

加固前后三角闸门空间有限元分析

迟朝娜¹, 徐宗美², 董彦汐¹

(1. 日照职业技术学院 建筑工程系, 山东 日照 276826; 2. 山东农业大学 水利土木工程学院, 山东 泰安 271000)

摘要: 对闸门结构进行合理的防撞加固, 可有效降低碰撞风险, 保障船闸安全运行。为研究其防撞效果, 以某船闸三角闸门为研究对象, 运用有限元软件 ANSYS, 构建加固前、加固后(直线形防撞板)、加固后(折线形防撞板)3 种模型。综合考虑开关门状态、正反向水位及不同撞击点位置等因素, 构建 17 种工况, 对比分析不同工况下主要构件的应力、变形以及枢座、启闭杆处的支座反力。结果表明, 在不考虑船舶撞击力时, 加固后正向水位下闸门各构件最大应力均有所降低, 但在反向水位时, 面板、主横梁最大应力约增加 30%; 当船舶撞击立柱和中直臂附近时, 设置直线形防撞板的闸门构件最大应力较折线形防撞板降低 30%~40%, 最大变形减小约 50%, 直线形防撞板的防撞性能更优。

关键词: 三角闸门; 加固; 有限元; ANSYS

中图分类号: U641.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)12-0137-09

Spatial finite element analysis of triangular gate before and after reinforcement

CHI Zhaona¹, XU Zongmei², DONG Yanxi¹

(1. College of Architectural Engineering, Rizhao Polytechnic, Rizhao 276826, China;

2. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271000, China)

Abstract: Reasonable anti-collision reinforcement of the gate structure can effectively reduce collision risks and ensure the safe operation of the ship lock. To study its collision avoidance effect, taking the triangular gate of a ship lock as the research object, using the finite element software ANSYS, three kinds of models are built: before reinforcement, after reinforcement (straight-line anti-collision plate) and after reinforcement (broken-line anti-collision plate). Considering the open and closed status, forward and reverse water levels and different impact point positions, 17 working conditions are constructed. The stress and deformation of the main components and the support reaction at the pivot seat and hoist rod under different working conditions are compared and analyzed. The results show that, when the ship impact force is not considered, the maximum stress of each component of the gate after reinforcement is reduced under the forward water level, but the maximum stress of the panel and main beam increases by about 30% under the reverse water level. Under the impact force of the ship, when the ship hits the column and the middle straight arm, the maximum stress of the gate component with the straight-line anti-collision plate is 30%~40% lower than that of the broken-line anti-collision plate, and the maximum deformation is reduced by about 50%. The anti-collision performance of the straight-line anti-collision plate is better.

Keywords: triangular gate; reinforcement; finite element; ANSYS

船闸作为连接重要航道的枢纽, 每日承载着大量的船舶通行任务, 随着航运事业的蓬勃发展, 船舶数量日益增多, 闸门遭受船舶撞击的概率大幅增加^[1]。研究闸门的防撞加固措施, 分析其抗撞性能, 对保障船闸的安全性和耐久性具有重要

意义。目前, 部分学者对船舶撞击作用下闸门的动力响应及浮箱对闸门结构的影响进行了一定研究。单立博^[2]、江固^[3]采用有限元方法分析了船舶撞击对闸门结构的动态影响; 徐文林^[4]研究了不同浮箱类型对闸门门体受力及变形的影响。然

而, 现有研究多集中于闸门本身的分析, 而针对防撞加固设施的优化设计及其防撞效果的系统研究仍较为缺乏。本文利用有限元软件, 对某船闸三角闸门加固前后的3种结构进行空间有限元分析, 以验证三角闸门防撞板、浮箱的防撞性能并对闸门防撞加固的部位、方式及效果提出合理化建议, 旨在为船舶撞击作用时闸门各构件的设计提供理论依据。

1 闸门加固方式

三角闸门加固方式主要包括增设钢护柱、防撞板及浮箱等^[5-8]。为保护侧止水在船舶撞击时受损, 在易撞部位的两侧, 增设两条竖向钢护柱, 横截面一般为半圆形; 防撞板设置在闸门水位变化范围的易撞部位; 浮箱一般设置在面板外侧, 一为减轻门体在水中的重力, 二能够使重心靠近旋转轴线, 改善轴套偏磨及闸门下垂现象, 还能有效降低底枢、蘑菇头处的压力。某船闸三角闸门加固前后见图1。

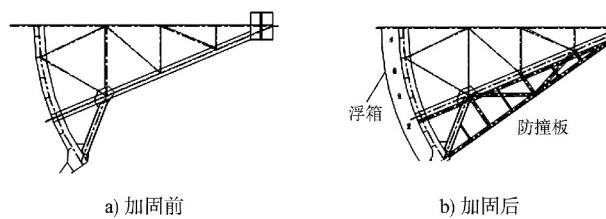


图1 某船闸三角闸门加固前后

Fig. 1 Triangle gate of a ship lock before and after reinforcement

2 三角闸门有限元模型创建

2.1 闸门结构与构件尺寸

闸门结构尺寸为: 单扇页面中心角70°, 半径10.620 m, 弧长12.974 m, 高11.900 m。其中面板兼作主横梁、纵梁的上翼缘; 弧形小次梁为槽钢[10; 桁架腹杆规格有2∠125×12、2∠90×10、2∠75×10、2∠75×8、2∠100×12; 梁格布置以及各构件截面形状、尺寸见图2^[9]; 浮箱布置在底横梁上约1/3闸门高度处, 采用对称矩形浮箱形式, 浮箱面板厚10 mm。

