



# 并列双线船闸单侧闸墙长廊道输水系统布置 及水力学模型试验研究

覃业传<sup>1</sup>, 李君<sup>2</sup>, 宣国祥<sup>2</sup>, 黄岳<sup>2</sup>

(1. 广西西江开发投资集团有限公司, 广西南宁 530022;  
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, 水利部水科学与水工程重点实验室, 江苏南京 210029)

**摘要:**长洲三线四线船闸为目前国内规模最大的单级船闸。针对其并列布置方案, 提出单侧闸墙主廊道闸底横支廊道的输水系统形式。通过水力计算分析及1:32的水工模型试验研究, 提出输水系统的具体布置, 确定船闸不同运行方式下的阀门开启方式, 得到输水过程的相关水力特性, 解决了单侧闸墙廊道布置下闸室水流分布不均的问题。研究表明: 提出的输水系统布置是合理可行的, 各水力特征值均满足规范和设计要求, 且输水系统布置于两线船闸之间, 便于管理, 减小了工程量, 并可减少船闸耗水量。研究成果可为巨型船闸设计及船闸节水研究提供借鉴。

**关键词:** 并列船闸; 输水系统; 水力特性; 模型试验; 省水

中图分类号: U 641.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)05-0139-06

## Layout and hydraulic model study of filling and emptying system with single wall culvert for parallel double-lane locks

QIN Ye-chuan<sup>1</sup>, LI Jun<sup>2</sup>, XUAN Guo-xiang<sup>2</sup>, HUANG Yue<sup>2</sup>

(1. Guangxi Xijiang Development & Investment Group Co., Ltd., Nanning 530022, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,

Key Laboratory of Navigation Structures Construction Technology, Ministry of Transport, PRC,

Key Laboratory of Water Science and Engineering, Ministry of Water Resources, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** Changzhou 3rd and 4th lane locks are the biggest single-step locks in China. Based on the parallel layout plan for these new locks, the filling and emptying system with single long culvert in the lock wall and lateral manifolds in the lock bottom has been put forward. By means of hydraulic analysis and model test (model scale 1:32), the specific layout of the filling and emptying system and the valve's opening patterns under different operation mode have been determined, the hydraulic characteristics during lock filling and emptying have also been studied, the uneven flow distribution in lock chamber with single wall culvert layout has been well improved. The results indicate that the layout of the filling and emptying system is reasonable and practical; each of the hydraulic characteristics satisfies the designing requirements. The filling and emptying system which is laid out between the two locks is convenience for management and can reduce the work quantities, it also can save water due to the connecting culvert. The results can be used for the huge lock design and lock water saving study.

**Keywords:** parallel locks; filling and emptying system; hydraulic characteristic; model test; water saving

收稿日期: 2014-08-04

作者简介: 覃业传 (1962—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事水运工程建设、管理与研究工作。

西江干线是我国与长江并列的黄金水道，对广西区域经济和社会发展影响巨大。广西壮族自治区做出了“打造西江黄金水道、促进区域经济协调发展”的重大战略决策<sup>[1]</sup>，为落实上述战略目标突破西江亿吨级航运通道瓶颈，就必须在西江黄金水道上建设一批巨型船闸，这其中就包括在建的长洲三线四线船闸。

长洲三线四线船闸按最大通过船舶吨级为 3 000 吨级设计，为 I 级船闸，采用并列布置方案，设计有效尺度为 340.0 m × 34.0 m × 5.8 m（长 × 宽 × 门槛水深），建成后将成为国内乃至世界范围内规模最大的单级船闸。船闸设计最大水头为 17.28 m（上游正常蓄水位 20.60 m 至下游最低通航水位 3.32 m），设计输水时间 12 min。

由于该船闸规模巨大、水力指标高、过闸运量大，且双线同时建设，而输水系统作为该船闸的核心组成部分，将直接影响到船闸的建设方案、运行效果与今后的管理模式。因此需对输水系统进行水力分析，并通过物理模型试验论证及优化，以确保船闸运行及过闸船舶的安全。在船闸可行性研究阶段及初步设计阶段，分别针对单侧闸墙长廊道输水系统和闸底单根主廊道输水系统开展了详细研究<sup>[2-3]</sup>。本文主要介绍前一种输水系统的研究成果。

