

2 波浪环境下带助浮装置航行体落水冲击流场及 3 运动特性研究*

4 王占莹^{1,2}, 权晓波^{1,3}, 段金雄⁴, 孙铁志⁴

5 (1. 哈尔滨工程大学船舶工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

6 2. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076;

7 3. 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076;

8 4. 大连理工大学船舶工程学院工业装备结构分析优化与 CAE 软件全国重点实验室, 辽宁 大连 116024)

9
10 **摘要:** 为探究波浪环境下带助浮装置航行体下落冲击过程中的流场以及运动演化特性, 基于 CFD(computational
11 fluid dynamics)数值模拟技术, 在方法上耦合了 VOF(volume of fluid)多相流模型, $k-\omega$ SST 湍流模型, Schnerr-Sauer 空
12 化模型以及 Stokes 五阶非线性波理论, 建立了一套可靠有效的数值计算方法。对水平圆柱下落入水过程进行数值模拟,
13 试验与数值结果在下落位移上对比差异较小, 验证了入水冲击数值方法的有效性。采用速度边界数值造波方法获得的
14 造波结果与 Stokes 五阶非线性波理论吻合性较好。基于构建的数值方法, 在不同波浪海况环境下对带助浮装置航行体
15 下落入水冲击过程进行数值模拟, 分析冲击过程中航行体的运动学参数, 动力学参数以及入水空泡流场演化过程, 总
16 结了波浪环境下带助浮装置航行体的入水冲击特性。结果表明波浪环境对下落冲击过程的影响主要体现在运动衰减段,
17 水平方向的冲击相较于垂直方向的冲击受到波浪环境的影响要大得多, 不同海况对航行体的水平冲击造成的影响主要
18 是通过影响入水空泡的形成与溃灭过程实现的。计算得到的带助浮装置航行体冲击过程位移, 速度, 加速度以及助浮
19 装置受力数据为航行体波浪环境中落水回收的结构设计与安全试验指导提供了参考依据。

20 **关键词:** 带助浮装置航行体; 入水冲击; 冲击载荷; 波浪载荷

22 Study on the water falling impact flow field and motion 23 characteristics of vehicle with boost floatation aids in wave 24 environment

25 Wang Zhanying^{1,2}, Quan Xiaobo^{1,3}, Duan Jinxiong⁴, SUN Tiezhi⁴

26 (1. College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China;

27 2. Beijing Institute of Astronautical System Engineering, Beijing 100076, China;

28 3. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China;

29 4. State Key Laboratory of Structural Analysis and Optimization for Industrial Equipment and CAE Software, School of Naval
30 Architecture, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

31 **Abstract:** Based on the computational fluid dynamics (CFD) numerical methods, a set of reliable and effective numerical
32 methods for investigating the flow field and evolution characteristics of motion during the falling impact of water falling
33 vehicle with boost floatation aids in wave environment was established by coupling with volume of fluid (VOF) multiphase

*收稿日期: 2023-08-02; 修回日期: 2024-06-27;

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52071062)

第一作者: 王占莹(1983—), 女, 博士, 高级工程师. E-mail: zhanyingwang123@163.com

通信作者: 权晓波(1976—), 男, 博士, 研究员. E-mail: quanxiaobo147@163.com

34 flow model, $k-\omega$ SST turbulence model, Schnerr-Sauer cavitation model and Stokes fifth-order nonlinear wave theory. The
35 numerical simulation of the process of falling into water under a horizontal cylinder showed that the difference between the
36 experimental results and the numerical results in falling displacement was small, which verifies the validity of the numerical
37 method of water falling impact. The wave generation results obtained by the velocity boundary numerical wave generation
38 method were in good agreement with Stokes fifth-order nonlinear wave theory. Based on the established numerical method,
39 numerical simulation was carried out on the water falling impact process of the vehicle with boost floatation aids under
40 different wave sea states. The kinematic and dynamic parameters of the vehicle and evolution of water-entry cavity flow field
41 during the impact process were analyzed, and the water falling impact characteristics of the vehicle with boost floatation aids
42 under wave environment were summarized. The results show that the impact of wave environment on the falling impact
43 process is mainly reflected in the motion attenuation section. The horizontal impact is much more affected by the wave
44 environment than the vertical impact and the influence of different sea conditions on the horizontal impact of the vehicle is
45 mainly achieved by influencing the formation and collapse of the water-entry cavity. The calculated displacement, velocity,
46 acceleration and boost floatation aids force during the impact process of vehicle with boost floatation aids can be provided as a
47 reference for the structural design and safety test guidance of the vehicle recovery under wave environment.

48 **Keywords:** vehicle with boost floatation aids; water entry impact; impact load; wave load

49
50 航行体水下作业过程涉及问题综合性高, 技术难度大, 试验装置往往设计复杂, 为了提高试验
51 过程的可重复性, 经济性, 以及尽可能形成试验装置的有效保护措施, 提高试验装置的可回收性,
52 对航行体下落入水过程进行研究具有极大意义。试验航行体的回收重点是实现航行体可打捞性的提
53 高以及尽可能减小对水下发射平台的破坏威胁。目前航行体下落入水回收主要采用的方式是在下落
54 过程中弹出助浮装置 [2-3], 携带助浮装置的航行体在下落入水过程中不仅仅可以依靠助浮装置进行冲
55 击缓冲, 而且助浮装置提供的浮力可以使得航行体下沉深度减小, 进一步保护水下发射平台, 助浮
56 装置的存在使得航行体最终上浮至水面, 因此带助浮装置航行体的设计也减小了试验航行体的搜寻
57 与打捞难度。

58 航行体入水过程涉及结构冲击问题, 气液两相跨介质问题以及流固动力学耦合问题, 其冲击过
59 程复杂, 非线性显著, 这使得该问题研究难度大, 研究综合性高, 近些年航行体入水问题也一直是
60 国内外学者研究的重点问题[4-7]。祁晓斌[8]等基于 VOF 多相流模型和动网格技术对带尾翼航行体在高
61 速小角度入水时的空泡发展和弹体姿态变化进行了研究。宋武超[9]等利用数值模拟方法对不同头型回
62 转体低速倾斜入水过程进行了分析, 得到了不同头型条件下回转体入水空泡形态发展规律、回转体
63 运动特性及流体动力特性变化规律。Dong 等[10]对无人潜航器入水问题进行了研究, 其结果表明初始
64 倾角对航行体入水过程具有一定影响, 无人潜航器初始倾角对水平速度的影响随滚距角增大而减小,
65 对水平力的影响在入水后期则更为显著。Yuan 等[11]对半球形弹头垂直入水阻力特性进行了数值研究,
66 研究表明航行体头部平面扩张半角越大, 弹头头部冲击速度越小, 最大阻力系数值越大。Huang 等[12]
67 研究了救生艇以不同倾斜角度与高度释放的下落入水过程, 结果表明, 较大的落水角可以减小入水
68 压力冲击, 但入水角也决定了救生艇入水时的运动模式, 入水角度过低或过高都会导致救生艇入水
69 后出现不良状态。

70 除了静水环境下的航行体入水问题, 研究者们还对航行体在波浪环境下的入水进行了研究。史
71 崇镔[13]通过建立数值预报模型对不同波浪环境下飞潜器入水过程进行了模拟, 结果表明波浪会对飞
72 潜器入水运动特性产生影响, 波浪工况下飞潜器具有更大的水平速度和更小的垂直速度, 升、阻力
73 系数也发生了变化。杨晓光等[14]通过实验对波浪环境下的高速入水物体进行了研究, 分别对静水、
74 不同波面位置、不同波高等条件下的模型入水过程中的加速度、姿态角等物理量进行了测量, 研究
75 结果表明波浪对入水过程的影响主要体现在入水时入水角度相对于水面的变化。李治涛等[15]分析了
76 高速旋转射弹在不同波浪相位下的入水过程, 研究发现波面的存在使得弹体实际有效入水角发生了

77 变化,进而影响了入水运动特征。Zhang 等^[16]在波浪环境下对楔形断面体的入水过程进行了数值模拟,
78 重点分析了不同断面曲率楔形体在不同波浪相位处的入水流域发展情况以及入水物体的力学响应特
79 性。Zhao 等^[17]采用了试验与数值相结合的方法探究了周期性发展波浪作用下的球体入水空泡演化过
80 程以及流动结构特性,具体分析了不同波浪相位入水位置 and 不同弗劳德数对入水小球所受的水动力
81 特性影响。Cheng 等^[18]基于高阶边界元方法研究了夹带气半圆航行器斜入五阶 Stokes 波的入水问题,
82 通过数值模拟的方法研究了波幅、波长、初始相位、初始气压以及航行器速度等影响参数对航行器
83 入水空泡的影响,研究表明,波浪的存在延缓了入水气穴的形成,随着波浪非线性的增加,气穴的
84 形状不对称性增加,气穴形成后流体压力急剧增加。

85 由于助浮装置在航行体下落入水过程中可以起到较好的缓冲与提供浮力作用,对带助浮装置的
86 航行体下落入水冲击过程进行研究可以进一步形成并优化助浮装置结构设计。赵蛟龙等^[19]在考虑可
87 压缩性的基础上推导出了带空腔复杂结构的落水数学模型,并研究了不同落水角度下结构表面水动
88 力载荷的变化规律。陈洋等^[20]基于 LS-DYNA 对带环形密闭气囊弹体入水冲击过程进行了数值分析,
89 计算了不同初始气囊内压条件下弹体的入水深度、减速时间及连接绳的拉力峰值。陈开颜^[21]等通过
90 试验与数值结合的方式辨识出了带囊回转体落水过程的影响因素,并基于大尺度带囊回转体落水试
91 验研究了不同囊-体连接结构形式的落水特征。包健等^[22]基于 ABAQUS 的耦合欧拉-拉格朗日方法对
92 不同姿态角和不同初始囊压条件下的带气囊航行体低速落水后的运动过程、囊压变化以及连接带的
93 受力情况进行了研究。

94 综合上述,带助浮装置航行体落水相关研究为航行体落水回收的方案设计与结构参数设计提供
95 了一定的参考依据,但是相关研究均为考虑静水环境下航行体的下落过程,而现实航行体下落环境
96 往往伴随着波浪的发展,因此本文基于 CFD 数值模拟技术构建了波浪环境下带助浮装置航行体下落
97 冲击的数值模型,基于数值模型对波浪环境下带助浮装置航行体的下落冲击与下沉-上浮过程进行了
98 研究,重点关注了下落冲击到上浮下沉过程中的航行体动力学响应以及载荷变化情况,为带助浮装
99 置航行体的设计与回收提供了一定的参考作用。

100 1 数值理论基础

101 1.1 控制方程

102 本文中流体为不可压粘性流且过程中不涉及热力学能量的相互交换,所以采用的数值模拟
103 控制方程不引入能量方程,仅包括质量守恒方程和动量守恒方程。

104 质量守恒方程体现了流体运动中的质量守恒定律,又称为连续性方程,其微分形式如下:

$$105 \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

106 式中 ρ 为流体混合相密度项, u_i 为流体速度在 i 方向上的分量项, t 为时间项, x_i 为流体在 i 方向上
107 的位置坐标项。

108 通过动量定理可推导出流体运动的动量守恒方程,其微分形式如下:

$$109 \quad \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g \quad (2)$$

110 式中 p 为压力项, g 为重力加速度项, τ_{ij} 为粘性剪应力项,具体定义如下:

$$111 \quad \tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

112 式中 μ 为混合动力粘度系数项。

113 1.2 VOF 多相流模型

114 本文通过 VOF 多相流模型来捕捉不同相流体之间的交界面,该模型以各相不同的的体积分数来

115 描述不同的流体, 并假设流体共享速度场和压力场, 分别以 α_l , α_g , α_v 表示液相, 气相与水蒸气相的
116 体积分数, 各相体积分数满足下式关系:

$$117 \quad \alpha_l + \alpha_g + \alpha_v = 1 \quad (4)$$

118 计算过程中每个流体单元的动态混合密度项和动态混合动力粘度项分别由以下两式确定:

$$119 \quad \rho = \alpha_l \rho_l + \alpha_g \rho_g + \alpha_v \rho_v \quad (5)$$

$$120 \quad \mu = \alpha_l \mu_l + \alpha_g \mu_g + \alpha_v \mu_v \quad (6)$$

121 式中 ρ_l , ρ_g , ρ_v 分别为液相, 气相与水蒸气相的密度, μ_l , μ_g , μ_v 分别为液相, 气相与水蒸气相
122 的动力粘度。

