

对转舵桨的水动力性能研究

王志勇^{1,2}, 范余明^{1,2}, 孙群^{1,2}, 吴琮^{1,2}

(1. 中国船舶及海洋工程设计研究院, 上海 200011; 2. 上海市船舶工程重点实验室, 上海 200011)

Email: wzy_my@163.com)

摘要: 对转舵桨具有良好的操纵性能和较高的推进效率, 在渡轮、拖轮以及海洋平台上都具有广阔的应用前景。本文基于 OpenFOAM 软件平台, 采用滑移网格方法结合 IDDES 模型, 对对转舵桨在直航及舵角工况下的水动力性能进行数值计算。对比舵桨单元力系数的计算值与试验值, 误差在 5% 以内, 证明了数值方法的准确性。得到对转舵桨各水动力系数随进速系数和舵角变化规律。

关键词: 对转舵桨; 数值计算; IDDES; 水动力性能

1 引言

对转舵桨兼具对转桨和舵桨的优点: 采用对转式的螺旋桨布置形式, 能够提高推进器效率; 推进器能够绕竖直轴 360° 旋转, 因此具有良好的操纵性能。目前对转舵桨主要应用于渡轮、拖轮等对操纵性要求高的船舶上^[1]。对于海洋平台而言, 风浪条件剧烈变化, 不利于作业, 因此海洋平台在作业时需要具有较强的定位能力。动力定位技术结合对转舵桨装置能够满足工程需要。对转舵桨具有广阔的工程应用前景, 研究对转舵桨, 对于船舶节能减排, 提高船舶的操纵性都有着十分重要的现实意义和实用价值。

从几何外形上, 对转舵桨主要由立柱、下齿轮箱体以及立柱前后各一且旋向相反的两个螺旋桨组成。从水动力外形上来看, 下齿轮箱体与吊舱相似, 因此舵桨装置与吊舱推进器有相似之处。由于专利保护的关系, 关于对转舵桨的公开研究资料并不多。因此本文借鉴了对转桨、舵桨以及吊舱推进器的研究经验。近年来, 国内外的许多学者, 在对转桨、舵桨以及吊舱推进器方面做了很多研究工作。王展智等^[2-3]采用滑移网格方法对对转桨进行了数值计算, 考察了时间步长和不同湍流模型对敞水计算结果精度的影响。徐嘉启^[4]采用重叠网格对不同偏转角度下的吊舱推进器水动力性能进行数值模拟。车霖源^[5]计算了单独前桨、单独吊舱推进器以及混合式 CRP 的水动力性能。与单独前桨相比, 混合式 CRP 前桨的推力扭矩增加; 与单独吊舱推进器相比, 混合式 CRP 后桨的推力扭矩减小。Islam 等^[6-7]在其已有的面元法程序基础上, 研究了桨毂锥角对推式和拖式吊舱推进器的水动力性能影响。

本文基于 OpenFOAM 软件对对转舵桨在直航及舵角工况下的水动力性能进行数值研究。

2 数值模拟

2.1 研究对象

选取某对转舵桨模型作为研究对象，主要参数见表 1。对转舵桨模型见图 1。

表 1 对转舵桨的主要几何参数

参数	前桨	后桨
叶数	5	4
直径/m	0.44	0.37
旋转方向	左旋	右旋

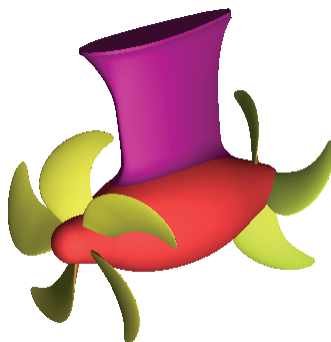


图 1 对转舵桨几何模型

2.2 控制方程

假定流体不可压，滤波后的质量方程和动量方程可以写为如下形式：

$$\nabla \cdot \bar{\mathbf{u}} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{D\bar{\mathbf{u}}}{Dt} = -\nabla p + (\mu + \mu_t) \nabla^2 \bar{\mathbf{u}} \quad (2)$$

式中， ρ 为流体密度， t 为时间， μ 为流体的动力黏性系数， p 为静压。上划线代表空间滤波而非时间平均。本文采用的 IDDES (Improved Delayed Detached Eddy Simulation)，其基准模式为 Spalart-Allmaras (S-A) 模型。

