

金汇港南闸中孔大宽高比平面直升门的振动特性分析

肖志乔¹, 孙嘉华², 盛 军¹

(1. 上海浦河工程设计有限公司, 上海 200333; 2. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200434)

摘要:针对大宽高比平面直升门在水流脉动压力作用下的动力特性问题,通过自振特性分析方法得到金汇港南闸中孔闸门的自振频率,通过物理模型试验测得不同工况下闸门模型上的脉动压力,采用快速傅里叶变换技术对脉动压力进行了频谱分析,得到各测点水流脉动压力的功率谱函数,并与自振特性结果进行对比判断是否会产生共振;将测得的水流脉动压力转换为有限元计算的节点荷载,采用随机振动法进行数值模拟,分析了闸门的流激振动响应,得到闸门不同开度条件下的动位移、动应力等响应结果。研究结果表明:水流脉动优势频率在1 Hz以内,与闸门一阶自振频率1.42 Hz错开度较大,不易产生共振;闸门动位移响应小于0.25 mm,最大总应力为8.15 MPa,闸门在不同开度条件下的动响应均在结构允许范围内,具有较高的安全性。

关键词:大宽高比平面直升门;闸门振动;模型试验;金汇港南闸

中图分类号:TV663⁺.4

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2024)05-0074-06

Analysis of vibration characteristics of planar vertical-lift gate with large aspect ratio in middle hole of Jinhui Harbor South Gate//XIAO Zhiqiao¹, SUN Jiahua², SHENG Jun¹ (1. Shanghai Puhe Engineering Design Co., Ltd., Shanghai 200333, China; 2. Shanghai Investigation Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200434, China)

Abstract: In view of the dynamic characteristics of planar vertical-lift gates with large aspect ratio under the influence of pulsating pressure from water flow, the natural vibration frequency of the middle hole gate of the Jinhui Harbour South Gate was obtained through the analysis of natural vibration characteristics. The pulsating pressure on the gate model under different conditions was measured through physical model tests. The power spectrum functions of pulsating pressure at various measurement points were obtained through spectral analysis using the fast Fourier transform technique. These results were compared with the natural vibration characteristics to determine whether resonance would occur. The measured pulsating pressure was converted into nodal loads for finite element calculations, and random vibration methods were employed for numerical simulations to analyze the flow-induced vibration response of the gate, yielding results for dynamic displacement, dynamic stress, and other response factors under different gate opening conditions. The research results show that the dominant frequency of the pulsating pressure is below 1 Hz, with a large offset from the first-order natural frequency of the gate, which is 1.42 Hz, making resonance unlikely. The dynamic displacement response of the gate is less than 0.25 mm, and the maximum total stress is 8.15 MPa. Under various gate opening conditions, the dynamic response of the gate remains within the allowable structural range, indicating a high level of safety.

Key words: planar vertical-lift gate with large aspect ratio; gate vibration; model test; Jinhui Harbor South Gate

闸门是水利建筑物中的重要组成部分,其安全性对整个工程具有至关重要的作用。闸门振动作为特殊的水力学问题,与水流环境、闸门结构间的相互作用密不可分。工程实践证明,闸门在不同水位下的泄流或启闭会发生不同情况的振动^[1-2]。目前,国内外众多学者对闸门振动开展了深入研究。例如:刘计良等^[3]基于三维有限元模态分析,总结了弧形钢闸门和闸墩在动力特性与流激振动响应交互作用下的影响规律;阮颖颖^[4]采用水力学试验和空间有

限元模型研究了翻板闸门结构振动特性及自振特性等;居荣初等^[5]以平面钢闸门为例,对闸门振动原因进行了综合分析并提出了防治手段。这些研究为理解闸门振动机制提供了重要的理论基础和实践经验。然而对于大宽高比平面直升门,当前的研究还存在不足之处:某些条件下,脉动压强的即时值易超过时均值,导致闸门瞬时荷载显著增强;当泄流脉动压力主频趋近闸门自振频率时,可能会引发闸门共振,严重影响其运行安全。因此大宽高比平面直升门在

