

水翼空化流场的调控和优化研究

赵伟, 刘真威, 陈石阳, 丁耀东, 李平

(西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为抑制水力机械中水翼绕流流场空化的形成和发展,通过对比分析 NACA0009、NACA0012 以及 Clark Y 3 种经典水翼不同攻角和空化数工况下的性能,获得型线优化思路,建立了新水翼。进一步地,在新水翼上布设多个流动控制结构,通过广义模式搜索算法进行快速优化设计,对空化流场进行整体控制和局部调控。研究表明:新水翼吸力面凸起高度介于 NACA0012 和 Clark Y 水翼之间,最大凸起高度位置后移;新水翼的空化性能和水动力性能提升,升阻比最大提高 48.8%,空泡脱落和回射流发展得到抑制;在新水翼吸力面均匀布设的多个控制结构能够对回射流起到连续抑制作用,改善压力分布;通过优化算法实现了控制结构设计的精准快速寻优,优化后的水翼性能得到了进一步提升,升阻比继续提高 4.8%~13.6%,空化厚度与长度减小。型线优化和添加连续流动控制结构实现了空化流场的整体和局部控制,是提高水翼的空化和水动力性能的有效方法。

关键词: 空化;型线优化;流动控制结构;新水翼;优化算法

中图分类号: TK730 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202305008 **文章编号:** 0253-987X(2023)05-0078-11

Research on Control and Optimization of Hydrofoil Cavitation Flow Field

ZHAO Wei, LIU Zhenwei, CHEN Shiyang, DING Yaodong, LI Ping

(MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to suppress the formation and development of cavitation in the flow field around the hydrofoil, this paper establishes a new hydrofoil with its profile optimized by comparing and analyzing the performance of three classical hydrofoils, NACA0009, NACA0012 and Clark Y under different working conditions. Then, several fluid control structures are uniformly arranged on the new hydrofoil, and optimized rapidly by generalized pattern search algorithm to realize general and local control of cavitation in the flow field. The results show that the new hydrofoil has a suction surface whose bulge height is between those of the NACA0012 and Clark hydrofoils, and its maximum bulge position is backward. The new hydrofoil shows improved cavitation performance (cavitation shedding suppressed) and hydrodynamic performance (backflow development suppressed), with its lift-drag ratio up by as high as 48.8%. The multiple control structures evenly arranged on the suction surface of the new hydrofoil can continuously suppress the backflow and improve the pressure distribution. They are accurately and rapidly optimized with an optimization algorithm. As a result, the performance of the optimized hydrofoil is further

improved, with the lift-drag ratio further up by 4.8%—13.6%, and the thickness and length of cavitation reduced. Therefore, optimizing the profile and adding continuous flow control structures can realize the overall and local control of the cavitation flow field, providing an effective way to improve the cavitation and hydrodynamic performance of the hydrofoil.

Keywords: cavitation; profile optimization; flow control structures; new hydrofoil; optimization algorithm

在水力机械运行过程中,当局部压力降低为饱和蒸汽压时,液相变为气相产生空化。空化会在叶轮旋转过程中周期性生成和溃灭,引起水力机械的振动和噪声^[1-2]。空化溃灭时形成的冲击波会对设备表面产生高度集中的表面应力,附着型空化的周期性脱落与不稳定流动会导致表面应力的反复作用,造成表面材料的侵蚀,影响设备的安全运行^[3-4]。因此,改善空化流场,抑制和削弱空化对水力机械产生的破坏,对于提高效率、保持水力机械安全稳定的运行至关重要。

NACA 翼型在水力机械中获得大量应用,但 NACA 翼型的开发主要以飞机机翼为应用目标,没有考虑空化问题。因此,在保持水动力性能的基础上,有必要设计符合水力机械抗汽蚀性能的 NACA 翼型。常欣等^[5]对三维水翼型线进行了优化设计,优化后翼型前缘厚度减小并呈流线型,水翼升阻比提高。黄胜等^[6]利用多目标优化算法,以提高升阻比和改善水翼表面压力分布为优化目标,对不同翼型的型线进行了改进,改进后水翼的厚度减小,升力效率和空泡性能提高。黄斌等^[7]利用粒子群优化算法对 NACA66(MOD)水翼型线进行了改进,获得的最优方案中,最大拱度位置向尾缘移动,最大厚度略微增加。李靖璐等^[8]采用自由变形法对 NACA0012 水翼进行了型线调整,研究发现,水翼厚度减小可使阻力系数降低,后缘扭转可使升力系数增加。Luo 等^[9]利用 NSGA-II 算法对水轮机叶片翼型进行了优化设计,改进后水翼前缘附近的曲率半径增大,翼型厚度减小,升阻比和最小压力系数增加,运行效率提高,减小了空化发生的可能性。上述研究结果表明,改进水翼型线可以实现空化流场的整体调控,并改善水翼的水动力性能。

以流场中空化发生的局部位置及后续发展趋势为着眼点,其调控方法主要有主动式控制和被动式控制。被动控制方法中,布设流动控制结构是一种易于实施和维护的控制方式。Kadivar 等^[10]在水翼表面分别布置了圆柱形和半球形涡发生器,研究发现在合适位置布置涡发生器可以抑制空泡脱落,减

小水翼尾迹区的压力脉动。顾魏等^[11]分别在 35% 弦长和 75% 弦长位置处布置单个展向挡流条,发现 35% 弦长处挡流条在一定的空化数范围内增强了空化的稳定性。Qiu 等^[12]在 NACA0015 水翼表面布置微涡发生器,发现微涡发生器对流体进行扰动,促进了不同能量流体的混合,形成稳定的涡流区,使空泡破灭时剧烈程度降低,减小了对水翼表面的空蚀。以上研究表明,流动控制结构可以实现局部空化流场的有效控制。在空化范围较大时,单个结构的控制作用有限,因此连续流动控制结构成为了优选方法^[13-15]。

在布设多个流动控制结构时,其几何参数和相对位置会显著影响空化控制效果,而将优化算法耦合到数值求解和参数化分析过程中,则可以快速得到理想的控制结构参数。Lin 等^[16]将简化的共轭梯度法与数值模拟方法相结合,对微通道中肋的宽度和厚度等结构参数进行了优化设计,获得不同工况下最优设计变量组合。Mazaheri 等^[17]利用差分进化优化算法对翼型表面的凸起结构进行了优化设计,优化后的翼型阻力和流动分离区域减小,增强了流场的稳定性。Xue 等^[18]利用遗传算法对凹槽结构的数量和深度等进行了全局优化,获得的最优凹槽结构改善了凹槽区域的压力分布,抑制了空化的产生。以上研究表明,耦合优化算法能够为空化性能和水动力性能的优化提升提供有效的快速实现方法。

