



葛洲坝船闸人字门顶枢拉杆拆除方案*

陶 然¹, 田 磊², 陈明华¹, 付君健²

(1. 长江三峡通航管理局, 湖北 宜昌 443002;

2. 水电机械设备设计与维护湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 拉杆及其前后楔块是人字门顶枢的重要组成部分。原有的人字门顶枢拉杆拆除过程中, 拉杆前后楔块松动施工存在安全风险高、拆除效率低等问题。为此, 提出一种安全有效的人字门顶枢拉杆楔块拆除设计方案: 1) 通过研究人字门顶枢拉杆拆除工艺, 设计一种人字门顶枢拉杆楔块快速松动工装和工艺流程。2) 对楔块松动工装进行校核计算和有限元分析, 验证设计的可靠性。3) 对楔块松动工装进行厂内和现场测试, 并根据工程应用情况验证设计的可行性和实用性。该方案能有效降低施工安全风险、提高人字门顶枢拉杆拆除效率。

关键词: 葛洲坝船闸; 人字门; 顶枢拉杆; 拆除方案; 有限元分析

中图分类号: U 643

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)07-0173-06

Removal scheme of top-pivot tie rods on miter gate of Gezhouba ship lock

TAO Ran¹, TIAN Lei², CHEN Ming-hua¹, FU Jun-jian²

(1. Three Gorges Navigation Authority, Yichang 443002, China;

2. Hubei Key Laboratory of Hydroelectric Machinery Design & Maintenance, Yichang 443002, China)

Abstract: The tie rods and their front and rear wedge blocks are essential parts of the top pivot on a miter gate. During the removal process of the original miter gate's top-pivot tie rods, there are problems such as high safety risks and low removal efficiency in loosening the front and rear wedge blocks of the tie rods. Therefore, a safe and effective scheme for removing the top-pivot tie rods on a miter gate is proposed: 1) The equipment and process flow are designed for rapidly loosening the wedge blocks of the top-pivot tie rods on the miter gate through research on the removal technology of top-pivot tie rods on a miter gate. 2) The loosening equipment for wedge blocks is checked by calculations and analyzed by the finite element method to verify the reliability of the design. 3) The in-plant and on-site tests of the loosening equipment are conducted, and the feasibility and practicability of the design are verified by the engineering applications. The proposed scheme can effectively reduce construction safety risks and improve the removal efficiency of top-pivot tie rods on a miter gate.

Keywords: Gezhouba ship lock; miter gate; top-pivot tie rods; removal scheme; finite element analysis

人字门是船闸重要设备之一, 其左右两扇门叶分别绕水道边壁内的垂直门轴旋转, 关闭水道时俯视形成“人”字形状^[1]。人字门顶枢是人字门顶端的支承装置, 它的作用是防止门体倾

倒、与底枢配合保证门体的旋转中心垂直^[2], 主要由楔块、A/B 杆、锚架、顶枢轴及轴套、A/B 杆连接轴等组成, 结构见图 1。

收稿日期: 2021-11-17

*基金项目: 水电机械设备设计与维护湖北省重点实验室开放基金项目(2020KJX04)

