

基于CFD的螺旋桨粘性流场的数值模拟研究

孟巧,高洁

(南通理工学院 船舶与海洋工程系,江苏 南通 226002)

摘要:文章利用FLUENT软件对螺旋桨在粘性流场中的敞水性能进行数值模拟计算,分析了螺旋桨的推力、扭矩以及桨叶表面压力分布情况,给出了螺旋桨敞水性能的数值模拟计算结果,并与试验值做了比较。研究结果表明利用CFD技术能够对常规螺旋桨进行数值预报,可以有效地满足工程应用。

关键词:螺旋桨;数值模拟;粘性流场;FLUENT

中图分类号:U661.31

文献标识码:A

文章编号:1671-9891(2016)01-0044-05

0 引言

螺旋桨是现代船舶主要的推进器,能够准确地获取其相关流动信息对船舶建造而言意义重大。获得螺旋桨水动力性能数据主要有实验和计算两种方法。如果采用实体模型,则制作螺旋桨模型的周期长,费用高,且能备快速预报螺旋桨敞水性能,如想得到更精细的实验数据就需要精密仪器如激光多普勒测速仪LDV(Laser Doppler Velocimetry,以下简称“LDV”)等进行试验。随着计算机技术和粘流理论方法的发展,应用计算流体力学技术CFD(Computational Fluid Dynamics,以下简称“CFD”)对螺旋桨周围水动力特性进行数值模拟变得切实可行。相比传统实验而言,CFD技术具有仿真性能好、计算周期短和成本低廉等优点。^[1-3]本文利用CFD常用计算软件之一FLUENT对螺旋桨在粘性流场中的敞水性能进行数值模拟计算。

1 控制方程的建立

假定流体是不可压的,来流为以定常速度 v 作匀速直线运动,转动区域在周向保持一定转速,螺旋桨保持相对旋转速度为0,得出控制方程,流场连续方程如式(1)所示:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

式中 μ_j 为在直角坐标系 $x_j(j=1, 2, 3)$ 下的流体速度分量。

流体瞬时动量守恒方程如式(2)所示:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} [\mu (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i})] - \frac{\partial p}{\partial x_i} + F_i \quad (2)$$

式中 ρ 为流体密度, t 为时间, μ 为流体动力粘性系数, p 为流体压力, F_i 为体积力。

本文采用目前广泛应用的 $k-\varepsilon$ 湍流模型^[4],湍流动能方程 k 如式(3)所示:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} [\mu (\frac{\partial k}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \frac{\partial k}{\partial x_j})] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3)$$

湍动能耗散率方程 ε 如式(4)所示:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} [\mu (\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j})] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} + (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (4)$$

式中 μ_t 为湍流粘度,由式(5)确定:

收稿日期:2015-10-20

基金项目:南通市科技计划项目“基于无线充电的内河船纯电推技术研究”(项目编号:GY12015024)。

作者简介:孟巧(1982—),女,江苏扬州人,南通理工学院船舶与海洋工程系讲师,硕士。

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

模型常量 $C_{1\varepsilon} = 1.44$ $C_{2\varepsilon} = 1.92$ $C_{3\varepsilon} = 0$ $\sigma_k = 1.0$ $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

2 螺旋桨几何模型的建立

2.1 模型建立

选用 MAU-4 型螺旋桨建立模型,详细参数如表 1 所示。

表 1 螺旋桨参数

项目	符号	单位	数据类型
直径	D_p	m	0.115 9
毂径比	d/D_p		0.180 0
盘面比	A_d/A_o		0.607 0
0.7R 螺距比	P/D_p'		0.756 0
叶数	Z		4
厚度比	t_0/D_p		0.050 00
纵倾角	θ	°	10.00

建立直角坐标系 O-xyz Z 轴方向表示来流方向,它沿着螺旋桨的旋转轴指向下游,X 轴与螺旋桨的某一桨叶的叶面参考线一致,Z 轴服从右手定则。将螺旋桨型值点的原始数据转换成特定的数据格式,输入到 FLUENT 软件前处理器 Gambit 中进行三维模型的建立,建好的螺旋桨三维模型如图 1 所示。

