

小型浮动冲击平台水下爆炸数值仿真与验证

陈高杰 周庆飞 王树乐 程素秋

(中国人民解放军 91439 部队 大连 116041)

摘要: 舰载设备抗冲击能力对舰艇生命力十分重要,实验测量因消耗大且危险性高不能大量开展,数值仿真技术的发展为舰载设备考核提供了新的手段。通过基于声固耦合法的有限元分析技术对某小型浮动冲击平台(FSP)进行数值仿真实验,并与实爆实验结果对比,验证了缓冲平台基座处冲击加速度峰值和冲击谱仿真计算的正确性。结果表明,该方法可为舰载设备提供准确的冲击环境输入,可对该型 FSP 进行准确的冲击环境预报,研究成果可推广应用到中大型 FSP。

关键词: 浮动冲击平台;数值仿真;水下爆炸;冲击谱

中图分类号: O347.3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:**

Numerical simulation test and validation of a small floating shock platform subjected to unex

Chen Gaojie Zhou Qingfei Wang Shule Cheng Suqiu

(91439 Unit of PLA, Dalian 116041, China)

Abstract: The anti-shock ability of naval ship equipment is very important for ship vitality. For the reasons of cost and safety, the real test measurement cannot be processed frequently. The technology of numerical simulation provides a new method for ship equipment evaluation. The finite element analysis technology based on acoustic-structure interaction method was used to simulate the shock response of a small floating shock platform(FSP) numerically. Then, the real-time explosion test validated the peak acceleration and shock response spectrum compared to the simulated result. The results showed that numerical simulation can provide the exact input for ship equipments and predict the shock environment of the FSP accurately. The method can be extended to medium and large FSP.

Keywords: floating shock platform; numerical simulation; underwater explosion; shock spectrum

1 引言

随着水中兵器爆炸威力和舰载装备精密程度的进一步提高,舰船系统及设备的抗冲击性能对舰船生命力显得越来越重要^[1]。对于舰载设备在非接触水下爆炸作用下的抗冲击能力考核与评估,最直接的方法是实船爆炸实验^[2-5]。采用轻型冲击机、中型冲击机可对重量较轻的设备进行实验考核,而中型设备则利用浮动冲击平台(FSP)进行海上实验考核,但 FSP 的海上实验消耗较大且周期长。随着水下爆炸数值仿真技术的发展,采用基于有限元技术的数值仿真手段开展 FSP 实验成为舰载设备抗冲击考核的一种新的方式。目前对 FSP 数值仿真实验的研究还处于起步阶段,张玮^[6]、王军^[7]等对利用仿真方法进行 FSP 实验进行了探讨,但仅与国外文献资料进行了对比,没有进行实际的实验验证,该文利用声固耦合法进行了小型 FSP 的数值仿

真实验,并与实爆实验进行了对比验证,为推广应用到大中型 FSP 进行舰载设备的虚拟考核验证提供参考。

2 基本理论

2.1 冲击波载荷描述

炸药水下爆炸后产生冲击波,幅值迅速达到最大,突跃后紧接着以近似于指数规律衰减,衰减持续时间不超过数毫秒,通常造成结构的局部破损。

冲击波压力-时间关系用经验公式可表示为:

$$P(R,t) = P_c \cdot \left(\frac{a_c}{R}\right)^{1+A} \cdot f(\tau) \quad (1)$$

式中: $\tau = \left(\frac{a_c}{R}\right)^B \cdot \frac{v_c \cdot t}{a_c}$;

$$\begin{cases} f(\tau) = e^{-\tau}, \tau \leq 1 \\ f(\tau) = 0.8251e^{-1.338\tau} + 0.1749e^{-0.1805\tau}, 1 < \tau \leq 7 \end{cases}$$

式中: $P(R,t)$ 为冲击波压力; R 为爆距; a_c 为球形装药半径; $f(\tau)$ 为指数衰减项; P_c 、 v_c 、 A 、 B 为炸药参数,如表 1 所示。

表 1 TNT 炸药材料参数表

炸药	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	P_c / GPa	v_c / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	A	B
TNT	1520	1.42	992	0.13	0.18

2.2 数值仿真算法

数值仿真算法采用声固耦合法,用声学介质来描述流体,冲击波在声学单元中传播。水下爆炸波能够激发结构很宽频带内的响应,建模时一方面要求流体的边界离结构足够远,确保低频响应的准确性;另一方面流体单元的特征尺寸足够小,以便能捕捉出结构传递到流体介质中的高频波。

要得到 FSP 受水下爆炸后的响应涉及结构与周围水介质之间的流固耦合效应。水下爆炸产生的冲击波作用到平台后,结构发生变形并使周围的水发生移动。结构周围的压力分布同样影响其运动方式,这种持续到系统衰减结束的相互作用采用基于面的流固耦合方程来描述。冲击波作用到结构后反射成为散射波,因此作用在结构上的载荷包括入射波和散射波两部分。

