

旋成体射弹倾斜入水运动仿真*

赵旭¹, 胡欣康¹, 姚蕊²

(1. 西北工业大学航空学院, 陕西西安 710072; 2. 中国航发燃气轮机有限公司, 辽宁沈阳 110000)

摘要:为了研究运动参数和弹头外形对弹体斜入水过程的影响规律,采用气液两相流体积分数和水汽空化模型,通过嵌套网格实现刚体三自由度运动学和动力学耦合,模拟了弹体以80~100 m/s速度倾斜入水开空泡阶段的运动过程。经文献实验验证,入水弹体速度与位移的误差为0~6%和-8%~0,转动角度误差为-6%~0。通过对入水速度和入水角度的多工况模拟研究,发现入水速度增大,弹体轴向冲击载荷增大,最大载荷与速度的平方呈线性关系,弹体速度非线性衰减率大;入水角增大,弹体转动角速率减小,运动稳定性强,速度衰减率不受入水角影响。与圆锥头部弹体相比,采用头部阶梯状修型后的弹体的平均速度衰减率、转动角速率和最大轴向冲击载荷分别降低到66.7%、40%和77.2%,显著提高了运动稳定性。

关键词:入水弹道;入水空泡;运动方程;CFD;非定常流动

中图分类号:O35 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1001-2486(2023)04-115-09

听语音
与作者互动
聊科研

Simulation of the oblique entry motion of convolational projectile into water

ZHAO Xu¹, HU Xinkang¹, YAO Rui²

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. AECC Gas Turbine Co., Ltd, Shenyang 110000, China)

Abstract: In order to study the influence of motion parameters and warhead shape on the oblique entry process of a projectile into water, adopting volume of fraction of gas-liquid two-phase flow and water vapor cavitation model. The three-dimensional kinematics and dynamics of the rigid body were coupled by nested grids, and the motion process of the projectile in the stage of speed 80~100 m/s tilting into water and opening cavitation process was simulated. According to the literature experiments, the prediction errors of the velocity and displacement of the underwater projectile are 0~6% and -8%~0, and the rotation angle error is -6%~0. Through the simulation study of the water entry velocity and angle of entering water under multiple working conditions, it is found that with the increase of the water entry velocity, the axial impact load of the projectile increases. The maximum load is linearly related to the square of the speed, and the nonlinear attenuation rate of the velocity is large. The larger the angle of entry, the smaller the angular rate of rotation of the projectile body, the stronger the stability of movement. But the velocity decay rate is not affected by the angle of entry. The projectile body adopted a stepped head modification, compared with the conical nose projectile, the average velocity decay rate, rotation angular rate and maximum axial impact load of the body after the head stepped modification are reduced to 66.7%, 40% and 77.2% respectively. The motion stability is improved significantly.

Keywords: water entry ballistics; water entry cavity; equation of motion; CFD; unsteady flow

入水问题广泛存在于空投鱼雷、反潜导弹和机载快速灭雷武器等军事工程应用中。弹体以某一速度和角度进入水中,入水瞬间会产生气、液、固强烈耦合作用,形成空泡或超空泡,流场出现复杂湍流和涡旋,作用在弹体上的冲击力急剧变化,导致弹体速度、姿态和运动轨迹改变,甚至引发结构断裂、连接失效和弹道失稳等现象。因此,研究弹体入水过程对于反潜武器的结构安全和弹道稳

定具有重要的研究意义^[1]。

在入水射弹的设计中,弹体几何形状、速度和入水角是决定射弹性能的关键因素。研究者通过采用头部修平、增加凹槽、头部喷气、锥型尖端、非对称头部等,设计弹体外形曲线,侧边加凹槽、增加长细比,利用尾拍增稳,弹体质心前移,提高旋转速度等方法增加弹体的稳定性,满足在特定速度和入水角条件下的设计需求^[2-3]。但由于入水

* 收稿日期:2023-03-15

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(52272380)

作者简介:赵旭(1974—),女,陕西西安人,副教授,博士,硕士生导师,E-mail:xuzhao@nwpu.edu.cn;

胡欣康(通信作者),男,江西南昌人,硕士研究生,E-mail:1219979152@qq.com

过程复杂,不同弹体运动规律随入水速度和入水角的变化尚未揭示清楚。

由于入水过程的强烈非线性、耦合性和非定常性,理论研究方法发展缓慢。而实验方法因费用昂贵、模型差异和测量参数有限,仅能提供特定条件下的规律,因此数值模拟成为研究入水问题的主要研究方法。数值方法可以摆脱结构几何外形、边界条件以及载荷情况的约束,较好地解决入水引起的飞溅、液面波动和变形,考虑结构变形的流固耦合,撞击时引起的气垫效应等解析方法无法解决的困难。在模拟方法中,流体体积方法(volume of fraction, VOF)是一种欧拉-欧拉多相流方法,是一种在固定欧拉网格下的表面跟踪方法,应用于各相不混溶的情况。各相流体共享动量方程通过相分数描述各相。VOF 方法的优点在于良好的质量守恒特性,该优势在相变问题中体现得更加明显。大量研究表明,VOF 方法的模拟结果能够很好地与实验或理论吻合,至今仍是相变模拟的重要方法之一。

