

水下齐射扰动特性

毕凤阳^{1,2}, 卢丙举^{1,2}, 赵世平^{1,2}, 李超艳³, 毕世华³

- (1. 中国船舶集团有限公司 第七一三研究所, 郑州 450015;
2. 中国船舶集团有限公司有限公司 第七一三研究所
河南省水下智能装备重点实验室, 郑州 450015;
3. 北京理工大学 宇航学院, 北京 100081)

摘 要: 围绕水下垂直齐射伴随的多相传热传质流动以及运动耦合过程, 建立涵盖多相流动、细长体运动以及适配模块变形载荷等在内的数值计算模型, 对齐射扰动特性进行研究分析。结果表明: 受流体的载荷、适配模块变形载荷影响, 细长体离筒横向位移和姿态等发生变化, 在弹体轴向运动 2 倍弹长的发射过程中, 齐射弹道横向位移可达 0.1 倍弹长, 横向姿态角达到 7°。此外, 首发细长体发射后水倒灌及筒口气泡溢出过程对次发细长体发射时的筒口气泡形态和载荷状态产生显著影响, 进而也会对其弹道产生干扰, 在考察状态下, 首发弹体与次发弹体离筒时横向角差异为 0.1°, 横向角速度差异达到 7.5 (°)/s。

关 键 词: 水下齐射; 多相流动; 运动干扰; 压强载荷; 气泡形态

中图分类号: V553.1⁺3; TJ762.4; U674.76 **文献标志码:** A

Disturbance characteristic of underwater salvo

BI Fengyang^{1,2}, LU Bingju^{1,2}, ZHAO Shiping^{1,2}, LI Chaoyan³, BI Shihua³

- (1. The 713 Research Institute of China State Shipbuilding Corporation Limited,
Zhengzhou 450015, China;
2. Henan Key Laboratory of Underwater Intelligent Equipment, The 713 Research Institute
of China State Shipbuilding Corporation Limited, Zhengzhou 450015, China;
3. School of Aerospace Engineering,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Focusing on the multiphase flow with heat and mass transition and the motion coupling process of underwater vertical salvo, a numerical calculation model of multiphase flow, slender body motion and deformation load of the adapter module was established to study the characteristics of salvo interference. The results showed that the lateral fluid load and the deformation of adapter module influenced the launching trajectory significantly. In the course of launching, the lateral displacement reached 0.1 times the length of the body and the lateral attitude angle reached 7°. In addition, the flow backward and bubble overflow process of canister outlet after the launch of the first slender body had a significant influence on the bubble shape, load state of the second slender body, as well as the trajectory. In the current case, the difference of lateral attitude angle between the first and second launching bodies is about 0.1° at the leaving moment, and the difference of angle velocity reaches

收稿日期: 2019-11-26

基金项目: 装备预研领域基金重点项目 (JZX7Y20190247021201)

作者简介: 毕凤阳 (1979—), 男, 高级工程师, 博士, 主要研究水下发射技术。

引用格式: 毕凤阳, 卢丙举, 赵世平, 等. 水下齐射扰动特性[J]. 航空动力学报, 2020, 35(7): 1345-1352. LU Bingju, BI Fengyang, ZHAO Shiping, et al. Disturbance characteristic of underwater salvo[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(7): 1345-1352.

7.5 (°) /s.

Key words: underwater salvo; multiphase fluid; motion interference; pressure load; bubble shape

采用多细长体共架垂直发射技术,不同型号的细长体共用同一发射装置,具有多功能、容装率高、火力强、继承性强等优点,已经成为潜载武器发射平台的一个重要发展方向,对于促进我国潜艇及其武器装备的发展具有重要意义^[1-2]。

细长体水下发射伴随着高压、高温、高速发射工质气体的复杂流动和筒口气液多相混合流动,呈现出复杂的流动状态和变化规律,此外,发射深度变化引起的环境背压变化、筒口结构引起的筒口涡流、艇速与洋流产生的横向流作用、筒口高温燃气与周围环境的水掺混便随的传热传质过程等均对水下发射流场产生影响^[3-7]。采用水下多细长体共架发射方式,多个发射筒在一个大筒内紧密排列,相邻发射筒之间的距离非常小,以致水下发射细长体产生的冲击振动传递到相邻发射筒的载荷大大增加,影响邻筒水密头罩安全以及后续细长体发射安全。在细长体发射时,发射平台为保持其操纵性能,在细长体发射时须保持一定的航行速度^[8-9]。闵景新和李云波^[10]采用数值方法对水下细长体带均压气体出筒过程进行数值模拟,研究了发射筒内均压气体及发射深度对出筒空泡的影响。傅德彬等^[11]针对潜射细长体水下垂直发射离筒后海水倒灌涌入引起的冲击问题,利用数值计算方法对其进行研究。赵世平等^[12]针对单筒内密集布置多枚细长体的水下齐射邻筒效应问题,开展了齐射载荷特性仿真研究,但未考虑艇速带来的横向流、均压气体等影响。

