

# 侧斜与负载对螺旋桨无空化和空化水动力性能的影响

杨琼方<sup>1</sup>, 王永生<sup>1</sup>, 张志宏<sup>2</sup>

(1. 海军工程大学 船舶与动力学院, 武汉 430033; 2. 海军工程大学 理学院, 武汉 430033)

**摘要:**为了定量分析空化初始航速的影响因素,首先分析侧斜和负载对螺旋桨无空化和有空化时性能的影响。以NSRDC 4381无侧斜桨和4383 100%侧斜桨为对象,采用改进Sauer空化模型和修正SST湍流模型,对空化崩溃性能、空化初生性能和无空化时正车、倒车以及紧急倒车敞水性能进行了计算与比较。结果表明,预报两个桨的敞水性能曲线和多空化数下的空化崩溃性能曲线均与实验值吻合较好。在中度负载区间( $J=0.5\sim 0.9$ )内,侧斜对正车和紧急倒车时敞水性能以及空化时推力和力矩崩溃性能均无明显影响,但会使倒车敞水性能显著下降。在重载和轻载条件下,侧斜均能明显改善空化初生性能。侧斜一定时,负载会直接影响尾流湍流速度脉动量和涡核集中区分布,影响轴面速度流管收缩程度,进而影响无空化和有空化条件下的推进性能。

**关键词:**螺旋桨;空化初生;推力崩溃;侧斜;负载  
**中图分类号:**U664.34;O35 **文献标志码:**A

## 1 引言

螺旋桨设计的基本准则是在抑制振动和噪声的条件下尽可能提高其推进效率,在保证水动力效率的前提下尽可能地延迟空化初生和减小空化程度是实现上述准则的一个基本要求。文献[1]通过系列桨的空泡筒实验给出了“在给定的船尾伴流下,大侧斜桨的空化初始航速较无侧斜桨能够延迟约设计航速的15%的量,但侧斜程度达到50%以后不再有明显改善”的事实,但文中也表明了还无法给出完全合理的解释。文献[2,3]提出了“当 $\sigma > \sigma_c$ 时,叶梢截面压力系数分布不再改变”的空化初生数值判定法则,将螺旋桨空化性能的衡量直接与桨叶负载分布联系起来,从而为解释侧斜对空化性能的影响找到了一个具体途径。

在此基础上,本文通过对NSRDC 4383 100%侧斜桨的正车、倒车和紧急倒车敞水性能、空化引起的推力和力矩崩溃性能以及空化初生性能的模拟与分析,以及与4381无侧斜桨相应性能的比较,分析侧斜和负载对螺旋桨无空化和空化水动力性能的影响,以期能从粘性流场特征的角度回答“为何一定程度的侧斜能提高舰船空化初始航速”的难题。

## 2 空化多相流模拟数值模型

同文献[2-4],多相流模型仍采用混合物多相流模型,且在混合密度 $\rho_m$ 项中同时包含非凝结性气核NCG(Non-Condensable Gas)质量分数和体积分数的影响,混合物相组分个数 $n=3$ , $\rho_m$ 表示为

$$\rho_m = \frac{\alpha_v \rho_v + (1 - \alpha_v - \alpha_g) \rho_l}{1 - f_g} \quad (1)$$

式中 $\alpha_v$ 和 $\rho_v$ 分别为水蒸汽体积分数和密度, $\alpha_g$ 和 $f_g$ 分别为NCG体积分数和质量分数, $\rho_l$ 为水的密度。第 $i$ 相体积分 $\alpha$ 与其质量分数 $f$ 对应关系为

$$f_i = \alpha_i \frac{\rho_i}{\rho_m} \quad (i=1, \dots, n) \quad (2)$$

空化模型取为改进Sauer空化模型:

$$\begin{aligned} \dot{m}^+ &= \frac{C_{\text{prod}} 3 \alpha_g (1 - \alpha_v) \rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{|p_v - p|}{\rho_l}} \text{sign}(p_v - p) \\ \dot{m}^- &= \frac{C_{\text{dest}} 3 \alpha_v \rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{|p_v - p|}{\rho_l}} \text{sign}(p_v - p) \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $\dot{m}^+$ 和 $\dot{m}^-$ 分别代表了水蒸汽蒸发(气泡生长)和凝结(气泡溃灭)过程, $p_v$ 为水的汽化压力。蒸发和凝结经验系数分别取 $C_{\text{prod}} = 50$ 和 $C_{\text{dest}} = 0.01$ , $f_g = 1 \times 10^{-6}$ , $\alpha_g = 7.8 \times 10^{-4}$ ,气泡平均初始半径 $R_B = 1.5 \mu\text{m}$ 。与之配合使用的湍流模型取为湍流粘度 $\mu_t = \rho_m k / \omega$ 的修正SST模型。相变临界压力仍由水的汽化压力修正为

$$p_v = p_{\text{sat}} + \frac{1}{2} (0.39 \rho_m k) \quad (4)$$

收稿日期:2011-05-25;修改稿收到日期:2012-01-11.  
基金项目:国家自然科学基金(51009144)资助项目.  
作者简介:杨琼方\*(1984-),男,博士,讲师  
(E-mail: yqfhaijun2008@126.com).

