

静水中船航行非线性首波生成的数值模拟*

何佳益, 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, 上海 200240)

摘要: 本文利用求解器 naoe-FOAM-SJTU 数值计算分析某巡逻舰在静水中航行时非线性船首波的形成。求解器 naoe-FOAM-SJTU 是基于开源代码 OpenFOAM 工具箱和数据结构, 专门面向船舶与海洋工程复杂水动力学问题而开发的求解器。控制方程为 RANS 方程, 用有限体积法进行离散, 采用 VOF 方法处理两相流界面。通过对某巡逻舰在静水中以傅汝德数 $Fr = 0.35$ 速度航行时的船首波形成的数值模拟, 得到了船首波的形成区域范围、与船体表面交线、射流产生时船首附近横截面内速度及表面压力的分布特征。

关键词: 船首波; 静水兴波; 非线性自由面流动; naoe-FOAM-SJTU 求解器

船舶在静水面中航行时, 船首波的形成、翻卷、破碎、飞溅是非常重要的非线性流动现象, 对船舶阻力和推进性能有重要影响; 由此产生的噪音和浪花的痕迹使船舶的位置容易被仪器探测甚至肉眼观察到。船首波的生成和演化是流体强非线性作用的结果, 采用传统势流理论分析较为困难, 船舶高速航行时产生的船首波问题尤其如此, 因此近年来关于非线性船首波的形成和演化机理研究越来越受到研究者的关注。

非线性船首波形成和演化的研究方法大致分为三类, 即模型试验、理论方法和数值计算方法。在试验方面, Miyata (1984)等^[1]对船首波的流场结构和波形进行了研究。认为在首波问题中, 大部分情况下, 用吃水代替船长作为长度的特征量更合适。由于当时测量技术的限制, 尚无法测量首波与船体分离前船首附近形成的液层内的流场信息。Dong (1997)等^[2]最先开始关注此液层内的流动, 采用 PIV (Particle Image Velocitometry) 方法测量船首附近液层内的速度和涡量分布, 对涡产生的机理和能量损耗的大小进行了研究。在此基础上, Roth (1999) 等^[3]研究了在更高雷诺数的情况下, 首波流场的变化情况。为了能更仔细地研究不同航速和几何参数对首波形成的影响, Waniewski (2002) 等^[4]试验了平板在不同吃水、与来流成不同角度时, 在不同的来流速度下的首波形状。他们认为首波的形成是强非线性的, 当时的一些理论分析如细长体理论、2D+t (two dimensions plus time) 只适用于一些特定的问题, 并不能解释他们的试验结果。在理论方法方面, Noblesse (2008) 等^[5]利用基本的数学和物理方法(如量纲分析法等)推导出首波高度、船首波面升高、首波波形与航速、吃水、水线面进水角之间的关系, 和一系列首部楔形无球鼻船的试验结果比较显示, 这些简单的关系式与试验结果相当一致。在数值计算方法方面, Wilson (2007) 等^[6]以单相 RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 方程为控制方程, 采用 level set 方法捕捉自由面, 结合重叠网格技术, 模拟了 DTMB 5415 在三个航速下的首波形成。其波面升高、尾流速度场和涡量场与试验结果比较, 显示出较高的一致性。Landrini (2012) 等^[7]利用混合边界元-光滑粒子法 (BEM-SPH) 研究了一艘快速船在静水中航行时的首波形成问题。分析结果验证了傅汝德数对首波形态的重要影响, 并强调了表面张力对小尺度船首波形成和演化的重要性。在船首波的形成过程中, 首波的翻卷、射流与周围自由面的碰撞、新的射流的产生、涡结构的脱落及波的破碎是其中的重要现象。传统的势流理论忽略的黏性的作用, 很难模拟船首波翻卷之后的一系列现象。

