

基于粘聚单元法的平整冰与极地结构物相互 作用数值模拟分析

- 硕士研究生: 詹开宇
- 学 号: 118010910248
- 导 师:刘成副教授
- 申请学位:工学硕士
- 学科:船舶与海洋工程
- 所在单位:船舶海洋与建筑工程学院
- 答辩日期: 2021年1月
- 授予学位单位:上海交通大学



Dissertation Submitted to Shanghai Jiao Tong University for the Degree of Master

NUMERICAL RESEARCH ON THE INTERACTIONS BETWEEN LEVEL ICE AND POLAR STRUCTURES BASED ON COHESIVE ELEMENT METHOD

Candidate:	Kaiyu ZHAN
Student ID:	118010910248
Supervisor:	Prof. Cheng LIU
Academic Degree Applied for:	Master of Engineering
Speciality:	Naval Architecture and Ocean Engineering
Affiliation:	School of Naval Architecture, Civil and Ocean Engineering
Date of Defence:	Jan, 2021
Degree-Conferring-Institution:	Shanghai Jiao Tong University



上海交通大学 学位论文原创性声明

本人郑重声明:所呈交的学位论文,是本人在导师的指导下,独立进行研究 工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外,本论文不包含任何其他个人 或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体, 均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名:

日期: 年 月 日

上海交通大学 学位论文使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定,同意学校保 留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版,允许论文被查阅和借阅。

本学位论文属于 □公开论文

□内部论文,□1年/□2年/□3年 解密后适用本授权书。

□**秘密论文**, _____年(不超过 10 年)解密后适用本授权书。

□**机密论文**, _____年(不超过 20 年)解密后适用本授权书。

(请在以上方框内打"√")

学位论文作者签名: 指导教师签名:

日期: 年月日 日期: 年月日





基于粘聚单元法的平整冰与极地结构物相互作用数值模拟分析

摘要

近年来,北极的资源、科研、航运、战略等方面的价值不断提升, 世界各国将探索的脚步向寒冷地区延伸。在冰区作业的极地结构物所 面临最主要的环境载荷是冰载荷。海冰性质复杂多变,不同类型的海 冰与不同结构物发生碰撞,衍生出大量动力学问题。因此,对海冰进 行准确模拟,了解海冰破坏机理以及冰载荷形成原因,并对其准确预 报,对合理设计极地结构物,保证寒区作业的安全稳定具有重大意义。

本文以粘聚单元理论为基础,使用非线性有限元方法,以显示动 力学分析软件LS-DYNA作为计算平台,建立平整冰的粘聚单元模型, 研究了平整冰与竖直锥形立柱、四桩腿平台结构以及极地船舶三种不 同类型极地结构物相互作用的动力过程。

本文介绍了海冰的主要性质和破坏机理,选择海冰各向异性弹塑 性本构模型作为建立海冰模型的基础。随后详细阐述了粘聚单元法的 基本理论,并基于粘聚单元法建立了平整冰数值模型,并通过冰锥挤 压试验对模型进行了准确性验证。

针对海洋平台结构物冰载荷计算分析的工程需求,本文对竖直锥 形立柱结构和多桩腿结构冰载荷进行计算分析,较准确地模拟了平整 冰与平台结构碰撞的动力过程,并计算分析冰载荷。模拟结果与实测 和试验吻合较好;研究发现抗冰锥角的大小对锥体的减载效果有明显 的影响,且锥形立柱所受平整冰载荷大小与冰厚呈正相关。根据单独 立柱所受冰载荷大小,计算得到了各个立柱的遮蔽系数,并分析遮蔽 效应造成冰力衰减的主要原因。

针对船舶极地航行冰阻力计算的实际需求,本文对极地船舶连续 破冰过程进行计算分析。选取某常见极地船舶船型建立有限元模型,

Ι



研究其在平整冰中连续破冰航行的动力过程,并分析其冰阻力。通过 模拟结果观察到了船舶连续破冰全过程。探究船速以及冰厚对船舶冰 阻力的影响。将模拟得到的结果与冰阻力 Lindqvist 半经验公式计算结 果进行对比,吻合较好。

关键词: 冰载荷, 极地结构物, 破冰船, 粘聚单元法, 平整冰



NUMERICAL RESEARCH ON THE INTERACTIONS BETWEEN LEVEL ICE AND POLAR STRUCTURES BASED ON COHESIVE ELEMENT METHOD

ABSTRACT

Under the background of economic globalization, the value of the Arctic in terms of resources, scientific research, navigation and strategy continues to rise. Global warming causes the gradual melting of the ice in cold regions and all over the world will also explore the footsteps of the cold areas to extend. The main environmental load faced by polar structures in ice areas is the ice load. Due to the complex and changeable characteristic of sea ice, the collision between different types of sea ice and different structures gives rise to a lot of dynamic problems. Therefore, the accurate simulation of sea ice, the understanding of the mechanism of sea ice failure and the formation of ice load are of great significance to the rational design of polar structures and to ensure the safety and stability of operations in cold regions.

In this paper, based on the basic theory of cohesive element method, a cohesive unit model of level ice is established and 8-node hexahedral mesh is used to divide the bulk ice units. The numerical simulation of ice cone and rigid plate squeezing each other is carried out, and the results are compared with the test results, which verifies the accuracy and feasibility of the level ice model.

The ice load of vertical conical column structures and multi-legged structures is calculated and analyzed and the dynamic process of collision between level ice and platform structure is simulated accurately. The simulation results are consistent with the measured and experimental results. It is found that the ice breaking angle has a significant effect on the load reduction and level ice load on the cone column is positively correlated with



the ice thickness. According to the ice load of individual columns, the shielding coefficients of each column are calculated and the main reasons for the ice force attenuation caused by the shielding effect are analyzed.

Finally, the continuous ice-breaking process of polar ships is calculated and analyzed. The finite element model of a common polar ship is established to study the dynamic process of its continuous ice-breaking sailing in level ice and analyze its ice resistance. The whole process of continuous ice-breaking was observed by the simulation results. The influence of ship speed and ice thickness on ice resistance in ice area is studied. Simulation results are in good consistent with the results based on Lindqvist semi-empirical formula.

KEY WORDS: ice load, polar structures, icebreaker, cohesive element method, level ice



目 录

基于粘聚单元法的平整冰与极地结构物相互作用数值模拟分析I
摘要
ABSTRACT
第一章 绪论
1.1 研究背景与意义1
1.2 极地结构物冰载荷国内外研究现状4
1.2.1 冰载荷理论分析方法 4
1.2.2 冰载荷直接测量方法 5
1.2.3 冰载荷模型试验方法
1.2.4 冰载荷数值模拟方法
1.3 本文主要内容
1.4 本文创新点
第二章 海冰的主要性质与本构模型11
2.1 引言
2.2 海冰主要性质
2.2.1 海冰的物理性质
2.2.2 海冰的力学性质
2.2.3 海冰的破坏机理与破坏形式
2.3 海冰各向异性弹塑性本构模型17
2.4 本章小结
第三章 基于粘聚单元法的平整冰数值模型
3.1 引言
3.2 粘聚单元法基本理论
3.2.1 粘聚单元理论
3.2.2 牵引力-位移函数
3.2.3 粘聚单元模型的有限元格式
3.3 海冰粘聚单元模型建立
3.4 海冰粘聚单元模型数值验证
3.5 本章小结



第四章 锥形立柱冰载荷数值模拟研究	28
4.1 引言	28
4.2 数值模型与参数设置	29
4.2.1 结构物概况与模型 ······	29
4.2.2 海冰模型参数 ······	31
4.2.3 计算域与边界条件设置 ······	32
4.2.4 网格收敛性分析 ······	32
4.2.5 接触模式	33
4.3 锥形立柱冰载荷计算结果与分析	33
4.3.1 平整冰破坏与堆积	33
4.3.2 立柱所受冰载荷	36
4.3.3 抗冰锥角大小对冰载荷的影响	
4.3.4 冰厚对冰载荷的影响	40
4.4 本章小结	41
第五章 多桩腿结构冰载荷数值模拟研究	43
5.1 引言	43
5.2 数值模型与参数设置	43
5.2.1 结构物模型建立	43
5.2.2 海冰模型参数	45
5.2.3 计算域与边界条件设置	46
5.2.4 接触模式	46
5.3 四桩腿平台冰载荷计算结果与分析	47
5.4 四桩腿平台结构冰载荷遮蔽效应分析	56
5.4.1 多桩腿平台结构中单立柱的遮蔽系数	56
5.4.2 自由边界对立柱冰载荷的影响	57
5.4.3 多桩腿平台结构总遮蔽系数 ······	59
5.5 本章小结	60
第六章 船舶连续破冰过程数值模拟研究	62
6.1 引言	62
6.2 数值模型与参数设置	64
6.2.1 极地船舶数值模型 ······	64
6.2.2 海冰模型参数	65



6.2.3 计算条件设置 ······65
6.3 船舶连续破冰过程数值模拟结果与分析
6.3.1 船舶连续破冰过程66
6.3.2 船舶连续破冰航行冰阻力
6.3.3 船速对连续破冰阻力的影响
6.3.4 冰厚对连续破冰阻力的影响 ····································
6.4 本章小结
第七章 总结与展望
7.1 全文总结
7.2 研究展望
参考文献
致 谢
攻读硕士学位期间已发表或录用的论文





第一章 绪论

1.1 研究背景与意义

"北极的未来关乎北极国家的利益,关乎北极域外国家和全人类的福祉,北 极治理需要各利益攸关方的参与和贡献。"^[1]

——《中国的北极政策》

在经济全球化、区域一体化不断深入发展的大背景下,北极的经济、资源、 科研、航运、战略等诸多方面价值不断提升,中国和越来越多的其他国家都将目 光聚集到了北极,北极问题受到国际社会的普遍关注。正如本文开篇所言,北极 的规划与治理已经超出了区域范畴,涉及到全球各国的整体利益,与人类生存发 展同命运,具有重大意义和影响^[2,3]。

北极地理位置特殊,自然环境独特。北极陆地面积约 800 万平方公里,北冰 洋海域的面积超过 1200 平方公里,大部分海域常年被冰层覆盖。而这辽阔冰原和 皑皑白雪的覆盖之下,蕴藏着丰富的资源。2008 年美国地质调查局的一项研究显 示,仅北极地区可能就储存着约 90 亿桶石油和 1699 亿立方英尺的天然气,约占 全球 30%的未开发天然气和 13%的石油储量,北极也因此被誉为"地球最后的宝 库"^[4,5]。在陆地常见资源逐渐枯竭的危机情况下,只有从海洋中获取新的资源和 能源才能满足人类工业经济发展的需求,世界各国也将探索的脚步逐渐向寒冷地 区延伸^[6]。



图 1-1 位于北极的俄罗斯油气开采平台^[4] Fig. 1-1 A Russian platform in the Arctic^[4]

如今,北极的自然环境正在经历极其快速的变化。过去三十年时间,全球气 候变暖,北极地区温度升高,冰雪融化逐渐加速,北极的夏季海冰覆盖面积持续 较少。据估计,本世纪中叶甚至更早时间,北极海域很有可能在出现季节性的无 冰现象^[1,7]。北极冰雪融化会对全球环境造成巨大的影响。一方面,北极冰雪的大 面积消融会进一步引发气候变暖的加速,导致海冰面上升,威胁沿海城市居住人 群的生命财产安全;另一方面,作为地球水循环的重要组成部分,北极冰雪融化 会破坏水循环稳定性,导致极端天气现象增多,同时威胁生物多样性,造成诸多 全球性的问题。和平有效地治理北极,保证北极自然和生态环境的稳定性,是一 项全球各国都应当积极参与的国际事务。

而从好的方面来看,北极冰雪消融也会给人类逐步开发利用北极提供利好条件。海冰覆盖面积的减少极大地降低了开发北极航道的难度和成本。近些年来,北极航道逐渐成为全球航海的热门选择,并注定将在未来成为世界贸易的主航道^[8,9]。北极航道是由东西两条航道构成的,是连接太平洋和大西洋的纽带,如图 1-2 所示。



图 1-2 北极航道示意图[9] Fig. 1-2 Illustration of Arctic channels[9]

北极航道的开发对于国际航运具有重要意义。首先,在传统的环球航海线路 中,连接太平洋和大西洋需要通过巴拿马或苏伊士运河,甚至有航线需要绕道好 望角。与这些航道相比,北极航道大大缩短航程,带来的经济利益巨大。一艘从 东南亚出发前往欧洲的集装箱船,选择北极航道的航程要比经马六甲海峡和苏伊 士运河的航程短 7-8 天,比好望角航线短近 15 天。这样的航程缩短对于将大大节

省开支和时间,提高国际航运的效率;同时,北极航道的开通可以减轻其他航道的拥堵,同时避开海盗威胁,是直通两大洋的首选航道;此外,北极航道启用将 会促进北极沿岸港口兴建,带动沿线经济发展,催生新的物资转运中心和居住点, 这势必会导致世界海上贸易中心的转移,增强沿线国家的政治影响力,对地区甚 至国际格局产生深远影响。从这些角度来看,北极航道的开发具有重要的价值^[8-10]。

海冰是北极地区最重要的自然现象,也是人类进军极地所需要面对的重要问题。近些年由海冰引发的工程研究也在迅速发展,并取得了显著成果。冰载荷是极地结构物所面临的最主要的环境载荷。对于在极地航行的船舶,北极航道的开辟十分依赖破冰船,尤其是在冰雪覆盖面积更大的冬季。如图 1-3 所示就是我国的雪龙号极地科考船在北极开辟航道。破冰过程船舶受到的主要载荷就是冰载荷,而普通商船也可能受到浮冰等小尺度海冰的碰撞;在北极进行油气开采和科学考察等作业行为的海洋平台也不可避免地与海冰发生相互作用。多种形式的海冰载荷会导致海洋结构物外壳不同程度的损毁、设备失效甚至倾覆,也会存在结构物因受困冰区而影响生产生活的问题^[11]。这些都是海冰载荷引起的极地开发的难题。因此,对海冰载荷进行深入研究,了解其形成机理并准确预报,对合理设计极地结构物,保证寒区作业的安全稳定具有重大意义。



图 1-3 我国雪龙号科考船在冰区航行[11] Fig. 1-3 Icebreaking navigation of China icebreaker Xue Long[11]

我国属于近北极国家,很早就开始参与北极事务。我国的北极政策认为,北 极科研价值极高,探索认知北极是中国极地科研的重点。如今,我国拥有以"雪 龙"号为代表的一系列极地科考船以及黄河站、长城站等极地科考站,成为世界 上探索极地的一支重要力量。2017年1月,国家主席习近平在联合国发表演讲时

表示:"把深海、极地、外太空等领域打造成各方合作的新疆域。"2017 年 7 月, 习总书记访问俄罗斯,希望双方开展北极航道合作,共同打造"冰上丝绸之路" ^[12]。"十三五"发展规划中也明确指出:"加强海洋资源勘探与开发,深入开展极 地大洋科学考察。"极地事业已经成为我国海洋研究的重要内容,而对极地结构物 冰载荷研究,是我们迈向极地这片神秘区域的第一步,也是关键一步,对合理安 全地开发、利用、治理南北极具有重要的现实意义。在此大背景下,本文将基于 粘聚单元法建立海冰模型,利用非线性有限元和显示动力学分析方法,对不同种 类的海洋结构所受冰载荷进行数值模拟研究,分析冰载荷形成机理,为极地结构 物设计制造以及冰载荷预报做出贡献。

1.2 极地结构物冰载荷国内外研究现状

在研究极地结构物冰载荷的过程中,如何确定冰载荷的大小是第一步,也是 至关重要的一步。冰载荷研究经过多年发展,由国内外学者总结出了一系列研究 方法,主要包括理论分析,直接测量,模型试验以及数值模拟等方法。下面将结 合国内外研究现状对上述方法作简单介绍。

1.2.1 冰载荷理论分析方法

最早的海冰与结构物相互作用的理论模型是 Matlock 在 1969 年首次提出的 Matlock 模型^[13],该模型将冰与结构物碰撞的过程简化成了单自由度的弹簧-阻尼 系统,如图 1-4 所示为 Matlock 模型的示意图。该模型由质量块、弹簧、阻尼器以 及可以在平面滑动的一组悬臂梁结构组成。在碰撞速度较低的情况下,质量块在 与两个相邻悬臂梁先后碰撞过程中可以回到平衡位置,用以模拟海冰的韧性破坏; 而当碰撞速度较高时,质量块将与悬臂梁连续碰撞,用以模拟海冰的脆性破坏。

Matlock 模型是一个模拟海冰破坏过程的简单模型,并不能用来计算冰载荷的 具体数值。后来的学者们又对改模型进行了改进和优化^[14,15],提出了海冰的条形 模型和分层模型等^[16]。这些模型提出了海冰与结构物作用时的失效区域、断裂强 度和冰力周期等概念。鉴于海冰的复杂性,需要在海冰模型中充分考虑其材料属 性和力学特性,才能使海冰的理论模型更加准确。



上海交通大学硕士学位论文



图 1-4 Matlock 候型[13] Fig. 1-4 Matlock model[13]

1.2.2 冰载荷直接测量方法

海冰的实测方法是在处于寒区的结构物上直接安装压力传感器,用以测量结构物所受海冰载荷的方法。直接测量方法得到的数据准确可靠,是对冰载荷最好的获取和估计方法,但是实际操作难度较大,且设备的安装与维护成本较高。通常直接测量得到的冰力数据可以作为国际冰力规范制定的基础,也可以为试验方法和数值模拟方法得到的结果提供参考,是研究冰载荷最真实有效的重要材料。 如图 1-5 所示就为海洋平台锥形桩腿上安装的压力传感器。



图 1-5 锥体结构上的压力测量装置[21]



Fig. 1-5 Load measuring devices on ice breaking cone^[13]

