文章编号:1000-8608(2010)05-0735-07

杭州湾湾内天文潮与风暴潮耦合模式建立与应用

黄世昌*1,2,李玉成1,谢亚力2,赵鑫2

(1.大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室,辽宁大连 116024;
2.浙江省水利河口研究院,浙江杭州 310020)

摘要:基于河口海岸水动力二维数值计算模拟,建立风暴潮与天文潮耦合作用的数值模型, 通过多次台风引起的增水和综合潮位的模拟验证,证实该模型可适用于杭州湾海域,能够准 确模拟强潮海湾内风暴潮和综合潮波的传播.应用该模型计算了秦山核电厂处可能最大热带 气旋引起的增水,结果表明,过程最大增水随遭遇的天文潮位降低而增大,增幅可达 85%,综 合高潮位则随遭遇的潮位降低而下降;在平均海平面条件下最大增水比高潮位增水约大 50%,也大于我国登陆最强的超强台风引起的增水.分析指出在强潮海区,基准洪水位组合中 的可能最大风暴潮增水取发生在高潮位时的最大增水较合理.

关键词:杭州湾;天文潮;风暴潮;耦合模式 中图分类号:O353.2 文献标志码:A

0 引 言

海岸工程的设计高潮位一般采用统计法求 得. 但滨海核电厂基准洪水位的确定一般要求采 用确定论法,即洪水位是18.6 a 最高天文潮位或 保证率为10%的天文潮高潮位叠加可能最大热 带气旋产生的可能最大风暴增水以及相应的波浪 增水,风暴增水均是基于海平面条件下的量值,在 陆架宽阔的浅海沿岸,由干浅水非线性效应的增 大,长波间的相互作用不容忽视,天文潮与风暴潮 耦合作用下产生的风暴潮增水与基于平均海面的 纯风暴潮增水有明显的差异[1~3].耦合增水的研 究往往需要建立数值模式,青岛海洋大学提出一 个考虑天文潮与风暴潮耦合作用、且含可变边界 的风暴潮动力学模型,用于预报宽阔潮间带上风 暴潮漫滩[4].另外,针对具体海区也有一些耦合预 报模式的研究成果[5~7].这类模型先是构建一个 既适用于天文潮汐,也适用于风暴增水计算的数 值模式,通过边界主要天文分潮的输入获得域内 的潮汐变化,然后通过表征台风强度的强迫力场 输入,再进行风暴潮位的耦合计算.将计算结果减 去模式所计算的潮汐过程,可得到"耦合增水"过 程.由于多数风暴潮与天文潮的耦合模式仅在有限 的区域,或分潮数不足,在潮差较大的海区,尚不能 准确模拟沿海的潮波运动,所得沿海测站的天文潮 潮位与测站通过调和分析推算的天文潮潮位差别 较大,其合成的潮位不足以表征实际的台风暴潮水 位^[8],难以获得在设定天文潮高潮位上的增水数 值.

本文建立适合于杭州湾湾内的天文潮与风暴 潮耦合模式,验证4场台风过程中的天文潮、增水 和综合潮位;并在此基础上,分析可能最大热带气 旋在各种天文潮潮位登陆时的增水差异,较为合 理地提出设计基准洪水位中天文潮与风暴潮非线 性耦合的结果.

1 数值模式的建立

选用 Denmark 水利研究所开发的河口、海岸 和海洋潮汐二维模型^[9]作为天文潮与风暴潮耦合 计算的基础,该模型的特点在于:(1)可以用粗网 格将开边界布置于天文潮与增水基本呈线性关系 的深水海域,在局部区域可嵌套加密网格,大、小 计算域相互提供水位及流速边界条件;(2)采用直

收稿日期: 2008-03-20; 修回日期: 2010-03-15.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50809062).

作者简介: 黄世昌*(1966-),男,博士,教授级高工,E-mail:chenxison@163.com.

角坐标系下 C 型网格,用稳定性好的交替方向隐 式(ADI)格式,具有二阶精度;(3)采用干-湿网格 法处理动边界问题,这对于杭州湾南岸存在大片 滩涂的情况尤其重要.

