

文章编号:1005-9865(2019)03-0136-07

# 辽东湾海洋工程可靠性设计的海冰参数选取

马玉贤<sup>1</sup>,关 湃<sup>2</sup>,许 宁<sup>1</sup>,许有良<sup>1</sup>,袁 帅<sup>1</sup>,刘永青<sup>1</sup>,于福祥<sup>3</sup>

(1. 国家海洋环境监测中心,辽宁 大连 116023;2. 中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津 300459;  
3. 大连测控技术研究所,辽宁 大连 116013)

**摘 要:**海冰参数的合理取值是海洋工程海冰灾害风险评估的重要内容。利用 1950—2018 年的冰情等级(5 个等级)数据,进行了 1950—2018、1950—1990、1991—2018 三种情景下的回归分析,确定了不同时期的冰情等级概率分布密度函数。利用鲅鱼圈雷达观测站 2002—2017 年的海冰现场实测资料,分别对鲅鱼圈附近海域一般冰厚、最大冰厚、最小冰厚进行概率分布拟合。基于上述概率分布结果,给出不同冰情等级的重现期,进而对海冰作业条件给出的设计参考值进行评价。结果表明:1990 年以后 2 级、3 级冰情重现期相对 1990 年之前变小,4 级、5 级冰情重现期相对 1990 年之前变大,规范给出重现期范围已不能代表辽东湾冬季海冰情况。本研究成果可为辽东湾海洋工程可靠性设计提供重要数据支撑。

**关键词:**辽东湾;海冰参数;概率分布;重现期;可靠性设计

**中图分类号:**P731.15 **文献标志码:**A **DOI:**10.16483/j.issn.1005-9865.2019.03.016

## Determination of the sea ice parameters for the reliability design of the marine structures in Liaodong Bay

MA Yuxian<sup>1</sup>,GUAN Pai<sup>2</sup>,XU Ning<sup>1</sup>,XU Youliang<sup>1</sup>,YUAN Shuai<sup>1</sup>,LIU Yongqing<sup>1</sup>,YU Fuxiang<sup>3</sup>

(1. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China; 2. Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin 300459, China; 3. Dalian Scientific Test and Control Technology Institute, Dalian 116013, China)

**Abstract:** The sea ice parameters play an important role in the risk assessment of sea ice disasters. Based on the data of sea ice class (1950—2018) in the Bohai Sea, three regression analyses (1950—2018, 1950—1990 and 1991—2018) were carried out to determine the probability distribution density function of sea ice class. Based on the field test data of the Bayuquan sea ice, the probability distribution fitting for general ice thickness, maximum ice thickness and minimum ice thickness was carried out. Using the above probability distribution results, the recurrence period of sea ice grade is given respectively, and the design values from the sea ice regulation are evaluated. The results show that: compared with the temperature rise, the recurrence period of class 2 and class 3 ice becomes smaller, and the recurrence period of class 4 and class 5 ice becomes larger. The range of the return period given in the regulation cannot represent the current sea ice situation in Liaodong Bay. The results of this paper can provide important data support for the reliability design of the marine structures in Liaodong Bay.

**Keywords:** Liaodong Bay; ice parameter; probability distribution; return period; reliability design

准确评估工程所在海域的海冰条件,特别是海冰控制性致灾要素的取值,对冰区海洋工程的规划设计和安全运行具有重要意义。近年来,随着辽东湾海域边际油田的开发,平台的经济性成为结构强度设计的重要考核指标。海冰参数取值过低,会使得冰区海洋工程暴露于极大的风险之下;海冰取值过高,又会成倍增加生产成本。因此,在满足结构强度的情况下,降低工程成本成为设计人员关注的重点内容。

收稿日期:2018-08-17

基金项目:国家重点研发计划支持项目(2017YFA0604904);国家重点研发计划(2016YFC1401505)