本文围绕多细长体水下齐射多相流动和运动耦合问题,综合应用多相传热传质流动模型、计算流体力学(CFD)方法、动网格技术^[13]、嵌套网格模型^[14]等,构建能够应用于多细长体水下齐射多相流动与多体运动耦合数值模拟的计算模型和求解方法,并对典型齐射干扰情况进行数值研究和分析。

1 理论模型和计算方法

1.1 多相传热传质模型

多细长体水下弹射涉及的气液多相耦合流动采用VOF(volume of fluid)多相流模型^[15],其流动控制方程可表示为

1) 质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \tag{1}$$

2) 动量守恒方程

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho g \tag{2}$$

3) 能量守恒方程

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot [u(\rho E + p)] = \nabla \cdot [\kappa_{\text{eff}} \nabla T + (\tau_{\text{eff}} \cdot u)] + S_h \tag{3}$$

4) 各相体积分分数方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_g \rho_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g u_g) = S_{a_g} + \sum_{l=1}^n (\dot{m}_{lg} - \dot{m}_{gl}) \tag{4}$$

式中 ρ 、 p 、 u 表示流体的密度、压强和速度; τ 、 g 为黏性应力、重力加速度; κ_{eff} 、 τ_{eff} 为导热系数和黏性引起的能量耗散系数; E 为总能, S_h 为热量源项。下标 l 和 g 分别表示液相流体、气相流体; α_g 为该相的体积分分数; m_{lg} 和 m_{gl} 分别为液相到气相、气相到液相的质量传输。采用饱和水蒸气的凝结和蒸发模型表征高温弹射工质与环境水相互作用产生的传热传质过程,具体方式为

1) 液态水汽化公式

$$m_l = \begin{cases} \lambda_l \alpha_l \rho_l |T_l - T_{\text{sat}}| / T_{\text{sat}} & T_l \geq T_{\text{sat}} \\ 0 & T_l < T_{\text{sat}} \end{cases} \tag{5}$$

2) 水蒸气凝结公式

$$m_v = \begin{cases} 0 & T_v \geq T_{\text{sat}} \\ \lambda_v \alpha_v \rho_v |T_v - T_{\text{sat}}| / T_{\text{sat}} & T_v < T_{\text{sat}} \end{cases} \tag{6}$$

3) 相变引起的能量变化为

$$S_h = -\Delta H m \tag{7}$$

式中 ΔH 为饱和水的汽化潜热,由当地压力查饱和水与饱和蒸汽表得到。

1.2 流动与运动耦合计算方法

研究采用雷诺平均方法^[16-17]求解计算流动控制方程,利用基于涡黏性假设的 realizable $k-\epsilon$ 湍流模型封闭雷诺平均方程。数值模型采用有限体积法^[18],并采用2阶迎风格式进行计算模型的空间离散,采用1阶隐式格式进行时间离散。

流动与运动耦合的计算模型采用嵌套网格和

动网格技术处理多细长体齐射运动引起的计算域变化。在动网格模型中,对于任意控制体 V ,可将物理量 φ 的积分形式守恒方程表示为

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \varphi dV + \int_{\partial V} \rho \varphi (u - u_g) dA = \int_{\partial V} \Gamma (\nabla \varphi) dA + \int_V S dV \tag{8}$$

式(8)中 u_g 为运动网格的速度, Γ 为扩散系数, S 为源项。

在嵌套网格中,将发射筒以及筒外水域作为背景网格,以包裹细长体的网格作为运动网格。细长体以及嵌套网格的运动通过求解细长体在流体的载荷和适配模块变形载荷作用下的如下动力学方程获得。

$$M \ddot{s}_x = F_x; \quad M \ddot{s}_y = F_y; \quad M \ddot{s}_z = F_z \tag{9}$$

$$I_{xx} \ddot{\theta}_x + (I_{zz} - I_{yy}) \dot{\theta}_y \dot{\theta}_z = M_x \tag{10}$$

$$I_{yy} \ddot{\theta}_y + (I_{xx} - I_{zz}) \dot{\theta}_x \dot{\theta}_z = M_y \tag{11}$$

$$I_{zz} \ddot{\theta}_z + (I_{yy} - I_{xx}) \dot{\theta}_x \dot{\theta}_y = M_z \tag{12}$$

