

# 跨介质航行器高速斜入水跳弹现象研究

周可, 黄振贵, 陈志华, 刘想炎, 王浩

(南京理工大学 瞬态物理国家重点实验室, 南京 210094)

**摘要:** **目的** 揭示跨介质航行器高速入水跳弹行为的机理, 提高航行器的突防能力。**方法** 基于 STAR-CCM+ 流体仿真软件, 采用 VOF 多相流模型以及 Schnerr-Sauer 空化模型, 计算航行器跳弹过程的空化流场, 并运用重叠网格技术, 耦合六自由度弹道方程, 求解航行器的运动特性。利用所建立的计算模型, 研究航行器在不同入水速度和角度下的空泡演化、水动力和弹道特性, 揭示航行器产生跳弹现象的原因和规律。**结果** 航行器在小角度高速入水时, 水下运动轨迹会发生很大的变化, 经历了入水、浸水、出水 3 个阶段。**结论** 产生跳弹现象的主要原因是航行器在入水后, 头部上下缘以及弹尾两侧受力不均, 形成了向上的偏转力矩, 使得航行器的俯仰角发生了较大的改变, 并且随着航行器的入水速度加快, 入水角度减小, 跳弹现象越容易产生。

**关键词:** 跳弹; 跨介质航行器; 高速入水; 空化; 多相流

**中图分类号:** TJ6; TJ410 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2022)05-0039-10

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2022.05.005

## Ricochet Phenomenon of Trans-media Vehicle at High-speed Oblique Water-entry

ZHOU Ke, HUANG Zhen-gui, CHEN Zhi-hua, LIU Xiang-yan, WANG Hao

(National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**ABSTRACT:** In order to reveal the ricochet mechanism of the trans-media vehicle entering water at high speed, and improve the penetration ability of the trans-media vehicle. Based on STAR-CCM+ fluid simulation software, the cavitation flow fields were calculated during the ricochet process of the vehicle by use of the VOF multiphase flow model and Schnerr-Sauer cavitation model. The motions of the vehicle were calculated using the overset mesh technique to couple the six-degree-of-freedom algorithm. Using the established computational model, the cavitation evolution, hydrodynamic and ballistic characteristics of the vehicle under different water entry speeds and angles were studied, and the causes and laws of the ricochet phenomenon of the vehicle were revealed. The results showed that when the vehicle enters the water at a small angle and high speed, the underwater motion trajectory will change greatly. It has experienced three stages: entering the water, soaking in the water and leaving the water. The main reason for ricochet was that after entering the water, the forces on the upper and lower edges of the head and on

收稿日期: 2022-03-21; 修订日期: 2022-04-27

Received: 2022-03-21; Revised: 2022-04-27

基金项目: 国家自然科学基金(12002165)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (12002165)

作者简介: 周可(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为空心弹高速入水。

Biography: ZHOU Ke (1998-), Male, Postgraduate, Research focus: hollow projectile enters water at high speed.

通讯作者: 黄振贵(1986—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为跨介质弹道技术。

Corresponding author: HUANG Zhen-gui (1986-), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: trans-medium ballistic technology.

引文格式: 周可, 黄振贵, 陈志华, 等. 跨介质航行器高速斜入水跳弹现象研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(5): 039-048.

ZHOU Ke, HUANG Zhen-gui, CHEN Zhi-hua, et al. Ricochet Phenomenon of Trans-media Vehicle at High-speed Oblique Water-entry[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(5): 039-048.

sides of the tail of the vehicle are uneven, forming an upward deflection moment, which greatly changes the pitch angle of the vehicle, and as the speed of the vehicle entering the water is faster, the smaller the angle of entering the water, the easier it is to produce ricochet.

**KEY WORDS:** ricochet; trans-media vehicle; enter the water at a high speed; cavitation; multiphase flow

随着跨介质航行器的发展,近来越来越多的国家开始研究跳弹现象,能在飞行过程中反复出入水面,对作战计划的隐蔽性有很大的提升。跳弹现象也已经在军事上得到应用,也就是“跳弹桅顶轰炸”。早在二战时期, W. Barnes 就利用跳弹轰炸德国鲁尔水坝<sup>[1]</sup>,随后在太平洋战争中,美国也效仿英国的跳弹,对日军舰队进行轰炸。相比于高空投射,低空的跳弹有着更好的隐蔽性和精准性,因此航行器的跳弹现象也得到了更大的关注,如果能较好地掌握这一现象的规律,就能开发出一种突防能力更好武器。

入水问题的研究最早开始于 19 世纪末, Worthington 等<sup>[2-3]</sup>利用闪光灯相机对刚性球体垂直入水过程中发生的一系列现象进行了试验研究。对于物体入水稳定性方面的研究,侯宇等<sup>[4]</sup>通过试验探究了射弹小角度高速入水时产生的超空泡对射弹的弹道轨迹的影响,以及高负载对弹体的损伤。胡青青<sup>[5]</sup>探讨了 4 种头型、3 种长径比射弹高速入水时的稳定性和空泡形态,并分析了其对入水过程的影响。黄鸿鑫等<sup>[6]</sup>通过数值模拟方法,从空泡形态、速度衰减以及俯仰角变化探讨了射弹头部形状和质心位置对高速入水稳定性的影响。郑磊<sup>[7]</sup>基于 STAR-CCM+ 和 ABAQUS 联合仿真对弹体进行了垂直和倾斜入水双向耦合计算,分析了在入水过程中弹体的动力学特性、弹体表面变量以及应力应变情况。

跳弹现象则是物体入水失稳方面的一种表现,对于跳弹问题的系统性研究最开始以刚性球体为研究对象。Richardson<sup>[8]</sup>研究了圆球倾斜入水跳弹的问题,讨论了当球体倾斜入水后弹跳时所涉及的机制和力。Miloh 等<sup>[9]</sup>通过数学方程的推导得出了椭圆球体入水发生跳弹的临界角的经验表达式。Soliman 等<sup>[10]</sup>用钢球和硬铝球射入浅水深度和干沙中,总结了不同介质下跳弹发生的临界角,临界角随着速度的增加而减小,但存在一个截止角,在任何速度下都不会发生弹跳。Johnson<sup>[11-12]</sup>探究了旋转和非旋转球形弹丸对跳弹行为的影响。随着研究的进一步深入,圆柱体以及射弹等回转体的入水跳弹现象开始被关注。Nguyen 等<sup>[13]</sup>通过数值模拟计算,探究了圆柱体入水时的角度和速度对跳弹行为的影响,总结出了每个入水角都有一个临界速度发生跳弹。Hutchings<sup>[14]</sup>提出了一种弹跳理论,该理论允许考虑弹丸自旋的影响,计算了球体和旋转圆柱体的弹跳临界角,并将旋转圆柱体的理论应用于第二次世界大战期间开发的“巴恩斯·沃利斯”跳弹炸弹。Moxnes 等<sup>[15]</sup>通过试验分析和数值模

