



飞来峡二、三线相互灌泄水船闸 省水特性及效益分析*

陈亮, 王晓青

(重庆交通大学, 重庆西南水运工程科学研究所, 重庆 400016)

摘要: 为缓解通航用水与发电、农业用水之间的矛盾, 拟建的广东北江飞来峡二、三线船闸采用相互灌泄水的省水运行方式。对船闸建立水工物理模型研究其省水特性并进行效益分析, 对比双线相互灌泄水的省水运行方式与单线运行方式的优劣。研究表明: 省水运行模式每年省水 2.89 亿~3.77 亿 m^3 , 折合水能发电量 0.135 亿~0.175 亿 $kW\cdot h$; 省水船闸闸室及引航道水流条件、船舶停泊条件优于单线运行模式; 船闸通过能力满足通航需求。省水船闸运行具有显著的经济效益和环境效益。

关键词: 相互灌泄水; 省水船闸; 水力学试验; 效益分析

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)06-0106-05

Water-saving characteristics and benefits of Feilaixia second-line and third-line locks

CHEN Liang, WANG Xiao-qing

(Southwest Research Institute of Water Transport Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China)

Abstract: To counter the contradiction of water navigation, power generation and agricultural water, the Feilaixia second-line and third-line locks were planned to be operated by water-saving mode during water filling and emptying. Hydraulic model experiments were carried out to study the characteristics of water-saving and the benefits. The water-saving ship locks of double lines were compared with the single lock, and the result showed that water-saving ship locks could save 2.89~3.77 million tons of water, and generate $13.5 \times 10^6 \sim 17.5 \times 10^6 kW\cdot h$ of hydropower energy. Thus the conclusion is drawn that the water conditions of chamber and approach channel are more favorable, and the berthing conditions in the chamber are better. The ship locks of water-saving satisfy navigation requirements, and the water-saving ship locks will have remarkable economic and environmental benefits.

Keywords: filling and emptying delivery; water-saving ship lock; hydraulic experiment; benefits analysis

省水船闸可有效缓解水资源贫乏地区航运用水和其它用水之间的冲突, 国外对于省水船闸研究起步较早、发展较快, 德国是修建省水船闸最多的国家, 从 19 世纪 80 年代开始兴建省水船闸^[1-3]。我国省水船闸的研究是从 20 世纪 60 年代开始的, 先后进行过长江三峡船闸的省水方案研究^[4], 郑家岗省水船闸模型试验研究^[5], 春天湖

双线双向省水船闸设计方案研究^[6-7], 乌江银盘高水头的省水船闸整体水力学研究^[8-10], 西江干线长洲枢纽三线四线省水船闸建设方案研究^[11-12]。而省水船闸真正实施的很少, 目前建成运行的仅有桂林市春天湖双线双向省水船闸工程, 作为旅游观光用途的通航建筑物, 等级为 VII 级, 通航规模小^[6-7]。

