

非回转体航行器高速斜入水过程研究

杨恺昕, 罗凯, 黄闯, 李代金, 王谦, 古鉴霄, 李永丰

(西北工业大学 航海学院, 陕西 西安 710072)

摘要:非回转体跨介质航行器能够更好适应空中高超声速飞行工况,但是在入水过程中的流体动力特性及运动稳定性存在新的问题。采用VOF多相流模型、Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型、Schnerr-Sauer空化模型,结合重叠网格技术,建立了非回转体入水过程运动与多相流场耦合的仿真方法,验证了所建模型的准确性,对横截面短长轴之比不同的航行器开展了斜入水过程仿真计算。结果表明:横截面短长轴之比虽然不会改变空泡形态,但是通过影响泡体相对位置关系对航行器的流体动力特性和运动特性都有影响;随着短长轴之比的减小,航行器的运动稳定性逐渐增加;但短长轴之比过小,则会影响减阻效果,并对结构安全性不利。

关键词:非回转体航行器;高速入水;数值模拟;重叠网格

中图分类号:O359

文献标志码:A

文章编号:1000-2758(2023)04-0635-09

跨介质航行器能够顺利跨越空水界面,同时具备导弹武器高速远程和鱼雷武器隐蔽性好的优势,是对抗大型水面舰船的杀手锏。为了追求空中弹道良好的气动性能,跨介质航行器一般不采用传统水中兵器的回转体外形,更倾向于采用适合高超声速飞行的外形。这种非回转体的航行器在入水及水下运动过程中表现出的流体动力特性和运动特性较回转体外形有很大不同。随着跨介质航行器相关研究的不断深入,具有非回转体外形的航行器在跨越自由液面时的运动及受力问题逐渐受到关注。

跨介质航行器的研究始于20世纪30年代,苏联最早提出了跨介质航行器的概念,但相关研究由于技术受限而搁浅^[1]。21世纪后,随着大型舰艇防御体系的日趋完备,导弹从空中突防的难度增大,而水下超空泡武器作战范围有限,于是跨介质航行器的突防优势逐渐凸显,引发各国进一步开展研究^[2]。以麻省理工学院的Lincoln实验室为代表的研究机构^[3-5]围绕仿生跨介质飞行器开展了大量研究,实现了空/水介质跨越。近年来高超声速飞行器研究表明,高升阻比气动布局形式主要包括翼身组

合体、翼身融合体、升力体以及乘波体等非回转体外形^[6],而跨介质航行器由于具有较长的空中弹道,故倾向于采用上述面对称外形以获得更好的气动性能。

跨介质航行器的介质跨越问题始终是制约其发展的瓶颈^[7],其入水过程涉及复杂的相变过程,流场、流体动力和弹道表现出强烈的瞬态特性,国内外对入水问题已展开了大量研究并取得一系列成果。Worthington等^[8]用闪光灯相机对小球垂直入水过程进行了试验研究,获得了入水空泡图片。Truscott等^[9-10]研究了球体和射弹入水时的流体动力特性。侯宇等^[11]通过试验研究了射弹高速入水过程中空泡形态的变化以及空泡对弹道的影响。袁绪龙等^[12-13]开展了模型实验,利用高速摄像机拍摄了回转体入水过程的空泡形态演变,分析了头型、入水角度和入水速度对水下弹道的影响。郭子涛等^[14]开展了水平回转体入水实验,研究了回转体入水过程的弹道稳定性和空泡拓展特性。黄鸿鑫等^[15]研究了回转体射弹的头部形状和质心位置对高速入水稳定性的影响。马庆鹏等^[16]研究了带有不同角度锥

收稿日期:2022-09-09

基金项目:水下信息与控制重点实验室开放研究项目(2021-JCJQ-LB-030-07)与中央高校基本

科研业务费(G2022KY0603)资助

作者简介:杨恺昕(1998—),西北工业大学硕士研究生,主要从事跨介质航行器研究。

通信作者:黄闯(1989—),西北工业大学副研究员,主要从事超空泡航行器研究。e-mail:huangchuang@nwpu.edu.cn

头圆柱体高速入水时的流场特性和运动特性。胡青青^[17]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。唐楚淳等^[18]对非轴对称头型弹体的入水弹道特性开展了弹丸低速垂直入水实验研究。华扬等^[19]通过高速摄影法对不同构型的非对称头型航行器低速入水时的入水弹道和空泡形态开展了实验研究。

关于入水问题的研究主要集中在回转体方面,关于非回转体的研究则是主要以空投鱼雷、水下飞机等为应用背景开展的,入水速度一般较低。随着高速跨介质航行器研究逐渐深入,非回转体外形在高速斜入水过程中的载荷和运动特性问题亟需解决。然而,从公开发表的文献来看,围绕非回转体外形开展的高速入水研究鲜见。为解决非回转体高速入水问题,本文采用数值仿真方法,建立了非回转体航行器高速斜入水模型,研究了非回转体外形对航行器入水过程中空泡形态、流体动力和弹道特性的影响,研究结果可为跨介质航行器的设计提供依据。

