

刘元广, 洪学飞, 李子昌, 等. 水电站大型弧形钢闸门结构响应与安全分析研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(6): 133-148. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.06.012

LIU Yuanguang, HONG Xuefei, LI Zichang, et al. Structural response and safety analysis of large-size radial steel gate for hydropower station[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(6): 133-148. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.06.012

水电站大型弧形钢闸门结构响应 与安全分析研究

刘元广¹, 洪学飞^{2,3}, 李子昌², 聂宇辛², 靳俊杰¹, 张睿¹, 林鹏^{2,3}

(1. 中国水利水电第十一工程局有限公司, 河南 三门峡 472001; 2. 清华四川能源互联网研究院, 四川 成都 610071; 3. 清华大学 水利水电工程系, 北京 100084)

摘要:【目的】弧形闸门是库坝泄洪建筑的关键装置, 其结构安全可靠对库坝正常运行、汛期库坝整体安全具有重要意义。为分析多工况复杂负载情况下弧形钢闸门瞬态结构的结构安全, 建立了大型弧形闸门三维精细 ANSYS 数值模型。【方法】以下凯富峡水电站大型弧形钢闸门工程为例, 计算了闭门、瞬启及故障瞬启三种典型工况下弧形闸门主体结构响应, 通过案例对比验证了三维模型和仿真过程的合理性。进一步分析了各工况下弧形闸门位移和应力的分布和变化规律, 并对弧形闸门主体结构及固定装置的强度、刚度及稳定性进行了综合分析。【结果】结果显示: 故障瞬启工况是弧形闸门主体结构安全的最不利工况, 该工况下弧形闸门启闭力作用侧下支臂与门叶固接部位周围位移大、等效应力集中程度高, 为危险部位; 整体而言, 弧形闸门主体结构及固定装置满足强度、刚度和稳定性方面的相关要求。【结论】结果表明: 弧形闸门长期服役状态下, 危险部位在反复启闭循环中易受到磨损, 且存在疲劳损伤的风险, 综合分析建议对该部位结构进行优化设计、加固处理, 符合最不利工况下结构安全要求, 以保障结构的长期安全; 弧形闸门结构设计是安全可靠的。本研究成果保障了下凯富峡水电站大型弧形钢闸门的结构安全, 可为同类型弧形闸门的安全设计提供参考与借鉴。

关键词: 弧形闸门; 响应规律; 安全分析; 有限元仿真; 水电站

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.06.012

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV663

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)06-0133-16



与作者互动
请扫码
联系编辑

Structural response and safety analysis of large-size radial steel gate for hydropower station

LIU Yuanguang¹, HONG Xuefei^{2,3}, LI Zichang², NIE Yuxin²,

JIN Junjie¹, ZHANG Rui¹, LIN Peng^{2,3}

(1. Snohydro Bureau 11 Co., Ltd., Sanmenxia 472001, Henan, China; 2. Sichuan Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Chengdu 610071, Sichuan, China; 3. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

收稿日期: 2024-12-27; 修回日期: 2025-03-28; 录用日期: 2025-04-22; 网络出版日期: 2025-05-09

基金项目: 中国水电坦桑尼亚 JuliusNyerere 水电站施工关键技术研究科技成果咨询服务资助项目(SHC-JNHPP-JSFW-01-18012022); 下凯富峡水电站施工关键技术研究科技成果咨询服务资助项目(SH-KGL-SUB-2021003); 国家自然科学基金项目(52308147)

作者简介: 刘元广(1968—), 男, 正高级工程师, 学士, 主要从事水工结构、水利水电工程建设。E-mail: yr.liuyuanguang@powerchina.cn

通信作者: 李子昌(1986—), 男, 研究员, 博士, 主要从事水工结构、水利水电工程建设研究。E-mail: Lizichang@qq.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Abstract: [Objective] Radial gates are crucial components in flood discharge structures for reservoirs and dams. Their structural safety and reliability are of great significance for achieving normal operation of reservoirs and dams and ensuring structural safety during flood seasons. To analyze the structural safety of the radial steel gate under multiple complex load conditions, a detailed 3D numerical model of the large-size radial steel gate was developed using ANSYS. [Methods] Taking the large-size radial steel gate in the Kafue Gorge Lower Hydropower Station as an example, the mechanical responses of the radial gate under three typical operating cases, e. g., closed, instant opening, and momentary open fault, were calculated. Then, the reasonableness of the 3D model and simulation process was verified through case comparisons. Moreover, the distributions and variation laws of displacement and stress of the radial gate under different operating conditions were further analyzed. The strength, stiffness, and stability of the main structure and fastening components of the radial gate were analyzed comprehensively. [Results] The result show that the case of momentary open fault constitutes the most critical operating condition for the structural safety of the main structure and the radial gate. Under this scenario, significant deformation and high concentration of equivalent stress are observed around the connection between the lower support arm and the gate leaf on the opening and closing force application side, which is identified as the dangerous part. Overall, the main structure and anchoring components of the radial gate meet the relevant requirements for strength, stiffness, and stability. [Conclusion] The results indicate that in the long-term service state of the radial gate, the dangerous part is prone to wear and has a risk of fatigue damage due to repeated opening and closing cycles. Comprehensive analysis suggests optimizing the design and reinforcing this structural area to meet the safety requirements under the most unfavorable conditions, thereby ensuring the long-term safety of the structure. The structural design of the radial gate is safe and reliable. This study ensures the structural safety of the large-size radial steel gate in the Kafue Gorge Lower Hydropower Station and can serve as a reference for the safety design of similar radial gates.

Keywords: radial steel gate; response rule; safety analysis; FEM simulation; hydropower station

0 引言

泄洪建筑物是库坝工程的重要组成部分,其中金属闸门肩负着水流通断、调节流量、控制水位等关键功能^[1-2],同时具有启闭频繁的工作特性,其稳定运行和结构安全对库坝工程意义重大。金属弧形闸门因其具有结构轻巧、启闭省力、受力合理及泄流流态良好^[3],且无需单独设置门槽等优势^[4],因而被广泛应用。然而,金属弧形闸门多采用轻量化的细长或薄壁金属构件拼装而成,导致其在复杂荷载作用下面临局部强度破坏、结构变形过大及整体失框架稳的风险,这在弧形闸门结构设计、强度和刚度保障及整体稳定性分析等方面提出了巨大挑战。此外,弧形闸门复杂结构形式与水电工程大孔口、高水头、大泄量的发展趋势无疑使上述问题更加突出^[5]。为此,诸多学者围绕弧形闸门结构响应和安全分析开展研究,取得了一些有价值的研究成果,为水电工程弧形闸门结构安全保障提供了指导。

目前,弧形闸门研究的主要方法包括理论分析、试验测试和数值仿真。理论分析方面,平面体系简化计算方法是分析结构响应的经典方法,但该方法仅凭荷载经验分配系数无法准确考虑弧形闸门各构件间的空间协同工作特性,对于大型弧形闸门计算误差较大,不能满足设计要求^[5]。此后,相关研究逐步探索中

大型钢闸门主要构件力学响应理论分析方法,主要在面板强度^[6-7]、主梁强度刚度^[8-10]以及支臂组合截面钢柱稳定性^[11-12]等结构响应的非线性分析理论方面取得了有价值的成果。然而,分析过程仍不可避免地针对各构件间协同作用特性进行简化,无法精准描述复杂荷载条件下弧形闸门结构的三维力学状态。总体来说,理论分析方法对结构形式和荷载分布模式的适应性有限,在应对复杂荷载工况下大型弧形闸门结构整体响应分析方面存在一定的局限性,但可作为结构初设尺寸确定的重要手段。试验测试方面,一些学者对弧形闸门结构静动力响应^[13-14]、振动特性^[15-16]、病害损伤作用^[17-18]等分布规律及因素影响机制进行了探索,研究成果可有效反映了弧形闸门结构运行期力学状态及响应规律,但由于试验测试法存在成本高、耗时长且不可控影响因素多等问题,一定程度上限制它的应用,多用于弧形闸门结构设计效果验证,可为类似工程提供经验借鉴。

数值仿真在灵活性、经济性、高效性、重复性等方面具有优势,在工程计算与分析领域广泛应用。随着计算机性能的不不断提升和数值算法的日趋完善,数值仿真逐渐成为预测分析复杂荷载作用下弧形闸门结构三维力学响应的重要方法,受到诸多专家和学者的青睐。顾富星和岳桃丽^[19]采用三维有限元计算并评估了弧形闸门在各个工况下的应力、变形、振动等参

数, 针对极端荷载或地震工况下弧形闸门应力集中和振动进行研究并给出了结构加强意见和减振措施。杨宗儒等^[20]以海南省南渡江迈湾水利枢纽工程溢流坝弧形钢闸门作为分析对象, 分别采用平面体系假设方法与有限元法对闸门在全水头挡水工况和启门工况进行结构计算与分析, 并对两种方法计算结果进行了对比, 发现有限元结果比平面体系假设方法数值偏大, 更能体现弧形闸门结构应力集中规律, 结构应力和变形计算结果可靠度更高。王学亮等^[21]基于 ANSYS Workbench 对潜孔式弧形钢闸门在静态挡水和启门瞬间两种工况下主要构件应力和位移分布特点以及变化原因进行了有限元分析, 研究了弧形钢闸门面板底缘处局部应力集中的原因, 建议采用局部补强方式对面板底缘进行结构优化并通过计算分析验证了加固效果。此外, 有些学者针对激流^[22-23]、滑坡涌浪^[24]、船舶撞击^[25]等复杂动载作用下的弧形闸门结构开展了三维有限元计算, 系统分析了弧形闸门主体结构的动力响应及其对结构设计安全性的影响。还有学者采用 BIM+CAE^[26]、CAD+CAE^[27]等联合分析手段分析弧形闸门结构静动力响应和综合性能, 通过数据交换效率和精度优化技术不断提升三维数值分析的效率和精细化程度。总体来说, 目前有限元分析研究在弧形钢闸门闭门工况和启门工况方面的已有相关研究, 但针对大型弧形钢闸门故障启动状态下结构响应分析及故障启闭力的影响方面的研究却不多见。为此, 本文依托非洲下凯富峡水电站大型弧形钢闸门, 在弧形闸门闭门、瞬时启动的基础上, 进一步考虑弧形闸门故障瞬启工况, 开展三种工况下大型弧形闸门三维结构响应的有限元计算与分析。

