

# 二滩水电站中孔水力学问题的试验研究

阎诗武 马萍章 王河生

(水利电力部南京水利科学研究所  
交通部)

## 一、概 述

二滩水电站位于四川省雅砻江河口段。拦河坝为双曲拱坝，最大坝高 240 m。初步设计比较阶段，河床部分设 6 孔溢洪道，7 个泄水中孔设于溢洪道的闸墩下部（图 1）。二滩中孔（I 型）洞身为平底，孔底高程为 1100 m，进口设置 5×8 m（宽×高）事故平板门，出口接一反弧段，采用 5×6 m 带偏心铰的工作弧形闸门，正常高水位 1200 m 时，每一中孔泄量 1100 m<sup>3</sup>/s

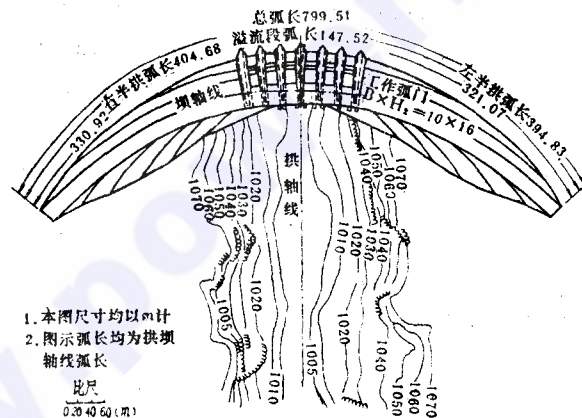


图 1 双曲拱坝平面布置图

模型按重力相似律设计，几何比尺  $L=35$ ，模型材料采用有机玻璃。试验内容包括：（1）泄流能力；（2）检修门启闭力和通气孔通气量（限于篇幅，内容略）；（3）各部分的时均压力、脉动压力和流速分布；（4）明流段体型的优化；（5）水舌轨迹及其与表孔水舌的对冲消能等。

二滩中孔（I 型）方案进口顶部与侧面均采用椭圆曲线。其曲线方程式为：

$$\frac{x^2}{7.5^2} + \frac{y^2}{2.5^2} = 1 \quad (\text{顶部})$$

$$\frac{x^2}{5^2} + \frac{y^2}{1.25^2} = 1 \quad (\text{侧面})$$

## 二、中孔进水段水力学试验

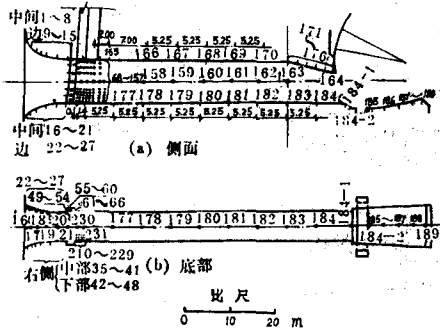


图2 中孔压力段测压管布置图

为测量时均压力共布置测压管 200 余根 (图 2)。当事故检修平板门与工作弧门全开时,共进行了库水位 1200~1145m 范围内四个组次的试验,时均压强均为正值,一般都有 1.96MPa (20m H<sub>2</sub>O) 以上,并相应于库水位的涨落而上下变化,事故检修平板门局部开启、弧形门全开,门槽后底部和侧面都出现负压。211、212、217、218 等测点负压较大,具体部位随闸门开度而变化,闸门开度大于 3/8 时所有测点负压都消失,但这种情况在正常运行过程中不可能出现。泄水过程中进口左右两侧检修门槽皆出现立轴旋涡。用公式:

$$K = \frac{H_1 + H_2 - H_v}{V_1^2 / 2g}$$

计算各组库水位下的门槽水流空穴数 (未考虑水流的脉动压力

值) 为 0.96~1.28。

参照钢闸门设计规范,本文门槽的初生空穴数  $K_1 = 0.4 \sim 0.6$ ,  $K_1 < K$  一般不致发生空穴。值得注意的是,检修门小开度、工作门全开时的值将远小于上述计算值。