1 非回转体航行器高速入水数值模型

1.1 研究对象

本文以某非回转体跨介质航行器为研究对象,为了适应空中飞行工况,采用具有椭圆截面的外形。几何结构如图1所示,航行器由空化器段、收缩段和柱段组成。

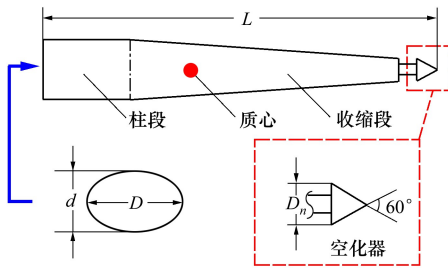


图1 非回转体航行器外形示意图

航行器总长为 L ,头部空化器直径为 D_n ,空化器锥角为 60° 。通过等比缩小回转体航行器收缩段和圆柱段截面在航行器立轴方向上的尺寸,可以得到一系列横截面为椭圆形的非回转体航行器。若截面椭圆的长轴长度为 D ,短轴长度为 d ,则短轴与长轴之比为 d/D ,记为 k 。对同一个航行器,其收缩段和柱段上各截面的 k 是相同的。参考某跨介质航行器

的入水工况,在入水角为 20° 、初速度为 200 m/s 的典型入水工况下,对不同截面形状(k 值分别取 $0.8, 0.7, 0.6$)的非回转体航行器入水过程进行数值仿真,研究其空泡演化规律、流体动力特性和弹道特性,选择回转体模型($k = 1.0$)作为对照组。

1.2 数值模型

非回转体跨介质航行器入水过程是一个典型的存在清晰界面的非定常多相流问题,其中还涉及自然空化问题。本文基于商用流场仿真软件平台STAR-CCM+,采用VOF多相流模型、Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型、Schnerr-Sauer空化模型和重叠网格技术进行数值仿真。

1) 多相流模型

航行器高速入水过程涉及空气、水、水蒸气三相,属于非定常多相流问题。基于均质多相流理论,本文采用VOF模型建立数值模型。

VOF模型要求在每个控制体中,所有相的体积分数之和为1,即各相体积分数满足关系式

$$\alpha_l + \alpha_a + \alpha_v = 1 \quad (1)$$

式中, $\alpha_l, \alpha_a, \alpha_v$ 表示液相、气相及水蒸气相的体积分数。

混合介质的连续性方程为

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

式中, $i = 1, 2, 3$,下同。

动量守恒方程为

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

(2)~(3)式中: u_i 为速度分量; ρ_m 和 μ_m 表达式分别为

$$\rho_m = \alpha_l \rho_l + \alpha_a \rho_a + \alpha_v \rho_v \quad (4)$$

$$\mu_m = \alpha_l \mu_l + \alpha_a \mu_a + \alpha_v \mu_v \quad (5)$$

对于VOF多相流模型,空气相体积分数的输运方程为

$$\frac{\partial \alpha_a}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha_a u_i) = 0 \quad (6)$$

2) 湍流模型

航行器高速入水过程中流场变化剧烈、雷诺数大、水气大量掺混,为了精准模拟流动参数分布和航行器的流体动力特性,需要对湍流进行建模求解。Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型是一种雷诺时均的湍流模

型,具有较高的精度和数值稳定性,在涉及多相耦合、非定常问题的流场模拟中表现稳健,可用于解决本文所研究的问题。该模型输运方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho k \mathbf{v}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \mathbf{v}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \frac{\rho C_2 \varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b \quad (8)$$

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

G_k 为速度梯度引起的湍流动能; G_b 为浮力引起的湍流动能; Y_M 为可压缩湍流脉动膨胀对耗散率的影响,对于不可压缩流动该项为 0; $\mu_t = \frac{\rho C_\mu k^2}{\varepsilon}$ 为湍流黏性系数; Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型中 C_μ 是平均应变率与旋度的函数,在平衡边界层惯性底层 $C_\mu = 0.09$; 模型常数 $C_2 = 1.9$; $C_{1\varepsilon} = 1.44$; $\sigma_k = 1.0$ 。

3) 空化模型

在高速入水过程伴随着自然空化现象,空化对流场特性有着显著的影响。Schnerr-Sauer 空化模型具有形式简单、计算效率高、数值稳定性强的特点,故以该模型模拟入水过程中的空化现象,其对相间质量传递的描述如下

$$\begin{cases} \dot{m}^+ = \frac{\rho_l \rho_v}{\rho_m} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_v - p}{\rho_l}}, & p < p_v \\ \dot{m}^- = \frac{\rho_l \rho_v}{\rho_m} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p - p_v}{\rho_l}}, & p > p_v \end{cases} \quad (9)$$

$$R_B = \left(\frac{\alpha_v}{1 - \alpha_v} \frac{3}{4\pi n} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

