

海冰, 荷载, 设计标准, 不确定性

联合概率分析

110-116

海冰荷载设计标准的不确定性及
联合概率分析

p731.15

刘德辅 杨永春 王超

(青岛海洋大学土木系)

(天津大学)

李桐魁

(中国石油工程设计公司, 天津)

摘 要 海冰荷载为寒冷海域海洋工程结构设计的控制条件。当前的工程设计中, 大多以平整冰厚和海冰强度两项指标作为设计标准, 但是影响平整冰厚和海冰强度的因素, 诸如水温、气温、冰温、盐度、风场等, 都具有很强的随机性。一般的数值模拟方法, 只能给出平均状态的结果, 无法表达各种随机因素影响下海冰的厚度和强度的概率特征。本文采用不确定性分析和联合概率分析的方法, 研究了海冰厚度、强度设计标准的离散度 (cov) 以及联合概率分析法在海冰设计标准中的应用。

关键词 海冰荷载 设计标准 不确定性分析 联合概率分析

前 言

辽东湾拥有丰富的油气资源, 同时也是我国冰情最严重的海区, 因此, 海冰设计标准已成为寒冷海区石油开发工程的安全和经济效益的重要控制因素之一。近年来, 针对渤海湾的冰情, 已有不少研究, 如提出了海冰厚度的概率预报方法^[1]以及对海冰强度所作的研究^[2,4], 但对影响海冰厚度和强度的主要因素的随机性及其影响, 还考虑不够。同时, 大多是将各种最严峻的自然条件组合去建立计算模式。这样的计算结果, 从经济的角度来考察, 往往偏于浪费。

本文一方面对海冰厚度和强度的计算进行了不确定性分析, 包括计算模式、统计方法以及选用资料等方面可能引起的不确定性。这一结果不仅可正确估计计算结果的离散性, 进而计算置信域, 而且也是正在开展的可靠性设计研究的重要组成部分。此外, 本文还利用随机模拟方法进行影响冰厚、强度的主要因素的联合概率分析, 使海冰荷载设计标准计算方法得到进一步的完善。

本文于1994-04-26收到, 修改稿于1994-07-24收到。

1 设计冰厚的不确定性分析

由于现场实测海冰资料较少,现在普遍采用冰厚与气象因子的相关关系来拟合出计算冰厚的经验公式,再利用冰区中有代表性的海洋气象台站实测水文气象资料得到历年最大冰厚的年极值系列.本文采用文献[1]所得的冰厚计算公式:

$$H = 1.71 \sqrt{(FDD - 3TDD) - 5.2}, \quad (1)$$

式中, H 为平整冰厚 (cm); FDD 为 -2°C 以下的累积冻冰度日; TDD 为 0°C 以上的累积融冰度日.

1.1 设计冰厚的统计不确定性分析

在设计冰厚的推算中,一般采用20~30a的资料系列,用某些分布模式(如Weibull、Gumbel等分布模式)进行分布拟合优化检验,从而选定分布模式,进行设计冰厚计算.由此可见,样本选择的合理程度直接影响到统计结果的可靠性,即用样本资料代替总体,必然存在统计不确定性.根据样本资料的统计特征,用Monte-Carlo方法产生大量年极值系列,用不同的统计方法计算相应的设计极值,即可计算出相应总体的设计值及变差系数 cov .

表1为A(葫芦岛)、B(鲅鱼圈)站相应的 FDD 、 TDD 、 H ;表2为优选出的分布模式及统计参数;表3为不同分布模式计算所得设计值及相应变差系数 cov .

1.2 大气候周期引起的设计冰厚不确定性分析

渤海是一个三面被大陆包围、水深较浅的内海,海-气的热交换直接影响冰情,气象因素的长周期变化,会直接影响冰情的周期规律.太阳黑子数的变化、大气环流的类型、北半球副高压以及海水温度变化的长期规律都会影响到气象因子的变化.文献[1]以 FDD 为例,证明渤海冰情变化与太阳黑子数具有明显的负相关和11~12a的周期律,而且,重冰年与El Niño年有一定关系.因此,取样时距长短不同,取样时段不同,都会对计算结果产生一定影响,存在不确定性.表4采用20a的滑动取样法推算设计冰厚及相应的 cov .