1.1 基本方程

平面二维水流数值模型(MIKE 21)的控制方 程包括1个连续性方程和2个动量方程,基本方 程为

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

 $\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} &+ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \Omega q - fvv_x + \\ gp \frac{\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} &= E \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right) - \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (p_a) \quad (2) \\ \frac{\partial q}{\partial t} &+ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{pq}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q^2}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \Omega p - fvv_y + \\ gq \frac{\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} &= E \left(\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} \right) - \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (p_a) \quad (3) \\ \vec{x} + : \zeta \, \beta \, \vec{y} \, \vec{u} \, (\dot{0} \, \vec{h} \, \vec{x} \, \vec{x} \, \vec{m} \, \vec{n} \, \vec{h} \, \vec{k} \,); p, q \, \dot{\beta} \end{aligned}$

别为x、y方向上的单宽流量; h 为水深; Ω 为柯氏 力参数; ρ_w 为水密度; C 为谢才系数; p_a 为大气压 力; f 为风摩擦因数; v、 v_x 、 v_y 分别为风速及其在 x、y方向的分量; E 为涡动粘性系数.

上述方程组中, $\frac{h}{\rho_w}\frac{\partial}{\partial x}(p_a)$ 、 $\frac{h}{\rho_w}\frac{\partial}{\partial y}(p_a)$ 为气压 梯度项, fvv_x 、 fvv_y 是台风强迫力对水体的切应 力项.气压梯度和风切应力均是风暴潮计算中最 重要的源动力项. Ωp 、 Ωq 为地转效应.

初始条件:

$$\begin{aligned} \zeta(x,y) \mid_{t=0} &= \zeta_0; \ p(x,y) \mid_{t=0} = 0; \\ q(x,y) \mid_{t=0} &= 0 \end{aligned} \tag{4}$$

1.2 计算范围

耦合模型计算域西至广东汕头,南至台湾岛 南端,东至日本琉球群岛一韩国济州岛东侧一线, 北至渤海辽东湾北岸,大致范围为 21.5°N~ 41°N、116.5°E~127°E,计算域面积为 224×10⁴ km².整个计算域采用三层嵌套逐步加密网格,其 中大范围的网格尺寸为 8 100 m,其后每一层网 格逐层缩小至上一层网格的 1/3,900 m 尺寸的 细网格覆盖了全部浙江沿海.

1.3 边界条件

陆边界取法向流量为零,即 $Q_n = 0$.大区开边 界包括静压水位及天文潮位,天文潮位由全球潮 波模型 TPXO6^[10] 提供,采用 10 个分潮推算,包 含 8 个主要分潮 M_2 、 S_2 、 K_1 、 O_1 、 N_2 、 P_1 、 K_2 、 Q_1 , 以及2个长周期分潮 M_f和 M_m,基本能够构造出 外海深水处真实的天文潮过程.西、南、东3条开 边界处的水位由下式给出:

$$\zeta_{0}(x) = \zeta_{p}(x) + \sum_{i=1}^{10} A_{i}(x) \cdot \sin(\omega_{i}t + \alpha_{i}(x))$$
(5)

式中: ζ_0 为边界处的潮位; ζ_p 为边界处静压水位;i = 1,2,...,10,分别对应上述分潮; A_i 、 α_i 分别为 各分潮在 3 条开边界处的振幅和相角; ω_i 为分潮 的角频率.

