

文章编号: 1000-4882 (2025) 06-0147-12

KCS 标模船首破波流场时空特征数值分析

李心怡, 王建华, 万德成*

(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)

摘 要

船舶在高航速下, 其首部兴波会发生明显的破碎现象。论文基于 2025 年国际 CFD 会议设置的 KCS 标模破波工况, 对 Fr 为 0.35、艏倾角为 1° 的静水 KCS 船模首波破碎开展数值建模与分析。采用延迟分离涡模拟 (DDES) 湍流模型, 并结合分段线性界面重构 (PLIC) 方法, 对静水条件下艏波破碎过程进行数值模拟。在时域上, 通过水动力系数和波高功率谱密度分析发现艏波具有显著的周期性; 在空间分布方面, 时均艏波的波面产生两条气体卷吸带, 在卷吸带前端上表面发生射流、飞溅等现象, 在卷吸带后端下表面发生气管、气泡等现象, 导致流场波动显著增强。

关键词: 船舶兴波; 艏波破碎; KCS 模型; 统计特征分析; 频率分析

中图分类号: U661.1

文献标志码: A

0 引 言

波浪破碎呈现复杂的气-液界面流动, 界面间的剧烈掺混导致自由面下生成大量气泡^[1]。水面舰船在以中高航速航行时形成的船首波破碎^[2]可以分为翻卷式破波和溢出式破波, 前者多出现在快速船等型线较为尖锐的船型首部, 而后者则主要出现在较肥大的船型首部^[3]。当能量充足时, 翻卷式破波撞击自由面形成射流, 进而发生多次翻卷, 而流体内部的湍流大幅消耗了能量, 最终在翻卷式兴波外围形成溢出式破波或者毛细波, 即自由面上存在大量波纹, 而非光滑状态。

船首波破碎过程涉及剧烈的气-液界面掺混, 形成小尺度的液滴、气泡等, 这些小尺度结构不仅会产生水动力噪声, 还会在船体后方形成延伸数千米的白色尾迹, 影响舰船的隐蔽性和战术性能。此外, 破波过程中产生的多尺度紊流导致破波阻力增加, 影响舰船快速性。

粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV)、高速摄像及光纤探头等技术已广泛应用于船首破波试验中。Pogozelski 等^[4]采用 PIV 技术, 在拖曳水槽中对某穿浪型钝体周围溢出式破波的速度场及涡量场进行了研究, 表明艏波破碎和其根部的涡旋现象会导致明显的能量损耗。Dong 等^[5]基于 PIV 技术观察了弗劳德数 Fr 在 0.17 ~ 0.45 范围时 DTMB 5512 标准船模的首波结构, 分析了艏波区域的局部速度场和涡量场, 显示艏波的演化生长与涡量有强相关性, 多出现在涡量集中区域。Roth 等^[6]采用 PIV 技术, 选取 DDG-51 船模, 对高雷诺数下的艏波演化进行了研究, 发现在波脚处会形成紊流, 使速度场产生明显变化。王威等^[7]用高速摄像机进行试验观测, 验证了艏波破碎及其抑制机理。Karion 等^[8]利用高速摄像技术, 研究了艏波破碎现象出现时弗劳德数与雷诺数的临界值。Liu 等^[9]基于高速摄像机,

收稿日期: 2025-05-19; 修改稿收稿日期: 2025-07-31
基金项目: 国家自然科学基金项目 (52131102)

通过 KCS 船模在不同吃水条件下的试验, 得到船首波浪破碎在船首俯仰时更加剧烈的结论。

CFD 是模拟艏波破碎的重要工具。Wang 等^[10]基于雷诺平均 (Reynolds-averaged Navier-Stokes, RANS) 模型以及流体体积 (volume of fluid, VOF) 法模拟了 Fr 为 0.35 和 0.41 时静水中 DTMB 5415 船模艏波破碎现象, 研究表明随着航速的增长, 艏波破碎产生的空气夹带现象更加明显, 而且艏波破碎的范围更大, 尤其是沿船体纵向的范围。Ren 等^[11]基于 RANS 模型选用典型 KCS 船模, 分析了航速对船首破波的影响, 表明在 Fr 为 0.35 时, 该模型的第一次翻卷会形成气穴, 也就是产生了空气卷吸现象。Mao 等^[12]基于延迟分离涡模拟 (delayed detached eddy simulation, DDES) 模型分析不同航速下艏波破波形成的气穴的时空特性以及船首区域的波面统计特征。谢路毅等^[13]基于 DDES 模型对不同尺度下的 KCS 模型的船首破波进行了尺度效应研究, 表明尺度效应对船首破波的第一、第二次翻卷的影响不明显, 但对于第三、第四次翻卷, 在船模尺度变大时具有更多的能量, 因此能够维持第三、第四次翻卷。Wang 等^[14]采用 DDES 模型模拟不同尺度下 KCS 船模的船首破波, 展示和分析了 3 种不同尺度下的流场, 涵盖艏波轮廓、各截面涡度以及尾流分布等。吴定坤^[1]基于 DDES 模型, 研究了不同纵倾角对 DTMB 5415 船模艏波破碎的影响, 发现艏倾角的增大会使艏波破碎更加剧烈, 从而加大紊流的能量消耗, 对船舶推进造成不良影响。Li 等^[15]基于 DDES 模型和几何 VOF 方法, 研究不同艏倾角下 KCS 的船首破波统计特征以及频谱特征。

为了建立统一的研究基准, 2025 年国际 CFD 会议正式将船首破波问题列为标准算例之一。本文基于该会议设置的标模破波工况, 将艏倾 1° 航行姿态的 KCS 标准船型作为研究对象, 依托 OpenFOAM 开源平台, 采用高精度湍流模型和界面捕捉方法对船首破波现象进行数值模拟, 阐述破波数据处理与分析流程, 并通过波面的统计特征与频谱特性揭示该标准工况下破波流场的时空特征。