作者简介: 陶然(1988—), 男, 硕士, 工程师, 从事船闸机械设备检修、改造及技术研究。

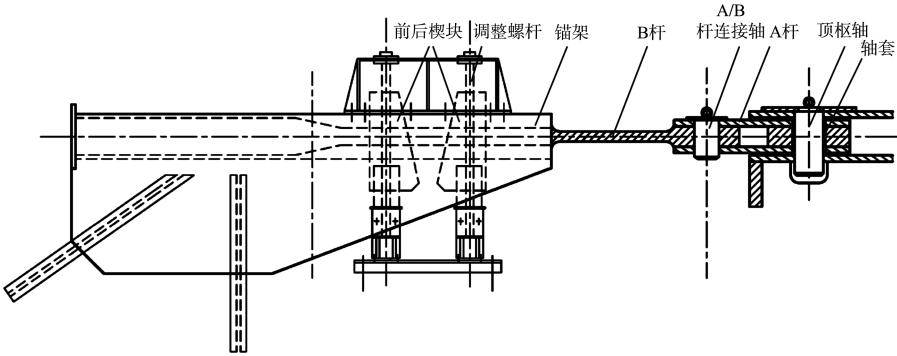


图 1 人字门顶枢结构

由于人字门运行频次高，底枢轴瓦和蘑菇头会磨损，密封件会损坏，从而影响人字门的安全稳定运行，因此需定期顶升门体进行底枢检修^[3-4]。一般情况下，人字门在顶门施工前需拆除 A/B 杆，然而 A/B 杆拆除过程中，楔块松动制约着 A/B 杆的拆除效率。主要原因是：1) 楔块长期运行未拆装；2) 经过人字门启闭牵拉的作用，楔块与 A/B 杆安装孔及锚架之间因挤压而贴合紧密；3) 结合面存在锈蚀填充杂物，导致楔块松动过程阻力较大。目前人字门顶枢拉杆楔块松动通常采用专用工装配合液压千斤顶的方式将楔块与 A/B 杆安装孔及锚架脱开^[5]，但由于千斤顶顶升力直接作用于锚架，受力过大时会对锚架和锚架螺纹孔造成损伤，或者导致连接螺栓断裂，存在安全隐患。

针对原有的人字门顶枢拉杆拆除过程中拉杆前后楔块松动工艺安全风险高、拆除效率低、螺纹孔易损伤且目前尚无成熟解决方案的问题，提出一种安全有效的人字门顶枢拉杆楔块拆除设计方案，为葛洲坝船闸及国内其他船闸人字门顶枢拉杆拆除提供参考。

1 人字门顶枢拉杆拆除工艺

1.1 人字门顶枢功能原理

由图 1 可知，人字门顶枢起到上部固门作用，承受着自重、启闭等产生的水平作用力以及旋转产生的摩擦力。人字门顶枢楔块分为前楔块和后楔块，前楔块为人字门 A/B 杆及门体的固定承力

楔块，前楔块的伸出高度对人字门门形起调整作用；后楔块为人字门 A/B 杆的锁定楔块，当人字门门形调整到位后对 A/B 杆进行锁紧。人字门 A/B 杆通过前、后楔块锁定于锚架内，与门体通过顶枢轴连接形成回转中心，A/B 杆对人字门起到牵拉作用。

1.2 人字门顶枢拆除工艺

人字门 A/B 杆拆除施工的重点在于人字门顶枢各部件的拆除，即利用专用工装和设备依次拆除顶枢各零部件，主要包括拉杆楔块松动、顶枢轴拆除、A/B 杆连接轴拆除、A/B 杆吊运移出等，拆除工艺见图 2。

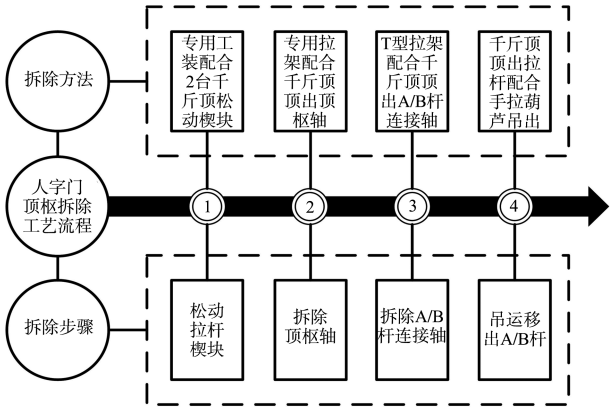


图 2 人字门顶枢拆除工艺流程

1) 拉杆楔块松动。如图 3 所示，2 台起重重量为 200 t 的液压千斤顶分别布设于前、后楔块的上方及专用工装的下方，利用专用工装配合液压千斤顶同步顶升，将楔块与 A/B 杆安装孔及锚架脱开，实现楔块的松动。

