



# 中低水头船闸人字门浮箱及背拉杆 抗扭能力研究<sup>\*</sup>

项博良<sup>1</sup>, 崔岩松<sup>2</sup>, 张燎军<sup>1</sup>, 丁典典<sup>1</sup>

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210024; 2. 宿迁市港航事业发展中心, 江苏 宿迁 223800)

**摘要:** 浮箱和背拉杆是中低水头船闸人字门提高抗扭能力的有效措施, 但是考虑二者共同预应力的研究工作较少。基于江苏某在建船闸人字门, 建立人字门空间薄壁结构有限元模型, 对比设置不同浮箱的人字门抗扭能力, 提出了较为合理的浮箱设置方案。在此基础上, 研究不同背拉杆布置方式下人字门的抗扭能力, 提出一种背拉杆预应力的改进优化模型, 使施加预应力后闸门的整体抗扭能力得到更大提高。研究结果表明: 采用 U 形浮箱及预应力背拉杆进行人字门组合抗扭的方案, 可有效提高闸门的整体抗扭能力。研究方法和研究成果可为中低水头船闸人字门的设计提供参考。

**关键词:** 中低水头船闸; 人字门; 浮箱; 背拉杆; 抗扭刚度; 改进预应力优化模型

中图分类号: U 641; TV 663

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)04-0137-06

## Torsion resistance of miter gate buoyancy tank and back tie rod of medium and low head ship lock

XIANG Bolian<sup>1</sup>, CUI Yansong<sup>2</sup>, ZHANG Liaojun<sup>1</sup>, DING Diandian<sup>1</sup>

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China;

2. Suqian Port and Shipping Development Center, Suqian 223800, China)

**Abstract:** Buoyancy tank and back tie rod are effective measures to improve the torsional resistance of miter gate of medium and low head ship lock. There is less research work considering both pontoon and back tie prestress. Based on the miter gate of a ship lock under construction in Jiangsu Province, a finite element model of miter gate space thin-walled structure is established in this paper. The torsion resistance of miter gates with different pontoons is calculated and compared, and a more reasonable pontoon setting scheme is proposed. On this basis, the torsion resistance of miter gate with different arrangement of back tie rod is studied, and an improved optimization model of back tie rod prestress is proposed, which can improve the overall anti-torsional ability of the gate after the prestress is applied. The research results show that the combined torsion resistance scheme of miter gate with U-shaped pontoon and prestressed back tie rod proposed in this paper can effectively improve the overall torsion resistance of the gate. The research methods and results can provide a reference for the design of miter gate of medium and low head ship lock.

**Keywords:** medium and low head ship lock; miter gate; buoyancy tank; back tie rod; torsion resistance; improved prestress optimization model

人字门为开口空间薄壁钢结构, 抗扭刚度较小。由于其剪切中心与重心不在同一平面, 在自

重力及启闭时壅水压力等荷载的作用下, 闸门将发生偏向上游或下游的翘曲变形。过大的翘曲变

收稿日期: 2022-07-18

\*基金项目: 江苏省交通运输厅科技项目 (2020QD28)

作者简介: 项博良 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事水工结构数值仿真研究。

通讯作者: 张燎军 (1962—), 男, 教授, 博导, 主要从事水工结构数值仿真研究。E-mail: ljzhang@hhu.edu.cn

形将致使两扇闸门关闭合拢时不易精准对接，影响对称传力，也易引起漏水。研究增强人字门抗扭能力的方法和措施十分必要。

大中型船闸人字门通常采用设置背拉杆并施加预应力的方法增加门叶的抗扭刚度。美国陆军工程师兵团<sup>[1]</sup>提出了采用开口薄壁杆件理论计算人字门背拉杆预应力的方法，缺点是难以准确反映人字门空间薄壁结构的组合变形效应。傅作新等<sup>[2]</sup>、张燎军等<sup>[3-4]</sup>、何文娟<sup>[5]</sup>研究了开敞式大型人字门的背拉杆预应力的分析理论、施加方法以及对闸门抗扭能力的影响。余学佳等<sup>[6]</sup>研究了不同背拉杆预应力储备的人字门的抗扭刚度。孙保虎等<sup>[7]</sup>采用解析法和有限元法比较分析了人字门背拉杆施加预应力的效果。但上述文献中均未考虑人字门的浮箱。

