

基于VOF模型的导弹低速入水数值模拟方法

张国军, 闫云聚

(西北工业大学力学与土木建筑学院, 陕西西安, 710129)

摘要 基于商用软件Fluent框架,利用动网格技术和UDF方法实现了回转体低速 0° 攻角直入水过程的数值模拟。采用水、气2相VOF方法捕捉界面,分别采用湍流与层流建立了导弹入水冲击的数值模拟方法,并与实验获得的照片进行了对比分析。分析结果表明:层流模型下导弹入水冲击的数值模拟和试验结果吻合较好,湍流模型下的数值模拟结果误差较大,因此在低速条件下,湍流模型不适用,应该用层流模型。

关键词 导弹;VOF;动网格;层流;湍流

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.06.006

中图分类号 O352 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)06-0023-04

Numerical Simulation Method of Water-entry Impact at Low Speed for A Missile Based on VOF Model

ZHANG Guo-jun, YAN Yun-ju

(School of Mechanics, Civil and Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: An underwater weapon will undergo stronger impact when it is in the incipient transient process of the entry-water, and this will cause serious harm to its structures and the carried instruments. It is very important to increase the reliability of the underwater weapon through researching the water entry impact of underwater weapon. In this paper, the numerical simulation of the vertical water-entry with zero attack angle at low speed for a missile is carried out based on the commercial software Fluent. The numerical simulation method of the water-entry at low speed for a column missile model is established using the technologies of dynamic mesh and UDF, and is validated by the experimental picture. The result shows that the numerical simulation accords with experimental results preferably at low speed for a missile with laminar flow model, however, the numerical simulation of the turbulence model shows an obvious error. So, the suitable method for low speed water-entry is not the turbulence model but the laminar flow model.

Key words: missile; VOF; dynamic mesh; turbulence; laminar flow

当空投或火箭助飞的水中兵器撞击液面的短暂瞬间,会受到液体对其作用的巨大的冲击载荷,这就要求弹体的强度要满足结构安全要求以承受这种强烈冲击。而且,水中兵器从空气界面冲击后结构损

坏、器件失灵、忽扑和弹道失控等问题,也是不可忽视的。研究弹体结构入水所受的冲击载荷对于研制弹体结构以及提高水中兵器的可靠性有着很重要的意义,而研究入水冲击首要解决的问题是对仿真方

收稿日期:2012-10-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50875212)

作者简介:张国军(1979—),男,陕西宝鸡人,博士生,主要从事流固耦合、噪声致振、声振耦合等研究。

E-mail: zgj2004@163.com

法的研究。

Von Karman^[1]最早进行了入水问题的理论研究。1932年 Wagner^[2]对 Karman 的方法做了进一步的修改使结果更符合实际。国内外在基于 Von Karman 和 Wagner 理论方法和数值分析方面上已经做了大量的研究工作^[3-4],对于结构入水中的低速入水问题取得了较大的进展。

本文基于商业软件 Fluent,分离求解算法采用 Simple,分别采用标准湍流 $k-\epsilon$ 2 方程模型和层流模型 Laminar,仿真分析了导弹的 2 相 VOF (Volume of Fluid Model, VOF) 模型低速入水过程。

1 数学模型

1.1 动网格技术

动网格技术^[5-6]可以用来模拟流场形状由于边界运动而随时间改变的问题。网格的更新过程由 Fluent 根据每次迭代步中边界的变化情况自动完成。在使用移动网格模型时,必须首先定义初始网格、边界运动的方式并指定参与运动的区域。可以用边界型函数或者 UDF (User Defined Function, UDF) 来定义边界的运动方式。

在任意一个控制单元中,广义标量 Φ 的积分守恒方程为:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \Phi dV + \int_{\partial V} \rho \Phi (u - u_g) dA = \int_{\partial V} \Gamma \nabla \Phi dA + \int_V S_\Phi dV \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度; u 为速度流量; u_g 为移动网格的网格速度; Γ 为扩散系数; S_Φ 为源项; ∂V 为控制单元 V 的边界; A 为控制单元的面积。

