

基于重叠网格方法模拟物体入水

谢路毅, 张晓嵩, 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: 研究物体入水问题对船舶下水、子弹入水等实际问题有重要的指导作用, 物体入水问题涉及物体与水的相互作用, 物体入水瞬间会引起液面骤变, 入水过程伴随着液体飞溅、空泡等复杂的物理现象, 对物体入水问题的数值模拟可以预测砰击力的大小和物体入水后平衡位置, 为工程应用中的入水问题提供重要的理论依据。采用基于开源平台 OpenFOAM 开发的 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU, 结合重叠网格对方柱和圆柱入水的问题进行数值模拟。

文中先模拟了方柱入水问题, 将计算得到的方柱入水瞬间的砰击力进行定性的分析, 验证了求解器在模拟物体入水问题的可靠性, 随后模拟了圆柱高速入水问题, 得到了圆柱位移、受力以及详细的流场信息, 与已有实验结果吻合良好。本文的结果可为后续研究更加复杂的物体入水问题奠定基础。

关键词: 物体入水; 砰击; 重叠网格; naoe-FOAM-SJTU 求解器

1 引言

物体入水问题广泛出现在船舶、军事、航空等领域。物体入水时产生的水面砰击、液面飞溅及空泡等现象使得物体入水过程十分复杂, 因此要准确模拟物体入水问题具有一定的难度。国内外的学者们研究物体入水问题已有近百年的时间, 研究手段有实验方法、概率统计法、解析半解析方法和数值方法等, 其中常用的是实验方法和数值方法。

实验方法一直以来都是研究入水问题的重要手段, 许多学者通过实验方法观察物体入水时产生的物理现象, 根据实验结果总结出入水砰击力的近似公式, 同时为数值模拟提供可靠的数据。Worthington^[1]是最早开始用实验方法研究入水问题的学者之一, 他使用闪光拍摄技术, 观察了小球进入各种液体产生的液面飞溅和空泡等现象, 为之后入水问题的实验设计提供了思路和研究方向。Chuang^[2-3]对刚体和弹性体的入水冲击问题设计了模型试验, 并根据平底和 $10^\circ \sim 60^\circ$ 楔形体的自由落体入水实验数据总结出了砰击压力的近似公

式。黄震球等^[4-5]通过实验研究平底物体斜向入水,分析得出通过设置翼缘减小砰击力的方法,并根据实验结果总结出了一系列的入水砰击力公式。Chuang 的公式关注点在于楔形体角度变化时入水砰击力的变化规律,黄震球的公式针对平底物体以较小的斜向角入水的情况,根据使入水砰击力达到最大值的临界角将砰击力公式分成三段来描述砰击力的变化。通过实验结果总结的近似公式虽然无法精确地预测砰击压力结果,但也可以为定性分析砰击压力的数量级提供参考依据。Wei 等^[6]利用高速数字摄像机系统,针对不同密度、长径比的圆柱,做了一系列的高速入水实验,很好地记录了水平圆柱高速入水产生的自由液面的变化情况和水下空腔形状的演变,成功捕捉水平圆柱入水的三维效应,也为数值模拟入水问题提供了详细的实验数据。

随着计算机硬件的不断更新和计算流体力学的兴起,数值模拟成为研究物体入水问题的重要手段。数值模拟入水问题主要难点在于自由面位置的判断。体积函数法 (Volume of the fluid:VOF) 是由 Hirt 和 Nichols 于 1981 年提出的一种自由面捕捉方法,其思路简单、精度和计算效率较高,目前已为多种主流 CFD 商业软件如 FLUENT, Flow3d 和 Starccm+, 以及开源代码 OpenFOAM 和 Gerris 等所采用。VOF 方法被提出以来,许多学者使用该方法对物体入水进行数值模拟。Arai 等^[7]进行了楔形体、圆柱和船艏以恒定速度入水的数值模拟,结合实验数据,验证了 VOF 方法在模拟物体入水这种瞬态问题的可靠性。Xing-Kaeding^[8]使用 VOF 方法进行了二维圆柱体出入水模拟,得到了与实验较为接近的结果。陈宇翔^[9]应用 VOF 方法结合动网格技术,对零浮力的圆柱入水问题进行了数值模拟,成功捕捉了入水过程中形成的射流和自由表面形成的气垫等现象,结果与 Greenhow 等^[10]的实验结果相吻合。综合几位前人所做的工作,可见 VOF 方法在模拟物体入水问题时可以比较准确地捕捉到自由面的瞬态变化,因此本文选用 VOF 方法捕捉自由液面,使用 naoe-FOAM-SJTU 求解器,应用重叠网格技术实现入水物体在计算域内的大幅度运动,并且以较高的速度入水,选择 RANS 方程和 SST $k-\omega$ 两方程模型进行流场求解,并将结果与 Zhaoyu We 和 Changhong Hu^[6]设计的水平圆柱入水实验相比较,得出相关结论。

