

乐昌峡水利枢纽工程放水底孔体型优化研究

黄智敏，何小惠，钟勇明，陈卓英，付波

(广东省水利水电科学研究院；广东省水动力学应用研究重点实验室，广州，510610)

摘要：乐昌峡水利枢纽工程坝址处河床狭窄，枢纽工程放水底孔布置在溢流坝左侧的近岸坡处，其挑射水舌易对下游河道左岸坡产生冲刷。本文通过水力模型试验，对放水底孔挑流鼻坎进行修改和优化，推荐其采用圆弧曲线边墙、等半径、变挑角的斜向高低挑坎，妥善解决了其挑射水舌对下游河道左岸坡冲刷问题。

关键词：乐昌峡水利枢纽工程；放水底孔；挑流鼻坎；体型；消能防冲；模型试验；优化

1 工程概况

乐昌峡水利枢纽工程位于我省乐昌市境内的北江一级支流武水乐昌峡河段内，是以防洪为主，结合发电、灌溉、供水、改善航运等综合利用的大型水利枢纽工程(见图 1)。

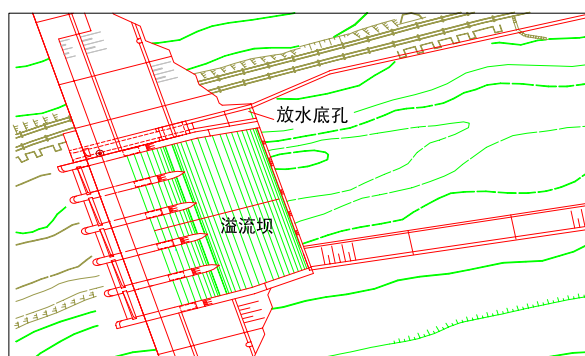


图1 乐昌峡水利枢纽溢流坝和放水底孔布置图

枢纽工程放水底孔布置在溢流坝段左侧的非溢流坝段内，其作用主要是在溢流坝溢流堰顶(高程 134.8m)以下水位泄洪放空水库和排沙，在特殊运行工况下，放水底孔与溢流坝共同承担泄洪。

设计方案进口底板高程为 110.0m，进口上游面为直立坝面，进口断面顶端以半径 $R=2\text{m}$ 、圆心角为 77.47° 的圆弧与 $1:4.5$ 坡度线连接，收缩至闸门槽断面处高度 6.4m，放水底孔洞身段断面尺寸为 $3.2\text{m} \times 6.4\text{m}$ (宽 \times 高)，底孔出口断面尺寸为 $3.2\text{m} \times 5.5\text{m}$ (宽 \times 高)，在出口处设置一扇弧形工作门；设计方案的放水底孔下游采用挑流消能，底孔出口后接长 20.768m 的明渠段，明渠段桩号 0+0 断面处由宽 3.2m 渐扩为 4.5m (桩号 0+0，扩散段长 13.77m)，扩散段末端为半径 $R=20\text{m}$ 、挑射角为 25.842° 的挑流鼻坎，挑流鼻坎出口断面高程为 112.0m(见图 2)。

为了测试和优化放水底孔的挑流鼻坎运行水力特性和消能特性，结合乐昌峡水利枢纽工程水工模型试验研究^[1]，开展了几何比尺 $L_r=60$ 和 $L_r=25$ 的两种正态水力模型的挑流鼻坎试验。本文介绍乐昌峡水利枢纽工程放水底孔挑流鼻坎布置和体型优化的试验研究成果。

