



长洲四线并列船闸运行方式对下游引航道水流条件的影响

韦德鉴¹, 宣国祥², 李君², 黄岳²

(1. 广西西江开发投资集团有限公司, 广西 南宁 530028;
2. 南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,
通航建筑物建设技术交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 长洲水利枢纽通航建筑物采用四线并列船闸布置, 其引航道水流条件受船闸布置及充泄水影响而十分复杂。采用物理模型试验与数学模型计算相结合的手段, 对长洲船闸不同下游水位下船闸泄水对引航道水流条件的影响进行研究, 针对存在的水力学问题, 结合长洲船闸的特点提出目前最为便捷有效的非工程措施——优化船闸运行方式, 并最终确定了船闸运行的控制下游水位及相应的运行方式, 为船闸设计与运行管理提供了依据。

关键词: 长洲水利枢纽; 船闸; 引航道; 水力学; 运行方式

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)08-0119-06

Influence of lock emptying of Changzhou four-parallel-lane locks on flow conditions in the downstream approach channels

WEI De-jian¹, XUAN Guo-xiang², LI Jun², HUANG Yue²

(1. Guangxi Xijiang Development & Investment Group Co., Ltd., Nanning 530028, China; 2. Key Laboratory of Navigation Structures Construction Technology, Ministry of Transport, PRC, State Key Laboratory of Hydrology-Water Resource and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The navigation structure of the Changzhou hydro-junction adopts a four-parallel-lane type, and the flow conditions in the approach channels are quite complicated due to its arrangement and the lock filling & emptying courses. By physical model tests and numerical computations, we study the influence of lock emptying under different downstream water levels on the flow conditions in the downstream approach channels. Considering the lock features, we propose the currently most convenient and effective non-structural measure, i.e. to optimize the locks' operation modes so as to solve the hydraulic problems. Finally, we determine the suggested controlling downstream water levels and their relating lock operation modes based on the study, which can be used for the lock design and management.

Key words: Changzhou hydro-junction; navigation lock; approach channel; hydraulics; operation mode

长洲水利枢纽是西江下游河段广西境内的最后一个规划梯级, 同时也是“西江亿吨黄金水道”的“咽喉”, 其通过能力直接影响广西内河水运事业的发展。

枢纽已建双线并列船闸, 平行布置在外江右

岸, 其中, 一线船闸为Ⅱ级船闸, 闸室有效尺度为 200 m × 34 m × 4.5 m (长 × 宽 × 门槛水深), 二线船闸为Ⅲ级船闸, 闸室有效尺度为 190 m × 23 m × 3.5 m。两线船闸于 2007 年 5 月实现双线通航, 然而, 随着货运量的不断增长, 现一、二线船闸规模

收稿日期: 2012-05-31

作者简介: 韦德鉴 (1966—), 男, 高级工程师, 主要从事水运工程建设、管理与研究工作。

已经不能满足航运运量要求。为适应不断增长的航运发展需求,拟新建三线和四线船闸,2座船闸均为I级船闸,闸室有效尺度均为 $340\text{ m}\times 34\text{ m}\times 5.8\text{ m}$ 。