## 三、中孔压力段水力学试验

### (一) 正常运行时中孔压力段流态及压力脉动

当检修门全开,工作门全开,库水位 1106 m 以下时,孔内为明流;库水位 1109.5 m 以下时孔内为满流。在此二水位之间孔内为明满流过渡状态,孔内水面随着库水位的上升而上升,在出口断面首先封顶,孔内上部空腔愈来愈小,直至 1109.5 m 时,孔内全部形成满流。但当库水位逐渐下降至 1108 m 时,孔内开始进气,并随着库水位的下降而逐渐形成明流。

在各组库水位情况下,测得时均压力为正压,沿泄水中孔顶、侧面及底部中心线上的压力分布见图 3。

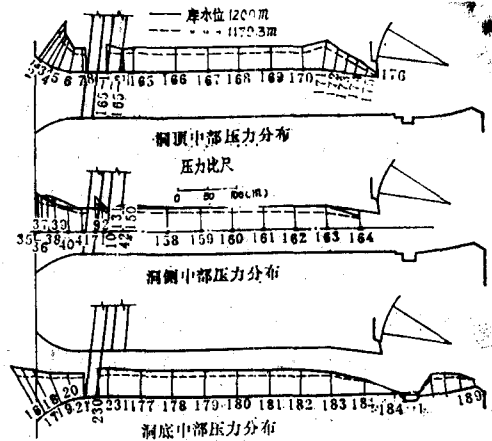


图3 孔顶、孔侧面、孔底中部压力分布

在一定的泄流控制条件下，水流的压力脉动可视为一个具有各态历经性的平稳随机过程。脉动压力测点布置见图4。试验及处理框图见图5。

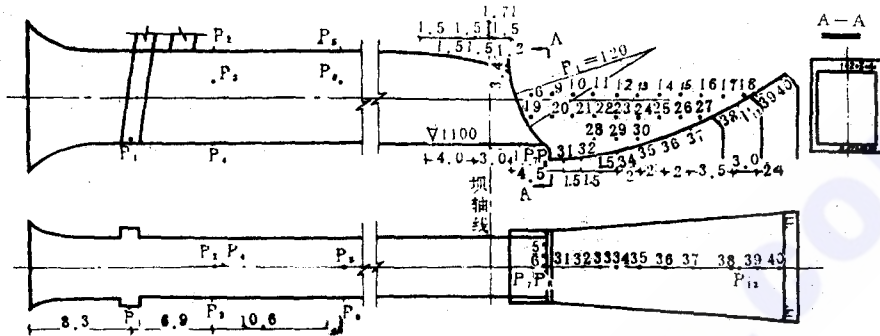


图4 较优方案时均压力及脉动压力测点布置图

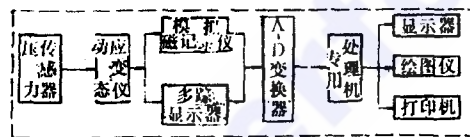


图5 试验与处理框图

利用福里哀变换,可将时域的随机函数变换到频域来考查。即脉动的幅值(或能量)是频率的函数,幅值谱  $A(\omega)$  可用下式表示:

$$A(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} P(t) e^{-i\omega t} dt \quad (1)$$

$$P(t) = \int_{-\infty}^{\infty} A(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (2)$$

式中  $P(t)$  ——压力脉动的随机函数;

$A(\omega)$  ——压力脉动幅值;

$\omega = 2\pi f$  ——压力脉动的圆频率;

$f$  ——脉动频率。

正常泄洪时,压力脉动幅值谱为一典型的“衰减”型曲线(图6-1),脉动幅值随频率的增加而减小,脉动幅值不大,典型概率密度曲线基本属正态分布。

### (二) 非正常运行时中孔压力段流态及压力脉动

模拟中孔非正常运行可能发生的特殊情况,系将工作门与检修门在不同开度组合下,使孔内形成急流或明满流过渡等恶劣流态。当检修门局部开启,工作门全开,库水位1200 m时,孔内为闸下急流,水流掺气充分,水舌直射出洞,冲向反弧底板,尔后跃起直冲支铰和弧门,流态极差。当检修门与工作门均作局部开启,库水位1200m时,观察了四种闸门开启组合情况。

