



# 船闸反弧门设计要点

陈景祥<sup>1</sup>, 张祖林<sup>1</sup>, 余玫芳<sup>2</sup>

(1. 中水珠江规划勘测设计有限公司, 广东 广州 510610; 2. 广州科技职业技术大学, 广东 广州 510550)

**摘要:** 反弧门设计边界条件复杂、计算参数难以选定, 目前缺乏相关设计指导文献, 设计难度大。通过大藤峡船闸反弧门相关的模型试验研究, 并总结葛洲坝、三峡和大藤峡船闸反弧门设计经验, 得出可有效抑制空化现象的廊道体形; 依据闭门速度快慢选取动水荷载系数; 采用全包板门体结构和流线型底缘可减小水流扰动, 改善流态, 减小气蚀破坏; 启闭力计算时需要考虑水柱力和水阻力等设计要点和合理化建议。

**关键词:** 船闸; 反弧门; 动水荷载; 结构设计; 启闭力计算

中图分类号: U641.2; TV34

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)06-0122-06

## Key points of design for reverse radial gate of ship lock

CHEN Jingxiang<sup>1</sup>, ZHANG Zulin<sup>1</sup>, YU Meifang<sup>2</sup>

(1. China Water Resources Pearl River Planning Surveying & Designing Co., Ltd., Guangzhou 510610, China;  
2. Guangzhou Vocational and Technical University of Science and Technology, Guangzhou 510550, China)

**Abstract:** In response to the complex boundary conditions and difficulty in determining calculation parameters for the design of the reverse radial gate, as well as the lack of relevant design guidance literature and high design difficulty, we carry out the model test research on the reverse radial gate of the Datengxia ship lock, and summarize the design experience of the reverse radial gate of Gezhouba, Three Gorges, and Datengxia ship locks. we obtain a corridor shape that can effectively suppress cavitation phenomenon, select the dynamic water load coefficient based on the speed of closing the door. Adopting a fully enclosed door structure and streamlined bottom edge can reduce water flow disturbance, improve flow patterns, and reduce cavitation damage. The calculation of the opening and closing force needs to consider design points and rationalization suggestions such as dynamic water resistance and water column force.

**Keywords:** ship lock; reverse radial gate; dynamic water load; structural design; opening and closing force calculation

随着国家交通强国战略的实施, 我国内河航道网建设进入快速发展的新时期, 依托长江经济带和粤港澳大湾区发展, 航道网从沿海向内陆不断延伸。目前国内航道等级要求越来越高, 船闸工程正向高水头、大型化方向快速发展。船闸是航道的咽喉部位, 而输水廊道工作阀门是船闸的咽喉, 其安全、平稳、高效运行对船闸通航至关

重要。目前国内外高水头船闸的廊道工作阀门普遍采用反弧门。反弧门经常挡高水头且频繁启闭, 承受着复杂的水动力荷载作用, 工作条件十分恶劣, 其设计边界复杂、计算参数难以选定, 导致设计难度大。反弧门的设计要点与正向弧门有较大差别, 目前设计手册和规范主要针对的是正向弧门设计, 对反弧门的设计指导性不强, 国

收稿日期: 2023-09-19

作者简介: 陈景祥 (1984—), 男, 高级工程师, 从事水工金属结构设计。

内也未见专门介绍反弧门设计的相关文献, 国内外反弧门发生故障的案例又屡见不鲜, 如何保证反弧门设计安全、可靠、经济、合理, 本文将做以下研究和探讨。

## 1 研究思路及方法

船闸反弧门的启闭频繁, 经常处于水位交变“非恒定、非均匀、非连续”的水流状态, 受力复杂, 在运行过程产生空化、气蚀和振动等问题突出, 是反弧门设计的重点和难点问题。本文通过大藤峡船闸廊道阀门段减压模型试验、反弧门的流激振动及启闭特性模型试验、反弧门止水结构研究以及门楣体形与掺气布置切片模型试验等相关试验研究分析反弧门产生空化机理、水动力荷载、阀门结构体形对气蚀的影响以及启闭力影响因素, 结合葛洲坝、三峡船闸反弧门设计经验总结的方法进行研究, 提出反弧门总体布置、动水荷载系数选取、结构设计和启闭力计算等设计要点和建议。

