doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.021

射流控制水翼空化流动的多工况适应性研究

王　巍[1,2]　安昭阳[1,2]　唐　滔[1,2]　张庆典[1,2]　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:空化时常会使船舶推进器、泵、水轮机等水力机械部件产生噪声、振动和腐蚀,导致设备总体性能的大幅下降,甚至破坏,因此开展空化流动控制具有重要意义。借助高速全流场测试技术,获得 NACA66(MOD)原始水翼及射流水翼表面的空化形态,研究射流控制参数对空化抑制的影响规律,分析主动射流在变工况下对空化流动控制的适应性。研究发现:在不同工况下,主动射流均可以取得明显的空化抑制效果,当射流流量及射流位置不同时,空化流动控制效果不同。在云空化阶段,射流水孔与水翼前缘距离与弦长比值为 0.19(H1 模型)可以收到较好的空化抑制效果,且始终优于 H2 模型;而在片空化阶段,射流水孔与水翼前缘距离与弦长比值为 0.45(H2 模型)空化抑制效果更优。不同的射流流量系数可以实现对空化流场的主动控制,且存在最佳射流流量系数,使空化抑制效果最优。在给定射流位置(H1 模型)和射流流量(流量系数为 0.024 5)时,在空化不断发展过程中($0.83 \leqslant \sigma \leqslant 1.46$),空化抑制效果较为稳定,与实验获得最佳空化抑制有效性参数的偏差均在 0.06 以内,H1 模型表现出良好的工况适应性,可实现多工况下空化的流动控制。

关键词:射流;空化流动;空化主动控制;适应性;可视化实验

中图分类号:TV131.3^{+}2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2020)10-0186-09　　**OSID**:

Adaptability of Cavitation Flow Controlled by Active Jet under Multi-cavitation Conditions

WANG Wei[1,2]　AN Zhaoyang[1,2]　TANG Tao[1,2]　ZHANG Qingdian[1,2]　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: Cavitation often causes noise, vibration and corrosion of hydraulic mechanical components such as ship propellers, pumps, and turbines, and causes the overall performance of the equipment to be greatly reduced, or even destroyed. Therefore, it is of great significance to carry out cavitation flow control. The method of arranging injection water holes on the suction side of the hydrofoil can effectively block the re-entrant jet to suppress cavitation. Through the high-speed visual flow field test technology, the cavitation morphology of NACA66 (MOD) original hydrofoil and jet hydrofoil surfaces was obtained. The influence of jet control parameters on cavitation suppression was studied, and the adaptability of active jet to cavitation flow control under varying operating conditions was analyzed. It was found that under different cavitation conditions, the active jet significantly reduced the cavity length around the suction surface of the hydrofoil, and the cavitation suppression effect was significant. When the jet coefficient and jet position were different, the effect of cavitation flow control was also different. In the cloud cavitation stage, the jet of 0.19 chord-length position from the leading edge of the hydrofoil (H1 model) can achieve the best cavitation suppression effect, and it was always better than that of the H2 model in the range of cavitation number $\sigma \leqslant 1.28$. In the sheet cavitation stage, $\sigma > 1.44$, the jet of 0.45 chord-length position from the leading edge of the hydrofoil (H2 model) was more effective in suppressing cavitation. When the fixed jet position (H1 model) and jet flow rate (flow coefficient was 0.024 5), simplified flow control process, during the continuous development of cavitation (cavitation number was with $0.83 \leqslant \sigma \leqslant 1.46$), the cavitation suppression effect was relatively stable, the deviation

收稿日期:2019-12-27　修回日期:2020-02-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51876022)和国家重点基础研究发展计划项目(2015CB057301)

作者简介:王巍(1967—),女,副教授,博士,主要从事先进动力装置及流体机械设计和优化研究,E-mail:wangw@dlut.edu.cn

from the best suppression effect was within 0.06, which showed that the H1 model had good adaptability to working conditions. The research results provided a direction for exploring the active control technology of cavitation flow.

Key words: jet; cavitation flow; active cavitation control; adaptability; visualization experiment

0　引言

空化是液体内部局部压力低于该温度下水蒸气饱和压力时,发生在液体内部或固液交界面的一种相变过程,空化现象广泛存在于流体机械、水利机械、水中兵器和舰船上。空化流动中空泡的脱落和溃灭会产生机械振动、冲击噪声和空蚀,降低了机械性能和安全性[1]。

关于空泡脱落的机理,目前普遍认为,逆压梯度所产生的回射流导致了片空化脱落,形成云空化。文献[2]利用高速摄像技术观测到了回射流的存在。文献[3]通过模拟和实验揭示了近壁面回射流导致了空化的失稳。文献[4]通过实验方法也观测到回射流到达附着型空穴前缘,与主流相互作用导致了附着型空穴的脱落。文献[5]通过对三维扭曲水翼的研究发现,形成于附着型空穴凸出部分的回射流造成了空穴的脱落。由于回射流会造成附着型空穴的脱落,所以阻挡回射流向前运动是抑制空化的主要方法之一。

