



# 三角闸门止水强度与变形的有限元分析

曹晓军<sup>1</sup>, 蔡建国<sup>2</sup>, 蒋昊敏<sup>2</sup>, 张 纬<sup>1</sup>, 王玉生<sup>1</sup>

(1. 安徽省港航建设投资集团有限公司, 安徽 合肥 230092;

2. 东南大学, 国家预应力工程技术研究中心, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 目前, 止水的研究多在止水的布置、设计、施工等方面, 而针对闸门工作状态下止水的受力能力与变形性能的研究较少。而且, 关于止水性能的研究大多只针对止水自身, 实际工程中, 止水固定在船闸上共同受水头作用, 因此考虑止水与船闸连接状态下的受力情况是有必要的。针对以上问题, 以裕溪一线船闸扩容改造工程中 34 m 口门三角闸门为例, 选取 2 个实际工况与 2 个附加工况对止水与闸门整体进行有限元仿真, 分析各工况下止水的工作状态与受力、变形能力, 得知止水的强度满足要求, 底止水与边羊角止水处于压紧状态, 变形适应性良好, 中羊角止水对抑制缝隙扩大起到积极作用。

**关键词:** 止水; 受力性能; 变形; 有限元仿真

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)03-0024-06

## Finite element analysis of waterstop performance of triangular gate

CAO Xiao-jun<sup>1</sup>, CAI Jian-guo<sup>2</sup>, JIANG Hao-min<sup>2</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>, WANG Yu-sheng<sup>1</sup>

(1. Anhui Provincial Port & Shipping Construction Investment Group Co., Ltd., Hefei 230092, China;

2. Southeast University, National Prestress Engineering Research Center, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** At present, the research on waterstop is mostly in the layout, design, and construction, while that on the stress capacity and deformation performance of waterstop under the working state of the gate is less. Moreover, most of the research on the waterstop performance is only for the waterstop itself. In actual engineering, the waterstop is fixed on the ship lock and is jointly affected by the water head. Therefore, it is necessary to consider the force when the waterstop is connected to the ship lock. Taking the 34 m-entrance triangular gate in the Yuxi ship lock expansion and reconstruction project as an example, we select two actual working conditions and two additional working conditions to conduct finite element simulation on the waterstop and the gate as a whole and analyze the working state, stress and deformation performance under each working condition. The result shows that the strength of the waterstop meets the requirements. The bottom waterstop and the side horn waterstop are in a compressed state, and the deformation performance is favorable. The middle horn waterstop plays a positive role in restraining the expansion of the gap.

**Keywords:** waterstop; mechanical performance; deformation; finite element simulation

三角闸门是由两扇绕垂直轴转动的三角形或扇形门扇构成的船闸闸门, 不但能承受双向水头, 而且能在闸门上、下游有一定的水位差时启闭, 使用灵活<sup>[1-2]</sup>。止水是船闸运行中的关键部件, 其

好坏直接关系到整个船闸系统运行与检修<sup>[3-4]</sup>。三角闸门止水通常由底止水、边羊角止水和中羊角止水组成。三角闸门止水所用的材料包括钢止水、尼龙止水和橡胶止水等<sup>[5]</sup>。止水的作用主要是阻

止水流从缝隙渗流和喷射<sup>[6]</sup>。大量的工程实践表明, 相当数量工程的止水效果不良, 不仅降低了船闸运营的效率, 还可能诱发止水的自激振动现象, 造成安全隐患<sup>[7]</sup>。

目前, 关于止水的研究多在止水的布置、设计、施工等方面, 而针对闸门工作状态下止水的受力能力与变形性能的相关研究较少<sup>[8-14]</sup>。而且, 关于止水性能的研究大多只针对止水自身, 实际工程中, 止水固定在船闸上共同受水头作用, 因此考虑止水与船闸连接状态下的受力情况是有必要的。

本文将以裕溪一线船闸扩容改造工程为研究背景, 通过有限元模拟的方式, 分析研究三角闸门止水在使用状态下的工作性能。针对裕溪一线船闸的底止水、中羊角止水和边羊角止水, 建立4个荷载工况下船闸与止水的整体有限元模型, 研究止水在重力和水荷载作用下自身强度是否满足要求, 同时判断止水和船闸自身的刚度与变形适