国内的海冰直接测量工作主要在渤海湾海域内的海洋平台上进行。岳前进和季顺迎^[17-20]等人对渤海湾 JZ20-2 平台进行了长期的实测工作,得到了海洋平台冰载荷、海冰漂移运动等多种现场数据,并对海洋平台的冰激振动等问题做出了研究与分析。屈衍^[21]对渤海湾 JZ20-2MUQ 平台所受冰载荷进行了测量和分析,提出并优化了适用于锥形结构的冰载荷模型。郭峰玮^[22]等人对渤海湾 JZ9-3 MDP-1 平台进行了冰载荷测量与分析,并将实测结果与模型试验结果进行对比,验证了试验方法的有效性。对于破冰船所受冰载荷,我国的季顺迎团队^[23]对"雪龙"号 南极科考船所受冰载荷进行了测量研究,并分析了船体所受的冰激振动,通过对 比"雪龙"号在冰区航行和无冰区航行的船体振动区别,总结了船体振动与破冰 船航行区域、速度、海冰特征等因素的关系。

国外方面,Brown 等人^[24,25]对 Confederation 大桥的桥墩所受冰载荷进行了直 接测量工作,并基于测得的数据为桥墩保护和桥梁安全设计提供了参考。Timco^[26] 等人对加拿大 Beaufort 海域的 Molikpaq 海洋钻井平台进行了冰载荷现场实测工 作,分析了平台所受冰载荷与海冰类型以及海冰破坏形式的关系,总结了包括一 年冰、多年冰、浮冰、平整冰、冰脊等海冰类型和海冰弯曲、挤压破坏等破坏方式 对冰载荷的影响规律,提出了快速计算海洋平台冰载荷的方法。Vance^[27]等人使用 破冰船实船进行了一系列破冰船连续破冰航行试验,测量了破冰船在冰区航行的 阻力,并对破冰船所受冰载荷进行了预报。Kim^[28]等人对 Araon 号破冰船进行了 测试,研究了该船的冰区航行性能,分析了海冰冰厚、类型等对破冰船航行速度 与阻力的影响,并将结果与实验结果进行对比,对破冰船的速度-功率关系曲线进 行优化。

1.2.3 冰载荷模型试验方法

海冰的模型试验方法也是常用的冰载荷研究手段。模型试验相较其他方法, 具有成本较低、海冰材料属性易控制、试验规模较小、容易实现等特点,如今已 经在国内外的冰载荷研究中取得了广泛的应用。海冰模型试验依赖冰水池,德国 汉堡船模试验水池(HSVA)、芬兰阿尔托大学冰水池、我国的天津大学低温冰水 池等目前都处于国际领先位置^[29]。如图 1-6 所示为 HSVA 第三代冰水池。

使用冰水池进行模型试验的关键是模拟冰区的真实环境以及制备接近实际工况的海冰模型。常用的模型冰有两种,一种为冻结冰,这种模型冰的材料属性更接近实际海冰,但要求试验在低温环境下进行,对冰水池的建造和维护提出了较



高要求,且海冰制备成本较高,重复利用率低,难以操作。德国汉堡水池(盐水 冰)、天津大学冰水池(尿素冰)、加拿大和韩国的冰水池(EG/AD/S冰)等都使 用冻结冰进行试验。另一种为非冻结冰,这种材料不需要依靠冰水池的建造,可 以重复利用模型材料,可操作性较高。常用的材料有考虑海冰强度等物理性质的 有机合成模型冰以及仅考虑海冰密度的石蜡、PE板等材料。



图 1-6 HSVA 第三代冰水池试验^[52] Fig. 1-6 Test at the third generation on the basin HSVA^[52]

黄焱^[30,31]等人利用天津大学低温水池,对船舶及海洋平台所受平整冰载荷和 浮冰载荷进行了一系列模型试验研究。试验使用冻结生成的尿素冰,与北极地区 一年生冰的结构与材料属性接近。试验研究了包括船舶冰区航行阻力、多桩腿平 台所受冰载荷的遮蔽效应和平台响应等内容。大连理工大学杨碧野、张桂勇^[32,33] 等人使用自主研发的 DUT-1 非冻结模型冰,在常温情况下研究了碎冰的形状对于 船舶冰区航行阻力的影响,试验发现,船速和浮冰覆盖率对于碎冰阻力有较为明 显的影响,且碎冰的形状和大小对于阻力有影响,在覆盖率较高的情况下,较方 的碎冰形状会比较圆整的碎冰带来更大的冰阻力。

国外学者中,Gurtner^[34]等人在德国汉堡试验水池中研究了平整冰和锥形结构的碰撞过程。通过改变锥形结构的斜面坡度来观察接触角度对平整冰破碎和碎冰爬升、随机等现象的影响。实验发现,当锥角达到 30°左右时,碎冰的爬升会得到明显的抑制。David J^[35]等人通过试验方法确定了不同形状和大小的浮冰对单圆筒的冲击特性,研究了多种规则和不规则条件下浮冰的运动学和碰撞特征。Robert Ettema^[36]等人通过试验得到了系泊圆锥平台上的碎冰载荷数据,并发现了平台周



围碎冰阻塞的主要原因。

1.2.4 冰载荷数值模拟方法

随着数值模拟方法的发展,国内外学者采用多种方法对海冰载荷进行了数值 模拟研究,这其中,离散单元法和有限元方法是最常用的两种方法。

离散单元法将海冰模拟成会发生相互作用的颗粒,通过改变离散单元间的连接方式、作用方式和作用力参数,达到模拟海冰材料属性的目的。离散单元法可以较为准确地模拟海冰的破碎堆积效果,在研究海冰的离散特性等方面具有明显的优越性,因此常被用于模拟浮冰、碎冰等离散状态下的海冰。季顺迎等人自主研发了基于 GPU 并行计算的海洋结构冰载荷模拟软件 IceDEM,使用离散单元法建立了不同类型的海冰数值模型,并进行了一系列冰区结构物冰载荷数值模拟^[37-41]。Zhan^[42]等人使用开源离散元程序,对船舶的冰区回转试验和 Z 形试验进行了数值模拟,计算与实验结果吻合较好。Micheal Lau^[43]等人使用离散单元法研究了海冰与船舶以及海洋平台的相互作用。将模拟结果与实验数据进行了对比,在精度和实时性等方面取得了满意的结果。

有限元方法的优点在于能够较好地研究海冰结构的变形。学者们多采用商业 有限元计算软件对海冰与结构物相互作用问题进行非线性有限元和显示动力学分 析。白旭^[44]等人使用 ANSYS/LS-DYNA 软件建立了有限元模型,研究船-冰碰撞 的动力过程,分析最大碰撞应力,集散得到了破冰船船艏结构的碰撞力-时间曲线 图。Liu^[45]等人使用 LS-DYNA 软件研究了船舶与冰山碰撞的动力过程,并提出了 有关应力状态和塑性应变的单元删除准则。张充霖^[46]等人应用 DYTRAN 研究了 船体与不同形状的海冰碰撞的动力过程,分析船艏结构的响应和损伤变形和能量 吸收机制等。Moon-Chan Kim^[47]等人采用新开发的有限元模型和模型实验方法, 对一艘货船在浮冰条件下的破冰阻力进行了数值和试验研究,对比结果得出了一 系列重要结论。

有限元方法基于连续介质力学对海冰进行模拟分析,但并不能较好地描述海冰破坏过程,特别是裂纹的生成、发展以及碎冰堆积等现象。为解决这一问题,学者们开始将粘聚单元理论引入有限元中,粘聚单元法就在有限元方法的基础上逐渐发展起来。粘聚单元法是在有限单元之间插入了粘聚单元,模拟中仅有粘聚单元发生破坏,而有限单元不会被删除,因此该方法可以在研究中同时考虑海冰的变形和破坏,且在模拟海冰的裂缝生成与发展以及破碎海冰堆积等后续运动方面表现良好,目前得到了广泛应用。Wenjun Lu^[48]等人使用粘聚单元法进行了平整

冰与锥形结构物相互作用的数值模拟研究,根据以往的实验结果对模拟结果进行 了验证,并讨论了不同方法下网格的收敛性和客观性。Gurtner^[34]等人使用粘聚单 元法研究了平整冰与竖直立柱碰撞时的碎冰堆积现象,并对立柱所受冰载荷进行 分析。王峰^[49,50]等人基于非线性有限元方法,使用粘聚单元模型对平整冰与固定 竖直圆柱体碰撞过程进行了数值模拟。模拟结果中成功观察到了海冰裂纹的生成 以及在圆柱附近碎冰堆积等现象。刘路平^[51,52]等人使用粘聚单元法进行了平整冰 与抗冰海洋平台相互作用的数值模拟研究,根据以往的实验结果对模拟结果进行 了验证。

此外,光滑粒子流体动力学方法(SPH)^[53,54]、格子玻尔兹曼方法(LBM-based Method)^[55]等方法也都在海冰数值模拟研究中得到了应用。

1.3 本文主要内容

本文使用非线性有限元软件 LS-DYNA 作为计算工具,基于粘聚单元法建立 平整冰的数值模型,模拟平整冰与带锥角的竖直立柱、四桩腿带锥立柱平台结构 和冰区航行船舶相互作用的动力过程,观察海冰的破坏过程和碎冰的堆积现象, 分析海冰的破坏机理,研究不同结构物所受冰载荷的特点和影响因素。全文一共 七章,具体内容如下:

第一章介绍本文研究背景与意义,综述国内外研究现状,重点分析目前极地 结构物冰载荷的主要研究方法。介绍本文的主要研究内容。

第二章介绍了海冰的基本性质与本构模型。海冰的物理性质和力学性质复杂, 破坏机理特殊。针对海冰的裂纹扩展机理,本章介绍了海冰的各向异性弹塑性本 构模型,该模型可用于描述海冰的破碎、堆积重叠和断裂等现象。

第三章基于粘聚单元方法建立了平整冰的数值模型。首先对粘聚单元方法进行介绍,重点对粘聚单元理论中的牵引力-位移函数以及粘聚单元法的有限元格式进行详细阐述。随后,基于上述理论建立了平整冰的数值模型,并使用该模型进行了冰锥与刚性板挤压的模拟,对比模拟结果与实验结果,验证模型的可行性与准确性。

第四章使用平整冰的粘聚单元模型研究了锥形立柱所受平整冰载荷。使用 LS-DYNA 软件模拟了不同冰速、厚度的平整冰与锥角大小不同的立柱相互作用的动 力过程。模拟结果发现,使用粘聚单元方法可以较好模拟出平整冰破碎与堆积现 象,可以观察到碎冰在结构物附近堆积以及在锥体斜面上爬升等现象;抗冰锥角 大小对冰载荷影响较大,且在锥角为 40°左右时抗冰效果最好;冰厚与冰速都与

冰载荷大小呈正相关。

第五章研究了四桩腿带锥立柱平台结构冰载荷。分析了四桩腿结构与平整冰 相互作用时各桩腿受力的差别,并以此分析多桩腿平台结构冰载荷遮蔽效应的产 生原因以及影响因素。

第六章模拟了船舶冰区航行连续破冰过程。选取一破冰船模型,研究其与平 整冰连续作用过程,分析海冰的破碎形式、裂纹发展形状以及船舶冰区航行阻力 的影响因素等。

第七章为本文的总结与展望。

1.4 本文创新点

本文研究内容为平整冰与不同海洋结构物相互作用的数值模拟,主要创新点 如下:

(1)本文研究了包括单独锥形立柱、多立柱平台结构以及破冰船在内的多种 极地结构物与平整冰相互作用的动力过程。通过研究不同类型结构物的冰载荷特 性,分析海冰在不同破坏形式下的力学行为。将单独锥形立柱的冰载荷研究作为 基础,为之后两种类型的研究提供了参考和对比依据。本文研究的结构物包含了 极地的主要结构物类型,有较大的研究价值。

(2)本文基于粘聚单元理论建立了平整冰的粘聚单元模型,对海冰的变形、 破坏和碎冰堆积等过程实现了较好的模拟。本文研究结果表明,粘聚单元法在海 冰载荷的研究中可以得到较好应用。

(3)本文第五章研究了多立柱平台结构的遮蔽效应。国内外学者对海冰遮蔽效应研究较少,该部分研究尚处于起步阶段。对于遮蔽效应的研究有较大的工程应用价值,通过分析风浪流载荷可以得知某特定海域的主要冰向,进而可以得知多立柱平台各桩腿冰载荷遮蔽效应的大致范围,可以对冰区平台的安全性和适用性设计提供重要参考。



第二章 海冰的主要性质与本构模型

2.1 引言

所有海洋环境中的冰统称为海冰。根据运动形态,海冰可以分为固定冰和流 冰两种。固定冰常见于海岸附近,或者依附海岸和水深较浅的海底生成和发展。 流冰一般漂浮在海平面上,受到海洋环境中风浪流等载荷作用而随之发生漂移和 运动,进而与海洋结构物发生相互作用。流冰是与海洋结构物进行相互作用的主 要海冰类型,依据其生成后存在的时间不同,可以分为初生冰、莲叶冰,灰冰、白 冰等。

依据海冰表面特征,可以将海冰分为平整冰(层冰)、重叠冰、冰脊、冰山、 碎冰等。这些都是冰区常见的海冰形存在形式,也都是与冰区结构物发生相互作 用的主要种类。如图 2-1 所示为冰区常见的碎冰和平整冰。本文的研究对象为平 整冰。这类海冰表面光滑平整,尺度相对海洋结构物较大,主要作用形式为挤压 与碰撞。在数值模拟研究中,通常通过设置边界条件来实现对半无限大平整冰的 模拟。



图 2-1 漂浮在北极海面上的碎冰和平整冰 Fig. 2-1 Level ice and breaking ice floating on Arctic

海冰内部结构复杂,主要由纯冰晶、固体盐、卤水和空气等部分组成。其各



成分比率会随时间、空间、外界条件等发生变化,其性质也随之改变。温度是影 响海冰性质最重要的控制因子。从材料学的角度,将海冰看作一种复杂的温度敏 感性复合材料。

海冰具有特殊的物理性质和力学性质。在进行冰载荷研究之前,首先需要确 定其力学参数和本构模型。本章将简单介绍海冰主要性质和常用本构模型,并结 合本文研究内容、具体工况选择合适参数和本构关系式,用以后续建立海冰的数 值模型。

2.2 海冰主要性质

2.2.1 海冰的物理性质

海冰作为天然复合结晶体,主要由纯冰晶、卤水、固体盐以及空气组成,其 内部构造可以简单理解成各组分的排列组合。如图 2-2 所示为海冰内部的基本构 造。不同类型的海冰结构差异较大。海冰的生成方式、盐度、密度、温度、孔隙率 以及内部结构等共同决定了海冰的性质^[2,56]。



图 2-2 海冰内部的基本构造[2] Fig. 2-2 The internal basic structure of sea ice[2]

海冰形成时,部分卤水会从冰晶析出流入海水。当环境温度较低时,海冰形 成快,冰晶间空隙很快被新生冰填塞,导致卤水来不及流出;形成速率较慢的海



冰,其内部卤水含量也会相对较低。海冰是固体冰和卤水的混合物,其形成速率 决定卤水成分的比率,进而影响其性质。

海冰盐度是指海冰融化之后所得海水的盐度,它与卤水含量相似,主要取决 于冻结速度和冻结前海水盐度两个因素。海冰冻结速度越快,盐分越来不及析出, 盐度也越大。冻结前海水本身盐度越高,形成的海冰盐度也会越高,但在形成过 程中由于盐分析出,海冰盐度会比海水盐度略低。初生冰的盐度通常较大,而随 着海冰存在时间不断增加,海冰盐分会在重力作用下沿内部通道向下沉降析出, 温度变化引起的海冰融化也会使海冰表面有浓盐水流出,因此冻龄越长的海冰, 其盐度一般情况下越小。

海冰的主要物理参数还包括海冰晶体结构。晶体结构指海冰的冰晶体结构, 大小和空间分布方位等。根据海冰的生成方式,晶体结构分为粒状冰和柱状冰。 在扰动的海面上,风浪流载荷随机多变,海洋环境复杂,最初生成的冰大多是颗 粒状的晶体结构,经融化、冻结过程反复交替后呈现出各向同性的晶体结构,即 为粒状冰;而在相对平静的条件下,细小的初生冰晶不断增多聚集,在海平面上 生成相对坚硬的冰层。当连续的冰面生成之后,冰晶会沿着垂直水面的方向向下 逐渐生长,形成具有单轴各向异性的海冰,即为柱状冰。

2.2.2 海冰的力学性质

海冰的力学性质是研究海冰工程学的基础,冰与结构物相互作用问题也与海 冰本身的材料属性直接相关。海冰是一种复杂材料,其性质受环境影响较大,尤 其是力学性质在时空上呈现较大差别。影响海冰力学性能的主要参数有拉伸强度、 压缩强度、剪切强度、弯曲强度、摩擦系数和泊松比等。这些参数一方面会受到 海冰内在因素,如孔隙率、温度、盐度、密度等影响,另一方面也会受到外部环 境,如加载速率,载荷方向,约束条件等的影响。本文讨论的平整冰为一年生的 柱状冰结构,国内外学者经过大量的试验和测量方法,给出了其主要力学参数的 参考范围,也为本文后续的数值模型建立和模拟计算提供基础。

压缩强度是冰载荷计算中的重要参数,海冰的压缩强度通常指海冰单轴无侧限压缩强度。挤压破坏是海冰最为常见的破坏形式之一,国内为学者通过试验方法对海冰的压缩强度进行了系统研究。如图 2-3 所示为常见的海冰单轴压缩实验装置。一年生的柱状冰结构的压缩强度一般在 1MPa-12MPa。海冰的压缩破坏对外载荷加载速率的变化十分敏感,随着应变速率的变化,海冰压缩强度存在一个极值点,对应的即为海冰最大压缩强度。低加载速率下海冰处于韧性区,高加载



速率下海冰处于脆性区,两者之间存在一个韧脆转变区。此外,海冰的压缩强度 会随海冰温度的降低而增加,也随卤水体积增加而减小。



图 2-3 海冰单轴压缩试验装置图[38] Fig. 2-3 A device for uni-axial compression test on sea ice[38]