根据有无外界能量的输入,空化抑制方法分为被动和主动控制方法。被动控制主要是在叶片表面进行微结构设计,以达到抑制空化的目的,例如布置障碍物[6-8]、凹槽[9-10]和涡流发生器[11-12],进行叶片改型[13]等;而主动控制一般通过注入非凝结性气体、聚合物和水来实现。文献[14]研究发现,在叶片前缘布置空气射流孔,空气可以起到气垫的作用,改善了空化区域的压力脉动情况,达到降低空化危害的目的。文献[15]研究发现,在头部为锥状的柱体表面注入空气,以大流率注入时,柱体表面可以形成相对稳定的连续性空腔,避免了空穴的脱落。文献[16]研究发现,在螺旋桨叶尖注入减阻聚合物可以有效抑制叶尖涡空化的发生。文献[17]研究发现,在 NACA66 水翼表面注入聚合物,以小流率注入时,流场压力系数提高,空化得到了较好的抑制;但是以大流率注入时,空化抑制效果变差。文献[18]通过在 NACA66(MOD)水翼表面布置射流水孔,研究了不同射流比下空化的结构和流动特性,发现射流水孔可以有效阻止片空化向云空化的转变,提高了水翼的升阻比。文献[19]研究发现,从水翼翼展方向的缝隙通道进行射流,可以减小附着型空穴长度以及近壁面的湍流波动,对空化具有明显的抑制效果。数值模拟的结果表明,射流孔位置、流量等参数对空化抑制效果具有明显的影响[20-21]。

空化抑制适应性是指空化抑制方法在变工况条件下对空化抑制的有效性。本文借助实验方法研究两种射流水翼在不同空化数下空化抑制的适应性,通过分析射流孔位置和射流流量系数与空化抑制效果之间的变化规律,确定在不同空化数下的空化抑制方案,使之具有更好的普适性。

1　实验设备与数据后处理

1.1　实验装置和模型

本实验依托于北京理工大学流体机械研究所闭式空化水洞实验平台,空化水洞示意图如图 1 所示。空化水洞实验设备主要包括贮水池、轴流泵、电机、真空泵、压力控制器、实验测试段、压力罐,实验测试段由收缩段、实验段、扩散段组成,水洞实验段空间尺寸为长 700 mm、宽 70 mm、高 190 mm,水翼在实验段的安放位置如图 2(图中 C 为水翼弦长)所示。

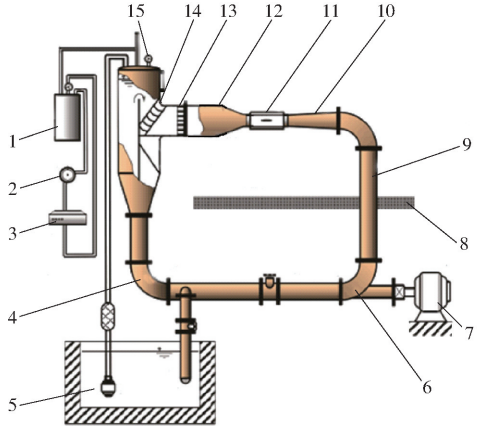


图 1　空化水洞示意图

Fig. 1　Schematic of cavitation tunnel

1. 压力罐　2. 真空泵　3. 压力控制器　4. 进水管　5. 贮水池　6. 轴流泵　7. 电机　8. 地板　9. 回水管　10. 扩散段　11. 实验段　12. 收缩段　13. 蜂窝器　14. 导流片　15. 真空计

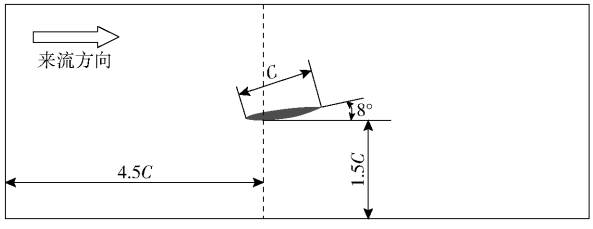


图 2　水翼安放位置示意图

Fig. 2　Schematic of hydrofoil placement

实验的动力由电机和轴流泵联合提供,电机额定转速为 1 480 r/s,额定功率为 55 kW,电机通过一台交流变频器调节空化水洞中水流速,精度可达 0.01 Hz。水洞实验段最大水流流速可达到 20 m/s。水洞的稳定流速为 4.68 ~ 12.78 m/s,稳定性系数为 0.71% ~ 12.83%。轴流泵布置于实验段下方 5 m 处,以提高轴流泵的抗空蚀性能。测试段上游布置有稳流除气罐,可以有效降低水中的游离型空泡,实验段下游安装有直角导流片和蜂窝器来减小水流的湍流度。真空泵通过导管与除气罐上方的密闭空腔连接来控制空化水洞系统中的真空度,控制范围是 0 ~ 0.095 MPa,控制精度等级为 5%。

本实验采用的原始实验水翼模型为 NACA66(MOD)水翼,水翼弦长 $C=70$ mm,展长 $L=67$ mm,材质为不锈钢,表面粗糙度为 3.2,厚度比为 12%。在此水翼的基础上对结构进行改型,在水翼吸力面布置射流水孔,如图 3 所示。两种不同改型水翼的射流水孔与水翼前缘距离分别为 $X_1=0.19C$,$X_2=0.45C$,射流孔数目为 25,射流孔直径为 1.4 mm,相邻射流孔圆心之间距离为 2.35 mm。

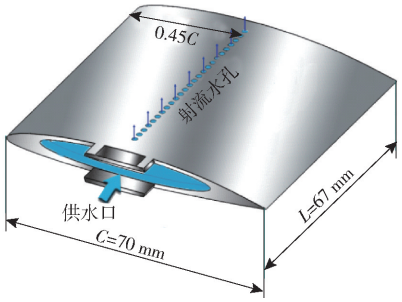


图 3 带射流孔水翼模型图

Fig. 3 Hydrofoil model with jet holes

1.2 数据采集和高速全流场系统

非定常空化发生在较短的时间内,同时存在气液相的相互传递过程,空泡的形态随时间在不断的发生变化。高速全流场摄像技术可以捕捉到空化流场的瞬态变化,实现对非定常空化形态在时间和空间上的定性及定量研究。

