

基于自适应直角网格的高速方尾船 气泡尾流模拟

杨玉肖, 刘 成*, 万德成

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 船海计算水动力学研究中心, 上海 200240)

摘 要

航行水面舰船的尾流中含有大量气泡。气泡尾流具有演化时间长、扩散范围广等特征, 对舰船的噪声、隐身性能等产生影响。这项研究通过自主开发的两相流求解器, 采用大涡模拟方法对方尾船后的近场尾流进行数值模拟。使用自适应直角网格方法进行动态网格加密, 通过几何 VOF 方法捕捉自由面和尾流中较大的气泡, 利用高阶浸入边界方法模拟方尾船体表面。通过对方尾船不同吃水深度下气泡尾流的模拟, 获得其形态特征。对尾流模拟数据进行时间平均和空间平均, 得到尾流两相混合区域的速度分布。使用自主开发的气泡识别程序, 获得尾流中气泡尺寸的分布和空间分布规律。

关 键 词: 方尾船; 气泡尾流; 自适应直角网格; 空气卷吸

中图分类号: U661.1

文献标志码: A

0 引 言

在航行过程中水面舰船尾部会形成含有大量气泡的尾流, 称为气泡尾流。船后气泡尾流的形成是船体各部分(包括裸船体、桨和舵等附体)与流体相互作用的结果。尾流中气泡来源主要有两个方面, 其一是在上游形成的气泡输运到尾流区域, 包括船首破波、船中破波、边界层空气卷吸等产生的气泡; 其二是在船尾及尾流区域形成的气泡, 主要有螺旋桨空化引起的气泡、船尾波破碎和卷吸时产生的气泡^[1-3]。已有的研究结果^[4-5]表明, 尾流中大尺度的气泡主要是由于尾流区域的卷吸和波浪破碎产生的。在多种因素的作用下最终在船后呈现一个复杂的尾流场, 在那里可以观察到自由面剧烈变形、液体射流、空气卷吸, 以及微观尺度上的气泡聚并、破碎和输运等现象。在尾流中因大尺度气泡群的存在而使得其声学 and 光学特性与周围流场显著不同, 容易被卫星探测和制导鱼雷识别、追踪, 从而影响舰船的隐身性能^[3, 6]。

方尾船型具有独特的水动力特性, 如高速时的减阻性能等。影响方尾船尾流的一个重要参数是吃水弗劳德数 Fr_T 。 $Fr_T = U / \sqrt{gT}$, 其中 U 为速度, T 为静水时尾部的吃水。随着吃水弗劳德数的增加, 方尾船的尾部会从湿润状态过渡到干燥状态, 尾流形态会发生巨大变化。为了获得方尾船尾流的数据, 已进行了大量模型试验^[7-9]和实船试验^[10-11]。然而研究气泡尾流的发展和演化需高精度的测量设备。而且由于设备安装等限制, 往往无法获得全流场的数据。

收稿日期: 2021-05-12; 修改稿收稿日期: 2021-08-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11902199); 上海市浦江人才计划 (19PJ1406100)

近年来数值模拟方法已应用于船舶气泡尾流的研究。RANS 方法^[12-13]可准确预测尾流整体形态、平均波高和阻力等信息,但是对于气泡等精细结构的模拟能力仍不足。直接数值模拟方法广泛应用于气泡等小尺度流动问题的研究,在波浪破碎的模拟^[14-15]中观察气泡和液滴的形成及其分布。另一个可行的方法是大涡模拟方法。Drazen 等^[4]使用大涡模拟方法针对 Fu 等^[8-9]的试验进行数值模拟,得到的尾流形态和试验吻合良好。Hendrickson 等^[16-17]将方尾船的尾部简化为立方体,忽略船首、船中等对流场的影响,基于隐式大涡模拟方法对气泡尾迹进行数值模拟,获得不同宽度和吃水比值下的尾流形态、气泡密度谱等信息。直接数值模拟在微观、小尺度问题的研究上具有显著的优势,但计算量较大。与直接数值模拟方法相比,大涡模拟方法的网格数量较少。而自适应网格技术还可进一步降低网格数量,只需要对关心区域动态加密。

本文重点关注方尾船尾流形态演化,以及在船尾波浪破碎、卷吸作用下产生的大尺度气泡的分布。受 Ghadimi 等^[13]、Hendrickson 等^[5, 16-17]对船舶尾流研究的启发,我们对问题作以下简化:不考虑螺旋桨、舵等附体的影响;忽略方尾船前半部分对含气率的干扰,假设来流到达船尾时为均匀的(不含有气泡),并将船尾简化为立方体。

基于自主开发的自适应直角网格求解器 BAMR-SJTU,使用大涡模拟方法对方尾船近场气泡尾流进行数值模拟,重点研究大气泡及较大尺寸空气团的卷吸。通过自主开发的气泡识别程序,计算气泡的空间分布和尺寸分布。

1 数值方法

1.1 控制方程

描述不可压缩两相流动积分形式的控制方程如下所示,控制体 Ω 被法向量为 \mathbf{n} 的边界 Γ 包围。

$$\int_{\Gamma} \rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} \, dS = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \mathbf{u} \, dV + \int_{\Gamma} \rho \mathbf{u} (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) \, dS = \int_{\Gamma} p \mathbf{n} \, dS + \int_{\Gamma} \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{n} \, dS + \mathbf{F}_g \quad (2)$$

式中, \mathbf{u} 和 p 分别为速度矢量和压力, \mathbf{F}_g 为体积力(重力), 应力张量 $\boldsymbol{\tau} = \mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)$, 密度 ρ 和动力黏度 μ 由下式计算得到:

$$\begin{aligned} \rho &= \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_g \\ \mu &= \alpha \mu_1 + (1 - \alpha) \mu_g \end{aligned} \quad (3)$$

式中, α 为相分数, 下标 1 和 g 分别表示液相和气相。本文重点关注尾流中的大尺度气泡的生成和发展过程,忽略表面张力的影响。

在 N-S 方程中使用二阶精度的投影法 (projection method) 解耦速度和压力。具体的求解步骤^[18]为: (1) 计算预测步的速度矢量 \mathbf{u}^n , (2) 通过压力 Poisson 方程求解压力梯度, (3) 通过压力梯度的修正得到满足不可压缩条件的 \mathbf{u}^n 。采用守恒格式的有限差分法离散控制方程,其中对流项的离散采用 5 阶 WENO 迎风格式处理,其他空间导数均采用二阶中心差分格式进行离散。在大涡模拟方法中,大于滤波器宽度的涡结构会被完全解析,而小尺度的涡结构则采用亚格子模型建模。亚格子应力的计算使用 Smagorinsky 涡黏度^[19]方法。