图 2-4 海冰三点弯曲试验装置图[38] Fig. 2-4 A device for three-point bending test on sea ice[38]



海冰的拉伸强度是指海冰单轴方向受拉时单位面积所能承受载荷的最大值。 海冰的拉伸强度与外载荷加载速率的关系不如压缩强度那样明显,但拉伸方向和 海冰卤水体积对拉伸强度有很大影响。海冰拉伸强度可以通过弯曲试验的方式得 到,数值较小,一年生柱状冰水平方向的拉伸强度在 0.2MPa-0.8MPa;当拉伸方向 为竖直方向,即平行柱状结构生长方向时,海冰拉伸强度可达 2MPa。海冰拉伸破 坏通常为脆性破坏。

海冰的弯曲强度指的是海冰材料在弯曲载荷下破坏时虽能承受的最大弯矩或 应力,随着海冰温度的降低而增加,且两者之间呈指数关系。柱状冰的悬臂梁弯 曲试验和海冰的三点弯曲试验是常用的两种测试海冰弯曲强度的方法。如图 2-4 所示为常见的海冰三点弯曲实验装置图。



图 2-5 海冰悬臂梁弯曲试验装置图[52] Fig. 2-5 A device for catiliver beam test on sea ice[52]

弹性模量和泊松比也是海冰重要力学参数。海冰弹性模量描述了海冰在弹性 变形阶段其应力和应变之间的关系,随冰温降低和卤水体积减小而增大。海冰的 泊松比表示其在单轴应力状态下横、纵方向的正应变比值,与海冰晶体的主轴方 向有关,垂直于晶体主轴方向的泊松比要远远大于平行主轴方向的泊松比。

在研究极地结构物冰载荷,尤其是冰区航行船舶冰阻力时,海冰的摩擦系数 对研究结果有较大影响,是海冰工程学中一个重要参数。海冰的摩擦系数包括两 种,即海洋结构物与海冰之间的摩擦系数以及海冰与海冰的摩擦系数。海冰与结 构物间的摩擦系数一般在 0.05-0.2 左右,数值与表面粗糙度以及接触时的速度有 关。海冰之间的摩擦系数与海冰类型、尺寸、结构有较大关系。



2.2.3 海冰的破坏机理与破坏形式

海冰的破坏机理在海冰载荷研究中是一项基本工作。目前学者们较为统一的 理论是用裂缝扩展机理来解释海冰的破坏过程。柱状冰在生长过程中,以冰针的 形式从水面刺入水中。由于外界环境的不稳定,一年生的海冰会在内部和底面产 生大量的微裂缝。在受到外力作用时,由于海冰的晶体错位也会引起结构内部的 裂缝生成。随着外载荷的不断增加,裂缝逐渐扩展。当加载速率较慢时,海冰处 于塑性区,晶体有充分的时间沿着边界错位滑动,并沿着边界产生更多的裂缝; 随着载荷的增加,裂缝不断扩展直至海冰结构完全破坏,表现出较大的变形,晶 体边界产生不规则裂纹。当加载速率较快,海冰处于脆性区,此时海冰没有充分 的时间进行晶体滑移和塑性变形;载荷增加时,裂缝尖端迅速产生应力集中,导 致裂缝贯穿晶体,表现出变形较小的脆性破坏,破坏边界平整,裂缝集中且多平 行于受力方向。

在冰区,与不同类型的极地结构物相互作用时,海冰会产生不同力学性质的 破坏,一般可以分为挤压破坏、屈曲破坏、剪切破坏和弯曲破坏。在本文研究的 几类结构物中,平整冰与垂直立柱以及带抗冰锥角的桩腿相互作用时,主要以挤 压破坏和弯曲破坏为主;对于在冰区航行连续破冰的船舶,海冰的主要破坏形式 为挤压破坏。如图 2-6 所示为海冰不同破坏形式,包括海冰的弯曲、断裂、蠕变、 屈曲、挤压破碎等形式。



图 2-6 海冰的不同破坏形式[52] Fig. 2-6 Different crushing mode of sea ice[52]



2.3 海冰各向异性弹塑性本构模型

海冰的本构模型研究是海冰数值模拟工作的难点和重点。为了描述海冰在外 载荷作用下产生的破坏,需要建立合适的海冰本构模型。上一节中提到海冰的破 坏机理,海冰的挤压破碎过程实质上是海冰在外载荷作用下产生裂纹以及裂纹扩 展的过程。裂纹的尖端产生高度的应力集中并迅速扩展,同时释放能量。当裂纹 积累到足够的数量时,便发生局部的破坏,产生颗粒状、粉末状的碎冰,在破坏 发生区域附近重叠堆积。这种破坏形式被学者们成为碎裂破坏。如图 2-7 所示就 为竖直立柱与平整冰碰撞时发生挤压破坏并产生碎冰堆积的现象。



图 2-7 灯塔立柱上的碎冰堆积[24] Fig. 2-7 Breaking ice accumulation on light house[24]

海冰会在不同的尺度下表现出断裂、堆积、流变和碰撞等多种动力学特征。 为了精确描述海冰破坏以及碎冰堆积的力学现象,多种海冰的本构模型被建立。 从上世纪 70 年代开始,海冰动力学的本构模型就从最初的线粘性模型逐渐发展完 善,目前主要有四类模型得到认可和使用,包括线粘性模型、弹塑性模型、海冰 颗粒流理论以及各向异性的断裂损伤模型。其中,弹塑性模型可以提高大中尺度 下海冰动力学的计算精度,海冰颗粒流体动力学方法能够对海冰重叠堆积特性进 行模拟。对海冰动力学的尺度效应进行研究并进行模型验证,也是海冰本构模型 研究的重要内容。海冰本构模型一般是基于卫星遥感和现场观测资料建立的,并



且通过敏感度分析进行验证,以适应不同尺度下的海冰^[3]。

本文使用的是适用于大中尺度下海冰断裂堆积等现象的各向异性弹塑性本构 模型。北极海冰动力学联合实验中,通过现场测量得到海冰应力、应变数据,将 较大尺度的海冰视为二位连续介质,建立了海冰动力学的弹塑性本构模型。该模 型将海冰动力学问题简化为平面应力问题,研究海冰弹性阶段的力学行为,并采 用 Mohr-Coulomb 屈服准则^[57]。塑性屈服前,海冰的弹性力学行为可以表述为:

$$\sigma = KD_{el}I + 2GD'_e \tag{2-1}$$

其中, K 表示海冰的体积, G 为海冰的剪切弹性模量, σ为应力矢量, D_{el}和 D_e表示膨胀应变以及弹性应变。

上述模型为各向同性弹塑性海冰动力学模型,可以用于=描述大、中尺度下海 冰的破碎、断裂等破坏现象。为了精确确定海冰结构内裂缝的发生方位和尺度, 学者们在上述模型的基础上又建立了海冰各向异性弹塑性本构模型。

在各向异性的弹塑性本构模型中,垂直于海冰晶体主轴方向的海冰应力为零, 而平行于海冰晶体主轴方向仍保持一定的应力^[58]。应力与 x-y 坐标系下的应力分 量有如下关系:

$$\begin{cases} \sigma_{xx} = \frac{\sigma_{\xi\xi}}{2} (1 - \cos 2\theta) \\ \sigma_{yy} = \frac{\sigma_{\xi\xi}}{2} (1 + \cos 2\theta) \\ \sigma_{xy} = -\frac{\sigma_{\xi\xi}}{2} \sin 2\theta \end{cases}$$
(2-2)

2.4 本章小结

本章介绍了海冰的基本性质,包括海冰的物理性质、力学性质、破坏机理以 及破坏形式等。针对本文所研究的一年生平整冰和不同类型的极地结构物,对适 用该种工况的海冰各向异性弹塑性本构模型进行了阐述,为后文建立平整冰的数 值模型提供了理论基础。



第三章 基于粘聚单元法的平整冰数值模型

3.1 引言

海冰是一种性质非常复杂的温度敏感型复合材料,外界环境以及其自身生长 条件对其性质存在明显的影响。在不同的外载荷加载速率下,海冰展现出塑性和 脆性两种性质;海冰与不同极地结构物相互作用也会呈现不同破坏形式,包括挤 压破坏,弯曲破坏,剪切破坏等,且通常会有多种破坏形式共同存在。这些都是 对海冰材料进行数值建模所面临的困难。因此在进行冰载荷数值模拟前,确定建 立海冰模型的数值方法、材料参数和破坏形式等,对得到准确有效的模拟结果十 分关键。

冰载荷模拟中常用的数值方法有离散单元法和有限元法。离散单元法将海冰 模拟成粘结在一起的颗粒,通过改变颗粒间的作用形式和作用力参数,能够较准 确模拟出平整冰的破坏和堆积效果,在模拟海冰离散特性方面具有较明显的优越 性;有限元法的重点和优点在于可以较好地研究海冰结构的变形。

粘聚单元法是在有限元方法的基础上变形和发展而来的。传统的有限元方法 无法对裂纹的产生、扩展以及海冰断裂后的碎冰重叠堆积进行有效模拟。粘聚单 元法在有限元单元之间插入了厚度为零的粘聚单元,可以用以分析海冰碰撞过程 中的断裂和变形等力学行为。粘聚单元法原本多用于模拟复合材料和岩土力学^[59,60],现如今已经在海冰材料模拟中得到了较为广泛的应用。

本文使用非线性有限元软件 LS-DYNA 进行计算,建立平整冰的粘聚单元模型,模拟了平整冰与不同海洋结构物相互作用时发生破坏以及碎冰堆积的过程。 本章将对粘聚单元法的基本理论、海冰粘聚单元模型的建立过程等进行详细阐述, 并对建立的海冰模型进行数值验证,为后文的模拟计算提供基础。

3.2 粘聚单元法基本理论

3.2.1 粘聚单元理论

材料的多样性不断发展,对于材料的韧性开裂以及裂纹扩展的研究已经很难 用传统断裂力学的理论来解决了。因此,新的裂纹延展模型和理论亟待建立和提 出。在传统断裂力学的知识中,材料的断裂问题常用线弹性断裂力学知识来解决。 该理论将研究对象简化为理想的弹性体,但在工程实际中,裂纹尖端存在一个微



小塑性区域。该塑性区域对于小变形问题可以忽略不计,但是当变形较大时则并 不适用。此外,传统的断裂模型是在奇异性理论的基础上建立起来的。奇异性理 论认为,裂纹尖端处的上下间距为零,因此尖端处的应力分量为无穷大。然而实 际情况中,裂纹尖端的应力与位移应当都为有限值。奇异性理论与实际情况不符, 传统断裂模型在解决裂纹延展问题时遇到困难。

粘聚单元法是内聚力模型在有限元方法中的一种应用与延展。该方法将裂纹 尖端的微小塑性区域作为研究考察的主要范围,研究中只需考察该区域内的裂纹 特性。如图 3-1 所示为粘聚单元法所研究的裂纹尖端范围。粘聚单元理论最早起 源于断裂力学,如今已经广泛应用于岩土力学和复合材料的研究中,在材料断裂 和裂纹延展研究等方面有一定的优越性。



图 3-1 粘聚单元区域示意图 Fig. 3-1 Illustration of cohesive element area

3.2.2 牵引力-位移函数

粘聚力即为结构内部的相互作用力。在对裂纹的研究中发现,结构内的作用 力大小与其裂纹尺寸有关,是一个与裂纹撕裂距离相关的函数。在裂纹尖端的韧 性区定义一个临界值,则该范围内一定存在一个小于该临界值的裂纹撕裂距离。 基于裂纹尖端韧性区的这一特征,粘聚单元法使用牵引力-位移函数来判定结构的 破坏。牵引力-位移函数是表示裂纹断裂位置处应力大小和裂纹撕裂距离的函数,



该函数的曲线称为牵引力-位移曲线。

牵引力-位移函数的重要参数有断裂应力、断裂韧性、最大分离位移、曲线形状等。根据上述参数的不同,可以将该函数模型分为不同的种类,目前常用的粘聚单元破坏准则模型主要有线性软化模型、梯形软化模型和指数软化模型。如图 3-2 所示为上述三种模型的牵引力-位移曲线。曲线的极值为该模型的粘聚强度,曲线与坐标轴所围成封闭图形的面积表示该模型的粘聚能,即粘聚单元破坏所需要的能量。对于脆性材料,常用线性软化模型或者指数软化模型来模拟材料破坏,对于其他材料则常用梯形软化模型来模拟。本文使用梯形软化模型对海冰结构进行数值模拟。本文选用梯形牵引力-位移曲线。该曲线模型相对简单,在LS-DYNA软件中较容易实现。可以通过曲线获取粘聚单元值、最大应力值等参数。



图 3-2 单元破坏准则模型的牵引力-分离位移曲线 Fig.3-2 mon shapes of traction-separation law

从图中我们可以分析得出粘聚单元从受力、变形到破坏的整个过程。粘聚单 元受到外力作用开始变形,当应力值达到最大之后在一定位移范围内保持稳定, 随后逐渐减小,表示粘聚单元承受外载荷作用后出现损伤,发生刚度软化,承受 外力作用的能力减弱;当应力值减小到零时,表示粘聚单元发生断裂破坏,失去 承受外载荷作用,冰实体单元之间的链接解除,冰单元脱落。整个过程中粘聚单 元所吸收的能量即为曲线与坐标轴围成的封闭图形面积大小。对于不同形状的牵 引力-位移曲线,粘聚单元的受力破坏过程类似。



3.2.3 粘聚单元模型的有限元格式

前文提到,粘聚单元法是粘聚单元模型在有限元方法中的一种延伸与应用。 在粘聚单元法的数值模拟实现过程中,有两种有限元格式可以选择:离散单元形 式和连续单元形式。如图 3-3 所示给出了两种粘聚单元有限元格式的示意图。



图 3-3 粘聚单元法的有限元形式(a 为连续式,b 为离散式)^[50] Fig.3-3 mode of cohesive element method in FEM (a. continuum mode, b. discrete mode)^[50]

离散单元形式是在裂缝的分裂面上选取相对应的一组节点插入非线性的弹簧 单元来模拟裂纹发展过程中结构内部的粘聚力;连续单元形式是在裂缝处的单元 之间插入厚度为零的粘聚单元,粘聚单元与有限单元共享节点,相当于在两个有 限单元的公共边界上插入了无数个非线性弹簧单元,因此可以被认为是连续的。 本文将使用连续形式的粘聚单元格式建立海冰模型。并使用处理断裂问题常用的 8 节点六面体单元建立材料模型。

使用粘聚单元法在 LS-DYNA 中进行有限元计算分析的过程为: 在当前时间 步中,首先确定粘聚单元模型的参数和单元属性,使用插值法生成参考面,计算 参考面上某一点的位移,并求得粘聚单元模型节点之间的相对位移; 在得到相对 位移后,根据前文提到的牵引力-位移函数以及粘聚单元本构模型判断粘聚单元是 否发生破坏,并计算牵引力,得到该单元的牵引力矢量以及刚度矩阵。将所得结 果输出后作为下一时间步的模型参数和初始条件,开始下一时间步的计算。



3.3 海冰粘聚单元模型建立

前文详细阐述了粘聚单元法的基本理论。这一节将基于上述理论建立海冰的 粘聚单元模型。本文的研究对象为平整冰。使用粘聚单元法建立平整冰数值模型 时,首先将平整冰离散成为冰实体单元,再在每一对相邻的冰实体单元的接触面 上插入粘聚单元。粘聚单元与冰实体单元共享节点。该模型可以实现平整冰内裂 纹的生成与扩展。常用的粘聚单元为零厚度单元或者八节点六面体单元。学者们 研究表明,在海冰的三维数值模拟中,零厚度粘聚单元可以保证更好的数值计算 稳定性。本文使用零厚度粘聚单元建立海冰模型。

平整冰受到外载荷作用时,粘聚单元受到牵引力作用,依据给定的牵引力-位 移准则发生偏移,当粘聚单元表面的分离量达到最大值时,粘聚单元发生破坏并 失效,从模型中被删除;同时,通过该粘聚单元连接的两个相邻冰实体单元间失 去粘结力,在原粘聚单元处形成裂纹;随着载荷的不断作用,越来越多的粘聚单 元被删除,即裂纹在平整冰结构中延展的现象得以被模拟;当完整的断裂裂纹形 成时,部分冰实体单元从脱落,形成碎冰在结构物附近堆积,并随着平整冰的运 动进一步与结构物作用,这也是结构物所受平整冰载荷的一个组成部分。如图 3-4 所示为粘聚单元与冰实体单元的示意图。



图 3-4 粘聚单元与冰实体单元示意图 Fig. 3-4 Illustration of Cohesive element and bulk element

平整冰模型的网格划分决定了冰实体单元的大小和形状以及粘聚单元的位置 分布,从而决定了平整冰材料的力学性能。本文使用最常用的正六面体八节点网



格进行平整冰的网格划分,这种网格被证明是一种数值稳定性较好的网格划分形式。如图 3-5 所示为本文建立的平整冰粘聚单元模型,横向和纵向的粘聚单元将 冰实体单元分隔,两种单元相互独立同时共享节点。这种单元排布形式可以有效 模拟出大尺度下平整冰的连续介质力学特性以及较小尺度下碎冰的离散特性。通 过调整粘聚单元牵引力-位移模型等参数可以实现不同性质海冰的力学性能模拟。



图 3-5 海冰六面体单元模型与粘聚单元模型 Fig.3-5 Ice hexahedral element model and cohesive element model

3.4 海冰粘聚单元模型数值验证

为了验证上节提出的海冰粘聚单元模型在模拟海冰与结构物相互作用方面的 有效性和准确性,本节依据已有实验工况与结果进行模型验证。在 LS-DYNA 中 建立了冰锥的粘聚单元模型,模拟其与刚性板的挤压碰撞过程,验证海冰材料的 力学性能。



上海交通大学硕士学位论文



图 3-6 冰锥刚性板挤压试验装置图[61] Fig.3-6 The device of ice cone crush rigid plane[61]