本实验所采用的高速全流场系统如图 4 所示,主要由 1 台用于存储实时图像的计算机、2 台功率为 1 kW 提供光源的镝灯以及记录空化形态变化的高速摄像机组成。流场形态记录采用的高速摄像机由美国柯达公司生产,型号为 HG - LE。该摄像机采用 CMOS 传感器,具有灵敏度高、曝光时间短、能耗较低和高分辨率等优点,实验拍摄频率为 5 000 帧/s。

在实验测量和实验结果讨论中,采用空化数 σ、斯特劳哈尔数 St、雷诺数 Re 来进行相关的定量描述,具体定义为

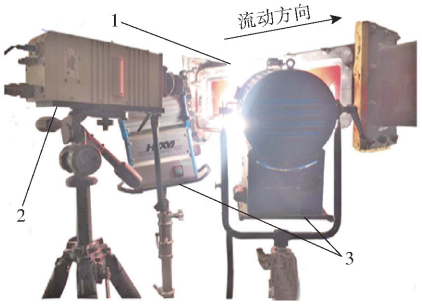


图 4 高速全流场系统

Fig. 4 High-speed flow field display system

1. 空化水洞 2. 高速摄像机 3. 光源

$$\sigma=\frac{p_0-p_v}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} \tag{1}$$

$$Re=\frac{U_\infty C}{v} \tag{2}$$

$$St=\frac{fC}{U_\infty} \tag{3}$$

式中 p_0——距水翼安装位置 0.21 m 处参考截面的静压力

p_v——距水翼安装位置 0.21 m 处参考截面的饱和蒸汽压力

ρ——空化流场中的液相密度

U_∞——实验水洞测试段的主流流速

v——液相的运动粘度系数

f——空穴脱落频率

为了研究主动射流对空化流动特性的影响规律,定义射流流量系数 C_Q 来定量评价主动射流流量的大小,用 η 表示空化抑制有效性参数,其数值越大,说明空化抑制效果越好。

$$C_Q=\frac{Q_{inj}}{Q_\infty}=\frac{Q_{inj}}{U_\infty S_0}=\frac{Q_{inj}}{U_\infty ha}\approx 0.000\,48\frac{Q_{inj}}{U_\infty} \tag{4}$$

$$\eta=1-\frac{L_c^{max}}{L_{co}^{max}} \tag{5}$$

式中 Q_{inj}——通过射流孔的液体流量

Q_∞——通过实验段的主流流量

h——NACA66(MOD)水翼中截面的厚度,即当水翼以一定的攻角安置时,翼型投影到 y 轴上的最大厚度

S_0——实验段进口截面面积

a——水翼中截面展长

L_c^{max}——射流水翼表面最大空穴长度

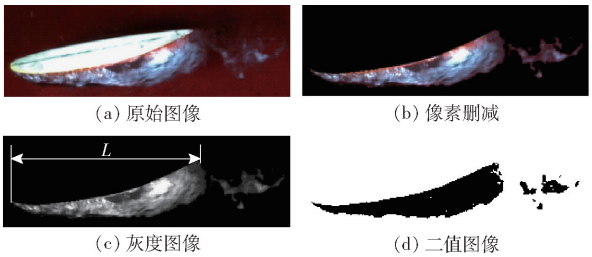
L_{co}^{max}——原始水翼表面最大空穴长度

水翼吸力面空化形态的演变会受到水翼表面粗糙度、水翼安装攻角、实验段静压、主流体流速、空化数、水体温度等多个因素的影响[22]。本次实验水翼攻角为 8°,流速 U_∞ 设定为 7.832 m/s,对应的雷诺

数为 5.1 ×10^5,通过调节水洞的真空度来调节空化数。实验过程中,调节空化水洞中轴流水泵转速的变频器的仪表精度为 0.1 Hz,空化水洞中来流压力测量精度为 0.1 kPa。具体参数的测量误差分别为:来流压力 Δp_0控制在 ±0.7 kPa 之间;饱和蒸汽压力 Δp_v控制在 ±0.192 kPa 之间;来流速度 ΔU_0控制在 ±0.104 m/s 之间。最终,实验条件下空化数的误差约为 6% 。

1.3　图像后处理

为了能准确描述空化形态随时间的变化,需要对空化流场的图像进行后处理。如图 5 所示,全流场图像中空化区域含气量不同会使图像亮度有所差异,通过删减像素点的方法可以去除图像中水翼和背景的干扰,只保留空化的瞬时形态,最后将彩色图像转换为灰度图像,能够更加清晰地得到附着型空化的空间特征。以一个周期内无量纲附着型空穴最大长度 L_{max}/C 作为空化的评价指标,其中 L_{max} 为空泡前缘距空泡尾缘的长度。空化是一种典型的非定常现象,不同工况下空化的时空变化不同,对一段时间内瞬时空化图像进行二值化处理后统计像素点,可以得到空化面积随时间的变化规律。



(a) 原始图像　(b) 像素删减　(c) 灰度图像　(d) 二值图像

图 5　图像处理方法

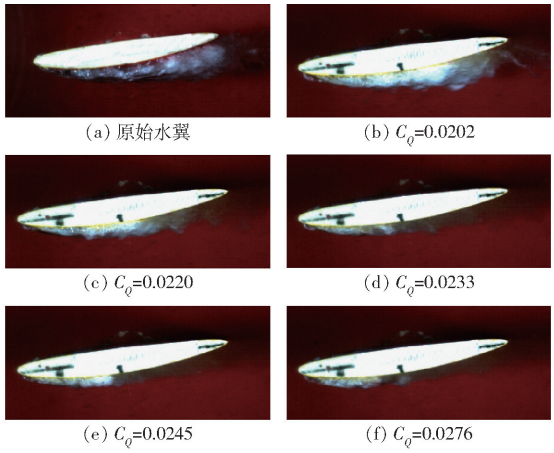
Fig. 5　Image processing method

2　射流抑制空化的适应性

基于高速全流场可视化测试技术,针对不同实验模型水翼、不同空化数、不同射流流量以及不同射流位置,开展了水翼表面空化形态实验观测,获得了水翼表面无量纲附着型空穴最大长度随射流流量系数变化规律,定量分析了射流对空化抑制效果的影响。

