

海上不同结构形式桩基对水流的影响

杨娟,王卫远,何倩倩,赵建春

(中国水电顾问集团华东勘测设计研究院有限公司,浙江 杭州 310014)

摘要:为了研究不同结构形式桩基对水流的影响规律,建立三维数值模型,采用直接模拟法将桩基作为不透水边界处理,利用三角形加密网格精确模拟桩基形状,计算分析不同结构形式桩基影响下水位和流速的变化。结果表明:桩基引起的水流变化主要表现为桩基上游水位壅高,下游水位跌落,在桩基两侧流速较大,上、下游流速较小;不同结构形式桩基的流速变化分布略有不同,三桩导管架基础对流速影响最大,其次为单桩基础,高桩承台基础影响最小;流速垂向变化由表至底呈增大趋势,水深越大,流速越大。

关键词:桩基;直接模拟法;垂向流速;风电场

中图分类号:TV131.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2014)01-0032-05

Effect of different structural forms of marine pile foundations on flow//YANG Juan, WANG Weiyan, HE Qianqian, ZHAO Jianchun(*Hydrochina Huadong Engineering Corporation, Hangzhou 310014, China*)

Abstract: In order to study the effect of different structural forms of marine pile foundations on flow, a three-dimensional numerical model for open channel flow influenced by pile foundations with different structural forms was built, considering the foundation as an impermeable area. The method of gradually refined triangular meshes was used to simulate the shape of pile foundations with high precision. Based on this model, the water level and velocity of water flow influenced by different structural forms of pile foundations were calculated. The results show that the water level increased upstream and dropped downstream. The flow velocity increased on both sides of the pile foundation and decreased both upstream and downstream. Different structural forms of the pile foundations caused different variations of flow velocity: the three-jacket foundation had the greatest impact, followed by the single-pile foundation, and the high-pile foundation had the least impact. The vertical distribution of the flow velocity showed an increasing trend from the surface to the bottom, and the flow velocity was higher at the lower level.

Key words: pile foundation; direct modeling method; vertical velocity; wind power field

海上风力发电可以利用丰富的风能资源,几乎不占土地,是无污染的、可再生的发电方式,具有良好的发展前景。在近海开敞海域布置发电机桩基础,势必会影响其周围海域的水流及泥沙条件,涉及结构的安全稳定,因此研究风机基础结构对水流的影响十分必要^[1-2]。可以采用物理模型和数值模拟方法研究风机基础对水流影响,对于大尺度的流场模拟,从经济和技术角度考虑,数值模拟具有较好的实用性。

近年来,王庆珍等^[3-4]采用VOF方法分析了桥墩附近的水流结构,指出桥墩附近床面的剪应力分布规律与流速分布相似;何国建等^[5]利用标准的 $k-\varepsilon$ 紊流模型求解N-S方程,得到受桥墩群影响的弯曲河道三维流场,分析了桥墩群对河道水流与水位的

影响;邓绍云等^[6-11]通过二维水流数值计算分析,讨论了数值计算中桥墩的概化,分析了桥墩对桥区水位、流速和流场的影响特性。

在以往的数值计算中,桩基对水流影响的数值模拟方法可分为间接模拟法和直接模拟法。间接模拟法是基于对桩基阻力特性的研究:一是可以通过经验公式或由实测数据推导的公式估算桩基修建后局部阻力的增加值,通过局部加糙方法进行计算;二是通过估算建筑物占用的过水面积,修正局部地形使过水面积与桩基修建后的过水面积相等;三是结合以上2种方法,以局部加糙和修正地形相叠加的方法进行计算。间接模拟法的不足之处在于不能描述桩基的真实形态,不能准确模拟桩基形状对水流的影响,从而无法给出桩基附近的水流条件^[12-13]。

以往对桥墩造成的水动力变化的研究较多,本文通过建立数值模型研究不同结构形式的桩基对水流的影响规律,采用直接模拟的方法将桩基作不透水处理,采用三角形网格精确模拟桩基形状。基于国内外海上、滩涂区风电场的建设经验及国内海洋工程、港口工程的施工能力,拟定3种代表性的桩基方案(图1)进行分析比较,研究不同结构形式的桩基对水流的影响。

