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

刘永青1, 李辉辉2, 史文奇1, 孔 飞3, 刘雪琴1, 袁 帅1, 许 宁1

(1. 国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023; 2. 中海油信息科技有限公司北京分公司, 北京 100029; 3. 辽宁省海洋环境预报与防灾减灾中心, 辽宁 沈阳 110001)

摘 要:单层平整冰厚的合理取值是海洋工程海冰灾害风险评估的重要内容。本文利用 JZ20-2 海域的实测环境数据,分别使用实测冰厚统计分析、海冰区划设计条件、累计负气温法 3 种方法对该海域的单层平 整冰厚进行推算,进而对 3 种推算方法的结果合理性、安全性与可行性进行了评价。结果表明:对于我国 冰区的海洋工程海冰风险评估,宜选用海冰区划方法和实测数据统计分析法,以确定安全合理的单层平整 冰厚取值。

关键词:单层平整冰厚;风险评估;海冰区划;累计负气温 中图分类号:P731.15 文献标识码:A 文章编号:1007-6336(2017)06-0941-06

Comparison of calculation methods for the design value of single layer ice thickness —A case study of JZ20-2 sea area in Liaodong bay

LIU Yong-qing¹, LI Hui-hui², SHI Wen-qi¹, KONG Fei³, LIU Xue-qin¹, YUAN Shuai¹, XU Ning¹ (1. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China; 2. CNOOC Information Technology CO, Ltd Beijing Branch, Beijing 100029, China; 3. Liaoning Marine Environmental Forecasting and Disaster Prevention and Mitigation Center, Shenyang 110001, China)

Abstract: The reasonable value of single layer ice thickness is important for sea ice disaster risk assessment to ocean engineering. The design value of single layer ice thickness for JZ20-2 sea area was calculated based on field measured data, utilizing statistical analysis, sea ice zoning design conditions and the negative accumulated temperature method. Then the calculation results, feasibility and safety of the three methods were evaluated. Results show that, for the sea ice risk assessment of China, the sea ice zoning method and the statistics analysis method were proposed to used to determine the design value of the single layer ice thickness.

Key words: single layer flat ice thickness; risk assessment; sea ice zoning; negative accumulated temperature

准确评估工程所在海域的海冰条件,特别是 海冰灾害的控制性致灾要素的取值,对于工程的 规划设计和安全运行都具有重要意义。如果取值 过低,会使得工程暴露于极大的风险之下,一旦发 生灾害事故,必将造成较大损失和影响^[1];如果 取值过高,会成倍增加生产成本,缩小可开发海 域,影响整体发展规划。根据工程类型和所处海 域特点等基本资料,确定影响该类工程的海洋灾害 灾种,判明控制性冰情参数作为海冰灾害特征参 数。海冰对工程结构物的冲击作用是形成海冰灾 害的主要诱因,其中,海冰厚度是极值冰力取 值^[24]、交变冰力的周期与幅值^[56],以及堆积冰的 时空分布的控制性因素^[57]。因此,确定海冰厚度 的合理取值,成为海冰灾害风险评估的关键内容。

收稿日期:2016-09-12,修订日期:2016-10-26

作者简介:刘永青(1981-),男,安徽怀宁人,主要从事海冰灾害监测和风险研究, E-mail: yqliu@ nmemc. org. cn 通讯作者: 许 宁, E-mail: nxu@ nmemc. org. cn

由于我国渤海最大单层平整冰厚度通常不足 50 cm^[8-9]. 且现场原位的实测冰厚数据较为有限. 这些都对海冰厚度的选取与确定提出了较高的要 求。因此如何选取合适的海冰厚度推算方法战为 了近年研究与应用的重点。自1969年渤海海冰 大冰封造成海上平台的摧毁性破坏[8]开始,开展 了包含海冰厚度在内的海冰设计条件分析计算, 主要用于海冰荷载的计算、海冰设计条件的确定 和平台疲劳寿命评估。为推算一定基准期内(50 a 或 100 a) 的最大值需要有 20 a 以上的实测资 料,这在实际观测中往往是比较困难的。因此,对 于海冰厚度的绝大部分工作是通过基于海冰热力 学理论的累计负气温方法进行的,该方法在确定 渤海海冰设计参数中起到了很大的作用^[10]。但 由于其推算结果的可靠性和完备性受到很大的局 限,已经满足不了目前海洋结构可靠性设计的要 求。自上世纪80年代初期开始的海冰数值模拟 和预报研究工作[11-14],主要用于分析海冰的热力 和动力过程[15-17],通过海冰数学模型对海冰参数 进行数值推算,以获得连续可靠的海冰数据资料。 另外,由于地理位置、水文和气象特征以及海洋地 势等因素的不同,渤海不同海区的冰情有很大差 异。因此,提出了海冰区划的思想^[18-19],目前,在 海上生产中广泛使用的基于海冰区划的设计条 件,是由中海石油研究中心根据海冰分布、变化特 征、工程设计和生产部门使用所提出的,将渤海和 黄海北部划分为21个冰区和5个烈度区,开展了 对 21 个冰区的物理力学参数,以及冰期、冰厚、冰 速等冰情参数的研究^[20]。

