双线船闸引航道水力特性数值模拟

周作茂1,陈野鹰2,杨忠超2

(1. 湖南省交通规划勘察设计院,湖南长沙 410008;2. 重庆交通大学,重庆 400074)

摘要: 长沙综合枢纽双线船闸共用引航道,船闸引用流量大,在灌、泄水时引航道内形成非恒定流,水流十分复杂.为确保引航道内船舶航行和停泊安全,采用三维数学模型对船闸最不利运行工况下引航道内复杂非恒定流进行了深入研究,分析了复杂水流形成机理、发展和传播过程,获得了不利工况下的波高、波速、比降和系缆力等水力要素,提出并研究了双线船闸错峰运行和增加船闸旁侧泄水等改善措施,有效改善了引航道内水流条件.研究成果已应用于依托工程中,船闸试运行表明研究提出的改善措施十分有效,该成果可供类似工程参考借鉴.

关 键 词:船闸;引航道;非恒定流;水力特性;数值模拟
 中图分类号:U641.3⁺2
 文献标志码:A
 文章编号:1009-640X(2013)04-0067-06

船闸灌(泄)水时引航道内非恒定流态水流十分复杂,尤其是并列双线船闸共用引航道时,不同运行方 式会在引航道内产生复杂水流以及水位波动等问题,对船舶航行和停泊安全影响较大.周华兴等^[1]对船闸 灌泄水引航道内波幅与比降进行了理论研究;孙尔雨等^[2-6]采用物理模型研究了葛洲坝和三峡工程引航道 内不稳定流对通航条件的影响;黄国兵等^[7-9]采用一维或二维数学模型研究引航道内的水力特性.

长沙综合枢纽双线船闸共用引航道,船闸引用流量大,在灌、泄水时引航道内形成非恒定流,水流十分复杂,船舶航行、停泊安全隐患突出.本文采用三维数学模型对船闸最不利运行工况下引航道内复杂非恒定流进行了深入研究,分析复杂水流形成机理、产生及发展过程,提出改善措施,以确保引航道船舶航行、停泊安全及船闸的正常运行.

1 工程概况

长沙综合枢纽是湘江规划的下游最后一级枢纽工程,是 一座综合利用水资源、改善航运、兼有发电等多功能的综合性 枢纽工程.船闸位于左汊左岸河边,船闸有效尺度(长×宽× 门槛水深)为280.0 m×34.0 m×4.5 m,为单级双线并列布 置,上下游均共用引航道,引航道总宽度按规范^[10]计算均为 146.0 m,总长910 m.输水系统采用闸墙长廊道短支孔方案, 设计输水时间 8 min;通航1顶2×2000 t级船队或1顶4× 1000 t级船队.船闸水位组合为:(1)上游正常挡水位 29.7 m,下游最低通航水位21.9 m(近期),水位差7.8 m, 最大灌、泄流量300 m³/s;(2)上游正常挡水位29.7 m,下游 最低通航水位20.4 m(远期),水位差9.3 m,最大灌、泄流量 339 m³/s.水力特性见图1.



收稿日期:2013-02-08

基金项目:湖南省交通运输厅科技项目(湘交科教[2012]48号)

作者简介:周作茂(1956-),男,湖南宜章人,研究员,主要从事港口、航道、航电枢纽工程的设计和咨询工作. E-mail: zhouzm1956@163.com

2 数学模型

2.1 控制方程

随着计算机技术的迅速发展、紊流数学模型理论的广泛应用和计算方法的不断完善,数值模拟已成为研究水力学问题的一条重要途径.大量数值模拟表明 k-e 双方程紊流模型是模拟复杂紊流的有力工具,其控制方程如下:

连续方程:
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0$$
 (1)

动量方程:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\nu + \nu_i) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]$$
(2)

$$k\,\overline{\beta}\overline{\mathcal{H}}:\qquad\qquad \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i, k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\nu + \nu_i}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho\varepsilon \tag{3}$$

$$\varepsilon \, \overline{\beta} \mathcal{R}: \qquad \qquad \frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i,\varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\nu + \nu_i}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial\varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \rho \, \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \, \frac{\varepsilon^2}{k} \tag{4}$$

