

【文章编号】 1004-1540(2009)01-0059-06

诺模图法预报风暴潮的高精度数值实现

张火明^{1,2}, 孙志林¹, 苏中地²

(1. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 2. 中国计量学院 计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018)

【摘要】 介绍了用诺模图法预报登陆台风引起最大风暴潮增水的基本思路, 给出了较为详尽的诺模图建立过程和方法, 提供了进行诺模图法预报计算所必需的图表. 选用二元三点插值和二元全区间插值法进行诺模图/表的插值计算, 并用C++语言编写了计算机程序, 选用一个算例进行了校验计算. 结果表明, 这一计算机程序能获得精度较高的预报结果.

【关键词】 风暴潮; 风暴潮预报; 数值预报; 诺模图法; 二元插值

【中图分类号】 P731

【文献标识码】 A

High precision numerical implement of nomogram method for storm surge forecast

ZHANG Huo-ming^{1,2}, SUN Zhi-lin¹, SU Zhong-di²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Firstly concepts related to the storm surge were described, followed by recalling the development history of the storm surge forecast methods. Then the basic idea of employing the nomogram method to forecast the peak storm surge caused by the landing typhoons were briefly introduced. How to establish the nomogram as well as the establishing process was presented in detail. The necessary charts and tables for the nomogram prediction method are provided. The dual three-point interpolation algorithm and the dual interpolation algorithm were chosen to perform the interpolation calculation in the nomograms or tables. The C++ Language was used to develop the computer program. An example was selected for calibration. Results show that by using the computational procedures presented in this paper, the forecasting results with quite high precision can be achieved.

Key words: storm surge; storm surge forecast; numerical forecast; nomogram method; dual interpolation

风暴潮, 亦称风暴水、风暴海啸. 它是一种由热带风暴(例如, 台风、飓风)、温带气旋或寒潮过

境所引起的海面异常升高或降低现象. 风暴潮至浅水域猛烈增长, 一般可高达数米. 当风暴潮与天

【收稿日期】 2008-10-16

【基金项目】 国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 10602055)

【作者简介】 张火明(1976-), 男, 湖北武穴人, 副教授. 主要研究方向为船舶与海洋工程及风暴潮预报.

文潮相迭加后的水位超过沿岸“警戒线”时,就会招致海水外溢,甚至泛滥成灾(见图1),造成工业、农业、渔业、盐业、交通运输、港湾建筑和人民生命财产的损失.在西北太平洋沿岸国家中我国遭受的风暴潮灾害最频繁最严重,一年四季均有发生.台风风暴潮的致灾区域几乎遍及整个中国沿海,且多发生在夏秋季节.



图1 2007年3月4日,特大风暴潮袭击山东烟台海滨大堤
Figure 1 Very large storm surge attacked the seashore levee of Yantai City, Shandong province, China, 2007-03-04

风暴潮的周期为数小时到数天不等,量值可达数十厘米到数米.它叠加在正常潮位之上,叠加后的潮位叫实测潮位或总体潮位.具有数秒到十几秒周期的风浪和涌浪叠加在总体潮位之上.风暴潮预报就是要预报在风暴条件下,沿岸风暴潮位随时间的变化,指出受影响的严重岸段,进而将其叠加在沿岸验潮站的正常潮位预报值之上,最终预报出那些要超过警戒水位的验潮站将要出现的最高潮位与潮时.由于我国是世界上风暴潮受灾最频繁、最严重的国家之一,因此研究有效的风暴潮预报方法具有积极的现实意义.

1 风暴潮经验预报方法简述

风暴潮预报,一般可分为两大类:其一为“经验统计预报”;另一为“动力-数值预报”——我们分别简称为“经验预报”和“数值预报”.