近 20 a 来,针对海冰单层平整冰厚的应用研 究较少,主要借助于海冰区划的方法对海冰设计 条件进行选取。由于应对环境发展变化等的评价 较少,这对高要求的风险评价提出了挑战。为此 本文根据渤海辽东湾 JZ20-2 海域的实测冰情和 环境数据,对实测数据统计分析、海冰区划设计条 件和累计负气温等3 种单层平整冰厚推算方法进 行比较,以探明单层平整冰厚推算方法的选取原 则和使用方法。

1 材料与方法

 的年际最大单层平整冰厚资料,可使用统计分析 方法确定工程所在海域最大单层平整冰厚年极值 系列,同时还应参考调查历史上临近海域出现的 最大单层平整冰厚,对计算结果进行验证与修正。

最大单层平整冰厚重现期的推算采用 Weibull分布、Pearson Ⅲ型分布、Gumbel分布等统 计方法进行推算,取其安全值。

(2)海冰区划设计条件

参考《中国海海冰条件及应用规定》(Q/HSn 3000-2002)^[20]企业技术标准中推荐的设计值进 行选取和确定。中海石油研究中心根据中国海冰 分布及变化的基本特征,同时考虑到工业设计和 生产部门的使用方便,将中国的结冰海区-渤海 和黄海北部划分为21个冰区,划分的原则是每个 冰区的冰情基本一致,根据该标准^[20]可查得各冰 区不同重现期单层冰的设计冰厚,冰区划分如图 1所示。每个海区的名称分别是:(1)营口;(2) 锦州湾;(3)复州湾;(4)绥中;(5)秦皇岛;(6) 南 堡;(7)岐口;(8)曹妃甸;(9)岔尖;(10)羊角沟; (11)龙口;(12)渤中;(13) 旅大;(14)金州湾; (15)蓬莱;(16) 北隍城岛;(17)大连湾;(18)獐 子窝;(19)大鹿岛;(20)烟台;(21)威海。



图 1 渤海及黄海北部海域海冰区划



(3)累计负气温法

在实测冰厚年最大值数据过短情况下,目前 普遍采用的是根据建立在热力学原理上的平整冰 厚度计算公式,由特定海区已知的负积温系列数 据推算出对应的冰厚系列数据,并按推荐统计方 法推算设计厚度的概率分布。

在用冻冰融冰度日法计算冰厚时,没有考虑

太阳辐射、海洋热通量等海冰热力要素,其计算结 果与实际情况有一定的差异。

由气温推算历年平整冰厚度的公式为

第6期

 $h = \alpha [FDD - 3TDD - K]^{1/2}$

式中:h 为平整冰厚度(cm); α 为海冰增长系数[cm·(℃·d)^{-1/2}];FDD 为在冰厚增长期内 日平均气温-2℃以下的累积冻冰度日(℃·d); TDD 为在冰厚增长期内日平均气温 0℃以上的累 积融冰度日(℃·d);K 为初生冰出现时所需的 平均累积冻冰度日(℃·d)。

α 值由海冰热学性质参数决定, $\alpha = (2\lambda_i/L_i\rho_i)^{1/2}$ 。式中: λ_i 为冰的导热系数; L_i 为海水相变潜热; ρ_i 为海冰密度;在纯热力学条件下, α 不超过 3.9 cm($^{\circ}$ Cd)^{-1/2}。

K为初生冰出现时所需的平均冻冰度日(℃
d)。就同一站位来讲,它趋于一个定值。条件相似的站位,可采用统一的值。K值从物理意义上可解释为初冰形成时所需的冻冰度日,通常K值由冰情实测资料统计得到,在进行计算时,考虑到短时间寒流的出现不足以结冰,将初冰日后连续3 d 气温低于冰点温度的日期定为初生冰形成的时间,计算每年该时间之前的冻冰度日,并进行多年平均得到K值。

