

## · 航道及通航建筑物 ·

大水位变幅下省水船闸水位分级研究<sup>\*</sup>杨 锦<sup>1</sup>, 刘本芹<sup>2</sup>, 汪 磊<sup>1</sup>, 宣国祥<sup>2</sup>

(1. 百色枢纽通航投资有限公司, 广西百色 533099; 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:** 省水船闸通过把总水头进行分级, 减小每级工作水头, 除节省船闸用水量外, 还有利于解决高水头船闸的水力学问题, 对我国西部山区河流船闸建设具有很好的适应性。在分析省水船闸运行原理的基础上, 研究了理论省水率的计算方法及其随省水池级数、面积的变化规律, 总结分析了影响省水船闸水位分级的主要因素。以广西右江百色水利枢纽通航船闸为依托工程, 针对船闸上游水位变幅大、设计水头高、工程布置条件及运行方式复杂等特点, 计算省水运行时剩余水头的变化规律。从运行水位、省水池级数和面积等方面, 提出了省水池布置参数及大水位变幅下的省水船闸水位分级方式, 进一步模拟计算不同运行方式下的船闸输水水力指标, 论证了水位分级的科学性与合理性。

**关键词:** 省水船闸; 大水位变幅; 水位分级; 运行方式

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)11-0059-07

## Study on water level classification of water-saving ship lock under large water level variation

YANG Jin<sup>1</sup>, LIU Ben-qin<sup>2</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>, XUAN Guo-xiang<sup>2</sup>

(1. Baise Hydro Project Navigation Investment Co., Ltd., Baise 533099, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Key Laboratory of Navigation Structure Construction Technology, Ministry of Transport, PRC, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** The water-saving ship lock can reduce the working head of each stage through classifying the total head. In addition to saving the water consumption, it is also conducive to solving the hydraulic problems of the high head ship lock. Therefore it is suitable for ship locks on rivers in western mountain areas of China. Based on the analyses of the operation principle of the water-saving ship lock, the calculation method of theoretical water saving rate and its variation with the step and area of water saving pools are studied in this paper, and the main factors affecting the water level classification of water-saving ship lock are summarized and analyzed. According to the characteristics of large variation of upstream water level, high design head, complex engineering layout conditions and operation modes, the variation laws of residual head in water saving operation are calculated on the navigation ship lock of Baise water control project on the Youjiang River in Guangxi. From the aspects of operation water level, and the step and area of the storage basins, the layout parameters of the storage basins and the water level classification method of the water-saving ship lock are proposed under large water level variation. Furthermore, the hydraulic indexes under different operation modes are simulated and calculated, and the scientific and reasonable classification of water level is proved.

**Keywords:** water-saving ship lock; large water level variation; water level classification; operation mode

收稿日期: 2021-02-02

\*基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402001)

作者简介: 杨锦(1981—), 男, 高级工程师, 从事水运工程及工程建设管理研究。

通讯作者: 刘本芹(1977—), 女, 硕士, 教授级高工, 从事通航水力学、水工水力学及生态水力学等方面的科研工作。

E-mail: bqliu@nhri.cn

省水船闸具有节省船闸运行耗水量的突出优势,在国外水运建设中尤其运河上应用广泛,德国在莱茵河—多瑙河运河上不到200 km的航道上就建设了十余座省水船闸,巴拿马运河第三通道建有规模最大的连续3级省水船闸,每级闸室设3个省水池<sup>[1]</sup>。除此之外,省水船闸通过省水池完成每次运行过程的临时蓄水,把总水头进行分级,可减小船闸工作水头,有利于解决高水头船闸的水力学问题,对我国西部山区河流船闸建设具有很好的适应性,广西巴江口复线船闸、贵州白市船闸等工程都对省水布置方案进行了研究<sup>[2-3]</sup>。与此同时,在省水船闸的水级划分、省水率以及水力计算方面也开展了相应的基础研究与探讨<sup>[4-6]</sup>,但至今国内尚未有真正意义上的省水船闸建成并投入运行。对于西部山区枢纽水库水位变幅较大、设计水头高且工程布置复杂的通航工程设施,省水船闸的水位分级对工程建设至关重要,将直接关系到船闸输水效率、通过能力及运行安全,需要紧密结合工程特点进行详细研究论证。本文以广西右江百色水利枢纽通航船闸为依托工程,从省水池级数、面积、输水水力指标等方面,研究大水位变幅下的省水船闸水位分级问题,以便充分发挥工程航运效益。