式(9)~式(12)中 M 为细长体质量, I_{xx} 、 I_{yy} 和 I_{zz} 为细长体沿转轴的惯性矩, s_x 、 s_y 、 s_z 为细长体沿 3 个坐标方向的位移; θ_x 、 θ_y 、 θ_z 为细长体绕 3 个坐标轴的转动角度; F_x 、 F_y 、 F_z 为细长体在 3 个坐标方向受到的作用力, M_x 、 M_y 、 M_z 为 3 个方向的转矩。

细长体受到的流体作用载荷通过表面压强和黏性应力积分获得。适配模块变形由适配模块布置位置、弹体运动和姿态变化确定,并依据适配模块刚度系数和变形量计算变形载荷。多相流动与弹体运动耦合计算流程如图 1 所示。

研究中的具体数值计算在商用 CFD 软件 Fluent 中进行,并利用其自定义函数(UDF)实现动网格处理及模型耦合求解。

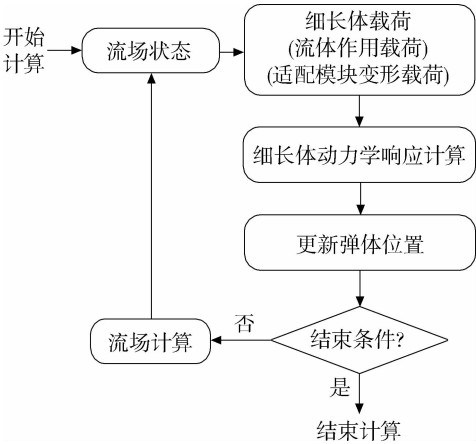


图 1 流动与运动耦合计算流程示意

Fig. 1 Calculation flowsheet coupling flow and motion

2 数值计算模型

2.1 计算模型设置

计算模型以国内外较常见的一筒三弹作为对象建立,模型包括细长体、发射筒、气密环、筒口结构、筒盖、艇体以及发射筒内的气体域和筒外水域,如图 2 所示。在计算模型中,第 1 发细长体布置在靠近艇体中轴线位置,第 2 发细长体布置在靠近筒盖的位置。本文重点考察细长体筒中段及离筒初期的流动、运动及干扰情况,为减小第 1 发细长体弹射带来的扰动,研究以细长体筒内运动时间 t_{exit} 为参照,选定弹射间隔为 3 倍 t_{exit} ,后续也用该运动时间对弹射时间进行无量纲处理,以便于对不同模型进行对比。此外,为减小计算域高度和整体计算量,每 1 发细长体离筒 0.6 倍 t_{exit} 时长,且运动距离超过 2 倍细长体长度时,即使其逐渐减速至零,滞留在计算域中,如图 2。图中颜色的深浅变化反映了不同水深对应的压强变化。

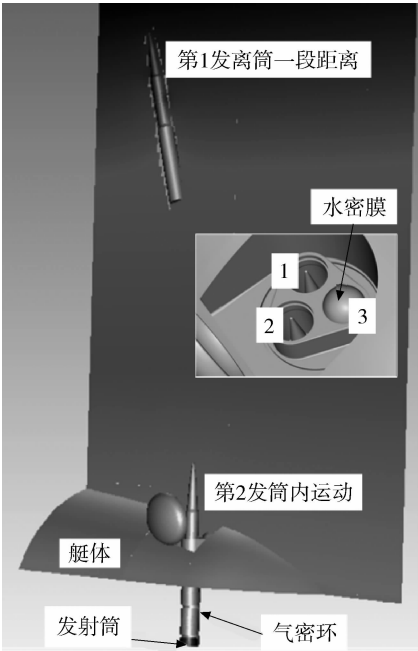


图 2 计算模型示意

Fig. 2 Computational model

在计算模型中,计算域对应的边界设置如下:

1) 计算域外场边界的上游、顶面及底面采用速度入口边界,其压强值依据水深环境指定,计算模型中设定筒口水深为 60 m;横流速度依据艇体速度指定,设置为 2.57 m/s。外场下游采用压强出口边界,其压强值依据水深环境指定。

2) 壁面采用无滑移绝热壁面。

3) 发射筒底部采用可变类型边界。弹体筒内运动阶段,采用压力入口边界,依据弹射动力装置参数给定。弹体离筒后,采用无滑移绝热壁面,表明动力装置不再提供弹射工质气体。

