

# 导流隧洞出口消力池体型优化数值模拟与试验研究

张铭, 杨敏, 刘金星

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 通过对新疆阿尔塔什水利枢纽工程导流洞水工模型泄流实验与数值模拟, 对出口消力池进行了体型优化, 在消力池水面线、消能率、出池最大临底流速、尾渠流态等方面与原方案进行了对比分析。结果表明: 在实验范围内, 优化后的消力池内最大水深降低了 2.05 m, 消能率提高了 12%, 出池最大临底流速降低了 28%, 尾渠稳定流速降低了 66.7%。通过各项水力特性指标表明, 优化后的消力池比原设计方案显现出更为优良的特性。

**关键词:** 导流; 消力池; 水面线; 消能率; 尾渠流速

中图分类号: TV672.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)01-0166-05

## Experiment and numerical simulation of stilling pool shape optimization at diversion tunnel outlet

ZHANG Ming, YANG Min, LIU Jinxing

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Through numerical simulation and model test on diversion tunnel discharge of water conservancy project in Aertash of Xinjiang, the paper optimized the shape of stilling pool, and compared water level line, energy dissipation, the maximum underflow speed and the flow pattern of tailwater canal of the optimization scheme with that of original design scheme. The results show that after the optimization, the maximum water depth decreased 2.05 m in the stilling basin, the energy dissipation ratio increased by 12%, the maximum underflow velocity reduced by 28%, and the velocity in tailwater canal decreased by 66.7%. The hydraulic characteristics indicators show that the stilling pool after optimization performs a better characteristics compared with that of the original design scheme.

**Key words:** diversion; stilling pool; water level line; energy dissipation rate; velocity of tailwater canal

导流洞作为水电站建设中的重要建筑物, 通常具有单宽流量大、佛氏数低的特点, 有些导流洞后期还要改为泄洪洞, 因此, 对于导流洞出口处消力池的结构布置提出了严格的要求。很多学者<sup>[1-7]</sup>做了大量的实验研究, 针对消力池断面、消力池内辅助消能工、消力池出口防冲设施布置等方面, 得出了大量成果。文献[8-9]研究了消力池消力坎高度的计算方法, 为确定消力池坎高提供了参考。文献[10-11]研究了消力池尾坎的设计及合理布置。本文以新疆阿尔塔什水利枢纽工程导流洞为工程依托, 通过 1:50 水工模型试验对导流洞出口消力池及尾渠的水力特性参数进行了对比试验研究, 其成果可为工程实际提供参考。

## 1 工程概况

阿尔塔什水利枢纽工程位于新疆维吾尔自治区南疆喀什地区莎车县霍什拉甫乡和克孜勒苏柯尔克孜自治州阿克陶县的库斯拉甫乡交界处, 距喀什地区的莎车县约 120 km, 是叶尔羌河干流山区下游河段具有防洪、灌溉、发电等综合利用功能的控制性水利枢纽工程。该枢纽工程由拦河坝、1#表孔溢洪洞、2#表孔溢洪洞、中孔泄洪洞、1#深孔放空排沙洞、2#深孔放空排沙洞、发电引水系统、电站厂房、生态基流引水洞及其厂房等主要建筑物组成。水库正常蓄水位 1 820 m, 设计洪水位 1 821.65 m, 校核洪水位 1 823.64 m。导流洞布置在左岸, 为有压洞, 与 2#深

收稿日期: 2014-08-29; 修回日期: 2014-11-21

作者简介: 张铭(1989-), 男, 河北沧州人, 硕士研究生, 主要从事水工水力学研究。

通讯作者: 杨敏(1956-), 男, 吉林长春人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水工水力学研究。

孔采用“龙抬头”方式结合。封堵闸井采用岸塔式进水口,后接有压洞。闸井底板高程 1 667 m,布置一道封堵门,孔口尺寸 12 m × 12.5 m。导流洞进口渐变段由 12 m × 12.5 m 的矩形断面渐变成 12 m × 13.5 m 的城门洞型断面,圆拱中心角为 120°。出口段底宽由 12 m 渐变至 30 m,后接  $i = 0.1797$  的直线段与消力池连接。消力池横断面为矩形断面,底板高程 1 652.72 m,边墙高 19.5 m,底宽 30 m。尾渠底高程 1 660.15 m,底宽 30 m。原设计方案消力池结构尺寸见图 1。

