

四川省仙女堡水利枢纽工程 水工模型试验研究

何晓敏¹，包中进¹，屠兴刚¹，周文妍²

(1. 浙江省水利河口研究院，浙江 杭州 310020；
2. 丽水市正源水利水电勘测设计研究院有限公司，浙江 丽水 323000)

摘 要：通过整体水工模型试验，对泄流能力、水流流态、流速分布、闸下消能、拦沙坎排沙方案等进行系统研究，尤其对闸前束水墙布置进行了不同方案的比选，并提出了适合枢纽布置的排沙措施。

关键词：泄流能力；消能；水工模型；拦沙坎；弯道；束水墙；四川省

中图分类号：TV131.61 **文献标识码：**B **文章编号：**1008-701X (2006)02-0015-03

1 工程概况

仙女堡水电站位于四川省境内涪江上，坝址在四川省平武县水晶镇下游约 1.5 km，土城河汇入口下游约 300 m 处，承接上游任家坝水电站尾水。仙女堡水电站坝址以上集水面积 2 097 km²，水库正常蓄水位 1 117.5 m，相应库容 112.1 万 m³；电站装机容量 2 × 38 MW，多年平均发电量 38 022 万 kW·h。河长 74 km，河道平均坡降 27.0‰。厂房距平武县城 29 km，厂址以上集水面积 2 285 km²。

根据 GB 50201-94《防洪标准》和 SL 252-2000《水利水电枢纽工程等级划分及洪水标准》，该工程为 Ⅰ 等工程，水库为小（1）型水库，电站为中型水电站。主要建筑物有堰坝、发电引水建筑物、发电厂房、升压开关站等。工程布置见图 1、2。

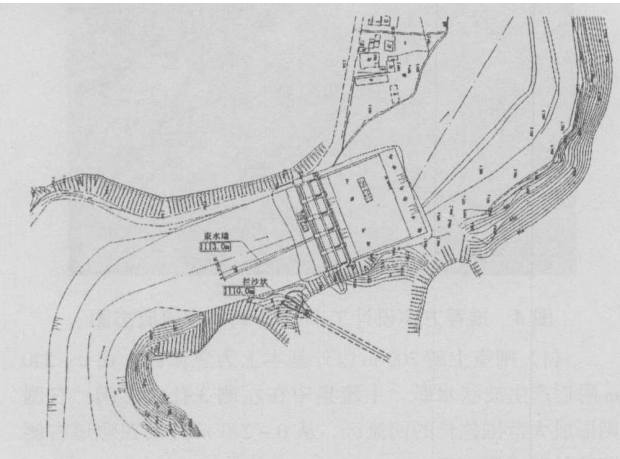


图 1 泄洪闸平面布置图（单位：m）

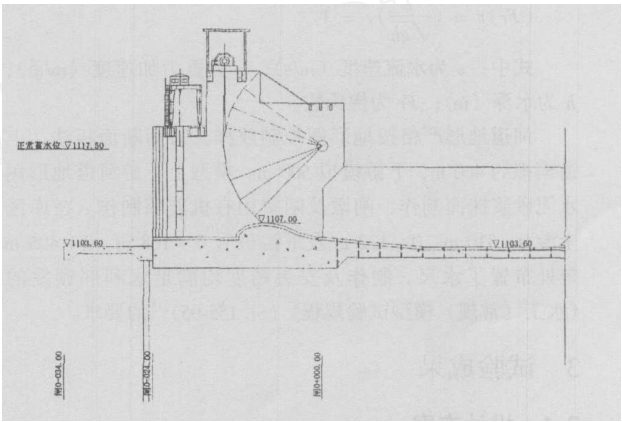


图 2 泄洪闸剖面图（单位：m）

泄洪闸采用 C20 混凝土实用堰，堰顶高程 1 107.00 m，设 5 孔，弧形钢闸门控制，每孔净宽 14.0 m，总宽 90.0 m，右岸两孔兼作冲沙闸。泄洪闸按照 100 年一遇洪水设计，500 年一遇校核。正常蓄水位 1 117.50 m，设计工况（ $P = 1\%$ ）的洪水水位为 1 118.00 m，相应下泄流量 4 230 m³/s；校核工况（ $P = 0.2\%$ ）的洪水水位为 1 119.30 m，相应下泄流量 5 858 m³/s。

