

# 惠州抽水蓄能电站上库溢流坝阶梯消能试验研究

黄智敏, 钟勇明, 朱红华, 何小惠

(广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510610)

**摘要:**介绍惠州抽水蓄能电站工程概况, 建议将上库溢流坝挑流消能改为底流消能方式。通过水力模型试验研究, 推荐溢流坝采用“坝面削角阶梯+底流消力池”的联合消能方案。试验表明, 削角阶梯坝面末端泄流的动能只占相应光滑坝面动能的 30% 以下, 相应动能消能率达 70% 以上, 消能效果较显著, 大幅度减小了溢流坝下游消力池的尺寸和工程量。

**关键词:**溢流坝; 消力池; 阶梯消能; 模型试验; 惠州抽水蓄能电站

**中图分类号:**TV653      **文献标识码:**B      **文章编号:**1006-7647(2006)03-0035-03

**Experimental study on stepped energy dissipation of upper reservoir overflow dam at Huizhou Pumped Storage Power Station//HUANG Zhi-min, ZHONG Yong-ming, ZHU Hong-hua, HE Xiao-hui( Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510610, China )**

**Abstract:** The general situation of the project of Huizhou Pumped Storage Power Station was introduced, and the mode of energy dissipation by hydraulic jump was suggested for upper reservoir overflow dam. Based on hydraulic model test, an energy dissipation scheme with the combination of angle-cut stepped dam face and bed flow stilling basin was recommended. The test results show that the kinetic energy of discharge at the end of angle-cut stepped dam face is less than 30% of that of the smooth dam face, and the rate of kinetic energy dissipation is higher than 70%, showing a notable effect of energy dissipation. The scheme greatly reduces the size of stilling basin below the overflow dam as well as its work load in the project.

**Key words:** overflow dam; stilling basin; stepped energy dissipation; model test; Huizhou Pumped Storage Power Station

国内以往对溢流坝下游末端流速  $v > 15 \text{ m/s}$  的工程多采用挑流消能, 以避免溢流坝下游消力池的尺寸和工程量过大或增加消力池内消力墩空蚀破坏的可能性。但实际上往往受下游枢纽建筑物布置、河道地形、河床地质条件等限制, 给工程方案布置带来一定的限制和困难。近年来发展的溢流坝面阶梯跌坎与下游消力池联合消能方式, 给高坝泄流采用底流消能提供了一条新的途径, 国内已有多座溢流坝采用坝面阶梯跌坎与底流消力池联合消能的工程实例。本文主要介绍惠州抽水蓄能电站上库溢流坝阶梯消能的水力模型试验研究成果。

## 1 工程概况

惠州抽水蓄能电站(以下简称惠蓄)位于广东省惠州市博罗县城郊, 距广州市区约 112 km, 是广东省正在兴建的第二座大型抽水蓄能电站。惠蓄一、二期工程总装机容量 2 400 MW, 电站上库为范家田水库, 坝高 53.6 m, 水库由库盆、1 个主坝和 4 个副坝组成。上库主坝为碾压混凝土重力坝, 溢洪道布置在主

坝的溢流坝段。溢流坝堰顶高程为正常蓄水位 762.0 m, 开敞式溢流堰分 3 孔, 每孔净宽 10 m, 堰面曲线方程  $y = 0.335 3x^{1.85}$ ; 溢流堰段下接坡比  $i = 1 : 0.78$ 、宽 32 m 的陡坡段。原设计方案上库溢流坝拟采用挑流消能方案, 后考虑到以下的因素: ①溢流坝中心线与下游河道轴线成  $20^\circ$  左右的夹角, 下游河道河床较狭窄, 溢流坝鼻坎挑射水舌将会对下游河道左岸坡产生严重的冲刷; ②上、下库发电和抽水工况切换较频繁, 上、下库水流相互调节, 因上库溢流坝采用无闸开敞式泄流方式, 洪水期有可能长时间出现小流量泄流状况, 使挑流鼻坎内出现漩滚、出坎水流为跌流状以至于淘刷鼻坎脚基础。因此, 根据本工程河道地形、泄流等特点, 并参考惠蓄下库溢流坝的试验研究成果<sup>[1-2]</sup>, 模型试验建议将上库溢流坝挑流消能改为底流消能方式, 得到了设计方的同意。