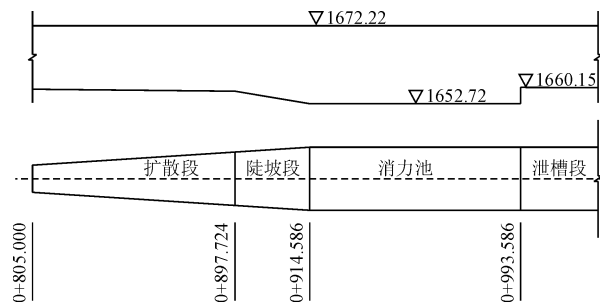


图 1 原设计方案消力池结构布置示意图

## 2 试验设计

模型按照重力相似准则设计,根据试验内容、场地条件等,模型几何比尺设为  $\lambda_l = 50$  模型由供水系统供水,上游设平水段和稳水栅,保证库区水流平稳,模型采用下游量水。各建筑物采用有机玻璃和灰塑料加工制作。模型设计中相关物理量的比尺如下:流量比尺  $\lambda_Q = \lambda_l^{5/2} = 17677.7$ ,流速比尺  $\lambda_v = \lambda_l^{1/2} = 7.07$ ,糙率比尺  $\lambda_n = \lambda_l^{1/6} = 1.92$ ,时间比尺  $\lambda_t = \lambda_l^{1/2} = 7.07$ 。导流洞实验工况见表 1。

## 3 试验成果分析

在各工况条件下,对原设计方案及修改方案进行了对比实验,从消力池内水面线、临底流速、消能率、尾渠水流流态等方面进行了成果对比分析,对消力池做出了优化改进。

### 3.1 原设计方案

在工况 1 运行条件下,导流洞内水流呈明流状态。在转弯段上游,洞内水流平顺。水流进入转弯段后,由于离心力的作用,靠右侧水面升高,左右侧水面高差最大约 2 m,并形成水面冲击波,一直到洞出口,水面呈起伏状,见图 2。尽管水面起伏,但并不波动,对泄流不产生影响。导流洞沿程各测点均无负压出现,水跃发生在斜坡扩散段,进入消力池的

水流已无旋滚。斜坡扩散段水流扩散充分,水面平顺。出池水流在渐变段和护坦段形成水面跌落,下游水流呈急流状态,并产生冲击波,水面波动较大,尾渠流态较差。

在工况 2 运行条件下,导流洞内呈有压流状态。消力池内水流旋滚剧烈,水面波动较大,超过原边墙高度。水跃跃首发生桩号约在 0+877 m 位置,出池水流呈急流冲击波状态,比工况 1 水流条件进一步恶化,消力池流态见图 3。

表 1 导流运行实验工况

			m, m <sup>3</sup> /s
工况	上游水位	下游水位	流量
1 (P = 5% 枯水)	1680.30	1664.25	901.70
2 (P = 5% 全年)	1702.28	1665.62	2537.79

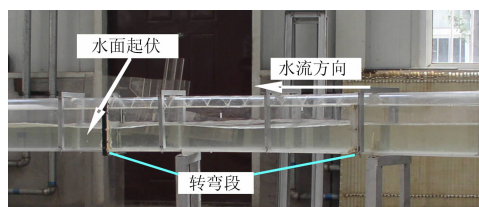


图 2 工况 1 洞身段流态

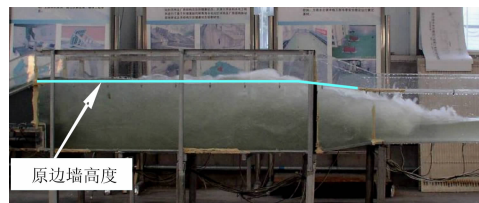


图 3 工况 2 消力池流态

### 3.2 消力池修改方案

由于出池水流的流态为急流,进而导致尾渠流速偏大,可能会对尾渠产生严重的冲刷,这是因为下游水位偏低所致。按照一般的消能要求,出池流速要呈缓流流态,应该在尽可能短的距离内达到天然河道断面流速分布。因此制定了如下修改方案:将消力池底高程由 1 652.72 m 降低到 1 651.00 m;尾渠底高程由 1 660.15 m 降低到 1 657.0 m。同时,消力池前移 7 m。消力池修改方案见图 4。