应性是否满足止水性能要求。

## 1 有限元模型的建立

裕溪一线船闸扩容改造工程新建船闸为Ⅱ级通航建筑物, 设计最大船型为2 000吨级船舶, 船闸基本尺度为290 m×34 m×5.6 m(闸室长×口门宽×门槛最小水深)。船闸承受双向水头作用, 最大正向设计水头4.98 m, 最大反向设计水头-3.80 m, 上、下闸首工作闸门均采用三角门型。

该三角闸门止水分为主底止水、边羊角止水和中羊角止水3个部分。在充分调研现有闸门止水形式的基础上, 为了更好地适应船闸门头下垂, 底止水采用L型止水; 为使止水在水压作用下具有较好的压紧效果, 边羊角止水采用V1型止水, 中羊角止水采用双P型结构, 如图1所示。止水材料采用防100号橡胶, 即SF6674, 该橡胶类止水材料可视为应力和应变非线性、体积不可压缩的超弹性体。

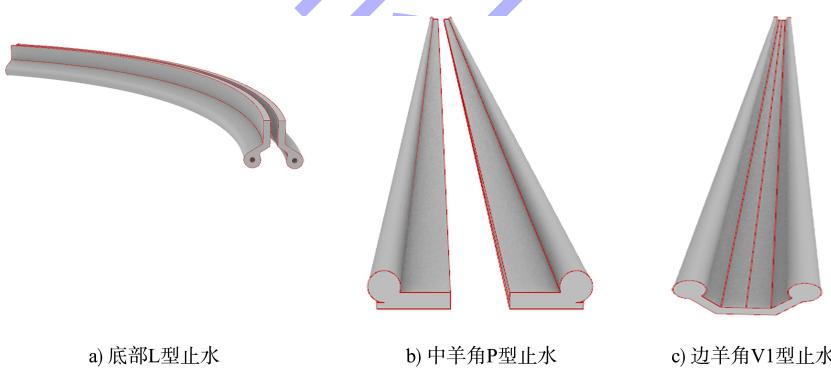


图1 止水

以裕溪船闸三角门的下闸首作为分析对象, 其中下游为面板外法线方向。根据船闸结构构造形式和实际尺寸, 采用通用有限元软件ABAQUS建立结构有限元模型, 如图2、3所示。闸门主体的单元分为2种, 其中桁架采用梁单元B31建模, 面板、羊角和端柱采用壳单元S4R。在端柱的顶部限制x、y2个方向约束, 在端柱底部限制x、y和z3个方向的约束。止水采用8结点线性六面体、杂交、恒压平面应变单元, 为了解决橡胶材料的不可压缩性, 橡胶材料单元采用基于Herrmann公式的不可压缩单元。

设置4个工况对船闸与止水进行分析, 其中工况1为闸门自重作用下工况, 工况2为闸门最不利荷载工况, 工况3、4为附加工况。

工况1: 无水状态下的三角门安装工况;

工况2: 上游设计水位8.5 m, 下游设计水位2.7 m;

工况3: 上游设计水位10 m, 下游设计水位2.7 m;

