

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.08.006

# 半浸式螺旋桨水动力性能的数值模拟研究\*

施宇翔, 张凌新, 邵雪明\*

(浙江大学 流体动力与机电系统国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 针对半浸式螺旋桨的水动力性能问题,应用CFD方法对其流场进行了数值模拟研究,并把结果与实验进行比较。通过求解雷诺平均方程(RANS)来模拟流场,采用SST  $k-\omega$  湍流模型来计算RANS方程中的雷诺应力。利用Fluent中的明渠流动(Open Channel Flow)功能模拟空泡水筒中的气液两相流动,采用VOF方法捕捉自由液面。应用滑移网格法完成搅拌桨的转动,实现了对一个五叶右旋半浸式螺旋桨的数值模拟。研究表明,桨的尾流场形态与实验结果吻合地较好,证明了CFD方法预测半浸式螺旋桨性能的有效性。在较低浸入深度时,数值模拟可以很好地预测半浸式螺旋桨的性能。随着浸入深度的增加,推力系数和效率的预测结果基本准确,扭矩系数的预测结果有一定偏差。从数值计算结果中,可以获得宏观力的脉动曲线和完全入水桨叶的压力分布,并且可以对桨叶出水和入水过程进行详细的研究。

**关键词:** 半浸式螺旋桨; 数值模拟; 尾流场; 性能曲线

**中图分类号:** TH133; U661.31<sup>3</sup>; TP302.7 **文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-4551(2014)08-0985-06

## Numerical study of the hydrodynamic performances of surface piercing propeller

SHI Yu-xiang, ZHANG Ling-xin, SHAO Xue-ming

(State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control,  
Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Aiming at investigating the hydrodynamic performances of surface piercing propeller, CFD method was applied to simulate its flow field. The numerical results were compared with the experimental data. A right-hand surface piercing propeller with five blades was modeled. Its flow field was solved through Reynolds Averaged Navier-Stokes equation(RANS). SST  $k-\omega$  turbulence model was utilized to calculate Reynolds stresses in the RANS equations. The Open Channel Flow model in Fluent was employed to simulate the gas-liquid flow in cavitation tunnel. The free surface was captured through the VOF method and the rotation of the propeller was handled by means of sliding mesh. The results indicate that the wake field shape is in satisfactory agreements with the experimental data. It proved the validity of CFD method to predict the performance of surface piercing propeller. In less depth of immersion, numerical simulation can supply a good prediction of propeller performance. With the increase of the immersing depth, the results are accurate enough for thrust coefficient and efficiency. However there are some deviations for torque coefficient prediction. The numerical results can provide the fluctuating curve of macroscopic forces and the pressure distribution contour of a fully-submerged blade. The process of entry and exit of the water can also be researched in detail.

**Key words:** surface piercing propeller; numerical simulation; wake field; performance curve

收稿日期: 2014-04-22

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(11332009)

作者简介: 施宇翔(1988-),男,山东济南人,主要从事水动力学方面的研究。E-mail:dlscxysyx@126.com

通信联系人: 邵雪明,男,教授,博士生导师。E-mail:mecsxm@zju.edu.cn

## 0 引言

半浸式螺旋桨(surface piercing propeller)又称部分浸水螺旋桨,或称表面螺旋桨。半浸式螺旋桨(以下简称半浸桨)是指当快艇在设计航速航行时,自由液面位于桨轴附近桨叶交替入水并且能正常工作的一种特殊螺旋桨。半浸桨由于其高效率、可减小快艇的附体阻力、减少桨叶剥蚀等优点<sup>[1]</sup>,在高速滑艇及浅吃水船上得到越来越广泛地应用。

由于桨叶交替入水,空气被吸进入水桨叶附近的流体中,产生空气腔(air cavity或者ventilated cavity),这种现象称为半浸桨的通气现象(ventilation)。这是半浸桨与常规螺旋桨性能不同的主要原因。另外,由于桨叶的出入水,还必然伴随飞溅和兴波等复杂的自由液面变形。

