

引用格式: 袭鹏, 熊鹰, 邱辽原, 等. 多桨船舶自航因子数值预报[J]. 中国舰船研究, 2014, 9(6): 59-64, 99.

XI Peng, XIONG Ying, QIU Liaoyuan, et al. Prediction of self-propulsion parameters for multi-propeller ships[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2014, 9(6): 59-64, 99.

多桨船舶自航因子数值预报

袭鹏¹, 熊鹰¹, 邱辽原², 王展智¹

1 海军工程大学 舰船工程系, 湖北 武汉 430033

2 中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064

摘要: 以某四桨水面船舶为研究对象, 基于RANS方法和滑移网格技术, 建立船、附体和螺旋桨整体计算模型, 并运用小范围改变螺旋桨转速的方法和前后桨分别计算的方法预报该船的自航因子。结果表明: 四桨船舶内、外桨的自航因子并不相等, 内后桨的实效伴流分数和推力减额分数均比外前桨的大; 提出的方法计算结果可靠, 能够体现四桨船舶自航因子的差异性, 并且符合推力减额与伴流关系的一般规律, 可为多桨船舶的自航试验提供依据。

关键词: 自航因子; 伴流分数; 推力减额分数; 四桨船舶; RANS

中图分类号: U661.31

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2014.06.011

Prediction of Self-Propulsion Parameters for Multi-Propeller Ships

XI Peng¹, XIONG Ying¹, QIU Liaoyuan², WANG Zhazhi¹

1 Department of Naval Architecture Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

2 China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China

Abstract: In this paper, a four-propeller surface ship is studied and an integral mathematic model including the hull appendage and propellers is established. Using a RANS solver and moving grids, the self-propulsion factors are predicted by gradually modifying the rotation speed of the propeller and by respectively calculating the propeller features. The result shows that the self-propulsion factors of the inner propeller differs from those of the outer propeller. The wake fraction and thrust deduction fraction of the inner propeller is bigger than the outer propeller's. In brief, the differences among four-propeller ship self-propulsion factors can be observed and are seen to fit the ordinary relation of thrust deduction and wake, which validates the reliability of the new proposed method and provides the basis for future self-propulsion tests of multi-propeller ships.

Key words: self-propulsion parameters; wake fraction; thrust deduction fraction; four-propeller ship; RANS

0 引言

船舶自航试验包括螺旋桨敞水试验、船模阻力试验和自航试验。随着CFD技术的快速发展和计算机硬件性能的飞速提高, 越来越多的研究者开始采用数值方法预报船舶的自航性能。船舶自

航性能数值计算方法主要有体积法和整体法2种。体积法是采用体积力代替螺旋桨, 将计算得到的流场作为输入, 采用升力线/面等势流方法计算螺旋桨的推力和扭矩, 如此反复迭代得到自航点及自航因子。由于水面船舶自航模拟的计算量和难度较大, 目前国际上大多使用体积法^[1-4]。

整体法是对船、桨整体进行建模,考虑螺旋桨的真实形状和旋转,求解船、桨的干扰流场。虽然使用该方法进行计算比较耗时,但能真实地反映船、桨的相互干扰作用,因此该方法的应用也比较广泛^[5-7]。Choi等^[8]分别采用体积法和整体法对船一桨一舵之间的水动力相互影响进行计算,并与模型试验值进行对比,获得了比较准确的计算结果。熊鹰等^[9-10]和刘志华等^[11]采用整体法,针对国际通用的标准船模KCS进行了自航因子的CFD分析及预报,计算结果与模型试验结果吻合较好,表明应用该方法能较准确地预报船体的自航性能。杨仁友等^[12]对潜艇自航试验进行了数值模拟,并采用滑移网格法来实现螺旋桨的旋转,结果表明了该方法的准确性。杨琴等^[13]对全附体潜艇模型+螺旋桨进行了仿真计算、分析和研究,既得到了合理的自航因子,也清晰地描述了带桨潜艇表面的压力分布,以及桨后尾流速度场的分布规律。郭春雨等^[14]以75 000 t散货船为研究对象,建立了船一桨一舵系统的整体计算模型,并对其自航试验进行了模拟研究,数值计算结果与模型试验结果吻合良好。

