文章编号: 1000-4882 (2025) 01-0218-11

# 带自由面圆柱绕流局部涡旋结构和 空气夹带特性研究

#### 章文彬,赵伟文,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

基于计算流体力学方法,使用流体体积法捕捉自由面,应用嵌入边界法模拟曲面边界,依托自适应网格 加密框架 Basilisk 实现了带自由面的有限长圆柱绕流数值模拟与流场特性分析。将计算得到的圆柱周围波面 升高与试验结果和利用自研求解器 naoe-FOAM-SJTU 计算的数值结果进行对比,分析了带自由面有限长圆 柱绕流自由面特征随弗劳德数变化的关系,研究了波浪破碎与空气夹带特性,探讨了含气流场与圆柱绕流涡 结构生成的内在联系。研究表明,基于 Basilisk 求解器的数值模拟可以高效且准确地捕捉多相流复杂流场特 征,同时自由面的存在和高弗劳德数下的空气夹带显著改变了圆柱绕流的流动特征。

关键词:自适应加密;嵌入边界法;带自由面圆柱;含气流场;涡旋结构;空气夹带
 中图分类号:U661.1
 文献标志码:A

0 引 言

带自由面的有限长三维圆柱是海洋工程中的一类典型结构,广泛存在于 Spar 平台、TLP 平台、 漂浮式风机和圆筒型 FPSO (floating production storage and offloading)等海洋工程浮式结构物中。相 较于研究较为成熟的单相圆柱绕流<sup>[1-2]</sup>,带自由面的有限长圆柱绕流涉及多相流问题,受到自由面的复 杂特性影响,呈现与单相圆柱绕流截然不同的流动特性。此外,高雷诺数(*Re*)和弗劳德数(*Fr*) 下的带自由面圆柱绕流往往伴随波浪破碎和空气夹带等更为复杂的现象<sup>[3]</sup>,并出现与船体绕流类似的 开尔文兴波等现象<sup>[4]</sup>,研究这些现象可以为船舶性能研究提供有益参考。

目前,国内外学者针对带自由面圆柱绕流问题展开了数值模拟和试验研究。早期研究集中于低雷 诺数和低弗劳德数的工况。Kawamura 等<sup>[5]</sup>利用基于 Smagorinsky SGS 模型的大涡模拟(large eddy simulation, LES)研究了*Re* = 2.7×10<sup>4</sup>和*Fr* = 0.2,0.5,0.8三个工况下的带自由面圆柱绕流问题。结果 表明在低*Fr*条件下,自由面变化较小,对绕流特征的影响基本可以忽略。随着*Fr*增大,自由面变化 逐渐显著且趋于不稳定,自由面附近绕流涡脱落现象受到自由面的抑制。Suh 等<sup>[6]</sup>基于 LES 方法和正 交曲线网格求解器研究了低*Re*和低*Fr*条件下的带自由面圆柱绕流中自由面对垂直涡脱落的抑制问 题,远离自由面处有规律的涡脱落被自由面附近的小尺度涡替代,研究认为自由面附近出现的流向涡 结构和向外的横向速度导致了流动分离区域的增大,从而抑制了涡脱落现象。岳永威等<sup>[7]</sup>应用

收稿日期: 2024-06-11; 修改稿收稿日期: 2025-01-08 基金项目: 国家自然科学基金项目(52131102)

CFX 软件和RNG *k*-ω湍流模型研究了一系列不同雷诺数、弗劳德数和直径的具有自由面效应的圆柱绕流,重点关注了自由面对圆柱绕流水动力特性的影响,发现三维圆柱总时均阻力系数和相同水深处各截面的时均阻力系数随*Fr*和*Re*的增加而减小。近年来,也有一些学者开展了高雷诺数和高弗劳德数下圆柱涡流的研究。Ageorges 等<sup>[3]</sup>利用模型试验分析了高*Re*和高*Fr*下带自由面圆柱绕流的空气夹带现象,得出了尾迹中涡旋结构卷入和圆柱后方自由面变化形成两个空腔的空气夹带的机理,研究还发现,存在空气夹带时,绕流阻力系数有一定的下降。Koo 等<sup>[4]</sup>利用 LES 和 CLSVOF(coupled level set and volume of fluid)方法研究了不同雷诺数和弗劳德数下的带自由面圆柱绕流的流场,并重点关注了雷诺数和弗劳德数变化对流场的影响,研究表明,*Fr*变化对自由面结构有更显著的影响。在*Fr*=1.24, 1.64两个工况下,出现了显著的首波破碎,并且在尾流区观察到了更小的水-气两相结构,如飞溅液滴和气泡等。

