

文章编号 : 1005-9865 (2002) 03-0039-05

辽东湾 JZ20-2 海域海冰参数的概率分布

季顺迎, 岳前进, 毕祥军

(大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘 要: 基于辽东湾 JZ20-2 海域 1996-2000 年 4 个冬季的海冰定点观测资料和海冰数值模拟结果, 对该海域的平整冰厚、冰速、冰向和压缩强度等海冰参数进行了概率分析, 确定了各自的分布参数, 并对冰速和冰向进行了联合概率分析。结果表明: 冰厚和冰速分别服从对数正态分布和瑞利分布, 海冰压缩强度服从正态分布。计算结果可用于 JZ20-2 海域海洋结构可靠性设计和疲劳累积损伤分析的海冰参数, 也可作为其邻近海域的参考资料。

关键词: 疲劳海冰参数; 概率分布; 海冰模拟

中图分类号: P731.15 **文献标识码:** A

Probability distribution of sea ice fatigue parameters in JZ20-2 sea area of the Liaodong Bay

Ji Shunying, Yue Qianjin, Bi Xiangjun

(State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: The ice conditions of JZ20-2 sea area in the Liaodong Bay were measured and simulated with a sea ice numerical model in the past 4 winters from 1996 to 2000. Based on the measured and simulated data, the probability distributions of level ice thickness, ice velocity, ice drifting direction and ice compression strength were determined respectively, and the joint probability distribution of ice velocity and ice drifting direction was analyzed. It is shown that the ice thickness and the ice velocity satisfy with Lognormal distribution and Rayleigh distribution respectively, and that the ice compression strength obeys Normal distribution. The results can be applied to the cumulative damage analysis and probability design of offshore structure in the JZ20-2 sea area, and can also be adopted as the reference data for the adjacent area.

Key words: sea ice fatigue parameter; probability distribution; sea ice simulation

在海洋结构向可靠性设计的发展中, 相应的环境荷载也由确定型向概率型转变。在渤海, 尤其是辽东湾海域, 作为控制荷载的冰荷载更是如此。它所涉及的海冰物理力学参数、海冰厚度、类型和密集度等都具有不确定性。

冰区结构的可靠性分析主要包括冰荷载的年极值概率分布和疲劳冰力谱, 其中疲劳冰力谱是冰区海洋结构进行累积损伤分析、耐久性设计和服役安全度评估的基础^[1]。类似于疲劳风速谱^[2], 疲劳冰力谱也由两部分组成: 一是疲劳冰荷载, 即疲劳冰参数的概率分布, 如冰期内不同冰厚的持续时间等; 二是脉动冰荷载的功率谱, 它刻画了脉动冰荷载的随机性。

为确定年极值冰荷载的概率分布, 人们基于多年实测气象资料对海冰厚度和海冰力学参数 (主要是压缩强度) 进行了大量的数值推算, 并通过联合概率分布或蒙特卡洛方法对渤海不同海域的设计冰荷载进行了确定^[3-7]。在疲劳冰力谱方面, 人们通过现场冰力测量或室内模型实验对脉动冰荷载的功率谱开展了许多有益的工作^[8-12]。相对而言, 有关疲劳冰荷载的概率分布研究较少, 其原因一是海冰连续实测资料的匮乏, 再就

收稿日期: 2001-07-26

基金项目: 国家自然科学基金与中海石油渤海公司联合资助项目 (59739170)

作者简介: 季顺迎 (1972 -), 男, 河北武邑人, 博士, 主要从事海冰数值模拟及其工程应用研究。

是海冰数值模拟成果在冰区油气开发工程中还未得到充分利用。

渤海海冰数值模式在近 20 年的发展过程中不断完善,能够较好地反应出渤海海冰的演化规律和特征^[13-15]。本文利用在辽东湾 JZ20-2 海域连续 4 个冬季的海冰定点实测资料以及在此基础上进行的海冰数值模拟结果对该海域疲劳海冰参数进行统计分析。

