

螺旋桨空化流场调控研究

赵伟, 丁耀东, 谭有为, 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: 为改善水力机械的空化现象, 基于流动控制结构布置原则和波茨坦水池测试(PPTC)螺旋桨空化流场特性, 在保障整体性能的前提下, 分别在叶尖与叶根位置设计控制结构进行局部调控。对比分析 4 种改进螺旋桨与原始螺旋桨的空化流场特性, 研究控制结构对螺旋桨空化流场调控的作用机理。结果表明: 添加控制结构牺牲了较小的效率, 显著减小了空泡区域体积, 改善了螺旋桨综合性能; 重载工况下, PPTC-t2 螺旋桨的综合性能最好, 效率损失了 0.134%, 空泡区域体积减小了 24.6%; 设计工况下, PPTC-t1 螺旋桨的综合性能最好, 效率损失了 0.284%, 空泡区域体积减小了 19.5%; 控制结构附近流速降低, 诱发了局部高压, 延缓了空化发生, 实现了空化流场的局部调控。研究为改善水力机械的空化问题提供了有效途径。

关键词: 空化; 波茨坦水池测试螺旋桨; 流动控制结构; 局部调控

中图分类号: U664.33 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202302015 **文章编号:** 0253-987X(2023)02-0141-10

Local Regulation of Cavitation Flow Field of Propeller

ZHAO Wei, DING Yaodong, TAN Youwei, LI Ping

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

Abstract: In order to ameliorate the cavitation of hydraulic machinery, based on the principle of control structure arrangement and the cavitation flow field of the PPTC propeller, under the premise of ensuring the overall performance, control structures are designed at the blade tip and the blade root for local regulation. The cavitation flow field characteristics of four modified propellers and the original propeller are compared and analyzed to study the mechanism of control structures effecting on the regulation of propeller cavitation flow field. The results show that additional control structures significantly reduce the volume of cavitation area with a little sacrifice on efficiency and improve the overall performance of propeller. PPTC-t2 propeller shows the best performance under heavy working condition, with an efficiency loss of 0.134% and a 24.6% volume reduction in cavitation area. Under the design condition, PPTC-t1 propeller delivers the best performance, with an efficiency loss of 0.284% and a 19.5% volume reduction in cavitation area. The reduced velocity around the control structures leads to localized high pressure and delays the occurrence of cavitation, thus realizing local regulation of cavitation flow field. This study proposes an effective way to ameliorate the cavitation of hydraulic machinery.

Keywords: cavitation; PPTC propeller; flow control structure; local regulation

收稿日期: 2022-07-11。 作者简介: 赵伟(1997—), 男, 硕士生; 李平(通信作者), 男, 副教授, 博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51976152)。

网络出版时间: 2022-08-19

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220819.1125.004.html>

水力机械叶片在旋转切割流体的过程中,表面产生的局部低压会导致空化的发生。叶片的重复旋转诱发周围的空泡周期性破灭,产生的能量对叶片表面产生冲击,剥蚀叶片表面,最终导致叶片被破坏,安全运行寿命减少^[1-2]。因此,调控水力机械的空化流场具有重要的意义。

为了对水力机械的空化流场进行控制,国内外学者进行了相应的研究。在保障水力机械整体性能的基础上,采用主动控制和被动控制方法对空化进行调控。Chahine等^[3]研究了螺旋桨梢涡空化,通过在螺旋桨叶片的尖端涡区域注入水或聚合物,减小了涡流中心压力降低的幅度,有效延缓了桨叶尖端涡空化,使螺旋桨空化次数减小了35%。Zhang等^[4]通过在螺旋桨叶尖涡空化区域注入聚合物溶液,结果表明聚合物抑制了球形空泡的变形和溃灭,使漩涡中心处的压力升高,有效抑制了涡空化的发生。Lee等^[5]在桨叶尖端空化区域注射液态水,通过测试发现了最佳的注射位置和方向。液态水的注入降低了叶尖区域流体的速度,抑制了尖端空化的产生。唐滔^[6]在轴流泵叶片表面引入射流,结果表明在空化区域内布置射流孔使空泡体积减小了59.6%,泵效率增加了0.6%。Mäkiharju等^[7]在空腔楔形区域的顶端或回流区域分别注入不凝结气体,结果表明在剪切层中注入的少量气体可以减少空泡的产生并抑制空腔振荡。Chang等^[8]通过向NACA66水翼表面流场注入聚合物以抑制空化,结果表明小流率注入时,流场内的压力系数提高,空化可以得到有效抑制。主动控制方法有效抑制了空化的产生和发展,但同时也增加了额外的能量消耗,提高了系统的复杂性和成本。

被动控制方式一般通过几何结构或形状的改变实现对空化流场的控制。Park等^[9]通过在螺旋桨顶端附加螺纹,抑制了螺旋桨叶片的空化发展。张睿^[10]通过在轴流泵叶片设置挡流条实现了空化的局部调控,结果表明挡流条宽度对空化现象的影响小于挡流条高度,而挡流条高度过高会造成空化恶化、泵性能下降。赵伟国等^[11]通过在离心泵叶片吸力面布置流动控制结构,发现流动控制结构附近湍动能增大,空泡体积衰减。牟介刚等^[12]研究了在离心泵叶片表面添加圆形控制结构对空化的影响,结果表明圆形控制结构附近湍动能增加,层流向湍流的转变加快,分离引起的压差阻力减小,空化得到抑制。郁金红^[13]提出在叶轮后盖板添加小叶片结构,结果发现叶片表面的流动分离和漩涡强度被抑制,

