



船闸灌泄水过程三角闸门及支承运转件受力特性研究*

陆茵茵¹, 徐军¹, 刘明维², 余丰泰², 黄德露¹, 王泓霖¹, 向周宇², 吴林键²

(1. 盐城市港航事业发展中心, 江苏盐城 224000;

2. 重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074)

摘要: 船闸三角闸门在灌泄水过程中因支承运转件的应力集中、磨损及隐蔽性故障等可能会产生异常振动, 严重威胁闸门运行安全与结构耐久性。然而, 三角闸门及其支承运转件在船闸灌泄水过程中的受力特性尚不明确。以我国运河某船闸三角闸门作为研究对象, 基于其原型结构几何尺寸建立闸门及其支承运转件的整体三维有限元数值模型, 采用数值模拟方法分析了不同水位差灌泄水工况下闸门及运转件的受荷响应特征, 揭示了门叶与支承运转件的应力分布规律, 明确了结构关键敏感区域及其受力特征之间的响应关系。结果表明, 船闸闸门与支承运转件存在典型的应力敏感区域, 通过应力敏感区域之间的响应特征参数实测信号, 量化了门叶与顶枢、门叶与底枢之间的关联性, 从而可通过实时监测闸门门叶及顶枢的应力敏感区响应特征参数信号(应力、应变、振动加速度等)来初步动态研判其隐蔽支承运转件(底枢等)的运行状态。研究成果为船闸三角闸门运行状态的实时监测提供了理论依据, 有助于提升船闸工程智能化运维水平。

关键词: 船闸; 三角闸门; 支承运转件; 应力敏感区; 数值仿真

中图分类号: U641.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)01-0164-09

Force characteristics of ship lock triangular gate and its supporting components during water discharge process

LU Yinyin¹, XU Jun¹, LIU Mingwei², YU Fengtai², HUANG Delu¹, WANG Honglin¹, XIANG Zhouyu², WU Linjian²

(1. Port and Shipping Development Center of Yancheng City, Yancheng 224000, China;

2. National Inland Waterway Improvement Project Technology Research Center, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: During the operation of ship locks, the triangular gates may experience abnormal vibrations during the water discharge process due to stress concentration, wear, and hidden faults in the supporting components. These vibrations pose a serious threat to the operational safety and structural durability of the gates. However, the stress characteristics of the triangular gates and their supporting components during the water discharge process are not fully understood. This study focuses on the triangular gates of a certain ship lock in our country, establishing a three-dimensional finite element numerical model based on the geometric dimensions of its prototype structure. Using numerical simulation methods, the study analyzes the load response characteristics of the triangular gates and their supporting components under different water level differences during the water discharge process. It reveals the stress distribution patterns between the gate leaf and the supporting components and clarifies the key sensitive areas and their stress response relationships. The results indicate that typical stress-sensitive areas exist in lock gates and supporting components. By measuring the characteristic response parameters from these stress-sensitive

收稿日期: 2025-04-25 录用日期: 2025-06-17

*基金项目: 江苏交通运输厅科技项目(LSXGH-KT-ZMJC)

作者简介: 陆茵茵(1980—), 女, 高级经济师, 从事港航科技成果转化、信息化工作。

areas, the correlation between the leaf and the top pivot, as well as between the leaf and the bottom pivot, has been quantified. This allows for the preliminary dynamic assessment of the operational status of concealed supporting components (such as the bottom pivot) through real-time monitoring of response parameters (e. g., stress, strain, vibration acceleration, etc.) in the stress-sensitive areas of the gate leaf and top pivot. The findings provide a theoretical basis for real-time monitoring of the operational status of triangular gates in navigation locks, contributing to the advancement of intelligent operation and maintenance in lock engineering.

Keywords: ship lock; triangular gate; supporting component; stress-sensitive area; numerical simulation

闸门灌泄水过程作为船闸运行中的关键环节, 对于确保船闸的安全与效率具有重要影响。在灌泄水过程中, 闸门受到包括静水压力、动水压力以及可能的冲击力在内的复杂水力作用^[1]。这些力的作用可能导致闸门及其支承结构的应力集中, 长期可能会引发结构疲劳、裂纹扩展甚至结构破坏, 从而带来安全隐患^[2]。此外, 灌泄水过程中的非恒定流特性可能导致闸室内涌浪, 增加船舶系缆力, 威胁船舶停泊安全^[3]。因此, 对闸门灌泄水过程进行深入研究, 掌握其受力特性和运行规律, 对于预防安全事故、保障船闸安全运行具有重要意义。

目前, 针对船闸闸门结构的研究多集中于人字闸门或弧形闸门, 而对三角闸门的受力分析相对较少。传统的理论计算和模型试验虽能提供一定的参考, 但难以全面反映闸门在实际运行中的复杂受力状态。杨铎等^[4]通过非线性接触仿真揭示了顶枢部件在极端水压下的应力集中规律; 祝智卿等^[5]基于流固耦合模型阐明了高水头闸门的频率衰减特性。然而, 现有研究多聚焦于静态设计水位或孤立部件分析^[6-9], 对于灌泄水过程中闸门及运转件应力响应与水位差的相互关系尚未形成系统认知。如何突破“局部建模-经验评估”的传统范式, 构建灌泄水全过程的结构整体响应模型, 成为当前工程实践亟待解决的难题。

