

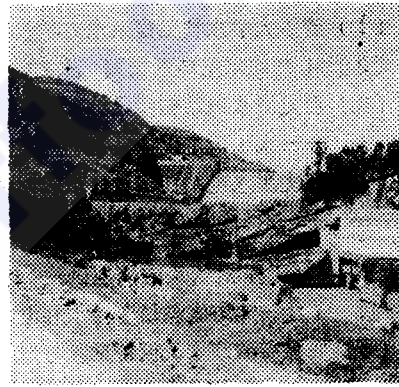
# 下洞电站混凝土重力坝溢流振动研究

秦惠承 朱志华 张兰 许丽云

(水电部成都勘测设计院科学研究所)

## 一、前言

下洞水电站系龙溪河四级电站,挡水建筑物为混凝土重力坝,最大坝高40米,坝顶长208.9米,总库容2000万米<sup>3</sup>,装机2×1.5万千瓦。1957年开工,1958年投产(照片1)。本工程设计等级为IV级,大坝中部为开敞式溢流坝段,设计泄洪流量2300米<sup>3</sup>/秒,泄洪能力2700米<sup>3</sup>/秒;相应单宽流量33.75米<sup>3</sup>/秒一米,由上游狮子滩水库调节控制。运行24年来,总发电量30余亿度,泄洪64次,最大流量2000米<sup>3</sup>/秒。修建时曾考虑到长江三峡开发后本工程将被淹没,故按临时性工程设计,标准偏低,施工质量较差,一直“带病”运行。1968年7月泄洪时,在廊道内发现有较强的噪声和振动现象,为确保工程安全,狮子滩水库被迫降低防洪限制水位,规定下泄洪水不超过2000米<sup>3</sup>/秒;因此平均年损失电能800万度<sup>[1]</sup>。



照片1 下洞电站溢流重力坝全貌

1982年3月全国防汛工作会议将下洞电站的大坝列为危险建筑物,需进行加固处理。根据大坝加固设计的需要,我所与核工业部2904厂、长寿发电厂共同进行了大坝溢流振动现场试验研究,其主要任务是:1)测定大坝的动力特性;2)测定大坝溢流的振动量级,评价大坝溢流振动安全性;3)探索大坝溢流振动的主要原因。

## 二、试验情况〔2〕

基于上述试验研究任务,确定以大坝的三种受激状态作为测试状态,即自然脉动,水库下游深潭爆炸激振和四种流量的溢流振动。试验中共采用60个传感器测定加速度、动水压力、动应变和噪声等动态要素。考虑到右岸非溢流坝段存在较严重的安全问题,为大坝加固设计所关注,因此,右坝段测点布置较密,并以有代表性的16号坝块为研究重点(测点布置见图1)。

加速度测量采用YD—43及C9402两种压电晶体加速度计,可分别测定0.001g~

\*参加现场试验的有所结构、水工、材料等专业组人员17人,另有核工业部二九〇四厂和长寿发电厂的有关人员近80人。

0.1g和0.01g~1g的振动信号，相应的分辨率各为0.0005g及0.005g。脉动压力测量采用SZ—2型渗压计(去掉头部的滤水石)，动应变测量采用DZ—25型应变计，灵敏度分别为0.016公斤/厘米<sup>2</sup>/10mv和1με/10mv。噪声测量采用丹麦的全套测试记录系统。

