

船舶驶入复杂闸室的全过程数值模拟

曹鸿杰¹, 郭超², 王建华¹, 万德成^{*1}

(1. 上海交通大学 船海计算水动力学研究中心 (CMHL), 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240;
2. 南京水利科学研究院 通航建筑物建设技术交通行业重点实验室, 南京 210029)

摘 要

采用基于 OpenFOAM 自主开发的求解器 naoe-FOAM-SJTU, 针对某 8 000 t 集散两用船进行了从开阔水域航行进入闸室的全过程数值模拟。数值计算时采用非定常雷诺平均方程 (URANS) 求解黏性流场和重叠网格技术模拟船舶运动。分别开展了不释放进闸船舶自由度和释放升沉及纵摇自由度两种工况的数值模拟, 结合两种工况下船舶的水动力性能、自由面、船体表面动压力分布及涡量场, 对船舶航行进入闸室的全过程进行了深入分析。结果显示, 受闸室壁面限制, 船舶进入闸室后阻力会有一个明显的上升趋势, 船体出现下沉现象。阻力峰值出现在 0.5 ~ 0.75 倍船长进入闸室时, 此时是进闸的危险时刻。研究表明, 相关数值方法能够适用于船舶进闸问题的数值模拟, 并为复杂闸室中船舶航行条件模拟提供了参考。

关键词: 限制水域; 重叠网格技术; 船-闸相互作用; naoe-FOAM-SJTU 求解器

中图分类号: U661.1

文献标志码: A

0 引 言

船闸是帮助船舶过坝或克服上下游水位高差的主要通航建筑物之一。随着内河水运的发展, 船舶越来越趋于大型化、专业化, 船舶主尺度不断增加。而相应的船闸闸室等配套的建筑设施受到时间、资金等投入成本的局限, 设计过程中在满足国家标准和通航能力要求的基础上, 要求基本尺度尽量取小值, 这使得船舶航行的水域过水断面系数较小, 从而引发了船舶在限制水域中的航行问题。

限制水域的航行问题通常体现为浅水效应和岸壁效应, 因此在实际场景中, 会出现浅水域、窄航道以及浅水窄航道的情况。不少学者针对限制水域问题开展了相关研究。Zou 等^[1]利用计算流体力学数值模拟的方法探究了岸壁效应对低速油轮的影响, 并对船舶下沉现象进行了分析。邓辉等^[2]以非线性浅水波为理论, 利用有限差分法计算了受限制水域阻塞效应的影响, 不同船型的升沉与纵倾随水深弗劳德数的变化。Ren 等^[3]模拟了限制水域中, 岸壁效应作用对螺旋桨尾流场的影响。Terziev 等^[4]模拟了 DTC (Duisburg test case) 船模在 4 种不同宽度及水深的限制航道中的行驶过程, 探究航道宽度及水深对船舶下沉、纵倾和阻力的影响。

船舶进闸问题是限制水域中典型的浅水窄航道场景, 这体现在闸首处通常会有一个明显的航道变窄, 而闸室内的水深明显小于开阔水域中的水深。闸室整体结构形式复杂, 呈现既浅又窄的特点。船舶在这样浅且窄的船闸中航行, 会造成航行阻力增加、航行速度降低, 从而导致船闸通过能力降低。

同时,与在一般航道内航行不同,船舶在进出船闸时,受到航行水域范围的限制以及船闸边壁的影响,航行时受力情况复杂。如果船舶进出闸室出现触底或碰壁的情况,将严重威胁船舶的通航安全,因此限制水域船舶进出闸问题受到了研究人员的广泛关注。

当前对于船舶进出船闸问题的研究,多以第 3 组巴拿马船闸为研究对象。比利时弗兰德水力学研究中心^[5]以巴拿马船闸为原型,设计了一系列模型试验,模拟了 12 000 TEU 集装箱船通过闸室的情况,并分析了速度、水深、偏心距等因素对船舶进闸的影响。王宏志等^[7]基于 FLUENT 求解器,采用动网格技术数值模拟了船舶进入第 3 组巴拿马船闸时的情况,计算了进闸过程中作用在船舶上的水动力并将结果与试验数据进行对比,一致性较好。孟庆杰等^[8-10]基于 naoe-FOAM-SJTU 求解器,使用重叠网格模拟船舶运动,考虑流体黏性作用,研究了 12 000 TEU 集装箱船通过第 3 组巴拿马船闸时的水动力特性,数值模拟了船舶过闸时的流场与水动力变化。

目前,对于第 3 组巴拿马船闸的研究已经相对成熟,但对于国内其他闸室船舶进闸问题的数值模拟研究相对较少。本文船闸下游水域较为开阔并采用对称布置,闸室内有效宽度变窄,且在闸首处门槛高程较高,导致闸室内水深较浅,船舶进入闸室后,闸室两侧边壁带来的岸壁效应以及闸室底部的浅水效应将会显著增大,影响船舶的操纵性,容易发生触底或碰壁事故。因此,本文将该复杂闸室为原型,模拟某 8 000 t 集散两用船从开阔水域进入闸室的全过程。基于 OpenFOAM 自主开发的求解器 naoe-FOAM-SJTU,使用以非定常雷诺平均方程 URANS 为基本方程的 SST $k-\omega$ 模型,采用高精度流体体积 (volume of fluid, VOF) 方法捕捉自由液面,采用重叠网格方法模拟船舶的运动。首先模拟了船舶进入第 3 组巴拿马船闸的过程,并与试验结果进行对比,验证了当前数值方法在船舶进闸问题上的适用性;然后建立了以复杂船闸为工程背景的数值计算模型,分别考虑进闸船舶不释放自由度和释放升沉与纵摇自由度的情形,开展船舶进入复杂闸室全过程的数值模拟。

1 数值方法

在数值研究中采用自主研发的求解器 naoe-FOAM-SJTU^[11-12],先前的相关研究已经充分验证了该求解器在船舶与海洋工程领域中应用的可靠性^[13]。在数值计算中,采用了非定常雷诺平均方程 (URANS),并结合 SST $k-\omega$ 湍流模式求解粘性流场,VOF 方法捕捉自由液面,重叠网格技术模拟船舶运动。

1.1 黏性流场求解方法

通常船舶以较低速度驶入闸室,黏性阻力所占比重较大。为了求解复杂黏性流场,本文使用了 URANS 方程为基本方程的 SST $k-\omega$ 模型。其控制方程包括连续性方程和动量方程,如式 (1) 和式 (2) 所示:

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

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho(\mathbf{U} - \mathbf{U}_g)\mathbf{U}) = -\nabla p_d - \mathbf{g} \cdot \mathbf{x} \nabla \rho + \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} \nabla \mathbf{U}) + (\nabla \mathbf{U}) \cdot \nabla \mu_{\text{eff}} \quad (2)$$

