



# 赣江万安二线船闸输水系统 水力学模型试验研究<sup>\*</sup>

李君<sup>1,2,3,4</sup>, 郭超<sup>1,2,3,4</sup>, 金英<sup>1,3</sup>, 宣国祥<sup>1,2,3,4</sup>, 黄岳<sup>1</sup>

(1. 南京水利科学研究院, 江苏南京 210029; 2. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210029;  
3. 通航建筑物建设技术交通行业重点实验室, 江苏南京 210029;  
4. 水利部水科学与水工程重点实验室, 江苏, 南京 210029)

**摘要:** 万安二线船闸工作水头和一次输水过程能量均居世界单级船闸前列, 输水系统设计直接关系到工程设计成败。根据《船闸输水系统设计规范》和类似工程经验, 结合水力计算, 设计优化了适合万安二线船闸的闸墙主廊道、闸室中部垂直立体分流、闸底四纵支廊道两区段出水、明沟消能的输水系统形式。通过比尺为 1:30 的整体物理模型试验, 研究了所设计输水系统的水力特性。成果表明: 万安二线船闸所采用的输水系统整体设计是合理可行的, 输水时间、船舶停泊条件、进出水口及引航道水流条件等各项水力指标均满足设计和规范要求。

**关键词:** 船闸; 输水系统; 水力学; 模型试验

中图分类号: U 642

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)02-0007-05

## Hydraulic model test and study on filling and emptying system of Wan'an 2nd lane lock on the Ganjiang River

LI Jun<sup>1,2,3,4</sup>, GUO Chao<sup>1,2,3,4</sup>, JIN Ying<sup>1,3</sup>, XUAN Guo-xiang<sup>1,2,3,4</sup>, HUANG Yue<sup>1</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China;

3. Key Laboratory of Navigation Structures Construction Technology, Ministry of Transport, PRC, Nanjing 210029, China;

4. Key Laboratory of Water Science and Engineering, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** The water head and the flow energy of Wan'an 2nd lane lock are all among the highest single-step locks around the world. The filling and emptying system design is the key part of the lock design. According to the *design code for filling and emptying system of ship locks* and based on analyzing a great number of references, combined with the hydraulic simulation, the filling and emptying system with wall culverts, vertical divider, in-chamber 4 manifolds of Wan'an 2nd lock is put forward and optimized. The results of the model test (scale 1:30) indicate that the layout and design of the filling and emptying system of Wan'an 2nd lane lock is reasonable and doable, thus the filling (emptying) time, vessel's berthing conditions, and flow conditions around the inlets and outlets and in the approach channels are all satisfying the requirements of the code and design.

**Keywords:** lock; filling and emptying system; hydraulics; model test

赣江自南向北纵贯江西全省, 是江西的黄金水道, 也是我国“两横一纵两网十八线”高等级

航道中的“十八线”之一。万安水电站枢纽为赣江赣州—湖口河段自上而下 6 个规划梯级中的第

收稿日期: 2020-04-10

\*基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402001)

作者简介: 李君(1982—), 男, 硕士, 正高级工程师, 从事通航建筑物水力学研究。

1 个梯级，是以发电为主，兼有防洪、航运、灌溉、养殖等综合利用效益的工程。

万安水电站已建船闸布置在右岸一级阶地上，采用单级布置，闸室有效尺寸为  $175\text{ m} \times 14\text{ m} \times 2.5\text{ m}$  (长  $\times$  宽  $\times$  门槛水深，下同)，可通过 2 艘 500 t 驳船组成的船队，最大水头为 32.5 m (上游正常蓄水位 100.00 m 至下游最低通航水位 67.50 m)，输水系统采用闸底长廊道两区段顶支孔盖板消能输水形式。考虑到远期发展及赣江船舶大型化的趋势，拟建二线船闸，新建船闸按通航 1 000 吨级船舶设计，建设规模为  $180\text{ m} \times 23\text{ m} \times 4.5\text{ m}$ ，输水时间要求为 10~12 min。