式中: \dot{m}^+ 为蒸发率; \dot{m}^- 为凝结率; α_v 为水蒸气相体积分数; n 为单位体积; R_B 为气泡半径。

4) 重叠网格技术

入水问题涉及到物体的大幅度运动,需要把运动与流场耦合求解。重叠网格的优势在于可以实现物体的大幅度运动,在运动过程中网格不会发生变形,且可以清晰显示自由液面,所以采用重叠网格技术将航行器自由运动与非定常多相流动耦合起来。重叠网格原理如图 2 所示,计算域网格分为背景网格区域和重叠网格区域,各网格区域在空间上重叠,

但相互独立存在。背景网格随地面坐标系保持不动,重叠区域可以随雷体坐标系在背景网格内部进行移动,利用重叠部分的网格以一定的插值形式进行流场信息交互,最终实现全流场计算。

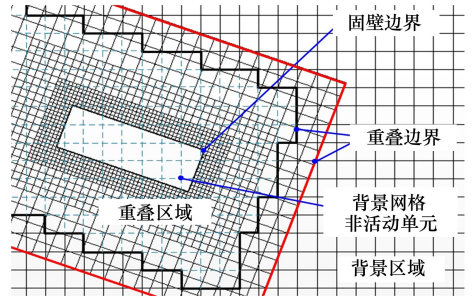


图2 重叠网格原理示意图

1.3 边界条件与网格划分

图 3 展示了背景计算域尺寸及其边界条件。背景计算域关于 $x_0O_0y_0$ 平面对称,长 $32L$,宽 $4L$,高 $19L$,水深 $15L$,空气域 $4L$,重力沿 y_0 轴负向。初始时刻航行器轴线与水平面夹角为 20° ,航行体初速度为 200 m/s 。计算域左侧边界为速度入口,前后边界为对称平面,上、下、右侧边界为压力出口,压强设置为随水深变化的压强。

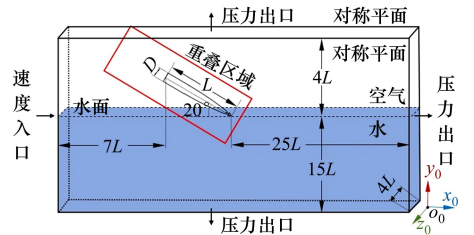


图3 背景计算域选取和边界条件设置示意图

入水点、前驻点、空化器等流动参数变化剧烈的区域全部位于重叠区域内,因此重叠区域网格较密,合理选择重叠区域范围能够提高对流场的模拟精度。经对比分析,最终确定重叠区域范围如图 4 所示,其长 $6.6L$,宽 $4D$,高 $10D$,其中航行器头部距右边界 $0.6L$ 。航行器位于重叠区域右视图中央,其椭圆截面的短轴与 $x_0O_0y_0$ 平面(铅垂面)重合。

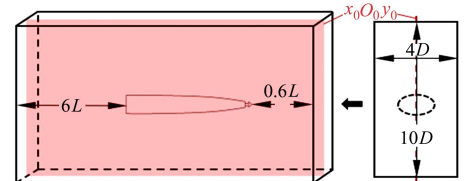


图4 重叠计算域示意图

采用切割体网格划分策略,并在近壁面处添加棱柱层网格进行细化,以期获得更精准的湍流模拟结果。在航行体头部、尾部附近流场设置加密区,并根据理论计算公式所得的空泡轮廓对两相交区域进行周向加密,以获得更好的流场界面。网格划分结果如图5所示。

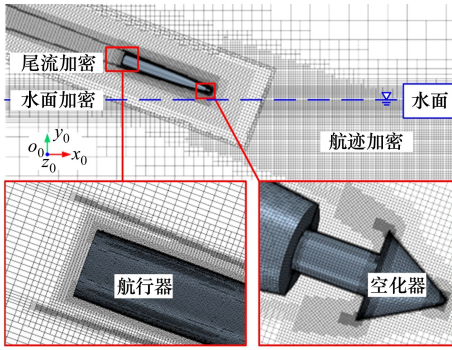


图5 网格划分结果

1.4 数值方法验证

1) 与试验对比

为了验证数值计算的可靠性,采用所建立的数值方法,对文献中的试验工况开展仿真计算。首先对文献[20]的平头圆柱垂直入水试验进行数值模拟计算,试验采用的平头圆柱长 25.4 mm,直径为 12.56 mm,质量为 25.1 g,初速度为 603 m/s,仿真计算结果与试验结果对比如图6所示。

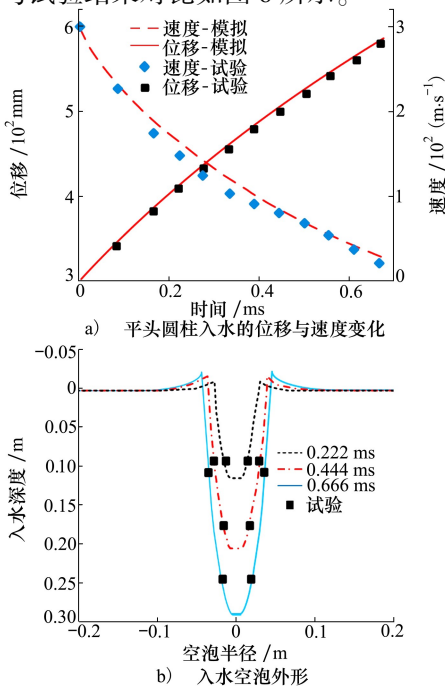


图6 垂直入水数值模拟与试验结果对比

对陈晨等人^[21]的小型运动体斜入水试验进行数值模拟计算,试验所用模型空化器直径为2.2 mm,弹身直径6 mm,质量8.5 g,初速度141.15 m/s,入水角为43.6°,仿真计算结果与试验结果对比如图7所示。