## 1 工程概况

依托工程通航建筑物形式采用船闸和升船机组合方案,过船设施由上游船闸、中间渠道、通航渡槽、垂直升船机和辅助闸室等建筑物组成。船闸是为适应上游水库的水位变幅而建,闸室有效尺度为130 m×12 m×4.7 m(长×宽×门槛水深);同时,为了减小船闸泄水进入下游中间渠道的水量、降低中间渠道内的非恒定流水位波动、满足下游升船机对接要求,船闸设计建设方案为省水船闸。

船闸上、下游特征水位分别为:上游最高通航水位228.0 m,汛限水位214.0 m,最低通航水位203.0 m;下游中间渠道最高通航水位203.2 m,

最低通航水位203.0 m。船闸典型运行水位组合为:1)上游至下游228.0~203.0 m,水头25.0 m,为设计最大运行水头;2)上游至下游214.0~203.0 m,水头11.0 m,为汛期特征水位组合时的常水头。船闸设计运行方式为:1)上游水位在228.0~214.0 m时,采用省水运行方式;2)上游水位在214.0~203.0 m时,采用非省水运行方式。

该船闸工程的特点为<sup>[7]</sup>:1)工程布置复杂,船闸下游布置了中间渠道、渡槽、升船机等多种不同类型的通航建筑物,省水船闸的水位分级和运行方式受中间渠道水流条件限制较大;2)最大水头达25.0 m,属高水头船闸,即使采用省水方案也很难完全满足下游较长的中间渠道的水流条件要求,须在水位分级的基础上进一步研究非工程措施;3)上游水位变幅大,最大变幅高达25.0 m,即使最高通航水位与汛限水位之间的变幅也有14.0 m,这需要各级省水池高程及高度能够适应较大的水位变化;4)船闸运行方式复杂,要求根据上游水位的不同而分为省水运行和非省水运行两种不同方式。

## 2 省水船闸运行原理

### 2.1 基本原理

对于设省水池的常规省水船闸,一般分为整体式和分散式,整体式省水船闸占地面积小,但结构复杂、止水设计困难、施工难度较大,省水池的水级划分较困难;分散式省水船闸结构简单,省水池之间可以部分重合,水级划分相对灵活,但占地面积大。

以设5级省水池的整体式省水船闸为例,其工作原理见图1。当船闸充水时,首先从最低的省水池向闸室充水,然后按从低到高的顺序,依次从其他省水池向闸室充水,直至最高的省水池向闸室充水完毕,此时闸室与上游之间尚存在一定的水位差,即剩余水头,该剩余水头由上游向闸室充水补充,待闸室与上游水位齐平后,完成整个充水过程。船闸泄水时的顺序恰恰相反,首先

向最高的省水池泄水, 然后按从高到低的顺序, 依次向其他省水池泄水, 直至闸室向最低的省水池泄水完毕, 剩余水体泄向下游, 待闸室与下游水位齐平后, 完成整个泄水过程。

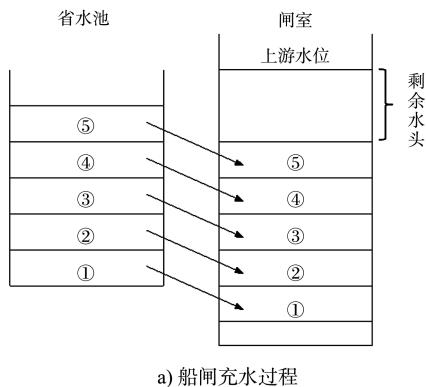


图 1 设省水池的省水船闸工作原理

## 2.2 省水率与省水池参数的关系

根据省水船闸运行原理可知, 省水船闸一次充、泄水过程节省的水量为存储于省水池内的水量, 该水体体积主要取决于省水池的数量和省水池的水域面积。因此, 理论省水率  $E_s$  与省水池的级数  $m$ 、省水池与闸室水域面积比  $k$  之间存在一定关系。

