

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2020.01.018

# 高航速下 KCS 模型艏波破碎与 艏部涡量数值研究\*

余安正, 万德成

(上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院 海洋工程国家重点实验室 船海计算水动力学研究中心,  
上海 200240, E-mail: anzhengyu@sjtu.edu.cn)

**摘要:** 基于 RANS 方法, 研究了高航速下 KCS 模型在静水工况中的艏波破碎。采用自主开发的水动力求解器 naoe-FOAM-SJTU, 数值模拟了 5 个航速下 ( $Fr = 0.26, 0.35, 0.375, 0.40, 0.425$ ) KCS 的兴波流场。将  $Fr = 0.26$  时工况的流场模拟结果与以往实验结果进行了对比, 验证了数值方法和网格设置的可行性。为了研究艏部破波的结构和机理机制, 分析对比了中高速工况 ( $Fr = 0.35$ ) 和高速工况 ( $Fr = 0.40$ ) 下的艏部兴波结构、涡量场以及速度场等。结果表明当前数值方法可以精确捕捉艏波的翻卷以及对应的凹陷。此外, 对  $Fr = 0.35$  工况下船舶处的横向切面和纵向切面云图进行了详细探讨, 分析了艏波破碎过程中涡量场、速度场的变化。

**关键词:** RANS; 艏波破碎; 高航速; 凹陷

**中图分类号:** O357

**文献标志码:** A

## Numerical study of bow wave breaking and vorticity of KCS under high speeds

YU An-zheng, WAN De-cheng

(Computational Marine Hydrodynamics Lab (CMHL), State Key Laboratory of Ocean Engineering,  
School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University,  
Shanghai 200240, China)

**Abstract:** In this paper, RANS model is used to study bow wave breaking of KCS model under high speeds in calm water. Numerical simulations under five speeds ( $Fr = 0.26, 0.35, 0.375, 0.40, 0.425$ ) are carried out in our in-house CFD solver naoe-FOAM-SJTU. The comparison between CFD and model test data at  $Fr = 0.26$  indicates the feasibility of present numerical methods and grid distribution. In order to study the structure and mechanism of bow wave breaking, the comparisons of bow wave

\* **收稿日期:** 2019-11-04(2019-11-24 修改稿)

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51879159), 国家重点研发计划项目(2019YFB1704204), 长江学者奖励计划(T2014099), 上海市优秀学术带头人计划(17XD1402300)

**作者简介:** 余安正(1994-), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生。

**通信作者:** 万德成, E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

**Received:** November 4, 2019 (**Revised** November 24, 2019)

**Project supported by foundations:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (51879159), National Key Research and Development Program of China (2019YFB1704204), Chang Jiang Scholars Program (T2014099), Shanghai Excellent Academic Leaders Program (17XD1402300)

**Biography:** YU An-zheng (1994-), Male, Master Candidate.

**Corresponding author:** WAN De-cheng, E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

structure, vorticity and velocity at medium-high speed ( $Fr = 0.35$ ) and high speed ( $Fr = 0.40$ ) are analyzed. The results indicate that present numerical methods can accurately capture the bow wave overturn and induced scar. In addition, detail analysis of vorticity field and velocity field under different transverse and longitudinal cuts at  $Fr = 0.35$  is presented.

**Key words:** RANS; bow wave breaking; high speeds; scar

## 引言

在高速船的船艏处经常发生波浪破碎的现象。船舶艏波破碎的研究由来已久,一方面是因为破波会对船体的性能产生影响(例如:破波阻力);另一方面,破波作为一种非定常且强非线性的流体现象对计算流体力学CFD(Computation Fluid Dynamics)是一个挑战,因此CFD2021研讨会也将破波作为其中的一个标准算例。

破波研究的手段主要方式有实验和数值模拟。早期由于计算机资源和技术的限制,对波浪破碎的研究主要是通过实验。Baba<sup>[1]</sup>通过模型实验和理论分析发现了破波阻力的存在。Duncan<sup>[2]</sup>测量了二维水翼以一定攻角匀速航行时的自由液面波高以及速度分量;通过测量发现,与破波区域相关联的最大拖曳力是理论分析所得的最大拖曳力的3倍以上;此外,还发现当波陡大于 $17^\circ$ 时容易发生破波。随着可视化技术的发展,粒子图像测速技术PIV(Particle Image Velocitmetry)被更多地用在破波的实验研究。Dong等<sup>[3]</sup>通过PIV和自由液面可视化技术重点研究了船模在不同航速下破波的产生以及涡量场的演化,发现三维船体破波常常伴随着剧烈的对流涡,涡的发生地点一般在破波的波趾处并且沿着水流方向不断衰落。Roth等<sup>[4]</sup>也使用PIV测量了7 m长的船模在傅汝德数 $Fr = 0.30$ 时的流场信息,发现波趾处一般是负涡而正涡一般发生在波峰处。Olivieri等<sup>[5]</sup>对DTMB 5415船模进行了实验研究,分析了弗劳德数和尺度比对艏波和肩波破碎的影响。此外,该作者还对 $Fr = 0.35$ 下的局部流场进行了精细的测量以分析由波浪破碎引起的凹陷(Scar)以及涡量场。Kang等<sup>[6]</sup>聚焦于浅水槽中流体越过障碍物时产生翻卷式破波的过程,详细分析了翻卷式破波过程中涡量场和速度场的变化。

随着计算机硬件技术和软件技术的发展,CFD被越来越多地应用于船舶流场的数值模拟当中。RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes)模型作为计算流体力学中最广泛使用的模型也被最早应用于波浪破碎的数值模拟。Rhee等<sup>[7]</sup>使用RANS方法对二维水翼模型进行了数值模拟并且成功地模拟出了溢出式破波。Wilson等<sup>[8]</sup>结合RANS模型和LEVEL-SET方法对DTMB 5415模型的艏波和肩波进行了捕捉,该数值实验是OLIVIERI等模型实验的

CFD对照,结果表明RANS方法能够模拟出DTMB模型艏波破碎时的涡量场、速度场以及凹陷的形态和位置。Wang等<sup>[9]</sup>和Ren等<sup>[10]</sup>基于船舶水动力学求解器naoe-FOAM-SJTU<sup>[11-12]</sup>,使用RANS方法求解N-S(Navier-Stokes)方程,VOF(Volume of Fluid)方法捕捉自由液面,成功捕捉了船舶的艏波破碎和凹陷。此外,阻力、波高、速度场以及涡量场的数值模拟结果表明基于RANS模型和VOF方法的数值模型能够精确捕捉到破波的产生。Koo等<sup>[13]</sup>基于Kang等<sup>[6]</sup>的实验,通过RANS模型成功地模拟出翻卷式破波产生的过程,通过对比破波形态、空气夹带、速度场、涡量场以及压力分布等信息,表明RANS方法在模拟翻卷式破波上的可行性。近几年来,部分学者开始尝试使用精度更高的模型来捕捉波浪破碎中产生的小尺度现象,如:气腔、气泡、液滴以及毛细波等。Deike等<sup>[14]</sup>基于DNS(Direct Numerical Simulation)模拟毛细管效应对波浪破碎的影响,提出使用邦德数(Bond Number)和波陡来判断波浪破碎的各个过程。此外,Marrone等<sup>[15-16]</sup>将光滑粒子法SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)应用到船舶破波的数值模拟中。

