

基于CFD的挑流泄洪雾化特性研究

薛万云¹, 杨家修², 杜帅群², 吴时强¹, 吴修锋¹, 张陆陈¹, 庞博慧³, 戴江玉¹

(1. 南京水利科学研究院水文水资源及水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;

2. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081;

3. 华能澜沧江水电股份有限公司, 云南 昆明 650214)

摘要:针对泄洪雾化影响范围不易采用数学模型直接模拟的问题,以某高坝电站泄洪为研究对象,先采用三维数学模型计算挑流水舌入水流速、入水角度等水力特征值,再基于此特征值选用原型观测校正后的计算公式预报泄洪雾化范围,并通过物理模型试验对计算结果进行验证分析。结果表明,受比尺效应影响,物理模型试验预测的雾化影响范围小于公式计算的范围,但两者的变化趋势一致;雾流受惯性力和水舌风作用,沿水舌轴线做爬坡运动,与原型观测现象一致;受出口挑流影响,泄洪雾化影响集中在水舌落入点的下游,而水垫塘上游、右岸降雨强度较小,影响范围有限。

关键词:泄洪雾化;数值模拟;降雨强度;物理模型;雾流

中图分类号:TV122

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2020)04-0016-05

Study on characteristics of flood discharge atomization of ski-jump jet based on CFD//XUE Wanyun¹, YANG Jiaxiu², DU Shuaiqun², WU Shiqiang¹, WU Xiufeng¹, ZHANG Luchen¹, PANG Bohui³, DAI Jiangyu¹ (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Guiyang Engineering Corporation Limited, Power China, Guiyang 550081, China; 3. Huaneng Lancang River Hydropower Co., Ltd., Kunming 650214, China)

Abstract: Aiming at the problem that the influence range for flood discharge atomization is not easy to be directly modeled by mathematical models, flood discharge from a high dam power station was taken as a study object, in which a three-dimensional mathematical model was used to calculate the hydraulic characteristic values such as the flow velocity and the jet angle into water. The empirical formula of the prototype observation was used to predict the flooding atomization range, and a physical model test was used for verification analysis. The results show that, affected by the scale effect, the influence range of the physical model atomization test is smaller than the calculation range but with a similar variation trend. The fog flow is affected by inertia and water tongue wind, revealing a climbing movement along the water tongue axis, which is consistent with the prototype measurement. Affected by the ski-jump jet at the outlet, the flood discharge atomization effect is concentrated downstream of the water tongue drop point. The upstream and right banks of the plunge pool have a small rainfall intensity with a limited influence range.

Key words: discharge atomization; numerical simulation; rainfall intensity; physical model; fog flow

水电工程在泄洪过程中易产生泄洪雾化现象^[1-4],雾化由电站下游局部区域产生的雾流和降雨构成,其影响包括雾化降雨和雾流两个方面的影响,已有研究表明雾化降雨对工程的影响更大。雾化降雨强度较自然降雨大,对枢纽建筑物、两岸交通、边坡稳定等产生重要影响。因此需要准确预报雾化降雨影响范围及降雨强度,以期提前做好防护措施。

从挑流泄洪雾化的形成机理看^[5-6],主要有两个源项,即水舌在空中运动所形成的雾化以及水舌入水激溅所引起的雾化。从量级上看,水舌在空中运

动所形成的雾化由于其源动力为紊动动能,雾化强度较低;而水舌入水激溅所形成的雾化由于其源动力来自时均动能与紊动动能,因而其雾化更为强烈,可认为是雾化的主要源项^[7]。

泄洪雾化受水工建筑物布置、泄流条件、气象条件及下游地形条件等的综合影响,不易对泄洪雾化进行直接数值模拟,现阶段大多采用物理模型预测泄洪雾化范围,物理模型试验能对某区域雾化水流运动进行定量描述,但因雾化水流前后各段性质差异较大及两相流运动的复杂性,在模型比尺选择等

方面仍存在问题。

为了更好地应对数学模型难以直接模拟泄洪雾化影响范围的问题,本文以某高坝电站泄洪雾化为例,利用三维模型计算入水速度、入水角度、泄流量等水力参数,选用原型观测校正后的公式计算雾化范围,并用物理模型试验对计算结果进行验证分析。