123 1.3 湍流模型

124 $k-\omega$ SST湍流模型考虑到湍流剪切应力的输运, 不但能够对各种来流进行准确的预测, 还能在各
125 种压力梯度下精确模拟分离现象, 其综合了近壁面 $k-\omega$ 模型的稳定性及边界层外部 $k-\varepsilon$ 模型独立性的
126 优点, 因此本文采用 $k-\omega$ SST湍流模型对下落水冲击过程中的湍流流动进行模拟, 其输运方程如下^[23]:

$$127 \quad \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = P_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (7)$$

$$128 \quad \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \omega)}{\partial x_i} = \frac{\gamma}{\mu_t} \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + 2(1-F_1) \rho \sigma_\omega \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (8)$$

$$129 \quad \mu_t = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, S, F_2)} \quad (9)$$

130 式中, P_k 为方程生成项, k 为湍动能项, ω 为湍动能比耗散率项, σ_k , σ_ω , γ , α_1 , β , β^* 均为常
131 数项, S 为应变速率项, F_1 与 F_2 均为控制常数的加权函数项。

132 1.4 空化模型

133 由于航行体下落入水过程中往往伴随着空化现象, 所以本文采用通过简化 Rayleigh-Plesset 空化
134 动力学方程^[24]得到的 Schnerr-Sauer 空化模型来模拟空化现象, 其水蒸气输运方程如下:

$$135 \quad \frac{\partial(\rho_v \alpha_v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_v \alpha_v u_i)}{\partial x_i} = \dot{m}^+ - \dot{m}^- \quad (10)$$

$$136 \quad \dot{m}^+ = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{R_b} \sqrt{\frac{2 \max(p_v - p, 0)}{\rho_l}} \quad (11)$$

$$137 \quad \dot{m}^- = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{R_b} \sqrt{\frac{2 \max(p - p_v, 0)}{\rho_l}} \quad (12)$$

138 其中, \dot{m}^+ 与 \dot{m}^- 分别为蒸发源项与冷凝源项, R_b 为气泡半径项, p 为环境压力项, p_v 为饱和蒸气
139 压项。

140 1.5 数值波浪水池模型

141 为了得到与真实海浪接近的波浪环境, 本文采用 Stokes 五阶非线性波理论构建数值波浪水池,
142 具体采用 Fenton^[25]将流函数展开为傅里叶级数形式并将波陡作为摄动参数进行展开所得到的五阶
143 波的解, 其波面方程与速度势表达式分别如下:

$$144 \quad k\eta(x) = kd + \varepsilon \cos kx + \varepsilon^2 B_{22} \cos 2kx + \varepsilon^3 B_{31} (\cos kx - \cos 3kx) + \varepsilon^4 (B_{42} \cos 2kx + B_{44} \cos
145 \quad + \varepsilon^5 (-B_{53} + B_{55}) \cos kx + B_{53} \cos 3kx + B_{55} \cos 5kx) + O(\varepsilon^6) \quad (13)$$

$$146 \quad \phi(x, y, t) = (c - \bar{u})x + C_0 \left(\frac{g}{k^3} \right)^{\frac{1}{2}} \sum_{i=1}^5 \varepsilon^i \sum_{j=1}^i A_{ij} \cosh(jky) \sin(jk(x - ct)) + O(\varepsilon^6) \quad (14)$$

147 其中, d , k , ε 分别为水深, 波数, 波陡, \bar{u} 为任意高程处一个波长范围内的平均流速, C_i , A_{ij} ,
148 B_{ij} 为无量纲系数。

149 基于上述波浪理论, 本文通过 wave forcing^[26]方法实现波浪水池的数值造波与消波, 该方法通过
150 在控制方程中加入一源项, 使得从距离航行体一定距离处开始, 由控制方程得到的流动变量逐渐趋

151 近于波浪模型的理论解，直到在流域边界处，所得的流动变量完全等于波浪模型的理论解，添加的
152 源项如下：

$$153 \quad q_\phi = -\alpha\rho(\phi - \phi^*) \quad (15)$$

154 式中 ρ 为流体密度， ϕ 为输运方程的当前解， ϕ^* 为 wave forcing 求解所接近的值， α 为力系数，定
155 义如下：

$$156 \quad \alpha = \alpha_0 \cos^2\left(\frac{\pi d}{2d_1}\right) \quad (16)$$

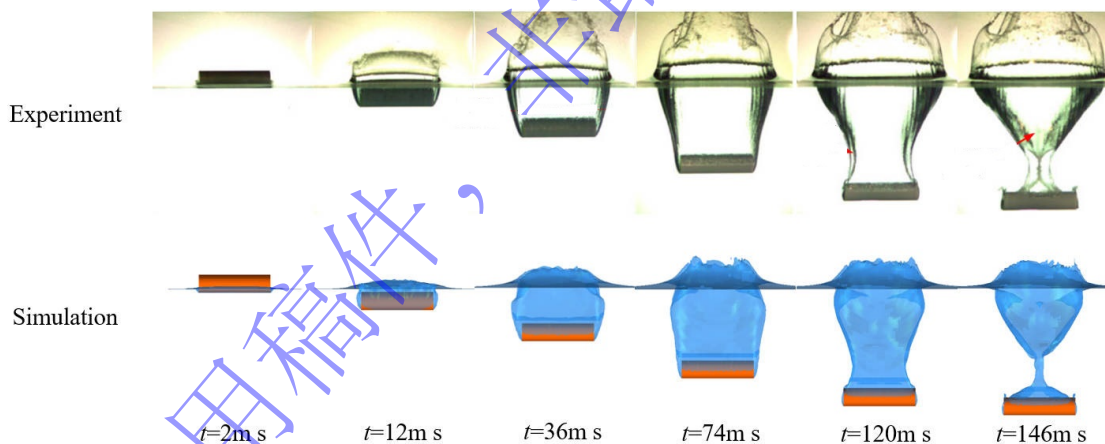
157 式中 d 为距边界距离， d_1 为应用 wave forcing 的区域宽度。

158 2 数值方法验证与模型建立

159 2.1 下落入水冲击数值方法验证

160 本文通过 CFD 方法构建了带助浮装置航行体下落入水冲击的数值模型，其中利用 VOF 多相流模
161 型捕捉不同流体之间的交界面，利用 $k-\omega$ SST 湍流模型捕捉湍流流动细节，利用 Schnerr-Sauer 空化模
162 型实现空化模拟，利用重叠网格与滑移网格相结合的方法实现航行体下落冲击的六自由度运动与助
163 浮装置的转动展开过程。为了验证以上数值方法的准确性，本文通过数值模拟方法对 Wei 等^[27]的下
164 落圆柱试验进行了复现，并将数值模拟得到的下落圆柱的入水空泡形态与下落位移时历曲线结果与
165 试验结果进行了对比。

166 图 1 给出了试验与数值得到的圆柱入水过程中空泡形态的发展情况，结果表明本文数值方法可
167 以有效地捕捉到物体入水过程中空泡的生成，发展与拉断现象，对比可知试验结果和数值模拟结果
168 基本吻合。



169 图 1 圆柱入水空泡形态试验与数值结果对比

170 Fig.1 Comparison of experimental and numerical results of cylindrical water-entry cavitation

171 图 2 给出了试验与数值得到的圆柱入水冲击过程中质心位置时历变化情况，经过计算本文数值
172 算法结果与试验结果之间在不同时刻的误差均保持在 5% 以下，因此本文构建的下落入水冲击数值方
173 法可以较好预示物体下落冲击过程。
174

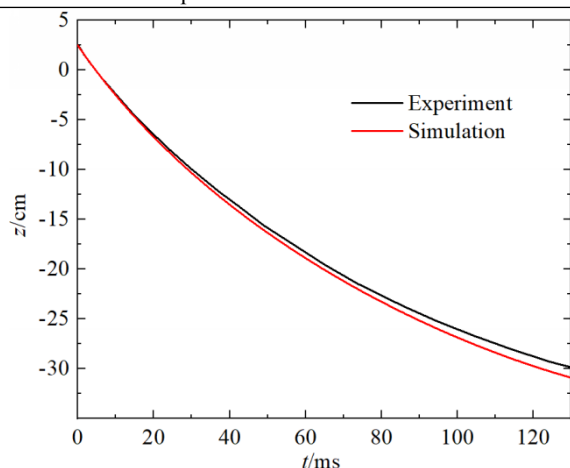


图2 圆柱下落冲击过程质心位置时历曲线对比

Fig.2 Comparison of the time history curve of centroid position during cylinder falling impact

2.2 数值波浪水池方法验证

本文基于 Stokes 五阶非线性波理论，通过 wave forcing 方法进行了波浪水池的构建，为了验证数值水池的有效性与稳定性，本文进行了数值波浪水池的方法有效性验证。在有效性验证中构建了如图 3 所示的长 60 m，宽 7 m，高 15 m 的立方体数值造波水池，水池入口，出口以及底面均设为速度入口边界，顶部设置为压力出口边界，前后设置为对称平面。

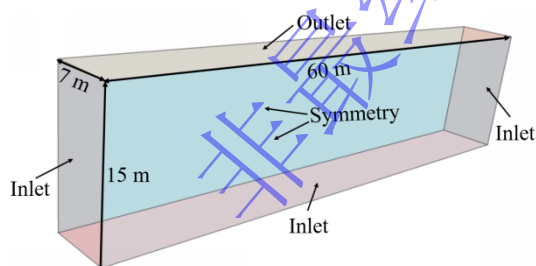


图3 数值造波水池几何模型

Fig.3 Numerical wave pool geometry model

基于构建完成的数值波浪水池对波高 $H=1$ m，周期 $T=3$ s，水深 $h=10$ m 的海况进行数值模拟，模拟中保证波高方向单位网格尺度为 $H/32$ ，波长方向与垂直波长方向单位网格尺度为 $L/120$ ， L 为波长。设定距离入口 15 m 区域与距离出口 15 m 区域为 wave forcing 力消波区， $x=15$ m~ $x=45$ m 区域为有效计算区，每隔 5 m 设置一个浪高仪对波高时历进行监测，具体布置如图 4 所示。

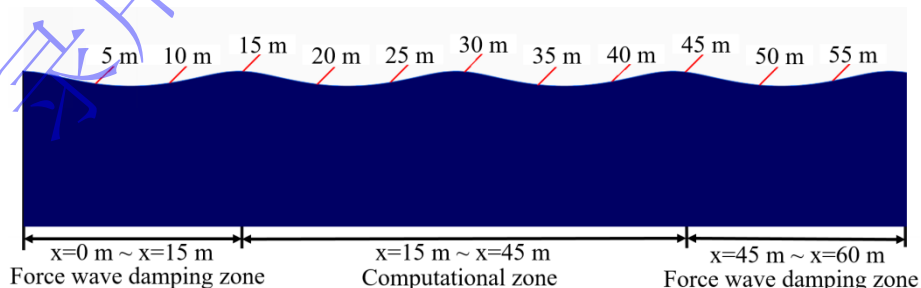


图4 浪高仪布置情况

Fig.4 The layout of waveprobes

图 5 给出了 $t=35$ s 时刻计算域中波浪波高分布的数值与理论对比情况，图 6 给出了 $x=20$ m 处与 $x=40$ m 处的波高时历曲线数值与理论对比情况，对比结果表明本文数值波浪水池方法在造波稳定性与准确性方面都满足后期开展波浪环境下带助浮装置航行体冲击入水研究的条件。

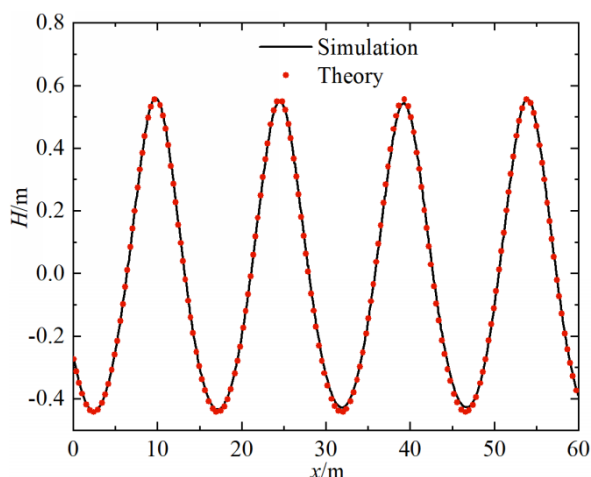
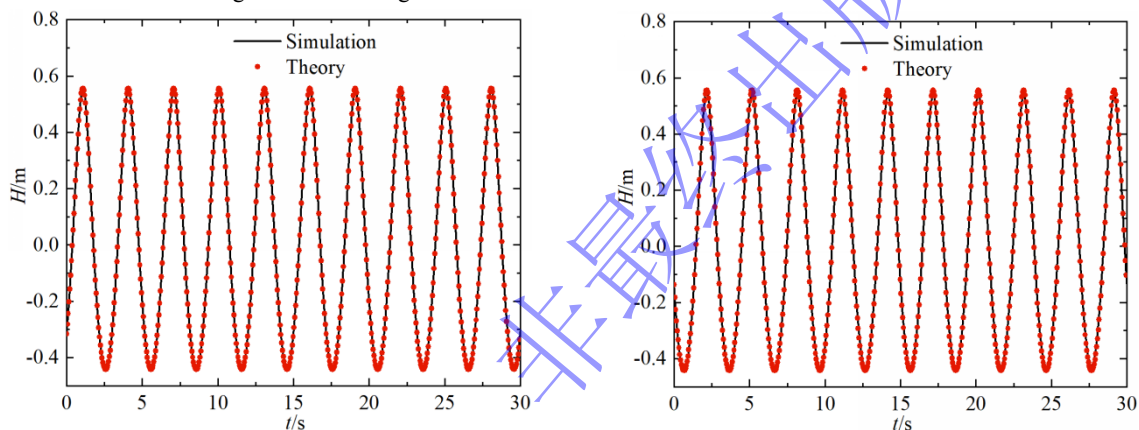