收稿日期: 2014-10-08

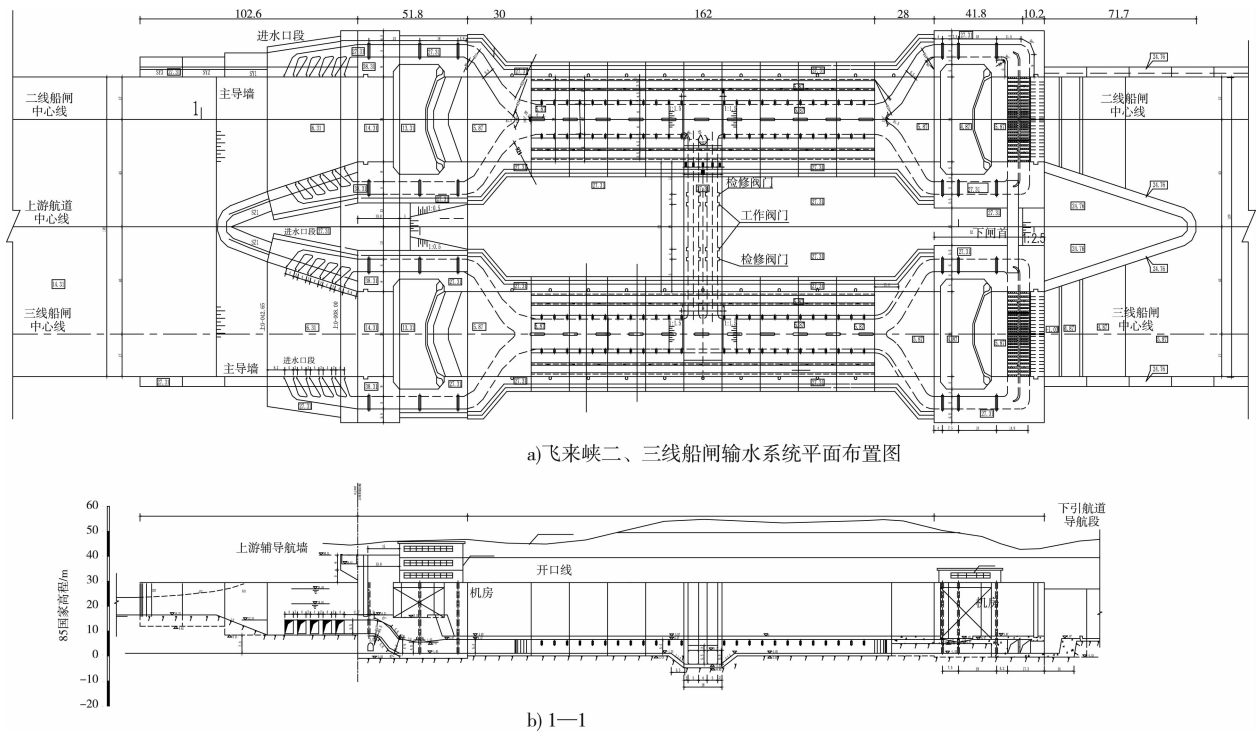
*基金项目: 西部交通建设科技项目 (20113283501580); 广东省交通运输厅科技项目 (科技-2013-04-007)

作者简介: 陈亮 (1987—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为船闸水力学。

1 工程方案

飞来峡水利枢纽工程是广东省建国以来规模最大的综合性水利枢纽工程, 于1999年10月建成运行, 一线船闸上闸首、土坝、副坝以及建于副坝部位的排水涵闸等均为1级建筑物; 闸室及下闸首为3级建筑物, 通航船舶500吨级, 现有通航能力467万t。由于现状通航能力不能满足运输发展的需求, 广东省“十二五”规划提出, 北江干流建设通航1000吨级船舶内河Ⅲ级和年单向通过能力合计4000万t以上的航道等级二、三线船闸。拟建船闸利用现有闸坝挡水, 上闸首位于枢纽挡水前沿, 工程等别为I等工程, 主要水工

建筑物级别应为1级, 二、三线船闸上闸首及其进水口段为1级建筑物, 下闸首、闸室为1级建筑物, 上、下游导航墙及靠船墩、隔流堤为3级建筑物。由于拟建二、三船闸平面尺度大, 运转频繁, 耗水量大, 发电和航运争水矛盾十分突出, 为了最大限度节约船闸的耗水量, 飞来峡二、三线船闸并列布置, 有效尺度为220 m × 34 m × 4.5 m, 设计水头为14.4 m。船闸输水系统采用闸底长廊道侧支孔出水, 在两线船闸间设互通廊道, 实现双线船闸相互灌、泄水, 连通廊道设两道工作阀门, 两线船闸既可每线独立运行, 亦可联合省水运行。飞来峡二、三线省水船闸布置见图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、三线省水船闸布置

省水船闸双线相互灌泄水输水过程分为两阶段。第1阶段: 首先开启连通廊道阀门(阀门启闭时间 t_{v2}), 从一线往另一线船闸输水, 待两线船闸达到一定水头差(Δh)或两线船闸水位基本齐平时, 第1阶段灌泄水结束; 第2阶段: 关闭连通阀门, 且同时开启充水船闸上闸首工作阀门及泄水船闸下闸首工作阀门(闸首阀门启闭时间 t_{v1}), 各自完成灌泄水过程。

2 水力学试验及成果

根据闸底长廊道输水系统方案设计物理模型, 建立1:30比尺的水工整体模型。模型模拟原体船闸上、下游引航道长度分别为150 m和450 m, 闸室、闸首长度约为300 m, 上、下游平水设备为200 m, 总计模型模拟原体长度1100 m。闸室边墙用玻璃钢框架制作, 输水廊道采用聚乙烯塑料板, 为了便于观察, 输水阀门段用有机玻璃制造。

