

卡特里娜飓风的启示

——有关海洋和水利工程的风险分析

刘德辅, 庞亮, 谢波涛, 史宏达, 逯义军

(中国海洋大学工程学院, 山东青岛 266003)

[摘要] 2005年卡特里娜(Katrina)和丽塔(Rita)飓风对美国新奥尔良市和佛罗里达东部海岸带来的灾难性破坏,验证了笔者在20世纪80年代初期提出的复合极值分布理论及其对上述海域飓风强度预测结果的正确性。以此为鉴,讨论了海岸、近海、水利和城市防灾工程中引入不确定性分析和多维联合概率理论进行风险分析的必要性。

[关键词] 卡特里娜飓风;复合极值分布;多维复合极值分布;不确定性分析;海洋;风险分析

[中图分类号] P444;X145;X43 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2007)10-0024-06

2005年8月,卡特里娜飓风给美国新奥尔良市带来了灾害性的破坏。死亡人数超过1200人,与随后影响佛罗里达东海岸的丽塔飓风,共带来经济损失700~1300亿美元。重建费预计达到2000亿美元。两次飓风带来如此巨大的灾害后果,与上述两个海区飓风设防标准的确定有直接关系。早在1980年笔者提出的“复合极值分布理论”(Compound extreme value distribution)^[1]及其对美国大西洋沿岸和墨西哥湾飓风特征的长期概率预测结果就表明^[2]:卡特里娜和丽塔飓风影响范围的A区(墨西哥湾东部)和1区(佛罗里达东海岸)复合极值分布预测的50年一遇值和千年一遇的飓风强度明显超过美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的SPH(standard project hurricane)和PMH(probable maximum hurricane)值^[3]。考虑到全球气候变暖、海平面上升、台风(飓风)频次和强度增加的趋势,以及去年桑美、碧利斯等几场台风对我国沿海和内陆省份的严重破坏,笔者针对卡特里娜飓风灾害的教训,结合20多年来复合极值分布理论在国内外的引用和应用,及其进一步拓宽为多维复合极值分布

(multivariate compound extreme value distribution, MCEVD)在理论上的创新突破和在海岸、近海、城市防灾和水利工程等各方面的应用,并对国内外有关规范建议的模式和计算方法进行了对比和相应的风险分析,以求达到防灾减灾的目的。

1 对NOAA提出的SPH和PMH的讨论

使用美国NOAA1900-1978年飓风资料,笔者导出的Poisson-Weibull复合极值分布的计算结果^[2],与美国对7个海区(墨西哥湾C,B,A区,大西洋沿岸1,2,3,4区)提出的SPH和PMH计算结果对比如图1所示(图中纵坐标 P_0 为飓风中心气压;横坐标为自墨西哥湾西部起算的距离;图中实线相应的SPH和PMH值取自美国NOAA的报告^[3])。

由图1可见,C,B,2,3,4各区的SPH,PMH与按Poisson-Weibull复合极值分布计算的50年一遇和千年一遇飓风中心气压(代表飓风强度)基本相近,而唯独墨西哥湾A区及大西洋沿岸1区,NOAA提供的SPH和PMH强度远远低于50年一遇和千年一遇值。美国政府部门最新发布资料说明,新

[收稿日期] 2006-04-10;修回日期 2006-06-01

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(50679076)

