

文章编号:1005-9865(2012)04-0109-09

海洋环境要素计算不确定性分析

雷方辉¹, 谢波涛^{1,2}, 王俊勤¹

(1. 中海油研究总院, 北京 100027; 2. 中科院力学研究所 博士后流动站, 北京 100080)

摘 要:海洋环境要素(如风、浪、流、周期等)极值参数的准确推算在海洋工程设计中具有重要意义。由于极值计算时存在的不确定性因素,导致不同模式、样本的组合会导致极值计算结果产生明显差异。使用南海长期波浪资料,对环境要素计算时存在的统计模型不确定性、取样不确定性和参数求解方法的不确定性等进行了系统的研究和比较,最终对极值理论总体不确定性进行了分析。结果表明,采用复合极值分布并扩大样本数量的方法,可有效减小极值预测的不确定性及其海洋结构设计阶段的风险。

关键词:极值模型; 设计波高; 不确定性; 取样方法; 概率预测

中图分类号:TV139.2 文献标识码:A

Uncertainty analysis of marine environment elements calculation

LEI Fang-hui¹, XIE Bo-tao^{1,2}, WANG Jun-qin¹

(1. China National Offshore Oil Corporation General Research Institute, Beijing 100027, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: The marine environmental extreme value parameters such as wind speed, current speed, wave height and wave period play an important role in marine engineering design. Because of the uncertainty existing in the parameter calculation, there is a significant difference in the prediction. Based on the observed data in South China Sea, the uncertainties existing in extreme theory, sampling method, samples interval and statistics parameters solving method are discussed in this paper. It is shown that the adoption of the compound extreme value distribution with more samplings can significantly reduce uncertainty factors in extreme value prediction and the risk of the marine constructions in the design stage.

Key words: extreme value distribution; significant wave height; uncertainty; sampling method; probability prediction

海洋环境要素是影响海洋结构物安全性、经济性和耐久性的主要因素。海洋环境条件包括十分广泛的内容,大致可归为水文、气象、物探、地质、地震、腐蚀及海生物等七类。它们虽然会对结构安全产生不同形式的影响,但海洋工程更关注以荷载形式作用于结构物上的主要环境要素^[1]。海洋环境要素包括有:风力、波浪力、海流力、冰力、地震力等,它们大都具有随机性与模糊性^[2],其取值对结构设计的安全和经济上都举足轻重。因此,如何充分利用有限的资料,使之全面地反映环境要素的实质性规律,从而合理地推算极值环境荷载,是工程设计中一直关心的问题。在极值计算时,由于在模型选择、样本选取、参数计算方法上均存在不确定性,不同的选择往往会导致预测结果的明显差异。

针对海洋环境要素计算中存在的的海不确定性,使用1949~1999年广东大鹏湾长期波高资料,对计算环境荷载标准的常用多种极值理论中存在的统计模型不确定性、取样不确定性和参数求解方法的不确定性进行了系统的分析和比较。我国南海受台风等天气系统影响明显,环境要素波动较大,针对该特点提出了区间

收稿日期:2011-12-19

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)基金资助项目(2008AA09A401)

作者简介:雷方辉(1956-),男,高级工程师,主要从事海洋工程环境条件、设计标准研究。E-mail: leifh@cnoc.com.cn

取样的不确定性,最终对极值理论总体不确定性进行了分析。

1 极值模型简介

海洋环境条件极值预测通常是采用年最大值法,将年极值样本序列在一定适线准则下确定其线型,如 Gumbel、Weibull、Pearson-III,在此基础上外延,推算多年一遇设计参数。由于每年仅选择一个最大值作为样本序列,当资料年限较短,采用年最大值做概率分析必然带来较大的误差,且计算结果不稳定。为了更大限度利用实测资料的信息量,阈值法(peak over threshold)被提出并得到了发展。

阈值法^[3]是选取达到或超过某一固定较大值“阈”的数据作为样本进行概率分析的取样方法。Cunnane 认为^[4]:当事件每年发生的次数超过 1.6 时($\gamma \geq 1.6$),阈值法比年极值法更加适用。但使用阈值法的关键是如何选定“阈”。阈值选得过低,不能满足其独立性要求;选得过高,不能满足每年超过阈值的样本数符合 Poisson 分布的假设^[5]。

考虑了台风出现频次的复合极值分布理论提出后^[6-7],在工程界得到了普遍重视。该理论认为每年入侵某海域的台风次数服从一种离散型分布,而台风影响下的海浪波高服从一种连续型分布,这两种分布可构成波高的“复合分布”。Langley R M, El-Shaarawi A H^[8]对比了包括本模式在内的国际海洋工程界广泛应用的六种概率分布模式,认为此模式具有与实测资料符合好,预测结果合理的优点。

