

底流消能诱发泄洪闸闸墩振动问题 分析和减振措施研究

刘 昉¹, 刘 晴¹, 李火坤², 黄 伟², 柳 波², 唐义员², 李玥康², 王文韬²

(1. 天津大学 水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300350; 2. 南昌大学 工程建设学院, 江西 南昌 330031)

摘 要: 底流式泄洪闸在大流量泄洪时常伴随着闸墩剧烈振动。针对泄洪闸闸墩振动问题,以某水电站为例,基于水弹性物理模型试验和原型观测,提出改善闸墩结构和优化水库调度方案的两种减振措施。物理模型试验为研究闸墩振动提供了数据支撑,而原型观测结果验证了模型试验的可靠性。结果表明:当泄流量为 $5\,400\text{ m}^3/\text{s}$ 时,通过优化水库调度,采用“低孔+表孔”联合泄洪的方式,表孔的泄流量从单独泄洪时的 $5\,400\text{ m}^3/\text{s}$ 转变为联合泄洪时的低孔泄流量 $3\,481\text{ m}^3/\text{s}$ +表孔泄流量 $1\,919\text{ m}^3/\text{s}$,表孔闸墩的振动位移标准差可从 $182.3\text{ }\mu\text{m}$ 减小到 $51.7\text{ }\mu\text{m}$,振动削减效果为 71.6% ;当表孔泄流量为 $10\,030\text{ m}^3/\text{s}$ 时,通过对闸墩进行加固,闸墩的振动位移标准差可由 $288.8\text{ }\mu\text{m}$ 减小到 $129.6\text{ }\mu\text{m}$,振动削减效果为 55.1% 。

关键词: 底流式泄洪闸; 闸墩振动; 减振措施; 模型试验; 原型观测

中图分类号:TV662+.2; TV663+.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2024)02-0107-08

Analysis of floodgate pier vibration induced by underflow dissipation and vibration reduction measures

LIU Fang¹, LIU Qing¹, LI Huokun², HUANG Wei², LIU Bo²,
TANG Yiyuan², LI Yuekang², WANG Wentao²

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. School of Infrastructure Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: Underflow dissipation floodgates are subjected to severe pier vibrations during high-flow discharge. Addressing to this issue, the hydraulic elasticity model test and prototype observation of a hydro-power station were conducted, with which two vibration reduction measures of improving pier structure and optimizing reservoir regulation schemes were proposed. The model test provided data support for the analysis of pier vibrations, while the prototype observation validated the reliability of the model test. When the discharge flow is $5\,400\text{ m}^3/\text{s}$, the combined discharge approach of “low orifices and surface orifices” can reduce the flow through surface orifices from $5\,400\text{ m}^3/\text{s}$ in standalone discharge to $1\,919\text{ m}^3/\text{s}$ in combined discharge, and the rest $3\,481\text{ m}^3/\text{s}$ can discharge from the low orifices. In this case, the standard deviation of pier vibration displacement at surface orifices decreases from 182.3 to $51.7\text{ }\mu\text{m}$, achieving a vibration reduction effect of 71.6% . When the discharge from the surface orifices reaches $10\,030\text{ m}^3/\text{s}$, reinforcing the piers can reduce the standard deviation of pier vibration displacement from 288.8 to $129.6\text{ }\mu\text{m}$, leading to a vibration reduction effect of 55.1% .

Key words: underflow dissipation floodgate; floodgate pier vibration; vibration reduction measure; model test; prototype observation

收稿日期:2023-10-22; 修回日期:2024-04-07

基金项目:江西省双千计划科技创新高端人才项目(jxsq2023201017);江西省水利厅重大科技项目(202325ZDKT05)

作者简介:刘 昉(1979—),男,辽宁抚顺人,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为工程水力学。

1 研究背景

底流消能具有入池流态稳定、消能效率高、泄洪雾化影响小的特点,但在高水头、大流量泄洪时,由于下游底板水流流速大、紊动剧烈,故泄水建筑物常因受到水体剧烈冲击而产生强烈振动,严重时甚至会发生失稳破坏^[1]。目前对水工建筑物的流激振动研究多以闸门为主,邓洪等^[2]、Zhang 等^[3]根据水力要素将影响闸门振动的振源分为闸门止水漏水、波浪冲击闸门、平面闸门的底缘型式以及闸后淹没水流等。实际上,闸墩作为闸门支绞推力的承载体,其大幅度振动也不容忽视^[4]。例如,蜀河水电站^[5-6]在建成初期连续遭遇两场特大洪水(30 年一遇),其泄洪闸闸墩顶部出现强烈振动;观音阁水电站^[7]在 2012 年泄洪期间,其泄洪闸顶部和闸墩顶部均出现左右振动,严重影响了泄洪闸的安全运行。

