

文章编号:1005-9865(2018)06-0109-07

基于 CFD 船舶操纵性预报方法研究

刘晨飞^{1,2}, 刘亚东^{1,2}

(1. 上海交通大学 海洋工程国家重点实验室, 上海 200240; 2. 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

摘 要: 基于 CFD 技术和重叠网格技术完成了黏性流场中 KVLCC2 船模的操纵性水动力导数的数值计算。为保证计算的精确性, 进行了网格的收敛性分析, 给出了合适的网格划分方法; 通过数值模拟斜航运动、纯横荡运动和纯艏摇运动计算出的水动力与相应条件下的试验值对比, 计算结果与试验值吻合良好, 计算出的水动力导数准确度较高。基于 MMG 分离建模方法建立 KVLCC2 船模的操纵性数学模型, 利用龙格-库塔算法求解微分方程组, 对船舶操纵运动进行仿真。回转试验和 Z 形操纵试验的仿真结果与试验结果对比, 其回转直径和轨迹都非常吻合, 表明采用的船舶操纵性预报是可行的。

关键词: CFD 技术; 水动力导数; 船舶运动模型; 船舶操纵性

中图分类号: U661.33 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16483/j.issn.1005-9865.2018.06.013

A CFD-based research on the method of predicting ship maneuverability

LIU Chenfei^{1,2}, LIU Yadong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China)

Abstract: Based on CFD technology and overlap grid technology, the hydrodynamic derivatives of KVLCC2 model in viscous flow field were calculated. In order to ensure the accuracy of calculation, the convergence of grid was analyzed, and a suitable mesh generation method was adopted. By means of comparing the hydrodynamic forces calculated by simulating the oblique motion, pure sway motion and pure yaw motion with experimental values, it was found that the results calculated by this method were in good agreement with the experimental values and the accuracy of the calculated hydrodynamic derivatives was ideal. Based on MMG separately building model idea, a mathematical model was established to simulate ship maneuvering motion and the differential equations were solved by Runge-Kutta algorithm. The comparison between the simulation results and the experimental results showed that the tactical diameter and trajectories were very consistent. The method adopted by this paper is feasible and can satisfy the requirements of maneuverability design and prediction.

Keywords: CFD technology; hydrodynamic derivatives; ship motion model; ship maneuverability

作为船舶运动方程中关键的参数之一, 水动力导数对于预报船舶操纵性起着关键作用。拘束船模试验被广泛的应用于求取水动力导数, 它也是获得精确的水动力导数的唯一可靠方法。但是, 模型试验的费用高、花费时间长, 难以在船舶设计的初期阶段进行。近年来, 计算机科学技术的发展和计算流体力学(CFD)的发展为计算水动力导数提供了新途径。为了验证预报船舶操纵性的数值模拟方法, 国际拖曳水池会议(ITTC)操纵性技术委员会分别在 2008 年和 2014 年召开学术研讨会, 比较了基于 EFD 的拘束模型试验计算结果和基于 CFD 的数值模拟结果, 说明了 CFD 方法能够准确的对水动力导数进行计算^[1-2]。Ohmori 等^[3-4]采用有限体积法计算了忽略自由面的影响时船舶操纵条件下的黏性流场及其水动力, 分析了船模回转运动

收稿日期: 2018-03-29

作者简介: 刘晨飞(1994-), 男, 河北保定人, 硕士研究生, 从事船舶操纵性方面的研究。E-mail: lcfego@163.com

时的黏性流场及其水动力分布;王化明^[5]利用 CFD 方法对限制水域中船舶的斜航运动、船舶操纵运动进行了数值模拟,分析了其黏性流场和水动力;李冬荔^[6]利用 Fluent 动网格模拟纯横荡、纯艏摇运动,对相关水动力导数进行了数值仿真计算;田喜民^[7]数值模拟了 KVLCC2 在深浅水时船舶斜航运动,分析了作用在船体的水动力及黏性流场。虽然有许多学者对船舶操纵性的数值预报做了大量的工作,但其得出的计算结果多是与回归公式计算值相比较,缺少相应的试验值佐证,缺乏说服力。

为了对船舶操纵性进行预报,以 KVLCC2 船型为研究对象,应用 CFD 技术,采用切割体网格和棱柱层网格离散流场,通过求解 RANS 方程,数值模拟了斜航试验、纯横荡试验和纯艏摇试验,并计算出相应的水动力,处理试验数据,得到其水动力导数。通过与意大利罗马水池 (INSEAN) 的试验结果进行比较,验证了数值模拟方法的可靠性,表明数值模拟方法计算船舶水动力导数的可行性。之后利用 Simulink 构建船舶操纵运动的数学模型,预报船舶回转试验与 Z 形操舵试验,与丹麦 FORCE technology 试验值进行比较,发现两者运动轨迹和回转直径吻合,验证了船舶操纵性预报方法是可行的。