2.1　射流流量对空化抑制效果的影响

以空化数 σ = 0.99 为例,说明射流流量系数对绕流水翼空化流动控制的影响。在主流绕原始水翼的空化流动中,在水翼吸力面呈现云状空化,空穴尾部最大延伸到了水翼的尾缘,如图 6a 所示。而对于射流水翼,当射流距水翼前缘 0.19C 位置(简称为 H1 模型水翼)时,水翼表面附着型空穴最大长度相比于原始水翼明显减短,并随着射流流量系数的增加而有不同程度的降低,如图 6b ~6f 显示的空化抑制过程。



(a) 原始水翼　(b) C_Q=0.0202　(c) C_Q=0.0220　(d) C_Q=0.0233　(e) C_Q=0.0245　(f) C_Q=0.0276

图 6　绕原始水翼和不同射流流量下射流水翼空化流动的空穴长度对比

Fig. 6　Cavity length comparison of jet hydrofoil under different jet flows and original hydrofoil

表 1 给出了空化数 σ = 0.99 时具体的量化分析结果:当射流流量系数 C_Q = 0.027 6 时,空化的抑制效果最佳,空穴最大长度只有原始水翼的 46% ,此时的空化抑制有效性参数 η 最大,空化抑制效果为 0.540 5;实验获得的斯特劳哈尔数相比原始水翼减小了 15.4% ,空穴脱落频率明显降低。此时的射流流量系数为实验所研究的 5 个射流流量系数中的最佳值,用最佳射流流量系数 C_Q^{opt} 表示。此外,当射流流量系数 C_Q = 0.023 3 时,空化抑制效果和空穴脱落频率仅次于最佳射流流量系数对应的实验结果,说明射流对于空化流动控制存在最佳控制参数值。

表 1　H1 水翼射流对空化流动控制的实验分析结果

Tab. 1　Analysis of experimental results of cavitation flow control of H1 hydrofoil by jet

参数	原始水翼	C_Q				
		0.020 2	0.022 0	0.023 3	0.024 5	0.027 6
L_{max}/C	1	0.92	0.69	0.50	0.52	0.46
空化抑制有效性参数 η	0	0.080 9	0.310 7	0.500 5	0.480 3	0.540 5
斯特劳哈尔数 St	0.137 3	0.144 5	0.122 5	0.116 4	0.143 7	0.116 2

当射流距水翼前缘 0.45C 位置(简称 H2 模型水翼)时,在实验条件下,随着射流流量系数的增加,绕水翼流动的附着型空穴最大长度和斯特劳哈尔数变化如表 2 所示。当射流流量系数 C_Q = 0.022 0

时,尽管实验测得的斯特劳哈尔数最低,St =0.109 5,相应地,空穴脱落频率最低,但其空化抑制效果 η = 0.242 0,相对较低。而当射流流量系数 C_Q =0.023 3 时,虽然实验测得的斯特劳哈尔数相比于原始水翼增加了 6.2%,意味着空穴脱落频率有所增加,但其空化抑制效果是最好的,η 达到 0.406 0。因此,虽然射流可以抑制空化的发展,但射流也增加了绕流水翼的流场扰动。因此,要综合评价射流对于空化流动的控制效果,也要设计合适的射流控制参数。

表 2 H2 水翼射流对空化流动控制的实验分析结果

Tab. 2 Analysis of experimental results of cavitation flow control of H2 hydrofoil by jet

参数	原始水翼	C_Q				
		0.020 2	0.022 0	0.023 3	0.024 5	0.027 6
L_{max}/C	1	0.68	0.758	0.594	0.698	0.626
空化抑制有效性参数 η	0	0.320 5	0.242 0	0.406 0	0.302 3	0.374 0
斯特劳哈尔数 St	0.137 3	0.174 3	0.109 5	0.145 8	0.155 9	0.142 0

在相同工况下,对比分析表 1 和表 2 的实验结果发现,即使在射流流量系数相同的时候,不同的射流位置也将带来不同的空化流动控制效果和脱落频率。

图 7 为针对不同水翼模型,即不同的射流位置,针对不同空化条件下,水翼表面附着型空穴最大长度随射流流量系数的变化规律,其中“√”标记了对应工况下的最佳射流流量系数,虚线为相对应的 4 个空化数下原始水翼的空穴最大长度。可以看出,无论是片状空化状态(σ =1.44)、云状空化状态(σ =0.99 和 σ =0.83),还是片空化向云空化的过渡状态(σ =1.28),主动射流都能够有效缩短空穴长度;且在实验测试的所有工况范围内,空穴最大长度随射流流量系数的变化而变化,总是存在一个最佳的射流流量系数,使得空穴长度最短,空化抑制效果最优。此外,在相同的空化数下,不同模型的最佳射流流量系数近似相同,但空化抑制效果并不相同,这主要与射流位置密切相关。

