



浪流耦合下的潜射导弹发射及出水特性研究

李华伟¹, 刘卫强¹, 张 军^{1*}, 焦艳梅²

(1.南京航空航天大学 航空学院,江苏 南京 210016;2.南京工业大学 数理科学学院,江苏 南京 211816)

摘要:潜射导弹作为战略核力量体系的核心装备,研究其在恶劣海况下的水下发射特性对提升发射几率有重要影响。基于斯托克斯五阶波理论,采用边界造波技术实现数值浪流耦合,通过重叠网格方法及六自由度运动方程模拟冷发射条件下的导弹运动过程,建立了浪流耦合下的潜射导弹冷发射过程的数值模型。通过数值仿真揭示了浪流耦合作用下导弹发射过程的空泡演化规律,重点分析了波浪相位角对弹体俯仰特性的影响机制,以及弹体水下运动过程中的动态载荷变化特性。研究结果表明:①空泡断点处形成向上的射流,射流挤压弹尾附着空泡并致使其溃灭,引起弹体竖向力峰值;②空泡断点处形成向下的射流,射流挤压发射筒内空泡引起水锤效应;③弹体水下运动阶段,附着空泡对弹底的作用力诱导弹体受力趋势;④不同出水相位角使得弹体俯仰运动呈差异性演化,且出水相位角为波峰处时偏转角与偏转角速度均为最大,波谷处最小。研究获取的弹体运动参数及载荷变化规律为潜射导弹结构设计与弹道修正算法开发提供了重要理论支撑。

关键词:潜射导弹;浪流耦合;空泡发展;模拟仿真

中图分类号:TJ385 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-499X(2026)03-0037-10

Research on Launch and Water-Exit Characteristics of Submarine-Launched Missiles Under Wave-Current Coupling

LI Huawei¹, LIU Weiqiang¹, ZHANG Jun^{1*}, JIAO Yanmei²

(1.College of Aeronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2.School of Mathematical and Physical Sciences, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: As a core component of strategic nuclear forces, submarine-launched missiles are highly affected by launch behavior in rough seas, making the study of their underwater launch characteristics important for improving launch success rates. Based on the fifth-order Stokes wave theory, a wave-current coupled numerical model was established using boundary wave generation. The cold-launch process of a submarine-launched missile was simulated by the overlapping grids method and six-degree-of-freedom motion equations. Numerical simulations reveal the cavity evolution during launch under wave-current coupling, with emphasis on how wave phase angle affects body pitch motion and how dynamic loads vary during underwater motion. The results show that: ①the upward jet at the cavity breakup point compresses the tail-attached cavity and causes its collapse, producing a peak vertical force; ②the downward jet at the cavity breakup point compresses the cavity inside the launch tube, and induces a water-hammer effect; ③during underwater motion, the force exerted by the attached cavity on the missile base governs the body's load trend; ④different exit-phase-angles lead to different pitch responses, with both deflection angle and angular velocity reaching their maxima at the wave crest, and their minima at the wave trough. These motion parameters and load laws provide important theoretical support for structural design and trajectory correction algorithm development.

Key words: submarine-launched missile; wave-current coupling; cavitation evolution; numerical simulation

潜射导弹成本昂贵,是海上战场决定胜负的撒手锏。对一个海洋大国而言,掌握潜射导弹发射技术,提高其在各海情下的发射成功机率十分重要。为此,本文针对浪流耦合作用下的导弹发射及出水特性展开研究。

潜射导弹的水下发射过程通常包括出筒、水中航行、出水3个阶段^[1]。在出筒阶段,筒内高压工质气体推动弹体向上加速运动;在水下航行阶段,高压的工质气体迅速膨胀而从筒内溢出,并受弹体尾流场的影响,部分空泡跟随弹体一起运动;在出水阶段,由于导弹穿越波面,受介质密度突变以及波浪作用,导弹的运动特性以及受力特性将受到剧烈影响。

国内外研究潜射导弹水下发射及出水的公开文献相对较少,但也取得了一些研究成果。李杰等^[2]建立了肩空泡尾端横向力模型,并研究了附着空泡对水下弹道的影响。李海龙等^[3]对潜射导弹在不同筒底压力和来流速度条件下的弹道具体变化情况进行了仿真研究。韦懿珉等^[4]分析了自然空化现象对弹体水动力特性的影响,研究表明在速度不超过20 m/s的情况下,空化效应对弹体出水姿态的影响较小。张志洋^[5]建立了发射筒湿模态仿真结构,针对艇速、发射深度及发射筒尺寸等发射参数进行了研究,分析了发射筒结构响应的频率特性。高山等^[6]对水下发射过程中的导弹尾涡不稳定性进行了分析,研究了尾流区瞬态流场分布,并讨论了横流强度等参数对导弹尾部流场演变和脉动压力分布特性的影响。武雨嫣^[7]针对双弹齐射过程中的流场演化特性进行了实验与仿真研究,结果表明首发导弹的发射气团将影响次发导弹筒口气团的膨胀及收缩,并且首发气团与次发气团融合将削弱次发筒内的压力振荡。ZHUANG等^[8]对不同头型导弹出水过程中的弹道稳定性进行了实验与仿真研究,研究表明在相同工况下平头弹体的出水俯仰角变化最大,其次为120°、90°锥形弹头,变化最小的为半球头弹体。

工程上在对波浪进行模拟时,往往会采用高阶的Stokes波,原因是基于Stokes波理论近似生成的高阶波相较于低阶波往往更接近于真实的波。高阶非线性入射波可以视作不同频率、相位、波束、振幅波的叠加,FENTON^[9]对前人提出的五阶Stokes理论进行了修正,最终提出了正确的Stokes五阶波公式,研究表明真正的五阶Stokes波的波形和波速取决于水深、波高以及自由面以下的平均流量。王建

