



闸墙长廊道侧支孔船闸阀门运行方式 优化试验研究^{*}

袁 浩¹, 邹翼遥², 林晶晶³

(1. 重庆西科水运工程咨询有限公司, 重庆交通大学, 重庆 400016; 2. 河海学院, 重庆交通大学, 重庆 400074;
3. 航海保障与航道技术研究中心, 交通运输部水运科学研究院, 北京 100088)

摘要: 船闸阀门开启时间对闸室通航效率、输水廊道压力和闸室停泊条件等产生影响, 针对阀门运行方式优化问题, 采用物理模型试验对船闸进水口水位、阀门段输水廊道压力特性、闸室和下引航道内船舶系缆力等水力特性进行分析, 结果表明: 闸室和下引航道内前横、后横和纵向 3 个方向的船舶系缆力均随阀门开启时间增大而减小, 且纵向船舶系缆力大于横向船舶系缆力。随着阀门开启时间增加, 充水时阀门段输水廊道压力先减小后增大, 泄水时则逐渐增大。综合考虑当阀门开启时间为 6 min 时船闸整体运行效果较好, 该成果可为实际船闸运行提供技术支撑。

关键词: 船闸输水系统; 阀门开启速度; 船舶系缆力; 压力

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)02-0101-06

Optimization of valve operation mode in wall culvert side ports in ship lock

YUAN Hao¹, ZOU Yiyao², LIN Jingjing³

(1. Chongqing Xike Water Transport Engineering Consulting Co., Ltd., Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China;

2. College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

3. Research Institute of Navigation Support and Channel Technology, China Waterborne Transport Research Institute, Beijing 100088, China)

Abstract: The opening time of ship lock valves has an impact on the navigation efficiency of the lock chamber, the pressure of the water conveyance gallery, and the berthing conditions of the lock chamber. To optimize the operation mode of the valves, physical model tests are used to analyze the factors such as the water level of the ship lock inlet, the pressure characteristics of the water passage, the ship mooring force in the lock chamber and the downstream channel. The results show that the mooring force of ship in front transverse, rear transverse and longitudinal direction decreases with the increase of valve opening time, and the mooring force of ship in longitudinal direction is greater than that of ship in transverse direction. With the increase of the opening time of the valve, the pressure in the passage gallery decreases first and then increases during water filling, while gradually increases during water discharge. It is considered that the overall operation effect of the ship lock is better when the valve opening time is 6 min. The conclusion can provide technical support for engineering practice.

Keywords: lock water delivery system; valve opening speed; ship mooring force; stress

船闸输水系统是保障船舶安全过闸的关键设施^[1], 其运行方式的合理性很大程度影响着船闸的通航效率^[2]。宁武等^[3]采用比尺为 1:30 模型试

验, 对不同船闸阀门运行条件下输水系统的水力特性、闸室船舶停泊条件、进出水口水流条件进行研究。为确定充泄水阀门开启的速度与方式,

收稿日期: 2023-06-14

*基金项目: 国家自然科学基金项目(52109076); 重庆市自然科学基金项目(cstc2021jcyj-msxmX1175)

作者简介: 袁浩 (1989—), 男, 高级工程师, 博士, 从事高速水力学和通航水力学研究。

很多研究者采用物模方法对输水过程的船舶停泊条件、输水水力计算、消能设施布置等方面进行了研究^[4-10]。山区河流具有水位落差大的特点，此时船闸运行方式与较低水位差情况下船闸的运行方式不同，针对高水头船闸众多研究者^[11-14]利用物理模型试验和原型观测等方式对充泄水过程、闸室内船舶停泊条件以及输水系统空化问题开展研究，并提出优化建议。数值模拟可以获得物理模型试验无法捕捉到的精细流场等信息，陈明等^[15]采用 RNG $k - \epsilon$ 紊流模型对带格栅消能室集中输水系统的三维水力特性动态进行仿真计算。关于船闸运行方式的研究取得了丰硕的成果，船闸运行方式与通航枢纽的实际物理条件密切相关，不同水流条件、物理结构需要不同的运行方式。

当船闸输水系统布置已经确定，合理调整冲泄水时间，改变输水指标，可以提高船闸通航效率。本文采用不同阀门开启时间，通过对进水口水位、过水廊道压力和闸室船舶系缆力等水力特性进行分析，获得最佳的阀门开启方式，旨在为实际工程提供借鉴。

