展舵间隙空化抑制的研究得到,间隙阻流装置可有效抑制空化发展并显著提高升力。Jin^[14]发现NACA0015水翼尾部固定单侧翼的设计能够持续抑制流体边界层分离,实现空化稳定性,并进一步实现NACA0015水翼的非空化控制。Qian等^[15]提出抑制双叶瓣机械心脏瓣膜空化的策略,通过增大叶

片厚度和减小旋转半径可有效抑制空化发展。部分学者从仿生学角度出发研究对空化的抑制。例如,Zhao等^[16]将鳍状棘的仿生结构布置于NACA0015翼型吸力面,发现翼型吸力面空泡体积与湍动能均降低,同时翼型升阻比增加约15.4%,流场变得更加稳定。陈柳等^[17]仿座头鲸鳍肢前缘的不规则凸结结构,将其作用于翼型前缘,弦向空化发展得到控制,尺度显著减小,实现抑制空化的目的。陈思青等^[18]为缓解空化对水液压系统的破坏,采用类乌贼射流孔的仿生结构,将大部分空泡转移至非重要区域,达到抑制阀芯密封面空化的目的。

综上所述,常规改变模型结构来抑制空化所取得的成果较为丰硕,但是通过仿生学角度来改变模型结构进而抑制空化的研究相对较少。鲫鱼对多种不同复杂环境均具有较强的适应能力,其身体布满的鳞片至关重要^[19]。受其启发,本文以NACA0015翼型为研究对象,以布满鲫鱼身体的鳞片为原型,通过构建水翼表面仿生特殊构型(鳞片构型)来实现对云空化演化的被动控制。开展水翼性能、空泡演化、空泡体积与空化柔度的对比分析,确定该仿生构型的作用效果;通过压力、涡旋与湍动能的对比研究,阐明相应的控制机理。

1 数值算法

1.1 控制方程

空化流动为一种作用机理复杂的水汽间存有相变的多相流动。数值计算过程中,清水介质为主相,水蒸气为次相,两者均为均质混合流体。控制方程^[20]如下

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_m u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

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

$$\frac{\partial (\rho_l \alpha_l)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_l \alpha_l u_j)}{\partial x_j} = m_e - m_c \quad (3)$$

式中: ρ_m 为混合相密度; μ_m 为混合相黏度; m_e 与 m_c 分别为蒸发源项与凝结源项; u 为混合相速度; x 为

空间坐标; i 与 j 值为1,2,3; ρ_l 为清水介质密度; α_l 为清水的体积分数; p 为压力; t 为时间。

ρ_m 与 μ_m 表达式分别如下

$$\rho_m = \rho_l \alpha_l + \rho_v \alpha_v \quad (4)$$

$$\mu_m = \mu_l \alpha_l + \mu_v \alpha_v \quad (5)$$

式中: ρ_v 为水蒸气密度; α_v 为水蒸气的体积分数; μ_l 为清水介质黏度; μ_v 为水蒸气黏度。

1.2 湍流模型

通过 SST $k-\omega$ 湍流模型^[21]求解湍流流动,该模型最显著的特征是将 $k-\epsilon$ 模型与标准 $k-\omega$ 模型的优势结合起来。求解过程中,混合函数的使用可实现 $k-\omega$ 模型对近壁面的求解和 $k-\epsilon$ 模型对远离壁面处的求解,方程如下

$$\rho_m \frac{\partial k}{\partial t} + \rho_m u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} =$$

$$G_k - \rho_m \beta_* \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (6)$$

$$\rho_m \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho_m u_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha G_\omega - \rho_m \beta \omega^2 +$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2\rho_m (1 - F_B) \frac{1}{\sigma_{\omega_{out}}} \omega \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (7)$$

式中: k 为湍动能; G_k 为对应生成项; ω 为湍流耗散率; G_ω 为对应的生成项; F_B 为混合函数; μ_t 为湍流黏度; $\alpha, \beta, \sigma_k, \sigma_\omega$ 为模型经验常数; β_* 为0.09; $\sigma_{\omega_{out}}$ 为1.176。

借鉴对 $k-\epsilon$ 模型中湍流黏度修正的方法^[22],通过式(8)与(9)的结合,实现对 SST $k-\omega$ 模型中湍流黏度的修正,密度修正函数如图1所示,从而实现降低空化区域湍流黏度的目的,计算过程中, n 取值为10,表达式如下

$$\mu_t = f(\rho) \frac{k}{\omega} \quad (8)$$

$$f(\rho) = \rho_v + \frac{(\rho_m - \rho_v)^n}{(\rho_l - \rho_v)^{n-1}} \quad (n \geq 1) \quad (9)$$

1.3 空化模型

本文采用 Zwart-Gerber-Belamri 空化模型^[23]求解绕翼型的非定常空化流动,该模型是对 Kubota 模型的改进^[24-25],可较好地捕捉空化流动的非定常特征,蒸发与凝结源项如下

$$m_e = F_{vap} \frac{3\alpha_{nuc}(1 - \alpha_v)\rho_v}{r_b} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_v - p}{\rho_l}}, \quad p < p_v \quad (10)$$

$$m_c = F_{cond} \frac{3\alpha_v \rho_v}{r_b} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p - p_v}{\rho_l}}, \quad p > p_v \quad (11)$$

