

筒口气团作用下航行体垂直出筒数值研究

李卓越¹, 秦丽萍², 李广华², 孙孟舸³, 杜鹏^{1,2}, 胡海豹¹, 黄潇^{1,4}, 陈效鹏¹

(1.西北工业大学航海学院, 陕西西安 710072; 2.中国船舶集团有限公司第七一三研究所, 河南郑州 450015; 3.昆明船舶设备集团有限公司, 云南昆明 650051; 4.西北工业大学深圳研究院, 广东深圳 518057)

摘要: 潜射航行体出筒过程是水下发射的基础与前提, 具有受力剧烈、时间短和非线性等特点。基于 CFD 方法, 利用 VOF 多相流模型追踪气液界面, 结合高分辨率交界面捕捉 (HRIC) 与重叠网格 (零间隙) 技术, 建立了完整描述航行体水下垂直出筒的数学模型, 系统研究了筒口气团与发射参数对流场与航行体载荷特性的影响规律。结果表明: 随着筒口气团初始压强的增加, 航行体受力变化周期增长, 筒口气团演化过程减慢; 发射深度的增加有助于缩短出筒过程中筒口气团脉动周期, 肩部压强增加, 有利于抑制航行体自然空化; 横向来流会显著增加航行体横向受力与偏转力矩; 横向流作用下, 筒口气团脉动过程对航行体偏转力矩与横向受力影响较大。

关键词: 水下发射; 数值模拟; 多相流; 筒口气团; 重叠网格

中图分类号: TJ762.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-2758(2023)06-1080-09

潜射航行体出筒段是水中航行、出水 and 空中航行的初始条件, 是危险集中的环节之一, 具有重要的研究意义与工程价值^[1-3]。在此过程中, 由于气液两相流密度差较大且在气液界面处存在强烈的掺混作用, 航行体所处流场环境相较单相流场更为复杂, 航行体所受流体动力在短时间剧烈变化, 呈现出强烈的非定常和非线性特征^[4-5]。

目前国内外已有众多学者对航行体水下垂直发射及其相关问题进行了研究。Dyment 等^[6]使用理论、实验和数值模拟 3 种方法对潜射导弹水下垂直冷发射过程进行了对比, 结果表明数值模拟可以很好地应用于水下发射的研究工作。Zhang 等^[7]利用动网格方法对航行体出筒过程进行了模拟分析, 获得了航行体出筒过程的流场特性与航行体表面压力时历演化规律。Zhang 等^[8]基于雷诺平均方法建立了航行体在水流推动作用下出筒运动的三维数值模型, 利用重叠网格方法和六自由度技术描述航行体的位置更新。张红军等^[9]建立了水下垂直冷发射过程的数值模型并进行了研究, 研究表明航行体完

全出筒后尾部的推进气体会在短时间内膨胀后收缩, 形成尾部空泡。任晓庆^[10]分析了 VOF 模型、Mixture 模型在航行体发射过程中多相流界面捕捉及压力计算方面的性能, 给出了 2 种模型的适用范围。

对于涉及筒口气团的航行体出筒过程, 王汉平等^[11]研究了筒口流场的压强特性, 并获取了筒口气团脉动过程对发射筒筒盖的影响规律。之后研究了筒口气团和空化作用对航行体出筒过程弹道特性和流场特性的影响规律^[12]。王亚东等^[13]对航行体出筒过程筒口气团演化过程进行了数值模拟研究, 获取了潜艇壁面压强变化规律, 并深入分析了发射深度的影响规律。曹嘉怡等^[14]建立了航行体水下垂直发射的全过程数值模型, 该模型考虑了重力、流体可压缩性、气液强掺混作用等复杂因素, 并利用上述模型模拟了航行体在筒内点火的热发射出筒过程。赵汝岩等^[15]研究了航行体水下出筒过程筒口气团和肩部空泡的演化规律及其对航行体壁面压强的影响。蓝仁恩等^[16]基于 VOF 多相流模型和动网格技

收稿日期: 2023-01-02

基金项目: 国家自然科学基金 (52201380, 52101373) 与深圳市科创委基础研究项目

(202308073003303) 资助

作者简介: 李卓越 (1996—), 西北工业大学博士研究生, 主要从事复杂水动力研究。

通信作者: 杜鹏 (1989—), 西北工业大学副教授, 主要从事复杂水动力研究。e-mail: dupeng@nwpu.edu.cn

术对潜射航行体水下垂直热发射进行了数值模拟研究,分析了导弹运动过程中的流场与载荷特性。邱海强等^[17]研究了航行体出筒过程中空泡演化形态与压强的关系,并分析了筒口气团的膨胀-收缩-切断过程。张晓乐等^[18]探讨了横向来流作用下的筒口气团演化过程与脉动特性。张耐民等^[19]研究了航行体垂直发射过程中肩部多孔排气气泡的融合特性。权晓波等^[20]提出了带尾空泡的航行体发射过程的流场瞬态计算方法,并研究了尾空泡对航行体运动、阻力和空泡演化过程的影响。

目前,国内外学者对筒口气团的处理方式主要是设定为与当地水压接近或略高的均压气体,鲜有人考虑航行体运动前水密膜爆破导致的筒口气团气体量的增加。为此,本文以网络上公开的法国 M51 潜射航行体为对象,在建立典型航行体水下垂直发射出筒过程全尺寸三维模型和数值模拟方法的基础上,系统研究了发射深度和横向流等发射条件对航行体出筒过程中流场特性与载荷特性的影响规律。