1 工程概况

某高坝电站是澜沧江上游河段规划的梯级电站,坝高为 315 m,水库正常蓄水位为 2 895.00 m。受坝址河弯地形限制及地质条件影响,泄水建筑物集中布置于电站右岸,具有大流量、水头高、窄河谷、出流集中等特点,其出口均为挑流,雾化降雨强度较大,需要对其影响进行定量研究。电站右岸溢洪道出口采用挑流消能工体型,长为 33 m,反弧半径为 120 m,挑角为 15°,挑坎坎顶高程为 2 735.00 m。右岸泄洪洞采用无压洞型式,轴线水平投影总长为 857 m。泄洪洞出口消能工形式为鼻坎挑流消能,消能工挑坎高程为 2 742.62 m,长为 26.66 m。泄洪系统水垫塘位于坝址下游 480 m 处主河道内,水垫塘最大长度为 405 m,最大宽度为 135 m,水垫塘底板高程为 2 590.00 m。泄洪洞轴线与河道交角为 43°。图 1 为泄水建筑物平面布置。

2 数学模型

2.1 控制方程

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \\ - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j}) + S_i \end{aligned} \quad (2)$$

式中: p 为压力; μ 为动力黏度; ρ 为水的密度; u_i 为 $x_i(i=1,2,3)$ 方向的流速; S_i 为广义源项; t 为时间; $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ 为雷诺应力。

2.2 紊流模型

$k-\varepsilon$ 模型是根据张量不黏性理论提出的一种线性紊流模型,能够准确地预测紊流^[8-9],故本文采用标准 $k-\varepsilon$ 模型,其控制方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \\ G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \\ C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (4)$$

其中

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

式中: k 为紊动动能; ε 为紊动耗散率; μ_t 为紊动黏度; G_b 为由于浮力引起的紊动动能 k 的产生项; G_k 为由于平均速度梯度引起的紊动动能 k 的产生项; Y_M 为可压紊流中脉动扩张的贡献; σ_k 、 σ_ε 分别为紊动动能 k 和紊动耗散率 ε 对应的紊流普朗特数; S_k 、 S_ε 分别为紊动动能 k 和紊动耗散率 ε 对应的自定义项; C_μ 、 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 为经验常数,根据 Launder 等^[10]的推荐值及后来的试验验证, $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 C_μ 、 σ_k 、 σ_ε 的取值分别为 1.44、1.92、0.09、1.00、1.30。当流体为不可压缩流体,且不考虑用户自定义的源项时, $G_b = 0$ 、 $Y_M = 0$ 、 $S_k = 0$ 、 $S_\varepsilon = 0$ 。

2.3 离散方法及网格划分

采用有限体积法离散控制方程。针对本文研究电站,参照设计原型进行建模,计算网格采用非均匀结构网格,网格尺寸为 0.2~1.0 m,对进口、边界等区域的网格进行加密。泄洪洞与溢洪道共用一个水垫塘,整个区域的网格单元总数约为 4 090 000 个。水垫塘模型见图 2,水垫塘计算网格见图 3。

2.4 边界条件及初始条件

隧洞底板以及边壁设为固壁边界,进口边界设为压力进口边界,出口边界设为压力出口边界,自由表面采用 VOF 法处理^[11]。初始流场中,自由液面以下的计算域水的体积分数设置为 1,整个计算区

