



大跨度桁架式闸门设计及分析

周 浩¹, 张祖林¹, 杨俊杰²

(1. 中水珠江规划勘测设计有限公司, 广东 广州 510630;
2. 郑州大学 机械与动力工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 针对大跨度桁架式闸门结构受力复杂、常规平面解析法计算不能全面反映结构受力情况, 结合闸门结构尺寸、使用工况以及构造要求, 提出面板+实腹式薄框架与桁架梁系组合结构的布置形式。正、反向均采用简支轮支承, 为便于安装和拆卸, 简支轮安装在边柱翼缘上; 考虑到锁定梁倾覆风险大以及锁定就位检测较为困难, 锁定装置采用旋转推拉式锁定梁配电动推杆操作。通过对闸门结构布置、主梁、支承、锁定等方面进行分析设计, 完成桁架式闸门结构整体布置。采用有限元法对桁架式闸门进行静力分析, 确定结构薄弱点, 提出改进方案。在挡水工况和起吊工况下, 改进后的闸门结构强度和位移均满足设计要求。研究成果可为大跨度桁架式闸门设计提供参考。

关键词: 桁架式闸门; 有限元法; 闸门锁定装置; 改进方案

中图分类号: U641.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)12-0192-06

Design and analysis of large span truss gate

ZHOU Hao¹, ZHANG Zulin¹, YANG Junjie²

(1. China Water the Pearl River Planning, Survey and Design Co., Ltd., Guangzhou 510630, China;
2. School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The large span truss gate structure is complex. Design calculation cannot be absolutely solved by graphic design method. Based on the working conditions and structural requirements of the gate, a structural form of panel and solid web thin frame and truss beam system combination structure is proposed. Both forward and reverse directions adopt simply supported wheels. To facilitate the installation and disassembly, the simply supported wheels are installed on the wing edges of the side columns. In response to the high risk of overturning of the locking beam and the difficulty of locking in place detection, the locking device adopts a rotating push-pull locking beam with an electric push rod operation. The article analyses gate structure layout, main beam, supporting structure, gate lock device, then arrangement of the large span truss gate structure is generally completed. The static analysis of the truss gate is conducted using the finite element method to identify the weak points of the structure and propose improvement measures. The strength and displacement of the improved gate structure can satisfy design specification in the operating mode of water retaining and gate lifting. The research results can provide references for the design of large-span truss gates.

Keywords: truss gate; finite element method; gate lock device; improvement scheme

平面式闸门按照结构和荷载情况一般可以分为实腹式结构和桁架式结构, 平面式闸门结构简单、受力明确, 运用范围比较广泛。实腹式主梁

结构主要是由板梁组成, 主梁截面形式及计算方式比较简单, 常用于中小跨度闸门; 桁架式闸门结构受力比较复杂, 尤其是主梁在不同截面位置,

其形式基本不同, 主梁内力计算没有相应的经验公式可以参考。与实腹式主梁结构相比, 桁架式闸门结构可以显著地降低梁高和闸门质量, 常用于大跨度闸门^[1]。本文以广西百色水利枢纽通航设施工程辅助船闸工作闸门为例, 探讨大跨度桁架式闸门设计。

广西百色水利枢纽通航设施工程采用船闸和升船机组合方案^[2]。升船机下游接百色电站尾水, 受机组运行调节影响, 水位变幅大、变化快, 对升船机承船厢在下游对接时影响较大, 因此在升船机下游引航道需设置辅助船闸, 用于隔离下游引航道和外江水域。辅助船闸工作闸门平时锁定在孔口上方, 当升船机工作时, 工作闸门关闭, 保证辅助船闸室内基本无水位变幅, 当船舶需进出辅助船闸时, 小开度提升工作闸门充水平压, 然后再提至孔口上方, 保证 10 m 通航净空。

1 结构设计

1.1 总体布置

辅助船闸工作闸门孔口尺寸 $34 \text{ m} \times 12.7 \text{ m}$ (宽×高), 设计水深 12.34 m, 设计水头差 3 m, 闸门需双向挡水。由于闸门孔口尺寸大, 且闸门需要动水充水, 底缘倾角须满足构造要求, 若全部采用实腹式主梁结构, 底主梁布置困难, 因此闸门采用面板+实腹式薄框架与桁架梁系组合结构, 边柱采用实腹式箱型结构。闸门结构形式为露顶式平面桁架双向定轮钢闸门, 启闭设备采用 $2 \times 4500 \text{ kN}$ 固定卷扬机, 闸门整体布置见图 1。