以考虑湍流诱导的脉动压力会促使空化初生提前的影响作用<sup>[5]</sup>, 其中  $p_{sat}$  为修正前汽化压力,  $k$  为湍动能,  $\omega$  为湍流涡频率。

### 3 大侧斜桨推力崩溃性能模拟与校验

NSRDC 4383 桨的桨叶几何、单通道几何和六面体结构化网格生成采用程式化操作来完成, 桨叶面网格拓扑结构布置同文献<sup>[2]</sup>中预报精度最高的 G3 网格, 网格生成命令流样本来自于 DTMB 4383 桨(72° 侧斜, 船纵倾), 对桨叶导边区、随边区和叶尖区进行单独拓扑块关联和加密, 桨叶壁面周围仍采用 O 形网格进行加密以捕捉近壁面流动细节, 如图 1 所示。计算得到 NSRDC 4383 桨敞水性能与实验值比较如图 2 所示, 表明与 4381 桨同样具有很高的模拟精度。

$$J = v_{\infty} / nD, K_t = T / \rho n^2 D^4, K_q = Q / \rho n^2 D^5 \quad (5)$$

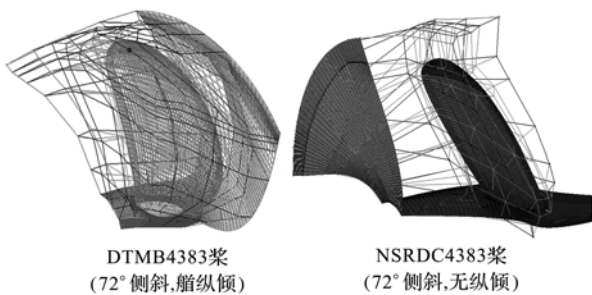


图 1 螺旋桨桨叶壁面网格及拓扑  
Fig. 1 Grid topology and blades surface mesh

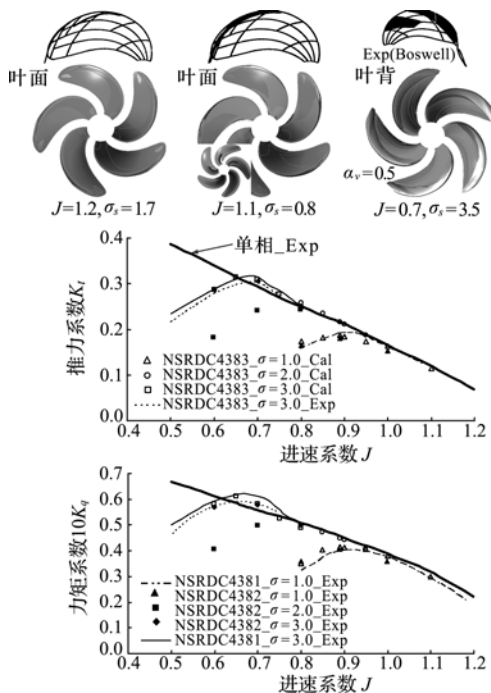


图 3 NSRDC 4383 桨空化形态和崩溃性能曲线的模拟与校验  
Fig. 3 Validation of cavity patterns and breakdown performances of NSRDC 4383 propeller

式中  $n=20$  rps 为转速,  $D=250$  mm 为直径, 均与 4381 桨模拟时相同,  $J$  为进速系数,  $T$  和  $Q$  分别为推力和力矩,  $v_{\infty}$  为来流进速。

以单相模拟的结果为初值, 加入空化模型后, 通过改变出口压力来调节基于来流速度的空化数, 以模拟螺旋桨空泡筒实验, 进而分析推力和力矩崩溃性能以及空化初生性能。计算得到 4383 桨的片空化形态和推力与力矩崩溃性能曲线如图 3 所示。从图 3 可以看出, 在多空化数及不同负载工况下, 计算推力和力矩系数均与实验值吻合较好。同时, 由图 3 中 NSRDC 4381、4382、4383 三个桨的推力和力矩系数实验值分布以及 4381 和 4383 两个桨的推力和力矩计算值可初步判断: 侧斜对空化崩溃性能影响很小。图 3 中空化数定义为

$$\sigma = (p_{out} - p_v) / 0.5 \rho_l v_{\infty}^2 \quad (6)$$

式中  $p_{out}$  为计算域出口压力。

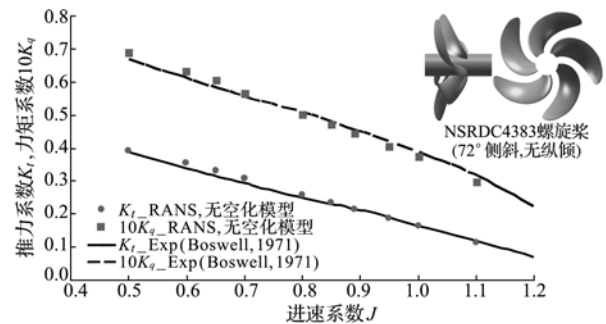


图 2 NSRDC 4383 桨敞水性能曲线模拟与校验  
Fig. 2 Validation of open water characteristics of NSRDC 4383 propeller