图 5 $t=35$ s 时刻计算域中波浪波高分布情况

Fig.5 The wave height distribution in the calculation domain at time $t=35$ s



(a) Wave height comparison at $x=20$ m

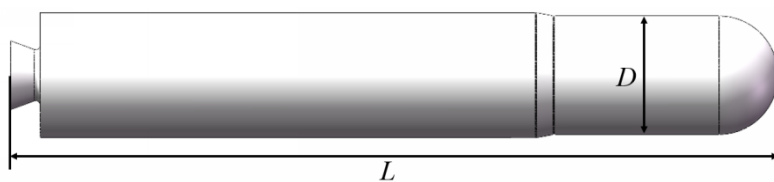
(b) Wave height comparison at $x=40$ m

图 6 $x=20$ m 处与 $x=40$ m 处波高时历曲线

Fig.6 The time history curve of wave height at $x=20$ m and $x=40$ m

2.3 带助浮装置航行体下落入水冲击数值模型构建

199
200
201
202
203 本文通过将航行体与助浮装置作为同一个六自由度体来模拟助浮装置与航行体的虚拟连接，实
204 现了助浮装置与航行体运动绑定与受力绑定，助浮装置与航行体绑定运动的同时利用滑移网格的方
205 式实现了助浮装置在冲击入水过程中的转动展开过程，计算中对航行体与助浮装置之间的连接杆进
206 行了忽略，模拟实现了助浮装置与航行体之间的刚性连接，固定了航行体与助浮装置之间的相对距
207 离，由于连接杆相较于助浮装置与航行体体积来说其直径较小，其对流场的扰动可以忽略不计，所
208 以计算过程中忽略了连接杆的实际体积。计算采用的航行体模型与助浮装置模型如图 7 所示，航行
209 体总长为 L ，第一级直径为 D 。助浮装置采用椭球体结构，椭球长轴半径为 R ，短轴为长轴的一
210 半。助浮装置分布在航行体两侧，助浮装置椭球中心距离航行体头部为 $2.34D$ ，距离航行体中轴线为
211 $2.56D$ 。
212



(a) Vehicle geometry model

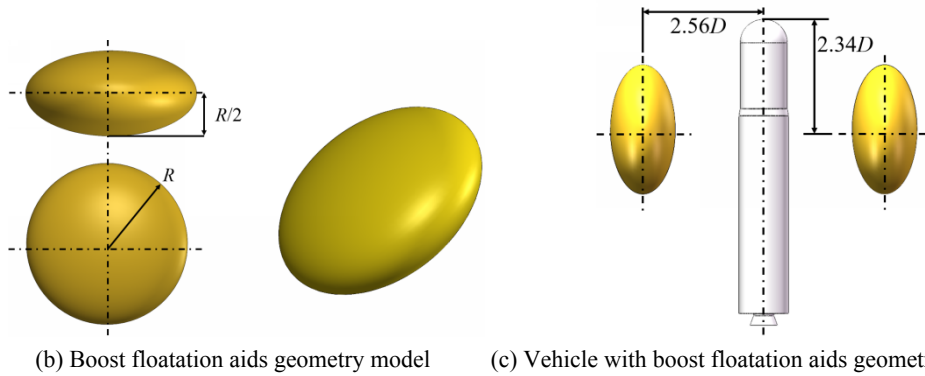
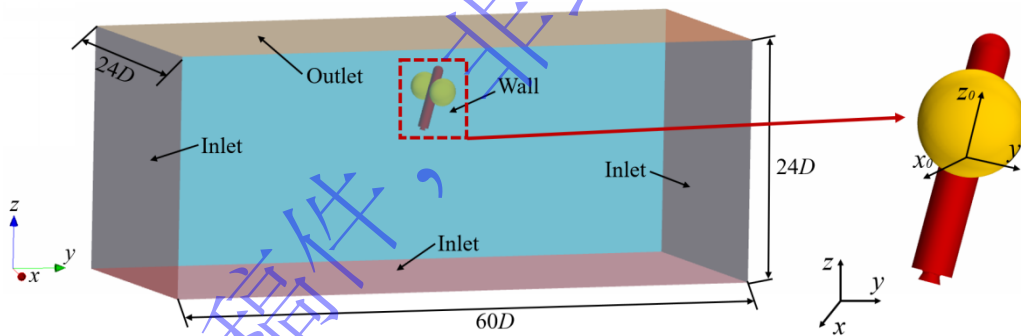


图7 计算模型几何尺寸

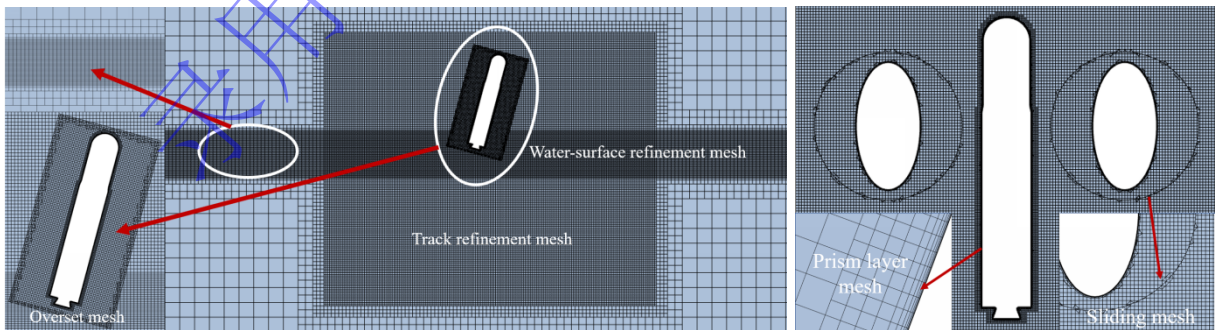
Fig.7 The geometric dimensions of computational model

215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228

图8给出了波浪环境下带助浮装置航行体的下落冲击过程计算域设置与网格划分情况，计算域长 $60D$ ，宽 $24D$ ，高 $24D$ ，深 $14D$ 的方形波浪水池，计算域边界设置与数值造波水池边界设置保持一致，航行体与助浮装置壁面设置为无滑移壁面边界条件。本文计算设置有大地坐标系 $x-y-z$ 与航行体坐标系 $x_0-y_0-z_0$ ，其中大地坐标系 z 轴方向为波高方向， y 轴为波长方向， x 轴为波浪展向，航行体坐标系原点设定在航行体质心处， x_0 轴与 y_0 轴为航行体径向方向， z_0 轴为航行体轴向方向。距离入口 $20D$ 区域与距离出口 $20D$ 区域设定为力消波区，航行体质心前后 $10D$ 区域为有效计算区域。计算域整体网格分为背景区域与重叠网格区域，背景区域中设置波面加密区与航行体下落路径加密区，重叠区与背景区通过重叠网格界面连接，重叠区内航行体与助浮装置壁面设置棱柱层网格，助浮装置转动展开过程通过滑移网格方法实现，助浮装置区域网格通过滑移网格界面与外部网格进行求解过程中的信息交互。



(a) Computing domain and boundary conditions



(b) Background mesh

(c) Overset mesh

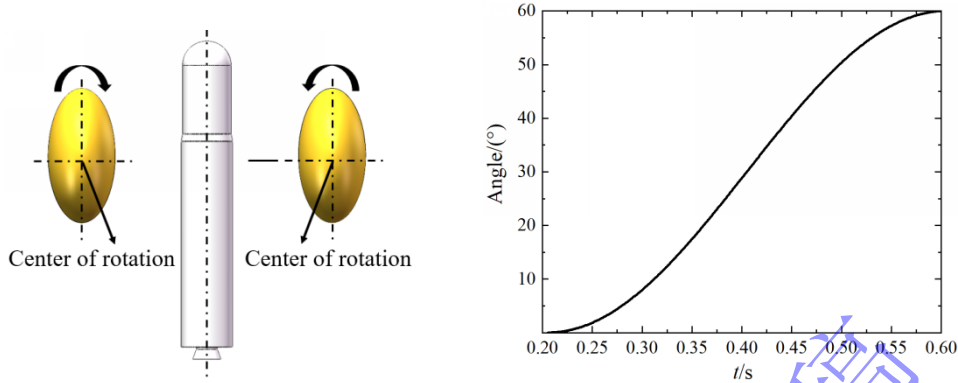
图8 计算域设置与网格划分方案

Fig.8 Computing domain setup and meshing scheme

231
232
233
234
235
236

助浮装置在航行体下落过程中进行转动展开，转动围绕助浮装置旋转中心进行，助浮装置初始触水时开始转动，转动角度按照正弦曲线规律变化，当旋转角度达到 60° 时停止转动，图9给出了

237 助浮装置转动方向示意与转动角度的时历曲线变化，整个转动展开过程从 0.405 s 开始，0.804 s 结束，
238 展开完成后助浮装置始终保持与航行体中轴线成 60° 夹角。



(a) Rotation direction of boost floatation aids (b) Time history change of boost floatation aids rotation angle

图 9 助浮装置转动方向示意与转动角度变化时历曲线

Fig.9 Boost floatation aids rotation direction and the time history curve of rotation Angle

239 本文在波浪环境下的带助浮装置航行体下落冲击模拟中设定航行体初始时刻中轴线与 z 轴轴线成
244 15° 夹角，中轴线与航行体尾部交点距离波峰点 0.2 m 距离，下落初始速度设定为沿 z 轴逆向 7.5 m/s。
245 航行体水下作业试验中，由于航行体尾部助推动力耗尽，航行体在空中进入自由下落过程，该过程
246 中航行体头部在上，尾部在下，其尾部往往最先接触水面，因此本文研究航行体尾部向下入水过程
247 对工程指导更具有针对性，并且航行体尾部构型相比于头部流线型来说更加具有复杂性，其流场演
248 化更加剧烈，入水冲击过程更加复杂，这使得选取尾部入水冲击过程开展研究可以对入水冲击流场
249 进行更加深入的挖掘分析。随着初始下落航行体中轴线与 z 轴所成夹角的减小，航行体最大入水深度
250 逐渐增加，并在垂直落水时达到峰值^[22]，因此为了综合考虑航行体姿态对入水过程的影响以及捕捉
251 较极端危险工况，本文计算设定航行体初始时刻轴线与 z 轴轴线呈 15° 夹角。

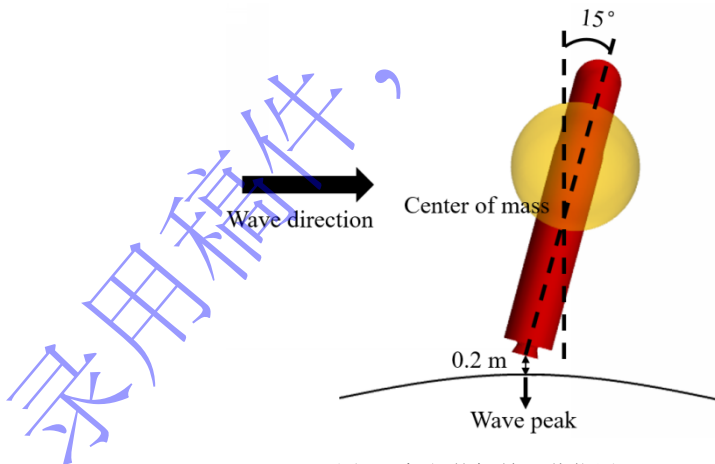


图 10 航行体初始下落位置

Fig.10 Initial drop position of vehicle

255 为了便于后续结果的分析比对，对相关参数进行无量化，其具体定义如下：
256 无量纲时间：

$$257 \quad \bar{t} = \frac{v_0 t}{L} \quad (17)$$

258 其中 t 为实际时间， v_0 为航行体初始下落速度，即 7.5 m/s， L 为航行体总长，即 3.25 m。

259 无量纲位移：

260
$$\bar{z} = \frac{z}{L} \quad (18)$$

261
$$\bar{y} = \frac{y}{D} \quad (19)$$

262 其中 \bar{z} 为无量纲垂向位移, z 为实际垂向位移, L 为航行体总长; \bar{y} 为无量纲横向位移, y 为实际横向位
263 移, D 为航行体第一级直径。