式中, \mathbf{U} 为速度, \mathbf{U}_g 为网格速度; $p_d = p - \rho g x$ 为动压力, ρ 为流体密度, \mathbf{g} 为重力加速度矢量; \mathbf{x} 为位置矢量; μ_{eff} 表示有效动力黏度, t 为时间。

SST $k-\omega$ 模型是一种应用广泛的湍流模型,它不仅能有效地处理近壁区,而且能很好地求解自由表面,从而模拟全流场的各种流动。为了捕捉限制水域中自由液面的变化,采用高精度的流体体积法。该方法的主要原理是计算网格单元中不同流体所占的体积分数 α ,以确定界面。当 $\alpha = 0$ 时,代表气体;当 $\alpha = 1$ 时,代表液体;介于 0~1 之间为水气交界面。

1.2 重叠网格技术

本文开展了船舶从开阔水域驶入闸室的全过程数值模拟,涉及船舶的大幅度运动以及进入闸室后船舶与闸室壁面间狭窄间隙处理。在模拟船舶 6 自由度运动时,传统的动网格方法无法有效解决该类复杂问题,重叠网格技术是直接模拟复杂船舶运动的关键。该方法通常包括将物体的每个部分单独划分网格,再嵌入到另一套网格中,从而实现多个相互独立的网格之间产生无约束的相对位移,模拟物体无约束的 6 自由度运动。这种特性保证了其在模拟物体大幅度运动时网格的稳定性。对于船舶进闸问题,采用重叠网格技术的帮助下,可以实现船舶大幅度 6 自由度运动,模拟船舶从开阔水域航行进入闸室的全过程。本文采用了求解器 naoe-FOAM-SJTU 中的重叠网格模块^[14-15],该模块可将相互独立的船体网格和计算域船闸网格通过 SUGGAR++ 技术进行挖洞和插值单元形成等操作^[16],最终整合为一套重叠网格体系。图 1 为船舶进闸时的重叠网格示意图,截取的是船舶的中横剖面。红色区域代表背景网格,蓝色区域代表船体网格。两个区域重叠的部分通过插值传递信息,保证了重叠网格计算的连续性。

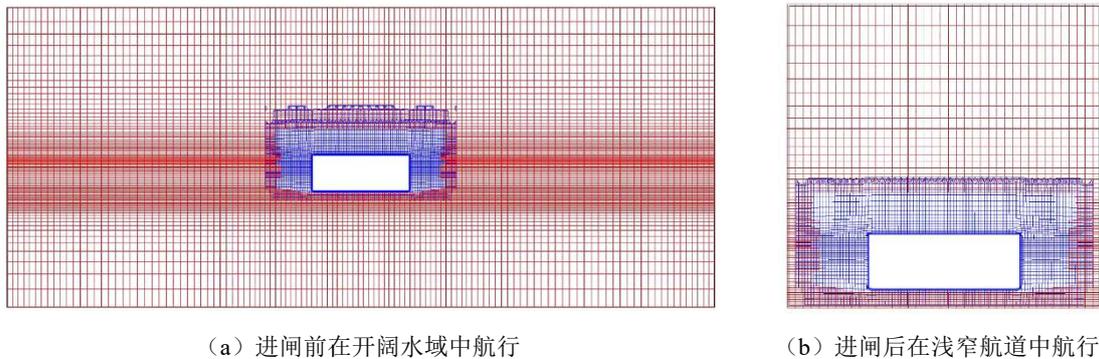


图 1 船舶进闸重叠网格示意图

2 数值模型的建立

2.1 几何模型

本文的计算模型采用某 8 000 t 集散两用船模型,如图 2 所示,计算采用缩尺后的模型尺度,船体模型长度为 4.35 m,模型参数如表 1 所示。

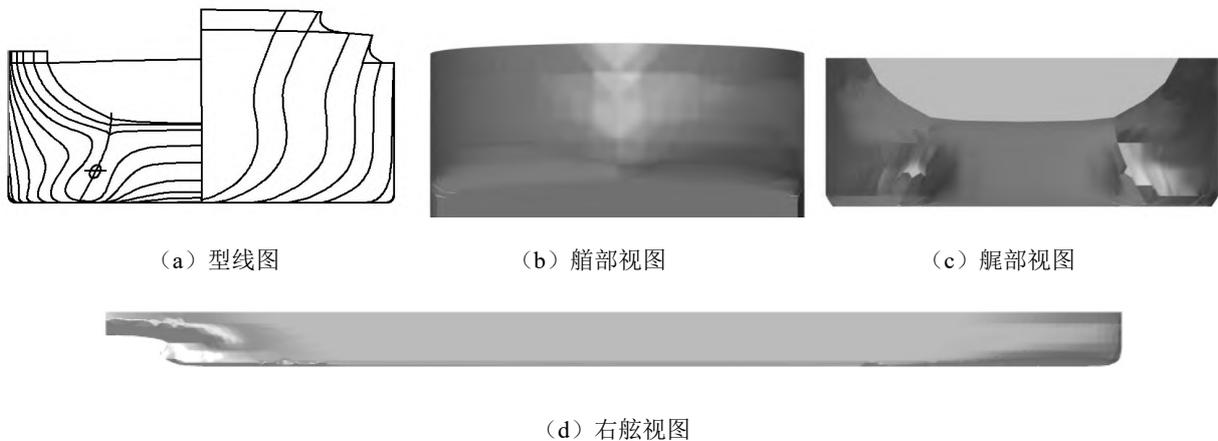


图 2 4.35 m 船体几何模型

表 1 4.35 m 船体模型主要参数

类型	缩尺比 λ	垂线间长 L_{PP}/m	水线宽 B_{WL}/m	吃水 T/m	型深 D/m	排水体积 ∇/m^3	湿表面积 S/m^2	方形系数 C_B
模型	28.97	4.35	0.663	0.190	0.242	0.495	4.373	0.872
实船	1	126	19.2	5.5	7	12 045.124	3 670.293	0.872

闸室的实际有效尺寸为 $280.0\text{ m} \times 40.0\text{ m} \times 8.0\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 门槛水深), 模型如图 3 所示。从图 3(a) 可以看到, 整个闸室总体上是一个对称结构, 在闸室入口处航道明显变窄, 出现窄航道的限制水域环境; 从图 3(b) 中可以看出, 在闸室入口处有一个底高程的抬升, 出现浅航道的限制水域环境。船体缩尺比为 $1:28.97$, 闸室也以同比例进行缩尺, 缩尺后船闸有效尺寸为 $9.665\text{ m} \times 1.38\text{ m} \times 0.276\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 门槛水深)。