在中低水头船闸中，增设浮箱及背拉杆是增大人字门的抗扭刚度的有效手段。增设浮箱后，浮箱产生的浮力可抵消部分闸门自重力，减轻蘑菇头压力，降低底枢蘑菇头的磨损，并减小人字门斜接柱竖向、径向位移<sup>[8]</sup>。邢述炳等<sup>[9]</sup>采用解析的方法研究了人字门浮箱的布置方式，但未考虑浮箱对人字门的空间扭曲变形的影响。王政平等<sup>[10]</sup>、邢述炳<sup>[11]</sup>分别将闸门侧向位移、闸门扭转变位和门头下垂量作为目标函数，研究人字门背拉杆的预应力优化问题。

本文基于江苏某在建船闸人字门工程，采用 ANSYS 结构分析软件，建立人字门三维薄壁结构有限元模型，计算增设浮箱、背拉杆对人字门抗扭刚度的影响，提出了改进预应力优化模型，进一步研究了背拉杆预应力的设计方法。

## 1 有限元模型

选取江苏某船闸下闸首人字门，其单扇闸门尺寸为  $11.48 \text{ m} \times 13.58 \text{ m} \times 1.50 \text{ m}$ (高×宽×厚)，最大工作水头  $4.68 \text{ m}$ ，最大启闭角度为  $67.5^\circ$ 。考虑到人字门采用对称布置，选取右门叶建立有限元仿真计算模型。

为了真实反映人字门的变形及受力，根据闸门各构件的受力特点，采用不同的薄壁单元进行模拟。人字门的面板、主梁腹板、主梁翼缘、纵隔板

等构件主要受面内和弯曲应力，采用 Shell 181 壳单元模拟；面板上的 T 形次梁及各种加劲肋主要受拉压、弯曲及扭转会力，采用可定义截面形状的 Beam 188 空间梁单元模拟；背拉杆、顶板 AB 杆及推拉杆主要受轴向力，采用 Link 8 杆单元模拟；门轴柱、斜接柱的支垫块主要传递关门挡水下的拱推力，采用 Solid 95 实体单元模拟。整体有限元模型共有节点 29 134 个、单元 29 946 个，其中壳单元 Shell 181、梁单元 Beam 188、杆单元 Link 8、实体单元 Solid 95 的单元数分别为 26 986、2 657、7、296 个。

三维有限元模型如图 1 所示，模型坐标原点为门轴柱支枕垫块支承中心(主梁轴线与推力隔板延长线交点)在水平面投影点； $x$  轴沿主梁轴向，指向斜接柱为正向； $y$  轴指向闸门迎水面； $z$  轴铅直向上。A、B 杆受靠闸墙支点  $x$ 、 $y$  向线位移约束，推拉杆受靠闸墙支点  $x$ 、 $y$ 、 $z$  线位移约束，底枢受旋转中心  $x$ 、 $y$ 、 $z$  向线位移约束。计算工况为无水悬挂(自重力)、有水悬挂(自重力+ $7.12 \text{ m}$  淹没水深)、启闭运行(自重力+ $7.12 \text{ m}$  淹没水深+ $0.2 \text{ m}$  壶水压力)。计算参数为弹性模量  $E = 206 \text{ GPa}$ 、密度  $\rho = 7 850 \text{ kg/m}^3$ 、泊松比  $\mu = 0.25$ 、单根背拉杆截面面积为  $69.62 \text{ cm}^2$ 。计算闸门在湿模态下的自振特性时，采用 Westergaard 附加质量法模拟动水压力，附加质量通过 ANSYS 中的 Mass 21 单元施加。