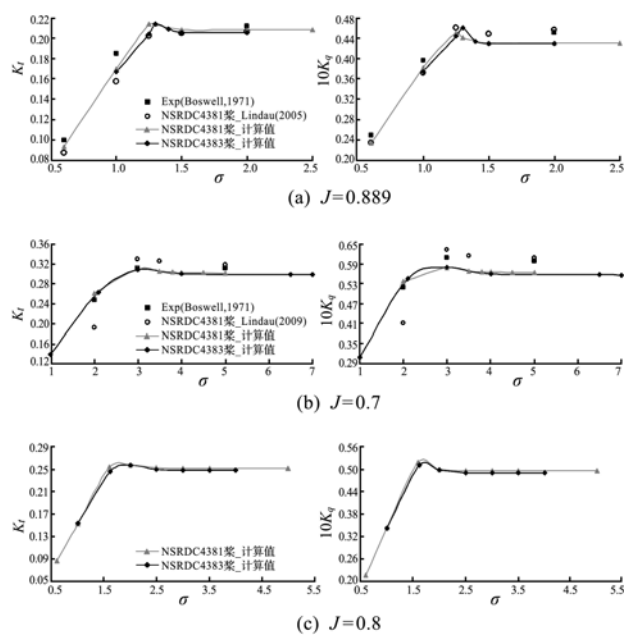


图 4 NSRDC 4381 和 4383 桨空化崩溃性能的计算与比较  
Fig. 4 Comparison of cavitation breakdown performances between NSRDC 4381 and 4383 propellers

为了证明这一结论,同时取  $J = (0.7, 0.8)$  两种重载工况以及  $J = 0.889$  设计负载,对 4381 和 4383 两个桨的空化崩溃性能进行计算和比较,结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,在不同负载下,两个桨的推力和力矩崩溃性能曲线计算值基本重合,且推力和力矩随空化数减小先小量增加后迅速下降的拐点位置,以及崩溃曲线在通过拐点后随空化程度增加的衰减斜率都相同。由此可充分说明:单纯采用侧斜并不能改善空化崩溃性能,在高转速、低航速运转条件下对大侧斜桨的操纵要求并不能较无侧斜桨低。

### 4 大侧斜桨空化初生判定与分析

大侧斜桨空化初生判定直接采用在文献[2,3]中提出的“当  $\sigma > \sigma_c$  时,叶梢截面压力系数分布不再改变”的判定法则,其可信性见文献[9]。与文献[2]分析 NSRDC 4381 桨时相同,分别计算  $J = (0.7, 0.8, 0.889)$  三种负载下的叶背空化初生和  $J = (1.1, 1.2)$  两种轻载工况下的叶面空化初生,并将两个桨进行比较。所有分析点均取于叶背空化曲线上方。限于篇幅,仅给出  $J = 0.889$  时的叶截

面压力系数分布随空化数变化的曲线,如图 5 所示。图 5 中压力系数定义为

$$C_p = (p - p_{out}) / 0.5 \rho_t v_\infty^2 \quad (6)$$

由该图得到指定叶截面的临界空化数后,将其标示于实验测得的该桨空化斗中如图 6 所示。从图 6 可以看出,预报叶截面初生空化数均与实验值吻合较好。同时,除轻载工况  $J = 1.2$  时,由 0.4R 截面和 0.9R 截面压力系数分布判断得到的初生空化数存在小的偏差 ( $\Delta\sigma_c = 0.1$ ) 外,三种中高负载下由 0.7R 截面和 0.8R 截面得到的  $\sigma_c$  以及  $J = 1.1$  时,由 0.4R 截面和 0.9R 截面得到的  $\sigma_c$  都完全相同,从而再次说明了分别采用叶背 0.7R 截面和叶面 0.4R 截面的空化初生曲线来表征叶背和叶面梢涡空化初生的合理性。将计算所得的 4381 和 4383 两个桨的空化斗图谱作于一块如图 7 所示。因叶背泡空化初生曲线仅与桨叶面积相关而与侧斜无关<sup>[1]</sup>,所以两个桨的空化斗底线相同。可以明显看出,在重载和轻载条件下,大侧斜桨较无侧斜桨均能明显延迟空化初生,且偏离设计负载越远,改善空化初生性