坝体上游设置长 10 m、厚 1.5 m 的 C20 混凝土铺盖，铺盖顶高程 1 103.60 m，下游设置长 65.5 m、厚 1.5 m 的 C20 混凝土护坦，护坦高程 1 103.60 m，护坦末端设防淘墙，墙深 9.6 m，底高程为 1 094.00 m，C20 混凝土结构，1 097.60 m 以下厚 1 m，以上为斜坡，至护坦底高程处厚 4 m。护坦后接浆砌石防冲保护体。护坦及防冲保护体侧布置挡墙，墙厚 2 m，墙顶高程 1 115.00 m。

为防止大量泥沙进入发电引水隧洞，故在进水口前设置拦沙坎。原设计拦坎顶高程 1 110.00 m，顶宽 2 m，上游坡直立，下游坡为 1 0.4（至进口底板高程 1 103.00 m）。

另外，为了确保冲沙闸的作用，在冲沙闸和泄洪闸之间设一束水墙。束水墙长度为 80 m，宽度 2.0 m，顶高程 1 111.60 m。

收稿日期：2005-09-28
作者简介：何晓敏（1981 - ），女，助理工程师，大学本科，主要从事水工水力学研究。

2 研究内容和模型设计

2.1 研究内容

研究的主要内容是：

- (1) 验证各种设计频率泄洪闸的泄流能力。
- (2) 观测 30 年一遇洪水闸下流态及消能效果。
- (3) 测试设计、校核工况运行时沿程水面线、流态、流速分布。
- (4) 观测冲沙闸的冲沙效果（控制拉沙流量 $500 \text{ m}^3/\text{s}$ ，不发电），验证电站进水口排沙系统的合理性，并提出改进建议。

2.2 模型设计

根据《水工（常规）模型试验规程》要求，针对研究对象特点及研究目的，采用正态水工模型。几何比尺 $L_r = 80$ ，按重力相似准则设计，即：

$$(Fr) r = \left(\frac{v}{\sqrt{gh}}\right) r = 1$$

式中： v 为水流速度 (m/s)； g 为重力加速度 (m/s^2)； h 为水深 (m)； Fr 为佛氏数。

河道地形严格按地形图控制放样，采用断面板法，上游模拟约 400 m，下游模拟 500 m。模型上下游河道地形用水泥砂浆抹面制作，闸墩及闸室用有机玻璃制作。在库区上游 0 - 310 m、0 - 122 m 及下游桩号 0 + 168 m、0 + 405 m 等处布置了水尺。制作及安装精度均满足水利部颁发的《水工（常规）模型试验规程》(SL 155-95)^[1]的要求。

3 试验成果

3.1 设计方案

3.1.1 水流状态

试验测试了泄洪闸 5 孔全开时各种设计工况的沿程水流流态。结果发现，在各工况下运行时，沿程水流流态比较相似。设计工况运行时，水流进入弯道后，由于惯性作用，在闸前 0 - 270 m 附近产生明显的横比降，左侧水流壅高，右侧水流几乎见底。水流主流在闸前 0 - 140 m 附近的河道中央形成平面形分布的水跃，然后略偏向右侧方向向下行进，主流集中在中间 3 孔泄洪闸；右侧则形成大范围狭长回流区。而过闸后的水流在护坦段内形成急流，护坦内平面呈斜向的水跃，然后沿着河道中心下泄（见图 3）。

3.1.2 拉沙试验

控制洪水流量 $500 \text{ m}^3/\text{s}$ 、洪水历时 4 h 工况进行拉沙试验，此时电站不发电。束水墙长度 80.00 m，方向与闸墩平行，顶高程 1 111.60 m。考虑极端情况，即将拦沙坎前淤满至 1 110.00 m 高程进行拉沙。结果发现束水墙左侧水流直接翻墙而过，形成横向水流进入右侧 2 孔冲沙闸；束水墙头部绕流强度和范围均较小。经过原型 4 h 拉沙，拦沙坎前未能做到门前清。

