

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2021.02.011

# 基于重叠网格方法模拟双圆柱入水过程\*

谢路毅, 曹留帅, 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, E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn)

**摘要:** 入水问题一直是水动力学研究的一个热点, 对入水问题的研究可以为船海工程中的船舶下水和兵器发射等实际问题提供有效的理论支撑。物体入水过程涉及到物体与水复杂的相互作用, 物体入水瞬间伴随着自由面大幅度的骤变, 还会有空泡等复杂现象出现, 因此模拟入水问题是验证数值方法准确性的一种有说服力的手段。该文进行的主要工作是使用 CFD 计算平台 naoe-FOAM-SJTU 的重叠网格功能, 模拟了圆柱入水过程。首先进行的是单圆柱入水的验证, 分别对三种不同长径比的圆柱进行入水模拟, 并与已有实验进行对比, 结果显示圆柱位移的时历曲线和自由面“皇冠”形状都与实验结果吻合良好, 验证了目前所使用的求解方法应用于圆柱入水问题时的正确性; 随后对双圆柱入水进行模拟, 研究了圆柱间距和入水速度等变量对入水过程的运动特性和流场特征的影响, 发现当圆柱入水速度增大时入水所受的冲击力会显著增大, 当圆柱间距减小, 双圆柱间会形成高压区域, 对圆柱的水平受力增幅明显, 高压区域对圆柱产生垂直向上的压力, 减小圆柱在入水过程的垂向速度。

**关键词:** 圆柱入水; 多体入水; naoe-FOAM-SJTU; 重叠网格方法

**中图分类号:** O357

**文献标志码:** A

## Simulation of twin-cylinder water entry process based on overset grid method

XIE Lu-yi, CAO Liu-shuai, WAN De-cheng

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

**Abstract:** The problem of water entry is a hotspot in hydrodynamic research. The study of water entry can provide effective theoretical support for practical issues such as ship launching and weapon launch in marine engineering. The process of object water entry involves complex interactions between the object and the free-surface. The instant the object enters the water

\* **收稿日期:** 2020-04-14(2020-05-08 修改稿)

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51879159)、国家重点研发计划项目(2019YFB1704200, 2019YFC0312400)和长江学者奖励计划(T2014099)

**作者简介:** 谢路毅(1996—), 男, 江西人, 硕士研究生。

**通讯作者:** 万德成, E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

**Received:** April 14, 2020 (**Revised** May 8, 2020)

**Project supported by foundations:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (51879159), National Key Research and Development Program of China (2019YFB1704200, 2019YFC0312400) and the Chang Jiang Scholars Program(T2014099)

**Biography:** XIE Lu-yi (1996—), Male, Master Candidate.

**Corresponding author:** WAN De-cheng, E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

is accompanied by a large sudden change in the free-surface, and complex phenomena such as cavitation appear. Therefore, the simulation of the problem of entering the water is a way to verify the accuracy of the numerical method. The main work of this paper is to use the overlapping grid module in the self-developed CFD solver naoe-FOAM-SJTU to numerically simulate the problem of water inflow into a cylinder. Firstly, the verification of water inflow into a single cylinder is performed. The results are in good agreement with experiments. Then, the double-cylinder water inflow simulation is performed, which reveals that the slamming force received by the water entering the cylinder will increase significantly when the water entry speed of the cylinder is increased. When the distance between the cylinders is reduced, a high pressure area will be formed between the double cylinders, and the horizontal force on the cylinder will increase significantly, and the high pressure area will produce vertical to the cylinder. The upward pressure reduces the vertical velocity of the cylinder in the process of entering the water.

**Key words:** Cylinder water entry; Multi-bodies water entry; naoe-FOAM-SJTU; Overset method

## 引言

物体入水在自然界以及工程实际都是十分常见的物理现象, 物体入水过程持续时间短, 引起的自由面形式变动非常大, 是自然界和船海工程中典型的非线性问题。物体在入水时伴随着液面砰击、液滴飞溅、气腔形成、气腔溃灭和空泡等一系列复杂的物理现象, 因此在研究物体入水过程需要考虑的因素众多, 是水动力学中一个很有挑战性的问题。

Worthington等<sup>[1]</sup>是最早为研究入水问题设计系统性实验的学者之一, 他使用了在19世纪较为先进的闪光拍摄技术, 观察到了圆柱体在进入多种液体时产生的空泡现象, 虽然对比起近期学者们的实验结果, 该实验参考价值有限, 但该实验所采用的研究思路被之后研究入水问题的学者们广泛借鉴, 其分析方法得到了长足的发展。