华^[10]基于OpenFoam进行二次开发,使用边界造波法对规则波浪中的船舶操纵问题展开了研究。余勇飞^[11]基于边界造波法对Fluent软件进行二次开发,针对Stokes波的流场结构进行了分析。分析表明Stokes波的涡核往往位于波峰以及波谷的气水界面处,并且波峰处的涡核逆时针旋转,波谷处的涡核顺时针旋转。因此,在出水过程中不同的出水相位角可能对导弹整体受力有着不同的影响。陈静等^[12]分析了风浪流耦合作用下不同海床地貌的波浪非定常演化规律。周炫成^[13]针对不同波浪环境下导弹出水过程进行了模拟,并对出水时的导弹载荷特性进行了分析。马如相等^[14]研究了海况等级对水下航行体发射过程的影响,研究表明海况等级越高,航行体的出水偏转角度越大。在同等级海况下,不同波向对航行体有着不同的影响,顺浪对航行体出水过程产生的扰动影响较小。

综合上述研究可知,现有成果主要集中于潜射导弹出筒阶段的动力响应及出水过程分析,针对尾空泡效应与浪流耦合环境下水下弹道问题的研究尚不充分。为此,本文基于五阶Stokes波理论,采用边界造波法生成波浪,针对浪流耦合条件下潜射导弹发射及出水全过程开展数值模拟研究。

1 物理模型

1.1 控制方程

本文采用VOF方法进行多相流的界面捕捉,其流动控制方程如下。

连续性方程:

$$\frac{\partial(\alpha_q \rho_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{u}_q) = 0 \quad (1)$$

式中: α_q 、 ρ_q 和 $\mathbf{u}_q$ 分别为控制体内第 q 相的体积分、密度和速度矢量,且 α_q 满足:

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (2)$$

动量方程:

$$\frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)] + \mathbf{G} \quad (3)$$

式中: p 为压力; $\mathbf{G}$ 为重力矢量; ρ 、 μ 分别为流体密度和体积平均黏性系数,其计算方式如下:

$$\begin{aligned} \rho &= \sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q \\ \mu &= \sum_{q=1}^n \alpha_q \mu_q \end{aligned} \quad (4)$$

能量方程:

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot [\mathbf{u}(\rho E + p)] = \nabla \cdot [k_{\text{eff}} \nabla T + (\bar{\boldsymbol{\tau}}_{\text{eff}} \cdot \mathbf{u})] \quad (5)$$

式中: E 为总能量, k_{eff} 为流体的有效热导率, $\bar{\boldsymbol{\tau}}_{\text{eff}}$ 为有效黏性应力张量。

体积分数输运方程:

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_q \mathbf{u}) = 0 \quad (6)$$

式中: α_q 为控制体中第 q 相的体积分数。此外, 由于发射筒内气体为可压缩气体, 将其视作理想气体, 有:

$$p = \rho RT \quad (7)$$

式中: 气体常数 $R = 287.05 \text{ m}^2/(\text{s}^2 \cdot \text{K})$, T 为绝对温度。

Stokes 五阶波^[9]的波面方程以及任意水质点速度可以用以下公式来描述。

波面方程:

$$\eta_w = \frac{1}{k_w} \sum_{n=1}^5 \lambda_n \cos(n(k_w x - \omega t)) \quad (8)$$

式中: 波数 $k_w = 2\pi/L$, L 为波长; ω 为角速度; λ_n 为五阶波的波面计算相关参数, 它由每个波唯一确定, 其具体计算方法见文献[14]。

自由界面水质点速度:

$$u_x = c \sum_{n=1}^5 n \lambda_n \text{ch}(n k_w (y+d)) \cos(n(k_w x - \omega t)) \quad (9)$$

$$u_y = c \sum_{n=1}^5 n \lambda_n \text{sh}(n k_w (y+d)) \sin(n(k_w x - \omega t)) \quad (10)$$

式中: d 为水深, $c = \text{ch}(k_w d)$ 。

KIM 等^[15]提出了一种用于计算波浪-结构物相互作用的高效方法: 通过对计算域划分区域, 在区域边界处使得数值计算获得的波浪解与 VOF 波指定的理论解或简化解结合起来。运用这种方法, 使得在指定区域内, 离散化的 N-S 方程求得的解将趋近于波浪理论解, 进而使波浪在与结构物作用时既能得到充分发展, 又可显著减少计算时间。这种方法还可以解决计算域边界处的波浪反射的相关问题。

若定义该区域为欧拉作用区, 则在该区域内, 首先将 CFD 求解得到的标量 ϕ 与欧拉求解器求解得到的 ϕ_E 相减, 并将该差值乘以流体密度与一经验

系数后, 以源项形式分别添加至各守恒方程中来达到修正源项的目的, 即:

$$S_\alpha^* = S_\alpha - \xi \rho (\phi - \phi_E) \quad (11)$$

式中: ϕ_E 为欧拉叠加法求解所得的解; ξ 为调节系数, 该系数取值越大, 计算结果越接近理论解。当数值耗散等因素导致求解值 ϕ 偏小时, S_α^* 将相应增大, 从而驱动数值解趋近于理论解, 以此保证波浪品质。在欧拉作用区边界处, 标量取值按 $\phi = \phi_E$ 处理。

1.2 DFBI 模型

为预测潜射导弹在冷发射条件下的运动轨迹, 本文采用 DFBI 模型将 N-S 方程与弹体六自由度运动方程耦合求解。

由牛顿第二定律可得:

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{F} \quad (12)$$

由欧拉动力学方程可得:

$$\bar{\mathbf{I}} \frac{d\boldsymbol{\omega}^*}{dt} + \boldsymbol{\omega}^* \times \bar{\mathbf{I}} \boldsymbol{\omega}^* = \mathbf{M} \quad (13)$$

式中: m 为弹体质量, $\mathbf{v}$ 为弹体质心的运动速度; $\mathbf{F}$ 为作用于弹体的合力, 其主要由浪流引起的侧向力、弹体前进受到的阻力、弹体自身重力以及空泡对弹底产生的作用力组成; $\bar{\mathbf{I}}$ 为弹体的惯性矩张量; $\boldsymbol{\omega}^*$ 为弹体的角速度; $\mathbf{M}$ 为作用于弹体的合力矩, 其主要由浪流作用引起的偏转力矩组成。

