

基于 RANS 法的 B 系列对转螺旋桨敞水性能数值模拟

胡俊明, 李铁骊, 林焰*, 纪卓尚, 杜祥进

(大连理工大学船舶工程学院, 辽宁大连 116024)

摘要:应用 RANS 法研究 B 系列对转螺旋桨敞水性能,对单桨和对转螺旋桨进行数值计算,研究不同湍流模型对数值结果的影响,分析研究对转螺旋桨桨距比和直径比的参数匹配问题,比较对转螺旋桨和单桨的敞水效率,剖析尾流场的变化情况,突破传统势流理论方法无法计入黏性和微观流动机理难以分析和把握等局限.数值结果表明:RSM 模型的数值精度较高,且选取桨距比和直径比合适的对转螺旋桨明显提高其推进效率,对转螺旋桨后桨能吸收前桨轴向速度和尾涡能量,减小切向速度对流体扰动的影响,增大流经桨叶的流体动量,减小前桨尾流外直径,增加螺旋桨的推力,提高对转螺旋桨推进性能,具有工程实用性.

关键词:对转螺旋桨;RANS 法;水动力性能;湍流模型;数值模拟

中图分类号:U661.3 **文献标识码:**A **doi:**10.7511/dllgxb201702006

0 引言

随着航运业的快速发展、高速舰船的涌现,传统船舶推进装置面临严峻挑战,为提高船舶的推进性能,对组合推进器的设计研究逐渐深入.组合推进器包括串列螺旋桨、对转螺旋桨和导管螺旋桨等^[1].其中对转螺旋桨具有高效率、扭矩平衡、改善空泡和振动等优点,因此越来越多的学者致力于对转螺旋桨的水动力性能研究^[2-3].传统对转螺旋桨的研究方法主要依靠模型试验和理论计算,因对转螺旋桨参数复杂,应用模型试验法研制对转螺旋桨图谱存在不少困难,且受到模型加工成本高、实验周期长、微观流动机理难以分析和把握等局限.目前经典的三大理论计算方法有升力线、升力面和面元法,均基于流体无黏假设势流理论^[4-5].随着技术进步,计算机性能更新和完善,计算流体力学(CFD)兴起,其克服基于势流理论求解黏性绕流场的局限,且数值模拟易于实现,经济性好,数值结果与模型试验方法吻合一致,精度较

高,已逐渐成为现阶段船舶水动力性能研究的重要方法之一^[6-8].

本文数值研究 B 系列对转螺旋桨的敞水性能,通过尾流场分析,为选取合适的对转螺旋桨参数提供重要的研究手段,为工程设计研究提供一定的参考.

1 计算原理

1.1 控制方程

应用 RANS 法处理黏性绕流场,流体不可压缩,螺旋桨以一定转速在均匀流体中旋转,其流体的连续方程(质量守恒方程)和雷诺平均 N-S 方程(动量守恒方程)表达式如下^[9]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}'_i \bar{u}'_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + f_i \quad (2)$$

式中: u 、 v 、 w 为流动速度在直角坐标系 3 个坐标

收稿日期: 2016-10-15; 修回日期: 2017-01-20.

基金项目: 国防基础科研计划资助项目(A0820132027); 渔业节能关键技术与重大装备开发资助项目(201003024); 国家自然科学基金资助项目(51209034); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(DUT14RC(3)043); 中国博士后科学基金资助项目(2014M561234); 中国博士后科学基金特别资助项目(2015T80256); 辽宁省博士启动基金资助项目(201501176).

作者简介: 胡俊明(1985-),男,博士生,E-mail:Junming5779@126.com; 李铁骊(1963-),女,副教授,博士生导师; 林焰*(1963-),男,教授,博士生导师,E-mail:linyany@dlut.edu.cn; 纪卓尚(1938-),男,教授,博士生导师; 杜祥进(1988-),男,硕士生.

轴上的分量, $\rho, p, f_i, t, \nu, u_i, u'_i, \partial \bar{u}'_i / \partial x_j$ 分别为流体密度、流体静压力、质量力、时间、流体运动黏性系数、时均速度、脉动速度和雷诺应力项. 考虑流场和曲面空间的复杂、流线弯曲、流动旋转及各向异性效应, 本文选取 RSM 湍流模型, RSM 模型在考虑流线弯曲、流动旋转和各向异性效应时能真实地反映实际情况, 且数值精度较高. 应用 RSM 模型使方程组封闭, 建立雷诺应力时均值和脉动值的联系^[9-10].

1.2 计算公式

根据对转螺旋桨的计算结果, 应用对转螺旋桨敞水性能计算公式^[3,7], 其推力系数、扭矩系数和敞水效率表达式如下:

前桨

$$J = \frac{v_A}{N_f D_f}, K_{T_f} = \frac{T_f}{\rho N_f^2 D_f^4}, K_{Q_f} = \frac{Q_f}{\rho N_f^2 D_f^5} \quad (3)$$

后桨

$$K_{T_a} = \frac{T_a}{\rho N_a^2 D_a^4}, K_{Q_a} = \frac{Q_a}{\rho N_a^2 D_a^5} \quad (4)$$

对转螺旋桨

$$K_T = K_{T_f} + K_{T_a}, K_Q = K_{Q_f} + K_{Q_a}, \eta = \frac{K_T J}{K_Q 2\pi} \quad (5)$$

式中: v_A 为流体速度, J 为进速系数, $D_f, N_f, T_f, Q_f, K_{T_f}, K_{Q_f}$ 分别为前桨的直径、转速、推力、扭矩、推力系数和扭矩系数, $T_a, Q_a, K_{T_a}, K_{Q_a}$ 分别为后桨的推力、扭矩、推力系数和扭矩系数, K_T, K_Q, η 分别为对转螺旋桨的推力系数、扭矩系数和敞水效率.

