

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2026.01.003

超大跨度下卧式扇形钢闸门流激振动模型试验研究

王政平^{1,2}, 余澜轩^{1,2}, 刘元勋^{1,2}

(1. 中水珠江规划勘测设计有限公司, 广东 广州 510610; 2. 广东省水工程及清洁能源工程技术研究中心, 广东 广州 510610)

摘要: 为评估超大跨度下卧式扇形钢闸门的流激振动安全性, 以澳门内港挡潮闸为对象, 基于几何比尺 1:20 的水弹性模型, 系统测量了有无止水、不同内外江水位组合及开度条件下闸门关键部位的脉动压力与流激振动响应。试验结果表明: 闸门脉动压力能谱集中于 1.0 Hz 以下低频段, 外侧弧形门板的脉动压力均方根值与动力系数均显著高于内侧平板门面, 表明溢流水舌与滚波是主导振源; 脉动压力的绝对值随水位差增大而上升, 但动力系数在本试验范围内呈下降趋势; 其原因在于静水压随水头增大更为显著, 且高水位差下溢流形态趋于平稳, 致使脉动相对于基压的比值减小; 设置止水可显著抑制缝隙流引发的脉动压力(降幅超 70%), 但对低频加速度控制有限。认为该闸门动力安全性良好。

关键词: 超大跨度下卧式扇形钢闸门; 流激振动; 水弹性模型; 脉动压力; 结构安全; 振动加速度; 振动位移
中图分类号: TV663; TV34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672—1144(2026)01—0025—08

Experimental Study on Flow-induced Vibration of a Super-large Span Reclining Sector Steel Gate

WANG Zhengping^{1,2}, YU Lanxuan^{1,2}, LIU Yuanxun^{1,2}

(1. China Water Resources Pearl River Planning Surveying & Designing Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510610, China;
2. Guangdong Provincial Water Engineering and Clean Energy Engineering Technology Research Center, Guangzhou, Guangdong 510610, China)

Abstract: To assess the flow-induced vibration safety of an ultra-large-span horizontal radial steel gate, this work takes the Macau Inner Harbor tide gate (single opening clear width: 62 m) as the prototype. Based on a hydroelastic model with a geometric scale of 1:20, systematic measurements were conducted to obtain the fluctuating pressures and flow-induced vibration responses (acceleration and displacement) at key locations of the gate. These measurements were taken under various conditions, including with and without water seals, different upstream and downstream water level combinations, and different gate openings. The experimental results are as follows. The energy spectrum of the gate's fluctuating pressure is concentrated in the low-frequency band below 1.0 Hz. The root mean square values and dynamic factors of the fluctuating pressure on the external curved skin plate are significantly higher than those on the internal flat plate, indicating that the overflow nappe and water roller are the dominant excitation sources. The absolute value of the fluctuating pressure increases with the head difference, while the dynamic factor shows a decreasing trend within the tested range which is because the static water pressure increases more significantly with the head, and the overflow pattern becomes more stable under high head difference, leading to a decrease in the ratio of the fluctuating pressure to the static pressure. Installing water seals can significantly suppress the fluctuating pressure induced by gap flow (reduction exceeding 70%), but has limited effect on controlling low-frequency accelerations. It is concluded that the gate exhibits good dynamic safety performance.

Keywords: ultra-large-span horizontal radial steel gate; flow-induced vibration; hydroelastic model; fluctuating pressure; structural safety; vibration acceleration; vibration displacement

收稿日期:2025-09-04

修稿日期:2025-10-23

基金项目:水利部重大科技项目(SKS-20222116)

作者简介:王政平(1978—),男,正高级工程师,主要从事水工结构、工程仿真研究工作。E-mail:sunwzhp@hotmail.com

通讯作者:刘元勋(1972—),男,正高级工程师,主要从事水工结构设计工作。E-mail:liuyuanxun@126.com

澳门河口区内港挡潮闸是兼具挡潮、防洪、通航及水环境调节功能的关键水工建筑物,其结构安全性至关重要。为兼顾通航与挡潮需求,横轴下卧式扇形钢闸门凭借启闭灵活、门叶可平卧于河底而不影响通航等优势,近年来在工程中逐步得到应用^[1-2],然而,该类闸门在运行过程中面临溢流、波浪与缝隙流等多重复杂水动力耦合作用,易诱发流激振动,对结构长期安全构成潜在威胁^[3-4]。

在闸门流激振动研究方面,现有成果主要集中于传统弧形闸门与平板闸门。例如,张亮等^[5]结合水动力荷载与三维有限元模型,分析了弧形闸门的振动特性并提出了抗振措施;刘计良等^[6]基于流固耦合理论,揭示了弧形闸门-闸墩体系的相互影响规律。段杭等^[7]通过现场监测分析了高水头条件下弧形闸门的异常振动与损伤机理;在平面闸门方面,刘竹丽等^[8]通过数值模拟研究了流固耦合作用下面板闸门的动力响应;刘昉等^[9]结合模型试验与模态分析探讨了导流洞平面闸门的振动行为。可见,现有研究多围绕传统闸型展开,并形成了较为系统的分析方法。然而,下卧式扇形钢闸门在结构体系(如横轴旋转支承方式)、动力特性及水流-结构相互作用机理等方面与常规闸型存在显著差异,现有研究成果适用性有限。目前,全球单孔净宽超过 40 m 的扇形钢闸门工程案例极少,仅见于英国泰晤士河挡潮闸^[10](采用上升弧形门,单孔净宽 61 m)与德国埃姆斯挡潮闸^[11](采用浮式扇形闸门,单孔净宽 40 m)等个别项目,相关试验数据与运行经验极为匮乏,因此,开展超大跨度扇形闸门流激振动试验研究具有重要理论与工程意义。

