

高土石坝大交角挑流消能水垫塘优化布置

杨家修¹,张陆陈²,庞博慧³,吴时强²,薛万云²

(1. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550002;
2. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;
3. 华能澜沧江水电股份有限公司, 云南 昆明 650214)

摘要:通过如美水电站整体模型试验,从水流流态、水垫深度、动水压力、下游河道流速分布等特性,对比研究了增设二道坝和降低底板高程两类优化方案。结果表明,大交角挑流消能水垫塘下游增设二道坝,其效果与二道坝高度、泄量、河谷宽度等密切相关,会恶化出流与下游河道的衔接;降低水垫塘底板高程对下游衔接影响较小,且可有效增加水垫深度,降低水垫塘临底水力指标。

关键词:大交角;挑流消能;水垫塘;脉动压力;水流流态;下游衔接

中图分类号:TV131 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2020)05-0009-04

Optimizing layout of plunge pool for a high earth dam with large angle of ski-jump energy dissipation// YANG Jiaxiu¹, ZHANG Luchen², PANG Bohui³, WU Shiqiang², XUE Wanyun² (1. Guiyang Engineering Corporation Limited, Power China, Guiyang 550002, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Huaneng Langcang River Hydropower Inc., Kunming 650214, China)

Abstract: Through the integral model test of the Rumei Hydropower Station, characteristics of flow pattern, water cushion depth, hydrodynamic pressure and velocity distribution at the downstream channel were studied. Optimization schemes of adding a subsidiary dam and lowering the bottom elevation of the plunge pool were compared. The results show that the effect of adding a subsidiary dam downstream the plunge pool is closely related to the height of the subsidiary dam, the discharge and the width of the valley, and can worsen the joint of the outflow and the downstream channel. Lowering the bottom elevation of the plunge pool has little influence on the downstream connection, and it can effectively increase the depth of the water cushion and reduce the near-bottom hydraulic indexes of the plunge pool.

Key words: large angle; ski-jump energy dissipation; plunge pool; fluctuating pressure; flow pattern; downstream connection

由于土石坝坝身不能溢流,泄水建筑物需设于岸边,与坝身挑流消能不同,岸边泄水建筑物挑流消能时,射流中心线与下游中心线交角较大,称之为“大交角”挑流消能^[1]。大交角挑流消能一般直接将水流泄入河道,重点关注归槽及冲刷问题。池明阳等^[2]采用异型挑坎+多面体消能工方案解决了枕头坝电站江沟泄洪洞水流归槽问题;邱勇等^[3]对黑石罗水库泄洪洞采用了斜鼻坎,出坎水舌在平面上转向的同时沿竖向大幅拉开,增大挑射水流和空气的接触面积,降低了对下游冲刷;查双全等^[4]在曼转河水库工程中采用高低坎、缩短无压段长度、控制闸门开度等措施控制挑射水流落点,减轻了对对岸山体的冲刷;韩成银等^[5]利用分隔墩消除水流集中的现象,减轻河床冲刷;徐敏^[6]认为燕尾坎对泄洪洞轴线与主河槽中心线交角相对不大的情况具有较

好的适应性;谭哲武等^[7]进行了窄缝燕尾新型组合挑坎的试验研究,在改善坎内水流流态、水舌形态、减轻下游河道冲刷方面起到了重要作用。对于高土石坝、大泄量、V型河谷而言,高功率的水流直接泄入河道将产生极大的水力安全风险,因此需要修建水垫塘进行消能。目前水垫塘轴线一般与射流中心线交角较小,其研究重点包括消能工体型^[8-9]、水垫塘消能防冲^[10-11]、水流掺气^[12-13]等,但对于大交角挑流消能水垫塘水力特性研究较少。本文结合西藏如美水电站,从水流流态、动水压力、下游河道衔接等方面,研究大交角挑流消能水垫塘优化布置。

1 工程概况

如美水电站拦河坝最大坝高315 m,是规划中世界最高心墙堆石坝;坝址海拔近3 000 m,泄洪最

大水头 250 m,最大泄洪功率 33 GW。泄洪系统包括三条洞式溢洪道、一条泄洪洞,采用挑流消能,挑射流中心线与水垫塘消能中心线夹角达 43°,平面布置如图 1 所示。洞式溢洪道位于枢纽区右岸,设置 3 个开敞式孔口,孔口尺寸为 15 m×22 m(宽×高)。洞式溢洪道由引渠、控制段、无压隧洞段、消能工段组成,洞式溢洪道洞室轴线间距 45.0 m,溢流堰采用 WES 曲线实用堰,无压隧洞段采用 3% 底坡,末端接渥奇曲线,后接陡槽段、反弧段和挑坎。