Kim^[61,62]等人进行了一系列有关刚性板挤压冰锥的模型实验,研究了冰锥锥角、碰撞速度等因素对挤压结果的影响,分析冰锥所受挤压力的变化过程和破坏形式。如图 3-6 所示为刚性板挤压冰锥的实验装置图。其中冰锥底面被固定在可移动水平底座上,底座带动冰锥匀速挤压刚性板。实验工况和海冰材料参数如下表 3-1 和表 3-2 所示。

Table.3-1 Parameters of the model tests	
试验参数	数值
锥角角度	120°
碰撞速度	1mm/s

表 3-1. 试验工况

表 3-2. 海冰材料参数

Table.3-2 Parameters of sea ice

海冰材料参数	数值
密度	910kg/m ³
压缩强度	15MPa


上海交通大学硕士学位论文

杨氏模量	5GPa
泊松比	0.3

根据上述工况,在 LS-DYNA 中建立刚性板挤压冰锥的有限元数值模型,如 图 3-7 所示。冰锥模型与实验所用样品保持一致,最大直径 10cm,顶端锥角大小 120°。刚性板表面设定为固定边界,设置冰锥给定的运动速度。使用前文提到的 六边形八节点网格进行冰实体单元划分,并设置粘聚单元。由于刚性板刚度和强 度远大于海冰材料,因此模拟过程中不考虑刚性板的变形对结果的影响。在 LS-DYNA 材料库中选择刚性材料作为刚性板属性,具体材料参数如下表所示。

设置冰锥以 1mm/s 的速度向刚性板运动,模拟不同碰撞速度下的海冰材料受 力和破坏现象,并将得到的位移-接触力曲线与 Kim 等人的实验结果进行对比,如 下图 3-8 所示。从图中可以看出,使用模拟得到的位移-接触力曲线与实验结果在 一定范围内吻合,整体趋势相同,接触力呈现波动上升的形式,说明刚性板与冰 锥挤压过程中,海冰内部结构不断破坏,压载和卸载过程交替进行。与试验结果 的对比也进一步验证了本章建立的海冰粘聚单元模型的有效性。



图 3-7 冰锥刚性板挤压试验数值模拟示意图

Fig.3-7 Illustration of computational model of ice cone crushing rigid plane test



上海交通大学硕士学位论文



图 3-8 挤压过程的位移-接触力曲线 Fig.3-8 Curves of the relationship of displacement-contact force

3.5 本章小结

本章首先介绍了粘聚单元法的特点和基本理论,以及该方法在海冰动力学数 值模拟方面的优势。其中,详细阐述了控制粘聚单元属性的牵引力-位移函数和粘 聚单元法的有限元格式,为后续建立海冰数值模型提供基础。

随后,本章建立了基于粘聚单元法的海冰数值模型,使用六面体八节点网格 划分冰实体单元,并对粘聚单元的插入和分布方式进行说明。这种网格划分方式 可以模拟出大尺度下海冰的连续介质力学特性以及小尺度下碎冰的离散特性,被 证明具有较好地数值稳定性,在海冰数值模拟中取得了广泛的应用。

最后,本章依据刚性板挤压冰锥的模型实验,使用 LS-DYNA 对上述海冰模型进行验证。模拟一定速度下冰锥的位移-接触力曲线,并与实验结果进行对比,吻合度较好,证明了本章所述海冰模型的准确性和有效性,可以应用于下文中进一步的数值模拟研究。



第四章 锥形立柱冰载荷数值模拟研究

4.1 引言

在冰区环境中,平整冰会与不同形式的极地结构物发生相互作用,其破坏方 式也不尽相同,主要有挤压破坏和弯曲破坏。其中,挤压破坏主要发生在海冰碰 撞直立结构时,如平台桩腿等。这种破坏通常发生在局部,且由于海冰的抗压强 度较大,这种破坏所引起的冰载荷通常也较大;弯曲破坏主要发生在海冰碰撞带 有一定倾斜角度的结构物时,如抗冰锥角、方形系数较大的船体船艏等。由于海 冰的弯曲强度通常较小,因此这种破坏形式下,其引起的冰载荷作用也较小。破 坏后的海冰会从平整冰上脱落,形成小尺度的碎冰。一部分碎冰会随着海冰的移 动,在海水的作用下继续运动,在结构物附近堆积,对结构物形成二次作用;一 部分碎冰则会在海水作用下逐渐远离结构物。碎冰在结构物附近的翻转、堆积和 摩擦等力学行为所引起的载荷也是极地结构物在平整冰作用下所受冰载荷的重要 组成部分。许多学者都对锥体所受海冰载荷的两个主要部分进行了系统研究^[63-65]。 海冰的挤压破碎和弯曲断裂造成的载荷被称为海冰破坏载荷;而碎冰在锥体附近 的堆积、爬升和翻转等所产生的载荷被称为海冰波坛载荷,这两部分载荷在海冰 总载荷中的占比不同。不同学者通过数值计算和理论方法得到海冰的破坏载荷约 占海冰总载荷的 20-30%。



图 4-1 层冰与锥形结构相互作用后的破坏与堆积 Fig.4-1 Failure and accumulation of ice after interaction with conical structure

在海冰覆盖率较高的冰区,通常会在海洋平台立柱的水线面附近设置抗冰结构,以增加平台的抗冰性能,其中最常见的抗冰结构为抗冰锥体。由于海冰的抗



剪强度要远小于其抗压强度,因此,在平整冰与海洋平台相互作用时,带有特定 锥角的抗冰锥体可以将海冰的主要破坏形式从挤压破坏转变为弯曲破坏和剪切破 坏,从而极大地减小平台立柱所受载荷作用,保证冰区作业的安全性。如图 4-1 所 示就为平整冰与锥形结构物相互作用过程的示意图。抗冰锥体是一种非常有效的 减小冰载荷的方式,对于冰区结构物的设计和作业安全具有重大意义。因此对于 抗冰锥体的研究是十分必要的,许多学者都对冰区的锥体结构进行了探索和研究。

本章将基于前文建立的海冰粘聚单元模型,进行平整冰与带有抗冰锥角的固定平台立柱相互作用的数值模拟。该数值模拟将探究海冰的厚度等自然条件对于结构物受力的影响。同时,对于带有抗冰锥体的立柱,锥体的角度对于抗冰效果也存在一定的影响,会改变海冰的破碎和堆积现象,这也是本章研究的重点之一。 模拟中简化了海水对碰撞过程的影响,海冰仅对海冰提供浮力作用,而忽略了海冰移动、翻转等过程中海水的拖曳力作用。数值研究之前,本章首先对海冰实体单元的网格敏感性进行分析,选择适合本章研究工况的网格尺寸。随后将数值模拟计算结果与近似环境条件下的试验结果、观测结果、使用离散单元法模拟得到的结果以及基于 ISO(International Organization of Standardization)冰力标准^[66]计算得到的结果进行了对比验证。结果表明,本文的模拟结果与上述结果在一定范围内具有较好的一致性。本章研究结果表明,基于粘聚单元法建立的海冰模型在研究平整冰与带有抗冰锥角的固定平台立柱相互作用时具有较好的适用性,对于后续冰区结构物冰载荷模拟和预报、抗冰结构设计等研究具有重要的参考意义。

4.2 数值模型与参数设置

4.2.1 结构物概况与模型

本章选用渤海湾 JZ20-2MUQ 海洋平台的带锥立柱作为研究模型,如图 4-2 所示。该海洋平台是固定式四腿导管架平台,位于渤海湾北部冰情较为严重的海域。 在冰载荷作用下平台立柱会产生强烈响应,严重影响平台寿命和海上作业安全。 因此,该平台的桩腿都安装了抗冰锥角,最大程度上减小冰载荷带来的危害。

现场观测结果显示,平整冰与抗冰锥角作用时,裂纹会从接触点开始向平整 冰内部延伸发展,直到海冰发生弯曲破坏,碎裂成大小随机的小尺度冰块;之后 碎冰会在平整冰的继续推进下沿锥体向上爬升,爬升到一定高度后翻转跌落,在 结构物附近堆积,同时后续的碎冰继续爬升;当结构物附近的碎冰堆积到一定程 度时,后续碎冰会在平整冰的推动下从锥体两侧绕过结构物继续向前运动。





图 4-2 渤海湾 JZ20-2 MUQ 海洋平台[38] Fig. 4-2 Platform JZ20-2 MUQ on Bohai sea[38]

基于 JZ20-2MUQ 平台的带锥立柱结构,从图 4-2 红圈表示部分提取部分结构,建立了本章所研究的锥形结构物模型,如图 4-3 所示。未加锥角之前,立柱直径为 1.7m,锥体高度 2.5m,锥体最大直径为 4m。定义锥体斜面与水线面夹角 θ 为锥角大小,并保证水线面处(即立柱与平整冰相互作用发生位置)锥体直径一致,为 2.8m。





碰撞过程中平整冰以恒定的速度撞击固定立柱。由于立柱的材料强度和刚度 远大于海冰材料,因此碰撞过程中不考虑立柱变形,选择立柱材料为刚性材料。 具体材料属性见表 4-1。

表 4-1 锥形立柱材料属性

Table.4-1 Parameters of column rigid material		
参数	数值	
密度 $ ho$	7850 kg•m ⁻³	
杨氏模量 E	200 GPa	
泊松比レ	0.3	

4.2.2 海冰模型参数

第三章建立了海冰粘聚单元模型。海冰的实体单元模型采用六面体八节点有限单元建立,取18m*40m的平整冰进行计算。本章将要研究平整冰厚度对冰力大小的影响,因此冰厚分别取0.2m、0.25m、0.3m、0.35m和0.4m。采用各向同性的线性弹塑性材料模拟海冰实体单元。在冰实体单元间插入厚度为零的粘聚单元项,粘聚单元的牵引力-分离位移曲线选择线性软化曲线模型。

海冰材料的基本参数受到许多因素的影响,在不同工况下很难有确定的数值。 国内外学者对海冰进行了大量的力学试验,并考虑海冰的温度、盐度、孔隙率等 对海冰性质的影响,给出了工程应用中所使用的海冰参数的推荐范围^[67,68]。本文 也根据该推荐范围选择了海冰弹塑性模型的材料参数,以满足本文算例的工程需 求。具体参数值见表 4-2。

冰实体	单元	粘聚自	单元
参数	数值	参数	数值
弹性模量 E	2GPa	弹性模量 E	2GPa
密度 ρ	900 kg•m ⁻³	密度 $ ho$	900 kg•m ⁻³
泊松比 ν	0.3	横向断裂强度 T	0.5 MPa
屈服应力 σ_y	2 MPa	纵向断裂强度 S	0.7 MPa
		断裂能	30 J•m ⁻²

表 4-2 海冰单元与粘聚单元模型参数

Table.4-2 Principle parameters of ice model



4.2.3 计算域与边界条件设置

在如图 4-4 所示的计算域中,海冰沿 x 轴负方向移动, z 轴与海冰厚度方向平 行,与水线面垂直,且定义向上为正方向。平整冰与立柱接触的边界设定为自由 边界,其余三边约束三个方向的自由度,并设置为无反射边界条件,以模拟半无 限大的平整冰。本章研究中没有考虑海水对碰撞过程的影响,仅在海冰下方增加 海平面,并在垂直方向定义海水对海冰的浮力作用,方向竖直向上。

研究过程中发现,当平整冰处于运动状态时,其边界也是不断变化的,因此 其边界条件难以设置。为了解决这一问题,本章将平整冰固定,锥形立柱以一定 速度与平整冰碰撞,进而进行碰撞过程的模拟计算。在后处理中再将立柱固定, 以实现平整冰主动碰撞锥形立柱的效果。



图 4-4 计算域设置 Fig.4-4 Computational domain settings

4.2.4 网格收敛性分析

网格尺度和时间步长对数值计算的时间和结果有着重要的影响。使用 LS-DYNA 进行显式动力学分析时,时间步长是通过最小单元尺寸确定的。本节将对 网格收敛性进行分析。

分别选取尺寸为 0.075m*0.075m*0.01m、 0.05m*0.05m*0.01m、 0.025m*0.025m*0.01m的网格,计算平整冰以 0.4m/s 的速度与锥形立柱的碰撞过程。模拟时长 90s并统计水平方向的平均冰力大小、相对误差以及计算所需时间。 计算结果如表 4-3 所示。从表中的统计结果可以看到,随着网格尺寸的增加,计



算结果逐渐收敛,同时计算时间迅速增加。权衡计算精度和计算时长,本章研究选择尺寸为0.05m*0.05m*0.01m的网格进行计算。

表 4-3. 网格尺寸对计算结果和计算时间的影响

网格尺寸	平均冰力大小(相对误差)	计算时间	
 0.075 m*0.075 m*0.01 m	25.5 KN (13.85%)	7hrs14min	
0.05 m*0.05 m*0.01 m	28.2 KN (4.73%)	16hrs46min	
0.025 m*0.025 m*0.01 m	29.6 KN	47hrs22min	

Table.3 Effects of mesh size on numerical results and computational time

4.2.5 接触模式

计算前设定平整冰与立柱碰撞的接触模式。立柱和平整冰之间的接触采用面面接触的侵蚀算法,在 LS-DYNA 中选择算法 "CONTACT_ERODING_NODES_TO_SURFACE",该算法可以定义海冰单元的破坏失效标准。平整冰与立柱之间的摩擦力系数设定为 0.2。破碎堆积的碎冰之间的接触采用单面接触的算法,在 LS-DYNA 中选择接触算法 "CONTACT_ERODING_SINGLE_SURFACE",该算法可以简化碎冰之间的相互作用,节约计算时间。海冰间的摩擦系数设定为 0.1。

4.3 锥形立柱冰载荷计算结果与分析

4.3.1 平整冰破坏与堆积

本章将使用粘聚单元法得到的模拟结果与国内外学者的实测、试验以及数值 模拟等不同方法得到的结果进行对比,从而验证该方法的可行性。



上海交通大学硕士学位论文



图 4-7. t=7s 时刻俯视图和侧视图 Fig.4-7 Top and side views at time t=7s



上海交通大学硕士学位论文



图 4-8. t=10s 时刻俯视图和侧视图 Fig.4-8 Top and side views at time t=10s

如图 4-5 至图 4-8 所示给出了厚度为 0.3m 的平整冰以 0.4m/s 的速度撞击固定 锥形立柱的模拟结果。锥角角度为 60°。图中所示为模拟进行到 t=1s、4s、7s 和 10s 时的俯视图和侧视图。观察碰撞过程可知平整冰与抗冰锥角斜面的接触过程。 海冰与斜面接触时会在斜面上有一小段爬升,此时海冰所受的载荷作用为弯曲载 荷。当海冰的弯曲应力大于其抗弯强度时,海冰发生破坏,形成碎冰,并随着平 整冰的推进在锥体上爬升。随着相互作用不断进行,碎冰逐渐在锥体附近堆积。 模拟中还观察到了碎冰从斜面滑落的现象。上述现象都与实地观测结果相符。



a) 渤海湾 JZ20-2 MUQ 平台实测结果[38] a) measured result of platform JZ20-2 MUQ on Bohai Bay[38]

b) HSVA 模型实验结果[38] b) experimental result of HSVA[38]

图 4-9 海冰堆积实测结果与实验结果 Fig. 4-9 Measured result and experimental result of ice accumulation



上海交通大学硕士学位论文



图 4-10 海冰堆积现象 数 值 模拟结果 Fig. 4-10 Simulation result of ice accumulation

分析完整的碰撞过程可知,平整冰与固定锥形立柱相互作用时产生的冰载荷 主要有两个部分,一部分为平整冰直接与斜面接触、破坏所引起的载荷力,这一 部分载荷主要是由平整冰对结构物的挤压碰撞引起的;另一部分为平整冰破碎后 堆积在结构物附近,对结构物的二次作用,这一部分的载荷力主要是由碎冰与结 构物的摩擦引起的。如图 4-9 所示为渤海湾 JZ20-2 MUQ 平台的实地观测结果以 及 HSVA(Hamburg Ship Model Basin,汉堡船模试验水池)的模型试验结果,与 本章模拟结果图 4-10 对比可知,本章模拟得到的一系列现象与上述结果基本吻合, 模型的有效性得到进一步验证。

4.3.2 立柱所受冰载荷

如图 4-11 所示为平整冰运动速度为 0.4m/s 时锥形立柱所受 x 方向水平载荷的时历曲线。从图中可知,在与平整冰的碰撞过程中,立柱所受冰载荷呈波动变化且幅值较大。分析碰撞过程可知,平整冰与立柱接触时一直在进行"接触变形-破碎-爬升-堆积-接触变形"这一循环过程,海冰受到压应力和弯曲应力作用,载荷上升,所有粘聚单元破坏,应力卸载,海冰对立柱的作用力被释放,因此在海冰爬升阶段冰载荷迅速降低,在后续的平整冰继续与立柱作用前,载荷一直保持一个较小值,这部分载荷是碎冰在斜面爬升的摩擦力引起的。



上海交通大学硕士学位论文



Fig.4-11 Time histories of horizontal ice loads on conical structures

分析冰载荷时历曲线还可以得知,在碰撞初期,冰载荷会呈一个震荡上升的 趋势,随后逐渐趋于稳定,在一定范围内波动。这是因为在碰撞初期,随着海冰 的不断破坏,碎冰开始堆积,海冰与立柱的接触面积逐渐增大,冰载荷开始上升、 当碎冰堆积达到一定程度时,接触面积不再有明显变化,平整冰碰撞与堆积过程 达到稳定,冰载荷在一定范围内波动、这一结果也与模型试验以及实测结果得到 的数据相吻合。

