

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2026.01.016

静水压力作用下人字闸门受力特性研究

关启钰¹, 杜政², 潘新恩¹, 扈世龙¹, 梁家华¹

(1. 广西交科集团有限公司, 广西南宁 530007; 2. 广西交通职业技术学院, 广西南宁 530023)

摘要: 人字闸门是水利工程关键承重结构, 其在静水压力下的受力特性与变形规律对工程安全至关重要。为探究该特性并指导现场静应力试验, 采用有限元法对比三种背拉杆设置模型(无背拉杆、背拉杆无预应力、预应力背拉杆)的应力与位移; 基于数值模拟结果, 在门叶应力集中区布设12组电阻应变片开展静应力试验。结果表明: 预应力背拉杆可提升闸门抗变形能力, 其面板最大应力较无背拉杆、背拉杆无预应力模型分别降低7.62%、6.54%, 最大位移分别降低12.58%、10.93%; 主梁最大应力分别降低3.84%、2.17%, 最大位移分别降低16.02%、14.92%。水位差增加时, 闸门1/4高度处及底部中心为主要受力区。有限元计算与实测数据正相关, 各构件最大应力校验系数0.40~0.66, 表明闸门刚度储备良好, 可满足安全运行要求。

关键词: 人字闸门; 静水压力; 背拉杆; 有限元法; 静应力试验

中图分类号: TV663.6

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)01-0136-08

Mechanical Behavior of Miter Gates under Hydrostatic Pressure

GUAN Qiyu¹, DU Zheng², PAN Xinen¹, HU Shilong¹, LIANG Jiahua¹

(1. Guangxi Transportation Science and Technology Group Co., Ltd., Nanning, Guangxi 530007, China;

2. Guangxi Transport Vocational and Technical College, Nanning, Guangxi 530023, China)

Abstract: As a critical load-bearing component in hydraulic engineering, miter gates ensure operational safety mainly through their mechanical performance and deformation characteristics under hydrostatic pressure. To investigate these characteristics and guide on-site static stress tests, this work adopted the finite element method (FEM) to compare stress and displacement across three back tie rod configurations: no tie rods, non-prestressed tie rods, and prestressed tie rods. Based on numerical simulation results, 12 sets of resistance strain gauges were installed in stress concentration zones of the gate leaf to conduct static stress tests. Results demonstrate that prestressed tie rods significantly enhance the gate's deformation resistance. Compared with the no-tie-rod and non-prestressed tie-rod models, the prestressed model reduces the panel's maximum stress by 7.62% and 6.54%, and maximum displacement by 12.58% and 10.93%, respectively. For the main beam, maximum stress decreases by 3.84% and 2.17%, while maximum displacement is reduced by 16.02% and 14.92%, respectively. As the water level difference increases, the primary stress-bearing areas are located at 1/4 of the gate height and the gate's bottom center. FEM calculations exhibit a positive correlation with measured data, with the maximum stress check coefficient of each component ranging from 0.40 to 0.66 which confirms the gate possesses sufficient stiffness reserve, thereby meeting the requirements for safe operation.

Keywords: miter gate; hydrostatic pressure; back tie rod; finite element method; static stress test

人字闸门^[1-2]是船闸中最常采用的闸门结构型式, 为保证航运枢纽的安全运行, 对人字闸门进行静

应力试验尤为重要。程小龙^[3]采用有限元模型, 对正常运行、极端水位、检修等典型工况下船闸人字闸

收稿日期: 2025-09-13

修稿日期: 2025-11-09

基金项目: 广西科技计划项目(桂科 AA23062032)

作者简介: 关启钰(1996—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事港航结构健康监测技术研究。E-mail: guanqiyu10@163.com

通讯作者: 潘新恩(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事水运工程试验检测、健康诊断评估技术研究工作。

E-mail: 569982948@qq.com

门结构进行有限元分析,但存在模型过于简化,缺少试验验证,其优化建议工程实用性不足等缺点。赵益佳等^[4]结合数值模拟与应用检测数据,对不同开度下弧形闸门结构安全性、运行可靠性进行综合评估。陈聪等^[5]采用数值模拟和试验验证对露顶式弧形闸门开展静力工况和动态工况下内力分析,基于分析和试验结果,评价闸门的结构强度和抗疲劳性能。赵伟等^[6]通过建立闸门-水流的耦合数值模型,将模拟结果与物理试验数据进行对比,分析平面闸门的受力及变形情况,揭示了闸门关闭过程中各构件的应力分布。