爆炸激振试验采用定点定量水下爆炸方式进行，以尽量减少激励源的随机性。爆

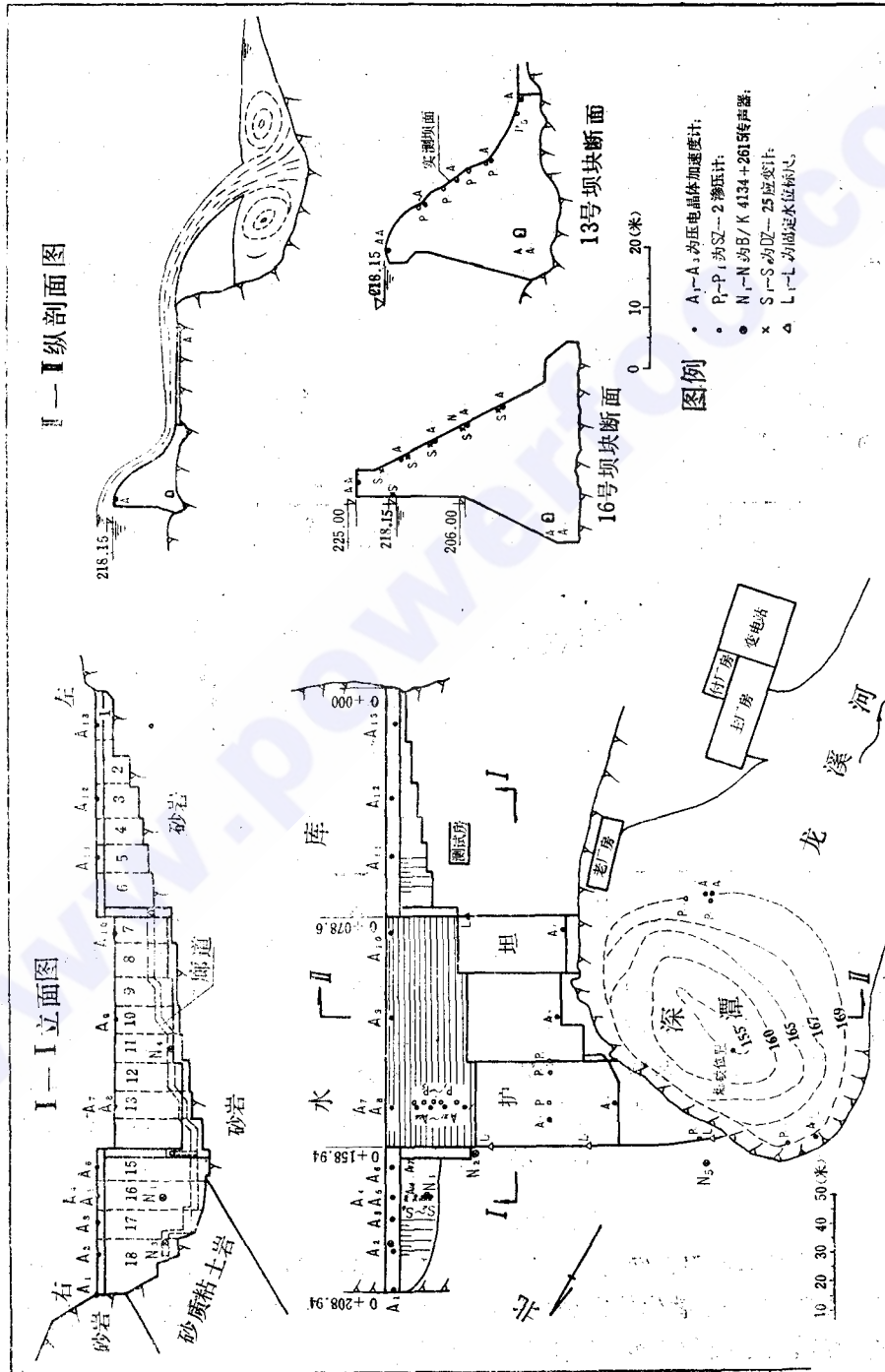


图1 重力坝溢流振动试验测点示意图

炸点选在深潭中央水面下4米深处,其平面位置大体是溢流水舌落点中心,爆炸当量为1公斤TNT炸药。爆炸时,深潭周围首先感到地面抖动,随后听到沉闷的声响,随即水面涌起一高20~100厘米的柱状波,并引起深潭水面长时间波动。回放各加速度测点磁记录,脉冲信号比较明显,峰值加速度 $0.08g \sim 0.2g$ ;5个固定噪声测点记录到的噪声信号波形良好,总声压级103.8分贝;但各动应变测点均无反应,经现场检验后,确认动应变信号过小,用DZ-25型应变计无法量测。

另外,还在库内用0.2公斤炸药距坝80米进行了水下爆炸激振试验,发现坝上各点加速度量级都超过深潭爆炸时的4倍以上。

在自然脉动状态下记录了各测点的振动加速度信号和噪声信号,量级都很小。

当泄洪流量基本稳定在800、1200、1500、1750米<sup>3</sup>/秒四种状态下,分组记录了各测点的加速度信号A、脉动压力信号P、应变信号S和噪声N,同时观测了坝顶位移和沉陷、坝基扬压力和漏水量、各固定水尺水位以及各种水力学现象。回放磁记录,发现振动加速度信号并不明显,几乎淹没在干扰信号之中;随着流量的增加,静应变也有所增加,但均未观测到动应变信号;脉动压力信号和噪声信号较明显地表现了随机过程特征。

溢流时坝顶永久测点的位移和沉陷量不足1毫米,坝基扬压力和漏水量略有增加,但均未超过设计允许值。护坦上4个水尺的水位及其波动情况见表1。

表1 护坦水位波动情况

流量 (米 <sup>3</sup> /秒)	水尺编号及水尺 零点高程(米)	1号 194.70	2号 193.70	3号 193.00	4号 200.20
800	平均水深(厘米)	73.6	86.0	166.5	43.0
	水位变幅(厘米)	±2.6	±5.0	±7.5	±1.5
1200	平均水深(厘米)	88.0	110.0	227.5	56.3
	水位变幅(厘米)	±2.6	±5.0	±7.5	±2.75
1500	平均水深(厘米)	117.5	137.5	247.5	73.4
	水位变幅(厘米)	±7.5	±7.5	±7.5	±3.6
1750	平均水深(厘米)	135.0	142.5	252.5	84.4
	水位变幅(厘米)	±5.0	±7.5	±7.5	±3.0

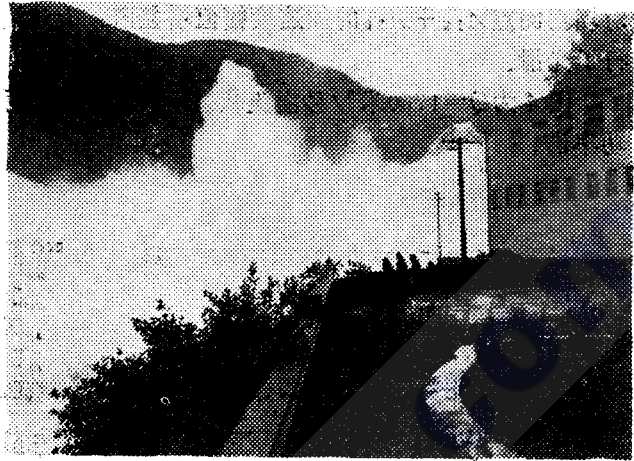
在各种流量下,溢流坝段中部周期性地出现旋涡状流带,从上到下展布在10号坝面上,并在邻近坝面派生出一些小的涡流带。12号到14号溢流坝块上水流有掺气现象,明显脱离坝面,溅起白色浪花。护坦很不平整,且有二级横向跌坎,流态紊乱,掺气充分;护坦末端水流通过未衬砌岩面时,激起高大的旋滚,成白色水团冲向深潭。掺气水团进入深潭后,受到流体的振荡冲击,碎裂后使深潭被水珠和浪花形成的烟雾所笼罩,并间歇性升起高40~50米的柱状水花(照片2)。从各方面观察,溢流水舌的掺气和水舌后方空腔内的补气还是充分的,水舌后方不大可能形成负压区。