1 辽东湾 JZ20-2 海域海冰定点观测系统

为研究渤海海冰的生消运移规律,在辽东湾 JZ20-2 平台上建立了海冰定点观测系统。它通过气象站、海流计、雷达监测系统等对气象、水文和海冰要素进行连续同步测量,仪器布置如图 1 所示。气象要素主要包括气温、风速、相对湿度、大气压和太阳辐射等,水文要素主要为流速、潮位、水温以及盐度等,海冰信息包括海冰厚度、流速、类型和密集度等。

从 1989 年冬季以来,该海冰观测系统为渤海海冰数值模式中计算参数的确定以及冰激结构振动问题的研究提供了详实可靠的海冰基础资料。采用 1996-2000 年 4 个冬季的海冰观测数据作为辽东湾 JZ20-2 海域疲劳海冰参数统计分析的基础资料。

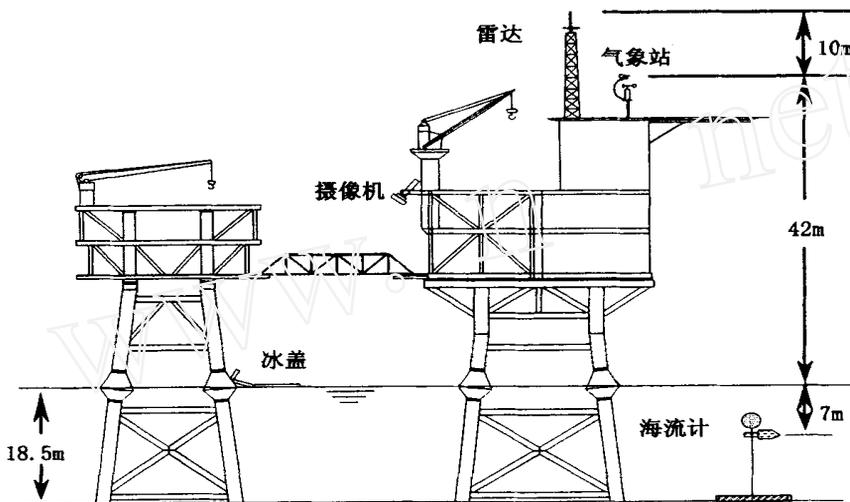


图 1 辽东湾 JZ20-2 海域海冰观测系统示意图

Fig. 1 Sketch of the sea ice observation system of JZ20-2 Platform in the Liaodong Bay

2 疲劳海冰参数的数值推算

为对海冰参数进行较准确的统计分析,需要有大量的数据样本。虽然近年来,在辽东湾进行了长期的海冰定点观测,获得了大量的现场资料,但它仍不能很好地满足该海域疲劳海冰参数的概率分析。因此,根据海冰的热力-动力模式,对冰厚、冰速和冰向等海冰参数进行数值模拟,其计算结果可作为实测资料的补充。另外,由于海冰盐度、卤水体积和海冰强度等海冰物理力学参数不易测量,也需要利用海冰数值模拟结果进行推算。

2.1 海冰生消的热力过程

海冰生消过程主要由其热力要素控制,并可通过海冰热力模式进行数值模拟。冰盖内的热传导和扩散比较复杂,除了入射到冰盖内部的太阳辐射外,还受冰内卤水泡和杂质的影响。冰盖内热传导方程为:

$$c(z, t) \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [K(z, t) \frac{\partial T_i}{\partial z}] + Q_{se} - \rho_i e^{-\tau z} \quad (1)$$

式中: $c(z, t) = \rho_i c_i + S_i(z) \frac{1}{T_i}$, $K(z, t) = k_i + \frac{S_i(z)}{T_i}$, 其中, ρ_i 、 c_i 和 k_i 分别为海冰的密度、比热和热传导系数, ρ_i 和 $S_i(z)$ 分别为冰温和冰面下深度 z 处的盐度; Q_{se} 为冰面有效太阳辐射; ρ_i 为太阳辐射在海冰表面的透射率; τ 为海冰对太阳辐射的衰减系数。