减小了流动损失,实现了对空化的抑制。赵伟国等^[14]在轴流泵叶片背面布置不连续的弧形凸起,结果表明叶轮背面的平均压力升高,云空化和梢涡空化被抑制。Zhao等^[15]在轴流泵吸力面添加两个与前缘线平行的三角形凸起结构,凸起结构诱发了前缘高压,抑制了前缘空泡的发展。流动控制结构可以对空化流场进行局部精确调控,控制结构的造型、大小以及布置位置对空化抑制效果具有决定性的影响。

综上所述,目前对螺旋桨空化流场的调控普遍采用主动控制方法,而被动控制方法由于其添加灵活、方便且不增加系统复杂的优势,在近些年的研究中逐渐得到关注。同时,当空化范围较大时,单个控制结构起到的作用往往有限。因此,本研究针对空化范围较大的波茨坦水池测试(Potsdam propeller test case, PPTC)螺旋桨,创新性地设计了添加4个并列控制结构的改进螺旋桨,研究并列控制结构对螺旋桨空化流场的调控效果,并对调控机理进行分析、阐释。

1 数值计算方法

1.1 物理模型和边界条件

采用PPTC螺旋桨模型,三维实体模型如图1所示。该型螺旋桨为右旋五叶桨,桨叶直径 D 为0.250 m,螺距比为1.635。计算域如图2所示,分为旋转域和静止域两部分,采用动静转子法对交界面进行处理。计算域进口距桨叶中心 $2.28D$,出口距桨叶中心 $6D$,圆柱流体域直径为 $2.4D$ 。

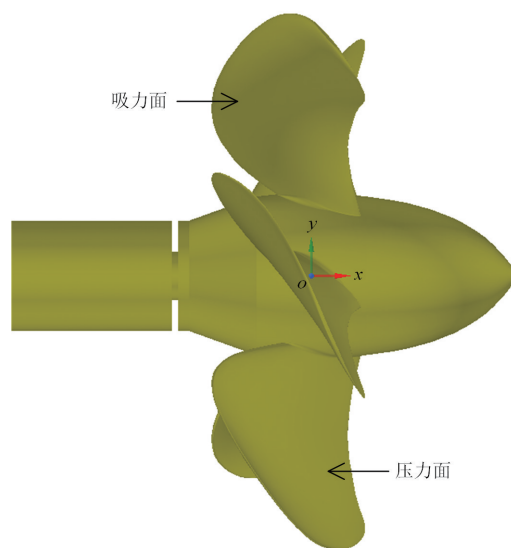


图1 PPTC螺旋桨模型

Fig. 1 PPTC propeller model

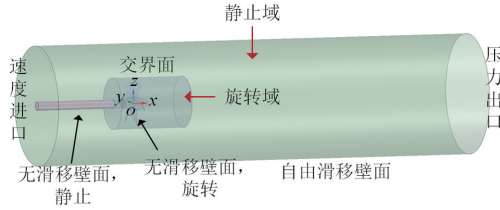


图2 螺旋桨空化模型计算域

Fig. 2 Computational domain of propeller cavitation model

PPTC螺旋桨综合性能的研究重点关注其敞水性能^[16]与空化性能。敞水性能和空化性能分别指螺旋桨在均匀水流中运行,无空化现象和有空化现象发生时的水动力性能,是衡量螺旋桨综合性能的重要参考。

1.2 控制方程

1.2.1 基本控制方程

在求解空化流动的计算中,均质混合流模型(HEM)是目前普遍采用的方法之一^[17-18]。均质混合流模型中,气液两相视为均匀物质,两相间无相对滑移。

混合相的连续性方程为

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

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

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

混合相的密度和黏度分别为

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

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

以上各式中: ρ 是混合相密度; u_i ($i=1,2,3$)表示与坐标轴 x_i 平行的速度分量; α_v 是气相体积分数;下标 l 代表液相,下标 v 代表气相; $\dot{m}$ 是两相之间的质量传输率。

1.2.2 湍流模型

本文采用剪切应力输运(shear stress transfer, SST- $k-\omega$)湍流模型^[19]对空化流动进行计算,该模型的方程式为

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

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

式中: k 为湍动能; P_k 为湍流产生率; ω 为湍流频率; $\beta^* = 0.09$; $\sigma_k = 0.85$; $\sigma_{\omega 1} = 0.5$; $\sigma_{\omega 2} = 0.856$; F_1 为混合函数。

由于原始的湍流模型过度预测了空化区域的湍流黏度,因此本研究采用修正后的SST- $k-\omega$ 模型^[20]。考虑混合相局部可压缩性的影响,原公式中的湍流黏度 μ_t 修正为

$$\mu_{T_mod} = \mu_t f(\rho) \quad (8)$$

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

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

式中: $a_1 = 0.31$; S 为液体表面张力系数; F_2 为混合函数。参照文献[21],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^[22-23]提出至今,经过了大量的模拟和实验验证,该模型在非稳态空化模拟中具有较好的效果。为实现空化过程的准确捕捉,本研究采用修正后的Zwart空化模型^[24-25],其表达式为

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

式中: $\dot{m}_e$ 是蒸汽生成率; $\dot{m}_c$ 是蒸汽凝结率; α_{nuc} 为汽核体积分数,取值为 5×10^{-4} ; p_v 为饱和蒸汽压; R 为 1×10^{-6} m; F_{cond} 为凝结系数,取值为0.01; F_{vap} 为气化系数,取值为50。