1.4 台风风场和气压场计算

风暴潮计算中,台风风场和气压场的计算是 重要的环节.通常使用参数化的风模型作为风暴 潮计算的强迫力,其优点之一是便于使用,且能反 映热带风暴的主要风场特征;其次是能够用于研 究台风参数的改变对风暴潮的影响.本模式选用 Jelesnianski 气压场和风速场模型^[11],其式如下:

$$W = \begin{cases} \frac{r}{r+R} (v_{0x}\boldsymbol{i} + v_{0y}\boldsymbol{j}) + W_R \left(\frac{r}{R}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{A\boldsymbol{i} + B\boldsymbol{j}}{r};\\ 0 < r \leqslant R\\ \frac{R}{r+R} (v_{0x}\boldsymbol{i} + v_{0y}\boldsymbol{j}) + W_R \left(\frac{R}{r}\right)^{\beta} \frac{A\boldsymbol{i} + B\boldsymbol{j}}{r};\\ r > R \end{cases}$$
(6)

$$p_{a} = \begin{cases} p_{0} + \frac{1}{4} (p_{\infty} - p_{0}) \left(\frac{r}{R}\right)^{3}; & 0 < r \leq R \\ p_{\infty} - \frac{3}{4} (p_{\infty} - p_{0}) \frac{R}{r}; & r > R \end{cases}$$
(7)

式中:R 为最大风速半径;r 为计算点到台风中心 的距离; v_0 为台风移动速度; W_R 为台风域内 R 处 的最大风速; $A =- [(x - x_c) \sin \theta + (y - y_c) \cos \theta]$; $B = (x - x_c) \cos \theta - (y - y_c) \sin \theta$;(x, y), (x_c, y_c) 分别为计算点坐标和台风中心坐标; θ 为流入角(计算中当 $r \leq R$ 时 θ 取10°,当r > 1.2R时 θ 取25°,其余的 θ 在10°和25°之间线性内插而 得); p_0 为台风中心气压, p_{∞} 为无穷远处的大气 压(计算中取1010 hPa), β 为台风风速距离衰减 系数.最大风速使用 Atkinson-Holliday 提出的 风-压关系式计算^[12].

2 模式的适用性验证

1949~2007 年间,浙江省登陆的台风共 39 次,除 5612 号台风以外,登陆时气压小于 960 hPa的台风均出现在 20 世纪 90 年代以后.其中, 9711 号台风造成杭州湾及邻近水域历史最高潮 位;5612 号超强台风是登陆杭州湾邻近最大的热 带气旋;9417 号台风则造成浙南历史高潮位; 0414 号台风风圈半径大,影响范围广.挑选这 4 次台风进行验证,基本上可代表台风在浙江省登 陆对杭州湾的影响,各条路径如图 1 所示.





2.1 天文潮验证

潮波在近岸浅水区传播过程中,倍潮、复合潮 及其他因非线性效应衍生的分潮均由模型自行给 出.本模型验证了上述4次台风期登陆前3d及 登陆后1d的天文潮过程.对杭州湾内3个潮位 站实测资料进行调和分析并计算天文潮作为"推 算值"ξ_d,模拟所得的杭州湾内的天文潮位相和 高、低潮位与当地测站的"推算值"十分吻合.台风 登陆时刻对应的一个潮周期过程的高、低潮位误 差见图2和图3,高、低潮位平均误差分别为13 cm和20 cm,绝大多数高潮位误差小于20 cm,吻 合程度较优,表明本模式对天文潮的拟合较好.







2.2 增水与风暴潮位的模拟验证

从4次台风登陆过程的模拟来看,风暴潮增 水得到较好的模拟,最大增水误差基本在 30 cm 以内(表 1),平均误差为 15 cm. 高(低)潮位及潮 位过程与实测基本一致(图 4),风暴高潮位平均 误差为 20 cm,误差基本都在 30 cm 以内. 造成风 暴高潮位的误差是多方面的,台风风场和天文潮 过程的模拟均有一定误差,而且岸边测站基本在 浅滩上,台风期大浪破碎引起的增水对岸边测站 的高潮位有一定的影响.而对于风暴潮位过程而 言,由于台风登陆后增水偏小或者减水偏大,台风 登陆后高潮位均有所偏低,此现象与风场模拟误 差有关,登陆后台风为离岸风,风速受陆域影响, 比模型风速小.9417号和9711号两台风登陆前, 即风暴高潮位出现之前,模拟的低潮位偏高,登陆 后低潮位偏低,也与风场模拟误差有关.尽管如 此,本文模拟的精度仍较高,可用于研究可能最大 热带气旋引起的增水和风暴潮位.