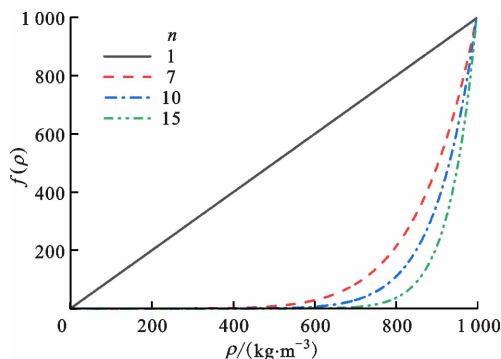


图1 密度修正函数

Fig. 1 Correction function of the density

式中: r_b 为空泡半径,值为 1×10^{-6} m; α_{nuc} 为空化核体积分数; p_v 为饱和蒸汽压,数值计算过程中, $p_v = 3\,169$ Pa; F_{vap} 为蒸发系数,值为50; F_{cond} 为凝结系数,值为0.01^[26]。

2 数学模型

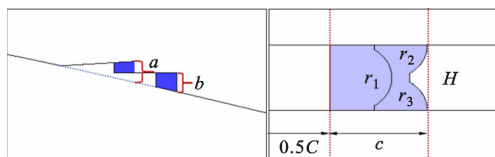
2.1 物理模型

鲫鱼身体表面布满鳞片(图2所示为鲫鱼鳞片实物图),不仅可起到保护作用,还可让其在水中畅快移动。受其启发,本文形成仿生特殊构型,结构示意图如图3所示,并布置于NACA0015翼型吸力面(后文均称表面含仿生特殊构型的翼型,原模型称为常规翼型),研究对水翼性能、空泡演化、空泡体积及其稳定性的影响,表面含仿生特殊构型的NACA0015翼型物理模型如图4所示。



图2 仿生过程所用鲫鱼鳞片实物图

Fig. 2 Physical picture of crucian scale employed in the bionic process



(a) y 方向

(b) z 方向

图3 仿生特殊构型的结构示意图

Fig. 3 Sketch of bionic special configuration

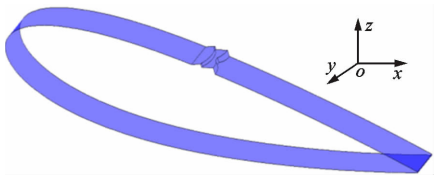


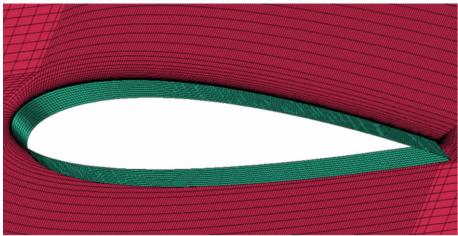
图 4 表面含仿生特殊构型的 NACA0015 翼型的物理模型
Fig. 4 Physical model of the NACA0015 hydrofoil with bionic special configuration on the surface

该翼型的主要几何尺寸如下:弦长 $C=100$ mm,展向宽度 $H=4$ mm,攻角 $\alpha=8^\circ$ 。为获得理想的位置参数,选取鳞片构型最前端至翼型前缘的距离以及鳞片构型距翼型吸力面的距离作为两个可变参量,通过 Design Expert 软件进行正交实验从而获得仿生特殊构型的最佳位置几何参数。 z 方向上,仿生构型前缘距翼型前缘的水平距离为 $0.5C$,构型的最大长度 $c=5.5$ mm,圆弧半径 $r_1=r_2=r_3=2$ mm;从翼型的展向(y 方向)看,两层鳞片的高度分别为 $a=1$ mm, $b=0.9$ mm。

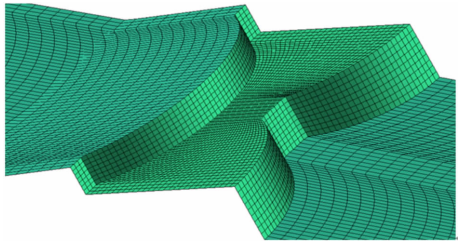
2.2 网格划分

计算域的网格离散是开展数值仿真与分析的核心步骤,网格质量的高低及其与几何模型的匹配程度将直接影响计算结果的可靠性。

本文通过 ANSYS-ICEM 软件实现网格划分,为更好的使网格与计算域边界拟合,采用六面体结构化网格,如图 5 所示,并对翼型近壁面处网格做加密处理,设置第一层网格高度为 0.001,增长率为 1.2,边界层厚度为 3 的 15 层网格。



(a)常规翼型整体网格



(b)仿生特殊构型网格

图 5 六面体结构化网格

Fig. 5 Hexahedral structured meshes

不同翼型网格无关性分析结果如表 1 与表 2 所示。随网格总数不断增加,空泡体积和升阻比的变化整体较小,对常规翼型,最大相对误差分别为 1.19% 与 1.05%,对表面含仿生特殊构型的翼型,最大相对误差分别为 2.24% 与 1.97%。在确保数值仿真结果准确性的同时,还需节约计算资源,最终确定用于开展数值计算的网格总数为 0.7×10^7 。

表 1 常规翼型的网格无关性分析

Table 1 Mesh independence check of the general hydrofoil

方案	网格总数	空泡体积/mm ³	升阻比
I	0.3×10^7	2 556.13	2.78
II	0.4×10^7	2 525.46	2.83
III	0.6×10^7	2 466.44	2.86
IV	0.7×10^7	2 415.54	2.89
V	1.2×10^7	2 410.15	2.90

表 2 表面含仿生特殊构型的翼型网格无关性分析
Table 2 Mesh independence check of the hydrofoil with bionic special configuration on the surface

方案	网格总数	空泡体积/mm ³	升阻比
I	0.3×10^7	2 117.21	2.99
II	0.4×10^7	2 095.36	3.05
III	0.6×10^7	2 048.45	3.09
IV	0.7×10^7	2 010.65	3.10
V	1.2×10^7	2 000.24	3.11