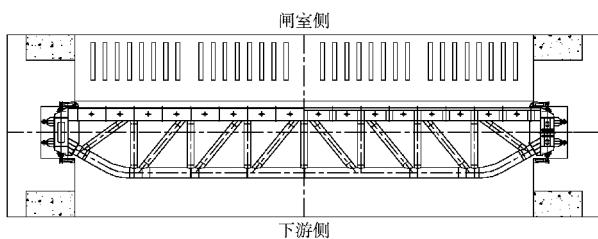


图 1 闸门整体布置

Fig. 1 Overall layout of gate

1.2 主梁设计

工作闸门主梁按照等荷载设计原则布置, 闸门结构下游侧视图见图 2, 设置 4 根桁架主梁, 面

板侧实腹式箱型梁构成桁架上弦杆, 底主梁距面板底缘 1.4 m, 主梁间距 3 m, 实腹式箱梁高 1 m, 桁架式梁系高 4 m, 主梁总高 5 m, 闸门底缘倾角约为 45° , 满足构造要求。主梁上、下弦杆按照等刚度设计, 即主梁截面形心位于截面中心附近, 从而保证双向挡水工况主梁跨中位置上、下弦杆应力基本相同。下弦杆尺寸为 $\phi 800 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, 弦杆两端通过支座与闸门边柱连接, 上、下弦杆之间通过水平腹杆连接, 腹杆结构以孔口中心线为基准呈对称结构布置。为了便于腹杆焊接, 腹杆和弦杆的节点为偏心结构。为提高单根主梁竖向抗弯能力, 主梁之间设置竖向连接腹杆和斜向连接腹杆, 腹杆尺寸均为 $\phi 500 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$ 。在主梁计算时只考虑上、下弦杆参与主梁截面特性计算, 其余腹杆作为安全冗余设计, 考虑防腐并减少对闸门启闭力影响, 梁系钢管按密封结构设计。

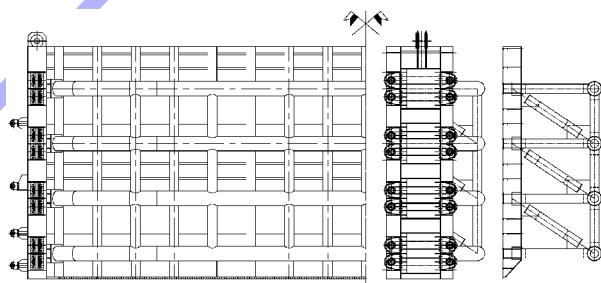


图 2 闸门结构

Fig. 2 Gate structure

1.3 支承设计

由于闸门具有双向挡水要求, 正、反向支承均采用简支轮支承, 支承形式见图 3, 支承跨度 36 m, 为了便于安装和拆卸, 简支轮安装在边柱翼缘上。简支轮按照等荷载设计原则, 每根主梁均设置 4 套简支轮, 根据支承轮压确定简支轮轮径。由于梁系钢管采用密封结构, 浮力较大, 闸门吊点位置需根据闸门实际质量确定, 即闸门吊点和闸门浮心不一致, 闸门浮力产生偏心力矩, 从而造成主轮产生附加轮压。综上, 闸门支承选定为 $\phi 800 \text{ mm}$ 的简支轮, 简支轮轴套为铜基镶嵌

自润滑关节轴承。根据简支轮支承结构、边柱结构、桁架式主梁结构、启闭机钢丝绳滑轮组结构及移轴装置等构造要求，门槽尺寸为 $4\text{ m} \times 2.5\text{ m}$ (宽×深)。为限制闸门侧向移动，在边柱外侧腹板上安装侧轮，每侧门槽内设置 8 套侧轮，闸门在锁定位置每侧门槽内有 4 套侧轮。