本文利用 naoe-FOAM-SJTU 求解器计算分析了某巡逻舰在静水中以傅汝德数 $Fr=0.35$ 航行时的非线性船首波形成问题, 对船首波的形状、位置、区域范围、速度和压力分布进行了详细的讨论。本文采用黏性模型数值模拟船首波形成问题, 能够捕捉到船首波的翻卷、射流与周围自由面的碰撞、涡结构的脱落及波的破碎这些复杂现象, 更接近实际情况。求解器 naoe-FOAM-SJTU 是基于开源代码 OpenFOAM 工具箱和数据结构开发的针对海洋工程复杂水动力学问题的 CFD 求解器。控制方程采用两相不可压 RANS 方程, 采用带可压缩技术的 VOF (Volume of Fluid) 方法捕捉自由面。离散方法采用有限体积法。采用 PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators) 算法处理速度和压力的耦合。湍流模型采用 k-Omega SST (Shear Stress Transport) 模型。naoe-FOAM-SJTU 集成数值水池、船舶 6DoF 运动、锚泊系统等模块。数值水池支持活塞式、推板式及入口边界条件等多种造波方式, 能产生规则波及多种不规则波。在先前的工作中, naoe-FOAM-SJTU 求解器的稳定性和可靠性已经得到大量验证^[8-10]。

基金项目: 国家自然科学基金项目(11072154), 海洋工程国家重点实验室自主研究课题基金 (GKZD010059), 上海东方学者人才计划基金(2008007)

1 数学模型及数值方法

1.1 控制方程

控制方程采用两相不可压 RANS 方程:

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

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

式中: \mathbf{U} 为速度场; $p_d = p - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}$ 为流体动压力; ρ 为气液两相的混合密度; \mathbf{g} 为重力加速度矢量; $\mu_{eff} = \rho(\nu + \nu_t)$ 为有效动力黏度, 式中 ν 和 ν_t 分别为运动黏度和涡黏度, 后者由 k-Omega SST 湍流模型求解而得; f_σ 为两相模型中的表面张力项, 在 2.2 节将作进一步阐述。本文通过 PISO 算法处理速度和压力的耦合, 区别于传统的交错网格, OpenFOAM 的 PISO 算法中采用由 Rhie 和 Chow 提出的同位网格。相比交错网格, 同位网格减少了数据的存储量, 解决三维问题更有效率。

1.2 VOF 方法

本文采用带人工压缩技术的 VOF 方法捕捉自由面, 这种人工压缩技术方法的优点是能控制数值耗散并能以更高的精度捕捉自由面。VOF 法的输运方程为:

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

式中: α 为体积分数, 代表一个网格单元中液体部分所占体积占单元体积的百分比, 因此每个单元中 α 的取值总是在 0 到 1 之间:

$$\begin{cases} \alpha = 0 & \text{空气中} \\ \alpha = 1 & \text{水中} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{自由液面} \end{cases} \quad (4)$$

通过体积分数 α , 密度 ρ 和动力黏度 μ 可以分别定义成:

$$\rho = \alpha \rho_l + (1 - \alpha) \rho_g \quad (5)$$

$$\mu = \alpha \mu_l + (1 - \alpha) \mu_g \quad (6)$$

式中: 下标 g 和 l 分别代表气体和液体。

方程 (2) 中的表面张力项可以定义为:

$$f_\sigma = \sigma \kappa \nabla \alpha \quad (7)$$

式中: σ 为表面张力, 本文取 $0.07 \text{ kg} / \text{s}^2$; κ 为自由面的曲率, 定义为

$$\kappa = -\nabla \cdot \mathbf{n} = -\frac{\sum_f \mathbf{S}_f \mathbf{n}_f}{V_i} \quad (8)$$

式中: V_i 为网格的体积; 下标 f 表示值存储在网格面上; Σ_f 表示遍历求和一个网格中所有网格面上的值; \mathbf{S}_f 为网格面的法向量, 其值等于这个面的面积; \mathbf{n}_f 为自由面的单位法向量, 定义为:

$$\mathbf{n}_f = \frac{(\nabla \alpha)_f}{|(\nabla \alpha)_f + \delta|} \quad (9)$$