1 数值模拟方法与验证

1.1 数值模拟方程

1.1.1 控制方程

描述航行体水下垂直发射出筒过程气液多相流动的基本控制方程包括连续性方程、动量方程和能量方程,其形式为

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

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

$$\frac{\partial (\rho_m T)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_m u_i T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\lambda}{c_p} \cdot \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + S_T \quad (3)$$

式中: ρ_m 为混合相密度; t 为时间; u_i 为笛卡尔坐标系下的速度分量, $i = 1, 2, 3$; p 为流体压强; τ_{ij} 为剪切黏性力; S 为源项,例如重力; T 为流体温度; λ 为流体导热系数; c_p 为常数,是流体比焓与温度的比值; S_T 为源项^[21]。

1.1.2 湍流模型

SST $k-\omega$ 湍流模型将远场的 $k-\varepsilon$ 湍流模型与近壁面的 $k-\omega$ 湍流模型有效结合,同时考虑了湍流各向异性^[22]。输运方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho k U) = \nabla \cdot [(\mu + \sigma_k \mu_t) \nabla k] +$$

$$P_k - \rho \beta^* f_{\beta^*} (\omega k - \omega_0 k_0) + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \nabla \cdot (\rho \omega U) = \nabla \cdot [(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \nabla \omega] +$$

$$P_\omega - \rho \beta f_\beta (\omega^2 - \omega_0^2) + S_\omega \quad (5)$$

式中: U 为平均速度; μ 为动力黏度; σ_k, σ_ω 和 β^* 为模型系数; f_{β^*} 为自由剪切修正因子; f_β 为涡流延伸修正因子; β 为热膨胀系数; S_k 和 S_ω 为源项; k_0 和 ω_0 为阻止湍流衰减的环境湍流值; μ_t 为湍流黏度; P_k 和 P_ω 为结果项。

1.1.3 多相流模型

本文利用 VOF 多相流模型描述气液界面,VOF 模型不同相采用同一套连续性方程、动量方程和能量方程。通过引入体积分数 α 描述不同相所占的比例,若第 p 相的体积分数为 α ,则

$$\begin{cases} \alpha = 0 & \text{无第 } p \text{ 相} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{交界面} \\ \alpha = 1 & \text{第 } p \text{ 相} \end{cases} \quad (6)$$

相体积分数控制方程为

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + u_i \cdot \nabla \alpha = 0 \quad (7)$$

1.2 重叠网格

为模拟壁面之间存在接触的物理过程,引入重叠网格零间隙数值算法,若重叠网格内部边界与背景网格边界的间隔少于 3 层网格,停止对相关网格的计算求解,在停用网格处创建临时壁面,网格停用后同洞内单元类似。零间隙算法效果如图 1 所示。

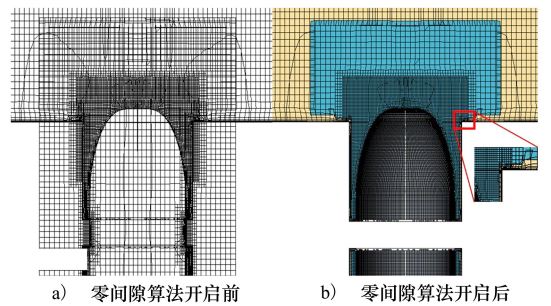


图1 重叠网格与零间隙算法效果

1.3 计算模型

本文重点研究航行体出筒过程中的流场与载荷特性,不考虑航行体壁面与适配器挤压变形等固体应变问题,发射筒以固体壁面处理,航行体以刚体处理,考虑航行体与适配器的接触隔离筒口气团与底部气体的作用,航行体出筒过程计算域示意图如图 2 所示。自由表面与压力出口边界满足静水压力分

布,压力分布为 $p = \rho g(h_0 - z)$, ρ 为液体密度, g 为重力, h_0 为自由表面距筒底距离, z 为网格距筒底距离,相分布为全液相。发射台、发射筒和航行体采用无滑移固体壁面。

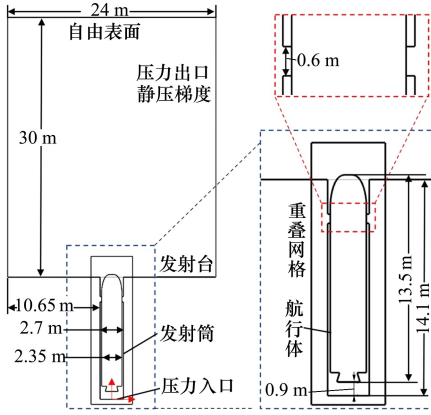


图 2 计算域示意图

网格独立性与时间步长独立性验证结果如图 3 所示,网格由疏到密分别为 431 万,602 万,694 万,网格加密主要以航行体部分为主,加密比例为 $\sqrt{2}$ 。时间步长分别为 4×10^{-5} , 2×10^{-5} , 1×10^{-5} s。以发射深度当地水压为基准对压强进行无因次处理,即 $C_p = p/p_w$, p_w 为当地水压。不同网格航行体表面压强分布基本一致,在适配器上方存在一定的差异。其中粗网格与其他网格差异较大,最终确定网格数为 602 万。在此基础上修改时间步长分别为 4×10^{-5} 和 1×10^{-5} s 进行时间步长独立性验证,结果表明时间步长最大的工况与其他工况差异较大,最终确定时间步长为 2×10^{-5} s。