1.2 物面和自由面捕捉

在直角网格的基础上, 采用刘成等^[18]开发的高阶浸入边界法, 在 N-S 方程右侧添加一个与力有关的源项代替物体边界。通过符号距离函数追踪物面。采用移动最小二乘 (moving least square) 方法^[20]重构物面附近流场 \mathbf{u} , 用虚拟单元 (ghost-cell) 方法在靠近物面的固体单元一侧引入压力边界条件 $\partial p / \partial n = 0$, 构造精度为二阶。

对自由面的追踪采用几何 VOF 方法, 该方法具有较好的质量守恒性。由式 (4) 所示的输运方程计算界面的运动与变形。

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot \alpha \mathbf{u} = 0 \quad (4)$$

式中, $\alpha \in [0, 1]$, 为流体的体积分数。本文取 $\alpha = 1$ 表示液体, $\alpha = 0$ 表示气体。对于三维问题, 考虑用维度分裂法在 3 个方向上离散式 (4)。然而原来的连续性条件在单方向分裂后不再成立, 因此在实际计算时对式 (4) 作如下修改:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot \alpha \mathbf{u} - \alpha \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (5)$$

然后使用基于线性几何重构的半拉格朗日方法进行数值通量的计算^[21]。

为提高大密度比两相流模拟的鲁棒性, 借鉴 Rudman^[22]提出的满足质量和动量一致推进的通量计算方法, 形成基于交错网格 (staggered grid) 的大密度比气液两相流动高鲁棒模拟新技术, 能大幅提高剧烈、强非线性两相流动模拟的数值稳定性。

1.3 自适应直角网格

为了捕捉尾流中更加精细的气泡等小尺度界面结构, 需要采用更加精细的网格。由于气泡群在空间扩散, 使用传统的网格加密方法就必须加密大部分计算域, 使计算规模增大。本文采用刘成等^[20]开发的块结构化自适应直角网格技术对两相界面附近的网格进行动态加密, 能有效降低计算量。

在块结构化自适应直角网格求解器中以块 (block) 作为基本的操作单位。在计算开始时, 将计算域划分为相互不重叠的网格块, 且所有的块均为正六面体 (图 1(a))。处于不同加密等级的块具有相同的拓扑结构 (图 1(b)), 每个块由外部缓冲层 (buffer layer) 和中心计算区域组成。每个中心计算区域含有 n^3 个均匀直角网格 (图 1(c))。缓冲层网格主要用于相邻块之间的信息交换, 以及在计算域的边界上构造边界条件。缓冲层网格 (图 1(d)) 的大小和中心计算区域的网格相同, 其层数与数值格式的插值模板宽度有关。求解器在计算过程中以块为最小单元进行加密, 在本文模拟计算中设定每个块包含有 12^3 个均匀直角网格。

采用叉树结构生成网格块。在计算开始时, 计算域由若干初始块组成。随着计算的进行, 在需要加密的区域, 将 1 个父块分裂为 8 个子块 (三维情况), 对自由面、物面以及流动变化剧烈区域等设定相应的加密准则, 以进行自适应网格加密。在达到设定的最高加密等级以后停止网格细化过程。每个网格块存储自己块的中心坐标、父块块号、子块块号、邻居块号等, 上述信息构成了计算区域的网格存储数据结构。

胡一丁等^[23]、李政等^[24]以及刘成等^[25]的工作展示了自适应直角网格求解器在两相流问题和多尺度界面流动问题计算分析方面的优势, 为本文提供了良好的研究基础。

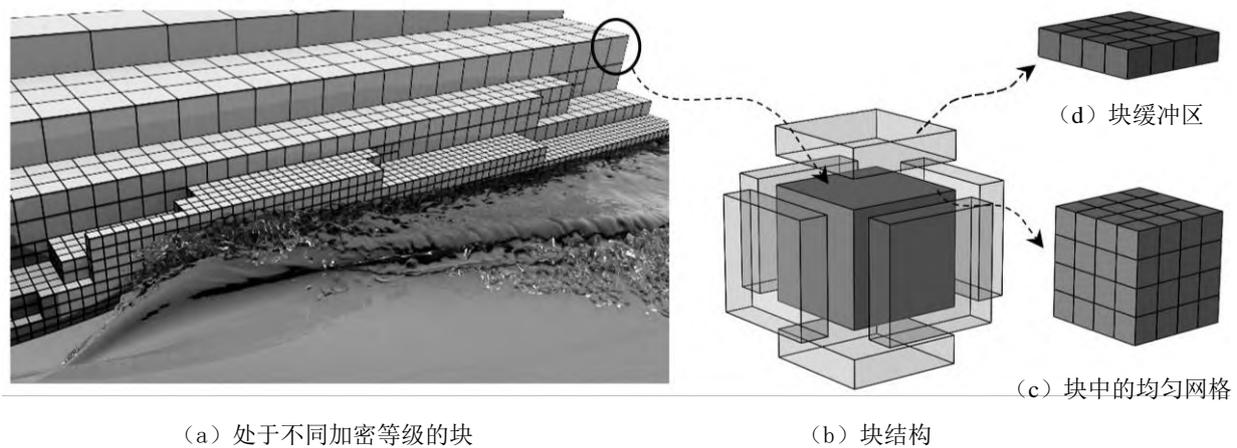


图1 不同加密等级的块及块中包含的网格

2 计算设置及网格收敛性验证

2.1 计算设置

将方尾船的尾部简化为立方体。如图 2 所示, 计算域长度 $l_1 = 5.4 \text{ m}$, 宽度 $b_1 = 1.8 \text{ m}$, 高度 $h_1 = 1.8 \text{ m}$, 其中静水面以下高度为 $h_2 = 1.046 \text{ m}$ 。方尾长度 $l_2 = 0.4 \text{ m}$, 半宽 $b_2 = 0.4 \text{ m}$, 吃水深度为 T 。将尾流方向设置为 x 轴方向, 原点设置在尾部。将方尾宽度方向设置为 y 轴方向, 原点设置在对称面上, 向左为正。竖直方向设置为 z 轴方向, 原点设置在静水面, 向上为正。对于计算域的边界条件, 在前方设置为均匀速度入口条件, 在后方设置为压力出口条件, 在左侧边界设置零速度梯度条件, 在上、下边界均设置为不可穿透滑移壁面条件, 右侧为对称边界条件。依据自由面位置和物面位置设定自适应加密准则, 在相界面、物面附近采用最精细的计算网格, 以确保小尺度流动结构能充分解析; 在对水、气两相掺混等流动特性影响较小的计算域, 如顶部气相区域和吃水较深的区域采用较粗的网格。

