



不依赖天气预报具有一定预报时效的风暴潮预报

陈孔沫

(国家海洋局第三海洋研究所, 厦门 361005)

收稿日期 1990年2月5日

关键词 风暴潮, 预报时效, 天气预报

提要 本文试图从大气运动方程出发, 提出一种极坐标形式的风暴潮定解问题, 并用作者以前导出的一种风场公式, 求解风暴潮高。然后用相关统计方法确定风暴潮预报式的系数, 以期寻找一种不依赖天气预报又具有一定预报时效的风暴潮预报方法。

目前风暴潮统计预报往往在历史上一些罕见的特大风暴潮面前束手无策, 而数值计算则因湍粘系数, 底应力形式和风应力与海面风速的关系等问题尚未完全解决, 至今很难进入数值预报阶段。为了摒弃数值计算中存在的上述问题, 建立不依赖天气预报又具有一定预报时效的风暴潮预报方法, 本文从基本的湍粘运动方程出发, 根据台风强风和低压这一激发风暴潮的主要强迫力, 建立一种极坐标下的风暴潮预报模式, 并引入作者所导出的一种风场公式^[1], 求解风暴潮高, 用相关统计方法确定风暴潮预报式的系数。同时以厦门港为例, 采用文献^[2]所提出的方法, 建立台风暴潮预报式。

I. 基本方程

设海水是不可压缩的小粘性流体, 当取坐标原点于未扰动海面时, 湍粘运动方程为

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \text{grad } P + A^* \Delta \vec{v} - 2\vec{\omega} \times \vec{v} \quad (1)$$

在静压关系成立和忽略垂直速度分量时可写成

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= fu - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_e}{\partial x} \\ -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + A_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + A_L \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \right\} (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= -fv - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_e}{\partial y} \\ -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + A_z \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + A_L \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \right\} (2)$$

式中 ζ 为风暴潮位; u, v 为水质点的 x, y 方向的速度分量; A_z, A_L 分别为垂直、水平方向的湍粘系数; P_e 为大气压; f 为科氏参数; ρ 为海水密度。

求解这一方程是相当困难的, 由于台风的强风和低压是激发风暴潮的主要强迫力, 其它对流加速度、科氏加速度等都是随着台风强风和低压所激发的风暴潮流和潮高而产生的。我国东南沿海大多台风移速比较缓慢, 因此, 以风暴潮的风、压为主, 忽略其余各项, 并转换为圆柱坐标形式, 对垂直粘滞项作如下积分

$$\int_{-\zeta}^h A_z \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} dz = A_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \Big|_{z=h} - A_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \Big|_{z=-\zeta} \quad (3)$$

并取

$$\begin{aligned} A_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \Big|_{z=-\zeta} &= -\frac{1}{\rho} \tau_r \\ A_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \Big|_{z=h} &= \frac{1}{\rho} \tau_b \end{aligned}$$

在风暴模式轴对称情况下有定解问题

$$\left. \begin{aligned} A_z \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial r} - g \frac{\partial \zeta}{\partial r} &= 0 \\ A_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \Big|_{z=-\zeta} &= -\frac{1}{\rho} \tau_i \\ v_r \Big|_{z=h} = 0, \quad A_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \Big|_{z=h} &= \frac{1}{\rho} \tau_b \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中, τ_i 为海面风应力, τ_b 为底应力。

II. 气象条件

台风模式提供了风暴潮计算所需要的表面风应力 τ 和大气压 P 。由于台风域内几乎没有海上天气观测, 要充分解台风这样复杂的物理、气象活动是非常困难的, 这里为了满足上述定解问题, 采用作者以前导出的一种风场模式^[4], 即将台风作为一种静止的理想台风, 则台风风速分布为

$$\left. \begin{aligned} w &= w_m / f(P_j) \quad 0 \leq r \leq R \\ w &= w_m f(P_j) \quad r \geq R \\ f(P_j) &= \ln \frac{\Delta P_0}{P_j - P_0} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

这里 w 为距台风中心 r 处的风速; w_m 为台风中心附近最大风速; $\Delta P_0 = P_\infty - P_0$; P_0 为台风中心气压; P_∞ 为台风外围气压; P_j 为 j 点气压。因最大风速半径有^[3]

$$R = rf(P_j) = L_i f(P_L) \quad (6)$$

故

$$f(P_j) = \frac{L_i}{r} f(P_L) \quad (7)$$

于是有

$$\left. \begin{aligned} w &= w_m \frac{1}{f(P_L)} \cdot \frac{r}{L_i} \quad 0 \leq r \leq R \\ w &= w_m f(P_L) \cdot \frac{L_i}{r} \quad r \geq R \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

