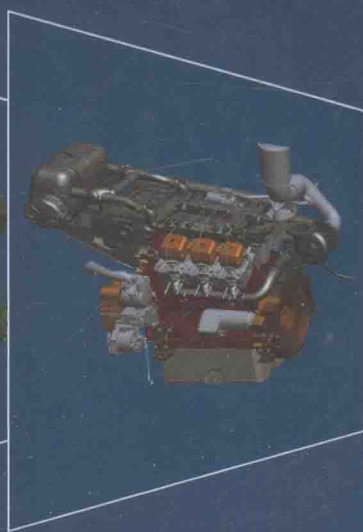
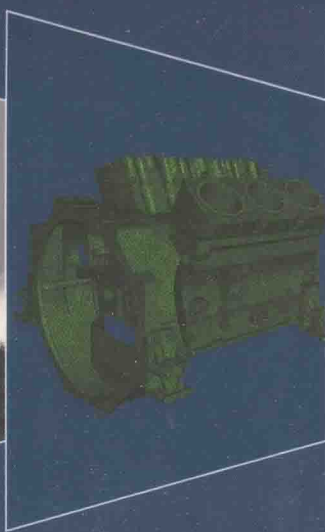


船舶柴油机抗冲击 性能分析与评估技术

汪 玉 赵建华 著



科学出版社

船舶柴油机抗冲击性能 分析与评估技术

汪 玉 赵建华 著

科 学 出 版 社

北 京

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

内 容 简 介

本书研究了船舶柴油机的抗冲击性能分析、试验及评估方法,系统论述了船舶柴油机抗冲击性能研究的内容体系、冲击输入载荷及预报方法、冲击分析方法及工程应用、冲击试验方法等。在冲击输入条件和冲击试验方面,基于船舶柴油机或其典型连接结构试验件的冲击试验机试验、缩比模型试验和海上实船爆炸冲击试验等,研究了船舶柴油机抗冲击性能试验的基本方法;在理论及应用方面,本书给出应用频域和时域两种方法的实例,实现了柴油机工作应力与冲击应力的耦合计算,并专门分析了柴油机的螺纹连接结构和油膜润滑结构两大关键力传递结构的冲击特性及分析方法,研究耦合力传递结构的柴油机多体系统传递矩阵法。最后,分析了船舶柴油机的抗冲击能力,并提出柴油机抗冲击性能改进提高的相关措施。

本书注重理论联系实际,适用于船舶柴油机等动力设备的抗冲击性能分析评估工作,可供从事船舶设备抗冲击理论及技术研究的科技人员,以及从事船舶柴油机设计,船舶动力装置设计、论证、建造和使用管理的科技人员、教师和研究生等阅读使用。

图书在版编目(CIP)数据

船舶柴油机抗冲击性能分析与评估技术/汪玉,赵建华著.—北京:科学出版社,2014.9

ISBN 978-7-03-040298-1

I.①船… II.①汪…②赵… III.①船用柴油机—抗冲击—性能分析②船用柴油机—抗冲击—技术评估 IV.①U664.121

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 058875 号

责任编辑:黄彩霞 王晓丽/责任校对:董艳辉

责任印制:高 嵘/封面设计:蓝 正

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>

武汉中远印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本:787×1092 1/16

2014 年 9 月第 一 版 印张:19 3/4 插页:32

2014 年 9 月第一次印刷 字数:553 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

现代水中兵器爆炸的威力越来越大,被广泛应用的非接触引信又增加了军船遭受非接触爆炸的可能性,水下非接触爆炸问题在船舶设计、建造和使用过程中越来越突出。国内外实船试验表明,相对于船体结构而言,水下非接触爆炸冲击对船舶设备造成的损伤会对船舶的安全性和生命力造成极大影响。现代船舶设计中广泛采取设备的振动和冲击隔离措施,目的之一便是降低设备的冲击输入载荷,提高设备的冲击安全性。为了给隔离系统设计提供定量依据,船舶设计人员越来越关注设备固有抗冲击能力的分析与评估工作。近年来,科研人员还希望在设备结构上进行校核与优化,使其本身具有承受较高的抗冲击能力,尽量减少使用隔离器,甚至不提倡使用隔离器,从而降低设备及其系统的复杂性,对设备抗冲击技术提出了新的更高的要求。柴油机作为船舶动力和电力的来源,必须满足船舶抗冲击设计指标的要求,是设备抗冲击研究的首选对象。

柴油机是一种集多种机械运动方式、高机械强度、热-机耦合、流-固耦合等于一体的大型复杂动力机械,容易发生机械疲劳、热损伤、强共振等十多种与结构动力学相关的故障,柴油机的结构强度分析还是目前研究的热点问题。在柴油机零部件结构强度分析中,通过柴油机机构运动学和动力学计算,可以获得较为准确的边界条件,将柴油机分解为单个的零部件进行各种计算分析。但是,承受冲击载荷时应将柴油机整机看成一个柔性体或刚柔耦合体,这使求得单个零部件的边界条件就困难得多。因此,可对柴油机整机进行建模,模型内容包含主要承力零部件、质量较大零部件、柔度较大零部件,以及零部件之间装配及力传递结构。显然,这种模型又存在计算规模大、非线性强及未知因素多等特点,特别是存在两类数量多、普遍性强的小尺度结构,带来两大关键性课题,即螺纹连接结构的冲击动力学理论和耦合动力润滑的运动机构多柔体运动及冲击动力学理论。其他大型复杂船用动力机械的抗冲击性能分析工作中也存在类似的理论问题,可见该研究工作具有一定的基础性和科学性。

柴油机设计过程中的主要矛盾是柴油机的动力性、经济性和可靠性,军船和核电站陆上应急机组等特殊场合使用时,再对柴油机的抗冲击性能进行校核评估。尽管存在评估柴油机抗冲击能力的需求,但还是难以查阅系统论述柴油机抗冲击性能的相关文献,因此,有必要系统开展柴油机抗冲击性能研究工作,梳理其中的问题,解决柴油机冲击环境、冲击试验和冲击动力学及工程应用问题。