1.3 计算冰厚代替实测冰厚可能引起的不确定性分析

用气象资料为基础推算的冰厚系列代替实测的冰厚系列,两者必然存在一定的差异,以 ΔH_i 代表差值,即

$$H_{\text{act}} = H_{\text{cl}} \pm \Delta H_i. \quad (2)$$

由计算可得 $\Delta H \in F(\alpha, u, x)$, 即 ΔH 符合以 α 、 u 为参数的 Gumbel 分布.用 Monte-Carlo 法,按 $F(\alpha, u, x)$ 分布统计特征值,产生大量 ΔH_i ,再使之与 H_{cl} 随机组合,即可得出相应的设计值及 cov ,即 A 站 $cov_{50a} = 0.020$, $cov_{100a} = 0.022$; B 站 $cov_{50a} = 0.022$, $cov_{100a} = 0.022$.

表1 辽东湾北区两站的多年气象因子及平整冰厚计算值

年份	A 站			B 站		
	FDD [$(^{\circ})\cdot d$]	TDD [$(^{\circ})\cdot d$]	平整冰厚 (cm)	FDD [$(^{\circ})\cdot d$]	TDD [$(^{\circ})\cdot d$]	平整冰厚 (cm)
1964~1965	268.7	3.6	27.2	354.9	12.0	30.3
1965~1966	349.0	4.8	31.1	359.0	11.0	31.1
1966~1967	416.2	5.0	34.0	465.5	3.3	36.3
1967~1968	523.4	1.5	38.8	573.8	5.7	40.2
1968~1969	553.9	1.1	39.9	566.0	17.6	38.5
1969~1970	485.6	14.0	35.8	487.0	10.5	36.3
1970~1971	363.1	3.8	36.1	494.0	8.6	36.8
1971~1972	373.3	1.8	32.6	407.0	7.8	33.3
1974~1975	321.6	0.0	30.4	328.6	1.6	30.5
1975~1976	285.9	4.5	28.0	318.1	10.7	28.7
1976~1977	522.9	2.6	38.6	554.3	2.3	39.0
1977~1978	312.4	6.5	29.0	360.3	9.1	31.0
1978~1979	320.0	4.9	30.0	294.0	16.7	26.4
1979~1980	333.9	1.4	30.8	365.8	5.6	31.7
1980~1981	463.5	1.3	36.5	408.0	3.2	33.9
1981~1982	292.5	1.6	28.7	306.9	12.8	27.7
1982~1983	200.1	3.2	27.9	270.6	15.5	25.8
1983~1984	410.5	0.9	34.3	427.0	0.4	35.1
1984~1985	547.6	0.7	39.7	496.3	6.0	37.2
1985~1986	437.6	4.4	35.0	430.9	5.3	35.0
1986~1987	388.4	6.8	32.6	368.7	9.1	31.4
1987~1988	282.4	14.5	26.1	293.3	22.9	25.3
1988~1989	170.8	4.6	21.1	160.7	6.8	19.9
1989~1990	528.3	6.2	38.4	369.2	8.9	31.4

表2 辽东湾各站多年平整冰厚的分布类型及其参数

站 名	分布类型	样本参数		分布参数	
		E_H	S_H	U	α
A	Weibull	32.61	4.80	34.72	0.14
B	Weibull	32.23	4.91	34.42	0.15

表3 辽东湾各站平整冰厚百年一遇值及其变差系数

站名	模 型	资 料 数	百年一遇		五十年一遇	
			冰厚(cm)	cov	冰厚(cm)	cov
A 站	Gumbel	1万	49.30	0.021 4	46.39	0.019 3
	Weibull	1万	43.42	0.023 4	42.40	0.021 6
	Log-normal	1万	48.54	0.033 4	46.19	0.029 1
	Gamma	1万	46.78	0.024 6	44.85	0.022 1
B 站	Gumbel	1万	49.84	0.022 5	46.77	0.020 3
	Weibull	1万	43.74	0.025 0	42.63	0.023 2
	Log-normal	1万	49.28	0.035 8	46.74	0.031 2
	Gamma	1万	47.26	0.026 0	45.20	0.023 4

表4 辽东湾各站20a 资料推算的五十年一遇及百年一遇设计冰厚值

A 站:		$H_{100a}=41.55,$		$cov_{100a}=0.02;$		$H_{50a}=40.735,$		$cov_{50a}=0.02$	
1964~1983	1965~1984	1966~1985	1967~1986	1968~1987	1969~1988	1970~1989	1971~1990		
40.07	40.17	40.30	41.40	40.56	39.85	41.05	41.48		
40.81	40.88	42.07	42.18	41.31	40.59	42.03	42.50		
A 站:		$H_{100a}=42.325,$		$cov_{100a}=0.017;$		$H_{50a}=41.408,$		$cov_{50a}=0.017$	
1964~1983	1965~1984	1966~1985	1967~1986	1968~1987	1969~1988	1970~1989	1971~1990		
41.31	41.74	42.38	42.22	40.98	40.36	41.57	40.70		
42.17	42.62	43.29	43.12	41.80	41.20	42.67	41.73		

