

DOI:10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2020.0018

刘昉,王畅,何军龄.基于正交设计的扭曲鼻坎体型优化试验研究[J].南水北调与水利科技,2020,18(1):166-175. LIU F, WANG C, HE J L. Experimental study on shape optimization of skew bucket based on orthogonal design[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(1): 166-175. (in Chinese)

基于正交设计的扭曲鼻坎体型优化试验研究

刘昉,王畅,何军龄

(天津大学 水利仿真与国家安全重点实验室,天津 300350)

摘要:挑坎体型对水舌形态和下游河床冲刷至关重要,基于水工模型试验,利用正交试验设计对纳子峡工程泄洪洞扭曲鼻坎体型进行优化研究。采用极差分析和方差分析,选取最大冲坑深度、冲刷最低点到边坡的距离、左侧挑距、右侧挑距和水舌宽度作为评价指标对扭曲鼻坎左侧边墙向右偏移距离、右侧边墙向右偏移距离、鼻坎扭曲程度系数3个因素进行计算,分析各因素对评价指标的敏感性,以确立扭曲鼻坎的最优体型。结果表明,各水力学特性指标对左侧边墙向右岸的偏移量的变化更敏感,其余因素对扭曲挑坎的消能效果影响较小,通过正交设计分析所得的最优体型,其水力特性指标均明显优于其他方案,所得成果可为实际工程扭曲鼻坎体型的设计提供依据。

关键词:挑流消能;扭曲鼻坎;水工模型试验;正交设计;河床冲刷

中图分类号:TV131.61 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Experimental study on shape optimization of skew bucket based on orthogonal design

LIU Fang, WANG Chang, HE Junling

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: The shape of a flip bucket is very important for the shape of the water tongue and the scouring of the downstream riverbed. Based on the hydraulic model test, optimizing the shape of the skew bucket of the Nazixia spillway tunnel by orthogonal design. Using extreme difference analysis and variance analysis, the maximum crater depth, the distance from the lowest point to the slope, the left jet trajectory length, the right jet trajectory length and nappe width were selected as the evaluation indicators for the offset of the left and right side walls of the skew bucket. The three factors of the degree of distortion of the nose were calculated, and the sensitivity of each factor to the evaluation index was analyzed to establish the optimal flip bucket form of the skew bucket. The results showed that the hydraulic characteristics were more sensitive to the change of the offset of the left side wall to the right bank. The other factors had little effect on the energy dissipation effect of the skew bucket. The optimal shape was also analyzed by orthogonal design. The hydraulic characteristics were superior to other schemes, while the obtained results could provide a basis for the design of the actual engineering skew bucket.

Key words: trajectory bucket energy dissipation; skew bucket; hydraulic model test; orthogonal design; riverbed scouring

挑流消能是泄水建筑物中应用最广泛的一种消能方式,它是利用泄水建筑物末端挑坎将高速水流挑射至远离坝体的下游河道,通过水舌在空气中扩

散及下游水垫发生剧烈混掺和剪切消耗大量的能量。扭曲型鼻坎两侧导墙长度不同,出口端与泄洪洞轴线斜交,横向和纵向均存在弯曲,对水流既有导

收稿日期:2019-05-11 修回日期:2019-08-07 网络出版时间:2019-08-29

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190828.1827.006.html>

基金项目:国家自然科学基金(51579172);高等学校学科创新引智计划(B14012)

作者简介:刘昉(1979—),男,吉林人,副教授,博士,主要从事工程水力学研究。E-mail:fangliu@tju.edu.cn

向作用又有扩散作用,从而减小水舌入水单宽流量,缓解下游河道冲刷^[1-4]。位敏等^[5]针对民乐河水库溢洪道出口河道狭窄、河床抗冲能力差等情况对其出口挑流鼻坎进行优化研究,采用斜切坎加折流器收缩局部水舌,增大挑距,改善水舌水流特性;陈瑞华等^[6]对小湾水电站的泄洪洞窄缝挑坎进行数值模拟研究,包括水舌的形态、入水点、起跳角度等;苏沛兰等^[7-8]对泄洪洞掺气坎体型参数进行了空腔特性的敏感性分析,分析了各参数对内外空腔长度等空腔特性的影响效应及权重大小。

通过以上的学者的研究发现,针对挑流鼻坎各参数对挑流水舌以及下游河道影响的敏感性分析尚不多见。挑流鼻坎可优化因素较多^[9-10],例如导墙的长短、偏转角度、扭曲贴角的弧度等。这些因素的差异性一方面会使出口轴线与下游边坡的夹角不同,从而对岸坡导墙的回流淘刷程度造成影响^[11];另一方面影响水舌的掺气量及其跌落引起的下游水面波动^[12]。因此,对扭曲挑流鼻坎体型进行优化研究,评价下游冲刷特性对水电站的安全运行具有重要意义。

正交试验方法可以科学的安排多因素多水平的试验,它根据正交性用尽可能少的试验次数提供可靠的试验数据,简便地分析得到正确的结论,取得较好的结果,所选试验工况具有“均匀分散,齐整可比”的特点^[13]。正交表是已经做成规范化的表格,它是正交设计的基本工具,符号为 $L_n(r^m)$ 。其中, L 表示正交表代号, n 为所需试验次数(表中行数), r 为因素的水平数, m 为最多因素数(表中列数)^[14]。该方法在多学科广泛应用,如生化、医药等领域,其显著的优越性近年来在水利岩土领域^[15-16]也有所体现,例如唐益群^[17]等运用正交试验法对黄土泥流运动进行了分析,崔贞^[18]等运用正交试验法对浮体结构流动特性进行了分析,李炎隆^[19]等运用正交试验法对梯级水库连溃分析模型进行了敏感性分析,刘欣蔚^[20]等通过正交分析得出了不同参数对 PSO 算法性能的影响能力,证明调整参数设置可提高模拟精度。本文以纳子峡工程泄洪洞泄洪消能工为背景