VOF 方法在数值计算物体入水领域得到了广泛的应用^[4],诸多入水的重要现象如飞溅现象、空气垫效应^[5]等自由表面形状的变化得到了很好的呈现,物体运动轨迹得到了很好的追踪。Wang 等^[6]采用此方法模拟了非对称鼻型自主水下航行器(autonomous underwater vehicles, AUV)入水过程,结果与实验吻合良好。Wang 等^[7]研究卵形头部弹倾斜入水载荷的变化规律,发现初始攻角对轴向载荷影响较小,而对径向载荷影响显著,攻角较大,轨迹偏斜,攻角最终发散。Shepard 等^[8]对球体垂直入水过程进行数值模拟,研究发现入水初期运动体阻力主要源于航行体与周围流域的动量交换。Gao 等^[9]发现高速弹体入水后的速度衰减主要受弹体几何参数的影响,如头部形状和长度,而不是进入角度和速度。阻力系数也主要由头部形状决定。弹体长度和入水速度的增加降低了抛射物俯仰角的波动,使抛射物更加稳定。Akbari 等^[10]对超空泡阶梯圆柱锥弹进行了入水仿真,发现台阶的存在提高了弹丸在进入过程中的稳定性。Yu 等^[11]数值研究了非对称鼻型弹丸在不同无因次切除半径下的入水空腔演化和运动特性。结果表明,当弹丸以非对称头形入水时,空腔发生弯曲,且随着无因次切除半径的增大,空腔的膨胀和收缩速度增大,空腔的逆时针偏转角减小。袁绪龙等^[12]采用 VOF 多相流模型,建立多相流场域与弹道耦合的仿真模型,对不同工况下的航行器入水过程冲击载荷进行仿真,

研究预置舵角域入水速度对冲击系数的影响。Lu 等^[13]采用此法模拟了两个平行射弹入水过程的流动干扰和空腔结构破坏,揭示了弹间距的影响规律。

文献综述表明,不同外形的弹体在不同入水参数的条件下,其运动规律不尽相同。在入水初期的冲击载荷、空泡外形对弹体的速度、姿态和轨迹影响显著。考虑水中兵器入水实验文献较少,采用缩比的弹体入水实验丰富,因此本文也采用 VOF 方法,开展某锥型头部弹体在固定速度范围 80 ~ 100 m/s,入水角度 35° ~ 90° 的入水初步开空泡过程中的运动规律。探索入水速度、入水角度和头部修型对于弹体的速度、旋转角度和运动轨迹的影响规律。为了确保数值结果的准确性,先采用文献实验结果验证计算,再设计不同工况,模拟倾斜入水过程弹体的运动,探索在开空泡阶段的空泡外形、弹体载荷、弹体速度和转动角度的变化规律。数值模拟入水过程,仅考虑入水过程中结构体撞击水面、流动形成、开空泡以及空泡闭合初期等阶段,不考虑后期空泡全溃灭以及沾湿状态。

1 数值方法验证

本文实验验证和数值仿真均采用嵌套网格、VOF 两相流模型和 Schnerr-Sauer 水汽空化模型,考虑弹体在竖直平面内三自由度运动,采用 FLUENT 软件的非定常流动模拟、可实现 $k-\varepsilon$ 湍流模型以及耦合式求解器,计算总时间 0.4 s,步长 0.01 s,内迭代 20 次,并通过隐式求解方法,完成若干模型的入水仿真。

1.1 嵌套网格技术

嵌套网格的特点主要是调节网格中不同的“孔”,与孔相邻及其附近的网格点成为边界点,各区域独立生成,彼此之间的流体信息通过插值在重叠区边界进行耦合与匹配,重叠网格对于刚体运动以及网格大变形的耦合问题求解非常方便,各个部件区域不需要复杂的拓扑分区,降低了网格生成的难度。本文对于航行体运动过程采用嵌套网格实现,主要是使包含运动部件的区域网格与运动体一起运动,边界点进行插值匹配背景网格。

1.2 多相流模型

多相流模型分为欧拉-欧拉方法和欧拉-拉格朗日方法。VOF 模型是一种用于固定欧拉网格上的界面追踪技术,可用于两相或者两相以上

不相容的流体。共用一组动量方程,在整个计算域中追踪每个网格单元每种流体的体积分数,除对于液体-气体界面稳定或瞬态有跟踪作用外,也可用于大坝破裂后流体运动、射流破裂、大气泡在液体中的运动等计算。VOF 中有隐式和显示求解器,相比较而言,隐式可以在较大时间步长下运行,且界面的求解更稳定,但界面曲率的预测精度略低。经过测试,显示求解器在本文模型中难以收敛,因此本文采用 VOF 模型隐式求解方式。

1.3 空化模型

空化是指液体内部压力降低时,液体内部或液固交界面上蒸汽或气体空腔的形成、发展和溃灭的过程,液体中含有气核和压力降低是空化发生的必要条件。空泡按不同的外形可以分为:瞬态孤立气泡;附着空泡;空化涡。文中研究的空泡均属于附着空泡,另外按空泡所含物质不同可分为空气空泡和蒸汽空泡。本文的研究中,二者均存在。

目前空化过程常采用质量源项来表述蒸发和凝结过程,本文空化模型采用 Schnerr-Sauer 公式进行求解,该模型从气液的质量传输率发展而来,将水和蒸汽看作包含大量蒸汽泡的物质,并计算其体积分数。

1.4 湍流模型

本文采用非定常雷诺平均方法(unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes, URANS),其中湍流双方程模型求解主要有三大类: $k-\varepsilon$ 、雷诺应力和 $k-\omega$ 模型。本文采用 $k-\varepsilon$ 双方程模型,其中 $k-\varepsilon$ 模型有三种形式,分别为标准、RNG、可实现。标准的 $k-\varepsilon$ 主要是针对高雷诺数时充分发展的湍流进行求解,而对于近壁面以及强旋流或者弯曲壁面计算可能会失真,对此进行改进,RNG 以及可实现 $k-\varepsilon$ 模型应运而生,这两种方法可以更好地模拟射流和撞击,分离流和二次流,跨介质过程中会存在射流等复杂流动,因此本文选取可实现 $k-\varepsilon$ 模型。