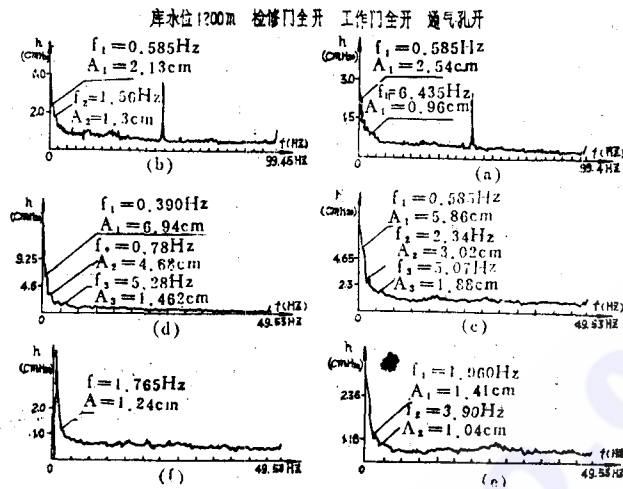


图 6-1 有压段压力脉动幅值谱

所有的组合状态，中孔内部水流都处于明满流过渡状态，中孔内上部是掺气旋滚，流态极不稳定。明满流过渡状态的压力脉动幅值显著增加，谱特征也略有变化，有的谱曲线在某些频率附近也出现较大幅值，与正常泄水状态相比，相应点的幅值增加约3~10倍。通气对门槽及通气管附近测点的脉动幅值影响较大，例如通气管关闭时，门槽的压力脉动幅值增加1倍，而在通气管附近的压力脉动幅值增加约4倍，其余各点增加不多或基本不变，见图6-2.3

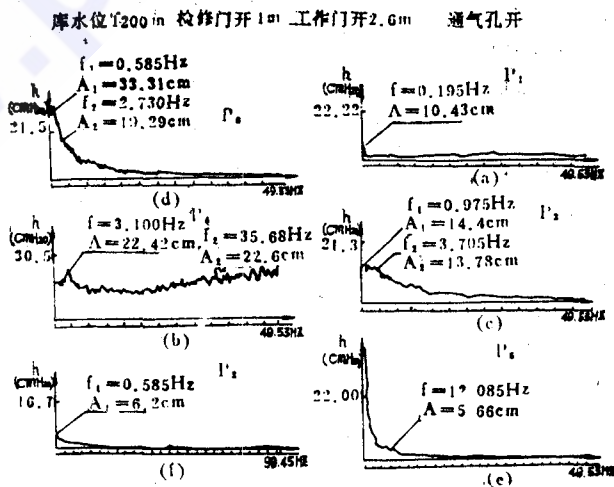


图 6-2 有压段压力脉动幅值谱

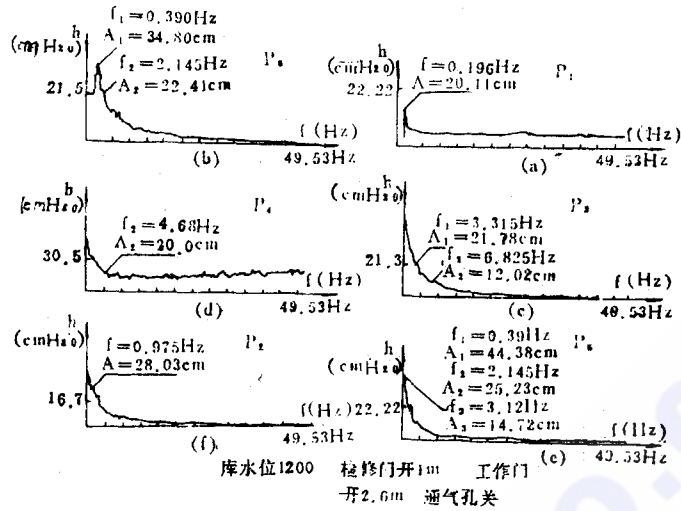


图 6-3 有压段压力脉动幅值谱

总的来说,孔中水流对孔壁的动水作用力是一个不均匀且随时间随机变化的荷载。正常泄洪时,动水作用力有同一类型的“衰减”谱,幅值较小,但非正常运行时,动水作用力具有明显地不均匀性,随时间变化的特征也各异,脉动幅值明显增加。如通气孔关闭,脉动幅值进一步增大,有些部位的脉动幅值达到相当可观的程度。因而,此种非正常运行情况应予避免。

