

平面钢闸门静水压力及振动特性分析

邢祚祥

河南省水利勘测设计研究有限公司, 河南 郑州

收稿日期: 2025年12月6日; 录用日期: 2025年12月30日; 发布日期: 2026年1月6日

摘要

平面钢闸门是水利工程的核心建筑物, 在运行中存在振动变形等问题。本文依据实际工程, 采用相邻间距和之半法分析多主梁的线荷载, 使用组合截面法对各构件进行理论计算, 并针对现有研究因结构简化导致对约束等效施加问题, 考虑主轮对整体结构的影响, 建立完整三维模型, 对单侧挡水时的平面定轮钢闸门进行有限元仿真, 研究在最高挡水位时各构件的应力应变, 与理论分析和相关规范做对比, 为闸门的强度校核与优化设计提供参考。并圈起水域, 基于流固耦合定义声学物理区域, 展开湿模态分析, 研究闸门在挡水时的振动规律与响应特性, 以保障平面钢闸门在复杂水力环境中的安全稳定运行。

关键词

平面钢闸门, 静水压力, 最高挡水位, 模态声学

Analysis of Hydrostatic Pressure and Vibration Characteristics of Plane Steel Gate

Zuoxiang Xing

Henan Water & Power Engineering Consulting CO., Ltd., Zhengzhou Henan

Received: December 6, 2025; accepted: December 30, 2025; published: January 6, 2026

Abstract

The plane steel gate is an essential component in hydraulic engineering, but it encounters vibration and deformation issues during operation. This study analyzes the line load of multi-main beams in a real project using the method of halves of the sum of adjacent distances. The combined section method performs theoretical calculations for each member. To address the problem of imposing constraint equivalence due to structural simplifications in previous studies, while considering the influence of the main wheel on the overall structure, a comprehensive 3D model has been established. Finite element simulation is conducted on plane fixed-wheel steel gates for single-side water

retainers, studying the stress-strain in each part at the maximum water level. By comparing with the theoretical analysis and related specifications, it provides a reference for the strength check and optimized design of the gate. In addition, circle the water area, define acoustic and physical regions based on fluid-structure coupling, and develop wet mode analysis. Studying the vibration regulation and response characteristics of gates when holding back water to ensure safe and stable operation of plane steel gates in complex hydraulic environments.

Keywords

Plane Steel Gate, Hydrostatic Pressure, Maximum Water Level, Modal Acoustics

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

闸门在水利水电工程中,通过封闭、局开、全开孔口,控制调节上下游的水位和流量,从而实现供水、灌溉,检修、排污等任务,广泛应用于泵站进出口、输水管道、溢洪道,是重要的水利金结建筑物。随着水利工程的快速发展,规范和设计要求逐渐提高,数字化、智慧模型的不断应用,对金属结构的需求随之不断提高。而闸门在启闭和挡水的过程中,在静水、动水等的作用下,会受到一定的振动和压力,一旦发生大变形或共振,都会造成安全隐患,因此对闸门的力学特性分析具有实际的工程意义。

在现有的闸门理论模型中,大多通过将整体拆分为单独的构件,并简化为平面进行结构计算。随着软件的不成熟,学者们逐渐使用有限元方法模拟闸门的实际工作情况。钟阳等[1]基于 Hamilton 构造方法,为闸门的中厚面板设计问题简化了解析求解过程。钦立峰[2]对比研究了前后两种止水形式的受力分布,但分析时将模型和单元简化为薄壁系统,无法反映真实的工作状态。纪伟等[3]对在校核洪水位与正常蓄水位下的闸门进行静力分析,并研究优化了配重对整体结构的影响。张雪才等[4] [5]基于 Kirchhoff-Love 与 Mindlin-Reissner 理论研究了不同约束类型、单元网格数、截面形状等对求解的影响,得出了不同方法和设置适用于相对应的类型需求,为闸门有限元分析的空间性奠定了精准稳定的基础分析原则。张聪等[6]对在不同运行工况下的露顶式弧形闸门展开数值模拟研究,并采用原型观测法进行对比,验证了结果的正确性。然而,现有研究对结构进行了许多简化,对载荷与约束的施加做出了许多等效,与闸门真实的运行状态存在较大误差。

本文基于实际工程,使用相邻间距和之半法,对主梁荷载展开布置,并通过各构件的结构计算,建立了露顶式平面定轮钢闸门的理论模型。然后考虑主轮对结构的影响,根据设计绘制装配了精确的三维模型,并对受静水压力、自重等载荷的闸门进行有限元仿真分析,研究最高挡水位时和不同水位下各构件的最大等效应力和应变,与理论计算和规范许用相对比,评估承载能力、安全性能是否满足要求。并建立流体域,与钢闸门流固耦合,展开湿模态分析,验证闸门在挡水时是否发生共振。本研究为平面钢闸门的强度校核、设计优化和安全稳定运行提供参考。

2. 理论分析

平面钢闸门主要由面板、主梁、主轮、侧轮、次梁、边梁等构件组成。本文以某工程中使用的露顶式平面定轮钢闸门为研究对象,面板布置在上游迎水面,单侧挡水,静水压力直接作用在面板上,并把荷