式中: ρ 和 μ 分别为体积分数的密度和分子黏性系数;p 为修正压力; ν_i 为紊流黏性系数,它可由紊动能 k 和 紊动耗散率 ε 求出, $\nu_i = C_{\mu} \frac{k^2}{\varepsilon}$; $C_{e1} = 1.42 - \frac{\eta(1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta\eta^3}$, $\eta = Sk/\varepsilon$, $S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$; 各张量表达式中, i = 1, 2, 3,即{ $x_i = x, y, z$ }, { $u_i = u, v, w$ };j 为求和下标,其他通用模型常数为 $\eta_0 = 4.28$, $\beta = 0.015$, $C_{\mu} = 0.085$, $C_{e2} = 1.68$, $\sigma_k = \sigma_e = 0.717$ 9.

采用有限容积法对上述偏微分方程组进行离散,使用 SIMPLER 法对压力-速度耦合进行求解. 对固壁边 界采用壁面函数法,以 VOF 法追踪水气界面、FLUENT 程序进行计算求解.

2.2 计算模型

上游引航道计算域总长1279 m,上游进口距上闸首1265 m,出口为灌水廊道.本文研究分隔流墙不透水和透水(修改方案)两种情况,透水孔高度根据桩基平台与实际河床地形的平均高差取6.5 m.

下游引航道计算域总长1080 m,进口为泄水廊道,下游出口距下闸首1065 m. 隔流墙采用不透空实体 结构. 泄水廊道有一线船闸右支泄水廊道旁测泄水和两线船闸右支均旁侧泄水两种布置方案. 采用四面体和 六面体网格对计算域进行剖分,得到如图2所示的三维计算网格图.



Fig. 2 3D computing grids of the approach channel

3 计算工况与水位组合

为分析灌、泄水过程中引航道水位、流速、流态、比降、波高等变化,针对2个最不利水位组合、隔流墙是 否透水、单旁泄或双旁泄是否错峰运行,拟定28种工况进行计算.其中上游引航道16个工况:工况1~6为 隔流墙不透水(设计方案),工况7~12为隔流墙透水(修改方案),工况13~14为双线船闸错峰5min运行(错峰灌水+隔流墙不透水方案),工况15~16为双线船闸错峰5min运行(错峰灌水+隔流墙透水方案).下游引航道(隔流墙均不透水)12个工况:工况1~6为一线船闸右支旁泄(单旁泄方案);工况7~10为一线船闸和二线船闸右支均采取旁泄(双旁泄方案);工况11~12为在双旁泄的基础上,双线船闸错峰4min开启 泄水(错峰泄水方案).

4 计算结果分析

4.1 上游引航道计算结果

上游引航道水面变化的特征是:随着船闸灌水,近闸首水位首先跌落,形成的跌水波迅速传向引航道上游,导致整个引航道内水位从闸首向上游逐渐下降;当船闸灌水流量达到最大时,闸首处水位下跌至最低;随着闸室水位上升,灌水流量减小,而引航道内的水流在惯性作用下仍流向上闸首,使上闸首处水位升高,形成壅水,壅水波又从闸首向上游传播,引航道水位不断升高,最后回复到与上游库区水位平齐.受水库影响,上游引航道水深较大,跌水波速较快,约为9.7 m/s,波动周期约为20 min. 图 3 为工况4(隔流墙不透水,船闸水头 H=9.3 m,双线船闸同时灌水)灌水时间 t=300 s 时上游引航道流速分布,此时停泊段内流速达到最大(0.3~0.5 m/s).



Fig. 3 Velocity distribution in the upstream approach channel during the double locks filling (t = 300 s)

上游引航道水力特性计算结果见表 1. 可见,设计方案(工况 1~6)上游引航道跌水波最大波速约 9.8 m/s,最低水位为 29.32 m,最大跌水波高为 0.38 m,停泊段内的水位最大变幅为 0.15~0.38 m,跌水波 的比降变化为 0.35‰~0.40‰,壅水波的比降为-0.2‰~-0.35‰,横比降约 0.1‰~0.2‰,停泊段最大流 速为 0.3~0.5 m/s,其他水流条件均较好.各修改方案之间差异不大,但修改方案明显优于初始设计方案,

如双线船闸同时灌水+隔流墙不透水方案与错峰灌水+隔流墙透水方案相比,最大波高由 0.38 m 降为 0.25 m,降幅达 34.2%.各工况系缆力均满足规范要求,工况 3 的最大,达 20.9 kN.

