淮安四线船闸下游引航道水流条件改善措施*

刘　威[1]，范红霞[2]，沈　虹[3]，张跃东[1]，胡　鹏[2]
（1. 华设设计集团股份有限公司，江苏 南京 210014；2. 南京水利科学研究院，江苏 南京 210024；
3. 淮安市港航事业发展中心，江苏 淮安 223022）

摘要：针对京杭运河淮安四线船闸下游引航道布置空间受限，船闸左侧淮安引江闸向北调水的水流穿过引航道造成横向流速超标难以满足规范的问题，进行了隔流堤布置优化研究。采用水工物理模型试验的方法，建立淮安船闸下游比尺为 1∶60 的整体物理模型，开展通航水流条件试验。结果表明，四线船闸和二线船闸停泊段采用独立墩式结构时，水流易穿过停泊段造成横流流速超标，在二线船闸靠船段中段 100 m、四线船闸中下段 250 m 增设底部高程渐变透空插板形成透空隔流堤，具有阻水隔流、缓慢分散水流的效果。经多组方案比选试验，透空率为 40%时引航道横流流速降低至规范限值 0.15 m/s。提出的底部渐变透空隔流结构可有效解决引航道及口门区横流超标难题，为复杂条件下高等级船闸建设和运行提供借鉴。

关键词：淮安四线船闸；下游引航道；水流条件；透空隔流堤；改善效果
中图分类号：U641.1　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)07-0129-07

Improvement measures for flow conditions in downstream approach channel of Huai'an fourth-line ship lock

LIU Wei[1], FAN Hongxia[2], SHEN Hong[3], ZHANG Yuedong[1], HU Peng[2]
(1. China Design Group Co., Ltd., Nanjing 210014, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China;
3. Huai'an Port and Shipping Development Center, Huai'an 223022, China)

Abstract: To address the issue of excessive transverse flow velocity caused by the northward water diversion from the Huai'an River intake gate on the left side of the downstream approach channel of the Huai'an fourth-line ship lock on the Beijing-Hangzhou Grand Canal, where space for layout is limited, an optimization study on the arrangement of diversion embankments is conducted. Adopting a hydraulic physical model test, an integral physical model with a scale of 1∶60 is established for the downstream area of Huai'an ship lock to conduct tests on navigation flow conditions. The results show that: When independent pier-type structures are used for the berthing sections of the fourth-line and second-line locks, water flow tends to pass through the berthing sections, resulting in excessive transverse flow velocity. By adding bottom elevation-gradient perforated baffles at the middle 100 m of the berthing section of the second-line ship lock and the middle-lower 250 m of the fourth-line ship lock to form perforated flow separation dike, water diversion and flow obstruction are achieved, gradually dispersing the flow. Comparative tests on multiple schemes reveal that the transverse flow velocity of the approach channel drops to the specified limit of 0.15 m/s at a porosity of 40%. The proposed bottom-gradient perforated diversion structure effectively resolves the issue of excessive transverse flow in the approach channel and entrance zone, providing valuable insights for the construction and operation of high-grade ship locks under complex working conditions.

Keywords: Huai'an fourth-line ship lock; downstream approach channel; flow conditions; perforated flow separation dike; improvement effect

收稿日期：2025-11-25　　**录用日期：**2026-01-05
***基金项目：**中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y225008)
作者简介：刘威(1993—)，男，工程师，从事水运工程建设项目设计及咨询工作。

船闸是航道工程的关键节点，设计建设船闸时，为满足船舶安全操作所需的条件，通常在船闸与溢流坝、泄水闸、电站等建筑物之间布置足够长度的隔流堤[1]。隔流堤宜具有隔流、导航、挡沙的功能，其布置应根据地形条件及引航道和口门区通航水流条件确定。由于隔流堤近区水流三维特性显著，为保障船闸各通航水域流态、纵横向表面流速及回流流速各项指标满足规范要求，常采用水工物理模型试验的技术手段优化隔流堤及引航道布置。一般情况下，通过采取调整隔流堤长度、走向及疏浚、切滩等工程措施[2-4]，辅以调整航线、优化泄水闸运行方式及最大通航流量管制等管理措施[5]，可使引航道及口门区通航水流条件达标。但随着船闸工程建设和运行受限因素增多，引航道及口门区水流条件日趋复杂化，由此透空隔流堤结构[6]应用逐渐增多。首先是在实体堤堤头或堤身局部开孔[7-8]，然后到导流墩[9]、导流屏[10]，再到格栅板式透空结构[11-12]，上述透空隔流堤在保障船闸引航道及口门区通航水流条件上发挥了重要作用。