## 四、出口明流段体型的优化

### (一) 出口明流段水力学问题

二滩水电站双曲拱坝 I 型方案采用表中孔水舌空中上下碰撞消能方式。因此,要求各中孔出流水舌平面上扩散,与表孔水舌碰撞应在 80 m 以内,碰撞角应尽可能大。

中孔出口明流段体型直接影响中表孔水舌碰撞消能的效果,影响因素可归结为:有压段出口的形状、明流段突扩尺寸、反弧的半径、扭角及挑角、以及边墙扩散角等。

1. 有压段出口压坡的选择试验 有压段出口顶部压坡对出口流态影响较大。原方案顶部压坡为 1:6,设计水位 1200 m 时,出口流态较差,边墙水翅较高,工作门支铰不断被水翅冲击。将压坡增加到 1:4 后,情况有所改善,水翅高度降低约 1.5~2.0 m,但支铰仍不时被水翅冲击。由于出口断面减小,泄量相应减少。为保持出口面积不变,同时又能改善出口流态,将顶部压坡改为半径 30m、20m 的圆弧及折线三种型式,试验结果如表 1 所示。

表 1 各孔顶水力要素比较

泄量	孔顶时均压力	水翅高度
折线 > R <sub>30</sub> > R <sub>20</sub>	F <sub>20</sub> > R <sub>30</sub> > 折线	折线 > R <sub>30</sub> > R <sub>20</sub>

为了满足泄量要求,同时出口流态也较好,以采用 R=30m 圆弧孔顶为宜。

2. 明流段突扩尺寸选择 中孔工作弧门布置在出口,由于闸门止水布置的要求,

出口四周采用突然扩大方式,使出口高速水舌在一定距离内脱壁自由扩散,一旦与侧墙相遇即形成很高的水翅,加上出口孔顶使水舌下压与反弧段相遇时,水舌亦折冲向上,使水翅更高。试验曾选用 0.5 m、0.675 m 及 0.84 m 三种突扩尺寸进行比较,看来突扩尺寸不宜过大,否则因出流高速水舌与边墙的间隙加大而使流态恶化,边墙水翅也会增高,其中,突扩 0.5 m 时流态较好。

3. 反弧段特征尺寸的选择 反弧段的特征尺寸包括:圆心及反弧起点的位置、半径、挑角与扭角。挑射水舌的高度与距离及明流段流态都与这些尺寸有关。高坝中孔出流,特别是象二滩工程高拱坝中孔出流,出口水舌流速高达 40 m/s,而明流段长度又短,因此,反弧段的特征尺寸与坝面挑流相比,有其特别之处。如体型尺寸不佳,水舌很可能平射而出,难以向上挑起。

(1) 反弧半径:试验过程中,反弧半径曾采用大(40 m)、中(30 m)及小(15 m)三种尺寸。在其它特征尺寸基本相同的条件下,不同反弧半径的出流轨迹不同,加大反弧半径有利于水舌挑高及增大与表孔水舌的交角,明流段的流态也较好。

(2) 鼻坎挑角:选用了 25°、30°、35° 三种鼻坎挑角进行试验。当其它尺寸不变时,鼻坎顶点高程、明流段高度及出口宽度等尺寸都随着挑角的加大而增大,水舌的挑距及中表孔水舌的交角及交汇高程也都随着挑角的加大而增大。同时,挑射水舌的掺气及扩散情况也以大挑角较充分。

(3) 扭角:反弧的扭角是指反弧起点半径与铅直线之间的夹角。增加扭角有助于高速水流在较短的距离内向上挑起,从而可使水舌挑得高而远,这样就可提高中表孔水舌的交角,同时还有助于缩短明流段的长度,减少工程量。

(4) 边墙的扩散角度:边墙扩散角直接影响挑流水舌的宽度,在一定的范围内水舌宽度随边墙扩散角度的增加而加宽,但边墙扩散角不宜太大,否则水舌可能与边墙分离或在边墙上产生负压,这样会使明流段流态恶化,有产生空穴的危险。方案比较阶段边墙扩散角为 3.44°,库水位 1200 m 时,各中孔水舌在坝轴线以下 60~70 m 范围内即可相交连成一片。