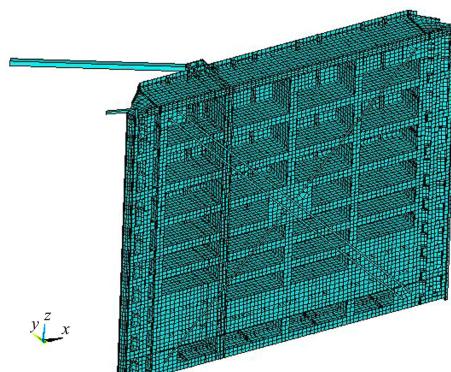


图 1 闸门三维有限元模型

## 2 人字门浮箱的抗扭能力

### 2.1 浮箱设置方式

为确定浮箱设置方式对人字门抗扭刚度的影

响, 分别对无浮箱、一层浮箱、一层半浮箱、两层浮箱 4 种设置方式进行研究, 见图 2。单个浮箱尺寸为  $2.7\text{ m} \times 1.5\text{ m} \times 1.0\text{ m}$ (长×宽×高), 最大浮箱顶高程 3.99 m, 小于下游最低通航水位 4.79 m, 浮箱均位于下游水面以下。表 1 为不同浮箱设置方式的相关参数。可以看出, 浮箱浮力与浮箱层数正相关, 当浮箱层数为两层时, 浮重比已达 43.2%。由于人字门在关门挡水时底梁承受约 400 kN 浮托力, 若再增加浮箱层数可能会引起闸门上浮, 不利于底止水线的布置。

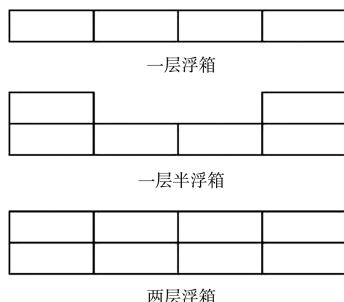


图 2 下游面浮箱设置方式

表 1 不同浮箱设置方式的相关参数对比

浮箱设置方式	人字门自重力/kN	最大浮力/kN	浮重比/%
无	715.4	0	0
一层	723.0	157.7	21.8
一层半	726.8	236.5	32.5
两层	730.6	315.3	43.2

表 2 人字门扭转变位及斜接柱竖向位移

浮箱设置 方式	人字门扭转变位/mm				斜接柱竖向位移/mm			
	无水悬挂	有水悬挂	开启运行	关闭运行	无水悬挂	有水悬挂	开启运行	关闭运行
无	6.03	6.03	-4.12	16.18	-3.03	-3.03	-0.48	-5.59
一层	5.25	4.09	-5.02	13.21	-2.86	-2.23	0.08	-4.55
一层半	4.70	3.16	-5.29	11.62	-2.75	-1.85	0.32	-4.02
两层	4.43	2.51	-5.55	10.56	-2.70	-1.54	0.55	-3.63

注: 径向位移(y 向)正值表示位移方向指向上游, 坚向位移(z 向)正值表示位移方向向上。

## 2.2.2 人字门固有频率

固有频率也能一定程度反映闸门的抗扭刚度。表 3 为不同浮箱设置方式下人字门干、湿模态的 1~5 阶固有频率。可以看出: 1) 人字门有水工况的各阶固有频率均有所下降; 2) 随着浮箱层数的增加, 人字门各工况下的 1、2 阶频率有所增加, 均为斜接柱底部(或顶部)向上游的