特定工况下的流激振动特性需要进一步研究和分析。

1 工程概况

金汇港南闸是上海市浦东片区的主要排水口,节制闸为一等工程,挡潮标准为 200 年一遇高潮位加 12 级风,除涝标准为 20 年一遇。闸孔总净宽 60 m,两边孔净宽 15 m,中孔净宽 30 m。中孔采用宽 30 m、高 6 m 的潜孔式平面管桁结构直升门,闸门材料为 Q345D 低合金钢,主梁、竖向联结系和门背联结系采用桁架结构,主梁采用弧形折线结构,桁架均采用空心钢管钢,边梁采用实腹式结构,其结构布置如图 1 所示。因闸门结构刚度较低,在启闭或泄流时水流脉动压力会对闸门产生影响,本文基于金汇港南闸中孔大宽高比平面直升门的结构和布置,采用数值模拟与物理模型试验相结合的方式,综合分析闸门在水流脉动压力作用下的动力特性,多方验证其运行稳定性,为闸门的安全运行提供可靠依据。

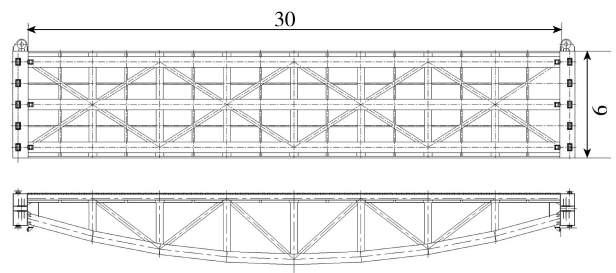


图 1 金汇港南闸中孔大宽高比平面直升门结构布置(单位:m)

2 计算方法

采用自振特性分析方法、脉动压力频谱分析方法和随机振动分析方法分别对闸门自振、水流作用下的振动频率和流激振动响应进行计算。

水流条件下闸门结构的振动属于水弹性理论范畴,该过程弹性系统和流体相互影响。当采用静力分析法时,可直接将水体对于闸门的作用力转换为外部静荷载,但在实际工程中,闸门自振会对水体产生一定的影响,导致动水压力反作用于闸门结构,分析时应考虑闸门与水流间的流固耦合效应。当不可压缩流体呈小幅运动时,动水压力的变化遵从拉普拉斯方程^[5-6]。

在与流体接触的结构中,动力学方程中的荷载可分为动水压力荷载及其他荷载:

$$K\delta + C\dot{\delta} + (M + M_p)\delta = R_0 \tag{1}$$

式中: K 、 C 、 M 分别为结构的刚度、阻尼、质量矩阵; M_p 为附加质量矩阵; δ 、 $\dot{\delta}$ 分别为节点位移、加速度列阵; R_0 为结构自振引起的动水压力以外的荷载。

因式(1)中阻尼对于结构固有频率及振动状态

影响微小,可忽略阻尼得出如下自振方程:

$$[K - \omega^2(M + M_p)]\delta_0 = 0 \tag{2}$$

式中: ω 为闸门固有频率; δ_0 为节点振幅。

在转换模型试验监测点测得的脉动压力时域图时,采用快速傅里叶变换技术计算各测点水流脉动压力的功率谱函数^[7-8]。由式(1)求得水体与结构间流固耦合作用下的自振特性后,进行振型展开,并作快速傅里叶变换,得到位移响应功率谱矩阵^[9-10]。