拟计算总结了不同类型的射弹在水中发生跳弹的规律。Gold 等<sup>[16]</sup>利用 UZI 冲锋枪发射 9 mm 子弹,探究了相同速度下不同角度子弹高速入水下的跳弹规律。

综上所述,目前对于物体跳弹现象的研究着重于球体、圆柱体和射弹,而对航行器入水时发生跳弹现象的研究还较少,特别是高速入水。公开的文献仅有 Chen 等<sup>[17]</sup>通过数值模拟计算了不同头型的航行器入水后的跳弹行为,得出锥形头部更容易改变轨迹。袁绪龙等<sup>[18]</sup>提出了跨介质航行器高速入水过程中产生的巨大法向过载和弯矩。李永利等<sup>[19]</sup>利用数值模拟技术研究了航行器在不同顶角下小角度低速入水时的跳弹现象。陈国明等<sup>[20]</sup>通过试验和数值仿真研究了航行器发生跳弹现象的条件和规律。本文通过数值模拟方法,模拟了航行器在高速斜入水后产生跳弹现象的运动过程,讨论并分析了不同入水角、不同速度对高速倾斜入水时航行器跳弹行为的影响,揭示产生跳弹的机理,为航行器高速入水跳弹的设计提供参考。

## 1 数值计算理论

### 1.1 流体基本控制方程

VOF 多相流模型是建立在欧拉网格下的界面追踪方法。该方法中,互不相容的流体组分共用一套动量方程,并通过引入相体积分数这一变量来实现对计算域内相间界面的追踪,更加适用于捕捉流体自由面的变化和求解气液相的比例。其中  $\alpha$  表示相的体积占所在网格体积分数的比值,  $\alpha=0$  表示为空气相,  $\alpha=1$  表示为水相,  $0<\alpha<1$  表示为交界面。VOF 方法就是通过求出整个计算域内各网格单元的相分数,从而构建出界面,如图 1 所示。

对于每个控制单元,其连续性方程为:

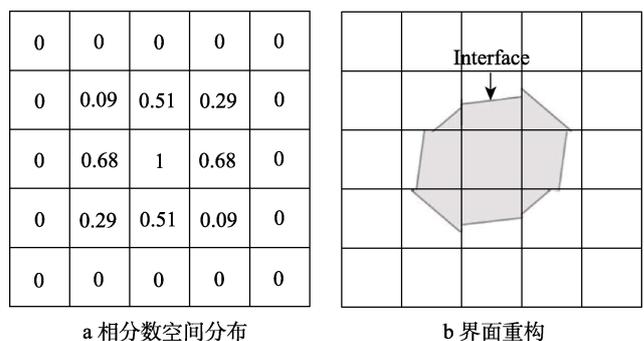


图 1 VOF 交界面示意图  
Fig.1 Interface of the VOF: a) phase fractional spatial distribution; b) interface reconstruction

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

$$\frac{\partial \alpha_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha_1 u_i) = 0 \quad (2)$$

式中:  $\rho_m$  为整体网格单元内的平均数学密度。

VOF 多相流模型中,  $\rho_m$  密度的定义为  $\rho_m = \alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2$ ,  $\rho_1$  和  $\rho_2$  分别为空气和水的密度,  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  为水和空气在单元格的密度。

动量守恒方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m u_j) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_m u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ (\mu_\infty + \mu_i) \cdot \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (3)$$

式中:  $\mu_\infty$  为网格单元的动力黏性系数;  $\mu_m$  为网格单元的湍流黏性系数,  $\mu_m = \alpha_1 \mu_1 + \alpha_2 \mu_2$ 。

两相之间采用的质量传输方程为 Schnerr-Sauer 空化模型。该空化模型的计算效率高, 稳定性强, 模拟效果好。相关计算表达式为:

$$M_e = \frac{\rho_l \rho_v}{\rho} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \left( \frac{P_v - P}{\rho_l} \right)}, P_v > P \quad (4)$$

$$M_c = \frac{\rho_l \rho_v}{\rho} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \left( \frac{P - P_v}{\rho_l} \right)}, P_v < P \quad (5)$$

$$R_B = \left( \frac{\alpha_v}{1 - \alpha_v} \frac{3}{4\pi n} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

式中:  $M_e$ 、 $M_c$  分别代表蒸发率和冷凝率;  $\alpha_v$ 、 $\rho_v$  分别为蒸汽相的体积分数和密度;  $R_B$  为气泡半径;  $n$  为单位体积空泡数。

## 1.2 湍流模型

采用 Realizable  $k-\varepsilon$  模型, 它是基于标准  $k-\varepsilon$  模型发展而来的, 基本思想和  $k-\varepsilon$  模型一致。其用某种数学方式建立湍动黏度和湍动能  $k$  以及湍流耗散率  $\varepsilon$  的数学联系, 并分别以湍动能  $k$  和湍动耗散率  $\varepsilon$  建立运输方程, 最终实现方程的封闭。

湍动黏度  $\mu_t$  的表达式为:

$$\mu_t = \rho_m C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

式中:  $\varepsilon$  为湍动耗散率,  $\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right)$ ;  $C_\mu$

为经验常数。

湍动能  $k$  和湍动耗散率  $\varepsilon$  的输运方程为:

$$\frac{\partial(\rho_m k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho_m \varepsilon - Y_M + S_k \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\rho_m \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \rho_m C_1 S_\varepsilon - \rho_m C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (9)$$

式中:  $G_k$  为速度梯度引发的湍动能,  $G_k = \mu_t S^2$ ;

$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}$  为浮力引起湍动能 ( $g_i$  为重力加速度

分量,  $\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P$ ,  $Pr_t = 0.85$  为经验常数);  $Y_M$  为

膨胀引起的湍动能耗散率,  $Y_M = 2 \frac{\rho k \varepsilon}{\gamma RT}$ ;

$C_1 = \max[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5}]$ ;  $\eta = \frac{Sk}{\varepsilon}$ ;  $S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$ ;

$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ ;  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ;  $C_2 = 1.9$ ;  $\sigma_k = 1.0$ ;

$\sigma_\varepsilon = 1.2$ ;  $S_\varepsilon$ 、 $S_k$  分别为湍动能源项和湍动耗散率源项。

## 1.3 六自由度弹道模型

本文利用 DFBI 模块耦合重叠网格模拟刚体复杂的六自由度运动。在全局惯性坐标系下, 刚体绕质心的运动方程为:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} \quad (10)$$

