

乐昌峡水电站溢流坝消能方案试验研究

黄智敏，钟勇明，付波，何小惠，陈卓英，

(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：乐昌峡水电站溢流坝具有泄流落差和单宽流量较大、下游河道狭窄等特点，溢流坝的消能问题较突出。通过水工模型试验研究，对溢流坝挑流消能工布置和体型进行比较，推荐溢流坝采用反弧段一体的扩散式梯形差动式挑流鼻坎的消能工方案，妥善解决了溢流坝消能问题。

关键词：溢流坝；挑流鼻坎；消能防冲；模型试验；乐昌峡水电站

1 概述

1.1 工程概况

乐昌峡水利枢纽工程是以防洪为主，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。枢纽工程主要由挡水大坝、溢流坝、放水底孔、电站等建筑物组成（见图1）。枢纽工程拦河坝最大坝高约83m，水库正常蓄水位为154.5m，汛限水位为144.5m，死水位为141.5m，水库总库容为3.439亿 m^3 ，防洪库容为2.113亿 m^3 。电站装机容量136MW。

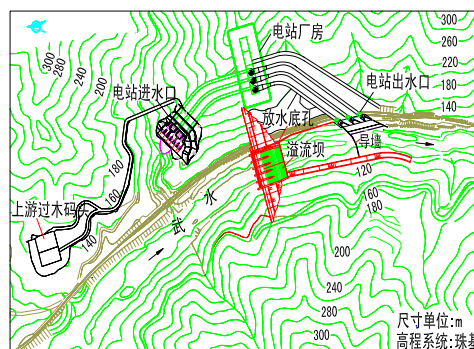


图1 乐昌峡水利枢纽工程平面布置图

工程主要特点为：1) 拦河坝最大坝高约83m，溢流坝泄流最大落差和单宽流流量分别达约50m和 $142m^3/(s \cdot m)$ ，溢流坝属高水头、大流量泄水建筑物；2) 坝址下游河道狭窄，溢流坝泄流挑射水舌易对下游河道两岸造成冲刷破坏；3) 电站尾水出水口上边缘距离溢流坝出口断面约160m，溢流坝挑射水舌易对电站出水口区域产生冲刷影响。

1.2 运行水文条件

乐昌峡水利枢纽工程为等大(2)型工程，溢流坝设计洪水标准为100年一遇($P=1\%$)，校核洪水为1000年一遇($P=0.1\%$)。不同频率的特征水位及流量见表1。

表1 溢流坝特征水位和流量调洪计算成果表

洪水频率 $P(\%)$	坝址洪峰流量 (m^3/s)	溢流坝泄流量 (m^3/s)	库水位 (m)	下游水位 (m)
0.1	8470	8470	163.0	116.0
0.5	6860			113.28
1	6040	3900	162.2	107.9

1.3 坝址地形和地质条件

坝址附近两岸地形对称，河谷呈“V”形，河道呈微弯、断面狭窄，河床面高程约90.0m~92.0m。坝址坝轴线两岸高程120.0m以下均为岩质边坡，坡度约 $60^\circ \sim 70^\circ$ ，边坡稳定。坝址处左、右岸和河床的弱风化岩体埋深较浅，河床弱风化带上界面埋深约为1.6m~8m。弱风化岩石厚约3m~5m，往下为微风化基岩。河床基岩较新鲜坚硬、岩体完整性较好。

1.4 泄洪消能方案

溢流坝布置在坝址河道中间,分5孔,每孔净宽12m,中墩、边墩厚3m,溢流坝段总长度为78m。溢流坝堰顶采用双胸墙与弧形闸门共同挡水的型式,胸墙底缘为圆弧曲线,溢流堰顶高程为134.8m,单孔孔口尺寸12m(宽)×10.7m(高),水工模型试验优化后的堰顶下游堰面(WES)曲线方程为 $y=0.03x^{1.85}$,堰面曲线下游接陡坡段、反弧段和挑流鼻坎^[1]。