### (二) 较优方案试验

根据以上比较试验可以看出各种特征尺寸对水流状况的影响,现综合各方面情况提出较优方案如图 7 所示。

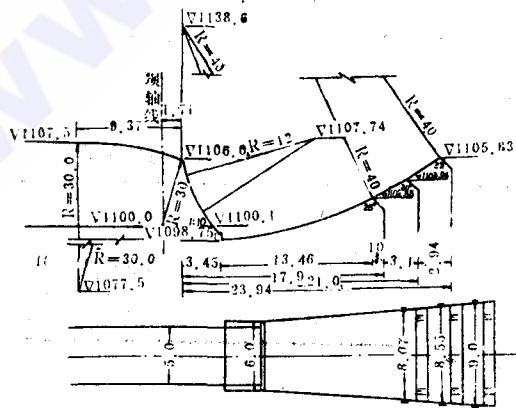


图 7 较优方案布置图

出口孔顶采用 30 m 半径圆弧,孔顶高程仍为 1106.0 m,孔底设小挑坎,明流段反弧半径为 40 m,边墙扩散角为 4.4°,试验结果分述如下。

1. 泄流能力 各级库水位情况下,中孔工作门全开、1/2 开度及 1/4 开度的泄量曲线见图 8。中孔内为满流时的流量系数为 0.877,库水位 1200 m 时,单孔泄量为 1130 m<sup>3</sup>/s,略大于设计要求的单孔泄量 (1100 m<sup>3</sup>/s)。

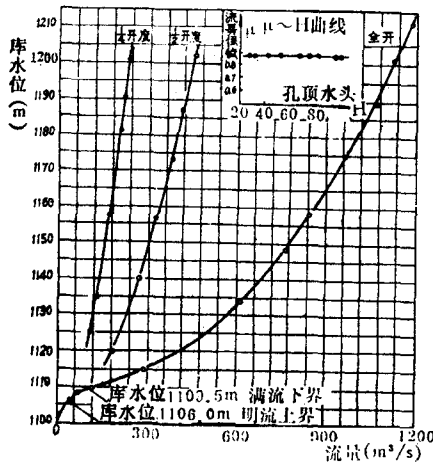


图8 水位流量关系曲线

由于模型中孔仅为单孔，受边界条件的影响中孔总泄量应在整体模型上验证。

2. 出口段水流状况

(1) 出口段流态：由于边墙突扩，水流从孔中出流后，水舌脱离边墙自由扩散。在出口下游5~6m处与边墙相撞后，在两侧形成掺气旋滚。旋滚的中心位于出口下游3~4m，1102~1103.5m高程之间。由突扩掺进的空气经旋滚带向下游鼻坎，气泡沿程逐渐上浮。

同时，在两侧形成水翅，其高度随库水位的上升而上升，高水位时不能满足弧门支铰在水面以上1.5m的要求，但水翅较薄（约7~20cm）。如在边墙上增设导流板，可使薄层水翅沿导流板顺流而下，使闸门支铰在各级水位情况下，都能免遭水翅的冲击，水面稳定在离支铰1.5m以下的范围内（图9）。

导流板的形状以流线型为佳，但导流板的设置，在结构布置上的问题，还需进一步研究。

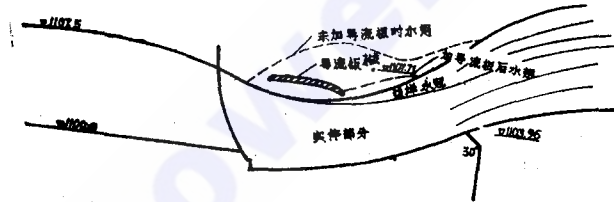


图9 导流板与流态示意

(2) 水舌的挑射：水舌的起挑水位与鼻坎挑角及工作闸门开度有关。鼻坎挑角愈大，要求的起挑水位愈高。闸门开度愈小，起挑水位也愈高（表2）。

由于水流的惯性作用，一般起挑水位高于终挑水位。

水舌的挑距与挑高随着库水位的增高而加大，也随着鼻坎挑角的加大而加大，库水位1200m时，水舌最高点的高程与距离见表3。此时水舌紊动大，位置不太稳定，各向摆动较大，最大摆动达4m左右。水位较低时，水舌较光滑平稳。

