

斜流工况下喷水推进器叶轮空化特性的数值研究

赖海滨,陈二云,杨爱玲

(上海理工大学 能源与动力工程学院,上海 200093)

摘要:针对喷水推进器斜流工况时叶轮内部的空化问题,采用 SST $k-\omega$ 湍流模型和 Zwart 空化模型,对不同斜流角下的喷水推进器流场特性进行了数值模拟,获得了斜流角对喷水推进器水力性能、叶片表面空泡分布以及叶顶间隙区空化分布等方面的影响特性。结果表明:斜流角从 0° 逐渐增大至 40° 时,推进泵的质量流量、扬程增加,效率则递减,约减小了 3%;随着斜流角增大,依次影响多个叶片表面的空化分布,叶片表面空化区域从吸力面进口边向出口处不断发展;叶顶尖隙内的泄漏流、叶顶泄漏涡及卷吸区的空化范围随斜流角的增大不断扩展,并发生相互干涉和混合,最后叶顶区空化趋于稳定状态;随着斜流角的增大,叶顶进口附近处的空化和涡量分布发展规律具有相似性。

关键词:喷水推进器;斜流;空化;叶顶间隙

中图分类号:U664.3 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2024.03.005

[引用本文格式] 赖海滨,陈二云,杨爱玲. 斜流工况下喷水推进器叶轮空化特性的数值研究[J]. 热能动力工程,2024,39(3):32-40. LAI Hai-bin, CHEN Er-yun, YANG Ai-ling. Numerical study on cavitation characteristics of water jet propulsor impeller under oblique flow condition[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2024,39(3):32-40.

Numerical Study on Cavitation Characteristics of Water Jet Propulsor Impeller under Oblique Flow Condition

LAI Hai-bin, CHEN Er-yun, YANG Ai-ling

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093)

Abstract: Aiming at the cavitation problem in the impeller of water jet propulsor under oblique flow condition, SST $k-\omega$ turbulence model and Zwart cavitation model were used to simulate the flow field characteristics of water jet propulsor under different oblique flow angles. The influence characteristics of the oblique flow angle on the hydraulic performance of water jet propulsor, the cavitation distribution on the blade surface and the cavitation distribution in the tip clearance area of the water jet propulsor were obtained. The results show that when the oblique flow angle gradually increases from 0° to 40° , the propulsion pump mass flow and head increase, while the efficiency decreases by about 3%; with the increase of the oblique flow angle, the cavitation distribution on multiple blade surfaces will be gradually affected in turn, the cavitation area on the blade surface constantly develops from the inlet edge of the suction surface to the outlet; the range of leakage flow cavitation in the tip clearance area, tip leakage vortex cavitation and entrainment zone cavitation will continue to expand with the increase of oblique flow angle, and there will be mutual interference and mixing, and finally the tip region cavitation tends to be stable; with the increase of oblique flow angle, the distribution and development law of cavitation and vorticity near tip inlet are similar.

Key words: water jet propulsor, oblique flow, cavitation, tip clearance

收稿日期:2023-02-28; 修訂日期:2023-03-20

基金项目:国家自然科学基金(51106099)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (51106099)

作者简介:赖海滨(1997-),男,上海理工大学硕士研究生。

通信作者:陈二云(1975-),男,上海理工大学副教授。

引言

喷水推进是一种新型的推进技术,利用推进泵叶轮转动对水流做功,使水流从喷嘴射出从而获得反作用力^[1-3]。相比于传统螺旋桨,喷水推进具有机动优良性、推进效率高、抗空化能力强和振动噪声小等优点^[4-5]。航行体在运行中面临着诸多的工作环境,当其在转弯、横移等运动过程中,来流速度会和推进泵轴向形成角度,此时喷水推进器将在斜流工况下工作。在斜流工况下,推进泵内流场复杂特性增加,叶轮内空泡恶化,会影响喷水推进器的性能并产生不必要的振动噪声,从而降低喷水推进器的使用寿命和船舶的隐蔽性。因此,对斜流工况下喷水推进器性能的研究具有重要价值和意义。

许慧丽等人^[6]通过数值模拟方法研究了进流方向对喷水推进器流道性能的影响,结果表明,倒航状态下喷水推进器的内流场更不均匀,整体壁面压力更低,更易产生空化。TAN 等人^[7]利用高速成像技术对推进泵内空化流动现象演变规律进行了可视化,并阐明了喷水推进器空化破坏的具体原理。WU 等人^[8]利用粒子成像测速技术(PIV)对喷水推进器叶轮内的叶顶泄漏涡流动状态进行了观察分析,揭露了叶顶泄漏涡的卷起过程、相关的内部结构及其发展规律。Laborde 等人^[9]对轴流泵叶轮叶顶间隙区域空化进行研究分析发现,叶顶间隙的几何形状对叶顶间隙空化有较大影响,叶片前倾会减弱叶顶泄漏涡空化,叶片后倾会加剧叶顶泄漏涡空化。Huang 等人^[10]对喷水推进泵的空化流动进行了数值模拟分析,揭示了空化和旋涡相互作用的机理,研究发现,空化的发展会显著增强推进泵内涡量的产生和流动的复杂性,在空化进程中旋涡基本位于空化界面。Guo 等人^[11]采用改进的 Zwart 空化模型对喷水推进泵叶轮内的叶顶泄漏涡空化进行了研究,揭示了叶顶泄漏涡的空化特性,并发现叶顶泄漏涡空化会导致叶顶泄漏流流量减小。Krasilnikov 等人^[12]以 DTMB4679 桨为研究对象,对不同斜流角下的叶片压力分布以及叶片载荷变化进行了研究分析。胡洋等人^[13]利用计算流体力学研究分析了 DTMB4679 桨的水动力性能,结果表明,桨叶上的载荷随着斜流角的增大呈现线性增长的趋势。

