网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/42.1755.TJ.20151008.1115.036.html 期刊网址:www.ship-research.com

引用格式:胡俊明,李铁骊,林焰,等.B系列串列螺旋桨敞水性能参数匹配数值仿真[J].中国舰船研究,2015,10(5):76-82.
HU Junming, LI Tieli, LIN Yan, et al. Numerical simulation of the open water performance of parameter matching of B series tandem propellers[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2015, 10(5):76-82.

B系列串列螺旋桨敞水性能参数匹配数值仿真

胡俊明,李铁骊,林焰,余欣
大连理工大学 船舶工程学院,辽宁 大连 116024

摘 要:分析研究B系列螺旋桨的敞水性能,应用VB语言编制B系列桨回归方程的计算程序,数值过程基于雷诺平均纳维—斯托克斯(RANS)法处理数值粘性流场,采用Fortran语言、Pro/E和GAMBIT前处理软件联合建模并划分网格,研究湍流模型对螺旋桨敞水性能的影响,对串列螺旋桨数值计算验证和敞水性能参数匹配问题进行研究,分析其尾流和速度场的变化状况。结果表明:RSM模型为较佳湍流模型;合适的桨距比和叶错角可明显提高串列桨的敞水性能,串列桨后桨吸收前桨的尾涡能量,且随着与盘面处的距离增大,串列桨轴向诱导速度减少趋势快于单桨,可提高串列桨的敞水效率。

关键词:B系列串列桨;RANS法;湍流模型;敞水性能;参数匹配
中图分类号:U664.33 **文献标志码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1673-3185.2015.05.013

Numerical simulation of the open water performance of parameter matching of B series tandem propellers

HU Junming, LI Tieli, LIN Yan, YU Xin
School of Naval Architecture Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

Abstract: Numerical study of the open water performance of B series propellers is conducted in this paper, with the regression equation, which comes from the open water test of B series propellers, programmed using VB language, and the viscous flow field analyzed based on RANS method. The process involves FORTRAN program, Pro/E and GAMBIT to establish the propeller model. Then, the open water performances of B4-40 propellers are compared under different kinds of turbulence models; the numerical results and the parameter matching problem of tandem propellers are studied, and the changes of wakes and axial velocity distribution are observed. The results show that the RSM model is superior to other turbulence models, and the reasonable angle and distance between the blades of tandem propellers significantly improve the propulsion efficiency. The tandem propellers can effectively absorb the energy of trailing vortex, and as the distance of the disk increases, the axial velocity of the tandem propellers decreases faster than that for a single paddle, so the open water efficiency of the tandem propellers can be greatly increased.

Key words: B series tandem propeller; RANS method; turbulence model; open water performance; parameter matching

0 引 言

随着社会的进步和技术革新,大批高速军用和民用船舶涌现,船舶吨位增加,螺旋桨空泡、振动问题日益突出,使传统船舶推进装置面临严峻的挑战。串列螺旋桨的提出,提高了普通螺旋桨

收稿日期:2015-04-02 **网络出版时间**:2015-10-8 11:15
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51209034);国家公益性行业科研专项资助项目(201003024)
作者简介:胡俊明,男,1985年生,博士生。研究方向:船舶与螺旋桨水动力性能研究。E-mail:Junming5779@126.com
李铁骊(通信作者),女,1963年生,副教授,博士生导师。研究方向:船舶与螺旋桨水动力性能研究。
E-mail:moet@dlut.edu.cn

的推进性能，突破了螺旋桨在直径受限制的情况下，敞水效率低下的局限，并在一定程度上降低了空泡和振动的发生[1-4]。

传统对串列螺旋桨的研究，停留在单桨设计方法的基础上，其根据实船试航和船模试验进行一定程度的修正，理论研究受势流理论的局限，无法考虑粘性的影响以及流场的非线性和复杂性。计算流体动力学（CFD）的发展，实现了粘性处理、数值计算绕流场，克服了理论方法的局限，且经济性好，数值结果与试验结果一致，成为现阶段研究螺旋桨敞水性能的重要手段[5-6]。

本文将基于RANS方法数值仿真研究B系列螺旋桨的水动力性能，数值过程采用Fortran语言、Pro/E和GAMBIT前处理软件联合建模并划分网格，对B系列螺旋桨应用VB语言进行回归计算、湍流模型数值计算验证和比较，研究串列螺旋桨敞水性能和参数匹配问题，以期为工程设计应用提供有价值的参考。