迄今,半浸桨的研究主要依靠理论计算和水动力实验这两种方法。它们互相结合,促进了人们对半浸桨的认识。理论计算在建立计算模型时引入了大量假设,得到的结果与真实情况有一定偏差,并且无法得到整个流场的全貌<sup>[2-4]</sup>。实验研究可以分为两个阶段,早期的研究中,研究者<sup>[5-6]</sup>主要关注半浸桨的整体受力情况。Olofsson<sup>[7-8]</sup>把分离的桨叶安装到可以测力的桨毂上,测出了每个桨叶单独的受力情况,并分析了空泡数和傅氏数对半浸桨性能的影响。此后的实验研究<sup>[9-10]</sup>多采用该种动态测试技术,研究内容更加具体。实验研究为半浸桨的研究奠定了基础,获得了很多通用性的结论。但是,实验会受到测量设备的限制,获得的数据一般为宏观受力特征,无法得到流场中任意位置的具体特征。

应用CFD研究常规螺旋桨已经发展了很多年,并且取得了满意的结果<sup>[11-12]</sup>。通过数值模拟不仅能够得到螺旋桨的宏观受力,而且能得到整个计算区域内流场的全部信息。和常规螺旋桨一样,半浸桨也可以用CFD进行研究。但是由于自由液面的存在,半浸桨周围的流场有很强的非线性,这将会给数值模拟带来很多挑战,采用CFD手段研究半浸桨的实例仍然很少。Caponnetto<sup>[13]</sup>应用基于有限体积法(FVM)和雷诺平均法(RANS)的商业软件Comet实现了半浸桨的数值计算。研究表明,一个桨叶在一个旋转周期内的推力变化情况与实验值吻合的较好。但是,该研究中没有给出半浸桨的性能曲线,以及尾流场形态图。

本研究基于Fluent平台,采用求解雷诺平均方程(RANS)的方法进行流场模拟,通过VOF方法捕捉自由液面,应用滑移网格完成桨的转动,实现对一个五

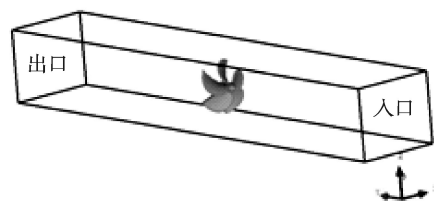
叶右旋半浸桨流场的数值模拟,并把计算所得的定性和定量的结果与实验结果进行比较,同时根据计算结果分析整个流场的具体特征。

## 1 数值模拟

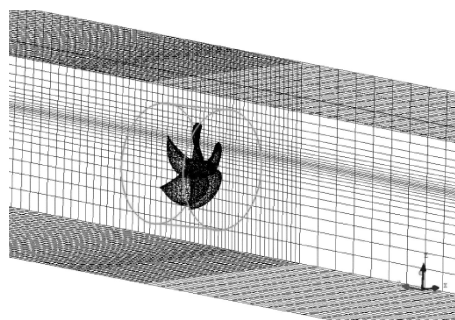
### 1.1 模型计算

数值计算所采用的半浸桨(F5SPP)由法国France Helices公司设计,为右旋五叶桨,直径220 mm,螺距比为1.5。该桨叶剖面为月牙型,具有“杯”形(cup)随边<sup>[14]</sup>,为典型的半浸桨设计。France Helices公司在法国的水动力实验室Bassin d'Essais des Carènes(DGA)进行了半浸桨的实验。该实验在空泡水筒中进行,安装半浸桨时,有4°的桨轴倾斜角。通常人们用桨轴到自由液面的距离*i*与桨直径*D*的比值来表示半浸桨的相对浸入深度。该实验测试了桨在3种不同浸入深度时的性能,*i/D*分别为-0.18、0.0、0.07。

数值模拟所取的计算域与空泡水筒的测试部分尺寸相同,为3.6×0.6×0.5,计算域示意图如图1(a)所示。本研究分别计算了实验测试的3种浸深,以便与实验进行比较。



(a) 计算区域



(b) 网格划分

图1 计算域及网格示意图

### 1.2 控制方程

半浸桨的流场是三维非定常气液两相流场,空气和水均视为不可压缩流体。另外,不考虑两相间的能量传递和表面张力。具体控制方程如下:

连续性方程:

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

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j} \right) \quad (2)$$

式中:  $u$ —时均速度;  $u'$ —脉动速度;  $-\overline{\rho u_i u_j}$ —雷诺应力;  $p$ —时均压力;  $\rho$ —水和空气的混合密度;  $\mu$ —混合动力粘性系数。

