

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20220932

泄洪放空洞挑流鼻坎水力特性研究

黄真乾¹, 刘 华^{1,2}, 沈焕荣^{1,2}, 易文敏¹, 王 川³

(1. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065; 2. 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065; 3. 四川足木足河流域水电开发有限公司, 四川 马尔康 624099)

摘要: 针对某水电站泄洪放空洞, 提出了两种挑流鼻坎体型, 通过泄洪放空洞单体水工模型对圆弧斜切挑坎和新型上下复合挑坎进行试验研究。对比分析了两种挑坎体型的水舌形态、挑距及下游冲坑深度等参数。试验发现, 新型挑坎将水流分为两股, 形成上下两层平行的水舌, 呈抛物线型前后跌入河道, 两层水舌的宽度控制在河道范围内。挑出的水舌流态稳定, 在空间和平面上得到了充分扩散。相较于圆弧斜切挑坎, 水舌的扩散范围从偏河道左侧回归到河道中间, 一定程度上减小了下游河床的冲坑深度、岸边的涌波高度及冲刷流速。运用 Ansys Fluent 软件对设计的新挑坎进行数值模拟计算, 得到各工况下挑流水舌形态、水舌挑距、湍动能及湍动能耗散率。对比分析数值计算和模型试验结果, 二者流态一致, 水舌的挑距和宽度结果基本吻合, 说明数值模拟可靠, 为挑流消能研究提供了便利和技术支持。

关键词: 泄洪放空洞; 新型上下复合挑坎; 数值模拟; 模型试验; 挑流水舌

中图分类号: TV135.2⁺3

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)02-0121-04

1 工程概况

某水电站地处我国西南, 水库正常蓄水位 2 920.00 m, 校核洪水位 2 922.63 m, 最大坝高 138 m, 相应库容 $1.277 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。泄洪放空洞布置在大坝左岸, 总长 834 m, 主要建筑物包括岸塔式进口、有压隧洞、工作闸门井、无压隧洞、出口挑流段。泄洪放空洞纵剖面见图 1。由于西南山区地势较高, 河谷狭窄, 河床抗冲刷能力较弱, 两岸边坡易失稳, 可能发生崩落现象。因此, 针对地形条件, 选择合适的挑流鼻坎体型, 避免过度冲刷尤为重要。对此已做了大量研究, 如郭红民等^[1]根据工程实际情况拟定了多种挑坎方案, 并对溢洪

道全域及下游河道进行了数值模拟; 马斌等^[2]通过模型试验对 6 种挑坎体型的水舌特性和下游消能防冲进行了对比研究; 郭静瑜等^[3]提出了一种凸坎式连续挑坎进行消能, 改善了水流流态, 减小了对岸冲刷区流速和河床冲刷。鉴此, 针对该工程的特点, 本文对泄洪放空洞挑坎体型提出两种方案, 进行物理模型试验, 比较试验结果, 选择推荐方案做数值模拟验证, 以期达到挑流水舌充分消能、减少下游河道冲刷的目的。

2 试验设计及对比试验

2.1 模型设计及试验工况

泄洪放空洞整体模型按照重力相似准则设计, 几何比尺为 1:30。模型包括上游库区、泄洪放空洞、下游河道和量堰。泄洪放空洞采用透明有机玻璃制作, 下游河道模拟长度为 300 m。动床采用颗粒均匀的碎石块铺设, 铺设至高程 2 796 m(河床底高程)。试验工况根据泄洪放空洞的运行要求, 选择闸门全开时两种挑坎体型的运行工况, 其水位流量关系见表 1。

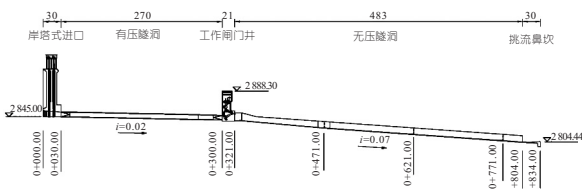


图 1 泄洪放空洞纵剖面图(单位:m)

Fig. 1 Longitudinal profile of the spillway tunnel

收稿日期: 2022-04-06, 修回日期: 2022-05-17

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51709191)

作者简介: 黄真乾(1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水利水电工程, E-mail: 1586289120@qq.com