1 计算模型的建立

1.1 斜航运动计算模型

船舶纵中剖面与水池中心线成一夹角 β , 在入口处施加速度为 V 的来流,系统的改变漂角 β , 可以得到相应的侧向速度,计算出相应的侧向力 Y 和首摇力矩 N , 可以做出侧向力 Y 和首摇力矩 N 随侧向速度 v 变化的曲线。

$$Y = Y_0 + Y_v v + Y_{vvv} v^3 \tag{1}$$

$$N = N_0 + N_v v + N_{vvv} v^3 \tag{2}$$

$$v = -V \sin \beta \approx -V \beta \tag{3}$$

力和力矩进行无因次化处理如式(4)-(6)所示,利用最小二乘法对其进行如式(1)-(2)的拟合,得到力和力矩的无因次化位置导数。

$$Y' = \frac{Y}{\frac{1}{2} \rho V^2 L^2} \tag{4}$$

$$N' = \frac{N}{\frac{1}{2} \rho V^2 L^3} \tag{5}$$

$$v' = \frac{v}{V} = -\sin \beta \tag{6}$$

1.2 纯横荡和纯艏摇运动运动计算模型

在纯横荡运动中,船模在纵向匀速运动的同时,叠加横向低频振荡运动,其运动规律为:

$$\begin{cases} y = a \sin \omega t \\ v = \dot{y} = a \omega \cos \omega t \\ a = \dot{y} = -a \omega^2 \sin \omega t \end{cases} \tag{7}$$

式中: a 为船模横向运动的幅值, ω 为船模运动的圆频率。

基于线性假设,可知船体所受约束力和力矩也是简谐变化的,即:

$$\begin{cases} \bar{Y} = Y_0 \sin(\omega t - \phi_Y) = Y_s \sin \omega t + Y_c \cos \omega t \\ \bar{N} = N_0 \sin(\omega t - \phi_N) = N_s \sin \omega t + N_c \cos \omega t \end{cases} \tag{8}$$

设数值模拟测得的约束横向力 $\bar{Y}$ 、力矩 $\bar{N}$, 纯横荡时对于线性运动有:

$$\begin{cases} Y = Y_v v + Y_{\dot{v}} \dot{v} \\ N = N_v v + N_{\dot{v}} \dot{v} \end{cases} \tag{9}$$

根据受力和力矩平衡原理,可知船模受到的约束力等于船模受到的水动力,将式(8)-(9)各项进行无因

次化处理并联立,即可得到相应的无因次化水动力导数 Y_v' 、 Y_i' 、 N_v' 、 N_i' 。

纯艏摇运动的合速度方向与船舶中纵剖面的方向一致。为达到这一目的,只需要在纯横荡运动的基础上叠加如式(10)的首向角的周期变化,其数据处理方式与纯横荡运动一致,最终计算出无因次化水动力导数 Y_r' 、 Y_i' 、 N_r' 、 N_i' 。

$$r = -\frac{a\omega^2}{V}\sin\omega t = r_0\sin\omega t$$

(10)

1.3 船舶操纵运动数学模型及仿真系统的建立

采用日本拖曳水池委员会提出的分离型数学模型——MMG 模型。MMG 模型将船舶受力分离成船体、桨、舵的单独受力及其间的相互干扰,其物理意义明确,能对船舶操纵运动进行准确预报。从控制工程的角度,舵角为系统输入,船舶运动为系统输出,对该操纵运动模型进行变换可得到响应模型。由于船舶运动时具有极大的惯性,并且操舵速度相对较小,船舶运动具有低频特性,据此将响应模型简化为如式(11)所示一阶转艏响应模型。仿真模型的建立采用模块化建模的方法,在模块中先求取船舶的 K 、 T 指数,然后求出转艏角 φ ,最后根据船舶速度计算得到船舶位置,具体过程可以参考文献[8]。

$$T\dot{\varphi} + \varphi = K\delta$$

(11)