由于溢流坝下游河床较狭窄和电站出水口较靠近溢流坝下游出口断面,为了避免或减轻溢流坝挑射水舌对下游河道两岸坡的冲刷,溢流坝左、右两侧边墙经优化后采用分两段收缩的布置形式,下游出口断面宽度为60m^[1];同时,在满足溢流坝安全的前提下,尽量采用小挑角的挑流鼻坎,以减小溢流坝挑射水舌的挑距,使溢流坝下游河床冲刷坑往坝址前移,减轻对电站尾水出水口的冲淤影响。

溢流坝挑流消能工进行了各闸孔分隔独立挑坎(方案1)和各闸孔反弧段一体挑坎(方案2)两种布置方案的试验比较(见图2和3),本文介绍两种消能方案的试验研究成果。

1.5 水工模型试验方法简介

溢流坝水工模型按佛劳德准则设计为正态,模型几何比尺 $L_r=60$ 。

根据工程设计资料,溢流坝下游河床弱风化基岩的抗冲流速 $V=(7\sim 8)\text{m/s}$ 、微风化基岩的抗冲流速 $V=(10\sim 12)\text{m/s}$ 。由伊兹巴什公式 $D=V^2/K^2$ (式中: D --散粒体粒径,m; V --基岩抗冲流速,m/s; K --系数、本文取 $K=6$)可计算出弱风化基岩的模型冲料散粒体粒径 $D_m=2.3\text{cm}\sim 3.0\text{cm}$,微风化基岩的模型冲料散粒体粒径 $D_m=4.7\text{cm}\sim 6.7\text{cm}$ 。动床模型模拟范围为:溢流坝下游出口断面(桩号0+061.5)至电站出水口区域河床(桩号0+300)。

2 溢流坝消能方案1试验

2.1 方案布置

溢流坝方案1的挑流鼻坎布置和体型见图2,各闸孔下游出口段布置为前、后和高、低错开布置的大差动挑坎形式。根据溢洪道挑射水舌挑距计算公式^[2],计算出溢流坝高坎和低坎挑射水舌的挑距,初步选择溢流坝各闸孔高坎和低坎的挑坎布置和体型(见图2):

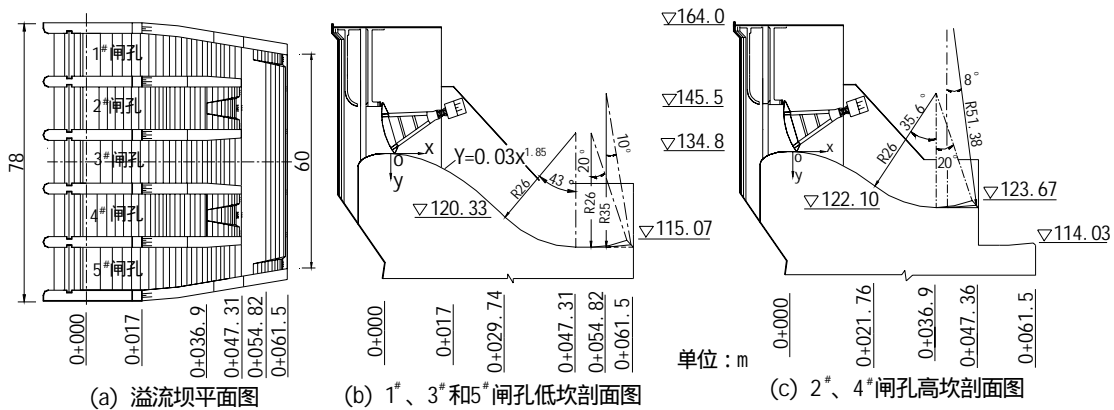


图2 溢流坝方案1布置图

(1)溢流坝1#、3#、5#闸孔挑坎为低坎布置,溢流坝下游出口段挑坎连成一整体为低坎,出口段低坎起始断面桩号为0+054.82,曲率半径 $R=35\text{m}$,挑角为 10° ,出口断面宽度60m,高程为114.03m;出口段左、右(1#、5#闸孔)两侧边墙设置3m宽的挑流高坎,高坎起始断面桩号为0+051.04,曲率半径 $R=26\text{m}$,挑角 20° ,出口断面高程115.07m。