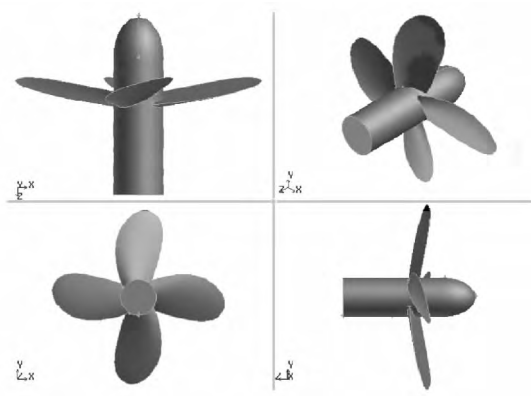


图 1 螺旋桨三维模型

2.2 网格划分

模型建好后,确定计算域并划分网格。计算流场域选用圆柱面,转动区域直径取螺旋桨直径的 1.1 倍,桨毂中心为方便计算也简化为圆柱面,桨毂和叶片表面作为计算域的内边界面,约为螺旋桨直径 5 倍处的圆柱体表面为无穷远表面作为计算域的外边界面。为提高计算结果的准确度,划分网格时这一区域要进行加密,计算边界条件选取不可压缩流体,选取模型为 $k-\varepsilon$ 模型,入口为速度进口,出口为压力出口。

螺旋桨叶之间的水流复杂,若要获取桨叶间隙之间的较好的水流状态,则需要对螺旋桨叶周围的网格进行局部加密,如图 2 所示。鉴于计算机硬件所能承受的计算能力,模型网格数量控制在 70 万,通过数值模拟实验与敞水实验数据对比,这一数量级可以达到满意的效果。

3 结果分析

本文将螺旋桨的水动力性能与进速系数 J 、推力系数 K_T 和扭矩系数 K_Q 分别定义如下:进速系数 $J = \frac{V_A}{nD}$ 推力系数 $K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$ 扭矩系数 $K_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}$ 。

3.1 计算结果

本文给定进速系数 J 与 MAU-4 型螺旋桨进行数值计算,表 2 为计算机数值模拟结果与敞水试验结果的对比。

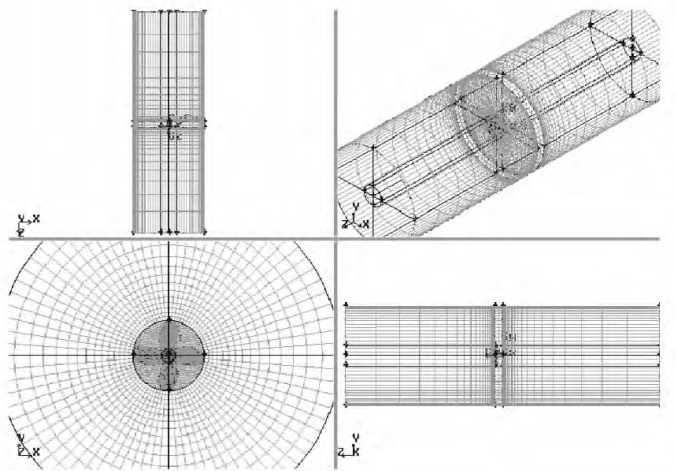


图 2 螺旋桨计算域网格

表 2 计算结果

进速系数 J	系数	敞水试验	数值模拟	误差%
0.102	K_T	0.318 60	0.323 6	1.57
	$10K_Q$	0.405 9	0.421 2	3.77
0.204	K_T	0.282 10	0.291 3	3.26
	$10K_Q$	0.368 4	0.375 2	1.85
0.306	K_T	0.243 10	0.249 2	2.51
	$10K_Q$	0.329 7	0.335 2	1.67
0.408	K_T	0.201 10	0.213 2	6.02
	$10K_Q$	0.285 7	0.291 3	1.96
0.510	K_T	0.158 50	0.168 9	6.56
	$10K_Q$	0.240 3	0.251	4.45
0.612	K_T	0.113 90	0.122 3	7.37
	$10K_Q$	0.192 7	0.206 3	7.06
0.658	K_T	0.093 90	0.100 3	6.82
	$10K_Q$	0.170 5	0.172 6	1.23

图 3 所示为数值模拟得到的敞水性能曲线与水池试验得到的敞水性能曲线的比较,图中可以看出在不同的进速系数下,数值模拟得到的螺旋桨推力系数 K_T 和扭矩系数 K_Q 与敞水试验结果趋势一致,随着螺旋桨进速系数增大,数值模拟结果与敞水试验结果偏差有增加的趋势,推力系数 K_T 和扭矩系数 K_Q 的最大误差分别为 7.37% 和 7.06%,是由于数值模拟时没有使用特定的螺旋桨空化模型所致,误差在可接受范围。

