



现代舰艇冲击防护技术 及工程应用

XIANDAI JIANTING
CHONGJI FANGHU JISHU
JI GONGCHENG YINGYONG

汪玉◎主编



国防工业出版社
National Defense Industry Press

现代舰艇冲击防护技术及工程应用

汪玉 主编

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

为加强国外舰艇抗冲击技术发展前沿的探索,总结、交流近年来国内抗冲击技术发展的成果和经验,促进我国舰艇抗冲击技术持续发展,海军舰艇抗冲击研究试验中心与中国造船工程学会军船学术委员会抗冲击学组联合于2012年3月在上海召开了“第四届全国舰艇抗冲击技术交流会”。来自军内外40个科研院所和企事业单位的102名代表参加了本次会议。会议共收到论文130余篇,经编委会及有关专家校阅,遴选出101篇论文由本书刊登出版,其中35篇论文已在核心期刊《噪声与振动控制》抗冲击专刊发表。本书内容主要包括舰艇总体及结构冲击防护技术、舰艇设备及系统冲击防护技术、舰员冲击防护技术、实船抗冲击试验技术、模拟冲击试验技术和舰艇抗冲击相关标准规范等。本书可供从事舰艇抗冲击技术研究与应用的技术人员阅读,也可供高等院校相关专业的本科生或研究生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代舰艇冲击防护技术及工程应用/汪玉主编. —北京:国防工业出版社,2013.1
ISBN 978-7-118-08508-2

I. ①现... II. ①汪... III. ①军用船-抗冲击-文集
IV. ①U674.7-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第291042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100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 880×1230 1/16 印张 33 字数 1074 千字

2013年1月第1版第1次印刷 印数 1—550 册 定价 198.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777
发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776
发行业务:(010)88540717

编委会名单

主 编 汪 玉

副主编 (以姓氏笔画为序)

王 强 刘东岳 刘建湖 华宏星

杨 莉 杜俭业 李兆俊 张 磊

吴静波 姚熊亮

前 言

21 世纪是海洋的世纪,海洋空间已成为当今世界各国经济发展和军事斗争的重要阵地,争夺海洋资源和海洋国土的斗争也日趋激烈。海军舰艇作为主要的海上作战平台,其战时不可避免地会受到鱼雷、水雷、反舰导弹和航空炸弹等各种武器的爆炸攻击,轻则使其退出战斗、返港维修,重则使其折断沉没、舰毁人亡。因此,如何有效提高舰艇的冲击防护能力以确保其战时海上生存能力业已成为 21 世纪海军舰艇发展不断追求的目标。舰艇抗冲击技术,作为研究和提高舰艇抗冲击能力的关键军事专用技术,也因此备受各国海军的重视和发展。以美国为代表的欧美军事强国和印度、日本、韩国等亚洲海军国家长期以来在舰艇抗冲击技术领域开展了深入系统的研究工作,并取得了卓有成效的成果和进展,为新型舰艇的设计建造和在役舰艇的改进提高提供了有力的技术支撑。我国自海军舰艇抗冲击研究试验中心成立以来,在总部、海军机关的领导和大力支持下,依托海军舰艇抗冲击技术实验室和国内相关科研院所,针对制约我海军舰艇抗冲击能力的瓶颈问题,通过深入开展舰艇抗冲击预研、型号科研、实船试验及工程应用等工作,有力推进了我国舰艇抗冲击工作的稳定、持续、协调发展,使我国的舰艇抗冲击技术水平得以显著提高。

为深入跟进我国在舰艇抗冲击技术领域最新研究进展,促进相关工作进一步开展,根据军船抗冲击学组第四届学术交流会征集的论文,经过优选和整理,我们特编辑出版了本书,以总结我国近些年来在舰艇抗冲击技术领域取得的研究成果,及时提供给广大从事舰艇抗冲击技术研究的专家学者和相关工程技术人员学习参考。

值此论文集出版之际,我们也向长期以来关心和支持军船抗冲击技术发展的各级首长、领导机关和同行专家表示衷心的感谢,向一直战斗奉献在舰艇抗冲击技术研究一线的所有科研人员表示崇高的敬意,向各位论文作者表示衷心的感谢。同时,也向郑茂礼高工、薛亚凡高工、高向东高工等专家对本书出版所给予的支持和帮助表示由衷的谢意!由于编者水平所限,书中恐有疏漏之处,敬请各位读者批评指正。

目 录

A 舰艇总体及结构冲击防护技术

水下爆炸载荷作用下细长体圆柱壳结构的鞭状响应研究 王海坤 刘建湖 潘建强 汪俊 毛海斌 张伦平	3
船体箱形截面梁设计及抗爆性能分析 郭君 王军 丁建军 崔杰 孙丰	9
水下爆炸气泡脉动载荷及溃破射流对内加筋圆柱壳结构的毁伤机理分析 汪浩 王先洲 刘均 程远胜	16
船体梁在水下近场爆炸作用下反直观动力行为的数值研究 赵海峰 张振华 汪玉	23
不同舷侧结构形式对空中接触爆炸载荷的防护性能研究 田昭丽 刘云龙 丁建军	32
水下爆炸载荷作用下不同长径比圆柱壳的动态响应研究 牟金磊 李海涛	37
船体梁模型在水下爆炸冲击波及气泡联合作用下的动力响应及毁伤机理研究 汪浩 刘均 程远胜 王先洲	43
加筋圆柱壳结构在水下爆炸冲击载荷作用下的弹塑性动力屈曲研究 袁建红 朱锡 张振华	51
空爆载荷对舰船结构毁伤效果研究 王超 岳永威 王奂钧	57
典型反舰武器对舰船总强度毁伤效应评估 岳永威 王超 王奂钧 丛刚	62
接触爆炸载荷作用下板架结构破坏特性研究 冯殿垒 刘谋斌	66
截卵形弹丸斜穿甲均质薄靶剩余速度的理论分析 巨圆圆 张庆明 黄凯 郭俊	71
圆柱壳结构对水下爆炸气泡脉动载荷绕射特性研究 刘云龙 田昭丽 李刚	75
冲击波作用下舰船刚体运动响应 张文鹏 宗智 汪玉 杜志鹏	79
水下爆炸作用下舰船双层底液舱动态响应研究 郭君 崔杰 肖巍 李世铭	83
抗冲瓦的结构研究及创新设计 章振华 谌勇 华宏星 汪玉 肖锋	90
三明治结构爆炸冲击动力学研究综述 肖锋 谌勇 章振华 朱大巍 华宏星	96
纤维金属层合板的抗冲击性能研究 蔺晓红 张涛 张小波 刘土光	104
低速撞击下矩形板动态断裂的试验及数值仿真 陈继恩 张涛 谢凡 刘土光	110
三种船用钢的动态力学性能研究 赵鹏铎 杜俭业 张磊	115
两种常用材料在高应变速率下的拉伸性能试验研究 刘文进 宋顺成 吴万军 杨宇	119
水下爆炸作用下金属材料动态失效判据研究 张伦平 严波 潘建强 刘建湖 周章涛 郝轶	123

