

不同射流参数下水翼云空化流动控制研究

王巍^{1,2} 刘明雨¹ 李智健¹ 纪祥¹ 王晓放^{1,2}

(1. 大连理工大学能源与动力学院, 大连 116024;

2. 大连理工大学海洋能源利用与节能教育部重点实验室, 大连 116024)

摘要: 在水翼吸力面采用主动射流方法可以很好地控制绕水翼的空化流动, 减弱空化的发生和发展。为此, 基于主动控制方法, 采用密度修正的 SST $k-\omega$ 湍流模型和 Zwart-Gerber-Belamri 空化模型, 数值研究射流参数对于绕 NACA66(MOD) 水翼云空化的流动特性影响规律。根据正交设计方法, 在来流雷诺数 Re 为 5.07×10^5 、攻角 α 为 8° 、空化数 σ 为 0.83 工况下, 针对由不同射流参数组合而成的 16 组射流结构, 评估了射流位置、射流角度和射流流量对绕水翼流场空化特性和水动力特性的影响, 并获得最优射流特征参数。结果表明, 射流位置对空化流动抑制影响最大, 而射流角度对水动力学性能影响最大。采用最佳射流特征参数将使水翼空化流场中的时均无量纲空穴面积降低 46.57%, 时均升阻比提高 5.59%。此时, 顺来流方向的射流与向前缘发展的回射流碰撞并形成强烈的掺混, 消耗了回射流的动量, 从而阻碍了回射流继续向水翼前缘移动, 极大地削弱了附着型空化的失稳脱落。

关键词: NACA66 水翼; 空化抑制; 主动射流; 水动力学性能; 正交设计

中图分类号: TV131.3⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2023)04-0161-09

OSID:



Control of Hydrofoil Cloud Cavitation Flow with Different Jet Parameters

WANG Wei^{1,2} LIU Mingyu¹ LI Zhijian¹ JI Xiang¹ WANG Xiaofang^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

2. Key Laboratory of Ocean Energy Utilization and Energy Conservation, Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The active jet method on the suction surface of the hydrofoil can well control the cavitation flow around the hydrofoil and reduce the occurrence and development of cavitation. Therefore, based on the method of active jet, with the density-corrected SST $k-\omega$ turbulence model and the Zwart-Gerber-Belamri cavitation model, the effect of jet parameters on the flow characteristic of cloud cavitation around the NACA66 (MOD) hydrofoil was numerically studied. According to the orthogonal design method, under the condition of incoming flow $Re = 5.07 \times 10^5$, the angle of attack $\alpha = 8^\circ$, and the cavitation number $\sigma = 0.83$, by studying 16 groups of jet structures composed of different jet parameters, the influence of the jet position, jet angle and jet flow rate on the cavitation and hydrodynamic performance of the flow field around the hydrofoil was evaluated, and the optimal jet parameters were obtained. The results showed that the jet position had the greatest influence on the suppression of cavitation flow, and the jet angle had the maximum influence on the hydrodynamic performance. Using the optimal jet parameters can reduce the time-averaged dimensionless cavitation area by 46.57% and increase the time-average lift-drag ratio by 5.59% in the hydrofoil cavitation flow field. At this point, the injected jet in the downstream direction collided with re-entrant jet towards the leading edge, which formed strong mixing and significantly consumed the momentum of the re-entrant jet, thereby preventing the re-entrant jet from continuing to move to the leading edge of the hydrofoil, greatly weakening the destabilizing shedding of attached cavitation.

Key words: NACA66 hydrofoil; cavitation suppression; active injection; hydrodynamic performance; orthogonal design

0 引言

空化是水动力学领域中的常见物理现象,涉及湍流、多相流、相变、可压缩和非定常特性等几乎所有复杂流体力学过程^[1-2],其本质是一种相变过程。空泡的脱落和溃灭不仅剥蚀设备表面,而且产生强烈的振动^[3]和脉冲噪声^[4],引起水动力特性和载荷的大幅变化,严重威胁高速运转设备的安全稳定运行。因此,提出可行有效的空化控制方法具有重要意义。

按照有无向体系内注入额外能量,空化控制策略可以分为主动控制和被动控制^[5]。被动控制主要通过改变水翼表面结构和材料特性来实现,常见的措施包括设置不同形状的凸起或障碍物^[6-7]、采用非常规水翼^[8]、机械加工^[9]和改变固体材料特性^[10]等。这些措施难以实现多工况条件下的精确响应调节。

主动控制方法则采用向流场中注入不凝气体、聚合物和水来抑制空化,一些学者对此进行了研究^[5,11-15]。上述主动控制策略均包含诸多控制参数,为提高空化控制效果,需要研究多控制参数的优化问题。而多参数优化前期需要获得一定量的试验样本,而且样本的选取需要最大化反映试验空间的信息,因此科学合理的试验设计方法是必要的。常用的试验设计方法包括中心组合设计、正交试验设计和拉丁超立方设计等。其中,正交设计法能够以极小的代价从设计空间获取散布性好、代表性强的设计点。对正交试验结果进行极差分析,获得影响结果的主要因素和次要因素,从而最终确定最优组合。目前,正交试验法已广泛应用于不同类型泵的优化设计^[16-19]。

水翼表面主动射流的空化抑制效果已经得到了实验^[20]和数值^[13]验证,但先前的研究或侧重于某一位置和某一角度射流的分析,或以牺牲一定量升阻比为代价^[15,21]。本文基于正交设计方法,研究射流孔位置、射流角度、射流流量不同组合对空化抑制效果及水动力学性能的影响,以期获得多因素多水平下兼顾空化性能和水动力学性能的优化射流方案。