引起底流消能泄洪闸闸墩振动的原因归结为两个方面。一方面,当遇到特大洪水时,下游水位较高,水跃产生的回水剧烈作用在闸墩底部,引起闸墩振动;当下游产生淹没水跃时,闸门及闸墩的振动将会呈现量级式增长^[8]。另一方面,高薄的闸墩类似于悬臂梁,其结构刚性较弱,缺少侧向约束,容易受到水流激励诱发振动^[9]。由于流固耦合机理十分复杂,常通过有限元数值模拟来评估流激振动的安全特性^[10-12]。例如,刘计良等^[13]通过建立弧形闸门-闸墩体系三维模型,研究了闸门和闸墩在动力特性和流激振动响应方面的相互影响规律;张龔等^[14]采用有限元-无限元模型分析了高坝泄流引发的场地振动问题。根据泄流诱发闸墩振动的原因,梁超^[15]和李成业等^[16]通过水弹性模型试验分别对乌东德水电站和向家坝水电站进行了不同开孔条件下的泄流分析,通过优化水库调度达到减振目的;张艺莹^[17]通过有限元分析软件对预应力闸墩进行分析并提出了闸墩减振措施;何小敏^[18]和 Li 等^[19]提出在闸墩顶部施加加固梁的方法,以增加闸墩的侧向约束从而减小闸墩的振动。

结合前人的研究成果,本文以某水利枢纽为例,建立水弹性物理模型分析不同泄洪工况下的闸墩振动情况,并通过原型观测验证物理模型的合理性。结合闸墩振动的诱因,从“将闸墩原有的高薄悬臂结构转化为刚架结构”和“优化水库调度避免泄洪时出现淹没水跃”两方面提出减振措施,通过比较不同减振措施的减振效果,考虑经济性和施工可行性,提出了合理的减振方案,可为水电站的安全泄洪

运行提供参考。

2 工程概况

某水利枢纽工程正常蓄水位为 56.00 m,防洪限制水位为 50.00 m,防洪高水位为 62.30 m,校核洪水位为 64.30 m。表孔溢流坝坝段长度为 78 m,闸墩顶高程为 65.50 m,共设 5 个闸孔,每孔净宽 12 m,堰顶高程为 47.00 m,基础高程为 27.00 m,表孔从左至右依次编号为 1#~5#^[20]。表孔弧形闸门开启泄洪时会引起两侧闸墩振动,因而需要研究泄洪激励下闸墩振动规律,并在考虑工程布置与施工条件下,优选出一种减振效率较高的方案,以确保今后泄洪闸的安全使用和电站的正常运行。

3 物理模型试验结果与分析

3.1 物理模型相似条件

为了使物理模型能够较好地反映原型结构的真实情况,物理模型需满足一定的相似条件。其中,水力学条件相似是指按照“重力相似准则”输入动荷载,各水力学要素需满足相似比尺。

$$\lambda_v = \lambda_L^{0.5}, \lambda_Q = \lambda_L^{2.5}, \lambda_P = \lambda_L, \lambda_f = \lambda_L^{-0.5} \quad (1)$$

式中: λ_v 为流速比尺; λ_Q 为流量比尺; λ_P 为脉动压力比尺; λ_f 为脉动频率比尺; λ_L 为模型几何比尺。

结构动力学条件相似包括 4 个方面。

(1) 几何条件相似

$$\lambda_e = \lambda_\theta = 1, \lambda_u = \lambda_L \quad (2)$$

式中: λ_e 为线应变比尺; λ_θ 为角应变比尺; λ_u 为线位移比尺。

(2) 物理条件相似

$$\lambda_\mu = 1, \lambda_\sigma = \lambda_E \cdot \lambda_\varepsilon, \lambda_\tau = \lambda_G \cdot \lambda_\theta \quad (3)$$

式中: λ_μ 为泊松比比尺; λ_σ 为正应力比尺; λ_E 为弹性模量比尺; λ_ε 为应变比尺; λ_τ 为切应力比尺; λ_G 为剪切模量比尺。

(3) 运动条件相似

$$\lambda_{\gamma_s} = 1, \lambda_\zeta = \lambda_L^{2.5}, \lambda_E = \lambda_L \quad (4)$$

式中: λ_{γ_s} 为材料容重比尺; λ_ζ 为阻尼系数比尺。

(4) 边界条件相似

边界约束条件相似主要是指地基选取范围合理,边界受力条件相似主要是指水荷载相似,即水力学条件相似。

表孔溢流坝体型如图 1 所示。建立几何比尺 $\lambda_L = 50$ 的局部水弹性模型,原型水电站闸墩采用 C25 混凝土浇筑,根据公式(1)~(4)计算得出,制

作物理模型的水弹性材料容重为 24 kN/m^3 、泊松比为 0.167 、弹性模量为 560 MPa 。2[#]、3[#]、4[#]表孔溢流坝面及 3[#]表孔左、右闸墩采用特殊配比的加重橡胶制作,表孔其余部分用有机玻璃制作。在 3[#]表孔的左、右闸墩顶部各布置一个水平向振动位移传感器,传感器的测点桩号为 $0+19.30\text{ m}$ 。表孔溢流坝水弹性模型见图 2。

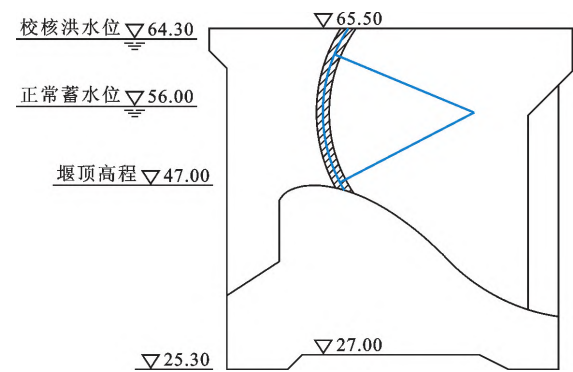


图 1 表孔溢流坝体型剖面图(单位:m)