2 极值模型不确定性分析

使用广东省大鹏湾海域 1949~1999 年波高年最大值及历次台风(共 279 场)的波高后报资料,分别应用 P-III 分布、Gumbel 分布和 Poisson-Gumbel 分布(复合极值)模式进行极值波高的概率预测,探讨了应用不同概率分布模式推算环境要素设计值导致的不确定性。

该海域历年台风频次见表 1。台风期间的波高数据较多,在文中略去。通过对 51 年间每年台风的频次进行 χ^2 检验,可得 $\chi^2 = 8.74 < \chi^2_{\alpha} = 11.1$ ($\alpha = 0.05$),因此判断每年台风的发生频次符合泊松分布。表 2 列出了三种极值模型不同重现期波高及其置信区间结果。

表 1 1949~1999 年大鹏湾台风频次表

Tab. 1 The frequency of typhoons in Dapeng Bay between 1949 and 1999

项目	数值											
每年台风次数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	279(台风总数)
对应出现的年份数	0	1	1	6	7	16	5	5	6	3	1	51(总年数)
平均每年发生台风次数	5.47											

表 2 三种分布不同重现期波高及其置信区间比较

Tab. 2 Comparison of the wave height and confidence interval by different models

序列	资料长度/a	复合极值法			年极值法					
		Poisson-Gumbel			Gumbel Distribution			P-III		
		样本数	H/m	ΔH	样本数	H/m	ΔH	样本数	H/m	ΔH
1	51(1949~1999)	279	10.11	0.19	51	10.78	0.50	51	9.70	0.46
2	30(1969~1998)	167	10.16	0.23	30	9.67	0.61	30	8.93	0.56
3	20(1969~1988)	114	9.46	0.27	20	10.05	0.74	20	8.65	0.68
4	17(1949~1965)	95	11.00	0.36	17	12.59	1.11	17	10.75	1.02
5	17(1966~1982)	98	9.77	0.30	17	10.50	0.83	17	8.95	0.76
6	17(1983~1999)	86	10.00	0.34	17	11.09	0.95	17	9.45	0.87
预测结果的标准差		$\sigma_{P-G} = 0.5178$			$\sigma_P = 1.0213$			$\sigma_{P-III} = 0.7617$		

注: ΔH 为置信区间的半宽; 重现期为 100 年。

从表 2 中可以得出: 1) 不同极值模型波高百年一遇预测值都不相同; 而且同一模型, 当取样序列不同时, 结果差异较大。2) 采用过程取样法的复合极值分布在取样数量上远远大于以年极值取样法的 Gumbel、

P-III 因此预测结果标准差、置信区间均小于其他两种模型。3) 三种极值模型中 ,Gumbel 模型的预测结果偏大 ,P-III 偏小 ,复合极值分布预测值介于两种分布之间 ,且预测结果波动较小。

3 模型取样不确定性分析

极值理论的取样方法主要分为以下 3 类。图 1 (a) 表示年极值取样法 ,即只在年序列数据中取最大的一个值的;图 1 (b) 表示的是过阈取样法 ,超过阈值 u 的都可选为样本;图 1 (c) 代表的是过程取样法 ,即选取发生台风、寒潮等极端环境条件时的样本。