综上分析:本文通过改进水翼型线,进行空化流场的整体优化;通过布设连续流动控制结构,并基于广义模式搜索算法进行结构优化,快速实现空化流场的局部精准调控。

1 数值计算方法

1.1 物理模型和边界条件

在水翼空化流场研究中,本文选择 NACA0009、NACA0012 和 Clark Y 3 种典型水翼型线进行对比分析。NACA0009 和 NACA0012 为低速对称翼型,弯度均为 0,具有低阻力系数,是水力机械中的基础翼型;Clark Y 水翼为非对称翼型,具有高升力

系数。图 1 展示了 NACA0009、NACA0012 和 Clark Y 3 种水翼型线的对比,3 种水翼弦长相等,均为 0.1 m。其中,NACA0009 水翼最大厚度为 9.90 mm,位于 49.5% 弦长处;NACA0012 水翼最大厚度为 12.0 mm,位于 30% 弦长处;Clark Y 水翼最大厚度为 11.7 mm,位于 28% 弦长处,吸力面最大凸起高度为 9.16 mm,位于 36% 弦长处,最大弯度位于 42% 弦长处。

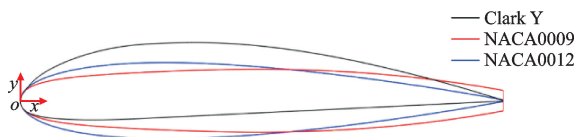


图 1 3 种水翼型线对比

Fig. 1 Profile comparison of three hydrofoils

计算域如图 2 所示,采用速度入口和静压出口,水翼表面和上下壁面为无滑移壁面。流体温度为 20 ℃,在此条件下饱和蒸汽压为 2 300 Pa,水的密度为 998 kg · m⁻³,蒸汽密度为 0.017 kg · m⁻³,水的动力黏度为 0.001 kg · m⁻¹ · s⁻¹,蒸汽动力黏度为 9.60 × 10⁻⁶ kg · m⁻¹ · s⁻¹。在入口速度为 10 m · s⁻¹ 条件下,针对攻角为 6° 和 8°,空化数为 1.5、1.3、1.0 和 0.8 等工况时,对比分析不同水翼的流场特性。

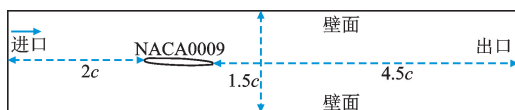


图 2 水翼空化模型计算域

Fig. 2 Computational domain

1.2 数值计算方法

1.2.1 基本控制方程

本文研究采用均质混合流模型^[19],其中液相和气相具有相同的速度和压力,空化流动非稳态求解控制方程如下。

混合相的连续性方程为

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

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right] \quad (2)$$

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

其中混合相的密度和黏度分别为

$$\rho = \alpha_v \rho_v + \rho_l (1 - \alpha_v) \quad (4)$$

$$\mu = \alpha_v \mu_v + \mu_l (1 - \alpha_v) \quad (5)$$

式中: ρ 为混合相密度; u_i ($i=1,2,3$) 表示与坐标轴 x_i 平行的速度分量; α_v 为气相体积分数;下标 l 代表液相,下标 v 代表气相; m 为两相之间的传质速率。

1.2.2 湍流模型

本文采用剪切应力输运 (SST $k-\omega$) 湍流模型^[20] 对空化流动进行计算,该模型如下

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = P_k - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (6)$$

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial \omega}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_{\omega} \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta_1 \rho \omega^2 + 2(1 - F_1) \rho \omega^2 \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (7)$$

式中: k 为湍动能; P_k 为湍流产生率; ω 为湍流频率; $\sigma_k = 0.85$; $\sigma_{\omega 1} = 0.5$; $\sigma_{\omega 2} = 0.856$; F_1 为混合函数。

由于原始的 SST $k-\omega$ 模型过度预测了空化区域的湍流黏度,因此 Ducoin 等^[21] 对 SST $k-\omega$ 模型进行了修正,考虑了混合相局部可压缩性的影响,提出了基于局部气相体积分数的混合湍流黏度求解方法,将原公式中的湍流黏度 μ_t 修正为

$$\mu_{t, \text{mod}} = \mu_t f(\rho) \quad (8)$$

$$\nu_t = \frac{\mu_t}{\rho} = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, SF_2)} \quad (9)$$

$$f(\rho) = \rho_v + \left(\frac{\rho_v - \rho}{\rho_v - \rho_l} \right)^n (\rho_l - \rho_v) \quad (10)$$

式中: $a_1 = 0.31$; S 为液体表面张力系数; F_2 为混合函数。通过调节 n 降低空化区域的密度,从而减小湍流黏度,参照文献^[21-22],当 n 取 3 时,对空化区域湍流黏度的预测满足本研究的精确度要求。

1.2.3 空化模型

Zwart 空化模型在非稳态空化模拟中具有较好的效果,自提出至今,进行了大量验证^[23]。考虑 Rayleigh-Plesset 方程的二阶项对空化数值模拟的影响,Geng 等^[24] 通过数学推导对 Zwart 空化模型进行了修正,得到更接近实验的计算结果,修正后的空化模型为

$$m = \begin{cases} m_e = F_{\text{vap}} \frac{3\alpha_{\text{nuc}} (1 - \alpha_v) \rho_v}{R} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{(p_v - p)}{\rho_l}}, & p < p_v \\ 0, & p = p_v \\ m_c = F_{\text{cond}} \frac{2.6 \sqrt{\alpha_v} \rho_v}{R} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{(p - p_v)}{\rho_l}}, & p > p_v \end{cases} \quad (11)$$

式中： m_e 为蒸发传质速率； m_c 为冷凝传质速率； α_{nuc} 为汽核体积分数，取 5×10^{-4} ； R 为 1×10^{-6} m； F_{cond} 为凝结系数，取 0.01； F_{vap} 为汽化系数，取 50。

1.2.4 参数定义

空化数 σ 是描述空化状态的无量纲参数，其定义为

$$\sigma = \frac{p_\infty - p_v}{0.5 \rho_l V_\infty^2} \tag{12}$$

式中： p_∞ 为出口压力； V_∞ 为来流速度。

压力系数定义为

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{0.5 \rho_l V_\infty^2} \tag{13}$$

