

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2022.03.008

原型观测试验在泄洪闸门振动特性分析中的应用

蒲楠楠¹, 柯亚唯²

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122;

2. 华电电力科学研究院有限公司, 浙江 杭州 310030)

摘要: 水库表孔泄洪闸是水库大坝安全运行的重要保障。实践证明, 水库泄洪闸门在动水启闭过程存在不同程度失稳现象。因此, 闸门动态受力研究引起越来越多的关注。以某水库泄洪弧形闸门为工程背景, 采用原型观测试验手段, 对泄洪闸门振动特性进行研究, 得到泄洪闸门体结构强度、固有振动特性及不同开度下的振动规律, 对闸门结构运行可靠性进行评估。试验结果表明: 泄洪闸门体结构静态受力安全, 但在小开度及大开度均存在明显振动, 中间开度运行趋于平稳。该研究成果对泄洪闸安全稳定运行具有指导意义。

关键词: 泄洪闸门; 原型观测试验; 静力特性; 动力特性

中图分类号: TV732

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2022)03-0046-07

Application of Prototype Observation Test in the Vibration Characteristic Analysis of Outlet Gate

PU Nannan¹, KE Yawei²

(1. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou, Zhejiang 311122, China;

2. Huadian Electric Power Research Institute Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310030, China)

Abstract: The outlet gate is a guarantee for the safety of the dam. Practice has proved that there is instability phenomenon existed in working conditions of opening and closing process. Therefore, the dynamic force of the gate has attracted more and more attention. Based on an engineering background of the outlet arc gate of a reservoir, the vibration characteristics of the outlet gate are studied by means of prototype observation test, and the structural strength, natural vibration characteristics and vibration rules under different opening degrees are obtained, and the operation reliability of the gate structure is evaluated. The test result shows that the static force of outlet gate is safe, but there is obvious vibration in small and large opening, and the operation of middle opening tends to be stable. The research results could provide valuable references for the safe and stable operation of the outlet gate.

Keywords: outlet gate; prototype observation test; static characteristic; vibration characteristic

泄洪闸门振动涉及水流与闸门整体组成的流固耦合振动, 是复杂的水力学问题, 泄洪闸服役期间受环境激励, 水流作用等因素影响, 振动特性变化复杂^[1-4]。目前, 闸门动力特性研究方法有原型观测试验、数值仿真计算及物理模型试验等^[5], 但数值仿真计算及物理模型试验均难以还原闸门实际运行

中的真实振动情况。因此, 为更全面掌握闸门实际运行中的动力特性, 需要借助原型观测试验手段。

原型观测试验主要包括结构静力测试、动力特性测试、振动响应测试等项目。结构静力测试的目的是测得闸门主要受力部件应力情况, 为闸门静态应力下结构刚度做出评价; 动力特性测试应用模态

收稿日期: 2021-10-17

修稿日期: 2021-11-24

作者简介: 蒲楠楠(1991—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事水利水电工程方面的工作。E-mail: pu_nn@hdec.com

通讯作者: 柯亚唯(1990—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事自动控制工程方面的工作。E-mail: keyawefried@qq.com

分析技术,得到闸门结构自振频率、阻尼系数和振型等固有参数,从而获得闸门机械系统的动力特性;振动响应测试测得闸门不同开度下闸门振动位移、振动频率、动应力变化规律,对闸门启闭过程中安全运行进行评价^[6-10]。

本文将利用原型观测试验方法,对泄洪闸弧形闸门动力特性进行分析评价,提出泄洪闸运行建议,降低运行风险。

1 工程概况

某工程水库以灌溉为主,兼顾防洪、发电等综合效益。水库大坝为混凝土重力坝,大坝溢流表孔布置于大坝中部,安装5扇泄洪弧形闸门,闸门孔口尺寸为15.0 m×20.5 m(宽×高),设计水头为20.30 m。泄洪闸门结构型式为三主横梁斜支臂弧形闸门,主框架为斜支臂π形框架。闸门门叶、主梁、次梁及支臂主材为Q345C,埋件主材为Q345B。