为了更好地捕捉精细化流场,深入分析带自由面有限长圆柱绕流局部涡旋结构、波浪破碎和空气 夹带等复杂含气流场特性,本文采用基于 Basilisk 框架<sup>[8]</sup>的自适应网格加密技术提高局部网格分辨 率,结合几何 VOF 方法<sup>[9]</sup>和嵌入边界法<sup>[10-11]</sup>模拟固-液-气三相边界,实现对高*Fr*和*Re*下复杂含气流 场的高精度模拟,并与模型试验结果<sup>[12]</sup>和基于 naoe-FOAM-SJTU 的数值结果<sup>[13]</sup>对比,对比*z*=0*D*和 *z*=1*D*两个剖面的自由面变化,验证了数值方法的可靠性。在此基础上,通过改变来流速度,实现不 同*Fr*下的带自由面圆柱绕流模拟,并分析了*Fr*对绕流流场特性的影响,然后分析了高*Fr*条件下的流 场空气夹带机理以及空气夹带与局部涡旋结构的关系。

1 数值方法

#### 1.1 控制方程

不可压缩两相流的 Navier-Stokes 方程可以写为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{u}) = 0 \tag{1}$$

$$\rho\left(\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t} + \boldsymbol{u}\left(\nabla \cdot \boldsymbol{u}\right)\right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \boldsymbol{u} + \rho \boldsymbol{g}$$
<sup>(2)</sup>

式中, $\rho$ 为流体密度,t为时间,u = (u,v,w)为流体速度,p为流体压力, $\mu$ 为流体动力黏度,g为重力加速度。

对于水气两相界面,采用动量守恒的流体体积(volume of fluid, VOF)方法捕捉界面,界面法线 方向由 MYC(mixed youngs centered)方法计算。定义由位置和时间决定的水体积分数场 $\alpha = \alpha(x,t)$ ,则混合流体的密度和黏度可分别表示为

$$\rho(\mathbf{x},t) = \alpha(\mathbf{x},t)\rho_{\rm w} + (1 - \alpha(\mathbf{x},t))\rho_{\rm a}$$
(3)

$$\mu(\mathbf{x},t) = \alpha(\mathbf{x},t)\mu_{\rm w} + (1 - \alpha(\mathbf{x},t))\mu_{\rm a} \tag{4}$$

式中, $\rho_w$ 和 $\rho_a$ 分别为水和空气的密度, $\mu_w$ 和 $\mu_a$ 为动力黏度。

自由面演化通过对流方程给出:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \boldsymbol{u}) = 0 \tag{5}$$

#### 1.2 自适应网格加密技术

自适应网格加密技术是一种新兴的网格建立技术,该技术简单省时,在划分局部网格分辨率高的 同时保持较高的计算效率,在带有水、气泡混合流动的复杂流场模拟分析划分中优势显著。本文数值 模拟采用了 Basilisk 开源求解库中的八叉树自适应直角网格加密技术进行网格划分,在计算过程中, 根据速度场梯度和体积分数场梯度这两个加密准则和小波分析的方法对网格进行动态加密。图1所示 为八叉树自适应网格加密的示例。



图1 自适应网格加密示例

#### 1.3 嵌入边界法和物面边界条件

不同于贴体网格,直角网格单元与计算域中的物面相交,因此需要对控制方程进行额外处理来模拟固体边界的存在。本文采用了 Basilisk 框架中植入的嵌入边界法(embedded boundary method)模拟 固体边界。嵌入边界法又称切割单元法(cut-cell method),是一种通过计算网格单元中的固体体积分数和界面位置并插值施加边界条件来处理不规则物面边界的方法,具有二阶精度和守恒的特性,可以 得到锐利的固体边界,适合高精度的流场模拟。

为应用嵌入边界法,首先需要计算单元中的固体体积分数*C*<sub>s</sub>。以二维为例,首先定义一个带符号的函数φ(*x*)并施加在笛卡尔网格的所有顶点上,如图 2(a)所示,规定固体内部φ<0,外部φ>0。接着确定网格单元每个边界上的线分数λ<sub>a</sub>,代表该条边上的固体范围。

$$\lambda_{d} = \frac{1 - \operatorname{sgn}\phi_{1}}{2} + \operatorname{sgn}\phi_{1}\frac{\phi_{1}}{\phi_{1} - \phi_{2}}, \quad \phi_{1} \cdot \phi_{2} < 0$$
(6)