反映水翼水力特性的升力系数、阻力系数分别定义为

$$C_l = \frac{F_l}{0.5 \rho_l V_\infty^2 A} \tag{14}$$

$$C_d = \frac{F_d}{0.5 \rho_l V_\infty^2 A} \tag{15}$$

式中： F_l 、 F_d 分别为水翼所受的升力和阻力； A 为翼型投影面积，二维翼型时为翼型弦长。

1.3 模型验证

1.3.1 网格无关性验证

本文中对流体域进行结构化网格划分，并对水翼近壁区进行网格加密，调整第一层网格高度，确保离壁面最近的第一个点位于黏性底层内，基于下式保证 $y^+ < 1$ ，网格划分如图 3 所示。

$$y^+ = \frac{y}{\mu} \sqrt{\rho \tau_w} \tag{16}$$

式中： y 为单元中心到壁面的距离； τ_w 为壁面切应力。

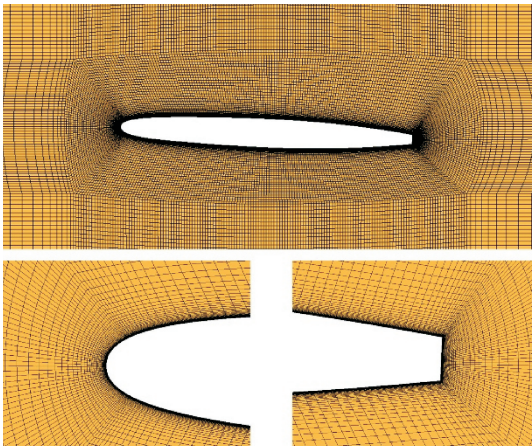


图 3 水翼周围及两端网格示意图

Fig. 3 Grid schematic around and at both ends of the hydrofoil

为确定合理的网格数，对网格进行无关性检验，保持第一层网格高度和增长率不变，不断对网格进行加密，最终网格数分别为 66 048、94 748 和 119 608。以升力系数、阻力系数作为评价标准，结果见表 1。网格 3 与网格 2 相比，参数相对误差均低于 0.1%，因此，以网格 3 为基准，进行后续水翼网格的划分。

表 1 网格无关性验证

Table 1 Grid independence validation

网格	网格数	$C_l/10^2$	C_l 相对 误差/%	$C_d/10^3$	C_d 相对 误差/%
1	66 048	34.467		16.502	
2	94 748	34.630	0.473	16.183	1.930
3	119 608	34.656	0.076	16.172	0.068

1.3.2 数值模型验证

以稳态空化流场计算结果作为初始值，对非稳态空化流场进行计算。将 NACA0009 水翼在入口速度为 20 m/s、攻角为 2.5°、空化数为 0.9 时，吸力面压力系数的计算值与 Dupont^[25] 的实验数据进行对比，验证结果如图 4 所示，可以看出，时均压力系数与实验值吻合较好。

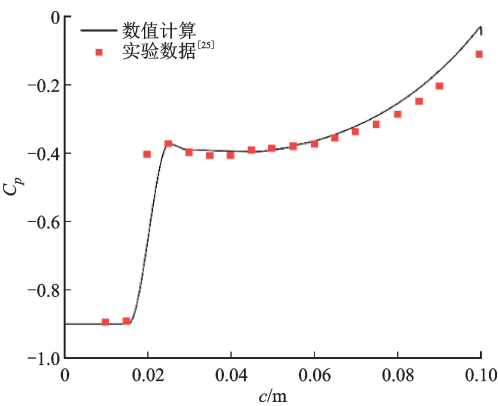


图 4 NACA0009 水翼吸力面时均压力系数

Fig. 4 Time-average pressure coefficient of suction surface of NACA0009 hydrofoil

图 5 给出了 Clark Y 水翼在入口速度为 10 m/s、攻角为 8°、空化数为 0.8 时，计算所得空泡形态随时间的变化及其与实验结果^[26] 的对比，数值计算结果清楚地描述了云状空化的产生、发展和脱落的准周期性变化，模拟空泡形态与实验结果吻合度较高。