1.3 参数定义

空化数 σ 为描述空化状态的无量纲参数,其定义为

$$\sigma = \frac{p - p_v}{0.5 \rho (n_p D)^2} \quad (12)$$

式中: p 为局部压力; n_p 为螺旋桨转速; D 为螺旋桨直径。

进速系数 J 为螺旋桨的进程与直径之比,其公式为

$$J = \frac{v_{\infty}}{n_p D} \quad (13)$$

式中 v_∞ 为来流速度。

螺旋桨水动力性能通过推力系数(K_T)、扭矩系数(K_Q)和效率(η_0)等参数评估,推力系数、扭矩系数和效率的公式分别为

$$K_T = \frac{T}{\rho n_p^2 D^4} \quad (14)$$

$$K_Q = \frac{Q}{\rho n_p^2 D^5} \quad (15)$$

$$\eta_0 = \frac{J}{2\pi} \frac{K_T}{K_Q} \quad (16)$$

螺旋桨压力系数为

$$C_{p,p} = \frac{p}{0.5\rho(v_\infty^2 + (2\pi n_p r)^2)} \quad (17)$$

式中: T 为螺旋桨所受的推力; Q 为螺旋桨所受的扭矩; r 为螺旋桨半径。

1.4 模型验证

1.4.1 网格无关性验证

采用非结构化网格划分方法,为精确捕获桨叶周围流场信息,对桨叶近壁面处网格进行加密处理,螺旋桨叶片表面和各剖面网格如图 3 所示。

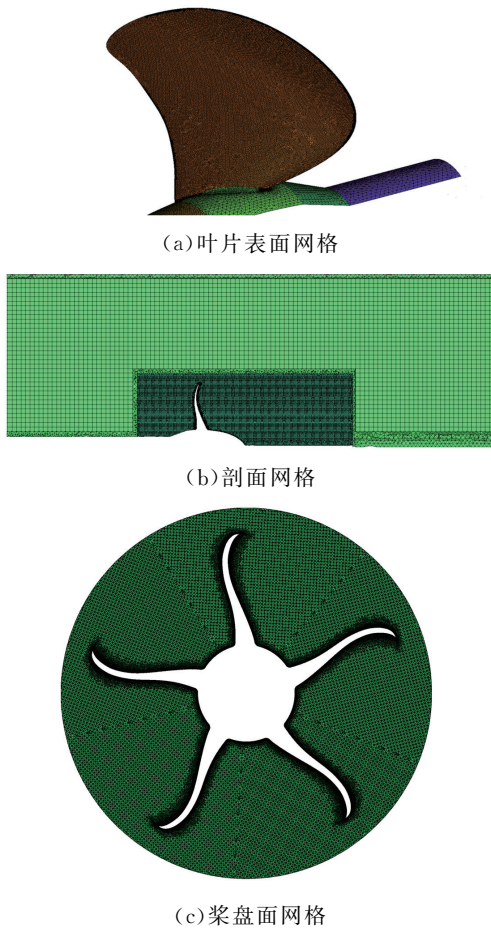


图 3 螺旋桨叶片表面和各剖面网格示意

Fig. 3 Grid schematic of propeller blade surface and each section

为确定合理的网格节点数,进行网格无关性验证,工况参数如下: $n_p = 15 \text{ r} \cdot \text{s}^{-1}$, $\rho_l = 997.71 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $v_l = 9.581 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $p_\infty = 98.237 \text{ kPa}$ 。选取推力系数 K_T 作为验证参数,验证结果如表 1 所示。综合考虑计算精度和计算资源因素,后续研究均参考第 3 套网格划分方案。

表 1 网格无关性验证

Table 1 Grid independence validation

网格方案	节点数	K_T	相对误差/%
1	0.71×10^6	0.420	4.22
2	0.95×10^6	0.411	1.99
3	1.58×10^6	0.408	1.24
4	2.32×10^6	0.403	

1.4.2 数值模型验证

本研究选择第二届船舶推进器国际研讨会(SMP'11)上提出的重载工况和设计工况进行分析,计算工况参数如表 2 所示。

表 2 计算工况参数

Table 2 Calculation condition

参数	取值	
	重载工况	设计工况
$n_p / (\text{r} \cdot \text{s}^{-1})$	24.987	24.986
J	1.019	1.269
σ	2.024	1.424
p_v / Pa	2 818	2 818
$v_l / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	9.34×10^{-7}	9.34×10^{-7}
$\rho_l / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	997.44	997.44

重载工况与设计工况下空泡形态的对比如图 4 和图 5 所示。可以看出,模拟空泡形态与实验结果吻合度较高。

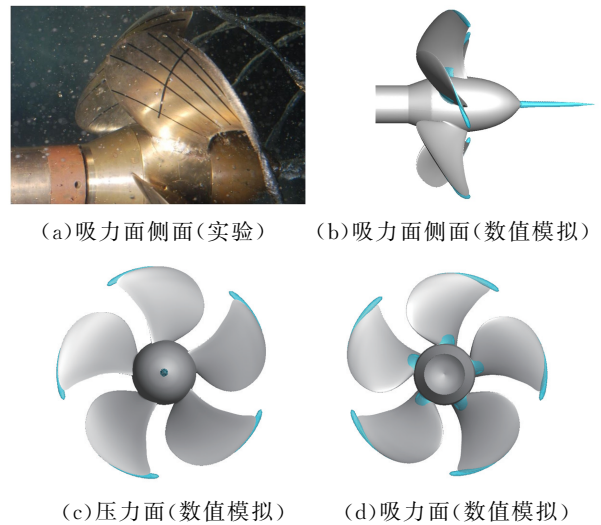


图 4 重载工况下空泡形态的对比

Fig. 4 Comparison of vapor morphology (overload condition)

