



# 太阳辐射对人字闸门影响的有限元分析

姚家晖, 杨光明

(河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100)

**摘要:** 人字闸门自身重力大且抗扭能力弱, 在自然悬挂时会产生扭转变形。人字闸门作为钢构件处于露天环境中, 夏季在太阳辐射的直接作用下其温度远高于环境温度, 这将加剧人字闸门的结构变形。为了量化太阳辐射对人字闸门结构的影响, 基于 ASHRAE 晴空模型, 通过 ANSYS 有限元软件仿真分析人字闸门的温度场、变形及应力分布情况。结果表明: 1) 在太阳辐射作用下, 形成空间分布比较均匀的闸门温度场, 在 15 时左右达到最高温度 67 °C。2) 在最高温度荷载下闸门主要构件变形与应力仍符合标准要求, 但闸门变形随温度升高逐渐加剧, 其中斜接柱位移与背拉杆变形增加 1~3 倍, 在实际工程设计中应引起重视。

**关键词:** 人字闸门; 太阳辐射; ASHRAE 晴空模型; 变形与应力

**中图分类号:** TV 663; U 641

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2022)09-0116-06

## Finite element analysis of solar radiation effect on miter gate

YAO Jia-hui, YANG Guang-ming

(College of Energy and Electric Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** Due to its high gravity and weak torsional resistance, the miter gate will produce torsional deformation when hanging naturally. As a steel member, the miter gate is in an open-air environment, and its temperature is much higher than the ambient temperature under the direct action of solar radiation in summer, which will aggravate the structural deformation of the miter gate. To quantify the influence of solar radiation on the structure of the miter gate, based on ASHRAE clear sky model, the temperature field, deformation and stress distribution of the miter gate are simulated by ANSYS finite element software. The results show that: 1) Under the action of solar radiation, the temperature field with uniform spatial distribution is formed, and the maximum temperature reaches 67 °C at about 3 pm. 2) The deformation and stress of the main components of the gate still meet the standard requirements under the maximum temperature load. The deformation of the gate gradually increases with the temperature rise, and the displacement of the miter column and the deformation of the back tie rod increase by 1~3 times, which should be paid attention to in practical engineering design.

**Keywords:** miter gate; solar radiation; ASHRAE clear-sky model; deformation and stress

大型船闸人字闸门为边柱半封闭、中间开口的空间薄壁结构, 其自身抗扭能力弱, 仅在自重、风压力作用下门体就会产生较大的扭转变形<sup>[1]</sup>。而处于自然环境中的钢结构或钢构件, 不可避免

地会受到大气环境的影响, 如太阳辐射的作用, 这种影响随温度的变化而变化。在夏季, 钢构件表面温度可达 60 °C 以上, 对构件的耐久性与安全性会产生较大的不利影响<sup>[2-3]</sup>。人字闸门在正常工

收稿日期: 2022-01-23

作者简介: 姚家晖(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水工金属结构。

通讯作者: 杨光明(1966—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为水工金属结构。E-mail: gmyang@hhu.edu.cn

作状态下, 水的浮力可以抵消部分重力作用, 且对闸门温度上升有较大缓解作用; 但当闸门处于自然悬挂状态且暴露于露天环境中, 在太阳辐射的直接作用下结构的温度远高于环境温度, 会产生较大的温度变形, 对人字闸门结构的变形影响显著。

目前对太阳辐射作用下结构温度场和温度应力的研究主要集中在桥梁、大坝、混凝土结构以及大型钢结构方面<sup>[4-6]</sup>, 针对人字闸门则主要集中在抗扭刚度的提升及止水强度等方面<sup>[7-9]</sup>, 尚未涉及太阳辐射产生的温度场对人字闸门的影响。所以, 研究人字闸门在太阳辐射下的变形与应力对于提升人字闸门的耐久性与安全性十分重要。本文基于 ASHRAE 晴空模型, 采用有限元软件 ANSYS 对一钢结构人字闸门在太阳辐射作用下的温度场进行仿真模拟<sup>[10]</sup>, 然后将不同太阳辐射下人字闸门的温度场作为边界条件, 建立热-结构耦合数值模型, 分析人字闸门的变形及应力场。所得结论及研究方法可为人字闸门在实际工程设计中考虑温度影响提供参考。