3 有限元模型构建

基于三维有限元程序对金汇港南闸中孔闸门各部分结构进行单元剖分,如图 2 所示。使用四边形板壳单元模拟门板、主横梁、纵梁、边梁、筋板,梁单元模拟水平次梁,杆单元模拟启闭杆,闸门滑块、转轮和对闸门有影响的水体均采用六面体单元。共计 53 768 个节点,54 426 个单元,其中六面体单元 38 660 个,板单元 15 540 个,梁单元和杆单元共 226 个。为了准确反映转轮的受力特性,模拟其在运行过程中的转动效果,静力计算时在轮子、轮轴之间设置接触面单元,将其作为非线性的无摩擦力的接触问题进行求解。在进行自振特性计算时,则在两者之间设置虚拟的刚性链杆,模拟其自由转动。坐标系中顺水流方向为 z 轴正向,顺水右岸为 x 轴正向,垂直向上为 y 轴正向。

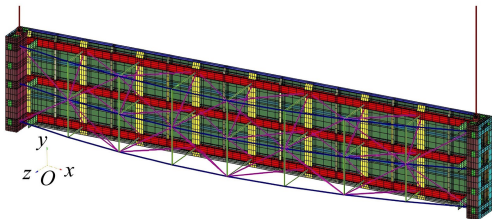


图 2 无水条件下中孔闸门静力有限元模型

除模拟闸门结构等部分的静力计算外,需对自闸门底缘向内外河两侧各 15 m 的水体进行有限元数值离散的动力计算,以充分反映有水条件下闸门的流固耦合效应,闸门静力有限元模型如图 3 所示。

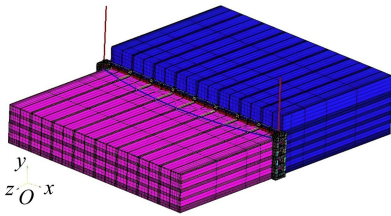


图 3 有水条件下中孔闸门静力有限元模型

4 自振特性分析

4.1 自振频率计算

采用流固耦合三维有限元计算方法,对金汇港

南闸中孔闸门自身固有振动特性进行计算分析。结合该闸门的实际运行情况,考虑结构与水体间的耦合效应,选取了5种不同的水位组合作为计算工况,如表1所示,其中第5种工况为不考虑结构与水体的相互作用。

表1 中孔闸门自振频率计算工况

工况	内河水位/m	外河水位/m
1	2.50	0
2	3.75	0
3	3.75	1.86
4	2.50	6.94
5	0	0

采用考虑结构与水体相互作用的自振特性分析方法对中孔闸门进行三维有限元数值分析,得到前述5种工况下最低前十阶自振频率,如表2所示。由表2可知,闸门振型分布较为密集,这也是大宽高比钢闸门的自振特性之一。闸门在有水及无水条件下不同工况自振频率相差不大,此时将无水条件下的一阶频率1.42 Hz视为闸门自振频率。一般来说,自振频率在考虑流固耦合效应的影响下会有所下降,这说明水的弹性耦合效应会使闸门自振频率降低。但是对于金汇港南闸中孔闸门来说,流固耦合效应不明显,主要原因为闸门属于低水头闸门,水

体的附加质量效应对结构自振频率的影响不明显。另一方面也说明,单一数值模拟未能精确体现水流引起的流固耦合现象,需进一步采用模型试验所得结果加以辅助支撑计算。

表2 中孔闸门5种工况下的自振频率 单位:Hz

阶数	工况1	工况2	工况3	工况4	工况5
1	1.42	1.42	1.42	1.42	1.42
2	1.67	1.67	1.67	1.67	1.67
3	3.09	3.09	3.09	3.09	3.09
4	3.31	3.31	3.31	3.31	3.31
5	3.76	3.76	3.76	3.75	3.76
6	5.01	5.01	5.01	5.01	5.01
7	5.43	5.43	5.43	5.42	5.43
8	5.95	5.95	5.95	5.95	5.95
9	6.37	6.37	6.37	6.39	6.43
10	6.42	6.42	6.42	6.42	6.37