作者简介:马玉贤(1989-),男,山西大同人,硕士,主要从事海冰物理学性质方面研究。E-mail:yxma@nmemc.org.cn

通信作者:许有良(1965-),E-mail:ylxu@nmemc.org.cn

一般而言,引起海洋工程结构构件失效的原因有两种,包括由冰力极值引起的强度失效与由交变冰力引起的疲劳失效<sup>[1-3]</sup>。海冰厚度是极值冰力取值、交变冰力周期与幅值的控制性因素。因此,海冰厚度的合理取值是评估海洋工程结构海冰灾害的重要内容。为确定冰情数据,人们基于多年实测气象资料对海冰厚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<sup>[4-10]</sup>。季顺迎等<sup>[11-12]</sup>基于辽东湾 JZ20-2 海域 1996—2000 年的海冰定点观测数据与数值模拟结果,拟合出了该海域平整冰冰厚的概率分布,发现冰厚服从对数正态分布;吴辉碁<sup>[5]</sup>认为不同冰情等级的发生概率服从正态分布,并给出不同重现期下各冰区的设计冰厚;段忠东等<sup>[13]</sup>采用平稳二项随机过程模型和组合概率方法,统计得到了年最大冰厚的概率分布及参数,并推算了若干年重现期的极值冰厚。然而,一些资料显示,与 20 世纪相比,近 20 年来我国海域冰情偏轻<sup>[14]</sup>,因此有必要对近几年数据进行总结与统计分析。

鉴于上述背景,利用 1950—2018 年的冰情等级(5 个等级)数据与鲅鱼圈雷达观测站 2002—2017 年的海冰现场实测资料,对冰情等级、鲅鱼圈附近海域冰厚进行概率分析。基于拟合得到的概率分布结果,给出不同冰情等级的重现期,为今后辽东湾海域海洋工程的生产设计提供重要数据支撑。

## 1 海冰观测资料

### 1.1 冰情等级

为了分析逐年冰情,研究人员在我国海冰预报和研究工作中,根据长期海冰连续观测资料,参考近百年来气温和历史海冰资料,以海冰的范围和厚度为标准,将渤海和黄海北部的冰情划分为五个等级,即冰情轻冰年、偏轻年、常年、偏重年和重冰年。冰情的等级的具体划分标准见表 1。依据上述划分标准,参考《中国海洋灾害四十年资料汇编(1949—1990)》与《中国海洋灾害公报(1991—2017)》,结合每年冬季辽东湾附近海域的海冰现场观测,将 1950—2018 年的冰情等级数据进行汇总,结果见图 1。

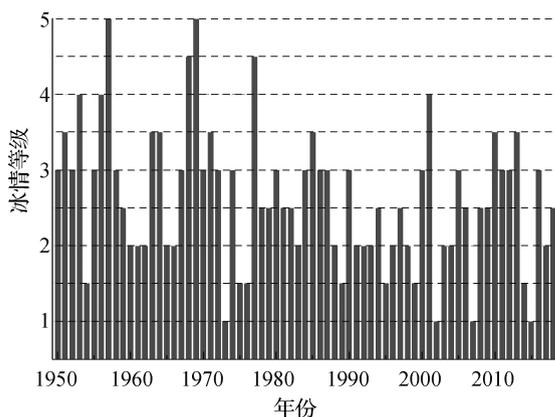


图 1 1950—2018 年冰情等级数据

Fig. 1 Data of sea ice class in 1950—2018

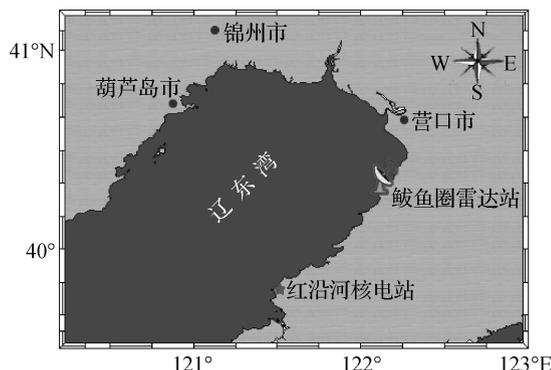


图 2 鲅鱼圈雷达站

Fig. 2 Bayuquan radar station

表 1 辽东湾海冰情等级  
Tab. 1 Sea ice grade of Liaodong Bay

等级	海区	结冰范围/km	冰厚情况/cm
1(轻冰年)	辽东湾	小于 64	小于 15,最大 30
2(偏轻年)	辽东湾	64~120	15~25,最大 45
3(常冰年)	辽东湾	120~166	25~40,最大 60
4(偏重年)	辽东湾	166~231	40~50,最大 60
5(重冰年)	辽东湾	大于 231	大于 50,最大 100

