

高航速 KCS 船艏破波数值模拟和实验研究

王建华, 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 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240, *通讯作者 Email: dcwan@sjtu.edu.cn)

摘要: 船舶阻力和兴波是船舶水动力学研究中最为基础的问题, 但是高航速下船舶兴波会出现明显的破波现象, 包含复杂的界面流动现象。本研究针对标准船模 KCS, 分别开展实验观测和数值模拟研究。船模实验在上海交通大学多功能拖曳水池进行, 实验中采用摄像机拍摄艏波演化过程。实验中对航速在 $Fr=0.26$ 到 $Fr=0.425$ 范围内的 8 个工况进行了拍摄和测量。数值模拟采用基于开源 CFD 工具包 OpenFOAM 自主开发的船舶水动力学数值求解器 naoe-FOAM-SJTU, 对实验中已经出现较为明显艏波破碎的 $Fr=0.35$ 工况进行了数值计算分析。通过数值计算得出了该航速下的兴波波形, 并给出了自由面兴波的对比分析, 验证了采用当前数值模拟手段可以模拟得到艏波破碎的现象。

关键词: 船舶兴波; 艏波破碎; 高航速; naoe-FOAM-SJTU 求解器

1 引言

船舶在高航速下会产生明显的兴波破碎现象, 伴随着复杂的界面变形, 是目前船舶水动力学研究中较为复杂的问题之一。为了更好地了解高航速船舶艏波破碎的机理, 国内外一些研究学者开展了针对船艏破波的试验观测和研究。Dong 等^[1]针对水面舰船在低速和高航速下的兴波进行了实验观测, 可以观察到明显的艏波破碎现象, 并进行了流场的 PIV 测量, 探讨了兴波破碎与界面涡量场分布的关系。Roth 等^[2]对 DDG-51 舰船进行了模型实验研究, 分析了 $Fr=0.3$ 工况下艏部破波区域的流动变化特性。Longo 等^[3]对不同漂角下的船体兴波进行了研究, 发现了艏波破碎的产生与一侧涡量分布的规律。Olivieri 等^[4]对 DTMB5415 船模进行了多个航速下的模型试验, 发现了艏部兴波不同的破碎形式, 并对稳定形式的破波问题进行了深入分析。

随着计算流体力学数值方法的日臻完善以及高性能计算机性能的飞速提升, CFD 方法在船舶水动力学中的应用越来越广泛。由于模型试验进行流场测量的成本较高, 且无法给出较为精确的流动数据, 目前已经有部分学者开展了船体兴波破碎方面的数值研究。本研

究将对照上海交通大学多功能拖曳水池中进行的船舶艏波破碎实验，采用课题组基于开源 OpenFOAM 开发的 naoe-FOAM-SJTU 求解器^[5-6]进行标准船模 KCS 的艏波破碎数值预报研究。

2 KCS 艏波破碎实验观测

实验模型为标准船模 KCS，该船模已经在船舶水动力学 CFD 研讨会(Gothenburg, 2010; Tokyo, 2015)，以及船舶操纵性会议 (SIMMAN2008, 2014) 上作为标准船型，进行了广泛的实验和数值模拟的对比验证研究。本次 KCS 高航速下艏波破碎实验也将作为 2021 年的船舶水动力学会议上的标准算例。实验重点关注不同航速下的艏部兴波破碎现象，并且采用摄像机对艏部的破碎波形态进行记录。

上海交通大学多功能拖曳水池池长 300m，池宽 16m，池深 7.5m，最大拖曳速度 10m/s，可以满足高航速船模的实验测量要求。实验采用的 KCS 船模缩尺比为 1: 37.89，船模垂线间长为 6.0702m，具体的船型尺度见表 1。

表 1 KCS 船模主尺度参数

主尺度	标识	模型尺度值
垂线间长	L_{pp} (m)	6.070
水线长	L_{wl} (m)	6.135
型宽	B (m)	0.85
吃水	T (m)	0.285
排水量	Δ (kg)	957.02
湿表面积	S (m ²)	6.718