表2 水舌的起挑水位

鼻坎挑角	30°			35°
	全开	1/2	1/4	全开
起挑水位	1114.5	1116.0	1118~1118.3	1120.0
终挑水位	1111.5	1109.5~1110.0	1110.5~1111.0	1115.0

表3 水舌最高点的位置

鼻坎挑角	35°	30°	25°
	高程(m)	1132.0	1126.2
距离(m)	66.0	53.0	46.0

注：距离自孔顶出口计。

当工作门局部开启时，水舌薄且掺气充分，水舌在纵横两个方向均已拉开。

(3) 水舌的掺气：水流在出口段经突扩掺入部分空气，掺气旋滚的大小随着库水的增高而加大，但这部分掺气仅在边墙附近，水流中心并未掺气。库水位 1200 m 时鼻坎（30°挑角）近底的掺气浓度约为 1~2%。水舌挑离鼻坎，四周与空气接触后，水流进一步掺气、挑射水舌最高点断面的掺气浓度达 60~70%，在库水位 1137 m 时，该断面的掺气浓度为 15~20%。虽然模型掺气现象并不相似，所测掺气浓度偏小，仍可定性看出平流掺气已达相当程度，这将有助于中孔水舌在未与表孔水舌碰撞前已在空中消除相当的能量，从而增加整个消能方案的消能效果，有利于减小水舌对河床的冲击作用。

(4) 水流的时均压力：出口段的测压管布置见图 4，底部时均压力分布见图 10。工作门全开时，底流全为正压，且随水位的增加而加大。侧墙部分，在挟气旋滚附近为零压，其余为正压。但当工作门局部开启时，在跌坎附近存在一定的负压，侧墙有相当部分位置产生负压，负压的大小随水位的增加而加大，但位置随开度而异，各测组的时均压力值见表 4。

表 4 较优方案明流段时均压力分布

压力单位 (mH<sub>2</sub>O)

挑角	30°				35°						
	全开				全开				1/2	1/4	
工作门开度											
水位	1137.18	1181.79	1200.00	1205.27	1137.11	1180.98	1201.59	1204.85	1200.00	1200.00	
出口弧面	1	0	0	0	0	0	0	0	60.0	60.0	
	2	0	0	0	0	0	0	0	60.0	60.0	
	3	0	0	0	0	0	0	0	60.0	55.6	
	4	0	0	0	0	0	0	0	52.6	45.0	
弧面跌坎	5	7.2	8.2	7.8	7.2	6.6	6.6	6.8	8.0	-2.4	-4
	6	8.1	9.2	9.4	8.8	7.5	8.0	8.3	9.4	-1.6	-4
	7	7.9	9.5	10.3	9.8	7.7	8.9	9.2	10.0	1.6	-2.4
侧墙	8	0	0	0	0	0	0	0			
	9	7.0	0.2	0.3	0.6	5.6	0.4	0	0.2		
	10	2.9	7.0	8.0	7.2	2.7	6.4	8.6	8.8		
	11	2.6	4.2	5.1	5.2	2.3	3.8	4.6	5.0		
	12	3.4	6.0	8.0	7.6	3.2	5.7	6.7	7.2		
	13	4.4	7.6	10.6	9.6	4.2	7.6	9.4	7.4		
	14	4.8	7.8	10.4	9.6	4.7	7.8	10.0	10.2		
	15	5.0	8.8	11.2	10.8	5.3	8.8	10.9	11.4		
	16	5.2	9.4	12.0	11.6	5.9	10.6	12.8	13.8	1.8	-1
	17	5.2	9.3	11.4	11.6	6.8	12.6	15.6	16.0	0.4	-1.7
	18	5.5	10.7	13.2	13.4	8.2	15.3	19.0	15.8		
	19	1.2	0	0	-0.1	0.9	0	-0.1	0		
墙	20										
	21	5.8	10.6	12.8	13.4	6.2	10.8	12.9	13.4		
	22	6.6	11.8	15.4	15.3	6.6	11.9	14.1	14.2		
	23	8.4	16.4	20.4	21.0	8.5	16.4	20.6	19.4		
	24	10.0	20.2	21.5	25.6	10.2	19.6	26.0	25.6		



