

# 舰艇水下爆炸试验 及冲击分析技术

JIANTING SHUIXIA BAOZHA SHIYAN  
JI CHONGJI FENXI JISHU

□ 汪玉 主编 □



国防工业出版社

National Defense Industry Press



# 舰艇水下爆炸试验 及冲击分析技术

汪玉 主编

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

2006年11月,在无锡召开了“第二届全国舰艇抗冲击技术交流会”。会议共收到论文近70篇。经校阅,本书刊登论文61篇。内容主要包括舰艇水下爆炸试验技术、舰艇总体及结构冲击分析技术、舰艇系统及设备冲击分析技术、抗冲元器件相关技术及人员冲击防护技术等。

本书可供从事舰艇水下爆炸冲击分析工作的工程技术人员阅读,对广大从事舰艇及设备抗冲击技术研究、应用和开发的科研人员也有较大的参考价值。

### 图书在版编目(CIP)数据

舰艇水下爆炸试验及冲击分析技术/汪玉主编. —北京:国防工业出版社,2007.12  
ISBN 978-7-118-05379-1

I. 舰... II. 汪... III. 军用船—水下爆炸冲击试验  
IV. U674.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 149827 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

※

开本 880 × 1230 1/16 印张 19 字数 626 千字

2007年12月第1版第1次印刷 印数 1—260 册 定价 80.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

## 本书编委会名单

主 编 汪 玉

副主编 (按姓氏笔画排序)

王 强 刘建湖 华宏星

孙永华 何 琳 李兆俊

杜俭业 胡刚义 彭 旭

## 前 言

舰艇抗冲击性能是舰艇生命力的重要内容,也是舰艇的主要战技指标,始终为各国海军高度重视。为适应现代海战的要求,提高我国舰艇抗冲击能力已成为我们面临的重要任务。近年来,舰艇抗冲击问题受到了有关领导和各个方面的高度重视,舰艇抗冲击技术的研究和试验工作得到了有力的支持,研究领域不断扩展,技术队伍不断壮大,研究成果不断涌现,我国舰艇抗冲击技术已经取得了长足的进步。

自军船抗冲击学组成立以来,我国舰艇抗冲击工作者围绕军船抗冲击学组提出的舰艇抗冲击研究的“十大工作内容”和“五大关键技术”,以舰艇水下爆炸试验研究为重点,开展了各类研究工作,取得了大量卓有成效的成果。为及时交流各方面的研究成果,根据军船抗冲击学组第二届学术交流会征集并交流的论文,经优选和整理,特编辑出版了该书。该书题材广泛,内容新颖,既有舰艇总体及结构冲击分析技术、舰艇系统及设备冲击分析技术、抗冲击元器件相关技术等方面的研究内容,也有不少舰艇水下爆炸试验技术方面的研究内容,同时还首次发表了模拟舰员的假人在舰艇抗冲击方面的研究内容。不仅对当前已开展的舰艇抗冲击研究工作有重要的参考价值,而且对今后舰艇抗冲击技术的深入研究也大有裨益。特别值得欣喜的是,该书不少论文的作者是年轻同志,他们思想敏锐、勇于创新、敢挑重担,已经成为我国舰艇抗冲击研究的重要力量,其论文很值得我们认真阅读。

值此论文集出版之际,感谢各位论文作者对舰艇抗冲击技术研究所做出的贡献。同时感谢陈继康、郑茂礼、薛亚凡等老一辈舰艇抗冲击专家对军船抗冲击学组工作的大力支持和帮助,也感谢吴静波在本书编辑中所做的大量工作。

由于水平和学识所限,书中难免存在疏漏、欠妥之处,敬请各位读者批评指正。

编者

2007年8月

# 目 录

<b>实船爆炸试验技术</b> .....	1
基于 LS-DYNA 的澳海军小型浮动冲击平台试验数值模拟 .....	3
水下爆炸试验相似准则 .....	10
舰船水下爆炸试验中模型试验的相似律(摘要) .....	16
水下爆炸试验测量方法研究(摘要) .....	17
水下爆炸试验中炸心定位及测量方法研究(摘要) .....	18
水下爆炸测量技术研究(摘要) .....	20
水面舰艇实船爆炸试验总体技术研究(摘要) .....	21
PVDF 压力传感器在冲击力学中的应用 .....	22
水中兵器实船爆炸试验测控技术研究(摘要) .....	26
矩形钢板水下爆炸试验研究 .....	27
<b>舰艇总体及结构冲击分析技术</b> .....	33
舰船对水下爆炸冲击响应的研究现状 .....	35
舰船水下爆炸气穴效应一维非线性流固耦合理论模型研究 .....	39
舰船水下爆炸数值模拟建模简化方法研究 .....	43
水下爆炸冲击波作用下舰船板架结构动态响应的数值仿真及试验研究 .....	49
水下爆炸气泡脉动载荷作用下的船体响应研究 .....	54
水下爆炸载荷与波浪载荷联合作用下的舰船响应研究 .....	59
水下方盒结构剩余冲击响应与声辐射相关性研究 .....	62
不同水深作用对潜艇抗爆抗冲击能力的影响 .....	66
关于水下爆炸冲击谱的讨论 .....	73
基于柔度修正的复杂结构动力模型简化方法 .....	76
基于 CE/SE 方法的二维 Euler 型多物质流体弹塑性计算程序 .....	80
轴向冲击下薄壁组合结构吸能特性研究 .....	87
结构受到强动载荷时安全计算和评估的简单方法 .....	94
基于模糊随机理论的舰艇抗冲击性能评估方法研究 .....	100
某水面船缩比模型冲击环境数值计算分析 .....	110
水下爆炸作用下船舱冲击响应时频特征的小波包分析 .....	117
复合壳体水下船舶抗爆性能研究 .....	122
<b>舰艇系统及设备冲击分析技术</b> .....	125
冲击载荷作用下舰艇管路系统全局参数灵敏度分析建模 .....	127
舰船设备抗冲隔振系统建模理论及其应用 .....	133
舰船设备抗冲击性能校核评估系统概念设计 .....	142
舰船设备在水下非接触爆炸环境下的冲击响应计算方法研究 .....	146