### 1.2 鲅鱼圈海冰雷达观测站

辽东湾的海冰结冰范围最大,西北季风是使辽东湾海冰向东部沿岸积聚的条件。每当冬季偏北和偏西

大风连续吹刮时,在顺时针回转流的作用下,可使流冰始终保存在以鲅鱼圈、长兴岛为中心的沿岸一带。为研究辽东湾海冰的生消运移规律,国家海洋局在辽东湾鲅鱼圈墩台山建立了海冰定点观测系统,通过气象站与雷达监测系统对气象、水文和海冰要素进行连续同步测量,雷达站位置见图 2。气象要素主要包括气温、风速、相对湿度和大气压等,海冰信息包括海冰厚度、类型和密集度等。

鲅鱼圈雷达站雷达天线架设高度 120 m(距海平面),目前鲅鱼圈雷达站使用的雷达设备最大监测量程为 180 km,海冰监测的实际有效范围在 27 km 左右。鲅鱼圈雷达站海冰监测采用了 HB-II B 型雷达测冰系统。HB-II B 型雷达测冰系统是在 SPERRY Bridge Master E 252X & 253 S 雷达设备的基础上,结合海冰监测的业务化工作需求重新研发设计而成。本系统大幅度提高了海冰监测数据的精度和获取时效性,系统具体性能指标见表 2。

自雷达站建站以来,该观测系统为鲅鱼圈附近海域海冰的研究提供了详实可靠的海冰基础数据。综合考虑冰情代表性、冰情数据序列长度、观测手段全面性,本报告选择鲅鱼圈雷达海冰观测示范站的冰情数据进行分析。在后续数据统计分析中,采用 2002—2017 年 16 个冬季的每日 8 时、14 时、20 时海冰观测数据作为冰厚数据分析的基础资料。

表 2 雷达监测系统性能指标

Tab. 2 Performance index of radar monitoring system

技术指标	指标性能
采集频率/MHz	40
数据位数	12
距离分辨率/m	3.75
方位分辨率/(°)	0.08
采集范围档/nm	60、24、15
采集模式	LP、MP、SP
网络传输速率/(kB·s <sup>-1</sup> )	50

## 2 数据分析与拟合

基于辽东湾 1950—2018 年冰情等级数据与鲅鱼圈 2002—2017 年冰厚数据,利用概率统计方法对其进行分析。其中冰情等级有效数据共 69 组、最大冰厚数据 919 组、一般冰厚数据 805 组、最小冰厚 925 组。

### 2.1 冰情等级

分析之前首先需要对冰情等级数据进行处理,这是因为冰情等级发布单位为了更精确的描述当年冰情,通常会在规范规定的冰情等级划分原则上进行  $\pm 0.5$  的操作。由于不同年份、不同冰条件等众多因素的影响,上述冰情等级数据不能满足概率分析要求。基于此,依据浮冰范围与冰厚数据对每年冰情等级进行修正,得到满足分析条件的冰情等级数据。依据修正后冰情等级数据,将不同等级下的频数进行汇总,并绘制频数—冰情等级散点图(图 3)。

针对上述数据,对 1950—2018 年各冰情等级下的冰情数据进行回归拟合,发现高斯分布能很好拟合上述数据。拟合方程为:

$$y = \frac{y_0}{69} + \frac{A}{69w \sqrt{\frac{1}{2}\pi}} e^{-2\left(\frac{x-x_c}{w}\right)^2} \quad (1)$$

式中: $y_0 = 0.70$ ;  $x_c = 2.513$ ;  $w = 2\sigma = 1.628$ ;  $A = 64.809$ 。

众所周知,全球气温在不断升高。这是由于温室效应不断积累,导致地—气系统吸收与发射的能量不平衡,能量不断在地—气系统累积,从而导致温度上升,造成全球气候变暖。图 4 为美国国家航空与航天局戈达德空间科学研究所给出的 1880 年之后地球平均气温变化趋势图。从图中可以明显观察到,1990 年之后地球平均气温显著升高。为准确考量平均气温上升对辽东湾海冰冰情的影响,将冰情等级数据按时间序列