KCS 船体模型见图 1，艏部标注刻度线用于标定艏部波高。



图 1 KCS 船体模型

本次实验共进行了从 $Fr=0.26$ 到 $Fr=0.425$ 共计 8 个航速的实验工况研究，具体的航速数据见表 2。

表 2 实验工况说明

工况编号	Fr	U (m/s)
1	0.26	2.006
2	0.275	2.123
3	0.30	2.315
4	0.325	2.507
5	0.35	2.701
6	0.375	2.893
7	0.40	3.086
8	0.425	3.279

实验中船模放开了纵倾和升沉，8 个航速下的自由面波形如图 2 所示。从图中可以看出，航速在 Fr 小于 0.3 的时候没有发生艏波破碎现象；而随着航速的增加，在 $Fr=0.30$ 的工况下船舶艏部出现了溢波（Spilling wave）形式的破碎波；而从 $Fr=0.35$ 开始则出现了明显的艏波翻卷（Plunging wave）现象，并伴随有液滴飞溅等强非线性自由面变化。为了对该物理问题进行深入的探讨分析，下一部分将针对 $Fr=0.35$ 工况进行数值模拟分析，进一步的研究高航速下艏波破碎的自由面变化和流场特性。

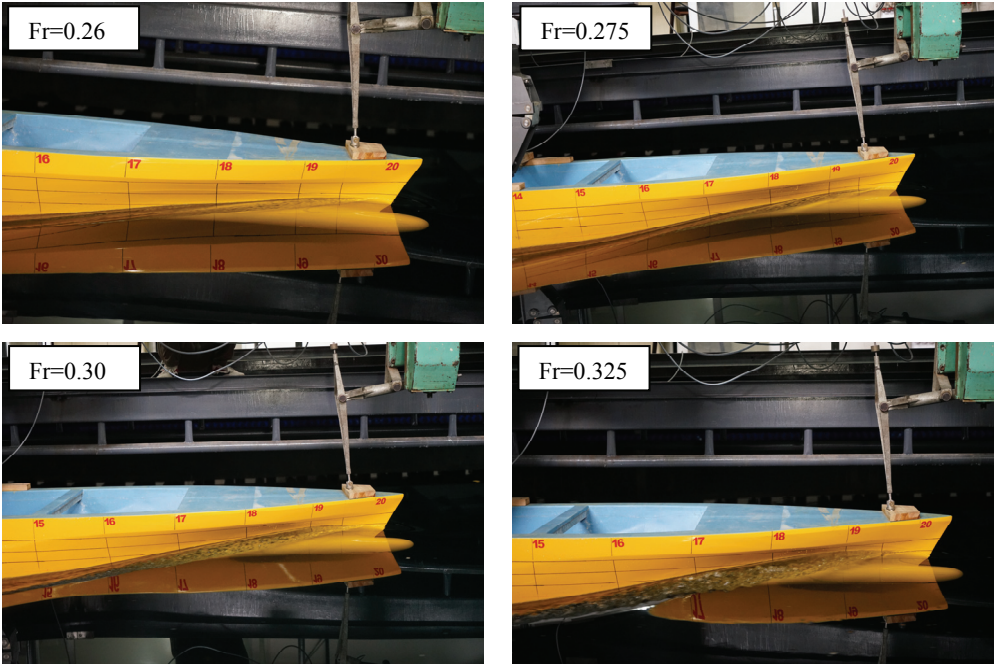
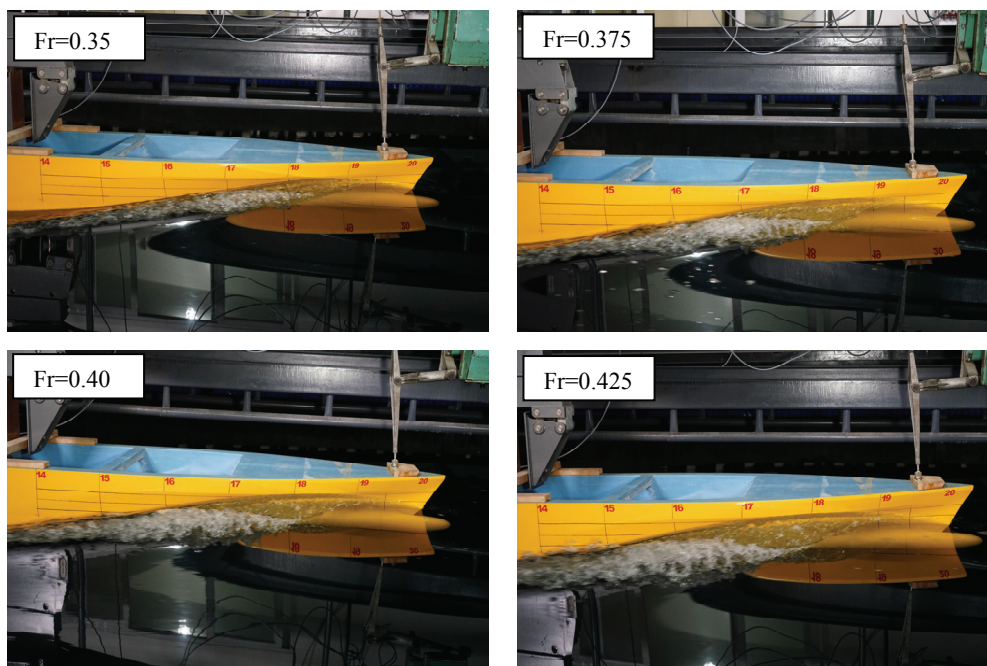