式中:  $m$  为刚体的质量;  $\vec{F}$  为流体作用在刚体上的合力;  $\vec{v}$  为刚体质心的速度。

在局部坐标系下, DFBI 旋转运动方程为:

$$\vec{M} \vec{\omega} + \vec{\omega} \times \vec{M} \vec{\omega} = \vec{n} \quad (11)$$

式中:  $\vec{M}$  为惯性矩张量;  $\vec{\omega}$  为刚体角速度;  $\vec{n}$  为作用于刚体的合力矩。

## 1.4 重叠网格技术

重叠网格技术是对计算区域和部件区域单独划分设计网格, 主要由背景网格和组件网格相互重叠而成, 如图 2 所示。两者之间会有一部分重叠区域, 但不存在连通关系, 在初始化的时候会进行布尔运算, 计算域外的网格会被删除并排除在外, 使该部分网格不进行数据交换。根据布尔运算剩余的重叠网格区域, 建立插值关系, 并且建立相应的数学关系进行数据交换。相比动网格技术中持续的网格更新, 重叠组件中组件网格随物体一起运动, 不需要网格变形, 也不需要重新生成网格, 只需要定义组件运动规律和网格重叠边界条件, 即可实现对物体在流域中运动的流体力学问题的模拟, 避免因网格变形、网格单元生成或消失带来的计算误差, 具有较大的优越性。

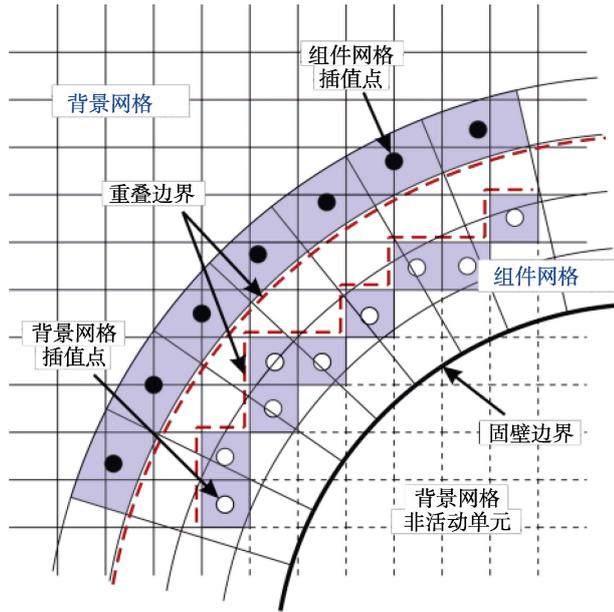


图2 重叠网格插值示意图  
Fig.2 Overset interpolation diagram

## 2 数值模拟方法

### 2.1 计算模型

计算模型<sup>[21]</sup>的几何尺寸如图3所示,全长  $L=1.28\text{ m}$ ,弹径  $D=0.128\text{ m}$ ,质量为  $16.991\text{ kg}$ ,分布均匀,头部为  $30^\circ$ 的拱形,尾部为线性截断体。

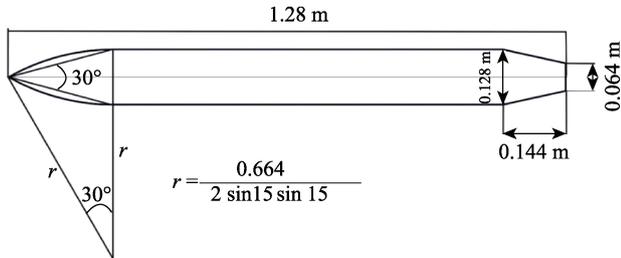


图3 航行器物理模型  
Fig.3 The physical model of the vehicle

采用的计算软件为 STAR-CCM+, 基于 N-S 方程, 选用 Realizable  $k-\varepsilon$  湍流, 欧拉多相流模型, 用 VOF 流体域体积模型捕捉自由液面的变化和 Schnerr and Sauer 空化模型模拟空化过程, 引用重叠网格技术耦合六自由度方程来捕捉航行器的入水运动。为了减少计算量, 本文预估了航行器的大致轨迹, 并在轨迹附近的网格进行加密作为计算域。网格截面如图4所示,  $z$  轴由纸面向外。计算域如图5所示, 长  $10L$ , 宽  $3.9L$ , 水域深  $2.7L$ , 空气域为  $1.2L$ 。计算域四周以及底部为压力出口, 压力根据水深依据公式  $P=\rho gh$  设置, 顶部设置为速度进口, 速度幅值为 0。湍流运输方程采用二阶迎风格式,  $k-\varepsilon$  湍流求解选用 STAR-CCM+内嵌的 AMG 线性求解器, 松弛方案选

用高斯-赛德尔。时间上采用隐式非稳态, 时间步长为  $2 \times 10^{-5}\text{ s}$ 。分别对航行器在初始入水角为  $15^\circ$  和入水速度为  $100、150、200\text{ m/s}$ , 以及初始速度为  $150\text{ m/s}$ , 入水角为  $8^\circ、15^\circ、25^\circ$  一共 5 个工况进行数值模拟计算。

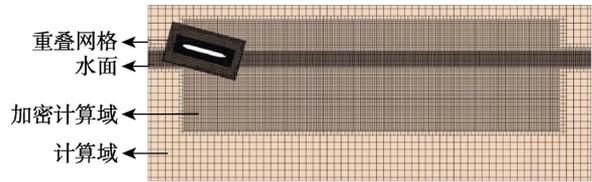


图4  $Z=0$  截面网格  
Fig.4 Schematic diagram of  $Z=0$  section mesh

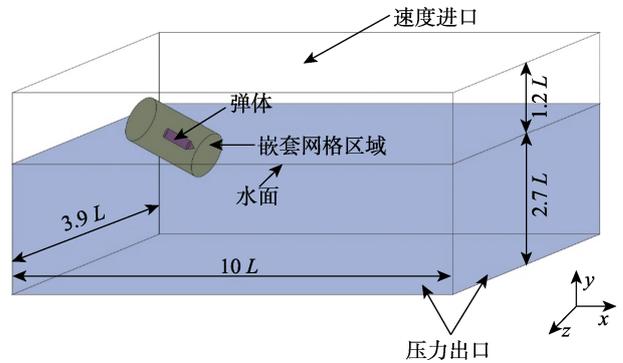


图5 计算域及边界条件设置  
Fig.5 Computational domain and boundary condition settings

### 2.2 数值计算方法验证

为了验证本次数值模拟方法的有效性, 本文选取参考文献[22]中的试验结果作为对照。本次验证模型采用文献中直径为  $6\text{ mm}$ 、长为  $24\text{ mm}$  的回转圆柱体, 质量为  $4.88\text{ g}$ , 入水速度为  $106.6\text{ m/s}$ , 水箱尺寸为  $310\text{ mm} \times 310\text{ mm} \times 660\text{ mm}$ , 水深为  $600\text{ mm}$ 。在数值模拟中, 模型质量、几何尺寸、入水速度与试验保持一致。通过对比圆柱体的速度衰减和位移变化以及不同时刻的空泡演化来验证模拟的有效性。