1 数值计算方法及验证

1.1 控制方程

在本文中,绕水翼空化流动数值模拟基于汽液均相流模型展开,该模型将汽液混合相看作均匀物质,混合相参数取汽液两相参数加权平均,两相之间速度无滑移,混合相密度 ρ_m 和动力粘度 μ_m 定义为

$$\rho_m = \rho_l \alpha_l + \rho_v \alpha_v \quad (1)$$

$$\mu_m = \mu_l \alpha_l + \mu_v \alpha_v \quad (2)$$

式中 ρ_l, ρ_v ——液相、汽相密度

μ_l, μ_v ——液相、汽相动力粘度

α_l, α_v ——液相、汽相体积分数

混合相连续性方程和动量方程为

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_m u_j) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho_m u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_m u_i u_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} +$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu_m + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) \right] \quad (4)$$

式中 u ——混合相瞬时速度

p ——混合相压力

μ_t ——混合相湍流粘度

δ_{ij} ——二阶单位张量

下角标 i, j 表示坐标方向。

1.2 湍流及空化模型

作为典型的汽液两相流动,空化的非定常运动行为与湍流发展密切相关。因此,需选用合适的湍流模型和空化模型,以更好地模拟空化的非定常发展过程。湍流模型方面,文献[22]比较了 RNG $k-\varepsilon$ 模型、SST $k-\omega$ 模型、密度修正的 RNG $k-\varepsilon$ 模型以及密度修正的 SST $k-\omega$ 模型等 4 种湍流模型在二维 NACA 水翼非定常空化流动下的预测精度,发现使用密度修正的 SST $k-\omega$ 模型能够精确预测空泡长度和脱落频率,且空泡区总体时间演化也与实验观测结果更加吻合,本文采用该模型进行空化流动分析。SST $k-\omega$ 模型^[23]在近壁面附近使用 $k-\omega$ 模型,在近壁面之外及自由剪切流动中使用 $k-\varepsilon$ 模型,从而提高了逆压梯度条件下流动分离开始点和分离区大小的预测精度^[24]。其湍流粘度、 k 方程以及 ω 方程形式为

$$\mu_t = \frac{\rho_m a_1 k}{\max(a_1 \omega, \Omega F_2)} \quad (5)$$

$$\frac{\partial (\rho_m k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_m u_j k)}{\partial x_j} = P_k -$$

$$\beta^* \rho_m \omega k + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu_m + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (6)$$

$$\frac{\partial (\rho_m \omega)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_m u_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\gamma \rho_m}{u_t} P - \beta_\omega \rho_m \omega^2 +$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu_m + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + 2 \rho_m (1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (7)$$

其中

$$P = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (8)$$

$$P_k = \min(P, 10 \beta^* \rho_m k \omega) \quad (9)$$

式中 k ——湍动能
 ω ——湍流比耗散率
 Ω ——涡量
 τ_{ij} ——偏应力张量
 $\gamma, a_1, \sigma_k, \sigma_{\omega 2}, \beta^*, \beta_\omega$ ——经验性封闭系数, 采用文献 [23] 中默认值

F_1, F_2 ——混合函数
 P, P_k ——湍流生成项
引入密度修正系数对湍流粘度进行修正, 修正公式为

$$\mu_t^* = f(\rho) k \omega \tag{10}$$

其中
$$f(\rho) = \rho_v + \frac{(\rho_m - \rho_v)^n}{(\rho_l - \rho_v)^{n-1}} \tag{11}$$

式中 μ_t^* ——修正后湍流粘度
 n ——密度修正系数

本文采用文献 [25] 推荐的密度修正系数 $n = 10$ 。修正后的方程可以考虑多相混合物局部可压缩性对湍流模型的影响, 可以较好模拟绕 NACA66 型水翼的空化流动现象 [25]。

空化模型方面, 本文使用文献 [26] 提出的 ZGB (Zwart – Gerber – Belamri) 空化模型, 该模型的设置与文献 [21] 一致, 此处不再赘述。

1.3 计算域设置与网格

本文以 NACA66 (MOD) 水翼为研究对象, 水翼弦长 C 为 70 mm, 最大厚度在距水翼前缘 $0.45C$ 位置, 最大厚弦比 11.74%, 最大弯度为 2%, 位于距水翼前缘 $0.5C$ 处。边界条件设置与实验条件 [20] 保持一致: 攻角 α 为 8° , 来流速度 U_∞ 为 7.832 m/s, 以水翼弦长 C 作为特征长度的雷诺数 Re 为 5.07×10^5 , 流场压力为 27 325 Pa, 对应空化数 $\sigma = (P - P_v) / (0.5\rho_l U_\infty^2) = 0.83$, 式中液相密度 ρ_l 为 998.7 kg/m³, 动力粘度 μ_l 为 1 079.85 μ Pa·s, 流场温度 290 K, 对应饱和蒸气压 P_v 为 1 940 Pa。

如图 1 所示, 边界条件设置为速度入口和压力出口, 水翼表面及流场上下前后壁面均为速度无滑移壁面条件。为保证流动稳定性和避免回流产生, 水翼前缘距入口和出口分别设置为 $4.0C$ 和 $8.0C$, 与上下壁面距离均为 $2.0C$ 。根据水翼特殊的几何特征, 使用 C 型 block 剖分建立结构化网格, 并对近壁面区域进行加密处理。为检验网格无关性, 设计了 4 种配置的结构化网格, 其网格数和升阻力系数对比如表 1 所示, 升、阻力系数定义为