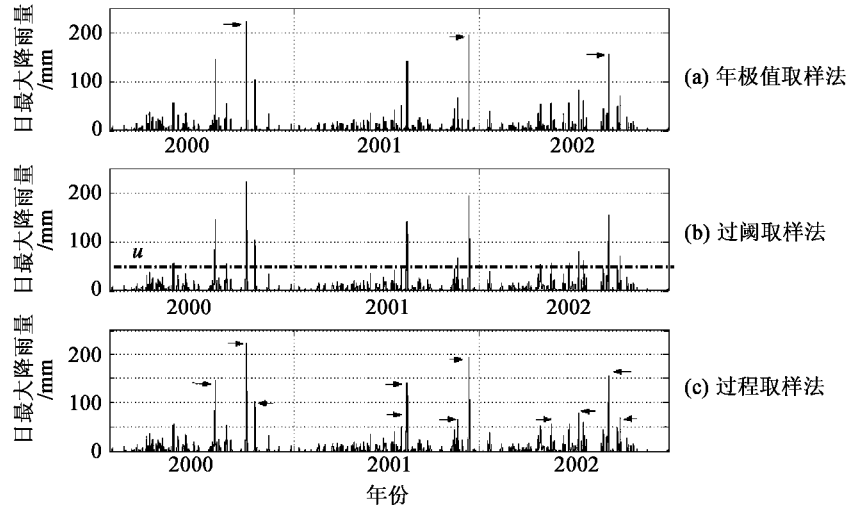


图 1 三种取样方法示意

Fig. 1 Illustration of sampling methods

年极值法在波高的计算上年极值法每年只取一个最大值 ,取样简单 ,不确定性较小;过程取样根据极端天气发生的情况 ,可参考相应的气象资料 ,因而取样时的不确定性也较小^[9]。最容易发生取样误差的模型主要是阈值法。

由于广义极值分布 (GEV) 具有最大值稳定性的特点 ,可以得到 GEV 的超阈值分布 (POT) ——广义 Pareto 分布 (GPD):

$$P(X < x | X > u) = W(x)^{[u]} = 1 - \left(1 + \xi \frac{x - u}{\sigma + \xi(x - u)}\right)^{-\frac{1}{\xi}} \quad (1)$$

由广义 Pareto 分布的性质 ,得到下面的关系式:

$$E(X - u | X > u) = \frac{\sigma - \xi u}{1 - \xi} + \frac{\xi}{1 - \xi} u \quad (2)$$

式中: u 为阈值 , $E(X - u | X > u)$ 为阈值超出量的期望值。

为研究阈值法取样的不确定性 ,使用大鹏湾海域 1949 ~ 1999 年波高日最大波高后报资料为研究对象 ,具体计算如下:

由式 (2) ,可知 $E(X - u | X > u)$ 为阈值超出量的期望值。由于期望值近似为平均值 ,故可作出阈值 u 与观测值超出量 ($X - u | X > u$) 之平均值 (称平均超出量) 的散点分布图 ,当形状参数 ξ 稳定时 ,图形近似为直线。也就是说 ,以阈值 u 为横轴 ,以平均超出量为纵轴 ,该直线的斜率和截距分别是 $\xi / (1 - \xi)$ 和 $(\sigma - \xi u) / (1 - \xi)$,因此可以根据平均剩余生命图 (见图 2) 中直线段所对应的横坐标 (0, 2) ,作为阈值的可选范围。

为了检验所选阈值是否合理 ,在阈值预估范围

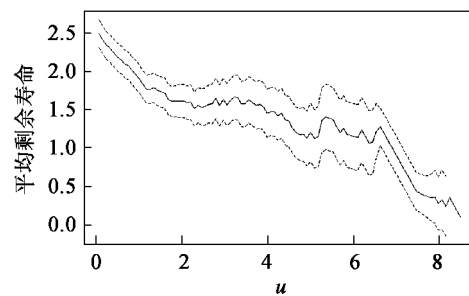


图 2 大鹏湾波高的平均剩余生命图

Fig. 2 Mean residual life plot of wave height

[0.2]内,均匀地选取100个值作为阈值,利用极大似然估计得到一系列参数值。当此参数估计在所选阈值附近是稳定时,就说明此阈值基本合理。

图3显示,当阈值 u 小于1.2时,GPD模型参数估计值近似稳定;当大于1.2时,参数估计值发生波动。为保证样本独立性,所选阈值应尽可能大,因此这里选 $u=1.2$ 作为阈值进行下一步计算。图4为波高数据的概率、分位数、重现水平及密度函数诊断图。可知,当 $u=1.2$ m时,与GPD分布拟合较好。表3显示了不同阈值时模型参数及估计值,括号内为使用极大似然法拟合参数的近似标准差。