4.3.3 抗冰锥角大小对冰载荷的影响

在研究抗冰锥角θ的大小对其减载效果的影响之前,本节将首先介绍 ISO 冰 力标准,并将冰力标准计算结果与本章模拟结果进行对比,以验证其准确性和可 行性。

ISO-19906 标准^[66]是广泛应用于海洋结构物设计的行业标准,其中给出了不 同类型的海冰与海洋结构物相互作用的冰载荷计算方法。本文使用冰力标准给出 的平整冰与锥形结构物相互作用过程中冰载荷的计算公式,得到了不同锥角条件 下立柱所受最大冰载荷的大小。ISO 标准中平整冰与锥形结构物相互作用的冰载 荷计算公式主要基于海冰的塑性破坏和脆性破坏。海冰的塑性破坏通常发生在载 荷加载速率较小的情况下,此时海冰在外力作用下的变形量超过其最大弹性变形 量,海冰产生明显的永久变形,进而破坏失效;当加载速率增加时,海冰破坏模 式逐渐转向脆性破坏;在大速率外载荷冲击下,海冰会发生无明显变形的脆性破



坏。本文选取海冰的塑性破坏模式进行计算和对比。

塑形破坏模式中,锥形结构物所受冰力由两部分组成:层冰弯曲断裂和碎冰爬升对结构物的作用力。层冰破坏时的水平冰力H_a和垂直冰力V_a表示为:

$$H_B = \frac{\sigma_f h^2}{3} \frac{\tan \alpha}{1 - \mu g_r} \left[\frac{1 + Y_x \ln x}{x - 1} + G(x - 1)(x + 2) \right]$$
(4-1)

$$V_B = H_B \cdot h \tag{4-2}$$

其中, Y取 2.711, $G = (\rho g w^2)/(4\sigma_f h)$ 、 $x = 1 + (3G + \frac{Y}{2})^{-1/2}$,w为水线处的 维径。

碎冰在锥面爬升时的水平冰力H_R与垂直冰力V_R表示为:

$$H_R = W \frac{\tan \alpha + \mu E_2 - \mu fg_r \cos \alpha}{1 - \mu g_r}$$
(4-3)

$$V_R = W \cos \alpha (\frac{\pi}{2} \cos \alpha - \mu \alpha - fh_v) + H_R h_V$$
(4-4)

其中, *f*, *g*, 和*h*, 等系数由冰-结构物间摩擦系数、锥径、锥角大小和碎冰爬升高度等参数定义。

则在锥形结构上的总冰力可以表示为:

$$F_H = H_B + H_R \tag{4-5}$$

$$F_V = V_B + V_R \tag{4-6}$$

为了研究抗冰锥角θ的大小对冰载荷的影响,本章取锥角本别为40°、45°、 50°、55°、60°、65°进行了一系列的模拟研究。为了消除锥角改变时造成的 锥径变化造成的影响,保持水线面处锥径不变,为 2.8m。本文计算了平整冰以 0.4m/s 的速度碰撞锥形立柱 90s 时间内立柱所受水平方向和竖直方向的最大冰力 和平均冰力大小,并将结果与 ISO 冰力标准计算得到的最大冰力以及狄少丞^[38]等 人使用离散单元法得到的最大冰力结果进行对比,结果如图 4-12 和图 4-13 所示。





图 4-12. 水平方向冰载荷与抗冰锥角θ大小的关系 Fig 4-12. The relation betweenθ and ice force of horizontal direction

由计算结果可知,水平方向的最大冰力和平均冰力随着抗冰锥角的增大而增 大;竖直方向的最大冰力在一定锥角范围内变化不大,而平均冰力随着锥角的增 大而减小。与其他结果对比可知,本文使用粘聚单元法得到的结果与其他方法得 到的结果吻合较好,在变化趋势上保持一致,但是整体的冰载荷结果偏小。相较 ISO 冰力标准,造成这一结果的原因可能是海冰粘聚单元模型本身的局限性。首 先,本文依据试验结果给出的参考值以及简化模型选择粘聚单元和冰实体单元的 材料参数,该参数值与实际海冰材料并不完全一致,造成了结果偏差;另一方面, 实际海冰材料的内部构造复杂,沿晶体主轴方向和垂直主轴方向的材料性质差距 较大,甚至同一方向上的晶体分布也不是规则的,且存在空隙、卤水等对材料属 性造成影响。而使用粘聚单元法建立的海冰模型中,冰实体单元和粘聚单元的分 布是均匀的,这与海冰的实际内部构造有差距,也是造成误差的主要原因之一。







图 4-13. 竖直方向冰载荷与抗冰锥角 θ 大小的关系 Fig 4-13. The relation between θand ice force of vertical direction

相较离散单元法,粘聚单元法在模拟海冰结构的变形和破坏时具有一定的优势,但是由于粘聚单元是插入在海冰实体单元之间厚度为零的片状单元,其可以承受拉应力和剪应力但几乎无法承受压应力;离散单元法中颗粒间的连接基于弹簧阻尼系统,可以更好地模拟海冰多个方向的受力,因此模拟结果更加接近实际情况。考虑到这一点,本证使用的粘聚单元模型还需要进一步改进和优化。

考虑平整冰与锥形结构物作用过程,锥角对冰载荷造成影响的主要原因是, 海冰与锥形结构物发生作用时的破坏形式发生了变化。海冰与直立结构作用时, 其破坏形式主要是挤压破坏;当海冰与锥形结构作用时,弯曲破坏和挤压破坏同 时存在。在锥角较小的情况下,破坏以弯曲破坏为主,随着锥角增大,弯曲和挤 压同时发生,且挤压破坏逐渐成为主要破坏形式。前文提到,海冰的抗压强度要 明显大于抗弯强度。因此,随着锥角增大,x方向上的冰力逐渐增大;同时,随着 锥角增大,碎冰在斜面上的爬升越来越困难,爬升高度降低,爬升时间缩短,由 摩擦力造成的冰载荷作用也逐渐减小,因此z方向的冰力呈减小趋势。

4.3.4 冰厚对冰载荷的影响

本章研究了冰厚对于冰载荷大小的影响。冰厚分别取 0.2m、0.25m、0.3m、 0.35m 和 0.4m 进行模拟,其余参数不变。如图 4-14 所示给出了 t=90s 时间内 x 方向最大冰力和平均冰力与冰厚的关系。可以明显看出,冰力大小与厚度呈正相关, 且增加速度接近线性。将计算结果与使用 ISO 冰力标准计算得到的结果进行对比, 具有较好的一致性。根据结果分析碰撞过程可知,随着冰厚的增加,平整冰与结



构物的接触面积和整体质量增加,使结构物受到更大的冲击力和摩擦阻力作用, 海冰总载荷增加。



Fig.4-14 The relation between ice thickness and ice force

4.4 本章小结

本章以第三章中建立的海冰模型作为研究对象,以渤海湾 JZ20-2 MUQ 导管架平台的带锥桩腿为结构物模型,模拟分析了平整冰与带有锥形结构的竖直立柱相互作用的动力过程,分析不同参数对碰撞过程和冰载荷大小的影响。具体的研究内容有:

(1)基于第三章的海冰粘聚单元模型建立尺寸为 40m*18m 的平整冰模型。 进行网格收敛性分析后选择尺寸为 0.05m*0.05m*0.01m 的网格进行后续计算;

(2)模拟结果显示,粘聚单元法可以较准确地模拟平整冰与锥形立柱碰撞的动力过程,该方法在模拟海冰的破碎、堆积以及在斜面上的爬升等方面有较好的表现,模拟结果与实测结果以及实验结果基本吻合;

(3)抗冰锥角的大小对锥体的减载效果有明显的影响。研究结果表明,锥角 角度在 40°左右时有较好的抗冰效果。随着锥角的增大,水平方向的冰载荷有明 显增加,而竖直方向冰载荷逐渐减小。造成这一结果的主要原因为抗冰锥角改变 了平整冰的破坏形式,海冰的破坏载荷中弯曲破坏引起的载荷逐渐占据较大比重。 该模拟结果与使用 ISO 冰力标准以及使用离散单元法得到的结果吻合;

(4)本章研究了平整冰冰厚对冰载荷大小的影响。结果表明,锥形立柱所受



平整冰载荷大小与冰厚呈正相关,且增长速度接近线性。该结果与 ISO 冰力标准 计算结果吻合较好。

研究中还发现了粘聚单元法在模拟本章问题中的局限性。对于模拟海冰内部 复杂结构以及多方向、多形式的外载荷作用下海冰的动力行为等方面,海冰的粘 聚单元模型还有待改进。下一步工作中将增加计算工况,优化网格和模型,并进 一步研究影响海冰载荷的多种因素,提高计算结果的准确性和可信度。



第五章 多桩腿结构冰载荷数值模拟研究

5.1 引言

第四章研究分析了单一带锥角直立桩腿与平整冰碰撞的动力过程。在实际冰 区环境中,多桩腿海洋平台凭借其稳定性,在油气开发、寒区作业和极地科考等 多方面得到了广泛应用。带有抗冰锥角的多立柱海洋平台可以有效缓解平台所受 冰载荷压力,同时影响冰力周期,避免平台因冰激振动而出现稳定振动现象,保 证平台工作时的稳定与安全。本文所研究的结构物模型来源 JZ20-2 MUQ 平台就 是在渤海湾作业的四桩腿导管架海洋平台。

多桩腿结构与海冰作用的动力过程相较单立柱更加复杂多变。海冰在风浪流 作用下在海平面上漂移,以不同角度与多桩腿平台发生碰撞。碰撞角度的变化会 导致各个桩腿上的冰载荷大小出现较大差异,即多桩腿结构冰载荷的遮蔽效应。 遮蔽效应是冰区海洋平台设计安装和冰载荷预报研究中需要重点考虑的影响因素。 国内外学者对多桩腿结构的冰载荷遮蔽效应进行了许多的实验研究和数值模拟研 究,希望通过分析冰载荷遮蔽效应的原因与机理,建立完整的遮蔽效应计算分析 体系。

模型实验方法是最早应用于多桩腿结构遮蔽效应研究的。Timco^[69]等人在渤海 湾冰区对四桩腿平台的冰载荷遮蔽效应进行了模型实验。Kato^[70]等人通过模型实 验分析确定了多立柱平台在不同迎冰角度下的遮蔽系数。黄焱^[71,72]等人通过模型 实验分析了不同迎冰角度下多立柱结构物的扭转变形现象,发现 45°迎冰角度下 结构变形最为明显。此外还有许多学者通过现场观测和数值模拟等方法对多立柱 结构物不同桩腿上的冰载荷特征以及遮蔽效应进行了系统的研究。目前,这项工 作尚处于起步阶段,是冰区结构物设计制造的重点与难点。

本章将继续以渤海湾 JZ20-2 MUQ 平台作为结构物模型来源,建立简化的四 桩腿带抗冰锥角的平台结构模型,研究其与平整冰碰撞的动力过程。计算各个桩 腿的受力情况,研究不同迎冰角度下的冰载荷特征,并分析造成遮蔽效应的原因。

5.2 数值模型与参数设置

5.2.1 结构物模型建立

与 4.2.1 节相同,本章依旧选用渤海湾 JZ20-2MUQ 海洋平台的带锥立柱作为 研究模型。该近海固定式的四腿导管架平台是较有代表性的四桩腿结构。平台的



桩腿都安装了抗冰锥角,最大程度上减小冰载荷带来的危害。如图 5-1 所示为平 台模型。图中红圈位置为本章选用的结构物来源。



图 5-1 渤海湾 JZ20-2 MUQ 海洋平台 Fig. 5-1 Platform JZ20-2 MUQ on Bohai sea



图 5-2 四柱腿带锥平台结构简化模型 Fig. 5-2 Model of four-legged platform with cone

基于 JZ20-2MUQ 平台的带锥立柱结构,本章建立了四桩腿平台的简化模型,如图 5-2 所示。四个桩腿均为竖直立柱,呈正方形分布,边长 10m。结构上下部分别用导管平台连接。增加未加锥角之前,立柱直径为 1.7m,锥体高度 2.5m,锥



体最大直径为4m。保证水线面处(即立柱与平整冰相互作用发生位置)锥体直径 一致,为2.8m。在四个立柱的进水线面处均布置了可读取冰载荷数值的指针,可 以分别读取每个立柱各自所受冰力大小。

碰撞过程中平整冰以恒定的速度撞击固定立柱。由于立柱的材料强度和刚度 远大于海冰材料,因此碰撞过程中不考虑立柱变形,选择立柱材料为刚性材料。 具体材料属性见表。

	8
参数	数值
密度 $ ho$	7850 kg•m ⁻³
杨氏模量 E	200 GPa
泊松比 ν	0.3

表 5-1 锥形立柱材料属性 Table.5-1 Parameters of column rigid material

5.2.2 海冰模型参数

与 4.2.2 节相同,本章依旧选用第三章建立了海冰粘聚单元模型。海冰的实体 单元模型采用六面体八节点有限单元建立,取 18m*40m 的平整冰进行计算。在冰 实体单元间插入厚度为零的粘聚单元项,粘聚单元的牵引力-分离位移曲线选择线 性软化曲线模型。

海冰材料的基本参数受到许多因素的影响,在不同工况下很难有确定的数值。 根据国内外学者给出的工程应用中所使用的海冰参数的推荐范围设置本文的海冰 弹塑性模型的材料参数。具体参数值见表。

表 5-2	海冰单元与粘聚单元模型参数

冰实体	单元	粘聚自	龟元
参数	数值	参数	数值
弹性模量 E	2GPa	弹性模量 E	2GPa
密度 ρ	900 kg•m ⁻³	密度 $ ho$	900 kg•m ⁻³
泊松比レ	0.3	横向断裂强度 T	0.5 MPa
屈服应力 σ_y	2 MPa	纵向断裂强度 S	0.7 MPa
		断裂能	30 J•m ⁻²

Table.5-2 Principle parameters of ice model



5.2.3 计算域与边界条件设置

在如图 5-3 所示的计算域中,海冰沿 x 轴负方向移动, z 轴与海冰厚度方向平 行,与水线面垂直,且定义向上为正方向。平整冰与平台接触的边界设定为自由 边界,其余三边约束三个方向的自由度,并设置为无反射边界条件,以模拟半无 限大的平整冰。本章研究中没有考虑海水对碰撞过程的影响,仅在海冰下方增加 海平面,并在垂直方向定义海水对海冰的浮力作用,方向竖直向上。



图 5-3 计算域设置 Fig.5-3 Computational domain settings

5.2.4 接触模式

计算前设定平整冰与立柱碰撞的接触模式。立柱和平整冰之间的接触采用面面接触的侵蚀算法,在LS-DYNA中选择算法"CONTACT_ERODING_NODES_TO_SURFACE",该算法可以定义海冰单元的破坏失效标准。平整冰与立柱之间的摩擦力系数设定为0.2。破碎堆积的碎冰之间的接触采用单面接触的算法,在LS-DYNA中选择接触算法"CONTACT_ERODING_SINGLE_SURFACE",该算法可以简化碎冰之间的相互作用,节约计算时间。海冰间的摩擦系数设定为0.1。



5.3 四桩腿平台冰载荷计算结果与分析

本节计算分析四桩腿平台所受冰力情况。首先定义冰向(平整冰与平台的碰 撞角度)和平台各桩腿编号,以便下文讨论。如图所示为海冰与四桩腿带锥平台 结构相互作用的示意图。桩腿从右下角开始由 1#-4#依次逆时针编号,其中 1#桩 腿和 2#桩腿的连线与平整冰接触面的夹角定义为冰向 θ。本节依次计算了冰向 θ =0°、15°、30°和45°时四桩腿平台与平整冰碰撞的动力过程以及各桩腿的受 力情况。



图 5-4 桩腿编号与冰向示意图 Fig.5-4 Illustration of column number and ice direction

如图 5-5 所示为冰厚为 0.3m 的平整冰以 0.4m/s 的速度与四桩腿平台碰撞的 结果图。碰撞初期,海冰出现轻微弯曲变形。随着海冰推进,裂纹延展,破坏持续 发生,产生大量碎冰并在锥体附近堆积。平整冰与立柱碰撞时,由于位于前侧的 立柱对海冰的破坏和切割作用,导致海冰内部形成若干条明显的水道。这就导致 当处于后侧的立柱与海冰发生碰撞时,海冰的结构、形状和力学特性等都已经发 生了明显的变化,则其对后侧立柱产生的作用力也与前侧立柱不同。这种前侧立 柱对后侧立柱所产生的冰力影响被称为遮蔽效应。

如图 5-6 所示为模拟进行到 20s 时海冰情况。此时,位于前侧的 1#与 2#立柱 已经在平整冰中切割出了明显水道,位于后侧的 3#与 4#立柱由于冰向角度的特殊 性,完全处于前方立柱产生的水道中。此时,后侧立柱仅会受到水道中残留的部



分碎冰作用,冰载荷极小。这种情况被称为冰载荷的完全遮蔽。将模拟结果与黄 焱等人进行的海冰与多立柱结构相互作用的模型试验结果对比,取得了较好的一 致性。



(a) t=1s 时的模拟结果图 (a) Simulation results at time t=1s



(b) t=5s 时的模拟结果图(b) Simulation results at time t=5s



(c) t=10s 时的模拟结果图







(d) t=10s 时的模拟结果图
 (d) Simulation results at time t=10s
 图 5-5 多立柱平台与平整冰作用不同时刻模拟结果图
 Fig 5-5 Simulation results at different times



图 5-6 t=20s 时的模拟结果图与试验结果^[71]对比 Fig.5-6 Comparison between simulation result at t=20s and model tests results^{[71}

随后又对冰向角为 15°、30°和 45°时的情况进行模拟。模拟情形如图 5-7 至 5-9 所示。对每种工况进行具体分析。当冰向 θ=0°时,位于后侧的 3#和 4#立 柱正好处于前侧立柱所产生的水道中,此时后侧立柱仅会受到水道内少量碎冰的 作用,因此其所受冰力较小,产生完全遮蔽现象。



上海交通大学硕士学位论文



(a) 冰向角 15°, t=10s 时的模拟场景(a) Situation when ice direction at 15°, t=10s



(b) 冰向角 15°, t=20s 时的模拟场景
(b) Situation when ice direction at 15°, t=20s
图 5-7 冰向角为 15°时的模拟结果

Fig.5-7 Simulation results when ice direction at 15°

当冰向 θ =15°时,1#与 2#立柱先后与海冰作用,产生水道,且均会对 3#立 柱产生影响,当海冰破坏较明显时,3#立柱会有一部分处于前侧立柱的水道中, 并受到其他水道所产生的自由边界的影响,因此其所受冰载荷也会明显减小。