它们的计算公式分别为:

$$\rho = F_w \rho_w + F_a \rho_a \quad (3)$$

$$\mu = F_w \mu_w + F_a \mu_a \quad (4)$$

$$F_w + F_a = 1 \quad (5)$$

式中:  $F$ —体积分数;  $w, a$ —水和空气。

目前,针对自由液面的捕捉已经发展了很多方法,本研究采用的是VOF方法<sup>[15]</sup>。它可以处理复杂的非线性流场,在流体力学计算中应用广泛。另外,它简单有效,所需计算时间短,存储量少。它的基本原理是通过计算网格中一种流体所占体积与网格自身体积之比函数  $F$ ,来确定自由面的形状,而不考虑自由液面处质点的具体运动。本研究计算水的体积分数  $F_w$ ,其输运方程为:

$$\frac{\partial F_w}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla F_w = 0 \quad (6)$$

若  $F_w$  取值为0,表示网格内为空气;取值为1,表示为水。若  $F_w$  取值在0和1之间,表示网格在水气界面上。

流场的计算考虑了流体的粘性,采用了SST  $k-\omega$  模型模拟流体的湍流特性。该湍流模型由Menter提出,它结合了  $k-\varepsilon$  模型与标准  $k-\omega$  模型的优点,在靠近壁面处采用标准  $k-\omega$  模型的处理方式,在远离壁面处,流动采用  $k-\varepsilon$  模型的处理方式。这种处理方法具有很强的模拟分离流动的能力<sup>[16]</sup>。

笔者对控制方程进行离散,为了保证较高的计算精度,对流项选用二阶迎风差分格式,扩散项选用二阶中心差分格式,瞬态项选用一阶隐式格式。在方程组求解过程中,压强与速度耦合选用PISO算法。本研究采用显式的VOF方法,并选用几何重构公式(Geo-Reconstruct)获得自由液面的形状。它是一种较为精确的VOF公式,可以获得清晰的水气界面。为了保证计算的收敛性,各项的松弛因子均取为0.1。

### 1.3 网格划分

针对旋转机械非定常流场的模拟问题,滑移网格技术是一种普遍采用的方法。通常,计算域分为旋转区域和静止区域,在它们的交界面上,网格进行滑移。本研究通过交界面间的物理量插值运算,进行流

场信息的传递。在交界面的两侧,网格不需要对齐,但两侧网格尺度要尽可能小,这样才能保证计算时流场内不出现明显的空隙。

本研究采用ICEM对流场进行混合网格的划分,整个流场分为两部分:内部为包含半浸桨的圆柱形旋转区域,外部为静止区域。内部区域由于几何形状复杂并且流场变化剧烈,采用较密的非结构化网格。外部区域采用较稀疏的结构化网格,通过划分混合网格以减小网格数量,其中在自由液面附近和滑移界面进行局部加密。整个计算区域的总网格数为  $1.5 \times 10^6$  左右,网格划分示意图如图1(b)所示。

### 1.4 边界条件与初始条件

本研究利用Fluent中的明渠流动(Open Channel Flow)功能模拟空泡水筒中的气液两相流动。入口为压力入口,水和空气有相同的速度,都为5 m/s,空气的压力为大气压。由于在空泡水筒中来流的湍流强度较低,根据以往计算经验,入口处湍流强度和湍流黏性比的取值分别为0.1%和1。出口为压力出口,压力和湍流的设置与入口相同。半浸桨表面和壁面为无滑移边界条件。

初始状态下,本研究将计算区域的下半部分充满水,水和空气具有相同的初始速度,速度大小为5 m/s。然后设置旋转区域的角速度与转轴方向,角速度大小为半浸桨转速。为了保证计算的收敛性,必须使全局Courant数小于1。计算采用固定的时间步长,取值为桨转速的1/5 000,以便在后处理时准确地确定半浸桨的旋转位置。例如,当  $J=1.17$  时,半浸桨的转速  $n=1\ 165$  rad/min,时间步长取为  $1.03 \times 10^{-5}$  s,最小网格尺寸为  $8.9 \times 10^{-5}$  m,此时全局Courant数为0.58。