$$C_l = \frac{F_l}{0.5\rho_l U_\infty^2 S_l} \tag{12}$$

$$C_d = \frac{F_d}{0.5\rho_l U_\infty^2 S_d} \tag{13}$$

式中 S_l, S_d ——水翼吸力面在 y 轴、 x 轴的投影面积, 在二维分析中均使用弦长 C 代替

F_l, F_d ——升力和阻力

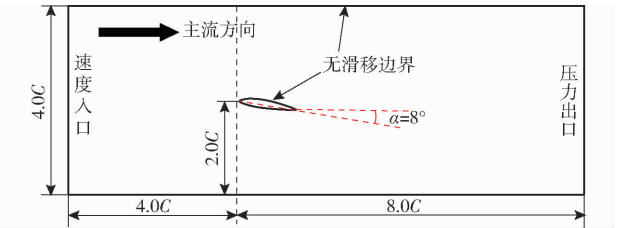


图 1 计算域及边界条件设置

Fig. 1 Computing domain and boundary condition setting

如表 1 所示, 从 Mesh3 开始, 继续加密后计算得到的升、阻力系数已经趋于稳定。为节省计算资源, 对二维原始水翼的数值模拟采用 Mesh3 网格, 总网格数为 404 362。水翼近壁面网格分布如图 2 所示, 弦长方向网格节点数为 480, 垂直于弦长方向近壁面网格节点数为 240。基于有限体积法对动量方程和连续性方程进行离散, 采用 SIMPLEC 格式的压力-速度耦合算法求解稳定流场, 采用一阶迎风格式计算初值, 得到稳定流场后将结果文件用于瞬态计算。瞬态计算时设置时间步长为 0.1 ms, 单个步长内迭代 20 次, 离散形式选择二阶迎风, 压力项采用 PRESTO! 格式, 非定常项的离散则采用一阶隐式格式。

表 1 网格无关性检验结果

Tab. 1 Mesh independence test results

网格编号	网格数	C_l	C_d
Mesh1	251 886	1.027 4	0.186 6
Mesh2	326 550	1.168 0	0.195 5
Mesh3	404 362	1.173 5	0.200 5
Mesh4	602 882	1.173 8	0.200 9

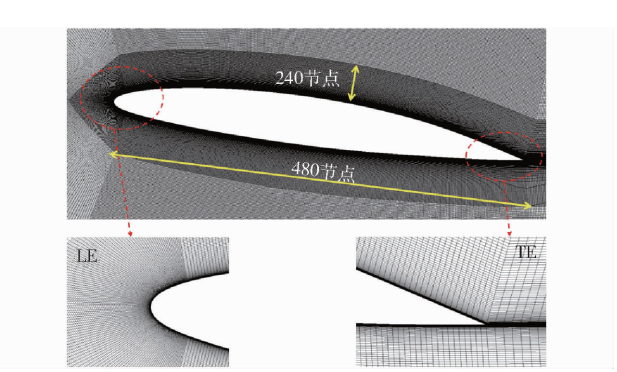


图 2 水翼近壁面网格分布

Fig. 2 Mesh distribution near wall of hydrofoil

1.4 数值模型验证

NACA66 (MOD) 水翼的全流场流动测试实验在北京理工大学空化循环水洞中完成,可以清晰观测到空化从初生到溃灭的演化过程。1 个典型周期内的实验观测和数值仿真计算结果的空化形态对比如图 3(t_0 为空化初始时刻, T 为原始水翼云空化周期)所示。从一个周期内空化形态演变规律来看,数值仿真与实验观测结果吻合良好。

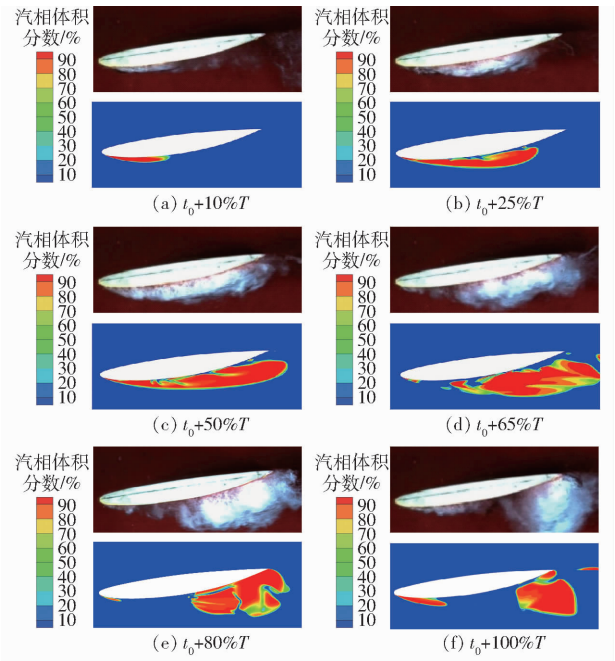


图 3 1 个典型周期内绕原始水翼空化发展侧视图
Fig.3 Side views of cavitation development around original hydrofoil in a typical period

为进一步定量分析数值计算的准确度,对实验图像进行灰度处理和二值化分析,获得无量纲空穴面积 S/S_c (S_c 为图 3 中水翼横截面积) 在 3 个典型周期内的变化情况,二值化分析的阈值采用 Otsu 法自适应确定,数值计算中定义流场中汽相体积分数大于 10% 的区域面积为空泡面积 S 。

图 4 和表 2 计算结果表明:在 3 个典型周期内,通过实验与数值计算的时均无量纲空穴面积相对偏差 4.78%,以弦长 C 为特征值的斯特劳哈尔数 St_c 相对偏差 0.13%,说明了数值模型描述云空化流动的可行性。

2 正交试验设计

正交试验设计方法可以从参数的全面组合中选取具有代表性和典型性的组合,具有均衡搭配和整齐可比的特点,用较少的试验次数来代替全面试验,降低试验成本。本文研究的射流位置、射流角度和射流流量对空化流动控制的影响属于多参数优

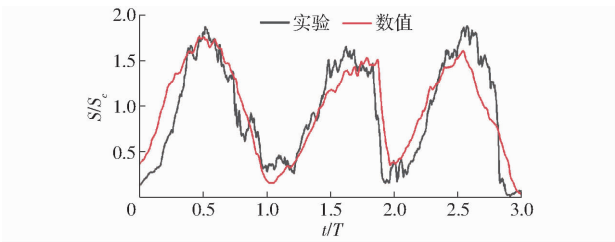


图 4 3 个典型周期内实验与数值计算无量纲空穴面积对比

Fig.4 Experimental and numerical comparison of dimensionless cavitation area in three typical periods

表 2 时均无量纲空穴面积与斯特劳哈尔数对比
Tab.2 Comparison of dimensionless cavitation area and Strouhal number