表1 最大增水误差统计

Tab. 1 Statistical error of maximum storm surge

台风	乍浦		镇海			澉浦				
		实测	计算	误差	实测	计算	误差	实测	计算	误差
5612 4	3	425	423	2	258	248	10	513	509	4
9417 4	7	157	153	4	92	85	7	164	176	-12
9711 -	7	233	254	-21	167	160	7	313	298	25
0414 4	3	117	144	-27	83	106	-23	140	179	-39



Fig. 4 Comparison of storm tidal level between the model and observations during typhoons

3 工程应用实例

杭州湾海域呈喇叭形,湾口镇海宽约 100 km,到湾内澉浦断面宽约 20 km,两者相距约 80 km.由于两岸约束,潮波进入杭州湾后,潮差渐次 增大,澉浦潮差为镇海的 2 倍以上,实测最大潮差 为 9 m,天文潮潮差可达 7 m,远大于开敞海岸海 域的潮差;水域平均水深约 8 m,潮波非线性作用 强,以致澉浦以上形成涌潮.秦山核电工程位于杭 州湾内乍浦和澉浦站之间,厂坪标高及海堤防潮 的确定需要计算设计基准洪水位,秦山三期所设 计的可能最大热带气旋参数以及引起厂址最大增 水的路径和移速取为^[13]中心气压 *p*₀ 为 903 hPa, 外围气压 *p*_n 为 1 010 hPa,最大风速半径 *R* 为 20 km;热带气旋移动风速 *v*_d 为 25 km/h;台风登陆 路径沿纬线,见图 1. 厂址处 18.6 a 最高天文潮潮 位 440 cm,10%超越概率天文潮高潮位 397 cm. 选择天文潮高潮位在 400~440 cm 的天文潮过 程,模拟 1997-08-15 至 1997-08-19 天文潮,结果 显示,1997-08-18 厂址处天文潮高潮位为 420 cm,低潮位为-298 cm,以此作为厂址耦合增水 计算的背景潮波.

3.1 可能最大热带气旋引起的厂址增水

可能最大热带气旋在登陆过程中,过程最大 增水可出现在天文潮任一时刻.分析最大增水遇 涨潮过程不同潮位时的变化,拟定了5种方案,分 别为最大增水出现在天文潮高潮位时刻、高潮位 前1h、中潮位、低潮位后0.5h和低潮位.同时计 算平均海平面条件下的最大增水作为方案六. 过程最大增水遭遇不同天文潮位,其变幅较 大,从高潮位降低至低潮位,增水值从4.51 m增 大至8.37 m,增幅达85%,增幅与潮差之比为 50%.但天文潮与风暴潮耦合的综合高潮位以最大 增水出现在天文潮高潮位时最高,随着相遇的潮位 降低,综合高潮位有所下降.在平均海平面条件下, 可能最大热带气旋引起的厂址处最大增水为6.6 m,比潮位值为平均海平面时的"耦合增水"大 13%,比高潮位增水约大50%,具体见表2和图5.

表 2 厂址可能最大增水及综合高潮位

Tab. 2	Maximum	surge &	 composed 	high	tidal level	
--------	---------	---------	------------------------------	------	-------------	--

计算 方案	特征天 文潮位	特征潮 位值/cm	过程最大 增水/cm	综合高 潮位/cm
方案一	高潮位	420	451	871
方案二	高潮位前1h	344	473	817
方案三	中潮位	35	584	711
方案四	低潮位后 0.5 h	-275	711	662
方案五	低潮位	-298	837	539
方案六	—	_	660	—



Fig. 5 Maximum surge and composed high tidal level

可能最大热带气旋在天文潮过程不同时刻登 陆,除增水的强度有差异外,增水过程的形态基本 一致,增水过程曲线的初振、激振和余振3个阶段 十分明显,初振阶段均存在振幅较小的先兆波,振 幅在30 cm以内,曲线在激振阶段有明显的大突 起的峰值,因此,对于可能最大热带气旋引起的风 暴潮波而言,海面潮汐的起伏对其形态的影响不 大,由于初振和余振阶段振动幅度非常小,风暴潮 波形态基本属于孤立波类型,见图5.