1 数值方法

1.1 数值模拟方法

1.1.1 控制方程

基于 VOF 方法的不可压缩水-气两相界面流动的控制方程包括质量守恒方程、动量守恒方程以及相体积分数的输运方程如式 (1) ~ 式 (3) 所示, 其中相体积分数的输运方程用于描述界面:

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

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

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla \alpha = 0 \quad (3)$$

式中, \mathbf{U} 为速度; ρ 为密度; t 为时间; \mathbf{g} 为重力加速度; \mathbf{x} 为空间位置; p_d 为动压力, $p_d = p - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}$, 其中 p 为总压力; α 为体积分数; μ_{eff} 为等效动力黏度, 由分子动力黏度和湍流动力黏度相加得到; \mathbf{f}_σ 为表面张力项。在自由面附近的流体被认为是均匀混合流体, 即流体的密度和黏度被认为是连续的, 由体积分数加权平均得到。

1.1.2 高精度界面捕捉

使用相分数场捕捉界面时, 界面在迭代演化过程中会产生数值扩散, 因此在 VOF 方法中界面依旧需要重构。为实现高精度的界面重构, 采用 VOF 方法中的几何分段线性界面重构 (PLIC) 方法。其基本思想是通过单个平面将网格单元切割成两部分, 保证浸没部分的体积与体积分数 α 保持一致, 进而实现网格单元内自由面的近似。对三维空间中的任意平面, 其表达式为

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{x} + D = 0 \quad (4)$$

式中, \boldsymbol{n} 为平面的法向量, \boldsymbol{x} 为平面上任意一点坐标, D 为待定常数。

在 PLIC 几何重构中确定界面法向量 \boldsymbol{n} 和位置信息 D 是至关重要的步骤, 其中 D 根据 \boldsymbol{n} 及该单元的 α 进行迭代寻根步骤求解。

1.1.3 高精度湍流模型

延迟分离涡 (DDES) 模型是在分离涡 (DES) 模型基础上优化的湍流模型。DDES 湍流模型使用混合函数将 RANS 模型以及大涡模拟 (LES) 模型桥接起来, 该混合函数根据计算的局部湍流特征长度得出 RANS 模型和 LES 模型的切换区域。这样在网格数尽可能减少的同时, 捕捉到尽可能多的小尺度细节流动。判断湍流特征长度的计算式如式 (5) ~ 式 (7) 所示:

$$L_{\text{RANS}} = \sqrt{k} / (C_{\mu} \omega) \quad (5)$$

$$L_{\text{LES}} = C_{\text{DES}} \Delta \quad (6)$$

$$L_{\text{DES}} = \min(L_{\text{RANS}}, L_{\text{LES}}) \quad (7)$$

式中, k 为湍动能; C_{μ} 为湍流模型系数; ω 为耗散率; C_{DES} 为标定的 DES 模型参数; Δ 为网格尺寸, 这说明 LES 方法的湍流特征长度依靠网格尺寸来确定。

当网格尺寸小于某个阈值时, 启用 LES 湍流模型来捕捉精细化流动, 而在近壁面区域 RANS 方法的湍流特征长度小于 LES 方法的湍流特征长度, 则通过 RANS 方法的壁面函数计算近壁面流动。这样能在尽可能节约计算资源的同时, 获得较精确的流场解。

此外, DDES 模型引入了延迟函数 f_d 来修正 LES 模型过早开启导致提前引发流动分离的问题:

$$f_d = 1 - \tanh(512r_d^3) \quad (8)$$

$$r_d = \frac{v_t + \nu}{\sqrt{u_{ij}u_{ji}}\kappa^2 d^2} \quad (9)$$

式中, d 为到壁面的距离, r_d 为延迟因子, 该因子在边界层内使得 f_d 为 0, 在发生流动分离的地方使 f_d 趋近于 1。在引入延迟因子后, DDES 模型中的湍流长度定义将发生改变, 如下式所示:

$$L_{\text{DDES}} = L_{\text{RANS}} - f_d \max(0, L_{\text{RANS}} - L_{\text{LES}}) \quad (10)$$

修正后, DDES 模型的桥接函数可以保证在近壁面处不会过早激活 LES 模型, 进而能在较精准计算水动力性能的同时, 更好地捕捉精细的小尺度流动和涡结构, 实现高精度湍流捕捉。

1.2 数据处理方法

1.2.1 水动力系数

在 KCS 船首破波标模中, 船模为全固定, 通过设置来流模拟船舶航行。在破波过程中关注较多的水动力系数为阻力系数 C_T 、升力系数 C_L 以及纵摇力矩系数 C_{M_y} , 以力矩定义参考点为重心, 这些水动力系数依次根据式 (11) ~ 式 (13) 计算:

$$C_T = \frac{R_T}{0.5\rho_w U_0^2 S} \quad (11)$$

$$C_L = \frac{F_z}{0.5\rho_w U_0^2 S} \quad (12)$$

$$C_{M_y} = \frac{M_y}{0.5\rho_w U_0^2 S L_{\text{PP}}} \quad (13)$$

式中, R_T 为船体总阻力、 F_Z 为船体总升力、 M_Y 为船体重心处的纵摇力矩, ρ_w 为水的密度, 此处取淡水密度, U_0 为水流速度, L_{pp} 为船模垂线间长, S 为船模湿表面积。

1.2.2 波面时空特征

波面时空特征通过波面高度的时均值 h_{MEAN} 与均方根 (root mean square, RMS) 值 h_{RMS} 表征, h_{MEAN} 与 h_{RMS} 按照下式表征:

$$h_{\text{MEAN}} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{n} \quad (14)$$

$$h_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - h_{\text{MEAN}})^2}{n}} \quad (15)$$

