

引航道通航水流条件数值模拟

陈辉, 刘志雄, 江耀祖

(长江科学院, 湖北 武汉 430010)

摘要: 采用数值模拟手段, 计算了当引航道航道中心线与河流主流存在较大夹角时, 船闸引航道口门区及其连接段区域不同流量下的水位、流速分布等水力特性. 计算结果表明: 各级流量下引航道口门区的斜流效应明显, 影响口门区通航水流条件, 分析各级流量下的通航水流条件后, 确定其最高通航流量为 $4\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$, 若要提高最高通航流量, 应适当减小航道中心线与河道主流的夹角. 通过对比分析数值模拟与物理模型试验的结果可知, 该数学模型能较好地模拟引航道口门区水流条件.

关键词: 数值模拟; 物理模型; 通航; 引航道

中图分类号: U641.2⁺11

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2012)04-0013-06

引航道通航水流条件是船闸布置设计的关键技术问题, 一般引航道出口距枢纽较近, 枢纽下泄主流至引航道出口处扩散形成与引航道航道中心线成一定夹角的斜流, 特别当引航道航道中心线与河流主流存在较大夹角时, 这种斜流效应加重, 威胁着船舶(队)安全进出引航道, 从而造成碍航甚至断航. 本文研究对象为某航电枢纽下引航道, 该引航道与下游河道存在近 40° 的夹角, 这一区域水流条件的好坏直接影响到船舶能否顺利进闸. 另外, 该枢纽下游河势为近 90° 的弯道, 其弯道水流特性对下游引航道通航水流条件的影响也是工程关心的问题之一. 拟通过数值模拟的手段研究不同流量下引航道口门区及其连接段的水位、流速分布, 确定其最高通航流量.

1 工程概况

本文研究的航电枢纽工程为河床式布置, 主要由挡水建筑物、泄洪建筑物、电站厂房和通航建筑物等组成. 电站建筑物布置在河床靠左侧, 泄洪建筑物布置在河床中部, 船闸布置在右岸. 船闸按照IV级航道标准设计, 船闸紧邻泄洪坝段的右侧, 布置于河道的右岸, 下游引航道直线段长 $185\ \text{m}$, 往下游依次以长 $213.1\ \text{m}$, 圆心角 74° 的圆弧段, $250\ \text{m}$ 的直线段与下游天然航道衔接. 引航道底高程为 $147.00\ \text{m}$, 底宽大于 $38\ \text{m}$, 口门宽度为 $60\ \text{m}$. 枢纽及下游引航道布置见图1.

下游引航道口门区为出口以下 $150\ \text{m}$ 范围, 出口下 $150\sim 270\ \text{m}$ 为引航道与下游河道连接段. 口门区通航水

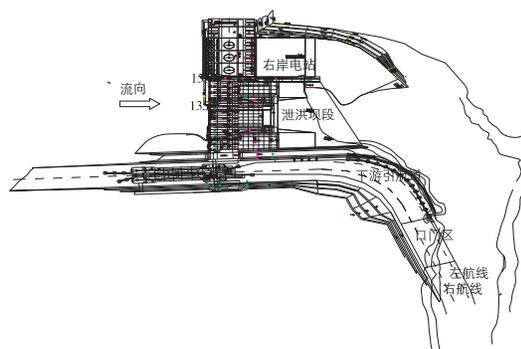


图1 枢纽及下游引航道布置
Fig. 1 Layout of the project with downstream approach channel

收稿日期: 2012-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50879006)

作者简介: 陈辉(1977-), 男, 江苏启东人, 工程师, 主要从事通航水力学研究.

E-mail: chydraulic@163.com

流条件限值有:①平行航线的纵向流速不大于2.0 m/s;②垂直航线的横向流速不大于0.3 m/s;③回流流速不大于0.4 m/s.