现行检测规范^[7-8]将闸门静应力检测列为必检项目之一,但未明确要检测的主要受力构件、部位及方法。不同于码头或桥梁等可以通过调整配重来控制加载效率^[9-10],人字闸门静力试验受条件限制,通常只能利用常水位下产生的水压差进行,一般难以达到设计荷载极限。近年来,部分学者开展了检测与监测方面的研究。如姜永生^[11]在人字门门体上布设光纤光栅应变传感器,并构建了人字门结构健康监测系统,达到了对人字门应力变化的在线监测。熊景然等^[12]借助监测系统采集人字门的振动频率和结构应力,并构建预测模型,实现了对闸门剩余寿命的预测。张仕凤等^[13]收集并计算了国内40余座典型船闸的年峰上下游水位差,得出了静水压力的不定性参数及变异系数,对人字门可靠指标进行了修正。上述研究大多采用在人字闸门结构上广泛布置传感器的方式,对闸门整体结构进行健康监测,或缺乏针对性,导致工作量庞大。在试运行环境存在限制的情况下,难以在实际检测工作中推广应用。同时,在结构试验前,一般采用有限元分析方法^[14-15]进行模型验算,而目前对人字闸门的数值模拟中,多未考虑预应力背拉杆^[16-17]的作用,导致结构静应力试验前的验算模型不能准确反映实际情况。因此,通过构建不同背拉杆设置方式的数值模型,探究背拉杆对闸门应力的影响,把握预应力人字闸门在不同水位差工况下的动态响应特性,对于在试验条件受限的情况下科学开展预应力人字闸门静力试验具有重要意义。

应用 ANSYS/LS-DYNA 软件,对广西柳州红花水利枢纽二线船闸下闸首单扇人字闸门进行仿真分析,通过对比3种不同背拉杆设置方式的验算模型,探究预应力背拉杆对人字闸门各受力构件的应力动态变化影响,进一步分析蓄水过程中预应力背拉杆

闸门各主要受力构件的动态应力变化情况,最后根据有限元模拟结果进行了实际现场检测工作。通过数值模拟与实际检测结果对比发现,二者变化规律呈现良好一致性,数值模拟结果可为船闸人字闸门检测提供可靠的理论基础。

1 工程概况

广西柳州红花水利枢纽二线船闸为2 000 t级船闸,船闸有效尺度为280 m×34 m×5.8 m(长×宽×门槛水深)。下闸首工作闸门采用1级大型人字闸门,人字闸门封闭孔口尺寸34 m×30.8 m(口门净宽×闸门总高)。门叶位于关门位置时,门轴线与闸首横向轴线夹角22.5°,门叶宽20.2 m,厚3 m,门轴线距后翼缘0.2 m。闸门底槛高程50.9 m,门顶高程81.7 m,闸首顶高程83.5 m。闸门最低通航水位为56.69 m,最大设计水头23.79 m。根据设计图纸,应用 Hypermesh 软件按实际尺寸建立三维模型,建模单位选择 kg-mm-s。几何模型如图1所示。

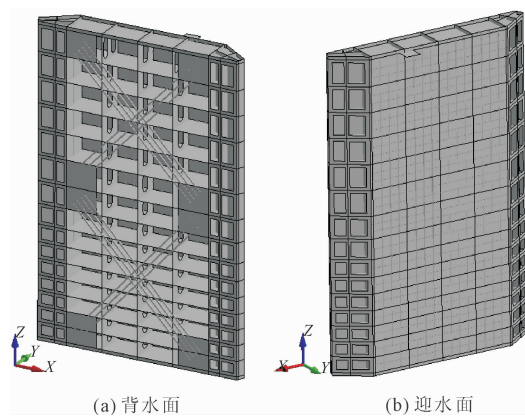


图1 人字闸门结构图

2 有限元仿真

2.1 模型导入与单元选择

利用 Hypermesh 对模型进行网格划分,考虑闸门实际受力变形情况,选择 shell 单元并设置实际厚度对钢闸门面板、纵主梁、斜接柱、横主梁进行模拟,水平次梁、纵向次梁、背拉杆均采用 beam 单元模拟,并按工件实际形状设置截面类型。

2.2 材料特性及边界条件

闸门结构的材料为 Q355B 碳素钢,取重度 $\gamma = 78.5 \text{ kN/m}^3$,弹性模量 $E = 2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$,泊松比 $\mu = 0.3$,热膨胀系数: $\eta = 1.2 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。按照

《水利水电工程钢闸门设计规范》^[7] (SL74—2019), 对横梁、中隔板、斜接柱等结构材料许用应力均进行折减,折减系数取 0.95,其许用应力为:213.8 MPa ($\delta < 16 \sim 40$ mm)。对于面板材料许用应力则按下式计算:

$$\sigma_{eq}^{max} \leq 1.1\alpha[\sigma] \tag{1}$$

式中: α 为弹塑性调整系数,当 $b/a \leq 3$ 时, $\alpha = 1.5$ (a 为面板短边, b 为面板长边),最终计算得出面板容许应力为 315.0 MPa。

闸门关门挡水时,斜接柱上的推力板相互力作用形成三铰拱,传递的轴向压力主要由门轴柱支、枕垫块承受,并传递到闸首边墩。根据闸门在关门挡水时的约束条件,模型中门轴柱约束所有线位移,仅释放绕 Z 轴的角位移;顶驱约束 X 、 Y 方向的线位移,以及绕 X 轴、 Y 轴的角位移;底驱与斜接柱均仅释放绕 Z 轴的角位移。

