



# 清水江干流平寨航电枢纽泄水闸断面模型试验

代正江<sup>1</sup>, 吕彪<sup>2</sup>

(1. 贵州省航电开发投资公司, 贵州 贵阳 550001;

2. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 港口水工建筑技术国家工程实验室,  
工程泥沙交通行业重点实验室, 天津 300456)

**摘要:** 低水头泄水建筑物的消能防冲是一个十分普遍的水力学问题, 影响其消能工的水力特性及消能机理的因素非常复杂, 目前尚无成熟的理论方法解决这一问题。针对贵州省清水江梯级开发已建的水利枢纽水头低、单宽流量大的特点, 对平寨泄水建筑物消能工进行水工断面模型试验。其成果不仅为平寨航电枢纽泄水闸布置方案的技术合理性提供了必要的依据, 同时对开展同类问题的研究具有参考价值。

**关键词:** 清水江; 航电枢纽; 泄水闸; 断面模型

中图分类号: U 64; TV 135.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)07-0107-05

## Section model test of Pingzhai navigation power junction sluice on stem stream of Qingshui river

DAI Zheng-jiang<sup>1</sup>, LYU Biao<sup>2</sup>

(1. Guizhou Shipping & Electric Power Development Investment Co., Guiyang 550001, China;

2. National Engineering Laboratory for Port Hydraulic Construction Technology, Key Laboratory of Engineering Sediment,  
Ministry of Transport, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China)

**Abstract:** In low water head outlet constructions, energy dissipation is a common hydraulic problem, which energy dissipation is less efficiency. The influencing factors about hydraulic characteristics and energy dissipation mechanism are very complicated, and there are no mature theories or methods to solve the problem. The thesis regards the characteristics of the low water head and large discharge per unit width of the navigation power junction on the Qingshui river as the research objects. By the hydraulic section model made in lab, the energy dissipated mechanism of the outlet constructions are discussed at first. It is proven the research results not only settle a necessary ground for the layout plan of Pingzhai navigation power junction sluice, but also be helpful for other similar projects.

**Keywords:** Qingshui river; navigation power junction; hydro-junction sluice; section model test

在水电工程建设中, 经常遇到泄水建筑物过流能力、体型优化及枢纽下游消能防冲等问题, 解决这些问题的传统方法通常是借助物理模型试验<sup>[1-5]</sup>。

拟建平寨航电枢纽位于贵州黔东南凯里市境内清水江干流上, 拟选坝址位于施秉县双井镇平寨村上游 0.7 km 处。清水江是长江支流沅水的上游, 发源于贵州省贵定、麻江、都匀三县(市)间的云雾山, 黔境内长 452 km, 平均比降 2.8‰, 流域面积 17 086 km<sup>2</sup>。平寨梯级工程开发任务为

发电、航运, 平寨航电枢纽建成后, 电站装机容量 42 MW, 多年平均电量 1.274 5 亿 kW·h(考虑下游施洞梯级回水影响后), 其中枯水期(12—5月)发电量 0.404 5 亿 kW·h。

枢纽主要建筑物从左至右依次布置: 左岸重力坝段长 121 m, 其中门库段长 42 m; 船闸上闸首长 28 m; 溢流坝段长 93 m; 厂房主机间长 43.9 m; 厂房安装间长 31.52 m; 右岸重力坝段长 64.58 m; 坝顶总长 382 m; 坝顶高程 552.5 m。

收稿日期: 2016-02-18

作者简介: 代正江(1979—), 男, 工程师, 从事水利水电工程建设管理工作。

平寨枢纽泄水闸布置在主河道，共5孔，采用开敞式闸室结构。泄水闸单孔净宽14.0 m，右边墩厚3.0 m，其他墩厚4.0 m，前缘总长93.0 m，墩顶与坝顶齐平，高程552.5 m。闸室内设上游检修闸门和工作闸门，上游检修门为露顶式平面滑动钢闸门，工作闸门为平板钢闸门。泄水闸是本枢纽工程的主要挡水及泄水建筑物之一，按Ⅲ级建筑物设计，其设计洪水标准为50 a一遇，相应洪水流量为6 617 m<sup>3</sup>/s；校核洪水标准为500 a一遇，相应洪水流量9 552 m<sup>3</sup>/s。