图 2 不同航速下船舶艏波破波



续 图2 不同航速下船舶艏波破波

2 KCS 艏波破碎数值模拟

本文中 KCS 艏波破碎的数值模拟采用课题组基于 OpenFOAM 平台自主开发的船舶水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU。该求解器已经广泛的应用于船舶与海洋工程的水动力学问题中，本次数值模拟采用的求解模型与以往不同的是采用了改进的 $k-\omega$ SST 湍流模型，主要是对湍流模型中的 TKE 方程增加了浮力修正项，从而可以更好的处理界面处的流场信息，浮力修正的具体过程可参见文献[7]。

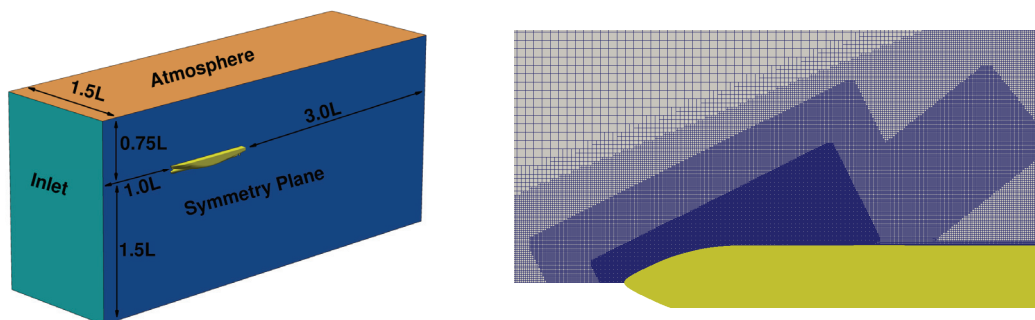


图3 计算域和艏部网格分布

图 3 给出了本次 KCS 船模艏部兴波破碎数值模拟所采用的计算域和艏部网格分布, 计算网格共计 792 万, 计算中采用了壁面函数, 并且 y^+ 值取为 30。计算工况为 $Fr=0.35$, 对应船模航速为 2.701m/s, 计算中为了保证变量较少, 因此固定了船模自由度, 并且采用半船计算域进行计算。数值计算在上海交通大学 CMHL 高性能计算中心进行, 采用 60 个计算核心进行并行计算, 时间步长为 0.1ms, 完成了 50s 的模型尺度时间模拟, 共花费 83h 计算时间。

图 4 给出了当前数值模拟得到的 KCS 船舶兴波结果, 从数值预报结果可以看出明显的艏部破碎情况, 该现象同实验观测结果 (图 2) 较为接近, 但是目前模拟得到的结果仍然较为粗糙, 不能够模拟得到实验中观测到的液滴飞溅等强非线性自由面变化。主要的原因有如下几点: ①当前采用的仍然是 RANS 方法, 经过时间平均后的流场无法给出精确的流动信息预报; ②网格数量不够, 当前的网格尺度相较于实验观测到的液滴尺寸仍然较粗糙; ③当前采用的 VOF 方法仍然属于代数方法, 没有几何类 VOF 方法中自由面重构等过程, 无法更为真实的模拟自由面的细节流动。