综上所述，本文计算模型可以有效模拟水翼流场及其空化特性，模型精度足够可靠，满足下一步研究需求。

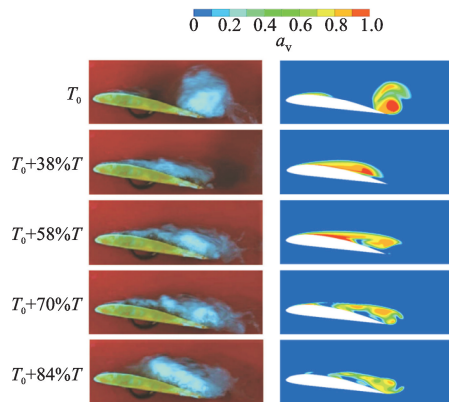


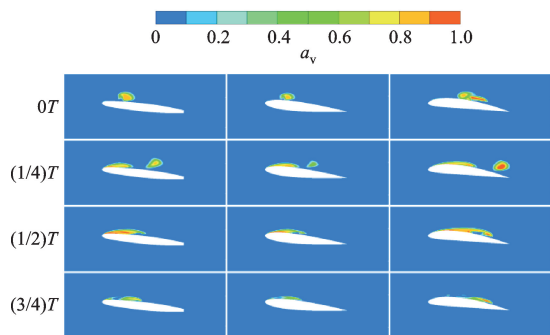
图5 Clark Y水翼云空化空泡演变

Fig. 5 Cavitation shape evolution of Clark Y hydrofoil

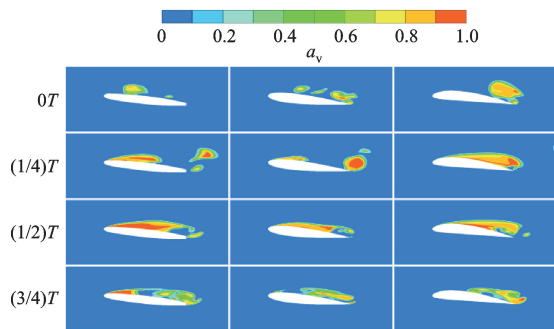
2 水翼空化流场整体调控

2.1 流线分布和水动力性能

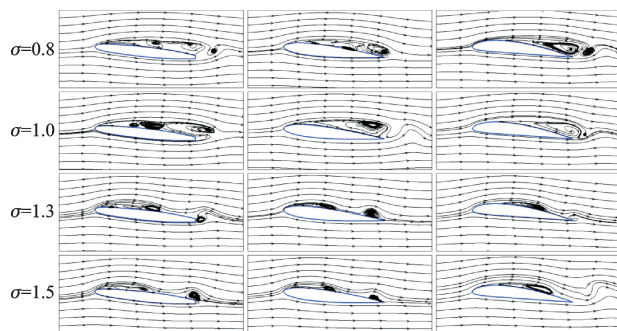
图6和图7为不同空化数下,一个周期内空化流场随时间的变化。水翼云空化的发展过程可归纳为:空泡从翼型前缘开始产生,并逐步发展成附着在水翼表面的片状空泡;随着回流流向向前缘方向运动,空泡尾端被拉伸,并逐渐脱落;脱落的空泡随流体向翼型尾缘方向移动,随着压力增大,空泡逐渐变小,最后在翼型尾缘附近消失。由于空泡的大量脱落和溃灭,造成压力脉动和冲击,对水翼壁面产生破坏。随着空化数的降低,流场压力降低,附着空泡的长度和厚度增加。最终,空泡发展的长度超过水翼尾缘,变成超空化状态。在相同空化数和不同攻角下,同一时刻空泡形态相似,但较大攻角下的空泡体积略大。

图6 $\alpha=6^\circ$ 和 $\sigma=1.5$ 时气体体积分数分布Fig. 6 Vapor volume fraction distribution ($\alpha=6^\circ$, $\sigma=1.5$)

对不同水翼的不同工况进行了计算,图8为不同空化数下各水翼周围的流线分布。空泡区域属于低压区,当水翼表面的附着空化发展到一定程度,由

图7 $\alpha=6^\circ$ 和 $\sigma=0.8$ 时气体体积分数分布Fig. 7 Vapor volume fraction distribution ($\alpha=6^\circ$, $\sigma=0.8$)

于逆压梯度的存在,流体沿水翼吸力面反方向流动,形成回流流。回流流所在区域速度与主流速度方向相反,对空泡产生反作用,同时与空泡体接触部分不断汽化,在相互作用的过程中,区域整体的运动方向与主流方向相同,形成回流流“倒退”现象。空化数较小时,水翼表面附着空化发展到尾缘附近,导致尾缘吸力面压力降低,与压力面的压差增大,流体从压力面流向吸力面尾缘并形成回流流,因此回流流产生的位置在尾缘附近。空化数较大时,附着空化的长度较小,离尾缘有一定的距离,尾缘附近吸力面和压力面的压差较小,提供给尾缘压力面流体流向吸力面的动力较小,因此尾缘产生的回流流较小。对比不同水翼的回流流分布可以看出,在较小空化数下,NACA0009和NACA0012水翼吸力面尾缘产生的回流流运动的更加深入,而相同空化数下Clark Y水翼吸力面尾缘产生的回流流运动的距离较短。比较3种水翼的型线可以看出,Clark Y水翼吸力面较大的凸起高度,改变了回流流运动的角度,使附着型空化更容易被剪断,从而抑制了回流流向前的发展,抑制了空化的发展。因此,在保持吸力面较大凸起高度的条件下,将最大凸起高度位置

图8 $\alpha=6^\circ$ 时不同空化数下水翼流线分布Fig. 8 Streamlines distribution of hydrofoil under different cavitation numbers ($\alpha=6^\circ$)

沿来流方向适当后移,可以抑制回射流的发展,减小空泡的脱落。

升阻比是评价水力机械水动力性能的重要参数。升阻比越高,意味着效率越高,同样的工作条件下可以节省更多的能源。图 9 给出了不同工况下 3 种水翼的升阻比大小。如图 9 所示,随着空化数的升高,各水翼的升阻比也逐渐升高。仅在攻角为 6°、空化数为 1.0 时,NACA0009 水翼升阻比大于 Clark Y 水翼升阻比,其余工况下 Clark Y 水翼的水动力性能均优于 NACA0009 水翼和 NACA0012 水翼。对于不同水翼,攻角为 6°时的升阻比均大于攻角为 8°时的升阻比。尽管攻角增大,升力系数也随之增大,但阻力中的诱导阻力增加比重更大,因而最终的结果是升阻比减小。Clark Y 水翼的升阻力特性与 NACA0012 水翼、NACA0012 水翼的升阻力特性不同。如表 2 所示,对于 NACA0012 水翼,升力系数和阻力系数均小于 Clark Y 水翼,而阻力系数对升阻比的影响较大。因此,NACA0012 水翼和具有高升力系数的 Clark Y 水翼在升阻比上差别较

小。NACA0012 水翼具有最小阻力系数,NACA0009 水翼的阻力系数介于 NACA0012 水翼和 Clark Y 水翼之间。结合图 1 中 3 种水翼的型线对比可以得出,翼型吸力面凸起高度过小和过大都会使阻力系数增大。因此,为保持高升力系数的同时拥有较小阻力系数,型线的凸起高度需要介于 Clark Y 水翼和 NACA0012 水翼的凸起高度之间。

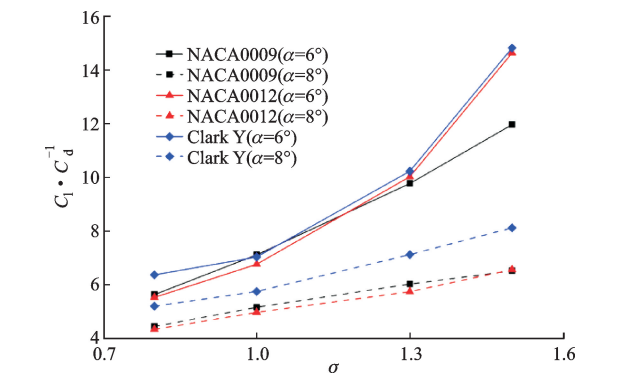


图 9 不同工况下的升阻比
Fig. 9 Lift-drag ratio under different working conditions

表 2 $\alpha=6^\circ$ 的时水翼升力系数、阻力系数
Table 2 lift coefficient and drag coefficient of hydrofoils($\alpha=6^\circ$)

水翼	C_l				C_d			
	$\sigma=0.8$	$\sigma=1.0$	$\sigma=1.3$	$\sigma=1.5$	$\sigma=0.8$	$\sigma=1.0$	$\sigma=1.3$	$\sigma=1.5$
NACA0009	0.576	0.737	0.866	0.802	0.102 0	0.104 0	0.089 0	0.067 0
NACA0012	0.529	0.669	0.763	0.725	0.096 0	0.099 0	0.076 0	0.050 0
Clark Y	0.670	0.835	1.004	1.100	0.105 0	0.119 0	0.098 0	0.074 0