1 太阳辐射及闸门模型

1.1 太阳辐射模型

太阳辐射模型选择美国加热、空调与制冷学会推荐的 ASHRAE 晴空模型。模型中太阳总辐射强度  $G_t$  计算公式为<sup>[11]</sup>:

$$G_t = \xi \left[ \max(\cos\theta, 0) + \frac{G_{dV}}{G_{dH}} C + \rho_g F_{wg} (\sin\beta + C) \right] G_{ND} \quad (1)$$

$$G_{ND} = \frac{A}{\exp(B/\sin\beta)} C_N \quad (2)$$

$$\frac{G_{dV}}{G_{dH}} = 0.55 + 0.437\cos\theta + 0.313\cos^2\theta \quad (3)$$

式中:  $A$  为太阳辐射强度系数;  $B$  为大气消光系数;  $C$  为散射辐射系数;  $\beta$  为太阳高度角;  $C_N$  为大气清洁度;  $\theta$  为太阳光线入射角;  $\rho_g$  为地面的反射率;  $F_{wg}$  为表面对地面的角系数;  $\xi$  为太阳辐射吸收系数。系数  $A$ 、 $B$ 、 $C$  按照文献[12]中给出的公式计算:

$$A = 1\,370 [1 + 0.034\cos(2\pi N/365)] \quad (4)$$

$$B = 0.205\,1 - 4.053\,69 \times 10^{-4} N + 3.518\,56 \times 10^{-5} N^2 - 1.983\,2 \times 10^{-7} N^3 + 2.893\,9 \times 10^{-10} N^4 \quad (5)$$

$$C = 7.876\,3 \times 10^{-2} - 4.217\,7 \times 10^{-4} N + 1.990\,8 \times 10^{-5} N^2 - 1.060\,710^{-7} \times N^3 + 1.502\,4 \times 10^{-10} N^4 \quad (6)$$

式中:  $N$  为自 1 月 1 日算起的年序日。得出夏至日时  $A = 1\,417$ 、 $B = 0.42$ 、 $C = 0.138$ 。

1.2 闸门模型

本文以西南地区某水利枢纽船闸下闸首人字闸门为背景建立有限元模型, 并对其自然悬挂状态进行分析计算。该人字闸门单扇门体尺寸为  $10.8\text{ m} \times 24\text{ m} \times 2.2\text{ m}$  (宽×高×厚), 属于大中型人字闸门。单扇门质量为  $382\text{ t}$ , 共设置主横梁 17 根, 布置间距由上至下依次减小。在闸门主梁侧设置 2 层截面尺寸为  $220\text{ mm} \times 36\text{ mm}$  的背拉杆 (背拉杆为钢板), 单层背拉杆中包含交叉式布置的主背拉杆 3 根、副背拉杆 2 根。

闸门所用钢材为 Q345, 总质量包含闸门主体及背拉杆等主要承载结构的质量。对于闸门上的钢梯等非主要结构 (质量约  $30\text{ t}$ ), 通过施加均布荷载等效其对闸门及背拉杆产生的力学作用。闸门模型材料属性为: 弹性模量  $206\text{ GPa}$ , 泊松比  $0.3$ , 密度  $7\,850\text{ kg/m}^3$ , 线性膨胀系数  $1.159 \times 10^{-5}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , 导热系数  $52.34\text{ W/(m}\cdot^\circ\text{C)}$ , 比热  $480\text{ J/(kg}\cdot^\circ\text{C)}$ 。