基于以上需求,本书分9章进行阐述。第1章分析了船舶柴油机抗冲击研究的实际需求;第2章简述了设备冲击输入的国内外标准规范,并给出一种船舶设备冲击环境预报理论,满足新型船舶设计中柴油机冲击环境预报的需要;第3章讨论了设备抗冲击的基本原理,从频域分析角度给出柴油机冲击响应计算实例;第4章利用冲击响应时域分析方法和多柔体动力学,实现了柴油机运动与冲击耦合的动力学仿真,提出计算流程;第5章和第6章论述了螺纹连接结构和油膜润滑两种力传递结构的冲击动力学建模方法;第7章探讨了耦合力传递结构的柴油机多体系统动力学建模理论;第8章论述了柴油机中螺纹连接结构和油膜润滑结构的冲击机

试验方法,总结柴油机实船爆炸试验的测试与分析方法;第9章讨论了柴油机冲击极限载荷,并提出了抗冲击性能改进提高的建议。本书可供从事船舶设备抗冲击理论及技术研究的科技人员,以及从事船舶柴油机设计,船舶动力装置设计、论证、建造和使用管理的科技人员、教师和研究生等阅读使用。

笔者长期从事舰船装备论证、舰船抗冲击技术和船舶柴油机等方面的科研工作,积累了较丰富的理论和实践经验,本书正是十多年来船舶柴油机抗冲击方面研究工作的总结。在此特别感谢上海交通大学华宏星教授、哈尔滨工程大学姚雄亮教授给予本书的指导。在本书的研究和写作过程中,海军工程大学欧阳光耀教授和黄映云教授给出了很多理论研究方面的建议并提出了良好的实验条件,原海军装备研究院舰船论证研究所郑茂礼所长、薛亚凡高工和海军工程大学吴晓平教授等专家提出了宝贵意见,杜俭业、张磊、杜志鹏、计晨、高洪滨、易太连、高浩鹏、冯麟涵、张瑞波、孙宇鹏、朱德彬、汪宏伟、张春辉、邹开凤等在研究工作中付出了辛勤劳动,在此表示深深的谢意。

本书的相关研究得到了海军“十一五”“十二五”国防预研基金等项目的资助,特致谢忱。还要特别感谢科学出版社的大力支持。

书稿从立意到成稿虽然历经多年,做了一定的工作,但由于船舶柴油机结构强度和冲击响应分析、试验工作的复杂性,本书只能解决实际工作中急需的问题,主要起到抛砖引玉的作用,希望有更多的科技工作者加入该领域的研究,发现新方法,解决更深层次的科学问题。随着现代科技的快速发展,限于作者的水平和能力,本书的观点和方法难免有一定的局限性,祈望读者不吝赐教。

作者

2013年9月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 水下非接触性爆炸作用下船舶的抗冲击性能	1
1.1.1 水下非接触性爆炸	1
1.1.2 船舶的抗冲击性能	3
1.2 水下非接触性爆炸冲击作用下船舶设备的抗冲击性能	6
1.2.1 船舶设备抗冲击性能研究的重要性	6
1.2.2 设备抗冲击性能的研究方法	6
1.2.3 船舶设备抗冲击能力和冲击损伤案例	9
1.3 船舶柴油机抗冲击性能研究需求分析	10
1.3.1 柴油机抗冲击性能研究的地位	11
1.3.2 柴油机抗冲击性能的特点	11
1.3.3 柴油机抗冲击研究的关键课题和主要研究方向	12
1.3.4 柴油机抗冲击性能研究体系	14
参考文献	19
第 2 章 船舶设备冲击环境及其预报	20
2.1 冲击响应谱与冲击时域载荷	20
2.1.1 冲击响应谱的定义和计算	20
2.1.2 标准冲击谱	22
2.1.3 国军标规定的冲击设计值	23
2.1.4 冲击响应谱与简单时域波形的转化关系	24
2.2 船舶设备在不同安装部位的冲击特点	25
2.3 船舶设备冲击环境预报技术	27
2.3.1 预报理论模型的基本假设	27
2.3.2 船体与设备冲击响应动力学模型	29
2.3.3 刚性板架水下爆炸冲击响应动力学模型	30
2.3.4 船体与设备一体化冲击动力学模型	36
2.3.5 其他影响因素分析	40
参考文献	42
第 3 章 船舶机械设备抗冲击的基本原理和工程应用	43
3.1 船舶设备的动力学模型	43
3.2 冲击响应的静态分析法	44
3.3 单自由度和两自由度线性系统计算模型分析	48
3.3.1 单自由度线性系统的计算	48

3.3.2 两自由度系统的计算	50
3.4 动态设计分析方法	52
3.4.1 一维 DDAM 方法	53
3.4.2 简化的单向谱分析方法	54
3.4.3 三维 DDAM 方法	59
3.5 DDAM 分析法在柴油机冲击响应仿真中的应用	61
3.5.1 基于 Abaqus 软件的柴油机冲击响应求解	61
3.5.2 基于 Algor 软件的柴油机固定件冲击响应求解	71
3.6 设备抗冲击计算中的非线性因素	74
参考文献	76
第 4 章 柴油机冲击响应时域分析方法及应用	77
4.1 柴油机多柔体运动——冲击耦合分析技术	77
4.1.1 柴油机曲柄连杆机构运动学及动力学传统算法	77
4.1.2 基于多柔体动力学的机械结构动力学建模	80
4.1.3 多柔体机构动力学的有限元求解法	86
4.1.4 时域分析方法的应用过程	87
4.2 某 A 型柴油机冲击响应时域分析应用实例	89
4.2.1 某 A 型柴油机多柔体动力学建模	89
4.2.2 柴油机动力学仿真分析	99
4.2.3 柴油机多柔体运动——冲击耦合动力学仿真	100
4.3 某 B 型柴油机冲击响应时域分析应用实例	104
4.3.1 某 B 型柴油机多柔体动力学建模	104
4.3.2 柴油机动力学仿真分析	113
4.3.3 柴油机多柔体运动——冲击耦合动力学仿真	116
4.3.4 工作应力与冲击响应的耦合关系分析	124
4.3.5 横向冲击响应分析	129
4.4 柴油机冲击响应仿真结果的验证方法	130
4.4.1 试验与仿真结果中冲击加速度响应频谱特征分析	130
4.4.2 基于冲击谱的强度特征分析	132
4.4.3 仿真和试验结果比较	132
参考文献	135
第 5 章 柴油机力传递结构——螺纹连接结构的冲击分析	136
5.1 螺纹连接结构动力学研究概述	136
5.1.1 螺纹连接动力学特性的研究热点	136
5.1.2 动载荷下螺纹连接结构的经典模型	138
5.2 螺纹连接结构受力分析和柔度计算	141
5.2.1 螺纹连接结构的特点及设计要求	141
5.2.2 螺纹连接结构的受力分析及参数	142
5.2.3 双弹簧模型的组合柔度	149

