

潜射导弹出水过程空化流数值计算*

张重先,李向林,刘玉秋
(中国航天科工二院,北京 100832)

摘要:运用 Zwart-Gerber-Belamri 空化模型,采用动网格和复合网格技术,提出复杂外形潜射导弹出水过程中空化流数值计算方法。对头肩部、舵面及突起物的空化生成、演化及影响因素进行分析。仿真结果表明:出水过程初期空化数降低使附体空泡迅速扩大,随后对空泡脱落与振荡的影响将更为显著;肩部以 15 m/s 的速度出水时产生空化并随速度上升而迅速增长,5°~10°攻角时肩空化非对称性显现;舵面空化受出水速度影响较小,攻角小于等于 5°时空化面积小于全舵面积的 10%,但攻角大于 5°后空化面积迅速增长至 50% 以上;减小突起物尺寸有利于避免空化产生,突起物空化受攻角影响较小,但在高速下可诱导临近弹体产生空化。

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 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2016)03-160-07

Numerical investigation of water-exit cavitation flow of submarine-launched missile

ZHANG Chongxian, LI Xianglin, LIU Yuqiu
(The Second Academy of CASIC, Beijing 100832, China)

Abstract: Based on Zwart-Gerber-Belamri cavitation model, a numerical calculation method of cavity flow of water-exit missile with complex configuration was proposed, in which the technology of dynamic mesh and composite mesh was used. Cavitation formation, evolution and influence of shoulder, rudder and protuberance of water-exit missile were analyzed. The simulation results acclaim that in the beginning of water-exit course, body-attached bubble quickly grows due to reduction of cavitation number. After that, the effect of bubble break-off and oscillation becomes more obvious. The cavitation of shoulder firstly appears at the water-exit speed of 15 m/s. And it grows quickly with water-exit speed. The dissymmetry of shoulder cavitation becomes obvious in the attack angle of 5°~10°. The cavitation of rudder is hardly influenced by water-exit speed. The proportion of cavitation area of rudder is less than 10% when the attack angle is less than 5°, and rapidly increases to 50% when the attack angle beyond 5°. Reduction of protuberance size is beneficial to cavitation avoidance. The influence of the attack angle on protuberance cavitation is unapparent. Protuberance can induce the cavitation on nearby missile body at high speed.

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

相比于其他类型的导弹,出水过程是潜射导弹所特有的运动过程。与传统水下航行体,如潜艇或无人水下航行器等相比,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。

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,发展出了基于流体体积函数、Mixture 等多种多相流模型的数值仿真方法^[1-4]。王一伟等^[5-6]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。权晓波等^[7]对空化数 0.3~0.4 情况下不同攻角出水的导弹空化特性进行了数值计算,结果表明攻角的增大会增加导弹空化的不对称性,空化数的减小将加重弹体空化及空化的不对称性。魏海鹏等^[8]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

* 收稿日期:2015-12-08

基金项目:国防预研基金资助项目(9140A13030512HT20042)

作者简介:张重先(1988—),男,辽宁锦州人,博士研究生,E-mail:dukebeb@163.com;

李向林(通信作者),男,研究员,博士,博士生导师,E-mail:lxl-700468@sina.com

影响。Shang^[9]采用流体体积函数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。尤天庆等^[10]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。张露颖等^[11]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。从研究现状来看,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 数值计算模型

1.1 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。由于导弹出水过程的空化流场中同时存在空气、液态水和水蒸气三种介质,采用 Mixture 模型对多相流进行数值模拟。流场连续性方程为:

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

不考虑导弹出水过程中的热传导及流体可压缩性,则能量方程为:

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

其中: $a_k, \rho_k, \mathbf{v}_k, h_k$ 分别为第 k 个组分的体积分数、密度、速度和焓。多相流的动量方程^[12]为:

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

其中: $\rho_m, \mathbf{v}_m, \mu_m$ 分别为混合物密度、速度和黏性系数。多相流质量输运方程为:

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

对于蒸气相而言, \dot{m}_+ 为蒸发率, \dot{m}_- 为凝结率;对于空气而言, $\dot{m}_+ - \dot{m}_- = 0$ 。

1.2 空化模型

潜射导弹出水过程中,空泡的产生与形态改变均是由惯性控制的空泡动力学过程。即由于弹体局部压强低于水的饱和蒸气压 p_v ,使局部产生汽化,同时水中原有气核生长,两者共同作用产生空泡。Zwart 等^[13]基于 Rayleigh-Plesset 空泡动力学方程,得到 Zwart-Gerber-Belamri 空化模型。则蒸发率与凝结率分别为:

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

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

其中: a_n 为水中原有气核的体积分数; a_v, ρ_v 为蒸气相体积分数和密度; ρ_l 为液态水密度; R 为空泡半径; F_+, F_- 分别为蒸发率系数和冷凝率系数,一般由经验确定,取 $F_+ = 50, F_- = 0.001$ 。

1.3 湍流模型

潜射导弹出水速度较大,流场变化剧烈,因而采用 RNG $k - \varepsilon$ 湍流模型求解湍动能及其耗散的输运方程,对不可压流体,湍动能输运方程^[14]为:

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

其中: a_k 为湍动能对应的普朗特数的倒数; μ 为黏性系数; G_k, G_b 分别为速度梯度及浮力引起的湍动能增量。

湍动能耗散方程^[14]为:

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

其中: a_ε 分别为湍动能耗散率对应的普朗特数的倒数; $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}$ 分别为模型的经验修正常数。

1.4 复合网格划分及动网格技术

潜射导弹出水速度快,流场非定常性较强,因而采用动网格技术跟踪导弹出水运动,并利用复合网格以避免动网格更新过程中产生负网格。导弹出水过程流场的网格划分如图 1 所示。

图 1 中 A, D 面所在的上部区域为空气, B, C, E 面所在的下部区域为水, C 面包含于 B, E 面所组成的区域内,弹体包含在 C 面所围成的区域内。水与空气交界面处(图 1 中上部区域和下部区域交界处)网格加密,以准确计算水、气交界面。为保证弹体空化流场的计算精度, C 面所围成的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;其余区域为静止网格,为避免

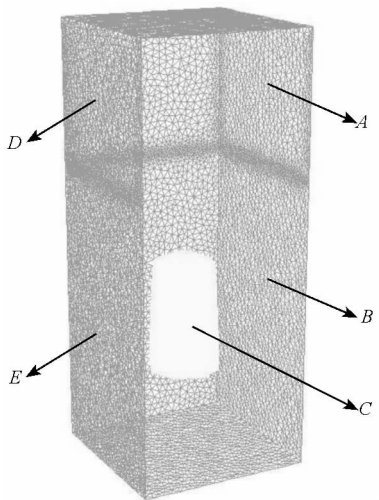


图 1 计算区域网格划分

Fig. 1 Mesh partition of calculation area

动网格更新时负网格的产生,采用非结构网格划分。

由于潜射导弹出水过程位移远大于网格尺寸,并且动网格区域运动方向与动网格交界面的相对几何关系复杂,因而动网格更新模型采用弹簧光滑模型和局部重划模型,以提高网格更新质量。

2 数值计算方法及有效性验证

如图 1 所示,不失一般性,设海流及波浪方向由 D, E 面流向 A, B 面,则 D, E 面为速度入口, A, B 面为压力出口, B 面利用用户自定义函数定义压强随水深的变化。 C 面为混合网格及动网格交界面,弹体为壁面边界条件。

采用 SIMPLE 格式压强 - 速度耦合算法对潜射导弹出水过程的空化流场进行求解。压强项采用 PISO 离散格式,多项流体积分数项采用 QUICK 离散格式,动量项、湍动能项及湍流耗散项均采用二阶迎风格式。

为验证上述模型及数值计算方法的有效性,对高速流动下的无限长半球头的空化流场进行数值计算。篇幅所限,只列出空化数 $\sigma = 0.3$ 时半球头表面压强系数分布,并与文献[11]中半球头的空化流实验结果进行对比。其中半球头直径为 0.2 m ,实验数据采用水洞中半球头表面压强测量数据,通过调节水洞入口水流速度,使流场空化数达到 0.3 ,验证结果如图 2 所示。

由图 2 可知,基于以上计算模型和方法的数值模拟结果与实验数据较为吻合,取得良好效果。由于上述算例中流场空化数与潜射导弹出水时流场空化数相近,实验条件与导弹出水工况相似,且