船闸东西向布置, 西方向为上游 (闸门自然悬挂时, 面板侧朝向西方向),  $X$  轴沿闸门门轴柱指向斜接柱为正,  $Y$  轴垂直于横梁向上为正,  $Z$  轴垂直于闸门指向下游为正。闸门有限元计算模型见图 1, 船闸平面布置见图 2。

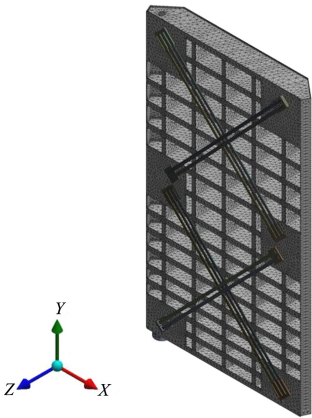


图 1 人字闸门有限元模型

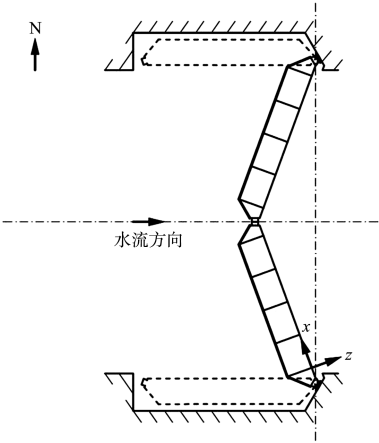


图 2 船闸平面布置

2 人字闸门温度场模拟与分析

温度场数值模拟参数为：东经 103.5°、北纬 30.8°，散射直射比值 0.138，大气清洁度 1，太阳辐射吸收率 0.65，太阳辐射强度 1 417 W/m<sup>2</sup>，钢材辐射发射率  $\varepsilon=0.8$ 。由于钢材的导热性能与均匀性明显优于混凝土材料，所以相比于混凝土结构在太阳辐射下形成的空间不均匀温度场，人字闸门在太阳辐射下形成较为均匀的空间温度场分布。

经过仿真模拟，得到人字闸门面板自太阳升起至太阳落下时段内的最高温度与最低温度变化规律，见图 3。日出前，闸门不受太阳辐射，各处温度分布比较均匀且与大气温度接近，基本保持在 17℃；日出后，由于闸门主梁侧(向阳面)受到太阳直射，温度呈现出先慢后快的上升趋势，在 15:00 左右闸门的局部温度达到最高温度 67℃，较初始温度升温达 50℃；闸门最高温度变化范围为 19~67℃、最低温度变化范围为 19~60℃。由于闸门东西向跨度小、直射面积大且钢材导热性能良好，所以主梁侧与面板侧没有产生过大温差，主梁侧与面板侧最大温差出现在 13:00 左右，相差 9℃。闸门整体温度场分布比较均匀。

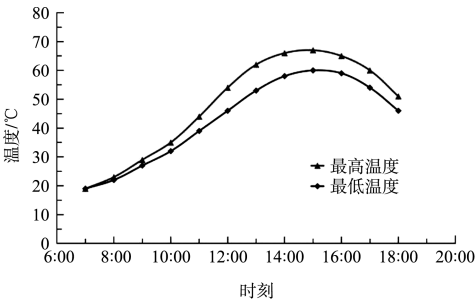


图 3 闸门面板温度变化曲线

3 温度作用下人字闸门结构变形与应力分析

3.1 结构变形

由于闸门整体温度梯度较小，在太阳辐射下形成均匀的空间温度场，故以闸门主体温度每上升 10℃为一个节点，将其温度场作为热荷载加载到闸门有限元模型上，得到人字闸门在不同温度下的变形，结果见图 4。