冰厚计算应同时考虑冰-气界面和冰-水界面的质量变化。如果不考虑降水的影响,在海冰表面,当表面

冰温 $T_s > T_m$ 时 (T_m 为海冰融点), 冰盖表层热量收支总和 $Q_s > 0$, 冰盖吸收热量, 导致表面冰融化; 而当 $T_s < T_m$ 时, 通过冰内传导来调节冰盖热力平衡。冰盖底部的质量变化主要由冰内传热和海洋热通量来确定, 对于薄冰应同时考虑冰下太阳辐射的影响^[16]。综合考虑冰盖表面和底部的质量变化, 便可计算冰厚的增减。

2.2 海冰漂移的动力过程

以牛顿第二定律为基础, 海冰漂移的动量方程为:

$$m \frac{d\vec{V}_i}{dt} = -mf\vec{K} \times \vec{V}_i + \vec{\tau}_a + \vec{\tau}_w - mg \nabla H + \vec{R} \quad (2)$$

式中: m 为单位面积海冰质量, 且 $m = \rho_i A h$, 其中 ρ_i 、 A 和 h 分别为海冰密度、密集度和冰厚; \vec{V}_i 为海冰速度; 科氏参数 $f = 2 \omega \sin \varphi$, 其中 ω 为地转角速度, φ 为地理纬度; \vec{K} 为垂直于海面的单位矢量; $\vec{\tau}_a$ 和 $\vec{\tau}_w$ 分别为风和流对海冰的拖曳力; g 为重力加速度; H 为海面动力高度; \vec{R} 为海冰内力。为计算 JZ20-2 海域海面高程的梯度变化, 采用 Leendertse 二维非线性长波模式对渤海潮流潮汐进行数值计算^[17]。

2.3 海冰物理力学参数推算

海冰的物理力学性质与其所处海域的气象、水文和海冰特征有关, 国内已做了大量的相关研究。董须瑜等^[7]针对辽东湾 JZ20-2 海域的现场海冰物理力学实测资料, 提出了该海域平整冰单轴压缩强度的推算方法, 即:

$$\sigma_c = 5.462 - 18.905 \sqrt{V_b} \quad (3)$$

式中: σ_c 为海冰单轴压缩强度 (MPa); V_b 为海冰卤水体积 (%), 它与海冰温度和盐度的关系为^[18]:

$$V_b = S_i \left(0.532 + \frac{49.185}{|T_i|} \right) (-0.5 \quad T_i \quad -22.9) \quad (4)$$

式中: T_i 为冰温 ($^{\circ}\text{C}$); S_i 为海冰盐度 (%), 是冰厚的函数, 对于辽东湾海冰有^[19]: $S_i = 19.077 h^{-0.387}$, 这里 h 为冰厚 (cm)。

3 疲劳海冰参数的概率分布

基于辽东湾 JZ20-2 海域 1996~2000 年 4 个冬季海冰定点观测资料, 并利用海冰的热力和动力模式对该海域平整海冰的厚度、速度、流向和压缩强度等海冰参数进行数值模拟和推算。该海域 1996~2000 年间 4 个冬季的有效冰期依次为 44、39、19 和 47 d。海冰数值模拟的时间步长为 10 min, 计算时每 1 h 存储一组数据, 共有数据样本 3 576 组。利用该数据样本, 对各海冰参数进行统计分析。

3.1 冰厚的概率分布

对平整冰厚的统计结果表明, 它较好地服从对数正态分布, 并通过了显著水平 $\alpha = 0.05$ 的 K-S 检验。分布参数 $\mu = 1.9057$, $\sigma = 0.5732$, 其概率密度为:

$$f(h) = \frac{1}{0.5732h\sqrt{2}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln h - 1.9047}{0.5732}\right)^2\right] \quad (5)$$

