



船闸同类输水系统布置研究

罗衍庆¹, 王勤振²

(1. 淮安市港航事业发展中心, 江苏 淮安 223001; 2. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 输水系统布置是船闸设计的灵魂核心, 对同类输水系统的布置进行综合比选研究, 选择更为合理的输水系统布置形式, 以满足船舶高效安全过闸、减少拥堵是十分必要的。在综合考虑船闸输水效率、泊稳条件、通过能力、平面布置、施工难易、工程投资、结构耐久性及对工作闸门振动影响等系列因素的基础上, 采用三维数学模型分析及物理模型试验验证的技术手段, 分别对同类输水系统中闸墙长廊道侧支孔全分散输水系统及组合式输水系统进行研究, 研究结果表明, 两种输水系统各项指标及泊稳条件均达到预期设计目标和要求, 组合式输水系统输水时间更长些, 推荐采用闸墙长廊道侧支孔全分散输水系统。该输水系统可进一步提高船闸输水效率, 提高通过能力, 确保船闸安全高效运行。

关键词: 船闸; 全分散输水系统; 输水效率

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)12-0204-06

Layout of similar water conveyance systems for ship locks

LUO Yanqing¹, WANG Qinzhen²

(1. Huai'an Port and Shipping Business Development Center, Huai'an 223001, China;

2. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: The layout of the water conveyance system is the core and soul of ship lock design. It is necessary to conduct a comprehensive comparative study of similar water conveyance systems to select a more reasonable layout, ensuring efficient and safe passage of vessels and reducing congestion. This paper comprehensively considers factors such as water conveyance efficiency of ship lock, berthing stability conditions, throughput capacity, plan layout, construction difficulty, project investment, structural durability, and the impact on working gate vibrations. By employing technical methods such as three-dimensional mathematical model analysis and physical model testing, it separately investigates the fully dispersed water conveyance system with side branch holes in the long corridor of the lock wall and the combined water conveyance system within similar water conveyance systems. The research results indicate that both systems meet the expected design goals and requirements in terms of various indicators and berthing stability conditions. The combined water conveyance system has a slightly longer water conveyance time, and it is recommended to adopt the fully dispersed water conveyance system with side branch holes in the long corridor of the lock wall. This water conveyance system can further enhance the water conveyance efficiency of ship lock, improve throughput capacity, and ensure the safe and efficient operation of the ship lock.

Keywords: ship lock; fully decentralized water conveyance system; water conveyance efficiency

船闸作为通航设施, 是航道上的重要节点工程。随着沿线经济社会的快速发展, 过闸货运量不断骤增, 过闸待泊船舶拥堵现象频繁发生, 船

舶急需高效、快速、安全通过船闸。船闸输水系统作为船闸运行过程中使用最为频繁的工作系统, 其有效运作同船闸通航安全、过闸效率、正常营

收稿日期: 2025-03-21 录用日期: 2025-05-28

作者简介: 罗衍庆(1975—), 男, 高级工程师, 从事内河船闸、航道及港口水运业务的管理研究工作。

运息息相关^[1]。输水系统设计是船闸设计的灵魂核心, 输水系统的布置型式及水力学问题是船闸设计中的关键技术难题^[2], 需对船闸输水系统进行水力设计, 并通过模型试验对输水系统的性能进行论证及优化^[3]。

输水系统的选型与设计水头、地质条件、船闸结构形式等密切相关, 其布置形式需满足输水时间、船舶泊稳条件要求, 必要通过物理模型试验进一步研究论证。王鑫等^[4]针对中水头船闸, 开展闸底长廊道侧支孔船闸输水系统优化布置方案研究, 通过增大输水廊道尺度、消除相关高程突变等结构优化措施, 有效提高输水效率, 改善进水口及闸室内水流条件。阚延炬等^[5]针对闸墙长廊道侧支孔输水系统, 重点研究充、泄水阀门运行方式, 在推荐阀门开启方式下, 输水系统各项水力指标和船舶停泊条件均满足规范和设计要求。当前大部分船闸输水系统的研究建立在规范对输水系统类型判别的基础上, 选择单一类型输水系统(如闸底长廊道侧支孔输水系统或闸墙长廊道侧支孔输水系统)进行结构优化布置或控制阀门开启方式, 以满足各项水力指标和船舶停泊条件。