泄洪洞轴线与洞式溢洪道平行,与 1 号洞式溢洪道间距 31.2 m,由进水塔、无压隧洞段、出口消能工段等组成,进水塔出口尺寸为 7 m×13 m(宽×高),无压隧洞段采用 3% 底坡。张陆陈等^[1]采用“横扩散、平入射”的方法进行了优化,被设计单位采纳为可行性研究方案的推荐设计方案,泄水建筑物出口段纵剖面设计如图 2 所示。

3 条洞式溢洪道洞出口底高程 2730.91 m,横向扩散均始于圆弧段起点处,扩散角度 3°。1 号、2 号洞式溢洪道出射口水平,位于圆弧段末端,其横向扩散段的长度为 35.73 m。3 号洞式溢洪道圆弧段末端接 16.50 m 的水平段,出射口水平,位于水平段末端,其横向扩散段的长度为 52.23 m。泄洪洞出口底高程 2702.34 m,横向扩散也始于圆弧段起点处,扩

散角度 4.26°,出射口水平,位于圆弧段末端,其横向扩散段的长度为 26.83 m。水垫塘总长 487.8 m,底宽 175 m,设计方案底高程 2590.00 m,下游未设二道坝。

如美水电站两岸河谷深切、坡陡险峻、岩层卸荷碎裂发育,坝址区下游 3 km 处为如美镇、业主营地及国家兵站,为进一步减小泄洪引起结构振动、场地振动、雾化等影响,需要进一步改善水流流态,减小水垫塘动水压力。

2 研究方法

采用整体模型试验方法,以重力相似准则设计,模型比尺为 1:80。为便于观测流态,洞式溢洪道、泄洪洞、水垫塘均采用有机玻璃精加工。试验工况为设计水位(2895.00 m)下,1 号洞式溢洪道单独运行(泄量 3200 m³/s)、3 号洞式溢洪道单独运行(泄量 3200 m³/s)、4 孔均匀局开运行(总泄量 3200 m³/s,4 孔各泄 800 m³/s)和 4 孔闸门全开运行(总泄量 12000 m³/s)。下游水位控制断面位于水垫塘下游 900 m,泄量 3200 m³/s 时下游水位为 2623.68 m,泄量 12000 m³/s 时下游水位为 2638.88 m。

水垫塘优化布置采用增设二道坝和挖深降低底板高程的方法,优化方案布置示意图 1。二道坝

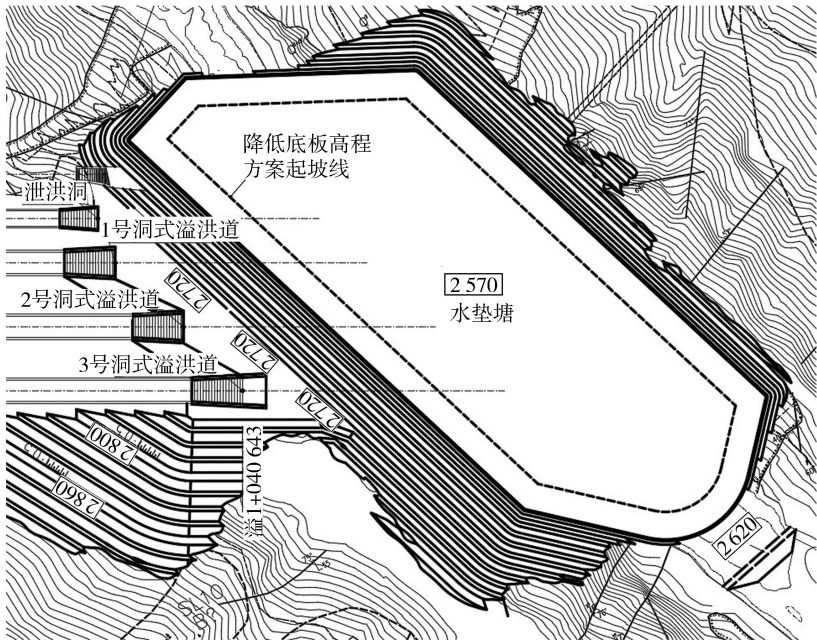


图 1 水垫塘优化布置示意图(单位:m)