式中, h_i 为波高时程数据, n 为总采样数。需注意的是, 此处 h_{RMS} 定义为波动分量的 RMS 值, 而非原始波高时程的 RMS 值。采集波面数据时需待计算充分收敛后再导出, 最好监测自由液面典型位置的波高以确保液面稳定性。

波面时空特征的计算需基于固定二维网格完成, 其具体计算流程为: 先从三维计算结果文件中提取波浪高程数据, 随后投影至平面二维直角网格, 通过界面高度值插值获取网格点的波高, 最终代入式 (14) 和式 (15) 计算。现有的试验结果和计算结果均显示, 作用力与波浪高程都存在周期约为 7 s 的低频振荡现象, 它会显著影响 RMS 值的计算结果。因此, 波浪高程数据的计算时长应至少覆盖两个完整振荡周期, 即总时长不低于 14 s。

1.2.3 波面不同视角区分

在破碎波区域存在空泡与水珠, 导致多处存在气-液界面问题, 这将显著影响波高统计值, 尤其是 RMS 值。因此在标模中给出了 Top 和 Bottom 视角这两种自由液面的提取方案, 图 1 为波面两种视角的示意。Top 视角主要提供包括翻卷、射流以及飞溅现象在内的艏部兴波上表面的波高信息; Bottom 视角主要提供卷吸形成的气穴和下水气管的波高信息。

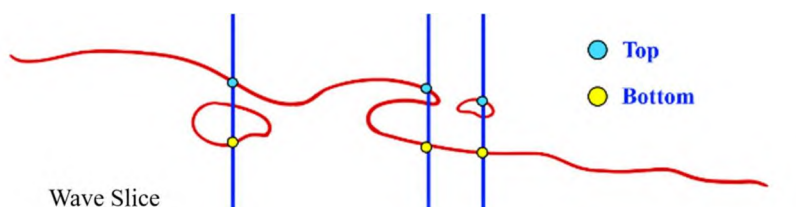


图 1 波面不同视角

在基于 VOF 方法提取波面不同表面的流程中对于存在多个气-液界面的区域, 定点记录体积分数为 0.5 的界面高度 h_i , 并对该点在各时刻的 h_i 排序, 取最低值和最高值, 分别对应于 Bottom 视角和 Top 视角。

2 数值模型

KCS 船模由韩国船舶与海洋工程研究院 (KRISO) 设计, 是常用于 CFD 验证的现代化集装箱船模型。标模的艏倾角为 1° , 缩尺比为 1:37.89, 垂线间长为 6.070 2 m, 不包含舵以及螺旋桨, 模型及主尺度如图 2 和表 1 所示。重心位置位于 (2 962.56 mm, 0 mm, 92.90 mm), 即 $(0.488\ 05L_{pp}, 0\ L_{pp}, 0.015\ 30\ L_{pp})$ 。

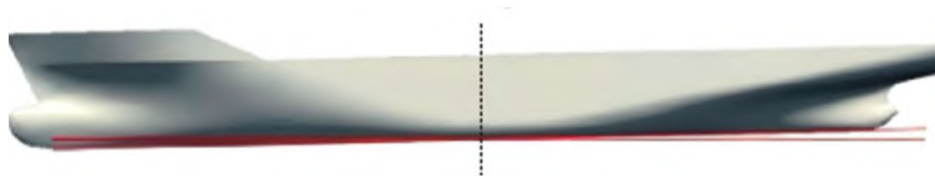
图 2 船倾 1° 的 KCS 船模

表 1 KCS 船模主尺度

主尺度	实尺度	模型尺度
缩尺比	1	1/37.89
垂线间长 L_{pp} / m	230	6.070
水线长 L_{WL} / m	224.63	5.928
型宽 B / m	32.2	0.849
吃水 d / m	10.8	0.285
排水量 / m^3	51 130	0.939
中心垂向位置 / m	14.32	0.378
湿表面积 S / m^2	9 250.2	6.443

标模工况取 $Fr = 0.35$, 采用相对坐标系, 船舶处于固定状态, 因此计算域内取流速为 2.7 m/s 。该工况属于中高速工况, 船首破波现象更加明显。数值计算涉及的其余物理量如表 2 所示。

表 2 模拟涉及的物理常量

参数	密度 / (kg/m^3)		运动黏度 / (m^2/s)		重力加速度 g / (m/s^2)
	水 ρ_w	空气 ρ_a	水 ν_w	空气 ν_a	
数值	997	1.184	1.09×10^{-6}	1.48×10^{-5}	9.81

为了优化计算效率并减少网格数量, 考虑到工况的对称性, 采用半船模型进行数值模拟。计算域坐标原点取正浮状态下自由液面与船垂线的交点, x 轴正向为从船首指向船尾, y 轴正向为从中纵轴指向右舷, z 轴正向为垂直向上。计算域长为 $4L_{pp}$, 宽和高均为 $1.5L_{pp}$ 。入口到船垂线的水平距离为 L_{pp} , 出口到船垂线的水平距离为 $2L_{pp}$, 这个距离对船模来说其流场可充分发展, 数值计算中可能产生的回流不会对船波的发展产生影响。顶部及底部边界到自由液面的距离分别为 $0.5L_{pp}$ 和 L_{pp} , 侧边界距离中纵剖面 $1.5L_{pp}$ 。计算域总体设置如图 3 所示。