平整冰厚的统计频率与式(5)的吻合程度示于图2中。

3.2 冰速和冰向的概率分布及其联合概率分布

如果假设冰速和冰向为相互独立的随机变量, 分别单独考虑它们的概率分布, 发现冰速服从瑞利分布, 并可通过显著水平 $\alpha = 0.05$ 的 K-S 检验。其概率分布为:

$$f(V_i) = \frac{V_i}{826.5512} \exp\left(-\frac{V_i^2}{1653.1024}\right) \quad (6)$$

式中: V_i 为冰速。冰速的统计频率与式(6)的吻合程度示于图3中。

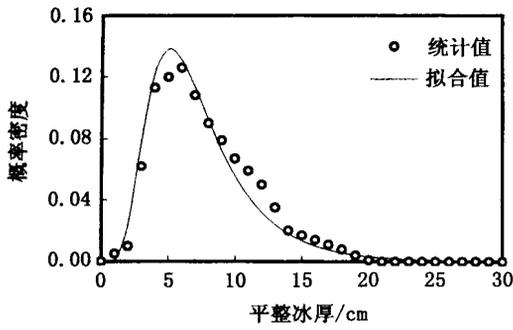


图 2 辽东湾 JZ20-2 海域平整冰厚的概率密度
Fig. 2 Probability density of level ice thickness in JZ20-2 sea area of the Liaodong Bay

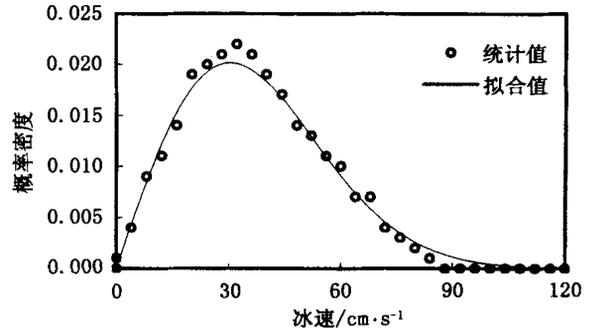


图 3 辽东湾 JZ20-2 海域冰速的概率密度
Fig. 3 Probability density of ice velocity in JZ20-2 sea area of the Liaodong Bay

海冰漂移方向的直方图如图 4 所示,其中冰向以正北方向为 0°,顺时针旋转至正南方向时为 180°。通过对海冰漂移方向的分段概率拟合,发现在 15°~95°之间以及 190°~265°之间,它符合正态分布,而在其它方向,可按均匀分布处理,并可通过显著水平 = 0.05 的 K-S 检验。海冰漂移方向的分段概率函数为:

$$f(\theta) = \begin{cases} 6.15 \times 10^{-4} & (0^\circ < \theta < 15^\circ, 265^\circ < \theta < 360^\circ) \\ 0.37 \times \frac{1}{18.79 \sqrt{2}} \exp\left(-\frac{(\theta - 59.39)^2}{706.13}\right) & (15^\circ < \theta < 95^\circ) \\ 12.83 \times 10^{-4} & (95^\circ < \theta < 190^\circ) \\ 0.46 \times \frac{1}{17.32 \sqrt{2}} \exp\left(-\frac{(\theta - 225.49)^2}{599.96}\right) & (190^\circ < \theta < 265^\circ) \end{cases} \quad (7)$$

式中: θ 为海冰漂移方向。冰向的概率分布如图 5 所示。从中可以看出海冰在 NE 向和 SW 向出现的频率最高,且 SW 向比 NE 向略强。这是因为海冰漂移速度和方向在海流控制下,又受 NE 主风向的海风影响。