Tab. 1	Hydraulic	characteristics	calculation	results	of t	the	upstream	approach	channel
--------	-----------	-----------------	-------------	---------	------	-----	----------	----------	---------

工况	波速/	最大波高/	停泊段水位	纵比降/	横比降/	停泊段流速/	横向流速/	法大	系缆力/
编号	$(m \cdot s^{-1})$	m	最大变幅/ m	%0	%0	$(m \cdot s^{-1})$	$(m \cdot s^{-1})$	流念	kN
1	9.6	0.31	0.25~0.31	-0.35 ~0.40	0.20	0.30~0.50	<0.10	良好	19.8
2	9.8	0.23	$0.10 \sim 0.23$	$-0.20 \sim 0.30$	0.15	$0.20 \sim 0.30$	<0.20	良好	14.8
3	9.7	0.22	$0.10 \sim 0.23$	$-0.20 \sim 0.30$	0.10	$0.20 \sim 0.30$	<0.20	良好	13.9
4	9.5	0.38	0.15~0.38	$-0.25 \sim 0.40$	0.20	$0.30 \sim 0.50$	<0.20	良好	20.9
5	9.6	0.31	0.15~0.31	$-0.20 \sim 0.35$	0.20	$0.20 \sim 0.30$	<0.20	良好	17.0
6	9.6	0.30	0.15~0.30	$-0.20 \sim 0.35$	0.15	$0.20 \sim 0.30$	<0.20	良好	16.5
7	9.5	0.27	$0.12 \sim 0.27$	$-0.20 \sim 0.35$	0.15	0.10~0.30	<0.10	良好	16.3
8	9.6	0.20	$0.10 \sim 0.20$	$-0.20 \sim 0.25$	0.10	$0.05 \sim 0.30$	<0.10	良好	12.1
9	9.5	0.19	0.10~0.19	$-0.20 \sim 0.25$	0.10	$0.05 \sim 0.20$	<0.10	良好	11.7
10	9.4	0.32	$0.25 \sim 0.32$	$-0.30 \sim 0.40$	0.15	0.10~0.30	<0.15	良好	18.0
11	9.6	0.25	$0.10 \sim 0.25$	$-0.20 \sim 0.30$	0.10	$0.05 \sim 0.20$	<0.10	良好	13.3
12	9.5	0.23	$0.10 \sim 0.23$	$-0.20 \sim 0.30$	0.05	$0.05 \sim 0.20$	<0.10	良好	12.4
13	9.7	0.24	$0.10 \sim 0.24$	$-0.20 \sim 0.33$	0.15	$0.20 \sim 0.30$	<0.20	良好	15.8
14	9.6	0.32	$0.15 \sim 0.32$	$-0.20 \sim 0.35$	0.20	$0.20 \sim 0.30$	<0.20	良好	17.4
15	9.6	0.21	$0.10 \sim 0.20$	$-0.20 \sim 0.25$	0.10	$0.05 \sim 0.30$	<0.10	良好	12.1
16	9.7	0.25	0.10~0.25	-0.20 ~0.30	0.10	0.05 ~ 0.20	<0.10	良好	13.3

4.2 下游引航道计算结果

船闸泄水时在下游引航道引起涨水波,涨水波迅速向下游扩散,随着泄水流量增大,下游引航道水位上升,水位上涨到最高后随泄水流量减小开始下落;泄水末期,水位有超降现象(图4).



Fig. 4 Velocity distribution in the downstream approach channel during emptying water (t = 260 s)

波浪经过多次往复,最后恢复到正常水位.无论是近、远期水位组合工况,下游引航道内水深均较浅,最大涨水波波速约6.4 m/s,波动周期约为18 min.图4表示工况4(船闸水头 H=9.3 m、一线船闸右支旁泄) 泄水时间 t=260 s 时下游引航道流速分布,此时停泊段内流速达到最大(0.6~0.8 m/s).下游引航道水力特性计算结果见表2.