2.3 仿真参数设置

通过 ANSYS-CFX 开展稳态与瞬态数值仿真计算,其中稳态计算结果是瞬态计算的基础。清水介质与水蒸气的密度分别为 998.2 kg/m^3 与 0.023 08 kg/m^3 ,黏度分别为 $0.001\text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ 与 $1.26\times10^{-6}\text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ 。进口设置为速度进口,值为 10 m/s ;出口设置为压力出口,空化数 $\sigma=0.8$,通过下式可计算出压力 p 为 43 049 Pa 。

$$\sigma = \frac{p - p_v}{0.2\rho_l V_\infty^2} \tag{12}$$

式中: V_∞ 为无穷远处来流速度。

瞬态计算的时间步长为 $\Delta t=5\times10^{-5}\text{ s}$,总时长为 0.6 s ,共 12 000 步。计算域与边界条件如图 6 所示。

3 算法验证

为验证所构建的数值仿真算法的可靠性,设置相同的条件,对 NACA0015 翼型的表面压力系数进

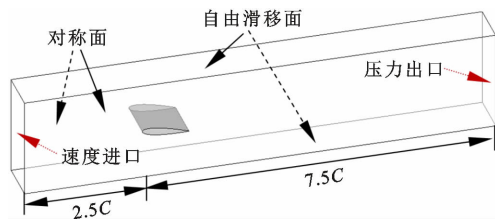


图6 计算域和边界条件

Fig. 6 Computational domain and boundary conditions

行计算,并与实验结果做对比^[27]。翼型表面压力系数分布如图7所示,数值仿真结果与实验结果吻合良好,当 x/C 由0.012 5增至0.275时,最大相对误差为2.155%;当 x/C 由0.417增至0.825时,最大相对误差为2.063%;其余情况下的最大相对误差均小于1.9%。结果表明,通过所建立的数值仿真方法开展所研究内容的数值计算,所获结果是可靠的。

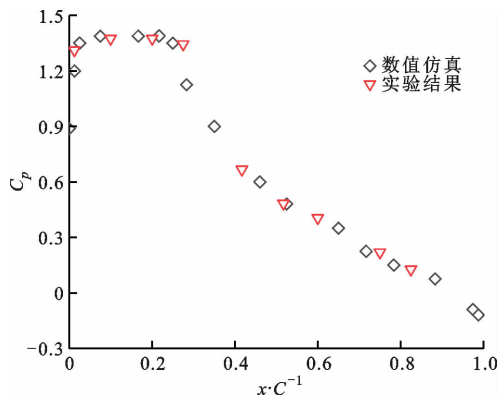


图7 翼型表面压力系数分布

Fig. 7 Distribution of pressure coefficient on the hydrofoil surface

4 结果与讨论

4.1 水翼性能分析

图8与图9分别为升力与阻力系数变化的时域分析,其变化反映出翼型的水动力性能,表达式如下

$$C_L = \frac{L}{0.5\rho_l V_\infty^2 A} \quad (13)$$

$$C_D = \frac{D}{0.5\rho_l V_\infty^2 A} \quad (14)$$

式中: C_L 为升力系数; C_D 为阻力系数; A 为翼型吸力面在 z 方向的投影面积。

斯特劳哈数 St (Strouhal number)常用于衡量流动的非定常特征,表达式如下

$$St = \frac{fl_c}{V_\infty} \quad (15)$$

式中: f 为空泡脱落的特征频率; l_c 为翼型上空泡最大长度。

由图8和图9可知,翼型升、阻力系数的变化具有明显的周期性。表面含仿生特殊构型的翼型的升力系数波动最大值超过1.18,阻力系数波动最大值超过0.2;常规翼型的升力系数波动最大值超过1.24,阻力系数波动最大值超过0.25。升阻力系数的周期性变化不仅反映出空化的周期性特征,还说明空化发展引起翼型周围压力场的剧烈变化表现为翼型升阻力的改变。

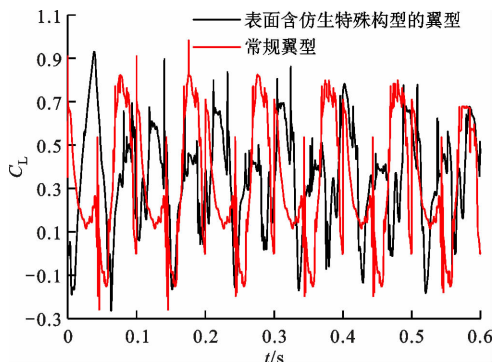


图8 升力系数的时域分析

Fig. 8 Time domain analysis of lift coefficient

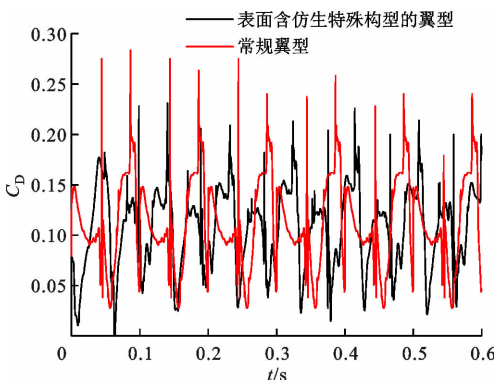


图9 阻力系数的时域分析

Fig. 9 Time domain analysis of drag coefficient

图10为升阻比的时域分析。两种不同翼型的升阻比的变化规律类似。对表面含仿生特殊构型的翼型,平均升阻比为3.10;对常规翼型,升阻比为2.89。升阻比的增加,表明表面含仿生特殊构型的翼型水动力性能得到提高。