2 数值方法

本文的数值模拟采用基于开源软件 OpenFOAM 开发的船舶与海洋工程水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU。使用其中的重叠网格和物体多级运动模块,对圆柱和方柱的入水问题进行数值模拟。

2.1 控制方程

采用的控制方程是非定常两相不可压的 RANS 方程:

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (1)$$

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

式中： \mathbf{U} 为速度的矢量场； ρ 为流体（气体和液体）密度； P_d 为流体动压力，即 $P_d = P - \rho g x$ ； t 为时间； x 代表空间坐标； g 为重力加速度，大小取 $g = -9.81 \text{ m/s}^2$ ； f_σ 为表面张力项； μ_{eff} 为有效动力黏度，通过表达式 $\mu_{eff} = \rho(\nu + \nu_t)$ 确定，该式中的 ν 为运动黏度， ν_t 为涡黏度。

湍流模型采用 SST $k-\omega$ 两方程模型。该模型即在边界层的内部使用能够良好处理低雷诺数的 $k-\omega$ 模型，在边界层外部使用 $k-\varepsilon$ 模型。该模型可使计算不受自由面的影响，并且在壁面也可以保证计算精度。

自由面的捕捉采用 OpenFOAM 中自带的带有人工压缩相的 VOF (Volume of Fluid) 方法，两相的 VOF 输运方程为：

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U} \alpha) + \nabla \cdot [\mathbf{U}_r (1 - \alpha) \alpha] = 0 \quad (3)$$

式中： \mathbf{U}_r 为压缩界面的速度矢量场； α 为流体的体积分数，当 $\alpha = 0$ 时表示气体， $\alpha = 1$ 时表示液体， $0 \sim 1$ 之间则表示自由面。通过体积分数 α 将气体域跟液体域统一为一个流体域。

2.2 离散格式

本文所使用的 RANS 方程、流体体积输运方程以及湍流方程都使用有限体积法进行离散。采用 OpenFOAM 自带的离散格式对偏微分方程进行离散，时间项采用一阶隐式 Euler 格式，梯度项采用高斯线性插值格式，对流项采用二阶迎风格式，扩散项采用中心差分格式，VOF 方程中对流项采用 Van Leer 格式离散。速度和压力的解耦采用 PIMPLE 算法。PIMPLE 算法是 SIMPLE 和 PISO 算法的结合，在 PISO 的基础上对一个时间步进行多次迭代修正，取最后一次修正结果作为下一步的初始值，因此 PIMPLE 算法可以使用较大的时间步进行计算。

2.3 重叠网格方法

重叠网格方法是目前求解物体多级运动和大幅度运动问题的有效方法之一。其中心思想是将各部分物体的网格进行单独划分，并使各个部分的网格可以无约束地在计算域内部进行移动，利用重叠部分的网格以一定的插值形式进行流场信息交互，最终达到全流场计算的目的。重叠网格对比起传统网格最大的优势在于可以实现物体的大幅度运动，并且在运动过程中网格不会发生变形。

对于物体入水问题，由于物体运动幅度较大，而且涉及入水物体和背景的两级运动，所以使用重叠网格方法可以有效模拟物体入水问题。在物体入水问题中，连接远场与物体网格的背景网格是第一级网格，可以与背景网格进行无约束的六自由度运动的物体网格是第二级网格。

本文采用的求解器 naoe-FOAM-SJTU 在开源软件 OpenFOAM 的基础上自主开发了重叠网格和多级物体六自由度运动模块，可以对物体入水问题直接进行数值模拟。更加详细的重叠网格相关内容可以参考文献[11]。

