



泄水闸调度方式对凸岸船闸 通航水流条件影响的试验研究

张 羽, 杜庆君, 李卓普, 赵集云
(华北水利水电大学 水利学院, 河南 郑州 450046)

摘要: 针对弯曲河段航运枢纽船闸上游口门区出现大范围回流漩涡、引航道存在斜向流等不良流态的工程问题, 采用正态整体水工物理模型试验的方法, 对泄水闸不同调度方式对凸岸船闸上游引航道及口门区通航水流条件的影响进行研究。结果表明: 对于船闸建在凸岸的航运枢纽, 泄水闸开启远端闸门的调度方式可有效减弱口门区回流尺度及引航道斜向流强度, 以保证通航安全。

关键词: 航运枢纽; 凸岸船闸; 调度方式; 上游口门区; 回流漩涡

中图分类号: U 641.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)04-0097-05

Experimental study on influence of discharge lock dispatching mode on navigable flow conditions of convex-bank ship lock

ZHANG Yu, DU Qing-jun, LI Zhuo-pu, ZHAO Ji-yun

(School of Water Resources, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: Aiming at the engineering problems that there is large-scale back-flow whirlpool at the entrance of the upstream area in the hub ship lock on the curved reach and the oblique flow in the approach channel, we adopt the method of the whole normal hydraulic physical model tests, and research the influence of different dispatching mode of the discharge sluice on the navigation flow conditions of the upstream approach channel and entrance area of the convex-bank ship lock. The results show that the lock in the convex bank hub, discharge sluice opening the remote area at the entrance of the gateway of scheduling can effectively weaken the reflow scale and the intensity of the approach channel oblique flow to ensure navigation safety.

Keywords: shipping hub; convex-bank ship lock; dispatching mode; upstream entrance area; back-flow whirlpool

中国地域辽阔, 水系发达, 内陆河流蜿蜒曲折, 多数河段为弯曲河段。由于弯曲河段水流受河床、地形与河岸边界的影响, 水流形态复杂, 修建航运枢纽需要进行重复试验及技术论证。针对内陆弯道河流航运枢纽, 许多学者进行了深入的研究, 李志云等^[1]、周华兴等^[2]、李焱等^[3]、卢文蕾^[4]通过概化模型和船模试验研究航运枢纽在弯曲河段的布置形式优化。李平^[5]、李茜希等^[6]

利用三维数值模型分析泄水闸泄水方式对引航道口门区流态的影响。黄明红等^[7]、王建平等^[8]、朱卫国等^[9]通过物理模型研究改善口门区条件的有效工程措施。

当船闸建在枢纽凸岸时, 船闸口门区处于动静交界位置, 水流条件尤为复杂, 存在对通航不利的斜向流、回流漩涡等不良流态, 对船舶通行产生不利影响, 是影响船闸通航条件的主要因素。

收稿日期: 2020-07-11

作者简介: 张羽(1970—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为水力学及河流动力学。

本文以南阳唐河郭滩航运枢纽为例，通过水工物理模型试验，对泄水闸不同调度方式对船闸引航道通航条件进行对比研究，给出最优的调度方式，保障船舶通航安全与效率，为国内类似工程提供借鉴。

1 工程概况与模型设计

1.1 工程概况

唐河位于南阳市东侧，是汉江的一条重要支流，唐河航道是我国内河航运规划蓝图的重要组成部分。唐河郭滩航运枢纽是唐河五级航道中继水台子航运枢纽以后的第二级航运枢纽，位于郭滩镇 S 形弯道河段。地理位置如图 1 所示。



a) 水系概况



b) 枢纽位置

图 1 郭滩航运枢纽地理位置

航运枢纽组成为左岸(凹岸)泄水闸和右岸(凸岸)船闸，泄水闸从左至右依次分为左敞泄区(1#~4#闸门)、控泄区(5#~8#闸门)和右敞泄区(9#~12#闸门)，水闸采用开敞式平底闸，为满足泄流能力要求，闸孔总净宽 168 m，共设 12 孔，单孔净宽 14 m，泄水闸闸室结构采用“两孔一联”整体式结构，“两孔一联”闸段宽 33.2 m。右岸通航建筑由上下游引航道、船闸和导航靠船建筑物组成，航道尺度为 2.3 m×50 m×350 m(水深×航宽×弯曲半径)，通航等级为 500 吨级。船闸为 IV 级建筑，闸室有效尺度为 180 m×23 m×3.5 m(长×宽×门槛水深)。上、下游引航道采用不对称布置，过闸方式为曲线进闸、直线出闸。郭滩枢纽整体布置及口门区测点分布如图 2 所示。

