

海冰工程学

杨国金 编著

石油工业出版社

海 冰 工 程 学

杨国金 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书系统地讲述了海冰工程,内容包括海冰生成运移特征及物理力学性质,冰与结构相互作用的理论和试验方法,抗冰结构和海冰设计作业条件。

本书将工程海冰与抗冰结构设计原理有机地联系起来,是工程技术人员设计冰区结构和进行海冰管理的主要参考书。本书可供高等学校和研究机构相关专业的师生及研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

海冰工程学/杨国金编著.

北京:石油工业出版社,2000.12

ISBN 7-5021-3106-X

I. 海…

II. 杨…

III. ①海冰-海洋水文学 ②海冰-工程水文学

IV. P731.15

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 47247 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

北京国民灰色系统科学研究院计算机部排版

石油工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 37.75 印张 966 千字 印 1—500

2000 年 12 月北京第 1 版 2000 年 12 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3106-X/P·3

定价:90.00 元

前 言

海冰控制着地球上海域的相当大的范围,尤其是极区,海洋几乎终年都在海冰的覆盖或作用之下。极区和亚极区是人们最后即将要认识和利用的海洋和土地。海洋工业起着相当重要的作用。在冰条件下,能源勘探和生产的工业活动不断增加,而且在今后的数十年中将继续发展。冰力学和冰与结构相互作用方面的技术进步从本质上来讲遇到了进一步发展的机遇。本书就是要提醒人们对于冰荷载,冰与海洋结构之间关系的研究,从而对这部分工作进行特殊研究和进一步研究的打算。

海冰荷载和其与近海及浅滩上固定和移动式结构之间的相互作用,主要与作用材料的性质有关。对海冰物理性质和力学性质的认识,无疑将帮助人们把有关结构设计改进成更合理、更安全和更经济的结构。

由已经开展的冰区工作,看出人们对某种环境条件下作用在已建成结构或操作结构上冰力的认识越来越明确了。为了认识施加于不同抗冰结构上的预计冰力,开展了很多研究工作,这些工作表明可以进行结构可靠度和优化设计。为了确定作用于不同结构类型上的冰力分布和强度,理论分析和实验研究都是必须的。

海冰工程学是一门古老而又年轻的科学。从 1905 年至现在也差不多有近百年的发展史了。发表的论文、报告和专著已有数千篇,然而细心查阅这些论文的内容时,多半偏重于河冰、湖冰的物理力学性质。近 40 年来人们开始了海冰的研究,研究的内容也以海冰的物理力学性质为主,开展了现场和室内试验,海冰与结构相作用的室内和现场试验研究。代表著作有:G. D. Ashton 1986 年编的《河流和湖泊冰工程》,T. J. O. Sanderson 1988 年著的《冰力学—近海工程危险性》。前者以河流和湖泊中的冰为主,后者以海冰为主,他们的共同点是以冰的物理力学性质为主,很少涉及到结构。一句话,他们研究的是冰力学^[1],或者是工程海冰学,与结构抗冰工程研究毫不相干,作者深感国内外海冰工程学界存在着一个严重缺陷,即冰力学与结构抗冰两者之间缺乏联系。就中国而言,负责冰力学的是国家海洋局系统及其相关的大专院校,做这部分工作的主要是海洋学家和气象学家。负责结构抗冰工作的是中国海洋石油和港口及船舶工程部门。目前国际上关于海冰工程学的书籍还不多见,绝大部分以结构抗冰为主要目标,只对工程海冰作简单介绍;少数专著则专门介绍工程海冰,虽亦涉及结构抗冰,但不深入^[2]。为此,作者不揣冒昧,谨以本书补此空白,若能为沟通工程海冰与结构抗冰两方面尽一点力量,实属万幸。

本书分六章。绪论主要论述的是海冰在地球上的分布,以及阿拉斯加、波罗的海和渤海及日本近海的海冰和工程类型。第二章和第三章主要阐述海冰的力学性质,包括海冰的生成、生长、分布、形态、运移和消失,以及盐度、温度、厚度、强度和特征,但主要是力学性质,对于海冰而言不仅仅是材料(例如:冰性质直至破坏),它还是传递荷载给结构的介质,随后即完全消失。第四章是试验,它是将海冰与结构直接联系起来的物质实体,互相关系的直接感觉,也是客观实际的最全面的描述。在计算方法尚不成熟的今天,它是指导设计者最有力

的依据。冰与结构相互作用系统包括运动机制和界面性质。对于结构设计而言,这些性质的确很重要。承受过冰作用的结构,由于作用的事实,必将迫使形成运动机制,这将可能使它排除结构,而不改变结构的形状,以便造成作用于结构上最小的冰力;或者承担全部应作用于结构的冰力,结构发生形变,甚至局部破坏而不倒塌。现场测量理论分析和模型试验的综合将开发设计过程中先进的工程概念,并建立工程结构的设计准则。第五章是分析海冰和工程结构之间的相互作用。由于船舶和海洋工程这两类结构上冰的作用特点有相当大的区别,我们将分别说明船舶和近海平台上冰荷载。船舶是一个主动移动的结构,而近海平台是一个被动结构。因此,船舶的推进和工作能力就确定了船体结构的荷载,减少冰荷载的强度仅是次要的作用。然而海洋平台的结构几何形状则是一个重要的因素。它可能影响作用其上的冰力大小,因此,减少冰荷载作用强度可能是主要设计准则之一;关于冰船相互作用,评述了确定实际和设计冰荷载的经验及分析方法,分析了现存实测的船体构件,冰力和应变(应力)足尺数据。碰撞作用是本章主要的课题。评论并对比了所有现行的规则;评述了实验数据,为土木工程及近海结构系统开发了不同结构类型的冰力分析方法。第六章是区划和设计作业参数。该章的主要内容是设计和作业参数的确定,而区划则是参数确定的范围限制。因此,准确地讲是区域性设计作业参数的规定。所以说这种参数是具有一定允许误差范围的规定参数。

