

## 耦合升沉运动的七叶侧斜螺旋桨空泡性能研究<sup>\*</sup>

齐江辉, 吴述庆, 郭翔, 郑亚雄, 陈强

(武汉第二船舶设计研究所, 湖北 武汉 430064)

**摘要:** 为建立有效的预报耦合升沉运动的螺旋桨空泡性能的方法, 并基于该方法分析升沉运动对螺旋桨空泡性能的影响, 基于RANS方法对耦合升沉运动的七叶侧斜螺旋桨的空泡性能进行了数值模拟, 螺旋桨的升沉和旋转运动耦合采用自定义运动方程实现, 其中升沉运动简化为简单正弦函数。非定常流场中网格和物理信息的传递采用重叠网格技术实现。将非定常流动中螺旋桨(DTMB 4381)的空泡计算结果与试验结果及现象进行了对比, 验证了数值计算模型的准确性。计算中对不同升沉运动周期下的螺旋桨非定常推力及扭矩系数进行了分析, 同时对螺旋桨的空泡性能进行了实时监测。计算结果显示, 升沉运动使螺旋桨的推力和扭矩系数的非定常特性更加明显, 同时导致螺旋桨各叶片上的空泡分布不均匀; 升沉运动周期越小, 上述现象越明显。同时较小升沉运动周期时, 推进系数和空泡面积均为周期性变化, 其变化周期均为升沉运动的1/2, 螺旋桨空泡面积最小值较无升沉运动时增大约17%, 空泡面积最大值则增大约57%。

**关键词:** 重叠网格; 七叶螺旋桨; 升沉运动; 空泡性能

中图分类号: TJ610.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2020) 02-0461-08

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 190242

## Numerical Simulation of a Seven-Blade Propeller with Skew on Its Cavitation Performance Coupled with Heave Motion

QI Jiang-hui, WU Shu-qing, GUO Xiang, ZHENG Ya-xiong, CHEN Qiang

(Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430064, China)

**Abstract:** In order to establish an effective method to predict cavitation characteristics of the seven-bladed propeller coupled with heave motion, a numerical simulation of cavitation performance was conducted for a seven-blade propeller with skew impacted by coupled heave motion using RANS method. Then the effects of heave motion of the propeller on its cavitation performance are analysed. The coupled heave and rotate motion of propeller was fulfilled using user-defined equations. The heave motion was simplified as a simple sinusoidal function. The overset grid approach was used to transmit physis and mesh information in the unsteady flow field. The validation studies of the DTMB 4381 propeller for unsteady cavitation flow are presented, and the calculation results are in acceptable agreement with the experimental results and observations. The unsteady thrust and torque coefficient in different heave motion period were analyzed. Also, the cavitation performance of the propeller was recorded in time. The results indicated that the unsteady characteristics of thrust and torque coefficient was intensified due to the heave motion and it also led to the non-uniform distribution of cavitation on the propeller. A

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2019-04-22; 修订日期: 2019-07-10。

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (2017YFC0307801)。

通讯作者: 齐江辉, 硕士, 工程师, 研究领域为舰船总体推进与节能技术。E-mail: qijianghui1028@163.com

引用格式: 齐江辉, 吴述庆, 郭翔, 等. 耦合升沉运动的七叶侧斜螺旋桨空泡性能研究[J]. 推进技术, 2020, 41(2): 461-468. (QI Jiang-hui, WU Shu-qing, GUO Xiang, et al. Numerical Simulation of a Seven-Blade Propeller with Skew on Its Cavitation Performance Coupled with Heave Motion [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41 (2) : 461-468.)

smaller heave period results in a severe unsteady characteristics and non-uniform cavitation distribution. The thrust and torque coefficient and sheet cavitation area change periodically and both the change cycle is one-half of the heave movement as the heave period is small. The minimum area of the propeller cavitation is about 17% higher and the maximum area is about 57% higher than without heave motion.

**Key words:** Overset grid; Seven blade propeller; Heave motion; Cavitation performance

## 1 引言

随着近年来各种舰艇不断向高速化和大型化发展,螺旋桨的空泡性能得到越来越多的关注。螺旋桨空泡的生成及溃灭过程对螺旋桨叶片表面产生剥蚀,同时该过程产生的激振力会导致螺旋桨的强烈震动,严重的会影响船桨的配合效率。同时螺旋桨的空泡是舰艇噪声的重要来源,对于军用舰艇的隐蔽性能有重要影响。通常研究螺旋桨是考虑其在定常或非定常流动中仅做旋转时的水动力特性,而随着计算条件的不断进步,对于模拟真实条件下(随船体升沉、纵摇等)的螺旋桨水动力特性等需求被进一步提出。