2.3 载荷的确定及施加

依据闸门设计^[18]要求,闸门安装后背拉杆预应力范围为 75~120 MPa,门叶底横梁在斜接柱下端点的顺水流方向(Y 向)及垂直方向(Z 向)最大位移控制值为 ± 4 mm。模型按照背拉杆预应力施工时的自然悬挂条件设置约束,应用降温法对背拉杆进行预应力施加,钢材材料卡片选择并可定义温度属性的 *MAT_PLASTIC_KINEMATIC,温度变化选择配合温度变化曲线方式加载,关键字卡片选择 LOAD_THERMAL_LOAD_CURVE,通过调整钢材比热,调节不同背拉杆所需达到的设定应力值,最终调试预应力结果范围为 75.2~121.3 MPa,基本符合设计要求,降温法调节背拉杆预应力计算式为:

$$\sigma_T = E \cdot \eta \cdot (T_R - T_0) \tag{2}$$

式中: T_R 为调节温度; T_0 为初始温度。

背拉杆预应力施加结果如图 2 所示,可以看到,闸门面板中心受两组拉杆的预应力组合作用,产生向迎水面的微小变形,沿 4 根主拉杆方向的闸门变形较大,门叶底横梁在斜接柱下端点的顺水流方向(Y 向)及垂直方向(Z 向)位移分别为 -4.04 mm、 $+2.49$ mm,与设计值接近。背拉杆预应力施加结束后,进行模型重启并施加边界约束,采用动力松弛方法对模型进行应力初始化。

建立静水压随深度变化函数(最大通航水位下,上游水位标高 56.69 m,下游水位标高 80.48 m,最大水位差为 23.79 m),并采用 *LOAD_SEGMENT_SET 关键字施加水压力,水压力作用区域包括面板、两侧斜接柱暴露水中部分。

2.4 模型合理性验证

根据文献[12],背拉杆主要作用是控制闸门的扭转变形,人字闸门的变形以沿门厚方向(Y 向)的变形为主,通过对比不同类型闸门在关门极限承压状态时的斜接柱上端、中间和下端 Y 向相对位移来验证模型的准确性,如表 1 所示。

根据表 1 可以发现,无背拉杆、无预应力背拉杆、预应力背拉杆闸门斜接柱相对位移依次减小,分别为 3.760、3.587、1.473 mm,其中无背拉杆、背拉杆无预应力两种工况结果相差不大,主要是由于在设计最高水位下,闸门本身刚度已足够抵御变形,背拉杆未充分发挥作用,而预应力背拉杆工况因闸门中部已有微小的外鼓变形,较前两种工况的相对位移分别降低了 60.8%、58.9%,说明预应力背拉杆能很好地降低闸门的翘曲变形,模型符合基本规律。

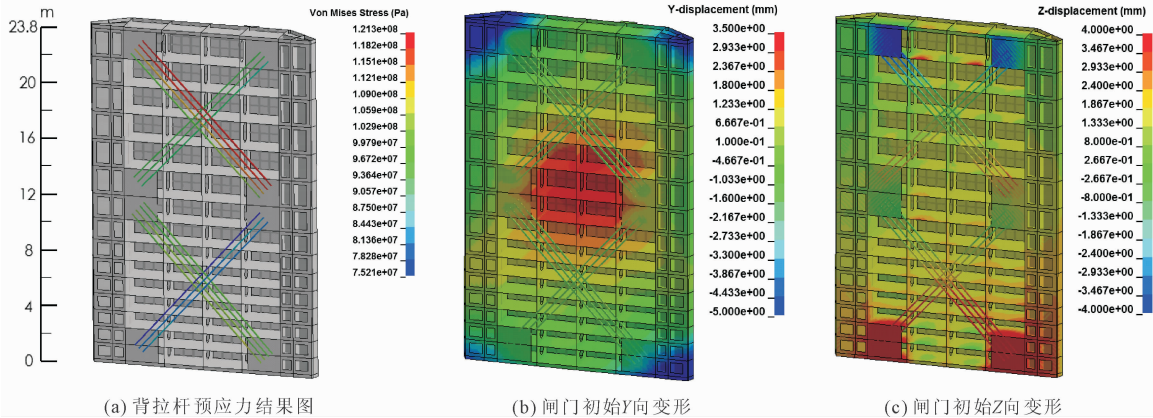


图 2 人字闸门背拉杆预应力结果图

表 1 闸门各部位最高水位时位移计算结果

背拉杆 设置情况	斜接柱上端			斜接柱中部			斜接柱下端		
	v_x	v_y	v_z	v_x	v_y	v_z	v_x	v_y	v_z
无背拉杆	-0.168	0.110	-0.316	2.170	-4.001	-0.189	2.348	-3.650	0.114
无预应力背拉杆	-0.037	-0.167	-0.266	2.144	-3.997	-0.184	2.407	-3.754	0.128
预应力背拉杆	0.123	-6.071	1.217	-0.068	-3.610	0.983	0.373	-7.544	0.840