本文主要针对斜流工况下喷水推进器叶轮内部的空化问题,采用计算流体力学方法,对不同斜流角下的喷水推进器空化流场进行了数值模拟,研究了斜流角对喷水推进器水力性能、叶片表面空泡分布以及叶顶间隙区空化分布等方面的影响特性。

1 数值计算模型与计算方法

1.1 控制方程及湍流和空化模型

基于 RANS 方程对喷水推进器内部流场进行数值模拟,其流动控制方程包括连续性方程和动量方程:

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

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + f_i \quad (2)$$

式中: ρ —流体密度, kg/m³; ν —运动粘度, m²/s; u_i , u_j —流体速度分量, m/s; p —流体微元上的压力, Pa; t —时间, s; x_i , x_j —笛卡尔坐标分量, m; f_i —一体积力, m/s²。

选用 SST $k-\omega$ 湍流模型,该模型结合了 $k-\omega$ 和 $k-\epsilon$ 模型的优越性,其湍流动能 k 和湍流频率 ω 方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho k \omega \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \frac{\omega}{k} \left(\alpha \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta \rho k \omega \right) + \frac{2\rho(1-F_1)}{\omega \sigma_\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (4)$$

式中: σ_k, σ_ω —湍流动能 k 和湍流频率 ω 的普朗特数; μ, μ_t —层流和紊流的黏性系数; α, β, β^* —比例系数; F_1 —混合函数; τ_{ij} —粘性力分量。

空化模型可以用来描述气液两相之间的相互转换,文献[14]表明,状态方程模型不能对空化过程中的动力学特性进行有效预测,而输运方程模型利用相输运方程来准确模拟气体和液体之间的相变。因此,本文选用基于 Rayleigh-Plesset 方程的 Zwart 空化模型^[15]。该模型被广泛应用于水力机械计算中,能较为准确地描述气泡在液体中的运动过程,且着重考虑了空化演化过程中空泡体积变化的影响,

其凝结相和蒸发相的表达式分别为:

$$\begin{aligned} r_e &= F_e \frac{3\alpha\rho_v}{R_B} \left(\frac{2}{3} \frac{p - p_s}{\rho_1} \right)^{\frac{1}{2}}, p > p_s \\ r_e &= -F_e \frac{3\alpha_{nuc}(1 - \alpha_v)\rho_v}{R_B} \left(\frac{2}{3} \frac{p_s - p}{\rho_1} \right)^{\frac{1}{2}}, p < p_s \end{aligned} \quad (5)$$

式中: F_e, F_c —凝结系数和蒸发系数; α_v —气相体积分数; α_{nuc} —气核体积分数; ρ_1, ρ_v —液相密度和气相密度, kg/m^3 ; R_B —空泡半径,m; p, p_s —当地压力和饱和蒸汽压力,Pa。

1.2 喷水推进器模型与计算域

选用混流式喷水推进器为研究对象,其几何模型如图 1 所示。喷水推进器主要由进水流道、叶轮、导叶和喷口组成。进水流道将船底的水流吸入并输送给推进泵做功,将推进泵的机械能转化为水的动能,导叶起到整流的作用,减小水流的周向速度,水流最后从喷口喷出产生推力。叶轮直径 $D = 180 \text{ mm}$,叶轮叶片数为 5,导叶叶片数为 9,叶顶间隙径向宽度 $d = 1 \text{ mm}$,计算转速 $n = 2700 \text{ r/min}$ 。

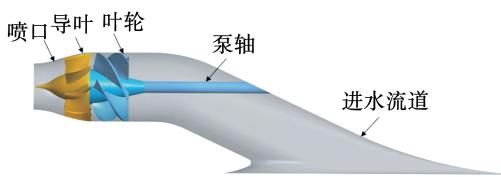


图 1 喷水推进器几何模型

Fig. 1 Geometric model of water jet propulsor

船体边界层、入流速度和压力等因素都会影响水流流动,为了对喷水推进器内部流场进行精确的数值模拟,需将船底周围流场的影响考虑在内。根据文献[16],选取船底流场控制体的长、宽、高分别为 $30D$ 、 $10D$ 、 $8D$,其计算域如图 2 所示。其中,定义斜流角 α 为喷水推进器轴向与来流速度之间形成的夹角。