参数	实验	数值	相对偏差/%
S/S_c	0.878	0.836	4.78
St_c	0.149 9	0.150 1	0.13

化问题,故采用正交设计方法以降低计算成本。
课题组研究发现,当水翼攻角为 8° 、距水翼前缘 $x_{LE} = 0.19C$ 位置以垂直水翼表面射流(即本研究中的 90° 角方向)能够有效抑制云空化发展^[20];在与水翼前缘距离 x_{LE} 为 $0.45C$ 处以垂直水翼表面射流大大降低了片空穴附着长度^[27]。故将 $0.19C$ 和 $0.45C$ 作为射流位置的两个水平。同时,为增加射流位置水平数个数,增加 $0.3C$ 和 $0.6C$ 作为其余两个射流位置,共计 4 个水平。定义射流角度 a_{jet} 为射流方向与来流方向的夹角。文献[14]在实验研究中发现 $x_{LE} = 0.45C$ 位置 155° 射流对 NACA66 (MOD) 水翼云空化抑制效果不佳,故射流角度不宜过大。综合考虑设计 30° 、 60° 、 90° 、 120° 共 4 种射流角度(图 5)。依据实验研究^[20] 结果,射流流量设置 360、380、400、450 L/h 共 4 个水平数。由于实验中射流孔直径 1.4 mm,射流孔个数 25 个保持不变^[28-30],因此在本文后续研究中,射流流量换算成射流速度分别为 2.60、2.74、2.89、3.25 m/s。综上,正交设计所研究的各因素水平见表 3,满足要求的三因素四水平正交表列于表 4。

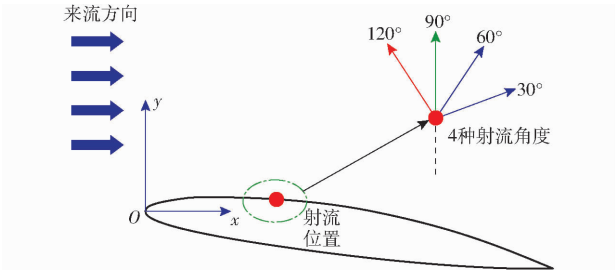


图 5 射流角度示意图
Fig.5 Jet angle diagram

表 3 正交试验因素和水平

Tab.3 Factors and levels of orthogonal design

水平	因素		
	射流位置	射流角度	射流流量
	x_{LE}	$\alpha_{jet}/(^{\circ})$	$U_{jet}/(L\cdot h^{-1})$
1	0.19C	30	360
2	0.30C	60	380
3	0.45C	90	400
4	0.60C	120	450

表 4 三因素四水平正交表

Tab.4 Orthogonal test with three factors and four levels

试验编号	射流位置	射流角度	射流流量
	x_{LE}	$\alpha_{jet}/(^{\circ})$	$U_{jet}/(L\cdot h^{-1})$
M01	0.19C	30	360
M02	0.19C	60	380
M03	0.19C	90	400
M04	0.19C	120	450
M05	0.30C	30	380
M06	0.30C	60	360
M07	0.30C	90	450
M08	0.30C	120	400
M09	0.45C	30	400
M10	0.45C	60	450
M11	0.45C	90	360
M12	0.45C	120	380
M13	0.60C	30	450
M14	0.60C	60	400
M15	0.60C	90	380
M16	0.60C	120	360

3 结果与讨论

3.1 空化流动控制结果分析

分别对正交表中不同射流参数组合开展空化流动控制的数值计算。为了定量描述空化抑制效果，将射流水翼较原始水翼 S/S_c 的减少比例定义为空化抑制有效性参数 η ，数值越大则空化抑制效果越好，具体表达式为

$$\eta = \left(1 - \frac{S}{S_{ori}}\right) \times 100\%$$
 (14)

式中 S_{ori} ——绕原始水翼空化流动中汽相体积分
数大于 10% 的区域面积

以水翼升阻力比 $K(K=L/D, L、D$ 分别为升力和阻力)的时均值作为水动力学性能的评价指标。为此,综合考虑空化抑制效果和水动力学性能,选取最优射流参数。16 组不同射流参数组合的流场计算结果(每组均采用瞬态计算 0.5 s 的均值)见表 5(表中 K_s 为原始水翼升阻比)。

表 5 射流水翼与原始水翼的 S/S_c 和 K 对比

Tab.5 Comparison of S/S_c and K between jet hydrofoils and original hydrofoil

试验编号	S/S_c	$\eta/\%$	K	$\frac{K-K_s}{K_s}/\%$
ORI	0.836 6		5.741 9	
M01	0.448 8	46.35	5.718 3	-0.41
M02	0.458 7	45.17	5.563 0	-3.12
M03	0.439 9	47.41	5.616 2	-2.19
M04	0.397 5	52.49	5.008 7	-12.77
M05	0.488 2	41.64	5.814 7	1.27
M06	0.464 3	44.50	5.721 7	-0.35
M07	0.461 0	44.89	5.569 4	-3.01
M08	0.484 5	42.09	5.726 4	-0.27
M09	0.447 0	46.57	6.063 1	5.59
M10	0.461 8	44.80	5.752 4	0.18
M11	0.501 7	40.03	5.818 4	1.33
M12	0.508 9	39.18	5.536 3	-3.58
M13	0.606 2	27.54	5.930 3	3.28
M14	0.583 5	30.26	5.853 7	1.95
M15	0.722 5	13.64	4.620 0	-19.54
M16	0.522 1	37.58	4.695 4	-18.23

鉴于在实际运行中射流流量可根据需要进行调节,在此仅针对射流的结构参数开展空化性能和水力性能影响分析。基于表 5 计算结果,分析了 16 个射流方案的空化抑制有效性参数 η 和相对于原始水翼的时均升阻比系数 K/K_s 随射流位置、射流角度的变化规律,如图 6、7 所示。