3 计算域及网格布置

3.1 几何模型

表 1 是圆柱和方柱的模型参数，其中的 U_0 表示物体的初速度，D 表示初始时刻物体最低点距液面的垂直高度。

表 1 方柱和圆柱几何参数

	圆柱	方柱
直径/边长 (m)	0.05	0.1
高度 (m)	0.2	0.1
密度 (kg/m^3)	1370	500
U_0 (m/s)	6.18	0
D (m)	0.05	0.05

3.2 计算域和网格布置

计算域范围： $0 \leq x \leq 1.3, 0 \leq y \leq 1.4, -0.1 \leq z \leq 0.5$ ，如图 1 所示，顶端设置为大气边界条件，前后两个面为对称边界条件，左右及水池底端设置为固壁，圆柱表面为无滑移边界条件。方柱工况下的计算域和边界条件设置成圆柱相同，只将入水物体换成对应的方柱。方柱和圆柱的具体参数见表 1。

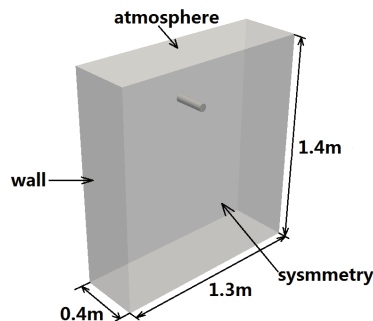


图 1 计算域示意图

网格的生成使用 OpenFOAM 自带的结构化网格生成工具 blockMesh。先后生成了背景网格和贴体网格，在自由面处和物体周围进行了适当加密。最终生成的网格数量如表 2 所示。

表 2 方柱和圆柱网格数量

	圆柱	方柱
背景网格 (万)	54.7	54.7
贴体网格 (万)	7.1	7.7
网格总数 (万)	61.8	62.4

生成的重叠网格效果图如图 2 和图 3 所示。蓝色的网格为插值边界单元，用于实现背景网格与贴体网格的流场信息交流，红色的网格为普通的活动单元，正常参与流场的计算。

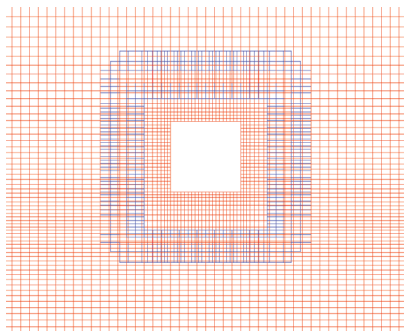


图 2 网格布置图(方柱)

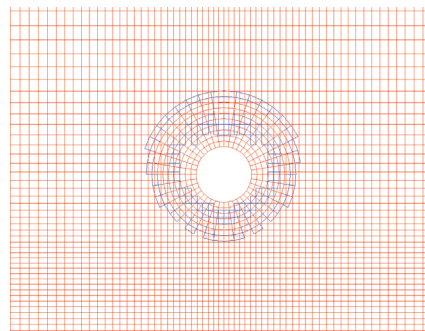


图 3 网格布置图(圆柱)

3.3 计算工况

方柱入水是为检验所使用的求解器在计算入水问题时的可行性而设置的工况，方柱的密度 $\rho=500\text{kg/m}^3$ ，在初始时刻从水面上方 0.05m 释放方柱，方柱的初速度设置为 0。

圆柱的密度为 $\rho=1370\text{kg/m}^3$ ，为了节约网格减少计算量，让圆柱最低点距自由液面的垂直距离为 0.05m 开始下落，并且使圆柱接触自由液面时的速度与实验值^[6]相同，为 6.22m/s。

4 结果分析

4.1 方柱入水结果与分析

方柱的入水过程经历了自由落体、与水面接触后开始做变加速运动和在水面做周期性垂荡运动三个阶段，其中与水面接触的瞬间受到了来自水面的砰击力，如图 5 的受力曲线所示，方柱的垂向受力都产生了大幅度的骤变。在方柱入水之后，开始在水面做垂荡运动。从图 4 的垂荡运动曲线可以看出，方柱在水面做幅度逐渐减小的周期性垂荡运动。

