

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2012.06.010

复杂嵌套网格模型及其 在三河闸大修工况泄流流态模拟中的应用

黄章羽¹,马晓忠²,王玲玲³,张友明²,成高峰⁴,胡孜军³

(1. 江苏省水利厅,江苏 南京 210029; 2. 江苏省洪泽湖水利工程管理处,江苏 洪泽 223100;
3. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098; 4. 中南勘测设计研究院,湖南 长沙 410014)

摘要: 针对三河闸启闭系统更新及土建附属工程实施时 63 扇闸门半侧开启泄流、半侧关闭更换启闭机的方案,构建三河闸枢纽泄流数学模型,采用结构网格疏密嵌套及 2D-3D 同步嵌套方法对计算区域进行离散。计算结果表明:(a)大修方案将使枢纽上下游产生大范围的回流区,局部单宽流量增大;(b)枢纽上游快活岭对过闸水流流态有重要影响;(c)与闸门全开工况相比,半开工况入闸水流存在明显偏流,北侧泄流时平均入流偏角最大,达到 27.35°。根据数值模拟结果提出改善入闸水流流态的建议,为三河闸大修时水闸的调度、运行和管理提供参考。

关键词: 三河闸;半侧开启泄流;复杂嵌套网格;偏流;泄流流态数值模拟

中图分类号:TV698.1⁺61 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2012)06-0653-06

Application of a nested grid hydrodynamic model to discharge pattern simulation overhaul conditions of Sanhe Sluice

HUANG Zhangyu¹, MA Xiaozhong², WANG Lingling³, ZHANG Youming², CHENG Gaofeng⁴, HU Zijun³
(1. Jiangsu Water Resources Department, Nanjing 210029, China;
2. Water Conservancy Project Management Office of Hongze Lake of Jiangsu Province, Hongze, 223100, China;
3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
4. HydroChina Zhongnan Engineering Corporation, Changsha 410014, China)

Abstract: When the Sanhe Sluice's overhaul project was conducted, 63 half-open gates were operated for the purpose of simultaneously discharging water and replacing hoists. A 2D-3D coupled model was put forward and the local nested grid method was employed to simulate the flow patterns of the Sanhe Sluice. The results show the following: (a) In this overhaul situation, there is a wide range of recirculation zones in both the upstream and downstream reaches, and the discharge per unit width increases locally. (b) The Kuaihuo Ridge upstream has a significant influence on the inflow pattern. (c) The flow deflection is more severe with half-open gates than with fully opened gates, and the maximum average deflection angle is 27.35° for the northern discharging case. Based on the numerical simulation results, we make some recommendations for improving the flow pattern, which can provide references for operation and management of the Sanhe Sluice in the overhaul project.

Key words: Sanhe Sluice; half-open gate for discharge; complex nested grid; deflecting flow; numerical simulation of discharge pattern

三河闸工程位于洪泽湖的东南角,是入江水道的控制口门,全闸共 63 扇孔闸门,是江苏省及淮河流域最大的水利枢纽工程。由于闸前进水流道近乎以直角左转,水流呈弯道水流特性,入闸水流条件先天不足,又因上游左岸有快活岭近乎垂直伸入湖区(见图 1),显著加大了入闸泓道的曲率,所以三河闸运行近 60 a 来一直存在泄洪偏流问题,具体表现为河岸及近岸河床的冲刷,同时入闸水流存在明显横向比降。目前,三河闸

面临启闭系统更新及土建附属工程实施问题,枢纽拟在非汛期采用半侧开启泄流、半侧关闭更换启闭机的方案,该方案可能会产生更加不利甚至危及枢纽安全的水力现象。因此,研究大修工况三河闸闸址附近区域的水流特性具有重要意义。