264 无量纲速度:

265
$$\bar{v}_z = \frac{v_z}{\sqrt{gL}} \quad (20)$$

266
$$\bar{v}_y = \frac{v_y}{\sqrt{gL}} \quad (21)$$

267 其中 \bar{v}_z 为无量纲垂向速度, v_z 为实际垂向速度, g 为重力加速度, 本文取 9.81 m/s^2 ; \bar{v}_y 为无量纲横向
268 速度, v_y 为实际垂向速度。

269 无量纲加速度:

270
$$\bar{a}_z = \frac{a_z}{g} \quad (22)$$

271
$$\bar{a}_y = \frac{a_y}{g} \quad (23)$$

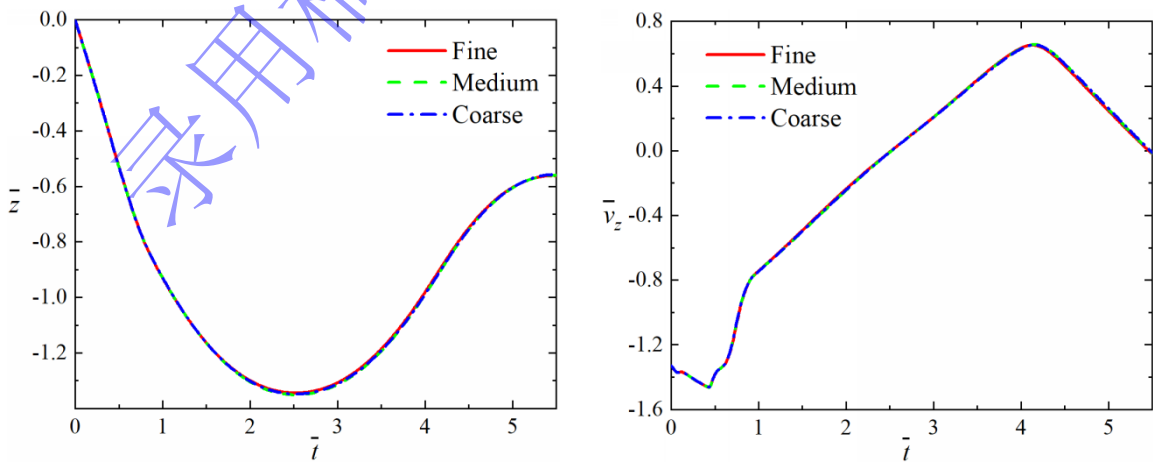
272 其中 \bar{a}_z 为无量纲垂向加速度, a_z 为实际垂向加速度; \bar{a}_y 为无量纲垂向加速度, a_y 为实际垂向加速度。

273 无量纲压力:

274
$$\bar{P} = \frac{P}{P_0} \quad (24)$$

275 其中 \bar{P} 为无量纲压力, P 为实际压力, P_0 为一个大气压强值, 本文取 101325 Pa 。

276 通过改变重叠区网格与背景加密区网格大小, 形成总体网格数量分别为 750 万、630 万和 530 万
277 的粗、中、细三套网格划分方案, 第一层网格大小设置为 $2.5 \times 10^{-4} \text{ m}$, 计算得到实际 $y+$ 值保持在
278 $0 \sim 150$ 之间, 计算采用全 $y+$ 壁面处理模型。基于三套网格划分方案对波高 $H=1 \text{ m}$, 周期 $T=3 \text{ s}$ 的特定
279 海况带助浮装置航行体下落入水过程进行计算, 计算结果如图 11 所示, 对比分析可知三套网格计算
280 结果最大相对误差均保持在 5% 以下, 因此综合考虑模拟计算精度, 稳定性以及计算效率, 本文模拟
281 研究选择网格数量为 630 万的中网格划分方案。



282 (a) Time history of vertical displacement of vehicle
283 (b) Time history of vertical velocity of vehicle

图 11 网格无关性计算结果

Fig.11 Grid independence calculation results

284

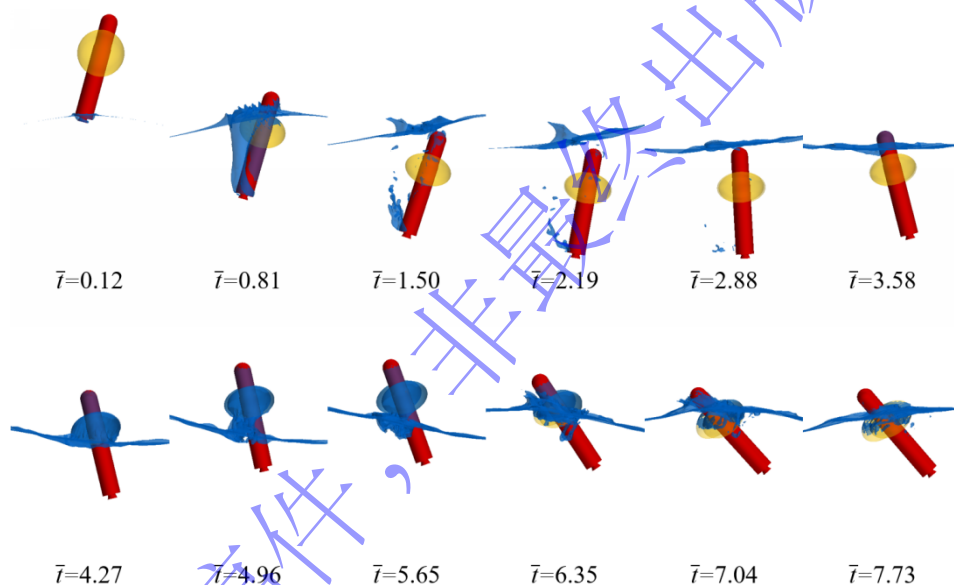
285

286 3 计算结果与分析

287 3.1 波浪环境下航行体下落运动过程分析

288 本文通过对波高 $H=1\text{ m}$ ，周期 $T=3\text{ s}$ 的特定海况下的航行体下落入水过程进行分析，探究波浪环
289 境对带助浮装置航行体下落冲击过程的具体影响与内在机理。

290 如图 12 所示，航行体带助浮装置下落冲击过程具体经历了下落冲击段，下沉段，上浮段，以及
291 下落-上浮过程衰减段，其中衰减段中航行体垂直位移与垂直速度逐渐趋近于稳定值，不再发生较大
292 变化，这也表征着带助浮装置航行体的下落冲击过程结束。第一次的下落-下沉-上浮过程由于航行体
293 具有一定的初始速度，在重力的作用下进入短暂加速阶段，加速结束后其下落速度达到最大值 $\bar{v}_z=-$
294 1.465 ，所以波浪对其运动状态没有明显的影响。当 $\bar{t}=2.52$ 时，航行体下落速度减为零，达到下落最
295 大位移 $\bar{z}=-1.351$ ，此后航行体进入首次上浮阶段。在上浮阶段中向上的浮力使得航行体具有向上的加
296 速度，在浮力加速度的作用下航行体再次越出水面并于 $\bar{t}=5.47$ 时达到最大上浮位置，紧接着航行体在
297 重力的作用下再次下落，即进入衰减运动段。进入运动衰减过程后航行体在垂直方向速度较小，因
298 此衰减阶段波浪对其的运动影响显著。

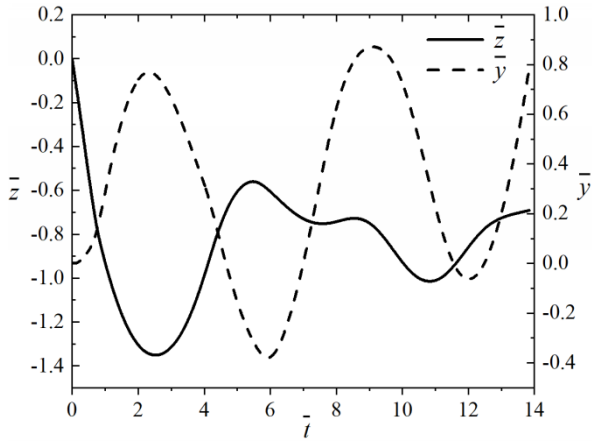


299 图 12 航行体下落-下沉-上浮过程
300

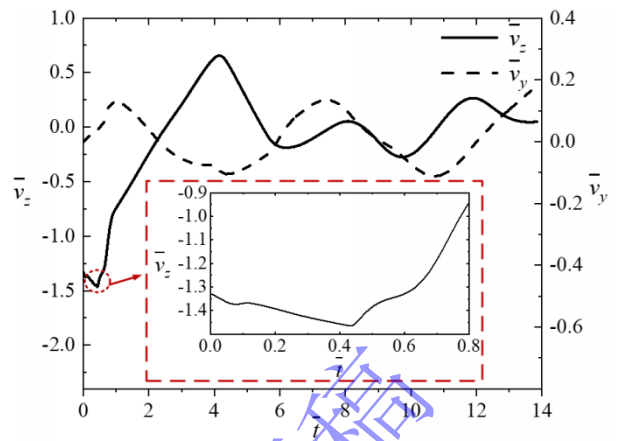
301 Fig.12 Vehicle fall-sink-rise process

302 图 13 与图 14 分别给出了航行体的位移与速度曲线，图 15 给出了航行体冲击下落过程的速度方
303 向矢量发展情况，从结果中可以发现当航行体进入运动衰减段后其运动状态体现出了与波浪的强相
304 关性，特别是航行体横向运动状态与波浪传播相位直接相关，波浪的作用使得航行体的运动状态偏
305 移了物体静浮运动的震荡衰减模式，其横向运动呈现出了随波性的摇荡模式。在航行体下落初期的
306 短暂加速过程中，垂直速度曲线初期出现了两个速度突变时刻，分别为 $\bar{t}=0.08$ 与 $\bar{t}=0.19$ ， $\bar{t}=0.08$ 为航
307 行体底部触水时刻，底部接触水面形成了短暂的反向冲击力，这使得航行体下落加速阶段出现了短
308 暂的减速， $\bar{t}=0.08$ 为航行体助浮装置触水时刻，触水形成的反向冲击力导致了航行体第二次减速，并
309 且由于触水面积大，其触水冲击力相较于航行体尾部触水时更大，持续时间更长，这也使得航行体
310 下落加速阶段结束，进入了下落减速阶段。航行体第二次下落进入运动衰减段并于 $\bar{t}=6.23$ 时航行体下
311 落速度达到最大，此时下落速度 \bar{v}_z 仅为 -0.189 m/s ，在助浮装置浮力的作用下，航行体开始减速下沉，
312 当 $\bar{t}=7.59$ 时航行体下落速度再次减为零并开始上浮，此时由于上浮位置处于波谷与波峰之间的波后相
313 位，航行体与助浮装置受到了具有垂直向下速度的水质点的作用，上浮速度受到极大抑制，上浮仅
314 仅持续到 $\bar{t}=8.55$ 后航行体再次进入下落阶段，此后航行体的浮动主要受波浪影响，即进入随浪漂浮