其中, L_i 为第 i 圈闭合等压线的矢径; $f(P_L) = \ln \frac{\Delta P_0}{P_L - P_0}$ 。

III. 方程的解

解(4)式, 取 $h + \zeta \approx h$, 忽略底胁强有

$$\frac{\partial \zeta}{\partial r} = \frac{1}{\rho g h} \tau_i - \frac{1}{\rho g} \frac{\partial P_a}{\partial r} \quad (9)$$

取风应力 $\tau_i = \mu |\vec{w}| \vec{w}$, μ 为风应力系数。若风向与等压线夹角为 α , 则

$$\tau_i = -\mu w^2 \sin \alpha \quad (10)$$

引入(8)式得

$$\left. \begin{aligned} \tau_i &= -\mu w_m^2 \frac{\sin \alpha}{f^2(P_L)} \left(\frac{r}{L_i}\right)^2 \quad 0 \leq r \leq R \\ \tau_i &= -\mu W_m^2 f^2(P_L) \sin \alpha \left(\frac{L_i}{r}\right)^2 \quad r \geq R \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

将(11)式代入(9)式并对 r 积分得

$$\left. \begin{aligned} \zeta_r &= \zeta_0 - \frac{1}{\rho g} (P_r - P_0) - \frac{\mu \sin \alpha}{\rho g h L_i^2 f^2(P_L)} \\ &\quad \cdot w_m^2 \frac{r^3}{3} \quad 0 \leq r \leq R \\ \zeta_r &= \zeta_0 - \frac{1}{\rho g} (P_r - P_R) - \frac{\mu \sin \alpha}{\rho g h} \\ &\quad \cdot L_i f^2(P_L) w_m^2 \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{r}\right) \quad r \geq R \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中 ζ_0 为台风中心增水。由上式第 1 式有

$$\zeta_{r=R} = \zeta_0 - \frac{1}{\rho g} (P_R - P_0) - \frac{\mu \sin \alpha}{3 \rho g h L_i^2 f^2(P_L)} w_m^2 R^3 \quad (13)$$

将(13)式代入(12)式第 2 式得

$$\zeta_r = \zeta_0 - \frac{1}{\rho g} (P_r - P_0) - \frac{\mu \sin \alpha}{\rho g h} \cdot w_m^2 \left[\frac{4}{3} L_i f(P_L) - \frac{L_i^2 f^2(P_L)}{r} \right] \quad (14)$$

当 $r \rightarrow \infty$ 时, $\zeta_r \rightarrow 0$; 则

$$\zeta_0 = \frac{1}{\rho g} (P_\infty - P_0) + \frac{\mu \sin \alpha}{\rho g h} \cdot w_m^2 \left[\frac{R^3}{3 L_i^2 f^2(P_L)} + \frac{L_i^2 f^2(P_L)}{R} \right] \quad (15)$$

将(15)式代入(12)式第 1 式和(14)式得

$$\left. \begin{aligned} \zeta_r &= \frac{1}{\rho g} (P_\infty - P_r) + \frac{\mu \sin \alpha}{3 \rho g h} w_m^2 \\ &\quad \cdot \left[4 L_i f(P_L) - \frac{r^3}{L_i^2 f^2(P_L)} \right] \quad 0 \leq r \leq R \\ \zeta_r &= \frac{1}{\rho g} (P_\infty - P_r) + \frac{\mu \sin \alpha}{\rho g h} \\ &\quad \cdot w_m^2 \frac{L_i^2 f^2(P_L)}{r} \quad r \geq R \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

IV. 具有一定预报时效的台风暴潮预报

我们曾利用(16)式对汕头港台风增水过程作过一些计算,结果多数能反映该站台风增水全过程,但这种过程预报正象其他过程预报方法一样,实际上是一种过程计算。台风暴潮对大气强迫力,尤其对台风强风的反映极为迅速,仅落后于大气强迫力场很短一段时间,使得预报时效十分短暂,因此这种过程预报还是依赖于天气预报,即使所计算的风暴潮位十分精确,也可能因为天气预报的失误而失败。

上述台风暴潮定解问题的解(16)式只反映了台风的强风,低压所引起的台风增水,对台风强风、低压所引起的风暴潮流以及由此而产生的科氏力、底摩擦效应等的影响并未加考虑。要设计一种适用于特定港口的台风暴潮预报式,无疑必须考虑这些因素的作用。因此,作者试图利用相关统计方法来确定方程解析解的各项系数。由于对特定港口, $\rho, g, h, \mu, \alpha, L, f(P_L)$ 均为常数,故(16)式可写成

$$\left. \begin{aligned} \zeta_r &= A_1(P_\infty - P_r) + A_2 w_m^2 \\ &\quad + A_3 w_m^2 m r^3 \quad 0 \leq r \leq R \\ \zeta_r &= B_1(P_\infty - P_r) + B_2 w_m^2 / r \quad r \geq R \end{aligned} \right\} (17)$$