由快速傅里叶变换,可获取升、阻力系数频域特性,如图11与图12所示。对表面含仿生特殊构型的翼型,由式(15)计算所得到的斯特劳哈数为0.18;对常规翼型,该值为0.19。结果表明,对表面含仿生特殊构型的翼型,非定常流动特征减弱。另一方面,表面含仿生特殊构型的翼型在相同频率下

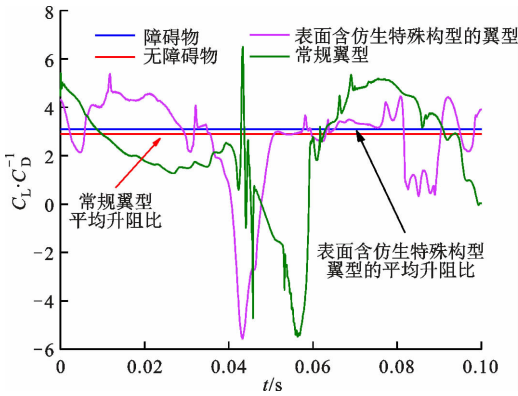


图 10 升阻比的时域分析

Fig. 10 Time domain analysis of lift-drag ratio

的幅值明显小于常规翼型下的,且幅值波动较弱,说明空化流场更加稳定。

两种不同翼型下均存有明显的次频。对表面含仿生特殊构型的翼型,升力系数的次频依次分别为 50 Hz、90 Hz、110 Hz;阻力系数的次频依次分别为 50 Hz、70 Hz、90 Hz。对常规翼型,次频依次分别为 50 Hz、70 Hz、90 Hz 与 60 Hz、100 Hz、120 Hz。这都表明,空泡脱落过程中,还存有更快的小的空泡结构脱落和溃灭。

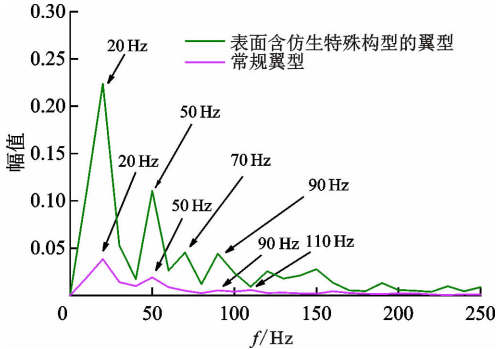


图 11 升力系数频谱分析

Fig. 11 Spectrum analysis of lift coefficient

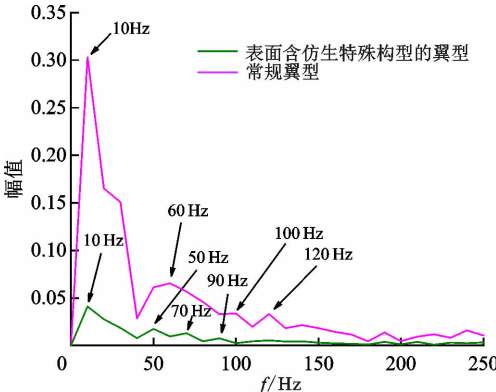


图 12 阻力系数频谱分析

Fig. 12 Spectrum analysis of drag coefficient

4.2 空泡周期性演化过程

图 13 为两种不同翼型下空泡周期性演化过程。 T 表示为一个周期, T 为 0.05 s。 $t=t_0$ 时,翼型前缘均形成微小附着空泡;常规翼型尾缘存有一个狭长空泡,而表面含仿生特殊构型的翼型尾缘处为一个体积较小的空泡。 $t=t_0+(2/8)T$ 时,附着空泡变大,且空泡尾缘脱离翼型吸力面;对常规翼型,空泡长度约为 $0.95C$,尾缘脱离翼型表面,空泡呈内凹状;对表面含仿生特殊构型的翼型,空泡长度约为 $0.9C$,尾缘处空泡呈椭圆状。 $t=t_0+(4/8)T$ 时,附着空泡约在 $0.5C$ 处被剪断,形成云状空泡脱落并向下游移动,此时常规翼型云状脱落空泡体积明显大于表面含仿生特殊构型翼型的。 $t=t_0+(6/8)T$ 时,附着空泡全脱落;常规翼型尾缘存有一个体积较大的空泡,处于游离状态,另一个体积较小,黏连在翼型尾部;表面含仿生特殊构型的翼型流场中,为 3