所谓“风暴潮数值预报”,系指“数值天气预报和‘风暴潮数值计算’二者组成的统一整体”.数值天气预报给出风暴潮数值计算时所需要的海上风场和气压场——所谓大气强迫力的预报;风暴潮数值计算是在给定的海上风场和气压场强迫力的作

用下、在适当的边界条件和初始条件下用数值方法求解风暴潮的基本方程组,从而给出风暴潮位和风暴潮流的时空分布,其中包括了特别具有实际预报意义的岸边风暴潮位的分布和随时间变化的风暴潮位过程曲线.无疑,这种更客观、更有效的理论预报方法是风暴潮预报当前和今后发展的主要方向.

我国从20世纪60年代起开始致力于风暴潮的理论和预报方法的研究.诺模图法是中国国家海洋环境预报中心业务预报中曾经使用(至今仍有应用价值)的台风风暴潮数值方法.

依据台风风暴潮数值模式对假想台风进行计算,由模式输出结果建立的诺模图和表,是风暴潮预报和港工设计与防潮工程极值潮位计算的有用工具.这类方法查算简便并能给出合理结果,所以至今仍在国内外一些国家的实时预报中采用.

Jelesnianski(1972)^[1]建立了世界上第一个查算一次台风过程最大增水(Peak Surge)的诺模图方法.该方法被世界气象组织推广,后又经有关专家发展,成为世界上有影响的方法(SPLASH-Special Program to List Amplitudes of Surges from Hurricanes).

1985年,王喜年建立了一个类似于SPLASH模式的动力数值模式.这个模式于同年用于预报.到1987年,他完成了166场假想台风引起的逐时风暴潮计算,进而建立了计算登陆台风引起最大增水的诺模图和表^[2].

2 诺模图法简介^[3,4]

2.1 诺模图的建立

2.1.1 最大增水的初估值(S_p) 气压示度(ΔP)、最大风速半径(R)、矢量风暴运动、登陆点附近的离岸海底地形以及纬度是影响风暴潮成长的参数.为了发展一个预报最大增水的客观预报技术,可以采取动力模式,通过一次改变一个参数而保持其它参数固定不变的方法,来计算最大增水.

台风气压示度是最重要的参数.因此,首先对指定的不同的 ΔP 值进行计算.选择的 ΔP 值范围与实际风暴的观测值相对应,其它参数(海底地形、矢量风暴运动、风暴尺度)是不变的.为了保持海底地形和矢量风暴运动不变,需要采用“标准水域”和“标准风暴运动”的概念.图2给出了标准水域:其沿岸方向长600 km,向海方向长192 km,

岸界水深为 5 m,向海方向水深线性增加,到外界为 103 m. 标准风暴运动的定义如下:其移速保持不变($v_x = -6 \text{ m/s}, v_y = 0.0$),其路径沿 30°N 由海向陆并与海岸垂直. 风暴必须移向陆地,可以把这个运动考虑为所有风暴运动的假想平均.

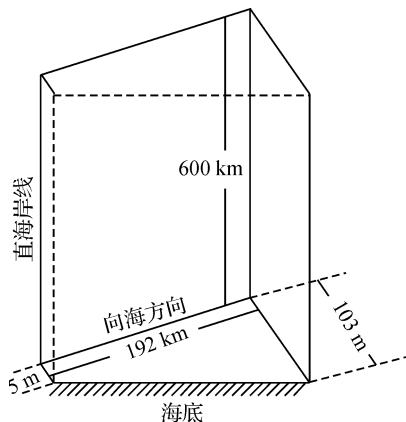


图 2 标准水域(长 600 km,宽 192 km)

Figure 2 Standard water area, length of 600 km, width of 192 km

为了计算最大增水初估值 S_p , 第一步允许所有风暴以标准运动横过标准水域, 这些风暴具有同样的最大风速半径 R (km 为单位), 都在 30°N 登陆, 只是每个风暴具有不同的 ΔP 值. 第二步是采用同样的风暴, 但只是改变 R 的值. 依据计算结果, 可以绘制出对不同的 R , 最大增水 S_p 相对于 ΔP 的诺模图, 如图 3.

