



# 深海采矿机器人入水冲击流场 仿真及试验验证

黄鑫, 戴瑜, 苏乔, 程慧云, 朱湘

(中南大学 机电工程学院, 长沙 410083)

**摘要:** 深海采矿机器人布放入水过程中的安全性和控制性能直接影响到整个采矿系统的可靠性。为获得深海采矿机器人入水过程流场变化规律, 提高机器人控制性能, 本文采用数值模拟和实验验证相结合的方式开展机器人入水特性及空泡演变研究, 主要内容为: 基于重叠网格方法和流体体积法, 采用 STAR-CCM+ 建立深海采矿机器人数值波浪水槽气-液-固多相耦合模型, 研究在波浪条件下深海采矿机器人的布放入水特性, 预测其在入水过程中的运动行为和动力学行为, 获得不同布放速度下其冲击载荷、位移、速度以及空泡演变规律; 搭建机器人入水实验平台, 利用高速摄影仪获得机器人入水的空泡特征和位移速度时程曲线。实验结果验证了所提数值模型的可行性和准确性。

**关键词:** 深海采矿机器人; 入水特性; 空泡演变; 数值建模

**文章编号:** 1004-0609(2021)-10-2782-13

**中图分类号:** TD431

**文献标志码:** A

**引文格式:** 黄鑫, 戴瑜, 苏乔, 等. 深海采矿机器人入水冲击流场仿真及试验验证[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(10): 2782-2794. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37996

HUANG Xin, DAI Yu, SU Qiao, et al. Simulation and experimental verification of water impact flow field of deep ocean mining vehicle entering water[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10): 2782-2794. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37996

## 1 深海采矿机器人水动力特性研究概况

现代新兴技术和能源应用的发展, 使得人们对多种金属矿物资源的需求逐年上升。目前人们发现丰富的海底金属矿物资源有望成为陆地矿产的替代资源<sup>[1-8]</sup>。深海矿物资源在储量和品相方面都极具吸引力, 但各类矿物复杂的赋存条件、现有科技水准以及海洋环境的多重限制对深海开发提出了严苛的挑战<sup>[9]</sup>。深海采矿机器人作为深海采矿作业中的关键装备, 已成为了各国研究的重点<sup>[10-12]</sup>。

深海采矿机器人水动力研究主要针对波浪条件下的布放、回收水动力特性以及海底行进水动力

问题, 影响到布放回收的安全性、稳定性以及海底正常工作的可靠性。就波浪海况下的布放工况而言, 深海采矿机器人的入水是一个典型的多相流问题, 入水瞬间会产生剧烈的冲击, 并且在撞击水面至完全浸入的过程中伴随着空泡的产生、发展、闭合以及溃灭; 若考虑实际波浪载荷的作用, 机器人的入水冲击和运动学行为将更为复杂。近年来, 基于计算流体力学的物体入水研究取得了较大的进展。IRANMANESH 等<sup>[13]</sup>提出以流体体积方法 (Volume of fluid, VOF) 跟踪自由液面的变化, 同时求解球体或水平圆柱体入水的连续性方程和纳维-斯托克斯 (Navier-Stokes, N-S) 方程。BILANDI 等<sup>[14]</sup>基于有限体积法 (Finite volume method, FVM) 和 VOF 对非对称楔形体垂直入水进行了数值模拟, 观

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51774324)

**收稿日期:** 2021-07-20; **修订日期:** 2021-09-03

**通信作者:** 戴瑜, 教授, 博士; 电话: 13755116953; E-mail: daiyu\_6@aliyun.com

察到楔形体锐角顶点处形成低压区域。CHEN 等<sup>[15]</sup>在 OpenFOAM 中探讨了重叠网格对于波浪-浮动结构相互作用模拟的有效性和准确性,仿真结果表明其精度和高分辨率的动态网格方法获得的结果相当。

物体入水往往伴随着空泡的演变过程,而空泡的存在会对物体的姿态产生较大影响。NGUYEN 等<sup>[16]</sup>和 VAN-TU 等<sup>[17]</sup>基于六自由度(Six degrees of freedom, 6DOF)和嵌套网格方法研究了三维圆柱体入水空腔的变化,并将仿真结果与 WEI 等<sup>[18]</sup>使用高速相机拍摄下的试验图像进行对比。自由表面液体在圆柱体撞击水面时发生分离,然后空气跟随柱体进入水中形成空泡,同时圆柱体姿态由倾斜趋向水平。侯昭等<sup>[19-20]</sup>通过 STAR-CCM+ 软件对圆柱体倾斜低速进入静水和波浪的冲击及空泡现象进行了大涡模拟,发现波浪入水的圆柱体尾部会产生持续时间更长的涡环,这表明波浪中的空泡发展更为缓慢。蒋运华等<sup>[21]</sup>针对航行器入水的空泡形成机理开展了试验研究,研究表明航行器倾斜入水时形成的空泡受重力影响尾部上漂,空泡的长度不减反增,因为这种情况下的空泡弹性效应更加明显。胡小舟等<sup>[22-24]</sup>展开了比较全面的研究。首先,文中基于摇杆造波理论讨论了四种海况下的规则波和不规则波的数值生成方式,并在出口边界附近添加多孔介质模拟阻尼。然后,文中将采矿机器人简化为平底刚体,分别研究了机器人在静水和波浪中的底部最大压力变化。仿真和试验结果表明,机器人在入水过程中的压力呈现双峰值的特性,与机器人布放速度呈正相关,但是文中并未考虑物体波浪入水时的纵荡和纵摇运动;并且与规则平底物体相比,实际的机器人结构非常复杂,仍然需要进一步讨论三维流场下的多自由度机器人波浪入水问题。

除此之外,大多数海面布放入水问题的研究主体为轴对称结构 AUV。吕欣倍<sup>[25]</sup>基于流体体积法模拟了 AUV 入静水时的自由液面变化,但文中忽略了海面波浪的复杂影响。齐铎等<sup>[26]</sup>研究水面布放式 AUV 二维入水过程中的自由液面飞溅及空泡现象,但未考虑主体三维姿态的变化对自由液面的影响。赵庆新等<sup>[27]</sup>研究空中投放的 AUV 波浪入水的冲击压力、速度、加速度随入水速度的变化关系,但未讨论伴随空泡的形成机制和影响。

综上所述,基于流体体积法跟踪自由液面的演变,同时求解连续性方程和 NS 方程,能够准确地求解物体入水的问题。本文基于重叠网格自适应方法和 6DOF 模型研究深海底采矿机器人入水的动力学行为和运动行为,分析空泡产生的过程以及其对机器人入水特性的影响。对深海底采矿机器人布放入水过程进行理论分析和建模,研究涡黏性湍流模型和雷诺应力模型的建模问题;介绍波浪理论及 VOF 表面重力波模型,基于边界造波法和阻尼消波法建立数值波浪水槽,并进行网格无关性验证。然后,基于重叠网格和 6DOF 理论在 STAR-CCM+ 中建立气-液-固多相耦合 CFD 数值模型,研究深海底采矿机器人波浪条件下入水的冲击压力、流体动力以及纵摇、纵荡和升沉运动特征。搭建机器人实验室入水冲击试验平台,利用高速摄影仪获得其入水过程中的运动学特征及空泡演变规律,分析对比试验和仿真获得的机器人入水空泡特征、自由表面飞溅现象以及位移、速度时程曲线,验证重叠网格-6DOF 方法的有效性。

## 2 深海采矿机器人波浪入水模型与理论

### 2.1 湍流控制模型

湍流本质上是一种复杂的非稳态随机流动,但其瞬时运动仍然满足连续流体介质的连续性方程和 Navier-Stokes 方程。深海采矿机器人所处深海环境复杂,加之结构特点,机器人行驶时的流场涉及典型的漩涡流和分离流特征。为考虑湍流各向异性的影响,引入直接求解  $\overline{\rho u_i' u_j'}$  的雷诺应力模型  $k$ -epsilon。