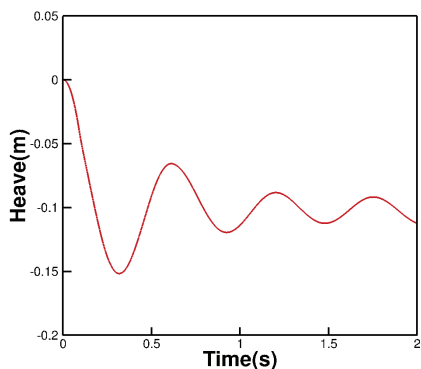


图 4 方柱垂荡运动曲线

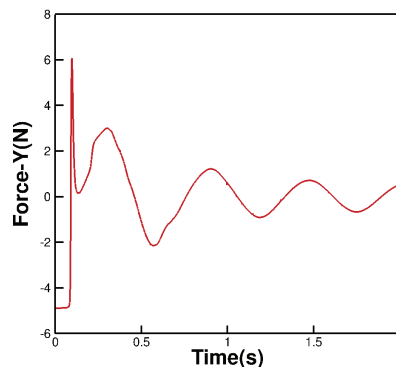


图 5 方柱垂向受力曲线

方柱入水的结果显示本文所使用的求解器在模拟物体入水问题时可以捕捉到物体低速入水瞬间的垂向受力骤变，以便后面模拟物体高速入水问题。

4.2 圆柱入水结果与分析

本节呈现三维水平圆柱入水的数值模拟结果，为了验证结果的可靠性，将数值模拟的结果与 Zhaoyu Wei 和 Changhong Hu^[6]的实验数据进行对比。图 6 是圆柱入水以后的位移情况与实验的对比曲线，可以看到位移情况与实验数据吻合良好，与实验结果的误差在合理范围内。图 7 是圆柱入水过程中的垂向受力曲线，从数量级上看，高速入水瞬间物体所受的冲击力远大于低速入水，而且冲击力作用时间极短，在圆柱完全入水之后，所受垂向力逐渐趋于平稳，随速度的降低逐渐减小。综合两张曲线图，从定性角度看圆柱的受力是符合物理规律的，加之圆柱位移与实验结果吻合较好，可以验证对圆柱高速入水的数值模拟可信度高。

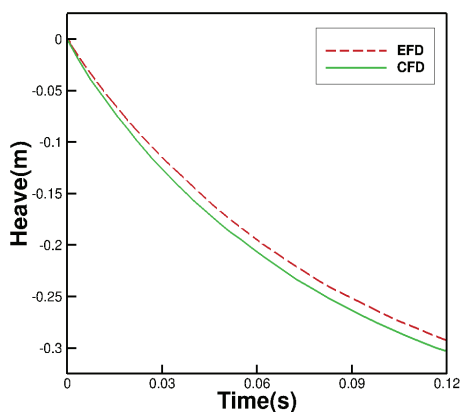


图 6 实验与数值模拟位移对比图

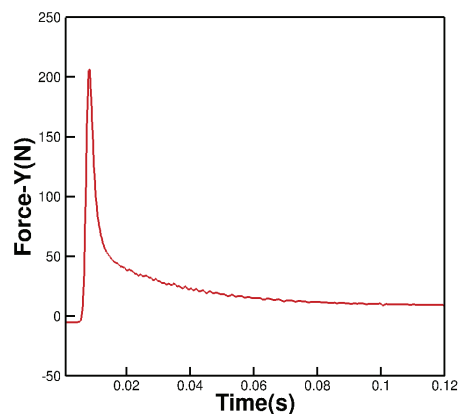


图 7 圆柱入水垂向受力曲线图

图 8 是空腔及自由液面形状的对比图，对比的对象是实验和 A. Iranmanesh^[12]所模拟的结果，展示了自由液面和水下空腔的演化过程。从数值模拟的结果中提取出流场中的水气交界面形状，与实验拍摄得到的空腔和自由液面情况进行对比。自由液面的整体形状大致相同，但数值模拟的自由液面变化不如实验结果剧烈。在实验图片中，液面飞溅形成的 crown（也就是液面飞溅较高的部分）液膜厚度非常小，进而导致水的体积分数 α 值非常接近于 0，由于网格尺寸及动量方程对流项离散格式精度的限制，数值模拟得到的飞溅 crown 形状与实验相比仍有差距，但也能够捕捉到液面飞溅到 crown 形成的过程。在水下，空腔的形状和大小都十分接近，从空腔开始形成到发展成即将与圆柱脱离的过程也基本和实验相同。