2 计算条件与验证算例

2.1 计算条件

本文全局坐标系采用笛卡尔坐标系, 原点位于初始时刻弹头驻点。所生成的五阶 Stokes 波参数如下: 波长 $L = 16 \text{ m}$, 波高 $H = 1.3 \text{ m}$, 波周期 $T_w = 2.60 \text{ s}$, 洋流速度 1 m/s 。计算域尺寸为 $3L \times 2L \times L$ (分别对应 x 、 y 、 z 方向), 平均水深为 $1.25L$; x 方向取为波浪前进方向, $-y$ 方向为重力方向, z 方向由右手定则确定。为分析发射筒水锤效应, 在筒内布置 5 个测压点, 计算域几何尺寸及测压点位置见图 1。

计算域左侧边界设为速度入口, 右侧及上侧设为压力出口, 底部及发射筒壁面设为固壁, 前后边界设为对称平面。发射筒底部边界在初始时刻设置为压力入口, 待弹体完全出筒后将其切换为固壁。为保证数值波浪品质, 在左侧入口及右侧出口的内法线方向各设置一个长度为 L 的欧拉作用区; 同时在 $x=0$ 处 (弹体出水位置附近) 布置浪高仪, 用于监测波面高程、验证波浪品质。欧拉作用区及浪高仪位

置如图2所示。

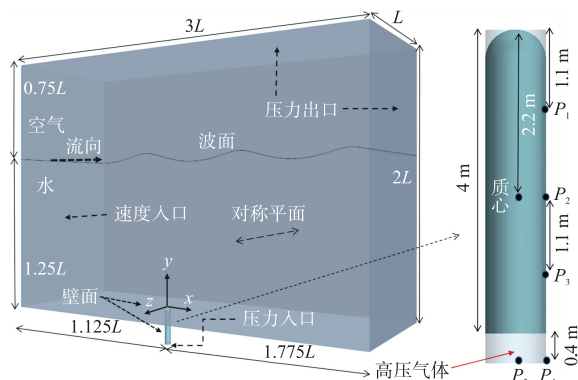


图1 计算域尺寸及边界条件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the calculation domain and boundary conditions

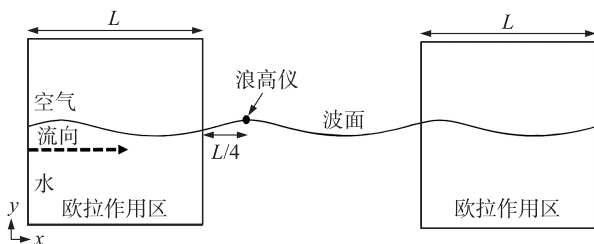


图2 欧拉作用区示意图

Fig. 2 Eulerian domain schematic

本文研究的潜射导弹采用半球头回转体外形,弹体直径 $D=0.8$ m,弹长为 4 m,长径比为 5。发射筒内径与弹体直径一致,发射筒长度为 4.4 m。弹体总质量为 1 937.8 kg,质心位于距弹头驻点 2.2 m 处。弹体坐标系下,绕 x, y, z 轴的转动惯量分量分别为 $2\,499.3\text{ kg}\cdot\text{m}^2$, $2\,499.3\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 和 $1\,52.9\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。发射筒内工质气体初始压力为 0.4 MPa,初始温度为 300 K,弹体出筒速度约为 22 m/s。

2.2 验证算例

为验证浪流耦合环境下潜射导弹水下发射计算方法的有效性,本节分别对 DFBI 模型与数值造波模型进行验证。

选用 CHEN 等^[16]所做的高速入水实验来验证本文模型在弹道及空泡演化预测方面的有效性。图3给出了实验得到的空泡轮廓与本文计算得到的空泡轮廓。由图3可见,弹体高速入水后,空泡迅速扩张并包裹弹体。随着入水深度增加,空泡被持续拉长,并于 2 ms 时开始闭合。随着入水深度的进一步增大,在 3 ms 与 3.8 ms 时可明显观察到空泡逐渐收缩,且空泡闭合诱发的射流侵入空泡内部。本文计算所得空泡形态与实验结果吻合良好,为进一

步验证所选模型在物体运动特性计算方面的准确性,图4和图5还给出了弹体入水速度与入水深度的演化曲线。

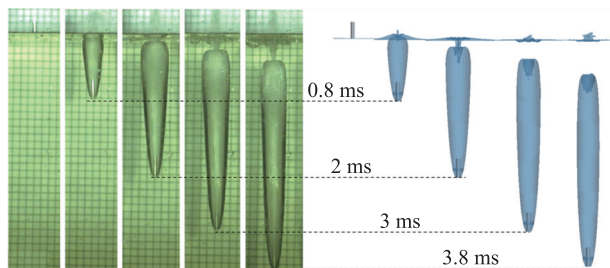


图3 气液界面分布图

Fig. 3 Gas-liquid interface distribution during the water-entry process

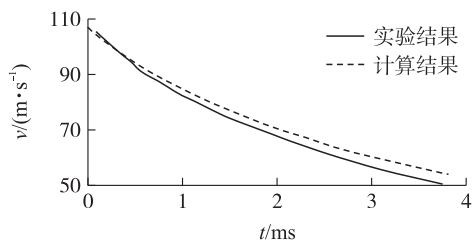


图4 弹体入水速度演化曲线

Fig. 4 Evolution curve of projectile water-entry velocity

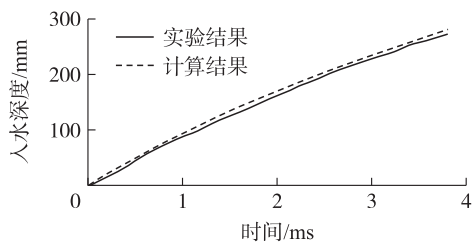


图5 弹体入水深度演化曲线

Fig. 5 Evolution curve of projectile water-entry depth

由图4和图5可见,弹体入水过程中计算所得的速度与深度演化趋势均与实验结果吻合良好,其中入水速度相对于实验值的最大误差为 6.46%,入水深度相对于实验值的最大误差为 3.31%。

为验证所选波浪模型的有效性,按照前文所述计算域尺寸与边界条件(不含弹体及发射筒区域)进行波浪生成计算,并将浪高仪监测结果与理论解对比,以验证造波方法的准确性。分别采用网格数量为 50 万(粗网格)、101 万(中等网格)、203 万(细网格)的 3 套网格进行收敛性验证,综合权衡计算精度与计算效率后,选取最优网格作为后续水下发射研究的配套网格。图6给出了中等网格在 $t=10T_w$ 时刻的液面相对于水平面的高程分布。