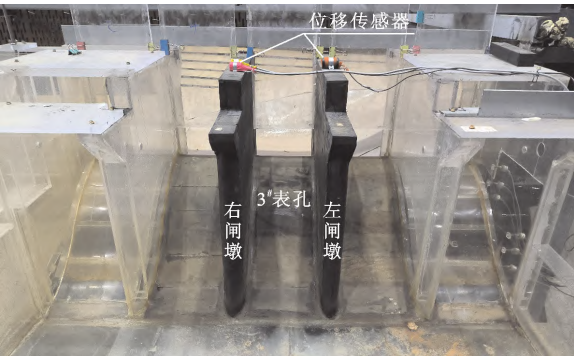


图 2 表孔溢流坝水弹性模型图

3.2 流量对闸墩振动的影响

利用水弹性模型试验观测不同泄洪工况下 3[#]表孔左、右侧闸墩的振动位移。模型试验设置了 3 组表孔闸门局开开度时不同上、下游水位情况共计 11 个泄洪工况(工况 1~11),闸门局开开度分别为

2.0、4.0、6.0 m。
表 1 为表孔 5 孔闸门局开各试验工况泄洪水位-流量关系,图 3 为表孔闸门局开各试验工况闸墩振动位移标准差;图 4 为闸门局开为 6.0 m、上游水位为 63.6 m 时(工况 11)左闸墩测点振动位移时程图及经过傅里叶变换后的功率谱密度曲线。本文中模型试验观测数据均已换算为原型值。

表 1 表孔 5 孔闸门局开各试验工况泄洪水位-流量关系					
工况	闸门开度/m	上游水位/m	下游水位/m	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	水跃形式
1	2.0	52.5	40.6	634	淹没
2		55.2	41.1	793	淹没
3		59.1	41.6	976	淹没
4		61.9	41.6	1 108	淹没
5	4.0	50.5	40.6	710	淹没
6		52.4	40.6	1 174	淹没
7		60.4	45.0	2 326	淹没
8		63.5	45.0	2 627	淹没
9	6.0	57.7	45.5	2 902	淹没
10		61.0	45.9	3 477	淹没
11		63.6	45.9	3 880	淹没

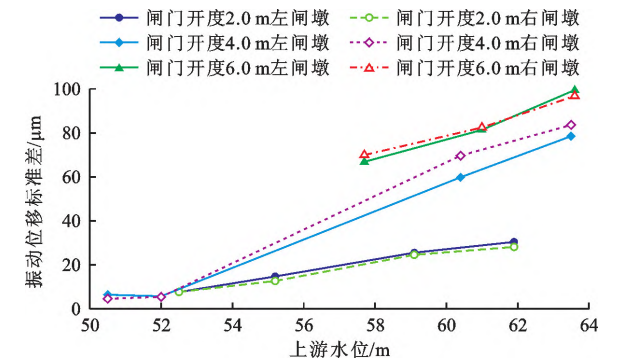


图 3 表孔闸门局开各试验工况闸墩振动位移标准差

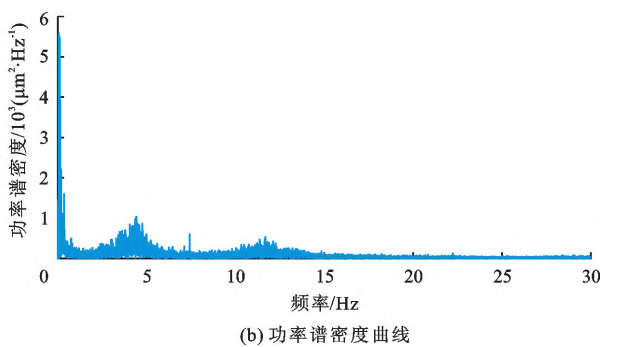
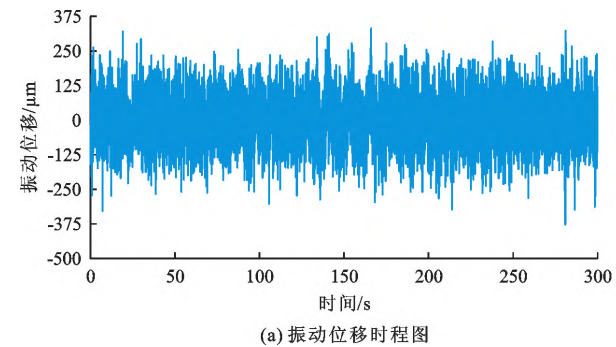


图 4 工况 11 左闸墩测点振动位移时程图及其功率谱密度曲线

分析图 3 可知,在表孔闸门开度相同的情况下,随着上游水位的升高,下泄流量增大,闸墩振动位移标准差也随之增大。发生闸孔出流时,在相同上游水位的情况下,闸门开度越大,则流量越大,相应的闸墩振动位移标准差也越大。在各试验工况中,工况 11 的闸墩振动位移最大,闸墩最大位移标准差为 99.5 μm ,以 3 倍标准差计算振动幅度,则闸墩振幅为 298.5 μm 。由图 4 可以看出,闸墩振动振幅约为 300 μm ,振动优势频率主要在 15 Hz 以内,主频在 0.5 Hz 以内。

