

水下爆炸冲击平台数值仿真设计研究

李琛¹, 宗智², 王巍¹

(1. 中国人民解放军 91388 部队, 广东 湛江 524000;

2. 大连理工大学 船舶工程学院 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116041)

摘要: 为研制水下爆炸冲击平台, 初步设计平台隔振系统和两种船体结构, 运用有限元分析软件 ABAQUS, 对安装隔振系统前后平台在爆炸载荷作用下的冲击响应进行计算分析, 预估平台抗冲隔振效果; 采用声固耦合方法, 考虑空化效应和材料应变率的影响; 仿真结果表明, 在水下爆炸载荷作用下, 采用加强的船体结构, 平台船体底部的塑性变形显著减小, 平台的垂向加速度峰值衰减率超过 95%; 经海上爆炸试验验证, 数值仿真结果与试验值吻合良好, 仿真设计方法合理。

关键词: 水下爆炸试验; 冲击平台; 有限元方法; 声固耦合; 隔振性能; 数值仿真

Research on Numerical Simulations Design of Shock Resistance Platform

Li Chen¹, Zong Zhi², Wang Wei¹

(1. Nave Forces 91388, Zhanjiang 524000, China; 2. School of Naval Architecture, Dalian University of Technology, State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian 116024, China)

Abstract: In order to develop UNDEX shock resistance platform, it was pre-designed that the isolation system and two hull structure. Used the finite element analysis software ABAQUS to simulate the impulsion response of the platform subjected to the explosion loading before and after vibration, predict of the anti-shock vibration isolation performance of platform. This paper adopts acoustic structure coupling method, considering the influence of cavitation effects and material strain rate strengthen effect. Simulation results show that: the plastic deformation of hull bottom is significantly reduced and vertical acceleration peak decrement of hull above 95% in UNDEX via adopting the strengthen hull structure. The result of offshore explosion test verifies that the coincidence numerical simulations with test value is good, the simulation design is rational.

Keywords: underwater explosion test; shock resistance platform; finite element method; acoustic structure coupling; vibration performance; numerical simulations

0 引言

随着水中兵器战斗部爆炸威力不断提高, 舰船以及舰船承载的爆炸测量设备在水下爆炸试验中面临更为严重的冲击安全问题。为确保爆炸试验中舰船和测量设备的安全, 目前通常采用的方法是对舰船进行冲击防护加(改)装。舰船冲击防护加(改)装实施难度大、成本高、周期长, 不易实现, 因此, 设计研制可重复使用的水下爆炸冲击平台替代舰船, 用以承载测量设备并为测量设备提供可靠的冲击防护, 对水下爆炸试验的安全实施和武器装备试验鉴定技术的提高具有重要意义。

水下爆炸冲击平台设计包括船体结构抗冲击设计和测量设备抗冲击设计两部分内容, 通过分析计算水下非接触爆炸载荷作用下平台冲击响应来实现。近年来, 随着 ABAQUS、LS-DYNA、MSC/DYTRAN 等多种大型有限元动力分析软件的普及, 有限元仿真成为计算舰船冲击响应的切实可行的方法^[1]。水下爆炸冲击平台承载设备在水下爆炸条件下的冲击输入具有非均匀性, 因此, 对测量设备进行抗冲击分析时必须采用设备与船体一体化抗冲击分析技术^[2]。本文采用数值仿真设计

方法, 依据平台抗冲隔振性能指标要求, 首先设计了两种船体结构; 其次, 建立有限元模型, 运用有限元软件 ABQUS, 计算船体结构的冲击响应并进行隔振器初步选型和隔振系统设计, 对安装隔振系统前后平台在爆炸载荷作用下的冲击响应进行分析计算, 对比采用不同船体结构的平台抗冲隔振效果; 最后, 采用优化的船体结构和隔振系统建造平台, 并通过水下爆炸试验进行平台性能验证。