2 原型观测试验方法

2.1 闸门结构静力原型观测试验

结构应力测试采用传统的电阻应变测量方法,即通过粘贴在闸门受力构件上的电阻应变片获取信号,实现远距离监测^[7]。

本次试验采用在检修闸门和泄洪闸门间充放水的方式模拟闸门从零水压到设计水位工况下挡水过程,泄洪闸应力变化情况。本次试验实际作用水头为19.21 m,接近设计水头。

结构静力试验测点布置在闸门结构典型的受力部位一支臂、面板、主梁、纵梁、边梁、腹板等部位,应力测点共39个。同时,应变测点布置在闸门主梁上,分别布置于上、中、下主梁3处。测点分布见图1、图2。

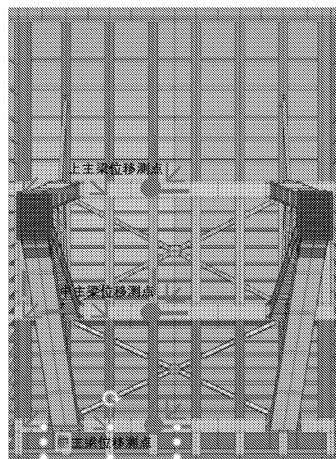


图2 闸门应力应变测点分布图

2.2 闸门动力特性原型观测试验

闸门动力特性测试主要包括闸门结构的自振频率、振型及其阻尼系数等基本参数测试^[10-13]。由于本工程泄洪闸门体型庞大,常规的锤击法无法产生明显试验效果,本次试验采用外部工作环境激励法,通过关闭泄洪闸门,利用相邻闸孔泄流、闸前的波浪冲击作为荷载激励,获得泄洪闸固有特性。

闸门模态测试的测点布置充分遵循结构对称性原则,垂直水流水平方向模态测点共7个,测点布置支臂部位;水流方向模态测点共21个,测点按对称布置在门叶其中一侧。测点分布见图3。

2.3 闸门振动响应原型观测试验

闸门结构振动响应测试,测得闸门不同开度下振动情况,获得闸门振动位移、振动应力及振动加速度与闸门开度变化情况。本次闸门试验水头为20.13 m,闸门开度设定为每1.0 m一个开度,在振动能量较大区域,按0.5 m加密试验开度。

闸门振动响应测点主要布置在支臂及主梁上,振动应力测点同结构静力测点;振动响应测点同动力特性测点。

3 原型观测试验结果分析

3.1 闸门结构静力特性分析

如表1所示,在设计水头19.21 m工况下,泄洪闸由不挡水到挡水状态,测得支臂最大压应力106.3 MPa。中主梁翼板跨中部位拉应力84.3 MPa,面板中部拉应力114.3 MPa,各实测值及换算值均小于材料允许值(225 MPa)^[14]。

如表2所示,支臂最大变形位移1.90 mm,平均变形位移1.86 mm;主梁跨中位移最大位移9.10

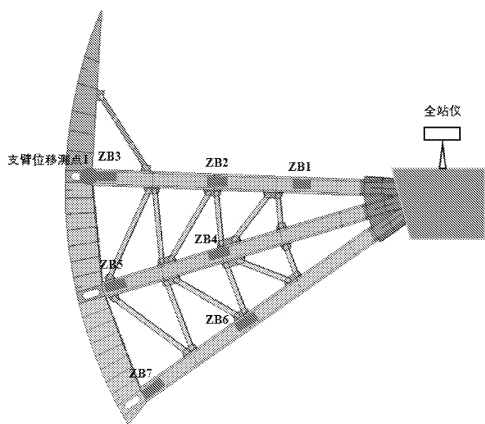
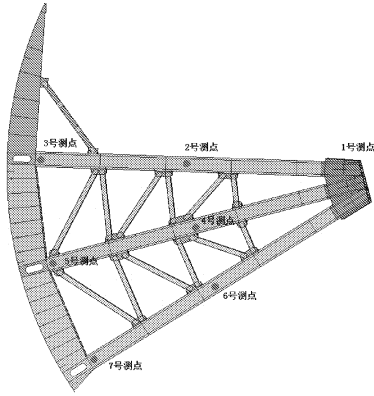
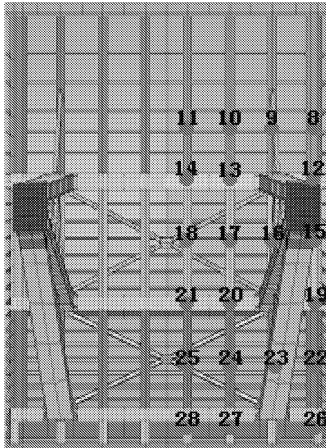


