

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2021.02.001

限制水域内船后螺旋桨梢涡特性研究*

冀楠¹, 杨春¹, 万德成², 钱志鹏¹, 杨光¹

(1. 重庆交通大学 航运与船舶工程学院, 重庆 400074, E-mail: 2554617008@qq.com;

2. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 海洋工程国家重点实验室
船海计算水动力学研究中心(CMHL), 上海 200240)

摘要: 为了探究船舶在限制水域中自航时螺旋桨的工作特性, 该文基于商业软件 STAR-CCM+, 通过求解 RANS 方程对船舶在限制水域航行进行了数值模拟。首先对船-舵一体阻力、螺旋桨敞水性能和船-桨-舵一体自航进行了验证, 证明了数值和网格划分方法的可行性; 然后考虑不同的水深和船-岸距离, 计算并分析了船舶螺旋桨的水动力和梢涡特性。研究表明: 随着船-岸距离的减小, 螺旋桨推力逐渐增大, 而水深对推力的影响比较复杂, 在极浅水时, 推力随船-岸距离的减小逐渐减小; 梢涡分离和融合现象随着水深的减小有提前的趋势, 梢涡结构有向船体中纵剖面收缩趋势; 梢涡强度随着水深和船-岸距离减小逐渐增大, 且舵右侧梢涡涡量强度大于左侧。

关键词: 限制水域; 船桨舵一体; 螺旋桨水动力; 梢涡

中图分类号: U661.1

文献标志码: A

Study on tip vortex characteristics of propeller in confined water

JI Nan¹, YANG Chun¹, WAN De-cheng², QIAN Zhi-peng¹, YANG Guang¹

(1. School of Shipping and Naval Architecture, Chongqing Jiao Tong University, Chongqing 400074, China;
2. Computational Marine Hydrodynamics Lab(CMHL), State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to research the working characteristics of the propeller when the ship is self-propelled in the restricted waters. Based on the commercial software STAR-CCM+, the ship navigation in restricted waters is simulated by solving RANS equation. Firstly, the resistance of the ship-rudder, the open water performance of the propeller and the self-propulsion of the hull- propeller-rudder are verified, which proves the feasibility of the numerical and mesh generation method. Then, the hydrodynamic and tip vortex characteristics of ship propeller are calculated and analyzed by considering different water depths and ship-bank distances. The results show that: with the decrease of the ship-bank distance, the propeller thrust increases gradually,

* **收稿日期:** 2020-11-05(2020-11-30 修改稿)

基金项目: 国家重点研发计划(Grant No. 2018YFB1600400)、重庆市科学技术委员会基础与前沿研究计划项目(No. cstc2015jcyjA70009)

作者简介: 杨春(1994—), 男, 重庆南川人, 硕士。

通讯作者: 冀楠, E-mail: 2554617008@qq.com

Received: November 5, 2020 (**Revised** November 30, 2020)

Project supported by foundations: Supported by the National Key R & D Program of China(Grant No. 2018YFB1600400), Basic and Frontier Research Project of Chongqing Science and Technology Commission(No. cstc2015jcyjA-70009)

Biography: YANG Chun (1994—), Male, Master.

Corresponding author: JI Nan, E-mail: 2554617008@qq.com

but the influence of water depth on the thrust is more complex. In very shallow water, the thrust decreases with the decrease of ship-bank distance; the separation and merging of tip vortices tend to advance with the decrease of water depth, and the tip vortex structure tends to contract to the longitudinal section of the ship; the strength of the tip vortex increases gradually with decreasing of the water depth and the ship-bank distance. The vorticity intensity of the right tip vortex of rudder is larger than that of the left.

Key words: Confined water; Hull-propeller-rudder; Propeller hydrodynamic; Tip vortex

引言

通常限制水域中的流场变化极其复杂, 比如运河、港口和狭窄航道等, 对螺旋桨的工作性能影响较大。复杂尾流对螺旋桨性能产生重要影响, 可能会使船体产生严重的振动和噪声, 降低螺旋桨的工作寿命, 减少船员的舒适性。因此有必要对船舶在限制水域内航行时螺旋桨的工作特性进行研究。

众多学者对船舶深水自航、螺旋桨水动力和流场已经进行了较多的研究, 但其中考虑浅水及岸壁效应的文献大多只分析了船舶的水动力性能, 未考虑附体影响。哈尔滨工程大学的郭春雨等^[1-5]对螺旋桨水动力性能和桨后涡结构进行了深入的研究。孙帅等^[6]以KCS和KP505螺旋桨为研究对象, 采用RANS方程和VOF模型, 对不同吃水条件下螺旋桨非定常轴承力的数值预报分析。其发现浅水条件下, 轴承力时均值明显大于深水, 当 $h/T < 3.0$ 时, 脉动幅值随水深的增加迅速减小, 当 $h/T > 3.0$ 时, 水深变化对脉动幅值影响较小。同样, 李亮等^[7]进行了KCS实尺度的自航计算, 分析了其自航点转速和船尾流场的伴流分数尺度效应, 研究发现实船的伴流分数要小于模型船, 其自航点要大于模型船。孙聪等^[8]以双桨船DTMB5415为研究对象, 进行了船桨舵一体耦合时的相互干扰问题研究, 研究发现, 螺旋桨工作使船尾区域压力降低, 随着航速增大, 压力降低幅度更大且自由液面波高增大明显。王恋舟等^[9-10]以KCS和KP505为研究对象, 分别分析了船桨一体在自由度开放和固定条件下的螺旋桨盘面流场的尺度效应。孙晨光等^[11]利用重叠网格, 进行了KVLCC2带桨停船操纵数值模拟, 对螺旋桨周围流场进行了分析。王建华等^[12-14]利用重叠网格对ONRT船模带桨在波浪中进行了自航和回转操纵运动。