315 沉状态。



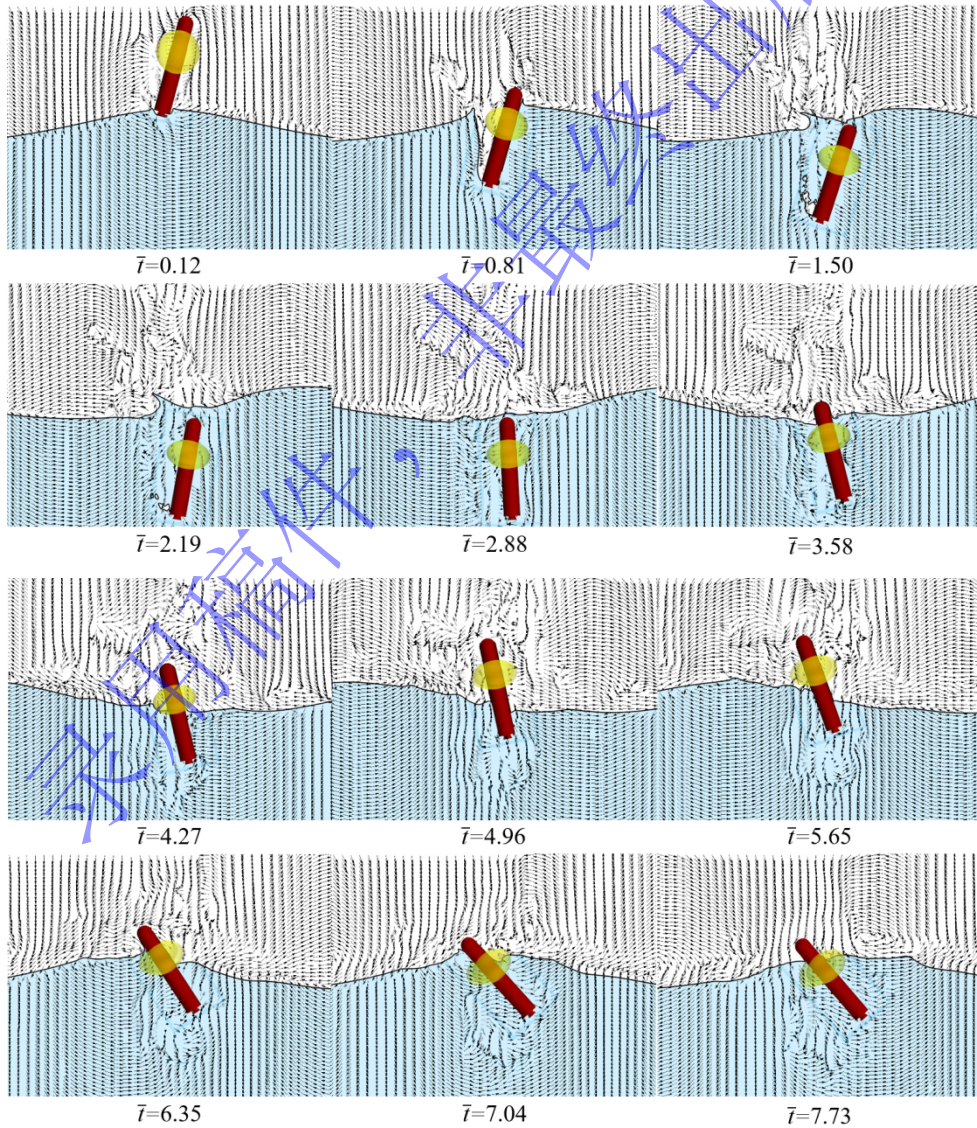
316



317 图 13 航行体位移时历曲线图

图 14 航行体速度时历曲线

318 Fig.13 The time history curve of vehicle's displacement Fig.14 The time history curve of vehicle's velocity



319

320

321

322

图 15 航行体冲击下落过程速度方向矢量

Fig.15 Velocity vector of vehicle during impact fall process

323 由于航行体下落初始不具有初始水平速度，所以航行体水平方向的运动显著地受到初始释放角
324 度与波浪水质点的影响。航行体下落时尾部抨击水面，由于航行体入水存在一定的倾斜角度，所以
325 沿航行体轴线的抨击力不仅仅产生了垂直向上的冲击力，而且还产生了+y方向的推动力，加之航行
326 体初始下落时波峰水平向右水质点的作用，航行体初始下落时产生了水平+y向位移，而随着航行体
327 下落深度的增加，航行体周围的波浪相位发展为了波谷相位，水平逆向的水质点使得航行体水平位
328 移方向变为了-y方向。当航行体第二次下落进入运动衰减段时，由于下落位置正好处于波浪波峰相
329 位，其航行体尾部受到了与波浪传播方向相同即+y方向运动水质点的冲击作用，其航行体水平逆向
330 速度开始减小并产生了水平正向速度，此后航行体水平速度即随着处于波浪的不同相位而改变，而
331 位移则呈现整体正向水平运动，局部短时逆向水平运动。

332 图 16 给出了航行体冲击下落过程中的 x_0 轴转角变化情况，规定绕 x_0 轴逆时针为正向转角，初始
333 下落过程中航行体尾部抨击力与航行体重力形成了沿 x_0 轴顺时针方向的偏转，随着波浪的发展，航
334 行体与助浮装置完全入水后波谷处的水平逆向水质点作用于航行体与助浮装置，由于助浮装置布置
335 位置相较于航行体质心偏上，所以波浪水质点的冲击使得航行体发生沿 x_0 轴逆时针方向偏转。航行
336 体在助浮装置浮力作用下第一次上浮，由于惯性作用，助浮装置再次出水，在下落过程中，航行体
337 尾部段与波浪波峰遭遇，这使得航行体沿 x_0 轴逆时针偏转加剧，当 $t=7.28$ 时航行体偏转达到了沿 x_0
338 轴逆时针 58.048° ，此后航行体尾部与头部先后经历了波浪的波谷与波峰相位，使得航行体发生了沿
339 x_0 轴顺时针偏转，最终航行体速度衰减达到一个较小水平，运动主要受波浪影响，转角随着波浪传播
340 呈现周期性偏转。

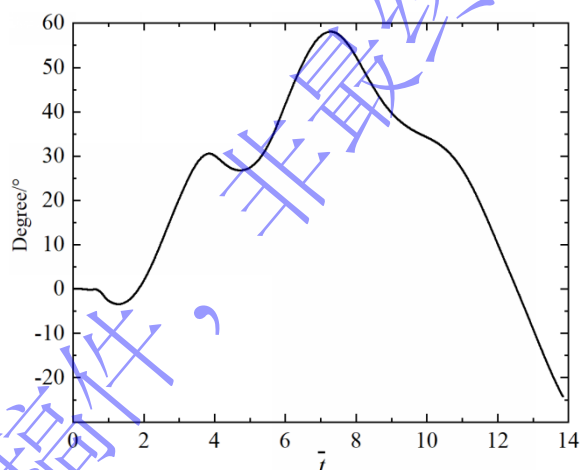


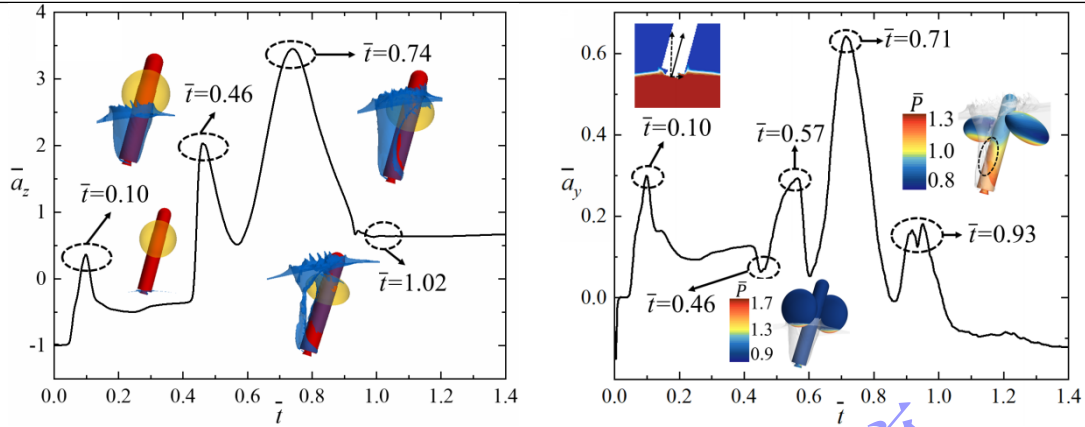
图 16 航行体转角时历曲线

Fig.16 The time history curve of vehicle's angle

341
342
343

344 3.2 波浪环境下航行体下落冲击过程分析

345 当 $t=2.52$ 时航行体下沉至最深位置，此后开始上浮，本文以下重点对 $t=2.52$ 之前的带助浮装置航
346 行体下落冲击过程进行分析。图 17 为航行体下落冲击过程中垂直方向与水平方向上所受到的冲击加
347 速度情况。



(a) Vertical acceleration time history curve

(b) Horizontal acceleration time history curve

图 17 带助浮装置航行体加速度时历曲线

Fig.17 Acceleration time history curve of vehicle with boost floatation aids

图 18 给出了下落冲击过程中入水空泡的发展情况，由于冲击过程持续时间仅仅为波浪周期的 1/3，所以冲击阶段波浪因素对航行体影响较小。

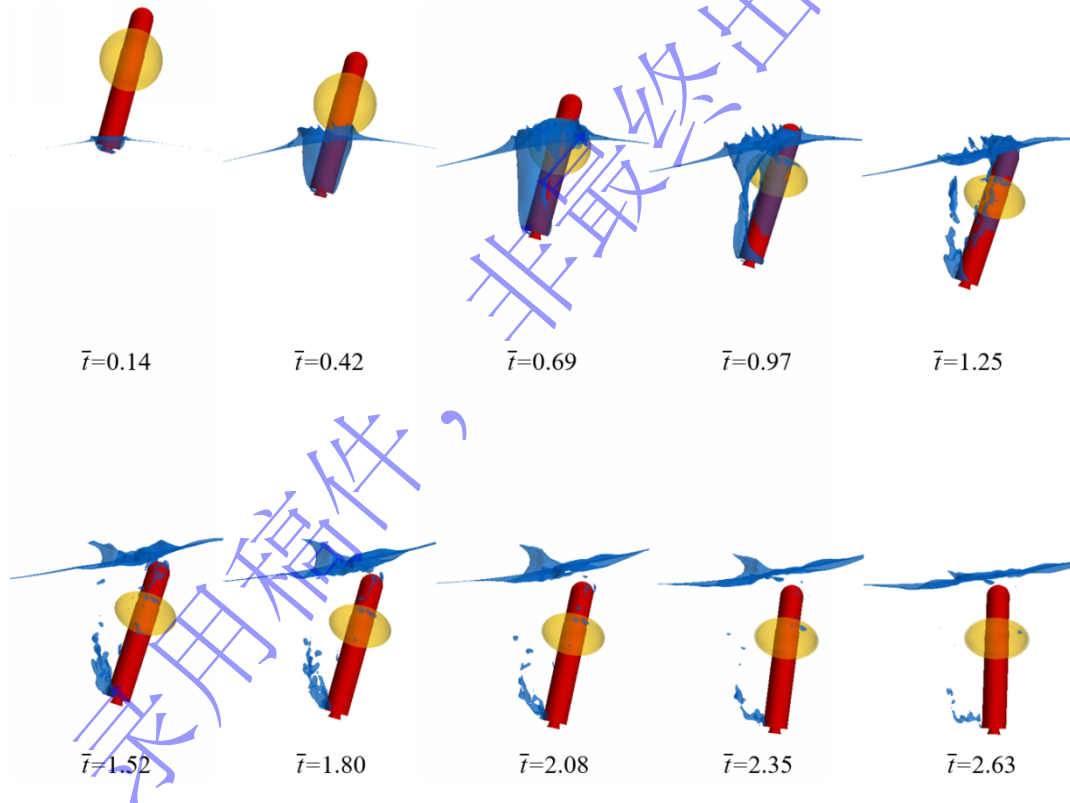
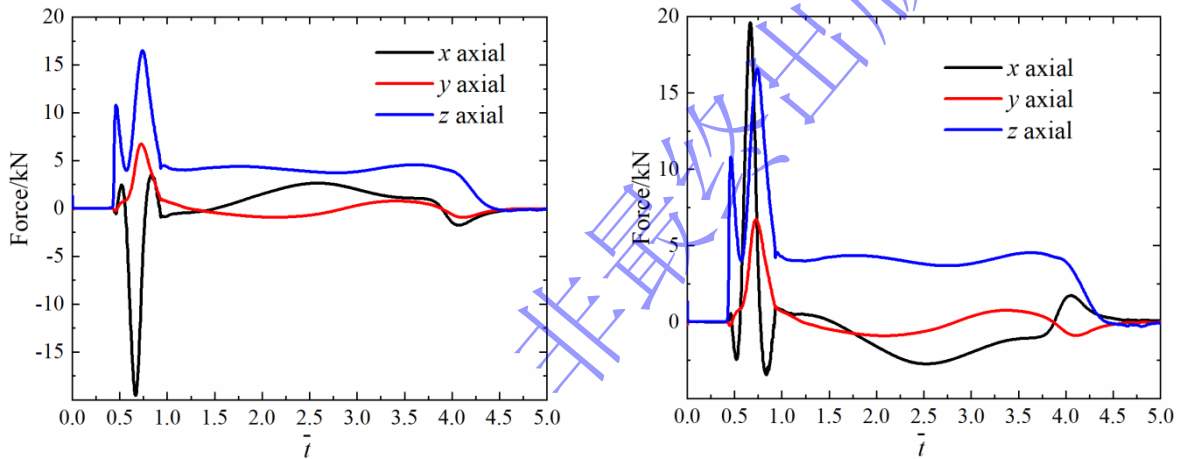