图1 支臂应力应变测点分布图

mm,平均变形位移 8.80 mm,最大变形出现在下主梁跨中位置。按照线弹性变形,设计水头(20.30 m)下支臂最大变形位移 2.01 mm,主梁跨中最大挠度值 9.64 mm,小于最大挠度允许值(22 mm)^[14]。



(a) 门叶



(b) 平面图

图 3 弧形闸门试验模态测点布置

通过泄洪闸结构静力特性试验结果,泄洪闸在正常挡水工况,在结构自重及静水压力作用下,结构应力和变形值均满足设计要求,闸门结构的静态受力安全。

表 1 泄洪闸静态应力测试数据

部件名称	结构位置	板厚/mm	试验应力/MPa	
			测试水位(19.21 m)	设计水位(20.30 m)
右支臂	上支臂与铰座连接处	20	-59.6	-70.3
	上支臂中部		-58.1	-68.5
	中支臂与主梁连接处		-80.0	-94.3
	下支臂中部		-106.3	-125.3
	下支臂与主梁连接处		-81.9	-96.6
左支臂	上支臂与铰座连接处	20	-70.0	-82.5
	上支臂中部		-65.2	-76.9
	中支臂与主梁连接处		-79.2	-93.4
	下支臂中部		-78.8	-92.9
	下支臂与主梁连接处		-71.9	-84.8
上主梁	上主梁翼板右部	25	68.7	76.3
	上主梁翼板中部		68.2	75.8
中主梁	中主梁翼板中部	25	74.2	87.5
	中主梁翼板右部		84.3	93.7
下主梁	下主梁翼板右部	25	-21.4	-25.2
	下主梁翼板中部		69.4	81.8
面板	上层面板中部	σ_1	98.7	109.7
		σ_2	21.2	23.6
	中层面板中部	σ_1	114.3	127.5
		σ_2	10.4	12.3
	下层面板中部	σ_1	105.3	117.1
		σ_2	27.4	32.3

表 2 泄洪闸静力变形测试数据

测点	充水静压	原始平距/m	静压平距/m	角度	位移/mm	平均值/mm	换算到设计水头下变形值/mm
上主梁	第一次试验	21.955	21.948	9°44'10"	6.74	6.74	7.52
	第二次试验	21.954	21.947	9°44'09"	6.74		
中主梁	第一次试验	21.341	21.334	9°21'44"	6.36	6.82	7.63
	第二次试验	21.340	21.332	9°21'50"	7.27		
下主梁	第一次试验	19.208	19.194	7°29'16"	8.50	8.80	9.64
	第二次试验	19.206	19.191	7°29'07"	9.10		
支臂	第一次试验	23.397	23.395	17°47'46"	1.81	1.86	2.01
	第二次试验	23.398	23.396	17°47'42"	1.90		

3.2 闸门结构动力特性分析

在泄洪闸结构动力特性原型观测试验的同时,

进行了有限元模态分析,通过对泄洪闸在自由状态下模态分析,得出泄洪闸模态频率的计算结果见表 3。

表 3 泄洪闸固有频率分析结果

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
模态频率/Hz	3.7	8.7	11.3	14.8	16.7	18.7	18.8	20.1	20.7	22.5