开展研究,将物理模型试验和正交设计原理相结合,对泄洪洞挑流鼻坎体型进行优化设计,为正交设计在体型优化工程领域的应用提供可行性验证。

1 工程背景与模型制作

纳子峡水电站最大坝高 121.5 m,正常蓄水位高程 3 201.5 m,库容 7.15 亿 m^3 ,电站装机容量为 87 MW。放空泄洪洞布置在左岸山体中,与导流洞结合布置,主要包括进口有压隧洞段、闸室段、龙抬头段、无压洞身段、挑流鼻坎段组成。泄洪洞总长 542.66 m,最大泄量 408 m^3/s ,左侧边墙的曲率半径为 50 m,右侧边墙的曲率半径为 19 m,出口宽度 20 m。采用挑流消能,鼻坎采用斜贴角形式,泄洪洞模型整体布置见图 1。

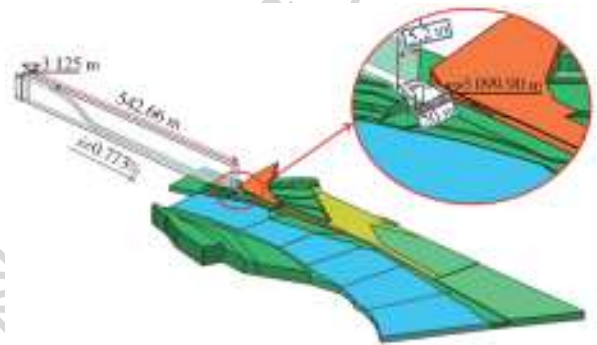


图 1 泄洪洞模型整体布置

Fig. 1 Layout of flood discharge tunnel model

采用物理模拟方法,制作模型比尺 1:50 的水工整体正态模型,制作材料为有机玻璃,按重力相似准则进行模型设计主要研究不同方案下泄洪洞挑流消能效果、下游流态及边坡冲刷情况。模型出口体型示意图见图 2。同时考虑紊动阻力相似和床沙起动相似的要求,抗冲流速相似法根据岩石地质情况,确定岩基的抗冲流速,和模型砂的材料和级配。抗冲流速按伊兹巴什公式确定, $V=k\sqrt{d}$, d 为冲刷料粒径, k 为流速系数,本次试验取 6.0^[21]。根据该工程地形材料,所选河沙粒径为 6.56 mm,对应抗冲流速按照该公式计算得 3.46 m/s。

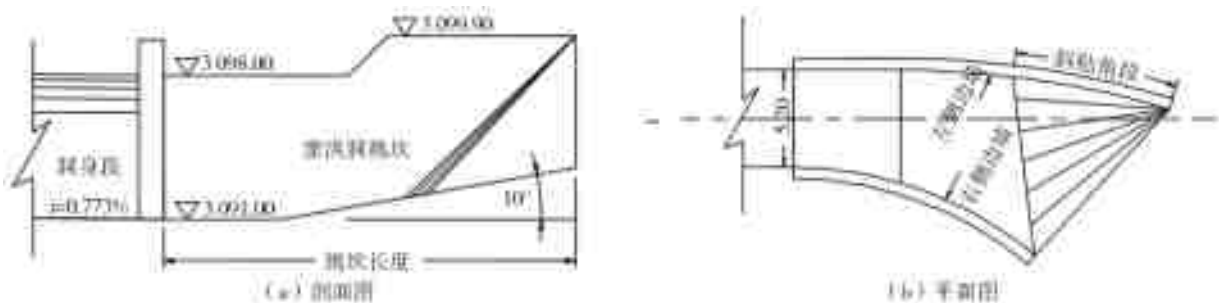


图 2 泄洪洞出口体型(单位:m)

Fig. 2 Schematic diagram of the outlet shape of the flood discharge tunnel

2 正交试验设计

纳子峡水电站泄洪洞运行的主要问题是水舌翻出左侧边墙,主流冲击左岸边坡较为严重,原型实地观测流态见图 3。经模型试验验证,扭曲鼻坎形成弯道扭面使得在离心惯性力作用下,挑射水流左侧挑距大于右侧,原型水舌左侧挑距 40.25 m,右侧挑距 37.75 m,入水宽度 37.5 m,最大冲坑深度 7.85 m。出现这种流态的主要原因为泄洪洞末端挑流消能工轴线与下游左岸边坡交角偏小,出口水舌翻转不够,

扩散程度过大。针对原型型存在的问题,本文主要对挑坎出口边墙和贴角进行优化,以 ΔZ 表示扭曲鼻坎左、右两侧的高程差的绝对值, Z_0 表示扭曲鼻坎出口断面底边中线长度,定义 $Z_0/\Delta Z$ 为挑坎的扭曲程度系数,表征扭曲鼻坎综合特征。改变左右边墙的曲率半径以增加出口轴线与下游边墙交角,而改变出口贴角扭曲程度可以增加水舌的翻转程度,使水流顺利归入下游河道,水舌漫墙现象通过加高边墙即可有效解决。选取体型优化的 3 个因素为:左侧边墙向右偏移距离、右侧边墙向右偏移距离和 $Z_0/\Delta Z$ ^[22]。



图 3 原型观测流态

Fig. 3 Flow patterns of skew bucket of the Nazixia spillway tunnel

各因素对应水平选取时,尤其左右边墙的偏移量不宜过大,左边墙向右偏移量大时会产生小流量洞顶余幅过小的情况,右侧边墙偏移量过大会造成脱流现象,边墙处产生负压,容易导致空蚀破坏^[7]。结合本工程实际情况,对于左岸边墙向右偏移距离这一因素设立 3 个水平,分别为偏移 1 m、偏移 2 m、偏移 3 m(曲率半径分别为 40、30、25 m),具体形式

见图 4。对于右岸边墙向右偏移距离这一因素设立 3 个水平,分别为 0.5、1、1.5 m(曲率半径分别为 17、15、14 m)。对于 $Z_0/\Delta Z$ 这个因素,将左、右两侧高程差设为定值 9 m,出口断面中线长度取 4.5、3.15、1.8 m,故该因素的 3 个水平分别为 0.5、0.35、0.2。参数敏感性分析的试验因素和因素水平见表 1。