针对船闸输水系统普遍存在选型保守、输水效率低、闸室泊稳条件差、经济性不佳等系列问题, 对同类输水系统的布置开展综合比选研究十分必要。本文综合考虑船闸输水效率、泊稳条件、通过能力、平面布置、施工难易、工程投资、结构耐久性及对工作闸门振动影响等系列因素, 对同类输水系统两种布置形式进行深入研究, 推荐采用闸墙长廊道侧支孔全分散输水系统, 旨在为其他类似工程供借鉴。

1 输水系统的选择

淮安东船闸位于京杭运河和灌溉总渠十字交汇口, 常水头 7.0 m, 船闸有效尺度 300 m×34 m×5.0 m(有效长度×净宽×门槛水深)。船闸主体结构见图 1。

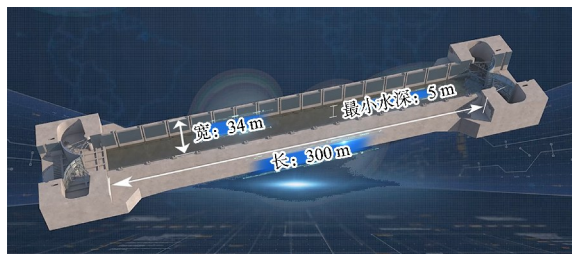


图 1 船闸主体结构

Fig. 1 Main structure of ship lock

综合考虑过闸效率, 避免船舶通过量增大后导致京杭运河与灌溉总渠十字交汇口处拥堵, 影响淮安枢纽通航安全及京杭运河淮安船闸通过能力, 淮安东船闸设计输水时间按常水头输水时间 8 min 控制。

根据 JTJ 306—2001《船闸输水系统设计规范》^[6] 输水系统类型的选择式:

$$m = T/\sqrt{H} \quad (1)$$

式中: T 为输水时间, min; H 为水头, m。

根据规范, m 大于 3.5, 采用集中输水; m 为 2.5~3.5 时, 输水系统类型应进行技术经济论证或参照类似工程选定; m 小于 2.5 时, 采用分散输水系统。对于分散输水系统的选择, m 值大于 2.4 时采用第一类输水系统; m 值为 1.8~2.4 时, 采用第二类输水系统。

经计算, 判别系数 m 为 2.78, 介于 2.5~3.5 之间, 输水系统类型应进行技术经济论证或参照类似工程选定。目前国内外船闸输水系统的选型没有统一的方法及标准, 设计阶段如何选择合适的输水系统是最为关注的问题之一^[7]。

工程实践经验表明, 在设计阶段选择输水形式时, 除主要考虑设计水头、要求的输水时间, 还应考虑闸室尺度、船舶泊稳条件、闸墙结构形式、地质条件以及闸室初始水深与船舶吃水的比值等因素^[8]。

2 输水系统的布置

2.1 闸墙长廊道侧支孔全分散输水系统

2.1.1 输水阀门段廊道面积及断面尺寸

根据 JTJ 306—2001《船闸输水系统设计规范》,

输水阀门处廊道断面面积可按以下式进行计算：

$$\omega = \frac{2C(\sqrt{H+d}-\sqrt{d})}{\mu T\sqrt{2g}[1-(1-\alpha)k_v]} \quad (2)$$

式中： ω 为输水阀门处廊道断面面积， m^2 ； C 为闸室水域面积， m^2 ； H 为设计水头， m ； d 为惯性水头， m ； μ 为阀门全开时输水系统的流量系数，可取 0.6~0.8； T 为输水时间， s ； α 为系数； k_v 可取 0.4~0.6； g 为重力加速度， m/s^2 。

计算结果显示，为满足设计输水时间 8 min 的要求，输水阀门处廊道断面面积需 46.4~51.9 m^2 ，综合考虑输水效率及闸室、引航道水流条件，确定输水阀门尺寸 $\omega=2\times 5.0\times 5.0$ (个数 \times 宽 \times 高)=50 m^2 。

2.1.2 主廊道及出水支孔断面面积

输水阀门廊道断面面积确定后，在选择主廊道断面面积以及侧支孔断面面积时，重点关注 2 个比值，即：

$$\alpha = \frac{\text{主廊道断面面积}}{\text{阀门处廊道断面面积}} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\text{短支孔断面总面积}}{\text{主廊道断面面积}} \quad (4)$$