杨国金

1999年9月于北京

目 录

第1章 绪 论	(1)
1.1 地球上的海冰	(1)
1.1.1 概 况	(1)
1.1.2 海冰研究现状	(3)
参考文献	(26)
1.2 中国海冰.....	(28)
1.2.1 序 言.....	(28)
1.2.2 冰情划分.....	(31)
1.2.3 中国海冰区划与发展.....	(38)
1.2.4 德国汉堡船舶模型试验有限公司 (HSVA) 技术在中国渤海的应用	(41)
1.2.5 渤海海冰灾害.....	(47)
1.2.6 中国海冰工程.....	(49)
参考文献	(53)
1.3 海冰符号和术语.....	(55)
1.3.1 海冰自然状态.....	(55)
1.3.2 国际海冰符号.....	(58)
1.3.3 WMO 海冰术语	(61)
参考文献	(65)
第2章 海冰调查	(66)
2.1 空中探测海冰.....	(66)
2.1.1 雷达测冰.....	(66)
2.1.2 航空遥感测冰.....	(72)
2.1.3 卫星遥感测冰.....	(81)
参考文献	(90)
2.2 沿岸台站观测海冰.....	(91)
2.2.1 大鹿岛海洋站.....	(91)
2.2.2 小长山海洋站.....	(93)
2.2.3 长兴岛海洋站.....	(95)
2.2.4 鲅鱼圈海洋站	(103)
2.2.5 葫芦岛海洋站	(104)
2.2.6 芷锚湾海洋站	(106)
2.2.7 秦皇岛海洋站	(107)
2.2.8 塘沽海洋站	(109)
2.2.9 龙口海洋站	(111)

2.2.10	烟台海洋站	(113)
2.2.11	其它沿岸海冰概况	(115)
参考文献		(115)
2.3	海中冰调查	(116)
2.3.1	1969 年渤海湾冰情记录 (重冰年)	(116)
2.3.2	1986 年渤海和北黄海冰情纪实 (偏重冰年)	(124)
2.3.3	1988 年辽东湾追冰调查 (常冰年)	(133)
2.3.4	1989 年辽东湾海冰调查 (轻冰年)	(166)
参考文献		(177)
2.4	沿岸冰调查	(178)
2.4.1	概 况	(178)
2.4.2	渤海湾海冰调查	(178)
2.4.3	1966 年莱州湾海冰调查	(182)
2.4.4	辽东湾海冰调查	(189)
参考文献		(214)
第 3 章 海冰物理力学性质		(215)
3.1	与冰力相关的冰性质	(215)
3.2	渤海水文气象	(222)
3.2.1	一般介绍	(222)
3.2.2	气象特征	(223)
3.2.3	水文特征	(229)
参考文献		(239)
3.3	海冰物理性质	(241)
3.3.1	成因和特征	(241)
3.3.2	类型	(250)
3.3.3	冰盖导热系数	(255)
3.3.4	晶粒取向	(256)
3.3.5	温度	(261)
3.3.6	孔隙率	(262)
3.3.7	密度	(264)
3.3.8	盐度	(266)
3.3.9	冰厚测量	(270)
参考文献		(290)
3.4	海冰力学性质	(292)
3.4.1	一般概念	(292)
3.4.2	标准化试验方法	(295)
3.4.3	挤压强度	(301)
3.4.4	弯曲强度	(315)
3.4.5	拉伸强度	(325)
3.4.6	剪切强度	(326)

3.4.7 挤压强度测量	(326)
3.4.8 弹性模量	(341)
参考文献	(343)
第4章 海冰结构试验	(345)
4.1 实验室冰中模型结构试验	(345)
4.1.1 冰池实验室	(345)
4.1.2 试验一般原理	(348)
4.1.3 试验装置和数据采集	(358)
4.1.4 模型冰	(360)
4.1.5 结果介绍和讨论	(361)
4.1.6 试验结论	(384)
4.1.7 锦州20-2平台多工况试验(1989~1992年)	(386)
4.1.8 小比例试验数据	(395)
参考文献	(400)
4.2 现场冰中原型结构试验	(401)
4.2.1 前言	(401)
4.2.2 历史原型测量的回顾	(401)
4.2.3 渤海冰力测量	(413)
4.2.4 平整冰与重叠冰(或层状冰)对平台作用力分析	(452)
4.3 冰力计算	(455)
4.3.1 一般概念	(455)
4.3.2 适用于不同冰区的冰力公式	(456)
4.3.3 适用于渤海的冰力公式	(469)
参考文献	(480)
第5章 抗冰结构	(482)
5.1 灯塔结构冰力分析	(482)
5.1.1 静冰荷载	(482)
5.1.2 动冰荷载	(485)
5.1.3 浮标	(486)
5.1.4 灯塔灯室上的冰或粘着雪的形成	(487)
5.1.5 说明部分	(488)
5.1.6 设计算例	(495)
参考文献	(500)
5.2 多腿结构冰力	(502)
5.2.1 引言	(502)
5.2.2 冰与结构作用的基本概念	(502)
5.2.3 腿柱间距与冰力	(504)
5.2.4 结构设计冰荷载	(505)
参考文献	(508)
5.3 固定刚结构上的冰力	(509)