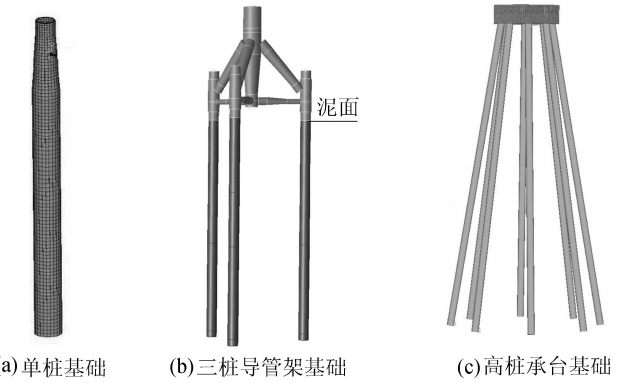


图1 桩基结构示意图

1 数值模型

1.1 基本方程

采用较为成熟的浅海三维水动力学模型,该模式是基于三维原始方程组、无结构网格下有限体积的模型,嵌套了一个2.5阶湍流闭合模型,提供垂向湍流黏滞和扩散系数;垂向采用 σ 坐标变换模拟不规则地形,使垂向沿水深的分布更趋于合理。连续方程采用不可压缩形式,在 σ 坐标系中模型控制方程组^[14]如下:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Hu}{\partial x} + \frac{\partial Hv}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Hu}{\partial t} + \frac{\partial Hu^2}{\partial x} + \frac{\partial Huv}{\partial y} + \frac{\partial u\omega}{\partial \sigma} =$$

$$fHv - gH \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(2A_M H \frac{\partial u}{\partial x} \right) +$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[A_M H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_M}{H} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) \quad (2)$$

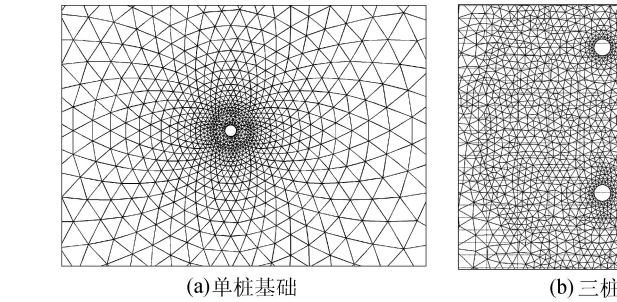


图3 桩基局部网格示意图

$$\begin{aligned} & \frac{\partial Hv}{\partial t} + \frac{\partial Hv^2}{\partial y} + \frac{\partial Huv}{\partial x} + \frac{\partial v\omega}{\partial \sigma} = \\ & fu - gH \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left(2A_M H \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial x} \left[A_M H \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_M}{H} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: t 为时间; x,y 为右手笛卡儿坐标; η 为水位; H 为水深; u,v,ω 分别为流速在 x,y,σ 方向上的分量; A_M 和 K_M 分别为水平和垂向紊动黏性系数。

1.2 求解方法

采用有限体积法对方程组进行数值离散,其实是逐单元进行水量、动量平衡,物理意义清晰、准确,使质量、动量和能量具有很好的守恒性,能够处理含间断或陡梯度的流动。采用任意三角形或者四边形网格剖分和网格中心格式,即将流动变量定义在单元形心,且控制体与单元本身重合^[15-17]。

1.3 水槽模型和网格形式

建立矩形断面水槽模型,水槽长2 800 m,宽1 200 m,槽底纵比降0.01%。模型的单桩基础的桩基直径为6.2 m,三桩导管架基础的3根桩沿直径为27 m的圆周均匀分布,桩直径为2.7 m,中间导管架直径为4.5 m;高桩承台基础的8根桩在承台底部沿10.0 m直径的圆周均匀分布,桩直径均为1.6 m。在整个模型范围内单桩基础、三桩导管架基础及高桩承台基础的网格节点分别为3 689、5 576、5 757,单元总数分别为7 151、10 870、11 231,其中最大单元尺寸均为55 m,最小单元尺寸分别为0.97 m、0.42 m、0.50 m,模型整体网格如图2所示,桩基局部网格如图3所示,各结构形式桩基所占水域面积和过水断面面积及相应等效直径计算结果见表1。计算中模型水