5.2.4 冲击柔度与静柔度的关系	150
5.3 螺纹连接结构抗冲击建模方法研究	154
5.3.1 轴向冲击载荷下螺纹连接结构受力	155
5.3.2 螺纹连接结构预紧力计算	156
5.3.3 接合面分离校核及螺纹连接结构的非线性模型	158
5.3.4 径向冲击载荷下螺纹连接结构抗冲击计算	163
5.4 某 A 型柴油机机脚螺纹连接结构的抗冲击计算实例	164
5.4.1 模型参数计算	165
5.4.2 接合面临界分离力计算与螺纹连接的非线性模型	168
5.4.3 刚性安装柴油机单自由度模型的计算示例	169
5.4.4 弹性安装柴油机单自由度模型的计算示例	174
5.4.5 提高轴向冲击下机脚螺栓抗冲击能力的措施	179
5.4.6 机脚螺纹连接结构轴向冲击计算方法	181
5.4.7 径向冲击载荷下机脚螺栓抗冲击计算	182
参考文献	184
第 6 章 柴油机力传递结构——油膜润滑的冲击分析	185
6.1 柴油机油膜润滑的基本原理	185
6.1.1 转子类轴承静载荷下振动方程	185
6.1.2 柴油机主轴承润滑原理	191
6.2 柴油机主轴承润滑结构冲击动力学分析	206
6.2.1 冲击刚度	206
6.2.2 柴油机主轴承冲击下的振动方程	206
6.3 主轴承油膜冲击刚度仿真计算及试验验证	210
6.3.1 简易式落锤冲击试验机的冲击载荷	210
6.3.2 转速 150 r/min 时油膜冲击刚度仿真研究及试验对比	211
6.3.3 转速 400 r/min 时油膜冲击刚度仿真研究及试验对比	214
6.3.4 转速 500 r/min 时油膜冲击刚度仿真研究及试验对比	216
参考文献	220
第 7 章 耦合力传递结构的多体系统传递矩阵法	221
7.1 计算多体系统动力学中引入 DTTMS 的混合算法研究	221
7.1.1 概述	221
7.1.2 混合算法研究	224
7.2 使用混合算法的螺栓连接结合面建模方法研究	225
7.2.1 螺栓连接结合面的多体系统离散时间传递矩阵分析	226
7.2.2 使用混合算法对柴油机缸盖-机体螺栓连接结合面建模	227
7.3 螺栓连接结合面参数识别	234
7.3.1 缸盖-机体螺栓连接结构跨点频响函数测量	235
7.3.2 以缸盖-机体为例的组合结构螺栓连接结构有限元建模	240
7.3.3 缸盖-机体螺栓连接结合面特性参数识别	243

7.4 多体动力学中螺栓连接结合面建模方法的应用实例	250
7.4.1 结合面对缸盖振动的影响	251
7.4.2 机脚受力分析	253
7.5 结合数值计算法的主轴承润滑模型及应用	255
7.5.1 结合数值算法的滑动轴承多体动力学建模方法	256
7.5.2 曲轴主轴承弹性流体润滑模型及力传递特性分析	259
7.5.3 曲轴-轴承系统动力学特性分析	265
参考文献	270
第8章 船舶柴油机的冲击试验	271
8.1 冲击试验机	271
8.1.1 冲击波形及简单波形的产生方法	271
8.1.2 国内外冲击试验机的发展概况	275
8.2 柴油机主要连接结构的冲击试验	282
8.2.1 螺纹连接结构的冲击试验	282
8.2.2 柴油机主轴承油膜冲击试验	288
8.3 柴油机实船爆炸冲击试验实例	306
8.3.1 实船爆炸试验测试方法	306
8.3.2 柴油机冲击响应的试验结果及分析	312
参考文献	319
第9章 船舶柴油机的冲击极限载荷	320
9.1 设备冲击极限载荷的定义及评估方法	320
9.1.1 设备冲击极限载荷的定义	320
9.1.2 冲击极限载荷的评估方法	322
9.1.3 设备冲击极限载荷试验评估的案例	324
9.1.4 基于拉伊达准则的冲击极限载荷计算	326
9.2 柴油机冲击极限载荷及其抗冲击性能改进	327
9.2.1 柴油机的冲击薄弱环节分析	328
9.2.2 某B型柴油机冲击极限载荷分析实例	330
9.2.3 柴油机抗冲击性能改进措施	332
9.3 设备抗冲击能力可靠性分析的探讨	335
参考文献	338