拟建淮安四线船闸下游与二线船闸共用引航道，隔流堤布置于左岸，分隔船闸与抽水三站及引江闸，隔流堤下游布置靠船段。改建二线船闸下游靠船段布置于右岸。四线船闸和二线船闸靠船段设计方案为独立墩式结构，临近的引江闸和抽水三站运行时，水流自两座船闸引航道穿过形成横流，造成横流流速超标，导流屏、栅格板结构在该工程中不适用，由此本文提出在靠船墩间增加底部透空插板的改善措施，通过水工模型试验确定透空段长度和透空率，实现了引航道停泊段和制动段横流流速小于 0.15 m/s 的规范限值要求。

1　京杭运河淮安船闸现状

淮安船闸位于京杭运河与苏北灌溉总渠交汇处下游，见图 1，是京杭运河苏北段由南向北第 3 座梯级船闸，承担北煤南运及鲁、豫等多省市船舶通航任务。已建三座船闸自西向东依次为三线、一线和二线船闸。一线船闸闸室有效尺度 230 m×20 m×5.0 m(长×宽×门槛水深)，建成于 1962 年；二线船闸闸室有效尺度 230 m×23 m×5.0 m，1987 年建成并投入运营；三线船闸闸室有效尺度 260 m×23 m×5.0 m，2005 年竣工验收。三座船闸设计通过能力分别为 1 712 万、2 527 万、2 842 万 t，合计 7 081 万 t，2023 年货运量达 2.7 亿 t，船舶通过量达 3.0 亿 t。

图 1　淮安船闸周边设施

Fig. 1　Surrounding facilities of Huai'an ship lock

已建淮安船闸下游设计最高通航水位取 20 a 一遇洪水位，为 8.83 m；一线和二线船闸下游设计最低通航水位为 6.63 m，三线船闸下游设计最低通航水位为 6.23 m。近年来淮安船闸下游侧枯季水位持续下降，根据 2000—2022 年实测资料分析，下游侧 98%保证率水位为 5.21 m，遭遇枯季不利水文条件，门槛水深仅容纳 1 000 吨级船舶通过，制约了大型船舶过闸效率。

江苏省内河运输船舶大型化趋势明显，2022 年船舶平均吨位为 875 万 t，京杭运河苏北段航道等级为二级，2022 年 2 000 吨级船舶占比达 50%。鉴于现有淮安船闸枯季下游侧门槛水深不足、船舶待闸时间长等不利运行条件，拟新建淮安四线船闸。

2　淮安船闸下游通航水流条件制约因素分析

2.1　下游引航道布置

淮安船闸周边水利、交通设施密布，综合航道网、水网现状和规划，经选址论证[13]，拟与已建 3 座船闸平行布置，位于淮安抽水三站和二线船闸之间的隔岛。淮安四线船闸建设等级为Ⅱ级，闸室有效尺度 290 m×34 m×5.0 m，因空间制约因素较多，给引航道布置带来很大困难，初拟下游引航道布置见图 2。

图 2　淮安四线船闸下游引航道布置

Fig. 2　Layout of downstream approach channel of Huai'an fourth-line ship lock

新建淮安四线船闸下游引航道采用不对称布置形式，过闸方式为“直进曲出”，左岸保留 340 m 长实体隔岛与抽水三站引河分隔，自闸首往下实体段长 270 m，上段 170 m 为主导航墙，下段 100 m 为靠船墩，实体堤上布置 4 个靠船墩，再往下游布置 7 个独立靠船墩，墩间距 25 m，11 个靠船墩形成 290 m 长停泊段，停泊段下游为长 88 m 的制动段。

改建二线船闸下游引航道，将主导航墙由左岸调整至右岸，过闸方式为“曲进直出”，导航调顺段长 150 m，停泊段长 330 m，布置 14 个独立墩，间距 25 m，制动段长 160 m。