对于不可压缩流体,基于  $k$ -epsilon 湍流模型假设的输运方程由式(1)和(2)表示:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \varepsilon P_k / k - C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon^2 / k \quad (2)$$

式中： $\rho$  为流体密度； $u_i$  为流速分量； $t$  为时间变量； $x_i$  和  $x_j$  为流量分量； $\mu$  为分子黏性； $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$  为涡黏性系数； $P_k = \mu_t S^2$  为平均速度梯度产生的湍流动能； $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$  为平均应变率张量的模，其中，应变率张量  $S_{ij} = (\partial u_i / \partial u_j + \partial u_j / \partial u_i) / 2$ ， $u_j$  为流速分量； $C_\mu$ 、 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $\sigma_k$ 、 $\sigma_\varepsilon$  为一组模型常量，其默认值为  $C_\mu = 0.09$ 、 $C_{1\varepsilon} = 1.44$ 、 $C_{2\varepsilon} = 1.92$ 、 $\sigma_k = 1$ 、 $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

为使方程闭合，补充模型化的湍流动能  $k$  及湍流耗散率  $\varepsilon$  方程如下所示

$$\frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\mu_t}{\rho \sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\mu_t}{\rho \sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - C_{\varepsilon 1} \overline{u_i' u_j'} \frac{\varepsilon}{k} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

### 2.2 VOF 波浪模型

本文采用流体体积 VOF 多相流方法来模拟数值波浪水槽中气-液交界处自由表面的演变过程。VOF 方法通过在计算域内建立流体体积函数并转换为数学模型，来跟踪和捕获离散网格内的流体流量变化过程，并根据模拟数值来构造多相不混溶流体的自由表面。

根据造波原理的不同，造波方法可以分为源项造波法和边界模拟造波法。前者通过在质量方程或动量方程中添加源项，后者则包括摇杆或推板物理造波以及边界造波法。本文在 STAR-CCM+ 采用边界造波法来生成 VOF 波，以模拟轻流体-空气和重流体-海水交界面上的五阶 Stokes 表面重力波。

首先定义入口边界处流体的三维速度分量以及波面方程。对于五阶 Stokes 波，其速度势、波面升高方程分别如式(5)和式(6)所示：

$$\varphi = \frac{c}{k} \sum_{n=1}^5 \varphi'_n \cosh[nk(z+d)] \sin(n\theta) \quad (5)$$

$$\eta = \frac{1}{k} \sum_{n=1}^5 \eta'_n \cos(n\theta) \quad (6)$$

式中： $\theta = kx - \omega t$ ， $k$  为五阶 Stokes 波的波数； $\omega$  为波浪角频率； $d$  为水深。对于有限水深，其色散关系为：

$$\omega^2 = gk \tanh(kd) \quad (7)$$

速度势和速度矢量的梯度  $\nabla \varphi$  满足  $\nabla \varphi = \mathbf{U}$ ，因此其水平速度和垂直速度分别如式(8)和式(9)所示：

$$u = c \sum_{n=1}^5 n \varphi'_n \cosh[nk(z+d)] \cos(n\theta) \quad (8)$$

$$w = c \sum_{n=1}^5 n \varphi'_n \sinh[nk(z+d)] \sin(n\theta) \quad (9)$$

式(5)和(6)中出现的  $\varphi'_n$  和  $\eta'_n$  项的详细定义如下所示：

$$\begin{cases} \varphi'_1 = \gamma A_{11} + \gamma^3 A_{13} + \gamma^5 A_{15} \\ \varphi'_2 = \gamma^2 A_{22} + \gamma^4 A_{24} \\ \varphi'_3 = \gamma^3 A_{33} + \gamma^5 A_{35} \\ \varphi'_4 = \gamma^4 A_{44} \\ \varphi'_5 = \gamma^5 A_{55} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \eta'_1 = \gamma \\ \eta'_2 = \gamma^2 B_{22} + \gamma^4 B_{24} \\ \eta'_3 = \gamma^3 B_{33} + \gamma^5 B_{35} \\ \eta'_4 = \gamma^4 B_{44} \\ \eta'_5 = \gamma^5 B_{55} \end{cases} \quad (11)$$

式中： $A_{ij}$ 、 $B_{kl}$  以及  $\gamma$  系数的取值参见文献[28]。

波浪到达数值水槽边界时会发生反射，从而影响上游工作区的数值波浪。通常可以建立较大的流体域或采取数值手段来减小反射波的影响。出于缩小计算域的考虑，本文采取阻尼消波法，即在出口的上游某段区域设置阻尼消波层，通过在流体质点的动量方程中加入阻尼源项，来减小自由表面  $z$  方向上的速度分量。加入阻尼源项  $S_w^d$  后的  $w$  动量方程为：

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u_i \frac{\partial w}{\partial x_i} = g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \underbrace{\nu \frac{\partial^2 w}{\partial x_i^2} - [\rho(f_1 + f_2 |w|) \frac{e^\kappa - 1}{e^1 - 1} w]}_{S_w^d} \quad (12)$$

式中： $\kappa = \left( \frac{x - x_{sd}}{x_{ed} - x_{sd}} \right)^{n_d}$ ， $x_{sd}$  为阻尼区起点， $x_{ed}$  为阻尼区终点； $f_1$ 、 $f_2$ 、 $n_d$  为常数，本例中分别取值 10.0、10.0、2.0。

### 2.3 数值波浪水槽

根据我国 1000 m 海试方案，机器人布放入水

时设计要求能在四级海况下进行作业。结合我国南海某海域的四级作业海况环境, 本文中设置的波浪参数为风速 8 m/s、海流 1.5 kn、波高 2.5 m、周期 6 s, 波浪类型为 Fifth-Stokes Wave。

根据色散关系, 自由表面波浪的波长  $S$  约为 60 m。本文中建立的三维数值波浪水槽如图 1 所示, 长、宽、高分别为  $5S$ 、 $S$ 、 $S$ , 模拟水深为 1000 m。图中波浪虚线表示自由表面, 距上边界为  $S$ , 距下边界为  $0.6S$ 。水槽下游边界为压力出口, 其余边界设置为满足 VOF 多相流体体积方程的速度入口, 目标试验区域的长度为  $S_1=3S$ 。为防止波浪在出口边界上的反射, 在压力出口的上游区域设置总长为  $S_2=2S$  的阻尼区, 包括过渡区和消波区。过渡区的波浪逐渐衰减, 直至恢复为平静水面。

准确追踪自由表面要求水面附近具备足够的网格精度和分辨率。根据对自由表面网格的加密程度, 本文共设置了四组网格划分方案: Mesh1 为  $X_\lambda = 40$ 、 $Z_H = 10$ ; Mesh2 为  $X_\lambda = 60$ 、 $Z_H = 10$ ; Mesh3 为  $X_\lambda = 60$ 、 $Z_H = 15$ ; Mesh4 为  $X_\lambda = 80$ 、 $Z_H = 20$ 。其中“ $X_\lambda$ ”表示在一个波长内, 沿  $X$  方向上分布的网格数目, “ $Z_H$ ”表示在一个波高内,

沿  $z$  方向上分布的网格数目。Mesh3 的计算域网格为在一个波长内, 沿  $X$  方向均匀分布 60 个网格; 在一个波高内, 沿  $z$  方向均匀分布 15 个网格。其他三组方案划分方法与 Mesh4 一致。流体体积 VOF 模型对流项设置为 HRIC, 时间步长由 CFL 条件限制, 上边界和下边界值分别为 0.5 和 1.0。

