



船闸闸室明沟形式及消能效果分析*

王召兵, 陈 亮, 彭永勤
(重庆交通大学, 重庆 400074)

摘要: 船闸侧墙廊道闸室明沟消能工布置及消能效果的优劣, 直接影响闸室内船舶所受系缆力大小及停泊安全。利用局部模型, 在恒定流情况下, 对侧墙廊道闸室内布置单明沟机加槛、双明沟及三明沟消能工充水过程进行试验研究; 分析和比较各明沟形式的剩余比能、动能及流场分布, 综合评判各形式明沟消能工的消能特性, 并在整体模型上进行了试验验证。研究表明: 三种明沟形式比较, 三明沟布置消能效果最优。双明沟消能形式较单明沟消能水体增大较多, 消能工布置灵活, 消能空间大, 水流分布亦较单明沟更为均匀, 在减小闸室内横向水流对船舶作用力方面较单明沟形式优越。因此, 综合比较, 双明沟消能效果较单明沟要好。

关键词: 闸室; 明沟消能工; 消能效果

中图分类号: U 641.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)07-0129-06

On form and energy dissipation effect of lock chamber's open ditch

WANG Zhao-bing, CHEN Liang, PENG Yong-qin
(Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The layout of energy dissipater and the effect of energy dissipation of lock chamber sidewall corridor ditches impact directly the mooring force and berthing safety of vessels in the lock chamber. Using the local model and in the case of the steady flow, we carry out an experimental research on the energy dissipater water-filling process of the single ditch, double ditches and three ditches in the lock chamber sidewall corridor, analyze and compare the residual specific energy, kinetic energy and distribution of flow field of various types of ditches, evaluate comprehensively the energy dissipation characteristics of energy dissipater of each type of ditch, and verify them in the overall model. The results show that comparing three kinds of open ditches, the best arrangement of the effect of energy dissipation is three ditches. Comparing with single ditch, the double ditches are characterized by more energy-dissipation water and more flexible energy dissipater arrangement. The energy dissipation space of double ditches is larger, the distribution of flow field is more homogeneous than the single ditch, and it is better to decrease the acting force of the lock chamber transverse flow to ship than the single ditch. Therefore, the effect of energy dissipation of double ditches is better.

Keywords: lock chamber; energy dissipater of open ditch; effect of energy dissipation

早在 20 世纪 30 年代, 美国即开始在船闸底部横支廊道前沿采用单明沟消能工^[1]。中国从 20 世纪 50 年代开始, 陆续在长江三峡船闸、葛洲坝 2 号船闸等设计、施工中陆续进行了研究^[2],

并付之于工程实践; 自 21 世纪初, 针对大型船闸设计水头远超过美国 WES 关于该类输水系统规定的情况, 中国相关研究机构提出在闸底纵支、横支廊道前设置双明沟消能布置, 相应进行了物理

收稿日期: 2015-11-25

*基金项目: 西部交通建设科技项目 (20113283501580)

作者简介: 王召兵 (1972—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为船闸水力学。

模型试验研究，并应用于工程实践；而对于中水头、大尺度船闸侧墙廊道闸室消能工的研究，至目前为止，国内外仅限于采用单明沟或消力坎消能工，远不能满足其闸室船舶停泊安全的要求^[3]。其次，由于其输水廊道布置于闸墙内，闸室内有足够的空间布置多明沟消能^[4-6]。因此，以广西西江贵港二线船闸为依托，利用局部物理模型对单明沟加槛、双明沟、三明沟形式消能工进行了研究，主要对闸室内流场、水面波动、剩余动能、比能等消能特性指标进行比较，提出最优的明沟形式，并利用船闸整体水力学模型，明沟群的消能效果进行了验证。上述的研究成果可以为国、内外同类型的船闸输水系统设计起到指导作用。

1 试验方法及评判标准

1.1 局部模型

局部物理模型比尺为 1:20，按重力相似准则设计。考虑所模拟的船闸闸室两侧廊道出水孔布置对称；所以局部模型模拟闸室宽度的 1/2，取典型船闸输水系统 24 个支孔中的中间 5 个支孔为试验段。

