

# 风暴潮模拟中潮位对风拖曳力系数的影响研究

孔 俊<sup>1,2</sup>, 宋志尧<sup>1,2</sup>, 张金善<sup>3</sup>, 康 琮<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 海洋学院, 江苏 南京 210098; 3. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024)

**摘 要:**近年来,应用数值模型模拟台风引起的风暴潮运动越来越普遍,模型中对于风拖曳力系数的确定,一般都从相对风速出发,可引用的公式也较多,但这些公式很少考虑潮位变化对此系数的影响。在强潮河口、海岸海域,潮位变幅大,最高潮位甚至可达风速参考高度(10m)的近一半,如长江口和杭州湾。在数值模拟中不考虑风暴潮和天文潮共同引起的潮位变化,会造成风应力高潮时被低估、低潮时被高估的现象,从而影响风暴潮模拟的精度。为此本文对现有的风拖曳力系数加以改进,提出了考虑潮位影响的风拖曳力系数表达式,并应用于长江口、杭州湾 9711 号台风风暴潮的模拟中,增水模拟结果得到了明显改善,可进一步推广应用于强潮河口、海岸的风暴潮增水模拟中。

**关键词:** 风暴潮; 风拖曳力系数; 潮位; 数值模拟; 长江口

**中图分类号:** P731 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003 - 0239 (2008) 1 - 0074 - 06

## 1 引言

我国沿海是台风多发地区,风暴潮造成的灾害一般都较为严重。因此对台风风暴潮的准确预报对海岸工程设计、防灾减灾等都具有重要的指导意义。

台风天气下表面风切应力和气压梯度力是造成海面水位异常升降的重要因素。其中风应力决定了气-海动量的传输,在数值模拟中合理确定风应力是准确模拟风暴潮的重要前提之一。风应力的计算涉及到风拖曳力系数的确定,为此不同学者提出了不同的看法和观点<sup>[1]</sup>,在这些研究中,普遍认为风暴潮过程中海面粗糙高度不变,在应用中一般将其取为常数<sup>[2]</sup>;近年来,随着风应力及气-海间动量传输研究的进展,通过实验成果发现该系数与海面粗糙高度有关,而海面粗糙高度与风速有关,并提出了一系列与风速有关的风拖曳力系数表达式<sup>[3~6]</sup>。

从上述研究成果可以看出,在计算风应力时,尽管公式中考虑了风应力对海面粗糙高度变化的影响,但并未考虑到水体波动变化的影响,因此在平均海面 10m 处风速一定条件下,在潮位的涨、落过程中计算得到的表面风切应力也是不变的。当然,如果潮位波动比较小,则这种影响可以忽略的,而当水位波动幅度与参考高度 10m 之比不可忽略时,则潮位变化对表面风应力(主要是风拖曳力系数)的影响是值得研究的。定性而言,若风速不变,涨潮时随着水位逐渐升高,风拖曳力系数及表面风应力将随之增大;而落

收稿日期: 2006-12-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50339010)。

作者简介: 孔 俊(1978-), 博士生, 主要从事河口、海岸水动力学研究。

潮时则随之减小。因此采用风拖曳力系数计算公式,则无法反映出表面风应力的变化特征,往往造成表面风应力涨潮时被低估、落潮时被高估事实。如在长江口地区,口外中浚站多年平均潮差为 4.6m,在风暴潮和天文潮的共同作用下,水体的涨落潮变化更为显著,最高潮位可达 5.69m (1981 年 8 月),远高于天文潮高潮位,且与参考高度 10m 相比不可忽略,此时若不考虑潮位波动对表面风拖曳力系数及风应力的影响显得不甚合理。

为此,本文在前人研究成果的基础上,在计算表面风应力时考虑了潮位的这种影响,对现有的风拖曳力系数计算公式加以改进;并应用于长江口 9711 号台风风暴潮数值模拟中,使增水计算值与实测值更为接近,误差减小,精度提高,结果令人满意。这一结果表明,改进公式可进一步推广应用于强潮河口、海岸海域风暴潮增水的数值模拟研究。

## 2 基本方程

风暴潮模拟的基本控制方程仍为连续方程和运动方程,并考虑海面气压场和台风场的作用。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial tx} + \frac{\partial N}{\partial ty} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) = -gD \frac{\partial (\zeta - \bar{\zeta} - \zeta_0)}{\partial x} + \frac{\tau_x - \bar{\tau}_x}{\rho_w} + fN \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N^2}{D} \right) = -gD \frac{\partial (\zeta - \bar{\zeta} - \zeta_0)}{\partial y} + \frac{\tau_y - \bar{\tau}_y}{\rho_w} - fM \quad (3)$$

$$\dot{\tau}_x = \rho_a \cdot C_d \cdot \bar{W} \cdot \bar{W} \quad (4)$$

$$\dot{\tau}_y = \rho_w \cdot R_b \cdot \bar{V} \cdot \bar{V} - \beta \dot{\tau}_x \quad (5)$$