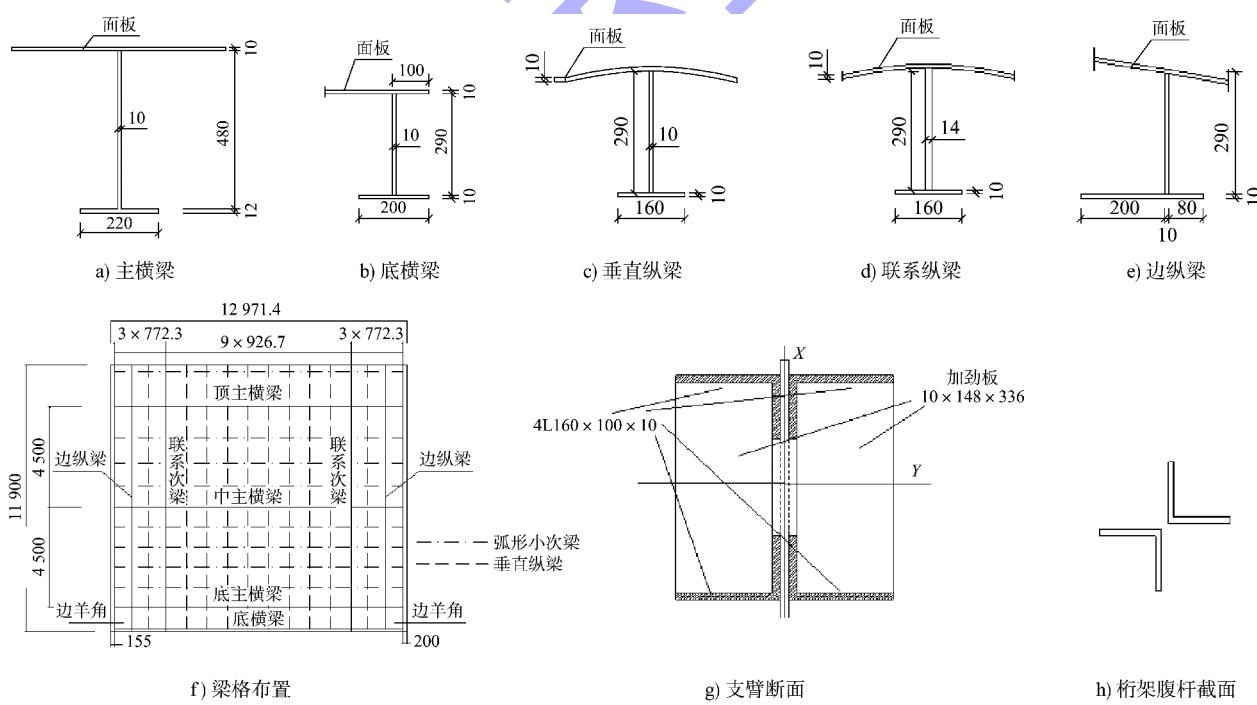


图2 三角闸门结构 (单位: mm)

Fig. 2 Triangle gate structures (unit: mm)

2.2 闸门有限元模型单元划分

闸门面板为圆柱面的一部分, 支臂轴线沿着

弧形面板的半径方向, 因此采用柱面坐标系建模。模型选用壳(shell63)、梁(beam4)、杆(link8)3种

单元^[10-11]: 壳单元模拟闸门面板、防撞板、浮箱面板、梁的上下翼缘板和腹板; 梁单元模拟支臂杆; 杆单元模拟闸门的水平、竖向桁架的腹杆。为便于比较分析, 创建加固前、加固后(直线形防撞板)、加固后(折线形防撞板)3 种模型, 并对各模型进行单元划分, 见表 1。

表 1 各闸门模型单元划分

Tab. 1 Unit division of each gate model 个

闸门模型	节点数	单元总数	shell63 单元数	beam4 单元数	link8 单元数
加固前	21 523	22 187	21 749	312	126
加固后(直线形防撞板)	23 950	25 488	24 174	1 117	197
加固后(折线形防撞板)	23 718	25 176	24 079	914	183

2.3 闸门计算工况

关门状态下应考虑的主要荷载有闸门自重、静水压力、风荷载等; 开门状态还需考虑船舶撞击力作用。

2.3.1 载荷施加

1) 闸门自重。在 ANSYS 软件中, 通过输入钢材密度及重力加速度可直接计算闸门自重。考

虑建模时未包含焊缝、加强板等构造细部材料, 因此将钢材密度乘以系数(此处取 1.2)进行修正, 即 $\rho = 9 420 \text{ kg/m}^3$, 工作桥的自重则以均布荷载的形式施加于闸门顶部。