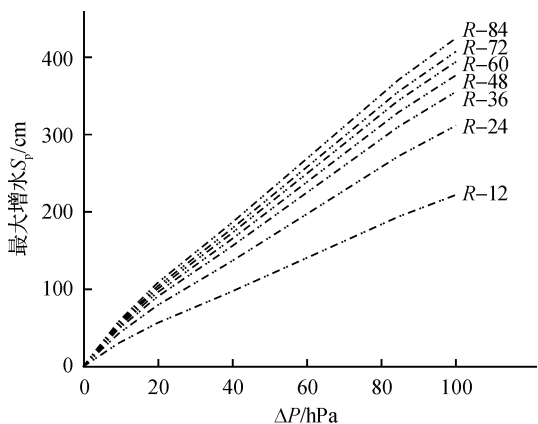


图 3 作为气压示度 (ΔP) 和最大风速半径 (R , km) 函数的最大风暴潮诺模图

Figure 3 As a degree of pressure (ΔP) and the radius of maximum wind speed (R , km) function of the peak storm surge nomogram

图 3 是快速确定所求最大增水的第一张诺模图. 可以看出, 对于不同的 R , 每条计算的曲线几乎都是通过原点的直线. 这意味着预报的风暴潮具有相对误差 $\delta P/\Delta P$, 这里 δP 是气压示度的误差变化量. 例如, 气压示度为 100 hPa 和 50 hPa 的 1 hPa 误差, 即可分别给台风风暴潮值带来 1% 和 2% 的误差. 这表明, 气压值应该非常准确. 如果 ΔP 是常数, 则风暴随 R 的增大而增大.

2.1.2 矢量风暴运动订正因子 (F_M) 风暴矢量运动对风暴潮成长有重大影响. 为了订正非标准风暴运动的效应, 需要考虑几个方向风暴运动方向和速度, 而所有其它参数则保持不变. 标准水域仍然被采用, 对于不同的风暴移向和移速分别计算了它们的最大增水值. 采用这些值与由标准运动产生的值相比的方式, 将这些值无因次化. 这些比值给出了运动因子 F_M . 图 4 用于订正不同矢量风暴运动对沿岸风暴潮的效应. 图 4 给出的运动因子 F_M 是对 $R = 36 \text{ km}, \Delta P = 58 \text{ hPa}$ 、纬度为 30°N 和标准水域而言的; 台风初始位置位于海岸以外 394.8 km. 如果改变这些参数, F_M 仅轻微变化. 风暴路径相对海岸的交角 θ 在图 4 中定义. 这里, 观察者由海面向陆地, 观察者右方海岸是相对的北方 (即 0°), 而其左方是相对的南方 (即 180°). 从海岸到路径按反时针方向量度 θ 角, 这里路径终止于登陆点. 由图 4 可以明显看出, 对于同样的风暴移速, 登陆风暴导致的最大增水较退场风暴 (由陆地移向海洋 $\theta = 270^\circ$) 引起的最大增水高. 对于登陆风暴, 最大增水随风暴移速的增大而增大; 对于退场风暴, 最大增水随风暴移速的增加而减少. 当 θ 在 75° 和 90° 之间并且其它参数保持不变时, 最大增水达到最大.

2.1.3 海底地形修正因子 (F_D) 王喜年先生对中国沿海 28 个验潮站完成了海底地形的修正^[3,5], 建立了 28 个计算域, 每个计算域的中心与一个验潮站相对应. 画出了经每个计算域中心以及在每个验潮站两边各 24 km 和 48 km 距离上的深度剖面, 取 5 个深度剖面的平均代表这个计算域的海底地形. 为了计算考虑沿中国海岸变化的海底地形效应的最大风暴潮, 将这些水域输入风暴潮模式. 计算和最大风暴潮值同标准水域计