式中: δ 为稳定因子, 表示为:

$$\delta = \frac{1 \times 10^{-8}}{\left(\frac{\sum_{i=1}^N V_i}{N} \right)^{1/3}} \quad (10)$$

式中: N 是网格总量。

方程 (3) 右端的前两项构成传统的 VOF 输运方程, 第三项为附加的人工压缩项。由于此项中存在的 $(1 - \alpha) \alpha$, 人工压缩项只对自由面有效。 \mathbf{U}_r 为用来压缩自由面的速度场, 其值可由存储在网格面的界面上的速度大小的最大值求得:

$$U_{r,f} = n_f \min \left\{ C_\alpha \frac{|\phi|}{|S_f|}, \max \left(\frac{|\phi|}{|S_f|} \right) \right\} \quad (11)$$

式中： ϕ 为面速度通量，由 PISO 算法求得； C_α 为压缩系数，用来控制压缩程度。其值越大压缩效果越明显，本文中取为 1。

2 计算船模及工况

2.1 计算船模

计算船模为某巡逻舰模型。缩尺比 λ 为 1:30.27。模型的几何视图如图 1 所示。



图 1 某巡逻舰模型侧视图

表 1 巡逻舰及模型主尺度

	实船	计算模型
垂线间长 L_{pp} (m)	90.80	3.00(1:30.27)
水线长 L_{wl} (m)	94.00	3.106
型宽 B (m)	12.20	0.403
吃水 d (m)	3.40	0.112
方形系数 C_B	0.486	0.486
半进水角 α_E (deg)	13	13

实船和模型的主尺度如表 1 所示。表中最后所列为设计水线处的半进水角，是首波问题中关键的物理量。

在本文中，船模设计水线与中纵剖面在船首的交点为地球坐标系原点， x 轴正向从船首指向船尾， y 轴正向指向右舷， z 轴正向垂直于 xy 平面向上。

2.2 计算工况

本文对巡逻舰模型在静水中以 $Fr=0.35$ 航行时形成的首波进行模拟，来流速度为 1.899 m/s，吃水傅汝德数 $Fr_d=1.81$ 。

3 网格生成

网格生成方式是首先在笛卡尔坐标系下生成背景网格，然后在指定区域加密网格。通过迭代细分和变形使船体表面附近的网格面贴于船体表面。船体表面附近还可生成边界层以捕捉剧烈的流场变化。本文使用的网格计算域为： $-1.0L_{pp} \leq x \leq 4.0L_{pp}$ ， $0 \leq y \leq 1.5L_{pp}$ ， $-1.0L_{pp} \leq z \leq 0.5L_{pp}$ 。考虑到流场的对称性网格计算域在 $y=0$ 右侧，在 $y=0$ 处使用对称边界条件。为了捕捉船体表面、自由面、船首区域的流场结构，对这些区域特别是船首附近区域进行了网格加密。计算域最终网格数约为 1.68×10^6 。全局网格及船体局部网格如图 2 所示。