本研究以澳门内港挡潮闸工程为背景,建立几何比尺为 1:20 的物理模型,通过系统模型试验,揭示闸门在复杂水力条件下的脉动压力分布与频谱特性;量化水位、开度及止水条件对振动响应的影响;阐明其流固耦合机制,提出安全运行控制准则,为同类工程的设计与安全运维提供参考。

1 工程概况

本研究以澳门内港挡潮闸通航孔闸门为研究对象。根据《广东省航道发展规划》(征求意见稿)(2018—2035)本段航道规划为内河Ⅲ级航道,按照《内河通航标准》珠江三角洲至澳门内河水上过河建筑物通航净空尺度双向通航孔净宽为 110 m,综合考虑闸墩对通航水流有效宽度的影响以及设置防撞等设施,取双向通航孔宽度为 124 m,单孔净宽 62

m。该闸门为横轴下卧式扇形钢结构,是目前世界上同类型闸门中单孔净宽跨度最大的工程。

澳门内港挡潮闸工程位于澳门半岛西侧,属大(1)型水利枢纽,具有挡潮、防洪、排涝、通航等综合功能。该通航孔闸门(图 1)为扇形钢结构,其挡水面采用弧形门板,启闭力转盘设于闸墩之上,闸门高 11 m,绕水平横轴旋转实现启闭操作。闸门开启时平卧于闸底凹槽内,门叶与河床齐平,配合清淤设备定期清淤,不影响航道通行;遇风暴潮时逆时针旋转 90°立起挡水。该布置带来两方面挑战:一是超大跨度对结构整体刚度与动力稳定性要求极高;二是运行中门体同时承受顶部溢流、底缝射流及波浪耦合作用,流激振动风险突出。

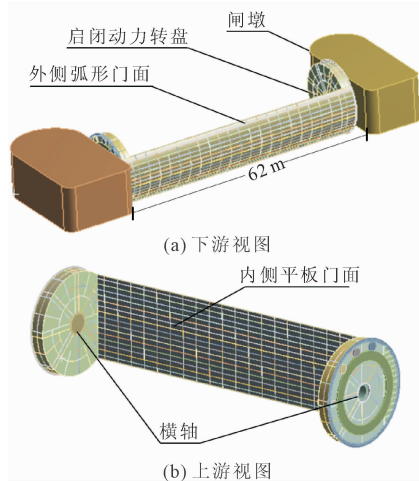


图 1 超大跨度扇形钢闸门示意图

2 试验材料与方法

2.1 模型设计与制作

通航孔横轴下卧式扇形钢闸门物理模型依据重力相似准则并满足水弹性振动研究需求进行设计。取模型比值为 1:20,利用水流弗氏数来推算其它水力学参数的相似比尺,如表 1 所示。

表 1 模型相似比尺

流量比尺	$Q_r = L_r^{2.5} = 1788.85$
流速比尺	$V_r = L_r^{0.5} = 4.4721$
时间比尺	$T_r = L_r^{0.5} = 4.4721$
压力比尺	$P_r = L_r = 20$
糙率系数比尺	$n_r = L_r^{1/6} = 1.6475$

为便于观测水流流态,模型主体采用无色透明的有机玻璃制作,布置具体详情见图 2(a)。闸门采用齿轮-转盘驱动,模型的启闭系统的启闭方式、传

动方式、支承模式等均按工程实际设计情况进行相应设计布置,见图 2(b)。系统配置调速驱动电机与步进电机,实现两侧传动的同步启闭。

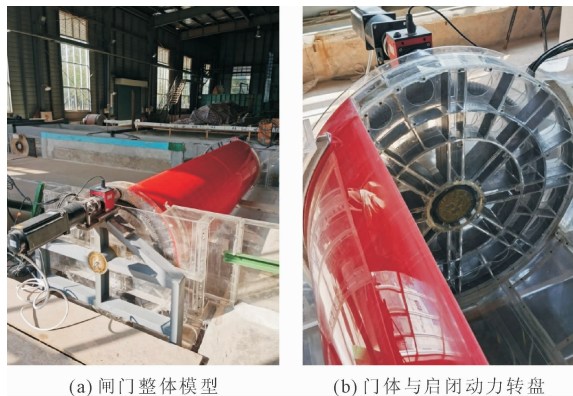


图 2 通航孔闸门模型照片

在门体中部、1/4 断面及闸室底板等关键位置共布设 15 个压力测点,以覆盖外侧弧形门板与内侧平面门板(缝隙流部位)等典型受载区域,系统采集脉动压力时序信号。并在门体设置 3 组三向振动加速度计并同步记录门体三向振动位移。

2.2 试验方法与流程

为系统研究各因素的影响,试验围绕三类变量展开:①止水条件:有止水与无止水两种状态;②水位组合:涵盖多种典型的内、外江水位及其水位差;③闸门开度:从全关($N=0$)到全开($N=1$)之间选取多个特征开度(如 $N=0.1、0.3、0.5$)。

试验采用单因子变量法,逐级调整目标变量,以保证各组试验结果之间的可比性。对于每一个预设工况:①待水位与闸门开度均调整至目标值,且流态稳定后,开始数据采集;②启动数据采集系统,同步触发所有脉动压力传感器、加速度传感器和位移传感器,记录瞬态时序信号;③每个工况的连续采样时间不少于 200 s,以确保所获数据的统计特性稳定且具有代表性;④数据采集完成后,进行初步的时域与频域分析,计算各测点的峰值、均方根值(RMS)等特征量,为后续的定量分析奠定基础。