螺旋桨的空泡问题,国内外都开展了许多研究。空泡的研究方法也从最初的自由线理论、薄翼理论<sup>[1-3]</sup>发展到势流理论中的升力面<sup>[3]</sup>、面元法<sup>[4]</sup>等理论,得到了许多有价值的结论<sup>[5-7]</sup>,如在每一步计算中均用 Kutta 条件封闭方程,提高了数值求解精度,同时建立了成熟的面元法预报螺旋桨非定常空泡形状的模型,在螺旋桨水动力性能预报方面提供了大量的资料。然而无论是升力面法还是面元法都忽略了流体的粘性,即使面元法采用基于经验及试验结果的尾涡模型,但对数值模拟精度仍有一定影响。而基于粘性流体理论的 CFD 方法由于可以精确模拟空泡的生成及脱落过程而越来越多地应用在螺旋桨空泡性能的研究中,螺旋桨空泡的脱落等是非常复杂的粘性問題,应用势流理论是无法求解的,而 CFD 技术预报空泡可以精细地模拟桨叶表面的流场以及空泡的生成及脱落过程。Morgut 等对比了三种空泡模型 Zwart 模型、FCM 模型、Kunz 模型对螺旋桨空泡形态的影响<sup>[8]</sup>;Liu 采用 FCM 模型对螺旋桨空泡性能进行了预报,其预报的空泡形态与试验结果对比吻合良好,验证了模型的准确性<sup>[9]</sup>。螺旋桨具有升沉、纵摇运动等耦合运动的模拟方面,由于其数值处理相对繁琐,对计算精度要求较高,国内在这方面的有关研究较少。国外对这方面的研究如:Politis<sup>[10]</sup>采用面元法计算了定常和非定常状态下船舶螺旋桨在升沉运动状态下的水动力性能,得到了较准确的桨叶压力

及尾涡结果;Kinnas 等<sup>[11]</sup>基于边界元法和涡格法对具有升沉运动的螺旋桨非定常性能进行了计算,其计算结果与别人数值计算结果吻合良好。而在考虑空化流中螺旋桨具有升沉运动的性能计算的研究则很少。

本研究基于 VOF 两相流模型结合 SST(Menter)  $k-\omega$  湍流模型,通过自定义螺旋桨旋转及升沉的耦合运动方程并采用重叠网格方法对非定常流场中的网格及物理信息进行传递,对空化流中具有升沉运动的七叶侧斜螺旋桨的空泡性能进行了数值模拟。对具有不同升沉运动周期的螺旋桨推力及扭矩非定常特性进行了分析,研究了螺旋桨叶片空泡形状的不规则分布规律。该计算结果可为七叶侧斜螺旋桨的设计提供一定的理论参考依据。

## 2 理论基础

### 2.1 湍流模型

本文空泡流数值模拟中采用的湍流模型为  $k-\omega$  两方程模型。在两方程湍流模型中, $k-\varepsilon$  模型可以较好地模拟远场充分发展的湍流流动,而  $k-\omega$  模型则更适用于各种压力梯度下的边界层问题。Menter 提出的 SST(Menter)  $k-\omega$  湍流模型则结合了两种模型的特点,是一种工程上得到广泛引用的混合模型,在近壁面保留了原始  $k-\omega$  模型,在远场处采用  $k-\varepsilon$  模型。SST(Menter)  $k-\omega$  湍流模型的方程组可以写为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}) + G_k - Y_k + S_k \quad (1) \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) &= \\ \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (2) \end{aligned}$$

式中  $G_k$  表示湍动能;  $G_\omega$  是  $\omega$  方程产生的;  $u_i$  为速度分量;  $\Gamma_k$  和  $\Gamma_\omega$  分别为  $k$  与  $\omega$  的有效扩散项;  $Y_k$  和  $Y_\omega$  分别为  $k$  与  $\omega$  的发散项;  $D_\omega$  为正交发散项;  $S_k$  和  $S_\omega$  为自定义源相。

### 2.2 Schnerr-Sauer 空化模型

计算空泡需要设置两相之间的关系,即空化模型。Schnerr-Sauer 空化模型是 Rayleigh-Plesset 方程的简化形式,其忽略了空泡生成的加速、粘性以及表

面张力的影响。蒸汽相质量分数的输运方程如下

$$\frac{\partial(\rho f_v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j f_v)}{\partial x_j} = R_e - R_c \quad (3)$$

式中  $\rho$  为混合介质密度,  $R_e$  为气泡增加质量,  $R_c$  为气泡减少质量,  $f_v$  为蒸汽的质量分数, 下标  $v$  代表蒸汽。

空泡成长速度通过以下方程控制

$$v_r^2 = \frac{2}{3} \left( \frac{p_{\text{sat}} - p}{\rho_l} \right) \quad (4)$$

式中  $v_r$  为空泡成长速度,  $p_{\text{sat}}$  为饱和蒸汽压力, 设置为 3.17034kPa,  $p$  是周围流体的压力,  $\rho_l$  是流体密度。式(4)是于惯性、粘性影响和表面张力影响有关的 Rayleigh-Plesset 方程的简化形式。对于大多数实际应用而言, 粘性和表面张力的影响是可以忽略的<sup>[12]</sup>。

2.3 重叠网格方法

采用重叠网格计算时, 将计算区域分为重叠网格区域和背景网格区域。重叠网格区域的边界为重叠网格边界条件, 通过重叠网格边界与背景网格之间进行插值实现两套网格之间的数值传递。重叠网格计算的关键在于重叠网格区域与背景网格区域在进行数据交换时的插值精度, 因此在划分网格时尽量保证两套网格交叉区域部分的网格尺寸基本一致。本文重叠网格划分结果如图 1 所示。文献[13-15]对重叠网格技术的应用有较为详细的介绍。