本文以KVLCC2、KP458以及配套舵为研究对象, 考虑不同的水深和船-岸距离, 研究了船-桨-舵一体在限制水域中航行时螺旋桨水动力和梢涡特性, 为螺旋桨优化和设计预报提供一定的参考。

1 数值方法

1.1 控制方程和VOF模型

本文考虑自由液面的影响。自由液面采用VOF(volume of fluid, 流体体积)界面捕捉法, 其基

本原理是通过研究网格单元中流体和网格体积比函数来确定自由面, 追踪流体的变化, 而非追踪自由液面上质点的运动。采用不可压缩流动RANS方程, 控制方程为如下连续性方程和动量方程

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

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

式中, x_i 和 x_j 为空间坐标分量, ρ 为流体密度, u_i 和 u_j 为空间平均速度分量, p 为流体平均压力, $-\overline{\rho u_i u_j}$ 为雷诺应力项。

1.2 湍流模型

考虑计算时间和计算精度, 本文选取Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型, 近壁面将选择Two-Layer Ally+Wall Treatment进行处理。模型湍流动能 k 及湍流耗散率 ε 方程如下

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 E \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (4)$$

式中: k 为湍流动能, ε 为湍流耗散率, ρ 为流体密度, μ_t 为湍流黏性系数。

式中: μ_t 公式如下

$$\mu_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

模型常量为: $C_\mu = 0.09$, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.9$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.2$ 。

2 数值验证

本文选取船模KVLCC2和配套螺旋桨KP458为研究对象, 缩尺比为1:46.426, 该船模为SIMMAN2014国际研讨会推荐的标准船型之一, 螺旋桨和船模模型如图1和图2所示, 主要参数如表1和表2所示。



图1 (网上彩图) 螺旋桨模型
Fig.1 (Color online) Propeller model



图2 (网上彩图) 船体模型
Fig.2 (Color online) Hull model

表1 螺旋桨几何参数

Table 1 Geometric parameters of propeller

参数	实船	模型
桨叶数 Z	4	4
直径 D/m	9.86	0.212
盘面比 A_p/A_0	0.431	0.431
螺距比 $P/D(0.7R)$	0.721	0.721

表2 船体几何参数

Table 2 Geometric parameters of hull

参数	实船	模型
缩尺比 λ	1	46.426
船长 L_{pp}/m	320	6.892 7
水线长 L_{wl}/m	325.5	7.011 2
型宽 B/m	58	1.249 3
吃水 T/m	20.8	0.448 0
排水量 ∇/m^3	312 622	3.124 2
方形系数 U	0.809 8	0.809 8
湿表面积 S/m^2	27 194	12.616 8
舵面积 A_R/m^2	273.3	0.128 6

2.1 船-舵一体阻力验证

本文选取HMRI水池11个实验航速点对船-舵一体进行阻力计算, 由于船舶设定航速较低, 船体的运动幅值本来就较小, 且下文考虑了岸壁的存在, 为剔除船舶在近壁面时船体运动对流场的影响, 因

此将船模固定。阻力计算背景域为一长方体, 入口距船首 $2.5 L_{pp}$, 边界类型设置为速度入口; 为使船体尾流场充分发展, 将出口设置在距船尾 $4.0 L_{pp}$ 处, 边界类型设置为压力出口, 为防止产生回流, 将进行消波处理; 顶部距水面 $1.0 L_{pp}$, 边界类型设置为速度入口; 左右两侧距船中纵剖面各为 $2.0 L_{pp}$, 底部距水面 $1.5 L_{pp}$, 底部和岸壁边界类型根据前人经验^[15]设置为无滑移的移动壁面, 移动速度与水流速度一致。网格采用切割体网格和棱柱层网格。网格由STAR-CCM+软件生成, Y^+ 值范围控制在30-200, 整体网格数为118万, 背景域如图3所示。将计算结果与实验值进行对比, 如表3所示。由表中可知: 随着航速的增大, 阻力逐渐增大。11个航速下的阻力误差均保持在1%以内, 数值计算结果与实验值吻合较好, 表明本文采用的数值和网格划分方法较为合理。

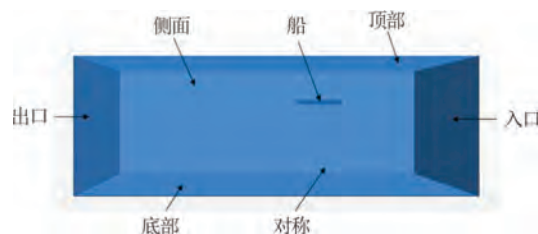


图3 (网上彩图) 背景域
Fig.3 (Color online) Background domain

表3 阻力计算结果

Table 3 The results of resistance calculation

航行速度/ $m \cdot s^{-1}$	EFD	CFD	E%D/%
0.944	22.97	22.89	0.35
0.981	24.70	24.63	0.30
1.019	26.47	26.56	0.33
1.057	28.27	28.52	0.88
1.095	30.15	30.00	-0.53
1.132	32.04	32.13	0.41
1.170	34.04	34.30	0.77
1.208	36.14	36.40	0.73
1.246	38.34	38.94	1.57
1.283	40.69	40.84	0.35
1.321	43.20	43.02	-0.42