为保证数据的准确性,所有传感器在试验前均进行了静态与动态标定,测量误差控制在 $\pm 1\%$;针对关键工况进行 3 次重复试验,结果标准差小于 5%,验证了结果的重复性和稳定性。同时,对比了量测信号的频谱特征与数值模拟结果,二者在主频分布及相位特征上保持一致,说明试验结果具有良好的物理合理性与可靠性。

3 试验结果与分析

3.1 闸门脉动压力特性的主要影响因素及规律

超大跨度扇形钢闸门在启闭运行过程中,门顶与门底间隙同时过流,水流结构复杂,易引发局部高强度脉动压力,对闸门的受力特性与动力响应产生显著影响。若脉动水压力过大或分布不均,不仅可能导致门体过度振动,还会加速结构疲劳和局部构件的损伤,进而威胁闸门的安全运行。深入研究闸门运行期间的脉动压力特性,对于揭示闸门流-固耦合作用规律、保障结构安全与运行稳定具有重要的工程意义。

3.1.1 水位对闸门脉动压力的影响

为剔除水位差 ΔH 的干扰,采用等水位差方案,固定 $\Delta H=1.0$ m,设置四组典型水位组合:上游水位 1.5、2.0、2.5、3.0 m,分别对应下游水位 0.5、1.0、1.5、2.0 m。在每一组水位多种开度条件下分别获取门体外侧弧形门板与门体内侧平面门板的脉动压力响应。

对于上游水位 1.5 m 时:该运行工况是工程设计主要的挡潮工况之一,表 2 统计了部分测点的特征值,其中包括动力系数。测点的布置如图 3 所示。

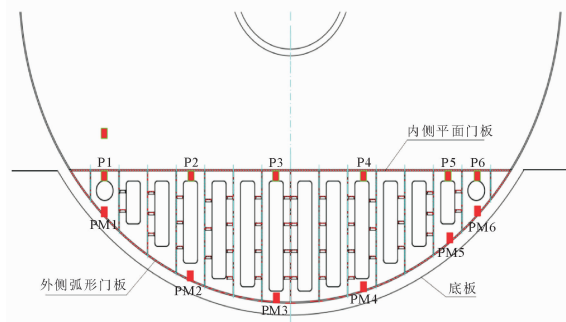


图 3 传感器测点布设示意图

根据我国水工钢闸门设计规范^[12]定义,动力系数是某一闸门相对开度下的动应力与其静应力之比,代表闸门可能承受某些直接作用于门体并作用时间较长的动力荷载,如水流及波浪对闸门的冲击、旋滚对闸门的脉动作用等等,因此对动力系数不宜规定过大,一般不超过 1.2。

由表 2 可见,无止水工况下作用于闸门结构的脉动压力整体水平较低,但不同开度条件下弧形门板的脉动压力峰值显著高于内侧平面门板的脉动压力。外侧测点的脉动压力均方根(RMS)较大值分布在 1.825~4.738 kPa 区间,而内侧缝隙流部位则

为 0.469~2.158 kPa;峰值方面,外侧最高达 22.803 kPa($N=0.8$, P5 测点),明显高于内侧的最高 9.659 kPa($N=0.4$, PM4 测点)。外侧均方根值普遍是内侧的约 2 倍(不同测点比值约 1.9~3.8),印证了溢流水舌及下游波浪/滚波对下卧门外弧面产生了更强的动力冲击作用。

从动力系数的变化规律来看,弧形门板的动力系数总体分布在 0.12~0.32,而内侧平面门板为

0.10~0.44,整体处于规范建议的较低水平。弧形门板在 $N=0.8$ 附近出现动力系数及压力峰值的同步升高,表明该开度下动载效应最为显著,对门体局部启闭与连接构件的疲劳累积不利;而内侧平面门板在小开度($N=0.4\sim0.6$)区间动力系数相对偏高,说明缝隙流的局部收缩和回流效应可能导致内侧产生较强的局部冲击载荷。

表 2 上游水位 1.5 m 闸门无止水脉动压力特征值

闸门开度 N	参数	弧形门板区域测点				平面门板区域测点			
		P1	P3	P4	P5	PM1	PM3	PM4	PM5
1.0	峰值	9.3099	7.9063	17.6091	15.408	2.2462	5.7857	2.9858	2.5013
	均方根值	2.2206	1.8251	2.6733	4.0791	0.5871	0.9464	0.655	0.6176
	动力系数	0.15	0.12	0.18	0.28	0.12	0.19	0.13	0.13
0.8	峰值	11.3734	14.2965	17.2569	22.803	2.1645	6.5887	2.9733	3.8862
	均方根值	2.3092	2.612	3.0658	4.7376	0.4686	1.0161	0.6025	1.4632
	动力系数	0.16	0.18	0.21	0.32	0.10	0.21	0.12	0.30
0.6	峰值	11.9908	9.1026	16.4027	20.5431	2.3147	4.5716	2.4724	4.9248
	均方根值	2.336	2.0507	2.9484	3.8838	0.5172	0.9735	0.6766	2.0589
	动力系数	0.16	0.14	0.20	0.26	0.11	0.20	0.14	0.42
0.5	峰值	8.3843	9.9951	10.533	9.9452	2.1169	3.2971	3.1529	4.8644
	均方根值	1.9105	2.4088	2.5018	2.4101	0.5452	0.7202	0.9409	1.6468
	动力系数	0.13	0.16	0.17	0.16	0.11	0.15	0.19	0.34
0.4	峰值	8.6517	8.7607	12.1096	14.2639	2.1341	3.4454	9.6592	2.7106
	均方根值	2.1425	2.1978	2.5573	3.4332	0.5168	0.8175	2.1577	0.6382
	动力系数	0.15	0.15	0.17	0.23	0.11	0.17	0.44	0.13