新建双线船闸并列也位于枢纽右岸台地,由此形成了国内唯一的一座四线并列船闸的布置形式。船闸及下游引航道布置见图1。

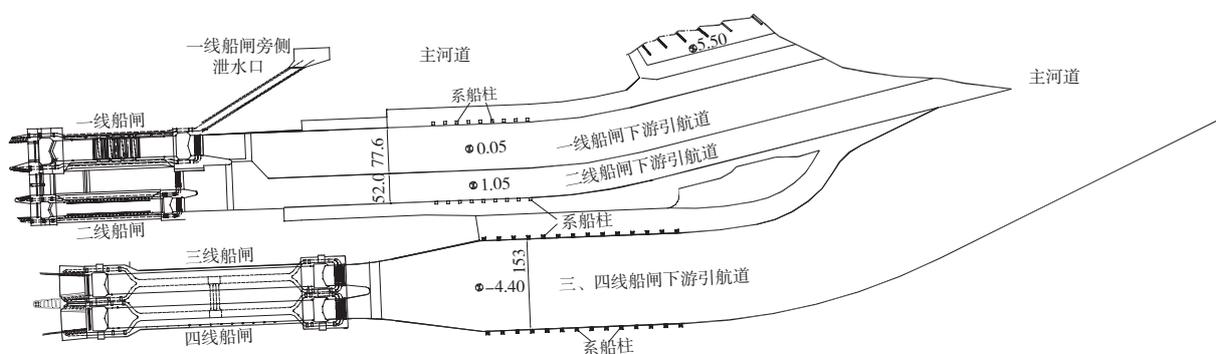


图1 长洲四线并列船闸及其下游引航道平面布置

1 多线并列船闸充泄水对引航道水流条件的影响

国内外的研究及实践经验表明:对于多线船闸并列布置形式,如果布置和运行控制不当,容易导致相关安全问题。例如:三峡船闸上游引航道施工期水深为 5.0 m ,此时三峡船闸采用四级运行方式、首级充水水头小于 6 m ,原型观测表明其系船墩附近非恒定流波高最大值为 0.6 m 左右,给停靠船舶带来了一定的影响;葛洲坝2[#]和3[#]船闸共用的三江引航道,发生过由于泄水长波运动而引起的船舶擦底事故;江苏京杭运河泗阳船闸共用下游引航道的双线并列船闸,一线船闸泄水时下游引航道内的非恒定流在另一线船闸下闸首人字门处产生了较大的反向水头,导致反向推力过大而使人字门启闭构件损坏,2010—2011年京杭运河刘老涧三线并列船闸也发生过类似事故。

上述运行经验和长洲船闸前期相关研究成果表明,其引航道也可能存在以下水力学问题:

1) 引航道内水流流速超标,使得船舶在引航道内的航行和停泊条件无法满足;

2) 引航道的水位波幅较大,使引航道水深不足导致船舶擦底,或引起引航道内船舶系缆力过大;

3) 人字门反向作用水头过大,即多线船闸中一线船闸的充泄水引起的非恒定流对处于平水状态的其他线船闸人字门形成反向的作用水头,从而出现人字门被顶开或者无法合拢甚至导致人字门启闭系统损坏的现象。

因此,需要对长洲四线并列船闸引航道水流条件开展详细研究,以提出对应的改善措施。由于三、四线船闸为扩建工程,通过布置调整等工程措施的余地较小,故本文主要以船闸泄水为例,探讨非工程措施——船闸运行方式对下游引航道水流条件的影响。

2 研究方法及其研究工况

2.1 研究方法

采用数学模型计算与物理模型试验相结合的手段开展研究:物理模型主要用于典型水位组合工况下下游引航道水流条件研究,而数学模型则用于其它工况补充研究,以缩短研究时间。

综合考虑模型试验精度要求以及试验场地实际情况,最终确定物理模型比尺为 $1:50$,包括长洲四线并列船闸及其输水系统、四线船闸下游引航道及口门区、部分外江水工建筑物及外江枢纽下游 3 km 范围内河道,模型见图2。试验中选取了11个典型断面,包括船闸下游人字门下游侧,下游引航道首、尾系船墩等,共布置了22个水位波动测点及8个流速测点,以全面研究船闸不同泄水组合工况下下游引航道的水位波动与水流流速情况。

数学模型利用美国Brigham大学环境模型研究实验室开发的SMS(Surface grater Modeling System)水动力学软件进行建立^[1],并采用其中美国陆军工程兵水道实验站开发的RMA2模块进行引航道及口门区的水流模拟,该模块主要用于沿水深平均的二

维水动力计算,采用有限单元法进行计算。在现有地形资料的基础上,充分考虑到船闸泄水产生的水面波动的传播和减少模型边界的反射对波动的影响,建立的范围包括枢纽下游约9.0 km。网格采用三角形与四边形的混合网格,在引航道区域网格加密,其下游则逐渐放大。下游数学模型网格及地形情况见图3。