为便于控制试验条件和比较 3 种消能形式的消能效果，3 种消能形式闸室底部高程相同。模型闸室尺寸为 2.13 m×0.85 m（长×宽）。根据相似准则，模型试验段采用的聚氯乙烯塑料板及有机玻璃糙率约为 0.008 0~0.008 5，与原型混凝土糙率基本相似。根据模型试验提供的充水过程中阀门开度及相应的水位和流量，经计算模型廊道水流的雷诺数 $R_e > 10^5$ ，保证试验水流处于紊流区域，可以满足试验要求^[5-7]。模型布置见图 1，试验工况见表 1。

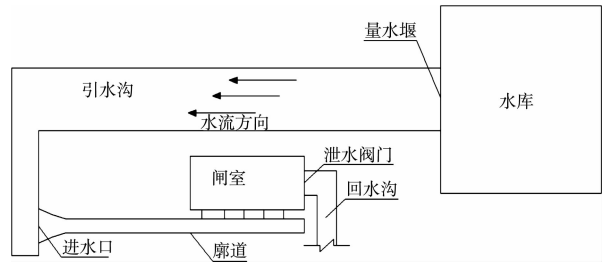


图 1 局部模型布置

表 1 局部模型试验工况

阀门开度	充泄水方式	7 min 双充		5 min 双充	
		原型流量及水位/ (m ³ ·s ⁻¹)	局部模型流量及水位/ (dm ³ ·s ⁻¹)	原型流量及水位/ (m ³ ·s ⁻¹)	局部模型流量及水位/ (dm ³ ·s ⁻¹)
n=0.3	水位/m	30.4	30.40	29.9	29.90
	流量	214.0	12.46	190.0	11.06
n=0.6	水位/m	34.0	34.00	32.8	32.80
	流量	382.0	22.24	429.0	24.98
n=0.8	水位/m	37.3	37.30	35.5	35.50
	流量	411.0	23.93	440.0	25.62

1.2 消能特性评判标准

为了正确反映各明沟的消能性能，研究中闸室水面波动特征值取水面波动均方根值 N ，水面波动最大值 $\Delta h_{\max}$ 及水面波动平均值 Δh 来说明。另一方面，由于闸室某一高程流速分布及能量也能反映各明沟的消能特性，因此，引入进入该断面剩余比能和动能作为另 2 个评判标准，即：

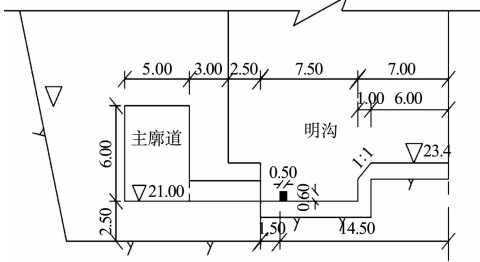
$$E_{pt} = \frac{\rho}{2} m_{2t} v_{mt}^3 \tag{1}$$

$$m_{2t} = \frac{\int_{c_t} v_t^3 dc_t}{c_t v_{mt}^3} \approx \frac{1}{n} \frac{\sum_{i=1}^n v_i^3}{v_{mt}^3} \tag{2}$$

$$E = \sum_{i=1}^n \frac{(v_i)^2}{2g} \tag{3}$$

式中： E_{pt} 为时刻 t 的剩余比能； ρ 为水的密度； v_{mt} 为时刻 t 的断面平均流速； m_{2t} 为时刻 t 的断面动能校正系数； v_t 为时刻 t 断面的点流速； c_t 为时刻 t 断面面积； E 为断面动能； v_i 为测点的流速大小； n 为测点个数。