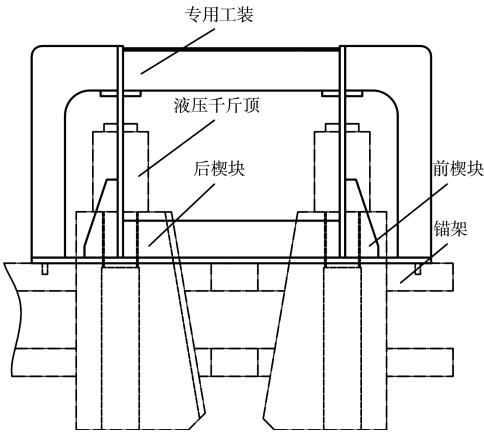


图 3 拉杆楔块松动

2) 顶枢轴拆除。通过在顶枢轴上部焊接专用工装拉架并布设千斤顶的方式顶出顶枢轴。

3) A/B 杆连接轴拆除。轴的下方无拆卸着力点，形成了不可拆卸的安装，因此检修时一般在轴的顶部焊接 T 型拉架，然后利用千斤顶将 A/B 杆连接轴顶起并吊出，见图 4。

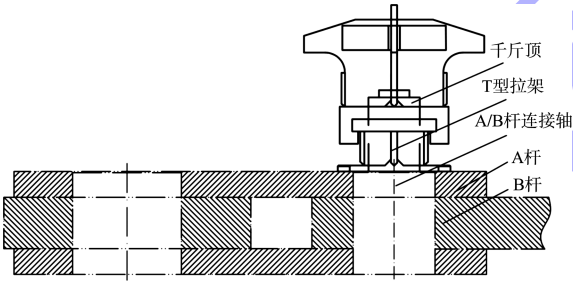


图 4 A/B 杆连接轴拆除

4) A/B 杆吊运移出。首先固定 B 杆，用起重质量 32 t 机械顶在锚架和 A 杆耳板间施加张力，使 B 杆与 A 杆耳板逐步脱开，同时在 A 杆尾部利用起重质量 16 t 机械顶顶升 A 杆，使 A 杆头部逐步露出门体耳板，然后系挂吊装钢丝绳和起重质量 10 t 手拉葫芦吊出 A 杆，同时在 B 杆尾部利用起重质量 16 t 机械顶逐步顶升 B 杆并吊出。

从历年葛洲坝船闸计划性停航检修期间人字门顶枢 A/B 杆的拆除现状来看^[6]，人字门顶枢 A/B 杆拆除过程存在检修时间长、投入设备多、施工

难度大、安全风险高等问题，主要表现为拉杆楔块松动制约着人字门顶枢 A/B 杆的拆除，因此需要设计一套人字门顶枢拉杆楔块松动工装，实现人字门顶枢拉杆前后楔块的快速松动。

2 人字门顶枢拉杆楔块松动工装设计和工艺

2.1 工装设计

考虑到葛洲坝船闸的实际工况，人字门顶枢拉杆楔块松动工装的结构设计主要由楔块拆除顶架、液压千斤顶、固定框、封板、调整垫墩、挑梁、液压泵站、高压软管等组成，工装装配见图 5。