原型观测试验中,在泄洪闸挡水、邻孔闸门泄洪的工况下,试验测得泄洪闸自振频率及其阻尼比,并得到泄洪闸在实际运行中的基本振型。由于泄洪闸实际振动由前几阶振型发挥主导作用,本次分析选用闸门前 6 阶振型进行分析,见表 4。

表 4 泄洪闸整体工作模态测试数据

阶数	固有频率/Hz	阻尼比/%
1	4.88	4.08
2	8.30	3.12
3	10.25	4.35
4	20.02	0.87
5	23.44	0.86
6	37.11	0.63

试验结果表明,泄洪闸的 1、2 阶振动频率为 4.88 Hz 和 8.30 Hz,阻尼比在 3.0~4.5 之间,主振型表现为闸门整体扭翘振动(见图 4—图 5);3 阶振动频率为 10.25 Hz,阻尼比为 4.35,主振型表现为支臂横向弯曲振动(见图 6);4 阶及以上振动频率则在 20 Hz 以上,阻尼比小于 1.0,主振型表现为支臂横向弯曲振动(见图 7—图 9)。泄洪闸原型观测试验结果与动力特性有限元分析结果在前 3 阶较为吻合,高阶频率则出现较大差异,该差异主要为泄洪闸实体制造安装与设计结构之间的误差导致。

下^[15-17],说明泄洪闸 1~3 阶振动易与水流脉动形成不利组合。

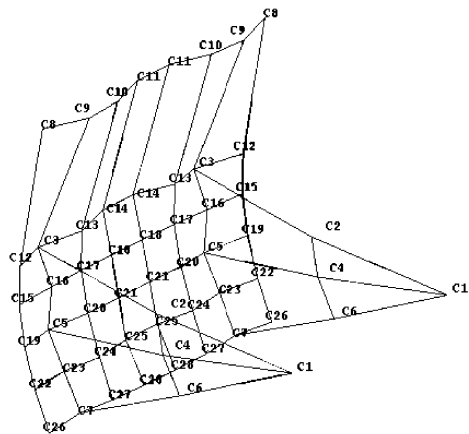


图 5 泄洪闸 2 阶振型(门体扭翘振动)

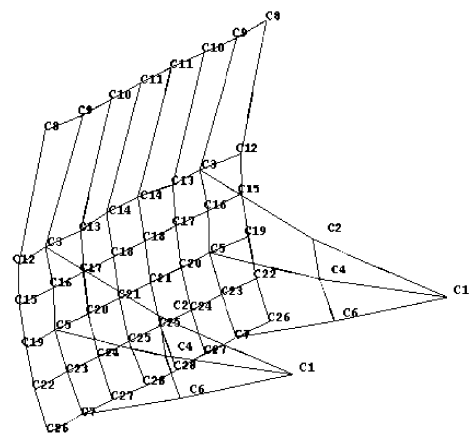


图 6 泄洪闸 3 阶振型(支臂横向弯曲振动)

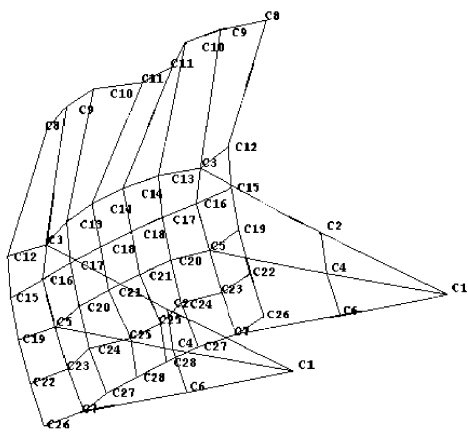


图 4 泄洪闸 1 阶振型(门体扭翘振动)