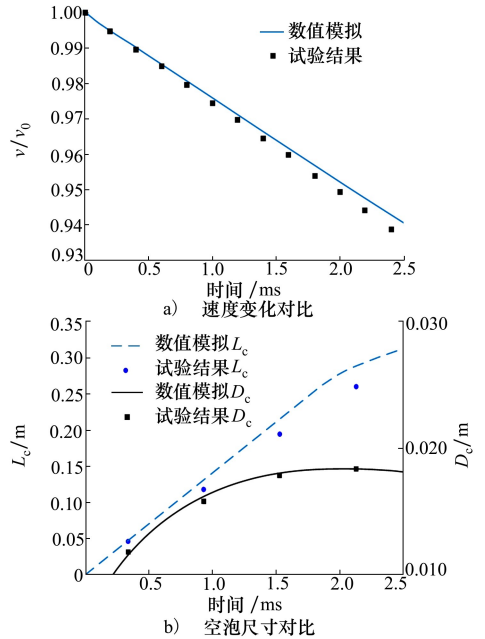


图7 斜入水数值模拟与试验结果对比

可以看出,数值计算结果与试验结果相比有较好的一致性,说明数值计算方法是可信的。

2) 结果无关性验证

为保证仿真结果独立性,在入水速度 200 m/s、入水角 20°的工况下,使用相同的数值模型进行计算,分别进行网格无关性验证和时间步长无关性验证。在最小时间步长为 1×10^{-6} s 的条件下,选取不同的网格数进行仿真,如图8所示。

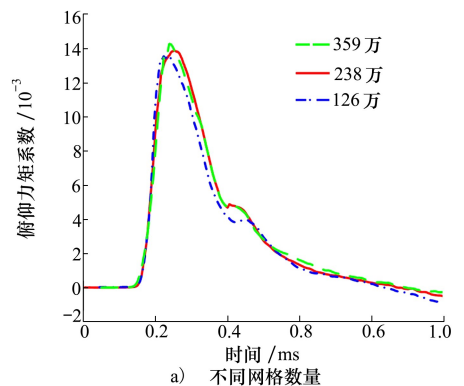


图8 不同网格数量

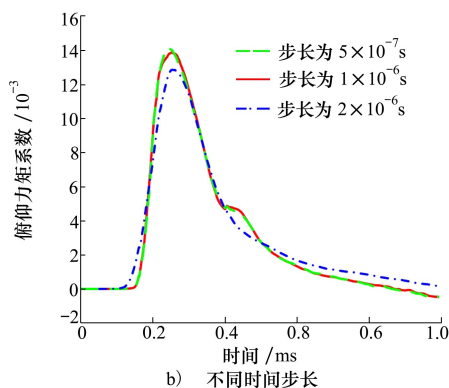


图8 网格和步长无关性验证结果

根据图8a)可得,网格节点总数为238万的算例满足网格无关性要求;在238万网格数的条件下,选取不同的最小时间步长进行数值仿真,根据图8b)可得,最小步长为 1×10^{-6} s的算例满足步长无关性要求。因此,在研究非回转体入水问题时,选用238万网格和 1×10^{-6} s最小时间步长。

2 仿真结果与分析

使用第1节建立的数值模型,在入水角 20° 、入水速度 200 m/s,无攻角、初始角速度和初始扰动的工况下,对不同截面形状的非回转体飞行器高速入水过程进行数值模拟研究。其中,同一飞行器的收缩段、柱段各横截面椭圆形状相似,即截面椭圆长短轴之比相同,非回转体飞行器横截面的椭圆短轴与长轴之比分别取 $0.8, 0.7, 0.6$,对照组回转体的该比例为 1.0 。

2.1 入水过程非定常空泡特性

根据仿真计算结果提取非定常超空泡形态,如图9所示,后处理时将水蒸气体积分数为 50% 的等值面作为两相交界。入水空泡经历了入水撞击、空泡形成、开口空泡和空泡闭合阶段。在入水撞击阶段,飞行器撞击液面,形成不对称的空泡,随后空泡迅速发展并包裹大部分飞行器。

当入水 9 ms时, k 为 1.0 的飞行器收缩段下表面刺破空泡壁面,使得飞行器下表面沾湿,飞行器未能稳定入水,发生弹跳翻转现象。当入水 11 ms时, k 为 0.8 的飞行器尾部刺破空泡壁面,沾湿区域扩大到一定程度后几乎不再变化,此后飞行器一直保持着在空泡壁上滑行的姿态。 k 为 0.7 和 0.6 的飞行器,飞行器尾部刺破空泡壁面,随后在沾湿区域升

