

鱼雷头部形状对入水影响的数值模拟研究*

李 强,石秀华,曹银萍

(西北工业大学航海学院,西安 710072)

摘 要:空投鱼雷的头部形状不仅影响其在空中和入水后的弹道,而且所受到的入水冲击载荷有很大的差别。为了研究鱼雷头部形状对入水的影响作用,文中利用 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟技术建立了鱼雷入水的有限元模型,并通过对三种不同头部形状的鱼雷入水过程的数值模拟,得到了不同头型的鱼雷垂直入水的压力响应曲线和速度响应曲线,在进行比较分析后讨论了头部形状对入水的影响规律。

关键词:ANSYS/LS-DYNA;鱼雷头型;动态响应;仿真

中图分类号:TJ63 文献标志码:A

Numerical Simulation of Influence of Different Shape of Torpedo Warhead on Water-entry Effect

LI Qiang, SHI Xiuhua, CAO Yinping

(School of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The shape of torpedo warhead affects the trajectory in air and water and impact force. In order to research water-entry effect of different shape of torpedo warhead, a finite element model of torpedo water-entry was built by ANSYS/LS-DYNA numerical simulation. Through numerical simulation of the process of torpedo water-entry with three shapes of torpedo warhead, the pressure response and speed response rule of the torpedo warhead case with different shape of warhead was obtained, and then the rules of the water-entry effect of different shape of warhead were compared.

Keywords: ANSYS/LS-DYNA, shape of warhead; dynamic response; simulation

0 引言

空投鱼雷入水时,在水面上下的气、水、物三者之间发生强烈的相互作用,伴随着许多物理现象的发生,且气、水、物各自发生一系列的复杂运动。这些现象及运动的特性主要决定于鱼雷的结构特点及入水条件^[1]。鱼雷头部几何形状对入水冲击载荷大小的影响很大,不同的头部形状所受到的冲击载荷不尽相同,因而有必要研究鱼雷头部形状对入水冲击的影响。

文中在仿真的基础上对不同头部形状的鱼雷入水冲击进行了数值模拟。首先建立截头锥形壳体鱼雷模型,计算的结果与文献[2]中截头锥形壳体垂直入水实验结果进行比较,以检验分析程序模拟鱼雷入水的可靠性。然后改变鱼雷

头部的形状,分别模拟不同头型鱼雷的入水过程。最后根据模拟仿真的结果,分析鱼雷头部形状对入水的影响。

1 ANSYS/LS-DYNA 程序算法介绍

ANSYS/LS-DYNA 是功能齐全的非线性显式分析程序,可以求解各种几何非线性、材料非线性和接触非线性问题。其算法的特点是以 Lagrange 为主,兼有 ALE 和 Euler 算法;以显式求解为主,兼有隐式求解功能;以结构分析为主,兼有热分析、流固耦合功能;以非线性动力分析为主,兼有静力分析功能^[3]。ANSYS/LS-DYNA 能够有效处理多物质流固耦合非线性动力学问题,非常适合于解决结构撞击水面动态响应的仿真分析。

* 收稿日期:2008-10-21

作者简介:李强(1983-),男,湖北荆门人,硕士研究生,研究方向:计算机辅助设计与制造。

LS-DYNA 程序的 Lagrange 算法单元网格附着在材料上,随着材料的流动而产生单元网格的变形。但是在结构变形过于巨大时,有可能使有限元网格造成严重畸变,引起数值计算的困难,甚至程序中止运算。Euler 算法则是材料在一个固定的网格中流动。ALE 算法与 Euler 算法的描述一样,但空间网格可以在空间任意运动。ALE 和 Euler 算法可以克服单元严重畸变引起的数值计算困难,并实现流固耦合的动态分析^[4]。

2 数值模型的建立

计算机在进行仿真模拟时,不可能把结构的每一个细节都考虑进去,那样必然会大大增加计算的时间,而对计算的结果并不会有很大的影响。因此在考虑实际结构基础上,在建模时可以忽略鱼雷的内部结构,忽略其中一部分对模拟计算结果影响较小的非重要结构,保留其外部几何特征,以建立计算模型。这样就可以建立相对简单的有限元模型来模拟鱼雷入水过程中鱼雷的运动与受力情况。

