

冰载荷作用下船舶结构 动态响应及损伤机理

Structural response and damage mechanism
of the ship under the action of ice load

张健 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

冰载荷作用下船舶结构 动态响应及损伤机理

Structural response and damage mechanism
of the ship under the action of ice load

张健 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书以极地航区航行的商船为研究对象,提出了基于概率分布的船—冰碰撞概率计算方法;研究船—冰碰撞数值仿真模型化技术,提出了用于有限元数值仿真的冰体材料模型;利用数值仿真方法计算多种工况下船体的结构响应和损伤模式,探究船舶与冰体的相互作用,并开展模型试验对仿真结果进行验证;开展船舶与冰排碰撞研究,获得船舶的结构动态响应规律;应用温度场—应力场的相互关系,获得船舶在冰挤压作用下的动态响应及损伤模式;总结船体结构在各种冰载荷(船与浮冰碰撞载荷、船与冰排碰撞载荷、冰体挤压载荷)下的破坏模式,进而获得船舶在冰载荷下的损伤机理;最后对冰撞载荷作用下的新型夹芯抗冲击结构设计进行了初步研究。

本书读者对象主要为船舶抗冲击领域、冰体载荷领域、极地船舶设计领域的学者、研究生及船舶设计人员。

图书在版编目(CIP)数据

冰载荷作用下船舶结构动态响应及损伤机理/张健著.

—北京:国防工业出版社,2015.10

ISBN 978-7-118-10447-9

I. ①冰… II. ①张… III. ①冰—作用—船舶结构—动态响应—研究 ②冰—作用—船舶结构—损伤(力学)—研究
IV. ①U663

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 213553 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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 插页 6 印张 10 $\frac{3}{4}$ 字数 230 千字
2015 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 35.00 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

前 言

随着全球气候变暖,冰山融化速度加快,北极航道的开通指日可待。北极航道的开通将有助于我国减少对常规航线的依赖、降低航运安全风险,同时还可减少航运成本。从上海到汉堡,通过北极航道比传统的马六甲海峡—苏伊士运河航线缩短航程约45%。此外,开发北极丰富的油气资源可以为我国油气安全战略提供新的保障。因此,北极开发及北极航道的开辟将成为我国新的战略发展方向。然而,我国对于北极地区不具有地缘优势,如果不能在科技上迅速领先,在未来将丧失北极地区的话语权,在新的世界格局中处于十分不利的地位。

覆盖于北极海域的冰山及冰原的融化,一方面使新航道的开辟成为可能,另一方面增加了航道内浮冰和流动冰山的数量,对航行于该海域的船舶构成极大威胁,使船与浮冰发生碰撞事故的概率大大增加。虽然我国是一个近北极国家和世界第一造船大国,但在极地船舶核心关键基础问题的研究方面还很薄弱,是制约我国极地船舶研发建造能力提升的重要原因,这一问题已经引起我国政府和学术界的高度重视。2014年6月工信部发布的《高技术船舶科研项目指南》中将“极地船舶与设备开发”作为科研专项进行了部署。因此,开展船舶在船—冰碰撞载荷作用下的损伤机理研究,对于提高极地船舶的结构安全性具有重要的科学意义,是极地运输船舶亟待解决的核心关键基础问题。

本书以冰载荷(船—冰碰撞载荷、冰体挤压载荷)下的船体结构响应为研究对象,通过对冰载荷下船体结构的响应理论分析,利用数值仿真方法、模型试验方法对船体结构的动态响应进行计算及测量,获得船舶在冰载荷作用下的失效模式及损伤机理,研究成果希望对于提高极地船舶的抗冲击性能及抗冲击设计具有一定的借鉴作用。

本书在撰写过程中,得到了中国船舶科学研究中心万正权研究员的悉心指导和大力支持,江苏科技大学尹群教授、嵇春艳教授给本书提出了诸多宝贵的建议,本书的出版受到了江苏科技大学船舶与海洋工程学院、江苏高校高技术协同创新中心的资助,在此一并向他们表示衷心的感谢!此外,感谢张充霖、张森溶、陈聪、何文心、吴胜伟、刘海冬、韩文栋等对于本书所做的贡献。

由于国内外在冰撞载荷及冰挤压载荷下的船体结构损伤机理方面的研究才刚刚起步,相关研究资料也非常缺乏,以及本人水平所限,本书难免存在很多疏漏之处,敬请各位读者批评指正。