3 数值模拟结果与分析

3.1 不同背拉杆设置方式的验算模型对比

为探究预应力背拉杆对验算模型的准确性影响,设置了无背拉杆、无预应力背拉杆、背拉杆预应力等 3 组结构验算模型,最高水位差下不同人字闸门应力如图 3(a)—图 3(c)所示,位移结果如图 3(d)—图 3(f)所示。可以发现,3 组验算模型大部区域应力分布在 50.0~120.0 MPa 范围内,满足规范要求。闸门的主要受力构件为面板、主横梁及水

平次梁,在应力方面,由于主横梁垂直间距设计为由密至疏,门体底部刚度较大,该区域力传导主要由主梁及水平次梁承担,因此主梁及水平次梁最大应力位于闸门底部中心区,而闸门 1/4 高度中心区横梁间距较大,面板主要发挥承压作用,因此面板最大应力区则位于闸门 1/4 高度中心区;在整体变形方面,受刚度分布影响,各构件最大变形区均位于闸门的 1/4 高度处。对比可见,预应力背拉杆模型的门体变形区域面积较前两者有明显的降低。

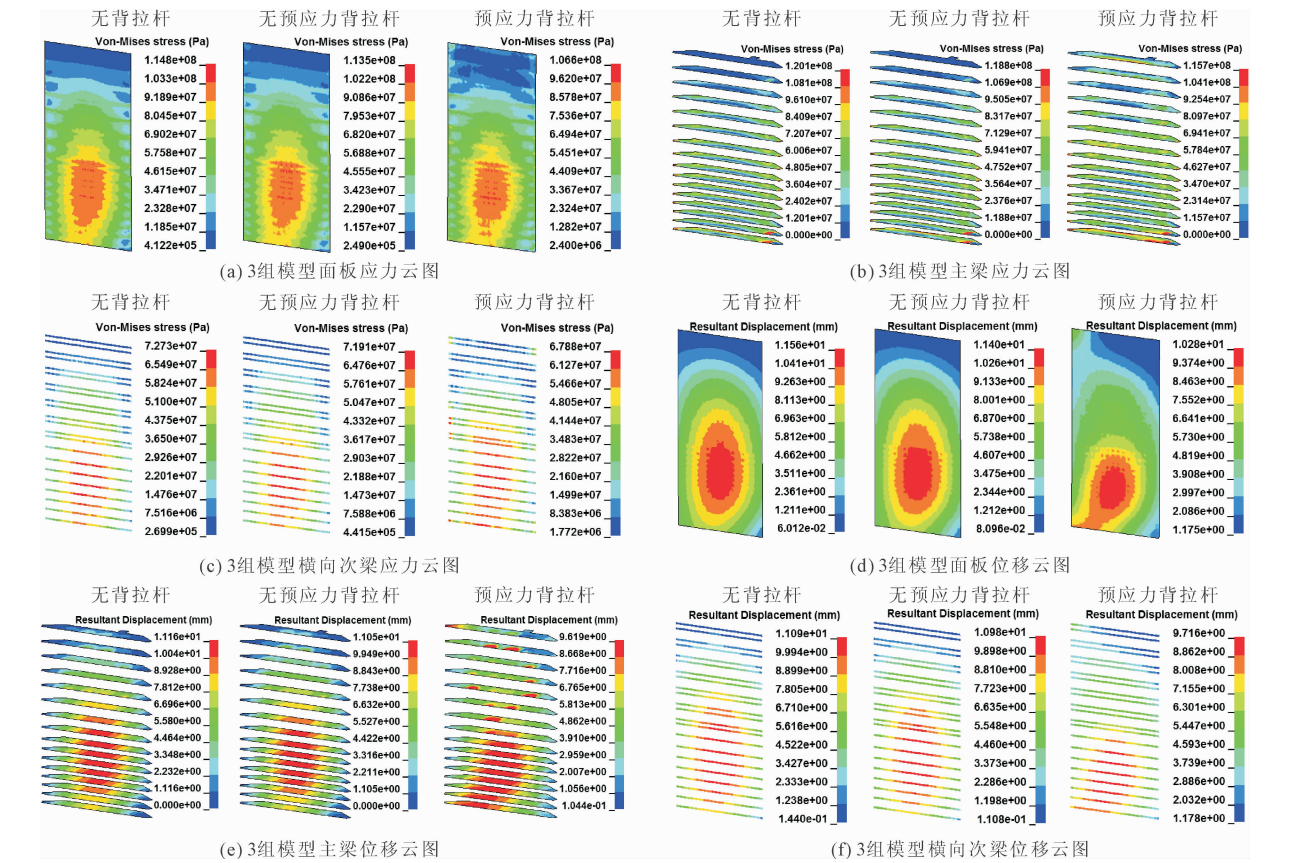


图 3 人字闸门最大水位差下应力与位移云图

闸门的主要受力构件在水位上升过程中的最大应力与位移结果,详见图 4 及表 2。可以发现,由于背拉杆未充分发挥作用,无背拉杆与背拉杆无预应力模型各构件最大应力基本接近,随水位差的增加,各主要受力构件呈规律的线性增长,表明闸门位移

基本呈刚体位移模式。预应力背拉杆模型较无背拉杆与背拉杆无预应力模型的面板最大应力分别降低 7.62%、6.54%,最大位移分别降低 12.58%、10.93%,主梁最大应力分别降低 3.84%、2.17%,最大位移分别降低 16.02%、14.92%。三组模型的

