

钱塘江涌潮特性及其数值模拟

潘存鸿^{1,2}, 鲁海燕^{1,2}, 曾 剑^{1,2}

(1. 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020; 2. 浙江省重点实验室潮汐泥沙试验基地, 浙江 杭州 310020)

摘要: 在钱塘江涌潮实测资料的基础上, 分析了钱塘江涌潮高度、涌潮传播速度、涌潮流速、涌潮形态及景观、涌潮压力等涌潮特性。同时, 应用基于 KFVS(kinetic flux vector splitting)格式的二维涌潮数值模型模拟了钱塘江涌潮的形成、发展和衰减的全过程, 复演了“交叉潮”、“一线潮”、“回头潮”等现象。通过对计算结果的比较分析, 对涌潮特性有了进一步的认识。

关 键 词: 涌潮特性; 涌潮数值模型; KFVS 格式; 钱塘江

中图分类号: TV131.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2008)02-0001-09

Characteristic and numerical simulation of tidal bore in Qiantang River

PAN Cun-hong^{1,2}, LU Hai-yan^{1,2}, ZENG Jian^{1,2}

(1. *Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, China*; 2. *Test Base for Tidal Sedimentation, Zhejiang Provincial Key Laboratory, Hangzhou 310020, China*)

Abstract: Based on the field data of the tidal bore in the Qiantang River, the characteristic of the tidal bore is analyzed, such as the height, the propagation speed, the fluid velocity, the shapes and sights, and the pressure of the tidal bore. In addition, a 2D mathematical model based on KFVS(kinetic flux vector splitting) scheme is used to simulate the formation, evolution and dissipation of the tidal bore in the Qiantang River, and to numerically replicate the phenomena of the intersection, reflection of the tidal bores, and a thread-shape bore, which leads to more understanding about the characteristic of the tidal bores in the Qiantang River by analyzing the computational results.

Key words: characteristic of tidal bore; numerical model of tidal bore; KFVS scheme; Qiantang River

东海潮波经杭州湾向钱塘江上游传播过程中, 因杭州湾的喇叭形平面形状使潮波能量积聚, 潮差增大, 至澉浦多年平均潮差达 5.62 m, 最大潮差 9 m; 另外, 乍浦以上水下沙坎发育, 水深急剧变浅, 潮波产生非线性畸变。在钱塘江尖山河段形成水位骤然抬升的涨潮潮波前锋线, 即为涌潮^[1]。

收稿日期: 2007-08-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10772163)

作者简介: 潘存鸿(1963-), 男, 浙江宁波人, 教授级高级工程师, 主要从事河口海岸规划及研究。

E-mail: panch@zjwater.gov.cn

钱塘江涌潮有两面性. 一方面涌潮是天下独特的自然景观和宝贵的旅游资源. 世界上有不少河口受人类活动影响涌潮大大减小甚至消失, 如法国塞纳河因航道整治涌潮不复存在; 流入加利福尼亚湾的科罗拉多河涌潮由于上游围垦而消失; 加拿大帕蒂科迪亚克河因河道整治涌潮大大减小^[2]. 另一方面, 涌潮也是一大危害. 涌潮造成河床大冲大淤, 不利于通航和沿江两岸岸线的开发利用; 涌潮掏刷堤防及其它涉水建筑物基础, 是造成潮灾的主要原因之一. 因此, 研究涌潮对于如何防护涌潮的危害, 开发利用保护涌潮旅游资源具有重要的实际意义.

数值模拟是研究涌潮的重要手段, 不但可以研究涌潮特性, 还可以较准确地预测钱塘江河口开发治理后涌潮的变化, 从而更科学地制订治理方案, 以保护、开发和利用钱塘江涌潮.

1 钱塘江涌潮特性

涌潮特性主要包括涌潮高度、涌潮传播速度、涌潮流速、涌潮形态及景观、涌潮压力等.

1.1 涌 潮 高 度

涌潮高度系指潮头水体顶面与潮端前趾低水位的水位差, 通常用来衡量涌潮的大小或强弱, 是表征涌潮形成、发展和衰减的指标. 涌潮高度随空间, 以及潮汐大小、河床地形、径流大小和气象因素等而变化.

涌潮高度随空间变化. 钱塘江涌潮形成于尖山河段高阳山下, 涌潮形成后向上游溯源传播过程中, 继续受河宽束窄和河床抬高的影响, 涌潮高度持续增大, 至曹娥江汇入口, 涌潮高度已达 1 m 以上, 在大缺口~盐官河段涌潮高度达到极值, 最大达 3 m 以上. 以后涌潮进入衰减阶段, 涌潮高度向上游逐渐减小, 至闻堰上游, 涌潮消失. 从涌潮形成点(高阳山)至涌潮消失点(闻堰)全长 90 km, 统称涌潮河段. 在涌潮形成和发展阶段, 涌潮高度只是整个涨潮波的一部分, 即涌潮高度小于潮差, 越往上游, 涌潮高度与潮差之比越接近 1, 到涌潮衰减阶段中后期(如七堡上游), 整个涨潮面即为涌潮^[3].