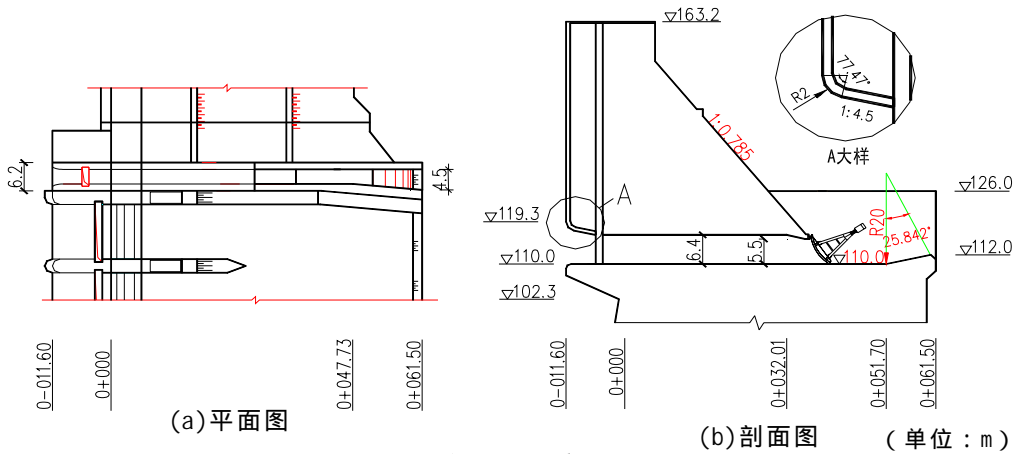


图2 放水底孔设计方案体型图

2 挑流鼻坎设计方案消能试验

(1) 在各级库水位泄流运行时，放水底孔上游进口的入流较平顺，当库水位 $Z < 130.0\text{m}$ 运行时，底孔上游进口水面出现顺时针旋转的游动性凹陷小漩涡，漩涡不会贯通，且模型试验的放水底孔进口水流雷诺数 $Re > 5 \times 10^5$ ($Re = VD/\nu$, V —进口流速, D —进口高度, ν —运动粘滞系数), 因此, 参考以往的试验研究成果^[3-5], 模型试验的水面漩涡状况与原型工程情况有良好的相似性, 放水底孔进口水面漩涡对工程的正常运行影响较小。

(2) 放水底孔进口段和矩形管道洞身段均无负压值出现，其体型和布置是合理的。

(3) 在各级库水位泄流运行时，放水底孔挑流鼻坎的挑射水舌下游入水区域主要落在下游河道左岸坡区域（见图3和照片1），对左岸坡会产生较明显的冲刷和淘刷，危及工程的安全运行。

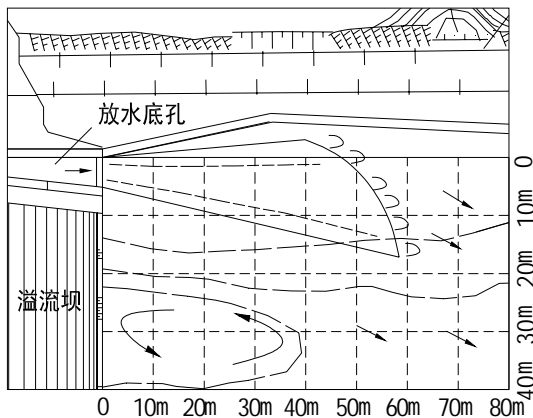


图3 设计方案放水底孔挑射水舌位置示意图



照片1 设计方案放水底孔挑射水舌

3 挑流鼻坎修改思路

为了避免放水底孔挑射水舌对下游河道左岸坡的冲刷，其挑流鼻坎体型修改的思路为：

(1) 将放水底孔挑流鼻坎直两侧直线和折线边墙修改为扭向下游河道中心区域的圆弧曲线边墙。圆弧曲线边墙选择的原则为，在水库正常蓄水位 ($Z=154.5\text{m}$) 运行条件下，放水底孔挑射水舌的下游入水区域不超过溢流坝中心线，避免挑射水舌入水区域下游水流对河道右岸坡的冲刷。

(2) 尽量增大挑坎出口断面宽度，减小挑坎出口断面的单宽流量。

(3) 调整挑坎出口断面的挑射角，尽量使挑坎挑射水舌的下游入水区域分散拉开，减轻对下

游河床的冲刷。

4 挑流鼻坎优化方案及试验

4.1 方案布置

经计算分析和多方案的修改比选^[1-2]，得出放水底孔出口挑流鼻坎段体型的优化方案为(见图4)：

(1) 以放水底孔下游桩号 0+052.28 断面为挑坎反弧段的起始断面，挑坎反弧段曲率半径 $R=25\text{m}$ ，挑坎反弧段左侧以圆心角 $\theta=35^\circ$ 往下游延伸至 A 点。左边墙平面位置由桩号 0+047.73 以半径 $R=45\text{m}$ 往下游延伸，形成左侧圆弧边墙。右边墙平面位置由桩号 0+047.73 以半径 $R=40\text{m}$ 往下游延伸，交汇于反弧段桩号 0+060 断面 C 点，该断面右边墙的挑射角 $\theta=18^\circ$ 。