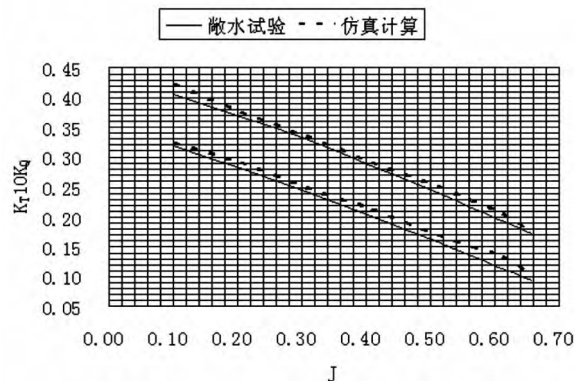


图 3 敞水性能曲线

3.2 螺旋桨性能分析

螺旋桨的推力和扭矩反映了螺旋桨的宏观受力,如果要研究螺旋桨在流场中的微观受力情况,则需要研究螺旋桨表面任意点的受力情况。图4为在给定进速系数 $J=0.658$ 条件下螺旋桨周围流场的流动情况,从图中可以清楚地看出水流从叶梢处泄出后的流动规律及叶根处的流动情况。可以知道在螺旋桨盘面区域,流场的运动状态较为复杂,在螺旋桨盘面以外区域,速度等值线近似为圆形,流场的运动状态较为规律,说明影响螺旋桨的主要流场区域在螺旋桨盘面以内区域。

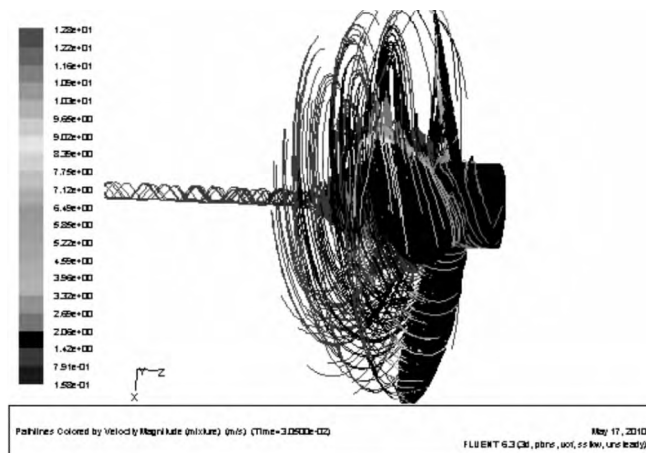


图4 转动区域流线

图5给出在进速系数 $J=0.658$ 条件时,螺旋桨叶背的压力系数分布图。从图中可以看出,叶背中间区域的载荷分布比较均匀,叶背梢部附近所受压力系数最小,因此这一区域最易产生空泡现象。图6给出在进速系数 $J=0.658$ 条件时,螺旋桨叶面的压力系数分布图。从图中可以看出叶面受到的压力高于叶背的压力,没有出现明显的最低压力点,说明叶面上不会首先产生空泡。

图7为叶背、叶面速度矢量分布图,图8给出进速系数 $J=0.658$ 条件时,在不同径向位置上叶表面压力系数。从图中可以看出叶面上流动信息的预报结果较好,而螺旋桨叶背的叶根处数值预报结果不理想,分析原因有两种可能。首先叶背附近流场可能出现分离,数值模拟选用的 $k-\varepsilon$ 方程无法捕捉到这一现象,从而无法进行准确预报;其次,网格划分的疏密程度也会影响数值计算的精确性。

图9给出 r/R 为0.9时(靠近叶梢)的压力云图。根据计算结果,可以预测出螺旋桨叶导边的驻点位置。叶面处叶梢压力明显高于叶背处,表明叶梢受到较大载荷。图10所示为叶背的流线分布,可以看出叶背流