(a) 冰向角 30°, t=10s 时的模拟场景(a) Situation when ice direction at 30°, t=10s



(b) 冰向角 30°, t=20s 时的模拟场景
(b) Situation when ice direction at 30°, t=20s
图 5-8 冰向角为 30°时的模拟结果
Fig.5-8 Simulation results when ice direction at 30°



θ=30°时的情况与θ=15°的情况类似,位于后侧的3#立柱和4#立柱也受到 较明显的遮蔽效应影响,但与前一种情况相比,后侧立柱未处于前侧立柱的水道 中,因此其所受遮蔽效应也相对较小。



(a) 冰向角 45°, t=10s 时的模拟场景(a) Situation when ice direction at 45°, t=10s



(b) 冰向角 45°, t=20s 时的模拟场景
(b) Situation when ice direction at 45°, t=20s
图 5-9 冰向角为 45°时的模拟结果
Fig.5-9 Simulation results when ice direction at 45°



当 θ =45° 时,3#立柱完全处于 1#立柱的水道中,仅受到水道内碎冰作用,冰 力较小,此时 3#立柱的冰载荷完全遮蔽。

如图 5-10 给出了不同冰向角条件下模拟进行到 30s 时,海冰以及水道的状态。 通过分析水道长短以及位置也可以得知立柱之间的遮蔽和影响。





以θ=15°为例,给出该工况下各桩腿所受冰载荷的时历曲线。如图 5-11 所 示。可以发现,在与平整冰的碰撞过程中,立柱所受冰载荷呈波动变化且幅值较 大,呈现出随机性很强的脉冲现象。同时,不同立柱所受冰载荷大小也有较大差 异,即遮蔽效应影响较为明显。





上海交通大学硕士学位论文



Fig. 5-11 Time series of ice load of each column when ice direction at 15°



计算 90s 内各立柱上所受冰力的平均值。计算结果如表 5-1 所示。图 5-12 给 出了各冰向下 1#-4#立柱所受冰载荷的平均值变化曲线。分析上述结果可以发现, 1#立柱与 2#立柱由于率先接触到海冰,受到遮蔽效应的影响较小,在曲线中表现 为它们所受平均冰力随冰向变化保持稳定。4#立柱在θ=0°时被1#立柱完全遮蔽, 冰力很小;随着冰向角不断变大,其位置逐渐远离 1#立柱所产生的水道,因此其 所受遮蔽效应也逐渐减小,冰力呈增大趋势。3#立柱在θ=0°时完全处于 2#立柱 产生的水道中,在θ=45°时则完全处于 1#立柱的水道中,这两种情况下立柱所 受冰载荷都非常小,即被完全遮蔽,因此 3#立柱所受冰载荷随着冰向角增大先增 大后减小。

 表 5-3 不同冰向角条件下各立柱所受冰力平均值

 Table.5-3 Average ice load on columns at different ice direction

 注柱
 冰向角 θ
 平均冰力值

 3号
 (°)
 (KN)

 0
 15.827
 0
 2.563

立柱	冰向角 θ	平均冰力值	立柱	冰向角 θ	平均冰力值
编号	(°)	(KN)	编号	(°)	(KN)
	0	15.827		0	2.563
1	15	16.144	2	15	10.006
1	30	15.263	5	30	9.894
	45	15.450		45	2.774
	0	14.927		0	2.478
n	15	15.208	4	15	12.149
L	30	15.391	4	30	14.085
	45	15.176		45	15.174



图 5-12 不同冰向条件下各桩腿的平均冰载荷 Fig. 5-12 Average ice load of each column at different ice directions



由上述计算结果可以得出结论:多桩腿平台各立柱之间会相互干扰,产生遮蔽效应,并直接影响立柱所受冰载荷大小;冰向变化其实就是立柱空间排布方式的改变,冰向的改变会影响各立柱遮蔽效应的程度;冰力变化由遮蔽效应程度决定。

5.4 四桩腿平台结构冰载荷遮蔽效应分析

上一节计算结果表示,多立柱平台结构与平整冰碰撞时,各立柱间会相互影响,导致冰载荷的遮蔽效应。本节将对多桩腿平台冰载荷遮蔽效应的影响因素以 及遮蔽系数展开进一步讨论。

5.4.1 多桩腿平台结构中单立柱的遮蔽系数

根据 Kato^[70]提出的多立柱结构中单立柱冰载荷衰减的表示方式,单立柱所受 冰载荷可以表示为:

$$F = k_s F_0 \tag{5-1}$$

其中, F 为多桩腿结构中单立柱所受冰载荷大小; F₀ 为单立柱与平整冰作用 是所受冰载荷大小, k_s为多桩腿结构中单立柱冰载荷的遮蔽系数。

表 5-4 不同冰向角条件下各立柱遮蔽系数

立柱 编号	冰向角 θ (°)	遮蔽系数	立柱 编号	冰向角 θ (°)	遮蔽系数
	0	0.727678		0	0.117839
1	15	0.742253	3	15	0.460046
1	30	0.701747	5	30	0.454897
	45	0.710345		45	0.12754
	0	0.686299		0	0.113931
2	15	0.699218	4	15	0.558575
	30	0.707632	4	30	0.647586
	45	0.697747		45	0.697655

Table.5-4 Shadowing coefficient of columns at different ice direction

本文第四章中计算了单独锥形立柱与平整冰作用过程。取第四章中相同工况下立柱平均冰载荷大小,冰厚为 0.3m,碰撞速度 0.4m/s,锥角为 60°,可得 F₀= 21.75KN。由此可以得到上一节中各立柱在不同冰向下的冰载荷遮蔽系数,计算结果如表 5-4 所示。图 5-13 给出了不同冰向下各立柱冰载荷遮蔽系数的曲线图。可



以看到,在相同条件下,立柱的冰载荷变化情况即为其遮蔽系数的变化情况。黄 焱^[71,72]等人的模型实验结果发现,冰向为 0°时迎冰方向前侧的两立柱冰载荷大 小小于单独立柱所受冰载荷,即有衰减;冰向为 45°时,两侧桩腿(本文中的 2# 立柱与 4#立柱)的冰载荷大小接近,且都小于前侧立柱(本文中的 1#立柱)。本 章模拟结果均与实验结果相吻合。



图 5-13 不同冰向条件下各桩腿的遮蔽系数 Fig. 5-13 shadowing coefficient of each column at differetn ice directions

1#立柱与 2#立柱为碰撞过程中最早与海冰接触的前侧立柱,这两个立柱的衰 减系数稳定在 0.7 左右。这说明造成遮蔽效应的原因除了前侧立柱改变海冰结构 从而影响后侧立柱外,立柱之间的制约和相互影响也会导致遮蔽效应的发生。本 章使用的四桩腿平台结构并不是独立的四个桩腿,其之间有导管架相连,不能简 单当作四个独立桩腿问题来处理。

5.4.2 自由边界对立柱冰载荷的影响

分析前文模拟结果可以得知,在多桩腿平台结构中,立柱所受冰载荷的遮蔽 效应与立柱发生碰撞时所处的海冰结构环境有密切关系。主要的影响因素为平整 冰自由边界的位置。



上海交通大学硕士学位论文



图 5-14 不同立柱所处冰力环境示意图 Fig.5-14 Illustration of circumstance of different columns

如图 5-14 所示为多立柱结构中立柱所处的不同海冰结构环境。红框标识范围 可以看作不同立柱与海冰发生碰撞时海冰的结构环境,蓝色标注了自由边界的位 置。图中 3#立柱两侧海冰边界均为自由边界,4#立柱左侧的海冰边界为自由边界, 2#立柱右侧海冰边界为自由边界,且 2#立柱距离自由边界的距离更近。立柱与平 整冰碰撞时,可以将平整冰当作半无限大平板来处理,由结构力学知识分析可知, 平板边界条件对碰撞力大小有直接影响。分析碰撞阶段立柱的平均冰力可知,3# 立柱所受冰载荷最小,2#立柱与 4#立柱所受载荷接近,且通常情况下 2#立柱载荷 更小,1#立柱所受载荷最大。这与上一节的模拟结果吻合。针对自由边界对单柱 冰载荷的影响,有学者进行了一系列数值模拟分析,结果发现,在一定条件下, 立柱的衰减系数是一个与立柱直径 D、立柱与自由边界的距离 s、冰速 v 以及海冰 尺寸等参数有关的分段函数,且在每一分段内,函数曲线接近线性^[40]。



5.4.3 多桩腿平台结构总遮蔽系数

ISO 冰力规范标准给出了有关多桩腿平台结构总冰载荷的计算参考式,该式同时考虑了海冰的堆积、遮蔽效应以及破坏顺序等因素的影响:

 $F_T = K_S K_n K_i F_A$

(5-2)

其中, *F_T*为多桩腿平台结构所受总冰力, *F_A*为各个单独立柱所受总冰力, *K_s*为遮蔽系数, *K_n*为考虑海冰非同时破坏情况下的影响系数, 一般取*K_n*=0.9, *K_j*为海冰堆积的影响系数, 对于本文研究的平整冰, 取*K_j*=1.0。遮蔽系数*K_s*与立柱的空间分布、直径以及冰向密切相关, 需要针对多桩腿平台结构的具体情况来确定。

Wang^[40]等人的研究给出了立柱受自由边界影响的衰减系数与立柱结构、海冰参数以及冰速等条件相关的经验公式。结合 ISO 冰力标准给出的冰力计算标准,得到了多立柱结构冰载荷遮蔽系数的计算公式,如式(5-3)所示:

$$k_{s} = \begin{cases} \frac{s - \frac{D}{2}}{D} & \text{if } \frac{s - \frac{D}{2}}{D} < 1\\ \min\left(\frac{\sigma_{f}h^{2}}{3.47F_{0}} + \frac{s - \frac{D}{2}}{D}, 1.0\right) & \text{if } \frac{s - \frac{D}{2}}{D} \ge 1 \end{cases}$$
(5-3)

其中,s表示立柱中心距离自由边界的距离,D为立柱水线面处的锥径。

则多立柱结构总冰力遮蔽系数可以表示为各立柱遮蔽系数的平均值,如式 5-4 所示。对于有多个自由边界影响的立柱,其总遮蔽系数为各自由边界造成的遮蔽 系数乘积。

$$k_s = (k_{s1} + k_{s2} + k_{s3} + k_{s4})/4 \tag{5-4}$$

表 5-5 给出了上述两种方法得到的平台总冰力遮蔽系数计算结果。图 5-15 给 出了基于 ISO 冰力标准估算得到的平台总冰力遮蔽系数与根据本章模拟结果计算 得到的总冰力遮蔽系数曲线。

Table.5-5 Total shadowing coefficient based on simulation and 15O standard			
	基于数值模拟的遮	基于 ISO 冰力标准的遮蔽	
小问用サ(゜)	蔽系数	系数	
0	0.411437	0.476	
15	0.615023	0.802	
30	0.627966	0.825	

表 5-5 基于数值模拟和 ISO 冰力标准计算得到的平台总冰力遮蔽系数



45 0.558322 0.633 0.7 simulation results ISO results 0.65 shadowingcoefficient 0.0 2.0 2.0 0.45 0.4 L 10 15 30 35 40 45 5 20 25 theta

上海交通大学硕士学位论文

图 5-15 平台总遮蔽系数对比 Fig.5-15 Comparison of platform total shadowing coefficient

观察图中曲线可以发现,本章的计算结果与 ISO 计算结果有较好的一致性, 但遮蔽系数总体偏小。这可能是因为 ISO 冰力标准计算各个立柱的k_s时,未考虑 海冰与前侧立柱作用时已经产生的裂纹损伤,因此与其计算得到的后侧立柱冰载 荷相比,模拟结果的数值会偏小,因此得到的遮蔽系数也会偏小。

5.5 本章小结

本章研究了多桩腿平台结构与平整冰相互作用的动力过程,计算了各个立柱 所受冰载荷,并分析了多桩腿平台结构冰载荷的遮蔽效应以及冰力衰减的原因。 具体的研究内容有:

(1)计算分析了多桩腿平台结构与平整冰相互作用的动力过程。平整冰与立 柱碰撞时,由于位于前侧的立柱对海冰的破坏和切割作用,导致海冰内部形成若 干条明显的水道。因此后侧的立柱与海冰发生碰撞时,海冰的结构、形状和力学 特性等都已经发生了明显的变化,则其对后侧立柱产生的作用力也与前侧立柱不 同。

(2)研究了不同冰向下各立柱所受冰载荷力的变化情况。研究发现,1#立柱 与2#立柱由于率先接触到海冰,因此几乎不会受到遮蔽效应的影响,所受平均冰



力随冰向变化保持稳定。4#立柱随着冰向角不断变大,其位置逐渐远离1#立柱所 产生的水道,因此其所受遮蔽效应也逐渐减小,冰力呈增大趋势。3#立柱所受冰 载荷随着冰向角增大先增大后减小。

(3)根据单独立柱所受冰载荷大小,计算得到了各个立柱的遮蔽系数,总体 变化趋势与立柱所受冰载荷变化趋势相同。该结果与其他学者的模型实验结果相符。

(4) 遮蔽效应造成冰力衰减的主要原因为平整冰自由边界的影响。立柱与自由边界的距离以及其两侧自由边界的数量直接决定了其所受冰载荷的大小。

(5)计算了多桩腿平台总冰载荷衰减系数。将本章数值模拟得到的结果与 ISO 冰力标准计算得到的结果相比,结果有较好的一致性,但遮蔽系数总体偏小。 这可能是因为 ISO 冰力标准计算各个立柱的衰减系数时,未考虑海冰与前侧立柱 作用时已经产生的裂纹损伤,因此与其计算得到的后侧立柱冰载荷相比,模拟结 果的数值会偏小,因此得到的遮蔽系数也会偏小。


第六章 船舶连续破冰过程数值模拟研究

6.1 引言

随着南北极科考事业的迅速发展以及北极航道逐渐成熟,极地船舶逐渐成为 世界各国迈向极地最为依仗也最重要的工具。极地船舶装备主要有破冰船、极地 科考船以及极地商用船舶等。我国先后有极地号、向阳红 10 号、雪龙号等破冰船 与科考船先后前往南北极开展工作,最新交付的雪龙 2 号也已经投入使用,并规 划建设雪龙 3 号以及核动力破冰船。我国目前极地船舶的设计技术仍处于起步阶 段,有相当多的技术依赖国外引进,在极地船型开发、极地声学和通信导航以及 极地材料等重点技术方面与国外存在较明显差距。为了满足我国极地开发的战略 需求,提升我国在极地资源、极地科考、北极航道开辟与维护等方面的话语权, 急需要国内学者自主研发和建造一批安全可靠的极地船舶。对于极地船舶的研究 任重而道远^[73]。

船舶在极地航行时会受到海冰阻力的影响。在碎冰区航行的商用船舶通常会 受到碎冰阻力的影响,这部分阻力是由碎冰撞击船体或者覆盖在船体表面发生滑 移而造成的。破冰阻力是船舶主动破冰时,海冰对其造成的阻力。破冰船的破冰 模式共有三种,分别为:连续式破冰、冲撞式破冰以及堆积水式破冰^[74]。

当平整冰的冰层较薄,强度较小或者船舶由足够的破冰能力可以连续破冰时, 破冰船可以在冰区持续航行,这样的破冰形式称作连续破冰形式,破冰过程如图 所示。目前国际上常用的 IACS URI 冰区分级对应了船舶连续破冰能力,同时规 定了不同冰区的船舶建造标准。根据冰层厚度,冰级分为 PC-1~PC-7 七个等级, 通常能在冰区稳定航行的破冰船为 PC-3~PC-5 级的中型破冰船,而等级最高的 PC-1 级破冰船可以全年在最大厚度为 3m 的冰区稳定航行^[73, 74]。连续破冰形式在冰 区航行中最常见,本章将主要讨论这种破冰形式。

当冰层较厚或者破冰船等级不足以完成连续破冰时,可以采用冲撞式破冰形式。破冰船以较快的速度冲撞冰层,依靠船首部的强度和自身动能破坏冰层结构; 通常这种撞击需要反复多次,则船舶需要倒退几倍船长的距离然后再次冲撞,直 到开辟出能供船舶通行的航道。目前,随着冰区全回转装置的发展,这种破冰模 式逐渐增多。

当冰层过厚或者强度过大时,需要考虑堆积水式破冰方法。这种模式是依靠 船舶自身重力实现破冰。通常会将船首压载水舱的水抽调至船尾,使船舶处于尾



倾状态,船首翘起;随后将船舶航行至冰层上方,再将压载水抽调至船首,利用船首重量和压载水重量将冰层压碎。上述三种破冰模式通常被组合使用,以面对 复杂冰况。



图 6-1 船舶连续破冰过程示意图 Fig.6-1 Illustration of continous icebreaking mode

本章使用 LS-DYNA 软件进行了船舶连续破冰航行过程的数值模拟,选用某 常见极地船型,使用第三章建立的平整冰粘聚单元模型,研究了船舶连续破冰过 程中海冰的力学行为,讨论了船速和冰厚等因素对冰区航行冰阻力的影响,并将 数值模拟结果与 Lindqvist 半经验公式计算结果进行了对比。



6.2 数值模型与参数设置

6.2.1 极地船舶数值模型

本章选取挪威 AKER 公司的 Antarctic Endurance (南极耐力号)极地作业船作为研究对象,如图 6-2 所示。该船全长 L=130m,宽 B=23m,属于中型破冰船,可以在一般冰况情况下连续破冰航行。

在 LS-DYNA 材料库中选择刚性材料作为船体材料,不考虑船体变形以及破 冰过程中外力对船舶航行状态的影响,仅保留船舶航行正方向一个自由度,约束 其他五个自由度。建立的极地船舶数值模型如图 6-3 所示。