1.5 几何模型建立

验证模型选用文献[14]中的 H 模型。弹体以 81 m/s 速度、31° 倾斜角入水,弹体外形以及入水角度如图 1 所示,具体参数见表 1。其中, L 为弹体长度, D 为直径, Φ 为锥角, V 为弹体总速度, m 为弹体质量, L_1 为锥头高度。初始状态时,速度矢量方向沿弹体的轴向, θ 为入水角度(也代表弹体倾斜角), J_x 、 J_y 、 J_z 均为转动惯量。入水计算过程中,速度矢量方向与轴线出现夹角,采用两种

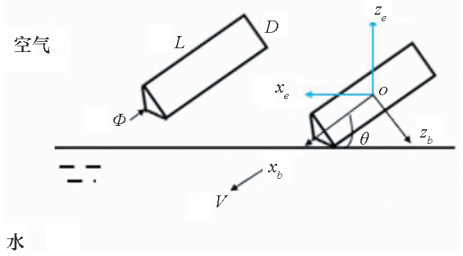


图1 弹体外形及相应坐标系

Fig. 1 Shell shape and corresponding coordinate system

坐标系,以质心 o 为原点, x_b, y_b, z_b 为弹体坐标系, x_e, y_e, z_e 为地面坐标系。

表1 入水弹体参数表^[14]

Tab. 1 Parameter table of underwater projectile body^[14]

参数	数值
L/mm	50
D/mm	8
$\Phi/(\circ)$	91
$V/(\text{m/s})$	81
$\theta/(\circ)$	31
L_1/mm	3.87
m/g	0.018 3
$J_x/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	1.454×10^{-7}
$J_y/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	3.484×10^{-6}
$J_z/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	3.484×10^{-6}
t/ms	4

在空中,当 Ma 超过 0.6 时(音速大于 200 m/s)要考虑空气压缩性。但由于水的黏性要比空气大得多,一般在结构物速度大于 700 m/s 时,跨介质过程中大的加速度可能会导致砰击压缩,此时压缩性不能忽略。针对本文研究速度,数值计算不考虑压缩性。

1.6 边界条件和计算网格

采用重叠网格,分为前景和背景 2 套网格。同时参考文献[15]对流域宽度无关性验证内容,选择合适的流域宽度能够快速计算并节省时间和资源。背景域尺寸为 $500 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$,将水面上空气高度设置为 $10L$ 。前景区域外形设置为直径 $4D$ 、长度 $2L$ 的圆柱。

研究模型为轴对称外形,采用半模计算。模型和边界条件如图 2 所示。网格总数为 428 万。图中 L_2 为弹体头部与水面间距,根据不同计算条件设置不同数值,方便保存数据。弹体局部网格

图如图 3 所示,由于前景与背景网格相互独立,不同倾斜工况旋转前景网格即可。

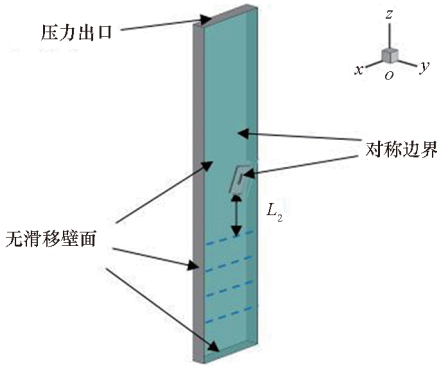
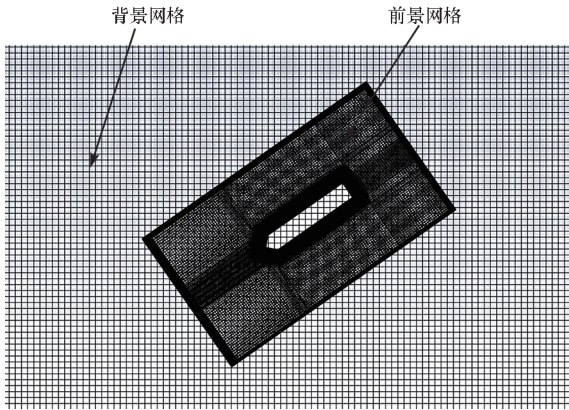


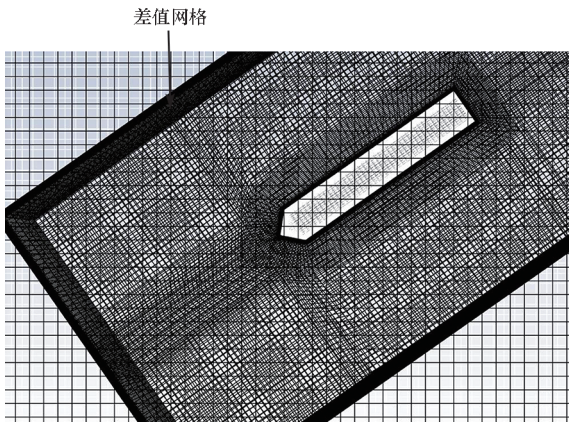
图 2 弹体入水模型计算区域

Fig. 2 Calculation area of projectile entry model



(a) 初始位置的前景和背景网格

(a) Foreground and background grids for initial positions



(b) 嵌套网格插值后状态

(b) Nested grid interpolation state

图 3 弹体入水局部网格

Fig. 3 Local mesh of projectile entering water

针对某一水深 h 处物体运动表面以及外部流动的空化问题研究,空化数可定义为:

$$\sigma_v = \frac{2(p_\infty - p_v)}{\rho v_\infty^2} \quad (1)$$

其中: p_∞ 为来流静压力, $p_\infty = p_a + \rho gh$; p_a 为自由

液面压力; ρ 为流体密度; v_∞ 为液体的来流速度; p_v 为不同温度下的饱和蒸汽压力(本文取 25 °C 时水的饱和蒸汽压为 3 540 Pa)。

实际的空化研究需要提出一个临界空化数 σ_{vi} ,此数难以确定,一般取其等于减压系数 ε ,减压系数定义为:

$$\varepsilon = \frac{2(p_\infty - p_m)}{\rho v_\infty^2} \quad (2)$$

其中, p_m 表示入水物体某点处的动压力,随着液体入水过程推进,入水物体某点处的压力不断减小,当 p_m 下降到一定数值时,液体发生空化。当 $\sigma_v < \varepsilon_{max}$ (ε_{max} 为最大减压系数)即在最小压力点处发生空化^[16]。一般将 $\sigma_v = 0.3$ 看作临界值,小于 0.3 发生空化。