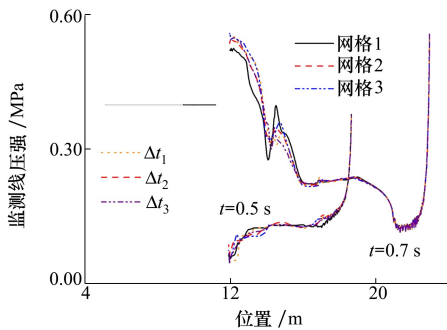


图 3 网格与时间步独立性验证

取航行体 4 条母线压强的平均值作为航行体壁面压强。沿母线从头部中心向下取 11 个监测点,分

别为 A~K,不同母线的 A 点重合,共计 41 个监测点,监测线与监测点如图 4 所示。

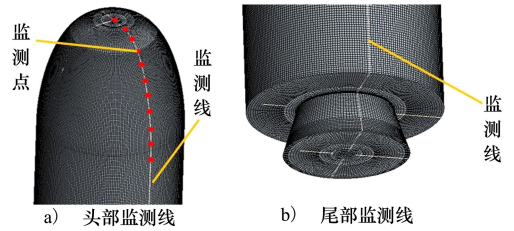


图 4 监测点与监测线

2 数值模拟结果

2.1 航行体出筒过程

2.1.1 筒口气团演化过程

如图 5 所示,在气团膨胀初期,筒口平台处的气液界面快速向周围移动,与气团顶部运动速度接近,气液界面呈“锅盖”状。随着气团的膨胀,顶部压强减小,膨胀速度大于侧面,气液界面逐渐向“半球形”转变。随后筒口气团开始收缩,首先在气液界面与发射平台相接处向内收缩,气团形状呈现为“蘑菇状”。

筒口气团收缩过程中,沿着发射平台向内运动的海水射流将筒口气团分割为上下两部分。下半部分被海水挤压在发射筒与航行体之间的圆形缝隙内,上半部分呈“圆环状”依附于航行体肩部。下侧射流沿着航行体壁面向发射筒内运动,使筒口气团下半部分体积减小,在压缩后沿着发射筒壁面向外溢出并接近上半部分。

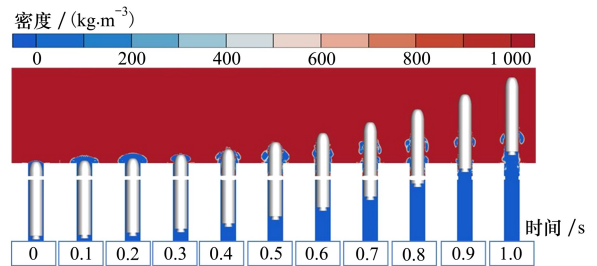


图 5 筒口气团演化过程

筒口气团下半部分从筒内溢出并接近上半部分的过程中挤压海水射流,在气团之间形成一层很薄的气液混合区域。随着航行体加速向上运动,筒口气团在壁面剪切与海水挤压的作用下贴近壁面,截面形状逐渐由直径大、高度小向直径小、高度大转变,与此同时筒口气团体积不断减小。最终筒口气

团截面呈现为细长的“纺锤形”。随后筒口气团再次被分割为上下两部分,上半部分在射流的作用下与航行体连接区域减少,在运动过程中筒口气团上方的少量环形气体与筒口气团发生融合。筒口气团上半部分在航行体的剪切和浮力作用下稳定上浮,形态基本保持不变。航行体离开适配器后,筒口气团与底部气体连通,筒口间隙处的气体与海水在筒内气体的推动作用下向上运动。

2.1.2 航行体壁载荷特性

航行体头部各测点的压强变化曲线如图 6 所示,在 0.28 s 前各测点压强保持一致。0.28~0.63 s 之间各测点压强存在一定的差异,但变化趋势基本一致,该阶段为筒口气团第二次膨胀-收缩过程,各点依次穿越气液界面,筒口气团压强脉动对附近的测点依旧存在较大的影响。0.63 s 后,测点压强受筒口气团影响减弱,受航行体运动速度与所处深度有关。测点 A, B 位于航行体头部前端,受速度影响较大,导致压强增加。测点 C 位于头部高压区与肩部低压区之间,压强保持稳定。测点 D~K 均位于肩部低压区附近,受运动速度增加和深度减小影响压强不断减低,且下降速率与距肩部低压区中心距离反相关。一个与筒口气团初始压强与体积相同的球形理想气泡的压强演化如图 6 所示。筒口气团第一次脉动过程压力变化与理论趋势一致,压强由降转升的过程缓慢平滑,而由升转降的过程相对迅速剧烈,这对航行体压力载荷是不利的。此外,由于壁面和航行体的阻碍作用,筒口气团只能从筒口方向向外侧运动,导致其第一次脉动周期较长且最小压强小于球形气泡。