2 数值处理方法

2.1 模型参数

对转螺旋桨由两个旋转方向相反的前后桨组成, 其参数复杂, 主要参数有桨距比 L/D_f (前后桨 $0.7R$ 处轴向距离与前桨直径之比)、直径比 D_a/D_f (后桨直径与前桨直径之比)、盘面比 A_E/A_0 、螺距比 P/D_f 、叶数、叶型和叶轮廓等. 选取两大基本参数桨距比 L/D_f 和直径比 D_a/D_f 来研究对转螺旋桨的敞水性能, 研究其参数匹配问题, 以水动力性能优良、图谱齐全、应用广泛且具代表性的 B 系列螺旋桨为研究对象, B 系列螺旋桨其叶梢部

较宽为弓形, 叶根部叶切面为机翼形, 有 15° 纵斜角, 其 4 叶桨自 $0.6R$ (R 为螺旋桨半径) 至叶梢处为等螺距, $0.6R$ 至叶根处为变螺距分布, 依次递减^[11].

本文研究的对转螺旋桨前桨模型参数与单桨 B4-40 相同, 后桨直径根据前后桨的直径比 D_a/D_f 来选取, 其他参数与单桨 B4-40 相同. 同时对 B4-40 单桨和 CRP 对转螺旋桨模型进行了数值验证, 其 B4-40 单桨和 CRP 对转螺旋桨模型的基本参数如表 1 所示.

表 1 螺旋桨模型参数

Tab. 1 The parameters of propeller model

模型	直径/m	叶数 Z	盘面比 A_E/A_0	螺距比 $(0.7R)$	剖面形式	
B4-40	0.3	4	0.400	1.300	B	
CRP	前桨	0.210 0	4	0.432	1.235	B
	后桨	0.198 9	5	0.539	1.306	B

2.2 模型的建立

螺旋桨模型的建立需要进行坐标转换, 由二维的螺旋桨尺度和各半径处纵切面坐标值通过全局坐标 $OXYZ$ 与局部坐标 $O_1 X_1 Y_1 Z_1$ 的转换关系式转变为三维坐标, 其转换关系式详见文献^[12].

因对转螺旋桨结构相对复杂, 曲面曲率较大, 为保证螺旋桨模型曲面的光顺, 应用 Fortran 语言和 Pro/E 软件联合建立螺旋桨模型. 应用此方法建立的 B4-40 和 CRP 模型如图 1 所示, 基于 B 系列螺旋桨为参考模型而建立不同桨距比和不同直径比的 B 系列对转螺旋桨模型如图 2、3 所示.

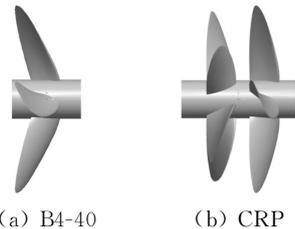
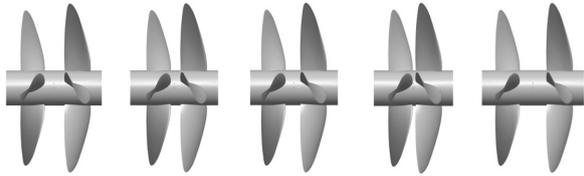


图 1 B4-40 与 CRP 螺旋桨模型

Fig. 1 The propeller models of B4-40 and CRP

2.3 网格的划分

网格划分在数值计算过程中占据着非常重要的作用, 其决定着数值计算结果的精度和计算时

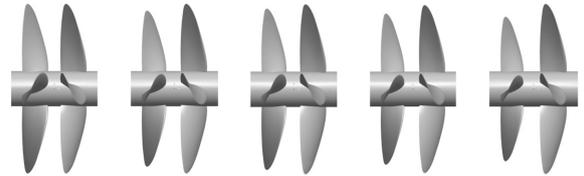


(a) 模型 1 (b) 模型 2 (c) 模型 3 (d) 模型 4 (e) 模型 5

图 2 对转螺旋桨模型(桨距比 L/D_f 依次为

0.16、0.20、0.23、0.26、0.30)

Fig. 2 The contra-rotating propellers model (L/D_f is 0.16, 0.20, 0.23, 0.26 and 0.30 in turn)



(a) 模型 6 (b) 模型 7 (c) 模型 3 (d) 模型 8 (e) 模型 9

图 3 对转螺旋桨模型(直径比 D_a/D_f 依次为

1.00、0.95、0.92、0.90、0.85)

Fig. 3 The contra-rotating propellers model (D_a/D_f is 1.00, 0.95, 0.92, 0.90 and 0.85 in turn)

