

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20231124

# 扇形中枢旋转门动水压强特性研究

蔡志勇<sup>1</sup>, 叶霖<sup>2</sup>, 傅宗甫<sup>1</sup>

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 苏州市水利工程建设处, 江苏 苏州 215011)

**摘要:** 鉴于扇形中枢旋转门是一种结构新颖的闸门,其过流流态与传统闸门有显著区别,为研究扇形中枢旋转门的动水压强特性,基于吴淞江整治工程 60 m 大孔闸及其消能设计工况,对闸门不同开度系数进行模型试验,分析了不同开度系数条件下的时均压强、平均波动幅度、脉动强度、频谱特性。结果表明,各开度系数下,门叶时均压强均为正压;总体脉动压强幅值较平稳,各测点在不同开度系数下脉动压强接近正态分布;脉动强度大小随开度和测点位置的变化而变化,随着开度系数的增大,脉动强度呈先减小后增大的趋势分布,脉动压强属于低频脉动;宽度方向测点位置的变化会对测点脉动强度的大小产生影响,可用中线位置脉动强度代替整体模型脉动强度。

**关键词:** 扇形中枢旋转门;动水压强;频谱特性;开度系数;模型试验

**中图分类号:** TV663 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)11-0208-04

## 1 工程概况

吴淞江整治工程 60 m 大孔闸为新颖的大跨度单孔闸,闸孔净宽 60 m,闸门为扇形中枢旋转门。此类闸门具有结构新颖、跨度大等特点,多作为入海河口挡潮闸闸门,在工程中应用较少<sup>[1]</sup>。扇形中枢旋转门具有双向挡水,维护方便,不影响原河道通航、泥沙输移等特性<sup>[2]</sup>。闸门半径 7 m,门库半径 7.2 m,水闸消能设计水位组合为上游 4.15 m、下游 3.70 m,闸底板高程 -1.50 m,闸门结构见图 1。由于该型闸门属于新型闸门,有必要对门叶的动水压强分布特性进行系统分析,为闸门结构和动力设计提供理论依据。泄流过程中的动水压强分布特性是闸门水力特性研究的重点问题之一,目前针对各型闸门泄流动水压强已

进行了大量研究<sup>[3-4]</sup>,但对扇形中枢旋转门的研究并不多见。对弧形闸门、平板闸门和翻板闸门等各型闸门的脉动压强研究表明,作用在面板上的脉动压强时域过程线具有正态分布特性,主要能量集中在 10 Hz 以内,具有低频特性<sup>[5-6]</sup>。对边孔弧形闸门的研究表明,导流墙会对闸门脉动强度均方根产生影响<sup>[7]</sup>。扇形中枢旋转门区别于传统闸门的泄流方式,过闸水流从门顶跌落,大开度下水闸泄流产生的淹没水跃会对闸门产生强烈冲击,巨大的脉动水压强是外部诱发振动的激励源<sup>[8]</sup>。鉴此,本文通过物理模型试验,研究了典型断面闸门不同开度的时均、脉动压强分布规律和边界条件对时均、脉动压强的影响范围,揭示了闸门泄流过程各开度动水压强特征,以期为此类闸门设计提供参考。

## 2 模型设计及测量方法

以吴淞江整治工程 60 m 大孔闸为例,由于闸门跨度大,宽深比较大,通常可认为是二维水流运动<sup>[9]</sup>,沿宽度方向水流条件相似,采用断面物理模型对闸门进行研究,根据试验场地和供水条件,试验在长  $L=20$  m、宽  $B=0.5$  m、高  $H=0.5$  m 的平底水槽中进行,模型比尺 1:20。所研究闸

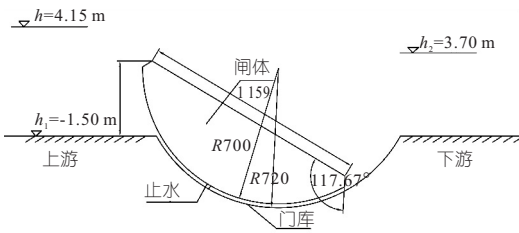


图 1 闸门结构图

Fig. 1 Gate structure

收稿日期: 2023-06-08, 修回日期: 2023-07-19

作者简介: 蔡志勇(1997-),男,硕士研究生,研究方向为水力学及河流动力学, E-mail: 1452828640@qq.com

通讯作者: 傅宗甫(1966-),男,博士、教授、硕导,研究方向为工程水力学, E-mail: zffu@hhu.edu.cn

门模型为有机玻璃制做,模型外侧设置启闭装置,以实现不同开度闸体水力特性的测量。试验系统由带溢流装置的供水头部、供水管路、量水堰、稳水设施、试验模型、控制尾门、回水槽、供水水泵和补水泵组成。