由于本工程泄洪闸门体体型庞大,结构刚度相对较小,门体结构基频低。泄洪闸前 3 阶自振频率接近及低于 10 Hz,而水流脉动主频一般在 10 Hz 以

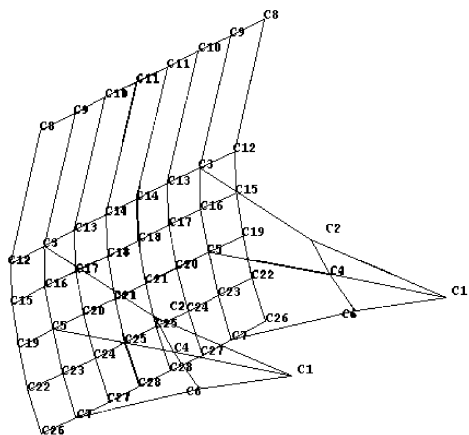


图 7 泄洪闸 4 阶振型(支臂横向弯曲振动)

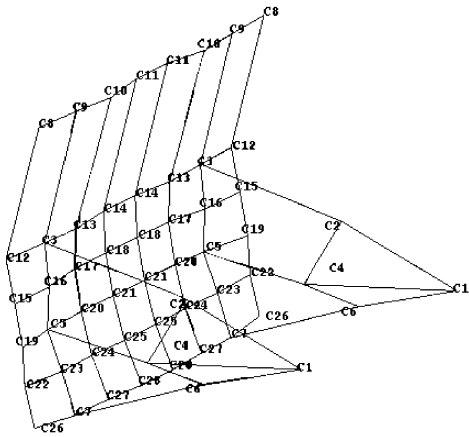


图 8 泄洪闸 5 阶振型(支臂横向弯曲振动)

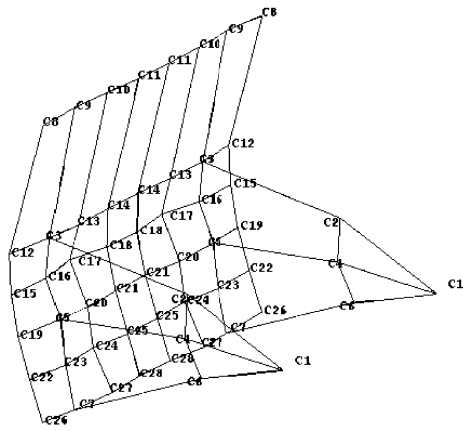


图 9 泄洪闸 6 阶振型(支臂横向弯曲振动)

3.3 闸门振动响应试验结果分析

闸门结构动力特性分析,已得到闸门振动基频及主要振型。通过振动响应试验,可测得闸门在实际启闭过程中主要受力构件的动应力及振动响应规律,以分析闸门的安全可靠性。在本次振动响应试验中,试验水头稳定在 20.13 m,综合各测点在不同开度下的振动特征参数及振动特性曲线,获得泄洪闸在泄流过程中振动趋势分析如下:

(1) 试验表明,泄洪闸的整体振动主要表现为侧向摆动。在开度 2 m 工况下,闸门门叶振动反应最大,侧向位移达到 0.439 1 mm,均方根值为 0.148 2 mm。根据美国阿肯色河通航枢纽中心提出的振动位移均方根值划分水工钢闸门振动强弱的标准,位移为 0.000 0 mm~0.050 8 mm 的振动可以忽略不计;位移为 0.050 8 mm~0.254 0 mm 的振动为微小;位移为 0.254 0 mm~0.508 0 mm 的振动为中等;位移大于 0.508 0 mm 的振动为严重。泄洪闸在全开度运行工况均属于微小等级以下振动,泄洪闸

可安全运行。

(2) 泄洪闸结构振动加速度随开度变化关系显示(见图 10—图 13),泄洪闸在开度 0.0 m~14.0 m 范围,闸门支臂及门叶结构振动加速度量值变化呈现小开度最大;随着开度的增加,振动量值逐渐减小;在接近全开时,振动量值略有回升的趋势。闸门下部振动明显强于上部振动。在 0.0 m~4.0 m 小开度,泄洪闸振动量最大,主频接近自振频率,最大振动量值出现在 1.0 m 开度闸门下主梁 28#测点,加速度均方根最大值为 0.712 m/s^2 ;在 4.0 m~8.0 m 开度,泄洪闸振动量值逐渐减小,主频偏离自振频率;在 9.0 m~14.0 m 开度,泄洪闸振动量值逐渐回升。