1.3 网格划分和无关性验证

整个计算域全部采用六面体结构化网格。利用 ICEM CFD 对船底进水流道和喷口进行网格划分,为了满足湍流模型的求解要求,将近壁面第 1 层网格厚度给定为 0.02 mm 。此时 $y^+ < 30$,进水流道连通船底采用 O 型网格,对弯管、唇角等流场变化剧烈的区域进行局部网格加密处理。利用 TurboGrid

软件对叶轮域和导叶域进行网格划分,在叶顶间隙、叶根等区域进行局部加密,确保能够更准确地模拟近壁面流动。计算域各部分网格如图 3 所示。

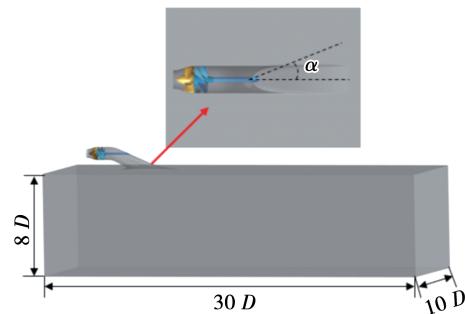


图 2 计算域

Fig. 2 Computational domain

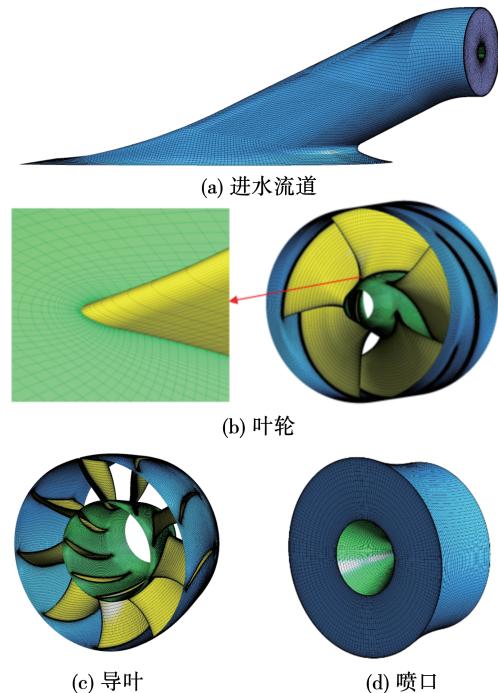


图 3 计算域网格划分

Fig. 3 Grid divisions of calculation domain

为了验证计算网格的无关性,对进水流道、叶轮及导叶域关键部位进行局部网格加密,生成 5 套不同密度的结构性网格,网格数分别为 623 万、745 万、899 万、1024 万和 1130 万。在直航工况下,选用推进泵扬程和流量作为考核网格无关性的标准,计算结果如图 4 所示。随着网格数的增加,推进泵的扬程和质量流量逐渐趋于平稳,当网格数达到 899 万后,扬程和质量流量基本不变。综合考虑时间成本

和计算精度,选取899万作为本文数值计算网格。其中,船底和进水流道网格数为270万,叶轮域网格数为429万,导叶域网格数为176万,喷口域网格数为24万。

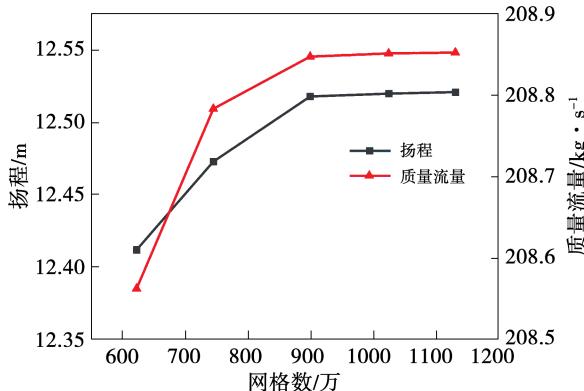


图4 网格无关性验证

Fig. 4 Grid independence verification

1.4 边界条件和求解设置

船底控制体上游面、两侧及底部设定为速度入口,取值为7.8 m/s,通过改变斜向来流速度分量来模拟不同角度下的斜流。控制体下游出口面设置为线性压力出口,喷口出口设置为环境压力出口,其余壁面均设置为无滑移壁面。其中,叶轮域为旋转域,采用多重参考系计算模型(MRF),其余计算域为静止域。

采用ANSYS-FLUENT软件对流场进行数值求解,湍流模型采用SST $k-\omega$ 模型,多相流模型设置为混合模型(Mixture Model)。以液态水为基础相,水蒸气为从属相,空化模型采用Zwart模型,饱和蒸汽压力设为3 540 Pa,此时参考压力设为0 Pa。压効-速度耦合迭代采用了Coupled算法,并设置高阶项松弛,动量项、湍动能项以及湍流耗散率项采用二阶迎风格式进行离散,体积分数采用一阶迎风格式进行离散,计算收敛残差设置为 1×10^{-5} 。

1.5 计算方法验证

为了验证数值计算方法的准确性,在不同转速条件下对推进泵进行了试验和数值模拟的比较,试验装置如图5所示。图6为试验结果和数值计算结果的对比。由图6可知,各转速下推进泵数值计算的出口体积流量与试验数据吻合良好,且两者误差始终小于3%,数值计算方法可靠性得到验证。