固定位置的涌潮高度随潮汐、河床地形、径流以及风速风向等而变化. 下游潮汐是影响涌潮高度的第一因素, 但钱塘江河口涌潮河段水深较浅, 且河床具有大冲大淤的特点. 因此, 涌潮河段的潮汐大小不但与下游潮汐有关, 还与当地河床地形密切相关. 每年的春、秋分附近, 下游杭州湾潮汐较大, 但因春秋两季, 钱塘江前期径流相差甚大, 春分期间河床淤积严重, 秋分期间因前期经历梅汛、台风暴雨期河床冲刷扩大, 所以涌潮一般在秋分期间为最强. 涌潮高度与潮差呈良好的正相关关系^[1].

河床地形通过影响潮汐大小间接影响涌潮高度. 因山潮水动力条件变化, 钱塘江尖山河段主槽存在走北和走南两种河势. 主槽走北时, 主槽长度短, 低潮位低, 潮差大, 从而涌潮强.

径流除上述通过冲淤河床间接影响涌潮高度外, 还对涌潮高度产生直接的影响. 赵雪华^[4]应用一维涌潮数值模型研究了径流对涌潮高度的影响, 认为山水流量增大, 对涨潮流有顶托作用, 可使涌潮高度稍有增加, 但山水流量增大到某一临界值后, 涌潮高度反而减小. 曾剑等^[5]在盐官站实测资料的基础上, 应用神经网络理论研究了径流大小对盐官涌潮高度的直接影响. 研究结果表明, 当上游径流量小于 $7\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 盐官涌潮高度随径流量增大而增加; 当上游径流量超过此值时, 涌潮高度随径流量增大而减小.

气象因素(主要是风速、风向和气压)对涌潮高度也产生一定影响, 尤其是在台风暴潮期间影响较大. 其影响主要表现在直接影响和间接影响两个方面: 直接影响是气象因素直接增大或减小涌潮高度, 当东风持续劲吹时, 涌潮高度将增大; 间接影响是气象因素通过增减水, 从而增大或减小涌潮河段下游潮差来实现的. 钱塘江最大潮差几乎都出现在台风暴潮期间, 此时的涌潮高度也最大. 由于缺乏相关的实测资料以及气象因素变化的复杂性, 气象因素对涌潮高度的影响还没有定量的结论.

1.2 涌潮传播速度及涌潮压力

涌潮传播速度系指涌潮潮头的前进速度. 根据一维连续性方程和动量方程分别可得涌潮传播速度 c .

$$c = \frac{h_d u_d - h_u u_u}{h_d - h_u} = u_d + \frac{h_u (u_d - u_u)}{\Delta h} \quad (1)$$

$$c = \frac{\left(h_d u_d^2 + \frac{1}{2} g h_d^2\right) - \left(h_u u_u^2 + \frac{1}{2} g h_u^2\right)}{h_d u_d - h_u u_u} \quad (2)$$

式中: h 为水深; u 为流速; 下标 d 和 u 分别表示下游侧(海侧)和上游侧(河侧); $\Delta h = h_d - h_u$ 表示涌潮高度。

由(1)和(2)式可得

$$c = u_u + \sqrt{\frac{g h_d (h_d + h_u)}{2 h_u}} \quad (3)$$

$$c = u_d + \sqrt{\frac{g h_u (h_d + h_u)}{2 h_d}} \quad (4)$$

可见,涌潮传播速度 c 与涌潮前、后的水深、流速有关,且涌潮传播速度 c 大于下游流速 u_d 。特别地:当上游水深 h_u 为零,即露滩时,由(4)式可得 $c = u_d$; 当上游流速为零时,由(1)式可得

$$c = \left(1 + \frac{h_u}{\Delta h}\right) u_d = \frac{h_d}{\Delta h} u_d \quad (5)$$

或者由(3)式得涌潮传播速度 c 与上、下游水深的关系

$$c = \sqrt{g h_d \left(1 + \frac{\Delta h}{2 h_u}\right)} \quad (6)$$

上式表明,涌潮传播速度大于浅水波波速 $c = \sqrt{g h_d}$ 。

由于涌潮传播速度与很多因素有关,因此,其变幅较大。根据实测资料分析,钱塘江涌潮传播速度在 3 ~ 10 m/s 之间,大多为 4 ~ 7 m/s 范围内。涌潮势猛力大,对涉水工程产生巨大的作用力,实测最大涌潮压力为 70 kPa^[1]。