3.2 试验推荐方案

3.2.1 工程布置

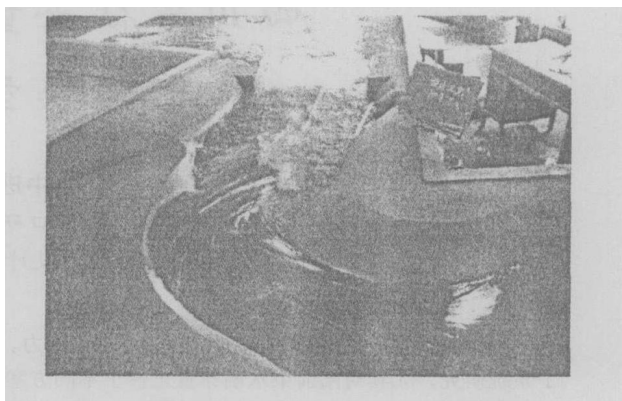


图 3 设计方案设计工况 ($P=1\%$) 水流流态图

根据设计方案试验情况，试验对工程布置进行了多组方案的修改。修改的目的是：

- (1) 闸前水流平顺。
- (2) 拦沙坎充分发挥作用。

最后推荐方案的工程布置（见图 1）为：上游河道弯道进行整治；增加束水墙长度由原来的 80.00 m 增加到 98.00 m；束水墙顶高程由原来的 1 111.60 m 增高至 1 113.00 m；束水墙头部右偏 5.0 m，角度 2.9° 。

3.2.2 水流状态和流速分布

试验主要观测了 30 年（消能工况）、100 年（设计工况）和 500 年（校核工况）一遇洪水共 3 种工况行洪时的沿程水流流态和流速分布。试验表明，在各工况运行时，沿程水流流态总体比较相似（见图 4）。

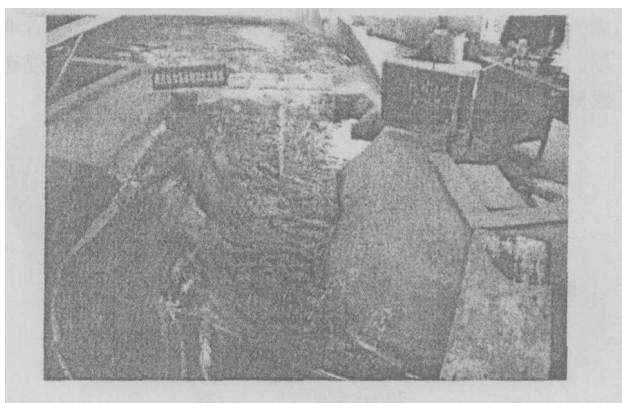


图 4 推荐方案设计工况 ($P=1\%$) 水流流态图

(1) 闸室上游 200 m 以外基本上为急流区，在 0 - 220 m 附近产生波状水跃，主流集中在左侧 3 孔泄洪闸；右侧则形成大范围狭长的回流区，从 0 - 270 m 开始在弯道右侧即开始形成回流区。

(2) 过闸的水流均较平顺，闸下均为自由出流，护坦上均能形成水跃。在校核工况和消能工况时，右边冲沙闸后水跃跃首发生在墩尾附近，而泄洪闸 1 ~ 3[#] 孔护坦上的水跃在平面上呈斜向分布。

(3) 沿程水流主流均集中在河道左侧。出护坦后的水

主流流均集中在原河道中心线附近，河边左右侧均存在大范围的回流区。

(4) 护坦末端左侧的流速普遍较大。在校核工况时，护坦末端左侧对应1~3[#]闸孔位置的流速最高达13.68 m/s，而右侧只有2.21~3.29 m/s；消能工况也一样，护坦末端左侧对应1~2[#]闸孔位置的流速最高达12.78 m/s，而右侧只有1.22~3.11 m/s。

3.2.3 泄流能力

试验主要观测了5孔全开的泄流能力。由于闸前水流流速较大，而右侧为水流回流平稳区域，所以上游水位取闸前桩号0-122 m断面的右侧岸边，5孔全开时的水位~流量关系拟合公式如式(2)：

$$Q = 423.01 (Z - 1107.00)^{1.209} \tag{2}$$

相关系数 $R = 0.9999$

式中： Q 为下泄流量 (m^3/s)； Z 为库水位 (m)；1107.00为堰顶高程 (m)。

表1 泄洪能力试验成果比较表

工况	频率/ %	流量/ (m^3/s)	库水位/ m	设计水位/ m
消能工况	3.33	3 049	1 112.12	
设计工况	1.00	4 230	1 113.72	1 118.00
校核工况	0.20	5 858	1 115.79	1 119.30

由表1可见，泄流能力完全满足设计要求，因此，该闸的兴建不会影响上游河道的行洪。

3.2.4 拉沙试验

在控制洪水流量为500 m^3/s 、洪水历时为4 h的工况下进行拉沙试验。此时电站不发电。在进行拉沙试验前，先进行5年一遇洪水的全动床试验。从5年一遇洪水的全动床冲刷结果来看，拦沙坎前面泥沙淤积高程普遍低于拦沙坎顶高程。此时进行发电，推移质泥沙一般不会进入电站发电引水隧洞。