表 3 不同水位条件下闸门动力系数

水位组合 (上游/下游)	闸门部位	闸门开度 N				
		1.0	0.8	0.6	0.5	0.4
0.5 m/1.5 m	弧形门板	0.275	0.324	0.286	0.235	0.263
	平面门板	0.136	0.156	0.179	0.162	0.174
1.0 m/2.0 m	弧形门板	0.127	0.119	0.129	0.113	0.127
	平面门板	0.062	0.061	0.055	0.054	0.087
1.5 m/2.5 m	弧形门板	0.103	0.111	0.118	0.106	0.009
	平面门板	0.046	0.048	0.049	0.044	0.003
2.0 m/3.0 m	弧形门板	0.088	0.087	0.088	0.090	0.085
	平面门板	0.049	0.038	0.036	0.039	0.035

3.1.2 水位差对闸门脉动压力的影响

水位差(ΔH)是影响闸门动力荷载的关键参数。为辨析其影响,固定上游水位为 3.0 m,通过调节下游水位,使 ΔH 从 0.5 m 增至 2.0 m。试验揭示了一个关键现象:脉动压力的绝对幅值与表征其相对强度的动力系数,随水位差的变化呈现出截然不

同的规律。

如图 4 所示,随着 ΔH 增大,作用于闸门上的脉动压力绝对幅值如预期般增大。外侧弧形门板的脉动压力均方根值从 2.49 kPa 升至 3.76 kPa,内侧平面门板则从约 1.04 kPa 微幅上升至 1.11 kPa。外侧的脉动压力始终为内侧的 3~5 倍,再次证明了溢流水舌的主导地位。

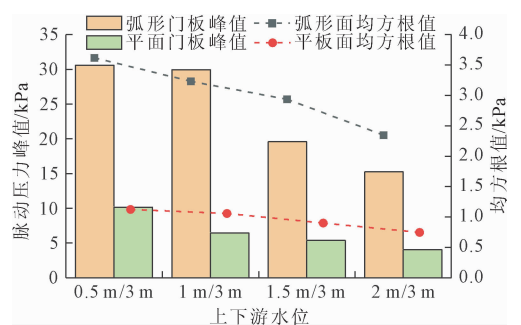


图 4 不同水位差下的脉动压力特征

然而,从结构安全的角度看,更具指导意义的参数—动力系数,却表现出相反的规律。由表 4 可知,随着 ΔH 从 1.0 m 增大至 2.5 m,弧形门板的动力系数从 0.128 单调递减至 0.085,平板门板的动力系数从 0.227 显著递减至 0.0375。这一“单调递减”的规律表明,尽管高水位差下的脉动水压力绝对值更大,但其波动强度(脉动压力)相对于静水荷载的比值却在减小。

表 4 不同水位差下闸门动力系数

水位(下游/上游)	弧形门板动力系数	平板门板动力系数
0.5 m/3.0 m	0.128	0.227
1.0 m/3.0 m	0.115	0.107
1.5 m/3.0 m	0.105	0.0605
2.0 m/3.0 m	0.085	0.0375

该现象可从流态演变的角度理解:在低水位差条件下,溢流水舌更易发生摆动、撞击和翻卷,流态不稳定,导致强烈的相对脉动,故动力系数偏高。而在高水位差条件下,水流功能增强,流线趋于平顺稳定,虽然脉动压力的绝对值因总水头增高而增大,但其脉动幅度相对于巨大的静水压力显得微不足道,

因此动力系数反而降低。

3.1.3 止水对闸门脉动压力特性的影响

设置止水是控制缝隙流、保障闸门运行安全的关键工程措施。本节通过对比有无止水两种条件下的脉动压力,评估止水的减载效果。总体上,止水对由门底缝隙流引起的内侧脉动压力与能量具有稳定且显著的抑制作用;而对由门顶溢流水舌主导的外侧脉动压力影响有限且具工况依赖性。

具体表现为:在上游 1.5 m/下游 0.5 m 工况中,内侧平板的均方根值有止水时约为 0.555 ~ 0.738,较无止水的 0.666 ~ 0.879 明显降低;在 3.0 m/2.0 m 工况中亦呈相似趋势(有止水约 0.518 ~ 0.554,无止水约 0.689 ~ 0.968)。动力系数分析进一步支持该结论:以 1.5 m/0.5 m 为例(见图 5),平面门板动力系数由 0.136 ~ 0.179 降至 0.038 ~ 0.050(降幅可超过 70%),表明止水能有效减弱缝隙流造成的动载。相对地,外侧弧形门板的均方根值与峰值并未获得同等程度的抑制,在某些工况甚至出现峰值上升,提示止水在改变缝隙边界条件时可能引发外侧溢流端的局部强化或激波效应。