开敞式泄水闸的堰顶高程525.0 m，堰顶上游堰面曲线为三圆弧，半径分别为0.56、2.8和7 m，下游采用WES幂曲线 $y=0.053 \times 1.85$ ，堰面曲线下接半径为20 m的反弧段，反弧角37.118°。消力池长68.5 m，其中水平段长65 m，高程为515.5 m，池尾设消力坎，消力坎顶高程为520 m，迎水面直立，背水面为1:1斜坡，消力坎后设30 m长海漫，海漫高程519.0 m，海漫后设20 m防冲

槽，防冲槽高程为519.0 m，防冲槽末端以1:10的坡连接天然河床。

### 1 模型设计与制作

断面模型试验中，需要研究泄水闸工况条件下洪水期泄水能力和闸下消能工的合理性等，所选几何比尺越小，模型水深、流速等参数误差就越大，无法达到试验目的；而比尺过大，试验场地又无法满足要求。根据试验任务要求，结合试验室场地、设备等情况，模型确定为正态模型，选用几何比尺40。

为了保证单宽流量下泄时水流的相似性，消除边壁层流厚度对水槽中部流速的影响，提高试验成果精度，采用两半加一整(共计两孔)设计方式更为合理<sup>[6]</sup>。原型闸孔净宽14 m，闸墩宽4.0 m，两半孔加一整孔宽度为36 m，泄水闸及其下游设计断面布置见图1。根据比尺换算，断面模型宽度为0.9 m。

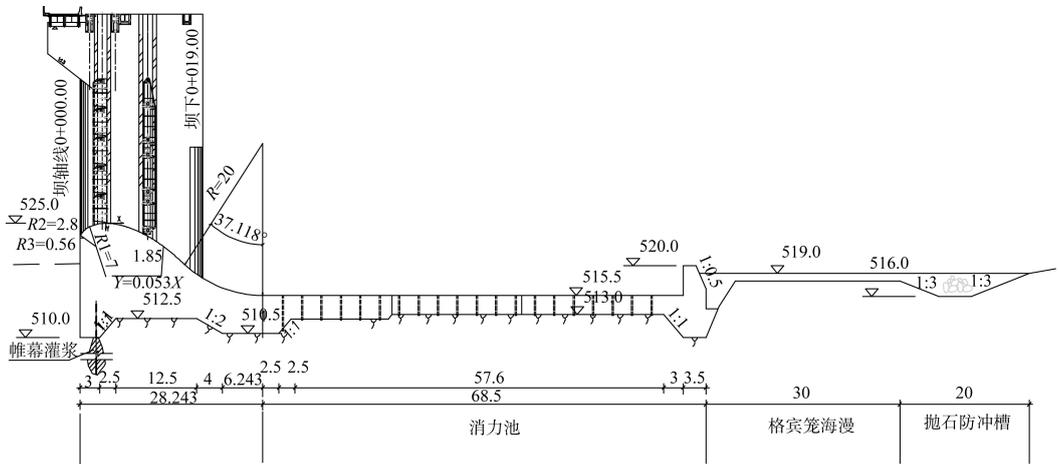


图1 泄水闸及其下游设计断面布置(单位:m)

模型试验在长35 m、宽0.9 m的矩形玻璃水槽中进行。按重力相似条件设计，确定模型各比尺如下：

平面比尺： $\lambda_l = \lambda_h = 40$ ；流速比尺： $\lambda_u = \lambda_h^{0.5} = 6.33$ ；流量比尺： $\lambda_Q = \lambda_h^{2.5} = 10 119.29$ ；糙率比尺： $\lambda_n = \lambda_L^{1/6} = 1.849$ 。