以上研究大多是以单桨船/潜艇为对象,很少涉及复杂的三桨和四桨船舶。对于此类多桨船舶,由于内、外桨位置及布置方式的差异以及它们之间的相互干扰影响,使得内、外桨所处的流场环境并不一样,进而导致内、外桨的负荷分配并不一致。王兴权等^[15]对三桨船自航试验推进因子的分析方法进行了比较和分析,并提出了按螺旋桨的有效推力来分配各桨所克服的船阻力的方法。史一鸣^[16]曾提出三桨船舶推力减额分数试验方法,但并没有给出算例。本文将使用GAMBIT和ICEM14.0软件,以某四桨船舶为研究对象,对船、桨及附体进行整体建模,采用RANS方法结合SST $k-\omega$ 模型和滑移网格技术求解船、桨的干扰流场,以验证文献[16]中的方法,并提出新的方法进行计算,分析各方法的优、缺点。

1 数学模型

1.1 控制方程

目前,对于N-S方程的统计平均方法以及补充反映湍流特性的其他方程,如湍动能方程和湍流耗散率方程,是目前的基本方法。

连续性方程是质量守恒定律在流体运动中的具体表现形式,流体连续性方程为

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

雷诺平均N-S方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_0 \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_0 \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \delta_{ij} \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\overline{\rho u_i u_j}) + \rho f_i \end{aligned} \quad (2)$$

式中的变量都是时历平均值,其中: ρ 为流体密度; p 为静压; f_i 为单位质量的质量力; u_i , u_j 为速度分量; $-\overline{\rho u_i u_j}$ 为代表湍流效应的雷诺应力项; μ_0 为流体的粘性系数。

为了求解N-S方程中增加的雷诺应力,需要额外增加方程,以使雷诺应力中的脉动值与时均值联系起来,使方程组封闭,即湍流模型。本文采用的湍流模型为SST $k-\omega$ 湍流模型^[17],该模型由标准 $k-\omega$ 湍流模型发展而来,其综合了标准 $k-\varepsilon$ 的优点,合并了来源于 ω 方程中的交叉扩散项,并且湍流粘度还考虑到了湍流剪应力的传播,故其在流场模拟中具有较高的精度。

1.2 研究对象

该船为排水型水面船舶,有球鼻艏。模型长8.56 m,吃水0.303 m。船艏部共布置有4个螺旋桨,外旋,形状完全相同,同侧两个桨分别叫做外前桨和内后桨,左、右侧的螺旋桨对称布置。螺旋桨模型为五叶桨,有侧斜和纵倾的变化。螺旋桨布置如图1所示。



图1 螺旋桨布置示意图

Fig.1 Propeller arrangement

1.3 网格划分及边界条件设置

由于计算对象和计算流域都存在对称性,故建模和计算均只考虑右舷部分。计算区域入口边界离船艏1倍船长,出口边界离船艉2倍船长,外侧面离船舭纵剖面1倍船长。由于艏部附体较复杂,故将艏部包住进行非结构化网格划分。采用滑移网格方法实现螺旋桨的旋转。每个螺旋桨转子域的网格约70万,艏部包体区域约630万,结构化网格约360万,总共约1 100万个网格单元。网格划分如图2和图3所示。



图2 艉部包体非结构网格示意图
Fig.2 Mesh at the stern



图3 船体表面网格图
Fig.3 Mesh of the hull

边界条件设置如下:上游入口采用速度入口,给定均匀来流的速度值;下游出口采用压力出口,设定表压为0,即参考点静压相等;上边界、侧边和中间面均采用对称面边界条件;在裸船体、轴包套和轴支架的表面定义无滑移、不可穿透的边界条件。采用有限体积法离散控制方程和湍流模式,对流项和扩散项采用二阶迎风格式进行离散,压力速度耦合迭代采用SIMPLEC方法。