2.2 新水翼结构与流场分析

为保证水动力性能的同时,实现对空化的整体调控,本研究依据多项式形式的型线方程设计新水翼型线^[27]。在对比分析的 3 种水翼中,Clark Y 水翼综合性能最佳,通过 Clark Y 水翼的数据点拟合型线方程,确定多项式中的各项系数和幂指数,得到待优化的初始型线方程

$$y = px^{a_1}(c-x)^{b_1} \pm qx^{c_1}(c-x)^{d_1} \pm rx^{s_1}(c-x)^{t_1} \tag{17}$$

式中: p 、 q 、 r 均为大于 0 的常数。对于上下型线,指数 a_1 、 b_1 、 c_1 、 d_1 、 s_1 、 t_1 可以取不同的值,但均为大于 0 的常数。

基于前文翼型对比分析得出的型线优化思路,以 NACA0012 水翼和 Clark Y 水翼型线作为新水翼型线优化的参数变化范围。以改善水翼的空化性能和水动力性能为目标,通过对比不同的常数值,调整型线方程对型线进行优化,进而确立新水翼型线,

方程式如下

$$\begin{cases} y_s = 0.08x(1.03-x) + \\ \quad 0.175x^{0.55}(1.03-x)^{1.15} + 0.01x^{1.5}(1.03-x)^2 \\ y_p = 0.08x(1.03-x) - \\ \quad 0.14x^{0.55}(1.03-x)^{1.5} - 0.03x^{1.5}(1.03-x)^{0.5} \end{cases} \tag{18}$$

式中: y_s 、 y_p 分别为吸力面、压力面型线方程。由型线方程建立新水翼模型,命名为 NF 水翼模型。

新水翼型线和现有 3 种水翼的对比如图 10 所示。新水翼的最大厚度为 11.3 mm,在 33% 弦长处,吸力面最大凸起高度为 8.34 mm,在 38.4% 弦

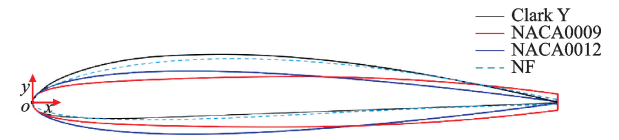


图 10 新水翼型线示意图
Fig. 10 Profile diagram of the new foil

长处。新水翼吸力面凸起高度介于 NACA0012 水翼和 Clark Y 水翼之间,并且与 Clark Y 翼型相比,吸力面最大凸起高度的位置沿来流方向后移。

通过翼型优化方案,建立了新的翼型结构。图 11 展示了不同空化数下新水翼流线分布,可以看出,空化数较小时,回射流从尾缘产生并向前缘流动;空化数较大时,回射流产生的位置提前。与图 8 各水翼流线分布相比,在相同的空化数下,新水翼吸力面回射流向前缘运动的距离比 NACA0009 水翼和 NACA0012 水翼小。虽然新水翼吸力面最大凸起高度小于 Clark Y 水翼,但新水翼吸力面最大凸起高度向后移动了一定的距离,所以回射流发展的距离相比 Clark Y 水翼增大不明显。因此,利用优化方案建立的新水翼抑制了回射流的发展,减小了回射流对空泡脱落的影响。

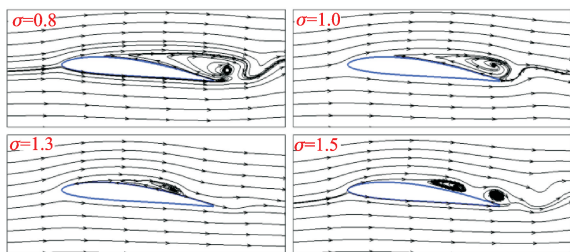


图 11 $\alpha=6^\circ$ 时不同空化数下新水翼流线分布

Fig. 11 Streamlines distribution of new foil under different cavitation numbers ($\alpha=6^\circ$)

新水翼与 Clark Y 水翼在攻角为 6° 和 8° 时的水动力性能如图 12 所示,可以看出,在相同攻角和相同空化数条件下,新水翼的水动力性能优于 Clark Y 水翼,升阻比最大提升 48.8%。这意味着,根据不同流场特性对比分析得出的型线优化思路,为提高水翼水动力性能提供了方向。新水翼升阻比变化规律与其他 3 种水翼相同,即升阻比随空化数的升高而升高,且攻角为 6° 时的升阻比大于攻角为 8° 时

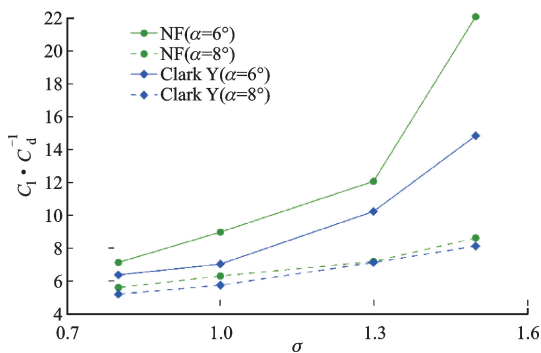


图 12 新水翼升阻比特性

Fig. 12 Lift-to-drag ratio characteristics of the new foil

的升阻比。另外,由于新水翼吸力面具有较大的凸起高度,所以新水翼阻力系数较大的同时具有较大的升力系数,升阻比特性与 Clark Y 水翼类似。

3 新水翼流场局部调控

3.1 TR 水翼及优化算法

为进一步对新翼型的空化流场进行局部调控,在新水翼上添加流动控制结构。参考空化流场中流动控制结构布置的原则^[28-30]可知,控制结构离前缘过近或过远都难以对空化起到有效的控制作用,而控制结构高度过高会对流场产生强烈扰动,对空化造成不良影响。因此,控制结构需选取合适的高度和间距,并且布置在水翼空化覆盖范围内。针对空化区域较大的 σ 为 0.8 和 1.0 两种工况,本文在新水翼吸力面均匀添加 3 个三角形凸起控制结构,研究多个控制结构对空化流场的影响。新水翼表面添加多个控制结构的模型如图 13 所示,命名为 TR 水翼模型。