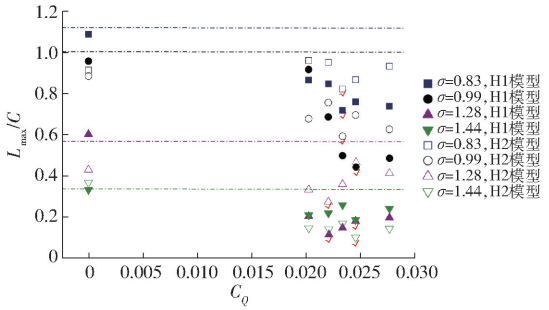


图 7 附着型空穴最大长度随射流流量系数的变化

Fig. 7 Variation of maximum cavity length with jet flow coefficient

表 3 为不同空化数下 5 个射流流量中的最佳射流流量系数 C_Q^{opt} 所对应的实验结果,在空化数 σ 在 1.28 ~ 1.44 之间时,射流水翼的空穴脱落没有明显的周期性,但空化得到了很好的抑制。随着空化数的降低,空化现象更加剧烈,通过射流所带来的抑制效果明显减弱,在 σ =0.83 的严重空化阶段,射流的抑制效果均在 0.36 以下,空穴脱落频率增加。

表 3 水翼在不同空化数下最佳射流流量系数的实验结果

Tab. 3 Experimental results of optimal jet flow coefficient of hydrofoil under different cavitation numbers

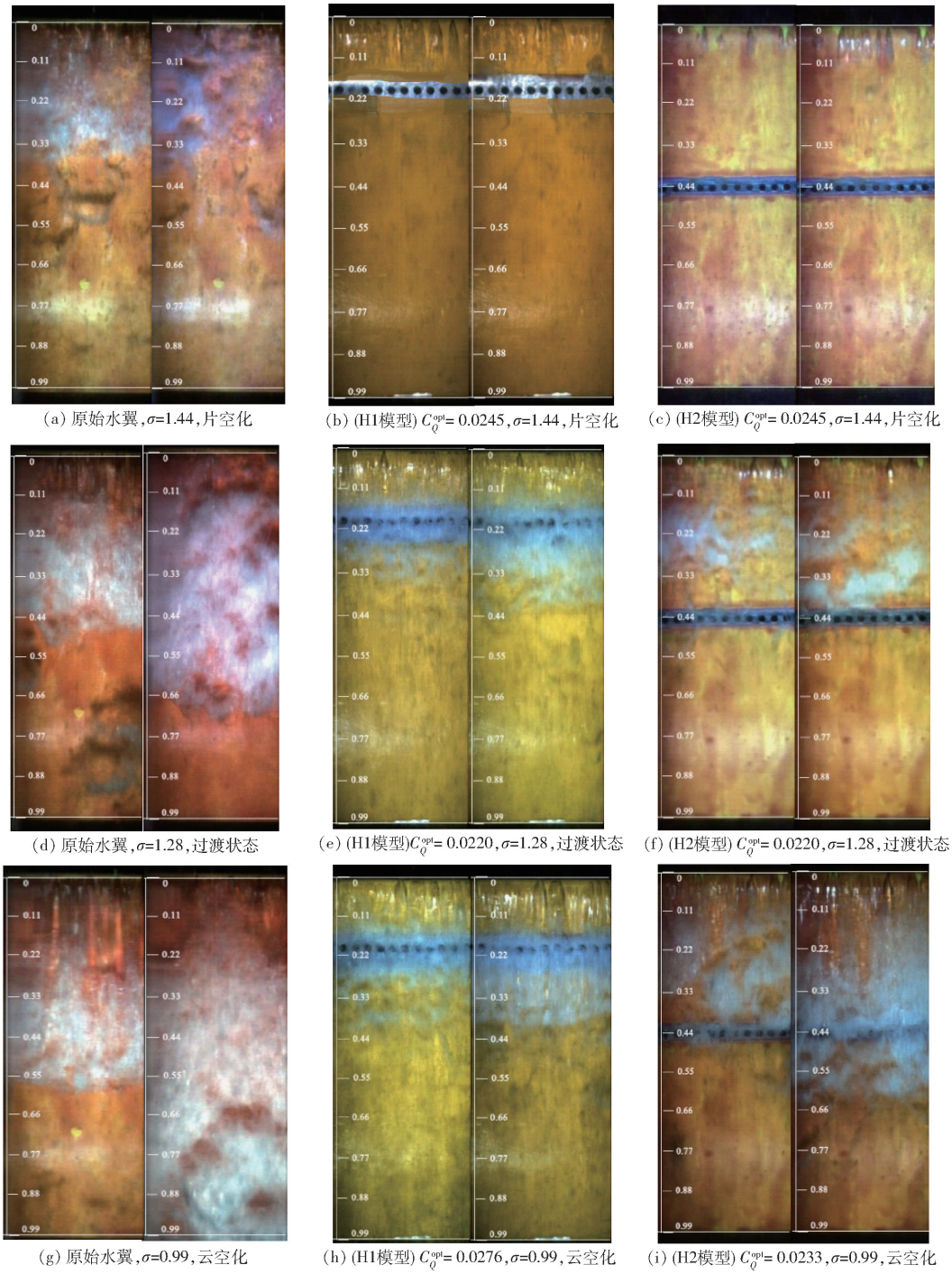
模型	σ	C_Q^{opt}	L_{max}/C	η^{opt}	St
H1	1.44	0.024 5	0.187	0.461	
	1.28	0.022 0	0.149	0.740	
	0.99	0.027 6	0.460	0.541	0.116 2
	0.83	0.023 3	0.720	0.356	0.169 3
H2	1.44	0.024 5	0.102	0.648	
	1.28	0.022 0	0.275	0.519	
	0.99	0.023 3	0.594	0.407	0.145 8
	0.83	0.023 3	0.825	0.263	0.156 8

2.2 射流位置对空化抑制效果的影响

水翼吸力面射流位置是主动射流抑制空化的另一个重要控制参数。在水翼表面距水翼前缘不同位置注入射流,不仅会影响空化流场的流态和压力分布,还会引起空穴振荡和脱落频率的变化,此外水翼的升力和阻力也会有所下降。研究表明,在云空化条件下,在水翼吸力面山顶位置(对应水翼安装攻角的吸力面最高点)布置射流水孔,抑制空化的同时还能较好地保持水动力性能[23]。