图5 试验装置

Fig. 5 Test device

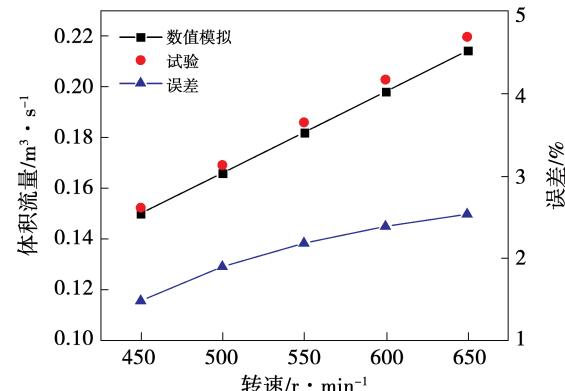


图6 试验与数值结果对比

Fig. 6 Comparison of experimental and numerical results

2 计算结果及分析

对喷水推进器分别在0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°和40°的斜流角下进行了数值计算,将从喷水推进器的水力性能、叶片表面空泡分布、叶顶间隙区空化分布及叶顶处空化涡流分布方面对各算例进行比较和分析。

2.1 水力性能参数分析

流量、扬程、功率及效率是喷水推进器重要的水力性能参数,喷水推进器效率是输出功率与推进泵轴功率的比值。推进泵的无量纲参数流量系数 Q^* 、扬程系数 H^* 、功率系数 P^* 和效率 η 定义如下:

$$Q^* = \frac{Q_v}{nD^3} \quad (6)$$

$$H^* = \frac{p_{12} - p_{11}}{\rho (nD)^2} \quad (7)$$

$$P^* = \frac{2\pi nT}{\rho n^3 D^5} \quad (8)$$

$$\eta = \frac{Q^* H^*}{P^*} \quad (9)$$

式中: Q^* —一体积流量, m^3/s ; P_{11}, P_{12} —泵进、出口断面的总压值, Pa ; T —叶轮扭矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; n —叶轮转速, r/s ; D —叶轮直径, m 。

图 7 给出了推进泵流量、扬程和效率随斜流角的变化趋势。由图 7 可知, 随着斜流角的增加, 质量流量和扬程逐渐增大, 而效率则呈现递减的趋势, 从 0° 到 40° 效率约下降了 3%。由于叶轮扭矩的增加, 喷水推进器吸收的轴功率也会增加, 从而导致质量流量和扬程增加。根据效率的定义, 流量和扬程乘积随斜流角增大的变化小于扭矩的变化, 因此效率会呈现逐渐减小的趋势。

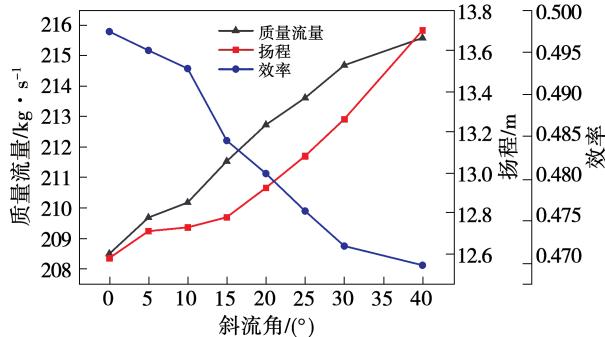


图 7 喷水推进器性能参数曲线

Fig. 7 Performance parameter curve of water jet propulsor

图 8 为加入和未加入空化模型推进泵的质量流量和效率随斜流角变化的对比曲线图。

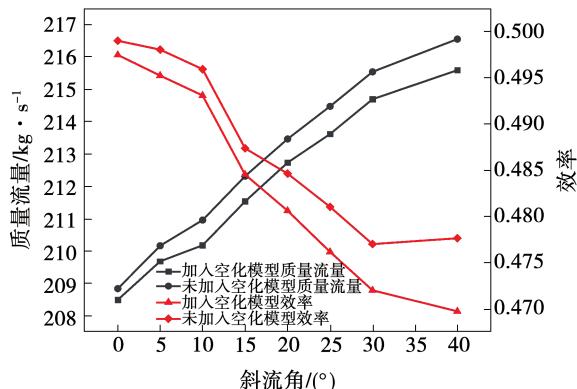


图 8 加入和未加入空化模型推进器的质量流量和效率随斜流角变化的结果比较

Fig. 8 Comparison of results of mass flow rate and efficiency of water jet propulsor with and without cavitation model changing with oblique flow angle

由图 8 可知, 随着斜流角的增大, 无论是否加入空化模型, 推进泵的质量流量变化趋势均递增, 效率则递减; 在同一斜流角下, 相较于未加入空化模型, 加入空化模型的质量流量和效率都相对更低, 这是由于喷水推进器内部发生空化, 局部液态水转变成汽态水所导致的; 斜流角越大, 未加入空化模型的质量流量和效率与加入空化模型的质量流量和效率的差值也会越大, 尤其是当 $\alpha > 30^\circ$ 时更明显。这表明, 随着斜流角的增大, 喷水推进器内部的空化会更剧烈, 对喷水推进器性能的影响也越大。