### 2 试验结果

模型制作完成后，通过对设计方案的模型放水试验，发现存在一些问题。针对存在的问题，提出

修改方案，经多次修改和试验，最终提出推荐方案。

#### 2.1 设计方案

洪水期水位雍高值及综合流量系数见表1。从表1可知：各特征洪水流量时坝上库水位测量值均小于设计值，设计流量下较设计洪水位低1.87 m，校核洪水流量下较校核洪水位小2.79 m，该枢纽满足洪水期泄流能力要求；对于设计方案堰型，综合流量系数随流量增大而增大，综合流量系数在0.476~0.489。

表 1 洪水期水位雍高值、综合流量系数结果

洪水 重现期/a	洪水流量/ (m <sup>3</sup> /s)	坝上库水位/m		差值/%	综合流量 系数 $m_0$
		设计值	测量值		
50	6 617	538.13	536.26	-1.87	0.476
100	7 251	538.99	536.94	-2.05	0.480
200	8 210	540.25	537.74	-2.51	0.488
500	9 552	541.89	539.10	-2.79	0.489

各种工况的堰面受压情况见图 2。试验表明: 在试验的各种工况下, 试验段所受压强分布趋势较为一致, 各测点均为正压, 没有出现负压, 各级流量下最小压强均出现在 2 号测点, 其值最小为 2.57 m 水柱, 满足设计要求。

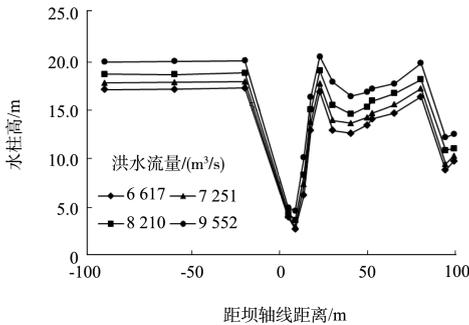


图 2 堰流试验压力分布

表 2 不同工况试验数据

工况	开启孔数	开度/m	下泄流量/(m <sup>3</sup> /s)	底孔流量/(m <sup>3</sup> /s)	发电流量/(m <sup>3</sup> /s)	上游水位/m	下游水位/m
1	5	1	934.6	0	250	543.00	524.20
2	5	2	1 809.5	0	250	543.00	525.62
3	5	4	3 548.8	560	0	543.00	527.74
4	5	6	5 200.2	560	0	543.00	529.90

由试验得知, 闸门各开度  $e$  与堰上水头  $H$  之比  $e/H$  均小于 0.75, 属于闸孔出流。

各种工况下闸孔出流的流量系数见表 3。从表 3 中可以看出: 上游库水位和开启孔数保持一定时, 闸孔出流的流量系数随闸门开度增加而减小, 其值在 0.653~0.710; 流量系数随相对开度增大而减小。

表 3 各种工况下的流量系数

开启 孔数	开度/ m	上游 水位/m	单宽流量/ [m <sup>3</sup> /(s·m)]	总流量/ (m <sup>3</sup> /s)	$e/H$	流量 系数
5	1	543.00	20.00	1 184.6	0.06	0.710
	2	543.00	23.00	2 059.5	0.11	0.687
	4	543.00	26.67	3 548.8	0.22	0.672
	6	538.00	30.38	5 200.2	0.33	0.653