## 2.2 浮箱设置方式对人字门抗扭能力的影响

### 2.2.1 人字门扭转变位及斜接柱坚向位移

为全面了解不同浮箱设置方式对人字门的抗扭刚度的影响, 计算了无水悬挂、有水悬挂、开启运行及关闭运行 4 种工况。表 2 为各种工况下人字门的扭转变位(斜接柱端底梁与顶梁处的径向位移之差, 即 y 向相对径向位移)及坚向位移(斜接柱端底梁处)。可以看出, 无水悬挂工况下, 随着浮箱层数的增多, 人字门扭转变位及坚向位移相应减小, 浮箱层数越多, 下降程度越大。与不设浮箱相比, 一层半浮箱无水悬挂工况下人字门向上游扭转变位为 4.70 mm, 较无浮箱的 6.03 mm 下降 22.1%; 坚向位移为 2.75 mm, 下降 9.2%。在有水悬挂工况下, 浮箱产生的浮力抵消了部分自重力产生的扭矩, 人字门扭转变位为 3.16 mm, 下降 47.6%; 坚向位移为 1.85 mm, 下降 38.9%。结果表明, 增设浮箱可有效提高人字门的抗扭刚度, 并减少人字门斜接柱坚向位移。关闭运行工况是闸门开启和关闭运行的不利工况。此时, 动水阻力引起闸门向上游的扭转变形, 叠加自重力引起向上游的扭转变形, 无浮箱时扭转变位达到 16.18 mm, 而增设一层半浮箱后的扭转变位为 11.62 mm, 降低了 28.2%。

翘曲变形。

表 3 人字门干、湿模态的固有频率

模态	浮箱设 置方式	固有频率/Hz				
		1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶
干模态	无	2.49	9.03	13.61	14.88	18.09
	一层	2.51	9.55	13.61	14.87	18.78
	一层半	2.53	9.91	13.60	14.87	19.12
	两层	2.54	10.2	13.58	14.87	19.34

续表3

模态	浮箱设置方式	固有频率/Hz				
		1阶	2阶	3阶	4阶	5阶
湿模态	无	2.26	7.76	10.71	13.31	14.95
	一层	2.34	8.51	10.45	13.31	14.88
	一层半	2.38	8.90	10.43	13.30	14.86
	两层	2.39	9.04	10.38	13.27	14.85

### 2.2.3 小结

综上所述，人字门的抗扭能力随着浮箱层数的增加而增强。选用两层浮箱时，浮箱浮力与底梁浮托力之和约 715 kN，接近闸门自重力 730.6 kN，闸门的上浮稳定安全余度不够大。同时由于浮箱层数增加闸门的刚度随之增大，也相应增加了背拉杆预应力施加的难度。选用一层半浮箱时，浮箱浮力与底梁浮托力之和约为 636.5 kN，小于闸门自重力 726.8 kN，闸门无上浮风险，故该人字门选用一层半浮箱较为合理，此时人字门的门轴柱和斜接柱的径向位移也均满足规范<sup>[12]</sup>要求。

## 3 人字门背拉杆及其预应力的抗扭能力

### 3.1 人字门背拉杆设置

由于本工程是中低水头船闸，有时仅靠浮箱不足以满足设计规范要求，因此，本文重点探讨对已经设置浮箱的中低水头船闸人字门，进一步考虑施加背拉杆预应力后闸门的抗扭能力。为此，对采用一层半的 U 形浮箱分别计算无背拉杆、有背拉杆(图 3)、预应力背拉杆 3 种设置方式的人字门位移和应力。

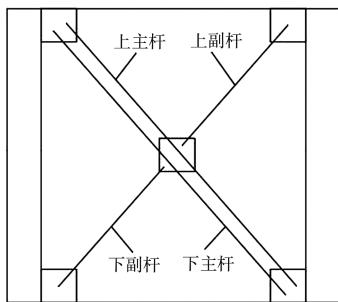


图 3 背拉杆设置方式

### 3.2 预应力优化模型

对文献[11]的背拉杆预应力优化模型适当加以改进。原模型的径向位移仅约束了人字门的扭

转变位，致使人字门的扭转变位虽然符合要求，但人字门有一个偏向下游的整体位移，表明闸门在径向的位移约束不足，且中低水头人字门的梁向位移一般不大。故对原模型进行了如下改进：模型的目标函数不变，删去门体侧倾量(斜接柱顶、底梁梁向位移之差)的约束，增加斜接柱底中相对径向位移(指斜接柱端底部与中部的径向位移之差)及斜接柱底径向位移的约束，以达到人字门扭转变位和斜接柱竖向位移的矢量在有水悬挂工况下最小的目的。改进后的预应力优化数学模型如下：