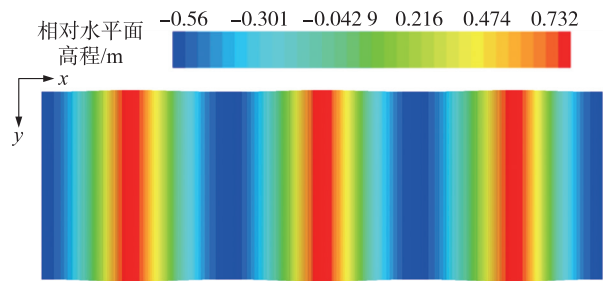


图6 $t=10T_w$ 液面相对水平面高程

Fig. 6 Free-surface elevation at $t=10T_w$

从图6可以看出,即便在离造波源(左侧)较远的地方,其波高衰减也较小,说明了本文使用的造波方法的有效性。此外,为定量分析本文方法生成的波浪质量,图7进一步给出了浪高仪收集到的10个波浪周期内不同密度网格相对水平面高程演化结果。

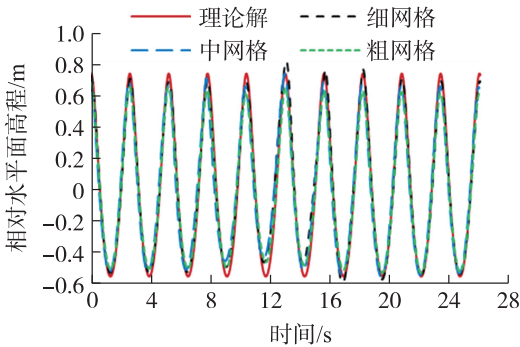


图7 不同网格密度计算结果与理论解对比

Fig. 7 Comparison of numerical results under different mesh densities with the theoretical solution

由图7可见,随着网格加密,数值解逐步收敛于理论解。通过统计10个周期的平均波高,可得到细网格与中等密度网格相对于理论解的误差分别为-4.97%与-7.89%。由于实际流体均具有黏性,水质点运动过程中亦须不断克服重力做功,因而数值解与理论解之间的偏差无法完全消除。鉴于该偏差仍属工程研究可接受范围,本文所采用的波浪计算方法是合理的。

以上验证表明,本文所采用的数值模型计算结果与实验值及理论解均吻合良好,适用于该问题的计算分析。为兼顾计算精度与效率,本文选用中等密度网格作为基础网格,并对弹体及其运动轨迹区域进行局部加密,最终网格总量为483万,网格划分情况如图8所示。

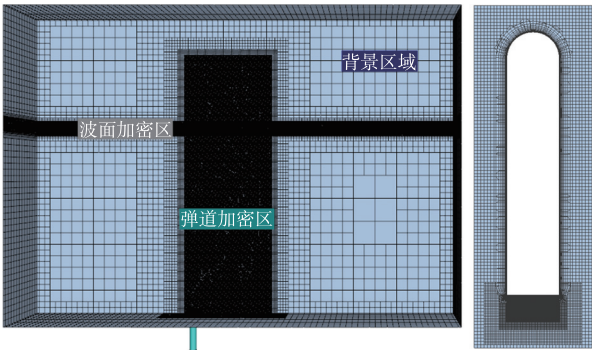


图8 网格示意图

Fig. 8 Schematic of the computational mesh

3 计算结果分析

为分析不同出水位置对潜射导弹出水姿态的影响,本文计算了浪流耦合环境下不同发射时刻的流场演化过程;为便于后续描述,将导弹出水相位角按图9所示方式定义。此外,图10还给出了航行体出水相位角为 90° 时的5个典型时刻气液界面分布。

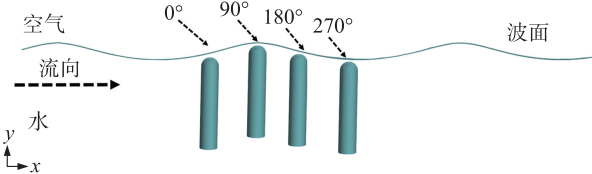


图9 浪流耦合下导弹出水相位定义

Fig. 9 Definition of the missile water-exit phase angle under combined wave-current conditions

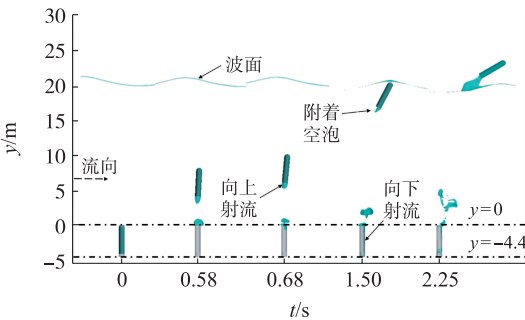


图10 气液界面分布图

Fig. 10 Gas-liquid interface distribution

从图10可以看出, $t=0.58\text{ s}$ 时,弹体在洋流作用下已发生明显偏转; $t=0.68\text{ s}$ 时,弹体尾部空泡内出现明显的气液掺混现象; $t=1.50\text{ s}$ 时,弹头基本接触波面,且此时可观察到筒内空泡开始溢出,并在洋流作用下向下游移动; $t=2.25\text{ s}$ 时,弹体完全出水,筒内气团进一步溢出并破碎。下文对出水相位角 90° 工况下的流场特性进行分析。图11~图13给出了弹体出筒后发射筒内的空泡及流场参数动态演化过程。

