



飞来峡二、三线船闸闸底长廊道 输水系统模型试验

张绪进^{1,2}, 随娟娟¹

(1. 重庆交通大学, 重庆 400074; 2. 重庆西南水运工程科学研究所, 重庆 400016)

摘要: 飞来峡水利枢纽位于北江中游, 新建的二、三线船闸并列布置有效尺度为 220 m × 34 m × 4.5 m (长 × 宽 × 门槛水深), 船闸最大设计水头 14.44 m, 采用闸底长廊道侧支孔输水系统双明沟消能布置形式。通过 1:30 的物理模型, 对船闸输水系统的布置形式及水力学特性进行试验研究。结果表明: 闸室输水时间、水力学指标、闸室停泊条件、进出口布置形式均能满足规范要求, 优化后的闸室停泊条件较好。

关键词: 船闸; 输水系统; 输水时间; 停泊条件; 模型试验

中图分类号: U 641.3⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)07-0119-05

Model experiment on lock-bottom long-culvert water conveyance system of Feilaixia second & third-lane locks

ZHANG Xu-jin^{1,2}, SUI Juan-juan¹

(1. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Southwestern Research Institute of Water Transport Engineering, Chongqing 400016, China)

Abstract: The water conservancy project of Feilaixia located in the middle reaches of Beijiang river. The new second & third-lane locks are arranged parallelly with the effective dimensions of 220 m × 34 m × 4.5 m (length × width × threshold depth), and the maximum design head is 14.44 m, using lock-bottom long-culvert & side-hole water conveyance system and layout pattern of energy dissipation with double open ditches. Carrying out an experimental study on the layout pattern of the conveyance system and hydraulic characteristics through the model test in 1:30 scale, we draw the conclusion that chamber delivery time, water hydraulic parameters, chamber berthing conditions, import and export of layout pattern can meet the specification requirements. It has been optimized to better conditions for the berthing chamber.

Keywords: lock; water conveyance system; delivery time; berthing condition; model experiment

1 工程概况

飞来峡水利枢纽位于北江干流中游飞来峡区黄洞村旁弯曲河段, 是北江干流自上而下第 4 个水利水电枢纽。新建二、三线船闸并列布置于枢纽右岸, 共用引航道, 按 1 000 吨级船闸 (Ⅲ级船闸) 建设, 船闸有效尺度为 220 m × 34 m × 4.5 m,

船闸上游设计最高通航水位为 24.81 m, 下游设计最低通航水位 10.37 m, 船闸最大设计水头 14.44 m^[1]。

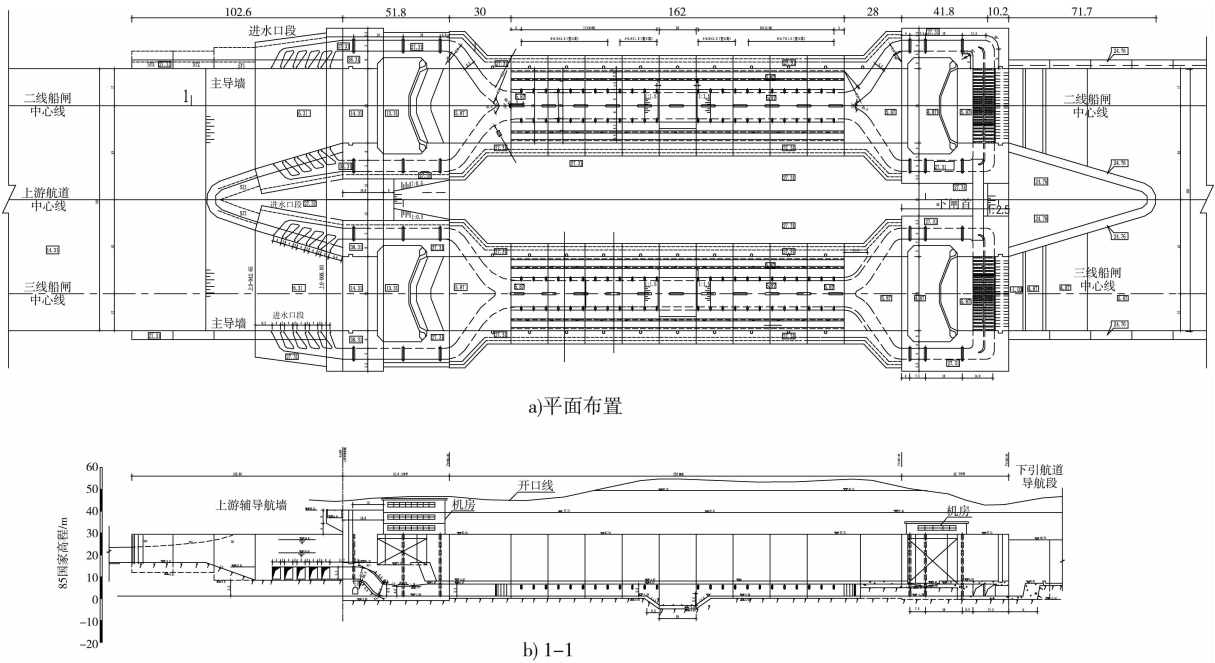
根据总体布置以及船闸输水系统设计规范的有关规定和要求, 输水系统类型选择公式^[2]计算的 m 值为 2.11 ~ 2.63。考虑到本船闸的闸室尺度较大, 且对运行效率要求较高, 宜采用分散输水