2.3 网格划分

网格采用 ANSYS ICEM 软件进行划分。如图 2 所示，计算域被分为 4 个部分：包含前桨和后桨的两个旋转域，包含立柱和下齿轮箱体的静止域，以及远场静止域。计算域是一个长方体，其长、宽、高分别为 $15 D_F$ （前桨直径）、 $10 D_F$ 、 $10 D_F$ 。坐标原点取为舵杆中心线与螺旋桨轴线的交点。原点距上游入口 $5 D_F$ ，距下游出口 $10 D_F$ ，距其余四侧边界

均为 $5D_F$ 。包含立柱和下轮箱的静止域为边长为 $4D_F$ 的正方体，其中心为坐标原点。为了方便安装，立柱部分在靠近船底板附近几何呈流线型扩大，并且前后桨距离立柱部分较近，所以前桨的叶梢和后桨的叶根与立柱之间的距离很近。螺旋桨所在旋转域的选取需要保证直径足够大，同时滑移面与立柱之间有足够距离，以确保立柱部分网格的满足网格正交性要求。因此，前桨所在旋转域的直径取为 $1.27D_F$ ，后桨所在旋转域的直径取为 $1D_F$ 。

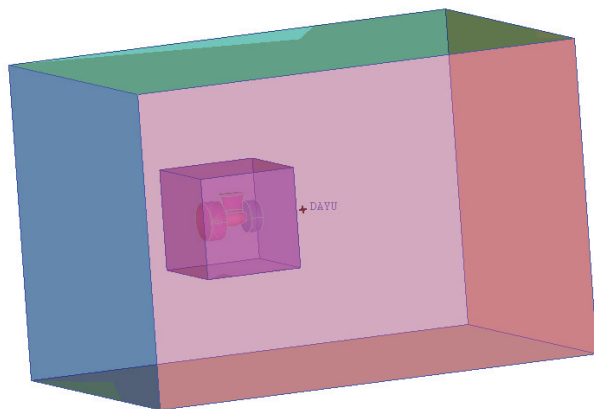
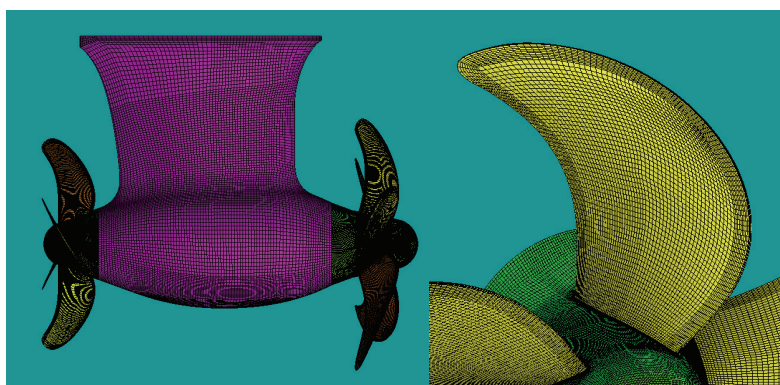


图2 计算域

立柱和下齿轮箱体的网格如图3(a)所示，桨叶表面网格如图3(b)所示。对螺旋桨导边、随边和立柱前后等速度梯度变化较大区域的网格进行了适当加密。在物面附近， y^+ 取30，边界层网格为10层。每片桨叶所在区域网格在100万左右，立柱和下齿轮箱体所在的静止区域网格数目约为200万，远场静止域网格数量在100万左右，总网格数量为1200万左右。



(a) 立柱和下齿轮箱体

(b) 桨叶表面

图3 计算网格

边界条件类型分别为：入口类型为速度入口；出口类型为压力出口；远场边界设为对称性边界；桨叶、桨毂以及立柱和下齿轮箱体设为不可穿透壁面条件。立柱和下齿轮箱体所在静止域与远场静止域之间的交界面采用滑移面处理。前桨和后桨转速相同，均为

13.65r/s, 时间步长取为 0.00010175s, 对应前后桨旋转一周内 720 个时间步。

3 结果和分析

3.1 坐标系及水动力系数定义

定义两个坐标系, 固定坐标系 O-ASZ 和随体坐标系 O-XYZ, 如图 4 所示。A 轴正方向为船舶行进方向, S 轴以船身左舷为正方向; 随体坐标系随吊舱转动, X 轴正方向为从后桨往前桨方向, Y 轴正方向为从后桨往前桨看, 垂直于 X 轴向左, Z 轴依据右手定则确定, 为垂直于 XOY 平面向上。