图 8 给出了当射流流量系数均为 5 个流量系数下的最佳值时,实验水翼模型 H1 和 H2 表面射流控制空化流场的实验分析结果。无论射流位置在 X_1 =0.19C 还是在 X_2 =0.45C,与原始水翼相比,空化发展明显改善。结合空穴形态和空穴长度,可以进一步得出关键结论。对于片空化阶段($\sigma \geqslant$ 1.41),H2 模型表面射流空化抑制效果优于 H1 模型;而对于过渡工况(1.28 $\leqslant \sigma <$ 1.41)和云空化阶段($\sigma <$ 1.28),H1 模型表面射流空化抑制效果优于 H2 模型。这一结论也可以从表 3 中看出。

基于图像二值法,通过对 1 800 帧图像的处理,获得了绕水翼无量纲空穴面积 S/S_C 随时间的变化规律,其中 S 为附着型空穴面积,S_C 为水翼的截面面



(a) 原始水翼，σ=1.44，片空化　(b) (H1模型) C_Q^{opt}= 0.0245，σ=1.44，片空化　(c) (H2模型) C_Q^{opt}= 0.0245，σ=1.44，片空化

(d) 原始水翼，σ=1.28，过渡状态　(e) (H1模型)C_Q^{opt}= 0.0220，σ=1.28，过渡状态　(f) (H2模型) C_Q^{opt}= 0.0220，σ=1.28，过渡状态

(g) 原始水翼，σ=0.99，云空化　(h) (H1模型) C_Q^{opt}= 0.0276，σ=0.99，云空化　(i) (H2模型) C_Q^{opt}= 0.0233，σ=0.99，云空化

图 8　射流孔位置对空化抑制效果的对比分析

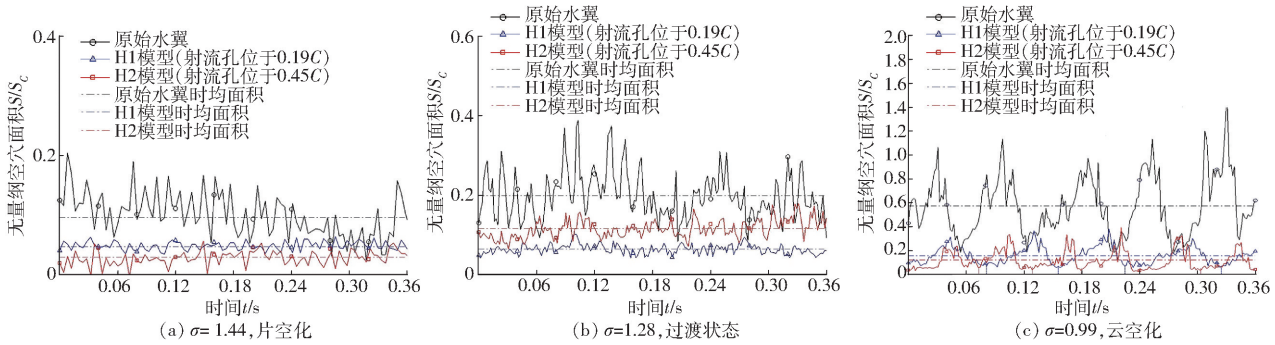
Fig. 8　Comparative analysis of the effect of jet hole position on cavitation suppression

积。图 9 显示了空化数分别为 1.44、1.28、0.99 时，原始水翼和射流水翼无量纲空穴面积随时间的变化，其中射流流量系数对应着最佳射流流量系数 C_Q^{opt}。

3　不同空化数下空化流动控制的适应性分析

空化的抑制效果会受到射流控制参数的影响，所以需要找到在变工况下主动射流抑制空化的最佳方案，增加抑制手段的普适性。图 10 为最佳射流流量系数 C_Q^{opt} 随空化数 σ 的变化。将原始水翼在 0.83 到 1.46 之间的 10 个不同空化数分为 4 个区域：片空化区 Ⅰ（$\sigma \geqslant 1.41$），片空化向云空化过渡区 Ⅱ（$1.28 \leqslant \sigma < 1.41$），云空化区 Ⅲ（$0.95 < \sigma < 1.28$），剧烈云空化区Ⅳ（$0.83 \leqslant \sigma \leqslant 0.95$）。

由图 10 可以看出，C_Q^{opt} 随着空化数变化并非单调递增。在稳定的片空化阶段（$\sigma \geqslant 1.41$），不论采用 H1 模型或 H2 模型，最佳空化抑制效果都对应着相同的最佳射流流量；在云空化阶段，针对 H1 和 H2 模型，C_Q^{opt} 变化趋势相近，达到最佳空化抑制效果时，H1 模型的射流流量系数始终大于 H2 模型。因此，随着空化数的变化，通过调节主动射流流量的



(a) σ= 1.44,片空化 (b) σ=1.28,过渡状态 (c) σ=0.99,云空化

图 9 最佳射流流量对应的空穴面积随时间的变化

Fig. 9 Schematic of cavity area corresponding to optimal jet flow over time

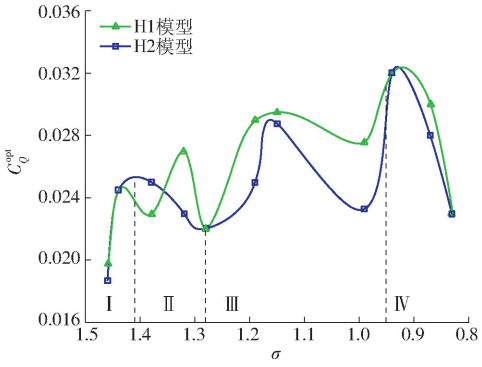


图 10 最佳射流流量系数 C_Q^{opt} 随空化数 σ 的变化

Fig. 10 Change of optimal jet flow coefficient C_Q^{opt} with cavitation number σ