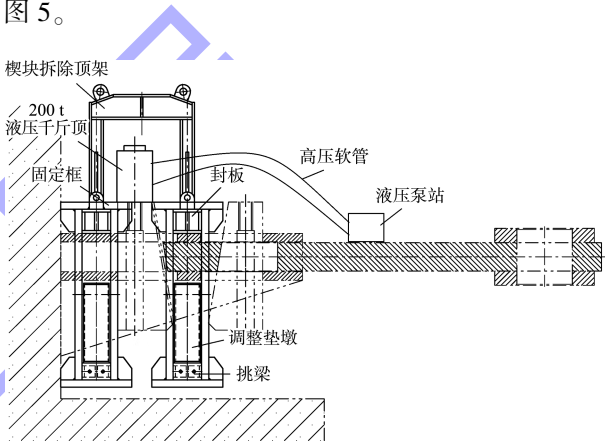


图 5 楔块松动工装装配

人字门顶枢拉杆楔块松动专用工装使用步骤如下：1) 架设楔块拆除顶架，保证顶架中心位置与楔块顶面重合。2) 从锚架下端架设前后两个挑梁，要求挑梁与楔块拆除顶架垂直对应。3) 用 4 个固定框套入挑梁与顶架横梁，并用锁紧螺母锁定。4) 将 4 个圆柱调整垫墩架设在锚架下方和挑梁上方。5) 使起重质量 200 t 液压千斤顶架设在顶架与楔块顶面之间，利用千斤顶顶升力松动楔块。

2.2 工艺

人字门顶枢拆除时需要在人字门失重状态下进行，并且人字门顶枢拉架与左右两侧闸墙间距较小。根据人字门顶枢的受力条件以及作业环境，设计了葛洲坝船闸人字门顶枢拉杆楔块松动工艺流程，见图 6。

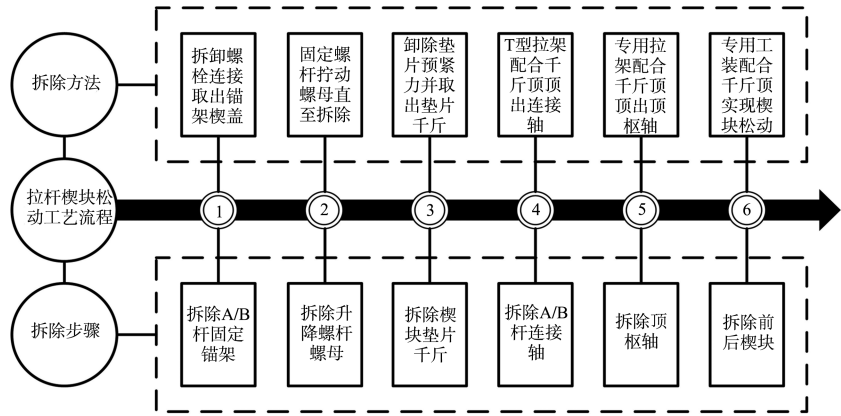


图 6 葛洲坝船闸人字门顶枢拉杆楔块松动工艺流程

人字门顶枢拉杆楔块松动前，需依次解体顶枢 A/B 杆固定锚架、升降螺杆螺母、楔块垫片千斤、A/B 杆连接轴、顶枢轴，使得楔块、A/B 杆、门体与拉杆约束解除，最终由楔块松动专用工装拆除前后楔块。

2.3 人字门顶枢拉杆楔块松动工装校核计算

2.3.1 工装材料选用

为验证工装设计的可靠性，需对工装主要结构进行校核计算。根据楔块松动工装设计要求，参照 GB/T 1591—2018《低合金高强度结构钢》^[7]，工装主要结构材料均选用碳素结构钢 Q345-A，其屈服强度 $\sigma_s = 345\text{ MPa}$ ，由于 Q345-A 为塑性材料，而塑性材料失效一般用屈服强度衡量，为了保证结构具有足够的强度，需要考虑安全系数，一般取安全系数 $n = 1.2$ ，则结构设计需满足如下强度条件：

