

# 舰船现代冲击理论及应用

汪 玉 华宏星 著



科学出版社  
[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

# 舰船现代冲击理论及应用

汪 玉 华宏星 著  
沈荣瀛 审校

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书系统介绍水下非接触爆炸冲击环境下,舰船及设备冲击响应特性仿真分析理论与实践。全书共分10章,包括绪论、冲击输入的时域和频域表示、冲击响应特性分析、谱跌和动态设计法的主模态理论、多刚体-弹性体的子结构建模方法、抗冲击设计的有限元缩聚建模、GAP单元在非线性建模中的应用、冲击脉冲和冲击谱的数据分析方法、冲击试验机和冲击脉冲的确定、舰船水下爆炸冲击等。本书的显著特点是:在空间上,将水、船体结构、舰载设备等综合在一起,船体结构强度和装备响应计算直接放在冲击环境之中;在时间上,考虑了爆炸冲击过程和船体弹塑性变形过程的连续性;在理论方法上,综合了理论、试验和数值方法,但以数值方法为主。本书内容全面,取材新颖,注重方法,实用性强。除系统叙述舰船及设备冲击响应特性仿真的相关基本概念、基本方法外,作者还注意结合亲身实践体会介绍应用实例和国内外的有关最新研究成果。

本书可直接指导舰船及设备冲击响应特性分析和防护设计,还可作为高等院校船舶工程、轮机工程专业以及航空航天、地震、爆炸等领域里的高年级学生和研究生的教学用书,对广大从事爆炸冲击动力学分析、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

舰船现代冲击理论及应用 /汪玉,华宏星著. —北京:科学出版社,2005  
ISBN 7-03-015836-9

I. 舰… I. ①汪… ②华… III. 船舶-水下爆炸-冲击试验-研究  
N. U661.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第072816号

责任编辑:鞠丽娜 韩 洁 / 责任校对:郝 岚  
责任印制:吕春珉 / 封面设计:郝希平

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2005年12月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2005年12月第一次印刷 印张:16 3/4

印数:1—2 000 字数:379 000

定价:45.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换<新欣>)

销售部电话:010-62136131 编辑部电话:010-62135763-8002(BZ06)

## 序 言

冲击现象广泛存在于我们的日常生活中,其危害也为人们所熟知。舰艇作为海上交战双方的作战平台,从它诞生起,就面临敌方武器攻击爆炸所产生的冲击的威胁。由于水的不可压缩性和气泡脉动的作用,水下非接触爆炸对舰艇产生的冲击破坏作用尤为严重,因此,不断提高舰艇抗水下爆炸冲击的防护性能是各国海军长期以来所面临的共同课题。

史料记载的最早的舰艇抗冲击研究是1860年美海军进行的船体水下抗爆炸试验。1946年美海军在太平洋比基尼群岛进行的系列水面舰艇和潜艇水下爆炸冲击试验揭开了近代开展大规模舰艇爆炸冲击研究试验的序幕。半个多世纪过去了,美国一直坚持两项独具特色的强制措施:新研制的或试验期超过5年的舰艇设备都必须进行实验室冲击试验或冲击计算考核,合格后才可装舰/艇;新型舰艇的首制舰在交付使用前都必须进行实船水下爆炸冲击试验考核。美海军耗费巨资所建立的系统完整的、面向实战的舰艇抗冲击体系,保证了美海军舰艇的优良的抗冲击性能,在20世纪几次局部战争中,其舰艇均遭受不同程度的攻击,但都表现出强大的生命力。进入21世纪后,美海军针对现代高科技局部战争的特点,不断地审视其传统的抗冲击体系,提出了“集中防护”新概念。在信息化和网络中心战的今天,仍继续不惜余力地强化其舰艇的抗冲击能力。目前,美国海军仍在不断进行新型驱逐舰、核潜艇、航空母舰的实船水下爆炸试验考核。2005年5月进行的“美国”号航母的系列爆炸冲击试验就是一个最典型的例证。

舰艇抗冲击技术是理论研究和试验紧密结合的应用技术,舰艇抗冲击体系的建立是一个耗资巨大,需要长期积累的历史过程。由于条件所限,广大发展中国家海军不可能像美海军那样执行以试验为主的抗冲击防护政策。计算机技术和数值计算技术的发展,使得虚拟仿真试验的作用地位日益突出,以仿真试验为主,实验试验为辅的技术路线开始成为大多数国家海军舰艇抗冲击研究的有效途径,同时,也成为今后舰艇抗冲击技术的发展方向。因此,从仿真试验的角度出发,系统科学地描述舰艇的冲击环境和舰艇及设备的冲击动态响应过程是非常重要的,也是开展舰艇冲击防护设计和效果评估的基础和前提。这正是作者出版本书的原始动因。

综观全书,有三大特点:

### (1) 思路清晰,层次分明

水下爆炸作用下舰船及设备的冲击响应是一个从外到里的过程,冲击波首先传递到舰艇结构,进而到舰载设备。为了使读者能够更好地理解,作者采取从里到外、从简单到复杂的叙述方法:按“设备—舰船—冲击环境—水下爆炸”的思路,首先将舰船设备简化为单自由度系统,讨论了冲击输入在时域和频域中的表示方法以及二者之间的转换关系。在比较各种冲击输入下的响应的基础上,讨论冲击响应谱概念,冲击响应谱的特点,冲击和振动问题的区别。通过二自由度系统的冲击响应,引出谱跃问题,并介绍了为解决谱跃而发展的动态设计方法和该方法的核心——主模态理论,以及其他相关的最新进展,如多刚体-