整体物理模型试验中的闸室流场分布、水面波动、船舶系缆力也作为 3 种明沟消能设施消能效果的重要评判标准。试验研究所采用的单明沟、双明沟和三明沟布置分别见图 2。



a) 单明沟

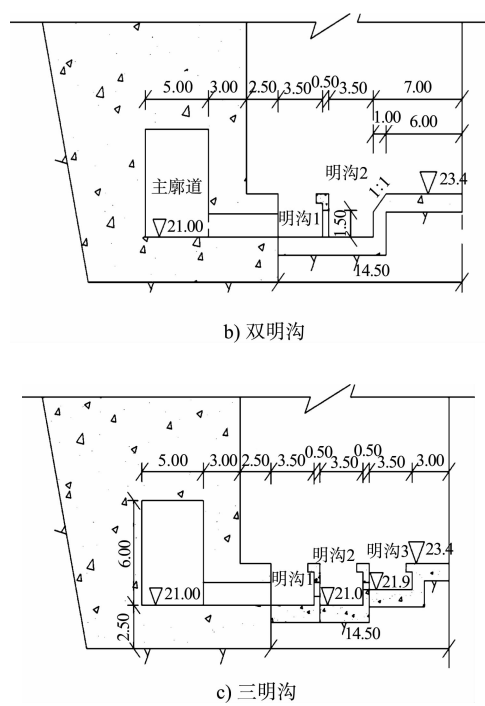


图 2 3 种明沟布置 (单位: m)

2 局部物理模型试验成果与分析

2.1 流场分布比较

流场测点布置见图 3。3 种明沟消能闸室流场、流速测量结果见图 4。根据其流场数据分析, 从 xy 平面可见, 阀门开度 $n=0.8$ 中部剖面, 由于该时段为闸室充水最大流量时段, 其平面流速大于阀门开度 $n=0.3$ 闸室底部剖面, 因而达到充水过程最大值; 另从流向上看, 单明沟和双明沟在阀门开度 $n=0.3$ 底部剖面, 由于消力坎和消力梁的阻挡, 部分流速方向指向靠闸墙侧; 到 $n=0.8$ 中部剖面, 由于流量增大, 2 种布置几乎所有测点流速方向指向闸室中间; 而三明沟布置, 在闸室中部剖面, 有部分测点流速方向仍指向闸墙侧, 其余测点的流速方向均匀指向闸室中间, 说明有部分水流在第 1 道明沟内消能, 该剖面上的流速分布较单明沟均匀。从垂直方向 z 平面流速分布可见, 无论底、中、上剖面, 3 种消能明沟流速值均较小, 且不随其位置高程变化。因此, 从流速的均匀程度上看, 双明沟较单明沟均匀、三明沟较双明沟更均匀些。