5.3.1	固定刚结构的定义	(509)
5.3.2	固定刚结构的实例	(509)
5.3.3	固定刚结构冰力考虑	(511)
5.3.4	倾斜结构冰力考虑	(512)
5.3.5	倾斜结构冰脊力考虑	(521)
5.3.6	直立结构固结冰脊力考虑	(523)
5.3.7	非固结冰脊力	(523)
5.3.8	冻结力	(524)
5.3.9	直立窄桩冰力考虑	(524)
5.3.10	作用在人工岛上的冰力	(531)
5.3.11	冰与人工岛相互作用	(536)
参考文献		(541)
第6章 海冰设计作业条件		(543)
6.1	中国海冰烈度区划	(543)
6.1.1	概 况	(543)
6.1.2	海冰概况	(544)
参考文献		(566)
6.2	海冰设计作业参数规定	(567)
6.2.1	一般定义	(567)
6.2.2	海冰环境与特征	(567)
6.2.3	海冰参数	(571)
6.2.4	冰力计算	(585)
6.2.5	海冰管理	(590)
参考文献		(591)
附录		(595)
附录1 渤海和黄海北部冰情等级标准		(595)
附录2 海冰烈度等级		(595)
附录3 有效冰温计算		(595)

第1章 绪 论

1.1 地球上的海冰

1.1.1 概况

地球上的海冰大致分布在三个海域：①南大洋。以南极洲陆地为中心，周围的陆架和其临近海域；②北冰洋。以北极中心水域为主，和其临近的陆架及海湾区域；③亚极区。波罗的海、鄂霍次克海、白令海、哈德逊海、库克湾、芬兰湾和渤海等^[2]区域。

南大洋由太平洋、印度洋和大西洋的南部海域组成，南面以南极大陆为界，北面通常以南极辐合带（约 $48^{\circ}\text{S}\sim 62^{\circ}\text{S}$ 之间，平均 55°S ）为界。南大洋面积为 $38\times 10^6\text{km}^2$ ，约为北冰洋的2.7倍。一般水深 $4000\sim 5800\text{m}$ ，最深 8428m 。北冰洋大致以北极为中心，四周由亚洲、欧洲和北美洲环抱，面积约 $14\times 10^6\text{km}^2$ ，平均水深 1117m ，最深 5449m 。北冰洋大陆架面积广，岛屿众多，通过白令海峡、丹麦海峡、史密斯海峡分别与太平洋和大西洋沟通。

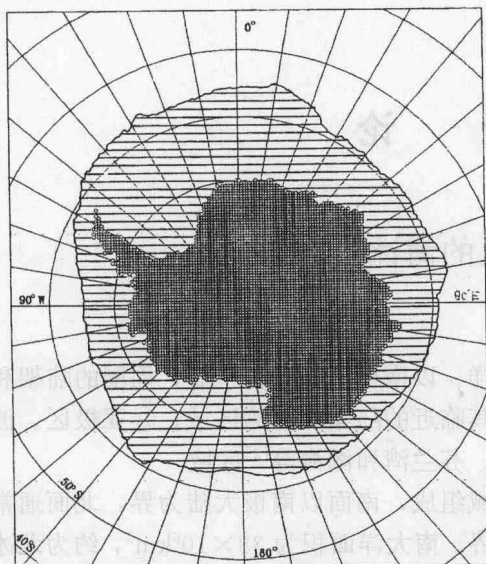
不难看出南大洋与北冰洋最大的差异是：南大洋为三大洋（印度洋、大西洋和太平洋）与南极洲大陆所环绕的水域，与外海直接相通；北冰洋则相反，由三大洲（欧洲、亚洲和北美洲）环绕的水域，通过很窄的几个海峡与外海相通。这就是为什么它们在冰面积及其它特性方面有如此之大差异的重要原因^[3]。在严重冰期的9月份和相对较轻的3月份，南大洋海冰面积在 $3\times 10^6\sim 12\times 10^6\text{km}^2$ 和 $18\times 10^6\sim 25\times 10^6\text{km}^2$ ，夏季有85%的冰融化（图1.1.1）。北冰洋的海冰是3月份最重，9月份最轻，它的结冰面积是 $9.1\times 10^6\sim 11.9\times 10^6\text{km}^2$ ，夏季只有25%的冰融化，因此，北极有大量的多年冰存在，最长的冰龄可达十年以上（图1.1.1）。