到了20世纪后半叶, 拍摄技术有很大的提升, 高速摄像机成为了研究入水问题更为可靠的工具。

20世纪后半叶, 学者们对此研究的焦点在于不同形状的物体入水时引起的物理现象。Greenhow等<sup>[2]</sup>通过高速摄像机观察了水平放置的圆柱体及楔形体的入水过程, 并对圆柱入水过程进行了密度比的参数研究, 记录了入水中的飞溅和空气垫效应。Chuang<sup>[3]</sup>针对 $10^{\circ}$ - $60^{\circ}$ 的楔形体和平底物体设计了入水实验, 并着重测算了入水过程中物体所受的砰击力, 利用回归思想, 总结出楔形体砰击力关于楔形体角度的表达式。同样以入水砰击力为研究焦点, 黄震球等<sup>[4]</sup>和李国钧等<sup>[5]</sup>通过实验测量平底物体入水砰击力, 为物体减小物体入水砰击力给出了一些可行方案。Speirs等<sup>[6]</sup>使用高速摄像机对不同直径的钢球进行入水实验, 得到了韦伯数和邦德数对球体入水所形成空腔的形状和维持时间的影响。

随着更加先进的DPTV(digital particle tracking velocimeter)技术和PIV(particle image velocimetry)技术被应用到入水问题的研究中, 使得物体入水过

程中的速度和压力等物理量可以直接测量, 入水问题也因此得到了更加深入的研究。Lin等<sup>[7]</sup>针对圆柱和平底物体入水问题, 结合DPTV技术设计了实验, 发现平底结构物在与水面接触后, 物体于水之间仍存在较薄的空气层, 压力分布较为均匀, 但气层会从物体边缘开始向中间溃灭, 所以会有明显的压力震荡, 而圆柱在入水过程中会发生明显的流动分离现象, 而且随着入水速度的增加, 物体表面的流动分离现象会提前发生。Panciroli等<sup>[8]</sup>使用PIV技术深入分析了楔形体自由入水过程, 对楔形体底角度数和入水速度进行了参数研究, 对比高速摄像机和DPTV技术, 该文章给出了大量关于入水过程物理量的定量结论。

实验方法对入水问题的研究给数值模拟提供可参考的结果, 数值模拟也由于其较低的研究成本在入水问题中得到了广泛的应用。研究入水问题的常用的数值方法有无网格粒子法、浸入边界法和重叠网格。

在无网格粒子法方面, 用于研究入水问题的有MPS和SPH两种方法。Khayyer等<sup>[9]</sup>采用多相可压缩MPS方法预报了平底物体入水时收到的砰击力, 预报结果与实验相吻合, 证明了MPS方法可用于模拟物体入水。陈翔等<sup>[10]</sup>使用MPS方法对二维楔形体的入水过程进行了模拟, 并通过MLM砰击模型验证了模拟结果的准确性。陈臻<sup>[11]</sup>使用改进的WCSPH模型对平底和底部带空腔的物体进行了入水模拟, 以底部形式为变量分析了入水砰击力的变化规律, 并总结了可降低物体入水砰击力的底部形式。

在有网格方法方面, 研究手段主要有静网格和动网格两种途径。自Peskin<sup>[12]</sup>提出静止笛卡尔坐标系下的浸入边界法以来, 浸入边界法就被广泛应用于物体入水问题。BAI等<sup>[13]</sup>使用浸入边界法模拟了二维矩形入水和出水过程, 得到了矩形入水和出水的速度压力场和较为理想的自由面形状。Zheng等<sup>[14]</sup>使用浸入边界法对三维楔形体不同姿态的入水过程进行了模拟, 姿态分为对称入水和不对称入水, 对压力和速度等物理量的时历变化进行总结, 结果与实验数据吻合良好。除了浸入边界法, 采用重叠

网格方法模拟物体入水也是常用方法之一,重叠网格方法优势在于可以根据需要设置各种复杂的入水工况,而无需对数值方法本身进行修改。Ma等<sup>[15]</sup>使用重叠网格方法进行了楔形体入水模拟,砰击力和自由面形状等指标与实验结果相吻合。

综上所述,目前研究入水问题的方法众多,数值模拟成本低,已被广泛应用,而重叠网格方法在研究复杂入水时的鲁棒性最佳,可用于模拟多体入水。本文基于重叠网格方法对单圆柱和双圆柱入水进行一系列的数值模拟,并将单圆柱入水的结果与WEI等<sup>[16]</sup>的实验数据进行对比,验证所用方法的准确性。再对双圆柱入水进行模拟,对圆柱间距和入水初速度给圆柱受力和运动造成的影响进行参数研究。