试验中观测了各测流垂线流速分布及流态情况。结果表明: 1) 堰前上游垂线流速分布均匀; 2) 堰面上, 闸室内最大底流速范围在 12.86~13.94 m/s, 最大流速出现在堰顶后的下坡段; 3) 消力池内流速分布表现为: 消力池上游底流速大于下游底流速; 上游最大底流速随流量增加逐渐减小, 流速范围 10.23~8.78 m/s; 消力坎底流速随流量增加逐渐增大, 流速范围在 5.64~8.44 m/s; 4) 在出消力池后, 水流慢慢扩散均匀, 海漫和防冲槽各测线上的流速分布均匀, 海漫和防冲槽底流速范围在 1.24~5.70 m/s; 5) 均为淹没出流, 水跃不出消力池; 闸室末端至水跃之间水流紊动较为剧烈, 过水跃后水面波动减弱, 出消力池后水流较为平稳; 闸前水流受闸墩影响, 闸室内表流形成剪刀水。

根据运行调度方式, 确定设计方案下泄水闸闸孔出流泄流能力试验情况: 上游库水位维持在 543 m 运行, 5 孔全开, 逐步提高闸门开度, 直到上游来水  $Q > 5 350 \text{ m}^3/\text{s}$  (敞泄流量), 闸门开启高度分别为 1、2、4 和 6 m。孔流试验场次见表 2。

试验观测了不同开度的压力分布, 结果见图 3。试验结果表明: 在局部开启各工况下, 3<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>测点产生负压, 其中, 堰面 3<sup>#</sup>测点负压随开启高度增加逐渐消失, 最大时均压强为 -3.25 m 水柱, 在闸门开度为 2 m 和 4 m 时, 消力池头部 6<sup>#</sup>测点也存在负压, 最大时均压强为 -1.28 m 水柱, 不能满足设计要求。压力最小值均出现在堰面下坡处, 即 3<sup>#</sup>测点。其原因主要在于: 在闸门局部开启的情况下, 闸门强制过堰水流收缩, 水舌较薄, 形成高速射流, 离心惯性作用较强, 导致堰面水压力较小。

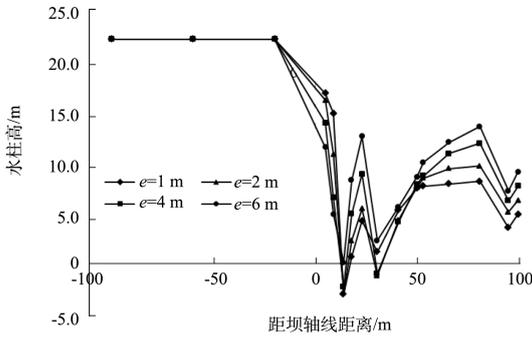


图3 5孔控泄沿程压力

### 2.2 修改方案1

根据前文所述,设计方案在控泄条件下,堰面存在较大的负压,通过调整泄水闸的堰面曲线和增加消力墩形成修改方案1。堰顶上游堰面曲线由三圆弧改为椭圆弧,下游采用WES幂曲线  $y = 0.05 \times 1.85$ ,堰面曲线下游接半径为20 m的反弧段,反弧角  $37.118^\circ$ 。在消力池池首下游20 m处增加消力墩,消力墩墩顶高程为519.0 m,迎水面直立,背水面为1:1斜坡。

泄流能力及综合流量系数试验结果见表4。从表4可知:各特征洪水流量时坝上库水位测量值均小于设计值,设计流量下较设计洪水位低1.56 m,校核洪水流量下较校核洪水位小2.61 m,该枢纽满足洪水期泄流能力要求;综合流量系数随流量增大而增大,其值在0.473~0.481。

表4 洪水期水位雍高值、综合流量系数结果

洪水重现期/a	洪水流量/ ( $m^3/s$ )	坝上库水位/m		差值/%	综合流量系数 $m_0$
		设计值	测量值		
50	6 617	538.13	536.57	-1.56	0.473
100	7 251	538.99	537.21	-1.78	0.474
200	8 210	540.25	537.96	-2.29	0.478
300	9 552	541.89	539.28	-2.61	0.481

各种工况的堰面受压情况见图4。试验结果表明,在试验的各种工况下,试验段所受压强分布趋势较为一致,各测点均为正压,没有出现负压,各级流量下最小压强均出现在1#测点,其值最小为4.27 m水柱,满足工程要求。

