

6-8-2020

Numerical Investigation of Water-exit Cavity Flow of Missile with Complex Configuration

Chongxian Zhang

The Second Academy of CASIC, Beijing 100854;

Xianglin Li

The Second Academy of CASIC, Beijing 100854;

Yuqiu Liu

The Second Academy of CASIC, Beijing 100854;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Numerical Investigation of Water-exit Cavity Flow of Missile with Complex Configuration

Abstract

Abstract: *Based on Zwart-Gerber-Belamri cavitation model, a numerical calculation method of cavitating flow of water-exit missile with complex configuration was proposed. The influence of velocity of water-exit and angle of attack to cavitation of parts of missile was analyzed. The simulation results showed that in the beginning of water-exit course, body-attached bubble quickly grew due to reduction of cavitation number. After that, the effect of bubble break-off and oscillation became more obvious. In water-exit course of zero angle of attack, the length and thickness of bubble of shoulder increased linearly with velocity. The ability of the protrusion to induce the cavitation of nearby missile body was enhanced with the increase of velocity. The influence of the cavitation of the rudder by velocity was not significant. On the other hand, the influence of angle of attack on the asymmetry of the bubble of shoulder and the cavitation of the rudder was small when attack angle is less than 5°. The asymmetry of the bubble of shoulder was notable when attack angle increased to 10°. As well as the cavitation area of rudder was increasing rapidly. The influence of the angle of attack on the cavitation of the protrusion was not significant when attack angle was less than 20°.*

Keywords

submarine-launched missile, cavitation flow, water-exit course, bubble dynamics

Recommended Citation

Zhang Chongxian, Li Xianglin, Liu Yuqiu. Numerical Investigation of Water-exit Cavity Flow of Missile with Complex Configuration[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(6): 1321-1328.

复杂外形导弹出水过程空化流数值计算研究

张重先, 李向林, 刘玉秋

(中国航天科工二院, 北京 100854)

摘要: 提出了一种基于 Zwart-Gerber-Belamri 空化模型的复杂外形潜射导弹空化流数值计算方法。分析了出水速度及攻角对弹体各部件空泡的影响。结果表明, 出水过程初期空化数降低使附体空泡迅速扩大, 随后空泡脱落与振荡的影响将更为显著; 零攻角出水时, 随出水速度上升, 肩空泡长度及厚度呈线性增长, 突起物诱导临近弹体空化能力增强, 舵空化变化不显著。5°攻角以下, 攻角对肩空化非对称性及舵空化的影响较小; 10°攻角时肩空化不对称性显现, 舵空化面积迅速增大; 20°攻角以内, 攻角变化对突起物空化的影响不显著。

关键词: 潜射导弹; 空化流; 出水过程; 空泡动力学

中图分类号: TJ762.4

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 06-1321-08

Numerical Investigation of Water-exit Cavity Flow of Missile with Complex Configuration

Zhang Chongxian, Li Xianglin, Liu Yuqiu

(The Second Academy of CASIC, Beijing 100854)

Abstract: Based on Zwart-Gerber-Belamri cavitation model, a numerical calculation method of cavitating flow of water-exit missile with complex configuration was proposed. The influence of velocity of water-exit and angle of attack to cavitation of parts of missile was analyzed. The simulation results showed that in the beginning of water-exit course, body-attached bubble quickly grew due to reduction of cavitation number. After that, the effect of bubble break-off and oscillation became more obvious. In water-exit course of zero angle of attack, the length and thickness of bubble of shoulder increased linearly with velocity. The ability of the protrusion to induce the cavitation of nearby missile body was enhanced with the increase of velocity. The influence of the cavitation of the rudder by velocity was not significant. On the other hand, the influence of angle of attack on the asymmetry of the bubble of shoulder and the cavitation of the rudder was small when attack angle is less than 5°. The asymmetry of the bubble of shoulder was notable when attack angle increased to 10°. As well as the cavitation area of rudder was increasing rapidly. The influence of the angle of attack on the cavitation of the protrusion was not significant when attack angle was less than 20°.

Keywords: submarine-launched missile; cavitation flow; water-exit course; bubble dynamics

引言

出水过程是潜射导弹不同于其他导弹所具有



收稿日期: 2015-12-04 修回日期: 2016-03-26;
基金项目: 国防预研基金(9140A13030512HT20042);
作者简介: 张重先(1988-), 男, 辽宁锦州, 博士生, 研究方向为导弹总体设计; 李向林(1971-), 男, 湖南邵东, 研究员, 博导, 研究方向为导弹总体设计; 刘玉秋(1975-), 女, 黑龙江五常, 研究员, 研究方向为导弹总体设计。