载传递到梁系中，再传递到主轮，最终传给土建基础。露顶式闸门在不同水位的静水压力分析如图 1 所示，静水压力为：

$$P = \frac{1}{2} \gamma H_s^2 B_{zs} \quad (1)$$

式中， P 为静水压力， γ 为水重度， H_s 为上游水头， B_{zs} 为孔口止水宽度。

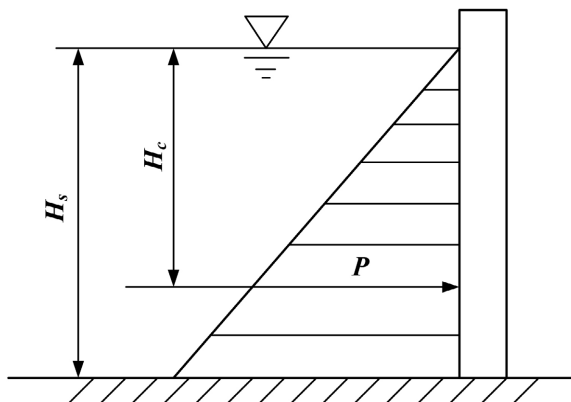


Figure 1. Hydrostatic pressure
图 1. 静水压力

在露顶式闸门中，面板被梁系分割成若干矩形区格，根据弹性薄板理论[7]，面板的局部弯曲应力，可视边界情况，按四边固定、三边固定等承受均布荷载计算，如图 2 所示面板区格形式，A 点为支承长边中点，B 点为支承短边中点。每个区格的面板在承受水压力后，会产生弯曲变形，将一部分荷载直接以弯矩的形式承受，另一部分则作为支座反力传递给周围的支承梁。面板主要以弯曲的形式消耗小部分荷载，将大部分荷载传递到梁系中。

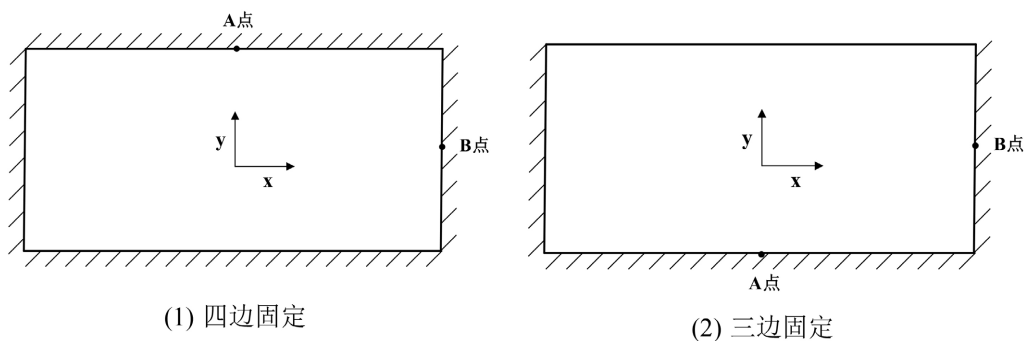


Figure 2. Panel area grid
图 2. 面板区格

钢闸门中主梁主要承受水压力以及自重、泥沙等荷载，而次梁、边梁、纵梁主要起减小跨度、导向、加强刚度等作用，因此对于主梁的布置与强度计算是十分重要的。多主梁的荷载计算是一个超静定问题，不仅与相对刚度有关，也取决于几何位置。本文使用相邻间距和之半法，多主梁荷载计算简图如图 3 所示，其受面板传递的梯形荷载和纵梁的集中荷载，单位宽度上的荷载为：

$$q_i = \frac{\gamma}{4} (H_{i-1} + 2H_i + H_{i+1}) \times \frac{1}{2} (l_{i-1} + l_i) \quad (2)$$

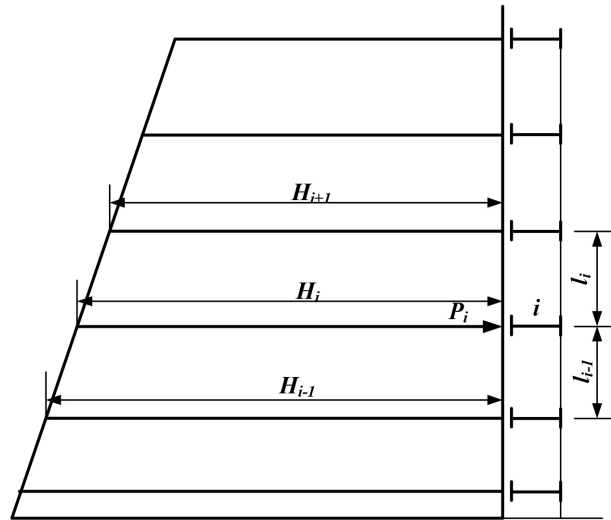


Figure 3. Multi-major beam load calculation
图 3. 多主梁荷载计算

根据主梁的布置特点，每根主梁荷载可近似地按照受均布荷载的等跨连续梁进行计算，计算简图如图 4 所示：

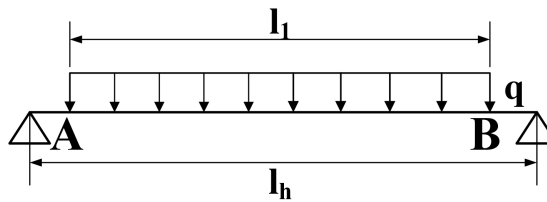


Figure 4. Main beam unit load
图 4. 主梁单位荷载

根据每根主梁的荷载分布进一步计算主梁的最大弯矩，通过相关规范确定面板有效宽度，并采用组合截面法计算主梁截面的惯性矩、静面矩、抗弯模量等特性后，主梁前后翼缘的拉压应力、最大挠度分别为：

$$\begin{cases} M_{\max} = \frac{ql_1}{2} \left(\frac{l_h}{2} - \frac{l_1}{4} \right) \\ \sigma = \frac{M}{W_x} \\ f_{\max} = \frac{5}{384} \cdot \frac{ql_h^4}{EI_x} \end{cases} \quad (3)$$