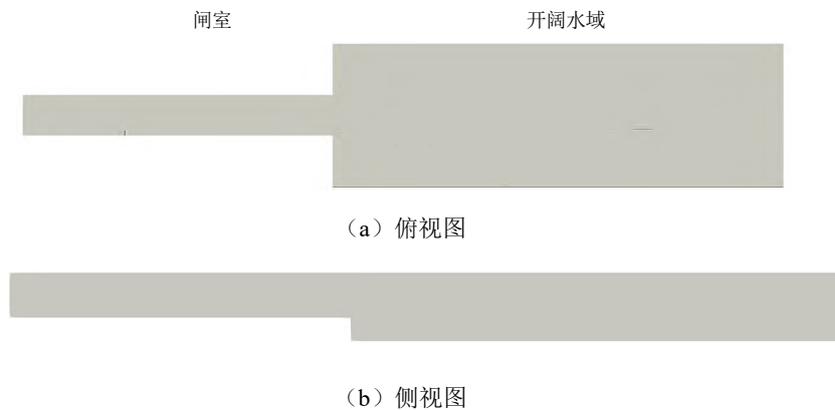


图 3 闸室几何模型

2.2 计算域及网格划分

在航行的数值模拟中, 船模长度为 4.35 m , 航行速度固定为 0.1618 m/s , 弗劳德数 $Fr = 0.0248$; 重力加速度为 9.81 m/s^2 , 水的密度为 997.561 kg/m^3 , 运动黏性系数为 $1.0087 \times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$ 。计算域如图 4 所示, x 轴指向船尾, y 轴指向右舷, z 轴指向上方。计算域的尺寸为 (以垂线间长 L_{PP} 为参考): 长度 (x) 方向: $-2.22L_{PP} \leq x \leq 3.47L_{PP}$; 深度 (z) 方向: 开阔水域为 $-0.23L_{PP} \leq z \leq 0.23L_{PP}$; 闸室部分为 $-0.063L_{PP} \leq z \leq 0.23L_{PP}$; 宽度 (y) 方向: 开阔水域为 $-0.556L_{PP} \leq y \leq 0.556L_{PP}$, 闸室部分为 $-0.159L_{PP} \leq y \leq 0.159L_{PP}$ 。平面 $z=0$ 为自由液面, 上方为空气, 下方为水。在计算中, 闸室周围边界选用不可穿透壁面边界条件, 顶部边界设置为压力出口, 船体则采用物面边界条件。

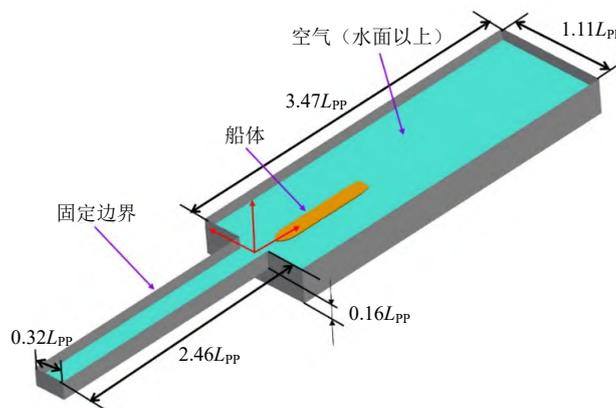
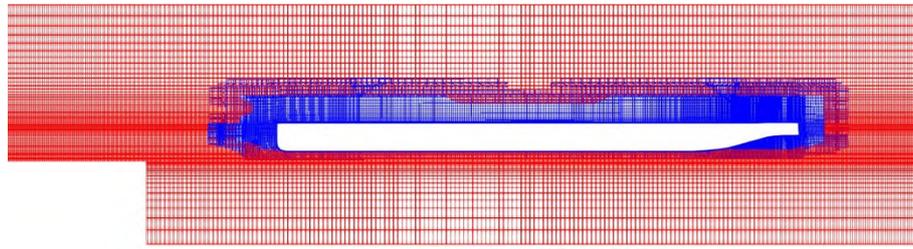
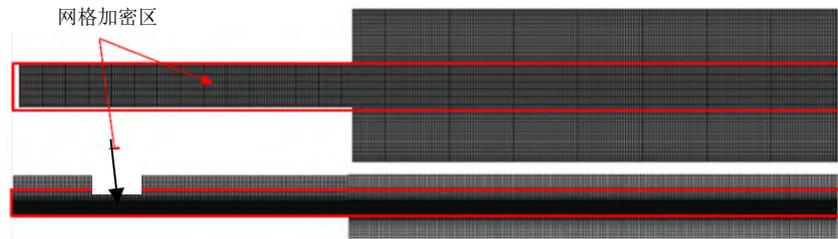


图 4 计算域与边界条件

模拟采用全六面体非结构化网格, 网格划分情况如图 5 所示。在计算中为模拟船舶的直航运动, 采用重叠网格技术, 分别生成了贴合船闸几何形状的背景网格和捕捉船体几何表面的船体网格。图 5(a) 为重叠网格的划分情况, 红色代表背景网格, 蓝色为船体网格。由于船闸的特殊结构, 在闸首处有一个明显的高程抬升, 因此对背景网格部分自由液面区域、船舶直航区域水下部分进行了加密, 如图 5(b) 所示。网格总数为 641 万, 其中, 背景网格数为 526 万, 船体网格数为 115 万。



(a) 重叠网格划分情况



(b) 网格加密区域

图 5 网格分布情况

为了更好地对船舶进闸过程中的流场及船舶水动力特性进行分析, 对船舶进闸过程中的典型时刻进行标记, 如图 6 所示。TIME 0 表示船舶在开阔水域航行, TIME 1 表示船首到达闸室口, TIME 2 表示船舶一半进入闸室, TIME 3 表示船舶完全进入闸室。

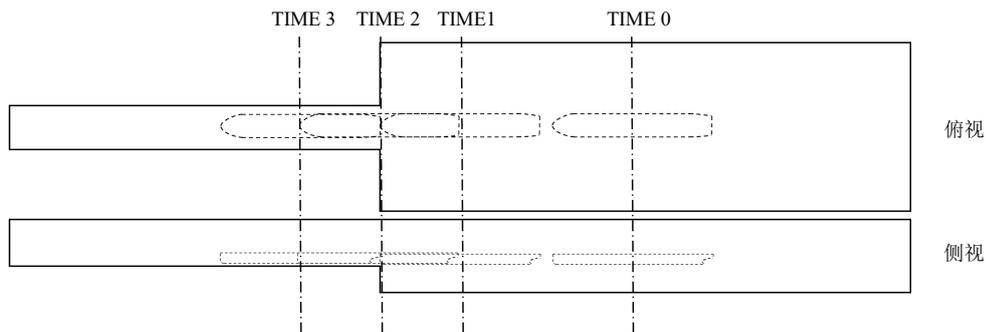


图 6 典型时刻示意图

2.3 数值方法验证

为了验证数值计算结果的可靠性, 模拟了 12 000 TEU 船模拖航进入巴拿马第 3 组船闸的过程, 并将其结果与巴拿马运河管理局和比利时弗兰德水力学研究中心 (Flanders Hydraulics Research, FHR) 合作模拟的船舶进闸试验结果^[5]进行对比。数值模拟中将船模缩尺至和试验相同的尺寸, 船模 L_{pp} 为 4.35 m, 拖航进闸的船速为 0.115 m/s, 约束升沉和纵摇运动自由度。数值计算得到的船舶所受阻力与试验值的对比如图 7 所示, 红色实线为数值模拟的结果, 黑色虚线为试验值。从图中可以看出, 固定船模的数值模拟计算值与试验值具有较好的一致性; 在 TIME 1 时刻船舶进入引航道之后, 数值模拟结果出现了