间,因对转螺旋桨曲面和结构复杂,且应用多重参考模型(MRF)进行数值模拟计算,需划分旋转域和静止域.对转螺旋桨整体域长度为 $11D_f$,宽度为 $5D_f$, D_f 为对转螺旋桨前桨直径.其整体域划分为 3 个静止域、2 个旋转域,前静止域为 $2.5D_f$,中间静止域为 $3.0D_f$,后静止域为 $5.5D_f$,前、后桨旋转域长度均为 $1.5D_f$,直径为 $1.1D_f$.静止域和旋转域、前后两桨旋转域之间均通过 Interior 连接.在桨叶、桨毂复杂的三维曲面进行网格加密,在壁面边界处划分边界层网格,为满足边界层第一层网格高度的量纲一要求(30~500),选取边界层第一层网格高度为 0.001 m,满足量纲一高度要求,在桨叶和桨毂面上划分网格尺寸为 $0.012D_f$ 的三角形非结构化网格.静止域和旋转域的圆形外端面均采用非结构化网格,柱面采用结构化四边形网格,旋转域圆形面和柱面网格尺寸为 $0.04D_f$,静止域柱面和圆形面为 $0.1D_f$.流域边界条件入口和出口处分别采用速度入口和速度出口,圆柱面及螺旋桨桨叶和桨毂均采用无滑移壁面条件,前后域与中间域的交界面和运动旋转域与大域之间的交界面采用 interface 连接,其边

界条件和网格划分如图 4 所示.

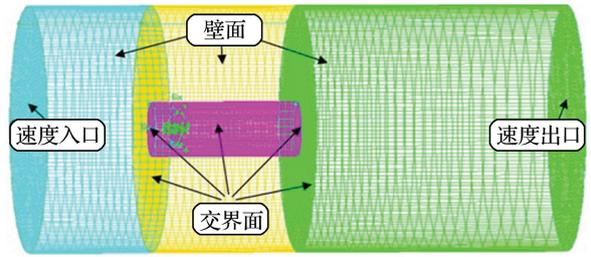


图 4 计算域网格划分及边界条件

Fig. 4 Meshing of computational domain and boundary condition

3 数值结果分析

3.1 单桨数值验证

由文献[13]可知湍流模型充分影响螺旋桨敞水性能的数值预报精度,为得到可靠的计算结果,应选取数值精度较佳的湍流模型.本文采用 4 种湍流模型对 B4-40 螺旋桨进行数值模拟计算,选取 B4-40 螺旋桨转速为 450 r/min,根据进速系数 $J=0.1\sim 0.9$ 的数值计算结果绘制推力系数 K_T 、转矩系数 K_Q 和敞水效率曲线(图 5).图 5(a)中,各个进速系数下 RSM 模型所得 K_T 均大于其余 3 种湍流模型数值结果,当 $J<0.8$ 时,4 种湍流模型所得 K_T 均小于实验值,且低进速系数下数值误差较大;当 $J=0.1$ 时,RSM 模型与实验值吻合相对稍好,其次是 SST $k-\omega$ 模型,Standard $k-\epsilon$ 模型的数值误差最大,数值误差为 7.45%.由图 5(b)中看出 4 种湍流模型所得数值结果精度均满足要求,误差较小,且当 $J<0.4$ 时,4 种湍流模型所得 K_Q 均小于实验值, $J>0.4$ 时则相反.图 5(c)中 4 种湍流模型所得敞水效率均小于实验值,且各个进速系数下 RSM 模型的敞水效率与实验值均吻合稍好,精度较高,SST $k-\omega$ 模型略次之,Standard $k-\epsilon$ 模型误差最大, $J=0.9$ 时其最大误差为 6.07%.基于图 5 的分析结果表明 RSM 模型具有较高的数值精度,应用此方法进行螺旋桨敞水性能的研究具有可行性.

3.2 对转螺旋桨数值验证

数值验证对转螺旋桨敞水性能,选取 CRP 模型为计算模型,进速系数 $J=0.4\sim 0.9$,前后桨转

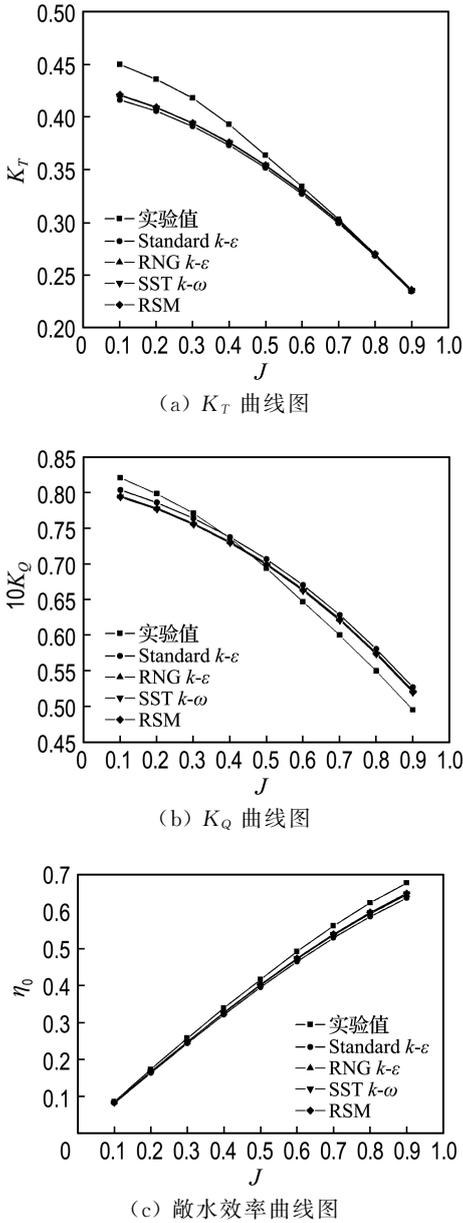


图5 不同湍流模型的水动力特性曲线

Fig. 5 Hydrodynamic performance curves with different turbulence models

速均为 450 r/min, 其对转螺旋桨敞水性能计算公式和试验结果详见文献[3], 通过数值模拟计算绘制推力系数 K_T 、转矩系数 K_Q 和敞水效率曲线(图 6). 图 6(a) 和(b) 中, 基于 RSM 模型和 SST $k-\omega$ 模型所得的前后桨 K_T 和 K_Q 与实验值均吻合良好, 后桨 K_Q 的数值误差略大于前桨 K_Q 的数值误差, 且 RSM 模型所得 K_Q 数值精度明显高于 SST $k-\omega$ 模型. 由图 6(c) 中看出, 基于此方法所得对转螺旋桨敞水性能数值结果满足精度要求, 与实验值吻合较好, 误差较小, 且 RSM 模型