分为 1950—1990 年与 1991—2018 年两组。其中,1950—1990 年近似代表平均气温未升高情况下的冰情概况,1991—2018 年代表平均气温升高情况下的冰情概况。

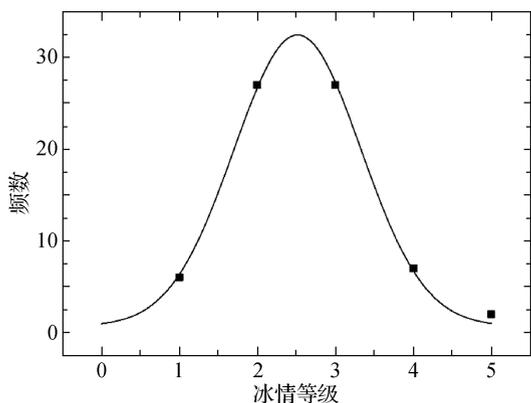


图 3 1950—2018 年冰情等级散点图

Fig. 3 Scatter plot of sea ice class in 1950—2018

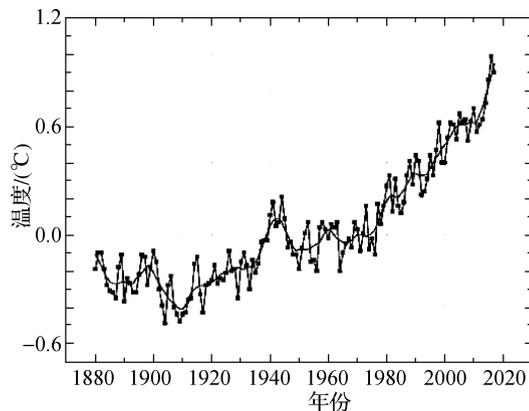


图 4 地球平均气温变化趋势图

Fig. 4 Annual temperature average in global surface

针对 1950—1990 年数据进行回归分析,发现高斯分布能很好拟合上述数据。概率密度方程为:

$$y = \frac{y_0}{41} + \frac{A}{41w \sqrt{\frac{1}{2}\pi}} e^{-2\left(\frac{x-x_c}{w}\right)^2} \quad (2)$$

式中: $y_0=0.716$ ;  $x_c=2.577$ ;  $w=2\sigma=1.646$ ;  $A=36.711$ 。

针对 1991—2018 年数据进行回归分析,运用高斯分布拟合上述数据。概率密度方程为:

$$y = \frac{y_0}{28} + \frac{A}{28w \sqrt{\frac{1}{2}\pi}} e^{-2\left(\frac{x-x_c}{w}\right)^2} \quad (3)$$

式中: $y_0=-0.153$ ;  $x_c=2.434$ ;  $w=2\sigma=1.642$ ;  $A=28.924$ 。

依据式(1)、(2)、(3),分别计算不同情景下的冰情等级重现期,计算结果见表 3。图 5 为冰情等级为 2、3、4 时的重现期。结合图 5 与表 3 可以发现,1990 年以后 2 级、3 级冰情重现期相对 1990 年之前变小;4 级、5 级冰情重现期相对 1990 年之前变大。也就是说,全球气温的上升对辽东湾冰情的减弱产生直接的影响。上述结果与海冰作业条件<sup>[5]</sup>推荐值进行比较后发现,规范极端冰情(5 级)的重现期与 1990 年之前数据较为接近,1990 年之后数据与规范推荐值存在明显差异。这是因为编制此规范所采用的数据基本为 1990 年之前。因此,依据 1991—2018 年数据分别给出不同冰情等级重现期为:28.77(1 级)、3.82(2 级)、2.15(3 级)、4.58(4 级)、43.97(5 级)。上述结论可为辽东湾海洋工程可靠性设计提供数据参考。