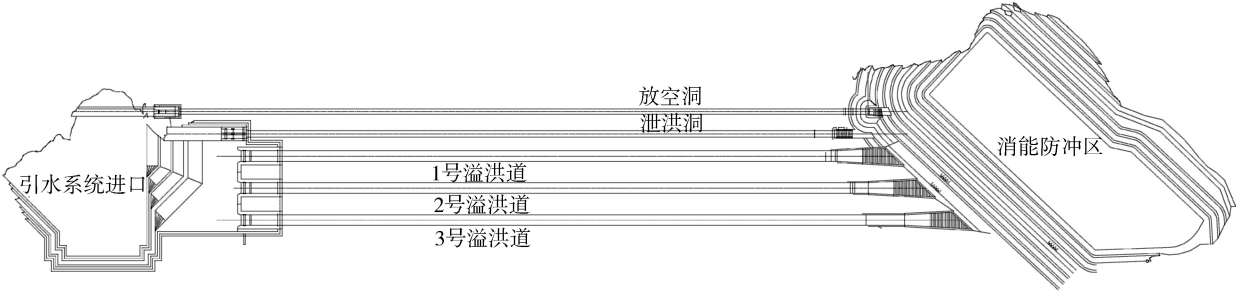


图 1 泄水建筑物平面布置

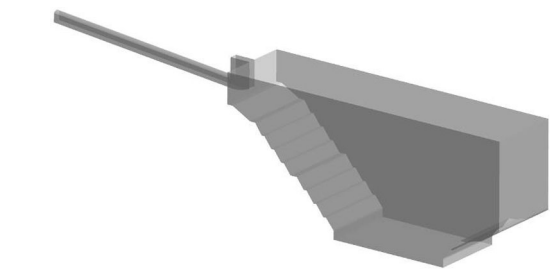


图2 水垫塘模型

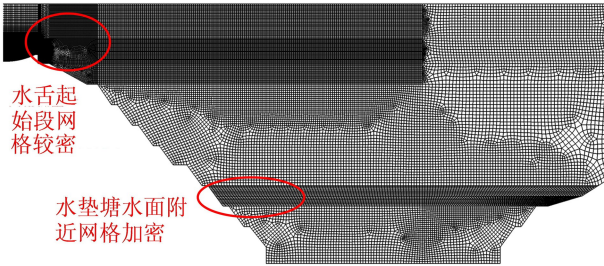


图3 水垫塘计算网格

域的初始速度都赋值为0。

2.5 模型验证

计算模型采用上下游进出口流量是否趋于一致来判别恒定流状态,当进出口流量趋于一致,且连续一段时间内保持这种一致状态,认定此时流动达到平衡,水流为恒定流状态,模型收敛,此刻的流量及沿程水力要素即为所求。各方程的收敛精度均为 1×10^{-4} 。

利用1:80物理模型的试验结果对建立的数学模型进行验证,选取水舌挑距及水舌流速为特征值。当洪水频率 $P=1\%$ 时,挑流出口流速计算值和试验值分别为48.0 m/s和47.2 m/s,出口流速相对误差为1.7%;水舌内缘挑距的计算值和试验值分别为240 m和242 m,水舌外缘挑距的计算值和试验值分别为265 m和270 m,挑距相对误差为0.8%~1.8%,计算结果与模型试验结果吻合较好,说明该模型可以用于水舌计算。

3 泄洪雾化计算分析

3.1 计算工况

对特征设计水文条件下的泄洪设施过流能力进行计算,计算工况见表1。

表1 三维数值模拟计算工况

工况	特征洪水	泄水建筑物	上游水位/m	出口水位/m
1	校核洪水	泄洪洞溢洪道	2 896.42	2 643.29
2	设计洪水 ($P=0.1\%$)	泄洪洞溢洪道	2 895.00	2 637.75

3.2 泄洪雾化模型计算结果与分析

由于研究对象为高坝坝体,同时考虑泄洪流量、流速等水力要素的适用范围,及泄洪雾化的其他主

要水力学影响因素,选取孙双科等^[12]提出的公式计算泄洪雾化纵向影响:

$$L = 10.267 \left(\frac{v_c^2}{2g} \right)^{0.7651} \left(\frac{Q}{v_c^2} \right)^{0.11745} (\cos \theta_c)^{0.06217} \quad (5)$$

式中: L 为雾化降雨区的纵向边缘(接近于零降雨强度的位置)与水舌入水点之间的距离; v_c 为水舌入水流速; θ_c 为入水角度; Q 为泄流量; g 为重力加速度。入水流速及入水角度需通过三维数值计算求得。式(5)的适用范围为: $6\,856\text{ m}^3/\text{s} > Q > 100\text{ m}^3/\text{s}$, $50.0\text{ m/s} > v_c > 19.3\text{ m/s}$, $71.0^\circ > \theta_c > 31.5^\circ$ 。式(5)适用于高坝挑流泄洪,水舌落入水垫塘的工程。

选取挑流泄洪工程(包括白山、东风、二滩、鲁布格电站)原型观测资料对式(5)的适用性进行验证,结果见图4。其中二滩电站4组原型观测资料见表2,其泄流、水舌参数与本文研究电站泄流参数数量级一致。