续表 4

	25	9.9	19.2	22.5	24.5	10.0	19.8	24.6	23.0	2.6	-0.3
	26	9.6	19.0	23.8	23.8	9.8	18.7	23.2	23.6	4.4	0.4
	27	9.6	19.2	24.4	24.6	10.7	20.8	26.0	26.2	11.5	4.2
	28	9.0	14.4	14.0	14.4	9.2	13.4	15.1	18.0	10.2	0.1
	29	13.5	27.8	33.6	35.0	13.6	25.6	34.4	34.5	18.8	1.8
	30	14.2	29.6	35.8	38.4	14.8	30.4	38.0	37.2	16.0	7.4
反弧底板	31	6.8	8.8	8.6	7.6	7.8	9.4	5.4	10.0	3.0	-1.4
	32	7.0	6.6	7.4	6.6	7.1	7.6	7.4	7.4	9.4	2.0
	33	9.8	14.7	16.2	17.1	10.2	15.0	16.0	17.0	24.0	19.4
	34	15.2	31.4	36.2	40.6	15.6	31.2	37.2	33.5	25.0	18.2
	35	16.0	36.0	43.6	44.4	16.7	34.0	45.2	44.0	18.3	10.5
	36	14.2	29.4	35.0	37.4	14.4	28.6	38.0	38.0	14.4	9.0
	37	11.1	24.0	26.4	28.0	11.3	22.8	26.0	28.6	9.4	4.8
	38	7.8	17.4	20.0	21.5	9.6	19.6	24.5	25.0	11.2	7.9
	39					7.6	16.0	18.3	18.6	7.8	5.4
	40					2.7	5.4	6.3	6.6	3.2	2.4

(5) 水流脉动压力: 现将出口, 小挑坎 ( $p_7$ ), 跌坎 ( $p_8$ ) 及反弧 ( $p_{12}$ ) 的脉动压力幅值谱绘于图 11。显然谱曲线基本为“衰减型”, 同一测点不同水位谱曲线的特征相似, 但高水位的幅值较高, 相应测点的概率密度曲线见图 12, 基本符合正态分布。

3. 关于空蚀问题 库水位 1200 m 时, 明流段水流的时均流速达 40 m/s 左右, 空蚀问题显得突出, 试验过程中考虑尽可能提高边界的时均压力, 以提高水流的空穴数。正常运行时, 边界时均压力全为正值, 而且数值较大。侧墙有些部位为零压或轻微负压, 实际上, 该处已直接与空气接触。

库水位 1200 m 时, 工作门全开代表性部位的空穴数见表 5。

表 5 明流段水流空穴数

测点	$p_7$	$p_8$	$p_9$	$p_{12}$
位置	小挑坎	跌坎	侧墙	反弧
K	0.323	0.310	0.401	0.554

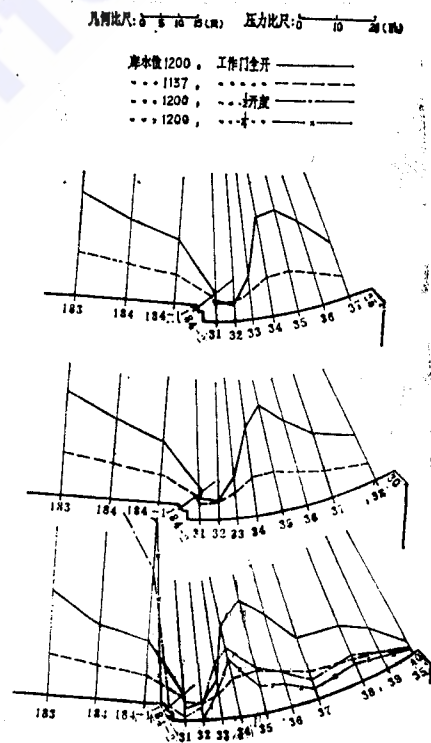


图 10 出口底部时均压力分布图

由于流速太大, 空穴数较小, 从流速和空穴数两方面看, 明流段的表面都需要进行特殊处理。如前所述, 水流经过突扩, 靠近边墙部分已有一定程度的掺气, 这将有助于提高抗蚀能力。