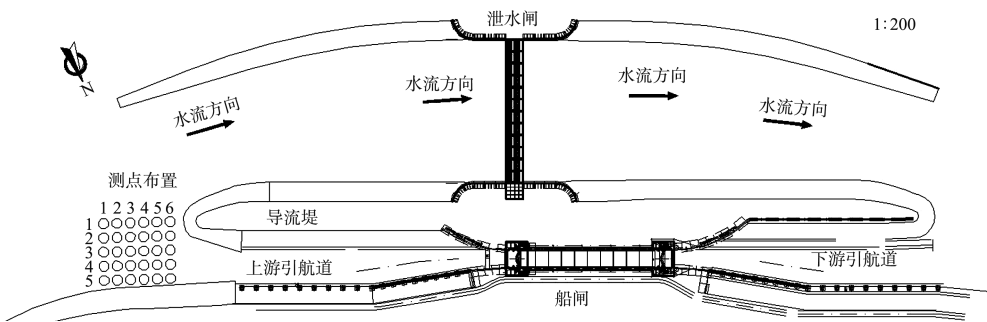


图 2 郭滩航运枢纽整体布置及口门区测点分布

1.2 模型设计

按照相关规范对模型比尺设计的要求，该模

型为正态水工模型，必须满足水流运动的重力(弗劳德)相似准则和紊动阻力相似准则。根据模型相

似性要求及场地条件和模型比例设计优选结果, 确定模型的水平比尺 λ_L 、垂直比尺 λ_H 均为 75, 糙率比尺 λ_n 为 2.05, 流速比尺 λ_v 为 8.66, 流量比尺 λ_Q 为 48 713, 水流运动时间比尺为 8.66。

模型按设计单位提供的郭滩河段实测地形数据为依据, 采用断面法对河道及两岸滩地地形进行缩放还原, 为确保地形放样的精确性, 对复杂的地形如两岸汇入小溪、小河, 采用局部增加断面的方法, 尽量减小模型误差, 现场物理模型如图 3 所示。



a) 模型整体

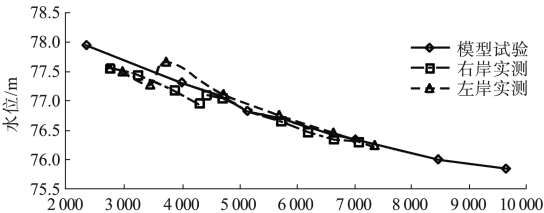


b) 枢纽细部

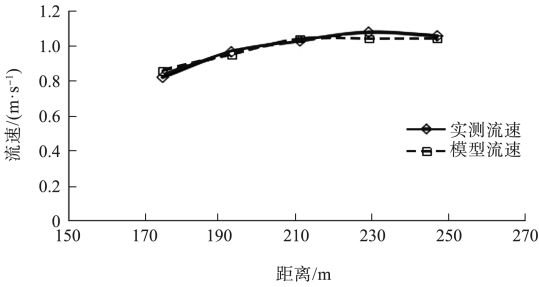
图 3 物理模型航拍图

1.3 模型验证

根据河段实测资料, 选取 326 m³/s 流量进行模型相似性验证, 水面线及断面流速验证结果如图 4 所示。可以看出, 模型试验水面坡降与实测一致, 模型断面流速与实测流速吻合, 误差不超过 0.29%, 模型满足相似要求。



a) 水面线



b) 断面流速

图 4 模型相似性验证结果

2 试验方案与分析

2.1 通航水流条件的要求

南阳郭滩航运枢纽航道等级为 IV 级, 根据 GB 50139—2014 《内河通航标准》的相关要求, 引航道口门区纵向表面流速不应大于 1.5 m/s, 横向表面流速小于 0.25 m/s, 回流表面流速小于 0.4 m/s; 引航道内水流宜为静水, 且船舶停靠段内最大表面纵向流速不应大于 0.5 m/s, 横向流速不应大于 0.15 m/s。

2.2 试验工况的选择

初步试验发现, 当上游来流量为 326~1 000 m³/s 时, 通过控制泄水闸开度及调度方式, 满足枢纽上下游通航水位要求, 此时河道主流稳定在河道中心线偏左 20 m 位置(中 4 孔左侧 2 孔闸门), 主流在河道转弯位置最大流速 1.47 m/s, 上游口门区无不良流态。引航道内最大横向流速 0.04 m/s, 引航道及口门区水流流态稳定, 对船舶通过船闸无不良影响。

