

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.01.006

基于 ANSYS/LS-DYNA 的波浪对潜射导弹出水姿态影响分析

崔奇伟, 王瑞臣

(海军潜艇学院 研究生队, 山东 青岛 266071)

摘要: 波浪是影响潜射导弹出水姿态的重要因素, 直接关系到导弹出水后空中飞行的成败。利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元动力分析软件, 建立了潜射导弹出水过程三维模型, 分析了潜射导弹在纵浪影响下出水姿态变化过程。结果表明, 潜射导弹出水俯仰角、俯仰角速度随浪级和出水相位的变化而变化, 浪级越大, 变化越显著。

关键词: ANSYS/LS-DYNA; 纵浪; 出水姿态; 俯仰角

中图分类号: TJ760.12; N945.12 **文献标志码:** A

Wave Effect on Gesture Perforating Water of Submarine-Launched Missile

Cui Qiwei, Wang Ruichen

(Brigade of Postgraduate, Submarine Academy of the Navy, Qingdao 266071, China)

Abstract: Wave is an important factor affecting missile's gesture perforating water, which relate to missile flying in air. A three dimension model of Submarine-launched missile perforating water was established based on ANSYS/LY-DYNA program, and the effect of longitudinal wave on missile was analyzed. Result shows that pitching angle and its velocity of missile launched under water changes with missile's location perforating wave and wave's height.

Keywords: ANSYS/LS-DYNA; longitudinal wave; perforating gesture; pitching angle

0 引言

潜射导弹从运动中的潜艇上发射出水, 经过筒中段、水中段和出水段进入空中飞行段, 在导弹出水过程中, 不可避免地受到波浪的影响。由于波浪运动的表面性, 导弹越接近水面, 受到波浪的影响越显著, 其出水姿态随之发生相应的变化。实验和计算表明, 导弹的出水姿态不但与浪级、波浪的传播方向有关, 同时与导弹出水处的相位有关^[1]。

潜射导弹水下高速无控运动决定了导弹水中绕流具有高动压、非定常和多相介质的特点。ANSYS/LS-DYNA 程序具有强大的非线性分析和接触分析能力, 适合于解决流固耦合问题, 是导弹设计和实验可以采用的有效工具。在工程应用领域被广泛认可为最佳的分析软件包, 同时与实验的无数次对比证实了其计算的可靠性^[2]。故运用 ANSYS/LS-DYNA 计算潜射导弹在纵浪影响下出水俯仰角和俯仰角速度, 分析纵浪对潜射导弹出水姿态的影响, 以详细了解导弹出水过程及其姿态变化情况。

1 微幅波数学模型

实际海洋中的海浪是一种十分复杂的现象, 严格说并不是真正的周期性变化。但作为最低近似, 可以把实际的海浪看作是简单波动(正弦波)或简单波动的叠加, 因为简单波动的许多特性可以直接应用于解释海浪运动的性质。

1.1 微幅波模型

微幅波模型由 Airy 提出, 又称为 Airy 波理论, 假设如下:

- 1) 流体是无粘性不可压缩的均匀流体;
- 2) 流体作有势的运动;
- 3) 重力是唯一的外力(回复力);
- 4) 流体自由表面上的压强等于大气压 P_a ;
- 5) 海底为水平的固体边界;
- 6) 波幅或波高相对于波长是无限小, 流体质点的运动速度是缓慢的。

Airy 波的数学模型为:

速度势^[1]

$$\varphi(x, z, t) = -\frac{ga}{\omega} \frac{\cosh[k(z+d)]}{\cosh(kd)} \sin(kx - \omega t) \quad (1)$$