2.2 螺旋桨敞水性能验证

工况选取进速系数在 $J=0.1-0.6$ 范围内, 验证KP458螺旋桨水动力性能数值和网格划分方法的准确性。在模拟中, 螺旋桨转速 $n=9.9$ rps, 通过改变入口速度来控制进速系数。把整个计算区域划分为同轴的两个圆柱, 大圆柱为背景域, 小圆柱为旋转域。背景域直径为 $9.5 D$; 前端距螺旋桨 $3.5 D$, 边界类型设置为速度入口; 为使螺旋桨尾流场充分发展, 后端延伸至距螺旋桨 $6 D$ 处, 边界类型设置为压力出口; 大圆柱表面设置为壁面。旋转域将桨包围, 直径为 $1.13 D$ 。背景域网格划分采用切割体网格; 旋转域利用多面体网格和滑移网格技术, 通过

interface界面与背景域之间进行数据的交互。为捕捉桨后涡结构，对桨叶、螺旋桨尾迹、梢涡和毂涡进行网格细化， Y^+ 值的范围控制在30-200，计算域和网格如图4所示。将数值计算结果与实验值进行对比，如图5所示。由图中可知：随着进速系数的增大， K_Q 和 η 误差均逐渐增大，但都在可接受的范围内。 K_T 、 K_Q 和 η 误差分别在5%、9%和7%以内，与实验值吻合较好。如图6所示，本套网格可以清晰地捕捉桨后涡结构，随着梢涡向下游发展，相邻两个梢涡会相融合，这与常欣等^[16]得出的CLT桨现象一致。

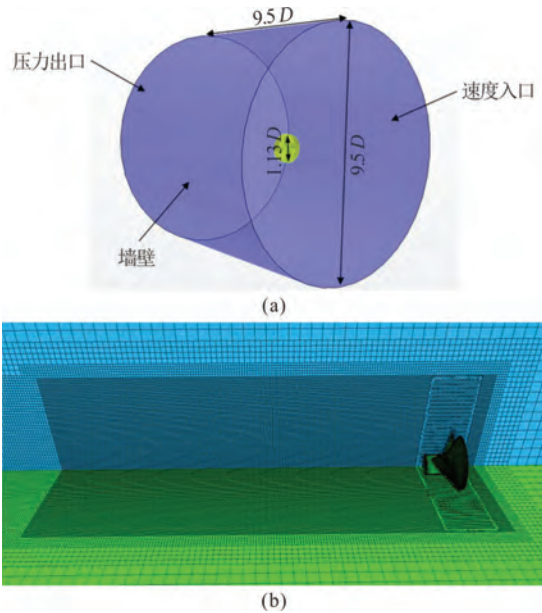


图4 (网上彩图) 计算域和网格划分
Fig.4 (Color online) Computational domain and meshing

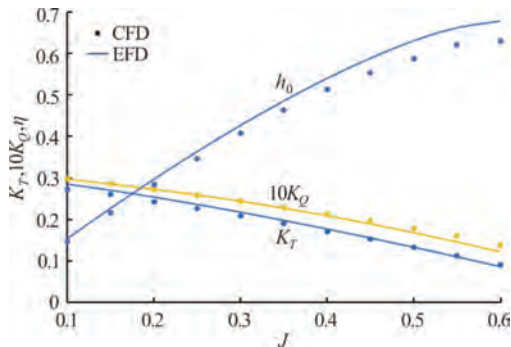


图5 (网上彩图) KP458 桨敞水性能
Fig.5 (Color online) Open water performance of KP458 propeller

2.3 船-桨-舵一体自航验证

自航验证采用全附体KVLCC2船模，航速 $Fr = 0.142 (U = 1.170 \text{ m/s})$ ，螺旋桨转速 $n = 9.9 \text{ rps}$ 。由于螺旋桨的引入，将整个计算区域分为包含船-舵一体的背景域和包含螺旋桨的旋转域，两者之间利用滑移网格技术的interface界面进行数据信息的交互，数值和网格划分方法与阻力和螺旋桨性能验证设

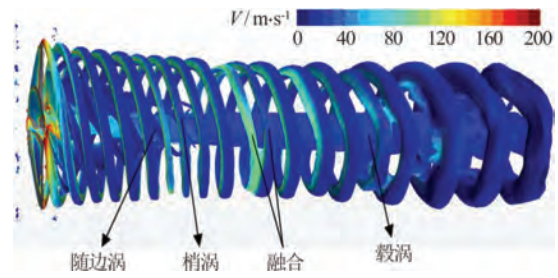


图6 (网上彩图) $J=0.4$ 涡结构图
Fig.6 (Color online) The diagram of vortex structure, $J=0.4$

置一样。为捕捉受船体流场影响的桨后涡结构，对螺旋桨桨叶、梢涡、毂涡、船尾以及尾流区域的网格需要进一步网格细化，整个计算域约480万网格。图7显示了自推进模拟中尾流场的加密网格。表4为自航模拟结果与实验值的对比。由表中可知：此套网格下阻力和推力的误差均在1%以内，与实验值吻合较好。

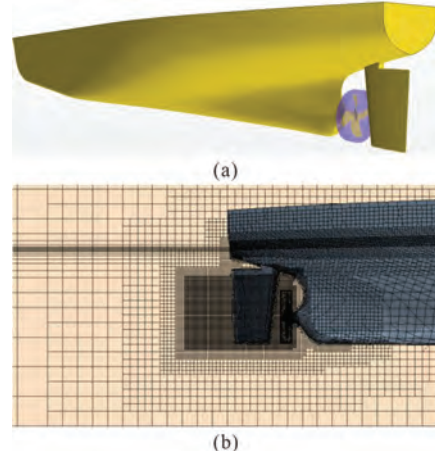


图7 (网上彩图) 自推进计算网格
Fig.7 (Color online) Computational grid for self-propulsion

表4 自航模拟结果
Table 4 Self-propulsion simulation results

	阻力(F_S/N)	推力(T/N)
CFD	42.5	39.4
EFD	42.2	39.6
误差 2	0.71%	-0.51%

如图8所示，船模自航时船体、螺旋桨和舵相互作用下涡结构特写。图9为 $x/L_{pp} = -0.5$ 处速度矢量图。由图中可以看出，此套网格和数值方法能较为清晰地捕捉到螺旋桨整体涡结构，主要由桨叶梢涡、毂涡、随边涡、舵的根涡以及脱落涡组成。其中 $Q=100$ 的等值面用轴向速度着色，桨叶随边处深色部位为高速度分布。在船体、方向舵和螺旋桨的相互作用下，舵左侧水流有向上流动的趋势，右侧的水流有向下流动的趋势，从而使桨叶梢涡在方向舵的左侧爬升得更高，而它们在右侧时向下流动。桨毂涡被舵分割为两股，分别从舵左右两侧进行发展，同时舵的根部有一股涡泄出。

