

# 基于流固耦合航行体入水冲击数值模拟研究

于佳晖, 贾亮, 朱元夫

(北京强度环境研究所, 北京 100076)

**摘要:** 针对航行体入水冲击过程中的流固耦合问题, 利用任意拉格朗日-欧拉算法建立三维入水冲击数值仿真模型。首先, 建立球体入水冲击数值模型, 获取了入水过程中的冲击载荷和表面压力数据, 通过与试验对比, 探究网格密度、接触刚度耦合系数以及时间步长对仿真准确性的影响。结果发现, 冲击区域网格密度和接触刚度耦合系数决定流固耦合接触刚度; 冲击域的网状密度对冲击系数结果和入水速度变化有明显影响; 耦合节点之间的接触刚度系数会影响局部压力峰值。最后, 建立锥形头部圆柱体入水仿真模型, 提出分段刚体计算截面载荷方法, 研究不同速度下结构入水冲击加速度、速度、位移和截面载荷变化规律, 与试验结果对比证明仿真准确性。

**关键词:** 数值建模; 入水冲击; 流固耦合; 任意拉格朗日-欧拉算法

中图分类号: V412

文献标识码: A

文章编号: 2096-4080 (2022) 01-0031-07

## Research on Numerical Simulation of Water-Entry Impact Based on Fluid-Structure Coupling

YU Jiahui, JIA Liang, ZHU Yuanfu

(Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 10076, China)

**Abstract:** Aiming at the fluid-structure coupling problem in the process of water-entry impact, a three-dimensional numerical simulation model is established by using arbitrary Lagrange-Euler method. Firstly, the numerical model of spherical is established, and the impact load and surface pressure of water-entry are obtained. By comparing with the test, the effects of grid density, contact stiffness coupling coefficient on the simulation accuracy are explored. The result show that the mesh density of the impact domain is very important to the quality of the simulation results. The contact stiffness between the coupling nodes affects the local peak pressure values. Finally, the water-entry simulation model of a conical head cylinder is established and the piecewise rigid body calculation is proposed. The acceleration, velocity, displacement and section load at different speeds are studied. Comparing with the test results, the accuracy of damage is proved.

**Key words:** Numerical modeling; Water-entry impact; Fluid-structure coupling; Arbitrary-Lagrange-Euler method

收稿日期: 2021-11-03; 修订日期: 2021-12-26

基金项目: 基础性军工科研院所稳定支持项目

作者简介: 于佳晖 (1993-), 女, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为结构动特性试验技术。

E-mail: 13652025035@163.com

## 0 引言

航行体入水过程引起周围流体介质的运动, 流体介质对结构又施加反作用力, 特别是在入水冲击初期瞬态间(毫秒级)过程中会遭受巨大的冲击载荷。结构入水冲击过程中形成的轴向力作用可能导致航行体头部变形、仪器设备失效等; 法向力作用会出现忽扑和弹道失控等问题, 并可能使结构弯曲破坏。

整个人水过程涉及航行体、水和空气三者之间的相互作用, 同时在空泡生成过程中还涉及气液相变过程, 具有强烈非线性、耦合性和非定常性<sup>[1]</sup>。整个过程涉及两个主要问题: 一是航行体、自由液面、空泡之间相互作用的非定常流体力学问题; 二是航行体高速撞水过程引起的结构力学问题。入水结构载荷分析及其稳定性研究在国内外仍是一大热点和难题, 尚有许多理论、数值模拟以及试验等方面的难题需要解决。入水冲击问题较为复杂, 通过理论分析解决此类问题较为困难<sup>[2]</sup>。数值模拟和试验是研究高速入水问题的主要手段。任意拉格朗日欧拉方法, 解决了大变形和移动边界的流体耦合问题, 该方法已被广泛用于入水问题的研究, 并已集成在 Dytran 和 LS-Dyna 等软件中。2018年, Derakhonian 等<sup>[3]</sup>提出基于有限容积方法(FVM)、有限差分方法(FDM)和任意拉格朗日欧拉米德方法(ALE)进行数值模拟并分别与试验结果相比, 结果表明 ALE 数值算法用于模拟这种流动固体相互作用问题具有可靠性且对于不同入射角度和入水速度计算冲击力更为准确。2011年, Luo 等<sup>[4]</sup>提出在结构和流体之间接触区域附近的网格尺寸对于仿真结果影响较大, 但是对于远离接触区域的网格无明显影响。Howison 等<sup>[5]</sup>对小斜升角楔形体入水试验中存在压力振动现象进行分析, 认为忽略气垫效应不会对计算结果产生很大差异。Wilson<sup>[6]</sup>对入水冲击初始阶段交界面出现的气垫层进行建模, 通过无量纲方法利用渐近理论得到解析解。Yettou 等<sup>[7]</sup>通过对 5 种楔形体模型以自由落体方式入水冲击进行试验, 得出影响压力系数的重要因素, 分析了各因素对冲击载荷变化的影响。