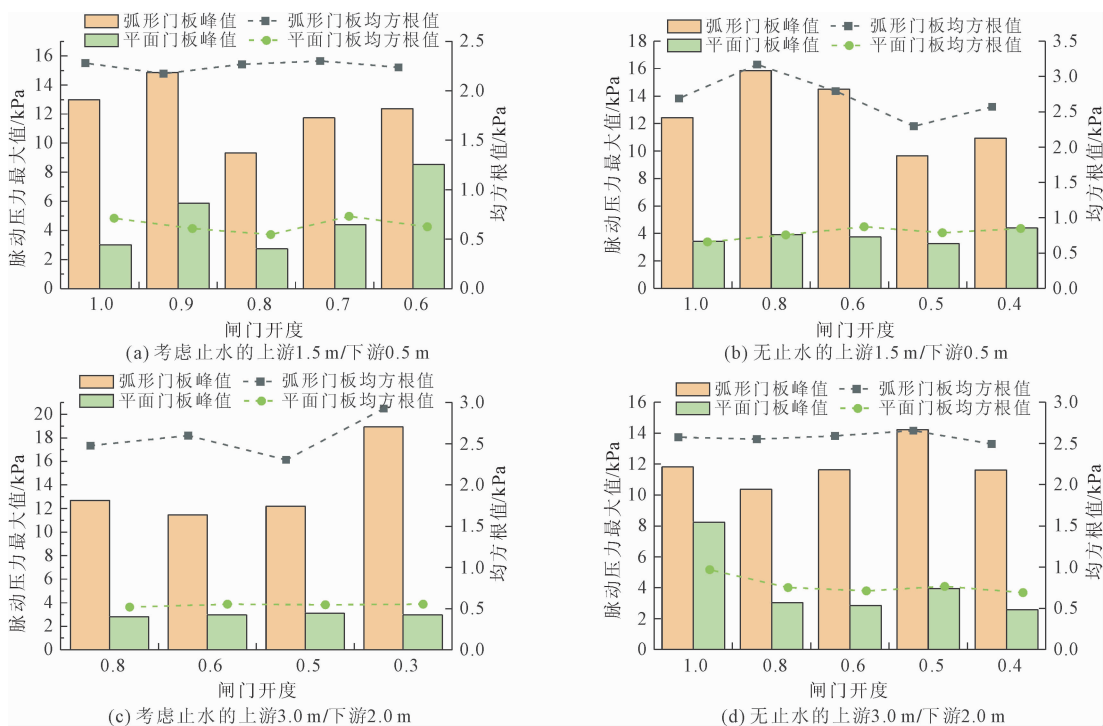


图 5 考虑止水的脉动压力特征图

由图 6 可知,止水条件可显著削减闸门动力系数。以上游 1.5 m/下游 0.5 m 工况为例,无止水时弧形门板动力系数为 0.157 ~ 0.216,平面门板为

0.136~0.179;而在考虑止水后,弧形门板降低并趋于稳定(0.148 ~ 0.156),平面门板则大幅下降至 0.038~0.050,削减幅度超过 70%。这表明止水装

置能够有效抑制缝隙流引起的脉动动载,尤其显著改善了平面门板的受力状况。机理上可解释为:止水主要通过阻断或缓解缝隙流通、改变局部流场而减小缝隙流湍动能量,因此对内侧局部载荷与位移响应作用显著;但溢流水舌及其下游波动为外侧主

控激励,止水对该整体低频激励的干预能力有限。整体而言,止水为控制缝隙诱发的局部动载和空蚀风险的有效措施,但不能替代针对外侧溢流的结构加固或能量耗散设计。

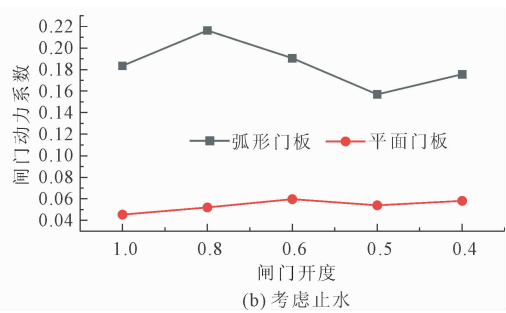
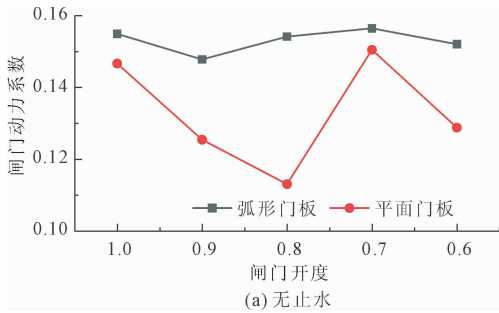


图6 上游 1.5 m/下游 0.5 m 工况下闸门动力系数

3.2 闸门流激振动动力响应的主要因素及规律

超大跨度扇形钢闸门在启闭过程中同时承受缝隙过流与门顶溢流的动水荷载,易诱发流激振动,且国内外工程实例中不利的水力条件常与严重振动事件相关联^[13-15]。闸门的振动加速度响应与振动位移响应是评价结构振动量及安全性的关键动力学参数^[16]。因此,系统研究不同水位、开度及止水条件下的流-固耦合响应,对于揭示流-固耦合作用机理、评价结构振动安全性以及指导工程运行具有重要意义。

3.2.1 水位对闸门流激振动响应的影响

在无止水条件下,振动响应总体呈随上游水位升高而增强的趋势。所有工况均以低频(< 1.0 Hz)为主,表明大尺度流动分离与低频涡脱落是主要激励源。图7显示:位移均方根值多数位于 $0.02 \sim 0.04$ mm,低于规范界定 0.0508 mm的“可忽略”危害阈值^[12],表明在试验范围内结构整体振动危害性较低;但振动上限会随水位升高而抬升,例如振动加速度均方根值上限由 0.1122 m/s^2 增至 0.1356 m/s^2 ,位移峰值上限由 0.363 mm增至 0.396 mm。

此外,部分工况存在显著的局部峰值(如上游 2.5 m/下游 1.5 m, $N=0.5$ 、 1.0 时 y 、 z 方向峰值分别达 0.579 mm与 1.216 mm),提示在特定水位-开度组合下可能出现共振或强漩涡脱落,应在运行调度中关注。