下凯富峡水电站位于非洲赞比亚南部省下凯富埃河, 距现有上凯富峡水电站 5.90 km, 正常蓄水位 579.00 m, 库容 8 300 万 m³, 总装机容量为 750 MW。电站主要由首部挡水大坝、引水系统和发电厂区三部分组成, 其中大坝坝型为碾压混凝土坝 (RCC), 沿坝轴线从左到右布置三孔泄洪闸门, 闸门位于溢流坝顶。泄洪闸门采用弧形钢闸门, 尺寸 15.00 m×19.90 m, 为大型弧形闸门。目前, 国内类似工程案例中没有可遵循的技术参数和指标, 为保障弧形闸门结构安全, 有必要针对性地开展大型弧形闸门设计结构的响应规律和安全分析研究。

本研究以下凯富峡水电站大型弧形闸门为对象, 建立了弧形闸门三维精细化数值仿真模型, 采用商用软件 ANSYS 开展了闭门、瞬启及故障瞬启三种典型运行工况时弧形闸门结构静动力的三维有限元计算,

系统分析了弧形闸门主体结构静动力响应分布规律及工况变化的影响机制, 并结合国内外相关规范开展了弧形闸门主体结构及固定装置的强度、刚度及稳定性的综合设计安全性分析。研究成果支撑了下凯富峡水电站大型弧形闸门结构设计和响应安全分析, 对同类型大型弧形闸门的安全设计具有重要指导意义和参考价值。

1 计算模型与工况

1.1 弧形闸门结构设计

下凯富峡水电站采用三孔开敞式泄洪闸门, 共设置三扇泄洪弧形闸门。弧形闸门主体结构由闸门门叶 (以下简称门叶)、支臂和支铰组成, 其结构形式为三主横梁斜支臂式, 其中门叶自上而下分成八节制作, 支臂由变截面箱型梁焊接而成, 分两段制作, 并通过螺栓与门叶结构刚接。闭合状态下, 门叶正面矩形开口宽 15.00 m、高 19.90 m, 门叶外轮廓半径 20.00 m, 曲率中心与支铰轴重合。弧形闸门主体结构在支铰部位与闸墩混凝土基础铰接, 考虑设备失效风险, 配备 2 台油压启闭机, 单台起吊能力 4 000.00 kN, 并通过活塞杆在吊点部位与门叶结构铰接。弧形闸门底槛标高 560.10 m, 支铰轴心标高 569.10 m, 门叶顶部标高 580.00 m。

1.2 计算模型及参数

依据弧形闸门结构设计图, 主要考虑弧形闸门面板、主横梁、垂直次梁、水平次梁、支臂框架等主要部件, 建立如图 1 所示的弧形闸门简化三维几何模型。三维模型全局坐标 X 轴沿水流方向, 正向指向上游方向, 坐标 Y 轴沿竖直方向以向上为正, 坐标 Z 轴沿弧形闸门旋转轴轴线方向, 以面向上游侧水平向右为正。接下来, 利用 ANSYS 有限元分析软件建立如图 2 所示的弧形闸门三维数值分析模型, 并在支臂支铰轴中心处建立参考点, 仅释放参考点在 XY 平面内的转动自由度, 约束其他方向位移和转动自由度。考虑弧形闸门主要部件均为型钢薄壁结构, 单元选用更适合于薄壳及中厚壳的内置 SHELL181 单元, 数值模型共有 139 472 个单元和 137 765 个节点。

模型材料及参数方面, 材料本构模型选用双线性等向强化模型, 第二刚度 (切线刚度) 取弹性阶段弹性模量的 3%。模型各部件材料及其有限元计算力学参数取值如表 1 所列。结构静力强度分析采用第四强度理论 (Von Mises 理论) 与最大剪应力强度理论进行材料强度的联合校验分析。结构刚度分析依据《水利水电工程钢闸门设计规范》(SL74—2013)^[28] 中

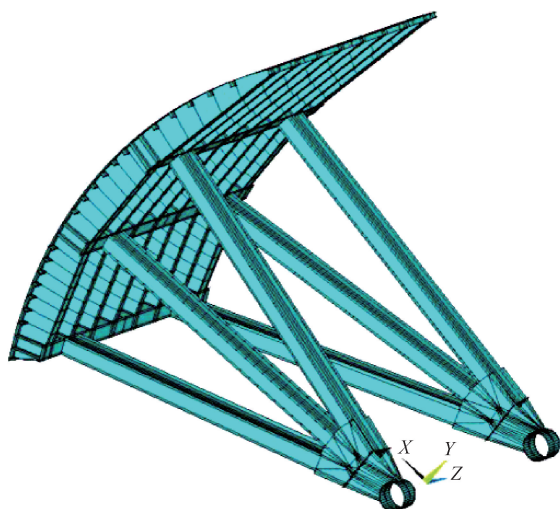


图1 弧形闸门三维几何模型

Fig. 1 Three dimensional geometric model of radial gate

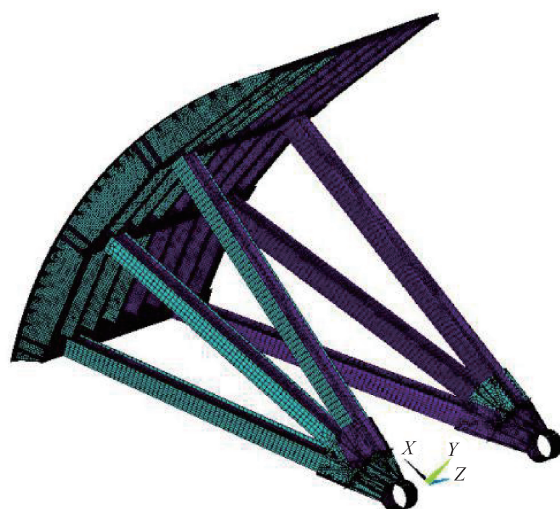


图2 弧形闸门三维数值仿真模型

Fig. 2 Three dimensional numerical simulation model of radial gate

“露顶式工作闸门挠跨比应小于 $1/600$ ”的规定, 本研究中弧形闸门主横梁工作跨度为 $9\,800.00\text{ mm}$, 因此构最大挠度应小于 16.33 mm 。结构屈曲稳定性分析采用弹性特征值屈曲分析, 计算模型各阶模态的屈

曲安全系数来评价结构稳定性。

1.3 计算工况及边界条件

依据弧形闸门结构设结合弧形闸门实际运行条件, 考虑最大水荷载的作用, 选取弧形闸门闭门、弧形闸门瞬时开启及某一启闭机故障时弧形闸门瞬时开启三种状态作为弧形闸门运行的代表状态, 设置对应工况进行弧形闸门主体结构有限元分析。各工况静态水头均按水平面高程取门叶顶部高程 580.00 m 计算。三种计算工况的荷载组合及边界条件如下。

工况 1 对应弧形闸门闭门状态, 此时启闭机未处于工作状态。作用荷载方面, 弧形闸门主体结构受到上游侧水推力和自身重力的作用, 水推力为作用在弧形闸门上游侧面板表面的梯度分布荷载, 作用方向沿面板表面内法线方向, 水重度 γ_w 取 10.00 kN/m^3 , 重力加速度 g 取 10.00 m/s^2 。边界约束方面, 仅释放整体模型关于支铰轴心参考点在 XY 平面内转动自由度, 约束位移和其他平面内转动, 保证模型绕支铰轴旋转, 同时固定门叶与底槛接触部位节点的切向位移(以支铰轴心参考点为极坐标点)。

工况 2 对应弧形闸门瞬启状态, 此时两台启闭机均处于正常工作状态。作用荷载方面, 弧形闸门主体结构受到上游侧水推力、自身重力及运行载荷的作用, 其中运行载荷主要包括侧密封摩阻力和支铰轴摩阻力, 依据设计文件, 侧密封摩阻力共 199.48 kN , 沿门叶两侧均匀作用, 单侧作用弧长 20.88 m , 数值仿真采用荷载集度为 4.777 kN/m 的均布荷载模拟, 均匀施加在门叶两端最外侧节点的切向, 与弧形闸门转动方向相反。支铰轴摩阻力共 $4\,490.4\text{ kN}$, 均匀作用于左右侧支臂与支铰销钉接触部位, 单侧作用长度取销钉轴承宽度 0.45 m , 数值仿真采用荷载集度为 $4\,989.33\text{ kN/m}$ 的均布荷载模拟, 均匀施加在支臂与支铰轴销钉接触部位节点切向, 与弧形闸门转动方向相反。边界约束方面, 保持支铰轴心处约束条件不变, 撤销门叶与底槛接触部位节点的切向位移约

表1 模型各部件材料及力学参数

Table 1 Materials and mechanical parameters of each component in the model

部件名称	材 料	弹性模量 E /GPa	泊松比 μ	密度 ρ /kg · m ⁻³	本构参数	
					屈服强度 f_y /MPa	切线模量/GPa
弧形闸门面板	Q345B/ $t \leq 16\text{ mm}$	206.00	0.30	7850.00	345.00	6.18
主横梁	Q345B/ $16\text{ mm} < t \leq 40\text{ mm}$	206.00	0.30	7850.00	325.00	6.18
支臂框架	Q345B/ $t \leq 16\text{ mm}$	206.00	0.30	7850.00	345.00	6.18
垂直次梁	Q345B/ $t \leq 16\text{ mm}$	206.00	0.30	7850.00	345.00	6.18
水平次梁	Q235B/ $t \leq 16\text{ mm}$	206.00	0.30	7850.00	235.00	6.18

束, 固定弧形闸门吊耳中心节点沿启闭机液压杆方向的位移。

工况 3 对应某一启闭机故障时弧形闸门故障瞬启状态, 假设此时仅 Z 负轴侧一台液压启闭机正常工作。作用荷载方面, 弧形闸门主体结构仍受到上游侧水推力、自身重力及运行载荷的作用, 荷载大小与方向与工况 1 和 2 中对应荷载相同。边界约束方面, 保持支铰轴心处约束条件不变, 无门叶与底槛接触部位节点的切向位移约束, 固定 Z 负轴侧弧形闸门吊耳中心节点沿启闭机液压杆方向的位移。

采用 ANSYS 软件对以上三种工况条件下弧形闸门主体结构及各部件的变形受力情况进行三维有限元分析。为方便下文描述, 规定门叶的面板迎水面为正面, 则顺流向右侧指向整体坐标 Z 轴负方向。