目 录

第1章 绪论	1
1.1 船—冰碰撞风险分析研究意义	1
1.2 船—冰碰撞理论	5
1.3 船—冰碰撞研究方法	10
第2章 碰撞概率计算方法及影响因素研究	16
2.1 引言	16
2.2 船—冰碰撞概率计算方法	16
2.2.1 问题的提出	16
2.2.2 海域的选择	17
2.2.3 问题的简化	18
2.2.4 船—冰碰撞概率计算模型	19
2.3 船—冰碰撞概率的数值算例	25
2.3.1 船舶与浮冰的分布函数	25
2.3.2 船—冰碰撞概率计算程序	26
2.3.3 各参数对船—冰碰撞概率的影响	27
2.3.4 结果分析及结论	33
2.4 小结	34
第3章 船—冰碰撞数值仿真技术研究	35
3.1 引言	35
3.2 基于 MSC. Dytran 的船—冰碰撞材料模型	35
3.2.1 船体材料特性和失效准则	35
3.2.2 冰体材料特性和失效准则	38
3.3 船舶的有限元模型处理技术	44
3.3.1 船舶概况	44
3.3.2 结构简化	46
3.3.3 网格划分	46
3.3.4 接触定义	47

3.4	冰的有限元模型处理技术	48
3.4.1	冰材料参数	48
3.4.2	冰体碰撞有限元仿真研究	50
3.5	小结	54
第4章	船—冰碰撞结构响应研究	55
4.1	引言	55
4.2	船—冰碰撞性能评判指标	55
4.3	冰体形状对船—冰碰撞的影响	56
4.3.1	冰体的形状	56
4.3.2	碰撞方案	57
4.3.3	船、冰质量控制与附连水质量	58
4.3.4	碰撞损伤变形	59
4.3.5	撞击船速度变化	63
4.3.6	碰撞力	64
4.3.7	能量吸收	67
4.4	冰体质量对船—冰碰撞的影响	73
4.4.1	碰撞方案	73
4.4.2	有限元模型	74
4.4.3	碰撞损伤变形	75
4.4.4	撞击船的速度及位移	76
4.4.5	碰撞力	77
4.4.6	能量吸收	78
4.5	船舶速度对船—冰碰撞的影响	81
4.5.1	速度设置	81
4.5.2	碰撞力	81
4.5.3	动能变化	82
4.6	撞击角度对船—冰碰撞的影响	83
4.6.1	概述	83
4.6.2	有限元模型及碰撞方案	84
4.6.3	计算结果及分析	85
4.7	小结	89
第5章	船舶与冰排碰撞结构响应研究	90
5.1	引言	90
5.2	船舶与冰排碰撞方案设计	90

5.2.1	冰排的形状	90
5.2.2	碰撞模型	92
5.2.3	船、冰质量控制与附连水质量	92
5.3	冰排厚度对船—冰碰撞的影响	93
5.3.1	碰撞损伤变形	93
5.3.2	撞击船舶速度变化	95
5.3.3	碰撞力	96
5.4	冰排运动状态对船—冰碰撞的影响	98
5.4.1	碰撞损伤变形	98
5.4.2	撞击船舶速度变化	100
5.4.3	碰撞力	101
5.5	冰排物理性质对船—冰碰撞的影响	102
5.5.1	碰撞损伤变形	103
5.5.2	撞击船舶速度变化	104
5.5.3	碰撞力	105
5.6	小结	106
第6章	船舶遭冰层挤压结构损伤研究	107
6.1	引言	107
6.2	挤压场景简化	107
6.3	冰层温度场的计算研究	108
6.3.1	数学理论研究	109
6.3.2	有限元方法与运用	110
6.3.3	有限元结果分析	111
6.4	冰层温度应力场的计算研究	113
6.4.1	数学理论研究	113
6.4.2	有限元方法与运用	114
6.4.3	有限元结果分析	116
6.5	船体结构模型以及承载工况	116
6.5.1	船舶有限元模型	117
6.5.2	承载工况研究	120
6.6	船舶结构损伤分析	121
6.7	小结	123
第7章	冰撞载荷作用下新型夹芯抗冲击结构设计研究	125
7.1	引言	125