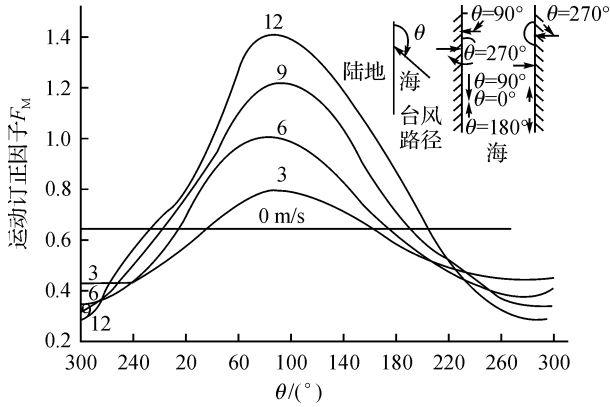


图4 对矢量风暴运动订正的诺模图(标准运动的路径与海岸交角 90° ,移速 6 m/s ,插图给出了变量 θ 的定义,还给出了几条相对海岸的极端路径)

Figure 4 Nomogram of the vector storm movement's revising (the angle between the standard movement path and the coast is 90° , the transfer speed is 6 m/s , the definition of the variable θ is given in the illustration, several extreme paths according to the coast is also given

算值相比的无因次比值给出了每个验潮站的浅水因子 F_D (表1). 必须指出的是:表1是针对 $R=60\text{ km}$, $\Delta P=58\text{ hPa}$ 和标准风暴运动计算出来的;同时在计算浅水因子 F_D 时,考虑了科氏参数随纬度变化(“科氏参数”全称“科里奥利参数”,亦称地转偏向力参数,或地转参数是地球自转角速度 ω 在地球面上各地的分量的2倍值.其关系式为 $f2\omega\sin\theta$.式中 f 为科氏参数, ω 为地球自转角速度,为地理纬度.它随地理纬度的增加,可从赤道处的零值,增大到两极的最大值,即地转角速度的2倍值).

这里需要指明如何确定最大风暴潮在海岸上的发生位置.如果台风路径是近乎垂直于海岸,则最大风暴潮发生在登陆点右方(观察者位于海面上面对海岸)约等于最大风速半径的距离上.尽管其发生位置会随相对海岸的台风矢量运动以及登陆点附近局地海底地形与岸形的变化而变化,但这种变化一般并不大.因此可以把最大风速半径作为确定最大风暴潮发生位置的量度.

最大风暴潮的发生时间如何确定是一个非常有意义的问题.模式计算结果表明,对登陆台风而言,移速慢时,最大风暴潮发生在登陆前,移速快

时,发生在登陆时或登陆后;对于由陆地出海的台风而言,其最大风暴潮几乎全部发生在台风出海时或出海后,并且台风移速越慢其发生在出海后的时间就越长(表2).

表1 沿中国大陆海岸28个验潮站的浅水因子(F_D)值

Table 1 Shallow factor (F_D) value of 28 tide stations along the coast of China mainland

水域号	验潮站	北纬	东经	F_D
01	乳山口	$36^\circ48'$	$121^\circ29'$	0.90
02	青岛	$36^\circ05'$	$120^\circ19'$	0.81
03	石臼所	$35^\circ23'$	$119^\circ33'$	0.95
04	连云港	$34^\circ45'$	$119^\circ26'$	1.19
05	燕尾	$34^\circ29'$	$119^\circ47'$	1.24
06	新洋港	$33^\circ37'$	$120^\circ28'$	1.52
07	小羊口	$32^\circ33'$	$120^\circ59'$	1.90
08	吕四	$32^\circ0'$	$121^\circ37'$	1.49
09	吴淞	$31^\circ24'$	$121^\circ30'$	1.32
10	滩浒	$30^\circ37'$	$121^\circ37'$	1.55
11	镇海	$29^\circ57'$	$121^\circ43'$	1.35
12	健跳	$29^\circ02'$	$121^\circ38'$	1.27
13	海门	$28^\circ41'$	$121^\circ27'$	1.13
14	坎门	$28^\circ05'$	$121^\circ17'$	1.01
15	温州	$28^\circ02'$	$121^\circ39'$	1.00
16	瑞安	$27^\circ48'$	$121^\circ38'$	1.05
17	沙埭	$27^\circ17'$	$121^\circ17'$	0.90
18	梅花	$26^\circ01'$	$119^\circ41'$	0.68
19	厦门	$24^\circ27'$	$118^\circ04'$	1.00
20	东山	$23^\circ44'$	$117^\circ32'$	0.93
21	汕头	$23^\circ20'$	$116^\circ45'$	1.02
22	汕尾	$22^\circ45'$	$115^\circ21'$	0.85
23	黄冲	$22^\circ18'$	$113^\circ04'$	0.93
24	三灶	$22^\circ02'$	$113^\circ24'$	0.91
25	闸坡	$21^\circ35'$	$111^\circ51'$	0.85
26	湛江	$21^\circ10'$	$110^\circ24'$	1.27
27	北海	$21^\circ29'$	$109^\circ05'$	1.43
28	白龙尾	$21^\circ30'$	$108^\circ13'$	1.15