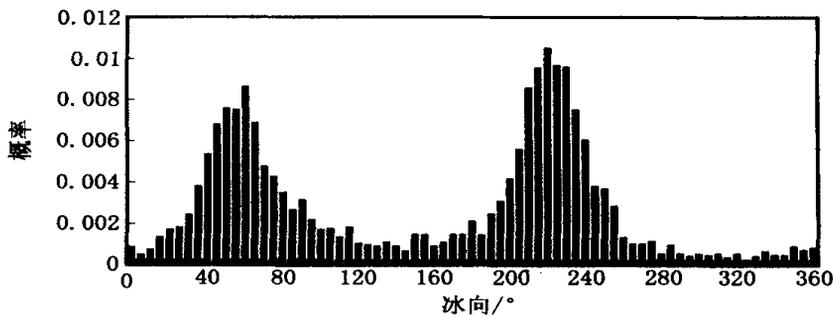


图 4 辽东湾 JZ20-2 海域海冰漂移方向直方图

Fig. 4 Histogram of ice drifting direction in JZ20-2 sea area of the Liaodong Bay

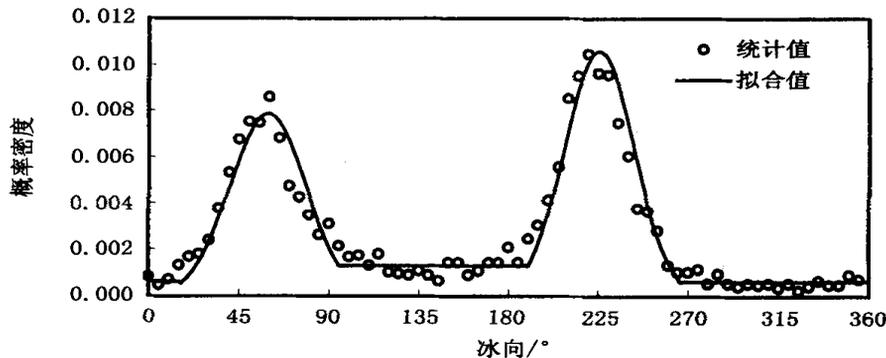


图 5 辽东湾 JZ20-2 海域海冰漂移方向的概率分布

Fig. 5 Probability density of ice drifting direction of JZ20-2 sea area in the Liaodong Bay

若同时考虑海冰漂移速度和方向的相关性,则可对其进行联合概率分析。将冰向按每 22.5 分成一组,冰速按每 20 cm/s 分成一组,得到的冰速和冰向的联合概率分布如图 6 所示。

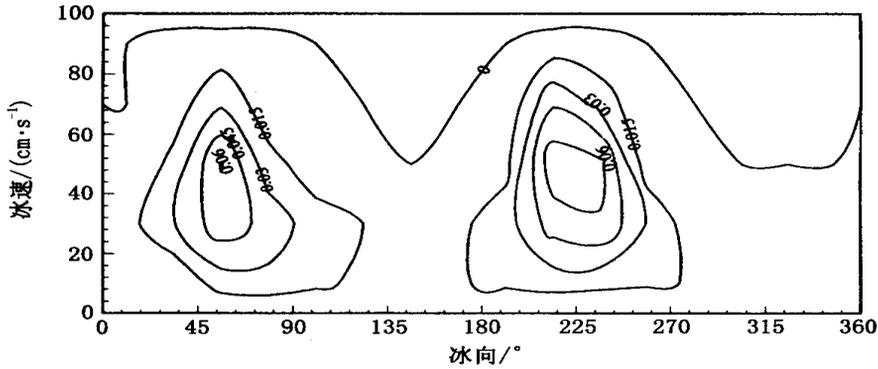


图 6 辽东湾 JZ20-2 海域海冰速度和冰向的联合概率分布

Fig. 6 Joint probability distribution of ice velocity and drifting direction in JZ20-2 sea area of the Liaodong Bay

