

引用格式: 陈志明, 伍斯杰, 张娟, 等. 斜航条件下船舶水动力性能数值仿真[J]. 中国舰船研究, 2018, 13(1): 79–84.
CHEN Z M, WU S J, ZHANG J, et al. Numerical simulation of hydrodynamic performance of ship under oblique conditions[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2018, 13(1): 79–84.

斜航条件下船舶水动力性能数值仿真

陈志明¹, 伍斯杰², 张娟¹, 侯玲¹, 黄晓恒³
1 广东海洋大学 海洋工程学院, 广东 湛江 524088
2 太阳鸟游艇股份有限公司, 广东 珠海 519055
3 中船黄埔文冲船舶有限公司, 广东 广州 510715

摘要: [目的] 为了研究船舶在斜航条件下的粘性绕流场, 为研究船舶操纵性提供相关依据, [方法] 采用商用软件 STRA-CCM+, 选取 SST $k-\omega$ 湍流模型, 对 KVLCC2 模型在不同漂角条件下的水动力性能、船体流场进行预报。观察船模在不同漂角下的压力分布情况, 并对船底涡系脱落及船体表面约束流线进行观测。[结果] 结果表明, 数值模拟在预报船舶横向力和转艏力矩以及船身表面的压力分布时满足工程应用的要求。[结论] 所得结论对研究船舶斜航条件下的流动分离现象具有一定的参考价值。
关键词: 斜航; 粘性绕流场; 约束流线; 横向力; 转艏力矩
中图分类号: U661.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1673-3185.2018.01.012

Numerical simulation of hydrodynamic performance of ship under oblique conditions

CHEN Zhiming¹, WU Sijie², ZHANG Juan¹, HOU Ling¹, HUANG Xiaoheng³
1 College of Ocean Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China
2 Sunbird Yacht Co., Ltd., Zhuhai 519055, China
3 CSSC Huangpu Wenchong Shipbuilding Co., Ltd., Guangzhou 510715, China

Abstract: [Objectives] This paper is intended to study the viscous flow field around a ship under oblique conditions and provide a research basis for ship maneuverability. [Methods] Using commercial software STRA-CCM+, the SST $k-\omega$ turbulence model is selected to predict the hydrodynamic performance of the KVLCC2 model at different drift angles, and predict the hull flow field. The pressure distribution of the ship model at different drift angles is observed and the vortex shedding of the ship's hull and constraint streamlines on the hull's surface are also observed. [Results] The results show that numerical simulation can satisfy the demands of engineering application in the prediction of the lateral force, yaw moment and hull surface pressure distribution of a ship. [Conclusions] The research results of this paper can provide valuable references for the study of the flow separation phenomenon under oblique conditions.
Key words: oblique motion; viscous flow field; constrained streamline; lateral force; yaw moment

0 引言

随着船舶建造朝向大型化、高速化的发展以

及数字化造船技术的进步, 通过计算机仿真模拟来预测新建船舶的水动力性能逐步得到推广应用。目前, 通过数值模拟对船舶的快速性能进行



预报的技术已颇为成熟,而船舶的水动力性能操纵性却由于问题的复杂性以及人为忽略等因素一直没能得到广泛研究。自1993年国际海事组织(IMO)通过了A.751(18)号决议“船舶操纵性暂行标准”^[1]后,2002年底又通过了MSC.137(76)号决议“船舶操纵性标准”^[2],而近年来由于船舶操纵性较差而频频发生的海难事故,使得人们开始重新重视船舶的操纵性。

国外在船舶操纵性数值研究方面起步较早,积累了较多的经验。早期,Ohmori^[3]采用有限体积法对Esso Osaka油轮进行定常斜航运动性能计算,但未考虑自由液面的影响。Alessandrini等^[4]采用有限差分方法,采用重叠网格技术和 $k-\omega$ 湍流模型,对Series 60船模做了非定常斜航运动并对相关湍流流场与水动力性能进行了计算,而且考虑了自由液面的影响。Kume等^[5]以KVLCC船模为研究对象,对该船的水动力力矩及斜航艉伴流场进行试验研究并对试验数据进行了不确定度分析,相关试验结果为数值研究提供了参考依据。Turnock等^[6]对KVLCC2模型全附体条件下在浅水中的螺旋桨推力性能进行数值研究,考虑了舵角不同时对螺旋桨推力带来的影响,并将相关结果与试验结果进行了对比,发现数值计算结果在推力和扭矩计算方面有较高的精度。