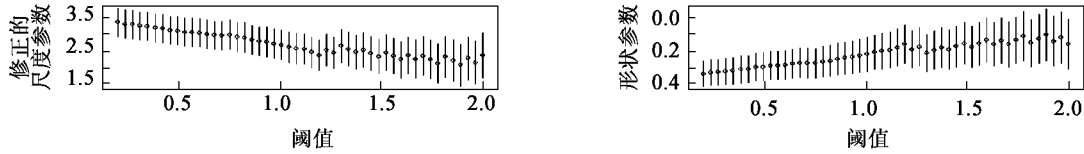


图3 不同阈值下 GPD 模型参数估计

Fig. 3 Maximum likelihood estimation of parameter

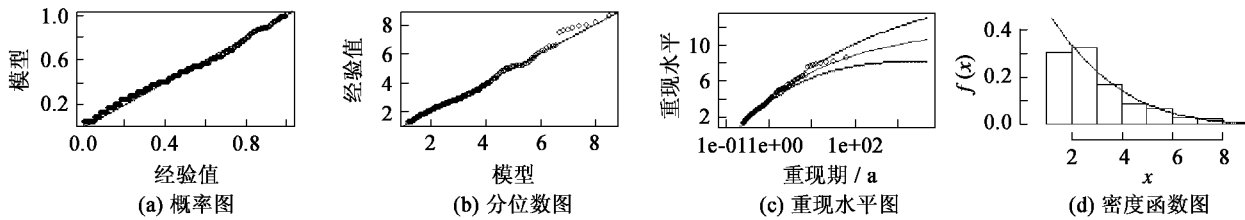


图4 波高数据的 GPD 分布拟合诊断图

Fig. 4 Distribution diagnostic testing of threshold excess values

表3 不同阈值时模型参数及估计值

Tab. 3 Comparison of different threshold values

阈值 u/m	样本数	频次 λ	参数		重现值/m		
			μ	σ	100 a	500 a	1 000 a
1.5	228	4.47	2.099 (0.189 5)	-0.188 (0.062 6)	7.97	9.19	9.62
1.2	258	5.06	2.228 (0.184 4)	-0.207 (0.056 1)	7.81	8.99	9.39
1.0	277	5.43	2.346 (0.183 0)	-0.225 (0.051 8)	7.73	8.85	9.22
0.8	286	5.61	2.590 (0.191 0)	-0.269 (0.047 0)	7.84	8.82	9.13

阈值法在选取阈值时较为复杂,如需要根据平均剩余生命图来计算,而且要根据预估值进行多次诊断检验,最终确定。而且依据散点分布图中的近似直线确定阈值的大小,很显然,判断一条线“直”和“曲”的近似程度有很大的主观性,也就是说,阈值的选取有极大的任意性,并且不易得到有代表性的阈值。由图5所示,预测值与阈值的取值也有关系。

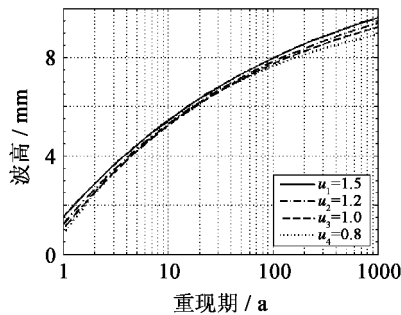


图5 不同阈值时预测结果比较

Fig. 5 Comparison of different threshold values

由此可见,使用阈值法的关键是如何选定“阈”,选定的阈值不同,同一原始资料系列将出现不同样本,并影响分布参数的估算、概率模型的选取及重现水平的确定。

王超,刘德辅^[10]分析我国南海某站波浪资料时,分别以2.0 m、4.0 m、5.0 m及6.0 m为阈值选取样本

计算百年一遇设计波高,预测的最小值为 8.3 m,最大值为 9.8 m,变幅 1.5 m,说明不同阈值对结果影响较大。Goda 的研究也表明预测结果和阈值的取值可能有关系^[11]。

4 取样区间选择的不确定性分析

由表 2 可以发现,样本区间的选择对极值模型的参数拟合及预测结果会有很大影响。为反映不同取样区间对预测值的影响,将大鹏湾波高资料以每 20 a 最大值数据分组,进行滑动取样,用得到的含有不同样本数量的数据组来研究样本区间选择对极值模型结果预测的影响。

根据 20 年滑动取样数据组,分别采用 P-III 分布、Gumbel 分布和复合极值分布(P-Gumbel)模式这三种分布计算各自的 100 a、50 a 一遇重现期波高,得到其变化范围。由图 6 可见,处在不同取样区间的各组数据在波高预测结果上波动较大,预测值也有较大差异。表 4 列出了由不同取样区间数据计算结果的变化范围及相对误差(相对误差是指预测波高最大值和最小值之差与最大值的比)。

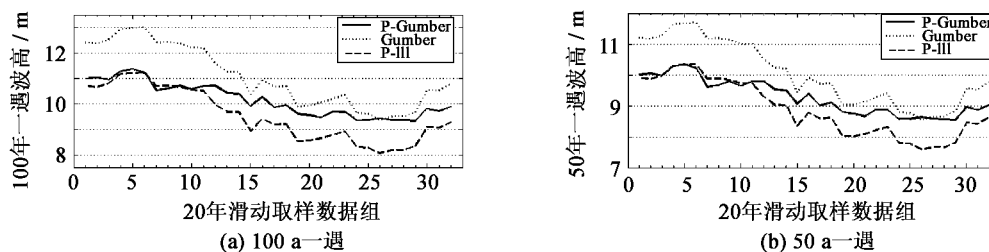


图 6 20 a 滑动取样不同周期条件下波高对比

Fig. 6 Comparison of wave height of different return periods by 20 a samples

以 100 年一遇波高为例,20 a 滑动取样的预测结果的最大值(13.02 m)与最小值(9.35 m)相差竟达 3.67 m,计算相对误差也达到了 28%。由此可见取样区间对预测结果的巨大影响。