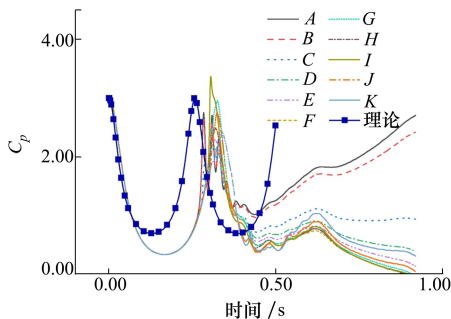


图 6 监测点压强曲线

2.2 筒口气团初始压强的影响

航行体出筒前水密膜的爆破过程会产生大量的高压气体,与位于筒口的初始均压气体快速融合形

成筒口高压气团。不同筒口气团初始压强情况下航行体出筒过程阻力变化如图 7 所示,除 0.30 MPa 工况外,其他工况下航行体阻力变化趋势基本一致,均为减小-增加-减小的周期性变化,其中由减小到增加的过程为光滑转变,而由增加到减小的过渡为尖锐迅速的变化,在周期变化的同时阻力逐渐减小。随着筒口气团初始压强的增加,航行体阻力变化幅值增加,周期增加。

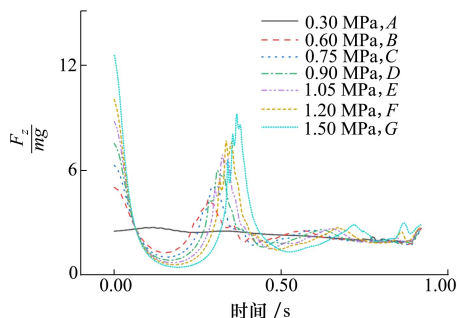


图 7 不同筒口气团压强的航行体阻力

由 2.1 节可知,筒口气团第一次膨胀至最大状态与航行体阻力极小对应,第一次收缩至最小状态与航行体阻力极大对应,航行体测点压强剧烈波动与航行体穿越气液界面对应,且该时刻筒口气团由团形演化为环状,第一次分割导致筒口气团分为两部分,以上各特征时刻均为筒口气团演化的典型时刻。不同筒口气团初始压强对应特征时刻如图 8 所示, p_0 为初始压强。特征时刻均随着筒口气团初始压强的增加而增大,表明筒口气团演化过程随着初始压强的增加而显著滞后。

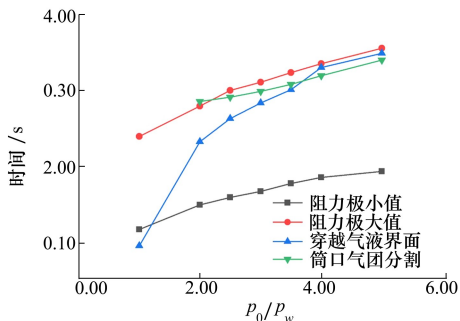


图 8 不同筒口气团初始压强的特征时刻

0.30 MPa 与 1.5 MPa 工况航行体壁面压强分布如图 9 所示,红色部分为高压时段,蓝色部分为低压时段,沿横坐标红-蓝-红转换表明筒口气团的 1 次

膨胀-收缩周期。随着筒口气团初始压强的增加,航行体壁面高压阶段压强增加,低压阶段压强降低,且压强变化周期显著增长。

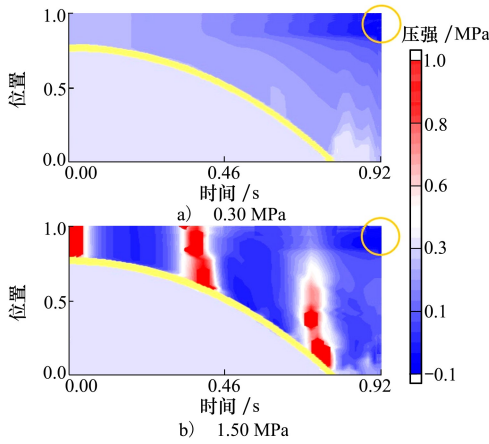


图 9 航行体出筒过程中壁面压强演化

2.3 发射深度的影响

不同发射深度下航行体出筒过程所受轴向力时历曲线如图 10 所示,随着航行体发射深度的增加,航行体阻力变化周期减短,变化幅值减小。由于不同发射深度改变的环境参数是出筒过程背景压强(当地水压),不改变初始状态的筒口气团压强,不同工况下航行体阻力在初始时刻所受轴向合力相等。发射深度的增加会导致航行体最小阻力时刻前移和数值增加。随着航行体穿越界面的部分多,筒口气团对航行体头部压强影响减弱,航行体阻力受当地水压的影响增加,轴向力在图中呈现为变化趋势一致,不同工况之间数值差异基本一致。

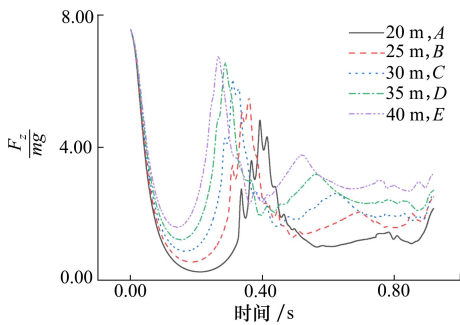


图 10 不同发射深度的航行体阻力

特征时刻随出筒时间的变化如图 11 所示,与筒口气团压强的影响类似,随着发射深度的增加,各特征值均稳定下降,表明发射深度的增加会导致筒口气团演化过程前移,且不同发射深度下个特征时刻