上下脉动, 这一方面由于试验测量时间步较大, 另一方面, 在船舶分别到达引航道口和闸室口时, 过流断面发生突变, 壅水效应尚未形成, 仅仅是入口处流体速度增加, 导致了入口处动压力下降, 阻力降低; 而随着船舶的进入, 壅水现象逐渐显现, 阻力逐渐增加。整体来看, 数值模拟值与试验值趋势一致, 吻合较好, 表明当前采用的数值方法是可靠的。

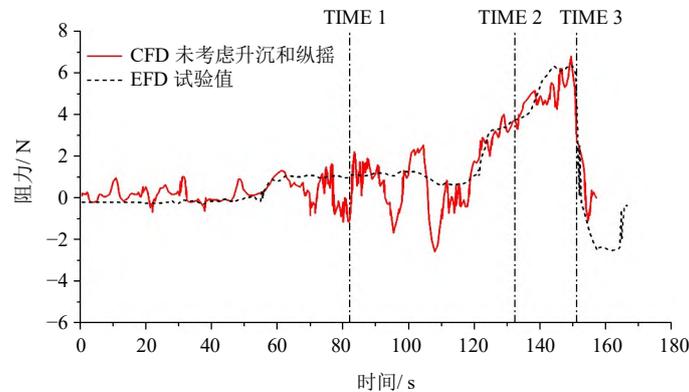


图 7 数值模拟结果与试验值的对比

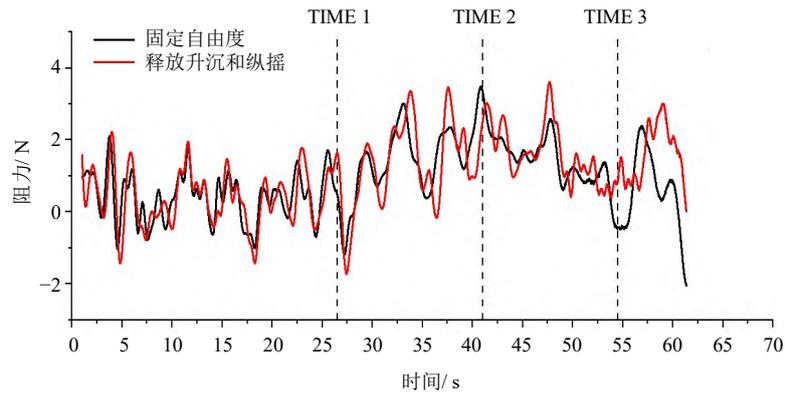
3 数值结果分析

为了深入分析船舶进入闸室过程中的流动机制, 更真实地还原船舶运动, 本文分别进行了考虑/未考虑升沉和纵摇运动的进闸模拟, 对比分析了释放升沉和纵摇运动前后船舶水动力特性及流场的变化。

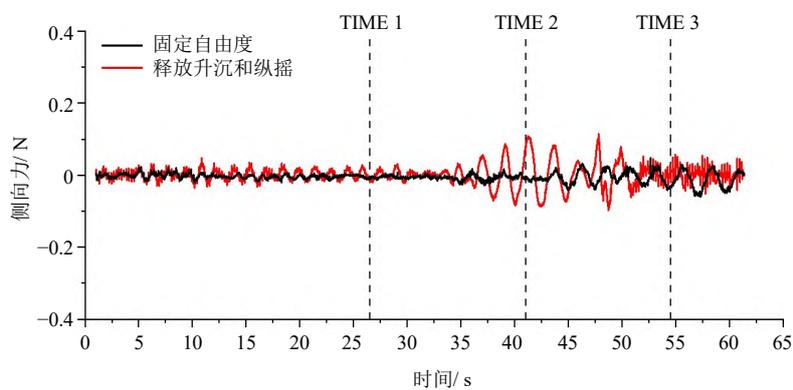
3.1 水动力特性分析

与开阔水域中的航行特性相比, 在既浅又窄的闸室航道中, 受到浅水效应和岸壁效应的影响, 船舶的水动力特性会有很大不同。图 8 展示了船舶进闸过程中的水动力特性时历曲线, 从图 8(a) 中可以看出, 船舶从远场 (船舶在开阔水域) 驶入闸室, 闸室内的航行环境既浅又窄, 船体周围流场呈现明显的岸壁效应和浅水效应。其中, 船舶在远场行驶时的阻力幅值较小, 且此时是否释放升沉、纵摇自由度对阻力的影响不大。当船首刚刚到达闸室门槛 (TIME 1) 时, 船舶的阻力有所降低, 这是因为此时闸室的壅水现象并不明显, 且由于闸室门槛存在一个壁面的抬升, 导致水深骤变。因为船舶的驶入, 闸室门槛附近流体以较快速度涌入闸室, 造成闸室门槛动压力有所下降。在 TIME 1 时刻后, 船舶逐渐进入闸室, 阻力呈现明显上升趋势, 这是由于船舶在闸室中航行时, 航道变窄, 航行水域变浅, 船舶航行的阻塞系数升高, 出现了壅水现象, 进而引起船舶压差阻力和摩擦阻力上升, 最大阻力出现在船舶一半船长进入闸室时。在释放升沉和纵摇自由度之后, 与固定船模相比, 船舶阻力总体上会有所增大, 且阻力最大值出现的位置有所靠后, 大约为 0.75 倍船长, 这是由于船舶自身运动调整, 导致闸室内出现壅水现象的时间靠后了。

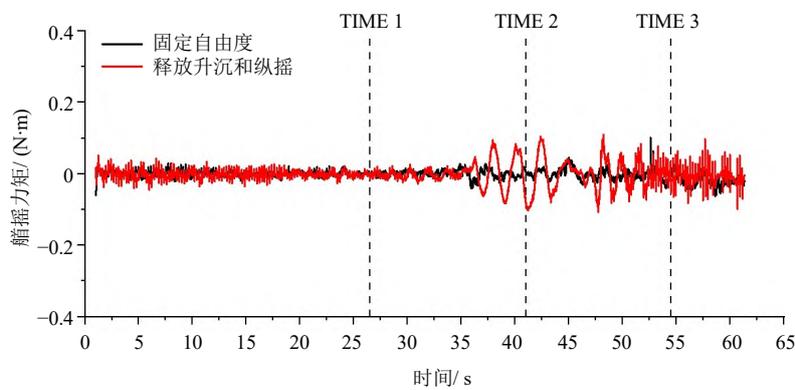
从图 8(b) 和图 8(c) 可以看出, 总体上由于船舶从中间驶入船闸, 流场左右对称, 因此侧向力和艏摇力矩几乎为 0, 符合实际情况。但从曲线的变化来看, 释放升沉和纵摇之后, 船舶受到的侧向力和艏摇力矩在船舶一半船长进入闸室 (TIME 2) 时, 有了较明显的上下波动, 而固定船舶的变化并不明显。这是由于释放自由度之后, 受到船体浮态变化的影响, 流场出现扰动从而出现细微不对称的情况。



