

# 近水面水下爆炸作用下舰艇结构 损伤数值仿真

冯 刚, 朱 锡, 张振华

(海军工程大学 船舶与动力学院, 湖北 武汉 430033)

**摘 要:** 在 MSC Dytran 中, 通过远场加载方法, 对水下冲击波在自由水面的反射效应及对舰艇结构的损伤进行数值仿真研究, 得到比较理想的计算结果. 通过与模型试验结果的比较验证该方法的可靠性.

**关键词:** 水下爆炸; 舰艇结构; MSC Dytran; 水面效应

**中图分类号:** U661.43; TP391.9 **文献标志码:** A

## Numerical Analysis of Hull Structure Damage due to Underwater Explosion near Water Surface

FENG Gang, ZHU Xi, ZHANG Zhenhua

(College of Naval Architecture and Power, Naval Univ. of Eng., Wuhan Hubei 430033, China)

**Abstract:** In the paper, a numerical analysis by long-distance loading method in MSC Dytran to simulate the damage of a hull structure subjected to shock waves reflected on free surface is proposed. The hull structure damage is obtained by this method. Comparison with the experiment proved the reliability of this method.

**Key words:** underwater explosion; hull structure; MSC Dytran; nonlinear reflection

### 0 引 言

水面舰艇结构在水下爆炸作用下的损伤比较复杂, 目前在理论方面仅限于求解一些较为简单的结构. 对于分析整船这样的复杂结构的动态响应则必须依赖于有限元程序. MSC Dytran 的广泛使用已经证明它在水下爆炸数值模拟方面的可靠性. 由于远场水下爆炸的数值仿真计算量非常巨大, 在实际计算当中几乎不可能实施. 因此文献[1]中, 张振华提出利用自定义子程序在近场水域边界处加上冲击波载荷, 以模拟远场爆炸效应, 进而利用 MSC Dytran 中强大的计算功能, 来计算船体在水下冲击波作用下的动态响应. 然而, 对于近水面水下爆炸时, 自

由水面对水下冲击波的反射效应, 文献[1]中并未进行深入研究. 本文根据文献[1]中提出的远场加载方法, 对水下冲击波在自由水面的反射效应及对舰艇结构的损伤进行数值仿真研究, 得到比较理想的计算结果, 通过与模型试验结果的比较验证该方法的可靠性.

### 1 水面效应影响下的冲击波参数

自由水面(水与空气的界面)的存在, 对水中冲击波的传播有着明显的影响. 水中冲击波到达自由水面就反射为稀疏波, 此稀疏波好像是从装药相对于水面的镜像发出的一样. ZAMYSHLYAYEV<sup>[2]</sup> (1973)对于水面效应影响下的爆炸冲击波进行深入

研究, 得出如下结论: 在半无限大流体空间中, 可划分成 I, II, III 3 个区域, I 区为线性反射区, 水面下某一点最初受到入射波的正压作用, 后来稀疏波到达, 使得合成压力低于周围介质的静压力. 这种自由水面反射造成的“切断”现象, 直达入射波的峰值并没有受到影响, 仅是波的作用时间减少, 波的冲量减少了. 这种反射属于线性反射, 采用声学近似处理已经足够精确; II, III 区属于非线性反射区, 对于 II 区, 非线性的影响区大于冲击波正相作用时间的 20% 而小于 100%, 冲击波波头的压力不受影响, 非线性影响不可忽视; III 区的非线性影响非常大, 稀疏波的波头完全赶上直达入射波, 冲击波的波头压力有所减小, 冲击波的能量受到较大程度的削弱. 在 II、III 区内, 由于非线性反射所产生的稀疏波整个卷入直达波, 使冲击波波形发生很大变化, 峰值压力受到强烈削弱. 因此最大压力、正压作用时间等参数不能再按照无限水域爆炸时的公式去计算. 图 1 所示为水面效应影响下的冲击波波形.

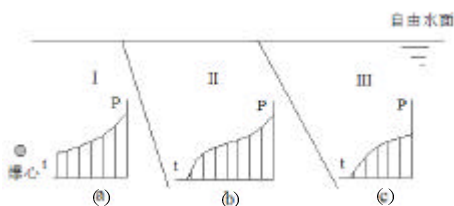


图 1 水面效应影响下的冲击波波形

假设水域中有一测点 A, 距爆心 O 点的距离为  $r$ , 距爆心镜像  $O'$  点的距离为  $r'$ , 球形药包的半径为  $r_0$ . 爆心 O 点的深度 (即爆深) 为  $H$ , A 点的深度 (即测深) 为  $h$ , 爆心 O 点到测点 A 点的水平距离为  $L$ , 可取以下无量纲量:

$$\bar{L}_1 = 0.1\bar{H}^{2.3} \left( 1 + 0.5 \frac{h}{H} \right) \quad (a)$$

$$\bar{L}_2 = \bar{H}^{1.3} (0.31\bar{H} + 1.3\bar{h}) \quad (b)$$

$$t_{ah} = \frac{r' - r}{C_0} = \frac{4Hh}{C_0(r' + r)} \quad (1)$$

$P_m(r)$  为测点 A 的峰值压力,  $q$  为衰减常数,  $t_{ah}$  为发生线性反射时该点的正压作用时间, 又称为“切断”时间, 即从 O 点发出的直达冲击波和从  $O'$  点发出的反射稀疏波到达测点 A 的时间差,  $C_0$  为水中声速.