之间不存在交叉,演化过程规律性更强。

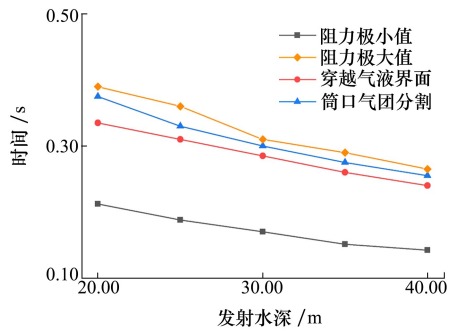


图 11 不同发射深度的特征时刻

航行体壁面压强随时间变化过程如图 12 所示。20 m 工况航行体壁面压强只经历了 2 次明显的周期性脉动,随着发射深度的增加,脉动周期缩短,固定发射时间内脉动次数逐渐增加,其中 40 m 工况航行体壁面压强脉动周期已超过 3 次。同时,航行体发射深度的增加有助于增加相同周期开始时刻航行体壁面压强极大值的幅值,背景压强的增加有助于增加航行体出筒后期肩部压强(图中右上角蓝色区域)。

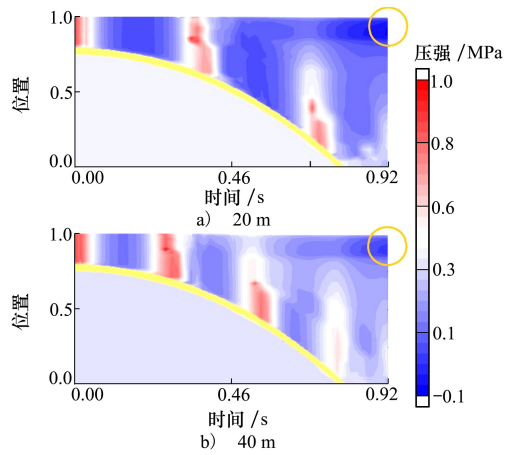


图 12 20 m 与 40 m 工况航行体出筒过程中壁面压强演化

如图 13 所示, A 点位于航行体运动头部中心,该点首先受到穿越过程的影响,航行体发射深度的增加有助于减弱航行体接触水时刻的高频气团脉动的周期与幅值,同时航行体穿越时刻 A 点压强极大值随着发射深度的增加而降低,航行体运动后期各工况压强变化趋势接近,各工况压强的差异主要由当地背景水压决定。 I 点位于航行体肩部低压区,该区域的特点是随着航行体速度的增加而不断降低

直至发生空化现象,测点压强极大值随着发射深度的增加先增加后减小,其中 30 m 工况瞬时压强最大。此外,20 m 工况监测点 I 在最后存在一段时间压强保持最小值不发生改变,表明此监测点在此阶段位于空化区域。

航行体出筒后期,受筒口气团影响减弱,航行体

肩部低压区压强随发射深度的增加而增加,20 m 工况在肩部出现空化导致的压强恒定段,25 m 工况在航行体肩部出现少量空化。如图 14 所示,发射深度的增加有助于对肩部低压区空化的抑制,但是与发射阻力的增加相矛盾。

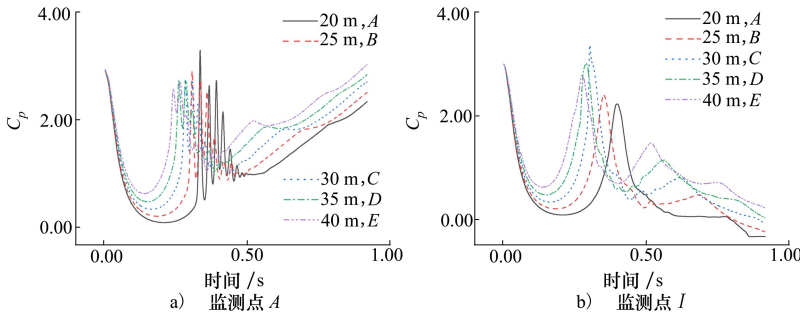


图 13 发射深度对监测点压强的影响

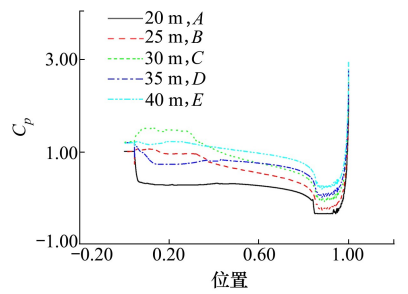


图 14 航行体出筒后的壁面压强分布

2.4 横向来流的影响

不同横向流流速下航行体出筒过程阻力变化如图 15 所示,横向流流速的增加会导致航行体轴向受力在头部曲线段穿越气液界面的过程波动更加剧烈,但对整体变化趋势而言影响很小,可以忽略不计。

不同横向流流速下航行体所受横向力时历变化如图 16 所示,横向来流使得航行体横向受力出现明显波动,且横向来流流速的增加会增加航行体横向受力波动剧烈程度。航行体横向力在 0.25 s 前始终为 0,该时刻为航行体开始穿越气液界面的时刻,横向流流速的增加有利于穿越点的略微提前,同时会