采用船型为1 000 t干货船进行充水过程最大系统力测试。

模型试验在设计水头14.4 m下,分别对单线独立输水和双线相互灌泄水两种运行方式进行试验,其模型试验主要结果如下:1)单线运行时,灌、泄水阀门启闭时间 $t_{v1} = 5$ min,输水时间小于

10 min,且各项水力指标满足规范要求;2)双线联合运行时,闸首阀门启闭时间 $t_{v1} = 5$ min,连通阀门启闭时间 $t_{v2} = 3$ min,连通阀门关闭时两线间水位差 $\Delta h = 0 \sim 5$ m,输水时间小于15 min,且各项水力指标满足规范要求。两种运行方式各水力学指标对比见表1。

表1 单线运行与双线省水运行输水系统特征参数对比

方案	最大流量/(m ³ ·s ⁻¹)		灌泄水时间/min		平均流量系数		闸室船舶最大系统力/kN						阀门后廊道最低压力/m水柱	一次过闸耗水量/万m ³
	灌水	泄水	灌水	泄水	灌水	泄水	纵向力 F_1		前横向力 F_2		后横向力 F_3			
							上半闸室	下半闸室	上半闸室	下半闸室	上半闸室	下半闸室		
方案1 (单线)	396	368	8.47	10.28	0.738	0.714	7.55	7.68	10.03	9.02	9.56	10.10	1.77	9.33
方案2 (双线相互灌泄水)	295	295	10.31~15.68	11.39~16.77	0.612	0.608	5.64~6.48	7.06~7.68	5.62~6.03	6.86~7.24	3.66~6.61	4.01~6.43	7.03	4.85~5.89

根据水力学特性对比分析,双线相互灌泄水运行方式下,船闸闸室及引航道水流条件优于单线运行方式,船舶停泊条件也优于单线运行方式。原因在于双线船闸相互输水使每线船闸的输水过程被分为了两个阶段,相比单线输水方式:1)船闸工作水头分为几级,从而降低了每级的水头差,使高水头船闸阀门水力学问题更容易解决;2)每个阶段的流量减小,各项水力学指标值相应降低,船舶纵、横向缆绳受力减小;3)上下游引航道因灌泄水引起的往复流问题容易解决,便于工程设计和施工。

3 耗水量及省水量计算

对飞来峡双线相互灌泄水省水船闸的推荐运行方案进行省水特性分析,船闸1 d内平均耗水量按以下公式^[13]计算:

$$\bar{Q} = \frac{nV_0''}{86\,400} + q \quad (1)$$

$$q = eu \quad (2)$$

式中: \bar{Q} 为1 d内平均耗水量(m³/s); V_0'' 为一次过闸用水量(m³·次⁻¹); n 为日平均过闸次数(次); q 为闸、阀门渗漏损失(m³/s); e 为止水线单位长度的渗漏损失(m³·s⁻¹·m⁻¹),当水头<10 m时取0.015~0.002 m³·s⁻¹·m⁻¹;当水头>10 m时取0.020~0.003 m³·s⁻¹·m⁻¹; u 为闸门、阀门止水线

总长度(m)。

过闸用水量为:

$$V_0 = L'_c B_c H_0 \quad (3)$$

式中: L'_c 为闸室水域长度(m); B_c 为闸室有效宽度(m); H_0 为船闸计算水头(m);单级船闸一次过闸平均用水量为 $V_0'' = 0.75V_0$ 。计算结果为: $n = 28.09$ 次, $L'_c = 254$ m, $B_c = 34$ m, $H_0 = 14.4$ m, $V_0 = 124\,358.4$ m³·次⁻¹, $V_0'' = 93\,268.8$ m³·次⁻¹, $e = 0.003$ m³·s⁻¹·m⁻¹, $u = 259$, $q = 0.777$ m³/s, $\bar{Q} = 31.12$ m³/s。

当双线船闸运行水位差 Δh 为0~4 m时,经多次运行,省水率可达36.9%~48.0%。由于双线灌泄水船闸连通阀门完全关闭时存在反向水位差,影响耗水率约为2.0%,按飞来峡二、三线船闸年通航天数为300 d^[14]计算每年过闸耗水总量,见表2。