近些年,我国在船舶操纵性方面也开展了较多的研究并取得了一定的成果。邱磊^[7]选取Wigley船型作为研究对象,应用开发的船舶粘性流求解器VSMAN,对漂角较大情况下的斜航运动进行了粘性流场和水动力性能计算。冯松波等^[8]通过CFD软件FLUENT计算并分析了KVLCC2模型在不同漂角、不同舵角作用下船—舵系统的横向力与转艏力矩。田喜民等^[9]分别采用SST $k-\omega$ 与RNG $k-\varepsilon$ 两种湍流模型对KVLCC2模型进行水动力及艉流场数值分析,并将计算结果与试验值进行了对比,得出SST $k-\omega$ 模型更适合斜航粘性水动力计算的结论。

在斜航研究方面,大都只考虑了约束模操纵性试验中的横向力及转艏力矩,而忽略了一定漂角情况下的船体流动分离现象。在国内外学者研究工作的基础上,本文拟使用数值模拟方法对不同漂角下船舶的横向力、船体压力分布进行数值模拟,并将相关结果与试验值进行对比以验证数值结果的有效性,且首次采用数值预报方式对不同漂角条件下的船体流域旋涡结构进行细致的划分,并将船体流动分离现象与船体流线等进行对比分析,可为研究船舶操纵性优劣提供一定的参

考依据。

1 数学模型

采用CFD商用计算软件STAR-CCM+对目标船模进行斜航下的数值研究,其基本方法是基于有限体积法求解N-S方程,湍流模型采用SST $k-\omega$ 模型,相关控制方程与坐标系如下。

1.1 控制方程

计算域内不可压缩牛顿流体满足连续方程和动量守恒方程^[10]:

$$\partial u_i / \partial x_i = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j}) + S_j \quad (2)$$

式中: u_i 和 u_j 为速度分量的时均值; x_i 和 x_j 为对应速度分量的2个方向; P 为压力的时均值; ρ 为流体密度; μ 为动力粘性系数; $\overline{\rho u_i u_j}$ 为雷诺应力项; S_j 为动量方程的广义源项。

1.2 坐标系

相关坐标系如图1所示。图中: xoy 为初始坐标系,满足右手定则;船舶航向 U 与初始坐标系的 x 轴方向一致;随船坐标系 $x_o y_o$ 与初始坐标系的夹角 β 为船舶漂角; F_{x_o} 与 F_{y_o} 为船舶所受水动力沿随船坐标系的2个分量; M_z 为船舶围绕 z 轴的转艏力矩。

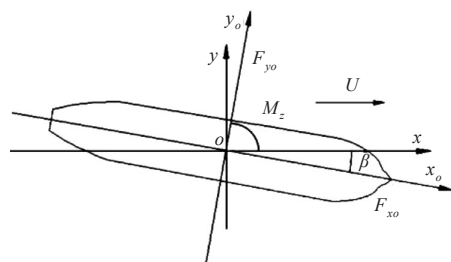


图1 坐标系
Fig.1 Coordinate systems

所有数值计算结果均进行无量纲化处理,相应的横向力系数和转艏力矩系数的无量纲化公式定义均参考文献[11],并将相关数值计算结果与其试验结果进行对比,以验证本文数值计算的准确性。无量纲化公式如下:

$$C_y = \frac{|F_{y_o}|}{\frac{1}{2} \rho U^2 L T} \quad (3)$$

$$C_m = \frac{|M_z|}{\frac{1}{2} \rho U^2 L^2 T} \quad (4)$$

式中: C_y 为横向力系数; C_m 为转艏力矩系数; L 为船长; T 为船模吃水。

2 计算模型及网格

2.1 几何模型

采用 ITTC 推荐的 KVLCC2 标准模型进行数值分析,模型相关参数如表 1 所示,几何模型如图 2 所示。

表 1 KVLCC2 主要参数
Table 1 Main parameters of KVLCC2

主尺度	实船	船模
垂线间长 L_{pp}/m	320.0	3.555 56
型宽 B/m	58	0.644 44
吃水 T/m	20.8	0.231 11
湿表面积(有舵) S/m^2	27 467.3	3.391 02
缩尺比 λ	—	90