具有刚度非线性双层隔振系统抗冲击性能研究 .....	150
利用增量模态叠加法计算带限位器隔离系统非线性冲击响应 .....	154
水下爆炸荷载冲击下大型舰船设备冲击环境预报方法 .....	159
应用 DDAM 进行船舶浮筏隔振装置抗冲击计算 .....	164
定位格架抗冲击性能研究 .....	172
压力管路系统冲击动响应特性试验研究 .....	175
柴油机抗冲击性能研究的若干问题 .....	178
舰艇推进轴系抗冲击研究 .....	182
线性隔振系统的极限抗冲击性能及参数优化 .....	188
<b>抗冲元器件相关技术 .....</b>	<b>191</b>
一种确定隔振器冲击刚度的新方法 .....	193
隔冲元器件非线性冲击特性测量方法精度分析 .....	196
基于磁流变阻尼器的舰船智能减振抗冲隔离器性能仿真研究 .....	205
弯曲型橡胶缓冲器冲击试验与数值仿真 .....	211
泡沫铝冲击吸能器工程设计研究 .....	215
泡沫铝夹芯梁的低速冲击失效行为研究 .....	217
钛镍形状记忆合金结构抗冲击研究 .....	223
<b>其他 .....</b>	<b>231</b>
舰船舱室爆炸数值试验研究 .....	233
密闭容器内次生冲击波的超压研究 .....	242
炸药在舰艇舱室内爆效应研究 .....	245
拟内爆问题的 SPH 方法模拟 .....	249
水下爆炸的跌落试验模拟方法研究 .....	254
垂直冲击载荷下人体冲击安全防护研究 .....	258
水面舰艇坐姿人员抗冲击防护系统 .....	263
弹丸垂直侵彻某型铝合金的数值模拟 .....	268
RPU 静载和动载压缩力学性质研究 .....	272
不同密度 RPU 结构块的静、动载响应试验研究 .....	275
一种基于 Yeoh 函数的非线性黏超弹性本构模型及其在冲击仿真中的应用 .....	278
自由落体系统振动对跌落式冲击响应的影响 .....	283
夹紧式机械滤波器 .....	287
20t 大型落锤试验装置及其应用 .....	293

---

# 实船爆炸试验技术

---





# 基于 LS-DYNA 的澳海军小型浮动冲击平台试验数值模拟

金辉<sup>1</sup> 宫国田<sup>1</sup> 周华<sup>1</sup> 张庆明<sup>2</sup>

(1 海军 91439 部队 大连 2 北京理工大学爆炸与科学技术国家重点实验室 北京)

**摘要:**本文简要介绍了 LS-DYNA 及其前后处理软件;针对澳海军小型浮动冲击平台冲击试验,用 TRUEGRID 软件进行建模,采用 BB 和 TRBB 变网格方法来控制计算量、减少能量耗散,提高计算精度;在考虑水底反射、水面自由面效应及材料应变率强化效应等情况下,用 LS-DYNA 软件对试验情况进行了数值计算;数值模拟比较直观地显示水下爆炸及舰体响应的全过程,并且数值模拟结果与试验结果比较吻合。

**关键词:**水下爆炸数值模拟 浮动冲击平台 LS-DYNA

## 1 引言

舰艇在航行时不可避免地会受到各种水中兵器的攻击,水中兵器水中爆炸不仅会给舰船结构造成破坏,同时也会对舰载装备、人员产生毁伤。因此,如何有效地分析、计算舰船水下冲击环境,改善舰船的抗冲击性能,提高其战斗力和生存力,是水下爆炸及舰船抗爆防护研究的主要内容。由于水下爆炸的复杂性以及舰船抗冲击试验的高费用性,浮动平台冲击试验和数值仿真也就成了研究水下爆炸问题的有效方法。

## 2 工程试验概况

本小型浮动冲击平台是澳大利亚皇家海军用来测试水下爆炸对舰体材料和小型舰载设备响应的装置。以前对澳大利亚皇家海军舰船材料和设备的损伤试验都是在大型的冲击机上进行的,但在冲击机上进行材料和设备的冲击响应不如在浮动冲击平台上准确和有效。

试验是在澳大利亚 Eppingr 的 AMRL 水池上进行的。水池直径 100m,深 20m。炸药是 10kg 的球形铸装裸炸药 50/50 RDX/TNT,并用 30g 4 号塑性炸药进行引爆,炸药放在浮动冲击平台的龙骨正下方 10m、水平方向 22m 处。浮动冲击平台为长 2.85m,宽 1.6m,吃水 0.65m,总质量 2450kg,平台两端设有水密舱,以防止爆炸后平台结构因破损而沉没。浮动冲击平台龙骨的法向方向正朝着装药方向以确保冲击波能够正向加载到平台上。在龙骨边上朝装药方向开一个 0.5m×0.5m 的窗口,该窗口是用来放置被测试的舰体材料。两个自由场压力传感器是型号为 PCB138A05 压电传感器,传感器布放在朝装药方向的船沿水下 1.5m 处;两个壁压传感