地形及边界形状复杂的河道工程水力学问题的数值模拟,可采用非结构网格局部加密的离散方法来提高网格对区域形状的适应性^[14],但其求解过程收敛速度慢,计算效率相对较低,且难以实现二、三维同步耦合^[5]。结构网格具有正交性好、便于嵌套等优点^[6],于福江等^[7]采用二维疏密嵌套网格模拟了东海风暴潮过程,王玲玲等^[8]利用二、三维嵌套技术模拟了三峡导流明渠通航流场。现有嵌套方法均通过边界数据传输,对嵌套区域实行独立数值模拟,小范围内嵌套区域的模拟精度在很大程度上依赖于大范围模型的模拟精度。笔者在嵌套技术数值模拟方法基础上,同步采用疏密嵌套和二、三维嵌套,对三河闸大范围入流湖区二维与水流过闸近区三维流场进行全耦合、高精度模拟,并利用该模型研究三河闸在启闭系统更新及土建附属工程实施时,半侧闸门开启泄洪情况下闸址附近水域的水流特性,为三河闸加固期泄洪管理、决策、安全评估提供依据。

1 模型建立与验证

1.1 基本方程与定解条件

正交曲线坐标系下的层化模型水流运动控制方程组如下:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{g_{\xi\xi}}\sqrt{g_{\eta\eta}}} \left\{ \frac{\partial(Hu\sqrt{g_{\eta\eta}})}{\partial \xi} + \frac{\partial(Hv\sqrt{g_{\xi\xi}})}{\partial \eta} \right\} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0 \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{g_{\xi\xi}}} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{g_{\eta\eta}}} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{uv}{\sqrt{g_{\xi\xi}}\sqrt{g_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{g_{\xi\xi}}}{\partial \eta} - \frac{v^2}{\sqrt{g_{\xi\xi}}\sqrt{g_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{g_{\eta\eta}}}{\partial \xi} + \frac{\omega}{H} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - f_v = \\ - \frac{g}{\sqrt{g_{\xi\xi}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} + F_\xi + \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\gamma_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{\sqrt{g_{\xi\xi}}} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{\sqrt{g_{\eta\eta}}} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{uv}{\sqrt{g_{\xi\xi}}\sqrt{g_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{g_{\eta\eta}}}{\partial \xi} - \frac{u^2}{\sqrt{g_{\xi\xi}}\sqrt{g_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{g_{\xi\xi}}}{\partial \eta} + \frac{\omega}{H} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + f_u = \\ - \frac{g}{\sqrt{g_{\eta\eta}}} \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} + F_\eta + \frac{1}{H^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\gamma_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) \end{aligned} \tag{3}$$

其中

$$H = d + \zeta$$
$$F_\xi = \gamma_H \left(\frac{1}{\sqrt{g_{\xi\xi}}\sqrt{g_{\xi\xi}}} \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\sqrt{g_{\eta\eta}}\sqrt{g_{\eta\eta}}} \frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2} \right) \quad F_\eta = \gamma_H \left(\frac{1}{\sqrt{g_{\xi\xi}}\sqrt{g_{\xi\xi}}} \frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} + \frac{1}{\sqrt{g_{\eta\eta}}\sqrt{g_{\eta\eta}}} \frac{\partial^2 v}{\partial \eta^2} \right)$$

式中: u, v, ω —— ξ, η, σ 方向的流速; $\sqrt{g_{\xi\xi}}, \sqrt{g_{\eta\eta}}$ ——坐标变换拉梅系数; d ——参照面以下水深; ζ ——相对于参照面水深; f ——柯氏力系数; ρ ——水体密度; γ_v, γ_H ——垂向及水平向涡黏性系数。根据文献[9],在浅水流动条件下, γ_H 远大于 γ_v ,可采用紊流模型求取或可分别取为 $1 \text{ m}^2/\text{s}$ 和 $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

物理域中的垂向速度 w 由式(4)计算得

$$w = \omega + \frac{1}{\sqrt{g_{\xi\xi}}\sqrt{g_{\eta\eta}}} \left[u\sqrt{g_{\eta\eta}} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial \xi} + \frac{\partial \zeta}{\partial \xi} \right) + v\sqrt{g_{\xi\xi}} \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial \eta} + \frac{\partial \zeta}{\partial \eta} \right) \right] + \left(\sigma \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} \right) \tag{4}$$