3.2.2 水位差对闸门流激振动响应的影响

以上游固定为 3.0 m、开度 $N=0.4$ 并改变下游水位构建水位差 ΔH 序列的试验表明:振动响应随水位差增大而系统性增强,结果如图8所示。

具体而言,振动加速度:均方根值由 $\Delta H=0.5$ m时的 0.029 m/s^2 增至 $\Delta H=2.0$ m时的 0.0803 m/s^2 ,增幅介于 2% 至 14% 之间。这表明水流激励的整体能量随水位差增大而提升;振动位移:均方根值由 0.0207 mm增至 0.0313 mm,增幅更为显著,达 9% 至 59% 。位移响应对于水位差的变化表现出比加速度更高的敏感性。

这一规律与第3.1.2节中脉动压力随水位差增大的结论相呼应。其内在机理在于,水位差的增大提升了溢流水舌的动能与冲击速度,同时增强了下游滚波的强度,导致闸门振动响应加剧。由此可见,水位差是调控闸门振动水平的关键外部驱动因子,尤其在中-大开度下需重点关注。

3.2.3 止水对闸门流激振动响应的影响

止水通过改变缝隙流边界条件来调控流场,其减振效果具有明显的工况依赖性。

低水位挡潮工况(1.5 m/ 0.5 m):止水对振动位移与加速度的抑制效果均不明显。这可能是由于在低水压条件下,止水对主导性的溢流激励模式影响甚微,其改变边界条件引入的刚度或阻尼变化,未能有效抑制结构的整体低频振动。

高水位工况(3.0 m/ 2.0 m):如图9(b)、图9(d)所示,止水的减振作用得到明确体现。设置止水后,振动位移的峰值在各开度下均被显著削减,但振动位移的均方根值在无止水条件下变化不大(无止水: $0.020 \sim 0.0277$ mm;有止水: $0.0213 \sim 0.0251$ mm)。这一现象表明:止水能有效抑制由瞬态冲击(如水流间歇性撞击)引发的短期大幅振动,但对长期的平均振动能级控制有限。同时,该工况

下振动加速度也呈总体下降趋势,说明在较高水压条件下,止水有助于稳定流态,在一定程度上减弱了

流固耦合的动态激励强度。

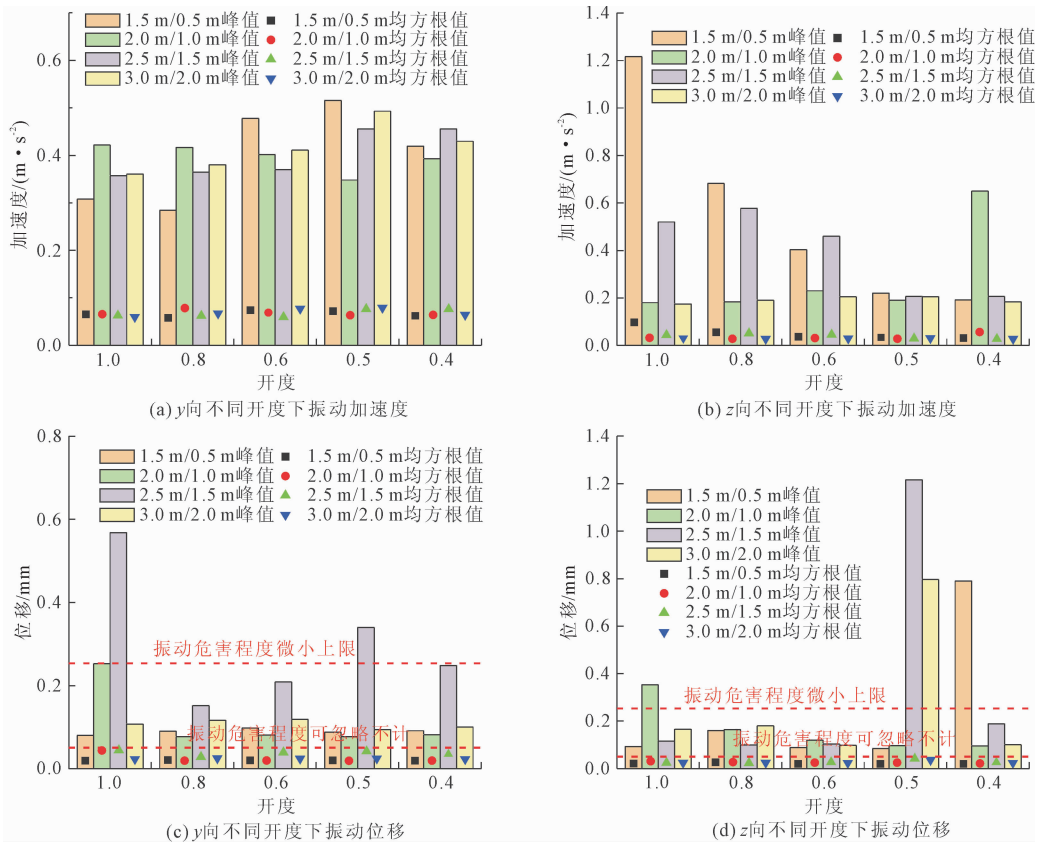


图 7 不同水位下闸门流激振动响应

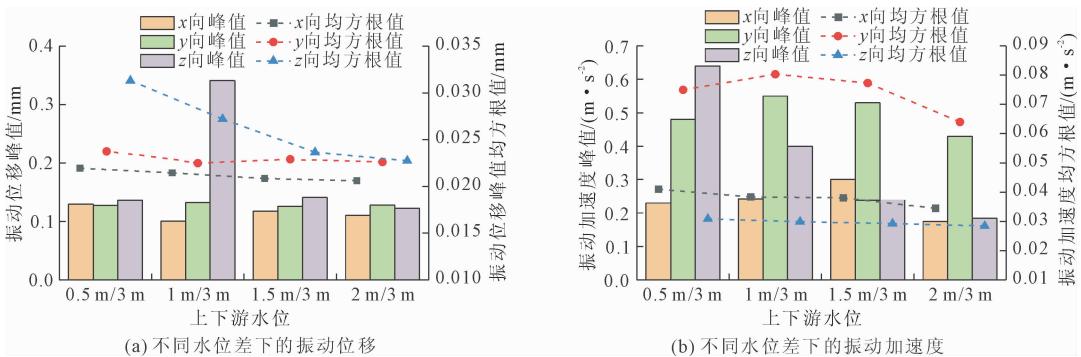


图 8 不同水位差下的闸门振动响应数据(闸门开度 0.4)