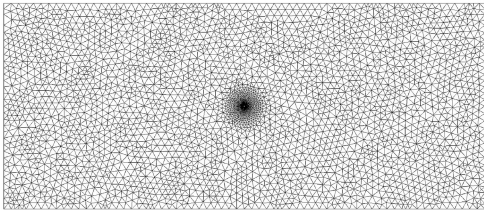


图2 模型整体网格示意图

深由表至底垂向分为10层:0.025H、0.1H、0.2H、0.3H、0.5H、0.7H、0.8H、0.9H、0.975H、1.0H。

表 1 3 种结构形式桩基等效直径计算结果

结构形式	占水域 面积/m ²	占过水断面 面积/m ²	等效直径/m
单桩基础	30.19	74.4	6.2
三桩导管架基础	33.08	118.8	6.5
高桩承台基础	16.08	76.8	4.5

1.4 计算参数

为了便于分析水位、流速的变化规律,设定工程建设前流态为均匀流,流速 $v=2.0\text{ m/s}$,由谢才公式计算求得正常水深 $h=12.0\text{ m}$, 水位 0.0 m , 流量 $Q=28\,800\text{ m}^3/\text{s}$,并分别设置为下游和上游边界条件,相应的弗劳德数 $Fr=0.18$,属于缓流^[18]。计算时采用非恒定方法逼近恒定流,时间步长 $\Delta t=3\text{ h}$ 。由于研究的重点不在于边界层,故计算中两侧陆地采用滑移边界。

在三维水流计算中,水流的阻力主要是综合考虑河床的糙度、水流强度和断面形态,本次计算中河床的糙度通过糙率的换算得出^[18],当曼宁系数 $n=0.025$ 时,河床的糙度 $K_s=0.065$ 。垂向紊动黏性系数对水平流速的大小和垂向分布影响较大,本文采用 $k-\varepsilon$ 紊流模型确定,该模型广泛应用于矩形水槽风生环流和明渠恒定流计算^[19]。根据文献[20]中对单个圆墩壅水的验证研究,水平紊动黏性系数采用 Smagorinsky^[21]提出的亚格子紊流模型计算:

$$E_{ij} = \rho C_s^2 A \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2} \tag{4}$$

式中: E_{ij} 为水平紊动黏性系数(i,j 分别为 x,y 方向的计算网格编号); C_s 为经验系数,按文献[21]取 0.11 ; A 为网格面积。

1.5 模型验证

经计算,设计流量时相应的流速为 2 m/s ,水深为 12.0 m ,计算结果与谢才公式的计算结果一致,说明本数值模型能够准确地模拟水槽模型。本文选用指数律来验证垂向流速的准确性,即