## 1 数值方法

控制方程采用的离散格式为有限体积法,选用PIMPLE对速度和压力进行解耦。

### 1.1 控制方程

本文所采用的控制方程为两相不可压缩的RANS方程

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

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

式中:  $p_d$ 为流体动压力,  $p_d = p - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}$ ;  $\mathbf{g}$ 和 $\mathbf{x}$ 为重力加速度和空间坐标的矢量,  $\mathbf{g}$ 取(0,0,-9.81 m/s<sup>2</sup>);  $\mu_{\text{eff}}$ 为有效动力黏度,根据公式 $\mu_{\text{eff}} = \rho(v + \nu_t)$ 求解,  $v$ 和 $\nu_t$ 分别为运动黏度和涡黏度,涡黏度通过湍流模型求解;  $f_\sigma$ 为表面张力项,在本文模拟入水问题中经过试算发现表面张力对结果的影响可以忽略不计,因此取 $f_\sigma = 0$ 。

### 1.2 湍流模型

本文采用的湍流模型为SST  $k-\omega$ 两方程模型。该模型使用混合函数分别处理近壁面和湍流区域,从而同时良好模拟全流场的各种流动。SST  $k-\omega$ 两方程模型的主要控制方程如式(3)-式(5)所示。

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U}k) = \tilde{G} - \beta^* k \omega + \nabla \cdot [(v + \alpha_k \nu_t) \nabla k] \quad (3)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U}\omega) =$$

$$\gamma S^2 - \beta \omega^2 + \nabla \cdot [(v + \alpha_\omega \nu_t) \nabla \omega] + (1 - F_1) CD_{k\omega} \quad (4)$$

$F_1$ 由混合函数确定

$$F_1 = \tanh \left\{ \min \left[ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\alpha_\omega^2 k}{CD_{k\omega}^* y^2} \right] \right\}^4 \quad (5)$$

湍流模型的主要方程中涉及大量经验参数,由Menter<sup>[17]</sup>提出且设计实验测算。

### 1.3 界面捕捉方法

对于入水问题,入水过程中水气交界面的“皇冠”形状是衡量模拟结果好坏的重要指标,根据前人研究的经验表明,流体体积法(volume of fluid, VOF)可以较好地捕捉物体入水时自由面的“皇冠形状”。式(6)为OpenFOAM中两相VOF方法的输运方程

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U}\alpha) + \nabla \cdot [\mathbf{U}_r(1-\alpha)\alpha] = 0 \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{U}_r$ 为压缩界面的速度矢量,  $\alpha$ 为相分数,  $\alpha=0$ 时代表气相,  $\alpha=1$ 时为液相,介于0-1之间时为水气交界面,也可大致代表物体入水问题中的自由面“皇冠”。

VOF方法在网格密度足够的情况下能有较高的模拟精度,并且在模拟中的质量守恒性良好,适用于入水问题的模拟。

### 1.4 重叠网格方法

入水问题尤其是多体入水问题涉及到物体的大幅度运动,目前研究入水问题虽然可用浸入边界法这一类较为巧妙的数值手段来解决物体的大幅度运动,但如果需要研究多体入水,还是采用重叠网格方法更为直接有效,因此本文采用了nao-FOAM-SJTU中的重叠网格模块。该模块可将分别形成的圆柱体和计算域网格通过SUGGAR++进行挖洞和插值单元形成等操作,最终合成一套重叠网格体系,体系中的两个或多个子单元间不存在相互约束关系,计算过程中不发生拓扑结构的变化,是研究多体入水问题最为直接有效和鲁棒性最强的方法之一。图1为单圆柱入水初始时刻的重叠网格。

图1中方形网格和圆柱轮廓状的网格重叠的区域为负责给两套子网格进行信息传递的插值单元,这些插值单元在不同的时刻会因周围网格的尺寸不同而发生动态变化,这部分网格不直接参与计算,而是通过插值的形式得到其它网格的流体信息,从而保证重叠网格计算结果中的流场连续性。

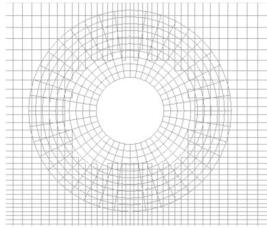


图1 单圆柱重叠网格示意图  
Fig.1 Overset grids of single cylinder

## 2 计算参数设置及结果分析

### 2.1 单圆柱计算参数及网格布置

本文研究的圆柱物理参数和工况与Wei等<sup>[16]</sup>相同, 实验初始时刻圆柱位于水面上方2 m, 让圆柱进行自由落体运动, 当圆柱接触水面时速度为6.25 m/s, 整个实验过程不对圆柱施加任何外力, 本文为了在模拟中节约网格, 将圆柱的起始位置设置为水面上方0.1 m, 速度设置为6.11 m/s, 与自由面接触时速度与实验一致, 具体参数见表1。