(a) 阻力



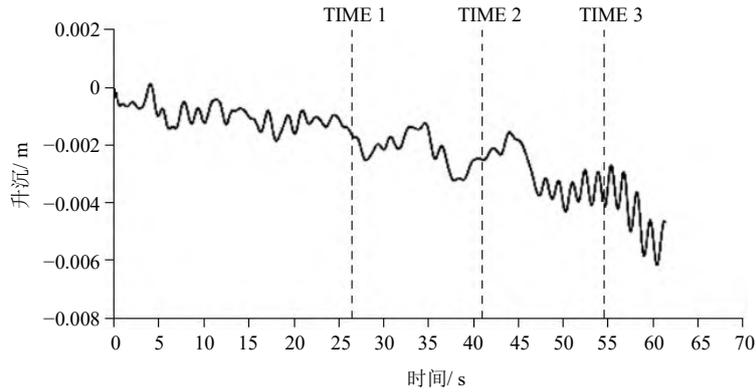
(b) 侧向力



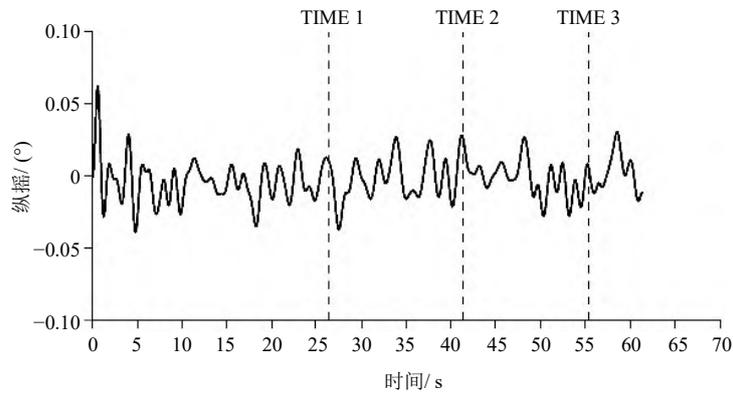
(c) 艏摇力矩

图8 进闸过程中船舶受力时历曲线

进一步对船舶运动情况进行分析,船舶航行进闸过程中的升沉和纵摇运动如图9所示。从升沉曲线中可以看出,船舶从开阔水域进入闸室后,逐渐下沉。在船舶刚刚进入闸室时,下沉量还较为平缓;当船舶完全进入闸室后,在受限制的闸室内航行,由于壅水效应的影响,过流断面减小,船舶下沉幅度增加,验证了船舶在限制水域中航行时会出现下沉的现象。而从纵摇曲线中可以看到,船舶在限制水域航行时,出现了轻微的纵倾,但由于当前阻塞效应并不很严重,此时船舶的纵倾并不明显。



(a) 升沉

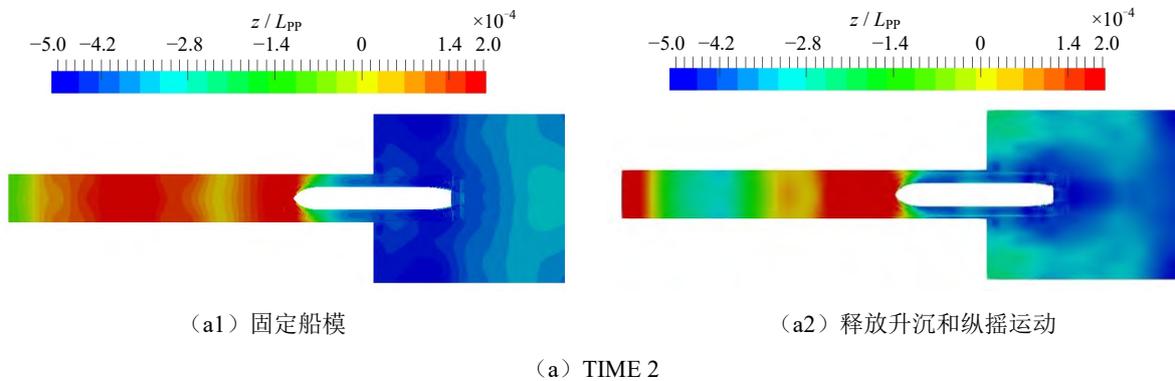


(b) 纵摇

图 9 进闸过程中船舶升沉和纵摇运动时历曲线

3.2 自由面及船体表面动压力分析

船舶从开阔水域进入闸室的过程中, 由于闸室航道整体变窄, 过流断面面积减小, 闸室内水体受到挤压, 自由面变化剧烈。图 10 给出了船舶进闸过程中典型时刻的自由面云图分布。图中采用自由面高度 z 与船模垂线间长 L_{PP} 的比值作为量纲一高度。随着船舶逐渐进入闸室, 闸室内的水仅能从船体两侧以及船体底部与闸室底部的过流断面处流出。闸室内自由面升高, 导致船体首部水位上升, 而船体中后部水位下降, 使得船体周围流体进一步回流。