弹性体和子结构相结合建模方法,抗冲击设计的有限元缩聚建模等。同时针对由冲击引起的舰载设备接触碰撞问题,研究了有限元间隙单元的应用。由于冲击理论研究和冲击实验紧密相关,本书还详细讨论了由冲击响应实验数据获取冲击响应谱的方法,以及反过来由冲击响应谱确定冲击输入的一系列新的研究进展,并对舰船设备冲击试验机和冲击波形发生器做了介绍。由于实船爆炸试验昂贵,舰船虚拟非接触爆炸研究就尤为重要,本书还详尽推导了流固耦合水下爆炸的高频和低频双逼近理论,并用整舰模型做了验证,同时对实验和理论计算之间的误差分析方法作了分析,从而解决了舰船输入环境条件如何确定的问题。将一个极其复杂的过程全面系统地、层次分明地呈现在读者面前。

### (2) 创意独特,体系完整


作者通过多刚体-弹性体和子结构相结合建模方法和抗冲击设计的有限元缩聚建模的新方法的组合,将设备和弹性基础联系起来,通过流固耦合水下爆炸的高频和低频双逼近理论的应用,将水下爆炸过程和船体结构联系起来,从而形成了一个统一的舰船结构及舰载设备抗冲击理论框架体系,使得一个完整的舰艇虚拟冲击试验得以实现。这是本书的学术价值所在,也是本书的独到和创新之处。

### (3) 内容新颖,简明实用

作者长期从事舰船抗冲击技术的科研和教学,因此能够将自己的科研积累和国内外最新发展及其应用融合在一起。书中大部分内容来自作者多年研究成果,还有部分理论是该领域当前世界上最新的研究进展的总结分析,作者巧妙地将它们融合到一个统一的舰艇虚拟冲击理论框架体系中。每个章节,特别是涉及冲击理论基础和冲击环境预报的有关章节,不仅所叙述的内容都涵盖了新近的重要成果,并且都用典型的实例来说明如何将理论应用于实际。这使得从事舰船抗冲击分析和设计的有关工程技术人员能够方便地了解和应用最新成果,实用性强。

舰艇抗冲击技术目前我国还是一个较新的研究领域,缺乏系统的参考资料。对从事舰船抗冲击分析和设计的有关工程技术人员、教学和科研人员来说,本书应该是一本非常难得的参考书。相信本书的出版,能够对我国舰艇抗冲击技术领域的研究和发展起到有力的推动作用。当然,作为一个新的研究领域,书中的一些观点恳请所有读者批评斧正,许多工作也有待进一步完善。

海军副司令员

 海军中将

2005年5月

# 前 言

现代舰船在海战中必然会面临非接触爆炸引起的冲击破坏问题。随着导弹、激光炸弹和水中兵器的发展,爆炸当量和冲击持续时间明显增加,精确制导技术使武器命中率大大提高,舰艇的冲击环境更为恶劣。在非接触爆炸冲击环境下,即使舰艇结构处在安全半径之内,舰载主要机电设备和武器电子设备也可能由于承受过大的加速度或位移而遭到破坏,从而丧失战斗力,处于被动挨打的局面。因此,开展舰艇艇体结构及设备在非接触爆炸作用下的冲击破坏机理及抗冲击性能理论和试验研究,对提高舰艇的生命力和战斗力是至关重要的,具有重大的现实意义和军事应用价值。在这个学科领域,我国目前还缺少有针对性的理论书籍。本书的出版,希望能对我国的舰艇抗冲击性能分析评估、防护设计、理论试验研究、工程应用和教学等起到推动作用。

从水下爆炸作用下舰船及设备的冲击响应的物理过程来看,是从外到里的连续过程,炸药爆炸产生冲击波、形成气泡脉动,然后传递到舰艇结构,进而作用到舰载设备。为了使读者能够从简单到复杂,更直观地理解,本书采取从里到外的描述方法:从舰载设备及支撑简化为一个单自由度系统的受基础激励的冲击问题开始。

按上述思路,本书的第1章为绪论,对冲击现象、冲击特点、抗冲击研究意义、抗冲击的研究历史以及最新发展做了全面的论述。

本书的第2章到第4章是现代冲击基本理论。从单自由度系统开始,讨论冲击信号的时域和频域分析方法,冲击问题和振动问题的区别,冲击响应谱的特性分析以及如何根据冲击响应谱的特性设计冲击隔离器,然后逐步进入到二自由度和多自由度系统。从二自由度系统的冲击问题和单自由度系统的冲击问题的区别引出谱跌的概念,以及由此产生的动态设计分析方法(DDAM法),在详细推导基于模态理论的设备抗冲击动态设计DDAM方法的基础上,还讨论了该方法的最新进展。

第5章是关于多刚体-弹性体和子结构相结合的复杂刚-柔耦合隔离系统的建模方法。冲击响应的多刚体方法是一种经典的方法。当基础是刚性时,该方法计算设备的冲击响应是足够精确的。但是,当基础被考虑为弹性体时(如较大的舰艇最低频率只有1~3Hz左右),则必须考虑谱跌的影响。因此,针对这两种情况,重点讨论了将设备和弹性基础连成一体的多刚体-弹性体和子结构相结合的复杂刚-柔耦合隔离系统的建模方法。