B 舰艇设备及系统冲击防护技术

舰艇设备及系统抗冲击研究 顾俊 周斌金 章定邦	129
设备冲击极限载荷及分析实例 赵建华 汪玉 高洪滨 孙宇鹏	134
柴油发电机组装置冲击极限载荷数值分析 李国平 李佳 罗放 周相荣	139
柴油机管路系统抗冲击计算方法研究 汪宏伟 汪玉 李伟军	143
内燃机曲柄连杆机构冲击动力学分析 马炳杰 王志刚 沈建平	147
舰用汽轮机汽缸在断叶撞击下的数值模拟及可靠性分析 谭海涛 李红钢 余永丰 商超	151
舰艇管路通舱方式对其抗冲击性能影响研究 孙巍	156

舰艇典型管路冲击动力响应和变形特性数值模拟方法及试验研究	嵇春艳 王朝	160
弹性安装齿轮箱抗冲击特性时域计算分析	戴光昊 高长伟 刘永恒 张帆	167
蓄能器在舰船液压操舵系统中抗冲击作用仿真	董仁义 吴崇健 张京伟 彭文波	171
滑动轴承冲击动力学研究综述	高霄汉 汪玉	177
加强飞机系留状态冲击特性技术与标准现状研究	邝俊彬 王官祥	181
轴向受力螺纹连接件冲击仿真分析	贺华 李佳 毕成 王强	184
弹性限位浮筏系统的随机动力学建模与算法	温建明 冯奇	187
浮筏隔振器阻尼及刚度对设备冲击载荷影响研究	吕帅 邱忠辉 曹冬梅	191
基于大质量法的设备浮筏抗冲击性能研究	翁章卓 陈崧	197
舰船浮筏隔振装置的 DDAM 抗冲击计算	李晓明 陈凤	201
隔振抗冲元件的损伤原因分析及对策	王志刚 姚辉 马炳杰	208
BE 型橡胶隔振器冲击极限载荷研究	李佳 周相荣 管月英 李青	211
六支杆抗冲器性能分析	丁炜 郭云松 李佳 王强	217
KA 弯曲型橡胶隔振抗冲器冲击极限载荷研究	周相荣 李佳 冯海军 管月英	223
GS2 型钢丝绳隔振器极限冲击载荷研究	李佳 冯海军 周相荣 管月英	228

C 实船抗冲击试验技术

海上实船爆炸试验测试技术研究	周心桃 肖汉林 吴国民	235
水面目标冲击试验定位技术研究	吴静波 李兆俊	238
测试仪器缓冲技术及平台研究	郭云松 丁炜 李佳 周相荣 张心玮	243
水面舰艇冲击响应数据的短时 Fourier 变换分析	于大鹏 汪玉 杜俭业	250
水中兵器聚能装药战斗部侵彻舰艇目标靶试验方法探讨	王雪松 赵鹏远 周学滨 沈晓乐	255
爆破型鱼雷对水面舰艇毁伤能力评定方法研究	李琛 马晓蕾 沈晓乐	259
舰船模型海上抗爆试验研究	蒋国岩	262
水下非接触爆炸条件下舰船冲击环境测试相关技术研究	陈辉 潘建强 唐佳炜 何斌 杨云川 程红梁	267
水下爆炸试验中特征炸点选取方法研究	冯麟涵 汪玉 计晨	274
潜艇抗冲击爆炸载荷设计研究	张姝红 赵鹏远 周庆飞 王雪松	281
装药在水中不同边界条件下的爆炸载荷特性研究	金辉 李兵 权琳 宋敬利	284
装药水下爆炸载荷的频率特征研究	毛海斌 刘建湖 唐佳炜 张显丕	289
某型爆源起爆装置性能分析及建议	董忠臣	293

D 模拟冲击试验技术

船用设备双波冲击试验机冲击环境研究	温肇东 张磊 焦素娟 张志谊	299
强碰撞中型冲击机冲击环境特征分析	何斌 唐佳炜	303
爆炸载荷作用下缓冲平台冲击谱计算与分析	郑长允 赵鹏远 邵宗战 宋敬利	310
船用设备双波冲击试验机管路温度特性分析	温肇东 汪玉 张磊 史少华	313
典型接合面冲击动响应研究	严波 何斌 王海坤	316
机械式缓冲平台冲击试验及结果分析	王雪松 郑长允 周华 周学滨	320
船舶动力设备的冲击测试技术研究	王志刚 沈建平 马炳杰	323
隔振抗冲装置的台架冲击试验研究	王志刚 马炳杰 沈建平	326
水下非接触爆炸作用下浮动平台冲击特性研究	许文辉 周维星 彭溢 刘世明	329