所得转矩系数 K_Q 和敞水效率其数值误差均小于 SST $k-\omega$ 模型. CRP 模型的计算结果进一步表明 RSM 模型为较佳湍流模型, 应用此方法研究对转螺旋桨敞水性能具有可靠性和成熟性.

3.3 不同桨距比数值结果分析

为进一步研究对转螺旋桨敞水性能, 选取两大基本参数桨距比 L/D_f 和直径比 D_a/D_f 作为研究对象, 研究其参数匹配问题. 对转螺旋桨前桨模型参数与 B4-40 相同; 后桨直径不同, 其他参数与 B4-40 相同. 根据文献[3]中数据结果可知最佳直径比 D_a/D_f 在 0.85~0.95, 本文以 L/D_f 作为因变量, L/D_f 分别为 0.16、0.20、0.23、0.26 和 0.30, 选取 $D_a/D_f = 0.92$, 进速系数 $J = 0.4 \sim 0.9$, 前桨转速为 414 r/min, 后桨转速为 450 r/min, 研究不同桨距比对敞水性能的影响, 根据其数值计算结果应用对转螺旋桨敞水性能计算公式, 绘制不同桨距比下敞水性能曲线(图 7). 图 7 中, 桨距比的变化对转矩系数 K_Q 的影响要大于推力系数 K_T 和敞水效率, 并对前桨 K_T 和 K_Q 的影响要大于后桨, 且前桨、后桨和对转螺旋桨的 K_T 和 K_Q 均随进速系数增大而减小. 图 7(a) 中, 前桨的 K_T 和 K_Q 在同一进速系数下随桨距比的增加而增大. 图 7(b) 中, 模型 3 的 K_T 和 K_Q 在相同进速系数下其数值最小. 由图 7(c) 中看出, 对转螺旋桨模型 1 的 K_T 和 K_Q 在相同进速系数下其值最小, 其次是模型 3. 5 种不同桨距比模型的对转螺旋桨敞水效率略有差别, 模型 3 的敞水效率在各个进速系数下略高于其他对转螺旋桨模型, 且模型 5 的敞水效率要略高于模型 4, 其原因是当桨距比增大到一定数值时, 随桨距比的增大, 对转螺旋桨前后桨之间相互干扰减少, 当前后桨轴向距离足够远时, 前后桨即为单桨, 对转螺旋桨总效率反而有所增加, 但当桨距比过大、前后桨轴向距离过长时, 会使尾轴振动增大, 产生噪音, 且对尾轴强度要求增加, 在实际应用中产生不利影响. 基于此分析结果得到本桨最佳桨距比在 0.23 左右.

3.4 不同直径比数值结果分析

为进一步研究直径比 D_a/D_f 对敞水性能的影响, 本文基于不同桨距比 L/D_f 的数值结果, 选取桨距比 $L/D_f = 0.23$, 以直径比 D_a/D_f 为因变

量, D_a/D_f 分别为 1.00、0.95、0.92、0.90 和 0.85, 进速系数 $J=0.4\sim 0.9$, 前桨转速为 414 r/min, 后桨转速为 450 r/min, 数值计算对转螺旋桨敞水性能, 根据其数值计算结果绘制不同 D_a/D_f 下的敞水性能曲线(图 8). 图 8 中直径比的变化对转矩系数 K_Q 的影响要大于推力系数 K_T 和敞水效率, 并对后桨 K_T 和 K_Q 的影响要大于前桨, 且前桨、后桨和对转螺旋桨的 K_T 和 K_Q 均随进速系

数增大而减小. 图 8(a)中, 模型 9 的 K_T 和 K_Q 在相同进速系数下其数值最大, 模型 3 次之, 再者是模型 8, 模型 6 数值最小. 图 8(b)中模型 9 的 K_T 和 K_Q 在相同进速系数下其数值最小, 模型 3 次之, 再者是模型 8, 模型 6 数值最大, 与图 8(a)中数值结果恰好相反. 图 8(c)中, 模型 9 的 K_T 和 K_Q 在相同进速系数下其数值最小, 模型 3 次之, 再者是模型 8, 模型 6 其数值最大, 且敞水效率随