苏北运河航道为Ⅱ级，设计水深 4.0 m，四线船闸为Ⅱ级船闸，设计代表船型为 2 000 吨级货船和 120~150 TEU 集装箱船，货船尺度 67.6 m×13.8 m×3.0 m(船长×型宽×吃水)，集装箱船尺度 88 m×15.8 m×3.0 m。四线船闸与二线船闸共用引航道，引航道宽 140 m，下游引航道底高程为设计最低通航水位(5.21 m)与门槛水深(5.0 m)之差，即 0.21 m，连接段航道及主航道底高程为设计最低通航水位(5.21 m)与航道设计水深(4.0 m)之差，即 1.21 m。

2.2　通航水流条件制约因素分析

淮安四线船闸左侧紧邻淮安抽水三站和淮安引江闸，三站和引江闸设计流量分别为 60、208 m^3/s，运行时水流方向自南向北，水流斜穿下游侧通航水域，易在引航道及口门区形成横流。根据周边水利枢纽调度资料，不利工况为：1)引江闸开启由南向北至总渠下游侧，最大设计流量排涝；2)引江闸、抽水三站和沙庄引江河同时由南向北引(抽)水，引(抽)水流量分别为 70、66、180 m^3/s，运河断面总过流量 316 m^3/s。

3　淮安船闸下游整体物理模型

3.1　模型设计与制作

依据 2021 年 3 月 1:2 000 实测地形，建立淮安船闸下游侧几何比尺为 1:60 水工物理模型[14]，模拟 3.0 km 天然河道。满足水流运动相似的流速、流量和糙率比尺分别为 7.75、27 885、1.98。运河天然河道糙率为 0.022~0.026，拉毛的水泥面糙率约 0.013，采用塑料草模拟岸边芦苇，经验证后满足阻力相似要求。

3.2　模型验证

以 2022 年 5 月 25 日引江闸 51 m^3/s 流量引水、三站 61 m^3/s 流量抽水、沙庄引江闸 162 m^3/s 抽水运行工况下观测的水位和流速资料对模型进行了水动力验证相似，测验期间布置水尺 6 把，声学多普勒流速剖面仪(acoustic Doppler current profiler，ADCP)测流断面 5 个，见图 3。经验证，水位相差±0.02 m，流速一般相差±0.05 m/s，见图 4 和图 5，结果符合 JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》[15]要求。