$$\sigma_{\max} < [\sigma] \left(= \frac{\sigma_s}{n} \right) \tag{1}$$

式中： σ_{\max} 为结构的最大工作应力； $[\sigma]$ 为材料许用应力，为 287.5 MPa。

2.3.2 工装强度校核

由图 5 可知，顶架受力危险部位在千斤顶加力处和顶架竖梁受力处^[8]，考虑实际工况，工装的实际承载能力为 1 960 kN。

2.3.2.1 顶架横梁强度校核

顶架横梁截面见图 7、受力见图 8。由图 8 可知，顶架横梁主要承受弯矩的作用，为验证顶架横梁的强度，首先根据顶架横梁截面形状和参数计算横梁的抗弯截面系数：

$$W_z = \frac{I_{Zc}}{|y_{\max}|} \tag{2}$$

式中： W_z 为抗弯截面系数，仅与截面形状和尺寸有关； I_{Zc} 为顶架横梁截面对形心轴 Z 的惯性矩； $|y_{\max}|$ 为离顶架横梁截面形心轴 Z 的最远距离。计算得 $W_z = 7.6 \times 10^{-4}\text{ m}^3$ 。

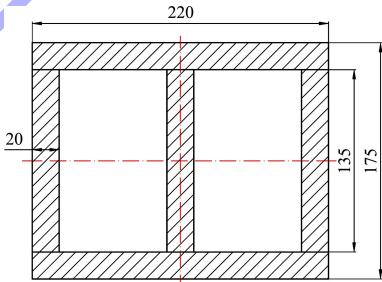


图 7 顶架横梁截面（单位：mm。下同）

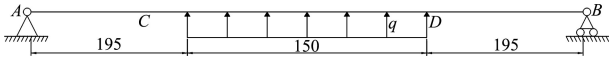


图 8 顶架横梁受力分析简图

根据图 8 可计算出顶架横梁的最大弯曲力矩为 $M_{\max} \approx 2.0 \times 10^5\text{ N}\cdot\text{m}$ ，顶架横梁所受的最大弯曲应力为 $\sigma_1 = \frac{M_{\max}}{W_z} \approx 263.2\text{ MPa} < [\sigma] (= 287.5\text{ MPa})$ 。顶架横梁的最大弯曲应力小于材料许用应力，满足材料强度条件。

2.3.2.2 顶架竖梁强度校核

顶架竖梁截面见图 9，为验证顶架竖梁的强度，根据两根竖梁的实际承载能力和截面积可计算出每根竖梁的最大工作应力为 $\sigma_2 = \frac{F_2}{S_2} \approx 79\text{ MPa} < [\sigma]$

(=287.5 MPa)。顶架竖梁的最大工作应力小于材料许用应力, 满足材料强度条件。

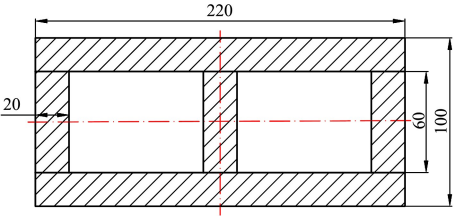


图 9 顶架竖梁截面

2.3.2.3 固定框强度校核

固定框采用 50 mm×50 mm 的方钢焊接而成, 见图 10, 受力薄弱点在中间的两根连接方钢。

为验证固定框的强度, 根据 4 组固定框的实际承载能力和截面积, 可计算出每组固定框的最大工作应力为 $\sigma_3 = \frac{F_3}{S_3} = 98 \text{ MPa} < [\sigma] \text{ (} = 287.5 \text{ MPa)}$ 。固定框的最大工作应力小于材料许用应力, 满足材料强度条件。