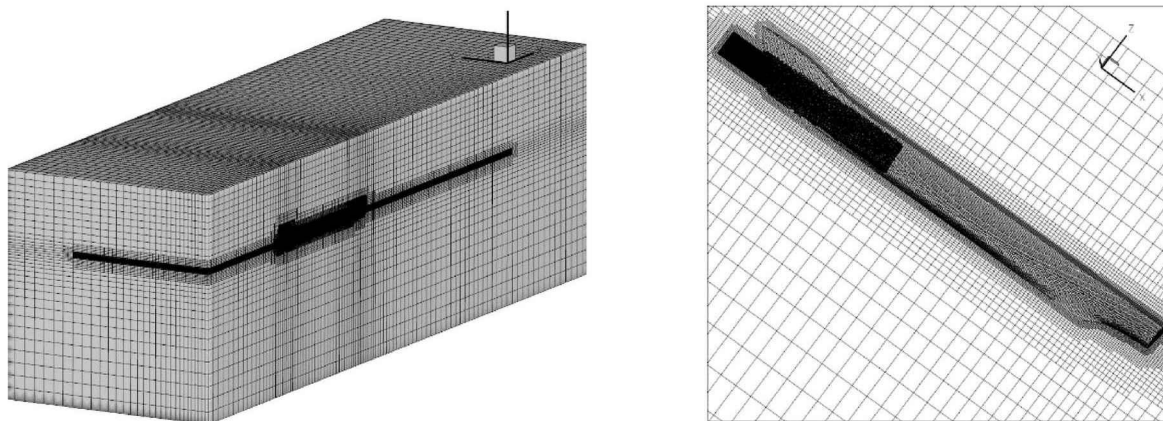


图 2 全局网格和局部网格

4 计算结果

4.1 首波的模拟现象

图 3 显示了船体附近自由面的波高，从图中可以明显看出船模航行时产生的首波（红色区域）和肩波（蓝色区域）。首波的区域范围在 $0 < x/L < 0.2, 0 < y/L < 0.1, 0 < z/L < 0.017$ 内。在 $x=0$ 处，水流与船模首柱相遇。水质点与船首的相互作用使自由面在首柱处升高，并在船首局部形成一层薄水层。沿来流方向，水层在船体表面逐渐上升，其厚度也逐渐增加。一旦水层在船体表面上升至最高点，由于重力的作用，水层高度开始下降并沿船模侧面翻卷，在水层侧面形成射流，最终跌落到周围的自由面中。从射流与周围自由面相互接触处到船体表面之间区域，有一块波高较小、相对平整的自由面。水层在船体表面上升的最高点是首波与船体的分离点。图 4 显示了船首附近首波的形态。图 5 显示了船首表面的动压分布，从图中可以看出船模在首柱附近及首波发生翻卷处动压比其他地方更高。