1.3 涌潮流速

涌潮过后,水流迅速从落潮流转变为涨潮流,并在数分至数十分内流速达到极值。涌潮过后数十分钟内流速较大,称为涌潮流速,俗称“快水”。涌潮河段流速最大特点是涨潮流历时短、数值大、变化急剧;而落潮流历时长、数值小、变化较缓。

1.3.1 涌潮流速纵向分布 涌潮存在形成、发展、衰减以及消失的过程,相应地,涌潮流速呈现从小到大,再从大到小的变化规律。涌潮形成初期,最大垂线平均流速约为 4 ~ 5 m/s,向上游传播过程中涌潮流速逐渐增大,至大缺口 ~ 盐官附近河段达到最大,垂线平均流速通常为 6 ~ 7 m/s,最大可达 10 m/s 以上,这与涌潮高度在此河段达到最大相对应。再往上游,涌潮流速逐渐减小。

在尖山附近,流速达到极值的时间为涌潮过后 30 ~ 45 分钟;往上游,流速达到极值的时间缩短,盐官河段流速达到极值的时间约为涌潮过后 20 分;七堡以上,流速达到极值的时间更短。“快水”持续历时各处不等,但基本上与涌潮强度相匹配,即涌潮越大,“快水”历时越长,“快水”流速也越大。

1.3.2 涌潮流速横向分布 一般地说,主槽处的涌潮流速不但流速大,并且大流速水流即“快水”持续的历时也长;边滩处流速小,大流速持续的历时也短。但在局部地段,在河岸边界及地形作用下,出现边滩上涌潮流速比主槽处大得多的现象。

1.4 涌潮形态及潮景

钱塘江涌潮存在波状涌潮和强涌潮(破碎涌潮)。据研究^[6],当相对 Fr 在 1 ~ 1.7 范围内为波状涌潮;当相对 $Fr > 1.7$ 时为强涌潮。波状涌潮往往发生在中、小潮期,大潮期涌潮形成初期和消失阶段,有时在同一断面能看到波状涌潮与强涌潮同时存在,浅滩处为强涌潮,深槽处为波状涌潮,并存在波状涌潮与强涌潮相互转换的情形。强涌潮的自由表面往往破碎,潮头并非直立,潮头水面比降为 1 : 2.9 ~ 1 : 9.4,固定位置的潮位涨率最大可达 1 m/s 左右^[7]。

由于钱塘江河口岸线曲折多变,河床形态复杂,涌潮在传播过程中形成变化多端的涌潮潮景,最有代表性的是“交叉潮”、“一线潮”和“回头潮”。尖山附近,河道骤然放宽,且河床宽浅,江中时有沙滩发育,主槽分成两汉,涌潮亦分成两股,分别在沙滩两侧的河槽中推进。一股紧靠尖山山脚西上,沿北岸海塘推进,称“东股潮”;另一股沿南岸上溯,与北岸海塘呈一较大夹角,称“南股潮”。东、南两股涌潮在大缺口下游沙洲上游端汇合。汇合前,东、南两股涌潮分别沿着江心洲边缘行进,相碰瞬间,激起大浪,高者可达十余米,俗称“碰头潮”,而后,相互交叉,各自行进,形成壮观的“交叉潮”,或呈十字形,或呈人字形^[1]。大缺口上游,岸线顺直,河床断面呈“U”字形。涌潮渐趋均匀,在盐官附近河段常形成“一线潮”。盐官上游 5 km 处的老盐仓为一急弯,涌潮行径至此,受几乎垂直的岸线阻挡,涌潮反射,潮头陡起丈高水柱,然后潮头折回,形成了一条反方向的潮头,即为“回头潮”。赭山湾河段涌潮走向与凹岸斜交,受岸壁反射,往往形成马赫反射,传播过程中,潮头高度不变,但是马赫结迅速展宽,因此造成傍南岸涌潮较大^[1]。此河段大型丁坝(如美女山坝)、盘头较多,涌潮受其反射,回头潮也更加精彩壮观,常有二次回头潮,当地称为“美女二回头”。

2 涌潮数值模型

涌潮数值模拟有 2 个关键问题,一是强间断的模拟。涌潮前后,水位、流速(流量)存在突变,非线性效应很强,常规的数值方法或数值耗散太大,计算结果将突变的物理量抹平;或产生数值振荡,甚至失稳;二是方程源项的处理。为准确求解涌潮传播速度,控制方程必须采用守恒型方程,从而带来方程左端压力项与方程右端底坡源项的“和谐”问题^[8]。