4.2 振型分析

分别选取工况1、5作为有水及无水条件下的代表工况,对中孔闸门前五阶振型图进行分析,因闸门高阶振型均为内部梁系结构的振动,故不作展示。两种工况下闸门放大后的振型分布分别如图4和图5所示。由图4和图5可见,前五阶振型均为闸门整体振动。其中,第一阶振幅较小,整体振型表现为门体上下方向的前后翻转振动;第二阶闸门发生

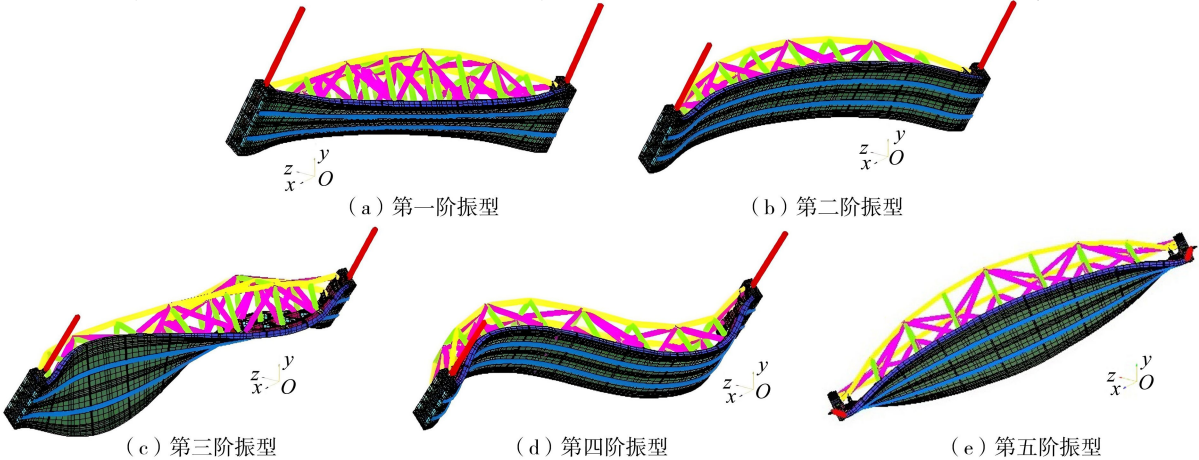


图4 有水条件下中孔闸门振型分布

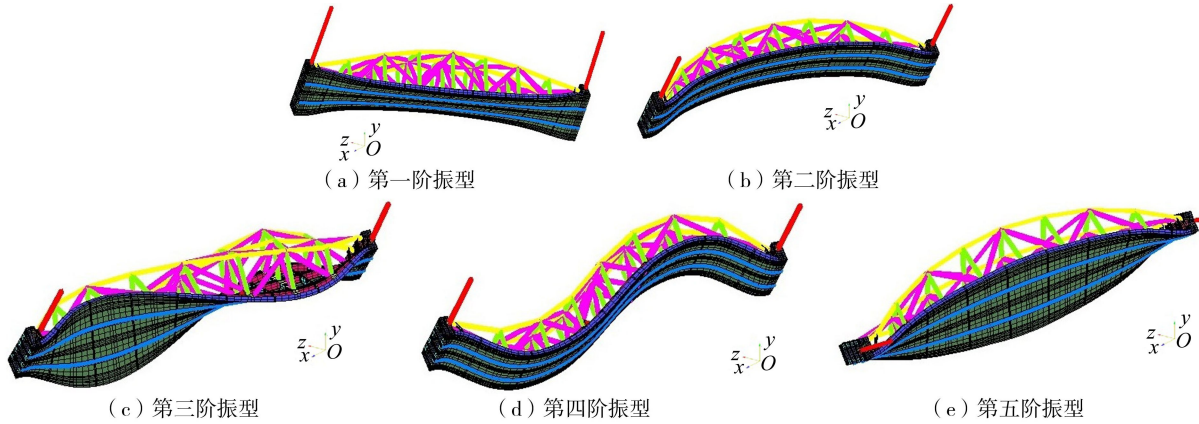


图5 无水条件下中孔闸门振型分布

明显形变,振型表现为闸门整体的前后振动;第三阶振型则表现为闸门的反对称扭转振动;第四阶振型表现为反对称前后振动;第五阶除闸门中心,其余部分向四周扭曲,振型则表现为扭转振动。因水位差较小,流场内部的变化对于闸门的反作用影响不大,有水及无水条件下闸门振型区别较小。