收稿日期: 2014-12-08

作者简介: 张绪进 (1959—), 男, 硕士, 研究员, 从事水电站枢纽水工力学、通航水力学、水库泥沙环境水力学、航道整治工程研究。

系统形式。参照桂平二线船闸^[3]等其他类似工程^[4,6]，飞来峡二、三线船闸宜采用闸底长廊道侧支孔双明沟消能输水系统布置。根据计算确定输水阀门及互通阀门处廊道断面尺寸 5.0 m × 4.5 m (宽 × 高)，主廊道断面尺寸为 5.5 m × 5.5 m (宽 × 高)，闸室主廊道中间设厚 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。闸底

主廊道出水段每侧设 24 个出水孔，分为 3 组，上游至下游孔口尺寸 (宽 × 高) 分别为 0.90 m × 1.50 m (8 孔)、0.80 m × 1.50 m (8 孔) 及 0.70 m × 1.50 m (8 孔)，总面积为 57.6 m² 支孔布置于闸底主廊道中部。为减少损失，支孔进出口应两侧面修圆，修圆半径为 0.30 m。输水系统布置见图 1。



注：1. 所有尺寸、高程均以m计(1956年黄海高程系)。
2. 内侧出水支孔四面修圆，外侧三面修圆，修圆半径0.3 m。

图 1 飞来峡二、三线船闸输水系统布置

2 模型设计制作及仪器设备

模型按重力相似准则设计，几何比尺为 1:30，模拟范围包括上、下游引航道、进水口、输水廊道、多支孔系统及出水口等组成部分，模型模拟原船闸上、下游引航道、闸室、闸首总计长度 1 100 m 左右，满足试验相似性要求。上、下游水位采用溢流式平水槽控制，输水阀门采用可无级调速的步进电机驱动启闭机控制，闸室充、泄水水位和阀门后廊道非恒定流压力均用电阻式点压力传感器测定，船舶 (队) 系缆力采用重庆西南水科所研制的全环电阻式测力仪测定，上闸首进口水面降落、壅高、下引航道水面波动采用 UBL-2 超声波/水位采集分析仪测定，闸室、充泄水过程非恒定流各参数采用 DHDAS5920 动态信号采集分析

仪进行采集分析处理，下引航道内的流速采用 ADV 进行测定。

3 船闸模型试验运行工况分析

由于飞来峡二、三线船闸采用并列布置且两线船闸尺度完全相同，因此选择单线运行工况分析。输水阀门采用 $t_v = 3 \sim 6 \text{ min}$ 匀速开启，试验全面测试了船闸输水系统各项指标：包括闸室水位流量过程线、闸室水位最大上升 (下降) 速度、惯性超高和超降值、进水口水位和流态变化过程、输水廊道典型断面流速、闸室充 (泄) 水流态和船舶系缆力、下闸首出水口流态、下引航道水位流速变化过程线及停泊段船舶系缆力等。