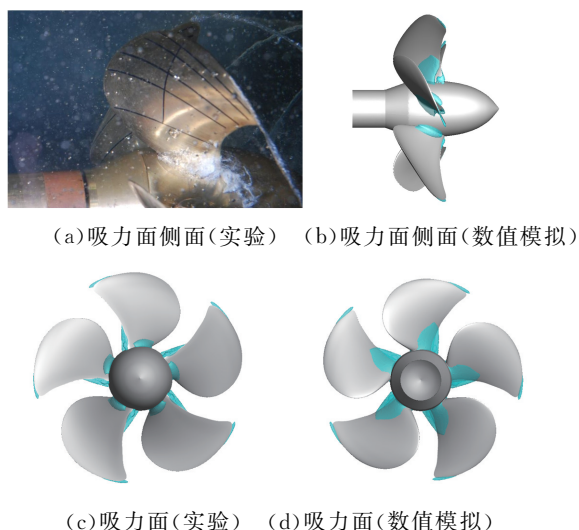


图5 设计工况下空泡形态的对比

Fig. 5 Comparison of vapor morphology (design condition)

重载工况与设计工况下水动力性能参数的对比如表3和表4所示。可以看出,与实验结果相比,数值模拟推力系数 K_T 和扭矩系数 K_Q 的最大相对误差为5.67%。综上所述,当前数值模型精度足够可靠,满足下一步研究需求。

表3 重载工况下水动力性能参数的对比

Table 3 Comparison of hydrodynamic performance parameters (overload condition)

性能	K_T			$10K_Q$		
	实验值	模拟值	误差/%	实验值	模拟值	误差/%
敞水	0.387 0	0.398 7	3.02		1.006 0	
空化	0.372 5	0.383 8	3.03	0.969 8	0.974 6	0.490

表4 设计工况下水动力性能参数的对比

Table 4 Comparison of hydrodynamic performance parameters (design condition)

性能	K_T			$10K_Q$		
	实验值	模拟值	误差/%	实验值	模拟值	误差/%
敞水	0.245 0	0.258 9	5.67		0.736 2	
空化	0.206 4	0.209 0	1.26	0.631 2	0.639 9	1.38

2 结果与分析

2.1 改进螺旋桨设计原则

如图4和图5所示,重载工况下空泡出现在吸力面叶梢、叶根和桨帽顶端,设计工况下空泡出现在吸力面叶梢、叶根以及压力面的叶根部位,且吸力面叶根部位的空泡范围明显大于重载工况。

图6和图7展示了不同工况下PPTC螺旋桨桨叶吸力面流线分布。可以看出,重载工况下由于叶根部位空泡区域压力较低,随边附近流线向空泡区

域偏斜,而设计工况下叶根部位空泡范围更大,随边附近流线在空泡区域边界处汇聚。

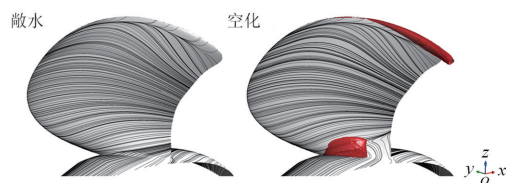


图6 重载工况下PPTC螺旋桨桨叶吸力面的流线分布

Fig. 6 Streamline distribution on the suction side of PPTC propeller (overload condition)

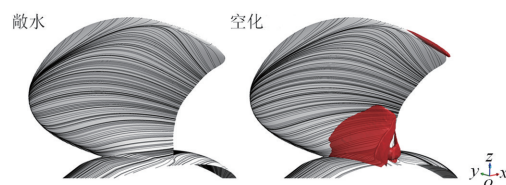


图7 设计工况下PPTC螺旋桨桨叶吸力面的流线分布

Fig. 7 Streamline distribution on the suction side of PPTC propeller (design condition)

综合上述分析可知,流动控制结构应当在空化范围内进行添加,且需要对流场起到足够扰动。因此,根据PPTC螺旋桨空泡位置及其流线分布,在叶根与叶尖位置添加多个三棱柱流动控制结构,控制结构与叶片表面结合,抑制空泡的产生。设计了4种改进螺旋桨,模型命名及添加的控制结构参数如表5所示。表中: n_r 为叶根位置添加的控制结构数; h_r 为叶根位置控制结构高度; h_t 为叶尖位置控制结构高度; l 为叶尖位置控制结构长度。

表5 改进模型控制结构参数

Table 5 The parameters of the control structure of the modified models

螺旋桨	n_r	h_r/mm	$h_t, l/\text{mm}$	叶尖位置 结构方向
PPTC-f1	4	1.00	0.50, 5.80	径向圆周
PPTC-f2	4	0.75	0.75, 5.80	径向圆周
PPTC-t1	3	0.75	0.75, 2.70	竖直方向
PPTC-t2	3	0.75	0.75, 1.35	竖直方向

以PPTC-f1、PPTC-t1螺旋桨模型为例,给出改进螺旋桨控制结构的添加位置,如图8所示。叶根控制结构在径向 $r/R=0.32\sim 0.40$ 范围内,起始位置为0.32倍弦长处,依次间隔0.15倍的弦长添加控制结构。在叶尖位置:对于PPTC-f1螺旋桨,控制结构沿 $r/R=0.98$ 和 $r/R=0.99$ 添加;对于