通讯作者: 刘华(1969-), 女, 博士、副教授, 研究方向为水利水电工程, E-mail: sculiuhua@163.com

表 1 泄洪放空洞闸门全开运行工况

Tab. 1 Water levels to discharges of tunnel at gate fully opened

工况	上游水位/m	下游控制水位/m	流量/(m ³ ·s ⁻¹)
常遇洪水	2 905	2 799.5	981.5
设计洪水	2 920	2 801.6	1 097.5

2.2 挑坎体型设计及对比试验

2.2.1 挑坎体型设计方案

设计方案 1 为圆弧斜切挑坎,因泄洪放空洞布置在河道左岸,斜切挑坎可使水舌挑射进入河道中。设计方案 2 为新型上下复合挑坎,是在方案 1 的基础上,设计上下挑坎分流,改变挑坎参数以实现水舌充分扩散,达到充分消能的效果;其挑坎体型的反弧半径、挑角等参数参考文献[3、4]中挑流鼻坎的体型参数,并结合该泄洪放空洞的模型反复试验确定。两种方案的体型结构见图 2。

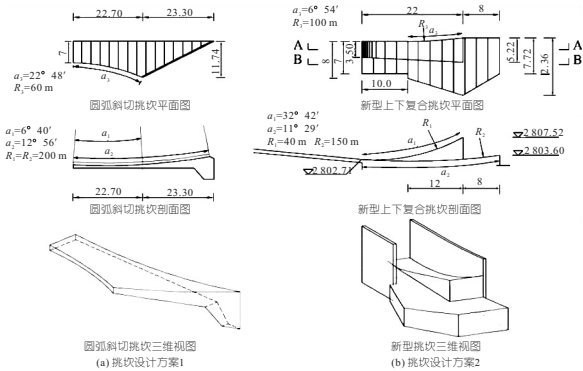


图 2 挑坎布置图(单位:m)

Fig. 2 Layout of the flip bucket

2.2.2 试验结果

(1)方案 1。由图 2 可知,在常遇洪水工况和设计洪水工况下,水舌流态相似,均呈半扇型。水舌的落点^[5]大致呈前后各一条线分布在河道中央附近。其水舌和冲坑参数见表 2。由表 2 可知,设计洪水工况下,水舌最大挑距 52.1 m,宽度 16.8 m。由于水流下泄产生巨大的能量,冲击下游河道,造成河流紊乱,波浪翻滚,使得河岸的涌波高度较大,右岸波浪已爬高至 2 811.3 m,高于岸边公路高程(2 810.0 m);冲坑深度达 11.2 m(河床底高程 2 796 m),对岸边坡脚的冲刷较严重。

表 2 水舌和冲坑参数

Tab. 2 Parameters of the water jets and punch m

工况	最小挑距	最大挑距	水舌宽度	涌波高程	冲坑深度	最深冲坑高程
常遇洪水	27.1	47.5	12.1	2 809.2	10.1	2 785.9
设计洪水	29.5	52.1	16.8	2 811.3	11.2	2 784.8

(2)方案 2。在常遇工况和设计工况下,水流通过挑坎后分为两股,形成上下两层平行的水舌,

呈抛物线形一前一后跌入河道,上层水舌的挑距比下层水舌的更远,两层水舌的宽度控制在河道范围内(表 3)。下游河道的冲坑沿河道横向散开。

表 3 水舌和冲坑参数

Tab. 3 Parameters of the water jets and punch

类别	常遇工况(库水位 2 905 m)		设计水位工况(库水位 2 920 m)	
	上层水舌	下层水舌	上层水舌	下层水舌
最小挑距/m	57.5	26.4	69.5	28.0
最大挑距/m	72.8	35.8	80.4	39.2
水舌宽度/m	24.4	30.0	30.9	33.0
岸边流速/(m·s ⁻¹)	4.55	4.55	4.82	4.82
涌波高程/m	2 806.40	2 806.40	2 808.04	2 808.04
冲坑深度/m	6.2	6.2	8.2	8.2
最深冲坑高程/m	2 789.84	2 789.84	2 787.88	2 787.88

由表 3 可知,当下泄流量增大时,挑流水舌的扩散范围也增大。设计洪水工况下,上层水舌最大挑距 80.4 m,与常遇洪水工况相比增大了 28.3 m;水舌宽度为 30.9 m,比常遇洪水工况扩大 14.1 m。涌波高程较常遇洪水工况降低 3 m 左右,对岸边公路威胁减小;冲坑深度较常遇洪水工况减少 26%。整体的冲坑范围^[6]虽然略微增大,但冲坑深度大幅减小;岸边流速在 4~5 m/s 范围内,对岸边的冲刷相对较小。所以,从整体的试验效果来看,新型上下复合挑坎在有限的下游河道中,将水舌分为上下两股,横向和纵向上得到充分扩散,减少了对下游河床和岸边的冲刷破坏。为此,对新型挑坎进行数值模拟计算,进一步验证试验结果。