共进行了4组工况的拉沙比较试验，试验组次见表2。

表2 拉沙试验工况表

工况	束水墙顶高程/ m	初始地形
1	1 111.60	全动床冲刷后
2	1 111.60	人为淤积到1 110.00 m
3	1 113.00	全动床冲刷后
4	1 113.00	人为淤积到1 110.00 m

试验发现：

(1) 工况1。拉沙试验在全动床冲刷的地形基础上直接进行，此时全动床冲刷后的拦沙坎前河床高程本身就低于拦沙坎高程。从水流流态观察，拉沙时，左侧部分水流直接翻越束水墙进入冲沙闸，拉走了闸前靠近束水墙一侧的部分淤积泥沙，结果拉沙后，拦沙坎前地形与起始状态相比没有什么变化（见图5）。

(2) 工况2。拉沙效果不好，左侧大部分水流直接越过束水墙顶进入冲沙闸下泄，其余都分水流基本上正向从束水墙和拦沙坎前的开口部位进入拉沙。由于流速小，致使拦沙坎前的淤积沙基本没有被拉动。经过4 h的拉沙试

验，拦沙坎前的淤积面仍然维持原状。此时如果发电运行，部分泥沙将进入发电引水隧洞。

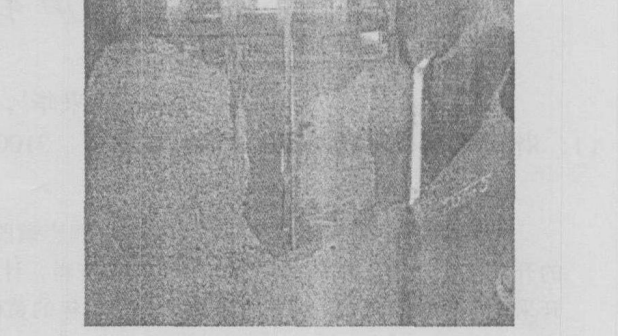


图5 工况1拉沙后地形图

(3) 工况3。拉沙试验也是在全动床冲刷的地形基础上直接进行。由于下泄水流基本上通过束水墙头部绕流进入拉沙，因此，结果明显比工况1好，拉沙试验结束后，测得拦沙坎前的河床地面高程低于全动床冲刷后的河床高程，并且束水墙头部的冲坑范围相对工况1扩大了。

(4) 工况4。加高束水墙顶高程至1 113.00 m后，越过束水墙顶的水流明显减少，束水墙头部的绕流拉沙作用明显，并逐渐将束水墙头部附近的沙拉走。与工况3相似，拦沙坎前的河床高程普遍都低于原来全动床冲刷的高程。若此时进行发电，推移质泥沙应该不会进入电站发电引水隧洞。

综合上述比较试验成果表明：

- (1) 增加束水墙高程有利于拉沙，拦沙坎前面的泥沙淤积面高程明显降低。
- (2) 从校核工况泥沙运动情况来看，拦沙坎前淤积至拦沙坎顶高程的可能性还是很大的。为了确保拉沙效果，增加束水墙高度是需要的。

4 结 论

仙女堡泄洪闸属于典型的山溪性低水头泄洪闸，闸前流速高，加上受弯道影响，对工程布置，特别是电站进水口拦沙坎的布置带来了困难。通过整体水工模型试验，对泄流能力、水流流态、流速分布、闸下消能、拦沙坎排沙方案等进行了系统研究，验证和优化了设计，为工程决策提供了科学依据。试验成果对类似工程具有一定的参考应用价值。

参考文献：

[1] SL 155-95, 水工(常规)模型试验规程[S].
[2] 包中进, 何晓敏, 屠兴刚. 仙女堡水利枢纽工程泄洪闸水工模型试验研究报告[R]. 杭州: 浙江省水利河口研究院, 2005.
[3] 包中进, 卞祖铭, 屠兴刚, 等. 曹娥江大闸整体水工模型试验研究[J]. 浙江水利科技, 2004, (6): 29-31.
[4] 史 斌, 包中进, 陆芳春. 曹娥江枢纽闸下冲刷试验研究[J]. 浙江水利科技, 2004, (6): 32-34.

(责任编辑 韩继静)