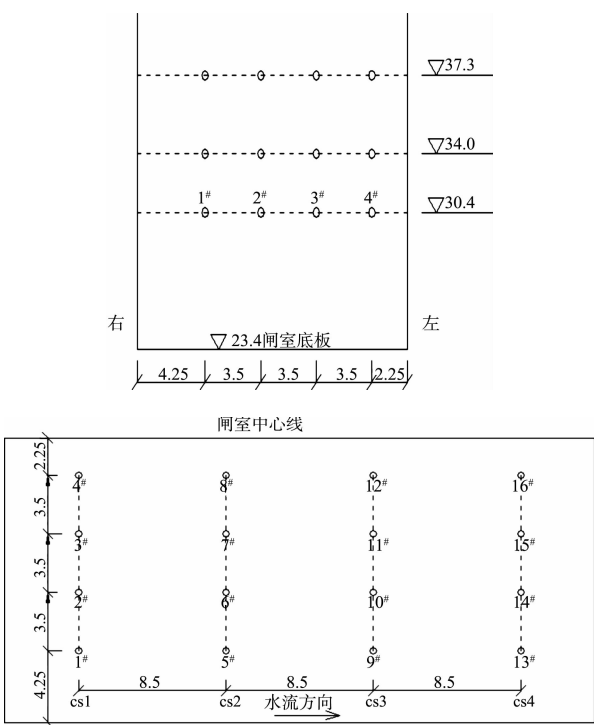
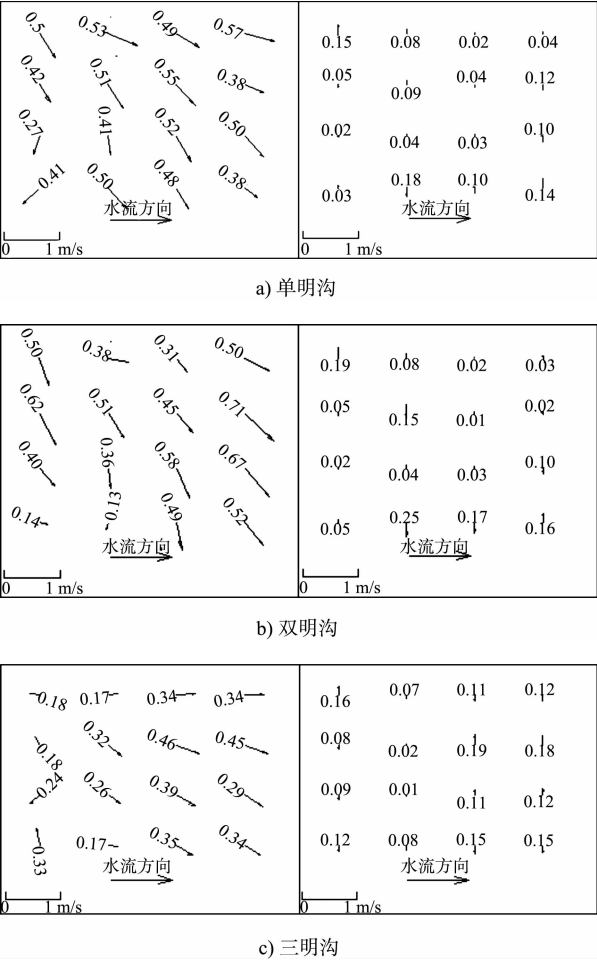


图 3 闸室流场测点分布 (单位: m)



注: 水平剖面 $Z=37.3$ m, $n=0.8$ 。

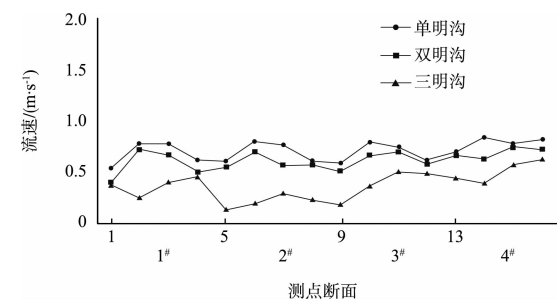
图 4 3 种明沟闸室流场、流速分布

2.2 流速比较

单、双和三明沟形式流速对比见图 4。由图 4 可知 3 种消能明沟形式在闸室内的分布规律基本相同，但流速绝对值及波动大小是有明显区别的。单明沟形式在充水最大流量的闸室中部剖面，流速绝对值较大；且同一断面的流速出现极大、极小值，流速波动较大，分布不均匀，说明闸室局部有不规则的水面紊动出现；而三明沟形式布置在充水的任一时段，未出现流速大的波动，分布均匀。流速绝对值较小；说明其水面平稳，紊动小。双明沟布置的流速波动及流速绝对值介于两者之间。

2.3 消能效果比较

单、双、三明沟消能布置下，2 种阀门开启时间闸室典型断面剩余比能及动能见表 2。可知，对于同一种明沟布置形式及阀门开启时间，其最大



注： $t_v=5\text{ min}$ ； $n=0.8$ ； $h=14$ 。

图 4 3 种明沟方案流速比较

断面动能和剩余比能均出现在、闸室充水最大流量时段；就 3 种方案明沟形式的剩余比能和动能比较来看，单明沟布置的各项指标均较大，双明沟布置次之，而三明沟消能布置的各项指标均最小。说明双明沟、三明沟形式布置消能效果均较单明沟要好。