4) 筒口水密膜采用可变类型边界。发射前采用无滑移绝热壁面;发射过程采用流场内部边界。

计算模型采用结构化网格体系,在流动参数变化梯度的区域,对网格进行局部加密。图 3 给出了计算模型中的局部网格示意。

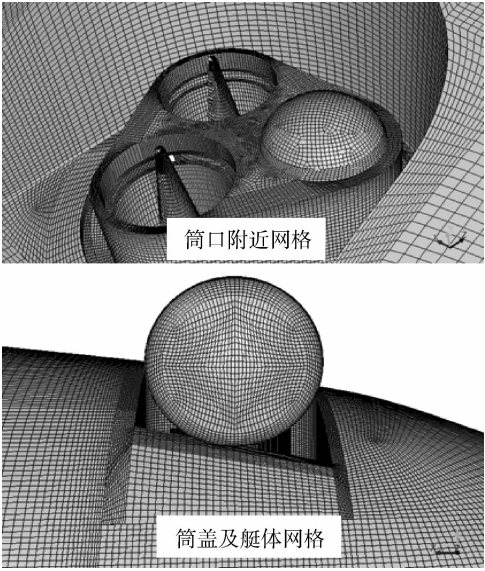


图 3 局部网格示意
Fig. 3 Local computational meshes

在求解计算中,依据计算网格尺度和 CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) 准则,设置计算时间步长为 1×10^{-5} s,每个时间步计算的归一化残差收敛至 1×10^{-3} 。

2.2 模型验证分析

为验证模型的有效性,结合细长体的静水弹射试验,对本文所采用的数值方法计算结果进行对比分析。细长体静水试验在水池中开展,为避免细长体飞离水面,弹射动力装置使弹体加速至正常离筒速度的一半时即停止工作,使得弹体离筒时,筒内压强低于当地环境压强,这从后续测点压强变化可以看出。结合细长体试验状态,利用前述数值建模方法建立计算分析模型并进行求解计算,获得弹体最大出水状态与试验最大出水状态对比如图 4(a)所示,邻筒水密膜外部测点压强如图 4(b)所示。在数值模型中,忽略了发射系统中对发射过程影响较小的倒角及细部结构。

从图 4 中可以看出:①模拟弹离筒前,受弹筒间隙气体随弹体流出发射筒并与环境水介质相互作用,引起测点压强呈振荡变化趋势。计算模型未考虑弹头顶破水密头罩的过程,假设在计算开始时水密头罩完全打开,因此弹筒间隙气体与水环境的作用时间提前,这也是计算结果测点压强振荡位置提前的主要原因。②细长体离开发射筒,筒内弹射工质气体与环境水介质连通,形成显著的压强冲击。对比测量结果和仿真结果,可以看出两者的冲击曲线吻合良好,峰值误差小于 10%。③弹体离筒后,工质气体产生的最大冲击振荡结束后,工质气体与水环境相互作用再次呈现振荡变化规律。由于水密膜的作用和两相界面非稳定导致的不确定性和不一致性,这个阶段的结果在指定时间点上虽有一定差异,但计算结果和测量结果具有相同的规律和趋势。结果对比表明本文采用的数值计算方法能够有效模拟细长体水下弹射的多相流动和运动耦合状态,可用于水下齐射扰动的数值研究分析。