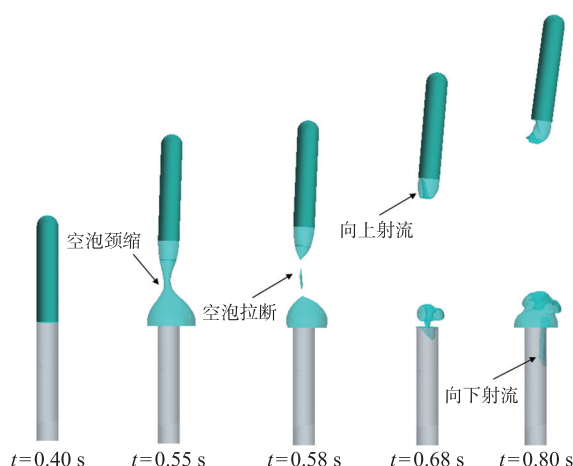


图 11 出筒后的气液界面分布图

Fig. 11 Gas-liquid interface distribution after launch-tube exit

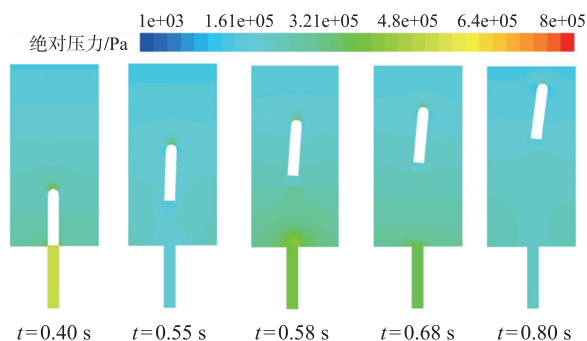


图 12 出筒后的压力分布云图

Fig. 12 Pressure distribution contour after launch-tube exit

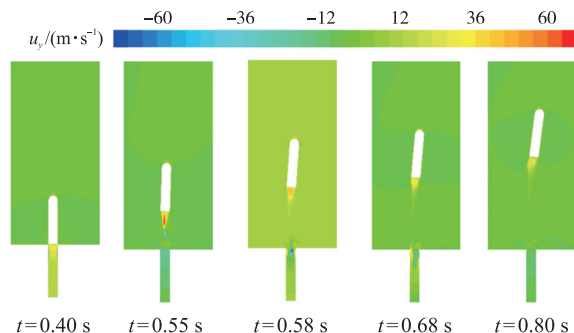


图 13 出筒后的 y 向速度分布云图

Fig. 13 Contours of y-velocity after launch-tube exit

从图 11~图 13 可以看出航行体出筒后发射气团沿发射筒轴向及径向的迅速膨胀过程。 $t=0.55\sim 0.58\text{ s}$ 期间,空泡因过度膨胀导致泡内压力低于当地压力,发生颈缩并断裂,水质点在空泡断点处撞击形成射流。 $t=0.68\text{ s}$ 时,向上射流抵至弹尾附着空泡,向下射流则在横流剪切作用下略微偏转并指向发射筒内,致使筒内空泡压力开始升高。 $t=0.80\text{ s}$ 时,弹尾附着空泡在向上射流高压作用下被挤压变

形,发射筒内空泡则在向下射流作用下膨胀并溢出。发射气团的这种持续演化使得筒内荷载呈现非定常特性。图 14 和图 15 分别给出了筒口流场气液界面分布及发射筒内各测压点压力演化曲线。

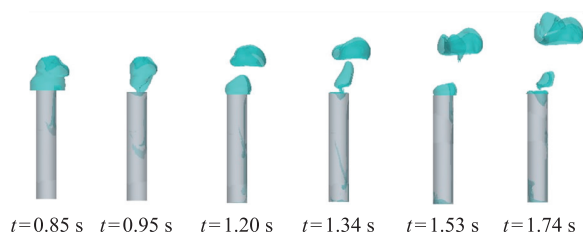


图 14 筒口流场气液界面分布图

Fig. 14 Gas-liquid interface distribution in the flow field at the launch tube exit

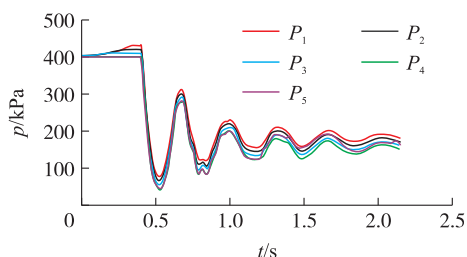


图 15 筒内各测压点压力演化曲线

Fig. 15 Pressure evolution curves at the monitoring points inside the launch tube

由图 15 可见, $t=0.68\text{ s}$ 左右,发射筒内各测压点压力在弹体出筒后首次达到峰值,最大值约为 300 kPa 。此外,结合图 11 与图 14 可知,弹体出筒后,筒内空泡持续经历膨胀—收缩—膨胀的周期性过程;这一膨胀、溢出、脱离、收缩的循环过程导致发射筒各测压点压力振荡,振荡周期约为 0.32 s 。随着弹体逐渐远离发射筒,各测压点压力振幅逐步衰减并趋于平缓。

在弹体向上运动过程中弹尾附着空泡形态不断变化,从而影响弹体整体的受力特性。为此,下文针对潜射导弹水下运动过程中的流场特性进行分析,图 16~图 18 分别给出了弹体向上运动过程中的气液界面分布图、压力分布云图以及速度分布云图。

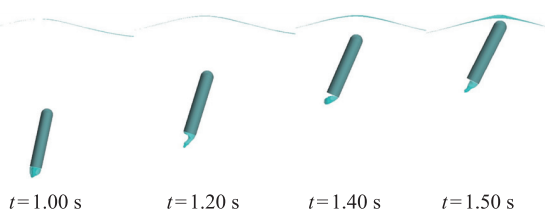


图 16 向上运动过程中气液界面分布图

Fig. 16 Gas-liquid interface distribution during post-exit upward motion

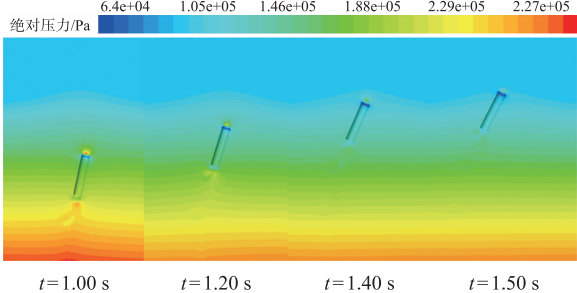


图 17 向上运动过程中压力分布云图

Fig. 17 Pressure distribution contour during post-exit upward motion

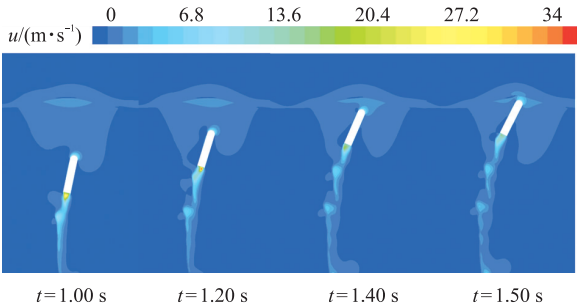


图 18 向上运动过程中速度分布云图

Fig. 18 Velocity distribution contour during post-exit upward motion

图 16~图 18 展示了向上运动过程中附着空泡压力与形态呈强非定常特性。这一特性源于环境压力改变、导弹尾涡及流体惯性力等多重因素的共同作用。为探究空泡形态变化对弹体受力特性的影响,图 19 和图 20 分别给出了弹体各部件竖向力 F_y 演化曲线以及 $t=0.68\text{ s}$ 时弹体 $z=0$ 截面处压力分布曲线。

