

# 考虑闸墩弹性效应的弧形闸门流激振动数模物模 联合预测与安全分析

潘文祥<sup>1</sup>, 杨敏<sup>1</sup>, 陈林<sup>1</sup>, 董天松<sup>1</sup>, 何小敏<sup>2</sup>

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072;

2. 中国水电顾问集团 西北勘测设计研究院, 西安 710065)

**摘要:** 通过试验和数模对闸门流激振动响应仿真模拟是研究闸门振动的一种有效方法。以某水电站泄洪底孔弧形闸门为具体研究对象, 根据模型试验要求设计了水力学和水弹性模型, 进行了支铰力荷载量测和流激振动响应试验, 分析了泄流条件和闸门、闸墩振动的关系, 同时将试验所得荷载分别施加于闸门—闸墩耦合数值模型和将闸墩处理成刚性约束的数值模型进行动力响应计算。通过对比分析, 认为闸墩振动对闸门动应力和垂向动位移影响较小, 但对闸门水平向和侧向动位移影响较大。最后结合数模和物模对闸门振动进行了安全分析。

**关键词:** 水工结构; 弧形闸门; 模型试验; 流激振动; 泄流条件; 有限元模型

**中图分类号:** TV 663    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2014)02-0041-05

## Joint Prediction and Safety Analysis of the Flow induced Vibration of Radial Gate Through Physical and Numerical Simulations Considering Effects of the Pier

PAN Wenxiang<sup>1</sup>, YANG Min<sup>1</sup>, CHEN Lin<sup>1</sup>, DONG Tiansong<sup>1</sup>, HE Xiaomin<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety of Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Hydrochina Xibei Engineering Corporation, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** The flow induced vibration response simulation of gate through model experiment and numerical model is an effective method to investigate the gate vibration problem. In this paper, the spillway under port radial gate of a hydropower station was studied. A hydraulic model and a hydroelastic model were designed according to the physical model experiment requirements. The hinge force measurement and the response of dynamic stress and displacement of flow induced vibration of the gate were tested. The relationship between the hydraulic condition and the vibrations of pier and gate was analyzed. The test load was applied to the coupled gate pier numerical model and the gate model in which the pier was treated as rigid constrain for dynamic analysis, respectively. The results showed that the pier vibration has insignificant impacts on dynamic stress and vertical dynamic displacement of the gate, but has significant impacts on the horizontal and lateral dynamic displacement of the gate. Finally, the dynamic safety of the gate was analyzed using the physical and numerical model.

**Key words:** hydraulic structure; radial gate; model experiment; flow induced vibration; discharge condition; FEM model

弧形闸门主要用于控制水位、调节流量<sup>[1]</sup>, 其安全性和适用性会影响整个水利枢纽的运行效果。闸门在局部开启泄水时, 由于门前后、底部或顶部水流脉动荷载作用, 常常伴随着强烈的振动, 严重时会引起动力失稳, 如陕西省某渠首冲刷闸和湖南省某电站溢洪道闸门均由于水流诱发振动导致支臂失稳破坏<sup>[2-3]</sup>。闸门振动问题属于水流和结构的耦合问题, 由于水流脉动荷载难以理论确定, 到目前为止还没有一套公式能够精确地计算闸门振动响应, 所以, 模型试验是

研究闸门振动的一种有效方法<sup>[4-7]</sup>。已有研究表明, 当闸后产生淹没水跃等流态时, 闸门振动量级将增大<sup>[8]</sup>, 而且实际工程中闸门振动受闸墩影响, 以往研究中通常将数值模型中的支铰处理成刚性<sup>[9-11]</sup>, 所以有必要通过试验分析泄流条件和闸门、闸墩振动的关系, 并结合闸门—闸墩耦合数值模型和物理模型, 分析闸墩对闸门振动的影响。

本次研究实例: 某枢纽工程泄洪底孔出口布置一扇 7 m × 8.84 m (宽 × 高) 的双主横梁直支臂弧形工作门, 由布

收稿日期: 2013-07-08    修回日期: 2013-10-29    网络出版时间: 2014-03-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2014.02.001.html>