显然,杭州湾水域宽阔,水深浅、潮差大,当风 暴潮从东海传入杭州湾后,天文潮和风暴潮的波 幅与水深之比已不是一个小量,潮位变化对风暴 潮增水影响相当大.风暴潮波的能量与最大增水 和水深成正比,由于波动能量的守恒性,当风暴潮 波在较低的潮位进入杭州湾时,水深小,而在较高 的潮位时水深大,后者最大增水相应小于前者.另 外,北岸厂址风暴潮增水值还受到杭州湾水域表 面风应力和天文潮波系统的影响,杭州湾类似半 封闭水域,同样的风应力作用下,水深变小,沿程 增水增加^[14].可见,基于平均海平面的最大增水 值叠加在天文潮高潮位上作为杭州湾北岸秦山厂 址基准洪水位是不合理的.

3.2 厂址可能最大增水敏感性试验

有台风记录以来在浙江沿海登陆的超强台风 有 2 次,分别为 5612 号台风和 0608(Saomai)号 台风.5612 号台风过程中心气压最低达 905 hPa, 登陆时中心气压 923 hPa,近中心最大风速 65 m/s,风力超过了 17 级.低气压持续时间长,大风 圈半径远大于 0608 号超强台风,比 0608 号超强 台风更为不利.因此,可以 5612 号台风作为与可 能最大热带气旋的对比典型.

5612 号台风中心气压比可能最大热带气旋 中心气压高 23 hPa,但最大风速半径则要大 10~ 15 km.以 5612 号台风参数,假定其沿可能最大 热带气旋路径登陆,厂址处的增水结果见图 6、7. 平均海平面条件下,过程最大增水为 6.3 m;过程 最大增水发生在高潮位时,其值为 4.28 m,综合 高潮位为 8.48 m;过程最大增水发生在低潮位 时,其值增至 8.28 m,综合高潮位降低至 5.3 m.



图 6 5612 号台风引起的增水(平均海平面) Fig. 6 Storm surge due to No. 5612 Typhoon (mean sea level surface)



- 图 7 5612 号台风引起的增水和综合潮位 过程(最大增水遭遇天文潮高潮位)
- Fig. 7 Storm surge and composed tidal level due to No. 5612 Typhoon (maximum surge at high astronomical tidal level)

综上所述,平均海平面条件下,可能最大热带 气旋引起的厂址处的增水为 6.6 m,5612 号台风 增水为 6.3 m;过程最大增水发生在高潮位时,可 能最大热带气旋和 5612 号台风引起的增水分别 为 4.51 m 和 4.28 m.两者比较,可能最大热带气 旋引起的增水是最大的,对厂址是最不利的.

由以上计算可知,基于平均海面的风暴潮最 大增水大于高潮位时的最大增水,作为秦山核电 厂设计基准洪水位确定中的风暴潮最大增水应选 后者,这是杭州湾特殊的水域环境所决定.不考虑 风浪影响的设计基准洪水位可按 18.6 a 最高天 文潮位叠加高潮位时可能最大风暴潮增水的组 合,其值为 8.9 m.由于秦山核电厂处于杭州湾 内,杭州湾两岸海堤潮浪的设防标准为 50 a 一遇 至 100 a 一遇,有些地段海堤顶高程低于可能最 大热带气旋造成的高潮位,而且高潮伴随大浪,存 在溢流,会使基准洪水位降低,目前的取值尚存在 一定的安全裕度.

4 结 语

本文项目研究利用 MIKE21 软件和全球海 洋天文潮预报模式 TPXO6 所构建的应用于杭州 湾湾内水域的流体动力数值模式,对于天文潮潮 汐、风暴增水和两潮耦合的数值计算均具有良好 的模拟性能,从而为进一步数值试验奠定了可靠 的基础.