的特殊弹道阶段。与传统水下航行体相比, 潜射导弹出水运动速度快、弹道倾角大, 导致空化数较小、空化现象严重, 空化导致的导弹水动力特性改变较为明显。同时, 由于导弹上升过程中静水压变化剧烈, 空化流场的非定常性较为明显。因此, 对潜射导弹出水过程的空化流场进行计算和仿真在潜射导弹的研制过程中具有重要意义。

<http://www.china-simulation.com>

• 1321 •

目前,国内外对于潜射导弹乃至航行体出水过程的空化流场数值计算主要采用计算流体力学方法,发展出了基于 VOF(Volume of Fluid)、Mixture 等多种多相流模型的数值仿真方法^[1-2]。王一伟等对圆柱形航行体出水过程的空化流场进行了数值计算,并对考虑空化作用后的航行体出水载荷进行了仿真计算^[3-4]。魏海鹏等对圆头锥柱体在水中航行时的空化流场进行了数值计算,并研究了非凝结性气体含量对导弹表面空化流动的影响^[5]。Zhi Shang 采用 VOF 两相流模型对潜艇形钝头航行体头部引起的非定常空化流进行了数值计算^[6]。尤天庆等对不同攻角下航行体出水过程的头部空化流进行了研究,并对相应攻角下的出水过程载荷进行了分析^[7]。张露颖等对 Singhal 空化模型进行了改进,采用两相流方法对钝体绕流的空化现象进行了数值模拟^[8]。陈超倩等研究了空化作用对大型潜射弹道导弹姿态及弹道的影响^[9]。从当前研究现状来看,对潜射导弹等复杂外形航行体高速出水过程中,空泡的生成及发展变化进行准确数值计算仍存在诸多困难。

与传统导弹气动特性的数值计算相比,潜射导弹出水过程存在特有的空化现象,流场由水、空气、水蒸气三相组成,是一个复杂的多相流数值计算问题。相对于传统水下航行体而言,由于导弹出水速度较快,流场非定常性特性明显。同时,潜射导弹外形复杂、弹体部件较多,导致空化流场复杂程度加剧、部件间的空化流相互干扰。本文针对以上问题,采用动网格和复合网格技术,基于 Mixture 多相流模型,对复杂外形潜射导弹出水过程的非定常空化流场进行了数值计算研究。

1 空化流数值计算模型

1.1 多相流基本方程

导弹出水过程的空化流场基本方程包括连续性方程、动量方程、能量方程以及质量输运方程。由于导弹出水过程流场由多种介质组成,设第 k 个

组分的体积分数、密度、速度和焓分别为 a_k , ρ_k , $\bar{v}_k$, h_k , 则流场连续性方程为:

$$\sum_{k=1}^n \frac{\partial(a_k \rho_k)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n a_k \rho_k \bar{v}_k \right) = 0 \quad (1)$$

忽略流体可压缩性及热传导的影响,能量方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (a_k \rho_k h_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n (a_k \bar{v}_k (\rho_k h_k + p)) = 0 \quad (2)$$

其中 p 为流场压强。多相流的动量方程为^[10]:

$$\frac{\partial(\rho_m \bar{v}_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \bar{v}_m \bar{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \bar{v}_m + \nabla \bar{v}_m^T)] + \rho_m \bar{g} + \bar{F} \quad (3)$$

式中: ρ_m 、 $\bar{v}_m$ 、 μ_m 分别为混合物密度、速度和粘性系数, g 为重力加速度, F 为外力。多相流质量输运方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t} (a_k \rho_k) + \nabla \cdot (a_k \rho_k \bar{v}_k) = \dot{m}_+ - \dot{m}_- \quad (4)$$

对于蒸汽相而言, $\dot{m}_+$ 为液态水蒸发率, $\dot{m}_-$ 为水蒸气凝结率; 由于空气不参与相变, 因此有 $\dot{m}_+ - \dot{m}_- = 0$ 。

1.2 空化模型

潜射导弹出水过程中,空泡的产生与演化均是由惯性控制的空泡动力学过程。即由于弹体运动,使得弹身表面低压区压强低于水的饱和蒸汽压 p_v , 液态水中原有溶解的气核在该低压区内生长膨胀, 从而造成弹体空化。为描述流场空化条件, 定义空化数如下:

$$\sigma = \frac{2(p_\infty - p_v)}{\rho v_\infty^2} \quad (5)$$

式中: p_∞ , v_∞ 来流静压和速度; ρ 为液体密度; p_v 为水的饱和蒸汽压。空化数越小, 流场内低压区越容易产生空化, 反之亦然。

为描述空泡生长与流场压强间的关系, Rayleigh 最早基于球形空泡假设提出了一种空泡动力学模型。Zwart 等人对以上模型进行了修正, 提高了计算精度、增强了数值计算的收敛性。本文