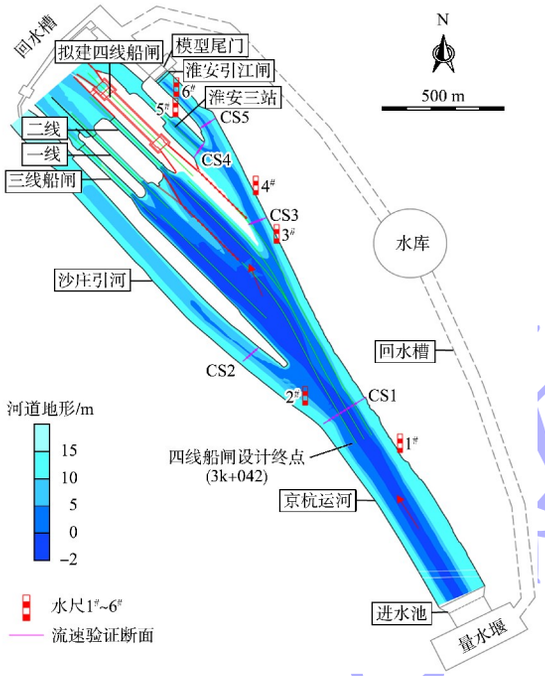


图 3　淮安船闸下游整体物理模型布置

Fig. 3　Layout of overall physical model downstream of Huai'an ship lock

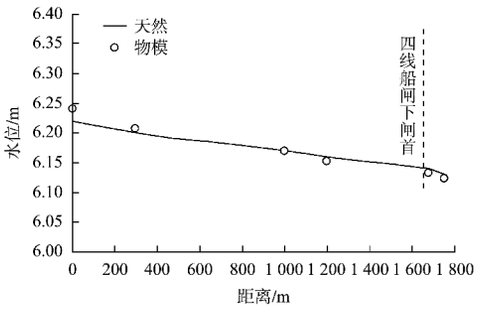


图 4　水位验证对比

Fig. 4　Comparison of water level verification

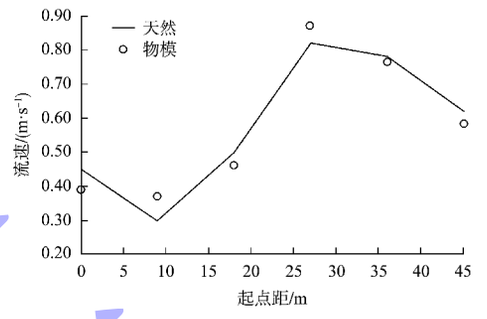


图 5　典型断面流速分布验证对比

Fig. 5　Comparison of typical cross-sectional velocity distribution verification

4　通航水流条件改善措施试验研究

4.1　试验水文条件

根据前述水流条件制约因素分析，选取两个试验工况开展试验，见表 1。工况 1：引江闸设计流量运行，对应闸上设计水位 6.83 m；工况 2：引江闸、三站及沙庄引江河联合调度，运河断面总流量 316 m^3/s，其中三站实测最大运行流量 66 m^3/s，引江闸和引江河流量分别为 70 和 180 m^3/s，水位取三站抽水期实测最低运行水位 5.83 m。

表 1　淮安四线和二线船闸下游通航水流条件试验工况

Tab. 1　Test conditions of navigation flow conditions downstream of Huai'an fourth-line and second-line ship locks

	工况	流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)				水位/m	
		引江闸	三站	沙庄引河	合计	引江闸闸上	运河侧
1	引江闸排涝,南往北运行	208	–	–	208	6.83	–
2	三站、引江闸和沙庄引江河同时南往北运行	70	66	180	316	–	5.83

4.2　船闸通航水流条件指标

JTJ 305—2025《船闸总体设计规范》明确给出了船闸上下游各通航水位纵横向表面流速及回流流速指标，上游要求严于下游。根据淮安船闸下游实际水流方向，本次下游通航水流条件采用上游判别标准。

1）引航道停泊段及制动段：水面最大纵向流速不应大于 0.50 m/s，横向流速不应大于 0.15 m/s。

2）口门区：最大纵向流速宜小于 2.0 m/s；当上游口门区的水面最大横向流速介于 0.30～0.40 m/s 之间时，口门区宽度宜在最小宽度的基础上增加 0.5 倍设计船宽；当上游口门区的水面最大横向流速介于 0.40～0.50 m/s 之间时，口门区的宽度宜在最小宽度的基础上增加 1.0 倍设计船宽。

3）引航道及口门区应通过工程措施避免形成回流；不能完全避免时应尽可能降低回流强度，回流直径接近船长时，垂直于船舶航线方向的强度宜控制在口门区最大允许横流值的 1/2 以内。

4.3　试验结果分析

4.3.1　初拟方案

初拟设计方案：三站与四线船闸间实体隔堤全长 340 m，包含导航调顺段 170 m、停泊段 100 m，余下 190 m 停泊段布置 5#～11#共计 7 个独立墩，墩间距 25.0 m，完全透空。二线船闸停泊段全长 330 m，布置 14 个独立墩。为引导水流提前归槽，降低水流流速及其与航道夹角，对下游引航道实施总长 850 m 疏浚，底高程自满足通航水深要求的 0.21～1.21 m 下降至−2.0 m。

两个工况下，穿越淮安船闸下游通航水域进入引江闸和三站的总流量为 136～208 m^3/s，总体不大，由于水域相对较宽阔，过流面积大，表面流速一般在 0.20 m/s 以内。初拟方案停泊段采用独立墩式结构，几近完全透空，无法有效起到阻水隔流作用，运河侧由南向北进入引江闸及三站引河的水流极易穿越引航道形成横流，水流与引航道夹角接近 90°，见图 6。观测四线船闸 4#～8#墩及二线船闸 2#～10#墩间的停泊段横流流速超标，最大横流流速为 0.20 m/s。