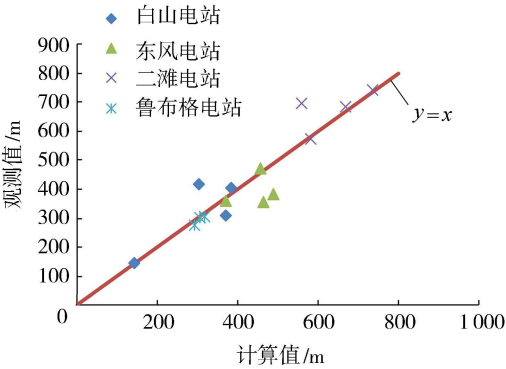


图4 式(5)计算结果与原型观测结果对比

表2 二滩雾化影响原型观测资料

工况	$Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	$v_c/(m \cdot s^{-1})$	$\theta_c/(^\circ)$	L/m
1	6 856	50.1	51.9	728
2	6 024	49.0	71.1	669
3	3 688	44.7	41.5	566
4	3 692	43.5	44.9	685

对于溢洪道、泄洪洞轴线与下游河道轴线有一个交角,且河道两岸为陡边坡的电站,泄洪水舌落入水垫塘产生雾流,根据原型观测结果发现,在无外界风力条件下,雾流并未受边坡阻挡改变移动路线转向下游河道漂移,而是继续沿着溢洪道轴线运动,遇到边坡时,爬坡行进。图5为锦屏水电站泄洪现场,从图5中可见,水舌落入水垫塘后形成雾流,雾流沿着边坡继续爬行漂移,且泄洪引起的雾化影响主要集中在入水点之后的边坡区域。因此参考以上原型观测结果,对于本文研究电站,泄洪时若无外界风力干扰,雾流也将沿边坡继续爬行漂移。

基于以上分析,本文水电站溢洪道泄流雾化影响分析采用式(5)是适用的。图6为模拟的泄洪洞水舌入水水流速分布,水舌断面沿程从方圆状逐渐发



图5 锦屏泄洪现场

展为偏状,流速沿程增大。溢洪道及泄洪洞流量、水舌入水流速、入水角度、浓雾区纵向长度见表3,其中纵向长度由式(5)计算得到。

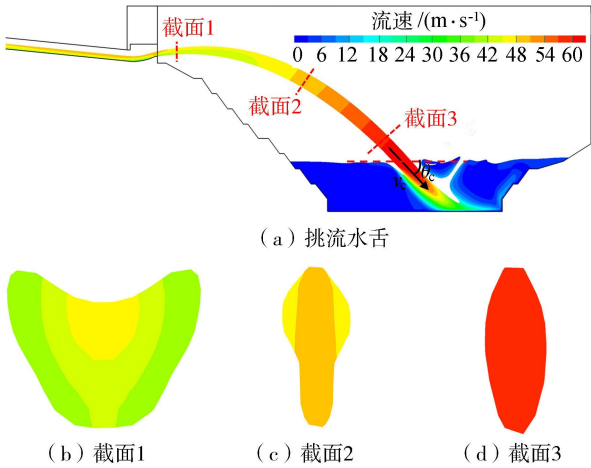


图6 泄洪洞出口水舌流速分布

刘宣烈等^[13]将雾化区分为浓雾区、薄雾区及淡雾区,并在收集原型观测雾化资料基础上,经统计分析之后,对雾化范围给出了估算公式,如表4所示(表中 H 为最大坝高)。

表3 雾化影响计算统计

工况	特征洪水	泄水建筑物	$Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	$v_c/(m \cdot s^{-1})$	$\theta_c/(^\circ)$	L/m
1	校核洪水	泄洪洞	2 534.91	56.20	55.88	750.74
		溢洪道	3 335.56	60.00	54.96	851.65
2	设计洪水 ($P=0.1\%$)	泄洪洞	2 483.01	56.00	55.56	745.53
		溢洪道	3 056.72	59.80	55.20	838.68

表4 雾化范围估算公式

分区	纵向范围	横向范围	高度
浓雾区	$(2.2 \sim 3.4)H$	$(1.5 \sim 2.0)H$	$(0.8 \sim 1.4)H$
薄雾和淡雾区	$(5.0 \sim 7.5)H$	$(2.5 \sim 4.0)H$	$(1.5 \sim 2.5)H$

本文水电站坝高为315 m,根据表4中公式,浓雾区纵向范围为693.0~1 071.0 m、横向范围为472.5~630.0 m、高度为252.0~441.0 m,纵向范围与表3中计算结果基本一致。