选用水闸消能设计工况为试验工况,闸门设置 5 个开度,门顶高程分别为 4、3、2、1、0 m。引入反映开度大小指标相对开度系数  $\lambda$ :

$$\lambda = (h - P) / (h - h_1) \quad (1)$$

式中,  $h$  为上游水位, m;  $P$  为闸门高程, m;  $h_1$  为河底高程, m。

脉动压强采用成都泰斯特 CY200 型智能数字脉动压强传感器与 Smart Sensor 压强测试系统进行动态采集与处理。试验中采样频率设置为 100 Hz, 采样时间 20 s, 采样次数 2 000 次。闸门中线压强测点布置示意图见图 2(a), 闸门中线布置 9 个测点, 测点 1~5 位于下游面板, 测点 6 位于门顶, 测点 7~9 位于上游面板。为研究边界条件对动水压强的影响范围, 沿宽度方向增加 4 个测点, 宽度方向测点布置示意图见图 2(b), 在测点 2 处水平向等距布置测点 2-1、2-2、2-3、2-4。

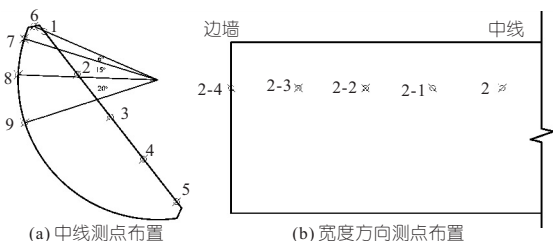


图 2 压强测点布置示意图

Fig. 2 Pressure measuring points layout

### 3 动水压强特性分析

#### 3.1 时均压强分布特性

门叶上时均压强的变化主要受闸门位置和水流条件的影响, 为了得到具有普遍意义的压强分布特性, 对各测点的时均压强进行无量纲化, 得到闸门各点的时均压强系数  $\alpha$ :

$$\alpha = \bar{p} / (\rho g \Delta h) \quad (2)$$

式中,  $\bar{p}$  为实测压强时均值, kPa;  $\rho$  为水的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $g$  为重力加速度,  $\text{m}/\text{s}^2$ ;  $\Delta h$  为测点位置水深, m。

时均压强系数分布见图 3。由图 3 可知, 各点压强均为正压; 下游面板各测点时均压强系数各工况下基本相等且接近 1, 说明测点时均压强随位置的变化发生线性变化, 且基本接近静水压强分布。  $\lambda = 0.027$  时, 门顶测点 6 主要受水流的

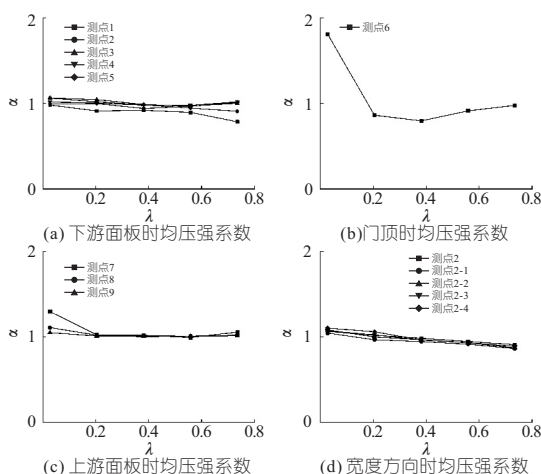


图 3 时均压强系数分布

Fig. 3 Time-average pressure coefficient distribution

阻碍影响, 动能转化为压能, 时均压强大于静水压强;  $\lambda = 0.027 \sim 0.381$  时, 过流流速逐渐增大, 存在部分压能转换成动能的情况, 所以时均压强系数逐渐减小,  $\lambda = 0.381$  时时均压强系数出现最小值;  $\lambda = 0.381 \sim 0.735$  时, 随着测点位置降低, 主流对测点的影响减小, 时均压强系数逐渐接近于 1, 接近静水压强分布。上游面板各测点时均压强系数在大开度系数时基本等于 1, 接近静水压强分布, 但  $\lambda = 0.027$  时, 由于闸体对水流有较大的阻碍作用, 动能转化为压能, 所以此时时均压强系数大于 1, 时均压强大于静水压强。沿闸门宽度方向, 各测点在相同开度系数下, 时均压强系数大小基本一致, 接近于 1, 基本接近静水压强分布。