工况	波速/	最大波高/	停泊段水位	纵比降/	横比降/	停泊段流速/	横向流速/	运太	系缆力/
编号	$(m \cdot s^{-1})$	m	最大变幅/ m	%00	%0	$(m \cdot s^{-1})$	$(m \cdot s^{-1})$	流念	kN
1	6.6	0.45	$0.30 \sim 0.45$	0.40 ~ -0.10	0.15	0.5~0.6	<0.10	良好	19.4
2	6.5	0.16	$0.05 \sim 0.16$	$0.25 \sim -0.05$	0.10	$0.1 \sim 0.2$	<0.05	良好	11.6
3	6.5	0.32	$0.20 \sim 0.32$	0.30 ~ -0.10	0.20	0.3~0.4	<0.10	良好	16.1
4	6.3	0.51	0.35~0.51	0.40 ~ -0.10	0.20	0.6~0.8	<0.20	良好	21.8
5	6.2	0.18	$0.05 \sim 0.18$	0.30 ~ -0.10	0.10	0.2~0.3	<0.05	良好	13.7
6	6.4	0.35	0.25~0.35	0.40 ~ -0.10	0.20	$0.4 \sim 0.5$	<0.20	良好	18.1
7	6.4	0.30	$0.25 \sim 0.30$	0.40 ~ -0.10	0	0.3~0.5	无	良好	15.9
8	6.5	0.16	0.10~0.16	$0.25 \sim -0.05$	0.10	0.1~0.2	< 0.05	良好	11.6
9	6.2	0.34	0.25~0.34	0.40 ~ -0.10	0	0.3~0.6	无	良好	16.5
10	6.2	0.18	0.12~0.18	0.25 ~ -0.10	0.15	0.2~0.3	< 0.05	良好	12.4
11	6.4	0.21	0.15~0.21	0.25 ~ -0.10	0.10	0.2~0.3	0.05	良好	12.1
12	6.2	0.24	0.18~0.24	0.30 ~ -0.10	0.10	0.2~0.3	0.05	良好	13.7

表 2 下游引航道水力特性计算结果

Tab. 2 Hydraulic characteristics calculation results of the downstream approach channel

可见,初始设计方案(工况1~6)引航道涨水波最大波速约6.6 m/s,最大波高为0.51 m,水面的纵比降 最大达0.4‰,横比降达0.2‰,停泊段最大流速为0.8 m/s.双旁泄但不错峰(工况7~10)时,最大波高由 0.51 m降为0.34 m,降幅达33.3%;停泊段最大流速由0.8 m/s 降为0.6 m/s,降幅达25%.双旁泄且错峰 (工况11~12)时,最大波高由0.51 m 降为0.24 m,降幅达52.9%;停泊段最大流速由0.8 m/s降低为 0.3 m/s,降幅达62.5%.各工况系缆力均满足规范要求,最大达21.8 kN.其他水流条件均较好.

5 结 语

本文采用有限体积法、VOF 法和双方程紊流模型相结合,建立了引航道三维数值模型,成功运用于长沙 综合枢纽双线船闸共用引航道非恒定流水力特性研究.通过数值模拟获得了非恒定流在双线船闸共用引航 道边界条件下的传播特性和水流特征,得到了最不利工况下的波高、流速、比降、系缆力等水力要素,评估了 通航条件,提出的双线船闸错峰运行和下游增加旁侧泄水等技术措施能有效改善引航道水流条件.本项研究 成果已应用于依托工程中,近期船闸试运行表明本项研究提出的工程措施十分有效.