通过该模型计算了可能最大台风在高潮位、 低潮位和中潮位登陆引起的增水以及风暴高潮位 差异,并比较了在我国登陆的超强台风沿该路径 登陆的增水情况.由此可知,鉴于杭州湾水浅,天 文潮与风暴潮非线性作用显著,水深的变化对过 程最大增水影响较大,基准洪水位组合中的可能 最大风暴潮增水取发生在高潮位时的最大增水较 合理,也符合 HAD101/09 安全导则的要求,可合 理降低设计基准位值.

参考文献:

- [1] JOHNS B, RAO A D, DUBE S K, et al. Numerical modeling of tide-surge interaction in the Bay Bengel
 [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society, 1985, 313:507-535
- [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] BERNIER N B, THOMPSON K R. Tide-surge interaction off the east coast of Canada and the northeastern United States [J]. Journal of Geophysics Research, 2007, 112(C6):doi:10.1029/ 2006JC003793
- [4] 青岛海洋大学风暴潮研究小组.风暴潮客观分析、四维同化和数值预报产品研究[R].青岛:青岛海洋大学,1996

- [5] 江毓武,吴培木,许金殿.厦门港天文潮与风暴潮耦 合模型[J].海洋学报,2000,22(3):1-6
- [6] 端义宏,朱建荣,秦曾灏.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
- [7] KUMAR V S. Assessment of storm surge disaster potential for the Andaman island [J]. Journal of Coastal Research, 2008, 24(2B, Supplement): 171-177
- [8] HUANG Shi-chang, LI Yu-cheng, ZHAO Xin, et al. Numerical investigation of high tide level due to a super typhoon in a coastal region [J]. China Ocean Engineering, 2007, 21(3):471-484
- [9] DHI. User guide and reference manual of MIKE21 (Coastal Hydraulics and Oceanography) [R]. Denmark:DHI Water & Environment, 1996

[10] EGBERT G D, EROFEEVA S Y. Efficient inverse

modeling of barotropic ocean tides [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19(2): 183-204

- [11] JELESNIANSKI C P. A numerical computation of storm tides induced by a tropical storm impinging on a continental shelf [J]. Monthly Weather Review, 1965, 93(16):343-358
- [12] ATKINSON G D, HOLLIDAY C R. Tropical cyclone minimum sea level pressure/maximum sustained wind relationship for the western North Pacific[J]. Monthly Weather Review, 1977, 105: 421-427
- [13] 黄冠鑫. 杭州湾台风暴潮的模拟与计算(秦山核电 厂三期工程可行性研究设计基准洪水位计算专题报告之四)[R]. 杭州:浙江省河口海岸研究所,1996
- [14] 冯士筰. 风暴潮导论[M]. 北京:科学出版社, 1982

Construction of mode coupling astronomical tide with storm surge and its application in Hangzhou Bay

HUANG Shi-chang *1,2 , LI Yu-cheng¹, XIE Ya-li², ZHAO Xin²

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, China)

Abstract: Based on estuarine and coastal hydrodynamic two-dimensional numerical simulation, the numerical model coupling astronomical tide with storm surge is established, which is confirmed to be suitable for Hangzhou Bay by validation of surge and integrated tidal level due to several typhoons, and accurately simulate storm surge and integrated wave propagation in the bay with strong tide. The model is applied to calculate the surges caused by possible maximum tropical cyclone at Qinshan Nuclear Power Plant, and it is testified that the maximum surge increases and integrated high tidal level declines with the decreasing of encountered astronomical tidal level, and the increment of maximum surge can reach up to 85%. In the condition of average sea level, the maximum surge is 50% larger than that occurring at high astronomical tide, which is also larger than the value caused by most powerful super typhoon landing in China. Analytical results reveal that it is reasonable that maximum surge occurring at astronomical high tidal level should be used as the component of designed base flood level in the bay with strong tide.

Key words: Hangzhou Bay; astronomical tide; storm surge; coupled mode