本文采用基于无碰撞二维 Boltzmann 方程的 KFVS(kinetic flux vector splitting)格式求解,该格式能模拟间断流动。无碰撞二维 Boltzmann 方程为^[9]

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u \frac{\partial f}{\partial x} + v \frac{\partial f}{\partial y} + \varphi_x \frac{\partial f}{\partial u} + \varphi_y \frac{\partial f}{\partial v} = 0 \quad (7)$$

式中: f 为分子速度分布函数; u, v 分别为分子在 x 和 y 方向的分子速度; φ 为外力作用项,这里考虑非平底引起的重力项和阻力项, $\varphi_x = g(S_{0x} - S_{fx})$, $\varphi_y = g(S_{0y} - S_{fy})$; g 为重力加速度; S_{fx} 和 S_{fy} 分别为 x 和 y 向的阻力项; S_{0x} 和 S_{0y} 分别为 x 和 y 向的底坡项。

(7)式没有考虑碰撞项,相应的控制方程没有计及二阶粘性项^[9]。将(7)式乘以 $[1, u, v]^T$,并对分子速度空间积分,利用水流宏观变量水深 h , x 和 y 方向的流速 U, V 与分子微观变量 f, u, v 的关系,可得控制方程

$$\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \mathbf{S} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{E} = [h, hU, hV]^T$; $\mathbf{F} = \left[\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} u f du dv, \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} u^2 f du dv, \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} uv f du dv \right]^T$; $\mathbf{G} = \left[\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} v f du dv, \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} uv f du dv, \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} v^2 f du dv \right]^T$; $\mathbf{S} = [0, gh(S_{0x} - S_{fx}), gh(S_{0y} - S_{fy})]^T$ 。

可见, KFVS 格式不同于常规的计算格式,通过求解 Boltzmann 方程得到单元界面通量 $\mathbf{F}$ 和 $\mathbf{G}$ 。 $\mathbf{F}$ 和 $\mathbf{G}$ 的求解详见文献[9]。

为拟合钱塘江河口岸复杂的平面形状,对以前有结构四边形网格进行了改进^[10],采用无结构三角形单元离散,并采用网格中心格式。设 Ω_i 为第 i 个三角形单元域, Γ 为其边界,对(8)式应用有限体积法离散,经推导可得基本数值解公式

$$E_i^{n+1} = E_i^n - \frac{\Delta t}{A_i} \sum_{j=1}^3 F_{nj} l_j + \frac{\Delta t}{A_i} \iint_{\Omega_i} S_{0i} dx dy + \Delta t S_{fi} \quad (9)$$

式中: A_i 为三角形单元 Ω_i 的面积; $F_n = F \cos \theta + G \sin \theta$, $(\cos \theta, \sin \theta)$ 为 Γ 外法向单位向量; Δt 为时间步长;下标 j 表示 i 单元第 j 边; l_j 为三角形边长;上标 n 为时间步。

求解(9)式的关键是法向数值通量的计算^[9]及底坡源项的处理^[9,10].为建立“和谐”格式,除应用 WLF 方法外^[11],还需应用控制方程变换法^[12]或静水压力变换法^[9].

动边界处理是涌潮计算的难点之一. 由于涌潮发生在低潮位时刻, 此时大片滩地露出水面, 因此, 动边界的处理对计算结果影响很大. 近 20 年来, 许多学者提出了各种动边界处理方法, 但大多数动边界处理方法不能适用于间断流情况的干湿边界处理, 而涌潮间断流动与动边界恰恰同时发生. 因此, 本文应用能模拟间断流的干底 Riemann 解处理动边界问题^[13].

3 钱塘江涌潮计算及分析

3.1 计算条件

计算下边界位于钱塘江湫浦,钱塘江上边界为富阳,曹娥江上边界为三江闸(见图1).从湫浦到富阳全长约146 km,计算域内共布置三角形单元93 681个,节点48 141个,相邻节点最小距离为50 m.3个水边界条件均给定潮位过程,并应用一维特征差分方法计算边界处流速^[14].固壁边界条件为滑移条件,法向流速为零.具体处理时在域外设置与域内单元相对称的虚拟单元,采用镜像反射原理,求解以固壁为单元边界的通量.另外,计算中不考虑风的影响.