## 2 计算结果与分析

### 2.1 尾流场形态对比

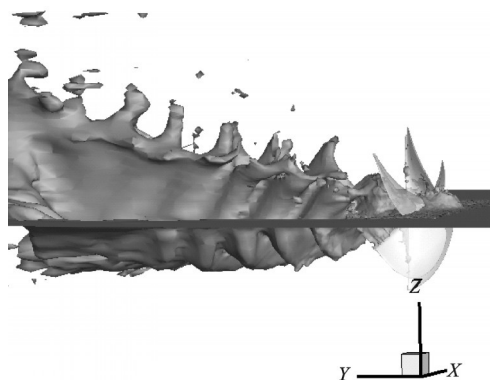
半浸桨在  $i/D=0.0$ ,  $J=1.7$  时,尾流场的形态的对比如图2所示。可以看出,CFD能正确地模拟出半浸桨尾流场的形态和桨的通气现象。在桨叶叶背随边处,有空气腔附着,并且连通空气,通气从桨叶入水持续到出水,空气腔呈螺旋形。桨叶出水后,空气腔继续向下游发展,体积和直径不断变大,到一定程度后,大小基本不变。在半浸桨的尾流场中,离桨盘面越远,自由液面上方的飞溅越大。但是,CFD得到的空气腔在叶背上的附着面积比实验结果小。

### 2.2 性能曲线对比

本研究使用流动稳定后推力和扭矩在一个旋转周期内的平均值绘制半浸桨性能曲线,与实验数据进行比较。



(a) 实验结果



(b) CFD结果

图2  $i/D=0.0$ ,  $J=1.7$ 时尾流场的形态对比  
不同工况下性能曲线如图3所示。

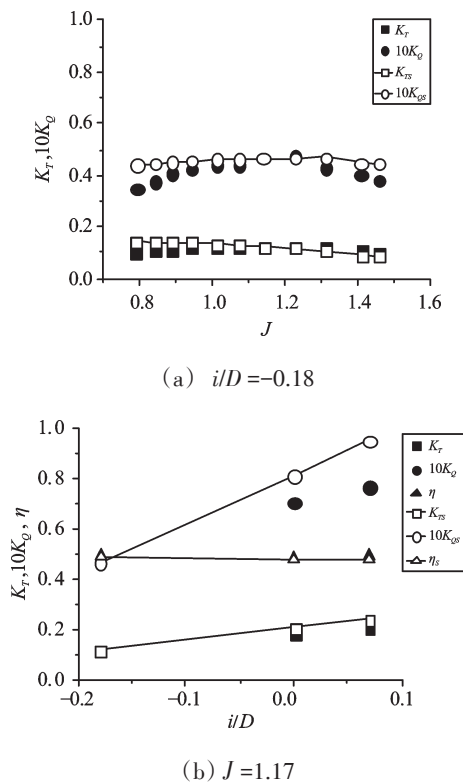


图3 不同工况下性能曲线

实心点—实验结果;空心点—模拟结果

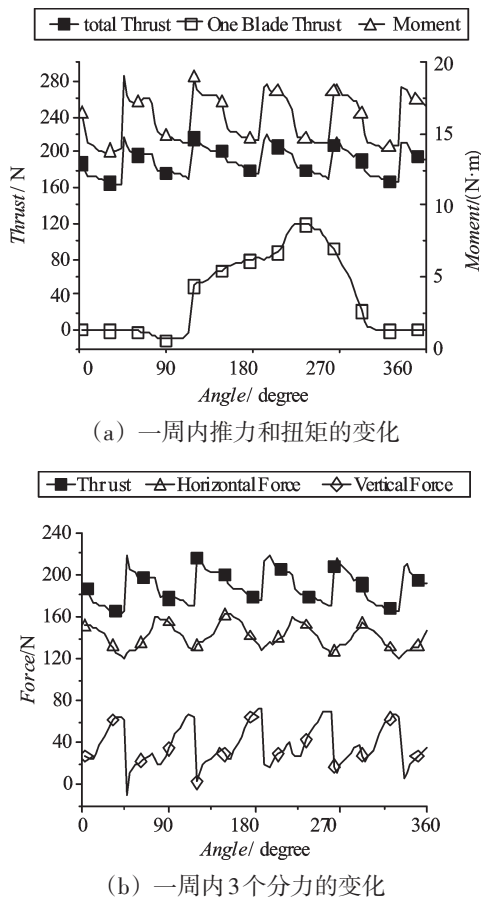
由图3(a)可见,  $i/D = -0.18$ 时,计算结果与实验值吻合较好,尤其是  $J$  在 0.9~1.4 之间时,误差在 5% 以内。模拟的  $K_Q$  值在有些工况下大于实验结果。