(2)溢流坝2#和4#闸孔挑坎为高坎布置,下游反弧段起始断面桩号为0+021.76(高程126.96m),曲率半径 $R=26\text{m}$,圆心角为 35.6° ;反弧段下游段设差动式挑流鼻坎,高坎曲率半径 $R=26\text{m}$,

挑角 20° ,出口断面高程为 123.67m;低坎曲率半径 $R=51.38\text{m}$,挑角为 8° ,高程为 122.6m;2#和4#闸孔出口断面桩号为 0+047.36。

2.2 试验成果

(1)在各级洪水流量泄流运行时,低坎段的1#和5#闸孔靠坝两侧边墙的高坎水流挑距最远,低坎段的低坎(挑角为 10°)挑射水舌挑距最近;2#和4#闸孔高坎挑射水舌挑距比1#和5#闸孔高坎水舌挑距相应缩短约 10m~15m。因此,各闸孔高、低挑坎挑射水舌沿竖向和纵向拉开扩散、碰撞和消能,增大了挑射水舌下游入水纵向长度和范围,减轻下游河床冲刷(见表1)。

表1 溢流坝方案1的高、低坎挑射水舌挑距

洪水频率 P(%)	库水位 Z(m)	泄流量 Q (m ³ /s)	挑射水舌挑距 (m)		
			2#、4#闸孔	1#、5#闸孔高坎	低坎 (10°)
1	162.2	3900	65	77	40
	162.2	6860	71	84	48
0.1	163.0	8470	76	91	53

注:水舌挑距是以水舌外缘与下游高程 95.0m 交汇处量测。

(2)各闸孔挑坎段均无负压值出现,挑坎段的布置和体型是合理的。

(3)在各级洪水流量泄流运行时,溢流坝下游河床冲刷坑最深处高程约 75.0m,冲刷坑上游坡度 $i < 1:4$,坝基是安全的,同时,也明显减轻了对电站尾水出水口区域河床的冲淤影响。

(4)溢流坝各闸孔泄流相互不干扰,各闸孔闸门调度运行较方便。

表2 溢流坝方案1的下游河道冲刷特性

洪水频率 P (%)	泄流量 Q(m ³ /s)	闸门开度 e(m)	冲刷坑底高程(m)	T(m)	L(m)	i=T/L
1	3900	4.15	81.0	9	61	1 6.78
	6860	7.3	77.0	13	68	1 5.23
0.1	8470	9.1	75.0	15	72	1 4.80

注:(1)T—冲刷坑深度,以河床面高程(90.0m)到冲刷坑底高程计算;(2)L—冲刷坑底至溢流坝出口断面的距离。

3 溢流坝消能方案2试验

3.1 方案布置

方案2的溢流坝各闸孔中墩采用短闸墩布置,各中墩末端设置宽尾墩,墩末端桩号为 0+028。溢流坝下游设置扩散式梯形差动式挑流鼻坎,其布置和体型为(见图3~4):1)高坎反弧段曲率半径 $R=35\text{m}$,高坎起始断面宽度为 3.5m(桩号为 0+047.42),出口断面宽度为 6m(桩号 0+059.39)、挑角为 20° 、高程为 115.61m,高坎两侧面坡度为 1:1;2)低坎为水平挑坎,高程为 113.5m,挑角为 0° 。