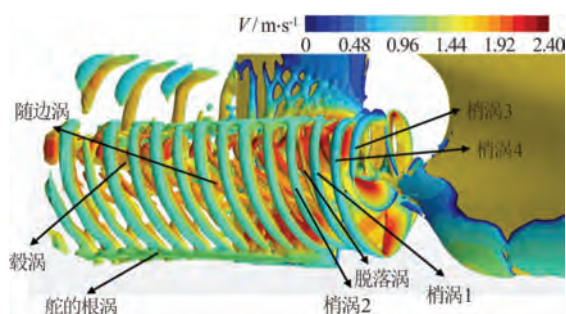


图8 (网上彩图) 桨后涡结构($Q=100$)
Fig.8 (Color online) Propeller vortex structure ($Q=100$)

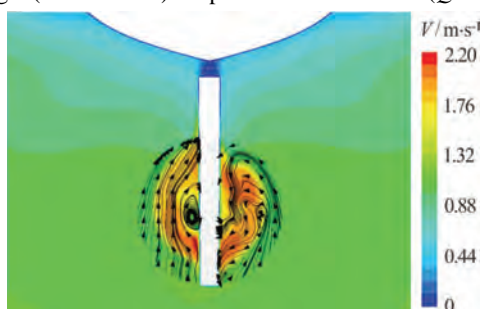


图9 (网上彩图) $x/L_{pp}=-0.5$ 处速度矢量图
Fig.9 (Color online) Velocity vector diagram at $x/L_{pp}=-0.5$

3 计算结果及分析

3.1 计算工况

本文共进行总计9个工况的数值计算, 分别考虑不同的水深和船-岸距离对螺旋桨性能的影响。计算工况如表5所示。

表5 计算工况

Table 5 Calculation conditions

Fr	航行速度/ $m \cdot s^{-1}$	n/rps	η/B	h/T
0.142	1.170 2	9.9	2.0	2.0
				1.5
				1.2
			1.5	2.0
				1.5
				1.2
1.3	1.5	1.2	2.0	
			1.5	
			1.2	

3.2 螺旋桨水动力分析

由图10可知, 当 h/T 一定时, 随着 η/B 的增加, 侧向力逐渐增加; 当 η/B 一定时, 螺旋桨侧向力随着 h/T 的减小逐渐增加; h/T 由2.0减小到1.5时, 侧向力变化趋势缓慢, 即岸壁效应不明显; h/T 为1.5和1.2时, 岸壁效应影响逐渐增大。

由图11可知, 当船-岸距离 η/B 一定时, 随着水深吃水比 h/T 减小, 推力逐渐增大。当 $h/T=2.0$ 和1.5时, 随着 η/B 减小, 螺旋桨推力逐渐增加;

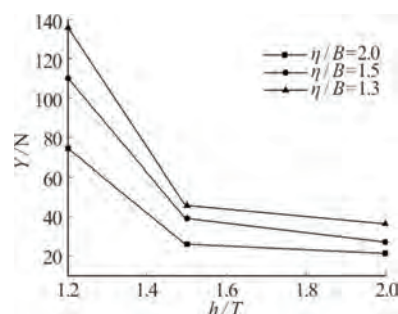


图10 不同 h/T 下推力随 η/B 的变化

Fig.10 Variation of thrust with η/B under different h/T

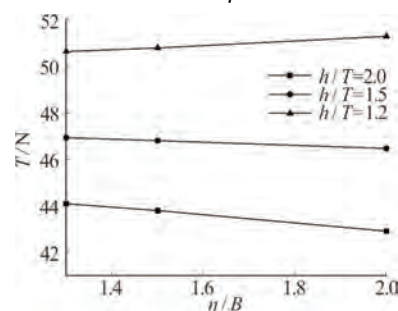


图11 不同 η/B 下侧向力随 h/T 的变化

Fig.11 Variation of lateral force with h/T under different η/B

而当极浅水 $h/T=1.2$ 时, 推力随着 η/B 的减小呈减小趋势, 这有可能是在极浅水时, 螺旋桨进流速度增大的原因。如图12所示, $h/T=1.5$ 和 $h/T=1.2$ 时桨盘面前流场速度变化分布, 可以看出 $h/T=1.5$ 时, 速度等值线整体分布较为对称, 偏移较小, 其中 $U=0.8$ 的等值线逐渐向桨盘外扩散的趋势, 说明螺旋桨进流在逐渐减小; 而极浅水时, 桨盘面前流场向岸壁偏移增大, 流场明显呈非对称分布, 这与本文前序研究得出的规律一致^[17], 螺旋桨前大部分低速流逐渐偏向螺旋桨盘面右侧, 而桨盘面左侧 $U=1.0$ 区域逐渐增大, 从而使螺旋桨盘面内的进流速度逐渐增大。