速度曲线的数值模拟和试验结果对比如图6a所示, 最大误差约在  $5\%$ , 并且在入水时刻速度的剧烈变化, 数值模拟能很好地捕捉。圆柱体的位移变化曲线如图6b所示, 最大误差也约在  $5\%$ , 在误差允许范围之内。

圆柱体入水时在  $t=0.8\text{ ms}$  和  $t=2\text{ ms}$  空泡轮廓的对比如图7所示。图7清楚地展示了空泡的产生以及闭合 2 种状态。在  $t=0.8\text{ ms}$  时, 空泡完全包裹了圆柱体。随着圆柱体继续的下落, 空泡逐渐的被拉长。在  $t=2\text{ ms}$  时, 空泡出现了闭合。通过与试验图像的对比可以发现, 模拟结果与试验结果较为一致, 进一步验证了模拟方法的有效性。

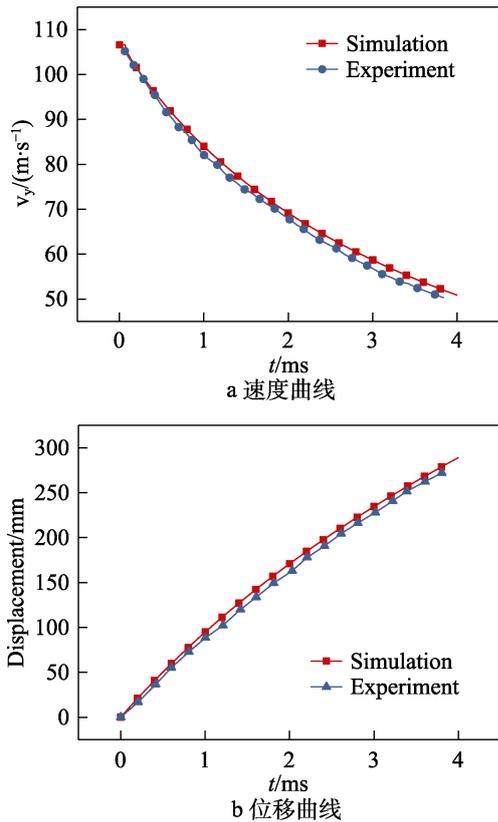


图 6 试验数据与模拟数据对比

Fig.6 Comparison of experimental data and simulation data: a) velocity curve; b) displacement curve

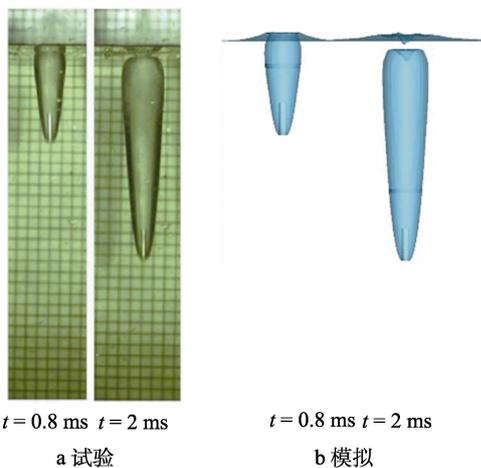


图 7 空泡演变图

Fig.7 Cavitation evolution: a) experiment; b) simulation

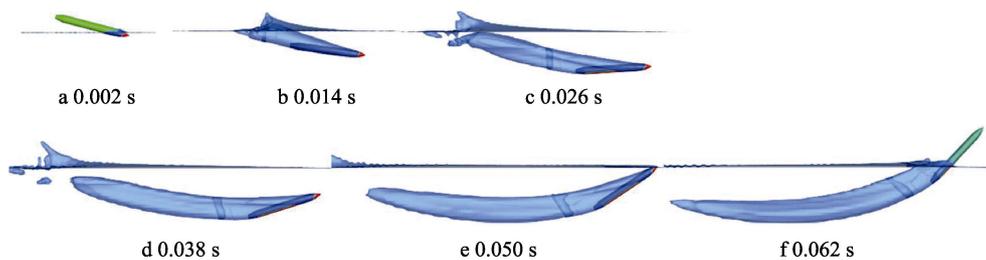


图 9 航行器入水出水过程

Fig.9 Schematic diagram of the process of entering and exiting water of the vehicle

为了避免网格数量对计算结果产生的影响,在数值计算之前建立了 3 种不同的网格密度来对网格无关性进行检验。基于不同网格密度计算下航行器入水深度的变化曲线如图 8 所示。可以看出,在下潜阶段,网格密度的影响不大,在后期上升过程中,不同网格密度之间有一定的差距,随着网格的加密,差距也越来越小。网格数量 330 万以上的时候,曲线几乎重合,相差较小。从计算成本和计算结果的准确性综合考虑,本文采用 330 万网格数量进行数值计算。

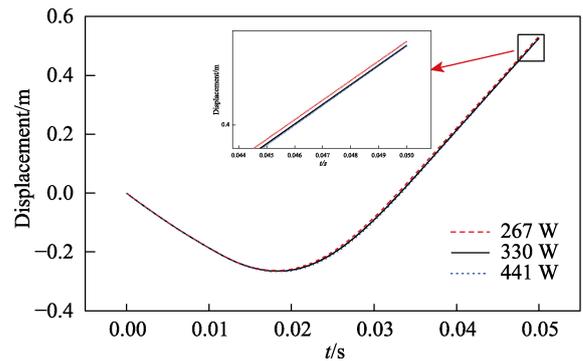


图 8 不同网格密度下航行器深度变化

Fig.8 Vehicle depth variation at different mesh densities

## 4 结果及讨论

### 4.1 航行器跳弹机理分析

通过数值模拟计算航行器在  $v=150 \text{ m/s}$ , 入水角为  $15^\circ$  工况下的跳弹现象来阐述跳弹发生的机理,整个跳弹现象过程如图 9 所示。首先,航行器的头部接触水面时,头部会受到很大的冲击载荷,同时产生飞溅和溅水。因为航行器头部为卵圆形,使得头部两侧受力不均匀,其中下半部远大于上半部,以此产生对航行器较大的俯仰力矩,如图 10 所示。此力矩会使得航行器产生一个逆时针方向的俯仰角速度,它随时间的变化曲线如图 11 所示。可以看出,俯仰角速度在入水后呈现增加的趋势,且方向一直为正方向,航行器的俯仰角增大,弹道发生弯曲。航行器头部沾湿面积逐渐增加,使得航行器受到的流体动力变大,俯仰力矩持续增加。随着航行器继续前行,在  $t=0.128 \text{ s}$  时,尾部也开始出现沾湿。因为头部和尾部的沾湿面

