



# 导流墩对急弯河道下游口门区水流条件的改善作用

王熔荣<sup>1</sup>, 赵根生<sup>1</sup>, 张首元<sup>1</sup>, 程弘宇<sup>2</sup>

(1. 南京水利科学研究院, 江苏南京 210029; 2. 河海大学, 江苏南京 210029)

**摘要:** 针对口门区通航水流条件影响船舶航行安全的问题, 根据急弯河道下游口门区特征建立概化数值模型, 从导流墩数量、布置角度和相对间距3个因素对船闸下游口门区通航水流条件的影响展开研究。依托位于急弯河道的航电枢纽建立二维数学模型, 对导流墩布置规律进行验证。研究结果表明, 合理布置导流墩可以较大幅度改善口门区水流条件, 适当增加导流墩数量且当导流墩间距与长度等长时通航水流改善效果较强。导流墩布置方向与航线平行时, 水流条件较优。

**关键词:** 导流墩; 急弯河道; 下游口门区; 通航水流条件

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)03-0099-06

## Improvement effect of diversion pier on flow conditions in downstream entrance area of sharp bend channel

WANG Rongrong<sup>1</sup>, ZHAO Gensheng<sup>1</sup>, ZHANG Shouyuan<sup>1</sup>, CHENG Hongyu<sup>2</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. Hohai University, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** The navigable flow conditions in the entrance area affect the navigation safety of ships. Hence, this study constructs a generalized numerical model according to the characteristics of the downstream entrance area of the sharp bend channel. It explores the influence of the number, the arrangement angle, and the relative spacing of diversion piers on the navigable flow conditions in the downstream entrance area of the ship lock. In addition, it builds a two-dimensional mathematical model on the basis of the navigation and power junction located in the sharp bend channel to verify the arrangement laws of diversion piers. The results show that reasonable arrangement of diversion piers can greatly improve the flow conditions in the entrance area. When the number of diversion piers is increased appropriately, and the spacing and length of diversion piers are equal, the improvement effect on navigable flow is more prominent. When the direction of diversion piers is parallel to the route, the flow conditions are better.

**Keywords:** diversion pier; sharp bend channel; downstream entrance area; navigable flow conditions

由于船闸口门区位处静动水交界处, 易产生较大的斜流和回流<sup>[1-2]</sup>, 当船舶航经该区域时, 可能出现横漂、扭转等现象。因此, 对口门区通航水流条件进行研究具有重要的意义和价值<sup>[3]</sup>。调整导流堤长度和堤头形式、堤身开孔引流<sup>[4-5]</sup>、设置导流墩<sup>[6-7]</sup>等工程措施是改善口门区水流条件的

常用方法。导流墩以实用、方便等优点, 成为近年来优化口门区水流条件的主要措施。

许多学者采用物理模型和二维数学模型对口门区通航水流条件展开研究<sup>[8-9]</sup>。李君涛等<sup>[10]</sup>建立整体物理模型分析导流墩布置角度与口门区斜流和横流之间的关系。王建平等<sup>[11]</sup>通过缩短导航墙

长度、增加导流墩数量以及缩短导流墩间距对口门区水流条件进行优化。刘超等<sup>[12]</sup>通过采用导流墩分流等工程措施达到优化水流条件的目的。李兴亮等<sup>[13]</sup>通过在口门区采用挑流墩与实体和透空导航墙相结合的措施对弯曲河段的通航条件进行了改善。以上研究虽取得很多成果，但对口门区处于急弯河道下的有关导流墩改善水流条件的研究较为有限。为了进一步深化相关研究内容，本文依据急弯河道下游口门区特征建立概化数学模型，分析导流墩数量、角度以及间距等因素对下游口门区水流条件的影响。依托下游口门区位于急弯河道凸岸的某航电枢纽构建二维数学模型，确定其最佳导流墩布置方式，并对概化数学模型的布置规律进行验证。