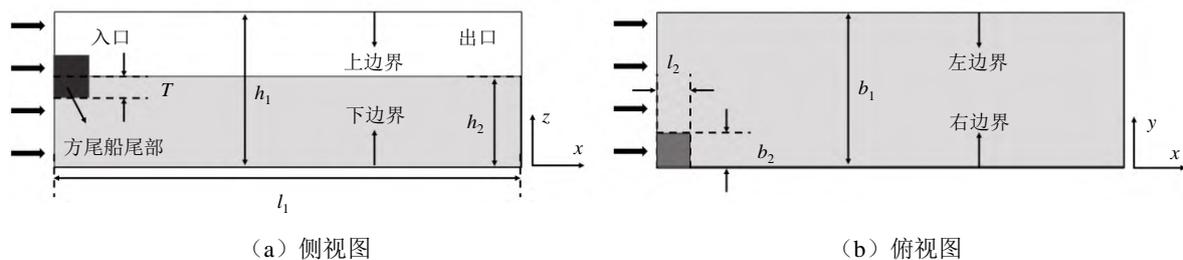


图2 方尾船尾流计算域设置

为研究方尾吃水深度对气泡尾流的影响, 尤其是在湿尾和干尾情况下尾流的差异, 选用两个吃水深度工况。算例 a(case a) 和算例 b(case b) 分别对应于吃水弗劳德数 $Fr_T = 2.14$ 和 $Fr_T = 1.75$, 来流速度都是 3.0 m/s 。

2.2 网格收敛性验证

选取自适应加密等级为 $L:2-4$ 、 $L:2-5$ 和 $L:2-6$ 这 3 种加密等级进行网格收敛性验证, 对应的最小网格尺度分别为 20 mm 、 10 mm 和 5 mm 。由于尾流中存在着大量的气泡和液滴, 在自由面附近出现一个较大的水、气混合区域。为了消除水、气混合区域对波高测量的影响, 用高度相关函数 H [16] 定义波高, 如式 (6) 所示。

$$H(x, y) = \int_z \bar{\alpha} dz \quad (6)$$

式中, $\bar{\alpha}$ 为对模拟数据时间平均之后的相分数。

在图 3 中展示了 3 种加密等级情况下尾流中心线处的时均波高, 其中 $\Delta H = H - H_s$, 此处 H_s 为静水面处高度函数。在静水面处定义 $\Delta H = 0$ m。可以看出, 网格加密等级在 $L:2-5$ 和 $L:2-6$ 时中心线处的时均波高已经收敛。在紧靠方尾后部的区域, 是一个包含大量气泡和液滴的水、汽混合区, 随着网格加密等级的提高, 可以解析到更多、更小的气泡和液滴, 这个区域的高度函数会随加密等级而变化。因此在计算资源允许的情况下, 本文选取自适应加密等级 $L:2-6$ 进行计算。

针对 Fu 等^[8-9]的方尾船试验工况, 选取相应的半宽 $b_2 = 0.75$ m, 速度 $U = 3.6$ m/s, 以及船尾吃水 $T = 0.3657$ m。不考虑船体的纵倾等影响因素, 对求解器进行验证。在图 4 中展示了尾迹中心线时均高度的试验值和模拟值的比较, 两者吻合良好。

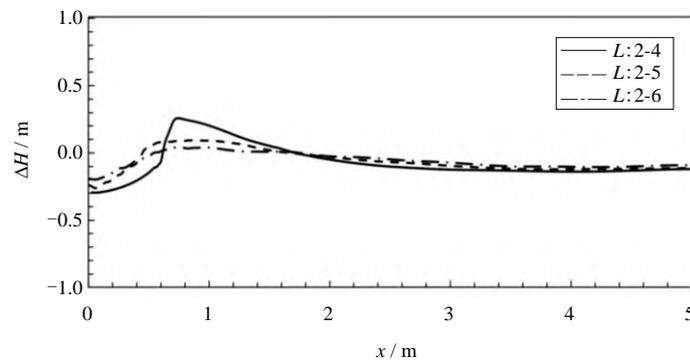


图 3 不同加密等级下尾流中心线的时均高度函数

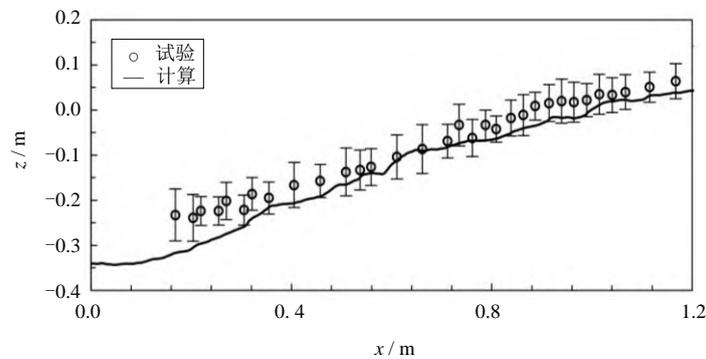


图 4 求解器验证: 中心线波高试验和模拟计算比较 (误差棒表示测量误差)

3 计算结果和讨论

3.1 尾流特征分析

含有气泡的尾流向两侧及下游扩散, 最终达到充分发展的状态, 尾流整体呈 V 型, 但是在局部伴随着自由面破碎和空气卷吸等现象。在图 5 中展示了两种工况下尾流的瞬时图像 (已经过对称处理)。在 case a 中方尾处于干燥状态, 即尾部断面完全暴露在空气中。在 case b 中方尾处于湿润状态。