表 4 三种分布预测值的相对误差及标准差

Tab. 4 The relative error and standard deviation of three models

分布模式	100 a 一遇		50 a 一遇		20 a 一遇	
	相对误差	标准差	相对误差	标准差	相对误差	标准差
Gumbel	28%	1.10	27%	0.94	25%	0.73
P-III	28%	0.96	27%	0.83	24%	0.65
P-Gumbel	18%	0.58	17%	0.52	17%	0.43

2007 年 5 月,当年负责新奥尔良防护工程的美国陆军工程兵团邀集美国相关领域、著名高校、研究单位及公司的专家二十余人共同研讨和编写了《飓风洪水概率分析白皮书》^[12],书中也指出对 NOAA“标准设计飓风”(SPH)计算偏低的一个原因是选择了一个低活跃期的飓风区间,使得预测值整体偏低所致。

由于所研究海区处在台风影响较频繁的南海,造成这种取样区间不确定性的主要原因是因为台风(热带气旋)活动的影响。有研究表明,热带气旋的活动有季节、年际和年代际的变化特征^[13-14]。李爱平等^[15]、李宪之^[16]采用 1970~2004 年西北太平洋 TC 资料分析 TC 强度变化时发现,大致在 20 世纪 70 年代和 90 年代 TC 强度有下降趋势,而在 20 世纪 80 年代 TC 强度有缓慢上升趋势,同时发现 TC 平均强度在厄尔尼诺年略偏强,而在拉尼娜年平均强度略偏弱。

谐波分析和活跃度分析,也显示了热带气旋年频数可能隐藏着超过样本数的 100 余年的低频周期变化。热带气旋活动可能呈现“低靡期—平静期—活跃期—鼎盛期—活跃期—平静期—低靡期……”的活动规律,其中 20 世纪 60~70 年代初,热带气旋处于鼎盛期。从当今比较完整的 100 余年台风资料显示,1960~1974 年的 15 年间,台风活动确实达到鼎盛时期(40.4 个/年),而在随后 1975~1994 年的 20 年间,台风的生成数却下降为 33 个/年,1995 年之后,台风生成平均数继续减少。

为减小取样区间带来的不确定性,拟扩大取样数,分别以 30 a 及 40 a 滑动取样来探讨取样区间对预测结果的影响情况。这不同取样区间的三种分布各自的 100 a、50 a 重现期波高变化范围情况见图 7~图 8。

