

水中兵器空投入水冲击仿真分析

张 臣, 奚慧巍

(中国人民解放军 91439 部队, 辽宁 大连 116041)

摘 要 水中兵器空投入水瞬间,在强大的水流冲击作用下,弹体结构会承受较大载荷。首先采用近似理论分析了弹体垂直入水时的最大载荷,然后采用 LS-DYNA 对弹体空投入水过程进行了模拟仿真分析,包括垂直入水和倾斜入水。计算结果显示:仿真分析能很好地模拟弹体入水冲击过程,有较高的准确度,相比于近似理论分析,模拟仿真可用于各种头型弹体入水冲击计算,以及各种姿态的入水动态变化过程模拟分析,具有更广的应用范围。

关键词 空投;入水冲击;仿真分析

中图分类号 TJ430 文献标识码 A

Simulation Analysis of Water-entry Impact of Air-laid Underwater Weapon

ZHANG Chen, XI Huiwei

(Unit No. 91439 of PLA, Dalian 116041, China)

Abstract At the point of the underwater weapon entering into water from the air, under the strong fluid impact, the elastic structure will bear larger load. First, this paper analyzes the largest load when weapon vertically enters into water in the application of the approximate theory, and then makes simulation analysis of water-entry process of air-laid weapon using the LS-DYNA, including vertical water-entry and oblique water-entry. The computation results show that simulation analysis can simulate water-entry impact process of weapon with high accuracy, and comparing to the approximate theory analysis, simulation has lager application range in water-entry impact calculation of various head-shaped weapons and simulation analysis of water-entry dynamic changing process of various attitudes.

Key words air-laid; water-entry impact; simulation analysis

0 引言

入水冲击是一个高度非线性流固耦合的过程,是一种普遍问题,如军事上涉及的空投水雷、鱼雷和深水炸弹等水中兵器,民用上涉及的救生艇入水等^[1-6]。入水瞬时,尤其是高速入水^[7],液体会对入水结构体产生很高的冲击载荷,如果不加以防护和限制,很有可能导致产品结构的破坏、仪器失灵和弹道失控等现象发生。通过理论及仿真分析^[8]

可以准确地评估入水冲击对结构带来的各种影响,有助于本体结构的优化以及防护结构的开发,可以避免部分高耗时、高费用的试验分析,缩短开发时间,节约研究成本。

本文以水中兵器为研究对象,对其空投入水过程进行研究分析。一般来说,水中兵器有 2 种空投入水方法:一种是高空投放,弹体下降过程中会出现平衡速度,这是伞降的普遍现象,最终弹体会以接近垂直的姿态进行入水;另一种是低空投放,由

于弹体是静稳设计,在低空空投入水时,俯仰角很难出现剧烈变化,一般情况下弹体均会以大于 45° 俯仰角(弹体中心轴与垂直水面方向的角度)的姿态入水,在极端情况下,弹体可能会以 45° 的姿态入水。下文将通过理论及仿真分析垂直入水及几种倾斜入水时的入水冲击过载问题。

1 近似理论分析

水中兵器常用的弹体头型为尖拱、圆盘、平头,在同样弹体参数条件下,平头型弹体入水物理变化过程更加复杂,产生的冲击载荷最大,从流体动力学角度估算平头型弹体入水加速度的近似公式为

$$a = k \frac{v_0 d^2}{m} g \quad (1)$$

式中: k 为常数; v_0 为垂直入水速度; d 为弹体直径; m 为弹体质量; g 为重力加速度系数。

该近似公式由陈九锡、过永昌、张贵德提出,经试验验证,在一定条件下与试验值较接近,误差较小,但仅适用于评估平头型弹体垂直入水最大载荷。

2 仿真分析

本文另采用 LS-DYNA 程序以 ALE 算法进行弹体入水流固耦合分析,弹体结构部分网格采用拉格朗日坐标系进行描述,流体域网格采用欧拉网格进行描述,两种网格可以重合,之间通过接触作用力进行控制侵蚀度,从而实现耦合,整个分析过程忽略热影响,列出 ALE 控制方程为^[7]

$$\frac{\partial f(\Phi_i, t)}{\partial t} = \frac{\partial f(\phi_i, t)}{\partial t} - (v_i - u_i) \frac{\partial f(\phi_i, t)}{\partial x_i} \quad (2)$$