4 试验主要成果与分析

4.1 闸室充、泄水时间

在上游最高通航水位 24.81 m 与下游最低通航水位 10.37 m 组合下, 船闸单线运行时阀门闸室充泄水时间见表 1, 开启时间 (t_v) 与充水时间 (T) 关系见图 2。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, 输水时间将缩短 10% ~ 15%。因此, 当充水阀门双边开启时间为 3 ~ 6 min 时, 原型输水时间均能满足设计单线输水 10 min 的要求, 阀门单边运行属非正常开启工况, 充泄水时间较长。

表 1 单线船闸运行闸室充、泄水时间 min			
运行方式	t_v	$T_{\text{充}}$	$T_{\text{泄}}$
双充(泄)	3	7.55	9.30
	4	7.92	9.57
	5	8.47	10.28
	6	9.08	11.01
单充(泄)	5	12.49	13.85
	6	13.03	14.22

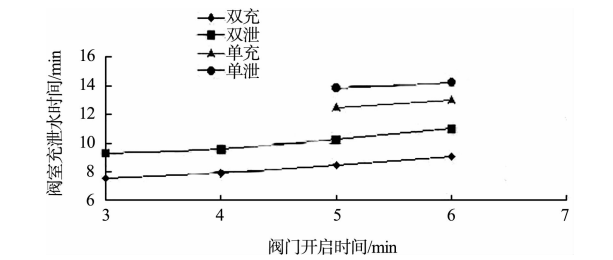
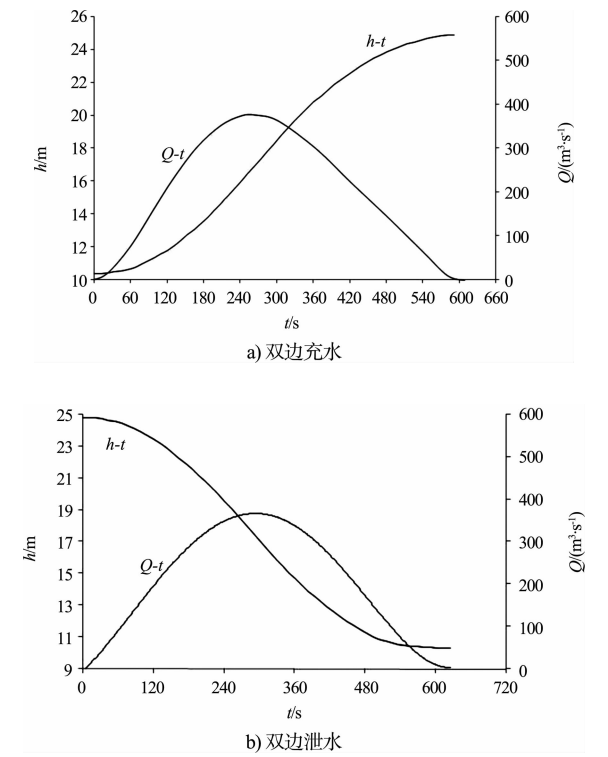


图 2 单线运行输水时间与阀门开启时间关系

4.2 闸室充、泄水水力特性

单线船闸运行时, 阀门采用 3 ~ 6 min 匀速开启, 试验实测各输水水力特性值见表 2, 充、泄水最大流量分别为 482 ~ 365 m³/s 和 435 ~ 349 m³/s; 闸室水面最大上升、下降速度分别为 3.24、2.52 m/min 和 3.00、2.34 m/min; 相应的阀门段廊道最大流速在 10.88 ~ 8.16 m/s 范围内, 上游进水口最大平均流速在 2.13 ~ 1.57 m/s 范围内。上述输水廊道各部位的流速指标均满足规范要求。闸室超灌、泄值分别约为 0.45 m 和 0.36 m, 其值超过规范允许的 0.25 m。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。典型工况水位流量过程线见图 3。

