

# 富春江船闸改扩建工程船闸输水系统布置研究

金国强<sup>1</sup>, 刘本芹<sup>2</sup>, 宣国祥<sup>2</sup>, 黄岳<sup>2</sup>

(1. 浙江省交通规划设计研究院, 浙江 杭州 310006; 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:** 结合富春江船闸改扩建工程具体条件, 根据《船闸输水系统设计规范》的相关规定及要求, 在对比分析大量资料的基础上, 确定了富春江船闸输水系统型式及具体布置, 重点研究了进水口布置方案, 并进行了1:30比尺的物理模型试验研究. 结果表明, 新船闸采用闸底长廊道输水系统布置型式是合适的, 通过老船闸上闸首进水口及其闸室共同进水的方式是可行的, 研究确定的阀门开启方式, 船闸输水时间、船舶停泊条件及进出水口水流条件等水力指标满足设计及规范要求.

**关键词:** 输水系统; 改扩建工程; 富春江船闸

**中图分类号:** TV135.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-640X(2012)04-0060-05

富春江船闸改扩建工程位于钱塘江中下游桐庐县富春江水电站东侧, 距下游杭州市约110 km, 按Ⅳ级航道通航标准(通航500 t级船舶)规划建设. 根据富春江船闸的现状以及大坝枢纽总体布置、地形条件和水电站发电调度以及预测的过闸货运量等, 为使扩建后的船闸和航道全天候运行, 建设方案考虑航运与电站发电关系的原则为:(1)不影响富春江电站的正常发电运行调度;(2)船闸运行没有航运基流要求, 船闸运行和发电调度互不影响. 前期对富春江通航“瓶颈”问题进行了多方案技术研究论证, 包括现有船闸改扩建方案、新建第二通道方案<sup>[1]</sup>以及新建升船机方案等. 综合考虑项目建设的难度、投资以及各种外部协调关系, 拟采用先期实施现有船闸改扩建工程方案, 第二通道工程作为预留方案.

现有富春江船闸布置在枢纽右岸, 有效尺度为100.0 m×14.4 m×2.5 m(长×宽×门槛水深), 输水系统采用闸底长廊道顶支孔出水方式, 通航100 t级船舶, 在下游满足通航水位的前提下可通航300 t级船舶. 富春江船闸改扩建工程建设方案是保留原有船闸结构物, 在其下游新建一座Ⅲ级标准船闸, 船闸设计有效尺度为300 m×23 m×4.5 m(长×宽×门槛水深); 最大设计水头21.22 m, 对应的上下游通航水位组合为: 上游最高通航水位24.00 m, 下游最低通航水位2.78 m; 设计输水时间为充水16 min(另考虑5 min的波动稳定时间)、泄水15 min; 最大通航船舶为1 000 t级货船, 船型尺度为80.0 m×10.8 m×2.0 m(总长×型宽×吃水深). 新建船闸的上闸首与原有船闸下闸首紧密相连, 上游引航道包括两部分: 一部分为原有船闸的上游引航道, 另一部分为原有船闸形成的上游引航渠道, 引航渠道进、出口宽度为12.4 m, 渠内宽度14.4 m, 上游引航渠道长度为132 m.

## 1 输水系统选型

初步分析可知, 新建船闸输水过程中上游引航渠道内流速会较大, 将引起一定的振荡波, 影响船舶进闸通行, 因此其输水系统布置尤为关键<sup>[2-3]</sup>. 考虑到富春江船闸改扩建工程的特殊性, 在此不适宜采用《船闸输

收稿日期: 2011-10-23

作者简介: 金国强(1965-), 男, 浙江东阳人, 教授级高级工程师, 主要从事港口与航道工程的规划、设计与研究工作.

E-mail: G. Q. jin@163.com

水系统设计规范》(JTJ306~2001)的选型公式计算其船闸输水系统型式。由于船闸设计水头较高,且船闸的航运地位十分重要,输水系统初步考虑采用闸底长廊道侧支孔出水明沟消能的输水方式,侧支孔出水明沟消能方式可以减小闸室底板厚度,节省工程量。

闸底长廊道输水系统不需要在闸墙内布置输水廊道,闸室输水时水流直接由布置在闸室底部长廊道上的支孔流入(出)闸室。这种型式输水系统的优点为:(1)对船闸闸墙结构尺寸没有要求,因此对采用闸墙断面尺寸较小的衬砌式船闸可节省工程量;(2)输水时水流由底部进入闸室,水流消能条件较好,可较好地适应阀门单边或不同步开启时船舶的停泊条件。