最大位移均小于设计值,说明闸门设计刚度储备良好,预应力背拉杆对门体的抗变形能力有一定积极

作用,设置了预应力背拉杆的验算模型能更准确反映闸门实际受力情况。

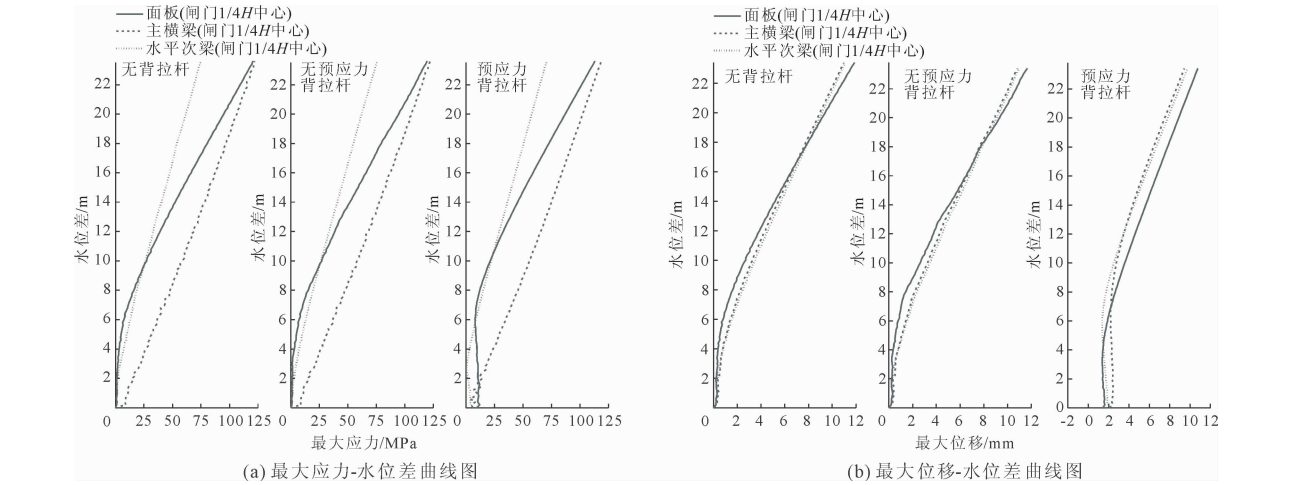


图 4 人字闸门最大水位差下应力与位移曲线图

表 2 不同背拉杆设置情况下最大应力及位移

结构部件	最大折算应力/MPa			最大位移/mm			应力允许值/MPa	设计最大位移/mm
	无背拉杆	背拉杆无预应力	背拉杆预应力	无背拉杆	背拉杆无预应力	背拉杆预应力		
面板	114.754	113.507	106.626	11.564	11.395	10.272	315.0	12.0
主横梁	120.123	118.810	115.678	11.160	11.054	9.619	213.8	12.0
水平次梁	72.734	71.906	67.881	11.088	10.985	9.716	213.8	12.0

3.2 预应力背拉杆人字闸门应力动态变化

闸门静力试验通常难以在最大设计水位差条件下进行,因此探究闸门在不同水位差条件下的最大应力与变形位置,能够为闸门静力试验提供良好的指导作用。对预应力背拉杆人字闸门的各主要受力构件进行应力与变形动态分析,提取主要受力区单元的最大应力与位移结果,如图 5 所示,表 3 为各构件最大应力与位置统计表。

最大应力方面,由于背拉杆预应力作用,各构件前期最大应力位置为闸门中部中心,随水位差增加,水压力作用大于背拉杆预应力作用,最大应力位置出现于闸门底部中心区域,面板、主横梁、水平次梁的最大应力位置转移的水位差节点分别为 2.0、9.2、17.2 m,其中面板在水位差大于 19.0 m 后,由于同时受门体刚度与水压力影响(见 3.1 节),最大应力区转移至闸门 1/4 高度中心区域。