表 2 3 种明沟剩余比能与动能对比

阀门开启时间	开度	单明沟			双明沟			三明沟		
		E	m_{2t}	E_{pt}	E	m_{2t}	E_{pt}	E	m_{2t}	E_{pt}
5 min	$n=0.3$	0.110	1.15	0.026	0.086	1.76	0.023	0.017	1.37	0.002
	$n=0.6$	0.280	1.16	0.097	0.230	1.16	0.120	0.072	1.34	0.015
	$n=0.8$	0.350	1.05	0.190	0.280	1.20	0.110	0.130	1.49	0.040
7 min	$n=0.3$	0.081	1.06	0.016	0.088	1.38	0.021	0.033	1.37	0.005
	$n=0.6$	0.170	1.07	0.047	0.150	1.20	0.042	0.053	1.37	0.010
	$n=0.8$	0.240	1.06	0.084	0.160	1.39	0.045	0.069	1.24	0.013

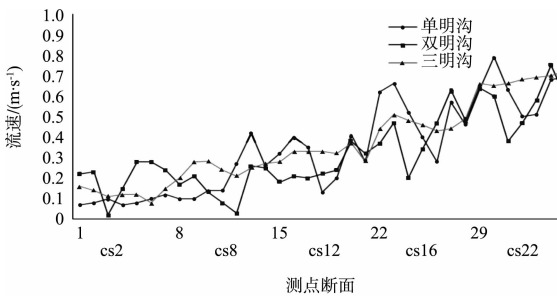
3 整体物理模型试验验证

为进一步论证 3 种明沟形式的消能效果，本节以一典型船闸工程为例，闸室平面尺度为 280 m×34 m，设计过闸船舶为 3 000 吨级单船。通过整体物理模型研究了 3 种消能设施下的闸室流场、船舶系缆力指标，确定三者的优劣。

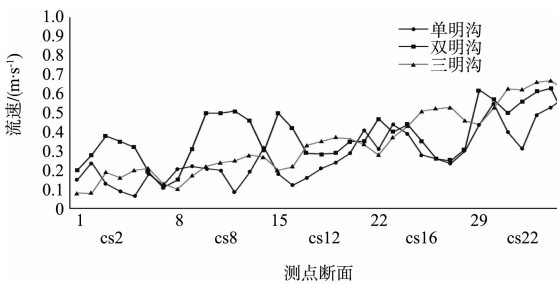
3.1 闸室流速分布

测量了该典型船闸 24 出水支孔中的 5 个支孔断面，断面编号自上游至下游。一个支孔断面布置 7 个测点，这些测点覆盖了全部出水段，较为真实地反映了闸室充水过程的流速分布情况。实测流速分布见图 5。

上述试验资料表明：对于 3 种明沟布置形式，无论是双充还是单充，阀门开度 $n=0.8$ 时，自上游至下游支孔流速是沿程递增的，这也反映了闸



a) $t_v=7\text{ min}$ 双充， $h=14.0\text{ m}$



b) $t_v=7\text{ min}$ 单充， $h=10.0\text{ m}$

图 5 闸室内流速分布 $n=0.8$

墙单向廊道受充水的惯性影响，流量分布不均匀特征。另外，从流速分布曲线可知，在同一横断面内，单明沟形式流速波动最为明显，说明闸室水面紊动较大。双明沟次之，三明沟流速分布曲线平缓，波动小，说明其分布均匀，消能效果较优。

3.2 闸室船舶系缆力

试验在阀门开启 $t_v = 7\text{ min}$ 双充、上、下游水位组合为 $43.1 \sim 29.0\text{ m}$ 情况下，比较了实测 3 000 t 单船停于闸室内的系缆力，图中仅显示前横系缆力作比较（图 6）。