3.3 水跃形式对闸墩振动的影响

由上节试验结果可知,表孔闸墩振动受到泄流量的影响,泄流量越大,则闸墩振动越剧烈。而最大泄流量出现在表孔 5 孔闸门全开的情况下,因此又设置了表孔闸门全开时不同上、下游水位情况共计 8 个泄洪工况(工况 12~19)进行试验观测。表 2 为表孔 5 孔闸门全开各试验工况泄洪水位-流量关系及相应的闸墩振动情况。

表 2 表孔 5 孔闸门全开各试验工况泄洪水位-流量关系及相应的闸墩振动情况

工况	上游水位/m	下游水位/m	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	水跃形式	位移标准差/ μm	
					左闸墩	右闸墩
12	56.1	37.0	3 309	远驱	21.1	15.6
13	58.7	36.3	4 846	远驱	83.0	55.2
14	60.3	36.3	5 881	远驱	119.6	114.9
15	63.0	38.3	7 782	远驱	169.1	166.3
16	56.1	47.5	3 309	淹没	155.7	175.5
17	59.0	48.7	5 035	淹没	181.7	200.4
18	60.4	49.8	5 948	淹没	193.5	191.8
19	63.0	49.6	7 782	淹没	248.8	243.8

将表 2 中的工况 12 与工况 16、工况 15 与工况 19 进行对比可知,发生淹没水跃时,闸墩的振动位移标准差比远驱水跃时更大。这是因为水跃淹没在墩前时,水流翻滚作用于闸墩,使闸墩产生较大的振动。例如,工况 15 发生远驱式水跃,左闸墩振动位移标准差为 169.1 μm ,右闸墩振动位移标准差为 166.3 μm ;而工况 19 发生淹没式水跃,左闸墩振动位移标准差为 248.8 μm ,比工况 15 增大了 47.1%,右闸墩振动位移标准差为 243.8 μm ,比工况 15 增大了 46.6%。由此可见,发生淹没水跃时不利于闸墩的安全运行。

参照《建筑工程容许振动标准》(GB 50868—

2013)^[21]和“以建筑物高度的十万分之一作为允许振幅”^[22]这一标准,该水电站表孔左、右闸墩的允许振幅约为 486.0 μm ,以 3 倍标准差计算振幅,可得左、右闸墩允许振动标准差为 162.0 μm 。表 2 中表孔 5 孔闸门全开各泄洪工况闸墩位移标准差最大值为 248.8 μm (工况 19),远大于允许振动标准差,因此需要对闸墩实施减振措施。

4 原型观测结果与分析

为验证水弹性模型的准确性,对该水电站的泄洪情况进行原型观测。原型观测对象为该水电站 3[#]表孔溢流坝左、右闸墩,测试工况为上游水位 53.44 m、下游水位 39.30 m,仅 3[#]表孔泄洪,泄流量为 300 m^3/s 。在 3[#]表孔左、右闸墩顶部共布置 22 个测点,其中,1[#]~20[#]为水平向振动位移测点,21[#]和 22[#]为垂向振动位移测点,各测点布置位置详见图 5 和表 3。

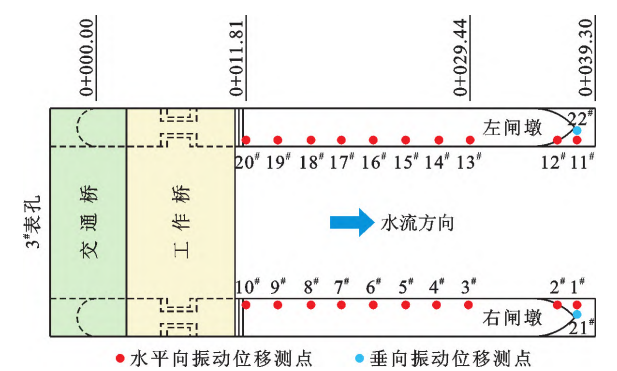


图 5 原型观测 3[#]表孔左、右闸墩各测点布置位置

表 3 原型观测 3[#]表孔左、右闸墩各测点布置桩号

闸墩	测点编号	桩号/m	闸墩	测点编号	桩号/m
右闸墩	1	0 + 037.86	左闸墩	11	0 + 037.86
	2	0 + 036.30		12	0 + 036.30
	3	0 + 029.31		13	0 + 029.44
	4	0 + 026.81		14	0 + 026.99
	5	0 + 024.36		15	0 + 024.36
	6	0 + 021.81		16	0 + 021.81
	7	0 + 019.31		17	0 + 019.31
	8	0 + 016.91		18	0 + 016.91
	9	0 + 014.31		19	0 + 014.31
	10	0 + 011.81		20	0 + 011.81
	21 *	0 + 011.81		22 *	0 + 011.81