## 2 输水系统布置

### 2.1 阀门处廊道断面面积

输水阀门处廊道断面面积可按以下公式进行计算<sup>[4]</sup>:

$$\omega = \frac{2C(\sqrt{H+d} - \sqrt{d})}{\mu T \sqrt{2g} [1 - (1 - \alpha)k_v]} \quad (1)$$

式中: $\omega$ 为输水阀门处廊道断面面积( $\text{m}^2$ ); $C$ 为闸室水域面积( $\text{m}^2$ ); $H$ 为设计水头( $\text{m}$ ); $d$ 为惯性水头( $\text{m}$ ); $\mu$ 为阀门全开时输水系统的流量系数; $T$ 为闸室输水时间( $\text{s}$ ); $\alpha$ 为系数(可查规范表); $k_v$ 可取0.6~0.8; $g$ 为重力加速度( $\text{m/s}^2$ )。对于富春江扩建船闸, $C=325 \times 23.0=7\,475\text{ m}^2$ , $H=21.22\text{ m}$ , $d$ 值根据已有试验资料取0.30 m,流量系数取 $\mu=0.70$ ,查表得 $\alpha=0.46$ , $T=960\text{ s}$ , $k_v$ 取0.67。计算得出 $\omega=32.2\text{ m}^2$ 。因此,确定每侧输水阀门处廊道断面尺寸(宽 $\times$ 高)为4.0 m $\times$ 4.0 m,两侧总断面面积32.0  $\text{m}^2$ 。

### 2.2 输水主廊道及出水支孔布置

输水主廊道断面面积需要大于阀门处廊道断面面积,而分析已有采用类似输水系统的船闸资料得出,侧向出水支孔总面积与主廊道断面面积之比一般在0.79~1.38之间<sup>[5-8]</sup>,比值越小,各出水支孔之间出流越均匀,比值越大,各段的损失越小。结合富春江船闸工程具体情况,综合考虑上述因素后取闸底输水主廊道断面为40.5  $\text{m}^2$ (主廊道中间设1.0 m隔墙,50%左右的面积互通,以保证单边输水时出流均匀)。廊道出水段每侧设46个出水孔,分为3组,自上游至下游孔口尺寸(宽 $\times$ 高)分别为0.36 m $\times$ 1.30 m(15孔)、0.33 m $\times$ 1.30 m(16孔)、0.30 m $\times$ 1.30 m(15孔),总面积为39.468  $\text{m}^2$ 。出水段顺水流方向首末段出水孔面积比为1.2:1.0,这是根据船闸复合管水力学研究成果而确定的,即对于相同断面的出水孔,当出水孔总面积与主廊道断面面积相当、且无消能盖板时,顺水流方向首末出水支孔平均流量比为1:1.2<sup>[9]</sup>。根据该船闸闸室的具体条件,确定出水段支孔采用分组、等间距布置。结合船闸结构分缝布置,确定出水支孔间距为4.5 m,这样出水孔总长为45 $\times$ 4.50=202.5 m,占闸室有效长度的67.5%。

支孔出口消能明沟对水流消能及二次调整作用十分显著,为达到较好的消能效果,对消能明沟宽度有一定的要求,《船闸输水系统设计规范》规定,明沟宽度宜大于支孔宽度的5倍,结合闸室宽度取明沟宽为4.50 m。明沟挡槛的高度 $D$ 应大于出水支孔出流扩散后的高度,经计算需要 $D \geq 2.38\text{ m}$ ,结合闸底长廊道高度取 $D=5.5\text{ m}$ ,同时为使水流导向闸室中部,明沟上部按1:1坡度向闸室中心倾斜。为保证出水支孔水流较平顺并减小出水支孔的形状阻力,出水支孔应有一定长度,沿水流方向的长度 $L$ 一般宜为其断面宽度的3.6倍左右,取 $L=1.0\text{ m}$ 。闸室横断面见图1。

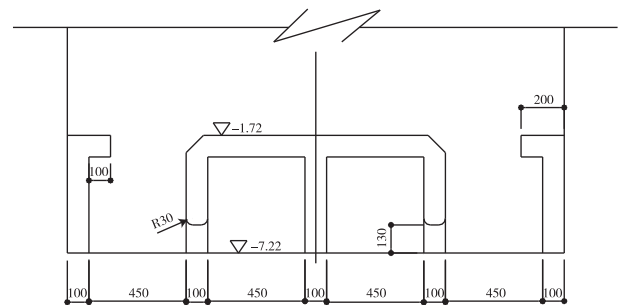


图1 闸室横断面(单位:高程:m,长度:cm)