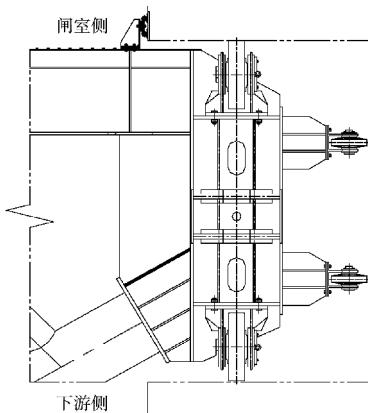


图 3 闸门支承结构
Fig. 3 Gate support structure

1.4 锁定设计

为缩短闸门锁定时间，提高船闸通行效率，闸门锁定装置以可靠、迅速为设计原则。闸门锁定座设置在边柱外侧腹板上，锁定座底面作为锁定接触面。闸门锁定梁就位形式有直线推拉式和旋转推拉式，动力设备可选用液压推杆和电动推杆。考虑到锁定梁行程短、工作荷载小，锁定动作响应要求迅速，动力设备选用电动推杆。一套直线推拉式锁定装置需要 2 台电动推杆，电动推杆沿垂直水流方向运动，行程约 1.1 m。鉴于 2 套电动推杆同步性不易控制、锁定梁倾覆风险大以及锁定就位检测较为困难，闸门锁定形式选用旋转推拉式，见图 4，1 套旋转推拉式锁定装置仅需 1 台电动推杆。锁定梁旋转中心设置在锁定梁一端，锁定梁和锁定旋转底座采用易拆卸结构。为减少锁定行程，电动推杆安装在锁定梁靠近旋转中心侧，锁定行程约 0.8 m，通过电动推杆行程检测装置判断锁定就位。

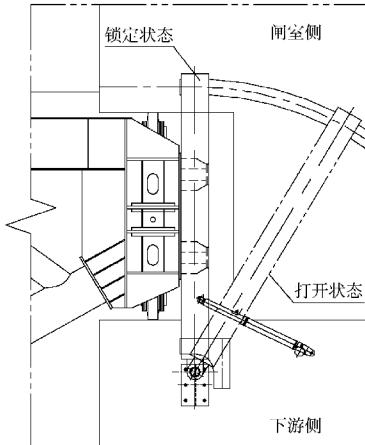


图 4 闸门锁定结构
Fig. 4 Lock structure of the gate

2 分析计算

2.1 有限元模型

闸门结构由钢板和钢管焊接而成，壁厚与结构总体尺寸相比较小，宜采用壳单元进行模拟^[3-4]，网格大小 0.1 m，考虑闸门结构自重影响。有限元模型中 X 向为垂直水流方向，Y 向为门高方向，Z 向为顺水流方向。

2.2 改进方案

对挡水工况试算后可知，腹杆与上弦杆箱梁后翼缘交点局部应力较大，可通过增加箱梁局部后翼缘厚度，并在箱梁内部增加劲板等措施分散受力状态；弦杆端部与腹杆相交的“∠”节点和与之相邻的“∟”节点受力复杂，存在应力集中，局部应力大^[5]，可通过增加弦杆壁厚来改善受力状态，但是增加弦杆整体壁厚会大大增加门重，因此只在上述节点位置一定范围内的弦杆外壁焊接管片，以达到局部增加弦杆壁厚的效果^[6]；在弦杆和腹杆交点处，均在弦杆内部焊接加劲环，以扩散节点集中荷载^[7]；安装主轮的边柱翼缘位置刚度较弱，容易产生应力集中现象，需在翼缘内侧相应位置增加纵向和横向加劲肋，加劲肋应避开主轮底座螺栓安装孔。按上述改进方案加强后，按挡水工况和起吊工况对闸门整体结构进行有限元分析。

2.3 挡水工况

挡水工况下水压力按照水深 12.34 m、水头差 3.0 m 呈梯形分布施加在闸门面板上，约束左侧主

轮位置 Z 向及右侧主轮位置 X、Z 向移动自由度; 约束闸门面板边柱与底槛接触部位的 Y 向移动自由度。闸室侧挡水及下游侧挡水的应力和位移云图分别见图 5、6, 闸室侧挡水工况和反向挡水工况下的闸门最大应力值差别较小, 闸室侧挡水工况下的最大应力值为 146 MPa, 反向挡水工况下的最大应力值为 164 MPa。

闸室侧挡水工况最大应力值为 146 MPa, 下游侧向挡水工况最大应力值为 170 MPa, 两者均位于端部“ \angle ”节点处; 闸室侧挡水工况最大位移值为 22 mm, 下游侧挡水工况最大位移值为 26 mm, 两者均位于闸门底部中间位置。