表1 圆柱基本物理参数

Table 1 The physical parameters of cylinder

圆柱长度 $H/m$	长径比(长度/直径)	质量/kg
0.05	1	0.135
0.10	2	0.269
0.20	4	0.538

在计算过程中, 不考虑圆柱产生的形变, 圆柱底部接触水面速度为6.25 m/s, 关于直径的弗劳德数

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gD}} = 8.89 \quad (7)$$

计算域方面,  $x$ 方向的宽度为0.6 m,  $y$ 方向的宽度为0.8 m,  $z$ 方向高度为1.2 m, 图2为计算域的三维示意图。如图中所示, 为更好地捕捉圆柱入水过程所形成的皇冠, 计算域中的网格朝圆柱的几何中心和自由面位置有明显的加密, 对三个不同的圆柱使用同一套计算域的网格, 计算域的网格量为144万。计算的时间步为0.000 1 s, 与实验结果对比发现该时间步下的模拟精度较高。

图3为长径比为4的圆柱为侧视图重叠网格分布情况。图4为重叠网格正面分布情况。由于在入水过程中在物体表面有较为剧烈的流场变化, 在剧烈变化的区域应避免网格之间的插值, 因此本文将插值单元也就是重叠区域的网格布置在物体网格的边缘。三个工况下圆柱虽然长度不一样, 但圆柱网格的边界设置相同, 因此网格量差距不大, 在10万到20万之间。

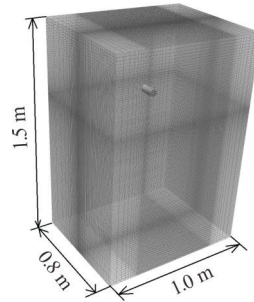


图2 计算域三维示意图  
Fig.2 3D Schematic of Computational Domain

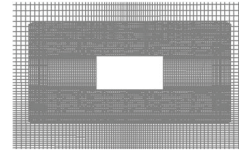


图3 圆柱周围重叠网格侧视图  
Fig.3 Overset grids around cylinder from the side

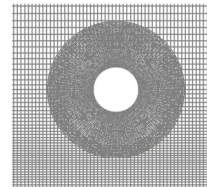


图4 圆柱周围重叠网格正视图  
Fig.4 Overset grids around cylinder from the front

### 2.2 单圆柱模拟结果及分析

入水物体的位移是衡量模拟结果好坏的指标之一, 三种工况下的圆柱长径比分别为1、2和4, 图5给出了这三种长径比的圆柱模拟的位移结果与实验数据<sup>[16]</sup>的对比曲线。图5中由上自下三个曲线图对应的圆柱长径比分别为1、2和4。从曲线中容易看到圆柱位移的模拟结果总体上虽略大于实验数据, 趋势与实验数据贴合较好。

表2中所列举的是三种工况下模拟结果和实验数据的相对误差, 表中呈现的相对误差由模拟时间段内的20个时间点的相对误差取平均值得到。表中相对误差值最大的工况的长径比为4, 数值约为9.52%, 误差值最小的工况是长径比为2的工况, 约为5.78%。

表2 圆柱基本物理参数

Table 2 The physical parameters of cylinder

长径比	相对误差/%
1	7.58
2	5.78
4	9.52

入水形成的飞溅“皇冠”形状也是评价模拟质量的关键指标。图6是本文模拟得到的“皇冠”形状的正视图和侧面视图。“皇冠”对应的是相分数 $\alpha=0.5$ 的等值面。图中左侧为长径比4的圆柱, 选取的对比时刻为圆柱底部接触水面后的146 ms, 中