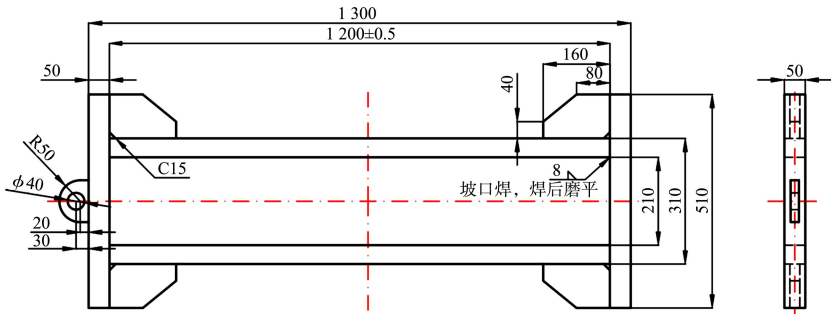


图 10 固定框结构

2.3.2.4 调整垫墩强度校核

为验证调整垫墩的强度, 考虑到 4 个垫墩的内、外径均为 164、180 mm, 根据每个垫墩的实际承载能力和截面积可计算出其最大工作应力为 $\sigma_4 = \frac{F_4}{S_4} \approx 113.4 \text{ MPa} < [\sigma] \text{ (} = 287.5 \text{ MPa)}$ 。垫墩的最大工作应力小于材料许用应力, 满足材料强度条件。

2.3.2.5 挑梁强度校核

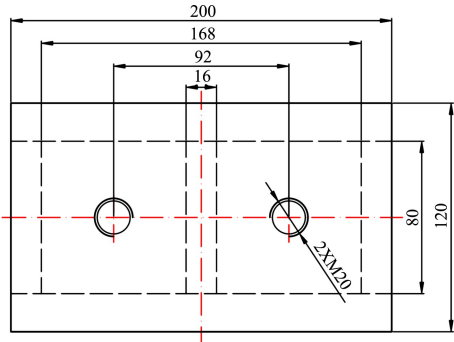


图 11 挑梁结构

挑梁结构见图 11。挑梁主要承受弯矩的作用, 为验证挑梁的强度, 首先计算挑梁的最大弯曲力矩和抗弯截面系数。梁的最大弯曲力矩为 $M_{\max} =$

$17\,150 \text{ N}\cdot\text{m}$, 抗弯截面系数为 $W_z = \frac{I_{Zc}}{|y_{\max}|} \approx 3.7 \times 10^{-4} \text{ m}^3$, 其中, I_{Zc} 为挑梁截面对形心轴 Z 的惯性矩, $|y_{\max}|$ 为离挑梁截面形心轴 Z 的最远距离。挑梁最大弯曲应力为 $\sigma_5 = \frac{M_{\max}}{W_z} \approx 46.1 \text{ MPa} < [\sigma] \text{ (} = 287.5 \text{ MPa)}$ 。挑梁最大弯曲应力小于材料许用应力, 满足材料强度条件。

2.4 工装主体有限元分析

为验证工装主体是否满足设计要求, 需对工装顶架进行有限元分析^[9]。根据有限元分析的基本步骤, 首先定义顶架材料属性, 顶架材料 Q345-A 特性为: 密度 $7.85 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$, 弹性模量 206 GPa, 抗拉强度 470 MPa, 屈服强度 345 MPa, 泊松比 0.3; 其次对顶架有限元模型进行网格划分, 并根据工装 1 960 kN 的承载能力, 对顶架施加竖直向上且大小为 1 960 kN 的载荷和两侧固定约束; 最后对顶架模型进行有限元分析。

根据工装主体受力特点, 对顶架进行了应力变形分析^[10], 有限元分析结果见图 12, 顶架整体等效应力最大值为 340.686 MPa, 根据

GB/T 33582—2017《机械产品结构有限元力学分析通用规则》^[11], 有限元计算未考虑安全系数, 故最大应力值未超出 Q345-A 材料的屈服强度 345 MPa; 整体综合变形最大值为 1.9 μm , 变形量较小, 对结构影响不大。因此通过有限元分析结果可以判断, 顶架在加载 1 960 kN 的情况下, 结构应力变形均满足设计要求。