式中， q 为主梁均布荷载， l_1 为荷载跨度，即为底止水间距， l_h 为计算跨度，即为两侧主轮间距， W_x 为主梁截面翼缘的抗弯模量， E 为材料弹性模量， I_x 为形心惯性矩， f_{\max} 为最大挠度。

次梁和纵梁平行布置，将面板分为小的区格，水压力传递到次梁，此时可按承受均布荷载的多跨连续梁计算，受力简图如图 5 所示。极大地减小了主梁直接承受的荷载面积，且由于梁系间荷载的传递，主梁的计算跨度 l_h 也从主轮间距减小为梁格的间距。次梁和纵梁通过分散荷载和减小主梁计算跨度的双重作用，对降低主梁弯矩的效果极其显著。

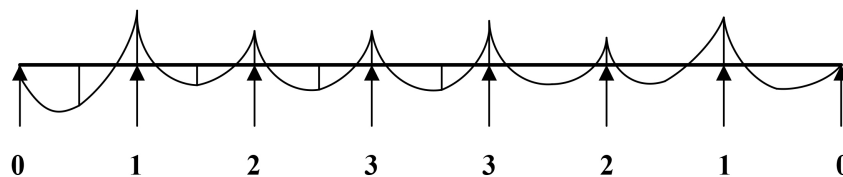


Figure 5. Schematic diagram of internal forces in secondary beams for continuous beam calculations
图 5. 连续梁计算的次梁内力简图

3. 闸门三维与仿真模型的建立

3.1. 闸门的三维模型

本文使用露顶式平面定轮钢闸门，孔口尺寸(宽 × 高) 4.2×4.3 m，闸门的最高挡水头 4 m，面板布置在上游迎水侧，梁系结构采用多主梁同层布置，主梁使用 40a 型号的工字钢，前翼缘与面板通过焊接连接，记主梁由上至下为 1#主梁、2#主梁、3#主梁，次梁采用 16 型号的槽钢，由上至下分别记为 1#~6#号，主轮采用悬臂轮的形式，和侧轮相同与门叶通过螺栓连接，主要设计参数如表 1 所示，在三维软件中建立的闸门模型如图 6 所示。

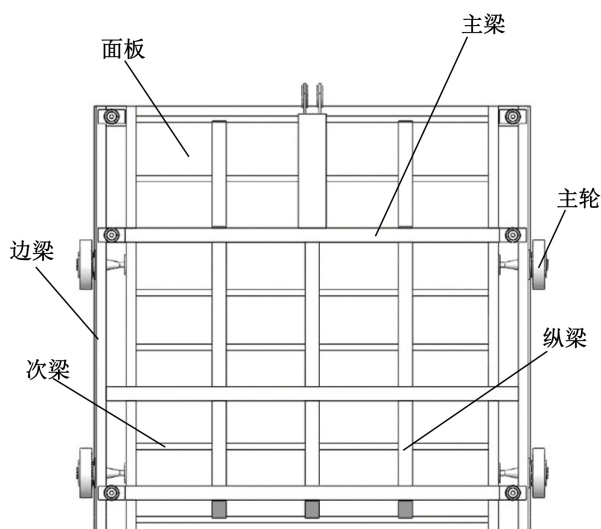


Figure 6. Plane steel gate 3D model
图 6. 平面钢闸门三维模型

Table 1. Gate main design parameters
表 1. 闸门主要设计参数

主要参数	设计尺寸
孔口宽度	4.2 m
孔口高度	4.3 m
止水宽度	4.2 m
止水高度	4.31 m
支承跨度	4.5 m
最高挡水头	4 m

3.2. 闸门的有限元模型

将建好的模型导入到有限元仿真软件中，根据实际工程选定装配体各部件的主材及材料性质如表 2 所示。早期仿真受算力的限制，面板与梁系分别采用板单元、梁单元，本研究为了更真实的反映闸门挡水时各构件受水压力的拉压与剪切，均采用实体单元进行模拟。网格采用六面体方式划分，并在各梁系的连接处进行局部加密。

Table 2. Finite element model material setting
表 2. 有限元模型材料设置

	材料	密度(kg/m ³)	弹性模量(GPa)	泊松比
门叶	Q235B	7850	206	0.3
主轮	ZG310-570	7850	198	0.28
侧轮	NGD	1200	20	0.36

模型建立时采用笛卡尔坐标系，主梁横向跨度为 x 轴，闸门起吊方向为 y 轴，水流方向为 z 轴。闸门坐落在底槛上，底部受底槛竖直方向的支撑约束，y 轴向竖向约束施加于闸门的底部；主轮为门槽中的支撑行走部件，然而现有研究在仿真时并未装配轮系，只能将约束等效施加到边梁上，改变了闸门实际的受力情况，本文建立了完整的装配模型，因此根据实际工程，在主轮与门槽的接触面上施加 z 轴水流方向的固定约束；且为保证模型的几何不变形，在底部中间节点的位移定义为零。