器是型号为 102A04PCB 压电传感器,传感器布设在测船体材料响应窗口内。四个加速度传感器是型号为 7207 的 ENDEVCO 压阻传感器,在传感器与平台基板之间安装型号为 UA0559 的 Bruel 和 Kjaer 的机械过滤器,用来过滤高于 10kHz 的高频波,传感器布设在测试窗口上方。压力传感器与加速度传感器连接到 Digistar-III 数字记录存储仪上。浮动冲击平台的形状及尺寸、试验装置的布设、测点分布如图 1 和图 2 所示。下面数值计算中的壁压、加速度、速度都是以 A4 点为例进行说明。

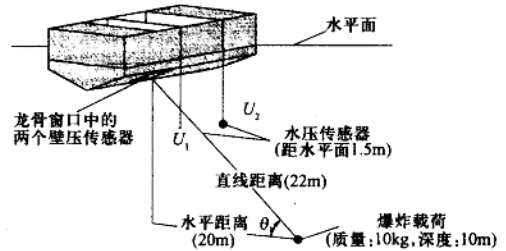
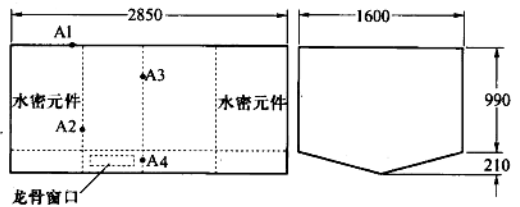


图 1 试验的布设图



所有单位为 mm  
A1、A2、A3 和 A4 为沿平台中线的加速度传感器

图 2 模型尺寸及测点布设图

试验是在相同工况下进行 10 次,每次试验爆炸的龙骨冲击因子均是  $0.1\sqrt{\text{kg}\cdot\text{m}}$ 。从加速度的时程曲线可以计算出模型的速度与冲击响应谱,冲击响应谱如

图3所示。模型的理论计算速度是1.10m/s,与实际测量的模型速度1.16m/s非常吻合。图3的冲击响应谱显示在这种工况下船体材料的响应符合澳大利亚冲

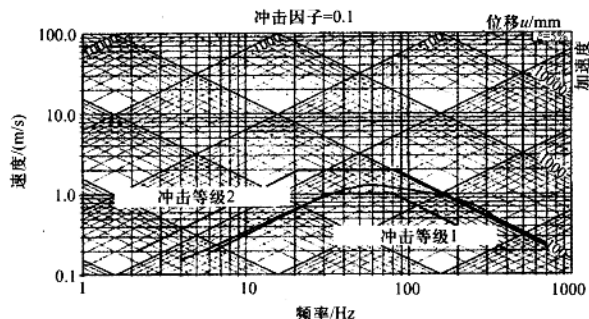


图3 模型试验的冲击响应谱

击标准1的要求,但冲击标准1是澳大利亚皇家海军船体材料与舰载设备冲击强度的最低要求。

### 3 LS-DYNA 软件及前后处理软件

由于数值模拟既不受材料性质的限制,也不受初始条件和边界条件的限制,对即使最复杂的问题也能给出近似解。因此,数值模拟与理论分析、试验分析一道已成为研究水下爆炸的三种基本方法之一,并且越来越受到重视。水下爆炸数值模拟的实质是把炸药、水、舰船、空气划分为微小的单元进行空间上离散化,同时把时间也划分为微小的步长进行时间离散,在微小的时间步长上直接应用质量、动量、能量守恒定律,并与状态方程结合在一起给出压力、密度、内能之间的关系,从而提供了控制流体动力学行为的一套完整方程。由于数值模拟的有效性,许多国家都投入大量的人力、物力进行数值模拟研究,开发了大量的非线性动力学分析工程软件,典型的应用程序有美国 ABAQUS 公司开发的 ABAQUS 软件、LSTC 公司开发的 LS-DYNA 软件、MSC 公司开发的 MSC. Dytran 软件、Century Dynamics 公司开发的 AUTODYN 软件、LOS ALAMOS 国家实验室开发的 SPHINX 软件和 SANDIA 国家实验室开发的 CTH 软件以及 ADINA、ASK 等软件。

#### 3.1 LS-DYNA 软件

LS-DYNA 软件最初称为 DYNA 软件,是由 J. O. Hallquist 博士于 1976 年在美国 Lawrence Livermore National Laboratory 主持开发完成的,1988 年 J. O. Hallquist 创建 LSTC (Lawrence Livermore Technology Corporation) 公司,推出 LS-DYNA 软件系列,并于 1997 年将 LS-DYNA2D、LS-DYNA3D、LS-TOPAZ2D、LS-TOPAZ3D 等程序合成一个软件包,称为 LS-DYNA。

LS-DYNA 是功能齐全的几何非线性(大位移、大转动和大应变)、材料非线性的显式动力分析程序,能够模拟真实世界的各种复杂问题,特别适合求解各种二维、三维非线性结构的高速碰撞、爆炸、穿甲与侵入、应力波传播等非线性动力冲击问题,同时可以求解传热、流体及流固耦合问题。目前该软件在全球拥有 1000 多家用户,广泛应用于航空航天、汽车、船舶、军工、核工业、石油、建筑等领域。