1　模型参数特征

基于荷兰船模水池提供的B系列螺旋桨敞水效率和空泡性能较佳，为船舶界广泛使用，本文主要研究B4系列螺旋桨。该系列螺旋桨为四叶桨，其叶形梢部为弓形且较宽，有15°后倾的纵斜角，根部叶切面为机翼型，此设计既能提高敞水效率又能改善空泡性能，其螺距不同于其他B系列螺旋桨，它自叶根向0.6R（R为螺旋桨半径）处逐渐递增，0.6R以上为等螺距分布[7]。单桨B4系列螺旋桨的基本参数如表1所示。

表1　B4系列螺旋桨基本参数

Tab.1　The geometry elements of B series propeller

基本参数	B4-40	B4-55	B4-70	B4-80
直径/m	0.22	0.22	0.22	0.22
螺距比（0.7R）	1.2	1.2	1.2	1.2
盘面比A_E/A_D	0.40	0.55	0.70	0.80
毂径比d/D	0.20	0.20	0.20	0.20
纵斜角/（°）	15	15	15	15
叶数/个	4	4	4	4
叶剖面形式	B	B	B	B

串列螺旋桨桨距比L/D（前后桨0.7R处轴向距离与螺旋桨直径之比）、叶错角θ（后桨叶滞后于前桨叶的角度）、前后桨直径比、螺距比、叶型和叶轮廓等组成串列桨的基本参数。本文研究B系列串列桨，其叶剖面为B型，在一定的轴向距离内前后桨梢涡不会相互干扰，且后桨直径不减小，有助于减轻桨叶负荷和提高串列桨的敞水效率，因此选取后桨直径和前桨相同。由文献[8]可知，串列螺旋桨尾流场径向速度变化甚小，因此，前后桨可取为等螺距桨。基于模型试验和理论结果表明，前后桨螺距比相差0.1~0.2时效率较高，因此本文前后桨螺距比差值取为0.2。串列桨前后桨基本参数与单桨相同，螺距比不同。

2　计算原理

2.1　控制方程

基于雷诺平均法研究螺旋桨的敞水性能，数值模拟粘性均匀来流场，螺旋桨保持一定转速在流场中旋转，其流场流动问题相对复杂，流体不可压缩且具有粘性，则不可压缩流场连续方程和RANS方程表达式[9]为：

$$\frac{\partial(v_1)}{\partial x_1}+\frac{\partial(v_2)}{\partial x_2}+\frac{\partial(v_3)}{\partial x_3}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial v_i}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}(v_i v_j)+\frac{\partial \overline{v'_i v'_j}}{\partial x_j}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i}+\mu\frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j \partial x_j}+f_i \tag{2}$$

式中：v_i，v_j为时均值（$i,j=1,2,3$）；v'_i为脉动值；ρ为流体密度；t为时间；p为流体压力；f_i为质量力；$\overline{v'_i v'_j}$为雷诺应力项。RANS方程因$\overline{v'_i v'_j}$项的存在而不封闭可解，本文基于流场和空间曲面的复杂性选取雷诺应力模型（RSM）使方程可解，其数值精度要高于其他湍流模型[10]。

2.2　回归公式

B系列螺旋桨应用广泛，奥氏基于120只B系列螺旋桨模型试验数据进行多元回归分析，提出了回归表达式[7]：

$$K_T=\sum_{n=1}^{39}C_{s,t,u,v}(J)^s(\frac{P}{D})^t(\frac{A_E}{A_D})^u(Z)^v \tag{3}$$

$$K_Q=\sum_{n=1}^{47}C_{s,t,u,v}(J)^s(\frac{P}{D})^t(\frac{A_E}{A_D})^u(Z)^v \tag{4}$$

式中：J为进速系数；P/D为螺距比；A_E/A_D为盘面比；Z为叶数；$C_{s,t,u,v}$为回归系数，s,t,u,v为回归指数。当雷诺数$R_{ED}>2\times10^6$时，需对回归公式推力系数K_T，转矩系数K_Q加一修正项$\triangle K_T$，$\triangle K_Q$进行修正，$\triangle K_T$，$\triangle K_Q$修正表达式和$C_{s,t,u,v}$，s,t,u,v系数详见文献[7]。