1.4 设计冰厚总不确定性

$$cov_H = \sqrt{cov_1^2 + cov_2^2 + cov_3^2}, \quad (3)$$

计算结果如表5所示。

2 海冰强度的不确定性分析

海冰的盐水体积 V_b (指冰中盐水体积与冰体积的比) 是影响渤海海冰抗压强度 σ_c 的主要因素, V_b 计算公式如下^[4]:

$$V_b = S \left(0.532 + \frac{49.185}{|T|} \right), \quad (4)$$

式中, S 为海冰盐度, 按文献[4], 取 $S=3.6$, T 为冰温($^{\circ}\text{C}$).

表5 设计冰厚的总不确定性

站名	百年一遇	五十年一遇
A 站	0.038	0.035
B 站	0.036	0.036

由于冰层中温度和盐度变化的复杂性,工程中一般采用“等效冰温”来代表各种因素的综合影响.等效冰温计算公式如下:

$$T_i = \frac{1}{2}(T_{iw} + T_{ia}), \quad (5)$$

式中,

$$T_{iw} = T_w - ka_1^{-1} - (T_w - T_a),$$

$$T_{ia} = T_a + ka_2^{-1} - (T_w - T_a),$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{a_1} + \frac{H}{\lambda} + \frac{1}{a_2}},$$

以上各式中, T_w 为海冰冰点温度(取 -1.4°C); T_a 为相对稳定的最低气温($^\circ\text{C}$); T_{iw} 为海冰与海水的界面温度($^\circ\text{C}$); T_{ia} 为海冰与大气界面温度($^\circ\text{C}$); a_1 为冰盖底层放热系数[$125 \times 4 \ 186.8 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$]; a_2 为冰盖表层放热系数[$4.7 \times 4 \ 186.8 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$]; k 为冰盖传热系数[$\times 4 \ 186.8 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$]; λ 为海冰导热系数[$2 \times 4 \ 186.8 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$]; H 为平整冰厚 (cm).

辽东湾平整冰抗压强度 (kPa) 按下式计算^[5]:

$$\sigma_c = 8.851V_b^{-0.422}. \quad (6)$$

表6为按以上各式计算所得等效冰温 T_i 、海冰盐水体积 V_b 和抗压强度 σ_c 值.

表6 B站历年平整冰等效冰温、盐水体积及抗压强度

年 份	$T_a(^{\circ}\text{C})$	$T_{iw}(^{\circ}\text{C})$	$T_{ia}(^{\circ}\text{C})$	$T_i(^{\circ}\text{C})$	$V_b(\text{cm}^3)$	$\sigma_c(\text{kPa})$
1964~1965	-22.3	-1.8	-10.4	-6.1	30.9	2 080
1965~1966	-22.9	-1.9	-10.7	-6.3	30.0	2 106
1966~1967	-19.7	-1.8	-10.0	-5.9	32.0	2 051
1967~1968	-17.1	-1.7	-9.2	-5.4	34.5	1 987
1968~1969	-21.8	-1.8	-11.3	-6.5	29.0	2 138
1969~1970	-23.6	-1.8	-11.9	-6.8	27.8	2 177
1970~1971	-18.9	-1.7	-9.7	-5.7	32.9	2 028
1971~1972	-18.4	-1.8	-9.1	-5.4	34.7	1 982
1974~1975	-14.9	-1.7	-7.2	-4.4	41.7	1 833
1975~1976	-22.4	-1.9	-10.1	-6.0	31.5	2 066
1976~1977	-21.4	-1.8	-11.3	-6.5	29.1	2 129
1977~1978	-18.3	-1.8	-8.7	-5.2	35.7	1 958
1978~1979	-19.8	-1.8	-8.7	-5.3	35.6	1 961
1979~1980	-19.4	-1.8	-9.3	-5.5	33.9	2 002
1980~1981	-19.2	-1.8	-9.5	-5.6	33.4	2 015
1981~1982	-18.6	-1.8	-8.4	-5.1	36.6	1 936
1982~1983	-17.9	-1.8	-7.9	-4.8	38.7	1 893
1983~1984	-18.5	-1.7	-9.3	-5.5	33.9	2 000
1984~1985	-21.9	-1.8	-11.2	-6.5	29.2	2 131
1985~1986	-18.0	-1.7	-9.1	-5.4	34.7	1 982
1986~1987	-22.9	-1.9	-10.8	-6.3	29.9	2 109
1987~1988	-13.7	-1.7	-6.2	-3.9	47.0	1 743
1988~1989	-15.8	-1.8	-6.2	-4.0	46.2	1 756
1989~1990	-20.6	-1.8	-9.8	-5.8	32.5	2 038

利用上述各年 σ_c 值,计算可得抗压强度均值 $\bar{\sigma}_c = 2 \ 004 \text{ kPa}$, 变差系数 $\text{cov} = 0.056$.