图 18 入水空泡发展过程

Fig.18 Development process of water-entry cavity

航行体倾斜下落过程中，尾部喷口先发生入水抨击，喷口尾部端面抨击力分解到垂直与水平方向体现为航行体下落过程中的下落阻力与水平正向推力，该抨击过程从尾部接触水面开始持续到了 $\bar{t}=0.10$ 。尾部抨击结束后，当 $\bar{t}=0.46$ 之前航行体两侧助浮装置与水面发生抨击，助浮装置冲击由于与水面的接触面积大，所以其垂向冲击力相较于尾部垂向冲击力要大得多。图 19 为下落过程中助浮装置的受力情况，其中助浮装置 1 与助浮装置 2 分别位于航行体两侧的 $-x$ 方向与 $+x$ 方向。结合下落加速度与助浮装置受力情况进行分析，带助浮装置航行体的垂直下落加速度变化情况与助浮装置 z 轴方向上的受力均出现了两次峰值，这说明航行体下落过程中垂直方向上的冲击主要是由于助浮装置的

364 冲击与转动造成的，第一次峰值是因为助浮装置与水面发生抨击，产生了冲击加速度，第二次峰值
365 是因为助浮装置展开过程中呈现先加速后减速的运动变化，展开速度在 $\bar{t}=0.69$ 达到最大，这也是第二
366 次加速度峰值出现的时间段，在加速展开过程中助浮装置加速拍水，水介质的反作用力直接导致了
367 带助浮装置航行体在垂直与水平方向上的加速度高峰， $\bar{t}=0.69$ 后助浮装置展开速度减小，展开的角加
368 速度方向逆转，其加速度也相应减小。与垂直方向不同的是，在水平方向上带助浮装置航行体的加
369 速度变化情况与助浮装置受力情况明显不同，这说明在水平方向上带助浮装置航行体的加速度变化
370 情况不仅仅受到助浮装置冲击过程影响，而且与入水空泡的发展过程直接相关。带助浮装置航行体
371 入水过程中其水平加速度出现了三次正向峰值，当 $\bar{t}=0.57$ 时，助浮装置抨击水面形成了第一次峰值，
372 当 $\bar{t}=0.71$ 时，助浮装置加速拍水形成了第二次峰值，也是水平正向最大的加速度峰值，当 $\bar{t}=0.93$ 左右，
373 带助浮装置航行体入水空泡脱离航行体背流侧进入大面积溃灭阶段，溃灭射流冲击航行体背流侧，
374 这直接造成了带助浮装置航行体水平方向上的第三个正向加速度峰值。助浮装置1与助浮装置2在
375 垂直与水平方向上的受力变化情况大致相同，在x轴方向上，两侧助浮装置均受到了背离航行体向外
376 的作用力，并且该作用力峰值相较于其他方向上的峰值要大得多，这使得航行体与助浮装置之间的
377 连接机构在设计强度上必须要满足该危险情况。



378 (a) The force time history curve of boost floatation aids 1 (b) The force time history curve of boost floatation aids 2
379

380 图 19 助浮装置受力时历曲线

381 Fig.19 The time history curve of boost floatation aids' force

382 为了进一步对航行体冲击入水空泡发展情况进行研究，设定如图 20 所示的压力监测点，测点分
383 为迎流端，背流端和侧流端三组，其中迎流端为航行体倾斜入水时的先触水侧，侧流端设定在助浮
384 装置与航行体内侧，各组各包含五个压力监测点，每个监测点之间距离 0.5 m，距离航行体壁面
385 0.00125 m，第一监测点 Point 1 与航行体质心位置保持的轴向距离为 1.25 m。图 21 给出了各监测点
386 的压力时历变化情况。

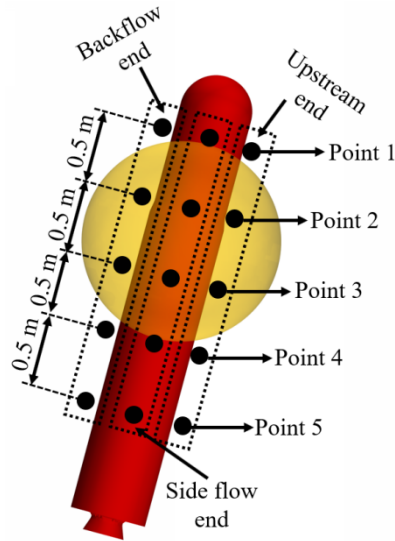
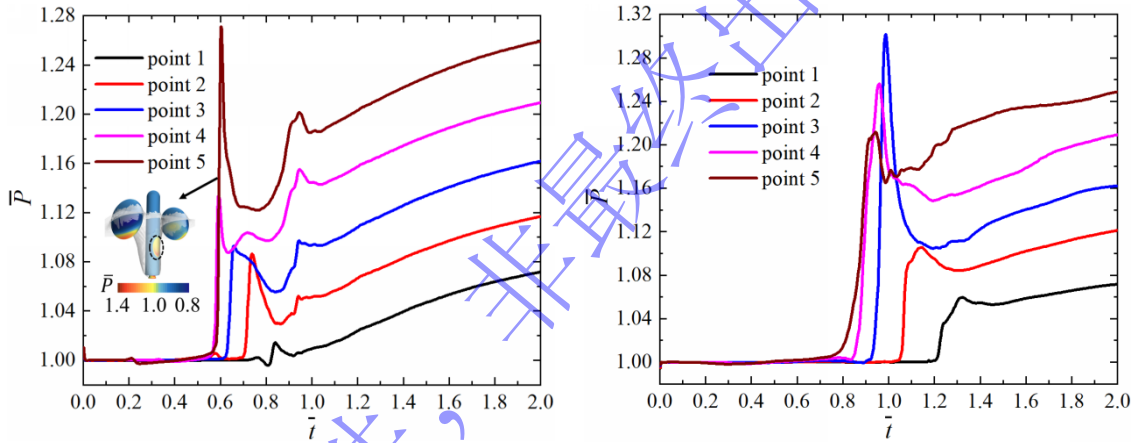


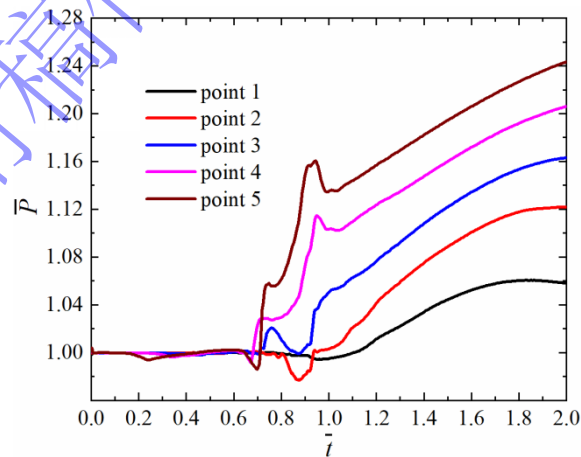
图 20 压力监测点布置位置

Fig.20 Location of pressure monitor points



(a) The pressure time history curve of Upstream end

(b) The pressure time history curve of Backflow end



(c) The pressure time history curve of Side flow end

图 21 压力监测点时历曲线

Fig.21 The time history curve of pressure monitor points

387
388
389

390
391

392
393
394
395

396 上述结果表明迎流端压力测点最先出现压力峰值，其出现峰值的时刻对应了带助浮装置航行体
397 水平加速度曲线的下落谷底出现时刻，这进一步说明了迎流侧入水空泡的溃灭是航行体出现水平加

398 速度逆向峰值的主要原因。从图 21 (a) 中不难发现每个压力测点均出现了两次压力局部峰值波动，
399 在 $\bar{t}=0.5$ 到 $\bar{t}=0.8$ 之间的第一次压力峰值是迎流侧入水空泡的溃灭所引起的；在 $\bar{t}=0.95$ 的第二次压力峰
400 值则是因为入水空泡逐渐溃灭至背流端，流体充满原来迎侧流端的空泡位置所引起的压力冲击。压
401 力监测点越靠近航行体尾部其压力峰值越大且出现时刻越早，说明迎流端入水空泡溃灭发展是自下
402 而上进行的，并且溃灭强度逐渐减弱。背流端与侧流端压力峰值均出现在 $\bar{t}=0.95$ 左右，但是侧流端压
403 力曲线较背流端出现扰动的时间要更早，这说明入水空泡沿迎流端-侧流端-背流端方向发展溃灭，并
404 且在背流端溃灭阶段其溃灭最剧烈，溃灭压力最大，溃灭压力随深度增加而增加。

405 3.3 不同海况环境对航行体下落冲击过程的影响分析

406 为了研究不同海况环境下带助浮装置航行体冲击下落过程，本文设定了如表 1 所示的计算工况，
407 其中工况 1 到工况 4 表示不同的海况环境，工况 5 为静水工况。

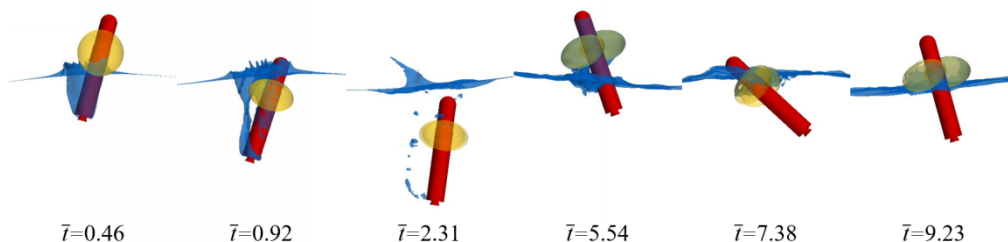
408 表 1 工况设置

Tab.1 Working conditions setting

工况	波高/m	波周期/s
工况 1	0.50	3.0
工况 2	0.75	3.0
工况 3	1.00	3.0
工况 4	1.25	3.0
工况 5	0.00	/

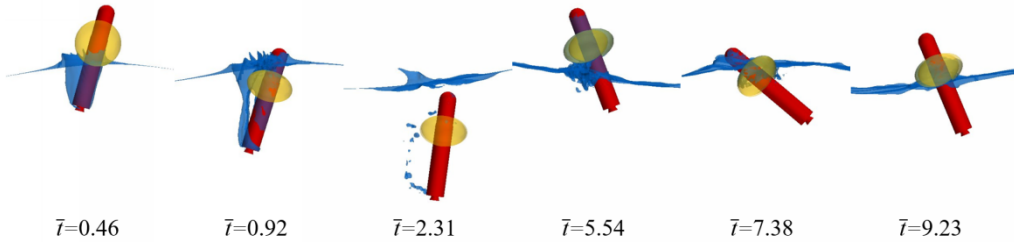
410 各工况下带助浮装置航行体以相同的初始条件释放，图 22 给出了不同工况下航行体的下落-下沉
411 -上浮过程，图 23 与图 24 分别给出了不同工况下带助浮装置航行体的位移与速度情况。从不同海况
412 环境下的航行体运动状态来看，波浪环境对航行体下落冲击过程的影响主要体现在了运动衰减阶段，
413 而在首次下落冲击阶段相对较小。从垂直位移来看，海况浪级越高，航行体在下沉过程中达到的深
414 度越大，进而在上浮过程中达到的高度也越小，这是因为在下沉过程中航行体遭遇到了波峰发展到
415 波谷之间的相位，该相位下水质点主要具有垂直向下的速度，并且海况等级越高，水质点速度越大，
416 所以航行体下沉深度也越大，由于海况浪级高的环境下航行体下沉深度越大，所以导致了航行体在
417 上浮过程中消耗的能量也越多，上浮高度也越低，在运动衰减段，海况浪级越低其航行体浮沉运动
418 越接近静浮衰减规律。从垂直速度来看，航行体下落冲击过程中海况浪级越高其垂直速度也越大，
419 而进入运动衰减段后，海况浪级越低，航行体速度反而越大，这是因为在带助浮装置航行体第二次
420 下落过程中遭遇到了波谷到波峰之间的波浪相位，水质点垂直向上的速度导致了高海况浪级下的航
421 行体速度大幅衰减。相较于垂直方向的运动响应，波浪环境对航行体的水平运动响应影响更明显，
422 海况浪级越高的环境，航行体水平位移的幅值和逆向漂浮位移越明显，不同时刻的水平速度也越大。