计算时间步长的选择和后续机器人重叠网格入水的运动状态相关联, 一般确保在采取的时间步长内机器人的运动小于背景网格的最小尺寸。本文后续分析中机器人最大入水速度取 4 m/s, 四种方案中背景网格最小尺寸为 0.1 m, 因此时间步长的取值不得大于 0.025 s。本文采取时间步长 0.0025 s, 并对 Mesh1~Mesh4 计算域网格进行了无关性分析。经分析, 四种网格下自由液面的演变规律相近。综上所述, 本文后续分析设置的时间步长和网格方案分别为 0.0025 s 和 Mesh3。通过分析发现试验区点的波形接近理想波形, 过渡区点的波形略微衰减; 消波区点的运动高度接近于零, 意味着边界阻尼消波起到良好作用, 使得出口边界上游为平静水面, 有效消除了波的反射。三维数值波浪水槽的自由表面高度如图 2 所示。

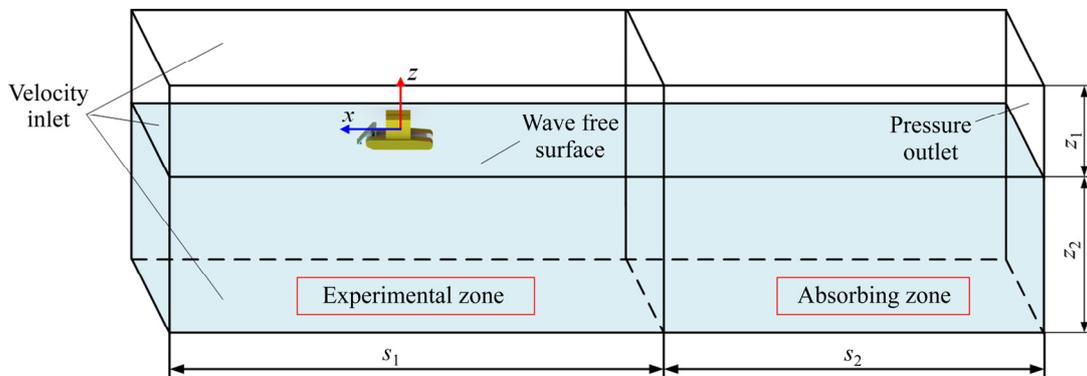


图 1 数值波浪水槽计算域  
Fig. 1 Numerical wave flume computing region

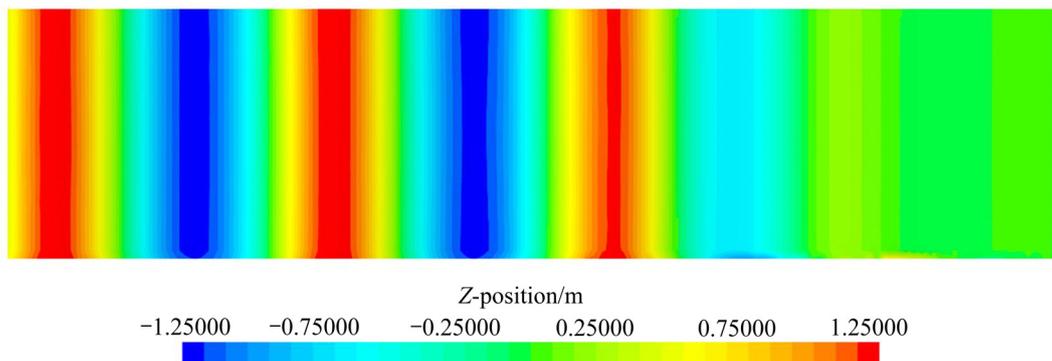


图 2 自由表面高度  
Fig. 2 Height of free surface

### 3 深海采矿机器人波浪入水数值建模与分析

#### 3.1 深海采矿机器人波浪入水数值建模

流体动力学数值模拟流程包括流体域数值建模、计算域网格划分、自由表面网格细化、边界和物理量初始化、流体域空间离散、数值求解以及收敛条件判别。对于瞬态计算，若不收敛，则迭代至当前最大内迭代数后才进入下一时步；反之提前结束当前内迭代。如此循环，直至到达最大外迭代时步。

机器人入水过程涉及到区域网格变形或移动，因此本节采用 STAR-CCM+ 基于重叠网格建立机器人-动态流体相互作用模型，通过求解机器人连续体周围的压力和速度场来获得刚体运动系统的流体力和流体力矩，进而求解其运动方程。机器人波浪入水网格模型如图 3 所示，该模型由背景区域和嵌套区域组成。机器人在布放过程中，在  $z$  方向上除了受到自身重力  $G$  和流体动力  $F_z$  和动力矩  $M_y$  的综合作用，还受到绞车缆绳向上的牵引拉力  $F_p$ ，使得机器人处于动态平衡。首先，机器人入水之前在缆绳牵引力的作用下匀速下降。随后机器人入水瞬间受到极大的流体冲击压力，使得机器人重力和流体作用力的合力向上；由于缆绳仅能提供正拉力而无法提供压力，机器人在综合作用力的影响下产生向上的加速度，而使得机器人减速运动。这个过程持续到机器人质量力重新大于流体作用力，机器人由减速运动转向新的稳定状态。因此，在缆绳牵引拉力  $F_p$  的作用下，机器人布放过程并不是单纯匀速下降或自由落体运动，也不是二者简单叠加运动。按照式(13)，在 STAR-CCM+ 中自定义作用于机器

人质心的场函数  $F_p$ ：

$$F_p = \begin{cases} 0 & F_{wz} > -G \\ -(F_{wz} + G) & F_{wz} \leq -G \end{cases} \quad (13)$$

单个周期  $T$  内数值水槽试验区的五阶 Stokes 波浪速度变化如图 4 所示，机器人在入水瞬间受到的冲击压力通常和入水相位有关。本例中机器人垂直于  $z=0$  平面布放，故而在入水点波浪垂直速度  $v_z$  较大时，如图 4 中的  $\pi$  相位液面点，机器人与自由液面的  $z$  向相对速度更大，其受到的瞬时冲击更大。因此，本文在数值模拟中选择图 4 中的  $\pi$  相位作为机器人与波浪的初始接触相位，研究不同布放速度下机器人的流场特征以及动力学特性。

#### 3.2 深海采矿机器人波浪入水流场分析

本节研究以 4 m/s 初始垂直速度布放时，深海采矿机器人的体积分数、压力等流场特征。为使得流场均匀，为提高收敛性和精度，在释放机器人之前，应预留时间使得数值波浪流场充分发展。在此期间机器人固定在自由表面上方，平行于  $z=0$  水平面，如图 5(a) 所示。释放机器人瞬间，重力  $G$ 、流体力  $F_z$ 、流体力矩  $M_y$  以及缆绳牵引力  $F_p$  施加于机器人网格质心，通过耦合的 6-DOF 和动态流体作用模型控制机器人下一时步的运动。为减少冲击振荡，提高瞬态求解的稳定性，应该在缓冲时间内均匀对机器人施加各项力和力矩。同时，为保证插值精度，单个时间步长内重叠网格的移动距离应小于背景网格最小单元尺寸。本节中释放时间、缓冲时间和时间步长分别取 27.5095 s、0.3 s 和 0.0002 s，入水初始冲击时间为第 28 s，对应瞬时液面如图 5(b) 所示。

