

# 高航速 KCS 船艏破波數值模擬和實驗研究

王健華, 萬德成\*

(上海交通大學 船舶海洋與建築工程學院 海洋工程國家重點實驗室 高新船舶與深海開發裝備協同創新中心,  
上海 200240, \*通訊作者 Email: dcwan@sjtu.edu.cn)

**摘要:** 船舶阻力和興波是船舶水動力學研究中最為基礎的問題, 但是高航速下船舶興波會出現明顯的破波現象, 包含複雜的界面流動現象。本研究針對標準船模 KCS, 分別開展實驗觀測和數值模擬研究。船模實驗在上海交通大學多功能拖曳水池進行, 實驗中採用攝像機拍攝艏波演化過程。實驗中對航速在  $Fr=0.26$  到  $Fr=0.425$  範圍內的 8 個工况進行了拍攝和測量。數值模擬採用基於開源 CFD 工具包 OpenFOAM 自主開發的船舶水動力學數值求解器 naoe-FOAM-SJTU, 對實驗中已經出現較為明顯艏波破碎的  $Fr=0.35$  工况進行了數值計算分析。通過數值計算得出了該航速下的興波波形, 並給出了自由面興波的對比分析, 驗證了採用當前數值模擬手段可以模擬得到艏波破碎的現象。

**關鍵詞:** 船舶興波; 艏波破碎; 高航速; naoe-FOAM-SJTU 求解器

## 1 引言

船舶在高航速下會產生明顯的興波破碎現象, 伴隨著複雜的界面變形, 是目前船舶水動力學研究中較為複雜的問題之一。為了更好地了解高航速船舶艏波破碎的機理, 國內外一些研究學者開展了針對艏波破碎的試驗觀測和研究。Dong 等<sup>[1]</sup>針對水面艦船在低速和高速下的興波進行了實驗觀測, 可以觀察到明顯的艏波破碎現象, 並進行了流場的 PIV 測量, 探討了興波破碎與界面渦量場分布的關係。Roth 等<sup>[2]</sup>對 DDG-51 艦船進行了模型實驗研究, 分析了  $Fr=0.3$  工况下艏部破波區域的流動變化特性。Longo 等<sup>[3]</sup>對不同漂角下的船體興波進行了研究, 發現了艏波破碎的產生與一側渦量分布的規律。Olivieri 等<sup>[4]</sup>對 DTMB5415 船模進行了多個航速下的模型試驗, 發現了艏部興波不同的破碎形式, 並對穩定形式的破波問題進行了深入分析。

隨著計算流體力學數值方法的日臻完善以及高性能計算機性能的飛速提升, CFD 方法在船舶水動力學中的應用越來越廣泛。由於模型試驗進行流場測量的成本較高, 且無法給出較為精確的流動數據, 目前已經有部分學者開展了船體興波破碎方面的數值研究。本研究將對照上海交通大學多功能拖曳水池中進行的船舶艏波破碎實驗, 採用課題組基於開源 OpenFOAM 開發的 naoe-FOAM-SJTU 求解器<sup>[5-6]</sup>進行標準船模 KCS 的艏波破碎數值預報研究。

## 2 KCS 艏波破碎實驗觀測

實驗模型為標準船模 KCS, 該船模已經在船舶水動力學 CFD 研討會(Gothenburg, 2010; Tokyo, 2015), 以及船舶操縱性會議 (SIMMAN2008, 2014) 上作為標準船型, 進行了廣泛的實驗和數值模擬的對比驗證研究。本次 KCS 高航速下艏波破碎實驗也將作為 2021 年的船舶水動力學會議上的標準算例。實驗重點關注不同航速下的艏部興波破碎現象, 並且採用攝像機對艏部的破碎波形態進行記錄。

上海交通大學多功能拖曳水池池長 300 m, 池寬 16 m, 池深 7.5 m, 最大拖曳速度 10 m/s, 可以滿足高航速船模的實驗測量要求。實驗採用的 KCS 船模縮尺比為 1:37.89, 船模垂線間長為

6.0702 m, 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	$\Delta$ (kg)	957.02
湿表面积	$S$ (m <sup>2</sup> )	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。