国内外学者已对船闸闸门及其支承运转件的

受荷响应问题开展了相关研究, 但在灌泄水过程中, 三角闸门的受力特征、变形规律以及潜在特性仍不够清晰^[10-14]。例如, 闸门在不同工况下的应力分布、变形情况以及潜在破坏模式等, 仍需通过精确的分析和模拟来预测和评估^[15-20]。本文基于闸门原型, 建立简化的三角闸门及运转件整体结构三维有限元模型, 利用三维数值仿真方法对船闸三角闸门在实际工况下的受力状态进行分析, 探讨其在灌泄水作用下的受荷响应特征^[21-25], 并进一步明确不同水位差条件下闸门及运转件的受荷响应规律, 旨在为三角闸门的设计优化和安全运行提供理论依据, 同时为提升船闸工程的整体性能提供参考。

1 船闸三角闸门及支承运转件三维模型

1.1 三角闸门概况

我国运河某船闸三角闸门是由空心圆管、工字梁和薄壁壳体组成的空间结构。闸门整体结构由端柱、门叶、空间桁架体系、顶/底枢和防撞板构成。上闸门高度为 11.62 m(面板高度), 单扇门质量约 111.73 t, 闸门开关门回转角为 68.5°, 闸门启闭机工作行程为 4.56 m。

1.2 模型建立

根据船闸工程下闸首闸门的实际尺寸, 建立上闸门和支承运转件的三维模型, 见图 1。

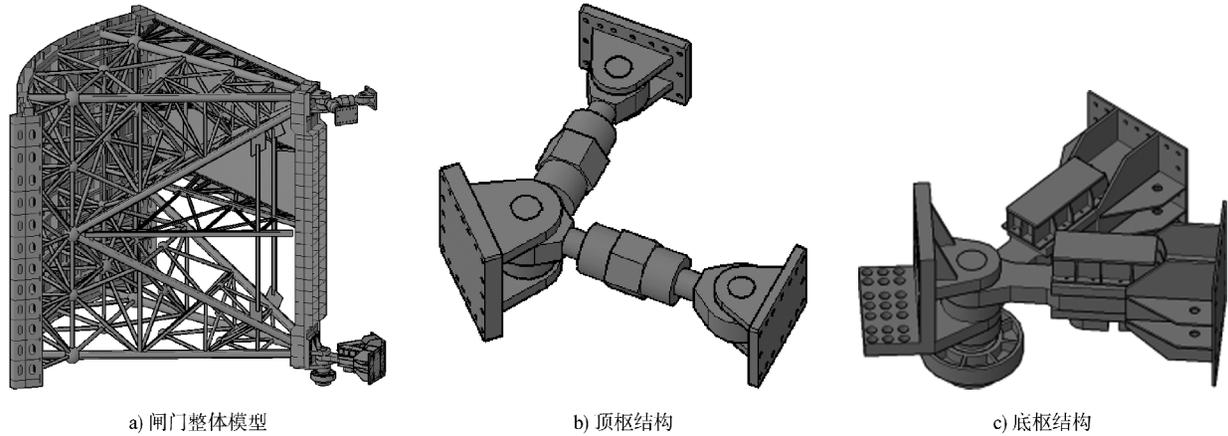


图1 闸门模型
Fig. 1 Gate model

1.3 模型参数和计算工况

闸门门叶的板材主要采用CCSB，门叶结构型材及球节点采用Q235B，防撞板结构型材采用Q355B，钢管采用20号钢。面板系部分采用多主梁式弧形结构，纵向布置有横隔板和T形竖直次梁，水平向在主横梁之间布置有T形水平次梁，用以增强面板的刚度；各钢架部分采用空间网架结构，杆件以无缝钢管为主，通过钢球节点连接。闸门顶枢支承拉杆采用花兰螺母式，结构型材采用锻45#，顶枢支承座轴采用锻40Cr。闸门底枢支承受力较大，且在水下不易调整，因此采用整体式结构配楔块微调，底枢拉杆结构型材采用锻45#，底枢轴采用锻40Cr，蘑菇头采用锻X17CrNi-16-2，蘑菇头衬套采用自润滑材料FZB053。材料参数见表1。

为了合理地模拟闸门受力响应特性，依托该船闸特征水位及水位组合，以船闸下游最低通航水位作为基准，即下游最低通航水位处的相对水位为0 m。考虑到灌泄水工况下船闸闸室内的最大水位差为6 m，以1 m作为水位增量累增至6 m。因此，在本文的数值仿真过程中，计算工况分别设置为水位差 $H=1、2、3、4、5、6$ m。