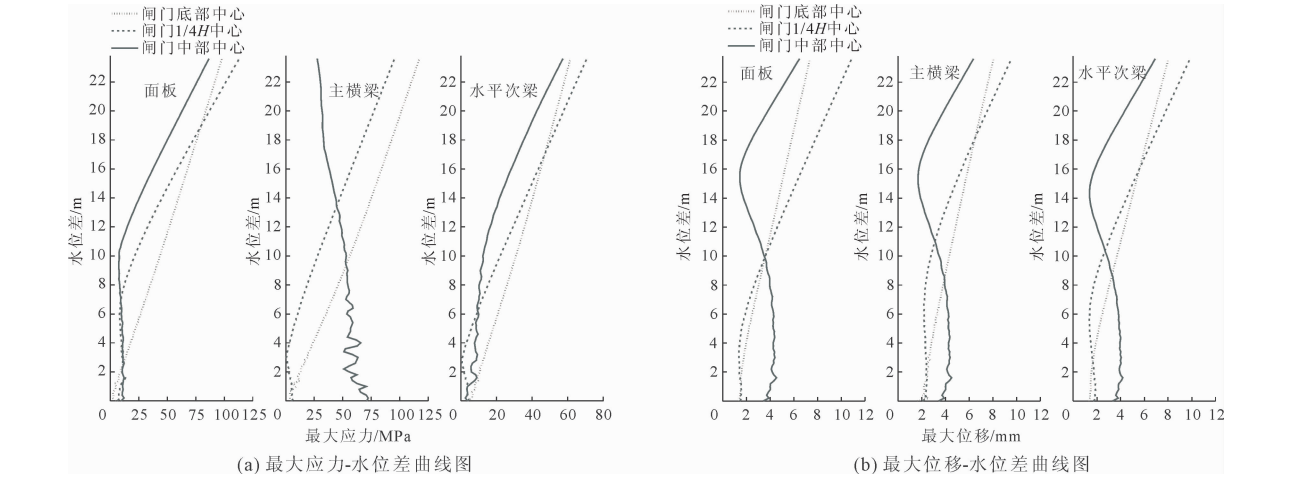


图 5 预应力背拉杆人字闸门最大应力及位移曲线

表 3 预应力背拉杆人字闸门最大应力及位移

部件	水位差/m	最大应力范围/MPa	水位差/m	最大位移范围/mm	位置
面板	0~2.0	10.397~11.957	0~10.0	3.430~4.527	闸门中部中心
	2.0~19.0	10.397~72.725	—	—	闸门底部中心
	19.0~23.8	72.725~106.626	10.0~23.8	3.504~10.272	闸门 1/4H 中心
主横梁	0~9.2	52.782~75.250	0~9.2	3.438~4.523	10 层主梁背水侧中心
	9.2~23.8	52.782~115.678	9.2~18.4	3.917~6.567	1 层主梁迎水侧中心
	—	—	18.4~23.8	6.567~9.619	6 层主梁迎水侧中心
水平次梁	0~17.2	3.735~47.497	0~8.8	3.319~4.181	闸门中部中心
	17.2~23.8	47.497~67.881	8.8~16.0	4.181~5.587	闸门底部中心
	—	—	16.0~23.8	5.587~9.716	闸门 1/4H 中心

最大位移方面,在前期阶段,闸门中部区域未直接受水压力作用,各构件最大变形以该区域的初始变形为主,随水位差增加,门体由向上游侧外鼓转为向下游侧弯曲,主横梁、水平次梁最大位移位置首先转移至闸门底部中心区域,水位差节点分别为 9.2、8.8 m,随水位差继续增加,受闸门刚度分布及水压力作用影响,各构件最大位移位置均位于闸门1/4高度中心区域,面板、主横梁、水平次梁的最大位移转移水位差节点分别为 10.0、18.4、16.0 m。不同水位差下闸门应力云图见图 6(a)—图 6(c),位移云图见图 6(d)—图 6(f),最大水位差云图见图 3。

整体而言,受背拉杆的预应力作用,门体中部产生了向上游侧的微小变形,横梁、面板、水平次梁的初始应力依次减小,说明预应力背拉杆对主横梁的初始内部应力影响最大,面板次之,横向次梁最小,人字闸门在水位差增加阶段,应力与位移关键区域为闸门底部及 1/4 高度中心区域。