PPTC-t1 螺旋桨, 控制结构在 $r/R=0.97$ 和 $r/R=0.99$ 之间添加; 添加方向与 z 轴平行。

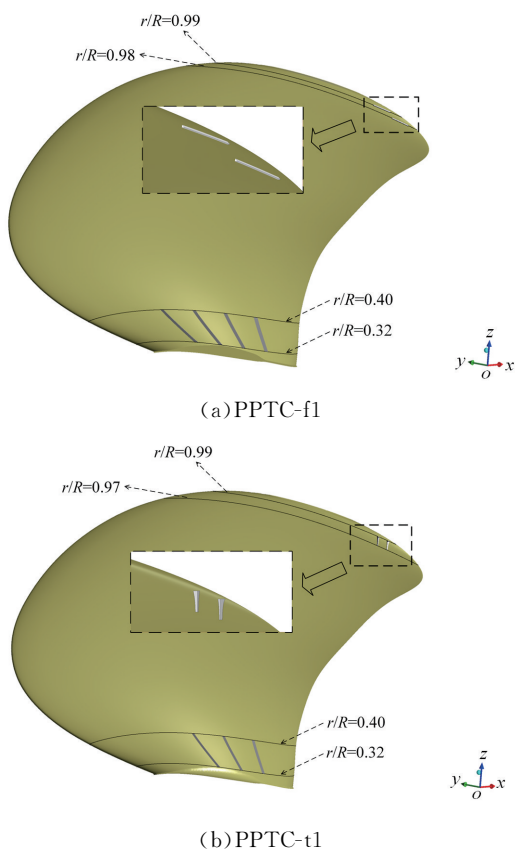


图 8 改进螺旋桨吸力面控制结构示意图

Fig. 8 Control structure on the suction surface of the modified propellers

2.2 改进螺旋桨流场特性

改进螺旋桨在不同工况下性能参数的变化如图 9 和图 10 所示。可以看出, 无论是否发生空化, 在重载工况和设计工况下, 随着进速系数的增大, PPTC 螺旋桨的推力系数和扭矩系数均相应减小。除 PPTC-f1 螺旋桨在设计工况下发生空化时扭矩系数增大以外, 改进螺旋桨的推力系数和扭矩系数均略有降低。与敞水性能参数相比, 改进螺旋桨的空化性能参数下降幅度更小, 添加控制结构对螺旋桨空化性能的负面影响不显著。

图 11 和图 12 给出了不同工况下螺旋桨效率和空泡区域体积变化。可以看出, 在重载工况下, PPTC-t2 螺旋桨的综合性能最好, 效率损失 0.235%, 空泡体积减小 23.9%。设计工况下, PPTC-t1 螺旋桨的综合性能最好, 效率损失 0.284%, 空泡体积减小 19.5%。添加控制结构牺牲了较小的效率, 显著减小了空泡区域体积, 水动力性能的较小损失获得了空化性能的显著改善。

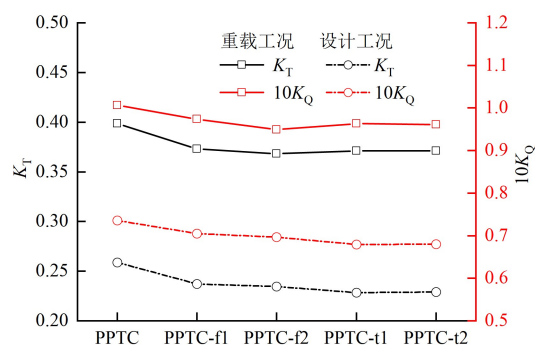


图 9 各工况下改进螺旋桨敞水性能参数对比

Fig. 9 Comparison of open-water performance parameters of modified propellers under different working conditions

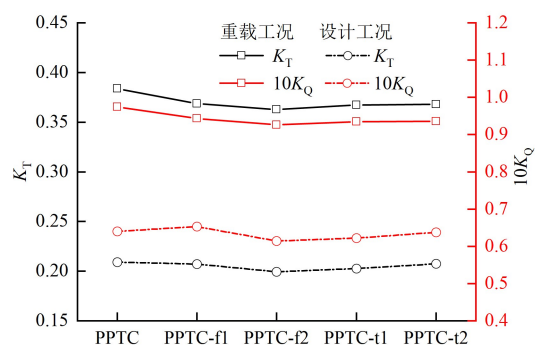


图 10 各工况下改进螺旋桨空化性能参数对比

Fig. 10 Comparison of cavitation performance parameters of modified propellers under different working conditions

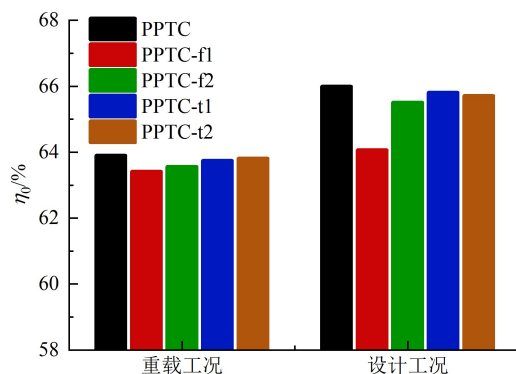


图 11 不同工况下螺旋桨效率的对比

Fig. 11 Efficiency comparison of propellers under different working conditions

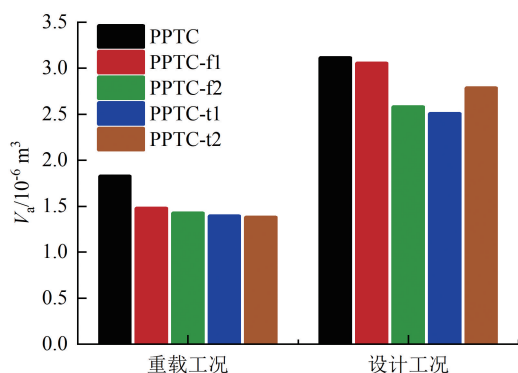


图 12 不同工况下螺旋桨空泡区域体积的对比

Fig. 12 Volume comparison of cavitation area of each propeller under different working conditions

