

乐昌峡水电站尾水出水口水力模型试验研究

黄智敏, 钟勇明, 陈卓英, 何小惠, 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河道狭窄, 电站尾水出水口靠近溢流坝, 溢流坝泄洪对电站尾水出水口出水渠安全运行影响较大。本文在水力模型试验的基础上, 对电站出水口出水渠布置进行改进和优化, 满足了工程安全的要求。

关键词: 电站尾水出水口; 出水渠; 导墙; 流态; 冲刷; 淤积; 模型试验

1 工程概况

乐昌峡水利枢纽为 等大(2)型工程, 枢纽工程的正常蓄水位为 154.5m, 汛限水位为 144.5m, 死水位为 141.5m, 设计洪水标准为 100 年一遇 ($P=1\%$), 校核洪水为 1000 年一遇 ($P=0.1\%$)。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; 电站引水系统布置在挡水大坝的左侧, 主要由电站进水口、隧洞、厂房、尾水出水口等建筑物组成(见图 1)。电站安装 3 台水轮发电机组, 总装机容量为 132MW, 发电设计流量为 $3 \times 118.04\text{m}^3/\text{s}$ 。

坝址及电站尾水出水口区域河谷呈“V”形, 河道微弯、断面狭窄, 河床面高程约 90.0m ~ 92.0m。河床的弱风化岩体埋深较浅, 河床弱风化带上界面埋深约 1.6m ~ 8m, 弱风化岩厚约 3m ~ 5m, 往下为微风化基岩。河床基岩较新鲜坚硬、强度较高, 岩体完整性较好。

在枢纽工程的初步设计阶段, 电站尾水出水口进行了多方案的比较, 并通过水力模型试验, 对电站尾水出水口出水渠布置进行优化。电站尾水出水口水力试验在乐昌峡水利枢纽工程水工整体模型中进行, 模型按重力相似律设计为正态, 几何比尺 $L_r=60$ [1]。本文介绍电站尾水出水口及其出水渠的水力模型试验研究成果。

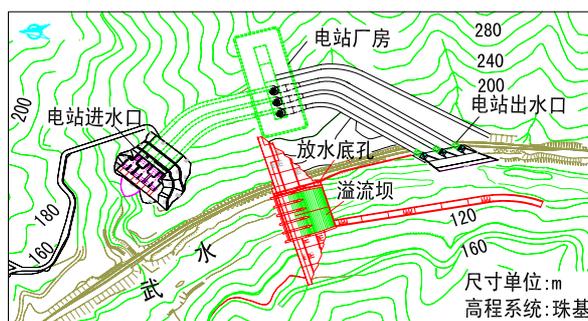


图1 乐昌峡水利枢纽工程平面布置图

2 出水口布置和试验

2.1 方案布置

电站尾水出水口位于坝轴线下游约 230m 的左岸处, 三台机组的三个出水口并排布置, 各机组隧洞中心线间距为 20m, 尾水隧洞直径 $D=6.8\text{m}$ 。电站出水口采用岸坡式布置, 出水口轴线与河道主流夹角约 40° 。三个出水口体型相同, 由尾水隧洞、圆变方管段、闸门井段、渐扩段和出水渠等组成(见图 2): 1) 电站尾水隧洞经圆变方管段(长度 10m)之后, 连接闸门井段, 闸门井段长 10m, 闸门井采用埋藏式结构, 矩形断面($6.8\text{m} \times 6.8\text{m}$), 闸门井顶部高程为 114.0m; 2) 渐扩段采用

侧向和顶板同时逐渐扩散的方式，其底板高程 87.1m，两侧边墙和顶部盖板扩散角均为 9.648°；渐扩段出口断面为左边墙长、右边墙短的斜断面，出口断面线与渐扩段轴线呈 44.437° 夹角。