7.2	夹层板简介	126
7.2.1	金属夹层板	126
7.2.2	复合夹层板	127
7.3	新型抗冲击结构有限元模型	128
7.4	碰撞方案	129
7.5	计算结果及分析	130
7.5.1	碰撞损伤变形	130
7.5.2	碰撞力	131
7.5.3	能量吸收	132
7.6	小结	133
第8章	舷侧板架与冰体碰撞数值仿真及模型试验研究	134
8.1	引言	134
8.2	数值仿真研究	134
8.2.1	模型尺寸及计算方案	134
8.2.2	有限元模型	136
8.2.3	模型材料	137
8.2.4	边界约束与接触定义	137
8.2.5	数值仿真计算结果	137
8.3	模型试验研究	141
8.3.1	试验目的	141
8.3.2	模型制作及试验方案	141
8.3.3	测量系统	143
8.3.4	试验过程	144
8.3.5	试验结果及分析	144
8.4	数值仿真及模型试验结果比较研究	156
8.4.1	最大加速度比较	156
8.4.2	应力值比较	156
8.4.3	变形量比较	157
8.5	小结	158
	参考文献	159

第 1 章 绪论

1.1 船—冰碰撞风险分析研究意义

在全球的海洋中,海冰的分布面积为 3770 万 km^2 ,占地球表面的 7.3%,占全球洋面的 11.8%。如果把冰山分布的地区加进去,则包括流冰在内的海冰面积为 7260 万 km^2 ,占地球表面的 14.2%,占全球洋面的 22.9%^[1]。人类在这些海域的各项活动,不可避免地会遇到海冰问题。近年来,随着中高纬度海域油气资源的开发与利用,由海冰引起的一系列灾害事件日益凸显,越来越受到船舶与海洋工程领域的关注与重视。

历史上由于忽视海冰的潜在威胁和危害,人类为此付出了惨重的代价,各类事故在许多文献中都有记载与描述。海冰的危害形式大致分为:船冰碰撞,封锁港口、航道,堵塞舰船海底门,使锚泊舰船走锚,挤压损坏舰船,破坏海洋工程建筑和各种海上设施,使渔民休渔,船舶积冰。这其中,危害最严重的当属船舶与冰体的碰撞事故。

1912 年 4 月 14 日,号称“永不沉没”的当时世界上最大的豪华客轮“泰坦尼克”号从英国南安普敦驶往纽约途中,在北大西洋纽芬兰海域与大型冰山相撞,船体右舷和冰山底部在碰撞后剧烈摩擦,导致右舷前部吃水线被划出一道 93m 长的口子,最终因水密舱全部进水而沉没。这场震惊世界的灾难造成 1523 人死亡,仅 705 人生还,是 20 世纪以来最为惨烈的一次海难^[2]。图 1.1 为漂浮于海洋中不同形状的冰山。



图 1.1 不同形状的冰山

“泰坦尼克”号沉没事件以来,尽管各国加强了海上巡逻监管,采用高科技雷达设备以及卫星导航系统监测冰山的存在,很大程度上提高了船舶在高纬度海域

2 ■ 冰载荷作用下船舶结构动态响应及损伤机理

的安全航行性能,冰区航行的各类船舶与大中型冰山(海平面以上高度超过 15m,近似质量超过 $2 \times 10^6 \text{t}$)的碰撞事故有所减少,但由于温室效应导致全球变暖,极地冰川融化呈加速态势,许多小型冰山和浮冰群的增多,仍然给船舶航行带来极大的困难和潜在的威胁。由于受风、浪和洋流作用,小型冰山和浮冰很难在碰撞发生前探测到,加之恶劣天气的影响,船舶与冰山在内的海冰的碰撞事故仍时有发生。自由漂浮的冰山约有 90% 的体积沉在水下,深不可测,通常具有尖利的边缘,一旦船只不慎靠近,极有可能损坏船体、引起货物泄漏和环境污染,甚至造成重大人员伤亡,特别是对于在冰区航行而没有针对冰载荷进行结构加强的船舶。表 1.1 为近年来所统计的 12 起船—冰碰撞事故。