电站泄洪洞、溢洪道轴线与河道轴线成一交角,受两岸深峡谷河道地形影响,沿溢洪道轴线的雾雨受边坡阻挡后,沿边坡爬高移动。图7显示了根据式(5)及表4计算的雾化影响范围结果,图中绿色虚线为降雨强度为0的等值线。

由于泄洪雾化过程是一个非常复杂的水气两相运动过程,因此有必要利用物理模型试验对计算结果进行校核验证。

3.3 泄洪雾化试验结果与分析

采用1:80整体模型对挑流泄洪雾化影响范围及降雨强度进行试验研究,泄洪雾化模型试验工况为校核洪水工况,3条溢洪道和1条泄洪洞同时泄洪。校核洪水条件下的雾化降雨分布如图7所示。校核洪水条件下,泄洪雾化降雨的最大影响范围如下:在纵向上,3号溢洪道出口至降雨强度0 mm/h等值线的距离为377 m,在横向上,水垫塘下边缘至

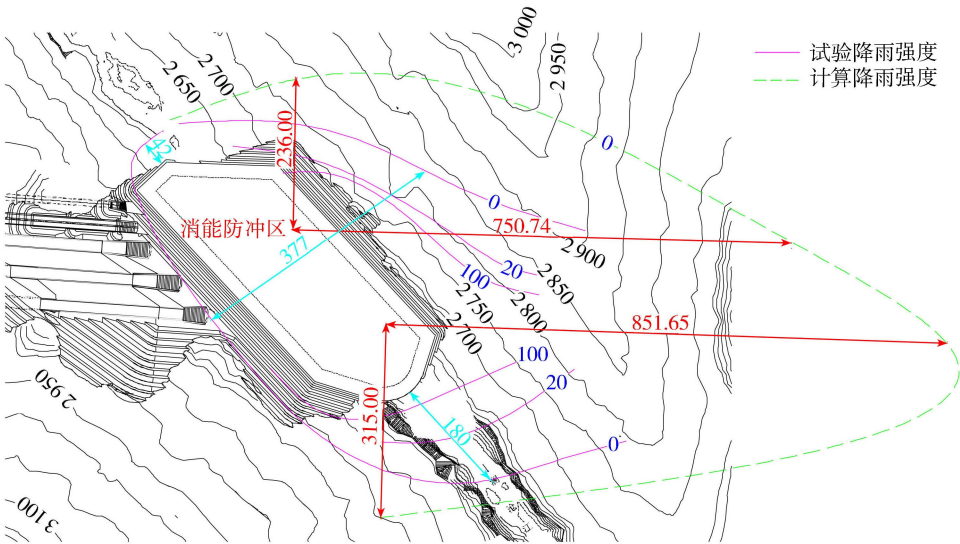


图7 雾化影响范围比较(高程单位:m;降雨强度单位:mm/h;影响范围单位:m)

降雨强度 0 mm/h 等值线的距离为 180 m,水垫塘上边缘至降雨强度 0 mm/h 等值线的距离为 42 m。

从图 7 可见,试验得到的雾化降雨强度变化趋势与计算预报趋势一致,受小比尺物理模型比尺效应影响,雾化试验的雾化影响范围小于计算的范围。泄洪雾化影响集中在水舌落入点的下游,水垫塘上游、右岸降雨强度较小;泄洪雾化影响范围沿溢洪道轴线纵向长度超过横向宽度;受出口挑流影响,左岸边坡泄洪雾化降雨强度比右岸大,靠近水垫塘边墙的区域降雨较大,远离边墙逐渐减小。在水垫塘内左岸中心区域,最大泄洪雾化降雨强度超过 5 000 mm/h。

4 结 语

采用三维数学模型与原型经验公式相结合的方法预报高坝挑流雾化影响范围,可有效解决数值模拟不易直接模拟雾化影响范围的难题。计算结果显示,受出口挑流影响,靠近水垫塘边墙的区域降雨较大,远离边墙逐渐减小。泄洪雾化影响集中在水舌落入点的下游,影响区域离上游坝体、发电厂房等工程建筑较远。水垫塘两侧虽然有高陡边坡的地形影响,但泄流水舌引起的雾流仍然沿边坡爬高移动,与原型观测结果一致。受比尺效应影响,本文 1:80 物理模型试验雾化影响范围小于计算结果,但两者变化趋势一致,建议以后研究中采用更大比尺模型进行验证分析。