(a1) 固定船模

(a2) 释放升沉和纵摇运动

(a) TIME 2

图 10 船舶进闸过程中典型时刻的自由面云图

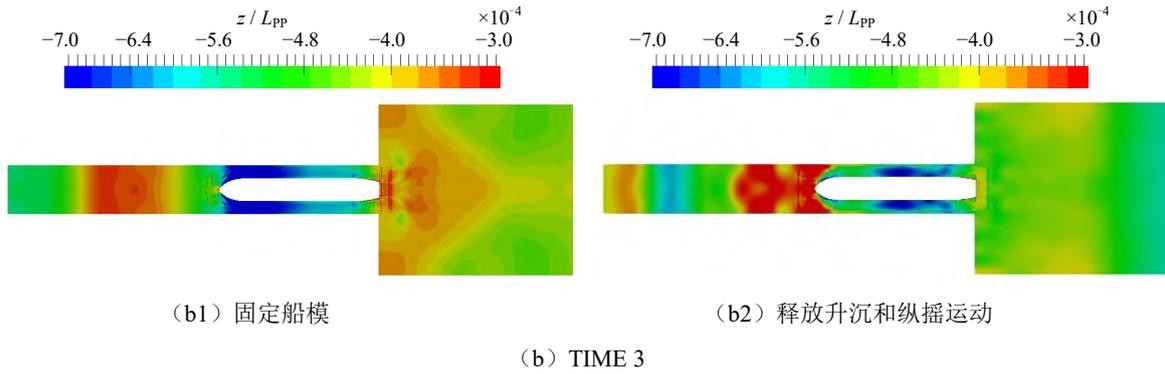


图 10 续 船舶进闸过程中典型时刻的自由面云图

船舶一半长度进入闸室 (TIME 2) 时, 闸室内部形成了较大的壅水, 在固定船模时, 壅水现象明显。而释放自由度的船模周围自由面高度下降更多, 且由于运动导致闸室内回流出现的时间不一致。在固定船模时, 船首部的壅水和闸室内回流已经相遇, 而放开运动时, 回流在闸室顶部。船舶完全进入闸室 (TIME 3) 之后, 闸室内的水逐渐流出, 自由面下降, 船舶下沉, 浅水效应进一步增加, 阻力增大。对比固定船模, 释放运动后的船模两侧自由面最低处出现在船中后部, 而固定船模则出现在船首至船中部分, 且释放运动前后自由面高度差大于固定船模工况。释放运动的船模首部壅水效应更为严重, 在船舶完全进入闸室后阻力更大, 与阻力曲线的变化趋势符合。

船体底部动压力分布的变化也会受到闸室环境的影响。图 11 给出了船舶进闸过程中典型时刻的船体表面动压力 P_{rgh} 分布, 单位为 Pa, 在 OpenFOAM 中可通过将压力 p 拆分得到, 如式 (3) 所示:

$$P_{rgh} = p - \rho g \cdot h \tag{3}$$

式中, h 表示网格单元体中心的位置矢量。从图中可以看出, 由于船舶沿着中间位置进入闸室, 所以整体的流场是对称的, 船底两侧压力分布相同。

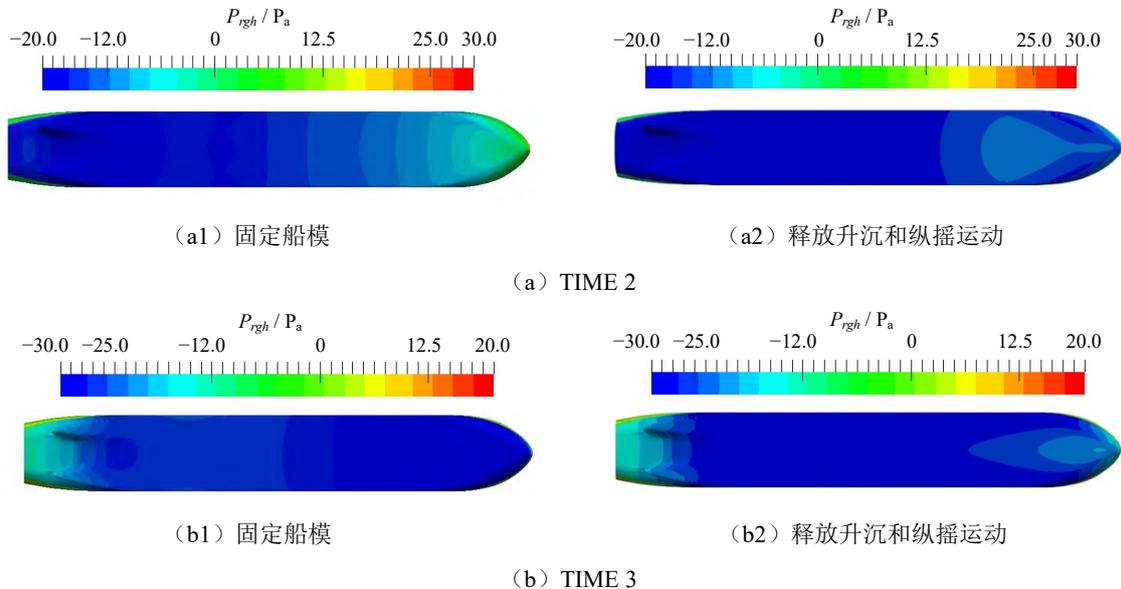


图 11 船体表面动压力分布

船舶一半长度进入闸室 (TIME 2) 时, 船中和船尾区压力小于艏部压力, 这是由于艏部壅水, 船中和船尾处水面下降导致。当船舶进入闸室时, 由于阻塞系数的增加, 水流以较快速度流出闸室, 造成船底压力降低。对比固定船模, 释放升沉和纵摇运动后船体动压下降更多, 这是由于船舶下沉, 造

成了艏部流动速度加快, 动压降低。船舶完全进入闸室 (TIME 3) 后, 从固定船模的动压分布可以看出, 因为艏部壅水被排出, 艉部动压高于艏部, 而释放运动的船模受到纵倾和下沉的影响, 艉部过流断面减小, 船体周围流速增大, 且和自由面云图分布一致; 船舶放开运动后, 由于壅水效应, 艏部下方流速降低, 动压力升高, 从而出现了抬船现象。

3.3 速度场分析

为了观察闸室口底部壁面升高对船舶进闸过程的影响, 以 y 轴为法线方向, 截取船舶中纵剖面的速度云图, 如图 12 所示, 图中仅选取了自由面以下的部分。以流场速度大小的标量 U_{Mag} 表示速度场大小, 单位为 m/s , 可由式 (4) 得到:

$$U_{\text{Mag}} = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2} \quad (4)$$

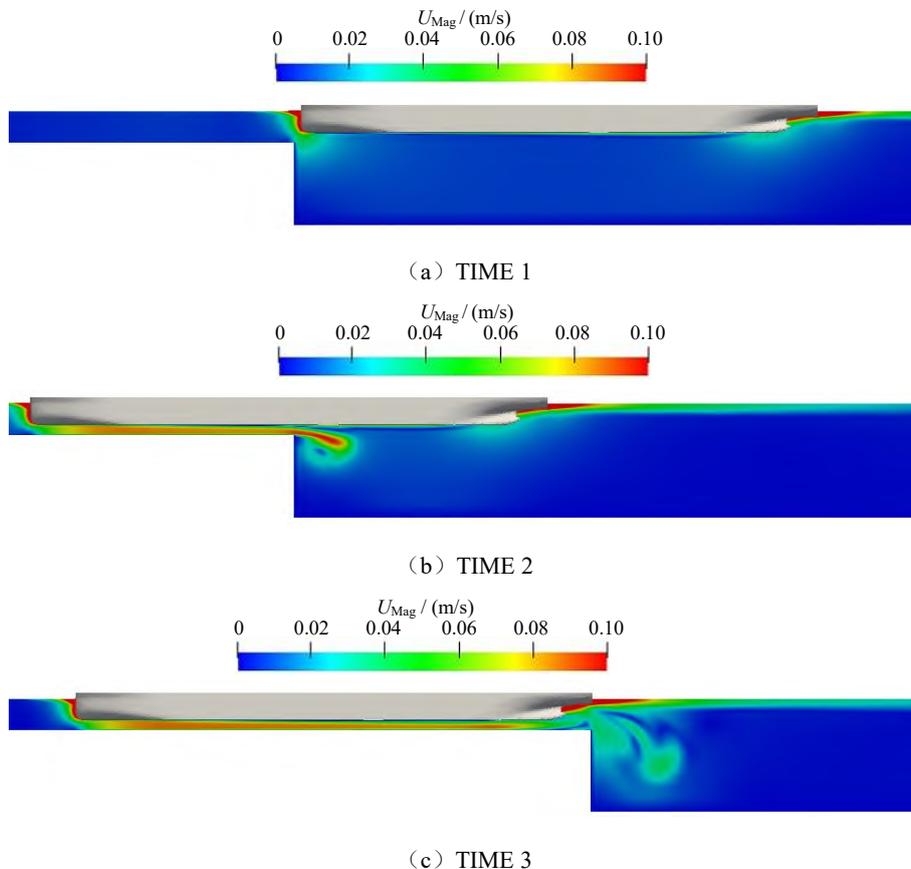


图 12 船舶进闸过程中的速度分布云图 ($y=0$)