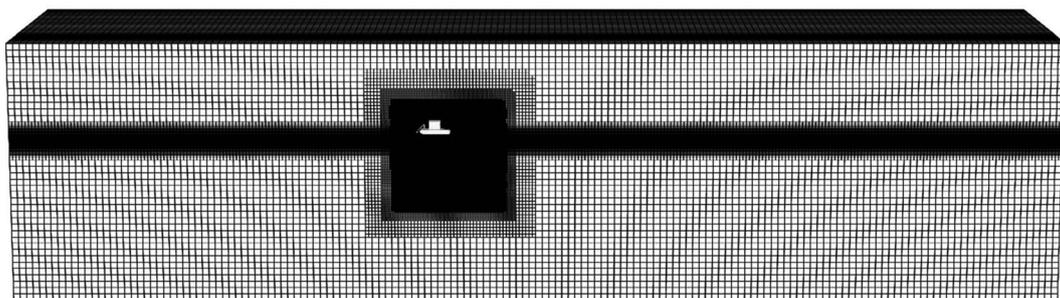


图 3 机器人波浪入水网格模型

Fig. 3 Mesh model of vehicle waves entering water

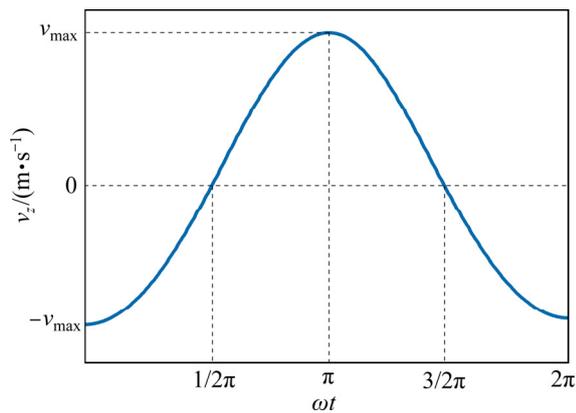


图 4 单个周期  $T$  内五阶 Stokes 波速度曲线  
 Fig. 4 Fifth-order Stokes wave velocity curve in single period of  $T$

图 6 所示为机器人波浪入水初期底部压力变化。观察到, 由于波浪相位差的影响,  $t=0.05\text{ s}$  机器人仅前端的履带和集矿设备与自由表面发生接触, 产生很大瞬时冲击压力, 并形成高压力梯度区域。随着机器人入水深度的增加和波浪前向推进, 压力沿车身向后传播, 压力峰值区域后移, 流场压力影响区域也不断扩大。经过  $0.15\text{ s}$  后, 高压区移动到机器人后部履带和底盘; 当机器人底部和自由表面完全接触时, 峰值压力显著降低, 但压力区域仍随着入水过程不断扩大。

### 3.3 深海采矿机器人不同速度入水研究

本节拟定机器人初始布放速度为  $1\sim 4\text{ m/s}$  范围

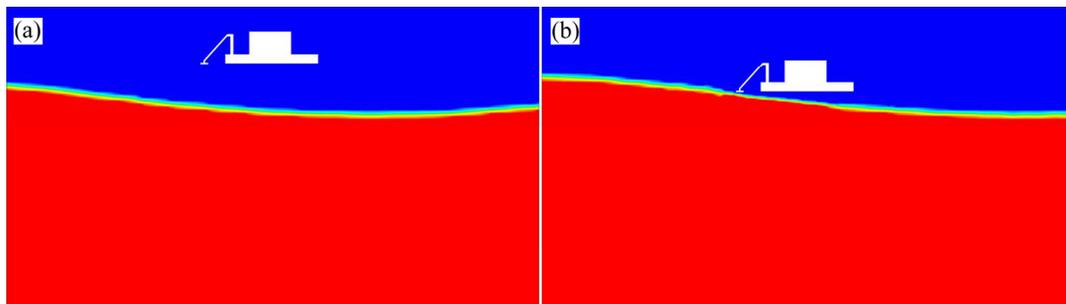


图 5 机器人入水体积分数  
 Fig. 5 Water entry volume fraction of vehicle

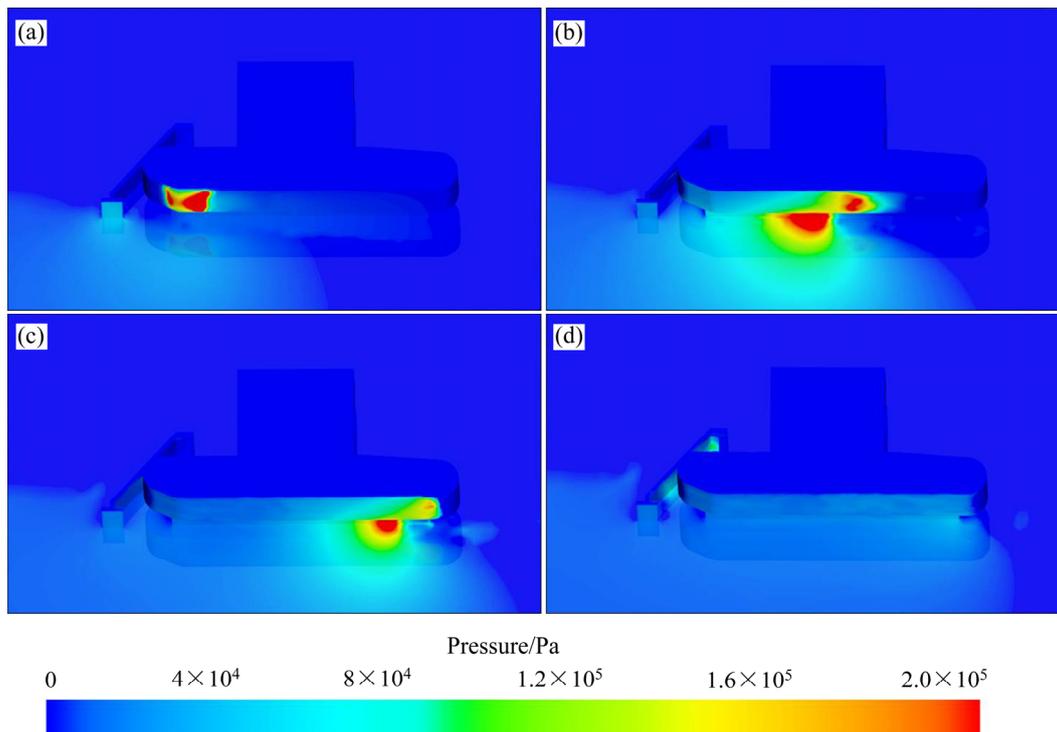


图 6 机器人波浪入水初期底部压力变化  
 Fig. 6 Bottom pressure changes of vehicle waves hit water: (a)  $t=0.05\text{ s}$ ; (b)  $t=0.10\text{ s}$ ; (c)  $t=0.15\text{ s}$ ; (d)  $t=0.20\text{ s}$

内均匀取值, 间隔为 1 m/s。对应四种工况的时间步长分别为 0.0025 s、0.0010 s、0.0005 s 和 0.0002 s, 分别对应 1.0~4.0 m/s 的初始布放速度。不同速度下的机器人释放时间随着初始布放速度的上升而增加, 目的是使得四种工况下机器人与自由水面  $\pi$  相位的初始瞬时时间相同, 均接近于第 28 s。

图 7 所示为不同初始布放速度下机器人底部受到的最大压力峰值曲线, 为便于观察, 此处将第 28s 设为入水接触的初始时间。机器人在入水瞬间湿表面积迅速增大, 流体动力大于机器人重力, 而缆绳却无法提供压力, 使得机器人  $z$  向合力朝上, 机器

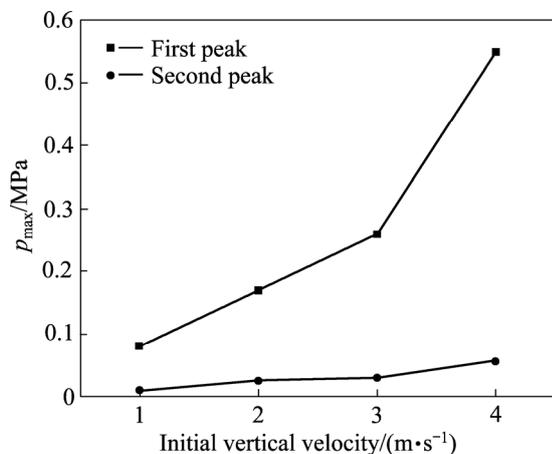


图 7 不同初始布放速度下机器人底部最大压力  $p_{\max}$  峰值

Fig. 7 Maximum pressure peak at bottom of vehicle at different initial placement speeds