第6章是抗冲击设计的有限元缩聚建模方法。为了考虑基础弹性变形引起的谱跌的影响,除了上面的多刚体-弹性体和子结构相结合的复杂刚-柔耦合隔离系统的建模方法外,提出了整船全局系统建模方法:即将设备安放在船体模型上,同时考虑舰艇的基本结构模态响应,以及设备和船体之间的相互作用,建立包含主要设备在内的整船虚拟冲击模型。这种方法所建立的模型一般规模很大,初始模型存在着大量的局部模态。针对这一问题,本章讨论了几种矩阵缩减方法和相应的迭代计算格式,包括(1)基于刚度矩阵子矩阵普通逆的迭代法;(2)基于矩阵广义逆的迭代法;(3)基于子空间迭代的动力缩聚法,并探

讨了主自由度的选择和局部模态的消除的精确性和完备性问题。

第7章研究了由限位引起的非线性冲击碰撞问题。为防止变型过大,舰船设备安装的隔振器通常还使用限位器。限位器在冲击过程中的响应是强非线性的,必须加以考虑。本章以舰艇典型的管道系统中的泵为例,探讨了限位器在冲击过程中的非线性特性、有限元建模方法、非线性冲击响应计算分析方法以及限位器间隙对冲击响应的影响,从而对因带有限位器而出现二次冲击的典型舰船机电设备隔冲系统的冲击响应分析进行了有益的尝试。

第8章和第9章讨论了当前最新的冲击试验技术、冲击响应数据的处理方法以及冲击试验设备。其中重点讨论了用冲击响应数据确定冲击谱的数字分析方法和测试方法,以及如何由冲击谱确定冲击输入的方法。

第10章首先讨论了流固耦合水下爆炸的各种数值模拟分析方法的最新进展,然后详细推导了高频和低频双逼近DAA理论,包括DAA一阶近似方法和DAA<sub>2</sub>二阶近似方法。再通过湿表面流固耦合方程将水下爆炸过程和船体结构联系起来,从而形成了一个系统的舰船结构及舰载设备抗冲击理论分析体系。

最后,本书以美海军某驱逐舰为实例,详细介绍了抗冲击理论体系的实际应用,其中重点讨论了各种计算和实验之间的误差分析方法及应用。

本书所描述的现代舰船及设备冲击仿真实验理论和方法的特点可以概括为

- (1) 在空间上,水、船体结构、舰载设备等综合在一起,船体结构强度和设备响应计算直接放在冲击环境之中,由二维空间进入到三维空间。
- (2) 在时间上,爆炸冲击过程和船体弹塑性变形过程是连续的。
- (3) 在理论方法上,综合理论、试验、数值方法,但以数值方法为主。

本书是作者近十年来研究工作的总结,希望对舰船领域有关工程技术人员开展冲击防护研究试验工作提供有益的指导和帮助。本书所描述的基础冲击激励下的冲击理论,对航空航天、地震、爆炸等相关领域都有重要的参考价值。本书还可以作为相关专业研究生教材。

最后感谢李俊在博士后工作期间、吴广明等在攻读博士学位期间参加与本书相关内容课题所做的宝贵研究工作。感谢湛勇博士、童宗鹏博士、吴震东硕士和其他学生在本书的图片处理方面所做的工作。感谢国家自然科学基金(批准号10276040)和国际重大基研研究等基金的支持。感谢海军金矛副司令员为本书作序,感谢海军装备部耿广生副部长、海军装备部舰艇部杨志利部长、姜义庆副部长、姚耀中处长、张继明处长、海军装备研究院丁晓明总工程师、赵永浦所长等领导和同事们对本书写作的大力支持和帮助。

希望本书的出版对我国的舰船抗冲击研究试验工作起到推动作用。由于水平和学识所限,书中肯定有不少疏漏、欠妥与谬误之处,真诚希望读者、专家和同行不吝赐教。

# 目 录

<b>第1章 绪论</b> .....	1
1.1 冲击和 underwater 爆炸现象的特点 .....	1
1.2 舰艇及其机电设备抗冲击试验研究进展 .....	3
1.3 舰艇及其机电设备抗冲击仿真研究进展 .....	7
1.3.1 水下爆炸冲击环境预报和结构冲击响应 .....	7
1.3.2 舰船机电设备的冲击设计计算方法 .....	10
1.4 冲击试验和虚拟冲击.....	12
1.4.1 设备冲击试验和全舰冲击试验 .....	12
1.4.2 虚拟冲击及其和冲击试验的关系 .....	13
1.5 舰船及设备虚拟冲击的若干关键技术问题.....	14
参考文献 .....	16
<b>第2章 冲击输入的时域和频域表示</b> .....	20
2.1 振动冲击的基本方程.....	20
2.1.1 运动方程式 .....	20
2.1.2 作用在基础上的冲击输入.....	22
2.2 对速度冲击的进一步说明.....	25
2.3 冲击信号的频域表示.....	29
2.4 典型冲击输入谱.....	34
2.5 三折线图谱的逆 Fourier 变换 .....	35
参考文献 .....	37
<b>第3章 冲击响应特性分析</b> .....	38
3.1 典型冲击输入下的响应.....	38
3.2 冲击谱.....	40
3.3 冲击问题和振动问题的区别.....	48
3.4 冲击谱的特性分析.....	54
3.4.1 冲击隔离区(低频率)特性.....	54
3.4.2 等冲击区(高频段)特性 .....	55
3.4.3 冲击放大区特性 .....	56
3.5 四参数对数冲击谱.....	56
3.6 三维冲击谱.....	61
3.7 冲击谱与冲击信号 Fourier 谱之间的关系 .....	62
3.7.1 主冲击谱与冲击信号 Fourier 谱的关系 .....	62