## 2 廊道体形设计要点

SL 74—2019《水利水电工程钢闸门设计规范》<sup>[1]</sup>规定闸门总体布置一般要求为:“闸门应布置在水流较平顺部位; 门前应避免出现横向流和漩涡, 门后应避免出现淹没出流和回流; 闸门底部和顶部不应同时过水”等。由于反弧门布置均无法满足门后、门底和门顶的要求, 且门底、门顶流速大, 极易在门后产生空化。严重的空化现象会引起巨大的轰鸣声和阀门强烈振动。葛洲坝船闸反弧门在前期运行过程中就发生了严重的空化现象, 位于上闸首的活动桥提升楼、事故门启闭机提升楼或桥墩摇晃, 坝面混凝土结构乃至于高程在66.0 m的机房地板都发生颤动, 伴有巨大的爆炸声, 在检修时发现反弧门底缘空蚀成蜂窝、面板蚀穿、门楣止水拉裂, 下游检修门槽混凝土掏出孔洞等破坏<sup>[2]</sup>。

如何避免门后的空化现象, 重点是选择合适的门后体形。国内外都做了大量关于这方面的试

验研究和原型观测, 门后廊道由不扩大到顶渐扩再发展到突扩再到组合体形。目前比较成熟有效解决空化的廊道体形是在门后采用底扩+顶扩+升坎+门楣通气的廊道体形组合<sup>[3]</sup>, 如图1所示。突扩廊道体形增大了门后的淹没水深, 增加廊道底的压力和门后断面增大减小流速从而提高了空化数<sup>[4]</sup>, 同时廊道突扩体形能减小临界空化数<sup>[5]</sup>, 从而达到减免空化现象。门楣通气以便在阀门运行过程中及时为其补气从而减轻了弧门面板与门楣缝隙之间的文丘里管效应减轻水流对阀门顶部的空化作用<sup>[6]</sup>。三峡船闸和大藤峡船闸均采用这种廊道组合体形, 船闸建成后运行至今, 反弧门运行平稳, 门后没有明显的气蚀问题, 气化现象得到极好的抑制。这种体形结构尺寸无法计算得到, 需要靠模型试验一步步优化, 关键要点是设计合理的模型, 且重复多次试验, 以得到最优体形。

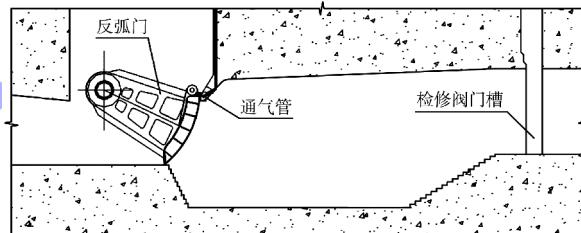


图1 廊道体形

## 3 反弧门动水荷载系数选取建议

反弧门设计首先要考虑各种最不利工况的荷载组合。JTJ 308—2003《船闸闸阀门设计规范》<sup>[7]</sup>列举了各种参数的选取范围和选取原则, 其中设计水动力荷载系数规定的范围比较大且没有明确的选取依据, 难以合理选取。JTJ 308—2003《船闸闸阀门设计规范》规定:“廊道输水系统工作阀门的设计动水荷载, 可按设计静水荷载乘以压力系数和动力系数确定, 其中动力系数取1.0~1.2、压力系数可取1.4~1.6”。按规定两个系数乘积为1.40~1.92, 取值范围比较大, 如何合理选取该规范未做进一步解释。以下通过大藤峡船闸反弧门的水力学模型试验和三峡的船闸反弧门原型观测结果研究水动力荷载系数。

大藤峡船闸反弧门水力学模型试验由南京水利科学研究院完成<sup>[8]</sup>，模型比例 1:14。第 1 种试验工况为：反弧门以开启时间  $t_v = 6 \text{ min}$  开至不同开度，再紧急以闭合时间  $t'_v = 3 \text{ min}$  闭门，测得水动力荷载