## 1 急弯河道下游口门区概化模型计算分析

### 1.1 概化数学模型

基于 Navier-Stokes 方程对急弯条件下的船闸下游口门区建立二维数学模型。模型计算时忽略水体的黏性耗散，假定水体为不可压缩流体且压力服从静水压强分布，不考虑科氏力影响。模型主要包括以下方程：

$$\text{连续方程: } \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

动量方程：

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{qp}{h} \right) &= -gh \frac{\partial(h+z_b)}{\partial x} + \\ \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon_t \frac{\partial q}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon_t \frac{\partial q}{\partial y} \right) \right] - \tau_{xb} & \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{qp}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{p^2}{h} \right) &= -gh \frac{\partial(h+z_b)}{\partial y} + \\ \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon_t \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon_t \frac{\partial p}{\partial y} \right) \right] - \tau_{yb} & \quad (3) \end{aligned}$$

式中： $h$  为水深，m； $p$  为水流垂向的单宽流量， $\text{m}^2/\text{s}$ ； $q$  为水流方向的单宽流量， $\text{m}^2/\text{s}$ ； $g$  为重力加速度， $\text{m}/\text{s}^2$ ； $z_b$  为床面高程，m； $\rho$  为水密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ ； $\varepsilon_t$  为动黏滞系数， $\text{m}^2/\text{s}$ ； $\tau_{xb}$ 、 $\tau_{yb}$  为底部摩阻力，kN。

模型在顺直河道口门区后加设 90°弯道，水槽

总宽度  $B=20 \text{ m}$ ，水平长度  $L_1=100 \text{ m}$ ，比降  $i$  为 0.1‰。入流镇定段长  $L'=40 \text{ m}$ ，入水口宽度  $B'=15.7 \text{ m}$ ，模拟的口门宽度  $b=3.5 \text{ m}$ 。水流在流经导流堤时，由于下游河道突然展宽，过水断面面积增大，因水流分离会形成狭长的回流区域。不同展宽比、不同初始水深以及不同入流流量都会对口门区的水流条件产生一定影响<sup>[14-15]</sup>。本文所建立的口门区概化数学模型的展宽比为 1.21，初始水深为 5 m，入流流量为 10  $\text{m}^3/\text{s}$ ，出流边界水深 4.8 m。模型中导流堤宽 0.8 m；导流墩为平行四边形，长度为 2 m、高度为 0.8 m。模型采用有限体积法进行求解，采用三角形有限单元加密技术剖分网格。入流及出流边界为透水边界，其余边界为不透水边界。共生成 1.159 2 万个网格，模型模拟时长为 60 min。概化模型布置见图 1。

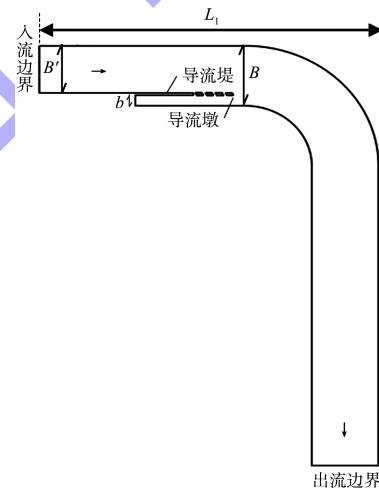


图 1 概化模型

### 1.2 概化模型分析

当船舶沿航道驶入或驶出口门区时，如果水流与航向有一定夹角，则斜向水流将对船体产生力的作用，从而影响船舶安全顺利进出船闸。因此，口门区附近水流与航线之间的斜流夹角是模型分析时重点关注的参数之一。模型在分析时，主要关注模型口门区范围内的斜流，对最大的斜流夹角进行观测。此外，对口门区横纵向流速和回流流速的最大值以及回流长度进行测量，由于回流长度可能受水流波动影响而变化，本文在分析时选取足够长的时间且发展稳定的回流予以分析。