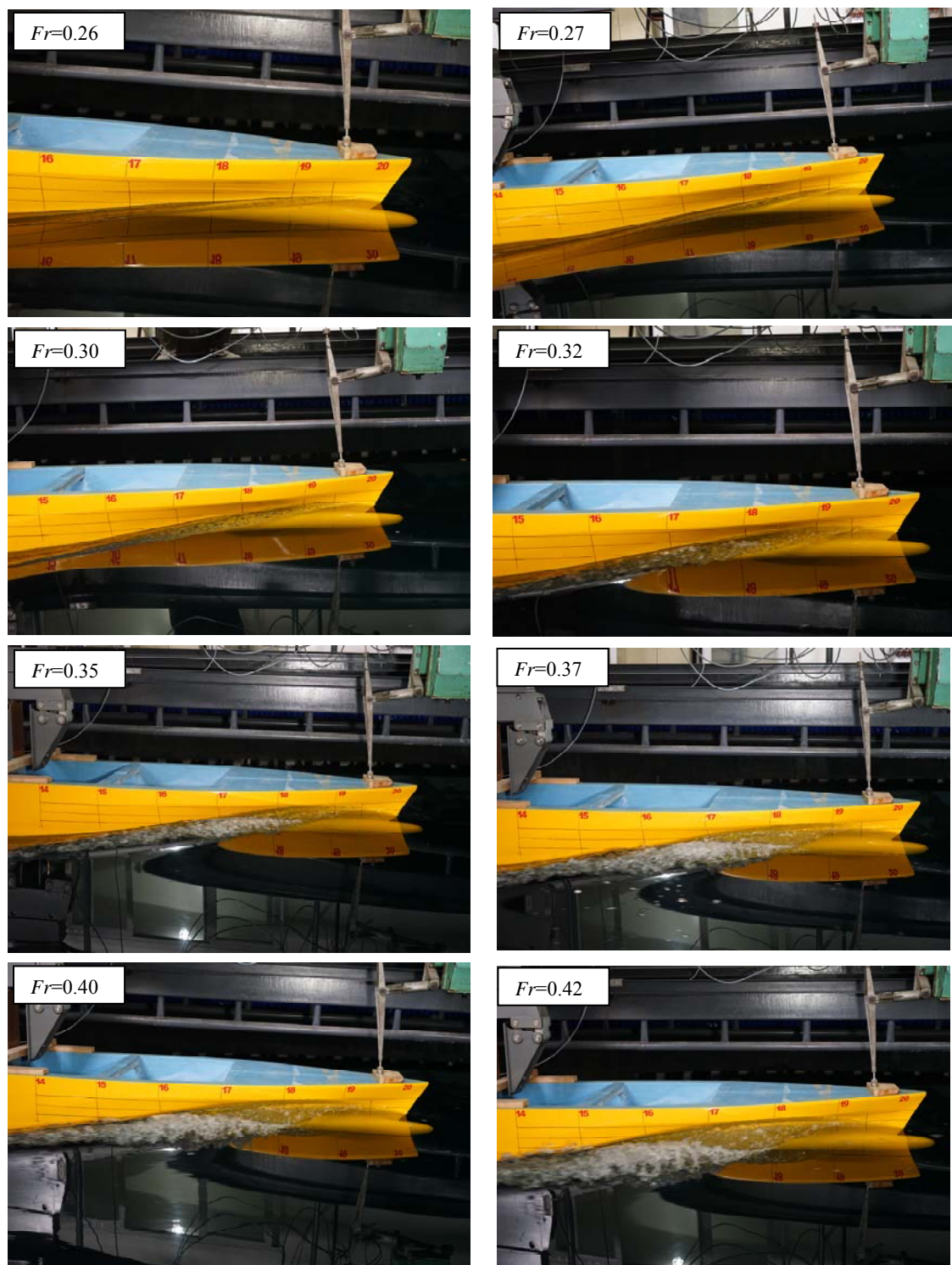


图2 不同航速下船舶艏波破波

### 3 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項，從而可以更好的處理界面處的流場信息，浮力修正的具體過程可參見文獻[7]。

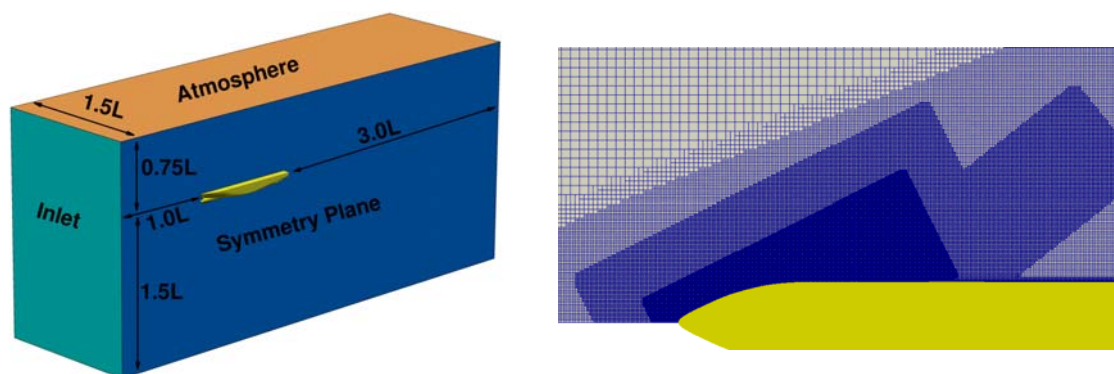


圖 3 計算域和艙部網格分布

圖 3 給出了本次 KCS 船模艙部興波破碎數值模擬所採用的計算域和艙部網格分布，計算網格共計 792 萬，計算中採用了壁面函數，並且  $y^+$  值取為 30。計算工況為  $Fr=0.35$ ，對應船模航速為 2.701m/s，計算中為了保證變量較少，因此固定了船模自由度，並且採用半船計算域進行計算。數值計算在上海交通大學 CMHL 高性能計算中心進行，採用 60 個計算核心進行並行計算，時間步長為 0.1ms，完成了 50s 的模型尺度時間模擬，共花費 83h 計算時間。

圖 4 給出了當前數值模擬得到的 KCS 船艙興波結果，從數值預報結果可以看出明顯的艙部破碎情況，該現象同實驗觀測結果（圖 2）較為接近，但是目前模擬得到的結果仍然較為粗糙，不能夠模擬得到實驗中觀測到的液滴飛濺等強非線性自由面變化。