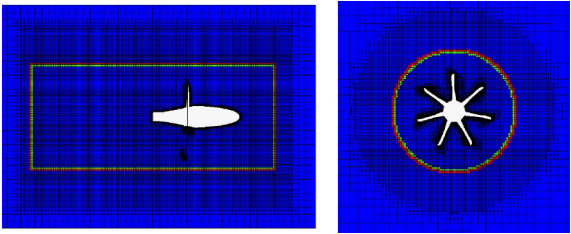


Fig. 1 Sketch of overset mesh grid

3 数值计算及分析

3.1 数值方法验证

为验证本文中螺旋桨空泡数值计算模型的准确性, 选取与泰勒水池提供的 DTMB4381 标准桨模型试验相同的试验参数进行数值模拟。表 1 为 DTMB4381 标准桨模型的主要参数<sup>[16]</sup>。其中,  $A_E$  为螺旋桨伸张面积,  $A_0$  为螺旋桨盘面积,  $D$  为螺旋桨直径。

为合理模拟螺旋桨运动特性, 本文计算域为圆柱形计算域, 计算域进口与桨盘面距离为  $5D$ , 出口与桨盘面距离为  $13D$ , 计算域外径距叶梢距离为  $3D$ 。

本文计算采用滑移网格方法模拟螺旋桨旋转运动, 因此计算域分为近场旋转域及远场静止域, 近场旋转域也为圆柱形, 其直径较螺旋桨稍大。其中旋转域和静止域网格划分基本尺寸相同, 均为 20mm, 不同的是由于远场区域对螺旋桨流场计算影响较小, 因此静止域边界表面网格尺寸较大。在旋转域与静止域之间设置交界面边界, 分别设置使得交界面内外两侧的一层网格大小完全一致, 以保证静止域与旋转域之间数值传递的准确性。静止域网格由交界面表面向远场边界逐渐增大, 其面网格增长率设置为 1.2。计算域尺寸及边界条件设置示意图如图 2 所示。

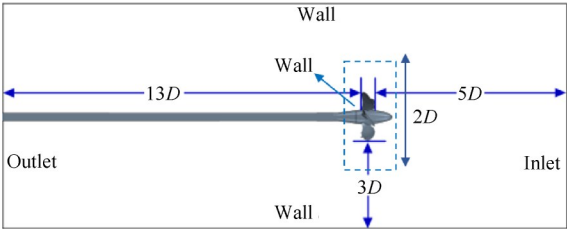


Fig. 2 Definition of calculation zone and boundary conditions

Table 1 Main parameters of propeller DTMB4381

| Parameter            | Value          |
|----------------------|----------------|
| Diameter $D$ /mm     | 304.8          |
| Number of blades $N$ | 5              |
| Area ratio $A_E/A_0$ | 0.725          |
| Shape of profile     | NACA66 $a=0.8$ |
| Hub diameter ratio   | 0.2            |

进行 CFD 数值分析时需要对网格收敛性进行研究<sup>[17]</sup>, 本文中选用满足一定细化率要求的三套网格用于网格收敛性分析, 三组网格分别为 Mesh A, Mesh B 和 Mesh C, 网格划分尺寸参数选取如表 2 所示, 其中  $D$  为螺旋桨直径。选取与试验中相同的工况, 进速  $V_0=3.048\text{m/s}$ , 转速  $n=14.28\text{r/min}$ , 模拟非定常工况下螺旋桨推力系数和转矩系数与试验值的对比如表 3 所示。从表中可以看出, 随着网格数量的增加, 推力系数和转矩系数与试验值的差别逐渐减小, 采用 Mesh C 时推力系数和转矩系数与试验值的差别分别为 1.97% 和 0.56%, 已经完全满足工程需要。

图 3 为进速系数  $J=0.7$ , 空泡数  $\sigma=3.5$  时三种网格下的螺旋桨空泡性能, 空泡数定义可参见文献[16]。图 4(a) 为 Boswell 进行空泡试验的观察结果, 其中黑色区域代表发生空化的位置, 图 4(b) 为 Kim 的数值计算结果<sup>[18]</sup>, 其中白色区域为发生空化的位置。将

Table 2 Parameters of grid

| Item   | Base size | Reference size of blade | Thickness of first boundary layer | Mesh number |
|--------|-----------|-------------------------|-----------------------------------|-------------|
| Mesh A | 4.0%D     | 0.4%D                   | 0.1%D                             | 1546358     |
| Mesh B | 2.0%D     | 0.2%D                   | 0.05%D                            | 3165897     |
| Mesh C | 1.0%D     | 0.1%D                   | 0.025%D                           | 6502315     |

Table 3 Comparison of  $K_T$  and  $K_Q$  with experimental results

| Parameter           | $K_T$  | $10K_Q$ | $\Delta K_T$ | $\Delta 10K_Q$ |
|---------------------|--------|---------|--------------|----------------|
| Experimental result | 0.2890 | 0.5560  | —            | —              |
| Mesh A              | 0.2805 | 0.5505  | 2.94%        | 0.99%          |
| Mesh B              | 0.2819 | 0.5514  | 2.46%        | 0.83%          |
| Mesh C              | 0.2833 | 0.5529  | 1.97%        | 0.56%          |