#### 3.2 LS-DYNA 软件的前后处理器

由于 LS-DYNA 软件在各个领域取得了广泛应用,加上其开放的结构体系,很多公司为其开发了前后处理软件,使其可以与大多数 CAD/CAM 软件集成并拥有接口,常用的前后处理软件如下。

##### 3.2.1 LS-INGRID/LS-PREPOST

LS-INGRID/LS-PREPOST 是 LSTC 公司自己开发的专用前后处理软件。LS-INGRID 是 TrueGrid 的前身。LS-PREPOST 的前处理能力还不很完善,但具有很好的后处理功能,可直接读取 LS-DYNA 的计算结果,进行计算数据的汇整及二次计算;可以直接于曲线图当中进行四则运算、微积分,快速傅里叶变换,滤波等;可同时输出各种力学数据,如应力、应变、塑性应变、温度、位移、速度、加速度等。

##### 3.2.2 ANSYS/LS-DYNA

ANSYS 公司购买了 LS-DYNA 软件后,针对 LS-DYNA 开发了前后处理器。该处理器秉承了 ANSYS 的传统,可用 APDL 语言进行编写,但支持 LS-DYNA 的功能有限,一些材料模型不能直接得到,往往需要在 KEYWORD 文件中手工添加。

##### 3.2.3 TRUEGRID

TRUEGRID 是由 XYZ 公司开发,在 LS-INGRID 的基础上发展而来的,基于 BLOCK、CLINDER 命令进行网格生成,具有功能强大、使用方便的特点,可生成高质量的六面体和四边形网格;可采用全交互式、批处理、宏和关键字操作,能支持 30 多种求解器;可使用户保证获得优质网格质量的同时,又极大地减少了时间消耗,是有限元分析最好的建模工具之一。

##### 3.2.4 HYPERMESH

HYPERMESH 由 ALTAIR 公司开发,是一个针对有限元主流求解器的高性能前后处理软件,可在较佳的交互式可视环境下进行操作,HYPERMESH 的图形界面易于学习,可以直接使用 CAD 几何数据和现存的有限元模型,从而减少附加的冗余数据,具有很强的网格划分功能。

### 3.2.5 MSC. PATRAN

PATRAN 是 MSC 公司开发的集有限元前后处理及分析的仿真软件。MSC. PATRAN 最早由美国国家航空和宇宙航局(NASA)倡导研制,是工业领域著名的并行框架式有限元前后处理及分析系统,其开放性、多功能性的体系可将工程设计、工程分析、结果评估、用户化设计和交互图形集于一身,具有高度的集成能力和良好的适用性。

### 3.2.6 AVS/Express

AVS/Express 是 AVS 公司研制,是一个面向对象的、可视的开发工具,能够建立可重复使用的对象,应用程序组件和复杂的数据可视化后处理应用程序。AVS/Express 对集成 C、Fortran 和 C++ 代码提供完全的支持。组件可以通过调用 C、Fortran 和 C++ 程序执行它们的处理过程。可以使用代码模板产生器输入用户书写的代码和数据,而不需要做什么修改。类似地,C++ 类产生器也能使用 C++ 的强大编程的能力存取 AVS/Express 组件。因此 AVS/Express 的后处理功能十分强大。

其他常用的前后处理器还有由 ETA 公司开发的 FEMB 软件以及 MEDINA、JVISION、FEMAP 软件等。

## 4 水下爆炸数值模拟

### 4.1 水下爆炸冲击数值模拟的理论基础

水中兵器在水下爆炸及其对舰船的毁伤作用是一个相当复杂的过程,它涉及爆炸力学、流体力学、塑性动力学、结构力学、材料动力学、有限元、计算机及数学等学科。水中兵器爆炸加载包括入射冲击波,自由面反射效应和海底反射效应,气泡脉动、迁移和局部空化等。炸药在水中爆炸后形成的爆炸产物,其压力、温度远远大于周围水介质,所以爆炸产物迅速而剧烈地压缩周围介质,使水的压力呈现突跃式升高,形成初始的冲击波,冲击波通过水介质传递而作用到目标上。

水下爆炸虽然十分复杂,但在其流场上质量、动量和能量是守恒的。利用 LS-DYNA 程序的 ALE 多材料算法可以对水中兵器战斗部装药爆炸、膨胀、冲击波的传播过程进行仿真计算。在计算过程中,舰船采用拉格朗日算法,炸药、水和空气采用欧拉算法。用 JWL (Jones Wilkin Lee) 状态方程描述了炸药爆炸气体产物的压力、体积、能量特性。JWL 状态方程为

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\rho_0 E}{V} \quad (1)$$

式中: $E$  为单位质量内能; $\rho_0$  为材料参考密度; $V$  为比容; $A$ 、 $B$ 、 $\omega$ 、 $R_1$ 、 $R_2$  为常数。

水的状态方程采用 Gruneisen 状态方程,即

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\nu_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[ 1 - (s_1 - 1) \mu + s_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - s_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2 + (\gamma_0 + a\mu) E} \quad (2)$$

式中: $C$  为  $\mu_1 - \mu_p$  曲线的截距; $s_1$ 、 $s_2$ 、 $s_3$  为  $\mu_1 - \mu_p$  曲线斜率的系数; $\gamma_0$  为 Gruneisen gamma; $a$  为对  $\gamma_0$  的一阶体积修正。

空气采用线性多项式状态方程

$$p = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E \quad (3)$$

式中: $p$  为爆轰压力; $E$  为单位体积内能; $V$  为相对体积; $C_0$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$ 、 $C_5$ 、 $C_6$  为实常数; $\mu = \frac{1}{V} - 1$ 。