水下爆炸冲击作用下浮动冲击平台试验安全性分析	杨莉 杜俭业	334
非牛顿流体阻尼器的冲击缓冲实验及其建模仿真	孙靖雅 焦素娟 温肇东 华宏星	338
远场水下爆炸流场建模方法研究	郭君 曹冬梅 白兆宏 丁建军	341
靠绑作业时船舶间碰撞冲击力计算的一种新方法	蒋丰 冯奇	346
水下爆炸空化效应二次加载的数值模拟研究	叶帆 刘见华 宗智	351
多个非球形气泡数值模拟	李章锐 宗智	361
基于间断迦僚金法的水下爆炸冲击波载荷模拟	宋莹 郭君 任少飞 崔杰	371
舰船三维水下爆炸冲击波载荷数值仿真研究	王耀辉 白兆宏 初文华 丛刚	375
战斗部外爆对舰船毁伤快速评估算法	胡玉涛 卢芳云 蒋邦海 张舵	381
基于高性能集群系统对水下爆炸仿真的研究	王树乐 陈高杰 程素秋 宗智	385
水下爆炸仿真、评估与数据管理平台的设计和实现	刘国振 严伟 金建海 潘建强 刘建湖	390

E 舰员冲击防护技术

水面舰艇舰员水下爆炸冲击响应研究	张玮	399
舰员冲击作用安全标准研究现状分析	黄建松 汪玉	413
潜艇艇员抗冲击防护技术研究	周方毅 张可玉 于德新	419
潜艇艇员水下非接触性爆炸冲击伤的研究	李长春 张可玉	423
水下和空中爆炸引起舰员冲击损伤效应及防护研究	黄建松 汪玉	425
模拟舰员冲击损伤生物力学多刚体假人模型研究	黄建松 汪玉 湛勇	431
侵彻及钝性弹道冲击人体损伤效应有限元仿真研究	陈菁 康建毅 刘海 李冠桦 王建民 赖西南	436
人员冲击振动损伤的失能效应评估现状	王建民 陈菁 赖西南 康建毅 李冠桦	442
基于假人冲击响应评价舰员抗冲击鞋性能试验研究	黄建松 汪玉 李政年 湛勇 许述财	448
新型防冲击鞋的性能试验与防护效果评估	李政年 黄建松 周宏元 柯文棋 乐秀鸿	453
舰员抗冲击地砖动力学分析	张磊 史少华 湛勇	456
某抗冲椅冲击响应计算及试验研究	茹嘉良 李志刚 赖庆鑫 辛龙 张金换	459

F 标准规范及其他

水下爆炸抗冲击试验标准化体系探讨	张姝红 张臣 金辉	465
我国舰艇结构抗爆标准分析和建议	楼伟锋 潘建强 汪俊	468
典型油船液舱晃荡冲击毁伤研究	曹冬梅 崔杰 郭君 吕帅	472
环境激励下船舶的振动特性研究	李卓 庞福振	477
折叠式舱口盖的振动模态分析	丛刚 王超 岳永威	483
吸声尖劈模型抑振效果仿真分析	郑律 吕帅 丛刚	487
舰船舱壁结构振动特性优化设计研究	邱中辉 郑律 丁建军 吕帅	492
线型聚能水射流结构切割行为的数值仿真	郝轶 毛海斌 朱枫	496
60kg/mU74 钢轨焊缝性能的磁弹测试	祁欣 舒迪 胡银娇	500
Maxwell 方程组几种表述形式及四维形式的讨论	刘辉 舒迪 祁欣	506
Magnetic Barkhausen Noise, Metal Magnetic Memory Testing and Estimation of the Ship Plate Welded Structure Stress	Qi Xin Di Shu Liu hui YinJiao Hu	511

A 舰艇总体及结构冲击防护技术

水下爆炸载荷作用下细长体圆柱壳结构的鞭状响应研究

王海坤 刘建湖 潘建强 汪俊 毛海斌 张伦平

(中国船舶科学研究中心 江苏无锡 214082)

摘要: 本文采用二阶 DAA 流固解耦技术, 对水下爆炸载荷作用下细长体圆柱壳结构的鞭状响应进行了分析研究。经模型试验验证后, 对细长体圆柱壳梁模型随不同药包爆炸方位、爆距及耦合程度变化时的鞭状响应进行了大量计算, 揭示了圆柱壳梁模型在水下爆炸载荷作用下的总体低频运动特性及鞭状响应规律, 为研究细长体圆柱壳结构在水下爆炸载荷作用下的鞭状效应总体损伤提供试验基础及理论方法。

关键词: 细长体圆柱壳 水下爆炸 鞭状响应 DAA 方法 模型试验

1 引言

水下爆炸载荷能够引起舰艇总体结构的鞭状(whipping)运动, 尤其当船体低阶振动频率与爆炸气泡脉动频率接近时, 严重的鞭状运动便会导致船体壳体撕裂、屈曲甚至是折断, 造成灾难性的后果。对于水面舰艇的鞭状响应已有较多的研究和报导。Chertock^[1]采用梁的模式方法对水下爆炸载荷作用下的水面箱形梁结构和水下圆柱壳结构的鞭状响应进行了理论分析, 结合大量的试验数据, 奠定了船体梁鞭状响应的研究基础。Hicks^[2]、Vernon^[3]、斋藤年正^[4]、李玉节^[5]等相继对船体梁的鞭状响应理论进行了应用和深入研究。刘建湖等^[6]考虑气泡载荷与水面船相互耦合作用的相似性, 建立空间子模型方法, 采用缩比模型试验进行实船鞭状响应与抗爆总强度的预报, 将理论研究成果工程实用化。

目前, 对于潜艇在水下爆炸作用下鞭状响应的研究公开资料不多, 用于水面舰艇鞭状响应的研究方法同样也可以用于潜艇。但由于潜艇的作战环境、自身结构特点与水面舰有所不同, 其鞭状响应规律也有所差别: 水面舰的鞭状运动以垂向为主, 而潜艇结构的鞭状运动与爆炸攻击角度相关; 潜艇的鞭状运动还要考虑自身潜深的影响, 此时气泡脉动与潜艇振动的频率耦合特征随潜深而变化。Stettler^[7]对水下爆炸作用下潜艇的鞭状运动进行了计算和试验研究, 重点分析了各种阻尼因素对于鞭状运动的影响, 潜艇采用梁模型, 水动力特征采用 Morison 公式描述, 但由于 Morison 公式存在对细长体的横向粘滞阻尼分析结果偏小的缺陷, 其计算结果与试验结果相比在响应的后期偏大。