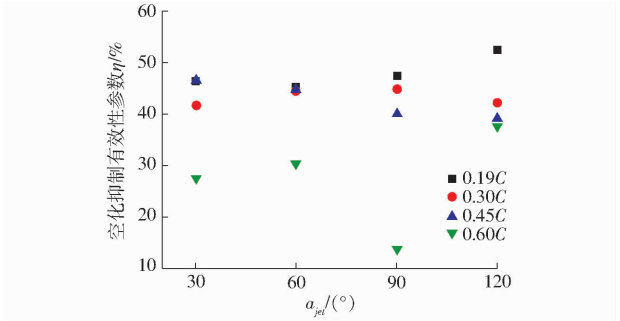


图 6 空化抑制有效性参数 η 随射流结构参数变化

Fig.6 η varied with jet structure parameters

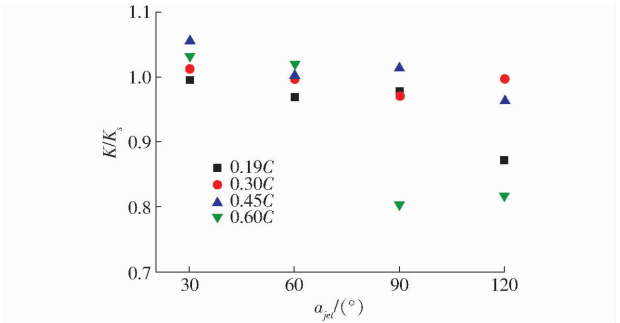


图 7 K/K_s 随射流结构参数变化

Fig.7 K/K_s varied with jet structure parameters

在所研究的水翼云空化流动中,当射流位置 $x_{LE}=0.6C$ 处时,在不同的射流角度下空化抑制有效性参数 η 明显低于其他位置,且角度 90° 和 120° 射流还造成水翼时均升阻比系数减小 20% 左右,显著降低了水翼的水动力性能。

从射流角度来看,如图 6 所示,所有角度的射流均可以不同程度地减弱空化的发展。当顺来流方向 ($30^\circ\leq a_{jet}<90^\circ$) 射流时,在水翼吸力面前半部分 ($x_{LE}<0.5C$) 的射流对空化抑制效果明显, η 可达 41% 以上。当射流垂直来流方向时,在 $x_{LE}=0.60C$ 位置时射流对空化抑制效果最差。而以 $a_{jet}=120^\circ$ 射流时,在 $x_{LE}=0.19C$ 位置可以获得最好的空化抑制效果。

从射流位置来看,在所有研究的射流角度范围内 ($30^\circ\leq a_{jet}\leq 120^\circ$), $x_{LE}=0.60C$ 处射流将引起空化抑制效果有效参数的最大变化量 $\Delta\eta_{max}$ 为 23.94%, 在 $x_{LE}=0.19C$ 处射流的 $\Delta\eta_{max}$ 为 7.32%, 在 $x_{LE}=0.30C$ 处射流的 $\Delta\eta_{max}$ 为 3.25%, $x_{LE}=0.45C$ 处射流的 $\Delta\eta_{max}$ 为 7.39%。可以看出,在 $x_{LE}=0.30C$ 处射流对于空化流动的抑制更加稳定,其次是 $x_{LE}=0.19C$ 处的射流。

从水翼动力学特性来看,如图 7 所示,为了避免射流对水翼水动力特性造成不利影响,射流角度和射流位置将不同程度受到限制。

当射流在 $x_{LE}=0.19C$ 处,针对所有射流角度,水翼升阻力系数比均低于原始水翼;而在 $x_{LE}=0.30C$ 处,仅在 $a_{jet}=30^\circ$ 才能满足水翼升阻比要求;只有在 $x_{LE}=0.45C$ 处,顺来流和垂直来流方向 ($30^\circ\leq a_{jet}\leq 90^\circ$) 的射流始终保持升阻比系数高于原始水翼。

综合上述分析表明,为了兼顾空化抑制效果和水动力性能,最佳的射流角度将分布在 $30^\circ\leq a_{jet}\leq 90^\circ$ 之间,而射流位置将在 $0.3C$ 和 $0.45C$ 中获得。

3.2 最佳射流方案

不同水平对应的试验结果平均值的极差反映该因素的波动情况。极差越大,说明该因素对试验结果的影响程度越大,因此也更加重要^[16-19]。

不同射流参数对无量纲空穴面积 S/S_c 的影响如表 6 所示,以射流位置为例,不同的水平数下 S/S_c 有明显差别, S/S_c 越小说明在该位置布置射流孔的空化抑制效果越好。为简化射流参数组合的叙述,以字母 $A\sim C$ 和数字 $1\sim 4$ 来分别表示各因素和各水平。比较表 6 中各因素不同水平数下 S/S_c ,发现空化抑制效果最优的射流位置为 $x_{LE}=0.19C$ 。这是由于该位置为 8° 攻角下水翼最高点,绕水翼来流经过此处时流速达到最大,压力降至最低,因此在该位

置布置射流孔能够更有效地抑制云空化。此外,最有利于提高空化抑制效果的射流角度 a_{jet} 和射流流量 U_{jet} 分别为 120° 和 450 L/h 。因此,由正交分析得到的空化抑制效果最优的组合为 $A_1B_4C_4$ ($x_{LE}=0.19C$ 、 $a_{jet}=120^\circ$ 、 $U_{jet}=450\text{ L/h}$),即 M04 方案,此时,空化抑制有效性参数 η 为 52.49%。

表 6 时均无量纲空穴面积 S/S_c 的正交分析

Tab.6 Orthogonal analysis of S/S_c			
	A	B	C
k_1	0.436 2	0.497 6	0.484 2
k_2	0.474 5	0.492 1	0.544 6
k_3	0.479 9	0.531 3	0.488 7
k_4	0.608 6	0.478 3	0.481 6
R	0.172 4	0.053 0	0.063 0