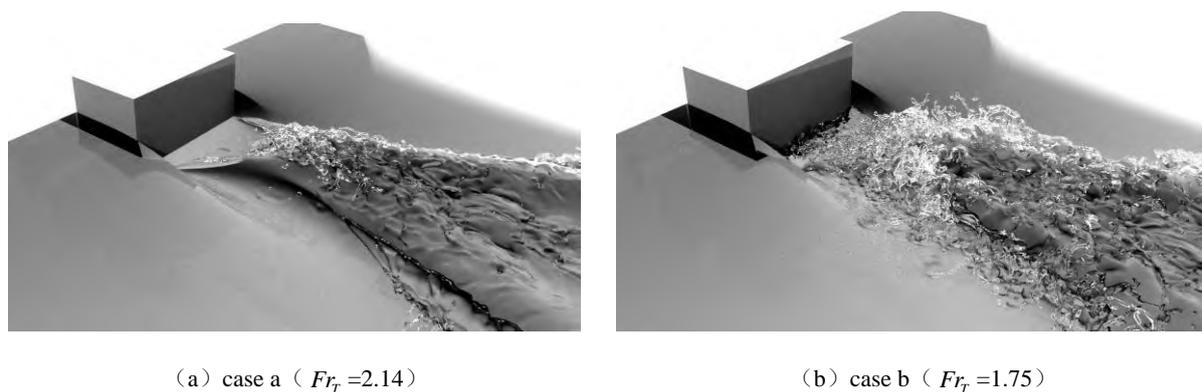


图5 方尾船尾流自由面瞬时图像（自由面选取相分数为0.5的等值面）

近场尾流可划分为3个特征区域，如图6所示。图中的上半部分对应于 case a，下半部分对应于 case b。从尾部向后分别是“空穴”区域，“鸡尾”区域以及“扩散”区域。图中的白色部分为尾流中出现的气腔、气泡和液滴。

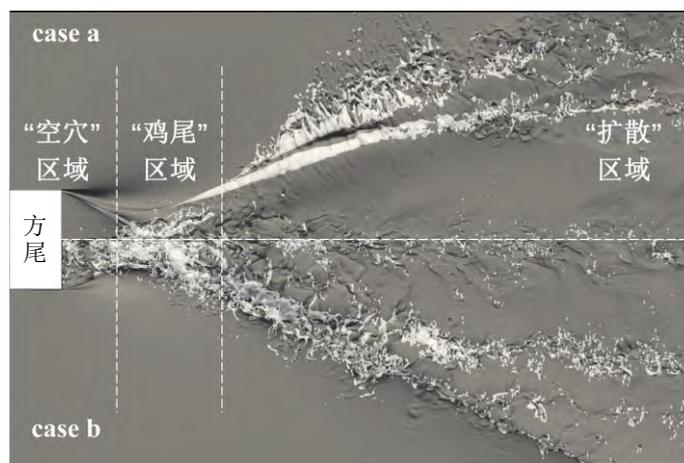


图6 方尾船尾流的3个特征区域（自由面选取相分数为0.5的等值面）

在吃水弗劳德数较高时，水流拥有足够的动能来克服黏性影响，迅速脱离船尾，使尾部完全暴露在空气中，形成干燥方尾状态。若保持船速不变，随着吃水深度的增加，吃水弗劳德数减小，来自方尾两侧和底部的水流不能完全脱离船尾，在通过方尾底部以后会迅速形成回流。最终水流在某个区域交汇，形成“鸡尾状”的水丘，该区域称为“鸡尾”区域。在方尾和“鸡尾”区域之间出现的一个低洼区，称为“空穴”区域，其长度与航速和船尾几何形状有关。来自方尾两侧的水流在“鸡尾”区域交汇以后，水流方向改变，开始向外扩展，形成“扩散”区域。

对比 case a 和 case b 的“空穴”区域可以发现，case a 的“空穴”区域自由面较为平滑，且可以观察到有向内侧翻卷的波浪，而在 case b 的空穴区域自由面附近伴随有大量的液滴和气泡。在“鸡尾”区域，由于水流之间强烈碰撞，形成了大量液滴以及气泡，且此处自由面高度与“空穴”区域相比明显提高。在“扩散”区域靠近船舶中心线的位置，自由面凸凹不平，且在外侧波峰附近形成强烈的波浪破碎，伴随有大量的气泡和液滴。case a 中的“扩散”区域表现为翻卷式破浪破碎，可以观察到波浪翻卷形成的完整气腔，气腔在向后发展时破碎，形成气泡，而在 case b 中主要表现为溢出式破浪破碎。

3.2 尾流场时均数据

对充分发展的尾流数据进行时间平均。在图 7 中展示了尾流中心线处时均高度沿尾流发展方向的变化。可以看出, 在紧靠船尾的“空穴”区域的上游端, 两工况具有相同的自由面高度, 然而在整个“空穴”区域内, case a 水面高度低于 case b; 在“鸡尾”区域 case a 的水面高度大于 case b, 这是由于方尾吃水深度的增加, 导致“鸡尾”区域水面高度降低。

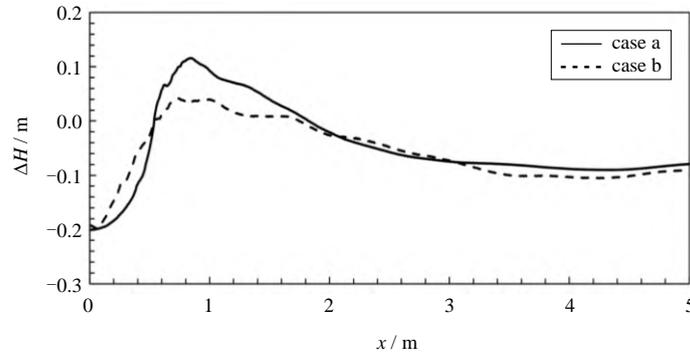


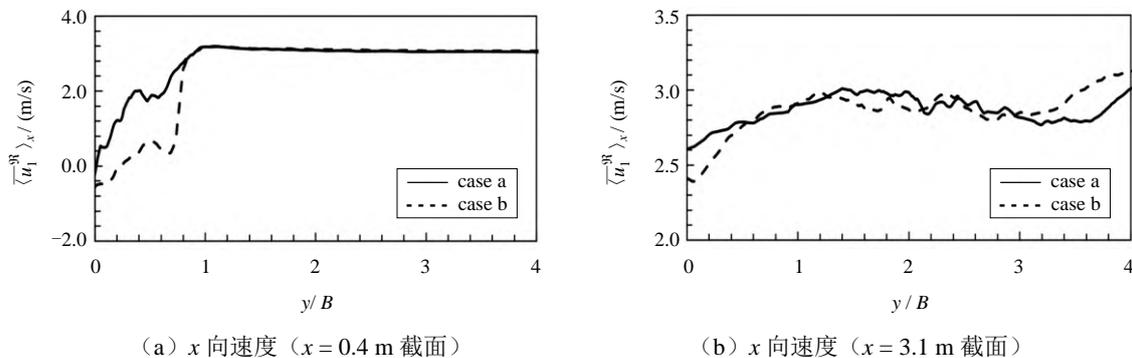
图 7 尾流中心线上水面时均高度

由于自由面破碎而形成的液滴以及空气卷吸形成的气泡, 在自由面附近构成两相混合区域。为了获得该区域速度分布的特征, 首先将气泡尾流的数据进行时间平均, 然后选取 $\alpha \in (0.05, 0.95)$ 定义水气两相混合区域 \mathfrak{R} , 并沿 z 方向对速度进行空间平均, 如下式^[17]所示:

$$\langle \bar{u}_i \rangle_z(x, y) = \frac{1}{Z^{\mathfrak{R}}} \int_0^{Z^{\mathfrak{R}}} \bar{u}_i(z; x, y) dz \quad (7)$$