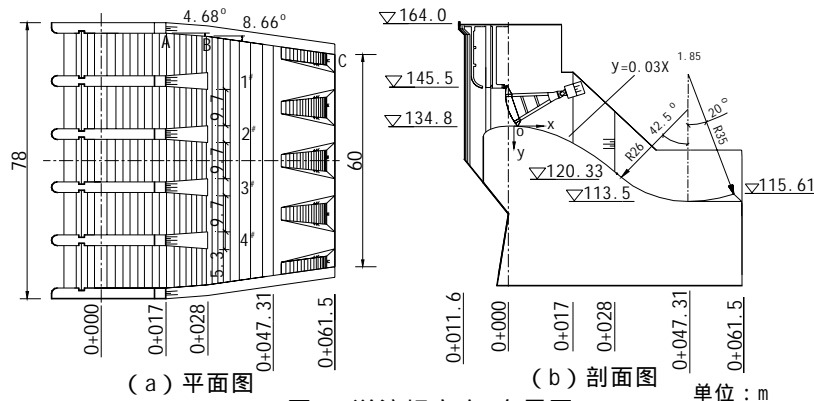


图3 溢流坝方案2布置图

单位:m

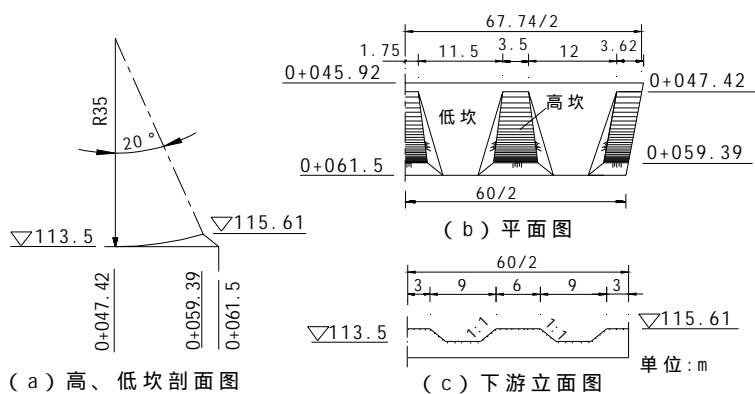


图4 扩散式梯形差动式挑流鼻坎布置图

3.2 试验成果

(1) 宽尾墩和差动式挑流鼻坎的联合运用，宽尾墩后和差动式挑坎形成多层次的挑射水舌，增大挑射水舌在空中的碰撞、掺气和消能，明显减轻了水舌对下游河床的冲刷。

(2) 差动式高坎平面布置前窄、后宽，使低坎水流形成窄缝式收缩状水流，且高坎两侧坡面坡度放缓至 1:1，使高坎侧坡面保持为正压状态，明显改善了高坎的抗空化性能。

(3) 扩散式梯形差动式挑流鼻坎高、低坎挑角分别为 20° 和 0° ，挑射水舌的挑距明显缩短(见表 3)，坝下游河床冲刷坑往坝址前移，且差动式挑坎大大减轻了下游河床的冲刷坑深度，因此，在各级洪水流量泄流运行条件下，溢流坝下游河道冲刷坑上游坡度 $i < 1:4$ (见表 3)，满足工程设计规范的要求。由于挑射水舌挑距减短和冲刷坑深度减小，明显减轻了对下游电站出水口出水渠区域河床的冲刷，电站出水口出水渠运行是安全的。

表 3 溢流坝方案 2 的挑射水舌和下游河道冲刷特性

洪水频率 P (%)	泄流量 Q(m ³ /s)	水舌挑距(m)	冲刷坑底 高程(m)	T(m)	L(m)	i=T/L
1	3900	78	81.5	8.5	69	1:8.12
	6860	86	77.0	13	78	1:6.0
0.1	8470	91	75.0	15	82	1:5.47

注：(1)水舌挑距是以水舌外缘与下游高程 95.0m 交汇处量测；(2)T—冲刷坑深度，以河床面高程(90.0m)到冲刷坑底高程计算；(3)L—冲刷坑底至溢流坝出口断面的距离。