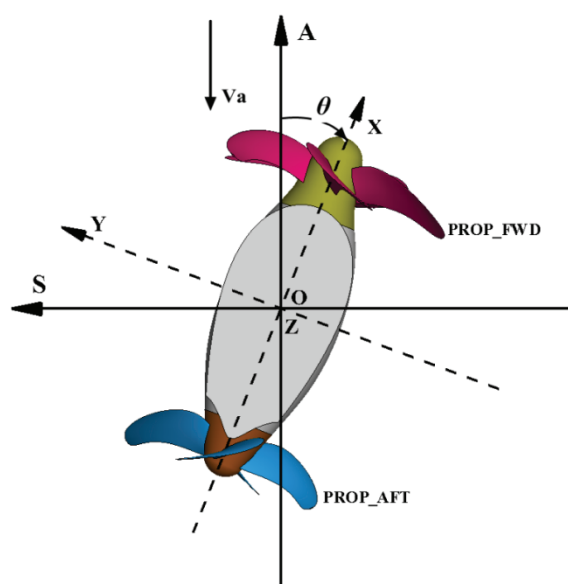


图 4 坐标系定义

对转舵桨各水动力系数定义如下:

进速系数: $J = V_A / nD_{FP}$;

前桨推力系数: $K_{TFP} = T_{FP} / \rho n^2 D_{FP}^4$;

前桨扭矩系数: $K_{QFP} = Q_{FP} / \rho n^2 D_{FP}^5$;

后桨推力系数: $K_{TAP} = T_{AP} / \rho n^2 D_{FP}^4$;

后桨扭矩系数: $K_{QAP} = Q_{AP} / \rho n^2 D_{FP}^5$;

舵桨单元推力系数: $K_{TA} = T_A / \rho n^2 D_{FP}^4$;

舵桨单元横向力系数: $K_{TS} = T_S / \rho n^2 D_{FP}^4$;

转舵力矩系数: $K_{QZ} = Q_Z / \rho n^2 D_{FP}^5$;

推进器敞水效率: $\eta = JK_{TA} / [2\pi(K_{QFP} + K_{QAP})]$;

式中，下标 FP 、 AP 分别代表对转舵桨的前桨和后桨， T_A 、 T_S 表示推进器单元轴向力和横向力， Q_z 表示整个对转舵桨单元绕 Z 轴转动的扭矩。

3.2 直航工况下对转舵桨水动力性能计算结果

直航计算时进速系数取值范围为 0.1~1.1，计算结果见表 2。舵桨单元力试验值与计算值误差在 5%以内，单元力计算值与试验值对比见图 5。由图 5 中可以看出，单元力计算值与试验值吻合良好。前后桨的推力和扭矩系数以及舵桨的单元力系数随着进速系数增加而减小。舵桨的推进效率随着进速系数增加先增大后减小，效率最大值在 $J=0.9$ 附近。舵桨的横向力系数和转舵力矩系数在直航工况下都为小量。