1.2 VOF 模型

VOF 模型^[7-9]是用体积率函数表示流体自由面的位置和流体所占的体积,其方法占内存小,是一种简单而有效的方法。

VOF 模型的连续性方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (2)$$

式中 \mathbf{v} 为速度矢量。

体积分数连续性方程为:

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla (\alpha_i) = 0 \quad (3)$$

式中 α_i 为第 i 相的体积分数。

动量方程为:

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla [\mu (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (4)$$

式中: μ 为流体动力粘度; \mathbf{F} 为因表面张力和壁面粘附作用引起的动量方程的源项。

2 仿真分析

本文研究内容为导弹入水非定常多相流建模与分析技术,故此阶段采用较简单的入水模型,模型为圆柱,长度为 120 mm,直径为 20 mm,材质为钢,其质量 $m=0.294$ kg。取计算初始时弹体质心距水面 70 mm,弹体 0° 攻角垂直入水,垂直方向速度为 3.5 m/s。

2.1 网格划分

网格生成是数值模拟过程中一个重要的组成部分,在平均流变化迅速以及包含大应变剪切层的区域,应该划分足够精密的网格。本文讨论的是攻角为 0° 时的垂直入水情况,网格划分情况见图 1,中心加密区域为动网格区域,选取的动网格划分方法 (Mesh Methods) 是动态分层 (Layering),因此,其网格的生成和消亡位置均采用四边形网格且等间距布置,既有利于网格的更新又能改善数值解的精度。在水面处布置较细密的网格,以增加水气界面捕捉的精度,为节省计算资源,整个外场静区布置的网格较稀疏且采用渐变网格。

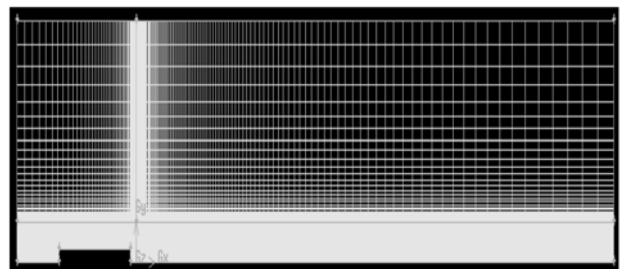


图 1 计算网格划分

Fig. 1 Dividing grid

2.2 数值模拟

本文采用了 VOF 多相流模型,其速度-压力耦合方式及离散方法的选择分别是 Simple 和 Standard,松弛因子默认。主相设为液态水,副相为空气相,流场初始化各介质分布按实际情况指定,水面以下压力按重力梯度通过 Custom Field Function 来 Patch 得到。

应用商业软件 Fluent,采用的水、气 2 相流,界面采用 VOF 方法捕捉,分别对选择标准 $k-\epsilon$ 2 方程湍流模型和层流模型,对导弹低速入水过程进行仿真,图 2 和图 3 分别给出了湍流和层流模型下仿真计算的密度云图,从图上可以看出整个弹体的入水过程,弹体从一定高度落下,撞击水面,带着一部分空气进入水下,随着压力的增大,气泡慢慢闭合,形

成空泡。

对比图2和图3可以发现,湍流条件下,形成的是贴体空泡,随着弹体尾部气泡的闭合,弹体成为全沾湿状态;而在层流条件下,空泡闭合于弹体中部偏后,导弹头部包裹在气泡中,空泡闭合点后到弹尾处于全沾湿状态,弹体尾后有气泡。