力作用下,飞行器与空泡壁面分离,飞行器被空泡完全包裹,空泡产生的抬头力矩使飞行器尾部端部下沿再次刺破空泡壁面;自此在流体动力综合作用下,射弹发生了尾拍现象。

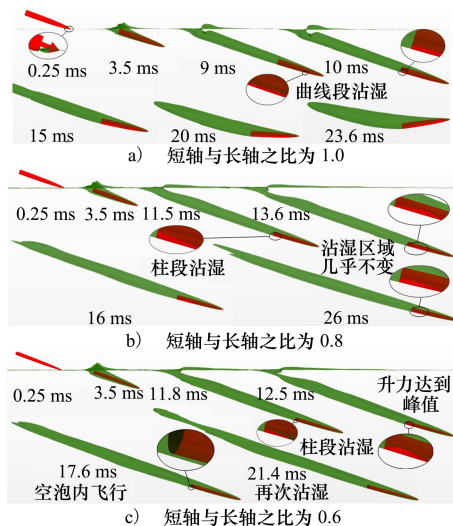


图9 入水空泡形态变化

由图9局部放大图可以看出, k 为 1.0 的飞行器,收缩段率先沾湿,升力作用点过于靠前,沾湿区域无法提供恢复力矩,故而飞行器攻角会不断增大,直至失稳;当 k 为 0.8 时,飞行器柱段最早沾湿,飞行器柱段始终未能脱离空泡壁面,在此过程中,虽然收缩段也有所沾湿,但沾湿区升力作用点仍在质心之后;当 k 为 0.6 时,飞行器尾端最早沾湿,且此时柱段距离空泡交界面还有相当的距离,沾湿区升力作用点一直处于质心之后。

综上所述,飞行器收缩段及柱段截面的椭圆形状的变化会在很大程度上影响飞行器刺穿空泡壁面的部位,即改变了飞行器的泡体位置关系。随着 k 值减小,飞行体收缩段愈发难以沾湿。

2.2 非回转体飞行器的流体动力特性

根据仿真计算结果,取不同飞行器模型在入水过程中的流体动力参数进行对比如图10所示。

入水初期,不同短长轴之比的飞行器所受的入水载荷相似。在 0.16 ms时,飞行器空泡与水开始接触,阻力系数绝对值骤然升高。同时,空泡受到的法向力使得飞行器受到正向俯仰力矩作用,引起飞行器抬头。在 3.2 ms时,飞行器尾部入水,升力系数略微增大。尾部入水后,空泡完全包裹飞行器,阻力系数趋于稳定,约为 -0.035 ,此时飞行器所受俯仰力矩很小。

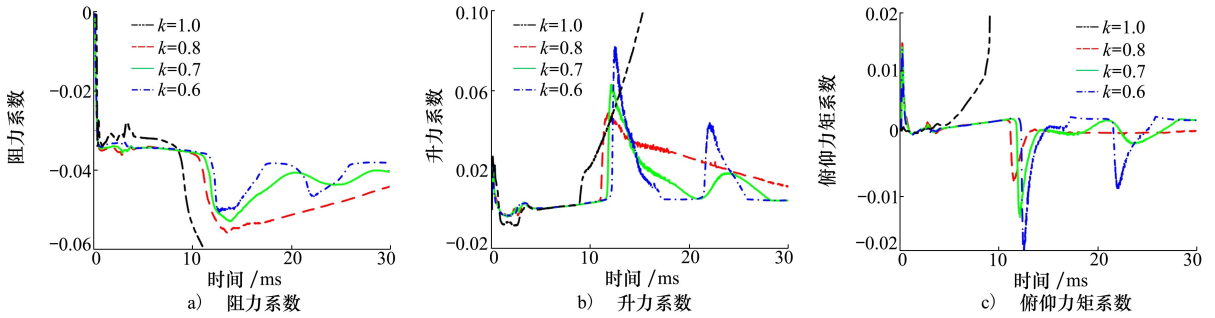


图 10 阻力系数、升力系数和俯仰力矩系数变化曲线

在 9 ms 时, k 为 1.0 的航行器收缩段发生沾湿, 航行器所受的力和力矩均急剧增大, 过大的流体动力载荷将对航行器结构安全产生不利影响。

在 10 ms 之前, 3 种椭圆截面航行器所受的流体动力较为接近。在 11.5 ms 时, k 为 0.8 的航行器尾部触水, 造成升阻力系数绝对值增大, 俯仰力矩系数跌至谷值。 k 为 0.7 和 0.6 的航行器先后触水, 触水后升阻力系数绝对值增大, 俯仰力矩系数跌至谷值, 随后航行器在沾湿区域升力作用下与空泡两相交界面分离, 升阻力系数逐渐回归触水前的数值。其中, 较之于 k 为 0.7 的航行器, k 为 0.6 的航行器尾拍周期更短, 所受的力与力矩的振幅更高。相较于 k 为 1.0 的回转体航行器, 椭圆截面航行器的阻力系数绝对值均值更小, 升力系数和俯仰力矩系数峰值更小。