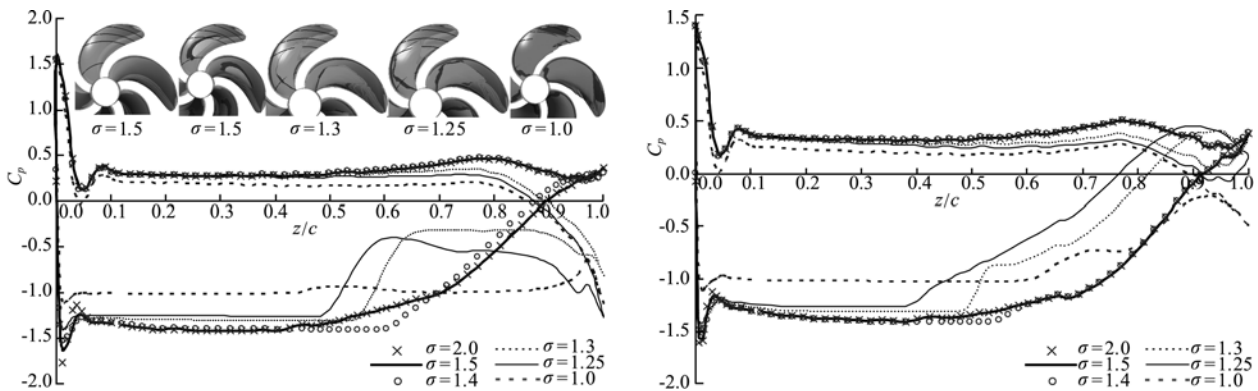


图 5  $J = 0.889$  时 4383 桨叶截面压力系数分布随空化数变化  
Fig. 5 Predicted pressure coefficients distribution versus cavitations numbers of 4383 propeller under condition of  $J = 0.889$

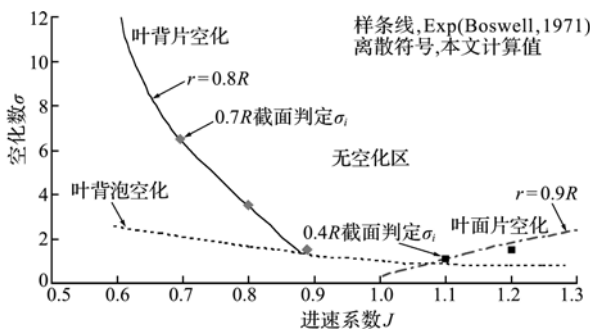


图 6 NSRDC 4383 桨叶背和叶面初生空化数的计算与校验  
Fig. 6 Validation of initial cavitation inception of both back and face sides of 4383 propeller

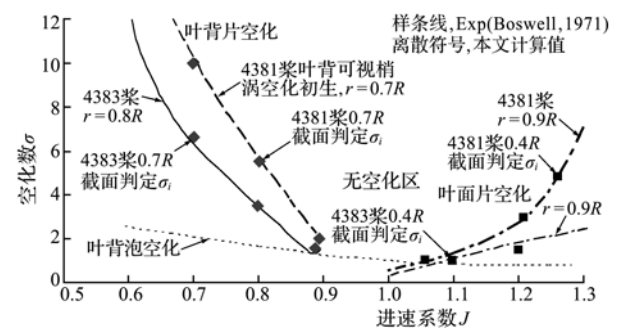


图 7 NSRDC 4381 和 4383 桨空化初生性能的计算与比较  
Fig. 7 Comparison of predicted cavitation inception performances between 4381 and 4383 propellers

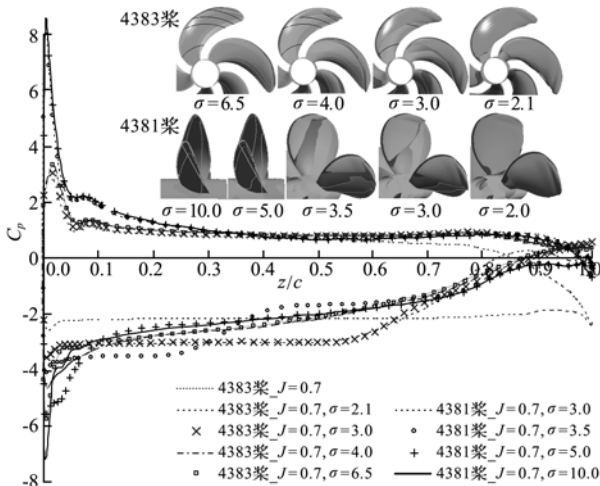


图8 4381和4383桨0.7R截面压力系数随空化数变化比较  
Fig. 8 Comparison of pressure coefficient distribution at 0.7R section between 4381 and 4383 propellers

能的效果越明显,伴流一定时对空化初始航速的提升幅度也越大。以 $J=0.7$ 为例,计算得到在相同空化数下两个桨的0.7R截面压力系数分布以及空化形态比较如图8所示。图中片空化范围以 $\alpha_0=0.5$ 表示。从图8可以看出,在无空化和空化数相近时,无侧斜桨的吸力面压力系数峰值均要明显高于大侧斜桨,且峰值变化量随空化数变化的程度也明显要剧烈,所以反应在空化斗上对应为叶背空化初生曲线更陡,斜率更大。而在设计负载附近时,采用大侧斜只能小量延迟桨叶空化初生;另一方面,侧斜一定时,随着偏离设计负载处于重载或轻载工况,叶截面的攻角变大,流动分离剧烈,两个桨的初生空化数均会提前。