图 13 为改进螺旋桨空泡形态的对比。可以看出,在吸力面叶根位置,空泡区域的分布与控制结构的形状比较相似。与 PPTC 螺旋桨相比,改进螺旋桨空泡区域径向高度升高,周向宽度降低。对于各改进螺旋桨,添加的第一个控制结构处流速降低,压力未能达到饱和蒸汽压,来流沿导边流向控制结构产生的空泡发展在此处受到抑制。不同螺旋桨起始空泡区域大小不同,PPTC-f1 螺旋桨起始空泡区域小于 PPTC-f2 螺旋桨;PPTC-t1 螺旋桨和 PPTC-t2 螺旋桨起始空泡区域大小相似,且大于 PPTC-f1 螺旋桨和 PPTC-f2 螺旋桨。一定范围内,叶根位置控制结构高度越高,对起始空泡区域的影响越大;控制结构离起始空泡区域越远,作用越小。第 3 和第 4 个控制结构分别位于重载工况和设计工况空泡区域结束位置,使控制结构顶端位置空泡区域减小。

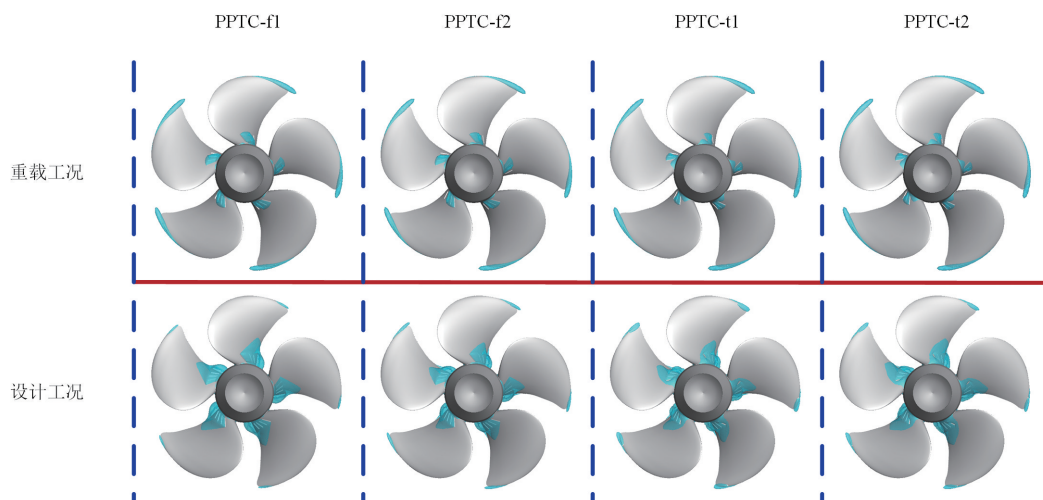


图 13 改进螺旋桨空泡形态的对比

Fig. 13 Comparison of vapor morphology

重载工况下,叶尖空泡区域较大,受控制结构影响不明显,因此添加控制结构后空泡区域变化较小。设计工况下:PPTC-f1 和 PPTC-f2 螺旋桨吸力面叶尖控制结构沿周向布置,仅对结构前端的空泡区域产生影响;PPTC-t1 和 PPTC-t2 螺旋桨叶尖控制结构沿竖直方向布置,径向空泡区域变大,且 PPTC-t1 螺旋桨的叶尖空泡区域整体大于 PPTC-t2 螺旋桨。

进一步地,以重载工况为例,揭示控制结构对空化现象的抑制机理。图 14 和图 15 展示了改进螺旋桨吸力面与压力面的压力分布云图。可以看出,由于来流流经螺旋桨导边时出现的流动分离现象,压力面压力从导边到随边呈下降趋势,而吸力面导边呈现低压状态,沿随边方向压力升高。吸力面导边、

叶尖以及叶根位于低压区,易发生空化。在吸力面叶根位置,控制结构的添加诱发了高压区域,改善了压力分布,且控制结构高度越大,改善作用越显著。PPTC-f1 螺旋桨吸力面叶根位置第一个控制结构产生的高压范围最明显。改进螺旋桨叶根位置第 4 个控制结构使靠近随边的区域压力升高,但由于此控制结构并不位于空泡范围内,对空泡的作用较小。同时,由于第 4 个结构的影响,桨叶压力面叶根位置在靠近随边处有小范围的压降。压力面压力的降低和吸力面压力的升高,造成了推力系数的整体下降。在吸力面叶尖位置,周向布置的控制结构对压力的分布影响较小,而竖直分布的控制结构对压力影响较为明显。