对目标计算时,由于目前舰艇的主要材料为低碳钢和合金材料,而低碳钢在强冲击作用下,会产生明显的应变率强化现象,因此还要考虑材料应变率效应的影响,故选用 JOHNSON COOK 模型。

$$\sigma_y = (A + B \bar{\epsilon}^n) (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - T^*) \bar{\epsilon}^p \quad (4)$$

式中: $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $n$  为材料常数; $A$  为材料静态屈服极限; $B$ 、 $n$  为与静态屈服阶段相关的参数; $C$  为与应变率相关的参数; $\bar{\epsilon}^p$  为有效塑性应变; $\dot{\epsilon}^*$  为有效应变率;若室温为  $T_{Room}$ ,熔点温度为  $T_{melt}$ ,则相对温度  $T^*$  的定义为

$$T^* = (T - T_{Room}) / (T_{melt} - T_{Room}) \quad (5)$$

在舰船和流体的界面定义全耦合面进行动态仿真。

另外在有限场水域爆炸时还要考虑海底反射、海面的自由面效应等,此时采用工程近似处理(映射源)方法。自由面能使冲击波产生截断效应,即把冲击波的尾部截掉,减小了冲击波的冲量和能量,底部效应根据装药与海底的距离及海底的底质加以考虑,如图 4 和图 5 所示。

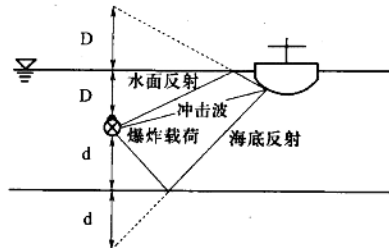


图 4 有限场的压力波反射图

### 4.2 有限元计算模型

用 LS-DYNA 软件计算较大范围水下爆炸时,由于受到计算机硬件、计算精度等要求的限制,网格不可能

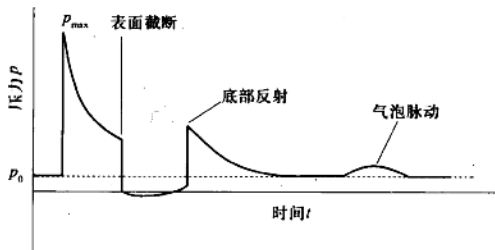


图5 有限场的压力波波图形

划分很细,否则计算量会十分巨大,计算时间也会很长;另外由于计算本身具有误差,如果网格划分过细,计算节点数量很大,计算的每一步误差也带入下一步计算,这样的累积误差随着增大,也会对最后的计算结果产生很大的影响。但如果网格划分过大,软件中的欧拉算法具有能量耗散效应,特别是炸药的近区,耗散效应影响非常大,致使计算的压力往往偏小,从而使计算结果达不到理想精度。要较好地模拟炸药爆轰的效果,炸药的网格大小一般要求不大于1cm。

有限元网格质量的好坏,是保证计算精度的重要前题,甚至关系到计算能否顺利进行。当网格质量不高时,往往会出现负体积和沙漏等问题,从而导致计算中止。同时有限元网格的划分应该反映出原物理模型的形状特征,保证在几何上的规整。在此基础上,由于三角形单元、四面体单元的刚度比较大,模型不容易变形,不适用于整体模型的网格划分,因此在壳单元建模上应尽量选用四边形单元、在体单元上应尽量选用六面体单元进行建模。

TRUEGRID 软件强大的建模功能、方便使用的特点,可生成高质量的六面体和四边形网格单元,非常适合用于水下爆炸的有限元模型建模。TRUEGRID 软件中的 BB 与 TRBB 变网格方法可方便地实现网格由小到大的过渡,又能保证应力的有效传递,即把炸药近区的网格划分的很小,远区网格则可以放大些。图 6~图 9 是用 TRUEGRID 软件建立的网格过渡有限元模型。

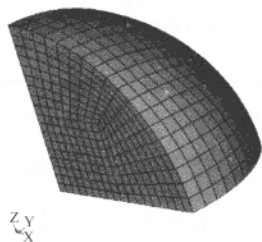


图6 炸药有限元网格大小0.9cm

浮动冲击平台的建模如图 10~图 12 所示。壳体部分的网格为 8cm 左右的壳单元,壳厚 0.8cm;龙骨定义为 T 形厚壳单元,加强筋为 T 形的厚壳单元,厚度为 2cm。

因炸药位于水下约 10m 处,爆炸水域水深 20m,问题具有轴对称的特点,因此流场采用 1/8 建模,水和空气的网格大小为 13.5cm,图 13 显示了水域、空气的有限元模型以及药包和浮动平台的相对位置。

