文章编号：1001-1455(2014)05-0521-06 **DOI**：10.11883/1001-1455(2014)05-0521-06

空投鱼雷入水载荷*

潘 光，杨 惺
（西北工业大学航海学院，陕西 西安 710072）

摘要：为了研究空投鱼雷的入水过程，首先分析入水过程中的受力情况进行数值计算；然后使用数值模拟软件 Msc. Dytran 建立鱼雷入水的有限元模型，计算入水过程中雷体所遭受的冲击压力及其在冲击面上的分布情况，并对不同入水速度和角度下冲击压力峰值、不同头部形状冲击压力峰值特点及鱼雷入水弹道做了分析与讨论，结果表明：鱼雷入水速度和入水角度会对鱼雷壳体所受载荷产生重要影响，研究结果可为预测鱼雷入水冲击载荷提供参考。

关键词：爆炸力学；冲击载荷；MSC/DYTRAN；空投鱼雷；入水
中图分类号：O383.1；TJ610.2 **国标学科代码**：1303599 **文献标志码**：A

现代鱼雷可通过多种发射方式攻击敌对目标，如飞机空投或舰载发射等，但不管采用何种发射方式，都要经过空中、入水、水下航行至命中目标的全弹道过程。入水是一个短暂、变化激烈而又复杂的力学过程，在入水的整个过程中，鱼雷将经历撞水、浸水、带空泡航行、全浸湿后转入受控运动等 4 个阶段。入水过程中雷体会激起周围流体介质的运动，反过来，流体介质对结构又施加各种反作用力。入水冲击力有 2 个分量相当重要：一个是轴向力或阻力，会引起减加速度，可能使雷头变形，破坏鱼雷内部的仪表设备；另一个是法向力或升力，会形成力矩，产生横向角速度，影响弹道，并可能使雷体皱折或断裂。因此研究空投鱼雷入水冲击力对鱼雷结构的总体设计以及水下弹道设计等方面具有重要的工程意义[1]。

本文中拟基于鱼雷入水动力学模型、动态非线性有限原理论和耦合算法[2]，计算计算鱼雷入水时受到的作用力，建立空投鱼雷入水冲击有限元模型，对不同工况进行数值模拟，以期为预测鱼雷入水冲击载荷提供参考。

1 鱼雷入水受力分析

作用在鱼雷上的力可以分成 2 类：鱼雷重力和流体反作用力，流体反作用力中包括浮力和流体动力[3]。重力和浮力的大小和方向都是明确的，容易确定的。流体动力不仅取决于鱼雷的外形、流体的特性，也取决于鱼雷入水运动状态参数（如速度、加速度、姿态角、姿态角速度）等。可以用适合于惯性参考系的牛顿运动定律来描述鱼雷斜入水时纵平面内的受力及运动。鱼雷入水时运动和几何参数如图 1 所示。

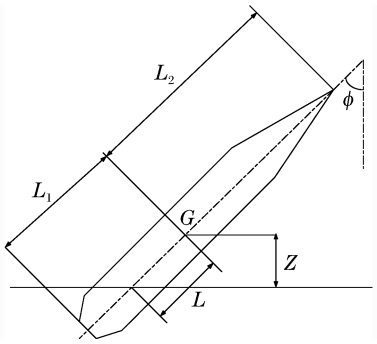

图 1 鱼雷入水运动简图

Fig. 1 Schematic of torpedo entry into water

浮力及其力矩为：

$$F_b = \rho g \int_{-L_2}^{L_1} A_b(l)\,\mathrm{d}l \tag{1}$$

$$M_b = F_b \int_{L}^{L_1} \sin(\phi) L(l)\,\mathrm{d}l \tag{2}$$

* **收稿日期**：2013-01-11；**修回日期**：2013-04-08
作者简介：潘 光（1969— ），男，博士，教授，博士生导师。

式中：A_b 为沾湿部分有效截面积。

轴向黏性阻力、法向黏性阻力及其对重心力矩为：

$$F_{d,a}=\frac{1}{2}\rho C_{d,a}A_e v_a|v_a| \tag{3}$$

$$F_{d,n}=\rho C_{d,n}\int_L^{L_1} r v_n|v_n|\,\mathrm{d}l \tag{4}$$

$$M_{d,n}=\rho C_{d,n}\int_l^{L_1} r l v_n|v_n|\,\mathrm{d}l \tag{5}$$

式中：v_a、v_n 分别为轴向、法向速度，轴向黏性阻力系数 $C_{d,a}=0.3$，法向粘性阻力系数 $C_{d,n}=1.1$，A_e 为轴向有效面积，r 为轴向截面半径。