表 1.1 近年来的船—冰碰撞事故

时间	位置	事故描述	人员伤亡情况	船体损伤情况
1996 年 7 月 21 日	格丁尼亚前往马尼托巴省丘吉尔	“Reduta Ordona”号与冰山相撞	未知	船艏全面受损,9 月 16 日前停止服役
1995 年 6 月 8 日	北纬 49°09', 西经 55°20'	“UB Prince”号被碎冰所撞击	未知	球鼻艏撕裂,艏尖舱受损
1994 年 1 月 2 日	威廉王子湾,阿拉斯加瓦尔迪兹	“Overseas Ohio”号油轮撞击 4000t 冰山	无	球鼻艏被压扁,压载舱破裂
1994 年 4 月 7 日	从安特卫普至蒙特利尔	“Federal Thames”号散货船遭遇严重冰情	未知	球鼻艏被撞成 3m×0.5m 破洞
1994 年 5 月 4 日	从加拿大魁北克省至挪威	“Eirini L”号撞击海冰	未知	球鼻艏左舷外板形成 30cm 破洞
1993 年 2 月 4 日	蒙特利尔至英国	“OOCLChallenge”号被碎冰所撞	未知	压载舱出现严重裂纹
1993 年 4 月 17 日	蒙特利尔至安特卫普	“Cast Polarbear”号遭遇浮冰撞击	无	船艏和前部严重损伤
1993 年 4 月 28 日	北纬 47°45', 西经 48°30'	“Omikronventure”号油轮与浮冰相撞	无	艏尖舱破裂并产生裂纹
1993 年 9 月 11 日	格陵兰某海峡	CCS 级“Hudson”号撞击冰山	未知	船体被撞出破洞
1991 年 8 月 16 日	阿拉斯加威廉王子湾	“Baltic Sea”号与移动冰山相撞	未知	进入干船坞修理
1990 年 10 月 3 日	北纬 73°48', 西经 78°04'	“Terra Nova”号被冰山所撞	未知	推定全损
1989 年 7 月 6 日	北纬 52°27', 西经 51°13'	“Trave Ore”号被冰山所撞	无	艏尖舱破损

1994年1月,美国“Overseas Ohio”号迎面正撞冰山后,球鼻艏严重破损,艏尖舱也被冰山撞出破洞,如图1.2所示,仅修复破损结构至少耗费了100万美元。时隔两年,1996年7月,“Reduta Ordona”号散货船在前往加拿大的马尼托巴省丘吉尔市时,与冰山发生碰撞,船体前段结构严重损伤,部分舷侧外板和肋骨生成巨大裂纹和划割痕迹,如图1.3所示。



图 1.2 “Overseas Ohio”号遭遇冰山碰撞后的船舶损伤情形

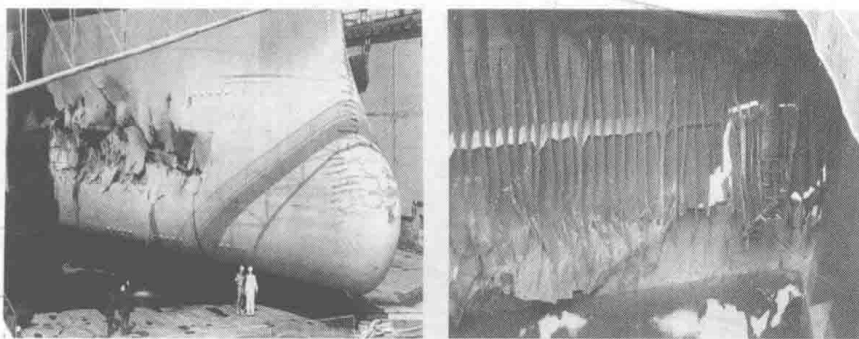


图 1.3 “Reduta Ordona”号与冰山碰撞后的结构损伤情形

然而,碰撞事故的惨烈后果并没有使人类停止对于高纬度海域海洋开发的热情与决心。据美国地质调查局2008年的评估显示,北极圈地区蕴藏着尚未开发的30%的天然气资源和13%的石油资源,被誉为未来的波斯湾。而2010年丹麦的一份研究报告称,目前夏季北极地区的冰量达到史上最低水平,该地区蕴藏着约占全球1/4的能源,其能源开发的北欧和亚太地区最短航线——北极航道的开通将成为迫近的现实。

北极航道是指穿过北冰洋、连接大西洋和太平洋的海上航道,由加拿大沿岸的“西北航道”和西伯利亚沿岸的“东北航道”构成。“西北航道”东起戴维斯海峡和

4 ■ 冰载荷作用下船舶结构动态响应及损伤机理

巴芬湾,向西穿过加拿大北极群岛水域,到达美国阿拉斯加北面,连接大西洋和太平洋,虽然日益完备,但商业上仍不可靠;而“东北航道”,又称北方航道,是指西起西欧和北欧港口,经西伯利亚以及北冰洋邻海,绕过白令海峡到达中、日、韩等国港口。这条神秘的航线,以往一年中大多数时候结着厚厚的冰层,根本没有商船在此通行。但由于近年来全球气候变暖,北极冰川融解加剧,北方航线越发具备在夏季通行商船的能力。2009 年 7 月,两艘德国货船在韩国装货出发,北上穿过了北方航道,并最终抵达目的地荷兰鹿特丹。