表2 风暴移向、移速与岸边最大风暴潮发生时间(min)

Table 2 Storm moving direction, speed and time of the largest coastal storm surge occurs (minutes)

θ 角, 风暴路径 与海岸交角	风暴移速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$			
	3	6	9	12
45°	-72	-24	0	0
90°	-36	0	12	24
135°	-60	0	24	48
210°	26	24	-12	12
270°	60	0	0	24
300°	84	48	36	24

注:登陆风暴最大风暴潮在岸边(标准海域内边界)发生的时间,负值表示最大风暴潮发生在登陆前;对由陆地入海的风暴,负值表示最大风暴潮发生在风暴入海前,正值表示出现在入海后.

2.2 诺模图的查算

诺模图的查算^[4]是以简单的台风参数为变量,首先由预报的台风中心气压示度 $\Delta P(\Delta P = P_\infty - P_0)$ 和台风最大风速半径 R ,由第一张诺模图(图 3)查算出最大风暴潮(Peak Surge) S_P ;由预报出的台风风速、移向 (V, θ) ,从第二张诺模图(图 4)查算出运动修正因子 F_M ;由浅水因子表(表 1)中查算出最大风暴潮值出现处或附近的验潮站所对应的浅水订正因子 F_D 值.这三个数相乘,就得到了这次台风过程的最大风暴潮增水(S_S):

$$S_S = S_P \times F_M \times F_D \quad (1)$$

2.3 诺模图查找时的插值算法

据预报的台风中心气压示度 $\Delta P(\Delta P = P_\infty - P_0)$ 和台风最大风速半径 R 从第一张诺模图(图 3)查算最大风暴潮(Peak Surge) S_P 和根据预报出的台风风速、移向 (V, θ) 从第二张诺模图(图 4)查算出运动修正因子 F_M 的过程中,需要用到二元插值算法.为保证精度,这里选用二元三点插值^[5]和二元全区间插值算法^[5]的平均结果.

2.3.1 二元三点插值算法 其功能可描述为:给定矩形域上 $n \times m$ 个结点 $(x_i, y_j)(i = 0, 1, \dots, n-1; j = 0, 1, \dots, m-1)$ 上的函数值 $z_{ij} = z(x_i, y_j)$,利用二元三点插值公式计算指定插值点 (u, v) 处的函数近似值 $w = z(u, v)$.

其方法说明:设给定矩形域上的 $n \times m$ 个结点在两个方向上的坐标分别为 $x_0 < x_1 < \dots < x_{n-1}, y_0 < y_1 < \dots < y_{m-1}$;相应的函数值为

$$z_{ij} = z(x_i, y_j), i = 0, 1, \dots, n-1; j = 0, 1, \dots, m-1 \quad (2)$$

选取最靠近插值点 (u, v) 的 9 个结点,其两个方向上的坐标分别为 $x_p < x_{p+1} < x_{p+2}$, 及 $y_q < y_{q+1} < y_{q+2}$;然后用二元三点插值公式

$$z(x, y) = \sum_{i=p}^{p+2} \sum_{j=q}^{q+2} \left(\prod_{\substack{k=p \\ k \neq i}}^{p+2} \frac{x - x_k}{x_i - x_k} \right) \left(\prod_{\substack{l=q \\ l \neq j}}^{q+2} \frac{y - y_l}{y_j - y_l} \right) z_{ij} \quad (3)$$

计算插值点 (u, v) 处的函数近似值.