其中  $M = \int_{-h(x,y)}^{\zeta(x,y)} u(x,y) dz$ 、 $N = \int_{-h(x,y)}^{\zeta(x,y)} v(x,y) dz$  分别为  $x$ 、 $y$  方向的单宽流量;  $\bar{V} = (u, v)$  是垂线平均流速矢量,  $u$ 、 $v$  分别为流速在  $x$ 、 $y$  方向的分量;  $D = h + \zeta$  为全水深,  $h$  为平均海平面下的水深,  $\zeta$  是平均海平面起算的水位;  $\bar{W}$  是平均海面上 10m 的风速矢量;  $f = 2\omega \sin \varphi$  为柯氏力系数, 其中  $\omega$  为自转角速度,  $\varphi$  为计算水域的地理纬度;  $g$  为重力加速度;  $C_d$ 、 $R_b$  分别为风拖曳力系数和底摩擦系数;  $\beta$  是底部摩擦力与表面风应力有关的系数, 一般取为 0.3 ~ 0.5;  $\zeta_0$  是由于台风气压变化引起的海面静压升高;  $\rho_a$ 、 $\rho_w$  分别为空气和海水的密度。

海面气压场和台风场可由相关台风气压模式和台风风场模式计算获得<sup>[5]</sup>。

## 3 风拖曳力系数的改进

假定水体自由表面的风场垂直结构满足对数分布,在不考虑潮位变化时有:

$$u = \frac{u_*}{k} \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \quad (6)$$

当考虑潮位逐时变化 $\zeta$ 时,上式应表达为:

$$u = \frac{u_*}{k} \ln \left( \frac{z - \zeta}{z_0} \right) \quad (7)$$

依此可得:

$$u_* = \frac{k u}{\ln \left( \frac{z - \zeta}{z_0} \right)} \quad (8)$$

其中 $u_*$ 为摩阻风速,反映表面风应力的强度, $k$ 为卡门常数, $z_0$ 为粗糙高度, $z$ 为对应平均海平面的计算高度。

通常取 10m 作为计算高度,则根据切应力的表达式有:

$$\tau = \rho_a (u_*)^2 = \rho_a \left[ k \ln \left( \frac{10 - \zeta}{z_0} \right) \right]^2 u_{10}^2 \quad (9)$$

对照(4)式得到:

$$C_g = \left[ k \ln \left( \frac{10 - \zeta}{z_0} \right) \right]^2 \quad (10)$$

根据级数展开方法,有:

$$\ln \left( \frac{10 - \zeta}{z_0} \right) = \ln \left( \frac{10}{z_0} \right) + \ln \left( 1 - \frac{\zeta}{10} \right) \approx \ln \left( \frac{10}{z_0} \right) + \left( -\frac{\zeta}{10} \right) - \frac{1}{2} \left( -\frac{\zeta}{10} \right)^2 \quad (11)$$

取卡门常数 $k=0.4$ ,即得:

$$\frac{1}{\sqrt{C_g}} = \frac{\ln(10/z_0)}{k} - \frac{\zeta}{10k} = \frac{1}{\sqrt{C_g^0}} - \frac{\zeta}{4} \quad (12)$$

从而得到:

$$C_g = \left[ \frac{1}{1/\sqrt{C_g^0} - \zeta/4} \right]^2 \approx C_g^0 \left( 1 + \frac{\zeta \sqrt{C_g^0}}{4} \right)^2 \quad (13)$$

式中 $C_g^0$ 为由(6)式得到的风拖曳力系数。

表 1 和图 1 为不同潮位时改进前后的拖曳力系数变幅比较。从中可以看出,改进的拖曳力系数相对于 $C_g^0$ ,当潮位大于 0 时增加,潮位越高,增幅越大;当潮位小于 0 时减小,潮位越低,减幅越大。

表 1 潮位对拖曳力系数影响的变幅（%）

$\zeta$ $C_d^0$	-5	-4	-3	-2	-1	1	2	3	4	5
0.50E-3	-5.51	-4.42	-3.33	-2.22	-1.11	1.12	2.25	3.38	4.52	5.67
1.00E-3	-7.75	-6.22	-4.69	-3.14	-1.57	1.59	3.19	4.80	6.42	8.06
1.50E-3	-9.45	-7.60	-5.73	-3.84	-1.93	1.95	3.91	5.89	7.90	9.92
2.00E-3	-10.87	-8.74	-6.60	-4.42	-2.22	2.25	4.52	6.82	9.14	11.49
2.50E-3	-12.11	-9.75	-7.36	-4.94	-2.48	2.52	5.06	7.64	10.25	12.89
3.00E-3	-13.22	-10.65	-8.05	-5.40	-2.72	2.76	5.55	8.38	11.25	14.16
3.50E-3	-14.24	-11.48	-8.68	-5.83	-2.94	2.98	6.00	9.07	12.18	15.34
4.00E-3	-15.19	-12.25	-9.26	-6.22	-3.14	3.19	6.42	9.71	13.05	16.44