3.3 海冰压缩强度的概率分布

利用海冰数值模拟的冰温、卤水体积,由式(3)对海冰的压缩强度进行数值推算,统计发现它服从正态分布,其均值 $\mu = 1.0348 \text{ MPa}$,均方差 $\sigma = 0.2641$,并通过了显著水平 $\alpha = 0.05$ 的 K-S 检验。海冰压缩强度的概率密度为:

$$f(x) = \frac{1}{0.2641 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - 1.0348)^2}{2 \times 0.1395}\right) \quad (8)$$

图 7 给出了海冰压缩强度与统计频率的拟合情况。

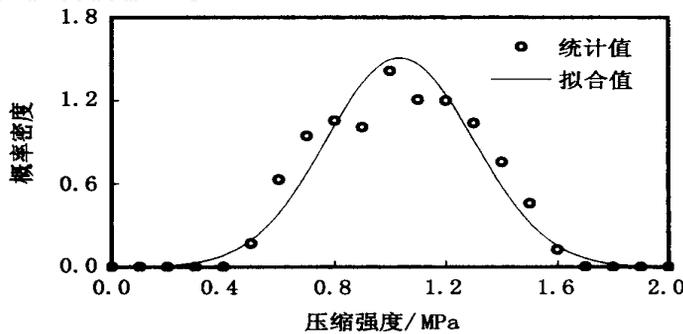


图 7 辽东湾 JZ20-2 海域海冰压缩强度概率密度

Fig. 7 Probability density of ice compression strength of JZ20-2 sea area in the Liaodong Bay

4 结 语

对辽东湾 JZ20-2 海域 1996 ~ 2000 年 4 个冬季的气象、水文和海冰参数进行了定点连续观测,并在其基础上利用海冰热力-动力模式对该海域海冰进行了数值模拟,对海冰厚度、冰速、冰向和海冰力学参数进行了统计分析。

统计结果表明:该海域平整冰厚符合对数正态分布,其分布参数 $\mu = 1.9047$, $\sigma = 0.5732$;冰速符合瑞利分布,分布参数 $\lambda = 826.5512$;海冰的压缩强度符合正态分布,其均值 $\mu = 1.0348 \text{ MPa}$, $\sigma = 0.2641$ 。该海域海冰漂移的主流向为 NE 和 SW 向,其中 SW 向略强。这在冰速和冰向的联合概率分布中尤为明显。

本文确定的辽东湾 JZ20-2 海域疲劳冰参数的概率分布可作为该海域及其邻近海域海洋结构物可靠性设计和现役结构疲劳累积损伤分析的参数依据。

参考文献:

[1] 陈国明. 冰区平台疲劳分析与评估方法的研究[R]. 石油大学海洋石油工程研究室研究报告,1999.
 [2] 欧进萍,段忠东,陆钦年,等. 渤海海域的风特性统计分析[J]. 海洋通报,1997,16(1):20-27.

(下转第 48 页)

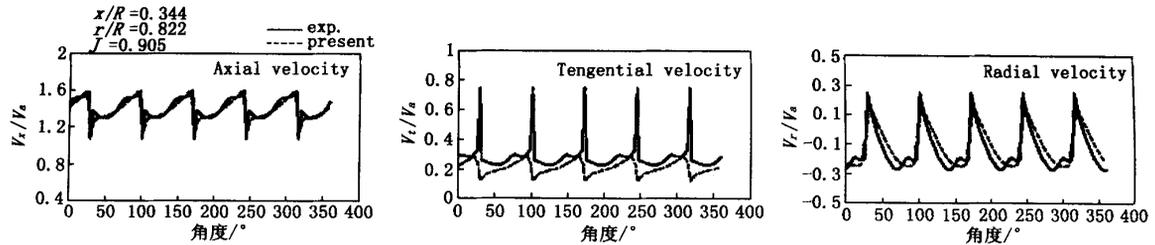


图8 DTRC4842的流场计算与实验的比较

Fig.8 Comparison of calculated flow field around DTRC4842 with experimental data

3 结 语

利用基于速度势的低阶面元法计算了船舶螺旋桨的尾流场,并将两个算例三叶桨 DTRC4119 和五叶侧斜桨 DTRC4842 的计算尾流场速度分布与实验值进行了比较分析,结果表明文中的计算值与实验值吻合良好,本文的计算方法可以被用来对船舶螺旋桨的尾流场进行计算分析。