结合实际工程情况，闸门中各梁系间，如主梁、次梁、边梁通过焊接连接，并与面板通过焊接连接，因此在仿真分析时面板、各梁系中的各部分接触面设定为绑定接触；主轮中轴的挡圈与边梁上焊接的加强板通过螺栓连接，主轮中的滚轮通过水流的作用下与埋件中的主反轨摩擦接触，因此，主轮与边梁接触面的接触设置为绑定接触。

平面闸门主要受静水压力荷载以及自身的自重，面板在上游迎水，因此将水压力按梯度施加到面板侧，自由液面高度为工程中的最高挡水头 4 m，流体密度即为水的密度，为 10^{-6} kg/mm^3 ，流体静力学加速度为 9.8 m/s^2 ，重力加速度沿 y 轴负方向设置为 9.8 m/s^2 ，静水压力的加载如图 7 所示。

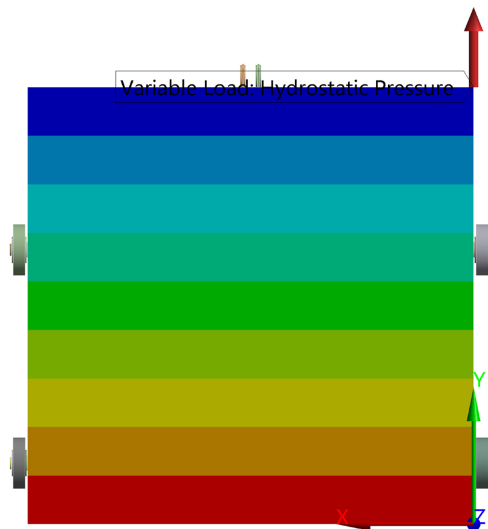


Figure 7. Hydrostatic pressure load
图 7. 静水压力加载

4. 计算结果分析

4.1. 强度校核

各主要构件的最大等效应力云图如图 8 所示, 由云图可知, 在最高挡水位时, 面板的最大等效应力为 18.725 MPa, 位于面板中心靠底部处, 由下往上受力逐渐减少, 在梁系支撑处的荷载较小, 这是由于梁系承担了由面板传递的部分水压力; 主梁的最大等效应力为 40.224 MPa, 位于最下方 3#主梁后翼缘的跨中处, 应力从中间向两侧不断减小, 2#主梁与 3#主梁的应力云图基本相似, 由 probe 探测可知两者所受荷载基本相同, 2#主梁的应力值略小于 3#主梁; 次梁的最大应力为 5.6162 MPa, 位于 6#次梁的后翼缘跨中处, 应力从中间向两端不断减小, 边梁、纵梁、侧轮所受应力也相对较小, 这是因为这些部件主要起协同加固、减小变形、导向的作用; 主轮的最大应力为 50.993 MPa, 在主轮轮轴与内边梁腹板的接触处应力较为集中, 这是由于静水压力通过梁系主要传递到主轮中, 再到土建基础, 因此应在轮系和梁系的接触处设置加强板。