2 弧形闸门主体结构三维有限元分析

2.1 弧形闸门主体结构响应分析

图 3 展现了前述三种工况下弧形闸门主体结构 X 轴方向位移 U_x (即径向位移) 和 Y 轴方向位移 U_y (即切向位移) 的分布情况。可以看出: 当弧形闸门闭门时(工况 1 条件), U_x 和 U_y 整体关于 XOY 平面呈对称分布, 由于远离支铰, 受支臂变形影响, 门叶整体 U_x 均大于 4.96 mm。门叶内 U_x 分布表现出跨中大于端部、上部大于下部的规律, U_x 最大值 22.43 mm, 出现在门叶顶部跨中位置。弧形闸门主体结构 U_y 量值小且分布差异不大, U_y 最大值 4.85 mm, 出现在门叶顶部面板的次梁网格中心部位。门叶 U_x 明显大于 U_y , 说明工况 1 条件下水平水推力占主导作用; 当弧形闸门正常瞬启时(工况 2 条件), 由于两台启闭机均正常工作, 问题仍为轴对称问题, 故 U_x 和 U_y 整体分布的对称性未发生改变。门叶下部跨中周围 U_x 明显增大, 最大值达到了 19.45 mm, 然而门叶顶部跨中周围 U_x 却出现小幅减小, 这是由于两侧吊耳中心位于下部主横梁上方, 启闭力作用点整体偏向门叶底部, 弧形闸门主体结构产生了变形, 这一点通过下支臂前端 U_x 增大、上支臂前端 U_x 减小的变形特征可以直观验证。同样的, 在启闭力影响下, 门叶 U_y 对比工况 1 显著增长, 变化后位移值整体大于 10.55 mm, U_y 最大值 16.14 mm, 出现位置未变。支臂框架同样产生了较大的竖向变形, 支臂前端也大于 10.55 mm, 支臂后端几乎无 U_y 产生, 支臂框架变形特征是导致门叶 U_y 增长的主要原因; 当左侧启闭机故障时弧形闸门瞬启时(工况 3 条件), 此时仅右侧启闭机正常工作, 问题不再为对称问题, U_x 和 U_y 整

体也表现出非对称的分布特点。在右侧启闭力作用下, 对比工况 2 可以发现门叶内启闭力作用侧 U_x 进一步增大, 最大值增大到了 24.75 mm, 出现在门叶下部右侧端部位置, 同时右侧中、下支臂 U_x 也小幅增长。弧形闸门主体结构 U_y 则表现出不一样的变化规律, U_y 整体相比工况 2 增大, 但左侧门叶与支臂 U_y 增长量更大, 导致左侧弧形闸门主体结构的 U_y 更大, 最大值为 24.34 mm, 出现在门叶左上角附近位置。

接下来, 分析不同工况时弧形闸门主体结构主应力的分布特点, 结果由图 4 给出, 可以看出: 工况 1 条件下, 第一主应力 S_1 、第三主应力 S_3 呈轴对称分布, 门叶面板部位内主应力分布区域差异性较大, 局部存在 S_1 和 S_3 的应力集中现象, 其中 S_1 在面板上部两端集中, S_3 则在面板跨中集中, 且集中区域与弧形闸门主、次梁位置相关性非常密切。具体而言, 面板的主、次梁连接部位附近 S_1 绝对值大(拉应力)且 S_3 绝对值小(压应力), 说明此处面板主要受拉, 主拉应力最大值达到 185.00 MPa。面板在主、次梁网格间 S_1 绝对值小且 S_3 绝对值大, 表明此处面板主要承压, 主压应力最大值达到 203.00 MPa。因此, 面板内拉压应力分布不均且集中区域网格化显著, 应注重选材和板厚以保证面板结构安全。支臂主应力分布比较单一, S_1 绝对值小且 S_3 绝对值大的特点表明支臂主要承受压力; 工况 2 条件下, S_1 和 S_3 主应力分布特点和规律与工况 1 基本一致, 在双侧启闭力作用下, S_1 最大值有所减小, 降为 175.00 MPa, S_3 最大值增长到 209.00 MPa; 工况 3 条件下, S_1 和 S_3 表现出非对称性, 在右侧吊耳启闭力作用下, S_1 最大值增长至 196.00 MPa, 出现在面板上部左侧端部, S_3 最大值增长至 264.00 MPa, 出现在面板右侧下支臂连接部位, 此时弧形闸门主体结构受力状态不佳, 结构强度设计方面建议重点关注工况 3。

Von Mises 应力是钢结构强度校核中一个重要的综合应力指标。图 5 给出了三种工况下弧形闸门主体结构 Mises 应力分布情况, 可以发现: 工况 1 和工况 2 的 Mises 应力分布基本一致, Mises 应力主要集中在面板上、中、下三道主横梁位置、支臂前端及支铰周围区域。工况 1 Mises 应力最大值为 195.00 MPa, 出现在面板的下主横梁左右支臂作用部位, 工况 2 Mises 应力最大值为 202.00 MPa, 出现在中主横梁左右支臂连接处, 工况 3 Mises 应力最大值为 214.00 MPa, 出现在面板的下主横梁右侧支臂作用部位, 向右发生了偏移, 体现出单侧启闭力引起的

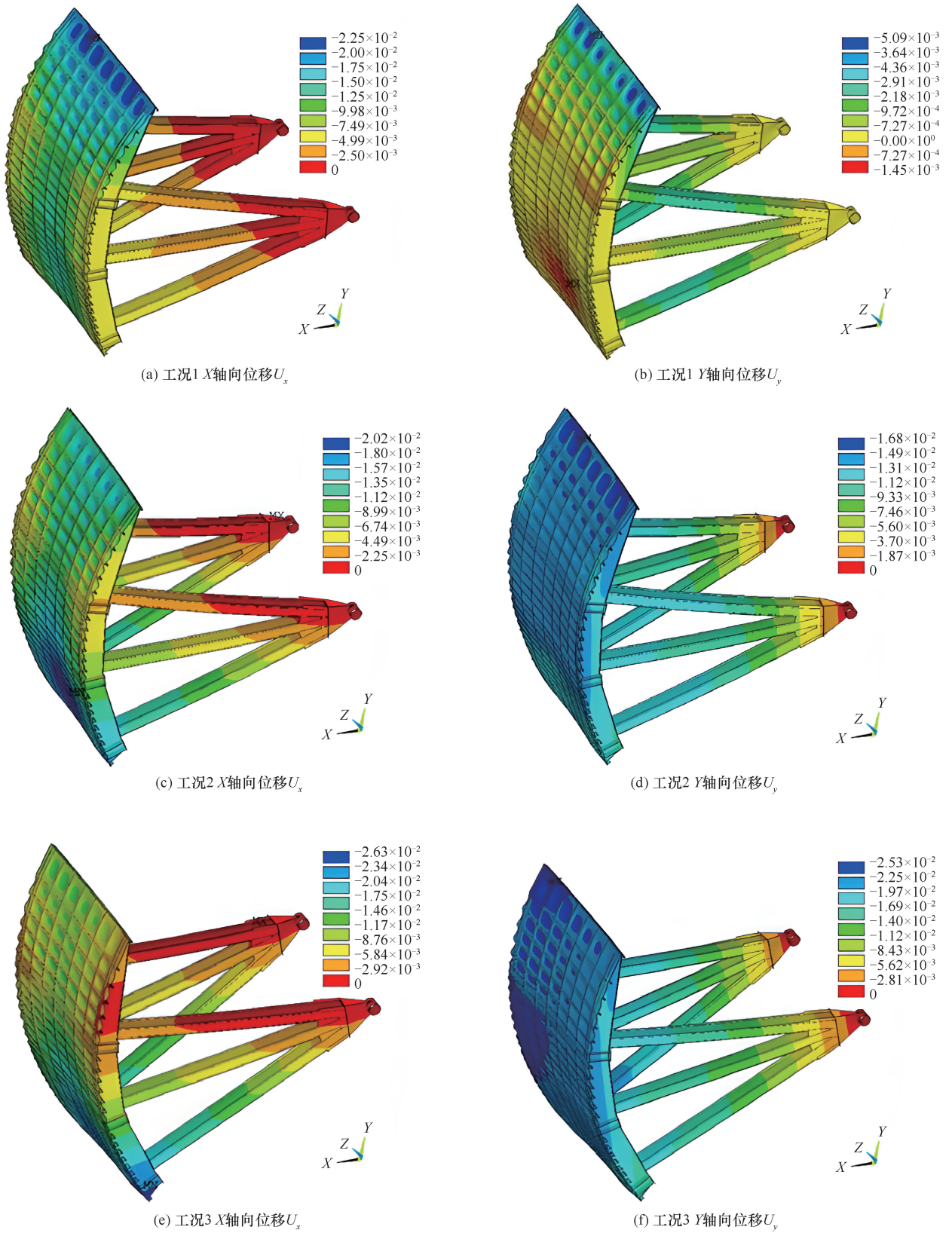


图3 三种工况下弧形闸门主体结构位移分布情况(单位: m)

Fig.3 Displacement distribution of the main structure of the radial gate under three working cases (Unit: m)