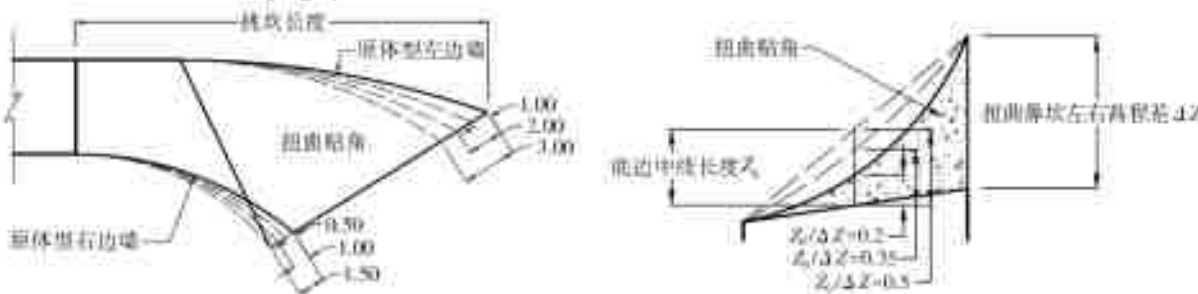


图 4 因素水平

Fig. 4 Factor level diagram

表 1 因素水平

Tab. 1 Factors of the orthogonal table and their levels

水平	优化因素		
	A(左边墙偏移量/m)	B(右边墙偏移量/m)	C($Z_0/\Delta Z$)
1	1	0.5	0.50
2	2	1.0	0.35
3	3	1.5	0.20

暂不考虑所选参数之间的交互作用^[23],本次试验共 3 个因素、3 个水平,选择 $L_9(3^4)$ 正交表安排试验,最后一列主要考虑了误差而设立该项,对试验没有影响,将试验因素分配到正交表的前三列,并用相应的设计参数值替换掉原有的每个元素对应的因素和水平^[19],得到该模型参数敏感性分析的正交试

验见表 2。

表 2 挑坎型式正交试验设计方案
Tab. 2 Schemes of orthogonal test design of the shape of the skew bucket

试验号	A(左边墙偏移量/m)	B(右边墙偏移量/m)	C($Z_0/\Delta Z$)	误差项
S ₁	A ₁ (1)	B ₁ (0.5)	C ₁ (0.5)	1
S ₂	A ₁ (1)	B ₂ (1)	C ₂ (0.35)	2
S ₃	A ₁ (1)	B ₃ (1.5)	C ₃ (0.2)	3
S ₄	A ₂ (2)	B ₁ (0.5)	C ₂ (0.35)	3
S ₅	A ₂ (2)	B ₂ (1)	C ₃ (0.2)	1
S ₆	A ₂ (2)	B ₃ (1.5)	C ₁ (0.5)	2
S ₇	A ₃ (3)	B ₁ (0.5)	C ₃ (0.2)	2
S ₈	A ₃ (3)	B ₂ (1)	C ₁ (0.5)	3
S ₉	A ₃ (3)	B ₃ (1.5)	C ₂ (0.35)	1

3 试验结果与分析

指标选取时需满足能够客观评价试验对象特定性质的要求,且要具有代表性,因其直接关系到试验结论的合理性。试验在设计洪水位(高程3 201.7 m)

下进行,流量为 417.31 m³/s,下游水位3 090 m,河床冲淤地形采用水准仪及测针测量并绘制等高线图,同时用数码相机记录冲刷地形等情况。借鉴其他工程优化经验,结合本工程中存在的问题,选取最大冲坑深度、冲刷最低点到边坡的距离、左侧挑距、右侧挑距和水舌宽度 5 个指标来评价试验结果,进行极差和方差分析。

3.1 极差分析

极差分析^[24-25]是根据各因素水平分别求解因素各水平下的总响应值 K 和平均响应 k ,并根据各水平下的平均响应求出因素水平对目标的极差 R 。极差统计数据中最值之差,是标志变动的指标,极差大时该因素试验指标的影响亦大,表达式为^[14]

$$R = \max\{k_1, k_2, \dots, k_i\} - \min\{k_1, k_2, \dots, k_i\} \quad (1)$$

对 5 组试验指标进行极差分析,其结果见表 3。对于多个试验指标存在的矛盾,本文选用综合比较法,以兼顾各个指标,寻求各指标都尽可能好的因素水平。

表 3 正交试验因素极差分析

Tab. 3 Extreme difference analysis of orthogonal test factors

指标	最大冲坑深度/m			冲刷最低点到边坡的距离/m		
	A	B	C	A	B	C
k_1	10.66	9.76	9.93	7.03	7.00	9.79
k_2	10.99	11.33	9.98	7.29	13.17	7.17
k_3	10.57	11.13	12.30	16.00	10.16	13.37
R	0.42	1.58	2.37	8.97	6.17	6.20
水平主次	3>1>2			1>3>2		
因素主次	A>B>C			A>C>B		

指标	左侧挑距/m			右侧挑距/m			水舌宽度/m		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
k_1	37.00	45.00	39.64	25.53	21.38	20.00	31.17	28.58	35.63
k_2	44.92	50.14	48.42	22.45	23.95	20.50	32.08	26.55	29.47
k_3	51.22	38.00	45.08	18.71	21.36	26.18	24.35	32.47	22.50
R	14.22	12.14	8.78	6.82	2.58	6.18	7.73	5.92	13.13
水平主次	3>2>1			2>1>3			2>1>3		
因素主次	A>B>C			A>C>B			C>A>B		

对于最大冲坑深度来说,水舌扩散程度合理,不存在冲刷边坡的情况下,深度越大越易于形成大的堆丘而抬高下游水位,因此最佳水平确定时选取 k 值最小的一项,其最优因素水平组合为 $A_3B_1C_1$ (左边墙偏移量为 3 m,右边墙偏移量为 0.5 m, $Z_0/\Delta Z$ 为 0.5);原型冲刷左岸边坡,冲刷最低点到边坡的距离越大说明水舌对边坡的冲刷程度越小,越易

