

潜射航行体齐射非定常流场特性研究

高山^{1,2}, 潘光^{1,2}

(1. 西北工业大学 航海学院, 陕西 西安 710072;
2. 无人水下运载技术工信部重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要 为研究潜射航行体齐射非定常流场演化特性, 基于动网格技术、VOF多相流模型以及用户自定义函数 (User Defined Function, UDF) 等对双发航行体齐射出水过程展开数值模拟研究, 建立了三维双发航行体齐射出水数值模型。研究了典型工况下航行体齐射出水过程各个阶段的云图与受力特性, 进一步分析了发射速度与航行体所受阻力的关系, 得到了如下结论: 1) 当发射间距在一定范围内, 整个发射阶段中航行体之间会产生明显的流动干扰现象, 对航行体的受力特性产生较大的影响; 2) 航行体在出筒阶段所受力矩最大, 易发生偏转, 从而影响水下发射的安全性; 3) 不同发射速度下, 双发航行体所受最大阻力均发生在出筒阶段, 且航行体所受阻力与发射速度二次方成正比。

关键词 航行体; 水下齐射; 受力特性

中图分类号 O35 **文献标识码** A **文章编号** 2096-5753(2020)03-0271-05

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2020.03.016

Characteristics Research on Unsteady Flow Field during Salvo of Submarine-launched Vehicles

GAO Shan^{1,2}, PAN Guang^{1,2}

(1. School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. MIIT Key Laboratory of Unmanned Underwater Vehicle Technology, Xi'an 710072, China)

Abstract In order to study the characteristics of unsteady flow field of submarine-launched vehicles during salvo, based on the dynamic grid technology, the VOF multiphase flow model and the User Defined Function (UDF), this paper conducted numerical simulation study on the salvo water-exit process of the double-vehicle, established a three-dimensional numerical model of the salvo water-exit of the double-vehicle. It studied the cloud image and forces characteristics in each stage of salvo water-exit process under typical operational conditions, and further analyzed the relations of launch speed and resistance on the vehicles. The following conclusions are obtained: 1) When the launch distance is within a certain range, significant flow interference will occur between the vehicle bodies during the entire launch phase, which will have a great impact on the force characteristics of the vehicles. 2) The deflection torque experienced by the sailing body during the canister-exit phase is the largest, and it is easy to deflect, which affects the safety of underwater launch. 3) At different launch speeds, the maximum resistance experienced by the double-vehicle occurs during the canister-exit phase, and the launch speed is directly proportional to the resistance of the double-vehicle.

Key words vehicle; underwater salvo; force characteristics; dynamic mesh

0 引言

水下齐射指多发航行体在较短的时间间隔内连续出水过程,此方式极大地提高了潜射航行体的突防能力,成为未来潜射武器发展的重要趋势。然而,潜射航行体出水过程中,由于流体介质的突变,导致航行体表面的流体动力特性发生巨大变化,加之齐射过程中,航行体之间的流场相互干扰,严重影响航行体的受力特性和弹道稳定性。

关于潜射航行体水下发射非定常流动特性问题,魏英杰等^[1]采用软件 FLUENT 对航行体垂直出水全过程进行了模拟,分析了航行体非定常肩空泡与出水速度之间的关系。刘海军等^[2]采用动网格技术对航行体出水过程进行了研究,获得了肩空泡形态与其周围压力分布。别庆等^[3]采用多相流模型结合动网格技术获得了航行体肩部空泡形态演变过程。权晓波等^[4]采用 Mixture 多相流模型和动网格方法来求解 RANS 方程,建立了三维三自由度计算模型,对航行体垂直发射过程进行了模拟,获得了尾空泡生成演化的周期性特征。杨晓光等^[5]采用计算流体动力学理论和动网格技术,研究了航行体出水过程运动学及动力学时域特性,给出了航行体空间流场结构以及水动力特性。此外,航行体齐射出水过程涉及多体间流动干扰问题,宋武超等^[6]基于势流理论和非线性假设,引入二维轴对称入水空泡计算模型和影响函数,给出了双体并联入水过程空泡的三维演化特性。Xu 等^[7]研究了双发航行体以不同时序出水过程,发现当反向旋转涡对出现时,对次发航行体的运动姿态产生较大的影响。卢佳兴等^[8]开展了回转体齐射出水过程空泡演化规律与弹道特性研究,并分析了艇速对其影响。

综上所述,目前大多数研究成果都集中在单发航行体,而在多发航行体齐射出水过程非定常流体动力特性研究方面很少涉及。因此,本文基于动网格技术、多相流模型以及 UDF 二次开发等技术,对双发航行体齐射出水过程非定常流动干扰特性展开深入研究,为水下多筒多弹武器研制提供相关技术支撑。