3 数值计算模型建立与边界条件

3.1 模型建立与网格划分

数学方程采用连续方程和 Navier-Stokes 方程。数学模型^[7、8]主要针对新型挑坎,包括上游一段无压隧洞(桩号 0+769.00~0+804.00)、新型挑坎(桩号 0+804.00~0+834.00)和下游一定长度的河道(桩号 0+834.00~0+924.00),模型范围见图 3。计算域中无压隧洞段和下游河道采用六面体结构网格,网格的局部尺寸设置为 0.5 m;挑流鼻坎采用四面体网格,网格的局部尺寸设置为 0.5 m。为提高计算精度,综合考虑计算机的运行能力,所以对新型挑坎处的网格进行适当加密,局部尺寸设置为 0.2 m。同时打开曲率函数和 Proximity 函数进行控制,模型总体网格数约 350×10⁴ 个,网格的单元质量、雅各比、倾斜及正交质量等均满足要求,模型计算域的网格划分见图 3。

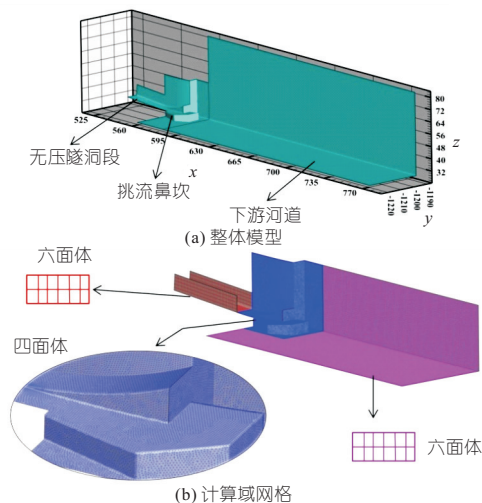


图 3 整体模型及网格

Fig. 3 Overall model and grid diagram

3.2 求解器及边界条件设置

数值模拟采用流体体积分数法 VOF 追踪自由液面,结合 RNG $\kappa-\epsilon$ 双方程紊流模型和标准壁面函数,运用压力基求解,并在时间上进行瞬态计算,压力速度耦合算法采用 PISO。收敛条件按照默认设置。上游入口设置为速度入口,速度初始值根据已知设计流量和试验测量的过水面积计算。下游出口设置为压力出口,自由液面设置为压力进口,壁面设置为无滑移固壁边界,压强环境设置为标准大气压 101.325 kPa。

4 数值计算结果与分析

4.1 挑坎水舌流态

新型挑坎水舌形态见图 4。通过上下挑坎,分成两股水流,形成上下两层平行的扇面水舌一前一后射入河道,两层水舌均呈抛物线状。随着流量加大,水舌挑距和扇面的宽度^[9]均增大。计算的两种工况挑坎出口的水舌流态相似,与模型试验的流态吻合。

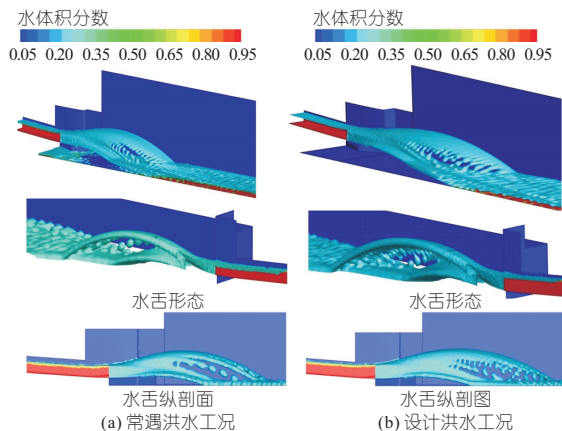


图 4 挑坎水舌流态

Fig. 4 Flow patterns of the water jets in flip bucket

挑坎水舌的水气二相分布见图 5。为更好地展示上下层水舌的最大挑距,分别采用 A、B 两个纵剖面(图 2)。根据计算结果,常遇洪水工况,上层水舌最大挑距 71.2 m,下层水舌最大挑距 34.9 m,上层水舌扇面最大宽度 23.1 m($x=618.5$ m 处),下层水舌扇面最大宽度 28.9 m($x=601.2$ m 处);设计洪水工况,上层水舌最大挑距 79.5 m,下层水舌最大挑距 38.6 m,上层水舌扇面最大宽度 30.5 m($x=618.5$ m 处),下层水舌扇面最大宽度 32.1 m($x=609.6$ m 处)。