2.3.2 二元全区间插值算法 其功能可描述为:给定矩形域上 $n \times m$ 个结点 $(x_i, y_j)(i = 0, 1, \dots, n-1; j = 0, 1, \dots, m-1)$ 上的函数值 $z_{ij} =$

$z(x_i, y_j)$,利用二元全区间插值公式计算指定插值点 (u, v) 处的函数近似值 $w = z(u, v)$.

其方法说明:设给定矩形域上的 $n \times m$ 个结点在两个方向上的坐标分别为 $x_0 < x_1 < \dots < x_{n-1}, y_0 < y_1 < \dots < y_{m-1}$;相应的函数值如(2)所示,计算插值点 (u, v) 处的函数值 $w = z(u, v)$.

以插值点 (u, v) 为中心,在 X 方向上,前后各取四个坐标:

$$x_p < x_{p+1} < x_{p+2} < x_{p+3} < u < x_{p+4} < x_{p+5} < x_{p+6} < x_{p+7}$$

在 Y 方向上,前后也各取四个坐标:

$$y_q < y_{q+1} < y_{q+2} < y_{q+3} < v < y_{q+4} < y_{q+5} < y_{q+6} < y_{q+7}$$

然后用二元插值公式

$$z(x, y) = \sum_{i=p}^{p+7} \sum_{j=q}^{q+7} \left(\prod_{\substack{k=p \\ k \neq i}}^{p+7} \frac{x - x_k}{x_i - x_k} \right) \left(\prod_{\substack{l=q \\ l \neq j}}^{q+7} \frac{y - y_l}{y_j - y_l} \right) z_{ij} \quad (4)$$

计算插值点 (u, v) 处的函数近似值.

本文采取先分别用两种插值方法进行插值计算,然后求其插值结果的平均值的办法获得最终的二元插值结果.

3 诺模图法预报实例

本文中用到的诺模图数据来自王喜年先生的论文^[4],由于论文中给出的是一系列曲线,所以需要将其离散化.为保证足够的精度,对第一张诺模图(图 3),由于每根曲线都比较直,所以对每根曲线都均匀取了 19 个点,共计 $19 \times 7 = 133$ 个点;对第二张诺模图(图 4),由于部分区段曲线变化比较剧烈,所以采取非均匀办法取了 29 个点,曲率变化较剧烈的区段取点较多,共计 $29 \times 5 = 145$ 个点.

有了这些离散的点,就可以根据 2.3.2 中二元插值算法进行插值查算出 S_P 和 F_M ,再根据表 1 查出 F_D ,然后根据式(1)就可以计算出最大风暴潮增水 S_S .

根据以上思路,用 C++ 语言编制了计算机程序,在 Visual C++ 6.0 编辑器上调试通过.以下给出一个完整的算例以验证该程序的功能.

表3 查算实例

Table 3 Searching example

资料(图5)	
台风:台风编号	870 2
日期:年 月 日	1987-06-19
小时:登陆时间(北京时间)	11:00
R:最大风速半径/km	48
P_{∞} :台风外围气压/hPa	1008
P_0 :台风中心气压/hPa	975
ΔP :台风气压梯度/hPa	33
V:台风移速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	6.5
θ :台风路径与海岸交角/($^{\circ}$)	50°