目标函数：

$$\min \{ \sqrt{\Delta^2 + V^2} \} \quad (1)$$

约束条件：

$$X_{j,\min} = \sum_{i=1}^n f_{ji} x_i + \sigma_{j,\min} \geq [\sigma]_{\min} \quad (2)$$

$$X_{j,\max} = \sum_{i=1}^n f_{ji} x_i + \sigma_{j,\max} \leq [\sigma]_{\max} \quad (3)$$

$$\text{abs}\{\Delta\} \leq [\Delta], \text{abs}\{V\} \leq [V], \text{abs}\{Z\} \leq [Z], R=0 \quad (4)$$

式中： $X_{j,\min}$ 、 $X_{j,\max}$  分别为第  $j$  根背拉杆的最小、最大总应力； $f_{ji}$  为在第  $i$  根背拉杆作用单位预应力引起第  $j$  根背拉杆的应力； $x_i$  为第  $i$  根背拉杆施加的预应力； $\sigma_{j,\min}$ 、 $\sigma_{j,\max}$  分别为除预应力外的荷载在第  $j$  根背拉杆产生的最小、最大应力； $[\sigma]_{\min}$ 、 $[\sigma]_{\max}$  分别为容许最小、最大应力，分别取为 10、100 MPa； $\Delta$  为门体扭转变位； $V$  为斜接柱竖向位移； $Z$  为斜接柱底中相对径向位移； $R$  为斜接柱底径向位移； $[\Delta]$ 、 $[V]$ 、 $[Z]$  为相应的容许值，参考规范分别取为 5、4、5 mm。

### 3.3 预应力优化结果比较

图 4 为在有水悬挂工况下采用改进前后的预应力优化模型得出的人字门的门轴柱及斜接柱沿高程的径向位移对比。可以看出，改进前后门轴柱的径向位移相差不大，均在 0 附近波动；但斜接柱的径向位移变化较大，改进前人字门扭转变位为 0.33 mm，斜接柱底中相对径向位移为 1.66 mm，均满足斜接柱平整度的要求。但斜接柱整体偏向下游位移约 9.00 mm，不利于两扇门的合拢对接。

改进后人字门扭转变位 0.51 mm, 斜接柱底中相对径向位移 0.25 mm, 均满足闸门平整度的要求, 斜接柱径向位移均在 0 附近, 更有利于闸门对接及止水。

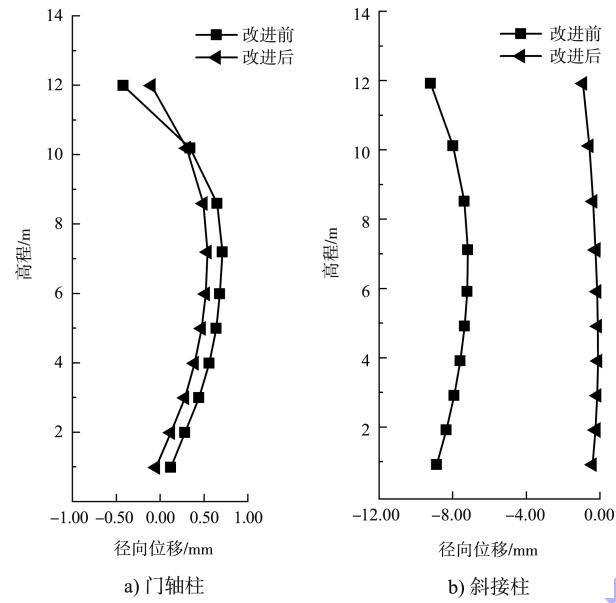


图 4 改进前后门轴柱及斜接柱径向位移对比

表 4 为改进前后预应力模型各工况下各背拉杆的实际应力。可以看出, 改进前后各背拉杆的实际应力均在容许应力的范围之内, 但改进后的背拉杆实际预应力更小, 便于工程中的施加。