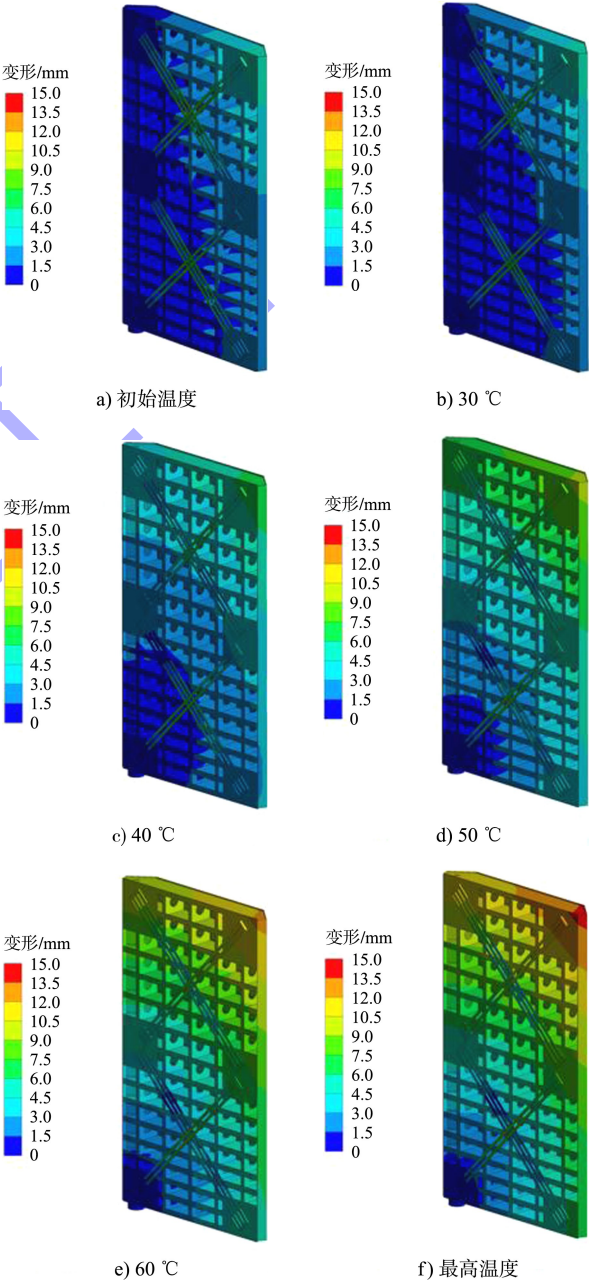


图 4 不同温度下闸门变形云图

从图 4 可以看出，闸门整体发生朝向下游的扭转变形。不同温度下，单扇闸门的最大变形都发生在斜接柱上角点、最小变形发生在门轴柱下

角点, 变形趋势基本一致。但随着闸门温度的升高, 变形产生的位移逐渐增大, 初始时刻闸门整体位移范围为 0~9 mm, 达到最高温度时闸门整体位移范围为 0~15 mm, 自门轴柱端至斜接柱端温度影响越来越明显。不同温度下, 斜接柱位移(部分)和背拉杆最大变形对比情况见表 1。

温度/℃	斜接柱位移/mm			背拉杆最大变形/mm
	上角点	中点	下角点	
初始温度	5.273	2.438	1.621	7.175
30	5.970	2.947	1.861	7.471
40	7.010	3.994	3.086	7.959
50	9.587	5.825	4.528	8.772
60	12.518	7.812	6.032	11.629
最高温度	14.047	8.835	6.795	13.111

由表 1 可知, 斜接柱上、中、下角点在初始温度下位移分别为 5.273、2.438、1.621 mm, 在最高温度下位移分别为 14.047、8.835、6.795 mm, 分别增加了 8.774、6.397、5.174 mm; 背拉杆在初始温度下的最大变形为 7.175 mm, 在最高温度下的最大变形为 13.111 mm, 增加了 5.936 mm。根据 JTJ 308—2003《船闸闸阀门设计规范》<sup>[13]</sup> 可知, 各构件变形均满足要求。

根据斜接柱沿闸门高度位移数据可以得到, 闸门温度每上升 10 ℃, 斜接柱位移平均增加 0.348、0.995、1.823、1.994、1.036 mm, 不同温度荷载下斜接柱沿闸门高度方向位移曲线见图 5。