第1章 绪 论

船舶在海上面临空中和水中兵器的威胁,承受的爆炸形式有接触性和非接触性两种,由此产生了船舶抗爆和抗冲击问题,主要包括四个方面:爆炸载荷、爆炸载荷与船体结构的相互作用、船体结构的冲击动响应和损伤、船用设备和系统的冲击动响应和损坏^[1,2]。接触性爆炸形成高强度的局部破坏,虽然波及部分舱内设备,但大部分能量消耗于船体结构的损伤,严重的情况下使船体进水,甚至沉没;相反,非接触性爆炸虽然很难使船体结构出现大的破口而沉没,但其冲击作用遍及全船,影响范围大于接触性爆炸。尤其是水下非接触性爆炸,由于水的压缩性小、密度大,将使大面积的船体受到水下压力脉冲的冲击,往往造成船员难以自行修复的设备损伤,使船舶丧失生命力和战斗力。现代兵器特别是水中兵器,爆炸威力越来越大,为非接触性爆炸损伤提供了更好的物质基础,非接触性引信的广泛应用也使船舶遭受非接触爆炸的比例出现较大幅度的上升。非接触性爆炸对船用设备的冲击损伤是设备设计、制造和使用部门十分关注的问题之一,世界船舶发展大国都在大力开展船舶抗水下非接触性爆炸的研究工作,突出解决船用设备的冲击安全与防护问题。

柴油机在船舶上广泛用于推进主机和电站原动机,其可靠性对于船舶生命力的重要性不言而喻,研究柴油机的冲击响应特性有助于在柴油机设计阶段提高其抗冲击能力。在船舶设计和建造过程中,一旦明确并掌握了柴油机抗冲击性能的指标参数,即可进行柴油机的冲击隔离设计及定量优化。在船舶使用过程中,也可以进一步明确其安全使用范围,并制订相关损害防治预案,提高船舶的生命力。

1.1 水下非接触性爆炸作用下船舶的抗冲击性能

水下非接触性爆炸通过冲击波和气泡脉动的方式传递到船舶壳体,引起船体冲击振动,可能造成船体结构损伤,冲击载荷传递至船舶系统、设备和人员,又将造成全船性的抗冲击问题。因此,对于船舶而言,其抗冲击性能包含船体结构抗冲击性能、船用设备及系统的抗冲击性能和人员的冲击防护三类。另外,提高船舶的抗冲击性能无疑会增加船舶设计、建造和使用维护的成本和复杂性,甚至影响船舶其他方面的性能。为此,必须重视船舶的抗冲击性能研究,在深入研究船舶抗冲击性能的基础上,实施最佳的船舶抗冲击设计方案。

1.1.1 水下非接触性爆炸

物质变为高温高压气体的化学反应称为爆炸,该反应非常快,并伴随着反应过程释放大量的热,通常,反应后的气体温度高达几千摄氏度,而压力可达几万个大气压,因此,爆炸可以产生非常大的威力。炸药在水中爆炸的初期,瞬间产生爆炸性气体物质,其体积与凝固态炸药的体积相当,具有很高的温度和压力。在内部压力的作用下,爆炸产生的气体迅速膨胀,形成气泡,气泡周围的水,具有很高的密度和很小的可压缩性,气泡内部的高压将驱使周围的流体以

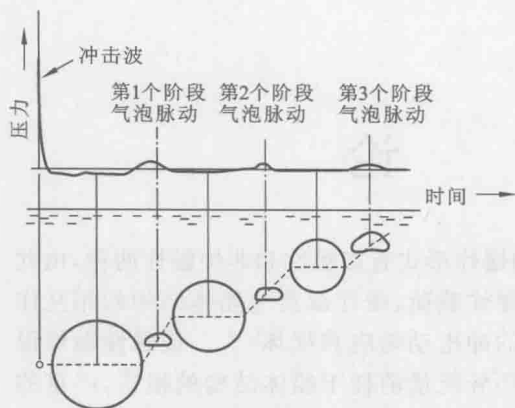


图 1.1 典型的水下爆炸过程

小于声速的速度向外扩散运动(即滞后流)。由于惯性的作用,气泡将过度膨胀,同时其内部压力减小,直至占外部流体静水压很小的一部分,气泡表面的负压差使气泡的膨胀运动停止,并使气泡产生收缩(即坍塌)运动,收缩过程由流场中周围流体静压力驱动,该过程将会继续直至不断增加的内部气泡压力将该过程瞬间逆转过来。气体和水的弹性特性为气泡振荡提供条件,学术上将该过程称为气泡脉动,直至破裂。气泡排开一部分密度比内部气体大的流体,排开的流体重量远远超过了气泡内部的气体重量,这就提供了浮力,浮力使气泡向上移动。由浮力及重力作用产生的气泡运动及其向上迁移的过程,如图 1.1 所示。对于这一具有四个波峰的冲击作用,其特点是爆炸瞬间冲击波压力值达到最大,然后气泡压力衰减下降^[3]。

水下爆炸脉动气泡的特点是:①脉动气泡能产生很高的压力,其幅值为冲击波压力的 20% 左右;②气泡脉动是空中爆炸所没有、水下爆炸所特有的现象,其持续的时间几乎小于 1 s。

由气泡脉动形成的第二次冲击波的瞬间压力,与第一主波比较,具有很平缓的峰值,其最大的压力峰值仅为主波峰值的 10%~15%。但是,当爆炸点离船舶比较近时,第二次冲击波对船舶壳体的结构强度、应力方面的影响还是十分明显的,所以,还要对船体承受第二次冲击波的强度进行深入的、具体的评估。

综合国内外研究情况^[4],水下非接触爆炸对船舶的影响分为两个明显的阶段:第一个阶段是冲击波引起的持续时间短而加速度很大的运动,以高频响应为主要特征,它是引起船体变形和设备冲击损坏的主要原因。实船水下爆炸冲击试验结果表明,船舶各典型水平部位的冲击动响应,在初期的几毫秒至几十毫秒内,加速度值很大,船用设备的损坏多数是发生在这一阶段。第二个阶段是气泡脉动引起的较慢的大位移运动,以低频响应为主要特征,对低频结构和低频安装的设备有较明显的影响。