表 2 船闸非恒定流水力特性参数					
运行方式	t_v/min	$Q_{\text{充}}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$Q_{\text{泄}}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$U_{\text{max}}/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	$H_{\text{超}}/\text{m}$
双边	3	482	435	3.24/3.00	0.45/0.36
	4	426	395	2.88/2.76	0.45/0.36
	5	396	368	2.64/2.52	0.45/0.36
	6	365	349	2.52/2.34	0.45/0.36
单边	5	291	272	2.16/1.98	
	6	286	261	2.10/1.92	



注: $t_{v1} = 5 \text{ min}$, Q 为流量, h 为闸室水位。

图 3 单线输水运行工况水位流量过程线

在输水廊道中布置时均压力测压点, 通过测压管测定恒定流情况廊道各部位的压、上下引航道水位和闸室水位, 计算出输水廊道各区段的阻力系数、廊道总阻力系数和流量系数 (表 3 ~ 4)。阀门双边开启充、泄水流量系数分别为: 0.750、0.702, 单边开启充、泄水流量系数分别为: 0.901、0.859。

表 3 充水廊道分段阻力系数					
廊道部位	上进水口段	鹅颈管及阀门段	出水支孔段	总阻力系数	流量系数
双边	0.111	0.475	1.192	1.777	0.750
单边	0.100	0.446	0.676	1.232	0.901

表 4 泄水廊道分段阻力系数

廊道 部位	出水支 孔段	输水阀 门段	下出 口段	总阻力 系数	流量 系数
双边	1. 209	0. 241	0. 580	2. 003	0. 702
单边	0. 571	0. 215	0. 568	1. 354	0. 859

4.3 闸室船舶停泊条件

由于飞来峡二、三线船闸闸室基础由基岩开挖而成，为减小开挖量，在闸室内原布置 2 道消能明沟底高程不等高，同时在两道消能明沟间的消力梁上设置透水孔，对闸室内横向水流分布进行调整，达到改善船舶停泊条件的目的。原方案消能明沟布置见图 4。

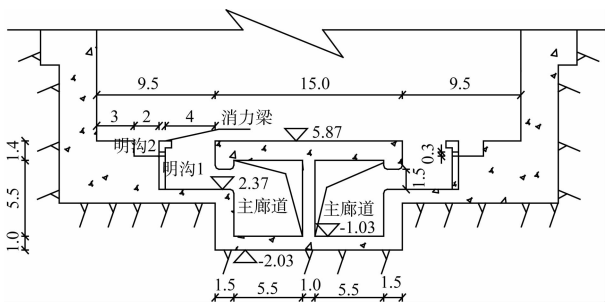


图 4 闸室出水孔及消力梁初步布置（单位：m。下同）

试验结果表明：闸室灌水过程中，支孔水流直接碰撞于第一道消力梁上，反射于闸中，致使闸室中间水流较多，闸室中心水面形成壅高，从而使船舶受到朝向两侧闸墙的横向水流作用力；水流横向分配不均匀。实测 1 000 t 单船最大横向力已接近或超过规范要求（表 5）。

表 5 闸室内船舶（队）最大系缆力（原方案）

阀门开启 时间/min	纵向力/ kN	前横 向力/kN	后横 向力/kN	阀门开启方式
3	11. 56	11. 42	16. 52	阀门双边开启
4	11. 16	10. 21	15. 42	
5	8. 33	8. 62	11. 46	
6	7. 34	7. 59	9. 58	
5	7. 18	8. 18	8. 84	阀门单边开启
6	6. 97	7. 59	8. 66	

根据原方案试验结果分析可知，由于支孔水流集中碰撞于第 1 道消力梁，加之消力梁透水孔高度太小，第 2 道明沟底高程又较高，消能水体小，支孔水流难于扩散至第 2 道明沟，导致闸室

内水流横向分配不均匀。为改善闸室流态，减小船舶的横向系缆力，试验进行了 3 个方面的修改：1) 增大第 2 道明沟的消能水体。即降低其明沟底高程和增加明沟宽度，由原布置明沟底高程 4. 77 m 降至 2. 37 m，与第 1 道明沟底高程齐平；明沟宽度由原布置 2. 0 m 增宽为 3. 5 m；2) 调整消力梁透水孔高度布置。进行了透水孔高度为 0. 40、0. 50、0. 60 m 的 3 次修改；3) 调整消力梁离孔口位置。综合比较 3. 5、4、4. 5 m 3 种布置，最终确定了图 5 的布置。