本文数值计算结果与试验值进行对比可以发现,上述三种网格的空泡计算结果与试验值基本一致,与 Kim 数值计算结果吻合度更高,同时需要注意计算空泡与试验结果在尺度上存在一定偏差,产生这种偏差的原因在文献[19]中做了解释,并认为采用 CFD 方法计算螺旋桨空泡性能是比较成熟的。在表 3 水动力性能计算结果中,可以看出 Mesh B 和 Mesh C 与试验结果更为一致,而 Mesh A 空泡结果则差别略大。综合全湿流模拟与空泡模拟结果,认为采用 Mesh C 网格计算能够保证水动力性能和空泡性能的误差最小,上述网格划分尺寸参数均参照螺旋桨直径,采用上述 Mesh C 网格划分方法进行七叶螺旋桨计算,在满足  $Y^+$  值等数值要求的情况下 ( $60.9 < Y^+ < 297.1$ ),也可满足工程精度要求,如图 5 所示。

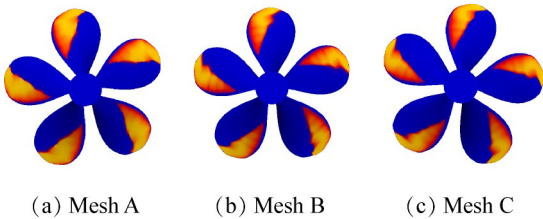


Fig. 3 Cavitation results of different mesh scale

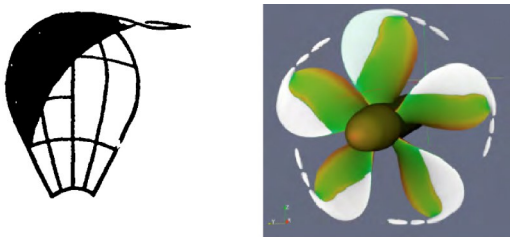


Fig. 4 Cavitation results of experiment and numerical simulation

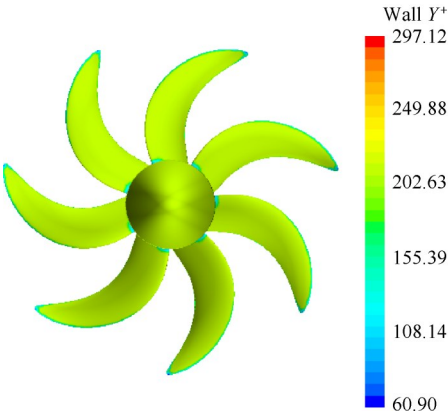


Fig. 5 Wall  $Y^+$  of the seven blade propeller at  $t=0$

3.2 耦合升沉运动计算工况

用于计算的螺旋桨为七叶侧斜螺旋桨,该型七叶侧斜螺旋桨设计参数如表 4 所示,  $R$  为螺旋桨半径。选取的设计工况为设计点附近进速系数  $J=0.7$ , 空泡数  $\sigma=3.5$ 。

Table 4 Main parameters of a seven-bladed propeller

| Parameter              | Value |
|------------------------|-------|
| Diameter $D/\text{mm}$ | 485   |
| Number of blades $N$   | 7     |
| Area ratio $A_E/A_0$   | 0.7   |
| Pitch at $r=0.7R$      | 0.5   |
| Hub diameter ratio     | 0.226 |

本文将螺旋桨的升沉运动简化为正弦运动

$$z(t) = A \sin(\omega(t - \Delta t)) \tag{5}$$

式中  $z$  为螺旋桨升沉运动的位移;  $A$  为螺旋桨升沉运动的幅值, 取为  $A=D/4$ ;  $\omega = 2\pi/T_h$ ,  $T_h$  为螺旋桨升沉运动的周期;  $\Delta t$  为计算设置的缓冲时间, 即在缓冲时间内螺旋桨无升沉运动仅有转动。本文选取螺旋桨升沉运动周期分别为  $T_h=1.0\text{s}$  和  $T_h=0.2\text{s}$  两种工况进行计算。图 6 为螺旋桨升沉运动的位移时历曲线, 对升沉运动中的 4 个典型运动节点进行重点监测。

在进行耦合升沉运动计算前, 首先给出相同计算工况下无升沉运动时七叶侧斜螺旋桨的各项性能

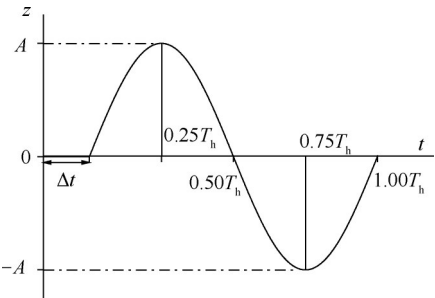


Fig. 6 Diagram of the propeller heave motion

计算结果如表 5 所示,各项计算结果均取计算稳定后平均值。

Table 5 Calculated results with no heave motion

| Item                                 | Calculated result |
|--------------------------------------|-------------------|
| $K_T$                                | 0.139             |
| $K_Q$                                | 0.0291            |
| Sheet cavitation area/m <sup>2</sup> | 0.055             |