工况4: 上游设计水位15 m, 下游设计水位2.7 m。

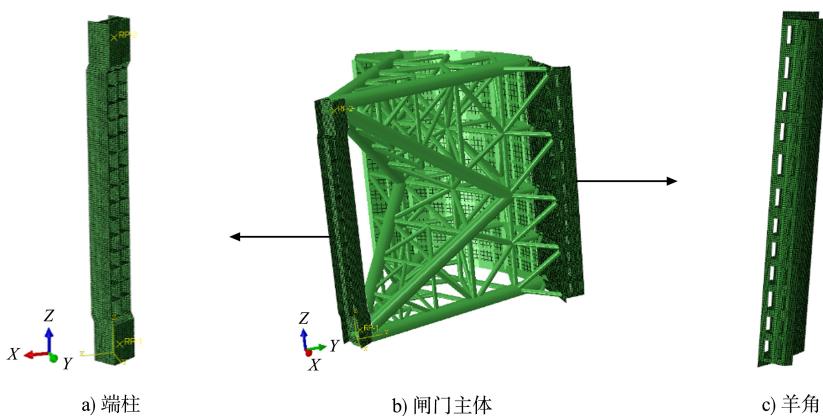


图 2 三角闸门有限元模型

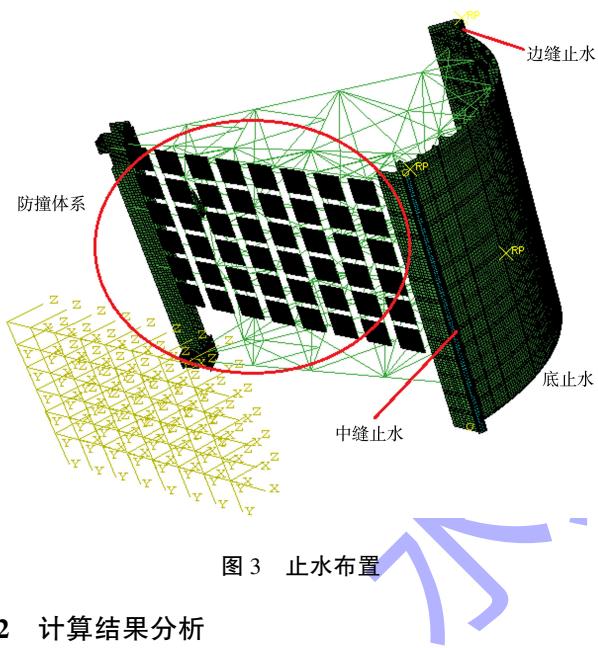


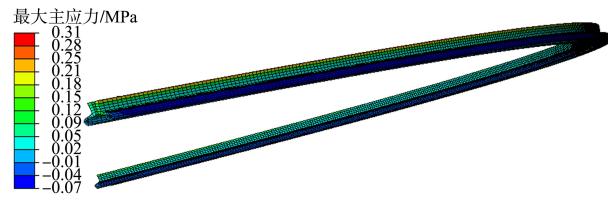
图 3 止水布置

## 2 计算结果分析

### 2.1 止水强度

通过对各工况分析结果的处理,选取裕溪一线船闸三角门实际情况下的最不利荷载工况 2 进行止水结构自身强度验算。计算得到止水应力云图,如图 4 所示。

从图 4 可知,底止水最大主应力为 0.31 MPa; 中羊角止水最大主应力为 0.15 MPa; 边羊角止水最大主应力为 0.64 MPa, 均小于 SF6674 橡胶拉伸强度 18 MPa, 因此止水结构满足强度要求。



a) 底止水

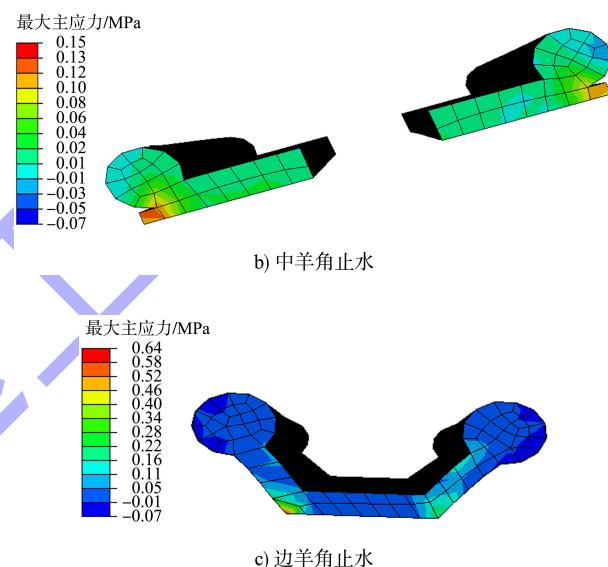


图 4 止水应力云图

### 2.2 止水变形

#### 2.2.1 底止水

选取闸门底部沿闸门弧长方向均匀布置的 6 个参照点位,从中缝处依次布置,如图 5 所示。

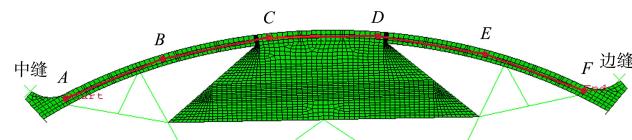


图 5 对应有限元中闸门底部的实际点位

表 1 为各工况下底止水的竖向与径向位移。工况 1 中缝羊角处偏重,闸门向中缝羊角方向有一定倾斜,但底止水处于压紧状态,止水性能良好。此工况最大门头下垂-8.49 mm,止水最大竖向变形-9.35 mm,见图 6a)。工况 2 底止水处于