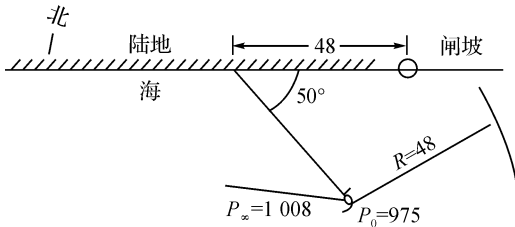


图5 8702号台风示意图

Figure 5 Diagram of Typhoon 8702

表4 计算结果

Table 4 Calculation results

项目	文献[4]结果	本文结果
风暴潮最大增水初估值 S_P /cm	144	141.344
矢量风暴运动订正因子 F_M	0.953	0.948
验潮站(闸坡)对海底地形的修正因子 F_D	0.85	0.85
风暴潮最大增水值 S_S /cm	115	113.922
与真实值(109 cm)误差/ $\pm\%$	+5.505	+4.515

由表4可见,采用本文算法能获得比文献[4]中更好的结果。

4 结语

本文简要介绍了诺模图法预报风暴潮的基本原理和方法,采用高精度的二元三点插值法和二元全区间插值法分别进行插值然后求其平均的办法进行插值计算,编制了C++语言的计算机程序,通过一个算例与文献[4]进行了比较,发现可以获得精度更高的结果,说明采用本文办法和程序是可行的。

但应该指出的是,尽管诺模图方法是风暴潮

预报的一种有用手段,但毕竟所能查算的值仅限于一次台风过程的最大风暴潮值(Peak Surge),而对于反映一次风暴潮在空间和时间上的变化是远远不够的.要做到这一点,只能由风暴潮数值预报方法^[6-11]来实现.就世界范围而言,风暴潮数值预报方法已在实时预报中发挥了重要作用,需要大量应用新的计算方法和软件开发技术^[12-14],这也是本文作者下一步研究的重要课题。

【参 考 文 献】

- [1] JELESNIANSKI C P, SPLASH I. Landfall storm. NOAA, Technology Memory. NWSTDL 40[M]. 北京:中国海洋出版社,1972:1-52.
- [2] WANG X N. Numerical calculation of storm surge in the open seas of china, storm surges observation and modeling, Proceedings of the international Symposium on Storm Surge[M]. 北京:中国海洋出版社,1990:211-225.
- [3] 王喜年. 开阔海风暴潮的数值计算[J]. 海洋通报,1989,8(3):11-20.
- [4] 王喜年. 风暴潮预报知识讲座-第四讲风暴潮预报技术(1)[J]. 海洋预报,2001,18(4):63-69.
- [5] 徐士良. C常用算法程序集[M]. 2版. 北京:清华大学出版社,1996:135-138.
- [6] 沙文钰,杨支中,冯 芒,等. 风暴潮、浪数值预报[M]. 北京:中国海洋出版社,2004:79-94.
- [7] MADSEN H, JAKOBSEN F. Cyclone induced storm surge and flood forecasting in the northern Bay of Bengal[J]. Coastal Engineering, 2004,51:277-296.
- [8] ISMAILOVA B B. Geoinformation modeling of wind-induced surges on the northern-eastern Caspian Sea[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2004,67:371-377.
- [9] 端义宏,朱建荣,秦曾灏,等. 一个高分辨率的长江口台风风暴潮数值预报模式及其应用[J]. 海洋学报,2005,27(3):11-19.
- [10] 魏晓宇,窦金来,陈 强,等. 杰氏风暴潮预报方法在珠海及粤西海域的应用[J]. 海洋预报,2007,24(3):90-98.
- [11] 莎日娜,尹宝树,杨德周,等. 天津近岸台风风暴潮漫滩数值模式研究[J]. 海洋科学,2007,31(7):63-67.
- [12] 张火明,陆萍蓝,朱莎莎. 虚拟广告场景定位及广告牌模型库设计[J]. 中国计量学院学报,2007,18(2):141-145.
- [13] 张火明,陆萍蓝,吴剑国. 离散复合形法的改进及应用研究[J]. 中国计量学院学报,2006,17(4):300-304.
- [14] 陆萍蓝,张火明. 改的混沌优化方法在机械设计中的应用[J]. 中国计量学院学报,2006,17(3):203-206.