2000年9月,从下游澈浦至上游富阳进行了为期半个月的大规模涌潮观测^[3],涌潮到达后,每隔1~2 min记录潮位.首先应用该次测量的大潮资料进行了模型验证,验证期间上游径流量较小,日平均流量仅241~305 m³/s(多年平均流量为952 m³/s);计算地形采用2000年7月1:50 000水下地形图,并根据2000年11月1:50 000测图进行修正.考虑到该次实测资料没有流速观测资料,又对2006年4月大潮期水文实测资料进行了验证,验证期间上游日平均流量为1 100 m³/s,相应计算地形采用2006年4月1:50 000测图.经多次调试,当涨潮期 Manning 系数取0.004,落潮取0.006~0.012时,模型计算结果与实测结果吻合较好.应用于钱塘江河口的各种格式的数值模型均表明,钱塘江河口 Manning 系数较小,约为0.01,甚至更小,特别是涌潮时,否则涌潮偏小甚至无涌潮,这可能与钱塘江河口宽浅、含沙量大、计算为定床等有关,但对其确切的机理还不清楚,有待于以后进一步的研究.

3.2 计算结果及分析

3.2.1 潮位和流速验证 2000 年 9 月实测资料中共有 12 个潮位站可供验证(位置见图 1). 验证结果表明, 无论是高、低潮位还是潮位过程, 计算值均与实测值相当吻合. 图 2 为盐官、仓前潮位站的验证计算结果.

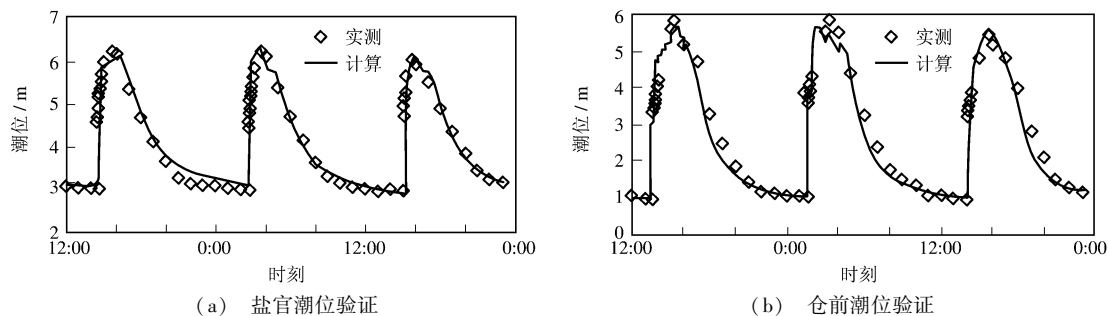


图2 盐官及仓前潮位验证

Fig. 2 Comparison of tidal levels at Yanguan and Cangqian

2006 年 4 月实测资料中共有 6 个潮位站和 3 个流速流向测点可供验证,潮位计算结果与实测非常接近,A 点的流速流向验证计算结果见图 3.

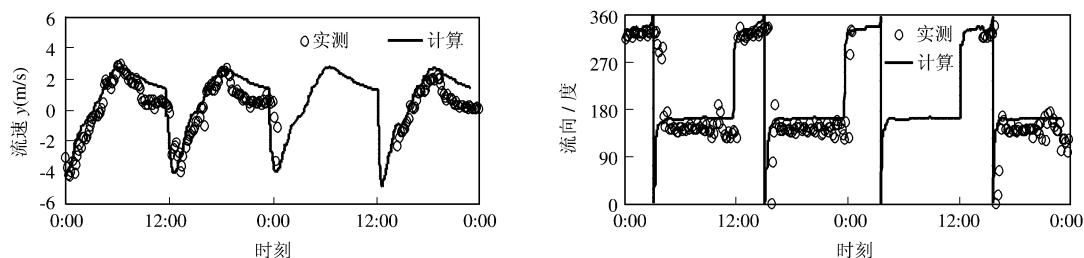


图 3 A 点流速流向验证

Fig. 3 Verification of velocity and flow direction at A

3.2.2 涌潮高度 事实上,涌潮是逐渐形成的,即涨潮波前峰的潮位涨率是逐渐增大的,当肉眼可分辨出涨潮波前峰潮位间断时,即认为涌潮.数值模型尽管也复演了这一涌潮形成的现象,但由于涌潮形成处计算网格较粗(约 750 m),且形成初期,水位的突变现象不明显.因此,很难界定涌潮形成于何处.

图 4 为沿程涌潮高度计算结果与实测值的比较.由图 4 可见,尽管计算涌潮高度略小于实测值,但两者基本一致.图 5 为不同时刻江道中心水面线图,图中可明显看出涌潮的传播过程以及沿程涌潮高度.