由于万安二线船闸工作水头位于国内单级船闸第 4 位，仅次于大藤峡船闸<sup>[1]</sup>、安谷船闸<sup>[2]</sup>和银盘船闸<sup>[3]</sup>；一次输水过程输水体积达 16.5 万  $\text{m}^3$ ，是安谷船闸和银盘船闸的 3 倍多，在国内高水头船闸中仅次于大藤峡船闸、葛洲坝船闸<sup>[4-5]</sup>和三峡船闸<sup>[6]</sup>，一次输水过程输水能量指标居世界单级船闸前列，如何确保船闸输水安全和效率是万安二线船闸建设中需解决的关键技术问题。本文根据枢纽总体布置与《船闸输水系统设计规范》<sup>[7]</sup>的有关规定及要求，对船闸输水系统

进行了水力设计，并通过模型试验对输水系统性能进行论证及优化，以确保船闸运行及过闸船舶的安全。

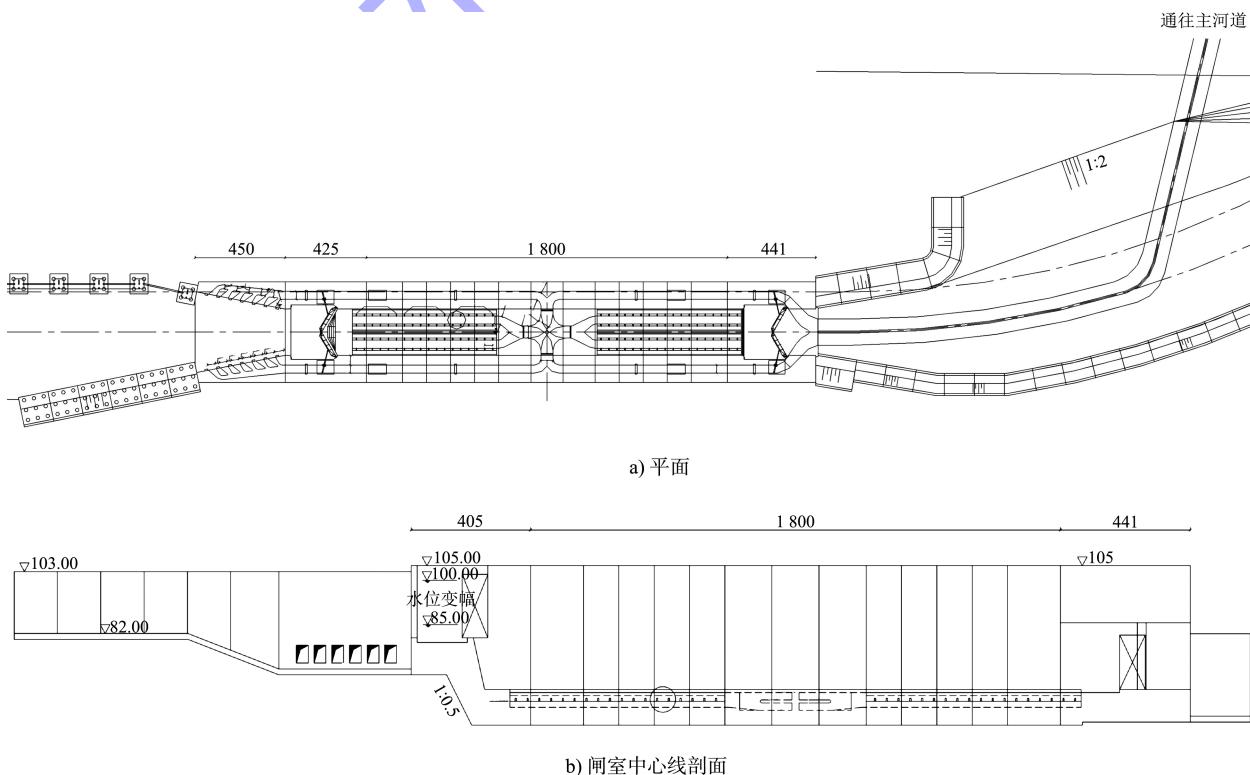
## 1 输水系统形式选择及布置

《船闸输水系统设计规范》(以下简称规范)中输水系统类型的选择公式为：

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

式中： $T$  为输水时间 (min)； $H$  为水头 (m)。对于万安二线船闸， $m=1.75\sim2.10$ 。

可见，其  $m$  值小于 2.4，可以采用第 2 类分散输水系统(水平分流)或第 3 类分散输水系统(垂直分流)，考虑到万安二线船闸水头达 32.5 m、最大流量预计达到约  $500\text{ m}^3/\text{s}$ ，并考虑分流口和引航道水流条件及船闸闸室结构采用重力式等因素，参考类似工程经验，输水系统拟选择性能较好的闸墙主廊道、闸室中部垂直立体分流、闸底两区段四纵支廊道、侧支孔出水、明沟消能、全旁侧泄水的布置形式，阀门段廊道采用突扩体型以解决高水头阀门空化问题。输水系统布置见图 1，各部位特征尺寸见表 1。