2 计算方法

以 ITTC 操纵性委员会推荐使用的 KVLCC2 船型为数值模拟的对象。KVLCC2 是 SIMMAN 2008 和 SIMMAN 2014研讨会用于验证数值模拟和试验法预报船舶操纵性的标准船型之一。数值模拟使用的船模与意大利罗马水池(INSEAN)的试验船模尺寸一致,如图 1 所示。船模长 7 m,宽 1.168 8 m,吃水 0.455 m,方形系数 0.809 8,模型缩尺比 45.714。



图 1 计算模型
Fig. 1 Calculation model

2.1 计算域设置

选取计算域如图 2 所示,边界条件的设置如下:1)入流边界,距离船首 1 倍船长,设置为速度入口;2)出流边界,距离船尾 3 倍船长,设置为压力出口;3)其余外边界,侧面距离纵向对称面 1 倍船长,上下对称面距离水面 1.5 倍船长,设置为速度入口(velocity inlet);4)船体表面,无滑移壁面;5)在船体进行纯横荡、纯艏摇运动时,为了保证网格的质量,提高求解的精度,采用重叠网格技术,船体周围区域边界设置为重叠网格。

2.2 网格划分

所选网格为切割体网格,为在保证计算精度的前提下相应缩短计算时间,对水线面、船首、船尾进行网格加密,水线面处加密区域与开尔文波的形状吻合,对距离船体较远的控制域,采用较为稀疏的网格。通常利用无量纲数 $y+$ 表征船体表面第一层网格与壁面的距离。为较好的模拟边界层,船体周围设置棱柱层网格。棱柱层网格的设置对于阻力计算结果有很大影响。通过参考文献[9],棱柱层网格设置为 12 层, $y+$ 值 30~60 之间,计算出的水动力较为精确。时间步长对于计算的稳定性和收敛性影响很大,在计算时为保证大部分区域库朗数小于 1,瞬态敏感区域库朗数小于 10,时间步长取为 0.02 s。数值模拟过程中,由于船模航速较低,通过比较 RNG k- ϵ 和 SST k- ω 湍流模型发现,适用于预报较低雷诺数流动的 RNG k- ϵ 湍流模型的计算结果更加精准。

为得到合适的网格,先进行网格收敛性分析。在船模漂角为 0°和 6°时,主要增加船体周围和水线面处的网格,网格数由粗糙到精细按照 $\sqrt{2}$ 的比例增长。计算结果如表 1 所示,不同网格之间计算结果差异不大,且计算结果随着网格数量的增加趋于稳定,与试验值吻合,计算精度较高。为了兼顾计算精度和计算量,选取数量为 148×10^4 网格。

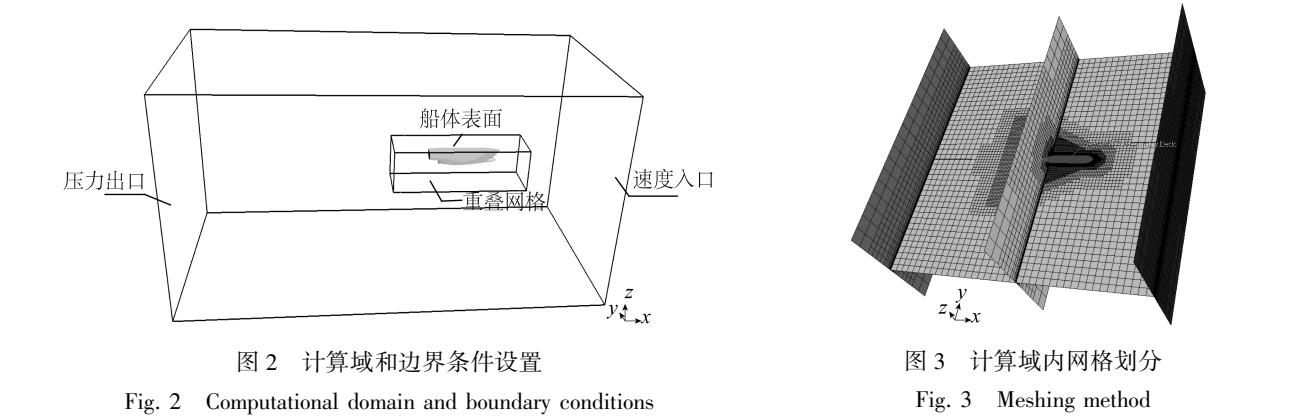


表 1 网格收敛性分析				
Tab. 1 Verification of grid convergence				
船舶拖曳角度	网格数量	X/N	Y/N	$N/(N \cdot m)$
0°	78×10 ⁴	-8.035	0.065	-0.051
0°	103×10 ⁴	-7.983	0.012	-0.018
0°	148×10 ⁴	-7.968	0.008	-0.011
0°	209×10 ⁴	-7.966	0.008	-0.015
0°	试验值	-7.821	0.641	1.142
-6°	78×10 ⁴	-9.317	-11.924	-56.064
-6°	103×10 ⁴	-9.144	-11.809	-55.727
-6°	148×10 ⁴	-9.108	-11.463	-54.918
-6°	209×10 ⁴	-9.098	-11.459	-54.912
-6°	试验值	-8.998	-11.258	-53.206