本文基于流固耦合 ALE 方法利用 LS-DYNA 软件数值进行航行体入水冲击问题数值模拟研究。用罚函数耦合计算方法求解入水冲击过程中流固耦合问题, 分析网格密度、罚函数耦合系数以及

时间步长等因素对数值仿真计算准确性的影响, 形成入水过程三维数值建模方法。最后, 建立航行体入水过程模型, 研究不同速度对入水过程中加速度、速度以及位移的影响。

## 1 基于 ALE 的流固耦合方法

### 1.1 基本控制方程

基于任意拉格朗日欧拉算法的质量守恒方程和动量守恒方程如下

$$\frac{\partial \rho_w}{\partial t} + c_i \frac{\partial \rho_w}{\partial x_i} + \rho_w \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho_w \frac{\partial v_i}{\partial t} + \rho_w c_i \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = \sigma_{ij,j} + \rho_w b_i \quad (2)$$

式中,  $x$  为空间坐标;  $c_i$  为 ALE 描述下的对流速度,  $c_i = v_i - w_i$ ;  $v_i$  为流体质点的物质速度;  $w_i$  为网格速度;  $\rho_w$  为流体密度;  $b_i$  为流体体积力;  $\sigma_{ij}$  为应力张量。

$$\sigma_{ij} = -p_s \delta_{ij} + \mu_d (v_{ij} + v_{ji}) \quad (3)$$

式中,  $p_s$  为水的静压,  $\mu_d$  为动力黏性系数,  $\delta_{ij}$  为克罗内克函数。

### 1.2 流固耦合罚函数计算方法

ALE 有限元方法研究三维入水冲击的水动力问题, 使用欧拉方法离散流体, 拉格朗日方法离散化结构, 罚函数接触算法求解流体与固体之间的接触。固体结构与流体之间的界面由流体体积函数方法(VOF)获得。Luo 等<sup>[4]</sup>研究二维半球和锥体分析不同的入射角度和入水速度, 通过与试验结果进行比较, 发现冲击接触区域的网格密度对于结果准确性影响较大。

罚函数耦合的计算类似于弹簧系统, 罚函数耦合力的计算与穿透深度和弹簧刚度成比例。弹簧的头部连接到结构从节点, 尾部连接流体单元(结构穿透部分)主节点。与罚函数接触相同, 耦合力表示为  $F$ 。

$$F = kd \quad (4)$$

式中,  $k$  表示弹簧刚度,  $d$  表示穿透深度。耦合力  $F$  在耦合处沿相反方向作用于主节点和从节点。

耦合问题中难点是对刚度  $k$  的设置。基于 LS-DYNA 中的显式惩罚接触算法, 刚度包含流体主单元与结构从单元关联部分单位面积的数值刚度体积模量  $K$ , 主节点流体单元体积  $V$  以及连接到结构节点的结构单元的平均面积  $A$ 。

$$k = p_f \frac{KA}{V} \quad (5)$$

为了避免数值不稳定性,引入罚函数耦合系数  $P_f$  以缩放相互作用(耦合)系统的刚度。对于冲击问题,罚函数耦合系数  $P_f$  对解具有明显的影响。对于二维楔形入水问题, Luo 等<sup>[4]</sup>进行相关参数研究,包括罚函数耦合系数,时间步长因子,网格尺寸和联络点的数量,并通过将预测与 Cui 等<sup>[8]</sup>实验结果进行比较来验证。结果表明网格尺寸对于模拟非常重要,而其他方面则影响很小。