综上所述,止水装置对于闸门流激振动的控制效果并非普适。其在高水位、大压力工况下主要通过抑制振动峰值来优化受力环境,而对低水位工况下的整体振动能级控制能力有限。故在工程实践中,应充分保证止水在高水位挡潮工况下的有效性;但对于低水位运行时的振动问题,则需寻求其他减振途径。

4 建议

(1) 运行调度:尽量避免闸门长期处于低水位差(例如 $\Delta H \leq 1.0$ m)且中-大开度(例如 $N \approx 0.8$)的工况,必要时采用保守启闭策略以降低相对动载与疲劳累积风险。

(2) 止水与细部设计:优先采用并定期检修高可靠性的止水/密封措施,以抑制缝隙泄流对内侧局

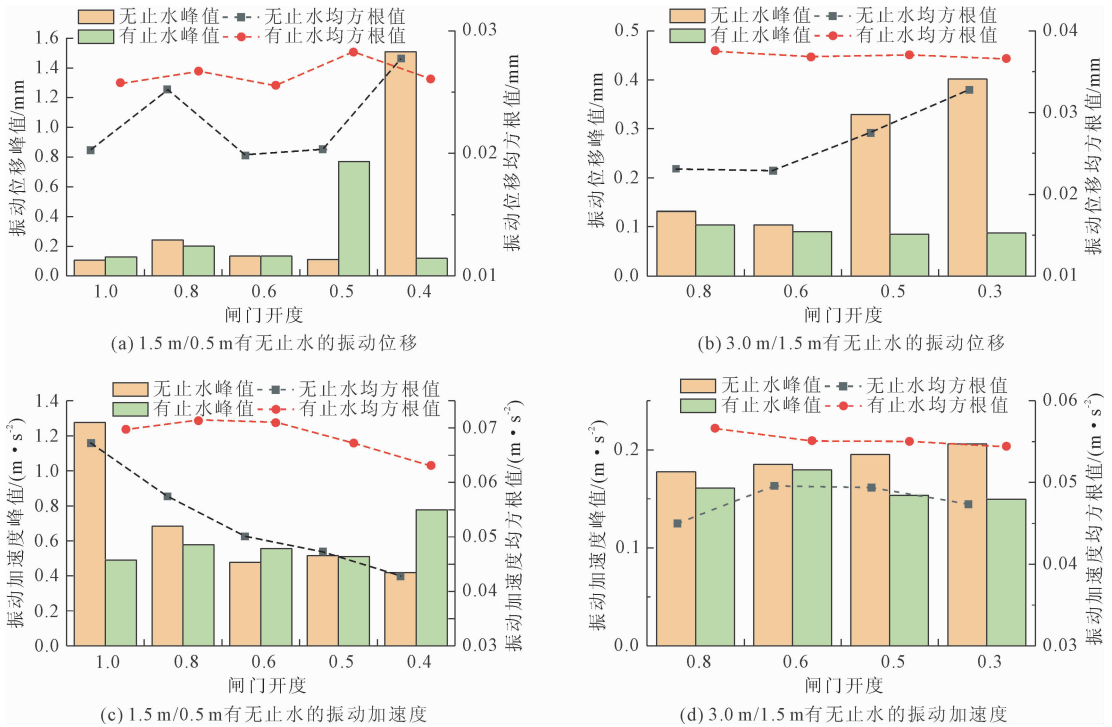


图9 有无止水的闸门流激振动响应数据

部动载的影响;同时评价止水装配公差与长期变形对减振效果的影响并制定维护规范。

(3) 结构强化:把外侧弧形门板作为动力校核与抗疲劳设计的首要对象,强化局部刚度与连接细部(加筋、焊缝、加强板等),并在可能的溢流区采取局部消能或加固措施。

(4) 监测与诊断:运营初期及关键工况下,应在外侧弧形门板与缝隙平板处布设长期监测(脉动压力、加速度、位移),对出现的异常峰值开展时频谱分析与测量复核,以判别真实流态突变或测量误差。

后续研究将开展考虑风浪、泥沙和原型边界条件的放大试验或原型观测,量化缩尺与阻尼差异对绝对响应的影响,并结合数值模拟完善设计系数与运行准则。

5 结论

基于 1:20 水弹性振动模型的系统物理模型试验,对超大跨度(62 m)下卧式扇形钢闸门在典型水位与多种开度下的流-固耦合响应进行了研究,主要得到如下结论:

(1) 脉动压力与频谱特征:闸门脉动压力具有显著的空间不平衡性与低频主导特征(能量主要集中于 <1.0 Hz)。外侧弧形门板均方根值最高可达约 4.74 kPa,约为内侧平板的 1.3~4.0 倍。这一差

异的根本原因在于二者所受的水动力激励机制不同:外侧弧面直接承受门顶溢流水舌的冲击及其在下游形成的滚波往复作用,能量输入集中且强烈;而内侧板件主要受限于门底缝隙流,流动尺度小、能量较低。该低频能谱特性易激发闸门整体的低阶模态振动,应在动力设计中予以重视。