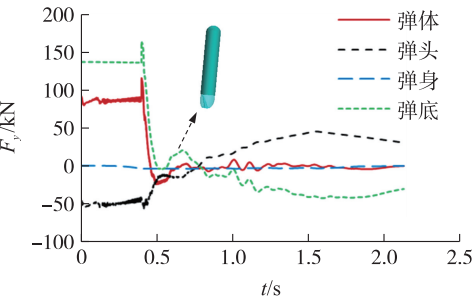


图 19 弹体及各部件竖向力演化曲线

Fig. 19 Evolution curves of the lateral force on the missile body and its components

由图 19 可见, $t=0.68\text{ s}$ 左右,弹底在出筒后再次受到较大的 F_y 载荷,其原因在于向上射流对弹底的拍击,且射流作用点并非位于弹底正中央,而是略微偏向弹体迎流侧。图 20 给出了向上射流拍击弹底瞬间弹体 $z=0$ 截面的压力分布,射流冲击压力约为 0.26 MPa 。随着弹体上升,环境压力持续变化,

附着空泡形态不断演变,导致弹体 F_y 呈振荡变化,且与弹底压力振荡特性基本一致。

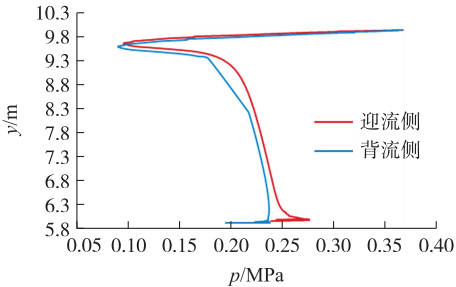


图 20 $t=0.68\text{ s}$ 时弹体 $z=0$ 截面压力分布曲线

Fig. 20 Pressure distribution at the $z=0$ cross-section of the missile body at $t=0.68\text{ s}$

潜射导弹冷发射条件下的出水姿态对发射成功率具有决定性影响。若弹体在出水时刻(弹底完全离开波面的瞬间)偏转角及偏转角速度过大,则可能超出控制系统扶正能力,导致发射失败。下文针对潜射导弹在不同出水相位下的运动特性与受力特性展开分析,图 21 给出了不同出水相位下的出水过

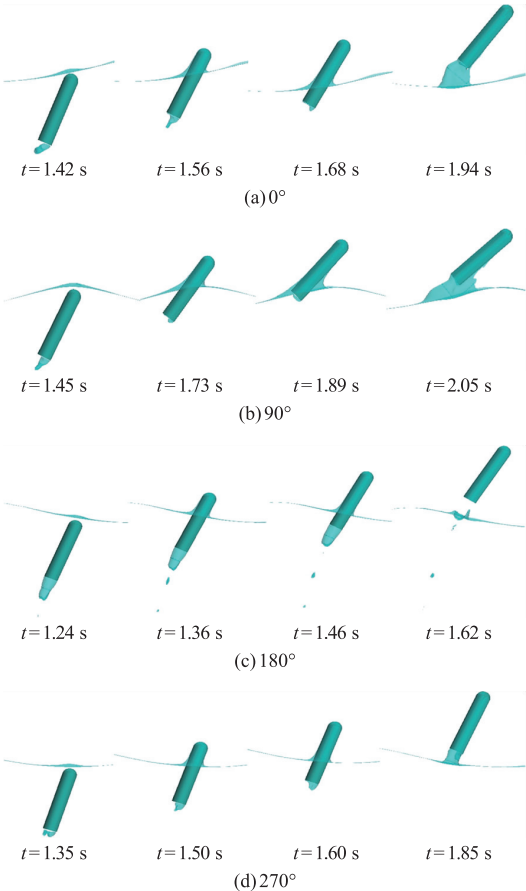


图 21 出水过程中气液界面分布图

Fig. 21 Gas-liquid interface distribution during the water-exit process

程气液界面分布。

由图 21 可以看出,弹体在不同出水相位下的出水偏转角(弹体轴线与发射筒轴线之间的夹角)存在显著差异。为便于分析出水相位对弹体出水偏转角及偏转角速度的影响,表 1 列出了各出水相位对应的出水时刻及该时刻的偏转角速度,图 22~图 24 分别给出了弹体 x 向位移、 y 向位移以及偏转角 θ_z 的演化曲线。

表 1 弹体出水时刻偏转角速度

Table 1 Missile body deflection angular velocity at the moment of water exit		
出水相位/(°)	出水时刻/s	出水偏转角速度/(rad·s ⁻¹)
0	1.94	-0.553 8
90	2.05	-0.706 5
180	1.62	-0.377 4
270	1.85	-0.234 6