表 4 改进前后各工况下背拉杆实际应力

优化模型	工况	上主杆 应力/MPa	下主杆 应力/MPa	上副杆 应力/MPa	下副杆 应力/MPa
改进前	无水悬挂	75.3	28.5	89.5	20.8
	有水悬挂	71.5	24.9	92.3	24.6
	开启运行	56.2	10.0	100	39.3
	关闭运行	86.9	39.7	84.7	10.0
改进后	无水悬挂	29.1	28.5	14.8	27.4
	有水悬挂	25.4	24.9	17.6	31.2
	开启运行	10.0	10.0	25.3	45.8
	关闭运行	40.8	39.7	10.0	16.6

以上分析表明, 改进后的预应力优化模型得出的各背拉杆预应力更加合理, 优化效果更好。由于背拉杆调试是在人字门无水悬挂时进行的, 此时背拉杆所需施加的实际预应力为上主杆 29.1 MPa, 下主杆 28.5 MPa, 上副杆 14.8 MPa, 下副杆 27.4 MPa。

改进前后人字门(有水悬挂)整体的径向位移见图 5。可以看出, 改进后的人字门除浮箱背板区受单向水荷载产生约 3.00 mm 的径向位移, 人字门其余部分径向位移基本处于 1.00 mm 以内, 达到了铅直悬挂的要求。

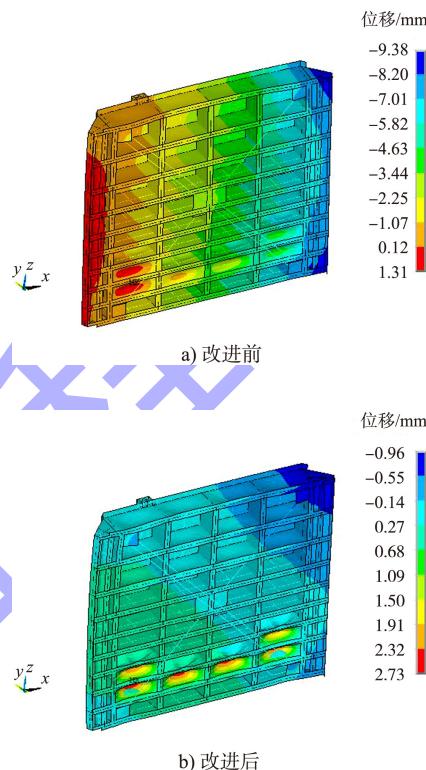


图 5 预应力方案改进前后人字门的径向位移

### 3.4 不同背拉杆设置方式对人字门抗扭刚度的影响

图 6 为 3 种背拉杆设置方式人字门有水悬挂工况下门轴柱和斜接柱的径向位移。由图可知, 无背拉杆、有背拉杆及预应力背拉杆 3 种方式的人字门抗扭刚度依次递增。无背拉杆人字门扭转变位达 11.00 mm, 不能满足人字门铅直悬挂的要求。有背拉杆人字门扭转变位为 3.20 mm, 较无背拉杆降低 71.3%, 满足人字门铅直悬挂的要求。预应力背拉杆斜接柱的扭转变位为 0.50 mm, 较无背拉杆及背拉杆分别降低 95.4% 和 84.4%。