在上游来流量超过 1 000 m³/s 且小于最高通航流量时, 导流堤右侧为口门区。河道主流在口门区与静水分流, 主流流速较大, 由于导流堤与口门区静水的阻滞作用, 在口门区形成一个逐渐向主流方向推进的回流漩涡, 漩涡开始发生于导流堤堤头前方 100 m 处, 由于导流堤的影响, 回流漩涡于导流堤堤头前汇入河道主流, 随主流前进并逐渐消散; 口门区回流引起引航道水流紊动, 产生不利于通航的斜向流, 斜向流与航道中心线夹角在 12°~35°。当来流流量超过 2 000 m³/s 时, 12 孔节制闸全部处于敞泄状态, 调度方式已无影响。

本文选择来流为 1 500 和 1 810 m³/s 两种典型工况进行试验, 根据原设计调度方案, 方案 a 为

当上游来流 1 500 m³/s 时,泄水闸打开敞泄区中 4 孔闸门(5[#]~8[#]闸门)进行调节;方案 b 为当上游来流 1 810 m³/s 时,同时打开泄水闸左侧 8 孔闸门进行调节。

上游口门区测点布置在上游引航道导流堤附

近,从导流堤堤头开始,沿引航道向上游布置5 行 6 列,共 30 个测点,每个点间距 20 cm(图 2)。

2.3 模型试验结果及分析

按原设计调度方案进行试验,利用八线流速计对口门区测点进行测量,试验结果见表 1。

表 1 口门区流速分布

Q/(m ³ ·s ⁻¹)	测点	流速/(m·s ⁻¹)		Q/(m ³ ·s ⁻¹)	测点	流速/(m·s ⁻¹)		Q/(m ³ ·s ⁻¹)	测点	流速/(m·s ⁻¹)	
		横向	纵向			横向	纵向			横向	纵向
1 500	1-1	0.17	0.06	1 500	3-1	0.15	0.25	1 500	5-1	0.15	0.22
	1-2	0.17	0.13		3-2	0.13	0.26		5-2	0.23	0.24
	1-3	0.15	0.13		3-3	0.15	0.25		5-3	0.30	0.36
	1-4	0.08	0.20		3-4	0.12	0.24		5-4	-	-
	1-5	-	-		3-5	-	-		5-5	-	-
	2-1	0.26	0.15		4-1	0.27	0.14		6-1	0.22	0.31
	2-2	0.23	0.16		4-2	0.30	0.25		6-2	0.25	0.35
	2-3	0.22	0.27		4-3	0.16	0.33		6-3	-	-
	2-4	-	-		4-4	-	-		6-4	-	-
	2-5	-	-		4-5	-	-		6-5	-	-
1 810	1-1	0.14	0.14	1 810	3-1	0.24	0.42	1 810	5-1	0.15	0.52
	1-2	0.22	0.25		3-2	0.25	0.42		5-2	0.23	0.57
	1-3	0.20	0.31		3-3	0.22	0.44		5-3	-	-
	1-4	-	-		3-4	0.32	0.45		5-4	-	-
	1-5	-	-		3-5	-	-		5-5	-	-
	2-1	0.15	0.25		4-1	0.30	0.23		6-1	0.45	0.21
	2-2	0.18	0.33		4-2	0.35	0.25		6-2	0.48	0.30
	2-3	0.31	0.45		4-3	-	-		6-3	-	-
	2-4	-	-		4-4	-	-		6-4	-	-
	2-5	-	-		4-5	-	-		6-5	-	-

方案 a 在控制来流量 1 500 m³/s、开中 4 孔闸门泄水时,河道主流位于河道中心线偏左 20 m 位置,在主流动水与引航道静水交界处(口门区)形成回流漩涡,口门区回流尺度 112 m×37.5 m(顺水流方向×垂直水流方向),回流强度在 0.17 ~ 0.47 m/s,口门区漩涡呈顺时针方向,其中顺水流方向表面流速较高,最大可达 1.47 m/s,逆向回流流速较小一般不大于 0.1 m/s,横向流速最大为 0.26 m/s,对本枢纽工程而言,口门区作为船舶进入引航道的制动段,大范围、高强度的回流不利于船舶的制动与调顺;口门区回流引起引航道水流波动。试验测定引航道内最大横向流速为 0.12 m/s,虽符合相关标准的要求,但对于部分船舶进出引航道存在安全隐患。

方案 b 在控制上游来流量 1 810 m³/s、开左 8 孔闸门调控时,主流偏向左岸,与原河道凸岸深槽主流相近,在离河道中心线偏左 50~60 m 范围

内稳定,此时口门区回流尺度为 165 m×45 m(顺水流方向×垂直水流方向),回流强度在 0.17 ~ 0.61 m/s,此时,漩涡起点较方案 a 偏向河道中心,顺水流方向最大流速较高,达到 1.8 m/s,最大逆向回流流速为 0.17 m/s,漩涡边缘最大横向流速不大于 0.35 m/s;由于漩涡位置更贴近河道中心,对引航道内紊流影响范围缩小。试验测定引航道内最大横向流速 0.16 m/s,对部分船舶平稳进入制动等待位置存在不利影响。