此外,由表 6 可知,不同射流参数对空化抑制效果的影响程度从大到小依次为射流位置、射流流量、射流角度。

然而,尽管 $A_1B_4C_4$ ($x_{LE}=0.19C$ 、 $a_{jet}=120^\circ$ 、 $U_{jet}=450\text{ L/h}$) 组合空化抑制效果达到最优,但该方案下射流对水翼时均升阻比造成了较大的破坏(相比原始水翼降低 12.77%)。

不同射流参数对水翼的时均升阻比 K 的影响见表 7,使水翼的水动性能达到最优的射流参数分别为 $x_{LE}=0.45C$ 、 $a_{jet}=30^\circ$ 、 $U_{jet}=400\text{ L/h}$,而不同射流参数对水动力性能的影响程度从大到小依次为射流角度、射流位置、射流流量。

表 7 时均升阻比 K 的正交分析

Tab.7 Orthogonal analysis of K			
	A	B	C
k_1	5.476 6	5.881 6	5.488 5
k_2	5.708 1	5.722 7	5.383 5
k_3	5.792 6	5.406 0	5.814 9
k_4	5.274 9	5.241 7	5.565 2
R	0.517 7	0.639 9	0.431 4

上述结果表明,射流参数无法满足空化抑制效果和水动力学性能同时达到最优,接下来将依据上述分析结果缩小寻优范围。对于射流位置,虽然 $x_{LE}=0.19C$ 处空化抑制效果整体较优,但观察图 8 和表 7 发现,在该位置以各个角度射流都对水翼升阻比造成了破坏,升阻比较原始水翼平均降低 4.62%,故最佳组合射流位置在 $0.3C$ 和 $0.45C$ 之间选择;对于射流角度, $a_{jet}=120^\circ$ 时升阻比最差,较原始水翼降低 8.71%,故最佳组合射流角度在 30° 和 60° 之间选择;对于射流流量, $U_{jet}=400\text{ L/h}$ 时有利于提高升阻比, $U_{jet}=450\text{ L/h}$ 时有利于提高空化抑制效果。因此,依托上述各水平建立三因素两水

平正交表,正交表涉及参数和正交计算结果分别列于表 8 和表 9,对计算结果的正交分析见表 10。

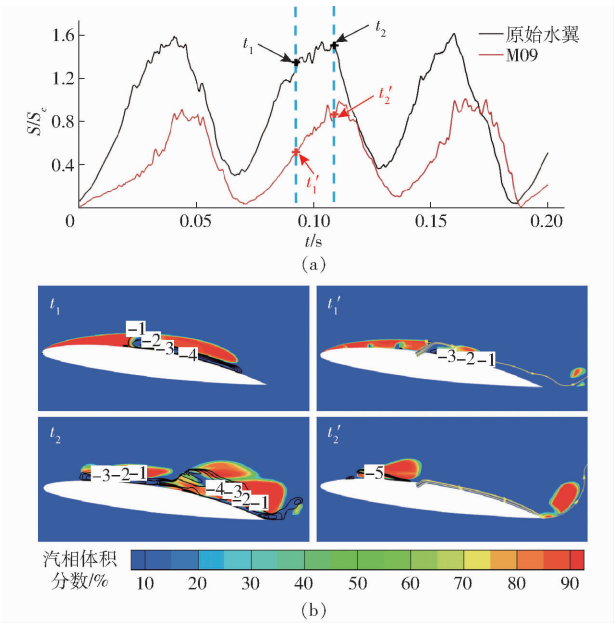


图 8 绕原始水翼与射流水翼空化流动对比
Fig. 8 Comparison of cavitation flow around original and jet hydrofoil

表 8 二次正交设计因素与水平
Tab. 8 Factors and levels of the second orthogonal design

水平	因素		
	射流位置	射流角度	射流流量
	x_{LE}	$\alpha_{jet}/(^{\circ})$	$U_{jet}/(L \cdot h^{-1})$
1	0.30C	30	400
2	0.45C	60	450

表 9 三因素两水平正交设计及计算结果
Tab. 9 Orthogonal test with three factors and two levels and calculation results

编号	因素			S/S_c	$\eta/\%$	K
	x_{LE}	$\alpha_{jet}/(^{\circ})$	$U_{jet}/(L \cdot h^{-1})$			
M17	0.30C	30	450	0.503 0	39.88	5.813 3
M18	0.30C	60	400	0.441 5	47.17	5.649 9
M09	0.45C	30	400	0.447 0	46.57	6.063 1
M10	0.45C	60	450	0.461 8	44.80	5.752 4

表 10 S/S_c 和 K 正交分析
Tab. 10 Orthogonal analysis of S/S_c and K

目标	水平	A	B	C
S/S_c	1	0.472 3	0.475 0	0.444 3
	2	0.454 4	0.451 7	0.482 4
K	1	5.731 6	5.938 2	5.856 5
	2	5.907 8	5.701 2	5.782 9

表 10 中结果显示,当 $x_{LE} = 0.45C$ 、 $\alpha_{jet} = 60^{\circ}$ 、 $U_{jet} = 400 L/h$ 时空化抑制效果最优,将该方案设为 M19 方案,开展绕水翼空化流动的水动力学性能分

析。与 M09 方案对比结果表明(表 11),M19 方案时均升阻比较 M09 方案降低 2.6%,但相对于原始水翼仍然提高 2.85%。

表 11 M09 与 M19 空化流动计算结果对比
Tab. 11 Comparison of cavitation flow calculation results between M09 and M19

	原始水翼	M09	M19
S/S_c	0.836 6	0.447 0	0.443 1
$\eta/\%$		46.57	47.03
K	5.741 9	6.063 1	5.905 8
$\frac{K - K_s}{K_s}/\%$		5.59	2.85

综上分析可知 M09 和 M19 射流方案均能实现良好的空化流动控制,并保证较优的水动力学性能。

3.3 最佳射流方案空化流动分析

采用 M09 方案作为最佳射流特征参数组合方案,图 8a 展示了 0.2 s 内绕原始水翼和射流水翼流动无量纲空穴面积 S/S_c 的变化情况。相比原始水翼,射流水翼在 0.2 s 内时均无量纲空穴面积减小 48.89%。对周期曲线数据进行快速傅里叶变换,发现该射流方案下空泡团脱落主导频率为 15.73 Hz,较原始水翼空泡团脱落频率的 16.79 Hz 降低 6.31%,从而在一定程度上减缓了空化发展的速度,增强了绕水翼空化流动的稳定性。