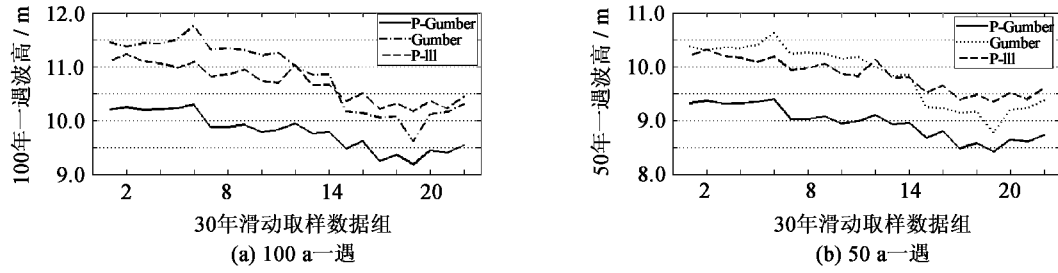


图7 30 a 滑动取样不同周期条件下波高对比

Fig. 7 Comparison of wave height of different return periods by 30 a samples

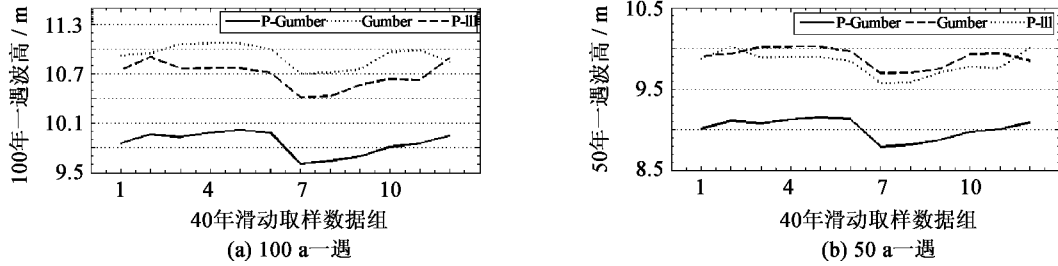


图8 40 a 滑动取样不同周期条件下波高对比

Fig. 8 Comparison of wave height of different return periods by 40 a samples

由图9中可以看出,随着取样数量的增加,不同重现期波高的预测结果也趋于平缓;而采用过程取样法的复合极值分布抗波动的能力明显优于其他两种分布。

在此引入 COV 值来表征不确定性变化的幅度。 $COV = \text{标准差}/\text{均值}$,反应了随机变量样本分布的离散情况。 COV 值越大,样本分布越分散,表明变量的不确定性越大,见表5和图10。

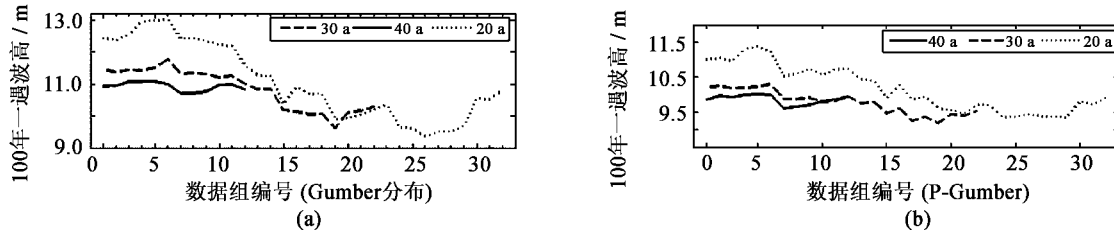


图9 模型取样情况比较

Fig. 9 Comparison of sampling numbers

表5 不同取样法及模型不确定性分析

Tab. 5 Uncertainty analysis of models and sampling methods

重现期		模型								
		P-Gumbel			Gumbel			P-III		
		100 a	50 a	20 a	100 a	50 a	20 a	100 a	50 a	20 a
20	均值	10.160	9.281	8.106	9.166	8.111	8.628	7.469	7.905	7.262
	均方差	0.658	0.585	0.485	1.210	1.042	0.819	1.049	0.916	0.733
	COV	6.48%	6.30%	5.99%	13.20%	12.85%	9.50%	14.04%	11.59%	10.10%
30	均值	9.441	9.399	7.836	7.921	7.983	8.487	8.568	8.623	8.615
	均方差	0.347	0.308	0.255	0.642	0.557	0.444	0.338	0.105	0.272
	COV	3.68%	3.27%	3.25%	8.10%	6.97%	5.23%	3.94%	1.22%	3.16%
40	均值	8.447	8.267	7.878	5.187	5.097	2.665	7.653	7.596	8.599
	均方差	0.141	0.125	0.104	0.134	0.119	0.102	0.158	0.145	0.127
	COV	1.67%	1.52%	1.32%	2.58%	2.34%	3.82%	2.07%	1.91%	1.48%

由表5、图10可以看到,由于取样区间的影响,传统方法推荐的使用20 a左右的资料推算台风影响海区的设计波浪时会存在较大不确定性。为保证重要结构物的安全,在资料允许的情况下,应尽量扩大样本数量;若资料年限较短,无法满足要求时,建议根据图10样本数与模型,使用插值法求出该模型不同样本数的COV,对最后计算结果进行更正。

同样20 a的数据,采用过程取样的复合极值分布的区间取样误差为6%左右(表6),而采用年极值取样法的Gumbel、P-III型分布则达到了10%。随着取样数增加,这种差异逐渐减小;当取样达到40 a左右时,三种方法的取样误差达到一致。

表6 不同模型取样数与COV的关系

Tab. 6 Relationship between sampling numbers and COV

样本数	P-Gumbel	Gumbel	P-III
20	6.26%	10.27%	10.20%
30	3.41%	5.60%	3.16%
40	1.38%	1.21%	1.48%