表1 材料参数

Tab. 1 Material parameters

| 材料名称 | 弹性模量/ GPa | 泊松比 | 密度/ (t/m^3) | 屈服强度/ MPa | 抗拉强度/ MPa |
|----------------|--------------|------|--------------------|--------------|--------------|
| CCSB | 150 | 0.25 | 7.87 | 245 | 440 |
| Q355B | 200 | 0.30 | 7.85 | 355 | 630 |
| 20号钢 | 210 | 0.28 | 7.85 | 245 | 500 |
| 锻 X17CrNi-16-2 | 210 | 0.27 | 7.83 | 1 200 | 1 080 |
| Q235B | 210 | 0.33 | 7.85 | 250 | 460 |
| 锻 45# | 210 | 0.31 | 7.85 | 355 | 600 |
| 锻 40 Cr | 206 | 0.29 | 7.82 | 785 | 810 |

1.4 接触设置及网格划分

因船闸三角闸门实体结构部件较多，各部件之间的连接关系也非常复杂。因此简化闸门各部件主要接触关系如下：门叶各梁、板之间采用绑定 (Bonded) 接触；端柱壳单元与顶/底枢实体单元连接部分采用绑定 (Bonded) 接触；顶枢轴面与A、B杆和楔形块之间采用摩擦 (Frictional) 接触；蘑菇球面与衬套之间采用摩擦 (Frictional) 接触，采用Solid187(四面体单元) 实体单元对闸门和支承运转件的三维模型进行网格划分，单个网格尺寸边长为：门叶结构尺寸为600 mm，其余部分为100 mm。具体工况见图2。

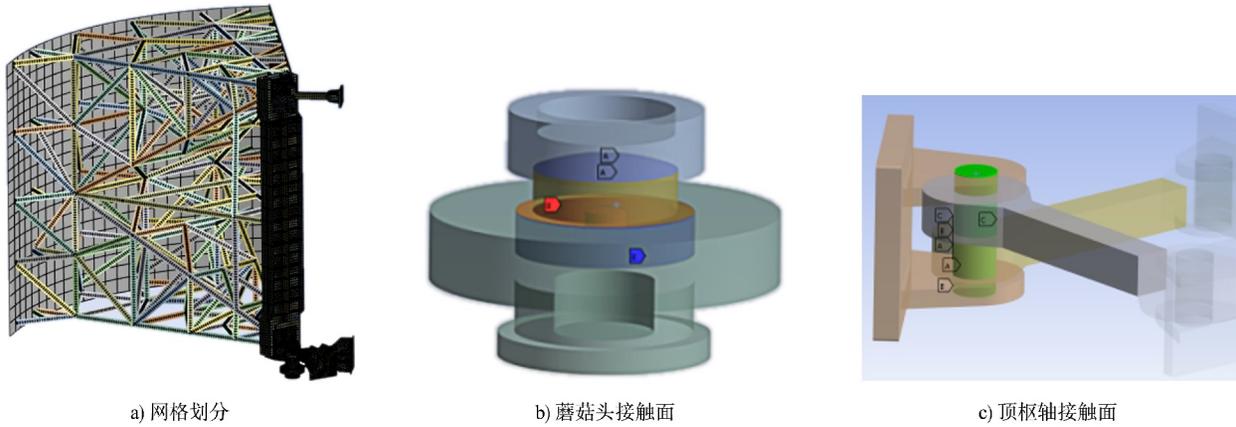


图 2 网格划分和接触面
Fig. 2 Meshing and contact surface

1.5 约束与荷载

模型中的底枢、顶枢均采用固定式, 即固定在基座上, 没有转动和平动。闸门在灌泄水过程中水位发生变化, 闸门静止不动, 限制底枢底座和两个端面、顶枢两个端面以及门中缝 X 、 Y 、 Z 3

个方向的平动自由度, 以及绕 X 、 Y 、 Z 的转动自由度, 在闸门两端羊角施加 X 、 Y 方向的位移约束。施加的荷载为静水流体荷载和自重, 流体荷载施加在模型与水接触的结构面上, 见图 3。