4 闸门应力检测

4.1 检测方案

检测工况为一个闸次的闸室充水,检测仪器采用 JM3812 无线静态应变测量系统,最大量程为

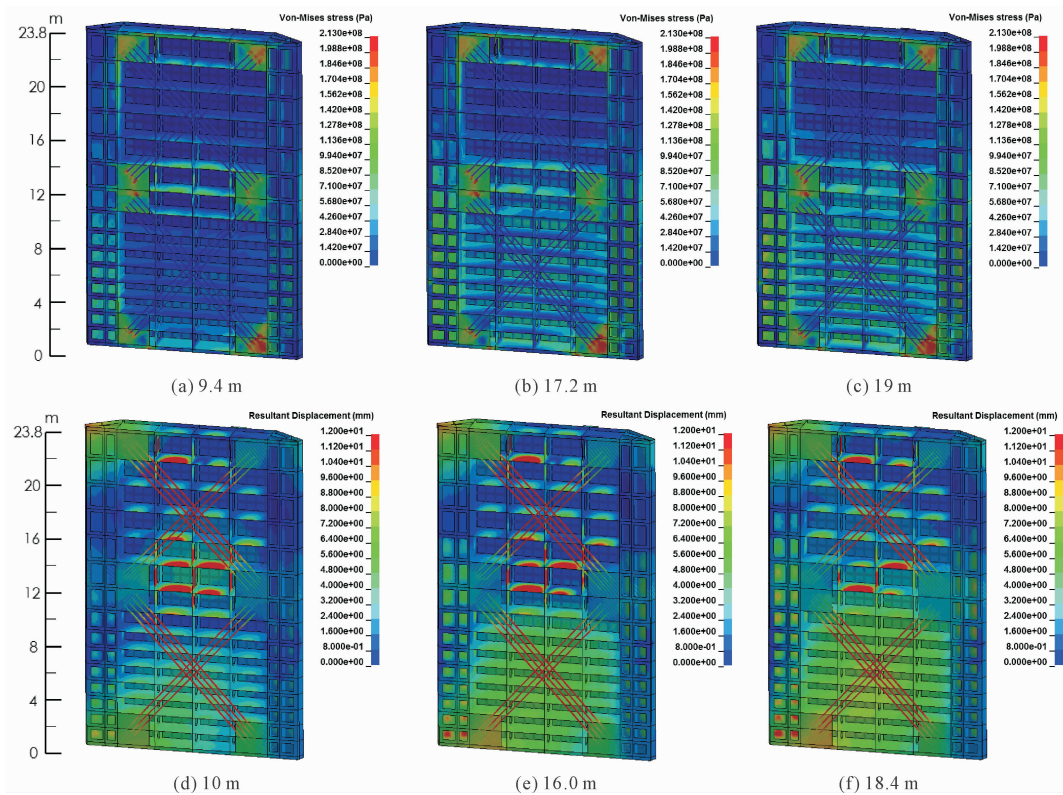


图 6 不同水位差下预应力背拉杆人字闸门应力与位移云图

60 000 $\mu\epsilon$,最高分辨率为 0.5 $\mu\epsilon$;应变片选用钢结构集成式电阻应变片,标准电阻 120 Ω ,测量范围 2 000 $\mu\epsilon$,灵敏系数 $k=2.06$ 。

检测时闸室最高水位为 78.0 m,下游水位保持为 60.25 m,水位差为 17.75 m。结合现场试验条件及数值模拟结果,选择在第 8 层主梁中部区域应力较大的面板、主梁及横向次梁作为主要检测构件,每构件对称布置 2 对测点。测点布置如图 7 所示,具体检测测点分布及受力情况见表 4。

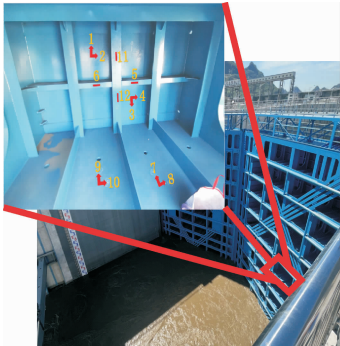


图 7 测点布置图

上、下闸首闸门关闭后,对闸室进行充水,水位上升过程中按水位差 3 m 间隔采集各测点应变值,

当水位临近最高水位时,在水位差 15.0、16.0、16.5 m 处加密采集点。

表 4 测点分布及受力情况

测点编号	检测位置	受力情况
1,2	面板上侧 X 向及 Z 向测点	下游侧受拉应力
3,4	面板下侧 X 向及 Z 向测点	下游侧受拉应力
5,6	横向次梁左、右侧点	轴向拉应力
7,8	主梁下游侧 X 向及 Y 向测点	弯拉应力
9,10	主梁中部 X 向及 Y 向测点	弯拉应力
11,12	纵向次梁上、下侧点	轴向压应力

4.2 检测结果分析

在数值模型中选择检测点位置单元,导出单元相应的方向应力,正值代表拉应力,负值代表压应力。各构件实测最大应力值及有限元计算值对比情况见表 5,人字闸门各构件检测与理论值曲线如图 8 所示。最大水位差校验系数计算式为:

$$\eta_q = \frac{S_t}{S_d}$$

(3)

式中: S_t 为试验中实际施加的荷载对结构产生的效应,即实测值; S_d 为数值模拟试验施加的荷载对结构产生的效应,即计算值。

表 5 人字闸门各构件检测与有限元计算结果

单位:MPa

水位差/m	面板 2#测点		主横梁 8#测点		横向次梁 6#测点		纵向次梁 11#测点	
	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值	计算值
3.00	0.67	3.01	0.14	0.86	0.00	4.41	0.00	-6.01
6.00	-3.58	-3.67	-3.90	-6.96	-5.04	-6.33	-1.26	0.51
9.00	-4.75	-13.14	-11.47	-22.51	-10.92	-20.63	2.31	8.06
12.00	-8.31	-24.32	-21.53	-36.82	-20.16	-36.41	5.25	18.42
15.00	-11.54	-35.90	-28.04	-51.52	-26.67	-52.74	7.14	29.04
16.00	-19.82	-39.81	-31.28	-56.54	-39.90	-58.20	10.50	32.50
16.50	-25.87	-44.12	-33.05	-59.43	-40.72	-61.43	13.02	33.54
最大水位差 校验系数	0.59		0.56		0.66		0.40	

现场检测及有限元模拟结果表明,人字闸门主要受力构件应力随上下游水位差的增加而增大,各构件实际检测的最大应力均小于有限元模型理论计算值,最大水位差校验系数范围为 0.40~0.66,表明人字闸门在试验水位差作用下满足设计正常使用要求。需要说明的是:有限元模型对人字闸门的加劲肋、人形孔洞等进行了简化,模型计算值略大于实测值,但实际检测与数值模拟的最大应力方向及变化规律呈现良好一致性,说明有限元建模方法可以较好的指导实际检测工作,保证试验的可靠性与安全性。