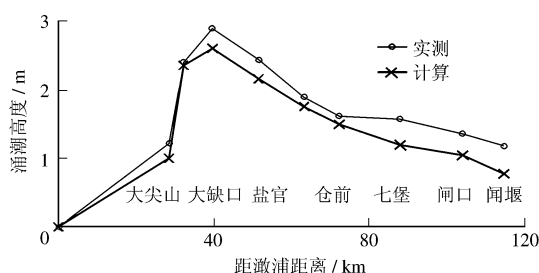


图 4 沿程涌潮高度计算与实测的比较

Fig. 4 Comparison between the computed and measured height of the tidal bore along the channel

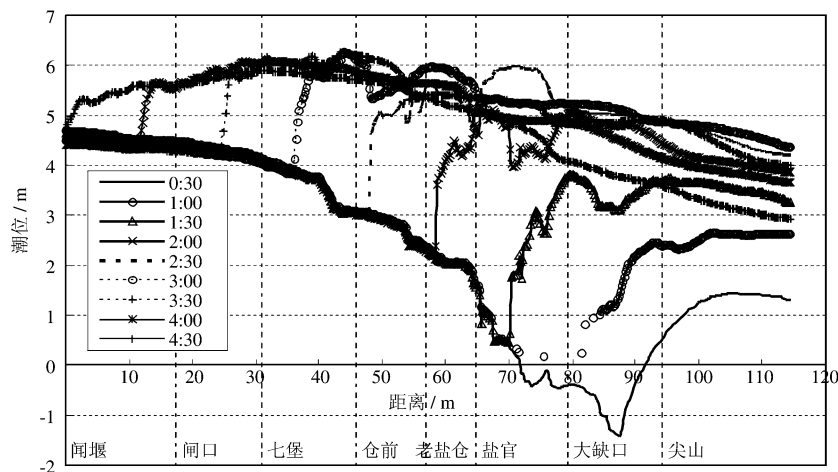


图 5 不同时刻江道中心水面线图

Fig. 5 Water surface profiles along the main channel at different moments

3.2.3 涌潮传播速度 沿江各站涌潮到达时刻计算值及涌潮传播速度计算值与相应实测值的比较见表 1. 可见,各站计算涌潮到达时间与实测非常接近,最大误差仅为 6 min. 实测涌潮传播速度为 4.96 ~ 8.03 m/s, 计算值与实测值非常符合.另外,七堡至闻堰河段涌潮传播速度较快,这主要与该段河道水深较大有关.

表 1 涌潮传播速度计算值与实测值的比较

Tab. 1 Comparison between the computed and measured propagation speeds of the tidal bore

站 名	距离/ km	涌潮到达时间/ min		涌潮传播速度/ (m · s ⁻¹)	
		实测	计算	实测	计算
尖 山		20	23		
大缺口	11.3	58	64	4.96	4.59
盐 官	11.2	94	99	5.19	5.33
仓 前	21.0	155	155	5.74	6.25
七 堡	16.0	199	196	6.06	6.50
闸 口	16.0	233	234	7.84	7.02
闻 堰	10.6	255	259	8.03	7.07

3.2.4 涌潮流速 表 2 为沿程主槽最大流速及出现时刻. 从表 2 可见,最大流速在纵向上存在从小到大,又从大到小的分布规律,最大流速(6.76 m/s)出现在盐官河段. 尖山附近,涌潮形成初期,最大流速出现在涌潮过后 40 min 左右,往上游,最大流速出现的时间提早,在仓前至七堡河段,最大流速出现在涌潮过后 2 min 左右;再往上游,最大流速出现的时间又有所推迟.

表 2 计算最大速度及出现时间

Tab. 2 The maximum velocity and its occurrence time

站 名	离激浦距离/ km	最大流速/ (m · s ⁻¹)	涌潮过后时间/ min
尖 山	28.3	4.81	39
廿二工段	32.0	5.50	14
大 缺 口	39.6	5.92	14
盐 官	51.4	6.76	14
四 工 段	63.1	6.01	5
仓 前	72.1	5.46	2
七 堡	87.8	3.86	2
闸 口	104.1	2.06	3
闻 堰	114.7	1.50	8

流速的横向分布上,弯道处大流速均出现在凸岸浅滩处,计算域内存在大缺口、老盐仓、赭山湾、七堡和闸口等多处弯道,所有这些弯道的最大流速均是凸岸大于凹岸. 图 6 为老盐仓弯道最大流速等值线图,可见,最大流速凸岸达 7 m/s 以上,凹岸仅为 2~3 m/s,两者相差悬殊. 这不同于一般河道的流速分布特征. 其原因分析如下:



图 6 老盐仓弯道计算最大流速等值线图(单位: m/s)

Fig. 6 Computational contours of maximum velocity at Laoyancang (unit: m/s)

联解(1)和(2)式,并设 $u_u=0$,经整理化简可得

$$\begin{aligned} u_d &= \sqrt{\frac{g}{2} \left(\frac{1}{h_u} + \frac{1}{h_d} \right) \Delta h} \\ &= \sqrt{\frac{g}{2} \left(\frac{1}{h_u} + \frac{1}{h_u + \Delta h} \right) \Delta h} \end{aligned} \quad (10)$$