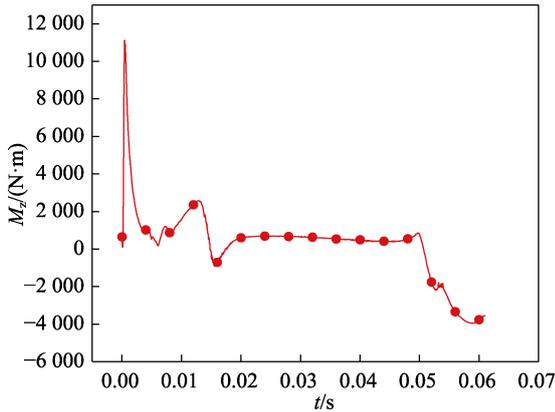


图 10 俯仰力矩变化曲线 ( $v=150\text{ m/s}$ ,  $\alpha=15^\circ$ )  
Fig.10 Change of pitch moment curve ( $v=150\text{ m/s}$ ,  $\alpha=15^\circ$ )

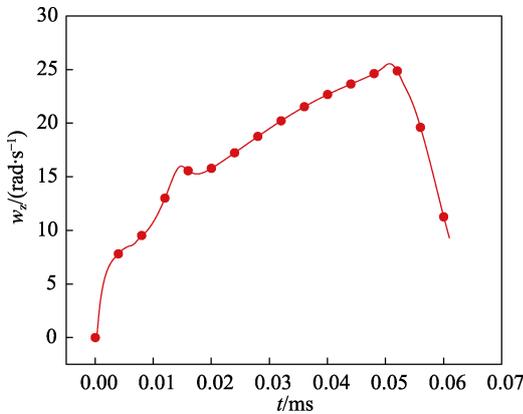


图 11 俯仰角速度变化曲线 ( $v=150\text{ m/s}$ ,  $\alpha=15^\circ$ )  
Fig.11 Change of pitch angular velocity curve ( $v=150\text{ m/s}$ ,  $\alpha=15^\circ$ )

出现在质心两端，所以两端对质心的力矩是反向的，使得航行器在该节点出现力矩减小，致使角速度也减小。最后航行器两端都受力的情况下达到力矩平衡，维持在 386 N·m 左右。此后俯仰角速度大小呈平稳增长趋势，航行器以较为平稳的速度抬升，然后冲出水面。当航行器头部离开水面瞬间，头部受到的流体动

力消失，俯仰力矩开始迅速减小。

通过上述分析可将航行器的跳弹运动过程分为 3 个阶段：第一阶段为入水，航行器头部撞击水面，头部下缘受力，给航行器一个逆时针方向的俯仰力矩；第二阶段为浸水，此时航行器两端的沾湿面积逐渐增加，使得航行器俯仰力矩出现微波动直至稳定；第三阶段为出水，此阶段航行器俯仰力矩维持稳定，航行器以较为平稳的速度冲出水面。

从图 9 可以看出，航行器的空泡经历了入水撞击、空泡形成、开空泡和空泡闭合几个阶段。航行器头部撞击液面，形成了不对称空泡。这是因为撞击水面时，下表面的沾湿面积大于上表面，所以下表面的空泡形成快于上表面，同时尾部只有下表面沾湿，使得航行器两侧受力不同。随着航行器的姿态和运动轨迹的变化，空泡变得越来越不对称。同时，可以观察到空泡呈现先扩张、后收缩的趋势，空泡后半段在扩张到最大直径后，水压开始挤压空泡壁，空泡收缩并开始闭合。

#### 4.2 航行器初速度对跳弹行为的影响

航行器在不同入水速度下水相的变化如图 12 所示。从图 12 中可以直观地看出 3 种工况下航行器在水中发生跳弹的全过程对比，不同速度下航行器的出水时间有着明显区别，随着速度的增加，出水时间节点就越早。其深度和水平位移如图 13 所示（图 13b 中箭头标注为航行器出水时间节点），也能看出 3 种入水速度下出水时间的差异，并且航行器最大下潜深度随着速度的改变变化不显著，但出水时的水平位移随着速度的增加而减小。速度的变化趋势如图 14 所示，不同入水速度下速度变化的斜率有所不同，初始速度为 200 m/s 的速度变化最快。由表 1 可知，虽然三者速度改变的快慢不同，但是在出水时它们的出入水速度比几乎一致，这是由于它们出水时间不一致所致。

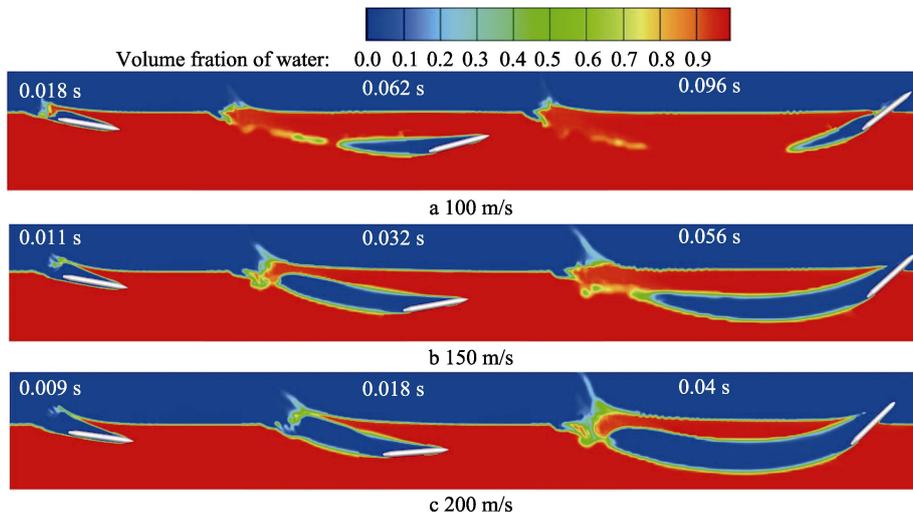


图 12 不同速度工况下的水相图  
Fig.12 The water phase diagram of different speed conditions

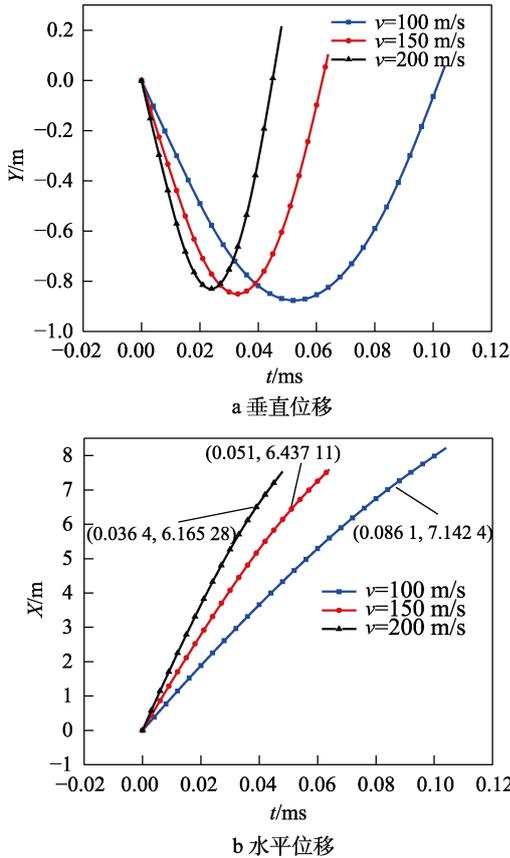


图 13 不同速度工况的位移变化曲线  
Fig.13 Change of displacement curve under different speed conditions a) Vertical displacement; b) Horizontal displacement