1.4 航点确定

摩擦阻力修正值 F_D 为

$$F_D = (C_{FM} - C_{FS} - \Delta C_F) \frac{\rho_M V_M^2 S_M}{2} \quad (3)$$

式中: C_{FM} 为船模的摩擦阻力系数; C_{FS} 为实船的摩擦阻力系数; ΔC_F 为换算补贴系数,可选取 0.3×10^{-3} ; ρ_M 为模型试验温度时的淡水密度, kg/m^3 ; S_M 为船模的浸湿面积, m^2 ; V_M 为船模速度, m/s 。

其中,摩擦阻力系数 C_{FM} 和 C_{FS} 采用下式计算:

$$C_{FS} = \frac{0.455}{(\lg R_{NS})^{2.58}} \quad (4)$$

$$C_{FM} = \frac{0.455}{(\lg R_{NM})^{2.58}} \quad (5)$$

式中, R_{NS} 和 R_{NM} 分别为实船和模型的雷诺数。

按照上述公式,计算得到本模型的摩擦阻力修正值 $F_D = 19.68 \text{ N}$ 。

参考文献[9-11],对自航点进行确定,如图4所示。其中, R_t 为船体总阻力, T_n 为内后桨推力, T_w 为外前桨推力; n 为螺旋转速, r/min 。

确定的自航工况如表1所示。

2 结果分析

图5所示为桨盘面中心所在水平面上船体周围的流线分布图。图6~图9为计算得到的桨叶表面压力分布图。

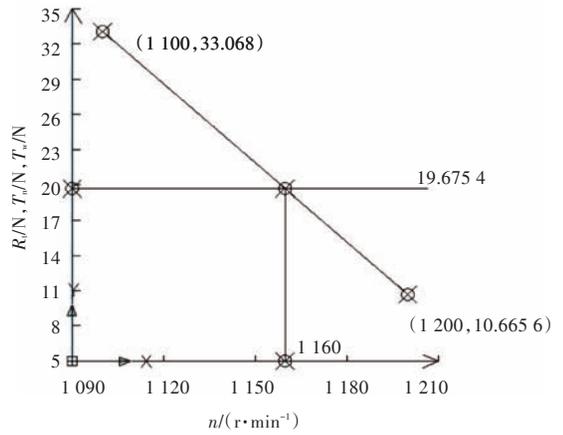


图4 自航点确定
Fig.4 Calculation of the self-propulsion point

表1 自航工况
Tab.1 Self-propulsion conditions

螺旋桨转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	1 160
船模速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	2.572
傅汝德数	0.281
计算时间步长/s	0.000 29

注:计算不考虑自由液面的影响。

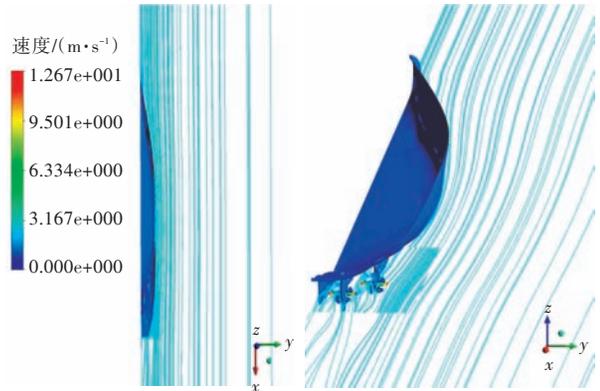


图5 流线图
Fig.5 Velocity streamlines

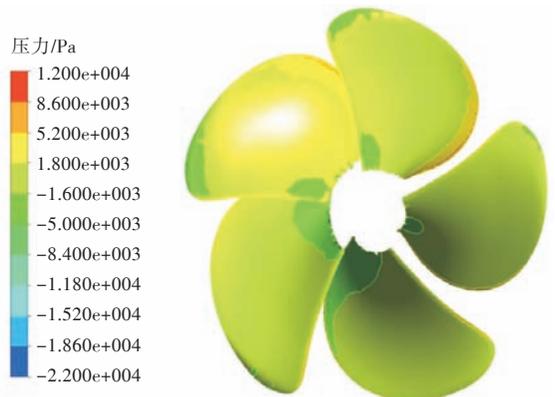


图6 外前桨压力面压力分布云图
Fig.6 Pressure distribution on the blade surface of pressure side of outer propeller.