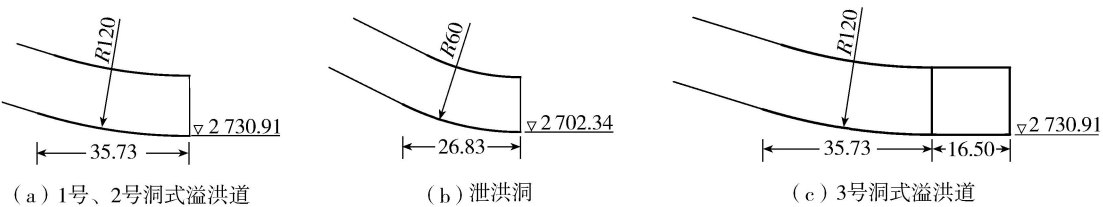


图 2 泄水建筑物出口体型(单位:m)

布置于水垫塘下游 36 m 处,上游面垂直,下游面坡度 1 : 1;二道坝顶宽度 4 m,分别试验 2 620 m 和 2 630 m(挖深方案)2 个坝顶高程方案。二道坝坝顶高程 2 620 m 方案示意如图 1 水垫塘下游虚线所示;挖深方案如图 1 水垫塘内虚线包络范围所示,水垫塘底板高程降低至 2 570 m,较设计方案降低 20 m。

3 试验结果

3.1 水流流态

3 号洞式溢洪道单独运行时各方案水流流态对比如图 3 所示。

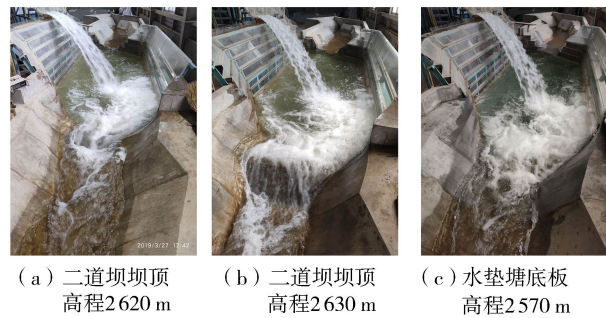


图 3 3 号洞式溢洪道单独运行时的水流流态

挑坎轴线不偏转、水平出射、横向扩散时,水舌入水角较小、横向宽度较大,相较前言所述的非连续坎或异形坎,尽管水流纵向消能空间略小,但水流紊动主要位于水垫塘中部和表面,对底板影响相对较小,且连续坎雾化影响较小。与设计方案水流流态^[1]相比,增设二道坝方案抬高了水垫塘内水面高程,水舌挑距略有减小,纵向消能空间有所增大,但增幅较小,塘内流态变化不明显。变化较大的是出流与下游河道衔接流态:二道坝前水面略有壅高;二道坝顶高程 2 620 m 时,坝后水流产生旋滚;二道坝顶高程 2 630 m 时,二道坝下游存在较明显的二次跌流现象;而降低底板高程方案,水垫塘内流态以及和下游衔接流态没有明显差别。

对于不同的运行工况,增设二道坝方案小泄量工况下水垫塘与下游衔接情况与 3 号洞式溢洪道基本一致;大泄量工况下二道坝前后水位差则不明显,基本能平顺衔接。降低水垫塘底板高程方案,较之设计方案,泄量及运行方式变化对流态影响较小。

3.2 水垫深度

不同方案水垫塘水垫深度如表 1 所示(表中水垫深度采用水垫塘不受水流泄洪消能影响的近坝端底板时均值)。二道坝顶高程 2 620 m 时,3 200 m³/s 泄量级下水垫塘水垫深度较设计方案提高了 2.4 ~ 3.1 m,12 000 m³/s 泄量级下水垫深度仅提高了 1.0 m;二道坝顶高程 2 630 m 时,3 200 m³/s 泄量级下水垫深度较设计方案提高 12.4 ~ 12.7 m,12 000 m³/s 泄

量下水垫深度提高了 5.0 m;底板高程 2 570 m 时,各泄量下水垫深度较设计方案提高了 19.0 ~ 19.6 m。通过增设二道坝的方法增加水垫,其效果与二道坝高度、泄量、河谷宽度等密切相关,二道坝越高、泄量越小、河谷越窄,增加水垫的效果越好,反之则效果不明显,如 12 000 m³/s 泄量级下,河道底部以上二道坝坝高 20.0 m 时,水垫深度也仅提高了 5.0 m。降低底板高程的方法增加水垫效果显著,水垫增量基本等同于底板高程降低量。