空化过程常采用质量源项来表述蒸发和凝结过程,本文空化模型采用 Schnerr-Sauer 公式进行求解, Schnerr-Sauer 模型从气液的质量传输率发展而来,将水和蒸汽看作包含大量蒸汽泡的物质,计算体积分数,具体运输方程见文献[16]。

1.7 结果验证

计算获得的 2 ms 和 3 ms 的弹体空泡轮廓,见图 4。2 ms 时模拟获得空泡开始闭合,而实验空泡尚未闭合。3 ms 时模拟显示弹体表面接触空泡壁面,深闭合已发生;实验结果显示自由液面刚发生闭合,基本外形一致。

弹体的速度、位移和倾角变化见图 5~7。

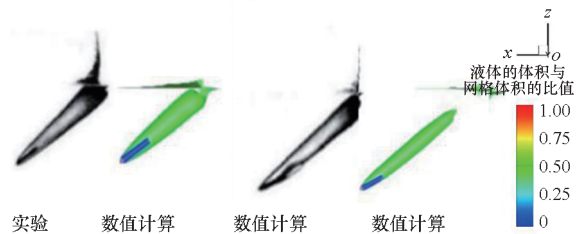


图 4 弹体在 2 ms 和 3 ms 时刻的空泡轮廓对比

Fig. 4 Comparison of cavitation profile of projectile at 2 ms and 3 ms

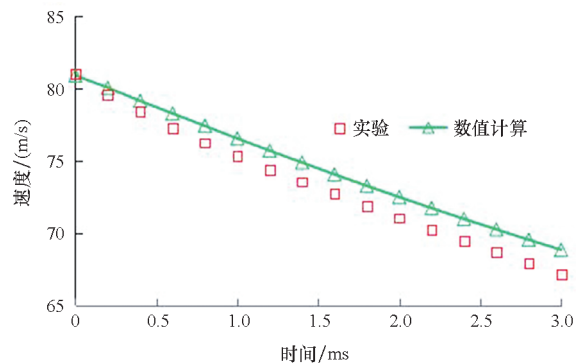


图 5 弹体速度变化

Fig. 5 Projectile velocity change

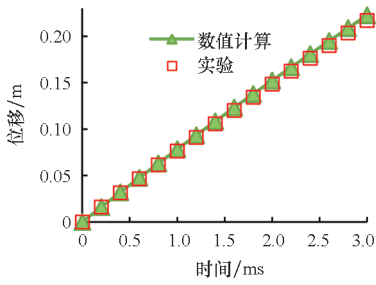


图6 弹体位移变化

Fig. 6 Body displacement change

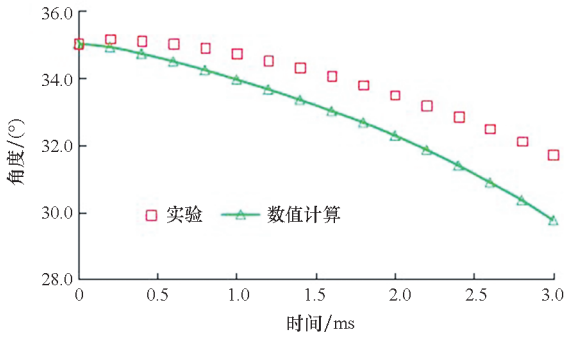


图7 弹体倾角变化

Fig. 7 Change of missile body tilt angle

图5和图6所示入水弹体速度与位移的预测误差为0~6%和-8%~0,图7显示预测的转动角度误差为-6%~0。数值计算结果与实验趋势一致,存在偏差的原因可能是:实验中弹体表面具有粗糙度,仿真模型采用光滑壁面。数值模拟对水体的泼溅和变形的复杂情况模拟精确度不够。采用隐式方法导致水气界面轮廓没有实验精细。数值模拟添加了人工黏性项使得流体变黏。综上,通过弹体斜入水的验证表明,本文采用的数值方法在空泡外形预测、弹体位移、速度和姿态预测方面具有一定的准确性。

2 入水弹道影响因素

本文将弹道的影响因素分为速度、倾斜角^[17]和头部外形三种。设置7种工况,分别开展数值模拟研究,见表2。其中工况7对弹体头部进行了阶梯圆台的修型详见2.3节。在考虑速度影响时,选取了垂直入水。分别计算弹体的运动参数、流场特性及空泡的发展规律。

2.1 入水速度

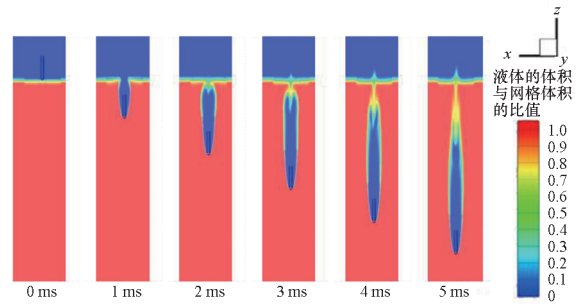
考虑计算资源以及本文主要研究空泡初期的弹体运动,数值模拟计算了9 ms的过程,即空泡表面闭合初期阶段。本文对前5 ms结果进行分析。图8(a)、(b)和(c)分别为工况4~6在各个时刻的空泡外形。可见速度越大,触水时液面波动更剧烈,运动过程中空泡扩张速度越快,同一