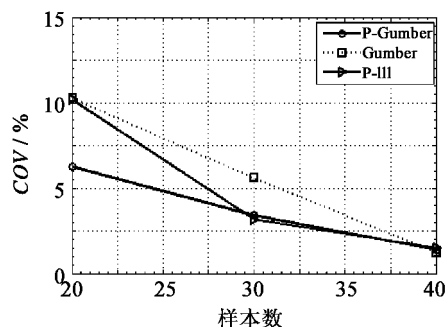


图10 不同模型取样数与COV的关系

Fig. 10 Comparison of sampling numbers and COV

5 模型参数求解的不确定性分析

参数估算方法有许多种,包括:矩法、极大似然法和最小二乘法等。下面就其中几种方法做简要说明。

5.1 矩法

矩法由K Pearson在20世纪初提出。其基本思路是用样本矩作为相应的总体矩的估计量,以样本矩的连续函数作为相应的总体矩的连续函数的估计量,从而求解要估计的参数。

矩估计方法有两个基本特点:一是矩估计基于经验分布函数,而经验分布函数逼近真实分布的前提条件是样本容量较大,因而理论上讲,矩方法是以大样本为应用对象的;其二,矩方法没有用到总体分布的任何信息。

5.2 极大似然法

极大似然法的思想最早由德国数学家Gauss于1821年提出,Fisher R A在1922年提出了极大似然法并探讨了它的性质,使之得到广泛研究和应用。极大似然估计法的基本方法是:先建立一个似然函数,它是变量的概率密度的函数,随概率密度函数中未知参数的变化而变化。

极大似然法的主要内容是使所研究的样本的出现可能性为最大。当存在一个有效估计量时,似然方程就有一个等于有效估计量的唯一解;但在实际使用时,计算比较繁复,对计算的精确度要求也较高,而且对某些分布(如P-III型)似然方程有时无解。

5.3 最小二乘法

最小二乘法也是一种常用的估计方法,常用于线性模型,非线性模型比线性模型复杂一些,通常是给定模型中待定参数的初值以后,采用最小二乘迭代得方法进行求解。

以Gumbel分布和P-Gumbel分布为例,采用矩法、极大似然法及最小二乘法分别对同一组波高资料进行推算。

由表7可以发现,参数求解方法的选取也会使预测结果产生较大差异。赵伟^[17]指出最小二乘法是比较保守的估计方法,极大似然估计是比较精确的估计方法。在参数计算方法中,史道济也推荐^[18]极大似然法,主要原因如下:

- 1) 它是唯一能够适应模型变化的方法,对各种不同极值建模方法得到的模型都适用;
- 2) 可以把各种各样的有关信息综合到统计推断中去;
- 3) 极大似然法估计具有优良的大样本性质,能给出估计方法不确定性的度量。

6 环境荷载的整体不确定性分析

由于自然界自身的随机性和多样性,统计结果往往不可避免的具有误差和不确定性,以致不能准确的计算海洋环境要素的重现水平。因此在数据的处理中,必须考虑它们的不确定性,通过规范的结果来确定置信

界限。

表7 三种参数求解法预测结果比较

Tab. 7 Comparison of statistics parameters of three solving methods

方法	Gumbel 分布		P-Gumbel 分布	
	参数	100 a	参数	100 a
矩法	$a = 3.9288$	10.06	$a = 2.1925$	9.91
	$b = 1.3326$		$b = 1.2250$	
极大似然法	$a = 4.1318$	10.74	$a = 2.2213$	9.82
	$b = 1.4357$		$b = 1.2061$	
最小二乘法	$a = 4.1966$	10.78	$a = 2.1827$	10.11
	$b = 1.4312$		$b = 1.2658$	

概率预测模式和方法有很多种,由于取样方法、参数求解的不同,各自的预测结果之间差别也较大。使用北海和我国南海资料,刘德辅教授对设计波高的推求进行不确定性分析。

1) 方法和模式的不确定性

分别采用最大值法、POT法(阈值法)和全部资料取样法,对Weibull和Gumbel分布,进行不同重现期的设计波高推算,获得 $COV = 0.06$ 。

2) 抽样不确定性分析

根据实测资料与原始资料差值系列:

$$\Delta H_i = H_s - H_{s(\text{后报})}; \Delta H_i \in F(\alpha, \mu; x) \quad (3)$$

式中: H_s 为实测的波浪资料; $H_{s(\text{后报})}$ 为后报资料; $F(\alpha, \mu; x)$ 为 ΔH_i 的Gumbel分布的概率密度特征。

进行蒙特卡洛模拟,从而可获得长期的资料。例如,从1万个模拟资料中,抽取100个百年一遇值,从而可计算出 $COV = 0.096$ 。

3) 统计不确定性分析

不同的取值方法,构成了统计不确定性,如年最大值法、相应不同阈值的POT法,以及日最大值法,使用蒙特卡洛法模拟所得长期资料,可求得相应的 $COV = 0.10$ 。