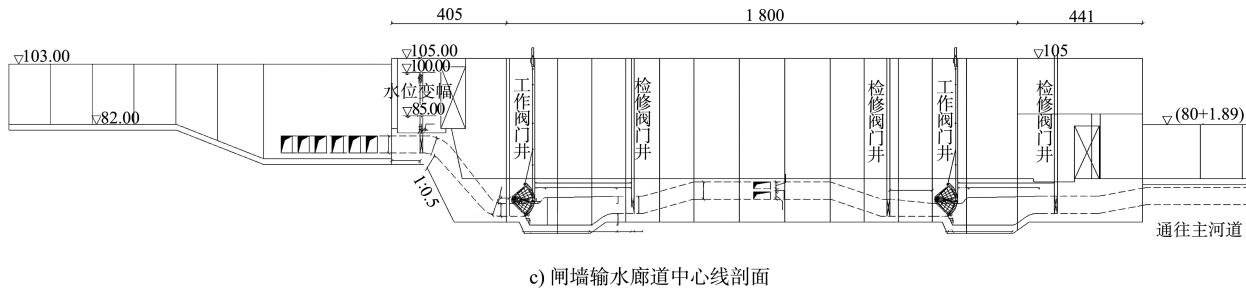


图1 船闸输水系统布置 (尺寸: mm; 高程: m)

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	288.0	8.00
充水阀门段廊道	36.0	1.00
闸墙主廊道	48.0	1.33
分流口	60.0	1.66
闸室出水段廊道	80.0	2.22
闸室出水支孔	63.36	1.76
泄水阀门段廊道	36.0	1.00
下闸首出水廊道	72.0	2.00

## 2 输水系统水力特性试验与分析

根据重力相似准则, 建立了万安二线船闸1:30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<sup>[8]</sup>。

试验主要针对水位组合100.00~67.50 m(上游最高通航水位至下游最低通航水位)和水位组合85.00~67.50 m(上游最低通航水位至下游最低通航水位)开展研究, 其中后一种水位组合主要用于研究上游进水口水流条件。经初步的水力分析, 确定输水阀门采用6~9 min匀速开启方式; 在研究闸室内船舶停泊条件时, 分别考虑1 000吨级单船和2×1 000吨级船队两种设计船型, 以及船舶停泊在上半闸室、闸室中部、下半闸室3个位置时的工况。

### 2.1 闸室充、泄水水力特性

最大设计水头下, 双边阀门运行, 闸室充、泄水水力特性试验成果见表2。

表2 闸室充、泄水水力特征值

工况	水位组合/m	$t_v/$ min	$T/$ min	$Q_{\max}/$ ( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ )	$v_{\max}/$ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$w_{\max}/$ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$u_{\max}/$ ( $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ )	$d/$ m	$v_{\text{vmax}}/$ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$v_{\text{imax}}/$ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$v_{\text{iimax}}/$ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$v_{\text{omax}}/$ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
充水	100.00~67.50	6	10.15	459	9.56	7.65	5.44	0.27	12.75	5.74	1.59	-
		7	10.63	427	8.90	7.12	5.06	0.27	11.86	5.34	1.48	-
		8	11.12	403	8.40	6.72	4.78	0.27	11.19	5.04	1.40	-
		9	11.61	383	7.98	6.38	4.54	0.27	10.64	4.79	1.33	-
泄水	100.00~67.50	6	10.76	427	8.90	7.12	5.06	-0.36	11.86	5.34	-	5.93
		7	11.23	402	8.38	6.70	4.77	-0.36	11.17	5.03	-	5.58
		8	11.71	385	8.02	6.42	4.57	-0.36	10.69	4.81	-	5.35
		9	12.19	368	7.67	6.13	4.36	-0.36	10.22	4.60	-	5.11