5 物理模型试验

为准确模拟闸门振动过程中存在的流固耦合现象,采用物理模型试验进一步测量不同水位组合下作用在闸门上的水流脉动压力。一方面可为闸门结构的流激振动^[11-13]数值计算提供前提条件,另一方面可从水流脉动压力的频谱分析结果中获得优势频率,与数值计算下的闸门自振结果作对比,从而定性判别闸门与脉动水流是否发生共振。

5.1 模型制作

模型试验的主要目的是量测作用于闸门的水流脉动压强并分析其特性,为结构动力特性分析提供水流脉动参数,故模型设计中重点考虑闸门及闸室,按重力相似准则选择长度比尺为 15,使模型闸门具有较大的尺度。模型的设计及加工均按 SL 155—95《水工(常规)模型试验规程》规定进行。在脉动压强量测试验中,中孔闸门内河侧垂直布置 4 个测点,距闸门底部距离分别为 0.3、1.2、2.4、3.6 m;外河

侧垂直布置 3 个测点,距闸门底部距离分别为 0.3、1.2、2.4 m。模型照片及测点布置情况如图 6 所示。

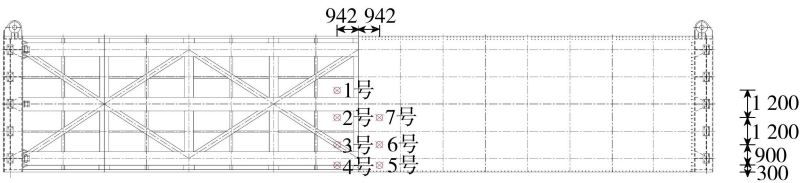
5.2 脉动压力结果分析

金汇港南闸常水位为 2.5~2.8 m,最高控制水位为 3.75 m。本试验中,对于自由孔流,内河水位按 3.75 m 与 2.8 m 两种水位组合进行计算分析;对于淹没孔流,按内河水位 3.75 m、外河水位 2.5 m 与 3.0 m 两种情况进行组合。水位及闸门开度组合共计 15 种工况。针对自由孔流和淹没孔流的不同水位组合进行脉动压强量测试验。由于水流脉动压力呈无规律波动变化,故对不同工况下各测点的脉动压力标准差进行分析,如表 3 所示。由表 3 可知,当内外河水位一定时,各测点的脉动压力标准差随闸门开度的增大而逐渐增大,当水位差较大且闸门开度为 1.8 m 时,测点 2 的脉动压力标准差达到最大值 0.988 kPa,表明此时水流脉动幅度较大;当闸门开度一定时,内外河水位差越大,各测点测得的脉动压力标准差也越大。

将各工况各测点的脉动压力时程曲线由快速傅里叶变换可转换成频谱曲线,图 7 为 2 号测点部分工况的功率谱密度曲线。由图 7 可知,闸门各测点能量均以低频为主,其优势频率均在 1 Hz 以内,与中孔闸门一阶自振频率 1.42 Hz 相比,水流激励频率与结构固有频率之间的错开度相差 20% 以上,结



(a) 模型照片



(b) 测点布置

图 6 中孔闸门模型照片及脉动压强测点布置(单位:mm)