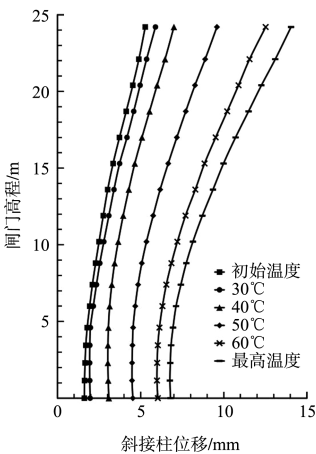


图 5 不同温度下斜接柱位移

结合图 5 可知, 闸门上部变形明显高于下部变形, 这是由于闸门主横梁布置间距从下到上逐渐增大, 下部抗扭刚度略强于上部; 除此之外, 温度在 30 ℃ 以下时, 闸门变形量小幅增加, 温度对闸门变形加剧的影响较小; 温度超过 30 ℃ 之后, 不仅闸门变形量随温度的上升大幅增加, 其平均位移的增速也呈现加快趋势, 即温度对闸门变形加剧的影响越来越显著; 温度达到 60 ℃ 之后, 闸门变形量继续增加, 平均位移增速呈现减缓趋势, 但仍显著高于温度上升的初期阶段(30 ℃ 以下阶段)。

斜接柱的位移对闸门的止水强度影响重大, 最高温度下斜接柱的 X、Z 向位移见图 6。闸门 Z 向位移沿闸门高程呈现增加趋势, 最大 Z 向位移出现在斜接柱顶端, 闸门整体向下游方向有一定倾斜, 而 X 向位移沿闸门高程基本不变。根据《水利水电工程钢闸门制造、安装及验收规范》<sup>[14]</sup> 可知, 闸门 X 向位移虽然远大于 Z 向位移, 但整体依然保持竖直; 而 Z 向位移已经超过标准中对斜接柱侧向直线度的要求。考虑到闸门参与挡水时, 水压力自上而下逐渐增大, 对于 Z 向位移的增加趋势有一定缓解作用, 斜接柱的变形不会造成闸门止水强度的明显下降, 但闸门上部可能会出现少量吃水现象, 可通过适量调整安装预压予以解决。同时, 人字闸门的施工检修工作应尽量避免安排在夏季尤其是高温节气; 若在高温时段施工, 应采取有效的遮阳措施, 并避免闸门长期处于自然悬挂状态。

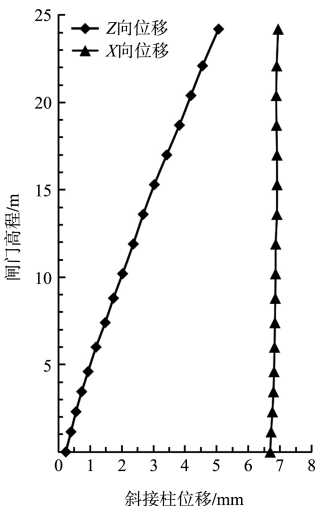


图 6 最高温度下斜接柱方向位移



3.2 结构应力

闸门在不同温度下变形有不同程度的增加，尤其是在最高温度下，闸门斜接柱位移增加 2~4 倍不等，背拉杆最大变形增加近 2 倍，故下文对其应力进行分析，不同温度下单扇闸门应力见图 7。