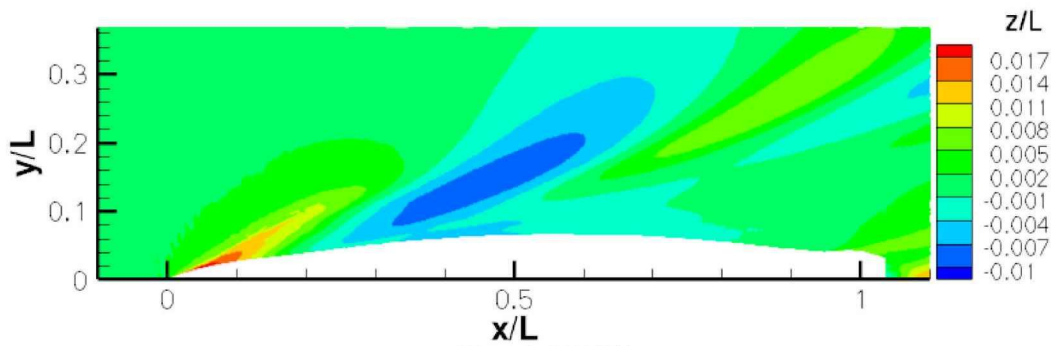


图 3 自由面兴波

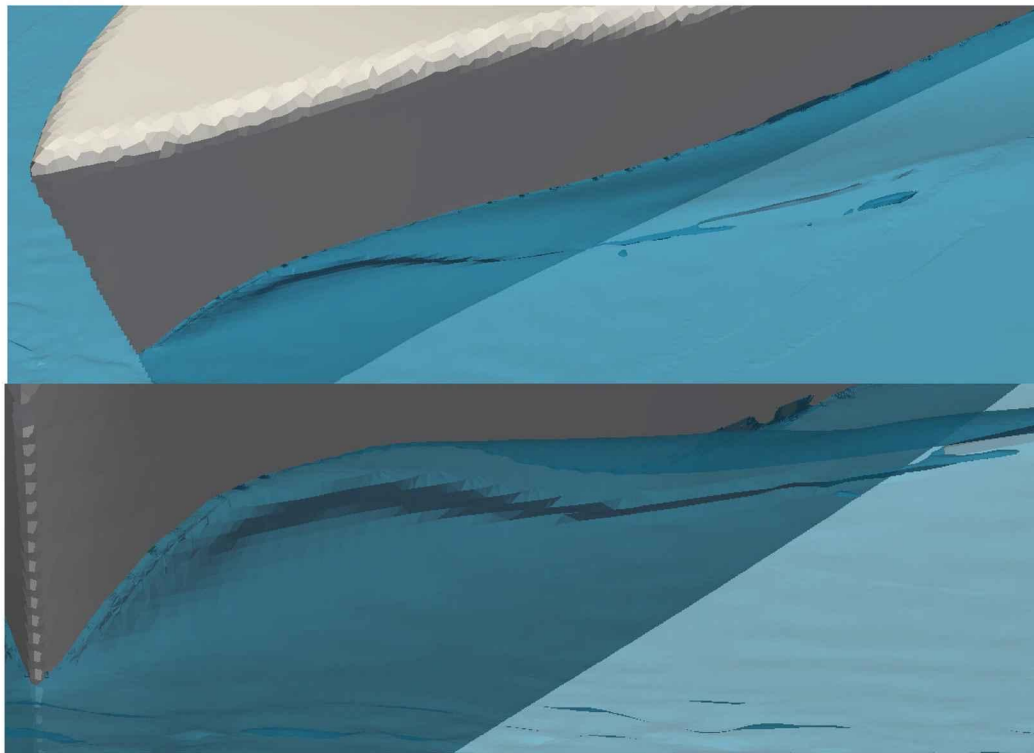


图 4 船首波波形

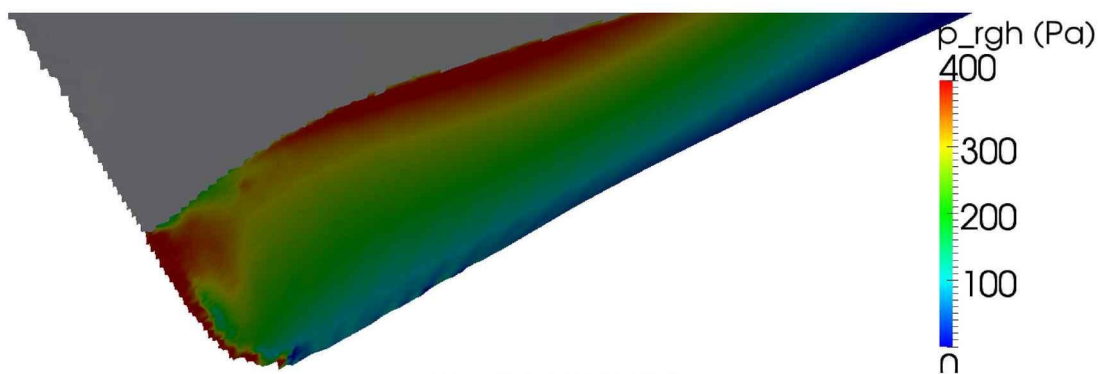


图 5 船体表面动压分布

4.2 自由面与船体交线

图 6 显示了自由面与船体间的交线。从图中可知，自由面在首柱处上升的高度 $z/L = 0.004$ 。自由面与船体交线的最高点，即首波与船体的分离点位于 $x/L = 0.047$ 处，其高度 $z/L = 0.0175$ ，约为自由面在首柱处高度的 4.375 倍。当 $x/L = 0.2$ 时，自由面高度基本与静水面持平。