注:“*”表示垂向振动位移测点。

图 6 为原型观测工况 3[#]表孔闸墩水平向各测

点振动位移标准差;图7为原型观测工况17#测点振动位移时程图及其功率谱密度曲线。

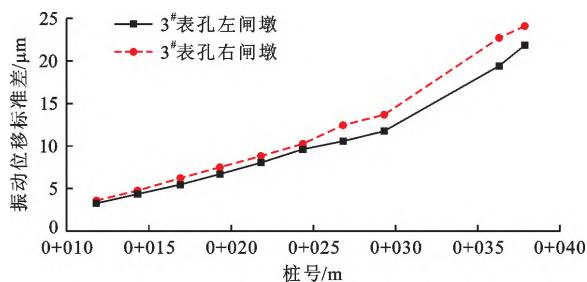
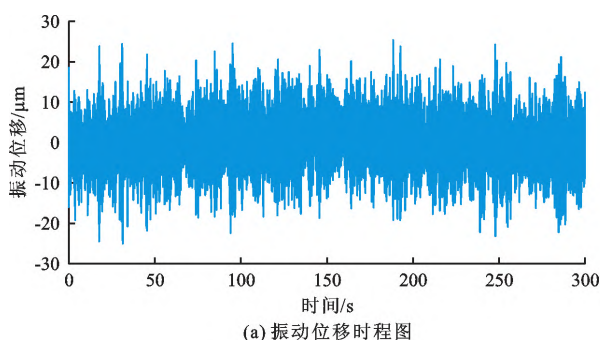


图6 原型观测3#表孔闸墩水平向各测点振动位移标准差

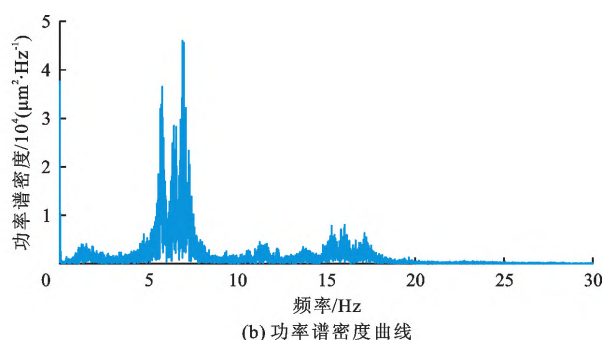
由图6可以看出,3#表孔左、右闸墩位移标准差值相差不大,且均随着桩号的增大,即越靠近下游,测点的振动位移标准差越大,闸墩振动越剧烈。桩号0+037.86m处右闸墩1#测点的振动位移标准

差最大,为24.1 μm ,以3倍标准差计算位移幅值约为72.3 μm 。由图6、7可知,17#测点的振动位移标准差为6.7 μm (图6);17#测点处闸墩最大振动位移双幅值为51.3 μm (图7(a));闸墩振动优势频率主要在20 Hz以内,主频集中在5~10 Hz之间(图7(b))。

为了对比原型观测与模型试验的结果,模型试验补充测试了与原型观测相同的工况,即上游水位53.44 m,下游水位39.30 m,仅3#表孔泄洪,下泄流量为300 m^3/s 。图8为该工况下相应测点模型试验观测的振动时程图及其功率谱密度曲线。试验结果表明,模型测点处闸墩的振动位移标准差为7.4 μm ,最大振动位移双幅值为48.4 μm (图8(a)),闸墩振动优势频率主要在20 Hz以内(图8(b))。

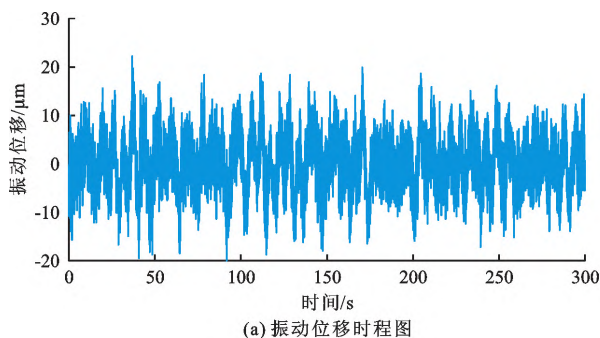


(a) 振动位移时程图

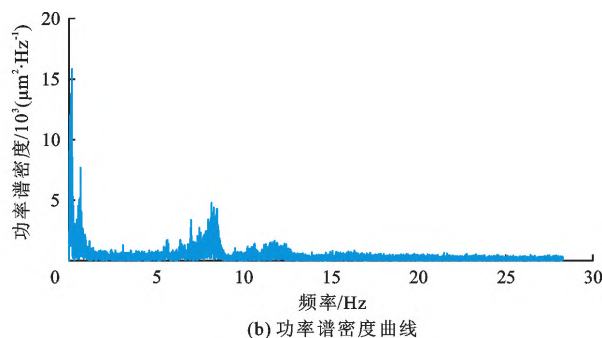


(b) 功率谱密度曲线

图7 原型观测17#测点振动位移时程图及其功率谱密度曲线



(a) 振动位移时程图



(b) 功率谱密度曲线

图8 与原型观测相同工况的模型试验闸墩测点振动位移时程图及其功率谱密度曲线

由于模型试验中水平向振动位移测点布置在3#表孔闸墩顶部的桩号0+19.30 m处,与原型观测中的17#测点位置基本相同,因此图7与图8的对比能够较好地反映模型试验测试结果相对于原型观测结果的准确性。对比图7与图8的振动位移,原型观测17#测点的振动位移标准差为6.7 μm ,最大振动位移双幅值为51.3 μm ;模型试验中得出的闸墩相同位置的振动位移标准差为7.4 μm ,最大振动位移双幅值为48.4 μm ,模型试验所得振动位移标准差与原型观测结果的误差为10.4%。对比图7与图8的功率谱

密度曲线可知,闸墩振动的优势频率均集中在20 Hz以内,由于原型中闸墩顶部存在交通桥、轨道梁等附属结构,故原型闸墩的振动基频大于模型试验中闸墩的振动基频,但两者总体趋势仍保持一致。