系数  $k_f$  值见图 2a)，其中  $n$  表示不同开度。第 2 种试验工况为：反弧门以不同开启时间  $t_v$  为 4、5、6、7、8 min 开至不同开度，再紧急以闭合时间  $t'_v = 3 \text{ min}$  闭门，测得水动力荷载系数  $k_f$  值见图 2b)。

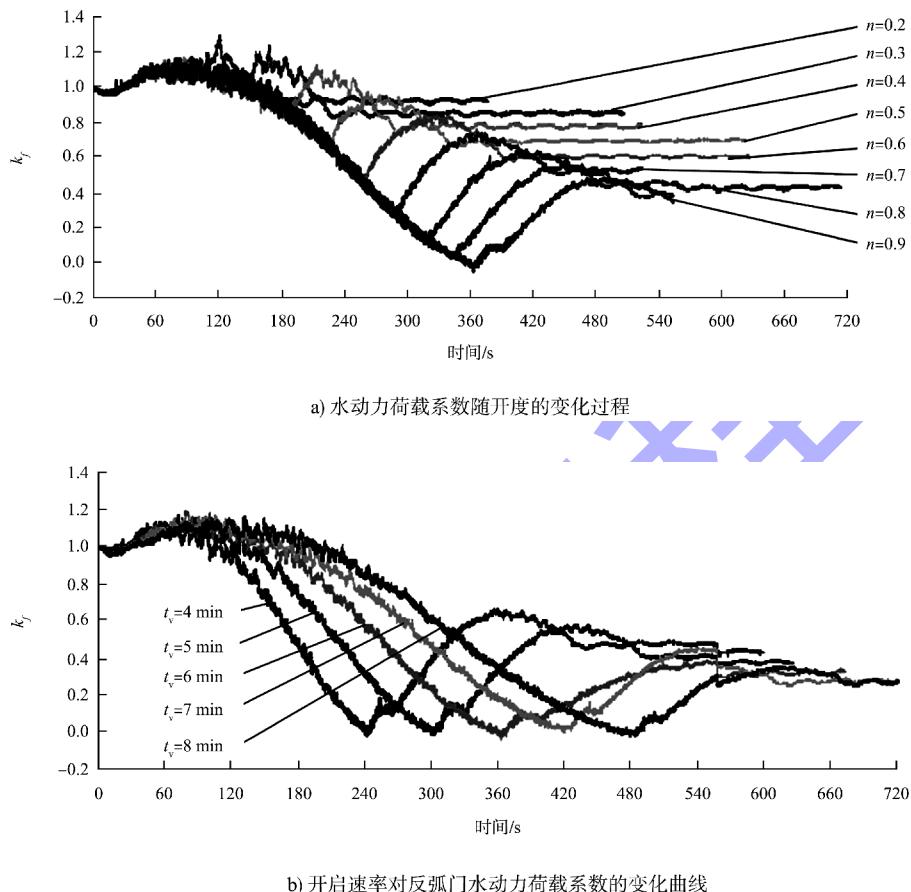


图 2 2 种工况下水动力荷载系数  $k_f$  值

由图 2a) 可看出，大藤峡反弧门的最大水动水荷载系数在  $n$  为 0.2~0.3 时关闭， $k_f = 1.28$ ，即反弧门小开度紧急闭门，阀门承受的水动力荷载最大，其他开度情况下动水关门，水动力荷载系数随闭门开度的增大而减小；由图 2b) 可看出，反弧门关门过程中的水动力荷载系数随阀门开启速率增大而增大，但峰值变化不大，即开启速率对水动力荷载系数影响不明显，且均未超最大值  $k_f = 1.28$ ，比规范值小。

在三峡船闸反弧门水力学模型试验中测得最大的水动力荷载系数为 1.64，出现在阀门开度  $n$  为 0.2~0.4，以  $t_v = 1 \text{ min}$  关阀，与原型观测结果基本吻合<sup>[9]</sup>。由于三峡船闸反弧门关门速度比大藤峡船闸反弧门快，水动力荷载系数相应增大，