修改方案下,消力池内的水流流态较原方案也有较大改善,池内水深明显减低。工况 1 运行情况下,消力池内最大水深由原来的 14.35 m,下降至 13.75 m;工况 2 运行情况下,池内最大水深由原来的 21.05 m,下降至 19.00 m。工况 2 运行情况下,修改方案与原方案消力池内水面线见图 5。

在不同工况下,用流速仪测量了各断面中线临

底流速,流速分布情况见图6、7。实验结果表明,修改后的导流洞消力池的消能效果很好,消力池产生较大淹没度的水跃。尾渠流态稳定较之前有很大改善。在消力池出池水流扩散跌落处,水流流速会达到一个最大值。工况1运行情况下,原方案的出

池最大流速为9.29 m/s,修改后出池最大流速下降到3.87 m/s,出池水流平稳;工况2运行情况下,原方案的出池最大流速为13.78 m/s,修改后出池最大流速下降到11.84 m/s,桩号0+1074.586 m以后很快恢复到6 m/s以下,比原方案降低25%左右。

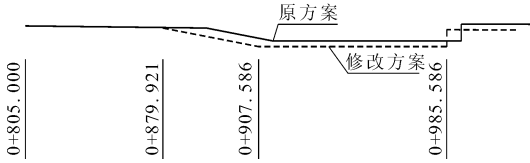


图4 消力池修改方案结构示意图

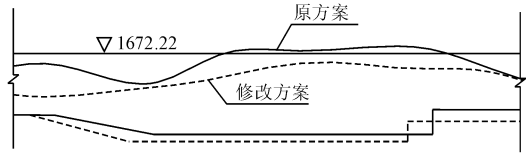


图5 两种方案消力池内水面线

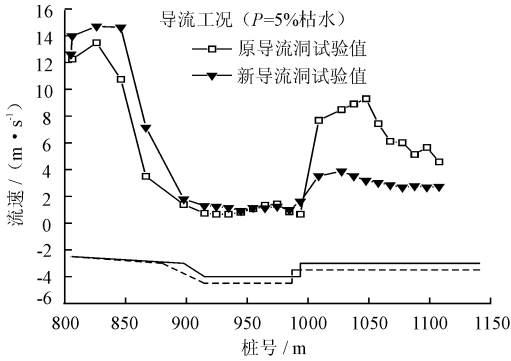


图6 工况1临底流速分布

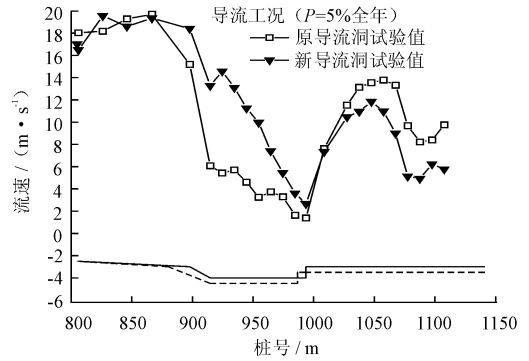


图7 工况2临底流速分布

### 3.3 消能率计算分析

在各工况条件下,对消力池各方案的消能率进行了计算、分析。消能率计算公式:

$$\eta = \Delta E / E_1 \quad (1)$$

$$\Delta E = E_1 - E_2; E_1 = h_1 + a + \frac{Q^2}{2gA_1^2};$$

$$E_2 = h_2 + \frac{Q^2}{2gA_2^2}$$

式中:  $h_1$ 、 $h_2$  分别为跃前、出口断面水深;  $A_1$ 、 $A_2$  分别为跃前、出口断面面积;  $E_1$ 、 $E_2$  分别为跃前、出口断面的水流总能量;  $a$  为跃前、出口的高程差值;  $Q$  为消力池的过流量。