## 2 数值仿真方法正确性研究

### 2.1 仿真模型

研究对象为球体以及带有圆锥头部柱体。为了验证 ALE 方法的准确性,首先建立球体模型不同入水速度垂直入水,并与 De Backer 等<sup>[9]</sup>的试验进行比较。

在数值建模中结构的主要参数如表 1 所示,球体的直径为 0.3 m,无表面张力效应。由于结构厚度大,在入水时不考虑弹性变形的影响。与试验对比首先设置较小的入水速度 4 m/s。

表 1 模型尺寸表

Tab. 1 Parameters of model

模型	半径	厚度	材料
球体	0.15 m	0.05 m	钢

坐标轴如图 1 所示,  $xy$  为水平面,  $z$  轴垂直于  $xy$  平面向上。结构入水角度为  $90^\circ$ , 垂直入水,入水速度为  $V$ 。

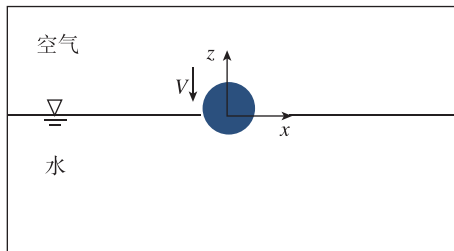


图 1 球体垂直入水模型

Fig. 1 Computational model

流体(水和空气)定义为多材料区域,考虑水和空气多相流问题。流体域水和空气采用 soild 11 多材料单元,定义空气材料设置其状态方程。其中水域设置 Gruneisen 状态方程,空气域设置线性多项式状态方程。结构设置为 soild1 单元建模用于显式动态分析和刚体材料。

施加罚函数接触耦合算法求解流体与结构之间的相互作用,通过定义流固耦合关键字 \* CON- STRAINED\_ LAGRANGE\_ IN\_ SOLID。从单元选择拉格朗日实体单元;主单元选择流体单元;耦合类型一般采用罚函数耦合方式;PFAC 为接触刚度又称罚函数耦合系数  $P_f$ 。罚函数接触耦合类似于弹簧系统,通过产生高振荡计算耦合力。

流域边界设置为对称边界,可扩大流域,减少液面升高现象。仿真流域长宽要求大于等于 12 倍的特征长度。设置计算域设置为  $5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 8.5 \text{ m}$ ,其中空气域为  $5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ ,水域为  $5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 7 \text{ m}$ 。主要用于观察刚入水冲击载荷,以及入水后速度加速度变化规律。需要设置足够的流域,并进行边界无关性验证。

为了精确求解入水冲击问题,需要仔细选择网状密度和接触刚度。接触刚度与罚函数设置的罚函数耦合系数和流体单元体积  $V$  所包含耦合节点有关,即流体的网格密度的影响。所以对于这两个影响因素做进一步的研究。

在仿真中记录表面压力随时间的变化,以及位移、速度和加速度。将仿真结果进行无量纲变换得到冲击系数与试验结果对比分析。

### 2.2 网格密度的影响

入水网格划分如图 2 所示,选择 3 种不同网状尺寸,分别为 10 mm, 5 mm 和 2.5 mm 设置为接触区域流体网格大小。流体区域网格尺寸由结构物特征尺寸  $R$  决定<sup>[10]</sup>。分别为  $0.067R$ ,  $0.033R$  和  $0.0167R$ ,其中  $R$  表示球体的半径。结构尺寸设置为 5 倍的流体网格尺寸。