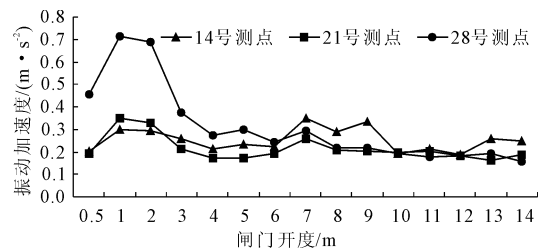


图 10 主梁振动加速度与开度关系曲线

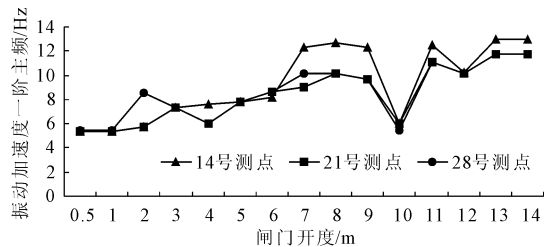


图 11 主梁振动加速度一阶主频与开度关系曲线

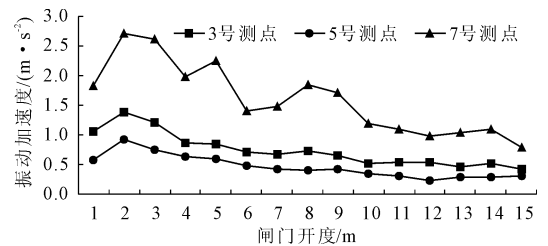


图 12 支臂振动加速度与开度关系曲线

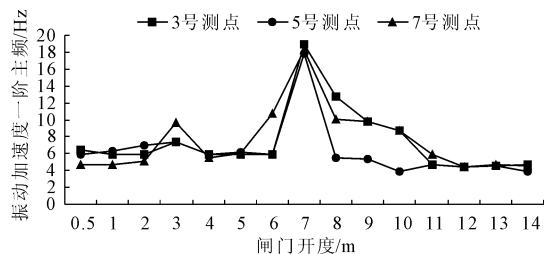


图 13 支臂振动加速度一阶主频与开度关系曲线

(3) 泄洪闸结构振动位移随开度变化关系同样存在由大逐渐减小再回升的规律(见图 14—图 17), 闸门结构振动幅值呈现闸门在 0.0 m ~ 4.0 m 小开度范围, 振动幅值最大, 一阶主频在 5 Hz ~ 7 Hz 之间, 接近闸门一阶自振频率。说明大能量水流脉动仅引起泄洪闸的受迫振动, 并未产生共振现象。