表2 单线与双线相互灌泄水耗水量对比

方案	一次过闸耗水量/万m ³	每年过闸耗水量/亿m ³
单线运行	9.33	7.84
双线相互灌泄水省水运行	4.85~5.89	4.07~4.95

与单线运行相比,双线相互灌泄水省水运行每年节约过闸耗水量可达2.89亿~3.77亿m³。

4 通过能力影响分析

根据运量预测成果,2020年、2030年、2040年

分别为642万t、2741万t、3530万~4110万t。经计算2座船闸实际最大年通过能力为4332万t。

如2座船闸采用双线相互输水, 根据模型试验结果, 当设计水头为14.44m, 连通阀门采用3min匀速启闭, 连通阀门关闭时二线船闸水位差为4m时的运行工况, 模型实测的充泄水时间分别为10.48min和11.76min; 即使二线船闸水位差为0m时关闭连通阀门, 且关闭完连通阀门, 再分别开启二线船闸的充、泄水阀门, 模型实测的充泄水时间分别为15.68min和16.77min。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, 原型输水时间将缩短为15.00min以内, 与单线船闸闸室充泄水时间10min相比, 双线相互输水闸室充、泄水时间延长了2~7min, 其它参数取值与单线运行相同, 经计算, 在模型拟定双线运行工况下, 船闸通过能力较单线运行均有所下降, 各联合运行工况下两船闸通过能力见表3。

表3 省水运行各工况下通过能力

水头差/m	单独运行/万t	省水运行/万t	省水运行减小通过能力/%
0*	4332	3745	13.54
0	4332	4084	5.72
2	4332	4140	4.44
3	4332	4171	3.70
4	4332	4179	3.52
5	4332	4212	2.78

注: 0* m为连通阀门完全关闭时在开启闸首阀门, 0~5m为连通阀门关闭时同时开启二线闸首阀门。

上述资料表明: 采用双线相互输水省水模式时, 水头差0m待连通阀门完全关闭时再开启闸首阀门工况, 通过能力减小了13.54%; 两船闸通过能力为3745万t, 水头差4m连通阀门关门时, 同时开启闸首阀门工况通过能力减小了3.52%, 两船闸通过能力为4179万t。以上运行工况下, 两船闸通过能力均能满足2040年货运量3530万~4110万t的要求。

考虑采用省水模式运行时, 需要二线船闸运行同步, 进出船闸船舶需相互等待, 船舶过闸时

间增长, 预测省水模式下通过能力还将会减少3.5%左右。

5 效益分析

拟建飞来峡枢纽二、三线省水船闸节约开发利用北江的水资源, 产生的经济效益和环境效益体现在水能发电、农业灌溉和生态环境等方面。

根据水能计算公式计算节约耗水量折合的年发电效益:

电站的保证出力:

$$N = \eta 9.81 QH \quad (4)$$

水流能量:

$$E = \eta 8760 \times 9.81 QH \quad (5)$$

式中: E 为水流能量(kW·h); η 为出力效率; Q 为平均流量(m^3/s); H 为水头落差(m); N 为电站的保证出力(kW)。

二线船闸各自单独运行时, 消耗水流量为62.24 m^3/s , 二线船闸相互灌泄省水运行时, 节约流量 Q 为22.97~29.88 m^3/s , η 取值0.8, 发电水头落差 H 取值8.53m(年内平均水头), 计算得到飞来峡二、三线省水船闸节约的水能发电量为13.47 $\times 10^6$ ~17.5 $\times 10^6$ kW·h。

农业效益体现在节约的水资源用于增加灌溉面积、提高农作物产量产生的效益, 价值等于增加的农业灌溉用水量和灌溉用水价格的乘积与农业产值增加之和。

生态环境效益体现在水环境容量的改善、河道维持生态水量增加所带来的水生态系统调节能力以及水土保持能力提高等方面。

6 结论

建立1:30的船闸水力学整体模型, 对拟建的飞来峡二、三线船闸双线相互灌泄水运行方式与单线运行方式进行对比试验, 研究其省水特性并进行效益分析, 研究成果表明: 1) 双线相互灌泄水运行方式下, 船闸闸室及引航道水流条件优于单线运行方式, 船舶停泊条件也优于单线运行方式。2) 双线相互灌泄水省水运行每年过闸耗水量