采用 Zwart-Gerber-Belamri 空化模型, 蒸发率与凝结率如下^[11]:

$$\dot{m}_+ = F_+ \frac{3a_n(1-a_v)\rho_v}{R} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_v - p}{\rho_l}} \quad p \leq p_v \quad (6)$$

$$\dot{m}_- = F_- \frac{3a_v\rho_v}{R} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p - p_v}{\rho_l}} \quad p \geq p_v \quad (7)$$

式中: F_+ , F_- 分别为蒸发率和冷凝率经验系数。本文取 $F_+ = 50$, $F_- = 0.001$ 。 a_n 为水中所自然溶解的气核的体积分数, a_v 为蒸汽相体积分数, ρ_l , ρ_v 分别为液态水和水蒸气密度, R 为空泡半径。

1.3 湍流模型

潜射导弹出水空化流属于高雷诺数流动, 且流场非定常性显著, 因而采用 RNG (Renormalization-group) $k-\varepsilon$ 湍流模型对湍流进行求解。湍动能输运方程如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left(a_k \mu \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon \end{aligned} \quad (8)$$

湍动能耗散方程如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(a_\varepsilon \mu \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \\ C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon \end{aligned} \quad (9)$$

式中: μ 为粘性系数; G_k 表示由流动速度梯度引起的湍动能增量; G_b 表示由浮力引起的湍动能增量; a_k 和 a_ε 分别为 k , ε 对应的 Prandtl 数的倒数; $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$ 分别为模型的修正常数, 根据经验及实验结果确定。

1.4 计算网格划分

由于潜射导弹在出水时处于高速运动状态, 因此本文采用动网格对弹体运动进行跟踪。为避免动网格更新时产生负网格、提高网格更新质量, 远处流场采用非结构网格划分。同时为保证弹体绕流的计算精度, 弹体附近流场采用结构网格划分, 从而形成复合网格。计算区域网格划分示意如图 1。

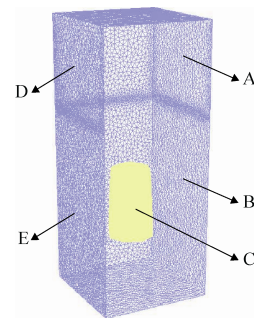


图 1 流场区域网格划分

图 1 中 A 区域为空气, B 和 C 区域为水, 弹体包含在 C 区域内。水与空气交界面处网格加密, 以准确计算水、气交界面。A、B 区域为静止网格, 为避免与 C 区域动网格结合时产生负网格、提高动网格更新质量, 采用非结构网格划分。为保证弹体空化流场的计算精度, C 区域采用结构网格划分, 并利用动网格技术连同弹体共同运动。

由于网格单元尺寸远小于潜射导弹出水过程位移, 并且动网格运动方向与动网格交界面呈现复杂几何关系, 因此为提高网格质量, 采用弹簧光滑方法和局部重划方法对动网格进行更新。

2 边界条件及数值计算方法

不失一般性, 设波浪及洋流由图左侧流向右侧, 则 D、E 面为速度入口条件, A、B 面为压力出口条件。C 面为混合网格和动网格交界面, 弹体为壁面边界条件。

在流动方程的离散化处理方面, 本文采用 PISO 离散格式对压强项进行离散化处理, 体积分数项采用 QUICK 离散格式, 动量方程及湍流模型均采用二阶迎风格式进行离散化处理。压强-速度耦合采用 SIMPLE 格式, 非定常项采用二阶隐式格式。

3 模型及数值方法有效性验证

针对潜射导弹出水过程的特点, 本文对高速流动下的无限长半球头的空化流场进行了数值计算。取空化数 $\sigma = 0.3$, 得到半球头表面压强系数分布, 并与文献[8]中半球头的空化流实验结果进行对比, 结果如图 2 所示。