图 2 KVLCC2 几何模型
Fig.2 The geometry model of KVLCC2

2.2 网格划分

应用 STAR-CCM+ 自带的前处理功能建立计算域并对其进行网格划分。其中,自由液面采用流体体积 (Volume of Fluid, VOF) 法捕捉,并在入口、出口和侧壁面进行数值消波,以防止自由表面反射回干扰。计算域及边界如图 3 所示,其大小为 $-1.0L_{pp} \leq x \leq 4.0L_{pp}$, $-1L_{pp} \leq y \leq 1L_{pp}$ 和 $-1.0L_{pp} \leq z \leq 2.0L_{pp}$ 的长方体区域,网格数目为 185 万。边界层的网格质量通过 y^+ 值的范围确定,本次计算的 y^+ 值的范围为 30~100,说明边界层网格划分合理。

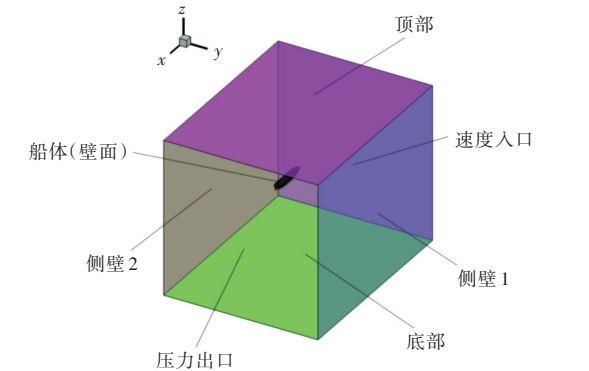


图 3 计算域及边界
Fig.3 Computational domain and boundaries

3 计算结果及分析

针对 KVLCC2 模型(有舵,舵角为 0°),分别在

漂角较小 ($\beta = 0^\circ, 2^\circ, 4^\circ, 6^\circ$) 及漂角较大 ($\beta = 30^\circ$) 条件下进行斜航数值计算。船模航速 U 为对应的设计航速 0.84 m/s。对比分析不同漂角情况下船模的水动力性能及流动分离状况,进而为预报对应实船斜航条件下的水动力性能,为实船操纵性能研究提供相关依据。

3.1 粘流下横向力矩及转艏力矩计算分析

分别计算漂角 $\beta = 0^\circ, 2^\circ, 4^\circ$ 与 6° 时作用在 KVLCC2 模型上的横向水动力及转艏力矩。并将数值计算结果与试验值进行对比,横向水动力结果如表 2 及图 4 所示,转艏力矩结果如表 3 及图 5 所示。文中误差定义为数值结果、试验值的差值与试验值的比值。相关试验结果来自文献[11]。

由图 4 可知,选取 SST $k-\omega$ 湍流模型,采用 RANS 方法求解,在漂角较小情况下横向力数值计算结果与试验值相差不大,并且当漂角在 $0^\circ \sim 6^\circ$ 之间时,漂角越大精度越高。根据图 5 可知,转艏力矩系数的数值计算结果与试验值吻合度较高,说明数值模拟方法在船舶操纵性计算方面有一定的工程适用性。

表 2 横向力系数
Table 2 Lateral force coefficients

漂角 $\beta/(^\circ)$	航速 $U/(m \cdot s^{-1})$	试验结果	数值结果	误差
0	0.84	0.006 1	1.03×10^{-4}	—
2	0.84	0.006 4	0.008 5	0.328
4	0.84	0.015 0	0.016 2	0.080
6	0.84	0.024 6	0.024 8	0.008