[作者简介] 刘德辅(1936-),男,四川成都市人,中国海洋大学工程学院教授,博士生导师,从事海洋工程环境、防灾减灾及可靠性理论研究

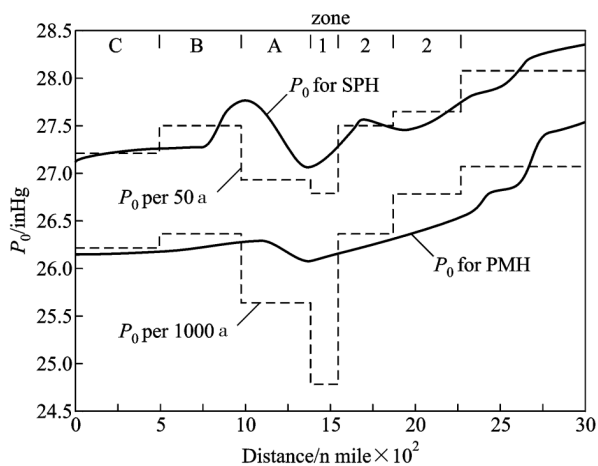


图1 复合极值分布与 NOAA 建议值对比图^[2]

Fig. 1 Comparison between the results of PWCED and NOAA^[2]

奥尔良周边防护工程以 SPH 为设计依据,能抗拒 200 至 300 年重现期的快速移动三级飓风^[4],但是,按照 Poisson - Weibull 复合极值分布理论计算,美国 NOAA 建议的 SPH 只相当于 38 年一遇,而卡特里娜飓风的重现期已达到 58 年一遇。

同样,使用笔者 2002 年以来新开发的一种多维复合极值分布理论模式——泊松 - 嵌套三维逻辑复合极值分布 (Poisson - nested logistic trivariate compound extreme value distribution, PNLTCED) 分析卡特里娜飓风及其诱发的灾害海况的联合概率显示^[5],2005 年以前美国公开发表的对上述海域研究成果仍明显低于 PNLTCED 的预测值^[6-8] (见图 2)。

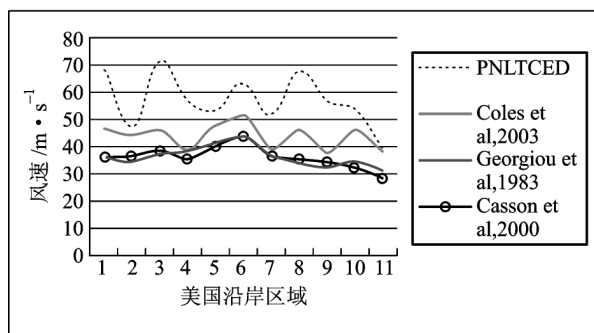


图2 使用不同方法计算百年一遇飓风风速对比图^[5]

Fig. 2 Comparison of 100yr-hurricane wind speed calculated by different methods^[5]

PNLTCED 的预测结果显示 (见表 1),联合重现期 50 年一遇的极端状况组合:风速 64.2 m/s,水位 3.35 m,飓风历时 96 h,与卡特里娜飓风状况相近,明显

高于新奥尔良设防标准。由此可见由于设防标准偏低而导致新奥尔良的毁灭性破坏是不言而喻的。

表 1 PNLTCED 计算新奥尔良不同联合重现期的飓风、水位、飓风历时组合

Table 1 The calculated results with some return periods at New Orleans using PNLTCED

重现期/a	1 000	100	50	10
风速/m · s ⁻¹	89.4	70.6	64.2	44.1
水位/m	7.6	4.11	3.35	2.04
飓风历时/h	149	107	96	60

2 不确定性分析和多维联合概率理论在工程风险评估中的应用

在海岸和海洋工程设计中,或是在模型试验中,都是把各种极端海况条件作为独立事件的组合考虑。如 50 年一遇波高、50 年一遇水位的组合,百年一遇波高和相应的风、流、水位等作为极端设计荷载的组合,是国内外普遍采用的方法^[9-11]。

由于风、浪、流、风暴潮等各种极端环境条件的抽样、取值、特征值计算等都具有各种各样的不确定性,应视作隶属于非高斯过程、具有不同相关性的随机变量,其联合出现的概率特性,既非各自重现期的相加,也非其相乘。因此,必须应用多维联合概率理论,才能正确反映它们不同组合联合出现的概率特征,为构建合理的防台风灾害设防标准及对各类工程设计进行风险评估提供科学依据。