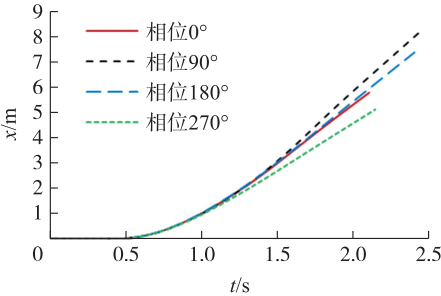


图 22 x 方向位移演化曲线

Fig. 22 Evolution curve of the x -displacement

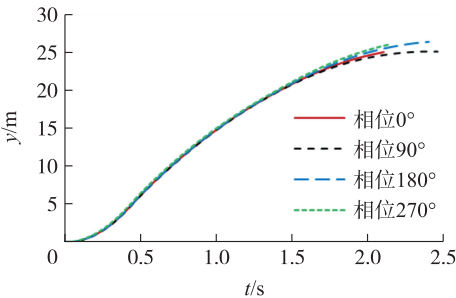


图 23 y 方向位移演化曲线

Fig. 23 Evolution curve of the y -displacement

由表 1 及图 22~图 24 可见,相位 90°对应的弹体 x 向位移、出水偏转角及偏转角速度均为最大,相位 270°时最小。此外,结合图 23 与图 24 可知, $t=0.75$ s 时(弹体航行至 $y=10$ m 附近),出水相位 270°的偏转角与偏转角速度开始明显低于其余工况,且这一差异持续保持至弹体出水。为探究出水偏转角及偏转角速度与出水相位的关系,图 25 和图 26 分别给出了浪流场在液面附近的

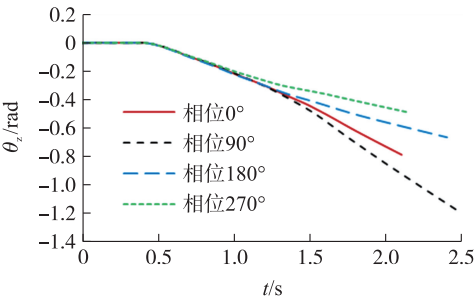


图 24 偏转角 θ_z 演化曲线

Fig. 24 Evolution curve of the deflection angle

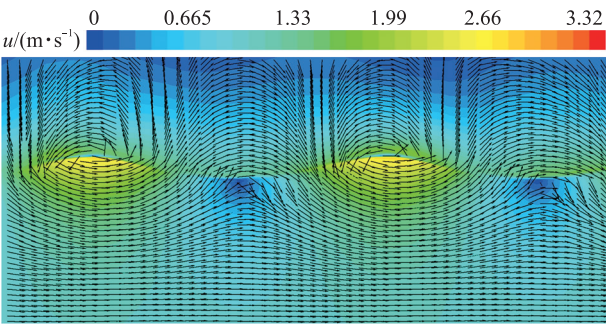


图 25 浪流场速度分布云图

Fig. 25 Velocity distribution contour of the wave-current field

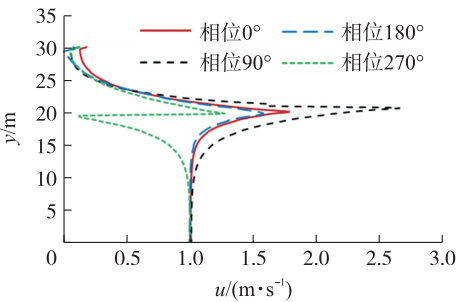


图 26 各相位角对应速度剖面

Fig. 26 Velocity profiles at various phase angles

由图 26 可见,各水深处相位 90°时速度最大,其次为 0°与 180°,270°时最小。这一特性使得出水相位 270°时,弹体在水下运动及出水全过程中受浪流场的扰动最小。 $y=10$ m 处为各相位速度分布的分界点,在该位置以上,各相位开始显著分化。相位 0°与相位 180°在液面处的速度大小基本一致,但方向不同:相位 0°处速度存在 $-y$ 向分量,相位 180°处的速度则存在 $+y$ 向分量,这种差异导致相位 0°时出水的偏转角速度大于相位 180°。为研究出水相位对弹体的受力影响,图 27~图 29 分别给出了弹体 x 方向加速度、 y 方向加速度以及偏转角加速度 $\ddot{\theta}_z$ 的演化曲线。由图 27~图 29 可知,在水下运动过程

中,弹体在洋流作用下持续绕质心偏转,垂直于相对来流方向的投影面积不断减小, a_x 随之递减。随着弹体偏转逐渐剧烈,附着空泡作用于弹底的力产生 x 向分量,使得 a_x 与 a_y 有着相似的振荡特性。各出水相位下的 y 向加速度 a_y 以及偏转角加速度 $\ddot{\theta}_z$ 均在弹体抵达液面时迅速减小,而后由于弹体不断上移和质心升高, $\ddot{\theta}_z$ 逐渐增大,并在弹体出水后趋于平缓。

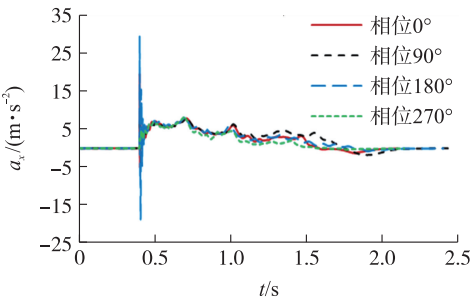


图 27 a_x 演化曲线

Fig. 27 Evolution curve of a_x

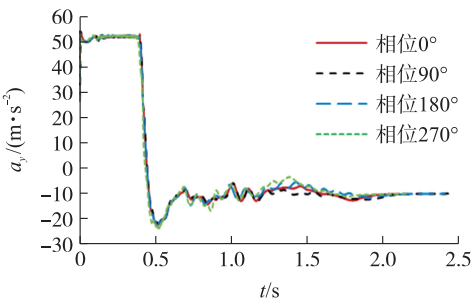


图 28 a_y 演化曲线

Fig. 28 Evolution curve of a_y

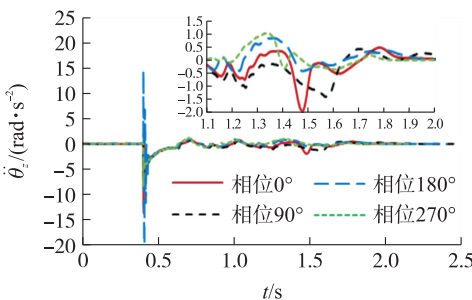


图 29 $\ddot{\theta}_z$ 演化曲线

Fig. 29 Evolution curve of $\ddot{\theta}_z$

4 结束语

本文基于 CFD 方法建立了数值波浪水池,并针对浪流耦合作用下潜射导弹的出筒、水下运动及出水全过程进行了数值模拟,分析了导弹出筒后发射

筒内水锤效应,并研究了浪流场对导弹航行过程中弹体偏转角的影响规律,对比了不同出水相位下导弹运动与受力参数的差异。主要结论如下:

①弹体脱离发射筒后,筒内高压气体迅速膨胀。随着弹体持续上升,附着空泡因过度膨胀导致其内压力低于周围流体压力,继而发生颈缩并被拉断;水流在空泡断点处高速撞击,形成向上与向下的两股射流。弹尾附着空泡在向上射流的挤压作用下发生变形,引发弹体 F_y 峰值;弹尾附着空泡在随弹体上升过程中持续经历膨胀与收缩,致使弹底 F_y 呈振荡特征,且弹体整体的振荡特性与弹尾的振荡特性相似;弹体在水下运动过程中受洋流作用不断偏转,弹底空泡振荡力由此产生 x 向分量,使 x 向加速度 a_x 与 y 向加速度 a_y 有着相似的振荡特性。

②向下射流指向发射筒底部,对筒内气体产生显著压缩作用,导致筒内压力升高;空泡溢出后在浪流场剪切作用下与筒内主空泡发生脱离。随着筒内主空泡再度膨胀,泡内压力再次降至环境压力以下;此后在向下射流及周围环境压力的共同挤压下,泡内压力重新升高。上述膨胀、溢出、脱离与收缩的循环过程,致使发射筒各测压点压力呈周期性振荡变化。

③弹体出水过程中的俯仰特性与出水相位角呈显著相关性,其核心在于,相位角接近 90° 时,流场速度明显高于 270° 附近工况,因此相位 90° 附近弹体所受波浪扰动较大,在相位 270° 附近出水所受扰动最小。需要指出的是,上述相位角与偏转角特性之间的对应关系并非绝对,其动态响应可能随波浪周期参数及弹体实际出水时刻等因素发生变化,具体影响有待进一步研究。

参考文献

[1] 王一伟,黄晨光. 高速航行体水下发射水动力学研究进展[J]. 力学进展,2018,48(1):259-298.
WANG Yiwei, HUANG Chenguang. Research progress on hydrodynamics of high speed vehicles in the underwater launching process[J]. Advances in Mechanics, 2018, 48(1): 259-298. (in Chinese)
[2] 李杰,鲁传敬,陈鑫,等. 附着空泡对潜射导弹弹道影响分析[J]. 弹道学报,2014,26(3):54-58.
LI Jie, LU Chuanjing, CHEN Xin, et al. Analysis on influence of attached cavity on the trajectory of submarine launched missile[J]. Journal of Ballistics 2014, 26(3): 54-58. (in Chinese)
[3] 李海龙,张军,黄达,等. 潜射导弹出筒过程流场与运动特性分析[J]. 弹道学报,2024,36(4):104-110.

- LI Hailong, ZHANG Jun, HUANG Da, et al. Flow field and motion characteristics analysis of ejection process of submarine-launched missile [J]. Journal of Ballistics 2024, 36 (4): 104 – 110. (in Chinese)
- [4] 韦懿珉, 李书田, 于海龙, 等. 潜射导弹出水姿态影响因素研究 [J]. 弹道学报, 2024, 36(2): 98–104.
- WEI Yimin, LI Shutian, YU Hailong, et al. Research on the factors influencing the exiting-water attitude of submarine launched missile [J]. Journal of Ballistics 2024, 36 (2): 98 – 104. (in Chinese)
- [5] 张志洋. 潜射航行体出筒过程多相流动特性及发射筒结构动力响应分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- ZHANG Zhiyang. Multiphase flow characteristics and dynamic response analysis of launch tube structure during submarine launching [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022. (in Chinese)
- [6] 高山, 施瑶, 潘光, 等. 水下发射航行体尾涡不稳定性分析 [J]. 力学学报, 2022, 54(9): 2435–2445.
- GAO Shan, SHI Yao, PAN Guang, et al. Study on the wake vortex instability of the projectile launched underwater [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2022, 54 (9): 2435–2445. (in Chinese)
- [7] 武雨嫣. 潜射航行体齐射出筒过程流场特性分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- WU Yuyan. Analysis of flow field characteristics of submarine launched vehicle during launching out of cylinder [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
- [8] ZHUANG Q, ZHANG H, ZHAO C, et al. Effects of the launch parameters on trans-phase stability performance and mechanism for submarine-launched missiles model [J]. Ocean Engineering, 2023, 283: 115083.
- [9] FENTON J D. A fifth-order stokes theory for steady waves [J]. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng, 1985, 111(2): 216–234.
- [10] 王建华. 基于重叠网格技术的船舶操纵运动直接数值模拟 [D]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- WANG Jianhua. Direct simulations of ship maneuver using overset grid technique [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018. (in Chinese)
- [11] 余勇飞. 波浪的数值模拟及其流场结构分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- YU Yongfei. Numerical simulation of wave and analysis of its flow field structure [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [12] 陈静, 柯世堂, 李文杰, 等. 浅海风-浪-流-海床耦合场非定常时空演化规律及评价指标 [J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(6): 666–679.
- CHEN Jing, KE Shitang, LI Wenjie, et al. Unsteady evolution law and evaluation index of shallow sea wind-wave-current-seabed coupling field [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2023, 57(6): 666–679. (in Chinese)
- [13] 周炫成. 不同波浪环境下航行体出水过程模拟及载荷特性分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- ZHOU Xuancheng. Simulations for the water-exit process of underwater vehicles and analyses on the characteristics of loads [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [14] 马如相, 洪亮, 刘新月, 等. 不同海况等级对某水下航行体发射影响的仿真分析 [J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(7): 203–208, 246.
- MA Ruxiang, HONG Liang, LIU Xinyue, et al. Simulation analysis of impact of different sea conditions on launch of a submarine-launched vehicle [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(7): 203–208, 246. (in Chinese)
- [15] KIM J, O’ SULLIVAN J, READ A. Ringing analysis of a vertical cylinder by Euler overlay method [C]//ASME 31st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Rio de Janeiro; ASME, 2012: 855–866.
- [16] CHEN T, HUANG W, ZHANG W, et al. Experimental investigation on trajectory stability of high-speed water entry projectiles [J]. Ocean Engineering, 2019, 175: 16–24.