相比而言，3 座水利闸站联合运行的工况 2 较引江闸单独运行的工况 1 更为不利，究其原因有两点：虽然工况 2 引江闸和三站总流量为 136 m^3/s，小于工况 1 总流量 208 m^3/s，但一方面工况 2 水位低于工况 1，另一方面三站更临近四线船闸，其运行加速水流转弯，增大了水流与引航道夹角，导致横流流速增大。可见四线船闸临近三站，初拟方案隔流堤偏短，应予以适当延长。

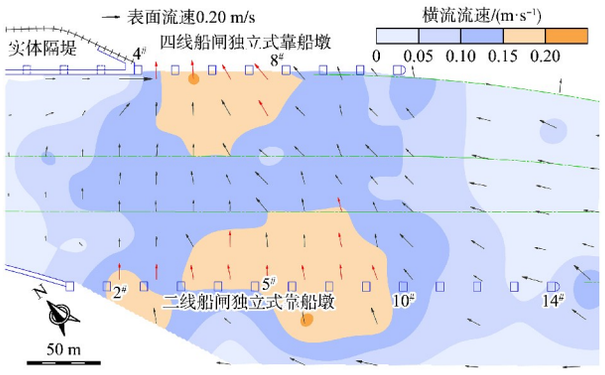


图 6　停泊段采用独立墩的初拟方案下游引航道及口门区表面及横向流速分布

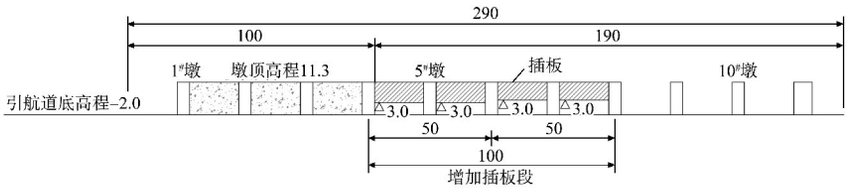
Fig. 6　Surface and transverse velocity distribution in downstream approach channel and entrance zone under preliminary scheme with independent piers in berthing section

4.3.2　改善措施

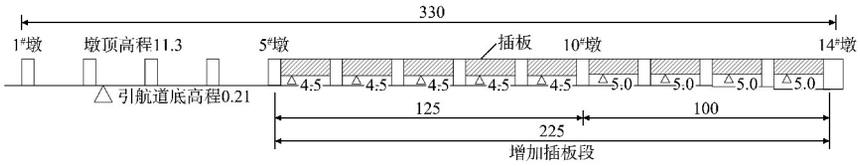
两座横流超标部位均位于引航道停泊段，最大值为 0.20 m/s，与规范限值相比，超标量值不大。根据初步设计方案，可结合停泊段布置，在靠船墩间设置插板形成透空隔流堤，在不影响船舶停靠、保障水利设施正常引流的同时，起到适当降低引航道横流流速的作用。

经多次试验对比论证，满足要求的最优改善措施为：1）在四线船闸停泊段中段 4#～8#墩间增加底部透空插板，总长 100 m，上下两段各 50 m 插板底高程分别为 3.0 和 4.0 m，透空高度分别为 5.0 和 6.0 m，见图 7；2）二线船闸上段 1#～5#墩右侧河床地形较高，水流不易穿过，5#墩以下河床地形较低，水流容易穿越。因此在中下段 5#～14#共计 10 个独立墩间布置底部透空插板，总长 225 m，上段 125 m 和下段 100 m 插板底高程分别为 4.5 和 5.0 m，透空高度分别为 6.5 和 7.0 m。

以最大横流流速控制在 0.15 m/s 为标准，试验结果表明，最优透空率随表面流速增加而降低，本文工程表面流速不大，增加插板段平均透空率 40%为宜。通过在靠船墩间设置底部透空插板，延长了四线船闸与三站间隔流堤长度，同样措施在二线船闸停泊段中下段形成隔流堤，起到了很好的阻水隔流和缓慢分散水流作用，两座船闸引航道水流条件均达标，见图 8、9。



a) 新建淮安四线船闸停泊段靠船墩间新增插板剖面布置



b) 改建淮安二线线船闸停泊段靠船墩间新增插板剖面布置

图 7　停泊段靠船墩间增加插板示意图(单位：m)