## 5 侧斜和负载对无空化性能的影响

在上述分析侧斜对螺旋桨空化崩溃和空化初生性能影响的基础上,进一步从速度场的角度分析侧斜和负载对无空化和空化性能的影响,并重点分析4383大侧斜桨。在倒车和紧急倒车工况时,因桨叶截面攻角变化幅度大,对网格密度和合理布置要求很高,特别是对于靠近导边区和随边区的桨叶近壁面流动的捕捉比较关键。在模拟倒车工况时,将计算域中桨叶反转和来流速度反向的同时,外部非旋转计算域也需要轴向反向,以保证对桨叶尾流场的计算精度。在模拟紧急倒车工况时,只需要在正车模拟的计算文件中将转速设置为负值即可。4381和4383两个桨计算时均取正车 $n=20$  rps,倒车 $n=-12$  rps,紧急倒车 $n=-10$  rps。

计算得到两个桨正车、倒车和紧急倒车敞水性

能比较如图9所示。从图9可以看出,在中度负载区间,侧斜对螺旋桨正车和紧急倒车敞水性能并无显著影响,但会使倒车性能明显下降。从承受桨叶主要负载的0.7R截面压力系数分布来看,正车时峰值同时位于压力面和吸力面近导边处,且随着负载增加而增加,如图10所示(由此可解释当侧斜一定时负载增加导致叶背初生空化数提前的现象);而倒车和紧急倒车时峰值同时位于压力面和吸力面近随边处,同样随负载增加而增加,且在 $|J|$ 相同时,紧急倒车负载峰值明显比倒车时大,如图11所示。

再从桨叶周围流动的速度分布来分析负载对无空化和空化性能的影响。计算得到4383桨正车时不同运转,工况下进流面和近尾流面的周向平均速度沿径向分布规律如图12所示。图12中 $z_0$ 为桨盘面轴向位置。从图12可以看出,进流面流动加速区主要集中于 $0.3R\sim 0.5R$ 区间,但近尾流面流动加速区集中于 $0.4R\sim 0.9R$ 区间。随着负载减小,轴向速度分量加速度减小,且流动沿径向向外扩散,与流管流面收缩程度减小相一致。轻度空化和中度空化时,对进流面速度分布影响很小,但重度空化会促使进流面速度幅值显著减小,且流动加速区沿径向向外扩张。但对于近尾流面而言,因空化诱导涡核量随空化程度增加而增加,在重载和轻载的重度空化条件下,轴向速度沿径向分布均出现二次加速和减速区,且与涡核集中位置一致。重载时,涡核集中于尾流面 $0.5R$ 和 $0.7R$ 处,而轻载时,涡核集中区向外游离至 $0.7R$ 和叶梢处。

进一步计算得到4383桨倒车和紧急倒车时轴向进流面和尾流面的周向平均速度沿径向分布如图13所示。图13(a)中尾流面指 $(z-z_0)/R=0.25$ ,近进流面指 $(z-z_0)/R=-0.45$ ,远进流面指 $(z-z_0)/R=-0.64$ 。图13(b)所示进、尾流面与图12所指相同。图13中紧急倒车重载 $J=-0.5$ 时,流场起主要作用的涡环回流特征如图14所示。从图14可以看出,倒车时进流面加速区主要集中于 $0.7R$ 截面以上部位,且随着负载增加沿径向向外游离;对于尾流面速度分布的影响,因同时存在二层涡核集中区,使得沿径向分布的轴向速度存在二次加减速区,且随着负载增加,一次加速区由 $0.4R$ 向外游离至 $0.6R$ 处,二次加速区由 $0.7R$ 向外游离至 $0.8R$ 处。在紧急倒车条件下,因转速增加量迅速,对流体形成强烈的抽吸作用,使得涡环回流成为流场的主要特征。此时,在流场中形成明显的来流冲击作用

与涡环回流作用的流动分界面以及涡核集中区,且该分界面和涡核中心随负载的减小沿来流方向向下游离,使得流场中湍流速度脉动量集中区,由倒车时的尾流面沿来流方向向下游移至桨盘面处。在紧急倒车重载时,进流面与尾流面轴向速度均与来

流方向相反,且涡环回流作用于进流面的加速区位于  $0.7R$  处,作用于尾流面的加速区位于  $0.9R$  处。随着负载减小,来流冲击作用增强,进流面轴向速度与来流速度方向相同,但尾流面仍在  $0.9R$  处受涡环回流加速作用明显。