下面将分别介绍不确定性分析和多维联合概率理论在海岸、海洋和水利工程风险评估中的应用。

2.1 设计波高的不确定性分析

50 年一遇、百年一遇设计波高,不仅是海岸工程设计的重要因素^[11],而且在固定式近海工程设计中也是必不可少的。美国 API 规范^[9] (中国海洋石油天然气行业标准 1996^[10]) 中至少有六处提到百年一遇波高及“相应的”海流、风速、波周期、风暴潮等。而有关研究表明,影响海洋结构荷载的九种因素(波高、周期、海流、风速、海洋生物滋生率、 C_a , C_m 、桩径、波浪理论的选择)中,设计波高的不确定性对环境荷载的影响位居首位^[12]。

设计波高的不确定性研究是进行海岸和近海工程安全评估的重大问题。由于概率模式、适线方法、统计检验等种类繁多,不同的选择往往会导致极值波高的明显差别,其取值的选择对结构设计的安全和经济都举足轻重。R. M. Langley 和 A. H.

El-Shaarawi 针对加拿大油气开发规范^[13] 建议采用 100 年一遇波高作为设计标准, 选用大西洋 Grand Banks 海区 30 年资料, 分析了现有的极值 I、II、III 型, Weibull 分布, 对数正态分布, Poisson-Gumbel 复合极值分布, Gamma 分布, 对数-皮尔逊 III 型, 瑞利分布, 三参数双指数分布十种类型, 对比了矩法, 最小二乘法, 极大似然法等适线法以及 χ^2 检验, 相关系数法, K-S 检验法, Cramer-von Mises 法, Anderson-Darling 法和 Q-Q 法 (quantile-quantile plot) 等, 最终选用前六种模式进行对比, 又从中删了在 Q-Q 图和极大似然法中不够合理的极值 I、II、III 型, 威布尔分布四种模式, 认为 Poisson-Gumbel 复合极值分布和对数正态分布最适合该海区百年一遇波高的推求^[14]。图 3 给出了六种模式百年一遇预测结果, 其显著的差距证明了不确定性分析的重要性。

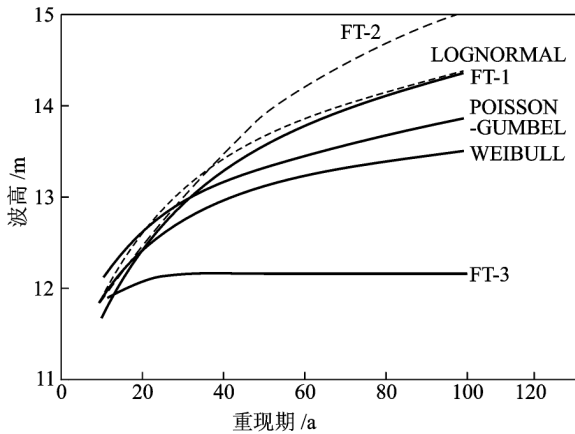


图 3 不同模式计算结果对比^[14]

Fig. 3 Comparison of calculated results using different models^[14]

表 2 为刘德辅使用北海某海区长期资料以及中国南海东部石油公司某项目的资料, 进行的设计波高不确定性分析结果。其中方法和模式不确定性分别采用了年、月极值, POT 取样法, 用 Gumbel, Weibull 分布进行计算^[15]。

表 2 北海和南中国海设计波高不确定性分析
Table 2 Uncertainty analysis of design waves (North Sea and South China Sea)

不确定性类别	北海	南中国海
方法和模式不确定性	0.06	0.08
抽样不确定性	0.096	0.09
统计不确定性	0.10	0.10
总不确定性	0.15	0.156