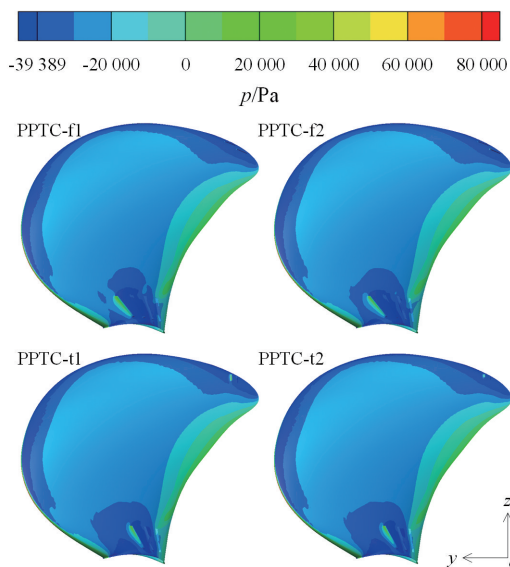


图 14 改进螺旋桨吸力面的压力分布

Fig. 14 Pressure distribution on the suction side of the modified propellers

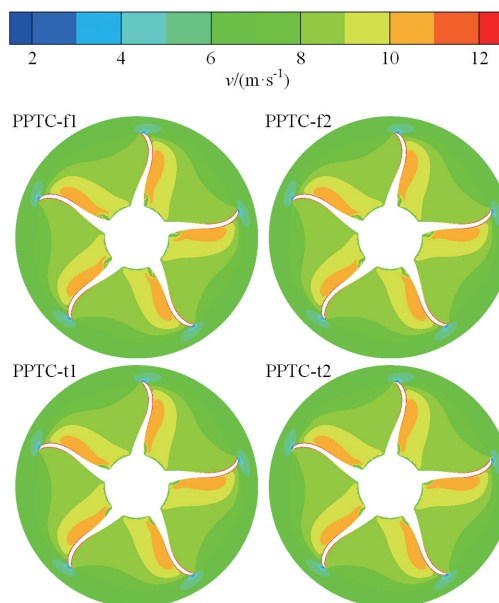


图 16 改进螺旋桨周向截面速度的分布

Fig. 16 Velocity distribution in circumferential sections of the modified propellers

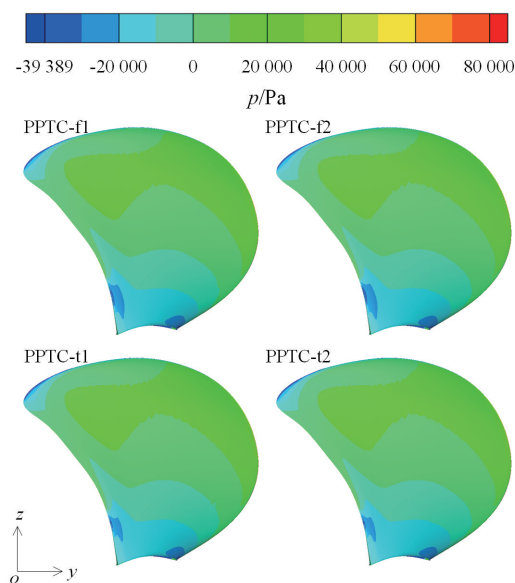


图 15 改进螺旋桨压力面的压力分布

Fig. 15 Pressure distribution on the pressure side of the modified propellers

图 16 展示了改进螺旋桨周向截面的速度分布。可以看出:桨叶控制范围内的流体被加速,形成高速区;叶尖部位失速,形成低速区。吸力面叶根位置的控制结构降低了局部流场的速度,使高速区范围减小,从而使控制结构附近压力升高,减小了空泡发生的可能性。

桨叶压力系数分布曲线包围的面积反映了螺旋桨的推力性能。当水流从桨叶表面经过时,在吸力面形成低压区,压力降低至饱和蒸汽压时产生空泡。重载工况下发生空化时最低压力偏高,空化的产生减小了压力面和吸力面的压差,推力系数降低。

图 17 展示了 $r/R=0.98$ 径向位置的桨叶表面压力系数分布。可以看出,当流体经过控制结构时,由于冲击作用,速度减小形成驻点,导致压力增加。对于竖直方向的控制结构,背流面压力迅速降低,而对于周向布置的控制结构,在流动控制结构端面处产生高压,控制结构诱发的高压区域较小,对空化流场的影响较小。

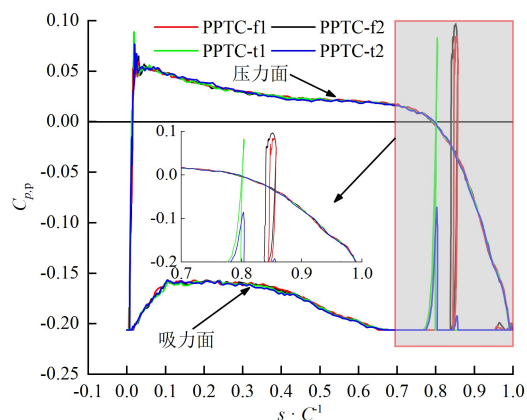
图 17 $r/R=0.98$ 时改进螺旋桨压力系数分布的对比Fig. 17 Comparison of pressure coefficient distribution of modified propeller ($r/R=0.98$)

图 18 展示了 $r/R=0.35$ 径向位置的压强系数分布。对于 PPTC-f1 和 PPTC-f2 螺旋桨,第一个控制结构处压力升高,第二个控制结构处在空泡覆盖区域,压力较低,第 3 个控制结构处压力升高。对于 PPTC-t1 和 PPTC-t2 螺旋桨,与 PPTC-f1 和 PPTC-f2 螺旋桨相比,第一个控制结构处产生的压力峰值较低。控制结构离空化起始区域越远,对空化的抑制作用越小。

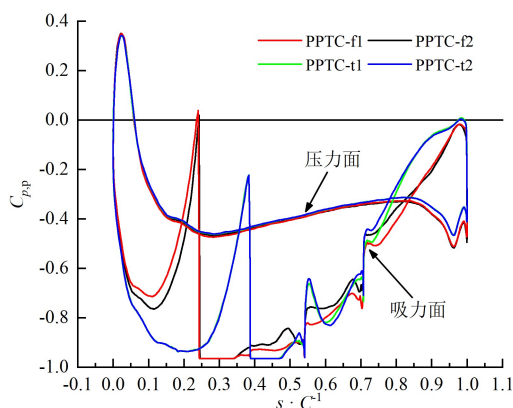


图 18 $r/R=0.35$ 时改进螺旋桨压强系数分布的对比

Fig. 18 Comparison of pressure coefficient distribution of modified propeller ($r/R=0.35$)