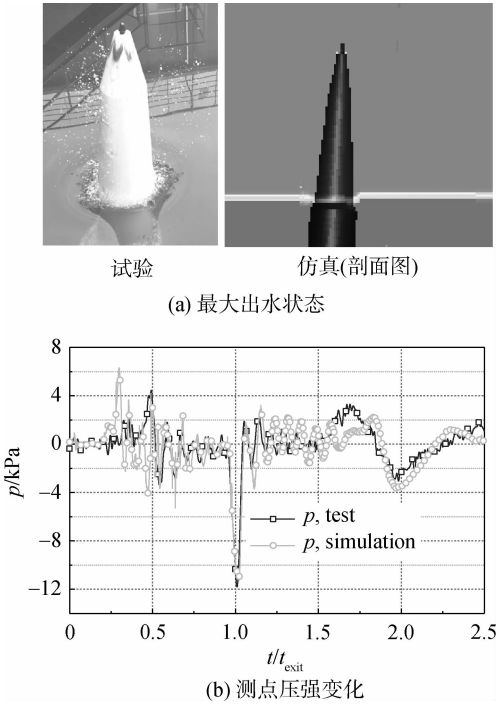


图 4 试验与计算结果对比
Fig. 4 Comparison between experiment and simulation

3 齐射扰动分析

3.1 齐射弹道分析

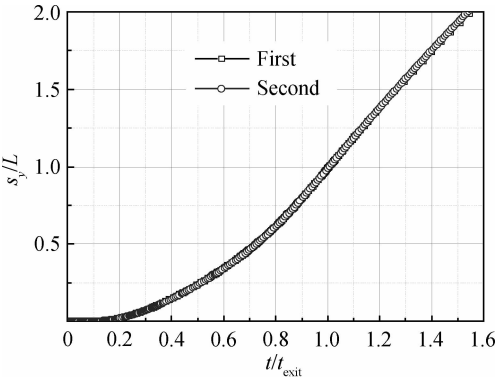
利用文中第 2.1 节所述数值计算模型,对第 1 发和第 2 发细长体齐射过程的多相流动和运动

状态进行求解计算,获得相应的流场和细长体运动情况。

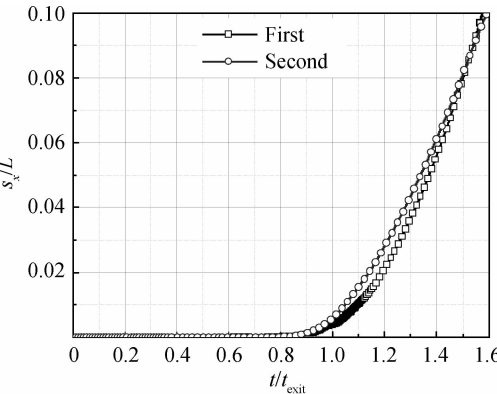
图 5 给出了两发细长体沿发射方向 y 向的位移 s_y 和沿横流方向 x 向的质心位移 s_x 曲线对比。为具有可比性,分别采用筒内运动时间 t_{exit} 、细长体长度 L 对时间和位移进行无量纲处理。可以看出在发射方向,两发弹的位移差异相对位移量来看并不明显,表明细长体从弹射至离筒初期,齐射扰动对沿射向的位移影响较小。事实上,尽管第 1 发细长体弹射离筒后会在筒口附近产生显著的扰动载荷,但随着时间推移,扰动量逐渐减小,如后文给出的第 3 发水密膜载荷状态所示。在第 2 发细长体弹射时,第 1 发引起的压强扰动已很小,此时齐射扰动主要体现为第 1 发筒内气体在浮力和周围水环境重力相互作用下的溢出气体扰动,相对弹射动力载荷为小量。此外,研究模型中细长体在筒内运动阶段会受到高刚度适配环节的周向约束。因此,细长体从弹射至离筒初期,在射向受到的齐射扰动量较小。在横流方向,弹体质心产生了一定偏移。在弹体离筒初期,第 2

发细长体质心横向位移大于第 1 发细长体质心横向位移,在 t/t_{exit} 为 1.5 时,两者质心横向位移基本一致,此后第 1 发细长体质心横向位移相对较大。弹体质心横向位移的变化主要由横向流引起,并受到后续深入分析的沿横向的姿态角变化影响。在弹体发射运动 2 倍弹长过程中,弹体横向位移约为 0.1 倍弹长。

图 6 给出了两发细长体沿横流方向的姿态角 φ_z 和姿态角速度 ω_z 变化曲线。可以看出在离筒前 t/t_{exit} 小于 0.5 时,两发细长体姿态角和姿态角速度变化均很小。在 t/t_{exit} 大于 0.5 后,尽管细长体还受到适配模块的约束,但随着横流作用增强,出现较为明显的姿态角变化,并在横流载荷和适配模块变形载荷共同作用下,姿态角速度呈现显著的振荡变化。在弹体离筒瞬间,第 1 发细长体姿态角为 -0.8° ,第 2 发细长体姿态角为 -0.9° 。在约束期内,两发弹的姿态角和姿态角速度的变化规律基本一致。但在细长体尾部离开位于筒口附近的适配模块时,姿态角速度出现了显著的差异。第 1 发细长体在离筒瞬间,姿态角速度还继续保持原有增长幅值;第 2 发细长体在离筒瞬间,