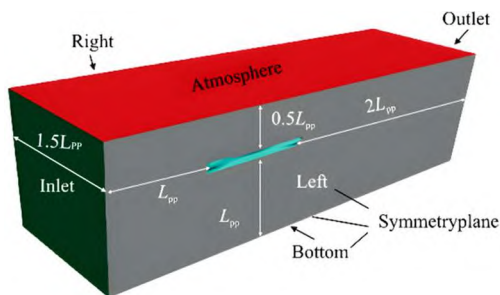
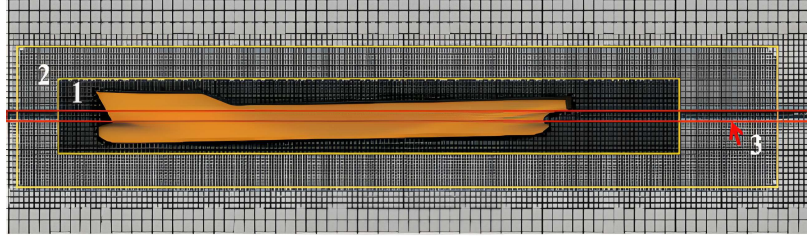


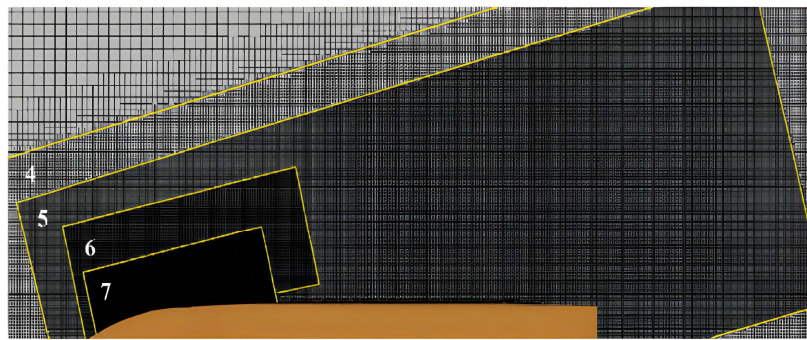
图 3 计算域设置

网格细化采用逐级加密的方式, 沿某方向每加密一级, 该方向的网格尺寸就减半一次。KCS 船体周围加密区域编号及对应的加密等级如图 4 和表 3 所示。整体加密区域可分为船体周身网格加密区、

自由液面加密区、开尔文波加密区以及艏波区域加密区这 4 个区域,除了自由液面加密区以外,其它区域均通过定义两个网格加密块实现细化过渡。图 4(a)展示了船体周围的网格加密以及自由液面的细化区域,图 4(b)展示了自由液面处艏波加密区和开尔文波加密区的网格分布。最终选定网格数为 724 万,网格基础尺寸为 0.33 m,最小尺寸为 5.2×10^{-3} m。



(a) 船体周围网格侧视图



(b) 自由液面网格布置

图 4 KCS 船体网格加密区域

表 3 网格加密方式

加密区域编号	加密区域	加密等级
1	船体周围	4:4:4
2	船体周围(过渡)	3:3:3
3	自由液面	0:0:5
4	开尔文波区(过渡)	3:3:3
5	开尔文波区	4:4:4
6	艏波区域(过渡)	5:5:5
7	艏波区域	6:6:6

3 结果与讨论

3.1 时间维度特征

首先研究宏观水动力及波面的时间特征。对 $Fr=0.35$ 工况下的 KCS 水动力系数进行对比,如表 4 所示。可见当前网格捕捉到的宏观水动力特征与试验吻合程度较高,其中纵摇系数相对误差最大,为 -3.38% ,在可接受误差范围内,因此认为当前网格可以反映宏观时均水动力系数特征。水动力系数的时历曲线如图 5 所示,水动力系数在其均值附近稳定振荡,且各水动力系数的振荡相位相近,周期均约为 7.5 s,可见船首破波的流动存在明显的周期性时间特征。

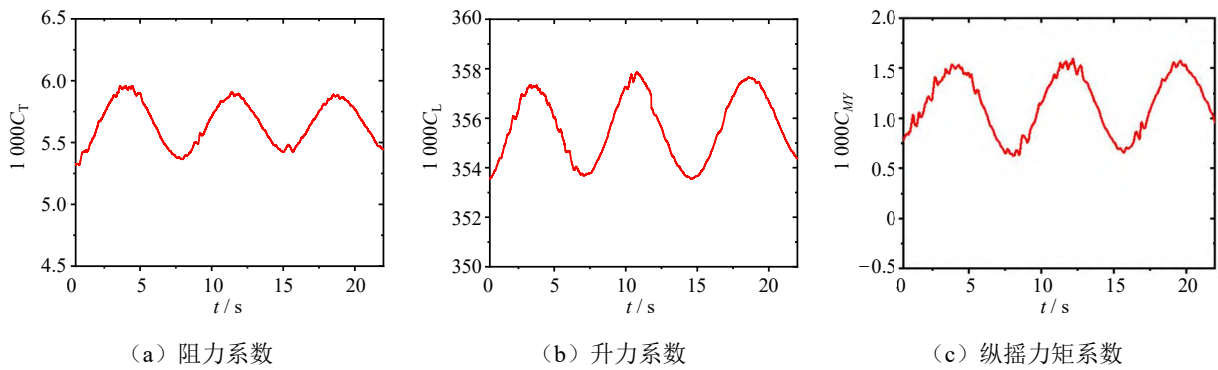


图 5 水动力系数时历曲线

表 4 水动力系数对比

参数	EFD	CFD	相对误差/ %
$1\ 000\ C_T$	5.716	5.663	-0.93
$1\ 000\ C_L$	346.773	353.250	1.87
$1\ 000\ C_{MY}$	1.154	1.115	-3.38

进一步研究稳定后艏波的波面时间特征。首先对稳定后的艏波进行定点波高数据采集, 此处选用 Top 视角表征。选取 $y = -0.092L_{pp}$ 及 $y = 0.2L_{pp}$ 两个横截面分别作为靠近船首和远离船首的截面。每个截面取 5 个点, 对应于轴向位置从 $x = 0.1L_{pp}$ 开始, 至 $x = 0.3L_{pp}$ 结束, 各点间隔 $0.05L_{pp}$, 接着绘制艏波波高信号的量纲一功率谱密度 (PSD) 图, 两个截面的 PSD 及测点分布如图 6 所示。虽然由于艏波的破碎行为波高 PSD 的衰减规律存在差异, 但不论是否靠近船首, 波面都具有与水动力主频相近的波面频率特征, 即可认为船周围波面也存在约 7.5 s 左右的周期性流动时间特征。