根据Deike等<sup>[14]</sup>的描述,波浪破碎一般可以分成四类:无破碎重力波(no-breaking gravity wave)、毛细波(capillary wave)、溢出式破波(spilling breaking wave)以及翻卷式破波(plunging breaking wave)。翻卷式和溢出式是船舶艏波破碎中最常见的两种形式。翻卷式破波产生的过程是:波陡逐渐增大,在波峰处形成了一个喷射。这个喷射在重力的作用下向下拍击自由液面,形成一股水流的飞溅。波浪翻卷的同时,会伴随着空气的夹带以及水花的飞溅。与翻卷式破波相比,溢出式破波最大的不同是由于波陡较小或者表面张力相对较大,形成的喷射并没有与自由液面重新结合而是处在一个相对稳定的状态。

本文主要研究了高航速下KCS模型艏波破碎的过程和对应的流场。基于naoe-FOAM-SJTU求解器,结合RANS方程和VOF方程,数值模拟了5个航速下KCS模型在静水中航行的流场。将 $Fr = 0.26$ 时的阻力系数、兴波场以及兴波切面与实验结果进行了对比,验证了使用RANS方法和VOF方法模拟破波的可行性。在中高速工况中( $Fr = 0.35$ ),船艏处已经形成了稳定的翻卷式破波;在高速工况中( $Fr = 0.40$ ),艏波处有两个可见的翻卷,但是在破波区域的尾部形成了紊乱的湍流区域。为了详细分析艏波翻卷的过程和对应的流场,选取了 $Fr = 0.35$ 时3个

位置的横向切面和纵向切面云图,研究了正涡或负涡区的产生以及相应的速度场变化。

## 1 数值方法

本文的数值模拟基于船舶水动力学求解器naoe-FOAM-SJTU,采用雷诺平均RANS模型来求解N-S方程,采用有限体积法进行空间离散。湍流模型采用SST  $k-\omega$ 模型并且使用带人工压缩项的VOF方法捕捉自由液面。此外,采用PIMPLE算法对速度压力方程进行解耦。

### 1.1 控制方程

流体控制方程为非定常两相不可压的雷诺平均RANS方程

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

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

$$\nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \mathbf{U}) + (\nabla \mathbf{U}) \cdot \nabla \mu_{eff} + f_\sigma \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{U}$  为速度场,  $\mathbf{U}_g$  为网格移动速度;  $p_d = p - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}$ , 为动压力, 等于总压力减去静水压力, 其中  $\rho$  为气体或者液体的密度,  $\mathbf{g}$  为重力加速度;  $\mu_{eff} = \rho(\nu + \nu_t)$ , 为有效动力黏性系数, 其中  $\nu$  为运动黏度,  $\nu_t$  为涡黏度;  $f_\sigma$  为表面张力项。

### 1.2 自由液面捕捉

采用VOF方法捕捉自由液面。VOF方法是处理两相流中最常用的方法之一, 它的控制方程如下

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho(\mathbf{U} - \mathbf{U}_g)\alpha) + \nabla \cdot (\mathbf{U}_r(1-\alpha)\alpha) = 0 \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{U}_r$  为压缩界面的速度场,  $\alpha$  为体积分数, 代表液体部分占的比例, VOF通过该体积分数来统一衡量流体在网格域中的分布。 $\alpha$  的含义如式(4)所示

$$\begin{cases} \alpha = 0 & \text{空气} \\ \alpha = 1 & \text{水} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{自由面} \end{cases} \quad (4)$$

## 2 计算模型与工况设置

计算模型采用带舵KCS船模, 船长为6.070 2 m。三维模型如图1所示, 模型主尺度参数如表1所示。当前模型的缩尺比为37.89, 是CFD2021研讨会船舶破波算例的标准模型。



图1 KCS 三维模型  
Fig.1 3D model of KCS

表1 KCS 模型主尺度参数 (缩尺比=1:37.89)

Table 1 Main parameters of KCS (scale factor = 1:37.89)	
$L_{pp}/\text{m}$	6.070 2
$B/\text{m}$	0.849 4
$T/\text{m}$	0.285 0
$\nabla/\text{m}^3$	0.957 1
$S_w/\text{m}$	6.697 8

为了研究不同航速下的艏波破碎, 本文针对KCS在5个航速下 ( $Fr = 0.26, 0.35, 0.375, 0.40, 0.425$ ) 的流场进行了数值模拟。在数值模拟中, 水的密度设置为  $998.63 \text{ kg/m}^3$ , 重力加速度设置为  $9.81 \text{ m/s}^2$ 。此外, 运动黏性系数设置为  $1.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。为了获得稳定的艏波流场以及减少船舶运动对艏部兴波的影响, 本文对计算模型进行了六个自由度上的固定, 采用均匀来流的方式来模拟船模在静水中以指定航速航行的工况。对于  $Fr = 0.26$  的工况, 本文将数值模拟的兴波场、流场纵向切面以及阻力数值与以往的标模实验结果进行了对比, 用来验证当前网格设置和数值方法在本文研究中的可行性。对于高航速的工况 ( $Fr = 0.35, 0.375, 0.40, 0.425$ ), 主要分析了艏波破碎产生的过程以及相应的流场变化, 例如涡量场、伴流场等。

## 3 网格设置与验证

### 3.1 网格设置

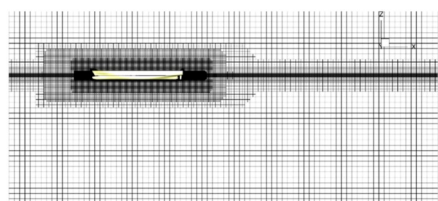
采用半船域进行数值模拟, 因为当前工况的流场具有对称性, 具体的计算域设置如图2所示。水线面位于  $z = 0$  的平面, 坐标原点设置在水线与船首的相交处, 其中  $x$  轴正向指向船尾, 入口设置在船头前1倍船长处, 出口设置在船尾后3倍船长处;  $y$  轴正向指向右舷, 左边界为对称面, 右侧在1.5倍船

长处;  $z$ 轴向上为正, 水线之上是空气部分, 为0.75倍船长, 水线之下是液态部分, 为1.0倍船长。

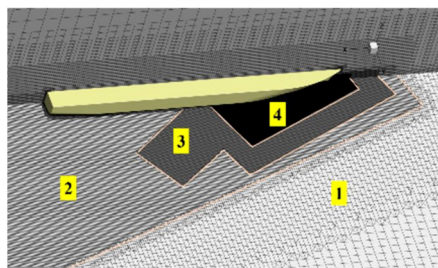


图2 (网上彩图)计算域与坐标轴设置  
Fig.2 (Color online)Computational domain and coordinate axis set