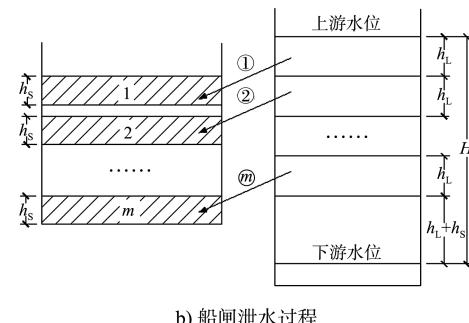
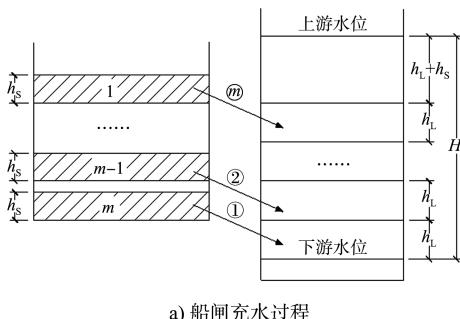


图 2 省水船闸充、泄水过程水位变化关系

如图 2 所示, 对于总水头为  $H$ 、设  $m$  级省水池的船闸, 闸室与每级省水池之间输水结束后, 闸室水位变化为  $h_L$ , 省水池水位变化为  $h_s$ , 而充(泄)水过程中闸室与上(下)游之间的运行水头为  $h_L+h_s$ , 由此可得出省水船闸一次充、泄水过程的理论省水率为:

$$E_s = \left(1 - \frac{h_L + h_s}{H}\right) \times 100\% \quad (1)$$

其中:

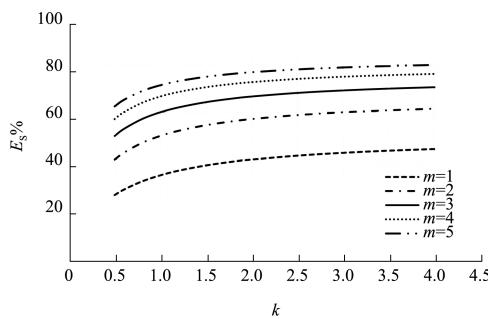
$$h_L/h_s = k \quad (2)$$

$$H = mh_L + (h_L + h_s) = [(m+1)k+1]h_s \quad (3)$$

代入式(1)后可进一步求出省水船闸的理论省水率和省水池级数  $m$ 、省水池与闸室水域面积比  $k$  之间的关系为:

$$E_s = \frac{mk}{(m+1)k+1} \times 100\% \quad (4)$$

根据式(4), 可计算出省水船闸在不同省水池级数、不同省水池与闸室水域面积比等条件下的省水率, 其关系曲线见图 3。由图 3 可知: 1) 在省水池级数  $m$  一定的情况下, 省水率随着省水池与闸室面积比  $k$  的增大而增大; 在省水池与闸室面积比  $k$  一定的情况下, 省水率随着省水池级数  $m$  的增大而增大。2) 当省水池级数  $m$  大于 4, 或省水池与闸室面积比  $k$  大于 3 时, 理论省水率  $E_s$  的增大效果不再明显。分析认为, 进行省水船闸设计布置时, 在充分结合工程布置条件的基础上, 从经济适用性角度考虑, 省水池级数不宜大于 4 级, 省水池与闸室面积比不宜大于 3。