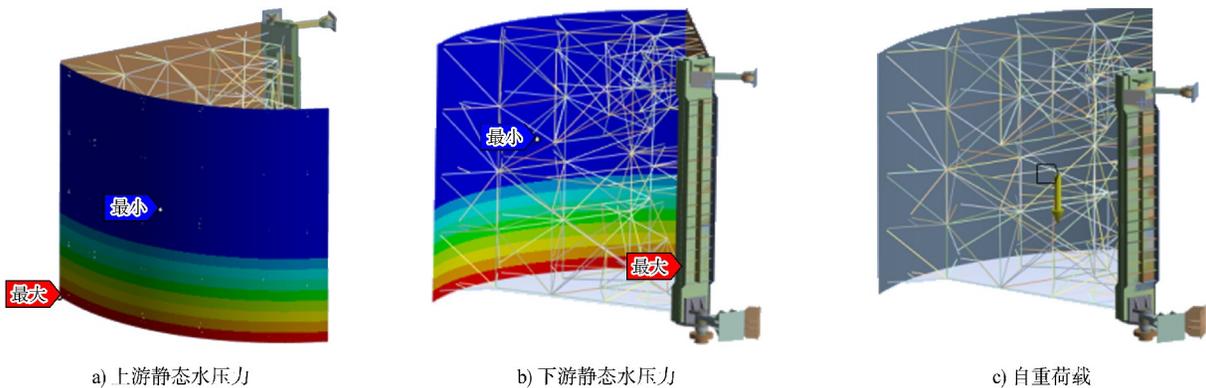
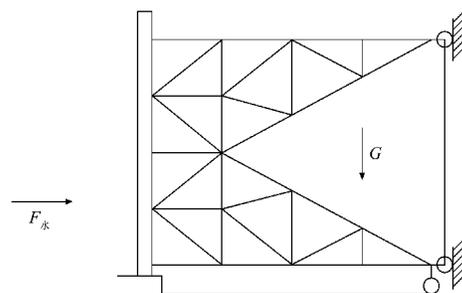


图 3 荷载施加位置
Fig. 3 Load application position

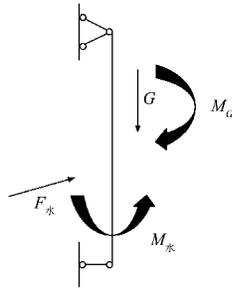
1.6 模型精度验证

为了验证数值模型的精度, 将闸门和支承运转件整体结构简化为杆系结构, 利用结构力学基本理论对简化的杆系结构进行求解。根据设计条件, 模型的计算需要综合考虑各工况下的条件荷载, 简化模型受力分析见图 4, 作用在闸门门叶上有两个荷载, 分别是门叶自重和静水压力。将自重简化到端柱的中心上, 产生集中力 G 和弯矩 M_G ; 将静水压力简化到端柱处同样会产生集中力 $F_{水}$ 和弯矩 $M_{水}$ 。通过理论计算得出, 顶枢反力为 148.3 kN, 底枢反力为 287.4 kN, 有限元数值计

算得出的顶枢水平反力为 152.1 kN, 底枢水平反力为 283.6 kN, 两者相对误差均小于 3%, 且方向相同, 验证了基于有限元数值仿真方法计算结果的正确性。



a) 闸门及支承运转件整体结构受力分析



b) 闸门及支承运转件简化模型受力分析

图4 闸门和支承运转件简化模型

Fig. 4 Simplified model of gate and supporting components

2 结果与分析

2.1 结构应力云图

通过有限元数值仿真计算，分别得到不同水位下的闸门和支承运转件的应力响应云图，见图5~7。由图5可知，在灌泄水水位为0 m时，门叶上最大应力分部位于门叶面板的右侧与右下部的位位置，随着水位的增大，门叶应力敏感区逐渐向上部移动，在5和6 m时达到最大值，最大应力值约为0.46 MPa。门叶的整体应力随水位升高呈现增加的趋势。整体分布情况为静水压力作用位

置处应力较大，表明门叶应力变化主要受水压力影响，其力学响应特性与外部荷载密切相关。

在闸门实际运行过程中，顶枢、底枢、蘑菇头面的磨损和润滑不良等状况会使闸门产生运行故障。顶枢与底枢的敏感区主要位于两侧拉杆，蘑菇头的敏感区主要位于球心的边缘处，顶枢与底枢两侧敏感区域的应力最大值随水位的增大而增大，这是由于在闸门运行过程中，顶枢拉杆处往往承担着连接闸门和顶枢的重要作用，运行过程中需要承受较大的拉压力，从而产生较大的应力。顶底枢两侧拉杆处应力随水位升高而增大，蘑菇头球心边缘处应力相对稳定，这反映了顶底枢和蘑菇头受力集中的特点，且各部件最大应力未超许用应力，表明闸门结构设计安全可靠。随着水位差的变化，蘑菇头面敏感区表面的应力分布会发生变化，但整体应力值相对稳定。上闸门顶枢、底枢和蘑菇头球面应力最大值在各工况下分别为7.3、14.6和15.0 MPa，均没有超过最大许用应力。

