

导弹潜射过程的流体动力载荷仿真

刘兆 刘玉标 程载斌 申仲翰

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要: 导弹潜射过程是流-固-气三态耦合的非定常复杂过程, 更是决定导弹发射成败的关键。本研究运用 ANSYS/LS-DYNA 显式程序对导弹的水下发射过程进行了模拟, 以为导弹设计提供有益的技术参考。文中流体模型采用多物质 ALE 单元, 使用罚函数流-固耦合方法进行导弹潜射过程仿真, 流体初始静水压力应用动力学平衡方法进行初始化, 最终仿真得到导弹的流体阻力及压力分布时程曲线。基于仿真所得数据, 对导弹流体阻力系数进行了计算和讨论, 为导弹的流体阻力系数提供了一种全新的校核方法。

关键字: 潜射导弹; 流-固耦合; 流体阻力系数; 空泡作用; LS-DYNA

1 前言

潜艇是现代海军的重要组成部分, 同时也是重要的二次核打击武器。潜射导弹作为战略核潜艇的主要武器, 是战略核力量中生存能力最强的武器。导弹潜射过程是决定导弹发射成败的关键, 目前尚缺乏满足工程设计要求的分析理论与方法。

随着计算机、有限元以及系统仿真技术的发展, 理论分析在一定程度上可以获得比较好的计算结果, 但对结构复杂并在水下发射的导弹而言, 计算结果的精度尚不能满足工程实际应用的要求。因此, 试验测试仍然是结构强度分析的主要手段^[1]。但是作为一种既省时又经济的分析方法, 国内众多学者对导弹潜射进行了有益的数学仿真模拟^[2-4], 并结合试验测试数据获得了大量的仿真经验。通过数值模拟对导弹潜射过程中水的冲击阻力进行计算与分析, 为潜射导弹的总体设计提供了一种新的分析方法和参考依据。

2 计算模型

采用 ANSYS 软件建立 1/2 对称有限元模型。坐标系为笛卡儿坐标系, 弹体运动方向与 y 轴相同, $x-z$ 平面垂直于运动方向(图 1)。导弹长 13m, 直径 2m; 发射筒深 15m, 直径 2.2m; 水深 20m, 水域直径 40m; 上层空气高度 20m, 直径 40m; 蒸汽模型高度 18m, 直径 40m。导弹、发射筒和发射筒盖均采用 LAGRANGE 实体单元组成; 流体由 Multi-material ALE 实体单元组成。1/2 对称界面施加对称约束, 蒸汽底面施加位移全约束, 流体圆柱面边界施加透射