3　计算方法

3.1　计算模型及网格划分

螺旋桨曲面复杂，为得到光滑的螺旋桨模型，本文采用Fortran语言处理螺旋桨坐标转换关系式[11]，编制桨叶、桨毂型值点数据处理程序，以特

定格式“*.ibl”输出，导入Pro/E前处理软件中建立模型，以“*stp”形式导出并采用GAMBIT软件划分网格。其“*.ibl”文本格式如下：

```
Open Arclength Begin section!  1
Begin curve!  1
0.019135696  -0.01085473  -0.014498951
0.019998075  -0.00918539  0.00973939
……
Begin curve!  2
0.019135696  -0.010854735  -0.014498951
……
```

文件格式第1行为Pro/E中的关键词，“Begin section!”是建立模块的命令。第2行“Begin curve! 1”为生成第1条曲线的命令代号。其各行数据为1个点的坐标值(x,y,z)。本文给出B4-40和前后螺距比为0.9和1.1的B4-40-2的串列螺旋桨的整体模型，如图1~图2所示。

图1 B4-40螺旋桨模型

Fig.1 The model of B4-40 propeller

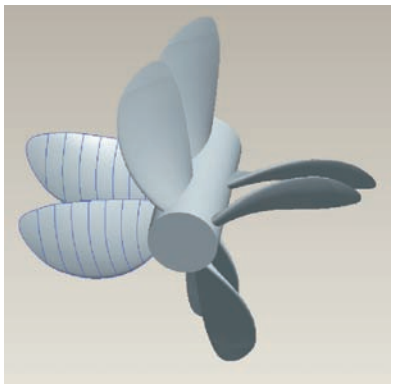


图2 B4-40-2串列螺旋桨模型

Fig.2 The model of B4-40-2 tandem propellers

3.2 网格及域划分

网格的质量和域的大小决定数值的精度和计算的时间，合理划分网格和选取域的大小成为数值过程的关键，因此，基于多重参考模型(MRF)数值计算螺旋桨的敞水性能，模型需要划分静止域和旋转域。本文整体域为一圆柱体，其直径为4D，长度为15D，其旋转域为小圆柱，长度为1D，直径为1.1D，螺旋桨盘面距速度入口为3D。因桨叶和桨毂的三维曲面复杂，在其表面进行网格加密，桨叶和桨毂面网格尺寸为0.015D，旋转域柱面采用四边形结构化网格，其网格尺寸为0.04D，静止域柱面网格尺寸为0.1D的四边形结构化网格，圆形面为0.1D的三角形非结构网格，在螺旋桨近壁面上划分边界层，取第1层网格高度为0.001 m，满足y^+无量纲距离(30~500)，其网格划分和边界条件的设置如图3所示。

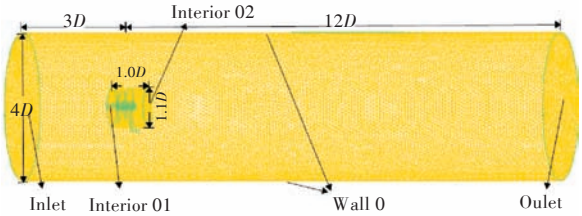


图3 网格划分及域模型

Fig.3 The division of the grid and the model of the computational domain

4 数值结果分析

4.1 数值回归验证

基于回归公式应用VB语言编制螺旋桨数值计算程序，实现视图软件的可视化，对B4-40，B4-55，B4-70螺旋桨数值回归计算，绘制螺旋桨敞水性能曲线图，并与试验值进行比较，其螺旋桨敞水性能曲线如图4~图6所示。由图中可以看出，回归计算所得到的推力系数K_T，转矩系数K_Q和敞水效率η_0与试验值吻合较好，并且随着进速系数增大，计算所得η_0大于试验值，但总体误差相对较小，验证了此程序计算螺旋桨敞水效率的