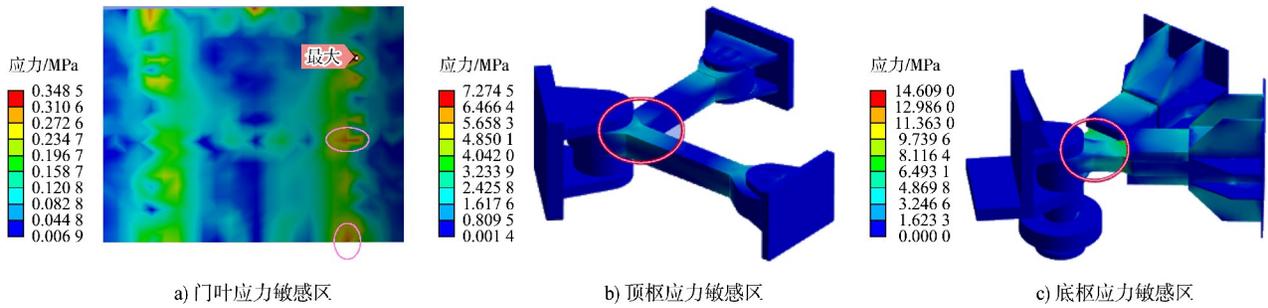
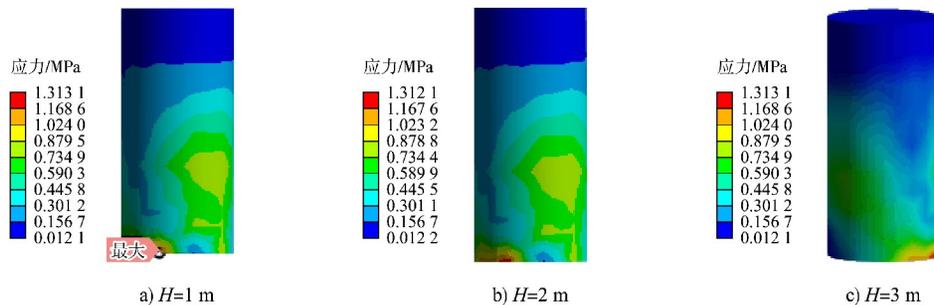


图5 闸门应力云图

Fig. 5 Stress nephogram of gate



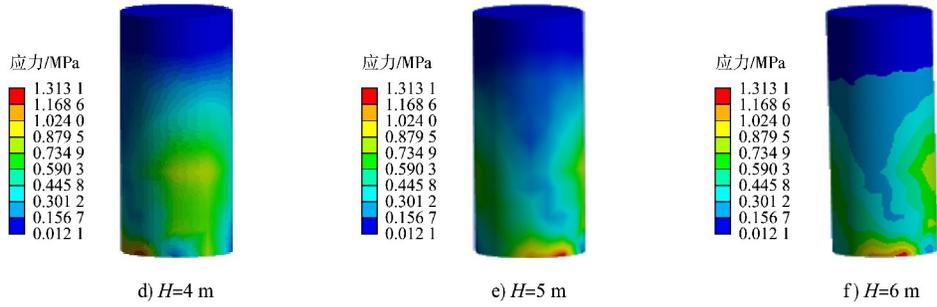


图 6 闸门不同水位差下顶枢轴面应力敏感区应力云图

Fig. 6 Stress nephogram of the stress-sensitive area of the pivot surface at different water level difference of the gate

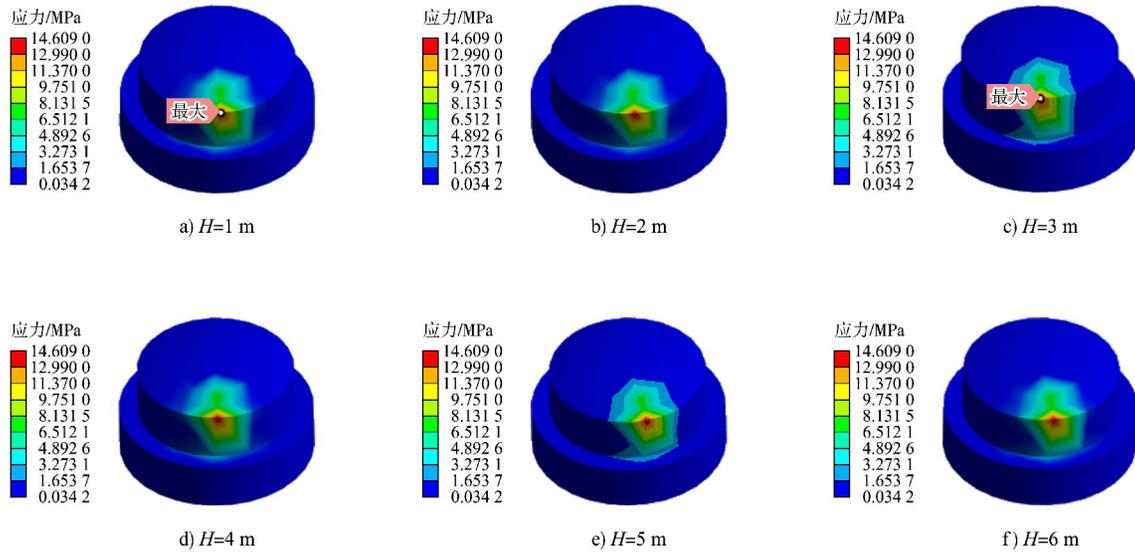


图 7 闸门不同水位差下蘑菇头应力敏感区应力云图

Fig. 7 Stress nephogram of stress-sensitive area of mushroom head at different water level difference of gate