1.1.1.1 冰情

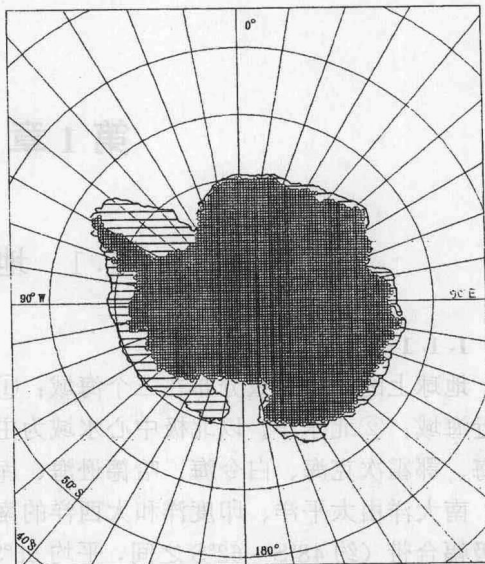
南大洋沿岸因有低温和大风，时有大雪纷飞，故南极大陆周围海冰表面的积雪要比北冰洋海冰表面的积雪多。又因南大洋北界为三大洋沟通的水域，流冰群及冰山漂移的自由度大，在向北流动的过程中，多数海冰被漂走或融化，因此，南大洋的海冰，大多为2~3m厚的“一年冰”。北冰洋则不同，因四周受陆地包围的限制，流冰群绕洋盆流动，仅少部分海冰从斯匹次卑尔根群岛和格陵兰岛间的海峡流出而进入北大西洋，故北冰洋的海冰比较稳定，带有相对“持久性”，多为3~4m厚的“多年冰”。

另外，南大洋的冰山起源地和海冰的结构也与北冰洋不同：后者多来源于格陵兰、加拿大、俄罗斯北部一些岛屿及斯匹次卑尔根等岛屿上的大陆冰川，滑入海中断裂而成，然后沿东格陵兰海流及拉布拉多寒潮南下进入北大西洋。冰块中含有泥土和岩屑，冰块尺度不太大，但密度较大，冰山外形似金字塔状。南大洋的冰山主要来自罗斯海、威德尔海以及南极大陆沿岸地带的陆缘冰架，外形比较平坦如桌状，其体积之大，数量之多，都超过北冰洋的冰山。冰块比较纯洁，色白，密度较小。

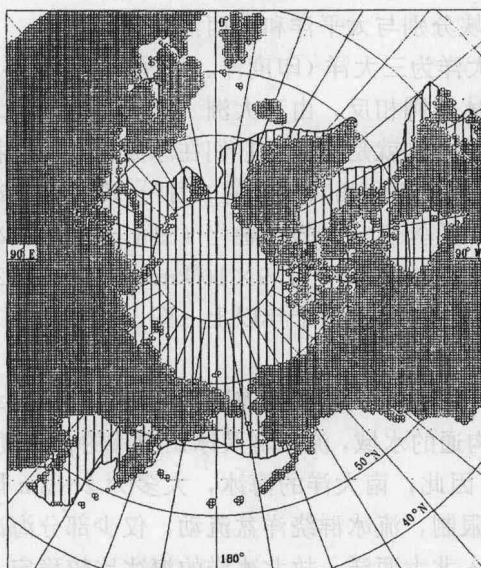
北冰洋海冰可以分几个部分：①北冰洋中心海域；②波弗特海域；③楚奇柯海域；④白令海域；⑤加拿大极区岛域；⑥拉布拉多、纽芬兰和西格陵兰海域；⑦东格陵兰和斯瓦巴德海域；⑧俄罗斯北部沿岸海域。



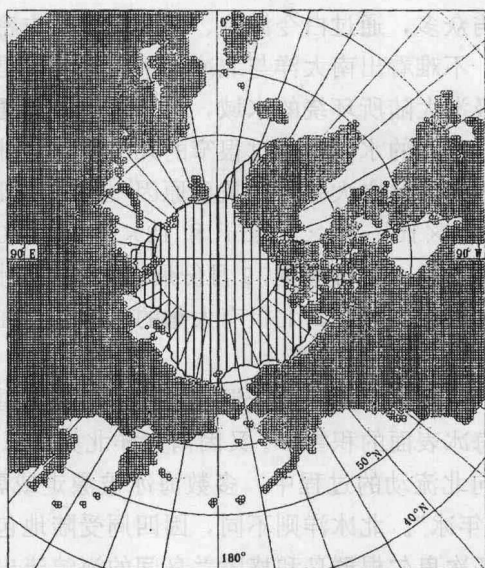
南太平洋最大冰面积
(9月15日)



南太平洋最小冰面积
(2月15日)



北极海最大冰面积
(3月15日)



北极海最小冰面积
(9月15日)

图 1.1.1 极区海冰概况

1.1.1.2 北极冰的漂移

北极海冰的漂移受海流的影响^[2,4]。

①波弗特海有一股旋转流，形成海冰的平稳旋转流动，海冰沿阿拉斯加半岛自东向西漂移。

②在极区中心，偏 90°E 方向有一股跨极海流。因此，形成了北极冰的跨极漂移，一直朝着格陵兰岛方向直接移动。

③东格陵兰有一股沿岸流自北向南，所以就有海冰自格陵兰东岸南下，直到拉布拉多沿

岸。

④由于北方岛屿的阻挡，以及北上的大西洋暖流的影响，海冰很难到达挪威海。

⑤在俄国北部沿岸，由于众多岛屿的影响，海流流速不大，所以这里易形成很厚的固定冰区。

⑥寒潮和大风的作用，北极海冰也可以沿着白令海峡和丹麦海峡流入太平洋和大西洋中。

1.1.2 海冰研究现状

由于冰区海上工业的发展，促进了海冰的研究，尤其是近海石油工业的迅速发展，给海冰的研究带来了机遇。首先是美国阿拉斯的库克湾；随后是加拿大的波弗特海和美国的波弗特海，芬兰的波斯尼亚湾和芬兰湾。中国渤海的海冰研究起步于 60 年代初，发展于海洋石油工业资助的 70 年代初。当然积累资料最多的应属加拿大、前苏联和芬兰，特别是芬兰，为了冰季的航行和改进灯塔结构，进行了大量的海冰调查和试验研究。