式中: Φ_i 、 ϕ_i 分别为拉格朗日坐标描述, ALE 坐标描述; v_i 、 u_i 分别为物质速度和 ALE 参考速度。

另根据质量守恒、动量守恒及能量守恒原理列出方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} = \rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} - (v_i - u_i) \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \\ \rho \frac{\partial v_i}{\partial t} = \sigma_{ij,j} + \rho b_i - \rho (v_i - u_i) \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \\ \rho \frac{\partial E}{\partial t} = -(\sigma_{ij} v_{i,j} + \rho b_i v_j) - \rho (v_i - u_i) \frac{\partial E}{\partial x_j} \end{cases} \quad (3)$$

式中:应力张量 $\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \mu(v_{i,j} + v_{j,i})$, δ_{ij} 为克罗内克函数; ρ 、 p 、 μ 、 b_i 和 E 分别为密度、压强、动态粘性密度、单位质量的体积力分量和内能。

利用式(2)和(3),再结合本构方程、状态方程,入水初始条件及边界条件,即可求解任意质点的位移、速度,压强等随时间变化的情况。

1) 仿真分析流程。

入水冲击仿真流程如图 1,首先在 CAD 软件中建立相关三维模型,导入网格划分软件(如 ICEM, HyperMesh)进行网格划分,以及定义边界条件及过程结果控制条件,生成 K 文件,导入 LS-DYNA 进行计算,最后进行数据处理,提取所需结果历程,生成最终计算报告,用于指导生产和试验。

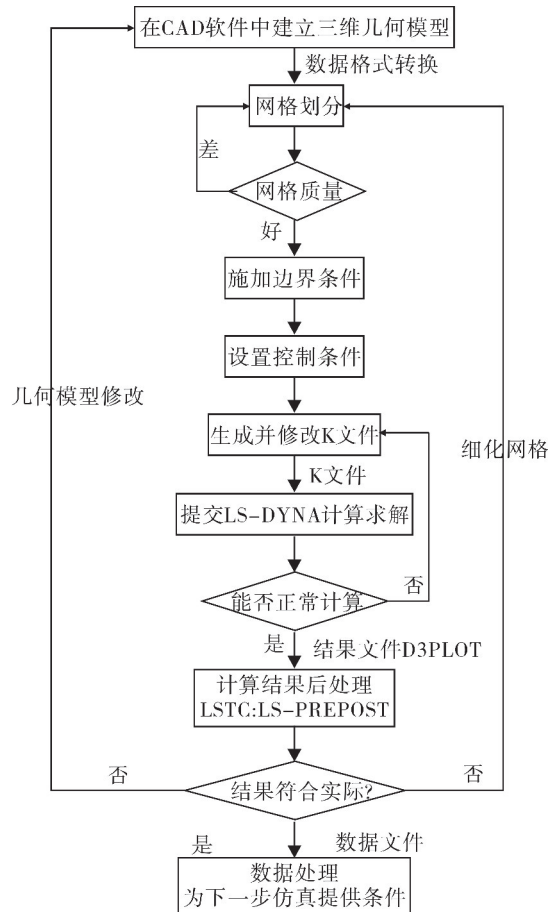


图 1 入水冲击仿真流程图

Fig. 1 Flow diagram of water-entry impact simulation

2) 仿真分析模型及边界条件。

有限元分析模型由弹体、水、空气组成,如图 2 所示,水、空气域采用欧拉网格建模,弹体采用拉格

朗日网格建模。

边界条件:为了模拟无限流体域效果,在水和空气模型边界施加无反射边界条件,为了实现水雷结构和流体的耦合,在空气与水雷结构边界、水与水雷结构边界通过罚函数建立约束方程,最后采用共用节点设置,实现空气和水边界的耦合。



图 2 击水过程有限元模型

Fig. 2 Finite element model of water striking process

3 计算结果及分析比较

1) 垂直入水分析。

弹体在空投速度 850 km/h、投放高度 1 000 m 时进行投放后,入水前弹体已经为平衡速度,根据计算平衡入水速度 $V=68\text{ m/s}$,入水角度与水面接近垂直,本节按极限垂直入水状态进行计算分析,也就是取入水俯仰角 $\theta=0$ 。