图 6-2 挪威极地船舶南极耐力号 Fig.6-2 Norweigian polar ship Antarctic Endurance



图 6-3 极地船舶的有限元数值模型 Fig.6-3 FEM computational model of the polar ship



6.2.2 海冰模型参数

与 4.2.2 节相同,本章依旧选用第三章建立了海冰粘聚单元模型。海冰的实体单元模型采用六面体八节点有限单元建立,取 100m*200m 的平整冰进行计算。海冰参数值见表 6-1。

表 6-1 海冰单元与粘聚单元模型参数

	单元	粘聚单元		
参数	数值	参数	数值	
弹性模量 E	2GPa	弹性模量 E	2GPa	
密度 ρ	900 kg•m ⁻³	密度 $ ho$	900 kg•m ⁻³	
泊松比レ	0.3	横向断裂强度 T	0.5 MPa	
屈服应力 σ_y	2 MPa	纵向断裂强度 S	0.7 MPa	
		断裂能	30 J•m ⁻²	

Table.6-1 Principle parameters of ice model

6.2.3 计算条件设置

在如图 6-4 所示的计算域中,海冰保持不动,船舶向右移动与平整冰发生碰撞。平整冰与平台接触的边界设定为自由边界,其余三边约束三个方向的自由度, 并设置为无反射边界条件,以模拟半无限大的平整冰。本章研究中没有考虑海水 对碰撞过程的影响,仅在海冰下方增加海平面,并在垂直方向定义海水对海冰的 浮力作用,方向竖直向上。



图 6-4 计算域设置 Fig.6-4 Computational domain settings



设定平整冰与立柱碰撞的接触模式。立柱和平整冰之间的接触采用面面接触的侵蚀算法,在LS-DYNA中选择算法"CONTACT_ERODING_NODES_TO_SURFACE"。平整冰与立柱之间的摩擦力系数设定为0.2。破碎堆积的碎冰之间的接触采用单面接触的算法,在LS-DYNA中选择接触算法"CONTACT_ERODING_SINGLE_SURFACE"。海冰间的摩擦系数设定为0.1。

6.3 船舶连续破冰过程数值模拟结果与分析

6.3.1 船舶连续破冰过程

如图 6-5 至 6-8 所示给出了船速 1.5m/s,冰厚为 0.5m 时船舶连续破冰过程的 模拟结果,可以完整观察到船舶连续破冰航行的全过程。可以看到,船体刚接触 到冰层时,船首连续挤压平整冰使其发生局部破坏;随着船舶的不断推进,挤压 破坏不断发生,同时之前产生的裂纹也逐渐扩展,冰层发生大面积破坏。破坏的 碎冰在船体附近堆积、覆盖在船体表面并发生滑移。也有碎冰在船舶推进过程中 发生翻转、滚动等现象。图 6-9 显示了模拟进行到 t=15s 时的侧视图,此时已经产 生大量碎冰,且主要集中堆积在水线面附近,有少量碎冰在船体周围翻转滑移。 图 6-10 显示了船舶行进 t=20s 时冰层的状况,可以观察到碎冰在水道两侧堆积。



图 6-5 t=1s 时模拟结果 Fig.6-5 Simulation result at time t=1s



上海交通大学硕士学位论文



图 6-6 t=5s 时模拟结果 Fig.6-6 Simulation result at time t=5s







Fig.6-8 Simulation result at time t=15s





图 6-9 t=15s 时模拟结果(侧视图) Fig.6-9 Simulation result at time t=15s (side view)



Fig.6-10 Ice situation at time t=20s

6.3.2 船舶连续破冰航行冰阻力

LS-DYNA 软件通过分析船体所受的总载荷,计算分析得到船舶在航行方向所 受到的冰阻力大小。如图 6-11 给出了船舶航行 20s 的冰阻力的时历曲线。从图中 可以看到,冰阻力呈随机波动的脉冲载荷形式,且振幅较大。在碰撞初期,冰载 荷震荡上升,随后逐渐趋于稳定,在一定范围内波动。在碰撞初期,随着海冰的 不断破坏,碎冰开始堆积,碎冰与船体接触面积逐渐增大,冰载荷开始上升、当 碎冰堆积达到一定程度时,在船体表面覆盖和滑移的碎冰数量以及船体与平整冰 碰撞过程趋于稳定,冰载荷在一定范围内波动。



上海交通大学硕士学位论文



图 6-11 船舶航行冰阻力时历曲线 Fig.6-11 Time histories of ice force on the ship

6.3.3 船速对连续破冰阻力的影响

研究船舶冰阻力之前,首先介绍破冰阻力的 Linndqvist 半经验公式。该公式 由 Lindqvist^[75]基于在波西尼亚湾大量实船实验数据拟合回归得到,将船舶航行冰 阻力总结为与船型参数、海冰参数以及航行速度等因素有关的表达式,是目前世 界上最常用的冰阻力计算公式。该公式将冰阻力分为挤压阻力、浸没阻力以及断 裂阻力三个部分。

挤压阻力Rc是船首与平整冰发生挤压作用时所产生的阻力。其计算公式如下:

$$R_{C} = 0.5\sigma_{b}h^{2}(tan\phi + \mu \frac{cos\phi}{cos\psi})/(1 - \mu \frac{sin\phi}{cos\psi})$$
(6-1)

其中, σ_b 为海冰的断裂强度,h为冰厚, ϕ 、 ψ 和 α 分别表示船体的船首纵倾角,船首水线入角以及船首的法向飘角,三个角度满足关系式 $\psi = \arctan\left(\frac{tan\phi}{tan\alpha}\right)$ 。 μ 表示冰块与船体的摩擦力系数。

断裂阻力*Rb*表示平整冰在受到压力发生弯曲断裂过程所引起的船舶阻力,其 计算公式如下:



$$R_b = \frac{27}{64} \sigma_b B \frac{h^{1.5}}{\sqrt{\frac{E_i}{12(1-\nu^2)g\rho_w}}} (tan\psi + \mu \frac{cos\phi}{cos\psi sin\alpha}) (1 + \frac{1}{cos\psi})$$
(6-2)

其中,g为重力加速度, ρ_w 为海水的密度, E_i 为海冰的弹性模量。

浸没阻力*Rs*表示碎冰在船体表面覆盖并发生滑移过程所引起的船舶阻力,计 算公式如下:

$$R_{s} = (\rho_{w} - \rho_{i})ghBT\frac{B+T}{B+2T} + (\rho_{w} - \rho_{i})ghBT\mu(0.7L - \frac{T}{tan\phi} - \frac{B}{4tan\alpha} + Tcos\phi cos\psi\sqrt{\frac{1}{sin\phi^{2}} + \frac{1}{tan\alpha^{2}}})$$
(6-3)

其中,浸没阻力有两部分组成,右边的第一项表示碎冰在船体作用下沉入水中随损耗的势能,第二项表示碎冰在船体表面摩擦滑移时所产生的摩擦阻力。式中,B为船宽,T为吃水,ρ_i表示海冰密度。

总冰阻力由上述三个部分组成,再加上基于经验估算得到的船速 V 对阻力的 影响,得到了 Lindqvist 半经验公式:

$$R_i = (R_c + R_b)(\frac{1+1.4V}{\sqrt{gh}} + R_s(\frac{1+9.4V}{\sqrt{gL}})$$
(6-4)



Fig.6-12 Comparison of ice force on ship at different velocity

本节分别研究了船速为 0.9m/s, 1.2m/s, 1.5m/s 和 1.8m/s 时的船舶航行阻力, 保持冰厚为 0.5m 不变, 航行时长 20s。计算 20s 内不同船速下船舶航行阻力的平



均值,并将结果与通过 Lindqvist 半经验公式计算得到的估算值进行对比,结果如 图 6-12 所示。

观察对比结果可知,本文模拟得到的船舶航行冰阻力与 Lindqvist 经验公式估算结果吻合较好,冰阻力随船速变化的趋势基本相同;模拟得到的冰阻力与公式计算结果相比总体偏小,主要原因为本文模拟中未考虑海水对平整冰与碎冰的拖曳力等作用,而经验公式估算中考虑了碎冰翻转沉降等于海水相关作用而导致的势能消耗,因此造成误差。

6.3.4 冰厚对连续破冰阻力的影响

本节分别研究了冰厚为 0.3m, 0.4m, 0.5m 以及 0.6m 时的船舶航行阻力,保持船速 1.5m/s 不变,航行时长 20s。计算 20s 内不同冰厚下船舶航行阻力的平均值,并将结果与通过 Lindqvist 半经验公式计算得到的估算值进行对比,结果如图 6-13 所示。观察对比结果可知,本文模拟得到的船舶航行冰阻力与 Lindqvist 经验公式估算结果吻合较好,冰阻力随冰厚变化的趋势基本相同。



图 6-13 不同冰厚条件下船舶航行冰阻力对比结果 Fig.6-13 Comparison of ice force on ship at different ice thickness

6.4 本章小结

本章使用 LS-DYNA 软件进行了船舶连续破冰航行过程的数值模拟,选用挪



威极地作业船南极耐力号作为研究对象,使用第三章建立的平整冰粘聚单元模型,研究了船舶连续破冰过程中海冰的力学行为,讨论了船速和冰厚等因素对冰区航行冰阻力的影响,并将数值模拟结果与Lindqvist半经验公式计算结果进行了对比。 具体内容如下:

(1)介绍了极地船舶目前研究进展以及船舶冰区航行的三种主要破冰形式。 本章选择连续破冰形式进行研究。

(2)选择挪威极地作业船南极耐力号作为研究对象,建立了极地船舶的数值 模型,选择第三章建立的平整冰粘聚单元模型,进行船舶连续破冰过程的数值模 拟研究。

(3)通过模拟结果观察到了船舶连续破冰全过程。平整冰首先发生局部破坏; 随着船舶的不断推进,挤压破坏不断发生,裂纹逐渐扩展,冰层发生大面积破坏。 破坏的碎冰在船体附近堆积、覆盖在船体表面并发生滑移。观察到了碎冰翻转、 滚动等现象。

(4)介绍了冰阻力 Lindqvist 半经验公式,研究了船速和冰厚对冰区航行冰阻力的影响。模拟结果与半经验公式计算结果总体吻合较好。



第七章 总结与展望

7.1 全文总结

本文以粘聚单元理论为基础,使用非线性有限元方法,借以显示动力学分析 软件 LS-DYNA 作为计算平台,建立平整冰的粘聚单元模型,研究了平整冰与竖 直锥形立柱、四桩腿带锥平台结构以及极地船舶三种不同类型极地结构物相互作 用的动力过程。本文成功模拟了碰撞发生过程,观察到海冰的断裂、破碎、堆积 与翻转等力学行为。计算分析了不同结构物所受海冰载荷,探究了抗冰锥角角度、 冰厚、碰撞速度、冰向等因素对不同结构物冰载荷大小的影响,并将模拟结果与 ISO 冰力标准计算结果以及试验、其他数值方法模拟结果等进行比较,有较好的 一致性。本文主要的研究内容与成果包括:

(1)总结分析了海冰的主要性质,包括海冰的物理性质、力学性质、还病得破坏机理与破坏形式等。针对本文研究的平整冰,探讨阐述了海冰各向异性弹塑性本构模型,作为建立海冰模型的理论基础。

(2)讨论了粘聚单元法的基本理论,包括粘聚单元理论的基础知识和发展现状,介绍了粘聚单元法中重要的牵引力位移函数,分析了粘聚单元模型不同的有限元格式。基于上述基本理论建立了平整冰的粘聚单元模型,采用 8 节点六面体网格进行冰实体单元的划分。进行了冰锥与刚性板相互挤压的数值模拟研究,将结果与试验结果进行对比,取得了较好的一致性,从而验证了该平整冰模型的准确性与可行性。

(3) 对竖直锥形立柱结构冰载荷进行计算分析。选择渤海湾 JZ20-2MUQ 平台的抗冰立柱作为结构物模型,基于海冰粘聚单元模型建立尺寸为 40m*18m 的平整冰模型,较准确地模拟了平整冰与锥形立柱碰撞的动力过程,该方法在模拟海冰的破碎、堆积以及在斜面上的爬升、翻转等方面有较好的表现,模拟结果与实测结果以及实验结果基本吻合;研究发现抗冰锥角的大小对锥体的减载效果有明显的影响且锥角角度在 40°左右时有较好的抗冰效果。随着锥角的增大,水平方向的冰载荷有明显增加,而竖直方向冰载荷减小;研究了平整冰冰厚对冰载荷大小的影响。结果表明,锥形立柱所受平整冰载荷大小与冰厚呈正相关,且增长速度接近线性。上述结果与 ISO 冰力标准计算结果吻合较好。

(4) 对多桩腿结构冰载荷进行计算分析。基于渤海湾 JZ20-2MUQ 导管架平 台建立了带有抗冰锥角的四桩腿平台结构简化模型,模拟其与平整冰碰撞的动力



过程。建立 40m*18m 的平整冰粘聚单元模型。计算分析了多桩腿平台结构与平整 冰相互作用的动力过程。平整冰与立柱碰撞时,由于位于前侧的立柱对海冰的破 坏和切割作用,海冰内部形成若干条明显的水道并对后侧立柱受力环境造成影响。 研究分析了不同冰向下各立柱所受冰载荷力的变化情况和区别。根据单独立柱所 受冰载荷大小,计算得到了各个立柱的遮蔽系数。分析遮蔽效应造成冰力衰减的 主要原因为平整冰自由边界的影响。立柱与自由边界的距离以及其两侧自由边界 的数量直接决定了其所受冰载荷的大小。计算了多桩腿平台总冰载荷衰减系数。 将本章数值模拟得到的结果与 ISO 冰力标准计算得到的结果相比,结果有较好的 一致性。

(5)对极地船舶连续破冰过程进行计算分析。首先介绍极地船舶常见的破冰 形式。选取某常见极地船舶船型建立有限元模型,研究其在平整冰中连续破冰航 行的动力过程,并分析其冰阻力。通过模拟结果观察到了船舶连续破冰全过程。 平整冰首先发生局部破坏;随着船舶的不断推进,挤压破坏不断发生,裂纹逐渐 扩展,冰层发生大面积破坏。破坏的碎冰在船体附近堆积、覆盖在船体表面并发 生滑移。观察到了碎冰翻转、滚动等现象;研究了船速和冰厚对冰区航行冰阻力 的影响。将模拟得到的结果与冰阻力 Lindqvist 半经验公式计算结果进行对比,吻 合较好。

7.2 研究展望

海冰与极地结构物相互作用问题是一类非常复杂的动力过程分析问题,一方 面由于海冰本身具有复杂的内部结构与材料属性,想要准确模拟其力学行为难度 较大;另一方面,极地结构物种类较多,且极地环境复杂,与海冰接触的工况随 机性较高。因此想要系统完整地研究海冰与极地结构物的相互作用,需要进行的 工作还有很多。本文依托粘聚单元法对这一问题进行了探讨,但研究过程中仍有 较多方面存在不足。结合已有研究成果与进展,对本文研究内容做出如下展望:

(1)本文使用的是适用于大中尺度下海冰断裂堆积等现象的各向异性弹塑性本构模型,将较大尺度的海冰视为二位连续介质,而各向异性弹塑性本构模型可以用来描述大、中尺度下海冰的破碎、堆积重叠和断裂等破坏现象。但该模型在小尺度冰块碰撞、破碎以及流动性等方面仍有一定局限性。下一步研究可以考虑借助现有的海冰颗粒流体动力学方法,对海冰的本构模型进行完善。

(2)本文基于粘聚单元理论建立了平整冰的数值模型并进行计算。模拟结果 较好地展示了海冰与结构物碰撞过程中的挤压破坏和弯曲破坏,并产生碎冰,在



结构物附近堆积、翻转。但模拟中产生的碎冰通常为单独的冰实体单元,而海冰 的实际破坏中,其断裂长度和形状是随机的,会产生尺寸和形状不同的碎冰。这 是该数值模型的局限性。在下一步研究中,可以对粘聚单元模型进行进一步优化, 调整粘聚单元的牵引力-位移函数等参数,使其更接近实际情况。

(3)由于海冰内部的复杂性,其性质较难被确定。本文使用的海冰参数为国 内外学者经过试验研究后给出的参考值。但在不同环境和工况下,海冰性质会有 较大差异。同时,本文用规则的网格划分方式和冰实体单元排布方式模拟海冰内 部复杂结构,会造成一定误差。后续研究需考虑海冰性质和结构的随机性,优化 网格和模型。

(4)本文研究的碰撞过程均为匀速单方向的碰撞,下一步工作中将增加计算 工况,并进一步研究影响海冰载荷的多种因素,提高计算结果的准确性和可信度。





参考文献

- [1]《中国的北极策略》白皮书. 中华人民共和国新闻办公室. 2018.
- [2] 丁德文. 工程海冰学概论[M]. 北京: 海洋出版社, 1999.
- [3] 季顺迎,岳前进.工程海冰数值模型及应用[M].北京:科学出版社,2011.
- [4] 赵喆,梁英波,胡菁菁,等. 北极地区含油气潜力及勘探开发趋势分析[J]. 地 学前沿, 2014, 21(3).
- [5] Gautier D L, Bird K J, Charpentier R R, et al. Assessment of undiscovered oil and gas in the Arctic[J]. Science, 2009, 324(5931): 1175-1179.
- [6] 党学博, 李怀印. 北极海洋工程模式及换件技术装备进展[J]. 石油工程建设. 2016, 42(04): 1-6.
- [7] 付敏,毕海波,杨清华,等.基于卫星观测的 2003-2013 年北极海冰体积变化 估算[J].海洋学报,2018,40(11):14-22.
- [8] 王诺, 闫冰, 吴迪, 等. 北极通航背景下中欧海运航线的时空格局[J]. 经济地理, 2017, 37(12): 9-16.
- [9] 陈明义. 北极航道的开通和利用[J]. 海峡科学, 2018, (05): 3-4.
- [10] Raza Z, Schoyens H. The commercial potential for LNG shipping between Europe and Asia via the Northern Sea Route [J].Journal of Maritime Research, 2014, 11(2): 67-79.
- [11] 张健. 冰载荷作用下船舶结构动态响应及损伤机理[M]. 北京: 国防工业出版 社, 2015.
- [12] 夏立平,谢茜.北极区域合作机制与"冰上丝绸之路"[J].同济大学学报(社 会科学版),2018,29(04):48-59.
- [13] Matlock H, Dawkins W P, Panak J. A model for the prediction of Ice-structure interaction [C]. Annual Offshore Technology Conference, Dallas, USA, 1969: 687-694.
- [14] Karr D G, Troesch A W, Wingate W C. Nonlinear dynamic response of a simple icestructure interaction model [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1993, 115:246-252.
- [15] Eranti E. Dynamic ice structure interaction[D]. Espoo, Finland: Helsinki University of Technology, 1992.
- [16] Kana T, Kamesaki K, Tsukuda H. A numerical model for dynamic ice-structure interaction[J]. Computers & Structures, 1999, 72:645-658.