### 三、主要成果

爆炸激振信号为有限区间的非平稳随机过程,采用傅里叶变换并考虑概率理论进行数据处理较为适宜,一个替代的方法是用功率谱<sup>[3]</sup>;自然脉动和溢流振动信号则可视各态历经的平稳随机过程<sup>[4,5,6]</sup>,宜采用功率谱分析方法。

在正式处理以前,对各种信号进行过预分析,噪声信号、爆炸激振加速度信号和溢流脉动压力信号较佳;自然脉动和溢流振动加速度信号微弱,且混有较强的系统噪声和工频干扰;动应变响应无信号输出。

数据处理采用丹麦B./K.公司的3348模拟分析器进行(图2)。图中2107作带阻滤波器使用,以滤掉50Hz工频信号;模拟分析器2030可给出400个等带宽频谱值,故确定分析频带0.5~



照片2 泄洪时坝下出现的柱状水花

200Hz,带宽0.5Hz;爆炸激振加速度信号用自动触发方式采样1200点,溢流振动加速度和脉动压力信号用6701通过16次谱平均法得到频谱图;分析结果经专用计算机转换后输出,包括均方值,均方根值,每20Hz活动带内的能量及功率谱密度峰值,0.5~100Hz功率谱密度函数值,然后用PC-1500计算机再整理并绘制各种谱图。

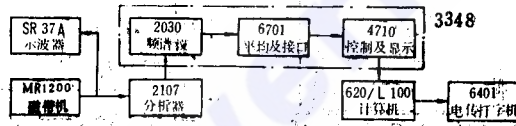


图2 3348模拟分析器框图

表2、3分别为典型测点加速度特征值统计和脉动压力特征值统计。

图3为16号坝块A<sub>4</sub>、A<sub>16</sub>两个典型测点的单边自功率谱、对振源测点A<sub>32</sub>+A<sub>34</sub>和