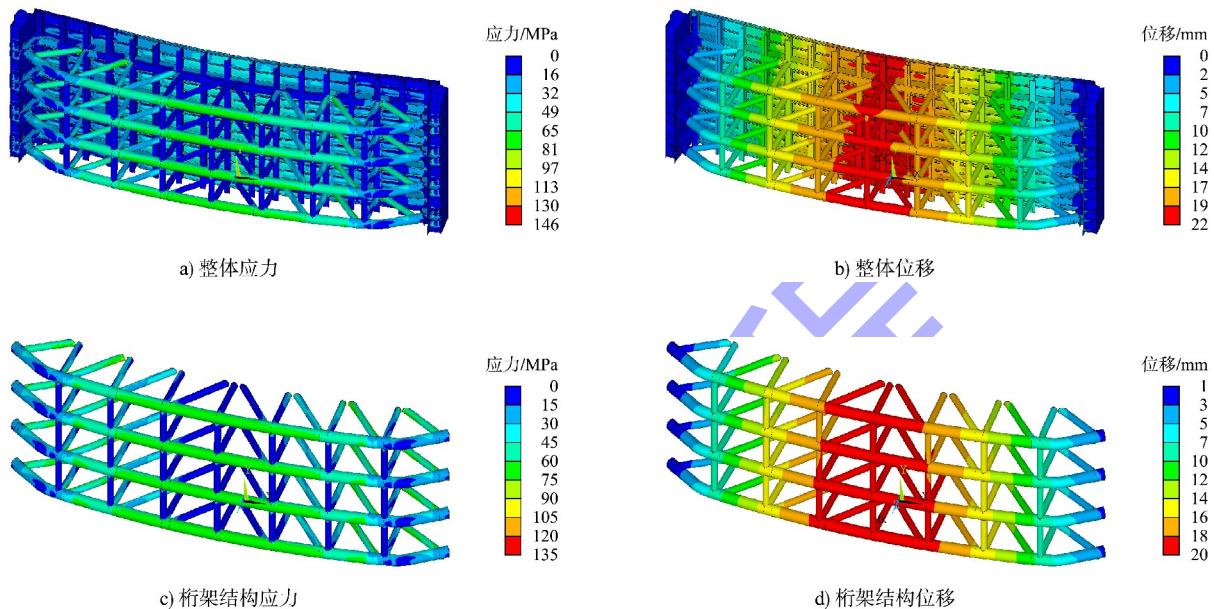


图 5 闸室侧挡水应力和位移云图

Fig. 5 Stress and displacement nephogram under positive water retaining condition