作者简介: 潘文祥(1987-), 男, 浙江建德人, 硕士研究生, 主要从事水工水力学研究。E-mail: pwxzjs@163.com

通讯作者: 杨敏(1956-), 男, 吉林长春人, 教授, 博士生导师, 主要从事水工水力学研究。E-mail: minyang2000@163.com

置于闸墩之上的油缸启闭机启闭。弧门弧面半径 18 m, 支铰采用球铰, 高度为 12.8 m, 支承间距 4.32 m, 闸门采用单吊点 3 600 kN/800 kN 液压启闭机启闭, 闸门布置见图 1, 该闸门要求能在动水启闭, 且能局部开启。

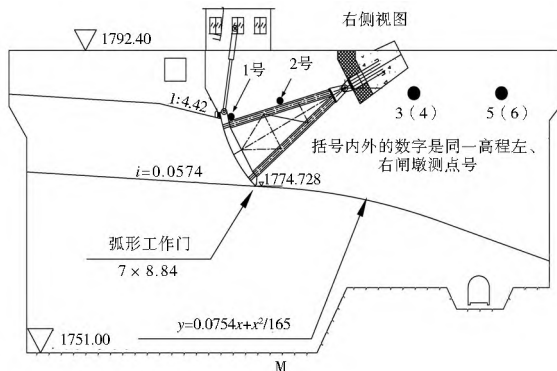


图 1 闸门布置

Fig. 1 Schematic diagram of gate layout

## 1 模型简介及测试方法

### 1.1 模型研制及布置

模型几何比尺定为  $\lambda_l = 20$ , 闸门水力学模型(图 2)用有机玻璃制作, 只考虑水力条件; 水弹性模型(图 3)是依据重力相似律制作的同时满足水力学条件和结构动力条件的实物模型<sup>[12-13]</sup>, 全面模拟水力系统- 闸门- 闸墩、启闭杆之间相互作用, 考虑到结构阻尼比较小, 故不作模拟, 各物理量的比尺见表 1。

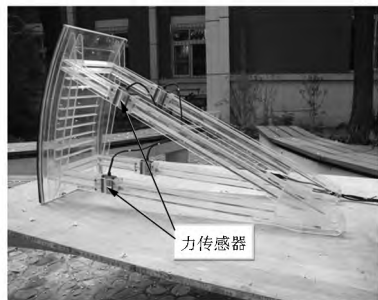


图 2 水力学模型

Fig. 2 Hydraulic model

表 1 物理量相似比尺

Table 1 Similarity scale of the physical parameters

物理量	长度	速度	加速度	频率	流量
比尺	$\lambda_l = 20$	$\lambda_v = 4.4721$	$\lambda_a = 1$	$\lambda_f = 0.224$	$\lambda_Q = 1789$
物理量	位移	弹模	应力	容重	阻尼
比尺	$\lambda_s = 20$	$\lambda_E = 20$	$\lambda_\sigma = 20$	$\lambda_\gamma = 1$	$\lambda_D = 1$

### 1.2 测试方法

为了测试作用在闸门面板上的整体水力荷载, 在闸门水力学模型的 4 个支臂上各安装一个力传感器, 如图 2 所示, 将 4 个传感器测得力合成得到整个由闸门面板传到支铰上的荷载, 整体水动力荷载试验采样频率为 100 Hz。该方法直接测量作用在闸门面板上的整体荷载, 不存在点、面脉动压力转换问题<sup>[13-14]</sup>。

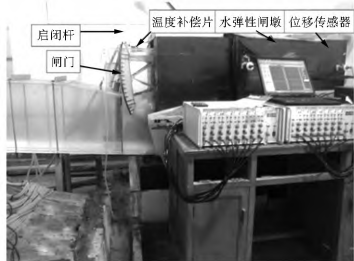


图 3 闸门- 闸墩- 启闭系统整体水弹性模型

Fig. 3 Hydr elastic model of gate pier hoisting equipment system

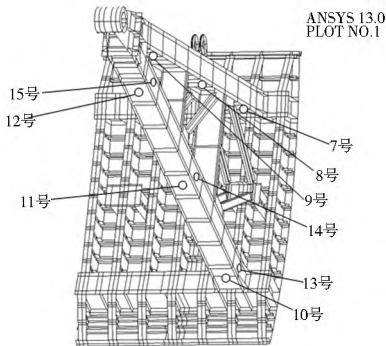


图 4 动应力测点布置

Fig. 4 Layout of measuring points of dynamic stress

为得到闸门在脉动水压力作用下的弹性动力响应特征, 在水弹性闸门模型上缘(1 号位置)和左侧上支臂中间部位(2 号位置)各安装 3 个动位移传感器, 用来测量闸门在各开度垂向、侧向与水平向动位移, 左右闸墩各装两个动位移传感器测量闸墩侧向振动, 动位移测点布置如图 1 所示。在 4 个支臂上各布置 6 个动应力测点, 如图 4 所示(图中列出部分测点), 水弹模型试验动态响应信号采样频率也为 100 Hz。