5 闸墩减振措施分析

通过模型试验研究,得出引起闸墩振动的原因主要有两方面:一是在高下游水位导致发生淹没水跃时,水跃翻滚作用于闸墩底部引起闸墩振动,此为影响闸墩振动的外界因素;二是闸墩高薄的悬臂结

构由于缺乏侧向约束,容易受水流荷载影响诱发振动,此为影响闸墩振动的内部因素。因此,闸墩的减振措施主要从避免发生淹没水跃以及改善闸墩原有结构两方面考虑。

5.1 水库调度方案减振措施

通过水弹模型试验研究,结合该水利枢纽工程的水位-流量关系,提出减振优化调度方案,表4为下游水位-流量关系。

表4 某水利枢纽工程下游水位-流量关系

下游水位/m	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	下游水位/m	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	下游水位/m	流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
34	0	43	2 890	52	9 740
35	93	44	3 430	53	10 800
36	287	45	4 030	54	11 900
37	549	46	4 660	55	13 100
38	842	47	5 300	56	14 300
39	1 190	48	6 040	57	15 500
40	1 570	49	6 880	58	16 800
41	4 980	50	7 810	59	18 100
42	2 420	51	8 760	60	19 400

对于同一泄流量,按照上、下游水位的不同,水库存在多种组合的闸门运行方式。前文中模型试验结果已表明,高下游水位引起的闸墩振动更为剧烈。

表5 泄流量为 $5\,400\text{ m}^3/\text{s}$ 时闸门优化调度方式组合及相应的表孔闸墩振动位移标准差

上游水位/ m	低孔流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	表孔流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	表孔闸门开启方式		低孔闸门开启方式		表孔闸墩振动 位移标准差/ μm
			开孔编号	开度/m	开孔编号	开度/m	
54	3 873	1 527	1 [#] ~5 [#]	4.0	7 [#] ~10 [#]	7.71	28.4
55	3 719	1 681	1 [#] ~5 [#]	4.0	7 [#] ~10 [#]	6.92	35.6
56	3 579	1 821	1 [#] ~5 [#]	4.0	7 [#] ~10 [#]	6.27	41.8
57	3 956	1 444	1 [#] ~5 [#]	3.0	7 [#] ~10 [#]	6.57	26.3
58	3 874	1 526	1 [#] ~5 [#]	3.0	7 [#] ~10 [#]	6.13	28.4
59	3 795	1 605	1 [#] ~5 [#]	3.0	6 [#] ~11 [#]	3.83	31.9
60	3 718	1 682	1 [#] ~5 [#]	3.0	6 [#] ~11 [#]	3.61	35.6
61	3 641	1 759	1 [#] ~5 [#]	3.0	6 [#] ~11 [#]	3.40	39.7
62	3 563	1 837	1 [#] ~5 [#]	3.0	6 [#] ~11 [#]	3.22	46.9
63	3 481	1 919	1 [#] ~5 [#]	3.0	6 [#] ~11 [#]	3.04	51.7

在表5所列闸门优化调度各组合方案中,表孔闸门最大泄流量为 $1\,919\text{ m}^3/\text{s}$,此时相应表孔闸墩振动位移标准差为 $51.7\text{ }\mu\text{m}$,比前述5个表孔全开运行方式的闸墩振动位移标准差减小了71.6%。

当泄流量超过 $7\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时,水库下游水位超过

根据该水电站运行方式中“当坝址来流量 $Q > 4\,800\text{ m}^3/\text{s}$,且前4 h水库坝址流量涨率 $\Delta Q < 0$,库水位高于汛限水位而低于防洪高水位时,水库泄流量为 $5\,400\text{ m}^3/\text{s}$ ”的规定,以水库泄流量 $5\,400\text{ m}^3/\text{s}$ 为例,通过模型试验测试给出优化调度前、后闸墩的振动位移标准差,以对比选择合适的减振调度方案。优化调度方案设计需遵循以下原则:

(1) 闸墩振动幅度的大小总体上取决于泄流量的大小;

(2) 在相同泄流量条件下,孔口开启方式对泄洪振动的影响较大,而上游水位的影响相对较小;

(3) 表孔泄流与低孔泄流流量差值不宜过大,否则会造成下游流态不利,表、低孔联合泄流是较为合理的闸墩减振调度方式。

由表4中下游水位-流量关系计算得出,当水库控制泄流量为 $5\,400\text{ m}^3/\text{s}$ 时,下游水位约为47.1 m。根据模型试验可知,当上游水位为59.6 m、下游水位为47.1 m时,5个表孔全开的泄流量达到 $5\,400\text{ m}^3/\text{s}$,此时表孔闸墩振动位移标准差为 $182.3\text{ }\mu\text{m}$ 。在保证总泄流量为 $5\,400\text{ m}^3/\text{s}$ 的条件下,优化泄洪调度方式为“低孔+表孔”联合泄洪,以减小表孔的泄流量,达到减轻表孔闸墩振动的目的。不同上游水位时两种孔口闸门的优化泄洪调度方式组合及相应的表孔闸墩振动位移标准差如表5所示。