式中, d代表上下左右四条边, sgn代表符号函数,  $\phi_1 和 \phi_2$ 为任意两个顶点的值。



图 2 二维网格固体体积分数计算示例

通过所有边界上的线分数,计算得到界面法向 $n_s$ 和固体体积分数 $C_s$ :

$$\boldsymbol{n}_{\rm s} = -\left(\sum_{d} \lambda_d \boldsymbol{n}_d\right) / \left| \sum_{d} \lambda_d \boldsymbol{n}_d \right| \tag{7}$$

$$C_{\rm s} = F(\boldsymbol{n}_{\rm s}, \lambda_d) \tag{8}$$

式中, n<sub>d</sub>为每个边界的法向量, F为预置的函数。

在计算得到单元内界面的基础上,为了在界面上施加无滑移边界条件,需要利用周围网格单元的 速度进行插值,求出界面上各维度的速度梯度。以*x*轴方向为例,可以用式(9)进行插值:

$$\nabla u_x|_{n_{\rm S}} = \frac{1}{l_2 - l_1} \left( \frac{l_2}{l_1} \left( u_{x{\rm S}} - u_{x1} \right) - \frac{l_1}{l_2} \left( u_{x{\rm S}} - u_{x2} \right) \right) \tag{9}$$

式中, *l*<sub>1</sub>和*l*<sub>2</sub>分别为界面中心点和位于该点的界面法线与相邻流体单元连线的两个交点之间的距离 (图 3), *u*<sub>xs</sub>, *u*<sub>x1</sub>和*u*<sub>x2</sub>分别为界面中心点、交点1和交点2处的速度。其中, *u*<sub>xs</sub>即为物体自身速度,本文中*u*<sub>xs</sub>=0, *u*<sub>x1</sub>和*u*<sub>x2</sub>分别由相邻单元中心处的值进行三阶精度插值得到。



图 3 固体界面速度梯度计算

### 2 计算模型

#### 2.1 物理模型和计算工况

本文以直径D = 0.2 m,长径比L/D = 6,吃水为4D的有限长圆柱作为研究对象,计算域大小为 30 $D \times 13D \times 30D$ ,如图4所示。参考陈松涛等<sup>[13]</sup>的计算设置,水的密度 $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ ,动力黏度 为 $\mu_w = 1.14 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ ,空气的密度为 $\rho_a = 1 \text{ kg/m}^3$ ,动力黏度为 $\mu_a = 1.48 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 。Fr的大小由均 匀来流速度 $U_{\infty}$ 确定, $Fr = U_{\infty}/\sqrt{gD}$ 。本文共计算了4个工况,分别为Fr = 0.6, 0.8, 1.1, 1.3,对应  $U_{\infty} = 0.84$ , 1.12, 1.54, 1.82 m/s。上游入口处采用均匀来流速度入口边界条件,下游出口处采用压力出 口边界条件,其余面设置为默认的无滑移边界条件。



2.2 网格划分

采用自适应网格加密技术进行网格划分。初始时刻下,对圆柱附近的网格进行预加密,加密等级为*L*=10,如图5所示。在后续计算中,根据体积分数场和速度场进行网格自适应加密,最大加密等级为*L*=10,在三维计算中等效1024<sup>3</sup>的网格密度。图6所示为*Fr*=1.1工况下*t*=3.5 s时刻的瞬时网格加密情况,可以看到圆柱前方网格数较小,而后方网格数较大,能够在确保计算精度的前提下有效降低总网格数,提高计算效率。





图 6 t = 3.5 s 时刻网格划分(Fr = 1.1)

3 结果分析

#### 3.1 自由面变化分析

在*Fr*=1.1条件下,与模型试验结果<sup>[12]</sup>和基于 naoe-FOAM-SJTU 的数值模拟结果<sup>[13]</sup>进行比较。 *z*=0*D*和*z*=1*D*两个剖面的自由面变化情况如图 7 所示。从图中可以看出,本文使用自适应直角网格 计算得到的自由面变化峰值和趋势与模型试验结果和 naoe-FOAM-SJTU 计算得到的数值结果均吻合。 且相比于 naoe-FOAM-SJTU 的数值结果,在*z*=1*D*剖面波谷处的结果更接近于模型试验数据,说明了 基于自适应直角网格的数值方法可以更有效地捕捉自由面特性。