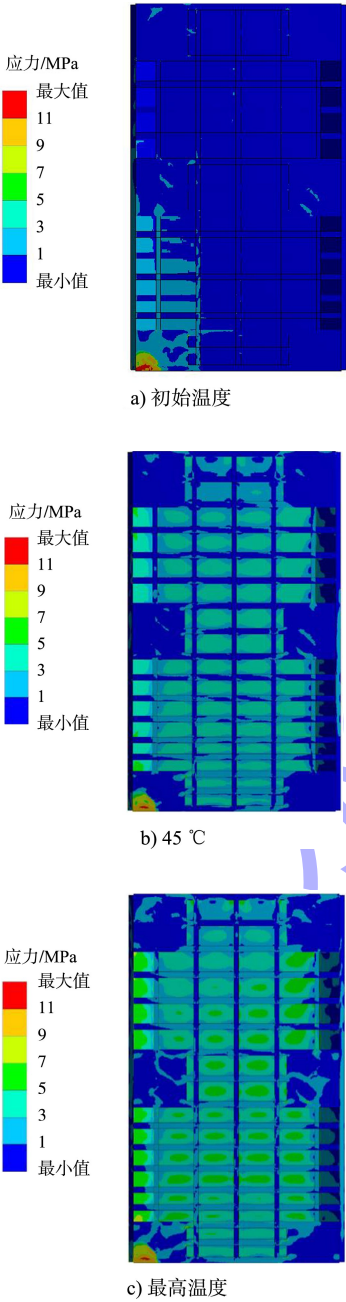


图 7 不同温度下单扇闸门应力云图

从图 7 可以看出，当温度在初始温度与最高温度之间变化时，虽然闸门多处变形均显著增大，但闸门应力的空间分布基本保持一致，且随着温度的升高闸门应力亦未见明显变化。最大应力都

发生在左下角的底枢附近，大小约为 31 MPa，这也与文献[15]中“温度变化对部分结构只产生变形，但对结构应力影响不大”的结论相一致。闸门的最大应力小于所用钢的屈服强度，闸门主体处于安全范围。

背拉杆是人字闸门的关键构件，对提高闸门扭转刚度、抵消闸门扭转变形至关重要，最高温度下背拉杆应力见图 8。由图 8 可知，背拉杆最大应力发生在其端部，出现了应力集中，最大应力在 40 MPa 左右；由于闸门上部刚度小于下部刚度、上部变形大于下部变形，所以上层背拉杆应力略大于下层背拉杆应力，并且由于两端固定，会受到一定的剪切应力，使其应力空间分布呈现出了一定的非均匀性。其应力变化范围仍然处于所用钢的容许应力范围之内，结构安全。

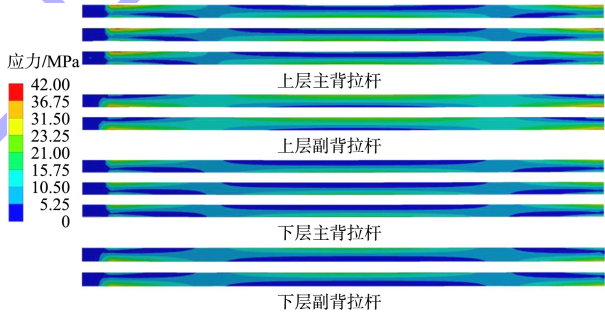


图 8 最高温度下背拉杆应力云图

最高温度下斜接柱的应力见图 9，斜接柱应力在 2 MPa 范围内呈现波动变化，最大应力为 1.6 MPa。从应力上看，其最大应力也远小于《船闸闸阀门设计规范》中给出的橡皮止水的最小拉伸强度 13 MPa，不会对止水橡皮造成不利影响。