中国作为近北极国家,若北方航道能够顺利开通,无疑将促进中国东北地区和东部沿海地区的发展,将使上海到欧洲汉堡的距离缩短约 6400km,从上海到北美洲东岸纽约的海运里程也将缩短约 5500 多千米,与固有的穿越巴拿马运河和苏伊士运河甚至绕道非洲好望角的南方航线相比,无疑将大大缩短航程,节约大笔开支、时间和能源的同时,也将减轻马六甲海峡、苏伊士运河日益严重的拥堵,避开日益猖獗的索马里海盗的威胁,从而大大降低船舶保险费用。中国交通运输部在“十二五”规划中也明确提出,中国在未来将致力于开辟“北方航道”,以缩短中国与欧洲及美洲之间的运输航程、降低运输成本。开辟北方航道将成为中国新的经济增长点和未来战略发展方向。因此,有必要对此课题提前布局,开展相关基础研究,以应对即将到来的机遇及挑战。图 1.4 为北方航道与南方航道对比图。



图 1.4 北方航道和南方航道的对比

气候变暖对海上航行带来的影响是双向的,一方面使北方航道通行成为可能,另一方面使大量冰川融化破碎,增加了浮动冰山和小型冰体的数量,给航行安全带来威胁。开展船—冰碰撞风险分析研究,探索船舶与冰山碰撞概率,研究碰撞过程

中的结构响应和吸能机理,分析碰撞后船舶的事故后果,进而进行抗冰载荷船舶结构设计,不仅有利于提高我国船舶在冰区航行中的安全性能,保障海上人身安全,而且对于防止油气泄漏造成的污染、促进高纬度海域油气资源的合理开发与利用,都具有重要的现实意义和经济价值。

1.2 船—冰碰撞理论

1. 内部碰撞力学(Empirical Methods)

内部动力学一直受到关注和重视,它是目前船舶碰撞研究的主要内容。

1) 经验公式法

Minorsky(1959)分析了26个实船碰撞数据,建立了如下经验公式:

$$E = 47.2R_T + 32.7 \quad (\text{MJ}) \quad (1-1)$$

$$R_T = \sum P_N L_N t_N + \sum p_n l_n t_n \quad (\text{m}^3) \quad (1-2)$$

式中: R_T 是相撞船舶的损伤体积,称为抗力因子(Resistance Factor); E 是能量吸收; P_N 、 p_n 分别是撞击船第 N 个构件和被撞船第 n 个构件的损伤深度; L_N 、 l_n 分别是第 N 、 n 个构件的损伤长度; t_N 、 t_n 分别是第 N 、 n 个构件的损伤厚度。由于18个低能碰撞(Minor Collision)数据的分散性较大,而8个高能碰撞(Major Collision)数据与经验公式吻合得比较好,故一般认为Minorsky的公式适用于高能碰撞情况。

Minorsky的经验公式简单方便,使人们有兴趣在此基础上进一步深入研究,以便推广至低能碰撞情况。基于一系列试验,Woision(1979)^[3]提出了一个新的经验公式,即

$$E = 47.2R_T + 0.5 \sum (ht_s^2) \quad (\text{MJ}) \quad (1-3)$$

式中: R_T 是材料的损伤体积(m^3); h 是破裂或严重失效的纵向构件的高度(m); t_s 是这些构件的厚度(cm)。

类似地,Vaughan(1978)^[4]也建立了一个经验公式,将能量吸收与损伤体积和面积联系起来,即

$$E = 93R_T + 33A \quad (\text{MJ}) \quad (1-4)$$

式中: R_T 是材料的损伤体积(m^3); A 是撕裂的面积(m^2)。

Jones(1983)^[5]基于受集中载荷作用的梁的塑性理论提出了一个用于低能碰撞的经验公式,即

$$E = \frac{1}{2} R_l \sigma_0 \left(\frac{2\omega}{l} \right)^2 \quad (1-5)$$

式中: R_l 为参与膜拉伸变形的舷侧外板的体积; σ_0 是材料的屈服应力; $2\omega/l$ 是最终的平均变形。

甲板的切入或压皱对被撞船的耐撞力贡献比较大。Lu和Callidine(1990)^[6]