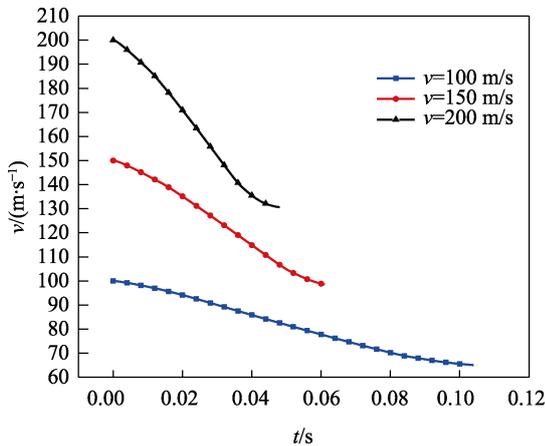


图 14 不同速度工况的速度变化曲线  
Fig.14 Change of velocity curve under different speed conditions

表 1 不同入水速度下水出水速度、时间变化  
Tab.1 Change of water inflow and outflow speed and time under different water entry speeds

入水速度/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	出水速度/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	出入速度比/ %	时间/s
100	68.40	68.40	0.086 1
150	104.07	69.38	0.051 0
200	143.15	71.58	0.036 4

俯仰力矩的变化如图 15 所示。可以看出, 入水阶段的俯仰力矩峰值随着速度的提升而明显增加, 在从浸水阶段进入出水阶段的过渡时间明显缩短。初始速度越快, 在该阶段越能快速稳定俯仰力矩, 这有利于缩短出水时间。最后在出水阶段时, 俯仰力矩随着速度的增加而提升。俯仰角速度变化的如图 16 所示。不同速度工况下, 除了在浸水阶段俯仰角速度有一小段下降外, 在出水前的其他时间段呈增加趋势。这是因为尾部受力增大, 使得俯仰力矩为负, 从而使得俯仰角速度减小。最后俯仰角速度发生骤降, 标志着航行器头部已经离开了水面。由此可知, 入水速度对跳弹现象有着明显的影响, 并且可推测当初始速度低于某一临界点时, 航行器在该角度就无法跳出水面。

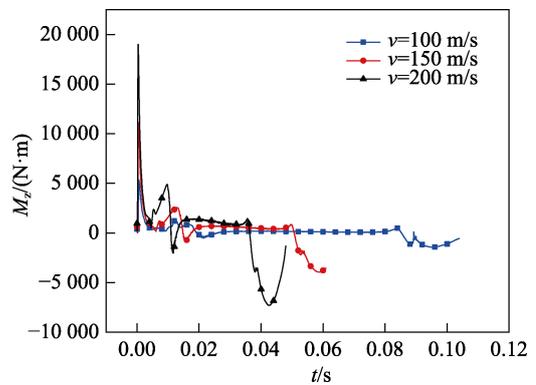


图 15 不同速度工况下俯仰力矩的变化曲线  
Fig.15 Change of pitch moment curve under different speed conditions

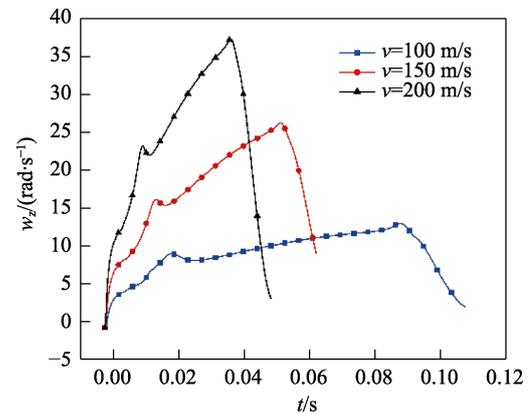


图 16 不同速度工况下俯仰角速度的变化曲线  
Fig.16 Change of pitch angular velocity curve under different speed conditions

### 4.3 不同入水角对跳弹行为的影响

在航行器初始速度为 150 m/s 下研究入水角对跳弹行为的影响, 其仿真结果水相图如图 17 所示, 俯仰角角度大小变化如图 18 所示。可以看出, 随着航行器入水角的增大, 最后出水时的角度也有着明显增大。由表 2 可知, 入水角越大时, 角度改变量也会明显增加。

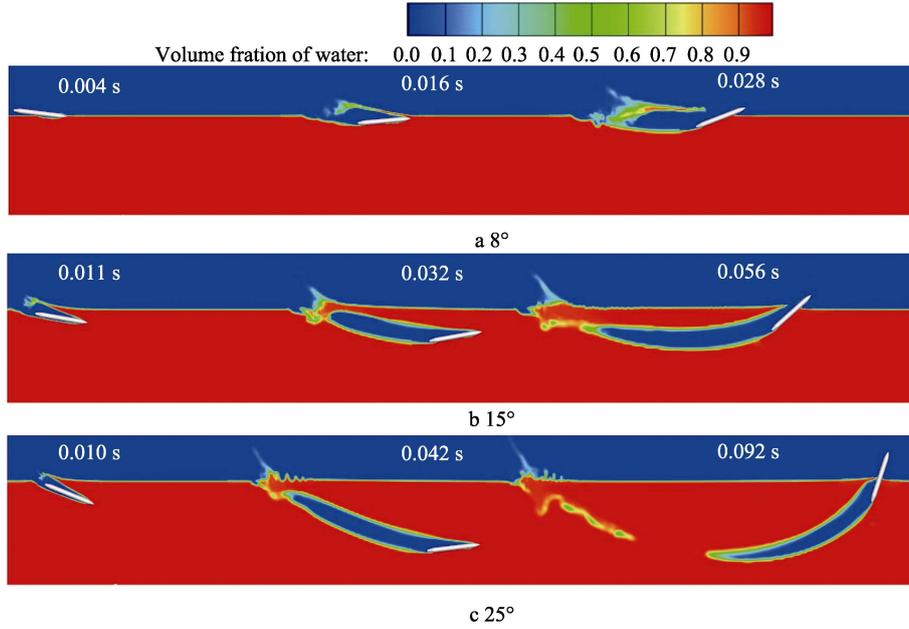


图 17 不同入水角度工况下的水相图  
Fig.17 Water phase diagrams at different water entry angle angles