人做减速运动。观察到, 在初始入水接触阶段, 机器人受到很大的瞬时冲击压力; 入水速度越高, 瞬时冲击越大, 最大压力  $p_{\max}$  峰值越大。

## 4 深海采矿机器人入水冲击试验

为验证本文提出的计算流体力学方法及数值仿真的有效性, 本节开展机器人样机入水冲击模型试验研究, 搭建实验室模拟试验水池, 并通过高速摄影及图像处理系统研究小车释放和入水过程中的运动学特征及空泡演变现象。

### 4.1 试验装置

机器人入水试验系统三维模型如图 8 所示, 总体包括高速摄影仪及图像处理系统、照明系统(前后光源及柔光屏)、水箱、机器人样机模型及释放机构。总体框架由欧标铝型材 4040 构成, 释放机构通过螺纹和滑块连接在框架顶部, 释放高度可由顶部的桁架调节控制。水箱由 0.012m 厚超白玻璃黏结而成, 透光率不低于 92%, 长×宽×高为 1.2 m×0.6 m×0.6 m。考虑到试验条件的限制, 本节中仅对平静水面下的机器人自由下落入水过程进行试验研究, 以验证所提出的计算流体数值模型的有效性。拟定机器人入水时速度达到 4 m/s, 当地重力加速度约为  $9.792 \text{ m/s}^2$ , 由此设置机器人质心到水面的距离为 0.817 m。

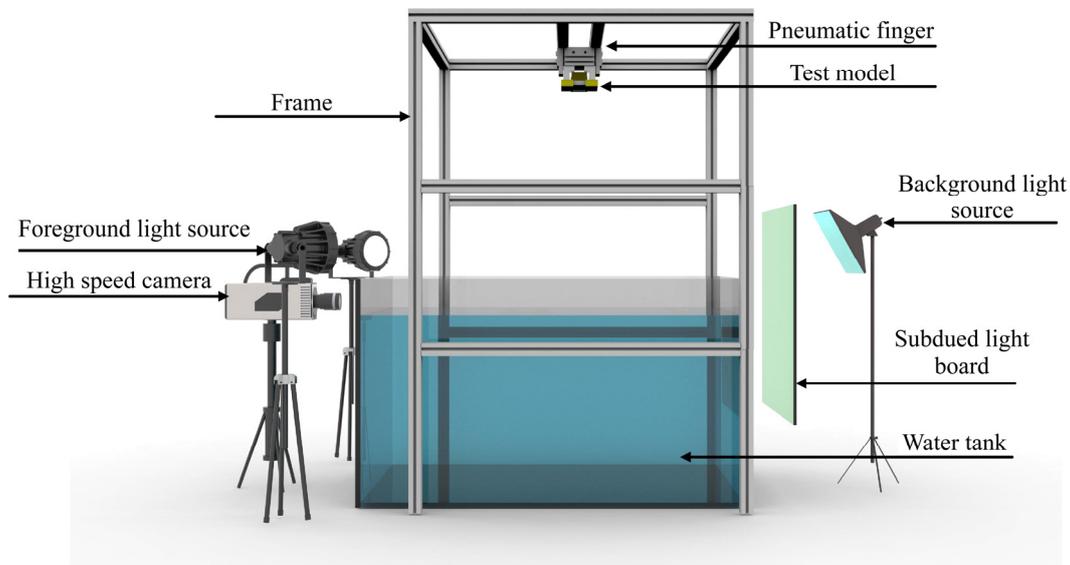


图 8 机器人入水试验系统三维图

Fig. 8 Three dimensional drawing of water entry test system

实验室试验水槽框架如图9(a)所示,前置光面为 $2 \times 200$  W 泛光灯,后置光源为 $2 \times 500$  W LED 灯源矩阵。玻璃水箱四周设置由白色柔光屏,以增强背景光源的均匀性。如图9(b)所示,本文采用搭载 Nikon AF-S 24–85 mm f/3.5–4.5G 变焦镜头的 Phantom VEO410L 高速摄影仪来采集机器人入水瞬间的运动学行为和空泡特征。本次试验中镜头焦距为 24 mm,光圈为 f3.5。高速摄影仪最大分辨率为  $1280 \times 800$ ,对应状态下的采样频率为 5200 Hz,拍摄时间间隔为  $192.3 \mu\text{s}$ 。VEO410L 的时间精度为 20 ns,具有高帧速率、帧同步及曝光精度。相邻曝光最小时间间隔为 480 ns,但为提高图片亮度,此处将曝光时间设为  $172 \mu\text{s}$ 。此外,搭配的 256 G 存储空间可以满足机器人入水过程长时间记录的需求。相机通过以太网接口与 PC 端进行信号传输与数据交换,并可由 Phantom Camera Control 软件对高速摄影仪进行拍摄参数设置、视频回放、图像分析、格式转换以及物体运动跟踪与轨迹分析。

机器人的试验模型由光敏树脂通过 3D 打印制作,如图10(a)所示。模型长 $\times$ 宽 $\times$ 高为  $0.21 \text{ m} \times 0.13 \text{ m} \times 0.08 \text{ m}$ ,密度  $\rho_v$  为  $1.15 \text{ g/cm}^3$ ,表面打磨后涂上自干型疏水 PTFE 溶剂,表面接触角为  $90^\circ$ 。实体模型通过图10(b)所示的 SMC 气动手指 MHL2-25D 固定在顶部桁架,气缸的进气和出气孔经过气管接口、8 mm 气管、二位五通手动换向阀、调速阀与空气压缩机连接。机器人由气动手指释放后经过自由落体加速至  $4 \text{ m/s}$ ,随后完成入水过程。

#### 4.2 试验结果分析

本节按照 4.1 节中提出的试验条件重新搭建了机器人计算流体力学模型作为模型试验的对照,由此验证文中提出的基于重叠网格的 6DOF 计算流体力学模型的有效性。类似地,设定机器人初始接触水的瞬间为零时刻,如图 11 所示;后续时刻试验和数值模拟的结果如图 12~16 所示。

当  $t=15 \text{ ms}$  时,自由表面飞溅形成,并不断向

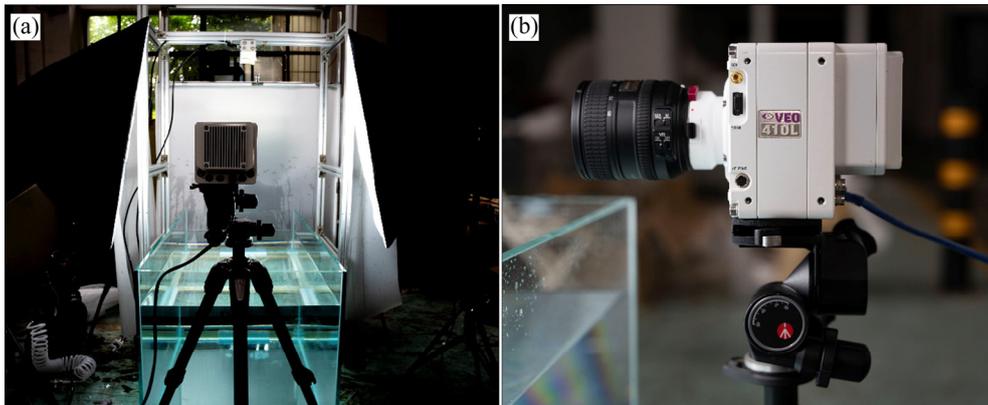


图9 试验水槽框架及 Phantom VEO410L 高速摄影仪

Fig. 9 Test tank frame(a) and Phantom VEO410L high speed camera(b)