根据设计单位提供的运行调度方式,确定修改方案1泄水闸闸孔出流泄流能力试验情况:1)上游

库水位维持在543 m运行,5孔全开,开启高度分别为1、2、4和6 m。有明显水跃发生在消力墩上方,水跃发生于坝面坡尾,结束于消力墩墩右方,水跃不打门,跃后水面稳定,出消力池后水流稳定均匀。2)上游库水位维持在543 m运行,开2孔,开启高度分别为1、2和4 m。孔流试验中观测到,控泄时闸孔的水流流态均为闸孔自由孔口出流。当开度 $\leq 2$  m时,有明显水跃发生于坝面坡尾,结束于消力墩上方,水跃不打门,跃后水面有轻微波动,出消力池后水流稳定均匀;开度 $> 2$  m时,消力池内水面波动很大,水跃不稳定,水跃上部的旋滚小而弱,水跃段的高速底流向水面蹿升,跃后水面波动大并向下游传播。

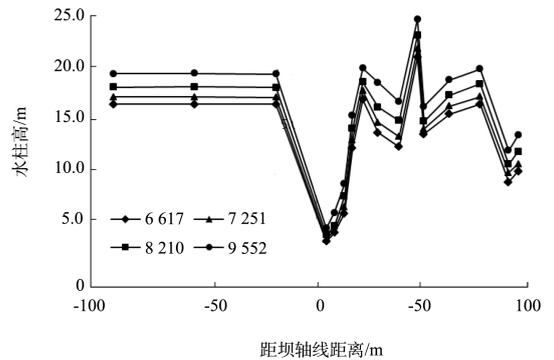


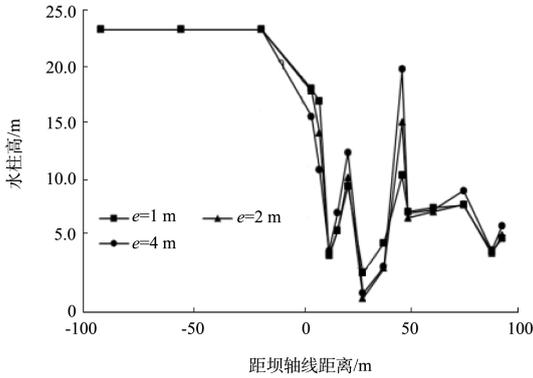
图4 堰流试验沿程压力分布

各工况下流量系数见表5。从表5可知:修改方案1堰型的流量系数在0.614~0.723;随着流量的增大,闸门相对开度逐渐增大;在库区水位保持不变的情况下,开孔数相同时,随着闸门开度增大,流量系数减小;在开度相同的情况下,随着开孔数的增多,流量系数增大。

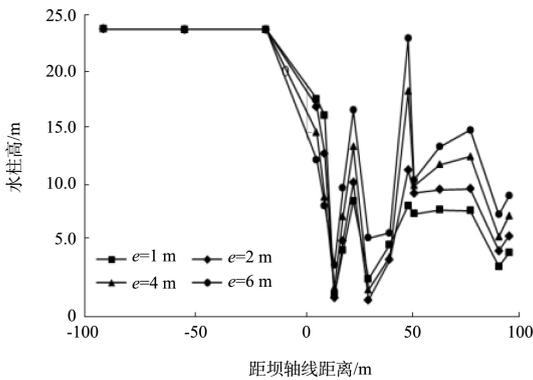
表5 各种工况下的流量系数

开启孔数	开度/ m	上游 水位/m	单宽流量/ [ $m^3/(s \cdot m)$ ]	总流量/ ( $m^3/s$ )	$e/H$	流量 系数
2	1	543.00	13.1	615.4	0.06	0.694
	2	543.00	25.3	958.4	0.11	0.673
	4	543.00	49.0	1 621.7	0.22	0.649
5	1	543.00	13.5	1 195.2	0.06	0.718
	2	543.00	25.0	1 999.8	0.11	0.665
	4	543.00	49.6	4 031.5	0.22	0.657
6	543.00	73.4	5 696.9	0.33	0.646	