导致该点横向力幅值的增加。横向力在短时间增加后快速降低并变为负值,再快速恢复至略大于 0 并呈周期性持续波动。整体而言,横向流流速的增加对横向力变化周期影响较小,但会明显增加横向力的变化幅值。

航行体偏转力矩为压力与压力点法线到重心距离乘积的积分,航行体出筒过程中横向力多数作用于航行体上半部分,在此情况下航行体所受横向力对航行体偏转力矩的影响极大,航行体偏转力矩时历曲线如图 17 所示,偏转力矩变化规律与横向力类似,不同的是在 0.55~0.65 s 内偏转力矩变化幅值远小于 0.27 s 左右的剧烈波动。

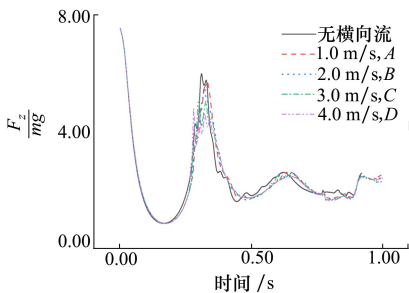


图 15 不同横向流流速下的航行体阻力

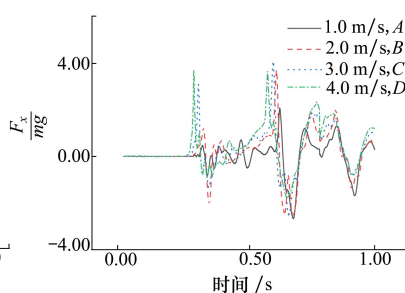


图 16 不同横向流流速下的航行体横向力

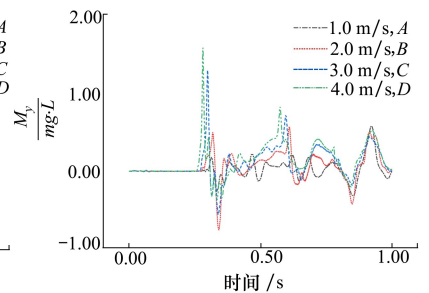


图 17 不同横向流流速下的航行体偏转力矩

航行体在 0.78 s 后允许横向运动与偏转运动,航行体横向速度与偏转角速度时历曲线如图 18 所示,正向表示沿流向运动。航行体在横向流作用下

沿流向不断移动,且横向流流速的增加会显著增加航行体横向运动速度。来流流速为 4.0 m/s 的工况下,航行体在 0.22 s 时重心横向移动 0.23 m,达到航

行体直径的 10%。航行体横向运动速度并非持续增加至来流速度,而是呈现为增加、减小再增加的变化趋势,在 0.88 s 左右达到极大值,在 0.95 s 左右航行体横向运动速度达到极小值。0.95 s 后,航行体横向运动速度继续增加。航行体离开适配器后,航行体偏转角速度首先顺时针增加,在较短的时间达到极大值并转化为逆时针偏转,在 0.87 s 左右达到极值,之后航行体偏转方向再次转变为顺时针。横流流速的增加会增加航行体平均偏转角速度。

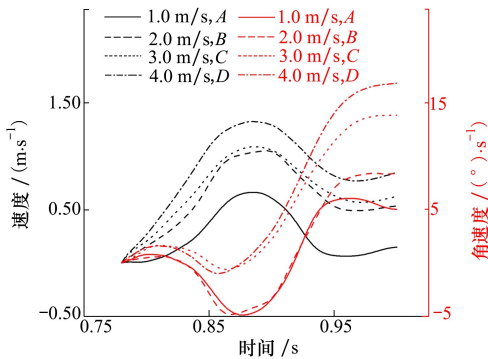


图 18 航行体离开适配器后横向与偏转运动响应

横向来流使航行体沿流向运动,同时,对筒口气团也有很大影响,横流影响下筒口气团演化过程如图 19 所示,筒口气团在横流的“冲击”和剪切作用下不断向“下游运动”。横流流速越大,对筒口气团的挤压与剪切作用越发明。低横流流速工况中筒口气团呈环状聚集在筒口处,高横流流速工况下筒口气团无法保持环状分布,呈“团”状聚集在航行体背流面处。筒口气团会随着横流流逐渐脱离航行体,在航行体背流区域形成独立气团,该气体区域距壁面距离随着横流流速的增加而增加。

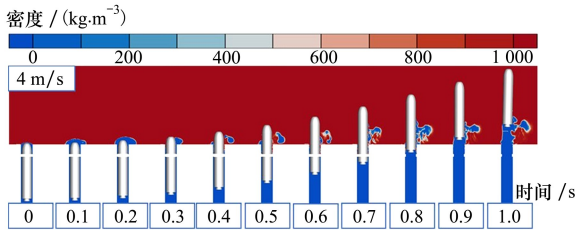


图 19 不同横向流流速作用下筒口气团演化过程

横流流速为 3 m/s 工况下的航行体出筒过程流场压强如图 20 所示。航行体离开适配器前,迎流区域压强较高,背流区域压强较低,且横流流速的增加会进一步增加迎流区域压强,降低背流区域压强。