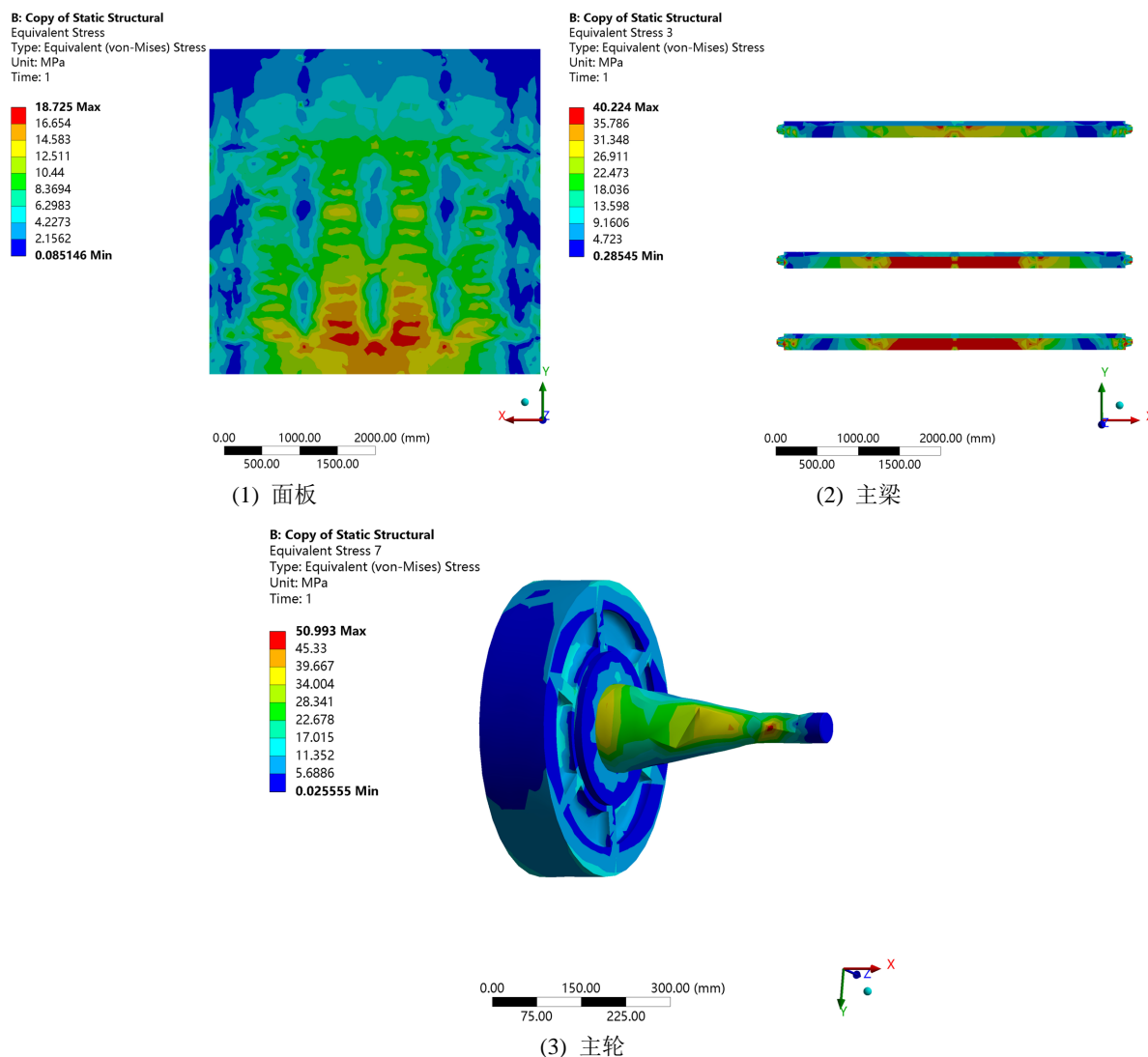


Figure 8. Stress diagram of gate components

图 8. 闸门各构件应力云图

根据所建立的理论模型分析可得, 1#、2#、3#主梁的荷载分别为 75.4 kN、128 kN、130 kN, 3#主梁的荷载最大, 进一步计算可得其最大弯矩为 78.4 kN·m, 前翼缘的拉应力为 25.2 MPa, 后翼缘的压应力为 59.9 MPa, 且 2#主梁和 3#主梁的荷载基本相同, 与仿真所得的主梁云图分布规律相同。这是由于理论分析时是根据主梁的布置特点近似地按简支梁计算, 而简支梁结构的最大应力通常位于跨中截面的上下边缘, 因此 3#主梁后翼缘跨中处的应力最大。次梁所受应力较小, 最大应力为 7.2 MPa, 位于 6#次梁的后翼缘跨中处, 与仿真结果相对应。

对比应力云图与理论分析可得, 各构件的应力分布规律基本相同, 但最大应力的仿真值均小于理论值, 由理论分析可知, 闸门在设计计算时是通过将各部件简化为平面, 按各个区格、截面进行划分, 并近似地将总水压力全部作用到主梁上进行分析, 将实际由面板传递出来的复杂分布荷载, 简化为均布线荷载或集中力, 导致计算弯矩偏大。然而闸门的各个构件是整体协调的, 梁系分工协同均承受并传递了水荷载, 因此设计计算的理论值偏大, 而仿真可以施加真实的水压力分布荷载, 考虑空间整体性的仿真值更符合闸门在实际工作中的受力情况。

本工程中使用的门叶主材为 Q235B, 由《水利水电工程钢闸门设计规范》(SL74-2019) [7] 可知, Q235B 钢材的厚度小于 16 mm 时, 容许抗拉压应力为 160 N/mm², 抗剪应力为 95 N/mm², 且对于大、中型工程的工作闸门, 容许应力应乘 0.9 的调整系数, 调整后的容许应力分别为 144、85.5 N/mm², 主轮主材为 ZG310-570, ZG310-570 的容许折算径向压应力为 320 N/mm²。将理论值、仿真值与容许值相对比可知, 所有构件的最大应力均小于容许值, 因此材料强度满足设计要求。

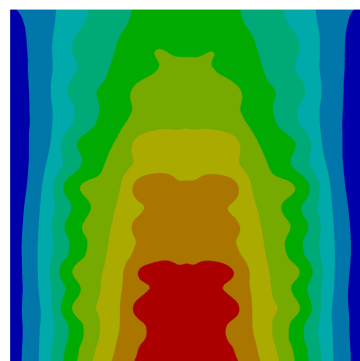
4.2. 刚度校核

各构件的位移云图如图 9 所示, 由图可知, 面板的最大位移为 1.3566 mm, 位于面板底部的中心, 位移由下往上, 由中间向两端不断减小; 主梁的最大位移为 1.3067 mm, 位于 3#主梁跨中处, 次梁的位移值较小, 位于 6#次梁的跨中处, 每根主梁和次梁的变形均从中间向两端逐渐减小; 主轮的最大位移为 0.34 mm, 位于轮轴轴端处, 由轮轴与内边梁接触处向滚轮处逐渐减小。

根据理论分析可得, 主梁、次梁的最大挠度分别为 2.12 mm、0.02 mm, 各构件应变的仿真值也均略小于理论值, 这是因为理论公式中的荷载与挠度成正比, 而根据闸门整体空间性的分析, 应力的仿真值均小于理论值, 应变的仿真值也相应小于理论值。

B: Copy of Static Structural
Total Deformation 4
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1