2) 静水压力。SL 744—2016《水工建筑物荷载设计规范》^[12] 中对静水压力规定, 垂直作用于建筑物(结构)表面某点处的静水压强为:

$$P_w = \gamma_w H \quad (1)$$

式中: P_w 为计算点处的静水压强, kN/m^2 ; γ_w 为水的重力密度, 为 9.81 kN/m^3 ; H 为计算点处的作用水头, m 。

船闸设计水位组合见表 2。选取正、反向水位差最大(正向水位差 3.85 m 与反向水位差 5.35 m)的两种情况进行分析, 增设浮箱前后闸门静水压力作用有所不同, 见图 3。

表 2 船闸设计水位组合

Tab. 2 Design water level combination of ship lock

组合情况	水位/m		水位差/m
	上游(内河)	下游(内河)	
正向水位	4.00	1.05	2.95
	7.00	3.15	3.85
反向水位	3.00	8.35	5.35

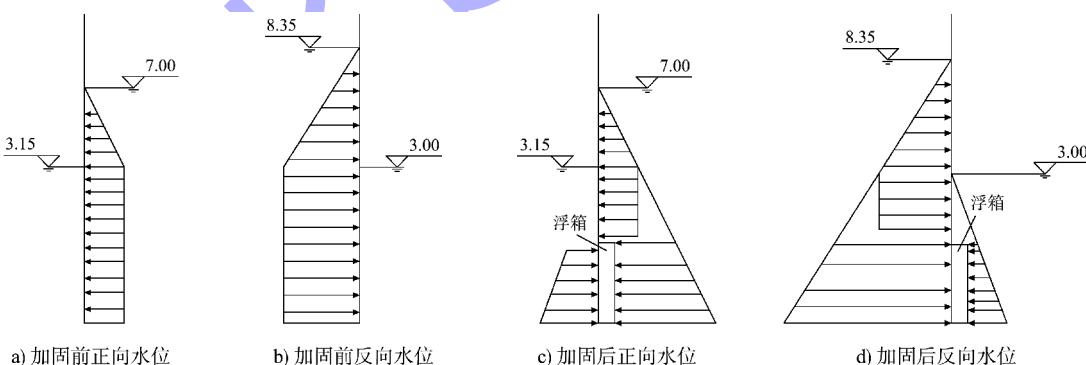


图 3 静水压力作用 (单位: m)
Fig. 3 Action of hydrostatic pressure (unit: m)

3) 风荷载。SL 744—2016《水工建筑物荷载设计规范》和 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》^[13] 对风荷载均进行了规定。

$$w_K = \beta_z \mu_s \mu_z w_0 \quad (2)$$

式中: w_K 为风荷载标准值, kN/m^2 ; β_z 为高度 z 处的风振系数; μ_s 为风荷载体形系数, 可取 1.3;

μ_z 为风压高度变化系数, 取 1.00; w_0 为基本风压, 根据船闸所在地查得, 取 0.45 kN/m^2 。

4) 船舶撞击力。根据文献[14], 取船舶撞击力 700 kN, 假定船舶以 25° 角撞击闸门, 将其分解为沿坐标轴方向的两个分力施加于有限元模型。

2.3.2 约束施加

根据三角闸门的结构特点及实际运行状况, 需要考虑施加以下约束: 在顶枢、中枢位置, 需沿着两个拉杆的方向施加水平位移约束; 底枢位置不仅要施加两个水平位移约束, 还应施加垂直位移约束; 启闭杆处沿杆方向施加位移约束; 在关门状态反向水位时两扇闸门有挤压的趋势, 需在两扇闸门中缝处沿纵轴线的垂直方向施加位移约束。

2.3.3 计算工况选取

关门状态下, 综合考虑 3 种模型、正反向水位选取 6 种工况; 开门状态下, 结合船舶撞击点

位置, 选取 11 种工况, 见表 3。选取的代表性撞击点见图 4。

表 3 三角闸门计算工况

Tab. 3 Calculation conditions of triangle gate

状态	加固前	加固后模型	加固后模型	
	模型	(直线形防撞板)	(折线形防撞板)	
关门	正向水位	工况 1	工况 3	工况 5
状态	反向水位	工况 2	工况 4	工况 6
	撞击点 1	工况 7	工况 12	工况 15
	撞击点 2	工况 8	工况 13	工况 16
开门	撞击点 3	工况 9	工况 14	工况 17
状态	撞击点 4	工况 10	-	-
	撞击点 5	工况 11	-	-