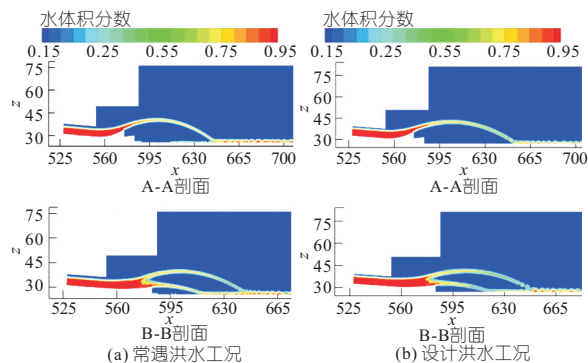


图 5 水体积分数云图

Fig. 5 Cloud chart of water volume fraction

4.2 水舌湍动能

挑坎 A、B 纵剖面的湍动能等值线分布见图 6。不同流量下,湍动能的分布规律大致相同。设计洪水工况挑射水舌对下游河道左侧造成了较大的紊动能,其对河流底部没有太大的影响。

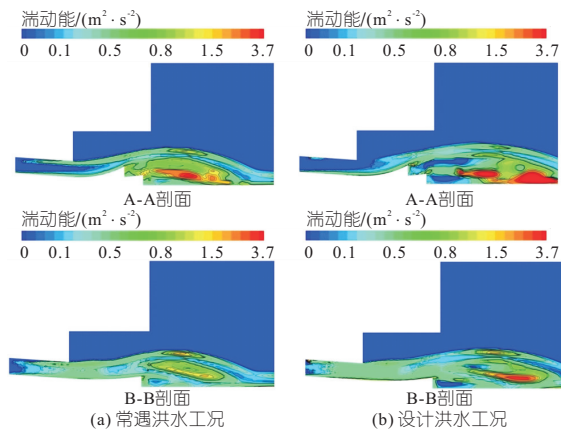


图 6 湍动能等值线分布(单位: $m^2 \cdot s^{-2}$)

Fig. 6 Isoline distribution of turbulent kinetic energy

上层水舌的湍动能最大值发生在水舌最高点,常遇洪水工况湍动能最大值约 $3.95 m^2/s^2$,设计洪水工况湍动能最大值约 $4.17 m^2/s^2$;下层水舌的规律也基本相同,湍动能最大值发生在水舌最高点,常遇洪水工况湍动能最大值约 $2.56 m^2/s^2$,设计洪水工况湍动能最大值约 $3.08 m^2/s^2$ 。两种工况的湍动能均在挑流最高处达到最大,说明在空气中水流的紊动较为剧烈。随着水舌的跌

落,湍动能逐渐减小,直到落入下游河道,又会增加紊动,利于水流进一步消能。

4.3 下游冲刷流速

对于下游河道冲刷,取下游河道底高程 2 796 m 平面的速度云图(图 7)进行分析。由图 7 可知,高流速基本分布在河床中央区域,设计洪水工况沿河道两岸也有分布。两种工况下,岸边流速均在 3~6 m/s 范围内。

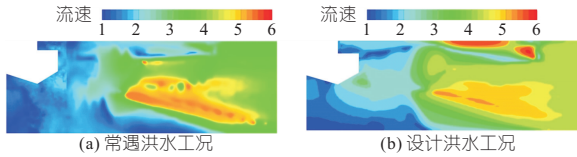


图 7 下游河道流速分布(单位: $m \cdot s^{-1}$)

Fig. 7 The distribution of flow velocity in the downstream channel

4.4 计算结果与试验结果的对比

对比数值模拟计算和模型试验的水舌参数,见表 4。二者数据基本吻合,相对误差小于 4%,表明数值模拟计算结果可靠。

表 4 数值计算与模型试验的水舌参数对比

Tab. 4 Comparison parameters of the water jets by numerical calculating to model testing