采用非结构六面体网格进行空间离散, 网格生成使用Hexpress, 网格总数为670万, 图3为生成后的网格。网格生成总体情况如图3(a)所示, 背景网格的边长是 $1/16L_{pp}$ 的规则正方体。为了能够精确求解气液交界处的流场, 水线面处的网格加密至背景网格的 $1/8$ 。艏部加密区设置如图3(b)所示, 4个加密区处的网格分别是背景网格的 $1/4$ ,  $1/16$ ,  $1/32$ 和 $1/64$ 。



(a) 网格生成



(b) 船舶加密区设置

图3 (网上彩图)网格生成与加密区设置

Fig.3 (Color online)Mesh generation and refinement region

### 3.2 网格验证

为了验证当前数值方法对KCS流场问题求解的可行性, 本文将 $Fr = 0.26$ 下的总阻力系数、兴波场、流场纵向切面以及船体表面波形跟以往实验数据进行了对比。数值模拟的总阻力系数 $C_t$ 为3.724而实验的总阻力系数为3.835, 误差为2.89%。阻力实验结果是从Tokyo2015研讨会算例2.10中获取的, 该实验放开了升沉和纵摇方向的自由度, 因此当前数值模拟计算所得阻力系数数值处在一个可接受的范围。图4展示了船舶兴波场以及网格的分布情况, 可以看到加密区合理地覆盖了艏波波峰区域。图5为自由液面兴波场的对比, 计算结果中的波形和

数值大小与实验结果相对吻合, 波峰和波谷的位置以及变化趋势与实验保持一致, 横波和散波也与实验对比良好。数值模拟结果在船尾一倍船长后的区域相对平缓, 主要原因是数值耗散以及网格密度较低。图6为船体表面波形的对比结果, 与图5结论相同, 波形的变化趋势以及波峰波谷的位置都与实验结果相符, 从曲线图可以看到两个明显的波谷分别出现在 $x/L = 0.3$ 以及 $x/L = 0.7$ 附近。

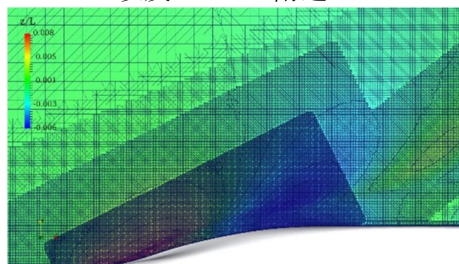


图4 (网上彩图)船舶兴波与网格分布

Fig.4 (Color online)Bow wave and grid distribution

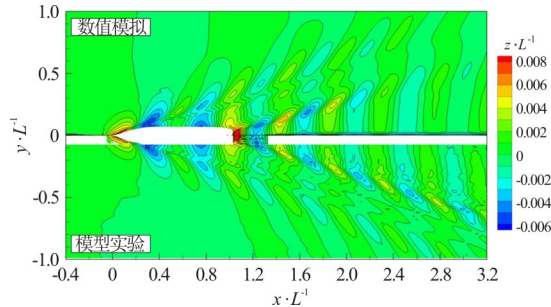


图5 (网上彩图)自由液面兴波场对比

(数值模拟(上),实验(下))

Fig.5 (Color online)Comparison of free surface wave pattern(CFD(top), EFD(bottom))

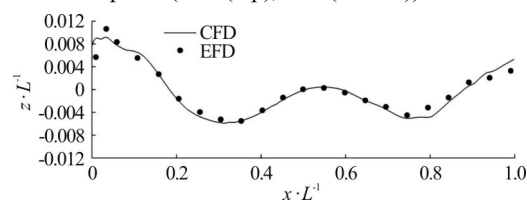


图6 船体表面波形比较

Fig.6 Comparison of wave profile on hull surface

图7展示了 $Fr=0.26$ 时 $y/L=0.074$  1、0.150 9、0.422 4三个沿纵向切面的自由液面对比结果。三个位置沿纵向切面的自由液面都与实验结果保持一致。在船长区域内, 波形的变化趋势与波高都与实验结果非常接近; 在 $x/L > 1$ 之后的区域, 由于网格密度减小, 波高在峰值上有略微的偏差, 但仍在可接受的范围内。

综上, 数值模拟的阻力值和自由液面兴波都与实验结果保持一致, 说明当前的网格设置以及基于RANS模型的数值方法能够准确模拟KCS模型的兴波场。

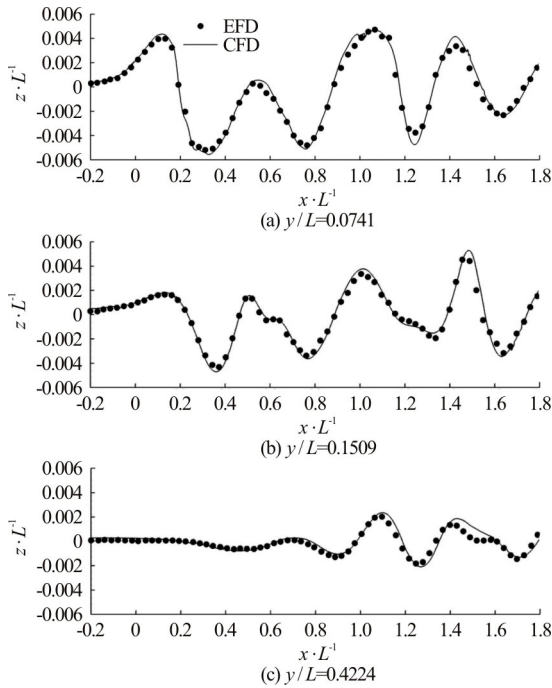


图7 纵向自由液面剖面对比  
Fig.7 Comparison of longitudinal Free surface cuts

## 4 结果分析

### 4.1 阻力系数

图8给出了高航速下阻力系数的变化趋势， $C_p\_CFD$ 、 $C_v\_CFD$ 、 $C_t\_CFD$ 分别代表数值模拟的压阻力系数、黏性阻力系数以及总阻力系数。可以看到 $Fr = 0.35$ 时，数值模拟所得的压阻力系数 $C_p$ 与黏性阻力系数 $C_v$ 基本相当。随着航速的增加，压阻力系数占比逐渐增大，在 $Fr = 0.425$ 时，压阻力为总阻力的60%，这表明阻力受兴波的影响逐渐增大。从 $Fr = 0.35$ 到 $Fr = 0.425$ ，总阻力系数增长了50%左右。

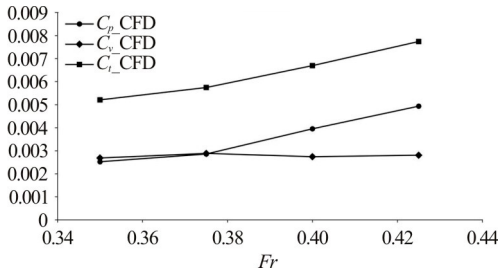


图8 不同航速下的阻力系数  
Fig.8 Resistance coefficient under different speeds

### 4.2 高航速下艏波破碎及流场

图9展示了不同航速( $Fr = 0.35, 0.375, 0.40, 0.425$ )下船体表面波形的对比。从图中可以看出，在一个完整的船长范围内，兴波总体上以峰-谷-峰-谷的趋势沿船艏向船艉演化。第一个波峰出现在 $x/L = 0-0.2$