表2 弹体入水数值计算工况

Tab. 2 Numerical calculation conditions for high speed water entry of projectile

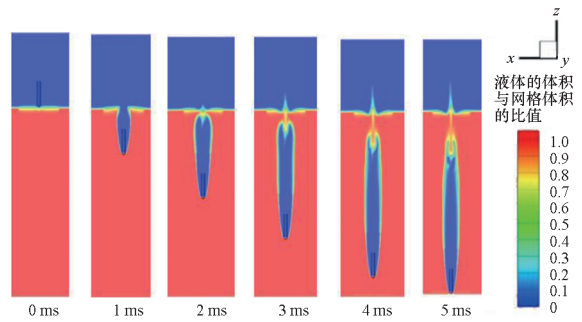
工况	入水角度/(°)	入水速度/(m/s)
1	35	81
2	50	81
3	70	81
4	90	81
5	90	90
6	90 <td 100	
7	35	81

时刻直径和长度增大,射流和喷溅增强。工况4~6空泡均包裹着弹体,弹道稳定。



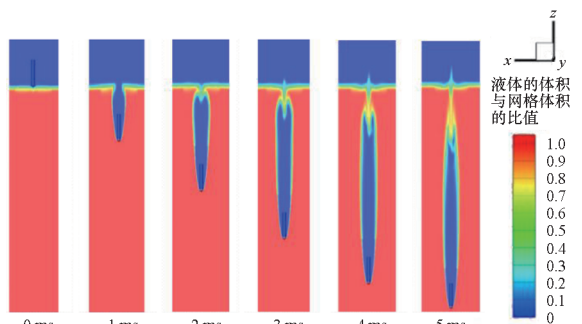
(a) 工况4

(a) Condition 4



(b) 工况5

(b) Condition 5



(c) 工况6

(c) Condition 6

图8 弹体入水空泡外形

Fig. 8 Cavitation shape of projectile entering water

图 9 显示了三种工况弹体速度随时间的变化。可见速度的非线性衰减,在 5 ms 内,初速度为 81 m/s、90 m/s 和 100 m/s 的弹体分别降低到 62 m/s、68 m/s 和 73 m/s,初速度越大,速度衰减越快。图 10 显示了弹体位移变化,可以看出,位移基本呈线性增长。

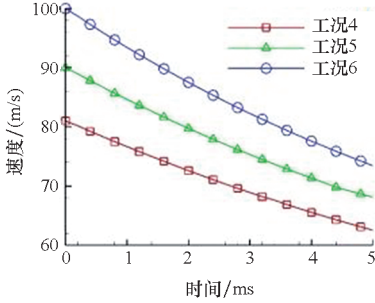


图 9 弹体总速度变化

Fig. 9 Total velocity change of projectile body

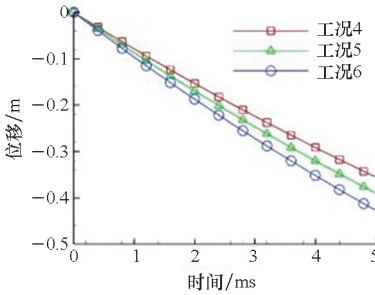


图 10 弹体轴向位移变化

Fig. 10 Change of axial displacement of projectile body

图 11 显示了弹体轴向载荷的变化。可知在入水初期载荷突增,三种工况均在 0.2 ms 达到最大值 45 N、54 N 和 67 N,对应弹体头部全部进入水中。之后载荷非线性缓慢衰减,衰减率随时间逐渐减小。5 ms 时载荷分别为 26 N、32 N 和 36 N。可见载荷峰值与入水速度的平方近似呈线性关系,弹体速度越大,载荷越大,非线性载荷衰减率越大。工况 6 较工况 4 的速度增加约 25%,最大轴向载荷增加了 49%。

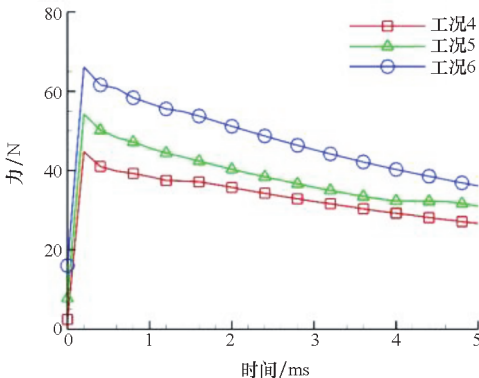


图 11 弹体轴向载荷变化

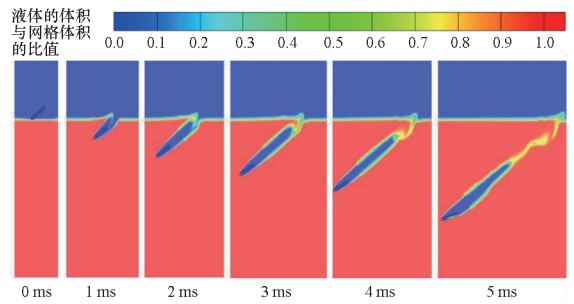
Fig. 11 Change of projectile axial load

本节分析表明,入水速度增大,弹体轴向冲击载荷增大,最大冲击载荷与速度的平方近似呈线性关系,在 0.2 ms 后,冲击载荷和弹体的速度均呈非线性衰减,速度越大,二者的衰减率越大,衰减率随时间缓慢减小。