3 数值计算水动力导数

采用 Star CCM+商业软件,利用 VOF 法确定水线面位置,数值模拟在考虑自由面兴波时船舶在黏性流场中的运动。分别模拟船舶的斜航试验、纯横荡试验和纯艏摇试验,计算船舶水动力。将计算结果进行处理即可得到相应的水动力导数。

3.1 拘束船模试验工况设置

为方便与 INSEAN 的试验数据进行比较,数值模拟拘束船模试验的工况设置与 INSEAN 的试验工况一致,其中,来流速度统一设置为 0.533 m/s,其余工况如下:

- 1)斜航试验。船模漂角分别为-6°、±4°、±2°、±1°、±0.5°,测得船模所受拘束横向力 X 、纵向力 Y 、力矩 N ,进而求得船模的位置水动力导数。
- 2)纯横荡运动试验。纯横荡幅值为 0.1 m,纯横荡圆频率为 0.38 Hz。
- 3)纯艏摇运动试验。纯艏摇运动角速度无因次幅值为 0.2、0.4、0.6,纯艏摇圆频率为 0.38 Hz。

3.2 计算数据处理

斜航试验、纯横荡试验和纯艏摇试验的计算结果分别如图 4、图 5 和图 6 所示,比较数值模拟计算结果和试验结果发现,两者吻合良好,利用 CFD 技术可以准确计算拘束船模试验的力和力矩。

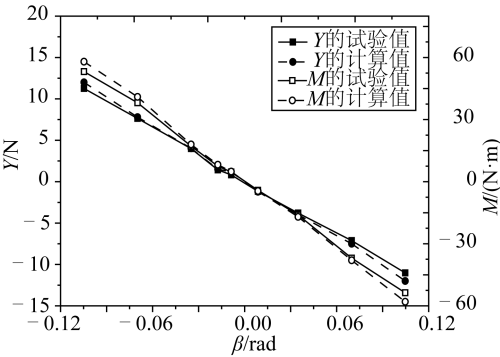


图 4 不同漂角下的横向力和首摇力矩

Fig. 4 Lateral force curve and yaw moment curve at different drift angles

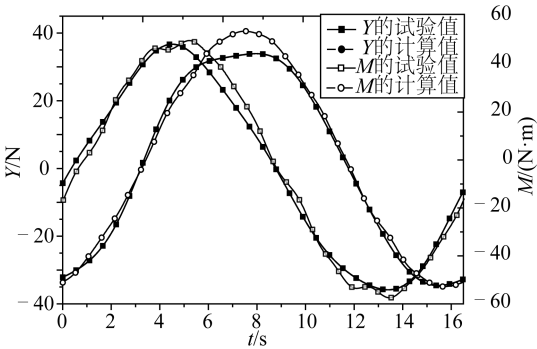


图 5 纯横荡运动的横向力和首摇力矩

Fig. 5 Lateral force curve and yaw moment curve in pure sway motion

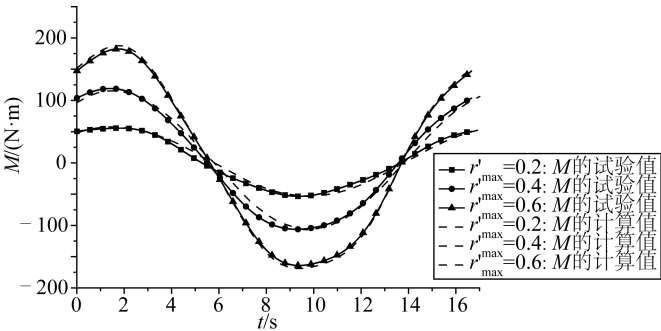


图 6 不同速度幅值时纯艏摇运动的首摇力矩

Fig. 6 Yaw moment curve at different velocity amplitudes in pure sway motion

利用 Matlab 的 lsqcurvefit 函数基于最小二乘法对计算结果进行拟合,拟合后即可得到式(8)中的参数,按步骤代入并求解,每种试验都计算得到相应的水动力导数,将计算得到的数值与试验值相比较,所得结果如表 2 所示。为方便的将水动力导数应用到实船,将计算结果进行了无因次化处理,无因次方法和数据处理方法参考杨勇^[10]的论文。利用 SIMMAN 2014 中韩国 HMRI 水池测得的数据经过处理得到控制导数,详细的舵参数在 SIMMAN 2014 的官网中有介绍($Y_{\delta}^{\prime}=3.101\times10^{-3}$, $N_{\delta}^{\prime}=-1.863\times10^{-3}$)。