结构响应可根据以下结构运动方程进行计算:

$$\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}_s \mathbf{u} = -[\mathbf{S}_{fs}]^T \mathbf{p}$$
 (2)

$$\mathbf{M}_f \ddot{\mathbf{p}} + \mathbf{C}_f \dot{\mathbf{p}} + \mathbf{K}_f \mathbf{u} = [\mathbf{S}_{fs}]^T \mathbf{T}$$
 (3)

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}_i + \mathbf{p}_s$$
 (4)

式中: \mathbf{M}_s 、 \mathbf{C}_s 、 \mathbf{K}_s 分别为结构质量、阻尼、刚度矩阵, \mathbf{M}_f 、 \mathbf{C}_f 、 \mathbf{K}_f 分别为流体质量、阻尼、刚度矩阵 \mathbf{p}_i 、 \mathbf{p}_s 分别为入射波和散射波压力, \mathbf{u} 为结构位移, \mathbf{S}_{fs} 为转换矩阵, \mathbf{T} 为流体对结构的牵引力。

3 平台数值仿真

在给定工况下研究设备安装位置的冲击响应对于研究设备在一定输入下的抗冲击性能十分重要。为了研究在设备安装位置的响应,在模型中设置缓冲平台底部基础为考察点。

3.1 仿真模型

小型浮动冲击平台满足美国海军规范 MIL-901D 相关冲击要求,其设计承载面积为 $5.4 \times 4 \text{ m}$,设备安装甲板有效长 4 m ,宽 3.2 m 。采用双层底结构设计,内底与外底的间距为 300 mm ,内底和甲板的间距为 280 mm ,平台共设 4 道纵壁,6 道横壁,吃水深度 0.7 m ,高 6 m ,自重约 15 t ,设计承载为 8 t [8]。

试验中爆源采用 1 kg 黑索今(RDX)炸药(等效为 1.5 kg 当量 TNT),位于迎爆面舷侧 5 m ,水下 4.7 m 位置,冲击因子 0.14 。平台上安装缓冲平台。有限元模型

如图 1 所示,左侧图标注了缓冲平台安装位置和基础处考察点 A 位置,右侧图隐藏了部分结构。冲击波载荷的压力时程曲线如图 2 所示,冲击波的压力峰值为 7.37 MPa ,时间常数为 0.145 ms ,时间步长取 10^{-7} s ,计算时间为 5 ms 。

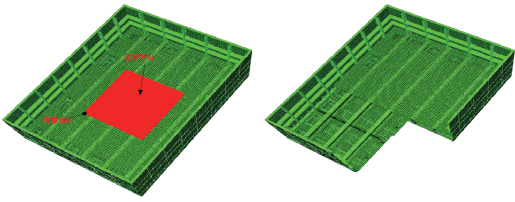


图 1 平台有限元模型图

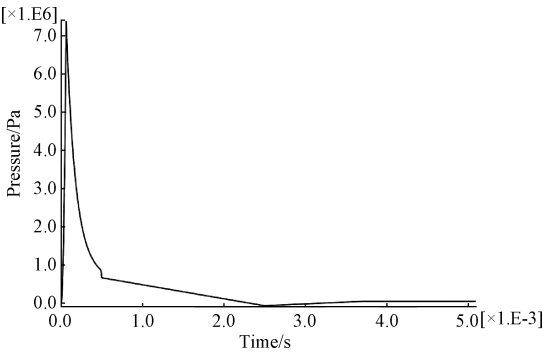
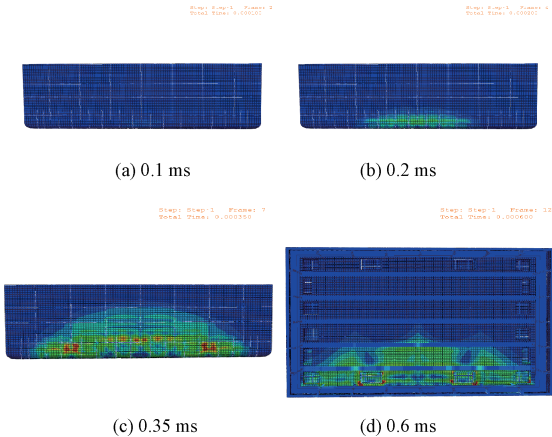


图 2 冲击波压力时程曲线

3.2 结果分析

浮动冲击平台的应力响应云图如图 3 所示,可以清楚地看到冲击波在结构上的整个传播过程。冲击波作用到迎爆面舷侧后,平台的应力主要集中在冲击波直接作用区域上,随后逐渐向四周扩散, 3.0 ms 时整个平台均产生应力响应。考察点 A 的垂向加速度时程曲线如图 4 所示,在 0.35 ms 时 A 点处产生加速度响应, 0.6 ms 时达到第一个峰值 676 g ,表明最快到达 A 点的冲击波能量并未产生最大加速度, 0.95 ms 时达到最大峰值 1771 g ,随后发生高频振荡。