由图3(b)可见,在  $J = 1.17$  时,随着浸入深度的增加,  $K_T$  和  $K_Q$  都增加,效率  $\eta$  基本保持不变,这一点 CFD 与实验结果一致。同时,随着浸入深度变大,  $K_Q$  的计算结果误差变大,最大可达 20%。这是由于 CFD 得到的空气腔在叶背上的附着面积小于实验结果,产生了更多的摩擦阻力所致。出现这一情况,可能是由于忽略了空气的压缩性和气液之间的能量传输,使得空气腔过早地脱落。

### 2.3 力的脉动特征

常规螺旋桨的推力和扭矩大小是接近恒定的,由于伴流等因素产生的微小脉动可以忽略不计。然而对于半浸桨,由于桨叶交替入水,其推力和扭矩随着时间变化,有较大的脉动特征。桨刚开始转动时,流动不太稳定,脉动无规律,随着流场的发展,推力和扭矩的脉动呈现明显的周期性。

数值模拟得到的结果如图4所示,此时  $i/D = 0.0$ ,  $J = 1.17$ 。由于单个桨叶都周期性地出入水,并且在空气中产生的推力可忽略不计,因此自身推力的脉动很大,一周内推力和扭矩的变化如图4(a)所示。不同桨

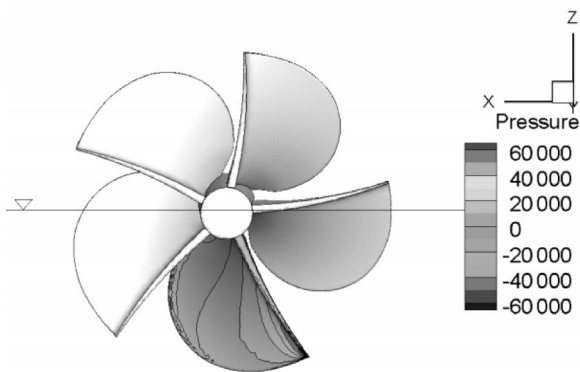
图4 受力变化曲线( $i/D=0.0$ ,  $J=1.17$ )

叶之间存在着相位差,它们叠加后得到整个桨的推力,其脉动性比单个桨叶小,但仍然比较明显,且呈周期性变化。可以看出,桨的总推力的变化周期约为单个桨叶的1/5。扭矩与推力有着同样的变化规律。

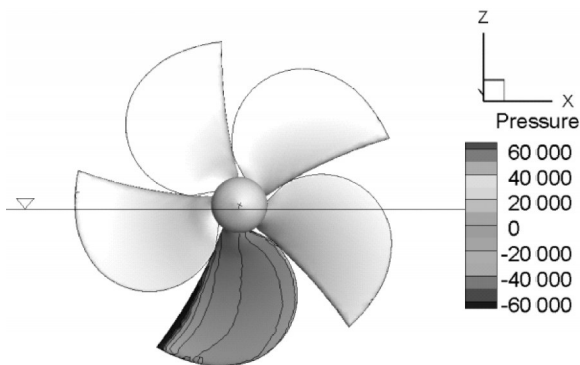
当半浸桨运转时,由于部分桨叶露出水面,整个桨的受力分布具有较大的不对称性,因而除了推力也会产生较大的水平侧向力和垂向力,同样具有周期性特征。数值模拟得到的桨叶在3个方向上的分力变化情况如图4(b)所示。可以看出,半浸桨的水平侧向力约为推力的3/4,垂直力相对较小。当半浸桨的桨轴在水平方向上有一定的偏角时,水平力与推力共同合成更大的船艇实际推力,此时半浸桨比没有水平偏角时拥有更高的推进效率。

#### 2.4 桨叶压力分布

$i/D=0.0$ ,  $J=1.17$ 时,一个完全入水桨叶的压力分布如图5所示,此时叶背有空气腔附着。总体上看,压力分布比较均匀。在叶面上,压力的最大值出现在随边叶梢处,从随边到导边压力逐渐减小,从叶梢到叶根压力逐渐减小。在叶背上,压力最小值出现在随边叶梢处,从随边到导边压力逐渐增加。可以看出,桨叶随边叶梢处受到的局部载荷很大,需要特别高的结构强度。