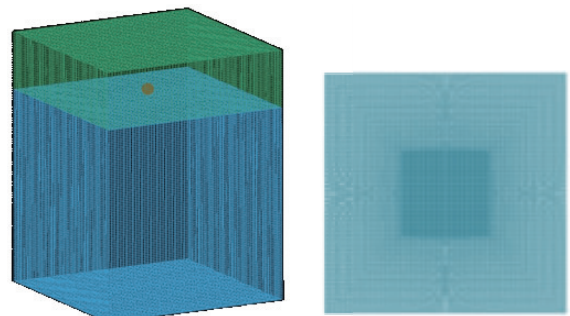


图 2 球体入水网格划分图

Fig. 2 Water-entry simulation FEA mesh

无量纲冲击系数

$$c_s = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^2} \quad (6)$$

式中,  $F$  为冲击力,  $\rho$  为水密度  $100 \text{ kg/m}^3$ , 时间表示为  $t = T/R$ , 其中  $T$  是球体进入水面的时间, 入水速度为  $4 \text{ m/s}$ 。

PFAC 的值设定为  $0.1$ , 得到接触刚度  $k$ , 接触刚度可由公式 (5) 估算, 分别为  $22.5 \text{ GPa/m}$ ,  $45 \text{ GPa/m}$  和  $90 \text{ GPa/m}$ 。如图 3 所示, 当网格尺寸为  $0.0167R$  时, 仿真结果除初始入水冲击阶段外与 De Backer 等<sup>[9]</sup> 的试验测量结果一致。在初始入水冲击阶段, 冲击系数高于试验结果。因为在入水冲击初始阶段, 流体和结构之间的相互作用仅为结构底部部分单元和水的表面单元。在初始冲击时, 单元压力的数值脉冲是不可避免的, 并且冲击力从沿着结构的湿表面的压力集合获得。当网格尺寸为  $0.033R$  和  $0.067R$  时, 仿真结果与试验结果不一致。在入水冲击的后期, 随着网格尺寸变大冲击最大值高于真实结果。另外, 数值信噪比对与网格尺寸有关。可知,  $0.0167R$  网格尺寸的仿真模型计算入水冲击力时间历程更准确。为验证数值结果的稳定性, 进行不同入水速度的仿真计算。入水速度分别为  $4 \text{ m/s}$  和  $18 \text{ m/s}$ , 入水冲击网格密度选择一致。

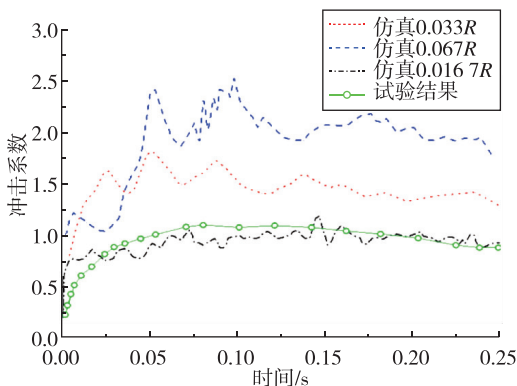


图 3 不同网格密度球体的无量纲冲击系数结果  
Fig. 3 Dimensionless impact coefficient of spheres with different mesh density

### 2.3 接触刚度的影响

引入罚函数耦合系数 Pf (PFAC) 以缩放耦合系统的刚度, 需研究该参数对仿真模型结果的影响。基于网格尺寸的敏感性研究, 选择具有  $0.0167R$  网格的仿真模型, 入水速度  $18 \text{ m/s}$ , 用于球体入水冲击仿真计算, 仿真模型设置不同 PFAC 值分别为  $0.01$ ,  $0.1$  和  $0.5$ 。图 4 绘制着不同 PFAC 值冲击系数曲线, 3 条曲线在入水冲击的初始时刻有明显的区别, 并且在峰值时刻一致, 但总趋势

相同。对于  $0.5$  PFAC 的模型, 冲击入水结果信噪比低。

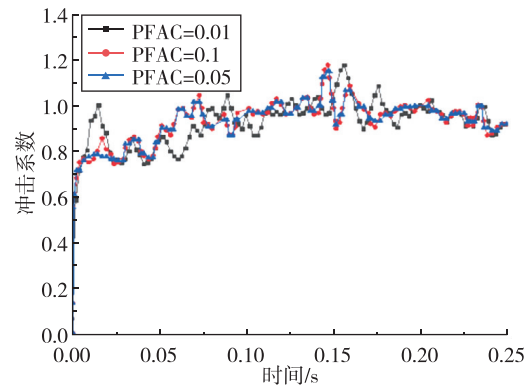


图 4 不同接触刚度无量纲冲击系数结果  
Fig. 4 Dimensionless impact coefficient of spheres with different contact stiffness