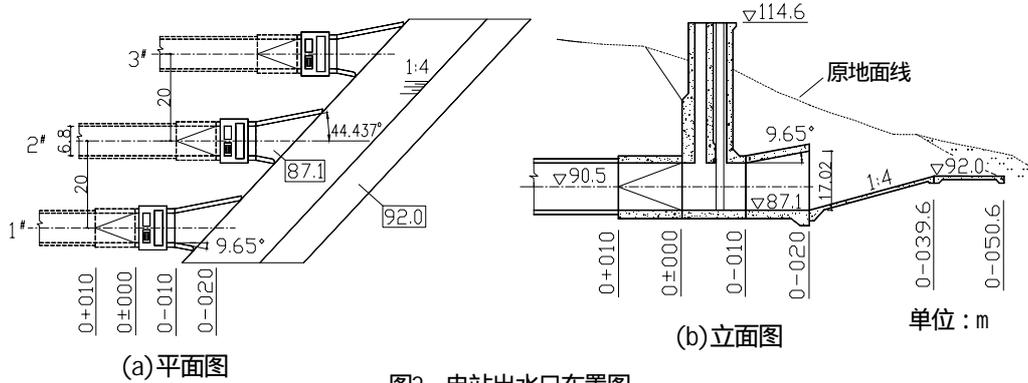


图2 电站出水口布置图

2.2 试验成果

2.2.1 出水口段出口断面流速分布

试验表明，电站尾水经闸门井段和渐扩段后，出水口段的出流较平顺，出水口段出口断面的流速分布较均匀。由于各机组出水口渐扩段的左导墙长度大于右导墙，因此，各出水口段出口断面的左侧垂线流速值均小于右侧垂线流速值(见表 1 和图 3)。

表 1 电站出水口出口断面垂线平均流速分布

流量 Q (m^3/s)	出口断面垂线平均流速(m/s)								
	1#机组			2#机组			3#机组		
	左	中	右	左	中	右	左	中	右
3×118.04	0.80	1.52	1.29	1.13	1.41	1.25	1.12	1.40	1.21

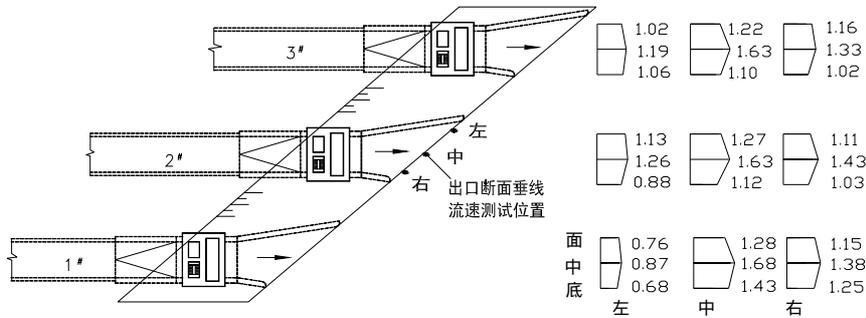


图3 电站出水口出口断面垂线流速分布图

2.2.2 电站出水口段水头损失

电站出水口段水头损失可采用式(1)~(2)计算:

$$h_j = (H_i - H_o) + (V^2/2g) \quad (1)$$

$$= h_j / (V^2/2g) \quad (2)$$

式中， h_j ---- 出水口段水头损失 (m)； H_o ---- 下游河道水位 (m)； H_i ---- 管道量测断面测压管水位 (m)； V ---- 管道量测断面平均流速 (m/s)；---- 断面流速分布系数，取 =1。

经测试和计算，电站出水口段(包括 10m 长尾水隧洞、圆变方管段、闸门井段、方管段、渐扩段和出水渠等) 水头损失值为 0.11m，水头损失系数为 0.20。

因此，设计方案的出水口运行水力特性较优，其体型和布置是合理的。

3 出水渠方案布置和试验

由于乐昌峡水利枢纽工程坝址河道较狭窄，电站尾水出水口靠近溢流坝，溢流坝泄洪对电站尾水出水口出水渠的安全运行影响较大，因此，对电站尾水出水口布置进行了多方案的比选和优化。

3.1 方案 1 试验

3.1.1 方案布置

电站出水口渐扩段下游布置出水渠，出水渠的反坡段以 1:4 坡度与河床连接，反坡段末端的水平段底板高程为 92.0m，底宽 56m。方案 1 的出水渠反坡段和水平段两侧以 1:2 坡度与两侧河床和岸坡连接(见图 4)。