受到气泡脉动、流固耦合、自由液面和海底反射等条件的影响,水下非接触性爆炸的毁伤作用还将显著增加。水下冲击波往往造成局部损伤,而现代船舶的设计有足够的强度储备来抵抗局部损伤。因此,水下冲击波一般不会造成船舶的沉没。但是气泡不同,气泡运动驱使周围大面积流体的运动,形成滞后流,气泡脉动产生脉动压力,滞后流及脉动压力可对船舶造成总体损伤。如果船舶的固有频率与气泡脉动频率一致,那么会引起结构的鞭状运动效应,从而加剧对船舶的损伤作用,同时,船体结构还将遭受气泡坍塌形成的高速射流的破坏作用,危及船舶的总纵强度,严重时船体将出现拦腰折断使船体很快沉入水中,其破坏过程如图 1.2 所示。自由液面会产生水锤效应,底部又会产生反射波,当水域比较浅时,海底反射和自由液面效应都不能忽略,对直接波又会产生作用,增加了非接触性爆炸分析的复杂性。

国内浮动冲击平台水下爆炸试验中,研究弹簧片应变曲线与水下爆炸作用外力对应关系时,发现了水下爆炸气泡膨胀产生的滞后流与船舶设备冲击振动响应有重要联系,并采用理论和实验数据证实了“水下爆炸滞后流使船舶产生的位移是安装频率为数十赫兹的船舶设备振

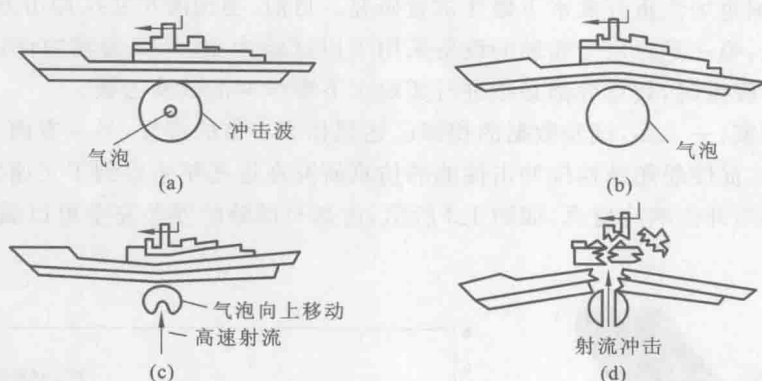


图 1.2 水下非接触性爆炸对船体的冲击作用

动的主要能源”，而冲击波的能量对船舶设备冲击振动的贡献则相对较弱。水下爆炸气泡对船体总体响应的影响研究又发现水下爆炸气泡脉动载荷对船舶造成严重的总体损伤，激起船体的鞭状运动。总而言之，水下爆炸气泡载荷对船体结构和船用设备的破坏作用是不可忽视的。

1.1.2 船舶的抗冲击性能

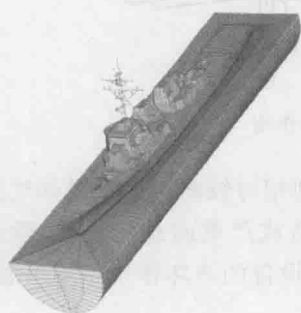
冲击对船舶造成的主要危害有：①结构件过应力引起永久变形、松脱或断裂，造成结构件强度破坏；②设备与设备、设备与结构相对运动引起碰撞、挤压，造成设备或结构的损伤与破坏，如严重的蒸汽泄漏、电路短路、设备或构件的坠落等；③系统原有作用力平衡的破坏，使设备性能变坏或机械系统功能损坏；④冲击波超压和动压使人体器官、骨骼损伤。因此，抗冲击指标是一项涉及全船各个环节的总体指标，即全船的构成要素都必须达到规定的抗冲击指标及要求。船舶抗冲击性能研究的内容十分丰富，可分为船体抗冲击技术，设备、系统及管路抗冲击技术和人员的冲击防护等方面^[5,6]。

船舶的结构形式和性能关系到船舶结构损伤模式，不同船体构件的爆炸变形性能吸收特性不同，从而决定了船舶抗冲击性能差异，并直接影响船上设备的冲击响应预报和防护控制功能。为此，国内外广泛开展船体结构的抗冲击性能研究，使得结构性能效果好、材料轻、制造工艺简单，并通过结构设计的局部改进，减少损伤，提供更好的抗冲击能力。该领域需要研究水下爆炸、冲击作用以及船舶结构动态响应等一系列理论、仿真和试验课题，水下爆炸载荷及其传递、水下爆炸流固耦合计算方法、水下爆炸载荷作用下的船舶结构动态响应、船用设备冲击环境预报方法、船舶抗冲击性能和抗冲击防护设计技术、水下爆炸试验测试分析技术等问题都是研究的重点和热点。

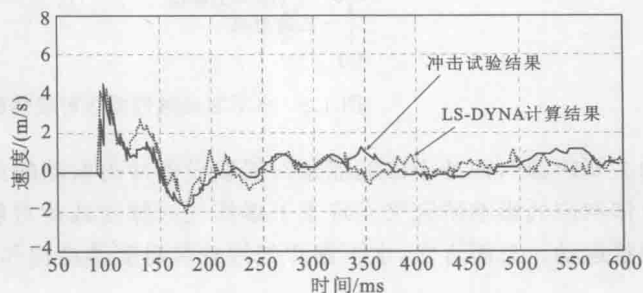
水下爆炸过程非常复杂，只有极少数问题能通过建立一个精确的数学模型而获得解析解。因此，开展水下爆炸冲击试验成为研究船舶结构抗冲击性能的重要手段。20 世纪 80 年代以来，国际上积极开展水下爆炸的试验研究，甚至进行一些实船的爆炸冲击测试研究工作。美国就是以水下爆炸试验为主要研究手段的代表性国家，早在第二次世界大战期间及第二次世界大战后，美国就对船舶的抗爆、抗冲击问题进行了系统的研究，还在比基尼岛进行了多次规模巨大的实船核爆炸效应试验研究，取得了很多成果。1956 年出版的《水下爆炸研究》1~4 卷汇集了大量的船舶抗爆研究资料，从爆炸载荷到船舶的损伤都进行了系统的研究。随着试验