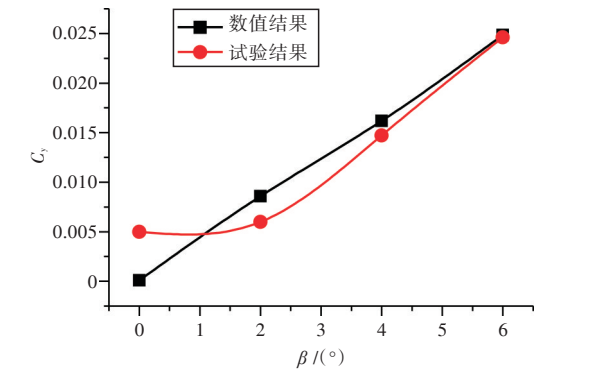


图 4 $U=0.84$ m/s 时横向力系数随漂角的变化
Fig.4 Variation of the lateral force coefficient with drift angle at $U=0.84$ m/s

表 3 转艏力矩系数
Table 3 Yaw moment coefficients

漂角 $\beta/(^\circ)$	航速 $U/(m \cdot s^{-1})$	试验结果	数值结果	误差
0	0.84	1.6×10^{-4}	1×10^{-4}	—
2	0.84	0.004 13	0.004	-0.03
4	0.84	0.01	0.01	0
6	0.84	0.015	0.014	-0.067

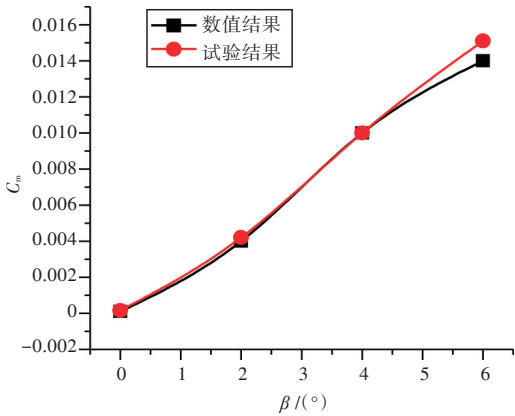


图5 $U=0.84\text{ m/s}$ 时转艏力矩系数随漂角的变化
Fig.5 Variation of the yaw moment coefficients with drift angle at $U=0.84\text{ m/s}$

3.2 压力分布计算结果

根据数值计算结果绘制船体水动力压力系数 C_p 分布曲线,将漂角 $\beta=6^\circ$ 时对应的压力系数曲线与同一母型船舶 KVLCC2M 的试验值进行对比(试验值来自文献[5]),以验证数值计算结果的准确性。压力系数 C_p 定义如下:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho U^2} \tag{5}$$

式中, U 为船模拖曳速度。

图6所示为 KVLCC2 模型在漂角 $\beta=0^\circ$ 时船体表面水动力压力系数分布的数值结果。图7(a)和图7(c)为 KVLCC2 模型在漂角 $\beta=6^\circ$ 时船体表面压力系数分布的数值结果,图7(b)和图7(d)为 KVLCC2M 模型在漂角 $\beta=6^\circ$ 时船体表面压力系数分布的试验结果。

图7所示 KVLCC2 船模与同一母型船舶 KVLCC2M 的表面压力分布吻合度较高,表明数值方法在小角度斜航压力计算方面有着较高的精度。由图6和图7可知,在漂移角度较小且舵角为