4) 取样区间不确定性

取样区间的不确定性随样本长度而变化;样本越长,取样的不确定性越小。

$COV = 0.10$ ——取样区间长度为20a;

$COV = 0.14$ ——取样区间长度为30a;

$COV = 0.02$ ——取样区间长度为40a。

5) 参数求解方法不确定性

参数求解过程中由于方法选择存在的不确定性约为 $COV = 0.027$ 。

最后可获得使用40a~20a样本获得的波高预测值,其总不确定性约为

$$COV = \sqrt{COV_1^2 + COV_2^2 + \dots + COV_n^2} = 0.155 \sim 0.183$$

7 结 语

通过上述研究,可以得出以下结论:

1) 由于常用极值模型存在的统计模型、取样和参数求解等不确定性,会使环境荷载的预测结果存在一定风险;

2) 台风影响海区由于受天气系统影响严重,环境荷载波动较大,区间取样的不确定性对预测结果会有较大影响;

3) 为减小不确定性,在工程设计应用中应尽量使用多的环境要素样本,采取多种极值模型及参数求解法运算,充分比较,最终选取适宜方案,以减小工程在设计阶段的风险;

4) 复合极值分布突破了传统分布模式每年只取一个极值的限制,体现了台风/飓风等极端海况出现频

次的概率特性,更全面地反映了环境要素的长期分布规律;其预测结果更稳定、准确,预测值的置信区间也最小。因此,为减小预测值的不确定性及设计阶段的风险,在台风/飓风影响海区应优先使用该模式进行海洋环境荷载的计算。

参考文献:

- [1] 欧进萍,段忠东,肖仪清. 海洋平台结构安全评定[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [2] 方华灿. 海洋环境荷载的不确定性分析[J]. 石油机械,1994,22(9):25-30.
- [3] Ferreira J, Guedes Soares C. An application of the peaks over threshold method to predict extremes of significant wave height [J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering,1998,120:165-176.
- [4] Cunnane C. A particular comparison of annual maxima and partial duration series methods of flood frequency prediction [J]. Journal of Hydrology,1973,18,(3/4):257-271.
- [5] Martins E, Stedinger J R. Generalized maximum likelihood Pareto-Poisson estimation for partial duration series [J]. Water Resources Research,2001,37(10):2551-2557.
- [6] Liu Defu, Wang Liping, Pang Liang. Theory of multivariate compound extreme value distribution and its application to extreme sea state prediction [J]. Chinese Science Bulletin,2006,51(23):2926-2930.
- [7] 刘德辅,庞亮,谢波涛,等. 卡特里娜飓风的启示——有关海洋和水利工程的风险分析[J]. 中国工程科学,2007,9(10):24-29.
- [8] Langley R M, El-Shaarawi A H. On the calculation of extreme wave height: A review [J]. Ocean Eng.,1986,13(1):93-118.
- [9] Xie Botao, Han Fengting, Liu Defu, et al. Statistical prediction of long term characteristics for typhoon induced rainstorm and inundation in China [C]//Proc. of the 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2008: No. 57017.
- [10] Wangchao, Liu De-fu. Undefined analysis of selecting design wave factors [J]. ACTA, Ceanologica Sinica,1991,13(4):874-881.
- [11] Goda Y. On the methodology of selecting design wave height [C]//21rd International Conference on Coastal Engineering, ASCE. 1988:899-913.
- [12] Donald T Resio. White Paper on Estimation Hurricane Inundation Probabilities [R]. U. S. Army Corps of Engineering Report, 2007:1-10.
- [13] Knutson T R, Tuleya R E, Kurihara Y. Simulate increase of hurricane intensities in a CO₂-warmed climate [J]. Science,1998,279(2):1018-1020.
- [14] Chen Lianshou, Luo Hui bang, Duan Yihong, et al. An overview of tropical cyclone and tropical meteorology research progress [J]. Advances in Atmospheric Sciences,2004,21(3):505-514.
- [15] 李爱平,沈红梅,石少华. 西北太平洋热带气旋强度变化特征分析[J]. 海洋预报,2006,23(3):64-71.
- [16] 李宪之. 论热带气旋[M]. 北京:气象出版社,1983:14-16.
- [17] 赵伟,杨永增,于卫东,等. 长期极值统计理论及其在海洋环境参数统计分析中的应用[J]. 海洋科学进展,2003,21(4):471-476.
- [18] 史道济. 实用极值统计方法[M]. 天津:天津科学技术出版社,2006.