惠蓄上库溢流坝校核洪水频率( $P = 0.02\%$ )泄流量  $Q = 186.69 \text{ m}^3/\text{s}$ , 设计洪水频率( $P = 0.2\%$ )泄流量  $Q = 129.61 \text{ m}^3/\text{s}$ , 消能设计洪水频率( $P = 1\%$ )泄流量  $Q = 93.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 。广东省水利水电科学研究院承担了惠

蓄上库溢流坝水力模型试验研究项目,模型按重力相似律设计为正态,几何比尺  $L_r = 40$ 。

## 2 底流消能初拟方案试验

### 2.1 方案布置

上库溢流坝底流消能初拟方案布置见图 1。

a. 参照国内部分工程和惠蓄下库溢流坝的试验研究成果,在溢流坝面上布置了 45 级连续的内凹式阶梯,阶梯高度按溢流坝碾压混凝土层高度 0.3 m 的倍数布置,1~3 级阶梯高 0.6 m、宽 0.468 m,4~45 级阶梯高 0.9 m、宽 0.702 m。

b. 溢流坝下游河床基岩面高程约 713.0~714.0 m,消力池池底高程初设定为 714.0 m。

c. 为了兼顾溢流坝泄流消能及水库泄水底孔消力池布置的要求,将溢流坝段桩号 0+025.93 处以  $10^\circ$  收缩角往下游出口断面收缩,溢流坝下游出口断面(桩号 0+038.97)的宽度为 25 m;溢流坝消力池末端尾坎布置在坝下游桩号 0+065.00 断面,该断面河中 16 m 宽的尾坎顶高程为 715.5 m,两岸端尾坎隔墙顶高程 717.0 m,左岸隔墙宽度约与泄水底孔消力池下游坡面宽度相等。

### 2.2 试验成果

a. 各级洪水频率流量泄流时,溢流坝的入流较平顺,泄流顺坝面急流直下。泄流进入阶梯坝面后,在阶梯的跌流、紊动作用下,加速水流的紊动和掺气,增大了水流的消能率,在 100 年一遇至 5 000 年一遇洪水频率流量泄流时,阶梯坝面的流速为 12.3~15.4 m/s,大大降低了进入下游消力池的流速和动能。

b. 在 5 000 年一遇洪水流量( $P = 0.02\%$ ,  $Q = 186.69 \text{ m}^3/\text{s}$ )泄流时,桩号 0+038.97~0+055.00 的消力池段形成急流段,水层较薄(水深 0.6~0.7 m),消力池进口右侧水流冲向池左侧,压缩池左侧的水

流,形成偏流,消力池左、右侧泄流在池内桩号近 0+055.00 断面处交汇,交汇处水流壅高约 5 m;桩号 0+038.97~0+065.00 的消力池右侧形成较明显的回流区,回流区宽度约占池宽的 1/2,回流流速为 3~4 m/s,流态较差。

c. 在设计洪水频率流量( $P = 0.2\%$ ,  $Q = 129.61 \text{ m}^3/\text{s}$ )泄流时,泄流进入消力池形成偏流的程度略有减轻,消力池右侧的回流区末端约在尾坎断面,回流宽度约占池宽的 1/3,回流流速仍达 3~3.6 m/s。

d. 在 100 年一遇洪水频率流量( $P = 1\%$ ,  $Q = 93.8 \text{ m}^3/\text{s}$ )泄流时,由于泄流单宽流量减小,消力池内的偏流程度减轻,池内右侧仍形成回流区,回流流速为 2~2.5 m/s。

由试验成果分析可知,溢流坝面设置连续式的内凹形阶梯后,大大增加了溢流坝面水流的消能率,降低了溢流坝进入下游消力池的流速,但此方案的消力池深度不够,使得溢流坝泄流在消力池上游区域形成急流和偏流,因此,需对溢流坝消力池体型进行修改和优化。

### 2.3 修改方案试验

经试验比较,拟定了修改方案:将溢流坝下游消力池池底高程降低至 713.0 m,坝面的阶梯形式和尺寸不变。试验表明,在各级洪水频率流量泄流运行时,消力池内形成稳定的水跃,水跃消能较充分,池末出流较平顺地与下游河道水流衔接,流态良好。