文献[8]的研究结果表明在鞭状振动幅度较大时, 阻尼对于响应的最大值及响应的衰减速度有非常大的影响, 认为在进行舰艇总强度预报时, 阻尼是必须考虑的因素。张效慈^[9]研究了深水爆炸水动压力场对潜体结构的动态影响, 考虑了气泡的迁移效应、水面效应以及多次脉动的余能率, 能够进行多个气泡脉动周期的结构响应计算。董海^[10]将细长加筋圆柱壳简化为一根变截面梁, 用双重渐进近似法(DAA₂)描述了结构的动态变形与瞬态流场的耦合作用, 从弯矩的角度考察了水下爆炸第一次气泡脉动载荷对结构鞭状响应的贡献, 总结了圆柱壳上的弯矩随潜深、爆距、爆炸方位角变化的规律。黄晓明^[11]利用大型室内爆炸筒, 通过高速摄影和应变测量获得水下爆炸气泡和细长圆柱壳模型的相互作用过程, 并对不同潜深、不同爆距和不同方位角下圆柱壳模型鞭状响应的变化规律进行了初步分析。

本文对水下细长体圆柱壳模型的水池爆炸试验结果进行了分析。同时, 采用文献[12]中的半经验公式描述水下爆炸载荷, 用 DAA₂ 方法处理流固耦合问题^[10], 考虑海底、自由面反射波的作用, 计算细长体圆柱壳结构在不同爆炸情况下的运动情况。计算与试验结果对比验证后, 通过大量计算揭示细长体圆柱壳结构在水下爆炸载荷作用下的总体低频运动特性及鞭状响应规律, 为研究水下结构在水下爆炸载荷作用下的鞭状效应总体损伤提供试验基础及理论方法。

2 计算方法

2.1 水下爆炸载荷

文献[12]根据 Cole^[13]关于气泡脉动过程的论述, 结合 Zamyshlyayev 的研究成果, 对水下爆炸压力全过

程中的指数衰减阶段、倒数衰减阶段、倒数衰减后段、气泡膨胀收缩段和脉动压力段分别给出了半经验半解析公式, 经大量的研究实践检验, 证明该公式的计算结果在压力波形和冲量等方面, 与理论公式有良好的一致性, 同时避免了气泡运动方程中大量的微分和积分计算, 为爆炸载荷的计算提供了简便、快捷、准确的计算方法。本文即采用该公式作用水下爆炸载荷的描述, 典型的载荷曲线如图 1 所示, 详细的公式形式参见文献[12]。

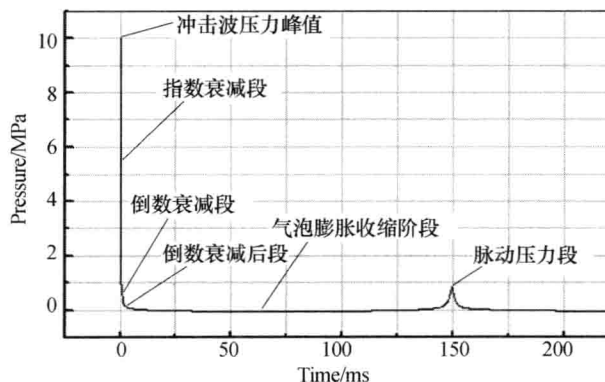


图 1 典型的水下爆炸载荷计算曲线

2.2 流固解耦方法

一阶双重渐进近似法(DAA₁)^[14]是一种分析水下爆炸流固相互作用的计算方法, 它在高频段和低频段分别用平面波假设和虚质量假设进行逼近, 有着很高的精度, 但中频段采用线性过渡。经过改进, 二阶 DAA 方法(DAA₂)^[15]通过加进模态频率矩阵使中频段的精度得以提高。这种方法占用计算机资源少, 求解快, 精度高, 特别适合对水下爆炸进行远场分析, 已经在国际上得到了广泛的应用。在我国, 刘建湖^[9]已成功解决了 DAA 方法在分析弹性钢质结构船舶水下爆炸动响应上的应用。国内外多年来大量的算例均表明这是一种非常有效的计算方法。

方法将瞬态流固耦合问题分为流体和结构两个子系统, 采用有限元描述结构的动响应, 采用二阶双重渐进法DAA₂描述流固相互作用, 运动的控制方程为:

$$\begin{cases} \underline{M}_s \ddot{\underline{U}} + \underline{C}_s \dot{\underline{U}} + \underline{K}_s \underline{U} = -\underline{T} \underline{A}_f (\underline{P}_{sc} + \underline{P}_f) \\ \underline{M}_f \ddot{\underline{P}}_{sc} + \rho a_0 \dot{\underline{P}}_{sc} \underline{A}_f + \rho a_0 \underline{\Omega}_f \underline{A}_f \underline{P}_{sc} = \\ \rho a_0 \left(\underline{M}_f \ddot{\underline{X}}_{sc} + \underline{\Omega}_f \underline{M}_f \ddot{\underline{X}}_{sc} \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\underline{M}_s$ 为结构质量矩阵; $\underline{C}_s$ 为结构阻尼矩阵; $\underline{K}_s$ 为结构刚度矩阵; $\underline{U}$ 为节点位移; $\underline{T}$ 为流体面元

上法向矢量与结构节点列阵元间的转换矩阵; $\underline{A}_f$ 为流体面元面积的对角阵; $\underline{P}_{sc}$ 、 $\underline{X}_{sc}$ 分别表示结构湿表面上的散射压力和流体质点法向位移; $\underline{P}_f$ 为结构湿表面的入射波压力; $\underline{M}_f$ 为附加质量矩阵; $\underline{\Omega}_f$ 为流体模态频率矩阵; ρ 为流体密度; a_0 为水中声速。

给定了结构形式与参数, 已知水下爆炸药量、爆距、水深、爆炸方位后, 经文献[12]公式计算, 即可得出结构湿表面上的入射波压力场 $\underline{P}_f$, 将 $\underline{P}_f$ 作为输入量, 采用交错迭代算法即可同步联合求解控制方程。