以上分析表明, 预应力背拉杆在施加合适的预应力后, 可显著降低人字门的扭转变位, 使人字门启闭运行时斜接柱下端的向上下游发生的最大翘曲变形控制在最小。

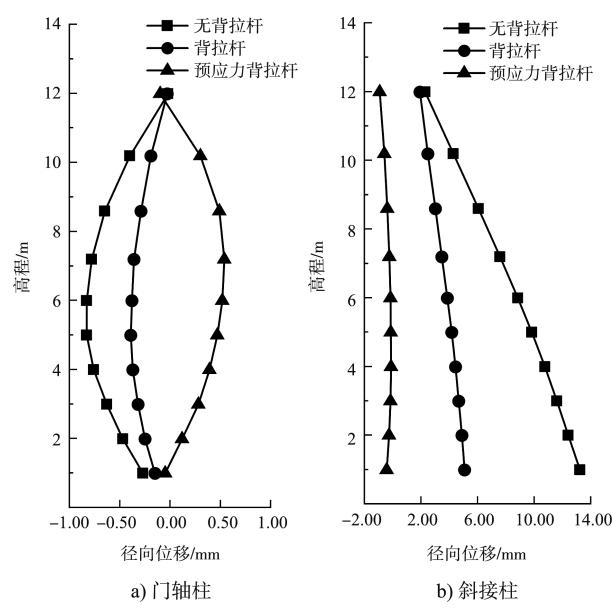


图 6 3 种背拉杆设置方式门轴柱及斜接柱径向位移

4 结论

1) 浮箱可以有效减小闸门自重力对底枢的压力, 同时一定程度上增加了闸门抗扭能力、减少斜接柱竖向位移。

2) 背拉杆能有效增加闸门的抗扭刚度。施加预应力后, 闸门的抗扭能力进一步提高, 并能实现有水悬挂时基本保持铅直状态, 即斜接柱顶底的相对变位接近 0, 启闭运行时保证扭曲变形达到相对最小。

3) 本文提出的预应力优化模型是合理可行的。与改进前的预应力优化模型相比，人字门斜接柱的径向位移控制在 0 附近，背拉杆实际应力也有显著降低，更利于背拉杆的预应力施加。

#### 参考文献：

- [1] USACE. Engineering and design of lock gates and operating equipment EM 1110-2-2703 [R]. Washington D. C.: USACE, 1984.
  - [2] 傅作新, 张燎军. 大型船闸人字门抗扭能力的研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 1993, 21(5): 70-76.
  - [3] 张燎军, 傅作新. 人字门背拉杆预应力方案的研究[J]. 水利电力机械, 1993 (6): 32-36.
  - [4] 张燎军, 傅作新, 吴小宁, 等. 三峡多级船闸人字门抗扭性能研究[J]. 水运工程, 1997(7): 7.
  - [5] 何文娟. 大型人字闸门主要构件的抗扭性能研究[J]. 水力学报, 1995(3): 6.
  - [6] 余学佳, 张燎军, 潘正泉, 等. 大型人字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.
  - [7] 孙保虎, 黄亚栋, 徐洪强. 基于 Ansys 的大型船闸人字闸门背拉杆预应力设计[J]. 水运工程, 2018 (12): 143-146.
  - [8] 常苏华. 船闸人字闸门增设浮箱的观测与研究[J]. 水运工程, 1995(10): 36-39.
  - [9] 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.
  - [10] 王政平, 李晓旭. 大藤峡水利枢纽人字闸门背拉杆预应力优化分析[J]. 人民长江, 2020, 51(4): 164-167.
  - [11] 邢述炳. 人字闸门背拉杆预应力优化方法研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2017, 41 (4): 656-661.
  - [12] 水利部水工金属结构质量检验测试中心. 水利水电工程钢闸门制造、安装及验收规范: GB/T 14173—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

(本文编辑 王传瑜)

著作权授权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述公司著作权使用费,所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。

《水运工程》编辑部