轴向、法向附加力及其对重心的力矩为：

$$F_{m,a}=\frac{\mathrm{d}m_a}{\mathrm{d}v}\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}+m_a A_a\left(\frac{L}{L_1+L_2}\right) \tag{6}$$

$$F_{m,n}=\int_{-L_2}^{L_1}\left(v_n\frac{\mathrm{d}m}{\mathrm{d}t}+m\frac{\mathrm{d}v_n}{\mathrm{d}t}\right)\mathrm{d}l \tag{7}$$

$$M_{m,n}=\int_{-L_2}^{L_1} l\,\mathrm{d}F_{m,n} \tag{8}$$

式中：m_a 为轴向附加质量，m 为单位长度的横截面在浸深 h 处的附加质量，其计算方法可由文献[4]确定。根据以上受力分析，建立鱼雷入水过程中动力学方程：

$$\begin{cases}MX''=F_{m,n}\cos\phi-F_{m,a}\sin\phi-F_{m,a}\sin\phi+F_{m,n}\cos\phi\\ MZ''=F_{m,n}\sin\phi+F_{m,a}\cos\phi+F_{m,a}\sin\phi+F_{m,n}\sin\phi-Mg\\ I\phi''=M_b+M_{m,n}+M_{d,n}\end{cases} \tag{9}$$

式中：M 为鱼雷总质量，I 为对重心的转动惯量。将上式转化成矩阵形式：

$$\begin{pmatrix}M+m_{11} & m_{12} & m_{13}\\ m_{21} & M+m_{22} & m_{23}\\ m_{31} & m_{32} & M+m_{33}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}X''\\ Z''\\ \phi''\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}F_x\\ F_z\\ F_\phi\end{pmatrix} \tag{10}$$

式中：m_{ij} $(i,j=1,2,3)$ 对应于加速度的质量项。式(10)是一个二阶常微分方程组，将其降阶转化为一阶方程组，采用变步长 Runge-Kutta 法求解，对于各积分项采用变步长辛普森法进行计算。取 MK46 鱼雷为计算目标，入水角为 45°，入水速度为 32 m/s，攻角为零，通过使用 Matlab 进行数值计算，计算结果如表 1 所示。

表 1 鱼雷入水时力学参数

Table 1 Mechnical parameters for torpedo entry into water

t/ms	$F_{m,a}$/kN	$F_{m,n}$/kN	$M_{m,n}$/(kN·m)
0.34	28.5	19.7	121.6
1.00	10.1	6.3	38.9
2.00	2.1	1.7	10.5
3.00	3.6	2.3	14.2
4.00	2.1	2.0	12.3
5.00	1.8	1.2	7.4
6.00	1.6	1.1	6.8

由表 1 可以看出，鱼雷在入水的瞬间就会受到很大的轴向以及法向冲击载荷，从而也产生了很大的法向弯矩，这都会对鱼雷的结果以及姿态产生很大的影响。但持续时间很短，随着不断入水，轴向力和法向力迅速衰减，趋于某一常值。

2 数值模型

以 MK46 鱼雷为算例，依据所研究问题的侧重点，对鱼雷和流体进行了必要的简化。由于主要研究对象为鱼雷入水冲击时的流体动力情况，不考虑载荷下鱼雷壳体会不会发生塑性变形以及结构破坏，故将鱼雷作为刚体建模，且不考虑分段。对于鱼雷入水，由于其入水速度高，粘性仅仅表现在附着在耦合面边界层很薄的一部分，对数值计算的结果影响很小，在本文中不予考虑[5-7]。

鱼雷结构采用刚体假设，泊松比 $\mu=0.3$，质量 $m=235$ kg，空气和水选用可压缩理想流体本构材料关系，水压力由多项式状态方程描述。

对于压缩状态：

$$p=a_1\mu+a_2\mu^2+a_3\mu^3+(b_0+b_1\mu)\rho_0 e \tag{11}$$

对于拉伸状态：

$$p=a_1\mu+(b_0+b_1\mu)\rho_0 e \tag{12}$$

空气的压力由 Gamma 状态方程来描述：

$$p=(\gamma-1)\rho_1 e \tag{13}$$

水密度为 $\rho_0=1\ 000$ kg/m^3，体积模量 $K=2.2$ GPa，质量内能 $e=83.95$ kJ/kg；空气密度 $\rho_1=1.293$ kg/m^3，质量热容比 $\gamma=1.4$，质量内能 $e=212.65$ kJ/kg