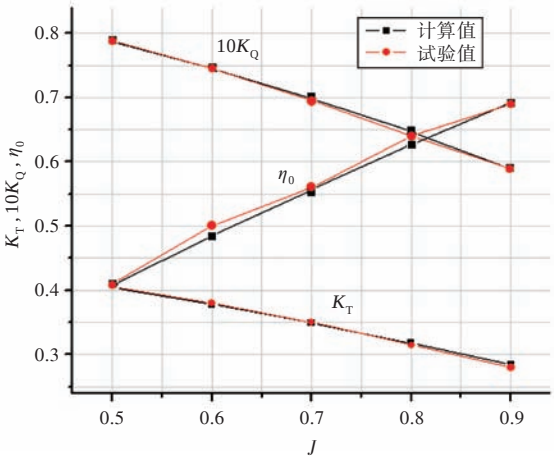


图4 B4-40桨敞水性能曲线图

Fig.4 The open water performance of B4-40 propeller

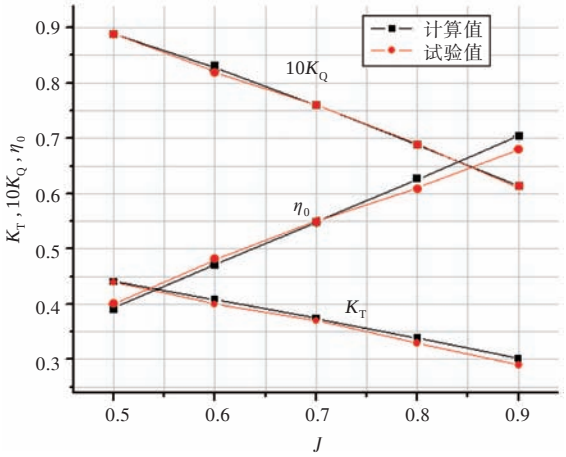


图5　B4-55桨敞水性能曲线图

Fig.5　The open water performance of B4-55 propeller

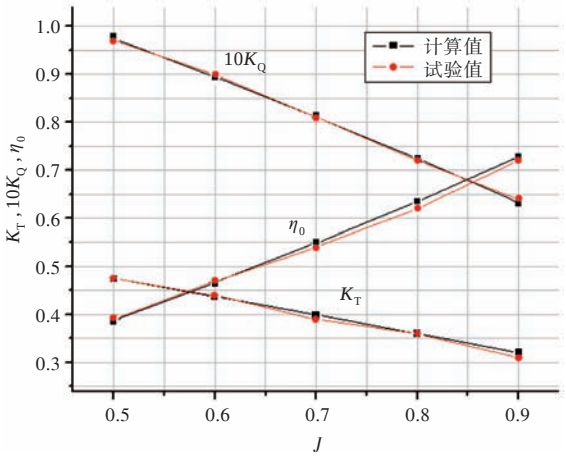


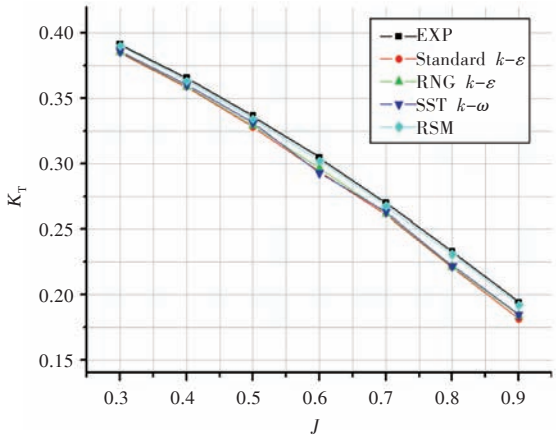
图6　B4-70桨敞水性能曲线图

Fig.6　The open water performance of B4-70 propeller

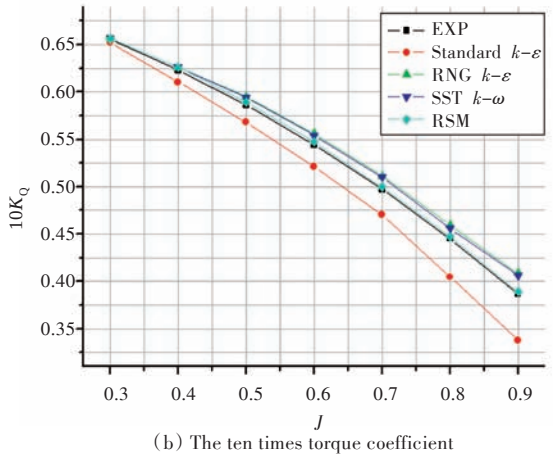
准确性。

4.2　湍流模型数值结果分析

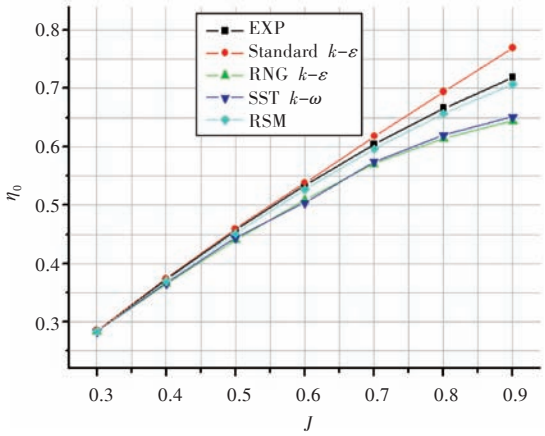
数值验证基于RANS法研究螺旋桨敞水性能的准确性，应用不同湍流模型对B4-40螺旋桨数值计算，比较湍流模型敞水效率数值结果，选取较佳的湍流模型计算方法[12]。取螺旋桨转速450 r/min，进速系数J=0.3~0.9，根据计算结果绘制K_T，K_Q和η_0性能曲线（图7）。