### 1 输水系统形式及布置

根据《船闸输水系统设计规范》<sup>[4]</sup>中输水系统

类型的选择公式：

$$m = \frac{T}{\sqrt{H}} \quad (1)$$

式中： $T$  为输水时间（min）， $H$  为水头（m）。可知，对于长洲三线四线船闸  $m = 2.89$ 。

可见，其  $m$  值在 2.5 ~ 3.5 之间，可采用集中输水系统，也可采用分散输水系统，但计算  $m$  值时未考虑到闸室规模对输水系统形式的影响，对于大型船闸需综合考虑其综合水力指标来确定最终的输水系统形式。鉴于长洲船闸为西江黄金水道的控制工程，且船闸规模巨大，通航保证率要求高，对集中输水系统来说，该船闸综合水力指标显然较高，因此考虑采用分散输水系统方案。结合该船闸双线并列布置及同时建设的特点，考虑采用单侧闸墙长廊道闸底横支廊道输水系统，并将输水系统布置在两线船闸之间，以便于管理、减小工程量；同时通过连通廊道连接两座船闸输水系统，并采用相互输水的方式，从而可减少船闸耗水量。

在综合国内外已有此类输水系统研究成果的基础上，结合长洲三线四线船闸特点，最终确定采用单侧闸墙长廊道闸底横支廊道两区段出水明沟消能的输水系统形式，输水系统具体布置见图 1~3，各部位特征尺寸见表 1。