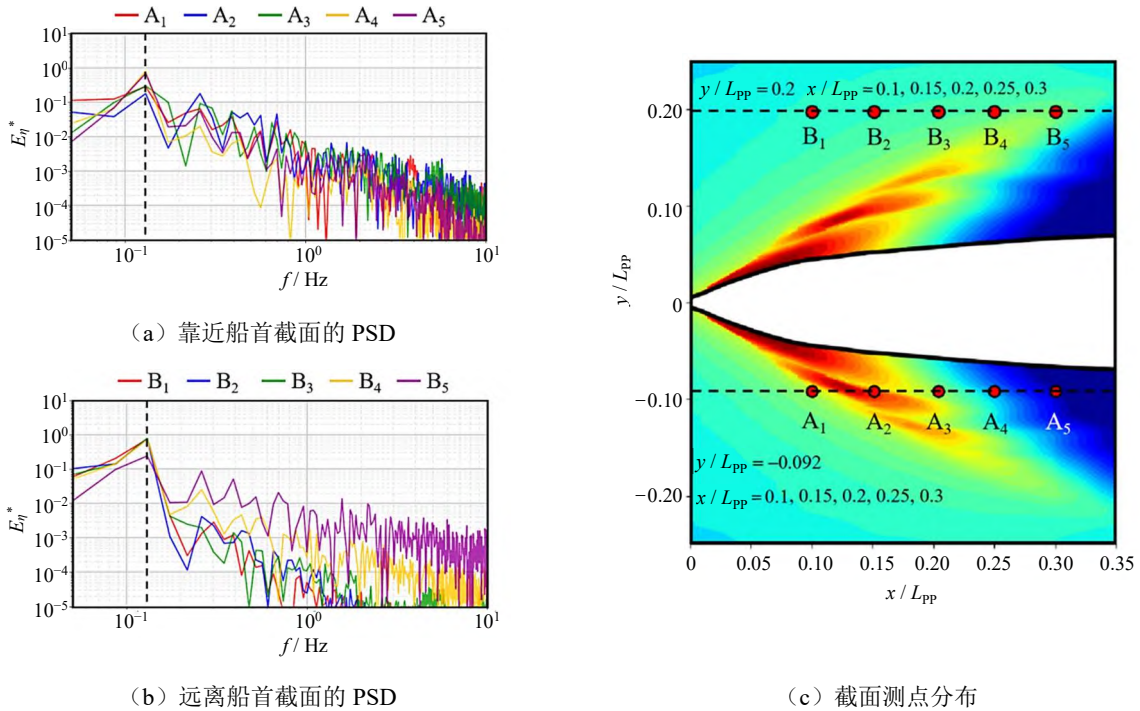


图 6 艏波波面时间周期性特征

3.2 空间维度特征

图7所示为3D空间时均及瞬时波面图。由图7(a)可见,在 $Fr = 0.35$, KCS 船倾 1° 的船首破波工况下,艏波存在两条稳定的气体卷吸带,由图7(b)可见两条气体卷吸带后延伸出非正常水下气管并溃散为气泡群,在气体卷吸的前段形成射流、飞溅等(如红线所示)显著非线性、非正常破碎现象,导致艏波强烈波动。

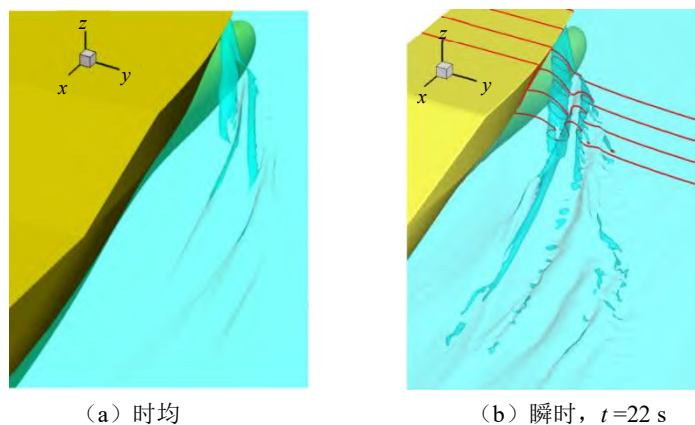


图7 3D空间波面及水下气管图

根据式(14)和式(15)分别计算艏波波高的 h_{MEAN} 和 h_{RMS} 。时间快照的采样间隔为 0.001 s ,采样时间长度取每个工况波面周期的3倍时长, n 约为22 500,从而减少周期对 h_{RMS} 的影响。图8所示为基于当前网络的Top视角和Bottom视角的模拟结果以及2025年国际CFD会议给出的KCS破波标模文件中艏波破碎统计特征的参考图。