由图中可以看出，4种湍流模型所得的K_T，K_Q和η_0随进速系数增大，其数值误差均有所增加，且4种模型所得K_T均小于试验值，RSM模型吻合最好，误差最小，SST k-ω模型次之，Standard k-ε模型误差最大，最大误差为6.51%。图7(b)中，RNG k-ε和SST k-ω模型所得的K_Q大于试验值，且Standard k-ε模型在高进速系数时与试验值偏差较大。由图7(c)中可以看出，基于Standard k-ε模型的敞水效率最大，其值大于试验值，其余3种湍流模型的敞水效率值小于试验值，从总体敞水性能曲线分析，基于RSM湍流模型，其数值结果与试验值吻合最好，误差最小，表明RSM湍流模型为较佳湍流模型，此数值方法计算螺旋桨敞水性能具有可行性和准确性。



(a) The thrust coefficient



(b) The ten times torque coefficient



(c) The open water coefficient

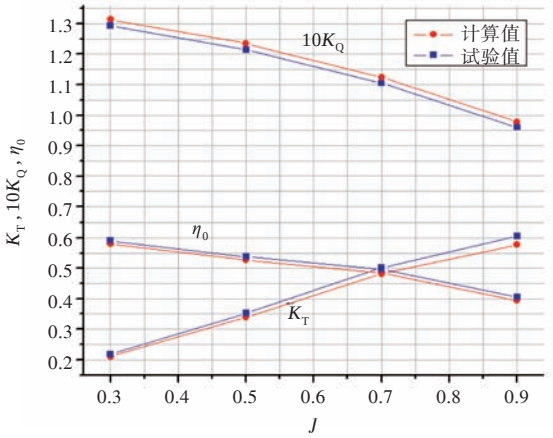
图7　不同湍流模型敞水性能曲线

Fig.7　The open water performance with different turbulence models

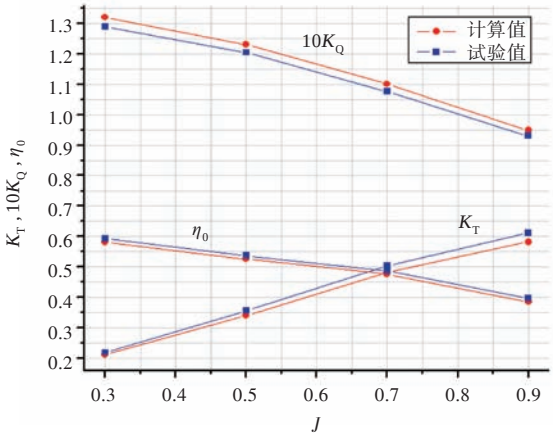
4.3　串列桨数值结果验证

数值验证串列螺旋桨计算结果的准确性，可为进一步研究参数匹配问题奠定基础。基于文献[3]中串列桨的试验结果，取模型参数为2只B4-40螺旋桨，前后桨螺距比为1.3和1.5，桨距比为0.17和0.252，叶错角β分别为1.8°和24.8°，进