表 3 主要试验工况及各测点脉动压力标准差

工况	内河水位/m	外河水位/m	闸门开度/m	标准差/kPa						
				测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	测点 5	测点 6	测点 7
1	2.80		0.3	0.210	0.485	0.251	0.308			
2	2.80		0.9	0.486	0.664	0.545				
3	2.80		1.5	0.595	0.778	0.813				
4	2.80		1.8	0.768	0.988	0.792				
5	3.75	2.50	0.6	0.444	0.127	0.112	0.023	0.190	0.177	0.153
6	3.75	2.50	0.9	0.462	0.143	0.132	0.057	0.291	0.285	0.210
7	3.75	2.50	1.2	0.517	0.239	0.221	0.168	0.388	0.291	0.204
8	3.75	2.50	1.5	0.578	0.383	0.323	0.318	0.462	0.419	
9	3.75	3.00	0.6	0.448	0.075	0.071	0.033	0.075	0.057	0.041
10	3.75	3.00	1.5	0.534	0.301	0.276	0.248	0.330	0.289	0.277
11	3.75		0.3	0.192	0.300	0.268	0.331			
12	3.75		0.6	0.335	0.427	0.387	0.429			
13	3.75		0.9	0.474	0.545	0.466	0.51			
14	3.75		1.2	0.586	0.652	0.559	0.637			
15	3.75		1.5	0.614	0.677	0.614	0.608			

构不会发生危害性共振。

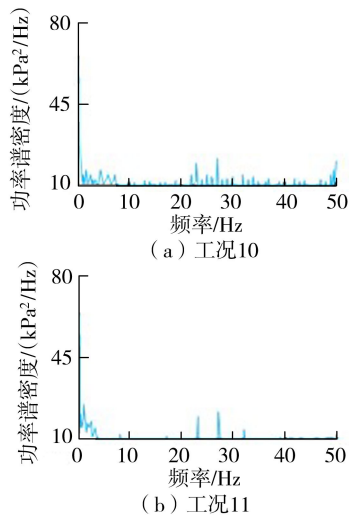


图 7 2号测点功率谱密度曲线

6 流激振动分析

根据模型试验测量结果,将离散水流脉动压力转换为闸门上的节点荷载,采用数值模拟法对闸门进行随机振动响应分析,求解不同工况脉动水流作用下主要部件的动位移和动应力,结果分别见图 8 和图 9。由图 8 和图 9 可知,中孔闸门的位移响应分布与其基本振型密切相关,主振型振动较大部件