(2) 动力系数与工况依赖性:试验获得的动力系数约 0.12~0.44(低于规范 SL74—2019 的 1.2),表明整体具有较大动力安全裕度。但动力系数随水位差 ΔH 增大呈下降趋势,表明在某些低水位差与中-大开度组合下(如 $N \approx 0.8$)相对动载更显著,低水位差 ΔH 工况在结构稳定性上更具挑战性。

(3) 止水效应的范围:止水装置能显著抑制由缝隙流引起的内侧脉动压力与位移能量(统计降幅超过 70%),证明通过改善局部流态可有效降低局部动载与空蚀风险。然而,止水对由门顶溢流水舌主导的低频整体加速度抑制作用有限,并且在个别开度/工况下可能改变局部流场结构,诱发短时加速度峰值增大。由此可见,止水是控制缝隙流与局部振动的关键措施,但并不能完全消除所有流激振动问题,故在设计与运行中应将止水优化与结构动力校核、阻尼与局部消能措施联合考虑。

(下转第 82 页)

- havior of ring beam joints between concrete-filled twin steel tubes columns and reinforced concrete beams[J]. *Engineering Structures*, 2012,39:1-10.
- [4] Yan Xueyuan, Li Anlong, Liu Xuhong, et al. Seismic performance of the joint between unequal-depth steel beam and CFDST column[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2025,225:109175.
- [5] Bai Yongtao, Wang Shuhong, Mou Ben, et al. Bi-directional seismic behavior of steel beam-column connections with outer annular stiffener[J]. *Engineering Structures*, 2021,227:111443.
- [6] Li Shen, Ding Shihao, Li Xiaolei, et al. Experimental study and mechanical properties of prefabricated beam-column joint with L-shaped stiffeners[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2022,199:107627.
- [7] GB/T 2975—2018 钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备[S]. 北京:中国标准出版社,2018.
- [8] GB/T 228.1—2021 金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2012.
- [9] GB/T 50081—2019 混凝土物理力学性能试验方法标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [10] JGJ/T 101—2015 建筑抗震规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [11] Fan Junchao, Zhao Junhai, Hua Linwei, et al. Seismic performance of prefabricated joint for hollow CFDST column[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022,45:103653.
- [12] Yan Xueyuan, Shi Shen, Yu Jitao, et al. Experimental and numerical investigation of multi-cavity concrete-filled double-skin steel tubular short column[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2025,227:109357.
- [13] Han Linhai, Zhao Xiaoling, Tao Zhong. Tests and mechanics model for concrete-filled SHS stub columns, columns and beam-columns[J]. *Steel and Composite Structures, An International Journal*, 2001,1(1):51-74.
- [14] 韩林海. 钢管混凝土结构-理论与实践[M]. 第 4 版. 北京:科学出版社,2022.
- [15] Manual A U. Abaqus theory guide. Version 6.14[J]. USA.: Dassault Systemes Simulia Corp, 2014.
- [16] Tao Zhong, Wang Zhibo, Yu Qing. Finite element modelling of concrete-filled steel stub columns under axial compression[J]. *Journal of constructional steel research*, 2013,89:121-131.

(上接第 32 页)

(4) 振动响应与安全评估:加速度以低频成分为主,位移均方根值通常处于 10^{-2} mm 量级,整体振动水平较低,对结构整体危害性小。但外侧局部高动载与低水位差 ΔH 下的相对动载仍应作为疲劳与局部构件校核的重点。

参考文献:

- [1] 田少杰,陈隽祎,王雪梅,等. 复杂条件下某大型挡潮闸的设计方案研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2021,52(S2):187-192.
- [2] 王正中,徐超. 国内外大跨度挡潮闸应用评述[J]. *长江科学院院报*,2018,35(12):1-11.
- [3] 王文涛,石清文. 枕头坝一级水电站泄洪闸弧形闸门流激振动研究[J]. *人民长江*,2021,52(S2):216-219.
- [4] 顾功开,徐栋栋,李德. 乌东德水电站水工闸门动力安全评价[J]. *人民长江*,2020,51(3):136-142.
- [5] 张亮,徐强,严根华,等. 大型液压启闭下卧式弧形闸门流激振动及抗振优化研究[J]. *水利与建筑工程学报*,2023,21(2):13-19,67.
- [6] 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.
- [7] 段杭,张文远,柯传芳,等. 白鹤滩导流底孔弧形工作闸门流激振动原型观测研究[J]. *水电能源科学*, 2025,43(1):137-140.
- [8] 刘竹丽,陈赞,伊元忠. 不同开度下平面钢闸门流固耦合数值模拟研究[J]. *人民黄河*,2020,42(11):79-83.
- [9] 刘昉,李文胜,王延召,等. 巴塘水电站导流洞平面闸门流激振动试验研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2021,32(1):136-142.
- [10] Tappin R G R, Dowling P J, Clark P J. Design and model testing of the Thames Barrier gates[J]. *Structural Engineer*, 1984,62:115-124.
- [11] Kendrick M. The Thames barrier[J]. *Landscape and Urban Planning*, 1988,16(1-2):57-68.
- [12] SL74—2019 水利水电工程钢闸门设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社,2019.
- [13] 俞伟,唐新军,卢廷浩. 溢流面板坝泄槽流激振动特性研究[J]. *水电能源科学*,2017,35(8):65-69.
- [14] 刘昉,李文胜,王延召,等. 巴塘水电站导流洞平面闸门流激振动试验研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2021,32(1):136-142.
- [15] 严根华. 我国大跨度闸门应用趋势与抗振对策[J]. *水利水运工程学报*,2009(4):134-142.
- [16] Oberrecht D, Wurpts A. Impact of controlled tidal barrier operation on tidal dynamics in the Ems estuary[J]. *Die Küste*, 2014,81:427-433.