航行体离开适配器后,航行体肩部附近压强分布变化幅度较小,但筒口气团处压强分布随时间变化较为剧烈,0.8 s 筒口气团呈低压状态,0.9 s 转变为高压,到 1.0 s 压强再次降低。航行体肩部背流面压强始终低于迎流面压强分布,对航行体产生顺时针力矩和正向横向力。当筒口气团压强较低时,对航行体产生正向横向力和顺时针偏转力矩,当筒口气团压强较高时,对航行体产生负向横向力和逆时针偏转力矩。筒口气团的周期性脉动导致了航行体在离开适配器后的不同运动响应。

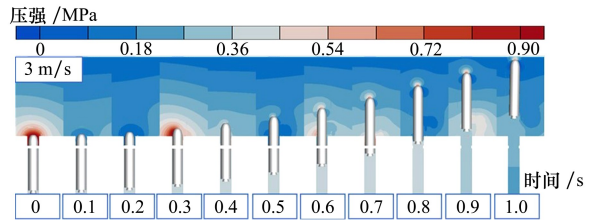


图 20 不同横流流速下航行体周围流场压强分布

3 结 论

利用重叠网格方法建立了全尺寸的数值仿真模型,考虑固定适配器(密封环)与航行体的零间隙问题。对不同发射深度以及横向流流速下的航行体出筒过程进行了模拟分析,研究了发射参数对流场与载荷特性的影响规律。主要结论如下:

1) 筒口气团对航行体出筒过程流场与载荷特性存在很大影响。随着筒口气团初始压强的增加,航行体受力变化周期增长,受力幅值增大,典型特征时刻后移,筒口气团演化过程滞后;筒口气团最大体积随初始压强增加而增加,压强随初始压强增加而减小。

2) 航行体发射深度的增加会增加背景水压,导致筒口气团脉动周期缩短,发射过程中筒口气团脉动周期增加,出筒后期航行体壁面压强显著增加,有助于抑制出筒过程中航行体肩部自然空化。

3) 横向流流速的增加会显著增加航行体出筒过程中的横向力与偏转力矩,导致航行体重心向下游移动,同时航行体发生小角度偏转。筒口气团在横流作用下聚集在航行体背流面的低压区域,位于筒口处的气团膨胀收缩过程对航行体壁面压强和运动姿态有较大影响。

参考文献:

- [1] 易淑群. 水下点火初期流场研究[D]. 北京: 中国舰船研究院, 2000
YI Shuqun. Research on the initial flow field of underwater ignition[D]. Beijing: China Ship Research and Development Academy, 2000 (in Chinese)
- [2] 黄向明. 国外潜射导弹的现状和发展趋势(一)[J]. 现代军事, 2000(3): 39-41
HUANG Xiangming. The Current situation and development trends of submarine launched missiles abroad(1)[J]. Conmilit, 2000(3): 39-41 (in Chinese)
- [3] 贺小艳. 水下气体射流数值研究[D]. 北京: 中国航空气动力技术研究院, 2001
HE Xiaoyan. Numerical research on gas jet in water[D]. Beijing: China Academy of Aerospace Aerodynamics, 2001 (in Chinese)
- [4] 邹鸿超. 发射环境及结构参数对潜射导弹出筒载荷影响分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013
ZOU Hongchao. Analysis of launch environment and structural parameters on tube-exit load of submarine-launched missiles impact[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013 (in Chinese)
- [5] 李强. 水下航行体连续垂直发射出筒过程多相流动特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018
LI Qiang. Research on multiphase flow characteristics of continuous vertical launch of underwater vehicles[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018 (in Chinese)
- [6] DYMENT A, FLODROPS J P, PAQUET J B, et al. Gaseous cavity at the base of an underwater projectile[J]. Aerospace Science and Technology, 1998, 2(8): 489-504
- [7] ZHANG X, WANG S, YU D. 2D axisymmetric CFD simulation of underwater torpedo launch tube flow[C]//2009 International Conference on Information Engineering and Computer Science, 2009: 1-4
- [8] ZHANG W, JIA G, WU P, et al. Study on hydrodynamic characteristics of AUV launch process from a launch tube[J]. Ocean Engineering, 2021, 232: 109171
- [9] 张红军, 陆宏志, 裴胤, 等. 潜射导弹出筒过程的三维非定常数值模拟研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2010, 25(3): 406-415
ZHANG Hongjun, LU Hongzhi, PEI Yin, et al. Numerical investigation to vertical launching of submarine launching missile[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2010, 25(3): 406-415 (in Chinese)
- [10] 任晓庆. 潜射航行体垂直发射过程三维数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015
REN Xiaoqing. Three dimensional numerical simulation on vertical launch of underwater vehicle[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015 (in Chinese)
- [11] 王汉平, 吴菊华. 基于 CFD 的潜射导弹筒口压力场预测[J]. 弹道学报, 2008, 20(4): 73-76
WANG Hanping, WU Juhua. Forecast of pressure field near launch canister outlet for underwater-launched missile based on CFD[J]. Journal of Ballistics, 2008, 20(4): 73-76 (in Chinese)
- [12] 王汉平, 吴友生, 程栋, 等. 潜射模拟弹弹射后效分析[J]. 船舶力学, 2010, 14(10): 1122-1128
WANG Hanping, WU Yousheng, CHENG Dong, et al. Analysis of ejection after-effect for underwater-launched emulating missile[J]. Journal of Ship Mechanics, 2010, 14(10): 1122-1128 (in Chinese)
- [13] 王亚东, 袁绪龙, 覃东升. 导弹水下发射筒口气泡特性研究[J]. 兵工学报, 2011, 32(8): 991-995
WANG Yadong, YUAN Xulong, QIN Dongsheng. Research on the outlet cavity features during the launch of submarine launched missile[J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(8): 991-995 (in Chinese)
- [14] 曹嘉怡, 鲁传敬, 陈鑫, 等. 导弹水下热发射出筒过程流动特性[J]. 固体火箭技术, 2011, 34(3): 281-284
CAO Jiayi, LU Chuanjing, CHEN Xin, et al. Flow behavior during uncorking process of an underwater hot-launched missile[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2011, 34(3): 281-284 (in Chinese)
- [15] 赵汝岩, 翁璐, 徐珂文, 等. 潜载导弹水下弹射过程数值仿真[J]. 海军航空工程学院学报, 2012, 27(5): 512-516
ZHAO Ruyan, WEN Lu, XU Kewen, et al. Numerical simulation of the underwater launching process of submarine-based missile[J]. Journal of Naval Aviation University, 2012, 27(5): 512-516 (in Chinese)
- [16] 蓝仁恩, 张志勇, 于殿君. 导弹水下垂直发射过程数值仿真分析[J]. 导弹与航天运载技术, 2013(5): 51-53
LAN Renen, ZHANG Zhiyong, YU Dianjun. Simulation and analysis of launching process in missile underwater vertical launching process[J]. Missiles and Space Vehicle, 2013(5): 51-53 (in Chinese)
- [17] 邱海强, 袁绪龙, 王亚东, 等. 潜射导弹筒口气泡发展规律研究[J]. 兵工学报, 2014, 35(9): 1510-1514
QIU Haiqiang, YUAN Xulong, WANG Yadong, et al. Research on the law of development of outlet cavity during the launch of submarine launched missile[J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(9): 1510-1514 (in Chinese)
- [18] 张晓乐, 卢丙举, 胡仁海, 等. 水下航行体垂直发射筒口压力场 L/E 耦合数值模拟[J]. 舰船科学技术, 2016, 38(21): 151-155