雷体结构采用拉格朗日四节点四边形壳建模，共有 4 800 个节点，4 798 个单元，有限元模型如图 2 所示。水和空气选用欧拉六面体实体单元，考虑到入水问题的具体情况，在近水面处网格较密，远离水面采用等差网格，逐渐稀疏。鱼雷的整个外表面为流固耦合面，采用一般耦合算法。鱼雷头部距液面初始高度 0.2 m。鱼雷入水(45°入水角)模型如图 3 所示。

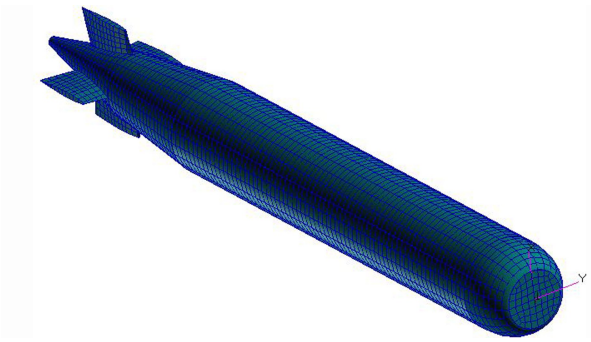

图 2　鱼雷有限元网格模型

Fig. 2　Finite element model of torpedo

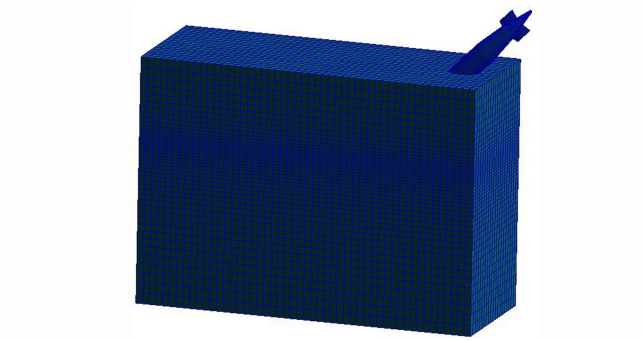

图 3　鱼雷入水有限元模型

Fig. 3　Finite element model for torpedo entry into water

3　鱼雷入水冲击载荷分析

3.1　鱼雷入水载荷分析

选取初始入水速度为 32 m/s，入水角度为 45°，初始步长为 1 μm，总计算时间为 0.06 s。将结果文件导入 MSC. Dytran 计算后可以得到该工况下鱼雷入水的分析结果。如图 4 所示为鱼雷入水过程中耦合面受到的作用力时间历程曲线。

由图 4 中可以看出，鱼雷在入水时，会遭受极大的冲击载荷，随着鱼雷不断入水，冲击载荷迅速的衰减下去，但还是会不断受到冲击力的作用，3 ms 后冲击过程基本结束，作用力趋于稳定。作用力峰值达到 35.397 kN，时间约为 0.32 ms，由于作用时间很短，不会影响鱼雷入水的姿态以及运动。计算得到的不同时刻作用力大小也与相同工况下 Matlab 计算出的结果(表 1)比较接近，从而从进一步验证了数值模型的可靠性。

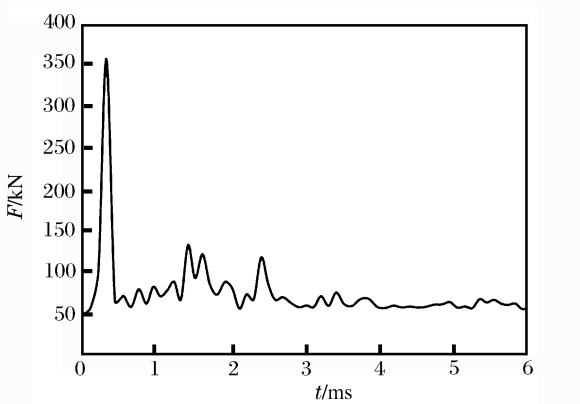

图 4　鱼雷入水耦合面作用力时间历程曲线

Fig. 4　Coupling force-time curve for torpedo entry into water

图 5 所示为入水 1.8 ms 时鱼雷外壳以及水所受到的压力云图。根据鱼雷在入水过程中受到的压力变化情况可得出，入水初始时接触面的压力最大，峰值为 25.8 MPa，向边缘逐渐减小。对于平头鱼雷入水情况，其撞水瞬间是一种碰撞现象，撞水初期可以假设其为一平板撞击可压缩水面。基于 Von Karman 一元碰撞理论，刚性平板撞击压缩水面的撞击压力峰值可由下式估算[8]：