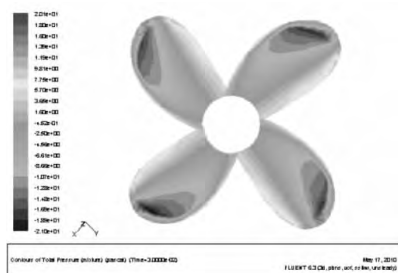


图5 叶背压力分布图

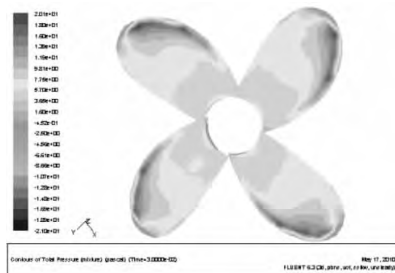


图6 叶面压力分布图

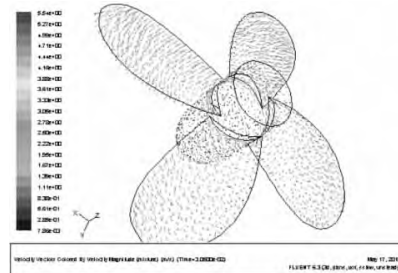


图7 叶背、叶面速度矢量分布图

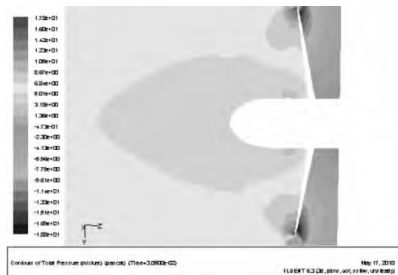


图8 叶表面压力系数图



图9 $r/R=0.9$ 压力云图

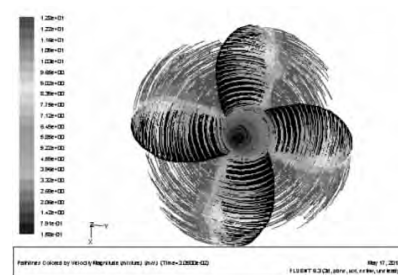


图10 叶背的流线分布

线从导边向随边的叶根处聚拢。流线在叶根附近分布较均匀,在叶梢附近变化较明显,分析其产生原因,正是由于从叶面到叶背存在泄流,使得叶背上出现从叶梢到叶根的二次流动,从而导致叶梢处流线变化。^[5]

4 结束语

虽然目前 CFD 技术无法完全取代模型试验,但将其技术用于指导基础课题研究,验证新技术的可行性,可以节省大量时间、人力和物力,同时可以通过图形和动画形象、直观地模拟所要研究的对象。本文采用 FLUENT 商用软件对螺旋桨粘性流场进行研究,对 MAU-4 型螺旋桨动力性能进行仿真模拟,主要研究结果如下:

(1)通过与 MAU-4 型螺旋桨敞水试验数据进行对比,验证了 FLUENT 软件的计算精度。虽然有一定误差,但两者趋势一致,结果拟合度较高,满足工程应用需求,表明该软件在螺旋桨推进器性能预报中的可行性和准确性较好。

(2)在螺旋桨数值计算的结果中,可以直观看到螺旋桨周围流场的压强分布,了解流场流动情况。在进速系数不同的条件下,螺旋桨尾流会产生相应的变化,得到不同进速系数下的扭矩系数及推力系数,预报达到预期要求。

参考文献:

- [1]冯学梅,陈凤明,蔡荣泉.使用 Fluent 软件的螺旋桨敞水性能计算和考察[J].船舶,2006(1):14-19.
- [2]李巍,王国强,汪蕾.螺旋桨粘流水动力特性数值模拟[J].上海交通大学学报,2007(7):1200-1203.
- [3]王超,黄胜,解学参.基于 CFD 方法的螺旋桨水动力性能预报[J].海军工程大学学报,2008(4):107-112.
- [4]张志荣,赵峰,李百齐.k- ω 湍流模式在船舶粘性流场计算中的应用[J].船舶力学,2003(1):33-37.
- [5]盛振邦,刘应中.船舶原理(下)[M].上海:上海交通大学出版社,2004.

Numerical Simulation Study on Propeller Viscous Flow Based on CFD

MENG Qiao, GAO Jie

(Dept. of Ship & Ocean Engineering, Nantong Institute of Technology, Nantong 226002, China)

Abstract: This article applies FLUENT to the numerical simulation of the open water performance of the propeller in viscous flow, analyzes its thrust, torque and pressure distribution, lists the numerical simulation results of its open water performance as well as makes a comparison between the results and the experimental value. The results indicate that CFD technology serves to make an effective numerical prediction of the conventional propeller.

Key words: Propeller; Numerical simulation; Viscous flow; FLUENT