### 1.2.1 导流墩数量对水流条件的影响

在概化模型中, 将导流墩的间距定义为  $D$ , 导流墩长度定义为  $L$ , 将其比值  $D/L$  定义为相对间距。为研究导流墩数量与回流长度、口门区最大横向流速以及口门区斜流夹角之间的关系, 模型模拟了不同数量的导流墩沿导流堤方向以 0.5 的相对间距依次布置的情况, 计算结果见图 2。

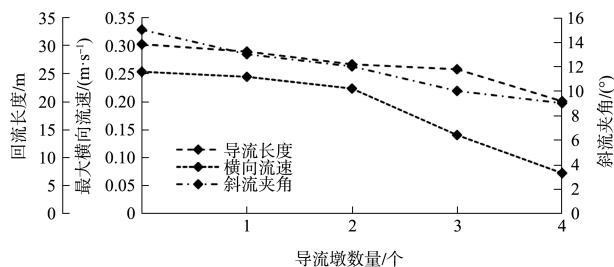


图 2 导流墩数量与回流长度、最大横向流速及斜流夹角关系

计算结果表明, 口门区的回流长度、最大横向流速和斜流夹角随导流墩数量增加而逐渐减小。当布置 1~2 个导流墩时, 导流墩对口门区水流条件的改善十分有限, 最大横向流速和斜流夹角的降幅为 11.8%。当导流墩数量增加到 3 个及以上时, 最大横向流速减小明显, 由原来的 0.22 m/s 减至 0.14 m/s, 减幅为 36.36%, 斜流夹角以及回流长度也有减小的趋势。

### 1.2.2 导流墩相对间距对水流条件的影响

为研究相对间距的变化对下游口门区通航水流条件的改善效果的影响, 在导流墩平行于航线布置且导流墩数量相同的情况下, 设置了 0.50、0.75、1.00、1.25、1.50 等 5 种不同的相对间距。计算结果见图 3。

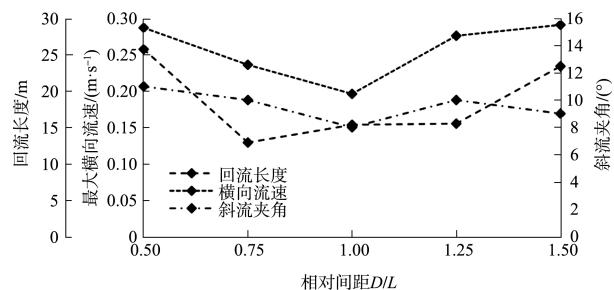


图 3 导流墩相对间距与回流长度、最大横向流速及斜流夹角关系

计算结果表明, 5 组工况中回流长度最大值与最小值的比值接近 2。其中当导流墩相对间距为

0.5 时回流长度最长, 这可能是由于间距过小时导流墩的过流能力较弱, 改善水流的作用有限; 而相对间距较大时, 由于导流墩的阻流作用没有得到充分发挥, 也导致回流长度有所增大。最大横向流速在相对间距小于 1.00 时, 随着间距的增大, 有减小的趋势且减小幅度分别为 17.77% 和 16.95%; 当相对间距大于 1.00 时, 最大横向流速随着间距的增大而增大, 且增幅明显减小, 斜流夹角的变化趋势大致与横向流速一致。对比 5 种相对间距下的最大横向流速以及斜流夹角, 相对间距为 1.00 时参数取值最小, 水流条件较优。

### 1.2.3 导流墩角度对水流条件的影响

为了进一步研究导流墩布置方向与航线方向的夹角对下游口门区斜流以及回流的影响, 概化模型在导流墩数量一定、导流墩相对间距为 1.00 的情况下, 共进行了偏角分别为 0°(导流墩与航线平行)、逆时针旋转 4°、逆时针旋转 8°、顺时针旋转 4°以及顺时针旋转 8°等 5 种工况的研究。假定逆时针旋转为正、顺时针旋转为负。导流墩不同布置角度的口门区水力参数见表 1。