$$v = v_0 \left(\frac{z}{H} \right)^m \tag{5}$$

式中: v 为分层流速; v_0 为表面流速; z 为水面与海床的距离; m 为系数,取 $1/6$ 。

垂向流速的模型计算值与指数律解析解的对比如图4所示。可以看出,本数值模型较好地模拟了明渠水流的垂向流速分布。

2 不同结构形式桩基对水流的影响

本文主要研究水流的平面变化分布规律,在水槽内取纵断面对水位和流速的变化进行分析,纵断

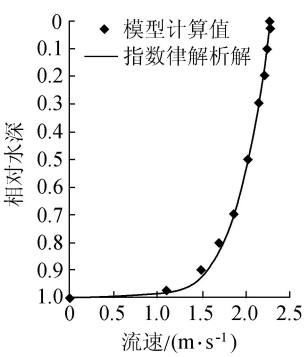


图 4 垂向流速的模型计算值与指数律解析解

面经过研究水槽中心线。将工程建设后的水位、流速与工程建设前的相减,分别得到水位、流速变化的平面分布及沿程变化,见图5~8。

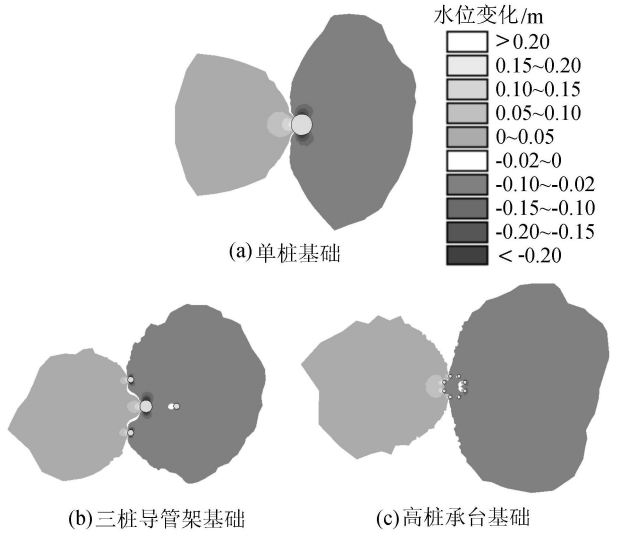


图 5 水位变化的平面分布

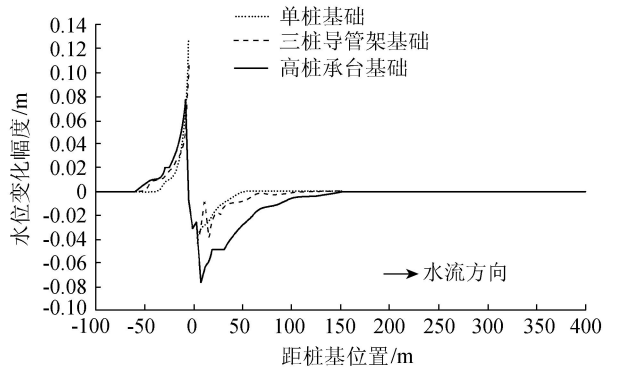


图 6 纵断面的水位沿程变化

2.1 对水位的影响

从图5可以看出:受3种形式桩基阻流影响,在桩基上游,水位抬高从而势能增加,桩基处水位达到最高,单桩基础、三桩导管架基础和高桩承台基础的水位抬高最大值分别为 0.17 m 、 0.18 m 、 0.24 m ;在桩基下游,由于水流在桩基分离,桩基后水量减少,从而下游形成跌水,跌水值也在桩基处最大,单桩基础、三桩导管架基础和高桩承台基础的水位跌水最

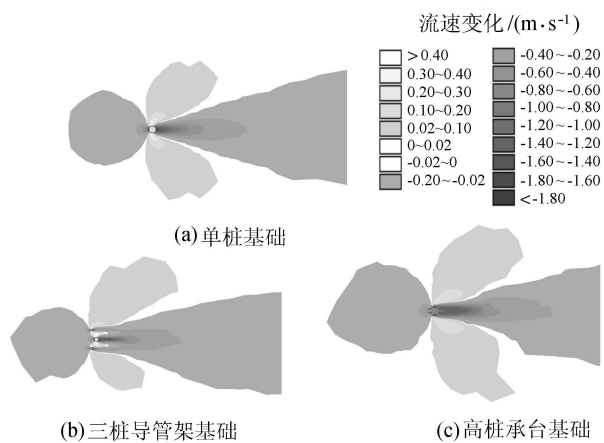


图7 断面平均流速变化的平面分布

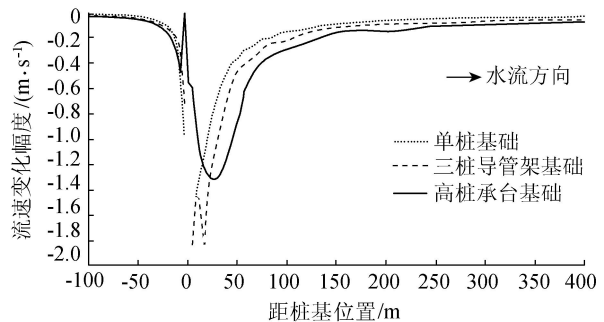


图8 纵断面的断面平均流速沿程变化

大值分别为-0.26 m、-0.36 m、-0.20 m。

从图6可以看出,3种形式桩基的上游水位抬高,然后壅水值向上游迅速回落,至桩基上游30 m处水位变化已经基本降至0.02 m,此后壅水值以缓慢的速度向上游继续减小,至桩基上游60 m处水位变化基本降至0.00 m;跌水值在桩基处最大,向下游跌水值逐渐减小直至消失,至桩基下游160 m处水位变化降至0.01 m。单桩基础、三桩导管架基础所影响的水域面积相似,壅水值和跌水值及其范围相似。高桩承台基础虽然占用水域面积较小,但是8根钢管桩在承台底部沿10.0 m直径的圆周均匀分布,桩群作用明显,对水位的影响范围最大。