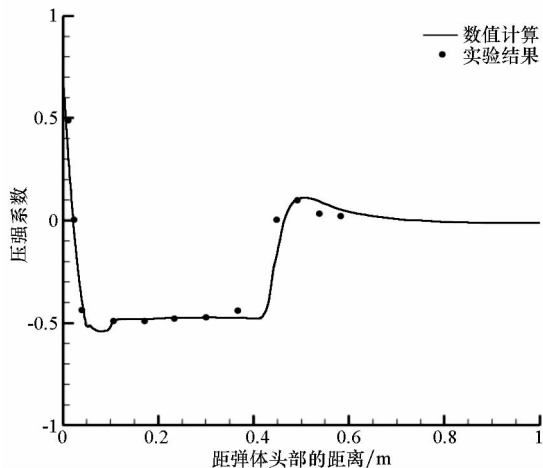


图 2 半球头空化流表面压强系数

Fig. 2 Surface pressure coefficient of cavitation flow of hemisphere head

潜射导弹采用钝头外形,长细比较大,与实验采用的半球头形状相近,因此以上模型及计算方法可以适用于潜射导弹出水空化流计算。

3 数值计算结果及分析

潜射导弹绕流中的低压区主要在头肩部、舵面末端及弹体突起物。因此,弹体表面空化主要集中于以上区域。同时,潜射导弹出水过程中的水深变化剧烈,空化流的非定常性十分显著。对潜射导弹头部从水下 7.5 m 开始到完全出水的过程中,头部、弹身突起物及舵面的非定常空化流场进行数值计算研究,并分析导弹出水速度和攻角对肩空泡、舵空泡及突起物空泡的生成及演化的影响。

3.1 肩部空化流数值计算

出水速度为 20 m/s 的条件下,沿导弹纵对称面截取导弹出水过程肩空泡生成及演化过程如图 3 所示,其中横坐标为以导弹弹径为基准,距离导弹头部的无量纲距离,下文亦同。

由以上计算结果可知,出水过程最开始阶段,随着导弹垂直出水运动,静水压逐渐减小,空化数随之降低,逐步达到肩空化生成条件,肩空泡开始形成,但此时肩部空泡长度及水蒸气体积分数均处于较低水平,空化数变化在空泡演化过程中的影响较为突出,此阶段空泡迅速生长膨胀,空泡内水蒸气体积分数在 0.2 s 内迅速由 0.6 增加至 0.75 ,肩部空泡长度增加 1 倍。 $t = 0.3 \text{ s}$ 时,导弹头部临近水面,随着空泡体积的增大、拉长,空泡后部开始出现部分脱落,此时空泡的振荡性及不稳定性在空泡演化中的作用更加显著,空泡膨胀与扩张速度减缓,弹体空泡内蒸气相体积分数