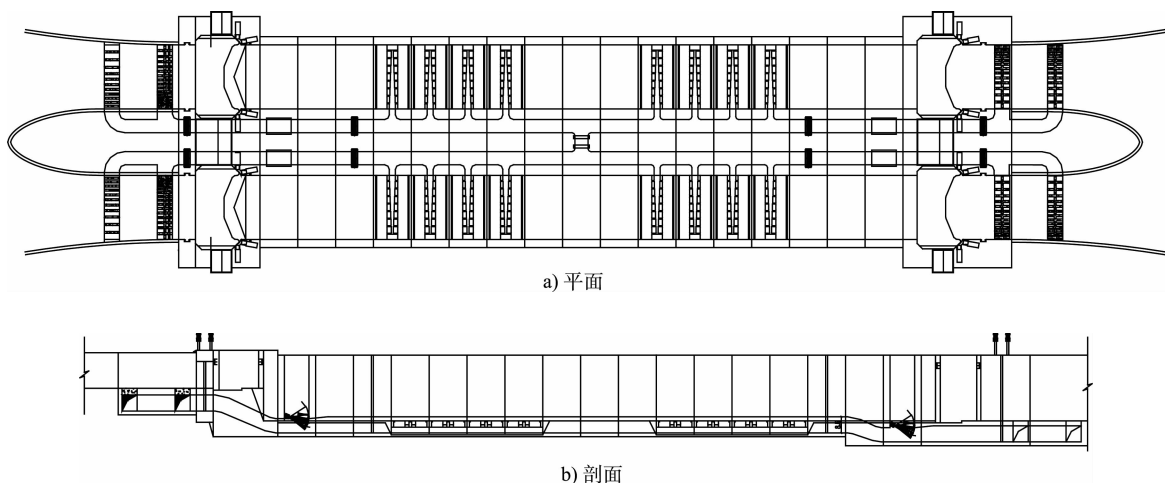


图 1 船闸输水系统总体布置

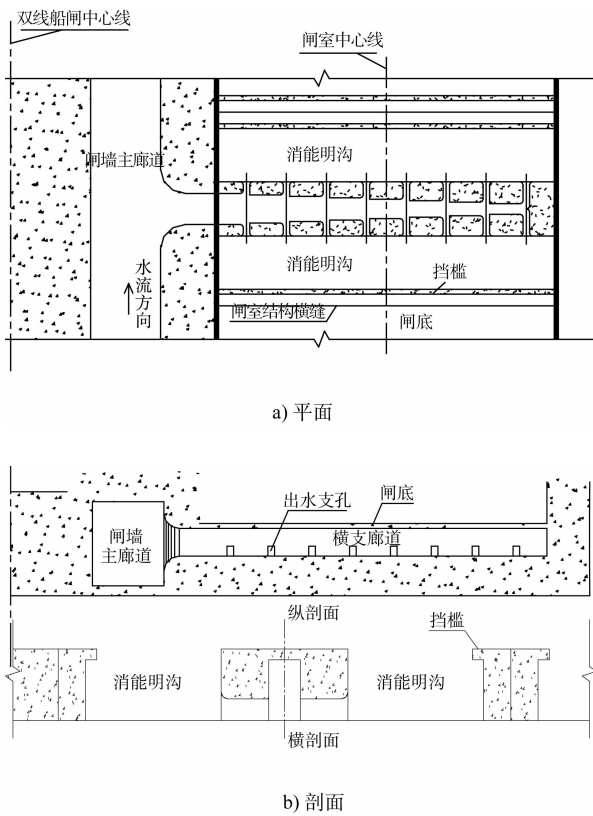


图 2 闸底横支廊道布置

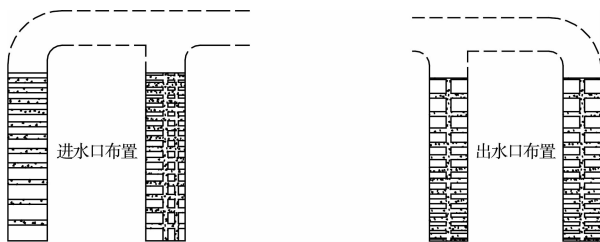


图 3 输水系统进、出水口布置

表 1 输水系统特征尺寸

部位	面积/m <sup>2</sup>	与阀门面积比
上闸首进水口	302.75	5.77
充水阀门段廊道	52.50	1.00
闸墙主廊道	59.50	1.13
闸底横支廊道	71.68	1.36
出水支孔	83.20	1.58
泄水阀门段廊道	52.50	1.00
下闸首出水口	284.2	5.41
连通廊道	52.50	1.00

## 2 输水系统水力特性试验与成果分析

根据重力相似准则, 建立了长洲三线四线船

闸 1:32 的整体物理模型, 进行了相关的水力学试验并对试验成果进行了详细的分析研究, 并最终确定了输水阀门的开启方式。

### 2.1 船闸运行方式与试验工况

由于长洲三线四线船闸采用并列布置及共用上下游引航道的方案, 并且在两线船闸输水系统间设置了连通廊道, 因此其运行方式有 2 种: 1) 单线输水运行方式, 即每一线独立完成充、泄水过程; 2) 双线相互输水运行方式, 即双线船闸之间先通过连通廊道进行相互输水, 待两线船闸间水头差减小到一定程度后, 关闭连通廊道输水阀门停止两线船闸间的输水, 同时开启每一线的充、泄阀门以完成剩余的输水过程。

试验主要针对水位组合 20.6 m 至 2.4 m (试验时船闸下游水位初定为 2.4 m, 最终确定为 3.32 m) 开展详细研究, 在研究上游进水口流态时则对水位组合 18.6 m (上游最低通航水位) 至 2.4 m 进行了补充研究。经初步的水力分析, 最终确定的 2 种船闸运行方式下输水阀门开启方式分别为: 1) 单线输水运行方式下, 输水阀门采用 4~6 min 匀速开启的开启方式; 2) 双线相互输水运行方式下, 采用 3 min 的连通阀门开启速度、5 min 的闸首输水阀门开启速度、4~6 min 的连通阀门关门速度及 4~6 min 的连通阀门关门时的两线船闸水位差的开启方式, 此运行方式下船闸输水时间可放慢至 15 min。而在研究闸室内船舶停泊条件时, 分别考虑了 3 000 吨级单船和 2×2 000 吨级船队 2 种设计船型, 以及船舶停泊在上半闸室右侧、上半闸室左侧、下半闸室右侧及下半闸室左侧 4 个位置时的工况。