原则上， α 值越大，输水系统主廊道沿程阻力系数换算至阀门处廊道断面的阻力系数越小； β 值越小，越有利于前后支孔出水均匀，但将增加出水孔段局部阻力系数。一般 β 取 0.95。

经比较，取闸墙主廊道断面尺寸为 5.0 m \times 5.5 m (宽 \times 高)，双边总断面面积为 55.0 m^2 ，闸墙每侧设 26 个侧支孔，分为 3 组，从上游至下游孔口尺寸分别为 0.92 m \times 1.2 m (宽 \times 高，9 孔)、0.85 m \times 1.2 m (8 孔)、0.78 m \times 1.2 m (9 孔)，总面积为 53.04 m^2 ，这样 α 、 β 值分别为 1.10 和 0.96。出水段顺水流方向首末出水孔分段面积比为 1.18。

2.1.3 上下闸首、闸室布置

船闸上下闸首、闸室平立面见图 2。上闸首进水口采用槛上顶格栅输水布置，进水口及廊道顶高程均为 0.83 m，采用平直廊道与进水口相连接，工作阀门后通过水平转弯与主廊道连接，廊道宽度及高度均保持不变；再经过垂直转弯将输水廊道顶高程抬高至 1.33 m，廊道高度由 5.0 m 扩大至 5.5 m，廊道宽度保持不变。上闸首与连接段闸室布置见图 3。

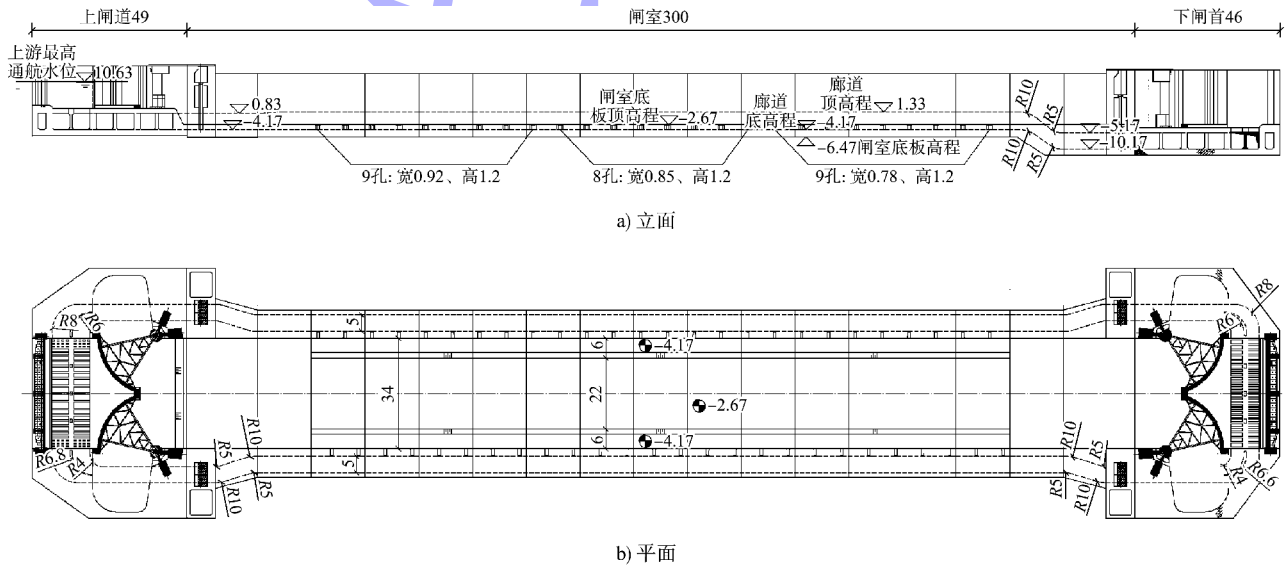


图 2 船闸主体平立面 (单位: m)

Fig. 2 Plan and elevation of main body of ship lock (unit: m)