$$p_{\max}=\rho c v_{\perp}\sin\varphi \tag{14}$$

式中：ρ 为水的密度，入水角度 $\varphi=45°$，水的声速 $c=1\,480$ m/s，垂直入水速度 $v_{\perp}=22.6$ m/s。计算得最大理论压力峰值为 33.45 MPa，较计算结果高。这主要是由于没有考虑到空气被压入水中的空气垫效应而减小了压力。对于一般雷头壳体，选用的材料为硬铝合金，其屈服应力为 330 MPa，故壳体所受压力值不可能使壳体发生塑性变形或破坏。

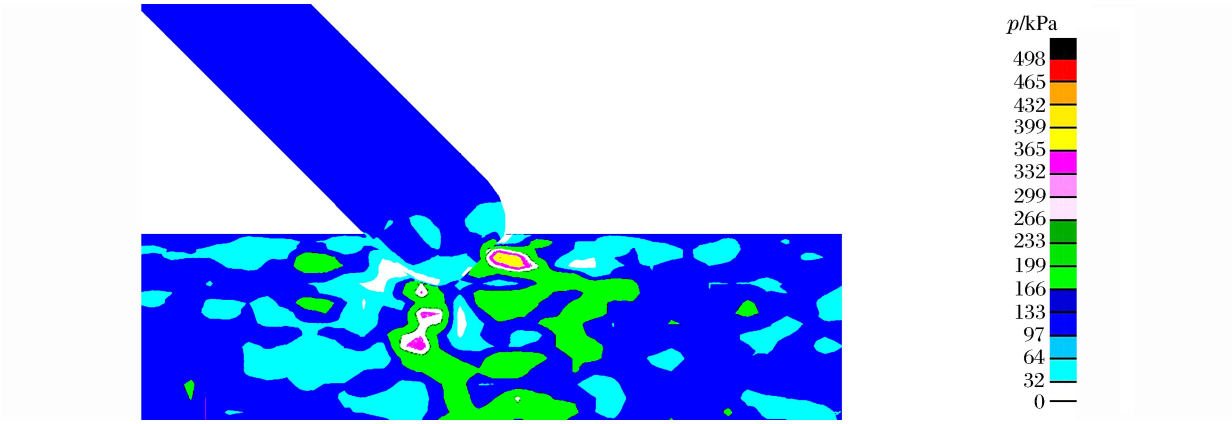

图 5 入水时鱼雷及水的压力云图

Fig. 5 Pressure contour for torpedo entry into water

3.2 入水速度对鱼雷入水的影响

为了进一步分析入水过程，以入水角度为 45°的工况下分别给鱼雷加以从 10～40 m/s 范围内变化的轴向入水速度进行计算。根据数值模拟结果，将不同速度下的鱼雷头部所受到的压力峰值进行曲线拟合，如图 6 所示。

所得拟合二次曲线函数：

$$F=223x^2+3\,523x+12\,480 \qquad 10\ \text{m/s}\leqslant x\leqslant 40\ \text{m/s} \tag{15}$$

将不同速度下的鱼雷入水弹道曲线进行比对分析，如图 7 所示，可以得出，当冲击力作用在鱼雷头部时，由于不通过重心，使得鱼雷产生俯仰角速度，对弹道产生严重影响。随着鱼雷入水速度的增大，弹道偏离现象逐渐减小，说明入水速度越高，越有利于消除法向力引起的弯矩对鱼雷带来的影响。

