

# 导弹水中弹道的有限元数值计算<sup>\*</sup>

龚红良,王瑞臣,张笑

(海军潜艇学院,山东 青岛 266071)

**摘要:**应用有限元程序 ANSYS/LS-DYNA 对导弹水中弹道进行了仿真计算,获得了导弹水中弹道的速度、加速度以及位移的变化曲线,解决了过程计算的繁琐问题,为导弹水中弹道进一步的理论分析提供参考。

**关键词:**导弹;ANSYS/LS-DYNA;数值计算

**中图分类号:**E927

**文献标识码:**A

**文章编号:**1006-0707(2009)11-0042-02

导弹水中段一般是指从导弹离开发射筒瞬间起到导弹尾部离开水面为止的阶段,导弹水中弹道研究的也正是这一阶段。导弹出水过程是一个短暂、变化激烈而又复杂的过程,无论在理论上还是实验上至今还存在着一些疑难问题尚未完全解决。导弹出水运动是它自身惯性和周围介质施加在它上的力系的综合作用结果,同时,运动着的弹体又是周围介质产生运动的原因<sup>[1]</sup>。本文中通过有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 对导弹水中弹道的速度、加速度以及位移进行数值计算。

## 1 模型建立

### 1.1 建模分析

数值模型由水和导弹 2 部分组成,其中水介质材料采用欧拉网格建模,单元使用多物质 ALE 算法,导弹采用拉格朗日网格建模,导弹与水之间采用耦合算法。模型中水介质周边采用透射边界条件。本文中利用这一假设,采用单层实体网格建模。这种简化既可以充分利用 ANSYS/LS-DYNA 程序中的多物质 ALE 算法,又可以将模型尺寸大大减小。数值模型采用 cm-g-ms 单位制。图 1 和 2 是模拟导弹在水中 38.5 m,潜艇在水平方向以 8 节的速度发射导弹时的不同时刻的模型。

### 1.2 水模型<sup>[2]</sup>

ANSYS/LS-DYNA 中水介质的材料模型选用空白材料 (NULL),通过此材料来避免应力、应变的计算。水介质的状态方程模型选用 Gruneisen 模型。定义压缩材料的压力

$$p = \frac{0.5 C^2 \mu [1 + (1 - \frac{0}{2}) \mu - \frac{a}{2} \mu^2]}{(1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2})^2} + (0 + a \mu) E$$

其中:  $C$  为  $\mu_s - \mu_p$  曲线的截距;  $E$  为介质的初始条件下单

位体积的内能;  $S_1, S_2, S_3$  是  $\mu_s - \mu_p$  曲线斜率的系数;  $\mu = \frac{V_0 - V}{V_0} - 1$ ;  $a$  是  $V_0$  的一阶体积修正;  $\gamma_0$  是 Gruneisen 常数。水介质定义为 ALE 单元,网格划分较粗一些。计算所用的水介质的材料参数如表 1 所示。

表 1 水介质的材料参数

材料	密度 $\rho_0$ / (g/cm <sup>3</sup> )	$C$	GAMAO
水	1.025	1.647	0.35

### 1.3 导弹结构材料模型<sup>[3]</sup>

导弹的结构材料为铝合金。为了考虑材料在冲击载荷作用下不变形,数值计算中弹体采用 Lagrange 实体单元,使用 RigidMaterial 材料模型,弹体与空气和水间采用耦合算法。计算所用的弹体结构的材料参数如表 2 所示。

表 2 弹体结构的材料参数

材料	密度 $\rho_0$ / (g/cm <sup>3</sup> )	弹性模量	泊松比
铝合金	8.75	0.78	0.82

## 2 假设条件

- 1) 导弹在水中运动时,只考虑潜艇在水平方向上对导弹的影响,不考虑潜艇的横倾、纵倾以及潜艇的升沉速度。
- 2) 不考虑水流和波浪对导弹的影响。
- 3) 假设导弹是刚体,不考虑导弹在出筒过程中的变形。
- 4) 假设导弹弹出发射筒的速度一定。

\* 收稿日期:2009-09-27

作者简介:龚红良(1979—),男,陕西宝鸡人,硕士,工程师,主要从事效能评估研究。

### 3 数值计算

#### 3.1 算法处理<sup>[4]</sup>

为研究导弹水中弹道的速度、加速度以及位移等方面的情况,必须对导弹在运动过程中与水结构相互作用的过程进行分析,为此,添加用于控制 ALE 算法的 \*CONTROL\_ALE 关键字,在 Lagrange (弹体) 和 ALE (水) 之间相互作用的算法 \*ALE\_MULTI\_MATERIAL\_GROUP 以及流-固耦合控制 \*CONSTRAINED\_LAGRANGE\_IN\_SOLID.

#### 3.2 计算结果与分析

1) 导弹水中弹道速度的变化情况见图 1 和 2.