表 1 不同方案水垫深度 m

泄洪工况	设计方案	二道坝	二道坝	水垫塘
		坝顶高程 2 620 m	坝顶高程 2 630 m	底板高程 2 570 m
1 号溢洪道单独运行	31.6	34.4	44.0	51.2
3 号溢洪道单独运行	32.1	35.2	44.8	51.6
4 孔局开 3 200 m ³ /s	33.6	36.0	45.6	52.6
4 孔全开联合运行	44.6	45.6	49.6	64.0

3.3 底板动水压力

不同方案下水垫塘底板最大脉动压力均方根值 $\sigma_{\max}$ 及冲击压力值 $\Delta P_{\max}$ 如表 2 所示。二道坝顶高程 2 620 m 时, $\sigma_{\max}$ 较设计方案减小了 $(0.07 \sim 0.81) \times 9.8 \text{ kPa}$, $\Delta P_{\max}$ 相应减小了 $(0.08 \sim 0.92) \times 9.8 \text{ kPa}$;二道坝顶高程 2 630 m 时, $\sigma_{\max}$ 较设计方案减小了 $(0.18 \sim 1.43) \times 9.8 \text{ kPa}$, $\Delta P_{\max}$ 相应减小了 $(0.24 \sim 1.28) \times 9.8 \text{ kPa}$;底板高程 2 570 m 时, $\sigma_{\max}$ 较设计方案减小了 $(0.39 \sim 2.15) \times 9.8 \text{ kPa}$, $\Delta P_{\max}$ 相应减小了 $(0.40 \sim 2.48) \times 9.8 \text{ kPa}$ 。水垫塘水垫越深,底板脉动压力及冲击压力越小。

表 2 水垫塘底板 $\sigma_{\max}$ 和 $\Delta P_{\max}$ 9.8 kPa

泄洪工况	设计方案		二道坝坝顶 高程 2 620 m		二道坝坝顶 高程 2 630 m		水垫塘底板 高程 2 570 m	
	$\sigma_{\max}$	$\Delta P_{\max}$	$\sigma_{\max}$	$\Delta P_{\max}$	$\sigma_{\max}$	$\Delta P_{\max}$	$\sigma_{\max}$	$\Delta P_{\max}$
1 号溢洪道单独运行	4.79	3.04	3.98	2.40	3.46	2.08	2.75	1.04
3 号溢洪道单独运行	4.63	3.68	4.15	2.72	3.20	2.40	2.48	1.20
4 孔局开 3 200 m ³ /s	0.88	0.64	0.81	0.56	0.70	0.40	0.49	0.24
4 孔全开联合运行	3.44	3.20	3.35	2.56	3.12	2.16	1.99	1.12

3.4 下游河道流速分布

不同方案典型工况下游河道沿程平均流速分布如图 4 所示。下游河道流速分布与流态密切相关,设置二道坝后,下游河道流速显著增大,二道坝越高、泄量越小,下游河道流速增幅越大;底板高程降低后,水垫塘消能更加充分,下游河道流速小幅降低。3 200 m³/s 泄量级下,二道坝顶高程 2 620 m 时下游河道最大断面平均流速为 7.9 ~ 9.2 m/s,较设计方案增大 0.8 ~ 2.4 m/s;二道坝顶高程 2 630 m 时

下游河道最大断面平均流速为 17.8 ~ 19.0 m/s,较设计方案增大 10.5 ~ 12.3 m/s;底板高程 2570 m 时下游河道最大断面平均流速为 4.9 ~ 7.9 m/s,较设计方案减小 0.1 ~ 0.6 m/s。12000 m³/s 泄量下,二道坝顶高程 2620 m 时下游河道最大断面平均流速为 10.6 m/s,较设计方案大 0.2 m/s;二道坝顶高程 2630 m 时下游河道最大断面平均流速为 12.5 m/s,较设计方案增大 2.2 m/s;底板高程 2570 m 时,下游河道最大断面平均流速为 10.4 m/s,与设计方案一致。