控泄试验结果表明: 开 2 孔时, 压力最小值均出现在消力池上游, 即 6# 测点, 当闸门开度为 2 m 和 4 m 时, 有较大负压, 最大负压为 2.94 m 水柱 (图 5 a)); 开 5 孔时, 各工况下没有负压, 压力最小值均出现在堰面下坡处, 即 3# 测点 (图 5b))。



a) 2孔



b) 5孔

图 5 泄沿程压力

### 2.3 修改方案 2

根据前文所述, 设计方案和修改方案 1 在控泄条件下, 堰面存在较大的负压, 消力坎底流速较大。修改方案 2 布置见图 6, 堰顶上游堰面和堰顶下游堰面曲线与修改方案 1 相同, 堰面曲线下游接半径为 25 m 的反弧段, 反弧角 37.295°。修改内容主要有: 1) 在闸墩后面增加尾墩; 2) 消力池水平段长度为 73.5 m 的, 高程降为 515.0 m, 消力坎顶高程为 520 m, 迎水面为 1:0.5 斜坡, 背水面直立。

主要研究结论如下: 1) 各特征洪水流量时坝上库水位测量值均小于设计值, 该枢纽满足洪水期泄流能力要求; 2) 洪水敞泄试验结果表明, 其值在 0.468~0.475; 试验段所受压强分布趋势较为一致, 各测点均为正压, 满足工程要求; 闸室内最大底流速为 13.30 m/s, 消力池最大底流速为 11.25 m/s, 消力坎最大底流速为 2.31 m/s, 海漫和防冲槽最大底流速为 4.96 m/s; 3) 孔流泄流试验结果表明: 闸孔出流的流量系数随闸门开度增加而减小, 其值在 0.658~0.716。开 5 孔, 各工况下试验段均无负压; 开 2 孔, 闸门开度为 2 m 时, 消力池内水跃形态较差, 消能率较低, 海漫有跌水现象, 此外, 7# 测点有轻微负压, 为 -0.94 m 水柱。闸室内最大底流速为 19.33 m/s, 消力池最大底流速为 18.60 m/s, 消力坎最大底流速为 2.51 m/s, 海漫和防冲槽最大底流速为 3.73 m/s。

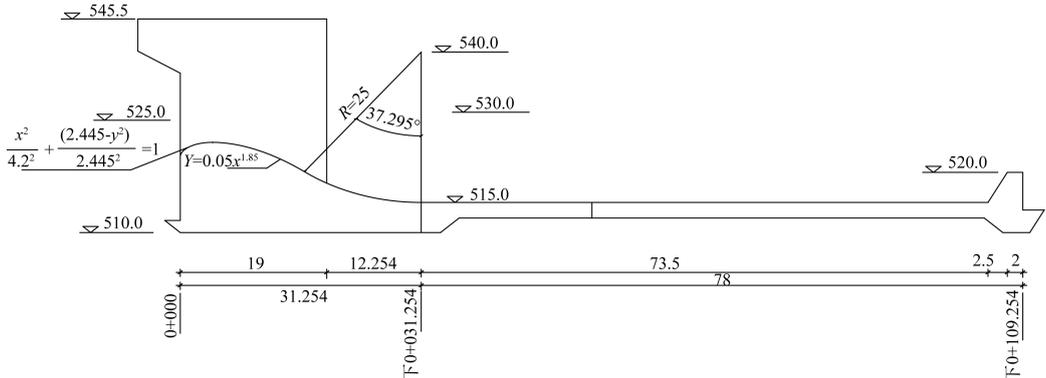


图 6 修改方案 2 剖面布置 (单位: m)