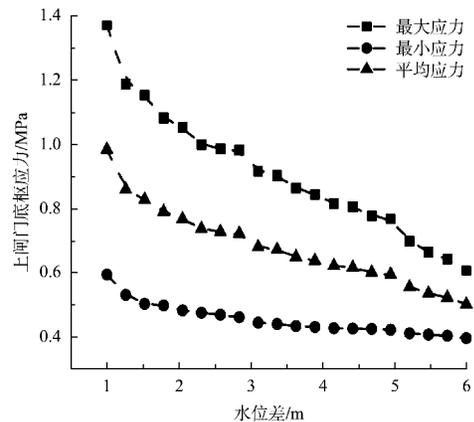
2.2 结构应力结果分析

根据数值仿真计算得到的结果, 对闸门门叶、顶枢、蘑菇头上的敏感区域的应力值进行数据统计, 进一步揭示结构应力敏感区域等效应力平均值、最大值、最小值随工况条件的变化规律。

2.2.1 应力在灌泄水过程中的变化规律

闸门各部位应力随水位差的变化见图 8。可以看出, 随着闸室水位的升高, 闸门的门叶应力值呈现下降的趋势; 闸门顶枢的应力值随水位的变化先下降后逐渐平稳, 稳定后应力值约为 11 MPa; 闸门

的底枢应力值变幅不大, 基本趋于平稳, 应力最大值约为 16 MPa。



a) 门叶

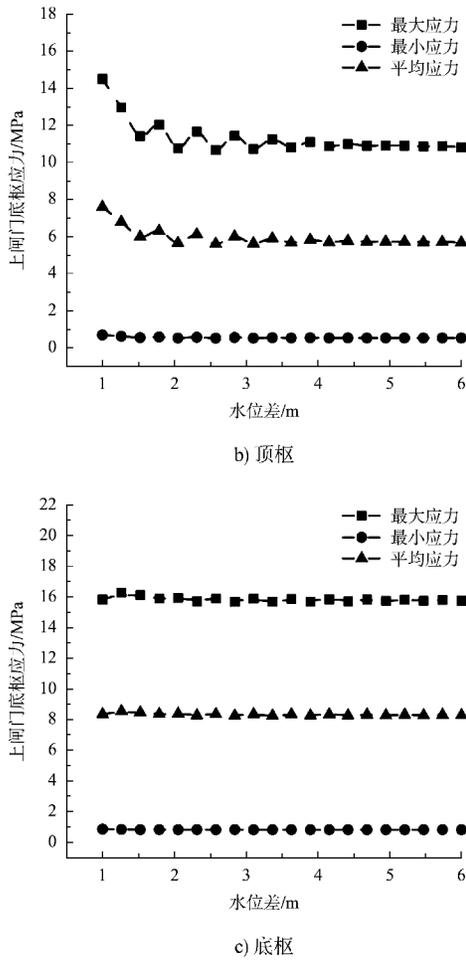


图 8 闸门各部位应力随水位差的变化
Fig. 8 Stress change of each part of the gate with water level difference

2.2.2 闸门门叶和顶枢、底枢之间的应力响应关系

水位变化会引起闸门和支承运转件应力的变化，通过数值模拟计算，可以得到闸门门叶敏感区的应力和顶枢、底枢敏感区的应力值在不同工况下的响应关系。灌泄水过程中上闸门门叶和支承运转件应力敏感区无量纲后的平均应力关系及其拟合函数见图 9。

上闸门及其支承运转件在水位变化下无量纲的平均应力关系公式如下。

门叶-顶枢：

$$y_A = 6.31 \times \exp\left(\frac{-x}{-5.9}\right) + 0.016 \quad (1)$$

门叶-底枢：

$$y_B = 0.024 + \frac{-7.33}{8.52\sqrt{\pi/2}} \times \exp\left[-2 \times \left(\frac{x - 0.0029}{8.52}\right)^2\right] \quad (2)$$

式中： x 为上闸门门叶平均应力； y_A 为顶枢平均应力； y_B 为底枢平均应力。

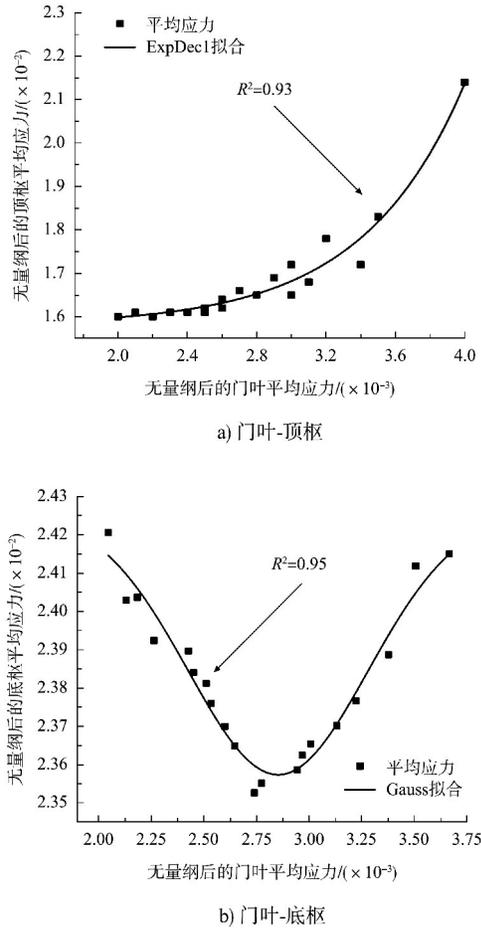


图 9 不同水位差下闸门和支承运转件无量纲后的平均应力关系

Fig. 9 Dimensionless average stress relationship between gate and supporting components under different water level differences