式中, u_i ($i=1, 2, 3$) 为速度分量, \bar{u}_i 为两相混合区域内的时间平均速度, $\langle \bar{u}_i \rangle_z$ 为两相混合区域内的时间平均速度在 z 方向的平均, $Z^{\mathfrak{R}}$ 为两相混合区域的高度, 它是 x 和 y 的函数。

经过时间和在空间 z 方向的平均, 得到尾流混合区域平均速度沿 x 方向和 y 方向的分布。选取位于“空穴”区域和“扩散”区域中 $x = 0.4 \text{ m}$ 和 $x = 3.1 \text{ m}$ 的两个横截面, 观察速度沿 y 方向的变化, 如图 8 所示。在“空穴”区域, 由于方尾的阻挡, 在 $y/B < 1$ 时 (B 为方尾半宽), x 方向速度明显减小, 在尾流中心线处出现极小值, 表明在该处出现回流, 且 case b 中的回流区域较大, 回流速度较高, 这使得“鸡尾”区域高度较小 (参见图 6)。 y 方向和 z 方向速度沿中心线出现两个峰值 (图 8(c) 和图 8(e)), 它们对应于“空穴”区域波浪向内翻卷的位置。 y 方向速度在“空穴”区域和“扩散”区域出现反向, 即由原先的流向中心线, 在经过“鸡尾”区域的碰撞后, 变为离开中心线。 z 方向速度在“空穴”区域出现极大值, 它对应于“鸡尾”区域液面的快速抬升。



(a) x 向速度 ($x = 0.4 \text{ m}$ 截面)

(b) x 向速度 ($x = 3.1 \text{ m}$ 截面)

图 8 尾流中两相混合区域平均速度分布

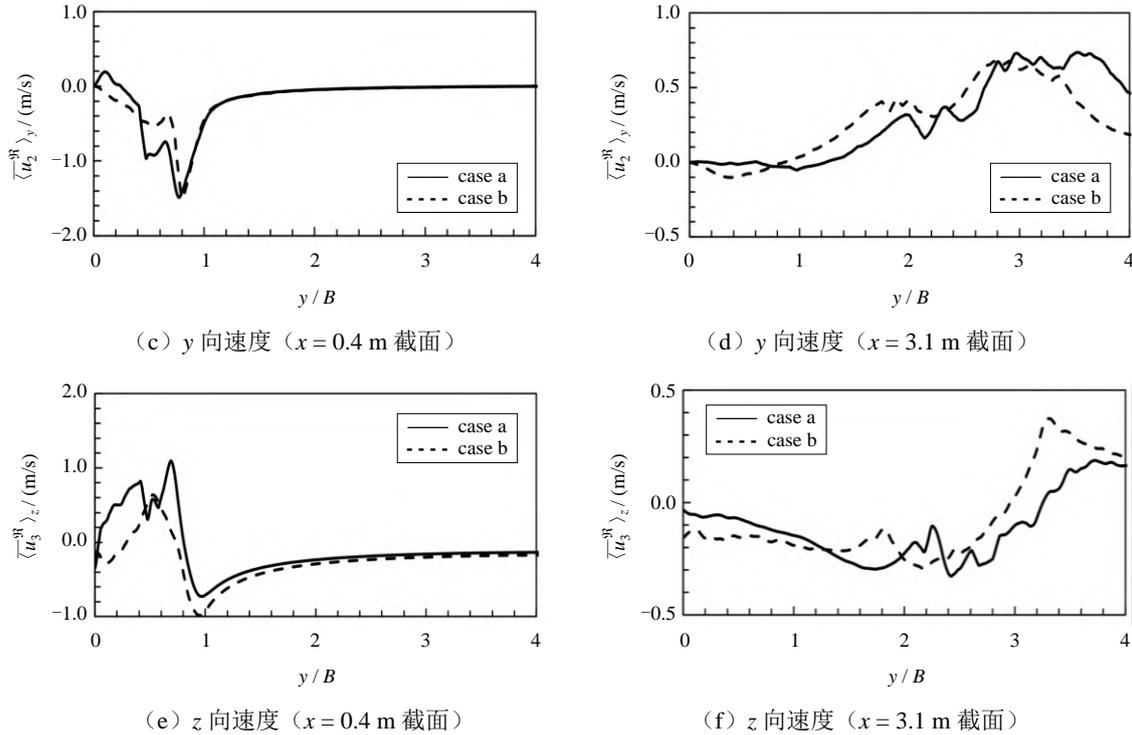
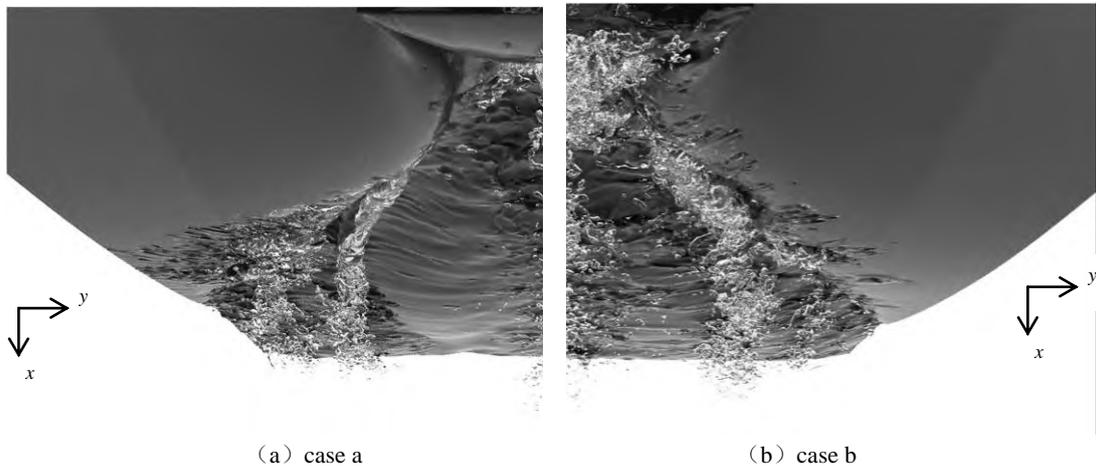