3 对比调度方式及结果

3.1 提出对比试验方案

通过对初步试验方案的分析,影响凸岸船闸通航条件的主要问题是上游引航道口门区存在不利于通航的回流漩涡。提出通过对比不同方案优化泄水闸调度方式将口门区保护在回流漩涡的影响范围之外或尽可能减小回流漩涡的强度以及尺

度, 以达到改善口门区水流形态的目的。

根据对初步试验的观察分析, 提出对比方案: 1 500 m³/s 流量时, 开启远离船闸的左岸 4 孔闸门进行调度为对比方案 1; 开启靠近船闸的右侧 4 孔闸门进行调度为对比方案 2; 1 810 m³/s 流量时, 开启右侧 8 孔闸门调度为对比方案 3。

3.2 改进试验方案结果与分析

当控制上游来流量 1 500、1 810 m³/s 时, 采用对比方案进行进一步试验, 对口门区测点利用八线流速仪进行测量, 测量结果见表 2、3, 流态见图 5。

表 2 不同调度方式时口门区水流特征						
$Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	方案	主流与引航道 中心线夹角/ $(^\circ)$	回流区 最大长度/m	回流区 最大宽度/m	回流流速/ $(m \cdot s^{-1})$	回流漩涡区位置
1 500	方案 a	25	112.5	37.5	0.17	口门区及导流堤左侧
	对比方案 1	35	90.0	45.0	0.08	口门区及导流堤左侧、偏离导流堤
	对比方案 2	12	150.0	60.0	0.21	口门区及导流堤左侧、右侧引航道内
1 810	方案 b	27	127.5	45	0.17	口门区及导流堤左侧
	对比方案 3	21	165.0	60	0.26	口门区及导流堤左侧、右侧引航道

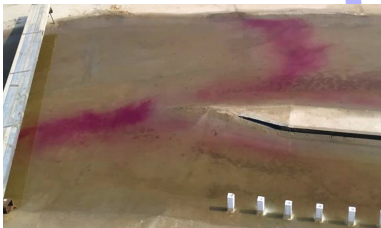
表 3 不同调度方式时引航道内水流特征				
$Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	方案	流速/ $(m \cdot s^{-1})$		
		斜向流	最大横向	最大纵向
1 500	方案 a	0.17	0.12	0.12
	对比方案 1	0.13	0.06	0.12
	对比方案 2	0.21	0.14	0.16
1 810	方案 b	0.15	0.08	0.13
	对比方案 3	0.30	0.24	0.18

注: 引航道内横向流仅限喇叭口制动段。

试验结果表明: 当控制上游来流量一致时, 不同的调度方式对上游引航道口门区影响明显, 通过泄水闸改变河道主流与引航道中心线夹角, 同一流量下, 随着闸门开启组合越来越靠近船闸, 河道主流与引航道中心线夹角减小; 同时对口门区和引航道水流流态影响较大。

1) 对口门区回流漩涡的影响。通过对比在同一流量情况下各方案可知: 当开启船闸远端闸门调度时, 船闸上游口门区回流漩涡向主河道偏移, 口门区受回流漩涡影响的范围明显减小, 仅导流堤附近水域仍有小范围回流, 最大回流流速为 0.08 m/s, 强度显著减弱, 口门区流态较为稳定。

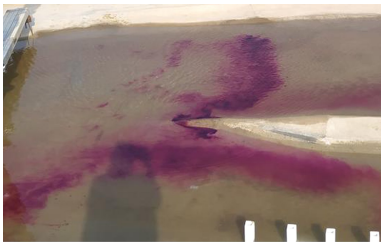
2) 对引航道斜流的影响。当控制来流流量一致的情况下, 通过对比发现, 当开启的调度闸门远离船闸轴线时, 口门区回流尺度及强度降低, 对引航道水流影响减弱, 引航道流态紊动程度减弱, 斜向及横向流速明显降低, 水流条件更有利于通航安全。



a) 对比方案1



b) 对比方案2



c) 对比方案3

图 5 各对比方案流态

4 结语

1) 当航运枢纽建在河道弯曲段且船闸位于凸岸时, 河道主流远离船闸时有利于改善上游引航道及口门区的水流流态。

2) 本文研究成果为通过具体工程模型试验得到, 对类似工程具有一定的借鉴意义, 但具体工程还须根据实际情况进行分析。 (下转第 152 页)