2.2 叶片表面空泡分布特性

喷水推进器内部空化现象的发生是由于局部压力降低至临界汽化压力以下所导致的, 在其运行过程中叶轮内更易发生空化现象。图 9 为不同斜流角下叶轮叶片吸力面空泡分布云图。

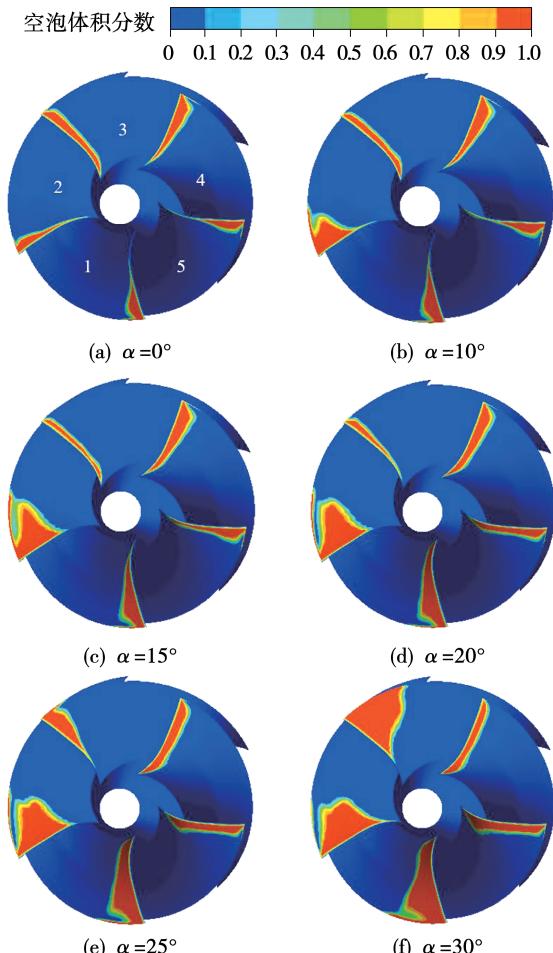


图 9 不同斜流角下叶轮叶片吸力面空泡分布云图

Fig. 9 Cloud maps of cavitation distribution on suction surface of impeller blade at different oblique flow angles

由图可知,当 $\alpha=0^\circ$ 时,各叶片表面空化区域基本一致,主要分布在叶片进口边及叶顶轮缘处,而在轮毂侧空化现象几乎未发生。这是由于叶片吸力面的局部低压区主要分布在叶片进口处,且轮毂侧的流速较低而轮缘侧的流速较高。沿着叶片绕流方向空泡体积分数由强减弱,这是因为尾缘空泡一部分发生溃灭,呈现云空化的状态。

由图9(a)~图9(d)可知,当 $\alpha \leq 20^\circ$ 时,主要会对叶片1和2吸力面的空泡分布产生影响,随着斜流角的增大,叶片1和2表面空化区域从进口边向出口处不断发展,径向不断向轮毂处延伸,空化范围不断扩大。这主要是受斜流角的影响,叶轮进口处的速度不均匀程度发生改变,叶片1和2对应进口边的速度有所增大,空化程度加剧。由图9(d)~图9(f)可知,当 $\alpha > 20^\circ$ 时,会逐渐对叶片3吸力面的空泡分布产生影响,尤其是当 $\alpha = 30^\circ$ 时,叶片3表面空化区域从进口边向出口和轮毂处急剧扩展,此时叶片3表面空化现象最为显著,对应进口处的速度也越大。随着斜流角的增大,空化现象在叶轮左半侧区域愈发严重,受到泵的性能制约,喷水推进器效率下降。

2.3 叶顶间隙区空化分布特性

叶顶间隙区的空化类型主要分为:刮起涡空化、泄漏流空化、卷吸区空化以及叶顶泄漏涡空化^[17]。根据前面分析可知,在所研究的斜流角范围内,主要会对叶片1,2和3上的空化产生影响,现针对叶片2叶顶间隙区的空化分布进行分析。

图10为不同斜流角下叶轮内空泡体积分数为0.1的等值面图。从图中可以看到,各斜流角下的叶顶空化区均呈现楔形轮廓,这是由叶顶间隙泄漏流和叶顶翼型绕流共同作用所形成的。由于叶片进口边距离轮缘较近处受到叶片工作面的刮起作用,在进口叶顶处形成了局部微小的刮起涡空化。当 $\alpha=0^\circ$ 时,在叶顶间隙区域内,由于叶片压力面与吸力面压差的存在会形成间隙泄漏流和叶顶泄漏涡,泄漏流在间隙内的流速较高,易形成剪切层,涡量较大,会生成叶顶分离涡。在漩涡的旋转作用下,叶顶分离涡和叶顶泄漏涡中心压力过低,从而会形成泄漏流空化和叶顶泄漏涡空化,且在这两种空化之间

会产生卷吸区空化。

随着斜流角的增加,泄漏流空化、叶顶泄漏涡空化和卷吸区空化范围不断扩展,楔形轮廓沿着尾缘方向不断发展。当 $\alpha=10^\circ$ 时,3种类型的空化已经发生互相干涉和混合;当 $\alpha=20^\circ$ 时,叶顶间隙区的空化基本呈现稳定状态,此时继续增大斜流角,叶顶区的空化分布几乎不再受影响。