该工程由于整体工程布置条件限制, 闸门在某些开度时会产生淹没水跃, 所以试验时还考虑淹没水流对闸门振动的影响。试验工况: 闸门按绝对开度  $e = 1 \sim 6$  m 变化, 每种开度对应上游两种水深、下游三种水深的试验工况组合。

## 2 闸门水动力特性

### 2.1 闸门支铰力

闸门支铰力  $F$  随开度  $e$  变化情况见图 5。开度越大, 水体与面板接触面积越小, 支铰力越小; 同种开度, 当上游水深不变时, 下游水深越大, 闸后水体反作用力越大, 支铰力越小。所以支铰力最大值(1 867.25 t) 出现在  $e = 1$  m, 上游最高水深 44 m, 下游最低水深 7.58 m 的试验工况。

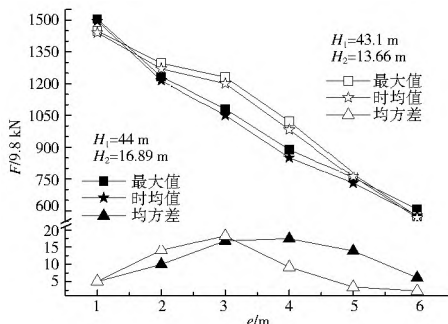


图 5 闸门不同开度时的支铰力分布

Fig. 5 Hinge force distribution of gate with different openings

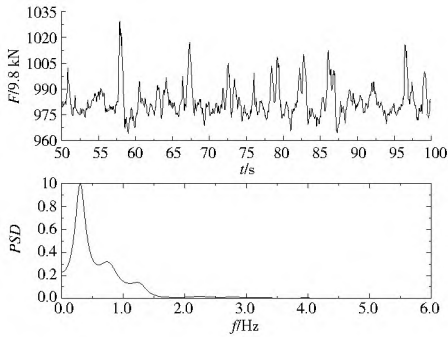


图6 支铰力时程线、功率谱密度

Fig. 6 Time curve and power spectral of hinge force

### 2.2 闸门动应力

为全面反映闸门振动情况,取上支臂两测点(8号、9号)和下支臂两测点(13号、14号)水流引起的动应力数值进行分析。各测点动应力均方差 $\sigma$ 随开度 $e$ 的变化情况见图7,试验结果显示:动应力均方差随开度增大有先增大后减小趋势,动应力均方差最大为5.89 MPa(7号测点)。典型测点动应力时程线、功率谱密度和概率密度( $Pd$ 为概率密度)见图8,动应力脉动能量在1.0 Hz以内,符合正态分布。

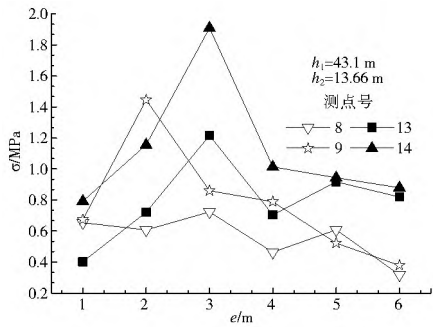


图7 动应力和开度关系

Fig. 7 Relationship between dynamic stress and opening

### 2.3 闸门-闸墩动位移

闸门振动随下游水深 $H_2$ 变化见图9。其中,左图为开度5m、相同上游水深状态,当下游水深为16.33m和16.89m时,闸后为淹没出流,其振动量级明显大于下游水深为13.66m时自由出流的振动,且下游水深越大,闸后淹没度越大,下游水体形成相对更大的“水垫”,水体更平稳,振动反而下降;右图为开度6m、相同上游水深状态,当下游水深为13.66m和16.45m时,闸后都为自由出流,且下游水深越大,跃首越靠近闸墩前半段和闸门,闸墩振动引起闸门振动