① 近似理论分析。

采用近似理论公式估算平头型弹体垂直入水的最大加速度值,常数 $k=8.16\times 10^3$,本文中 $v_0=68\text{ m/s}$, $d=0.534\text{ m}$, $m=1\ 038\text{ kg}$, $g=9.8\text{ m/s}^2$,代入公式(1)计算得:

$$a_t = 1\ 493.86\text{ m/s}^2$$

② 仿真分析。

采用仿真分析可得到弹体入水瞬间加速度时间历程如图 3:其中横轴为时间,s;图纵轴为加速度, km/s^2 。图中 A、B 分别为头部加速度、尾部加速度,垂直入水时,弹体头部及尾部所受的冲击基本一致,产生的最大加速度 $a_{L90}=1\ 120\text{ m/s}^2$,位于弹体头部。

2) 倾斜入水仿真分析。

① 45° 倾斜入水。

弹体在空投速度 850 km/h、高度 50 m 时进行投放后,若入水速度 $V=100\text{ m/s}$,入水俯仰角 $\theta=$

45°。采用仿真分析可得到弹体入水瞬间加速度时间历程如图 4。45° 倾斜入水时,弹体头部及尾部所受的冲击变化趋势基本一致,但在整个入水过程中产生的最大加速度为度 $a_{L45}=3\ 855\text{ m/s}^2$,位于弹体头部,在 0.035 时,会对弹体尾部产生相对较小的二次冲击。

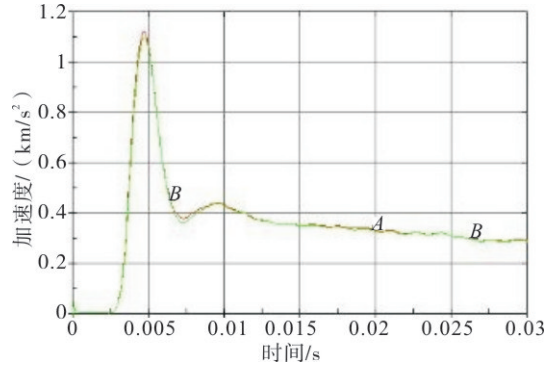


图 3 垂直入水瞬间加速度时间历程图
Fig. 3 Time history diagram of transient acceleration for vertical water-entry

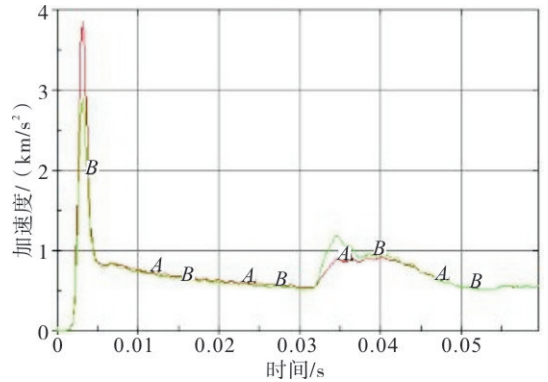


图 4 45° 倾斜入水瞬间加速度时间历程图
Fig. 4 Time history diagram of transient acceleration for oblique water-entry under 45°

② 75° 倾斜入水。

弹体在空投速度 850 km/h、高度 50 m 时进行投放后,若入水速度 $V=100\text{ m/s}$,入水俯仰角 $\theta=75^\circ$ 。采用仿真分析可得到弹体入水瞬间加速度时间历程如图 5。在整个入水过程中产生的最大加速度为度 $a_{L75}=2\ 402\text{ m/s}^2$,位于弹体头部,在 0.025 时,会对弹体尾部产生相对较高的二次冲击。

弹体在空投速度 600 km/h、高度 50 m 时进行投放后,若入水速度 $V=80\text{ m/s}$,入水俯仰角 $\theta=75^\circ$ 。采用仿真分析可得到弹体入水瞬间加速度时

间历程如图6。在整个入水过程中,弹体头部所受冲击大于尾部所受冲击,但趋势基本一致,入水最大冲击加速度为 $a'_{L75} = 1\ 903\ \text{m/s}^2$,位于弹体头部。