- ZHANG Xiaole, LU Bingju, HU Renhai, et al. L/E coupling numerical simulation of pressure field near launch canister outlet for underwater vehicle vertical launch[J]. *Ship Science and Technology*, 2016, 38(21): 151-155 (in Chinese)
- [19] 张耐民, 赵阳, 魏海鹏, 等. 水下垂直发射航行体多孔排气气泡融合特性研究[J]. *船舶力学*, 2018, 22(2): 135-143
- ZHANG Naimin, ZHAO Yang, WEI Haipeng, et al. Study on air bleed fusion characteristics of vertically launched underwater vehicle[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2018, 22(2): 135-143 (in Chinese)
- [20] 权晓波, 尤天庆, 张晨星, 等. 水下垂直发射航行体尾空泡振荡演化特性[J]. *兵工学报*, 2021, 42(8): 1728-1734
- QUAN Xiaobo, YOU Tianqing, ZHANG Chenxing, et al. Evolution properties of tail cavity oscillation of underwater launched vehicle[J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(8): 1728-1734 (in Chinese)
- [21] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001
- TAO Wenquan. *Numerical (Second Edition)* [M]. 2nd ed. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001 (in Chinese)
- [22] Menter F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. *AIAA Journal*, 1994, 32(8): 1598-1605

Numerical simulation on underwater vertical launching process under effect of initial gas

LI Zhuoyue¹, QIN Liping², LI Guanghua², SUN Mengke³, DU Peng^{1,2},
HU Haibao¹, HUANG Xiao^{1,4}, CHEN Xiaopeng¹

- (1.School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2.No.713 Research Institute, CSSC, Zhengzhou 450015, China;
3.Kunming Shipbuilding Equipment Co., Ltd, Kunming 650051, China;
4.Shenzhen Research Institute of Northwestern Polytechnical University, Shenzhen 518057, China)

Abstract: The exiting-tube process is the basis and premise of the underwater vertical launching process. which is a multiphase, rapid, nonlinear, complex issue. Based on RANS method, combined the VOF multiphase flow model, high-resolution interface capture (HRIC) and overlapping grid (zero gap) technology, a complete mathematical model to describe the underwater exiting-tube process of the vehicle is established. The effects of the initial gas and launch parameters on the flow field and the load characteristics of the vehicle are systematically obtained. The research results indicated that: With the increase of the initial pressure of the initial gas, the force period of the vehicle increases, and the evolution process of the initial gas slows down. The initial gas pulsation period can be shortened by increasing the launch depth, while increasing the pressure at the shoulder of the vehicle and suppressing the natural cavitation of the vehicle. The increase of the lateral flow velocity will significantly increase the lateral force and deflection moment of the vehicle. The initial gas's pulsation process has a greater influence on the deflection moment and lateral force of the vehicle.

Keywords: underwater vertical launching process; numerical simulation; multiphase flow; initial gas; overlapping grid

引用格式: 李卓越, 秦丽萍, 李广华, 等. 筒口气团作用下航行体垂直出筒数值研究[J]. *西北工业大学学报*, 2023, 41(6): 1080-1088

LI Zhuoyue, QIN Liping, LI Guanghua, et al. Numerical simulation on underwater vertical launching process under effect of initial gas[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2023, 41(6): 1080-1088 (in Chinese)