2.2 多维联合概率理论求解法和随机模拟技术

在海岸、海洋和滨海城市防灾的工程设计中, 都不可避免地要涉及各种极端海况联合出现时防灾设防标准的选定。在海岸工程设计中采用 50 年一遇波高和极端高水位 (50 年一遇水位) 的组合; 在固定式平台极端荷载计算中 API 建议采用的百年一遇波高和“相应”的风速、海流组合作为设计标准。而这些极端海况联合出现的概率, 是各类工程正确选定设防标准的关键问题。

通过近 20 多年的研究, 对于自然界各种非高斯过程, 具有不同相关性的多种随机变量联合概率求解方法, 不仅完成了二维、三维的理论求解法^[16~19], 而且完成了三维以上多变量的联合概率随机模拟求解技术^[20,21], 首先完成了美国学者 Kirby 等在“美国洪水概率分析研究 50 年总结”中提出的希望: 把基于事件取样和联合概率结合起来, 将对洪水概率分析起到巨大的推动作用^[22]。

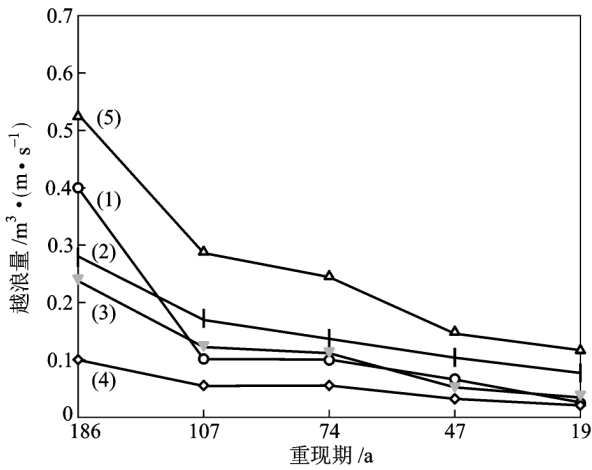
3 基于不确定性分析和多维联合概率的风险分析

3.1 防波堤越浪量的风险评估

为了进行斜坡式防波堤越浪量的风险分析, 针对物模试验成果和按我国防波堤规范^[23] 及荷兰 Delft 公式^[24] 计算值, 分别引入了设计波高不确定性分析和相应波高、水位联合概率分析, 其结果如图 4 所示^[25]。上述结果不但显示了设计波高的不确定性对计算结果的影响, 同时也给出了 50 年一遇波高和极端高水位组合的联合重现期相应于 186 年一遇, 而 20 年一遇波高与极端高水位的组合相应于 107 年一遇, 50 年一遇波高与设计高水位组合则仅为 74 年一遇……, 这仅仅考虑了设计波高的不确定性, 如增加考虑极端高水位、设计水位的不确定性, 将更加深我们对相应风险的认识。

3.2 固定式平台的可靠性分析

针对南海某海域 145 m 水深导管架平台进行了风、浪、流极端荷载组合作用下平台抗倾的可靠性分析, 按照 API 建议的方案: 百年一遇波高 (15.6 m)、相应风速 (52.7 m/s) 和海流 (1.96 m/s) 计算所得的联合重现期为 180 年一遇^[21], 抗倾失效概率为 $P_f = 0.102 \times 10^{-5}$ ^[15], 表面看来似乎完全满足设计要求, 但如果考虑南海百年一遇设计波高的不确定性 (cov = 0.15), 则设计波高可增大至 17.9 m, 按照相同方法计算所得失效概率 $P_f = 0.195 \times 10^{-3}$ 。



(1)物模试验结果;(2)考虑不确定性的按我国防波堤规范计算结果;(3)Delft公式计算值;(4)按我国防波堤规范计算值;(5)考虑不确定性的Delft公式计算值

图4 斜坡式防波堤越浪量物模试验及计算结果比较^[26]

Fig. 4 Comparison of overtopping experiments and calculated results of slope breakwater

按照国际上广泛采用的ALARP(as low as reasonable practice)准则^[23],结构失效概率高于 10^{-3} 为不可接受风险,低于 10^{-6} 为可接受风险,则不考虑设计波高不确定性计算的平台抗倾失效概率达到了可接受的风险水平,而考虑了设计波高不确定性,则其失效概率是不可接受的。