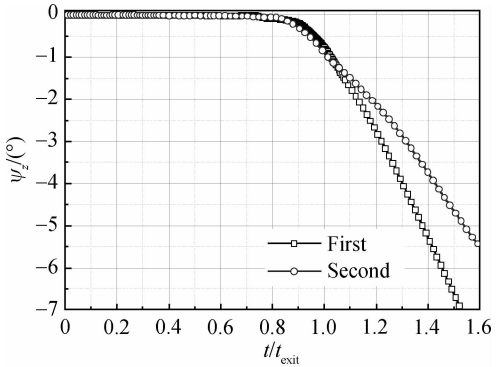
(a) 发射方向质心位移



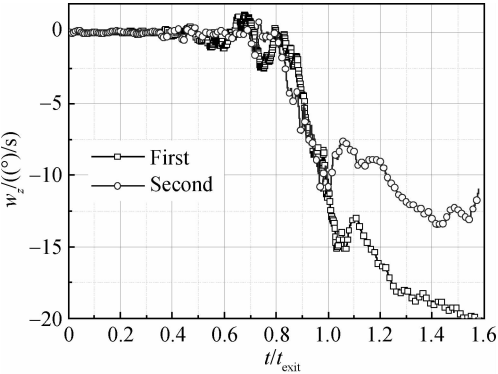
(b) 横向质心位移

图 5 两发细长体质心位移对比

Fig. 5 Comparison of the centroid displacement between two slender bodies



(a) 沿横流方向转角



(b) 沿横流方向转动角速度

图 6 两发细长体姿态角和姿态角速度对比

Fig. 6 Comparison of attitude angle and angular velocity between two slender bodies

姿态角速度呈现先减小后增大的状态。其产生原因与第 2 发在与筒口附近最后一组适配模块相互作用时,横向位移和横向姿态角均较大,刚度很大的适配模块变形后在细长体上作用一个很大的与横流作用方向相反的力矩,使得其姿态角速度快速减小。在细长体离筒后,两发细长体主要受以流体载荷作用,姿态角速度的变化趋势又开始趋于一致。在考察模型中,两发弹体离筒时的横向角度差异约为 0.1° ,但由此引起的后续横向角速度差异达到 $7.5^{\circ}/\text{s}$ 。受这较大的离筒角速度影响,两发弹体在运动两倍弹长距离时,横向姿态角最大值达到 7° 。

3.2 齐射扰动状态

通常情况下,第 1 发细长体弹射对第 2 发细长体弹射的扰动主要体现在两个方面,一是筒口附近水气两相相互作用引起的载荷扰动;二是细长体运动轨迹附近产生涡流扰动。筒口附近水气两相作用会持续较长一段时间,是引起齐射干扰的重要因素;而在考虑横流的情况下,细长体运动产生的涡流扰动会在横流作用下向下游发展,对第 2 发的扰动相对较小,因此这里重点考虑前者。

图 7 给出了第 1 发、第 2 发细长体齐射过程中第 3 发水密膜表面测点压强变化情况,其中 point 1 布置在水密膜中心,其他 4 个测点均匀布置在水密膜周向位置,可以看出各测点间压强差异不大,但前后两发细长体发射引起的载荷变化存在显著差异。从整体上看,第 1 发细长体弹射引起的载荷振荡在 t/t_{exit} 大于 2 以后即趋于稳定,但第 2 发细长体弹射过程中产生的载荷振荡过程与第 1 发有着明显差异。通过分析两发细长体发射时的流动状态,初步明确第 2 发细长体弹射时,第 1 发发射筒内气体在溢出时与第 2 发筒内气体

发生融合,使第 2 发弹射时引起气泡载荷变化的气体增多,相应的载荷状态产生显著变化。图 8 给出了第 2 发细长体弹射初期第 1 发发射筒内气体与第 2 发发射筒内气体融合的状态示例。

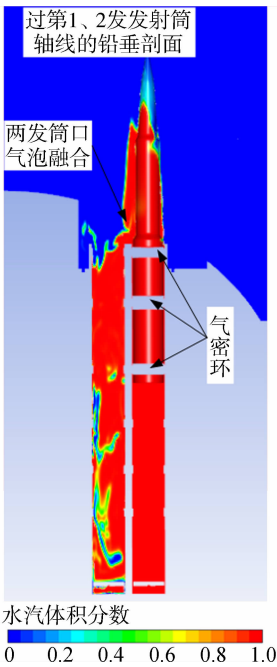


图 8 两发筒口气泡融合状态

Fig. 8 Bubble fusion near the canister outlet of two slender bodies

为进一步明确齐射扰动带来的载荷差异,图 9 给出了第 1 发和第 2 发细长体离筒后筒口气泡的发展变化过程。可以看出第 1 发细长体离筒后的 $t/t_{\text{exit}}=1.21$ 时,筒口气泡发生了颈缩断裂,气泡分离为随弹体运动的气泡和滞留发射筒的气泡。第 2 发细长体出筒后,滞留在第 1 发筒内的气泡溢出,在第 2 发细长体离筒后的 $t/t_{\text{exit}}=1.21$ 时,可观测到两发筒口气泡融合,此时气泡压强相对较低。由于气泡膨胀引起的负压值也相对较