Fig. 1 Cross section of lock chamber  
(unit: elevation: m, length: cm)

### 2.3 进出水口布置

新建船闸上游引航道一部分为原有船闸的上游引航道,另一部分为老船闸形成的上游引航渠道,在此对输水系统上游取水方式进行了多个方案比选,各方案进水方式见图 2。方案 1 由老船闸上闸首取水,在对老船闸上闸首进水口顶部消能盖板进行加固的基础上,采用正面进水方式,进水口总面积为  $58.2 \text{ m}^2$ ,是新建船闸阀门面积的 1.82 倍;方案 2 在保留老船闸上闸首顶面格栅进水的基础上,在老闸室底板上方增设两支输水廊道,每支廊道宽 4.5 m,高 4.0 m,两支廊道中间部分连通,廊道顶设一定数量的进水孔,孔的面积可根据引水渠的水流条件及输水系统流量系数由模型试验最终确定,增设的廊道在新建船闸上闸首处降低高程,并与布置在闸首两侧的输水廊道联接;方案 3 新建船闸的输水系统进水口直接布置在其上闸首处,不利用原有船闸的输水系统。

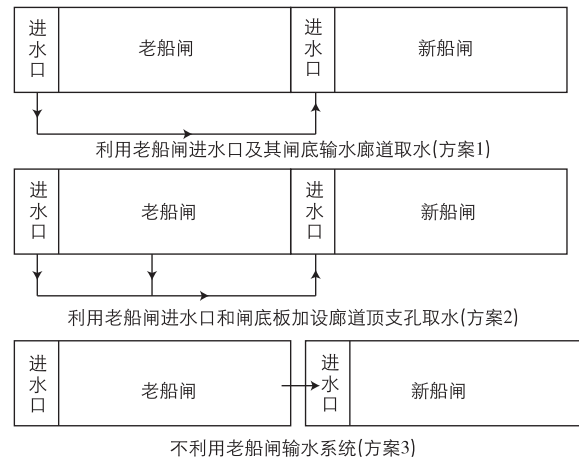


图 2 进水口示意图

Fig. 2 Layout of the water inlet

新建船闸上闸首输水阀门处廊道高度和宽度均为 4.0 m,门后廊道顶高程抬高至  $-2.72 \text{ m}$ ,同时廊道高度增大为 4.5 m;然后通过水平转弯在闸室汇合至中心断面输水廊道,并将闸底廊道宽度增大为 4.5 m。闸底廊道通过两个水平转弯与下闸首闸室输水廊道相联接,同时将廊道宽度由 4.5 m 调整至 4.0 m,输水阀门底高程采用与闸室输水廊道底高程一致,以简化布置。为了保证下游引航道具有较好的通航水流条件,下闸首一侧廊道通过消能室顶支孔出水泄入下游引航道;另一侧廊道采用旁侧泄水,出水口断面面积取阀门断面面积的 2 倍,并设中间隔墩。

新建船闸输水系统各部分尺寸汇总见表 1。

表 1 输水系统特征尺寸

Tab. 1 Characteristics of filling and emptying system

| 序号 | 部位      | 描述                                                                                              | 面积(宽/m×高/m×数量)                                   | 与阀门面积比       |
|----|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------|
| 1  | 充水阀门段廊道 | 阀门处廊道顶高程 $-4.72 \text{ m}$ ,最小淹没水深 7.5m                                                         | $4.0 \times 4.0 \times 2 = 32.0$                 | 1.00         |
| 2  | 进水口     | 采用 3 种进水布置方案                                                                                    | /                                                | /            |
| 3  | 输水主廊道   | 廊道高度和宽度均增大为 4.5 m,通过垂直和水平转弯与阀门段廊道联接                                                             | $4.5 \times 4.5 \times 2 = 40.5$                 | 1.27         |
| 4  | 闸室出水支孔  | 每侧自上游向下游分 3 组,孔口尺寸分别为 15 孔 $0.36 \times 1.30$ ,16 孔 $0.33 \times 1.30$ ,15 孔 $0.30 \times 1.30$ | 39.468                                           | 1.23         |
| 5  | 消能明沟    | 闸室出水孔外设宽 4.5 m、高 5.5 m 的消能明沟                                                                    | /                                                | /            |
| 6  | 泄水阀门段廊道 | 阀门处廊道顶高程 $-3.22 \text{ m}$ ,最小淹没水深 6.0m                                                         | $4.0 \times 4.0 \times 2 = 32.0$                 | 1.00         |
| 7  | 出水口     | 旁侧泄水;出水口廊道断面面积增大一倍<br>引航道泄水;采用消能室顶支孔出水                                                          | $8.0 \times 4.0 = 32.0$<br>$9 \times 6.5 = 58.5$ | 2.00<br>3.66 |