图3 省水率  $E_s$  与  $m$ 、 $k$  的关系

### 3 省水船闸水位分级

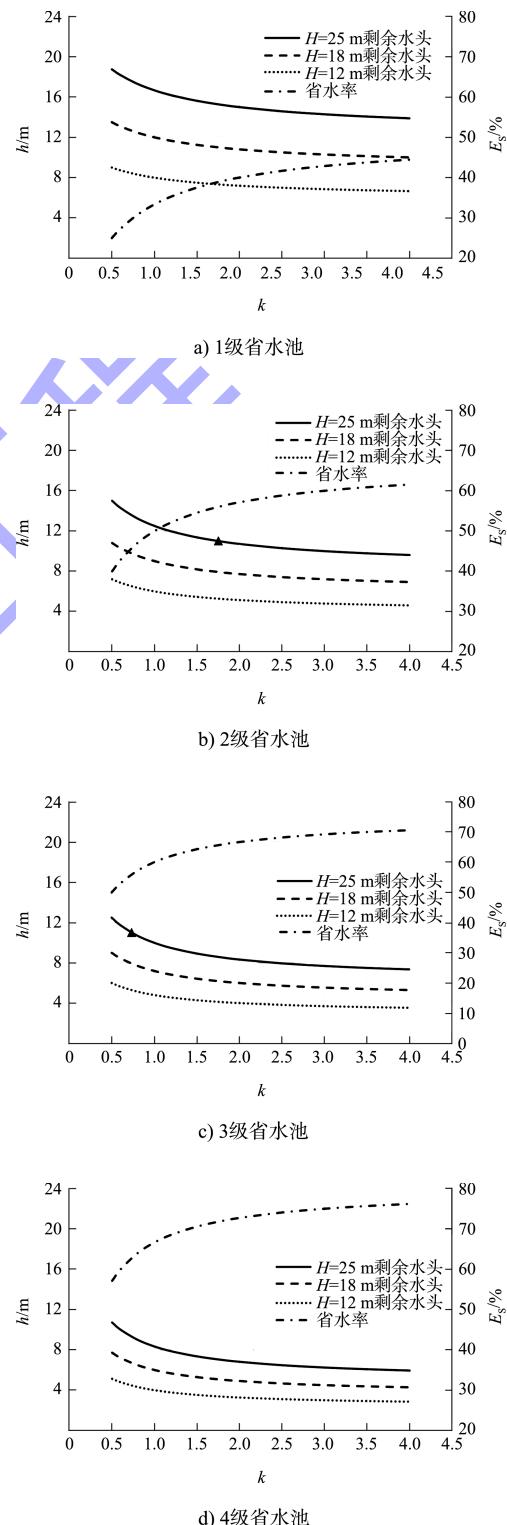
#### 3.1 影响因素分析

影响省水船闸水位分级的因素众多,归纳起来可分为以下几种:1)节水要求。对于水资源匮乏的工程,需要结合船闸省水率要求,论证分析省水池数量或面积,提高水资源综合利用率。2)工程布置条件。省水池数量、面积与结构在一定程度上受工程总体布置、地形、地貌与地质条件等因素限制,须综合考虑予以确定。3)输水力学条件。对于高水头船闸,为了降低输水系统布置的复杂程度,又能够改善阀门工作条件或引航道水流条件,同时需要根据船闸规模、总水头及引航道布置等,通过详细的水动力学研究,论证和验证分析水位分级的合理性。4)通过能力要求。省水船闸运行相对复杂,输水过程分为多个阶段,总的输水时间往往比普通船闸输水时间长,在进行水级划分和省水池布置时需要考虑设计输水时间指标,满足船闸通过能力要求。5)船闸设计运行方式。对于水位变幅较大的船闸,如果存在省水与非省水等不同运行方式,则省水运行时闸室和上游或下游之间的剩余水头不宜与非省水运行水头差别太大,这样在闸首输水阀门采用相同的开启方式时,二者的水力学控制指标能够保持一致,便于工程运行调度管理。对于具体工程而言,须根据以上各因素的重要性程度,并结合工程自身特点进行分析论证。

#### 3.2 剩余水头变化规律

船闸充、泄水过程的省水率越大,剩余水体就越少,相应船闸与上游或下游之间的剩余水头

也会越小,越有利于改善上、下游引航道的水流条件。针对省水池级数为1~4级的情况,研究了省水池面积与闸室水域面积比 $k$ 为0.5~4.0的条件下,船闸总水头 $H$ 在12~25 m范围内的省水运行剩余水头 $h$ 的变化规律,见图4。

图4 不同水位分级条件下剩余水头 $h$ 的变化规律

研究表明: 1) 根据省水池级数与面积的不同, 船闸在设计最大水头 25.0 m 省水运行时, 剩余水头在 18.75~5.95 m; 在水头 12.0 m 省水运行时, 剩余水头在 9.0~2.86 m。2) 当设置 1 级省水池时, 即使省水池面积与闸室面积比达到 4.0, 最大水头省水运行时的剩余水头仍为 13.89 m, 大于非省水运行时的最大水头 11.0 m; 当设置 4 级省水池时, 即使省水池面积与闸室面积比仅为 0.5, 最大水头省水运行时的剩余水头也只有 10.71 m, 略小于非省水运行时的最大水头 11.0 m。3) 当设置 2 级省水池时, 省水池面积与闸室面积比为 1.75 左右, 相应最大水头省水运行时的剩余水头为 11.0 m; 当设置 3 级省水池时, 省水池面积与闸室面积比为 0.74 左右, 相应最大水头省水运行时的剩余水头为 11.0 m, 均能够与非省水运行时的最大水头一致。