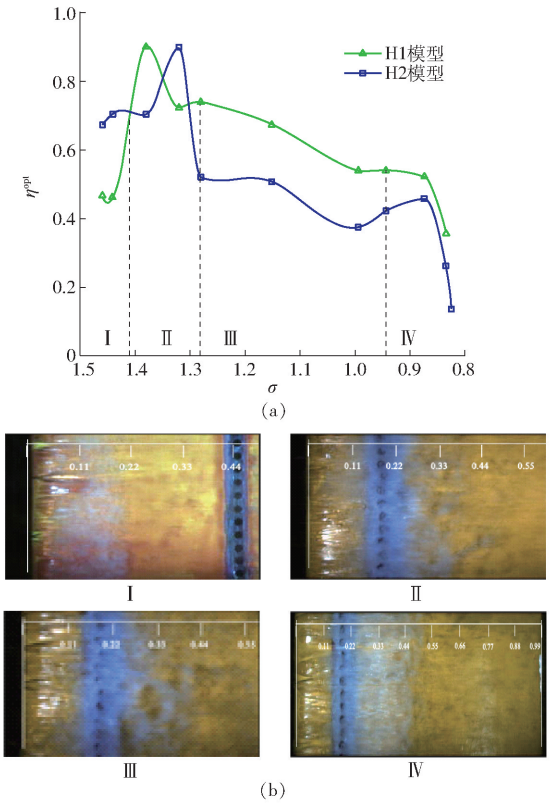


图 11 最佳射流流量系数下空化抑制效果 η^{opt} 的变化

Fig. 11 Changes of cavitation suppression effect η^{opt} with optimal jet flow coefficient

大小,可以实现对空化流场的主动控制。而在强烈的云空化区域(Ⅳ),抑制云空化的最佳射流流量不但不增加,反而减小,分析原因认为:由于伴随着剧烈的非定常云空化的发生,流场内流动状态更加复杂,而过大的射流流量会造成射流孔内出现空化,进而引起水翼表面空化区范围的进一步扩大,使流场变得更加不稳定。

图 11a 给出在最佳射流流量 C_Q^{opt} 下,空化抑制有效性参数 η^{opt} 随空化数 σ 的变化规律。图 11b 展示了实验得到的与这 4 个区域分别对应的 4 种典型的空穴形态,对应的空化数分别为 1.44、1.28、0.99、0.83。在片空化发展的Ⅰ区,采用 H2 模型,空化抑制效果好,且空化流动控制较为稳定。然而,随着空化的进一步发展,H1 模型空化抑制效果迅速提高,在 σ = 1.41 时,2 种模型抑制空化的效果相当。在云空化发展的Ⅲ区,采用 H1 模型,空化抑制效果始终优于 H2 模型,且提高的幅度在 11.8% ~ 22.1%之间。尽管随着空化发展加剧,2 种模型主动射流抑制空化的效果都在削弱,H1 模型空化抑制效果减小了 20.2%,但 η^{opt} 仍然维持在 0.53 以上,表现出射流抑制空化的有效性和对于不同工况的适应性。在云空化严重发展的Ⅳ区,当空化数 σ < 0.83 时,无论何种水翼模型,空化抑制效果急剧下降。在 σ = 0.83 时,H2 模型所获得的 η^{opt} 只有 0.263,射流所带来的空化抑制效果减弱,这与图 10 显示的趋势分析结果相似。随着空化数降低,空化逐渐变得更剧烈,回射流的强度也增加,因此,阻挡回射流所需的射流流量增加。然而,射流流量的增加易造成射流流道内出现空化,又会加速水翼表面空化区的扩张,造成空化更加严重。受射流孔结构限制,以及对水翼强度要求及对水动力性能的影响,不可能无限增加射流流量,因此,导致云空化的抑制效果随空化数降低而降低。

表 4 给出了 H1 模型在给定射流流量系数下空化抑制的量化分析结果,括号内数值是不同射流流

量下空化抑制效果与相同空化条件所对应的最佳抑制效果的偏差。在 $\sigma=0.99$ 时，尽管 H1 模型最佳射流流量系数为 0.027 6，但与 0.023 3 流量系数下结果对比，空化抑制有效性参数仅提高 0.041，而空穴脱落频率几乎相同，可以认为两者在实现空化流动控制的效果上近似相同，因此，提出给定射流流量系数来研究在不同空化状态下，射流抑制空化的普适规律。当给定射流流量系数为 0.024 5 时，不同空化数对应的空化抑制效果较为稳定，且相比于最佳抑制效果，偏差较小，均在 0.06 以内。而采用其他射流流量时，空化抑制稳定性较差，与最佳空化抑制有效性参数的最大偏差均超过 0.16。

表 4　H1 模型给定射流流量系数下空化抑制效果 η^{opt}

Tab. 4　Cavitation suppression effect η^{opt} with given jet flow coefficient in H1 model

σ	C_Q			
	0.022 0	0.023 3	0.024 5	0.027 6
0.83	0.241(−0.115)	0.356(0)	0.319(−0.037)	0.339(−0.017)
0.99	0.311(−0.23)	0.500(−0.041)	0.481(−0.06)	0.541(0)
1.28	0.740(0)	0.735(−0.005)	0.682(−0.053)	0.653(−0.082)
1.44	0.366(−0.095)	0.250(−0.211)	0.461(0)	0.297(−0.164)