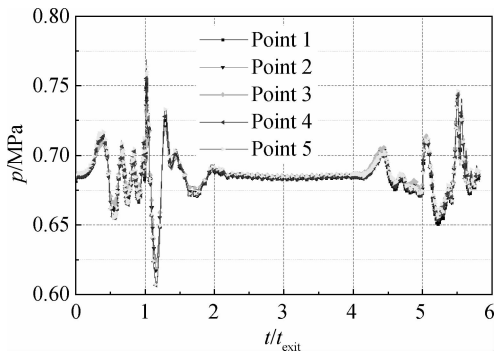
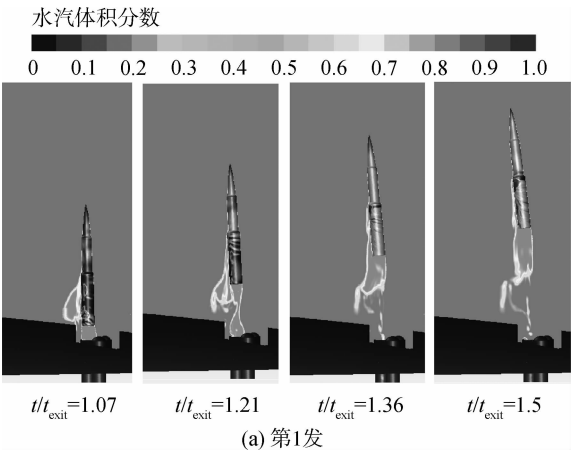


图 7 第 3 发水密膜表面测点压强变化

Fig. 7 Pressure curve of monitor positions on water diaphragm seal of the third slender body



(a) 第1发

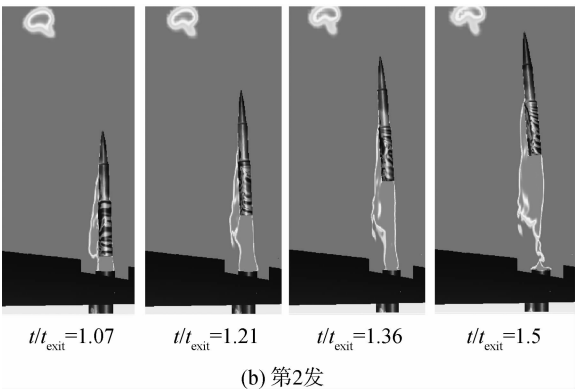


图 9 细长体离筒后筒口气泡形态对比

Fig. 9 Comparison of bubble shape after the exit of the slender bodies

小,相间界面的非稳定性也相对较弱,到第 2 发细长体离筒后的 $t/t_{\text{exit}}=1.5$ 时,筒口气泡才产生显著的颈缩断裂情况。

4 结 论

围绕多细长体水下齐射扰动特性,结合水下齐射多相流动和运动耦合状态,综合应用计算流体力学方法以及多种载荷、运动分析技术,建立适用于多相流动与多体运动耦合的计算分析模型,并对指定状态下的齐射干扰进行计算分析,结果表明:

1) 多细长体垂直弹射会受到动力装置、横向流以及适配模块变形等多种因素产生的载荷作用,对细长体离筒横向位移和姿态等产生显著影响。多细长体接近离筒时的姿态以及由此引起的适配模块变形载荷,会对后续姿态角产生较大影响,进而引起较大的齐射弹道散布。

2) 在指定的模型中,第 1 发细长体发射后筒内气泡与水环境相互作用会导致水倒灌及气体溢出,部分溢出气体与第 2 发细长体弹射过程产生的筒口气泡相互融合,对筒口气泡状态、作用载荷等产生显著影响。

参考文献:

[1] 张义忠,倪火才. 潜载导弹水下共架垂直发射方案探讨[J]. 舰船科学技术,2005,27(5):56-61.
ZHANG Yizhong, NI Huocai. The concept of subma rine launched missile's common frame, modular and vertical launcher[J]. Ship Science and Technology, 2005, 27(5): 56-61. (in Chinese)

[2] 倪火才. 潜载导弹水下发射技术的发展趋势分析[J]. 舰载武器,2001,20(1):11-19.
NI Huocai. Development trend analysis of submarine

launched underwater launch technology [J]. Shipborne Weapons, 2001, 20(1): 11-19. (in Chinese)