压紧状态, 此工况最大门头下垂-3.66 mm, 止水竖向压缩变形为-4.18 mm, 见图 6b)。根据底止水工况 3 与工况 4 的位移可知, 随着水荷载的增

大, 底止水向外的径向位移逐渐减小, 由向外逐渐变为向内。

表 1 各工况底止水位移

位移方向	工况	A	B	C	D	E	F
竖向 (门头下垂量)	1	-8.49	-8.43	-8.42	-8.35	-8.20	-8.12
	2	-3.66	-3.49	-3.31	-3.18	-3.14	-3.10
	3	-3.75	-3.61	-3.46	-3.28	-3.26	-3.15
	4	-3.83	-3.75	-3.56	-3.30	-3.29	-3.21
竖向	1	3.92	4.17	4.14	4.14	4.16	4.04
	2	1.46	1.77	1.56	1.59	1.76	1.40
	3	1.29	1.36	1.22	1.18	1.33	1.27
	4	-1.45	-0.73	-0.92	-0.89	-0.65	-1.45

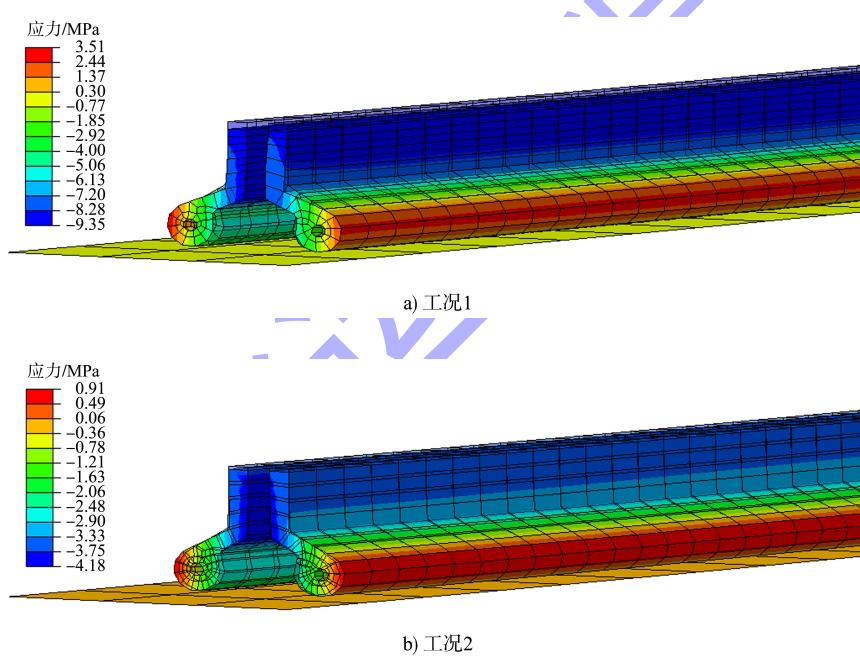


图 6 底止水应力云图

## 2.2.2 中羊角止水

船闸结构安装完成后在重力作用下会自然下垂, 对中羊角止水造成上部偏于压紧的趋势, 而下部止水则可能处于松弛状态, 从而产生间隙。选取闸门中缝从上至下均匀布置的 6 个参照点位, 如图 7 所示。

表 2 为各工况中缝位移与变形。

从表 2 可以看出, 工况 1 作用下闸门中羊角止水上部贴紧刚体, 下部止水留有空隙。上游水荷载存在使中羊角止水下部缝隙扩大的趋势, 随着上游水荷载的增大, 上部止水总能紧密贴合, 但下部止水缝隙则会逐渐扩大并向上延伸。同时, 随着荷载的增大, 止水变形也逐渐增大, 从而抑制下部缝隙的进一步扩大。说明该止水可帮助船闸减小缝隙。