### 2.2 闸室充、泄水水力特性

针对上述工况, 分别对 2 种船闸运行方式下的输水水力特性进行试验, 以比较各开启方式下的输水时间及水力指标。闸室充、泄水水力特性试验成果分别见表 2 和表 3, 典型充水工况水位流量曲线见图 4 和图 5。

表 2 单线船闸输水时闸室充、泄水水力特征值

工况编号	H/m	$t_{v1}$ /min	$T_f/T_e$ /s	$Q_{fmax}/Q_{emax}/(m^3 \cdot s^{-1})$	$U_{umax}/U_{dmax}/(m \cdot min^{-1})$	$U_{uavg}/U_{davg}/(m \cdot min^{-1})$	$d_f/d_e/m$
SNF01/SNE01	18.2 (20.6 - 2.4)	4	10.97/12.93	668/565	3.09/2.62	1.66/1.41	0.28/0.26
SNF02/SNE02		5	11.36/13.32	629/536	2.91/2.48	1.60/1.37	0.28/0.26
SNF03/SNE03		6	11.78/13.71	589/491	2.73/2.27	1.54/1.33	0.28/0.26

注: H 为水头,  $t_{v1}$  为闸首输水阀门开启时间,  $T_f/T_e$  分别为闸室充/泄水时间,  $Q_{fmax}/Q_{emax}$  分别为最大充/泄水流量,  $U_{umax}/U_{dmax}$  分别为充/泄水时闸室水面最大上升/下降速度,  $U_{uavg}/U_{davg}$  分别为充/泄水时闸室水面平均上升/下降速度,  $d_f/d_e$  分别为闸室超灌/泄值。

表 3 双线船闸相互输水时闸室充、泄水水力特征值 ( $t_{v1} = 5 \text{ min}$ ,  $t_{v2} = 3 \text{ min}$ )

工况编号	H/m	$t_{v3}$ /min	h/m	$T_f/T_e$ /s	$Q_{fmax1}/Q_{fmax2}/(m^3 \cdot s^{-1})$	$Q_{emax1}/Q_{emax2}/(m^3 \cdot s^{-1})$	$U_{umax}/U_{dmax}/(m \cdot min^{-1})$
DNF01/DNE01	18.2 (20.6 - 2.4)	4	5	13.36/15.01	540/418	540/343	2.50
DNF02/DNE02		5	4	13.85/15.47	540/401	540/331	2.50
DNF03/DNE03		5	5	13.42/15.15	540/410	540/335	2.50
DNF04/DNE04		5	6	13.11/14.76	540/417	540/342	2.50
DNF05/DNE05		6	5	13.50/15.31	540/373	540/307	2.50

注: H 为水头,  $t_{v1}$  为闸首输水阀门开启时间,  $t_{v2}$  为连通阀门开启时间,  $t_{v3}$  为连通阀门关闭时间,  $T_f/T_e$  分别为闸室充/泄水时间,  $Q_{fmax1}/Q_{fmax2}$  分别为充水过程第一/第二阶段最大充水流量,  $Q_{emax1}/Q_{emax2}$  分别为泄水过程第一/第二阶段最大充水流量,  $U_{umax}/U_{dmax}$  分别为充/泄水时闸室水面最大上升/下降速度。

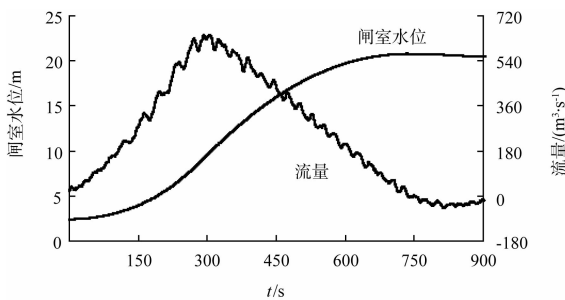


图 4 单线船闸充水过程水位流量过程 ( $t_v = 5 \text{ min}$ )