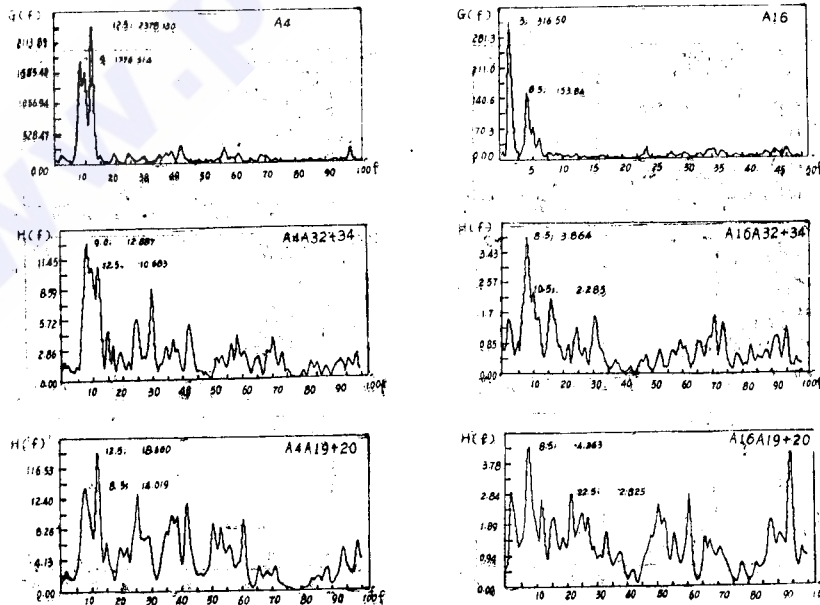


图3

对坝基测点  $A_{19} + A_{20}$  的加速度幅值增益谱, 上述谱图已用汉宁 (Hanning) 窗函数进行了光滑。

图 4 为  $Q=1750$  米<sup>3</sup>/秒溢流状态下坝面、护坦和深潭边沿共 6 个脉动压力测点的自功率谱。

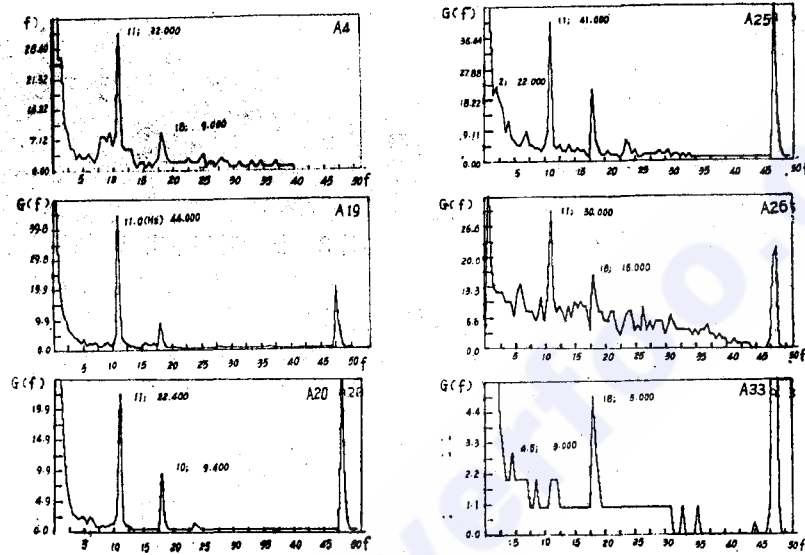


图 4

图 5 为  $Q=1750$  米<sup>3</sup>/秒溢流状态下 13 号坝块、16 号坝块和深潭边缘共 6 个加速度测点的自功率谱。

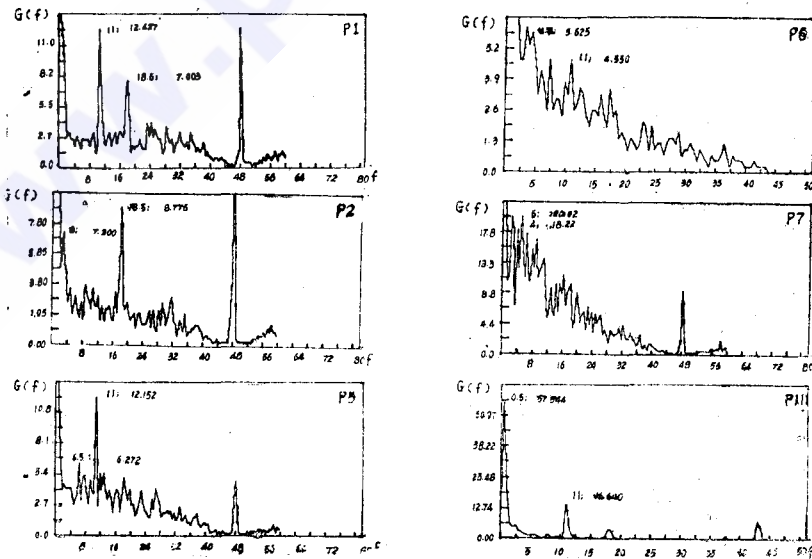


图 5



表4为各种测试状态下噪声测点的总声压级和A计权声级。图6、7、8分别给出16号坝块下坝坡(N<sub>1</sub>)、17号坝块廊道内(N<sub>3</sub>)和深潭边沿(N<sub>5</sub>)共三个测点的1/3倍频程声谱图。