1 模型设计与仿真计算

1.1 仿真模型参数

首先建立三维潜射航行体模型,其中模型直径 $D_1=15\text{ mm}$,长径比为 10,半球头型;发射筒直径 $D_2=21\text{ mm}$,高度为 200 mm;空气域高度为 250 mm,水域高度为 450 mm。此外,为了系统分析航行体整个发射过程,对发射区域进行划分,如图 1 所示。分为 3 个阶段:出筒阶段、水中航行阶段以及出水阶段。定义航行体沿着竖直运动方向为 Z 轴正方向,水平向右为 X 轴正方向,垂直航行体向内为 Y 轴正方向。

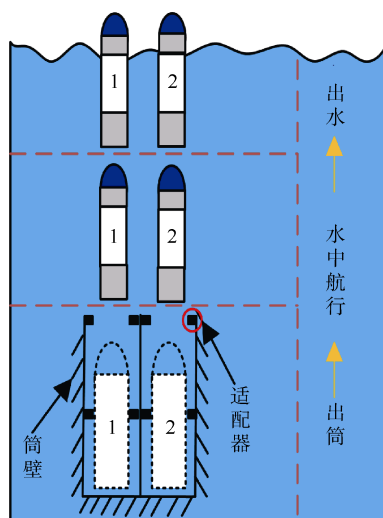


图 1 齐射出水区域划分

Fig. 1 Division of underwater region

1.2 VOF 多相流模型

描述航行体水下发射气液多相流动的基本控制方程包括连续性方程、动量方程、能量方程及体积分方程,其基本形式如下。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \\ \nabla \cdot \left[\mu_m (\nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^T) \right] + \nabla \cdot \left[\lambda_m (\nabla \cdot \vec{u}) \right] + \vec{F} \end{aligned} \quad (2)$$

能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m E) + \nabla \cdot (\rho_m E \vec{u}) =$$

$$\rho_m q - p \nabla \cdot \vec{u} + \nabla \cdot (k \nabla T) + \phi \quad (3)$$

体积分方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k) + \nabla \cdot (\alpha_k \vec{u}) = 0 \quad (4)$$

1.3 动网格技术

动网格技术包含 3 种计算模型, 即弹簧光顺模型 (Spring-based smoothing), 动态铺层模型 (Dynamic layering) 以及局部重构模型 (Local remeshing), 其中动态铺层模型因其网格质量较高的优势而被广泛使用。本文将采用动态铺层模型进行仿真计算, 其中心思想是运动边界发生变化过程中, 当紧邻边界的网格层高度达到一定程度时, 将分裂成两层网格; 当其网格层高度下降到一定程度时, 则附近的两层网格将合并成一层。

1.4 网格划分及边界条件设置

采用 ICEM 进行结构化网格划分, 对发射筒周围以及整个水域进行网格加密, 其中航行体周围第一层网格高度为 0.001 5 mm, 网格总数约为 730 万, 最小质量为 0.681, 如图 2 所示, 满足动网格计算要求。

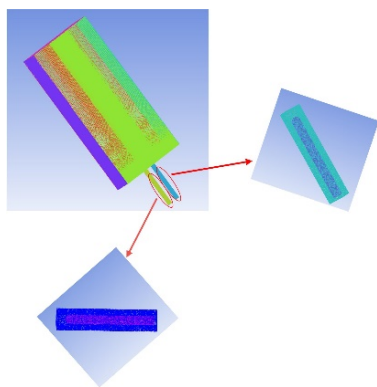


图 2 计算域网格

Fig. 2 Grid of computational domain

计算域的上端和四周都为压力出口; 考虑到航行体重力的影响, 航行体的速度、质量、惯性矩、水压等物理参数通过 UDF 输入到 Fluent 中, 其中选用隐式 VOF 多相流模型来捕捉航行体出水过程变化情况, 湍流模型选用 RNG $k-\varepsilon$ 模型, 并采取有限体积法对方程数值离散, 数值求解方法使用