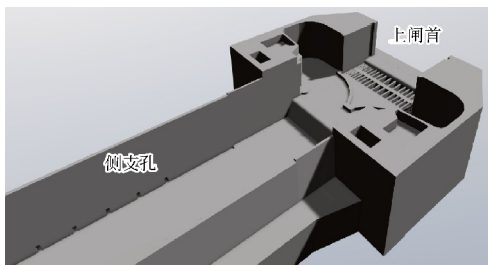


图 3 上闸首与连接段闸室布置模型

Fig. 3 Layout model of upper lock head and connecting section lock chamber

闸室两侧布置闸墙长廊道, 廊道顶高程 1.33 m。每侧共布置 26 个出水支孔, 分为 3 组, 由上游至下游支孔喉部断面尺寸(宽×高)分别为 0.92 m×1.2 m (9 孔), 0.85 m×1.2 m (8 孔), 0.78 m×1.2 m (9 孔)。出水侧支孔出口设置消能明沟, 明沟宽 1.5 m、深 0.5 m。

下闸首主廊道后经过垂直转弯将输水廊道底高程降低至-10.17 m, 廊道高度由 5.5 m 缩小至 5.0 m, 廊道宽度保持不变; 再经过水平转弯与下闸首工作阀门段廊道连接, 廊道宽度及高度均保持不变。工作阀门段廊道顶高程-5.17 m, 其后通过平直廊道与出水口连接。出水口采用格栅消能式出流, 出水口顶高程-5.17 m。下闸首与连接段闸室布置见图 4。

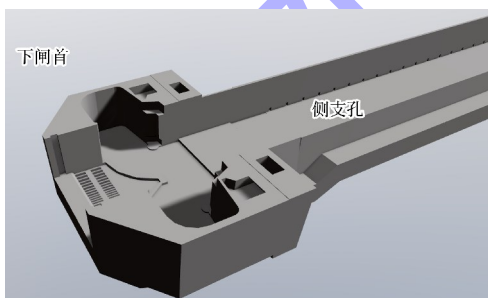


图 4 下闸首与连接段闸室布置模型

Fig. 4 Layout model of downstream lock head and connecting section lock chamber

2.1.4 输水时间及泊稳条件

采用三维数学模型对船闸输水系统进行水力计算分析^[9], 提出相对较优的输水系统布置方案供物理模型试验研究。

1) 综合试验研究成果可知^[10], 淮安东船闸输水系统采用闸墙长廊道侧支孔输水系统可行,

通过系列试验优化闸室消能工等细部结构, 使输水系统各项指标达到预期设计目标和要求。

2) 经综合对比分析, 推荐的淮安东船闸阀门双边运行方式为匀速开启($t_v = 5 \text{ min}$), 通行船队时适当延长阀门输水时间($t_v \geq 7 \text{ min}$), 船闸运行期间, 可根据原型调试情况进行调整($\pm 1.0 \text{ min}$), 满足闸室及上、下游引航道通航水流条件。

2.2 组合式输水系统

为减少下闸首基坑开挖深度, 增强施工安全性, 另提出一种新型输水系统, 即: 长廊道充水, 廊道+门库泄水的新型输水形式。

2.2.1 布置方案

基于闸墙长廊道侧支孔全分散输水系统的试验成果, 尽量控制输水时间, 对下闸首与闸室连接段进行优化改进, 下闸首廊道与闸室廊道联通, 下闸首工作闸门面板朝向上游, 在满足淹没水深的前提下, 抬高廊道, 避让下闸首底枢二期混凝土, 将廊道布置在门库外边缘, 在门库位置廊道断开, 在闸室末节直线段布置工作阀门, 下闸首采用简单消能工水平环绕对冲消能方式。为满足后期工作阀门检修更换要求及下闸首机房净空要求, 阀门启闭设备及下闸首机房避让淮扬公路桥。其他布置同闸墙长廊道侧支孔全分散输水系统布置方案。组合式输水系统下闸首与连接段闸室布置模型见图 5。

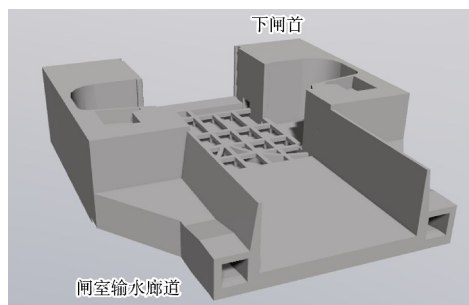


图 5 下闸首与连接段闸室布置模型 (组合式输水系统)

Fig. 5 Layout model of downstream lock head and connecting section lock chamber (combined water conveyance system)