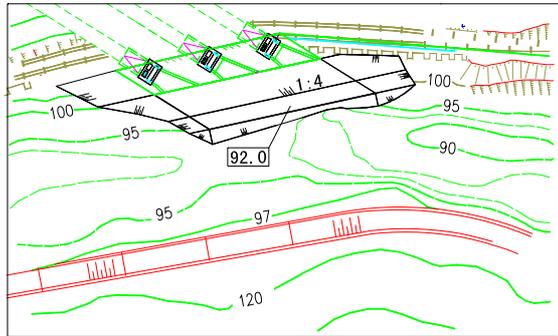


图4 电站出水口出水渠方案1平面布置图

3.1.2 试验成果

(1) 电站发电尾水经出水渠较平顺进入下游河道。由于方案 1 的电站出水渠两侧为开挖边坡，坡度相对较缓 ($i=1:2$)，两侧边坡区域出现局部回流区，回流流速约为 $0.5\text{m/s} \sim 0.6\text{m/s}$ ，两侧边坡区域的回流对出水渠正常运行影响较小。

(2) 受枢纽工程布置等因素影响，电站出水渠上边缘位于溢流坝出口断面下游约 150m 处(桩号约 0+210)，溢流坝泄洪对电站出水渠区域会产生不同程度的冲淤影响^[3]，溢流坝泄洪对电站出水口安全运行影响的主要问题为(见表 2)：在溢流坝泄洪流量 $Q=3900\text{m}^3/\text{s}$ 运行时，电站出水口区域主要为溢流坝下游河床冲刷坑冲淤的淤积区，100 年一遇设计洪水流量泄流运行的溢流坝下游河床冲淤状况见图 5；当泄洪流量 $Q=5340\text{m}^3/\text{s}$ 运行时，电站出水口区域河床遭受不同程度的冲刷，溢流坝泄洪流量越大，冲刷的影响程度越大，冲刷区域下游形成堆渣淤积；在洪水流量 $Q=6860\text{m}^3/\text{s}$ (200 年一遇坝址洪峰流量) 泄流运行条件下，电站上游端 1#机组出水口出水渠区域河床遭受严重冲刷和淘刷，冲刷区域河床较低处高程约 78.0m，危及电站尾水出水口的安全运行(见图 5)。

因此，在电站出水口位置不改变的情况下，应做好电站出水口及其出水渠区域的加固和防护工程措施，并对出水渠两侧边坡布置进行优化，以确保工程的安全运行。

表 2 方案 1 电站出水口出水渠区域河床冲淤状况

洪水频率 P(%)	库水位 Z(m)	泄洪流量 Q(m ³ /s)	桩号 0+210 断面 冲刷底高程(m)	冲刷区域 下边界桩号	出水渠区域 淤积高程(m)
1	162.2	3900	/	/	95.0
	162.2	5340	90.0	0+220	97.0
	162.2	6860	83.0	0+250	99.0
0.1	163.0	8470	75.0	0+270	102.0