表 1 导流墩不同布置角度口门区水力参数

导流墩 布置角度/ (°)	最大横向 流速/ (m·s⁻¹)	最大纵向 流速/ (m·s⁻¹)	最大回流 流速/ (m·s⁻¹)	回流 长度/ m
-8	0.20	0.67	0.09	24.03
-4	0.17	0.62	0.05	16.18
0	0.12	0.59	0.02	15.33
4	0.15	0.53	0.03	18.66
8	0.17	0.44	0.05	16.30

试验结果表明, 当导流墩顺时针旋转时, 口门区的回流长度、最大横纵向流速以及最大回流流速均不同程度地增加。其中, 每顺时针偏转 1°, 最大横向流速增加 8.33%, 纵向流速增幅为 1.69%, 最大回流流速增幅达到 43.75%, 回流长度增幅为 7.33%, 此时水力参数的增加是因为此工况下导流墩布置顺应了口门区水流的流向, 导致其导流效果减弱; 并且当导流墩布置角度为顺时针旋转 8°时, 最接近导流堤的导流墩周围形成了一个不稳定的小逆时针回流区, 回流长度大约

为 2.5 m，且随着旋转角度的增大，最大回流流速及范围有所增加。相反，当导流墩逆时针旋转时，导流墩的阻流作用明显增强，致使纵向流速减低明显，但导流墩间入汇水流偏角明显增大，使得回流流速有所增加。由表中数据可知，每逆时针旋转 1°，最大横向流速增加 5.21%，最大纵向流速减小 3.18%，最大回流流速增幅为 18.75%，回流长度增幅为 0.79%。综上 5 组工况，平行于航线布置导流墩时水流条件较优。

## 2 急弯河道导流墩布置对下游口门区水流条件影响

### 2.1 模型建立

为进一步探究概化数学模型计算结果在急弯河道口门区的实际应用情况，以下游引航道口门区位于弯道凸岸的某航电枢纽为依托，进一步验证导流墩布置规律的适用性和准确性。该航电枢纽工程采用河床式布置方式，枢纽位于 S 形河段中的顺直段，建筑物的布置从左向右依次为：电站、泄洪闸和船闸，船闸等级为Ⅳ 级。河道总宽 344 m，导流堤宽 5 m，导流墩为平行四边形，高 5 m、长 10 m。下游口门区宽 60.00 m，展宽比为 1.21，口门区河床疏浚至 80.10 m，下游引航道底部高程为 79.60 m，弯道角度 91°，弯道宽度基本与口门区河道宽度等宽。根据枢纽的地形数据和实测水文资料建立二维数学模型。

模型模拟上边界为枢纽泄洪闸处，下边界为弯道下游 450 m 处，上下模拟边界的设置不影响模型进出口的水流。模型计算时出流边界水位为 86.00 m，泄洪闸门处入流流量为 898 m<sup>3</sup>/s，电站处入流边界流量为 102 m<sup>3</sup>/s，时间步长为 30 s，模拟步数为 1 000 步。模型共划分 3.145 5 万个网格，河道糙率选为 0.032 5，网格大小均匀。

### 2.2 导流墩布置对下游口门区水流条件影响分析

#### 2.2.1 导流墩数量

为了验证导流墩数量对下游口门区水流条件的影响，模型设置 4 个工况，包括 3 个实验组和 1 个对照组。其中对照组为不设置导流墩而采用等长的导流堤进行替代，实验组分别设置 1、2、3 个

导流墩。数值模拟结果表明，不设置导流墩时，上游主流在导流堤堤头进行扩散，在与主流交界的口门静水区域，由于水流的紊动切应力作用，在口门区形成一个封闭的回流区域。该区域内横向流速最大值为 0.54 m/s，超出船闸设计规范中 0.3 m/s 的限值要求，此时口门区外回流区域的回流长度为 148 m。当设置 1 个导流墩时，口门区外回流长度相比不设置导流墩有所减小，减幅为 10.14%，此时横向流速最大值为 0.48 m/s。当设置 2 个导流墩时，回流长度进一步减小至 125 m，回流流速最大值为 0.47 m/s，相比对照组的流速，此工况下横向流速最大值减幅达到 42.59%。当设置 3 个导流墩时，由于导流墩之间的过流，共形成了 2 个明显的回流区域。引航道内形成一个逆时针的回流，口门区外形成一个 116 m 长的顺时针回流区，此时横向流速最大值为 0.22 m/s，纵向流速最大值为 0.84 m/s。