3.3 升沉运动对推进系数影响

在图 6 中给出了螺旋桨升沉运动规律示意图,参照图中重点标注了升沉运动的四个典型运动节点,后续计算中将监测螺旋桨在不同升沉运动周期时在每个运动节点时的推力、扭矩及空泡特性的变化规律。图 7 给出了空化流中不同升沉运动周期时螺旋桨推力系数及扭矩系数的时间历程曲线,为对比各个时间点时的升沉运动位置与推进系数,图中虚线为升沉运动时历曲线,图中曲线取计算稳定段( $t=1$ s 之后)。从图中可以明显地看出两种升沉运动周期下推进系数和扭矩系数都存在明显的脉动特性,这是由于空泡流中螺旋桨桨叶表面时刻伴随着空泡的初生、成长、溃灭过程,这个过程中会在桨叶表面产生强烈的压力脉动。对比两种升沉运动周期下的推进系数可以发现,在升沉运动周期为  $T_h=0.2$ s 时,螺旋桨推力系数和扭矩系数均呈现一种周期性运动特

点,其变化规律与升沉运动类似,呈现类正弦曲线变化规律;而当螺旋桨升沉运动周期为  $T_h=1.0$ s 时,螺旋桨推进系数和扭矩系数则相对稳定,在某一特定值附近上下波动且波动幅度较小。分析上述现象,两种周期下升沉运动最大幅值相同,在相同单位时间内小周期升沉运动幅度更大,其运动速度变化更快,而大周期运动则更加迟缓,可以推断当升沉运动周期无限大时,螺旋桨的升沉运动则可以忽略不计。同时观察图中推力系数和扭矩系数的变化规律,可以看出当升沉运动周期为  $T_h=0.2$ s 时,推力系数和扭矩系数变化的周期基本为升沉运动周期的 1/2,这是由于在不考虑水深变化导致压力变化的情况下,螺旋桨受到的非定常力和扭矩是相对升沉运动平衡位置对称的,即在一个升沉运动周期内螺旋桨的非定常力和扭矩变化了两个周期。进一步观察可以看出升沉运动周期为  $T_h=1.0$ s 时的推力系数和扭矩系数均与表 5 中无升沉运动结果十分接近,而升沉运动周期为  $T_h=0.2$ s 时的推力系数和扭矩系数则基本为峰值时,接近无升沉运动结果,这表明升沉运动使得螺旋桨的推进性能有所下降。 $T_h=0.2$ s 时的最小推力系数较无升沉运动时降低约 40%。

3.4 耦合升沉运动的桨叶速度多角形解析

桨叶处的速度分布通常可通过桨叶剖面处的速度多角形展示,如图 8 所示。其中  $V_0$  为螺旋桨进速,

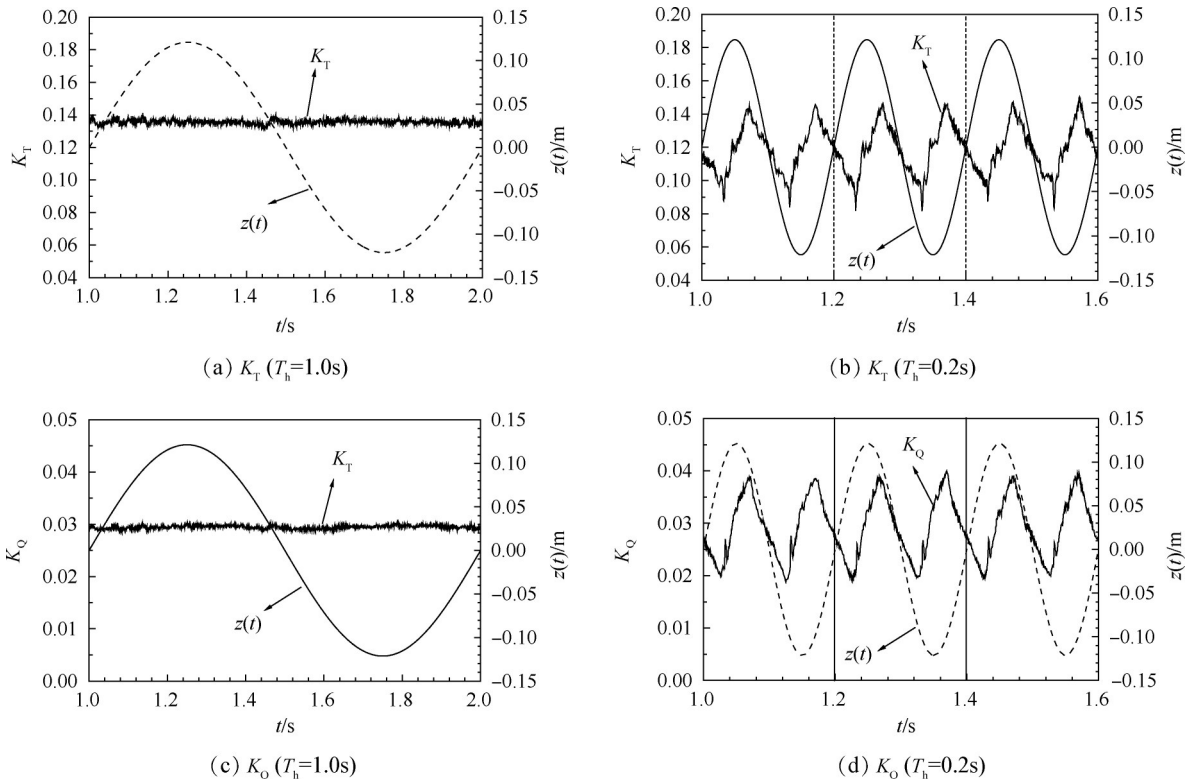


Fig. 7 Time history of thrust and torque coefficient with different heave motion period