1 试验设计及仪器

为保证通航安全，采用水库正常蓄水位 249.00 m、下游最低通航水位 235.50 m，船闸运行最大工作水头 13.5 m 作为试验水力条件，此时引船闸充泄水对引航道内的水流影响最为明显。基于相关规划设计，选取 1 000 吨级试验船，尺度为 67.0 m×11.0 m×2.6 m(总长×型宽×设计吃水深度)。根据 JTJ 306—2001《船闸输水系统设计规范》^[16]选择输水系统类型。考虑到船闸的闸室尺度较大且对运行效率要求较高，结合公式(1)采用闸墙长廊道侧支孔出水的第一类分散输水系统。

$$m = \frac{T}{\sqrt{H}} = \frac{10}{\sqrt{13.5}} = 2.72 \quad (1)$$

式中： m 为判别系数，取 2.5~3.5； T 为闸室输水总时间，min； H 为船闸工作水头，m。

物理模型上、下游水位均采用溢流式平水槽控制，其溢流量远大于模型充、泄水流量，较好

地消除了水面波动和保持上、下游水位的稳定；闸室水位采用压力传感器及自动水位指示器显示测定；输水阀门采用平板阀门形式，由无级调速步进电机驱动实现自动起闭，可任意调整阀门的启闭时间和方式；闸室充、泄水过程由压力传感器、DH5920 动态信号测试分析系统及计算机组成的自动测量系统采集瞬时水位，进行数据处理；水面波动采用 UBL-2 超声波水位仪/水位采集分析仪测定；船舶系缆力由全环电阻式拉力仪测定；为观测输水过程中廊道各部位的压力变化，在模型充、泄水廊道关键部位布置测压孔和压力传感器，测量不同工况下的廊道压力；上、下游引航道的流速测量采用表面流场测量系统进行连续观测，并用计算机进行自动记录及数据处理。试验模型见图 1。



图 1 物理模型试验布置

在充、泄水过程中，阀门开启后廊道内水流速度明显增大，易出现负压，对廊道结构安全产生不利影响。前期研究发现负压一般出现在廊道顶端，因此选择阀门下侧廊道顶端不同距离位置进行压力监测，以及对廊道中间位置也进行压力监测，见图 2。

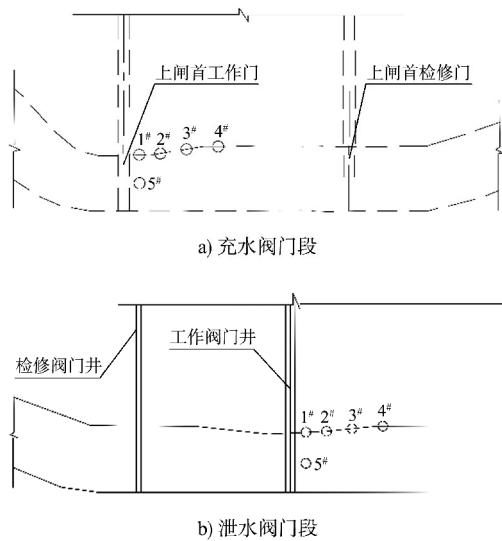


图2 测压点布置

为确定船闸工作阀门合理的运行方式, 在船闸最大运行水头(13.5 m)条件下, 输水廊道工作阀门采取双边匀速开启, 开启时间(T_v)分别为: 4、5、6、7 min, 不同工况下充水和泄水的水力特征参数见表1。

表1 不同工况水力特性参数

阀门开启方式	时间/min	闸室充(泄)水时间 T/min	最大流量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	水位最大变幅/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
充水	4	8.55	164	0.045
	5	9.08	150	0.041
	6	9.66	140	0.039
	7	10.37	126	0.035
泄水	4	9.13	144	0.040
	5	9.69	136	0.038
	6	10.28	127	0.035
	7	11.10	118	0.033