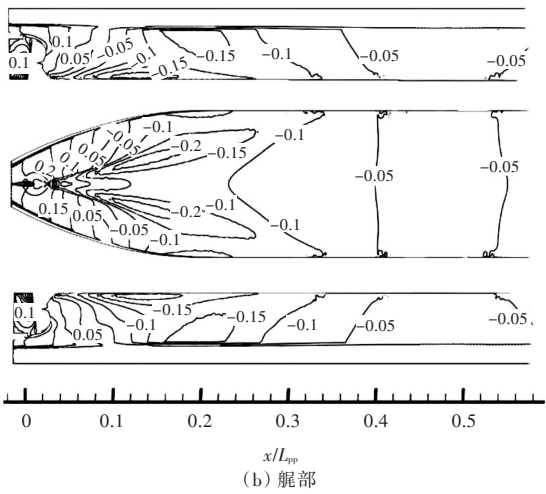
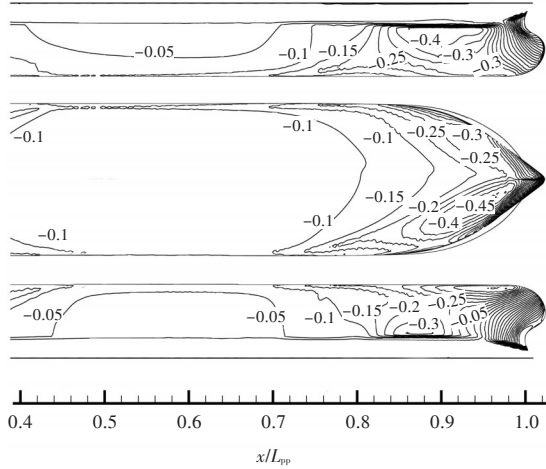
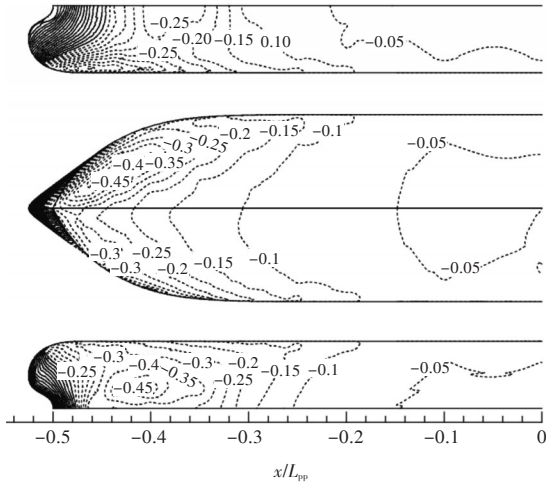


图6 $\beta=0^\circ$ 时船体表面压力系数分布
Fig.6 Distribution of hull surface pressure coefficients for $\beta=0^\circ$

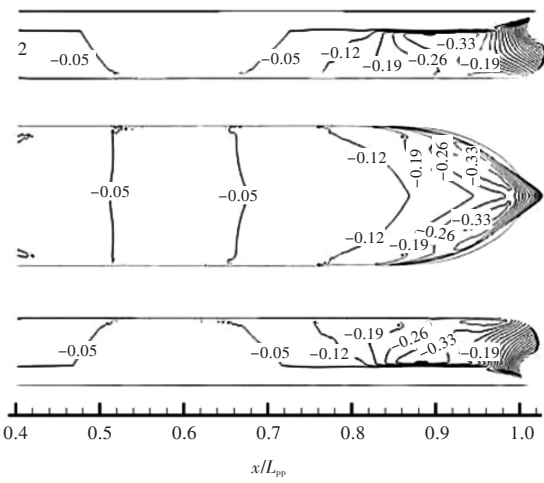
0° 的情况下,船舵表面压力并没有明显的变化。当漂角 $\beta=6^\circ$ 时,船艏的压力中心偏移,压力中心位置在船艏迎流面 $0.9L_{pp}$ 处,而船艉的压力中心位置则在 $0.15L_{pp}$ 处。由于压力中心的不对称性,会产生转艏力矩,尾部压力中心在背流侧,这与船艏侧涡与舭涡脱离位置基本保持一致。



(a) KVLCC2 船模数值模拟结果(艏部)



(b) KVLCC2M 船模试验结果(艏部)