由(10)式可见,涌潮高度相同情况下,涌潮前水深越小,涌潮后流速越大。

图7为盐官断面主槽处 $F_r = \frac{u_d}{\sqrt{gh_d}}$ 随时间变化过程,图7反映了水流从缓流到急流,又从急流到缓流的变化过程。显然,流态变化也不同于恒定流。

3.2.5 涌潮形态及潮景 据分析,波状涌潮的色散作用较大,在控制方程中需增加色散项才能模拟^[6]。另外,波状涌潮的波长较短,一般只有数米至数十米,要求网格尺寸达到米量级才能模拟。因此,本文仅模拟强涌潮的传播过程。涌潮在传播过程中,由于受河床地形和河道边界的影响,形成了一系列变化多端的潮景。

“交叉潮”:在尖山河段分汊河势下,常常发育交叉潮。由于“交叉潮”涌潮高度较小,一般为1 m左右,而计算网格较粗(100 m左右),一般很难模拟实际观测到的两潮相碰的壮观景象。图8为两股涌潮相交的流速矢量图。

“一线潮”:涌潮向上游传播过程中,在盐官附近和仓前上游等河段常常可观测到“一线潮”,数值模型比较容易复演这一潮景,图9为盐官附近“一线潮”的水位等值线图。

“回头潮”:以老盐仓的“回头潮”最为著名。发生“回头潮”时,一般下层水流继续向前流动,而上层水流则作向后流动,上、下两层流向相反,是典型的三维流动,二维模型尽管不能模拟分层流现象,但还是能模拟水位变化过程。图10(a)为“回头潮”与向上游传播的涌潮发生人字形交叉时的水位等值线图,图10(b)为相应时刻的流速矢量图。

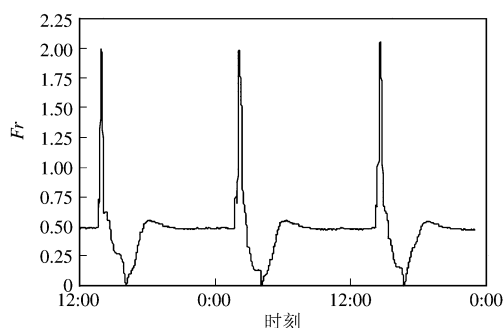


图7 盐官断面主槽处 Froude 数时间变化过程
Fig.7 Froude number evolution in the main channel of Yanguan section

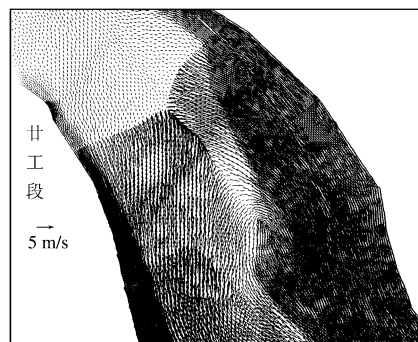


图8 两股涌潮相交时刻流速矢量图
Fig.8 Distribution of velocity vectors when two bores meet

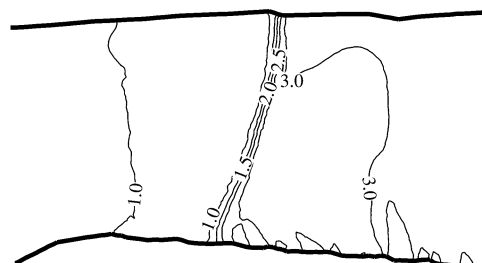
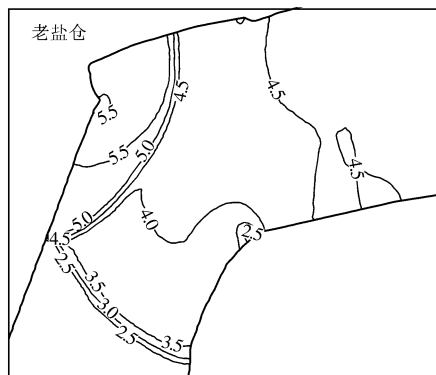
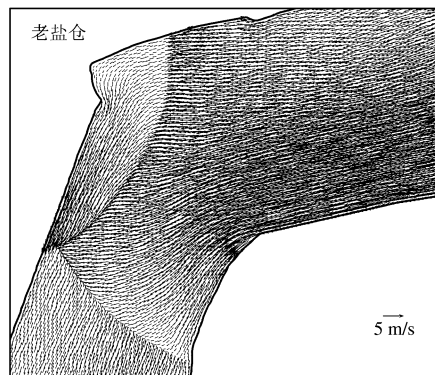