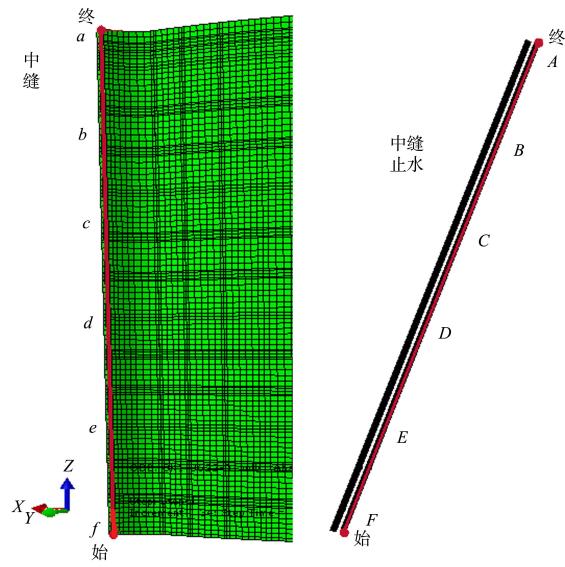


图 7 中缝计算参照点

表 2 各工况中缝位移与变形

工况	位置	闸门位移/mm	止水位移/mm	止水变形/mm
1	A	0.31	0.00	-0.31
	B	0.19	0.00	-0.19
	C	0.06	0.00	-0.06
	D	-0.06	-0.06	0.00
	E	-0.14	-0.14	0.00
	F	-0.22	-0.22	0.00
2	A	0.46	0.00	-0.46
	B	0.23	0.00	-0.23
	C	-0.20	0.17	0.03
	D	-0.97	0.87	0.10
	E	-1.86	-1.67	0.19
	F	-2.64	-2.43	0.21
3	A	0.52	0.00	-0.52
	B	0.16	0.00	-0.16
	C	-0.51	-0.44	0.07
	D	-1.51	-1.35	0.16
	E	-2.54	-2.28	0.26
	F	-3.36	-3.05	0.32
4	A	0.35	0.00	-0.35
	B	-0.49	-0.39	0.10
	C	-1.57	-1.31	0.26
	D	-2.38	-2.11	0.27
	E	-3.10	-2.78	0.32
	F	-3.60	-3.19	0.41

### 2.2.3 边羊角止水

船闸结构在重力作用下对边羊角止水造成的影响同样是存在上部压紧、下部松弛的趋势。选

取闸门边缝从上至下均匀布置的 6 个参照点位，布置如图 8 所示。

表 3 各工况边缝位移与变形

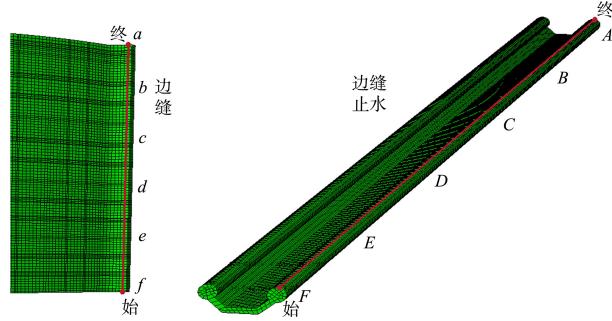


图 8 边缝计算参照点

表 3 各工况边缝位移与变形

工况	位置	闸门位移/mm	止水位移/mm	止水变形/mm
1	A	0.47	0.00	-0.47
	B	0.35	0.00	-0.35
	C	0.23	0.00	-0.23
	D	0.11	0.00	-0.11
	E	0.00	0.00	0.00
	F	-0.10	-0.10	0.00
2	A	0.72	0.00	-0.72
	B	0.39	0.00	-0.39
	C	-0.10	0.00	0.10
	D	-1.04	0.00	1.04
	E	-2.22	0.00	2.22
	F	-2.57	0.00	2.57
3	A	0.78	0.00	-0.78
	B	0.30	0.00	-0.30
	C	-0.45	0.00	0.45
	D	-1.79	0.00	1.79
	E	-3.11	0.00	3.11
	F	-3.39	0.00	3.39
4	A	0.44	0.00	-0.44
	B	-1.50	0.00	1.50
	C	-2.94	0.00	2.94
	D	-3.81	0.00	3.81
	E	-3.67	0.00	2.67
	F	-3.60	-3.19	0.41