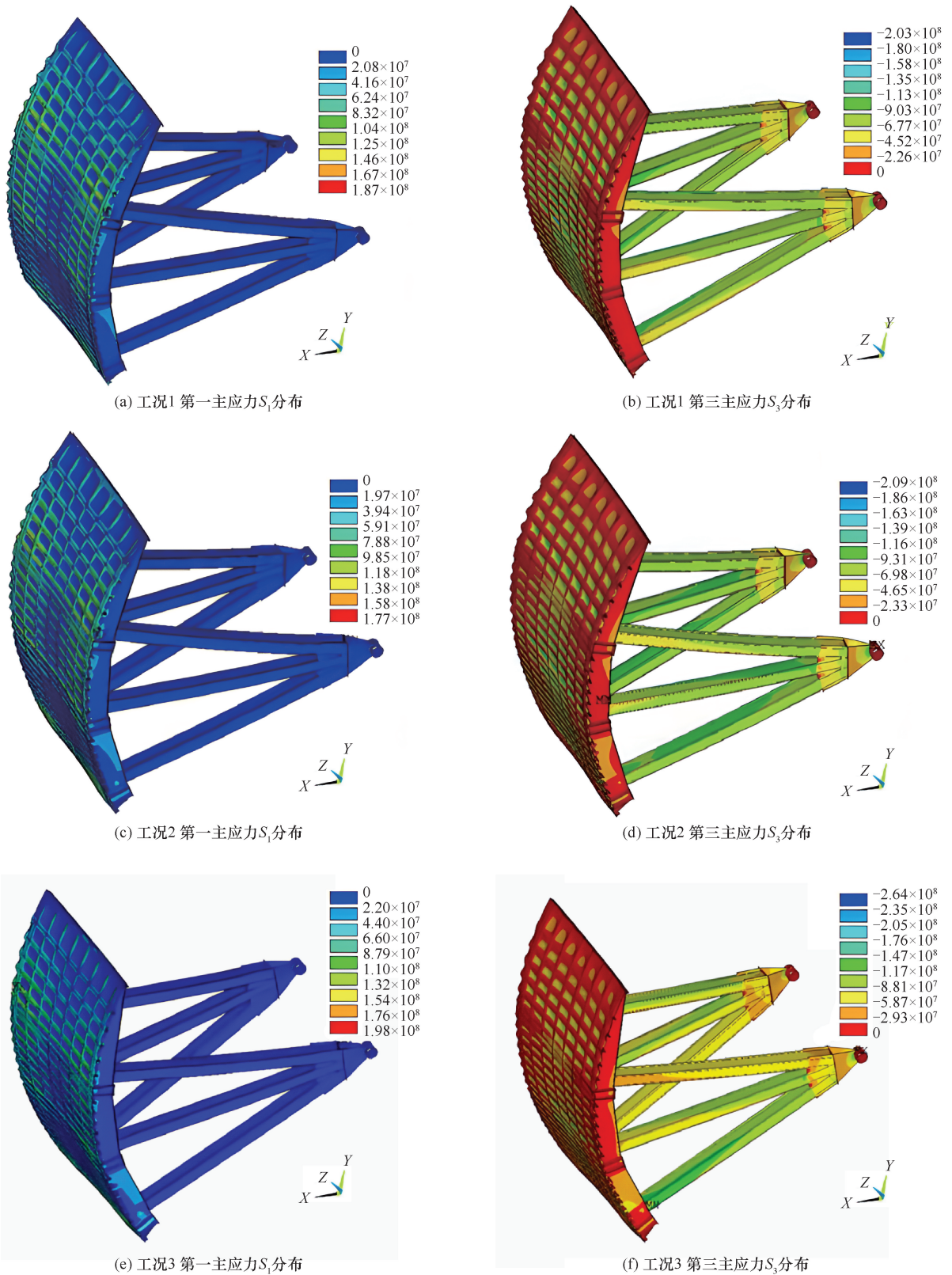


图4 三种工况下弧形闸门主体结构主应力分布情况(单位: Pa)

Fig. 4 Distribution of principal stress in the main structure of the radial gate under three working cases (Unit: Pa)

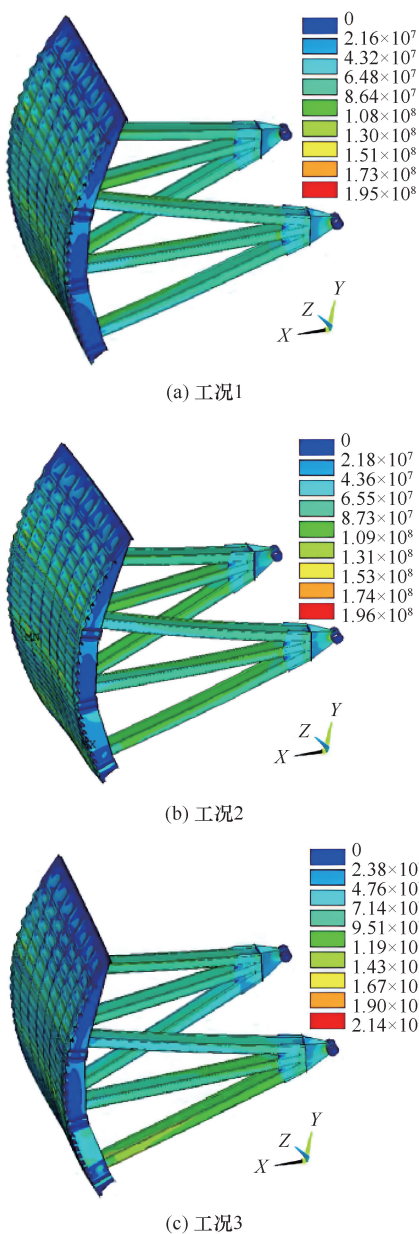


图5 三种工况下弧形闸门主体结构 Mises 应力分布情况(单位: Pa)

Fig. 5 Mises stress distribution of the main structure of the radial gate under three working cases (Unit: Pa)

非对称性。对于面板 $Q345B/t \leq 16$ mm 钢材来说, 三种工况 Mises 应力均小于材料。

考虑到部件选材的不同, 结构强度分析需具体结合部件的材料属性及受力情况, 将在 2.2 节中具体分析。

2.2 弧形闸门主要部件安全性分析

2.1 节分析了三种工况条件下弧形闸门主体结构整体受力变形分布特点及变化规律, 主要规律对各部件同样适用。本节将在弧形闸门主体结构响应分析的基础上, 进一步针对弧形闸门面板、主横梁、水平次梁、垂直次梁及支臂等主要部件, 按照前文办法重点开展部件的强度及刚度校核。首先, 在表 1 基础上进一步补充各材料的容许弯曲应力和容许剪切应力值, 以满足强度校核需要, 具体如下表 2 所列。

接下来, 分析三种工况条件下弧形闸门各部件剪切应力和 Mises 应力计算结果并汇总, 得各部件最大剪应力和最大 Mises 应力情况, 同时给出最大值出现位置, 据此分析各部件强度安全性。计算结果如表 3 所列, 可知: 门叶面板部位作为薄板结构, 主要考虑拉压弯曲破坏。工况 1 和工况 2 面板 Mises 应力最大值均出现在面板的下主横梁左右支臂连接处附近, 最大值均在 195.00~196.00 MPa 范围内, 工况 2 稍大。工况 3 面板 Mises 应力最大值向启闭力作用点发生偏移, 出现在面板的下主横梁右侧支臂连接处, 最大值达到了 212.00 MPa, 明显大于工况 1 和工况 2, 作为全部工况面板最大 Mises 应力小于面板材料的容许弯曲应力 233.00 MPa, 面板满足强度安全要求。

工况 1 和工况 2 主横梁剪应力最大值处于 69.00 MPa 左右, 工况 1 稍大, 出现位置均为下主横梁左右支臂连接处。同时, 主横梁 Mises 应力最大值处于 187.60~203.00 MPa 范围, 工况 2 偏大, 均出现在中主横梁左右支臂连接处。工况 3 右侧吊耳启闭力作用下, 主横梁剪应力最大值增长至 101.00 MPa,

表 2 各部件材料容许应力值

Table 2 Allowable stress values for each component material

部件名称	材 料	屈服应力 f_y /MPa	容许弯曲应力 σ /MPa	容许剪切应力 τ /MPa
弧形闸门面板	Q345B/ $t \leq 16$ mm	345.00	233.00	139.00
主横梁/吊耳板	Q345B/ $16 \text{ mm} < t \leq 40$ mm	325.00	219.00	131.00
支臂框架	Q345B/ $t \leq 16$ mm	345.00	233.00	139.00
垂直次梁	Q345B/ $t \leq 16$ mm	345.00	233.00	139.00
水平次梁	Q235B/ $t \leq 16$ mm	235.00	158.00	95.00
支铰轴底座钢板	ZG310—570	310.00	209.00	125.00
支铰轴销钉	40Cr	440.00	297.00	178.00

注: 1. 根据《水利水电工程钢闸门设计规范》(SL74—2013)^[27] 条文说明第 5 章中相关规定, 容许弯曲应力安全系数取 1.48, 容许剪切应力取 0.6 倍容许弯曲应力; 2. 本表中各容许应力计算结果向下取整。

表3 各部件最大剪应力及 Mises 应力情况

Table 3 Maximum shear stress and Mises stress of each component

部件名称	工况条件	最大剪应力 τ_{\max}/MPa	最大剪应力位置	最大 Mises 应力 $\sigma_{e\max}/\text{MPa}$	Mises 应力集中主要部位
弧形闸门面板	工况 1	—	—	195.00	面板下主横梁左右支臂连接处
	工况 2	—	—	196.00	面板下主横梁左右支臂连接处
	工况 3	—	—	212.00	面板下主横梁右侧支臂连接处
主横梁	工况 1	69.60	下主横梁左右支臂连接处	187.60	中主横梁左右支臂连接处
	工况 2	69.10	下主横梁左右支臂连接处	202.00	中主横梁左右支臂连接处
	工况 3	101.00	下主横梁右侧支臂连接处	214.00	下主横梁右侧支臂连接处
支臂	工况 1	63.10	左右下支臂前端	169.00	左右中支臂前端
	工况 2	61.00	左右下支臂前端	180.00	左右中支臂前端
	工况 3	87.90	右侧下支臂前端	213.00	右侧下支臂前端
垂直次梁	工况 1	70.00	垂直次梁左右上支臂连接处	132.00	垂直次梁左右上支臂连接处
	工况 2	70.60	垂直次梁左右上支臂连接处	135.00	垂直次梁左右上支臂连接处
	工况 3	76.10	垂直次梁左侧上支臂连接处	214.00	垂直次梁右侧下支臂连接处
水平次梁	工况 1	23.80	—	122.00	左右上支臂前端附近水平次梁
	工况 2	21.80	—	125.00	左右中支臂前端附近水平次梁
	工况 3	25.40	—	130.00	左侧上支臂前端附近水平次梁

较工况 2 的增长幅度达 46.16%，出现位置右移至下主横梁右侧支臂连接处。主横梁 Mises 应力最大值达到 214.00 MPa，出现在下主横梁右侧支臂连接处。主横梁最大剪应力和最大 Mises 应力均属于工况 3，最大剪应力小于主横梁材料容许剪切应力 131.00 MPa，最大 Mises 应力小于主横梁材料容许弯曲应力 219.00 MPa，主横梁通过弯曲和剪切的联合强度校核。需要指出的是下主横梁右侧支臂连接处的最大 Mises 应力 214.00 MPa 已非常接近容许弯曲应力，设计满足强度需求，但施工中应强调该位置处施工质量的保障。