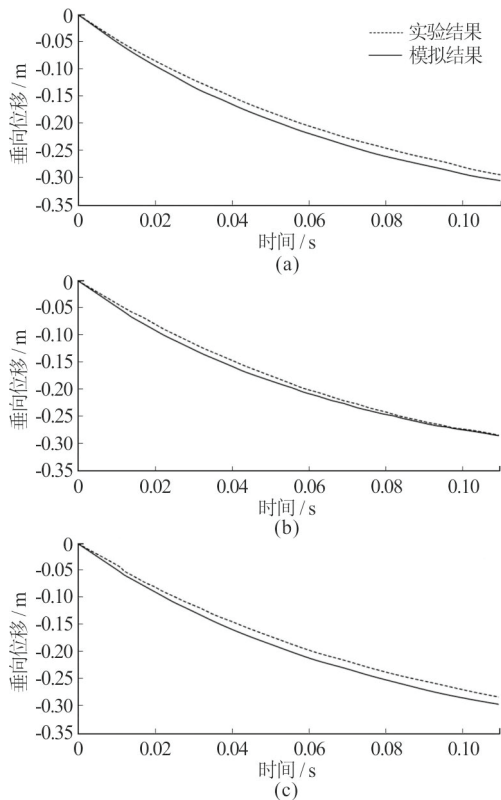
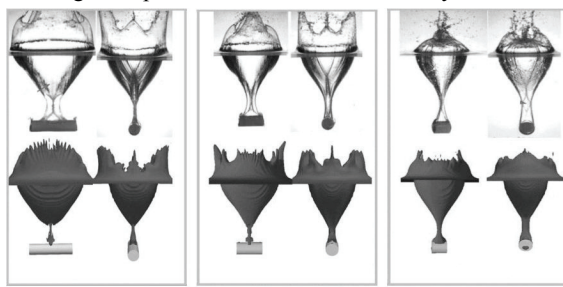


图5 单圆柱入水时历对比曲线  
Fig.5 Displacement curves of different cylinders



(a)  $H/D=4, t=146$  ms (b)  $H/D=2, t=124$  ms (c)  $H/D=1, t=106$  ms  
图6 单圆柱入水飞溅“皇冠”正面视图及侧面视图  
Fig.6 Splash crown from the front and side view of single cylinder

间圆柱长径比为2，选取的时刻为124 ms，右侧圆柱长径比为1，选取的时刻为106 ms。

从图中的对比情况可以看出，水气交界面的形状与实验结果吻合较好。水面以下与圆柱直接相连的气腔无论是形状还是尺寸都与实验结果几乎一致，但由于网格尺寸不够精细，水面以上的“皇冠”形状与实验结果有所差异，无法模拟出“皇冠”末端的射流形状以及在物体入水抨击引起的液滴飞溅，但从总体上可以还原实验中测得的“皇冠”形状。

综合图6可以看到，采用当前的数值方法无论是正面视角的皇冠及水下空腔还是圆柱入水侧面视角的三维效应都可以得到较为准确的模拟结果。

图7给出了长径比为4的圆柱入水过程中正面视角的自由面“皇冠”形状与实验结果的对比图。

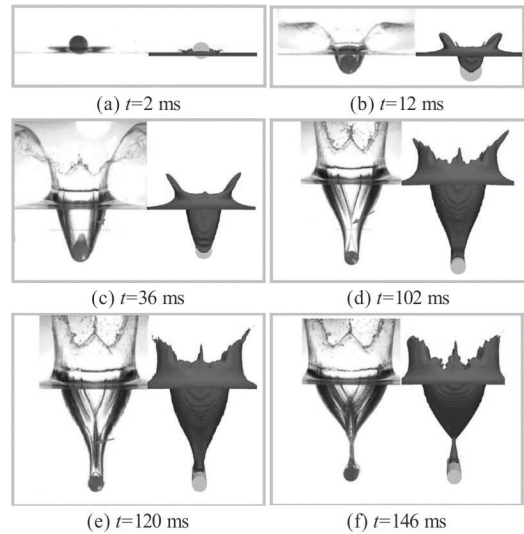


图7 长径比4圆柱入水自由面时历变化  
Fig.7 The changes of free surface with time of cylinder with height to diameter ratio of 4

从对比图中可看出，自由面形状的演化过程与实验吻合良好。

在圆柱撞击水面的初始时刻( $t=2$  ms)，圆柱体占据了一部分液体原先所在的空间，这部分液体会在接触点处从圆柱的两侧溅出； $t=12$  ms时刻可以看到较为清楚的水平射流； $t=36$  ms时刻圆柱上方会形成一个饱满的空腔，同时水面以上的飞溅“皇冠”继续向上发展，形成更为明显的射流，但此时射流方向变为向两侧倾斜，而数值模拟限于网格分辨率和后处理手段无法显示出射流尾端的超薄液膜； $t=102$  ms时刻自由面“皇冠”已经演化得比较完整，后续演化中在形状上“皇冠”的变化已经不是很明显，但水下空腔与圆柱直接相连的部分变得更加细长，直到 $t=146$  ms时刻，水下空腔即将溃灭，从而出现了间断。

### 2.3 双圆柱入水模拟结果及分析

双圆柱入水模拟采用了与单圆柱相同的计算域，由于单圆柱模拟结果中，长径比为2的圆柱位移模拟结果误差最小，因此选择了长径比为2的圆柱作为研究对象。网格尺寸在单圆柱入水的基础上做了 $\sqrt{2}$ 倍的加密，加密区域不发生改变。表3为双圆柱入水算例的网格量。