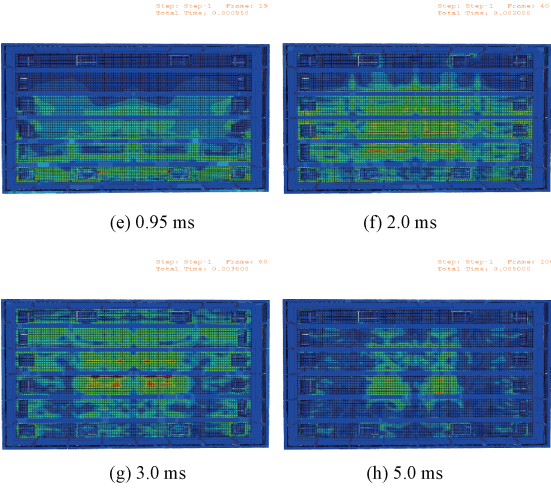


图 3 平台应力云图

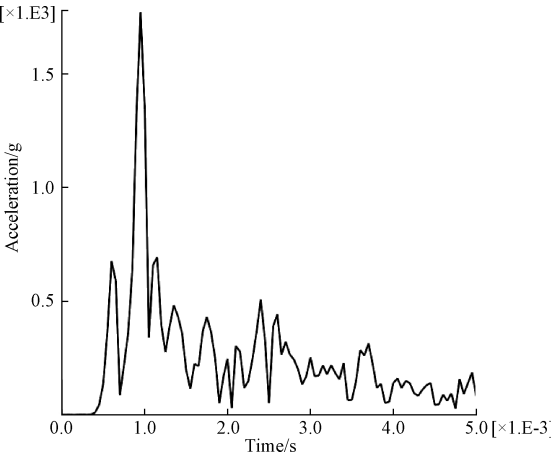


图 4 考察点 A 垂向加速度时程曲线

4 实爆实验验证

如图 5 所示,实爆试验在旅顺某海域进行,海区水深大于 9 m,底质为平坦的泥沙底,流速小于 2 kn。测量采用美国 NI 公司的采集设备,加速度量程为 10000 g,采样频率取 30 kHz^[9]。



图 5 试验场景图

从考察点 A 处加速度最大峰值来看,测量结果为 1696.6 g,仿真计算结果偏高,误差为 4.4%。而加速度时程曲线无法表征最大冲击响应的频域特性,为描述浮动冲击平台的水下爆炸冲击环境,通常采用四维坐标系下的冲击谱进行分析^[10-11]。冲击谱是假想中安装在同一基础上的结构或设备,在经受同样的瞬态基础冲击运动的一系列不同固有频率的质量弹簧线性振子的最大响应幅值与其固有频率的关系曲线。谱值包括相对位移、相对速度和绝对加速度值。在四维坐标系中频率为横坐标,速度谱为纵坐标,位移谱与横坐标成+45°,加速度谱与横坐标成-45°。图 6 为考察点 A 处测量值与仿真值冲击谱对比图,两者在总体上表现出较好的一致性。在低频段(小于 10 Hz)两者均为等位移谱,位移谱值均小于 1 mm,表明甲板上缓冲平台基座处位移响应很小;测量结果在 30 Hz 处速度谱达到最大值 7.2 m/s,而仿真结果在 70 Hz 处速度谱达到最大值 9.8 m/s,计算值偏保守,但趋势一致;在 1000 Hz 以上频率段仿真结果表现为等加速度谱特征,但测量结果表现为等速度谱特征,这主要是由于测量值进行了 1000 Hz 的低通滤波。

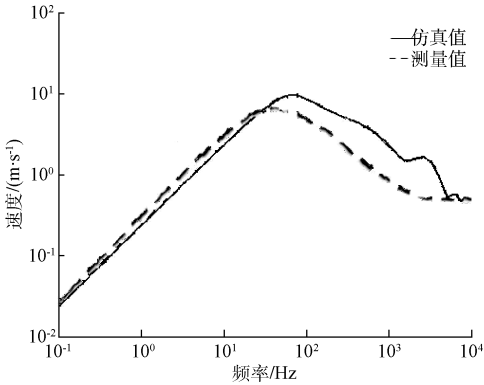


图 6 考察点 A 处冲击谱测量值与仿真值比较

5 结 论

该文利用声固耦合法进行了小型 FSP 的数值仿真试验,并用实爆试验验证了方法的可行性:1)声固耦合法将流体视为声学介质,可有效解决流固耦合产生的结构响应;2)FSP 数值仿真试验可对实爆试验进行冲击环境预报;3)研究成果可推广应用到大中型 FSP 数值仿真试验;4)下一步应结合舰载设备进行一体化数值仿真研究。

参考文献

[1] 张磊,汪玉,华宏星,等. 舰载设备冲击试验系统研制现状及其发展趋势[J]. 科技导报, 2009, 27(1): 96-101.
[2] 赵慎,乔纯捷,王跃科. 基于多节点到达时间差的相对位姿测量系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2013(3): 194-198.

(下转第 52 页)