进行了一系列刚楔块切入平板的试验,获得了一个经验关系式,即

$$E = C\sigma_0 l^{1.4} t^{1.6} \quad (1-6)$$

式中: E 是吸能; σ_0 是材料的屈服应力; l 是切口长度; t 是板厚; $C=0.9\sim 3.5$ 。

Paik(1994)^[7]也进行了一系列加筋板的切入试验。加筋板采用等效厚度方法进行处理,使用尺度分析和最小二乘法,获得如下经验公式:

$$E = C_{1.5}\sigma_0 l^{1.5} t_{eq}^{1.5} \quad (1-7)$$

式中: $C_{1.5}=1.112-1.156\theta+3.760\theta^2$; 2θ 是楔形角(rad); t_{eq} 是等效板厚。

Shengming Zhang(1999)基于 Abramowicz(1994)、Amdahl(1983)、Wierzbicki 和 Thomas(1993)的理论研究结果以及塑性力学中的上限理论提出了一套新的吸能—损伤体积关系式。由塑性拉伸损伤模式所消耗的能量为

$$E_1 = 0.77\varepsilon_c \sigma_0 R_T \quad (1-8)$$

式中: E_1 是吸能; σ_0 是材料的屈服应力; ε_c 是材料的极限断裂应变, $\varepsilon_c=0.10(\varepsilon_f/0.32)$, ε_f 是材料拉伸试验中的钢材延伸率; R_T 是发生拉伸变形和破裂失效的材料体积。由压皱和卷曲损伤模式所引起的能量吸收为

$$E_2 = 3.50 \left(\frac{t}{d} \right)^{0.67} \sigma_0 R_T \quad (1-9)$$

式中: t 为压皱板的平均厚度; d 是板在压皱横截面上的平均宽度; R_T 是压皱材料的体积。由撕裂损伤模式而引起的能量吸收为

$$E_3 = 3.21 \left(\frac{t}{l} \right)^{0.6} \sigma_0 R_T \quad (1-10)$$

式中: t 是等效板厚; l 是实际撕裂长度; R_T 是发生撕裂的材料体积。

Zhang 的公式与 Minorsky 的经验公式有相近的形式,但克服了 Minorsky 公式中的一些缺陷,它可以作为一种设计工具,用于各种船舶碰撞或搁浅的分析计算。

2) 简化解析法

简化解析法主要基于塑性力学中的上限理论和一些重要假设来分析碰撞问题,这些假设主要来自对碰撞事故和试验研究的观察分析。由于简化解析方法既迅速又简单,且能提供较好的分析结果,故在船舶碰撞分析中得到了广泛应用。

McDermott 等(1974)^[8]建立了一套油船的低能碰撞分析方法。该方法基于一系列基本假设,数学模型中包括加筋板的弯曲和屈曲、外板和甲板的膜拉伸、肋骨的失效。分析结果表明,碰撞中舷侧外板的膜拉伸变形能占吸能的绝大部分(大约为 70%~85%),甲板的膜拉伸变形能和肋骨的面内剪切变形能仅占一小部分,至于弯曲变形能很小,可以忽略。

Chang 等(1980)^[9]提出了预测船体结构碰撞响应的简化分析方法。该方法是有限元技术、崩溃理论和试验数据的综合。研究表明,碰撞力是板厚、中横截面面积以及材料屈服应力和极限强度的函数。这项研究仅局限于侧向垂直碰撞情况。

Kinthead(1980)^[10]提出了一种求取极限撞击速度的计算方法。该计算专用于

某 27400m^3 LNG 船遭遇 5 条不同吨位(载重吨为 $4800 \sim 121000$) 船舶撞击时的极限分析。所得结果与修正的 Minorsky 公式进行了比较。

Reckling(1983)^[11]提出的方法同时考虑了撞击船和被撞船的损伤变形。利用该方法对两条 141600t 油船的碰撞进行了分析。计算结果表明,被撞船舷侧结构吸收了 58% 的碰撞能量,其中外板的膜拉伸仅占 18%,而强框架、甲板、底板却吸收了 40%;至于撞击船艏则消耗掉另外的 42% 碰撞能量。