#### 3.2 平均波动幅度

试验测量了各测点的瞬时压强分布, 典型测点瞬时压强分布见图 4。引入平均波动幅度  $\delta$ , 计

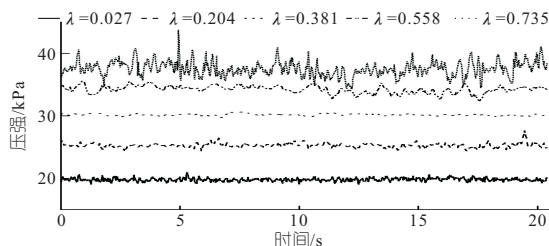


图 4 测点 2 瞬时压强分布

Fig. 4 Instantaneous pressure distribution of No. 2

计算公式为:

$$\delta = \left( \frac{1}{n+1} \sum_{i=0}^n |p_i - \bar{p}| \right) / \bar{p} \quad (3)$$

式中,  $p_i$  为实测压强, kPa;  $\bar{p}$  实测压强时均值, kPa。

根据式(3)计算平均波动幅度, 结果见表 1。由表 1 可知, 最大平均波动幅度出现在测点 1, 平均波动幅度为 3.96%; 最小波动幅度出现在测点

表 1 典型测点平均波动幅度

Tab. 1 Average fluctuation amplitude of typical stations

测点	平均波动幅度/%				
	$\lambda=0.027$	$\lambda=0.204$	$\lambda=0.381$	$\lambda=0.558$	$\lambda=0.735$
1	3.96	2.18	1.01	1.37	1.99
2	0.99	0.99	0.42	1.39	2.35
3	0.25	0.67	0.28	0.96	1.80
4	0.14	0.31	0.17	0.67	0.95
5	0.26	0.27	0.21	0.64	0.75
6	1.33	1.48	2.77	1.38	1.65
7	0.45	0.28	0.42	0.62	0.82
8	0.25	0.20	0.23	0.25	0.41
9	0.03	0.04	0.10	0.14	0.30

9,平均波动幅度为 0.03%。在同一开度系数下,随着水深的增加,平均波动幅度呈减小趋势。随着开度系数的增加,过闸水流流量增大,下游面板同一测点波动幅度呈现先增大再减小再增大的趋势,而上游面板同一测点波动幅度呈增大趋势。大部分测点脉动压强波动幅度小于时均压强的 1%,说明总体脉动压强幅值较平稳。

### 3.3 脉动压强强度

脉动压强标准差  $\sigma_p$  可以反映其强度大小,计算公式为:

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=0}^n (p_i - \bar{p})^2} \quad (4)$$

引入脉动强度系数  $\varphi$ :

$$\varphi = \sigma_p / (\rho v^2 / 2) \quad (5)$$

式中,  $v$  为闸门门顶断面水流平均流速, m/s。

由试验结果算出的脉动强度系数变化规律见图 5。由图 5 可知,各测点脉动强度系数在不同开度系数下的增减趋势呈现出基本一致的分布规律,上下游面板各测点脉动强度系数随着开度系

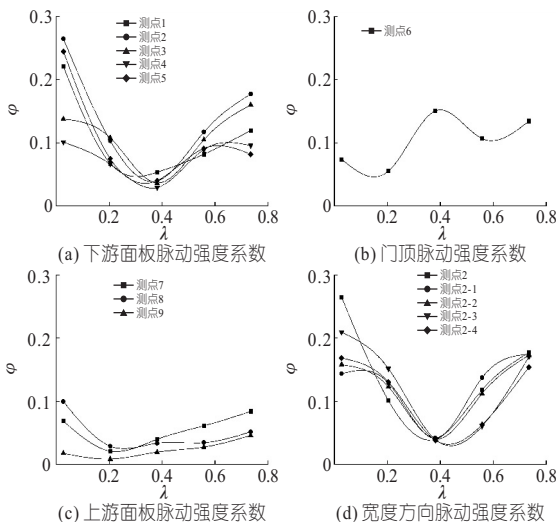


图 5 脉动强度系数

Fig. 5 Pulsation intensity coefficient

数的增加呈现先减小后增大的趋势,最小值均出现在  $\lambda=0.204 \sim 0.381$ ,其中测点 1、2、4、5、8 的最大值出现在  $\lambda=0.027$ ,测点 3、7 的最大值出现在  $\lambda=0.735$ ,但门顶测点 6 的脉动强度系数的分布规律与其他测点不一致,最大值在  $\lambda=0.381$ ,最小值在  $\lambda=0.204$ ,这是由于门顶测点脉动强度系数大小仅与测点附近流速紊动有关,而其他测点的脉动强度系数还受漩涡的影响。