α、*K*值取决于各冰区固定平整冰厚度数据 和气象数据,一般情况下,不同海域的 α 和 *K* 值 是不同的。

根据实地获取的不少于 20 a 的连续的逐日 冬季气温资料,应用累计负气温法进行单层平整 冰厚的取值计算,进而应用统计方法计算不同设 计条件下的参数取值。

1.2 示范区

为了对比说明3种单层平整冰厚推算方法的 可行性与实用性,需要选取有较长时间序列(近 30 a)的实测单层平整冰厚数据和气温数据。虽 然在我国渤海和黄海北部的沿海海冰观测站位有 较长时间的冰情观测数据,但多为海冰类型和海 冰总厚度的描述,未针对单层平整冰厚数据获取 直接信息。JZ20-2 海域自1996年开始,获取了近 20 a 连续的冬季冰情以及气温序列资料^[21],因此 选取该海域作为单层平整冰厚推算方法的示范 海域。

在位于辽东湾北部的 JZ20-2 海域(图 2)油 气作业区的石油平台上安装了集成视频、雷达测 量和人工辅助观测等手段的冰情测量系统,可获 取每日逐时的冰类型、冰厚、冰速等现场实测 数据^[21]。



图 2 JZ20-2 海域地理位置 Fig. 2 Location of JZ20-2 sea area

2 结果与讨论

2.1 实测冰厚数据统计分析方法

JZ20-2 海域的 1996~2016 年间历年单层平 整冰厚数据(数据序列长度 20 a,见表 1),满足实 测数据统计方法的计算条件。

表 1 JZ20-2 海域实测最大单层平整冰厚(1996~2016)

Tab. 1 Measured maximum monolayer flat ice thickness of JZ20-2 sea area (1996 \sim 2016)										
年份	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
冰厚/cm	30	18	10	20	20	12	16	15	25	20
年份	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
冰厚/cm	16	16	15	16	20	20	30	15	15	20

采用 Weibull 分布、Pearson Ⅲ型分布和 Gumbel 分布对上述数据序列进行统计分析计算,计算

结果如表2所示。

表2 不同重现期设计冰厚值

Tab. 2 Calculation of ice thickness in different recurrence period

按计士计				重现期/a			
机杆刀齿	100	50	25	20	10	5	2
Gumbel	34.3	31.5	28.8	27.9	25	22.1	17.6
Pearson III	32.6	30.6	28.4	27.7	25.3	22.6	18
Weibull	31.8	30.6	29.3	27.3	25.5	23.1	18.5

综合比较分析上述 3 种统计方法的计算结 果,对于工程设计重现期和校核重现期而言,选用 50 a 和 100 a 重现期安全度最高的 Gumbel 方法 的计算结果进行比对分析。

2.2 规范计算方法分析结果

参考《中国海海冰条件及应用规定》(Q/HSn

3000-2002)中国海海冰区划图, JZ20-2 海域属于 冰区(2):锦州湾。查表"各冰区海冰厚度推荐 值",计算该海域的单层平整冰厚典型年份重现 期设计值, 如表 3 所示。

表 3 基于海冰区划方法的 JZ 20-2 海域设计冰厚值

Tab. 3 Design of ice thickness in JZ20-2 area based on sea ice zoning method

 重现期/a	100	50	25	20	10	5	2
设计冰厚/cm	47.2	46.7	44.2	42.7	37.8	33	23.8
 田川女台田川					and a th		

2.3	累计负望	气温法

JZ 20-2 海域气温数据在冬季海冰管理过程 中仅记录每日 7:00~18:00 的整点气温,不满足 累积负气温方法中"日平均气温"的数据要求,这 里选取距工程海域最近的兴城气象站实测历年日 平均气温值(1980~2012,共32 a)进行分析说 明,数据来源于中国气象科学数据共享服务网 http://cdc.cma.gov.cn/home.do。

用于 JZ20-2 海域累积负气温公式的 $\alpha_{x} K$ 取 值研究成果。计算冰厚序列分别记为 h_1, h_2, h_3 。

不同重现期的单层平整冰厚数据,如表6所示。

算结果显著大于工程海域实测数据;h1、h3(第1、3

组的 α ,*K* 值)所得结果比较接近,与实测数据情

况较为吻合。参照实测数据统计方法中所选取的

Gumbel 方法统计结果进行分析。

分析结果表明: h_2 (选用第2组 α 、K值)的计

表 4 渤海不同海域累积负气温冰厚计算中的α和 K 值 Tab. 4 α&K of ice thickness calculation of the negative accumulated temperature in Bohai Sea