综上所述，随着导流墩数量的增加，口门区外回流长度以及横向流速有减小的趋势，且口门区附近水流方向与主流方向的夹角也有所减小，分析其原因可能是由于导流堤长度缩短、下游口门区上移、口门区距离弯道段的距离增加以及导流墩的阻流作用。

#### 2.2.2 导流墩相对间距

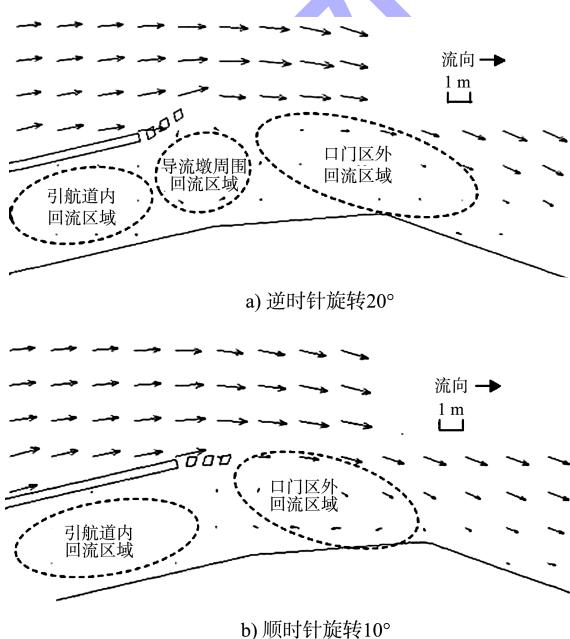
在平行航线布置 3 个导流墩前提下，对 0.50、0.75、1.00、1.25、1.50 等 5 种不同导流墩的相对间距进行模拟计算。回流流速、回流长度以及横向流速的观测范围包括引航道和口门区。由计算结果可知，当  $D/L=0.50$  时，导流墩附近形成了 1 个长度为 62 m 的逆时针回流区域，回流流速范围为 0.07~0.22 m/s。口门区外形成 1 个回流长度为 121 m 的顺时针回流，此时横向流速最大值为 0.27 m/s。当  $D/L=0.75$  时，存在 3 个明显的回流区，引航道内与口门区外为顺时针回流，导流墩周围形成 1 个 92 m 长的逆时针回流区，回流流速最大值为 0.41 m/s，横向流速最大值为 0.26 m/s。当  $D/L$  等于 1.00 时，导流墩形状接近菱形，此时导流墩附近基本无明显回流区，引航道内形成

1个逆时针的回流区, 口门区外仍旧形成1个顺时针回流, 回流长度为116 m, 此工况下横向流速最大值为0.22 m/s。当 $D/L=1.25$ 时, 存在3个明显的回流区, 引航道内与口门区外为顺时针回流, 导流墩周围有1个逆时针回流区, 其中导流墩周围回流区域较大, 回流长度103 m, 回流流速最大值为0.18 m/s, 横向流速最大值为0.31 m/s。当 $D/L=1.5$ 时, 导流墩附近形成1个51 m长的逆时针回流区域, 口门区外回流长度为118 m, 横向流速最大值为0.26 m/s。依据船闸总体设计规范, 口门区纵向流速不超过2 m/s, 横向流速不超过0.3 m/s, 回流流速不超过0.4 m/s。

综上所述, 试验模拟的5种工况中 $D/L$ 等于1.00时的横向流速最小, 回流流速最弱, 水流条件最优, 此模拟结果与概化模型所得结论一致。

### 2.2.3 导流墩布置角度

在导流墩数量以及导流墩相对间距一致的情况下, 设置偏角分别为0°(导流墩与航线平行)、逆时针旋转10°、逆时针旋转20°以及顺时针旋转10°等4种工况, 对不同导流墩摆放角度时下游口门区的流场分布以及水流流态进行模拟与分析。其中逆时针旋转20°以及顺时针旋转10°工况下下游口门区流场见图4, 4种工况下的水力参数见表2。