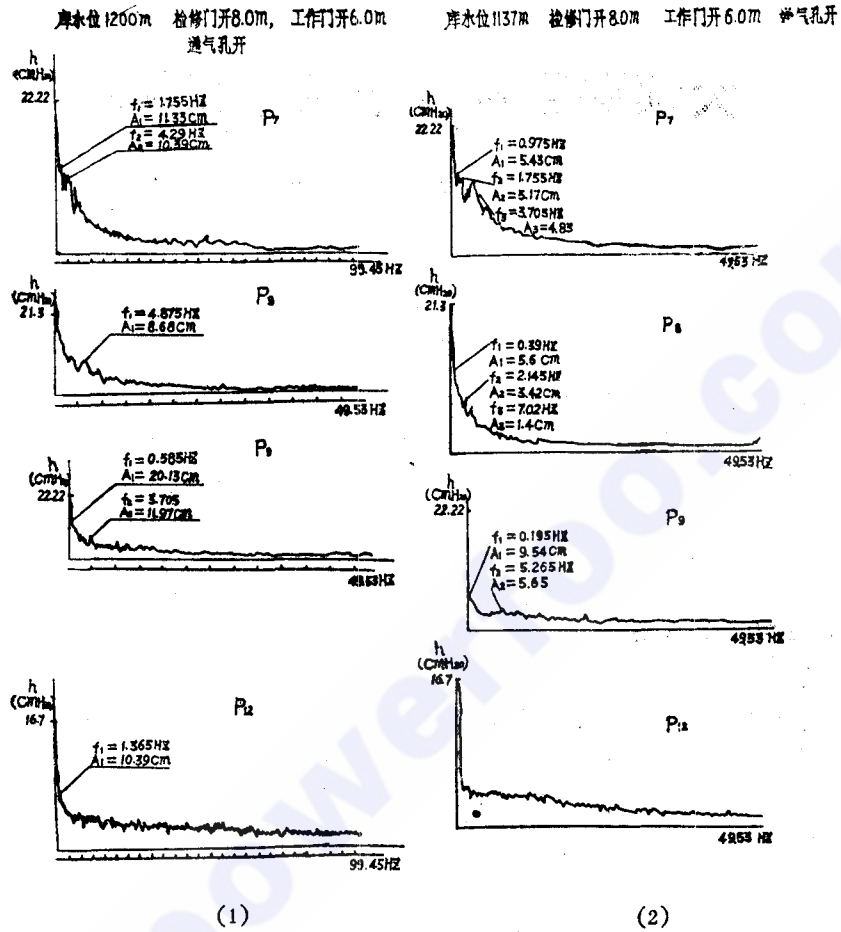


图11 明流段压力脉动谱曲线

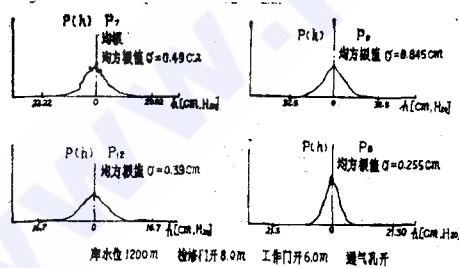


图12 明流段测点压力脉动幅值概率密度

## 五、结 语

1. 所提的出口体型方案除掺气槽外,水力学方面基本满足设计要求,可作为进一步设计的基础。而且出口体型优化试验成果可供类似拱坝中(底)孔选型时参考。本试验仅进行单孔试验,中孔的总泄量与中表孔水舌碰撞的实际消能效果,需在整体模型中加以验证。

2. 事故平板门局部开启时,特别是小开度时,紧靠门槽下游附近出现较大负压,中孔非正常泄流时,可能形成明满流过渡状态,流态不稳,压力脉动显著增大,对泄水结构将产生有害作用,应避免这种状态发生。

3. 进一步提高明流段抗空蚀的能力及偏心铰弧形门启闭过程的缝隙水力学问题,有待进一步试验研究。