技术的发展,美国更加注重开展水下爆炸试验研究。目前,美国海军在抗冲击方面采用了两项独特的强制措施:第一是对用于船舶的设备采用了以试验为主、计算为辅的评估方法;第二是规定每推出一新舰型时,其首舰都必须进行实船水下爆炸冲击试验考核。

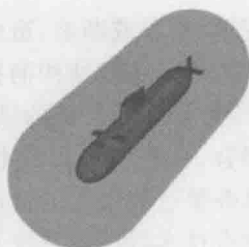
对于欧美国家,一方面,试验数据的积累已达到相当丰富的程度,另一方面,计算机仿真技术得到飞速发展,促使船舶结构抗冲击性能的仿真研究在近些年来得到了飞速发展。例如,实现了整船的建模与冲击响应仿真,如图 1.3 所示,仿真与试验的误差完全可以满足工程应用的需要^[7]。



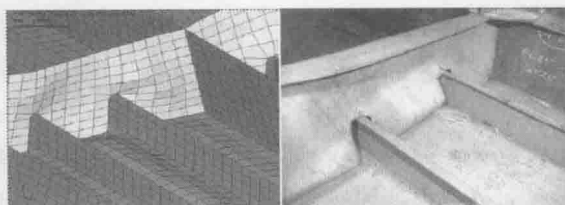
(a) 水面船舶模型



(b) 有限元仿真结果与试验对比



(c) 潜艇模型



(d) 有限元仿真结果与试验对比

图 1.3 仿真模型及结果验证

船舶设备的抗冲击性能要求与设备的特性、在船舶中安装部位和安装方式等因素有关。例如,推进柴油机、导航设备和船舶雷达等设备的冲击环境和冲击要求有很大不同。一般情况下,船用设备通过市场采购的方法供应,有时这些设备在设计过程中并未考虑抗冲击性能。因此,国内外制定了相应的行业标准,船舶设备必须通过冲击试验或动力学校核计算以确定是否满足特定船舶的设计要求,不能满足抗冲击要求的,就需要进行改进,或通过加装冲击和振动隔离器达到减小设备冲击载荷的方式来满足装船条件,常见的隔离器如图 1.4 所示。



(a) SU型抗冲器



(b) 钢丝绳隔振器



(c) 橡皮隔振器



(d) 空气弹簧

图 1.4 振动隔离器

船舶系统由多种设备通过轴、液体和气体管路等方式连接组成,其冲击响应不同于单个设备,一方面,增加了船舶设备冲击输入的渠道,另一方面,系统中若存在抗冲击能力短板的设备,还需要进行系统的抗冲击性能优化,为此,需要通过分析船舶系统的冲击动力响应,校核船舶系统的冲击安全性。推进轴系就是一种典型的需要进行抗冲击性能校核的船舶系统,如图 1.5 所示^[8]。

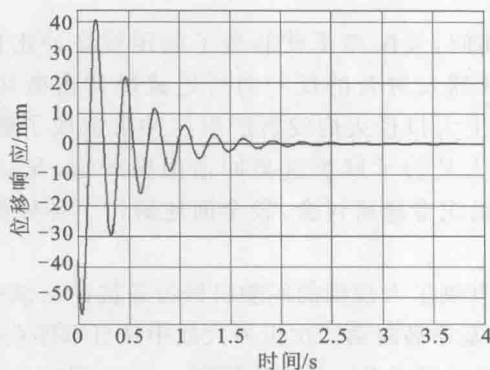


图 1.5 推进轴系及螺旋桨冲击位移响应

1991 年美国海军“普林斯顿”号船在科威特附近浅海海域中为联军扫雷部队提供保护时,先后触发了两枚水雷。剧烈的水下爆炸使得在靠近船尾的 472 号肋骨处产生严重损伤,消防总管和油箱破裂,损管人员不得不在从管路中泄漏出来的油和水工作中^[9]。而且,冷却水管路系统破裂导致船舶三个舱室的电子设备无冷却水而停用,船舶管路系统抗冲击性能的重要性非常突出。在时间上,管路系统的抗冲击性能贯穿船舶设计、研制、建造及使用整个寿命周期;在空间上,管路系统分布于不同舱室和安装位置,而且安装过程随机性强,其冲击性能难以通过系统试验得到评估,是船舶抗冲击性能评估技术中的难题之一。

在实船爆炸试验和实战中还发现,非接触爆炸会引起人员失稳、抛离和碰撞,导致人体骨折、体内出血和器官破裂等直接冲击伤,甚至死亡。由于人员受伤不能在短时间内恢复,大大降低了整船的损管能力和综合抗冲击能力。因此,国内外高度重视人员的抗冲击性研究,并开展了试验和仿真计算工作,如图 1.6 所示^[10],研制了相应的冲击防护装具,甚至对船舶舱室甲板提出了人员冲击适应性要求。