自由表面

$$\eta(x, t) = a \cos(kx - \omega t) \quad (2)$$

式中, x 为波传播方向; z 为水深; a 表示微幅波振幅; k 表示波数; λ 为波长; ω 为波动圆频率; T 为波动周期。

当水深 d 与波长 λ 的比值等于或大于 1/2 时, 即为深水情况。在深水情况下, 微幅波速度势可简化为:

$$\varphi(x, z, t) = -\frac{ga}{\omega} e^{kz} \sin(kx - \omega t) \quad (3)$$

深水波的水质点速度为:

收稿日期: 2010-08-21; 修回日期: 2010-10-25

作者简介: 崔奇伟(1979-), 男, 河南人, 从事武器装备使用与效能分析研究。

$$\left. \begin{aligned} u &= a\omega e^{kz} \cos(kx - \omega t) \\ v &= -a\omega e^{kz} \sin(kx - \omega t) \\ \sqrt{u^2 + v^2} &= a\omega e^{kz} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

由式 (4) 得到流体质点绕平均位置点轨迹坐标:

$$\left. \begin{aligned} x &= x_0 - ae^{kz_0} \sin(kx_0 - \omega t) \\ z &= z_0 + ae^{kz_0} \cos(kx_0 - \omega t) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由式 (5) 得到流体质点轨迹方程为:

$$(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2 = a^2 e^{2kz_0} \quad (6)$$

由式 (5)、式 (6) 可以看出, 深水波水质点运动轨迹是以半径为 ae^{kz_0} 的圆, 随着水深的增加, 水质点的速度呈指数下降, 在水深为一个波长的深度, 速度只有表面的 1/535, 这也正说明了波动的表面性, 在这样的深度几乎不受波浪的影响。正是由于海浪波动的表面性, 越接近水面, 水质点速度越大, 导弹受到的波浪力越大, 并且随着浪级的增大波浪对导弹的影响将越发显著。

1.2 波浪定义

根据波浪的传播方向与导弹 x 轴向速度方向的夹角 δ 将波浪分为纵浪、横浪、首斜浪和尾斜浪。

纵浪: 波浪方向与导弹 x 轴向速度方向相同 (随浪) 或相反 (迎浪), $\delta=0^\circ$ ($\delta=180^\circ$)。

首斜浪: 波浪方向在导弹 x 轴向速度方向侧前方 $90^\circ < \delta < 180^\circ$, $180^\circ < \delta < 270^\circ$;

尾斜浪: 波浪方向在导弹 x 轴向速度方向侧后方 $0^\circ < \delta < 90^\circ$, $270^\circ < \delta < 360^\circ$;

横浪: 波浪方向与导弹 x 轴向速度方向垂直, $\delta=90^\circ$, $\delta=270^\circ$;

在本文中, 主要分析随浪和迎浪条件下导弹出水姿态变化情况。

2 导弹出水过程有限元模型

2.1 基本假设

1) 导弹为刚体, 其外形关于纵平面对称; 不考虑导弹在发射筒内的滚转和压缩适配器产生的初始俯仰角 (速度);

2) 发射艇纵 (横) 摇角 (速度) 为零, 相对海流匀速航行;

3) 导弹初始运动时完全浸没于流体介质, 处于完全沾湿状态。

2.2 几何模型与材料

导弹采用 LAGRANGE 实体单元, 水和空气采用

ALE 实体单元; 水域尺寸为 $20\text{ m} \times 16\text{ m} \times 60\text{ m}$, 上层空气高度 18 m 。导弹、水和空气之间采用多物质 ALE 耦合算法。

水材料模型采用空白材料, GRUNEISEN 状态方程^[2]:

$$p = \rho_0 C \mu \frac{[1+(1-\frac{\gamma_0}{2})\mu-\frac{b}{2}\mu^2]}{[1-(S_1-1)\mu-S_2\frac{\mu^2}{\mu+1}-S_3\frac{\mu^3}{(\mu+1)^2}]} + (\lambda_0 + b\mu)E \quad (7)$$