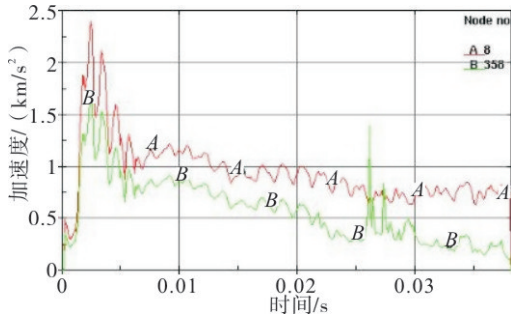


图5 75°倾斜入水加速度时间历程图($V=100\ \text{m/s}$)
Fig. 5 Time history diagram of transient acceleration for oblique water-entry under 75° ($V=100\ \text{m/s}$)

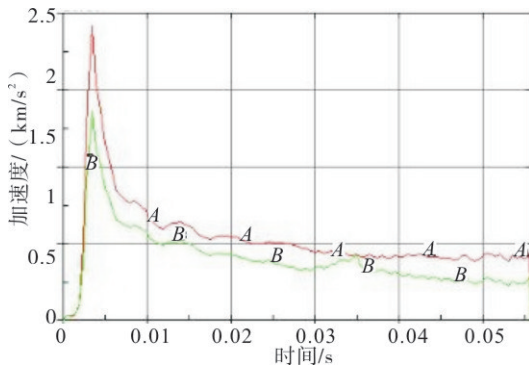


图6 75°倾斜入水瞬间加速度时间历程图
($V=80\ \text{m/s}$)

Fig. 6 Time history diagram of transient acceleration for oblique water-entry under 75° ($V=80\ \text{m/s}$)
3)分析及比较。

通过理论计算及仿真计算,汇总结果如表1。从计算结果可以看出,近似理论与仿真计算相对误差在25%左右,近似理论值偏大,这主要是因为模拟仿真时,采用的是实物建模,弹体雷头并非理想圆柱平头体,而是有部分圆弧过度,这在一定程度上削弱了入水冲击载荷,因而模拟仿真结果更加接近于真实弹体入水载荷。并且,通过对不同角度及不同速度入水冲击仿真分析,还可以得知:在入水冲击速度一定的前提下,入水俯仰角越小入水冲击越高;在相同的入水俯仰角的前提下,入水速度越大产生的入水冲击越高。

表1 计算结果汇总表

Table 1 Summary list of calculation results

计算结果	初始条件			
	$V=68\ \text{m/s}$ $\theta=0^\circ$	$V=100\ \text{m/s}$ $\theta=45^\circ$	$V=100\ \text{m/s}$ $\theta=75^\circ$	$V=80\ \text{m/s}$ $\theta=75^\circ$
近似理论	1 493.86	—	—	—
仿真计算	1 120	3 855	2 402	1 903

4 结束语

通过对水中兵器空投入水冲击分析比较,说明了仿真分析能很好地对入水冲击过程进行模拟,相比于近似理论分析具有更加广阔的适用范围,能够对多种头型、多种入水姿态进行较准确的仿真,这将极大地促进水中兵器的开发研究,并且在一定程度上能缩减试验次数,节约开发成本,缩短开发时间。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 安世亚太公司.ANSYS 动力学分析指南[M].北京:安世亚太公司,2000.
- [3] 严中汉.试论鱼雷入水问题[J].中国造船,2002,43(3):88-93.
- [4] 谭天水,刘明治,刘海东,等.ANSYS 仿真跌落试验[J].机械,2004,31(8):33-41.
- [5] 郑金伟,宗智.2D 刚体椭圆头结构高速撞水模拟[J].鱼雷技术,2008,16(2):9-12.
- [6] 郑金伟,宗智.三维刚体椭圆头结构高速倾斜入水冲击模拟[J].船海工程,2012,41(3):7-9.
- [7] 宣建明,陈九锡.锥和球形头部物体的垂直入水计算[C]//全国计算流体力学会议论文集.北京:中国力学学会,1988:26-33.
- [8] 王永虎,石秀华.空投鱼雷斜入水冲击动力建模及仿真分析[J].计算机仿真,2009,26(1):46-49.