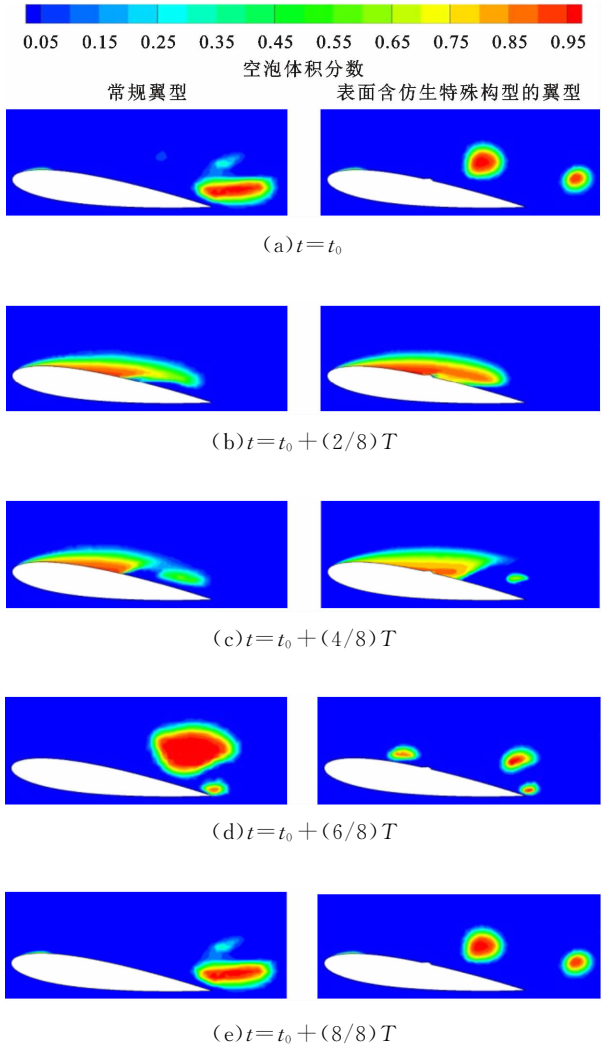


图 13 两种不同翼型下空泡周期性演化过程

Fig. 13 Periodic evolutionary process of cavitation bubbles of two different kinds of hydrofoil

个体积较小的空泡,一个靠近仿生构型,另两个位于翼型尾缘。 $t=t_0+(8/8)T$ 时,常规翼型尾缘脱落空泡更大,而表面含仿生特殊构型的翼型尾缘处空泡相对较小。整个周期内,仿生构型对空化演化起到明显的抑制作用。

4.3 空泡体积

空泡是空化演化过程的最直观体现。图14为两种不同翼型空泡体积变化的时域分析图,均具有明显的周期性变化。对表面含仿生特殊构型的翼型,空泡体积随时间的整体变化小于常规翼型的。0.1 s内,表面含仿生特殊构型的翼型所形成空泡的平均体积为 $2\,010.65\text{ mm}^3$;对常规翼型,为 $2\,415.54\text{ mm}^3$,两者相差为 404.89 mm^3 ,差异较为显著。空泡体积的变化表明,仿生结构明显抑制空化流动的发展。

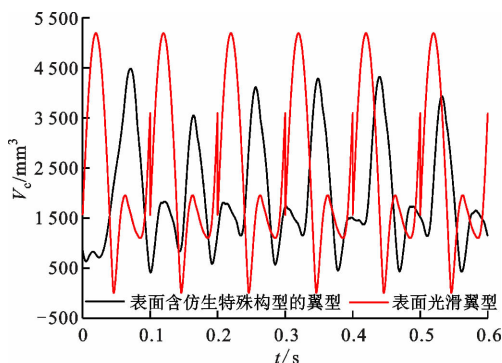


图14 两种不同翼型空泡体积变化的时域分析图

Fig. 14 Time domain analysis of vapor volume variations of two different kinds of hydrofoils

4.4 空化柔度

空化柔度 K 的定义^[28]如下

$$K = -\frac{\rho_l V_\infty^2}{2t^2} \frac{\partial V_c}{\partial p_1} \quad (16)$$

式中: V_c 为翼型上的空泡体积。监测点示意图如图15所示, P_1 为压力监测点,位于翼型前缘,监测点与翼型前缘间距离为2 mm。

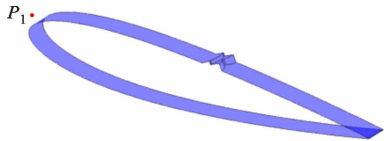


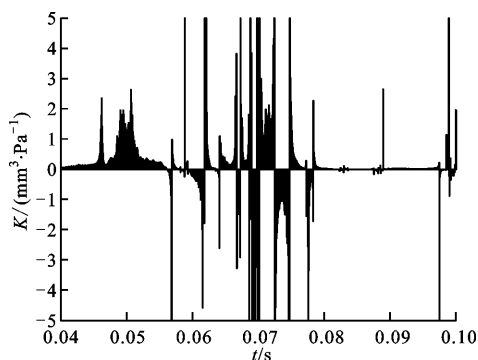
图15 监测点示意图

Fig. 15 Sketch of the monitored point

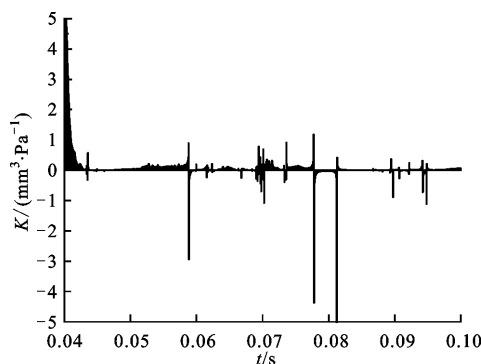
图16为空化柔度在空泡脱落周期内的变化规律。结果表明,对两种不同翼型,空化柔度 K 均在正负之间交替变换,当 K 小于0时,若局部压力降低,空泡体积减少,此时多出的空间将由周围的流体

补充,造成局部压力进一步降低,空泡在此种状态下是静态不稳定的。

图16(a)为常规翼型 K 的变化过程,变化剧烈,这与吸力面上空泡脱落所造成的流体动压的剧烈变化有关。图16(b)为表面含仿生特殊构型翼型的 K ,虽然也在正负间变换,但是 K 变化的剧烈程度明显减弱, K 小于0所对应的时间明显减少,说明表面含仿生特殊构型的翼型在空化状态下的不稳定振荡得到较为明显的改善。