1 系统结构及原理

1.1 系统结构组成

水下爆炸冲击平台主要由双体结构钢质船体和隔振系统组成。

水下爆炸冲击平台结构示意图如图 1 所示。

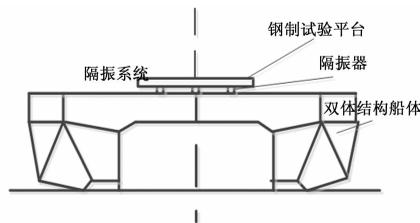


图 1 水下爆炸冲击平台结构示意图

1.1.1 双体结构钢质船体

双体结构钢质船体用于承载测量设备和隔振系统, 采用宽式侧片体双体船, 左右片体舱室、结构均对称布置。连接桥

收稿日期: 2017-11-07; 修回日期: 2018-03-14。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51679037); 国家自然科学基金重点项目(51639003)。

作者简介: 李琛(1972-), 女, 高级工程师、硕士学位, 主要从事水下爆炸测量与数值仿真方向的研究。

结构贯通船艙,上表面与主甲板平齐,采用箱型梁结构形式,中间设有一道纵向舱壁。片体为滑行艇形式、平底,内舷为垂向直壁形式。甲板上方设有阶梯状舷墙、栏杆;在测量设备周围设置防浪装置;主甲板上配备缓冲固定接口,用于安装隔振系统。

水下爆炸冲击平台基于双体船结构设计,主要考虑双体船结构具有良好的初稳性、耐波性和抗沉性,便于在海上实爆试验实施过程中布放和拖带。

1.1.2 隔振系统

隔振系统用于测量设备冲击防护,由钢制试验平台和隔振器组成,隔振器与双体船甲板相连;隔振系统安装于双体结构船体主甲板上,具有冲击加速度垂向和横向缓冲能力。

使用隔振器是舰载设备抗冲击防护的常用方法,隔振器刚度的选取和隔振器选型是否科学合理直接关系到隔振系统缓冲效率。基于设备冲击输入谱转换法的时域算法广泛应用于设备抗冲击防护系统设计,文献[3]依据GJB1060.1-91标准和德国BV0430标准^[4-5],将水下爆炸载荷简化为三角形变化历程,根据设备冲击响应谱和防护系统设计指标研制的缓冲平台缓冲效率可达90%。由于水下爆炸载荷响应曲线的复杂性,采用数值仿真计算与水下爆炸试验相结合的设计方法进行隔振系统设计,能有效提高隔振系统的缓冲效率。

本文采用数值仿真软件,对没有安装隔振系统的双体船船体结构冲击加速度响应进行计算,根据测量设备重量和体积,设计试验平台面积为 $2.0\text{ m}\times 1.5\text{ m}$ 、重 $1\ 000\text{ kg}$ (含测量设备重量);依据水下爆炸试验工况和测量设备抗冲击性能要求,初步确定采用8个非线性隔振器,非线性隔振器三个方向刚度为 0.1 kN/mm ,沿试验平台周向均匀分布。

1.2 系统设计原理

采用数值仿真设计方法,依据平台抗冲隔振性能指标要求,进行水下爆炸冲击平台设计。设计步骤如下。

Step1:设计两种船体结构。

双体船结构模型1:双体船水线以下船体板厚度为 8 mm ,水线以上船体板厚度为 5 mm ;

双体船结构模型2:双体船水线以下船体板厚度为 10 mm ,水线以上船体板厚度为 8 mm 。肋位增加1倍,采用T型材;船底中线两侧分别增加一条船底纵骨,和原船底纵骨都延伸到水线面。

Step2:建立有限元模型,运用数值仿真软件,对两种船体结构在水下爆炸载荷作用下的应变应力响应进行仿真计算,对比船体毁伤情况,选用优化的船体结构作为平台结构。

Step3:对安装隔振系统后平台在水下爆炸载荷作用下的冲击响应进行数值仿真计算,通过模拟结果判断平台的垂向加速度峰值衰减率是否满足设计要求,检验隔振系统设计的合理性。