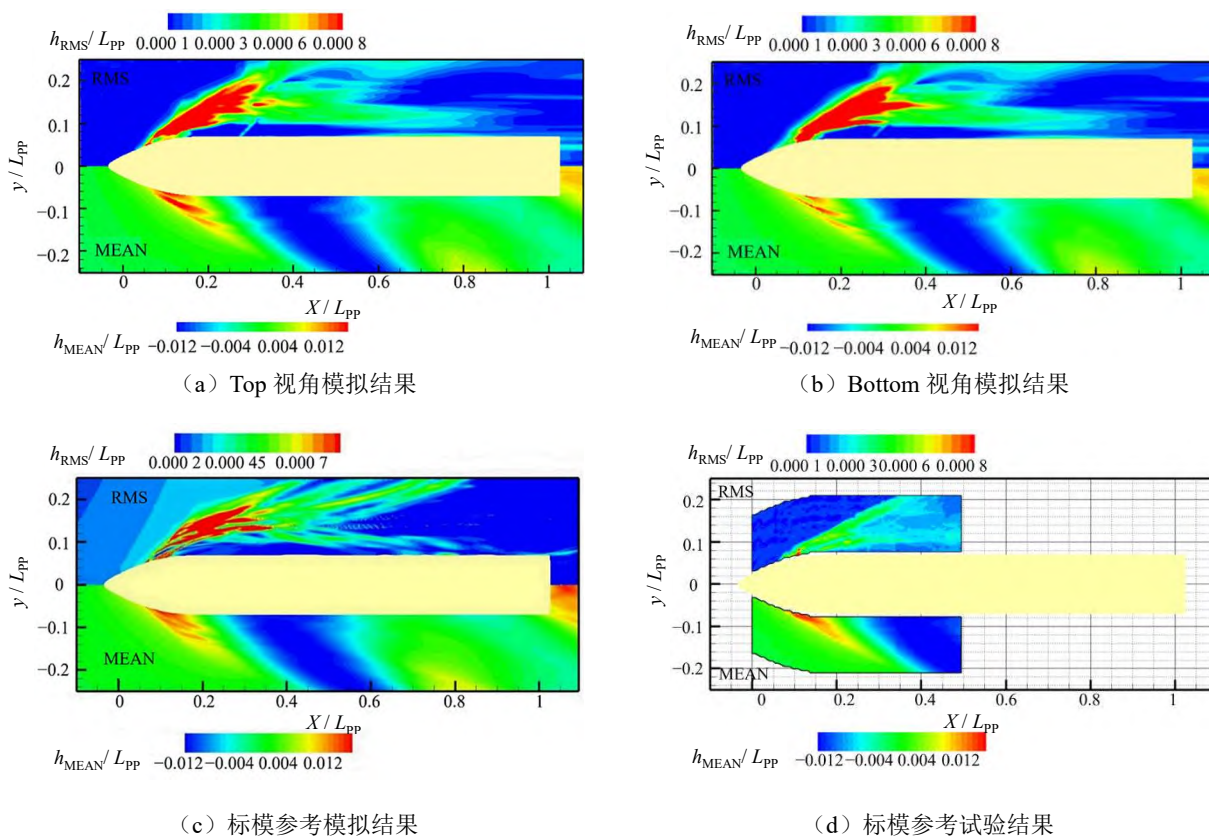


图8 统计值 h_{MEAN} 及 h_{RMS} 的模拟结果与标模参考云图

图 8(a)和图 8(b)分别展示了 Top 和 Bottom 视角下的 h_{MEAN} 和 h_{RMS} , h_{MEAN} 的空间分布在两个视角下存在较大差异, 尤其在 Bottom 视角下存在显著的波高断层。这源于艏波翻卷形成的气穴可见断层的形状与图 7 中时均气体的卷吸十分接近。由图 8 可见, 当前模拟结果十分接近参考模拟结果, 但相比参考模拟结果更加整洁, 更接近参考试验结果。此外, 本文模拟所得 h_{RMS} 云图的波动比参考试验结果更加显著, 这一点与参考模拟结果相近。Top 视角下的高 h_{RMS} 区域与 Bottom 视角相比存在前移现象, 即波面的上表面波动更多发生在艏波前端, 而下表面波动多分布在艏波后端。

将 h_{RMS} 云图与瞬时空间 3D 波面对比, 如图 9 所示。图中更改了云图的色带显示范围, 取为 $0 \sim 0.003$, 各颜色的间隔为 0.0001 。