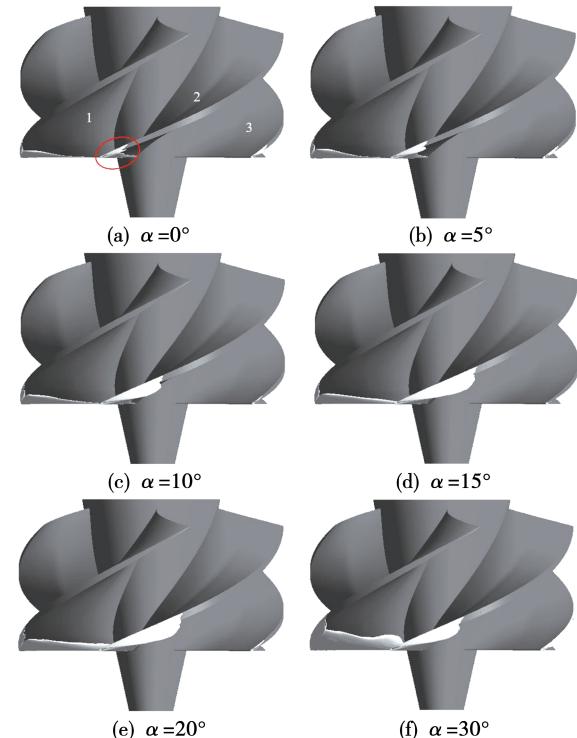


图10 不同斜流角下叶轮内空泡体积分数为0.1的等值面图

Fig. 10 Isosurface cloud maps of impeller with cavitation volume fraction of 0.1 at different oblique flow angles

图11为叶轮域内空泡体积随斜流角的变化曲线。由图可知,在 $\alpha=0^\circ$ 时叶轮域内已经有少量空泡的出现,空化程度轻微,此时由图8可知,对喷水推进器性能的影响较小;当 $\alpha < 25^\circ$ 时,叶轮域内空泡体积随着斜流角的增大从 0.84 cm^3 缓慢增加至 4.37 cm^3 ,空化愈加强烈,此时由图7可知,喷水推进器效率已下降2%左右;当 $\alpha > 25^\circ$ 时,叶轮域内空泡体积随斜流角的增大迅速增长,曲线斜率呈现不断变大的趋势;在 $\alpha=40^\circ$ 时,叶轮域内空泡体积已达到 15.15 cm^3 ,为直航工况下的18倍,此时喷水推

进器效率进一步受到影响,约降低了3%。在大斜流角状态下,叶轮域内空泡体积急剧上升,对流道的阻塞作用也越严重,流场复杂特性增加,喷水推进器效率下降明显。

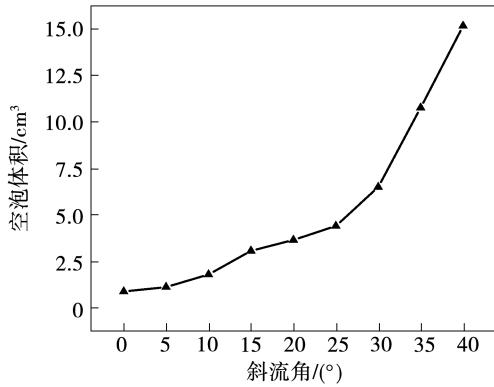


图 11 叶轮域内空泡体积随斜流角的变化

Fig. 11 Variation of cavitation volume with oblique flow angle in impeller domain

2.4 叶顶处空化涡流

在喷水推进器叶轮内,空化与漩涡存在相互作用,在漩涡的局部高速旋转作用下,漩涡中心会形成低压区,从而引起涡空化现象。选取99%的翼展长度叶顶处展向截面,对叶片1,2和3附近的空化和涡量进行分析。图12为不同斜流角下叶顶处展向截面的空泡分布云图。由图可知,各斜流角下叶片表面的空泡分布都具有楔形轮廓,这与图10叶顶间隙区空化分布现象对应。在 $\alpha=0^\circ$ 时,各叶片表面的空化区域主要聚集在吸力面进口边,此时发生的空化现象较为轻微;当 $\alpha \leq 20^\circ$ 时,随着斜流角的增加,叶片1和2吸力面附近的空泡分布产生明显的变化,楔形空化区在流道内沿出口方向不断发展;当 $\alpha > 20^\circ$ 时,叶片3吸力面附近的空化区域也逐渐受到影晌,其表面的空泡密集区域迅速变大且向出口和相邻叶片间扩张。