选取图 8a 中两个特征时刻下(第 2 个空化发展周期内)原始水翼和射流水翼的空化形态进行对比(如图 8b,图中黑线为 X 方向速度为负的等值线,单位 m/s,白线为射流孔处流线)。对于原始水翼: t_1 时刻回射流(X 方向速度为负值)从水翼尾缘一直延伸至约 0.45C 处,并在该位置抬升使得附着型空化远离吸力面向下游发展,且 t_1 时刻之后空泡面积持续增加, t_2 时刻空泡面积即将达到峰值,回射流运动至水翼前缘,将整个附着空泡从壁面完全剥离,而后在下游形成大规模脱落云团。

对于射流水翼: t_1' 时刻,附着型空化被分成了两块区域,容易看出这是由于射流的阻挡,射流孔上游的附着型空化的发展受阻;另外,由图 9 可知,射流

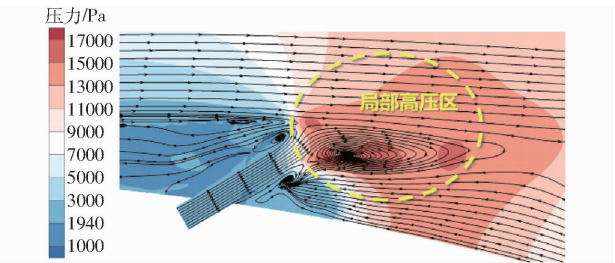


图 9 射流孔局部放大视图:压力场与流线耦合
Fig. 9 Local enlarged view of jet hole: coupling of pressure field and streamline

与回射流碰撞并强烈掺混,大大消耗了回射流的动量。掺混区形成局部高压环境,使得脱落空泡团的面积大大减小。 t_2' 时刻,虽然回射流强度增大,越过射流孔达到水翼前缘,将射流孔上游的附着空穴剥离,但此时脱落空穴的规模仍然较小。由于射流以顺来流方向运动,射流流体在大部分时刻得以贴壁向下游运动,消耗了回射流的动量,即使当射流强度不足以阻挡回射流时,也可以将回射流一定程度地抬升,降低了附着空腔被回射流整体剥离的可能,有利于空化流场的稳定。

4 结论

(1)当射流孔布置在水翼吸力面前半部分($x_{LE} < 0.5C$)时,顺来流方向($30^\circ \leq a_{jet} < 90^\circ$)射流对空化抑制效果明显;对于水动力特性,在 $x_{LE} =$

$0.45C$ 处以顺来流和垂直来流方向($30^\circ \leq a_{jet} \leq 90^\circ$)射流能够提高水翼升阻比。

(2)不同射流参数对绕水翼空化流动抑制效果的影响从大到小依次为射流位置、射流流量、射流角度;对水翼升阻比的影响从大到小依次为射流角度、射流位置、射流流量。

(3)采用射流位置 $x_{LE} = 0.45C$ 、射流角度 $a_{jet} = 30^\circ$ 、射流流量 $U_{jet} = 400 \text{ L/h}$ 的射流方案(M09)时,空化抑制效果和水动力学性能综合评价达到最优,相比于原始水翼,水翼吸力面无量纲空穴面积减小46.57%,水翼升阻比提高5.59%。

(4)射流与回射流在射流孔附近掺混,形成局部高压区,阻碍了附着空化的发展,同时,顺来流方向的射流消耗了回射流向前景发展的动量,降低了空穴面积和脱落频率,有利于空化流场的稳定。

参 考 文 献

- [1] FRANC J P, MICHEL J M. Fundamentals of cavitation[M]. Springer Science & Business Media, 2006.
- [2] 黄彪, 吴钦, 王国玉. 非定常空化流动研究现状与进展[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(1): 1-14.
HUANG Biao, WU Qin, WANG Guoyu. Progress and prospects of investigation into unsteady cavitating flows[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(1): 1-14. (in Chinese)
- [3] WU Q, WANG C, HUANG B, et al. Measurement and prediction of cavitating flow-induced vibrations[J]. Journal of Hydrodynamics, 2018, 30(6): 1064-1071.
- [4] EBRAHIMI A, RAZAGHIAN A H, TOOTIAN A, et al. An experimental investigation of hydrodynamic performance, cavitation, and noise of a normal skew B-series marine propeller in the cavitation tunnel[J]. Ocean Engineering, 2021, 238: 109739.
- [5] TIMOSHEVSKIY M V, ZAPRYAGAIEY I I, PERVUNIN K S, et al. Manipulating cavitation by a wall jet: experiments on a 2D hydrofoil[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2018, 99: 312-328.
- [6] CHE B X, CHU N, STEFFEN J S, et al. Control effect of micro vortex generators on leading edge of attached cavitation[J]. Physics of Fluids, 2019, 31(4): 044102.
- [7] 赵伟国, 赵国寿, 咸丽霞, 等. 离心泵叶片表面布置障碍物抑制空化的数值模拟与实验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 111-120.
ZHAO Weiguo, ZHAO Guoshou, XIAN Lixia, et al. Effect of surface-fitted obstacle in centrifugal pump on cavitation suppression[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 111-120. (in Chinese)
- [8] LI Z, QIAN Z, JI B. Transient cavitating flow structure and acoustic analysis of a hydrofoil with whalelike wavy leading edge[J]. Applied Mathematical Modelling, 2020, 85: 60-88.
- [9] 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 CSAE, 2019, 35(2): 40-47. (in Chinese)
- [10] PERNOD L, DUCOIN A, LE S H, et al. Experimental and numerical investigation of the fluid-structure interaction on a flexible composite hydrofoil under viscous flows[J]. Ocean Engineering, 2019, 194: 106647.
- [11] ARNDT R E A, BALAS G J, WOSNIK M. Control of cavitating flows: a perspective[J]. JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering, 2005, 48(2): 334-341.
- [12] YAKUSHIJI R. Mechanism of tip vortex cavitation suppression by polymer and water injection[D]. Ann Arbor: University of Michigan, 2009.
- [13] WANG W, ZHANG Q, TANG T, et al. Numerical study of the impact of water injection holes arrangement on cavitation flow control[J]. Science Progress, 2020, 103(1): 0036850419877742.
- [14] 焦建雄. 水翼表面带角度射流对空化影响的实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
JIAO Jianxiong. Experimental study on the effect of angular jet on cavitation on hydrofoil surface[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [15] 安昭阳. 射流控制参数对空化流动控制的影响研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
AN Zhaoyang. The influence of jet control parameters on cavitation flow control[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [16] LIU M, TAN L, CAO S. Design method of controllable blade angle and orthogonal optimization of pressure rise for a