图 8 续 尾流中两相混合区域平均速度分布

3.3 尾流中气泡分布规律

利用气泡识别程序获得尾流中气泡的坐标和体积等信息。根据气泡体积 V_b ，计算其等效半径 $r_{\text{eff}} = ((3V_b)/(4\pi))^{1/3}$ 。

图 9 所示是两种工况下某一瞬时在自由面以下的尾流，展示了水中气泡的位置及其分布。使用气泡识别程序获得气泡的位置以及气泡等效半径，并绘制气泡的分布图，如图 10 所示。图中的一个圆圈表示一个个气泡，圆圈半径与气泡的等效半径相关，圆圈的重叠度越高，表示在该位置垂直方向分布的气泡越多。可以看出，尾流中气泡主要分布在两个区域：中心线附近以及“扩散”区域中发生波浪翻卷的地方。在“扩散”区域，气泡形成的主要机理是波浪的翻卷破碎。在中心线附近两工况气泡形成的机理不同。对于 case a，中心线附近的气泡主要是由“空穴”区域中的气腔在“鸡尾”区域碰撞产生的，因此在“鸡尾”区域之前基本上观察不到气泡。对于 case b，由于两侧和底部来流在方尾后回流的交汇而生成大量气泡。

图 9 自由面尾迹：水下视角（取相分数 $\alpha = 0.5$ 的等值面为自由面）

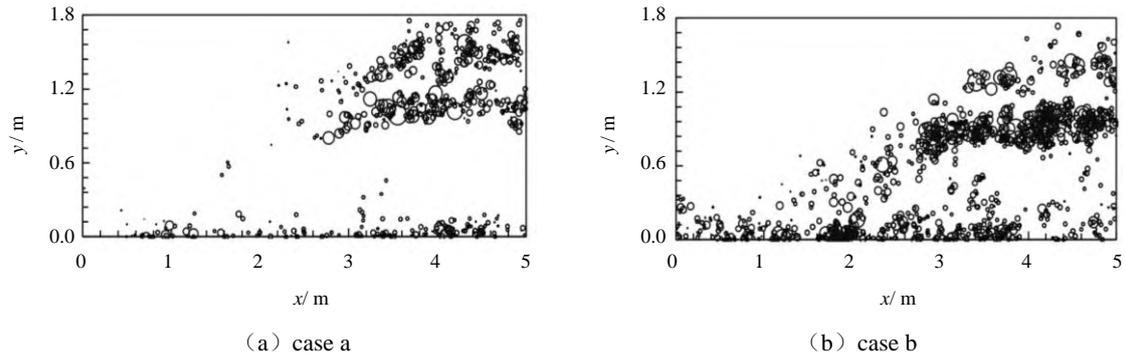


图 10 由气泡识别程序获得的尾迹中某一瞬时的气泡分布

在扩散区域波浪翻滚处存在两条较为明显的气泡带, 且气泡较大。而在尾流中心线区域, 较多的是小气泡。与 case a 相比, 在 case b 尾流区中的气泡数量更多。统计结果表明, case b 尾流区中气泡的平均数量是 case a 的两倍左右。

将计算域划分为一定数量的子区域, 用式 (9) 计算各子区域内气泡数量的时均百分比。对各子区域内气泡体积累加, 然后进行时间平均, 计算各子区域内气泡体积的时均百分比。

$$P_{\Delta} = \frac{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} n_{\Delta} dt}{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} N dt} \quad (9)$$

式中, P_{Δ} 为指定子区域内时均气泡数量占尾流中时均气泡总数量的百分比, n_{Δ} 为该子区域内时刻 t 气泡的数量, N 为时刻 t 尾流中气泡总数量。

在 x, y, z 这 3 个方向分别取间隔 $\Delta x = 0.2 \text{ m}$, $\Delta y = 0.1 \text{ m}$ 和 $\Delta z = 0.05 \text{ m}$, 对气泡在 3 个方向的分布进行时均统计, 如图 11 所示。计算结果表明, 尾迹中近场区域气泡数量和体积沿流动方向逐渐增加, 并且在“扩散”区域达到最大。与 case b 相比, case a 中的峰值位置偏后 (图 11(a) 和图 11(b))。y 方向的分布 (图 11(c) 和图 11(d)) 表明, 中心线附近的气泡数量较多, 而在远离中心线的地方, 气泡数量有两个峰值, 对应于“扩散”区域的两条主气泡带。z 方向的计算结果 (图 11(e) 和图 11(f)) 表明, 气泡数量和体积在 z 方向均为单峰分布。