SIMPLEC 算法的一阶迎风格式。

1.5 数值算法验证

如图 3 和图 4 所示, 仿真结果和试验结果吻合度较好, 包括尾空泡演变以及竖直方向位移, 可以认为此仿真方法达到了要求的精度。

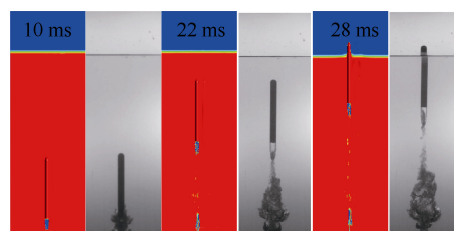


图 3 仿真相图与试验图对比

Fig. 3 Comparison of simulation diagram with experiment diagram

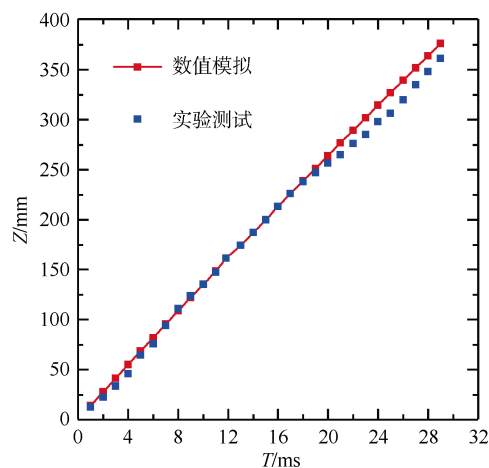


图 4 竖直方向弹道曲线对比

Fig. 4 Comparison of trajectory curves in vertical direction

2 结果分析

2.1 典型工况下航行体出水流场结构分析

图 5 和图 6 所示为双发航行体水下发射过程压力云图和体积分数云图, 发射速度为 14 m/s。

其中发射间距(初始时刻两发航行体中轴线距离)为 $1.5D_2$, 发射时间间隔为 0。0~12 ms 为航行体出筒阶段, 即从初始时刻至航行体尾部完全出水过程; 12~34 ms 为自由航行阶段, 即从航行体尾部离开发射筒口至航行体头部触及水面; 34 ms 之

后为航行体出水阶段,即航行体头部触及自由液面至完全出水。

矩大小相等,方向相反,最大值均出现在出筒阶段,主要是由于受到航行体之间流场相互干扰影响。

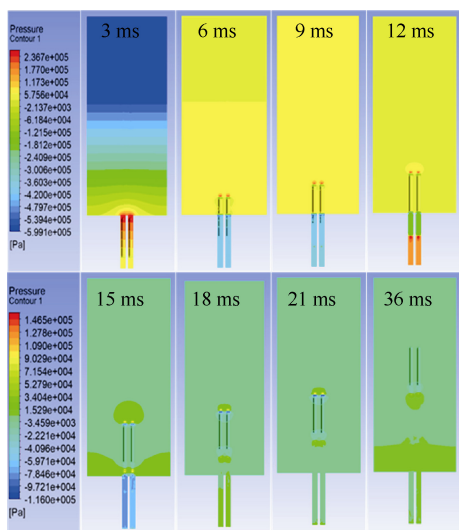


图5 齐射出水过程压力云图

Fig. 5 Pressure cloud during salvo water-exit

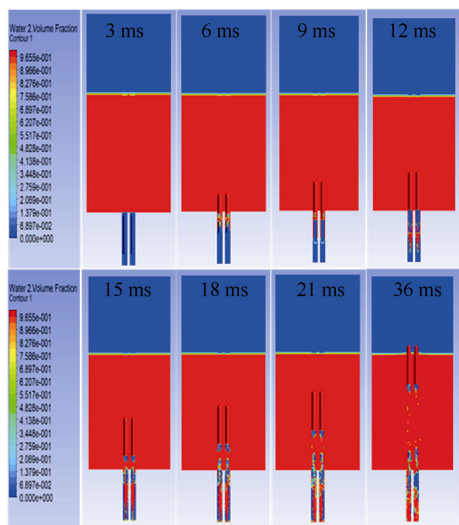


图6 齐射出水过程体积分数云图

Fig. 6 Volume fraction cloud during salvo water-exit

从图7中可以发现,双发航行体最大阻力均发生在航行体出筒阶段,相比之下,水中航行以及出水阶段的阻力基本可以忽略不计,主要是由于出筒阶段航行体从气域运动至水域过程中流体介质密度发生突变,致使其阻力急剧上升。从图8可知,双发航行体沿着水平方向受力基本对称,航行体头部出筒过程中水平方向出现了短期的振荡,随后基本趋于稳定;从图9可以发现,双发航行体所受力