3.3 梢涡特性分析

3.3.1 船-岸距离的影响

选极浅水 $h/T=1.2$ 为例, 图13为不同 η/B 下螺旋桨涡结构分布, 黑色虚线为螺旋桨盘面至下游 $0.5D$ 范围内的涡量分布; 红色实线为舵顶部表面附着涡量分布; 黑色实线为下游涡量分布。可以看出在极浅水下, η/B 对船后桨涡结构的影响较小。红色实线和黑色实线内的涡量变化均不大。涡结构变化主要集中在方向舵的右侧, 主要原因可能是随着 η/B 的减小, 尾流场向右侧岸壁偏移, 大部分水流流向右舷, 与岸壁作用下产生一定的回流, 使方向舵右侧流场变得紊乱。随着 η/B 的减小, 右侧梢涡结构

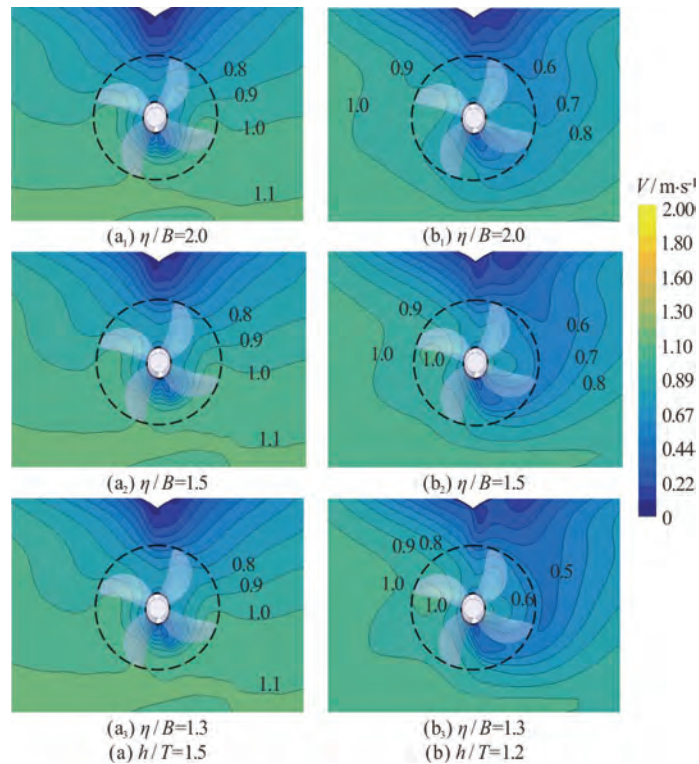


图 12 (网上彩图) 桨盘面前流场速度分布对比
 Fig.12 (Color online) Comparison of velocity distribution in front of propeller plane

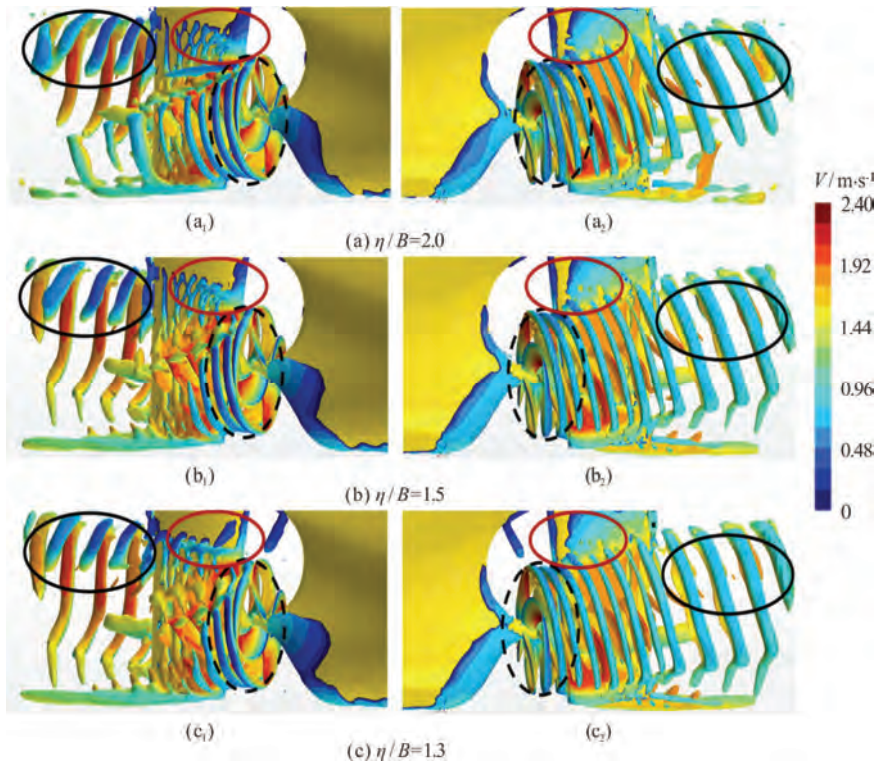


图 13 (网上彩图) $h/T=1.2$ 时桨后涡结构特写图(左: 右舷; 右: 左舷)
 Fig.13 (Color online) Propeller vortex structure(Left: starboard; Right: port)

有向下收缩的趋势。如图14所示, 舵左侧流线整体有向上流动的趋势, 且流动比较规则, 而右侧流线

流动比较复杂, 且在舵表面附近形成旋涡, 这使得右侧涡结构变得极其复杂。

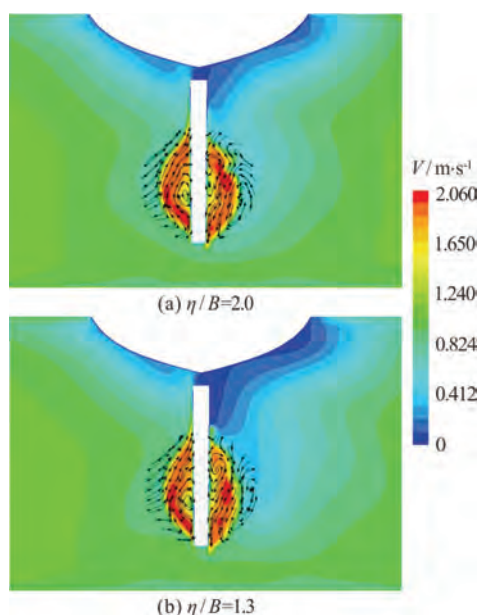


图 14 (网上彩图) 不同船-岸距离下 $x/L_{pp}=-0.5$ 处速度矢量图
Fig.14 (Color online) Velocity vector diagram at $x/L_{pp}=-0.5$ under different η/B