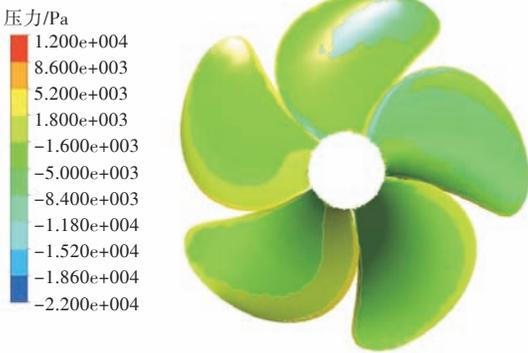


图7 外前桨吸力面压力分布云图

Fig.7 Pressure distribution on the blade surface of suction side of outer propeller

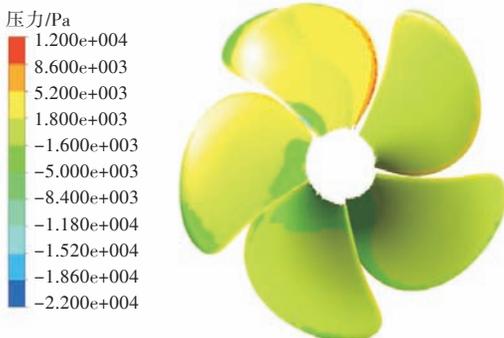


图8 内后桨压力面压力分布云图

Fig.8 Pressure distribution on the blade surface of pressure side of inner propeller

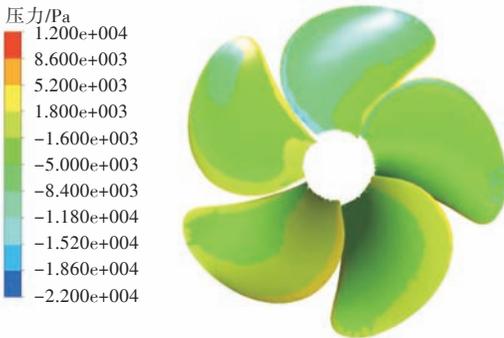


图9 内后桨吸力面压力分布云图

Fig.9 Pressure distribution on the blade surface of suction side of inner propeller

2.1 实效伴流分数

目前,测定实效伴流广泛使用等推力法^[18]。首先,计算得到螺旋桨的敞水曲线。螺旋桨敞水数据如表2所示,敞水曲线如图10所示。

表2 螺旋桨敞水性能参数

Tab.2 Open water performance parameters of propeller

进速系数 J	推力 T/N	扭矩 $Q/(N \cdot m)$	推力系数 K_T	扭矩系数 K_Q	敞水效率 η
0.7	50.447 4	1.525 2	0.231 9	0.045 89	0.563 0
0.8	39.682 9	1.311 1	0.182 4	0.039 45	0.588 8
0.9	28.055 4	1.064 0	0.129 0	0.032 02	0.5770
1.0	14.930 7	0.772 2	0.068 6	0.023 24	0.470 1