Step4:采用优化的船体结构和隔振系统建造平台,并通过水下爆炸试验进行平台性能验证。

2 仿真模型建立

2.1 有限元模型

采用ABAQUS中的声-固耦合方法模拟平台水下爆炸,在进行舰船水下爆炸数值计算的过程中,建立精确的有限元模型很重要,有限元模型的精确与否直接影响分析结果。

取双体船长度为1,则宽度为0.35、型深0.14、吃水0.075。建立水下爆炸冲击平台模型,导入有限元软件后进行分析计算。船体外板和水密舱壁网格由 0.1×0.1 四边形网格划分,其中最小网格边长 0.016 ,最大网格边长 0.17 。外板和水密舱壁总单元数为17244个,其中四边形单元16727个,三角形单元517个。船体梁由 0.1 线网格划分,线单元8106个。水域半径取船体半宽(型宽一半)的六倍 1.05 ,水域中间为长 1.14 ,半径 1.05 的圆柱,两边为半径 1.05 的四分之一球。将流场底面边界设为无反射边界条件^[6],水域由内到外网格大小依次为 $0.1, 0.2, 0.4, 0.8$,单元总数为1704116,单元类型为声学四面体单元。

外板模型和水密舱壁模型如图2~3所示。



图2 外板模型



图3 水密舱壁模型

2.2 材料属性设置

建立有限元网格实体模型,并对模型添加材料属性及约束条件:双体船材料选用Q235钢,杨氏模量为 $2.1\times 10^{11}\text{ N/m}^2$,泊松比为0.3,密度为 $7.85\times 10^3\text{ kg/m}^3$,塑性属性中屈服应力为 $2.35\times 10^8\text{ Pa}$ 时塑性应变为0;屈服应力为 $3.5\times 10^8\text{ Pa}$ 时塑性应变为0.15。水域密度 $1\ 000\text{ kg/m}^3$,声学介质 $2.1409\times 10^9\text{ Pa}$ 。

2.3 计算工况设置

仿真计算工况如表1所示。

表1 数值仿真工况

工况	爆源位置	爆源 TNT /kg	水平距离 /m	水下深度 /m	船体结构模型	分析参数
1	船艙	1000	70	40	模型1,2	应变
2	船艙	1000	70	40	模型1,2	应变
3	船艙	2	3	3	模型2	位移,加速度
4	船艙	2	3	2.5	模型2	位移,加速度

对比两种双体船结构在水下爆炸作用下的应变应力响应,检验船体结构强度设计的合理性;对比隔振器船上节点和平台节点输出的垂向加速度峰值,计算衰减率,检验隔振系统的隔振效果。

3 仿真试验结果

3.1 船底单元应变响应数值计算

对比数值仿真工况1、2船底单元应变计算结果,工况1船体结构变形相对较大,本文主要针对工况1条件下平台船体结构应变响应数值计算结果进行分析。

3.1.1 双体船结构模型1船底单元应变响应计算

船底单元应变峰值为 $6.7\times 10^{-3}\epsilon$,应变云图如图4所示。

3.1.2 双体船结构模型2船底单元应变响应计算

船底单元塑性应变峰值为 $0.9\times 10^{-3}\epsilon$,应变云图如图5所示。

3.1.3 采用两种双体船结构模型,对船底某一单元应变的数值仿真计算

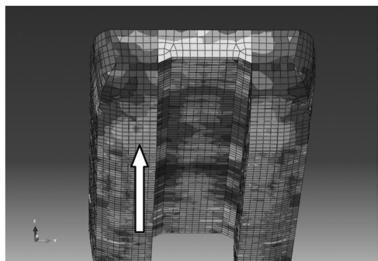


图 4 双体船结构模型 1 船底单元应变云图

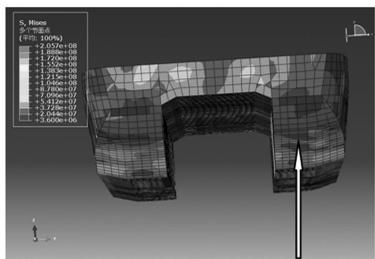


图 5 双体船结构模型 2 船底单元应变云图

采用双体船结构模型 1，船底某一单元塑性应变峰值为 $2.25 \times 10^{-3} \epsilon$ ；采用双体船结构模型 2，船底同一单元无塑性应变。应变云图如图 6~7 所示。