球体底部局部峰值压力对 PFAC 的值敏感。接触刚度越高, 峰值越小。从压力时间历程结果中, 得到球体接触平静的水面时, 最大压力值产生。峰值对 PFAC 值敏感, 主从节点上的耦合力通过接触刚度和穿透力之积计算得到, 而接触刚度缩放值为 PFAC 的值。结构受到的冲击力对 PFAC 的变化不敏感, 因为冲击力是结构的平均值。

### 3 数值仿真结果与分析

建立航行体入水冲击模型, 结构柱体直径  $0.15 \text{ m}$ 、全长  $2 \text{ m}$ 、圆锥头部直径  $0.15 \text{ m}$ , 头部角度为  $60^\circ$ , 带锥体头部柱体垂直入水模型如图 5 所示。计算域设置为  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 9 \text{ m}$ , 其中空气域为  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ , 水域为  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 7 \text{ m}$ 。流体区域网格尺寸设置为  $0.01 \text{ m}$ , 结构网格尺寸设置为  $0.015 \text{ m}$ , 并进行网格无关性验证。PFAC 的默认值为  $0.1$ 。仿真时间为  $0.04 \text{ s}$ , 主要分析刚入水阶段的加速度、速度和位移规律。

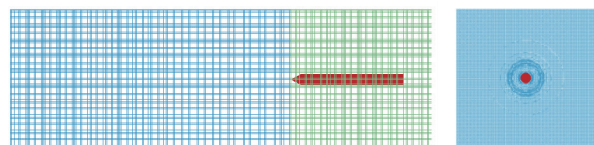


图 5 带锥体头部柱体垂直入水模型  
Fig. 5 Vertical water-entry model of cylinder with cone head

为研究航行体的截面载荷, 必须要考虑航行体的弹性变形, 但实际航行体结构复杂, 完全建立航行体的弹性体模型会显著增加流固耦合计算

时间。所以提出一种航行体入水冲击模型截面载荷计算方法，采用分段刚体的方法将结构简化，求出航行体在入水冲击过程中的截面载荷。将带锥形头部柱体用分段刚体进行离散，分段刚体之间用弹性梁进行连接。设置分段刚体为柱段中心截面处。

航行体入水时结构和空气垫及水的相互作用，使空泡区的水获得了较高的运动速度，而水介质不承受拉力易形成溅水。飞溅不属于连续介质力学范畴，用理论方法求解异常困难。但用仿真可模拟入水飞溅和超空泡效果，溅水效应和超空泡

如图 6 所示。在入水各个阶段，水面压力如图 7 所示。当结构在水中超过一定速度时，空泡在结构周围形成并把结构包裹起来，直至形成超空泡，此时整个结构只有头部与水接触。