由表1可知, 当充水阀门开启时间分别为4、5、6和7 min时, 闸室充水时间依次增大, 闸室最大充水流量依次减小, 相应的输水主廊道最大断面平均流速分别为7.81、7.14、6.67和6.00 m/s, 工作阀门段廊道的最大断面平均流速分别为9.11、8.33、7.78和7.00 m/s, 上游进水口断面最大断面平均流速分别为1.67、1.53、1.43和1.29 m/s, 闸室水位最大上升速率依次减小。

当泄水阀门双边开启时间分别为4、5、6和7 min时, 闸室泄水时间依次增大, 闸室最大泄水

流量依次减小, 相应的输水主廊道最大断面平均流速分别为6.86、6.48、6.05和5.62 m/s, 阀门段廊道最大断面平均流速分别为8.00、7.56、7.06和6.56 m/s, 闸室水位最大下降速度依次减小。

2 结果分析

2.1 进水口水位

船闸充水时, 上闸首进水口存在水面先跌落后回升的现象, 不同工况下进水口水位变化过程曲线见图3。在前期的水位跌落过程中, 不同工况下水位随时间变化的下落速度以及水位最低点均较为接近; 回升和稳定阶段受阀门开启时间的影响开始出现不同, 随阀门开启时间增大, 回升段起点逐渐靠后, 稳定段初期水位逐渐降低。由于水位稳定需要较长的时间, 因此图3中稳定段存在一定的波动。

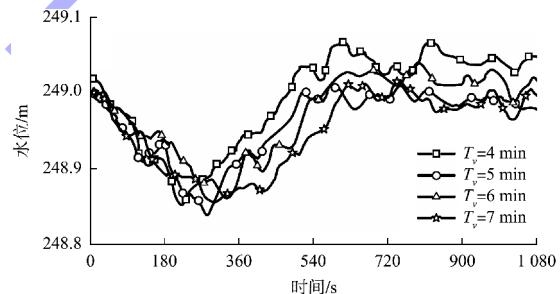


图3 进水口水位变化时程曲线

2.2 充、泄水廊道压力特性

将压力转化为水柱高度进行记录, 转化公式为:

$$h = \frac{P}{\rho g} \quad (2)$$

式中: h 为压力换算的水柱高度, m; P 为实测压力值, Pa; ρ 为水的密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 。

不同工况下压力点测量值见表2, 可知在充水和泄水时, 最低压力均出现在阀门后廊道顶部。随阀门开启时间增大, 充水过程中阀门段廊道压力最小值呈现出先减小后增大的变化趋势, 阀门开启时间为5 min时压力值达到最小, 此时不同位

置的压力大小平均值分别为：3.10、2.75、2.63、2.37、4.50 m。泄水过程中阀门段廊道压力最小值随阀门开启时间增加先增大后减小。由于试验测量过程中可能存在随机误差，忽略局部数据误差，整体符合上述变化规律。在阀门双边开启情况下，船闸充、泄水门槽后廊道侧面最低压力为2.47 m，未出现负压，说明门槽设计的宽深比、错距比及斜坡坡度形式合理，较好地改善门槽后水流的分离。

表 2 不同工况各测点最低压力值

充泄水	T_v/min	最低压力/m				
		1#	2#	3#	4#	5#
4	平均值	3.90	3.60	3.20	3.05	5.10
	瞬时值	3.20	2.65	1.77	1.78	4.05
5	平均值	3.10	2.75	2.63	2.37	4.50
	瞬时值	2.03	1.80	0.82	1.21	3.14
6	平均值	3.50	3.20	2.80	2.60	4.70
	瞬时值	2.83	2.16	1.88	1.59	3.69
7	平均值	3.80	3.50	3.25	3.00	5.20
	瞬时值	3.34	2.92	2.32	2.10	4.46
4	平均值	2.54	2.00	1.80	2.20	3.80
	瞬时值	1.77	1.23	1.05	0.58	2.97
5	平均值	2.55	2.10	2.05	2.22	4.12
	瞬时值	1.85	1.15	1.09	1.11	3.14
6	平均值	2.78	2.28	2.17	2.31	4.20
	瞬时值	1.89	1.58	1.16	1.15	3.22
7	平均值	2.65	2.35	2.00	2.15	3.92
	瞬时值	1.72	1.24	1.21	1.13	3.08