2 数学模型

2.1 控制方程及边界条件

2.1.1 曲线坐标系下基本方程 为较好拟合不规则河道及船闸引航道边界,模型采用正交曲线网格对计算域进行网格划分.正交曲线坐标系下基本方程如下:

$$\frac{\partial(C_\xi C_\eta z)}{\partial t} + \frac{\partial(C_\eta hU)}{\partial \xi} + \frac{\partial(C_\xi hV)}{\partial \eta} = q \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(C_\xi C_\eta hU)}{\partial t} + \left[\frac{\partial}{\partial \xi}(C_\eta hUU) + \frac{\partial}{\partial \eta}(C_\xi hVU) + hVU \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} - hV^2 \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} \right] + \\ & C_\eta gh \frac{\partial z}{\partial \xi} = - \frac{C_\xi C_\eta n^2 gU \sqrt{U^2 + V^2}}{h^{\frac{1}{3}}} + C_\xi C_\eta f hV + \\ & \left[\frac{\partial}{\partial \xi}(C_\eta h\sigma_{\xi\xi}) + \frac{\partial}{\partial \eta}(C_\xi h\sigma_{\eta\xi}) + h\sigma_{\xi\eta} \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} - h\sigma_{\eta\eta} \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} \right] + C_\xi C_\eta q u_0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(C_\xi C_\eta hV)}{\partial t} + \left[\frac{\partial}{\partial \xi}(C_\eta hUV) + \frac{\partial}{\partial \eta}(C_\xi hVV) + hUV \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} - hU^2 \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} \right] + \\ & C_\xi gh \frac{\partial z}{\partial \eta} = - \frac{C_\xi C_\eta n^2 gV \sqrt{U^2 + V^2}}{h^{\frac{1}{3}}} - C_\xi C_\eta f hU + \\ & \left[\frac{\partial}{\partial \xi}(C_\eta h\sigma_{\xi\eta}) + \frac{\partial}{\partial \eta}(C_\xi h\sigma_{\eta\eta}) + h\sigma_{\xi\eta} \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} - h\sigma_{\xi\xi} \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} \right] + C_\xi C_\eta q v_0 \end{aligned} \quad (3)$$

式中: U, V 分别为 ξ, η 方向流速分量; q 为单位面积上水流的源汇强度; u_0, v_0 分别为沿水深平均的源汇速度在 x, y 方向上的分量; z, h 分别为水位和水深; g 为重力加速度; ν_t 为水流紊动黏性系数; n 为糙率系数; f 为柯氏力系数, $f=2\omega\sin\Phi$, ω 为地球自转角速度, Φ 为计算河段所处纬度; $\sigma_{\xi\xi}, \sigma_{\eta\eta}, \sigma_{\xi\eta}$ 和 $\sigma_{\eta\xi}$ 为应力项, $\sigma_{\xi\xi}=2\nu_t \left[\frac{1}{C_\xi} \frac{\partial U}{\partial \xi} + \frac{V}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} \right]$, $\sigma_{\eta\eta}=2\nu_t \left[\frac{1}{C_\eta} \frac{\partial V}{\partial \eta} + \frac{U}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} \right]$, $\sigma_{\xi\eta}=\sigma_{\eta\xi}=\nu_t \left[\frac{C_\eta}{C_\xi} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{V}{C_\eta} \right) + \frac{C_\xi}{C_\eta} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{U}{C_\xi} \right) \right]$.

2.1.2 流场定解条件 流场定解条件包括边界条件和初始条件.边界条件有开边界和闭边界条件.开边界即进、出口水边界,在非恒定流计算中模型进、出口边界一般给定水位,在恒定流计算中按进口给定流量、出口给定水位.闭边界即陆域边界,模型中令其法向流速分量为0.初始条件包括初始水位和初始流速条件,初始水位直接采用出口边界水位给出,初始流速为零.初始条件的偏差在迭代计算中会很快消失,不会影响最终计算结果精度.

2.2 数值求解方法

根据推导,曲线坐标系下模型基本方程可表示成如下一般形式:

$$\frac{\partial(C_\eta hu\Phi)}{\partial \xi} + \frac{\partial(C_\xi hv\Phi)}{\partial \eta} = \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\Gamma_\phi h \frac{C_\eta}{C_\xi} \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\Gamma_\phi h \frac{C_\xi}{C_\eta} \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} \right) + S_\phi \quad (4)$$

该方程的数值离散采用有限体积法,该方法的优点在于能很好保证水流模型中水量和动量守恒.方程离散采用了自动迎风格式,离散方程的求解采用SIMPLE算法.为避免水位锯齿波,采用了交错网格技术.