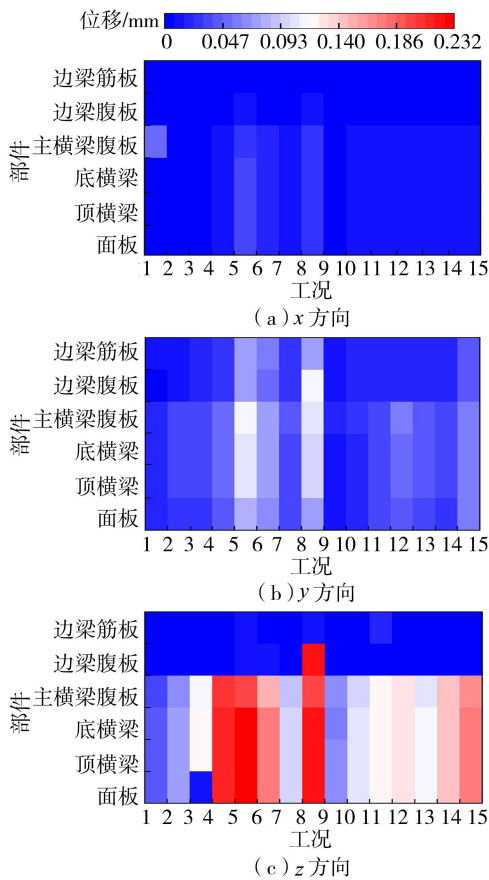


图 8 中孔闸门主要部件动位移响应分布

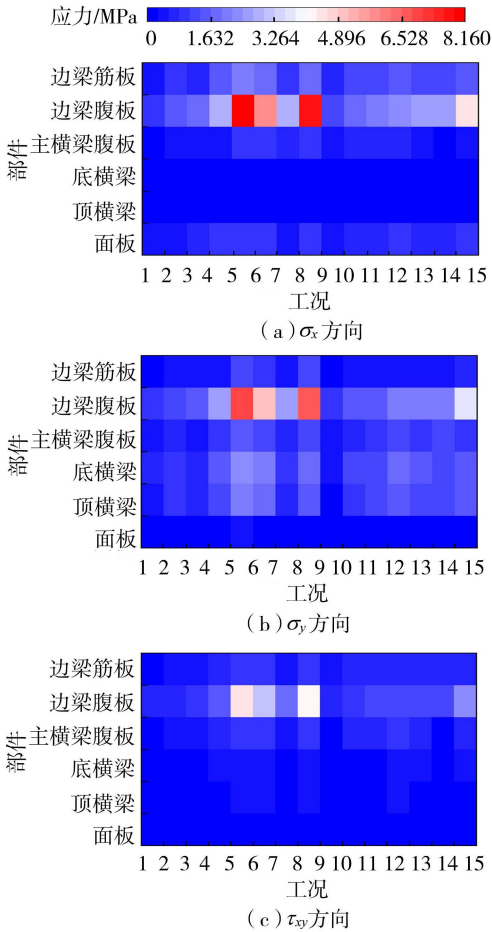


图 9 中孔闸门主要部件动应力响应分布

其动位移响应也较大;从振动位移量级上来说,中孔闸门振动响应不大;在脉动水流作用下,各种工况动位移响应均小于 0.25 mm,根据美国阿肯色州通航枢纽工程中所提出的闸门振动位移判别标准,闸门在微小振动范围内;各部件的动力响应结果均较低,其中最大总应力为 8.15 MPa,发生于边梁腹板处,结构较为安全。

7 结 论

- a. 金汇港南闸中孔闸门振型分布较为密集,第一阶振型为前后翻转振动;第二阶为前后振动;第三阶为反对称扭转振动;第四阶为反对称前后振动;第五阶为扭转振动。
- b. 水位变化对闸门振动频率影响较小,闸门一阶自振频率为 1.42 Hz。中孔闸门各部件脉动压力均以低频为主,其优势频率在 1 Hz 以内,与自振频率错开度较大,结构不会发生共振,具有一定的安全性。
- c. 流激振动计算所得中孔闸门各部件动位移响应均小于 0.25 mm,动应力响应均较低,最大总应力为 8.15 MPa,结构偏安全。

参考文献:

[1] 林敦志. 闸门振动现象及振动特性分析[J]. 科技资讯, 2010,8(16):116. (LIN Dunzhi. Analysis of gate vibration phenomenon and vibration characteristics[J]. Science & Technology Information,2010,8(16):116. (in Chinese))

[2] 彭思贤,赵兰浩,毛佳. 大宽高比弧形钢闸门流激振动数值分析[J]. 水利水电科技进展,2022,42(3):90-96. (PENG Sixian,ZHAO Lanhao,MAO Jia,et al. Numerical analysis of flow-induced vibration of a steel radial gate with large width to height ratio[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(3):90-96. (in Chinese))

[3] 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. (LIU Jiliang, XI Honglin, SI Zheng,et al. Flow induced vibration of radial gate-pier system based on fluid-structure coupling[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2023,34(5):149-154. (in Chinese))

[4] 阮颖颖. 翻板闸门流激振动模型试验及优化设计[J]. 黑龙江水利科技, 2023,51(4):96-99. (RUAN Yingying. Model test and optimization design of flow-induced vibration of flap gate[J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2023,51(4):96-99. (in Chinese))

[5] 居荣初,曾心传. 弹性结构与液体的耦联振动理论 [M]. 北京:地震出版社,1983.