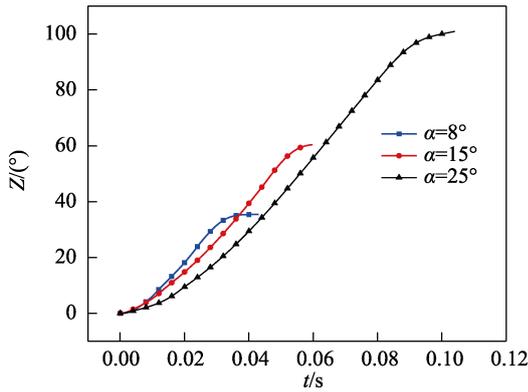
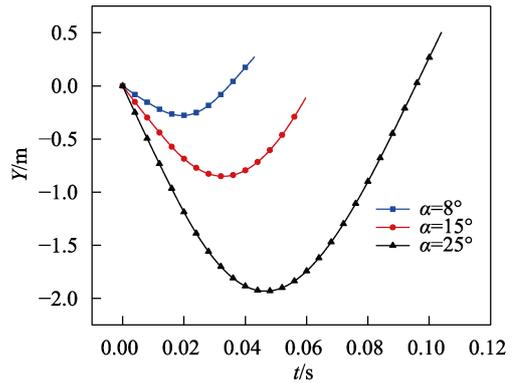


图 18 不同入水角度工况下俯仰角的变化曲线  
Fig.18 Change of pitch angle curve under different water entry angle conditions

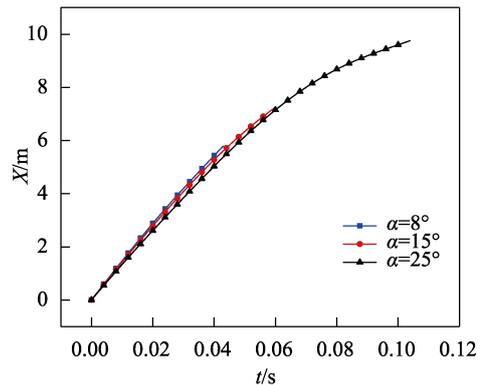
表 2 不同入水角入水出水时角度的变化量  
Tab.2 Variation of angle when entering and exiting water at different entry angles

入水角/(°)	出水角/(°)	改变量/(°)	出水时间/s
8	-22.66	30.66	0.0232
15	-55.139	70.139	0.051
25	-85.97	130.97	0.0818

不同入水角下飞行器质心垂直位移和水平位移变化趋势如图 19 所示。从图 19a 可以看出，3 种入水角中，飞行器质心垂直位移有着较大差异，其中 25°入水角的最大垂直位移几乎为 8°入水角的 8 倍。图 19b 中，3 种工况在出水前的水平位移较为一致，但是因为出水时间的不同，使得它们的出水点位移有着较大差别，入水角为 8°、15°、25°对应的出水点位移分别为 3.31、6.43、8.78 m。由此可知，入水角度对飞行器下潜深度的影响比初始速度大。



a 垂直位移



b 水平位移

图 19 不同入水角度工况下位移的变化曲线  
Fig.19 Change of displacement curve under different water entry angle conditions

进一步分析不同入水角带来的差异性。入水瞬间，25°和 15°入水角工况的俯仰力矩峰值相差不大，但是都远大于 8°的工况。在浸水阶段，不同角度的俯仰力矩变化趋势几乎一致，在该阶段不同角度的俯仰

力矩几乎都维持在  $386 \text{ N}\cdot\text{m}$ , 而  $8^\circ$  入水角的浸水阶段时间较短, 俯仰力矩还未稳定就进入了出水阶段, 离开水面。从图 21 也能看出, 这一阶段俯仰角速度的增加较为匀速, 航行器偏转较为平稳。航行器在刚入水时, 角速度迅速增加, 当尾部触碰空泡壁沾湿后, 3 个工况角速度均出现下降过程。随着航行器姿态的改变, 入水角为  $15^\circ$  和  $25^\circ$  的工况, 航行器头尾两端作用力相互作用, 使得力矩稳定, 角速度平稳增加, 直至最后离开水面; 而入水角为  $8^\circ$  的工况因为没有经过力矩平衡这一过程, 在角速度下降后, 又迅速增加, 然后离开水面, 整个过程中角速度大小随入水角的减小而增大。

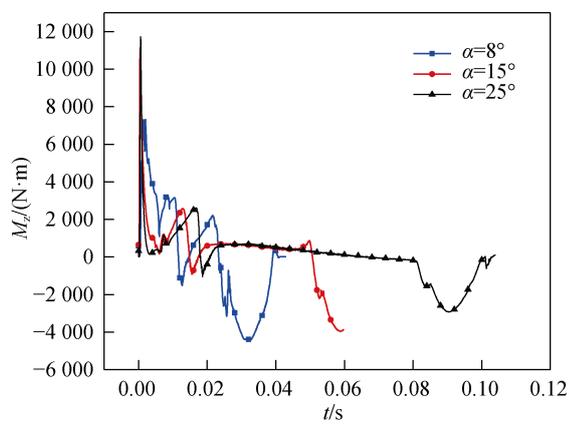


图 20 不同入水角度工况下俯仰力矩的变化曲线  
Fig.20 Change of pitch moment curve under different water entry angle conditions

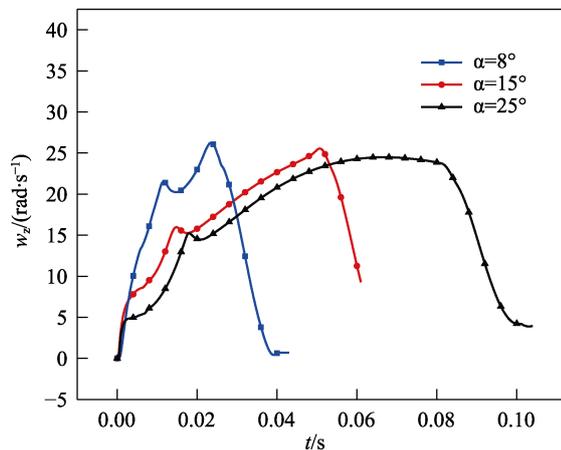


图 21 不同入水角度工况下俯仰角速度的变化曲线  
Fig.21 Change of pitch angular velocity curve under different water entry angle conditions