边界约束。

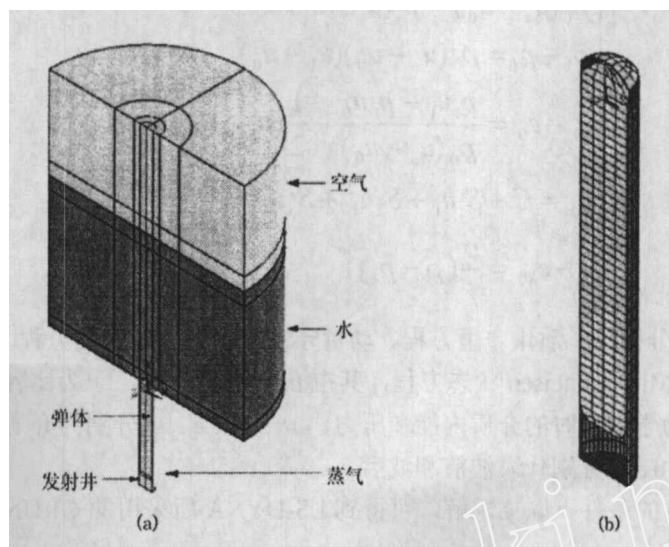


图1 模型示意图

(a) 总体示意图; (b) 弹体与发射筒放大图

模型材料见表1和表2。流体冲击过程如图2(a)，为了便于计算采用等效相对坐标流场——图2(b)进行计算。

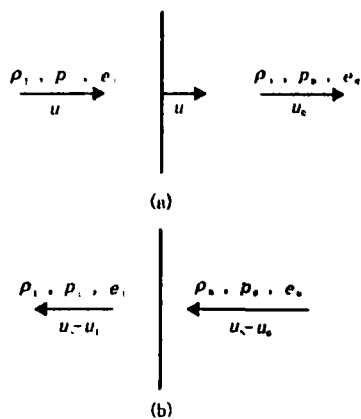


图2 冲击波前后状态示意图

(a) 真实流场; (b) 相对坐标流场

计算采用以下方程组：

$$\begin{cases} \rho_0(u_s - u_0) = \rho_1(u_s - u_1) \\ p_1 - p_0 = \rho_0(u_s - u_0)(u_1 - u_0) \\ e_1 - e_0 = \frac{p_1 u_1 - p_0 u_0}{\rho_0(u_s - u_0)} - \frac{1}{2}(u_1^2 - u_0^2) \\ u_s = C + S_1 u_1 + S_2 u_1^2 + S_3 u_1^3 \\ e - e_{k0} = \frac{v}{\gamma}(p - p_{k0}) \end{cases} \quad (1)$$

方程组中从上而下分别为：质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程^[5]、波速-粒子速度三次拟和曲线^[6]和 Mie-Grüneisen 状态方程，其中 u_s 为冲击波速， v 为比容， γ 为格林艾森常数， e_{k0} 、 p_{k0} 为热力学零度时的介质内能和压力， ρ 、 P 、 e 、 u 分别为介质密度、压力、内能和粒子速度，下标 0、1 分别代表波前和波后。

方程组(1)在 u_0 为 0 的条件下联立求解，可得到 LS-DYNA 所采用的 GRUNEISEN 状态方程：

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

根据相关资料^[5]，设定其参数为：波速 $C=1531\text{m/s}$ ，一次项系数 $S_1=2.56$ ，二次项系数 $S_2=-1.99$ ，三次系数 $S_3=0.227$ ，GRUNEISEN 系数 $\gamma=0.5$ ^[6,7]。

LINEAR_POLYNOMIAL 即线性多项式状态方程，空气参数如下： $C_1=C_5=0.4$ ， $E=0$ ；蒸汽参数为 $C_4=C_5=0.4$ ， $E=2.5 \times 10^{5[7]}$ ；

表 1 固体材料参数表

	材料模型	密度	杨氏模量	泊松比	屈服应力	硬化系数
导弹	mat-1	1000kg/m ³	0.200E+12Pa	0.3		
发射筒	mat-20	1000kg/m ³	0.200E+12 Pa	0.3		
筒盖	mat-3	1000kg/m ³	0.100E-2 Pa	0.3	1.1E-3Pa	1.0

表 2 流体材料参数表

	材料模型	密度	截断压力	运动粘性系数	状态方程
水	mat-9	1030 kg/m ³	-2.2E+10Pa	8.97e-7m ² /s	GRUNEISEN
空气	mat-9	1.225kg/m ³	-3.394e+6Pa	1.5e-5 m ² /s	LINEAR_POLYNOMIAL
蒸汽	mat-9	1.625kg/m ³	-2.205E+7Pa	1.5e-5 m ² /s	LINEAR_POLYNOMIAL

3 LS-DYNA 模拟

3.1 流体平衡初始化过程

潜射水深为 20m, 初始静水压力十分重要。忽略静水压力, 仿真将严重偏离流体力学理论计算结果。由于 mat-9 材料无法通过 LS-DYNA 的动力松弛功能进行流体静力平衡初始化, 故本文利用初始 0.3s 仿真时间等待流体重力达到平衡状态, 而后模拟加载推力, 进行发射仿真。同时为尽量接近发射真实状况, 导弹模拟发射前发射筒内必须无水, 发射筒盖在此时间内应该处于关闭状态, 而发射时刻筒盖必须开启以避免不真实的碰撞。

3.2. LS-DYNA 仿真过程

模型中筒盖材料为表 1 中 mat-3 材料参数 (此参数在小应力条件下即发生材料破坏), 运用刚体-变形体自动转化命令, 使筒盖在初始 0.3s 仿真时间内为刚体, 然后复原并进行发射过程仿真, 最终导弹冲破筒盖射入水中, 运用罚函数方法进行流-固耦合。

导弹发射筒底载荷采用峰值为 1.1MPa 持续 0.4s 的平滑压力曲线。

4 仿真结果

4.1 加速度和阻力曲线

计算模拟导弹潜射工程目的是获得导弹潜射时的水冲击阻力曲线和应力分布云图, 为导弹弹道和强度设计提供参考。图 3 为仿真所得导弹质心加速度曲线对比图, 图 4 为仿真所得水阻力对质心合力图。导弹在发射初期由于弹头被蒸汽包围, 极大的缓冲了水体对导弹的冲击作用(图 4)。