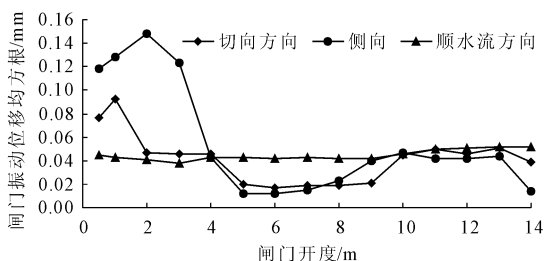


图 14 主梁振动位移与开度关系曲线

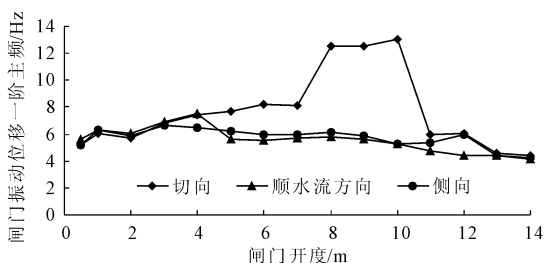


图 15 主梁振动位移一阶主频与开度关系曲线

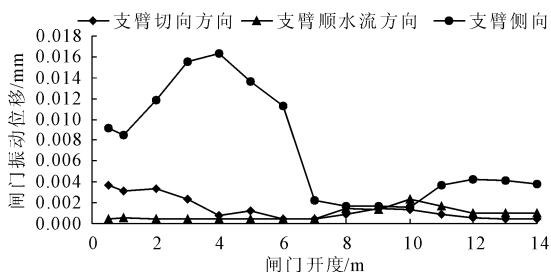


图 16 支臂振动位移与开度关系曲线

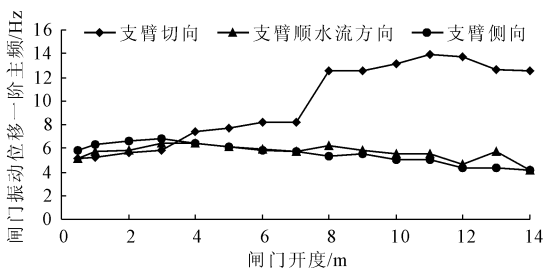


图 17 支臂振动位移一阶主频与开度关系曲线

(4) 实测泄洪闸在开启过程中各测点振动应力变化趋势与前述振动量随开度变化规律一致(见图 18), 最大动应力为 14.7 MPa, 发生在 0 m ~ 4 m 小开度工况的主梁部位, 所有测点的实测振动应力均远小

于钢材容许应力的 20% (36 MPa)。泄洪闸动应力变化为平稳过程, 未发现动应力剧烈变化现象。泄洪闸振动应力主能量主要集中在 10 Hz 以下低频振动范围内, 反映了水力荷载的频率及闸门结构基频。

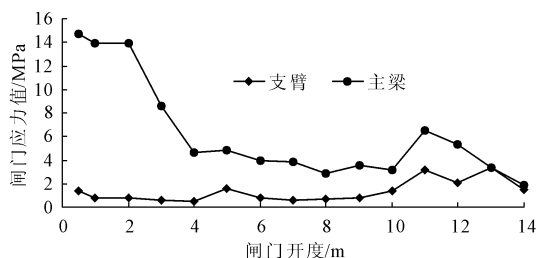


图 18 闸门振动应力与开度关系曲线

(5) 分析引发该振动规律的原因, 由于泄洪闸在小开度工况下, 闸下出流存在不稳定射流, 导致闸门振动响应在紊流影响下达到最大值; 随着泄洪闸开度的增加, 闸下出流逐渐变为明流, 水流流态好转, 泄洪闸趋于稳定运行; 闸门接近全开工况下, 下泄水流部分脱离闸门底缘, 又造成泄洪闸短时振动^[17], 但由于门体受到水压力减小, 泄洪闸在大开度工况振动明显轻于小开度工况, 应力值也小于小开度工况。

4 结 语

通过泄洪闸原型观测试验, 获得闸门振动特性结果如下:

(1) 通过泄洪闸结构静态测试分析, 泄洪闸支臂、主梁、次梁、面板等主要结构部件最大应力及最大挠度均未超过材料允许值, 说明泄洪闸结构的静态受力安全, 闸门刚度满足设计规范要求。

(2) 通过试验模态分析, 泄洪闸前 3 阶自振频率接近及低于 10 Hz, 易与水流脉动形成不利组合。泄洪闸 1 ~ 2 阶主振型表现为闸门整体扭翘振动; 3 ~ 6 阶主振型表现为支臂横向弯曲振动。泄洪闸原型观测试验结果与动力特性有限元分析结果在前 3 阶较为吻合。