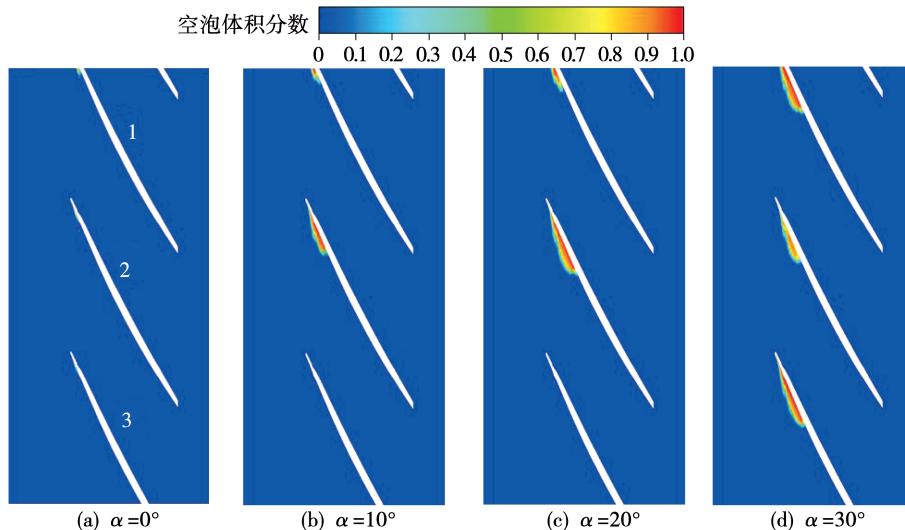


图 12 不同斜流角下叶顶处展向截面的空泡分布云图

Fig. 12 Cloud maps of cavitation distribution on spanwise section of blade tip at different oblique flow angles

图13为不同斜流角下叶顶处展向截面的涡量分布云图。由图可知,随着斜流角的增大,各叶片进口附近处的高涡量分布及发展规律与图12的空泡分布及发展规律具有相似性,但无论在哪个斜流角下各叶片通道内均呈现高涡量现象。这是由于间隙泄漏流沿着叶片厚度方向流动,促使涡流向叶片吸

力面侧发展所引起的。并且可以发现,空化现象存在于涡流结构中,涡流对空化的形成具有一定的促进作用。高涡量在喷水推进器内分布的范围越广,流场中不稳定的区域会越大,对整体性能产生的影响也越大。

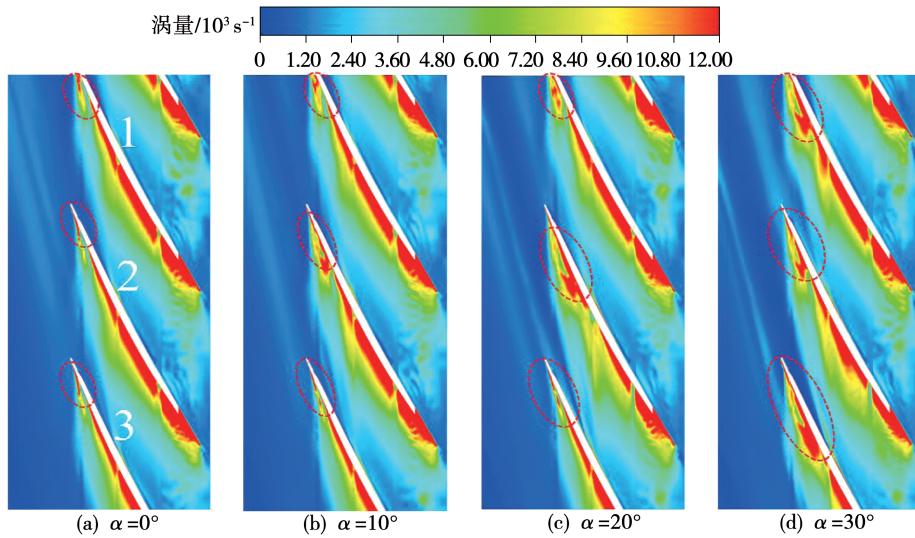


图 13 不同斜流角下叶顶处展向截面的涡量分布云图

Fig. 13 Cloud maps of vorticity distribution on spanwise section of blade tip at different oblique flow angles

3 结 论

以混流式喷水推进器为研究对象,对不同斜流工况下的喷水推进器进行数值模拟分析,得到以下结论:

(1) 随着斜流角增大,叶轮内空泡体积呈现先慢后快的增长趋势,在 40° 时为 0° 时的18倍,喷水推进器效率约下降3%。

(2) 叶轮内的空化区域主要集中在叶片吸力面进口和叶顶间隙处。随着斜流角增大,将逐渐依次影响多个叶片表面的空化分布,空化区域从叶片吸力面进口边向出口处不断发展,径向不断向轮毂侧延伸。

(3) 针对叶片2间隙区空化分布特性分析可知,随着斜流角的增大,泄漏流空化、叶顶泄漏涡空化和卷吸区空化的范围会不断扩展,发生相互干涉和混合。当 $\alpha > 20^\circ$,叶顶空化区基本呈现稳定状态。

(4) 叶顶进口附近处的空化和涡量分布发展随斜流角的变化规律具有相似性。随着斜流角的增大,叶顶进口附近处空化和高涡量分布区域沿出口方向不断发展,空化存在于涡流结构中,涡流对空化的形成具有促进作用。

参考文献:

[1] 王立祥. 喷水推进及喷水推进泵[J]. 通用机械, 2007(10):

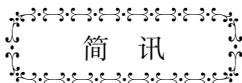
12-15.