2.3 非回转体航行器的弹道特性

图 11 给出了各截面形状航行器在典型工况下入水过程中的速度衰减曲线和质心位移曲线。

由图可知, k 为 1.0 的航行器的速度衰减曲线在 0.01 s 内近似为一条斜直线, 但在 0.01 s 以后速度快速衰减, 这是由于航行器在这段时间里持续与空泡壁面大面积接触, 动能严重损失。而 k 为 0.8, 0.7 和 0.6 时, 航行器速度衰减趋势大体相同, 近似为斜直线, 这是由于 k 值减小使得航行器沾湿面积在较小范围内变化, 阻力系数因此受限。其中, 在入水初期, k 为 1.0 的非回转体航行器速度衰减最慢, k 为 0.6 的非回转体航行器速度衰减最快, 这是由于 k 越小航行器质量就越小, 故而速度衰减越快。 k 为 1.0 的航行器在 $5L$ 位移之内, 质心轨迹近似为斜直线, 此后则不断向上偏转, 发生了跳弹现象; k 为 0.8, 0.7 和 0.6 时, 航行器在入水后 0.03 s 内质心轨迹基本一致, 近似为一条斜线。

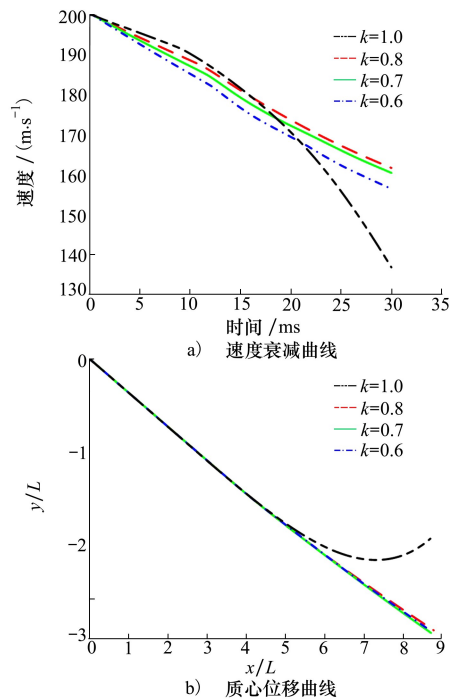


图 11 速度衰减和质心位移曲线

图 12 分别为不同截面形状下非回转体航行器的俯仰角、俯仰角速度和攻角随时间变化曲线。

由图可知 k 为 1.0 的航行器, 俯仰角先减小后增大且增速越来越快, 俯仰角速度在 5 ms 后也表现出相同的趋势; 攻角在入水初期近似为线性增大, 在收缩段沾湿后, 升力作用点过于靠前, 难以提供足够的恢复力矩, 攻角增长没有被遏止, 航行器最终失稳。

k 为 0.8 的航行器在尾部沾湿后, 其俯仰角速度显著下降, 俯仰角增速变慢, 攻角持续减小。 k 为 0.7 和 0.6 的航行器, 由于射弹尾拍, 故而俯仰角、俯仰角速度和攻角呈规律性的振荡状态, 总体来看, 其俯仰角速度和攻角幅值呈下降态势, 俯仰角增速也得

到了抑制。其中, k 为 0.7 的航行器在同一个振荡周期内俯仰角和俯仰角速度均值都更低。对比来看, 截面为一定椭圆形的非回转体航行器, 尾部沾湿区域的升力作用点始终在质心之后, 可以持续提供恢复力矩, 使得航行器攻角减小; k 减小到一定程度时, 会发生尾拍现象, 此时俯仰角增速放缓程度更高; 但 k 继续减小则会导致升力系数和俯仰力矩系数峰值增大, 从而使俯仰角和俯仰角速度振荡的幅值增大, 导致尾拍频率加快、尾拍幅度增大, 这将影响航行器的结构安全。同时俯仰角增速放缓的程度有所减弱, 使得航行器姿态变化加快。

结合以上分析可知, 相比于回转体航行器, 具有椭圆截面的航行器尾部沾湿区域更为靠后, 故而滑

水力作用点更易位于质心之后, 从而能产生恢复力矩维持航行姿态。航行器椭圆截面的 k 值越小, 其尾部距离空泡两相交界面的距离越远, 需要更大的攻角才会刺穿空泡, 故而刺穿的时间更晚; 同时, 由于航行器刺穿空泡前的角速度随时间增加, 故而 k 值越小会导致航行器拍击水的角速度更大、升力峰值更高、沾湿区提供的恢复力矩更大, 从而使尾拍周期更短、攻角振幅更大。总之, 减小航行器截面的短轴与长轴之比 k 能改变泡体位置关系, 影响航行器入水下表面的沾湿区域, 进而增大恢复力矩, 有效改善该航行器跳弹倾覆的问题, 获得稳定的入水航迹, 但 k 值过小则会导致尾拍幅度过大, 俯仰角和攻角变化加快且幅度增大, 速度衰减加剧。