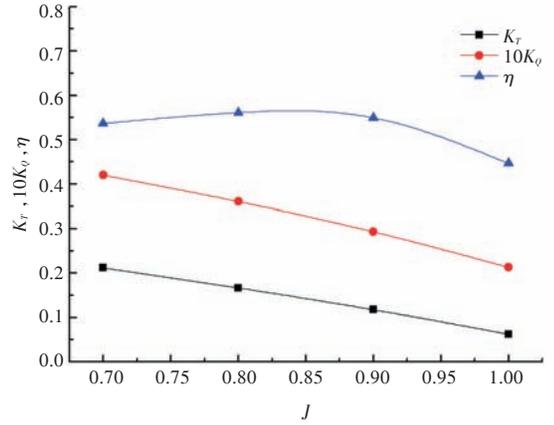


图10 螺旋桨敞水曲线

Fig.10 Open water performance of propeller

通过对自航方案进行计算,得到前、后桨的水动力性能参数如表3所示。

表3 螺旋桨水动力性能参数

Tab.3 Hydrodynamic performance parameters of propeller

	T/N	Q/N	K_T	$10K_Q$	船后效率
内后桨	37.595 4	1.273 2	0.185 0	0.410 0	0.625 2
外前桨	32.800 0	1.121 6	0.161 4	0.361 2	0.619 2

按照等推力法,在图10上分别找到令 K_T 等于0.185 0和0.161 4的进速系数,结果如表4所示。

从表4中可以看出,四桨船舶内、外桨的实效伴流分数是不同的,对于本类型船,内后桨的实效伴流分数比外前桨的大。

表4 实效伴流分数

Tab.4 Wake fraction

船速/ ($m \cdot s^{-1}$)	推力系 数 K_T	进速 系数 J	进流 速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	伴流速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	实效伴 流分数	
内后桨	2.572	0.185 0	0.759 5	2.215 3	0.357 7	0.138 7
外前桨	2.572	0.161 4	0.810 6	2.364 4	0.208 6	0.080 7

2.2 推力减额分数

螺旋桨在船后工作时,由于它的抽吸作用,会使桨盘前方的水流速度增大。根据伯努利定理,水流速度增大,压力必然下降,故在螺旋桨抽吸作用所及的整个区域内压力都将降低,其结果会改变船艏部分的压力分布状况,导致船体阻力增加。

螺旋桨在船后工作时引起的船体附加阻力称为阻力增额 ΔR ,阻力增额通常被称为推力减额,用 ΔT 表示。在实用上,常用推力减额分数来表征推力减额的大小,推力减额 ΔT 与推力 T 的比值称为推力减额分数 t ,即

$$t = \frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta R}{T}$$

文献[16]提出了三桨船推力减额分数的试验方法,本文将以此为基础,经过改进而得到四桨

船舶推力减额分数的数值计算方法,并对其进行计算验证。其原理是通过对内后桨和外前桨在转速满足力平衡方程的条件下做小量改变,从而得到多个不同转速下的力平衡方程,通过联立求解平衡方程,即可得到内后桨和外前桨的推力减额分数。