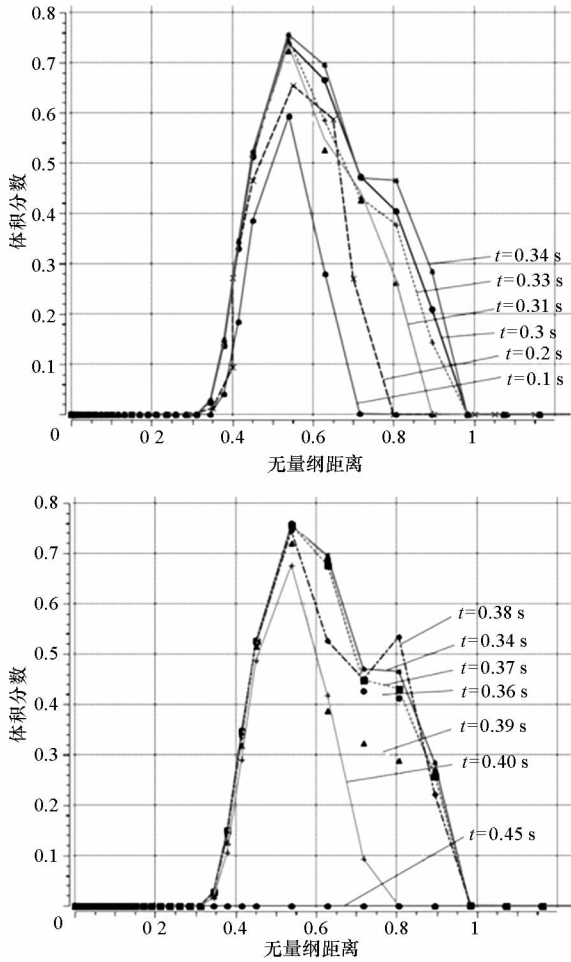


图3 出水过程弹体水蒸气体积分数

Fig.3 Volume fraction of vapor in water-exit course

以约 40 ms 为周期振荡。 $t = 0.38$ s 时,导弹头部开始穿越水、气界面,由于介质种类与密度突变,导弹肩部低压条件逐步消失,同时空泡周围流体介质由水变为空气使得蒸发量下降,蒸气相体积分数从空泡前部开始下降,空泡逐步缩小,并随弹体出水而最终溃灭。

弹体头部距水面 1.5 m 时不同出水速度下潜射导弹肩空泡变化如图 4、图 5 所示,图 5 中比例尺为无量纲长度,下文亦同,其中图 5 从上至下出水速度分别为 15 m/s, 20 m/s, 25 m/s 和 30 m/s。由结果可知,导弹出水速度对于肩空泡形态及肩部空化面积的影响较为显著。出水速度增大导致导弹出水过程空化数降低,弹身低压区域扩大,空泡长度显著增加,15 m/s 下导弹肩空泡初生,此后至 30 m/s 出水速度每增加 5 m/s,肩空泡无量纲长度增加约 1,无量纲厚度增加约 0.1。空泡变厚导致高速出水时弹体边界层内流体介质的速度梯度使空泡变形更为严重,弹体绕流经过空泡后重新附体并形成回流,从而对空泡下游的弹体形成压力冲击,导致空泡下游弹体载荷局部升高。

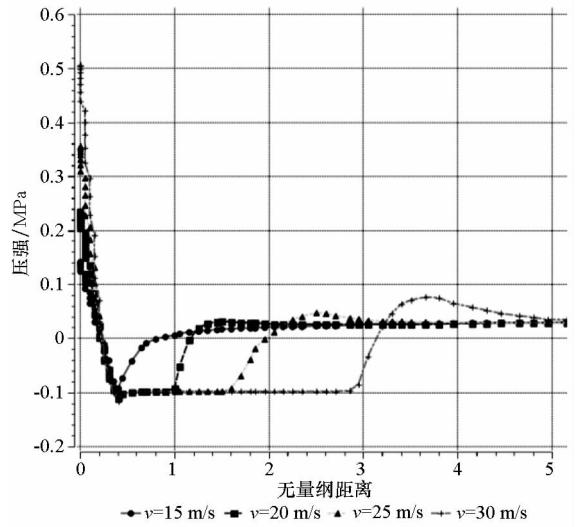


图4 导弹弹体压强分布

Fig.4 Pressure distributing of missile's body

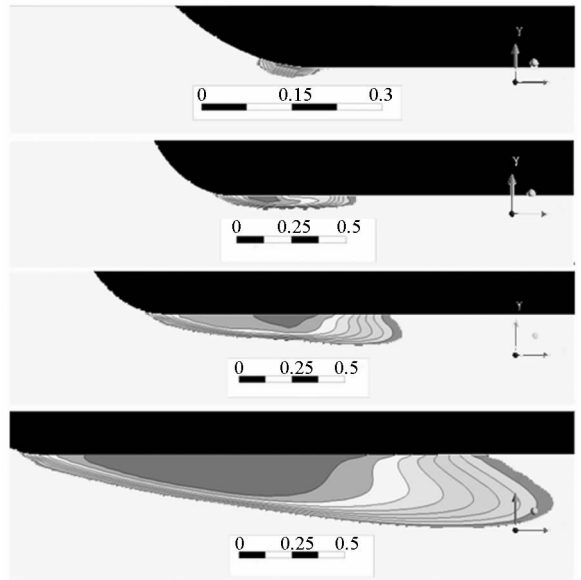


图5 导弹出水肩部水蒸气体积分数云图

Fig.5 Nephogram of volume fraction of vapor of missile's shoulder in water-exit course