表 2 水动力导数计算值和试验值对比

Tab. 2 Comparison of calculated values and test values

水动力导数	$Y_v^{\prime}$	$Y_v^{\prime}$	$N_v^{\prime}$	$N_v^{\prime}$	$Y_r^{\prime}$	$Y_r^{\prime}$	$N_r^{\prime}$	$N_r^{\prime}$
计算值 $\times10^3$	-6.619	-14.663	-5.312	0.773	1.047	-0.834	-1.151	-0.870
试验值 $\times10^3$	-6.094	-13.938	-6.335	0.886	1.213	-0.852	-1.136	-1.010
对比	8.62%	5.20%	-16.15%	-12.75%	-13.69%	-2.11%	1.32%	-13.86%

表 3 为船模纯艏摇运动的线性水动力导数随频率变化的曲线。理论上,线性水动力导数在低频运动时,水动力导数随频率变化幅度很小,基本趋于常数,表 3 也反映出这一现象,这反映出计算结果的合理性。计算时,统一取振幅为 $r_{\max}^{\prime}=0.2$ 时计算的水动力导数。

表 3 纯艏摇运动的水动力导数

Tab. 3 The hydrodynamic derivatives in pure sway motion

	$r'_{\max}$	Y'	Y'_δ	N'	N'_δ
0.2	计算值 $\times 10^3$	1.047	-0.834	-1.151	-0.870
	试验值 $\times 10^3$	1.213	-0.852	-1.136	-1.010
0.4	计算值 $\times 10^3$	1.213	-0.840	-1.151	-0.894
	试验值 $\times 10^3$	1.304	-0.842	-1.239	-1.037
0.6	计算值 $\times 10^3$	1.500	-0.794	-1.316	-0.889
	试验值 $\times 10^3$	1.552	-0.815	-1.395	-1.023

3.3 船舶操纵性试验

实践证明,水动力导数的尺度效应很小,通常认为由拘束船模试验得到的无因次水动力导数可直接用于应用于实船水动力的估算^[11]。将算得的无因次水动力导数数值代入到 MMG 模型中,利用 Matlab 的 Simulink 仿真工具对船舶回转运动和 Z 形操舵运动进行模拟,其原理是利用龙格-库塔算法求解 MMG 微分方程组。Simulink 的仿真界面如图 7 所示,仿真结果如图 8、图 9 所示。在航速为 7 kn,在舵角为 35°时,与丹麦 FORCE technology 的试验值进行比较,比较结果如表 4 所示(L 表示船长);图 9 比较 20°/5°(分子表示规定的舵角,分母表示执行反操舵时的艏向角)的 Z 形操舵试验的仿真值和试验值发现,两者误差较小,方法计算精度较高。