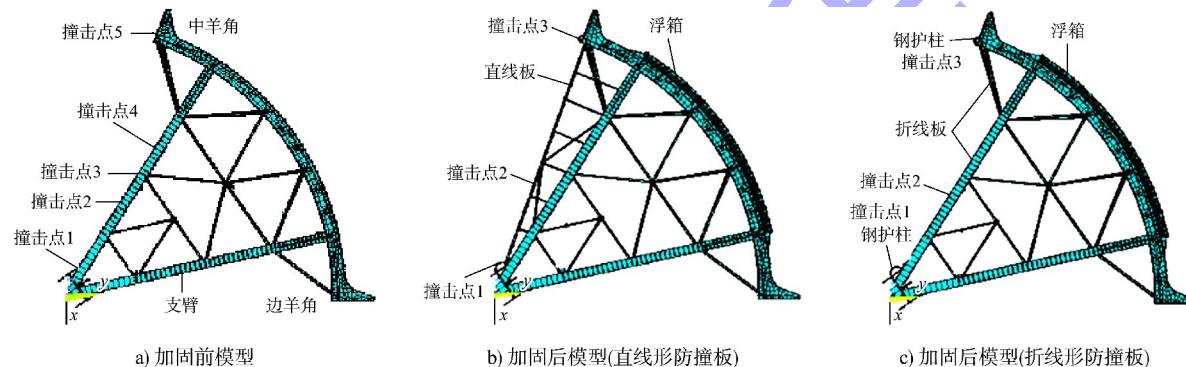


图 4 加固前后三角闸门撞击点位置

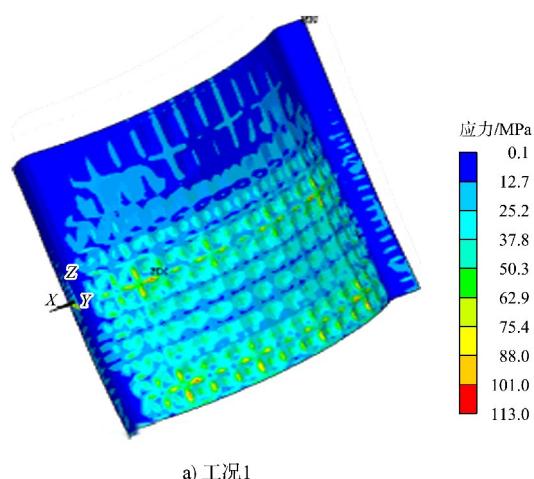
Fig. 4 Impact point position of triangular gate before and after reinforcement

3 三角闸门有限元计算结果

3.1 关门状态下典型工况有限元计算结果

3.1.1 闸门面板

工况 1 面板等效应力见图 5a), 其他工况最大等效应力见图 5b)。



a) 工况 1

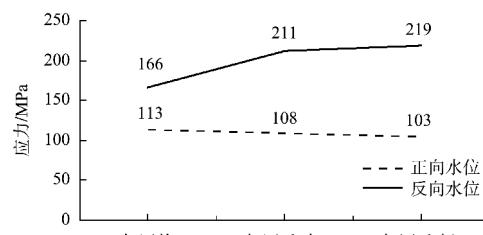


图 5 闸门面板等效应力

Fig. 5 Equivalent stress diagram of gate panel

3.1.2 主横梁

根据闸门结构布置, 主横梁计算见图 6; 工况 1 下各主横梁等效应力见图 7a)~c), 其他工况最大等效应力见图 7d)。

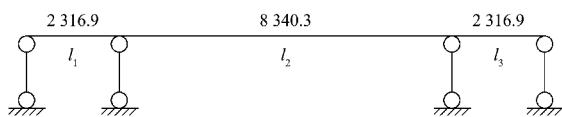
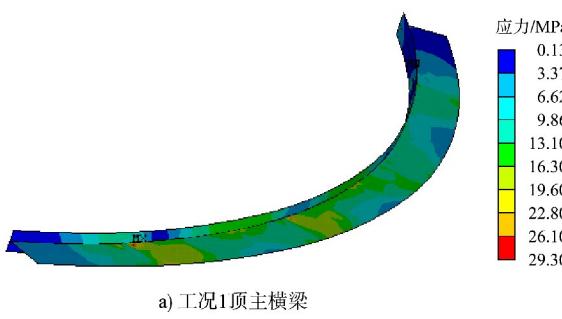
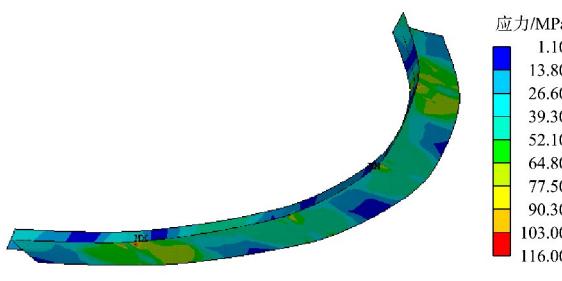


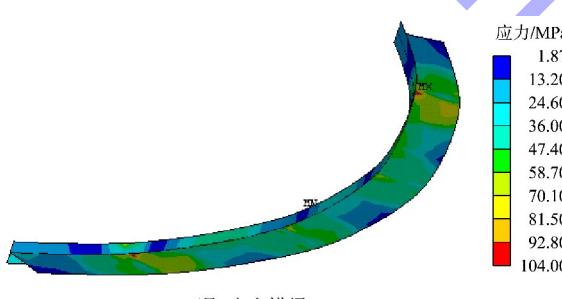
图 6 主横梁计算 (单位: mm)
Fig. 6 Calculation of main beam (unit: mm)