出水速度的提高加重了回流强度,从而提高了空泡后弹体局部压强,30 m/s 出水时空泡后局部压强比 20 m/s 提高了 33.8%。

$t = 0.3$ s 时典型攻角下导弹出水的肩空化流计算结果如图 6 所示,图 6 中导弹下部为迎水面,上部为背水面。潜射导弹有攻角出水导致导弹空化流产生不对称性。迎水面低压区后移,空泡受到来流挤压,背水面空泡厚度增加,并随攻角增大逐步产生脱体趋势。在 5° 攻角以下,肩空泡的非对称性不显著,迎水面空泡呈完全附着状态,背水面空泡尾部轻微脱离弹体。随攻角增大,驻点向迎水面空泡移动,攻角达到 10° 时迎水面空泡在

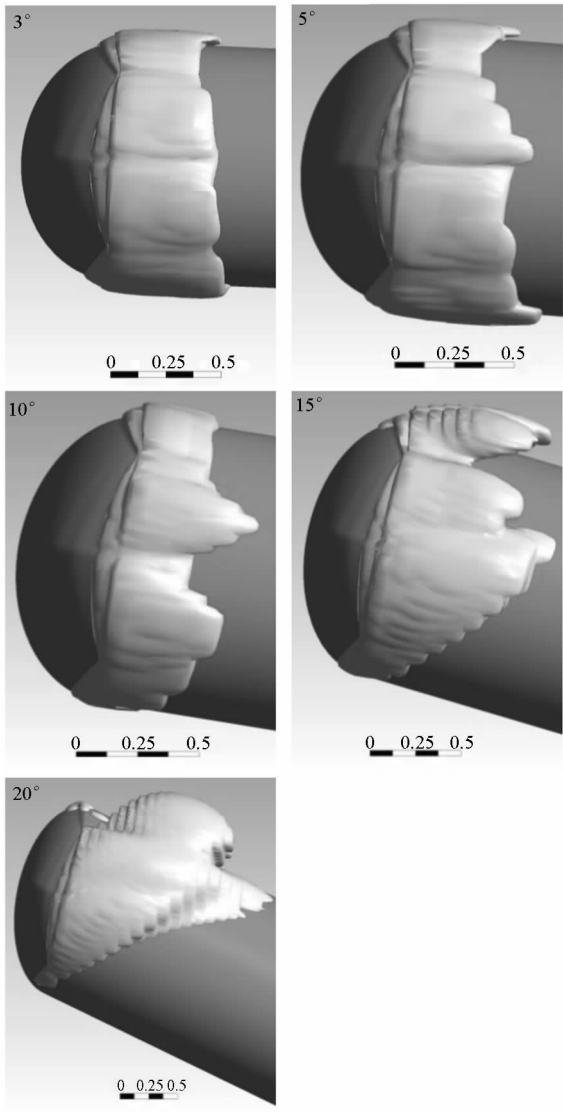


图 6 导弹有攻角出水空泡外形图

Fig. 6 Outline of bubble in water-exit course with attack angle

导弹纵对称面处断裂,空化非对称性显著增加。在较大攻角下,导弹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约为 0.75,比 15°时增加近 1 倍。由于攻角较大,背水面空泡在低压区生成后无法附着于弹体,从而迅速从弹体脱落溃灭,同时,由于空泡后回射流升压作用的影响,弹体背水面在空泡后的局部压强升高,以上因素共同导致弹体肩部表面空化长度的最大值出现在导弹背水面的侧面部分。

3.2 舵空化流数值计算

导弹零攻角出水时,以 30 m/s 出水速度为例,舵面当地空化数约为 0.5,相对于头肩部的 0.18 而言较高。图 7 列出导弹舵面前缘距水面 1 m 时,30 m/s 出水速度下导弹舵面水蒸气体积分数云图,篇幅所限只截取一个舵面。由图 7 可