由计算可知,消力池的消能率原方案与修改方案对比见表2。

表2 消力池消能率对比

工况	工况1		工况2	
	原方案	修改方案	原方案	修改方案
入池佛氏数 $Fr$	4.24	4.68	3.77	3.92
淹没度	1.48	1.33	1.14	1.02
消能率/%	17.06	31.01	28.72	36.77

由表2可知,消力池入池佛氏数  $Fr$  较小,属于不稳定水跃,消能率较低。在各工况条件下,修改方

案比原方案消能率提高了9%~12%,水流波动减小,流态平稳。消力池底板及尾渠底板高程的降低,使消力池及尾渠的水深增加,水流在消力池内的紊动剪切运动更加充分,消耗了更多的机械能,从而提高了消力池的消能率。

## 4 数值模拟

本文数值计算采用Flow3D软件的RNG  $\kappa$ - $\epsilon$ 模型。由于Flow3D软件具有独特的FAVOR网格处理技术,并且采用VOF方法模拟自由表面,因此控制方程中含有体积和面积分数等参数。具体方程如下:

连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = 0 \quad (2)$$

运动方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \{ uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \} \\ = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \{ uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \} \\ = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z \quad (5)$$

式中:  $A_x, A_y, A_z$  分别为  $x, y, z$  三个方向上可流动的面积分数;  $u, v, w$  分别为  $x, y, z$  三个方向上的速度分量;  $V_F$  为可流动的体积分;  $\rho$  为液体密度;  $G_x, G_y, G_z$  分别为  $x, y, z$  三个方向上的重力加速度;  $f_x, f_y, f_z$  分别为  $x, y, z$  三个方向上的粘滞力。

RNG  $\kappa - \varepsilon$  方程形式上同标准的  $\kappa - \varepsilon$  方程一样,只是系数值不是根据实验数据得到的,而是由理论分析得到,因此通用性比较强。系数取值及关系如下:

$$C_{\mu} = 0.085; C_{\varepsilon 1} = 1.42 - \frac{\tilde{\eta}(1 - \tilde{\eta})}{1 + \beta\tilde{\eta}^3};$$

$$C_{\varepsilon 2} = 1.68; \sigma = 0.7194; C_{\varepsilon} = 0.7194; \tilde{\eta} = Sk/\varepsilon;$$

$$S = (2S_{i,j}S_{i,j})^{1/2}; \tilde{\eta}_0 = 4.38; \beta = 0.015;$$

$$S_{i,j} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right).$$

#### 4.1 计算模型

对不同工况下,原设计方案和修改方案进行了数值模拟计算和对比分析。导流洞模型如图 8~9。

#### 4.2 计算成果分析

图 10~13 为数值模拟计算的导流洞流态及水面线的结果,表 3 为数值模拟计算的消力池的消能率。

模型实验和数值模拟结果分析对比表明,各工况消力池内流态基本一致,尾渠流速分布情况基本一致。

计算结果表明,工况 1 运行情况时,修改方案导流洞消力池的消能效果很好,消力池产生较大淹没度的水跃。尾水渠流态稳定,除消力池出口附近流速较高(7.5 m/s)外,很快降到 3 m/s 左右,比修改前的 6 m/s 降低约 50%。

工况 2 运行情况下,消力池能产生稳定的水跃。尾水渠流态较之枯水期运行差一些,水面存在一定程度的波动。主要是由出池水流扩散作用产生的,工况 1 运行时因为出池流速较低而扩散作用不明显,但比原设计方案大为改善。尾水渠流速基本在 8 m/s 左右,比原设计方案的 12 m/s 左右降低约 33%。

为防止出池水流对尾渠边界产生冲刷,防止水流的回淘,在尾渠做好一定防护,如在出口护坦段末端做垂直防冲墙,不对护坦构成威胁即可。尾渠下游的冲刷过程也是水流的重新调整过程,随着冲刷的加深,流速自然降低,由于没有其他建筑物,可以允许存在一定的冲刷。