主要的原因有如下幾點：①當前採用的仍然是 RANS 方法，經過時間平均後的流場無法給出精確的流動信息預報；②網格數量不夠，當前的網格尺度相較於實驗觀測到的液滴尺寸仍然較粗糙；③當前採用的 VOF 方法仍然屬於代數方法，沒有幾何類 VOF 方法中自由面重構等過程，無法更為真實的模擬自由面的細節流動。

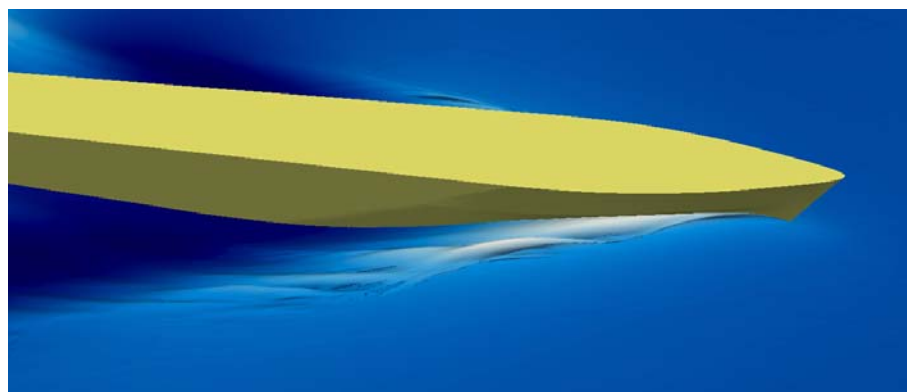


圖 4 數值模擬得到的 KCS 艙波破碎現象

## 致謝

本文工作國家自然科學基金項目（51809169, 51879159, 51490675, 11432009, 51579145）、長江學者獎勵計劃（T2014099）、上海高校特聘教授（東方學者）崗位跟蹤計劃（2013022）、上海市優秀學術帶頭人計劃（17XD1402300）、工信部數值水池創新專項課題（2016-23/09）資助項目。在此一併表示感謝。

## 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](mailto: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.