## 3 阶梯溢流坝建议方案试验

### 3.1 建议方案布置

建议方案溢流坝和消力池布置见图 2。

a. 桩号 0+007.00 下游坝面布置 45 级连续的内凹式阶梯,1~3 级阶梯尺寸与初拟方案相同,4~45 级阶梯高 0.9 m、宽 0.702 m。

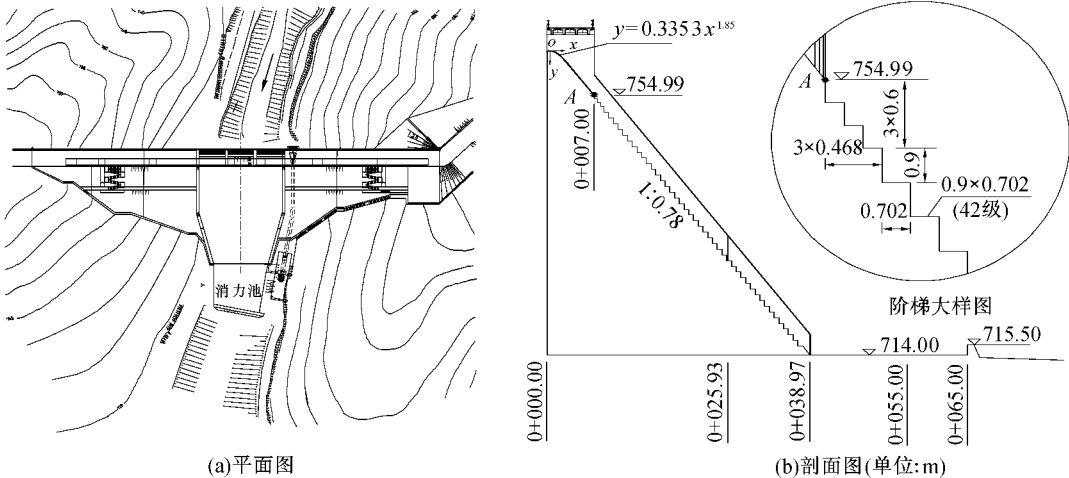


图 1 惠蓄上库溢流坝底流消能初拟方案

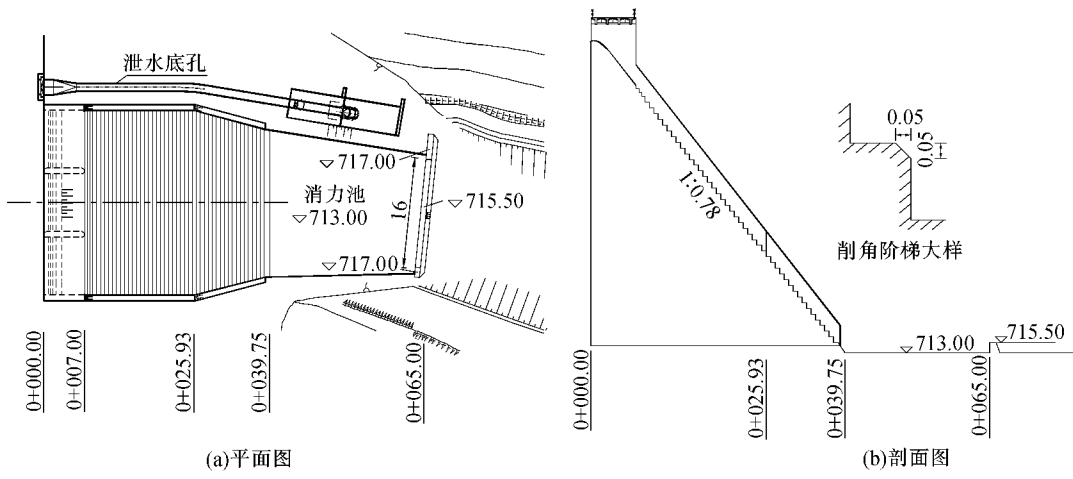


图2 惠蓄上库阶梯溢流坝及消力池建议方案(单位:m)

b. 为了避免坝面泄流损坏阶梯顶尖角体并保持坝面的美观,各阶梯顶角两边各削掉边长为0.05 m的尖角体。

c. 消力池池底高程为713.0 m,池末尾坎桩号及体型尺寸与初拟方案相同。

### 3.2 建议方案试验成果

a. 消力池内形成稳定的水跃,水流消能较充分,出水水流较平顺地与下游河道水流衔接,流态良好。

b. 阶梯溢流坝面水流掺气点位置、流速值范围、消力池内水跃跃长等见表1。

表1 建议方案阶梯溢流坝泄流特征值

| 洪水频率<br>$P/\%$ | 泄流量<br>$Q/(m^3 \cdot s^{-1})$ | 掺气点<br>阶梯号 | 坝面流速<br>$v/(m \cdot s^{-1})$ | 水跃跃长<br>$L/m$ |
|----------------|-------------------------------|------------|------------------------------|---------------|
| 0.02           | 186.69                        | 13~14      | 13.0~15.7                    | 20.6          |
| 0.2            | 129.61                        | 9~10       | 13.0~14.3                    | 16.8          |
| 1              | 93.80                         | 6~7        | 12.7~13.8                    | 13.1          |
| 10             | 41.56                         | 5          | 9.0~9.5                      | 8.8           |