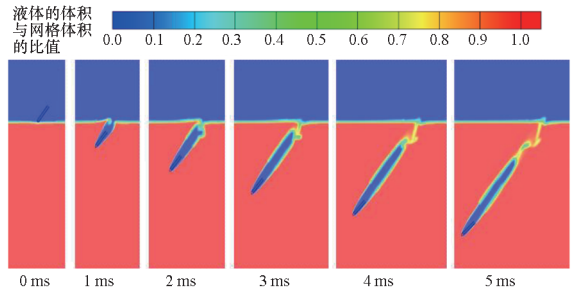
2.2 入水角度

表 2 中工况 1 ~ 3 选用不同入水角度(35°、50°、70°)进行计算,并设置不同初始条件。图 12 为 0 ~ 5 ms 空泡外形图,图 12(a)、(b)和(c)对应工况 1、2、3。

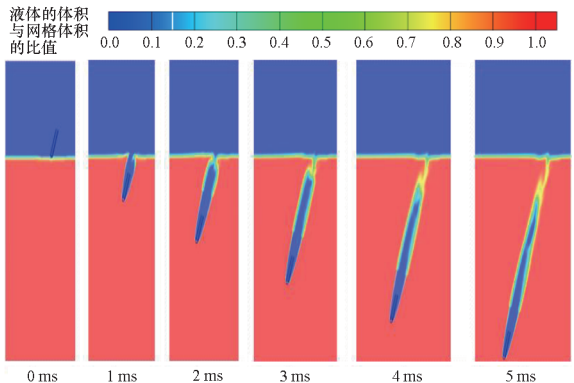
图 12 显示了小角度入水的弹体(工况 1)的侧壁更快接触到空泡壁面,且空泡的不对称显著,



(a) 工况 1
(a) Condition 1



(b) 工况 2
(b) Condition 2



(c) 工况 3
(c) Condition 3

图 12 弹体入水空泡外形

Fig. 12 Cavitation shape of projectile entering water

工况 1 在 5 ms 时弹体侧壁接触空泡壁面,工况 2~3 此刻刻则尚未接触空泡壁面,且工况 1 气液交界面处的变化显著,空泡面闭合后尾部产生的射流现象更紊乱。三种工况均在 2 ms 出现面闭合趋势,闭合后空泡最大直径处未发生变化,不断向前推进,尾部空化不断收缩。

将三种工况的弹体速度和倾角进行对比,如图 13 和图 14 所示。由图 13 可看出,工况 1~3 弹体速度曲线基本重合,表明在开空泡阶段,速度的变化率与入水角度无关,均随时间非线性衰减。此时弹体仅头部沾水,空泡包裹其运动,黏性力与水的附加质量力较小,对速度的影响不大,计算表明 5 ms 后,当空泡外形发生变化时,3 种工况速度差异明显。

图 14 表明,5 ms 内弹体在工况 1 和 2 中顺时针转动了 16.3°和 9.6°,工况 3 逆时针转动了 1.2°。5 ms 时,工况 1 和 2 弹体尾部已接触空泡壁面,破坏了稳定空泡外形,导致弹体受力不平衡,弹道失稳。工况 3 弹体仍被空泡包裹运动,转动角度小,与理想弹道偏离小,弹道更稳定。计算表明,弹体的轴向载荷几乎不变化。可见,入水角越大,弹体转动角速率减小,运动稳定性强。

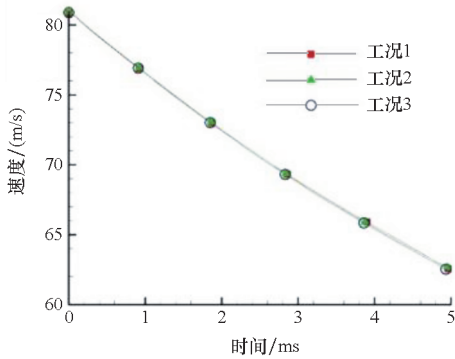


图 13 弹体速度变化(工况 1~3)

Fig. 13 Projectile velocity change (condition 1~3)

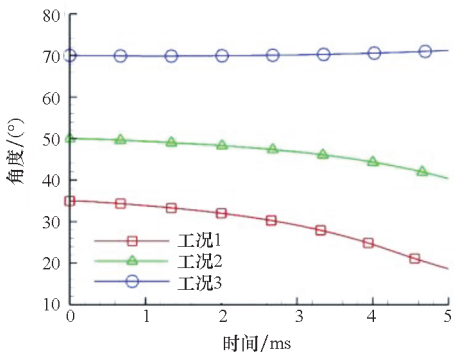


图 14 弹体倾角变化(工况 1~3)

Fig. 14 Change of missile body tilt angle (condition 1~3)

2.3 头部外形

本文仅采用阶梯圆台增稳的设计方法^[18],对弹体头部进行了阶梯圆台修型,如图 15 所示,并对比了修型前后的效果。这种修型能根据实际需求更有效地减少与射弹运动方向垂直区域受到水冲击的面积,从而显著减小射弹承受的不稳定扭矩,起到稳定弹道的作用。

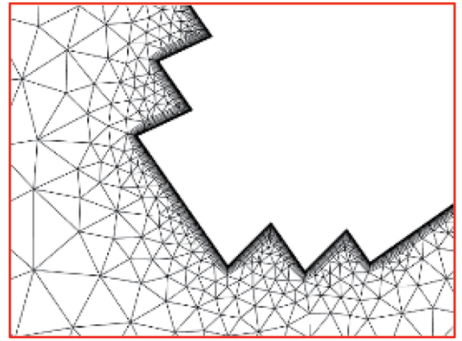


图 15 头部修型后网格

Fig. 15 Mesh after head modification

对比图 16 修型后(工况 7)弹体入水空泡外形和修型前(见图 12(a)),可见,工况 1 中弹体在 3~4 ms 时开始倾斜,碰撞气泡壁面,破坏整体外形,沾水法向合力导致弹体快速顺时针转动,后期发生翻转,偏离直线理想弹道。而工况 7 中弹体由于在超空泡中稳定时间更长,碰撞壁面推迟至 5 ms 以后,可保持稳定弹道,时间最长。