满足下游河道的消能防冲要求,所以最佳水平确定时选 k 值最大的一项,其最优因素水平组合为 $A_3B_2C_3$;在不冲刷边坡的情况下,水舌挑距和宽度越大,能量在空中消耗的越多,入水能量越小,对下游河道越有利,故对于左、右侧挑距和水舌宽度而言,最佳水平确定时应选 k 值最大的一项,左侧挑距的最优因素水平组合为 $A_3B_2C_2$;右侧挑距最优因

素水平为 $A_1B_2C_3$;水舌宽度最优因素水平为 $A_2B_3C_1$ 。

通过正交表的极差 R 值确定左边墙向右岸的偏移量 A 是最主要因素,扭曲程度系数 C 是次要因素,右边墙向右岸的偏移量 B 是最次要因素,结果对比见图 5。对于左侧边墙向右岸偏移量 A 来说,在 5 个指标中 A_3 出现 3 次为最优水平;对于右侧边墙向右岸偏移量 B 来说,在 5 个指标中 B_2 出现 3 次为最优水平。对于鼻坎扭曲程度系数 C 来说,其最优水平出现次数为:2 次 C_1 ,1 次 C_2 ,2 次 C_3 ;其最次要水平出现次数为:2 次 C_1 ,1 次 C_2 ,2 次 C_3 ; C_1 在左、右侧挑距两项指标中为最次要水平,其与最主要水平的偏差分别为 12.07% 和 23.60%, C_3 在最大冲坑深度和水舌宽度两相指标中为最次要水平,其与最主要水平的偏差分别为 23.80% 和 36.82%,均大于 C_1 作为最次要水平时与最主要水平的偏差,故确定因素 C 最优水平为 C_1 。

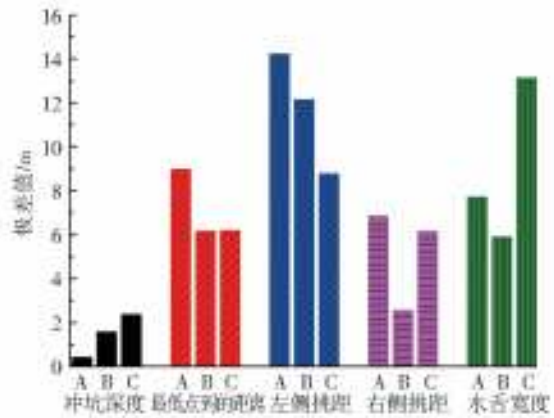


图 5 各指标试验因素敏感性对比结果
Fig. 5 Contrast results of sensitivity factors for each index

综上所述,仅由极差分析可以确定出口扭曲挑坎的最优形式为 $A_3B_2C_1$,即左边墙向右岸偏移 3 m、右边墙向右岸偏移 1 m、鼻坎扭曲程度系数 $Z_0/\Delta Z$ 取 0.5 的组合方式,与原体型的对比见图 6。

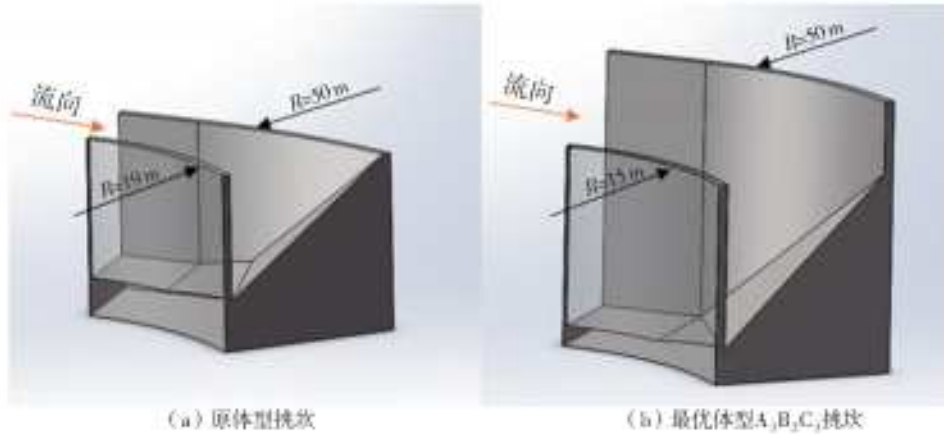


图 6 原体型与最优体型挑坎对比
Fig. 6 Comparison between original bucket shape and optimal bucket shape

3.2 方差分析

相比极差分析,方差分析将某因素数据波动对整体结果的影响考虑在内,提供了判断因素显著性的标准,和极差分析相互验证补充。

在方差分析^[26]中,总偏差平方和 Q_T 的表达式为

$$Q_T = q \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_i^2 - \frac{T^2}{mn} \right] \quad (2)$$

式中: q 为列数; m 为正交试验水平数; n 为水平重复次数; T 为各试验指标的总和 $T = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n y_{ij}$ 。

$$\text{自由度} = \text{因素水平数} - 1 \quad (3)$$

$$\text{均方差} = \frac{\text{平均偏差平方和}}{\text{自由度}} \quad (4)$$

$$F \text{ 值} = \frac{\text{因素均方差}}{\text{误差均方差}} \quad (5)$$

F 值是检验显著性的重要指标,通过计算得出

的 F 值与 F 分布表中选定置信度 α 下的定值进行比较,当 $F_{\text{计算}} > F_{\alpha}$ 时,该因素对试验结果影响显著^[14]。

分析结果统计见表 4,查询 F 表可知, $F_{0.25}(2,2) = 3$, $F_{0.1}(2,2) = 9$, $F_{0.05}(2,2) = 19$ 。从表 4 中可以看出满足 $F > F_{0.25}(2,2)$ 的情况 4 次 A,1 次 B,4 次 C; 满足 $F > F_{0.1}(2,2)$ 的情况为 2 次 A,1 次 B,2 次 C; 满足 $F > F_{0.05}(2,2)$ 的情况只有 A 出现一次。单独分析 5 组试验指标,首要因素出现次数为 3 次 A,0 次 B,2 次 C;次要因素出现次数为:1 次 A,3 次 B,1 次 C。综上认为 A 为最显著影响因素,所得显著性分析结论与极差分析结果一致。