物理模型和数学模型均通过实测的长洲一线、二线船闸下游引航道水位、流速进行了率定和验证。



图2 物理模型



图3 数学模型计算区域与网格划分

2.2 研究工况

影响船闸下游引航道水流条件的因素主要有2个:一是船闸的泄水流量,二是引航道的过水断面面积。由于长洲四座船闸的设计标准、建设时间不完全一致,导致每座船闸的运行水位组合及引航道布置不尽相同。对于一、二线船闸,其设计最大水头均为15.55 m,对应水位组合为20.60~5.05 m,下游引航道底高程则分别为0.05 m和1.05 m;而对于新建的三、四线船闸,由于近年来枢纽下游水位的变化,其设计下游最低通航水位调整为3.32 m,因而设计最大水头增加为17.28 m,且存在下游极端低水位1.40 m的可能,下游引航道底高程则为-4.40 m。在船闸上游水位和下游引航道布置确定的情况下,上述2个因素的直接控

制条件即为船闸下游水位。因此,本文以下游水位为控制条件,研究不同下游水位条件下不同船闸运行方式泄水对下游引航道水流条件的影响。其中,重点针对20.6~3.32 m(三线和四线船闸设计工况)、20.6~5.05 m(一线和二线船闸设计工况)以及20.6~1.4 m(三线和四线船闸极限工况)3种水位组合开展详细研究,而对其余典型水位组合则利用数学模型开展补充研究。最后,通过上述研究,寻求影响四线船闸运行方式的下游控制水位以及不同水位下的船闸运行方式。

3 研究成果与分析

3.1 船闸设计运行方式

不同下游通航水位下,各线船闸按各自设计运行方式(双边泄水阀门匀速连续开启)运行^[2-5],不同泄水组合工况的下游引航道水流条件主要成果见表1。

由试验成果可知,在船闸设计运行方式下:

1)各典型下游水位下,一、二线船闸单独运行泄水时的下游引航道水力指标满足规范要求^[6-8],且对非泄水船闸的影响较小;一、二线船闸同时泄水时的下游引航道水力指标满足规范要求,但在低于其下游设计最低通航水位时会对三、四线船闸人字闸门运行产生一定影响。

2)各典型下游水位下,三、四线船闸单独泄水时的下游引航道水力指标满足规范要求,但在下游设计最低通航水位及极限低水位下会对非泄水船闸人字闸门运行产生一定影响;下游水位大于等于下游设计最低通航水位时三、四线船闸同时泄水下游引航道水力指标满足规范要求,但极限工况时下游引航道流速超过规范允许值;各典型下游水位下,三、四线船闸同时泄水均会对一、二线船闸人字闸门运行产生较大影响。

3)各典型下游水位下,4座船闸同时泄水时的下游引航道水力指标满足规范要求。

4)当下游水位 ≥ 6.32 m时,4座船闸可按其设计运行方式以任意组合方式泄水。

结合长洲船闸的特点,并综合上述成果分析可知:由于一线船闸采用了部分旁侧泄水的布置,而二线船闸的尺度相对较小,因此一、二线

表1 船闸设计运行方式下泄水引航道水力特征值(上游水位20.60 m)