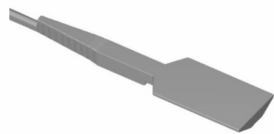
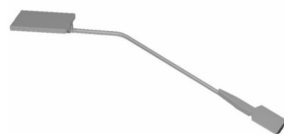


图 8 导流洞模型示意图

图 9 消力池模型示意图

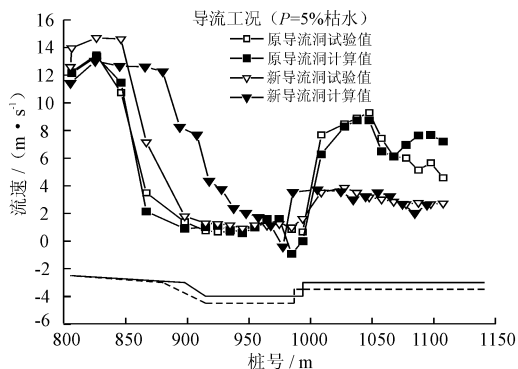


图 10 工况 1 临底流速分布

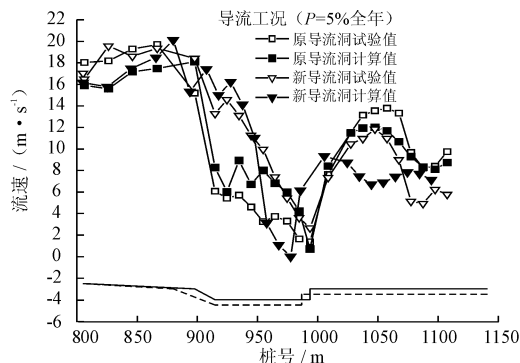


图 11 工况 2 临底流速分布

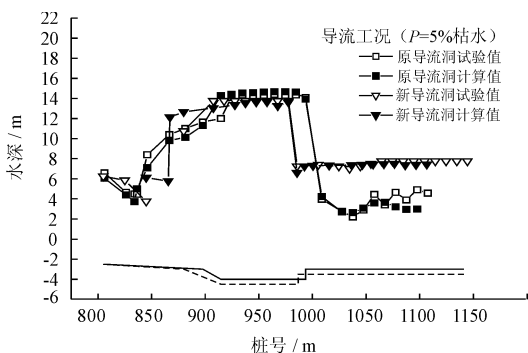


图 12 工况 1 水面线

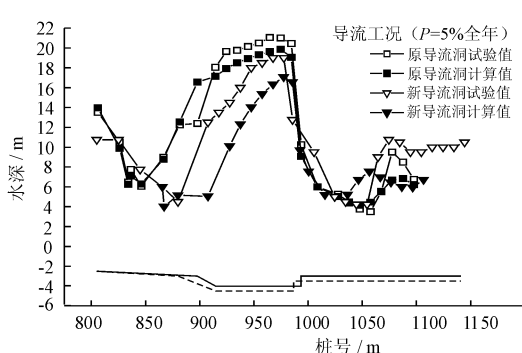


图 13 工况 2 水面线

表3 消力池消能率 %

方案	工况1		工况2	
	试验值	计算值	试验值	计算值
原方案	17.06	21.62	28.72	30.97
修改方案	31.01	30.51	36.77	40.42

## 5 尾坎修改试验

在工况2运行情况下,由于修改方案消力池出池水流流态不佳,在修改方案基础上,对尾坎进行了局部修改试验,制定了4个修改方案,见图14。

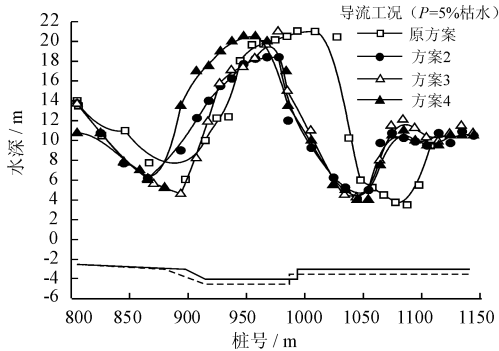


图15 工况2水面线

通过试验可以得出,方案1在工况2运行情况下,形成远驱式水跃。对比方案1和方案4可以看出,尾坎加高之后,水跃发生在消力池内,说明尾坎对稳定消力池内水流流态作用明显。消力池出池最大流速对比原方案都有所降低,其中方案4最小,尾渠稳定水流流速基本在4 m/s左右,比尾坎修改前的8 m/s降低了50%。综合来看,方案4为最优,主要体现在出池局部流速小,尾渠流速比原修改方案降低,流态平稳。