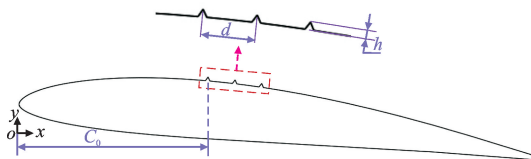


图 13 TR 水翼模型

Fig. 13 TR hydrofoil model

利用给定的流动控制结构进行水翼空化调控研究时,存在遗漏流动控制结构最优设计参数的可能。为了实现流动控制结构设计的快速寻优,以及水翼性能的最大化提升,针对 TR 水翼,利用广义模式搜索算法进行优化设计。在优化过程中,以流动控制结构起始位置 C_0 、控制结构高度 h 以及相邻控制结构的间距 d 作为设计变量,以代表水翼水动力性能的升阻比作为目标参数。为保证结构的正常添加,避免远离水翼吸力面前缘,以及控制结构由于间距过小而相互干扰等问题,给出各设计变量 $[C_0, h, d]$ 变化的上下限,对控制结构的添加进行限制,下限为 $[0.1, 0.03, 0.003]$,上限为 $[0.7, 0.3, 0.01]$ 。控制结构优化流程如图 14 所示,利用 Matlab 调用相应的程序,自动完成几何建模、网格划分以及数值计算,并对结果进行处理。最后,利用 Matlab 中的优化算法完成目标参数的寻优和对比,并将调整的设计变量参数重新输入,继续下一次迭代。

利用模式搜索算法对函数式(17)进行求解,验证该优化方法的可靠性,得到

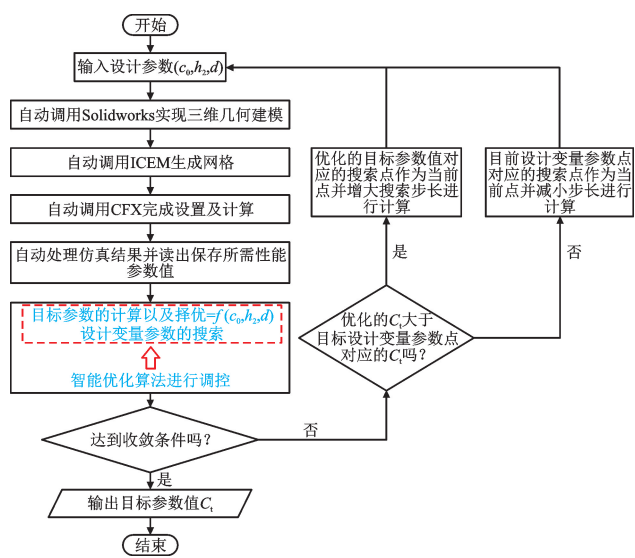


图 14 添加控制结构的水翼优化流程图

Fig. 14 Optimization process for hydrofoils with control structures

$$f = -x^2 - 2y^2 + 0.4\cos(3\pi x) + 0.6\cos(4\pi y)$$

(19)

式中: $x,y \in [-10,10]$ 。该函数为多峰函数,在 $[0,0]$ 处具有最大值 1。通过模式搜索方法进行最大值搜索,经过多次迭代之后,在 $x=-0.534\,3\times 10^{-15}$, $y=-0.104\,1\times 10^{-15}$ 处得到最大值 1,两坐标值接近理论值 0,由此验证了优化程序的可靠性。

3.2 优化结果与分析

在优化设计中,将攻角为 6° 和 8° 时优化前的模型分别命名为 TR_6 和 TR_8 ,同时将各工况优化后的模型按照以下规则进行命名: $TR_{\alpha-\sigma}$ 。基于新水翼流场分析结果,综合考虑空泡和回射流产生的位置及大小等,选定本次优化的初始点为 $x_0=[0.025\text{ m}, 0.000\,6\text{ m}, 0.005\text{ m}]$,即控制结构起始位置 C_0 在弦长 25% 位置处,控制结构高度 h 为 0.6 mm,相邻控制结构间距 d 为 5 mm。表 3 为优化前后控制结构参数对比,从优化结果可以看出,优化后流动控制结构初始位置后移,同时控制结构的高度以及间距都增加。

表 3 不同工况下流动控制结构优化结果
Table 3 Optimization results of flow control structure under different working conditions

水翼	C_0/mm	h/mm	d/mm	$\alpha/(\text{^\circ})$	σ
TR_6	25	0.6	5	6	0.8, 1.0
TR_8	25	0.6	5	8	0.8
$TR_{6-0.8}$	32	0.7	10	6	0.8
$TR_{6-1.0}$	34	0.8	6	6	1.0
$TR_{8-0.8}$	35	0.9	6	8	0.8

优化后水翼特性与 NF 水翼、TR 水翼特性的对比如图 15 和图 16 所示,可以看出,相对于 NF 水翼,TR 水翼升阻比减小,空化厚度 C_y 与长度 C_x 增加。通过优化设计后,水翼的升阻比增加,与 NF 水翼相比, $TR_{6-0.8}$ 水翼升阻比提升了 9.5%, $TR_{6-1.0}$ 水翼升阻比提升了 13.6%, $TR_{8-0.8}$ 水翼升阻比提升了 4.8%。同时,优化后水翼空化的发展得到了抑制,空化长度 C_x 与厚度 C_y 均有所减小。这意味着,使用优化设计程序实现了流动控制结构的优化,空化流场得到局部调控。