[6] 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. (YAN Genhua,DONG Jia,SUN Yunxi. Flow-induced vibration control and prototype measurement verification of large upwelling arch gate[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020,40(5):55-61. (in Chinese))

[7] 赵兰浩,李同春,汪凌. 水工闸门流激振动响应的一种

(上接第 64 页)

[7] 李承木,陈学茂,李晓勇. 关于外掺 MgO 混凝土压蒸安定性试验的几个问题[J]. 广东水利水电,2009(6):1-4. (LI Chengmu, CHEN Xuemao, LI Xiaoyong. Some problems related to autoclave stability test of concrete mixed magnesia [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower,2009(6):1-4. (in Chinese))

[8] 陈荣妃,陈昌礼. 试件尺寸对外掺 MgO 水泥净浆压蒸膨胀变形的影响[J]. 混凝土,2014(3):7-10. (CHEN Rongfei,CHEN Changli. Dimensional effect on deformation of autoclave expansion in cement paste maxed with magnesium oxide[J]. Concrete,2014(3):7-10. (in Chinese))

[9] 李维维,陈昌礼,李良川,等. 外掺 MgO 水泥净浆和砂浆小尺寸试件的压蒸膨胀变形[J]. 材料科学与工程学

计算方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2005,33(4):404-408. (ZHAO Lanhao,LI Tongchun,WANG Ling. A computation method for flow-induced vibration response of gates [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2005,33(4):404-408. (in Chinese))

[8] 王雨苗,路观平,张法宝. 水流脉动压力的谱特性及相干尺度[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),1998,21(5):71-76. (WANG Yumiao, LU Guanping, ZHANG Fabao. The spectrum character and coherence scale of fluctuation pressure in water flow [J]. Journal of Hefei University of Technology, 1998,21(5):71-76. (in Chinese))

[9] 庄表中,王衍新. 随机振动概论[M]. 北京:地震出版社,1982.

[10] 纽兰. 随机振动与谱分析概论[M]. 方同,译. 北京:机械工业出版社,1980.

[11] 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. (SU Shengzhi, YANG Chunxia, RAO Tianhua, et al. Numerical simulation of flow-induced vibration of a gate with different opening degrees [J]. Water Resources and Hydropower Technology (Chinese and English),2023,54(9):148-155. (in Chinese))

[12] 郭博文,高玉琴,范冰,等. 基于 LES 的水工钢闸门流激振动数值模拟研究[J]. 人民黄河,2024,46(3):126-131. (GUO Bowen, GAO Yuqin, FAN Bing, et al. Numerical simulation of flow-induced vibration of hydraulic steel gate based on LES [J]. Yellow River, 2019,46(3):126-131. (in Chinese))

[13] 王文强,王雪岩,李超. 某项目泄洪闸工作闸门流激振动试验研究[J]. 内蒙古水利,2024(4):15-17. (WANG Wenqiang, WANG Xueyan, LI Chao. Experimental study on flow-induced vibration of working sluice gate of a project [J]. Inner Mongolia Ancient Water Conservancy, 2024(4):15-17. (in Chinese))

(收稿日期:2024-03-18 编辑:俞云利)

报,2016,34(1):160-165. (LI Weiwei, CHEN Changli, LI Liangchuan, et al. Autoclave-treated expansibility of small dimension specimens of cement paste and mortar with magnesium oxide[J]. Journal of Materials Science & Engineering,2016,34(1):160-165. (in Chinese))

[10] 吴中伟,廉慧珍. 高性能混凝土[M]. 北京:中国铁道出版社,1999.

[11] 李维维,陈昌礼,雷平,等. 外掺 MgO 水泥基材料的微观结构研究[J]. 功能材料,2017,47(2):2166-2171. (LI Weiwei, CHEN Changli, LEI Ping, et al. Study on microstructure of MgO cement-based materials[J]. Journal of Functional Materials,2017,47(2):2166-2171.

[12] 沈旦申. 粉煤灰混凝土[M]. 北京:中国铁道出版社,1989.

(收稿日期:2023-09-29 编辑:俞云利)