表3 双圆柱入水网格量  
Table 3 Mesh quality of twin-cylinder water entry

模块	网格量
背景网格	3.67M
圆柱网格	0.45M×2
总网格	4.58M

为进行圆柱间距 $S$ ( $S$ 为两圆柱轴心距离减去直径)对圆柱受力和垂向速度的影响研究，选取了五种

间距, 并且在计算中关闭了圆柱横向位移自由度, 间距为 $2D$ 时设置了三个不同的入水速度, 以研究入水速度对圆柱受力和流场变化的影响。表4记录了所有双圆柱入水的工况, 表中 $Fr$ 数对应的速度相当于圆柱从 $2\text{ m}$ 、 $1.5\text{ m}$ 和 $1\text{ m}$ 的高度自由落体后得到的运动速度。

相同圆柱间距 $S$ 的工况采用同样的网格, 不同的间距圆柱周围的重叠网格如图8所示, 由上自下对应的圆柱间距为 $D$ 、 $2D$ 和 $3D$ 。

表4 双圆柱入水工况汇总

Table 4 Summary of cases for twin-cylinder water entry

工况	圆柱间距 $S/D$	入水 $Fr$ 数
Case 1	0.25	8.89
Case 2	0.50	8.89
Case 3	1.00	8.89
Case 4	2.00	8.89
Case 5	3.00	8.89
Case 6	2.00	7.75
Case 7	2.00	6.25

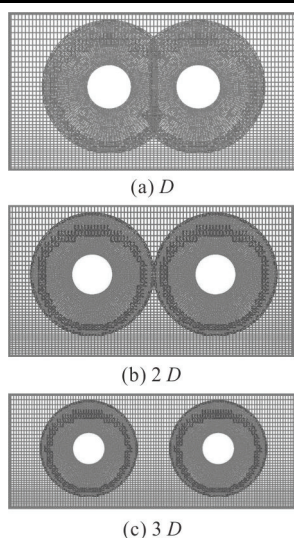


图8 不同间距双圆柱重叠网格示意图

Fig.8 The overset schematic diagram for different spacing

图9为Case 1-Case 5圆柱垂向速度的时历曲线。可以看到, 在刚入水前期(入水后 $10\text{ ms}$ 以内), 双圆柱之间没有明显的相互干扰作用, 速度曲线与单圆柱入水几乎重合, 随时间推移, 双圆柱之间的影响逐渐显现。由时历曲线可以看出, 圆柱在入水后的一段时间, 间距较小的圆柱垂向速度会小于间距较大的圆柱。

通过压力云图可以看到, 在两圆柱之间的区域存在一个高压区域, 高压作用在圆柱表面产生垂直向上的压力, 增加了圆柱受到的垂直向上的力, 因此双圆柱受到彼此的干扰, 入水速度会小于单圆柱。

高压区域随着间距减小而变窄, 压力也随之产生变化, 由图10可看到, 间距减小时圆柱的水平受

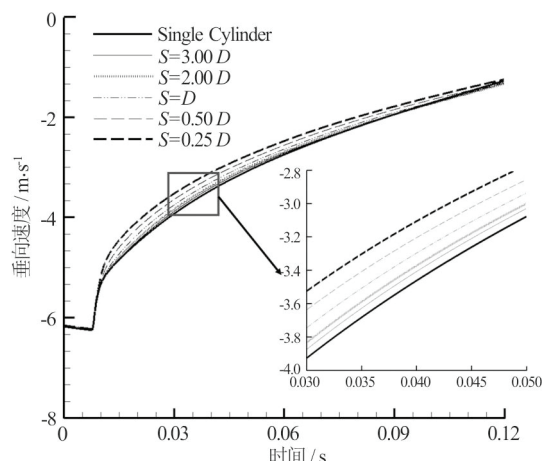


图9 双圆柱入水垂向速度时历曲线

Fig.9 Vertical velocity of twin cylinder

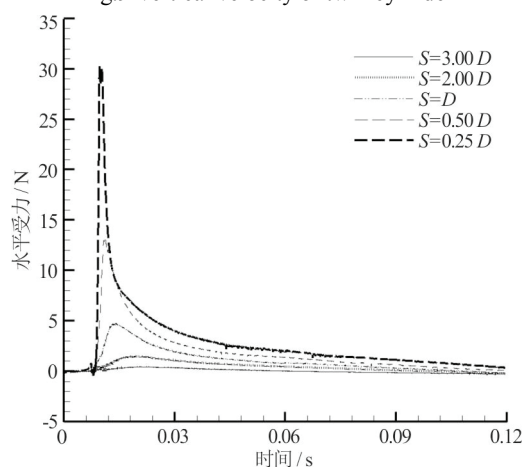


图10 双圆柱水平受力曲线

Fig.10 Horizontal force of twin cylinder

力增大, 从而可以推断出高压区域的压力会随间距减小而增大, 作用在圆柱表面的压力增大, 高压区域对圆柱压力的垂向分量也随之增大, 对圆柱产生的减速作用更加明显, 但这部分压力要远小于圆柱入水时的抨击压力, 所以对圆柱入水过程中的速度影响不是特别明显。