(a) 艏部

力的不均匀会导致横向力与转艏力矩的增加。

由图9可以看出,船体表面约束流线与船体表面涡核分离区域有着较好的一致性。当漂角

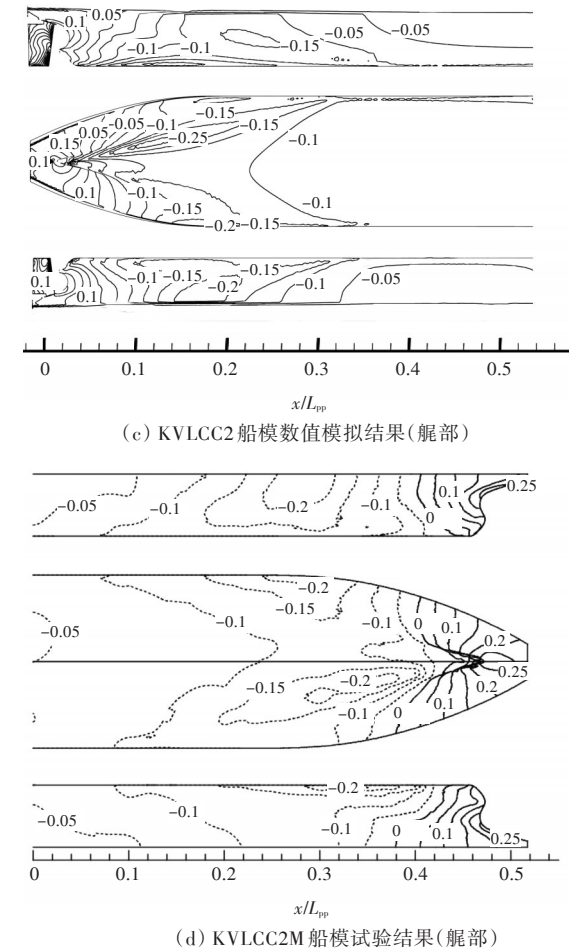


图7 $\beta = 6^\circ$ 时船体表面压力系数分布

Fig.7 Distribution of hull surface pressure coefficients for $\beta = 6^\circ$

3.3 船身流动分离

图8所示为KVLCC2模型在漂角 $\beta = 0^\circ, 6^\circ, 30^\circ$ 时的船底涡系结构,其中涡系通过 Q -Criterion的方式表示,且 $Q=10$ 。图9为其对应船体表面约束流线。

由图8可以看出,虽然不同漂角下的船舶涡系结构差异较大,但船底涡核主要由船艏舦涡、船艏侧涡和船艏舦涡3部分构成。当漂角 $\beta = 0^\circ$ 时,3种主涡的结构形式(船艏舦涡、船艏侧涡、船艏舦涡)可以清楚地辨别并且相对称;当漂角 $\beta = 6^\circ$ 时,船艏侧涡、船尾发卡涡逐渐被辨别,船艏迎流面舦涡随船体附近向船艏发展,船艏侧涡呈现明显的不对称性;当漂角 $\beta = 30^\circ$ 时,船艏背流面侧涡、船艏发卡涡可以清楚地观察到,船艏迎流面舦涡与船艏背流面侧涡明显脱离船体向船艏发展,船艏背流面舦涡核与迎流面船艏侧涡核开始沿船长法向方向发展。从以上现象可知:随着漂角的增大,船舶的流动分离现象相对船艏并不明显,船艏两侧压力不均并非由旋涡脱落造成,而船艏压力的不对称性则主要由船艏侧涡分离造成,这种压