符合阀门闭门速度越快、门前水位上升越高、门后压力越低的规律。

综上所得，反弧门的水动力荷载系数峰值一般出现在  $n$  介于 0.2~0.4，快速闭门；与开门速率相关性不强；与闭门速率呈正相关性；结果均未超规范值，规范推荐值偏安全，在设计过程中依据闭门速率快慢选取水动力荷载系数，可适当取小值，有条件通过模型试验确定。

## 4 反弧门结构设计要点

### 4.1 包板设计

反弧门结构设计基本原则是根据孔口尺寸采用横梁或竖梁结构，主梁等荷载同层布置。这些原则与正向弧门设计基本一致。由于船闸廊道内

流态比较复杂, 为改善反弧门前后流态, 在易产生空化和气蚀的面板、底缘、门楣等结构设计做了相应优化。

反弧门设计采用双面板, 避免梁格对水流的扰动; 其次是支臂也设计成全包板, 支臂上沿和下沿宜采用半圆或椭圆柱形包裹, 除了减小水流振动, 还能减小启闭力。根据相关研究结果表明<sup>[10]</sup>, 采用半圆、椭圆柱形包裹能分别减小启闭力 80~100、100~120 kN。

#### 4.2 底缘设计

在反弧门开启过程中, 水流沿阀门面板急剧转折, 主流与门底缘曲面分离, 使分离区局部压力降低, 脉动幅值增大, 从而促成了分离型空穴的发生, 当门底缘的曲面形状较差时, 显然极易产生分离型的空穴。此外, 门底缘的梢涡与主流及门后水流漩滚体之间强烈的剪切作用, 促成剪切型的空穴。门底缘形式直接影响到梢涡的强弱, 也影响剪切型空穴的强弱<sup>[11]</sup>。JTJ 308—2003《船闸闸阀门设计规范》要求上游面与廊道底夹角为 90°, 导流板设计成流线型(图 3), 底止水采用钢止水, 可以改善来流流态、减弱底缘水流分离作用, 其抗空化性能较优<sup>[12]</sup>。同时这种流线形式能减少阀门启闭过程中的湍流, 降低受到的水流阻力, 从而减小启闭力<sup>[13]</sup>。

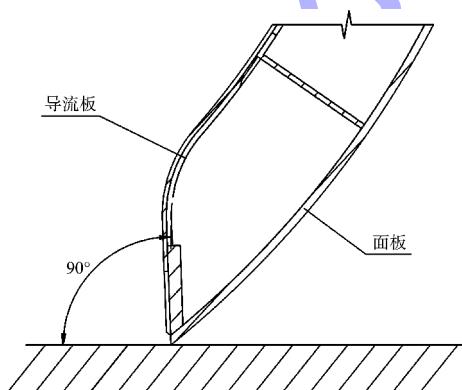


图 3 反弧门底缘

#### 4.3 顶止水和门楣设计

目前国内船闸反弧门均采用一道顶止水, 材料以橡胶为主, 止水主要是 P 形和半圆头形, 见图 4。在阀门开启过程中, 因阀门面板与门楣形成

的缝隙形状尤如文丘里管, 而作用水头接近于上、下游水位差, 压力大, 门楣缝隙段更易发生空化(称为顶缝空化或门楣空化), 且强度远超过底缘空化, 其空化类型属剪切型, 噪声谱中高频能量突出, 空化溃灭所产生的空蚀破坏作用较强。顶止水极易被沿接头等部位撕裂破坏, 根据试验对比, 相同材料的半圆头形式相比, P 形止水变形偏大, 且存在头部与止水板局部受弯易损坏问题, 在高水头阀门中推荐采用半圆头形式止水<sup>[14]</sup>。