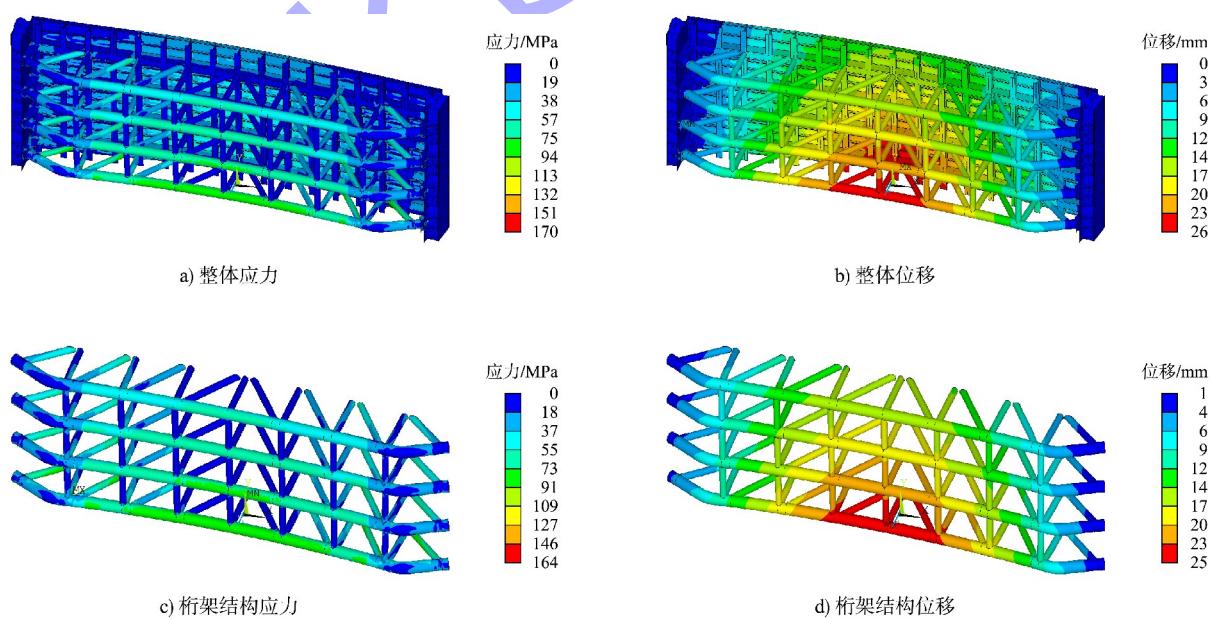


图 6 下游侧挡水应力和位移云图

Fig. 6 Stress and displacement nephogram under negative water retaining condition

2.4 起吊工况

起吊工况水压力按照下游侧挡水工况考虑，在起吊工况中考虑闸门在门槽内卡住，约束左侧主轮位置Y、Z向及右侧主轮位置X、Y、Z向移动自由度；闸门吊耳孔壁施加固定卷扬机最大启门

力。起吊工况应力和位移云图见图7，起吊工况最大应力值166 MPa，位于端部“ \angle ”节点处；最大位移值27 mm，均位于闸门底部中间位置；吊耳处最大应力值127 MPa，主轮安装位置最大应力值166 MPa，且应力分布均匀。

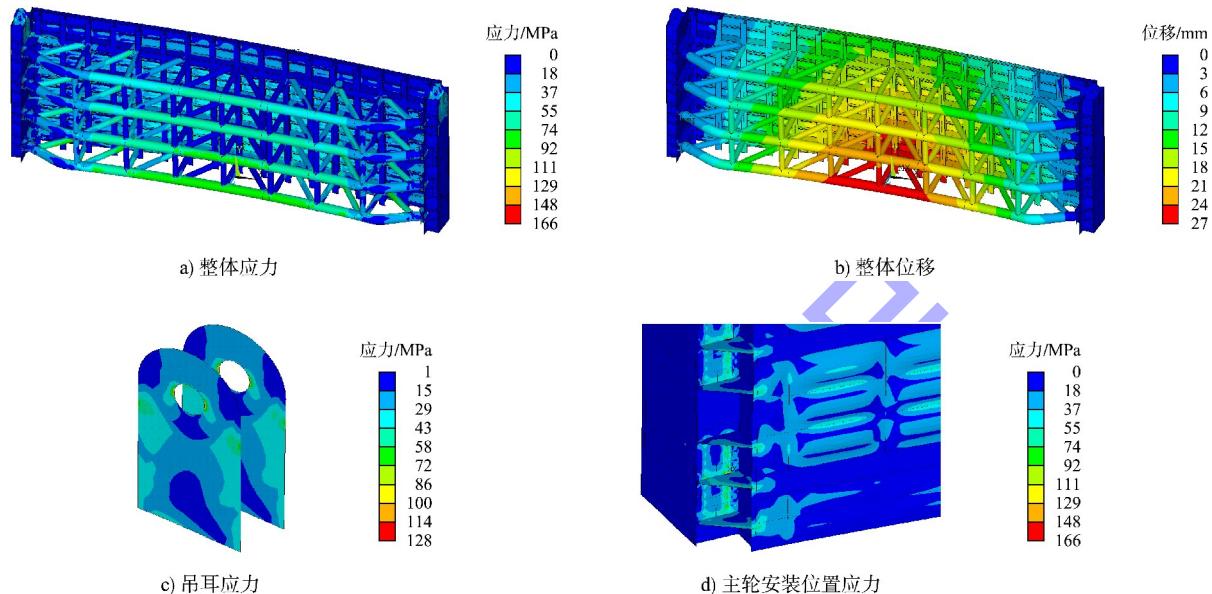


图7 起吊工况应力和位移云图

Fig. 7 Stress and displacement nephogram under lifting condition

2.5 结果分析

闸门结构主要材质采用Q355B，容许应力值225 MPa，最大容许挠度60 mm，经优化处理后的桁架式闸门结构强度和结构刚度均满足规范要求^[8-10]。相比弦杆中部位置，弦杆两端应力较大，弦杆端部圆弧段应采用直管热煨弯或冷弯成型，且弦杆制造分节数量不应超过3节，分节位置应避开弦杆腹杆节点位置，以降低焊接缺陷影响。