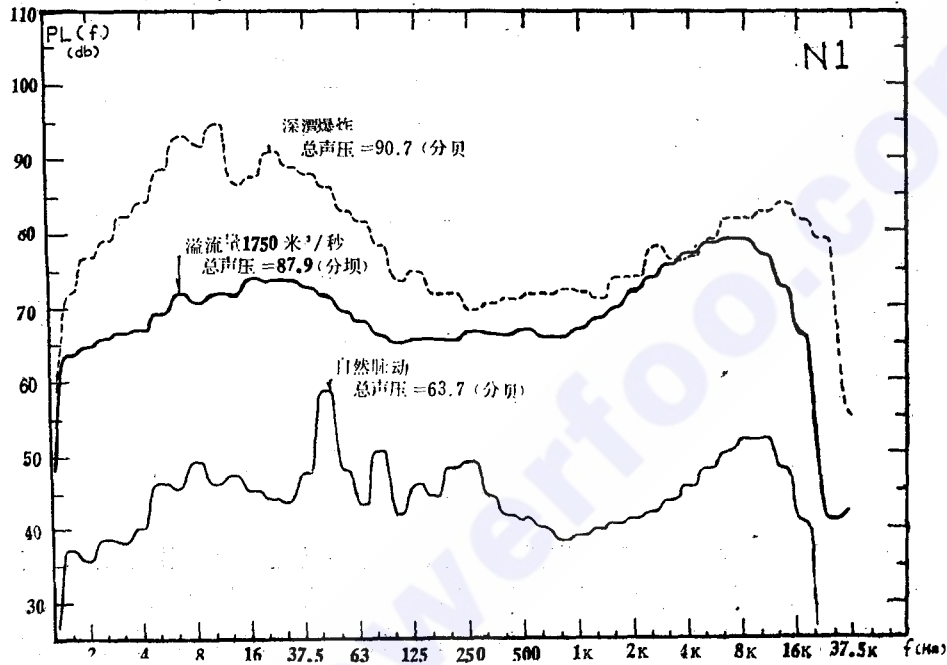


图6

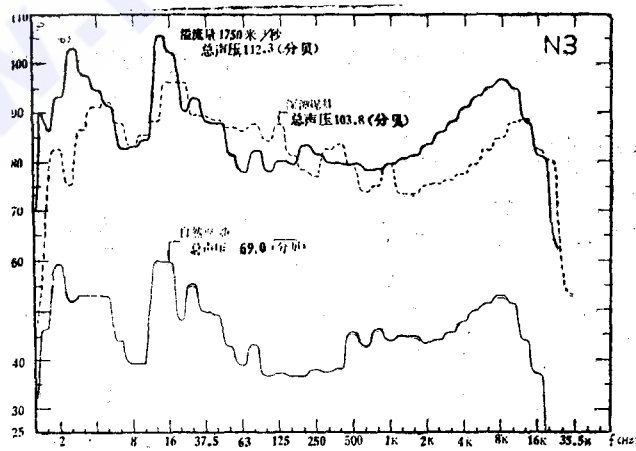


图7

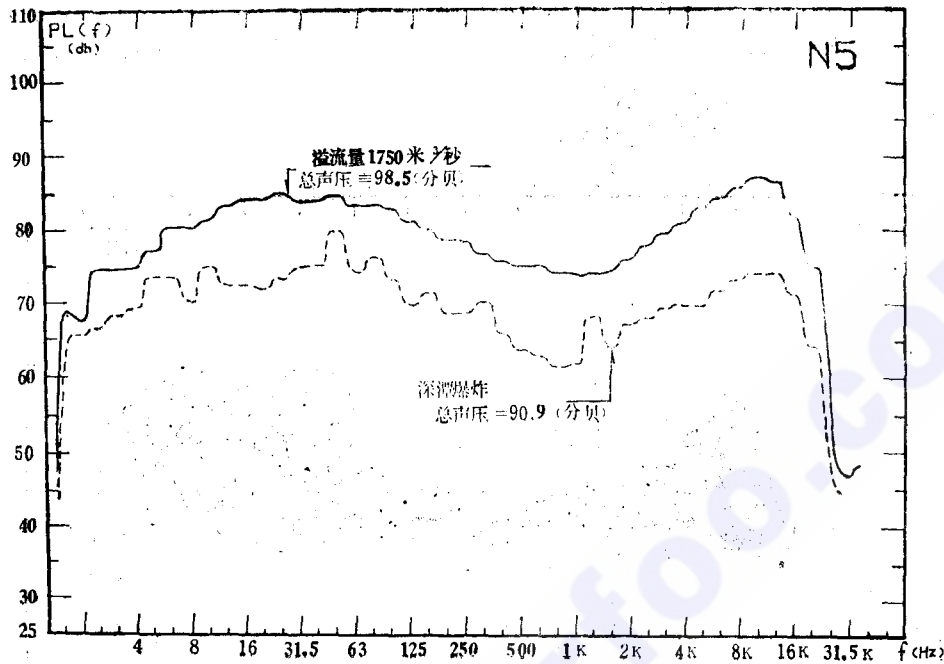


图8

试验成果的误差来自测试系统和数据处理，其中主要是干扰和系统噪声、安装调试误差和统计误差。分析后认为，爆炸激振加速度信号、大流量脉动压力信号及噪声信号，误差较小，成果的可信度高；其它信号比较微弱，信噪比不足，对成果的精度影响较大，在综合分析时应予注意。

### 四、综合分析

#### (一) 大坝的动力特性

将大坝连同基础视为一个稳定的线性力学系统，当在L处受到时间函数 $X_L(t)$ 激励作强迫振动时，K点的响应历程 $y_K(t)$ 可表示为卷积分形式：

$$y_K(t) = x_L(t) * h_{KL}(t) \tag{1}$$

在复频率域中，式(1)变为：

$$Y_K(if) = X_L(if) * H_{KL}(if) \tag{2}$$

结构物的脉冲响应函数 $h_{KL}(t)$ 和传递函数 $H_{KL}(if)$ 构成傅里叶对，分别在时域和频域中表征系统的动态特性，它们均可通过测量输入、输出过程后经数据处理求得。采用较粗略的自谱分析形式，传递函数的模代表输出的幅值增益：

$$|H_{KL}(f)| = ((G_{YY}^K(f)/G_{XX}^L(f))^{1/2} \tag{3}$$

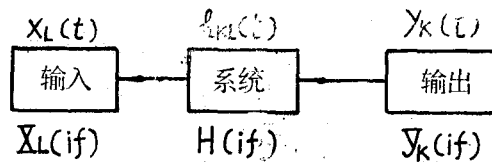


图9 系统方块图

表4 噪声特征值统计表

类别	测号	测点		各种测试状态下的总声压级 (db)				溢流噪声的A计权声级 (db)			
		部	位	Q=800	Q=1200	Q=1500	Q=1750	Q=800	Q=1200	Q=1500	Q=1750
固定	N 1	16坝块下坝坡		83.9	88.6	88.6	87.9				
"	N 2	右廊道进口外侧	深潭爆炸	90.7	73.7						
"	N 3	18坝块廊道内	自然脉动	64							
"	N 4	11坝块廊道内		103.8	69						
"	N 5	深潭右侧15米		86.3							
流动	1	测试房外		90.9							
"	2	左廊道进口外		90	92	94	95.0	80	79	75	74
"	3	8坝块廊道内		94	96	99	101	83	84	83	77
"	4	9坝块廊道内		100	104	104	105	70	70	69	67
"	5	12坝块廊道内		102	102	105	106	70	67	66	65
"	6	13坝块廊道内		103	103	106	105	68	66	67	66
"	7	14坝块廊道内		100	103	104	106	68	67	71	66
"	8	15坝块廊道内 (拐一)		100	102	103	104	69	73	73	69
"	9	15坝块廊道内 (拐二)		101	103	106	106	72	71	70	66
"	10	16坝块廊道内 (拐三)		102	103	103	106	70	72	68	66
"	11	17坝块廊道内		100	103	106	107	69	70	64	66
"	12	右廊道进口内侧		102	103	104	105	70	64	62	60
"	13	右廊道进口外侧		103	104	106	108	79	80	74	72
"	14	右导墙中部		95	96	98	98	89	87	87	86
"	15	右导墙末端, 深潭右		97	98	99	100	76	81	78	81
"	16	4坝块坝顶		97	98	100	100	75	75	74	75



式中  $G_{YY}^K(f)$  和  $G_{XX}^L(f)$  各自为  $y_K(t)$  和  $X_L(t)$  的自谱。

研究表明〔6.7.8〕, 自然脉动是具有一定谱特性的随机过程, 但它的功率谱比较平坦; 建筑物受其作用时, 常产生以结构固有频率为主的振动, 因此可用响应的自谱识别系统的动态特性, 唯下洞重力坝较低, 脉动振幅小, 识别精度低。