1.3566 Max
1.21
1.0634
0.91683
0.77023
0.62362
0.47702
0.33041
0.18381
0.037202 Min

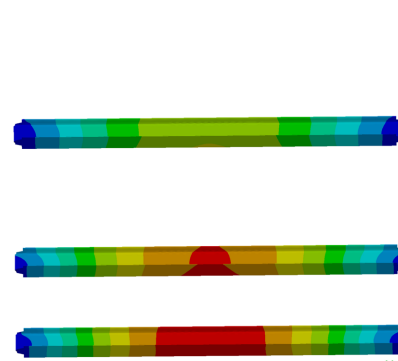


0.00 1000.00 2000.00 (mm)
500.00 1500.00

(1) 面板

B: Copy of Static Structural
Total Deformation 2
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1

1.3067 Max
1.1676
1.0285
0.88935
0.75023
0.61112
0.472
0.33288
0.19376
0.054648 Min



0.00 1000.00 2000.00 (mm)
500.00 1500.00

(2) 主梁

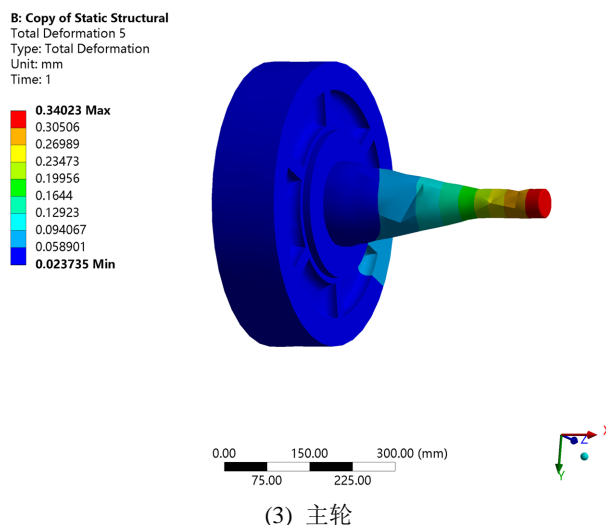


Figure 9. Displacement diagram of gate components

图 9. 闸门各构件位移云图

主梁是闸门的承重构件，在挡水时承受较大压力，一旦发生大变形，会造成面板、止水等的形变，导致闸门难以启闭。依据规范《水利水电工程金属结构报废标准》[8]可知：露顶式闸门主梁的最大挠度与计算跨度之比应小于 $1/600$ ，次梁应小于 $1/250$ 。因此在本工程中，主梁最大挠度应小于 7.5 mm ，次梁应小于 18 mm ，对比可得，结构刚度满足规范要求。

4.3. 不同水位下的变化

研究闸门前在 $1\sim 4\text{ m}$ 不同水位下的应力与变形，如图 10、图 11 所示，可以发现主轮、面板、主梁在挡 1 m 水头时受力较小，随着水位的上升，各构件的应力与变形随之增大，且相较于低水头，水位越高，闸门的各主要受力部件的应力明显增大。因此，在水位较高时，尤其是潜孔、深孔闸门，应加强对结构的设计，并进行理论与仿真的校核验算，保证闸门的安全稳定运行。