参数	工况	数值计算/m		模型试验/m		相对误差/%	
		上水舌	下水舌	上水舌	下水舌	上水舌	下水舌
水舌挑距	1	71.2	34.9	72.8	35.8	2.2	2.6
	2	79.5	38.6	80.4	39.2	1.1	1.5
水舌宽度	1	23.1	28.9	24.4	30.0	2.8	3.8
	2	30.5	32.1	30.9	33.0	1.3	2.7

5 结论

a. 由于挑坎的斜切作用,圆弧斜切挑坎水舌的挑距左侧最大,逐渐收缩到右侧最小。水舌落

点分布靠河床左侧区域,冲坑深度集中在河道左侧,河床左岸存在被冲刷的危险。

b. 新型上下复合挑坎将水流分为上下两股,形成上下两层平行的扇面水舌呈抛物线型前后跌入下游河道,相比于圆弧斜切挑坎,水舌的扩散范围更合理,河道冲坑深度减小,岸边涌波下降,流速在 4~5 m/s 范围内,改善了消能效果。

参考文献:

- [1] 郭红民,向光明,谢洋,等.毛家河水电站溢洪道三维数值模拟[J].水电能源科学,2013,31(3):81-85.
- [2] 马斌,王宇航,缙文娟,等.高重力坝挑坎体型对比及水力特性[J/OL].水利水电科技进展:1-11[2022-05-09].http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1439.TV.20220124.1305.006.html.
- [3] 郭静瑜,周其航,马旭东,等.小挑坎在导流隧洞出口消能中的应用[J].水电能源科学,2018,36(6):81-83.
- [4] 郝晓辉,郭磊,王慧.峽山水库溢洪道挑流鼻坎结构尺寸的确定[J].山东水利,2011(1):50-51.
- [5] 倪健博,田忠,刘文,等.窄河谷多个泄水建筑物水舌落点的控制研究[J].水力发电,2020,46(4):126-129.
- [6] 吴鹏,侍克斌.差动式挑坎冲坑影响范围的估算[J].甘肃水利水电技术,2010,46(5):32-33,61.
- [7] 赵莹,王贞化.组合掺气体型水力特性三维数值模拟[J].水电能源科学,2011,29(3):89-91.
- [8] 崔晓玉,李奇龙,李大贵,等.某闸坝工程跌坎底流消力池形体形优化试验研究[J].水力发电,2020,46(10):127-131.
- [9] 莫海春,陈和春,罗伦,等.斜切挑坎水舌入水宽度随切角变化规律研究[J].水电能源科学,2013,31(11):124-126,254.

Research on Hydraulic Properties of Composite Flip Bucket in Flood Discharge Tunnel

HUANG Zhen-qian¹, LIU Hua^{1,2}, SHEN Huan-rong^{1,2}, YI Wen-min¹, WANG Chuan³

(1. School of Water Conservancy and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. State Key Laboratory of Hydraulics and Development and Protection of Mountain Rivers, Chengdu 610065, China;

3. Sichuan Zumuzu River Basin Hydropower Development Co., Ltd., Maerkang 624099, China)

Abstract: In view of a flood discharge hole of a hydropower station, two types of flip buckets were proposed. The experimental study was carried out with the arc bevel and the new upper and lower composite flip bucket for hydraulic model in flood discharge hole. The parameters of two types of flip buckets such as shape of the water jets, jet trajectory length and the depth of downstream scour hole were compared and analyzed. The test results show that the new type of flip bucket divides the water flow into two parts, forming two upper and lower parallel floors water jets, which fall into the river channel in a parabolic shape, and the width of the two layers of water jets is controlled within the range of the river channel. The trajectory water jets have a stable flow state and are fully diffused in space and plane. Compared with the arc bevel flip bucket, the scour depth of downstream riverbed, the surge height, and the bank flow velocity have all been reduced to a certain extent. Finally, the Ansys Fluent software was used to carry out numerical simulation verification of the designed new flip bucket, and the shape of the tongue, jet trajectory length, turbulent kinetic energy and turbulent kinetic energy dissipation rate under each working condition were obtained. Comparing with the results of numerical calculation and model test, the flow patterns of the two are consistent, and the results of the trajectory length and width of the water jets are basically consistent, which verifies the reliability of the numerical simulation, and provides convenience and technical support for research of ski-jump energy dissipation.

Key words: flood discharge tunnel; new type of upper and lower composite flip bucket; numerical simulation; model test; water jets