2.3 闸室船舶系统缆力

船舶在室内停泊过程中，系统缆力是考虑船舶通行安全的重要指标，选择船舶停于下半闸室，消力梁距离闸墙1.5 m时的闸室船舶系统缆力进行分析，见表3。

由表3可知，在前横、后横和纵向3个方向的船舶系统缆力均随阀门开启时间的增大而逐渐减小，说明阀门开启时间对船舶系统缆力产生明显影响。且纵向船舶系统缆力整体大于横向船舶系统缆力，这是由于船舶受力主要来自水流方向，在承

受纵向力的同时也受横向力影响。随时间增大，纵向船舶系统缆力相对于4 min时的减小幅度分别为17%、34%、36%。说明随阀门开启时间增大产生的纵向船舶系统缆力逐渐减小，最终趋于稳定。

表 3 闸室船舶最大平均系统缆力

双边阀门 开启时间	最大平均系统缆力/kN			
	$T_v=4\text{ min}$	$T_v=5\text{ min}$	$T_v=6\text{ min}$	$T_v=7\text{ min}$
前横	11.5	6.6	4.9	3.5
纵向	8.6	7.1	5.7	5.5
后横	4.7	3.9	3.1	2.4

注：1 000 t 船纵向最大系统缆力允许值为 32.0 kN，横向为 16.0 kN。

2.4 下引航道水流条件及船舶停泊条件

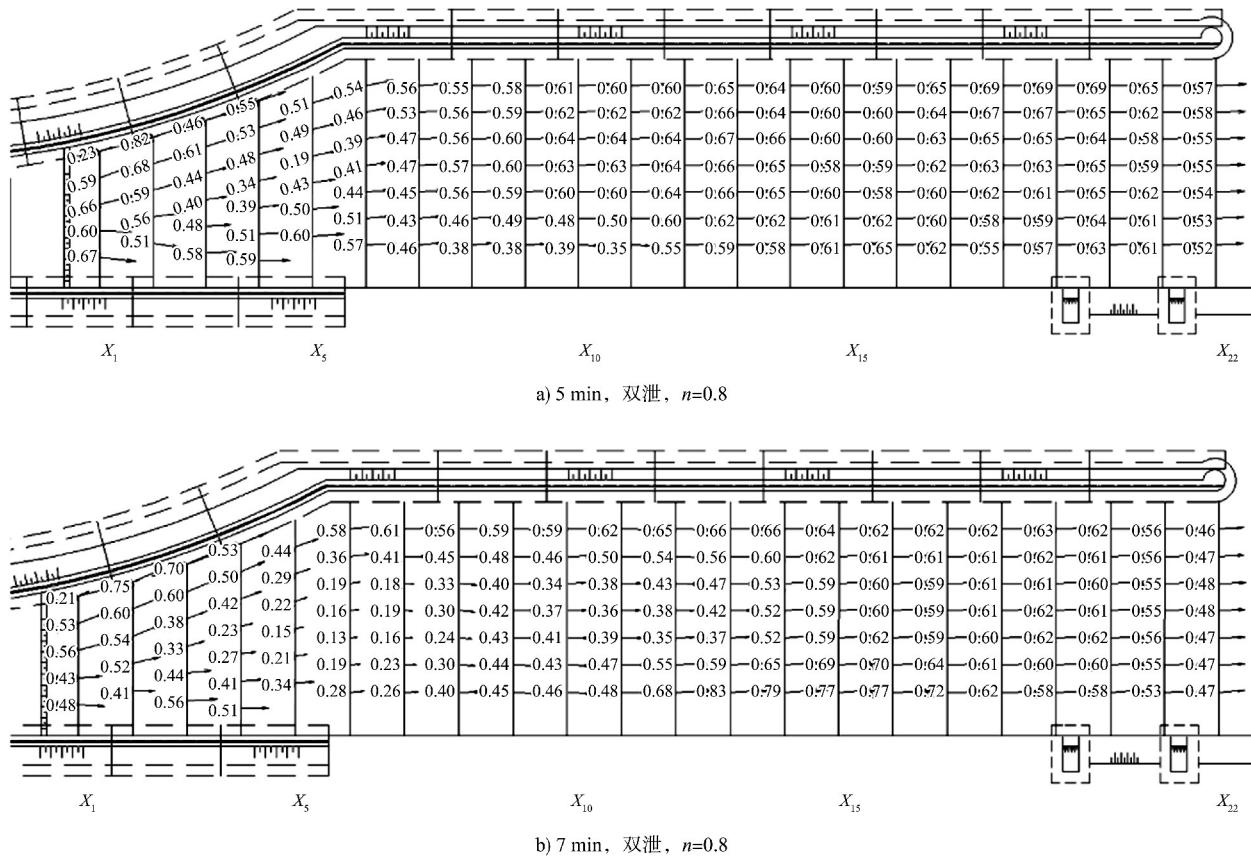
2.4.1 下引航道流速、流态

船闸泄水过程中下引航道水面流态见图4。



图 4 泄水过程中下引航道流态

由图4可知，在整个泄水过程中格栅消能室顶部出流较均匀，无明显局部水面壅高，水流出消力塘后扩散快，下游引航道内水流分布较为均匀，水面波浪较小。利用表面流速测量软件识别后得到表面流场的流速分布规律均较为接近。