对于某一船模速度,当内后桨和外前桨的转速保持相同时,力平衡方程为

$$R - F_D = T_{n1}(1 - t_{n1}) + T_{w1}(1 - t_{w1}) \quad (6)$$

保持船模速度不变,内后桨转速增加一个小量 Δn_n ,而为了满足上述平衡方程,外前桨的转速减少一个小量 Δn_w ,则有

$$R - F_D = T_{n2}(1 - t_{n2}) + T_{w2}(1 - t_{w2}) \quad (7)$$

同理,可以使外前桨的转速增加一个小量 Δn_w ,而内后桨的转速减少一个小量 Δn_n ,则有

$$R - F_D = T_{n3}(1 - t_{n3}) + T_{w3}(1 - t_{w3}) \quad (8)$$

假定螺旋桨转速的小量变化对推力减额分数的影响可以忽略,即

$$t_n = t_{n1} = t_{n2} = t_{n3}$$

$$t_w = t_{w1} = t_{w2} = t_{w3}$$

将式(6)~式(8)两两联立求解,得到

$$t_w = 1 - \frac{(R - F_D)(T_{n1} - T_{n2})}{(T_{n1}T_{w2} - T_{w1}T_{n2})}$$

或

$$t_w = 1 - \frac{(R - F_D)(T_{n1} - T_{n3})}{(T_{n1}T_{w3} - T_{w1}T_{n3})}$$

本文设定的螺旋桨转速以及计算得到的前、后桨推力如表5所示。经方程计算,得到前、后桨的推力减额分数如表6所示。

表5 计算转速及螺旋桨推力

Tab.5 Calculation rotating speed and thrust of propeller

	转速/(r·min ⁻¹)		推力 T/N	
	外前桨	内后桨	外前桨	内后桨
式(6)	1 160	1 160	32.800	37.595 4
式(7)	1 155	1 165	31.679 4	39.219 5
式(8)	1 165	1 155	33.942 1	35.842 6

表6 推力减额分数

Tab.6 Thrust deduction fraction

	外前桨推力 减额分数	内后桨推力 减额分数
联立式(6)、式(7)	0.076 0	0.362 5
联立式(6)、式(8)	0.052 7	0.382 8
平均值	0.064 4	0.372 6

由表6可知,采用该方法计算得到的前、后桨的推力减额分数不同,内后桨的推力减额分数要比外前桨的大。规律是合理的,但内后桨的计算结果偏大。根据文献[18]中的推力减额与伴流的

理论关系,得到推力减额分数要比伴流分数小,说明该计算结果与实际情况不符。这是由于前、后桨转速的改变比较微小,所以 $(T_{n1}T_{w2} - T_{w1}T_{n2})$ 和 $(T_{n1}T_{w3} - T_{w1}T_{n3})$ 均为一小量,容易引起较大的计算误差。

为了得到准确的结果,本文提出以下方法:忽略内、外两桨的相互干扰,认为双桨方案的船体附加阻力与只有内桨没有外桨的船体附加阻力之差即为外桨引起的阻力增额,该阻力增额除以双桨方案时的外桨推力即为外桨推力减额分数。同理,双桨方案的船体附加阻力与只有外桨没有内桨的船体附加阻力之差即为内桨引起的阻力增额,该阻力增额除以双桨方案时的内桨推力即为内桨推力减额分数。只带内后桨的计算模型如图11所示,网格如图12所示。



图11 只带内后桨的计算模型图

Fig.11 Calculational model with the inner propeller



图12 只带内后桨的计算模型网格图

Fig.12 Mesh of the calculational model with the inner propeller

通过计算,得到带双桨、只带内后桨、只带外前桨3种计算方案中船体阻力(单位:N)如表7所示。表8所示为采用新方法所得的推力减额分数。

表7 船体阻力

Tab.7 Resistance of hull

双桨	81.215 0
只有外前桨	77.997 5
只有内后桨	79.521 1

表8 新方法所得推力减额分数

Tab.8 Thrust deduction fraction by new method

	推力 T/N	阻力增额 ΔR /N	推力减额 ΔT /N	推力减额分数 t
外前桨	33.018 3	1.693 9	1.693 9	0.051 6
内后桨	38.013 5	3.217 5	3.217 5	0.085 6

由表8可以看出:四桨船舶内后桨的推力减额分数要比外前桨的大,且前、后桨的推力减额分数均比其实效伴流分数小,符合推力减额分数与伴流分数关系的一般规律。这是由于形势推力减

额为推力减额的主要成分,而形势推力减额分数又比形势伴流分数小^[18]。该结果可靠性较高,说明在工程上可用该方法于进行多桨船舶推进因子的预报。

3 结 论

本文以某四桨水面船舶为研究对象,预报了该船的实效伴流分数,并采用文献中的方法和本文提出的方法分别预报了该船的推力减额分数。通过分析自航因子预报结果,可以得到:

1) 四桨船舶内后桨的实效伴流分数比外前桨的大。

2) 四桨船舶内后桨的推力减额分数比外前桨的大,且前、后桨的推力减额分数均比其实效伴流分数小。

3) 采用文献[16]中方法所得计算结果存在较大误差,采用本文提出的方法所得计算结果更具参考价值,但由于本文提出的方法忽略了内、外桨之间的相互干扰,故其准确性还需进一步提高。