2.2 对流速的影响

从图7可以看出:①受3种形式桩基阻流影响,断面平均流速变化的平面分布整体相似。桩基上、下游流速较小,在桩基处流速最小;桩基两侧流速较

大,在桩基两侧约70°圆心角位置达到最大,3种桩基的断面平均流速最大值分别为0.45 m/s、0.87 m/s、0.26 m/s。②桩基形式不同,对流速的影响也不同。三桩导管架基础的中间导管架与其他两根导管架基础之间流速较大,最大值为0.87 m/s。高桩承台基础方的桩群作用明显,其流速变化分布整体与单桩基础相似,均为桩基上、下游流速较小,两侧流速较大,但高桩承台基础的流速增加值要小于单桩基础,但影响范围却相反。

从图8可以看出,3种形式桩基的上游流速减小幅度小于下游,桩基上游20 m附近流速减小幅度为0.1 m/s,然后减幅变缓;桩基上游120 m附近流速减小幅度为0.01 m/s;桩基下游150 m附近流速减小幅度为0.1 m/s,然后减幅变缓。

3种结构形式桩基影响下垂向流速变化的平面分布与断面平均流速相似,本文不再赘述,流速垂向变化情况见表2。可以看出:①三桩导管架基础对流速影响最大,其次为单桩基础,高桩承台基础影响最小。虽然三桩导管架基础与单桩基础所占水域面积相似,但是对流速的影响却几乎相差1倍,主要是桩基占水槽过水断面面积较大,其对流速的影响较大。相反,虽然高桩承台基础占水槽过水断面面积与单桩结构几乎相同,但占过水面积较小,考虑桩群影响,流速影响反而较小。②流速垂向变化由表至底呈增大的趋势,水深越大,流速越大。

3 结 论

- a. 应用三维水动力数值模型研究不同结构形式桩基影响下水流的变化规律,通过验证计算,模型能够较好地模拟明渠水流的垂向流速分布。
- b. 3种结构形式桩基影响下水位变化的平面分布较为相似,主要表现为桩基上游水位抬高,下游水位跌落;高桩承台基础对水位的影响最小,但由于群桩作用明显,对水位的影响范围较大。
- c. 3种结构形式桩基影响下流速变化的平面分布较为相似,主要表现为桩基前后流速较小,桩基两侧流速较大;三桩导管架基础导管架之间流速增加,高桩承台基础8根桩墩间没有出现流速增加现象,

表2 3种结构形式桩基影响下流速垂向变化

位置	无桩基 流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	单桩基础		三桩导管架基础				高桩承台基础	
				导管架之间		导管架两侧			
		流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	变化率/%	流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	变化率/%	流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	变化率/%	流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	变化率/%
表层(0.025H)	2.28	2.64	15.8	3.02	32.5	2.98	30.7	2.44	7.0
中层(0.5H)	2.15	2.45	14.0	2.96	37.7	2.94	36.7	2.42	12.6
底层(0.975H)	1.11	1.86	67.6	2.42	118.0	2.35	111.7	1.76	58.6
断面平均水深处	2.00	2.45	22.5	2.87	43.5	2.82	41.0	2.26	13.0

整体作用明显。

d. 3 种结构形式桩基影响下流速垂向变化由表至底呈增加趋势,三桩导管架基础对流速影响最大,其次为单桩基础,高桩承台基础影响最小。

e. 3 种结构形式桩基对上游的壅水影响距离桩基约 30 m,对下游的减水影响距离桩基约 160 m。

参考文献:

- [1] 王晓姝. 上海近海风电场桩群对潮流影响数值研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [2] 阳磊. 潮间带风电场水动力及泥沙冲刷数值模拟[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [3] 王庆珍, 李田生, 官盛飞. 圆柱形桥墩附近三维流场分析[J]. 公路交通技术, 2008, 4(2): 47-54. (WANG Qingzhen, LI Tiansheng, GUAN Shengfei. Analysis of three dimensional stream fields around columnar piers[J]. Technology of Highway and Transport, 2008, 4(2): 47: 54. (in Chinese))
- [4] 凌建明, 林小平, 赵鸿铎. 圆柱形桥墩附近三维流场及河床局部冲刷分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007, 35(5): 582-585. (LING Jianming, LIN Xiaoping, ZHAO Hongduo. Analysis of three-dimensional flow field and local scour of riverbed around cylindrical pier[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(5): 582-585. (in Chinese))
- [5] 何国建, 方红卫, 府仁寿. 桥墩群对河道水流影响的三维数值分析[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2007, 22(3): 345-351. (HE Guojian, FANG Hongwei, FU Renshou. Three-dimensional numerical analyse on water flow affected by piers[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2007, 22(3): 345-351. (in Chinese))
- [6] 邓绍云. 桩柱水流绕流阻力特性及其计算[J]. 中国港湾建设, 2007(1): 14-21. (DENG Shaoyun. Drag force characteristics and calculation of water flow around pile[J]. China Harbor Engineering, 2007(1): 14-21. (in Chinese))
- [7] 邓绍云. 桩基绕流阻力特性研究现状与展望[J]. 水运工程, 2006, 9(9): 10-14. (DENG Shaoyun. Current situation and prospect of study on drag force characteristics of piles[J]. Port & Waterway Engineering, 2006, 9(9): 10-14. (in Chinese))
- [8] 曹民雄, 甘小荣. 潮汐河段桥墩对水流影响的数值计算与分析[J]. 人民长江, 2006, 36(4): 81-84. (CAO Minxiong, GAN Xiaorong. Numerical modeling of the flow field under the impact of bridge piers in tidal river[J]. Yangtze River, 2006, 36(4): 81-84. (in Chinese))
- [9] 吕宏, 吴飞. 高桩码头对河道流场影响数值模拟方法研究现状与展望[J]. 吉林水利, 2008(7): 4-7. (LU Hong, WU Fei. The present status and prospects for the numerical simulation of the watercourse flow field impacted by high pile marina[J]. Jilin Water Conservancy, 2008(7): 4-7. (in Chinese))
- [10] 李光炽, 周晶晏, 张贵寿. 高桩码头对河道流场影响的数值模拟[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2004, 32(2): 216-220. (LI Guangzhi, ZHOU Jingyan, ZHANG Guishou. Numerical simulation of river flow patterns affected by standing pile wharf[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2004, 32(2): 216-220. (in Chinese))
- [11] 何杰, 辛文杰, 贾雨少. 港珠澳大桥对珠江口水域水动力影响的数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2012(2): 84-90. (HE Jie, XIN Wenjie, JIA Yushao. Numerical simulation of hydrodynamic impact of Hongkong Zhuhai Macao Bridge on Pearl River estuary[J]. Hydro-Science and Engineering, 2012(2): 84-90. (in Chinese))
- [12] 解鸣晓, 张玮, 谢慧姣. 桩群数值模拟中的概化方法研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2008, 23(4): 464-471. (XIE Mingxiao, ZHANG Wei, XIE Huijiao. Simplification method in numerical modeling of bridge pier group[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2008, 23(4): 464-471. (in Chinese))
- [13] 余子牛. 平面二维数值模型与桥墩壅水问题的研究[M]. 北京: 清华大学, 1996.
- [14] 汪德懋. 计算水力学理论与应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 1989.
- [15] 李凤蔚, 鄂秦. 有限体积法的分析与改进[J]. 空气动力学报, 1997, 12(4): 465-470. (LI Fengwei. Analysing and improving of the finite volume scheme[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 1997, 12(4): 465-470. (in Chinese))
- [16] 包中进, 汪德懋. 有限体积法数学模型在开潭水利枢纽工程中的应用[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2004, 32(5): 565-568. (BAO Zhongjin, WANG Deguan. Application of finite volume model to Kaitan hydraulic complex[J]. Journal of Hehai University: Natural Sciences, 2004, 32(5): 565-568. (in Chinese))
- [17] LI Y S, ZHAN J M. An efficient three-dimensional semi-implicit finite element scheme for simulation of free surface flows[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 1993(16): 187-198.
- [18] 李家兴, 赵振兴. 水力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 2001.
- [19] 张长高. 论 Chezy 公式和 Chezy 系数[J]. 水利水电科技进展, 1993, 13(2): 51-58. (ZHANG Changgao. Study of Chezy formula and Chezy coefficient[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 1993, 13(2): 51-58. (in Chinese))
- [20] 张玮, 解鸣晓. 桩墩壅水数值计算方法[J]. 水利水电科技进展, 2008, 28(5): 8-12. (ZHANG Wei, XIE Mingxiao. Numerical modeling and verification of backwater effects caused by bridgepiers[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(5): 8-12. (in Chinese))
- [21] SMAGORINSKY J S. General circulation experiments with the primitive equations- I, the basic experiment[J]. Monthly Weather Review, 1963, 91: 99-164.

(收稿日期: 2013-01-20 编辑: 周红梅)