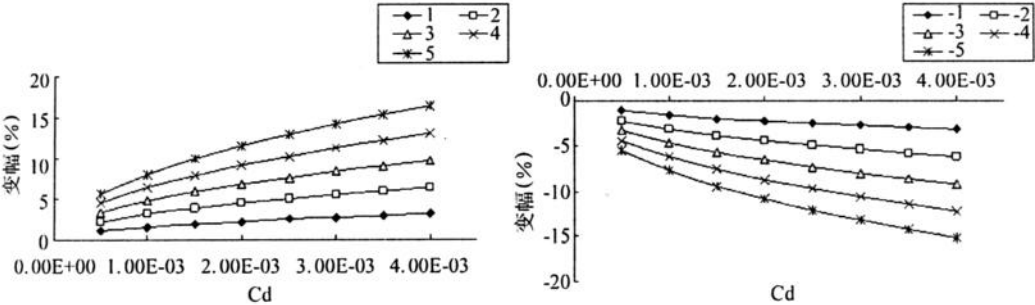


图 1 潮位影响下拖曳力系数的变幅

由此还可以看出，在以往的风暴潮数值模拟中，由于选取拖曳力系数时不考虑潮位的变化，造成计算的风应力在高潮前后被低估，而低潮前后被高估，这种偏差且随着潮位及风拖曳力系数的逐渐增大而增大。以 4m 潮位为例，若取  $C_d^0=2.5\times10^{-3}$ （不考虑潮位影响），则考虑潮位影响的拖曳力系数平均增幅逾10%，因此在计算风应力时，潮位对风应力及增水的影响是不容忽视的。

4 算例

应用风暴潮数学模型，本文对 9711 号台风影响下的长江口、杭州湾风暴潮增水场进行了模拟。9711 号热带风暴于 1997 年年 8 月 10 日 08 时在关岛在以东洋面生成，后向西北偏西方向移动，强度逐渐增强，11 日 08 时发展成台风，中心强度曾达到 920hPa，最大风速 60m/s。以后继续朝西北偏西方向移动，于 18 日 21 时 30 分在浙江省温岭市登陆，登陆后经天目山区北上，进入安徽省南陵县，强度逐渐减弱<sup>[8]</sup>。9711号台风自生成以来，以平均每天 400km 多的速度向偏西方向快速运行，历时 8.5d（见图 2）。9711 台风登陆期间，长江口、杭州湾恰逢农历天文大潮，受台风影响，高潮位明显高于正常情况。此时最高潮位由天文潮和风暴潮增水组成，但有时最高潮位时的增水值并不是风暴潮引起的最大增水，因此从河口防洪角度而言，最高潮位时对应的增水值意义更大。

数值模型的计算范围包括了整个长江口与杭州湾，计算时段从 8 月 15 ~ 23 日，根据同期实测资料，长江口上游平均流量为 45500m<sup>3</sup>/s，实测增水站位(见图 3)，模拟计算时气压场和风场通过 MM5 模型计算获得<sup>[9]</sup>。

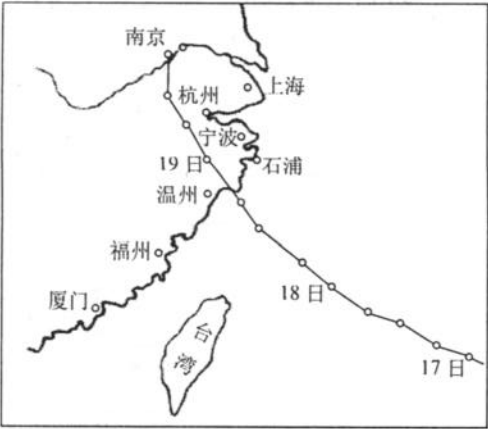


图 2 9711 号台风运移路径



图 3 实测增水站布置

为便于比较 本文将不考虑潮位影响计算风应力的方法称为传统方法(取  $C_D^0=0.0026$ )，而把考虑潮位影响(即依据公式(13)改进)的方法称为本文方法，两种方法增水模拟结果与实测值的比较(见表 2)。从表中可以看出，本文方法计算的各站最高潮位增水值与实测值更为接近，各站误差及平均误差更小，明显优于传统方法。