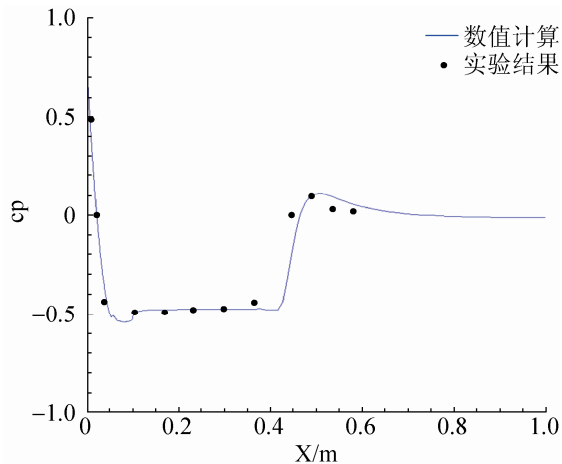


图 2 无限长半球头表面压强系数

由以上计算结果可知,采用上文所述计算模型及计算方法所得到的空化流计算结果与实验结果吻合较好,采用上述模型及方法进行空化流计算取得良好效果。

4 数值计算结果及分析

为方便描述,定义无量纲长度为 x/d , 其中 d 为导弹弹径。潜射导弹采用“十”字舵正常式布局,如图 3 所示,弹体尾部附近具有 2 个突起物 A、B。以与导弹头部的距离为基准,A、B 前缘的位置分别为 15.4 和 16,长度分别为 0.3 和 1,宽度分别为 0.12 和 0.47,高度分别为 0.11 和 0.082,有攻角出水时,突起物位于导弹的背水面。因此,弹体表面空化主要集中于头肩部、弹体突起物及舵面处。同时,由于随导弹上升运动,静水压迅速减小,使得流场的非定常性十分显著。设导弹头部初始水深为 7.5 m,采用垂直出水方式出水,对导弹头肩部、弹体突起物及舵面空化流场的演化及其受出水速度和攻角的影响进行了数值计算研究。

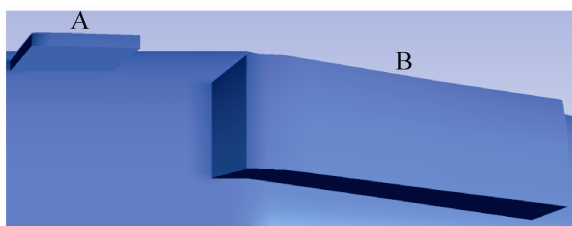


图 3 突起物几何外形图

4.1 空泡演化数值计算

出水速度 20 m/s 条件下,对导弹出水过程空泡演化进行数值计算,此处列出肩空泡演化过程。肩部弹体表面水蒸气体积分数如图 4 所示,图中为导弹纵对称截面处数据,横坐标为距离导弹头部的无量纲距离。

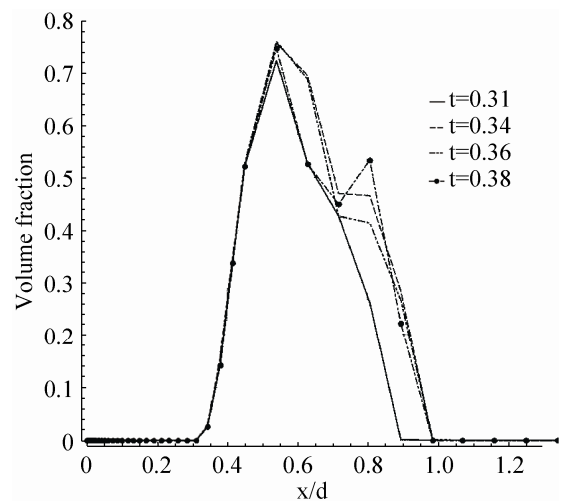
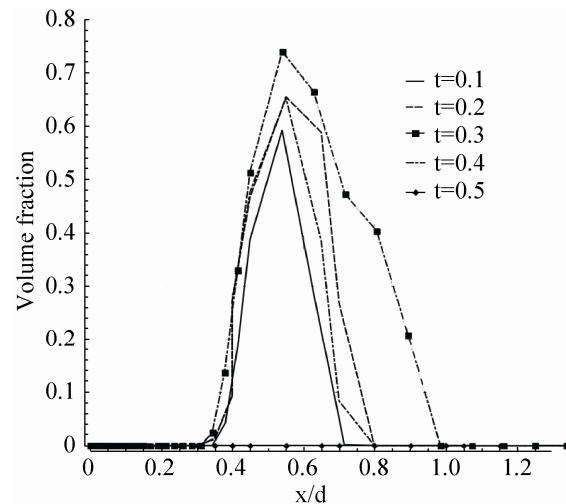


图 4 肩部弹体表面水蒸气体积分数

由以上计算结果可知,肩空泡演化可分为 3 个阶段:出水过程初始阶段,由于 p_∞ 随水深变浅而不断下降,因此流场空化数随导弹的出水运动而逐步降低,肩空泡开始初步形成,此时肩空泡长度及泡内水蒸气体积分数均处于较低水平,空泡演化过程受空化数降低的影响较为显著。在此阶段中,空泡随出水过程而迅速膨胀,空泡核心处水蒸气体