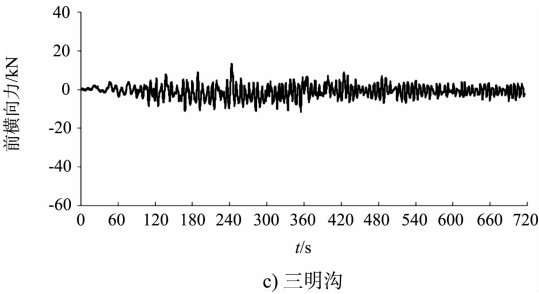
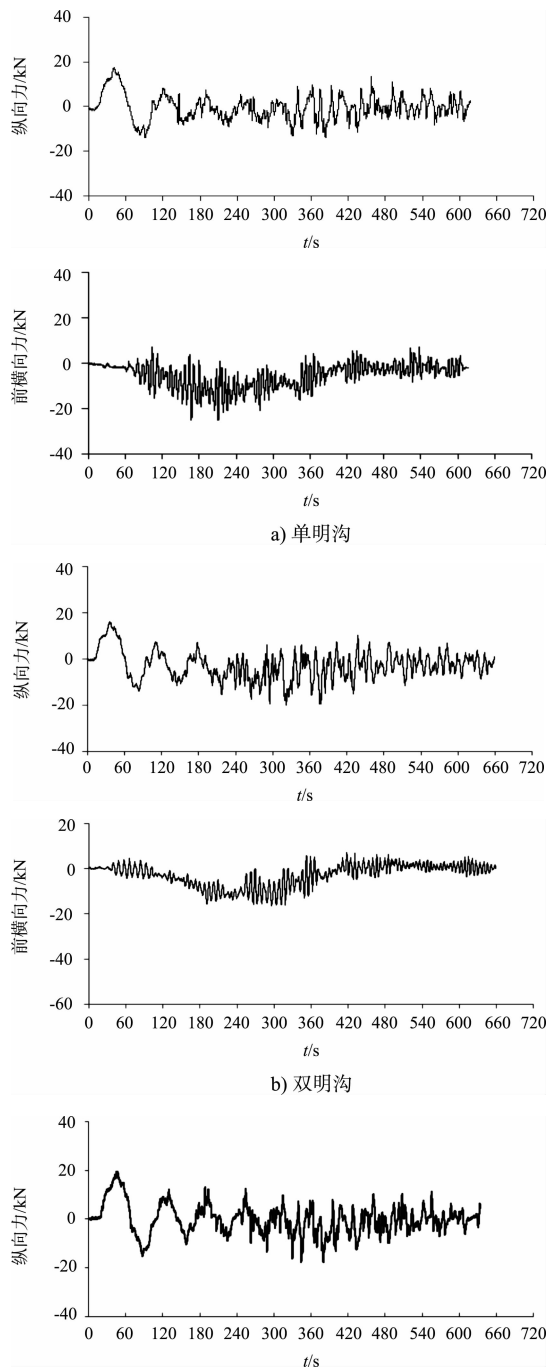


图 6 3 种明沟 3 000 t 船舶系缆力过程线对比

由上述船舶系缆力过程线资料可见，在闸室充水过程中，由于单明沟布置闸室中间部分出流量偏多，闸室内横断面上水流分布不均匀，致使船舶明显向闸墙一侧位移，且水流横向摆动大。船舶前横向力曲线频率高、振幅大，最大横向力达 21.3 kN。而双明沟布置虽然船舶也向闸墙一侧有所位移，但幅度较单明沟布置要小。从船舶前横向系缆力的曲线可看出，其脉动的频率、振幅均要较单明沟布置小得多，船舶最大前、后横向力仅为 15.0 kN。三明沟布置实测的船舶前横向系缆力的曲线始终围绕着中轴线摆动，说明闸室内横断面上的流速分布较为均匀，闸室水面紊动小。船舶最大前、后横向力仅为 12.0 kN。所以双明沟、三明沟形式，无论从闸室内流场分布、水面紊动及船舶横向系缆力等指标比较均明显优于单明沟。

4 结论

1) 通过船闸局部物理模型试验、整体物理模型试验验证 2 种研究手段对闸室单明沟、双明沟、三明沟消能形式流场分布、流速大小、水面波动消能效果的比较分析，认为双明沟、三明沟消能形式布置均比单明沟消能水体增大较多，消能工布置灵活，消能充分。反映到闸室内的流场分布、流速均匀程度、剩余比能、动能及水面波动、船舶系缆力特征值均较单明沟消能形式要好。而前两者综合比较，三明沟消能形式各项指标最优。