$\lambda=0.027 \sim 0.204$  时,在闸门开度系数较小时,上游水流流速较小,沿水深方向流速变化不大,上游渠底靠近闸门面板位置产生了水流旋滚,上游面板受主流与水流旋滚的共同作用,在同一开度系数下,上游面板各测点之间沿水深方向脉动强度系数大小没有确定的变化规律;  $\lambda=0.204 \sim 0.735$  时,随着开度系数的增加,上游主流位置更靠近水面,越接近水面流速越大,水流的紊动也更加剧烈,其中主流大流速产生的水流脉动占主导位置,在同一开度系数下,上游面板各测点越靠近水面脉动强度系数越大。水流在下游侧产生了波状水跃,这使下游水流流态更为复杂,水流紊动程度较上游更加剧烈,主流位置及水流旋滚位置随着开度系数的变化而变化,脉动强度系数与主流位置及水流旋滚位置有关,与水深方向相关性较弱,在同一开度系数下,下游面板各测点脉动强度系数沿水深方向没有确定的变化规律,且下游面板脉动强度系数总体上大于上游面板。

沿闸门宽度方向测点的脉动强度系数在相同开度下大小不同,但随着开度的增加均呈现出脉动强度系数先减小后增加的趋势,这是由于受边界条件的影响,沿闸门宽度方向水流流态不同,使得宽度方向各测点脉动强度系数大小存在差异。小开度时,脉动强度系数最大值出现在中线上,而随着开度系数的增大,边界条件对宽度方向上的脉动强度系数的影响范围在缩小,宽度方向各点脉动强度大小逐渐接近,边界条件对中线上的脉动强度不产生影响,因此可用中线上的脉动强度作为闸门整体加强防护的标准,由此验证了使用断面模型进行试验的合理性。

### 3.4 脉动压强概率密度

典型开度下各测点的压强脉动值  $p'$  经标准化后的概率密度见图 6。由图 6 可知,各测点的脉动压强概率密度在不同开度下分布形态存在一定差异,但脉动压强基本符合标准正态分布。脉动压强信号的不对称程度和陡峭程度可通过偏态系数  $C_S$  和峰度系数  $C_E$  分析,偏态系数  $C_S$  和峰度系数  $C_E$  见图 7。由图 7 可知,门上各测点偏态系

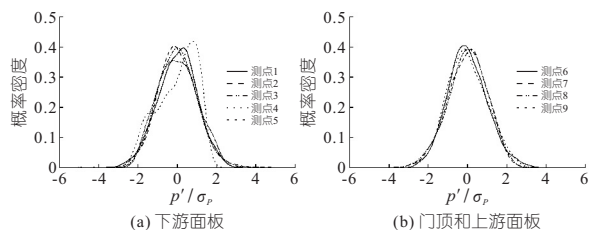


图 6 典型开度系数 ( $\lambda=0.027$ ) 下概率密度  
Fig. 6 Probability density of typical openness coefficient ( $\lambda=0.027$ )

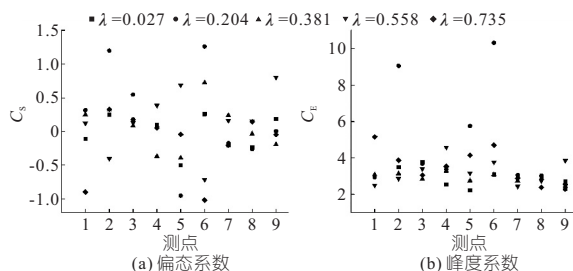


图 7 偏态系数和峰度系数

数  $C_s$  分布在  $-1.017 \sim 1.261$  之间, 脉动压强出现正偏或负偏的概率相近, 与开度的相关性较弱, 峰度系数  $C_e$  多分布在 3 附近, 大于 3 或小于 3 的几率均等, 说明脉动压强的分布比较接近标准正态分布, 且函数形态比标准正态分布高瘦或平缓具有随机性, 与测点位置和开度系数的相关性较弱。