2.6 厂内制造及现场安装

由于桁架式闸门结构尺寸较大，采取厂内分节制造、现场拼焊的方式。实腹式门叶结构沿闸门高度方向分为3节，单节最大尺寸约为35 m×4 m，实腹式箱型边梁整体制造，桁架结构单榀制造，共计4榀。现场安装时先将2个实腹式箱梁边梁置于门槽内，将底节实腹式门叶结构吊装至底槛位置后与边梁拼焊，拼焊完成后，将单榀桁架结构、斜向连接腹杆与底节门叶实腹式门叶结构和实腹式箱型边梁拼焊；然后按照相同工序拼接上

一节实腹式门叶结构和单榀桁架结构。

3 结语

1) 针对闸门使用工况和构造要求，提出面板+实腹式薄框架与桁架梁系组合结构的闸门结构形式；考虑到锁定梁倾覆风险大以及锁定就位检测较为困难，闸门锁定装置采用旋转推拉式锁定梁配电动推杆操作。

2) 通过有限元法对桁架式闸门整体结构分析可知，弦杆端部与腹杆相交的“ \angle ”节点和与之相邻的“ \angle ”节点受力复杂，存在应力集中，在节点位置一定范围内的弦杆外壁焊接管片，在弦杆和腹杆交点处的弦杆内部焊接加劲环，可以扩散节点集中荷载。

3) 根据改进方案，对挡水工况和起吊工况进行有限元分析，闸门结构强度和刚度满足设计要求，研究成果对大跨度桁架式闸门设计具有一定参考价值。

参考文献:

- [1] 周浩, 徐素红, 陶柏辰. 桁架式平面直升闸门结构有限元分析[J]. 广东水利水电, 2018(10): 35-39.
- ZHOU H, XU S H, TAO B C. Design and structural finite element analysis of truss plane gate [J]. Guangdong water resources and hydropower, 2018(10): 35-39.
- [2] 阎栋栋, 朱旭, 张发茂. 百色水利枢纽通航设施工程省水船闸选型方案[J]. 水运工程, 2024(6): 135-141.
- KAN D D, ZHU X, ZHANG F M. Type-selecting scheme of water-saving ship lock for navigation facilities project at Baise water conservancy hub [J]. Port & waterway engineering, 2024(6): 135-141.
- [3] 郑铁恒, 朱召泉. 新型鱼腹桁架式大跨深水叠梁门有限元分析[J]. 水运工程, 2016(7): 112-115.
- ZHENG T H, ZHU Z Q. Finite element analysis on a new fish-bellied truss type of long-span and deep-water stop-log gate [J]. Port & waterway engineering, 2016(7): 112-115.
- [4] 胡俊峰. 基于有限元分析的大跨度平面闸门设计研究[J]. 中国农村水利水电, 2012(8): 110-111, 114.
- HU J F. Research on design of long-span plane gate based on finite element analysis [J]. China rural water and hydropower, 2012(8): 110-111, 114.
- [5] 朱世哲, 罗尧治. 新型双拱钢管结构闸门的应用与研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(1): 35-41.
- ZHU S Z, LUO Y Z. Application and study of a steel tubular double-arch lock [J]. China civil engineering journal, 2008, 41(1): 35-41.
- [6] 朱世哲, 罗尧治, 娄荣. 双拱结构 X 型钢管相贯节点试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42(1): 99-104, 110.
- ZHU S Z, LUO Y Z, LOU R. Experimental investigation of X-joint in double-arch structure [J]. Journal of Zhejiang University (engineering science), 2008, 42(1): 99-104, 110.
- [7] 但泽义. 钢结构设计手册[M]. 4 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- DAN Z Y. Manual of steel structure design [M]. 4th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.
- [8] 船闸阀门设计规范: JTJ 308—2003[S]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- Code for design of lock gates and valves of shiplocks: JTJ 308-2003[S]. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [9] 水利水电工程钢闸门设计规范: SL 74—2019[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019.
- Design specification for steel gates of water and hydropower projects: SL 74-2019 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2019.
- [10] 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- Standard for design of steel structures: GB 50017-2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.

(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等以数字化方式复制、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