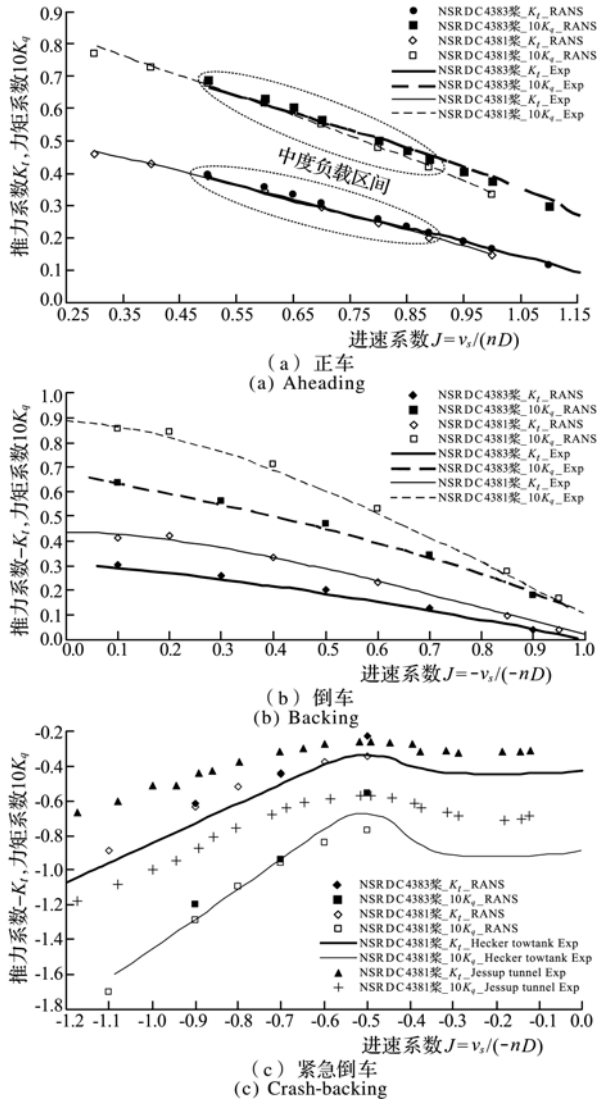


图9 NSRDC 4381 和 4383 桨敞水性能计算与比较  
Fig. 9 Comparison of open water characteristics between 4381 and 4383 propellers

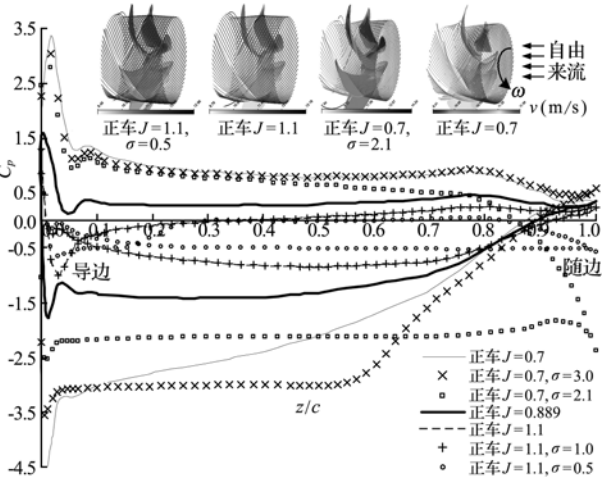
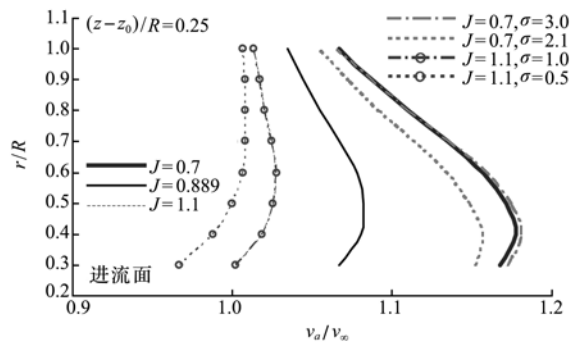


图10 NSRDC 4383 桨正车时桨叶  $0.7R$  截面压力系数分布  
Fig. 10 Predicted pressure coefficient distribution around  $0.7R$  section of 4383 propeller with aheading

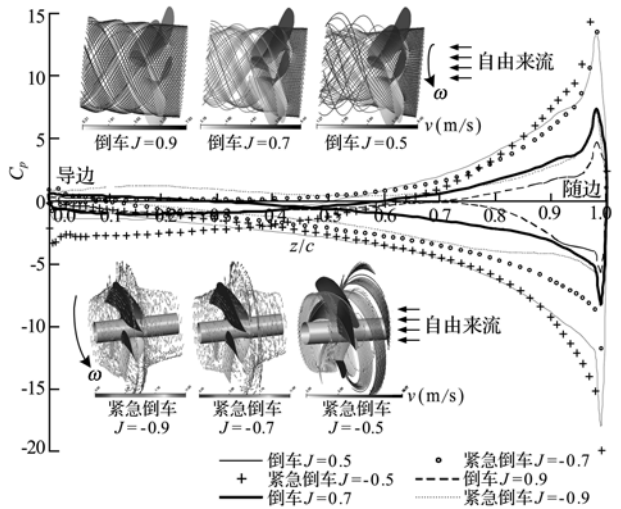


图11 NSRDC 4383 桨倒车和紧急倒车时  $0.7R$  截面负载分布  
Fig. 11 Predicted loading distribution at  $0.7R$  section of 4383 propeller under backing and crash-backing conditions