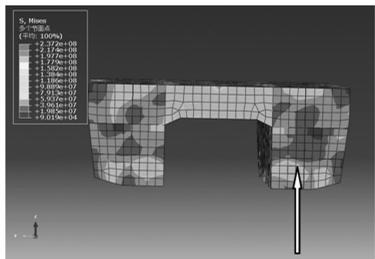


图 6 双体船结构模型 1 应变云图

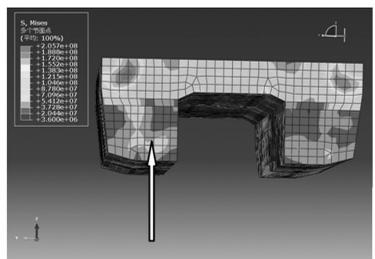


图 7 双体船结构模型 2 应变云图

3.1.4 船底应变响应数值计算结果分析

从船底单元应变数值计算结果可以看出：

- ①采用双体船结构模型 1，最大塑性应变 6.7 毫应变，全船多处出现塑性应变；
- ②采用双体船结构模型 2，最大塑性应变 0.9 毫应变；
- ③采用双体船结构模型 1，船底某一单元应变为 2.25 毫应变；采用双体船结构模型 2，船底同一单元无塑性变形。

双体船结构模型 2 大量采用加强筋设计，船体结构强度比模型 1 的结构强度大，在水下爆炸载荷作用下，船体结构塑性变形小。

3.2 隔振前后测量设备冲击响应数值计算

平台冲击响应在各个部位是不同的，对于水下爆炸冲击平台来说，垂向位移、加速度是主要的。

3.2.1 隔振后垂向位移数值计算

工况 3、4 条件下，隔振后隔振器基座与隔振器上设备垂向位移数值计算结果如图 8~9 所示。

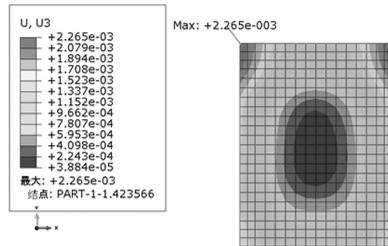


图 8 工况 3 垂向位移

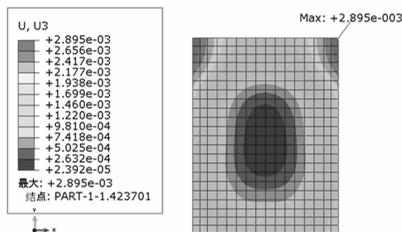


图 9 工况 4 垂向位移

3.2.2 隔振前后垂向加速度数值计算

工况 3、4 条件下，隔振前后垂向加速度数值计算结果为：

工况 3 平台隔振前加速度峰值为 $2.09 \times 10^4 \text{ m/s}^2$ ，隔振后加速度峰值为 $5.94 \times 10^1 \text{ m/s}^2$ ；工况 4 隔振前加速度峰值为 $2.31 \times 10^4 \text{ m/s}^2$ ，隔振后加速度峰值为 $6.52 \times 10^1 \text{ m/s}^2$ 。

3.3 仿真试验结论

从仿真试验结果可以得出如下结论：

- 1) 在相同爆炸试验工况下，双体船船体结构采用模型 2，船体结构的最大塑性变形小，考虑到钢具有冲击强化的特性（冲击后强度增强），双体船结构模型 2 满足平台的抗冲设计要求；
- 2) 水下爆炸冲击平台隔振器基座与隔振器上设备垂向位移不超过 3 mm，垂向加速度峰值衰减率超过 95%，符合平台的隔振设计要求。

4 试验验证

4.1 水下爆炸试验

按照数值仿真设计方案研制了双体船水下爆炸冲击平台；基于水下爆炸相似原理，设置了 1 kg RDX 炸药在水下 3.7 m、距船艏水平距离分别为 4.0 m 和 2.0 m 两个爆炸试验工况。在迎爆面左右 2 个隔振器基础及对应的试验平台顶部位置、背爆面右侧隔振器基础及对应的试验平台顶部位置共布设 6 个测点，测量双体船船体和试验平台上测点垂向加速度峰值并计算衰减率；检查双体船船体结构变形情况。

4.2 试验结果对比分析

隔振前后迎爆面右侧测点的加速度时程曲线如图 10~11 所示。