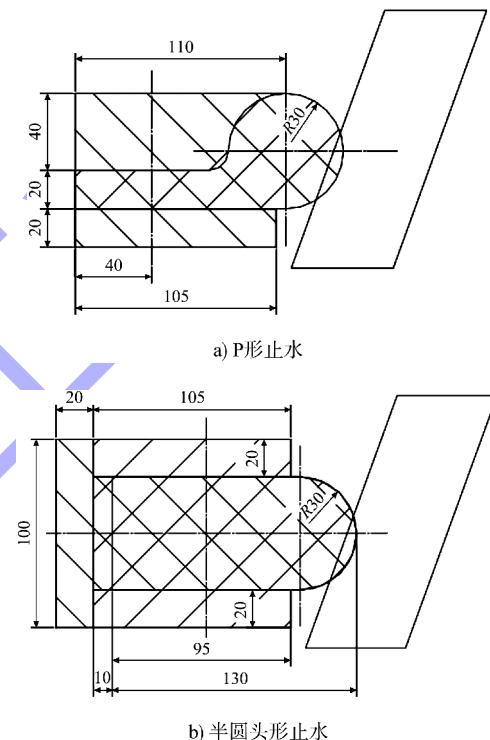


图 4 P 形和半圆头形止水 (单位: mm)

输水阀门顶缝空化包括 2 个方面: 1) 在阀门开启之初, 顶水封与门楣形成的间隙小于面板与门楣的间隙, 止水处先发生空化, 止水形式对其影响较大; 2) 阀门开启过程中, 顶止水脱离门楣, 止水与门楣的间隙远大于面板与门楣的间隙, 此时门楣发生空化。如何解决门楣处空化问题, 根据葛洲坝船闸的改造经验是采用门楣通气<sup>[15]</sup>, 能有效抑制空化现象。三峡船闸和大藤峡船闸也均在门楣布置了通气孔, 空化问题基本解决。所以在门楣设计时应考虑通气要求, 有条件的还需要通过模型试验确定通气量大小和门楣细部体形。

## 5 启闭力计算

根据 JTJ 308—2003《船闸闸阀门设计规范》，反弧门启闭力计算公式为：

$$F_Q = \frac{1}{R_2} [n_T (T_{zd} r_0 + T_{zs} r_1) + n_G G r_2 + G_j R_1 + P_x r_4] \quad (1)$$

$$F_w = \frac{1}{R_1} [n_T (T_{zd} r_0 + T_{zs} r_1) + P_t r_3 - n_G G r_2] \quad (2)$$

$$P_x = p_x D_2 B \quad (3)$$

$$P_t = p_t D_1 B \quad (4)$$

式中： $F_Q$  为反弧门的启门力，N； $F_w$  为反弧门的闭门力，N； $R_2$ 、 $r_0$ 、 $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ 、 $R_1$ 、 $r_4$  分别为启门力、转动铰摩阻力、止水摩阻力、阀门重力、上托力、配重(下压力)和下吸力对弧形阀门转动中心的力臂，m； $n_T$  为摩擦阻力安全系数； $n_G$  为阀门重力修正系数； $G_j$  为加重块重力，N； $T_{zd}$  为转

动摩阻力，N； $T_{zs}$  为止水摩阻力，N； $P_x$ 、 $P_t$  分别为下吸力、上托力，N； $p_x$  为下吸力强度，Pa； $B$  为反弧门止水宽度，m； $D_1$  为阀门底缘止水距上游面距离，m； $p_t$  为上托力强度，Pa； $D_2$  为阀门底缘止水距下游面距离，m。

式(1)~(4)中除  $P_x$ 、 $P_t$  外，其他各项参数均可根据结构设计确定。 $P_x$ 、 $P_t$  难以确定的原因为下吸力强度  $p_x$  和上托力强度  $p_t$  是变化的， $D_1$ 、 $D_2$  尺寸也不容易确定。借助大藤峡反弧门启闭力特性模型试验研究  $P_x$ 、 $P_t$  大小及影响。

大藤峡反弧门试验工况是以  $t_v = 6$  min 开启至全开，停机数秒后，再以  $t'_v = 3$  min 关闭，动水启闭力及静水启闭力过程线见图 5a)，净动水启闭力(为动水启闭力与静水启闭力之差)过程线见图 5b)。