1.1.2.1 波罗的海海冰与结构

1) 海冰的变化。波罗的海（包括波斯尼亚湾和芬兰湾）的海冰季节变化很大，最大冰盖面积范围从 52000~420000km²，平均 218000km²。波斯尼亚湾和东芬兰湾冰出现的概率是百分之百，50%的冰出现在北纬 59°的北波罗的海（即波斯尼亚湾和芬兰湾），10%出现在南波罗的海（表 1.1.1），年最大冰量出现在 1 月和 3 月之间^[2,4,5,6]。

表 1.1.1 波罗的海海冰概况

北波斯尼亚湾	初冰 9 月 10 日之前	冰期 7 个月
芬兰湾	初冰 12 月 10 日之前	完全冰冻 1 月下旬
波斯尼亚湾	1 月中旬	—
波斯尼亚海	2 月中旬	—
波罗的海	冰期 190 天	—

冰在风暴条件下，一天之内能运动 20~30km，运动的结果使冰破碎，形成大小不一的冰块，大的有数千米的特征尺寸，中间有水道和裂纹，重叠冰和冰脊，初生冰和雪冰等。破冰船能通过 80cm 厚的平整冰，但不能通过同样厚度的冰脊和雪冰及重新冻结的碎冰。有时候船在这种冰中航行数天而不能离开冰区。

2) 冰数值模型。冰模拟的原理是依据冰漂移和变形的质量和动量守恒。通常由空气和冰的外力，以及冰块中的内力确定冰的运动。在笛卡尔坐标系中，模型的稳态动量方程和质量连续性方程为：

$$\begin{aligned}\tau_a + \tau_w - mfk_x v_i + F &= 0 \\ F &= \nabla \sigma\end{aligned}$$

式中 τ_a, τ_w ——空气和冰应力，由大气和潮流模型用二次应力定律获得；

m ——单位面积上冰的质量；

v_i ——冰速度；

k_x ——垂直表面的单位向量；

f ——参数；

F ——冰的内力；

σ ——冰中应力场，应力与速率和冰厚分布有关，特别是开阔水域部分。

表 1.1.2 波斯尼亚湾冰预报统计检验

24h 检验								
日期	厚度 cm	冰边缘 km	日期	厚度 cm	冰边缘 km	日期	厚度 cm	冰边缘 km
23, 02, 94	3.22	2.00	06, 03, 94	9.27	2.38	17, 03, 94	5.56	2.18
24, 02, 94	4.41	3.05	07, 03, 94	5.39	3.40	18, 03, 94	6.48	1.33
25, 02, 94	8.69	3.88	08, 03, 94	8.66	2.02	19, 03, 94	4.72	1.71
26, 02, 94	4.48	1.04	09, 03, 94	9.27	3.05	20, 03, 94	5.54	3.21
27, 02, 94	6.01	0.79	10, 03, 94	8.63	2.63	21, 03, 94	5.15	9.87
28, 02, 94	5.22	3.09	11, 03, 94	8.72	1.03	22, 03, 94	8.14	14.72
01, 03, 94	4.03	1.72	12, 03, 94	9.05	0.90	23, 03, 94	6.61	4.49
02, 03, 94	7.80	4.78	13, 03, 94	7.44	9.58	24, 03, 94	16.86	8.04
03, 03, 94	5.36	3.71	14, 03, 94	6.71	6.47	25, 03, 94	11.73	9.02
04, 03, 94	8.39	2.87	15, 03, 94	10.99	5.14	26, 03, 94	9.31	7.40
05, 03, 94	13.52	4.57	16, 03, 94	8.01	3.31	27, 03, 94	6.83	6.80
28, 03, 94	8.79	5.21	17, 04, 94	8.10	5.75	07, 05, 94	6.23	7.64
29, 03, 94	14.00	8.01	18, 04, 94	10.42	9.39	08, 05, 94	11.31	12.48
30, 03, 94	7.87	4.61	19, 04, 94	11.55	8.05	09, 05, 94	12.74	4.56
31, 03, 94	5.58	2.94	20, 04, 94	11.78	6.21	10, 05, 94	5.48	8.16
01, 04, 94	12.67	6.02	21, 04, 94	13.67	6.74	11, 05, 94	6.54	9.98
02, 04, 94	7.28	5.59	22, 04, 94	14.15	8.24	12, 05, 94	17.71	20.35
03, 04, 94	5.95	4.71	23, 04, 94	7.76	6.68	13, 05, 94	6.61	12.33
04, 04, 94	7.86	5.82	24, 04, 94	7.54	6.98	14, 05, 94	2.88	6.28
05, 04, 94	11.21	9.33	25, 04, 94	11.32	9.77	15, 05, 94	11.54	25.81
06, 04, 94	10.90	6.55	26, 04, 94	7.89	6.60	16, 05, 94	5.80	7.40
07, 04, 94	8.57	7.33	27, 04, 94	16.31	9.87	17, 05, 94	5.17	11.84
08, 04, 94	8.99	6.71	28, 04, 94	10.03	5.57	18, 05, 94	7.05	11.68
09, 04, 94	6.09	6.25	29, 04, 94	15.72	13.94			
10, 04, 94	6.22	4.06	30, 04, 94	13.10	9.68	Number	85	85
11, 04, 94	5.92	4.67	01, 05, 94	10.74	12.61	最小	2.88	0.79
12, 04, 94	6.32	4.09	02, 05, 94	9.68	9.89	平均	8.53	6.73
13, 04, 94	7.72	5.73	03, 05, 94	6.01	7.87	最大	17.71	25.81
14, 04, 94	8.17	6.58	04, 05, 94	8.74	12.88	SD	3.18	4.17
15, 04, 94	9.46	6.70	05, 05, 94	5.27	9.44			
16, 04, 94	10.71	6.19	06, 05, 94	5.74	10.19			