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,  $v_{\max}$ 为闸墙输水主廊道最大断面平均流速,  $w_{\max}$ 为分流口最大断面平均流速,  $u_{\max}$ 为闸室水面最大上升(下降)速度,  $d$ 为惯性超高(降),  $v_{\text{vmax}}$ 为输水阀门处廊道最大断面平均流速,  $v_{\text{imax}}$ 为闸底出水支廊道最大断面平均流速,  $v_{\text{iimax}}$ 为进水口最大断面平均流速,  $v_{\text{omax}}$ 为旁侧泄水廊道最大断面平均流速。

由表2可知, 在32.5 m水头下充水时: 1)当充水阀门采用6~9 min开启, 特征值闸室充水时间在10.15~11.61 min, 若考虑模型试验缩尺效应, 只要输水阀门开启时间小于等于9 min, 闸室

充水时间都能够满足12 min的设计要求。2)当充水阀门采用8~9 min开启, 特征值充水最大流量为383~403  $\text{m}^3/\text{s}$ 、闸墙主廊道最大断面平均流速为7.98~8.40  $\text{m}/\text{s}$ , 与安全运行多年的葛洲坝1#船

闸(最大流量 868 m<sup>3</sup>/s、充水主廊道平均最大流速 12.4 m/s)和三峡船闸中间级(最大流量 700 m<sup>3</sup>/s、充水主廊道平均最大流速 14.4 m/s)相比,输水指标有较大幅度减小。3)当充水阀门采用 8~9 min 开启,特征值分流口平均最大断面平均流速为 6.38~6.72 m/s,远小于葛洲坝 1#船闸分流口平均最大断面流速(10.8 m/s)和三峡船闸分流口平均最大断面流速(15.9 m/s)。根据大藤峡船闸的研究成果,分流口最大流速大约为其最大断面平均流速的 1.2~1.5 倍,因而,即使充水阀门采用 8~9 min 开启,分流口可能的最大流速也将达到 8.06~10.08 m/s,因此分流口防空化布置仍然需要引起重视。4)当充水阀门采用 8~9 min 开启,特征值输水阀门处廊道最大断面平均流速为 10.64~11.19 m/s,而在阀门开启过程中,孔口收缩断面流速将更高,有可能引起阀门段廊道空化或阀门振动,须引起重点关注。5)特征值闸底出水支廊道最大断面平均流速和输水系统进水口最大断面平均流速均满足规范要求,且有一定富余。6)当充水阀门开启时间采用 8~9 min 时,闸室水面最大上升速度(4.54~4.78 m/min)小于葛洲坝 1#船闸(4.94 m/min),但仍超过三峡船闸中间级(3.98 m/min)。7)特征值惯性超高约为 0.27 m,略大于规范的允许值,可以采用三峡船闸解决惯性超高问题的工程措施(即提前关闭充水阀门、水位平齐时开启人字门)加以改善。

在 32.5 m 水头下泄水时:如泄水阀门采用 6~9 min 开启,闸室泄水时间在 10.76~12.19 min,泄水最大流量在 368~427 m<sup>3</sup>/s,相应主廊道和分流口最大断面平均流速分别为 7.27~8.90 m/s 和

6.13~7.12 m/s,输水阀门处廊道最大断面平均流速为 10.22~11.86 m/s,闸室出水支廊道最大断面平均流速为 4.60~5.34 m/s,闸室水面最大下降速度在 4.36~5.06 m/min,泄水系统惯性超降约为 0.36 m。对比分析充、泄水的主要水力特征值可以发现,除输水时间和惯性超降外,相同阀门开启时间条件下充水工况其他水力特征值都大于泄水工况,这表明只要充水水力特征指标满足规范要求,则泄水也满足。而特征值泄水时间,虽然大于相同开启方式对应的充水时间,若考虑模型试验缩尺效应,仍然小于设计要求。对于特征值泄水惯性超降,模型试验得到的惯性超降值为 0.36 m,采用解决充水过程惯性超高的工程措施,也可以解决惯性超降。对于特征值旁侧泄水廊道流速值,如泄水阀门采用 7~8 min 开启,万安二线船闸旁侧泄水廊道最大断面平均流速为 5.35~5.58 m/s,小于已安全运行多年的三峡船闸末级旁侧泄水廊道流速(6.8 m/s)。

综上所述,对于万安二线船闸,最大设计水头工况、双边阀门运行时,只要充水阀门开启时间控制在 8~9 min、泄水阀门开启时间控制在 7~8 min,所有的水力特征指标都满足规范要求,并小于已经安全运行多年的三峡船闸、葛洲坝 1#船闸。