从图 12 可以看出, 受船舶运动影响, 船体周围流场速度较大。船首刚刚到达闸室 (TIME 1) 时, 艏部和艉部附近流场的速度较周围而言较大, 船底部流场速度几乎为 0。船舶一半船长进入闸室 (TIME 2) 时, 进入闸室部分的船底部流速增大, 并且区别于 TIME 1, 在闸首开始形成一个清晰的涡旋。这是由于闸室入口处有特殊的阶梯状, 闸室底部上升, 水深从初始状态的 1 m 降低至 0.276 m (对应实尺度 8 m), 此时船舶所处的水深 h 与吃水 T 的比值 $h/T \approx 1.45$, 小于 1.5 , 属于典型的浅水模型。水深的骤变使得船舶进入闸室后, 闸室内逐渐出现壅水现象。当船舶完全进入闸室 (TIME 3) 后, 底部速度增大更加明显, 闸首处的涡旋发展更加完整。

3.4 涡量场分析

为了更好地分析船舶进闸过程中受到闸室壁面限制后引起流场变化的机理, 本文在后处理中采用

了第三代涡识别方法—— Ω_R 方法^[17]分析船体周围的涡结构。 Ω_R 方法的优点在于其不仅克服了传统涡识别方法需要针对具体流动调整阈值的缺点,还能同时捕捉到流场中的强涡和弱涡^[19]。图 13 给出了不同时刻基于 Ω_R 方法捕捉到的船体周围涡结构,采用量纲一速度,由流场速度大小的标量 U_{Mag} 与船模固定速度 u 的比值表示。使用该方法不仅捕捉到了船体周围的涡结构,而且由于航道变窄而产生的弯涡的捕捉也很丰富。由于整体航道变窄,船舶通过闸首时,涡向闸室外侧扩散,形成了向下、向外翻卷的现象,并且水流在流过船尾后向上方急速扩散,加剧了尾流场中的涡流。这种向外翻卷的涡在 TIME 2 时的船中部位以及 TIME 3 时的船尾都可以明显观察到。此外,在向外翻卷的涡前还出现了一条笔直的线涡,这是由于在闸室口底部高程的抬升,闸室内外水深骤变造成的。

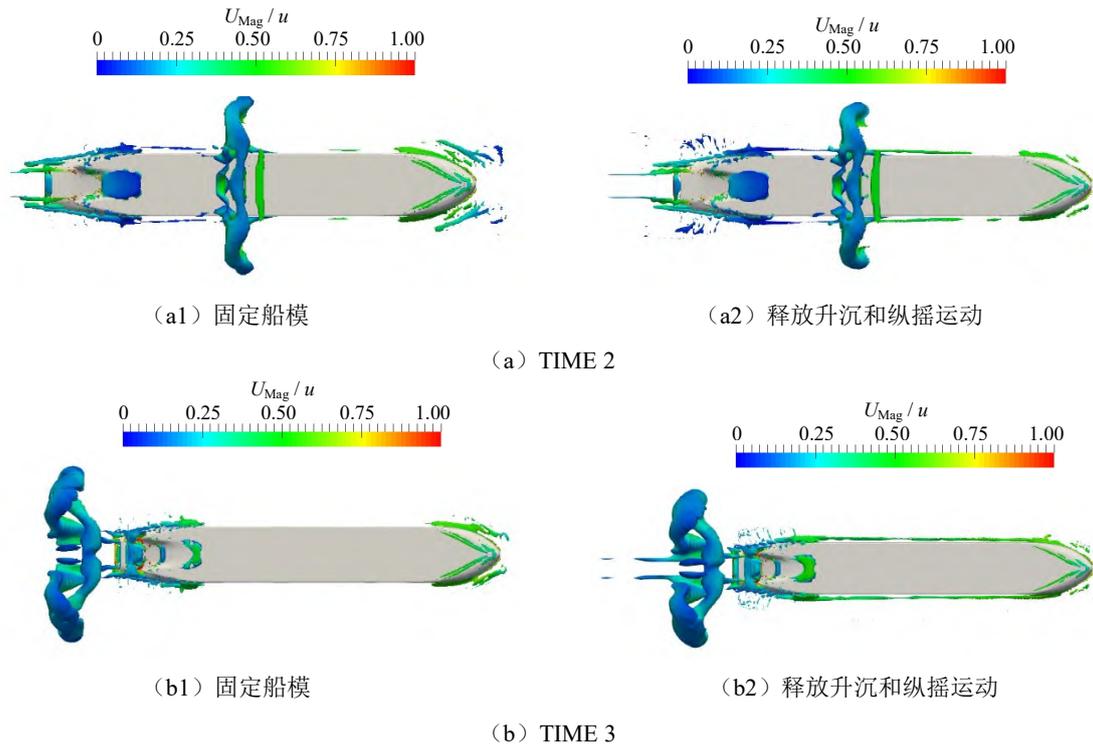


图 13 使用 Ω_R 方法得到的船体周围涡结构

对比释放升沉和纵摇自由度的船与固定船周围的涡结构发现,释放升沉和纵摇自由度之后,船体周围的涡结构更加丰富,涡翻卷的程度以及尾涡都更加明显,这表明释放升沉和纵摇自由度后,船体运动对流场的扰动更加剧烈,相应的涡量的变化也更加剧烈。

4 结 论

本文利用自主研发的求解器 naoe-FOAM-SJTU,采用基于 URANS 方法的 SST $k-\omega$ 湍流模型,使用重叠网格技术模拟了船舶从开阔水域航行进入闸室的全过程。分别考虑固定船模与释放升沉和纵摇自由度的船模两种工况,模拟船舶进入复杂闸室中的水动力特性、自由面、船体表面动压力分布以及涡量场,通过对比分析得到以下主要结论:

(1) 船舶从开阔水域进入闸室时,由于受到了闸室壁面的限制,船舶处于限制水域中航行,进入闸室后船舶受到的阻力会有明显的上升趋势。在船舶逐渐进入闸室时,最大阻力出现在 0.50 ~ 0.75 倍船长左右,此时船舶的下沉量也突增,是进闸的危险时刻。