速系数 J 分别为0.3,0.5,0.7,0.9,得到数值结果并绘制敞水性能曲线(图8)。由图中可以看出,数值得到的 K_T 和 η_0 小于试验值,K_Q 大于试验值,并且随着进速系数增大,K_T,K_Q 和 η_0 与试验误差有所增加,但总体数值结果与试验值吻合较好,最大误差在5%以内,说明基于此方法的数值计算串列桨的准确度较高。



(a) The distance between the blades is 0.17



(b) The distance between the blades is 0.252

图8 串列桨敞水性能曲线图

Fig.8 The open water performance of tandem propellers

4.4 串列桨参数匹配研究

在串列桨前后桨剖面形式、直径、螺距比已选取的情况下,为提高串列桨的敞水性能,需进一步研究 L/D 和 β 的参数匹配问题。基于叶错角理论可知,后桨叶处于前桨叶的自由涡之间时效率较高,其公式为

$$\beta=\frac{L/D}{(P_i/D)_{0.7R}}\times 360^\circ\pm\frac{180^\circ}{Z} \tag{5}$$

式中:当前桨冲角很小且为无振入水时,P_i/D 近似为前桨螺距比。本文串列桨所建模型为2只B4-40螺旋桨,为提高螺旋桨效率,取前后桨螺距比差值为0.2,前桨为0.9,后桨为1.1,以叶错角为因变量,选取 L/D=0.17,依据公式计算得到最佳叶错角为23°,取15°为步长间隔,计算 β 在8°,23°,38°,53°下串列桨的敞水性能,绘制敞水效率 η_0 曲线(图9)。由图9可以看出,叶错角23°时,敞水效率最好,8°次之,其次是38°,53°时的效率最差,验证了理论计算所得最佳叶错角的准确性。进一步研究串列桨的最佳参数匹配问题,选取最佳叶错角下的桨距比,分别计算 L/D=0.17,0.21,0.25,0.29这4种情况下的敞水性能,绘制效率 η_0 曲线(图10),由图10看出,L/D=0.25时,敞水性能最佳,0.21次之,0.29时的水动力性能最差。基于本文计算方法得到本桨 L/D 选取在0.21~0.25之间。

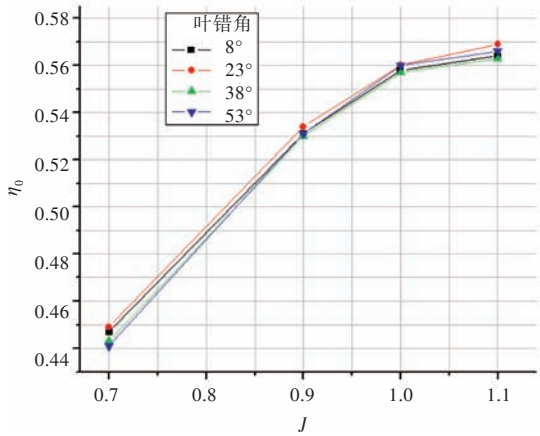


图9 不同叶错角下敞水效率曲线图

Fig.9 The open water performance with different spacing angles

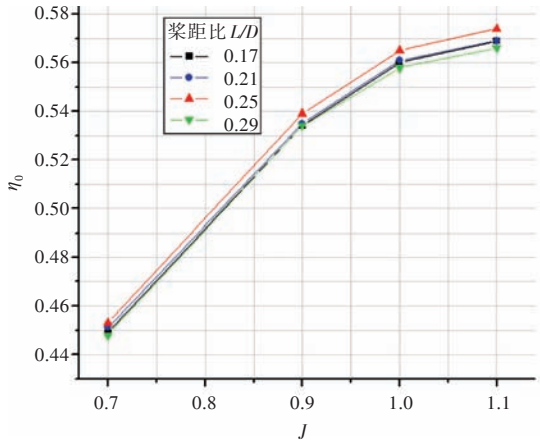


图10 不同桨距比下敞水效率曲线图

Fig.10 The open water performance with different axial spacing ratios

4.5 串列桨和单桨敞水性能比较

基于最佳 β 和 L/D,参数匹配结果选取 β=23°,L/D=0.25的串列螺旋桨,任意选取单桨模型为B4-80,比较串列桨和单桨敞水性能的优越性。根据功率系数公式 $B_P=33.07K_Q^{1/2}/J^{5/2}=NP^{1/2}/V_A^{5/2}$,在保证串列桨和单桨功率系数相等的情况下,研究其敞水性能。本文计算了在单桨和