之间，出现的位置随着傅汝德数的增大而后移。中高速工况中( $Fr = 0.35, 0.375$ )，第一个波峰的大小约为船长的2%；高速工况中( $Fr = 0.40, 0.425$ )，波峰值分别为船长的2.3%和2.5%。可以看出，第一个波峰的大小基本也随着傅汝德数的增大而增大。为了研究中高速工况和高速工况下的KCS船部波浪破碎，下面选取 $Fr = 0.35$ 和 $Fr = 0.40$ 两个工况进行详细的流场分析。

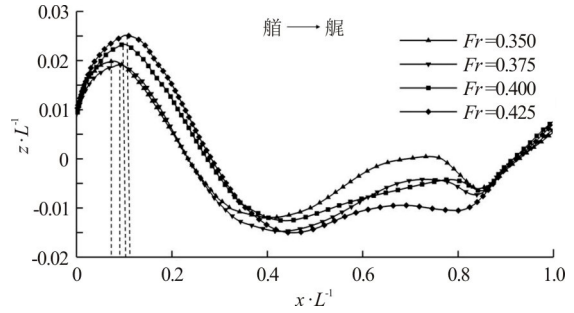


图9 不同航速下船体表面波形比较  
Fig.9 Comparison of wave profile under different speeds

#### 4.2.1 $Fr = 0.35$ 工况

图10(a)为实验中捕捉的KCS船部兴波，可以看到在 $Fr = 0.35$ 时，船舶位置已经形成了稳定的翻卷式破波，并且在 $x/L = 0.05-0.1$  (18站与19站之间)处可以观察到一个由于艏波翻卷而产生的凹陷。图10(b)与图10(c)为数值模拟的艏部流场，从图10(b)可以看到在实验中观察到的凹陷。为了能更清晰地显示凹陷的位置，调整了图例的范围后(图10(c))，可以看到在艏波范围内出现了一个局部的波谷，这个波谷就是所谓的凹陷。

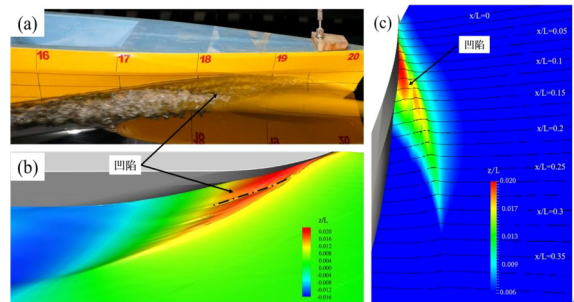


图10 (网上彩图) $Fr = 0.35$  艏部流场对比:  
(a)试验;(b)和(c)数值模拟

Fig.10 (Color online) Comparison of bow wave contour at  $Fr = 0.35$ : (a)EFD; (b) and (c):CFD

图11展示了 $Fr = 0.35$ 时船艏附近的速度场和涡量场。从图中可以清晰地看到一个向船尾和船侧演化的艏波翻卷(如图11(a)点划线所示)。在船部兴波处，轴向速度 $U_x$ 有一个明显的减弱而横向速度 $U_y$ 为局部最大，这是因为船艏处的船型曲面变化，导致流体的流向发生了变化。

以往的研究结果表明，在发生波浪破碎的船艏处一般会形成复杂的涡量场。图11(c)和图11(d)展示了 $Fr = 0.35$ 船侧的轴向涡量和横向涡量分布(这里

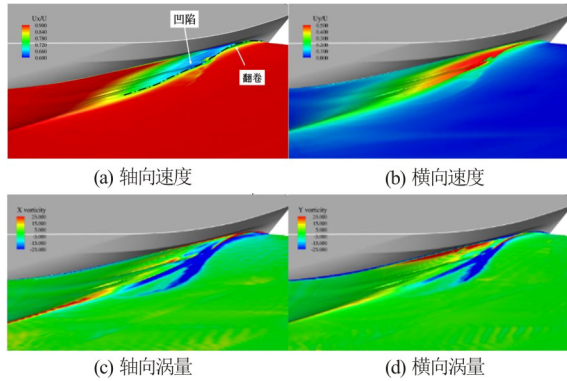


图 11 (网上彩图)  $Fr = 0.35$  时船艏处流场信息  
Fig.11 (Color online) Flow field of bow wave region at  $Fr = 0.35$

轴向涡量的定义如下: 绕 $x$ 轴顺时针旋转为负涡; 绕 $x$ 轴逆时针旋转为正涡, 横向涡量定义类似)。从涡量图可以看出, 两种航速下的负涡区都是占主导地位。在艏波翻卷的根部为大规模负涡区, 并且沿着流向一直发展; 艏波翻卷的尖部可以看到小规模的正涡区。横向涡量从规模和量级上都比轴向涡量要小, 但是总体趋势保持一致。这也说明与二维破波不同的地方在于船体破波会表现出更多的三维特性。

为了进一步研究艏波处的涡量场, 图12展示了  $Fr = 0.35$  时船侧轴向涡量场。从图中可以看出, 艏部产生了3对涡 ( $V1$ 和 $V2$ 、 $V3$ 和 $V4$ 、 $V5$ 和 $V6$ )。  $V1$ 和 $V2$ 是与第一次翻卷相关的涡, 其中 $V1$ 为负涡, 发生在第一次翻卷的根部。而 $V2$ 为正涡, 发生在第一次翻卷的尖部。在第一次翻卷后, 流体与自由液面又重新结合并产生了第二对涡 ( $V3$ 和 $V4$ )。第二对涡 ( $V3$ 和 $V4$ ) 与第一对涡的产生方式类似, 但是涡的范围和大小都有所减弱。因为发生了流体的翻卷以及与液面的重新结合, 所以在第一对涡和第二对涡的发生区域产生的是翻卷式破波。由于表面张力的作用, 第三对涡 ( $V5$ 和 $V6$ ) 的发生处波浪并未翻卷, 因此这个区域的破波更像是溢出式的破波。

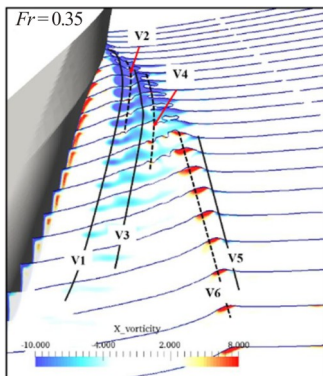


图 12 (网上彩图)  $Fr = 0.35$  时船艏轴向涡量切面  
Fig.12 (Color online) Axial vorticity cuts around bow at  $Fr = 0.35$

#### 4.2.2 $Fr = 0.40$ 工况

从实验结果上来看 (图10(a)和图13(a)), 高速工况下艏部兴波整体上更加剧烈, 特别是在发生第一次翻卷之后, 高速工况中出现了大范围的白色浪花。与  $Fr = 0.35$  的工况类似, 艏部在发生第一次翻卷后可以观察到一个局部的凹陷。但是从数值模拟结果来看 (图13(b)和图13(c)), 艏波范围和凹陷的长度都有显著的增大, 并且可以观察到艏波的第二次翻卷。由于在  $x/L = 0.15-0.30$  之间的兴波场比较紊乱, 无法清晰地观察到因第二次翻卷而产生凹陷。