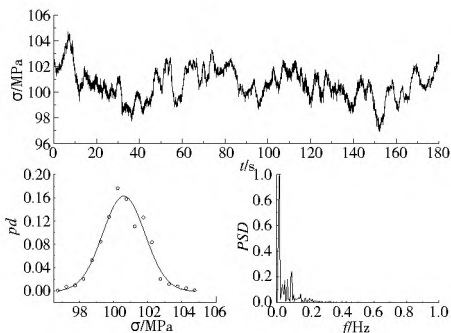


图8 实测动应力时间过程、概率密度和功率谱密度

Fig. 8 The measured dynamic stress time process, probability density, and power spectrum

也越大,但这两种水深下的振动都小于下游水深为16.89m时发生淹没出流时的振动。由此可知,闸后产生淹没水跃时,动荷载量加大,闸门的振动量级将显著增大。

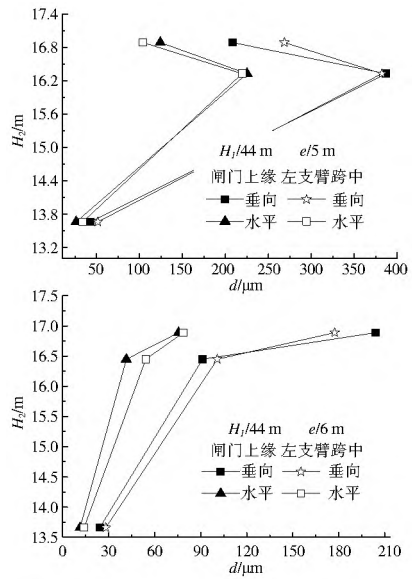


图9 闸门振动与下游水深关系

Fig. 9 Relationship between gate vibration and downstream water depth

闸门振动与上游水深 $H_1$ 关系见图10。其中,左图为自由出流,右图为淹没出流。相同开度和下游水深状态下,当闸后为自由出流、上游水深为43.1m时,水跃跃首集中在闸墩中部更靠近闸门,而上游水深为44m时,水跃跃首集中在闸墩尾部,远离闸门,闸墩振动引起闸门振动比低水位时的小;而当闸后为淹没出流时,上游水深越大,过闸流量、流速越大,闸后水流紊动也越大,振动越明显。

闸门动位移 $d$ 与开度 $e$ 关系见图11,从图中可看出闸门动位移均方差随开度增大有先增大后减小趋势。在某一开度,闸后紊动相对较大,且门体与水接触面积也不小,闸门振动达到最大。

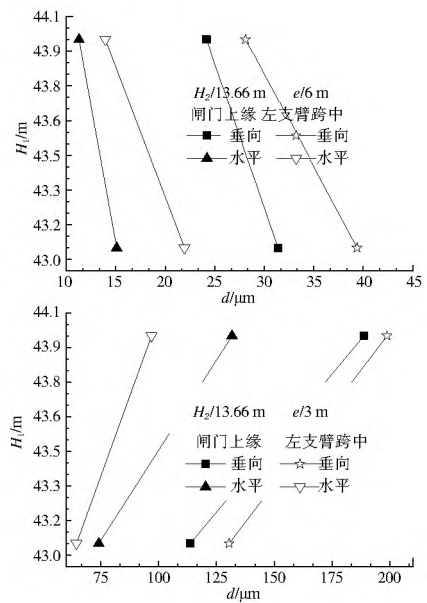


图10 闸门振动与上游水深关系

Fig. 10 Relationship between gate vibration and upstream water depth

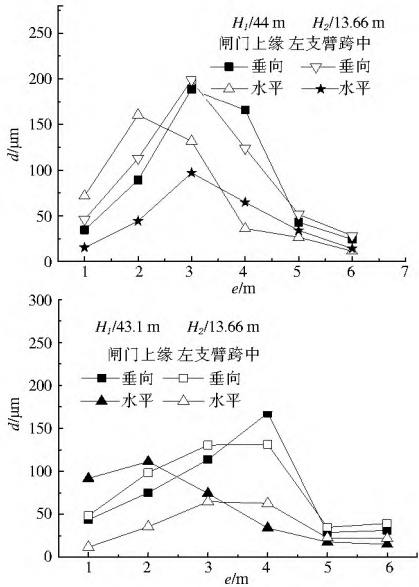


图 11 闸门振动与开度关系

Fig. 11 Relationship between gate vibration and opening

闸墩振动与开度关系见图 12。当上游水深为 44 m, 下游水深为 16.89 m 时, 各开度闸后都为淹没出流, 闸门开度越小, 闸门与水作用面积越大, 削弱了闸前后水流旋滚作用, 在该泄流条件下闸墩动位移均方差随闸门开度减小而减小; 而当上游水深为 43.1 m, 下游水深为 13.66 m,  $e=1\sim 4\text{ m}$  时, 闸后为淹没出流,  $e=5\sim 6\text{ m}$  时, 闸后为自由出流, 开度越大, 水跃推得越远, 跃首越靠近闸墩后半段, 闸墩振动反而越小, 所以闸墩动位移均方差随闸门开度增大先增大后减小。