3 细长体圆柱壳模型

细长体圆柱壳模型如图 2 所示。模型在水中进行激振模态试验, 得到模型一阶湿频率为 6.0 Hz, 二阶为 17.5 Hz。水下爆炸试验前, 通过弹性软绳将浮筒与模型相连后置于水下指定深度, 药包可以布放在模型附近的任意位置。采用加速度计测量模型鞭状运动的加速度响应, 再换算成位移和挠度, 测点布置在每段圆柱壳中部壳板上, 共计 7 个。

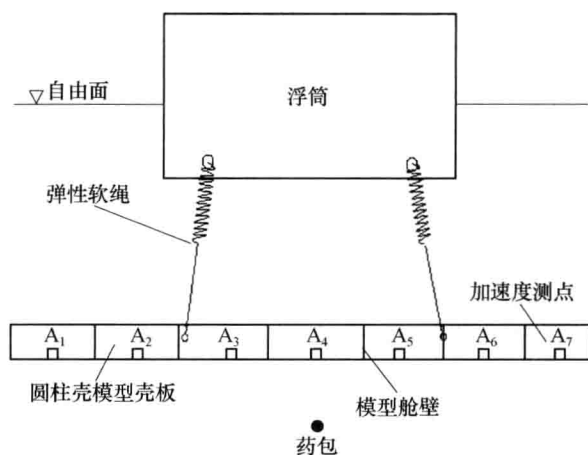


图 2 细长体圆柱壳模型及其水下试验状态示意图

计算模型结构有限元及湿表面网格如图 3 所示。模型采用壳单元建立, 几何形式与试验模型一致, 压载采用质量元模拟, 湿表面网格为模型实际浸水部分表面。附连水质量通过湿表面网格模型计算后附加在结构单元的节点上, 水下爆炸载荷加载在湿表面网格上。通过 DAA₂ 方法处理流固解耦, 交错迭代求解圆柱壳模型在水下爆炸载荷作用下的鞭状响应。

圆柱壳模型在水中与药包的相对位置如图 4 所示。



图3 模型结构有限元及湿表面网格

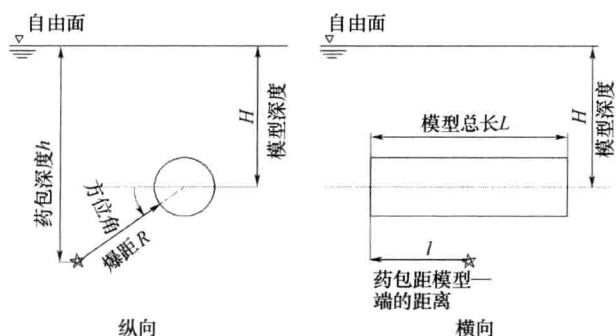


图4 圆柱壳长模型与药包方位示意图

4 计算与试验结果对比

模型爆炸试验于2007年在中国船舶科学研究中心露天水池实施完成,炸药为0.5kg的TNT球形药包,模型中心距水面4.25m,实施水下爆炸试验。

将试验结果与鞭状响应计算结果进行对比,药包分别置于圆柱壳中部正下方(90°)和横向水平位置(0°)的典型对比结果如图5、图6所示。每张图中包含7个测点的结果,测点位置与图2标示的一致。每个测点对比图的横坐标为时间轴,单位为s,纵坐标为该测点相对于模型两端点的挠曲变形,单位为mm。

对比结果显示,采用DAA₂方法得到的模型鞭状响应计算结果与试验结果基本一致。但由于试验模型的阻尼、配载、吊装等现象较为复杂,计算模型很难精确模拟,或者做了适当简化,造成响应的对比结果仍有所偏差。