### 2.4 进水口布置方案的确定

通过估算 3 种输水系统布置方案的基本水力参数,初步计算了其输水水力特性。计算结果表明:方案 1 虽然进水口面积比原来有所增大,但进水控制断面仍为老船闸输水阀门处廊道断面,而该断面面积与新建船闸输水阀门处廊道断面相比太小,仅为其 27%<sup>[10]</sup>,计算得出充水流量系数较小,充水时间远不能满足 16 min 的设计要求;方案 2 为了尽量保证老船闸闸室内的水流条件,可通过控制廊道顶进水孔面积及其分布,控制两处并联进水的流量分配,充泄水总时间基本满足设计输水时间要求;方案 3 流量系数相对较大,输水时间满足设计要求,缺点是由于充水流量较大,充水时将导致上游引航渠道内的水流条件非常差,产生往复流、较

大水位波动以及水跃等不良水力现象,很难满足船舶安全航行要求.因此,最终确定采用方案2的取水方式,即上游通过老船闸输水系统进水口及老船闸闸底廊道上方新布置的廊道顶部进水孔同时进水.

### 3 模型试验验证

通过比尺为1:30的输水系统整体模型试验研究,确定老船闸闸底廊道上方新布置的廊道顶部进水孔总面积为18 m<sup>2</sup>.研究发现,闸室充水时随充水流量增大,老船闸闸室内水位迅速下降,老船闸上闸首门槛处形成堰流,当上游为最低通航水位时该现象更为明显,水位集中跌落,最大落差可达7.5 m,当闸室充水流量减小后水位逐渐回升,在充水结束时回升至与上游水位一致.因整个船闸充水过程较长,老船闸闸室内水位回升缓慢,不存在往复流及明显波动现象,因此船闸充水结束便可开启上闸首闸门过船,故可将原设计考虑的5 min水流波动时间计入充水时间,即闸室充水时间在21 min以内便可满足设计要求.

模型试验实测最大水头充、泄水阀门开启时间分别为3 min和7 min时的水力特征值见表2,充水时闸室内船舶系缆力最大值见表3,充泄水时间满足设计要求,船舶系缆力满足规范要求.

表2 实测充、泄水水力特征值

Tab.2 Hydraulic characteristics of lock filling and emptying

| 水位组合/m  | 水头/m  | $t_v/\text{min}$ | $T/\text{min}$ | $Q_{\max}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ | $U/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$ | 工况 |
|---------|-------|------------------|----------------|---------------------------------------------|--------------------------------------|----|
| 24~2.78 | 21.22 | 3                | 18.70          | 290.17                                      | 2.43                                 | 充水 |
| 24~2.78 | 21.22 | 7                | 15.14          | 335.06                                      | 2.80                                 | 泄水 |

注: $t_v$ 为阀门开启时间, $T$ 为闸室输水时间, $Q_{\max}$ 为最大流量, $U$ 为闸室水面最大上升(下降)速度.

表3 充水时船舶最大系缆力

Tab.3 Maximum hawser forces during filling

| $t_v/\text{min}$ | 船舶停泊位置 | 纵向力/kN | 前横向力/kN | 后横向力/kN |
|------------------|--------|--------|---------|---------|
| 3                | 上游侧    | 9.12   | 15.60   | 15.97   |
| 3                | 中部     | 11.08  | 10.61   | 13.94   |
| 3                | 下游侧    | 11.33  | 9.13    | 6.06    |

注:1 000 t船舶的纵向力允许值为32kN,横向力允许值为16kN,测试对象为1 000 t单船.

### 4 结 语

富春江船闸改扩建工程是在保留老船闸结构物的基础上,紧临其下游新建一座Ⅲ级标准船闸,新建船闸规模较大、水头较高,输水系统布置也较为复杂.依据有关规定及要求,研究确定的闸室底部长廊道输水系统型式是合适的,经模型试验研究确定的充、泄水阀门匀速全开时间分别为3 min和7 min,充水时上闸首进水口水流条件良好,泄水时出水水流较为均匀,充泄水时间满足设计要求,船舶系缆力满足规范要求.因此,通过老船闸上闸首进水口及闸室共同进水的方式是可行的.