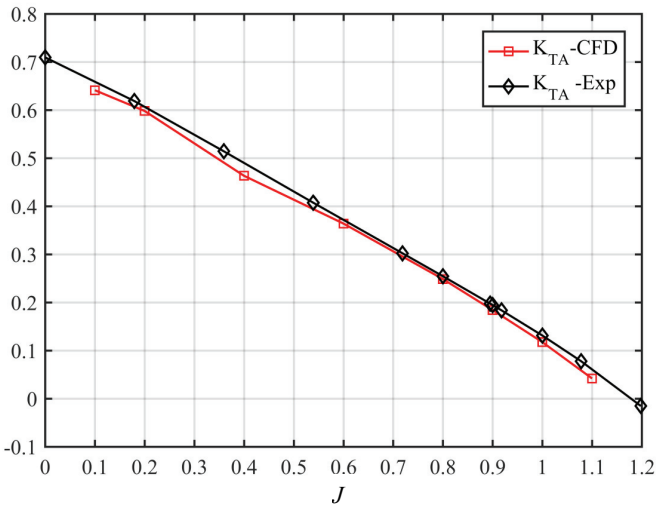


图 5 对转舵桨单元力曲线

表 2 直航工况下对转舵桨水动力计算结果

J	K_{TFP}	$10K_{QFP}$	K_{TAP}	$10K_{QAP}$	K_{TA}	η_0	K_{TS}	$10K_{QZ}$
0.1	0.4309	0.6431	0.2588	0.4498	0.6412	0.0934	0.0359	0.0691
0.2	0.4027	0.6064	0.2422	0.4244	0.5982	0.1847	0.0305	0.1006
0.4	0.3048	0.4886	0.2028	0.3664	0.4633	0.3450	0.0202	0.1415
0.6	0.2596	0.4386	0.1473	0.2789	0.3640	0.4844	-0.0006	0.1914
0.8	0.1868	0.3488	0.1013	0.2050	0.2486	0.5714	-0.0197	0.1874
0.9	0.1411	0.2878	0.0807	0.1713	0.1841	0.5743	-0.0255	0.1632
1.0	0.0932	0.2189	0.0591	0.1347	0.1175	0.5287	-0.0282	0.1260
1.1	0.0412	0.1395	0.0330	0.0891	0.0419	0.3210	-0.0196	0.0613

比较舵桨的单元力与前后桨的推力之和可以发现，两者之间存在差值。这部分力为立柱和下齿轮箱体所受的阻力。阻力值如表 3 所示，由于阻力数值较小，因此此处并未进行无量纲化。由表中可知，立柱和下齿轮箱体所受阻力随着进速系数增大而减小。

表 3 立柱和下齿轮箱体阻力

J	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	0.9	1.0	1.1
阻力 (N)	32.24	31.02	29.45	28.51	26.26	25.06	23.08	21.47

3.3 舵角工况下对转舵桨水动力性能计算结果

舵角工况计算采用旋转推进器的方式进行设置。数值计算进速系数取 $J=0.9$ ，舵角取 0° 、 5° 、 10° 、 15° 、 -10° 、 -15° 共 6 个舵角。图 6 为舵桨单元力计算值与试验值对比，二者吻合良好。数值计算结果如表 4 所示。在 $-15^\circ \sim 15^\circ$ 范围内，舵桨单元力随着舵角增加先增大随后基本不变；前桨推力系数和扭矩系数随舵角增加先减小后增大，但变化幅度不大；后桨的推力系数和扭矩系数随着舵角增加而增大；推进器效率随着舵角增加先增大后减小，效率最大值在 0° 与 5° 舵角之间；舵桨横向力系数和转舵力矩系数随着舵角增加而减小，随后反向增大，两者的最小值均在 0° 附近。

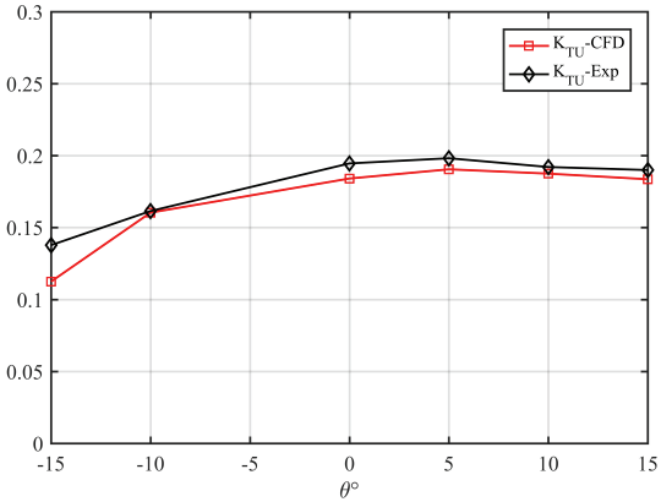


图 6 对转舵桨单元力

表 4 舵角工况数值计算结果

θ	K_{TFP}	$10K_{QFP}$	K_{TAP}	$10K_{QAP}$	K_{TA}	η_0	K_{TS}	$10K_{QZ}$
-15	0.1560	0.3443	0.0557	0.1850	0.1125	0.3045	0.2394	0.4160
-10	0.1461	0.3098	0.0576	0.1516	0.1604	0.4979	0.1551	0.4665
0	0.1411	0.2878	0.0807	0.1713	0.1841	0.5743	-0.0255	0.1632
5	0.1425	0.2982	0.0897	0.1914	0.1905	0.5572	-0.1107	-0.0049
10	0.1461	0.3224	0.0911	0.2096	0.1875	0.5048	-0.1796	-0.2163
15	0.1511	0.3594	0.0982	0.2485	0.1836	0.4326	-0.2706	-0.3855