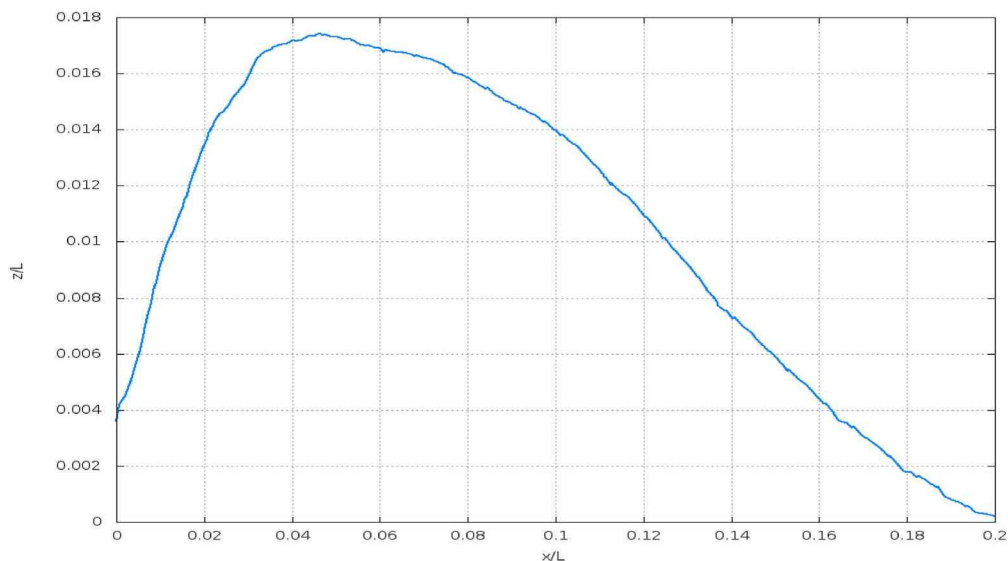


图 6 首波与船体交线

4.3 横截面速度场

图 7 为 $x/L = 0.047$ 处的流场剖面，图中左侧黑色曲线为船体表面轮廓。图中箭头表示横截面内的二维速度场 $(0, u_y, u_z)$ ，箭头方向指向速度方向，箭头大小表示速度大小。箭头的疏密程度由网格决定，没有实际物理意义。在靠近船体表面的边界层内网格较密，因此箭头较密。右上方黑色箭头用于表示参考速度，其下方数值表示该箭头长度对应的速度大小，单位为 m/s 。从图中可以看出，在水层的峰顶处，速度方向接近水平方向，Dong 等^[2]在其试验结果中也观察到类似现象。水层峰处的速度大小约 $0.6 m/s$ ，约为来流速度的 30%。从峰顶沿自由面向下，速度方向逐渐向上倾斜。剖面速度的最大值出现在峰的右下侧，约 $0.8 m/s$ ，约为来流速度的 42%。在距离船体表面较远的自由面处，速度大小几乎为零，表明此处已接近主流区域。