工况	下游水位/ m	阀门开启 时间/min	人字门处水位波动最大值/m				靠船墩处水位波动最大值/m				靠船墩处纵向流速最大值/(m·s ⁻¹)			
			一线	二线	三线	四线	一线	二线	三线	四线	一线	二线	三线	四线
一线单 独泄水	3.32	t _{v一} =7	+0.10	+0.14	+0.10	+0.10	+0.18	+0.13	+0.10	+0.11	+0.47	+0.15	+0.03	+0.02
			-0.25	-0.14	-0.08	-0.07	-0.08	-0.13	-0.08	-0.04	-0.15	-0.02	-0.05	-0.05
	5.05	+0.06	+0.16	+0.09	+0.03	+0.03	+0.08	+0.18	+0.15	+0.32	+0.28	+0.06	+0.06	
二线单 独泄水	3.32	t _{v二} =7	+0.06	+0.34	+0.09	+0.08	+0.16	+0.21	+0.08	+0.10	+0.55	+0.49	+0.04	+0.04
			-0.50	-0.42	-0.06	-0.06	-0.31	-0.27	-0.06	-0.05	-0.22	-0.26	-0.15	-0.14
	5.05	+0.03	+0.06	+0.09	+0.06	+0.20	+0.01	+0.10	+0.11	+0.41	+0.41	+0.04	+0.09	
三(四) 线单 独泄水	3.32	t _{v三} =5	+0.24	+0.37	+0.24	+0.23	+0.28	+0.30	+0.22	+0.22	+0.10	+0.10	+0.54	+0.46
			-0.06	-0.03	-0.08	-0.07	-0.02	-0.02	-0.03	-0.07	-0.27	-0.28	-0.08	-0.04
	5.05	+0.16	+0.14	+0.24	+0.15	+0.16	+0.18	+0.19	+0.29	+0.13	+0.12	+0.31	+0.36	
一、二线 同时泄水	3.32	t _{v一、二} =7	+0.35	+0.60	+0.27	+0.27	+0.39	+0.38	+0.24	+0.23	+0.88	+0.84	+0.08	+0.09
			-0.50	-0.45	-0.09	-0.10	-0.28	-0.17	-0.14	-0.10	-0.28	-0.22	-0.06	-0.07
	5.05	+0.19	+0.26	+0.14	+0.16	+0.16	+0.30	+0.16	+0.20	+0.81	+0.81	+0.08	+0.12	
三、四线 同时泄水	3.32	t _{v三、四} =5	+0.54	+0.58	+0.57	+0.62	+0.51	+0.53	+0.48	+0.51	+0.29	+0.30	+0.94	+0.93
			-0.07	-0.04	-0.11	-0.15	-0.01	-0.10	-0.10	-0.08	-0.53	-0.55	-0.18	-0.16
	5.05	+0.39	+0.40	+0.47	+0.52	+0.29	+0.35	+0.37	+0.43	+0.23	+0.23	+0.63	+0.72	
4座船闸 同时泄水	3.32	t _{v一、二} =7	0.00	0.00	-0.20	-0.19	0.00	0.00	-0.18	-0.15	-0.21	-0.11	-0.01	-0.05
			+0.18	+0.21	+0.29	+0.29	+0.16	+0.16	+0.25	+0.29	+0.08	+0.08	+0.61	+0.57
	6.32	-0.03	-0.03	-0.15	-0.15	-0.02	-0.02	-0.10	-0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	
4座船闸 同时泄水	3.32	t _{v三、四} =7	+0.72	+0.90	+0.81	+0.85	+0.73	+0.50	+0.71	+0.73			+1.25	+1.14
			-0.13	0.00	-0.11	-0.16	0.00	0.00	-0.11	-0.15			-0.06	-0.08
	5.05	+0.56	+0.53	+0.41	+0.41	+0.56	+0.56	+0.38	+0.38	+0.61	+0.55	+1.00	+0.94	
4座船闸 同时泄水	3.32	t _{v一、二} =7	-0.11	-0.11	0.00	0.00	-0.04	-0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.08	-0.12
			+0.38	+0.36	+0.47	+0.45	+0.41	+0.42	+0.44	+0.45	+0.41	+0.39	+0.70	+0.70
	5.05	-0.12	-0.13	-0.11	-0.08	-0.03	-0.08	-0.05	-0.05	-0.12	-0.17	-0.06	-0.08	