串列桨功率系数相同，各个功率系数 B_p 不同时的敞水效率数值计算结果，如表2所示。由表2可以看出，在相同功率系数下，串列桨敞水效率 η_0 要高于单桨 η_1，其敞水性能优于单桨的情形。

表2　单桨B4-80与串列桨敞水效率计算结果

Tab.2　The calculation results on open water efficiency of B4-80 and tandem propellers

	B_p				
	16	25	36	49	81
η_1	0.617 0	0.563 3	0.527 9	0.491 7	0.419 5
η_0	0.624 2	0.567 1	0.531 4	0.498 2	0.423 5

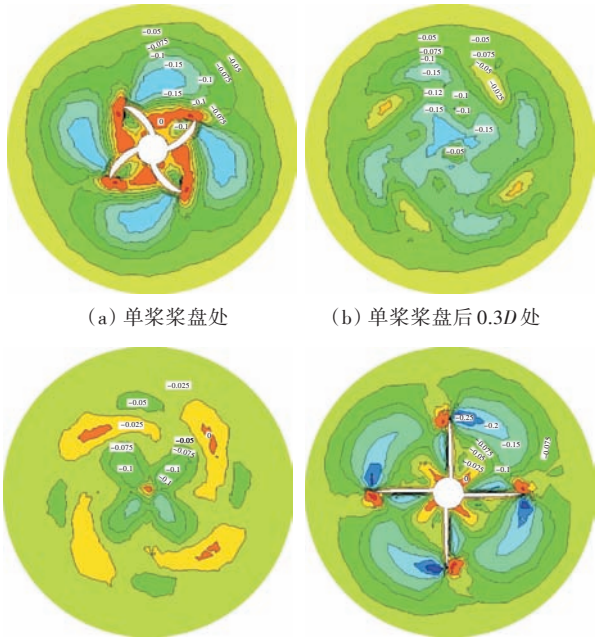
4.6　尾流及速度分析

剖析串列桨和单桨尾流场结果，选取进速系数为0.7，其尾流场如图11所示。由图中可以看出，串列桨尾流外直径小于螺旋桨直径，单桨尾流外直径却相反，其原因是高进速系数下，单桨尾流外直径随进速系数增大而增大，串列桨因前后2个桨盘之间存在相互干扰，后桨能吸收前桨的尾涡能量，使其尾流外直径小于螺旋桨直径，从而提高能量利用效率和螺旋桨性能。

图11　单桨和串列桨的尾流显示图（J=0.7）

Fig.11　The trailing vortex of propeller while J=0.7

研究单桨和串列桨的径向和轴向速度分布，选取功率系数 B_p=25时桨盘处和桨盘后0.3D处的径向和轴向速度分布等值线云图（图12~图13）。基于理论可知，径向速度产生尾涡，由图12可以看出，串列桨后桨因其吸收尾涡能量使其径向诱导速度随着与盘面处距离增加而明显减少，其负值高速区域面积变小，低速区域面积变大，且趋势快于单桨，进而减少尾流外直径，提高螺旋桨效率。由图13可以看出，轴向速度主要分布在桨盘叶面和叶背处，随着与盘面距离的增加，串列桨轴向诱导速度值减小趋势也快于单桨，表明串列桨流经桨叶的流体动量变化增加，效率增大。