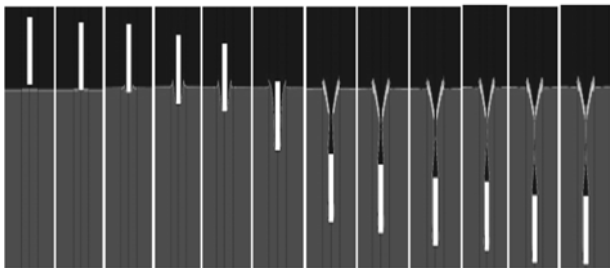


图2 湍流模型仿真

Fig. 2 Turbulence model

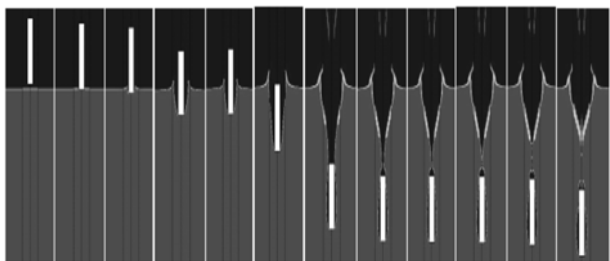


图3 层流模型仿真

Fig. 3 Laminar flow model

2.3 试验验证

为了验证仿真结果的正确性,在小水池开展了圆柱体低速入水的试验。圆柱体以一定高度下落,在重力作用下加速,使入水时的速度与仿真速度相等,用高速摄像拍摄照片,通过分析对比照片,验证仿真模型。

图4是从高速摄像提取的照片。从照片中可以看到,圆柱体带着气泡入水,随着入水深度的增加,压力增大,圆柱体尾后的气泡慢慢变细,最后拉断,形成封闭空泡。头部空泡闭合于中部偏后位置。

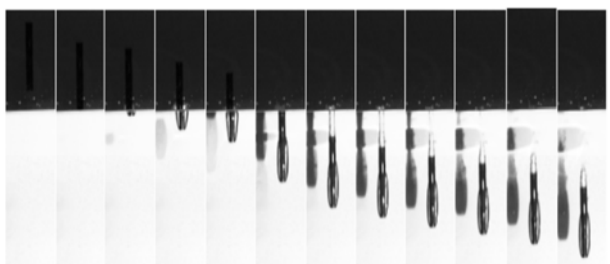


图4 试验图片

Fig. 4 Experimental picture

从试验图片与仿真情况的对比来看,层流模型比较符合,而湍流模型与实验结果有很大的差别。从而说明,湍流黏性对低速入水有很大的影响,在低

速条件下不能开启湍流模型,否则会有很大的误差,甚至得到不正确的结果。因此,在低速条件下,湍流模型不适用,仿真分析应当采用不考虑黏性的层流模型。

2.4 层流模型下的运动参数

图5给出了层流模型条件下,导弹仿真计算的冲击-时间历程以及速度-时间历程。从冲击力图上可以看出,导弹模型撞水瞬时受到巨大的冲击力,然后迅速减小并趋于稳定。冲击力峰值达到16.3 g(其中g为重力加速度)。从速度-时间图中可以看出,在撞水之前,导弹在重力作用下,加速运动,由于加速时间很短,可以认为,导弹以UDF中初始设定的速度撞水。撞水瞬间,速度迅速减小,然后变缓变平稳,是因为形成了空泡,此时空泡是开口空泡,末端与空气相连。

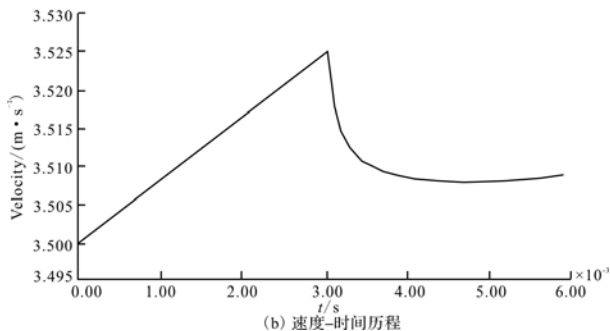
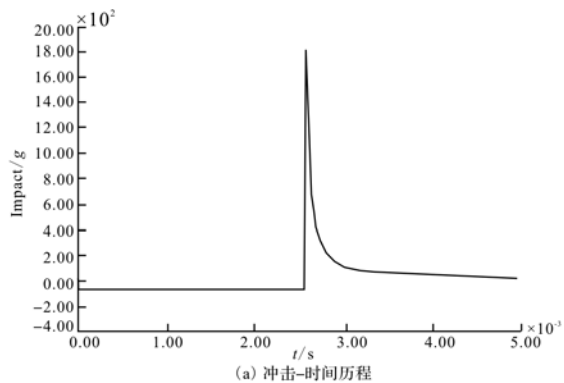