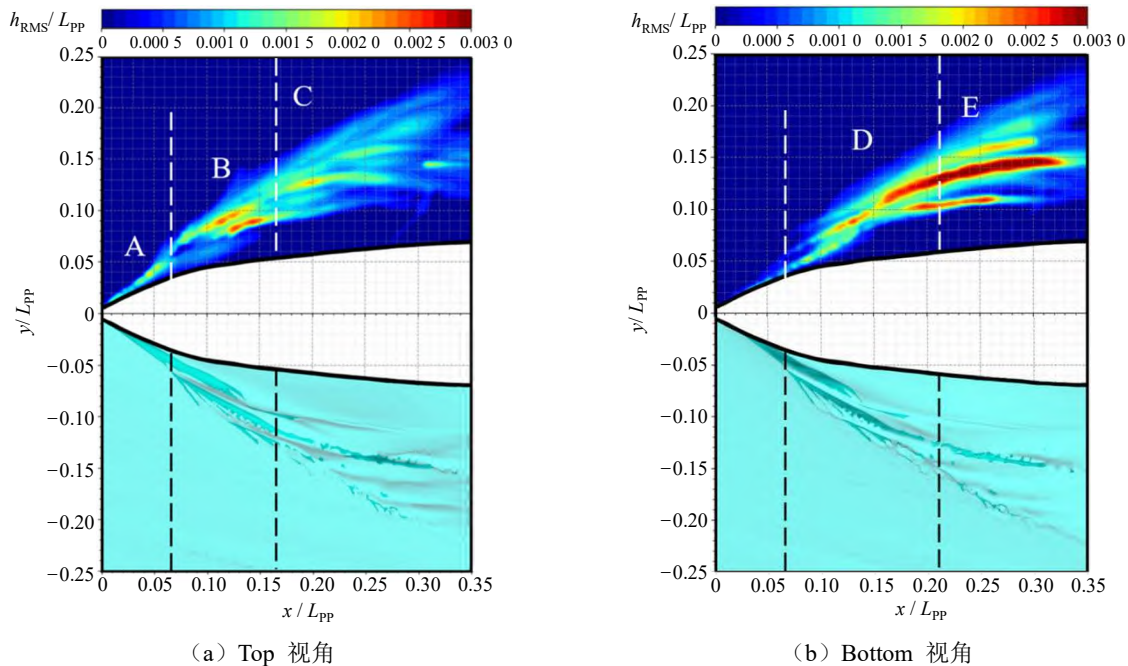


图 9 h_{RMS} 与瞬时空间 3D 波面对照

将 Top 视角下的艏波区域划分为 A、B、C 这 3 个区域, A 区为初始射流翻卷区域, B 区为初始翻卷末期以及二次翻卷区, A 区和 B 区是翻卷卷吸可能发生的区域, C 区是后续的次生翻卷和波面湍动区域。可以发现这 3 个区域中 B 区波动最强烈, 对应于流动行为中的射流、飞溅等破碎现象。A 区主要表现为翻卷水舌等波动, 而 C 区波动多为湍动引发, 这两个区域的波动强度相近。在 Bottom 视角下, 将艏波区域划分为 D 区和 E 区, D 区主要为初始翻卷形成的水下气管振荡区, E 区主要为二次翻卷形成的水下气管振荡区以及波面湍动区。E 区的波动强于 D 区, 气管溃散成气泡群的行为与气管生成、振荡的行为相比波动更强烈。同时, 可以看到高 h_{RMS} 值分布并不完全对应瞬时水下气管分布位置, 这表明水下气管的生成和分布具有强非正常性。

为进一步结合数据给出清晰明确的定量分析, 根据国际 CFD 会议中给出的标准截面设置, 取截面 $x=0.103L_{\text{PP}}$ 、 $x=0.151L_{\text{PP}}$ 、 $x=0.199L_{\text{PP}}$ 以及 $x=0.302L_{\text{PP}}$, 绘制了随轴向演化的 h_{MEAN} 及 h_{RMS} 在各截面上沿横向的分布, 如图 10 所示。

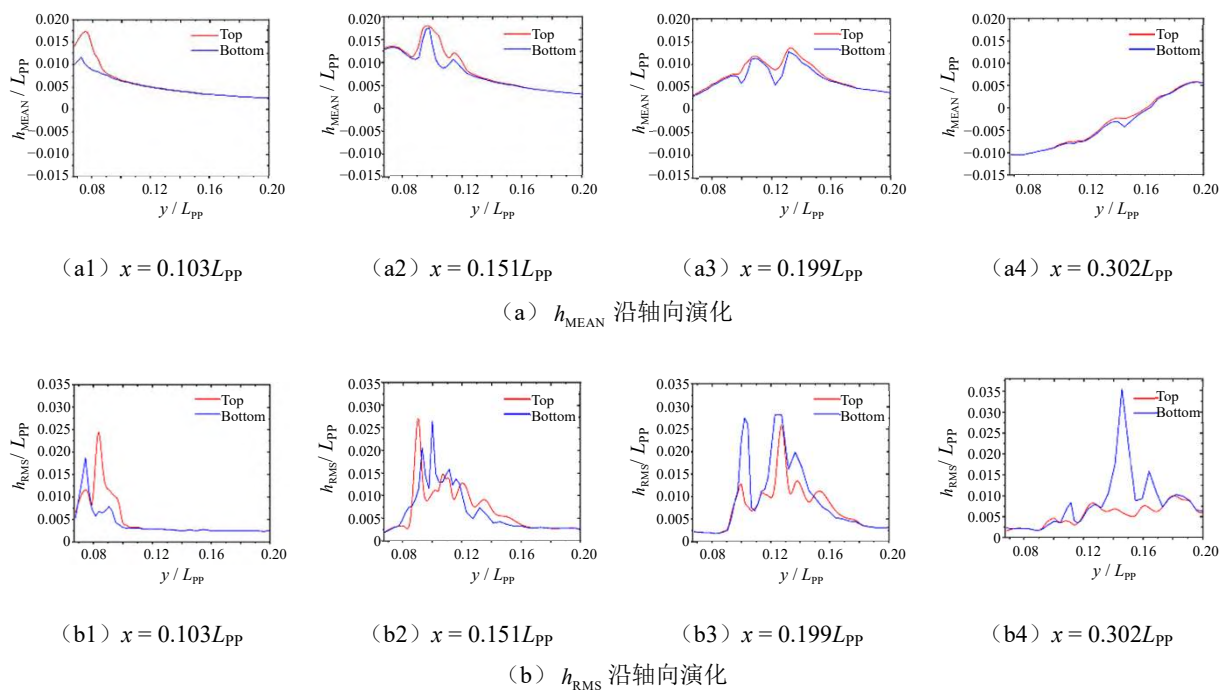


图 10 不同横截面统计特征分布

翻卷和气体卷吸等艏波破碎现象都会引发 Top 视角和 Bottom 视角之间的差异,因此由两个视角间 h_{MEAN} 和 h_{RMS} 的差异程度可反映气体卷吸情况以及水下气管到水面的绝对距离,间接反映艏波破碎的强度^[15]。由图 10 可见,沿横向的破波强度均表现为先增强后减弱,符合艏波分布规律。Top 视角中的 h_{RMS} 局部峰值主要位于其 h_{MEAN} 峰值线横向稍外的位置,对应于艏波翻卷后的射流及飞溅液滴,Bottom 视角中的 h_{RMS} 局部峰值主要位于其 h_{MEAN} 的凹陷处,对应于卷吸形成的水下气管。越靠近船首的截面,如 $x = 0.103L_{pp}$ 和 $x = 0.151L_{pp}$, 其 h_{RMS} 在 Top 视角的波动强度相比 Bottom 视角更强。在截面 $x = 0.151L_{pp}$ 之后,水下气管的行为使得 Bottom 视角的 h_{RMS} 波动强度开始反超 Top 视角中由于射流飞溅等行为产生的波动强度。在抵达截面 $x = 0.302L_{pp}$ 时,艏波在 Top 表面已经不发生显著破碎行为,其波动强度主要由波面湍动引发,而 Bottom 视角则进入水下气管溃散区,形成峰值 h_{RMS} 。定量显示 Bottom 视角的 h_{RMS} 的最大值为 Top 视角的 1.3 倍。