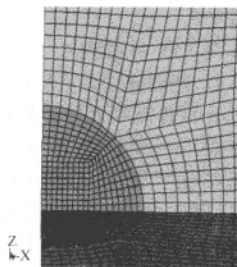


图7 炸药到水单元过渡网格大小从0.9cm~1.5cm

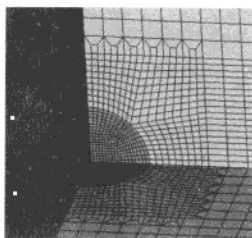


图8 网格大小过渡到4.5cm

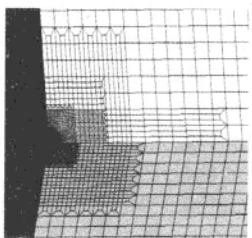


图9 网格大小过渡到13.5cm

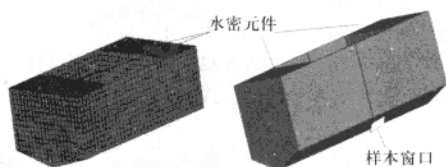


图10 浮动平台有限元模型

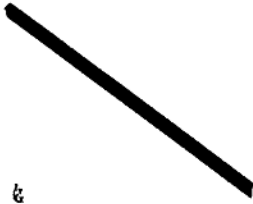


图 11 浮动平台龙骨

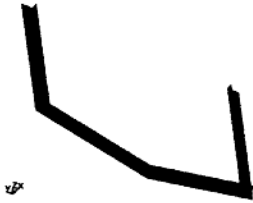


图 12 浮动平台加强筋

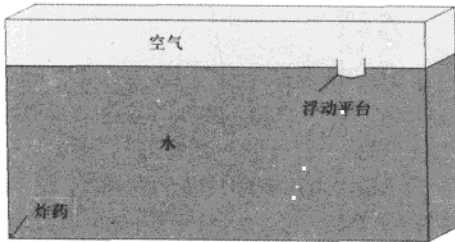


图 13 整体有限元模型

### 4.3 计算结果与试验比较

在有限元模型中,为防止冲击波在边界引起聚集和反射,除三个对称面外,把另外三个面定义为无反射穿透边界条件。炸药爆轰后,当爆轰波阵面到达水的接触面时,在水中产生冲击波,而向爆轰产物内反射稀疏波。当冲击波到达水与空气的界面(自由界面)时,由于空气介质的密度比水小得多,就反射为拉伸波,冲击波迅速衰减,出现了自由面效应。图 14 和图 15 可以清晰直观看到在不同的时刻,冲击波在水中的传播图像,从不同的颜色上可以区分出在某一时刻距离爆炸中心不同位置的压力大小。图 16 是浮动平台上的应力波传播。

事实上冲击波是一种强间断波,在波阵面上有一个突跃。但在 LS-DYNA 数值计算中需要把间断处的解进行光滑化,以保证解的稳定性和收敛性,因而具有一定耗散性,计算结果会出现波阵面上峰值压力滞后以及压力值偏小现象。图 17 和图 18 为自由场压力试验测量值与计算值的比较,数值计算值为 3.9MPa,比较接近于试验测量的 4.3MPa。

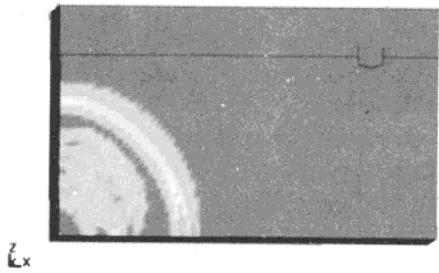
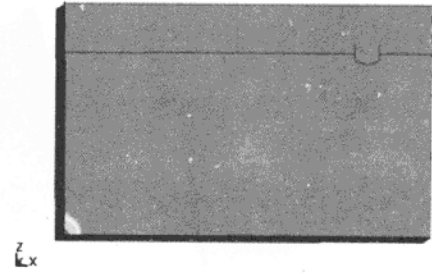


图 14 炸药开始爆轰和冲击波在水中传播

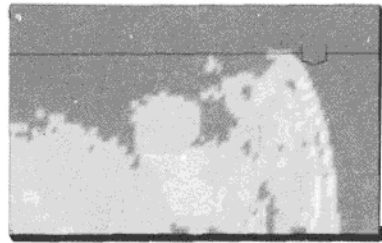
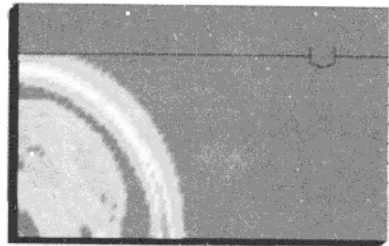


图 15 冲击波到达水面和到达浮动平台

图 19 与图 20 分别是试验中 A4 测点的壁压测量值和计算的壁压加载曲线。由于在计算中浮动平台采用拉格朗日单元,因此所得的是平台上该点压力随时间的变化。它除了水中冲击波的直接作用外,还要受