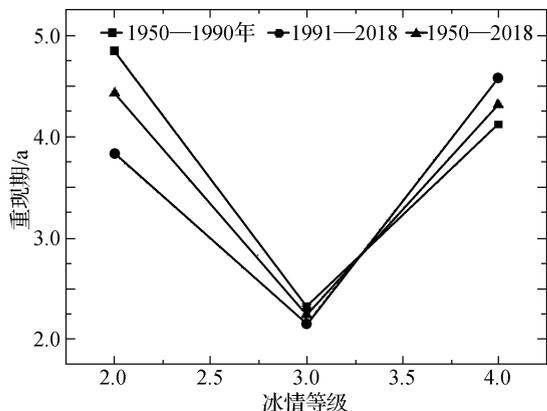


图 5 重现期对比

Fig. 5 Recurrence period comparison

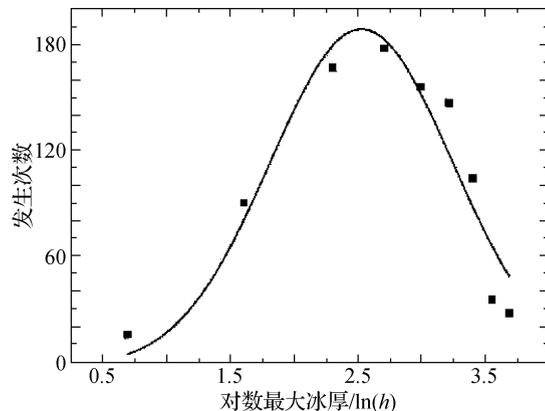


图 6 最大冰厚散点图

Fig. 6 Scatter plot of maximum ice thickness

表 3 不同冰情情景下重现期

Tab. 3 Present period under different situations

年 份	重现期/a				
	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
1950—2018	25.75	4.37	2.26	4.23	24.44
1950—1990	24.12	4.78	2.35	3.97	18.70
1991—2018	28.77	3.82	2.15	4.58	43.97
海冰作业条件 <sup>[5]</sup>	3~15	2~8	1~5	5~10	8~25

2.2 鲛鱼圈附近海域冰厚数据分析

在复杂的海冰条件下,雷达覆盖范围内的海冰厚度各异。为准确描述现场海冰数据,观测中将海冰厚度记录为最大冰厚、一般冰厚、最小冰厚。为统计各冰厚规律,将每日冰厚数据按厚度频数汇总(见图6)。汇总过程中将冰厚以5cm为步长分为1~5cm、5~10cm、10~15cm、15~20cm、20~25cm、25~30cm、30~35cm、35~40cm等情况,统计时,每种情况内的冰厚数据均近似为其范围最大值。即1cm、5cm、10cm、15cm、20cm、25cm、30cm、35cm、40cm。统计结果见表4。

表 4 不同冰厚发生次数

Tab. 4 Frequency number of ice thickness

冰厚/cm	最大冰厚/次	一般冰厚/次	最小冰厚/次
1	15	83	131
5	90	105	330
10	167	161	488
15	178	177	1 615
20	156	194	295
25	147	77	30
30	104	8	\
35	35	\	\
40	27	\	\

工程设计过程中,最大冰厚为结构强度失效的主要参考数据。借鉴季顺迎等(2004)对锦州海域海冰数据的分析方法,对最大冰厚统计后发现,拟合函数能很好的服从对数正态分布。其概率密度函数为:

$$y = \frac{y_0}{323} + \frac{A}{323w \sqrt{\frac{1}{2}\pi}} e^{-2\left(\frac{x-x_c}{w}\right)^2} \tag{4}$$

式中: $y_0 = -3.345$ ;  $x_c = 2.531$ (冰厚为12.2cm);  $w = 1.430$ ;  $A = 344.677$ ;  $\sigma = 0.71498$ 。由于这里数据为鲛鱼圈附近海域雷达观测的最大冰厚数据,因此最大冰厚概率密度函数在海洋工程结构疲劳失效计算中将会偏于保守。

对一般冰厚统计后发现,拟合函数能很好的服从正态分布。其概率密度函数为:

$$y = \frac{y_0}{3820} + \frac{A}{3820w \sqrt{\frac{1}{2}\pi}} e^{-2\left(\frac{x-x_c}{w}\right)^2} \tag{5}$$