- multiphase pump[J]. *Energies*, 2018, 11(5): 1048.
- [17] 王秀礼, 朱荣生, 苏保稳, 等. 无过载旋流泵正交设计数值模拟与试验[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(1): 48–52.
WANG Xiuli, ZHU Rongsheng, SU Baowen, et al. Numerical simulation and experiment of latin square design on non-overload vortex pump[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(1): 48–52. (in Chinese)
- [18] 高雄发, 施卫东, 张德胜, 等. 基于 CFD 正交试验的旋流泵优化设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(5): 101–106.
GAO Xiongfa, SHI Weidong, ZHANG Desheng, et al. Optimization design and test of vortex pump based on CFD orthogonal test[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(5): 101–106. (in Chinese)
- [19] 薛城, 祝宝山, 刘小兵, 等. 基于叶片载荷分布的离心泵正交优化设计[J]. *工程热物理学报*, 2019, 40(5): 1065–1071.
XUE Cheng, ZHU Baoshan, LIU Xiaobing, et al. Orthogonal optimization design of centrifugal pump on blade load distribution [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2019, 40(5): 1065–1071. (in Chinese)
- [20] WANG W, TANG T, ZHANG Q D, et al. Effect of water injection on the cavitation control: experiments on a NACA66 (MOD) hydrofoil[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2020, 36(5): 999–1017.
- [21] WANG W, LI Z, LIU M, et al. Influence of water injection on broadband noise and hydrodynamic performance for a NACA66 (MOD) hydrofoil under cloud cavitation condition[J]. *Applied Ocean Research*, 2021, 115: 102858.
- [22] CHEBLI R, AUDEBER B, ZHANG G, et al. Influence of the turbulence modeling on the simulation of unsteady cavitating flows[J]. *Computers & Fluids*, 2021, 221: 104898.
- [23] MENTER F R. Improved two-equation k- ω turbulence models for aerodynamic flows[R]. 1992.
- [24] Ansys Inc. Ansys CFX-solver theory guide[M]. Canonsburg: Ansys Inc., 2015.
- [25] COUTIER-DELGOSHA O, FORTES-PATELLA R, REBOUD J L. Evaluation of the turbulence model influence on the numerical simulations of unsteady cavitation[J]. *J. Fluids Eng.*, 2003, 125(1): 38–45.
- [26] ZAWART P J, GERBER A G, BELAMRI T. A two-phase flow model for predicting cavitation dynamics [C] // Fifth International Conference on Multiphase Flow. Yokohama, 2004: 152.
- [27] LU S P, WANG W, WANG X F. Experiment research on cavitation control by active injection[C] // The 10th International Symposium on Cavitation (CAV2018), 2018.
- [28] 羿琦. 水翼表面微结构设计及其对空化流场影响研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
YI Qi. Microstructure design of hydrofoil surface and its influence on cavitation flow field[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [29] 侯腾飞. 基于主动控制技术的空化抑制实验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
HOU Tengfei. Experimental research of cavitation suppression based on active control [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [30] 王巍, 安昭阳, 唐滔, 等. 射流控制水翼空化流动的多工况适应性研究[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(10): 186–194.
WANG Wei, AN Zhaoyang, TANG Tao, et al. Adaptability of cavitation flow controlled by active jet under multi-cavitation conditions[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(10): 186–194. (in Chinese)

(上接第 160 页)

- [18] 杨帆, 刘超, 汤方平, 等. S 形轴伸贯流泵装置时变湍流场的脉动特性分析[J]. *水力发电学报*, 2015, 34(2): 175–180.
YANG Fan, LIU Chao, TANG Fangping, et al. Analysis of the pulsation characteristics of the time-varying turbulent flow field of the S-shaped shaft-extension tubular pump device[J]. *Journal of Hydroelectric Power Generation*, 2015, 34(2): 175–180. (in Chinese)
- [19] 杨帆, 赵浩儒, 刘超, 等. 涡带工况下轴流泵装置内部脉动特性数值分析[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2017, 25(4): 670–678.
YANG Fan, ZHAO Haoru, LIU Chao, et al. Numerical analysis of internal pulsation characteristics of axial flow pump unit under vortex band condition[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2017, 25(4): 670–678. (in Chinese)
- [20] KABANOV V V, SHARAFUTDINOV V M. Variations in the power spectrum density of whistlers in the frequency band 8 ~ 40 kHz during earthquake preparation[J]. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2013, 53(4): 534–540.
- [21] CARBONE A, PALMA F. Considering noise orbital deviations on the evaluation of power density spectrum of oscillators[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems, II. Express Briefs*, 2006, 53(6): 438–442.
- [22] AUGER F, FLANDRIN P. Improving the readability of time-frequency and time-scale representations by the reassignment method[J]. *Signal Processing IEEE Transactions on*, 1995, 43(5): 1068–1089.
- [23] CUI Baoling, ZHANG Yingbin, HUANG Yakun. Analysis of the pressure pulsation and vibration in a low-specific-speed centrifugal pump[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2021, 143(2): 021201.