3.3 上海防洪设防标准风险分析

上海防洪设防标准,应考虑风暴潮、天文大潮、

上游洪水三者的最不利组合,在文献[8],[20]中分别采用随机模拟技术和PNLTCED进行了研究,其结果如表3所示。

由表3可见,传统方法单因素概率预测所得的1000年一遇的防洪水位,仅相当于考虑了各因素不利组合的联合重现期100~200年一遇。2006年桑美台风登陆前诱发了3.76m的增水和7m的巨浪。如果桑美台风晚2h登陆,则会与天文大潮相遇,其严重后果绝不亚于卡特里娜飓风导致的新奥尔良毁灭性灾害。因此,对上海沿岸台风灾害设防标准的风险分析应该引起足够重视。

表3 不同方法计算上海防洪设防标准结果对比

Table 3 The comparison of disaster prevention design criteria calculated by different methods

方法	设计水位/m	重现期/a
传统P-III型曲线方法	5.86	1000
随机模拟法	5.84	200
PNLTCED	5.89	100

3.4 三峡设计洪水的风险评估

影响三峡入库设计洪水,主要取决于岷江、嘉陵江、乌江和金沙江的来水量,将上游各支流最末一级水文站作为支流的控制站,以宜昌为干流控制站,分别考虑各站代表的集水面积、各支流控制站至宜昌洪水的传播时间,以3日洪量为变量系列,应用随机模拟技术,分别进行以不同支流为控制因素的四维联合概率求解,模拟结果如表4所示。

表4 宜昌不同重现期三日洪量随机模拟结果对比

Table 4 The 3 day flood volumes with different return period of Yichang calculated by ISPUD

		100年一遇			500年一遇			千年一遇	
		传统方法3日洪量 $208 \times 10^8 \text{ m}^3$			传统方法3日洪量 $236 \times 10^8 \text{ m}^3$			传统方法3日洪量 $248 \times 10^8 \text{ m}^3$	
		组合1	组合2	组合3	组合1	组合2	组合3	组合1	组合2
金沙江	重现期/a	2	2	2	3	2	4	4	2
	洪量/ 10^8 m^3	42.25	43.30	42.40	43.97	42.95	46.15	44.40	42.90
岷江	重现期/a	75	4	2	70	10	6	100	4
	洪量/ 10^8 m^3	57.49	37.62	33.25	55.50	44.03	40.12	59.51	36.49
嘉陵江	重现期/a	2	45	2	8	90	2	20	300
	洪量/ 10^8 m^3	52.80	100.00	52.80	72.00	112.70	57.62	85.12	129.00
乌江	重现期/a	2	2	75	2	4	200	2	2
	洪量/ 10^8 m^3	26.41	26.80	53.23	26.86	29.45	60.00	25.58	26.86
模拟宜昌洪量值/ 10^8 m^3		209.3	243.0	212.5	32.0	268.0	239.0	251.0	275.0
联合重现期/a		88	80	81	404	455	494	928	787

注:数据来自逯义军的多维联合概率理论在防洪工程中的应用及风险分析,中国海洋大学研究生学位论文,2006.40~49

由表4可见,当嘉陵江3日洪量为45年一遇,而其他各江仅为2~4年一遇的宜昌站100年一遇

联合重现期3日洪量已超过三峡百年一遇设计值20%以上。这是一个不容忽视的数字。多维复合极值分布理论在防洪工程中的应用,更证明了事件极值取样和联合概率结合起来,在洪水分析中的科学性和合理性。

4 结论

将不确定性和多维联合概率分析方法引入了海岸、近海、上海城市防灾和三峡风险评估,计算结果显示了以上分析方法和理论的重要性,绝无否定各种设计规范之意,但“思所以危则安”,是笔者的初衷。总结卡特里娜飓风灾害性破坏的教训,可得到以下几点启示:

第一,单因素、单一方法的概率分析结果,远远不能满足重要城市和工程的防灾设防标准。

第二,在传统设防标准基础上,对重要城市和工程,建议进一步增加风险评估。

第三,不确定性分析和多维联合概率理论,是风险评估的重要工具。

参考文献

[1] Liu T F, Ma F S. Prediction of extreme wave heights and wind velocities [J]. Journal of the Waterway Port Coastal and Ocean Division, ASCE, 1980, WW4:469 ~ 479

[2] Liu T F. Long term distributions of hurricane characteristics [A]. Proc Offshore Technology Conference [C], Huston, OTC4325, 1982. 305 ~ 313

[3] Schwerdt R W, Ho F P, Watking R R. Meteorological Criteria for Standard Project Hurricane and Probable Maximum Hurricane Wind Fields, Gulf and East Coast of the United States [R]. NOAA Technical Report NWS 23, 1979

[4] Army Corps of Engineers. History of Lake Pontchartrain and Vicinity Hurricane Protection Project [R]. U. S. Government Accountability Office, (GAO - 06 - 244T), Nov. 9, 2005. 1 ~ 4

[5] Liu Defu, Pang Liang, Fu Gang, et al. Joint probability analysis of Hurricane Katrina 2005 [A]. Proc. Intern. Offshore & Polar Eng. Conf [C]. San Francisco, USA, 2006. 74 ~ 80

[6] Guedes G, Moan T. On the uncertainties to the extreme hydrodynamic loads on the cylindrical pile [A]. Reliability Theory and Its Application in Structural and Soil Mechanics [C]. Hague, The Netherlands, 1983

[7] Georgiou P N, Davenport A G, Vickery P J. Design wind speeds in regions dominated by tropical cyclones [J]. J Wind Engng Industl Aerodyn, 1983, 13: 139 ~ 152

[8] Casson E, Coles S. Simulation and extremal analysis of hurricane events. [J]. Appl Statist, 2000, 49, Part 2: 227 ~ 245

[9] American Petroleum Institute (API). Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms -

Load and Resistance Factor Design [S]. 1993, RP 2A-LRFD

[10] 中华人民共和国行业标准 SY/T 10009 - 1996. 中国海洋石油天然气行业标准 [S]

[11] 中华人民共和国行业标准 JTJ213 - 98. 海港水文规范 [S]

[12] Coles S, Simiu E. Estimating uncertainty in the extreme value analysis of data generated by a hurricane simulation model [J]. J of Engineering Mech, ASCE, ISSN 0733 - 9399, 2003: 1288 ~ 1294

[13] ANDN. Canada Oil and Gas Drilling Regulation [S]. P. C., 1980 ~ 2111, Queens Printer, Ottawa, 1980

[14] Langley R M, El-Shaarawi A H. On the calculation of extreme wave height: a review [J]. Ocean Engineering, 1986, 13 (1): 93 ~ 118

[15] Liu Defu, Dong Sheng, Wang Chao. University and sensitivity analysis of reliability for marine structures [A]. Proc ISOPE [C]. 1996, Vol. 4. Los Angeles. USA. 380 ~ 386.

[16] Liu Defu, Wen Shuqin, Wang Liping. Poisson-gumbel mixed compound distribution and its application [J]. China Science Bulletin, 2002, 47(22): 1901 ~ 1904

[17] Liu Defu (Liu T F), Song Yan, Shi Hongda. Poisson-logistic compound bivariate extreme distribution and its application for designing of platform deck clearance [A]. Offshore Mechanics and Arctic Engineering [C]. OMAE 2003. 2223 ~ 2228

[18] Liu Defu, Shi Hongda, Pang Liang. Disaster prevention design criteria for the estuarine cities: new orleans and shanghai—the lesson from Hurricane Katrina [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2006, 25(4): 131 ~ 142