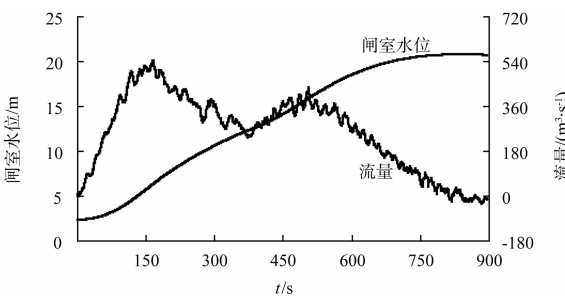


图 5 双线船闸相互充水过程水位流量过程 ( $t_{v3} = 5 \text{ min}$ ,  $h = 4 \text{ m}$ )

由表 2 可知, 单线船闸在 18.2 m 水头下输水时: 1) 充、泄水阀门采用 4 ~ 6 min 匀速开启方式, 平均输水时间在 11.95 ~ 12.74 min 之间, 考虑到船闸输水系统水力学模型试验存在一定的缩尺效应, 原型流量系数比模型将有所增大, 而输水时间将缩短, 因此原型输水时间应能满足设计要求; 2) 经计算所得阀门段廊道最大流速在 12.72 ~ 9.35 m/s 范围内, 闸底主廊道最大流速在

11.23 ~ 8.25 m/s 范围内, 上游进水口最大平均流速在 2.21 ~ 1.94 m/s 范围内, 上述各项水力指标均满足规范要求。3) 惯性超高(降)值略超过规范允许值 (0.25 m), 但在原型中可采用提前关闭输水阀门和水位齐平时打开人字门等措施加以解决。

由表 3 可知, 双线船闸在 18.2 m 水头下相互输水时: 1) 第一阶段连通阀门采用 3 min 匀速开启方式, 第二阶段充、泄水阀门采用 5 min 匀速开启方式, 第一阶段末连通阀门采用 3 ~ 6 min 关闭方式, 关阀时两线船闸水位差采用 4 ~ 6 m, 闸室平均输水时间在 15 min 之内, 满足设计要求, 原型输水时间将进一步缩短; 2) 在其余参数相同的情况下, 输水时间随连通阀门关闭时间的增加而增加, 随连通阀门关闭时两线船闸水位差的增加而缩短, 随着初始工作水头的增加而增加; 3) 经计算所得连通廊道阀门段最大流速为 10.28 m/s, 闸首阀门段廊道最大流速在 7.96 ~ 5.85 m/s 范围内, 闸墙主廊道最大流速为 9.08 m/s, 上游进水口最大平均流速在 1.38 ~ 1.01 m/s 范围内, 上述各项水力指标均满足规范要求。

### 2.3 输水系统阻力系数与流量系数

在恒定流条件下, 通过测压管测定廊道压力及

上、下游引航道水位和闸室水位,计算出输水廊道的总阻力系数和流量系数,计算结果见表4。可知,

单线船闸充、泄水流量系数分别为0.849和0.708,双线船闸相互充水时的流量系数在0.70左右。

表4 输水廊道阻力系数和流量系数

单线船闸充水		单线船闸泄水		三线向四线船闸充水		四线向三线船闸充水	
廊道部位	阻力系数	廊道部位	阻力系数	廊道部位	阻力系数	廊道部位	阻力系数
上进水口段	0.234	出水支孔段	0.938	三线闸室水面至连通阀门	1.132	四线闸室水面至连通阀门	1.141
鹅颈管段	0.346	鹅颈管段	0.257	连通阀门至四线闸室水面	0.924	连通阀门至三线闸室水面	0.913
输水阀门段	0.124	输水阀门段	0.105	总阻力系数	2.056	总阻力系数	2.054
出水支孔段	0.684	下出水口段	0.693	流量系数	0.697	流量系数	0.698
总阻力系数	1.388	总阻力系数	1.993				
流量系数	0.849	流量系数	0.708				