$2\pi rn$  为半径  $r$  处的旋转线速度,  $U_0$  为合速度,  $\beta_0$  即为半径  $r$  处桨叶剖面的攻角,  $\theta$  则为半径  $r$  处桨叶剖面的螺距角。

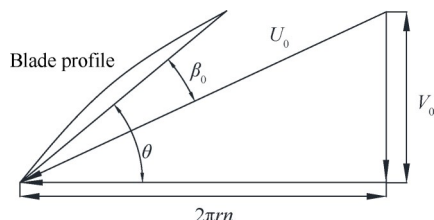


Fig. 8 Velocity polygon of blade profile

在螺旋桨具有升沉运动时,从桨叶速度多角形上可以看作是在原有运动的基础上加入升沉运动速度分量,如图9所示。其中  $V$  为螺旋桨升沉运动速度,即式(5)中对时间求导数,随时间变化而变;  $\alpha$  定义如图9(a),升沉运动对桨叶剖面速度多角形的影响即为图中  $V\cos\alpha$ 。  $U$  为考虑螺旋桨升沉运动后的半径  $r$  处桨叶剖面合速度,  $\beta$  为实际桨叶剖面速度攻角。图9(b)中桨叶剖面速度多角形以图9(a)中阴影桨叶  $r$  处剖面为例,可以看出由于升沉运动提供的速度贡献使得桨叶剖面的攻角以及合成速度大小较无升沉运动时增大;可以推断,在图9(a)右下角所示桨叶剖面处的攻角及合成速度大小均较无升沉运动时减小。由此可以得出结论:在  $\alpha=0^\circ$  时,桨叶剖面攻角及合成速度大小最小;在  $\alpha=180^\circ$  时,桨叶剖面攻角及合成速度大小达到最大;其变化规律为  $\alpha=0^\circ\sim180^\circ$  过程为由最小值变为最大值过程,  $\alpha=180^\circ\sim0^\circ$  过程为由最

大值变为最小值过程。而上述结论对应螺旋桨升沉运动为下沉运动时,当螺旋桨升沉运动为上升运动时上述结论则相反。

### 3.5 升沉运动对桨叶空泡性能影响

通过3.4节中升沉运动对桨叶速度多角形的分析并结合速度与空泡数的关系可知,螺旋桨下沉运动过程中,  $\alpha=0^\circ$  时空泡数最大,空化程度最轻,  $\alpha=180^\circ$  时空泡数最小,空化程度最严重。图10和图11中分别给出了  $T_h=0.2s$  和  $T_h=1.0s$  时的各典型运动时刻螺旋桨表面空泡形态图。分析图10中,在  $t=0.25T_h$  和  $t=0.75T_h$  时螺旋桨均处于升沉运动的最远端,螺旋桨升沉运动速度为0,此时螺旋桨各叶片表面空泡分布比较均匀;而在  $t=0.5T_h$  和  $t=1.0T_h$  时螺旋桨处于升沉运动的“平衡位置”处,螺旋桨升沉运动速度为整个运动周期的最大值,此时螺旋桨各叶片表面空泡分布差异很大。图中结果与上节中结论吻合,即  $t=0.5T_h$  时刻螺旋桨为下沉运动,此时  $\alpha=0^\circ$  位置空化程度最轻;  $t=1.0T_h$  时刻螺旋桨为上升运动,此时  $\alpha=0^\circ$  位置空化程度最严重。在图11中,可以看出各个时刻螺旋桨各叶片表面的空泡形态差异不大,结合上节中分析结论,这是由于在同等运动幅度下螺旋桨升沉运动周期较大时,其在各个运动节点处的升沉速度要小很多,因此升沉运动对空泡性能的影响也相应小很多。