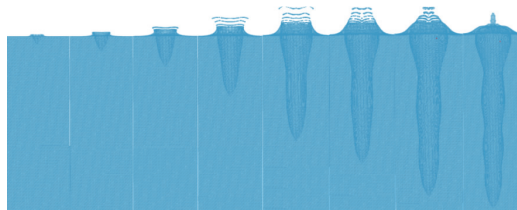


图 6 锥头柱体垂直入水不同时刻状态图  
Fig. 6 Different times of vertical water-entry

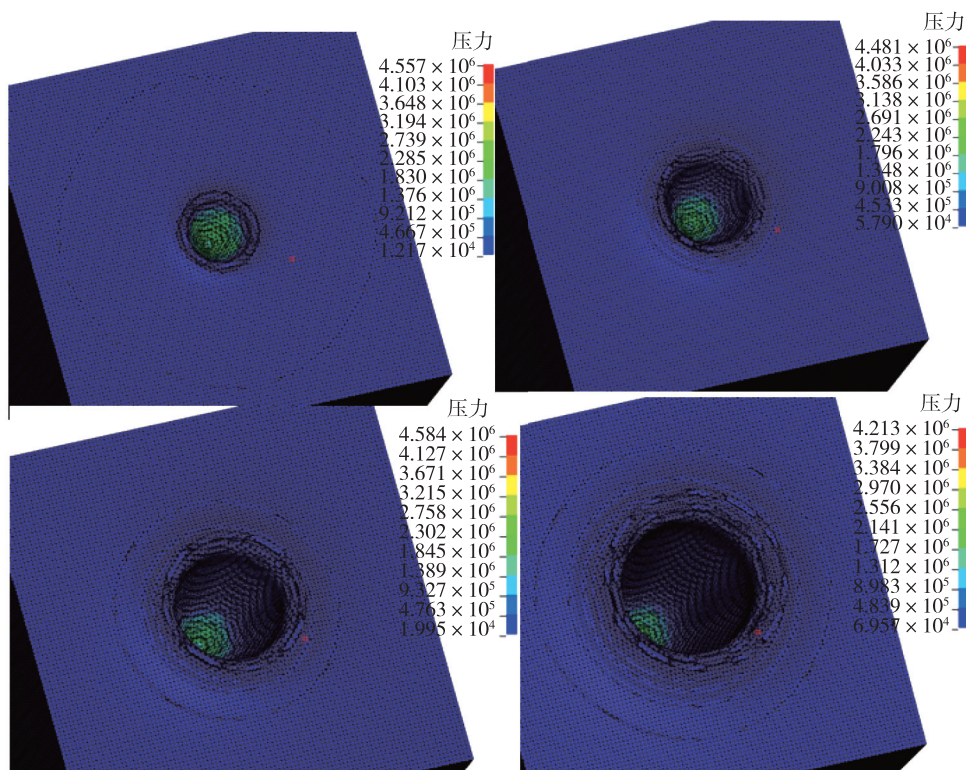
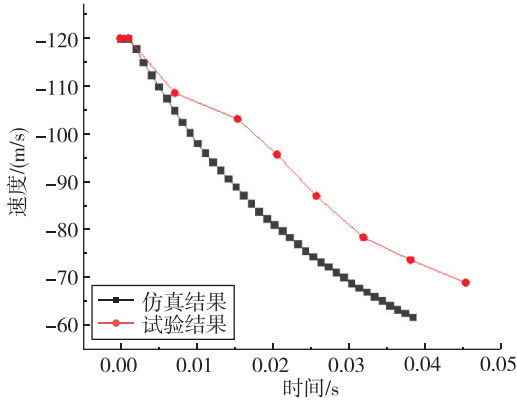


图 7 锥头柱体垂直入水不同时刻状态水面压力图  
Fig. 7 Water surface pressure at different times

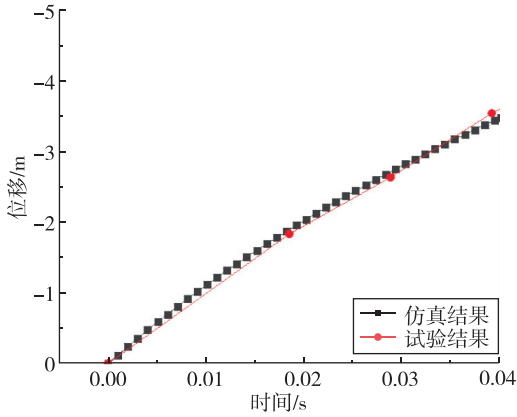
图 8 为锥体头部以入水速度 120 m/s 垂直入水，接触水之后的 0.04 s 期间加速度、速度和位移结果，并与试验结果进行对比。LS-DYNA 仿真具有较高准确性，速度误差在 10% 以内。LS-DYNA 获得的冲击速度低于试验中测量的冲击速度，随着时间的推移，它们之间的差异变大，速度误差产生的原因是仿真模型结构自由运动产生的摩擦大于测试系统实际摩擦。位移即入水深度在 0.04 s 内误差较小，但随着时间的推移，测量值和仿真模型的偏差逐渐加大。垂直入水工况下