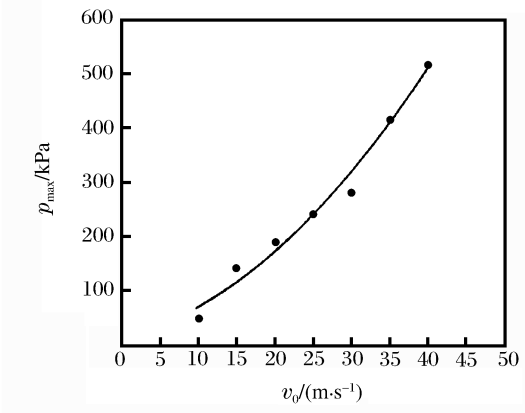

图 6 不同速度下鱼雷头部所受到的压力峰值

Fig. 6 The pressure peak of torpedo head at different water-entry velocities

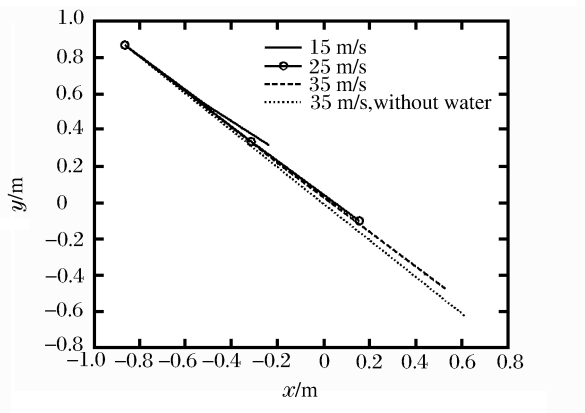

图 7 不同入水速度鱼雷弹道曲线图

Fig. 7 Torpedo trajectory curves at different water-entry velocities

3.3　入水角度对鱼雷入水的影响

取入水速度为 40 m/s，改变入水角度，得到不同角度下的冲击力峰值变化曲线，如表 2 所示。

由表 2 可知，入水轴向冲击力随着入水角度的增大而增大，尤其在垂直入水时轴向力急剧增大，这说明垂直入水是鱼雷入水最不安全的情况，会对鱼雷的纵向结构强度提出了很高的要求，应该尽量避免。

而法向力随着入水角度的增大而减小，这说明当鱼雷以小角度入水时应该注意避免法向力太大而引起的忽扑现象。同时根据计算结果分析不同角度入水弹道轨迹，发现随着入水角度的变小，鱼雷运动轨迹偏离初始角度的情况变的更为严重，这也同样说明法向作用力及其所引起的弯矩在小角度入水情况下大于大角度入水时的现象。

表 2　不同角度入水时鱼雷所受最大冲击力

Table 2　The maximum impact force at different water-entry angles

ϕ/(°)	$F_{m,a}$/kN	$F_{m,n}$/kN
30	23.9	21.8
45	30.9	19.2
60	36.5	11.7
75	38.5	6.5
90	68.0	0

3.4　不同头型对雷体入水的影响

分别选取了截头锥形壳体，尖头壳体以及半圆头壳体这 3 种头部壳体形状的结构，以入水速度 30 m/s对鱼雷垂直入水工况进行计算，其有限元模型如图 8 所示。

3 种不同头型鱼雷垂直入水工况的入水耦合面作用力时间历程曲线如图 9 所示。

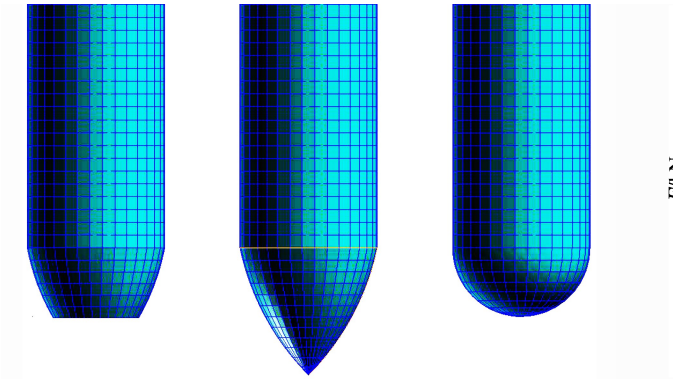

图 8　不同头型鱼雷有限元模型

Fig. 8　Finite element models for torpedo with different headtypes

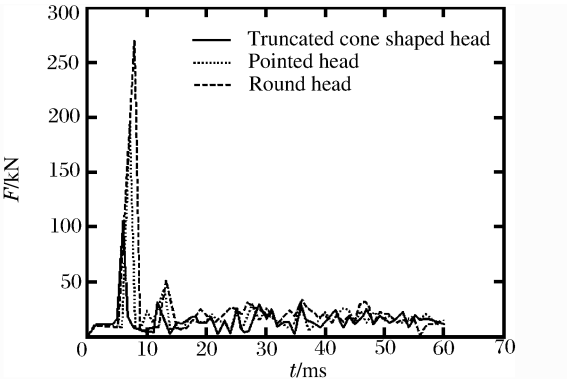

图 9　不同头型入水耦合面作用力时程曲线

Fig. 9　Coupling force-time curve for water-entry torpedoes with different head shapes