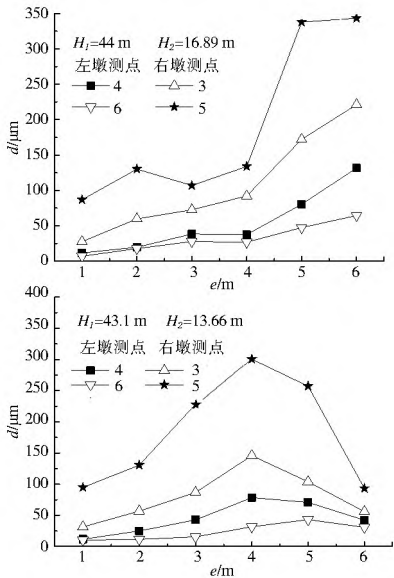


图 12 闸墩振动与开度关系

Fig. 12 Relationship between pier vibration and opening

### 3 弧形闸门流激振动响应计算

#### 3.1 闸门-闸墩数值模型

采用 ANSYS 软件进行数值模拟计算, 考虑到该工作闸门结构支臂截面为箱形, 面板、主横梁、纵梁等由不同厚度的板或型钢焊接而成, 因此, 采用具有 6 个自由度的壳单元 (Shell63 单元) 来模拟该弧形工作闸门的主要结构, 采用梁

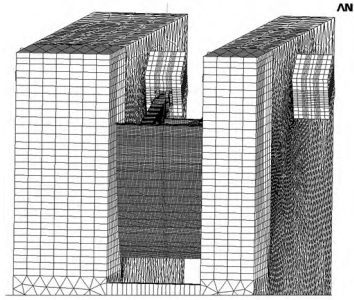


图 13 闸门和闸墩有限元模型

Fig. 13 Finite element model of gate and pier

单元 (Beam188) 来模拟启闭杆, 采用实体单元 (Solid45) 模拟支铰和闸墩, 有限元模型见图 13。闸门两侧止水以及支铰和闸墩的连接用接触单元模拟, 吊杆顶部施加全部位移约束和除水流平面的其它平面内的转动约束, 闸墩地基底部施加全部约束, 闸墩下游处施加顺水流向约束。

材料基本参数: 启闭杆和闸门的弹模  $E=206\text{ GPa}$ , 密度  $\rho=7850\text{ kg/m}^3$ , 泊松比  $\mu=0.3$ , 闸墩动弹模  $E=39\text{ GPa}$ , 泊松比  $\mu=0.167$ , 不考虑重力。

#### 3.2 闸门-闸墩流激振动响应计算

闸门在运行中受到水动力荷载作用产生随机振动, 其振动量级取决于结构的动力特性和外荷载的统计特征。在取得完整的结构模态参数和外荷载谱参数后, 理论上可通过动力分析计算获得结构的振动响应<sup>[15-16]</sup>。将模型试验测得荷载一起分别施加于闸门-闸墩耦合数值模型和将闸墩处理成刚性约束模型进行动力响应计算, 对比分析闸墩对闸门振动的影响。

#### 3.3 物模-数模对比分析

为验证物模与数模的正确合理性, 现取闸门下支臂 11 号和 15 号测点动应力、上支臂跨中 (2 号) 动位移进行对比分析。由于有些工况动位移传感器发生了淹没, 所以选取开度 3 m 和开度 4 m 进行对比, 具体见表 2。因闸门动应力、动位移均方差较小, 应变片和传感器受温度等环境因素影响大, 虽然实测值比计算值大, 但振动都在同一量级, 基本一致, 两种方法都能较好反映闸门振动响应特征。

表 2 物模-数模动应力、动位移对比

Table 2 Comparison of dynamic stress and displacement from the physical and numerical model