鱼雷入水的数值模拟模型采用 $cm-g-\mu s$ 单位制,三维有限元模型如图 1 所示。由于鱼雷和水域都是关于中心截面对称的,为了节省机时,只建立四分之一模型。其中,鱼雷结构壁厚 4mm,上段为柱状壳体,下段为截头锥形壳体。鱼雷在空气域中,空气域和水域的边界采用的是无反射边界来模拟无限水域的情况,这样处理得到的计算结果更接近于真实情况。鱼雷结构网格较流体网格密以保证界面不会出现渗透。而空气域和水域的接触面采用共节点,从而确保了模型流体网格的一致性,使得流体物质能够在不同流体物质的初始网格间输送。

文中在壳体结构、水以及空气单元都采用 solid 164 三维实体单元。在算法的选择上,针对不同的材料,体单元有着不同的计算公式。鱼雷选用拉格朗日(Lagrange)单元,采用单点积分算法,并使用基于粘性的沙漏控制算法来抑制单点积分可能引起的零能模式。水域和空气域选用的是任意拉格朗日-欧拉(ALE)单元。

由于在文中的仿真过程中有多种物质的相互作用,因而需要一种有效的方法对不同物质进

行耦合。在 LS-DYNA 中最常用的耦合算法是使用罚函数耦合算法对结构和流体域进行耦合,这种算法适用于无侵蚀的实体单元。罚函数耦合系数追踪拉格朗日节点(即从物质)和欧拉流体(主物质)物质位置间的相对位移。检查每一个从节点对主物质的贯穿,如果从节点不出现贯穿,就不进行任何操作;如果发生从节点对主物质表面的贯穿,界面力就会分布到欧拉流体的节点上^[3]。结构和流体域的交界面被定义为流固耦合面。当拉格朗日单元运动变形时,耦合面发生移动,欧拉网格也随之发生移动,在计算过程中耦合面充当欧拉材料的流场边界,同时欧拉材料对该边界产生压力,使模型的拉格朗日单元受到载荷的作用。

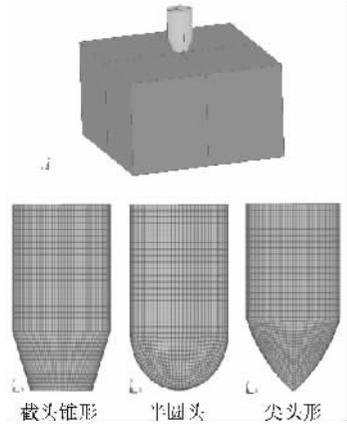


图 1 鱼雷入水三维有限元模型

材料模型在选择上与文献[1]中的实验条件相对应起来。文中的鱼雷采用钢质材料,选用 ANSYS/LS-DYNA 提供的 Johnson-Cook 材料本构模型,这是一种经验型的粘塑性本构模型,能较好地描述金属材料的加工硬化效应,应变率效应和温度软化效应。空气和水均选用 NULL 空白材料本构模型。在状态方程的选择上,钢、空气和水都选用 Gruneisen 状态方程。其中适用于 ANSYS/LS-DYNA 计算的 Gruneisen 状态方程参数采用文献[5]中的数据。

其中,Johnson-Cook 材料本构方程为:

$$\sigma_y = (A + B\bar{\epsilon}^n)(1 + c\ln\dot{\epsilon}^*) (1 - T^{*m})$$

式中: $\bar{\epsilon}^n$ 为等效塑性应变, $\dot{\epsilon}^*$ 为相对等效塑性应变率, T^* 为相对温度, A 为屈服应力, B 为应变硬化, n 为应变硬化指数, c 为应变率相关系数, m 为温度相关系数。钢质材料模型主要参数见表 1。

Gruneisen 状态方程为:

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2}} + (\gamma_0 + a\mu) E$$

式中: V_S 是冲击波速度, V_P 是质点速度, C 是 $V_S - V_P$ 曲线的截距, S_1 、 S_2 和 S_3 是 $V_S - V_P$ 曲线斜率的系数, γ_0 是 Gruneisen 常数, $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ 是体积变化率, a 是对 γ_0 和 μ 的一阶体积修正量, E 为材料内能。材料的状态方程主要参数见表 2。