控制方程组(1),(2),(3)的定解条件为

$$\omega \Big|_{\sigma=0} = 0 \quad \omega \Big|_{\sigma=-1} = 0 \quad \frac{\gamma_H}{H} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=-1} = \frac{1}{\rho} \tau_{b\xi} \quad \frac{\gamma_H}{H} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \Big|_{\sigma=-1} = \frac{1}{\rho} \tau_{b\eta}$$

式中: $\tau_{b\xi}, \tau_{b\eta}$ 为底部切应力在 ξ, η 方向上的分量。对于三维流动,底部切应力可用类似二维模型的阻力平方公式:

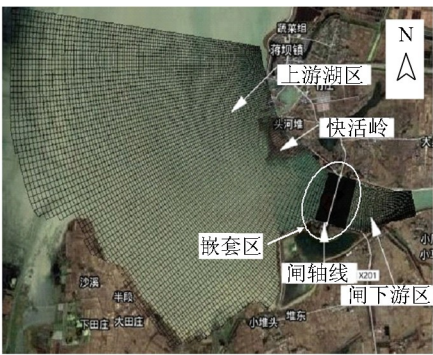


图1 计算区域网格剖分示意图
Fig. 1 Schematic map of grid generation of computational domain

$$\tau_b = \frac{\rho g u_b |u_b|}{C_{3D}^2}$$

(5)

式中： C_{3D} ——三维计算中的谢才系数； $|u_b|$ ——床底近壁水平速度大小，可按壁函数理论求得。

在速度对数分布规律及床面粗糙高度远小于实际水深情况下^[6]

$$C_{3D} \approx \frac{\sqrt[6]{H}}{n} + \frac{\sqrt{g}}{\kappa} \ln\left(\frac{\Delta z_b}{2H}\right)$$

(6)

式中： n ——水深平均流速二维模型糙率； κ ——卡门系数； Δz_b ——距床面最近的网格中心点至床面的距离。

表面边界上： $\left.\frac{\partial u}{\partial \sigma}\right|_{\sigma=0} = \left.\frac{\partial v}{\partial \sigma}\right|_{\sigma=0} = 0$ 。出、入流边界上，分别给定流量与水位。

水深平均流速二维模型见文献[8]。

1.2 计算区域网格剖分及边界条件

计算区域自闸址上游 3 800 m 湖区至下游 1 400 m 入江水道。闸室近区局部加密网格，上游湖区和闸址下游区域以 1 : 9 的比率与闸室近区加密网格嵌套，垂向分 15 层，其平面图如图 2(a) 所示。上游湖区网格步长在 10 ~ 90 m 之间，中间闸室段网格步长在 0.8 ~ 7 m 之间，下游区网格步长在 8 ~ 50 m 之间，总网格数达 41 579 个。图 2(b) 为嵌套概化图，其中 a, c 节点以二维模型离散， b, d 节点将二维水深平均流速以垂向抛物线分布进行三维处理， e, f 节点的水动力要素通过 b, d 节点插值获得，三维区域内节点以三维模型离散，所有节点离散方程同步求解。

模型上游（蒋坝镇）边界条件为给定水位，下游（众渡站）边界条件为给定流量，采用 Leendertse 交替方向隐式方法求解^[10]。文献[11-12]给出了利用上述三维模型研究三河闸进流纠偏及闸下出流三维流动特性的成果。

1.3 模型验证

采用 2010 年 7 月实测洪泽湖地形进行数值模拟，闸前入流水道地形如图 3 所示。

利用三河闸管理处 2010 年 7 月实测断面流速水位资料对模型参数进行率定，并进行参数敏感性分析，二维模型糙率取为 0.02。图 4(a) 为闸上游 1 000 m 处断面水深平均流速分布；图 4(b) 为闸下游 1 000 m 处断面水深平均流速分布。图 4 表明复杂嵌套网格模型对上游和下游的水深平均流速分布均有较好的模拟效果。该测流工况下，闸上游 228 m 和下游 1 300 m 左岸观测点水位计算值与实测值误差分别仅为 0.007 m 和 0.005 m，计算水位值与实测值吻合极好，表明模型具有较高的计算精度。