4 方案比较和分析

溢流坝挑流鼻坎两种布置方案具有增大挑射水舌的竖向和纵向拉开扩散、碰撞、掺气和消能，减轻下游河床冲刷等优点，溢流坝运行是安全的，且对电站尾水出水口区域河床冲淤影响较小。两种布置方案的主要差异为：

(1) 方案 1 各闸孔泄流分隔，相互干扰较少，溢流坝各闸孔闸门调度运行较方便。

(2) 由于方案 1 的 2[#]和 4[#]闸孔反弧段往坝面堰面上移，2[#]和 4[#]闸孔的溢流堰面相应缩短，在较大洪水流量泄流运行时，溢流堰的泄流能力会略降低；方案 1 的 2[#]和 4[#]闸孔挑坎形成高坎之后，相应会增加工程量和投资。

(3) 方案 2 的各闸孔在闸墩后反弧段连成一体，模型试验对方案 2 各闸孔闸门非正常调度运行进行了分析。试验表明，在正常蓄水位 154.5m、闸门开度 $e = 3m$ 运行时，关闭闸孔下游差动式高坎受相邻开启闸孔反弧段扩散水流的影响，反弧段扩散水流斜向漫越关闭闸孔的下游差动式高坎坎顶、往下游斜向挑射，扩散水流对差动式鼻坎的冲击影响较小(见图 5)，关闭闸孔高坎的背水斜坡面部分区域形成小负压区，其负压强绝对值 $|p| < 15kPa$ ，因此，关闭闸孔下游差动式高

坎背水坡面产生空蚀破坏的可能性较小。

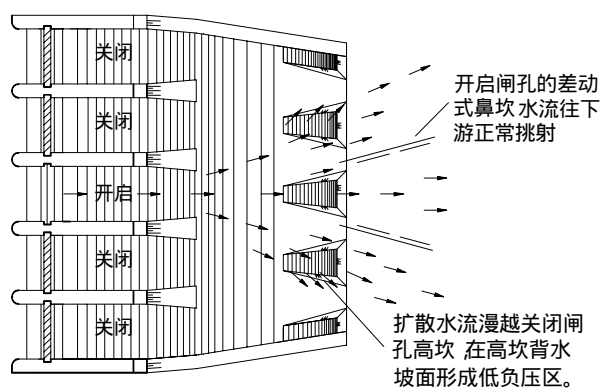


图5 闸孔不同步开启泄流流态示意图

(4)方案2 闸孔闸门的非正常调度运行会给溢流坝差动式挑流鼻坎和下游河道岸坡正常运行带来一定程度的不良影响,由于方案2 各闸孔出现非正常运行的概率较小,且非正常运行期的溢流坝主体工程不会造成重大损毁事故,因此,方案2 具有工程布置简便、投资较省等优点,工程运行中应重视和注意溢流坝闸孔闸门的检查和调度运行管理,除非出现人为难于控制的非正常因素,溢流坝各闸孔闸门应遵循同步、均匀开启的运行方式,以确保工程的安全运行。

因此,综合考虑溢流坝泄流水力特性、工程布置、运行调度、工程施工和投资等因素,选择溢流坝方案2 为工程布置的推荐方案。

5 结语

本文对乐昌峡水利枢纽工程溢流坝挑流鼻坎方案进行试验比较,综合考虑溢流坝泄流水力特性、工程布置、运行调度、工程施工和投资等因素,推荐溢流坝采用方案2 的反弧段一体的扩散式梯形差动式挑流鼻坎。本文研究成果可供类似工程设计和运行参考。

参考文献:

- [1] 黄智敏,何小惠,钟勇明等.乐昌峡水利枢纽工程水工模型试验研究报告[R].广州:广东省水利水电科学研究院,2009年.
- [2] 中华人民共和国水利部发布.《混凝土重力坝设计规范》(SL319--2005)[S].北京:中国水利水电出版社,2005年.