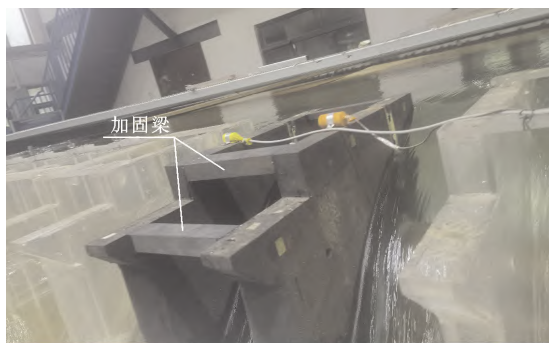
49 m,处于高下游水位工况。若表孔泄流量小于 $2\,000\text{ m}^3/\text{s}$,则下游流态较为不利,若表孔泄流量大于 $2\,000\text{ m}^3/\text{s}$,则对闸墩振动不利,可见大流量泄洪时仅依靠孔口闸门调度无法既满足水库安全运行条件又保障良好的下游流态,因此需要采取进一步的减振措施。

5.2 闸墩加固方案减振措施

由原型观测结果可知,越靠近下游闸墩振动越剧烈,在实施加固方案时,应优先考虑加固闸墩尾部。现拟定 3 种闸墩加固方案,表 6 为各加固方案加固梁截面尺寸(长度×宽度)及空间分布统计表,图 9 为闸墩加固后的水弹性模型图。

表 6 闸墩各加固方案加固梁截面尺寸与空间分布统计表

方案	位置桩号/m	截面尺寸/m
I	0+00.00	2.5×1.0
	0+24.20	4.0×2.0
	0+33.20	2.5×2.0
II	0+25.20	3.0×1.4
	0+32.70	3.0×2.0
III	0+00.00	2.5×1.0
	0+25.20	3.0×1.4
	0+33.70	3.0×2.0



(a) 闸墩局部加固图



(b) 闸墩整体加固图

图 9 表孔闸墩加固后的水弹性模型

为比较 3 种闸墩加固方案的加固效果,在闸门开度(5 孔全开)和水跃流态均相同的条件下,测试不同上游水位泄洪工况的各加固方案表孔闸墩振动位移标准差,结果如图 10 所示。

分析图 10 可知,在大流量情况下,采用 3 种方案加固后的闸墩振动位移标准差均明显减小,相比较而言,方案 I 的加固效果优于方案 II,方案 II、III 的加固效果相近。与方案 III 相比,方案 II 去掉了闸

首加固梁,其余加固梁的尺寸和位置均与方案 III 一致,而该 2 种方案最终加固效果基本相同,因此,在实际加固方案中可去掉对闸墩首部的加固。加固方案 I 与方案 II 相比,方案 I 的加固梁截面尺寸大于方案 II,当上游水位为校核洪水位 64.30 m,表孔下泄流量为 10 030 m³/s 时,加固前闸墩振动位移标准差为 288.8 μm;加固方案 I 的闸墩振动位移标准差为 118.6 μm,削减效果为 58.9%;加固方案 II 的闸墩振动位移标准差为 129.6 μm,削减效果为 55.1%。闸墩允许的最大振动位移标准差为 162.0 μm,加固方案 I、II 均能满足减振要求,综合考虑工程造价等因素,可适当减小加固梁的截面尺寸,故推荐加固方案 II 作为最终加固方案。

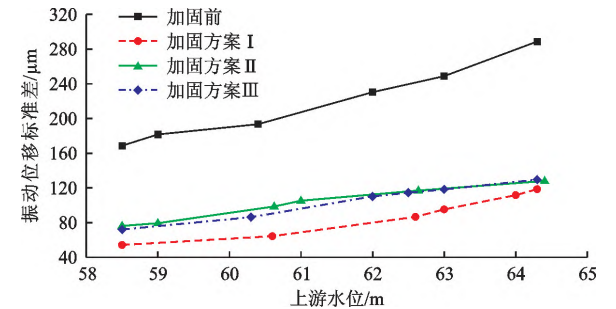


图 10 各加固方案表孔闸墩振动位移标准差对比

5.3 讨 论

本研究采用物理模型试验与原型观测相结合的方法分析影响水电站表孔闸墩振动的因素。物理模型试验中可对泄流量、闸门开孔方式、上下游水位等进行控制,从而模拟原型工程泄洪运行中没有出现的工况,为全面研究闸墩振动提供数据支撑;将原型观测的结果与物理模型试验的结果进行对比,可验证物理模型试验所得数据的可靠性。经对比,在相同工况下,物理模型试验与原型观测得出的闸墩振动位移标准差相差约 10%。因此,本研究开展的水弹性模型试验能较好地反映该水电站表孔闸墩的实际振动情况。

本研究分析了下泄流量和水跃形式对闸墩振动的影响,结果表明,下泄流量越大、水跃发生位置越靠近闸墩,则闸墩的振动越大。这与梁超^[15]在对乌东德水电站泄洪诱发场地振动问题研究中得出的“大流量泄洪水舌碰撞充分、水流紊动悬滚导致水垫塘振动大”的结论相似。在大流量情况下,可采取“表孔+低孔”联合泄洪的方式,当泄流量相对较小时,加开低孔闸门泄洪即可有效减轻闸墩振动,当泄流量超过 7 000 m³/s 时,仅靠水库泄洪优化调度无法满足闸墩减振要求时,则需要对闸墩进行加固。