爆炸振动效应可视为球形压力脉冲引起的地震动; 水下爆炸时, 介质水只传播纵波, 震源明确, 机制较单纯, 其基频、谐波和波动混响, 包含了丰富的频率成分,〔6.8〕所以自然可用响应的自谱或其加权谱识别系统特性。考虑到振源的影响, 按式(3)计算了坝上测点对深潭边沿测点的加速度幅值增益谱。由此可估计各点所代表的坝块的基频特性(表5), 表中同时列出按参考文献〔9〕计算的基频。

A. K. Chopra用有限元法计算过库水和弹性基础对混凝土重力坝频响特性的影响, 其结果与图3极为相似〔10〕。用坝上测点的加速度幅值增益谱计算的16号坝块的一阶振型图(图10), 图中还绘制了刚性基础重力坝的一阶理论振型〔9〕和考虑基础弹性影响时坝顶、坝基两点的归一化加速度理论值〔10〕。

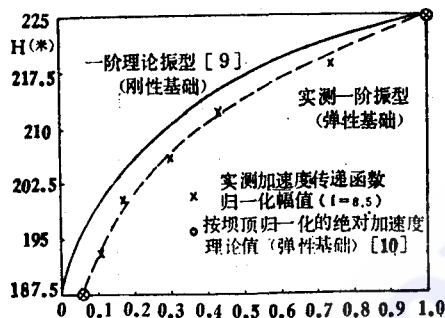


图10 16号坝块一阶振型图

由此可见, 实测结果与理论计算基本一致。由于自谱分析无相位, 又受到各种干扰信号的影响, 高阶频率难以辨认确切。

## (二) 大坝的溢流振动

统计表明(表2)坝上各测点的振动加速度均方值为  $(2.1 \sim 19.4) \times 10^{-6} g^2$ , 均方根值为  $(1.47 \sim 4.41) \times 10^{-3} g$ ; 考虑到低频趋势项的影响、截断效应对工频干扰滤波不彻底等因素的影响, 评价本坝振动程度时, 最有意义的频率范围是  $3 \sim 40 \text{ Hz}$ , 在此活动带内, 振动

加速度均方根值为  $(0.69 \sim 1.65) \times 10^{-3} g$ , 它可能反应大坝振动的统计平均程度。

因振动加速度的均值为零, 故其均方根值  $\sigma$  等于标准差; 设信号的概率密度函数符合正态分布, 则加速度值  $A$  位于  $\pm 3\sigma$  内的概率为:

$$P \{ -3\sigma < A \leq 3\sigma \} = 99.7\% \quad (4)$$

由此计算各典型测点的最大加速度绝对值见表6, 它在概率意义上给出溢流  $1750 \text{ m}^3/\text{秒}$  状态下, 各代表性部位的可能振动程度, 由此可知:

1. 坝基的振动加速度绝对值约  $0.005g$  左右, 不大可能达到  $0.01g$ , 这在修订的 Mercalli 烈度表 (MM 烈度) 中, 大体相当于 IV 度地震的量级\*;

2. 16号坝块水平顺河向振动加速度与竖向振动加速度的比值, 在廊道内为 1.3, 在坝顶为 1.7;

3. 16号坝块坝顶水平顺河向振动加速度对廊道内测点的动力放大系数为 1.7。

采用统计推断原理, 估计了在大于试验溢流量情况下, 坝和基础的可能振动程度, 结果表明: 在  $2300 \text{ m}^3/\text{秒}$  状态下, 振动量级将平均增加 1 倍左右, 有可能达到 MM 烈度表中 V 度地震的振动量级。

\* 应当指出, 用 MM 烈度表作对比, 只是为了给出比较直观的振动程度。实际上, 溢流振动的持续时间和振动特性与实际地震迥然不同, 它对坝的危害性也不能用 MM 烈度来简单地衡量。

表4 噪声特征值统计表

类别	测号	测点		各种测试状态下的总声压级 (db)					溢流噪声的A计权声级 (db)				
		部	位	深潭爆炸	自然脉动	Q=800	Q=1200	Q=1500	Q=1750	Q=800	Q=1200	Q=1500	Q=1750
固定	N 1	16坝块下坝坡		90.7	73.7	83.9	88.6	88.6	87.9				
"	N 2	右廊道进口外侧		101	64	95.4	97.6	97.7	98.1				
"	N 3	18坝块廊道内		103.8	69	106.6	108.7	110.9	112.3				
"	N 4	11坝块廊道内		86.3		103.0	103.0	106.0	106.0				
"	N 5	深潭右侧15米		90.9		94.5	94.5	98.3	98.5				
流动	1	测试房外				90	92	94	95.0	80	79	75	74
"	2	左廊道进口外				94	96	99	101	83	84	83	77
"	3	8坝块廊道内				100	104	104	105	70	70	69	67
"	4	9坝块廊道内				102	102	105	106	70	67	66	65
"	5	12坝块廊道内				103	103	106	105	68	66	67	66
"	6	13坝块廊道内				100	103	104	106	68	67	71	66
"	7	14坝块廊道内				100	102	103	104	69	73	73	69
"	8	15坝块廊道内 (拐一)				101	103	106	106	72	71	70	66
"	9	15坝块廊道内 (拐二)				102	103	103	106	70	72	68	66
"	10	16坝块廊道内 (拐三)				100	103	106	107	69	70	64	66
"	11	17坝块廊道内				102	103	104	105	70	64	62	60
"	12	右廊道进口内侧				103	104	106	108	79	80	74	72
"	13	右廊道进口外侧				95	96	98	98	89	87	87	86
"	14	右导墙中部				97	98	99	100	76	81	78	81
"	15	右导墙末端, 深潭右				97	98	100	100	75	75	74	75
"	16	4坝块坝顶								78			