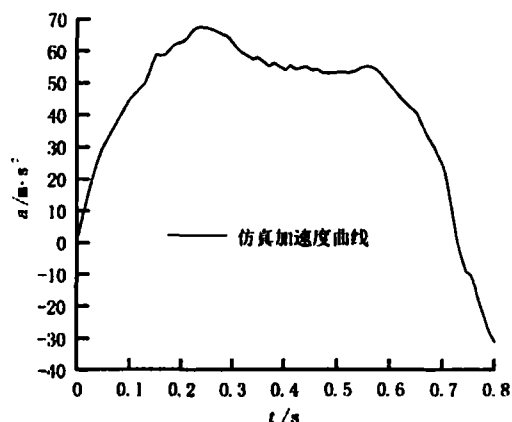


图 3 仿真导弹质心加速度曲线

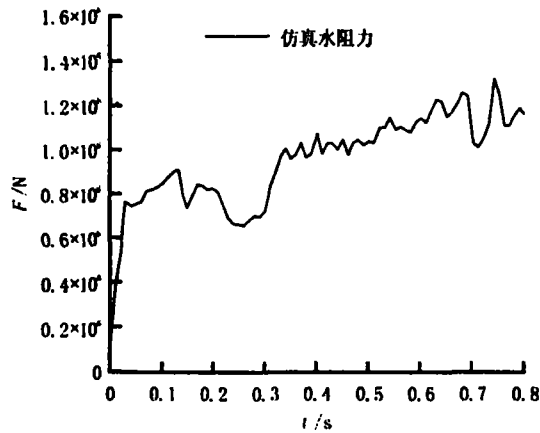


图4 仿真导弹水阻合力曲线图

4.2 空泡作用

导弹潜射过程中的空泡作用是影响导弹弹道的重要因素。由于空泡的产生和溃灭时压力突变过程对导弹材料要求较高，且在导弹小攻角潜射时，由于空泡的不平衡发展，往往会导致导弹迎水面和被水面的压力分布严重不平衡，对导弹产生弯矩，从而改变导弹的弹道，所以潜射过程中空泡的模拟一直是仿真工作一个关键点。本研究模拟水体所采用的 mat-9 材料模型并不支持严格的空泡仿真计算，但是当流体材料膨胀到压力小于其截断压力时，材料便不能阻碍本身的膨胀作用，从而出现“空泡”。虽然这种数学上的“空泡”与实际空泡的产生原理有一定差异，却可以在一定程度上反映了导弹潜射过程中空泡的产生过程。

空泡的作用主要反映在导弹表面压力的变化时程曲线上。图 5 和图 6 表示了随时间变化的导弹表面径向压力分布图，导弹顶部所受压力始终保持在 0.5MPa 附近，同时在发射 0.4s 后出现空泡作用，导弹前端部分出现低压区域，随后空泡（低压范围）不断向导弹后端发展，直至图 6 中 1.0s 时刻导弹压力分布状况，空泡尾端压力峰值为 0.2MPa。同时图 7 所示流场密度分布图，可以将此现象表现得更为具体明了。