其中: p 为介质压力; ρ_0 为波前介质密度; C 为冲击波速; γ_0 为 GRUNEISEN 常数; S_1 、 S_2 和 S_3 分别为 Mie-GRUNEISEN 状态方程 $\mu_s = C + S_1\mu_1 + S_2\mu_2^2 + S_3\mu_1^3$ 的一次项系数、二次项系数和三次项系数; b 为 GRUNEISEN 常数 γ_0 的一阶体积修正; $\rho = \rho / \rho_0 - 1$, 文中设定水模型参数为: 波速 $C=1\ 531\text{ m/s}$; 一次项系数 $S_1=2.56$, 二次项系数 $S_2=-1.99$, 三次项系数 $S_3=0.227$, $b=0$, GRUNEISEN 系数 $\gamma=0.5$ 。

空气材料选用空白材料模型, 采用线性多项式状态方程 Linear Polynomial^[2]:

$$p = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E \quad (8)$$

其中: $C_0 \sim C_6$ 为线性多项式状态方程系数。 $C_0=C_1=C_2=C_3=C_6=0$, $C_4=C_5=0.4$, $E=2.5 \times 10^5$ 。

刚性体模型在显式动力分析中有着非常重要的意义, 导弹选用刚体材料 (RIGID) 模型, 这样可以加快运算速度, 节省分析时间。如表 1、表 2。

表 1 固体材料参数

名称	$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	E/Pa	R_0
导弹	2.7×10^3	0.2×10^{12}	0.3

表 2 流体材料参数

名称	$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	P/Pa	$\mu/\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
水	1.02×10^3	-2.2×10^{10}	8.97×10^{-7}
空气	1.225	-3.394×10^{10}	1.5×10^{-5}

2.3 边界条件

水域底面施加全约束; 为了用有限的空间来模拟无限空间, 对水域和空气域四周边界施加透射边界约束。

3 数值分析

3.1 出水姿态角计算

取导弹轴线顶端点 A 和底端点 B , 两端点之间的距离即为导弹的长度 L 。2 个端点在艇速方向上的位移的差为 $(X_A - X_B)$, 其值随导弹运动时间变

化而变化, 那么导弹的俯仰角偏差 $\Delta\phi = \arcsin \frac{X_A - X_B}{L}$; 俯仰角速度为 $\dot{\phi} = \frac{\Delta\phi_{i+1} - \Delta\phi_i}{t_{i+1} - t_i}$ 。