图 7 Fr = 1.1下自由面剖面图

当带自由面圆柱绕流的*Fr*变化时,圆柱周围的自由面变化情况明显不同。图8所示为不同*Fr*下 圆柱周围的自由面变化情况。在较低*Fr*下,圆柱前方的液面出现一定的抬升,后方液面出现一定的凹 陷,自由面受到干扰出现兴波现象;随着*Fr*的增大,圆柱前方抬升和后方凹陷均逐渐增大;在较高 的 *Fr*(*Fr*=1.1)下,初步出现了包含液滴飞溅和气泡夹带的自由面破碎现象,此外,在圆柱后方可以观察到一个弯月状尾兴波叠加区;在更高 *Fr*(*Fr*=1.3)下,自由面破碎现象更加剧烈,并出现了 类似于船首波破碎的现象,同时,尾部兴波叠加更加明显,并在此区域出现了波浪翻卷破碎的现象。



图8 不同Fr下瞬时自由面变化

进一步对不同*Fr*下*z*=0*D*剖面的自由面变化进行定量分析。Chaplin 等<sup>[14]</sup> 基于伯努利方程和试验 数据,描述了圆柱前方波面抬升高度的理论值。由于圆柱正前方驻点处的速度为0,在压力的作用下 波面被抬升,波面抬升高度*D*<sub>1</sub>与*Fr*的关系为

$$\frac{D_1}{D} = \frac{Fr^2}{2} \tag{10}$$

式中, *D*<sub>1</sub>/*D*可以被视作量纲一高度, 而*Fr*<sup>2</sup>实际包含了1/*D*项, 因此波面抬升高度*D*<sub>1</sub>不受圆柱直径的 影响。由于伯努利方程的适用条件为无黏流,式(10)在高雷诺数下适用。受到黏性作用的影响,波 面实际抬升高度比该理论预测值小。Keough 等<sup>[15]</sup>考虑了黏性效应的影响,结合拖曳水池模型试验数 据提出了修正模型:

$$D_1 = \frac{V^2}{2g} - C_{\rm dissp} V^2 \tag{11}$$

式中, $C_{\text{dissp}}$ 为黏性耗散系数,根据试验数据,取 $C_{\text{dissp}} = 0.005$ 。

图 9(a) 绘制了 4 个 *Fr* 下*z* = 0*D* 剖面的自由面峰值和谷值变化。从峰值结果可以看出,本文仿真 结果与理论较为吻合,在低 *Fr* 数下,更加符合标准伯努利方程导出的结果,而在更高的 *Fr* 数下,由 于首波破碎导致更强的能量耗散,结果更接近带耗散修正的方程。圆柱后方的自由面谷值*D*,变化更 加复杂,并非与来流速度呈正比。在Fr=0.6时,圆柱对自由面的扰动较小,并未出现明显的流动分 离现象(图 8(a));Fr增大到 0.8时,自由面变化增大,圆柱后方出现了明显的流动分离,使自由 面产生了一个较大的凹陷(图 8(b)),D2显著增大;Fr继续增大到 1.1时,虽然流动分离更加显著, 但由于自由面的效应,在圆柱后方产生了一个兴波区域和回流,此时回流恰好在圆柱尾端 (图 8(c)),因此D2增速放缓;Fr=1.3时,流动分离继续加大,而此时回流无法到达圆柱尾端,自 由面谷值D2增速重新增大。



图 9 不同 Fr 下z = 0D 剖面自由面峰值和谷值

#### 3.2 空气夹带与涡结构特性分析

在高 *Fr* 的条件下,带自由面圆柱绕流的空气夹带主要有3条途径:(1)通过圆柱前方的破碎波卷入;(2)通过圆柱后方自由面凹陷吸入;(3)通过尾流区的自由面破碎卷入。

图 10 所示为Fr=1.3下自由面的瞬时侧视图。从图中可以看出,气泡主要存在于圆柱正后方凹陷 自由面的周围以及尾流兴波叠加区的后方。其中,前一个区域的气泡数较少,运动速度较快,主要通 过圆柱周围产生的自由面破碎吸入;后一个区域气泡数较多,主要是尾兴波破碎后形成并卷入。由于 尾兴波破碎方向与流向相反,区域前端气泡速度较慢,并顺流向逐渐加速。