注：(1) 电站出水渠上边缘桩号为 0+210；(2) 电站出水渠区域河床面高程约 92.0m，弱风化基岩面高程约 85.0m ~ 86.0m。

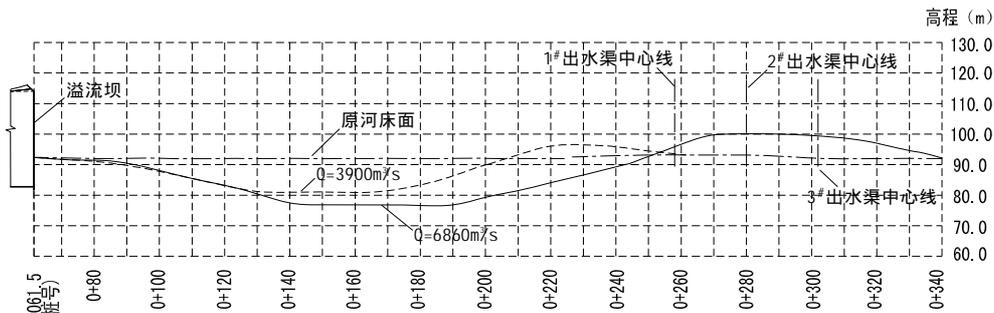


图5 方案1——溢流坝下游河道及电站出水渠冲淤地形剖面图

3.2 方案 2 试验

3.2.1 方案布置

为了拦截溢流坝泄洪的下游河床冲刷坑向电站出水渠区域河床发展，减少中小洪水流量泄洪的下游冲刷坑冲渣对电站出水渠河床的淤积，在电站出水渠右侧上游端设置拦断整个河床断面的拦截导墙。经多方案修改和比选之后，得出电站出水口出水渠方案 2 布置为(见图 6)：

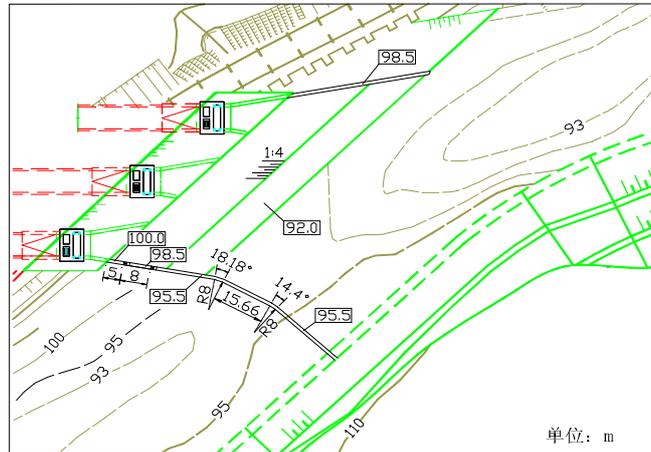


图6 电站出水口出水渠方案2平面布置图

(1) 在电站出水口出水渠右侧（上游侧）设置横贯河道断面的导墙，根据河道河床的地形，紧靠电站出水口 5m 长的导墙顶高程为 100.0m，其后连接一段长为 8m、高程为 98.5m 的导墙，其余导墙顶高程为 95.5m；各段导墙之间采用 1:1 斜坡段连接。

(2) 电站出水口出水渠的左导墙修改为直立导墙，顶高程为 98.5m，长度约 38.6m。

3.2.2 电站区域的流态

(1) 电站出水渠两侧设置直立导墙之后，消除了方案 1 出水渠两侧边坡区域出现的局部回流区，电站发电尾水经出水渠较平顺进入下游河道。

(2) 电站出水渠右侧导墙对溢流坝下游河床行洪影响较小，溢流坝下游河床流态和流速分布与无导墙方案的状况相近，测试的电站出水渠右侧导墙顶流速值见表 3，供工程设计参考。

表 3 电站出水渠右侧导墙顶垂线平均流速值

洪水频率 P(%)	泄洪流量 Q(m ³ /s)	右侧导墙顶垂线平均流速值 (m/s)				
		墙顶高程 100.0m	墙顶高程 98.5m	墙顶高程 95.5m		
				左端	中间	右端
1	3900	7.86	7.89	7.09	6.61	6.09
	5340	8.30	8.56	8.36	7.91	6.82
	6860	8.58	9.02	8.96	8.41	7.60
0.1	8470	8.98	9.30	9.97	9.02	8.35

3.2.3 电站区域冲淤特性

电站出水口出水渠右侧（上游侧）设置横贯河道断面的导墙之后，溢流坝下泄水流对下游河床、河道两岸坡及电站出水口区域河床的冲刷和淤积比方案 1 明显减小(见图 7)：

(1) 在泄洪流量 $Q = 3900\text{m}^3/\text{s}$ 泄流运行时，溢流坝下游河床冲刷坑的冲渣对电站出水口出水渠区域影响较小，电站出水口出水渠右侧导墙有利于减轻中小洪水流量的溢流坝下游河床冲刷对电站出水渠区域河床的淤积影响。