图9 盐官附近“一线潮”水位等值线图(单位:m)
Fig.9 Tidal level contour of thread-shape bore at Yanguan (unit:m)



(a) 水位等值线(单位:m)



(b) 流速矢量图

图10 老盐仓涌潮时刻水位等值线及流速矢量图

Fig.10 Tidal level contour and distribution of velocity vectors when the bore appears at Laoyancang

4 结 语

本文在钱塘江涌潮实测资料的基础上,分析了钱塘江涌潮特性,应用基于无结构三角形网格的二维涌潮数值模型模拟了钱塘江涌潮的形成、发展及其衰减的过程,复演了“交叉潮”、“一线潮”、“回头潮”等潮景,揭示了不同于一般河流的涌潮流速平面分布特点.通过对计算结果的分析,增加了对涌潮的认识,弥补了实测涌潮资料的不足.

参 考 文 献:

- [1] 韩曾萃,戴泽衡,李光炳,等. 钱塘江河口治理开发[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.
- [2] Sentinelles Petitcodiac Riverkeeper. The Petitcodiac River Tidal Bore 250 Years of Anecdotes[R]. 2001.
- [3] 林炳尧,黄世昌,毛献忠,等. 钱塘江河口潮波变化过程[J]. 水动力学研究与进展,2002(A辑),17(6):665-675.
- [4] 赵雪华. 几项主要因素对钱塘江涌潮形成和发展的影响[R]. 杭州:浙江省河口海岸研究所,1982.
- [5] 曾 剑,熊绍隆,潘存鸿,等. 运用神经网络理论研究钱塘江涌潮的影响因素[J]. 长江科学院院报,2006,23(5):14-16.
- [6] 林炳尧,黄世昌,潘存鸿. 涌波的基本性质[J]. 长江科学院院报,2003,20(6):12-14.
- [7] 周 胜,倪浩清,赵永明,等. 钱塘江水下防护工程研究与实践[J]. 水利学报,1992,(1):20-30.
- [8] 徐 昆,潘存鸿. 求解非平底一维浅水方程的KFVS格式[J]. 水动力学研究与进展,2002(A辑),17(2):140-147.
- [9] 潘存鸿,徐 昆. 三角形网格下求解二维浅水方程的KFVS格式[J]. 水利学报,2006,37(7):858-864.
- [10] 潘存鸿,林炳尧,毛献忠. 钱塘江涌潮二维数值模拟[J]. 海洋工程,2007,25(2):50-56.
- [11] 潘存鸿,林炳尧,毛献忠. 一维浅水流动方程的Godunov格式求解[J]. 水科学进展,2003,14(4):430-436.
- [12] Pan Cunhong, Dai Shiqiang, Chen Senmei. Numerical simulation for 2D shallow water equations by using Godunov-type scheme with unstructured mesh[J]. **Journal of Hydrodynamics**(Ser. B), 2006,18(4):475-480.
- [13] 潘存鸿,林炳尧,毛献忠. 浅水问题动边界数值模拟[J]. 水利水运工程学报,2004,(4):1-7.
- [14] Pan Cunhong, Lin Bingyao, Mao Xianzhong. Case study: numerical modeling of the tidal bore on the Qiantang River, China[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2007, 133(2):130-138.

《水利水运工程学报》编辑部召开编委会会议

2008年5月15日下午,新一届《水利水运工程学报》编委会会议在南京召开.本届编委会是一届开放的编委会,由分别来自清华大学、南京大学、东南大学、河海大学、南京工业大学和南京水利科学研究所的50位专家学者组成.32位编委参加了本次会议.会上张建云主编首先宣读了本届编委会主任、水利部胡四一副部长的来信.胡四一副部长在信中希望学报不断提高办刊水平,将《水利水运工程学报》真正办成水利、水电、水运科学技术交流的平台.编辑部副主任丁绿芳简要汇报了编辑部近一年来的工作以及近期的打算.与会编委就办刊方针和如何不断提高办刊水平、提高学报整体质量、提升学报影响因子和被引频次、争取早日成为EI收录期刊等议题,进行了广泛而热烈的讨论,提出了许多宝贵意见和建议.

与会编委认为:开放办刊的方针是正确的;学报应该在现有办刊基础上,不断拓宽思路,办出特色;编辑部要采取措施,加强交流,扩大稿源,严把质量关,把学报愈办愈好.

张建云主编代表学报编辑部对上一届编委会的工作给予充分肯定,并对各位编委长期以来对学报的关心和支持表示感谢.结合编委们提出的意见和建议,张建云主编对学报的定位、办刊目标提出了具体的意见,并对编辑部工作人员提出具体要求.会议明确了编委的权利与义务.

《水利水运工程学报》编辑部