(i) 当  $\bar{L} < \bar{L}_1$  时, 测点 A 处于区域 I 中, 属于线性反射, 其压力、正压作用时间等参数可以采用声学近似来分析. 波形可见图 1(a). 测点 A 的压力

一时间方程可以按照指数形式表达为:

$$P(t) = P_m(r) e^{-\frac{t}{q}} \quad (0 < t < t_{ah})$$

其中:  $t_+ = bt_{ah}$ ,

$$b = 0.7 \left( 1 + \frac{0.83\bar{L}^{0.435} - 0.1\bar{h}}{\bar{H}} \right),$$

$$t_{ah} = \frac{2Hh}{C_0 r}$$

(ii) 当  $\bar{L}_1 < \bar{L} < \bar{L}_2$  时, 测点 A 处于区域 II 中, 非线性的影响区大于冲击波正相作用时间的 20%, 小于 100%, 冲击波波头的压力不受影响. 波形可见图 1(b). 测点 A 的压力一时间方程可以表达为:

$$P(t) = P_m(r) \left[ 1 - \left( \frac{t}{t_+} \right)^n \right], \quad (0 < t < t_+) \quad (2)$$

其中:  $n = \frac{j}{1-j}$ ,  $j = \frac{q}{t_+} \left( 1 - e^{-\frac{t_{ah}}{q}} \right)$ ,  $t_+ = bt_{ah}$ ,

$$b = 0.7 \left( 1 + \frac{0.83\bar{L}^{0.435} - 0.1\bar{h}}{\bar{H}} \right), \quad t_{ah} = \frac{2Hh}{C_0 r}$$

$P_m(r)$  为测点 A 的峰值压力,  $t_+$  为发生非线性反射时测点 A 的正压作用时间.

(iii) 当  $\bar{L} > \bar{L}_2$  时, 测点 A 处于区域 III 中, 非线性影响非常大, 稀疏波的波头完全赶上直达入射波, 冲击波的波头压力有所减小, 冲击波的能量受到较大程度的削弱. 波形可见图 1(c).

$$\text{令 } k = \frac{\bar{L}_2}{\bar{L}} = \frac{0.31\bar{H}^{2.3}}{\bar{L}} \left( 1 + 4.2 \frac{h}{H} \right),$$

则测点 A 处的水下爆炸冲击波峰值压力为

$$P_m = P_m(r) \sqrt[3]{k}$$

测点 A 的压力一时间方程可以表达为:

$$P(t) = P_m \left[ 1 - \left( \frac{t}{t_+} \right)^n \right] = P_m(r) \sqrt[3]{k} \left[ 1 - \left( \frac{t}{t_+} \right)^n \right] \quad (0 < t < t_+) \quad (3)$$

$$\bar{L} = \frac{L}{r_0} \quad (c)$$

其中  $\bar{H} = \frac{H}{r_0}$ ,  $\bar{h} = \frac{h}{r_0}$ , 将近自由水面流场划分为 I、

II、III 3 个区域.

## 2 缩比模型试验及数值仿真计算

### 2.1 模型设计

试验模型为某舰艏部板架结构缩比模型, 如图 2 所示, 图中标注单位为 mm. 图 2(a) 为模型的横剖面图. 外板 AF 为一圆弧, 圆心为 O 点, 厚度为 1 mm,

其上有肋骨支撑. 甲板、纵向舱壁和外底厚 1 mm, 横梁和纵向舱壁扶强材为 T 型钢. 外底肋板、肋骨、甲板横梁和扶强材对接, 形成框架. 各构件的具体尺寸如图 2 所示. 图 2(b)为模型的正视图, 如图所示该模型分成 3 个舱段, 中间舱段长 600 mm, 首尾舱段各长 300 mm. 共设置 7 个肋骨位置, 其中 2 号和 6 号肋骨位置设置了两道横向舱壁, 舱壁板厚 1 mm, 其上有角钢加强. 为安装测量设备, 在甲板上开孔, 孔直径 400 mm, 周边有扁钢加强. 由于焊接和加工等过程的影响, 板架模型不可避免地会产生初始变形, 在试验之前需要对其进行测量.