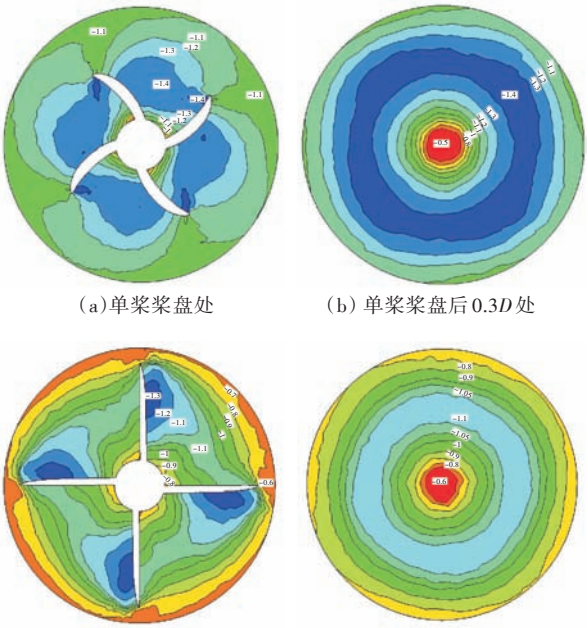


（a）单桨桨盘处　　（b）单桨桨盘后0.3D处

（c）串列桨桨盘处　　（d）串列桨桨盘后0.3D处

图12　径向速度分布等值线图

Fig.12　The radial velocity contours at different section



（a）单桨桨盘处　　（b）单桨桨盘后0.3D处

（c）串列桨桨盘处　　（d）串列桨桨盘后0.3D处

图13　轴向速度分布等值线图

Fig.13　The axial velocity contours at different section

5　结　论

本文研究B系列螺旋桨敞水性能和串列桨参数匹配的问题，分析研究其数值计算结果，得到以下结论：

1）基于VB语言对B系列螺旋桨进行数值回归计算，验证了此程序的准确性。

2）数值验证单桨、串列桨的计算结果，研究湍流模型对敞水性能的影响，结果表明，RSM模型为较佳的湍流模型，此方法具有可行性。

3）数值研究此串列螺旋桨的参数匹配问题，结果表明，合适的桨距比和叶错角可提高串列桨

的敞水性能，本桨最佳叶错角 β 为23°，桨距比 L/D 应选取在0.21~0.25之间，此研究方法可为串列桨工程设计应用提供一定的参考价值。

4）数值比较单桨与串列桨敞水性能的优越性，结果表明，在功率系数相同的情况下，串列桨的敞水效率要高于单桨，后桨吸收前桨的尾涡能量使其尾流外直径变小，且串列桨径向和轴向诱导速度随着与盘面处距离的增加而减小，其趋势快于单桨，从而提高串列桨的敞水效率和性能。

参考文献：

[1] 毕俊颖. 多桨推进初步设计方法研究[D]. 大连：大连理工大学，2013.

[2] JALKANEN J P, JOHANSSON L, KUKKONEN J, et al. Extension of an assessment model of ship traffic exhaust emissions for particulate matter and carbon monoxide [J]. Atmospheric Chemistry Physics, 2012, 12(5): 2641-2659.

[3] 孙勤，顾蕴德，郑淑珍. 串列螺旋桨的模型系列试验和图谱设计方法[J]. 中国造船，1979，20(3)：3-20.
SUN Qin, GU Yunde, ZHENG Shuzhen. On the open water series test of model tandem-propeller and its design method with charts [J]. Shipbuilding of China, 1979, 20(3): 3-20.

[4] 唐登海，董世汤. 船舶螺旋桨周围粘流场数值预报与流场分析[J]. 水动力学研究与进展，1997，12(4)：426-436.
TANG Denghai, DONG Shitang. Numerical prediction and physical analysis of the viscous flow around a marine propeller[J]. Journal of Hydrodynamics, 1997, 12(4): 426-436.

[5] HUANG S, ZHU X Y, GUO C Y, et al. CFD simulation of propeller and rudder performance when using additional thrust fins [J]. Journal of Marine Science and Application, 2007, 6(4): 27-31.

[6] ZHU Z F, FANG S L, WANG X Y, et al. Numerical simulation of viscous cavitating flow around a ship propeller [J]. China Ocean Engineering, 2011, 25(3): 539-548.

[7] 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)：30-36.
SUN Yonghua. Comparing of new and old spectrum of B-series propellers of Netherlands ship model basin [J]. Ship and Boat, 1997(3): 30-36.

[8] GAO Q X, JIN W, DRACOS V. The calculations of propeller induced velocity by RANS and momentum theory [J]. Journal of Marine Science and Application, 2012, 11(2): 164-168.

[9] 王福军. 计算流体动力学分析：CFD软件原理与应用[M]. 北京：清华大学出版社，2004.

[10] LAUNDER B, SPALDING D B. Lectures in mathematical models of turbulence [M]. London: Academic Press, 1972.

[11] 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.

[12] 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.

[责任编辑：胡文莉]