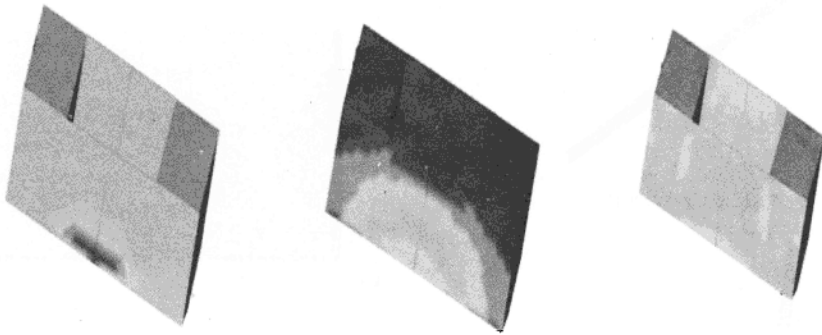


图 16 浮动平台上的应力波传播

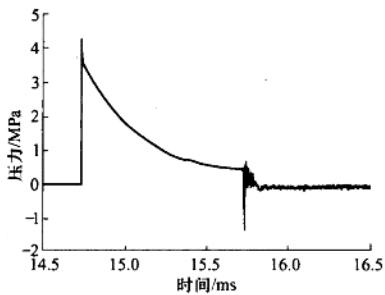


图 17 自由场压力试验测量曲线

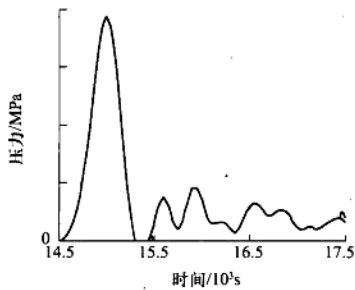


图 18 自由场压力计算曲线

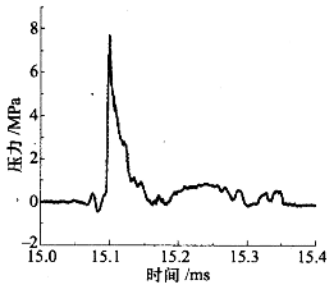


图 19 试验测量壁压曲线

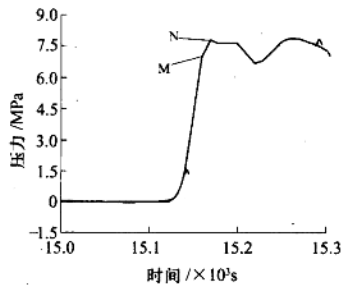


图 20 浮动平台壁压计算加载曲线

到平台上其他地方传过来的应力,因此得出的是一条加载曲线,而不是一个三角形脉冲载荷。计算曲线中第一个拐点 M 代表水中冲击波作用在平台上的壁压峰值;最大值点 N 代表的是冲击波作用在测点周围后,应力波向测点传播,在测点处叠加后的壁压峰值。计算得出的 M 点壁压峰值 7MPa 和试验得出的 8MPa 也比较吻合。

图 21 和图 22 是试验测量加速度和数值计算加速度曲线的比较,图 23 和图 24 是由试验测量加速度得出的速度与数值计算得出的速度曲线比较。从图中可以看出数值计算比较好地反映了由试验测量得出的加速度、速度大小及变化规律。

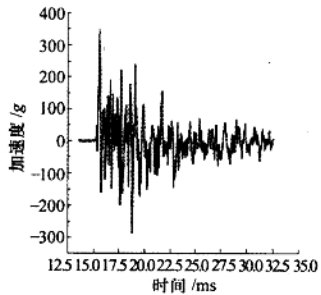


图 21 试验测量加速度曲线

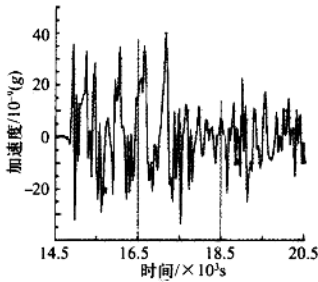


图 22 数值计算加速度曲线

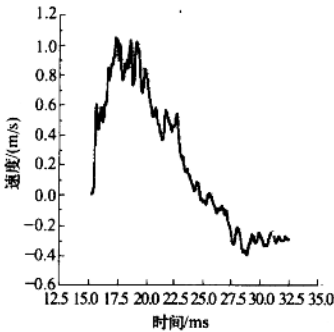


图 23 试验测量得出的速度曲线

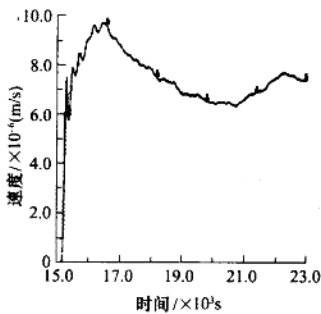


图 24 数值计算得出的速度曲线

## 5 结论

用 LS-DYNA 软件进行水下爆炸数值模拟, 网格的数量及网格质量的好坏是影响计算结果的重要因素,

用有限元建模软件 TRUEGRID 的 BB 与 TRBB 变网格方法, 能很好地控制计算网格的数量, 既能使炸药近区有较高的网格密度, 又能使远区有一定网格密度, 同时又使网格具有很高的质量。由于 LS-DYNA 数值计算中需要把间断处的解进行光滑化, 以保证解的稳定性和收敛性, 因而具有一定有耗散性, 计算结果会出现波阵面上峰值压力滞后以及压力值偏小现象。用 LS-DYNA 软件进行水下爆炸数值模拟能比较直观地显示水下爆炸冲击波传播及船体响应的全过程, 并且数值模拟结果与试验结果比较吻合。

## 参考文献

- [1] Burch IA, Mouritz AP. Analysis of Responses of a Small Shock Platform Subjected to Underwater Explosions. DEFENSE SCIENCE & TECHNOLOGY ORGANISATION, 2000.
- [2] 库尔 P. 水下爆炸[M]. 北京: 国防工业出版社, 1960.
- [3] LS-DYNA USER'S MANUAL. LSTC, 2003.
- [4] TrueGrid Manual. XYZ. 2003.
- [5] 张宝平, 张庆明, 黄风雷. 爆炸物理学. 北京: 兵器工业出版社, 2001.
- [6] 恽寿榕, 等. 爆炸力学计算方法. 北京: 北京理工大学出版社, 1995.
- [7] 赵海腾. LS-DYNA 动力分析指南. 北京: 兵器工业出版社, 2003.
- [8] 张振华, 朱锡, 刘建湖, 等. 水下爆炸载荷作用下自由环肋圆柱壳的非线性动态响应研究. 第七届全国爆炸力学会议. 2003.
- [9] 姚熊亮, 等. 水下爆炸冲击载荷作用时船舶冲击环境仿真. 中国造船, 2003.
- [10] 顾文彬, 阳天海, 叶序双, 等. 单个装药浅层水中沉底爆炸的数值模拟. 解放军理工大学学报, 2000.
- [11] 北京理工大学爆炸及其应用编写组. 爆炸及其应用. 北京: 国防工业出版社, 1979.
- [12] 时党勇, 李裕春, 张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA 8.1 进行显式动力分析. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [13] Wright. Advace. Fluid Modeling Capability for Underwater Shock Analysis of Naval Ship. Naval Research, 2002.
- [14] Leonard D. santiago. FLUID-INTERACTION AND CAVITATION EFFECTS ON A SURFACE SHIP MODEL DUE TO AN UNDERWATER EXPLOSION. MASTER OF SCIENCE IN MECHANICAL ENGINEERING, 1996.