当圆柱的垂向速度持续减小, 两圆柱间区域压力会逐渐减小, 因此在入水后 $100\text{ ms}$ 开始不同间距工况下圆柱的垂向速度趋于相同。

图11为表4中Case 1在入水过程中几个时间点的压力云图。从云图中可以看到, 圆柱刚接触水面时中间区域的压力大小和压力梯度都非常大, 随后迅速变小, 到 $120\text{ ms}$ 时, 圆柱下方区域压力变为负值, 圆柱下方区域的压力梯度远小于入水后 $40\text{ ms}$ 内。

图12为双圆柱在不同 $Fr$ 数下的砰击力时历曲线。图中可以看到, 速度增大时, 砰击力的峰值提前出现, 并且峰值随速度增加明显增大,  $Fr=8.89$ 的工况所受砰击力超过 $Fr=6.25$ 时的两倍, 砰击力的具体数值如表5所示。

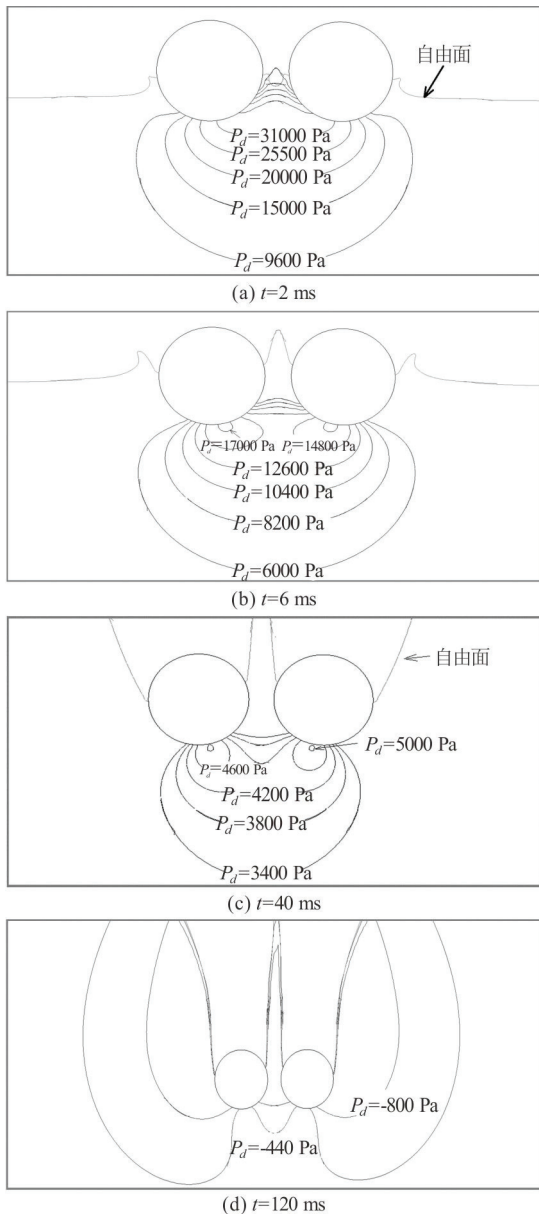


图 11 Case 1 动压力等值线变化图

Fig.11 Dynamic pressure of Case 1 in different time steps

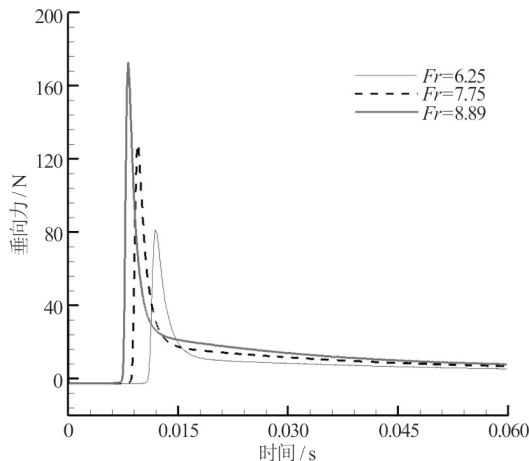


图 12 不同  $Fr$  数下双圆柱垂向力时历曲线

Fig.12 Vertical force of twin cylinder in different  $Fr$

表5 不同  $Fr$  数下单个圆柱所受冲击力大小

Table 5 Slamming force of one cylinder in different  $Fr$

$Fr$	冲击力大小/N
6.25	170.8
7.75	124.6
8.89	81.0

### 3 结论

本文使用重叠网格方法对单圆柱和双圆柱入水进行了数值模拟研究，通过对圆柱的长径比、双圆柱间距和入水速度进行参数研究，得到以下主要结论：

(1) 三种长径比的单圆柱入水位移时历曲线和实验结果均吻合良好，最大误差不超过10%，自由液面“皇冠”形状同高速摄像机拍摄结果非常相似，可以较为准确地预报圆柱入水的三维效应。由此表明，所使用的重叠网格方法和RANS方程可以准确模拟圆柱入水问题。

(2) 选取长径比为2的圆柱进行双圆柱入水模拟，对圆柱间距 $S$ 和接触水面时的速度两个变量进行了参数研究。从运动角度看，间距较小的圆柱入水后速度会小于间距较大的圆柱，但随速度的减小，这种速度的差异会逐渐消失。从受力角度看，双圆柱在入水时中间区域会形成高压，从而对圆柱造成减速效果，但速度减小后，两圆柱间区域的高压会消失。本文的研究结果可为多体入水提供一定的参考。

### 参 考 文 献:

[1] WORTHINGTON A M, COLE R S. Impact with a liquid surface, studied by means of instantaneous photography[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1900, 194: 175-199.

[2] GREENHOW M, LIN W M. Nonlinear-free surface effects: Experiments and theory[R]. Massachusetts Inst of Tech Cambridge Dept of Ocean Engineering, 1983.

[3] CHUANG S L. Experiments on flat-bottom slamming[J]. Journal of Ship Research, 1966, 10: 10-17.

[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(05): 97-102.

HUANG Zheng-qi, ZHANG Wen-hai, Experimental investigation on the reduction of flat-bottom body slamming[J]. Huazhong Institute of Technology, 1986(05): 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.  
LI Guo-jun, HUANG Zhen-qiu. The slant impact of a Flat-Bottom body on a water[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1995(S1): 145-147.