a) 工况1顶主横梁



b) 工况1中主横梁



c) 工况1底主横梁

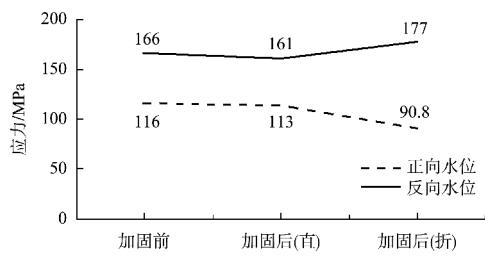


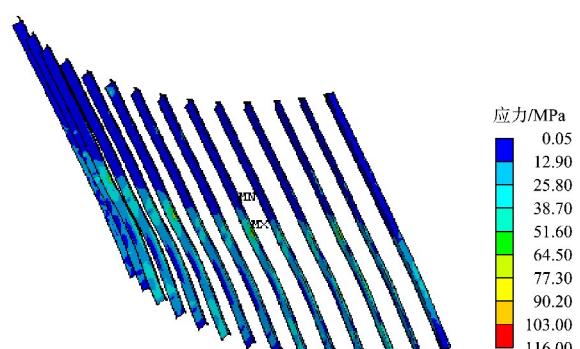
图 7 闸门主横梁等效应力

Fig. 7 Equivalent stress of gate main beam

3.1.3 坚纵梁

工况 1 坚纵梁等效应力云图见图 8a), 其他工

况最大等效应力见图 8b)。



a) 工况1

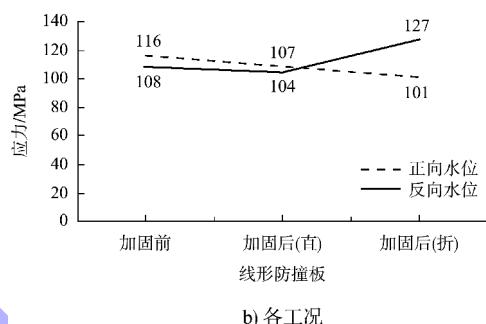
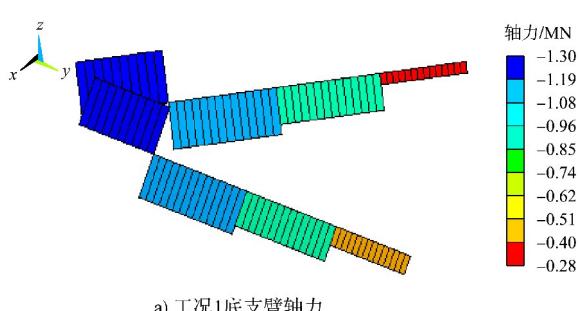


图 8 坚纵梁等效应力

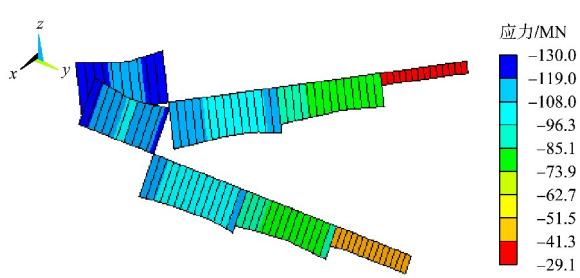
Fig. 8 Equivalent stress of vertical longitudinal beam

3.1.4 支臂杆

选取起控制作用的底支臂进行分析, 底支臂有限元结果见图 9。



a) 工况1底支臂轴力



b) 工况1底支臂最大应力

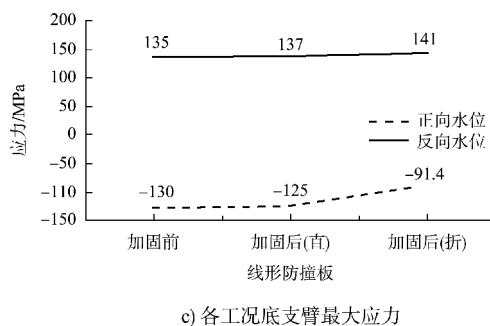


图 9 底支臂有限元结果

Fig. 9 Finite element results of bottom support arm

3.1.5 桁架腹杆

桁架腹杆杆件号见图 10, 工况 1 下 3 层水平桁架腹杆的轴向应力见表 4, 其他工况最大应力见表 5。

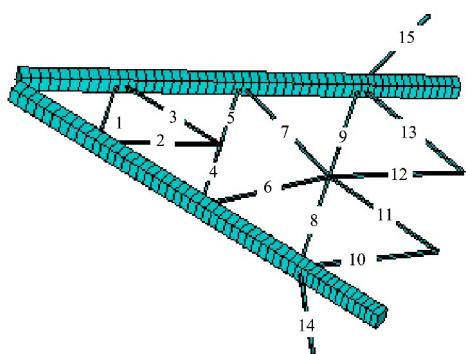


图 10 桁架腹杆

Fig. 10 Truss web member

表 4 桁架腹杆轴向应力

Tab. 4 Axial stress of truss web member

杆件号	腹杆轴向应力/MPa		
	顶桁架	中桁架	底桁架
1	-6.41	2.04	10.55
2	-3.31	-1.97	5.93
3	3.31	-5.64	-5.93
4	-6.60	35.62	49.38
5	-8.66	38.11	53.09
6	-42.62	-34.82	-45.64
7	2.72	-31.79	-48.26
8	19.39	18.91	12.56
9	0.77	17.66	27.81
10	-28.90	-41.98	-45.64
11	-1.48	-33.07	-27.93
12	-23.67	-37.92	-33.61
13	-2.37	-37.68	-50.42
14	-7.22	-26.70	-22.52
15	-4.73	-23.84	-21.12