图12给出了空化流中不同升沉运动周期时螺旋桨桨叶表面片空泡面积时间历程曲线,图中曲线取计算稳定段。图12(a)中可以观察到桨叶空泡面积

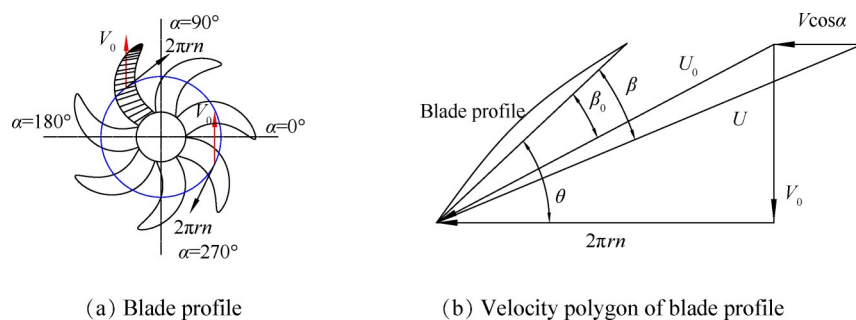


Fig. 9 Hydrodynamic analysis of blade profile with heave motion

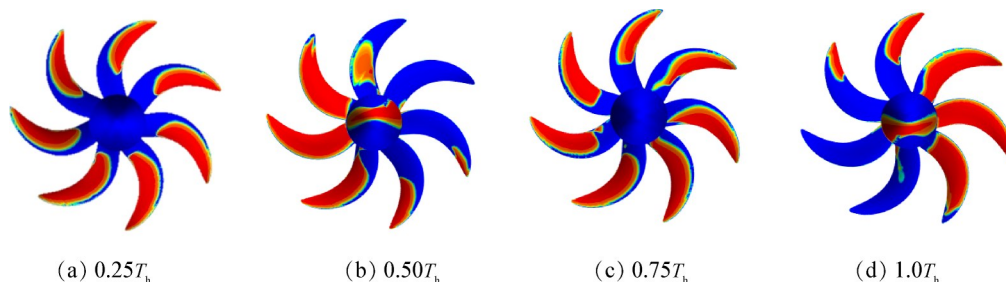


Fig. 10 Cavitation shape of typical movement moments ( $T_h=0.2s$ )

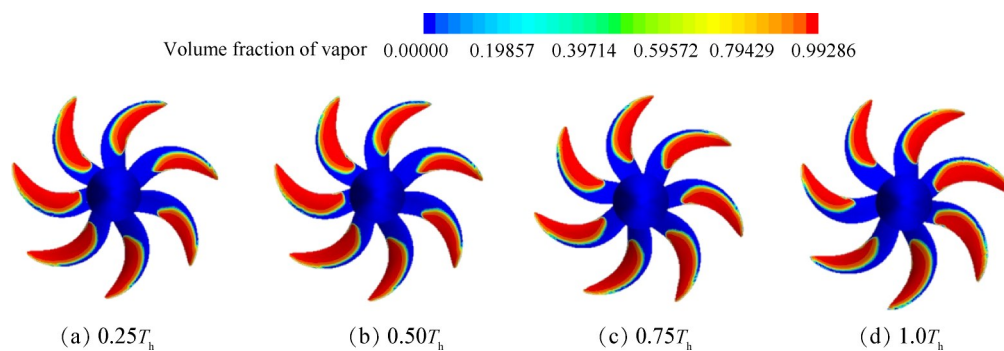
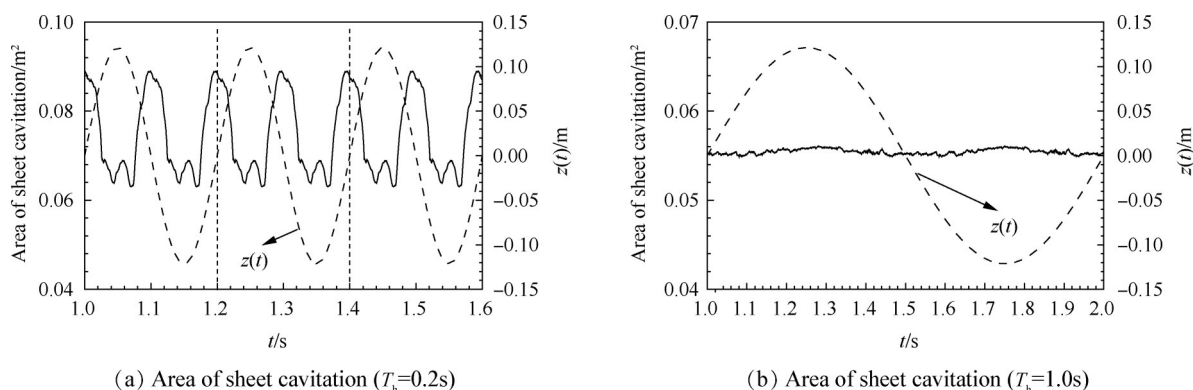
Fig. 11 Cavitation shape of typical movement moments ( $T_h=1.0s$ )

Fig. 12 Time history of cavitation area with different heave motion period

呈周期性变化,且变化周期为升沉运动周期的一半;图中各个节点的空泡面积与图9中所示相吻合,最大空泡面积为  $0.0864\text{m}^2$ ,最小空泡面积为  $0.0645\text{m}^2$ ,结合表5无升沉运动计算结果可以看出,  $T_h=0.2s$ 时即便在空泡面积最小时也依旧比无升沉运动时大,而最大空泡面积可比无升沉运动时增加约57%。结合图10中,螺旋桨运动到“平衡位置”时空泡面积最大,在两端时则空泡面积最小,图10(b)中严重空化的桨叶已经完全被空泡包围,而空化较轻的桨叶则基本没有空化,这种空化差异严重的会导致螺旋桨较强的激振力,产生严重的振动噪声。需要注意的是,结合图7(b)中对推力系数的分析,推力系数的最大值均出现在空泡面积最小的时刻。同时注意到在螺旋桨从“平衡位置”上升到最高点的1/4个运动周期内,空泡面积逐渐减小而推力系数则是先减小后增大,需要进一步研究空泡面积与推进系数之间的关系。在图12(b)中空泡面积在整个周期内整体比较平稳,其平均值与无升沉运动时十分接近,同时有一定的脉动性,这也与之前的分析结论相符。