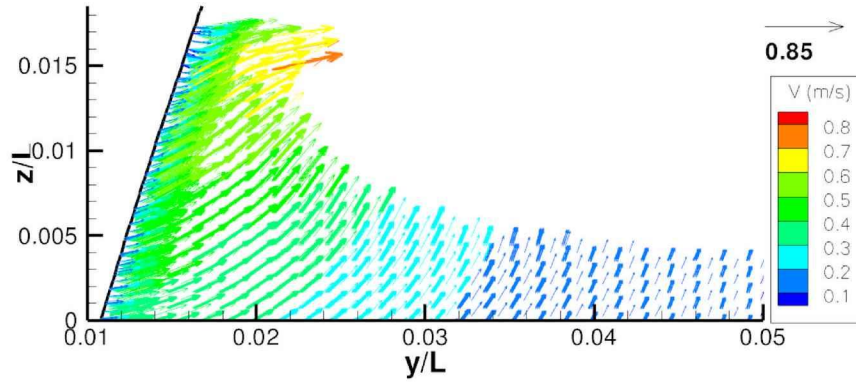


图 7 $x/L = 0.047$ 剖面速度场

从图 8 可见，在 $x/L = 0.04$ ，首波还未与船体表面分离，波峰处速度方向斜向上。随着 x 增大，首波与船体表面发生分离并出现翻卷和射流。射流位置逐渐接近外侧自由面，射流处速度方向逐渐向下，速度大小逐渐增大。在 $x/L = 0.09$ ，速度大小约 1.2 m/s，约为来流速度的 63%。图 8 与图 7 中速度剖面存在共同点——在自由面下方（不包括射流区域），从船体表面到右侧流场，速度方向逐渐上升；从左至右，速度大小存在逐渐减小的趋势。

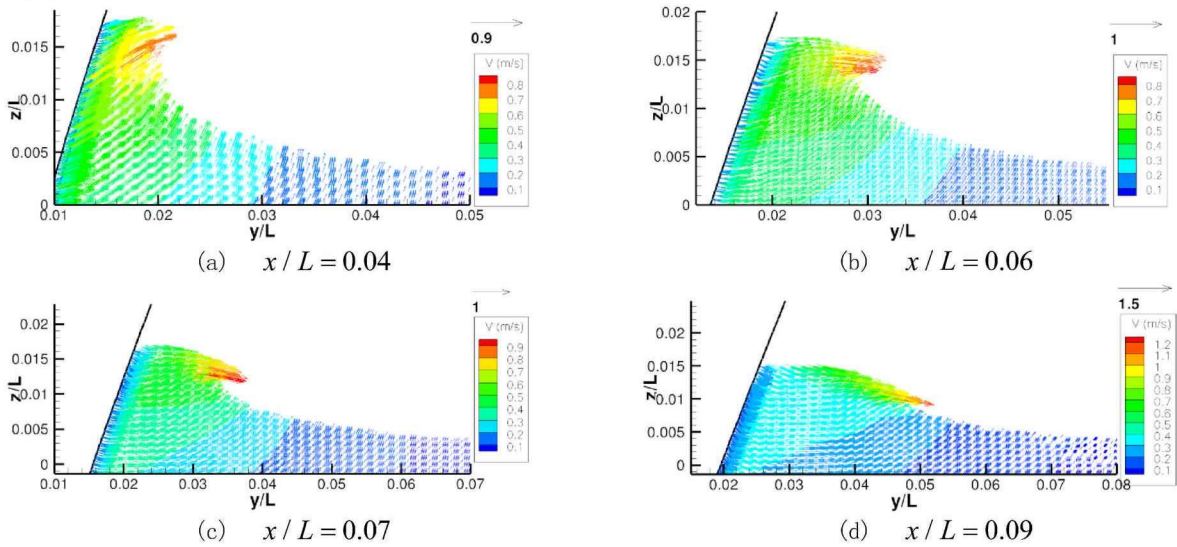


图 8 其他横剖面速度场

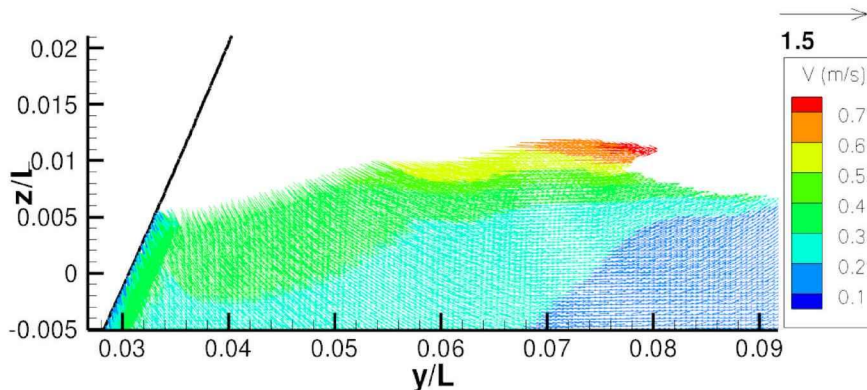


图 9 $x/L = 0.15$ 剖面速度场

在 $x/L = 0.15$ 剖面，自由面除在 $y/L = 0.075$ 处出现射流外，在其左侧 $y/L = 0.065$ 处，自由面出现微凹。在两处自由面下方，速度大小相近且都较周围局部区域速度大。这表明在 $y/L = 0.065$ 处的射流已经