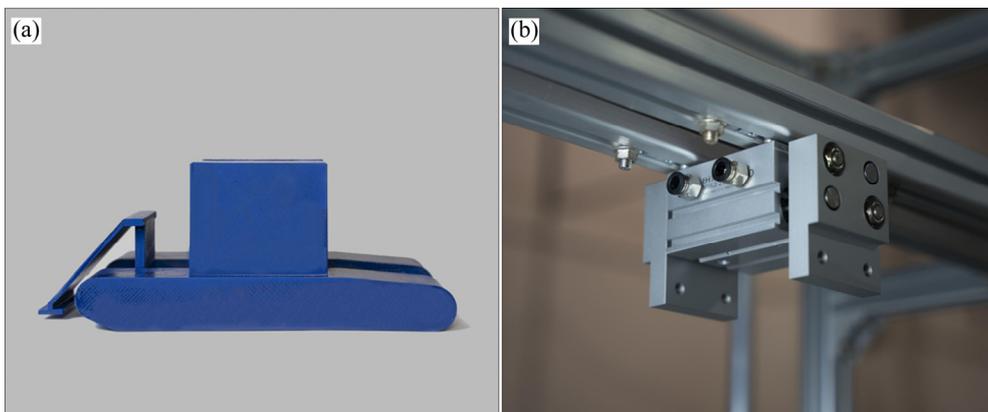


图10 机器人光敏树脂模型及 SMC 气动手指

Fig. 10 Photosensitive resin model of vehicle(a) and SMC pneumatic finger(b)

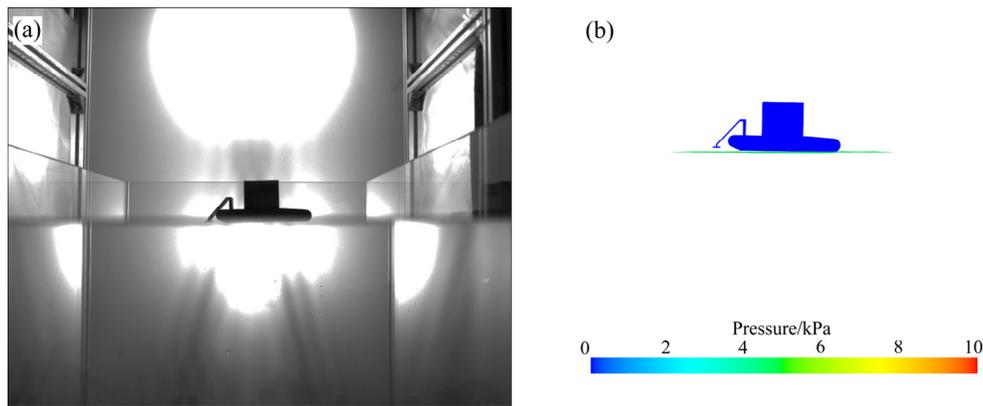


图 11  $t=0$  ms 时机器人的入水特征对比

Fig. 11 Comparison of water entry characteristics of vehicle at  $t=0$  ms: (a) Experiment; (b) Numerical simulation

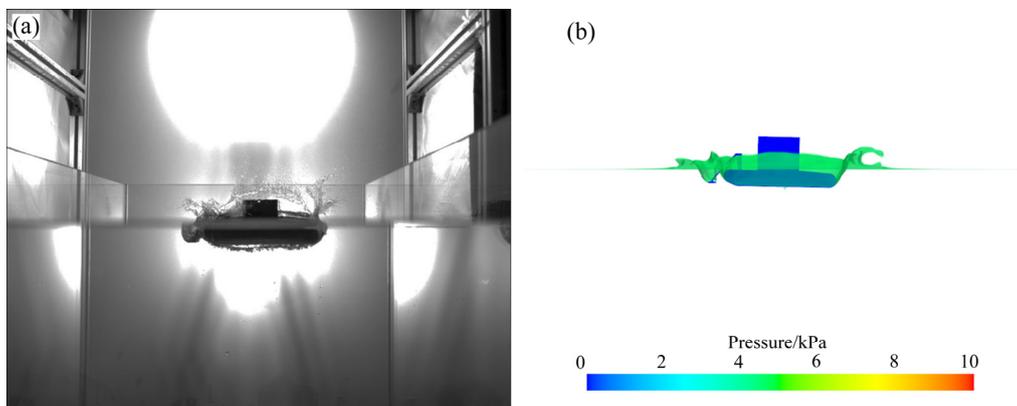


图 12  $t=15$  ms 时机器人的入水特征对比

Fig. 12 Comparison of water entry characteristics of vehicle at  $t=15$  ms: (a) Experiment; (b) Numerical simulation

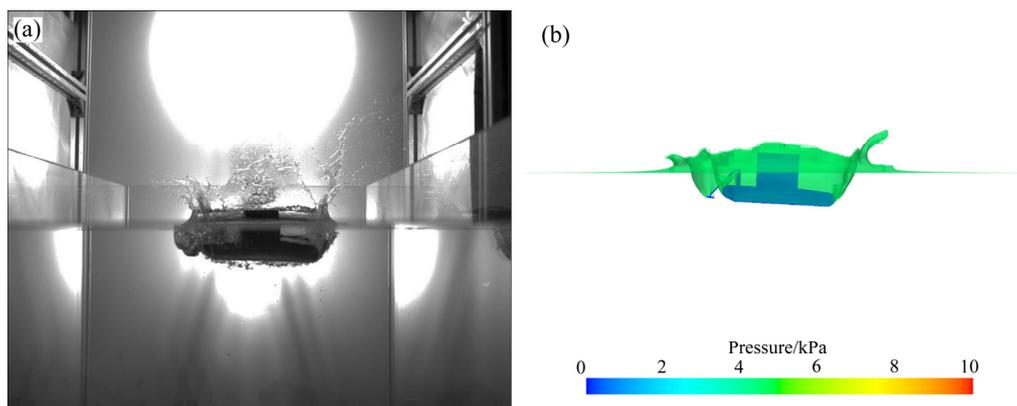


图 13  $t=30$  ms 时机器人的入水特征对比

Fig. 13 Comparison of water entry characteristics of vehicle at  $t=30$  ms: (a) Experiment; (b) Numerical simulation

外扩张；在  $t$  为 30~100 ms 时，随着机器人入水过程的进行，空气伴随机器人不断进入自由表面之下，空泡呈现扩张的趋势；当  $t=160$  ms 时，空泡发生颈缩现象，自由表面开始闭合；最后机器人周

围的气泡不断耗散，自由表面动能由于闭合碰撞转换为势能，表现为中心液体的飞溅和高度的增加。通过结果对比可知，数值模拟获得的自由液面演变及空泡特征与试验结果十分吻合。如图 17 和