## 2.4 闸室内船舶(队)停泊条件

由于采用的是单侧闸墙主廊道布置,与双侧闸墙主廊道布置相比,其闸室内的水流分布尤其是横向水流分布更为不均匀,若处置不当,将会对闸室内船舶产生较大的横向水流作用力。在进行此种单侧闸墙廊道输水系统布置时,已充分考虑了闸室内流量分配,为使闸室纵向及横向流量分配均匀,在闸室内设置了2个总长均为80 m出水区段,每个区段分别布置4根尺寸相同的横支廊道,每个横支廊道的两侧各布置相等面积的8个

出水支孔,横支廊道断面面积分8级递减,以保持等面积出水支孔出流均匀,从而使闸室内不出现明显的横向水流。为调整闸室上下2个出水区域水量基本相同,上、下半闸室闸墙主廊道与闸底横支廊道分别采用不同的连接圆弧半径,以保证两出水区段进流基本一致,从而不使闸室内出现较明显的纵向水流。

采用上述布置取得了较好的效果,试验中未观察到明显的纵向水流,18.2 m水头下2种船闸运行方式不同阀门开启方式下典型船舶最大系缆力值见表5。

表5 典型船舶(队)最大系缆力

试验工况	船舶形式	阀门开启方式	船舶(队)停泊位置	纵向力/kN	前横向力/kN	后横向力/kN
FF01D/ FF02D	3 000 t 单船	$t_{v1} = 4/5 \text{ min}$	上半闸室右侧	24.9/20.1	17.1/7.1	22.3/10.3
FF01E/ FF02E	3 000 t 单船		上半闸室左侧	32.7/22.3	15.4/3.2	21.6/11.3
FF01F/ FF02F	3 000 t 单船		下半闸室右侧	34.9/31.1	16.6/8.4	20.7/10.4
FF01G/ FF02G	3 000 t 单船		下半闸室左侧	40.3/31.0	15.4/10.0	21.7/18.8
FF11D/ FF12D	2 × 2 000 t 船队	$t_{v1} = 4/5 \text{ min}$	上半闸室右侧	26.2/23.8	9.5/8.3	8.9/7.1
FF11E/ FF12E	2 × 2 000 t 船队		上半闸室左侧	37.4/36.8	14.1/11.6	12.5/8.7
FF11F/ FF12F	2 × 2 000 t 船队		下半闸室右侧	36.3/28.9	13.5/8.9	18.7/14.9
FF11G/ FF12G	2 × 2 000 t 船队		下半闸室左侧	39.0/38.2	15.6/12.0	14.6/11.3
FF03E/ FF13E	3 000 t 单船/2 × 2 000 t 船队	$t_{v1} = 5 \text{ min}$ 、 $t_{v2} = 3 \text{ min}$ $t_{v3} = 5 \text{ min}$ 、 $h = 4 \text{ m}$	上半闸室左侧	41.6/30.0	16.4/13.8	20.1/13.1
FF03G/ FF13G	3 000 t 单船/2 × 2 000 t 船队		下半闸室左侧	35.5/31.6	15.8/9.2	10.4/9.3
FF03H/ FF13H	3 000 t 单船/2 × 2 000 t 船队		闸室中部左侧	31.6/18.4	21.8/18.9	11.6/8.1

注:停靠位置中闸室左侧代表靠近闸墙主廊道一侧,右侧为无输水廊道闸墙一侧。

根据表5数据,并结合闸室内水流流态及船舶漂移情况,分析可知,在单线船闸输水时:  
1) 由于采用了底部两区段出水布置,闸室底部存在三段间隔布置的不出水段。对于3 000吨级单船,其长度较短,当其停泊在上半闸室(船的一

端位于闸室前部不出水段,一端位于出水段上)时,其纵向系缆力朝向上闸首方向,停泊在下半闸室时,其纵向系缆力方向则朝向下闸首方向;而对于2 × 2 000吨顶推船队,其长度较长,无论其停泊在何位置,都将横跨2个不出水段及一个