### (三) 脉动压力特性

脉动压力的能量呈下降趋势连续地展布在很宽的频带内,但主要集中在低频段,0.5~20Hz活动带的百分能量占37~84.8%,平均为53.9%;20.5~40Hz活动带的百分能量占3.3~22.4%,平均为11.3%;其它8个活动带的百分能量均不足5%。在对大坝振动有关的3~40Hz活动带内,脉动压力的百分能量为27.7~65%,平均为44%,其中坝面5点平均38%,护坦两点平均54%,深潭边沿三点平均36%。

脉动压力的峰值频率在不同部位差异较大。坝面 $P_1 \sim P_5$ 测点,往往在11Hz和18.5Hz两处, $G(f)$ 值高于背景水平三倍以上,说明这是坝面脉动压力的前两个有意义的频率;护坦上四个测点均为连续下降谱,分辨不出突峰所代表的主频率;深潭内 $p_{1.0} \sim p_{1.2}$ 三个测点,在11Hz处均出现突峰,高于背景水平5倍以上,联系到深潭的边界条件和流态,可以确信,这正是深潭内脉动压力的主频率,它是在本工程特定条件下,深潭内水跃、涡流、紊流和混响的综合反应。

### (四) 噪声特性

表4以分贝标度列出各测点的溢流噪声总声压值(SPL),它是噪声总能量的客观标准;表中的A计权声级则是考虑人耳频率响应的主观评价标准〔11〕。由此不难看出溢流噪声空间分布特点:外声场近于均匀场;内声场(廊道内)的SPL值高于外声场,而A计权声级则相反;SPL值由深潭向右廊道口逐渐衰减,而A计权声级则逐渐递增,SPL值随溢流量的增加而递增,基本符合能量迭加原理,而A计权声级基本无变化。溢流噪声尚在人耳能够忍受的范围内。

三个噪声测点的声谱图表明,溢流噪声的频率成分非常丰富,但其能量主要集中在50Hz以下的低频段,其中3~20Hz的次声分量很强。噪声在外声场的谱图比较平坦,与内声场明显不同,这主要是由于廊道空间的混响所致,所以在3.15Hz和16Hz附近出现了突峰。

### (五) 溢流致振因素

纵然溢流噪声中次声分量较强,又包络了大坝的固有频率而有可能引起结构振动,但噪声的SPL值不超过120db,相应的声压均方根值 $P_{r.m.s.} = 2 \times 10^{-4}$ 公斤/厘米<sup>2</sup>,若扣除廊道混响和高频能量,相应的 $P_{r.m.s.}$ 值不超过 $2 \times 10^{-6}$ 公斤/厘米<sup>2</sup>,比实测动水压力复合值(表3)小50~100倍,因此溢流噪声不可能是引起大坝振动的主要因素。

根据表1的水位观测资料,可计算护坦典型部位的水力学要素,从而估计水流经过坝面及护坦的能量损失系数 $\eta$ ;令 $v$ 和 $v_0$ 代表水尺断面处的实测流速和该处的理论流速\*则:

$$\eta = 1 - (v^2/2g) / (v_0^2/2g) \quad (5)$$

虽然实际观测误差较大,且因未考虑水流掺气及横向流的影响而估算比较粗略,但仍可大体看出:水流通过坝面的能量损失约比水流在护坦上的能量损失大1倍左右,这主要是由于溢流坝面凹凸不平所致,实测13号坝面曲线表明,局部偏离设计曲线达30~60厘米。总起来看,水流通过坝面、护坦和深潭所消耗的水能约各占总能量的20%、10%和50%左右。水流能量损失的型式主要有:水跃、水流与边界面的摩擦、紊流、掺气、涡

\*注:理论流速以该处的总水头H按 $v_0 = \sqrt{2gH}$ 计算

流和噪声等, 表现为边界层的压力脉动。因此可以认为, 脉动压力所作的功来自于水流损失的能量, 从而引起结构的振动〔4〕。基于这个观点, 综合分析后可有:

1. 脉动压力的均方根值, 坝面为 $0.034\sim 0.051$ 公斤/厘米<sup>2</sup>, 护坦上为 $0.037\sim 0.063$ 公斤/厘米<sup>2</sup>, 按点面统计关系〔5〕换算后, 单位宽度上作用的表面力为: 坝面 $4.7\sim 7$ 吨/米, 护坦 $5.7\sim 9.7$ 吨/米, 同时考虑到动水压力的作用方向、部位和频率结构, 可以认为护坦上的脉动压力将不会是引起大坝振动的主要振源, 但对坝的竖向振动有影响。

2. 实测坝面和深潭脉动压力均方根值虽基本接近, 但 $P_{10}$ 、 $P_{11}$ 、 $P_{12}$ 三个测点只反映深潭边缘脉动压力情况, 按照二元射流的扩散理论〔12〕, 估算水舌冲击点附近的动水压力至少可达到 $6\sim 8$ 米水柱, 为 $P_{10}\sim P_{12}$ 实测值的 $15\sim 30$ 倍以上。由此可知, 水流对整个深潭的作用力将超过它对全部溢流坝面和护坦作用力的两倍以上。另外, 若仔细考察溢流状态的各种谱图, 可以看出, 不少坝上测点的加速度响应自谱图, 其谱峰值、谱型都与深潭周围的加速度和脉动压力自谱图更为相似。因此, 根据强迫振动的原理, 从对比激励力的量值和输入、输出谱的形状两个方面, 都可以认为深潭消能将是大坝溢流振动的主要振源。