3.3 各指标与试验因素的影响关系

各试验因素对指标存在不同程度的影响,其不同水平下的指标与因素的关系见图 7。冲刷最低点到边坡的距离和左侧挑距随着左边墙向右的偏移量增加显著增加;右侧挑距则随左边墙向右偏移量增

表 4 方差分析

Tab. 4 Variance analysis of experimental indices

指标	方差来源	偏差平方和	自由度	平均偏差平方和	F 值
最大冲坑深度	A	0.30	2	0.15	0.13
	B	4.39	2	2.20	1.86
	C	10.97	2	5.49	4.65
	误差	2.36	2	1.18	
冲刷最低点到边坡的距离	A	156.30	2	78.15	6.07
	B	57.05	2	28.53	2.22
	C	58.11	2	29.06	2.26
	误差	25.75	2	12.88	
左侧挑距	A	304.68	2	152.34	33.28
	B	222.74	2	111.37	24.33
	C	117.82	2	58.91	12.87
	误差	9.15	2	4.58	
右侧挑距	A	70.74	2	35.37	12.00
	B	13.28	2	6.64	2.25
	C	69.98	2	34.99	11.87
	误差	5.90	2	2.95	
水舌宽度	A	107.11	2	53.56	3.22
	B	54.22	2	27.11	1.63
	C	259.05	2	129.52	7.78
	误差	33.30	2	16.65	

加而减小。水舌宽度随扭曲程度系数的减小显著减小。除水舌宽度外,其他指标都随着右边墙向右偏

移量增加均有先增大后减小的趋势。从图中的数据与趋势中更加直观地得出最优组合为 $A_3B_2C_1$ 。

3.4 最优体型和原型水力特性对比分析

与原型相比,修改体型贴角面积增加,左侧边墙向右岸偏移了 3 m,右岸边墙向右岸偏移了 1 m,其流态和下游冲淤与原型型的对比见图 8 和 9。改动旨在解决左岸边坡冲刷,调整水舌方向,理顺下游河道形态。

3.4.1 水舌形态分析

本工程泄洪洞与河道交角过小,水舌呈扇形散开,厚度较薄,水舌主流冲击左岸边坡,见图 8(a),优化时主要考虑扭转水舌方向,将原本扩散的水舌变集中,使水舌纵向落入河道。通过模型试验图 8(b)所示结果可以看出,优化后挑坎达到了水舌纵向扩散,改善水流走向的效果,水舌空中形态较舒展,解决了水舌扩散及入水点靠左岸的问题。

3.4.2 水舌挑距分析

观察水舌形态以及试验实际测量,认为水舌左侧为最大挑距,水舌右侧为最小挑距。因原型水舌呈扇形,左右挑距差距不大。正交试验所得的最优体型左右挑距差别较大,左侧挑距比原型明显增加,大小为 50.92 m,右侧挑距减小为 32.34 m。水舌发生偏转,呈斜向大幅拉开,水流顺利归河。

3.4.3 水舌入水位置及下游冲刷分析

原型最深冲坑高程 3 082.15m,深度虽仅为

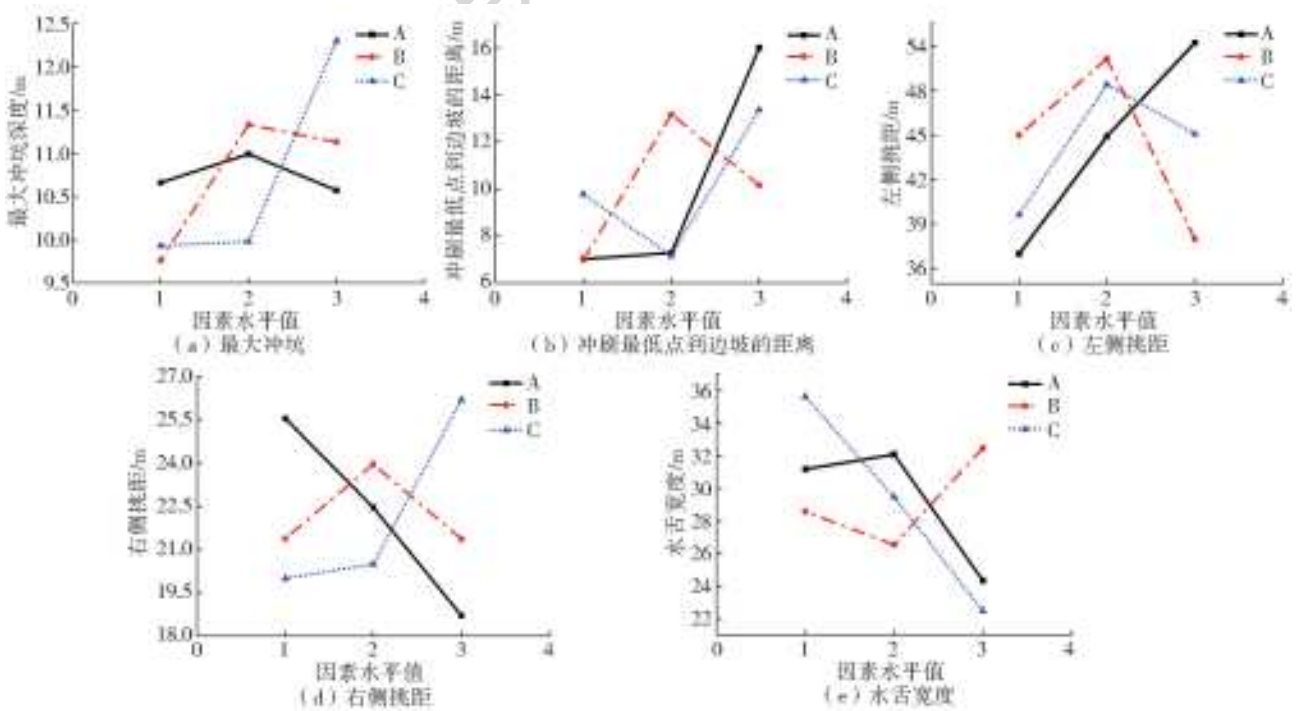


图 7 各指标与因素水平关系

Fig. 7 Indexes and test factors



图 8 原体型与最优体型流态对比

Fig. 8 Flow patterns comparison between original bucket shape and optimal bucket shape