(2) 船舶在进入闸室时,由于闸首存在一个明显的台阶状结构,在闸首前后的水深变化明显,使

得船底流场的流速改变, 从船底动压分布和速度场的云图可以看出, 进入闸室部分的船底流速大, 船底压力小。

(3) 对比固定船模和释放升沉和纵摇自由度的船模两种工况, 释放升沉和纵摇自由度时, 流场的变化更加剧烈, 验证了船舶在限制水域中航行时存在下沉特性。受到船舶运动姿态变化的影响, 阻力峰值的出现有一定的滞后。从涡量场和速度场的云图可以看出, 在闸首处, 即航道变窄、水深骤变的区域形成了向下、向外翻卷的涡旋, 考虑升沉和纵摇自由度时得到的涡结构更加复杂。

参 考 文 献

- [1] ZOU L, LARSSON L, DELEFORTRIE G, et al. CFD prediction and validation of ship-bank interaction in a canal[C]// Proceedings of International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water: Ship to Ship Interaction, Trondheim, 2011: 413-422.
- [2] 邓辉, 张志宏, 刘巨斌, 等. 限制水域船舶升沉与纵倾研究[J]. 中国造船, 2018, 59(1): 16-25.
- [3] REN Z, WAN D C. Numerical prediction of wall effect on propeller in restricted channel[J]. Journal of Applied Mathematics and Physics, 2019, 7(8): 1645-1659.
- [4] TERZIEV M, TEZDOGAN T, OGUZ E, et al. Numerical investigation of the behaviour and performance of ships advancing through restricted shallow waters[J]. Journal of Fluids and Structures, 2018, 76: 185-215.
- [5] VANTORRE M, DELEFORTRIE G, MOSTAERT F. Behaviour of ships approaching and leaving locks: Open model test data for validation purposes[C]// Proceeding of the 3rd International conference on ship manoeuvring in shallow and confined water: with non-exclusive focus on ship behaviour in locks, Ghent, Belgium, 2013: 337-352.
- [6] VERGOTE T, ELOOT K, VANTORRE M, et al. Hydrodynamics of a ship while entering a lock[C]// 3rd International Conference on Ship manoeuvring in Shallow and Confined water: with non exclusive focus on ship behaviour in locks. Flanders Hydraulic Research, 2012: 1-9.
- [7] 王宏志, 邹早建. 船舶进入第三组巴拿马船闸时的水动力数值研究[C]// 第十六届中国海洋(岸)工程学术讨论会(下册), 2013: 301-309.
- [8] 孟庆杰, 万德成. 船舶驶入船闸过程水动力数值研究[C]// 第十三届全国水动力学学术会议暨第二十六届全国水动力学研讨会, 工程科技II辑, 青岛, 2014.
- [9] WAN Decheng, MENG Qingjie, HUANG Wenhua. Numerical investigation of influence of eccentricity on the hydrodynamics of a ship maneuvering into a lock[C]// Proceedings of the 6th International Conference on Computational Methods. Auckland, 2015.
- [10] MENG Q J, WAN D C. URANS simulations of complex flows around a ship entering a lock with different speeds[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2016, 26(2): 161-168.
- [11] SHEN Z R, CAO H J, WAN D C. The manual of CFD solver for ship and ocean engineering flows: naoe-FOAM-SJTU[R]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [12] CAO H J, WAN D C. Development of multidirectional nonlinear numerical wave tank by naoe-FOAM-SJTU solver[J]. International Journal of Ocean System Engineering, 2014, 4(1): 52-59.
- [13] WANG J H, ZHAO W W, WAN D C. Development of naoe-FOAM-SJTU solver based on OpenFOAM for marine hydrodynamics[J]. Journal of Hydrodynamics, 2019, 31(1): 1-20.
- [14] WANG J H, ZOU L, WAN D C. Numerical simulations of zigzag maneuver of free running ship in waves by RANS-overset grid method[J]. Ocean Engineering, 2018, 162: 55-79
- [15] WANG J H, WAN D C. CFD study of ship stopping maneuver by overset grid technique[J]. Ocean Engineering, 2020, 197: 106895.

- [16] NOACK R W, BOGER D A, KUNZ R F, et al. Suggar++: An improved general overset grid assembly capability[C]// Proceedings of the 19th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference. San Antonio, 2009.
- [17] LIU C Q, GAO Y S, DONG X R, et al. Third generation of vortex identification methods: Omega and Liutex/Rortex based systems[J]. Journal of Hydrodynamics, 2019, 31(2): 205-223.
- [18] 王义乾, 桂南. 第三代涡识别方法及其应用综述[J]. 水动力学研究与进展 (A辑), 2019, 34(4): 413-429.
- [19] DONG X R, GAO Y S, LIU C Q. New normalized Rortex/vortex identification method[J]. Physics of Fluids, 2019, 31(1): 011701.

Numerical Simulation of the Whole Process of a Ship Towed into the Complex Lock

CAO Hongjie¹, GUO Chao², WANG Jianhua¹, WAN Decheng^{*1}

(1. Computational Marine Hydrodynamics Laboratory, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao tong University, Shanghai 200240, China;

2. Key Laboratory of Navigation Structure Construction Technology, Ministry of Transport, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract

In this paper, the whole process of an 8000t ship entering the lock from the open water is simulated. The main work uses the CFD solver naoe-FOAM-SJTU, which is a self-developed solver based on OpenFOAM. In numerical simulation, the unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes (URANS) approach is used to solve the viscous flow field, and the overset grid technology is used to simulate the ship motion. In the present research, the heave and pitch motion of the ship are taken into consideration. Combined with the hydrodynamic performance of the hull, free surface, dynamic pressure distribution on the hull and vortex structures, the whole process of the ship towed into the complex lock is deeply analyzed. The results show that the resistance of the ship when it enters the lock will have an obvious upward trend and the squat phenomenon occurs due to the limitation of the ship-lock interaction. The peak value of the drag force occurs when 0.5 ~ 0.75 times ship length enters the lock, which is a dangerous time. The research demonstrates that the relevant numerical methods can be applied to the numerical simulation of the issue ship entering the lock and provide a reference for the simulation of ship navigation conditions in the complex ship lock.

Key words: restricted waters; overset grid technology; ship-lock interaction; naoe-FOAM-SJTU solver

作者简介

曹鸿杰 男, 1998 年生, 硕士研究生。主要从事限制水域船舶操纵性研究。

郭超 女, 1985 年生, 硕士研究生。主要从事船闸及升船机等通航建筑物水力学研究。

王建华 男, 1988 年生, 助理研究员, 硕士研究生导师。主要从事船舶计算水动力学研究。

万德成 男, 1967 年生, 教授, 博士研究生导师。主要从事船舶与海洋工程水动力学、数值水池研究。

*通讯作者: 万德成