- [6] SPEIRS N B, MANSOOR M M, BELDEN J, et al. Water entry of spheres with various contact angles[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2019, 862(R3): jfm, 2018, 985.
- [7] LIN M C, SHIEH L D. Simultaneous measurements of water impact on a two-dimensional body[J]. Fluid Dynamics Research, 1997, 19(3): 125-148.
- [8] PANCIROLI R, SHAMS A, PORFIRI M. Experiments on the water entry of curved wedges: High speed imaging and particle image velocimetry[J]. Ocean Engineering, 2015, 94: 213-222.
- [9] KHAYYER A, GOTOH H. A multiphase compressible-incompressible particle method for water slamming[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2016, 26(1): 20-25.
- [10] 陈翔, 饶成平, 万德成. MPS 方法数值模拟楔形体入水问题[J]. 计算力学学报, 2017, 34(3): 356-362.  
CHEN Xiang, RAO Cheng-ping, WAN De-cheng. Numerical simulation of water entry for two-dimensional wedge[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2017, 034(003): 356-362.
- [11] 陈臻. SPH 算法改进及在晃荡与入水中的应用[D]. 大连理工大学, 大连, 中国, 2014.  
CHEN Zhen. Improving SPH methodology with its application to sloshing and water entry[D]. Dalian University of Technology, Dalian, China, 2014.
- [12] PESKIN C S. Flow patterns around heart valves: A numerical method[J]. Journal of Computational Physics, 1972, 10(2): 252-271.
- [13] BAI W, HUO C. Study on water entry problem using a level-set immersed boundary method[J]. International Journal of Modern Physics: Conference Series, The Authors, 2014, 34: 1460376.
- [14] ZHENG K, ZHAO X, YANG Z, et al. Numerical simulation of water entry of a wedge using a modified ghost-cell immersed boundary method[J]. Journal of Marine Science & Technology, 2019, 25(2): 1-20.
- [15] MA Z H, QIAN L, MARTÍNEZ-FERRER P J, et al. An overset mesh based multiphase flow solver for water entry problems[J]. Computers & Fluids, 2018, 172: 689-705.
- [16] WEI Z, HU C. An experimental study on water entry of horizontal cylinders[J]. Journal of Marine Ence and Technology, 2014, 19(3): 338-350.
- [17] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. AIAA Journal, 1994, 32(8): 1598-1605.