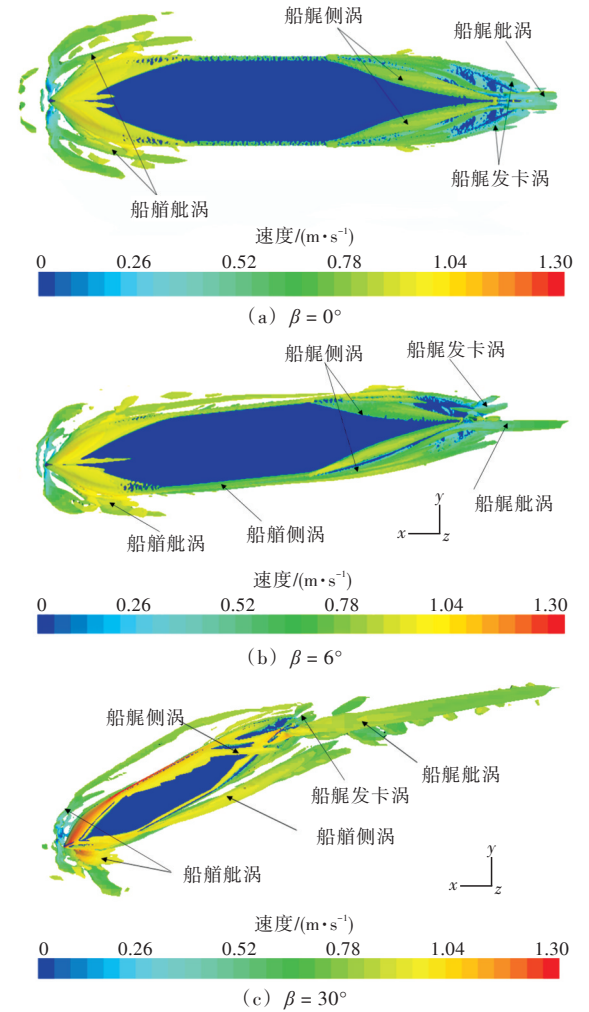
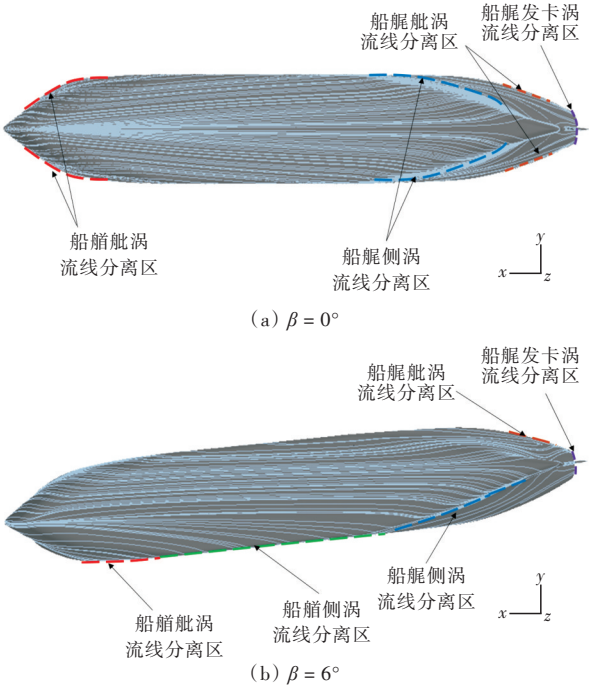


图8 KVLCC2的船底涡系($Q=10$)

Fig.8 Vortex system of KVLCC2 at the bottom ($Q=10$)



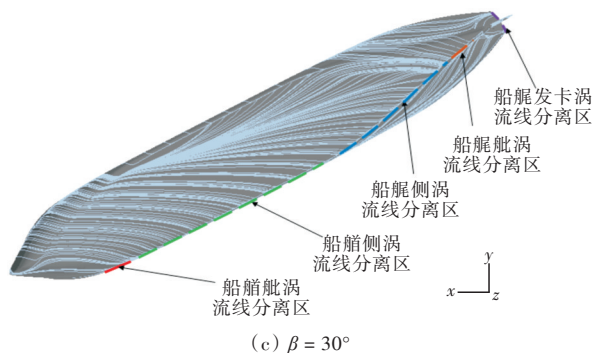


图9 KVLCC2的船底约束流线

Fig.9 Constrained streamline of KVLCC2 at the bottom

$\beta = 0^\circ$ 时,船体表面约束流线沿船长方向对称;当漂角 $\beta = 6^\circ$ 时,船底流线基本与来流方向一致,船体背流面一侧流线由于受船艏侧涡与船艏侧涡的影响出现了偏移;当漂角 $\beta = 30^\circ$ 时,船体表面约束流线分布较复杂,这是由于当漂角较大时,船体周围流动分离,旋涡运动剧烈所造成。