对比项目	测点位置	$e=3\text{ m}$		$e=4\text{ m}$			
		实测值	计算值 (考虑闸墩)	计算值 (不考虑闸墩)	实测值	计算值 (考虑闸墩)	计算值 (不考虑闸墩)
动应力均方差 /MPa	11 号	1.28	1.14	0.98	0.47	0.17	0.15
	15 号	2.45	1.10	0.95	0.59	0.21	0.14
动位移均方差 / $\mu\text{m}$	水平向	54.60	20.88	8.25	17.65	6.42	1.08
	垂直向	100.61	37.76	35.49	22.64	7.82	6.19
	侧向	72.01	45.85	0.36	64.81	59.26	0.03

从表 2 中发现, 考虑闸墩弹性效应与否对闸门的动应力影响较小。由于支铰力在垂直方向分力较小, 由此引起闸墩垂直向振动很小, 所以有弹性闸墩对闸门垂直向振动的影响较小。而且从表中还发现不考虑闸墩时, 闸门侧向振动 (闸门跨度方向) 很小; 考虑闸墩时, 闸门侧向振动量与水弹试验

(考虑闸墩)结果接近。说明闸门侧向振动主要由闸墩振动引起,所以闸墩对闸门振动,特别是侧向振动的影响不能忽略。

### 3.4 闸门振动预测与安全分析

闸门振动最大垂向动位移均方差为  $387.06 \mu\text{m}$ , 发生在上游水深  $44 \text{ m}$ , 下游水深  $16.33 \text{ m}$ ,  $e=5.0 \text{ m}$  时的闸门上缘, 按 3 倍均方差计算振幅, 则为  $1161.18 \mu\text{m}$ 。按美国阿肯色河的判别标准<sup>[4]</sup>, 大于  $0.508 \text{ mm}$  为严重危害, 则本工程闸门振幅属严重危害程度, 应引起重视。

闸门动应力以时均应力为主, 脉动分量较小, 最大动应力为  $68.71 \text{ MPa}$ , 出现在  $e=3 \text{ m}$  时下支臂下侧面跨中部位, 满足容许应力要求。动应力脉动能量在  $1.0 \text{ Hz}$  以内, 表现为低频强迫振动。

## 4 结论

(1) 一定开度和上游水深状态下, 淹没出流时, 闸门振动随下游水深升高而减小, 而自由出流时, 闸门振动随下游水深升高而增大, 且淹没出流闸门振动量增大。所以调整下游水深和开度, 避免形成淹没水跃对控制和降低闸门结构的振动量具有明显效果。

(2) 一定开度和下游水深状态下, 自由出流时, 闸门振动随上游水深增大而减小, 而淹没出流时, 闸门振动随上游水深增大而增大。

(3) 一定上下游水深状态下, 闸后淹没出流时, 闸墩振动随闸门开度增大而增大, 而自由出流时, 闸墩振动随闸门开度增大而减小。

(4) 闸墩振动对闸门动应力和垂向动位移影响不大, 但对闸门水平和侧向动位移影响较大, 因此, 对闸门的安全评价应该考虑闸墩的弹性效应。

(5) 闸门最大垂向动位移均方差为  $387.06 \mu\text{m}$ , 按 3 倍均方差计算振幅, 则为  $1161.18 \mu\text{m}$ , 按美国阿肯色河的判别标准, 闸门振幅为严重危害程度, 应引起重视。最大动应力为  $68.71 \text{ MPa}$ , 满足容许应力要求。

### 参考文献(References):

- [1] 范崇仁. 水工钢结构[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008. (FAN Chong ren. Hydraulic Steel Structure[M]. Beijing: Press of Water Conservancy and Hydropower in China, 2008. (in Chinese))
- [2] 刘恭忍, 章继光. 轻型弧形钢闸门事故分析研究[J]. 水力发电学报, 1992, (3): 49-57. (LIU Gong ren, ZHANG Ji guang. Study on Accident Analysis of Lightweight Radial Gate[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1992, (3): 49-57. (in Chinese))
- [3] 邱德修. 弧形钢闸门的动力特性及动力稳定性分析[D]. 南京: 河海大学, 2006: 2-9. (QIU De xiu. Research on Dynamic Property and Dynamic Stability of Steel Radial Gate. NanJing: Hohai University, 2006: 2-9. (in Chinese))
- [4] 倪汉根, 刘永林, 刘斌, 等. 弧形闸门流激振动的物模-数模预报[J]. 水动力学研究与进展, 2005, 20(1): 24-31. (NI Han gen, LIU Yong lin, LIU Bin, et al. Prediction of Radial Gate Vibration Using Combined Physical and Numerical Models[J]. Journal of Hydrodynamics, 2005, 20(1): 24-31. (in Chinese))
- [5] 张微, 张鹏飞, 王均星. 汗华水电站表孔弧形闸门流激振动试验