注: 下游水位为1.40 m时, 一、二线下游引航道水深无法满足船舶航行需要, 故此水位下一、二线船闸不投入运行。

船闸泄水时的流量都不大, 其自身下游引航道水流条件均能满足规范要求, 并且其对三、四线船闸下游引航道水流条件的影响较小。而三、四线船闸泄水时, 由于其泄水流量较大, 其自身引航道内水流指标相对较高, 并会在相邻非泄水一线船闸人字门处产生较大的反向水头; 同时受下游主河道地形的顶托作用, 其泄水水流大部分将进入到一、二线船闸引航道内, 并在一、二线船闸人字门处产生较大的反向水头。因此, 解决上述问题的关键在于控制三、四线船闸的泄水流量, 而优化船闸尤其是泄水阀门的运行方式则是最为有效最为便捷的措施。

3.2 船闸优化运行方式

控制三、四线船闸泄水流量的方法有以下几种:

- 1) 泄水阀门慢速开启方式;
- 2) 泄水阀门局部开启方式;
- 3) 泄水阀门间歇开启方式;
- 4) 三、四线船闸相互输水方式(两线船闸间设有连通廊道);
- 5) 三、四线船闸错时泄水方式。

各种优化方式的试验成果见表2。

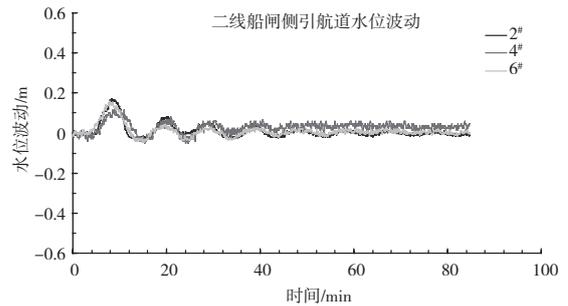
由优化试验成果可知, 上述各种优化运行方式均可有效控制三、四线船闸的泄水流量, 改善下游引航道的水流条件。但对于三、四线船闸

表2 船闸优化运行方式下泄水引航道水力特征值 (上游水位20.60 m)

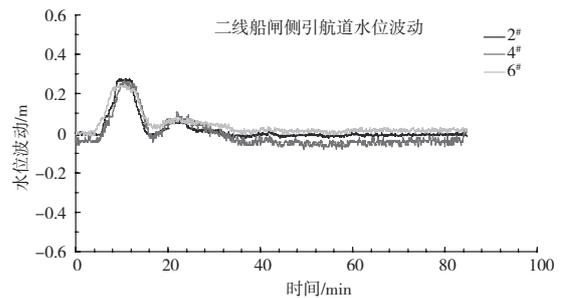
工况	优化方式	下游水位/m	阀门开启方式	人字门处水位波动				靠船墩处水位波动				靠船墩处纵向流速			
				最大值/m				最大值/m				最大值/(m·s ⁻¹)			
				一线	二线	三线	四线	一线	二线	三线	四线	一线	二线	三线	四线
三(四)线单独泄水	慢速开启	3.32	$t_{v3}=7\text{min}$	+0.20	+0.29	+0.15	+0.14	+0.20	+0.20	+0.15	+0.14	+0.14	+0.14	+0.44	+0.38
	局部开启	3.32	$t_{v3}=7\text{min}$ $n=0.4$	-0.04	-0.04	-0.05	-0.05	-0.04	-0.03	-0.05	-0.05	-0.14	-0.12	-0.05	-0.05
	间歇开启	3.32	$t_1=5\text{min}$ $n=0.4$ $t_2=3.5\text{min}$	+0.19	+0.22	+0.24	+0.18	+0.17	+0.27	+0.20	+0.21	+0.18	+0.27	+0.50	+0.38
三、四线同时泄水	相互输水	5.05	$t_{v1}=5\text{min}$ $t_{v2}=3\text{min}$	+0.22	+0.25	+0.24	+0.18	+0.20	+0.11	+0.19	+0.16	+0.10	+0.10	+0.34	+0.32
		1.40	$t_{v3}=5\text{min}$ $h=4\text{m}$	-0.06	-0.10	-0.07	-0.10	-0.06	-0.16	-0.06	-0.07	-0.09	-0.10	-0.09	-0.08
	错时泄水	3.32	$t_{v3}=5\text{min}$ $t_c=5\text{min}$	+0.34	+0.40	+0.23	+0.24	+0.27	+0.07	+0.27	+0.19			+0.43	+0.52
		3.32	$t_{v3}=5\text{min}$ $t_c=5\text{min}$	-0.03	-0.05	0.00	-0.02	0.00	0.00	0.00	0.00			-0.04	0.00
				+0.21	+0.32	+0.32	+0.25	+0.21	+0.41	+0.23	+0.24	+0.11	+0.10	+0.69	+0.71
				-0.10	-0.09	-0.11	-0.14	-0.10	-0.10	-0.10	-0.10	-0.23	-0.21	-0.18	-0.19