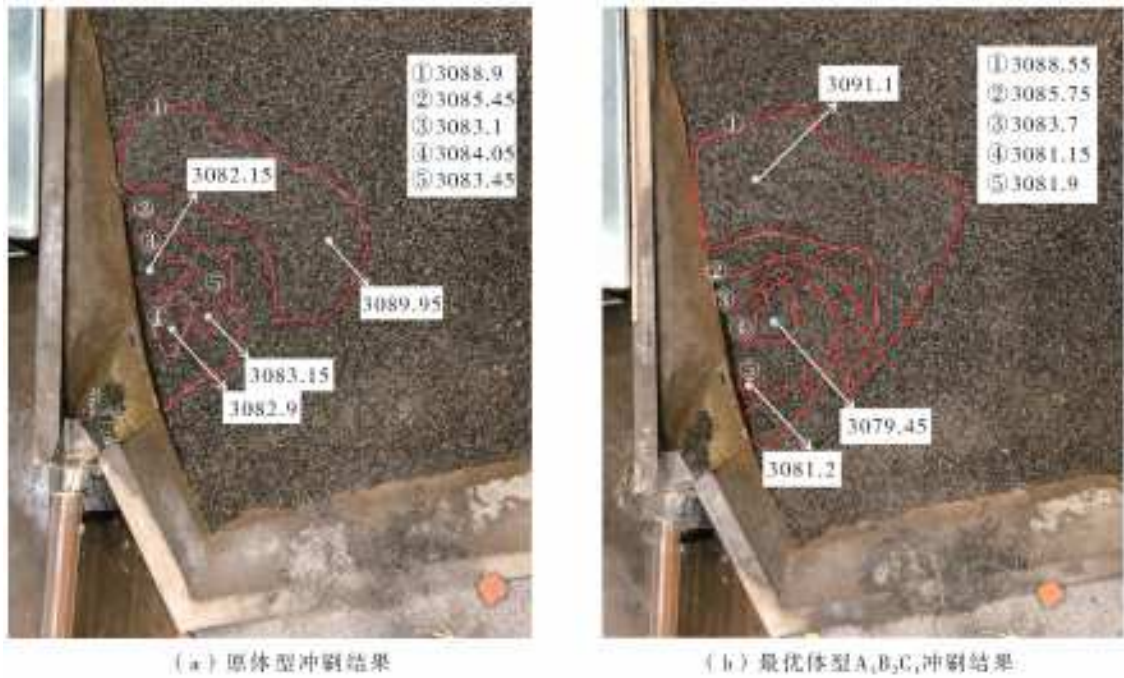


图 9 原体型与最优体型冲刷结果对比(单位:m)

Fig. 9 Comparison of original bucket shape and optimal bucket shape scouring results

7.85 m,但水舌主流砸在左岸边坡小部分挑进河道,且形成的最深冲坑位于坡脚处,深度为 8.5 m,试验结果见图 9(a)。由正交试验得出的最优体型,最深冲坑为水舌主流冲刷所致,最低点距离边坡 17.5 m,高程 3 079.3 m,冲坑深度为 10.7 m,相比原体型增加了 2.85 m,试验结果见图 9(b)。对于大型工程,冲坑上游侧与挑坎末端距离大于冲刷深度的 2.5~5 倍时,认为对建筑物不构成安全威胁^[27]。原体型冲刷最深点紧贴坡脚,实际运用中未

出现滑坡现象,基于此又测量了推荐体型临近坡脚处冲刷深度,高程为 3 083 m,深度为 7 m,小于原体型坡脚处的冲刷深度。所以推荐最优挑坎体型在冲刷深度合理的范围内,解决了水舌冲刷边坡,调整了水舌落点位置,使最深冲坑位置尽量远离左岸边坡,同时降低了出现边坡滑坡的可能性,适应性较强。

4 结论

本文基于物理模型试验,采用正交试验设计对

泄洪洞出口挑坎体型进行优化研究结论如下。

(1) 极差分析与方差分析的结果均表明,左边墙向右岸的偏移量为泄洪洞出口扭曲挑坎消能效果的最显著影响因素,扭曲程度系数为较显著影响因素,右边墙向右岸的偏移量为最不显著影响因素。

(2) 综合考虑扭曲挑坎对左岸边坡的冲刷程度,以及对下游河道冲淤的影响,确定挑坎的最优形式为:左边墙向右岸偏移 3 m、右边墙向右岸偏移 1 m、鼻坎扭曲程度系数 $Z_0/\Delta Z$ 取 0.5 的组合。

(3) 通过正交设计分析所选出的最优方案,其水舌空中形态,水舌入水位置以及下游河道内流态等水力特性指标与原体型相比优势明显,而且同试验其他方案相比较,水舌挑距、宽度,入水位置与边坡的相对距离,冲坑最大值等方面亦佳。这说明正交试验法在工程领域的运用具有合理性和可行性。

(4) 本文在各参数水平取值时具有任意性,对于试验中各因素水平的变化幅值仍需进行更深入的研究。此外,对于定性指标,如挑坎扭曲程度,进行概化分析时定义较为粗略,其扭曲程度曲线的确定是模型制作的一个难点,这些都是以后需要进一步开展研究工作的内容。

本次关于泄洪洞出口挑流鼻坎的优化模型试验的结论,适用于采用挑流消能方式,出口挑坎为斜贴角或扭曲贴角的工程,特别是出口左右导墙长度不一,一侧离边坡较近,存在涌浪回流、边坡淘刷问题的工程。以上结论为该工程出口挑流鼻坎的优化提供科学依据,其他类似工程可用此方法进行优化计算,具有一定的指导意义。

参考文献(References):