表 1 钢质材料模型主要参数

材料	$\rho/(g/cm^3)$	A/GPa	B/GPa	c	n
钢	7.84	792	510	0.014	0.26

表 2 材料状态方程主要参数

材料	$\rho/(g/cm^3)$	$C/(cm/\mu s)$	S_1	S_2	γ_0	a
钢	7.836	0.4567	1.49	0	2.17	0.46
空气	0.00129	0.33	0	0	1.4	0
水	1.000	1.43	1.92	-0.096	0.35	0

3 结果及分析

为检验程序模拟鱼雷垂直入水的可靠性,对文献[1]中的实验进行了数值模拟。分别计算 $v = 4.43m/s$ 、 $v = 5.42m/s$ 、 $v = 7m/s$ 入水速度下的截头锥形鱼雷垂直入水过程。表 3 是压力峰值的计算值与实验值比较,其中有两处测点 P_1 和 P_2 ,此两处分别位于头部圆平板中央及 $2/5$ 半径处。从表中可以看出计算结果与实验值总体上比较吻合,说明文中建模所选取的参数是合适的。

表 3 不同速度下压力峰值的计算值与实验值比较

	$v_{p1}/(m/s)$		
	4.43	5.42	7
实验值 /Pa	4.7628E5	5.7820E5	8.5064E5
计算值 /Pa	4.7294E5	8.6867E5	9.0402E5
	$v_{p2}/(m/s)$		
	4.43	5.42	7
实验值 /Pa	4.0572E5	5.2234E5	6.6640E5
计算值 /Pa	3.8796E5	6.1865E5	6.5280E5

图 2 是截头锥形壳体入水冲击过程中底面中心的压力曲线,该曲线和文献[1]中的压力实验曲线大致吻合。从图 2 中可以看出,截头锥形

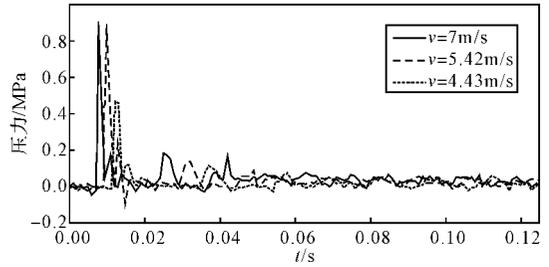


图 2 不同速度下截头锥形壳体底面中心压力曲线

壳体结构入水的最大撞击压力随着入水速度的增大而迅速增大,达到压力峰值的时间也越短。截头锥形壳体的底面可以看成是一个平底结构,在壳体接触水面的瞬间,作用在底面上的压力在很短的时间内就达到了压力峰值,随后迅速的衰减下去。结构以 $v = 7m/s$ 的初速度在 7.142ms 时压力已经接近峰值,而此时液面还没有发生很大的变化,这一现象与文献[6]的结论十分吻合,平底结构入水冲击的压力峰值更多的是由空气的压缩引起的,很好地说明了空气垫效应在平底结构入水冲击中的作用。

随后文中选取了截头锥形壳体、半圆头壳体和尖头形壳体这三种不同头部壳体形状的结构垂直入水过程进行仿真计算。结构的最低点距水面距离为 5cm,入水初速度均为 7m/s。图 3 为三种不同头部壳体形状结构入水冲击压力曲线,其壳体中心所受到的压力峰值依次减小,截头锥形壳体底面受到的冲击压力是最大的,作用持续时间也最长。同时三种不同头部壳体形状结构入水达到压力峰值所需的时间也越来越晚,而且说明空气垫效应对钝形的头部结构影响比较大,对尖锐的头部结构影响很小。

图 4 为三种不同头部壳体形状结构入水的速度曲线,由图可以看出截头锥形壳体在一开始入水时有一个很大的减速度,而尖头形壳体则入水速度变化比较平滑。在壳体的头部完全侵水之后,三种壳体的速度趋于稳定,并且速度曲线斜率大体相同。这说明结构物入水冲击压力影响其入水速度,冲击压力越大,发生的越早,则速度减小的也就越快。