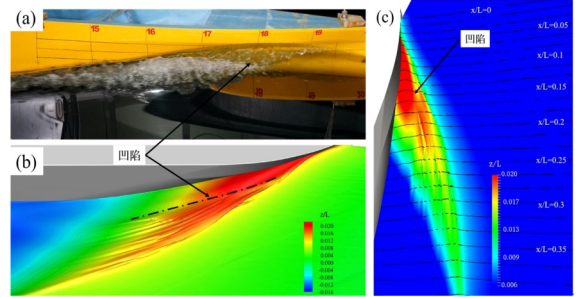


图 13 (网上彩图)  $Fr = 0.40$  艏部流场对比: (a) 实验; (b) 和 (c) 数值模拟

Fig.13 (Color online) Comparison of bow wave contour at  $Fr = 0.40$ : (a) EFD; (b) and (c) CFD

图14展示了  $Fr = 0.40$  时船艏附近的速度场和涡量场。从艏波翻卷的发展来看 (图14(a)点划线), 高速工况中艏波有两个规模相似的翻卷。第一个翻卷在与自由液面结合后又发生了第二次翻卷, 并且产生了一条凹陷。但是第二次翻卷之后的兴波场非常紊乱, 因此并未观察到第二条凹陷。与  $Fr = 0.35$  时相比,  $Fr = 0.40$  时船艏对速度场和涡量场的影响范围更大, 大规模负涡出现在翻卷的根部。

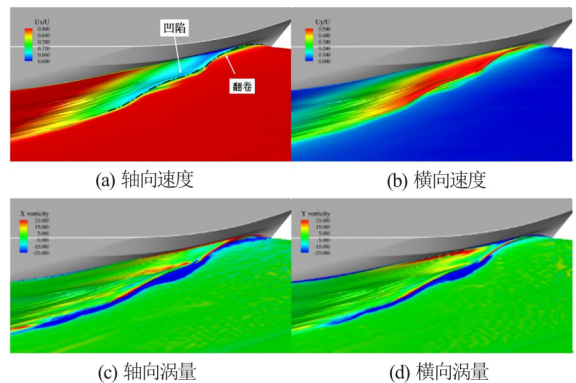


图 14 (网上彩图)  $Fr = 0.40$  时船艏处流场信息

Fig.14 (Color online) Flow field of bow wave region at  $Fr = 0.40$

图15展示了  $Fr = 0.40$  时的船侧轴向涡量场。与  $Fr = 0.35$  时相比, 涡的范围与量级都有显著地增大。由于艏波的翻卷, 在近场区域有两对涡 ( $V1$ 和 $V2$ 、 $V3$ 和 $V4$ )。与  $Fr = 0.35$  时类似, 这部分的波浪破碎

属于翻卷式破波。与中高速工况下不同的是,在远场区域的破波不再是溢式破波。如图15所示, V5和V6、V7和V8是与远场破波区域相关的两对涡。从横向切面可以看出,在远场区域也存在波浪的翻卷和与液面的结合,因此这部分产生的也是翻卷式破波,但是相比近场区域,涡量场的范围和量级都相对较小。

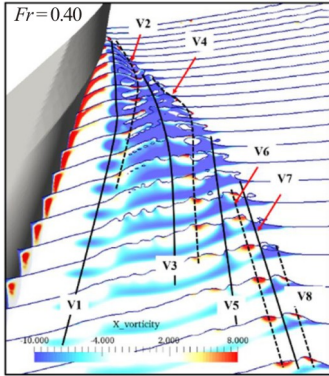


图15 (网上彩图) $Fr = 0.40$ 时船舶轴向涡量  
Fig.15 (Color online) Axial vorticity cuts around bow at  $Fr = 0.40$

#### 4.3 $Fr=0.35$ 时流场分析

上文展示了中高速工况 ( $Fr = 0.35$ ) 和高速工况 ( $Fr = 0.40$ ) 时船舶附近流场,可以看到  $Fr = 0.35$  时船侧形成了较为稳定的波浪翻卷和艏波破碎,而  $Fr = 0.40$  时艏波的破碎相对更加复杂,特别是第二次翻卷之后的复杂湍流区域。为了进一步分析艏波破碎的机理以及艏波发生区域的流场特性,选取  $Fr = 0.35$  的工况进行详细的流场分析。

图16展示了船舶处兴波的横向切面和纵向切面,在两个方向上都可以看到艏波翻卷的结构。在位置1处 ( $x/L = 0.06, y/L = 0.03$ ) 是靠近船体表面的第一个翻卷;在位置2处 ( $x/L = 0.10, y/L = 0.05$ ), 第一个翻卷与自由液面结合,并且产生了空腔;在位置3处 ( $x/L = 0.16, y/L = 0.09$ ), 第一个翻卷以及空腔都已消失,第二个翻卷发展成熟。下面对这三个位置的流场进行详细地分析。

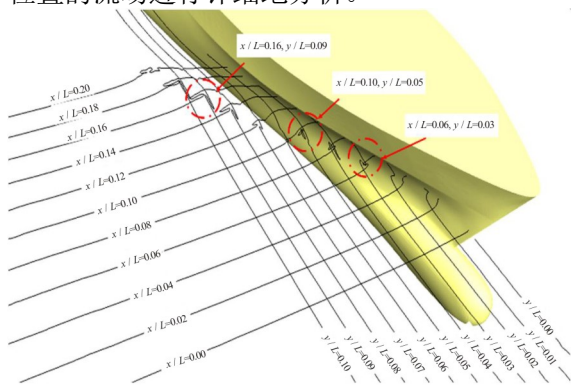


图16 (网上彩图) $Fr = 0.35$ 时船舶处波形横向切面和纵向切面  
Fig.16 (Color online) Transverse and longitudinal cuts around bow at  $Fr = 0.35$

图17和图18展示了位置1处的轴向涡量、横向涡量、轴向速度以及横向速度的云图。在位置1处,第一个翻卷已经初步形成。结合横向切面和纵向切面视图,艏波的翻卷是远离船侧并且与来流相逆。从涡量图来看,在翻卷的尖部出现小规模的正涡区V2而在翻卷的根部为大规模负涡区V1。横向切面上的速度矢量 ( $U_y$ 及 $U_z$ ) 表明船侧流体整体上以向右及向上的趋势流动,而纵向切面上的速度矢量 ( $U_x$ 及 $U_z$ ) 仍然受来流主导。从翻卷的根部到尖部,轴向速度  $U_x$  逐渐减小而横向速度  $U_y$  逐渐增大。