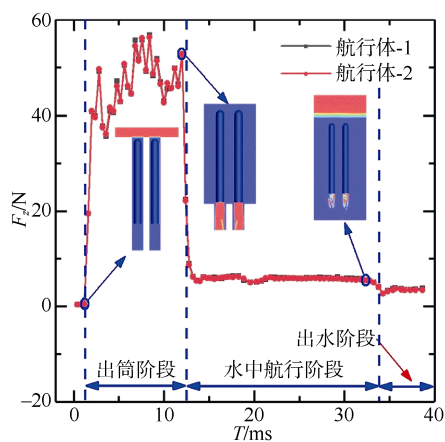


图7 Z轴方向阻力曲线

Fig. 7 Resistance curve along Z-axis

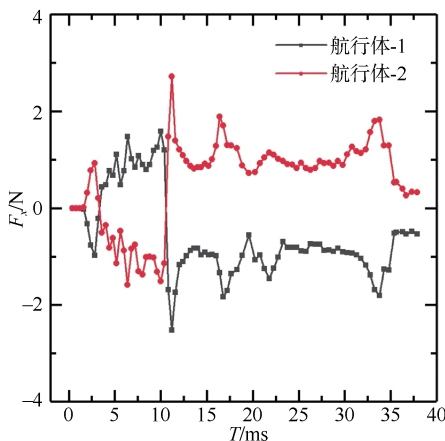


图8 X轴受力曲线

Fig. 8 Force curve along X-axis

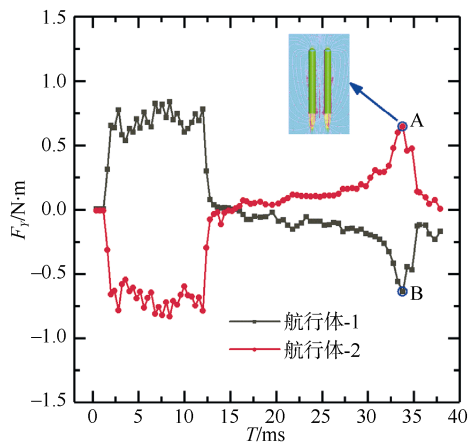


图9 偏转力矩曲线

Fig. 9 Moment curve

2.2 不同发射速度下航行体受力特性分析

由图 10 可知, 2 种工况下航行体所受的最大阻力都发生在航行体“出筒阶段”, 即航行体所受阻力与发射速度二次方成正比; 航行体在水中航行阶段和出水阶段所受的阻力相比出筒阶段可以忽略不计。

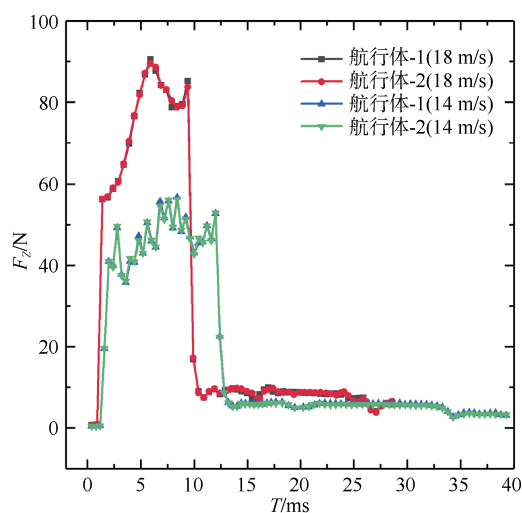


图 10 不同发射速度下阻力曲线

Fig. 10 Resistance curve at different launch speeds

3 结束语

本文基于动网格技术对双发航行体齐射出水过程流动干扰特性进行了仿真分析, 获得如下结论:

1) 在一定范围内的发射间距下, 航行体之间会产生明显的流动干扰, 对其受力特性产生明显的影响。

2) 双发航行体齐射过程中, 出筒阶段航行体

所受力矩最大, 易发生偏转, 从而影响水下发射的安全性。

3) 不同齐射速度下航行体出水过程中, 所受最大阻力发生在出筒阶段, 水中航行以及出水阶段较小, 相比之下可以忽略不计, 且航行体所受阻力与发射速度二次方成正比。

参考文献

- [1] 魏英杰, 闵景新, 王聪, 等. 潜射导弹垂直发射过程空化特性研究[J]. 工程力学, 2009, 26(7): 251-256.
- [2] 刘海军, 王聪, 邹振祝, 等. 圆柱体出筒过程头型对流体动力的影响[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(6): 684-689.
- [3] 别庆, 吕卫民, 袁书生, 等. 潜射导弹垂直发射非常空泡仿真研究[J]. 舰船科学技术, 2015, 37(S1): 185-189.
- [4] 权晓波, 燕国军, 李岩, 等. 水下航行体垂直发射尾空泡生成演化过程三维数值研究[J]. 船舶力学, 2014(7): 739-745.
- [5] 杨晓光, 陈焕龙, 刘华坪, 等. 导弹水下运动及出水过程的三维流场仿真[J]. 弹道学报, 2010, 22(1): 107-110.
- [6] 宋武超, 魏英杰, 路丽睿, 等. 基于势流理论的回转体并联入水双空泡演化动力学研究[J]. 物理学报, 2018, 67(22): 224702-224702.
- [7] XU H, WEI Y, WANG C, et al. On wake vortex encounter of axial-symmetric projectiles launched successively underwater[J]. Ocean Engineering, 2019, 189: 106382.
- [8] 卢佳兴, 王聪, 魏英杰, 等. 回转体齐射出水过程空泡演化规律与弹道特性实验研究[J]. 兵工学报, 2019, 40(6): 1226-1233.

(责任编辑: 肖楚楚)