## 4 结论

本文基于重叠网格方法建立了耦合升沉运动的七叶侧斜螺旋桨空泡特性数值计算模型,得到如下

结论:

(1)耦合升沉运动的七叶侧斜螺旋桨推进性能及空泡性能均与无升沉运动桨有明显不同,尤其当升沉运动周期较小时,其推进系数及空泡会产生明显的周期性变化。

(2)当升沉运动周期较小时,推力系数和扭矩系数也呈现周期性变化,且其变化周期为螺旋桨升沉运动周期的1/2,并且其推力系数最小值较无升沉运动时降低约40%。当运动周期较大时,推力系数和扭矩系数在某一特定值附近变化,波动幅度较小。

(3)根据对螺旋桨升沉运动过程中的桨叶速度多角形分析,由于不同位置桨叶进流的不均匀性,导致螺旋桨不同区域桨叶空化程度明显不同,且升沉运动周期较小时,这种空化差异性更大。升沉运动周期较小时,螺旋桨空泡最小值较无升沉运动时增大约17%,空泡最大值则增大约57%。

致谢:感谢国家重点研发计划基金资助项目的支持。

## 参考文献

- [1] Tulin M P. Supercavitation Flows—Small Perturbation Theory[J]. *Journal of Ship Research*, 1964, (4): 16–36.
- [2] 董世汤. 二元超空泡翼栅的自由流线理论[C]. 上海: 中国造船学会年会, 1964.

- [ 3 ] Geurse J A. Linearized Theory of Two-Dimensional Cavity Flows[D]. *Delft: Delft University of Technology*, 1961.
- [ 4 ] Lee C S. Prediction of the Transient Cavitation on Marine Propellers by Numerical Lifting Surface Theory[C]. *Tokyo: 13th Symposium on Naval Hydrodynamics*, 1980.
- [ 5 ] 熊 鹰. 非均匀流中螺旋桨空泡及脉动压力的数值和试验研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2002.
- [ 6 ] 胡 健. 螺旋桨空泡性能及低噪声螺旋桨性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006.
- [ 7 ] Gaggero S, Brizzolara S. A Potential Panel Method for the Prediction of Midchord Face and Back Cavitation[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2001, 123(6): 311-319.
- [ 8 ] Mitja Morgut, Enrico Nobile. Influence of the Mass Transfer Model on the Numerical Prediction of the Cavitation Flow Around a Marine Propeller[C]. *Hamburg: Second International Symposium on Marine Propulsors smp'* 11, 2011.
- [ 9 ] Dengcheng Liu. The CFD Analysis of Propeller Sheet Cavitation[C]. *Nantes: Proceedings of the 8th International Conference on Hydrodynamics*, 2008.
- [ 10 ] Politis G K. Simulation of Unsteady Motion of a Propeller in a Fluid Including Free Wake Modeling[J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2004, 28(6): 633-653.
- [ 11 ] Kinnas S A, Tian Y, Sharma A. Numerical Modeling of a Marine Propeller Undergoing Surge and Heave Motion[J]. *International Journal of Rotation Machinery*, 2012(3): 257-461.
- [ 12 ] Brennen C E. Cavitation and Bubble Dynamics [M]. *UK: Oxford University Press*, 1995.
- [ 13 ] Carrica P M, Wilson R V, Noack R W, et al. Ship Motions Using Single-Phase Level Set with Dynamic Overset Grids[J]. *Computers and Fluids*, 2007, 36(9): 1415-1433.
- [ 14 ] 杨 强, 林 状, 郭志群, 等. 穿浪双体船艏部分段模型入水砰击的数值仿真[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(6): 42-47.
- [ 15 ] 孙 涛, 万德成. 前置导管节能效果数值计算与分析[J]. *水动力学研究与进展*, 2016, (6): 651-658.
- [ 16 ] Boswell R J. Design, Cavitation Performance and Open-water Performance of a Series of Research Skewed Propellers[R]. *Carderock: Department of the Naval Ship Research and Development Center, Report 3339*, 1965.
- [ 17 ] 朱德祥, 张志荣, 吴乘胜, 等. 船舶CFD不确定度分析及ITTC临时规程的初步应用[J]. *水动力研究与进展*, 2007, 22(3): 363-370.
- [ 18 ] Kim S E. Multiphase CFD Simulation of Turbulent Cavitation Flows in and Around Marine Propulsors[R]. *Carderock: David Taylor Model Basin*, 1982.
- [ 19 ] Vaz G, Hally D, Huuva T, et al. Cavitation Flow Calculations for the E779A Propeller in Open Water and Behind Conditions: Code Comparison and Solution Validation[C]. *Austin: the Fourth International Symposium on Marine Propulsors*, 2015: 314-360.

(编辑:梅 瑛)