图19和图20展示了位置2处的轴向涡量、横向涡量、轴向速度以及横向速度的云图。在位置2处,第一个翻卷已经与自由液面重新结合,并且在  $x/L = 0.10$  和  $y/L = 0.05$  处形成了空腔。在空腔的四周仍是大规模负涡区V1,位置1处的波尖在与自由液面结合的正涡区V2处形成了船侧的第一个凹陷。在  $x/L = 0.10$  和  $y/L = 0.06$  处,第二个翻卷已经初具规模并且在根部形成了负涡区V3。与位置1处类似,艏波翻卷区域形成了轴向速度  $U_x$  的较小区域以及横向速度  $U_y$  的较大区域。

图21和图22展示了位置3处的轴向涡量、横向涡量、轴向速度以及横向速度的云图。此时第一个翻卷已经趋于平缓并且位置2处的空腔已经消失。与前两个位置相比,位置3处的轴向涡量和横向涡量的范围和量级都相对较小。在  $x/L = 0.16$  和  $y/L = 0.075$  处,第一个负涡区V1已经减弱很多,接近自由液面处是与第一个负涡区相关的正涡区V2。第二个翻卷发生的位置为  $x/L = 0.16$  和  $y/L = 0.09$ , 艏波翻卷的结构与第一个翻卷类似。在翻卷的尖部为负涡区V4而根部为正涡区V3。但与第一个翻卷相比,涡的量级相对更小。轴向速度和横向速度变化趋势也与前面两个位置相似,但是整体上受到翻卷影响的区域以及横向速度的峰值也相对更小。

## 5 结论

本文的主要工作着重于高航速下KCS模型的艏波破碎和艏部涡量分析。基于RANS模型和VOF模型来捕捉高航速下KCS的兴波流场。得出的主要结论如下:

(1) 本文采用的数值模型可以精确捕捉到艏波翻卷的过程以及产生的凹陷现象,在  $Fr = 0.35$  时可以捕捉到稳定的艏部翻卷式破波。但是由于RANS模型以及网格量的限制,对于高航速下艏波破碎尾部紊乱的湍流区域暂时无法精确捕捉(例如  $Fr = 0.40$  时的艏波流场)。

(2) 艏波破碎一般伴随着复杂的涡量场。在翻卷的根部一般是大规模的负涡区而尖部一般是小范围的正涡区,并且都沿着流向逐渐减弱。在艏波翻

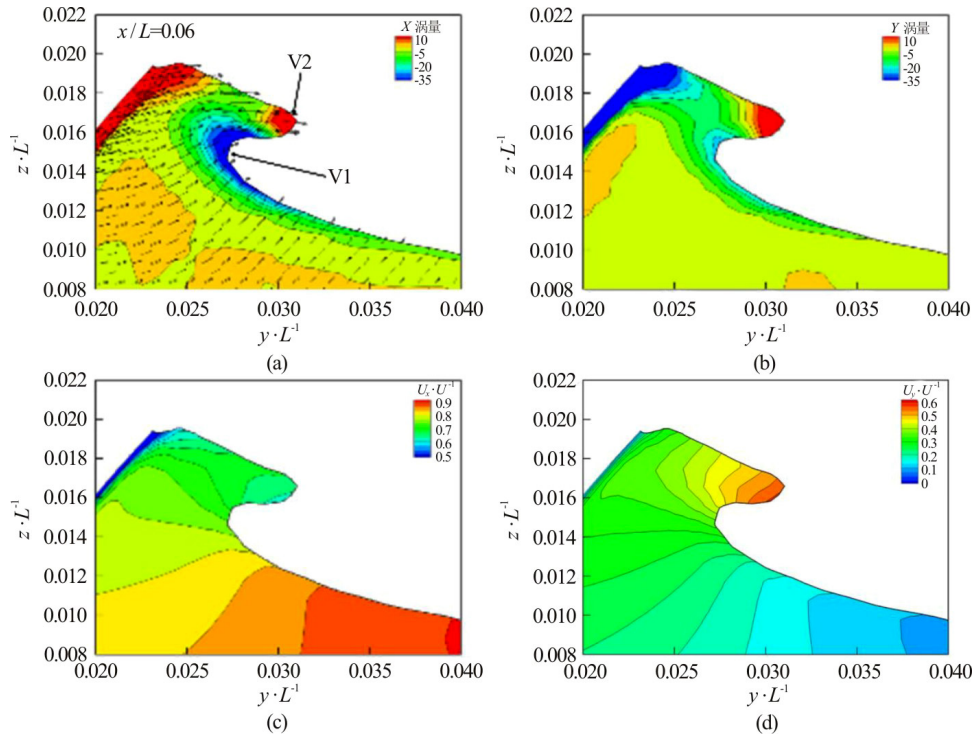


图17 (网上彩图) $x/L=0.06$ 轴向涡量、横向涡量、轴向速度、横向速度云图

Fig.17 (Color online) Axial vorticity, transverse vorticity, axial velocity, transverse velocity contour at  $x/L = 0.06$

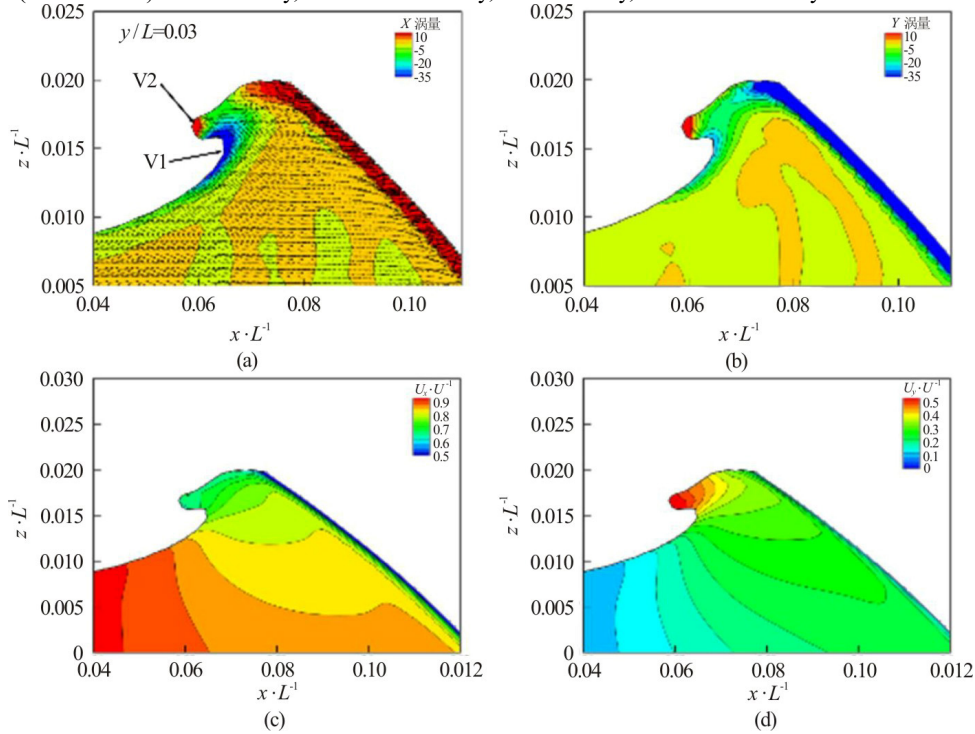


图18 (网上彩图) $y/L=0.03$ 轴向涡量、横向涡量、轴向速度、横向速度云图

Fig.18 (Color online) Axial vorticity, transverse vorticity, axial velocity, transverse velocity contour at  $y/L = 0.03$