积分在 $t = 0.1\text{s} - 0.3\text{s}$ 内由 0.6 迅速增加 0.75, 肩部弹体表面空化长度增加 1 倍。随着空泡长度及厚度的增加, 空泡演化进入振荡阶段。该阶段中空泡的振荡性及不稳定性对空泡的演化起主要影响作用。由图 4 所示, $t = 0.31\text{s}$ 时, 肩空泡后部出现脱落, 空泡的膨胀速度变缓, 泡内水蒸气体积分数以约 40 ms 为周期振荡。导弹头部接触水、空气界面时, 空泡演化进入溃灭阶段。由于介质密度突变, 使得导弹肩部低压条件迅速消失, 空泡周围流体介质蒸发量也迅速下降, 两者共同导致泡内水蒸气体积分数迅速下降, 空泡急剧缩小, 并最终随弹体出水而溃灭。由图 4 所示, $t = 0.38\text{s}$ 时空泡前部蒸汽相体积分数下降, 空泡进入溃灭过程。20 ms 后空泡长度迅速减小近 30%, 空泡在 50 ms 内完全溃灭。

4.2 典型出水速度下空化流数值计算

取弹体头部距水面 1.5 m, 典型出水速度下肩部弹体表面压强及水蒸气体积分数云图如图 5~6 所示, 图中比例尺为无量纲长度, 下文亦同。图 6 中从上至下水速度分别为 15 m/s, 20 m/s, 25 m/s 和 30 m/s。

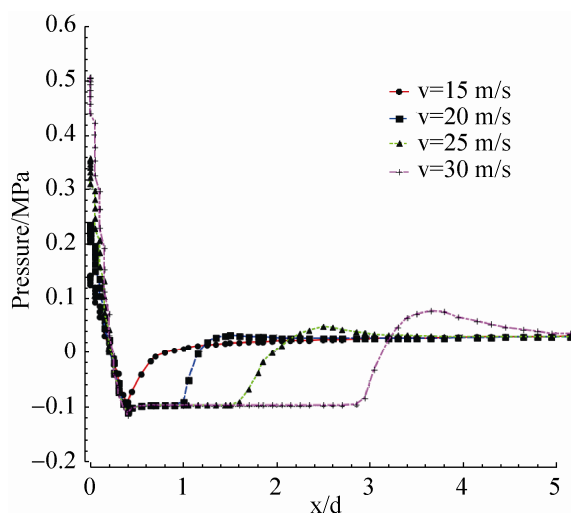


图 5 肩部弹体表面压强

由结果可知, 导弹出水速度对于肩空泡长度、外形及肩部弹体表面压强均有显著影响。由式(5)

可知, v_∞ 的增加显著降低了流场空化数, 使得空泡长度显著增加。在 15 m/s~30 m/s 范围内, 肩空泡长度和厚度随出水速度增加近似呈线性增长。肩空泡无量纲长度每 5 m/s 增加约 1, 无量纲厚度每 5 m/s 增加约 0.1。如图 6 所示, 空化程度的加强使得空泡外形发生显著改变。边界层内流体的速度梯度使空泡呈现锥形截面, 弹体绕流经过空泡后重新附体从而在空泡后部形成回射流区域, 区域内流动将向弹体表面偏斜, 使得空泡临近的下游弹体表面压强局部升高。由于空泡厚度随出水速度增大而增加, 因此加重了回射流强度, 从图 5 计算结果来看, 30 m/s 出水时空泡后回射流区内压强比 20 m/s 提高了 33.8%。

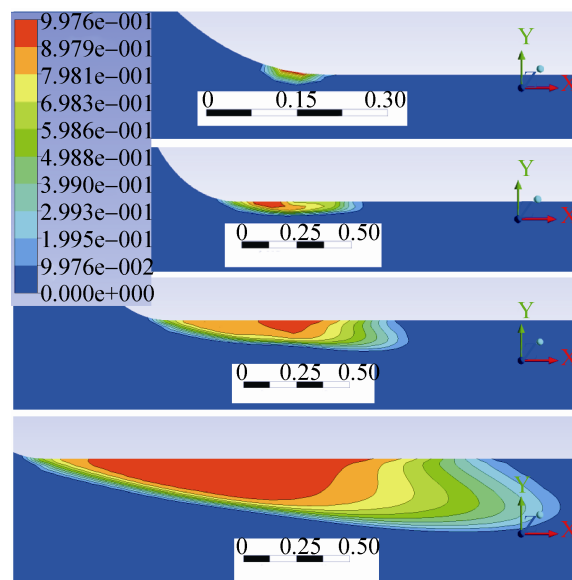


图 6 肩空泡横截面水蒸气体积分数云图

图 7 从上至下所示分别为出水速度 20 m/s, 25 m/s 和 30 m/s 时突起物表面水蒸气体积分数云图。从突起物的空化情况来看, 由于突起物 A 的尺寸较小, 使得突起物 A 引起的临近弹体表面压强降低不显著, 因而并未产生空化现象。而突起物 B 的尺寸较大, 对临近弹体表面压强的降低作用较为显著, 出水速度 25 m/s 时, 突起物前部空化初生, 空化部分长度为 0.1。此后随着出水速度的增加, 突起物空化逐步向后缘扩展。30 m/s 时, 突起