表 5 桁架腹杆最大应力

Tab. 5 Maximum stress of truss web member

模型	最大拉应力/MPa				最大压应力/MPa			
	正向 水位	反向 水位	正向 水位	反向 水位	正向 水位	反向 水位	正向 水位	反向 水位
加固前	53.1	65.1	-50.4	-58.8				
加固后(直线形防撞板)	55.4	69.6	-50.8	-68.1				
加固后(折线形防撞板)	34.9	74.9	-34.7	-72.4				

3.1.6 支座反力

支座反力包括顶、中、底枢及启闭机处的反力, 关门状态 6 种工况支座反力见表 6。

表 6 关门状态支座反力

Tab. 6 Reaction force of support in closed state

水位	模型	支座反力/kN							
		顶枢		中枢		底枢		启闭杆	
		F_1	F_2	F_1	F_2	F_1	F_2	F_z	
正向 水位	加固前	-199	-128	699	677	1 320	1 402	699	367
	加固后(直线形防撞板)	-166	-237	665	788	1 324	1 378	669	367
	加固后(折线形防撞板)	-181	-369	544	928	1 021	931	663	367
反向 水位	加固前	-634	-820	-1 082	-960	-1 238	-1 040	699	-310
	加固后(直线形防撞板)	-470	-957	-1 061	-947	-1 306	-955	669	-425
	加固后(折线形防撞板)	-489	-1 078	-1 127	-1 735	-1 510	-1 101	663	-348

注: F_1 、 F_2 为各枢座沿着两拉杆方向的支座反力, 压力为正, 拉力为负; F_z 为底枢竖直方向的反力, 向上为正, 向下为负; 启闭机处反力则是沿着启闭杆方向, 压力为正, 拉力为负。