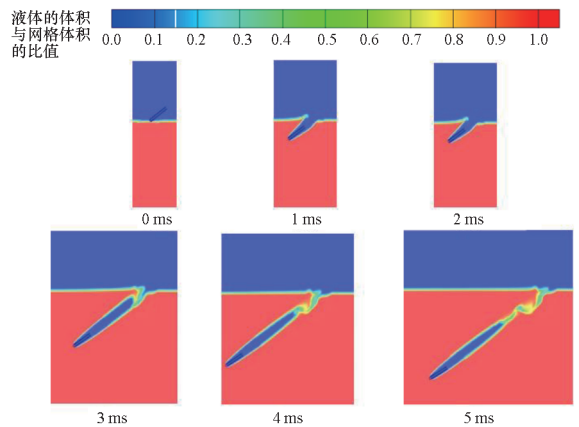


图 16 弹体入水在 0~5 ms 时刻入水空泡外形(工况 7)

Fig. 16 Cavitation shape of projectile entering water with high speed at 0~5 ms (condition 7)

对比工况 1 和 7 的弹体轴向力和法向力,如图 17 和图 18 所示。由图 17 可以看出,两种工况轴向力变化趋势一致,全为负值。主要受轴向力作用,头部浸润过程中轴向力迅速增大,在 0.2 ms 左右出现最大值,分别为 -43.35 N 和 -33.46 N,之后缓慢减小,由此可见平头头部冲击作用小于

锥头。图 18 显示了两种工况法向力的变化。在 4 ms 前数值小,工况 7 的法向力值在 5 ms 内趋于平稳,使得弹体稳定运动。

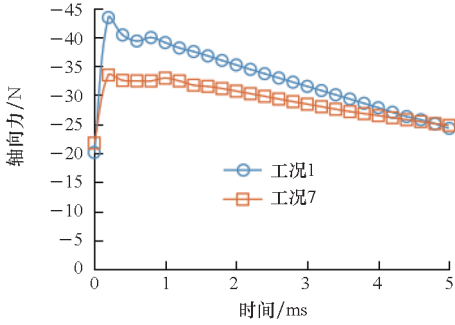


图 17 修型前后弹体入水的轴向力变化(工况 1、7)
Fig. 17 Change of axial force of projectile entering water before and after modification (conditions 1 and 7)

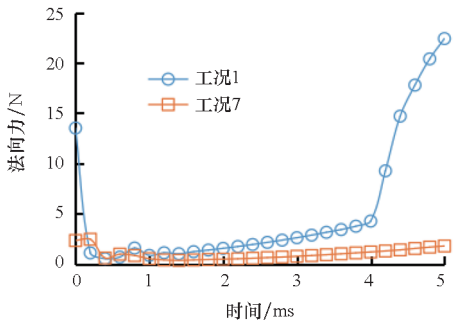


图 18 修型前后弹体入水的法向力变化(工况 1、7)
Fig. 18 Change of normal force of projectile entering water before and after modification (conditions 1 and 7)

对比两种工况的空泡外形,分别见图 19 和图 20。对比图 19 和图 20,可见两者的空泡直径大小基本一致,工况 1 空泡头部外形没有工况 7 光滑规则。工况 1 在空泡长度为 2 倍弹长时,出现面闭合现象,闭合速度快,无明显尾流。在 5 ms

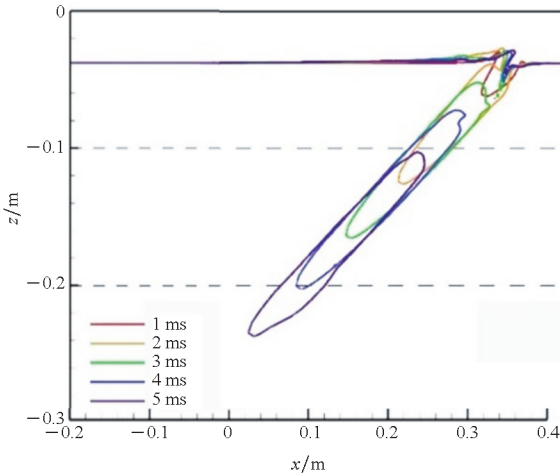


图 19 工况 1 空泡外形

Fig. 19 Cavity shape under condition 1

时空泡外形发生变化,弹身触水后空泡外形流线型结构被破坏,出现不规则外形。而工况 7 在闭合过程中存在尾流,规则空泡保持时间长。5 ms 时仍未发生变化,弹体未沾水。分析修型后的影响主要是头部阶梯显著降低了弹体的浸润面积,而弹体侧边和尾部凹槽的作用不明显。

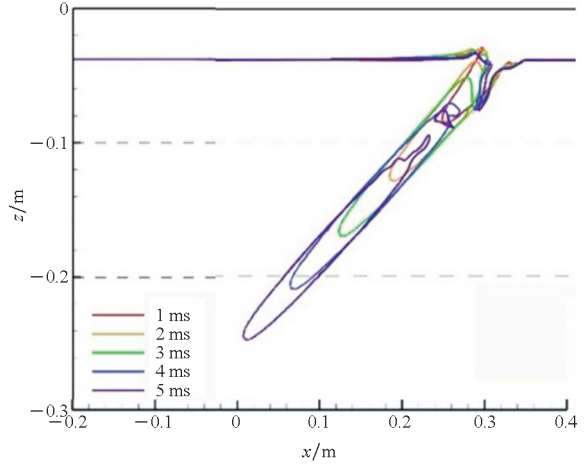


图 20 工况 7 空泡外形

Fig. 20 Cavity shape under condition 7

通过以上分析,可见弹体修型后,在开空泡初期,弹体浸润面积减小,速度和俯仰角变化变小。弹体尾部接触空泡壁面的时间推迟,轨迹更接近预定弹道,冲击力减小,可见,头部阶梯状修型增强了弹道稳定性。