以厦门港为例说明这一预报方法。为了消除对天气预报的依赖和简化预报方法,根据作者以往对厦门港台风暴潮分析所得到的结论^[2],即(1)厦门港出现最大台风增水时的台风位置大致是沿着台湾西海岸以北到台南,呈狭小的带状;(2)台风到达台湾东岸时厦门港的前期台风增水与最大台风增水之间密切相关;考虑到台湾东岸处在以厦门为圆心,以厦门到台湾东岸为半径的准圆弧上,将(17)式的各项作为新的因子,求这些因子在台风到达以厦门为圆心,厦门到台湾东岸的距离 $r_{\text{厦-台东岸}}$ 为半径的圆弧上的值,建立与最大台风增水的关系。 $Y_{\text{厦-台东岸}} \approx \text{const} > R$,所以方程只余下(17)式的第2式。

由于前期台风增水体现了台风前期各种水

文气象要素综合作用的效果,且厦门港在台风到达台湾东岸时的本站前期台风增水 $\Delta H_{\text{台东岸}}$ 与最大台风增水关系相当密切^[2],因此这里引进 $\Delta H_{\text{台东岸}}$ 这一因子,从中筛选2个因子,建立如下台风暴潮预报方程

$$\zeta = 40.7460 + 0.7117 \Delta H_{\text{台东岸}} + 0.0055 w_m^2 \quad (18)$$

上式 w_m 为台风到达台湾东岸时台风中心的最大风速。取11年的19个台风过程进行计算,复相关系数为0.84,均方差11.4cm,最大偏差24.8cm。预报值与实测值颇为接近(见表1)。

表1 厦门港最大台风增水实测值与预报值的比较
Tab. 1 Comparison of observed and forecasted maximum typhoon set-up in the Xiamen Harbor

台风号	$\Delta H_{\text{台东岸}}$	$w_{m\text{台东岸}}$	$\zeta_{\text{max实}}$	$\zeta_{\text{计}}$	$\Delta \zeta$
58(10)	53	61	88	98.9	10.9
5904	66.5	75	132	119.0	13.0
5905	12	60	60	69.1	9.1
6016	29	25	65	64.8	0.2
6109	37	20	62	69.3	7.3
6122	56	60	104	100.4	3.8
6125	60	40	117	92.2	24.8
6208	65	65	97	110.2	13.2
6214	50	47	102	88.5	13.5
6217	53	50	92	92.2	0.2
6306	44	37.5	65	79.8	14.8
6510	73	39	93	101.1	8.1
6702	35	42.5	64	75.6	11.6
6814	80	40	111	106.5	4.5
6903	52	70	110	104.7	5.3
6910	20	20	74	57.2	16.8
7115	75	44	116	104.8	11.2
7122	90	40	110	113.6	13.6
7123	87	45	110	113.8	3.8

台风暴潮的预报不仅要求精确地预报暴潮水位,而且同时要求充分提前地预报暴潮出现的时间,二者缺一不可。为了提高台风暴潮的预报时效,拉长台风到本站的半径距离 r 是一种简便的方法。这就是在保证预报精度的前提下,将台风到本站的半径距离向前延长。厦门这一半径距离可增大到4~4.5纬距,预报时效大约可以从5~6h提高到9~11h。利用台风到

达 $r_{4.0}$ 和 $r_{4.5}$ 圆弧上的台风强度及本站前期台风增水 $\Delta H_{4.0}$ 和 $\Delta H_{4.5}$ 所建立的暴潮预报式如下

$$\zeta = 57.7 + 0.3466\Delta H_{4.0} + 0.0063w_{m4.0}^2$$

$$\zeta = 57.4 + 0.2723\Delta H_{4.5} + 0.0065w_{m4.5}^2$$

以上两式子样个数 $n = 21$, 复相关系数分别为 0.70 和 0.65, 均方差为 14.6cm 和 16.2cm。由表 2 可见, 预报值与实测值偏差不大。

表 2 厦门港最大台风增水实测值与预报值的比较
Tab.2 Comparison of maximum typhoon set-up between observation and forecast in the Xiamen harbour