3.3.2 水深的影响

选 $\eta/B=2.0$ 工况为例, 如图15所示, 为不同水深下的桨后涡结构分布。随着 h/T 的减小, 船体周围水流被加速, 尾流场向岸壁偏移的趋势越大, 使附着在舵顶部表面的涡量速度逐渐增大。虚线内和实线内的梢涡速度均随着 h/T 的减小逐渐减小; 右

侧梢涡结构逐渐向下收缩, 且涡结构逐渐变得不完整, 其原因在于螺旋桨进流速度急剧下降, 使螺旋桨负荷增加。在极浅水时, 右侧梢涡结构在往下游发展过程中极其不稳定, 比左侧溃灭得更快, 说明受浅水和岸壁影响, 右侧梢涡在往下游发展过程中涡量强度在急剧降低。

3.4 梢涡的分离和融合

由于梢涡和随边涡之间相互干扰, 桨叶梢涡向下游发展过程中脱落出一股脱落涡, 随后与另一桨叶梢涡相融合, 且舵左右两侧均有此现象, 如图16所示(由图15放大), 图中虚线圆为梢涡分离现象, 实线圆为融合现象。由图中可知, 随着 h/T 减小, 尾流场的偏移使涡结构之间干扰增强, 梢涡的分离和融合现象有提前的趋势, 主要原因可能是由于随着 h/T 的减小, 尾流场低流速区域增加, 使梢涡表面速度分布与随边涡表面速度分布存在较大的速度差。当极浅水时, 在岸壁影响下, 更多低速流偏向螺旋桨右侧, 复杂流场致使涡结构很快就耗散, 导致舵的右侧没有融合现象。

3.5 桨轴所在水平面($Z=0$)内的涡量分布

图17为当 $\eta/B=2.0$ 不同 h/T 下 $Z=0$ 平面涡结构, 以螺旋桨旋转坐标为基准坐标系进行截面, 图中数字1-4分别为每叶桨所产生的梢涡。由图中可以看出: 岸壁效应影响下, 流场呈左右不对称分布,

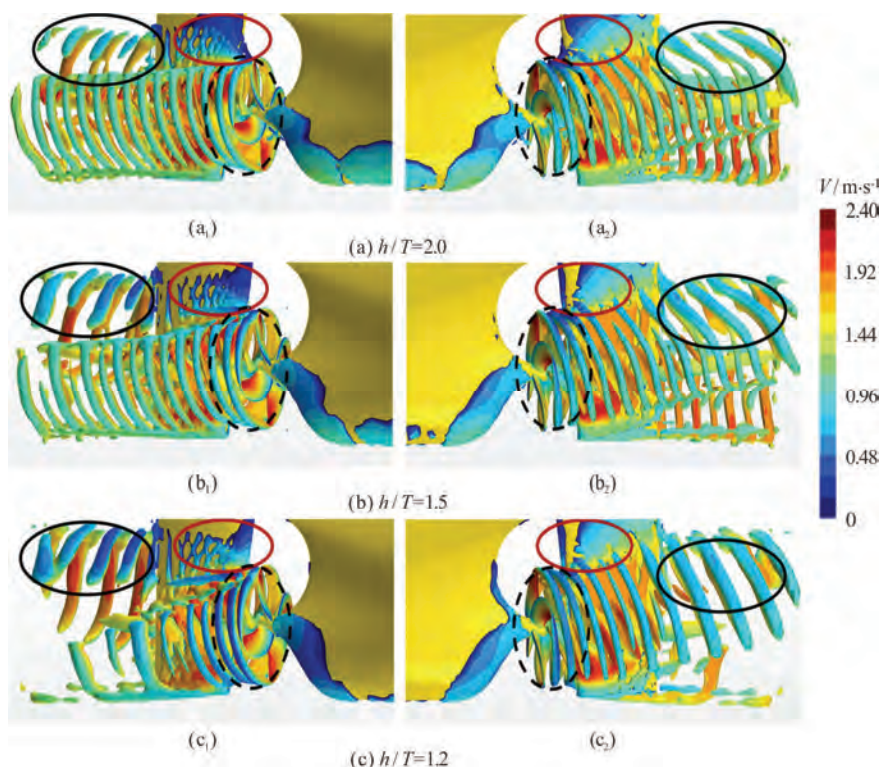


图 15 (网上彩图) 不同 h/T 下螺旋桨涡结构
Fig.15 (Color online) Propeller vortex structure under different h/T