### 3.3 适应大水位变幅的省水船闸水位分级

本依托工程上游水位变幅大, 最高通航水位与汛限特征水位之间的变幅有 14.0 m; 而下游连接着中间渠道, 水位基本保持 203.0 m 不变。为了便于船闸上、下闸首输水阀门的统一运行管理, 当设计最大水头省水运行的剩余水头与汛限水位组合非省水运行的水头差别不大时, 水位分级是较为合理的。根据剩余水头变化规律研究分析结果, 只有当省水池级数为 2 级或 3 级时, 才能满足上述条件, 需进一步对表 1 中的 2 级和 3 级省水池方案进行对比分析。

表 1 2 级和 3 级省水池方案剩余水头计算结果

水池 级数 $m$	水池与闸室 面积比 $k$	剩余水头/m			省水率/%
		$H=25\text{ m}$	$H=18\text{ m}$	$H=12\text{ m}$	
2	0.5	15.00	10.80	7.20	40.00
	0.8	13.24	9.53	6.35	47.06
	1.0	12.50	9.00	6.00	50.00
	1.2	11.96	8.61	5.74	52.17
	1.5	11.36	8.18	5.45	54.55
	1.8	10.94	7.88	5.25	56.25
	2.0	10.71	7.71	5.14	57.14
	2.5	10.29	7.41	4.94	58.82
	3.0	10.00	7.20	4.80	60.00

续表1

水池 级数 $m$	水池与闸室 面积比 $k$	剩余水头/m			省水率/%
		$H=25\text{ m}$	$H=18\text{ m}$	$H=12\text{ m}$	
3	0.5	12.50	9.00	6.00	50.00
	0.8	10.71	7.71	5.14	57.14
	1.0	10.00	7.20	4.80	60.00
	1.2	9.48	6.83	4.55	62.07
	1.5	8.93	6.43	4.29	64.29
	1.8	8.54	6.15	4.10	65.85
	2.0	8.33	6.00	4.00	66.67
	2.5	7.95	5.73	3.82	68.18
	3.0	7.69	5.54	3.69	69.23

对于 2 级省水池方案, 省水池面积与闸室面积比为 1.8 时, 最大水头省水运行的剩余水头为 10.94 m; 对于 3 级省水池方案, 省水池面积与闸室面积比为 0.8 时, 最大水头省水运行的剩余水头为 10.71 m。两种方案的剩余水头均与非省水运行的最大水头较为接近。考虑到本工程通航线路布置于百色水利枢纽左岸的那禄沟, 船闸位置两侧均为山体, 相对而言 3 个省水池在总体布置上较难实现, 而 2 级省水池可分别布置于闸室两侧, 充分利用工程条件, 具有可行性。基于以上分析, 提出省水船闸的省水池布置参数为: 省水池级数  $m=2$ , 每级省水池的面积与闸室面积比  $k=1.8$ , 此时省水船闸理论省水率  $E_s=56.25\%$ 。

针对船闸省水运行时的上游水位变幅范围 228.0~214.0 m, 可分别计算出每级省水池的高程、水位及闸室水位分级, 见图 5 和表 2。高省水池的最高、最低水位分别为 209.19、220.97 m, 低省水池的最高、最低水位分别为 206.09、213.94 m。其中: 1) 水位组合 228.0~203.0 m 条件下, 船闸充、泄水运行过程中高池内的水位变化范围是 217.06~220.97 m, 低池内的水位变化范围是 210.03~213.94 m, 高、低池的水位变幅均为 3.91 m, 闸室与高、低省水池及上(下)游之间每个输水过程的初始水头均为 10.94 m; 2) 水位组合 214.0~203.0 m 条件下, 高池内的水位变化范围是 209.19~210.91 m, 低池内的水位变化范围是 206.09~207.81 m, 高、低池的水位变幅均

为 1.72 m, 阀室与高、低省水池及上(下)游之间每个输水过程的初始水头均为 4.81 m。当上游水

位介于 228.0~214.0 m 时, 相应水位变化及分级也介于二者相应指标范围内。

表 2 阀室与省水池的水位分级

水位组合/m	高池水位/m	低池水位/m	$h_s/m$	$h_L/m$	剩余水头/m
228.0~203.0	217.06~220.97	210.03~213.94	3.91	7.03	10.94
214.0~203.0	209.19~210.91	206.09~207.81	1.72	3.09	4.81