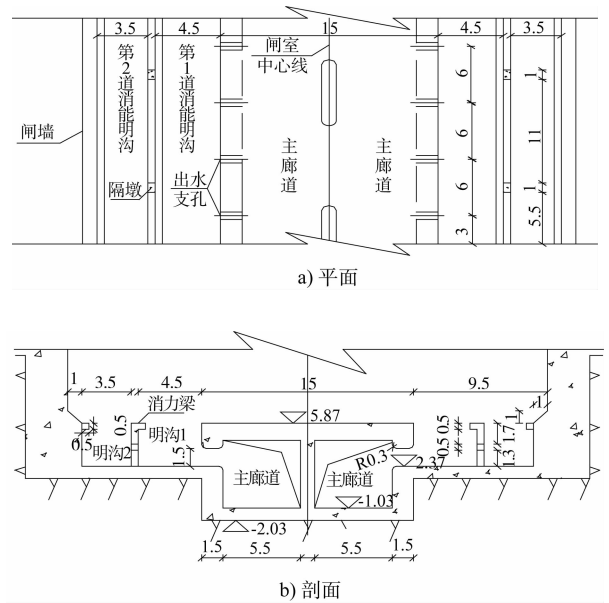


图 5 闸室出水孔及消力梁修改布置

修改方案布置下，试验结果表明：充水整个过程，闸室水流横向分配较为均匀；由于船舶停于左闸墙位置，在阀门全开前一段时间内船舶仍受到朝两侧闸墙的水流作用力，但船舶系缆力较原方案大为减小。各工况下 1 000 t 单船停于闸室最大系缆力见表 6，典型工况船舶系缆力过程线见图 6。

表 6 闸室内船舶（队）最大系缆力（修改方案）

阀门开启 时间/min	纵向力/ kN	前横 向力/kN	后横 向力/kN	阀门开启方式
3	12. 37	11. 87	11. 95	阀门双边开启
4	11. 52	10. 95	8. 79	
5	9. 47	9. 38	9. 44	
6	6. 94	8. 00	7. 70	
5	8. 35	7. 17	6. 47	阀门单边开启
6	8. 19	5. 52	6. 83	