开展四桨船舶自航因子的数值预报研究为四桨船舶自航试验研究打下了良好的基础,下一步将就内、外桨的相互干扰系数展开研究,以提高四桨船舶自航因子预报的准确性。

参考文献:

[1] HAN K J, LARSSON L, REGNSTROM B. A numerical study of hull/propeller/rudder interaction[C]//Proceedings of 27th Symposium on Naval Hydrodynamics. Seoul, Korea, 2008.

[2] CHOI J K, KINNAS S A. Prediction of non-axisymmetric effective wake by a three-dimensional euler solver [J]. Journal of Ship Research, 2001, 45(1): 13-33.

[3] 戈亮, 顾民, 吴乘胜, 等. 水面船自航因子 CFD 预报研究[J]. 船舶力学, 2012, 16(7): 767-773.

GE Liang, GU Min, WU Chengsheng, et al. CFD prediction of self-propulsion parameters for a surface ship[J]. Journal of Ship Mechanics, 2012, 16(7): 767-773.

[4] 吴召华, 陈作钢, 代毅. 基于体积力法的船体自航性能数值预报[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(6): 943-949.

WU Zhaohua, CHEN Zuogang, DAI Yi. Numerical prediction of self-propulsion with a body-force propeller model[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2013, 47(6): 943-949.

[5] 沈兴荣, 冯学梅, 蔡荣泉. 大型集装箱船桨舵干扰黏性流场的数值计算研究[C]//2007年船舶力学学术会议暨《船舶力学》创刊十周年纪念学术会议论文集. 中国, 2007: 152-161.

[6] 王展智, 熊鹰, 姜治芳. 舵的布置对螺旋桨水动力性能的影响[J]. 华中科技大学学报, 2012, 40(8): 53-56.

WANG Zhanzhi, XIONG Ying, JIANG Zhifang. Effect of rudder's arrangement on propeller hydrodynamic performance [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2012, 40(8): 53-56.

[7] 王展智, 熊鹰, 齐万江, 等. 船后桨的布局对螺旋桨水动力性能的影响[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(4): 427-431.

WANG Zhanzhi, XIONG Ying, QI Wanjiang, et al. The effect of propeller arrangement behind the hull on propeller hydrodynamic performance [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2012, 33(4): 427-431.

[8] CHOI J E, MIN K S, KIM J H, et al. Resistance and propulsion characteristics of various commercial ships based on CFD results[J]. Ocean Engineering, 2010, 37(7): 549-566.

[9] 熊鹰, 刘志华. 某集装箱船推进性能的数值预报[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 35(4): 670-674.

XIONG Ying, LIU Zhihua. Numerical prediction on the propulsion performance of a container ship [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 35(4): 670-674.

[10] 熊鹰, 刘志华. 自航船模和实船推进因子的数值预报方法研究[J]. 船舶力学, 2013, 17(1/2): 14-18.

XIONG Ying, LIU Zhihua. Numerical prediction of propulsion factors of propelled ship model and full scale ship [J]. Journal of Ship Mechanics, 2013, 17(1/2): 14-18.

[11] 刘志华, 熊鹰, 韩宝玉. 雷诺相似船模预报实船推进因子的数值方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2008, 29(7): 658-662.

LIU Zhihua, XIONG Ying, HAN Baoyu. Accurately predicting the propulsion factors of a ship using a Reynolds-similarity ship model [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2008, 29(7): 658-662.

[12] 杨仁友, 沈泓萃, 姚惠之. 带前置导叶桨潜艇自航试验的数值模拟与自航因子预报[J]. 船舶力学, 2005, 9(2): 31-40.

YANG Renyou, SHEN Hongcui, YAO Huizhi. Numerical simulation on self-propulsion test of the submarine with guide vanes and calculations for self-propulsion factors [J]. Journal of Ship Mechanics, 2005, 9(2): 31-40.