3 结论

1) 本文采用气液两相流体积分数和水汽空化模型,通过嵌套网格实现刚体三自由度运动学和动力学耦合,模拟了弹体倾斜入水开空泡阶段的运动过程。经实验^[7]验证,入水弹体速度与位移的预测误差为 0 ~ 6% 和 -8% ~ 0,转动角度误差为 -6% ~ 0,具有较高的准确性。

2) 倾斜弹体入水影响因素分析表明:弹体入水速度越大,弹体轴向冲击载荷越大,最大冲击载荷与入水速度的平方呈线性关系,速度衰减速率更快。入水角越大,弹体转动角速率减小,运动稳定性强,速度衰减率不受入水角影响。

3) 采用头部阶梯状修型的弹体,相比未修型的锥形头部,其头部浸润面积减小,空泡外形更规则,平均速度衰减率、转动角速率和最大轴向冲击载荷分别降低到 66.7%、40% 和 77.2%,显著提高了运动稳定性。

参考文献 (References)

[1] 鱼怡澜,施瑶,潘光,等. 超空泡航行体高速入水空泡与

- 载荷特性数值分析[J]. 西北工业大学学报, 2022, 40(3): 584-591.
- YU Y L, SHI Y, PAN G, et al. Numerical analysis of cavitation and impact load characteristics of supercavitating vehicle entering water at high speed [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2022, 40(3): 584-591. (in Chinese)
- [2] 张浩. 基于波浪条件下射弹入水弹道特性研究[D]. 太原: 中北大学, 2021.
- ZHANG H. Research on the ballistic characteristics of projectiles entering water under wave conditions [D]. Taiyuan: North University of China, 2021. (in Chinese)
- [3] TRUSCOTT T T, EPPS B P, BELDEN J. Water entry of projectiles[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2014, 46: 355-378.
- [4] 陈宇翔, 郜冶, 刘乾坤. 应用VOF方法的水平圆柱入水数值模拟[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32(11): 1439-1442.
- CHEN Y X, GAO Y, LIU Q K. Numerical simulation of water-entry in a horizontal circular cylinder using the volume of fluid (VOF) method [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2011, 32(11): 1439-1442. (in Chinese)
- [5] 陈震, 肖熙. 空气垫在平底结构入水砰击中作用的仿真分析[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(5): 670-673.
- CHEN Z, XIAO X. Simulation analysis on the role of air cushion in the slamming of a flat-bottom structure [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2005, 39(5): 670-673. (in Chinese)
- [6] WANG X H, SHI Y, PAN G, et al. Numerical research on the high-speed water entry trajectories of AUVs with asymmetric nose shapes [J]. Ocean Engineering, 2021, 234: 109274.
- [7] WANG Z, FENG P H, LIU G Q, et al. Load and motion behaviors of ogive-nosed projectile during high-speed water entry with angle of attack [J]. Ocean Engineering, 2022, 266: 112937.
- [8] SHEPARD T, ABRAHAM J, SCHWALBACH D, et al. Velocity and density effect on impact force during water entry of sphere [J]. Journal of Geophysics & Remote Sensing, 2014, 3(3): 2169-0049. 1000129.
- [9] GAO J G, CHEN Z H, HUANG Z G, et al. Numerical investigations on the oblique water entry of high-speed projectiles [J]. Applied Mathematics and Computation, 2019, 362: 124547.
- [10] AKBARI M A, MOHAMMADI J, FEREDOON I J. A dynamic study of the high-speed oblique water entry of a stepped cylindrical-cone projectile [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2020, 43(2): 1-15.
- [11] YU Y L, SHI Y, PAN G, et al. Effect of asymmetric nose shape on the cavity and mechanics of projectile during high-speed water entry [J]. Ocean Engineering, 2022, 266: 112983.
- [12] 袁绪龙, 栗敏, 丁旭拓, 等. 跨介质飞行器高速入水冲击载荷特性[J]. 兵工学报, 2021, 42(7): 1440-1449.
- YUAN X L, LI M, DING X T, 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)
- [13] LU L, WANG C, LI Q, et al. Numerical investigation of water-entry characteristics of high-speed parallel projectiles [J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2021, 13: 450-465.
- [14] SONG Z J, DUAN W Y, XU G D, et al. Experimental and numerical study of the water entry of projectiles at high oblique entry speed [J]. Ocean Engineering, 2020, 211: 107574.
- [15] 郑磊. 弹体跨介质入水过程研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
- ZHENG L. Study on the process of water missile crossing medium [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020. (in Chinese)
- [16] 胡明勇, 张硕, 孟庆昌, 等. 射弹斜入水时流体动力特性及弹体水动力冲击载荷研究[J]. 海军工程大学学报, 2021, 33(4): 7-12.
- HU M Y, ZHANG S, MENG Q C, et al. Hydrodynamic characteristics of projectile oblique entry into water and hydrodynamic impulse load of projectile body [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2021, 33(4): 7-12. (in Chinese)
- [17] YAO R, ZHAO X, HU X K. Simulation of water-entry motion of cross-media vehicles basing on overset grids [C]// Proceedings of the 2022 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, 2022.
- [18] 赵子杰, 张成龙, 江代文. 一种稳定的超空泡射弹入水结构: 110360897 [P]. 2019-10-22.
- ZHAO Z J, ZHANG C L, JIANG D W. A stable supercavitation projectile water entry structure: 110360897 [P]. 2019-10-22. (in Chinese)