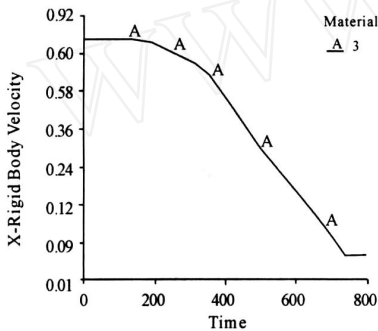


图 1 导弹在 X 方向速度的变化情况

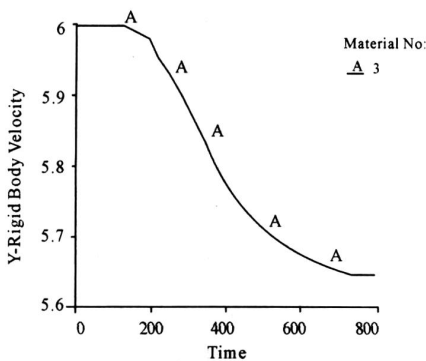


图 2 导弹在 Y 方向速度的变化情况

从以上数值模拟项目和测量数据来看,在几种假设的条件下获得的测量结果对实际的导弹水中弹道模拟具有一定的指导意义.从模拟的导弹速度的变化规律可以看出,导弹在水介质的作用下,X 方向的速度和 Y 方向的速度都在不断地减小.从理论上分析,这一变化是正常的,也是符合实际情况的.当导弹弹头接触水面时,在水介质中运动的时间为 2 000 ms,在 X 方向的速度由  $b$  m/s 变为  $c$  m/s, Y 方向的速度由  $d$  m/s 变为  $e$  m/s.这一过程显示了导弹在水中运动时,其动能受到水流体的阻力不断的减小.图 1、图 2 详细的描述了导弹在水中运动时的速度变化曲线.

2) 导弹水中弹道加速度的变化情况见图 3 和 4.

图 3 和 4 描述了导弹在水中运动过程中的 X, Y 方向的加速度变化情况.在 X 方向加速度的峰值变化主要集中在 900, 1 300, 1 600, 1 981 ms;在 Y 方向加速度的峰值变化

主要集中在 1 300, 1 400 ms.导弹加速度的产生是由于水流体黏性力的作用引起的.

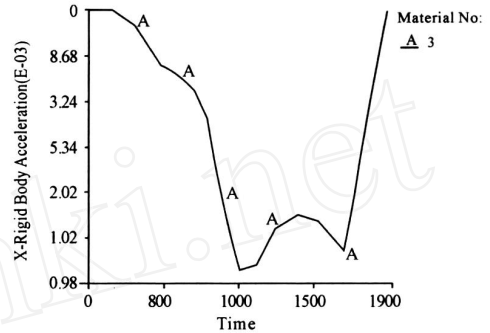


图 3 导弹在 X 方向加速度的变化情况

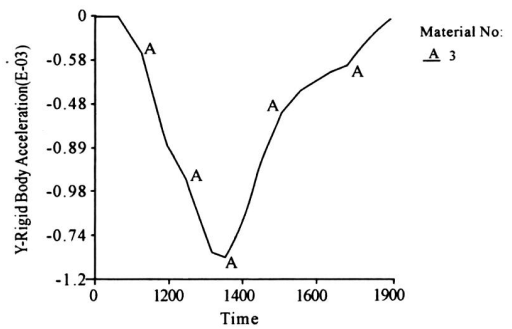


图 4 导弹在 Y 方向加速度的变化情况

3) 导弹水中弹道位移的变化情况见图 5 和 6.

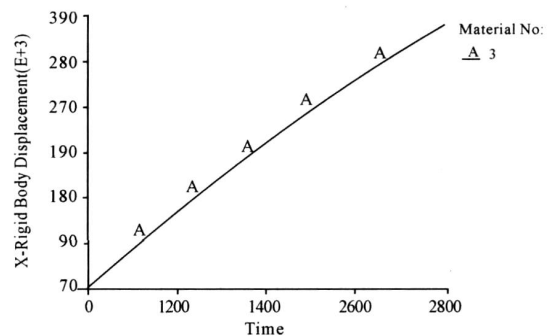


图 5 导弹在 X 方向位移的变化情况

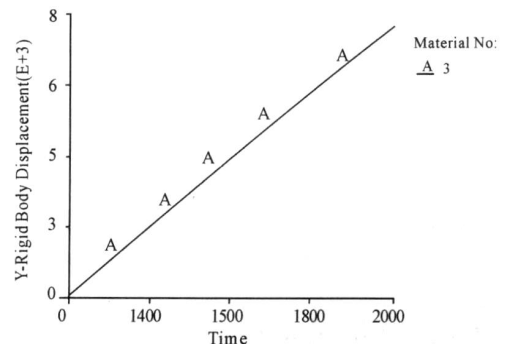


图 6 导弹在 Y 方向位移的变化情况

(下转第 59 页)