WANG Li-xiang. Water jet propulsion and water jet propulsion pumps[J]. General Machinery, 2007(10):12-15.

- [2] 董新国,刘建国,戴原星,等.基于喷水推进理论的泵喷推进性能预报研究[J].舰船科学技术,2020,42(6):39-43.
- [3] DONG Xin-guo, LIU Jian-guo, DAI Yuan-xing, et al. Research on the prediction of propulsion performance of pump jet based on the theory of waterjet[J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(6): 39-43.
- [4] SHEN Z H, PAN Z Y. Research on axial thrust of the waterjet pump based on CFD under cavitation conditions[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2015, 72(2): 022013.
- [5] 王国玉,赵宇,余志毅.流体机械在船舶推进领域的应用及研究[J].通用机械,2012(10):42-45.
- [6] WANG Guo-yu, ZHAO Yu, YU Zhi-yi. Application and research of fluid machinery in the field of marine propulsion[J]. General Machinery, 2012(10):42-45.
- [7] WARN G P, JIN H J, HO H C, et al. Numerical flow and performance analysis of waterjet propulsion system[J]. Ocean Engineering, 2005, 32(14/15):1740-1761.
- [8] 许慧丽,邹早建.喷水推进器进流方向对流道内流场的影响数值研究[J].水动力学研究与进展,2018,33(2):181-187.
- [9] XU Hui-li, ZOU Zao-jian. Numerical study on the effects of inflow directions on the flow field in a waterjet duct[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2018, 33(2):181-187.
- [10] TAN D, LI Y, WILKES I, et al. Experimental investigation of the role of large scale cavitating vortical structures in performance breakdown of an axial waterjet pump[J]. Journal of Fluids Engineering, 2018, 140(10):101101.

- neering, 2015, 137(11): 111301.1 – 111301.14.
- [8] WU H, MIORINI R L, KATZ J. Measurements of the tip leakage vortex structures and turbulence in the meridional plane of an axial water-jet pump[J]. Experiments in Fluids, 2011, 50: 989 – 1003.
- [9] LABORDE R, CHANTREL P, MORY M. Tip clearance and tip vortex cavitation in an axial flow pump[J]. Journal of Fluids Engineering, 1997, 119(3): 680 – 685.
- [10] HUANG R, JI B, LUO X, et al. Numerical investigation of cavitation-vortex interaction in a mixed-flow waterjet pump[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015, 29 (9): 3707 – 3716.
- [11] GUO Q, HUANG X, QIU B. Numerical investigation of the blade tip leakage vortex cavitation in a waterjet pump[J]. Ocean Engineering, 2019, 187: 106170.
- [12] KRASILNIKOV V, ZHANG Z, HONG F. Analysis of unsteady propeller blade forces by RANS[C]//First International Symposium on Marine Propulsors, Trondheim, Norway, 2009.
- [13] 胡 洋,胡 健,刘亚彬. 斜流中螺旋桨的水动力性能研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2019, 43(2): 262 – 268.
HU Yang, HU Jian, LIU Ya-bin. Research on hydrodynamic performance of propeller in oblique flow[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering
- Edition), 2019, 43(2): 262 – 268.
- [14] 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.
- [15] ZWART P J, GERBER A G, BELAMRI T. A two-phase flow model for predicting cavitation dynamics[C]//5th International Conference on Multiphase Flow (ICMF 2004), Yokohama, Japan, 2004.
- [16] 刘承江,王永生,张志宏. 喷水推进器数值模拟所需流场控制体的研究[J]. 水动力学研究与进展, 2008, 23(5): 592 – 595.
LIU Cheng-jiang, WANG Yong-sheng, ZHANG Zhi-hong. Study on flow control volume in numerical simulation of waterjet propulsor [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2008, 23 (5): 592 – 595.
- [17] 张德胜,王海宇,施卫东,等. 不同空化数下轴流泵叶顶间隙区空化特性[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 115 – 121.
ZHANG De-sheng, WANG Hai-yu, SHI Wei-dong, et al. Tip clearance cavitation characteristics in axial flow pump under different cavitation numbers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 115 – 121.

(刘 颖 编辑)



GE Vernova 成功升级改造科威特 Sabiya 电厂的 4 台燃气轮机

据官方报道,科威特的电力、水利和可再生能源部门宣布,GE Vernova 成功升级改造了该地电力容量 2 GW 的 Sabiya 联合循环发电厂中的 4 台 9F.03 级燃气轮机装置。此次升级的目标是提高电力生产,增加计划维修周期之间的持续时间,推动燃料效率,降低成本及降低每兆瓦发电的二氧化碳排放量。

在与 Alghanim International 的服务协议框架下,GE Vernova 已为 Sabiya 电厂第 2 和 3 厂区的 4 台 9F.03 级燃气轮机的高级天然气通道(AGP)进行升级,并提供为期 7 年的机组供电和维修服务。根据国际能源署(IEA)的数据,科威特完全依赖化石燃料来发电,其能源需求预计到 2030 年将达到现在的 3 倍。

(孙嘉忆摘译自 <https://www.powerengineeringint.com>)