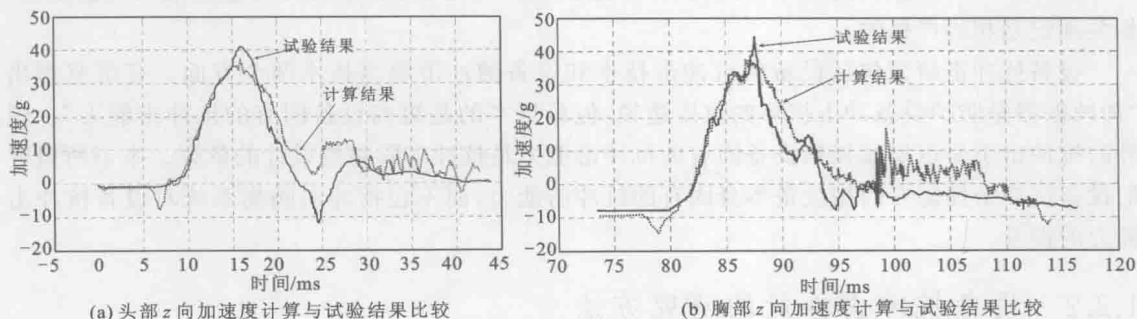


图 1.6 坐姿假人的冲击响应计算与试验

综上所述,船舶抗冲击是一个综合性课题,涵盖水下爆炸、冲击载荷传递、船体结构、系统、管路、设备的抗冲击性能和人员的冲击防护研究,分属于不同学科的多种工程领域。

1.2 水下非接触性爆炸冲击作用下船舶设备的抗冲击性能

1.2.1 船舶设备抗冲击性能研究的重要性

早在第一次世界大战期间,美国海军就制造了船用设备冲击试验机,用来考核船舶机械及电器设备抵抗由自身武器发射时的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口径火炮发射产生的冲击造成了舰载电气设备和机械设备出现故障,发生损坏。技术人员为了解决这类冲击损伤问题,开始研究冲击响应和冲击隔离问题,1943年,美国海军组织专题研讨会,较全面地研讨了各种船舶上的设备的冲击防护问题^[2]。

1946年以后,西方国家开展了大规模的船舶机械设备抗冲击试验和冲击隔离设计理论的研究。美国海军在太平洋比基尼岛对第二次世界大战中从日本俘获的大量船舶进行了一系列实船水下爆炸冲击试验,并且进行了系统的理论研究。1947年正式召开第一届冲击和振动研讨会,并从1949年9月第13届起,美国国防部成为这一研讨会的主要资助者。此后,出版了《船舶设备抗冲击设计者指南》等一系列关于船舶设备抗冲击的专著及论文。

荷兰、法国等西欧国家从英国海军在马岛战争中船舶的战损情况,总结认识到现役船舶的抗冲击能力不能适应现代战争的要求,曾暂时冻结了原来的海军装备建造计划,纷纷制订了新的船舶设备抗冲击标准,具有代表性的为德国1985年颁布的舰艇建造规范中的《BV043/85冲击安全性标准》和美国1989年颁布的《MIL-S-901D规范》。虽然船用设备的冲击标准不同,但所有的海军强国都要求装船设备必须通过冲击考核。德国的BV新标准大幅度提高了船舶及其设备的抗冲击要求,美国的MIL新标准要求重量小于181 t的装船设备都要进行冲击试验考核,潜艇上的重型设备还要求在水下冲击平台上进行试验考核。北大西洋公约组织对所有主要的装船设备进行了大量的冲击试验,得到了它们在不同冲击条件下的损伤概率,并建立了相应的数据库,为船舶设备的抗冲击性能评估提供了损坏模式和验证资料。我国国军标也对船舶设备的抗冲击性能提出了动力分析方法和试验考核要求。另外,对主要动力设备提出冗余和备份的要求。例如,将相同功能的动力设备尽可能地分开布置,尤其是分舱布置,从而降低同时受到损伤的概率。由此可见,船舶设备的抗冲击要求是十分重要的战技指标,其相关规定是相当严格的。

设备抗冲击研究包括设备的抗冲击技术和设备的冲击隔离技术两个方面。有研究指出“加减振器是防护设备冲击损坏的重要途径,但最根本的是提高设备固有的抗冲击能力”。国外的抗冲击手册也反复提到设备固有的抗冲击能力是抗冲击隔离器设计的依据。本书所研究的设备抗冲击性能专门指设备本身固有的抗冲击能力,而不包括冲击隔离系统对设备抗冲击能力的提升。

1.2.2 设备抗冲击性能的研究方法

设备本身抗冲击性能研究有试验和仿真计算两条途径,这两条途径是相互补充的。试

验研究的方法是一种最直接可靠、最具有说服力的方法,但需要昂贵的测试仪器和传感器等硬件,试验费用高。随着计算机技术的发展,仿真在设备抗冲击响应的计算方面发挥的作用越来越大,不仅可以用来评估船用设备设计方案,而且还可以配合试验获得一些仅靠试验不能得到的实用性强的技术成果。例如,可给出结构上的优化设计改进方案、多次冲击后设备使用寿命和维修时间的科学决策等。基于仿真技术形成的一套设备抗冲击特性分析评估技术可用于校核设备抗冲击能力,可减少抗冲击试验次数,节省抗冲击性能研究与评估经费。

经过几十年的发展,设备抗冲击性能计算方法有三种:静态等效法、动力设计分析法(又称为弹性冲击法)和时域动态分析法。

静态等效分析法假定设备上每一点都承受相同的瞬时加速度,所以可以应用达朗伯原理,将一个动力学问题变成静力学问题来处理。遭受冲击载荷时设备上各部分的加速度均与基础加速度相同,由这一加速度所产生的惯性力作为设备的冲击作用力,通过静力学计算得到设备的应力和变形,再考虑设备正常运转产生的应力,两者合成后的应力应小于允许的设计应力。

静态等效分析法的优点是计算方法简单易行,其不足是没有考虑设备的动力特性(自振频率、振型与结构阻尼等),当一阶响应是设备的主要破坏因素时,采用静态等效分析法具有较高的精确度,当高频破坏是设备的主要损坏因素时,静态等效分析法并不适合,而冲击作用中高频的作用也很重要,所以计算结果与实际情况不能较好地吻合。尽管如此,对于刚度较大且动力特性难以确定的设备,根据这一方法所算得的冲击作用结果仍然具有较高的参考价值。