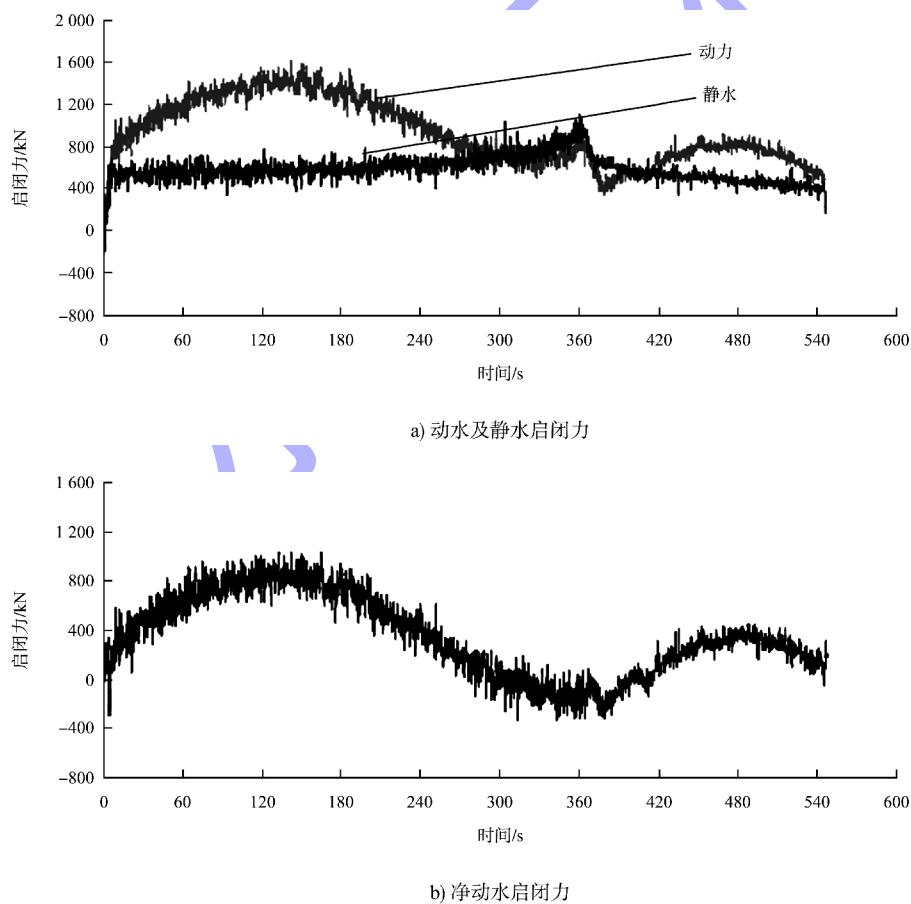


图 5 动水、静水、净动水启闭力过程线

由图 5 可知，反弧门最大净动水启闭力约 880 kN，最小净动水闭门力约-300 kN，这 2 个作用力均由水流作用产生，可认为是下吸力和上托力。按

JTJ 308—2003《船闸闸阀门设计规范》公式计算出下吸力约为 90 kN( $p_x$  取 20 kPa)、上托力为 0 kN( $D_1 = 0$  m)的计算结果远小于模型试验的结果。认

主要有以下原因: 1) 反弧门在启闭过程中, 上下游产生了水压差, 就形成了较大的水柱力; 2) 反弧门在水体中运动过程中产生一个与运动速度二次方成正比关系的水阻力, 速度越大, 阻力越大。这2点原因在式(1)~(4)中均未考虑, 从试验结果看这部分作用力占总启闭力约50%, 直接影响计算结果正确性, 不容忽视。

有部分工程由于反弧门布置受限, 在全开位置时启闭机拉杆与半径夹角较小, 有效力臂很短, 此时启门力会很大, 可能成为控制值, 启闭力计算进也应充分考虑, 要计算整个启闭过程线, 确定启闭机容量。