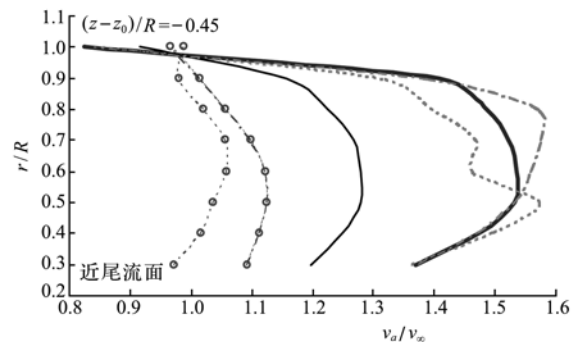


图12 4383 桨正车时进流面和近尾流面周向平均速度分布

Fig. 12 Predicted circumferential averaged velocity on incoming and near-wake cross planes of 4383 propeller with aheading condition

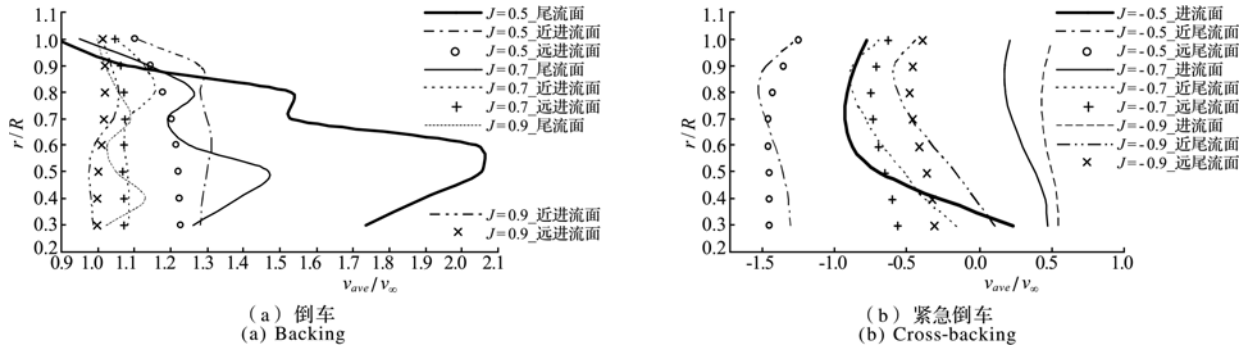


图 13 4383 桨进流面和尾流面周向平均速度分布  
Fig. 13 Predicted circumferential averaged velocity on incoming and wake cross planes of 4383 propeller

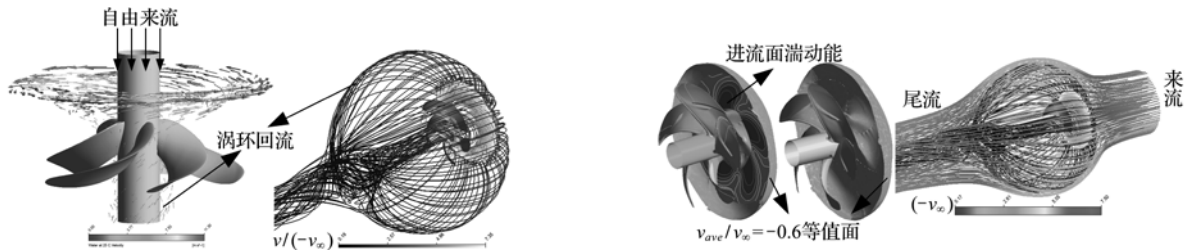


图 14 4383 桨紧急倒车重载  $J = -0.5$  时涡环回流特征

Fig. 14 Simulated vortex ring re-entranced streamlines under crash-backing condition of  $J = -0.5$  with heavy loading of 4383 propeller

## 6 结论

通过对 NSRDC 4383 大侧斜桨空化时推力和力矩崩溃性能以及空化初生性能模拟与分析,得到了在中度负载区间内( $J = 0.5 \sim 0.9$ ),侧斜对螺旋桨正车和紧急倒车敞水性能均无明显影响,但会使倒车敞水性能明显下降;在设计和非设计进速系数下,侧斜对推力和力矩崩溃性能均无明显影响;在重载和轻载条件下,侧斜均能明显改善螺旋桨空化初生性能;在侧斜一定时,负载会直接影响螺旋桨尾流、湍流速度脉动量和涡核集中区分布,影响轴向速度流管收缩程度,进而影响无空化和空化条件下的推进性能。