式中: $y_0 = -312.286$ ;  $x_c = 14.31765$ ;  $w = 2\sigma = 33.35$ ;  $A = 20893.84569$ 。

对最小冰厚进行同样的统计分析,拟合函数服从 Lorentz 分布。其概率密度函数为:

$$y = \frac{y_0}{3670} + \frac{2A}{3670\pi} \frac{w}{4(x-x_c)^2 + w^2} \tag{6}$$

式中: $y_0 = -21.98$ ;  $x_c = 7.898$ ;  $w = 8.57389$ ;  $A = 5527.87$ 。

基于上述分析结果可以发现,鲑鱼圈附近海域最大冰厚基本分布于10~30 cm;一般冰厚分布于10~20 cm;最小冰厚分布于5~10 cm。

### 3 结 语

基于1950—2018年的冰情等级数据与鲑鱼圈雷达观测站2002—2017年的海冰现场实测资料,对冰情等级、鲑鱼圈附近海域冰厚进行概率分析得出以下结论:

1) 冰情等级服从正态分布,且1990年以后2级、3级冰情重现期相对1990年之前变小;4级、5级冰情重现期相对1990年之前变大;全球气温上升对辽东湾冰情的减弱产生了直接影响。

2) 与海冰作业条件推荐值进行比较后发现,作业条件中的极端冰情重现期与1990年之前数据较为接近,1990年之后数据与其存在明显差异,这是因为编制此作业条件所使用的数据基本为1990年之前;依据1991—2018年数据给出当前不同冰情等级重现期分别为:28.77(1级)、3.82(2级)、2.15(3级)、4.58(4级)、43.97(5级)。

3) 鲑鱼圈海域最大冰厚服从对数正态分布、一般冰厚服从正态分布、最小冰厚服从Lorentz分布,其中最大冰厚概率密度函数可为附近海域海洋工程结构可靠性设计提供重要数据支撑。

### 参考文献:

- [1] HUANG Yan, SHI Qingzeng, SONG An. Model test study of the interaction between ice and a compliant vertical narrow structure[J]. Cold Regions Science and Technology, 2005, 49:151-160.
- [2] SODHI D S. Crushing failure during ice-structure interaction [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2001, 68(17-18): 1889-1921.
- [3] SCHULSON E M. Brittle failure of ice[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2002, 68(17):1839-1887.
- [4] 刘德辅,李桐魁,张涛,等. 渤海辽东湾海冰条件的概率分析[J]. 天津大学学报:自然科学与工程技术版,1987(4): 52-60. (LIU Defu, LI Tongkui, ZHANG Tao, et al. Probabilistic analysis of sea ice conditions in the liaodong bay in the bohai gulf[J]. Journal of Tianjin University, 1987(4):52-60. (in Chinese))
- [5] 吴辉斌. 渤海海冰设计作业条件[M]. 北京:海洋出版社,2001. (WU Huiding. Bohai sea ice design and operation conditions[M]. Beijing: China Ocean press, 2001. (in Chinese))
- [6] 史庆增,王永刚. 辽东湾孤立桩柱上冰力的概率分布[J]. 海洋学报,1995,17(4):130-136. (SHI Qingzeng, WANG Yonggang. Probability distribution of isolated pile [J]. Haiyang Xuebao, 1995, 17(4):130-136. (in Chinese))
- [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):36-44. (DONG Xuyu, LIU Chunhou. The revision suggestion concerning sea ice design conditions of JZ20-2 sea area in liaodong bay[J]. China Offshore Oil and Gas, 1989(1):36-44. (in Chinese))
- [8] 岳前进,季顺迎,于学兵. 局地海冰数值预测的冰激结构响应计算[J]. 海洋工程,2003,21(2):32-37. (YUE Qianjin, JI Shunying, YU Xuebing. Computation of ice-induced structural vibration based on local sea ice numerical forecast[J]. The Ocean Engineering, 2003, 21(2):32-37. (in Chinese))
- [9] 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. (OU Jinping, DUAN Zhongdong. Stochastic process model of ice acting on upright column of marine platform and determination of model parameters [J]. Haiyang Xuebao, 1998, 20(3):110-118. (in Chinese))
- [10] 李志军,隋吉学,董须瑜,等. 辽东湾海冰设计要素的初步统计[J]. 海洋工程,1992(2):72-78. (LI Zhijun, SUI Jixue, DONG Xuyu, et al. Preliminary statistics of some sea ice conditions in liaodong gulf[J]. The Ocean Engineering, 1992(2): 72-78. (In Chinese))
- [11] 季顺迎,岳前进. 渤海海冰特征厚度分析[J]. 海洋学报,2000,22(6):117-123. (JI Shunying, YUE Qianjin. Discussion on sea ice diagnostic thickness for the Bohai sea[J]. Haiyang Xuebao, 2000, 22(6):117-123. (in Chinese))
- [12] 季顺迎,岳前进,毕祥军. 辽东湾JZ20-2海域海冰参数的概率分布[J]. 海洋工程,2002,20(3):39-43. (JI Shunying, YUE Qianjin, BI Xiangjun. Probability distribution of sea fatigue parameters in JZ20-2 sea area of the Liaodong Bay[J]. The Ocean Engineering, 2002, 20(3):39-43. (in Chinese))
- [13] 段忠东,杨冀东,欧进萍,等. 渤海及黄海北部年极值冰厚概率分布的统计分析[J]. 海洋科学进展,2000,18(3):34-40. (DUAN Zhongdong, YANG Jidong, OU Jinping, et al. Statistical analysis of probability distribution of extreme ice