支臂最大剪应力和最大 Mises 应力分别为 87.90 MPa 和 213.00 MPa，均属于工况 3 条件，产生位置均位于右侧下支臂前端。支臂框架采用 Q345B/ $t \leq 16$ mm 材料，根据表 2 其容许剪应力取 139.00 MPa，容许弯曲应力取 233.00 MPa，因此，支臂结构满足强度要求。

对于垂直次梁，剪应力和 Mises 应力最不利工况均为工况 3，最大剪应力和最大 Mises 应力分别为 76.10 MPa 和 214.00 MPa，分别小于材料容许剪应力取 139.00 MPa，容许弯曲应力取 233.00 MPa，垂直次梁满足强度要求。值得注意的是，对比工况 1 和工况 2，工况 3 剪应力最大值增长幅度不大，在

8.70% 左右，但 Mises 应力最大值却大幅增长了 62.88%，说明垂直次梁 Mises 应力值对外载变化比较敏感。因此，当设计载荷发生变化时，特别强调要针对垂直次梁右侧下支臂连接处的 Mises 应力进行复核，避免因荷载增大引起此处最大 Mises 应力超限情况发生。

水平次梁受力的最不利工况为工况 3。全部工况的剪应力最大值均不超过 30.00 MPa，远小于材料容许剪应力 95.00 MPa，剪切破坏安全度比较高。此外，各工况 Mises 应力最大值变化不大，最大 Mises 应力为 130.00 MPa，出现在左侧上支臂前端附近水平次梁处，小于材料容许弯曲应力 158.00 MPa。因此，水平次梁满足强度要求。

最后，总结计算结果得各工况条件下同一主横梁、垂直次梁和水平次梁的结构挠度 w 及其位移 U_x 最值情况，如表 4 所列。

对于主横梁，随着工况的改变，上、中、下三个主横梁 w 表现出复杂的变化规律，在工况 1 水推力主导作用下，结构整体受力比较均匀，三个主横梁 w 相当，均在 5.50~7.00 mm 之间，中主横梁 w 稍大为 6.92 mm。随着吊耳处启闭力作用来到工况 2 条件，下主横梁 U_x 显著增大但 w 却由工况 1 时的 6.36 mm 大幅减小为 1.98 mm，与此同时，上、中主横梁 w

表4 同一部件结构挠度 w 及其位移 U_x 最大值情况Table 4 The maximum deflection w and displacement U_x of the same component structure

部件名称	工况	U_x 最大值/mm	最大 U_x 位置	U_x 最小值/mm	最小 U_x 位置	结构挠度 w /mm	
主横梁	上	工况 1	11.11	跨中	5.61	两端支臂支承	5.50
		工况 2	9.18	跨中	3.40	两端支臂支承	5.78
		工况 3	8.04	跨中偏右	1.22	左侧支臂支承	6.82
	中	工况 1	12.30	跨中	5.38	两端支臂支承	6.92
		工况 2	14.12	跨中	7.42	两端支臂支承	6.70
		工况 3	15.26	跨中偏右	7.71	左侧支臂支承	7.55
	下	工况 1	12.54	跨中	6.18	两端支臂支承	6.36
		工况 2	17.04	跨中	15.06	两端支臂支承	1.98
		工况 3	22.49	右侧支臂支承	13.03	左侧支臂支承	9.46
垂直次梁	工况 1	19.42	右 2、7 次梁顶部	6.10	上主横梁支承	13.22	
	工况 2	17.23	右 4、5 次梁底部	8.34	上主横梁支承	8.89	
	工况 3	22.69	右 1 次梁底部	8.58	中主横梁支承	14.11	
水平次梁	工况 1	14.79	底部次梁跨中	6.03	两端垂直次梁支承	8.76	
	工况 2	11.40	中部次梁跨中	5.20	两端垂直次梁支承	6.20	
	工况 3	21.30	底部次梁右端	12.10	左端垂直次梁支承	9.20	

注: 1. 常规工况下 U_x 计算结果均指向弧形闸门支铰轴, U_x 方向相同, 故表中仅取 U_x 的模长。2. 水平次梁数量众多, 表中仅给出结构挠度 w 最大的水平次梁变形和位移数据。

变化不大, 最大 w 仍出现在中主横梁上取 6.70 mm。在工况 3 右侧吊耳启闭力作用下, 三个主横梁 U_x 都表现出非对称的特点, w 增大且均大于工况 1 和工况 2, 其中下主横梁 U_x 非对称性尤其显著, 其 w 取 9.46 mm 为主横梁挠度最大值, 该值小于弧形闸门结构挠度限值 16.33 mm, 因此, 主横梁满足刚度要求。

对于垂直次梁, 工况 1 条件下, 最大 w 为 13.22 mm, 出现在右侧第 2 和第 7 垂直次梁上, 恰好位于左右两侧支臂前端的中心断面内, 此处支臂和上主横梁的联合支撑作用强, 垂直次梁支承点 U_x 最小, 是造成垂直次梁 w 偏大的主要原因。工况 2 时, 两侧吊耳处对称启闭力作用导致垂直次梁最大 w 出现位置变为第 4 和第 5 垂直次梁, 位于弧形闸门中心位置, w 最大值也减小为 8.89 mm。条件来到工况 3, 右侧吊耳非对称启闭力作用造成右侧第 1 垂直次梁的 w 最大, 最大 w 达到了 14.11 mm。综合来看, 各工况下垂直次梁最大 w 满足弧形闸门结构挠度限值要求, 垂直次梁刚度检核通过。需要指出 14.11 mm 已比较接近 16.33 mm 限值, 施工时要保证右侧第 1 垂直次梁安装质量, 同时运行期间应重点监测其运行响应, 以保证垂直次梁刚度满足要求。

水平次梁挠度 w 最不利工况为工况 3, 对应最大

w 值为 9.20 mm, 出现在底部的水平次梁, 小于弧形闸门结构挠度限值, 因此, 水平次梁满足刚度要求。

综上, 弧形闸门主体结构主要部件均满足刚度要求。

2.3 弧形闸门主体结构屈曲稳定分析

2.1 节中关于弧形闸门主体结构第一主应力 S_1 和第三主应力 S_3 的分析结果表明三种工况下弧形闸门支臂结构均为承压构件, 为保证弧形闸门主体结构安全, 还需针对支臂结构开展稳定性分析研究。本研究采用 ANSYS 弹性特征值屈曲分析算法给出了如图 6 所示的支臂结构前三阶模态的变形结果。图中 FREQ 为自定义屈曲荷载系数, 即屈曲安全系数。结果显示: 第一阶模态的屈曲安全系数为 1.53, 该模态对应支臂结构的平面外稳定性。第二和第三阶模态则对应支臂结构的平面内稳定性, 两个模态的屈曲安全系数均为 8.57。因此, 承压支臂结构的平面内稳定性和平面外稳定性均具有足够的安全冗余, 不会产生受压平面内和平面外的失稳。

3 弧形闸门固定装置设计安全性分析

除弧形闸门自身主体结构满足安全要求外, 针对吊耳、支铰轴等关键部位开展安全性分析也是支撑弧形闸门正常运行的关键。以下针对各关键部位设计模

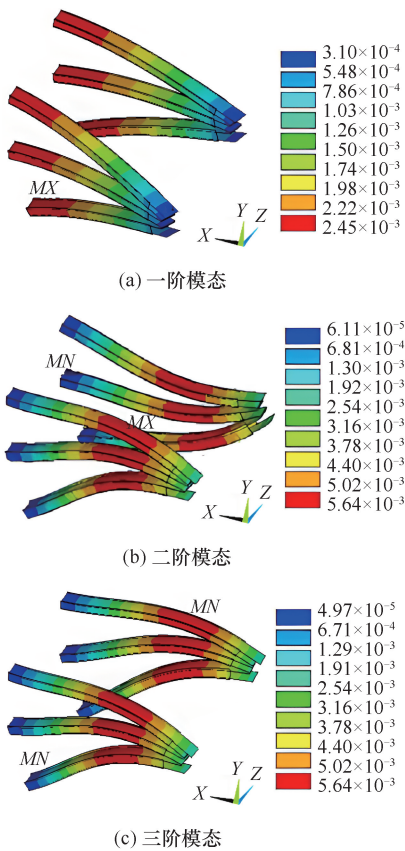


图6 支臂特征值屈曲分析结果

Fig. 6 Analysis results of buckling of arm Eigenvalues

型求解力学响应并进行安全性分析。

3.1 吊耳部位受力安全分析

弧形闸门单侧吊耳孔 A—A 剖面如图 7 所示。单侧吊耳孔采用小间距并列双孔布置, 单孔内直径 d_1 为 300.00 mm, 外直径 D_1 为 780.00 mm, 吊耳孔横截面半宽度 a_0 取 240.00 mm, 吊耳板厚 t_{s1} 为 30.00 mm, 轴承板厚 t_{s2} 为 70.00 mm。启闭力 P 按工况 3 中单台启闭机最大吊载 4 000.00 kN 的最不利条件考虑。依据德国工业标准 DIN 19704^[29] 第 7.3.3.1 条相关规定, 给出吊耳部位各力学响应主要计算过程及安全分析情况, 并汇总如表 5 所列, 从表中可以看出对于吊耳板及吊耳轴承板采用的 Q345B/16 mm< t ≤35 mm 材料来说, 吊耳板截面拉应

力和吊耳轴承板孔与轴销表面压应力均小于容许弯曲(拉压)应力 219.00 MPa, 因此, 最大吊载下吊耳部位结构满足强度安全要求。

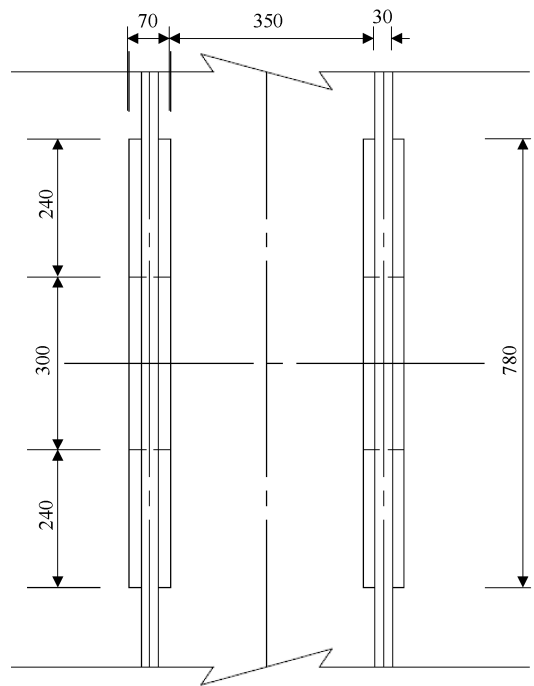


图7 吊耳孔 A—A 剖面(单位: mm)