知,舵面低压区并未具备形成空化的低压条件,因此零攻角出水时,在 30 m/s 以下舵面空化流表现出速度不敏感特性。

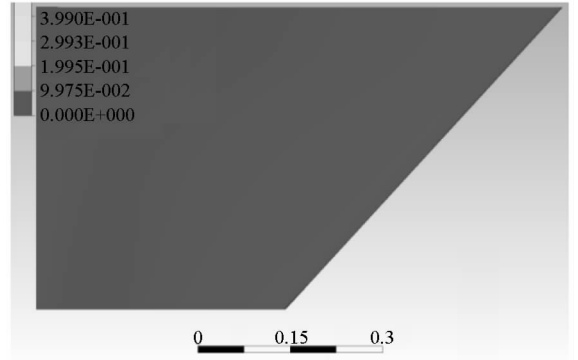


图 7 30 m/s 出水速度下舵面水蒸气体积分数云图

Fig. 7 Nephogram of volume fraction of vapor of missile's rudder at water-exit speed of 30 m/s

对于不同攻角下的潜射导弹出水情况,舵面空化表现出高度敏感性。图 8 所示为出水速度 20 m/s, $t = 0.3$ s 时导弹背水面舵面空化流蒸气相体积分数云图,其中从上至下攻角分别为 5°, 10°和 20°。由图 8 可知,随导弹出水攻角增大,舵面空化首先由舵梢前缘处开始生成并迅速向后缘发展扩大。附着空泡核心处蒸气相体积分数及舵面空化面积见表 1。

表 1 典型攻角下舵面空化状况

Tab. 1 Cavitation status of rudder in typical attack angle

攻角	空泡核心蒸气相体积分数	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

由计算结果可知, $\alpha = 3^\circ$ 时舵面空化面积为 0, $\alpha < 3^\circ$ 时舵面合成攻角的改变不影响舵面空化面积。从 $\alpha = 5^\circ$ 开始舵面空化随攻角增大迅速发展,空泡内蒸气相体积分数迅速增加,在 5°至 15°攻角范围内导弹舵面空化面积受攻角影响极大,20°时舵面空化面积发展至全舵面积的 50% 以上。因此,为保证导弹具有良好的操纵性,应保证导弹出水时操纵舵的合成攻角小于 5°。

3.3 突起物空化流数值计算

突起物是弹身表面较为常见的结构,主要用

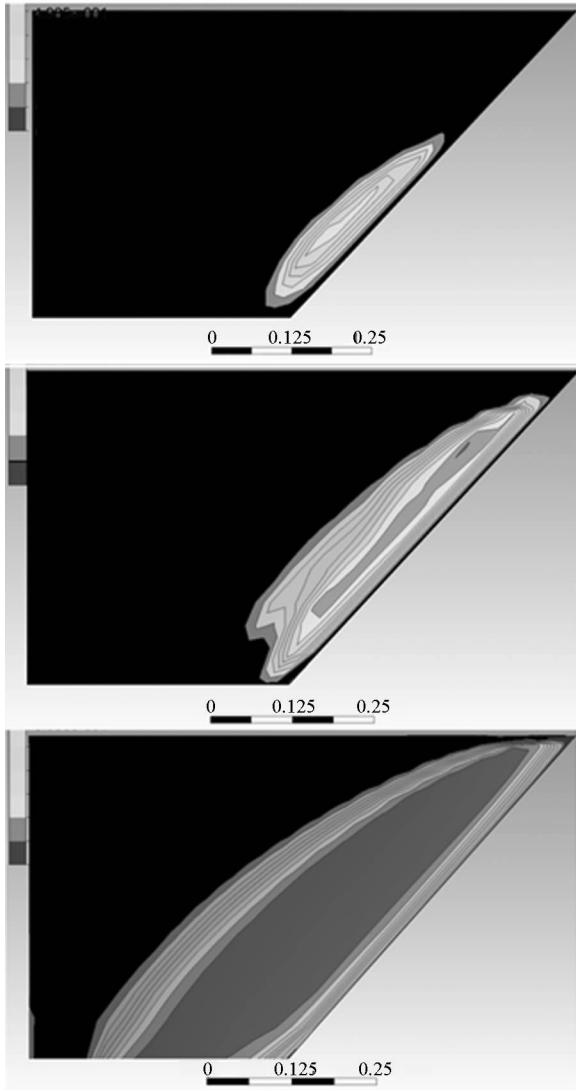


图8 典型攻角时舵面水蒸气体积分数云图
Fig.8 Nephogram of volume fraction of vapor of missile's rudder in typical attack angle