动力设计分析法(Dynamic Design Analysis Method, DDAM)建立在模态分析理论的基础上,克服了静态等效分析法的不足。如果已知系统的自振周期,就可利用加速度响应谱曲线或相应公式,确定出系统的响应加速度,进而求出冲击作用。因为多自由度系统的振动可以分解为若干振型的叠加,而每个振型又可以转化成为一个等效单自由度系统来考虑,这样任何设备对于冲击的响应均可作为若干个单自由度系统响应的叠加来求解。随着计算能力的提高,DDAM 也逐渐完善,解决了密集模态现象、多向响应分析、动力学缩减技术、模态选择标准等问题。DDAM 编制的计算程序甚至成为了商用软件的一个模块,Algor、Nastran 和 Abaqus 等都内置了这一模块,ANSYS 也可做冲击谱计算。

DDAM 在解决一些冲击的实际问题中显示出良好的效果。Huber 公司的 Dominic Lorino 利用 Algor 中的 DDAM 模块计算了两栖攻击舰后部的一套液压操纵设备的冲击响应,如图 1.7 所示,获得了很好的效果。刘建湖采用 DDAM 计算的方法对某型潜艇的推进电机进行了抗冲击计算^[2],建立了 4 个分析模型,每个模型具有 4000 多个 6 自由度节点,得到了一些有用的结论。

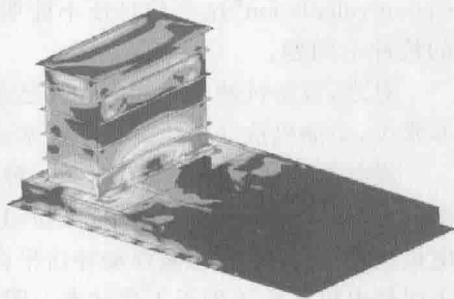


图 1.7 液压油箱及结构 DDAM 计算结果

DDAM 虽然可以分析高阶的损坏模式,比静态等效分析法前进了一大步,但它仍然具有较大的局限性。一是只能分析线弹性安装的设备;二是只能分析设备的线弹性损坏;三是不能考虑冲击载荷在设备中的瞬态波动效应;四是不能考虑邻近设备

和船体对冲击输入的影响。

时域动态分析法能够解决上述问题,它采用实测的时间历程曲线作为设备的输入载荷,选择一种时间积分方法对设备在时间域上进行瞬态分析。目前,虽然 DDAM 仍然被大多数国家作为船舶设备抗冲击性能的主要设计方法,但时域动态分析法正成为发展的趋势。

James 利用 ANSYS 软件进行了计算机主板的抗冲击建模和求解,在脉宽 9 ms、峰值 45 g 的半正弦冲击输入下,某测点加速度响应计算值和测量值的对比表明计算比较成功,如图 1.8 所示。国外还进行了硬盘受冲击的仿真和试验研究。美国海军水面战中心的 Erwin 利用有限元软件对两级式 Gifford 低温制冷器进行了冲击计算。计算过程中假定柱塞在最下方,将设备简化为一个静止的结构来计算。Oesterreich 利用有限元建模及瞬态分析法解决了计算机支架是否满足 MIL-901D 要求的问题。

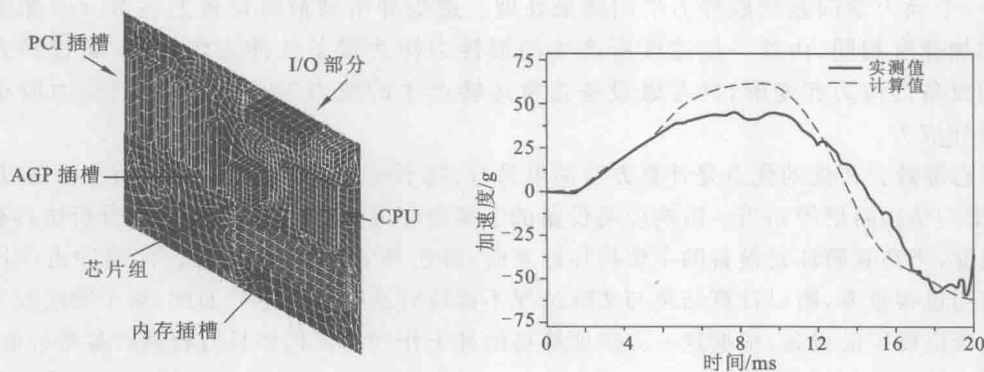


图 1.8 计算机主板的冲击计算

荷兰等国家要求设备制造商在设备进入试验前都要提供设备本身抗冲击能力的校核计算资料,以保证冲击试验能一次性通过,节省试验经费。美国虽然没有明文规定,但是为了节省经费,很多制造商也都进行设备抗冲击能力的校核研究。美国海军比较常用的柴油机是 Colt-Pielstick 公司的 PA6B STC engines 柴油机,Colt-Pielstick 公司明确提到其柴油机具有抗冲击性能,可见柴油机抗冲击性能是一个受到普遍重视的问题。该公司还提到其工程部有能力解决包括抗冲击计算在内的综合和交叉问题。但是,其网站上给出的“shock resistant calculation”这个信息还不能明确该公司研究的是柴油机本身的抗冲击还是减振系统的抗冲击问题。

总之,设备抗冲击性能的计算已逐渐向时域动态分析方向发展,复杂机械设备的研究文献非常少,柴油机抗冲击仿真评估技术研究具有开创性。

设备制造商将仿真计算作为一种设计和优化手段,更将其作为一种考核前的技术摸底,以争取一次通过试验,节省费用。Colt-Pielstick 公司的 12PA6B 柴油机作为 LHD-8 舰的柴油发电机组在 Hi-test 公司做浮动冲击平台试验,如图 1.9 所示。浮动冲击平台上安装了排气管,表明柴电机组应该处于工作状态。图 1.9(b)是 16PA6B 作为主机的抗冲击试验。可见,柴油机抗冲击性能评估在国外确实是作为一项重要工作在抓,但是很难见到详细论述的试验情况。例如,如何测量、如何检验柴油机的完好性等。其他设备冲击试验的一些细节可以从有关文献中看到。又如,浮动冲击平台试验中加速度传感器的布置和安装方式,如图 1.10 所示,对了解柴油机抗冲击试验有一定帮助。