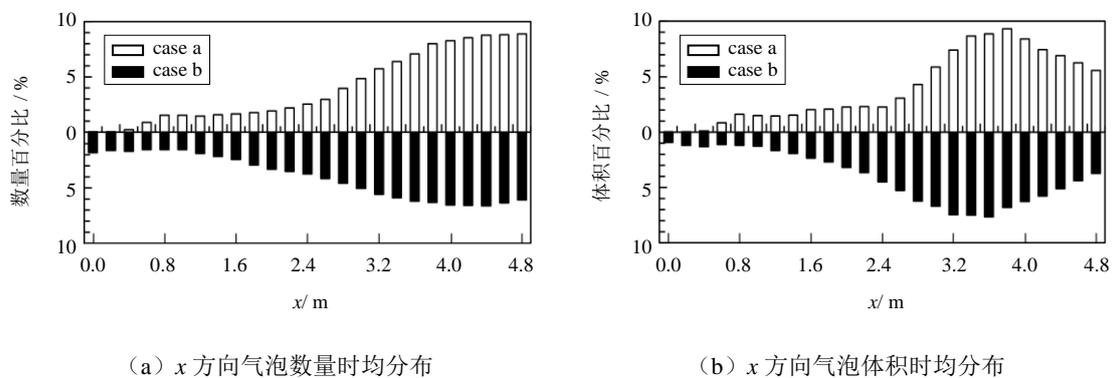


图 11 气泡数量和体积时均分布

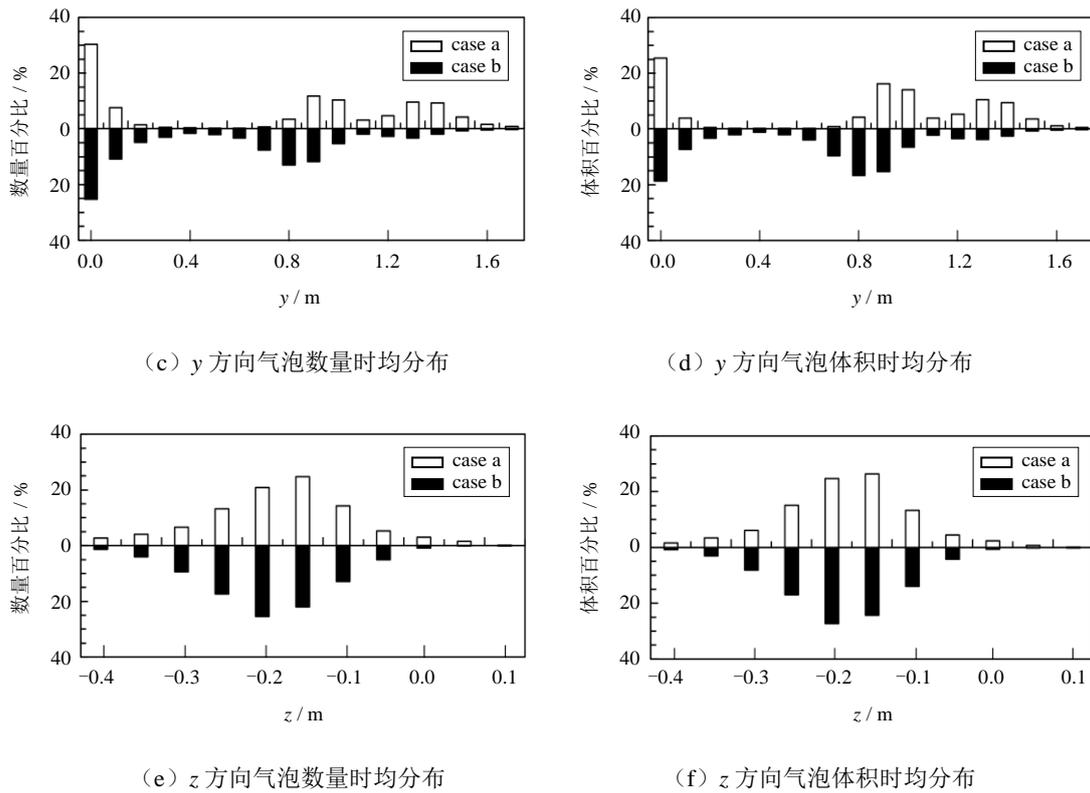


图 11 续 气泡数量和体积时均分布

气泡半径的时均统计, 用式 (10) 计算气泡尺寸的概率密度函数 (PDF)。图 12 所示为尾流区域中时间平均气泡尺寸的概率密度。

$$f_{\text{PDF}}(r_{\text{eff}}) = \frac{\bar{n}}{\Delta r_{\text{eff}} \bar{N}} \quad (10)$$

式中, \bar{n} 是在相应气泡半径区间内的时均气泡数量, \bar{N} 是尾流中气泡总数的时均值, Δr_{eff} 是指定的气泡半径区间。

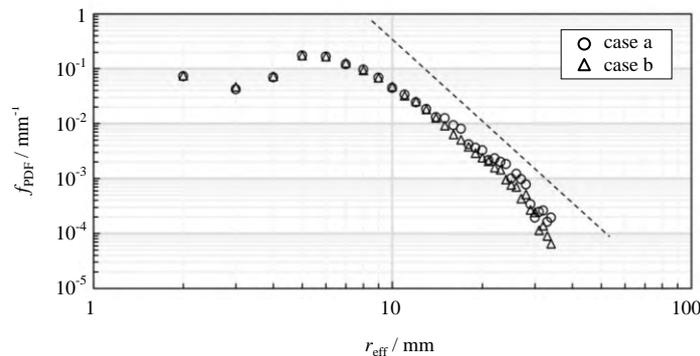


图 12 尾流中时间平均气泡尺寸的概率密度

统计结果表明尾流区域中气泡半径符合幂次分布规律, 即 $f_{\text{PDF}} \sim r_{\text{eff}}^{\beta}$ 。对于 case a, $\beta = -2.853$; 对于 case b, $\beta = -2.920$ 。 β 值与波浪破碎试验及直接数值模拟^[14-15]得到的结果 $\beta^* = -3.3 \sim -3.0$ 较为接近, 这进一步验证了数值模拟的可靠性。

4 结 论

本文基于自主开发的大密度比两相流自适应直角网格求解器, 对方尾船近场气泡尾流进行数值模拟, 并使用气泡识别程序获得尾流中气泡的坐标、等效半径等信息, 经过数据处理获得尾流中气泡分布规律。主要结论如下:

(1) 方尾船后的气泡尾流可大致划分为 3 个特征区域, “空穴”区域、“鸡尾”区域以及“扩散”区域。在速度一定时, 随着方尾船静吃水的变化, 其尾部会从干燥方尾过渡到湿润方尾状态。

(2) 尾流中的气泡主要分布在两个区域, 即尾流中心线附近以及“扩散”区域波浪翻卷部位附近。在干燥方尾状态下, 尾流中“扩散”区域的波浪翻卷位置附近会出现两条较为明显的气泡带, 而在紧靠船尾的“空穴”区域极少有气泡出现。然而在湿润方尾状态下紧靠船尾的“空穴”区域会有大量气泡产生。

(3) 尾流中气泡半径的分布大致符合幂次分布特征。由于中心线附近和波浪翻卷区域附近气泡产生的机理不同, 其尺寸分布有明显差异。中心线附近的气泡半径整体较小, 而“扩散”区域波浪翻卷附近的气泡半径整体较大。

(4) 自适应直角网格技术可较好地平衡计算量和计算精度。大密度比气、液两相流动高鲁棒模拟新技术可较好地捕捉尾流基本形态以及其中的气泡和液滴等小尺度结构。

以上结论仅针对具有较高的吃水弗劳德数的工况, 即方尾船的尾部为干燥状态或部分湿润状态。在吃水弗劳德数较小的情况下, 结论可能会不同, 这是今后要进一步研究的内容。