图5 层流模型下的运动参数

Fig. 5 Moving parametres of the linamar model

在试验图片中,弹体完全进入水中之前,头部空泡已经闭合,而层流模型的模拟中,弹体头部的气泡是在尾后空泡拉断之后才闭合的,可能产生的原因是:①为了简化计算,减少计算量,采用的是二维轴对称模型,可能会对计算结果造成影响;②动网格更新方式采用Layering,只能响应单自由度,对于实际的弹体包括试验用的模型在入水过程中都会产生转动,也会影响计算结果;③没有考虑空气相的压缩性,忽略了空气垫作用,会引起导弹入水冲击力偏大,从而也会影响到仿真计算结果;④实验中模型入水是人工控制的,很难把握入水时的速度是精确的,同时也无法保证姿态角和攻角都是 0° ;⑤仿真

初始速度给定,触水之前在重力的作用下加速直至撞水,事实上撞水时速度是大于给定速度的。

3 结语

本文采用 VOF 多相流模型,应用计算流体力学软件 Fluent,分别对标准 $k-\epsilon$ 湍流模型与 Laminar 层流模型下导弹低速入水过程进行了数值模拟,并与验证试验照片进行对比,给出了导弹低速入水数值模拟方法,即对导弹低速入水数据模拟仿真研究应该选取 Laminar 层流的 VOF 多相流模型。

参考文献(References):

- [1] Von Karman T. The impact of seaplane floats during landing[R]. Washington DC: National advisory committee for aeronautics, NACA, TN2321, 1929.
- [2] Wagner V H. Phenomena associated with impacts and sliding on liquid surfaces [J]. Z angew math mech, 1932, 12(4): 193-215.
- [3] 卢焯华,郑际嘉.空投鱼雷倾斜姿态落水冲击研究[J].应用力学学报,1997, 14(3): 131-135.
LU Chihua, ZHENG Jijia. On oblique water impact of the air-dropped torpedo during water entry[J]. Journal of applied mechanics, 1997, 14(3): 131-135. (in Chinese)
- [4] 王永虎,石秀华.入水冲击问题研究的现状与进展[J].爆炸与冲击,2008,28(3): 276-282.
WANG Yonghu, SHI Xiuhua. Review on research and development of water-entry impact problem[J]. Explosion and shock waves, 2008, 28(3): 276-282. (in Chinese)
- [5] 史忠军,徐敏,陈士槽.动网格生成技术[J].空军工程大学学报:自然科学版,2003, 4(1): 61-64.
SHI Zhongjun, XU Min, CHEN Shilu. Analysis of moving mesh generation technology[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2003, 4(1): 61-64. (in Chinese)
- [6] 张军,谭俊杰,褚江,等.一种新的非结构动网格的生成方法[J].南京航空航天大学学报,2007,39(5): 633-636.
ZHANG Jun, TAN Junjie, CHU Jiang, et al. New method for generating unstructured moving grids[J]. Journal of Nanjing university of aeronautics & astronautics, 2007, 39(5): 633-636. (in Chinese)
- [7] Zhu X, Sui P C, Djilali N. Three-dimensional numerical simulations of water droplet dynamics in a PEMFC gas channel [J]. Journal of power sources, 2008, 181(1): 1-15.
- [8] ABE K, KORO K. A topology optimization approach using VOF method [J]. Structural and multidisciplinary optimization, 2006, 31(6): 470-479.
- [9] Phung D H, Katsutoshit. Verification of a VOF based two phase flow model for wave breaking and wave structure interactions [J]. Ocean engineering, 2006, 33(11-12): 1 565-1 588.

(编辑:田新华)