(2) 在泄洪流量 $Q = 5340\text{m}^3/\text{s}$ 泄流运行时，溢流坝下游河床的冲刷对电站出水口出水渠右导墙基础影响较小。

(3) 泄洪流量 $Q > 5340\text{m}^3/\text{s}$ 泄流运行时, 电站出水口出水渠右导墙基础遭受到不同程度的冲刷, 各级洪水流量的电站出水渠右导墙基础的冲刷高程见表 4, 应对电站出水渠右导墙基础和电站区域岸坡进行安全加固和防护。

表 4 方案 2 电站出水口出水渠区域河床冲淤状况

洪水频率 P(%)	泄洪流量 Q(m ³ /s)	出水渠右导墙底部 冲刷高程(m)	出水渠区域 淤积高程(m)
1	3900	/	淤积量少
	5340	90.0	98.0
	6860	85.0	100.0
0.1	8470	82.0	103.0

注:(1)电站出水渠上边缘桩号为 0+210;(2)电站出水渠区域河床面高程约 92.0m,弱风化基岩面高程约 85.0m~86.0m。

(4) 在各级洪水流量泄流运行时, 电站出水口出水渠上游右导墙拦截了溢流坝下游冲刷坑往电站出水渠区域河床发展和延伸, 出水渠区域河床无冲刷。

(5) 溢流坝泄洪是一个时间较漫长、洪水流量逐级增大的过程, 电站出水口出水渠区域堆渣淤积也是由逐级洪水冲刷造成的, 由于模型试验的冲刷坑下游淤积程度与原型工程并不完全相似, 原型工程的电站出水渠区域河床的淤积程度会比模型试验的淤积程度相应减轻。因此, 在每场中小洪水泄洪之后, 应注意电站出水口区域的堆渣淤积情况, 若出现影响电站出水口尾水出流的情况, 应及时清淤处理, 以确保电站出水口尾水出流顺畅。

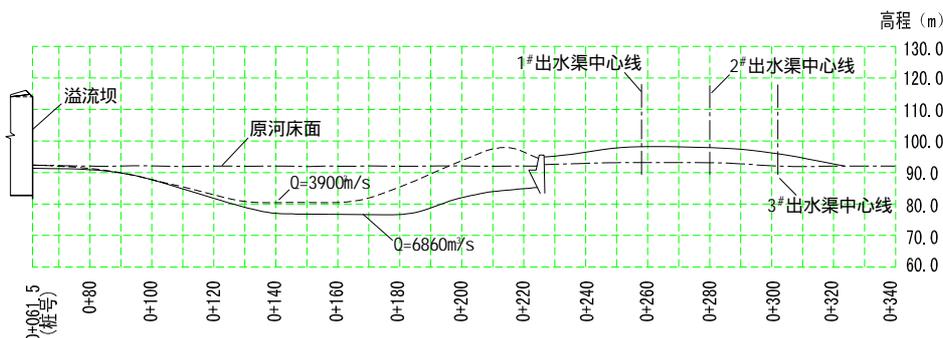


图 7 方案 2——溢流坝下游河道及电站出水渠冲淤地形剖面图

4 结语

(1) 乐昌峡水利枢纽工程坝址河道狭窄, 电站尾水出水口靠近溢流坝, 溢流坝泄洪对电站尾水出水口及其出水渠安全运行影响较大。经模型试验比较和分析, 在电站出水口出水渠右侧设置拦断河床的导墙之后, 拦截了溢流坝下游河床冲刷坑向出水渠区域河床发展, 同时对冲刷坑冲渣起到一定的拦截作用, 相应减轻了电站出水渠区域河床的淤积, 效果良好。

(2) 当溢流坝泄洪流量 $Q > 3900\text{m}^3/\text{s}$ 运行时, 电站出水渠右导墙底部基岩遭受不同程度的冲刷, 应重视导墙的结构稳定和基础安全。在工程设计和施工中, 应根据河床的地质条件, 将电站出水渠右导墙基础座落在河床弱风化基岩的一定深度, 以确保工程的安全运行。

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] 华东水利学院主编, 《水工设计手册》(第 6 卷, 泄水与过坝建筑物) [S], 水利电力出版社, 1982 年.