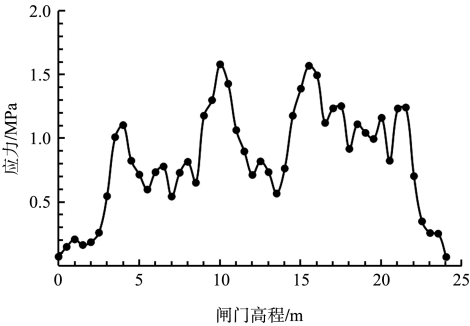


图 9 最高温度下斜接柱应力

4 结论

- 1) 太阳辐射下人字闸门形成较为均匀的空间温度场, 随着时间推移温度呈现先上升后下降的趋势。最大温差出现在 13:00 左右, 相差 9℃; 最高温度出现在 15:00 左右, 局部温度达到 67℃。
- 2) 闸门整体发生朝向下游的扭转变形, 随着闸门温度上升变形不断加剧; 闸门局部达到最高温度时, 斜接柱、闸门与背拉杆变形均满足设计规范中的安全要求, 但较初始温度下分别增大 1~3 倍不等, 温度对闸门变形影响显著、闸门止水强度受到小幅影响。
- 3) 随着闸门温度上升, 闸门应力基本保持不变, 温度变化对闸门结构应力未产生明显影响; 在最高温度下, 闸门、背拉杆及止水橡皮受力状态均处于安全范围内。
- 4) 鉴于高温下闸门变形加剧, 建议尽量避免安排在夏季尤其是高温节气对人字闸门进行施工检修; 避免闸门长期处于自然悬挂状态; 在高温时段施工时, 应采取有效的遮阳措施。

参考文献:

[1] 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.

[2] 马越, 杨红霞. 变壁厚钢筒仓在太阳辐射下结构热响应研究[J]. 延安大学学报(自然科学版), 2020, 39(4): 58-62.

[3] 刘树堂, 龙期亮. 基于 ASHRAE 晴空模型的日照作用下钢构件的温度场分析[J]. 建筑钢结构进展, 2012, 14(5): 35-43.

[4] 刘永健, 刘江, 张宁. 桥梁结构日照温度作用研究综述[J]. 土木工程学报, 2019, 52(5): 59-78.

[5] 刘红波, 陈志华, 周婷. 太阳辐射作用下钢管温度场分析[J]. 空间结构, 2011, 17(2): 65-71.

[6] 蔡靖, 王斯颖. 太阳辐射作用下大跨度钢结构塔架温度场及应力分析[J]. 河北工业大学学报, 2014, 43(6): 113-116.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 曹晓军, 蔡建国, 蒋昊敏, 等. 三角闸门止水强度与变形的有限元分析[J]. 水运工程, 2021(3): 24-29.

[10] 黄佳程, 郑源, 阚阚, 等. 轴流泵装置反向发电的水力特性[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(3): 230-237.

[11] 杨应华, 马越. 太阳辐射作用下钢筒仓结构温度场分析研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2016, 48(1): 52-57.

[12] 李锦萍, 宋爱国. 北京晴天太阳辐射模型与 ASHRAE 模型的比较[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 1998, 4(1): 37-40.

[13] 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.

[14] 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: 中国水利水电出版社, 2008.

[15] 游颖, 张泽涛, 王君, 等. 考虑温度影响的空间钢结构应力及变形变化规律[J]. 空间结构, 2020, 26(4): 58-63.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 115 页)

参考文献:

[1] 水利部水利水电规划设计总院, 长江勘测规划设计研究院. 升船机设计规范: GB 51177—2016[S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.

[2] 须清华, 张瑞凯. 通航建筑物应用基础研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.

[3] 金锋. 齿轮齿条爬升式升船机驱动系统运行可靠性分析[J]. 水运工程, 2021(2): 89-92, 136.

[4] 张银婷, 彭享文, 陈新. 三峡升船机上下游水情分析及运行应对建议[J]. 水运工程, 2020(12): 131-135.

[5] 胡亚安, 王新, 陈莹颖, 等. 三峡升船机 145m 水位上游对接厢内水面波动特性实船试验研究[J]. 水运工程, 2020(12): 1-6.

[6] 吴蓉, 兰毓峰, 黄绍文. 三峡船闸和三峡升船机协同运行下通航效益分析[J]. 中国水运(下半月), 2016, 16(12): 144-145.

[7] 齐俊麟, 胡亚安, 郑卫力, 等. 三峡升船机通航运行与保障系统关键技术研究及实践[R]. 宜昌: 长江三峡通航管理局, 2020.

(本文编辑 王传瑜)