冲入自由面中,并且在 $y/L=0.075$ 处产生了新的射流。在 $y/L=0.075$ 处的自由面下方区域,

速度方向几乎为水平。在其左侧区域速度方向指向右下方;其右侧区域速度方向指向右上方,且速度大小逐渐降低。

5 结 论

本文利用 naoe-FOAM-SJTU 求解器计算分析了某巡逻舰在静水中以傅汝德数 $Fr=0.35$ 航行时的非线性船首波形成问题。生成的船首波大致位于 $0 < x/L < 0.2$, $0 < y/L < 0.1$, $0 < z/L < 0.017$ 的区域内。首波在船体表面上升至最高点后在重力的作用下发生翻卷。船首附近的船体表面压力在首柱及首波发生翻卷区域较大。从首波与船体表面的交线可知首波与船体发生分离的位置及首柱处的波高。从横截面内的速度场可知,首波与船体表面发生分离时,首波的波峰处速度接近水平方向。速度大小约为来流速度的30%。顺着来流方向,首波发生翻卷并形成射流。射流速度方向逐渐向下,并逐渐接近自由面。射流速度先增大后减小。在 $x/L=0.09$,速度大小约1.2 m/s,约为来流速度的63%。射流与自由面接触后会在自由面上形成新的射流。本文工作为进一步考虑船舶高速航行时非线性船首波流动问题的数值模拟奠定了很好基础。

参考文献:

- 1 Miyata, H. & Inui, T. in *Advances in Applied Mechanics* Vol. Volume 24 (eds W. Hutchinson John & Y. Wu Theodore) 215-288 (Elsevier, 1984).
- 2 Dong, R. R., Katz, J. & Huang, T. T. On the structure of bow waves on a ship model. *Journal of Fluid Mechanics* **346**, 77-115 (1997).
- 3 Roth, G. I., Mascenik, D. T. & Katz, J. Measurements of the flow structure and turbulence within a ship bow wave. *Physics of Fluids*, **11**, 3512 (1999).
- 4 Waniewski, T., Brennen, C. & Raichlen, F. Bow wave dynamics. *Journal of ship research*, **46**, 1-15 (2002).
- 5 Noblesse, F., Hendrix, D., Faul, L. & Slutsky, J. Simple analytical expressions for the height, location, and steepness of a ship bow wave. *Journal of Ship Research*, **50**, 360-370 (2006).
- 6 Wilson, R. V., Carrica, P. M. & Stern, F. Simulation of ship breaking bow waves and induced vortices and scars. *International journal for numerical methods in fluids*, **54**, 419-451 (2007).
- 7 Landrini, M., Colagrossi, A., Greco, M. & Tulin, M. P. The fluid mechanics of splashing bow waves on ships: A hybrid BEMSPH analysis. *Ocean Engineering*, **53**, 111-127 (2012).
- 8 Liu, Y. & Wan, D. Numerical simulation of motion response of an offshore observation platform in waves. *Journal of Marine Science and Application*, **12**, 89-97 (2013).
- 9 Ye, H., Shen, Z. & Wan, D. Numerical prediction of added resistance and vertical ship motions in regular head waves. *Journal of Marine Science and Application*, **11**, 410-416 (2012).
- 10 Shen, Z. & Wan, D. RANS Computations of Added Resistance and Motions of Ship in Head Waves, Proceedings of the Twenty-second (2012) International Offshore and Polar Engineering Conference, Rhodes, Greece, June 17-22, 2012, pp.1096-1103