Fig. 7 A—A sectional view of the lifting lug hole. (Unit: mm)

3.2 支铰轴部位受力安全分析

支铰轴是弧形闸门工作时整体旋转的核心部件, 承受水推力、弧形闸门自重及工作荷载的联合作用, 对弧形闸门工作安全至关重要。本研究从支铰轴底座混凝土抗压、支铰轴底座支撑板与支铰轴销钉表面受压、支铰轴销钉抗弯以及支铰轴底板抗弯四个主要方面综合分析支铰轴部件安全性, 并将各分析的核心过程汇总如表 6 所列。

首先, 结合数值分析结果获取表 6 中关键荷载。数值模拟结果显示弧形闸门最大开启状态时支铰轴支座反力和运行负载均小于最小开启状态, 其中瞬启状态支铰轴支座反力较大, 单个支铰轴所受合压力 S_T 为 16 221.11 kN, 方向与 X 负轴夹角 α_s 为 9.973°。

表 5 吊耳部位各响应计算及安全分析情况

Table 5 Response calculation and safety analysis of lifting ear parts

安全分析项目	响应计算公式	计算参数及取值	安全分析
吊耳板截面受拉分析	$\sigma_{T1} = \frac{P}{4a_0t_{s1}}$ ^[29]	$P = 4\ 000.00\ \text{kN}$ $a_0 = 240.00\ \text{mm}$ $t_{s1} = 30.00\ \text{mm}$	$\sigma_{T1} = 138.9\ \text{MPa}$ [σ] = 219.00 MPa 满足受拉安全要求
吊耳轴承板孔与轴销表面受压分析	$\sigma_{P1} = \frac{P}{2d_1t_{s2}}$ ^[29]	$d_1 = 300.00\ \text{mm}$ $t_{s2} = 70.00\ \text{mm}$	$\sigma_{P1} = 95.24\ \text{MPa}$ [σ] = 219.00 MPa 满足局部受压安全要求

表 6 支铰轴部位各响应计算及安全分析情况

Table 6 Response calculation and safety analysis of various hinge shaft parts

安全分析项目	相关计算公式	计算参数及取值	安全分析
支铰轴底座混凝土受压分析	$\sigma_h = \frac{P_S}{b_R l_R} + \frac{6P_H e_h}{b_R l_R^2}$ $\sigma_R = \frac{\beta_R}{2.1}$ (无负载扩散效应)	$P_S = 16\ 180.60\ \text{kN}$ $P_H = 1\ 145.70\ \text{kN}$ $b_R = 1\ 500.00\ \text{mm}$ $l_R = 1\ 800.00\ \text{mm}$ $e_h = 900.00\ \text{mm}$ $\beta_R = 23.00\ \text{MPa}$	$\sigma_h = 7.27\ \text{MPa}$ $\sigma_r = 10.95\ \text{MPa}$ 满足受压安全要求
支铰轴底座支撑板与支铰轴销钉表面受压分析	$\sigma_{p2} = \frac{S_T}{2d_2 t_{\min}} \quad [29]$	$S_T = 16\ 221.11\ \text{kN}$ $d_2 = 600.00\ \text{mm}$ $t_{\min} = 160.00\ \text{mm}$	$\sigma_{p2} = 84.48\ \text{MPa}$ $[\sigma] = 209.00\ \text{MPa}$ 满足局部受压安全要求
支铰轴销钉弯剪分析	$\sigma = \frac{32M}{\pi d_2^3}$ $\tau = \frac{16Q}{3\pi d_2^2}$ $\sigma_{Mises} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$	$M = 2\ 007.36\ \text{kN} \cdot \text{m}$ $Q = 8\ 110.55\ \text{kN}$	$\sigma_{Mises} = 115.60\ \text{MPa}$ $[\sigma] = 297.00\ \text{MPa}$ $\tau = 38.27\ \text{MPa}$ $[\tau] = 178.00\ \text{MPa}$ 满足弯剪安全要求
支铰轴底座钢板抗弯分析	$\sigma_1 = \frac{k_1 \sigma_h b_1^2 [29]}{100 t_{s3}^2}$	$a_1 = 1\ 190.00\ \text{mm}$ $b_1 = 680.00\ \text{mm}$ $a_2 = 680.00\ \text{mm}$ $b_2 = 215.00\ \text{mm}$ $k_1 = 32.44$ $k_2 = 73.90$ $t_{s3} = 200.00\ \text{mm}$	$\sigma_1 = 27.26\ \text{MPa}$ $\sigma_2 = 6.21\ \text{MPa}$ $[\sigma] = 209.00\ \text{MPa}$ 满足抗弯安全要求

注: 1. 主要计算参数仅在表中首次出现给出; 2. β_R 表示混凝土的设计抗压强度; 3. k_1 和 k_2 为板弯曲应力计算公式中的无量纲参数, 根据校核平面长宽比 a/b 按德国工业设计标准 DIN 19704 第 6.5.2.2 条的表 2 选取。

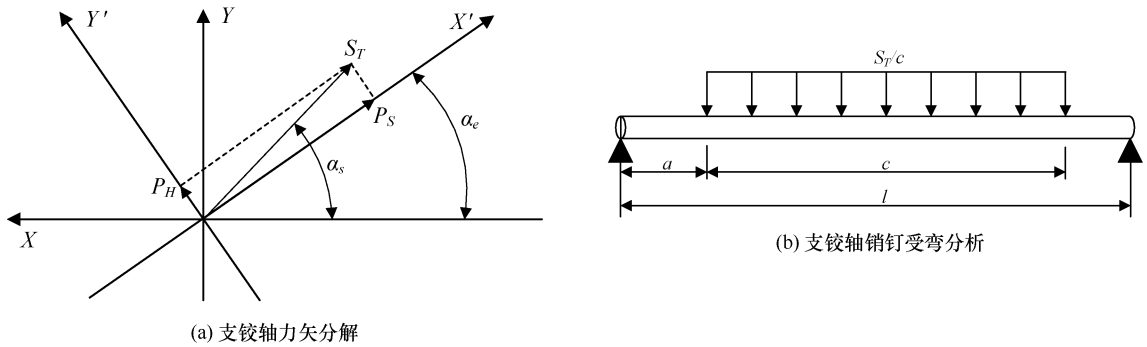


图 8 力学分析模型

Fig. 8 Mechanical analysis models

设计资料显示支铰轴支撑梁中心线与 X 负轴夹角 $\alpha_e = 5.9228^\circ$ 。建立如图 8(a) 所示支铰轴力矢分解模型, 可得支铰轴支座法向力 P_S 和切向力 P_H 如下

$$\begin{cases} P_S = S_T \cos(\alpha_s - \alpha_e) = 16\ 180.60\ \text{kN} \\ P_H = S_T \sin(\alpha_s - \alpha_e) = 1\ 145.70\ \text{kN} \end{cases} \quad (1)$$

支铰轴销钉受弯力学分析模型见图 8(b), 其中销钉跨中对称作用均布压载, 范围长度 c 为 $450.00\ \text{mm}$, 荷载集度 S_T/c , 销钉长度 l 为 $720.00\ \text{mm}$ 。

根据结构力学原理, 销钉跨中最大弯矩 M 和剪力 Q 通过下式计算

$$\begin{cases} M = \frac{S_T(2l - c)}{8} = 2\ 007.36\ \text{kN} \cdot \text{m} \\ Q = S_T/2 = 8\ 110.55\ \text{kN} \end{cases} \quad (2)$$

支铰轴和支座底板几何模型在 9 中给出。校核计算结果如表 6 所列, 从表 6 中可以看出, 依据德国工业标准 DIN 1045 第 16.3.3 条的规定, 支铰轴支座在

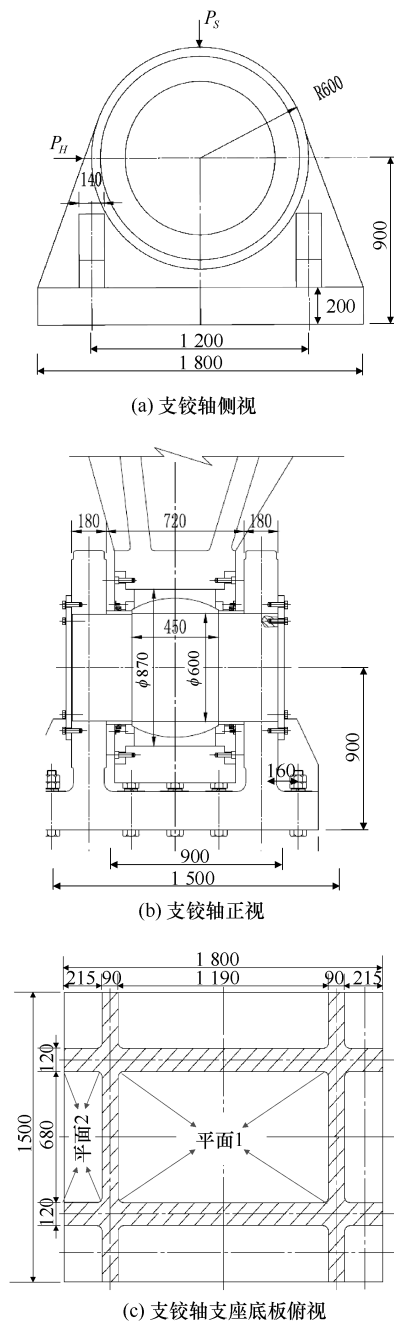


图9 支铰轴及支座底板几何模型(单位: mm)
Fig. 9 Geometric model of hinge shaft and support base plate (Unit: mm)