Fig. 7　Schematic diagram of baffles installed between berthing piers in mooring section(unit：m)

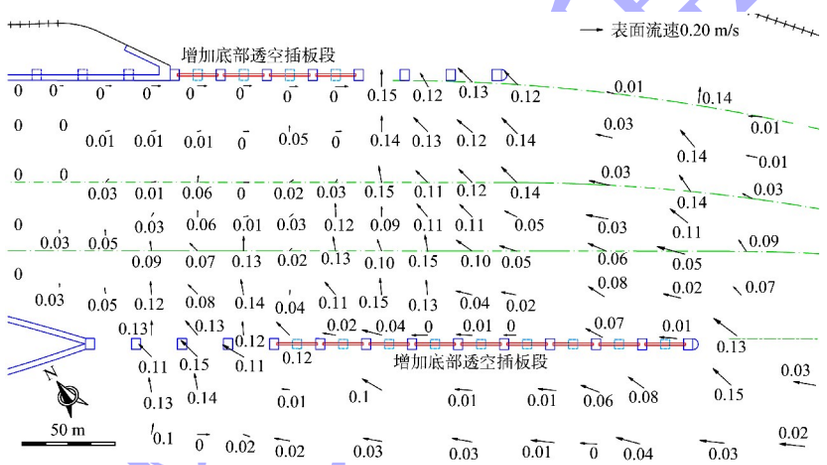


图 8　增加底部透空插板形成透空隔流堤后下游通航水域表面及横向流速分布

Fig. 8　Surface and transverse velocity distribution of downstream navigable waters after forming perforated flow separation dike with bottom perforated baffles

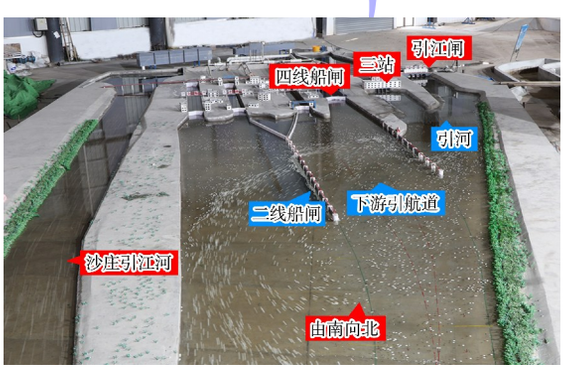


图 9　优化方案下游引航道及口门区流态

Fig. 9　Flow pattern in downstream approach channel and entrance zone under optimized scheme

5　结论

1）淮安船闸下游通航水域表面流速较小，不超过 0.30 m/s，但水流横穿淮安四线和二线船闸停泊段仍造成横流值超标，优化措施为在停泊段独立墩间增加底部透空插板形成透空隔流堤，经模型试验论证，透空段透空率宜在 40%。

2）船闸引航道布置无法避免临近泄水建筑，易造成引航道及口门区横向流速不满足规范，采用墩板式底部透空结构的隔流堤，能缓慢分散水流，有效降低引航道横流值，可推广应用。

参考文献：

[1]　船闸总体设计规范: JTS 305—2025[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2025.
Code for master design of shiplocks: JTJ 305-2025[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2025.

[2]　李艳, 黄军, 刘洋, 等. 长洲五线船闸下引航道通航水流条件试验研究[J]. 水运工程, 2024(10): 104-109.

LI Y, HUANG J, LIU Y, et al. Experimental research on navigation flow conditions in downstream approach channel of Changzhou fifth-line ship lock [J]. Port & waterway engineering, 2024(10): 104-109.

[3] 王勤振, 胡鹏, 江涛, 等. 灌溉总渠行洪限制下淮安东船闸隔流堤布置[J]. 水运工程, 2025(11): 95-102.
WANG Q Z, HU P, JIANG T, et al. Layout of separation levee of Huai'an East Shiplock under restriction of irrigation canal flood [J]. Port & waterway engineering, 2025(11): 95-102.