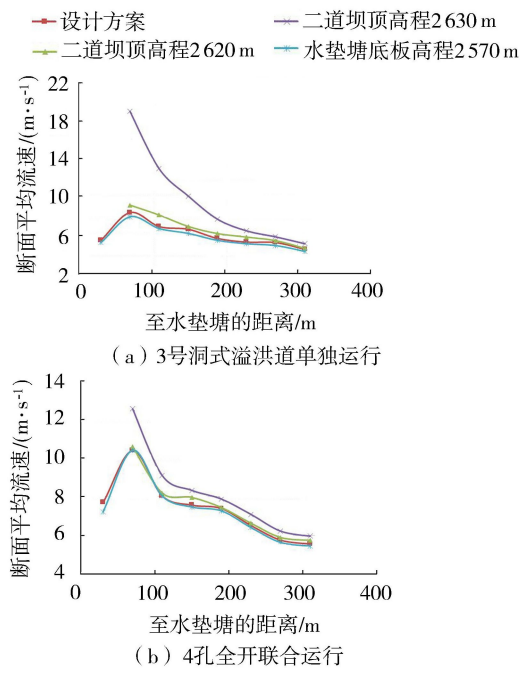


图4 典型工况下游河道沿程流速分布

4 结 论

优化高土石坝大交角挑流消能水垫塘,主要措施是增设二道坝和深挖底板。水垫塘下游增设二道坝,增加了水垫厚度但恶化了出流与下游河道的衔接,二道坝过低,改善水垫塘临底水力指标作用不明显;二道坝过高,小泄量时形成二次跌流,需要二次消能。深挖底板降低水垫塘底板高程,泄量及运行方式变化对流态影响较小,可有效增加水垫深度,降低水垫塘临底水力指标,是大交角挑流消能水垫塘推荐的优化布置方式。

参考文献:

[1] 张陆陈,骆少泽,吴时强. 西藏如美水电站整体水工模型试验研究[R]. 南京:南京水利科学研究院,2018.
[2] 池明阳,雷声军,崔进,等. 枕头坝电站江沟泄洪洞出口消能防冲设计[J]. 人民长江,2012,43(14):36-39. (CHI Mingyang, LEI Shengjun, CUI Jin, et al. Design of energy dissipation and anti-scouring for flood discharge in complicated landform and geology [J]. Yangtze River, 2012,43(14):36-39. (in Chinese))

[3] 邱勇,龚爱民. 斜鼻坎挑流消能在黑石罗水库的应用[J]. 水电能源科学,2016,34(3):101-103. (QIU Yong, GONG Aimin. Application of flip trajectory bucket lip skirjump energy dissipation in Heishiluo Reservoir[J]. Water Resources and Power, 2016,34(3):101-103. (in Chinese))
[4] 查双全,王均星,朱祖国. 狭窄河道垂直交角泄洪洞水舌落点控制试验研究[J]. 水电能源科学,2011,29(3):92-94. (ZHA Shuangquan, WANG Junxing, ZHU Zuguo. Control of fall point of water jet for flood discharge tunnel in narrow channel with right angle [J]. Water Resources and Power, 2011,29(3):92-94. (in Chinese))
[5] 韩成银,刘红军,傅宗甫,等. 除险加固水闸的消能防冲措施[J]. 水利水电科技进展,2017,37(4):42-46. (HAN Chengyin, LIU Hongjun, FU Zongfu, et al. Energy dissipation and scour prevention measures of reinforced sluices[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017,37(4):42-46. (in Chinese))
[6] 徐敏. 泄洪洞挑坎对比研究[J]. 四川水力发电,2017,36(3):120-123. (XU Min. A comparative study of spillway tunnel selection [J]. Sichuan Water Power, 2017,36(3):120-123. (in Chinese))
[7] 谭哲武,王均星. 泄洪洞窄缝燕尾组合挑坎试验研究[J]. 长江科学院院报,2015,32(4):40-44. (TAN Zhewu, WANG Junxing. Experimental research on flip bucket combining narrow slit and swallow tail in flood release tunnel [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015,32(4):40-44. (in Chinese))
[8] 穆亮. 差动坎体型对挑射水舌及水垫塘流场的影响研究[D]. 天津:天津大学,2012.
[9] LUCAS J, HAGER W H, BOES R M. Deflector effect on chute flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 139(4):444-449.
[10] 王英奎,廖仁强,许唯临. 高拱坝水垫塘消能的研究进展[J]. 水利科技与经济,2013,19(7):1-5. (WANG Yingkui, LIAO Renqiang, XU Weiling. Research progress on energy dissipation of plunge pool in high arch dam [J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2013,19(7):1-5. (in Chinese))
[11] HELLER V, HAGER W H, MINOR H. Ski jump hydraulics [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 131(5):347-355.
[12] 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))
[13] 马文韬,杨红宣,张功育,等. 水垫塘冲击区掺气浓度对脉动压强作用的试验研究[J]. 水利水电技术,2018,49(4):70-75. (MA Wentao, YANG Hongxuan, ZHANG Gongyu, et al. Experimental study on effect of aeration concentration on fluctuating pressure in impacted region of plunge pool [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018,49(4):70-75. (in Chinese))

(收稿日期:2019-09-02 编辑:郑孝宇)