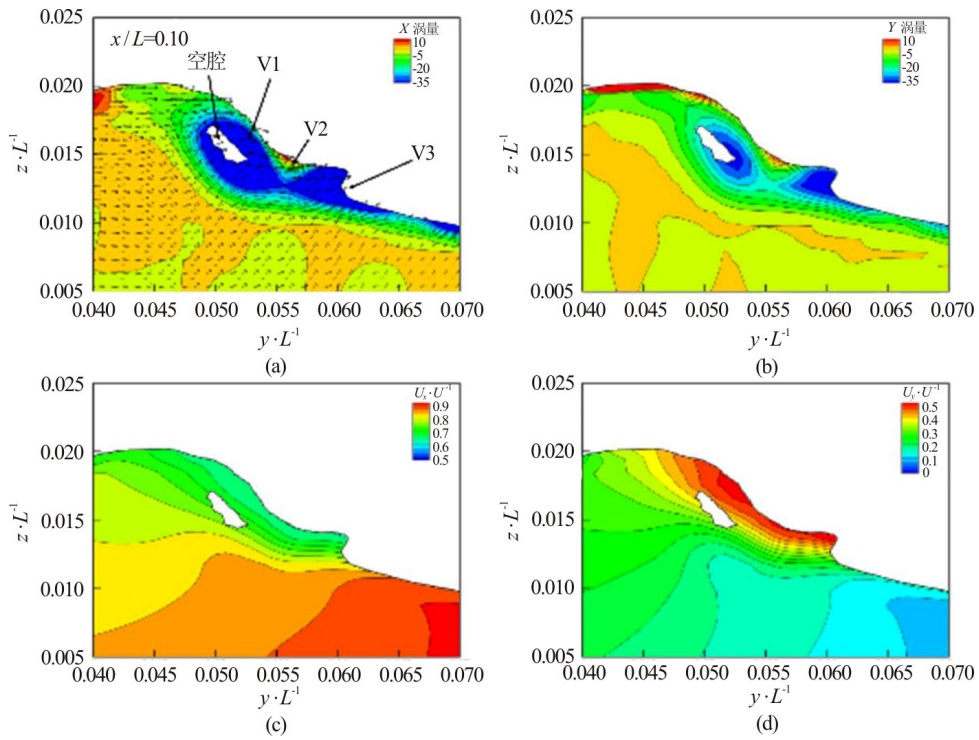


图19 (网上彩图) $x/L=0.10$ 轴向涡量、横向涡量、轴向速度、横向速度云图

Fig.19 (Color online) Axial vorticity, transverse vorticity, axial velocity, transverse velocity contour at  $x/L = 0.10$

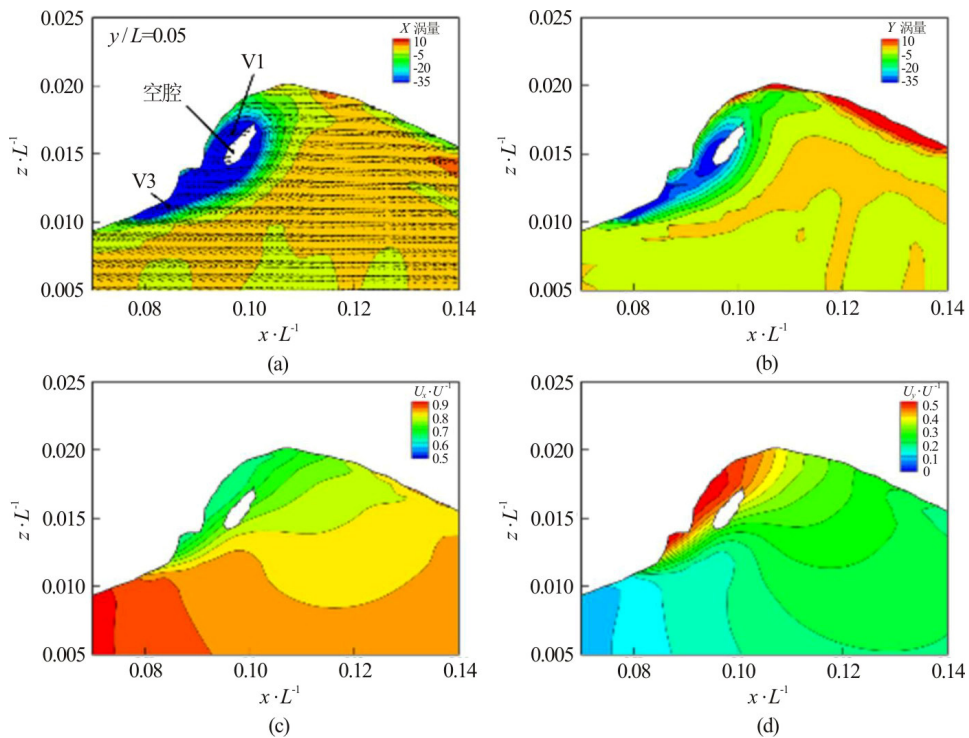


图20 (网上彩图) $y/L=0.05$ 轴向涡量、横向涡量、轴向速度、横向速度云图

Fig.20 (Color online) Axial vorticity, transverse vorticity, axial velocity, transverse velocity contour at  $y/L = 0.05$

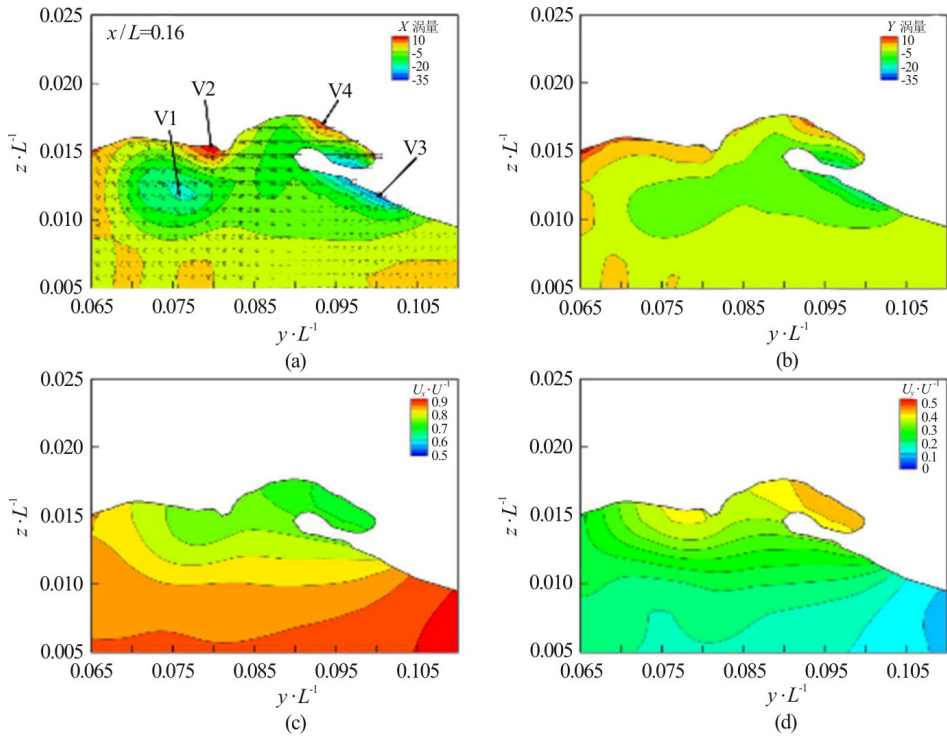


图21 (网上彩图) $x/L=0.16$ 轴向涡量、横向涡量、轴向速度、横向速度云图

Fig.21 (Color online) Axial vorticity, transverse vorticity, axial velocity, transverse velocity contour at  $x/L = 0.16$