# 水下爆炸试验相似准则

张效慈

(中国船舶科学研究中心 无锡)

摘要:水下爆炸研究几十年了,水下爆炸试验相应做了几十年,水下爆炸“相似律”探索也就持续那么多年。水下爆炸现象很复杂,根本不可能做到完全性的相似,哪怕做到一般船舶力学中的流体近似相似也相当困难。因此文献中有关水下爆炸相似律的描述就显得特别简单、笼统和模糊。本文首先对已经公认的一次冲击波的相似律做些解释,再对文献中没有出现过的气泡脉冲相似律的选择做了推导,最后将水下爆炸相似律推广到结构耦合上去。

关键词:相似准则 水下爆炸 冲击波 气泡脉冲

## 1 基本相似量

先确定基本相似量,才能用量纲分析( $\pi$ 定理)或已知试验方程导出其他变量的相似条件。

### 1.1 几何相似

特征长度相似是最基本的相似量。记结构模型(model)与原型(prototype)特征长度缩比 $\lambda_l$ ,则相关的其他几何变量的缩比:面积 $\lambda_a^2$ 、体积 $\lambda_v^3$ 、截面静矩 $\lambda_s^3$ 、截面惯矩 $\lambda_i^4$ (一般,在模型试验中几何变量都是缩小的)。

### 1.2 运动相似

关键是确定时间基本相似量。使待研究的其他变量在对应时刻保持比例,即不一定要相同时刻,但要对应时间或时间间隔成比例, $\lambda_t = \frac{t_m}{t_p}$ 或 $\lambda_t = \frac{\Delta t_m}{\Delta t_p}$ 。与特征长度缩比 $\lambda_l$ 很不一样, $\lambda_t$ 这个缩比量不能直接预定,必须根据一定的基本关系式来导出与其他相似量的关系。

船舶力学中的数学建模通常分为考虑或不考虑重力场的影响,这会导致时间缩比 $\lambda_t$ 与长度缩比 $\lambda_l$ 的不同的关系式,并引起其他与时间变量有关的导出量的相应缩比的变化。

#### 1.2.1 不考虑重力场影响

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

式中: $\omega$ 为结构圆频率; $k$ 为结构刚度; $m$ 为结构质量。

因

$$\lambda_m = \lambda_\rho \lambda_l^3, \lambda_k = \lambda_E \lambda_l \quad (kl/s = \sigma = E\varepsilon)$$

式中: $\rho$ 为结构密度; $E$ 为结构弹性模量; $\sigma$ 为结构应力; $s$ 为面积。

$$\lambda_t = \lambda_T = \sqrt{\frac{\lambda_m}{\lambda_k}} = \sqrt{\frac{\lambda_\rho \lambda_l^3}{\lambda_E \lambda_l}} = \sqrt{\frac{\lambda_\rho}{\lambda_E}} \lambda_l$$

式中:下标 $T$ 为周期。

若取 $\lambda_E = \lambda_\rho = 1$ ,则 $\lambda_t = \lambda_T = \lambda_l$ 。水下爆炸一次冲击波情况是采用这样的时间缩比的,且由于要分析材料破坏状况,一般取同种材料做试验。

当 $\lambda_t = \lambda_l$ ,其他运动变量

$$\lambda_f = \lambda_t^{-1} = \lambda_l^{-1}$$

$$\lambda_v = \frac{\lambda_l}{\lambda_t} = 1$$

$$\lambda_a = \frac{\lambda_l}{\lambda_t^2} = \lambda_l^{-1}$$

式中:下标 $f, v, a$ 分别为频率、速度和加速度。即频率变量在模型试验中增大、速度变量不变及加速度变量也增大。不采用同种材料做试验,一般应为

$$\lambda_f = \lambda_l^{-1} \sqrt{\frac{\lambda_E}{\lambda_\rho}}$$

$$\lambda_v = \sqrt{\frac{\lambda_E}{\lambda_\rho}}$$

$$\lambda_a = \frac{\lambda_E}{\lambda_l \lambda_\rho}$$

#### 1.2.2 考虑重力场影响

$$\sigma = E\varepsilon$$

式中: $\varepsilon$ 为结构应变。

$$g\rho ls = \sigma s = E\varepsilon s$$

式中: $g$ 为重力加速度; $l$ 为有自重分布的长度段长。相对变形 $\lambda_\varepsilon = 1$ ,因此

$$\left(\frac{E}{g\rho l}\right)_m = \left(\frac{E}{g\rho l}\right)_p$$

即

$$\frac{\lambda_E}{\lambda_g \lambda_\rho} = \lambda_l$$