序号	来源	海域	$\alpha / [\operatorname{cm} \cdot (\ ^{\circ} \mathrm{C} \cdot \mathrm{d})^{-1/2}]$	<i>K</i> ∕(℃ ⋅ d)
h1	[11]	JZ 20-2 海域	1.8	136
h ₂	[22]	JZ 20-2 海域	2.707	78.7
h ₃	[10]	辽东湾南区和北区	1.71	5.2

利用兴城气象站实测历年日平均气温资料, 统计逐年度的累计冻冰度日 FDD、累计融冰度日 TDD;利用表 4 中推荐的 α 、K 取值计算冰厚 h_1 、 h_2 、 h_3 的数据序列(表 5);需要说明的是,此方法 对于长序列工程原位实测气温数据和累积负气温 公式中的系数选取有很高要求。

将计算所得的冰厚序列进行统计分析,得到

表 5 累计负气温法计算的工程海域逐年平整冰厚

		140.5 11030	into or mar is	the unexites?	s by negativ	e accumula	acu tempere	aute memo	u		
年份	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991
h_1 /cm	41.6	31.9	34.9	41.7	44	42.2	34.8	34.4	21.9	33.3	29.6
h_2/cm	65.9	52.1	56.3	66	69.3	66.7	56.2	55.6	38.8	54.1	49
h_3 /cm	44.1	36.1	38.5	44.2	46.1	44.6	38.4	38.1	28.6	37.2	34.3
年份	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
h_1 /cm	28.7	27.4	33.9	24.2	29.9	28.7	26.4	27.3	37.9	41.7	26.1
h_2/cm	47.8	46	55	41.8	49.5	47.8	44.7	45.9	60.5	65.9	44.2
h_3 /cm	33.6	32.5	37.7	30.2	34.5	33.5	31.8	32.5	40.9	44.1	31.6
年份	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
h_1 /cm	31.5	25.6	37.4	36.1	22.5	31.7	29.1	41.6	40	47	45.6
h_2/cm	51.5	43.6	59.9	58	39.6	51.9	48.3	65.9	63.5	73.6	71.6
h_3 /cm	35.7	31.2	40.6	39.5	29	35.9	33.9	44.1	42.7	48.8	47.6

Tab. 5 Results of flat ice thickness by negative accumulated temperature method

表 6 不同重现期下的累积负气温方法的冰厚计算结果(单位:cm)

Tab. 6 Results of the ice thickness by negative accumulated temperature method under different return periods

冰巨	依让于外	重现期 /a								
小序	纯竹刀齿	100	50	25	20	10	5	2		
h_1	Weibull	48.4	47.0	45.3	44.7	42.6	39.8	34.1		
	Pearson III	52.0	49.5	46.8	45.9	42.8	39.3	33.2		
	Gumbel	55.2	51.5	47.7	46.5	42.6	38.6	32.5		
h_2	Weibull	75.1	73.2	70.9	70.1	67.2	63.5	55.5		
	Pearson III	79.8	76.5	72.9	71.6	67.5	62.7	54.2		
	Gumbel	84.7	79.5	74.3	72.6	67.2	61.6	53.2		
h_3	Weibull	49.4	48.3	47.0	46.6	44.9	42.8	38.1		
	Pearson III	52.0	50.1	48.1	47.4	45.0	42.3	37.4		
	Gumbel	55.1	52.0	49.0	48.0	44.9	41.6	36.7		

2.4 海冰灾害特征参数推算方法比较分析

在以JZ20-2 海域为例进行计算分析的过程 中,通过基础数据资料收集、现场实测数据比对、 推算结果合理性分析等方面的工作,对单层平整 冰厚的三种计算方法进行合理性、安全性和可行 性分析。

(1)合理性分析

实测数据统计方法能够比较客观的反映工程 所在海域的海冰特征现状以及变化趋势,计算结 果客观可信;海冰区划设计条件,规范的制定结合 了实测数据统计、理论分析、数值模拟和经验的综 合方法,经过了多年工程应用,结果合理可靠,由 于近20a来我国冰情较20世纪偏轻(图3),因此 规范推荐值可能趋于保守;累积负气温法是一种 理论方法,主要考虑海冰生消的纯热力学过程,而 我国渤海及北黄海海冰厚度的最大特点就是动力 学过程影响起重要作用,通常由于忽略了动力影 响,计算冰厚结果会偏大。