3.7.2 残余冲击谱与冲击信号 Fourier 谱的关系 .....	63
3.8 二自由度系统的冲击谱 .....	64
3.9 隔冲器的性能评价 .....	66
参考文献 .....	68
<b>第 4 章 谱跌和动态设计法的主模态理论</b> .....	<b>69</b>
4.1 谱跌及由此产生的 DDAM 法 .....	69
4.1.1 谱跌分析实例 .....	73
4.1.2 DDAM 法中的设计谱与响应谱 .....	74
4.1.3 DDAM 方法中的输入速度和加速度 .....	74
4.2 一维主模态理论 .....	76
4.2.1 主模态的正交性 .....	76
4.2.2 对于基础运动的响应及模态组合法 .....	77
4.2.3 作用在质点上的力 .....	79
4.2.4 模态质量及振型的归一化 .....	80
4.3 三维主模态理论 .....	81
4.3.1 术语的定义 .....	81
4.3.2 运动方程 .....	83
4.3.3 振动控制方程 .....	84
4.3.4 平移惯性力 .....	87
4.3.5 模态质量和惯性矩 .....	88
4.3.6 三维主模态理论的实例 .....	90
4.4 动态设计分析方法最新进展 .....	95
4.4.1 概述 .....	95
4.4.2 密集模态问题和多向响应问题 .....	96
4.4.3 有效应力和应力分类 .....	101
4.4.4 模态选择的标准 .....	104
4.4.5 许用应力 .....	105
4.4.6 $f$ 参数 .....	107
参考文献 .....	108
<b>第 5 章 多刚体-弹性体的子结构建模方法</b> .....	<b>110</b>
5.1 多刚体-弹性体法建模 .....	111
5.2 三维复杂刚体-弹性体耦合系统建模 .....	113
5.2.1 三维复杂弹性耦合隔振系统的描述及建模思想 .....	113
5.2.2 刚体子系统建模 .....	113
5.2.3 弹性体子系统建模 .....	115
5.2.4 刚体子系统与弹性体子系统的综合 .....	116
5.2.5 弹性体子系统与弹性体子系统的综合 .....	118

5.2.6 三维复杂弹性耦合隔振系统的动力学方程 .....	121
5.3 从基座测试阻抗求基座物理模型 .....	125
参考文献 .....	126
<b>第6章 抗冲击设计的有限元缩聚建模 .....</b>	<b>127</b>
6.1 基于变分原理的有限元法 .....	127
6.2 矩阵缩减和局部模态消除 .....	131
6.2.1 基于刚度矩阵子矩阵普通逆的迭代法 .....	131
6.2.2 基于矩阵广义逆的迭代法 .....	133
6.2.3 基于子空间迭代的动力缩聚法 .....	136
6.2.4 主自由度的选择和局部模态的消除 .....	139
6.3 应用举例 .....	142
参考文献 .....	144
<b>第7章 GAP单元在非线性建模中的应用 .....</b>	<b>146</b>
7.1 限位器刚度突变引起的接触-碰撞非线性问题 .....	146
7.1.1 限位器冲击刚度的确定 .....	146
7.1.2 限位器的限位有限元数学模型 .....	150
7.1.3 含限位器的设备的冲击响应分析 .....	151
7.1.4 结论 .....	152
7.2 Gap单元在多刚体静力学问题中的应用 .....	153
7.3 Gap单元在低温真空储罐动态应力响应中的应用 .....	153
7.3.1 液压真空储罐冲击响应分析的有限元模型 .....	153
7.3.2 零间隙时的动态应力响应 .....	154
7.3.3 有间隙时的动态应力响应 .....	157
参考文献 .....	162
<b>第8章 冲击脉冲和冲击谱的数据分析方法 .....</b>	<b>163</b>
8.1 由冲击谱试验数据确定冲击输入 .....	163
8.1.1 正弦扫描法 .....	165
8.1.2 快速正弦扫描法 .....	166
8.1.3 瞬态波组合法 .....	167
8.1.4 瞬时矩方法 .....	170
8.1.5 随机冲击重构的Karhunen Loeve方法 .....	172
8.2 冲击谱的测试 .....	174
8.3 冲击谱的数字分析方法 .....	176
8.3.1 直接积分方法和FFT法 .....	176
8.3.2 Smallwood方法 .....	177
8.3.3 Ahlin方法(改进的Smallwood方法) .....	179
参考文献 .....	182