### 参 考 文 献:

- [1] 金国强,宣国祥.富春江七里泷航道第二通道工程船闸输水系统布置[J].水利水运工程学报,2007(1):47-52.(JIN Guo-qiang,XUAN Guo-xiang. Layout of filling and emptying system of the second line shiplock of Qililong waterway on Fuchun River [J]. Hydro-Science and Engineering, 2007(1):47-52. (in Chinese))
- [2] 宣国祥,刘本芹,黄岳,等.富春江船闸改扩建工程输水系统布置、水力特性分析及水力学模型试验研究[R].南京:南京水利科学研究院,2011.(XUAN Guo-xiang, LIU Ben-qin, HUANG Yue, et al. Layout, hydraulic calculations and model test study of Fuchunjiang shiplock's filling and emptying system in the expanding project [R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2011. (in Chinese))
- [3] 王作高.船闸设计[M].北京:水利电力出版社,1992.(WANG Zuo-gao. Design of shiplocks[M]. Beijing: China Water Power Press, 1992. (in Chinese))



- [4] JTJ306-2001, 船闸输水系统设计规范[S]. (JTJ306-2001, Design code for filling and emptying system of shiplocks[S]. (in Chinese))
- [5] GLENN A PICKERING P E. Filling and emptying system for high-lift navigation lock[R]. USA: Hydraulic Laboratory, USAE Waterways Experiment Station.
- [6] 宣国祥,黄岳. 柳江红花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,2003. (XUAN Guo-xiang, HUANG Yue. Hydraulic model test study of the Honghua shiplock's filling and emptying system on Liujiang River[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2003. (in Chinese))
- [7] 李中华,宣国祥,黄岳. 广西红水河桥巩船闸输水系统水力学试验研究[R]. 南京:南京水利科学研究院,2005. (LI Zhong-hua,XUAN Guo-xiang, HUANG Yue. Hydraulic model test study of the Qiaogong shiplock's filling and emptying system on Hongshuihe River in Guangxi Province[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2005. (in Chinese))
- [8] 宣国祥,黄岳,李君. 西江航运干线桂平航运枢纽二线船闸闸底长廊道输水系统方案布置、水力特性分析和水力学模型试验研究[R]. 南京:南京水利科学研究院,2007. (XUAN Guo-xiang, HUANG Yue, LI Jun. Layout,hydraulic calculations and model test study of the Guiping second line navigation lock's lock bottom longitudinal culvert filling and emptying system on Xijiang River[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2007. (in Chinese))
- [9] 张瑞凯. 船闸廊道复合管不稳定流水力学研究[R]. 南京:南京水利科学研究院,1982. (ZHANG Rui-kai. Hydraulic study on multiunit tube unsteady flow in shiplock's culvert [R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 1982. (in Chinese))
- [10] 宗慕伟. 浙江富春江七里泷船闸终结布置方案水工模型试验报告[R]. 南京:南京水利科学研究院,1972. (ZONG Mu-wei. Hydraulic model test report of Qilong shiplock's filling and emptying system for the end layout scheme on Fuchunjiang River in Zhejiang Province[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 1972. (in Chinese))

## Layout of filling and emptying system of ship lock reconstruction project on Fuchunjiang River

JIN Guo-qiang<sup>1</sup>, LIU Ben-qin<sup>2</sup>, XUAN Guo-xiang<sup>2</sup>, HUANG Yue<sup>2</sup>

(1. Zhejiang Provincial Institute of Communications, Hangzhou 310006, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Key Laboratory of Navigation Structures, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** According to specific characteristics of ship lock reconstruction project on Fuchunjiang River and the relevant rules of “*Design Code for Filling and Emptying System of Shiplocks*”, on the basis of analyzing a great number of references, a type of the filling and emptying system and a detailed layout are put forward in the paper. The layout of the water inlet is especially studied and physical model tests(scale 1:30) are finished. The study results show that the layout of the new shiplock's lock bottom longitudinal culvert filling and emptying system on Fuchunjiang River is suitable. And a scheme of the water inlet is reasonable through the old shiplock's inlet and its lock chamber. Hydraulic indexes such as the filling or emptying time, vessel's berthing conditions and flow conditions at the inlet and outlet can all fulfil design and criterion demands if the recommended open modes of the valve are adopted.

**Key words:** filling and emptying system; reconstruction project; Fuchunjiang River shiplock