法向荷载 P_s 和切向荷载 P_H 作用下, 支铰轴底座混凝土最大压应力 σ_h 为 7.27 MPa, 小于混凝土允许压应力 10.95 MPa, 支铰轴底座混凝土满足受压安全要求。接下来, 对于支铰轴支撑板与支铰轴销钉表面受压分析, 同样采用德国工业标准 DIN 19704^[29] 第 7.3.3.1 条的规定, 给出支铰轴支撑板与支铰轴销钉表面间压应力 σ_{p2} 为 84.48 MPa, 由于支铰轴底座钢板采用 ZG310—570 钢材, 小于材料的容许弯曲(拉

压)应力 $[\sigma]$ (209.00 MPa), 故支铰轴支撑板满足局部受压安全要求。然后, 对于支铰轴销钉的弯剪安全分析, 支铰轴销钉采用 40Cr 钢材, 支铰轴销钉抗弯分析结果表明销钉最大 Mises 应力 σ_{Mises} 和最大剪应力 τ 分别为 115.60 MPa 和 38.27 MPa, 均小于销钉材料容许弯曲应力 297.00 MPa 和容许剪切应力 178.00 MPa, 因此, 销钉通过弯曲和剪切的联合强度校核, 满足安全要求。最后, 对于支铰轴底板抗弯分析, 图 9(c) 给出了支铰轴支座底板俯视图, 并选取平面 1 和平面 2 进行底板抗弯安全分析, 依据德国工业标准 DIN 19704^[29] 第 6.5.2.2 条的规定, 给出平面 1 和平面 2 内底板最大弯曲应力分别为 27.26 MPa 和 6.21 MPa, 均远小于支铰轴底座钢板材料的容许弯曲应力 209.00 MPa, 因此, 支铰轴底座钢板具有较高的安全冗余度。综上可知, 支铰轴部件综合受力安全性满足要求。

4 案例对比分析

为进一步说明本文大型弧形闸门三维有限元分析的合理性, 本节主要调研了国内部分水电站工程弧形闸门工程案例及研究案例, 对弧形闸门结构形式、尺寸以及结构主要响应规律等情况进行了归纳汇总, 如表 7 所列。

考虑到弧形闸门结构应力及变形数值与结构的尺寸和材料密切相关, 因此主要对比结构响应的分布规律及工况变化的影响, 结构应力和位移值仅作为参考。从表 7 给出的案例对比情况可以看出: 本研究中弧形闸门采用三主横梁三斜支臂式, 结构跨度 15 m 为全部案例工程中跨度最大, 高度 19.9 m 也处于中高水平, 弧形闸门本身具有结构形式复杂和结构规模大的特点。本文揭示了弧形闸门闭门状态额定蓄水工况条件下的结构应力集中区主要分布在中主横梁及下主横梁与支臂连接部位附近、支臂支铰部位附近, 这种应力集中分布现象与其他案例结果是保持一致的。案例 2、3 和 4 这三个案例中弧形闸门的尺寸与本研究相近, 受水荷载条件也基本相同, 说明案例 2、3 和 4 中弧形闸门结构响应对本文弧形闸门具有一定的参考意义。案例 2 额定蓄水工况和瞬时启动工况结构中高应力区和应力集中部位与本文较为吻合, 最大应力分别为 173 MPa 和 184 MPa, 最大应力量级和出现位置与本文结果也基本接近。案例 3 中额定蓄水工况下结构最大变形出现的位置和本文相同, 最大变形 15.1 mm, 与本文 20 mm 左右差别不大, 主横梁最大变形 10.8 mm, 与本文 12.54 mm 也比较接近。

表7 本文工程与国内部分水电站弧形闸门工程案例对比情况

Table 7 Comparison between this project and some domestic hydropower station radial gates

序号	案例名称	结构尺寸及结构形式	研究手段	结构响应主要规律
1	本文露顶式弧形闸门	15.0 m×19.9 m 三主横梁三斜支臂式	数值模拟	结构位移方面, 额定蓄水工况下, 闸门位移总体表现出“跨中大端部小”、竖向“上部大下部小”的分布规律, 主要以顺流向位移为主, 最大顺流向位移和竖向位移均位于面板顶部中间, 分别为-22.43 mm和-4.96 mm。瞬时启动工况下, 启闭力作用导致下部跨中区域顺流向位移显著增大, 最大位移出现在面板底部中间。故障瞬启工况下, 启闭力作用侧顺流向位移进一步增大, 故障侧竖向位移显著增大, 位移表现出显著的非对称性。故障瞬启工况位移最大 结构应力方面, 额定蓄水工况下, 门叶中下部区域应力值普遍偏大, 其中中主横梁及下主横梁与支臂连接部位附近出现显著应力集中区, 最大应力达195 MPa, 面表现网格状拉压分区复杂受力。支臂以承压为主, 压应力集中区域主要位于支臂与主横梁连接部位以及支铰附近。瞬时启动工况下, 最大应力小幅增长, 应力分布规律变化不大。故障瞬启工况下, 最大应力增长至214 MPa, 出现在启闭力作用侧下主横梁与下支臂连接部位附近, 应力分布表现出非对称性。故障瞬启工况应力最大
2	省南渡江迈湾水利枢纽露顶式弧形闸门 ^[20]	13 m×24.5 m 三主横梁三斜支臂式	数值模拟	额定蓄水工况下, 中高应力区主要分布在门叶中下部及支臂处, 并在中、下主横梁与支臂连接部位附近以及支臂支铰部位附近出现应力集中现象, 最大应力达173 MPa, 位于中主横梁与支臂连接部位附近。瞬时启动工况下, 中高应力区和应力集中部位基本保持不变, 最大应力增长至184 MPa, 位置变为下主横梁与支臂连接部位附近
3	里底水电站露顶式弧形闸门 ^[30]	14.0 m×23.2 m 三主横梁三斜支臂式	数值模拟	额定蓄水工况, 闸门最大变形15.1 mm, 位于面板顶部中间。主梁最大变形10.8 mm。结构最大应力155 MPa, 位于下主横梁下部面板处
4	蜀河水电站露顶式弧形闸门 ^[14]	13 m×24.3 m 三主横梁三斜支臂式	原型测试	额定蓄水工况下, 闸门顺流向最大位移14.1 mm, 位于主横梁和中主纵梁上, 竖向最大位移-4.4 mm, 位于面板上。最大静压力值-114.56 MPa, 位于中支臂与主横梁连接的第一梁格中
5	浩口水电站露顶式弧形闸门 ^[31]	13 m×22.2 m 三主横梁三斜支臂式	数值模拟	额定蓄水工况下, 闭门和瞬启工况下弧形闸门门叶应力分布规律相似, 闭门工况最大Mises应力为118 MPa, 瞬启工况最大Mises应力增长至135 MPa, 均出现在下主横梁与支臂连接部位附近; 对于支臂结构, 闭门工况最大Mises应力为269 MPa, 瞬启工况最大Mises应力为318 MPa, 出现位置均在支铰附近及与主横梁连接部位附近
6	某黄河沿岸水库露顶式弧形闸门 ^[32]	12 m×8.4 m 双主横梁双支臂式	数值模拟	额定蓄水工况下, 最大应力区主要分布在面板中部、主横梁与支臂连接部位, 其中主横梁与支臂连接部位存在较显著的应力集中, 最大应力达147.6 MPa。支臂主要承受压应力, 压应力在支臂与主横梁连接部位以及支铰部位应力值偏大
7	某水电站露顶式弧形闸门 ^[33]	8 m×28.3 m 三主横梁三斜支臂式	数值模拟	额定蓄水工况下, 最大应力区域位于面板主横梁和纵梁结合接头附近, 应力分布规律表现为闸门底向闸门顶逐渐减小。最大应力位于闸门下主横梁部位, 最大值达142.19 MPa
8	某水电站潜没式弧形闸门 ^[34]	13 m×16 m 双主横梁双斜支臂式	原型测试	额定蓄水工况, 上支臂测点静压力均在-90 MPa, 最大静压力-95 MPa, 位于与主横梁连接的第一梁格中; 面板最大静压力-80 MPa, 位于下主横梁中部面板; 主横梁最大静压力-78 MPa, 位于下主横梁中部近面板腹板; 支臂应力水平较高, 上支臂应力高于下支臂应力, 受下游回水反向荷载作用机理导致
9	露顶式弧形闸门 ^[35]	10 m×4.8 m 主纵梁双支臂式	数值模拟	额定蓄水工况, 高应力区主要分布在门叶中下部横梁和纵梁交接部位、支臂与纵梁连接部位附近, 结构最大应力达199 MPa, 出现在与主总梁连接的下支臂处。相应主纵梁最大应力达183 MPa

案例4中额定蓄水工况下闸门顺流向最大位移14.1 mm, 位于主横梁和中主纵梁上, 本文主横梁最大位移12.54 mm, 位于下主横梁跨中, 两者在最大位移量级和出现位置方面是吻合的。以上与各案例的对比分析说明了本文三维有限元模型和模拟是合理的, 能有效用来计算和分析本文大型弧形闸门结构响应。

此外, 还可以发现, 与其他案例相比(案例2、5考虑了瞬时启动工况), 本文不仅系统分析了闭门状态额定蓄水和瞬时启动工况下的弧形闸门结构响应规

律, 还给出了故障瞬启工况的模拟过程和结构相应分析结果, 揭示了启闭力作用下结构响应的变化规律, 并综合三种典型工况响应研究确定了故障瞬启工况是弧形闸门的最不利工况。因此, 本文三维模型和仿真过程更能有力支撑下凯富峡水电站大型弧形闸门结构的安全、可靠设计。

5 结论

本研究针对下凯富峡大型弧形钢闸门设计结构, 采用数值模拟方法研究了不同典型运行工况下弧形闸

门主体结构位移和应力分布规律及其受工况变化的影响机制,并结合国内外相关标准对弧形闸门主体结构和固定装置在强度、刚度及稳定性方面进行综合安全分析。主要结论如下。

(1)位移响应方面:闸门闭合时,径向位移在横向上表现为“跨中大端部小”,竖向上为“上部大下部小”,水推力作用显著;瞬间开启时,下部跨中区域径向位移显著增加,竖向呈现“下部大上部小”新规律,切向位移整体增大,门叶下部对称启闭力作用效果十分显著;故障瞬启时,径向和切向位移呈现显著非对称性,正常侧径向位移偏大,故障侧切向位移偏大。最大位移出现在此工况,对弧形闸门变形安全威胁最大。

(2)应力响应方面:门叶面板应力分布复杂,其拉压应力分布呈现出与弧形闸门主、次梁位置密切相关的网格化特征,拉应力集中在上部两端,压应力集中在跨中。支臂应力状态表现出单一承压特征,应重点关注稳定性。故障瞬启时,拉压应力分布呈现非对称性,均出现较大幅度增长,出现位置分别位于故障侧上部和正常侧下部附近。最大 Mises 应力出现在启闭力作用侧下支臂与门叶固接部位周围,因此,故障瞬启工况对弧形闸门强度安全威胁最大。

(3)安全分析方面:弧形闸门主体结构各部件及固定装置,包括吊耳和支铰轴,满足强度和刚度要求,且结构稳定性有足够冗余,故弧形闸门的结构设计是安全可靠的。

参考文献 (References):

[1] 王成刚. 密云水库弧形钢闸门安全性态的分析与评价[D]. 北京:清华大学,2017.
WANG C G. Miyun Reservoir Spillway Radial Steel Gate-Security State Analysis and Countermeasure [D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.