由图 9 可以看出，鱼雷在开始入水时都会受到很大的冲击载荷，但截头锥形的头部形状受到的压力峰值最大，压力作用的时间也是最长的，其次是圆头雷，最小的是尖头雷。这说明鱼雷入水时，如果减小头部与水的接触面积，则可以有效地减小鱼雷所受到的冲击载荷。

4　结　论

分析了鱼雷入水时受到的流体动力，应用 MATLAB 编程求解了鱼雷入水过程的流体动力参数，并通过使用 MSC. Dytran 仿真模拟了空投鱼雷入水过程。通过建立鱼雷入水三维有限元模型，对鱼雷入水过程雷体所遭受的冲击力及其在不同入水速度和角度下冲击压力峰值、不同头部形状冲击压力峰值特点、鱼雷入水弹道做了分析与讨论。得出如下结论：

(1)空投鱼雷入水时会受到很高的冲击载荷，存在明显的冲击载荷峰值，对雷头部结构将造成极大的影响，随着鱼雷不断进入水中，冲击载荷逐渐趋于常值。因此，在设计鱼雷壳体的时候有必要强化其前端面附近的强度设计或在头部加装缓冲头帽，提高其耐冲击的性能，以确保其入水时的安全性；

(2)随着鱼雷入水速度的增加，作用在鱼雷壳体上的冲击载荷也不断升高，这对鱼雷雷体的强度提出了很高的要求，所以应尽可能减小空投鱼雷在入水时的速度，如在空投时雷身附有降落伞；

(3)随着鱼雷入水角度的增加,作用在鱼雷上的法向作用力不断减小,但轴向力不断增大,从而由于法向弯矩引起的忽扑现象逐渐消失。垂直入水时轴向作用力达到最高值,这是鱼雷入水最危险的工况,应该尽量避免;

(4)对于垂直入水工况,不同头型鱼雷的入水载荷各不相同,减小鱼雷与水的接触面积会明显减小入水载荷峰值的大小。

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] 丁佩然,钱纯.非线性瞬态动力学分析[M].北京:科学出版社,2006.

[3] 张宇文.鱼雷弹道与弹道设计[M].西安:西北工业大学出版社,1999.

[4] Boef W J C. Launch and impact of free-fall lifeboats[J]. Ocean Energy, 1992,19(22):119-138.

[5] Wick A. Numerical study of a cylinder impacting water with a flattened striking area[C]// The 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada, 2007.

[6] Park M S, Jung Y R, Park W G. Numerical study of impact force and ricochet behavior of high speed water-entry bodies[J]. Computers & Fluids, 2003,32(7):939-951.

[7] 鲁忠宝,南长江.鱼雷入水战斗部动态响应仿真分析[J].鱼雷技术,2006,14(4):36-39.
Lu Zhong-bao, Nan Chang-jiang. Simulation analysis of warhead dynamic response during torpedo water entry[J]. Torpedo Technology, 2006,14(4):36-39.

[8] Karman V T. The impact of seaplane floats during landing[R]. NACA Technical Notes 321. National Advisory Committee for Aero-nautics, Washington D C, USA, 1929.

Impact force encountered by water-entry airborne torpedo*

Pan Guang, Yang Kui

(*College Of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an* 710072, *Shaanxi, China*)

Abstract: To investigate the water-entry process of an airborne torpedo, the forces encountered by the water-entry airborne torpedo were analyzed and calculated by using MATLAB. A finite element model for the torpedo entry into water was established by using the finite element code MSC/DYTRAN. Thereby, by considering different water-entry angles and velocities, the impact forces encountered by the water-entry torpedoes were calculated as well as their corresponding pressure at the surfaces of the torpedoes for the torpedoes with different warhead shapes. The effects of water-entry angles, velocities and warhead shapes were analyzed on the maximum force and the peak pressure encountered by the water-entry torpedoes. And the water-entry trajectories of the torpedoes were discussed. The investigated results are helpful for forecasting the impact forces of water entry about the torpedoes.

Key words: Mechanics of explosion; impact force; MSC/DYTRAN; airborne torpedo; water entry

* Received 11 January 2013; Revised 8 April 2013

Corresponding author: Yang Kui, 810006222@qq.com

(责任编辑 王易难)