参考文献:

- [1] 高木又男.关于螺旋桨尾流速度场的研究(日文)[J].日本造船学会论文集,1961,193.
- [2] 黄 胜,等.船舶螺旋桨后尾流速度场理论计算[J].哈尔滨船舶工程学院学报,1989,10:
- [3] Su, Y. A study on design of maine propellers by lifting body theory[J]. Ph.D thesis, Yokohama National University, 1999.
- [4] Morino L. Subsonic Potential Aerodynamics for Complex Configurations[J]. A General Theory. AIAA Journal, 1974, 12(2): 191-197.
- [5] 苏玉民,黄 胜.用面元法预报船舶螺旋桨的水动力性能[J].哈尔滨工程大学学报,2001,22(2):1-5.
- [6] Koyama, K. Comparative calculations of propellers by surface panel method/workshop organized by 20th ITTC propulsor committee[J]. Papers of Ship Research Institute, Supplement No. 15, Japan, 1993.

(上接第 43 页)

- [3] 刘德辅,杨永春,王 超,等.海冰荷载设计标准的不确定性及其联合概率分析[J].海洋学报,1996,18(5):110-116.
- [4] 中海生产石油研究中心.渤海海冰设计作业条件规定[Z].中海石油生产研究中心,1998.
- [5] 史庆增,王永刚.辽东湾孤立柱上冰力的概率分布[J].海洋学报,1995,17(4):130-137.
- [6] 王永刚,康苏海.辽东湾平整冰抗压强度的概率分布及其蒙特卡罗模拟[J].中国海上油气(工程),1995,7(3):40-43.
- [7] 董须瑜,刘春厚.关于辽东湾JZ20-2海区海冰设计条件的修改意见[J].中国海上油气(工程),1989,1(1):36-44.
- [8] 欧进萍,段忠东.渤海导管架平台桩柱冰压力随机过程模型及其参数确定[J].海洋学报,1998,20(3):110-118.
- [9] 段忠东,欧进萍.作用于平台桩腿的海冰屈服破坏冰压力随机过程模型及其参数确定[J].海洋工程,1996,14(4):1-8.
- [10] 李大华,卢 敏,刘春厚.海洋平台冰力反应谱数值算法的研究[J].海洋工程,1993,11(4):1-6.
- [11] 史庆增.海冰的动力作用和冰力谱[J].海洋学报,1994,16(5):106-111.
- [12] 智 浩,岳前进,林家浩.海洋平台随机冰力谱的识别[J].海洋工程,2000,18(2):13-17.
- [13] 王仁刚.渤海海冰的数值试验[J].海洋学报,1984,6(4):572-580.
- [14] 吴辉斌.海冰的动力-热力过程的数学处理[J].海洋与湖沼,1991,20(2):321-327.
- [15] 岳前进,季顺迎,毕祥军,等.渤海海冰数值模式中计算参数的确定[J].海洋预报,1999,16(3):97-103.
- [16] Parkinson C L, Washington W M. A large-scale numerical model of sea lee[J].J. Geophysical Research,1979,84:311-337.
- [17] 窦振兴,罗远论,黄克辛,等.渤海潮流及潮余流的数值计算[J].海洋学报,1981,3(3):355-369.
- [18] Frankenstein G, Garner R. Equations for determining the brine volume sea ice from - 0.5 to - 22.0 [J]. Journal of glaciology, 1967,6(48):943-944.
- [19] 李志军,隋吉学,董须瑜,等.辽东湾海冰设计要素的初步设计[J].海洋工程,1992,10(2):72-78.