<b>第9章 冲击试验机和冲击脉冲的确定</b> .....	183
9.1 冲击实验机的分类 .....	183
9.2 冲击波模拟实验机和冲击响应谱模拟试验机 .....	183
9.3 强冲击试验机 .....	185
9.3.1 轻型冲击机 .....	185
9.3.2 中型冲击机 .....	188
9.3.3 浮动冲击平台 .....	191
9.3.4 海军的其他冲击试验装置 .....	194
9.4 由冲击谱试验数据确定冲击脉冲的波形钳制 .....	195
9.4.1 前后钳制冲击脉冲的运动学 .....	195
9.4.2 跌落试验中的前后钳制 .....	198
9.5 波形发生器 .....	199
9.5.1 半正弦波形发生器 .....	199
9.5.2 其他波形发生器 .....	201
参考文献 .....	203
<b>第10章 舰船水下爆炸冲击</b> .....	204
10.1 爆炸波特性 .....	206
10.1.1 压力波特性 .....	206
10.1.2 表面反射和空泡 .....	210
10.1.3 冲击系数(因子) .....	213
10.1.4 波动方程 .....	215
10.1.5 两种介质间的透射——正入射 .....	218
10.2 流固耦合的 Taylor 平板理论 .....	220
10.2.1 应用到空气背衬的自由平板 .....	222
10.2.2 FSP 作用 .....	224
10.2.3 基于 Taylor 相互作用方程和 Nastran 程序的水面船实例 .....	227
10.3 Mindlin 和 Bleich 方法 .....	229
10.4 双逼近 DAA 法 .....	231
10.4.1 流固耦合面的压力和速度之间的关系 .....	231
10.4.2 低频和高频时的流固耦合作用的近似关系 .....	233
10.4.3 双逼近 DAA <sub>1</sub> 方法 .....	234
10.4.4 双逼近 DAA <sub>2</sub> 方法 .....	237
10.5 双逼近法计算冲击响应的步骤 .....	240
10.6 计算响应的误差估计方法 .....	241
10.7 水面舰艇水下爆炸冲击的计算实例 .....	244
参考文献 .....	252
<b>附录 恒等式的证明</b> .....	255

# 第1章 绪 论

## 1.1 冲击和水中爆炸现象的特点

冲击是指一个系统在相当短的时间内(通常以毫秒计),受到瞬态激励,其位移、速度或加速度突然发生变化的物理现象。在日常生活和工作中,可以遇到大量的冲击问题:如手锤敲打钉子,跌落物体在触地的瞬间,车辆的颠簸、碰撞,舰船遭受水中兵器的攻击而引起的爆炸,飞机的着陆,火炮及导弹的发射等都伴随着冲击现象。一般来说,冲击具有如下的几个特点:

1) 冲击作用的持续时间非常短暂,因此剧烈的能量释放、转换和传递的时间很短,是骤然完成的。

2) 冲击激励函数不呈现周期性。在冲击作用下,系统所产生的运动为瞬态运动,而振动激励函数一般都是周期性的,系统运动响应为稳态振动。

3) 在冲击作用下,系统的运动响应与冲击作用的持续时间及系统的固有频率或周期有关。

4) 冲击作用下系统的响应(位移,速度或加速度)在冲击持续时间内与冲击作用结束后是不同的。前者称为初始响应,后者称为余响应。而响应最大值可能发生在初始响应,也可能发生在残余响应。

在海战中,舰船所遭受的主要冲击源有:

1) 接触性爆炸,如遭受导弹、激光炸弹直接攻击,造成舰体损伤及舰船机电设备损伤。

2) 水中非接触性爆炸,如遭受鱼雷、水雷爆炸的冲击,主要破坏舰载机电设备。

3) 自身武器发射时反冲击造成的冲击,或由炸弹在空中爆炸或自身武器发射所产生的气浪,也会影响到舰载机电设备的正常运转。

本书主要关心的是水中非接触爆炸对舰船、设备及人员产生的冲击。

水中非接触爆炸具有冲击的一般性。鱼雷、水雷等在水下爆炸时,瞬间产生高温高压的气体产物,其压力即可以达到10GPa以上,形成水中冲击波的波前,以数倍于声速的速度沿径向向四周传播,并大致上按指数规律下降。实测数据表明,在靠近船壳测到的压力近似地是一个阶跃信号,从最大值下降到峰值三分之一的时间内,可以认为按指数规律下降<sup>[1,2]</sup>。因此,在非接触爆炸下舰船湿表面冲击环境的特征可以描述为:在相当短的(与舰船总体振动特性和设备弹性支承系统的固有振动周期相比)时间内,作用在舰船湿表面上的一个突然的扰动,即冲击压力。而对设备和人员来说,如把甲板或机座等当作基础,这个扰动就是基础的速度突变或加速度。这就是水中非接触爆炸冲击的一般性。美国海军舰船建造局W. P. Welch著有《舰船设备抗冲击设计指南》,在其中的专题论文Navyships 250-660-30中指出:实际的舰船冲击可以认为是一个等速度冲击,至少在刚开始的

0.015 秒内是这样的;并第一次提出了用阶跃速度法来进行冲击隔离设计的计算方法<sup>[3]</sup>。美国海军泰勒船模试验室冲击部主任R. L. Bort 提出了舰船冲击运动的计算公式<sup>[4]</sup>。美国旧金山海军造船厂的造船工程师Sal Giannoccolo 自1963年以来曾对美国SSB(N)级核潜艇及DLG16~24级各型舰船上的主要设备做过冲击试验,并提出过专门报告,给出了舰船机电设备的冲击速度的大致范围,很有参考价值<sup>[5]</sup>。

在远距离爆炸时,作用在船体上的压力虽不一定会破坏结构,但是船体运动速度的突变所产生的加速度却可能损伤安装在船上的设备和人员,就如同汽车突然刹车使乘客受伤。当然,在近距离爆炸时,压力也可能大到足以破坏船体局部结构。因此对非接触水下爆炸问题,设备和人员的安全问题更为重要:

1) 结构件应力过大引起永久变形、松脱或断裂(这经常出现在机械设备的支脚处、连接焊接处),造成结构件强度破坏。

2) 设备与设备、设备与结构之间的相对运动引起碰撞、挤压,造成设备或结构的损坏与破坏,如严重的蒸气泄漏、电路短路、设备或构件的坠落等。

3) 机械系统原有作用力的平衡遭到破坏,使设备性能变坏或机械系统功能被破坏。

4) 冲击对人体造成危害,冲击波通过超压和动压使人体器官、骨架损伤或死亡。

水下非接触爆炸冲击具有其特殊性。水下爆炸不仅产生冲击波,炸药产生的气体压力迫使周围水质点做径向运动,称之为滞后流。同时,爆轰产物会迅速向外膨胀,形成气泡。当膨胀到压力等于静水压后,因为惯性作用而继续向外膨胀直至最大体积,此时气泡内部的压力约为静水压的 $1/10\sim 1/5$ ,而后由于外界压力的作用使气泡收缩,同样由于惯性的作用,在气泡内压力达到静水压时仍继续收缩,直到最小体积时又开始膨胀,同时产生一个压力波,如此反复膨胀,收缩,形成气泡脉动,在脉动过程中,气泡逐渐上升,最后脱离水面。虽然气泡脉动的频率较低,但是由于前面的冲击波在较大频率范围内都具有很大的能量,可以激发船体及设备几乎所有的模态。因此,当气泡脉动的频率和船体或某些设备的固有频率接近时,也会造成严重的危害。轻者使得机电设备功能失效,重者导致舰船断裂沉没。

评估舰船的生命力有4个要求:

1) Susceptibility, 敏感性,指的是对各种攻击的敏感程度。

2) Vulnerability, 易损性,指的是承受攻击的能力。

3) Survivability, 生存能力,其概率是susceptibility 和vulnerability 概率的乘积。

4) Recoverability, 恢复战斗的能力。舰船抗水下非接触爆炸的能力直接关系到舰船的生命力。现代战争是高科技的战争,舰船装备了为数众多的复杂电子设备,尤其是在电子信息领域引进了作战系统和电子战系统、电子导航系统等,对环境要求更苛刻。随着导弹、激光炸弹和水中兵器的发展,爆炸当量和冲击持续时间明显增加,三向冲击载荷增大,大部分电子设备的位移及加速度响应会严重超标,从而使其运行可靠性大为降低。因此,整船生命力的要求必须以作战为定向,其指标提到了与战斗力指标同等重要的地位。目前公认的、由美国学者H. C. Pusey 提出的23项舰船生命力组成指标中,有14项是舰艇和设备的抗爆和抗冲性能和指标。正因为如此,舰船的抗冲击性能是其生命力的最核心内容、舰船的核心战技指标。本书所讨论的舰船抗冲击问题,主要就是为以作战为定向的生命力

研究提供有关的基础理论和计算方法。

舰船抗冲击技术是多学科、多领域交叉的技术,主要包括:

1) 力学共性问题:水下非接触爆炸冲击环境预报方法、振动冲击理论和其他学科,如弹塑性理论、断裂力学理论、穿甲力学、流固耦合理论、结构力学、微分方程数值计算方法、高性能计算方法(有限元法、边界元法、无网格法)等的交叉。

2) 水下非接触爆炸下的水、结构、舰载设备等的一体化虚拟冲击实现技术研究中的冲击动力学和计算机仿真技术的交叉。

3) 抗冲击新材料研究中和材料科学、纳米材料科学的交叉,冲击试验机研制中和现代机械机构设计理论的交叉。

4) 冲击信号测试分析中和现代信号分析测试技术的交叉。

5) 人员冲击防护技术和生物力学的交叉。因此,舰船抗冲击技术的深入研究也必然会推动其他各个学科的进一步发展。

## 1.2 舰艇及其机电设备抗冲击试验研究进展

舰艇抗冲击研究的历史可以追溯到19世纪。美国海军早在1860年就进行了船体抗爆炸试验。1874年8月4日,英国海军在Portsmouth的Stoke海湾进行了第一次全面的水下爆炸试验,文献[6]非常详尽地阐述了舰艇水下爆炸试验研究的完整历史,记述了自19世纪开始所有的有影响的水下爆炸试验。第一次世界大战使参战各国海军认识到,水下爆炸不仅能造成甲板的破坏,而且会造成机电设备的错位和破坏、电路的开裂、主轴的变形等。此外,舰艇经受了水下爆炸以后,尽管有时可以保持其壳板的水密性,但是由于内部设备遭受冲击后功能丧失,也会导致舰艇完全丧失战斗力。

第一次世界大战期间,美国海军制作了冲击试验机,用来考核舰船机械和电器设备抵抗由自身武器发射时反冲力所造成的冲击破坏的能力。在第二次世界大战初期,美国军舰由于舰上大炮发射时产生的冲击造成了舰载电器设备和机械设备出现大量故障,为了解决这类冲击损伤的问题,开始研究冲击响应和冲击隔离问题。第二次世界大战期间,不断改进的武器的猛烈炮火,以及水中兵器的水下爆炸造成战舰严重的破坏,美国在此期间共丧失了47艘主战舰和42艘潜艇<sup>[6]</sup>。所以美国海军意识到要提高战舰的生命力,不仅要改进结构的设计,而且必须研究和提高舰载设备对水下爆炸所产生的严酷的动态响应的抵抗能力。1943年美国海军舰船建造局(The Bureau of Ships)组织专题研讨会,研究包括战列舰、巡洋舰、驱逐舰、潜艇和扫雷艇等在内的舰载电器设备和机械设备的冲击破坏。在这次研讨会上,Charles E. Crede(冲击和振动手册两位编者之一)阐述了英国和美国进行的舰船冲击试验的情况,美国海军舰船建造局W. P. Welch做了冲击设计的报告(designing for shock),由此而开展的大规模的舰船机械设备抗冲击试验和冲击隔离设计的理论研究则开始于1946年。