## 5 结论

本文采用数值模拟的方法对跨介质航行器的小角度入水的跳弹过程进行了研究, 分别研究了入水速度和入水角的变化对跳弹行为带来的影响, 分析对比了不同工况下航行器的位移、俯仰力矩和俯仰角速度

变化以及出水时间的差异, 得到以下结论:

1) 航行器高速入水时, 发生跳弹的主要原因是航行器上下以及头尾两侧受力不均, 形成了向上的偏转力矩, 改变了航行器的俯仰角, 会形成不对称空泡。整个跳弹过程可以分为入水阶段、浸水阶段和出水阶段 3 个阶段。

2) 相同入水角, 不同入水速度下, 速度越大, 越容易发生跳弹现象, 出水时间也越早, 航行器出水时的速度约为入水速度的 70%。航行器在水中下潜的深度受速度的影响不大, 但是在出水点位移随着速度的增加而减小。入水速度越大, 航行器所受到的俯仰力矩越大, 俯仰角速度越大。

3) 相同入水速度, 不同入水角工况下, 入水角越小, 越能促进跳弹行为的发生, 航行器出水时角度改变量越小。入水角的变化对航行器位移的变化更加明显, 随着入水角的增加, 航行器的下潜深度和出水点位置也随之增大。

## 参考文献:

- [1] ZAIDI S W H. The Janus-Face of Techno-Nationalism: Barnes Willis and the "Strength of England"[J]. *Technology and Culture*, 2007, 49(1): 62-88.
- [2] WORTHINGTON A M. On Impact with a Liquid Surface[J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1883, 34(220/221/222/223): 217-230.
- [3] WORTHINGTON A M, COLE R S. Impact with a Liquid Surface Studied by the Aid of Instantaneous Photography. Paper II[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1897, 189: 137-148.
- [4] 侯宇, 黄振贵, 郭则庆, 等. 超空泡射弹小入水角高速斜入水试验研究[J]. *兵工学报*, 2020, 41(2): 332-341.  
HOU Yu, HUANG Zhen-gui, GUO Ze-qing, et al. Experimental Investigation on Shallow-Angle Oblique Water-Entry of a High-Speed Supercavitating Projectile[J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(2): 332-341.
- [5] 胡青青. 不同倾角下钝体入水后的超空泡流动的实验观察及数值计算[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2014.  
HU Qing-qing. Experimental Observation and Numerical Calculation of Supercavity Flow of Blunt Body under Different Inclination Angle into the Water[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2014.
- [6] 黄鸿鑫, 张会锁, 魏锦, 等. 不同结构射弹高速入水稳定性分析[J]. *兵器装备工程学报*, 2019, 40(11): 50-54.  
HUANG Hong-xin, ZHANG Hui-suo, WEI Jin, et al. Stability Analysis of High-Speed Water Entry of Different Structure Projectiles[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2019, 40(11): 50-54.
- [7] 郑磊. 弹体跨介质入水过程研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.  
ZHENG Lei. Study on the Process of Water Missile Crossing Medium[D]. Harbin: Harbin Engineering Uni-

- versity, 2020.
- [8] RICHARDSON E G. The Impact of a Solid on a Liquid Surface[J]. Proceedings of the Physical Society, 1948, 61(4): 352-367.
- [9] MILOH T, SHUKRON Y. Ricochet Off Water of Spherical Projectiles[J]. Journal of Ship Research, 1991, 35(2): 91-100.
- [10] SOLIMAN A S, REID S R, JOHNSON W. The Effect of Spherical Projectile Speed in Ricochet off Water and Sand[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1976, 18(6): 279-282.
- [11] JOHNSON W. The Ricochet of Spinning and Non-Spinning Spherical Projectiles, Mainly from Water. Part II: An Outline of Theory and Warlike Applications[J]. International Journal of Impact Engineering, 1998, 21(1-2): 25-34.
- [12] JOHNSON W. Ricochet of Non-Spinning Projectiles, Mainly from Water Part I: Some Historical Contributions[J]. International Journal of Impact Engineering, 1998, 21(1-2): 15-24.
- [13] NGUYEN V T, PHAN T H, PARK W G. Modeling and Numerical Simulation of Ricochet and Penetration of Water Entry Bodies Using an Efficient Free Surface Model[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 182: 105726.
- [14] HUTCHINGS I M. The Ricochet of Spheres and Cylinders from the Surface of Water[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1976, 18(5): 243-247.
- [15] MOXNES J F, FRØYLAND Ø, SKRIUDALEN S, et al. On the Study of Ricochet and Penetration in Sand, Water and Gelatin by Spheres, 7.62 mm APM2, and 25 mm Projectiles[J]. Defence Technology, 2016, 12(2): 159-170.
- [16] GOLD R E, SCHECTER B. Ricochet Dynamics for the Nine-Millimetre Parabellum Bullet[J]. Journal of Forensic Sciences, 1992, 37(1): 13215J.
- [17] CHEN Guo-ming, HU Jun-hua, LIU An, et al. Ricochet Behavior of Air-Water Trans-Media Vehicle during Water-Entry Crossing[J]. Fluid Dynamics Research, 2019, 51(6): 065503.
- [18] 袁绪龙, 栗敏, 丁旭拓, 等. 跨介质航行器高速入水冲击载荷特性[J]. 兵工学报, 2021, 42(7): 1440-1449.
- [18] YUAN Xu-long, LI Min, DING Xu-tuo, et al. Impact Load Characteristics of a Trans-Media Vehicle during High-Speed Water-Entry[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(7): 1440-1449.
- [19] 李永利, 刘安, 冯金富, 等. 航行器小角度入水跳弹过程研究[J]. 兵工学报, 2016, 37(10): 1860-1872.
- [19] LI Yong-li, LIU An, FENG Jin-fu, et al. Research on Ricochet Process of Small-Angle Water-Entry Vehicle[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(10): 1860-1872.
- [20] 陈国明, 刘安, 胡俊华, 等. 航行器斜入水跳弹现象研究[J]. 船舶力学, 2020, 24(5): 611-617.
- [20] CHEN Guo-ming, LIU An, HU Jun-hua, et al. Research on Ricochet Phenomenon of a Vehicle Making an Oblique Water-Entry[J]. Journal of Ship Mechanics, 2020, 24(5): 611-617.
- [21] 李永利, 冯金富, 齐铎, 等. 航行器低速斜入水运动规律[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(12): 2698-2708.
- [21] LI Yong-li, FENG Jin-fu, QI Duo, et al. Movement Rule of a Vehicle Obliquely Water-Entry at Low Speed[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(12): 2698-2708.
- [22] CHEN Tuo, HUANG Wei, ZHANG Wei, et al. Experimental Investigation on Trajectory Stability of High-Speed Water Entry Projectiles[J]. Ocean Engineering, 2019, 175: 16-24.

责任编辑: 刘世忠