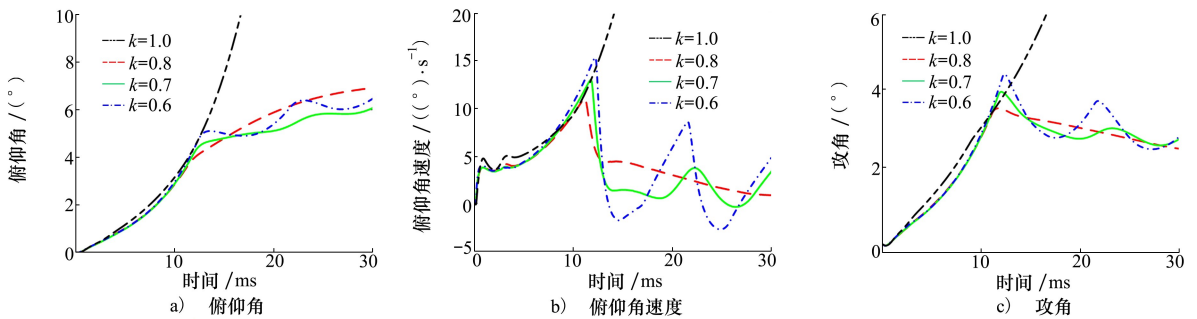


图 12 俯仰角、俯仰角速度和攻角变化曲线

3 结 论

建立了非回转体跨介质航行器斜入水过程仿真计算模型, 研究了高速斜入水工况下, 航行器横截面短长轴之比对多相流场、入水载荷、非定常运动特性的影响规律。主要结论如下:

1) 在不改变空化器的条件下, 航行器横截面短长轴之比对入水空泡的影响有限, 但是显著改变了泡体相对位置关系, 短长轴之比越小航行体收缩段越难以穿刺空泡, 短长轴之比不超过 0.8 时, 航行器收缩段不会沾湿。

2) 选择合适的短长轴之比, 可改善航行器在入水过程中的流体动力特性。适当减小短长轴之比, 可降低流体动力载荷。但是, 当短长轴之比小于 0.6 时, 流体动力载荷明显增大, 会对减阻效果和结构安全带来不利影响。

3) 随着航行器横截面短长轴之比的减小, 入水弹道稳定性逐渐增强, 主要原因在于航行器越扁, 滑水力的作用点越靠后, 尾部沾湿区域升力能够为航行器提供恢复力矩。短长轴之比不超过 0.8 时, 入水弹道是稳定的; 短长轴之比不超过 0.7 时入水弹道具有明显的“尾拍”特性。

参考文献:

- [1] 何肇雄, 郑震山, 马东立, 等. 国外跨介质飞行器发展历程及启示[J]. 舰船科学技术, 2016, 38(5): 152-157
HE Zhaoxiong, ZHENG Zhenshan, MA Dongli, et al. Development of foreign trans-media aircraft and its enlightenment to China [J]. Ship Science and Technology, 2016, 38(9): 152-157 (in Chinese)
- [2] 孙泽鹏, 宋乾福, 贾重任. 跨介质飞行器的应用与技术特点分析[J]. 军民两用技术与产品, 2015(10): 22-23
SUN Zepeng, SONG Qianfu, JIA Zhongren. Analysis of the application and technical characteristics of trans-media vehicles [J].