3.2 开门状态下受船舶撞击时的有限元计算结果

3.2.1 防撞板

以工况 13 为代表, 阀门受到船舶撞击时防撞板的变形和应力见图 11。

3.2.2 主体构件

工况 13 下阀门主体构件的应力与变形见图 12。

3.2.3 支座反力

加固前后 3 种模型的阀门结构受到船舶撞击时, 支座反力见表 7。

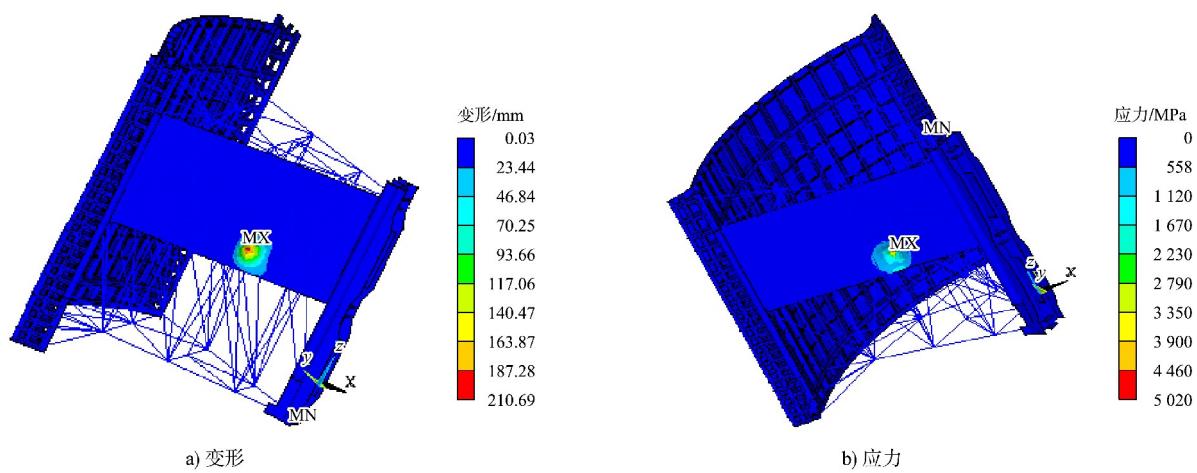


图 11 防撞板变形和应力

Fig. 11 Deformation and stress of anti-collision plate

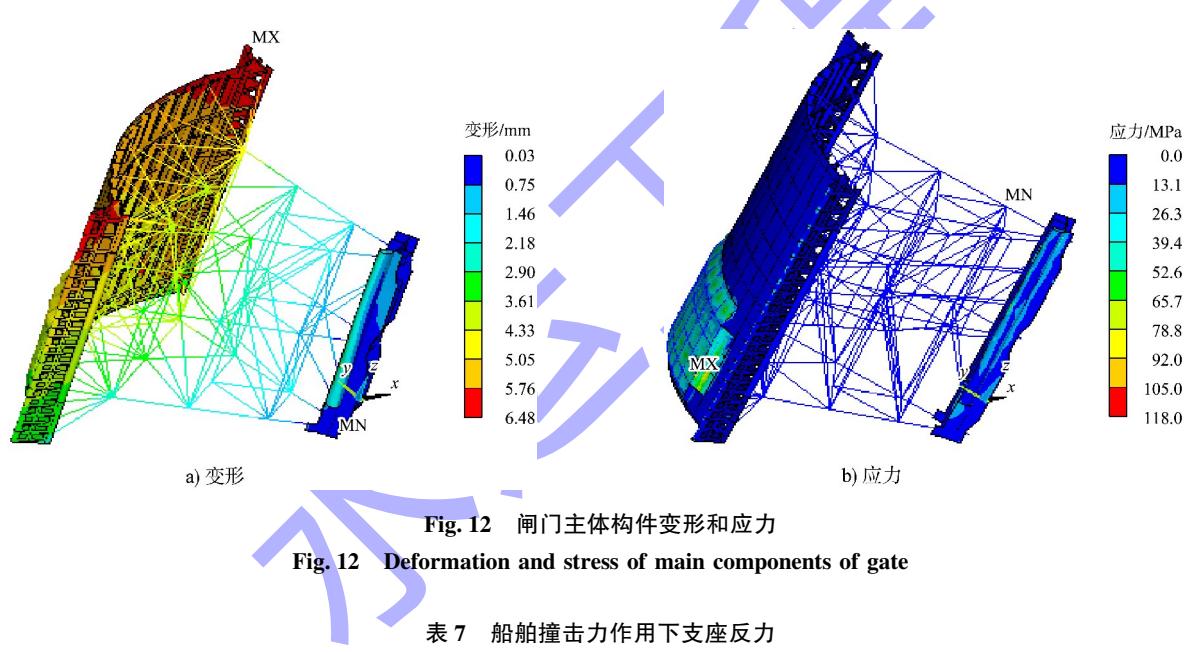


图 12 闸门主体构件变形和应力

Fig. 12 Deformation and stress of main components of gate

表 7 船舶撞击力作用下支座反力

Tab. 7 Support reaction under ship impact force

模型	撞击点 编号	闸门支座反力/kN							
		顶枢		中枢		底枢		启闭杆	
		F_1	F_2	F_1	F_2	F_1	F_2	F_z	
加固前	1	-368	543	-330	452	347	-336	699	40
	2	-473	515	-486	310	228	-305	699	94
	3	-533	531	-464	283	173	-298	699	123
	4	-588	541	-463	261	121	-294	699	149
	5	-833	650	-385	130	-93	-324	699	484
加固后 (直线形防撞板)	1	-529	488	-299	546	171	-118	669	12
	2	-693	550	-423	269	15	-106	669	208
	3	-908	562	-516	235	-118	-113	669	331
加固后 (折线形防撞板)	1	-648	599	-12	369	31	-28	663	95
	2	-735	593	-282	256	41	-50	663	119
	3	-1 040	651	-282	121	-179	-50	663	467

3.2.4 加固效果对比

为了进一步验证加固效果, 选取易被船舶撞击

的立柱、中直臂、中羊角作为典型构件进行分析, 船舶撞击闸门某构件时其最大应力及位移见表 8。

表 8 被撞击构件最大应力与位移
Tab. 8 Maximum stress and displacement of impacted member

模型	立柱 最大应力/MPa	立柱 最大位移/mm	中直臂 最大应力/MPa	中直臂 最大位移/mm	中羊角 最大应力/MPa	中羊角 最大位移/mm
加固前	3 130	210	124	0.57	6 420	41.0
加固后(直线形防撞板)	286	28	40	0.49	829	9.4
加固后(折线形防撞板)	424	63	71	0.33	832	10.0

4 结论

1) 不考虑船舶撞击力作用, 关门状态正向水位时, 加固后闸门的面板的最大等效应力有所减小, 而在反向水位时, 加固后闸门结构的面板最大应力比加固前增加约 30%, 这是由于闸门增设浮箱后, 反向水位作用下底部面板区域两侧的水压力无法互相抵消, 导致面板底部应力增大。

2) 主横梁中, 中横梁应力与变形最大, 底横梁次之, 顶横梁最小, 这一结论与“主横梁非等荷载布置, 近似取相邻间距之和的一半”^[15]的假定一致。

3) 3 层支臂中的底支臂起控制作用, 底支臂在立柱附近应力最大; 正向水位时底支臂为压弯构件, 反向水位时为拉弯构件。

4) 不考虑船舶撞击力作用, 各枢座的水平支座反力由闸门自重和水压力两部分叠加而成。在自重荷载作用下, 水平支座反力为拉力; 水压力引起的支座反力在正向水位下为压力, 反向水位时则为拉力。在反向水位下, 水压力和闸门自重引起的支座反力均为拉力, 因此顶、中、底枢处 F_1 、 F_2 均为拉力且底枢处最大; 正向水位下, 顶枢处因为水压力比较小, 引起的支座反力(压力)小于闸门自重引起的拉力, 因此顶枢处 F_1 、 F_2 为拉力, 而中、底枢处的水压力较大, 引起的支座反力(压力)大于自重引起的拉力, 因此中、底枢处 F_1 、 F_2 均为压力。 F_z 为闸门的自重减去浮箱的