c. 受溢流坝下游收缩段的影响,在泄放校核和设计洪水频率流量时,消力池右岸边出现小范围的回流区,回流流速较大值介于1.1~2.5 m/s范围;在消能设计洪水频率( $P=1\%$ )流量泄流时,消力池内两侧基本无回流产生。设计洪水频率流量泄流运行的坝面及消力池的流态和流速分布见图3。

d. 坝面阶梯下游面底部最大负压强 $p/\gamma$ 的绝对值小于10 kPa,且阶梯坝面水流紊动和掺气较明

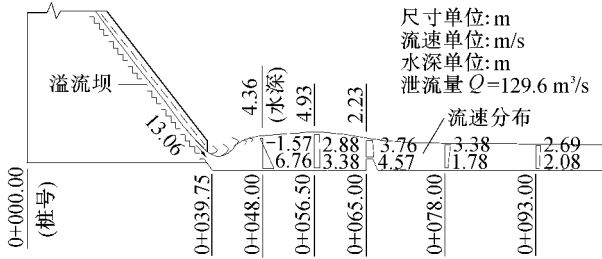


图3 建议方案阶梯溢流坝消力池运行流态和流速分布

### 3.3 光滑溢流坝面比较方案试验

在建议方案溢流坝下游消力池的体型和布置方案的基础上,进行光滑溢流坝面的试验比较。试验显示:①在各级洪水频率( $P=0.02\% \sim 10\%$ )流量泄流运行时,光滑溢流坝下游末端入池流速 $v=25.7 \sim 21.3$  m/s,比阶梯溢流坝相应的流速增大1.85~2.38倍。②光滑和阶梯溢流坝末端流速比较见表2。阶梯溢流坝末端水流动能( $E=\frac{v^2}{2g}$ )只有光滑坝面相应动能的17.7%~29.2%,可见阶梯坝面的水流消能作用较明显。③光滑坝面下游消力池内形成急流状( $P=0.02\% \sim 0.2\%$ ),泄流直接撞击消力池尾坎后跃起再跌落,出池水流汹涌紊乱,流态较差,无法满足设计要求。

表2 光滑和阶梯坝面入池流速和动能比较

| 洪水频率<br>$P/\%$ | 泄流量<br>$Q/(m^3 \cdot s^{-1})$ | 光滑坝面                   |         | 阶梯坝面                   |         | $\Delta E/m$ | 消能率<br>$\Delta E/E_1$ |
|----------------|-------------------------------|------------------------|---------|------------------------|---------|--------------|-----------------------|
|                |                               | $v_1/(m \cdot s^{-1})$ | $E_1/m$ | $v_2/(m \cdot s^{-1})$ | $E_2/m$ |              |                       |
| 0.02           | 186.69                        | 25.68                  | 33.65   | 13.89                  | 9.84    | 23.81        | 0.708                 |
| 0.2            | 129.61                        | 24.97                  | 31.81   | 13.06                  | 8.70    | 23.11        | 0.727                 |
| 0.5            | 108.30                        | 24.62                  | 30.93   | 12.67                  | 8.19    | 22.74        | 0.735                 |
| 1              | 93.80                         | 24.27                  | 30.05   | 12.28                  | 7.69    | 22.36        | 0.744                 |
| 2              | 77.17                         | 23.83                  | 28.97   | 11.86                  | 7.18    | 21.79        | 0.752                 |
| 10             | 41.56                         | 21.33                  | 23.21   | 8.97                   | 4.11    | 19.10        | 0.823                 |

注:  $E_1=\frac{v_1^2}{2g}$ ,  $E_2=\frac{v_2^2}{2g}$ ,  $\Delta E=E_1-E_2$ 。

b. 作为对弧形闸门动力稳定性问题的初步研究,分析了由支臂和横梁所构成的不同主框架形式在简单荷载作用下对称失稳和不对称失稳情况下的动力稳定性。对本文采用的以 B-R 准则通过时程分析直接根据结构响应来判断弧形闸门支臂主框架的动力稳定性代替构造 V 函数法的可行性进行了验证,从而可以在此基础上对弧形闸门整体动力稳定性进行进一步的深入分析。本文方法对类似问题的分析有一定的参考意义。

参考文献:

[1] 朱召泉,卓家寿,陶桂兰.弧形钢闸门的动力稳定性研究进展[J].水利水电科技进展,1999,19(5):27-32.