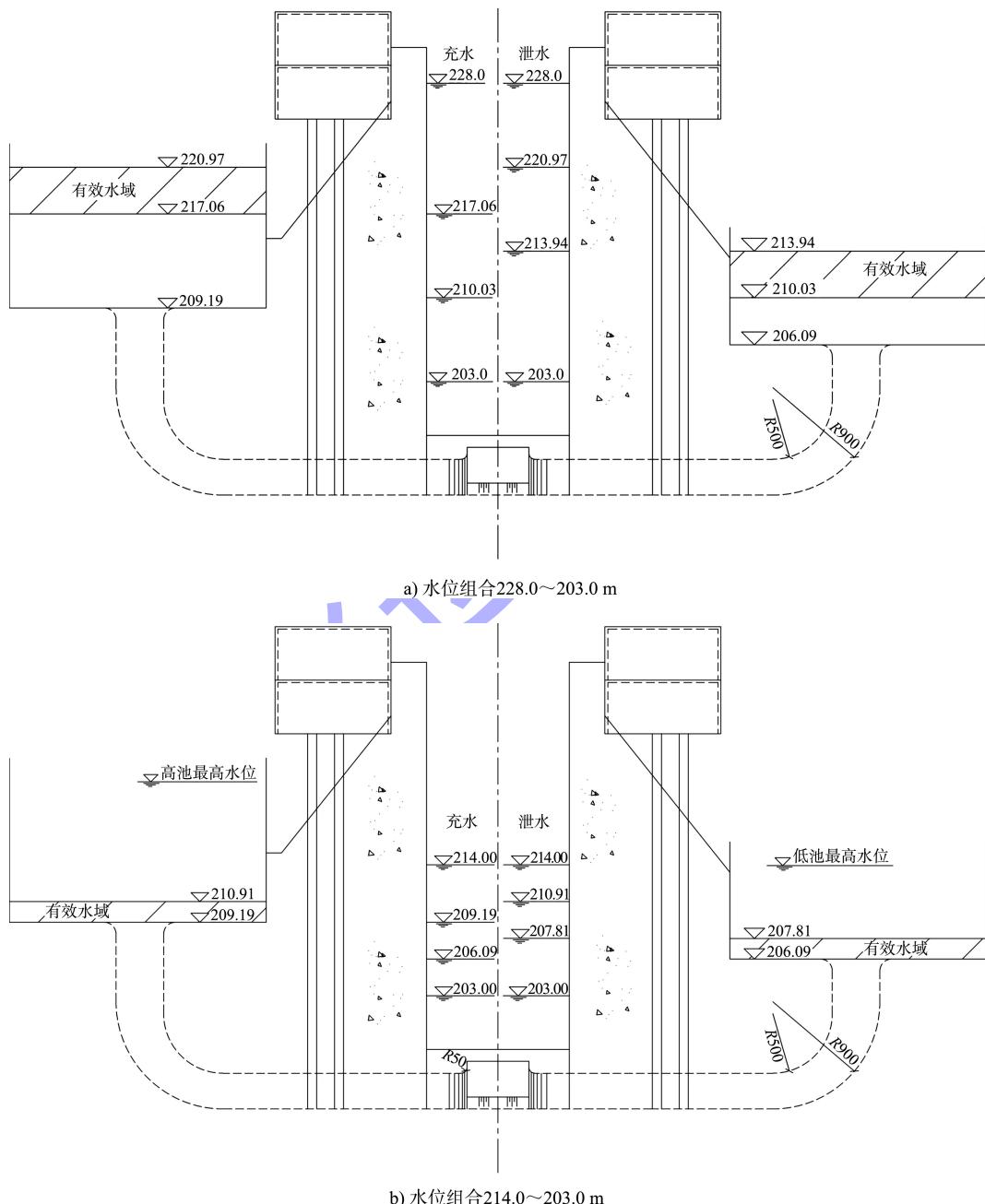


图 5 省水船闸水位分级 (单位: m)

#### 4 输水水力指标分析

为了进一步论证水位分级的科学合理性, 研究分析船闸输水运行时的水力指标, 水力指标见表 3。

在定定的阀门开启方式下, 船闸最大水头省水运行时的充、泄水平均时间在 15.04~15.66 min, 汛限特征水位组合非省水运行时的充、泄水平均时间

在 5.96~6.42 min。分析表明, 两种运行方式下的输水时间均可满足设计要求, 并有一定浮动余地, 具备后续优化闸室及引航道、中间渠道水流条件的调整空间。