浮力, 增设防撞板、浮箱等加固设施后, F_z 不但没有增大反而减小, 验证了浮箱的作用。

5) 船舶撞击闸门的作用主要集中在受撞部位附近, 表现为受撞点附近的防撞板出现显著的应力集中且伴有较大的塑性变形。通过提取主体构件的应力和变形数据, 得出增设防撞板可有效缓冲船舶对三角闸门对主体构件的撞击, 验证了防撞板的效果。

6) 船舶撞击立柱和中直臂附近时, 直线形防撞板闸门构件与折线形防撞板相比, 最大应力降低 30%~40%, 变形降低 50% 左右; 船舶撞击中羊角附近时, 两种防撞板闸门构件最大应力与变形差距较小, 直线形防撞板防撞性能更优。

7) 在对三角闸门进行有限元分析时, 船舶撞击力作为静荷载施加于所建模型的撞击点上, 然而, 船舶撞击闸门是一个动态过程, 下一步将在此研究基础上构建网格更加细化的闸门与船舶模型, 并采用动力有限元程序模拟闸门在受到船舶撞击整个过程中的动态响应, 进一步分析闸门结构在船舶撞击力作用下的应力及变形。未来研究还应进一步分析浮箱在闸门内侧的布置形式, 为浮箱设置提供更全面的参考依据。

参考文献:

- [1] 迟朝娜. 船闸三角闸门结构的空间有限元分析[D]. 南京: 河海大学, 2007.
CHI Z N. Spatial finite element analysis of triangular gate structure of ship lock[D]. Nanjing: Hohai University, 2007.

- [2] 单立博. 船舶撞击下弧形钢闸门的动力响应分析[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023.
- SHAN L B. Dynamic response analysis of arc steel gate under ship collision [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023.
- [3] 江固. 船舶撞击作用下人字闸门结构的力学响应特征研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.
- JIANG G. Mechanical response characteristics of herringbone gate structures under ship impacts [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2024.
- [4] 徐文林. 海安船闸闸首三角闸门浮箱设置问题探析[J]. 珠江水运, 2025(3): 120-122.
- XU W L. Discussion on floating box setting of triangular gate at head of Haian Shiplock [J]. Pearl River water transport, 2025(3): 120-122.
- [5] 李芬. 船闸闸门增设浮箱问题的探讨[J]. 江苏船舶, 2004, 21(3): 8-9, 12.
- LI F. Discussion on lock gate superimposing float chamber [J]. Jiangsu ship, 2004, 21(3): 8-9, 12.
- [6] 顾磊, 杨铎, 胡友安. 浮箱结构对三角闸门静动力特性影响[J]. 中国港湾建设, 2020, 40(12): 16-19.
- GU L, YANG D, HU Y A. Influence of buoyancy tank structure on static and dynamic characteristics of triangular gate [J]. Chinaharbour engineering, 2020, 40(12): 16-19.
- [7] 刘浩. 三角闸门浮箱设置方案对比分析与研究[J]. 江淮水利科技, 2022(3): 32-35.
- LIU H. Comparative analysis and research on the design scheme of buoyancy tank for the sector lock gate [J]. Jianghuai water resources science and technology, 2022(3): 32-35.
- [8] 邢述炳, 黄珑, 朱召泉. 船闸人字闸门浮箱的设置方法[J]. 水运工程, 2016(8): 112-118.
- XING S B, HUANG L, ZHU Z Q. Methods of setting buoyancy tank for the miter gate of ship lock [J]. Port & waterway engineering, 2016(8): 112-118.
- [9] 江苏省交通规划设计院. 谅壁船闸工程设计计算书[R]. 南京: 江苏省交通规划设计院, 1979.
- Jiangsu Provincial Transportation Planning and Design Institute. Jianbi ship lock engineering design calculation sheet [R]. Nanjing: Jiangsu Provincial Transportation Planning and Design Institute, 1979.
- [10] 曹渊. ANSYS18.0 有限元分析从入门到精通[M]. 北京: 电子工业出版社, 2018: 45-60.
- CAO Y. Ansys18.0 finite element analysis from introduction to mastery [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2018: 45-60.
- [11] 马晓攀, 王海建. 船舶撞击作用下船闸人字门三维有限元动力分析[J]. 广东水利水电, 2022(8): 1-6.
- MA X P, WANG H J. Three dimensional finite element dynamic analysis of miter gate under ship impact [J]. Guangdong water resources and hydropower, 2022 (8): 1-6.
- [12] 水工建筑物荷载设计规范: SL 744—2016[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.
- Specification for load design of hydraulic structures: SL 744-2016 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2016.
- [13] 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Load code for the design of building structures: GB 50009-2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [14] 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.
- [15] 《水电站机电设计手册》编写组. 水电站机电设计手册[M]. 北京: 水利电力出版社, 1989: 197.
- Compilation group of *Electromechanical Design Manual of Hydropower Station*. Electromechanical design manual of hydropower station [M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1989: 197.

(本文编辑 王传瑜)