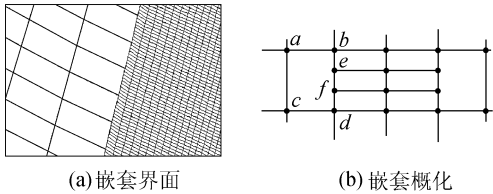


图2 嵌套网格示意图
Fig. 2 Flow chart of nested grid model

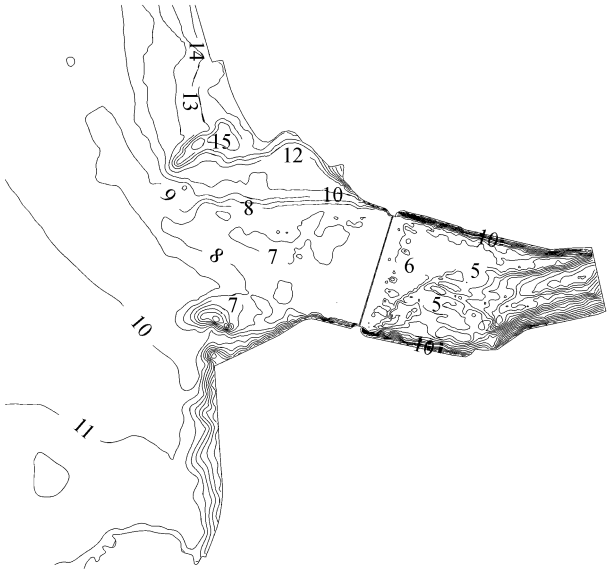


图3 实测地形等高线(单位:m)
Fig. 3 Contour of observed topography (units: m)

2 三河闸大修工况模拟结果及分析

针对三河闸大修、闸门半侧开启运行情况，选取过闸流量 4 000 m³/s，对应上游蒋坝镇水位 13.4 m，对比分析南侧闸门和北侧闸门分别开启泄流时过闸水流特性。

2.1 流场对比分析

图 5 为北侧闸门和南侧闸门分别开启泄流时全域流速矢量图(图中近闸区域矢量图已进行稀疏处理)。由图 5(a) 可知，北侧闸门开启泄流时，由于快活岭和关闭的南侧闸门产生的阻流作用，过闸水流流线弯曲曲率显著增加，使入闸水流向左岸严重偏斜，水流以较大的角度冲击闸室和下游左岸翼墙；枢纽上、下游均产生

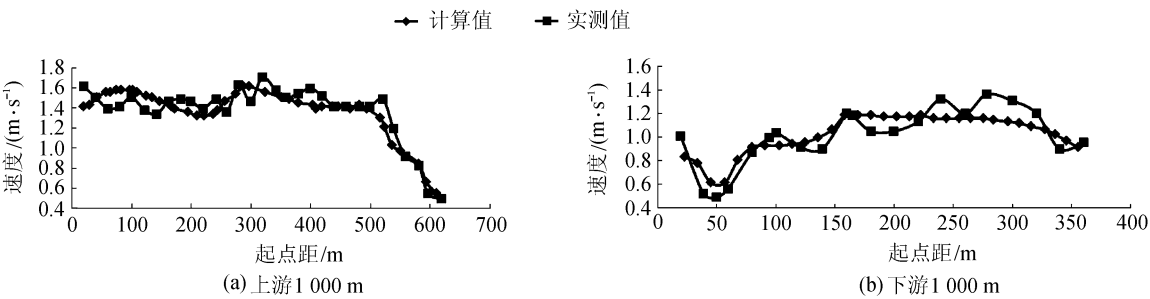


图4 不同断面水深平均流速分布对比

Fig. 4 Comparison of average flow velocity distribution at different cross sections