3.2 结果分析

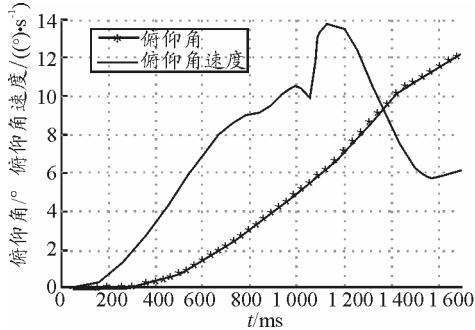


图1 无浪时导弹俯仰角和俯仰角速度

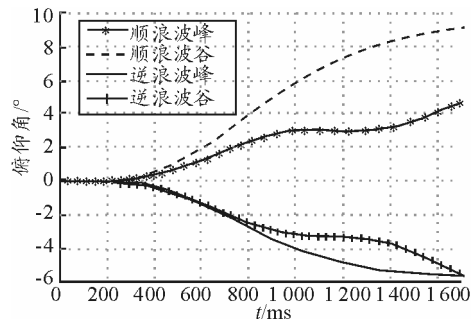


图2 波浪3级下导弹俯仰角曲线

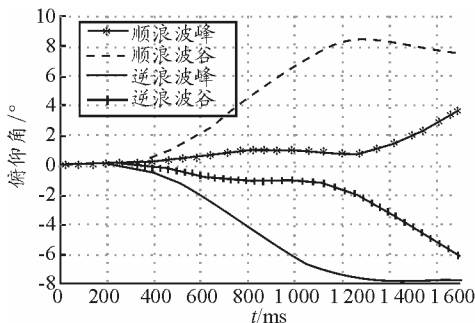


图3 波浪5级下导弹俯仰角曲线

分析潜艇定深、定速航行情况下潜射导弹在不同浪级下的出水姿态, 如图1~图5, 在无浪情况下, 导弹俯仰角单调递增, 至全弹出水后增速下降, 俯仰角速度在导弹头部出水后迅速变小, 在全弹出水后又变大; 在海浪3级和5级条件下, 导弹从顺浪波谷和逆浪波峰出水时姿态角较大, 姿态角速度变化规律为先增大后减小再增大, 与无浪时不同的是, 在导弹头部尚未出水时导弹俯仰角速度便开始下降, 而在导弹完全出水前又开始增大, 这是因为导弹越靠近水面水质点速度越大, 导弹的攻角增大, 作用于导弹弹体的流体动力及其力矩发生了改变; 导弹从顺浪波峰和逆浪波谷出水时导弹姿态角变化较顺浪波谷和逆

浪波峰平缓, 导弹姿态角也较小; 浪级5级下导弹出水姿态较3级情况下大, 同时波峰与波谷出水姿态角的差值也较3级情况下大, 证明了浪级越大, 波浪对导弹出水姿态的影响越明显。

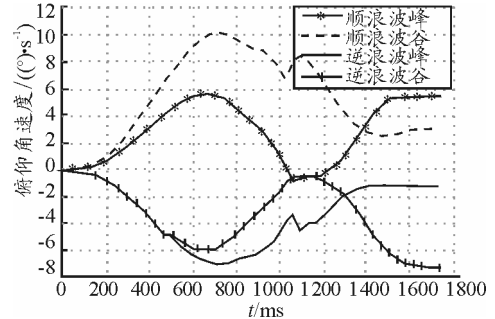


图4 波浪3级下导弹俯仰角速度曲线

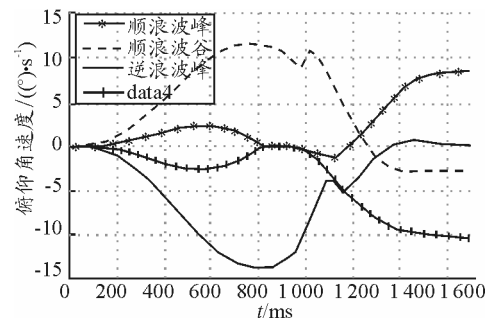


图5 波浪5级下导弹俯仰角曲线

4 结束语

潜射导弹出水姿态受波浪影响显著, 顺浪波峰出水 and 逆浪波谷出水时导弹姿态较小, 顺浪波谷和逆浪波峰出水则形成大姿态。由于导弹出水相位具有随机性, 因此其出水姿态也是随机的。计算结果表明, 浪级越高, 波峰出水 and 波谷出水姿态角及角速度相差越大, 导弹出水姿态角最大值越大。

参考文献:

- [1] 黄寿康. 流体动力·弹道·载荷·环境[M]. 北京: 宇航出版社, 1991: 385-388.
- [2] 尚晓江, 苏建宇, 王化锋, 等. 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, 2008: 171-180.
- [3] 田兵, 徐新琦, 肖鹏飞. 波浪对潜地弹道导弹出水运动的影响[J]. 舰船科学技术, 2009, 31(4): 81-84.
- [4] 刘曜. 波浪对运载器出水姿态角的影响[J]. 舰船科学技术, 2005, 27(3): 32-34.
- [5] 程载斌, 刘玉标, 申仲翰. 导弹水下潜射过程的流体-固体耦合仿真[J]. 兵工学报, 2008, 29(2): 16-18.
- [6] 赵田, 曾前腾. 高炮群抗击巡航导弹阵地配置辅助决策模型分析[J]. 四川兵工学报, 2009(11): 75-77.