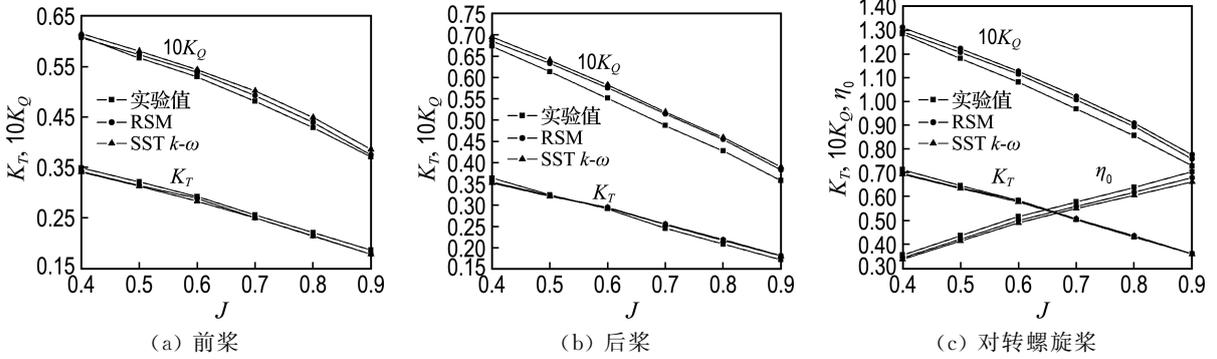


图 6 CRP 模型对转螺旋桨水动力特性曲线
 Fig. 6 Hydrodynamic performance curves of CRP model

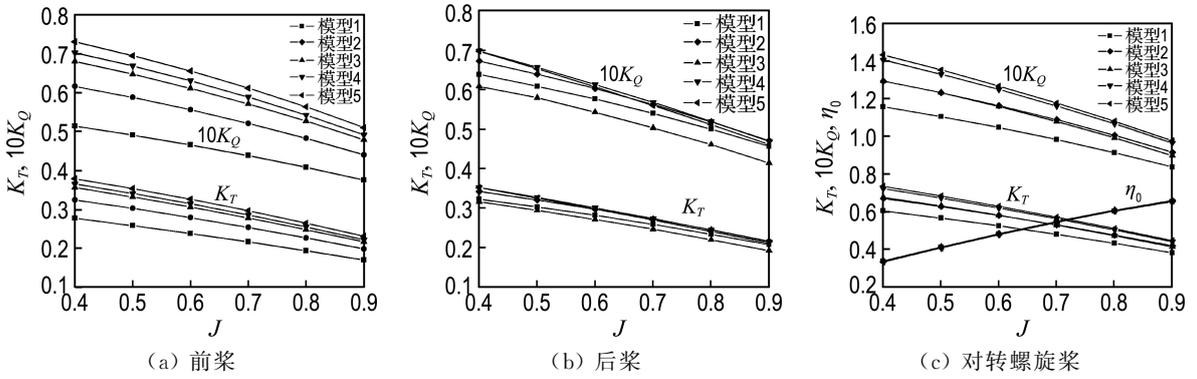


图 7 不同桨距比对转螺旋桨水动力特性曲线

Fig. 7 Hydrodynamic performance curves of contra-rotating propellers with different pitch ratios

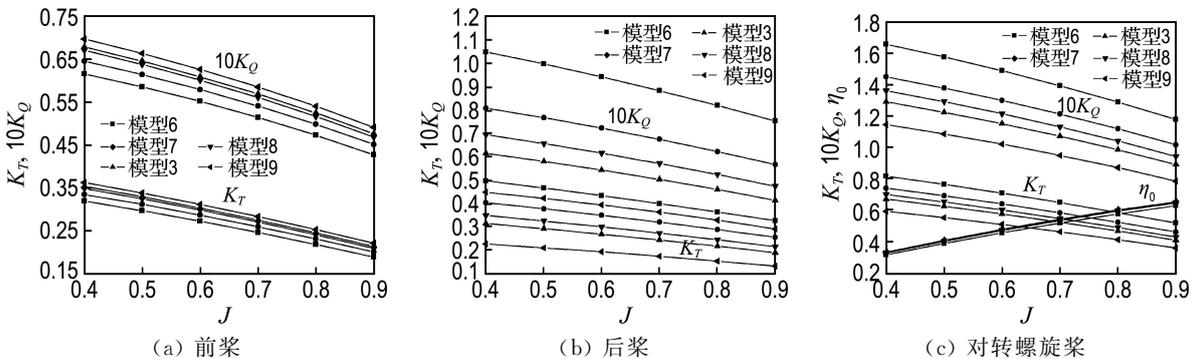


图 8 不同直径比对转螺旋桨水动力特性曲线

Fig. 8 Hydrodynamic performance curves of contra-rotating propellers with different diameter ratios

D_a/D_f 的减小有先增大后减小再增大的趋势, 模型 3 的敞水效率在各个进速系数下略高于其他对转螺旋桨模型, 模型 9 的敞水效率要略高于模型 8, 但在实际应用中 D_a/D_f 不能过小, 由图 8(b) 中能看出后桨直径过小会导致后桨转矩系数 K_Q 过小, 前后桨扭矩不平衡, 丧失对转螺旋桨应有的特性, 且易引起空泡现象的发生, 致使叶表面材料发生腐蚀和降低对转螺旋桨的敞水性能. 基于图 8 的数值结果得到本桨最佳 D_a/D_f 选取在 0.92 左右.

3.5 对转螺旋桨和单桨敞水性能比较

根据不同桨距比和直径比对转螺旋桨的数值结果, 选取敞水性能较佳的对转螺旋桨模型 3, 桨距比 $L/D_f=0.23$, 直径比 $D_a/D_f=0.92$, 研究其对转螺旋桨和单桨的敞水性能. 任意选取 B4 系列单桨模型, 考虑船尾部轮廓对螺旋桨直径限制的因素, 选取单桨 2 的直径和模型 3 前桨直径相等, 盘面比 $A_E/A_0=0.768$, 其他参数与 B4-40 相同. 单桨 2 的转速为 414 r/min, 进速系数 $J=0.4 \sim 0.9$. 由于单桨和对转螺旋桨提供的主机功率相同, 根据功率系数公式 $B_p = 33.07K_Q^{1/2}/J^{5/2} = NP^{1/2}/v_A^{5/2}$, 保证单桨和对转螺旋桨功率系数相等的情况下研究其敞水性能. 由单双桨的数值计算结果绘制功率系数-敞水性能曲线(图 9). 图 9 中, 在同等功率系数条件下, 对转螺旋桨模型 3 其敞水效率明显高于单桨 2, 其水动力性能具有明显的优越性.