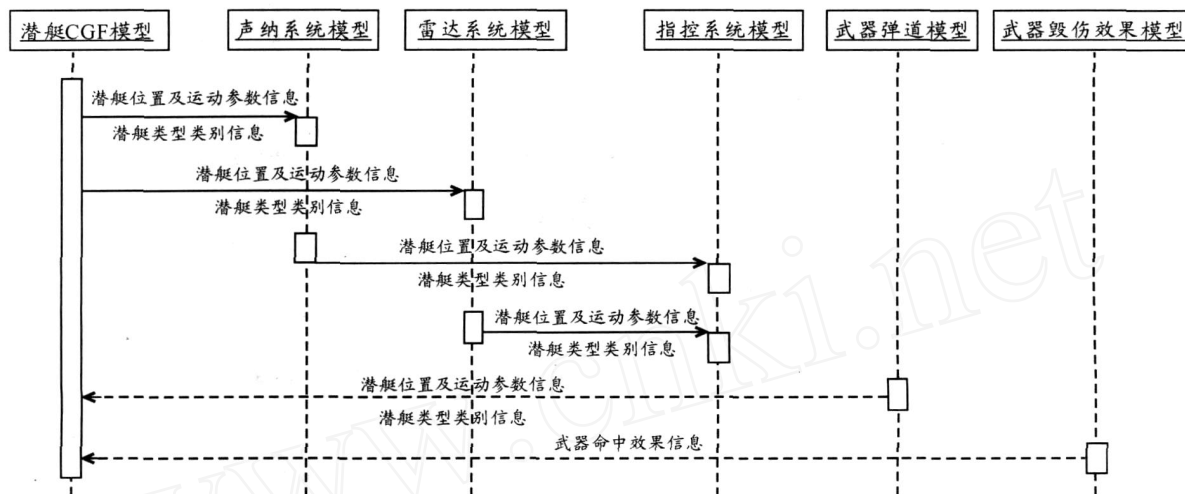


图5 潜艇作战仿真各个模型间信息交互关系

### 3 结束语

仿真程度高的潜艇作战不仅可为受训者提供近似战场环境下的作战对抗或协同兵力,还可为部队扩展训练内容、节省训练经费。潜艇作为一个高技术的作战平台,具有装备复杂多样、受外部环境制约因素多和武器装备多的特点,而基于 Web Service 的潜艇作战仿真平台可将各装备模型模块化封装、小粒度分解,不仅有利于模型资源的扩展和潜艇作战仿真精度的提高,也使得潜艇作战装备模型的发展更好地与实际装备发展同步。同时,研究人员还可以以分布式仿真为基本手段,验证和评估潜艇装备在潜艇作

战中的效能。

### 参考文献:

- [1] 史扬,陆铭华,吴金平. 基于 HLA 的潜艇作战仿真平台设计与实现[J]. 系统仿真学报, 2009.
- [2] 孙德建,陶旭. 基于 SOA 的军事信息系统应用集成研究[J]. 情报杂志, 2008(1): 57 - 60.
- [3] 李本昌,薛昌友. 现代潜艇作战软件的需求与技术难点[J]. 火力与指挥控制, 2004(29): 6.
- [3] 赵连军,彭炎午. 基于组件技术的应用系统开发服务模式[J]. 计算机工程与应用, 2004(6): 230 - 232.

(上接第 43 页)

图 5 和图 6 描述了导弹在水中运动过程中  $X$ ,  $Y$  方向的位移的变化情况。  $X$  方向的位移主要是由导弹出筒时潜艇在  $X$  方向上附加给导弹的初始速度引起的,位移值的大小取决于  $X$  方向上的初始速度的大小。在本文中的假设条件下  $X$  方向上的位移为 300 m。  $Y$  方向的位移主要是由导弹出筒时导弹在方向上的速度引起的,  $Y$  方向上的位移为  $x$  m,正好是导弹出筒时离水面的距离。由于在  $X$  方向和  $Y$  方向位移的产生,就有了偏航角的出现。

### 4 结束语

运用 ANSYS/LS-DYNA 软件分析导弹在水中的弹道情况,能够直观表达导弹在水中的运动状态,明确得到导弹

水中弹道的速度、加速度及位移的相关结果。模拟导弹水中弹道可以解决水中弹道试验规模大、耗资多的风险。

### 参考文献:

- [1] 赵国艳,宁学侃. 潜艇导弹水下弹道仿真研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2006(1): 16 - 19.
- [2] 尚晓江,苏建宇. 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, 2006.
- [3] 杜忠华. 动能弹侵彻陶瓷复合装甲机理[D]. 南京:南京理工大学, 2002.
- [4] 时党勇,李裕春,张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA 8.1 进行显式动力分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.