图 10 Fr = 1.3下自由面瞬时侧视图

图 11 所示为使用 *Q* 准则提取的涡结构瞬时图,取*Q* = 100等值面,并使用涡量模的大小进行染 色。从图中可以看出,圆柱下方自由端产生的卷拧状漩涡从端部脱落后不是简单的向后传播,而是斜 向上运动。从漩涡强度来看,强度较高的涡集中在圆柱后方和自由面附近。在尾兴波叠加的作用下, 尾流区产生了一些较大尺度的涡结构,但是这些涡的强度相对较低。



图 11 Fr = 1.3下 Q 准则瞬时等值面侧视图

图 12 所示为两个不同Fr下的涡结构分布与涡量强度对比。从图中可以看出, Fr=0.8工况下涡结 构主要出现在圆柱后方,主要由圆柱引起,在两侧开尔文兴波出现的位置基本保持了层流状态,且在 该Fr下几乎没有空气夹带的现象;在Fr=1.3工况下,圆柱后方的涡结构分布区域更窄,且在首波和 尾兴波两翼产生空气夹带的区域出现了大量的细碎涡。



图 12 不同 Fr 下的涡结构分布

图 13 所示为 Fr = 1.3 工况下的瞬时等值面局部细节图,该图更好地说明了局部涡结构与空气夹 带的关系。从图 13(a) 中可以观察到,圆柱前方的马蹄涡分布受到自由面剧烈变化的影响呈现十分细 碎的状态,细小漩涡存在的位置和出现空气夹带现象的位置一致,并一起向后运动。此外,在尾流区 域,空气夹带现象与细小涡结构同样呈现同步出现和发展的状态。从图 13(b) 中可以看出,涡结构在 尾兴波叠加区产生波浪破碎和空气夹带并向后发展,形成一系列卷拧状漩涡和流向涡丝,与 Stokes 波 浪破碎中观察到的涡结构十分类似<sup>[16-17]</sup>。这种同步关系进一步揭示了高 Fr 下空气夹带现象和气泡流 影响流场特征和能量耗散的机理。



(a) 圆柱周围

(b) 尾兴波区

图 13 Fr = 1.3下 Q 准则瞬时等值面局部

## 4 结 论

本文以带自由面圆柱为研究对象,利用自适应直角网格实现精细化的数值模拟,结合 VOF 法和 嵌入边界法准确捕捉自由面和固体边界,对带自由面圆柱绕流含气流场进行分析。在*Fr* = 1.1的工况 下将本文方法计算得到的自由面与模型试验结果和 naoe-FOAM-SJTU 数值结果进行比较,验证了计算 方法的可靠性。在此基础上,针对不同 *Fr*下的含气流场进行比较分析,得到结论如下:

(1)随着 Fr 增大,圆柱对自由面的扰动逐渐增大,在高 Fr 下可以观察到首波破碎和尾兴波叠加等与高速船兴波类似的现象。

(2) 在低 *Fr* 和高 *Re* 下,圆柱前方*z*=0*D*剖面处的自由面抬升峰值可以通过伯努利方程导出, 当 *Fr* 增大时,抬升峰值受到首波破碎的影响较理论值偏低;圆柱后方的自由面凹陷谷值变化更加复杂,在*Fr*=1.1时受回流效应的影响自由面谷值的绝对值减小。

(3)带自由面圆柱绕流的细小涡结构与空气夹带现象关系密切。高 Fr 下自由面的剧烈变化导致 空气夹带现象产生,同时在圆柱周围和尾兴波两翼处产生细碎涡结构与气泡同步发展,从而影响了圆 柱绕流流场特征。