4 结 论

本文主要针对 KVLCC2 船模在漂角较小 ($\beta = 0^\circ, 2^\circ, 4^\circ, 6^\circ$)及漂角较大 ($\beta = 30^\circ$)的情况下,对其水动力性能及粘性绕流场进行了数值分析,相关数值结果可为船舶操纵性数值研究提供相关依据。主要结论如下:

1) 在预报船舶操纵性相关的横向力与转艏力矩方面,采用数值模拟方法满足一定的精度,并且在预报小漂角下的转艏力矩方面精度更高,符合工程应用的要求。

2) 当漂角 $\beta = 6^\circ$ 时,船艏压力中心偏移,压力中心在迎流面 $0.9L_{pp}$ 处,艏部压力中心在 $0.15L_{pp}$ 处,压力的不对称性与船身绕流场有关。由于压力的不对称性,产生了船舶横向力与转艏力矩。

3) 船底涡核主要由船艏侧涡、船艏侧涡及船艏侧涡3部分构成。当漂角较大时,船艏侧涡与船艏侧涡可以清楚地被观察到。船底涡系分离区域与船身约束流线分离区域相互对应,船身约束流线对于研究斜航条件下的船身旋涡分离脱落具有一定的参考意义。

4) 船艏压力不均受流动分离影响较小,船艏压力不均主要是由船艏的侧涡脱离造成,侧涡的脱离导致船舶横向力与转艏力矩增加。

参考文献:

[1] IMO. Interim standards for ship maneuverability[S].

International Maritime Organization, 1993.

[2] IMO. Standards for ship maneuverability[S]. International Maritime Organization, 2002.

[3] OHMORI T. Finite-volume simulation on flows about a ship in maneuvering motion[J]. Journal of Marine Science & Technology, 1998, 3(2): 82-93.

[4] ALESSANDRINI B, DELHOMMEAU G. Viscous free surface flow past a ship in drift and in rotating motion [C]//Proceedings of 22th Symposium on Naval Hydrodynamics. Washington, DC, USA: [s.n.], 1998: 491-507.

[5] KUME K, HASEGAWA J, TSUKADA Y, et al. Measurements of hydrodynamic forces, surface pressure and wake for obliquely towed KVLCC2M model and uncertainty analysis[C]//Proceedings of CFD Workshop, Tokyo, Japan: [s.n.], 2005.

[6] TURNOK S R, PHILLIPS A B, FURLONG M. Urans simulations of static drift and dynamic manoeuvres of the KVLCC2 tanker[C]//Proceedings of SIMMAN 2008: Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Methods. Lyngby, Denmark: [s.n.], 2008.

[7] 邱磊. 船舶操纵相关粘性流及水动力计算[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2003.

QIU L. Computation of ship manoeuvring related viscous flow and hydrodynamic forces[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2003 (in Chinese).

[8] 冯松波, 邹早建, 邹璐. KVLCC2船-舵系统斜航水动力数值计算[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(4): 470-474.

FENG S B, ZOU Z J, ZOU L. Numerical calculation of hydrodynamic forces on a KVLCC2 hull-rudder system in oblique motion [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2015, 49(4): 470-474 (in Chinese).

[9] 田喜民, 邹早建, 王化明. KVLCC2船模斜航运动粘性流场及水动力数值计算[J]. 船舶力学, 2010, 14(8): 834-840.

TIAN X M, ZOU Z J, WANG H M. Computation of the viscous flow and hydrodynamic forces on a KVLCC2 model in oblique motion[J]. Journal of Ship Mechanics, 2010, 14(8): 834-840 (in Chinese).

[10] WILCOX D C. Turbulence modeling for CFD [M]. LA California: DCW Industries, Inc., 1994: 15-20.

[11] 王化明. 限制水域操纵运动船舶粘性流场及水动力数值研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.

WANG H M. Numerical study on the viscous flow and hydrodynamic forces on a manoeuvring ship in restricted waters [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009 (in Chinese).