- Dual Use Technologies & Products, 2015(10): 22-23 (in Chinese)
- [3] FABIAN A, FENG Y, SWARTZ E, et al. Hybrid aerial underwater vehicle[R/OL]. (2012-08-01)[2022-09-09]. http://digitalcommons.olin.edu/scope_2012/B
- [4] SIDDALL R, ORTEGA A A, KOVAC M. Wind and water tunnel testing of a morphing aquatic micro air vehicle[J]. Interface Focus, 2017, 7(1): 1-5
- [5] MA K Y, CHIRARATTANANON P, FULLER S B, et al. Controlled flight of a biologically inspired, insect-scale robot[J]. Science, 2013, 340(6132): 603-607
- [6] 安复兴, 李磊, 苏伟, 等. 高超声速飞行器气动设计中的若干关键问题[J]. 中国科学:物理学、力学、天文学, 2021, 51(10): 6-25
AN Fuxing, LI Lei, SU Wei, et al. Key issues in hypersonic vehicle aerodynamic design[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2021, 51(10): 6-25 (in Chinese)
- [7] 贺永圣. 仿生跨介质飞行器水气动布局融合设计及出水特性分析[D]. 长春: 吉林大学, 2021
HE Yongsheng. Fusion design of hydrodynamic and aerodynamic layout and analysis of characteristics of water exit for the bionic cross-medium aircraft[D]. Changchun: Jilin University, 2021 (in Chinese)
- [8] WORTHINGTON A M, COLE R S. Impact with a liquid surface, studied by the aid of instantaneous photography[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1900, 194: 175-199
- [9] TRUSCOTT T T. Cavity dynamics of water entry for spheres and ballistic projectiles[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2009
- [10] TRUSCOTT T T, TECHET A H. A spin on cavity formation during water entry of hydrophobic and hydrophilic spheres[J]. Physics of Fluids, 2009, 21(12): 121703
- [11] 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 Zhengui, GUO Zeqing, et al. Experimental investigation on shallow-angle oblique water-entry of a high-speed supercavitating projectile[J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(2): 126-135 (in Chinese)
- [12] 陈诚, 袁绪龙, 党建军, 等. 超空泡航行器 20°角倾斜入水冲击载荷特性试验研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(6): 1159-1164
CHEN Cheng, YUAN Xulong, DANG Jianjun, et al. Experimental investigation into impact load during oblique water-entry of a supercavitating vehicle at 20°[J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(6): 1159-1164 (in Chinese)
- [13] 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): 1140-1149
YUAN Xulong, LI Min, DING Xutuo, et al. Impact load characteristics of a trans-media vehicle during high-speed water-entry[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(7): 1440-1449 (in Chinese)
- [14] 郭子涛, 陈拓, 郭钊, 等. 弹体水平入水的空泡扩展相关特性研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(4): 90-94
GUO Zitao, CHEN Tuo, GUO Zhao, et al. A study on the cavitation expansion related characteristics induced by horizontal water entry of projectiles[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(2): 90-94 (in Chinese)
- [15] 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 Hongxin, ZHANG Huisuo, 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 (in Chinese)
- [16] 马庆鹏, 魏英杰, 王聪, 等. 锥头圆柱体高速入水空泡数值模拟[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(2): 204-209
MA Qingpeng, WEI Yingjie, WANG Cong, et al. Numerical simulation of high-speed water-entry cavity of cone cylinder[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(2): 204-209 (in Chinese)
- [17] 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 Qingqing. 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 (in Chinese)
- [18] 唐楚淳, 黄振贵, 陈志华, 等. 斜截体头型弹丸低速垂直入水实验研究[J]. 兵工学报, 2020, 41(增刊1): 54-58
TANG Chuchun, HUAN Zhengui, CHEN Zhihua, et al. Experimental study of the low-speed vertical water entry process of oblique head projectile[J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(suppl 1): 54-58 (in Chinese)
- [19] 华扬, 施瑶, 潘光, 等. 非对称头型航行器入水空泡形态与弹道特性的实验研究[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39(6): 1249-1258

- HUA Yang, SHI Yao, PAN Guang, et al. Experimental study on water-entry cavity and trajectory of vehicle with asymmetric nose shape[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2021, 39(6): 1249-1258 (in Chinese)
- [20] 郭子涛. 弹体入水特性及不同介质中金属靶的抗侵彻性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012
- GUO Zitao. Research on characteristics of projectile water entry and ballistic resistance of targets under different mediums[D]. Harbin; Harbin Institute of Technology, 2012 (in Chinese)
- [21] 陈晨, 魏英杰, 王聪. 小型运动体高速倾斜入水空泡流动数值研究[J]. 兵工学报, 2019, 40(2): 334-344
- CHEN Chen, WEI Yingjie, WANG Cong. Computational analysis of cavity flow induced by high-speed oblique water entry of axisymmetric body[J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(2): 334-344 (in Chinese)

Study on high-speed water entry process of non-rotating vehicles

YANG Kaixin, LUO Kai, HUANG Chuang, LI Daijin, WANG Qian,
GU Jianxiao, LI Yongfeng

(School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The non-rotating trans-media vehicle can better adapt to the hypersonic flight conditions, but new problems in the hydrodynamic characteristics and motion stability arise during the water entry process. With the VOF multiphase model, Realizable $k-\varepsilon$ turbulence model, and Schnerr-Sauer cavitation model, this paper establishes a simulation method of coupling the movement of non-roating body into water with multiphase flow fields based on overset grid technology, and the accuracy of the established model is verified. The simulation calculation of the oblique water entry process of the vehicle with different ratio of short axis to long axis in cross section is carried out. And the results show that although the ratio of short axis to long axis in cross section does not change the cavitation morphology, it affects the hydrodynamic and kinematic characteristics of the vehicle by influencing the relative position of the cavitation. As the ratio of short axis to long axis decreases, the motion stability of the vehicle increases gradually. However, if the ratio of short axis to long axis is too small, the drag reduction effect will be weakened, and the structure will suffer a bigger load.

Keywords: non-rotating vehicle; high-speed water entry; numerical simulation; overset mesh

引用格式: 杨恺昕, 罗凯, 黄闯, 等. 非回转体飞行器高速斜入水过程研究[J]. 西北工业大学学报, 2023, 41(4): 635-643
YANG Kaixin, LUO Kai, HUANG Chuang, et al. Study on high-speed water entry process of non-rotating vehicles[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2023, 41(4): 635-643 (in Chinese)