在模拟中,海冰是作为受压的粘塑性材料处理的。因此,在目前研究的状态下,上述关系是基本关系。

冰厚分布用三个理想状态来描述:开阔水 1—A (A 冰密集度);平整冰厚度 h_i 和堆积冰高度 h_r (表 1.1.2)。这样:

$$m = \rho_i(h_i + h_r)A$$

式中 ρ_i 为冰密度。实际上开阔水部分代表开阔水和带有厚度小于某个截断厚度 h_0 的薄冰。根据波罗的海的冰条件,在模拟中 h_0 取作 4cm。对于三种状态,连续性方程可以描述作:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = -\vec{v}_i \cdot \nabla A + \phi_a + \phi_b$$

$$\frac{\partial h_i}{\partial t} = -\vec{v}_i \cdot \nabla h_i + \psi_i + \phi_i$$

$$\frac{\partial h_r}{\partial t} = -\vec{v}_i \cdot \nabla h_r + \phi_r + \phi_t$$

式中第二项表示力学变形，力的重分布函数 ϕ_a , ϕ_i 和 ϕ_r ，必须满足：

$$h\phi_a + A(\phi_i + \phi_r) = -hA\nabla \cdot \vec{v}_i$$

式中 $h = h_r + h_i$ ，函数 (ϕ_a, ϕ_i, ϕ_r) 与冰速和冰密集度有关。

采用 Arahawa 型计算网格，如图 1.1.2 所示。在 x 和 y 坐标系中，格栅尺寸是 10n mile，而时间步长取作 6h 来描述模型。在动量方程中采用空间中心偏差。对于中心非线性项使用一个半隐含预测修正方法。为此，使每个时间步长上要求两步方法。借助于修正的欧拉方法，数值解 a , h_i 和 h_r 的连续性方程，作为初值问题。在对流项中，采用标准差。

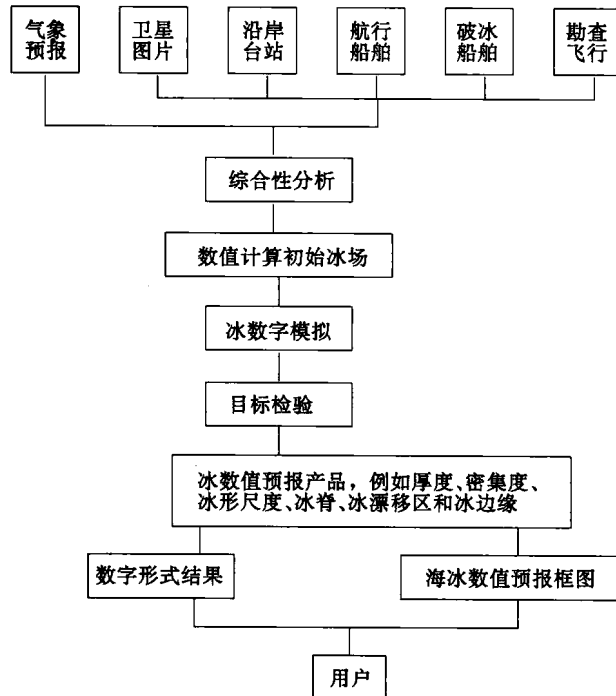


图 1.1.2 数值预报框图

3) 波斯尼亚湾海洋结构类型。这里主要是冬季船舶航行，对于港湾中的灯塔，冰季的生存能力就显得很重要。据介绍，早期灯塔多为圆柱形结构（图 1.1.3），受冰挤压力大，而且冰又多半是挤压破坏，能激起结构的强烈振动，有的灯塔因振动而破坏，经过研究，设计出锥形结构基础、方形沉箱基础和加减振器的灯塔（图 1.1.3）。

1.1.2.2 阿拉斯加波弗特海海冰与人工岛

1) 冰情。波弗特海，即加拿大和美国阿拉斯加北部海域的海冰研究是北极海冰研究最有成绩的海域。它终年都存在一年冰、多年冰和冰山。楚奇科海和白令海的海冰来自波弗特海。冰可从波弗特海流入楚奇科海，之后沿俄罗斯海岸流入白令海。在楚奇科海调查到的一年冰厚 1.25~1.40m 厚（表 1.1.3）；一年冰脊平均每公里有 3 到 5 个，帆高平均为 1.5~3.7m。白令海很少有多多年冰，大部分是一年冰，一年冰脊在每公里之内最多有 3 个，一般帆高在 1.0~2.4m。俄罗斯北部沿岸存在着大量的多年冰、一年冰和冰山。俄罗斯北部陆架面积约为 $3.5 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，大约是楚奇科和波弗特海面积的 10 倍。纽芬兰、西格陵兰和东格陵兰