- [1] 王英奎,江春波,廖仁强,等.泄洪洞出口体型对挑流消能效果的影响研究[J].水力发电学报,2015,34(8):70-76.(WANG Y,JIANG C,LIAO R,et al.Effect of different outlet shapes of spillway tunnel on ski-jump energy dissipation [J].Journal of Hydroelectric Engineering,2015,34(8):70-76.(in Chinese)) DOI:10.11660/sfidxb.20150809.
- [2] 孙颖,李国庆,李旭东,等.溪洛渡水电站泄洪洞双曲挑坎形体设计[J].水利学报,2003(8):32-36.(SUN Y,LI G Q,LI X D,et al.Design of double-curvature flip bucket for spillway in Xiluodu Hydropower Project [J].Journal of Hydraulic Engineering,2003(8):32-36.(in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn:0559-9350.2003.08.007.
- [3] 刘晓芳,余明辉,兰才胜,等.三里坪水电工程泄洪洞出口挑流鼻坎的优化试验研究[J].南水北调与水利科

- 技,2007(4):76-79.(LIU X F,YU M H,LAN C S,et al.An optimal experiment research of flip bucket of Sanliping hydropower project flood-releasing tunnel outlet[J].South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2007(4):76-79.(in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1672-1683.2007.04.023.
- [4] 闫谨,刁明军,王磊.泄洪洞出口扭曲斜切挑坎挑流数值模拟[J].西南民族大学学报(自然科学版),2015,41(6):773-777.(YAN J,DIAO M J,WANG L.Numerical simulation of the jet nappe in the contorted & beveled flip bucket of the tunnel spillway [J].Journal of Southwest University for Nationalities(Natural Science Edition),2015,41(6):773-777.(in Chinese)) DOI:10.11920/xnmdzk.2015.06.022.
- [5] 位敏,陈利强,叶俊荣,等.民乐水库溢洪道挑流鼻坎体型优化试验研究[J].人民长江,2016,47(19):83-86.(WEI M,CHEN L Q,YE J R,et al.Test research on shape optimization for flip bucket in spillway of Minlehe reservoir[J].Yangtze River,2016,47(19):83-86.(in Chinese)) DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2016.19.016.
- [6] 陈瑞华,杨吉健,马麟,等.小湾水电站泄洪洞窄缝挑坎数值模拟研究[J].长江科学院院报,2017,34(4):56-60.(CHEN R H,YANG J J,MA L,et al.Numerical simulation on slip-type flip bucket at flood discharging tunnel of Xiaowan hydropower station[J].Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2017,34(4):56-60.(in Chinese)) DOI:10.11988/ckyyb.20160121.
- [7] 苏沛兰,廖华胜.基于正交设计的掺气坎体型设计数值模拟研究[J].水动力学研究与进展 A 辑,2011,26(2):217-227.(SU P L,LIAO H S.Investigation of numerical simulation for aerator shape based on orthogonal design[J].Chinese Journal of Hydrodynamics,2011,26(2):217-227.(in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-4874.2011.02.011.
- [8] SU P L,LIAO H S,QIU Y,LI C J.Experimental study on a new type of aerator in spillway with low Froude number and mild slope flow[J].Journal of Hydrodynamics,2009,21(3):415-422.DOI:10.1016/S1001-6058(08)60165-1
- [9] 赵荣,杨敏,齐春风.阿尔塔什水利枢纽水垫塘消能方式选择[J].南水北调与水利科技,2016,14(5):124-129.(ZHAO X,YANG M,QI C F.Selection of energy dissipation scheme in plunge pool for Altash project [J].South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2016,14(5):124-129.(in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2016.05.020.
- [10] 张金福,杨敏,张少济,等.向家坝工程坝面隔墙水动

- 力特性及体型优选研究[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(6): 105-109. (ZHANG J F, YANG M, ZHANG S J, et al. Study on the hydrodynamic characteristics and shape of optimization of the dividing-wall of Xiangjiaba project[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2011, 9(6): 105-109. (in Chinese)) DOI: 10. 3724/SP. J. 1201. 2011. 06105.
- [11] 余挺, 贺昌林, 张建民, 等. 高水头大流量泄洪洞挑坎体型优化及下游冲淤研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2007(4): 20-25. (YU T, HE C L, ZHANG J M, et al. Scour downstream river and optimum geometry of flip bucket in tunnel with high head and large discharge[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2007(4): 20-25. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1009-3087. 2007. 04. 005.
- [12] 侯冬梅, 占桂泉, 王才欢, 等. 挑坎水舌运动轨迹控导措施研究[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(3): 16-20. (HOU D M, ZHAN G Q, WANG C H, et al. Measures of controlling the movement locus of nappe in Flip bucket [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(3): 16-20. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-5485. 2013. 03. 004.
- [13] 贾超, 张凯, 张强勇, 等. 基于正交试验设计的层状盐岩地下储库群多因素优化研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 1718-1726. (JIA C, ZHANG K, ZHANG Q Y, et al. Research on multi-factor optimization of underground laminated salt rock storage group based on orthogonal experimental design [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(6): 1718-1726. (in Chinese)) DOI: 10. 16285/j. rsm. 2014. 06. 015.
- [14] 倪恒, 刘佑荣, 龙治国. 正交设计在滑坡敏感性分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002(7): 989-992. (NI H, LIU Y R, LONG Z G. Applications of orthogonal design to sensitivity analysis of landslide [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002(7): 989-992. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1000-6915. 2002. 07. 010.
- [15] 宋鑫华, 包太, 庄锦亮, 等. 基于尖点突变理论的土质边坡稳定性分析[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(3): 138-143, 168. (SONG X, BAO T, ZHUANG J L, et al. Stability analysis of soil slope based on cusp catastrophe theory [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(3): 138-143, 168. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2016. 03. 024.
- [16] 邱珍锋, 卢孝志, 伍应华. 考虑颗粒形状的粗粒土渗透特性试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(4): 102-106. (QIU Z F, LU X Z, WU Y H. Experimental research on the permeability property of coarse grained soils considering the particle [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(4): 102-106. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2014. 04. 022.
- [17] 唐益群, 袁斌, 李军鹏. 基于正交试验的黄土泥流运动分析[J]. 水利学报, 2015, 46(2): 183-189, 196. (TANG Y Q, YUAN B, LI J P. A modified debris-flow super-elevation formula with the run-up effect [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(2): 183-189, 196. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 2015. 02. 007.
- [18] 崔贞, 傅宗甫, 陈月君. 基于正交设计的浮体结构流动特性分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2018, 51(6): 471-477, 497. (CUI Z, FU Z F, CHEN Y J. Exploring of flow characteristics of floating structure based on orthogonal design [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2018, 51(6): 471-477, 497. (in Chinese)) DOI: 10. 14188/j. 1671-8844. 2018-06-001.
- [19] 李炎隆, 余磊, 周兴波, 等. 基于正交试验法的梯级水库连溃分析模型参数敏感性分析[J]. 水利学报, 2018, 49(7): 823-830. (LI Y L, SHE L, ZHOU X B, et al. Parameters sensitivity analysis of successive dam break model for cascade reservoir based on the orthogonal test method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(7): 823-830. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20180074.
- [20] 刘欣蔚, 王浩, 雷晓辉, 等. 粒子群算法参数设置对新安江模型模拟结果的影响研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1): 69-74, 208. (LIU X W, WANG H, LEI X H, et al. Influence of parameter settings in PSO Algorithm on simulation results of Xin'anjiang model [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 69-74, 208. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 20180011.
- [21] 蒋俏芬. 马岭水利枢纽工程导流与泄洪建筑物体型研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017. (JIANG Q F. Study on the configuration of diversion and flood discharge structure of Maling Hydropower Project [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017. (in Chinese))
- [22] 吴新宇, 孙东坡, 高昂, 等. 扭曲鼻坎对泄洪洞挑流消能的影响研究[J]. 水利水电技术, 2014, 45(8): 56-61. (WU X Y, SUN D P, GAO A, et al. Study on impact from skew bucket on trajectory bucket energy dissipation for flood discharge tunnel [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2014, 45(8): 56-61. (in Chinese)) DOI: 10. 13928/j. cnki. wrahe. 2014. 08. 056.