[19] 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

[20] Liu Defu, Ma Li, Jing Kun. Risk analysis of the disaster prevention design criteria for an estuarine city - shanghai [A]. Proc Offsh Mech & Arc Eng [C]. Canada, OMAE2004. 463 ~ 467

[21] Liu Defu, Song Yan, Ma Li, et al. Combined environmental loads criteria for marine structures [A]. Offshore Technology Conference [C]. Houston, USA, OTC2002. 1749 ~ 1755

[22] Kirby W H, Moss M E. Summary of flood-frequency analysis in the united states [J]. Journal of Hydrology, 1987, 96: 5 ~ 14

[23] 中华人民共和国行业标准 JTJ298 - 98. 防波堤设计与施工规范 [S]

[24] Meer van der J W, Tonjes P, De Waal J P. A code for dike height design. and examination [A]. Proc Conf Coastlines, Structures & Breakwaters [C]. 1998, 5 ~ 21, (Ed. NWH Allsop) Thomas Telford, London.

[25] Liu Defu, Li Fengli, Jing Kun, et al. Uncertainty analysis of breakwater wave overtopping volume, wave forces and structure stability [A]. Proc. Intern. Offshore & Polar Eng Conf [C]. San Francisco, USA, 2006. 387 ~ 392

[26] Marine Risk Assessment by Det Norsk Veritas, for the Health and Safety Executive, Offshore Technology Report [R]. 2001. 3

The Lesson From Hurricane Katrina 2005 ——Risk Analysis for Coastal, Offshore, and Hydraulic Engineering

Liu Defu, Pang Liang, Xie Botao, Shi Hongda, Lu Yijun
(Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266003, China)

[Abstract] Comparison among predicted hurricane characteristics with the Poisson-Weibull compound extreme value distribution proposed by the authors in 1982, Poisson-nested logistic trivariate compound extreme value distribution in 2004 and hurricane disaster prevention design criteria for New Orleans (proposed by NOAA) shows that the compound extreme value distribution is a more reasonable model for typhoon or hurricane statistical prediction. Based on the lesson from Hurricane Katrina, this paper involved the uncertainty analysis and multivariate joint probability theory to the risk assessment for coastal, offshore and hydraulic engineering.

[Key words] Hurricane Katrina; compound extreme value distribution; multivariate compound extreme value distribution; uncertainty analysis; coastal, offshore, hydraulic and disaster prevention engineering; risk analysis

《中国工程科学》2007 年第 11 期要目预告

- | | |
|----------------------------------|------------------------------------|
| 超高面板坝的关键技术问题 马洪琪等 | 一种抗 RPE - LTP 声码器压缩的端到端数据传输方法 陈立全等 |
| 非饱和土的塑性体应变与剪应变的相互作用原理 王靖涛 | 模糊基函数神经网络在线跟踪自学习算法研究 许飞云等 |
| 论新时代的创新人才 甘自恒等 | 优化输水方式提高三峡船闸通过能力措施研究 曹光荣等 |
| 强度理论与实验现象 刘大斌等 | 基于层次的 K - means 初始化算法 汤九斌等 |
| 金属矿床地下自动开采的前沿技术及其发展途径 李仲学等 | 基于车辆动力学的轨迹跟踪器设计 陈扬等 |
| 鄂尔多斯盆地特低渗透砂岩储层裂缝压力敏感性及其开发意义 曾联波等 | 基于免疫 Agent 的网格性能抗衰 徐建等 |
| 独头巷道空气年龄及通风有效性评价研究 王海桥等 | 低高宽比矩形微通道中流动沸腾的压降特性 张炳雷等 |
| 基于并联机构及 MR 阻尼器的多维减振平台半主动控制研究 朱伟等 | T 形截面柱框架节点试验及非线性有限元分析 陈昌宏等 |
| 旅客列车硬座车厢内气流模拟与浓度场分析 张登春等 | |