于满足电缆布线等结构要求。突起物的存在将形成低压区,从而导致弹身空化的产生。

导弹弹身突起物如图9所示。参照工程中常见的电缆罩位置及尺寸,突起物A,B前缘距导弹头部的无量纲距离分别为15.4和16,无量纲宽度分别为0.12和0.47,无量纲高度分别为0.11和0.082,无量纲长度分别为0.3和1。导弹有攻角出水时,为对空化程度最大时的突起物空化进行研究,突起物设置于导弹的背水面。

弹体头部距水面1.5 m时,典型出水速度下突起物空化的数值计算结果如图10所示,图10中从上至下出水速度分别为20 m/s,25 m/s和30 m/s。由计算结果可知,长度和宽度均较小的A突起物并未产生空化现象,而随速度增加B突起物空化从突起物前部开始逐步扩展。在25 m/s出水速度下突起物前部弹体表面产生空化,空化

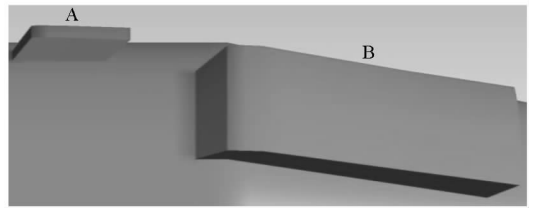


图9 弹身突起物示意图

Fig.9 Figuration of protuberance on missile's body

部分无量纲长度为0.1,30 m/s时,突起物前部空化长度发展至0.25。同时受突起物影响,其周边弹体绕流发生变化,表面形成低压区域,从而诱导弹体发生空化,30 m/s出水时,突起物侧面临近弹体受突起物诱导形成空化,该诱导空化区的无量纲长度为0.2。

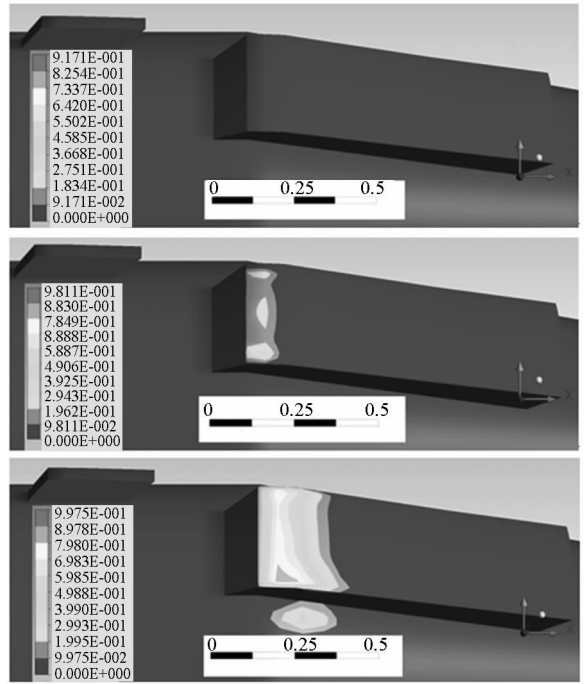


图10 典型出水速度下突起物水蒸气体积分数云图
Fig.10 Nephogram of volume fraction of vapor of protuberance at typical water-exit speed

从攻角对突起物的影响来看,如图11所示截取出水速度20 m/s时,20°攻角下弹身突起物水蒸气体积分数云图。由于突起物尺寸及高度相对较小,在20°出水攻角以下,突起物均未产生空化现象,此时突起物空化对导弹出水攻角变化表现出不敏感的特性。

4 结论

基于Mixture多相流模型,对复杂外形潜射导弹出水过程空化流进行数值计算,研究了复杂外形导弹出水过程空泡的生长和演化规律,以及速度、

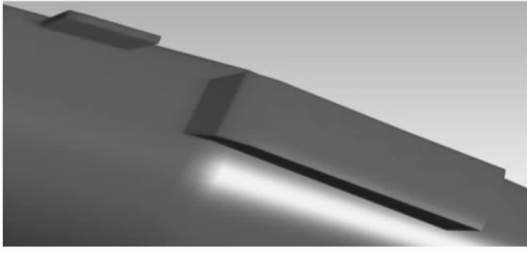


图 11 20°攻角下突起物水蒸气体积分数云图
Fig. 11 Nephogram of volume fraction of vapor of protuberance in 20° attack angle

攻角对导弹出水空化流的影响:

1) 从导弹各部件产生空化的难易程度上看,小攻角出水时,导弹肩部最易产生空化,突起物其次,舵面不易产生空化。

2) 从肩部空化来看,肩空泡尺寸较小时,空化数对肩空泡的演化起主要作用。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。随着出水速度增加,肩空泡长度及厚度呈近似线性增长,肩空泡后回射流强度显著增强。小攻角时肩空泡非对称性不显著,较大攻角下肩空泡非对称性迅速提升,肩部弹身空化长度的最大值出现在背水面的侧面部分。

3) 从舵面空化来看,小攻角时舵空化对速度呈现不敏感特性。有攻角出水时,舵空化随攻角增大而迅速提升,为保证导弹具有良好的舵效,导弹出水攻角应确保在 5° 以下。

4) 从突起物空化来看,减小突起物尺寸有利于避免突起物空化的产生。由于突起物可诱导临近弹体空化,因此为减小弹体的空化程度,应避免将突起物置于弹体低压区附近。

参考文献 (References)

[1] 陈鑫, 鲁传敬, 李杰, 等. VOF 和 Mixture 多相流模型在空泡流模拟中的应用 [C]// 第九届全国水动力学学术会议暨第二十二届全国水动力学研讨会, 2009.
CHEN Xin, LU Chuanjing, LI Jie, et al. Application in simulating cavitating flows by using VOF and Mixture multiphase models [C]// Proceedings of 9th National Conference on Hydrodynamics & 22nd National Proseminar on Hydrodynamics, 2009. (in Chinese)

[2] Salvador G P, Frankel S H. Numerical modeling of cavitation using fluent: validation and parametric studies [C]// Proceedings of 34th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, 2004.

[3] Lindau J W, Kunz R F. Advancement and application of multiphase CFD modeling to high speed supercavitating flows: ADA588597 [R]. 2013.

[4] Chahine G L. Numerical simulation of bubble flow interactions [J]. Journal of Hydrodynamics, 2009, 21 (3): 316 - 332.

[5] 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.
WANG Yiwei, HUANG Chenguang, DU Tezhuan, et al. Numerical simulation of a submerged body exiting from water with an attack angle [J]. Journal of Hydrodynamics (Ser. A), 2011, 26 (1): 48 - 57. (in Chinese)

[6] 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.
WANG Yiwei, HUANG Chenguang, DU Tezhuan, et al. Mechanism analysis about cavitation collapse load of underwater vehicles in a vertical launching process [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2012, 44 (1): 39 - 48. (in Chinese)

[7] 权晓波, 魏海鹏, 孔德才, 等. 潜射导弹大攻角空化流动特性计算研究 [J]. 宇航学报, 2008, 29 (6): 1701 - 1705.
QUAN Xiaobo, WEI Haipeng, KONG Decai, et al. Numerical simulation on cavitation of submarine launched missile's surface at large angles of attack [J]. Journal of Astronautics, 2008, 29 (6): 1701 - 1705. (in Chinese)

[8] 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.
WEI Haipeng, GUO Fengmei, QUAN Xiaobo. Research on cavitation of submarine launched missile's surface [J]. Journal of Astronautics, 2007, 28 (6): 1506 - 1509. (in Chinese)

[9] Shang Z. Numerical investigations of supercavitation around blunt bodies of submarine shape [J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37 (20/21): 8836 - 8845.

[10] 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.
YOU Tianqing, ZHANG Jiazhong, WANG Cong, et al. Characteristic analysis of flow load around head during vehicles exit of water [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37 (5): 610 - 614. (in Chinese)

[11] 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.
ZHANG Luying, FU Song. Numerical study of cavitation flow around a blunt cylindrical object [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26 (12): 46 - 51. (in Chinese)

[12] Samiei E, Shams M, Ebrahimi R. 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, 2011, 30 (1): 41 - 50.

[13] Zwart P J, Gerber A G, Belamri T. A two-phase flow model for predicting cavitation dynamics [C]// Proceedings of ICMF International Conference on Multiphase Flow, 2004.

[14] Orszag S A, Yakhot V, Flannery W S, et al. Renormalization group modeling and turbulence simulations [C]// Proceedings of International Conference on Near-Wall Turbulent Flows, 1993.