张惠元等(1990)^[12]在分析低能碰撞中舷侧结构变形特征的基础上,建立了简化的力学计算模型,由能量法导出平衡方程并进行数值计算,利用所编制的专用程序可以对碰撞中舷侧结构的损伤过程进行模拟计算,获得能量吸收和变形之间的关系。

Hysing(1995)^[13]和 Scharrer(1996)^[14]使用简化方法完成了滚装客船碰撞的系列计算,预报了力—撞深曲线、吸能—撞深曲线以及舷侧结构损伤区域的尺寸大小,获得了许多有益的结果。

朱厚勤等(1996)^[15]对舷侧结构遭遇刚性船舶垂直撞击的情况进行了理论分析和计算,得到了力与侵入度、吸能与侵入度之间的关系,并对丧失承受能力前的双壳和单壳舷侧结构的最大承受能力和能量吸收能力进行了比较,得出了相应的关系曲线。

Wang 和 Ohtsubo(1997)^[16]提出了一套板的失效模式计算公式,用以分析船舶侧向碰撞和船舶搁浅。计算结果与试验结果取得了良好的一致性。

需要指出的是,由于碰撞过程中撞击区构件要发生大的损伤变形,构件之间必然发生显著的接触作用,但大多数简化解析方法却忽略了构件之间的这种相互接触作用,假设每一构件都不受影响地贡献自身抗撞强度,这与实际情况不符,是个明显的缺陷。

2. 非线性有限元数值仿真的基本理论和关键技术

1) 显式有限元的发展

有限元法的发展起始于电子计算机的崛起。作为结构或连续体问题的数值近似解方法,首先要建立和求解控制系统响应的代数方程,只有在电子计算机上才能十分有效地应用有限元法对复杂问题建立和求解控制方程。由于能被求解的结构或连续体有其广义性以及建立方程相对比较方便,并且形成的系统矩阵有良好的数值特性,因此使有限元法更具有吸引力。

我们很难说出有限元法是在哪个具体日期发明的,但如果追根溯源的话,有限元法起始于三个不同领域的研究人员:数学家、物理学家和工程师们。有限元法起用于 1956 年,由特纳(Turner)等人最早应用于飞机结构分析中并获得成功。Courant 等人的论文探讨了早期有限元的理论,促成了有限元方法的诞生。克劳夫(Clough)教授 1960 年首次使用“有限元法(Finite Element Method)”这一概念。20

世纪 60 年代, P. V. Marcal 和山田嘉昭导出弹塑性矩阵, 推动了弹塑性有限元法的发展。Marcal 于 1970 年推出第一个非线性有限元程序 MARC。此后, Zienkiewicz 等人推动了有限元法的理论体系和计算方法的完善。

1970 年, Hibbit、Marcal 和 Rice 基于有限变形理论应用增量法建立了全拉格朗日 (Lagrange) 格式的大位移、大应变弹塑性有限元法。S. Kabayashi 和 C. H. Lee 于 1973 年提出刚塑性有限元法。同年, Oden、Bhandari、Yagewa 和 Chung 建立了热黏弹塑性有限元法。1974 年, Zienkiewicz 提出了黏塑性有限元法, McMeeking 和 Rice 建立了更新的拉格朗日格式大变形弹塑性有限元法。这一时期的大量的有限元法的理论文献奠定了以后发展的基础。

1976 年, 美国 Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) 在 J. O. Hallquist 的主持下研制开发了第一个显式非线性动力分析通用有限元程序 DYNA3D 和 DYNA2D^[17]。这是目前世界上所有显式有限元程序的鼻祖。

1980 年, 显式算法取得了突破性进展, T. Belytschko 和 C. Tsay 合作开发了采用缩减积分方法的 T. Belytschko - C. Tsay 单元 (简称 BT 单元), 这是目前计算效率最高且应用最为广泛的单元。

进入 20 世纪 80 年代以后, 随着早期 DYNA 源程序的公开, 国际上掀起一股显式有限元开发的热潮, 英国的 OASYS、德国的 ESI、美国的 NASA 等相继推出在公开的 DYNA 源程序基础上开发出来的各自的显式有限元程序。这些程序和最初的 LLNL 开发的第一个显式程序相比有了长足的进步。1998 年, Hallquist 成立了 LSTC 公司 (Livermore Software Technology Corporation), 专门致力于 LS - DYNA 的开发。钟志华提出了一种同样的碰撞接触界面的计算方法, 即所谓的“防御节点法”来算法向接触力^[18]。