18 所示, 机器人数值模拟获得的  $z$  向位移及速度曲线趋势接近于试验数据, 在入水的瞬间机器人的动能急剧减小, 完成入水后逐渐趋于稳定, 最后在

水中净重的驱动下缓慢加速。上述试验结果与数值模拟结果之间吻合一致, 验证了本文数值仿真计算方法的有效性。

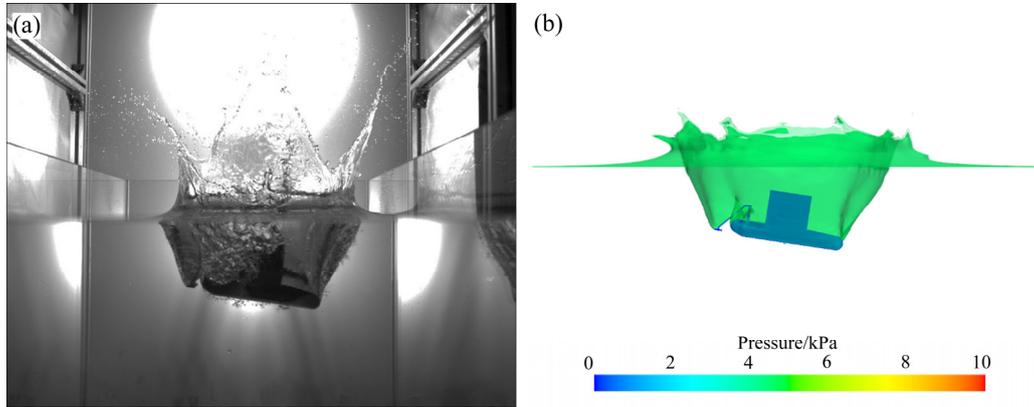


图 14  $t=95$  ms 时机器的入水特征对比

Fig. 14 Comparison of water entry characteristics of vehicle at  $t=95$  ms: (a) Experiment; (b) Numerical simulation

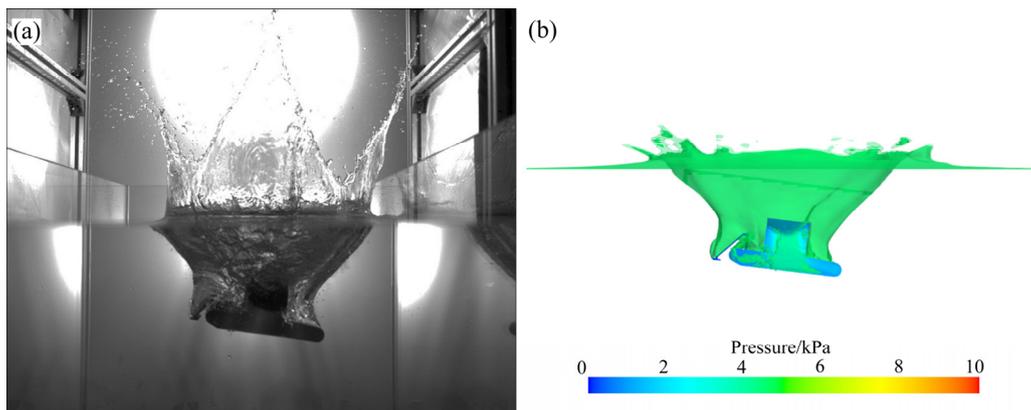


图 15  $t=100$  ms 时机器的入水特征对比

Fig. 15 Comparison of water entry characteristics of vehicle at  $t=100$  ms: (a) Experiment; (b) Numerical simulation

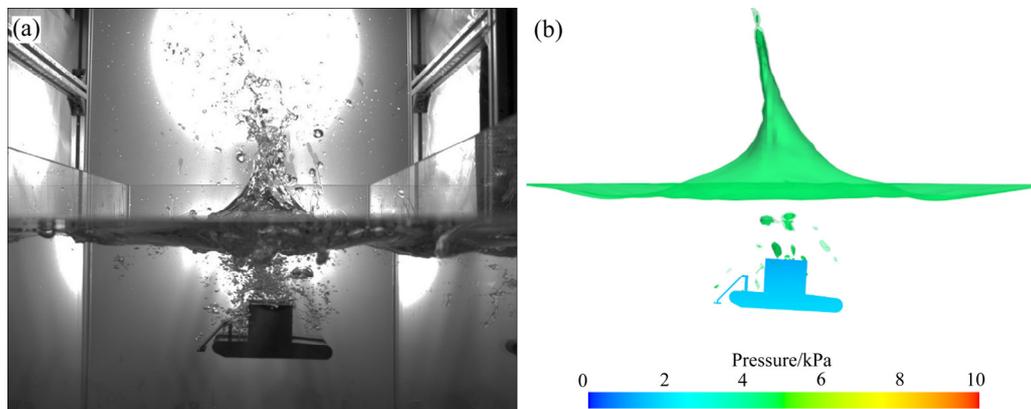
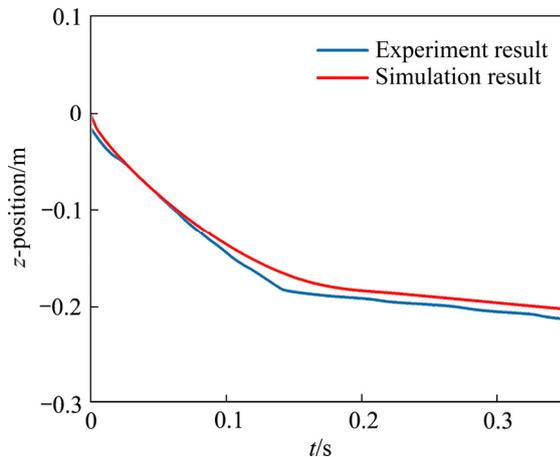
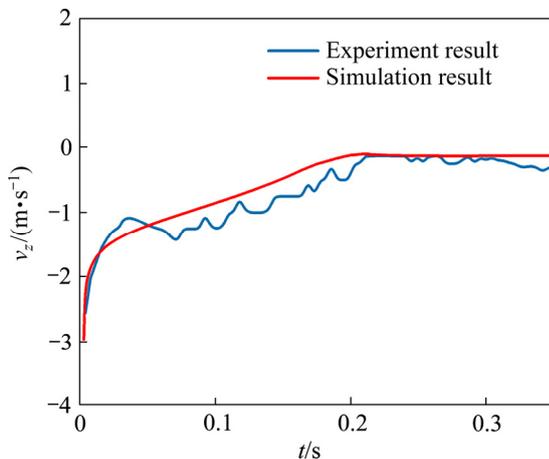


图 16  $t=160$  ms 时机器的入水特征对比

Fig. 16 Comparison of water entry characteristics of vehicle at  $t=160$  ms: (a) Experiment; (b) Numerical simulation

图 17 机器人  $z$  向位移Fig. 17  $z$  displacement of vehicle图 18 机器人  $z$  向速度Fig. 18  $z$  velocity of vehicle

## 5 结论

1) 波浪条件下深海采矿机器人在入水初始瞬间中水动力急剧变化, 经历第一次水动力峰值, 缆绳无法提供正向压力, 采矿机器人  $z$  向合力向上, 表现为非线性减速运动。

2) 随着入水深度的增加, 压力峰值区域从机器人前端沿流向移动; 当采矿机器人底部完全没入自由表面时峰值压力显著降低, 但压力影响区域随着入水过程不断扩大。

3) 单位无量纲时间内采矿机器人的纵荡位移在波浪的影响下随着布放速度的减小而增大; 但随着入水速度的增加, 深海机器人瞬时入水冲击力不断增大, 峰值时间相对提前, 机器人入水速度在 2 m/s 以下时较为合适。

4) 深海采矿机器人由于前进波浪作用而经历第二次  $z$  向水动力峰值, 机器人在垂向经历第二次非线性减速。

5) 利用高速摄影仪捕获的机器人入水冲击试验空泡特征和仿真结果吻合, 验证了数值计算方法和雷诺应力湍流模型对分离流模拟的有效性; 后续章节将基于上述方法开展深海采矿机器人海底行进水动力数值分析。