[4] 马超, 陈明, 周绪生, 等. 岷江张坎航电枢纽船闸引航道通航水流条件优化[J]. 水运工程, 2024(7): 124-130, 171.
MA C, CHEN M, ZHOU X S, et al. Optimization of navigable flow conditions for approach channel of Zhangkan Navigation-power Junction ship lock on Minjiang River [J]. Port & waterway engineering, 2024(7): 124-130, 171.

[5] 肖钦, 赵凯, 范红霞, 等. 复杂河道边界条件下新建船闸布置方案及运行方式[J]. 水运工程, 2023(9): 93-100.
XIAO Q, ZHAO K, FAN H X, et al. Layout and operation of new navigation lock under complicated river condition [J]. Port & waterway engineering, 2023(9): 93-100.

[6] 马兴佳, 康雄才. 船闸引航道隔流墙物理模型试验优化研究[J]. 水运工程, 2024(7): 172-178, 216.
MA X J, KANG X C. Optimization on physical model test of separation wall in ship lock approach channel [J]. Port & waterway engineering, 2024(7): 172-178, 216.

[7] 王波, 程子兵, 金峰. 水电站引航道透空式隔流堤水力学试验研究[J]. 人民长江, 2012, 43(7): 67-69, 76.
WANG B, CHENG Z B, JIN F. Hydraulic experimental study of hollow-type separation levee of approach channel in hydropower station [J]. Yangtze River, 2012, 43(7): 67-69, 76.

[8] 胡亮亮, 谭家万, 袁浩. 基于隔流堤的下游引航道通航水流条件优化[J]. 水运工程, 2022(5): 72-77.
HU L L, TAN J W, YUAN H. Optimization of navigable flow conditions of downstream entrance channel with separation levee [J]. Port & waterway engineering, 2022(5): 72-77.

[9] 方洋, 尚倩倩, 许慧, 等. 山区急弯段船闸引航道口门区导流墩布置[J]. 水运工程, 2025(8): 118-126.
FANG Y, SHANG Q Q, XU H, et al. Layout of diversion piers at entrance area of ship lock approach channel in mountainous sharp bends [J]. Port & waterway engineering, 2025(8): 118-126.

[10] 彭伟, 冯小香, 普晓刚. 船闸下游引航道口门区急流碍航改善措施比选[J]. 中国港湾建设, 2017, 37(10): 47-52.
PENG W, FENG X X, PU X G. Comparison and selection of improvement measures for jet flow navigation obstruction in outlet area of shiplock downstream [J]. China harbour engineering, 2017, 37(10): 47-52.

[11] 王志鹏, 吴凌波, 范红霞, 等. 受限空间下龙头山二线船闸建设方案与运行方式研究[J]. 水运工程, 2025(7): 143-149, 214.
WANG Z P, WU L B, FAN H X, et al. Building scheme and operation mode of second-line ship lock in Longtoushan Junction under confined space [J]. Port & waterway engineering, 2025(7): 143-149, 214.

[12] 肖钦, 范红霞, 邓伟, 等. 赣江龙头山枢纽一线船闸通航水流条件及改善措施研究[J]. 水利水运工程学报, 2023(6): 213-220.
XIAO Q, FAN H X, DENG W, et al. Study on navigation flow conditions and improvement measures at Longtoushan Junction in the Ganjiang River [J]. Hydro-science and engineering, 2023(6): 213-220.

[13] 华设设计集团股份有限公司. 京杭运河淮安四线船闸工程初步设计报告[R]. 南京: 华设设计集团股份有限公司, 2025.
China Design Group Co., Ltd. Preliminary design report on the Huai'an fourth line ship lock project on the Beijing－Hangzhou Grand Canal [R]. Nanjing: China Design Group Co., Ltd., 2025.

[14] 南京水利科学研究院. 京杭运河淮安四线船闸工程下游引航道水流条件物理模型试验研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2025.
Nanjing Hydraulic Research Institute. Experimental study report on physical model of water flow conditions in the downstream approach channel of the Huai'an fourth line ship lock project on the Beijing－Hangzhou Grand Canal [R]. Najing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2025.

[15] 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.
Technical code of modelling test for port and waterway engineering: JTS/T 231-2021 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2021.

(本文编辑　王传瑜)