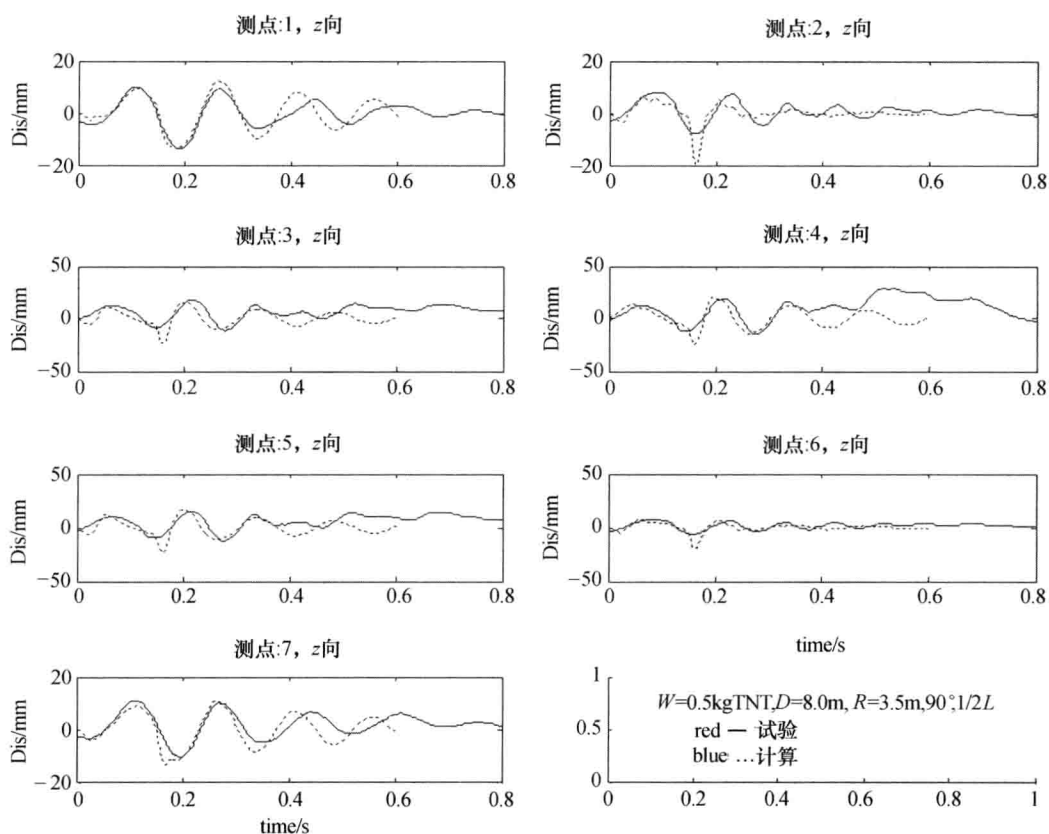


图5 药包正下方爆炸时模型垂向鞭状位移计算和试验结果对比

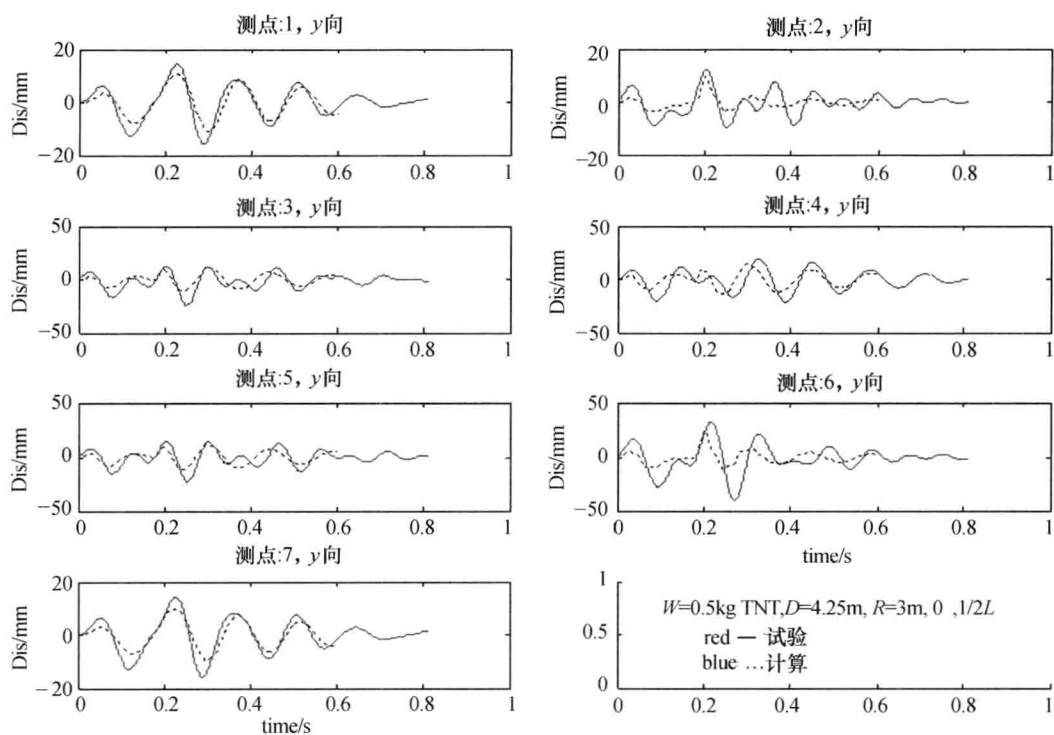


图6 药包水平位置爆炸时模型横向鞭状位移计算和试验结果对比

5 细长体圆柱壳结构的鞭状响应特性

同样采用 DAA_2 方法, 对两端封闭的加筋圆柱壳进行了 whipping 分析, 计算模型如图 7 所示, 将圆柱壳作为一根变截面的梁, 共分为 26 站, 节点编号自首

部至尾部依次为 1~27。于每个节点处规定等价的集中惯性矩、剪切刚度、弯曲刚度、集中质量等基本元素, 在线弹性应力应变关系的假定下, 分析模型的 whipping 振动。梁模型的湿表面流体网格按照圆柱壳表面的实际尺寸建立。

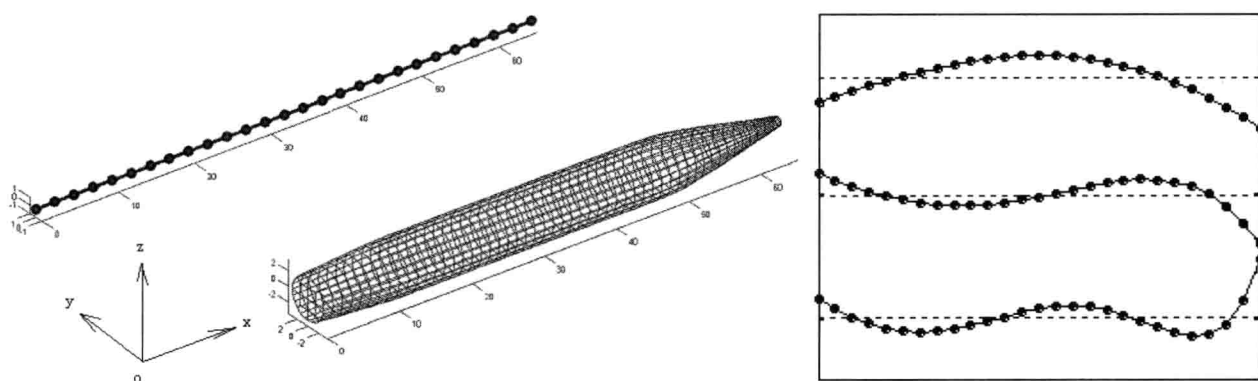


图7 加筋圆柱壳结构梁模型、湿表面流体网格及湿模态振型

5.1 鞭状响应与耦合频率比的关系

以往的研究一致认为, 当爆炸气泡的脉动频率与船体一阶振动频率相接近时, 鞭状响应最大。将药包二次气泡脉动频率与梁一阶固有湿频率之比 f_b/f_s 定义为耦合频率比, 用以描述频率耦合程度, 设置特定的

计算条件来观察频率耦合程度对梁鞭状运动的影响。

计算条件为: 药量 $W=350\text{kg}$, 攻角 90° (正下方), 爆距 $R=10\text{m}$, 爆炸位置艏部, 以上参数不变, 同时改变模型潜深 H_0 ($10\text{ m}\sim 200\text{ m}$)和药包深度 D ($23.5\text{ m}\sim 213.5\text{ m}$), 则二次气泡脉动频率的变化范围为 $1.27\text{ Hz}\sim 6.11\text{ Hz}$ 。