可以看出，在自重荷载作用下止水下部存在有 0.1 mm 的缝隙，随着水荷载的施加，缝隙消失，止水贴紧。随着水荷载的增大，闸门存在远

离接触面的趋势, 此时止水通过变形来贴紧缝隙, 因此总体表现为水荷载作用下, 边羊角止水处于压紧状态。说明边羊角止水效果良好, 变形适应性较高。

### 3 结论

- 1) 在各工况下, 底止水、边羊角止水和中羊角止水的强度均满足要求。
- 2) 底止水与边羊角止水均处于压紧状态, 变形适应性良好; 中羊角止水虽下部存在缝隙, 但止水对抑制缝隙扩大起到积极作用, 且初始缝隙可通过安装预压得到解决。

### 参考文献:

- [1] 戴振华, 黄可璠. 三角闸门设计与改进[J]. 中国水运(下半月), 2017, 17(4): 89-90, 107.
- [2] 四川省交通厅内河勘察规划设计院. 船闸闸阀门设计规范: JTJ 308—2003[S]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [3] 李家熹. 阀门止水装置可靠性与失效分析[J]. 水运工程, 1992(11): 33-36, 13.
- [4] 陶然, 陈飞, 陈明华, 等. 三峡船闸人字门底枢检修低位顶门方案[J]. 水运工程, 2020(2): 152-156.
- [5] 房谷, 颜斌, 王兵. 浅谈船闸球节点弧形三角门安装质

(上接第 11 页)

### 参考文献:

- [1] 张志宁, 张晓辉, 张骞. 洪蓝船闸闸门刚性防撞体系碰撞研究[J]. 中国水运(下半月), 2018, 18(11): 92-93.
- [2] 张启灵, 李端有, 周武. 船舶撞击作用下弧形闸门的动力响应[J]. 水电能源科学, 2012, 30(1): 117-119, 216.
- [3] 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.
- [4] 许佳妮. 船-闸撞击力分析及三角闸门主要部件的吸能优化设计[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2012.
- [5] 雷正保, 李丽红, 雷沐羲, 等. 新型柔性护栏碰撞安全性仿真分析及实车验证[J]. 振动与冲击, 2013, 32(22): 28-31.

量控制的几点体会[C] //中国航海学会船闸专业委员会 2014 年学术交流会论文集. 北京: 中国航海学会船闸专业委员会, 2014.

- [6] 刘桢. 浅谈混凝土闸门的漏水与止水[J]. 知识经济, 2011(11): 111.
- [7] 熊润娥, 严根华. 水工闸门止水结构动力特性与体型优化[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(6): 798-802, 818.
- [8] 王小健. 船闸三角门中边缝止水施工优化措施研究[J]. 中国水运(下半月), 2017, 17(11): 141-142.
- [9] 王新, 胡亚安, 严秀俊. 高水头阀门顶止水抗冲磨与变形特性试验[J]. 工程力学, 2018, 35(S1): 349-354.
- [10] 居祥, 王定山. 浅议三峡永久船闸输水廊道反弧门止水安装[J]. 治淮, 2017(7): 42-43.
- [11] 杨斌, 刘宏敏, 刘礼华. 大型船闸移动工作门伸缩式止水水密性验证方法[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(5): 163-166, 172.
- [12] 吴启和, 仇正中, 赵东梁, 等. 富春江船闸改造加固工程止水结构的制作与安装[J]. 中国水运(下半月), 2016, 16(8): 249-250.
- [13] 许志荣. 浅谈连江各船闸人字门止水改造的施工工艺[J]. 人民珠江, 2003(S1): 42-43.
- [14] 郑雁. 葛洲坝 3 号船闸反弧门止水装置改进方案的研究[J]. 水运工程, 2001(5): 41-44.

(本文编辑 郭雪珍)

- [6] 雷正保, 阳彪, 宁寒, 等. 新型柔性护栏矩形截面立柱优化[J]. 中外公路, 2015, 35(3): 323-327.
- [7] 雷正保, 廖卓, 刘助春. 4 索交叉缠绕式 A 级柔性护栏优化设计[J]. 交通科技, 2016(3): 177-179.
- [8] 雷正保, 廖卓, 刘助春. 交叉缠绕式柔性护栏端部锚固优化设计[J]. 山东大学学报(工学版), 2016, 46(3): 93-98.
- [9] 张志宁, 张晓辉, 张骞, 等. 洪蓝船闸闸门柔性索结构防撞体系碰撞研究[J]. 中国水运(下半月), 2019, 19(6): 115-116, 124.
- [10] 中交水运规划设计院. 船闸总体设计规范: JTJ 305—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.

(本文编辑 王璁)