thickness in the Bohai and Northern Huanghai Seas[J]. *Advances in Marine Science*, 2000, 18(3):34-40. (in Chinese))

- [14] 刘永青, 李辉辉, 史文奇, 等. 单层平整冰厚设计条件推算方法的比较-以辽东湾 JZ20-2 海域为例[J]. *海洋环境科学*, 2017, 36(6):941-946. (LIU Yongqing, LI Huihui, SHI Wenqi, et al. Comparison of calculation methods for the design value of single layer ice thickness-A case study of JZ20-2 sea area in Liaodong bay[J]. *Marine Environmental Science*, 2017, 36(6):941-946. (in Chinese))

(上接第 101 页)

- [16] API Recommended Practice 2A-WSD, Planning, designing and constructing fixed offshore foundations [S]. 2014.
- [17] ANSI/API Recommended Practice 2EQ, Seismic design procedures and criteria for offshore structures [S]. 2014.
- [18] ISO 19901-2, Petroleum and natural gas industries-Specific requirements for offshore structures-Part 2: Seismic design procedures and criteria [S]. 2004.
- [19] ISO 19902, Petroleum and natural gas industries-Fixed steel offshore structures [S]. 2007.
- [20] 陆新征, 蒋庆, 廖志伟, 等. 建筑抗震弹塑性分析[M]. 第 2 版, 北京: 中国建筑工业出版社, 2015. (LU Xinzhen, JIANG Qing, LIAO Zhiwei, et al. *Elasto-plastic analysis of buildings against earthquake* [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese))
- [21] 中国船级社, 浅海固定平台建造与检验规范[S]. 2004. (China Classification Society, Specification for construction and inspection of fixed platforms in shallow water[S]. 2004. (in Chinese))
- [22] SY/T 10009-2002, 海上固定平台规划、设计和建造的推荐作法——荷载抗力系数设计法(增补 1) [S]. 2002. (SY/T 10009-2002, Supplement 1 to recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platform——Load and resistance factor design[S]. 2002. (in Chinese))

(上接第 110 页)

- [14] LIU Shuxiao, TANG Yougang, LI Wei. Nonlinear random motion analysis of a spar platform's coupled heave-pitch considering 2nd-order wave loads [J]. *Journal of Marine Science and Application*, 2016, 15(2): 166-174.
- [15] 沈文君, 唐友刚, 李红霞. 随机波浪下 Truss Spar 平台垂荡运动时域分析[J]. *海洋工程*, 2012, 30(1): 60-65. (SHEN Wenjun, TANG Yougang, LI Hongxia. Time domain analysis of heave motion for Truss Spar in random seas[J]. *The Ocean Engineering*, 2012, 30(1): 60-65. (in Chinese))