参考文献:

- [1] 周华兴,郑宝友,王化仁. 船闸灌泄水引航道内波幅与比降研究[J]. 水道港口,2005(2):103-107. (ZHOU Hua-xing, ZHENG Bao-you, WANG Hua-ren. Test on wave amplitude and slope during lock filling and emptying in approach channel[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2005(2):103-107. (in Chinese))
- [2] 易兴华,刘大明. 葛洲坝双线船闸的泄水布置及不稳定流问题[J]. 长江科学院院报, 1989(4): 30-39. (YI Xing-hua, LIU Da-ming. The emptying system layout of the double-line locks of Gezhouba project and its unsteady flow in downstream channel[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1989(4): 30-39. (in Chinese))
- [3] 薛阿强. 三峡工程下游引航道不稳定流试验研究[J]. 长江科学院院报, 1994(4): 10-15. (XUE A-qiang. Experimental study on unsteady flow of downstream approach channel from locks of Three Gorges Project [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1994(4): 10-15. (in Chinese))

- [4] 孙尔雨,李发政. 三峡船闸上引航道通航水流条件研究[J]. 长江科学院院报, 1996(3): 6-11. (SUN Er-yu, LI Fazheng. A study of navigation condition in upper approach channel of Three Gorges Project's locks[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1996(3): 6-11. (in Chinese))
- [5] 孙尔雨,杨文俊. 三峡工程引航道非恒定流通航条件研究[J]. 中国三峡建设, 2001(1): 25-29. (SUN Er-yu, YANG Wen-jun. A study of navigation condition of unsteady flow in Three Gorges Project's approach channel[J]. China Three Gorges Construction, 2001(1): 25-29. (in Chinese))
- [6] 杨文俊,孙尔雨,杨伟,等. 三峡水利枢纽工程非恒定流通航影响研究 I:上、下引航道[J]. 水力发电学报,2006(1):
 45-49. (YANG Wen-jun, SUN Er-yu, YANG Wei, et al. Research on the influence of unsteady flow produced by operation of TGP on navigation I: Upper and lower access channels[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006(1): 45-49. (in Chinese))
- [7] 黄国兵. 三峡工程上游引航道非恒定流数值分析与计算[J]. 长江科学院院报, 1997(3): 10-14. (HUANG Guo-bing. Numerical analysis and computation of unsteady flow in Three Gorges Project's lock upper approach channel[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1997(3): 10-14. (in Chinese))
- [8] 陈阳,李焱,孟祥玮. 船闸引航道内水面波动的二维数学模型研究[J]. 水道港口, 1998(3): 21-27. (CHEN Yang, LI Yan, MENG Xiang-wei. 2-D Numerical model of wave motion in lock approach channel[J]. Journal of Waterway and Harbor, 1998(3): 21-27. (in Chinese))
- [9] 李焱, 孟祥玮, 李金合, 等. 三峡工程船闸灌水上引航道内水力特性数值模拟分析[J]. 水道港口, 2002(3): 122-126. (LI Yan, MENG Xiang-wei, LI Jin-he, et al. Numerical modeling and analysis of hydraulic characteristics in the upper approach during the lock filling of the Three Gorges[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2002(3): 122-126. (in Chinese))
- [10] JTJ 305-2001,船闸总体设计规范[S].(JTJ 305-2001, Code for master design of shiplocks[S].(in Chinese))

Numerical simulation of hydraulic characteristics of a double-line locks approach channel

ZHOU Zuo-mao¹, CHEN Ye-ying², YANG Zhong-chao²

Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute, Changsha 410008, China;
 Chongging Jiaotong University, Chongging 400074, China)

Abstract: The double-line locks of Changsha navigation-hydropower junction share an approach channel, in which forms unsteady flow during locks empting and filling water because of large discharge flow. The unsteady flow is very complex, so ship navigation and berthing safety may subject to dangers. To ensure the safety of the ship navigation and berthing, hydraulic characteristics of complex unsteady flow in the approach channel under the most unfavorable operation condition are studied in detail by means of a three dimensional mathematical model. The formation, developing and spreading mechanisms of wave are analyzed, and these hydraulic factors such as wave height, wave velocity, gradient and mooring force are obtained from numerical simulation. And some improvement measures to help the double locks to operate by means of staggered flow peak and the locks to discharge the water not to the downstream navigation channel directly but to the side pipeline are proposed. These measures mentioned above have improved effectively the flow condition in the approach channel and been applied successfully to the supporting projects. Research results can be taken as a reference for the similar projects in future.

Key words: ship lock; approach channel; unsteady flow; hydraulic characteristics; numerical simulation