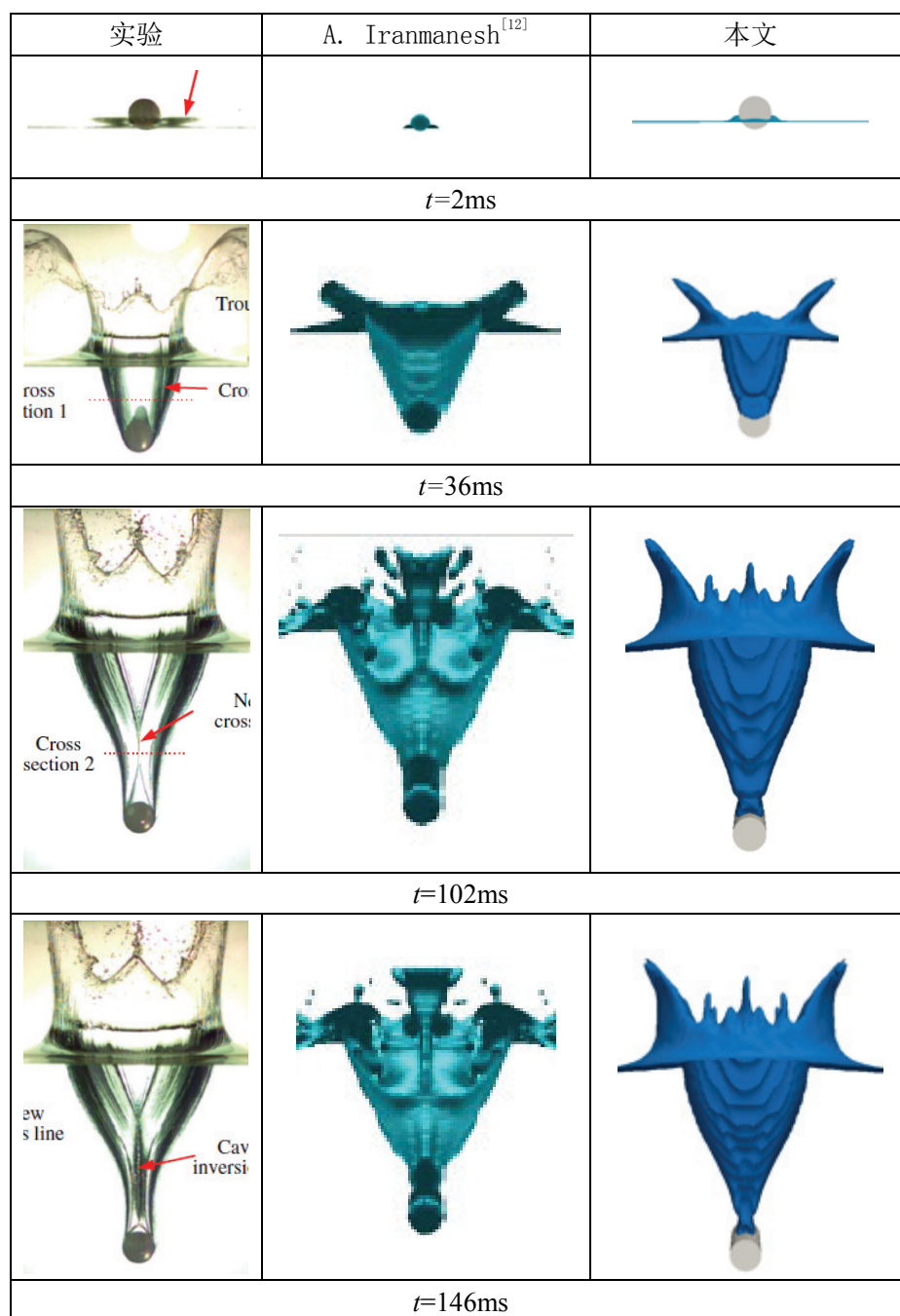


图8 数值模拟水气交界面与实验结果的对比

4.3 结论

本文以方柱和圆柱为研究对象，使用 RANS 方程和 SST $k-\omega$ 湍流模型，对物体入水问

题进行初步研究。对低速入水问题,本文以方柱为研究对象,目的在于定性地验证所使用的求解器和数值方法可以对物体入水问题中所出现的主要物理现象进行预测,模拟结果也证实了 naoe-FOAM-SJTU 求解器可以成功捕捉到方柱入水所受到的砰击力。对于高速入水问题,本文以圆柱为研究对象,受力情况从定性角度符合物理规律,位移模拟结果与实验数据对比吻合程度较高,并且没有呈现出误差继续增大的趋势。模拟得到的水下空腔形状和实验结果很相近,空腔从形成到与圆柱脱离的过程也基本一致,液面飞溅的形状与实验大致相符,但是飞溅的高度比实验结果更低,这是由于飞溅得到的液膜厚度太薄,在数值模拟中水的体积分数接近于 0,而本文控制方程中动量方程对流项的离散格式精度不足以捕捉液面飞溅形成的 crown,这也是以后在研究入水问题时可以改进的一个方面。

致谢

本文得到国家自然科学基金(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 Worthington A M , Cole R S . Impact with a Liquid Surface, Studied by Means of Instantaneous Photography. [Abstract][J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1900, 194:175-199.
- 2 Chuang S L. Experiments on flat-bottom slamming [J]. Journal of Ship Research. 1966,10:10-17.
- 3 Chuang S L. Investigation of impact of rigid and elastic bodies with water[R]. Naval Warfare and Marine Engineering, 1970.
- 4 黄震球, 张文海. 减小平底体砰击的试验研究[J]. 华中工学院学报, 1986(5):97-102.
- 5 李国钧, 黄震球. 平底物体对水面的斜向冲击[J]. 华中理工大学学报, 1995(S1):145-147.
- 6 Wei Z , Hu C . An experimental study on water entry of horizontal cylinders[J]. Journal of Marine Science & Technology, 2014, 19(3):338-350.
- 7 Arai M, Cheng L Y, Inoue Y. A computing method for the analysis of water impact of arbitrary shaped bodies (2nd report)[J]. Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 1995, 1995(177): 91-99.
- 8 XING-KAEDING Y , JENSEN G , PERIC M . Numerical simulation of water-entry and water-exit of a horizontal circular cylinder[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Hydrodynamics . Perth , 2004: 663-669 .
- 9 陈宇翔, 郜冶, 刘乾坤. 应用 VOF 方法的水平圆柱入水数值模拟[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011,

32(11):1439-1442.