4 结 论

本文基于 2025 年 CFD 国际会议设置的 KCS 标模破波工况,采用延迟分离涡模拟 (DDES) 与分段线性界面重构 (PLIC) 相结合的高精度数值方法,对艏倾 1° 的 KCS 船模在 $Fr = 0.35$ 静水条件下的破波流场开展数值模拟,研究其时空特性,得到结论如下:

- (1) 功率谱密度及水动力系数时历曲线显示艏波破碎呈现显著的周期性特征,周期约为 7.5 s。
- (2) 在该标模工况下存在两条稳定的气体卷吸带,并沿卷吸带存在较多强非定常艏波破碎行为。
- (3) 在 Bottom 视角下的波高断层反映了气体卷吸行为,强波动区域主要位于二次翻卷的射流、飞溅破碎和水下气管溃散成气泡的区域,在这些区域存在强非定常性。气泡行为的波动强度强于射流、飞溅行为的波动强度。
- (4) 在截面 $x = 0.151L_{pp}$ 之前,强波浪破碎主要由翻卷射流及液滴飞溅引发,而在该截面之后,强波浪破碎现象逐步转变为水下气管行为,并在截面 $x = 0.302L_{pp}$ 处由于气管溃散而引发全局最强波浪

破碎, 气管溃散行为强度 h_{RMS} 是飞溅行为强度的 1.3 倍左右。

参 考 文 献

- [1] 吴定坤. 基于 DDES 方法的标准船型艏波破碎精细流场与水动力学性能研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2022.
- [2] 孙柏康. 中高速船艏波破碎与强非线性波浪下船舶运动响应数值研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
- [3] DEIKE L, POPINET S, MELVILLE W K. Capillary effects on wave breaking[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2015, 769: 541-569.
- [4] POGOZELSKI E, KATZ J, HUANG T T. The flow structure around a surface piercing strut[J]. *Physics of Fluids*, 1997, 9: 1387-1399.
- [5] 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.
- [6] 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: 3512-3523.
- [7] 王威, 刘志华, 张家瑞. 高速深 V 型船新型艏部减阻附体方案设计及模型试验研究[J]. *中国造船*, 2017, 58(1): 38-45.
- [8] KARIONA, FU T C, WANIEWSKI T, et al. Experiment to examine the effect of scale on a breaking bow wave[R]. Maryland: Hydromechanics Department, 2004.
- [9] LIU W, WANG W, QIU G. et al. KCS unsteady bow wave breaking experiments for physics and CFD validation[C]// 34th Symposium on Naval Hydrodynamics (SNH), Washington D.C., 2022.
- [10] WANG J H, WAN D C. Breaking wave simulations of high-speed surface combatant using OpenFOAM[C]// the 8th International Conference on Computational Methods, 2017.
- [11] REN Z, WANG J H, WAN D C. Numerical simulations of ship bow and shoulder wave breaking in different advancing speeds[C]// the 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2018.
- [12] MAO T Y, BAO F J, WANG J H, et al. Numerical study of air cavity characteristics of bow wave breaking of KCS ship under different speeds[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2024, 36(4): 678-692.
- [13] 谢路毅, 王建华, 万德成. 基于 DDES 研究尺度效应对船艏破波的影响[J]. *中国造船*, 2021, 62(2): 82-96.
- [14] WANG J H, WANG W T, WAN D C. Scale effects on bow wave breaking of KCS ship model: Insights from DDES investigations[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2023, 35(4): 668-678.
- [15] LI X Y, BAO F J, WANG J H, et al. Spectral and statistical analysis of bow wave breaking characteristics of KCS ship[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2024, 36(4): 593-608.

Numerical Analysis of Spatiotemporal Characteristics of Bow Wave Breaking in KCS Standard Model

LI Xinyi, WANG Jianhua, WAN Decheng*

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

Abstract

This study numerically investigates the bow wave breaking characteristics of the KRISO Container Ship (KCS) under high-speed conditions ($Fr = 0.35$) with 1° trim, employing Delayed Detached Eddy Simulation (DDES) coupled with Piecewise Linear Interface Calculation (PLIC) method based on the 2025 International CFD Conference benchmark. The results demonstrate that bow wave breaking becomes significantly more pronounced at high speeds, with spectral analysis of hydrodynamic coefficients and wave elevation revealing distinct periodic behavior in the time domain, while spatial analysis shows the formation of two characteristic gas entrainment bands: the upper frontal region dominated by jetting and spray phenomena, and the lower rear region featuring air tube and bubble formation, whose multiphase interactions substantially enhance flow unsteadiness and turbulent fluctuations, with these spatiotemporal characteristics being further quantified through comprehensive statistical and frequency-domain analyses.

Key words: ship wave; bow wave breaking; KCS model; statistical characteristic analysis; frequency analysis

作者简介

李心怡 女, 2001年生, 硕士研究生。主要从事艏波破碎计算及界面问题等研究。

王建华 男, 1988年生, 博士, 助理研究员。主要从事船舶计算水动力学、流-固耦合和运动界面问题的数值模拟、波浪中船舶操纵等研究。

万德成 男, 1967年生, 博士, 教授。主要从事船舶与海洋工程水动力学、流体力学有限元方法、流-固耦合和运动界面问题的数值模拟、拟小波高精度格式和强对流问题求解器的设计、移动网格技术、分块并行计算方法、计算流体力学软件集成与开发等研究。

*通讯作者: 万德成