计算结果如图 8 所示。当 $f_b/f_s \approx 1.12$ 时, 梁模型最大鞭状变形达到最大值; 当 $f_b/f_s < 0.75$ 时, 梁模型最大鞭状变形随 f_b/f_s 增大而缓慢增加; 当 $1.12 > f_b/f_s > 0.75$ 时, 梁模型最大鞭状变形随 f_b/f_s 增大而快速增加; 当 $f_b/f_s > 1.12$ 时, 梁模型最大鞭状变形随 f_b/f_s 增大而呈幂函数规律减小。

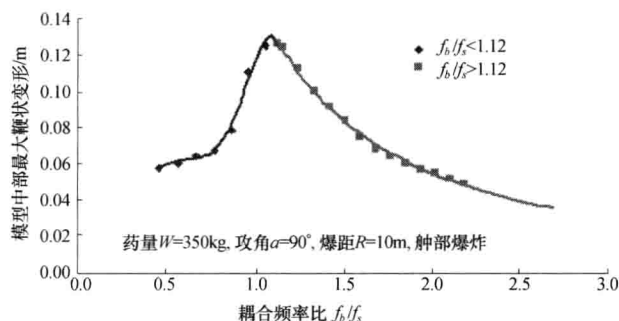


图 8 梁模型最大鞭状变形与耦合频率的关系

可见, 耦合频率比 $f_b/f_s \approx 1.12$ 是一个转折点, 也是一个关键值。采用相同的方法, 当改变药量和改变药包攻角时, 梁模型频率与气泡脉动频率仍旧在 $f_b/f_s \approx 1.12$ 处达到最佳耦合状态。

5.2 鞭状响应与爆距的关系

不改变梁模型潜深、爆炸药量和爆炸位置, 攻角分别为 0° (水平) 和 90° (正下方) 时, 观察最大鞭状变形随爆距的变化规律。为消除耦合频率的影响, 所选择的工况为 f_b/f_s 值在 1.071 到 1.127 之间, 从图 8 中可以看出该区域为鞭状响应的最佳耦合状态。

计算结果曲线如图 9 所示。可见, 梁模型最大鞭状效应随爆距变大而呈幂函数衰减。

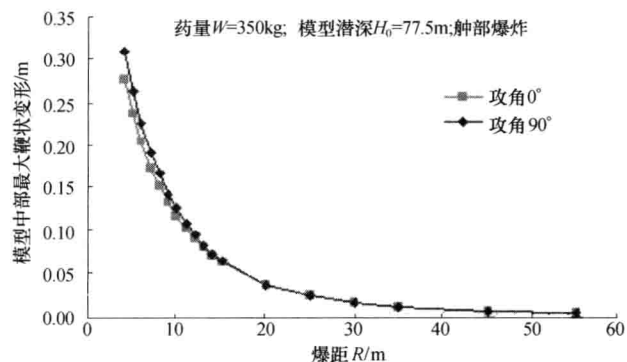


图 9 梁模型最大鞭状变形随爆距的变化关系

5.3 鞭状响应与药包攻角的关系

保持药包的水深和位置不变, 在爆距不变的条件下, 使梁模型绕着药包旋转来改变方位角, 即消除耦合频率的影响, 研究梁模型鞭状响应随药包攻角变化

规律。

计算结果如图 10 所示。当攻角 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 变化时, 梁模型中部最大鞭状变形的合成结果只有 $1\text{mm} \sim 5\text{mm}$ 的变化, 可以认为, 药包方位角的变化对梁模型鞭状变形的合成结果基本无影响。

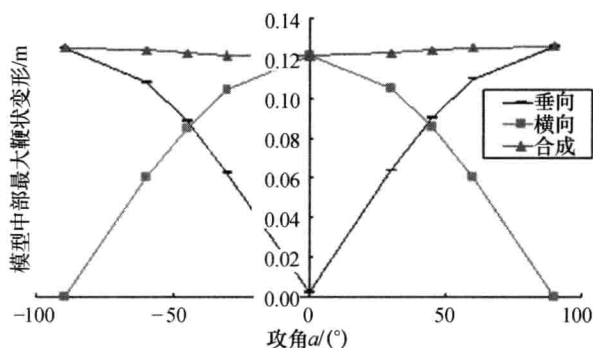


图 10 梁模型最大鞭状变形与药包攻角关系曲线

6 结论

本文采用二阶 DAA 流固解耦技术, 对水下爆炸载荷作用下细长体圆柱壳结构的鞭状响应进行了分析研究。经大尺度模型水池爆炸试验验证后, 对细长体加筋圆柱壳梁模型随不同药包爆炸方位、爆距及耦合程度变化时的鞭状响应进行了大量计算, 获得了梁模型总体低频运动特性及鞭状响应的一些规律。在一定药量和爆距条件下, 气泡脉动频率与梁模型一阶频率的耦合程度对鞭状运动有很大影响, 存在一个最佳耦合频率比 $f_b/f_s \approx 1.12$, 使梁模型获得最大鞭状响应, 并且最佳耦合频率比不因炸药的药量、爆距、方位角改变而变化, 可以认为它是圆柱壳梁模型总体结构在水下爆炸气泡作用下作鞭状运动的一个特征值。而当耦合频率比保持不变的条件下, 梁模型最大鞭状变形随爆距增大呈幂函数衰减趋势, 药包方位角的变化对鞭状变形的合成结果基本无影响。

参考文献

- [1] Chertock G. Transient Flexural Vibrations of Ship-like Structures Exposed to Underwater Explosions. J. Acoust. Soc. Am., 1970, 48(1):170~180.
- [2] Hicks A N. Explosion Induced Hull Whipping. Advances in Marine Structures, edited by Smith C S and Clark J D, Elsevier Applied Science Publishers, 1986:390-410.
- [3] Vernon T A. Whipping Response of Ship Hulls from Underwater Explosion Bubble Loading. AD-A178096. 1986.