反弧门启闭过程中受水流变化、阀门的形状、启闭速度等综合影响, 条件很复杂, 要得到准确启闭力结果须通过模型试验确定。对于不具备模型试验条件的工程或前期初步估算建议参考已建类似工程。

## 6 结论

1) 通过总结国内反弧门廊道体形研究发展经验, 推荐比较成熟且能有效解决阀门空化的廊道体形为: 门后底扩+顶扩+升坎+门楣通气的廊道组合体形。

2) 反弧门的水动力荷载系数峰值一般出现在 $n$ 介于0.2~0.4时, 快速闭门; 与开门速率相关性不强; 与闭门速率呈正相关性; 规范的推荐值偏安全, 依据闭门速率快慢选取水动力荷载系数, 可适当取小值, 有条件应通过模型试验确定。

3) 通过大藤峡船闸反弧门的流激振动、门楣切片和止水结构试验研究得出反弧门结构设计比较合理的设计: 采用双面板, 包括支臂合包板; 门底缘上游面与廊道底夹角为90°, 导流板尽设计成流线形式; 顶止水采用橡胶半圆头形式, 门楣布置通气管。

4) 通过大藤峡反弧门启闭特性模型研究分析得出启闭力受水流变化、阀门的形状、启闭速度等综合影响产生的水柱力和水阻力不容忽视, 规范中的启闭力计算公式未考虑水柱力和水阻力,

计算结果偏小, 采用规范公式计算得到结果, 需要通过模型试验加以修正。

## 参考文献:

- [1] 中水东北勘测设计研究有限责任公司. 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.
- [2] 卞兆盛. 葛洲坝船闸输水反弧门运行实践[J]. 水运工程, 2001(5): 24-27, 31.
- [3] 王心海, 胡亚安, 吴建华. 船闸输水反弧门后突扩廊道体形的空化特性研究综述[C]//唐洪武, 李桂芬, 王连祥. 第三届全国水力学与水利信息学大会论文集. 南京: 河海大学出版社, 2007: 272-277.
- [4] 李云, 张瑞凯. 高水头船闸反弧门后水流流态和收缩系数研究[J]. 水利水运科学研究, 1996(2): 126-132.
- [5] 梁川, 谢省宗. 三峡船闸输水隧洞反弧门后廊道体形空化模型试验[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2000, 12(2): 4-7.
- [6] 李健, 姜国华. 三峡永久船闸输水廊道工作门防空化措施分析[J]. 人民长江, 2005, 36(6): 46-47, 69.
- [7] 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.
- [8] 胡亚安, 王新, 严秀俊, 等. 大藤峡水利枢纽工程船闸输水阀门流激振动、启闭特性及三维有限元分析成果报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院 2016.
- [9] 胡亚安, 严秀俊, 薛淑. 三峡船闸紧急关阀工况输水阀门工作条件原型观测[J]. 水运工程, 2021(1): 1-5.
- [10] 徐勤勤, 王业红, 岳汉生, 等. 三峡船闸输水系统反弧门启闭力特性研究[J]. 长江科学院院报, 1998, 15(5): 1-5.
- [11] 宣国祥. 高水头船闸输水阀门的空穴问题研究及其改善措施[J]. 水利水运科学研究, 1990, 6(2): 213-221.
- [12] 胡亚安, 张瑞凯, 郑楚珮. 反弧形输水阀门底缘空化减免措施研究[J]. 水利水运科学研究, 1994, 6(Z1): 71-79.
- [13] 徐勤勤, 刘敦煌, 岳汉生. 船闸反向弧形阀门底缘体形优化试验[J]. 长江科学院院报, 1997, 14(3): 2-5, 15.
- [14] 胡亚安, 王新, 黄岳, 等. 大藤峡水利枢纽工程船闸输水系统反弧门止水结构研究成果报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2016.
- [15] 卞兆盛. 葛洲坝船闸输水阀门段空化与声振研究[J]. 水运工程, 2000(7): 34-37, 58.

(本文编辑 王璁)