.....

(上接第 34 页)

[3] WU Zhi-qiao, MIZUMOTO M. PID type fuzzy controller and parameters adaptive method[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1996, 78(1):23-25.

[4] 谭永红.基于 BP 神经网络的自适应控制[J].控制理论及应用,1994,11(1):84-87.

[5] 陶永华,尹怡欣,葛芦生.新型 PID 控制及其应用[M].北京:机械工业出版社,1998:136-184.

[6] 丛爽.面向 MATLAB 工具箱的神经网络理论及其应用[M].合肥:中国科学技术大学出版社,1998:45-73.

[7] 邹进,袁晓辉,李承军,等.基于模糊控制原理的多目标决策方法[J].水利水电科技进展,2003,23(3):28-31.

[8] 梁宏柱,叶鲁卿,孟安波.参数自适应模糊 PID 控制器及其在水电机组调速器中的应用[J].水电自动化与大坝监测,2003,27(6):26-29.

[9] 王日莲,董曼玲.人工神经网络在水文预报中的应用[J].水利水电科技进展,2002,22(5):33-37.

(收稿日期:2005-03-09 编辑:高建群)

.....

· 简讯 ·

国家“863”项目“苏州市城市水环境质量改善技术与综合示范”课题通过验收

2006 年 2 月 20 日,河海大学主持的“苏州市城市水环境质量改善技术与综合示范”课题,在苏州由国家“863”计划资源环境技术领域办公室会同“十五”水专项专家组成员进行验收并顺利通过。

验收专家组通过示范工程现场考察、课题组汇报及现场质询,认为该课题针对苏州河网城市特色和水污染特征,结合学校水利学科特长,提出的以水动力循环为核心、控源为基础、生态工程为补充手段的城市水环境质量改善技术方案极具特色;研究开发的河网水动力分级循环及水量自动控制技术、局部重污染河道水质改善的生物-生态协同调控等技术成果具有创新性;建立的拙政园水质净化与生态修复、苗家河河道水质净化等 7 项示范工程,初步形成了苏州主城区河网水环境实时监测系统。研究成果具有较好的推广应用前景,已申请国家发明专利 3 项。该课题全面达到了合同规定的考核目标和技术经济指标。

“苏州市城市水环境质量改善技术与综合示范”课题是河海大学主持的第一个“863”计划一级项目,该课题的顺利验收不但推动了学校环境学科的发展,也为学校“十一五”期间在资源环境领域的发展奠定了基础。

(本刊编辑部供稿)

[2] 黄廷璞,危盼.我国低水头弧形闸门失事调查和初步分析[J].金属结构,1986(5):23-41.

[3] 阎诗武.水工弧形闸门的振动[J].金属结构,1985(5):21-33.

[4] BUDINSKY B, ROTH R S. Axisymmetric dynamic buckling of clamped shallow spherical shells[J]. NASA TNU-1510, 1962, 5(3):16-21.

[5] 孙建恒,夏亨烹.网壳结构非线性动力稳定分析[J].空间结构,1994,1(1):25-31.

[6] 水电站机电设计手册编写组.水电站机电设计手册:金属结构(一)[M].北京:水利电力出版社,1988.

[7] 符华·鲍洛金.弹性体系的动力稳定性[M].北京:高等教育出版社,1960.

(收稿日期:2005-02-28 编辑:高建群)

.....

(上接第 37 页)

4 结 语

本文结合惠蓄上库溢流坝的泄流特性、运行条件、河道地形等特点,经多方案的模型试验研究,推荐溢流坝采用“坝面削角阶梯+底流消力池”的联合消能方案,工程效果良好。本文的试验研究成果已应用于工程设计中,并可为类似的工程设计参考。

参考文献:

[1] 陆汉柱,黄智敏,陈灿辉,等.惠州抽水蓄能电站下库溢流坝水工模型试验研究[J].广东水利水电,2003(5):32-33.

[2] 陆汉柱,黄智敏,钟勇明.惠蓄下库溢流坝阶梯消能试验研究[J].广东水利水电,2004(5):21-24.

(收稿日期:2005-03-01 编辑:高建群)