(a) 常规翼型



(b) 表面含仿生特殊构型的翼型

图16 空化柔度在空泡脱落周期内的变化规律

Fig. 16 Variation law of cavitation flexibility during the cavitation bubble shedding period

5 机理分析

5.1 压力分布

图17为两种不同翼型下的压力分布,低压区的分布与空泡的分布吻合良好,准确反映出空泡的演化发展过程。

$t=t_0$ 时,两种不同翼型前缘均存有微小范围的低压区,这与前缘空泡分布吻合良好;对常规翼型,吸力面尾缘低压区范围大于表面含仿生特殊构型翼型下的。 $t=t_0+(2/8)T$ 时,对常规翼型,低压区所延伸的范围较表面含仿生特殊构型翼型下的广; $t=$

$t_0 + (4/8)T$ 时,对比压力云图分布,常规翼型的整体平均压力较表面含仿生特殊构型翼型的低。 $t = t_0 + (6/8)T$ 时,常规翼型吸力面低压区较表面含仿生特殊构型翼型的明显大,且压力更低。 $t = t_0 + (8/8)T$ 时,两种不同翼型的前缘均存有微小低压区,在尾缘处均存有较大范围的低压区,且常规翼型下的更大。压力的变化准确反映出表面仿生特殊构型显著抑制空化的发展。

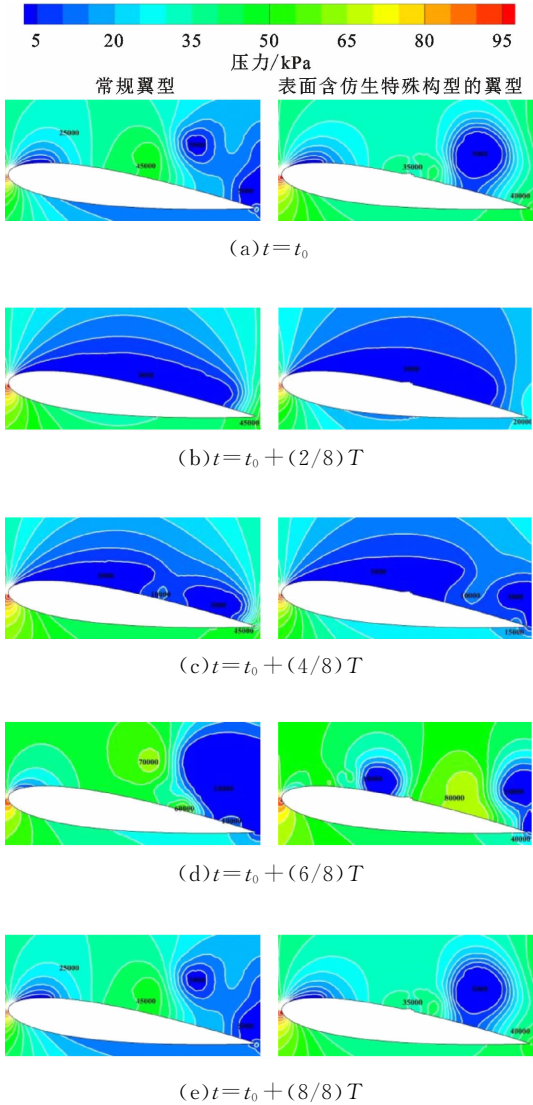


图 17 两种不同翼型吸力面压力分布

Fig. 17 Pressure distribution on suction surface of two different kinds of hydrofoils

5.2 涡旋分布

图 18 为两种不同翼型吸力面涡旋分布。 $t = t_0$ 时,常规翼型吸力面两个涡旋的分布范围较大,两者间的相互作用较强;对表面含仿生特殊构型的翼型,两个涡旋分布范围较小,同时两者间的相互作用也较弱。 $t = t_0 + (2/8)T$ 到 $t = t_0 + (4/8)T$ 时,常规翼

型吸力面涡旋不断生长变厚且分布范围持续扩大;对表面含仿生特殊构型的翼型,吸力面涡旋变薄且长度有所变长。 $t = t_0 + (6/8)T$ 时,常规翼型吸力面尾缘有较大范围的区域被涡旋占据;对表面含仿生特殊构型的翼型吸力面,存有两个范围较大的涡旋,影响范围相对较长,但整体作用范围仍小于常规翼型下的。 $t = t_0 + (8/8)T$ 时,翼型吸力面涡旋向尾缘移动,常规翼型涡旋的作用范围仍大于表面含仿生特殊构型翼型下的。整个周期内,表面含仿生特殊构型的翼型吸力面涡旋对空化流动的影响较常规翼型下的弱,因此使流动变得更加稳定。

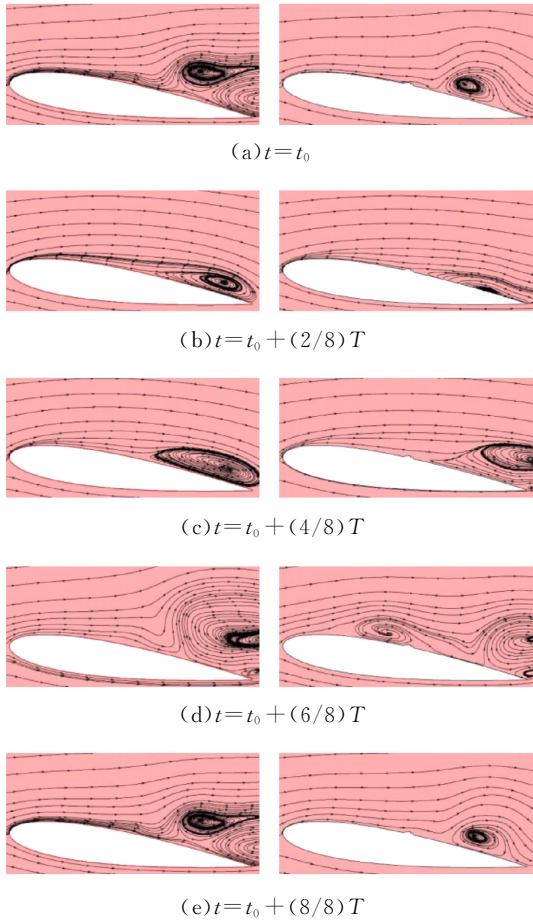


图 18 两种不同翼型吸力面涡旋分布

Fig. 18 Distributions of vortices on suction surface of two different kinds of hydrofoils