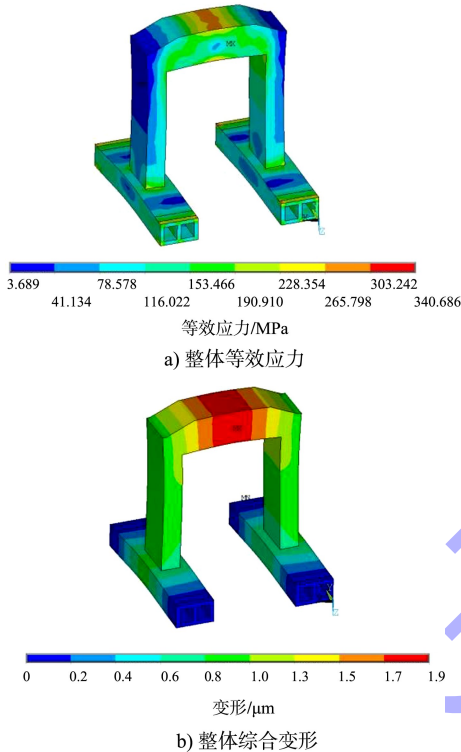


图 12 顶架有限元分析结果

3 工装的测试与应用

3.1 工装的测试

为检验工装设计的可行性, 对工装分别进行厂内和现场测试。首先, 结合工装设计图纸和现有的设备, 根据实际工况对人字门顶枢拉杆楔块松动工装开展厂内加载测试。在加载测试过程中, 工装未发生干涉、变形、破坏等现象。其次, 根据葛洲坝船闸的现场安装环境, 结合厂内加载测试, 进行现场模拟测试, 根据现场测试的实际情况, 虽然工装的安装具有一定的空间限制, 但是工装在现场安装时不会产生干涉现象。

3.2 工装的应用

人字门顶枢拉杆楔块快速松动工装在葛洲坝船闸人字门楔块拆除中成功应用。根据新型楔块松动

工装现场实际应用情况, 安装楔块松动工装的时间平均不到 1 h, 且整个拆除过程安全、稳定、高效。

4 结论

1) 提出了一种人字门顶枢拉杆楔块拆除设计方案。通过研究人字门顶枢拉杆拆除工艺, 设计了人字门顶枢拉杆楔块松动工装和工艺流程。

2) 对楔块松动工装进行校核计算和有限元分析, 验证了设计的可靠性。结合厂内和现场测试以及工程应用情况证明了设计的可行性和实用性。

3) 工装的工程应用情况证明该拆除方案降低了施工安全风险、提高了人字门顶枢拉杆拆除效率, 为葛洲坝船闸以及国内其他船闸人字门顶枢拉杆拆除提供了参考。

参考文献:

- [1] 王万奇, 翁海红. 人字闸门的抗疲劳强度探析[J]. 中国水运(下半月), 2009, 9(6): 168-169, 181.
- [2] 杨警声. 葛洲坝三号船闸人字门的顶枢[J]. 水运工程, 1981(9): 1-5.
- [3] 彭开持. 三峡船闸人字门顶升时机与工艺探讨[J]. 中国水运, 2011(5): 38-39.
- [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, 168.
- [5] 张元刚, 马洪生, 钱文君. 运东船闸人字门顶、底枢修理关键技术浅析[J]. 江苏水利, 2010(12): 23-24.
- [6] 计玉健. 葛洲坝船闸停航大修工期研究[J]. 中国水运, 2013(5): 19-21.
- [7] 鞍钢股份有限公司, 冶金工业信息标准研究院, 首钢总公司, 等. 低合金高强度结构钢: GB/T 1591—2018[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2019.
- [8] 隆彩云, 李伟. 型材使用的强度刚度校核方法[J]. 价值工程, 2020, 39(8): 221-224.
- [9] 李永新. 船闸人字闸门结构三维有限元分析[J]. 水电能源科学, 2011, 29(1): 116-118.
- [10] 李壮, 李芬花, 赵萌萌, 等. 基于 ANSYS 的水闸应力与位移分析[J]. 水利规划与设计, 2020(10): 150-154.
- [11] 中国电子科技集团公司第三十八研究所, 上海湃睿信息科技有限公司, 合肥京联信息科技有限公司, 等. 机械产品结构有限元力学分析通用规则: GB/T 33582—2017[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2017.