第二次世界大战结束后,美国海军在太平洋比基尼群岛对从日本俘获的大量舰船进行了一系列爆炸冲击试验,并且进行了系统的理论研究。美国海军自1947年正式召开第一届冲击和振动研讨会(Shock and Vibration Symposium),每年举行1~2次研讨会,美

国国防部从1949年9月第13届起成为这一研讨会的主要资助者,1989年11月14~16日由泰勒研究中心水下爆炸研究部召开了第六十届冲击和振动研讨会。此后每年一次研讨会,成百名代表参加,发表70~80篇文章,内容涉及冲击、碰撞、动态试验、水下爆炸及振动等。

Sal Giannoccolo,美国旧金山海军造船厂的造船工程师,自1963年以来曾对美国SSB(N)级核潜艇及DLG16~24级各型舰艇上的主要设备做过冲击试验,并提出过专门报告,基本上反映了美国海军的官方意见,给出了舰船机电设备的冲击速度的大致范围,很有参考价值。

在当代世界各国海军中,对舰艇及其机电设备抗水下爆炸研究水平最高的是美国,其次是北约、澳大利亚、日本等。美海军在抗冲击方面采取了两项独具特色的强制措施:第一是对用于舰艇的设备采取了以试验为主、计算为辅的评估方法,其次是规定每艘新型舰艇在交付使用前都必须进行实艇水下爆炸试验考核,考核不合格不能服役,必须重新进行抗爆抗冲击设计,直至合格。

美海军强调用冲击试验考核舰船设备抗冲击能力和作为舰船设备的验收标准。在美国军标(MIL-STD-1399 Section 072)Part 4《Shock Environment》中明确规定:凡设备通过了冲击试验,也就符合了冲击环境的要求,即设备通过了冲击试验,表明它能承受未来海军实战中的严酷条件。对于那些过重、过大的不能进行试验的设备,则要求通过理论模型来确定其能够承受的冲击载荷。

美海军舰船管理局在戴维-泰勒结构力学实验室的协助下完成的研究报告认为,近年来,海军舰船结构对爆炸的抵抗能力已经增加了许多,特别是潜艇,它的壳体从第二次世界大战结束至今有了很大的增强。但这又导致舰载设备抵抗冲击的能力相对更显薄弱。由于舰船设备,特别是复杂的推进、导航以及武器系统的电子设备的大量使用,并有可能面临由核攻击和精确打击导致的新的冲击环境。因此必须采取相应措施:

1) 在舰船机电设备设计时,需提出抗冲击能力要求。舰船管理处在新起草的说明书中已增加了抗冲击能力标准。海军开发署发展了冲击频谱。基于这种概念的冲击实验方法被应用到舰船机电设备的考核。

2) 采用轻型和中型冲击试验机和浮动冲击平台,对舰船机电设备进行广泛的实验考核。

3) 海军舰艇的冲击试验由舰船管理处在戴维-泰勒小组的协助下开发并实施。被试验的船只包括扫雷艇、炮艇、巡洋舰、航空母舰和潜艇等。

试验结果表明:

1) 一些未经过冲击试验机考核的新研系统、设备,在实船试验时表现出的抗冲击性能比那些按照规范经过冲击试验机考核的设备要差。因此,机电设备放弃冲击试验机考核直接上舰是一件很危险的事,应该被禁止。

2) 直接安装在壳体上的轻型设备承受到的冲击最大,而重型机械,如主推进装置,可以依靠它们的重量在相当程度上降低第一阶段的冲击影响,通常能抵抗较为严重的冲击。

3) 装在上甲板和舰船上部结构的设备,在冲击中受到的影响会由于船的甲板变形而得到缓和。但这种缓和效果在设计甲板上设备时往往被过高估计,事实上在甲板上发生的

损坏还是占了很大比重的。

4) 固有频率较低的设备在缓慢的冲击第二阶段中会受到相反的影响,这种现象还没有受到重视。如雷达天线及其连接件,较低的固有频率使得它们在以低加速度和大位移为特征的第二阶段冲击中变得易受损。因为这种冲击不仅没有被船体结构所削弱,甚至会被甲板的共振所加强。

5) 在加速度很大的冲击第一阶段,弹性安装设备有很好的保护作用,然而,如果设计和应用不当,这种优点会在第二个阶段消失。发生在第二阶段的较大位移会传到设备底部,从而对设备造成第二次伤害。如安装在上甲板的设备上的抗冲击装置可能适得其反,这些抗冲击装置能够抵抗的很大的加速度在早期就被船体结构降低了,但是这些装置在有较大位移的第二阶段却给设备造成极大的冲击伤害。在这个阶段由于和临近的设备发生碰撞并导致损伤的情况也会发生。另外,甲板上处于甲板频率和设备频率之间的共振环境也是非常有害的。Warren D. Reid 有关美国海军水面舰艇中心分部水下爆炸研究的工作报告<sup>[7]</sup>支持了上述观点。

为了模拟舰船机械设备的冲击环境,美国海军早在1954年就制定了军用规范MIL-S901B,规定了船用机器、设备和系统强碰撞冲击试验的要求,用来考核舰船设备抗冲击能力和作为舰船设备的验收标准,并且于1963年更新为901C,1989年又更新为901D。规范规定了被试验的机器设备按质量分为三个等级:轻量级250磅(113kg)以下;中量级250~6000磅(113~2722kg);重量级6000~30000磅(2722~13608kg)。它们分别在轻量级冲击试验机、中量级冲击试验机和浮动冲击试验台上进行,规范还规定了敲击次数和摆锤的跌落高度。