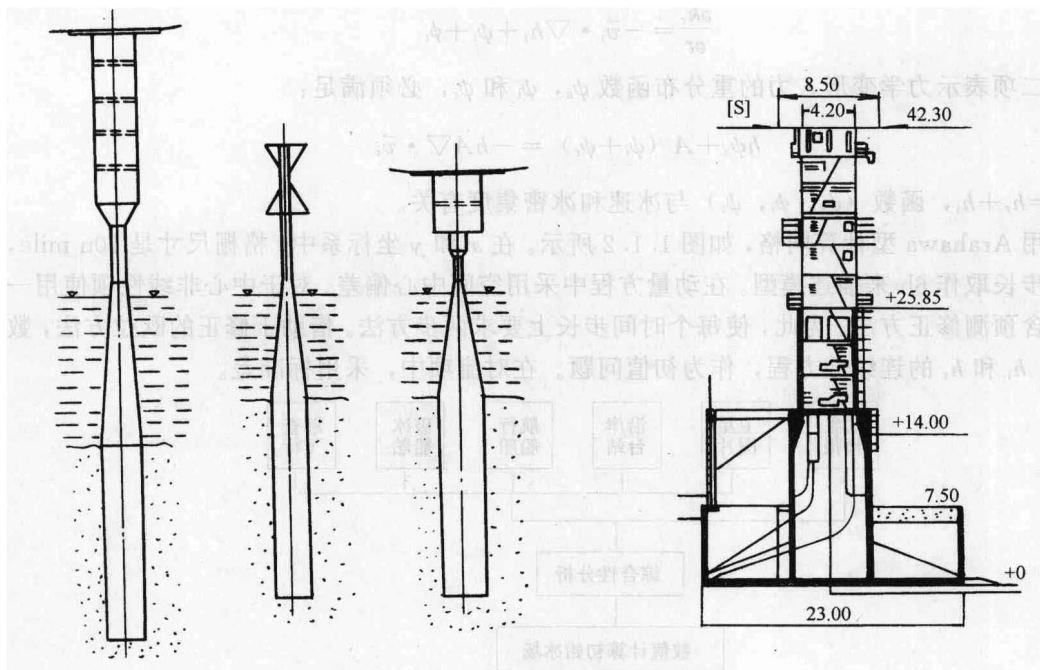


图 1.1.3 波罗的海主要结构形式

也存在着大量的冰山、多年冰和一年冰^[7,8,9]。

波弗特海从 10 月到次年 7 月中海面由完整的冰面覆盖。波弗特海的冰分三个区域：固定、过渡和流冰三个区。固定冰和潮间带上的冰由附着在潮间带上的冰组成，并逐步向 20~25m 水深扩散（图 1.1.4）。这些冰在 4 月份达到最大厚度 2.00m，日运动 100m 左右。在固定冰中冰表面的主要特征是由于冬季风暴而生成的冰脊，这些冰脊的帆高范围在 0.9~2.1m。在固定冰和流冰中间存在一个剪切区，宽度年年都有变化，剪切区中的冰厚 2.00~2.50m，日运动 800m 左右，冰表面主要形态是冰脊、冰丘和水道。流冰具有极区海残留的水面，流冰自北极向外扩散，并分为固定冰区、过渡冰区和流冰区（图 1.1.4）。流冰中主要由 2.50~4.50m 厚的多年冰盖构成。极区冰盖以不变的平均每日 10km 的速度运动^[5]。

表 1.1.3 波弗特和白令海主要冰特性

冰特性	阿拉斯加波弗特海	白令海
冰覆盖	10 月到 7 月中旬	10 月下旬到 6 月初
冰厚, m (平整冰)	2	1
重叠冰, m	5~6	3~4
一年冰脊, m	8~9	5~8
极值, m	30	30
多年冰片, m	6~8	无记录
多年冰脊, m	13~20	无记录
堆积冰, m (固结冰厚)	3~4	2~3

续表

冰特性	阿拉斯加波弗特海	白令海
最大高度, m	11~13	10~13
最大长度, m	300	150~250
运动, m/h (<10m 等深线)	3~6	3
10~20m 等深线, m/h	30~150	$2\sim4\times10^3$
>20m 等深线, m/h	300	$2\sim4\times10^3$
开阔水域冰, m/h	$2\sim4\times10^3$	$2\sim4\times10^3$

在波弗特海十月初就能达到 10/10 的密集度, 白令海的冰变化很大, 与波弗特海不同。在白令海北部当地生成的冰影响外来冰, 通常在十月下旬生成冰盖。白令海南部的冰片主要由北部漂来。白令海中冬冰盖从零变到 8 成。大多数海区风、流、波浪和温度改变都会影响冰的移动, 但主要是潮流。在有风暴的海域, 短期冰运动能出现风应力, 或波浪作用, 拉开冰缝增加水道的宽度。冰运动是常事, 薄冰运动速度达到 300m/h 左右, 能引起落地冰堆积。1979 年 3 月中旬形成堆积冰高度 (水上) 22m, 水下 20m (图 1.1.4) 的大冰堆; 冰脊高度 8~10m, 浮动冰脊可达 25~30m。在白令海冰脊厚度一般都能达到 6m 左右, 然而有些冰脊水下部分有 27m 左右。一年冰脊龙骨为 2.5~4m。根据统计冰脊骨龙与帆高之比为 4.5~6。

2) 冰厚度的两种计算方法:

①公式:
$$h = A(\sum T)^B$$

式中 h ——估算冰厚;