2.2.2 输水时间及泊稳条件

结合该输水系统三维数学模型研究成果, 得出以下结论:

1) 输水水力特性方面, 相同的阀门开启工况

下,较侧支孔全分散输水系统约慢 75 s。

2) 闸室泊稳条件方面,两者基本一致,采用侧支孔全分散泄水,闸室整体泄水均匀,表面流速及表面横向流速均较小,不作为限制输水时间的控制条件。

3) 下游引航道水流条件方面,组合式输水系统由于出水口面积及淹没水深小,在同样泄水强度下,两侧廊道出流流速急剧增加,碰撞后中部形成明显壅水,出流扩散不均匀,主流集中于中

部,水面波动大、流速高,停泊段泊稳条件差。要使引航道水流条件满足要求,输水时间明显较侧支孔全分散输水系统更长。

3 输水系统综合比选

结合以上同类分散输水系统两种布置形式,综合考虑输水效率、泊稳条件、通过能力、平面布置、施工难易、工程投资、结构耐久性及对工作闸门振动影响等,进行综合比选,见表 1。

表 1 综合比选
Tab.1 Comprehensive comparison and selection

项目		工程投资	输水效率及泊稳条件		基坑支护
闸墙长廊道侧支孔全分散输水系统	上下闸首、闸室及基坑支护合计 2.7 亿元	闸墙长廊道侧支孔全分散输水系统由布置在闸墙中的廊道贯通上、下游,并附带一系列侧支孔组成,船闸充、泄水运行时,水流由闸墙长廊道侧支孔分散进出闸室,输水水力性能、泊稳条件比集中、局部分散输水系统有较大的提高,是一种适合中等水头、重力式闸墙的较优的船闸输水系统形式			基坑支护工程投资 8 442.47 万元
组合式输水系统	下闸首长度增加 3 m,下闸首支护工程量相对减小;上下闸首、闸室及基坑支护合计 2.6 亿元,较全分散输水系统投资稍少	下游引航道水流条件方面,由于出水口面积及淹没水深小,在同样泄水强度下,两侧廊道出流流速急剧增加,碰撞后中部形成明显壅水,出流扩散不均匀,主流集中于中部,水面波动大、流速高,停泊段泊稳条件差			基坑支护工程投资 7 792.82 万元,较全分散输水系统投资稍少
项目	通过能力	平面布置	水工结构、金属结构及启闭设备、房建		
闸墙长廊道侧支孔全分散输水系统	充水、泄水时间各控制在 8 min 以内,年单向通过能力约 4 357 万 t,通过能力大	总平面布置顺畅,上游停泊段位于直线段	下闸首平面尺度为 77 m×49 m (宽×长),有利于减小温度应力的影响;工作阀门井位于末节闸室,可将阀门井包入机房,方便检修;启闭机房在 100 a 一遇水位(11.59 m)时满足不进水要求;闸室内水体均通过廊道进出,闸室灌泄水对工作闸门振动影响小		
组合式输水系统	充水时间约 8 min,泄水时间约 12~13 min,年单向通过能力约 4 026 万 t,较全分散减少约 331 万 t,通过能力较小,考虑项目不具备新建复线船闸条件,不利于远期发展	总平面布置顺畅,但下闸首与水利二期工程已改建完成的 110 kV 张翻线 T3 双回路耐张塔冲突,需再次改建铁塔;检修时检修门的起吊和安装均位于 110 kV 张翻线正下方,存在安全风险	下闸首平面尺度为 77 m×52 m (宽×长),温度应力较大,底板更容易产生裂缝;工作阀门井位于末节闸室,远离机房,检修时略麻烦,且阀门启闭机外露,外观不够美观;下闸首工作闸面板朝上游,闸门杆系均位于检修门和闸门之间,后期检修的空间受限,大型机械吊进入下闸首较困难,对后期闸门检修不利,特别是对于极端的更换闸门工况;闸室泄水,部分水体高速经下闸首门库进入下游廊道,对工作闸门振动影响较大		