的截面弯矩数值较小，截面弯矩产生阶段为入水冲击阶段以及空泡闭合阶段。在高速入水工况下，入水瞬间以及空泡闭合时的尾拍都会使航行体受到明显的弯矩载荷。

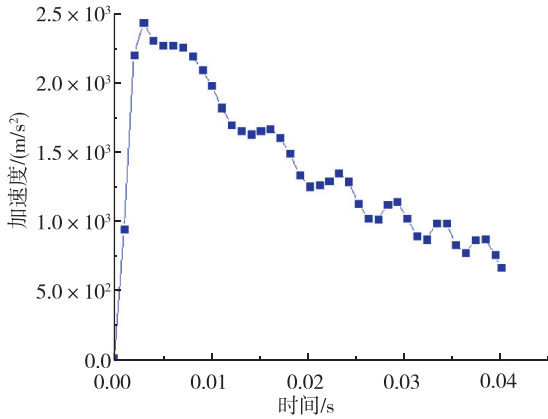
垂直入水工况改变入水初速度，通过对仿真结果分析可得到随着入水初速度的衰减，加速度幅值变化如图 9 所示。随速度增加，加速度幅值开始变化较小，随后变化明显。这可能是因为超空泡显著降低了结构在入水初始阶段的阻力。随着初始速度的增加，结构在入水冲击瞬间受到的截



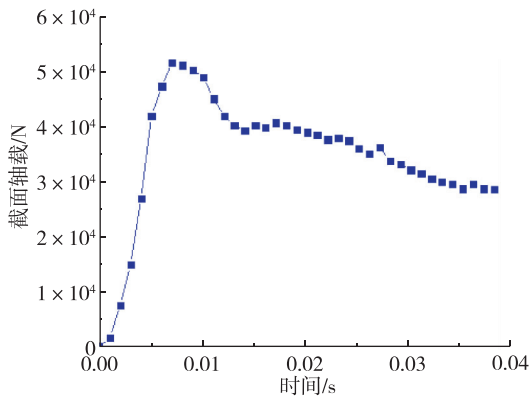
(a) 速度随入水时间结果



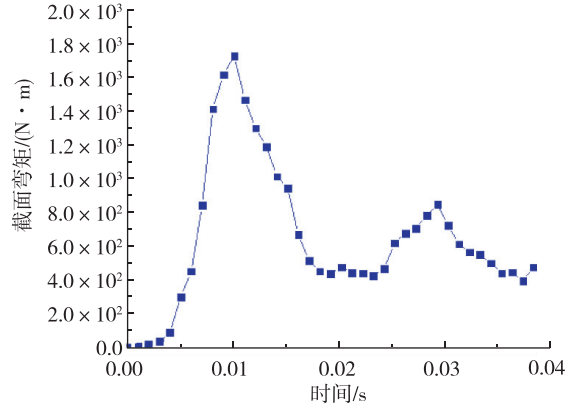
(b) 位移随入水时间结果



(c) 加速度随入水时间结果



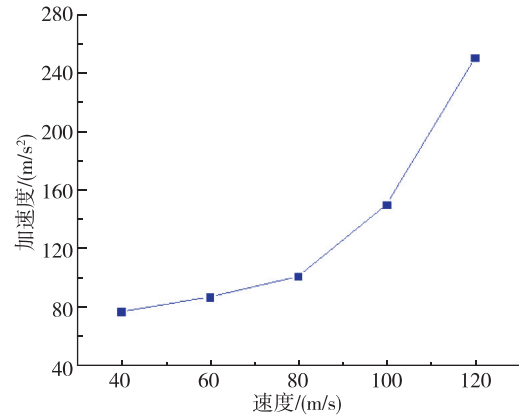
(d) 截面轴载随入水时间结果



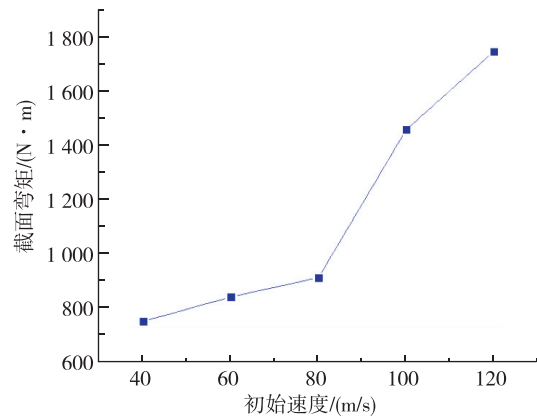
(e) 截面弯矩随入水时间结果

图8 锥头柱体 120 m/s 垂直入水加速度、速度、位移和截面载荷结果

Fig. 8 120 m/s vertical water-entry acceleration, velocity and displacement



(a) 不同速度对入水瞬间最大加速度的影响



(b) 不同速度对入水瞬间最大截面弯矩的影响

图9 不同入水初速度下加速度、截面弯矩峰值结果

Fig. 9 Acceleration and section bending moment under different initial water-entry velocities