图5为 $T_v=5$ 、7 min 泄水时的表面流场分布情况。可知距下闸首220 m 停泊段处断面最大纵向表流为0.69 m/s(左侧)，此断面上其余各测点表面流速约0.60 m/s。向下游发展断面流速有所衰减，各断面流速分布均匀，流速绝对值均小于规范允许值，整体流态较好。



注: n 为流速系数, 指流体通过船闸时的平均流速与进口流速之比; $X_1 \sim X_{22}$ 表示 1~22 号断面。

图 5 典型泄水过程中引航道流速分布 (单位: m/s)

2.4.2 下引航道内船舶系缆力

下引航道内船舶系缆力同样是影响船舶安全性和稳定性的重要指标, 为了解 1 000 t 船舶在船闸下引航道内的泊稳情况, 将船舶停于距下闸首 220 m 处停泊段区域, 分别测定不同阀门开启方式下船舶的系缆力, 见图 6。

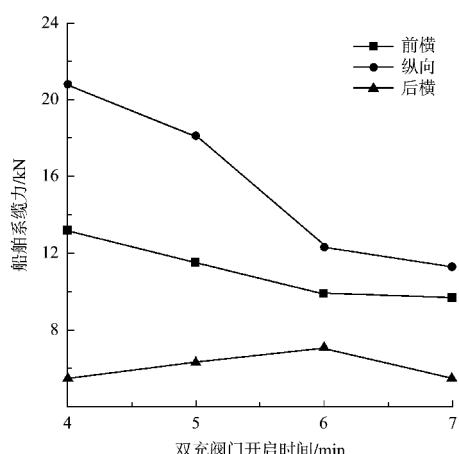


图 6 下引航道船舶平均最大系缆力与阀门开启时间关系

由图 6 可知, 下引航道停泊段平均最大系缆力随阀门开启时间的增大均逐渐减小, 并且纵向船舶系缆力明显大于横向船舶系缆力, 其原因与闸室段船舶系缆力分布规律类似。随时间增大, 纵向船舶系缆力相对于 4 min 时的减小幅度分别为 13%、41%、44%。前横、后横两个方向的最大船舶系缆力分别为 13.2、5.5 kN, 均小于 16.0 kN, 满足规范要求。纵向最大船舶系缆力为 20.8 kN, 小于 32.0 kN, 满足规范要求, 且富余度较大。

3 结论

1) 充、泄水最低压力均出现在阀门后廊道顶部。充水过程中随阀门开启时间增大, 阀门段廊道压力先减小后增大; 泄水过程中阀门段廊道压力值随阀门开启时间增大则逐渐增大。