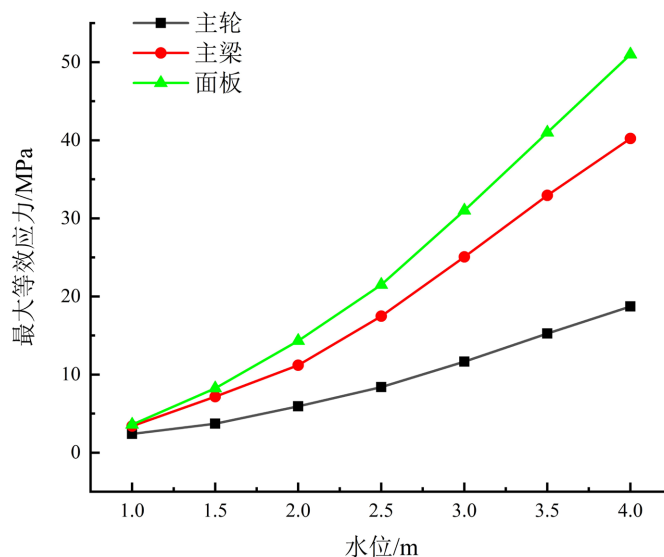


Figure 10. Stresses at different water levels

图 10. 不同水位的应力

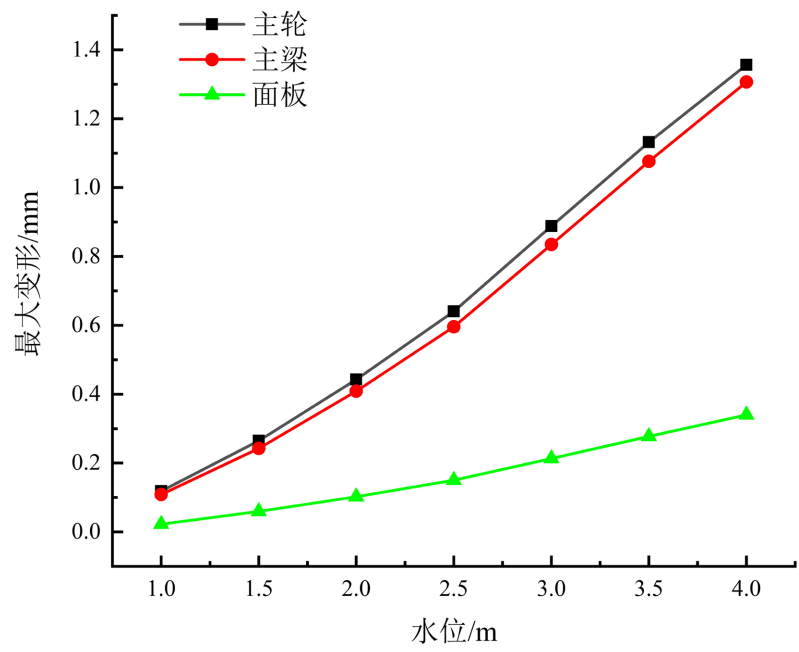
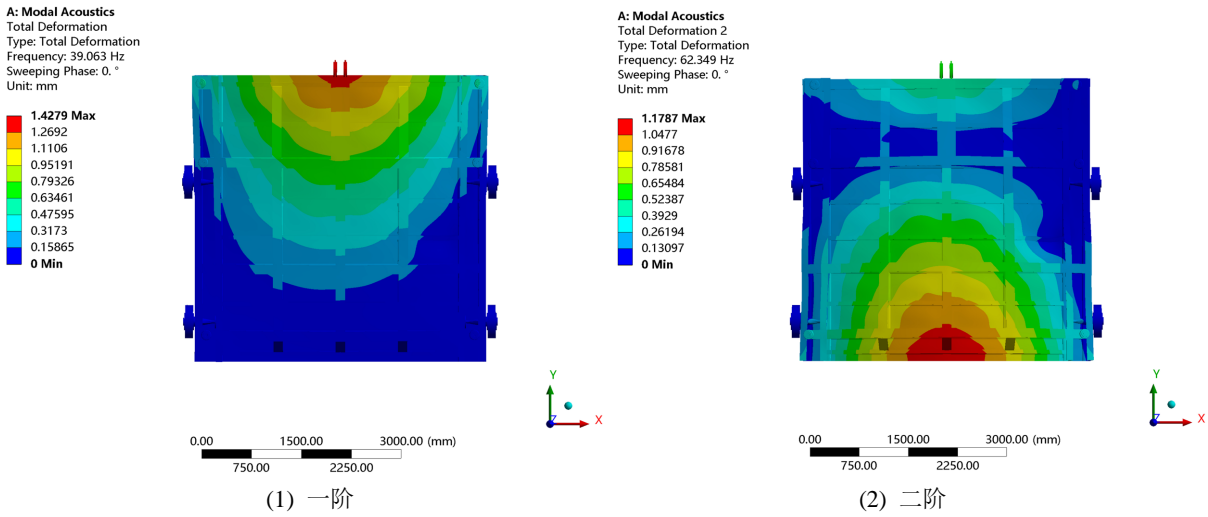


Figure 11. Deformation at different water levels
图 11. 不同水位的变形

4.4. 湿模态分析

闸门在实际工作中，通常处于挡水工况，而水流与门体的相互作用会影响闸门的固有振动特性，为研究平面定轮钢闸门闸前有水时的振动问题，进行湿模态仿真分析。由于水流为液体，门体为固体，闸门在挡水时为流固耦合问题，首先需要 enclosure 水域，结合实际工作，本工程模拟单侧挡水工况，面板设置在上游，因此流体域位于面板侧，由表 1 可知，孔口宽度为 4.2 m，闸门宽度为 4.38 m，但模拟的闸门止水型式采用 Y-L 型前止水，因此液体作用的最大宽度为孔口宽度，作用高度为最高挡水位 4 m。并定义水的特性，其密度为 1000 kg/m^3 ，声速为 1400 m/s ，闸门整体为 physics region，水为 acoustics region。由于模拟闸门的运行工况相同，边界条件、闸门的网格划分、材料定义等设置与静水压力分析保持一致，钢闸门的前六阶湿模态如图 12 所示。