参考文献:

[1] 柳海涛,孙双科,郑铁刚,等. 两河口水电站泄洪雾化影响分析[J]. 水力发电, 2016, 42(11): 54-57. (LIU Haitao, SUN Shuangke, ZHENG Tiegang, et al. Analysis of flood discharge atomization in Lianghekou Hydropower Station[J]. Water Power, 2016, 42(11): 54-57. (in Chinese))

[2] 王思莹,陈端,侯冬梅. 泄洪雾化源区降雨强度分布特性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(8): 70-74. (WANG Siying, CHEN Duan, HOU Dongmei. Experimental research on the rainfall intensity in the source area of flood discharge atomization[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(8): 70-74. (in Chinese))

[3] 柳海涛,孙双科,刘之平. 泄洪雨雾输运模型及其计算验证[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(4): 45-48. (LIU Haitao, SUN Shuangke, LIU Zhiping. Mathematical model for rain-fog transportation during flood discharge and its verification[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(4): 45-48. (in Chinese))

[4] 辜晋德,赵建钧,安建峰. 挑流水垫塘掺气比尺效应试验[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(2): 61-65. (GU Jinde, ZHAO Jianjun, AN Jianfeng. Experimental study on scale effect of a aerated jet in a plunge pool[J].

Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(2): 61-65. (in Chinese))

[5] 姚克烨,曲景学. 挑流泄洪雾化机理与分区研究综述[J]. 东北水利水电, 2007, 25(4): 7-9. (YAO Keye, QU Jingxue. Summarization of trajectory flood discharging atomization mechanism and subzone study[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2007, 25(4): 7-9. (in Chinese))

[6] 周辉,陈慧玲. 挑流泄洪雾化降雨的模糊综合评判方法[J]. 水利水运科学研究, 1994(1): 165-170. (ZHOU Hui, CHEN Huiling. Method of fuzzy synthetic evaluation for atomization-rain of jet overflow[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1994(1): 165-170. (in Chinese))

[7] 刘昉,练继建,张晓军,等. 挑流水舌入水喷溅试验研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29(4): 113-117. (LIU Fang, LIAN Jijian, ZHANG Xiaojun, et al. Experimental study of atomization and splashing caused by a ski-jump jet into scour pool[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(4): 113-117. (in Chinese))

[8] 沙海飞,吴时强,陈振文. 泄洪洞整体三维紊流数值模拟[J]. 水科学进展, 2006, 17(4): 507-511. (SHA Haifei, WU Shiqiang, CHEN Zhenwen. 3D numerical simulation for spillway tunnel[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(4): 507-511. (in Chinese))

[9] 张春晋,孙西欢,李永业,等. 基于数值模拟的小浪底龙抬头式泄洪洞防洪安全分析[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(6): 68-74. (ZHANG Chunjin, SUN Xihuan, LI Yongye, et al. Flood control safety analysis of Xiaolangdi Dam Ogee Spillway Tunnel based on numerical simulation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(6): 68-74. (in Chinese))

[10] LAUNDER B, SPALDING B D. The numerical computation of turbulent flows[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1974, 3: 269-289.

[11] 邱毅,吴欧保,杨具瑞,等. 阶梯溢流坝面坡度对一体化消能工水力特性的影响[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(3): 28-35. (QIU Yi, WU Ouyu, YANG Jurui, et al. Impact of stepped overflow dam surface slope on hydraulic characteristics of an integrated energy dissipator[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(3): 28-35. (in Chinese))

[12] 孙双科,刘之平. 泄洪雾化降雨的纵向边界估算[J]. 水利学报, 2003, 34(12): 53-58. (SUN Shuangke, LIU Zhiping. Longitudinal range of atomized flow forming by discharge of spillways and outlet works in hydropower stations[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(12): 53-58. (in Chinese))

[13] 刘宣烈,安刚,姚仲达. 泄洪雾化机理和影响范围的探讨[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 1991(特刊): 30-36. (LIU Xuanlie, AN Gang, YAO Zhongda. The investigation on the mechanism and sphere of influence of atomization by discharge flow[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 1991(Spe): 30-36. (in Chinese))

(收稿日期:2019-06-02 编辑:雷燕)