明显的回流区,上游回流区位于快活岭下方,由于受右侧水体推挤,范围较小,下游回流区形状狭长,其中心贴近右岸,距离闸门约1000 m。图5(b)显示南侧闸门开启泄流时,主流始终沿右岸下行,整体过闸主流走势较北侧半开稍平顺,入闸水流偏角和流速不均匀程度有所减小;枢纽上、下游沿左岸均有明显回流区产生,上游回流区较北侧过流增大,下游回流区中心距离闸门约800 m;由于闸下游主流受河势改变的影响,在下游约1400 m处向左岸折冲,逐步形成全断面过流态势。

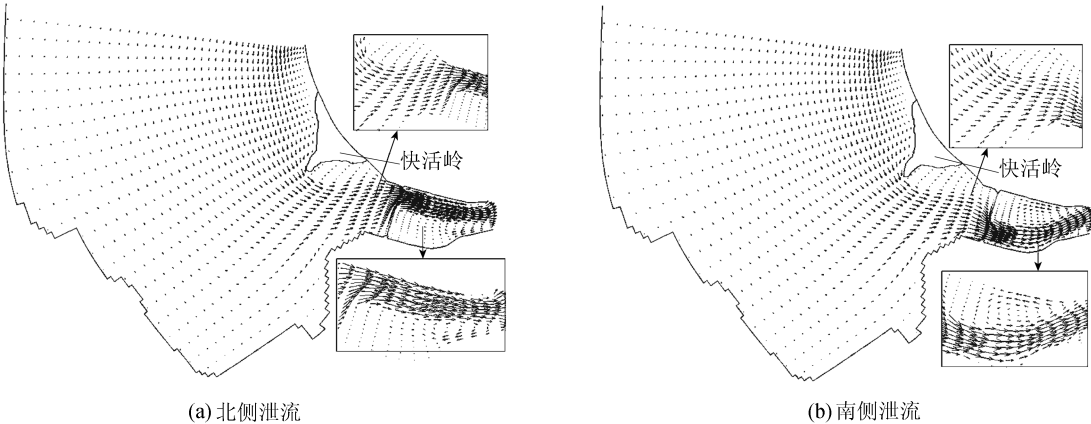


图5 北侧和南侧泄流全域流速矢量图

Fig. 5 Vector graph of flow velocity field when northern and southern gates are opened

图6为南侧泄流时距左岸200 m处截面流速矢量图。由图6可知,该截面处闸门完全关闭,上游近闸水流呈向底环流的趋势,而闸下游截面处于左岸回流区,整体流向指向向闸门。图6显示近闸水流具有显著的三维流动特征。

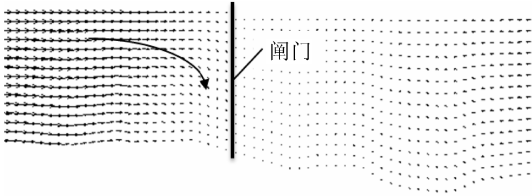


图6 闸室段沿水深方向流速矢量图

Fig. 6 Vector graph of flow velocity field in vertical plane

图7为北侧和南侧泄流工况下闸址附近的水位等值线。结果显示北侧泄流时闸前最低水位约为13.0 m,水体过闸后水位显著降低;而南侧泄流时,闸下水位普遍高于北侧泄流工况下的水位。枢纽下游岸线左折处形成水流顶冲,顶冲点附近出现13.02 m的高水位值,下边界水位比北侧泄流工况时高6.0 cm。表明北侧半开,下游泄流通道顺畅;而南侧半开因河势原因,下游显示出壅水特征。