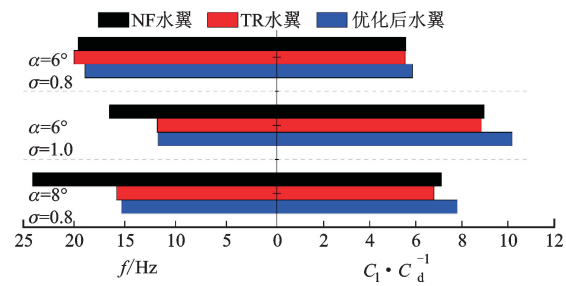


图 15 优化前后水翼空泡脱落频率和升阻比

Fig. 15 Lift-drag ratio and cavitation shedding frequency of each hydrofoil

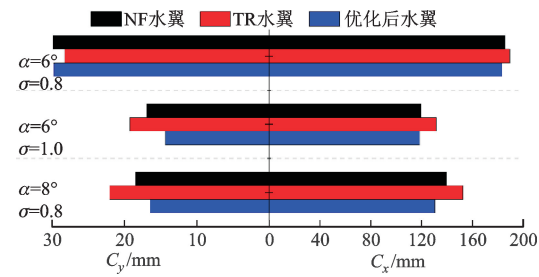


图 16 优化前后水翼空化厚度和空化长度

Fig. 16 Cavitation length and thickness of each hydrofoil

图 17 和图 18 分别给出了攻角为 6° 、空化数为 0.8 条件下,控制结构优化前后,即 TR_6 水翼和 $TR_{6-0.8}$ 水翼的气体体积分数与流线分布在一个周期内的变化,其中图 17(a)和图 18(a)为水翼周围流场图,图 17(b)和图 18(b)为控制结构附近局部放大图。优化后的 $TR_{6-0.8}$ 水翼对空化的抑制作用更大,空化的长度和厚度明显减小。与 TR_6 水翼相比, $TR_{6-0.8}$ 水翼的气体体积分数减小,空化流场得到改善。从流线分布可以看出,在空泡初生时刻,水翼尾缘处回射流还未产生,控制结构处由于自身形状原因产生涡结构。由于 $TR_{6-0.8}$ 水翼控制结构之间的间距大于 TR_6 水翼, $TR_{6-0.8}$ 水翼控制结构处的涡结

构较大,因此 $TR_{6-0.8}$ 水翼控制结构对空化流的改善作用更大。在空泡脱落时,由于回射流的切割作用,使空泡变的不稳定。从空泡脱落时控制结构处的流线分布可以看出,回射流受到 3 个连续控制结构的阻碍作用,向前缘的深入运动得到连续抑制。 TR_6 水翼控制结构初始位置在弦长 25% 处,回射流绕过后面两个控制结构,虽然控制结构对回射流起到了阻碍作用,但是 TR_6 水翼的控制结构位置离前缘较近,不仅没有起到抑制空化的作用,还导致空化长度和厚度增加。对于 $TR_{6-0.8}$ 水翼,由于控制结构的位置在弦长 32% 处,并且高度更大,回射流在绕过第二个控制结构到达第一个控制结构后,没有再绕过第一个控制结构,充分抑制了回射流向前的深入运动。同样的,优化后得到的 $TR_{6-1.0}$ 水翼和 $TR_{8-0.8}$ 水翼都对回射流产生了较大的抑制作用。通过布设连续流动控制结构,能够实现空化流场的局部调控,但需要合适的控制结构参数及布局,通过优化算法,快速实现了这一过程。

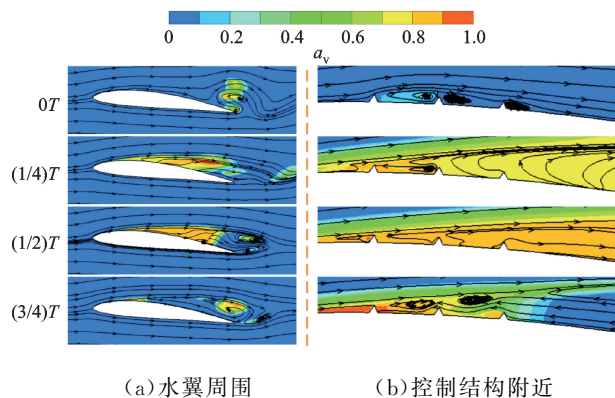


图 17 优化前气体体积分数与流线分布

Fig. 17 Vapor volume fraction and streamlines distribution before optimization

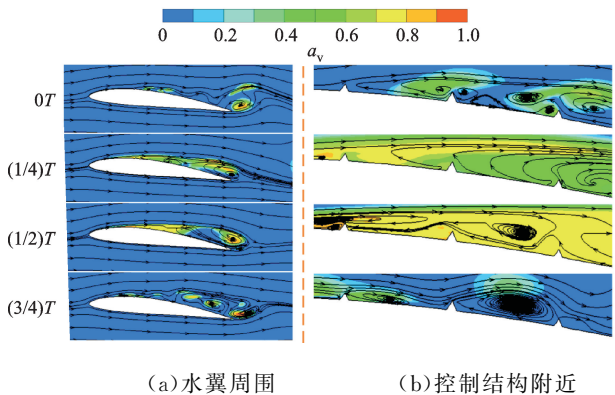


图 18 优化后气体体积分数与流线分布

Fig. 18 Vapor volume fraction and streamlines distribution after optimization

4 结 论

本文在不同攻角和空化数的工况下,对 NACA0009、NACA0012 和 Clark Y 3 种水翼的流场进行了对比分析。通过改变型线,设计了新水翼,对空化流场进行整体控制。进一步地,结合广义模式搜索算法在新水翼吸力面布设多个控制结构进行了优化设计,对空化流场进行局部调控。主要研究结论如下。

(1)在相同工况下,3 种水翼中 Clark Y 水翼的水动力性能最优,同一时刻不同水翼产生的空泡形态相似。对于同一水翼,空泡体积会随攻角的减小和空化数的增加而减小,相应的升阻比也会升高,水动力性能提升。

(2)为保持高升力系数的同时拥有较小阻力系数,新水翼型线的凸起高度需要介于 Clark Y 水翼和 NACA0012 水翼之间;在保持吸力面较大的凸起高度条件下,将最大凸起高度位置沿来流方向适当后移,可以抑制回射流的发展。

(3)新水翼的水动力性能优于 NACA0009、NACA0012 和 Clark Y 3 种水翼,升阻比明显提高,最大提高 48.8%;与 NACA0009 和 NACA0012 水翼相比,新水翼抑制了回射流的发展,减小了空泡脱落频率,实现了对空化流场的整体调控。

(4)在新水翼吸力面布设连续控制结构,通过优化得到的 $TR_{6-0.8}$ 水翼升阻比进一步提高了 9.5%, $TR_{6-1.0}$ 水翼提高了 13.6%, $TR_{8-0.8}$ 水翼提高了 4.8%,优化后水翼的水动力性能进一步提升,空化长度与厚度均有所减小,实现了对空化流场的局部调控。

(5)控制结构位置需要与水翼前缘具有一定的距离,如果控制结构离前缘较近,不仅不会起到抑制空化的作用,还会导致空化恶化。均匀布置的多个控制结构能够对回射流起到连续抑制作用,减小回射流对空化区域的影响。

参考文献:

- [1] 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, 1992, 240: 59-96.
- [2] 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. Cavi-