轻型冲击机(LWSM):1939年英国制作安装了第一台LWSM,1940年美国对其进行了升级和修订。目前的LWSM符合MIL-S-901D冲击测试标准,包括一个标准钢结构断面的焊接框架和两个冲锤;一个在垂直弧度上摆动跌落,另一个垂直跌落。每个冲锤重400磅(182kg),它们可被提升到离其冲击位置5英尺(1524mm)的垂直高度上,最大的输入能量为2712J。

中型冲击机(MMSM):1943年第一个用于中型量级设备的海军强冲击机器安装在前海军工程试验台上。基本设备包括一个在摆冲锤下面的基准打击台。冲锤的重量是3000磅(1361kg),摆动弧度为270度,它可打击到基准台上的重量是4500磅(2041kg)。

浮动冲击平台(FSP):1959年设计的FSP,是为了对所有大于30000磅(13608kg)的机械设备进行强冲击试验。FSP包含一个开放的钢平底船,设备用螺栓或焊接固定在它的上面(包括设备的基础),与在舰船上的安装位置和形式一样,因此测试基本上近似实际的工作状态。

舰船抗冲击试验可以提高海军舰艇的抗冲击能力。但是冲击试验需要大量的费用和时间,投入很大;而通过冲击建模、仿真预测冲击响应,结合部分的冲击试验进行校核是西欧海军普遍采用的方法。20世纪70年代,前联邦德国海军的BV043/73冲击标准主要是采用舰船设备冲击建模和计算的方法考核舰船机电设备的冲击保护问题。它同时给出了抗冲击设计计算所需的冲击波形、冲击幅值和冲击作用时间。冲击速度和冲击时间按设备重量来确定,并考虑到舰船类型的不同(水上、水下),安装部位的不同(外部连接、内部连



接),以及冲击作用方向的不同(垂向、横向、纵向)进行加权。但是BV043/73冲击标准建立在较小的冲击载荷(加速度 $40\sim 70g$ )、理想半正弦波冲击波形及线性叠加冲击响应的基础上,因此垂向冲击时,位移响应仅达 $25\sim 30\text{mm}$ ;横向冲击由于规定的载荷小,故位移响应仅 $20\text{mm}$ 左右。在BV043/73标准下,抗冲击器最大允许的垂向位移为 $35\text{mm}$ <sup>[8]</sup>。

然而近20年来,随着水中兵器的发展,水下的爆炸当量对舰艇设备的威胁更为严重,特别是英国与阿根廷马岛海战后,欧、美西方诸国基于海战中舰艇机电设备的损坏及运行情况,对冲击保护的标准,即BV043/73、MIL901C等,及设备抗冲击性能进行了全面的评估及分析,1985年在北约组织的协调和前西德海军部主持下,通过了舰艇冲击新军标,即BV043/85。此后,美国海军亦制定了MIL901D的军标。BV043/85与BV043/73相比主要有4个特点<sup>[9]</sup>:

1) 冲击波形由原来理想的半正弦波、梯形波改为标准的全波,即双峰正弦波、双峰三角波。

2) 冲击载荷加大,如双峰正弦波,最大垂向载荷达 $140g$ 以上,横向载荷为 $125g$ ,冲击作用时间 $20\text{ms}$ ;双峰三角波最大垂向载荷达 $188g$ 以上,横向 $166g$ ,冲击作用时间 $16\text{ms}$ 。

3) BV043/73冲击载荷分为一、二两级;BV043/85增加到三级。

4) BV043/73按线性方法进行计算;BV043/85必须按非线性方法进行计算。

1989年后,西方国家海军根据新军标,在冲击计算模型、研制符合新军标要求的隔冲器、舰艇的隔冲设备改装等冲击保护方面做了许多工作:

1) 建立了单层隔振系统非线性冲击计算模型,完成了按BV043/85冲击标准的隔冲系统的校核程序。

2) 研制符合新军标要求的隔冲器,以取代现役产品。其基本性能是:三向允许变形量达 $\pm 65\text{mm}$ ;自振频率(三向)为 $5\sim 9\text{Hz}$ (部分电子设备可达 $24\sim 30\text{Hz}$ );隔冲器三向刚度也近似相等。

3) 对改装舰艇的隔冲设备采用冲击校核程序,逐一选择恰当的隔冲器型号及类型,进行改装。仅1992年至1994年,按上述过程,已完成德国10条潜艇(Noski)、4条水面舰艇(布勃登F123),荷兰潜艇及一艘海象级驱逐舰,希腊、丹麦等共4条水面舰艇的改装任务。同时对德国出口到澳大利亚的10条潜艇亦同样采用上述校核程序及新型隔冲元件系统。

综上所述,西方海军强国抗冲击技术的发展可以概括为5个特点:

1) 研究历史长,舰艇机电设备的抗冲击试验与抗冲击技术研究始于第二次世界大战末期。

2) 冲击标准更新快。

3) 试验技术得到系统性理论研究和规范化计算软件的补充。

4) 考虑非线性因素的影响。根据BV043/85冲击标准,以非线性模型为主的计算软件(ISOLIER, FEDMAS)经权威机构审核通过,输入、输出有统一格式,操作规范,保证抗冲击设计质量。

5) 冲击试验频繁、现役舰艇改装到位。西欧国家每两年一次在海上对新发展的抗冲击保护装置和抗冲击元器件进行冲击考核,并将考核合格的新技术应用到现役舰艇上,对现役的舰艇机电设备重新进行改装。