- [23] 王鹏,舒才,施峰,等.不同砂胶比、密度和含水性相似材料力学性质正交试验研究[J].岩土力学,2017,38(S2):229-235. (WANG P, SHU C, SHI F, et al. Orthogonal experimental study of similar materials properties of different densities, sand-binder ratios and residual moisture contents [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38 (S2): 229-235. (in Chinese)) DOI:10.16285/j.rsm.2017.S2.032.
- [24] 尹升华,吴爱祥,李希雯.矿柱稳定性影响因素敏感性正交极差分析[J].煤炭学报,2012,37(S1):48-52. (YIN S H, WU A X, LI X W. Orthogonal polar difference analysis for sensitivity of the factors influencing the ore pillar stability [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(S1): 48-52. (in Chinese)) DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2012.s1.021.
- [25] 刘兴坡,陈翔,胡小婷,等.基于正交极差分析的青龙河流域 HSPF 模型参数寻优模式[J].哈尔滨工业大学学报,2018,50(2):131-138. (LIU X P, CHEN X, HU X T, et al. Orthogonal range analysis-based HSPF parameter optimization pattern for Qinglong River watershed [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50 (2): 131-138. (in Chinese)) DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201607069.
- [26] 刘瑞江,张业旺,闻崇伟,等.正交试验设计和分析方法研究[J].实验技术与管理,2010,27(9):52-55. (LIU R H, ZHANG Y W, WEN C W, et al. Study on the design and analysis methods of orthogonal experiment [J]. Experimental Technology and Management, 2010, 27(9): 52-55. (in Chinese)) DOI:10.16791/j.cnki.sjg.2010.09.016.
- [27] 水利部水利水电规划设计总院.水工设计手册:第七卷:泄水与过坝建筑物[M].北京:中国水利水电出版社,2014:104. China renewable energy engineering institute. Hydraulic design manual: Volume 7: Drainage and dam buildings [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2014: 104.
-
- (上接第 149 页)
- [8] 焦修明.弧形闸门动力特性及流激振动研究[D].武汉:武汉大学,2005. (JIAO X M. Research on dynamic characteristic and flow-induced vibration of radial gate [D]. Wuhan: Wuhan University, 2005. (in Chinese))
- [9] 唐祥甫,宁廷俊,陈元清.浅谈水力学面脉动压力的计算[J].长江科学院院报,2000(4):8-11. (TANG X F, NING T J, CHEN Y Q. Elementary introduction to calculation of area fluctuating pressures in hydraulics [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2000(4): 8-11. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1001-5485.2000.04.003.
- [10] 严根华.水动力荷载与闸门振动问题[A].振动工程学报(工程应用专辑)[C].2001:3. (YAN G H, Hydrodynamic loads and gates vibration problems [A]. Journal of Vibration Engineering [C]. 2001: 3 (in Chinese))
- [11] 汪海平.三峡泄水建筑物动力特性研究分析[D].武汉:武汉大学,2005. (WANG H P. Technology of analysis to dynamic characteristics in the sluices dam of Three Gorges Project [D]. Wuhan: Wuhan University, 2005. (in Chinese))
- [12] 高仕赵.泥沙淤积对闸门启门力的影响及行走支承和水封摩擦阻的研究[D].天津:天津大学,2013. (GAO S Z. The research on the effect of sediment to the lifting force of gate and the friction of walking-bearing and sealing-rubber [D]. Tianjin: Tianjin University, 2013. (in Chinese))
- [13] 高仕赵,徐国宾.水工闸门垂直水动力计算方法[J].工程力学,2015,32(7):236-242. (GAO S Z, XU G B. Calculation method for vertical hydrodynamic force of hydraulic gate [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32 (7): 236-242. (in Chinese)) DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2013.12.1234.
- [14] 韩立.石泉水电站中孔平面工作闸门原型观测成果及分析[J].水利水电技术,1985(1):18-25. (HAN L. Prototype observation and analysis of working plane gate of middle hole in Shiquan Hydropower Station [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1985(1): 18-25. (in Chinese)) DOI:10.13928/j.cnki.wrahe.1985.01.003.
- [15] 张双平,丁小龙,单福平.石泉水电厂中孔工作闸门振动问题的研究[J].西北电力技术,1997(4):23-29. (ZHANG S P, DING X L, SHAN F P. Study on vibration of the medium-row working gate in Shiquan Hydropower Plant [J]. Northwest China Electric Power, 1997(4): 23-29. (in Chinese))