- tation state recognition of centrifugal pump based on deep learning [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(11): 165-172.
- [3] 季斌,程怀玉,黄彪,等. 空化水动力学非定常特性研究进展及展望 [J]. 力学进展, 2019, 49(1): 428-479.
- JI Bin, CHENG Huaiyu, HUANG Biao, et al. Research progresses and prospects of unsteady hydrodynamics characteristics for cavitation [J]. Advances in Mechanics, 2019, 49(1): 428-479.
- [4] 余本旭. 基于 OpenFOAM 的绕水翼空化流动与湍动能输运研究 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2018: 1-12.
- [5] 常欣,郭春雨,孟祥印,等. 基于粒子群算法的水翼剖面优化设计 [J]. 船舶工程, 2010, 32(5): 1-3, 26.
- CHANG Xin, GUO Chunyu, MENG Xiangyin, et al. Design of hydrofoil section based on particle swarm optimization [J]. Ship Engineering, 2010, 32(5): 1-3, 26.
- [6] 黄胜,任万龙,王超. 水翼剖面多目标粒子群算法优化 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35(12): 1451-1457.
- HUANG Sheng, REN Wanlong, WANG Chao. Multi-objective particle swarm optimization of hydrofoil sections [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2014, 35(12): 1451-1457.
- [7] 黄斌,熊鹰. 基于多目标粒子群算法的翼剖面优化设计 [J]. 船舶工程, 2016, 38(7): 10-14.
- HUANG Bin, XIONG Ying. Optimizing design of hydrofoil section based on multi-objective particle swarm algorithm [J]. Ship Engineering, 2016, 38(7): 10-14.
- [8] 李靖璐,王鹏,牛宏磊,等. 自由变形在水翼外形优化设计中的应用 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(9): 1249-1254.
- LI Jinglu, WANG Peng, NIU Honglei, et al. Application of free-form deformation method in the shape Optimization design of hydrofoil [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(9): 1249-1254.
- [9] LUO Xingqi, ZHU Guojun, FENG Jianjun. Multi-point design optimization of hydrofoil for marine current turbine [J]. Journal of Hydrodynamics, 2014, 26(5): 807-817.
- [10] KADIVAR E, OCHIAI T, IGA Y, et al. An experimental investigation of transient cavitation control on a hydrofoil using hemispherical vortex generators [J]. Journal of Hydrodynamics, 2021, 33(6): 1139-1147.
- [11] 顾巍,何友声. 空泡流非稳态现象的流动控制 [J]. 力学学报, 2001, 33(1): 19-27.
- GU Wei, HE Yousheng. Flow control on unstable cavitation phenomena [J]. Acta Mechanica Sinica, 2001, 33(1): 19-27.
- [12] QIU Ning, ZHOU Wenjie, CHE Bangxiang, et al. Effects of microvortex generators on cavitation erosion by changing periodic shedding into new structures [J]. Physics of Fluids, 2020, 32(10): 104108.
- [13] 赵国寿,伍锐,车邦祥,等. 基于障碍物的轴流泵叶片空化控制 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(4): 742-749.
- ZHAO Guoshou, WU Rui, CHE Bangxiang, et al. Blade cavitation control by obstacles in axial-flow pump [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2021, 55(4): 742-749.
- [14] ZHAO Guoshou, CAO Linlin, CHE Bangxiang, et al. Towards the control of blade cavitation in a waterjet pump with inlet guide vanes: passive control by obstacles [J]. Ocean Engineering, 2021, 231: 108820.
- [15] QIAN Zhongdong, ZHANG Shaofeng, XUE Longjian. Numerical study of mitigating cloud cavitation shedding using biomimetic protuberant stripes [J]. Journal of Fluids Engineering, 2022, 144(9): 091201.
- [16] LIN Lin, CHEN Yangyang, ZHANG Xinxin, et al. Optimization of geometry and flow rate distribution for double-layer microchannel heat sink [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2014, 78: 158-168.
- [17] MAZAHARI K, KIANI K C, NEJATI A, et al. Optimization and analysis of shock wave/boundary layer interaction for drag reduction by shock control bump [J]. Aerospace Science and Technology, 2015, 42: 196-208.
- [18] XUE Bing, WEI Chao, HU Jibin, et al. Research on effects of groove shape optimization on cavitation and lubricating characteristics for microgroove rotary seal [J]. Tribology Transactions, 2018, 61(3): 569-584.
- [19] SAUREL R, LEMETAYER O. A multiphase model for compressible flows with interfaces, shocks, detonation waves and cavitation [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2001, 431: 239-271.
- [20] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [J]. AIAA Journal, 1994, 32(8): 1598-1605.
- [21] DUCOIN A, HUANG Biao, YOUNG Y L. Numerical modeling of unsteady cavitating flows around a stationary hydrofoil [J]. International Journal of Rotating Machinery, 2012, 2012: 215678.
- [22] HUANG Biao, DUCOIN A, YOUNG Y L. Physical and numerical investigation of cavitating flows around a pitching hydrofoil [J]. Physics of Fluids, 2013, 25(10): 102109.

- [23] MORGUT M, NOBILE E, BILUŠ I. Comparison of mass transfer models for the numerical prediction of sheet cavitation around a hydrofoil [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2011, 37(6): 620-626.
- [24] GENG Linlin, CHEN Jian, ESCALER X. Improvement of cavitation mass transfer modeling by including Rayleigh-Plesset equation second order term [J]. *European Journal of Mechanics: B Fluids*, 2020, 84: 313-324.
- [25] DUPONT P. Etude de la dynamique d'une poche de cavitation partielle en vue de la prédiction de l'érosion dans les turbomachines hydrauliques [D]. Lausanne: École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1993: 64-69.
- [26] HUANG Biao, WANG Guoyu. Experimental and numerical investigation of unsteady cavitating flows through a 2D hydrofoil [J]. *Science China Technological Sciences*, 2011, 54(7): 1801-1812.
- [27] 姜海波, 赵云鹏. 基于中弧线-厚度函数的翼型形状解析构造法 [J]. *图学学报*, 2013, 34(1): 50-54.
JIANG Haibo, ZHAO Yunpeng. Analytic expression method of airfoil profile shape based on a mean camber and thickness function [J]. *Journal of Graphics*, 2013, 34(1): 50-54.
- [28] CHE Bangxiang, CAO Linlin, CHU Ning, et al. Effect of obstacle position on attached cavitation control through response surface methodology [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2019, 33(9): 4265-4279.
- [29] 陈明. 障碍物抑制平板水翼云空化研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018: 65-103.
- [30] KADIVAR E, MOCTAR O E, JAVADI K. Stabilization of cloud cavitation instabilities using Cylindrical Cavitating-bubble Generators (CCGs) [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2019, 115: 108-125.

(编辑 武红江 杜秀杰)