- [17] Yue Q, Bi X. Ice-induced jacket structure vibrations in Bohai Sea[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2000, 14: 81-92.
- [18] 岳前进,毕祥军,于晓,等. 锥体结构的冰激振动与冰力函数[J]. 土木工程学报, 2003, 36:16-19.
- [19] 季顺迎,王安良,车啸飞,等. 锥体导管架海洋平台冰激结构振动响应分析[J]. 海洋工程, 2011, 29(02): 32-39.
- [20] 岳前进,张大勇,刘园,等. 渤海抗冰导管架平台失效模式分析[J]. 海洋工程, 2008, (01): 18-23.
- [21] 屈衍. 基于现场实验的海洋结构随机冰载荷分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [22] Guo F, Kana T. Dynamic ice force of slender vertical structures due to ice crushing[J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, 56: 77-83.
- [23] 季顺迎, 雷瑞波, 李春花, 等. "雪龙"号科考船在冰区航行的船体振动测量 研究[J]. 极地研究, 2017, 29(04): 427-435.
- [24] Brown T. G., Maattanen M. Comparison of Kemi-I and Confederation Bridge cone ice load measurement results[J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, 55: 3-13.
- [25] Brown T. G., Tibbo J. S., Tripathi D., et al. Extreme ice load events on the Confederation Bridge[J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 60: 1-14.
- [26] Timco G. W., Johnston M. Ice loads on the Molikpaq in the Canadian Beaufort Sea[J]. Cold Regions Science and Technology, 2003, 37: 51-68.
- [27] Vance G P. Analysis of the performance of a 140-foot Great lakes icebreaker: USCGC Katmai Bay[R]. Cold Regions Research and Engineering Lab Hanover, U.S, 1980.
- [28] Kim H S, Kim C, Choi K S, et al. Full scale ice sea trials of Korean ice breaking research vessel 'Araon' on the big floes near Antarctica[J]. Journal of Marine Science & Technology, 2013, 18(4): 515-523.
- [29] 梁云芳, 王迎晖, 廖又明, 等. 冰水池发展现状及趋势[J]. 舰船科学技术, 2015,37(S1): 21-26.
- [30] 黄焱, 史庆增, 宋安. 冰激柔性直立四桩柱结构振动的模型试验[J]. 天津大学 学报, 2009, 42(05): 388-393.
- [31] Huang Y, Shi Q Z, Song A. A model test study on ice induced vibration of compliant multi-cone structures[J]. China Ocean Engineering, 2009, 23(02): 317-328.
- [32] 杨碧野, 张贵勇. 碎冰形状对于船-冰阻力影响的试验研究[C]. 第二届中国舰船研究创新论坛,哈尔滨工程大学,2019.



- [33] 李志军. DUT-1 非冻结合成模型冰物理模拟技术及应用[J]. 大连理工大学学报, 2001, 41: 94-99.
- [34] Gurtner A. Experimental and numerical investigations of ice-structure interaction[D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology,2009.
- [35] David J. McGovern, Wei Bai. Experimental study of wave-driven impact of sea ice floes on a circular cylinder[J]. Cold Regions Science and Technology. 2014,108:36-48.
- [36] Robert E, Nixon W A. Ice tank tests on ice rubble loads against a cable-moored conical platform[J]. Journal of Cold Region Engineering, 2005,19(4): 103-116.
 [37] 季顺迎, 狄少丞, 李正,等. 海冰与直立结构相互作用的离散单元数值模拟[J]. 工程力学. 2013, 30(1):463-469.
- [38] 狄少丞. 基于 GPU 并行算法的海洋平台及船舶结构冰荷载的离散元分析[D]. 大连:大连理工大学. 2015.
- [39] LONG Xue, JI Shunying. Discrete element modelling of relationship between ice breaking length and ice load on conical structure[J]. Ocean Engineering. 2020, 201:107152.
- [40] 王帅霖, 狄少丞, 季顺迎. 多桩锥体海洋平台结构冰荷载遮蔽效应离散元分 析[J]. 海洋工程, 2016, 34(02): 1-9.
- [41] 季顺迎,李紫麟,李春花. 碎冰区海冰与船舶结构相互作用的离散元分析[J]. 应用力学学报, 2013, 30(04): 520-526.
- [42] Zhan D, Agar D, He M, et al. Numerical simulation of ship maneuvering in pack ice[C]. Proceedings of the 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, Shanghai, China, 2010.
- [43] Michael Lau, Karl P. Lawrence. Discrete element analysis of ice loads on ships and structures[J]. Ships and Offshore Structures. 2010,6:3,211-221.
- [44] 白旭,陶冶,周利,等. 破冰船直航破冰载荷的有限元数值模拟[C]. 第十八 届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上),舟山,中国,2017: 197-201.
- [45] Liu Z H. Analytical and numerical analysis of iceberg collisions with ship structures[D]. Proceedings of the 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Estoril, Portugal, 2008.
- [46] 张充霖. 冰载荷作用下船首结构碰撞数值仿真计算分析[J]. 中国海上油气. 2014, 26(S1): 6-10.
- [47] Kim M C, Lee S K, Lee W J, et al. Numerical and experimental investigation of the resistance performance of an icebreaking cargo vessel in pack ice conditions[J].



International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2013, 5:116-131.

- [48] Lu W J, Loset S, Lubbad R. Simulation ice-sloping structure interaction with the cohesive element method[C]. International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering.2012. (OMAE2012).
- [49] 王峰, 邹早建, 任奕舟. 基于粘聚单元模型 平整冰-竖直圆柱体碰撞数值模 拟[J]. 振动与冲击. 2019, 38(16):153-158.
- [50] 王峰. 基于粘聚单元模型的海洋结构物与平整冰相互作用数值模拟研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- [51] 刘路平, 李欣, 徐胜文, 等. 基于粘聚单元法的抗冰海洋平台与层冰相互作用数值模拟[J]. 海洋工程. 2019, 37(2):20-28.
- [52] 刘路平. 浮式海洋平台与海冰相互作用数值模拟. 上海,上海交通大学,2020.
- [53] Zhang N B, Zheng X, Ma Q W. Updated smoothed particle hydrodynamics for simulating bending and compression failure progress of ice[J]. Water. 2017, 9(11): w9110882.
- [54] 卞光夫. 基于 SPH-FEM 耦合算法的海冰-海洋结构物相互作用过程研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学.2019.
- [55] Su B, Riska K, Moan T. A numerical method for the prediction of ship performance in level ice[J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 60(3): 177-188.
- [56] 杨国金. 海冰工程学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000.
- [57] Coon M D, Maykut S A, Pritchard R S, et al. Modeling the pack ice as an elastic plastic material[J]. AIDJEX Bulletin, 1974,24:1-105.
- [58] Pritchard R S. An elastic-plastic constitutive law for sea ice[J]. Journal of Applied Mechanics, 1975, 42:379-384.
- [59] Song S H, Paulino G H, Buttlar W G. A bilinear cohesive zone model tailored for fracture of asphalt concrete considering viscoelastic bulk material[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2006, 73(18): 2829-2848.
- [60] 王晓强. 基于粘聚区模型的复合材料拉伸性能细观有限元分析[D]. 哈尔滨工程大学, 2012.
- [61] Kim H, Ulan-Kvitberg C, Daley C. Evaluation of spatial pressure distribution during ice-structure interaction using pressure indication film[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2014, 6(3): 578-597.
- [62] Kim H, Daley C, Colbourne B. A numerical model for ice crushing on concave surface[J]. Ocean Engineering,2015, 106: 289-297.
- [63] Lu W J, Loset S, Lubbad R. Simulation ice-sloping structure interaction with the cohesive element method[C]. International Conference on Ocean, Offshore and

Arctic Engineering.2012. (OMAE2012).

- [64] 许子非, 李春, 叶柯华, 等. 海冰载荷作用下风力机抗冰锥体减载研究[J]. 热能动力工程. 2018, 33(8):121-128. (XU Zifei, LI Chun, YE Kehua. Load reduction characteristic of anti-ice for offshore wind turbine under ice loading condition[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power. 2018, 33(8):121-128. (in Chinese))
- [65] DI Shaocheng, XUE Yanzhuo, WANG Qiang, et al. Discrete element simulation of ice loads on narrow conical structures[J]. Ocean Engineering. 2017, 146:282-297.
- [66] ISO-19906. Petroleum and Natural Gas Industries Arctic Offshore Structure. 2010.
- [67] Timco G W, Weeks WF. A Review of the Engineering Properties of Sea Ice[J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 60(2), 107-129.

[68]Kuehn G A, Lee R W, Nixon W A. The Structure and Tensile Behavior of First-Year

- Sea Ice and Laboratory-Grown Saline Ice[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1990, 112,357-363.
- [69] Timco G W, Irani M B, Tesng J, et al. Model tests of dynamic in ice loading on the Chinese JZ20-2 jacket platform[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1992, 19: 819-832.
- [70] Kato K. Total ice force on multi legged structures[C]. Proceedings of 10th International Symposium on Ice. Espoo, Finland. 1990, 2: 974-983.
- [71] Huang Y, Ma J, Tian Y. Model tests of four-legged jacket platforms in ice: Part 1. Model tests and results[J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 95: 74-85.
- [72] Huang Y, Ma J, Tian Y. Model tests of four-legged jacket platforms in ice: Part 2. Analysis and discussion[J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 95: 86-101.
- [73] 吴刚,王燕舞,张东江.中国极地破冰船总体与结构设计技术现状与展望[J]. 中国造船, 2020, 61(1): 194-203.
- [74] 任奕舟. 破冰船在层冰中连续破冰的数值模拟与冰阻力预报[D]. 上海: 上海 交通大学, 2016.
- [75] Lindqvist G. A straightforward method for calculation of ice resistance of ships[C]. POAC1989, 15th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Lulea, Sweden. 1989, Vol.2: 722-735.



致 谢

写完论文最后一个句号,我在交大校园的生活也接近了尾声。三年前参加夏 令营的情景还历历在目,现在还能回忆起收到预录取邮件时的兴奋与激动。回望 两年半的硕士生涯,有许多人在为我助力,有许多人默默付出,我要向他们一一 表示感谢。

首先要感谢恩师万德成教授。夏令营期间的第一次见面,万老师就教导我们 首先要学会做人,然后再专心科研,做人和学习一样都应当脚踏实地。万老师的 教诲两年多来一直在耳边回响,鞭策着我以认真严谨的态度对待自己的工作与生 活。课题组每周一次的组会万老师都会出席,针对我们的汇报提出宝贵意见与指 导。万老师以多年深厚的学科知识积累和精益求精的治学精神,带领着 CMHL 团 队不断取得突破。感谢万老师为我提供高质量科研平台,让我在探索中不断进步。

感谢 CMHL 课题组刘成副教授、王建华老师、赵伟文老师和曹留帅老师。每 一次与他们的接触与交流都是一个让自己反思和提高的过程。他们扎实的基本功 和对科研执着的追求,是我们课题组每一个人的榜样。

感谢课题组刘鑫旺师兄、缪爱琴师姐、武磊师兄、余安正师兄等。从我进入 课题组开始,他们就在科研和生活上给予我大量的帮助与指导。刘鑫旺师兄在数 学和科研方法等方面给了我很多指导和启发,让我在科研道路上少走了很多弯路。 缪爱琴师姐、武磊师兄、余安正师兄等与我同在 A704 教研室,他们一同营造了和 谐愉快的教研室氛围,也为我的学习生活提供了大量帮助。也要感谢同在 A704 奋 斗的魏德志、李晶琦、卢泽宇、吴定坤等同学,无数个日夜的陪伴给我紧张忙碌 的科研生活增添了许多乐趣,我也会永远记住在这里留下的笑声。

感谢课题组同级的李敏、杨晓彤、谢路毅、梁尚、鲁逸豪、张钰祺以及转博的 胡一丁同学,我们一起进入交大校园,共同学习进步,共克难关,与你们度过了 一段难忘的时光。感谢这几年的陪伴与相互支持,祝你们前路宽阔,也祝胡一丁 同学科研顺利,早日毕业。

感谢我的室友张建宏、曾敏同学,奇妙的缘分让我们相遇,共同的爱好让我 们并肩同行,让我度过一段难忘的时光。感谢付振秋、王怀成、俞嘉臻同学,从大 连到上海,你们一路的陪伴让我不再孤单,祝你们一切顺利。

感谢我的思政老师史舒婧。我们能度过一段顺利的交大生涯,离不开婧姐细 致入微的工作。我在交大校园角角落落都留下了足迹,从新图到陈瑞球楼,从南



体到气膜体育馆,从木兰楼到东 32,感谢一路走来遇到的每一个人。

感谢养育我的父母,你们是我永远温暖的港湾,是我随时都能找到的倾诉对 象,是我迷茫无助时坚强的后盾和依靠。感谢你们二十多年来的辛苦付出,我爱 你们!感谢我的外公、外婆、小姨和堂妹等家人,你们的陪伴与鼓励让我充满希 望!

2020 是特殊的一年。感谢奋斗在每一条战线上的人们,是你们的付出换来了 我们如今平稳安定的生活。感谢年底高产的老林,每一个从木兰楼独自回寝的深 夜,是你的歌声给我陪伴,在阳光并不普照的时刻为我趋走黑暗。感谢你让我明 白是谁一直在身边,让我成为匆匆人群中的幸存者。

2020年12月24日上海



攻读硕士学位期间已发表或录用的论文

[1] 詹开宇,曹留帅,万德成.基于粘聚单元法计算分析锥形立柱冰载荷.海洋工程.(已录用)

[2] Kaiyu Zhan, Decheng Wan, Zhiming Yuan. Cohesive Element Method for Ice Load on Conical Structures. Proceeding the Thirtieth (2020) International Ocean and Polar Engineering Conference Shanghai, China, October 11-16, 2020, PP.743-749.

[3] 刘鑫旺, 詹开宇, 万德成. 势流理论评估下三体船主体船型及片题间距优化. 第十九届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集. 中国, 重庆, 2019, 203-208.

上海交通大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明:所呈交的学位论文,是本人在导师的指导下,独立进行研究 工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外,本论文不包含任何其他个人 或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体, 均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名: 在 日期: 乙卯 年 2月 27日

上海交通大学

学位论文使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定,同意学校保 留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版,允许论文被查阅和借阅。

本学位论文属于 🗹 公开论文

□内部论文,□1年/□2年/□3年 解密后适用本授权书。
□秘密论文, ____年(不超过10年)解密后适用本授权书。
□机密论文, ____年(不超过20年)解密后适用本授权书。

(请在以上方框内打" $\sqrt{}$ ") 学位论文作者签名: $\frac{1}{2}$ 指导教师签名: $\frac{1}{2}$ $\frac{1}{2}$



上海交通大学硕士学位论文答辩决议书



118010910248

姓名	詹开宇	学号	118010910248	所在 学科	船舶与海洋工程			
指导教师	刘成	答辩 日期	2021-01-08	答辩 地点	机动学院A401会议室			
论文题目 基于粘聚单元法的平整冰与极地结构物相互作用数值模拟分析								
投票表决结果: <u>「</u> (<i>「</i>) (同意票数/实到委员数/应到委员数) 答辩结论: D通过 □未通过 评语和决议:								

论文针对极地船舶与海洋工程冰载荷计算的实际需求,开展极地结构物与平整冰相互作用的数值模 拟研究,选题正确,具有重要的理论意义和实际应用价值。

论文主要开展了以下工作: (1)分析了适用于船舶与海洋工程结构物与海冰相互作用的各向异性 弹塑性本构模型,建立了基于粘聚单元法平整冰的数值模型,并利用冰锥挤压刚性板标模算例验证了计 算模型的可靠性; (2)模拟了锥形立柱和平整冰相互作用过程,捕捉到了海冰破坏、碎冰堆积等现象, 分析了锥角、冰厚等因素对冰载荷大小的影响规律,并得到试验验证; (3)模拟了四桩腿平台结构与 平整冰相互作用过程,分析了平台结构冰载荷的遮蔽效应以及自由边界对海冰载荷遮蔽效应的影响,计 算的平台遮蔽系数得到试验结果和冰力规范的验证; (4)模拟了极地船舶连续破冰过程,分析了船速 与冰厚等因素对船舶航行冰阻力的影响规律,结果与经验公式较为一致。

论文研究内容丰富,技术路线正确,内容翔实,结果可信。论文结构完整,条理清晰,逻辑性强。 论文撰写行文流畅,图表规范。论文以及达到硕士学位论文的要求,是一篇优秀的硕士论文。论文工作 表明作者已经掌握本学科坚实的基础理论和系统的专业知识,具有较强的独立从事科研工作的能力。

论文作者在答辩中思路清晰,回答问题正确。经答辩委员会投票表决,全票(5票)一致同意通过 论文答辩,并建议授予硕士学位。

答	职务	姓名	职称	单位	签名
辩	主席	邹早建	教授	上海交通大学	21/212
委品	委员	张怀新	教授	上海交通大学	2Fapt-15
会	委员	万德成	教授	上海交通大学	- BB
成品	委员	王金宝	研究员	中船集团第七O八研究所	242
公签	委员	陈伟民	研究员	上海船舶运输科学研究所	HYKZZ
名	秘书	曹留帅	助理研究员	上海交通大学	黄田小