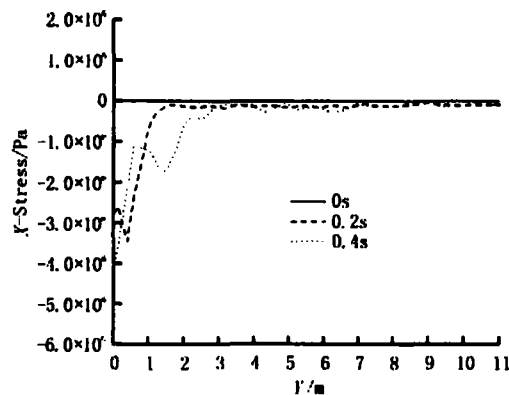


图5 导弹 0-0.4s 表面径向压力分布

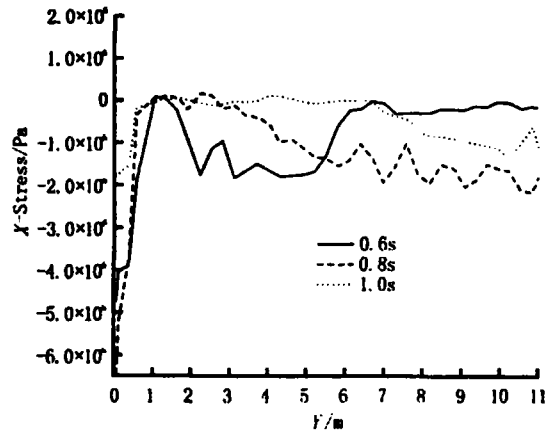
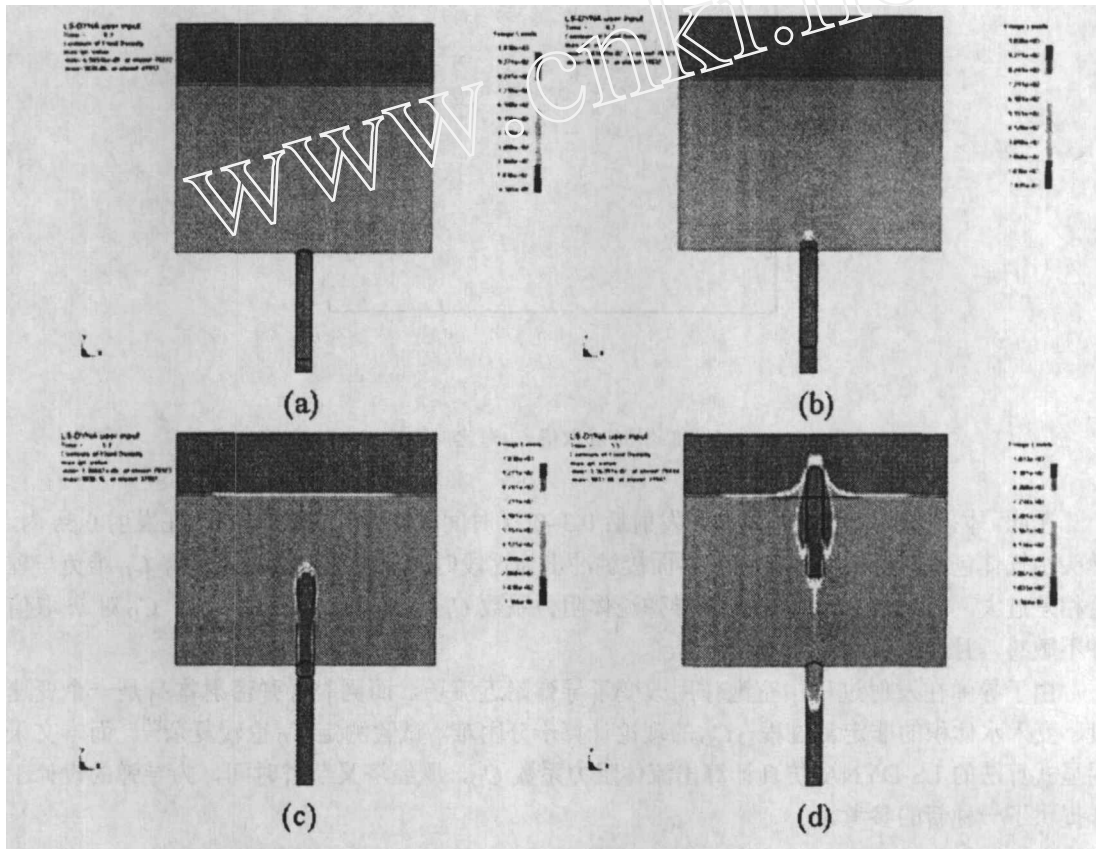


图6 导弹0.4-1.0s表面径向压力分布



(c) 发射0.8s密度分布图; (d) 发射1.2s密度分布图

图7 潜射过程流体密度分布

4.3 水阻力系数计算

根据流体力学理论, 计算导弹在原静止的无界流体中作变速直线运动, 作用于物面上的合力(Y 向)应为^[8]:

$$F_y = -P(t) - m(t)a(t) - \left[\frac{1}{2} \rho v(t)^2 \right] \cdot A \cdot C_D(t) \quad (3)$$

静水压力: $P(t) = \rho g h(t)A$, 其中 $h(t)$ —弹头离水面距离, $m(t)$ —轴向附加质量, g —重力加速度, $a(t)$ —加速度, ρ —流体密度, $v(t)$ —弹体质心相对水流速度。