1988 年, 以拥有著名的 CAE 软件——NASTRAN 的美国 MSC (MacNeal - Schwendler Corporation) 公司对 LS - DYNA3D 进行全新的改进后发布了 MSC/DYNA, 它具备优秀的显式积分算法和多种材料模式而被广泛应用于分析大量的非线性瞬态问题。1990 年, MSC 公司收购 PISCES 公司并推出 MSC/PISCES 程序, 该程序的欧拉 (Euler) 模式算法可以成功地应用于分析复杂的流体—固体相互作用问题。1991 年, MSC 公司融合了它的两个产品 MSC/DYNA 和 MSC/PISCES 的精华, 诞生了一个新的产品 MSC/DYTRAN, 该程序作为二者合一的产品具备了它们各自的优点, 同时又在 PISCES 欧拉模式算法的基础上自行开发了物质流动算法和流固耦合算法, 使得 MSC/DYTRAN 成为世界上第一个能够用完全耦合的方法求解流体—结构相互作用问题的产品。

进入 20 世纪 90 年代以来, 显式动力有限元程序在技术上争取领先的焦点集中到能精确反映材料本质而且易于计算的材料模型开发、效率更高的接触搜寻算法和更为灵活的缩减积分技术上。

在有限元发展的 40 多年间,可以看到从线弹性到弹塑性再到弹黏塑性的发展、从解决小变形问题到大变形问题、从静力问题到复杂的动力接触问题直至瞬态的碰撞响应问题的发展历程。有限元方法的应用范围还在不断拓展,可以预言,它将走向更为成熟的新阶段。

2) 非线性有限元控制方程

在建立弹塑性有限变形的有限元控制方程时有两种描述方法:一种是拉格朗日描述方法,它是以初始态图形为参考来描述的,又称质点坐标系描述;另一种是欧拉描述方法,它是以变形态图形为参考来描述的,又称流动坐标系描述。拉格朗日方法是一个比较自然和有效的描述方法,通常用于固体力学和结构力学的公式描述;欧拉描述方法主要用来分析具有固定控制体积物质的运动,如用来分析大位移结构问题,由于必须不断建立新的控制体积(因其边界在不断变化),就显得不是很方便,该方法通常主要用来分析流体力学问题。这里介绍拉格朗日描述方法建立的非线性有限元控制方程。

考虑一个运动系统,某质点在初始时刻 $t=0$ 时,位于 B 处,在固定的笛卡儿坐标系下,其坐标为 X_α ($\alpha=1,2,3$)。经时间 t ,该质点运动到位置 b ,在同一笛卡儿坐标系下的坐标为 x_i ($i=1,2,3$)。采用拉格朗日描述增量法可得

$$x_i = x_i(X_\alpha, t) \quad (1-11)$$

在时间 $t=0$ 时,即为初始条件

$$x_i(X_\alpha, t) = X_\alpha \quad (1-12)$$

$$\dot{x}(X_\alpha, 0) = v_i(X_\alpha) \quad (1-13)$$

式中: v_i 定义了初始速度。

参考构形取为 $t=0$ 时刻物体的初始构形的运动描述称为全拉格朗日格式(T. L);参考构形取为 t 前一时刻物体构形的运动描述称为更新的拉格朗日格式(U. L)。可以证明这两种表达方式建立起来的有限元格式是等效的^[19]。

根据连续介质力学理论,整个运动系统必须保持质量守恒、动量守恒和能量守恒。

(1) 质量守恒方程:

$$\rho = J\rho_0 \quad (1-14)$$

式中: ρ 为当前构形的质量密度; J 是体积变化率; ρ_0 为初始构形的质量密度。

(2) 动量守恒方程:

$$\sigma_{ij,j} + \rho f_i = \rho \ddot{x}_i \quad (1-15)$$

式中: $\sigma_{ij,j}$ 是柯西应力张量; f_i 是单位质量的体积力; $\ddot{x}_i$ 是质点加速度。式(1-15)的解应满足下列边界条件:

$$\text{应力边界条件} \quad \sigma_{ij} n_j = t_i(t) \quad (\text{在面力边界 } \partial b_1 \text{ 上})$$

$$\text{位移边界条件} \quad x_i(X_\alpha, t) = D_i(t) \quad (\text{在位移边界 } \partial b_2 \text{ 上})$$