B 和 A ——与实际调查有关的经验常数, A 取 0.5~0.7, B 取 0.5~0.6。

一般冰厚: 1.00~1.30m (Norton 海湾); 1.80~2.10m (波弗特海); 0.45~0.60m, (库克湾)。

②公式:
$$h = KA(S)^{1/2} \text{ 或 } h = 3.4KA(S)^{1/2}$$

式中 h ——冰厚, cm;

S ——冻结指数, $^{\circ}\text{C}/\text{日}$ (S 比平均年指数高 30%~40%);

K ——冰生长常数 (0.5~0.9);

A ——消融常数。

3) 冰力计算方法:

①挤压模型:

$$F = R\sigma_c Dh \text{ 或 } F = 0.0102R\sigma_c Dh$$

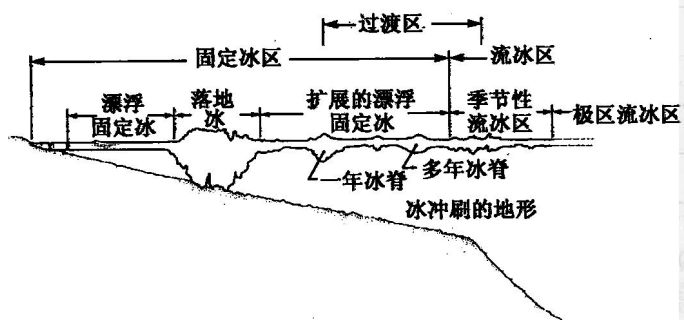
式中 F ——水平冰力, kg;

R ——宽厚比;

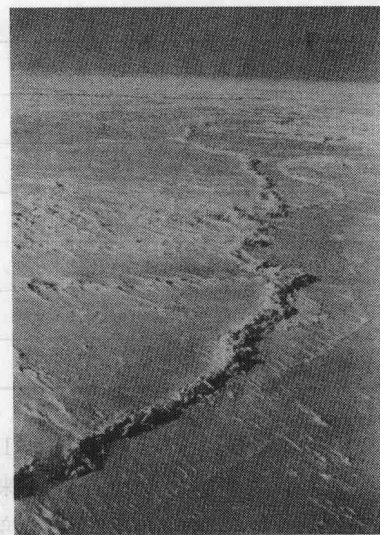
σ_c ——挤压强度, kPa;

D ——结构宽度, cm;

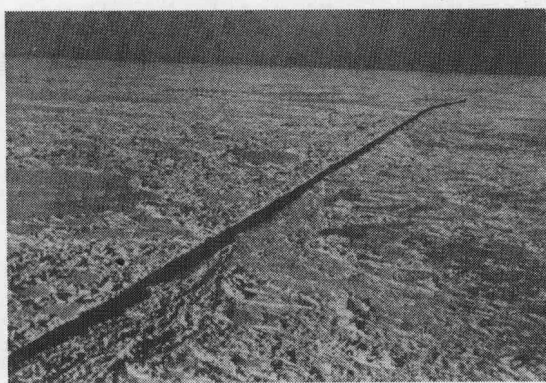
h ——冰厚, cm。



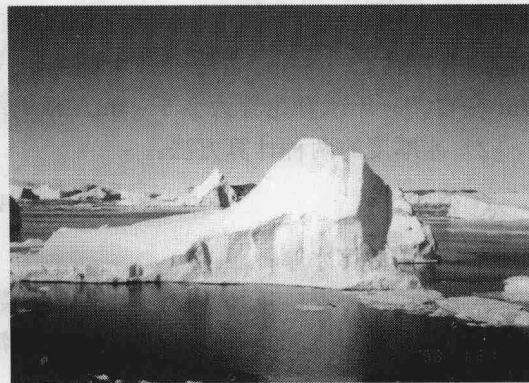
极区海水的三个典型区域



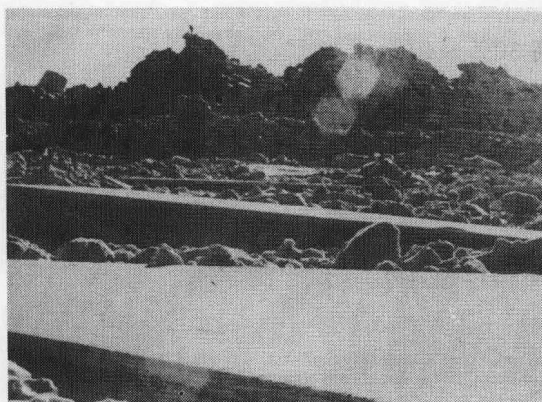
典型的一年挤压冰脊



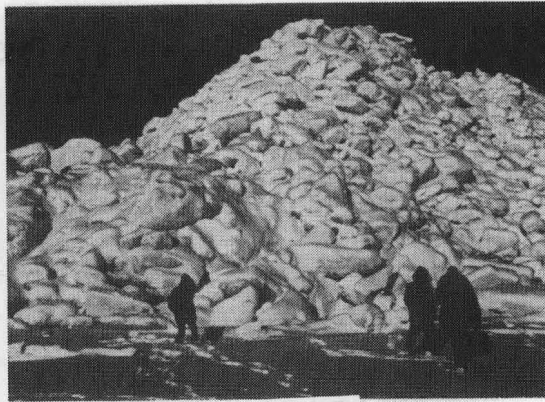
剪切冰脊，形成 3m 高的直立墙



1998 年 12 月 1 日脱离南极大陆的浮冰山



1.7m 厚的一年冰形成堆积冰



在 12m 水深的近岸生成的堆积冰

图 1.1.4 波弗特海的海冰特征