3 结论

1) 本文建立的船闸三角闸门及支承运转件三维数值仿真计算结果与三角闸门整体简化模型的支座反力结果的相对误差在 3% 以内，验证了闸门和支承运转件三维数值仿真计算结果的精度。

2) 根据数值仿真结果，确定了三角闸门及其支承运转件的应力敏感区位置，基于门叶与顶、底枢敏感区的应力结果统计值，获得了三角闸门及其支承运转件敏感区应力统计值随水位的变化规律：门叶、顶枢、底枢和蘑菇头等关键部位的应力分布和变形规律具有明显的水位差依赖性。

门叶应力随水位升高呈非线性增加趋势,顶底枢两侧拉杆处应力显著增大,而蘑菇头球心边缘处应力相对稳定。各部件最大应力值均未超过许用应力,表明闸门结构设计安全可靠。

3) 建立了灌泄水工况下三角闸门门叶和支承运转件敏感区内无量纲后应力的定量关系,初步实现了通过闸门的受荷响应应力值来间接评估支承运转件受力特征的目标。研究成果可为运行状态下船闸闸门的智能监测及安全预警等提供技术支持。

参考文献:

- [1] JAFARI A, KABIRI-SAMANI A, BEHNAMFAR F. Flow-induced horizontal and vertical vibration of sluice gates[J]. Proceedings of the institution of civil engineers-water management, 2018, 171(3): 152-162.
- [2] SOLA S A, NAEENI S T O, KHAVASI E, et al. Experimental study on venting of lock exchange turbidity current[J]. Water resources, 2024, 51(4): 475-485.
- [3] HEMALATHA M, BALAMURUGAN N B, SUGUNA M, et al. Impact of variation in fin thickness and self-heating on the output characteristics of triangular gate FinFETs[J]. Silicon, 2024, 16(5): 2253-2266.
- [4] 杨铎, 顾磊, 胡友安, 等. 三角闸门顶枢结构计算分析[J]. 中国港湾建设, 2021, 41(3): 12-15.
YANG D, GU L, HU Y A, et al. Structure calculation and analysis of the top pintle of triangular gate [J]. Chinaharbour engineering, 2021, 41(3): 12-15.
- [5] 祝智卿, 朱召泉. 中高水头船闸三角门流固耦合动力特性分析[J]. 水运工程, 2013(6): 119-122.
ZHU Z Q, ZHU Z Q. Dynamic characteristics of middle-high waterhead sector gate with fluid-structure interaction effect considered [J]. Port & waterway engineering, 2013(6): 119-122.
- [6] 戴文渊. 三角闸门运行过程中主要故障分析及思考: 以大治河西枢纽二线船闸为例[J]. 珠江水运, 2022(17): 9-11.
DAI W Y. Analysis and consideration of main failures in triangular gate operation: a case study of Dazhi River west hub second-line ship lock [J]. Pearl River water transport, 2022 (17): 9-11.
- [7] 迟朝娜, 徐宗美. 基于 ANSYS/LS-DYNA 模块的船-闸撞击力分析[J]. 水运工程, 2021(8): 129-133.
CHI Z N, XU Z M. Analysis of ship-gate impact force based on ANSYS/LS-DYNA modular[J]. Port & waterway engineering, 2021(8): 129-133.
- [8] 刘明维, 徐光亮, 吴林键, 等. 船闸运行状态下闸门及支承运转件敏感区应力关系研究[J]. 水道港口, 2021, 42(2): 220-228.
LIU M W, XU G L, WU L J, et al. Study on relationship between stress in the sensitive area of gate and supporting operating parts under operation state of ship lock [J]. Journal of waterway and harbor, 2021, 42(2): 220-228.
- [9] 曹晓军, 蔡建国, 蒋昊敏, 等. 三角闸门止水强度与变形的有限元分析[J]. 水运工程, 2021(3): 24-29.
CAO X J, CAI J G, JIANG H M, et al. Finite element analysis of waterstop performance of triangular gate [J]. Port & waterway engineering, 2021(3): 24-29.
- [10] 梁碧, 朱明涛, 朱召泉. 大跨度船闸三角闸门的静动力优化设计[J]. 水运工程, 2021(1): 12-16.
LIANG B, ZHU M T, ZHU Z Q. Static and dynamic optimal design of large-span ship lock sector gate [J]. Port & waterway engineering, 2021(1): 12-16.
- [11] 史丹, 戴振华. 三角闸门振动特性分析[J]. 中国水运(下半月), 2020, 20(24): 61-62.
SHI D, DAI Z H. Vibration characteristics analysis of triangular gate [J]. China water transport (the second half of the month), 2020, 20(24): 61-62.
- [12] 姜育松. 不同工况下三角闸门启闭力计算[J]. 中国水运(下半月), 2019, 19(22): 99-100.
JIANG Y S. Calculation of opening and closing forces for triangular gate under different working conditions [J]. China watertransport (the second half of the month), 2019, 19(22): 99-100.
- [13] 高卓, 胡友安. 船闸三角门静力数值分析[J]. 江苏水