注: n 表示停机开度, t_f 表示停机时间, t_{v1} 表示泄水阀门开启时间, t_{v2} 表示连通阀门开启时间, t_{v3} 表示连通阀门关闭时间, h 表示连通阀门关闭时刻三、四线船闸间的剩余水头差, t_c 表示三、四线船闸错开泄水的时间。

单独泄水工况, 无论是泄水阀门慢速开启、局部开启还是间歇开启方式, 其输水时间将大大超过原设计输水时间, 因而可行性较低, 考虑到该工况仅在下游设计最低通航水位3.32 m时引起二线船闸人字门处反向水头超标, 而此时二线船闸下游引航道水深较浅, 已不宜船舶航行, 因此, 建议该水位下二线船闸不投入运行, 此时三、四线船闸则仍可采用设计运行方式运行, 但需将二线船闸下闸首人字门打开置于门库内并处于锁锭状态以确保其安全。而对于三、四线船闸同时泄水工况, 上述相互输水方式和错时输水方式均可采用, 但在极限工况下, 三、四线船闸仅能采用相互输水运行方式。下游典型水位下三、四线船闸同时泄水、相互输水及错时泄水时二线船闸下游引航道水位波动及三线船闸下游引航道流速对比分别见图4和图5。

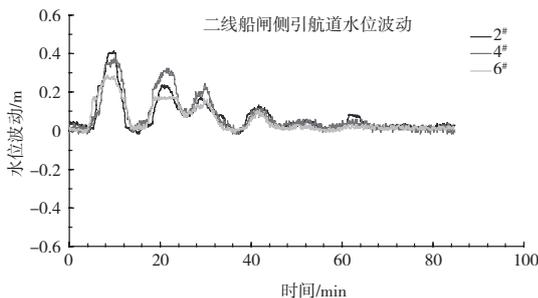


b) 三、四线船闸相互输水

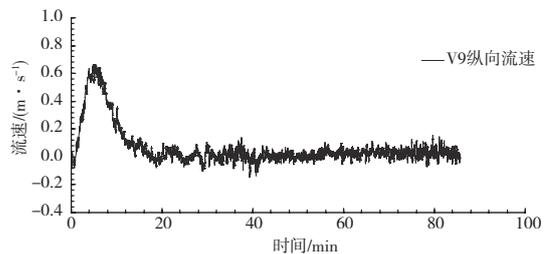


c) 三、四线船闸错时泄水

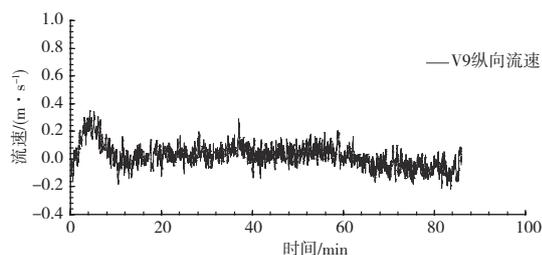
图4 长洲三、四线船闸不同运行方式泄水时二线船闸下游引航道水位波动对比



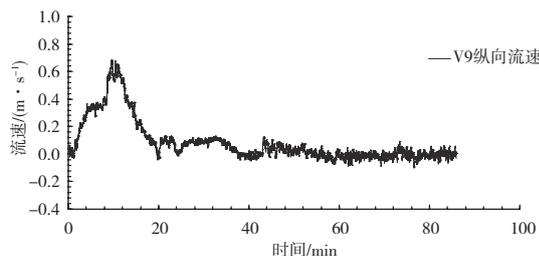
a) 三、四线船闸同时泄水



a) 三、四线船闸同时泄水



b) 三、四线船闸相互输水



c) 三、四线船闸错时泄水

图5 长洲三、四线船闸不同运行方式泄水时三线船闸下游引航道水流纵向流速波动对比

3.3 船闸最终推荐运行方式

1) 经综合比较分析,最终确定的船闸阀门开启方式为:①一、二线船闸运行方式采用——泄水阀门连续开启、开启时间 $t_v=7$ min;②三、四线船闸独立运行方式采用——泄水阀门连续开启、开启时间 $t_v=5$ min;③三、四线船闸相互输水运行方式——连通阀门先以 $t_v=3$ min的速度开至全开,待两线船闸间剩余水头4 m时,以 $t_v=5$ min的速度关闭连通阀门,同时以 $t_v=5$ min的速度开启泄水阀门。