## 2.2 闸室内船舶(队)停泊条件

最大设计水头下(水位组合为 100.00~67.50 m),双边阀门运行,船舶(队)停泊条件试验成果见表 3。试验结果表明:双边阀门充水时,闸室内无明显纵、横向水流,闸室内水流紊乱较小,水面平稳,只要充水阀门开启时间控制在 7~9 min,各种船舶(队)的纵向和横向系统缆力均能满足规范要求。

表 3 闸室内船舶(队)最大系统缆力

船舶(队)类型	阀门运行方式	$t_v/\text{min}$	船舶(队)停泊位置	纵向力/kN	前横向力/kN	后横向力/kN
2×1 000 t 船队	双边	6	闸室中部	24.78	8.91	5.74
		7				
		8				
		9				

续表3

船舶(队)类型	阀门运行方式	$t_v/\text{min}$	船舶(队)停泊位置	纵向力/kN	前横向力/kN	后横向力/kN
1 000 t 单船	双边	6	上半闸室	14.60	9.85	11.02
		7		13.04	7.62	6.70
		8		11.01	6.33	9.45
		9		10.78	5.42	5.75
		6	闸室中部	15.03	6.36	7.85
		7		14.55	5.57	5.77
		8		11.20	7.01	6.89
		9		10.53	4.98	4.99
	单边	6	下半闸室	12.80	7.13	16.58
		7		11.80	7.76	13.83
		8		10.12	6.66	12.26
		9		9.81	5.52	9.97

注: 1 000 t 船舶的纵向力允许值为 32 kN、横向力允许值为 16 kN。

## 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。试验所得船闸充水时的阻力系数及流量系数分别为 1.644 和 0.849, 泄水时的阻力系数及流量系数则分别为 2.087 和 0.692。

## 2.4 进出水口及引航道水流条件

### 2.4.1 进出水口水流条件

最大设计水头工况下充水阀门双边开启(阀门开启时间 8 min)时, 双边充水最大流量为  $403 \text{ m}^3/\text{s}$ , 进水口最大断面平均流速为  $1.40 \text{ m/s}$ , 进水口水流条件良好, 充水时水面十分平稳。上游最低通航水位工况下充水阀门双边开启(阀门开启时间 8 min)时, 双边充水最大流量为  $254 \text{ m}^3/\text{s}$ , 进水口最大平均流速仅为  $0.88 \text{ m/s}$ , 进水口水流条件仍令人满意, 水面亦十分平稳, 未见漩涡等不良水力现象。采用推荐的进水口布置方案, 万安二线船闸上游进水口水流条件能够满足规范及设计要求。万安二线船闸采用了全旁侧泄水的方式, 旁侧泄水廊道最大流速小于已安全运行多年的三峡船闸末级旁侧泄水廊道流速, 因而可认为旁侧廊道可满足要求。

### 2.4.2 引航道水流条件

万安二线船闸上游引航道位于现有水库库区内, 且所处为浅滩地, 可适当加宽引航道底宽辅

以局部浚深等方式以满足上游引航道水流条件规范要求。下游出水采用了全部旁侧泄水的形式, 因此泄水过程中下游引航道内为静水状态。

## 2.5 输水阀门开启方式

综合闸室船舶停泊条件、输水廊道水动力特性、输水时间要求、进出水口及引航道水流条件等因素, 经过多种方案比较, 推荐充水阀门开启采用 8 min 的匀速开启方式、泄水阀门开启采用 7 min 的匀速开启方式。

## 3 结语

1) 万安二线船闸所采用的闸墙主廊道、闸室中部垂直立体分流、闸底两区段四纵支廊道、侧支孔出水、明沟消能、全旁侧泄水的输水系统整体布置设计是合理可行的, 达到了预期的设计目标和要求。

2) 推荐的阀门开启方式下, 输水系统各项水力特征值都小于安全运行多年的葛洲坝 1#船闸和三峡船闸中间级对应条件, 同时满足设计和规范要求。

3) 输水系统分区布置面积不等的出水支孔和明沟消能在改善闸室中船舶停泊条件方面获得了预期的效果, 船闸不同运行工况时闸室内水流较平稳, 船舶在充水上升过程基本无漂移, 系缆力均满足规范要求, 分流口分流均匀。