研究中提出 3 种闸墩加固方案与蜀河水电站、观音阁水电站的加固方案得到的减振效果类似^[6-7]。径向加固梁约束了闸墩的左右振动,加固梁的横截面积越大,减振效果越好。蜀河水电站、观音阁水电站推荐采用闸墩“首部+尾部”的加固方案^[6-7],但本研究表明,闸墩振动剧烈部位主要集中在闸墩尾部,闸首加固对振动的影响不大,从工程经济的角度出发,应选取仅对闸墩中部和尾部进行加固的加固方案。采用本研究提出的方案加固闸墩后,能够满足振动幅度小于泄水建筑物高度的“十万分之一”的标准。根据研究结果,建议该水电站在泄洪运行中采取联合泄洪的方式,同时在闸墩两侧施加混凝土加固梁对闸墩进行加固。

6 结 论

针对底流式泄洪闸墩振动问题,以某水电站表孔溢流坝闸墩为实例,基于水弹性模型试验和原型观测,提出优化水库调度和闸墩加固两种减振措施。

(1) 优化水库泄洪调度方案与闸墩加固两种工程措施均能达到减振的效果,二者并不冲突,可同时实施。闸孔泄洪为闸墩振动的外因,闸墩高薄的悬臂体型为闸墩振动的内因,可在对闸墩进行加固的同时采用水库优化调度方案,提高减振效率。

(2) 闸墩振动主要受流量和下游水位的影响,泄流量越大,下游水位越高,水跃发生位置越靠近闸墩,则闸墩振动越剧烈。

(3) 在该水电站泄洪运行中,推荐采用“低孔+表孔”联合泄洪方案,避免出现淹没水跃而引起表孔闸墩产生较大振动。

(4) 加固梁的截面尺寸越大,减振效果越明显,结合工程经济性和施工可行性给出了适宜的加固方案,确保水电站能够安全运行,并可为其他水利工程中解决高薄闸墩振动问题提供参考。

参考文献:

- [1] 王睿齐,王海军,沈春颖,等.底流消能工水流结构与掺气浓度分布试验研究[J].水电能源科学,2021,39(5):113-117.
- [2] 邓淇,沈春颖,马江霞.平面闸门流激振动分析及防振措施[J].中国水运,2021(12):112-114.
- [3] ZHANG Bozhi, JING Xiaochuan. Theoretical analysis and simulation calculation of hydrodynamic pressure pulsation effect and flow induced vibration response of radial gate structure[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 21932.
- [4] ZHOU Chenguang, ZOU Degao, YU Xiang. Influence of seismic wave type and incident direction on the dynamic response of tall concrete-faced rockfill dams[J]. Earthquake Science, 2022, 35(5): 343-354.
- [5] 何小敏,张浩,齐春风.水电站闸墩-闸门-水体流激振动特性研究[J].西北水电,2020(6):127-132.
- [6] 胡木生,杨志泽,张兵,等.蜀河水电站弧形闸门原型观测试验研究[J].水力发电学报,2016,35(2):90-100.
- [7] 安娜.观音阁水库闸墩流激振动与减振措施研究[J].水利规划与设计,2017(4):85-87.
- [8] 余春海.水利枢纽闸墩泄洪振动原型动力检测与安全评价[J].水利技术监督,2017,25(4):22-24.
- [9] 陈林,杨敏,李火坤,等.泄洪闸墩抗振加固措施研究[J].水利水电技术,2016,47(9):28-33+49.
- [10] SINGH D K, PAL P, DUGGAL S K. Dynamic pressure on lock gate structure coupled with fluid[J]. Vibro Engineering Procedia, 2019, 29: 165-170.
- [11] SINGH D K, PAL P, DUGGAL S K. Free vibration analysis of stiffened lock gate structure[J]. Journal of Vibration Engineering & Technologies, 2018, 45(1): 1-9.
- [12] 苏圣致,杨春霞,饶天华,等.不同开度下某闸门流激振动数值模拟研究[J].水利水电技术(中英文),2023,54(9):148-155.
- [13] 刘计良,奚宏林,司政,等.基于流固耦合的弧形闸门-闸墩体系的流激振动研究[J].水资源与水工程学报,2023,34(5):149-154+171.
- [14] 张龔,练继建,李松辉,等.高坝泄洪诱发场地振动传播问题的有限元-无限元耦合分析[J].振动与冲击,2018,37(15):14-26+58.
- [15] 梁超.高坝泄流诱发结构和场地振动机理和减振方法研究[D].天津:天津大学,2017.
- [16] 李成业,张龔.高坝泄流诱发底流消能泄水建筑物振动特性试验研究[J].水利水电技术,2015,46(12):53-57.
- [17] 张艺莹.基于ANSYS预应力闸墩的流激振动分析和减振措施研究[D].郑州:华北水利水电大学,2019.
- [18] 何小敏.泄洪闸墩流激振动特性与加固措施研究[D].天津:天津大学,2014.
- [19] LI Huokun, ZHONG Yiwei, WEI Bowen, et al. Beat vibration mechanism of a sluice pier under high-speed flood discharge excitation[J]. Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control, 2020, 39(1): 28-43.
- [20] 李成业,徐瑛丹.基于ANSYS有限元分析的闸墩流激振动数值模拟[C]//中国水利学会.2023中国水利学术大会论文集(第五分册).郑州:黄河水利出版社,2023.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.建筑工程容许振动标准:GB 50868—2013[S].北京:中国计划出版社,2013.
- [22] 张雯雯.水工泄水建筑物振动安全评价方法研究[D].南昌:南昌大学,2015.