表 2 最高潮位增水计算值与实测值比较

测 站	实测值	传统方法	误差	本文方法	误差
大戢山	0.84	0.56	0.28	0.58	0.26
滩 浒	1.48	1.42	0.06	1.48	0.00
芦潮港	1.18	1.17	0.01	1.21	-0.03
横 沙	1.28	1.21	0.07	1.29	0.01
长 兴	1.35	1.28	0.07	1.38	-0.03
堡 镇	1.47	1.37	0.10	1.48	0.01
金 山	1.67	1.67	0.00	1.76	-0.09
北槽中	0.94	0.72	0.22	0.77	0.17
吴 淞	1.45	1.34	0.11	1.45	0.00
平均值	1.30	1.19	0.11	1.27	0.03

5 结语

在强潮河口、海岸海域，潮位对风力拖曳系数的影响是不容忽视的，忽略潮位的影响，直接造成风应力高潮时被低估。通过对现有的风拖曳力系数的改进，并应用于 9711 号台风风暴潮增水的模拟中，计算值与实测值更为接近，表明本文所提出的考虑潮位影响的风拖曳力系数表达式，可进一步推广应用于风暴潮增水模拟的研究中。

## 参考文献:

- [1] 李克让, 林贤超. 大洋风应力及风场的计算和分析[J]. 地理研究, 1994,13 (3) :44 ~ 52.
- [2] 周旭波, 孙文心. 长江口以外海域风暴潮与天文潮的非线性相互作用[J]. 青岛海洋大学学报, 2000,30 (2) :201 ~ 206.
- [3] Smith S D. Wind stress and heat flux over the ocean in gale force winds[J]. J Phys Oceanogr, 1980,10 :709 ~ 726.
- [4] Garratt J R. Review of drag coefficients over oceans and continents[J]. MonWeather Rev, 1977,105 :915 ~ 929.
- [5] Geernaert G L, Larssen S E, Hansen J. Measurements of the wind- stress, Heat flux, and turbulence intensity during storm conditions over the North Sea[J]. J Geophys Res, 1987,98 :16571 ~ 16582.
- [6] Margaret Y, Tayler P K. Wind stress measurements from the open ocean[J]. J phys oceanogr, 1996,26 :541 ~ 558.
- [7] 张金善, 钟 中, 黄 瑾. 中尺度大气模式 MM5 简介[J]. 海洋预报, 2005, 22 (1) :31 ~ 40.
- [8] 杨 辉, 余振美, 周则凯. 9711 号台风暴雨分析[J]. 水文, 2000, 20 (6) :59 ~ 61.
- [9] 钟 中, 张金善, 黄 瑾 .mm5 模式在热带气旋模拟中的应用[J]. 海洋预报, 2004,21 (4) :10 ~ 15.
- [10] 王秀芹, 钱成春, 王 伟. 风应力拖曳系数选取对风暴潮数值模拟的影响[J]. 青岛海洋大学学报, 2000,31 (5) : 640 ~ 646.
- [11] Dawson G P, Johns, B and Soulsby R L. Numerical Model of Shallow Water Flow Over Topography, In : Physical Oceanography of Coastal and Shelf seas. Johns, 1983 ,267 ~ 320.
- [12] Song Zhiyao, Liu Yifan, Corrected Formula of Bed Resistance Coefficient for Plane Numerical Simulation of Tidal Current [J]. China Ocean Engineering, 2000,14 (2) :221 ~ 227.

## Research of the effluence of tidal level on wind drag stress coefficient in storm surge model

KONG Jun<sup>1,2</sup>, SONG Zhi-yao<sup>1,2</sup>, ZHANG Jin-shan<sup>3</sup>, KANG Cong<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resource and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. OceanCollege, Hohai University, Nanjing 210098 China; 3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024 China)

**Abstract :** Storm surge model has been used widely to simulate the non-astronomical tidal set-down and set-up occurring in typhoon season. In model there are many formulas about wind stress coefficient can be used to calculate the wind drag stress on free surface. But in conventional formula only the relative wind speed is considered without considering the effluence of tide level. Actually in intensive estuarine and coastal area, the tidal range is large, even reaching half of the reference height of 10m, such as the Yangtze estuary and Hangzhou bay. So the precision of model will be reduced because the wind stress is underestimated in flood tide and be over-valuated in falling tide without considering the fluctuation of water itself. Therefore the relationship of the relative wind speed and water elevation should be considered together. A new kind of wind stress formula has been established in this paper and used to simulate the storm surge of typhoon Winnie in Yangtze Estuary and Hangzhou bay. The results are better and satisfying. The new formula can be used in the future storm surge model in intensive estuarine and coastal areas.

**Key Words :** storm surge, wind drag stress coefficient, tidal range, numerical model, Yangtze estuary