3 结 论

本文以 PPTC 螺旋桨为研究对象,在不影响整体性能的情况下,分析了流动控制结构对空化流场的局部调控,主要研究结论如下。

(1)重载工况下空泡出现在吸力面叶梢、叶根和桨帽顶端,设计工况下空泡出现在吸力面叶梢、叶根以及压力面的叶根部位,且吸力面叶根部位的空泡范围明显大于重载工况。

(2)叶根与叶尖位置添加的流动控制结构有效抑制了空泡的产生,效率牺牲较小的同时,显著减小了空泡区域体积,改善了螺旋桨综合性能。

(3)重载工况下,PPTC-t2 螺旋桨的综合性能最好,效率损失 0.134%,空泡区域体积减小 24.6%。设计工况下,PPTC-t1 螺旋桨的综合性能最好,效率损失 0.284%,空泡区域体积减小 19.5%。

(4)控制结构的添加降低了局部流场的速度,诱发了高压区域,改善了压力分布,减小了空泡发生的可能性,实现了空化流场的局部调控。

参考文献:

[1] 王秀礼,袁寿其,朱荣生,等. 离心泵汽蚀过渡过程

瞬态特性分析 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(7): 38-43.

WANG Xiuli, YUAN Shouqi, ZHU Rongsheng, et al. Analysis on transient hydraulic characteristics of cavitation process in centrifugal pumps [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(7): 38-43.

[2] 燕浩,刘梅清,梁兴,等. 大型轴流泵空化特性的数值模拟 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(11): 44-50.

YAN Hao, LIU Meiqing, LIANG Xing, et al. Numerical simulation on cavitation behavior of large-scale axial-flow pumps [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(11): 44-50.

[3] 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.

[4] ZHANG Quan, HSIAO C T, CHAHINE G L. Numerical study of vortex cavitation suppression with polymer injection [C/OL]//Proceedings of the 7th International Symposium on Cavitation. 2009 [2022-07-01]. <https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/84323/CAV2009-final153.pdf;sequence=1>.

[5] LEE C S, AHN B K, HAN J M, et al. Propeller tip vortex cavitation control and induced noise suppression by water injection [J]. Journal of Marine Science and Technology, 2018, 23(3): 453-463.

[6] 唐滔. 射流对轴流泵空化性能的影响研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2021.

[7] MÄKI HARJU S A, GANESH H, CECCIO S L. Effect of non-condensable gas injection on cavitation dynamics of partial cavities [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2015, 656: 012161.

[8] CHANG N, 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. [S. l.]: [s. n.], 2009: 149.

[9] PARK S L, LEE S J, YOU G S, et al. An experimental study on tip vortex cavitation suppression in a marine propeller [J]. Journal of Ship Research, 2014, 58(3): 157-167.

[10] 张睿. 轴流泵失速和空化流动特性及其性能改善研究 [D]. 上海: 上海大学, 2014.

[11] 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.
- [12] 牟介刚, 章子成, 谷云庆, 等. 圆形非光滑表面叶片对离心泵空化特性的影响 [J]. 上海交通大学学报, 2020, 54(6): 577-583.
- MOU Jiegang, ZHANG Zicheng, GU Yunqing, et al. Effect of circular non-smooth surface blades on cavitation characteristics of centrifugal pump [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2020, 54(6): 577-583.
- [13] 郁金红. 后盖板小叶片对离心泵空化特性的影响研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.
- [14] 赵伟国, 赵富荣, 路佳佳. 叶片背面不连续凸起对轴流泵空化的控制研究 [J]. 工程热物理学报, 2021, 42(1): 96-105.
- ZHAO Weiguo, ZHAO Furong, LU Jiajia. Study on the control of cavitation of axial flow pump with discontinuous bulges on the back of blades [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42(1): 96-105.
- [15] 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.
- [16] EOM M J, JANG Y H, PAIK K J. A study on the propeller open water performance due to immersion depth and regular wave [J]. Ocean Engineering, 2021, 219: 108265.
- [17] ZHU Jiakai, ZHAO Dongfang, XU Lu, et al. Interactions of vortices, thermal effects and cavitation in liquid hydrogen cavitating flows [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(1): 614-631.
- [18] 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.
- [19] 任芸, 吴登昊, 牟介刚, 等. 考虑旋转和曲率的湍流模型修正及应用 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(9): 25-30.
- REN Yun, WU Denghao, MOU Jiegang, et al. Modification for turbulence model considering rotation and curvature with applications [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(9): 25-30.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] ZWART P J, GERBER A G, BELAMRI T. A two-phase flow model for predicting cavitation dynamics [C]//ICMF 2004 International Conference on Multiphase Flow. [S.l.]: [s.n.], 2004: 152.
- [23] LONG Xinping, CHENG Huaiyu, JI Bin, et al. Large eddy simulation and Euler-Lagrangian coupling investigation of the transient cavitating turbulent flow around a twisted hydrofoil [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2018, 100: 41-56.
- [24] ISHII M, KIM S, UHLE J. Interfacial area transport equation: model development and benchmark experiments [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(15): 3111-3123.
- [25] HIBIKI T, ISHII M. Development of one-group interfacial area transport equation in bubbly flow systems [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(11): 2351-2372.

(编辑 陶晴 杜秀杰)