立柱和下齿轮箱体阻力如表 5 所示，随着舵角增加，立柱和下齿轮箱体阻力逐渐减小，因此舵桨单元力系数才会出现先增加而后基本不变的现象。

表 5 立柱和下齿轮箱体阻力

θ	-15	-10	0	5	10	15
阻力 (N)	32.24	31.02	29.45	28.51	26.26	25.06

4 结论

本文以对转舵桨为研究对象,采用滑移网格方法结合 IDDES 模型对对转舵桨在直航及舵角工况下的水动力性能进行数值计算,得出其推力系数、扭矩系数、横向力系数以及转舵力矩系数等。得出结论如下:

(1) 对比直航及舵角工况下舵桨单元力系数与试验值,二者吻合良好,证明了 IDDES 模型结合滑移网格方法预报对转舵桨水动力性能的准确性。

(2) 舵桨水动力系数随进速系数变化规律。随着进速系数增加:①对转舵桨前后桨的推力系数和扭矩系数减小;②舵桨单元力系数减小;③推进效率先增大后减小,效率最大值在 $J=0.9$ 附近;④立柱和下齿轮箱体阻力减小。

(3) 舵桨水动力系数随舵角变化规律。舵角工况下,在 $-15^\circ \sim 15^\circ$ 舵角范围内,随着舵角增加:①前桨的推力扭矩系数先减小后增大, 0° 附近最小;②后桨的推力扭矩系数增大;③舵桨单元力系数先增加而后基本不变;④推进器效率先增大后减小,在 0° 附近效率最大;⑤横向力系数和转舵力矩系数先减小随后反向增大;⑥立柱和下齿轮箱体阻力减小。

参 考 文 献

- 1 Inukai Y, Ochi F: A Study on the Characteristics of Self Propulsion Factors for a Ship Equipped with Contra-Rotating Propeller[C]. The first International Symposium on Marine Propulsors, 2009:112-116
- 2 Zhan-zhi W, Ying X. Effect of time step size and turbulence model on the open water hydrodynamic performance prediction of contra-rotating propellers[J]. China Ocean Engineering, 2013, 27(2):193-204.
- 3 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.
- 4 徐嘉启,熊鹰,时立攀. 基于重叠网格的吊舱推进器偏转工况水动力性能数值模拟[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2016, 40(2).
- 5 邢健. 吊舱推进器敞水推进性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- 6 Islam M, Veitch B, Bose N, et al. Numerical study of hub taper angle on podded propeller performance[J]. Marine Technology, 2006, 15(1):86-93.
- 7 Pengfei Liu, Mohammed Islam, Brian Veitch. Some Unsteady Propulsive Characteristics of a Podded Propeller Unit under Maneuvering Operation.[A] First International Symposium on Marine Propulsors Smp'

09, Trondheim, Norway, June 2009

Investigation on hydrodynamic performance of contra-rotating rudder propeller

WANG Zhi-yong^{1,2}, FAN She-ming^{1,2}, SUN Qun^{1,2}, WU Qiong¹

(1. Marine Design & Research Institute of China, Shanghai 200011.

2. Shanghai Key Laboratory of Ship Engineering, Shanghai 200011

Email: wzy_my@163.com)

Abstract: Contra-Rotating rudder propeller has good maneuverability and high propulsion efficiency, and has broad applications on ferries, tugs and offshore platforms. Based on the OpenFOAM software platform, the sliding mesh method combined with the IDDES model are employed to simulate the hydrodynamic performance of contra-rotating propeller under conditions of straight navigation and different rudder angles. The errors of propulsor unit thrust coefficients are within 5%, verifying the accuracy of numerical method. The relationships among hydrodynamic coefficients of contra-rotating propeller, advanced coefficients and rudder angles are obtained.

Key words: Contra-Rotating rudder propeller; Numerical simulation; IDDES; hydrodynamic performance.