- 利, 2017(8): 38-42.
- GAO Z, HU Y A. Static numerical analysis of ship lock triangular gate [J]. *Jiangsu water resources*, 2017 (8): 38-42.
- [14] 王善春, 陶言祺. 固镇船闸三角闸门的静力数值分析[J]. *水利与建筑工程学报*, 2016, 14(3): 211-215.
- WANG S C, TAO Y Q. Numerical analysis on static force for sector lock gate of Guzhen [J]. *Journal of water resources and architectural engineering*, 2016, 14 (3): 211-215.
- [15] NAJMZADEH M, BERTHOMÉ M, SALLESE J M, et al. Electron mobility extraction in triangular gate-all-around Si nanowire junctionless nMOSFETs with cross-section down to 5nm [J]. *Solid-state electronics*, 2014, 98(8): 55-62.
- [16] 胡剑杰, 胡友安, 陈卫冲, 等. 弧面三角闸门的静力数值分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2014, 25(2): 218-221.
- HU JJ, HU Y A, CHEN W C, et al. Numerical analysis on static force for cambered triangular gate [J]. *Journal of water resources and water engineering*, 2014, 25(2): 218-221.
- [17] WU T, DING J, WU L L. Experiment study on force of hoisting triangular gate of ship lock in tidal reach [J]. *Applied mechanics and materials*, 2013, 2635 (391): 402-405.
- [18] 罗家安, 孙保虎, 黄亚栋, 等. 中高水头大型三角闸门静力数值分析[J]. *水运工程*, 2011(12): 127-130.
- LUO J A, SUN B H, HUANG Y D, et al. Static numerical analysis of large-scale sector lock gate with medium and high water head [J]. *Port & waterway engineering*, 2011(12): 127-130.
- [19] 苏超, 王仙美, 曹建中, 等. 船闸结构仿真计算方法研究[J]. *水运工程*, 2010(9): 97-99, 104.
- SU C, WANG X M, CAO J Z, et al. Simulation method for shiplock structure [J]. *Port & waterway engineering*, 2010(9): 97-99, 104.
- [20] 董静, 白宇航, 裴多菲, 等. 弧形钢闸门支臂受冲击荷载的非线性动力分析[J]. *水利水电工程学报*, 2025(1): 133-144.
- DONG J, BAI Y H, PEI D F, et al. Nonlinear dynamic analysis of arc steel gate arms subject to impact load [J]. *Hydro-science and engineering*, 2025(1): 133-144.
- [21] 范海洋, 曹海瑞, 丁峰, 等. 基于 ANSYS 的弧形钢闸门自振特性分析[J]. *水利水电技术*, 2023, 54 (S2): 187-193.
- FAN H Y, CAO H R, DING F, et al. Analysis of natural vibration frequency of steel arch-gate [J]. *Water resources and hydropower engineering*, 2023, 54 (S2): 187-193.
- [22] 汪昕, 王新, 孙立武, 等. 大型三角闸门门缝输水运用条件试验研究[J]. *水运工程*, 2021(3): 12-16, 40.
- WANG X, WANG X, SUN L W, et al. Experimental study on the operation conditions of door water delivery of large sector gate [J]. *Port & waterway engineering*, 2021(3): 12-16, 40.
- [23] 邢述炳, 丁兆铭, 董浩. 三角闸门门缝输水运行工况研究[J]. *水运工程*, 2020(8): 146-151.
- XING S B, DING Z M, DONG H. Research on the operation conditions of door water delivery of triangular gate [J]. *Port & waterway engineering*, 2020 (8): 146-151.
- [24] 嵇旭红, 杜彩霞, 周洋, 等. 船闸三角闸门静力仿真研究[J]. *中国水运*, 2023(9): 111-113.
- Ji X H, DU C X, ZHOU X, et al. Static simulation study of ship lock triangular gate [J]. *China water transport*, 2023(9): 111-113.
- [25] 董顾春, 朱召泉. 大型水闸三角闸门的优化设计[J]. *水利水电工程学报*, 2013(2): 83-86.
- DONG G C, ZHU Z Q. Optimum design of a large-scale sector gate [J]. *Hydro-science and engineering*, 2013(2): 83-86.

(本文编辑 王传瑜)