2) 明沟形式的消能工主要消能机理是：①出

流水流经过挡板末端与挡板碰撞形成涡旋耗散能量；②未充分碰撞的水流经过孔口，而孔口出流的突扩生成大量的旋涡以及水流的相互剧烈掺混同样达到了耗散能量的效果；③明沟中水流与闸室中的水体进行质量、动量和能量的交换，由于内外摩擦作用，在水流动能转变为势能的过程中，流场急剧改变，致使水流内部相对运动加剧、碰撞和摩擦作用亦加强，消耗能量。

参考文献：

[1] US Army Corps Engineers. Hydraulic Design of Navigation Locks[R]. Washington: U S Army Corps, 1975.

[2] 须清华. 葛洲坝工程二号船闸输水系统水工模型终结试验报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 1981.

[3] 南京水利科学研究院. 船闸输水系统水力学创新技术研究与实践[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2009.

[4] 张绪进. 贵港航运枢纽二线船闸输水系统水力学试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2012(8): 34-38.

[5] 陈亮, 刘平昌, 张绪进, 等. 贵港二线船闸闸室双明沟消能工布置及消能特性研究[J]. 水道港口, 2013(4): 144-149.

[6] 陈亮. 船闸闸室明沟消能工布置及消能机理研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.

[7] 刘平昌, 彭永勤, 王召兵. 贵港二线船闸侧墙廊道输水系统布置计算分析论证报告[R]. 重庆: 重庆西南水运工程科学研究所, 2010.

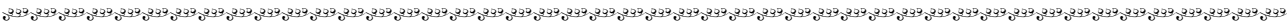
[8] 刘平昌, 彭永勤, 王召兵. 贵港二线船闸侧墙廊道输水系统水力学试验阶段研究报告[R]. 重庆: 重庆西南水运工程科学研究所, 2010.

[9] 刘平昌, 彭永勤, 王召兵. 贵港二线船闸侧墙廊道输水系统水力学试验研究报告[R]. 重庆: 重庆西南水运工程科学研究所, 2010.

[10] 杨忠超. 高水头船闸闸室明沟消能效果及机理分析[J]. 水运工程, 2009(12): 169-173.

[11] 吕伟东. 船闸闸室明沟消能工消能效果三维数值模拟[J]. 水道港口, 2013(8): 203-206.

(本文编辑 郭雪珍)



(上接第 123 页)

4) 最终确定的闸室消力梁及透水孔等效能工布置形式使闸室水流分配均匀，各工况下测定船舶系缆力均能满足规范要求。

5) 通过调整出水口的布置形式，下游出水口能够较好地适应引航道的布置，控制工况下引航道内的水流条件能够满足过闸船舶安全运行的要求，泄水侧船闸对另一线船闸的下引航道流速分布影响较小。

参考文献：

[1] 刘平昌, 陈亮, 彭永勤, 等. 北江飞来峡二三线船闸工程初步设计阶段船闸水力学模型试验研究[R]. 重庆: 重庆西南水运工程科学研究所, 2014.

[2] JTJ 306—2001 船闸输水系统设计规范[S].

[3] 刘平昌, 王召兵, 陈亮, 等. 西江航运干线贵港航运枢纽二线船闸工程初步设计阶段输水系统水力学模型试验研究[R]. 重庆: 重庆西南水运工程科学研究所, 2010.

[4] 宣国祥, 李君, 黄岳. 长洲水利枢纽三线四线船闸工程可行性研究阶段船闸水力学模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2009.

[5] 张绪进, 吕伟东, 刘平昌, 等. 贵港航运枢纽二线船闸输水系统水力学试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2012(8): 34-38.

[6] 嘉陵江草街二线船闸输水系统水力学模型试验研究[R]. 重庆: 重庆西南水运工程科学研究所, 2006.

(本文编辑 郭雪珍)