(a) 叶面(压力面)压力分布

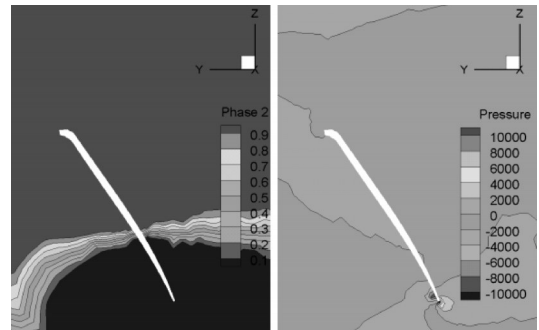


(b) 叶背(吸力面)压力分布

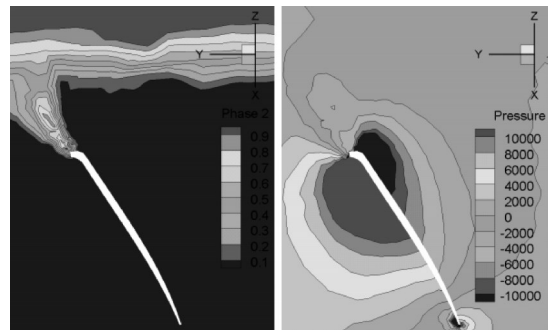
图5 完全入水桨叶压力分布 ( $i/D=0.0$ ,  $J=1.17$ )

#### 2.5 出入水状态

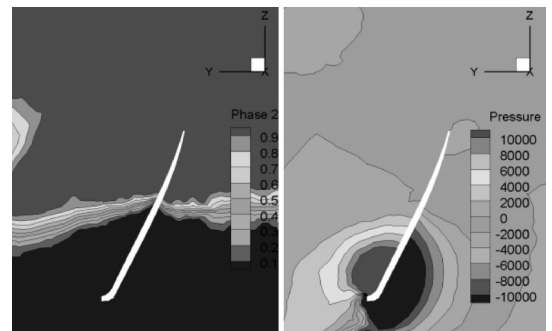
$i/D=0.0$ ,  $J=1.17$ 时的流场切面图如图6所示,切面位置取在径向0.75半径处,分别给出了桨叶入水和出水过程中水气界面的变化情况以及桨叶切面周围流场的压力分布。入水过程对应的是图4(a)中 $54^\circ\sim 126^\circ$ ,出水过程对应的是 $234^\circ\sim 306^\circ$ 。



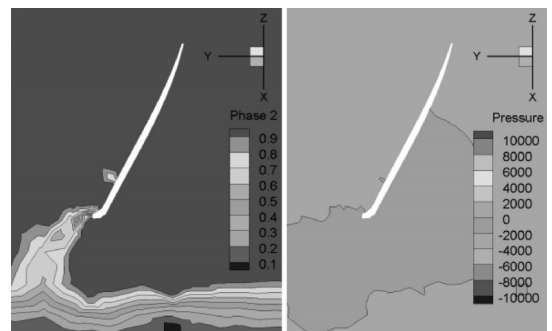
(a) 入水时



(b) 入水后



(c) 出水时



(d) 出水后

图6 入水和出水过程中水气界面形态和压力分布 ( $i/D=0.0$ ,  $J=1.17$ )

桨叶入水时,入水部分叶面为负压,叶背为正压,桨叶产生负推力,对应图4(a)中 $54^{\circ}\sim 115^{\circ}$ 的过程。当桨叶的随边入水后,压力分布产生了很大变化,叶面的大部分为正压,叶背的大部分为负压,然而在导边处分布情况相反。此时桨叶大部分产生正推力,导边处产生负推力,桨叶的推力骤然上升,对应图4(a)中 $115^{\circ}\sim 126^{\circ}$ 的过程。随着桨叶浸入深度不断增加,空气腔逐渐形成,并附着在叶背上。

桨叶出水时,叶面上的水被桨叶抬起,出水部分桨叶两侧没有压力差,未出水部分桨叶两侧流体的压力分布仍然与完全浸入时相同。出水过程中流场的压力分布是渐变的,故推力是逐渐减少的,与入水过程不同,对应图4(a)中 $234^{\circ}\sim 306^{\circ}$ 的过程。当桨叶完全出水后,仍有少量水附着在叶面随边,随着桨叶的转动,产生飞溅。