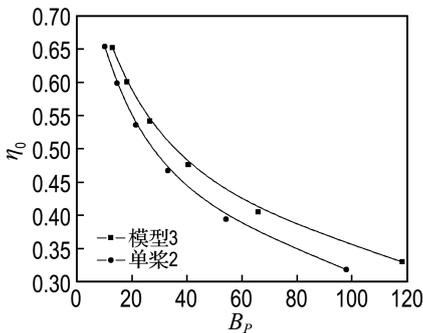


图 9 功率系数水动力特性曲线

Fig. 9 Hydrodynamic performance curves with different power coefficients

3.6 尾流场分析

基于计算结果可知对转螺旋桨模型 3 具有较好的敞水性能, 为进一步研究对转螺旋桨的作用

机理, 剖析尾流场变化情况, 选取进速系数 $J=0.7$, 不同直径比对转螺旋桨模型 7、3 和 8, 其轴向诱导速度分布如图 10 所示. 图 10 中, 对转螺旋桨模型 7、模型 3 和模型 8 在前桨盘面中心 $Z=0$ 处其轴向速度云图基本一致, 数值基本相同, 表明直径比的变化对前桨盘面中心 $Z=0$ 处轴向速度的变化影响甚小, 可以忽略不计. 由距离前桨盘面中心 $0.4D_f$ 处的轴向速度分布图中看出, 模型 3 其轴向速度负值高速区域面积小于模型 7 和模型 8, 低速区域面积则相反, 且在截面中心处出现正值速度, 其正值速度区域面积明显大于模型 7 和模型 8. 说明模型 3 的轴向诱导速度随着与盘面处距离的增加, 其减小趋势快于模型 7 和模型 8, 使后桨吸收前桨轴向速度和流经桨叶的流体动量变化增大, 提高了对转螺旋桨的敞水效率.

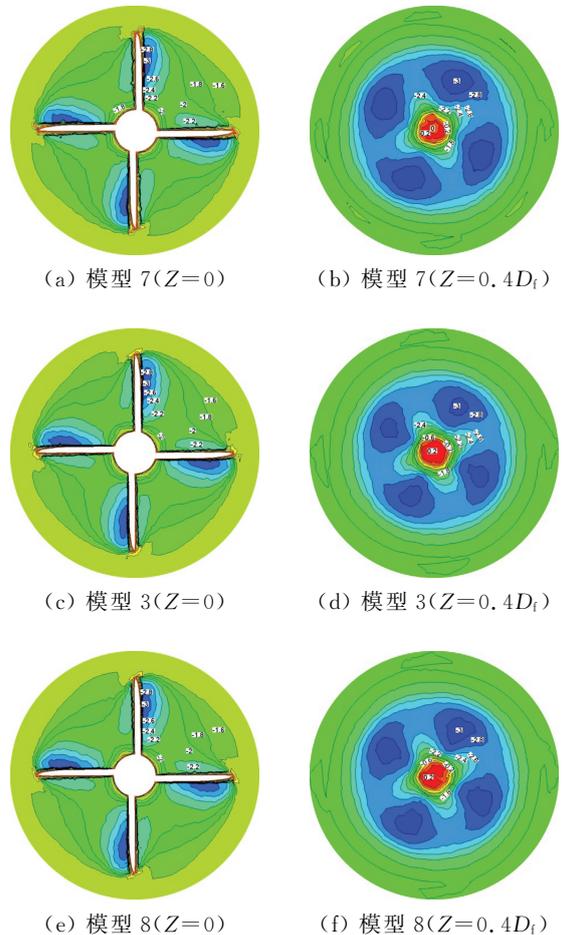
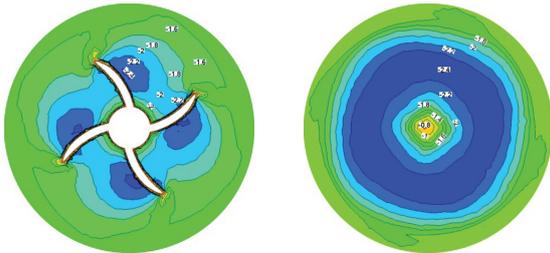


图 10 不同直径比对转螺旋桨轴向速度等值线分布图

Fig. 10 Axial velocity contours of contra-rotating propellers with different diameter ratios

研究对转螺旋桨和单桨的轴向、径向和切向速度分布,剖析对转螺旋桨具有较好敞水性能的作用机理,选取功率系数 $B_p = 26.601$ 的对转螺旋桨模型 3 和单桨 2 的数值结果.比较图 11 中单桨 2 和图 10 中模型 3 的轴向速度等值线分布图,图中模型 3 在桨盘 $Z=0$ 处其轴向速度负值高速区域面积明显大于单桨 2,随着与盘面中心处距离的增加,在截面 $0.4D_f$ 处其负值高速区域面积变小,在截面中心处形成正值速度区域,相比单桨 2,其轴向诱导速度减小趋势明显较快,表明流经桨叶的流体动量变化增大,提高了对转螺旋桨的敞水效率.由图 12 中看出,对转螺旋桨模型 3 在桨盘 $Z=0$ 处的径向诱导速度明显高于单桨 2,在