[2] 贾金生. 中国水利水电工程发展综述[J]. 工程(英文), 2016(3): 345-366.
JIA Jinsheng. A technical review of hydro-project development in China[J]. Engineering, 2016(3): 345-366.

[3] 刘细龙,陈福荣. 闸门与启闭设备[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.
LIU X L, CHEN F R. Gates and Hoists[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2003.

[4] 李火坤,练继建. 水工弧形闸门流激振动特性物模-数模联合预测与安全分析[J]. 水力发电学报, 2007, 26(3): 69-76.
LI H K, LIAN J J. Joint prediction and safety analysis of the flow-induced vibration of hydraulic radial gate using physical and numerical model[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(3): 69-76.

[5] 王正中,张雪才,刘计良. 大型水工钢闸门的研究进展及发展趋势[J]. 水力发电学报, 2017, 36(10): 1-18.
WANG Z Z, ZHANG X C, LIU J L. Advances and developing trends in research of large hydraulic steel gates[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(10): 1-18.

[6] 王正中,徐永前. 对四边固支矩形钢板弹塑性调整系数理论值的探讨[J]. 水力发电, 1989, 15(5): 39-43.

[7] 王正中,余小孔,王慧阳. 基于钢闸门设计规范屈服状态的面板弹塑性调整系数[J]. 水力发电学报, 2010, 29(5): 141-146.
WANG Z Z, YU X K, WANG H Y. Elastic-plastic adjusting coefficients of panel based on the yielding state in specification for design of steel gate[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(5): 141-146.

[8] 王正中,朱军祚,谌磊,等. 集中力作用下深梁弯剪耦合变形应力计算方法[J]. 工程力学, 2008, 25(4): 115-120.
WANG Zhengzhong, ZHU Junzuo, CHEN Lei, et al. The stress calculation method for deep beams with shear-bending coupling distortion under concentrated load [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(4): 115-120.

[9] 刘计良,王正中,陈立杰,等. 均布荷载作用下悬臂深梁应力计算方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(2): 316-320.
LIU J L, WANG Z Z, CHEN L J, et al. Stress calculation method for a cantilever deep beam subjected to a uniform load [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2010, 50(2): 316-320.

[10] 刘计良,冷畅俭,王正中. 弧门框架形式及其单位刚度比对主梁翘曲应力影响的研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29(4): 179-183.
LIU J L, LENG C J, WANG Z Z. Study on the effect of frame mode and unit rigidity ratio on warping stress of the main beam of radial gate [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(4): 179-183.

[11] 赵显慧,赵加祯. 中小柔度钢压杆稳定性设计的通用公式[J]. 力学与实践, 1996, 18(3): 68.
ZHAO Xianhui, ZHAO Jiazhen. General formula for stability design of steel compression members with medium and small flexibility[J]. Mechanics and Practice, 1996, 18(3): 68.

[12] ISHII N, NAUDASCHER E. A design criterion for dynamic stability of Tainter gates[J]. Journal of Fluids and Structures, 1992, 6(1): 67-84.

[13] 王延召,田甜,徐国宾,等. 弧形闸门面板水压力计算方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(4): 102-107.
WANG Yanzhao, TIAN Tian, XU Guobin, et al. Calculation method of panel hydrodynamic pressure of radial gate [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(4): 102-107.

[14] 胡木生,杨志泽,张兵,等. 蜀河水电站弧形闸门原型观测试验研究[J]. 水力发电学报, 2016, 35(2): 90-100.
HU M S, YANG Z Z, ZHANG B, et al. Study on prototype experiment of radial gates at Shuhe Hydropower Station[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(2): 90-100.

- [15] PREDIN A, KLASINC R. Emergency gate vibration of the pipe-turbine model[J]. Shock and Vibration, 2000, 7(1): 3-13.
- [16] 蒲楠楠, 柯亚唯. 原型观测试验在泄洪闸门振动特性分析中的应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2022, 20(3): 46-52.
- PU N N, KE Y W. Application of prototype observation test in the vibration characteristic analysis of outlet gate[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2022, 20(3): 46-52.
- [17] 韩林山, 刘国龙, 上官宗光, 等. 锈蚀后深孔弧形钢闸门安全评估及寿命预测[J]. 水利规划与设计, 2023(1): 82-85, 95.
- HAN Linshan, LIU Guolong, SHANGGUAN Zongguang, et al. Safety assessment and life prediction of deep hole curved steel gate after corrosion[J]. Water Conservancy Planning and Design, 2023(1): 82-85, 95.
- [18] 胡强, 王姣, 朱振寰. 基于检测数据的弧形钢闸门支臂可靠度分析[J]. 江西水利科技, 2021, 47(2): 101-104.
- HU Qing, WANG Jiao, ZHU Zhenhuan. Reliability analysis of curved steel gate support arm based on test data[J]. Jiangxi Hydraulic Science & Technology, 2021, 47(2): 101-104.
- [19] 顾富星, 岳桃丽. 弧形工作闸门三维静动力有限元分析[J]. 珠江水运, 2023(18): 35-37.
- GU Fuxing, YUE Taoli. Three D dynamic finite element analysis of curved working gate[J]. Pearl River Water Transport, 2023(18): 35-37.
- [20] 杨宗儒, 甘志军, 张发茂. 超大型三斜支臂弧形钢闸门设计及有限元分析[J]. 人民珠江, 2023, 44(z1): 139-144.
- YANG Zongru, GAN Zhijun, ZHANG Famao. Design and finite element analysis of curved steel gate of super large triple inclined support arm[J]. Pearl River, 2023, 44(z1): 139-144.
- [21] 王学亮, 杜蔚琼, 李东明, 等. 弧形钢闸门有限元分析及结构优化[J]. 水利规划与设计, 2020(7): 70-74.
- WANG Xueliang, DU Weiqiong, LI Dongming, et al. Finite element analysis and structural optimization of radial steel gates[J]. Water Resources Planning and Design, 2020(7): 70-74.
- [22] 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 & Water Engineering, 2023, 34(5): 149-154.
- [23] 张亮, 徐强, 严根华, 等. 大型液压启闭卧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.
- ZHANG Liang, XU Qiang, YAN Genhua, et al. Large hydraulic radial gate flow-induced vibration and anti-vibration optimization[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2023, 21(2): 13-19.
- [24] 王鲁, 李斌, 易魁, 等. 滑坡涌浪作用下弧形闸门动力响应数值分析[J]. 水电能源科学, 2024, 42(4): 151-154.
- WANG L, LI B, YI K, et al. Numerical analysis of dynamic response of radial gate under action of landslide surge[J]. Water Resources and Power, 2024, 42(4): 151-154.
- [25] 张中昊, 单立博, 汪可欣, 等. 船舶撞击下弧形钢闸门的动力分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2024, 45(7): 1297-1304.
- ZHANG Zhonghao, SHAN Libo, WANG Kexin, et al. Dynamic response analysis of steel arch-gate under ship impact[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2024, 45(7): 1297-1304.
- [26] 孙少楠, 张瑞捷, 马莉, 等. 基于 BIM+数值模拟的弧形闸门结构性能分析研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 12(54): 155-166.
- SUN Shaonan, ZHANG Ruijie, MA Li, et al. Analysis and research on structural performance of radial gate based on BIM + numerical simulation[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(12): 155-166.
- [27] 傅学敏, 卢洋亮, 王晨, 等. 复杂弧形闸门结构的 CAD-CAE 联合分析方法[J]. 水电能源科学, 2024, 42(7): 137-141.
- FU Xuemin, LU Yangliang, WANG Chen, et al. CAD-CAE joint analysis method of complex arc gate structure[J]. Water Resources and Power, 2024, 42(7): 137-141.
- [28] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 水利水电工程钢闸门设计规范: SL 74—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Hydraulic and Hydroelectric Engineering Specification for Design of Steel Gate: SL 74—2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.
- [29] Deutsches Institut für Normung. Hydraulic Steel Structures: Criteria for Design and Calculation: DIN 19704: 1976[S]. Berlin: German Institute for Standardization, 1976.
- [30] 赵清静, 冷云, 高扬. 里底水电站溢洪道弧门水力学及水弹性振动试验研究[J]. 中国设备工程, 2017, (24): 155-156.
- ZHAO Qingjing, LENG Yun, GAO Yang. Hydraulic and hydroelastic vibration experimental study on the spillway radial gate at Lidi Hydropower Station[J]. China Plant Engineering, 2017, (24): 155-156.
- [31] 连子怡. 三支臂弧形钢闸门静动力特性研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- LIAN Ziyi. Research on Static and Dynamic Characteristics of Three-arm Radial Gates[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017.
- [32] SUN S N, ZHANG R J, LIU X J, et al. Numerical simulation and application of radial steel gate structure based on building information modeling under different opening degrees[J]. Water, 2024, 16(5): 636.
- [33] 朱晨, 徐要伟, 于淑敏. 水电站潜没式弧形闸门结构应力测试与分析[J]. 华电技术, 2019, 41(9): 33-35.
- ZHU Chen, XU Yaowei, YU Shumin. Stress test and analysis of submerged radial gate structure of hydropower station[J]. Huadian Technology, 2019, 41(9): 33-35.
- [35] ZHANG Z H, LAN J X, FAN F, et al. Selection of new type radial steel gate and analysis of static and dynamic characteristics[J]. International Journal of Steel Structures, 2021, 21(5): 1630-1643.

(责任编辑 王璐)