(2) 右边墙出口 C 点(桩号 0+060) 以斜直线连接反弧段的左边墙线 A 点，左边墙圆弧曲线交汇于 AC 连线 B 点，为左侧圆弧曲线边墙与反弧段挑坎出口断面的交汇点，反弧段左边墙挑射角为 25.7° 。

因此，推荐方案的放水底孔下游出口挑流鼻坎段为等半径($R=25\text{m}$)、变挑角(左边墙挑角 25.7° 、右边墙挑角 18°)的扭向下游河道中心区域的圆弧曲线边墙的的斜向高、低挑坎。

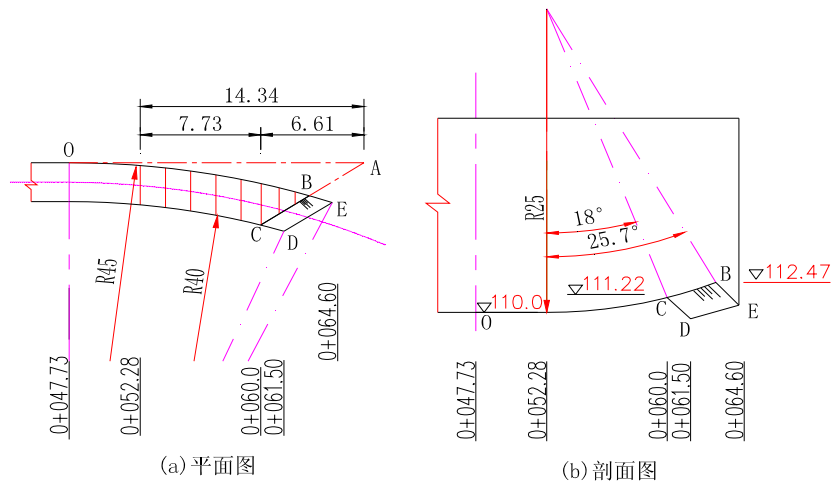


图4 放水底孔挑流鼻坎推荐方案体型图

单位：m

4.2 挑流鼻坎段流态和挑射水舌

优化方案放水底孔挑流鼻坎的挑射水舌试验成果见表 1、图 5 和照片 2。试验表明，在库水位 125.0m ~ 144.5m(汛限水位)泄流运行时，挑射水舌下游入水断面左边缘距离放水底孔原左边墙线(内边墙)约 12m ~ 18m，明显减轻了对下游河道左岸坡的冲刷。

表 1 放水底孔泄流挑射水舌参数

库水位 (m)	泄流量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$	水舌最大 挑射高程 (m)	水舌挑距 (m)	水舌下游入水断面左边缘到底孔 原左边墙线距离 (m)	备注
144.5	346	120.8	62	18	汛限水位
138.5	308	118.3	57	16.5	极限死水位
125.0	188	117.0	32	12	

说明：水舌挑距是以水舌外缘与下游 95.0m 高程交汇处计算。

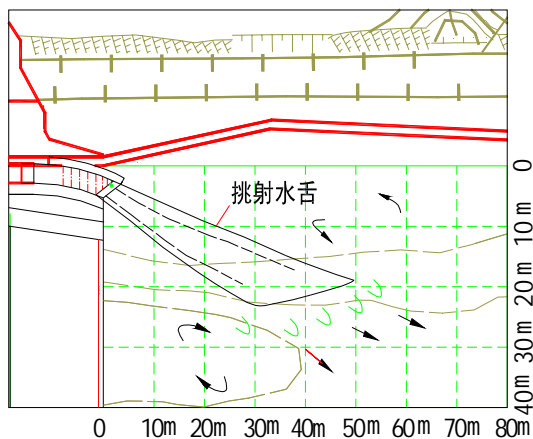


图5 推荐方案挑射水舌位置示意图



照片 2 推荐方案放水底孔挑射水舌

4.3 下游河道冲刷特性

4.3.1 下游河道地质条件模拟

在几何比尺 $L_r=60$ 的枢纽工程水工整体模型进行放水底孔下游河床冲刷试验。根据工程设计资料，坝址处河床面高程约 92.0m~93.0m，表层的砂卵砾石层厚约 6m~7m；其底部为弱风化基岩，厚约 3m~4m；往下为微风化基岩。