2) 阀室内前横、后横和纵向 3 个方向的船舶系缆力均随阀门开启时间的增大而逐渐减小, 且

纵向船舶系缆力整体大于横向船舶系缆力；下引航道内呈现出相似的分布规律。

3) 综合考虑水位变化、船舶停泊条件和阀门段廊道压力等因素，当阀门开启时间为 6 min 时，某船闸运行效果相对较好。

参考文献：

- [1] 吴英卓, 江耀祖, 刘火箭, 等. 适应整体式闸室结构的船闸输水系统研究 [J]. 人民长江, 2021, 52 (1): 145-150, 166.
- [2] 刘本芹, 徐新敏, 宣国祥. 風江三溪口船闸输水系统布置及水力学模型试验 [J]. 水运工程, 2013(8): 115-120.
- [3] 宁武, 李君, 宣国祥, 等. 柳江红花二线船闸输水系统布置与水力学模型试验研究 [J]. 水运工程, 2017 (10): 154-159.
- [4] 阙延炬, 李君, 宣国祥, 等. 蜀山泵站枢纽船闸输水系统水力学模型试验 [J]. 水运工程, 2017(9): 126-130, 143.
- [5] 谢红, 刘本芹. 引江济汉通航工程高石碑船闸输水系统布置 [J]. 水运工程, 2012(7): 135-139.
- [6] 张绪进, 吕伟东, 刘平昌, 等. 贵港航运枢纽二线船闸输水系统水力学试验 [J]. 水利水运工程学报, 2012, 134(4): 34-38.
- [7] 金国强, 刘本芹, 宣国祥, 等. 富春江船闸改扩建工程船闸输水系统布置研究 [J]. 水利水运工程学报, 2012, 134(4): 60-64.
- [8] 刘本芹, 宣国祥. 泰州引江河高港二线船闸输水系统布置及水力计算分析 [J]. 水利水运工程学报, 2012, 134(4): 65-70.
- [9] 覃业传, 李君, 宣国祥, 等. 并列双线船闸单侧闸墙长廊道输水系统布置及水力学模型试验研究 [J]. 水运工程, 2015(5): 139-144.
- [10] 吴英卓, 江耀祖, 王智娟, 等. 兴隆船闸关键水力学问题研究 [J]. 水利水运工程学报, 2012, 134(4): 6-12.
- [11] 胡亚安, 李君, 宗慕伟. 红水河乐滩船闸输水系统水力特性原型调试研究 [J]. 水利水运工程学报, 2008, 115(1): 6-13.
- [12] 宣国祥, 李君, 黄岳, 等. 中水头巨型船闸闸墙长廊道侧支孔输水系统水动力学研究 [J]. 水运工程, 2016(12): 36-41.
- [13] 刘平昌, 周家渝, 王召兵, 等. 渠江金盘子船闸输水系统水力学原型观测研究 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2011, 30(6): 1396-1399, 1419.
- [14] 吴英卓, 陈建, 王智娟, 等. 高水头船闸输水系统布置及应用 [J]. 长江科学院院报, 2015, 32(2): 58-63.
- [15] 陈明, 梁应辰, 宣国祥, 等. 船闸输水过程三维水力特性动态仿真研究 [J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2013, 28(5): 559-565.
- [16] 南京水利科学研究院, 天津水运工程科学研究所. 船闸输水系统设计规范: JTJ 306—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.

(本文编辑 赵娟)

- (上接第 100 页)
- [12] 郭红民, 夏修宝, 曹光春, 等. 改善石牌急弯段通航水流条件的河道整治研究 [J]. 水电能源科学, 2015, 33(3): 86-88, 95.
 - [13] HALLAM J, CHILD D R, HINDLE D J. Design and construction of remedial works for the Standedge canal tunnel [J]. Mining technology, 2022, 111(2): 106-114.
 - [14] 李焱, 郑宝友, 周华兴. 构皮滩开船机中间渠道通航隧洞和渡槽的尺度研究 [J]. 水道港口, 2012, 33(1): 45-50.
 - [15] 吴德兴, 周红升, 郭洪雨, 等. 富春江通航隧道建筑限界及内轮廓设计研究 [J]. 隧道建设, 2015, 35(11): 1182-1187.
 - [16] 易建州, 杨培生, 许小华. 基于 FLOW 3D 的山丘区小流域山洪演进三维数值模拟研究 [J]. 江西水利科技, 2021, 47(5): 317-322.
 - [17] 梁秀忠, 原辉. 山区弯曲航道整治技术分析 [J]. 水利科技与经济, 2011, 17(12): 28-30.
 - [18] 何云宏. 三峡两坝间石牌急弯河段通航水流条件及改善措施研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.
 - [19] 长江航道局. 内河通航标准: GB 50139—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
 - [20] 中交水运规划设计院. 船闸总体设计规范: JTJ 305—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
 - [21] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 水运工程模拟试验技术规范: JTS/T 231-2021[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.

(本文编辑 王传瑜)