致 谢

本文工作得国家重点研发计划 (No. 2019YFB1704204, 2019YFC0312400) 和上海市浦江人才计划 (19PJ1406100) 的资助。在此一并表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] CASTRO A M, CARRICA P M. Eulerian polydispersed modeling of bubbly flows around ships with application to Athena R/V[J]. *International Shipbuilding Progress*, 2013, 60(1-4): 403-433.
- [2] LI Jiajia, MARTIN J E, CARRICA P M. Large-scale simulation of ship bubbly wake during a maneuver in stratified flow[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 173: 643-658.
- [3] ABBASZADEH M, ALISHAHI M M, EMDAD H. Experimental investigations on the bubbly wake of a transom stern model using optical laser beam scattering characteristics[J]. *Applied Ocean Research*, 2020, 104: 102380.
- [4] DRAZEN D A, FULLERTON A M, FU T C, et al. A comparison of model-scale experimental measurements and computational predictions for a large transom-stern wave[J]. *arXiv preprint arXiv:1410.1872*, 2014.
- [5] HENDRICKSON K, WEYMOUTH G, BANERJEE S, et al. Air entrainment and multiphase turbulence in the bubbly wake of a transom stern[J]. *International Shipbuilding Progress*, 2013, 60(1-4): 375-401.
- [6] 田雪冰, 顾建农, 张志宏, 等. 航速对舰船气泡尾流几何特性的影响[J]. *鱼雷技术*, 2010, 18(4): 268-271.
- [7] MAKI K J. *Transom stern hydrodynamics*[M]. Ann Arbor: University of Michigan, 2006.
- [8] FU T C, FULLERTON A M, RATCLIFFE T, et al. A detailed study of transom breaking waves[R]. Naval Surface Warfare Center Carderock Div Bethesda MD, 2009.
- [9] FU T C, FULLERTON A M, DRAZEN D, et al. A detailed study of transom breaking waves. Part 2[R]. Naval Surface Warfare Center Carderock Div Bethesda MD, 2010.

- [10] JOHANSEN J P, CASTRO A M, CARRICA P M. Full-scale two-phase flow measurements on Athena research vessel[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2010, 36(9): 720-737.
- [11] WYATT D C, FU T C, TAYLOR G L, et al. A comparison of full-scale experimental measurements and computational predictions of the transom-stern wave of the R/V Athena I[J]. arXiv preprint arXiv:1410.1810, 2014.
- [12] WILSON R V, CARRICA P M, STERN F. URANS simulations for a high-speed transom stern ship with breaking waves[J]. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 2006, 20(2): 105-125.
- [13] GHADIMI P, CHEKAB M F, DASHTIMANESH A, et al. Three-dimensional simulation of transom stern flow at various Froude numbers and trim angles[J]. *Progress in Computational Fluid Dynamics, an International Journal*, 2018, 18(4): 232-240.
- [14] WANG Zhaoyuan, YANG Jianming, STERN F. High-fidelity simulations of bubble, droplet and spray formation in breaking waves[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2016, 792: 307-327.
- [15] DEIKE L, MELVILLE W K, POPINET S. Air entrainment and bubble statistics in breaking waves[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2016, 801: 91-129.
- [16] HENDRICKSON K, WEYMOUTH G D, YU Xiangming, et al. Wake behind a three-dimensional dry transom stern. Part 1. Flow structure and large-scale air entrainment[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2019, 875: 854-883.
- [17] HENDRICKSON K, YUE D K P. Wake behind a three-dimensional dry transom stern. Part 2. Analysis and modelling of incompressible highly variable density turbulence[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2019, 875: 884-913.
- [18] LIU Cheng, HU Changhong. An efficient immersed boundary treatment for complex moving object[J]. *Journal of Computational Physics*, 2014, 274: 654-680.
- [19] XIAO Feng. Large eddy simulation of liquid jet primary breakup[D]. Loughborough University, 2012.
- [20] LIU Cheng, HU Changhong. Block-based adaptive mesh refinement for fluid-structure interactions in incompressible flows[J]. *Computer Physics Communications*, 2018, 232: 104-123.
- [21] GUEYFFIER D, LI Jie, NADIM A, et al. Volume-of-fluid interface tracking with smoothed surface stress methods for three-dimensional flows[J]. *Journal of Computational Physics*, 1999, 152(2): 423-456.
- [22] RUDMAN M. A volume tracking method for incompressible multifluid flows with large density variations[J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 1998, 28(2): 357-378.
- [23] HU Yiding, LIU Cheng, WAN Decheng. Numerical simulation of bow waves generated by a rectangular plate[C]// The 30th International Ocean and Polar Engineering Conference, 2020.
- [24] LI Zheng, LIU Cheng, WAN Decheng. Numerical simulations of droplet impact onto a pool surface[C]// The 30th International Ocean and Polar Engineering Conference, 2020.
- [25] LIU Cheng, LI Zheng, HU Yiding, et al. Numerical simulations of breaking waves based on block-structured adaptive mesh refinement[C]// The 30th International Ocean and Polar Engineering Conference, 2020.

Numerical Simulation of Bubbly Wake behind High-speed Transom Stern Based on Adaptive Cartesian Mesh

YANG Yuxiao, LIU Cheng^{*}, WAN Decheng

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

Abstract

Wake flow generated by a moving ship contains a large number of bubbles behind the stern. Many complex processes are involved in the bubbly flow, including wave breaking, air entrainment and two-phase turbulence, and will affect the stealthy and acoustic performance of the ship. In this paper, we study the bubbly wake of a transom stern by performing high-resolution large eddy simulation (LES) with block-based adaptive mesh refinement (BAMR) method. The geometric volume of fluid (VOF) method is used to capture the interface. An efficient immersed boundary method (IBM) is adopted to represent geometry of the transom stern. Wake characteristics and bubble's spatial distribution regularities are discussed in cases of dry-transom and wetted-transom with different draft.

Key words: transom stern; bubbly wake; adaptive mesh refinement; air entrainment

作者简介

杨玉肖 男, 1998年生, 硕士研究生。主要研究方向为船舶气泡尾流。

刘成 男, 1987年生, 副教授, 博士研究生导师。主要从事计算流体力学相关工作。

万德成 男, 1967年生, 教授, 博士研究生导师。主要从事船舶与海洋工程水动力学、数值水池等研究。

*通讯作者: 刘成