#### 参考文献

- SINGH S P, MITTAL S. Flow past a cylinder: shear layer instability and drag crisis[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2005, 47(1): 75-98.
- [2] CATALANO P, WANG M, IACCARINO G, et al. Numerical simulation of the flow around a circular cylinder at high Reynolds numbers[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2003, 24(4): 463-469.
- [3] AGEORGES V, PEIXINHO J, PERRET G. Flow and air-entrainment around partially submerged vertical cylinders[J]. Physical Review Fluids, 2019, 4(6): 064801.
- [4] KOO B, YANG J, YEON S M, et al. Reynolds and Froude number effect on the flow past an interface-piercing circular cylinder[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2014, 6(3): 529-561.
- [5] KAWAMURA T, MAYER S, GARAPON A, et al. Large eddy simulation of a flow past a free surface piercing circular cylinder[J]. Journal of Fluids Engineering, 2001, 124(1): 91-101.
- [6] SUH J, YANG J, STERN F. The effect of air-water interface on the vortex shedding from a vertical circular cylinder[J]. Journal of Fluids and Structures, 2011, 27(1): 1-22.
- [7] 岳永威, 李梦阳, 孙龙泉, 等. 具有自由液面效应的圆柱绕流三维数值模拟[J]. 船舶, 2012, 23(4): 16-22.
- [8] POPINET S. An accurate adaptive solver for surface-tension-driven interfacial flows[J]. Journal of Computational Physics, 2009, 228(16): 5838-5866.
- [9] FUSTER D, POPINET S. An all-Mach method for the simulation of bubble dynamics problems in the presence of surface

tension[J]. Journal of Computational Physics, 2018, 374: 752-768.

- [10] JOHANSEN H, COLELLA P. A cartesian grid embedded boundary method for poisson's equation on irregular domains[J]. Journal of Computational Physics, 1998, 147(1): 60-85.
- [11] SCHWARTZ P, BARAD M, COLELLA P, et al. A cartesian grid embedded boundary method for the heat equation and Poisson's equation in three dimensions[J]. Journal of Computational Physics, 2006, 211(2): 531-550.
- [12] STERN F. Integrated high-fidelity validation experiments and LES for a surface-piercing truncated cylinder for sub-and critical Reynolds and Froude numbers[C]// AVT-246: Progress and Challenges in Validation Testing for CFD, Avila, 2016: 26-28.
- [13] 陈松涛, 赵伟文, 万德成, 等. 带自由液面有限长圆柱绕流数值模拟[J]. 中国舰船研究, 2022, 17(1): 91-98.
- [14] CHAPLIN J R, TEIGEN P. Steady flow past a vertical surface-piercing circular cylinder[J]. Journal of Fluids and Structures, 2003, 18(3): 271-285.
- [15] KEOUGH S J, KERMONDE I, AMIET A, et al. Time resolved measurements of wake characteristics from vertical surface-piercing circular cylinders[C]// Proceedings of the 20th Australasian Fluid Mechanics Conference. Perth, 2016.
- [16] WANG Z, YANG J, STERN F. High-fidelity simulations of bubble, droplet and spray formation in breaking waves[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2016, 792: 307-327.
- [17] ZHANG W, ZHAO W, WAN D. Flow characteristics and bubble statistics during the fragmentation process of the ingested main cavity in plunging breaking waves[J]. Journal of Hydrodynamics, 2024, 36(3): 546-555.

# Free Surface and Air Entrainment Analyses in Flow Past Surface-Piercing Circular Cylinder

ZHANG Wenbin, ZHAO Weiwen, WAN Decheng\*

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

#### Abstract

This paper employs computational fluid dynamics (CFD) methods, utilizing the volume of fluid (VOF) method to capture free surfaces and the embedded boundary method (EBM) to simulate curved solid boundaries. Based on the adaptive mesh framework Basilisk, numerical simulations and flow field characteristic analyses of flow around a finite-length cylinder with a free surface are realized. The wave elevation around the cylinder obtained from the calculations is compared with experimental results and numerical results computed using the self-developed solver naoe-FOAM-SJTU. The flow field characteristics around the cylinder under varying Froude numbers are analyzed, and the characteristics of wave breaking and cavity entrainment are studied, exploring the intrinsic connection between the airflow and the generation of vortex structures in the cylinder wake. The study demonstrates that the Basilisk solver can efficiently and accurately capture the complex flow field characteristics of multiphase flows with curved solid boundaries. Meanwhile, the presence of a free surface and cavity entrainment at high Froude numbers significantly alter the flow characteristics around the cylinder.

Key words: adaptive mesh refinement; embedded boundary method; free-surface cylinder; air-mixed flow; vortex structure; air entrainment

作者简介

章文彬 男,2003年生,本科生。主要从事基于自适应加密的多相流精细化模拟研究。 赵伟文 男,1990年生,助理研究员。主要从事高雷诺数流动、自由面流动数值方法和涡激运动数值模拟等研究。 万德成 男,1967年生,教授。主要从事船海计算水动力学、高性能计算、CFD和 CAE 软件研发等研究。 \*通讯作者:万德成