物表面空化长度扩大至 0.25。同时,突起物的存在使其周边流动受到影响,进而诱导临近弹体发生空化现象。由图 7 可知,导弹速度增加至 30 m/s 时,突起物诱导的侧面弹体空化区长度约为 0.2。

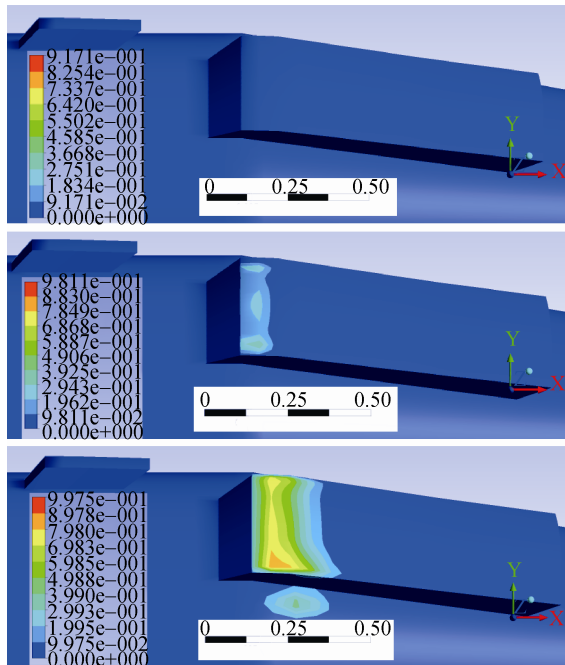


图 7 突起物水蒸气体积分数云图

图 8 所示为舵面前缘位于水下 1 m 时, 30 m/s 出水速度下舵面水蒸气体积分数云图。小攻角 ($\alpha \leq 3^\circ$) 条件下, 由于导弹舵面厚度较小, 因此 30 m/s 出水时舵面当地空化数仍可达到 0.5 以上, 是头肩部空化数的 3 倍以上。因此, 小攻角出水时舵面始终不产生空化, 舵面空化在 30 m/s 以下对速度变化呈现出敏感特性。

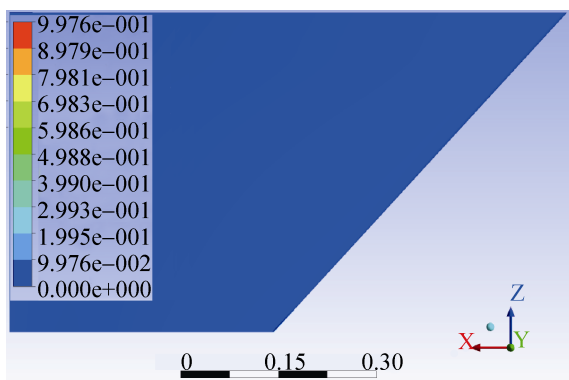


图 8 舵面水蒸气体积分数云图

4.3 典型攻角下空化流数值计算

取弹体头部距水面 1.5 m, 出水速度为 20 m/s, 对典型攻角下导弹出水空化流进行计算。其中肩空泡外形随攻角的变化如图 9 所示, 图中下方为迎水面, 下方为背水面, 分图 1~5 分别为攻角 3° , 5° , 10° , 15° 和 20° 时的计算结果。