[3] 程栋,何国强,胡仁海,等. 发射筒口燃气压力波数值模拟及实验验证[J]. 西北工业大学学报,2011,29(3):497-502.
CHENG Dong, HE Guoqiang, HU Renhai, et al. Numerical simulation and experimental verification of gas pressure wave at the exit of launching tube[J]. Journal of North-western Polytechnical University, 2011, 29(3): 497-502. (in Chinese)

[4] 王汉平,余文辉,魏建峰. 潜射模拟弹筒口压力场仿真[J]. 兵工学报,2009,30(8):1009-1013.
WANG Hanping, YU Wenhui, WEI Jianfeng. Simulation of pressure field near canister outlet for underwater-launched emulated missile[J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(8): 1009-1013. (in Chinese)

[5] 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):73-76,87.
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, 87. (in Chinese)

[6] 仲峰泉,陆夕云,庄礼贤. 火箭水下发射复杂流场的近似数值模拟[J]. 宇航学报,2000,21(2):1-7.
ZHONG Fengquan, LU Xiyun, ZHUANG Lixian. Numerical simulation of the complex flowfield for rocket launch under water[J]. Journal of Astronautics, 2000, 21(2): 1-7. (in Chinese)

[7] 胡晓磊,乐贵高,马大为,等. 水下燃气-蒸汽弹射气-液两相流场数值研究[J]. 航空动力学报,2015,30(1):164-172.
HU Xiaolei, YUE Guigao, MA Dawei, et al. Numerical study of gas-steam ejection gas-liquid two-phase flow field under water[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(1): 164-172. (in Chinese)

[8] 赵世平,蔡体敏. 横向流对潜艇垂直发射导弹的影响[J]. 船舶力学,2006,10(4):33-37.
ZHAO Shiping, CAI Timin. Effects of lateral flow to the missile vertical launched from a submarine[J]. Journal of Ship Mechanics, 2006, 10(4): 33-37. (in Chinese)

[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] 闵景新,李云波. 水下航体变深度发射出筒空泡数值研究[J]. 工程力学,2015,32(Suppl.):342-347.
MIN Jingxin, LI Yunbo. Numerical simulation of tube-exit cavity over underwater projectile ejected from different depth[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(Suppl.): 342-347. (in Chinese)

[11] 傅德彬,于殿君,张志勇. 潜射导弹离筒后海水倒灌效应数值分析[J]. 固体火箭技术,2012,35(2):157-160.

FU Debin, YU Dianjun, ZHANG Zhiyong. Numerical simulation on hydrodynamic impact effect after submarine launched missile leaves the launcher[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2012, 35(2): 157-160. (in Chinese)

[12] 赵世平, 毕凤阳, 卢丙举, 等. 单筒多细长体飞行器水下齐射载荷特性仿真[J]. 鱼雷技术, 2019, 27(1): 31-36.

ZHAO Shiping, BI Fengyang, LU Bingju, et al. Simulation on underwater salvo load characteristics of multi-slender body vehicles in single launching tube[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2019, 27(1): 31-36. (in Chinese)

[13] JASAK H, TUKOVIC Z. Automatic mesh motion for the unstructured finite volume method[J]. Transactions of Fama, 2004, 30(2): 1-20.

[14] 叶靓, 招启军, 徐国华. 非结构嵌套网格的直升机旋翼/机身前飞流场数值模拟[J]. 航空动力学报, 2009, 24(4): 903-910.

YE Liang, ZHAO Qijun, XU Guohua. Numerical simulation of flowfield of helicopter rotor and fuselage in forward flight based on unstructured embedded grid technique[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(4): 903-910. (in Chinese)

[15] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J]. Journal of Computational Physics, 1981, 39(4): 201-225.

[16] 张小伟, 王延荣, 张潇, 等. 涡轮机械叶片的流固耦合数值计算方法[J]. 航空动力学报, 2009, 24(7): 1622-1626

ZHANG Xiaowei, WANG Yanrong, ZHANG Xiao, et al. Numerical method for fluid-structure interaction in turbomachinery bladings[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(7): 1622-1626. (in Chinese)

[17] REYNOLDS A M. Lagrangian stochastic modeling of anomalous diffusion in two-dimensional turbulence [J]. Physics of Fluids, 2002, 14(4): 1442-1449.

[18] EYMARD R, GALLOUËT T, HERBIN R. The finite volume method[J]. Handbook of Numerical Analysis, 2000, 23(7): 715-1022.

(编辑: 张 雪)