3 海冰设计标准中的联合概率

对于寒冷海域的工程设计,一般采用百年一遇或五十年一遇的平整冰厚和最大可能的抗压强度作为设计标准,但是影响平整冰厚和抗压强度的各种环境条件都具有随机性.事实上,百年一遇冰厚和最大可能抗压强度都是考虑各种环境因素的最不利组合,它们出现的概率往往是极为稀遇的,用以作为设计标准有时会造成浪费.因此,研究几种影响海冰设计标准随机因素的联合概率,对保证工程设计的安全和节约投资都具有重大意义.本文针对影响海冰厚度的 FDD 和 TDD 与海冰的抗压强度为例,进行联合概率研究.

多维联合概率的推求实际上是求解以下公式:

$$P = \int \int \int \cdots \int_{[g(x) < 0]} f(x_1, x_2, \cdots, x_n) dx_1 dx_2 \cdots dx_n. \quad (7)$$

各种环境因素可能遵循不同的概率分布模式,彼此间具有不同的相关性.求解这种非高斯相关的多维随机变量联合分布,本文采用文献[3]中的“重点抽样法”进行随机模拟,本方法具有节约机时和降低方差的优点.

为了使用重点抽样法计算联合概率,需输入的随机变量统计特征值和相关系数矩阵如表7所示.

表7 B站各随机变量统计特征

计算要素	分布模式	样本特征值		设计值	
		EX	SX	五十年一遇	百年一遇
FDD	Weibull	395.25	99.19	609.2	634.25
TDD	Gumbel	8.89	5.37	25.48	28.92
σ_c	Gumbel	2.004	113.5	2.207	2.226

相关系数矩阵为

$$\rho_{ij} = \begin{bmatrix} 1.0 & & & \\ 0.681\ 0 & 1.0 & & \\ 0.212\ 8 & 0.297\ 5 & 1.0 & \\ & & & 1.0 \end{bmatrix}.$$

进行随机模拟求解式(7)时,使用以下状态方程:

$$X_{\min} = \max(G_1, G_2, G_3),$$

$$G_1 = X(1) - A_1,$$

$$G_2 = A_2 - X(2),$$

$$G_3 = X(3) - A_3,$$

式中, A_1 、 A_2 和 A_3 分别表示上列三种随机变量的五十年一遇和百年一遇值.由此可得 FDD 、 TDD 、 σ_c 超过各自五十年一遇和百年一遇设计值的联合概率分别为

$$P(\xi > \xi_{50a}) = 0.006\ 1,$$

$$P(\xi > \xi_{100a}) = 0.002\ 6.$$

相应的重现期分别为 $T=163$ 和 $384a$ 。由此可见,分别采用五十年一遇的特征值作为设计标准,其联合出现的重现期已达到 $163a$ 一遇,显然,这是比较保守的。

4 结论

(1)通过对海冰厚度及强度计算中的不确定性进行研究,进而估算设计标准取值的置信域,对进一步开展海工结构的可靠性理论研究都具有重要意义。

(2)本文采用联合概率分析法对海冰荷载设计标准进行研究,其结果表明,即使独立采用五十年一遇的海冰厚度和强度作为设计标准,也是过于保守的,势必造成浪费。

(3)用联合概率法对更多的随机变量进行极值冰力的随机模拟,进一步探讨合理的设计冰力标准是有现实意义的。

参考文献

- 1 Liu Tehfu, Li Tongkui *et al.* Probabilistic Analysis of Sea Ice in North Bohai Gulf. In: Proc. OMAE, Vol. N, 1987
- 2 Tunik A L and B D Wright. Probability of winter environmental forces on offshore structures. In: Proc. OMAE, Vol. N, 1989
- 3 刘德辅,王 铮,旋建刚. 海洋环境条件联合设计标准. 海洋学报, 1994, 16(2): 116~123
- 4 李福成, 孟广琳等. 渤海海冰抗压强度试验研究. 海洋学报, 1987, 9(2): 255~261
- 5 孟广琳等. 渤海北部平整冰抗压强度设计标准研究. 海洋工程, 1989, 7(3): 65~72