- 10 GREENHOW M, LIN W M. Nonlinear free-surface effects: Experiments and theory. MIT report 83-19 [R]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1983.
- 11 沈志荣. 船桨舵相互作用的重叠网格技术数值方法研究[D]. 2014.
- 12 Iranmanesh A, Passandideh-Fard M. A three-dimensional numerical approach on water entry of a horizontal circular cylinder using the volume of fluid technique[J]. Ocean Engineering, 2017, 130:557-566.

Numerical simulation of water entry of cylinder and box square column based on overset grid method

XIE Lu-yi, ZHANG Xiao-song, 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, China)

Abstract: Research on water entry has an important guiding effect on ship launching and projectile water entry. The problem of water entry involves the interaction between objects and water. An object entering water will cause the liquid level to change suddenly, water entry is accompanied by complex physical phenomena such as splash and cavitation. Numerical simulation of the water entry problem of an object can predict the size of the slamming force and the equilibrium position of the object after it enters the water and provide important theoretical basis for water entry in engineering application. The main work of this paper is numerical simulation of water entry of cylinder and square column. First, square column water entry is simulated and qualitatively analyzes the slamming force on the square column entering water, which verifies the feasibility of the solver used in simulating the water entry problem. Then the cylinder water entry was simulated, the simulation results are in good agreement with the experiment. The solver used in this paper is naoe-FOAM-SJTU which is developed based on OpenFoam.

Key words: Water entry; Slamming; Overset grid; naoe-FOAM-SJTU solver.