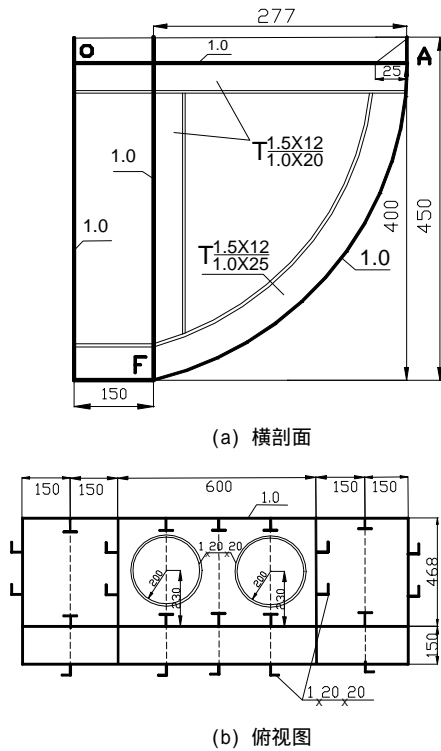


图 2 舷侧舳部板架模型示意图

2.2 试验工况

板架模型试验在海军工程大学爆炸试验筒内进行, 试验工况见表 1.

表 1 板架模型试验工况载荷参数表

模型吃水/m	TNT 装药量/kg	攻角/度	装药爆距/m	装药沉深/m
0.4	0.2	30	1	0.71

2.3 试验结果

板架模型在外板迎爆面出现明显内凹变形, 形状为纵向凹坑状, 中间深, 两端较浅. 模型最大变形在中部舱段迎爆面 3 号和 5 号肋骨之间. 变形结果经过测量, 最大值为 24 mm, 在 3 号和 4 号肋骨之间. 外板变形在两个舱壁处被隔断.

2.4 数值计算

2.4.1 数值计算模型与计算工况

利用 MSC Dytran 对试验模型进行数值仿真计算, 严格按照试验模型建立三维有限元模型. 在有限元模型中考虑板架的初始变形. 计算材料采用低碳钢, 与试验模型保持一致. 考虑材料应变率强化效应, 采用 Cowper-Symonds 应变率强化模型. 按照普通低碳钢, D 取 40, P 取 5, 屈服强度  $s_y$  取 250 MPa. 板架有限元模型如图 3 所示. 计算工况与模型试验相同, 加载方式与加载面见图 4.



图 3 板架有限元模型

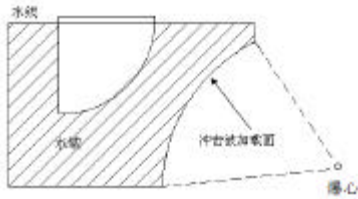


图 4 有限元模型加载面与爆心位置

按照前一节的经验公式, 计算在加载面上的载荷及正压作用时间.

$\bar{L}=27.9$ ,  $\bar{L}_1=153.1$ ,  $\bar{L}_2=907.5$ , 可见,  $\bar{L}<\bar{L}_1$ , 测点 A 处于区域 I 中, 按照公式 (1) 进行计算, 得到的载荷压力—时间方程及正压作用时间输入 MSC Dytran 进行计算.

2.4.2 数值计算结果

图 5 所示为数值计算结果云图, 图中显示的是板架最终变形情况. 模型中部舱段最大变形在两个舱壁之间, 最大值为 18.7 mm. 变形在两个舱壁处 (4 号和 12 号肋骨) 被隔断.



图 5 板架变形情况数值仿真结果

2.4.3 试验结果与数值计算结果比较

比较试验和数值计算的结果，可以得出以下结论：

(1) 数值计算得到的有限元模型最终变形结果与试验非常相似。模型均在迎爆面出现明显内凹变形，形状为纵向凹坑状，中间深，两端较浅。

表 2 变形结果比较（单位：mm）

肋骨	1	2	3	4	5	6	7
模型试验	-20.2	-4.35	-17	-17	-13.7	-7.9	-4.9
数值计算	-14.5	-6.5	-18.2	-18.7	-18	-6.8	-15.5

模型最大变形在中部舱段迎爆面 3 号和 5 号肋骨之间。壳板变形在两个舱壁处被隔断，同时在顶部与底部也被边界所隔断。

(2) 在模型迎爆面选取 7 个测点，分别是在外板迎爆面 1 号~7 号肋骨位置上，距离爆心最近的

点。即表 2 中的 1 号~7 号肋骨位置共 7 个点。通过表 2 中对模型试验和数值计算的变形结果进行的对比可以看出，从 2 号到 6 号共计 5 个测点，数值计算结果与模型试验结果非常接近。表 2 中可以发现，1 号和 7 号两个测点的试验结果与数值计算结果相差较大，这是由于在试验中模型定位的偏差造成的。

3 结 论

(1) 本文提出利用加载面加载来计算近水面水下爆炸冲击波的方法，该方法考虑自由水面的反射效应。在线性反射情况下，通过数值仿真和模型试验结果比较，验证该方法具体可靠性。

(2) 本文进行的试验中，仅对线性反射情况作了验证。由于受爆炸试验筒的大小所限制，尚无法对非线性反射情况进行验证，这还有待于将来的研究进行验证。

参考文献：

[1] 张振华，朱锡，冯刚. 船舶在远场水下爆炸载荷作用下动态响应的数值计算方法[J]. 中国造船，2003，(4)：36-42.  
[2] ZAMYSHLYAYEV B V. 1973. Dynamic loads in underwater explosion[R]. AD-757183, 1972: 86-120.  
[3] DYTRAN User' s Manual [K]. MSC, 2001.

（编辑 吴彦生）