因此，与频繁地改变射流流量进行调节相比，给定射流流量，可以简化射流复杂的控制调节过程，同样能够减弱空化流动的发展，实现多工况下对于空化流动的控制。

4　结论

(1)主动射流对片空化和云空化均有明显抑制效果，射流流量不同，空化抑制效果不同，存在最佳射流流量。因此，可以通过射流流量的调节实现对空化流场的主动控制。

(2)射流位置不同，对云空化和片空化的流动控制效果不同。在云空化阶段，在距水翼前缘 0.19C 位置布置射流的 H1 模型可以收到较优的空化抑制效果。而在片空化阶段，H2 模型水翼空化抑制效果更优。

(3)在所研究的空化数范围内($0.83\leqslant\sigma\leqslant1.46$)，H1 模型具有良好的工况适应性，且当保持射流流量系数为 0.024 5 时，在简化流动控制过程的情况下，均可实现对空化流动的主动控制，取得良好的空化抑制效果。

参　考　文　献

[1] 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. (in Chinese)

[2] KANPP R T. Recent investigations of the mechanics of cavitation and cavitation damage [J]. Transactions of the ASME, 1955, 77(8): 1045－1054.

[3] FURNESS R A, HUTTON S P. Experimental and theoretical studies of two-dimensional fixed-type cavities [J]. Journal of Fluids Engineering, 1975, 97(4): 515－521.

[4] 王畅畅，黄彪，王国玉，等. 附着型空穴断裂及脱落机制的实验研究[J]. 工程力学，2017，34(10)：256－263.
WANG Changchang, HUANG Biao, WANG Guoyu, et al. Experimental investigation on the breakdown and shedding mechanisms of unsteady attached cavitating flows[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(10): 249－256. (in Chinese)

[5] PENG X X, JI B, CAO Y, et al. Combined experimental observation and numerical simulation of the cloud cavitation with U-type flow structures on hydrofoils[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2016, 79: 10－22.

[6] 邬伟，熊鹰，齐万江. 基于翼剖面改型的空化抑制[J]. 中国舰船研究，2012，7(3)：36－40，45.
WU Wei, XIONG Ying, QI Wanjiang. Cavitation control of a 2-D hydrofoil under section reshaping[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2012, 7(3): 36－40, 45. (in Chinese)

[7] ZHANG L, CHEN M, DENG J, et al. Experimental and numerical studies on the cavitation over flat hydrofoils with and without obstacle[J]. Journal of Hydrodynamics, 2019, 31(4): 708－716.

[8] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 111－120. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20170914&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.014. (in Chinese)

[9] 赵伟国，翟利静，夏添，等. 离心泵叶片开槽抑制空化数值模拟[J/OL]. 农业机械学报，2018，49(12)：150－157.
ZHAO Weiguo, ZHAI Lijing, XIA Tian, et al. Numerical simulation of slotted blade in centrifugal pump on cavitation

suppression[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 150 - 157. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20181219&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.019. (in Chinese)

[10] 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 CASE, 2019, 35(2): 40 - 47. (in Chinese)

[11] CHE B, CHU N, CAO L, et al. Control effect of micro vortex generators on attached cavitation instability[J]. Physics of Fluids, 2019, 31(6): 064102.

[12] KADIVAR E, TIMOSHEVSKIY M V, PERVUNIN K S, et al. Experimental and numerical study of the cavitation surge passive control around a semi-circular leading-edge flat plate[J/OL]. Journal of Marine Science and Technology, 2019. DOI: 10.1007/S00773-019-00697-2.

[13] AMINI A, RECLARI M, SANO T, et al. Suppressing tip vortex cavitation by winglets[J]. Experiments in Fluids, 2019, 60(11): 159.

[14] ARNDT R E A, ELLIS C R, PAUL S, Preliminary investigation of the use of air injection to mitigate cavitation erosion[J]. Journal of Fluids Engineering, 1995, 117(3): 498 - 504.

[15] LIU T, HUANG B, WANG G, et al. Experimental investigation of ventilated partial cavitating flows with special emphasis on flow pattern regime and unsteady shedding behavior around an axisymmetric body at different angles of attack[J]. Ocean Engineering, 2018, 147: 289 - 303.

[16] CHAHINE G L, FREDERICK G F, BATEMAN R D. Propeller tip vortex cavitation suppression using selective polymer injection[J]. Journal of Fluids Engineering, 1993, 115(3): 497 - 503.

[17] CHANG N A, YAKUSHIJI R, GANESH H, et al. Mechanism and scalability of tip vortex cavitation suppression by water and polymer injection[C]// Proceedings of the 7th International Symposium on Cavitation, 2009.

[18] 王巍,羿琦,林茵,等. 水翼表面布置射流水孔抑制空化[J]. 排灌机械工程学报,2016,34(10):872 - 877.
WANG Wei, YI Qi, LIN Yin, et al. Impact of hydrofoil surface water injection on cavitation suppression[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(10): 865 - 870. (in Chinese)

[19] TIMOSHEVSKIY M V, ZAPRYAGAEV 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.

[20] WANG W, ZHANG Q D, TANG T, et al. Numerical study of the impact of water injection holes arrangement on cavitation flow control[J/OL]. Science Progress, 2019. DOI: 10.1177/0036850419877742.

[21] WANG W, LU S P, XU R D, et al. Numerical study of hydrofoil surface jet flow on cavitation suppression[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(10): 829 - 834.

[22] COUTIER-DELGOSHA O, DEVILLERS J F, LERICHE M, et al. Effect of wall roughness on the dynamics of unsteady cavitation[J]. Journal of fluids Engineering, 2005, 127(4): 726 - 733.

[23] 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.