## REFERENCES

- [1] SHARMA R. Deep-Sea Mining: Current status and future considerations[C]//SHARMA R. Deep-Sea Mining: Resource Potential, Technical and Environmental Considerations. Cham: Springer International Publishing, 2017: 3–21.
- [2] TORO N, ROBLES P, JELDRES R I. Seabed mineral resources, an alternative for the future of renewable energy: A critical review[J]. Ore Geology Reviews, 2020, 126: 103699.
- [3] ORCUTT B N, BRADLEY J A, BRAZELTON W J, et al. Impacts of deep-sea mining on microbial ecosystem services[J]. Limnology and Oceanography, 2020, 65(7): 1489–1510.
- [4] 蒋训雄, 蒋伟. 深海矿产资源选冶加工研究现状及展望[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(10): 2861–2880. JIANG xun-xiong, JIANG wei. Research status and future prospect of mineral resources concentration and metallurgical processing in deep sea[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10): 2861–2880.
- [5] BOSCHEN R E, ROWDEN AA, CLARK M R, et al. Mining of deep-sea seafloor massive sulfides: A review of the deposits, their benthic communities, impacts from mining, regulatory frameworks and management strategies[J]. Ocean & Coastal Management, 2013, 84: 54–67.
- [6] MILLER K A, THOMPSON K F, JOHNSTON P, et al. An overview of seabed mining including the current state of development, environmental impacts, and knowledge gaps[J]. Frontiers in Marine Science, 2018, 4: 418.
- [7] 刘峰, 刘予, 宋成兵, 等. 中国深海大洋事业跨越发展的三十年[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(10): 2613–2623. LIU Feng, LIU Yu, SONG Cheng-bing, et al. Three decades' development of China in the deep sea field[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10): 2613–2623.

- [8] 黄牧,石学法,毕东杰,等. 深海稀土资源勘查开发研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(10): 2665–2682.  
HUANG Mu, SHI Xue-fa, BI Dong-jie, et al. Advances on the study of exploration and development of deep-sea rare earth resources[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(10): 2665–2682.
- [9] 杨建民,刘磊,吕海宁,等. 我国深海矿产资源开发装备研发现状与展望[J]. 中国工程科学, 2020, 22(6): 1–9.  
YANG Jian-min, LIU Lei, LÜ Hai-ning, et al. Present situation and prospect of research and development of deep-sea mineral resources exploitation equipment in China[J]. Engineering Science, 2020, 22(6): 1–9.
- [10] RAJESH S, GNANARAJ A A, VELMURUGAN A, et al. Qualification tests on underwater mining system with manganese nodule collection and crushing devices[C]// Proceedings of the 9th(2011) ISOPE Ocean Mining Symposium. Maui, USA, 2011: ISOPE-M-11-038.
- [11] HONG S, KIM H W, CHOI J S, et al. A self-propelled deep-seabed miner and lessons from shallow water tests[C]// Proceedings of the ASME 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Shanghai, China: [s. n.], 2010: OMAE2010-20313.
- [12] TEAGUE J, ALLEN M J, SCOTT T B. The potential of low-cost ROV for use in deep-sea mineral, ore prospecting and monitoring[J]. Ocean Engineering, 2018, 147: 333–339.
- [13] 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.
- [14] BILANDI R N, JAMEI S, ROSHAN F, et al. Numerical simulation of vertical water impact of asymmetric wedges by using a finite volume method combined with a volume-of-fluid technique[J]. Ocean Engineering, 2018, 160: 119–131.
- [15] CHEN H, QIAN L, MA Z, et al. Application of an overset mesh based numerical wave tank for modelling realistic free-surface hydrodynamic problems[J]. Ocean Engineering, 2019, 176: 97–117.
- [16] NGUYEN V, PHAN T, DUY T, et al. 3D simulation of water entry of an oblique cylinder with six-degree-of-freedom motions using an efficient free surface flow model[J]. Ocean Engineering, 2021, 220: 108409.
- [17] VAN-TU N, DUC-THANH V, PARK W, et al. Navier-Stokes solver for water entry bodies with moving Chimera grid method in 6DOF motions[J]. Ocean Engineering, 2016, 140: 19–38.
- [18] WEI Z, SHI X. Evolution of three-dimensional cavitation following water entry of an inclined cylinder[J]. Theoretical and Applied Mechanics Letters, 2012, 2(2): 022002.
- [19] HOU Z, SUN T, QUAN X, et al. Large eddy simulation and experimental investigation on the cavity dynamics and vortex evolution for oblique water entry of a cylinder[J]. Applied Ocean Research, 2018, 81: 76–92.
- [20] 侯昭. 圆柱体低速倾斜入水过程非定常多相流及旋涡特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.  
HOU Zhao. Research on Unsteady Multiphase Flow and Vortex Characteristics of Cylinder Inclined into Water at Low Speed[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [21] 蒋运华,徐胜利,周杰. 圆盘空化器航行体入水空泡实验研究[J]. 工程力学, 2017, 34(3): 241–246.  
JIANG Yun-hua, XU Sheng-li, ZHOU Jie. Experimental study on cavitation of a disk cavitation vessel entering water[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(3): 241–246.
- [22] HU X, LIU S. Numerical investigation of wave slamming of flat bottom body during water entry process[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014, 2014: 821689.
- [23] HU X, JIANG Y, CAI D. Numerical modeling and simulation of wave impact of a circular cylinder during the submergence process[J]. Modelling and Simulation in Engineering, 2017, 2017: 2197150.
- [24] 胡小舟. 深海采矿1000米海试系统主要部件布放中的水动力学问题研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.  
HU Xiao-zhou. Research on the hydrodynamic problems in the deployment of the main components of the 1,000-meter sea trial system for deep-sea mining[D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [25] 吕欣倍. 空中投放型AUV入水数值模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.  
LU Xin-bei. Numerical simulation study of air-launched AUV entering water[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015.
- [26] 齐铎,冯金富,余宗金,等. 机载布放式AUV入水冲击仿真研究[J]. 船舶力学, 2016, 20(10): 1281–1288.  
QI Duo, FENG Jin-fu, YU Zong-jin, et al. Simulation study on water impact of airborne AUV[J]. Journal of Ship Mechanics, 2016, 20(10): 1281–1288.
- [27] 赵庆新,丁忠军. 波浪条件下空投AUV入水数值模拟[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 128–132.  
ZHAO Qing-xin. DING Zhong-jun. Numerical simulation of

air-dropped AUV entering water under wave conditions[J].  
Journal of Huazhong University of Science and Technology  
(Natural Science Edition), 2021, 49(1): 128–132.

[28] FENTON J D. A fifth-order stokes theory for steady  
waves[J]. Journal of Waterway Port Coastal and Ocean  
Engineering, 1985, 111(2): 216–234.

## Simulation and experimental verification of water impact flow field of deep ocean mining vehicle entering water

HUANG Xin, DAI Yu, SU Qiao, CHENG Hui-yun, ZHU Xiang

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The safety and control performance of the deep ocean mining vehicle during the process of water entry directly affect the reliability of the mining system. In this paper, the numerical studies and experimental verification were conducted to research on the hydrodynamic behaviors and cavitation evolution of water entry of the deep ocean mining vehicle. The main contents are as follows: A gas-liquid-solid coupling numerical model of the deep ocean mining vehicle was established in STAR-CCM+ to research on the flow distribution and hydrodynamic characteristics of water entry of the vehicle. The kinematic and dynamic behaviors of the vehicle were predicted, including impact forces, displacement, velocity, and acceleration. The evolution of cavitation and the splash of free surface were numerically simulated and experimentally observed in a water entry test based on the high-speed photography method. The experimental results validated the feasibility and accuracy of the proposed numerical methods.

**Key words:** deep ocean mining vehicle; characteristics of water entry; cavitation evolution; numerical modeling

---

**Foundation item:** Project(51774324) supported by the National Natural Science Foundation of China

**Received date:** 2021-07-20; **Accepted date:** 2021-09-03

**Corresponding author:** DAI Yu; Tel: +86-13755116953; E-mail: daiyu\_6@aliyun.com

(编辑 何学锋)