### 3.5 脉动压强的频谱特性

脉动能量的分布情况可由脉动压强功率谱密度表示。对不同开度下各测点所对应的脉动压强进行频谱分析, 绘制脉动压强功率谱密度曲线, 提取各测点的脉动压强优势频率。典型测点脉动压强功率谱密度见图 8。由图 8 可知, 脉动能量主要集中在  $0.5 \text{ Hz}$  以内, 属于低频脉动。各测点不同开度下优势频率见表 2。由表 2 可知, 各工况下测点的脉动压强的能量以低频为主, 脉动压强的优势频率最大值为  $0.32617 \text{ Hz}$ , 位于  $\lambda = 0.027$  时的测点 8 处。同一开度系数下, 各测点优势频率随测点位置的变化无固定变化规律; 不同开度系数下, 同一测点优势频率变化也无固定变化规律。

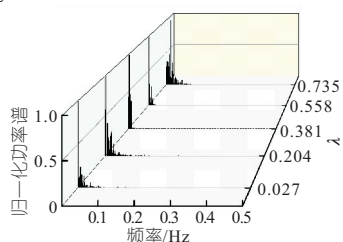


图 8 测点 4 归一化功率谱

Fig. 8 Normalized power spectrum of No. 4

表 2 典型测点优势频率

Tab. 2 Dominant frequencies of typical stations

测点	优势频率/Hz				
	$\lambda=0.027$	$\lambda=0.204$	$\lambda=0.381$	$\lambda=0.558$	$\lambda=0.735$
1	0.018 55	0.002 93	0.005 86	0.002 93	0.002 93
2	0.027 34	0.004 88	0.005 86	0.011 72	0.012 69
3	0.001 95	0.012 69	0.001 95	0.011 72	0.013 67
4	0.001 95	0.003 91	0.003 91	0.001 95	0.018 55
5	0.001 95	0.003 91	0.006 84	0.001 95	0.003 91
6	0.323 24	0.002 93	0.001 95	0.002 93	0.001 95
7	0.001 95	0.003 91	0.001 95	0.001 95	0.001 95
8	0.326 17	0.004 88	0.001 95	0.002 93	0.002 93
9	0.001 95	0.001 95	0.001 95	0.001 95	0.002 93

## 4 结论

a. 闸门开度较小时, 仅门顶及上游面板各测点时均压强和静水压强大小存在差异, 但随着开度的增大, 闸门各测点的时均压强均逐渐接近静水压强分布。不同开度系数下, 脉动强度系数基本呈现出先减小后增大的趋势, 脉动强度系数最小值出现在  $\lambda=0.204 \sim 0.381$  范围内, 最大值点无确定规律; 同一开度系数下, 上游面板各测点越靠近水面脉动强度系数越大, 下游面板各测点之间脉动强度系数大小无固定规律, 下游面板脉动强度系数大于上游面板。各测点在不同开度系数下脉动压强接近正态分布, 脉动压强功率谱的优势频率及主要能量在  $0.5 \text{ Hz}$  以内。

b. 沿闸门宽度方向, 时均压强分布规律基本一致; 脉动强度系数具有相同变化规律, 但其大小存在差异, 可用中线脉动强度系数代替闸门整体脉动强度系数。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 管义兵, 顾晓峰, 李灿, 等. 大跨度旋转扇形门在吴淞江工程上的应用[J]. 江苏水利, 2022(5): 28-31.
- [3] 冷涛. 弧形闸门物理模型试验分析研究[J]. 中国农村水利水电, 2016(10): 167-170, 172.
- [4] 李利荣. 自动滚筒闸门水动力特性实验研究与数值模拟[J]. 中国农村水利水电, 2018(8): 160-165, 175.
- [5] 刘月楼, 何士华, 沈春颖, 等. 平面闸门门槽对闸孔脉动压力影响的试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2018(3): 143-147.
- [6] 徐惠民, 严根华, 陈照. 中山河翻板闸门流激振动试验及优化设计[J]. 人民黄河, 2018, 40(7): 108-112.
- [7] 李小超, 汤凯, 张戈, 等. 边孔弧形闸门水流脉动压力特性研究[J]. 实验力学, 2015, 30(6): 749-756.
- [8] 马斌, 郭乙良. 水工闸门振动研究现状及发展趋势[J]. 水利水运工程学报, 2019(2): 55-64.
- [9] 卢金友, 詹义正, 赵根生, 等. 河道中受侧壁影响的断面流速分布规律研究[J]. 水利学报, 2012, 43(6): 645-652.