采用伊兹巴什公式 $D=(V/k)^2$ (式中， D —散拉体粒径，m； V —河床抗冲流速，m/s； K —系数，一般取 5~7，本文选用 $K=6$) 计算和选择放水底孔下游河床冲刷模拟材料：1) 河床面至约 85.0m 高程的砂卵砾石层抗冲流速 $V=1.5\text{m/s} \sim 2\text{m/s}$ ，采用中值粒径 $D=0.2\text{cm}$ 的小碎石模拟；2) 85.0m~81.0m 高程的弱风化基岩抗冲流速 $V=7\text{m/s} \sim 8\text{m/s}$ ，采用粒径 $D_m=2.0\text{cm} \sim 3.0\text{cm}$ 的花岗岩碎石模拟；81.0m 高程以下的微风化基岩抗冲流速 $V=10\text{m/s} \sim 12\text{m/s}$ ，采用粒径 $D_m=4.5\text{cm} \sim 6.5\text{cm}$ 的花岗岩碎石模拟。

4.3.2 放水底孔单独运行的下游河道冲刷特性

(1)放水底孔挑射水舌撞击下游河床后，挑射水舌入水区域水流掺混剧烈，对下游河床产生冲刷。下游河床冲刷坑形成之后，冲刷坑区域形成有一定水深的水垫区，相应减缓了挑射水舌的撞击，冲刷坑下游的水流较平顺与下游河道水流衔接。

(2)在库水位 $Z=125.0\text{m} \sim 144.5\text{m}$ 、闸门全开运行时，下游河床冲刷坑底高程约为 84.0m~82.0m，冲刷坑上游坡度 $i=1 \sim 3.67 \sim 1 \sim 6.38$ ，冲刷坑对下游河道左岸坡稳定的影响较小，下游河床冲刷状况可以满足工程安全运行的要求。

(3)在库水位 $Z < 125.0\text{m}$ 、闸门全开泄流运行时，放水底孔挑射水舌挑距较小或无法正常挑射，下游河道冲刷坑较靠近溢流坝和放水底孔的坝基，会影响工程的安全运行。因此，当库水位 $Z < 125.0\text{m}$ 运行时，应调节控制放水底孔的闸门开度，以避免水舌落在坝趾的近区、危及工程的安全运行。

表 2 放水底孔下游河床冲刷特性

库水位 (m)	泄流量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$	下游水位 (m)	冲刷坑底高 程(m)	冲刷坑 深度(m)	冲刷坑距离 $L(\text{m})$	i
144.5	346	99.2	82.0	8	51	1 6.38
138.5	308	99.1	83.0	7	48	1 6.85
125.0	188	98.5	84.0	6	22	1 3.67

说明：(1)冲刷坑深度 T 是以高程 90.0m 到冲刷坑底高程计算；(2)冲刷坑上游坡度 $i=T/L$ 。

4.3.3 放水底孔与溢流坝联合运行的下游河道冲刷特性

放水底孔与溢流坝联合运行时，其下游河道水位相应大于放水底孔单独运行的下游水位，放水底孔挑射水舌对下游河床冲刷程度相应减轻；随着溢流坝泄流量的增大，放水底孔泄流量所占的泄洪总流量的比例越来越小，且下游河道水位逐渐上升，因此，放水底孔泄流对下游河道冲刷的影响逐渐减小，放水底孔与溢流坝联合运行是安全的。

4.4 出口曲线段边墙动水压强特性

试验表明，放水底孔挑流鼻坎段两侧圆弧曲线段边墙的动水压强均为正压，右侧圆弧边墙不会出现脱壁水流、形成负压的现象。因此，放水底孔反弧段的左、右侧圆弧边墙布置和体型是合理的。

5 结语

本文结合乐昌峡水利枢纽工程水力模型试验，对枢纽工程放水底孔挑流鼻坎体型进行修改和优化，推荐其采用圆弧曲线边墙、等半径、变挑角的斜向高低挑坎，妥善解决了放水底孔下游挑流消能防冲的问题，推荐方案得到了工程设计和建设的应用。

参考文献：

- [1] 广东省水利水电科学研究院，乐昌峡水利枢纽工程水工模型试验研究报告，2009年3月。
- [2] 中华人民共和国行业标准，《溢洪道设计规范》(SL253-2000)，中国水利水电出版社，北京：2000。
- [3] Geore E Hecker, Model-Prototype Comparison of Free Surface Vortices, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 107, No. Hy10, Oct., 1981.
- [4] 福原华一. 抽水蓄能电站进水口、泄水口的水力设计, 庞培译. 上海水利水电技术, 1988年第1期.
- [5] 黄智敏, 张从联等. 抽水蓄能电站侧式进、出水口的体型研究. 水电站设计, 2007年第2期.