[13] 杨琴, 王国栋, 张志国, 等. 基于 CFD 的潜艇模型自航仿真分析[J]. 中国舰船研究, 2013, 8(2): 22-27.

YANG Qin, WANG Guodong, ZHANG Zhiguo, et al. Numerical simulation of the submarine self-propulsion model based on CFD technology [J]. Chinese

[5] 孙元泉. 潜艇和深潜器的现代操纵理论与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2001.

[6] 施生达. 潜艇操纵性[M]. 北京:国防工业出版社, 1995.

[7] 郭威, 王晓辉. 载人潜水器及其运动控制[J]. 仪器仪表学报,2005,26(增刊1):824-826.
GUO Wei, WANG Xiaohui. Manned submarine and its motion control[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(Supp 1):824-826.

[8] 黄俊峰, 徐竟青, 李一平. 水下机器人实验平台软件系统[J]. 计算机工程,2003,29(22):175-177.
HUANG Junfeng, XU Jingqing, LI Yiping. Software system of experiment platform for underwater robot[J].

Computer Engineering, 2003, 29(22):175-177.

[9] YOERGER, D R, COOKE J G, SLOTINE J E. The influence of thruster dynamics on underwater vehicle behavior and their incorporation into control system design[J]. IEEE Journal of Ocean Engineering, 1999, 15 (3):167-178.

[10] FUJII T, URA T. Control with neural network for autonomous underwater vehicle: Application to longitudinal motion control[J]. Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 1989, 166(4):503-511.

[责任编辑:饶亦楠,胡文莉]



(上接第64页)

Journal of Ship Research, 2013, 8(2):22-27.

[14] 郭春雨,赵庆新,赵大刚.基于CFD仿真模拟的船模自航试验数据处理[J].航海工程,2013,42(3):17-20.
GUO Chunyu, ZHAO Qingxin, ZHAO Dagang. Data processing method of self-propulsion test of ship based on CFD[J].Ship & Ocean Engineering, 2013, 42(3):17-20.

[15] 王兴权,陈秋芝,王德恂.三桨船船模自航试验推进因子分析方法探讨[J].武汉交通科技大学学报, 1998,22(2):145-148.
WANG Xingquan, CHEN Qiuzhi, WANG Dexun. A discussion on the analysis method of three screw

ship's propulsive factor based on model self-propulsion test[J].Journal of Wuhan Transportation University, 1998,22(2):145-148.

[16] 史一鸣.多桨船船模自航试验推进因子分析方法探讨[J].船舶设计通讯,2008(1):14-16.
SHI Yiming. Discussion on propulsive factor based on ship's self-propulsion test with multi-screw[J].Journal of Ship Design, 2008(1):14-16.

[17] 张兆顺,崔桂香,许春晓.湍流理论与模拟[M].北京:清华大学出版社,2005.

[18] 盛振邦,刘应中.船舶原理[M].上海:上海交通大学出版社,2004.

[责任编辑:卢圣芳]



(上接第91页)

2011, 16(1): 11-16.

[9] BHATTA P, LEONARD N E. Stabilization and coordination of underwater gliders [C]// 2008 Decision and Control. Piscataway, USA, 2002:2081-2086.

[10] GRAVER J G. Underwater gliders: dynamics, control and design[D]. Princeton, NJ: Princeton University, 2005.

[11] 杨海. 水下热滑翔机的温差能热机性能与运动控制研究[D].上海:上海交通大学, 2011.

[12] GRAICHEN K, HAGENMEYER V, ZEITZ M. A new approach to inversion-based feedforward control design for nonlinear systems[J]. Automatica, 2005, 41(12): 2033-2041.

[13] GRAICHEN K, ZEITZ M. Feedforward control design for finite-time transition problems of non-linear MIMO systems under input constraints [J]. International Journal of Control, 2008, 81(3): 415-425.

[责任编辑:喻 菁]