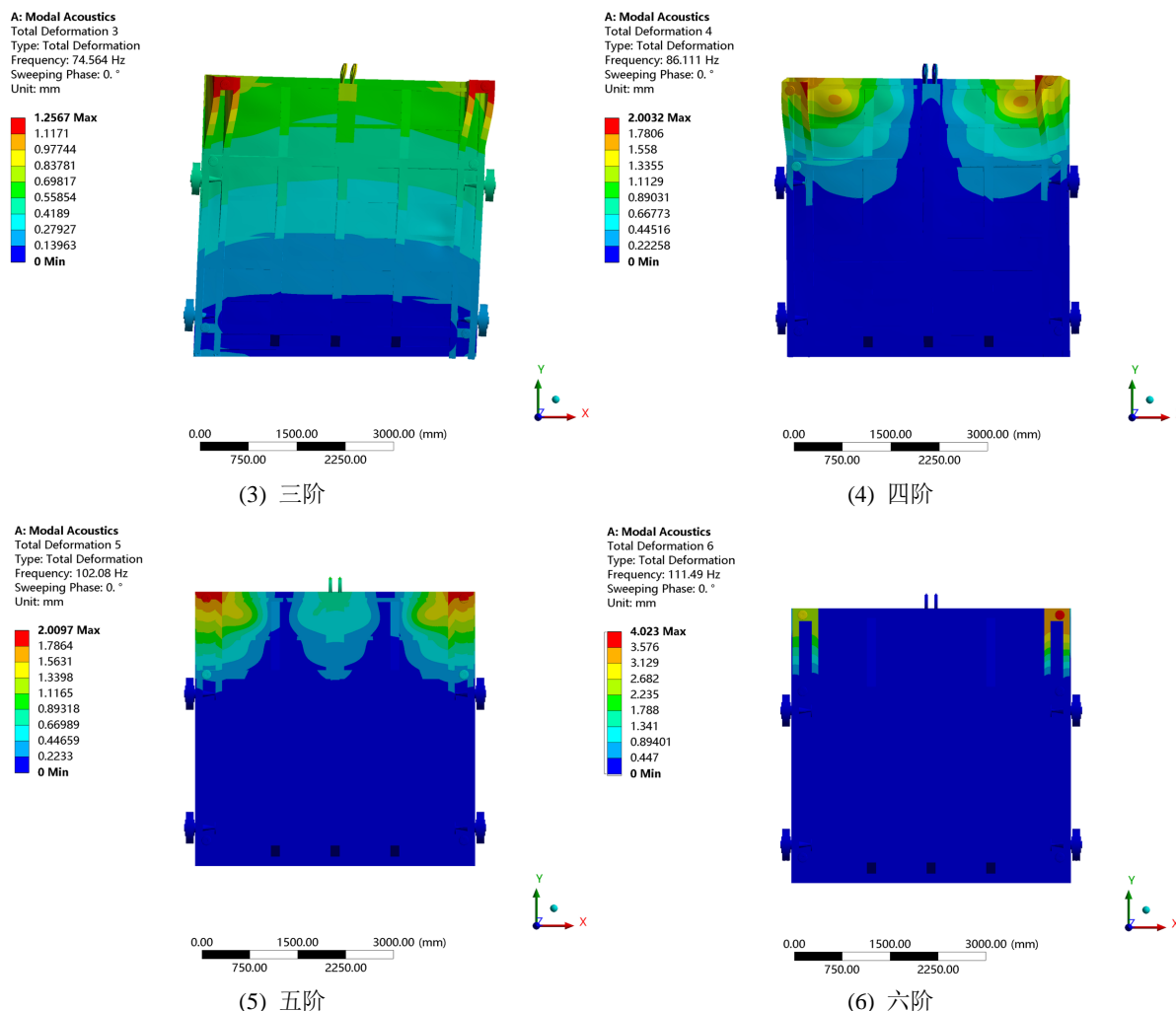


Figure 12. Modal acoustics

图 12. 湿模态振型

由云图可得，一阶振型为闸门顶部中心位置沿水流方向的变形，二阶振型主要为闸门底部中心沿水流方向的变形，且闸顶位置有相应的摆动，三阶振型表现为闸门在门槽内的沿 x 方向的左右摆动，底槛支撑处的变形较小，四阶为闸门在 z 向的扭转，五阶六阶均为梁系的振动。仿真得出闸门六阶湿模态的固有频率分别为 39.1、62.3、74.6、86.1、102.1、111.5 Hz，在水流的作用下闸门工作频率在 8 Hz 左右，因此，在闸门单侧挡水运行时不会发生共振。

5. 结论

本文根据闸门实际运行工况，利用有限元仿真，分析各构件在最高挡水位下和不同水位时的应力与变形，研究闸门与水体的耦合问题，得出结论如下：

1) 在静水压力、自重等荷载的作用下，主梁为核心承重与传力构件，其最大应力与变形位于后翼缘的跨中处，其他梁系受力较小，主要起减小跨度、导向等作用，主轮轮轴与边梁的接触处出现应力集中现象。可根据研究结果针对性地采取加固措施，优化整体结构。

2) 各构件的仿真值均小于理论值，考虑空间整体性的仿真结果更符合实际工况，更加适用于高水头下的钢结构复核算。整体结构的强度和刚度满足规范许用要求，研究为闸门的在线监测、健康稳定运

行提供参考。

3) 闸门与水体相互耦合作用, 在单侧挡水时, 固有频率大于工作频率, 不会发生共振。

参考文献

- [1] 钟阳, 刘衡. 矩形中厚板弯曲问题的解耦解法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(3): 143-146.
- [2] 钦立峰. 平面钢闸门止水布置应力有限元分析[J]. 河南水利与南水北调, 2022, 51(4): 78-79, 85.
- [3] 纪伟, 任玉珊, 等. 基于有限元法的平面钢闸门结构整体性优化设计[J]. 人民珠江, 2015, 36(3): 76-81.
- [4] 张雪才, 陈丽晔, 姚宏超, 等. 弧形闸门支臂结构空间有限元分析原则研究[J]. 水力发电, 2021, 47(7): 73-82.
- [5] 张雪才, 杨顺群, 侯庆宏, 等. 水工闸门面板结构空间有限元分析原则[J]. 水力发电, 2021, 47(10): 61-70.
- [6] 张聪, 张钰奇, 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, 160.
- [7] 中华人民共和国水利部. SL74-2019 水利水电工程钢闸门设计规范[S]. 北京: 水利电力出版社, 2019.
- [8] 中华人民共和国水利部. SL226-1998 水利水电工程金属结构报废标准[S]. 北京: 水利水电出版社, 1998.