- [J]. 武汉大学学报(工学版), 2010, 43(6): 719-722. (ZHANG Wei, ZHANG Peng fei, WANG Jur xing. Experimental Research on Flow-induced Vibration for Spillway Radial gate of Khan Khwar Hydropower Station[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2010, 43(6): 719-722. (in Chinese))
- [6] 杨敏, 崔广涛. 水工结构流激振动的综合集成探讨[J]. 水力发电学报, 2008, 27(1): 102-110. (YANG Min, CUI Guang tao. Comprehensive Integration Study on Flow-induced Vibration of Hydraulic Structure[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(1): 102-110. (in Chinese))
- [7] 李火坤, 练继建, 杨敏. 新政航电泄洪弧形闸门水动力特性模型试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2006, (10): 61-65. (LI Huo kun, LIAN Ji jian, YANG Min. Experimental Study on Hydrodynamic Characteristic Model of Arc shaped Flood release Gate of Xinzheng Hydraulic Project[J]. China Rural Water and Hydropower, 2006, (10): 61-65. (in Chinese))
- [8] 严根华. 水工闸门流激振动研究进展[J]. 水利水运工程学报, 2006, (1): 66-73. (YAN Gei hua. Research Development of Flow-induced Gate Vibration[J]. Hydr Science and Engineering, 2006, (1): 66-73. (in Chinese))
- [9] 李火坤, 练继建. 水工弧形闸门流激振动特性物模-数模联合预测与安全分析[J]. 水力发电学报, 2007, 26(3): 69-76. (LI Huo kun, LIAN Ji jian. Joint Prediction and Safety Analysis of the Flow-induced Vibration of Hydraulic Radial Gate Using Physical and Numerical Model[J]. Journal Of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(3): 69-76. (in Chinese))
- [10] 闫蕴菁, 张瑞杰. ANSYS 软件在水电站弧形闸门设计中的应用[J]. 华电技术, 2010, 32(11): 26-27. (YAN Yur jing, ZHANG Rui jie. Application of ANSYS Software For Radial Gate Design in Hydropower Station[J]. Huadian Technology, 2010, 32(11): 26-27. (in Chinese))
- [11] 彭新民, 尚宪锋, 杨敏. 基于模态叠加法的弧形闸门流激振动反分析[J]. 中国农村水利水电, 2008, (1): 72-74. (PENG Xin min, SHANG Xiai feng, YANG Min. Application of Mode Superposition Method in Flow-induced Vibration Counter Analysis of Arch Gate[J]. China Rural Water and Hydropower, 2008, (1): 72-74. (in Chinese))
- [12] 崔广涛, 练继建, 彭新民, 等. 水流动力荷载与流固相互作用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. (CUI Guang tao, LIAN Ji jian, PENG Xin min, et al. Hydrodynamic Loads and Fluid solid Interaction[M]. Beijing: Press of Water Conservancy and Hydropower in China, 1999. (in Chinese))
- [13] 胡楠. 考虑流激振动的闸门受力分析[D]. 南京: 河海大学, 2006: 39-48. (HU Nan. Stress Analysis of Gate Under Flow-induced Vibration[D]. Nanjing: Hohai University, 2006: 39-48. (in Chinese))
- [14] 李火坤. 弧形闸门流激振动特性及其结构优化研究[D]. 天津: 天津大学建筑工程学院, 2004. (LI Huo kun. Study on the Flow-induced Vibration Characteristics of Radial Gate and Its Structural Optimization[D]. Tianjin: Civil Engineering College of Tianjin University, 2004. (in Chinese))
- [15] 练继建. 黄河积石峡水电站工程中孔泄洪洞进口水力学及闸门振动试验报告[R]. 天津: 天津大学水利水电工程系, 2006.
- [16] 严根华. 水动力荷载与闸门振动[J]. 水利水运工程学报, 2001, (2): 10-15. (YAN Gei hua. Hydrodynamic Load and Gate's Vibration[J]. Hydr Science and Engineering, 2001, (2): 10-15. (in Chinese))