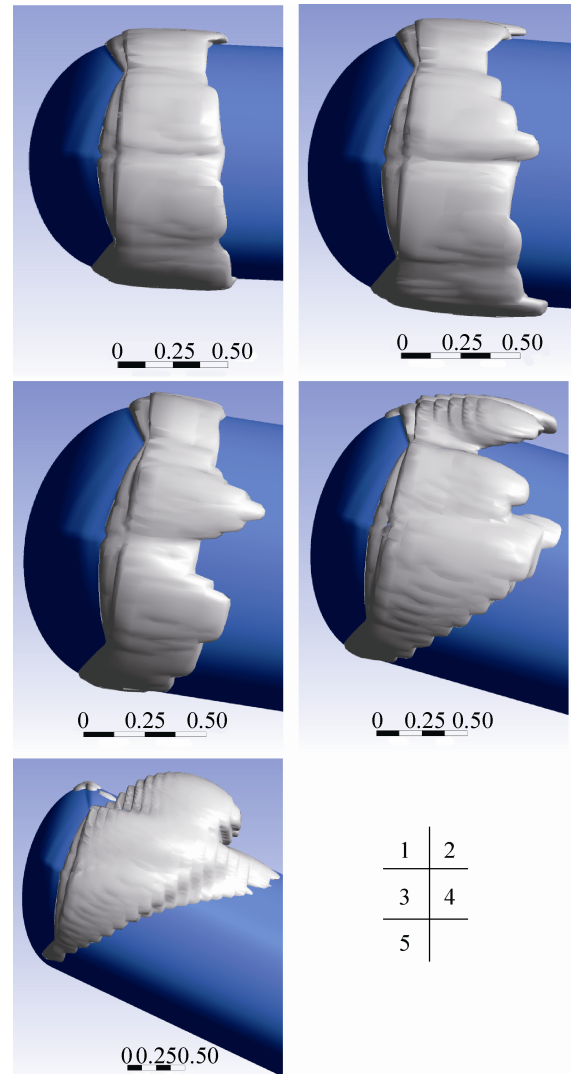


图 9 肩空泡外形图

由以上计算结果, 导弹有攻角出水时, 头部驻点向迎水面移动, 导致迎水面低压区缩小, 空化程度逐步降低。背水面空化程度增强, 空泡厚度增加, 并随攻角增大逐步产生脱体趋势。攻角 $\alpha \leq 5^\circ$ 时, 迎水面与背水面空化的不对称性不显著, 此时迎水面空泡受到来流压缩而厚度减小, 背水面空泡尾部

轻微脱离弹体。随着攻角的继续增大, 肩部空化的不对称性迅速增强, $\alpha = 10^\circ$ 时迎水面空泡在导弹纵对称面处断裂, 背水面空化区厚度迅速增加, 20° 攻角出水时背水面空泡无量纲厚度增加为 0.75, 比 15° 时增加近 1 倍。由于空泡的增厚, 背水面回射流强度升高, 使得回射流区压强升高。同时, 背水面空泡的剧烈脱落也使得肩空泡不再沿弹体表面方向生长。在上述因素的共同作用下, 肩部弹体表面空化长度的最大值出现在导弹背水面的侧面部分。

图 10 从上至下分别为 5° , 10° 和 20° 攻角时的舵面水蒸气体积分数云图。

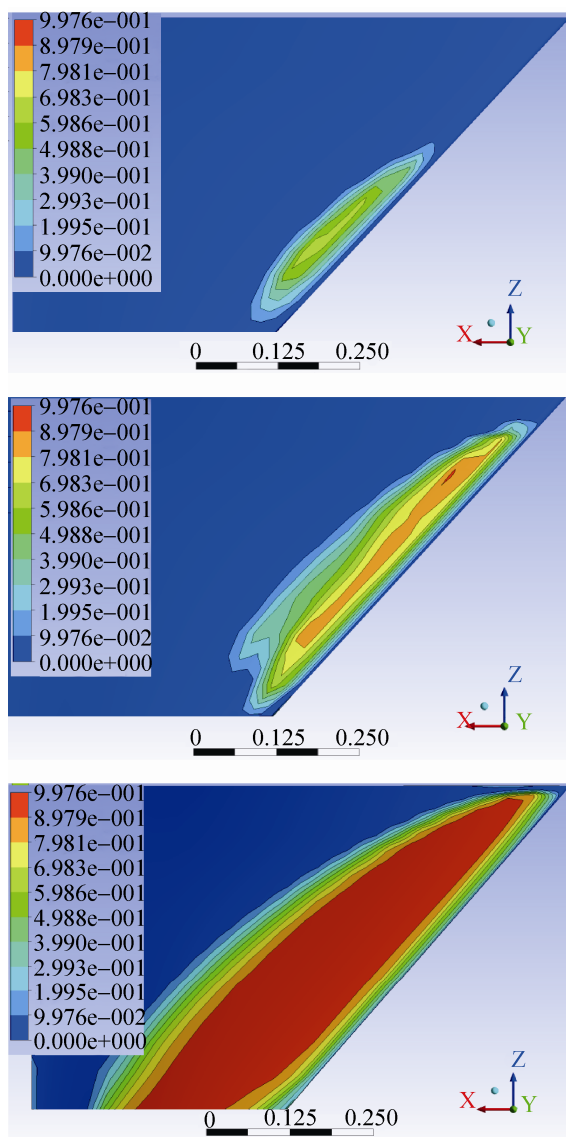


图 10 舵面水蒸气体积分数云图

如图 10 所示, 舵面空化对攻角的变化表现出高度敏感性。 5° 攻角时舵面空化首先由舵梢前缘处初生, 并迅速随攻角增大向舵面后缘扩大。典型攻角下舵空泡核心处水蒸气体积分数及舵空化面积如表 1 所示。

表 1 舵空泡核心水蒸气体积分数及空化面积

攻角 $/\circ$	空泡核心蒸汽相 体积分数	空化面积占全舵 面积百分比%
3	0	0%
5	0.59	9.06%
10	0.87	20.04%
15	0.95	44.33%
20	0.99	51.99%