但仍要指出,目前界面捕捉的精细程度还不够,水气界面过渡区域的厚度相对于桨叶厚度还比较大,这也是造成计算结果与实验结果差异的原因之一。

### 3 结束语

本研究采用CFD数值模拟对一个半浸桨的水动力性能进行了研究。计算结果表明,通过数值模拟可以正确给出半浸桨的尾流场形态和通气现象。通过与实验数据的对比,验证了CFD方法预测半浸桨性能的有效性。在较低 $i/D$ 时,数值模拟可以很好地预测半浸桨的性能,尤其是 $J$ 在0.9~1.4之间。在较高 $i/D$ 时, $K_r$ 和 $\eta$ 的预测结果基本准确, $K_\theta$ 预测结果有一定偏差。另外,本研究通过CFD数值模拟预报了半浸桨的水平侧向力和垂向力以及它们的脉动特征。计算结果给出了完全入水桨叶的压力分布,以及桨叶出水和入水过程中流场压力分布和水气界面的变化情况。

在本研究的工作中,笔者提出了一种有效模拟半浸桨的方法,模拟结果对工程实际有一定的指导意义,为半浸桨的设计及优化提供理论参考。在以后的研究中,需要细化半浸桨的研究内容,探究计算偏差产生的原因,提升CFD分析半浸桨流场物理特征的能力。

### 参考文献(References):

- [1] 丁恩宝,唐登海,周伟新. 半浸式螺旋桨研究综述[J]. 船舶力学,2002,6(2):75-84.
- [2] 王国强,贾大山,盛振邦. 部分浸水通气螺旋桨水动力性能[J]. 中国造船,1990(109):22-31.
- [3] FURUYA O. A performance-prediction theory for partially submerged ventilated propellers[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1985(2):311-335.
- [4] YOUNG Y L. Numerical modeling of supercavitating and surface piercing propellers[D]. Austin: The University of Texas, 2002.
- [5] HADLER J B, HECKER R. Performance of Partially Submerged Propellers[C]//Proceedings of 7th ONR Symposium on Naval Hydrodynamics, Rome: [s.n.], 1968.
- [6] KRUPPA C F L. Testing of Partially Submerged Propellers[C]//Proceedings of 13th ITTC Report of Cavitation Committee, Berlin & Hamburg: [s.n.], 1972.
- [7] OLOFSSON N. A Contribution on the Performance of Partially Submerged Propellers[C]//Proceedings of FAST'93, Yokohama: [s.n.], 1993:765-776.
- [8] OLOFSSON N. Force and flow characteristics of a partially submerged propeller[D]. Goteborg: Chalmers University, 1993.
- [9] 刘希武,倪兵,赵峰,等. 减压水池半浸桨空化水动力性能试验技术研究[J]. 船舶力学,2001,5(1):25-31.
- [10] 黄红波,陆林章,吴幼华,等. 不同浸深比半浸式螺旋桨动态力试验研究[J]. 船舶力学,2006,10(4):9-17.
- [11] 冯学梅,陈凤明,蔡荣泉. 使用Fluent软件的螺旋桨敞水性能计算和考察[J]. 船舶,2006,(1):14-19.
- [12] 董星涛,李超,朱健,等. 基于Fluent低压旋流喷嘴下游流场数值模拟及分析[J]. 轻工机械,2012,30(5):25-27.
- [13] CAPONNETTO M. RANSE Simulations of Surface Piercing Propellers[C]//Proceedings of 6th Numerical Towing Tank Symposium, Rome: [s.n.], 2003.
- [14] 俞永清,余建星,丁恩宝,等. 二维“杯”形随边超空泡剖面入水数值研究[J]. 船舶力学,2008,12(4):539-544.
- [15] 王志东,汪德. VOF方法中自由液面重构的方法研究[J]. 水动力学研究与进展,2003,18(1):1-5.
- [16] 施培丽,邵雪明. 高密实度H型风力机气动性能的数值分析[J]. 机电工程,2013,30(3):277-280.

[编辑:张豪]

#### 本文引用格式:

施宇翔,张凌新,邵雪明. 半浸式螺旋桨水动力性能的数值模拟研究[J]. 机电工程,2014,31(8):985-990.

SHI Yu-xiang, ZHANG Ling-xin, SHAO Xue-ming. Numerical study of the hydrodynamic performances of surface piercing propeller[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014,31(8):985-990.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>