3. 进一步将溢流和深潭爆炸两种测试状态下的实测加速度特征值进行对比, 各测点大体都有 $1:3$ 左右的统计关系, 即两种测试状态下的输入和输出有着对应的相似性, 而深潭爆炸时振源确切无误, 这从另一个侧面说明深潭消能将是大坝溢流振动的主要振源。

综上所述, 结合到大坝溢流的水力学现象观察和消能情况, 可以认为大坝溢流振动的主要振源在深潭, 而溢流坝面上的脉动压力对大坝的振动也有很大影响, 其中以13号坝块为代表的溢流坝段, 其振动直接受到坝面脉动压力的影响。溢流时, 大坝的竖向振动较大, 与同一测点的顺河向振动相近, 这是深潭消能、护坦和溢流坝面上压力脉动的综合反映。

## 五、结 论

(一) 根据试验研究任务提出的试验方案和测试方案基本切合实际, 试验进行得比较顺利, 基本上达到了预期的目的。但试验前估计的振动量级偏高, 测试系统的灵敏度略嫌不足, 部分测点干扰信号偏大, 给数据处理工作带来一定困难, 但经反复探索, 仍然获得了有重要价值的成果。

(二) 实测大坝各坝段的一阶固有频率不同: 右侧非溢流坝段 $8.5\sim 9.5$ Hz, 中部溢流坝段 $12.5$ Hz, 左侧非溢流坝段 $16$ Hz, 除了测试和计算误差外, 主要是由于地形、基础条件、结构差异和施工质量所引起。这说明大坝受激振动时各坝段相对独立, 符合宽河谷上重力坝振动的一般规律。四个竖向测点的加速度自谱分析表明, 大坝竖向振动整体性较强, 基频 $10$ Hz。16号坝块基频 $8.5$ Hz, 实测一阶振型与理论计算结果一致。

(三) 在溢流 $1750$ 米<sup>3</sup>/秒情况下, 坝基振动加速度将不会超过 $0.005g\sim 0.01g$ , 这在MM烈度表中大约与IV度地震相当; 尚不致危及坝的安全; 采用统计推断原理, 估计在溢流 $2300$ 米<sup>3</sup>/秒状态下振动量级将增加1倍左右, 有可能达到MM表中V度地震烈度水



平。当然，溢流振动不同于地震引起的结构振动，其危害性也不能简单用  $MM$  烈度衡量。

(四) 在  $0.5 \sim 200 \text{ Hz}$  范围内，脉动压力为连续下降谱，其能量主要集中在  $40 \text{ Hz}$  以下的低频段，主频率在坝面和深潭均为  $11 \text{ Hz}$  其次是  $18.5 \text{ Hz}$ ，与大坝顺河向的振动的基频甚为接近。脉动压力的均方根值一般为  $0.3 \sim 0.4$  米水柱，最大幅值估计约  $1$  米水柱； $P_6$  测点在右导墙弯道侧壁， $P_7$  测点在护坦横向流水舌落点附近，流态紊乱，脉动压力的幅值大于其它测点的  $1$  倍左右。

(五) 溢流噪声主要是深潭消能时将水流的部分动能直接转化为声能引起的，其频率成分丰富，次声分量很强。次声能使人感受到其压迫而引起心理上(甚至生理上)的反应，又包络了坝的基频而有可能引起结构振动，但其相应的声压量级很小，因而对大坝振动的影响微弱。

(六) 在溢流过程中，脉动压力所作的功来自水流损失的能量，从而引起结构振动。据此综合分析后认为：引起大坝振动的主要因素是深潭消能，其次是溢流坝面上的压力脉动(它对溢流坝段的影响比较显著)。溢流时，大坝的竖向振动与顺河向振动同一量级，这主要是深潭消能和护坦上压力脉动的综合反映。

### 主要参考文献

- [ 1 ] 重庆电业局“下洞拦河坝存在的问题及运行中采取的技术措施”，1981. 6.
- [ 2 ] 水电部成都勘测设计院科学研究所“龙溪河下洞水电站重力坝原型测振试验研究总结报告”，1983. 7.
- [ 3 ] J. S. 贝达特, A. G. 皮尔索“随机数据分析法”，凌福根译，国防工业出版社。
- [ 4 ] Robert D. Blevins, Flow-Induced Vibration, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1977.
- [ 5 ] 曾昭扬等“水流脉动压力下结构的随机振动分析”，水利学报，1981. 1.
- [ 6 ] M. 巴特“地球物理学中的谱分析”，郑治真等译，地震出版社，1978.
- [ 7 ] 胡韦贤等“建筑物脉动的Fourier谱分析”，中国科学院工程力学研究所“地震工程研究报告集(二)”，科学出版社，1965.
- [ 8 ] 华东水利学院工程力学实验室，“刘家峡大坝的抗震研究(一)原型测量”，1979. 3.
- [ 9 ] Anil K. Chopra, “混凝土重力坝的抗震设计”，秦惠承译，成勘院水电技术情报，1980. 第七期。
- [ 10 ] Anil K. Chopra and Sunil Gupta, Hydrodynamic and Foundation Interaction Effects in Frequency Response Function for Concrete Gravity Dams, Earthquake, Engineering and Structural Dynamics, Vol 10, NO 1, Jan-Feb, 1982.
- [ 11 ] P. M. 莫尔斯“振动与声”南京大学《振动与声翻译组》译，科学出版社，1974.
- [ 12 ] 日本土木学会“水力公式集”，铁道部科学研究院水文研究会译，人民铁道出版社，1977.