- [4] 斋藤年正,等. 气泡诱导的船体 whipping. 关西造船协会志, 1995, 223: 105-112.
- [5] 李玉节, 张效慈, 吴有生, 陈起富. 水下爆炸气泡激起的船体鞭状运动. 中国造船, 2001, 42(3): 1~8.
- [6] Jianhu Liu, Yousheng Wu, Jianqiang Pan, Haikun Wang. The Scaling Method for the Whipping Responses of a Ship Structure to Underwater Explosion. Proceedings of sixth international conference of navy and shipbuilding nowadays. ST. Petersburg, Russia, 2011.
- [7] Stettler J W. Damping Mechanisms and their Effects on the Whipping Response of a Submerged Submarine Subjected to an Underwater Explosion. AD-A298743, 1983: 22-104.
- [8] 王海坤, 刘建湖, 潘建强, 何斌, 陈学兵. 水下爆炸载荷作用下舰船鞭状振动的阻尼现象研究. 现代振动与噪声技术, 2011, 9: 71-78.
- [9] 张效慈, 李玉节, 赵本立. 深水爆炸水动力压力场对潜体结构的动态影响. 中国造船, 1997(11): 61-67.
- [10] 董海, 刘建湖, 吴有生. 水下爆炸气泡脉动作用下细长加筋圆柱壳的鞭状响应分析. 船舶力学, 2007, 11(2): 250-258.
- [11] 黄晓明, 朱锡, 牟金磊, 李海涛. 圆柱壳在水下爆炸作用下鞭状响应试验研究. 哈尔滨工程大学学报, 2010, 31(10): 1278-1285.
- [12] 刘建湖. 舰船非接触水下爆炸动力学的理论与应用[D]. 无锡: 中国船舶科学研究中心, 2002: 22-40.
- [13] Cole R H. Underwater Explosions. Princeton, N.J. Princeton University Press, 1948.
- [14] Geers T L. Residual Potential and Approximate Methods for Three Dimensional Fluid-Structure Interaction Problem[J] Acoust. Soc. Am., 1971 Vol. 49: 1505-1501.
- [15] Geers T L. Doubly Asymptotic Approximations for Transient Acoustic Wave[J] Acoust. Soc. Am., 1978 Vol. 64 (5): 1505-1508.

船体箱形截面梁设计及抗爆性能分析

郭君 王军 丁建军 崔杰 孙丰

(哈尔滨工程大学 黑龙江哈尔滨 150001)

摘要: 在船体构件上应用箱形梁设计,能提高结构的纵向强度,具有利于保护重要管道和线缆、提高建造速度、利于质量控制和方便维修等优点。针对国内外研究现状都是局部运用箱形梁结构,并未全船性设计使用,本文创新点在于以某常规船体为基础,针对提高船舶抗爆性能和保持生命力的设计要求,全船性使用箱形梁。这种船体结构的特点是钢制箱形梁承担全部的总强度,而船体型线和必要的使用刚度由轻质高强的复合材料板材来保证,实现局部强度与总体强度的解耦。在 ABAQUS 软件中基于声固耦合法,对船体水下爆炸响应进行分析,证实箱形梁结构具有较好的抗爆性能。

关键词: 船体箱形梁 复合材料 稳性校核 抗爆性能 优化设计

1 引言

船体箱形梁不是指船舶结构强度中的船体梁。此处箱形梁是指代替传统 T 型材、球扁钢的新型加强构件。目前这种结构形式已有应用,但发表文献甚少。德国海军“萨克森”(Sachsen)级防空型护卫舰装有 3 根首尾相连的纵向箱形梁,几乎是国外可以查到应用箱形梁结构的唯一舰船^[1-3],如图 1、图 2 所示。

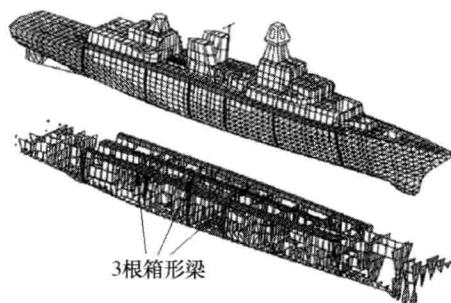


图 1 德国萨克森级护卫舰计算机建模图



图 2 单个箱形梁模型图

本文建立舱段三维有限元模型,对应用箱形梁的新设计船进行稳性校核,在 ABAQUS 软件中,对船体水下爆炸响应进行分析,将设计船与原船进行水下爆炸数值模拟,对比其抗爆性能。得出箱形梁比传统

纵向加强结构具有更好的抗爆性能的结论,因此具有较好的实际抗爆应用前景。最后总结箱形梁结构的优缺点,并对其进行优化设计。

2 横剖面形状的设计

本文设计的船体结构模型主尺度为:平行中体长 16.5m,型深 6.5m,半宽 5.03m,三个舱段,舱长 5.5m,上下甲板间高 1.57m,如图 3 所示。

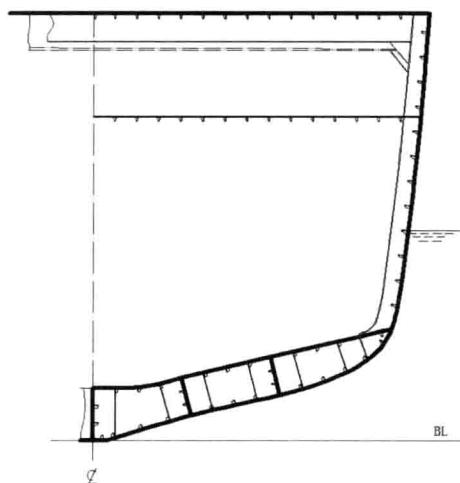


图 3 传统纵向加强构件船体横剖面图

本文是基于此横剖面形式,把所有球扁钢都换成设计的箱形梁形式,来进行抗爆性能的对比。船体箱形梁抗爆结构在保证船体重量不增加的情况下,重新分配钢板质量,把原来大部分质量分配在箱形梁板厚上,没有箱形梁的外板应用比质量大、比强度大的复合材料,在箱形梁设计好之后把剩下的质量全部分给