2) 综合考虑今后船闸运行管理的可操作性,最终确定了影响船闸运行方式的3个下游控制水位,分别为6.32 m, 4.32 m和3.32 m,并提出了不同下游水位范围下的船闸运行方式,即:①当下游水位 ≥ 6.32 m时:4座船闸可按上述运行方式在任意时刻开启泄水;②当下游水位在6.32~3.32 m时:一线船闸可采用上述运行方式在任意时刻开启泄水;二线船闸在下游水位在6.32~4.32 m时,采用上述运行方式可在任意时刻开启泄水,在下游水位低于4.32 m时不投入运行。三、四线船闸采用上述独立运行方式,但两线船闸泄水时刻需错开5 min,或者采用上述相互输水方式;③当下游水

位 < 3.32 m时,一、二线船闸则建议不投入运行,三、四线船闸推荐采用上述相互输水运行方式。

3) 无论何种运行方式下,不投入运行的船闸下闸首人字门应打开置于门库内并处于锁锭状态,以确保闸门自身安全。

4 结语

长洲水利枢纽通航建筑物采用四线船闸并列布置,且共用引航道,其引航道内水流条件受船闸充泄水影响较大。通过建立的比尺为1:50的包括一、二、三、四线船闸在内的下游引航道整体物理模型及相应的数学模型,全面研究了长洲船闸各种典型水位组合及运行方式下的下游引航道的水流条件,确定了影响船闸运行方式的下游控制水位,并提出了相应的船闸运行方式,成果可为工程设计和运行管理提供依据。

参考文献:

- [1] 黄卡. SMS 模型在长洲水利枢纽下游水流模拟中的应用研究[J]. 红水河, 2010(3): 24-28.
- [2] 刘本芹, 黄岳, 宗慕伟. 广西长洲水利枢纽1号船闸输水系统水力学模型试验研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究所, 2003.
- [3] 宣国祥, 李中华, 黄岳. 广西长洲水利枢纽船闸输水系统模型试验研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究所, 2003.
- [4] 宣国祥, 李君. 长洲水利枢纽三线四线船闸工程初步设计阶段输水系统布置及水力分析[R]. 南京: 南京水利科学研究所, 2010.
- [5] 宣国祥, 李君, 黄岳. 长洲水利枢纽三线四线船闸工程初步设计阶段输水系统水力学模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究所, 2010.
- [6] GB 50139—2004 内河通航标准[S].
- [7] JTJ 305—2001 船闸总体设计规范[S].
- [8] JTJ 306—2001 船闸输水系统设计规范[S].

(本文编辑 郭雪珍)