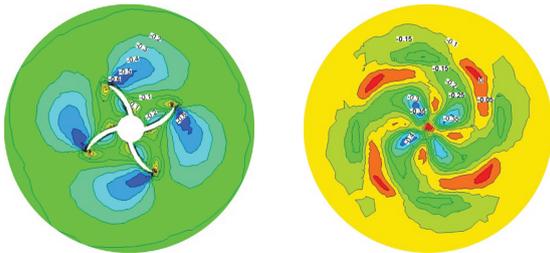
截面 $0.4D_f$ 处其两者数值却相差不大,表明模型 3 径向诱导速度的减小趋势也快于单桨 2,其后桨具有吸收前桨尾涡能量,减小前桨尾流外直径,提高对转螺旋桨敞水性能的作用.图 13 中 $Z=0$ 处的切向速度等值线分布图中螺旋桨桨叶各部分的切向速度不相同,叶根处的速度较低,叶梢处速度最高,且模型 3 的切向速度叶梢处其数值要略大于单桨 2.在 $0.4D_f$ 处切向速度数值由截面中心向两端有逐渐减小的变化趋势,且模型 3 出现负值的切向速度,其数值明显小于单桨 2,减小切向速度对流体扰动的影响,增加螺旋桨的推力,提高了对转螺旋桨的敞水效率.



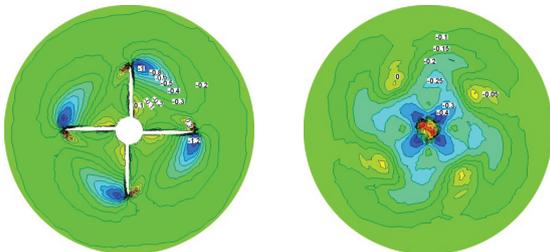
(a) 单桨 2 ($Z=0$) (b) 单桨 2 ($Z=0.4D_f$)

图 11 单桨 2 轴向速度的等值线分布图

Fig. 11 Axial velocity contours of single propeller 2



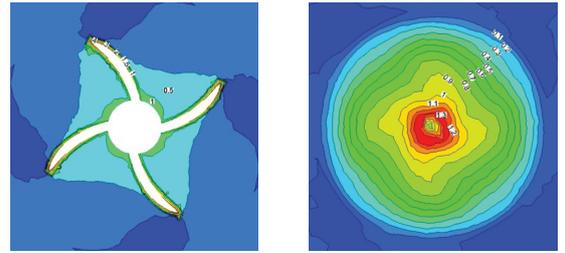
(a) 单桨 2 ($Z=0$) (b) 单桨 2 ($Z=0.4D_f$)



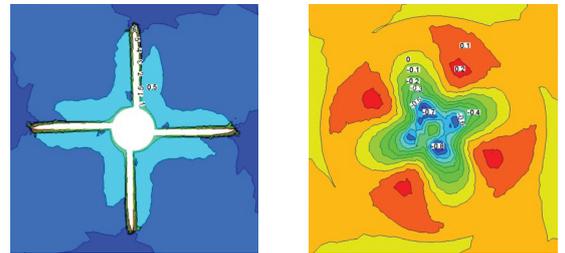
(c) 模型 3 ($Z=0$) (d) 模型 3 ($Z=0.4D_f$)

图 12 单桨和对转螺旋桨径向速度的等值线分布图

Fig. 12 Radial velocity contours of single propeller and contra-rotating propellers



(a) 单桨 2 ($Z=0$) (b) 单桨 2 ($Z=0.4D_f$)



(c) 模型 3 ($Z=0$) (d) 模型 3 ($Z=0.4D_f$)

图 13 单桨和对转螺旋桨切向速度的等值线分布图

Fig. 13 Tangential velocity contours of single propeller and contra-rotating propellers

4 结 论

(1) 基于不同湍流模型对单桨和对转螺旋桨进行数值验证,数值结果表明 RSM 模型的数值精度较高,且应用此方法进行螺旋桨敞水性能的研究具有准确性、可行性和可靠性.

(2) 应用两大基本参数桨距比 L/D_f 和直径比 D_a/D_f 来研究对转螺旋桨的敞水性能,研究其参数匹配问题,结果表明选取桨距比和直径比合适的对转螺旋桨明显提高其推进效率,本桨最佳

桨距比 L/D_t 和直径比 D_a/D_t 分别选取在 0.23 和 0.92 左右,此方法为工程实际应用研究提供了实用参考价值。

(3)基于不同桨距比 L/D_t 和直径比 D_a/D_t 对转螺旋桨模型研究得到桨距比和直径比的变化对转矩系数 K_Q 的影响要大于推力系数 K_T 和敞水效率,前桨、后桨和对转螺旋桨的 K_T 和 K_Q 均随进速系数增大而减小,且桨距比 L/D_t 变化对前桨 K_T 和 K_Q 的影响要大于后桨,直径比 D_a/D_t 变化的数值结果却相反。

(4)数值计算比较对转螺旋桨和单桨的水动力性能,结果表明在功率系数相同的情况下,对转螺旋桨的敞水效率明显高于单桨,其敞水性能明显具有优越性。

(5)数值剖析对转螺旋桨具有较好敞水性能的作用机理,结果表明随着与盘面中心处距离的增加,对转螺旋桨模型 3 的后桨吸收前桨轴向速度和尾涡能量,使轴向和径向诱导速度减小趋势快于单桨和其他对转螺旋桨模型,增加流经桨叶的流体动量,减少前桨尾流外直径,且其切向速度的数值也随着与盘面中心处距离的增加而小于单桨 2,减小了切向速度对流体扰动的影响,增加了螺旋桨的推力,提高了对转螺旋桨敞水性能。