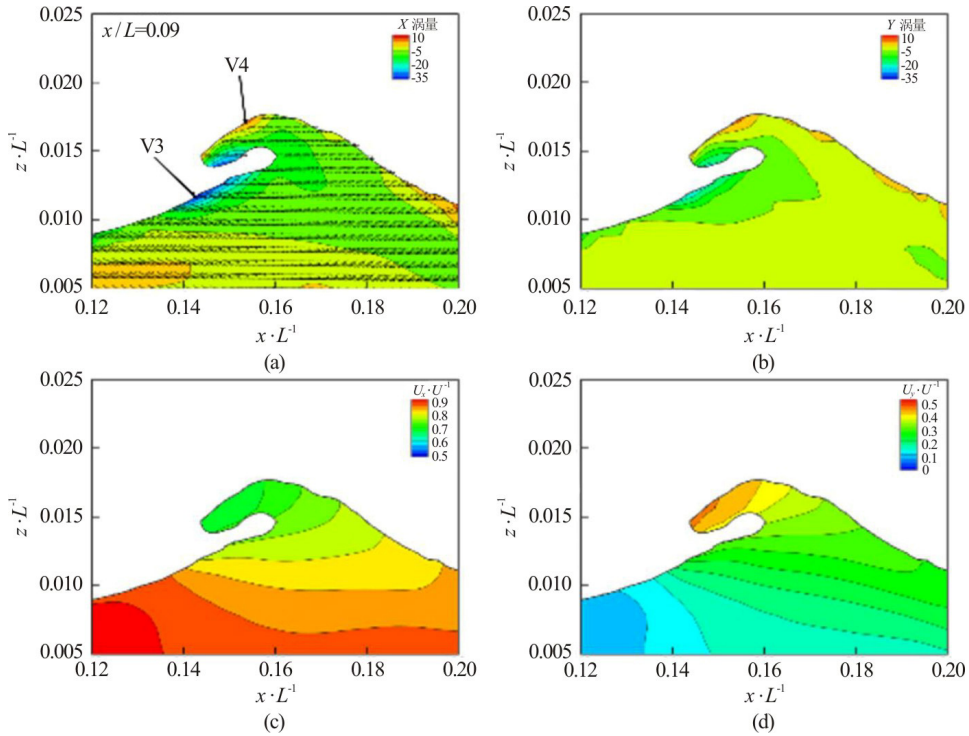


图22 (网上彩图) $y/L=0.09$ 轴向涡量、横向涡量、轴向速度、横向速度云图

Fig.22 (Color online) Axial vorticity, transverse vorticity, axial velocity, transverse velocity contour at  $y/L = 0.09$

卷的尖部,受来流和重力的影响,轴向速度会逐渐减小而横向速度会逐渐增大。此外,船舶破波具有三维特性,艏波翻卷的结构方向远离船侧并且与来流相逆。

综上,采用本文的数值方法以及网格布置可以较为精确的捕捉高航速下KCS模型的艏波破碎,但是仍旧存在缺陷。因此,下一步的工作将着眼于使用更高精度的数值模型模拟KCS模型的艏波破碎(如:DES)。

## 致谢

本文工作还得到了工信部数值水池创新专项VIV/VIM项目(2016-23/09)的资助。在此表示衷心感谢。

## 参 考 文 献:

- [1] BABA E. A new component of viscous resistance of ships[J]. Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 1969, 125: 23-34.
- [2] DUNCAN J H. The breaking and non-breaking wave resistance of a two-dimensional hydrofoil[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1983, 126: 507-520.
- [3] DONG R R, KATZ J, HUANG T T. On the structure of bow waves on a ship model[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1997, 346: 77-115.
- [4] ROTH G I, MASCENIK D T, KATZ J. Measurements of the flow structure and turbulence within a ship bow wave[J]. Physics of Fluids, 1999, 11(11): 3512-3523.
- [5] OLIVIERI A, PISTANI F, WILSON R, et al. Scars and vortices induced by ship bow and shoulder wave breaking[J]. Journal of Fluids Engineering, 2007, 129(11): 1445-1459.
- [6] KANG D, GHOSH S, REINS G, et al. Impulsive plunging wave breaking downstream of a bump in a shallow water flume—part I: experimental observations[J]. Journal of Fluids and Structures, 2012, 32: 104-120.
- [7] RHEE SH, STERN F. RANS model for spilling breaking waves[J]. Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(2): 424-432.
- [8] WILSON R V, CARRICA P M, STERN F. Simulation of ship breaking bow waves and induced vortices and scars[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2007, 54(4): 419-451.
- [9] WANG J H, WAN D C. Breaking wave simulations of high-speed surface combatant using OpenFOAM[C]. Proceedings of the 8th International Conference on Computational Methods (ICCM2017), Guilin, China, 2017.
- [10] REN Z, WANG J H, WAN D C. Numerical simulations of ship bow and shoulder wave breaking under different speeds[C]. Proceedings of the 37th International Conference on Ocean, Offshore & Arctic Engineering (OMAE2018), Madrid, Spain, 2018.
- [11] CAO H J, WAN D C. Development of multidirectional nonlinear numerical wave tank bynaoe-FOAM-SJTU solver[J]. International Journal of Ocean System Engineering, 2014, 4(1): 49-56.
- [12] SHEN Z R, WAN D C. An irregular wave generating approach based on naoe-FOAM-SJTU solver[J]. China Ocean Engineering, 2016,30(2): 177-192.
- [13] KOO B, WANG Z Y, YANG J M, et al. Impulsive plunging wave breaking downstream of a bump in a shallow water flume—Part II: numerical simulations[J]. Journal of Fluids and Structures, 2012, 32: 121-134.
- [14] DEIKE L, POPINET S, MELVILLE W K. Capillary effects on wave breaking[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2015, 769: 541-569.
- [15] MARRONE S, COLAGROSSI A, ANTUONO M, et al. A 2D+t SPH model to study the breaking wave pattern generated by fast ships[J]. Journal of Fluids and Structures, 2011, 27(8): 1199-1215.
- [16] MARRONE S, BOUSCASSE B, CPLAGROSSI A, et al. Study of ship wave breaking patterns using 3D parallel SPH simulations[J]. Computers and Fluids, 2012, 69(11): 54-66.