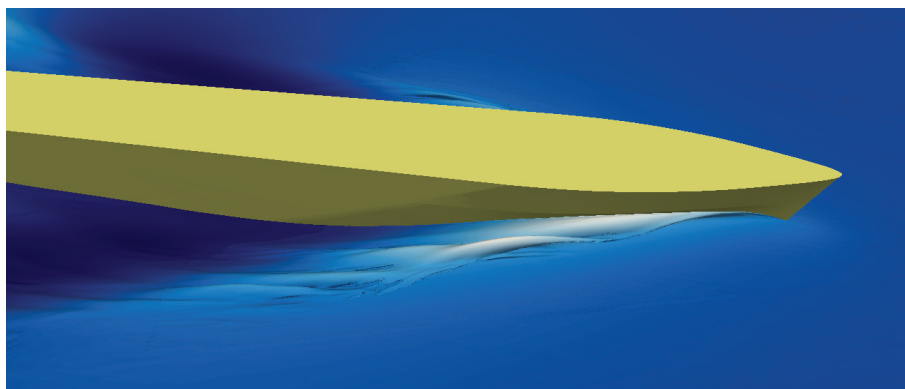


图 4 数值模拟得到的 KCS 艏波破碎现象

致谢

本文工作国家自然科学基金项目 (51809169, 51879159, 51490675, 11432009, 51579145)、长江学者奖励计划 (T2014099)、上海高校特聘教授 (东方学者) 岗位跟踪计划 (2013022)、上海市优秀学术带头人计划 (17XD1402300)、工信部数值水池创新专项课题 (2016-23/09) 资助项目。在此一并表示感谢。

参考文献

- 1 Dong, R. R., Katz, J., Huang, T. T. On the structure of bow waves on a ship model. Journal of Fluid Mechanics, 1997, 346: 77-115.

- 2 Roth, G. I., Mascenik, D. T., Katz, J. Measurements of the flow structure and turbulence within a ship bow wave. *Physics of Fluids*, 1999, 11(11): 3512–3523.
- 3 Longo, J., Stern, F. Effects of drift angle on model ship flow. *Experiments in Fluids*, 2002, 32(5): 558–569.
- 4 Olivieri, A., Pistani, F., Wilson, R., Campana, E. F., and Stern, F. Scars and Vortices Induced by Ship Bow and Shoulder Wave Breaking. *Journal of Fluids Engineering*, 2007, 129(11): 1445–1459.
- 5 Shen, Z., Wan, D.C., Carrica, P. M. Dynamic overset grids in OpenFOAM with application to KCS self-propulsion and maneuvering. *Ocean Engineering*, 2015, 108: 287–306.
- 6 Wang, J., Zhao, W., Wan, D.C. Development of naoe-FOAM-SJTU solver based on OpenFOAM for marine hydrodynamics. *Journal of Hydrodynamics*, 2019, 31(1): 1–20.
- 7 Liu, C., Zhao, W., Wang, J., Wan, D.C. Improving the Numerical Robustness of Buoyancy modified $k-\omega$ SST Turbulence Model. In the proceedings of MARINE 2019, May 13-15, Gothenburg, Sweden.

Numerical and experimental study of the bow wave breaking of high-speed KCS model

WANG Jian-hua, WAN De-cheng

Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240.

Email: dcwan@sjtu.edu.cn)

Abstract: Ship advancing in calm water is one of the most fundamental studies in the research field of ship hydrodynamics. For high-speed ships, significant wave breaking can be observed and the free surface flow is very complex. In the present paper, both numerical and experimental studies have been conducted to investigate the breaking bow waves of KCS ship model. The experiment is performed in the towing tank at SJTU and the breaking waves pictures of 8 ship speeds varies from $Fr=0.26$ to $Fr=0.425$ have been captured by high speed camera. Numerical simulations are carried out at $Fr=0.35$ and the predicted bow wave has been compared with the experiment. Good agreement has been achieved and it is showed that the present method can predict well with the breaking bow wave phenomenon of high speed surface ships.

Key words: Wave pattern; Breaking bow wave; High speed ship; naoe-FOAM-SJTU.