## 参考文献(References):

[1] Cumming R A, Morgan B, Boswell R J. Highly skewed propellers[J]. *SNAME Transactions*, 1982, **90**:98-135.  
 [2] 杨琼方,王永生,张志宏.螺旋桨空化初生的判定和空化斗的数值分析[J]. *上海交通大学学报*, 2012, **46**(3): 410-416. (YANG Qiong-fang, WANG Yong-sheng, ZHANG Zhi-hong. Determination of propeller cavitation initial inception and numerical analysis of the inception bucket[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2012, **46**(3): 410-416. (in Chinese))  
 [3] 杨琼方,王永生,张志宏.非均匀进流对螺旋桨空化水动力性能的影响[J]. *水动力学研究与进展(A辑)*, 2011, **26**(5): 538-550. (YANG Qiong-fang, WANG

Yong-sheng, ZHANG Zhi-hong. Effects of non-uniform inflow on propeller cavitation hydrodynamics [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2011, **26**(5): 538-550. (in Chinese))

- [4] 杨琼方,王永生,张志宏.螺旋桨叶截面空化模拟数值模型的改进与评估[J]. *北京理工大学学报(自然科学版)*, 2012, **31**(12): 1401-1407. (YANG Qiong-fang, WANG Yong-sheng, ZHANG Zhi-hong. Improvement and evaluation of numerical model for viscous simulation of cavitating flow around propeller blade section [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2012, **31**(12): 1401-1407. (in Chinese))  
 [5] Singhal A K, Athavale M M, Huiying Li, et al. Mathematical basis and validation of the full cavitation model[J]. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 2002, **124**:617-624.  
 [6] Boswell R J. Design, Cavitation Performance and Open-water Performance of a Series of Research Skewed Propellers, Report No. 3339[R]. Washington D. C.: Naval Ship Research and Development Center, 1971.  
 [7] Lindau J W, Boger D A, Medvitz R B, et al. Propeller cavitation breakdown analysis[J]. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 2005, **127**:995-1002.  
 [8] Lindau J W, Moody W L, Kinzel M P, et al. Computation of cavitating flow through marine propulsors [A]. *First International Symposium on Marine Propulsors*. Norway[C]. Norwegian Marine Technology Research Institute, 2009.  
 [9] 杨琼方.潜艇流噪声和推进器噪声的数值预报和分析[D]. *海军工程大学*, 2012.

## Effects of skew and load on propeller non-cavitation and cavitation hydrodynamic performances

YANG Qiong-fang<sup>\*1</sup>, WANG Yong-sheng<sup>1</sup>, ZHANG Zhi-hong<sup>2</sup>

(1. School of Naval Architecture and Marine Power, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. School of Science, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** Effects of skew and load on propeller non-cavitation and cavitation hydrodynamic performances were presented to quantitative analysis of the effects on cavitation inception speed. Exactly, the cavitating breakdown performances, cavitation inception characteristics, and the forward, backward and crashbacking open water performances under non-cavitation conditions of both NSRDC4381 no skew propeller and 4383 100% skewed propeller were simulated with improved Sauer cavitation model and modified shear stress transport turbulence model. Results show that calculated open water performances and thrust and torque coefficients versus advance ratio over a range of cavitation indices for both of the two propellers are all got successful validation against experiment. The effects of skew on forward and crashback open water performances and cavitating breakdown characteristics are negligible over the range of moderately loads ( $J=0.5\sim 0.9$ ), but substantially declines the backward performances. Under heavy and light loading conditions, the skew can both elevate the inception performances significantly. Given the skew, the load will directly influence the wake turbulent velocity fluctuation and vortex center, and the axial velocity streamtube shape, so to the non-cavitation and cavitation propulsion performances.

**Key words:** propeller; cavitation initial inception; thrust breakdown; skew; load

~~~~~  
(上接第 752 页)

## Analysis wave-like disturbance of coupling vibration characteristic of HVAS droplets

CHEN Bin<sup>\*</sup>, LIU Ge

(Engineering Research Centre for Waste Oil Recovery Technology and Equipment,

Ministry of Education, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

**Abstract:** Vibration characteristics of molten metal droplets are the decisive effects to performances of high velocity arc sprayed coating, but it is hardly to test the dynamic action of liquid droplets owing to the limitation of experimental technique. Though it established the sprayed gas and liquid droplet coupling vibration system of equations based on wave-like disturbance, numerical solutions for the governing equation, a fastest-growing wave number is derived. Comparing of predicted fastest-growing wave number and data of Bradley, the deviation within the  $\pm 2\%$  limits, its efficiency is validated to the gas liquid droplet coupling vibration system of equations. Using the coupling vibration system of equations, analyzed the effects of different gas type, different gas velocity and different molten metal type to vibration characteristics of HVAS droplets. The results show that  $N_2$  gas is better selected as sprayed gas, adhesive strength of the spraying coating increase with an increase in the gas velocity, thereby provides theoretical evidence for choice of spraying materials and control processing parameters of HVAS.

**Key words:** HVAS droplets; wave-like disturbance; coupling vibration; vibration characteristics