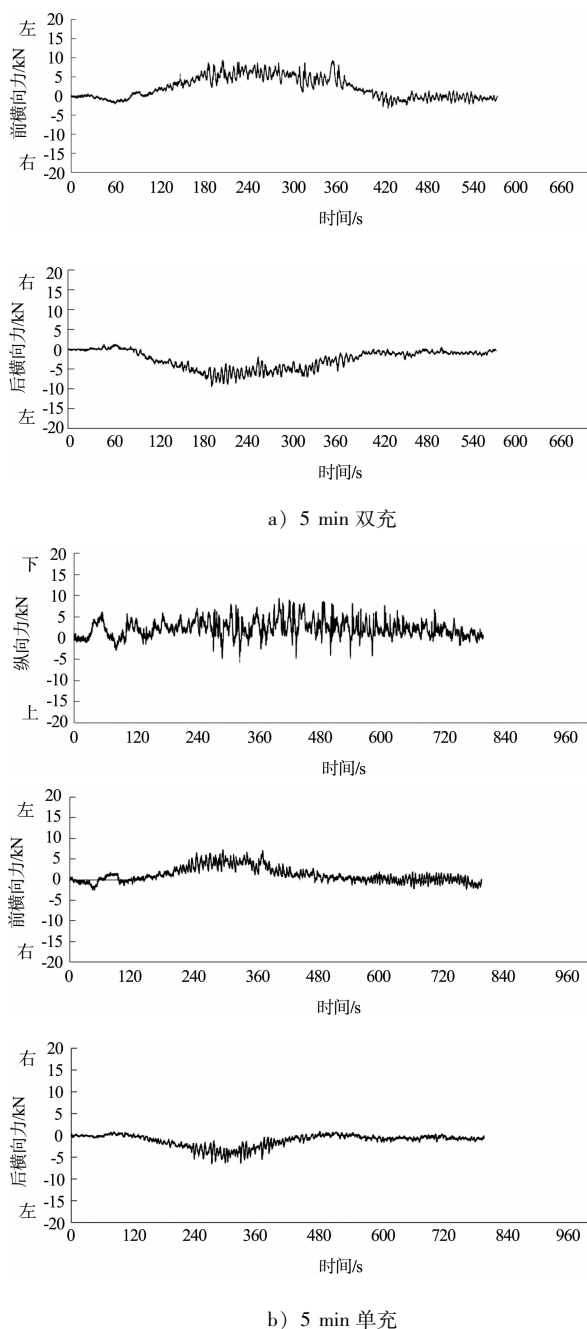


图 6 1 000 t 船舶停于闸室左侧舶系缆力过程线

4.4 进、出水口水流条件

飞来峡二、三线进水口形式均采用导墙上垂直多支孔布置,采用 $t_v = 3 \text{ min}$ 双边匀速开启,未发现 有串通漏斗漩涡及有害于进闸船舶安全的不良流态,说明进水口形式、面积及高程布置是基本合理的。

出水口采用结构水流消能效果较好的“顶部出水+正面出水”格栅式消能室布置形式,其出水支孔为对称布置,试验进行了多种方案的分析和比较,最终确定出水口的布置为:消能室内主、

辅导墙侧各布置 1 道消力槛, 槛高分别为 2.4、1.5 m, 实体辅导墙长度改成 20 m。辅导墙与引航道中心线扩散角增大至 47° , 布置见图 7。

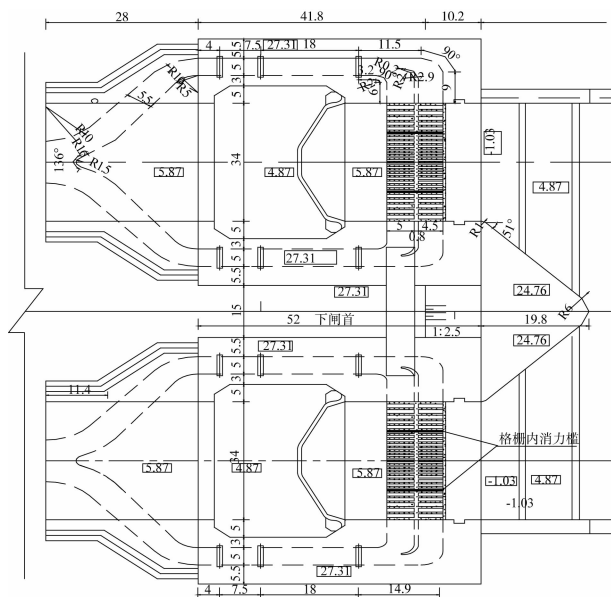


图7 修改后辅导墙布置

试验结果表明:单线运行,双边阀门 $t_v=5\text{ min}$ 泄水过程中,下游引航道内水流分布较为均匀。距下闸首170 m处停泊区断面平均流速小于1.0 m/s,满足规范要求;非泄水船闸下引航道仅在辅导墙至下闸首范围内存在小范围强度不大的回流,停泊区断面最大回流流速均小于0.4 m/s。试验分析认为,一线船闸泄水对另一线船闸船舶正常进出闸的影响不大。

5 结论

- 1) 采用闸底长廊道侧支孔双明沟消能输水系统布置是合理可行的, 各项水力学指标均能满足设计规范要求, 达到了预期的设计目标。
- 2) 考虑船闸通过能力、闸室及下引航道内船舶停泊条件及廊道结构安全等因素, 试验推荐充、泄水双边阀门采用 $t_v = 5 \text{ min}$ 开启, 单边阀门采用 $t_v = 5 \text{ min}$ 间断开启。
- 3) 对于模型中出现的超灌、泄现象, 原型中可采用提前关闭阀门及平水时打开人字门等措施解决。