## 6 结语

本文通过新疆阿尔塔什水利枢纽导流洞水工模型试验与计算,得出如下结论:

(1)在不同试验工况下,原方案消力池内水流波动剧烈,水流翻越边墙,消力池消能率较低,消能效果不好。

(2)在不同试验工况下,原方案消力池内水流的出池流速局部较大,尾渠水流流态不好。

(3)修改方案将原消力池底板及尾渠高程降低,尾坎由直立改为30°斜坡且加高,增加了消力池的消能效率,消力池水面线降低,同时消力池出池水流的流速减小,尾渠流速降低,流态平稳,比原设计方案有了较大的改善,可以为同类工程设计提供参考。

在工况2运行情况下,不同方案消力池和尾渠底板中线水面线及临底流速分布见图15~图16。

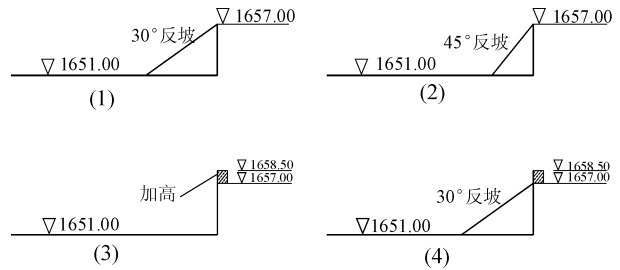


图14 尾坎修改方案

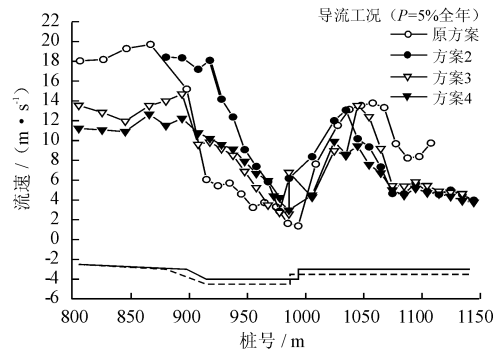


图16 工况2临底流速分布

## 参考文献:

- [1] 吴战营,牧振伟,潘光磊. 导流洞出口消力池内设置悬栅消能工试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2011, 9(4): 39-41.
- [2] 李琳,鲁克恩,邱秀云,等. 小石峡水电站导流兼深孔泄洪洞消能工优化试验[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(2): 5-8.
- [3] 张志雁,张岩. 某水电站导流兼泄洪洞水工模型试验[J]. 广西水利水电, 2012(2): 65-67.
- [4] 卫勇. 导流洞出口消能工的合理体型[J]. 西北水资源与水工程, 2001, 12(1): 44-48.
- [5] 花立峰. 导流泄洪洞泄洪消能问题研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2011, 9(1): 47-50.
- [6] 余胜祥,白奇瑞,胡兴丹. 沐若水电站导流隧洞出口消能与防护研究[J]. 人民长江, 2013, 44(8): 94-96.
- [7] 邓建伟,花立峰,安梦雄. 龙抬头式泄洪洞体型设计与泄洪消能问题研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(3): 165-168.
- [8] 张志昌,李若冰,赵莹,等. 消力坎式消力池淹没系数和坎高的计算[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(11): 50-54.
- [9] 张小艳,王馨梅. 消力坎式消力池淹没系数和坎高简化计算[J]. 甘肃农业大学学报, 2013, 48(2): 145-149.
- [10] 金宝芬,张声鸣,黄国兵,等. 水布垭水利枢纽导流隧洞水力学试验研究[J]. 长江科学院院报, 2002, 19(4): 7-10.
- [11] 韩守都,刘韩生,吴宝琴. 布仑口水电站消力池尾坎位置模型试验[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(1): 62-64.