$A = \pi D^2/4$ 为特征面积, $C_D(t)$ 为计算截面轴向力分布系数。

令 $m(t)$ 取值在 500~1500 kg 范围内, 利用已得仿真结果, 可求得如图 8 所示的 $C_D(t)$ 时程曲线。

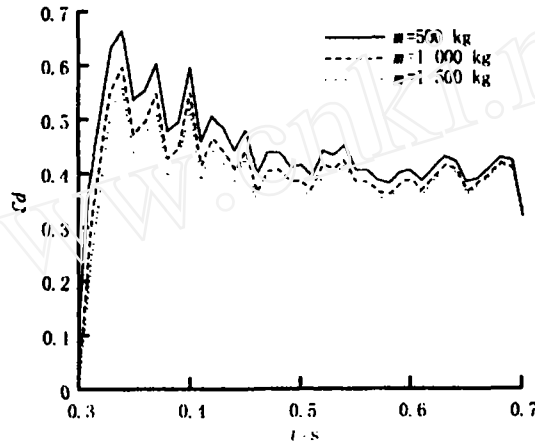


图 8 不同 m 取值 C_D 对比曲线

在此, 本研究只截取了仿真导弹发射后 0.3~0.7s 时间段进行 C_D 计算。因其在发射 0.3s 内, 弹头由气体包围, 且出筒距离小, 界面接触冲击为这段时间的主要作用力, 计算 C_D 难免与理论相差过大, 故只取 0.3s 以后进行导弹流体阻力系数 C_D 的计算。由图 8 可见, C_D 对 m 取值并不敏感, 且最终均收敛在 0.4 附近。

由于导弹在发射过程中空泡作用改变了导弹附近流场, 而同时导弹潜射本身是一个变速度、变入水体积的非定常过程, C_D 的理论计算十分困难, 试验测定 C_D 也较复杂^[9]。而本文采用显式算法的 LS-DYNA 仿真计算出流体阻力系数 C_D , 既经济又节省时间, 为导弹的设计工作提供了一种新的参考。

5 结论

潜射导弹是重要的战略武器, 同时其潜射过程是一个固-液-气多物质耦合的非定常过程。采用 LS-DYNA 对此过程进行了显式动力学分析, 建立了有限元多物质耦合模型, 并进行了模

拟计算。基于仿真结果，对导弹发射过程中的空泡作用进行了讨论，同时分析得到了导弹的 y 方向流体阻力系数 C_D 的时程变化曲线。文中所采用的显式算法的 LS-DYNA，经济又节省时间，为潜射导弹设计中的仿真模拟提供了一项新的技巧方法。

参 考 文 献

- 1 牟志华, 王基玉. 潜射导弹发射原点测量方法. 飞行器测量学报, 2006, 4(25): 49-51.
- 2 王聪, 王学孝, 徐世昌, 张嘉钟. 潜射导弹运动特性的分析与测试. 导弹与航天运载技术, 2002, 2: 12-15.
- 3 曹嘉怡, 鲁传敬, 李杰, 吴磊. 潜射导弹水下垂直自抛发射过程研究. 水动力学研究与进展(A), 2006, 6(21): 752-759.
- 4 刘曜, 马震宇. 导弹水下垂直发射的弹道研究. 战术导弹技术, 2006, 2: 21-25.
- 5 张守中. 爆炸与冲击动力学. 北京: 兵器工业出版社, 1993: 376-390.
- 6 M'hamed Souli. LS-DYNA advanced course in ALE and fluid/structure coupling. 8th International LS-DYNA Users Conference, 2004: 30-33, 103-111.
- 7 李裕春, 时党勇, 赵远. ANSYS10.0/LS-DYNA 基础理论与工程实践. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 237-244.
- 8 潘文全. 流体力学基础. 北京: 机械工业出版社, 1984: 271-292.
- 9 J G 沃, G W 斯塔奈斯德. 水弹道学模拟. 北京: 国防工业出版社, 1979: 4-11, 120-145.

The numerical method for fluid resistance of launching process of underwater missile

LIU zhao LIU Yu-biao CHENG Zai-bin SHEN Zhong-han

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: The launching process of underwater missile is a quite complicate process. In the present paper, the model with ALE multi-material element was built to simulate the vertical launching process of underwater missile by using the FEA code LS-DYNA. The penalty FSC (Fluid/Structure Coupling) method was adopted. The water resisting force and the pressure to the missile were obtained. Based on fluid mechanics and impact dynamics, the fluid drag coefficient was calculated. It could provide a new kind of reference standard for missile design work.

Key words: Submarine-carried missile, Fluid/Structure Coupling, Fluid drag coefficient, Cavitation, LS-DYNA