参考文献:

- [1] 王国强,董世汤. 船舶螺旋桨理论与应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2005:383-396.
WANG Guoqiang, DONG Shitang. **Theory and Application of Ship Propeller** [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2005:383-396. (in Chinese)
- [2] 潘光,肖志勇,黄明明,等. 对转螺旋桨设计参数优化[J]. 鱼雷技术,2010,18(1):6-8.
PAN Guang, XIAO Zhiyong, HUANG Mingming, *et al.* Parameters optimization of contra-rotating propeller design [J]. **Torpedo Technology**, 2010, 18(1):6-8. (in Chinese)
- [3] 孙勤,顾蕴德. 对转螺旋桨的一个简单计算方法[J]. 交通部上海船舶运输科学研究所学报,1981,8(2):198-215.
SUN Qin, GU Yunde. A simplified method for calculating the performance of contra-rotating propellers [J]. **Journal of Shanghai Ship and Shipping Research Institute**, 1981, 8(2):198-215. (in Chinese)
- [4] MILLER M L. Experimental determination of unsteady forces on contra-rotating propellers in uniform flow: AD-A032337 [R]. Bethesda: David W Taylor Naval Ship R&D Center, 1976.
- [5] YANG Chengjun, TAMASHIMA M, WANG Gouqiang, *et al.* Prediction of the unsteady performance of contra-rotating propellers by lifting surface theory [J]. **Transactions of the West-Japan Society of Naval Architects**, 1992(83):47-65.
- [6] 刘志华,熊鹰,叶金铭,等. 基于多块混合格网的RANS方法预报螺旋桨敞水性能的研究[J]. 水动力学研究与进展 A辑,2007,22(4):450-456.
LIU Zhihua, XIONG Ying, YE Jinming, *et al.* Study on the prediction of propeller open-water performance using RANS formula and multi-block hybrid meshes [J]. **Journal of Hydrodynamics**, 2007, 22(4):450-456. (in Chinese)
- [7] 王展智,熊鹰,齐万江. 对转螺旋桨敞水性能数值预报[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2012,40(11):77-80, 88.
WANG Zhanzhi, XIONG Ying, QI Wanjiang. Numerical prediction of contra-rotating propellers open water performance [J]. **Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)**, 2012, 40(11):77-80, 88. (in Chinese)
- [8] ZHANG Tao, YANG Chengjun, SONG Baowei, *et al.* CFD simulation of the unsteady performance of contra-rotating propellers [J]. **Journal of Ship Mechanics**, 2011(6):605-615.
- [9] 王福军. 计算流体力学分析——CFD软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
WANG Fujun. **Principle and Application of CFD Software for Computational Fluid Dynamics** [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [10] VERSTEEG H K, MALALASEKERA W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method** [M]. New York: Wiley, 1995.
- [11] 孙永华. 荷兰船模水池B系列螺旋桨新旧图谱的比较[J]. 船舶,1997(3):30-39.
SUN Yonghua. Comparing of new and old spectrum

- of B-series propellers of Netherlands ship model basin [J]. *Ship and Boat*, 1997 (3): 30-39. (in Chinese)
- [12] 吴利红,董连斌,徐文海. 基于 MATLAB 和 ProE 的螺旋桨三维建模[J]. 大连海事大学学报, 2011, **37**(2):17-20.
WU Lihong, DONG Lianbin, XU Wenhai. 3D modeling of ship propeller based on MATLAB and ProE [J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2011, **37**(2):17-20. (in Chinese)
- [13] 黄胜,王超,王诗洋. 不同湍流模型在螺旋桨水动力性能计算中的应用与比较[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2009, **30**(5):481-485.
HUANG Sheng, WANG Chao, WANG Shiyang. Application and comparison of different turbulence models in the computation of a propeller's hydrodynamic performance [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2009, **30**(5):481-485. (in Chinese)

Numerical simulation of open water performance of B series of contra-rotating propellers based on RANS methods

HU Junming, LI Tieli, LIN Yan*, JI Zhuoshang, DU Xiangjin

(School of Naval Architecture & Ocean Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Based on RANS methods, the open water performance of B series of contra-rotating propellers is studied, and single propeller and contra-rotating propellers are calculated to analyze the effects of different turbulence models on the numerical results. The research is conducted to study the parameters matching of contra-rotating propellers between pitch ratio and diameter ratio. The open water efficiency of single propeller and contra-rotating propellers is compared, meanwhile, the change of wake stream field is dissected. The method breaks through the limitation of the traditional potential flow theory which can not include viscosity, and the difficulty of analyzing and grasping the micro-flow mechanism and so on. The numerical analyses results show that the numerical accuracy of RSM model is higher, and the reasonable diameter ratio and distance between the blades of the contra-rotating propellers significantly improve the propulsive efficiency. The rear propeller can absorb the axial velocity and vortex energy of the front propeller which will increase the fluid momentum flowing through the blade and reduce the external diameter of wake flow of the front propeller, reduce the tangential velocity's influence on fluid disturbance which can increase the propeller's thrust. It's practical for improving the propeller's propulsion performance in engineering.

Key words: contra-rotating propellers; RANS methods; hydrodynamic performance; turbulence models; numerical simulation