经比选分析,两种输水系统涉及的平面布置均较为顺畅,组合式输水系统对应的周边施工条件稍差;关于上下闸首、闸室及基坑支护投资,组合式输水系统较全分散稍少;输水效率及泊稳条件,全分散输水系统较组合式更优;全分散输水系统对应的通过能力较组合式更大,更利于远期发展;两种输水系统对应水工结构耐久性、后期闸阀门检修、工作闸门振动影响等方面,全分散输水系统更优。综上,推荐采用闸墙长廊道侧支孔全分散输水系统。

4 结论

- 1) 同类输水系统的布置综合考虑船闸输水效率、泊稳条件、通过能力、平面布置等系列因素,推荐采用闸墙长廊道侧支孔全分散输水系统。
- 2) 重点关注输水系统各项指标及泊稳条件,闸墙长廊道侧支孔全分散输水系统更优。
- 3) 闸墙长廊道侧支孔全分散输水系统可进一步提高船闸输水效率,提高通过能力,确保船闸高效、安全运行。

参考文献:

- [1] 周俊,匡涛,王能.中高水头船闸输水系统选型布置及试验研究[J].水运工程,2021(6):121-127.
ZHOU J, KUANG T, WANG N. Type selection and test research of filling and emptying system in medium and high head ship lock [J]. Port & waterway engineering, 2021(6): 121-127.
- [2] 韩莹莹,刘海民,张丽媛,等.某枢纽省水船闸输水系统水力学模型试验[J].水运工程,2023(3):121-126.
HAN Y Y, LIU H M, ZHANG L Y, et al. Hydraulic model test of filling and emptying system for a water-saving ship lock[J]. Port & waterway engineering, 2023(3): 121-126.
- [3] 李君,郭超,金英,等.赣江万安二线船闸输水系统水力学模型试验研究[J].水运工程,2021(2):7-11,21.
LI J, GUO C, JIN Y, et al. Hydraulic model test and study on filling and emptying system of Wan'an 2nd lane lock on the Ganjiang River [J]. Port & waterway engineering, 2021(2): 7-11, 21.
- [4] 王鑫,李君涛,冯小香.中水头船闸输水系统优化试验研究[J].水道港口,2019,40(3):304-312.
WANG X, LI J T, FENG X X. Experimental study on the optimization of medium head lock filling and emptying system[J]. Journal of waterway and harbor, 2019, 40(3): 304-312.
- [5] 阚延炬,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.
KAN Y J, LI J, XUAN G X, et al. Hydraulic modelling test of lock filling and emptying system of Shushan Pump Station [J]. Port & waterway engineering, 2017 (9): 126-130, 143.
- [6] 船闸输水系统设计规范:JTJ 306—2001[S].北京:人民交通出版社,2001.
Design code for filling and emptying system of shiplocks: JTJ 306-2001[S]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [7] 李中华,宣国祥.基于多因素的船闸输水系统选型方法[J].水运工程,2020(10):1-6.
LI Z H, XUAN G X. Filling and emptying system decision for navigation lock based on multiple factors [J]. Port & waterway engineering, 2020(10): 1-6.
- [8] 中交水运规划设计院有限公司.淮河入海水道二期配套通航工程淮安段初步设计报告[R].北京:中交水运规划设计院有限公司,2025.
CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd. Preliminary design report of Huai'an section of Huaihe River diversion into the sea phase II supporting navigation project [R]. Beijing: CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., 2025.
- [9] 重庆西科水运工程咨询有限公司,淮河入海水道二期配套通航工程淮安东船闸输水系统及引航道数学模型试验研究报告[R].重庆:重庆西科水运工程咨询有限公司,2024.
Chongqing Xike Water Transportation Engineering Consulting Co., Ltd. Research report on mathematical model test of water conveyance system and approach channel of Huai'an east ship lock in Huaihe River diversion into the sea phase II supporting navigation project [R]. Chongqing: Chongqing Xike Water Transportation Engineering Consulting Co., Ltd., 2024.
- [10] 重庆西科水运工程咨询有限公司.淮河入海水道二期配套通航工程淮安东船闸输水系统水力学物理模型试验研究报告[R].重庆:重庆西科水运工程咨询有限公司,2024.
Chongqing Xike Water Transportation Engineering Consulting Co., Ltd. Research report on hydraulic physical model test of water conveyance system of Huai'an east ship lock in Huaihe River diversion into the sea phase II supporting navigation project [R]. Chongqing: Chongqing Xike Water Transportation Engineering Consulting Co., Ltd., 2024.

(本文编辑 赵娟)