(3) 通过泄洪闸振动响应分析, 泄洪闸的整体振动主要表现为门叶侧向摆动。各工况下, 泄洪闸门叶及支臂振动位移及动应力均方根均未超过美国阿肯色河通航枢纽中心提出水工钢闸门振动幅值允许值。泄洪闸在全开度运行工况均属于微小等级以下振动, 说明大能量水流脉动仅引起泄洪闸的受迫振动, 未产生共振现象, 泄洪闸可安全运行。

(4) 泄洪闸在小开度及大开度均存在明显振动,中间开度运行趋于平稳,振动加速度、振动位移及动应力均存体现该规律。由于泄洪闸在小开度工况下,闸下出流存在不稳定射流,导致闸门振动响应在紊流影响下达到最大值;随着泄洪闸开度的增加,闸下出流逐渐变为明流,水流流态好转,泄洪闸趋于稳定运行;闸门接近全开工况下,下泄水流部分脱离闸门底缘,又造成泄洪闸短时振动,但由于门体受到水压力减小,泄洪闸在大开度工况振动明显轻于小开度工况,应力值也小于小开度工况。

(5) 考虑闸门振动过程中的疲劳破坏,建议在泄洪闸启闭过程中尽量避免在大开度及小开度长时间运行,以确保泄洪闸结构安全。

参考文献:

- [1] 严根华. 大跨度特型闸门流激振动及控振措施研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(5): 1-11.
- [2] 常 富, 纪 伟. 平面钢闸门流固耦合分析与优化设计[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(2): 184-188, 199.
- [3] 丁俊丰, 翁光远, 张煜敏, 等. 考虑水流耦合效应的弧形闸门结构自振特性[J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19(4): 93-98, 137.
- [4] 严根华, 董 家, 孙云茜. 上翻式拱形闸门的流激振动控制及原型观测验证[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(5): 55-61.
- [5] 胡木生. 蜀河水电站弧形闸门原型观测试验研究[C]//中国水力发电工程学会大坝安全专委会 2015 年会暨大坝安全检测技术与新仪器应用学术交流会, 西宁, 2015: 295-305.
- [6] 徐要伟, 朱 晨, 张文科. 水电站泄洪闸弧形工作闸门原型观测试验[J]. 华电技术, 2019, 41(12): 46-49.
- [7] 董运福, 朱 晨, 徐要伟. 应力测试在水电站弧形闸门原型观测中的应用[J]. 河南科技, 2019(6): 83-86.
- [8] 胡木生, 耿红磊. 小湾水电站泄洪洞弧形闸门原型观测研究[J]. 水电站机电技术, 2016, 39(2): 49-53.
- [9] 盛旭军, 胡木生, 张 兵, 等. 弧形闸门流激振动原型观测试验技术研究[J]. 水利技术监督, 2016(1): 7-11.
- [10] 龚登位, 张德选, 胡木生. 高坝大库水电站泄洪闸门原型观测试验[J]. 水力发电, 2015, 41(10): 64-66, 86.
- [11] 胡 玮, 冯晓波, 朱 锐, 等. 南水北调中线某节制闸弧形门小开度振动观测与安全评价[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(5): 139-151.
- [12] 赵 瑜, 王云龙, 黄锦林, 等. 不同固-液耦合形式下水闸结构自振特性分析[J]. 广东水利水电, 2019(12): 12-17.
- [13] 沈远航, 朱召泉. 考虑流固耦合的泵闸组合闸门结构自振特性研究[J]. 中国农村水利水电, 2021(2): 13-17, 23.
- [14] 中华人民共和国水利部. 水利水电钢闸门设计规范: SL 74—2019[S]. 中国水利水电出版社, 2019: 14-29.
- [15] 严根华, 陈发展, 赵建平. 表孔弧形闸门流激振动原型观测研究[J]. 水力发电学报, 2006, 25(4): 45-50.
- [16] 严根华, 陈发展. 溢流坝表孔弧形闸门流激振动原型观测研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(2): 140-145.
- [17] 李亚非, 徐元发, 何文娟, 等. 高坝洲水电站弧形闸门设计和原型观测试验[J]. 水力发电, 2002(3): 35-38.