水下非接触爆炸舰船动响应数值模拟

刘 孝,柳艳丽,周俊威,雷 鸣 (华中科技大学 数字化工程与仿真中心, 湖北 武汉 430074)

摘 要:对舰船在水下非接触爆炸载荷下动态响应的研究有助于深入了解舰船失效规律和损伤机理,为舰船损伤分 析与技术保障系统的建立提供良好的数据与技术支撑。本文基于视景仿真和舰船损伤仿真系统研究的需要,选取 Multigen Creator 和 TrueGrid 混合的建模方法;通过在 Ansys 系统中整合、重新构网生成混合计算模型,有效 提高了 LS-DYNA 进行数值计算的精度;最后,通过模拟船体在非接触爆炸下的冲击环境,对舰船的加速度响应状 况进行了数值及机理的分析。

关键词:水下非接触爆炸;舰船;动态响应;数值模拟;有限元分析 中图分类号: U674.7 文献标识码: A

舰船作为重要的水面武器作战平台,易受水雷、炸弹等 非接触式水下爆炸武器的攻击,为保证舰船在一定战损的情 况下提高生存几率,研究其在水下爆炸载荷下的动态响应有 十分重要的意义。然而,通过实验的方式研究舰船水下爆炸 动力学响应是一项费时并且昂贵的系统工程。近几年随着计 算机硬件和相关软件的飞速发展,使得舰船在水下爆炸载荷 作用下的模型建立和数值模拟成为可能。

近年来,国内外对水下爆炸舰船动响应开展了实验和理 论两方面系统而深入的研究。其中数值分析的主要思想是将 研究对象模型导入有限元分析软件(如 MSC.DYTRAN^[1]、 ABAQUS^[3]等)进行构网和建模,进而应用有限元分析模块 进行数值模拟。然而,由于有限元商业软件自带的前处理建 模工具对研究对象加以了简化,有时只是通过简单的板^[1]或 圆柱壳^[3]替代所研究的对象,导致了对复杂研究对象建模的 不足以及计算与仿真结果的不精确。本文基于视景仿真和舰 船损伤系统研究的需要,首先通过对比选取 Multigen Creator 建立三维船体几何模型、TrueGrid 建立流体三维几 何模型;其次在 Ansys 将所建立模型通过数据转换、重新构 网生成混合计算模型,在 LS-DYNA 中选取相应的材料参数 等生成 K 文件并进行数值计算;最后对舰船遭受水下非接触 爆炸时加速度响应进行了数值及机理分析。



一、三维可视化几何模型的建立

1.船体模型

Multigen Creator 是专门为复杂的虚拟场景实时漫游

收稿日期: 2010-07-01

作者简介:刘孝,男,硕士,华中科技大学数字化工程与仿真中心。

文章编号: 1006-7973 (2010) 11-0016-02

设计的建模工具,建模速度快且不会影响虚拟环境的实时性。 本文参考某型舰船进行建模,全长186.5m,宽度为22m, 高度为 49m, 吃水线为 5m。



图 2 Multigen Creator 所建舰船模型(只取甲板以下部分) 2.流体几何模型

为考核 Ansys 前处理的建模工具和 Truegrid 中建模数 值描述的精度,以相同的矩形板(钢材料)及水域为模型进行比 较。水体为 200m×100m×20m, 矩形板为 100×60m², 厚度为 16mm, 工况为 13kgTNT 在板的中心正下方 20m 处爆炸(计算相关设置、参数见2小节)。



图 3 Ansys (左)和 TrueGrid (右)建模精度比较 Cloe (1948) 的水下爆炸下的结构动态响应方程:

$$P(t) = P_{\max} e^{-\frac{t-t_0}{\theta}} \dots t \ge t_0$$
⁽¹⁾

其中: $P_{\max} = K_1(\frac{W^{\frac{1}{3}}}{p})^{\alpha_1}$, $\theta = K_2 W^{\frac{1}{3}}(\frac{W^{\frac{1}{3}}}{p})^{\alpha_2} \circ P_{\max}$ 为峰值压力, θ

为冲击波时间衰减常数,W为装药量,R为爆心距观测点的 距离。

对比 Shin, Y.S^[5]和 Huang, C.F.^[6]的相关研究方程 可知,二者采用的参数及单位不一致,代入后的计算结果也 有差异:

表1											
	<i>P</i> (<i>t</i>)单位	₩单位	R 单位	K_1	α_1	K_2	α_2	P(t)理论计算值	heta理论计算值	本文仿真数值	
Shin	Psi	磅(lb)	英寸 (in)	22505	1.18	0.058	-0.185	2.22MPa	0.496ms	P _{max} =2.5~3.0MPa	
Huang	Pa	牛(N)	米 (m)	2.217×10 ⁷	1.13	0.0511	-0.22	4.66MPa	0.348ms	heta = 6.23ms(Truegrid 模型) heta = 26.455ms(Ansys 模型)	
P (pa) Ppax							舰船的伤害最大,因此我们选取乙轴加速度响应进行分析。				



图 4 Cole 理论的冲击波衰减曲线

由表 1 及图 5 中数据的对比可以看出: 压力仿真数值和 理论的数值在同一数量级, 合乎实际。但利用 MATLAB 进 行曲线拟合求取θ值, 由图 6 可见, Truegrid 模型中所得到θ 值与理论分析结果更接近。



图 5 矩形板中心的压力曲线 (Ansys (左)、Truegrid (右))

由上述分析、比较,本文采用 TrueGrid 与 Ansys 混合 建立的模型计算进行数值计算。TrueGrid 中建立的水体模型 201m×39m×14.2m,如图 7 所示。





图 7 网格划分后的整体模型

- 二、有限元计算模型的建立
- 1. 单元尺寸及计算方法选择

为保持计算的均匀性,对炸药、船体和水体大部分采用相同的网格划分,参照汪俊(2006)^[2]的设置,单元尺寸为0.2m。 共划分结点88,129个,生成网格81,488个,如图7所示。

本试验中选用固流耦合 ALE 网格进行计算,其中船体采用 Lagrange 网格划分,水体、炸药采用 Euler 网格划分。

2. 试验参数、方程设置

在本次试验中,炸药采用高速爆炸燃烧材料和JWL 状态 方程;水体采用MAT-NULL材料和GRUNEISEN 状态方程; 船壳采用MAT_JOHNSON_COOK材料和GRUNEISEN状态方程加以描述。

三、仿真计算结果分析

本实例工况为 330kgTNT 在船体的底部正下方 9.2m 处,起爆点设在炸药的底部中心。在水下冲击试验中,垂直 方向是主要的结构响应方向^[4],尤其是垂直方向的加速度对 57123 61732 53327 56806

图 8 船体壳结构上的 4 个单元分布情况



图 9 四节点加速度响应时程曲线图

从图 9 中可以看出沿水平方向加速度的响应相对较大且 距爆点越远峰值越大,垂直方向的加速度响应相对较小且距 爆点越远峰值越小,二个方向数值相差 2~3 个数量级。艏底 部和艉底部的变化趋势类似,加速度变化剧烈且衰减迅速— 一两部位均处于壳面的交接部,有自于船体以及船体与水体 耦合的两种位移偏量;在冲击波后接受的传递能量迅速减小 (10%)^[4]。舯底部及上部(甲板)的变化趋势较缓——底 部在冲击波过后只有气泡作用,甲板上接收的传递能量较小。

四、结论

本文通过对舰船受水下非接触爆炸冲击的影响进行数值 模拟,建立了一个完整的建模、仿真流程。在仿真计算中忽 略了结构阻尼的影响,这一点需要在以后的深入研究中考虑。 参考文献

- 梅志远.船用加筋板架爆炸载荷下动态响应数值分析[J]. 爆炸与冲击,2004,24,(1):80-84.
- [2] 汪俊. 加筋圆柱壳水下爆炸动响应数值模拟[J]. 船舶力学, 2006, 10, (2): 126-137.
- [3] 姚熊亮.水下爆炸冲击载荷作用时船舶冲击环境仿真[].
 中国造船, 2003, 44, (1): 71-74.
- [4] Nathan A. Schneider. Prediction of Surface Ship Response to Severe Underwater Explosions Using a Virtual Underwater Shock Environment [D]. USA: NAVAL POSTGRADUA TE SCHOOL, 2003.
- [5] Shin, Y.S. Ship shock trial simulation of USS John Paul Jones (DDG53) using LS-DYNA/USA: three dimensional analysis.
 Presented at 70th Shock and Vibration Symposium, Albuquerque NM, November 15 – 19, 1999.
- [6] Huang, C.F. Dynamic Response of Cylindrical Shell Structures Subjected to Underwater Explosion, Ocean Engineering, 2009, 36: 564–577.