根据以上成果可以预测:(a)由于入闸水流存在偏角,水流过闸后无明显横向扩散,这将显著降低水闸的泄洪能力;(b)上下游大范围的回流区,使主流局部单宽流量增大,可能加重岸坡冲刷;(c)南侧泄流时受下游河势影响,造成水流下泄不畅、水位壅高、流速降低,泄流能力比北侧泄流时弱;(d)水流在下游右岸顶冲点折向左岸,还将可能出现较强的两岸对应位置的岸坡冲刷。

2.2 闸前典型断面水动力指标

为定量分析三河闸大修时半侧闸门开启泄流时的水流流态,选取闸前40 m处过流断面,计算该断面各节点的流速均值、流速相对枢纽轴线法向的偏角平均值和断面横向最大水位差,并与上游水位13.4 m、过闸

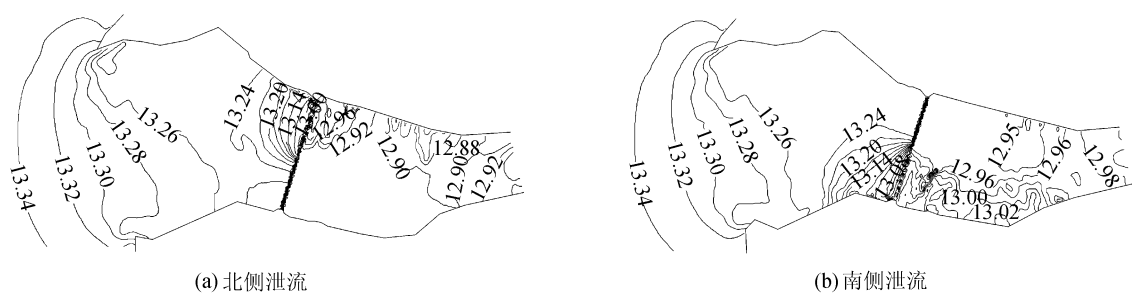


图7 北侧和南侧泄流闸址附近水位等值线(单位:m)
Fig. 7 Water level contours when northern and southern gate are opened (units: m)

流量 $8\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 工况的同类指标进行比较。在半开工况下,仅以泄流口门上游节点速度参数代入计算,节点流速均值 $\overline{|v|}$ 、偏角平均值 $\overline{|\theta|}$ 和断面最大水位差 Δh 分别按式(7),(8),(9)计算。

$$\overline{|v|} = \frac{\sum_{i=1}^m |v_i|}{m} \tag{7}$$

$$\overline{|\theta|} = \frac{\sum_{i=1}^m |\theta_i|}{m} \tag{8}$$

$$\Delta h = h_{\max} - h_{\min} \tag{9}$$

式中: v_i ——断面离散点流速; m ——断面参与计算的节点数; θ_i ——离散点流速与闸轴线法向夹角; $h_{\max}$, $h_{\min}$ ——断面最高和最低水位。

半开及全开对比工况计算结果见表1。由于南侧半开泄流时水流下泄不畅,典型断面平均流速小于北侧泄流工况。北侧泄流时偏流角度最大,达 27.353° ;南侧泄流时偏流角较北侧泄流时显著减小,但仍有 17.906° 。由于快活岭的存在,增加了北侧泄流水体入闸路线的曲率,使北侧过流断面最大水位差达到 0.241 m ,水位横向比降较南侧泄流时显著增加。可见,枢纽闸门半开泄流时,各偏流指标均将全面超过全断面过流工况。

3 结论与建议

a. 建立了三河闸枢纽上下游大范围复杂嵌套网格模型,同步实现疏密嵌套和二、三维嵌套,精细地模拟了三河闸大修工况的泄洪与过闸流态。通过与实际测流工况对比验证,表明所建立模型具有较高的模拟精度。

b. 以典型断面平均流速、平均偏流角度和横向最大水位差为指标定量表征三河闸大修时泄流偏流程度。分析表明,北侧泄流时入流偏角比南侧泄流时大,对闸室和下游翼墙等安全极为不利;南侧泄流时入闸水流偏角较北侧泄流时有所减小,但过闸水流受下游河势影响,可能发生主流折冲、下游水位壅高的现象,导致枢纽泄流能力降低;2种半开工况,水流过闸后均贴岸下行,可能造成对河床及岸坡较严重的冲刷。

c. 三河闸泄流整体流态表明,快活岭对过闸流态具有极为重要的影响,应对快活岭进行适当切滩,并结合导流建筑物等工程方案,从根本上解决三河闸的偏流问题。

参考文献:

[1] 蒋艳群,段雅丽,刘儒勋,等. 基于 MATLAB 的非结构网格生成器和浅水问题的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, 2009,24(4): 398-405. (JIANG Yanqun, DUAN Yali, LIU Ruxun, et al. An unstructured-mesh MATLAB generator and numerical simulation of shallow water problems[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics,2009,24(4):398-405. (in Chinese))

[2] 于守兵,王万战,余欣. 基于非结构网格的三维浅水模型[J]. 河海大学学报:自然科学版,2011,39(2):195-200. (YU

表1 典型断面偏流指标计算结果

Table 1 Calculation results of indices of deflecting flow at typical cross-sections

泄流方式	$\overline{ v }/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\overline{ \theta }/(^{\circ})$	$\Delta h/\text{m}$
全闸泄流	1.858	9.448	0.115
北侧泄流	2.061	27.353	0.241
南侧泄流	1.892	17.906	0.198

- Shoubing, WANG Wanzhan, YU Xin. 3-D shallow water model based on unstructured grids[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2011, 39(2): 195-200. (in Chinese))
- [3] 李静, 李丹, 姜伯乐. 带闸墩溢流坝控泄工况二维与三维数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(6): 10-13 (LI Jing, LI Dan, JIANG Bole. 2D and 3D numerical simulations of controlled discharging conditions of overflow dam with frusta[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(6): 10-13. (in Chinese))
- [4] 杨忠超, 杨斌, 陈明栋, 等. 高水头船闸阀门段体型优化三维数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(2): 10-13 (YANG Zhongchao, YANG Bin, CHEN Mingdong, et al. Three dimensional numerical simulation of figure optimization of valves of high head locks[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(2): 10-13. (in Chinese))
- [5] 刘晶. 结构与非结构网格的生成、转化及应用[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- [6] BENEK J A, BUNING P G, STEER J L. A 3-D chimera grid embedding technique[C]//Proceedings of the AIAA 7th Computational Fluid Dynamics Conference. New York: AIAA, 1985: 322-331.
- [7] 于福江, 张占海. 一个东海嵌套网格台风暴雨数值预报模式的研制与应用[J]. 海洋学报, 2002, 24(4): 23-33. (YU Fujiang, ZHANG Zhanhai. Implementation and application of a nested numerical typhoon storm surge forecast model in the East China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2002, 24(4): 23-33. (in Chinese))
- [8] 王玲玲, 金忠青. 利用二、三维嵌套技术数值模拟复杂边界下的流场[J]. 南京航空航天大学学报, 1999, 31(2): 133-138. (WANG Lingling, JIN Zhongqing. Simulation of flow field of complicated boundary by using 2D-3D combining turbulent model[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 1999, 31(2): 133-138. (in Chinese))
- [9] DELTARES. Delft 3D-flow user manual[M]. Delft: Deltares, 2009: 193-209.
- [10] LEENDERTSE J J. Aspects of a computational model for long-period water-wave propagation[M]. Santa Monica: Rand Corporation, 1967.
- [11] 成高峰. 三河闸泄流流态与进流纠偏措施研究[D]. 南京: 河海大学, 2011.
- [12] 胡孜军, 王玲玲, 成高峰, 等. 三河闸泄流流态与进流纠偏数值研究[J], 水利学报, 2011, 42(11): 1349-1353. (HU Zijun, WANG Lingling, CHENG Gaofeng, et al. Numerical study on the inflow and rectification measures of the Sanhe Sluice[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(11): 1349-1353. (in Chinese))