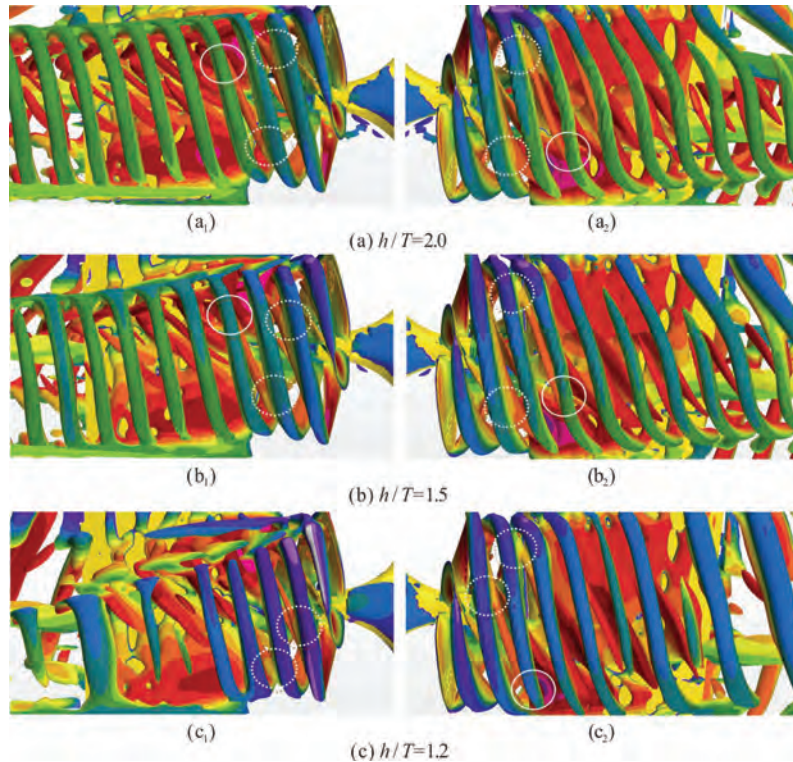


图 16 (网上彩图) 桨后涡结构特写图(左: 右舷; 右: 左舷)
Fig.16 (Color online) Propeller vortex structure(Left: starboard; Right: port)

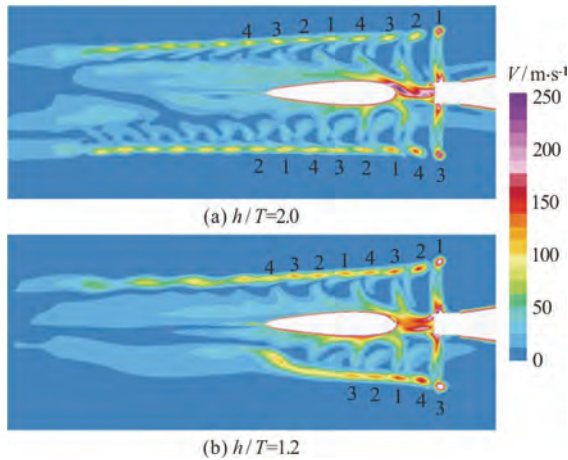


图 17 (网上彩图) $\eta/B=2.0$ 不同 h/T 下 $Z=0$ 平面涡量图
Fig.17 (Color online) The vorticity diagram of plane at $Z=0$ under different h/T

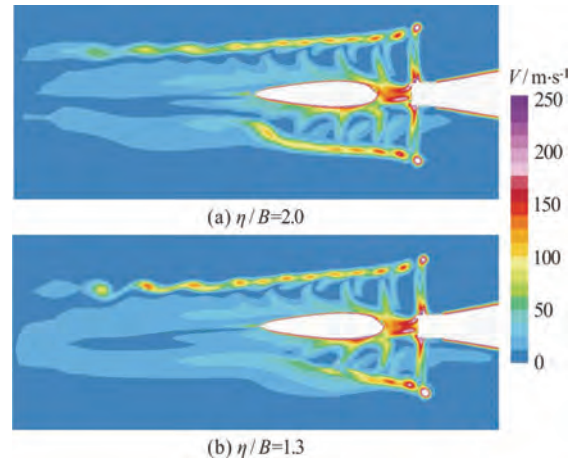


图 18 (网上彩图) $h/T=1.2$ 不同 η/B 下 $Z=0$ 平面涡量图
Fig.18 (Color online) The vorticity diagram of plane at $Z=0$ under different η/B

使船舶右舷梢涡涡量强度大于左舷涡量。随着 h/T 的减小, 两侧涡量强度逐渐增大; 梢涡结构向下游发展过程中, 有向船体中纵剖面收缩的趋势, 两侧梢涡涡量强度均逐渐降低, 直至溃灭。当 h/T 减小到 1.2 时, 岸壁效应越加明显, 复杂流场使涡量强度急剧减小, 两侧梢涡迅速溃灭, 左侧梢涡在舵后缘开始溃灭, 而右侧梢涡在舵的后缘就已经溃灭。

图 18 为 $h/T=1.2$ 时, 平面涡量强度随不同 η/B 的变化。由图中可知, 整体结构无明显变化, 变化主要集中在舵的右侧。随着 η/B 的减小, 尾流场加

速向右侧岸壁偏移, 使舵右侧涡量强度小于左侧, 梢涡在往下游发展过程中迅速溃灭且涡量强度急剧下降, 且同样有往船中纵剖面收缩的趋势。

4 结论

本文以 KVLCC2 和 KP458 为研究对象, 着重分析了船后螺旋桨的水动力和船后涡量变化, 主要结论如下:

(1) 在极浅水时($h/T=1.2$)时, 随 η/B 的减小, 螺旋桨推力逐渐减小; 而当水深较大时, 随 η/B 的减小, 螺旋桨推力逐渐增大。

(2) 尾流场的偏移使螺旋桨下游 $0.5D$ 范围内以及下游梢涡表面速度随着 h/T 和 η/B 减小逐渐减小, 而舵顶部附着涡呈现逐渐增大。

(3) 复杂的流场导致梢涡和随边涡之间存在相互干扰, 舵左右两侧均出现梢涡分离和融合的现象; 并且分离和融合现象随着 h/T 的减小, 有提前发生的趋势。

(4) 在岸壁效应影响下, 船舶右舷梢涡涡量强度大于左舷, 呈不对称分布; 随着 h/T 的减小, 两侧涡量强度逐渐增大, 梢涡结构向下游发展过程中有收缩趋势。

需要指出的是本文未考虑船舶姿态的影响, 下一步工作将考虑船舶自由度对船舶水动力和螺旋桨水动力性能的影响。

参 考 文 献:

- [1] 郭春雨, 王超, 赵大刚, 等. 沉深变化对螺旋桨水动力性能影响的数值分析[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2013, 41(6): 86-89.
GUO Chun-yu, WANG Chao, ZHAO Da-gang, et al. Numerical analysis of effects of shaft-depth variation on the hydrodynamic performance of propellers[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2013, 41(6): 86-89.
- [2] SUN S, WANG C, GUO C Y, et al. Numerical study of scale effect on the wake dynamics of a propeller[J]. Ocean Engineering, 2020, (196): 106810.
- [3] WANG L Z, GUO C Y, SU Y M, et al. A numerical study on the correlation between the evolution of propeller trailing vortex wake and skew of propellers[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2018, (10): 212-224.
- [4] 龚杰, 郭春雨, 吴铁成, 等. 基于分离涡模拟方法的导管桨近尾流场及尾涡特性分析[J]. 上海交通大学学报, 2018, 52(6): 674-680.
GONG Jie, GUO Chun-yu, WU Tie-cheng, et al. Detached eddy simulation of near wake field and vortex characteristics for a ducted propeller[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2018, 52(6): 674-680.
- [5] 龚杰, 郭春雨, 赵大刚, 等. 导管桨内流场及涡特性 DES 模拟[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40(8): 1381-1386.
GONG Jie, GUO Chun-yu, ZHAO Da-gang, et al. Detached eddy simulations of internal flow fields and vortex characteristics of ducted propellers[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2019, 40(8): 1381-1386.
- [6] 孙帅, 常欣, 王超, 等. 浅水效应对螺旋桨轴承力的影响分析[J]. 船舶力学, 2020, 24(2): 161-169.
SUN Shuai, CHANG Xin, WANG Chao, et al. Analysis of propeller bearing force characteristics in shallow water[J]. Journal of Ship Mechanics, 2020, 24(2): 161-169.
- [7] 李亮, 王超, 孙帅, 等. 实船自航试验数值模拟及尺度效应分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(7): 901-907.
LI Liang, WANG Chao, SUN Shuai, et al. Numerical simulation and scale effect of self-propulsion test of full-scale ship[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2016, 37(7): 901-907.
- [8] 孙聪, 宋科委, 王超, 等. 船桨舵一体化耦合下的双桨船数值自航模拟[J]. 应用科技, 2020, 47(2): 1-5, 11.
SUN Cong, SONG Ke-wei, WANG Chao, et al. Self-propulsion simulation of twin screw ship coupling with propeller and rudder[J]. Applied science and technology, 2020, 47(2): 1-5, 11.
- [9] 王恋舟. 标称流场尺度效应及螺旋桨激振力数值分析[D]. 哈尔滨工程大学, 哈尔滨, 中国, 2016.
WANG Lian-zhou. Numerical study of scale effect of nominal wake field and propeller-induced exciting force[D]. Harbin Engineering University, Harbin, China, 2016.
- [10] 王恋舟, 郭春雨, 宋妙妍, 等. 空化流中具有升沉运动状态的螺旋桨数值模拟[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2017, 45(9): 101-107.
WANG Lian-zhou, GUO Chun-yu, SONG Miao-yan, et al. Numerical simulation of propeller with heave motion in cavitating flow[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2017, 45(9): 101-107.
- [11] 孙晨光, 王建华, 万德成. 基于重叠网格的船模停船操纵 CFD 数值模拟[J]. 中国舰船研究, 2019, 14(2): 8-14.
SUN Chen-guang, WANG Jian-hua, WAN De-cheng. CFD numerical simulations of stopping maneuver of ship model using overset grid technology[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2019, 14(2): 8-14.
- [12] 王建华, 万德成. CFD 数值模拟船舶在波浪中的回转操纵运动[J]. 中国舰船研究, 2019, 14(1): 1-8.
WANG Jian-hua, WAN De-cheng. CFD simulation of ship turning motion in waves[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2019, 14(1): 1-8.
- [13] 王建华, 万德成. 自航船舶在首斜浪中航向保持的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, 2018, 33(6): 740-748.
WANG Jian-hua, WAN De-cheng. Numerical investigations of free running ship in bow quartering waves under

- course keeping control[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2018, 33(6): 740-748.
- [14] WANG J H, WAN D C. Investigations of self-propulsion in waves of fully appended ONR tumblehome model[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2016, 37(12): 1345-1358.
- [15] ZOU L, Larsson L. Computational fluid dynamics(CFD) prediction of bank effects including verification and validation[J]. Journal of Marine Science & Technology, 2013, 18(3): 310-323.
- [16] 常欣, 马开放, 王超, 等. CLT 桨的尾流场及梢涡特性数值分析[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2020, 48(4): 79-84.
- CHANG Xin, MA Kai-fang, WANG Chao, et al. Numerical analysis of wake field and tip vortex characteristics of CLT propeller[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2020, 48(4): 79-84.
- [17] 杨春, 冀楠, 万德成. 计及浅水及岸壁效应的船舶尾流场偏移特性数值分析[C]. 第三十一届全国水动力学研讨会, 中国, 厦门, 2020.
- YANG Chun, JI Nan, WAN De-cheng. Numerical analysis of deviation characteristics of ship wake field with shallow water and bank effects[C]. Proceedings of the 31th National Conference on Hydrodynamics, Xiamen, China, 2020.