Working condition 1



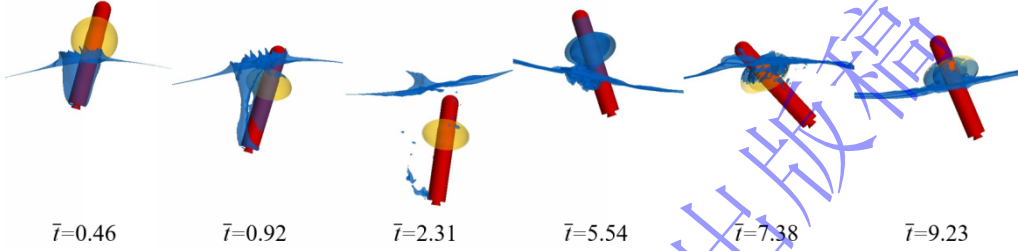
423

Working condition 2



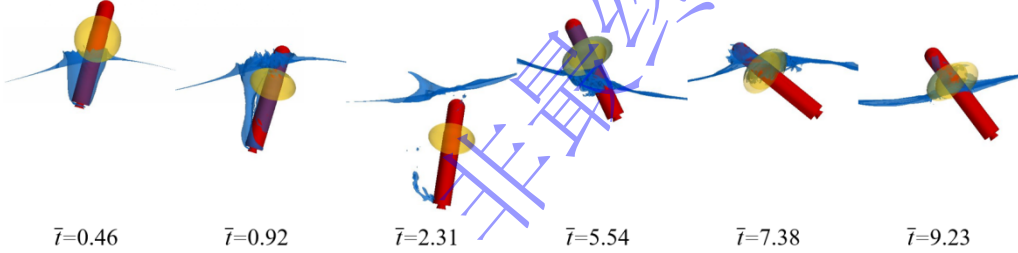
424

Working condition 3



425

Working condition 4



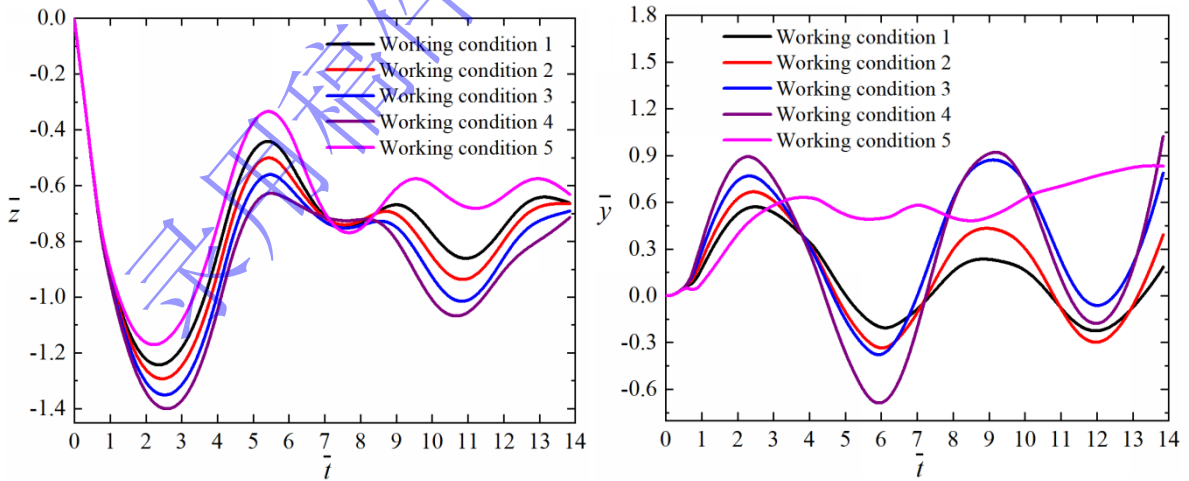
426

427

428

图 22 不同工况下航行体下落-下沉-上浮过程

Fig.22 Vehicle fall-sink-rise process under different working conditions



429

430

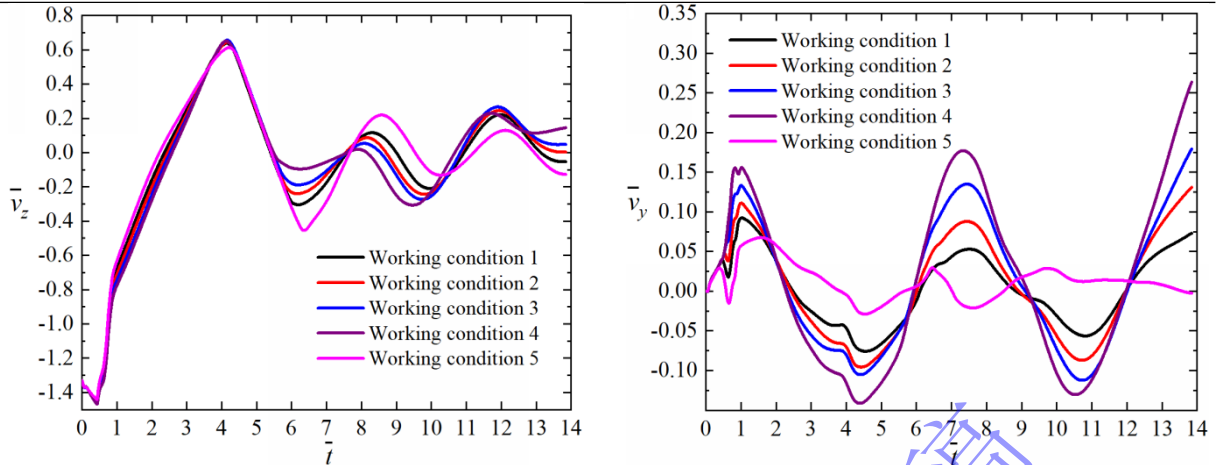
431

432

(a) The vertical displacement time history curve of vehicle (b) The horizontal displacement time history curve of vehicle

图 23 不同工况下航行体位移时历曲线

Fig.23 The time history curve of vehicle's displacement under different working conditions



(a) The vertical velocity time history curve of vehicle (b) The horizontal velocity time history curve of vehicle

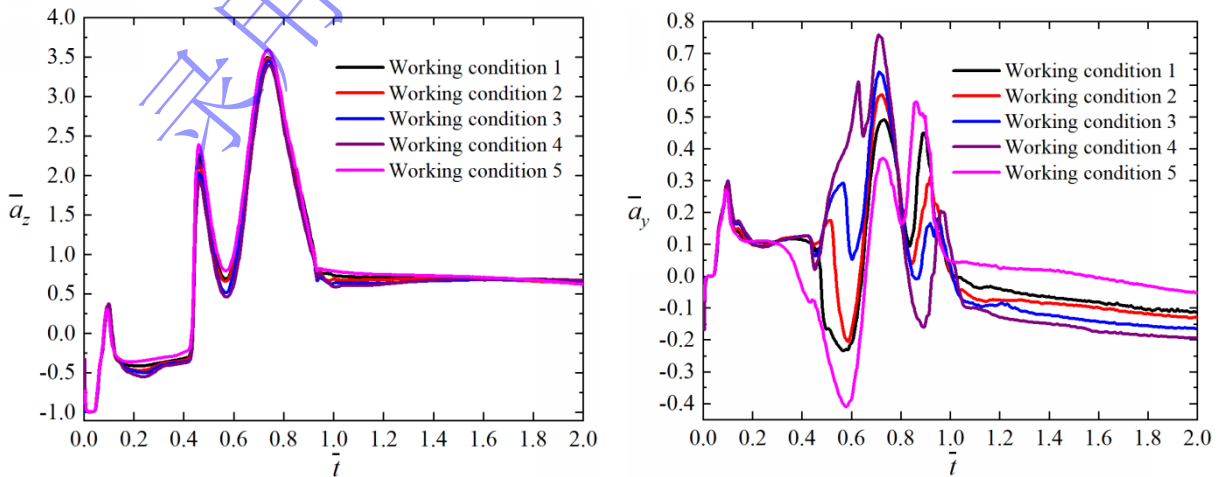
图 24 不同工况下航行体速度时历曲线

Fig.24 The time history curve of vehicle's velocity under different working conditions

433
434
435
436

图 25 给出了带助浮装置航行体下落冲击过程中的冲击加速度情况，不同海况环境下的垂向加速度总体变化浮动较小，尾部抨击结束到助浮装置抨击开始阶段，海况浪级与垂直加速度保持正相关关系，该区间波浪水质点的垂直分量加快了航行体的下落过程。不同工况航行体尾部抨击加速度变化不大，助浮装置抨击与助浮装置加速展开形成的抨击力随着海况等级的提高而略微减小，以静浮工况加速度为基准，工况 1 助浮装置抨击加速度占比静浮工况加速度为 93.76%，随着工况波高每增加 0.25 m，助浮装置抨击加速度按平均 4.28% 的占比速度减小；工况 1 助浮装置加速展开形成的抨击加速度占比静浮工况加速度为 97.42%，随着工况波高每增加 0.25 m，助浮装置加速展开抨击加速度按平均 0.94% 的占比速度减小。水平方向上的抨击加速度受到波浪影响较大，随着海况浪级的增加，助浮装置触水抨击后会形正向水平加速度的短时震荡，当助浮装置入水开始加速展开时，水平加速度的峰值随着海况浪级的增加而增加，波高每增加 0.25 m，加速度峰值平均增加 15.31%，而由于背流端入水空泡溃灭所造成的第二个正向水平加速度峰值则会随着海况浪级的增加而减小。

不同海况环境对带助浮装置航行体水平方向的加速度冲击主要体现在了对入水空泡的影响上，图 26 为 $\bar{t}=0.92$ s 时不同海况环境下的计算域中纵剖面水的体积分数云图以及速度方向矢量图，入水空泡从迎流端向背流端进行溃灭，当 $\bar{t}=0.92$ s 时航行体入水位置处于波浪波峰位置，可以发现海况浪级越高其航行体入水空泡溃灭闭合时间越晚，这是因为波浪水质点的水平速度与入水空泡的溃灭方向相反，这极大减缓了入水空泡从迎流端到背流端的溃灭进程。



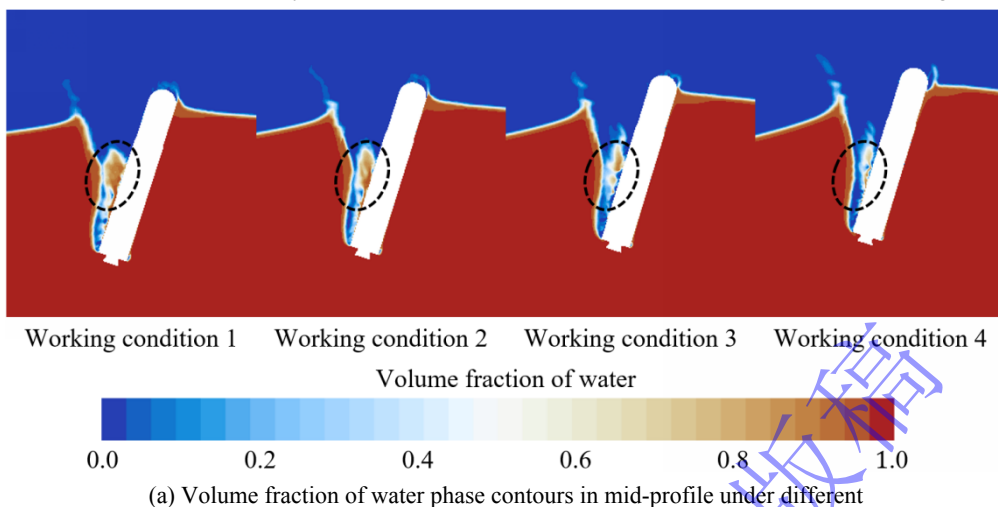
(a) The vertical acceleration time history curve of vehicle (b) The horizontal acceleration time history curve of vehicle