船闸充、泄水过程中的闸室水面升降速度、

输水廊道断面流速、进水口流速等水力指标能够满足规范要求; 为便于运行管理, 两种水位组合条件下的闸首阀门可采用相同的开启方式, 闸首输水的水力指标较为接近, 流量指标最大仅相差 2.95%, 说明研究提出的水位分级是科学合理的。

表 3 船闸输水水力特征值

水位组合/m	输水过程	$t_v$ 闸首 / min	$t_v$ 低池 / min	$t_v$ 高池 / min	$T$ / min	$Q_{\max}$ 闸首 / $(m^3 \cdot s^{-1})$	$Q_{\max}$ 省水池 / $(m^3 \cdot s^{-1})$	$u_{\max}$ / $(m \cdot min^{-1})$	$v_{\max}$ 闸 / $(m \cdot s^{-1})$	$v_{\max}$ 进水口 / $(m \cdot s^{-1})$
228.0~203.0	充水	2	2	2	14.40	108.40	106.06	3.61	9.03	2.01
		3	3	2	15.13	97.90	105.92	3.53	8.83	1.81
	泄水	3	2	2	15.68	90.05	97.92	3.26	8.16	-
		4	3	2	16.18	82.75	97.92	3.26	8.16	-
214.0~203.0	充水	2	-	-	5.57	111.45	-	3.72	9.34	2.06
		3	-	-	6.03	99.71	-	3.32	8.31	1.85
	泄水	3	-	-	6.35	92.71	-	3.09	7.72	-
		4	-	-	6.80	84.62	-	2.82	7.05	-

注:  $t_v$  闸首、 $t_v$  低池、 $t_v$  高池 分别为闸首、低池和高池输水阀门的开启时间;  $T$  为输水时间;  $Q_{\max}$  闸首、 $Q_{\max}$  省水池 分别为引航道、省水池与闸室之间输水时的流量峰值;  $u_{\max}$  为输水全过程最大流量时对应的闸室水面上升(下降)速度;  $v_{\max}$  为输水全过程输水阀门处的断面最大流速;  $v_{\max}$  进水口 为上游向闸室充水时进水口的断面最大流速。

## 5 结语

1) 通过分析设省水池的省水船闸输水运行原理, 研究省水船闸充、泄水过程闸室与省水池的水位变化及相互关系, 在此基础上提出理论省水率的计算方法, 得出省水率随省水池级数、省水池面积的变化规律。

2) 总结分析了影响省水船闸水位分级的主要因素, 结合依托工程从运行水位、省水池级数、省水池与闸室面积比等方面, 综合研究省水运行时剩余水头的变化规律; 针对工程上游水位变幅大、运行方式复杂等特点, 提出了合适的省水池布置参数: 省水池级数  $m=2$ , 每级省水池的面积与闸室面积比  $k=1.8$ ; 计算各级省水池的高程及特征水位, 给出了大水位变幅下的船闸省水运行水位分级方法。

3) 针对研究提出的水位分级方式, 进一步计算分析最大水头省水运行和汛限特征水位非省水运行时的船闸充、泄水水力指标, 输水时间满足设计要求; 不论省水还是非省水运行, 闸首输水阀门均可采用相同的开启方式, 此时二者输水水

力控制指标较为接近, 流量指标最大仅相差 2.95%, 说明研究提出的水位分级是科学合理的。

## 参考文献:

- [1] 季晓堂, 苏静波, 何良德. 巴拿马运河船闸省水技术综述[J]. 水运工程, 2021(1): 111-116.
- [2] 刘本芹, 宣国祥. 桂林市桂江巴江口船闸改扩能工程省水船闸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, 2019.5
- [3] 祝龙, 宣国祥. 清水江白市枢纽船闸关键技术试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2019.
- [4] 刘本芹, 李云, 胡亚安, 等. 高水头大尺度船闸省水布置与水力计算[J]. 水运工程, 2016(12): 42-46.
- [5] 李中华, 许铎, 安建峰. 单级省水船闸水级计算和影响因素探讨[J]. 水运工程, 2020(11): 7-11.
- [6] 董思远, 王乔, 张楠, 等. 多级船闸省水率计算方法[J]. 中国水运, 2020(12): 87-89.
- [7] 刘本芹. 百色省水船闸输水系统布置及输水水力特性计算分析研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2021.