2.3 数学模型相关问题处理

2.3.1 计算河段网格布置 计算区域为枢纽下游200 m至引航道出口下500 m长约1 km的河段.二维计算网格采用正交曲线网格形式,网格节点数为300×133个,沿水流方向网格间距3~4 m,垂直水流方向网格间距1~2 m,引航道口门区计算区域的网格布置见图2(图中为使网格清晰,对纵向和横向网格分别以5和

4的间距进行了变稀显示处理)。

2.3.2 动边界模拟 在计算过程中,计算域内部分节点在涨水时会被“淹没”,在落水时会“干出”。为正确反映这部分节点的干湿变化,模型中采用了以下动边界模拟技术:选定一临界水深(h_{min} 取0.001 m),当某时刻某节点实际水深(水位减去河底高程)小于临界水深时,认为该节点“干出”,令该点流速为0,水深为临界水深,水位值由附近非“干出”点水位值外插值得到;当某时刻某节点实际水深大于临界水深时,则恢复程序计算。

2.3.3 参数取值 二维水流数模计算涉及的主要参系数有河道糙率、紊动黏性系数等。河道糙率实际上是一个综合阻力系数,反映了计算河段的河床河岸阻力、河道形态变化、水流阻力及河道地形概化等因素的综合影响。计算所需的糙率采用分区域给定,根据实测水文资料河床糙率确定为0.030,而引航道内开挖边界的糙率确定为0.014。紊动黏性系数采用 $\nu_t = \alpha u_* h$ 公式计算, α 为常数,取为0.5; u_* 为摩阻流速。

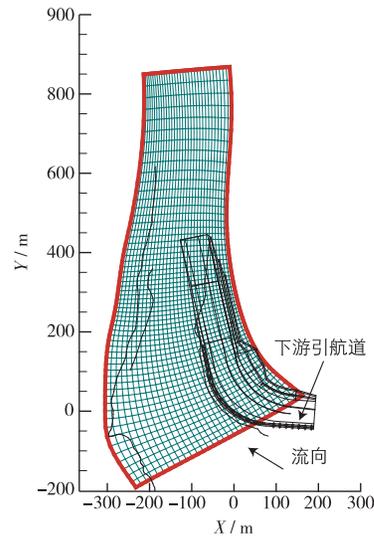


图2 引航道口门区计算区域的网格布置
Fig. 2 Grid layout of the approach channel entrance

3 计算成果及分析

3.1 数值模拟计算结果

对3种通航流量 $Q=2\,530, 4\,000, 6\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 下的下游引航道通航水流条件进行了数值模拟。

3.1.1 水面比降 表1为各级流量下口门区的水面比降值,图3(a),(b)和(c)分别为 $Q=6\,000, 4\,000$ 和 $2\,530\text{ m}^3/\text{s}$ 条件下引航道水位等值线图。由计算结果可知:各级流量下口门区水面平顺,水面纵横比降均较小,随下泄流量的降低水面比降亦随之减小。 $Q=6\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 条件下,最大水面纵比降为0.80‰,最大水面横比降为-0.40‰,连接段水面存在一定的纵比降-1.80‰,横比降相对较小。所以,各级流量下水面比降较小,满足通航要求。

表1 各级流量下口门区水面比降

Tab. 1 Water surface slope at the entrance

断面离出口距离/m	$Q=6\,000\text{ m}^3/\text{s}$					$Q=4\,000\text{ m}^3/\text{s}$					$Q=2\,530\text{ m}^3/\text{s}$				
	右航线		左航线		横比降/ ‰	右航线		左航线		横比降/ ‰	右航线		左航线		横比降/ ‰
	水位/ m	纵比降/ ‰	水位/ m	纵比降/ ‰		水位/ m	纵比降/ ‰	水位/ m	纵比降/ ‰		水位/ m	纵比降/ ‰	水位/ m	纵比降/ ‰	
25	165.86	-	165.86	-	0.00	167.23	-	167.22	-	0.40	158.38	-	158.37	-	0.00
50	165.88	0.80	165.88	0.80	0.00	167.25	0.80	167.25	1.20	0.00	158.40	0.80	158.40	1.20	0.00
100	165.90	0.40	165.9	0.40	0.00	167.28	0.60	167.27	0.40	0.40	158.42	0.40	158.42	0.40	0.00
150	165.93	0.60	165.94	0.80	-0.40	167.30	0.40	167.30	0.60	0.00	158.44	0.40	158.45	0.60	-0.40
200	165.85	-1.60	165.85	-1.80	0.00	167.25	-1.00	167.25	-1.00	-0.00	158.40	-0.80	158.40	-1.00	0.00