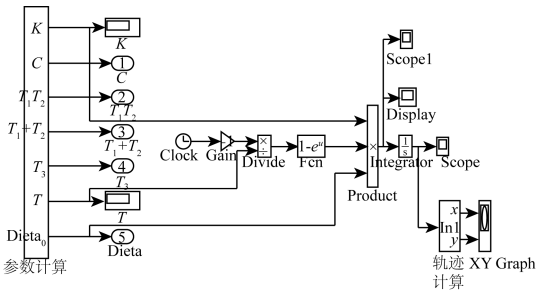


图 7 Simulink 仿真界面

Fig. 7 Simulation interface of Simulink

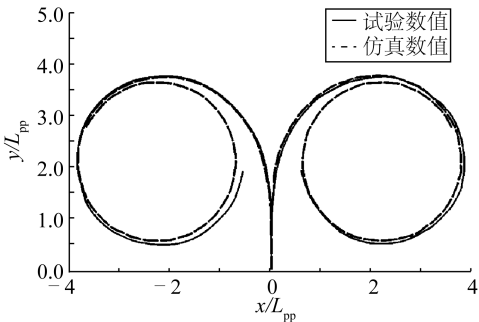


图 8 35°操舵船舶运动轨迹

Fig. 8 Trajectory of ship with 35°rudder angle

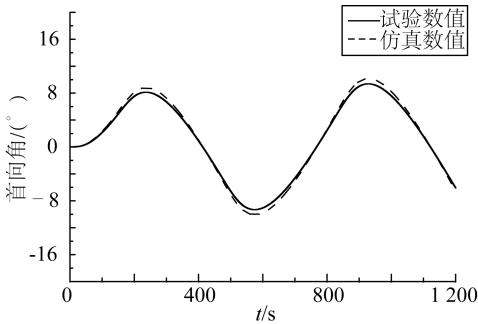


图 9 20°/5°Z 形操舵试验

Fig. 9 20°/5°zigzag test

表 4 回转直径的仿真值和试验值对比

Tab. 4 Comparison of calculated values and test values of turning radius

操舵角	回转直径	
	试验值	仿真值
左操舵 35°	3.91L	3.86L
右操舵 35°	4.04L	3.95L

4 结 语

基于 CFD 技术数值模拟了 KVLCC2 船模的斜航试验、纯横荡试验和纯艏摇试验,计算出相应条件下的水动力,处理计算结果后得到了其水动力导数并代入到 Matlab 中建立的 MMG 运动模型,对回转运动和 Z 形

操舵运动进行仿真。数值模拟的水动力与意大利罗马水池(INSEAN)测得水动力相比较,误差小于5%,操纵试验的轨迹与试验值也很吻合。探索出了合适的网格划分方法,应用CFD技术和重叠网格技术,利用MMG船舶操纵运动方程,完整的对船舶操纵性进行了预报,为船舶操纵性预报提供了一种新的思路,为船舶设计初期阶段的进行快速有效的操纵性预报提供了可行性方案。

参考文献:

- [1] STERN F, AGDRUP K, KIM S Y, et al. Experience from SIMMAN 2008—The first workshop on verification and validation of ship maneuvering simulation methods[J]. *Journal of Ship Research*, 2011, 55(2): 135-147.
- [2] TURNOCK S R, PHILLIPS A B, FURLONG M. Urans simulations of static drift and dynamic manoeuvres of the KVLCC2 tanker[C]// SIMMAN 2008: Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Methods. 2008.
- [3] OHMORI T. Finite-volume simulation of flows about a ship in maneuvering motion[J]. *Journal of Marine Science & Technology*, 1998, 3(2): 82-93.
- [4] OHMORI T, FUJINO M, MIYATA H. A study on flow field around full ship forms in maneuvering motion[J]. *Journal of Marine Science & Technology*, 1998, 3(1): 22-29.
- [5] 王化明. 限制水域操纵运动船舶黏性流场及水动力数值研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009. (WANG Huaming. 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))
- [6] 李冬荔. 黏性流场中船舶操纵水动力导数计算[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2010(4): 421-427. (LI Dongli. Computation of hydrodynamic derivatives related to ship maneuverability in viscous flows[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2010(4): 421-427. (in Chinese))
- [7] 田喜民. 船舶操纵运动黏性水动力数值与试验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008. (TIAN Ximin. A numerical and experimental research on the viscous hydrodynamic forces acting on a ship in manoeuvring motion[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008. (in Chinese))
- [8] 岳晋, 任光, 曹辉. 基于Simulink的船舶运动模型动态仿真研究[J]. 大连海事大学学报, 2009, 35(4): 13-16. (YUE Jin, REN Guang, CAO Hui. Dynamic simulation of ship motion model based on Simulink[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2009, 35(4): 13-16. (in Chinese))
- [9] 邓锐, 黄德波, 于雷, 等. 影响双体船阻力计算的流场CFD因素探讨[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011(2): 141-147. (DENG Rui, HUANG Debo, YU Lei, et al. Research on factors of a flow field affecting catamaran resistance calculation[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2011(2): 141-147. (in Chinese))
- [10] 杨勇, 邹早建, 张晨曦. 深浅水中KVLCC船体横荡运动水动力数值计算[J]. 水动力学研究与进展, 2011, 26(1): 85-93. (YANG Yong, ZOU Zaojian, ZHANG Chenxi. Calculation of hydrodynamic forces on a KVLCC hull in sway motion in deep and shallow water[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2011, 26(1): 85-93. (in Chinese))
- [11] 边海朋. 三体船操纵性试验及数值模拟与运动仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013. (BIAN Haipeng. The model maneuvering test and numerical simulation and motion simulation of trimaran[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013. (in Chinese))