4 结束语

文中基于 ANSYS/LS-DYNA 软件,对截头

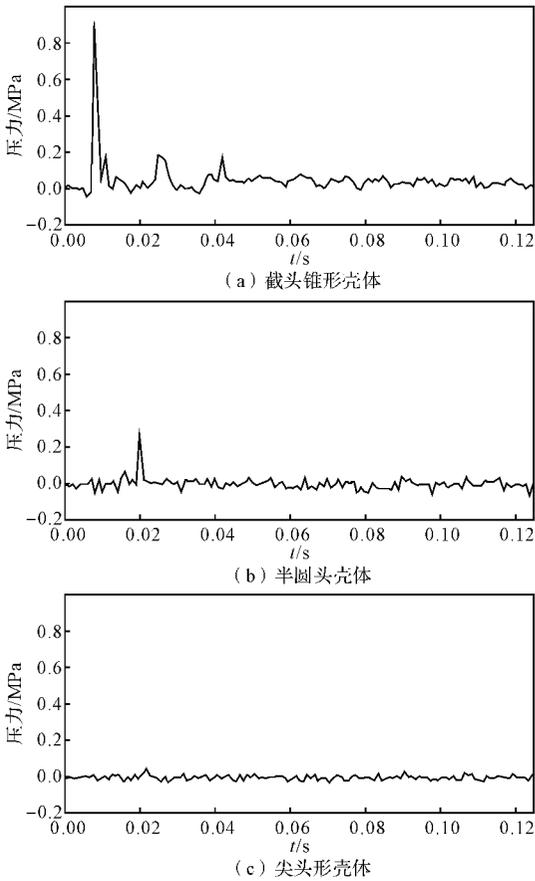


图 3 不同头部壳体中心压力曲线

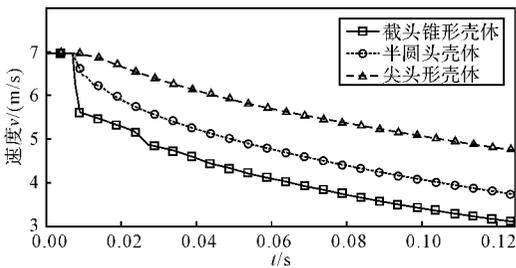


图 4 不同头部形状壳体速度曲线

锥形壳体、半圆头壳体和尖头形壳体垂直入水过程进行了数值模拟研究。在仿真计算中,考虑了空气、水和结构之间的耦合作用,分析了不同头部壳体形状的鱼雷入水过程中其底面所受到冲击压力的影响,得知截头锥形壳体在入水刚开始的时候所受冲击载荷是远大于半圆头壳体和尖头形壳体的。而如今绝大部分的鱼雷由于其工作原理上的要求一般都是截平头的,那么在空投发射时,虽然进入水中所用的时间很短,但其头部受到的冲击载荷十分巨大,很有可能对其结构或者内部元件造成损坏,因此应该采取一定的方法降低载荷水平,将其限制在一定的程度之内。当然,对于鱼雷头部壳体的线形对冲击入水过程的影响,还需要进一步开展更多的研究工作。

参考文献:

[1] 黄景泉,张宇文. 鱼雷流体力学[M]. 西安:西北工业大学出版社,1989.

[2] 张效慈,顾懋祥,程贯一. 平头旋转壳撞水水弹性实验的研究[J]. 实验力学,1989,4(4):388-394.

[3] 尚晓江,苏建宁. ANSYS/LS-DYNA 动力分析方法与工程实例[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005.

[4] 赵海鸥. LS-DYNA 动力分析指南[M]. 北京:兵器工业出版社,2003.

[5] 时党勇,李裕春,张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA8.1 进行显式动力分析[M]. 北京:清华大学出版社,2005.

[6] 陈震,肖熙. 空气垫在平底结构入水冲击中作用的仿真分析[J]. 上海交通大学学报,2005,39(5):670-673.

(上接第 166 页)

2) 弹体的弹道包括三个阶段,初始的直线运动段、中间的曲线运动段、最后的垂直下潜段。可以通过减小初始弹道倾角和增大初始速度获得较远的弹体落点。

3) 弹体极限下潜速度的大小只与弹体本身的参数有关。达到极限下潜速度的时间与初始速度和初始弹道倾角的关系不大。

4) 仿真得到的极限速度与相关试验结果相

吻合,获得的结论可以为相关研究提供参考。

参考文献:

[1] 张志涌. MATLAB 教程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2001.

[2] 魏凤昕. 火箭深弹外弹道学[M]. 北京:国防工业出版社,1992.

[3] 徐宣志. 鱼雷力学[M]. 北京:国防工业出版社,1992.