3.1.2 流态及流速分布 下泄主流在下游弯道处略偏左岸下行,至下游引航道出口处,主流逐渐向右岸扩散,在口门区及连接段形成与航道中心线存在一定夹角的斜流,斜流效应明显,斜流夹角为 $10^\circ \sim 45^\circ$,横向流速较大,影响口门区通航水流条件。同时在口门右岸形成一个顺时针方向的三角形回流区,回流强度较弱,引航道出口下150 m断面下游河道水流全断面顺流。引航道内仅出口处为弱回流,其余为较弱的往复流。

当下游水位受顶托上升至淹没引航道左侧边坡顶时,口门区主流变宽,口门区回流向右岸缩窄,且回流进入引航道内,上溯至出口以上约100 m。

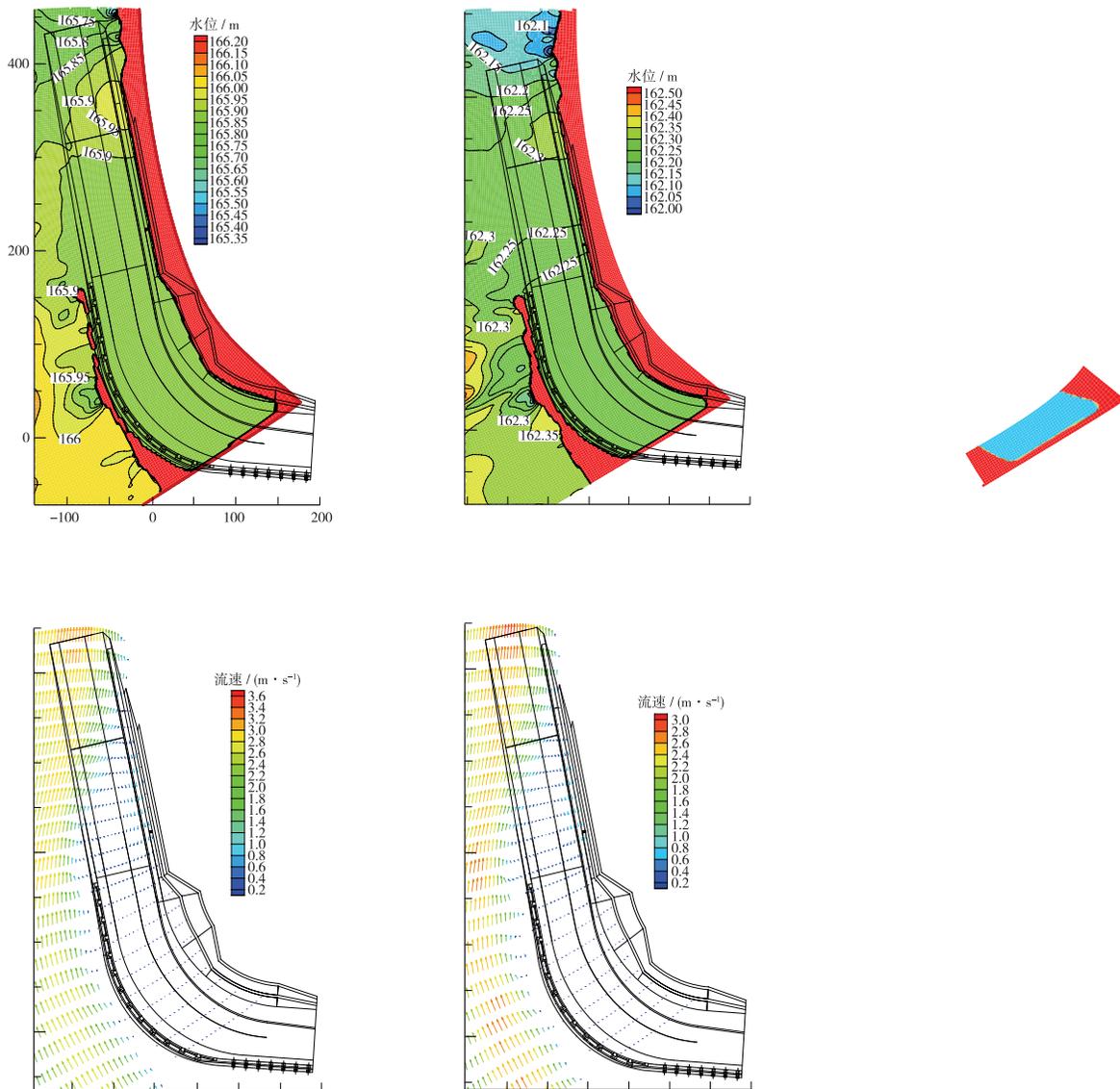


图3 不同流量下引航道水位某值线与流速矢量

Fig. 3 Water level isolines and velocity vector diagrams of the approach channel with different discharges