5.3 湍动能分布

湍动能是湍流强度的度量,是流动稳定性的重要标志,其大小可以反映流场的非定常强度。图 19 为一个周期内两种不同翼型下的湍动能分布。可以得到,对两种不同翼型,空泡周期性脱落过程中,翼型尾缘附近及翼型后方的湍动能整体较强,说明该区域具有更强的非定常性。整个周期性变化过程

中,表面含仿生特殊构型翼型的湍动能区域及湍动能强度均小于常规翼型下的,说明流场更加稳定。主要原因是,表面仿生特殊构型会对主流和从翼型尾缘指向前缘的回射流均形成阻碍作用,流体的动能可在表面仿生特殊构型周围转化为压力势能,使得流场中的局部压力升高,进而降低翼型周围的湍动能,达到对空化的抑制作用。

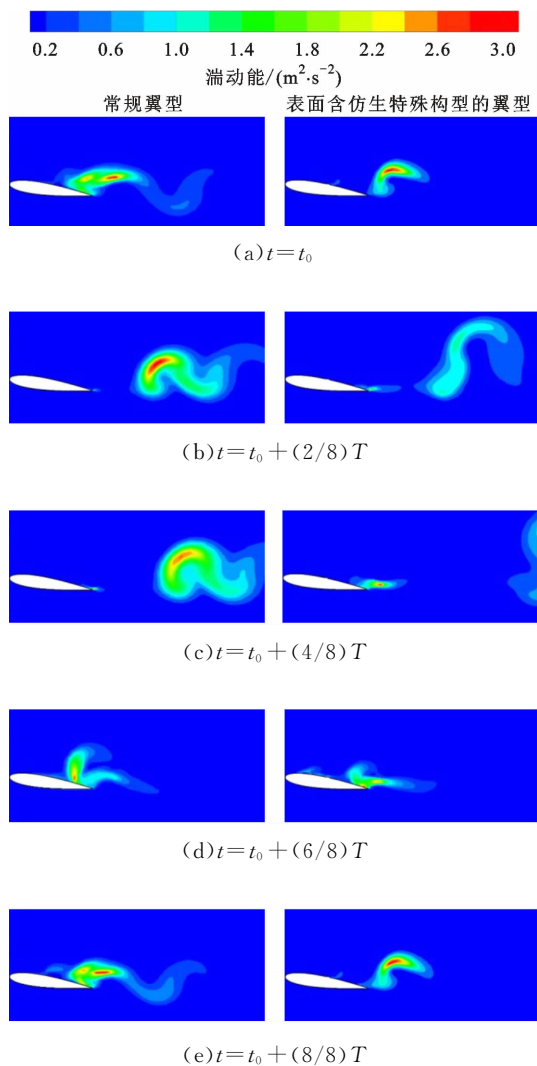


图 19 一个周期内两种不同翼型下的湍动能分布
Fig. 19 Turbulent kinetic energy distribution of two different kinds of hydrofoils in one cycle

6 结 论

本文通过验证的数值算法开展常规翼型与表面含仿生特殊构型的翼型空化流动的数值计算,确定仿生特殊构型对空化流动影响的规律,并揭示机理。主要结论如下。

(1)相同频率下,表面含仿生特殊构型的翼型升阻力幅值均明显小于常规翼型的,且幅值波动较弱。

表面含仿生特殊构型翼型的平均升阻比为 3.10,常规翼型的为 2.89,水翼性能得到提高。

(2)对表面含仿生特殊构型的翼型,一个周期内空泡演化过程弱于常规翼型的,且空泡体积小于常规翼型下的。

(3)两种不同翼型的空化柔度均在正负之间变化。对常规翼型,空化柔度变化较剧烈,且小于 0 所对应的时间较多。对表面含仿生特殊构型的翼型,变化减弱且相应的时间减少。

(4)表面含仿生特殊构型的翼型下的低压区与涡旋整体分布范围较常规翼型下的小,湍动能分布区域较常规翼型的小且湍动能强度较其弱,在其影响下抑制空化发展,流场变稳定。

参考文献:

- [1] KOUKOUVINIS P, GAVAISES M. Cavitation and bubble dynamics: fundamentals and applications [M]. London, UK: Academic Press, 2021: 1-100.
- [2] 郑直, 赵鹏坤, 闵为, 等. 液压阀口空气型空化周期特性的实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(10): 72-78, 150.
ZHENG Zhi, ZHAO Pengkun, MIN Wei, et al. An experimental investigation on periodic characteristics of gaseous cavitating flow in hydraulic valve orifices [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(10): 72-78, 150.
- [3] 曹玉良, 明廷锋, 贺国, 等. 基于深度学习的离心泵空化状态识别 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(11): 165-172.
CAO Yuliang, MING Tingfeng, HE Guo, et al. Cavitation state recognition of centrifugal pump based on deep learning [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(11): 165-172.
- [4] LI S C. Cavitation of hydraulic machinery [M]. London, UK: Imperial College Press, 2000: 211-265.
- [5] KANG Can, LIU Haixia, SONG Longbo, et al. Cavitation erosion [M]. Beijing, China: Science Press, 2020: 26-88.
- [6] KAWANAMI Y, KATO H, YAMAGUCHI H, et al. Mechanism and control of cloud cavitation [J]. Journal of Fluids Engineering, 1997, 119(4): 788-794.
- [7] 王巍, 唐滔, 卢盛鹏, 等. 水翼吸力面布置凹槽抑制空化研究 [J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 40-47.
WANG Wei, TANG Tao, LU Shengpeng, et al. Investigation of cavitation suppression by arranging pits on hydrofoil suction side [J]. Transactions of the Chi-

- nese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(2): 40-47.
- [8] CHOI Y D, KUROKAWA J, IMAMURA H. Suppression of cavitation in inducers by J-grooves [J]. Journal of Fluids Engineering, 2007, 129(1): 15-22.
- [9] LIU Cheng, YAN Qingdong, WOOD H G. Numerical investigation of passive cavitation control using a slot on a three-dimensional hydrofoil [J]. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 2020, 30(7): 3585-3605.
- [10] 郭伟,熊鹰.一种抗空化翼型修形设计方法[J].上海交通大学学报,2013,47(6):878-883,888.
WU Wei, XIONG Ying. A reshaping method for anti-cavitating hydrofoil design [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2013, 47(6): 878-883, 888.
- [11] FUJII A, MIZUNO S, HORIGUCHI H, et al. Suppression of cavitation instabilities by jet injection at inducer inlet [C]//ASME 2005 Fluids Engineering Division Summer Meeting. New York, NY, USA: ASME, 2005: 1477-1482.
- [12] YANG He, XU Yufan, CHEN Zhanfeng, et al. Cavitation suppression in the nozzle-flapper valves of the aircraft hydraulic system using triangular nozzle exits [J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 112: 106598.
- [13] RHEE S H, LEE C, LEE H B, et al. Rudder gap cavitation: fundamental understanding and its suppression devices [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2010, 31(4): 640-650.
- [14] JIN Weiwei. Cavitation generation and inhibition. II. Invisible tail wing of cloud cavitation and non-cavitation control mechanism [J]. AIP Advances, 2021, 11(11): 115-216.
- [15] QIAN Jinyuan, GAO Zhixin, LI Wenqing, et al. Cavitation suppression of bileaflet mechanical heart valves [J]. Cardiovascular Engineering and Technology, 2020, 11(6): 783-794.
- [16] ZHAO G W, WANG Guipeng. Research on passive control of cloud cavitation based on a bionic fin-fin structure [J]. Engineering Computations, 2020, 37(3): 863-880.
- [17] 陈柳,曹琳琳,赵国寿,等.仿生前缘流动与空化控制机理的数值研究[J].工程热物理学报,2019,40(10):2291-2298.
CHEN Liu, CAO Linlin, ZHAO Guoshou, et al. Numerical study on the mechanism of flow and cavitation control by leading-edge tubercles on hydrofoil [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2019, 40(10): 2291-2298.
- [18] 陈思青,钱玉峰,徐贺,等.基于乌贼射流孔的仿生水液压阀抗空化结构研究[J].中国科技论文在线精品论文,2019,12(2):281-291.
CHEN Siqing, QIAN Yufeng, XU He, et al. Study on anti-cavitation structure of bionic water hydraulic valve based on squid jet hole [J]. Highlights of Sciencepaper Online, 2019, 12(2): 281-291.
- [19] 于凯.形状记忆合金丝驱动的仿生鲫鱼设计与研究[D].南京:南京航空航天大学,2016:10-16.
- [20] YEOH G H, TU Jiyuan. Chapter 2: governing equations and boundary conditions [M]//Computational Techniques for Multiphase Flows. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2010: 21-94.
- [21] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [J]. AIAA Journal, 1994, 32(8): 1598-1605.
- [22] COUTIER-DELGOSHA O, FORTES-PATELLA R, REBOUD J L. Evaluation of the turbulence model influence on the numerical simulations of unsteady cavitation [J]. Journal of Fluids Engineering, 2003, 125(1): 38-45.
- [23] LI Deyou, SONG Yechen, LIN Song, et al. Effect mechanism of cavitation on the hump characteristic of a pump-turbine [J]. Renewable Energy, 2021, 167: 369-383.
- [24] SAITO Y, TAKAMI R, NAKAMORI I, et al. Numerical analysis of unsteady behavior of cloud cavitation around a NACA0015 foil [J]. Computational Mechanics, 2007, 40(1): 85-96.
- [25] KUBOTA A, KATO H, YAMAGUCHI H. A new modelling of cavitating flows: a numerical study of unsteady cavitation on a hydrofoil section [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2006, 240: 59-96.
- [26] JI Bin, LUO Xianwu, WU Yulin, et al. Numerical analysis of unsteady cavitating turbulent flow and shedding horse-shoe vortex structure around a twisted hydrofoil [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2013, 51: 33-43.
- [27] CERVONE A, BRAMANTI C, RAPPOSELLI E, et al. Thermal cavitation experiments on a NACA0015 hydrofoil [J]. Journal of Fluids Engineering, 2006, 128(2): 326-331.
- [28] 潘中永,袁寿其.泵空化基础[M].镇江:江苏大学出版社,2013:311-403.

(编辑 武红江 杜秀杰)