出水段,其纵向系缆力方向始终呈朝向上、下闸首交替变化;2)对于闸底横支廊道出水段,靠近主廊道侧出水稍多,因此,船舶停泊在闸室左侧(即靠近主廊道侧闸墙)时,其横向系缆力较停泊在闸室右侧的系缆力稍大。3)各种工况下,设计船舶(队)的系缆力均满足规范要求。在双线船闸相互输水时:1)船舶(队)停泊在闸室中部也是控制工况之一;2)设计船舶(队)的系缆力均满足规范要求。

### 2.5 进、出水口水流条件

上游进水口采用引航道底部双横支廊道顶支孔布置,最大设计水头时淹没水深为11.3 m,上游最低通航水位时淹没水深为9.3 m,上游最低通航水位时(18.60~2.40 m)为其控制工况。对于单线船闸充水工况,试验中发现尽管在最大流量前后靠近主廊道一侧进水口上方出现旋转水流,但未形成串心漩涡,不至于影响船闸安全运行。对于双线相互输水运行方式,输水第一阶段为两线船闸相互充水,当进入第二阶段时,充水水头已大大降低,因而进水口流量较小,其流态非常平稳。

下闸首出水口亦采用引航道底部双横支廊道顶支孔布置,在整个泄水过程中,下游引航道水流较为平稳,流速分布较为均匀,而另一线船闸一侧引航道内表面存在旋转水流,对此可通过采用底部透空式副导墙加以改善<sup>[5]</sup>。

### 2.6 推荐输水阀门开启方式

根据上述试验成果综合分析,最终推荐的输水阀门运行方式分别为:1)单线船闸运行时,采用 $t_{v1}=5\text{ min}$ (参数含义见表2、表3注,下同)的匀速开启方式;2)双线相互输水运行时,采用 $t_{v1}=5\text{ min}$ 、 $t_{v2}=3\text{ min}$ 、 $t_{v3}=5\text{ min}$ 、 $h=4\text{ m}$ 的阀门运行方式。

上述试验成果均为18.2 m水头下成果,对于最终的设计水头17.28 m工况,其输水水头降低近1 m,输水阀门淹没水深及下游引航道水深亦增加近1 m,在同样的推荐阀门运行方式下,这将使各项输水水力指标有所下降,从而使船闸

充泄水水流条件有所改善,并进一步缩短输水时间。

### 3 结语

长洲三线四线船闸是西江黄金水道重要的控制节点,也是世界内河规模最大的单级船闸之一,其运行安全与效率直接影响到西江黄金水道的平安与畅通。

根据长洲三线四线船闸并列布置且同时建设的特点,提出采用单侧闸墙主廊道闸底横支廊道侧支孔明沟消能的输水系统形式,将2座船闸的输水系统主输水廊道、输水阀门及其启闭机构均设置于两线船闸之间,不但可简化工程设计、降低工程量,还便于船闸运行管理。同时提出在两线船闸闸墙主廊道之间设置连通廊道,实现了两线船闸间的相互输水,从而可大大降低船闸耗水量,以达到船闸省水的目的。通过详细的水工模型试验对上述方案的水力特性进行研究,解决了单侧闸墙廊道布置下闸室内水流分布不均的问题,验证了该方案的可行性,并推荐了船闸的运行方式,从而为工程设计提供依据。

### 参考文献:

- [1] 中国共产党广西壮族自治区委员会.中共广西壮族自治区委员会广西壮族自治区人民政府关于打造西江黄金水道促进区域协调发展的若干意见(桂发[2009]24号)[R].南宁:中国共产党广西壮族自治区委员会,2009.
- [2] 李君,宣国祥,黄岳.长洲水利枢纽三线四线船闸工程可行性研究阶段船闸水力学模型试验研究[R].南京:南京水利科学研究院,2009.
- [3] 宣国祥,李君,黄岳.长洲水利枢纽三线四线船闸初步设计阶段输水系统水力学模型试验研究[R].南京:南京水利科学研究院,2011.
- [4] JTJ 306—2001 船闸输水系统设计规范[S].
- [5] 韦德鉴,宣国祥,李君,等.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[J].水运工程,2012(8):119-124.

(本文编辑 郭雪珍)