图3(d),(e)和(f)分别为 $Q=6\,000, 4\,000$ 和 $2\,530\text{ m}^3/\text{s}$ 条件下引航道流速矢量图。 $Q=2\,530\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 条件下,口门区 $V_{\text{纵}} \leq 2\text{ m/s}$,纵向流速最大值为 1.96 m/s ,口门区横向流速 $V_{\text{横}} \leq 0.3\text{ m/s}$,横向流速最大值为 0.30 m/s 。口门区内回流较弱,最大回流流速为 0.36 m/s ,下游引航道内通航水流条件满足通航标准。 $Q=6\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 条件下,口门区右航线(出口下 $100 \sim 150\text{ m}$)通航水流条件较差,下游引航道内通航水流条件不满足通航标准,口门区该处纵向流速最大值为 2.66 m/s ,横向流速最大值为 0.55 m/s ,而口门区左航线位于回流区内,纵向流速相对较小。由于流速矢量与航线夹角较大,横向流速较大,该处纵向流速最大值为 1.85 m/s ,横向流速最大值为 0.45 m/s ,回流流速最大值为 0.41 m/s 。综上所述,下游引航道内最大通航流量宜为 $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$,若要提高通航流量,可适当减小航道中心线与河道主流的夹角。

3.2 数值计算结果与物模试验结果对比分析

将数值模拟结果与物理模型试验(模型几何比尺为 $1:100$)相应流量下口门区的相同测点流速进行了对

比分析(见表2)。可见,各级流量下数、物模流速分布吻合较好,流速最大误差为0.10 m/s,该数学模型能较好地模拟引航道内通航水流条件。

表2 数、物模口门区流速比较

断面离 出口距离/m	6 000 m ³ /s				4 000 m ³ /s				2 530 m ³ /s			
	左航线		右航线		左航线		右航线		左航线		右航线	
	数模	物模	数模	物模	数模	物模	数模	物模	数模	物模	数模	物模
0	0.50	0.52	0.38	0.39	0.30	0.30	0.38	0.34	0.10	0.12	0.10	0.11
25	0.50	0.54	0.30	0.31	0.41	0.43	0.26	0.21	0.15	0.11	0.09	0.09
50	0.30	0.31	0.47	0.48	0.35	0.30	0.27	0.22	0.16	0.17	0.05	0.05
100	0.75	0.69	0.28	0.27	0.38	0.36	0.30	0.22	0.27	0.22	0.05	0.05
150	1.35	1.39	0.75	0.73	1.20	1.21	0.60	0.70	0.31	0.25	0.07	0.08
200	2.29	2.34	1.04	1.14	1.80	1.80	1.61	1.54	1.66	1.60	1.01	1.08

4 结 语

采用数值模拟手段,研究了不同流量下引航道口门区及其连接段区域的水位、流速分布,得出以下结论:(1)当引航道航道中心线与河流主流存在较大夹角时,引航道口门区的斜流效应明显,影响口门区通航水流条件;(2) $Q=6\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 条件下,口门区右航线(出口下100~150 m)通航水流条件较差,下游引航道内水流条件不满足通航标准,当 $Q\leq 4\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 时,下游引航道内水流条件满足通航要求;(3)数学模型计算结果与物理模型试验结果吻合较好,流速最大误差值为0.10 m/s,该数学模型能较好地模拟引航道内通航水流条件。

参 考 文 献:

- [1] JTJ 306-2001, 船闸输水系统设计规范[S]. (JTJ 306-2001, Design code of filling and emptying system of shiplock[S]. (in Chinese))
- [2] 夏军强, 王光谦, 杨文俊, 等. 三峡工程明渠截流水流数学模型研究及其应用[J]. 长江科学院院报, 2005, 22(3): 1-3. (XIA Jun-qiang, WANG Guang-qian, YANG Wen-jun, et al. Study and its application of flow mathematical models of TGPS third-stage open channel closure[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2005, 22(3): 1-3. (in Chinese))
- [3] 李义天, 赵明登. 河道平面二维水沙数学模型[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001. (LI Yi-tian, ZHAO Ming-deng. 2D flow and sediment mathematical model in channels[M]. Beijing: China Water Power Press, 2001. (in Chinese))
- [4] 周华兴. 船闸通航水力学研究[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2007. (ZHOU Hua-xing. Study on hydraulics of navigation lock[M]. Harbin: Northeast Forestry University Press, 2007. (in Chinese))
- [5] 周美林, 夏波, 李世峰. 南海市第二水厂扩建取水工程对通航影响平面二维数学模型研究[J]. 长沙交通学院学报, 2007, 23(3): 20-25. (ZHOU Mei-lin, XIA Bo, LI Si-feng. Numerical model analysis of influences on navigation conditions due to the water intake project of No. 2[J]. Journal of Changsha Communications University, 2007, 23(3): 20-25. (in Chinese))
- [6] 周美林, 肖政, 蒋昌波. 沿河公路丁坝群水毁防护平面二维水流数值模拟研究[J]. 水运工程, 2007(8): 17-20. (ZHOU Mei-lin, XIAO Zhen, JIANG Chang-bo. Numerical simulation of planar 2D flow with spur-dikes protecting riverside subgrade [J]. Port & Waterway Engineering, 2007(8): 17-20. (in Chinese))
- [7] NICHOLS B D, HIRT C W. Improved free surface boundary conditions for numerical incompressible flow calculation[J]. Journal of Computational Physics, 1971, 8(3): 434-448.
- [8] 彭晓庆. 广州大学城杂用水厂取水工程对航道影响数学模型[J]. 水运工程, 2005(3): 70-73. (PENG Xiao-qing. Mathematical model analysis of influences on waterway due to implementation of the miscellaneous-purpose waterworks intake project of Guangzhou Higher Education Mega Centre[J]. Port & Waterway Engineering, 2005(3): 70-73. (in Chinese))
- [9] 金忠青. N-S方程数值解及紊流模型[M]. 南京: 河海大学出版社, 1989. (JING Zhong-qing. The numerical solution of N-S

equation turbulence model[M]. Beijing: Hohai University Publishing House, 1989. (in Chinese))

- [10] 江耀祖, 吴英卓, 徐勤勤. 三峡船闸关键水力学问题研究[J]. 湖北水力发电, 2007(5):60-63. (JIANG Yao-zu, WU Ying-zhuo, XU qin-qin. Research on key hydraulic problems of Sanxia lock[J]. Hubei Water Power, 2007(5):60-63. (in Chinese))

Numerical simulation and analysis of navigation conditions in a shiplock approach channel

CHEN Hui, LIU Zhi-xiong, JIANG Yao-zu

(Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: Based on the numerical simulation of different discharges, water level and velocity distribution of a ship lock approach channel entrance and abutment are studied with a large angle between the mainstream of the river and the central line of the approach channel. The calculated results show that the channel entrance at all levels has oblique flow influencing navigation, and the maximum navigable flow is determined as 4 000 m³/s after analysis of navigation conditions, which can be improved by decreasing the above angle. Comparison with physical model experiment results show that this numerical model can well simulate the flow conditions of the approach channel entrance.

Key words: numerical simulation; physical model; navigation; approach channel

水利部“948”项目“引进 3D-Tracker 实时三维变形监测系统”通过验收

2012年7月6日,水利部“948”项目管理办公室在南京组织召开了“引进 3D-Tracker 实时三维变形监测系统”项目验收会.水利部国科司、水利部推广中心以及来自河海大学、东南大学、南京工业大学、中国水利水电科学研究院、南京水利水文自动化研究所和江苏省水利厅等单位的专家参加了会议.

该项目从美国 AGI 公司引进“3D-Tracker 实时三维变形监测系统”一套,包括 GPS 测站、GPS 接收机、无线电波中继站及相关软件,并在引进的基础上开展了适应我国水利工程安全监测的 GPS 测量系统的安装调试方法、监测技术、远程控制、数据传输和数据处理分析技术试验研究,提出了适合我国水利工程和地质灾害安全监测的全天候 GPS 动态监测技术和方法.引进设备在新疆克孜尔水库除险加固工程中得到示范应用,实施效果表明该技术在水利工程及地质灾害监测方面具有推广应用前景.

验收专家组认真听取了项目组的工作汇报和成果介绍,详细审阅了有关技术资料,经质疑和讨论,一致认为该项目提交的验收资料齐全、翔实,符合验收要求,项目已按期全面完成了任务书规定的工作任务,达到了考核指标,同意通过验收.

摘自南京水利科学研究院网站