5 结 论

以广西柳州红花水利枢纽二线船闸钢闸门静力试验为例,对不同背拉杆设置方式的三种验算模型进行对比分析,研究预应力背拉杆人字闸门在水位差增加过程中的结构动态响应,得出以下结论:

(1) 预应力背拉杆对人字闸门抵抗变形起到一定的积极作用,对比无背拉杆与背拉杆无预应力模型,预应力背拉杆模型主要受力构件的最大应力与位移均有一定程度降低,未设置预应力背拉杆的验算模型应考虑合理的安全系数。

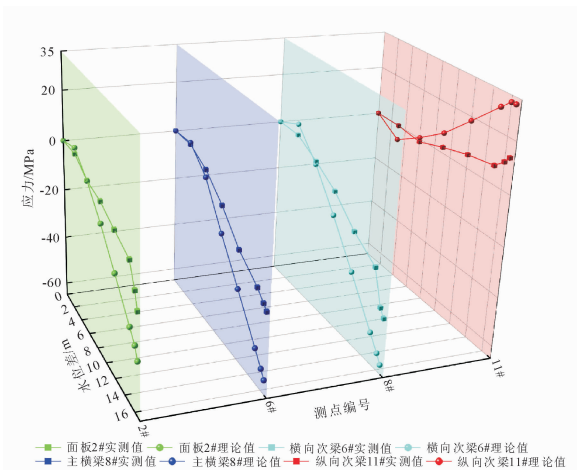


图 8 人字闸门各构件检测与理论值曲线

(2) 预应力背拉杆对主横梁的初始内部应力影响最大,面板次之,横向次梁最小。随着水位差增加,受背拉杆初始应力、闸门刚度分布及水压力作用的综合影响,主要受力构件的最大应力与位移区域主要集中在闸门底部及 1/4 高度中心。

(3) 有限元验算模型与实测最大应力校验系数范围为 0.40~0.66,表明人字闸门在试验水位差作用下满足设计正常使用要求。为保障钢闸门的后续安全使用,应针对闸门底部以及刚度较小且受较大水压力直接作用的区域进行重点监测;有条件时,应对背拉杆内部应力进行常态化监测,及时维护。

(4) 根据有限元模型验算结果,对关键位置测点的有效检测,可以很大程度提高闸门检测的工作效率,同时也保证了试验的安全性和可靠性。

参考文献:

[1] 余学佳,张燎军,潘正泉,等.大型人字闸门设计安装中若干因素对抗扭刚度影响[J].人民长江,2016,47(15):63-67.

[2] 刘云俊,杨建明,叶小强.基于检测数据的在役水工钢闸门主梁可靠度分析[J].人民长江,2010,41(17):88-91.

[3] 程小龙.船闸人字闸门结构有限元分析[D].重庆:重庆交通大学,2013.

[4] 赵益佳,曹平周,张贺,等.小南川水库弧形工作钢闸门安全检测与评估[J].中国农村水利水电,2018(8):149-154,159.

[5] 赵伟,蔡伟,易伟.平面闸门动水闭门的数值模拟研究[J].水资源与水工程学报,2025,36(2):125-133.

[6] 张聪,张钰奇,王童童,等.露顶式弧形闸门静动态应力数值分析与试验验证[J].人民黄河,2023,45(3):151-155.

[7] SL 74—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.

[8] GB/T 51394—2020 水工建筑物荷载标准[S].北京:中国水利水电出版社,2020.

[9] JTG/T J21-01—2015 公路桥梁荷载试验规程[S].北京:人民交通出版社,2015.

[10] JTS 144-1—2010 港口工程荷载规范[S].北京:人民交通出版社,2010.

[11] 姜永生.基于光纤传感技术的人字闸门结构健康监测研究与应用[J].半导体光电,2022,43(6):1179-1183.

[12] 朱潇,张钰奇,熊景然,等.数字孪生驱动的水工闸门损伤在线识别与监测方法[J].水电能源科学,2024,42(9):143-147.

[13] 张仕凤,张燎军.基于改进 JC 法的船闸人字闸门结构可靠度研究[J].中国农村水利水电,2025(7):158-163.

[14] 卢洋亮,傅学敏,刘亚坤,等.露顶式弧形闸门流固耦合数值模拟正反分析[J].人民黄河,2024,46(8):137-142.

[15] 叶雅思,周钦,曾又林,等.大源渡二线船闸人字闸门静动力数值计算[J].水运工程,2019(3):116-120.

[16] 殷小珠,方帅,李烨,等.关于背拉杆对人字闸门力学性能影响的研究[J].钢结构,2019,34(3):90-94.

[17] 赵文芳,陆仙,戴雪梅.惠州东江船闸人字闸门背拉杆施工技术[J].水利水电技术,2017,48(S1):98-101.

[18] 中交水运规划设计院有限公司,广西西江集团红花二线船闸有限公司.广西柳江红花水利枢纽二线船闸工程施工图设计(报批稿)第四册金属结构第二分册下闸首人字闸门[R].北京,2019.