台风号	$\zeta_{m实}$	$\zeta_{4.0}$	$\Delta\zeta$	$\zeta_{4.5}$	$\Delta\zeta$
58(10)	88	98.3	10.3	98.4	10.4
5904	132	129.3	2.7	127.3	4.7
5905	60	87.0	27.0	84.3	24.3
6012	59	74.5	15.5	74.2	15.2
6110	60	79.1	19.1	80.4	20.4
6122	104	102.3	1.6	99.6	4.4
6208	97	105.6	8.6	105.8	8.8
6213	74	86.8	12.8	80.8	6.8
6214	102	88.2	13.8	92.7	9.3
6217	92	84.0	8.0	90.1	9.9
6306	65	79.6	14.6	73.3	8.3
6510	93	78.0	15.0	75.9	17.1
6708	48	70.3	22.3	68.3	20.3
6803	80	82.7	2.7	78.1	1.9
6811	84	80.0	4.0	80.0	4.0
6814	111	99.0	12.0	83.5	27.5
6903	110	117.5	7.5	114.8	4.8
6910	74	67.5	6.5	77.8	3.8
7114	67	68.3	1.3	92.5	25.5
7115	116	78.4	37.8	83.7	32.3
7122	100	83.0	17.0	80.6	19.4
7123	110	88.4	21.6	81.8	28.3

V. 一点分析

上述暴潮预报式不仅具有一定的预报价值和预报时效, 能在保证一定预报精度的前提下提高预报时效, 更重要的是它提供了一些有益的信息。表 3 的结果清楚地表明, 前期台风增水作为预报因子的作用伴随着半径距离的增大

而迅速减小; 台风强度, 特别是台风中心附近最大风速的平方项作为预报因子的作用却衰减很慢。这说明台风中心附近最大风速是提高暴潮预报时效最有潜力的因子。特别是台风在接近或登陆台湾省之后, 台风中心附近最大风速作为预报因子对本站的贡献反而大大减小, 表现为单相关系数 R_{ζ} , w_m^2 反而由台风到达 $r_{4.0}$ 、 $r_{4.5}$ 圆弧上的 0.64、0.61 减小到 0.47, 回归系数由 0.0063、0.0065 减小到 0.0055。这种奇异现象的产生, 看来是台湾玉山山脉的壁墙效应和海峡效应的缘故。台风模拟实验发现^[4], 台风无论从东方或偏南方移近台湾一定范围之后, 由于台湾省的壁墙和海峡地形的影响, 都会在台湾海峡一侧产生新的低压扰动; 若台风更加靠近台湾省, 则会同时出现两个台风中心, 使流场发生变形, 吸引或诱导台风折向西行。因此可以预言, 这种奇特现象的出现并非偶然, 而是新生低压扰动引起流场变化的一种结果。

表 3 相关系数、回归系数和均方差
Tab.3 Correlation coefficient, regression coefficient and mean square deviation

要素		值	半径		
		$r_{距-台东岸}$	$r_{4.0}$	$r_{4.5}$	
相关系数	R_{ζ}	0.84	0.70	0.65	
	$R_{\zeta, \Delta H}$	0.76	0.52	0.30	
	R_{ζ, w_m^2}	0.47	0.64	0.61	
回归系数	a_0	40.7	57.7	57.4	
	a_1	0.71	0.35	0.27	
	a_2	0.0055	0.0063	0.0065	
均方差		11.4	14.6	16.2	

参考文献

- [1] 陈孔沫, 1982. 海上台风风场模式. 海洋学报 4(6): 771~777.
- [2] 国家海洋局第三海洋研究所 101 组, 1976. 厦门港台风暴潮的简易预报方法. 海洋科技 6: 1~14.
- [3] 陈孔沫, 1981. 台风气压场和风场模式. 海洋学报 3(1): 44~56.
- [4] 魏鼎文, 1979. 由模拟实验研究提供的几点台风预报意见. 大气科学 3(4): 326~333.

FORECAST METHOD OF STORM SURGE WITH CERTAIN TIME EFFECT WITHOUT WEATHER PREDICTION DEPENDENCE

Chen Kongmo

(Third Institute of Oceanology, SOA, Xiamen 361005)

Received: Feb., 5, 1990

Key Words: Storm surge, Time effect forecast, Weather prediction

Abstract

Statistic forecast can not be used for a big storm surge. Numerical forecast still suffers from difficulties in solution of viscosity coefficient, bottom street shape, interrelation between wind stress and sea surface wind velocity, and a quasisynchronization of variational field of storm surge and air compelling force. A definite equation in the planetpolar coordinate is developed based on an air motion equation and used to calculate the surge height using a simple and convenient wind field model of typhoon. Therefore, a coefficient surge forecast formula can be derived using a correlation method, and a forecast method of storm surge with certain time effect can be established without weather forecast dependence.