可达 2.89 亿 ~ 3.77 亿 m³，节水效果显著；其运行能力满足 2020—2040 年运输量的需求。3) 除发挥良好的航运效益外，省水船闸还具有经济效益和环境效益，节省水能折合发电量为 0.135 亿 ~ 0.175 亿 kW·h，有效缓解航运与发电用水之间的矛盾。

飞来峡水利枢纽对北江航运至关重要，其水流条件复杂，各个水力学指标设计要求较高，因此应通过物理模型试验对输水系统进一步进行水力学物理模型试验研究，对输水系统细部布置进行优化，以保证船闸工程设计的构筑物及阀门等满足水力学条件，保证闸室船舶停泊的安全条件。

参考文献：

[1] 周玉华, 刘锋. 省水船闸初探[J]. 水运工程, 2006(10): 156-159.
 [2] 吴澎, 宣国祥. 船闸设计的新进展[J]. 水利水运工程学报, 2009(4): 122-127.
 [3] 吴澎. 中国内河航运发展的机遇与挑战[J]. 水运工程, 2010(2): 11-15.
 [4] 天津水运工程科学研究所. 三峡工程(设中间渠道)船闸输水系统试验研究报告[R]. 天津: 天津水运工程科学研究所, 1990.

[5] 杨裔轩. 郑家岗省水船闸输水系统水力学试验[J]. 水利水运科学研究, 1980(1): 37-45.
 [6] 苏海滨. 双线双向省水运行船闸的设计体会[J]. 电学学报, 2006, 21(2): 247-248.
 [7] 范惠生. 春天湖船闸的特点及设计创新[J]. 水利规划与设计, 2007(3): 53-55.
 [8] 陈明栋, 杨忠超, 杨斌. 乌江银盘船闸输水系统选型研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2006, 28(5): 30-34.
 [9] 陈明栋, 杨斌, 杨忠超, 等. 省水船闸在高坝通航中的应用[J]. 水运工程, 2008(12): 114-118.
 [10] 杨忠超, 陈明栋, 杨斌. 乌江银盘省水船闸整体水力学模型试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2010(2): 61-65.
 [11] 交通部天津水运工程科学研究所. 长洲水利枢纽三线四线船闸初步设计阶段整体模型试验研究报告[R]. 天津: 交通部天津水运工程科学研究所, 2010.
 [12] 张珊, 吴澎. 长洲水利枢纽 3-4 号船闸平面布置研究[J]. 水利水运工程学报, 2012(4): 1-5.
 [13] JTJ 305—2001 船闸总体设计规范 [S].
 [14] 广东省综合交通勘察设计院有限公司, 中水珠江规划勘测设计有限公司. 北江(乌石至三水河口)航道整治工程可行性研究报告[R]. 广州: 广东省综合交通勘察设计院有限公司, 2012: 51-57.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 105 页)

2) 三岔管体型顶部边壁动水荷载分布不均，总体上边壁压强脉动较为剧烈，在某些工况下存在由流态不稳造成的边壁压强脉动强度不断变化的现象；矩形突扩厢体顶部边壁动水荷载分布较为均匀，压强脉动剧烈程度远远小于三岔管体型。矩形突扩厢体体型改善边壁压强脉动等方面具有显著优势。

3) 主阀大开度 ($n_1 \geq 0.7$) 情况下，采用突扩体型可以明显降低主阀的临界空化数、改善主阀的空化特性；辅阀由于其结构设计特点，阀后体型对其临界空化数无显著影响。

4) 在相同的极端工况下，三岔管体型下阀后空泡群范围延伸至边壁，空泡溃灭可能对边壁产生

冲击破坏；而突扩厢体体型可以将阀后空泡区限制在水体内部，边壁发生空蚀破坏的概率大大降低。

参考文献：

[1] 胡亚安. 水力浮动式升船机应用基础研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2011.
 [2] 李中华, 胡亚安. 水力浮动式升船机设计原理[J]. 水运工程, 2010(7): 116-120.
 [3] 胡亚安, 张瑞凯. 三峡船闸底扩与顶扩体型水力特性综合研究[J]. 水科学进展, 1998(2): 59-64.
 [4] 李云, 胡亚安, 宣国祥. 通航船闸水力学研究进展[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 1999, 14(2): 232-239.

(本文编辑 武亚庆)