(2)安全性评估

将工程海域实测平整冰厚数据序列中年最大 值与推算结果对比,以证明推算结果的可靠性,如 图4所示。实测冰厚的范围为15~32 cm(见表 1)。分析结果表明:实测数据统计方法与实测结 果相近,海冰区划方法的推算结果作为工程设计 条件较为适宜,累计负气温方法结果偏大。



图 4 单层平整冰厚推算结果与实测冰厚的比较

Fig. 4 Comparison of the calculated results and measured data of single layer ice thickness

(3)可行性评估

本文介绍的3种设计平整冰厚推算方法,原 理各不相同,但均属于技术成熟、在海洋工程中被 广泛认可的方法,能够得到合理取值,用于客观评 价工程原始设计条件。其中,实测冰厚统计方法 和累计负气温方法均需要工程原位测量的高质量 数据积累,目前绝大部分工程难以满足,因此对工 程原位测量提出了新的要求。

3 结 论

(1)利用 JZ20-2 海域的实测冰情及环境数据,对实测数据统计分析、海冰区划设计条件和累

计负气温等3种单层平整冰厚的推算方法进行了 应用,分析了3种方法推算结果的合理性、安全 性,以及方法本身的可行性。

(2)分析结果表明,海冰区划方法仍是现阶段对单层平整冰厚推算的主要手段。应当重视积 累工程海域实测数据要求,提出观测指标、频次、 精度等的具体要求,开展工程原位测量的高质量 数据积累,逐渐提高实测冰厚统计分析方法的可 行性。综合3种计算方法可以得到合理取值,用 于客观评价工程原始设计条件。

参考文献:

- [1] 段梦兰,方华灿,陈如恒. 渤海老二号平台被冰推倒的调查结论[J]. 石油矿场机械,1994,23(3):14.
- [2] CROASDALE K R. Ice forces on fixed rigid structures [R]. CRREL Special Report. Hanover, NH: Working Group on Ice Forces on Structures, 1980:34-106.
- [3] LØSET S, SHKHINEK K N, GUDMESTAD O T, et al. Actions from ice on Arctic offshore and coastal structures. Publisher "LAN". St. St. Petersburg, Russia, 2006.
- [4] 陈伟斌. 海冰与孤立桩相互作用的数值模拟[J]. 海洋学报, 1996,18(4):114-119.
- [5] IEC. 61400-3 IEC WG3, Recommendations for design of wind turbine structures with respect to ice loads [S]. International Electrotechnical Commission. 2004.
- [6] ISO 19906:2010 Petroleum and natural gas industries-Arctic offshore structures [S]. International Organization for Standardization. 2010.
- [7] MÄÄTTÄNEN M. The effect of ice pile-up on the ice force of a

conical structure[C]//Proceedings of 16th IAHR Ice Symposium. Espoo, Finland: IAHR, 1990(2):1010-1021.

- [8] 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.
- [9] 国家海洋局.中国海洋灾害公报[R].北京:国家海洋局, 1989-2015.
- [10] 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,1987(4):47-56.
- [11] 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.
- [12] 王仁树,刘旭世,张立锟. 渤海海冰的数值试验[J]. 海洋学报,1984,6(5):572-580.
- [13] 吴辉碇. 海冰的动力-热力过程的数学处理[J]. 海洋与湖 沼,1991,22(4):321-328.
- [14] 白 珊,吴辉碇. 渤海的海冰数值预报[J]. 气象学报,1998, 56(2):139-153.
- [15] 王仁树,刘钦政,陈伟斌,等. 渤海海冰漂移过程的数值模拟 和试验[J]. 海洋与湖沼,1994,25(3):301-305.
- [16] 吴辉碇,白珊,张占海.海冰动力学过程的数值模拟[J].海 洋学报,1998,22(2):1-13.
- [17] 程 斌. 一维海冰热力模式的守恒型差分格式和数值模拟 [J]. 海洋通报,1996,15(4):8-16.
- [18] 杨国金.中国近海工程环境参数区划[J].海洋预报,1998, 15(3):132-139.
- [19] 杨国金. 渤海海冰区划[J]. 中国海洋平台, 1994(Z1): 494-498.
- [20] 中国海洋石油总公司. Q/HSn 3000-2002 中国海海冰条件及 应用规定[S](内部资料). 2002.
- [21] 中海石油公司. 海冰管理报告[R]. 1996-2016.
- [22] 邓树奇. 辽东湾 JZ20-2 区海冰条件分析和设计参数计算 [J].海洋石油,1986(2):59-67.