面弯矩载荷逐渐增大, 轴向冲击载荷的峰值呈上升趋势。

#### 4 结论

1) 基于流固耦合运用 ALE 算法研究三维航行体入水冲击数值模拟方法, 获取了模型入水冲击过程中的冲击系数、表面压力、加速度、速度及流固耦合形态等结果。

2) 对比试验分析网格密度、接触刚度以及时间步长对数值仿真模型准确性的影响。冲击区域网格密度和接触刚度耦合系数决定流固耦合接触刚度。网格密度对数值模型准确性非常重要, 尤其是对于冲击系数以及加速度的准确预估。耦合因子 PFAC 对于结构所受表面压力具有一定的影响, 但结构上受力对耦合因子不敏感。

3) 针对锥形头圆柱体模型垂直入水, 建立不同入水初速度下的仿真模型, 提出分段刚体计算截面载荷方法, 研究不同速度下结构入水冲击加速度、速度、位移和截面载荷变化规律。结果表明, 入水冲击模型准确度高, 验证了仿真方法的有效性。入水速度越大, 结构振动和冲击最大幅值越高。随着初始速度的增加, 结构在入水冲击瞬间受到的轴向冲击载荷和截面弯矩载荷逐渐增大。

#### 参考文献

- [1] 魏洪亮, 赵静, 徐志程, 等. 基于流固耦合的航行体高速入水规律研究 [J]. 导弹与航天运载技术, 2020 (2): 33-37.
- [2] Chuang S L. Investigation of impact of rigid and elastic bodies with water[R]. Structural Analysis, 1970: 1-124.
- [3] Derakhshanian M S, Haghdel M, Alishahi M M, et al. Experimental and numerical investigation for a reliable simulation tool for oblique water entry problems [J]. Ocean Engineering, 2018, 160:231-243.
- [4] Luo H B, Wang S, Guedes Soares C. Numerical prediction of slamming loads on rigid wedge for water entry problem by an explicit finite element method [M]. Taylor & Francis, UK, 2011: 41-47.
- [5] Howison S D, Ockendon J R, Wilson S K. Incompressible water entry problems at small deadrise angles[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1991, 222:215-230.
- [6] Wilson S K. A mathematical model for the initial stages of fluid impact in the presence of a cushioning fluid layer[J]. Journal of Engineering Mathematics, 1991, 25(3):265-285.
- [7] Yettou E M, Desrochers A, Champoux Y. Experimental study on the water impact of a symmetrical wedge[J]. Fluid Dynamics Research, 2006, 38(1): 47-66.
- [8] Cui S J, Cheong H K, Hao H. Experimental study of dynamic post-buckling characteristics of columns under fluid-solid slamming[J]. Engineering Structures, 2000, 22 (6):647-656.
- [9] De Backer G, Vantorre M, Victor S, et al. Investigation of vertical slamming on point absorbers[C]. Proceedings of the 27<sup>th</sup> International Conference Offshore Mechanics Arctic Engineering, 2008.
- [10] 马春生, 黄世霖, 张金换, 等. LS-DYNA 的 ALE 方法在飞船返回舱着陆仿真中的应用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, 46(8): 1455-1457.
- 引用格式: 于佳晖, 贾亮, 朱元夫. 基于流固耦合航行体入水冲击数值模拟研究[J]. 宇航总体技术, 2022, 6(1): 31-37.
- Citation: Yu J H, Jia L, Zhu Y F. Research on numerical simulation of water-entry impact based on fluid-structure coupling[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2022, 6(1): 31-37.