由以上结果, 小攻角 ($\alpha \leq 3^\circ$) 出水时, 舵面始终处于无空化状态, 此时攻角对舵面空化不产生影响。 $5^\circ \leq \alpha \leq 15^\circ$ 时, 舵表面空化面积随攻角增大近似呈指数扩大, 在此区间内, 攻角每增加 5° , 舵空化面积扩大约 1 倍, 空泡核心处水蒸气体积分数也随空泡的扩大而迅速增加, 随着攻角的继续增大, $\alpha = 20^\circ$ 时舵空化面积扩大至全舵面积的 50% 以上。综上所述, 为保证导弹的操纵性在出水过程中始终保持稳定, 导弹舵面的合成攻角应小于 5° 。

图 11 为 20° 攻角下突起物表面水蒸气体积分数云图。

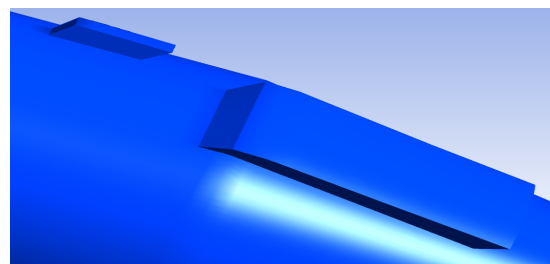


图 11 20° 攻角下突起物水蒸气体积分数

从攻角对突起物空化的影响来看, 由于突起物的尺寸相对较小, 因此 $\alpha \leq 20^\circ$ 时, 突起物表面压强始终大于水的饱和蒸汽压, 突起物处于无空化状态, 此时攻角的变化对突起物空化不产生显著影响。

5 结论

本文针对复杂外形导弹出水空化流,提出了一种基于 Zwart-Gerber-Belamri 空化模型,利用动网格及复合网格技术的数值计算方法,并对空泡演化过程及影响因素进行研究。

从空化的生成及演化过程来看,出水过程初期,空化数减小引起的空泡增长在空泡演化中起主要作用。空泡扩大后,空泡的脱落及振荡将对其演化过程产生重要影响。

从出水速度对空化流的影响来看,导弹出水速度的增加对肩空化的增强最为显著,其次分别为突起物空化和舵面空化。同时,出水速度增加导致肩空泡后回射流强度显著增加,突起物诱导临近弹体空化的能力增强。

从出水攻角对空化流的影响来看,攻角对舵面空化的影响最为显著,其次为肩空化及突起物空化。 $\alpha \leq 5^\circ$ 时肩空泡的非对称性不显著,舵空化面积缓慢增长。 $\alpha \geq 10^\circ$ 时肩空泡非对称性迅速提升,舵空化面积迅速提升,在 20° 攻角时可达到全舵面积的 50% 以上。因此,为保证导弹良好的动力学特性,出水攻角应确保在 5° 以下。

参考文献:

- [1] Michael P Kinzel, Jules W Lindau. Advancement and Application of Multi-Phase CFD Modeling to High Speed Supercavitating Flows [R]// ADA588597, 2013.

USA: ADA, 2013.

- [2] 魏海鹏, 符松. 不同多相流模型在航行体出水流场数值模拟中的应用 [J]. 振动与冲击, 2015, 34(4): 48-52.
- [3] 王一伟, 黄晨光, 杜特专, 等. 航行体有攻角出水全过程数值模拟 [J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2011, 26(1): 48-57.
- [4] 王一伟, 黄晨光, 杜特专, 等. 航行体垂直出水载荷与空泡溃灭机理分析 [J]. 力学学报, 2012, 44(1): 39-48.
- [5] 魏海鹏, 郭凤美, 权晓波. 潜射导弹表面空化特性研究 [J]. 宇航学报, 2007, 28(6): 1506-1509.
- [6] Zhi Shang. Numerical investigations of supercavitation around blunt bodies of submarine shape [J]. Applied Mathematical Modelling (S0307-904X), 2013, 37: 8836-8845.
- [7] 尤天庆, 张嘉钟, 王聪, 等. 航行体出水过程头部流场载荷特性分析 [J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(5): 610-614.
- [8] 张露颖, 符松. 钝体绕流空化的数值研究 [J]. 工程力学, 2009, 26(12): 46-51.
- [9] 陈超倩, 曹伟, 王聪, 等. 考虑空化作用的潜射航行体弹道仿真 [J]. 工程力学, 2014, 31(10): 242-247.
- [10] Ehsan Samiei, Mehrzad Shamsa, Reza Ebrahimi. A novel numerical scheme for the investigation of surface tension effects on growth and collapse stages of cavitation bubbles [J]. European Journal of Mechanics B/Fluids (S0997-7546), 2011, 30: 41-50.
- [11] P J Zwart, A G Gerber, T Belamri. A Two-Phase Flow Model for Predicting Cavitation Dynamics [C]// Fifth International Conference on Multiphase Flow, Yokohama, Japan: ICMF, 2004: 152-162.