453
454

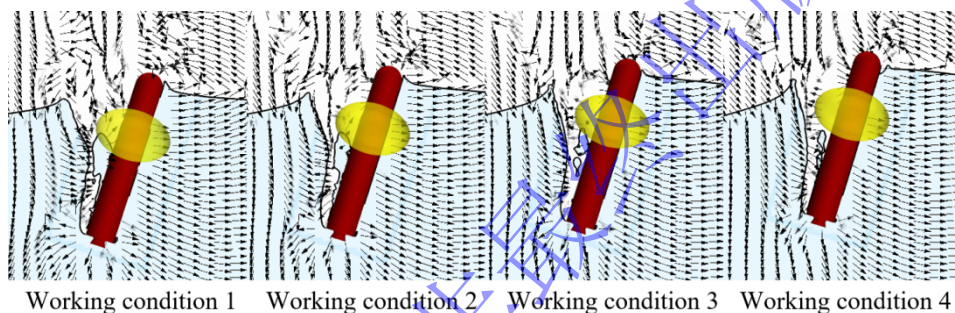
455
456

图 25 不同工况下带助浮装置航行体加速度时历曲线

Fig.25 The acceleration time history curve of vehicle with boost floatation aids under different working conditions



457
458



459

(b) Velocity direction vector diagram in mid-profile under different working conditions

460

461

图 26 不同工况下入水空泡流场中截面示意图

462

Fig.26 Schematic diagram of mid-profile in the flow field of water-entry cavity under different working conditions

463 4 结论

464 本文通过 CFD 数值模拟方法对波浪环境下的带助浮装置航行体下落冲击过程进行了探究，主要
465 研究了带助浮装置航行体下落冲击过程中的运动学以及动力学参数变化特性以及空化流场演化过程，
466 以此为基础具体分析了航行体以及助浮装置在下落入水冲击过程中的冲击特性以及运动演化，具体
467 研究了带助浮装置航行体下落冲击过程在不同海况等级下的具体表现，主要得到了以下结论：

468 (1)按照运动状态的不同，带助浮装置航行体下落冲击过程具体分为了下落冲击段，下沉段，上
469 浮段，以及下落-上浮过程衰减段，其中当航行体进入运动衰减段后其运动状态体现出了与波浪的强
470 相关性。

471 (2)带助浮装置航行体下落冲击过程中主要经历了航行体尾部入水抨击，助浮装置入水抨击以及
472 助浮装置旋转展开过程。垂直方向的冲击中助浮装置加速展开阶段产生的加速度峰值最大，脉宽最
473 大；水平方向的冲击中，助浮装置加速展开阶段产生的水平加速度峰值最大，并且入水空泡背流端
474 溃灭冲击也将产生较大的加速度峰值。在助浮装置入水冲击过程中，助浮装置 x 轴方向会产生较大冲
475 击力，威胁助浮装置与航行体之间的连接结构。

476 (3)不同海况对带助浮装置航行体下落冲击过程的影响主要体现在运动衰减阶段，而在首次下落
477 冲击阶段相对较小。相对于垂直方向的冲击，水平方向的冲击受到不同海况下波浪环境的影响较大，
478 不同海况对航行体的水平冲击造成的影响主要是通过影响入水空泡的形成与溃灭过程实现的。

479 (4)不同海况对航行体尾部抨击加速度影响远远小于助浮装置抨击影响, 其中在垂直方向上, 随
480 着海况波高每增加 0.25 m, 助浮装置抨击加速度按平均 4.28%的占比速度减小, 助浮装置加速展开抨
481 击加速度按平均 0.94%的占比速度减小; 在水平方向上, 随着海况波高每增加 0.25 m, 助浮装置加速
482 展开抨击加速度峰值平均增加 15.31%。
483

484 参考文献

- 485 [1] 杨继锋, 刘丙杰, 陈捷, 等. 潜射弹道导弹水下大深度发射技术途径分析 [J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(6): 32-3
486 6. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2020.06.007.
- 487 YANG J F, LIU B J, CHEN J, et al. Research on underwater large depth launching technology of submarine launch
488 ed ballistic missile [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(6): 32-36. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2020.0
489 6.007.
- 490 [2] 张晓光, 李斌, 党会学, 等. 水下航行体充气上浮仿真方法研究 [J]. 兵工学报, 2020, 41(7): 1249-1261. DOI: 10.3
491 969/j.issn.1000-1093.2020.07.001.
- 492 ZHANG X G, LI B, DANG H X, et al. A simulation method for inflatable floating of underwater vehicle [J]. Acta
493 Armamentarii, 2020, 41(7): 1249-1261. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2020.07.001.
- 494 [3] DANG H X, ZHANG X G, LI B, et al. Multi-disciplinary co-simulation of floating process induced by pneumati
495 c inflatable collar for underwater vehicle recovery [J]. Ocean Engineering, 2020, 216: 108008. DOI: 10.1016/j.oceanen
496 g.2020.108008.
- 497 [4] 王晓辉, 李鹏, 孙士明, 等. 射弹高速入水尾拍载荷和弹道特性的数值研究 [J]. 船舶力学, 2022, 26(8): 1111-1119.
498 DOI: 10.3969/j.issn.1007-7294.2022.08.001.
- 499 WANG X H, LI P, SUN S M, et al. Numerical study on hydrodynamic and ballistic characteristics of projectile's hi
500 gh-speed water-entry process [J]. Journal of Ship Mechanics, 2022, 26(8): 1111-1119. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7294.2
501 022.08.001.
- 502 [5] DENG F, SUN X Y, CHI F H, et al. A numerical study on the water entry of cylindrical trans-media vehicles [J
503 J]. Aerospace, 2022, 9(12): 805. DOI: 10.3390/aerospace9120805.
- 504 [6] WU X C, CHANG X, LIU S W, et al. Numerical study on the water entry impact forces of an air-launched un
505 derwater glider under wave conditions [J]. Shock and Vibration, 2022, 2022: 4330043. DOI: 10.1155/2022/4330043.
- 506 [7] 邹田春, 高飞, 魏家威, 等. 圆柱体垂直入水三维数值模拟及影响因素研究 [J]. 振动与冲击, 2022, 41(10): 177-185.
507 DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2022.10.023.
- 508 ZOU T C, GAO F, WEI J W, et al. Three-dimensional numerical simulation and influencing factors study on the ve
509 rtical water entry of a circular cylinder [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(10): 177-185. DOI: 10.13465/j.
510 cnki.jvs.2022.10.023.
- 511 [8] 祁晓斌, 刘喜燕, 王瑞, 等. 高速射弹小角度入水数值模拟研究 [J]. 中国造船, 2022, 63(3): 31-39. DOI: 10.3969/j.
512 issn.1000-4882.2022.03.004.
- 513 QI X B, LIU X Y, WANG R, et al. Numerical simulation of water entry for high-speed projectile at small angle [J].
514 Shipbuilding of China, 2022, 63(3): 31-39. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4882.2022.03.004.
- 515 [9] 宋武超, 王聪, 魏英杰, 等. 不同头型回转体低速倾斜入水过程流场特性数值模拟 [J]. 北京理工大学学报, 2017, 3
516 7(7): 661-666, 671. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2017.07.001.
- 517 SONG W C, WANG C, WEI Y J, et al. Numerical simulation of the flow field characteristics of low speed oblique
518 water entry of revolution body [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2017, 37(7): 661-666, 671. DOI:
519 10.15918/j.tbit1001-0645.2017.07.001.

- 520 [10] DANG L Y, WEI Z Y, ZHOU H Y, et al. Numerical study on the water entry of a freely falling unmanned a
521 erial-underwater vehicle [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11(3): 552. DOI: 10.3390/jmse1103055
522 2.
- 523 [11] Yuan K, Yu J W, Gu X, et al. Numerical investigation on drag characteristics of the truncated hemispherical-no
524 se projectile in vertical water entry [J]. *Ships and Offshore Structures*, 2023, 18(12): 1726-1736. DOI: 10.1080/17445
525 302.2022.2140526.
- 526 [12] HUANG L F, TAVAKOLI S, LI M H, et al. CFD analyses on the water entry process of a freefall lifeboat [J].
527 *Ocean Engineering*, 2021, 232: 109115. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.109115.
- 528 [13] 史崇宾. 跨介质结构物出入水多相流体动力学特性研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2021. DOI: 10.26991/d.cnki.gd
529 llu.2021.002803.
- 530 SHI C B. Study on the multiphase fluid hydrodynamics characteristics of water entry and water exit for trans- mediu
531 m structures [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021. DOI: 10.26991/d.cnki.gdllu.2021.002803.
- 532 [14] 杨晓光, 党建军, 王鹏, 等. 波面环境对高速入水载荷及弹道特性影响试验研究 [J]. *西北工业大学学报*, 2021, 39
533 (6): 1259-1265. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2758.2021.06.011.
- 534 YANG X G, DANG J J, WANG P, et al. Experimental research on influence of wave environment on high-speed w
535 ater entry load and trajectory characteristics [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2021, 39(6): 1259-1
536 265. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2758.2021.06.011.
- 537 [15] 李治涛, 赵世平, 卢丙举, 等. 高速旋转射弹波浪入水多相流场与弹道特征数值仿真研究 [J]. *振动与冲击*, 2022,
538 41(8): 55-71. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2022.08.007.
- 539 LI Z T, ZHAO S P, LU B J, et al. Numerical simulation of multiphase flow field and trajectory characteristics of h
540 igh-speed spinning projectile entry water in wave [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(8): 55-71. DOI: 10.1
541 3465/j.cnki.jvs.2022.08.007.
- 542 [16] ZHANG Y F, MA S, SHAO W B, et al. Numerical investigation on the water entry of curved wedge-shaped s
543 ections into waves [J]. *Ocean Engineering*, 2023, 275: 114155. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.114155.
- 544 [17] ZHAO C Z, WANG Q, LU H C, et al. Vertical water entry of a hydrophobic sphere into waves: numerical co
545 mputations and experiments [J]. *Physics of Fluids*, 2023, 35(7): 073324. DOI: 10.1063/5.0160041.
- 546 [18] CHENG Y, YUAN D C, JI C Y. Water entry of a floating body into waves with air cavity effect [J]. *Journal*
547 *of Fluids and Structures*, 2021, 104: 103302. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2021.103302.
- 548 [19] 赵蛟龙, 孙龙泉, 张忠宇, 等. 柱形空腔结构落水载荷及冲击响应研究 [J]. *振动与冲击*, 2013, 32(20): 113-118. D
549 OI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2013.20.022.
- 550 ZHAO J L, SUN L Q, ZHANG Z Y, et al. Hydrodynamic loads and impact response for a water entry of a cylindr
551 ical cavitory structure [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(20): 113-118. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2013.2
552 0.022.
- 553 [20] 陈洋, 吴亮, 曾国伟, 等. 带环形密闭气囊弹体入水冲击过程的数值分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(5): 1155-1164.
554 DOI: 10.11883/bzycj-2017-0387.
- 555 CHEN Y, WU L, ZHEN G W, et al. Numerical analysis of the water entry process of a projectile with a circular a
556 irbag [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(5): 1155-1164. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0387.
- 557 [21] 陈开颜, 陈辉, 魏海鹏, 等. 带囊回转体落水仿真与试验研究 [J]. *船舶力学*, 2022, 26(3): 315-322. DOI: 10.3969/j.i
558 ssn.1007-7294.2022.03.001.
- 559 CHEN K Y, CHEN H, WEI H P, et al. Simulation and experimental study on a cylinder with airbags falling into w
560 ater [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2022, 26(3): 315-322. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7294.2022.03.001.
- 561 [22] 包健, 马贵辉, 孙龙泉, 等. 带椭球形气囊航行体落水-上浮过程仿真 [J]. *兵工学报*, 2024, 45(01): 206-218. DOI:
562 10.12382/bgxb.2022.0503

- 563 BAO J, MA G H, SUN L Q, et al. Simulation of falling-floating process of vehicle with ellipsoidal airbags [J]. Act
564 a Armamentarii, 2024, 45(01): 206-218. DOI:10.12382/bgxb.2022.0503
- 565 [23] STEELANT J, DICK E. Modeling of laminar-turbulent transition for high freestream turbulence [J]. Journal of F
566 luids Engineering, 2001, 123(1): 22-30. DOI: 10.1115/1.1340623.
- 567 [24] PLESSET M S. The dynamics of cavitation bubbles [J]. Journal of Applied Mechanics, 1949, 16(3): 277-282. D
568 OI: 10.1115/1.4009975.
- 569 [25] FENTON J D. A fifth-order stokes theory for steady waves [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean
570 Engineering, 1985, 111(2): 216-234. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-950X(1985)111:2(216).
- 571 [26] KIM J, O'SULLIVAN J, READ A. Ringing analysis of a vertical cylinder by Euler overlay method [C]//ASME
572 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Rio de Janeiro: American Society of
573 Mechanical Engineers, 2012: 855-866. DOI: 10.1115/OMAE2012-84091.
- 574 [27] WEI Z Y, HU C H. An experimental study on water entry of horizontal cylinders [J]. Journal of Marine Scien
575 ce and Technology, 2014, 19(3): 338-350. DOI: 10.1007/s00773-013-0252-z.