注: 泄洪闸流量898 m<sup>3</sup>/s; 电站流量102 m<sup>3</sup>/s; 出流水位86.00 m。

图4 导流墩不同布置角度的口门区流场

表2 导流墩不同布置角度的口门区水力参数变化

导流墩 布置角度/ (°)	最大横向 流速/ (m·s <sup>-1</sup> )	最大纵向 流速/ (m·s <sup>-1</sup> )	最大回流 流速/ (m·s <sup>-1</sup> )	回流 长度/m
-10	0.33	0.92	0.46	161
0	0.23	0.85	0.39	166
10	0.27	0.73	0.42	156
20	0.29	0.64	0.67	152

模拟结果表明, 导流墩平行于航线以及顺时针旋转10°布置时, 存在2个回流区, 引航道内形成1个逆时针回流区, 口门区外形成一个顺时针回流区。当导流墩逆时针旋转布置时, 共存在3个明显的回流区域, 其中引航道内与口门区外为顺时针回流, 导流墩周围形成逆时针回流。分析各项水力参数可知, 导流墩顺时针旋转时, 口门区的横纵向流速以及回流流速均有不同幅度增加, 且横向及回流流速超标, 水流条件恶化。当导流墩逆时针布置时, 纵向流速以及口门区回流长度有所减小, 但是口门区回流流速增加且超出限值, 因此逆时针旋转时水流条件也不如平行航线布置时的水流条件。综上, 平行于航线布置导流墩时水流条件更佳。

### 3 结论

- 1) 导流墩可以削弱口门区的斜流以及回流, 改善口门区通航水流条件, 效果较为明显。
- 2) 适当缩短导流堤长度并布置导流墩可以有效改善口门区水流条件, 且在一定范围内, 随着导流墩数量的增加, 改善效果愈好。当导流墩数量一定时, 导流墩间距与长度等长时水流条件较优。
- 3) 当导流墩数量和相对间距一定时, 导流墩逆时针旋转布置会导致纵向流速以及口门区回流长度有所减小, 但是口门区回流流速会增加, 导流墩右侧会产生连续小范围的回流。因此导流墩布置方向与航线平行时, 水流条件更优。
- 4) 导流墩形状接近菱形时的水流流态相较平行四边形时更好, 导流墩形状也是影响口门区通

航水流条件的重要因素。

5) 工程实例中回流流速较大, 为进一步降低回流流速、改善水流流态, 下一步可对透空导流墩进行研究。

#### 参考文献:

- [1] 李伟, 张宝航. 船闸下引航道口门区回流特性及改善措施[J]. 水运工程, 2013(8): 160-164.
- [2] 王建平, 邢方亮, 陈奕芬. 弯曲河道船闸口门区通航水流条件优化[J]. 水运工程, 2019(11): 86-91.
- [3] WANG F, AN X Y. Study on flow conditions for navigation in entrance area and connection reach downstream of the lock of a new hub[J]. IOP conference series earth and environmental science, 2021, 768(1): 012049.
- [4] DE JONG R J, VRIJER A. Mathematical and hydraulic model investigation of longitudinal forces on ships in locks with door filling systems[R]. Delft: Delft Hydraulic Laboratory, 1980.
- [5] VINCENZO C. Numerical simulation of three-dimensional free surface flow in isopycnal co-ordinates[J]. International journal for numerical methods in fluids. 1997, 25 ( 6): 645-648.
- [6] 颜志庆, 赵建钧, 姜晋德, 等. “S”形急弯河段通航水流条件研究[J]. 水运工程, 2021(6): 128-134.
- [7] 韩康, 余凯文, 赵建钧, 等. 常山江阁底枢纽通航水流条件及方案优化试验研究[J]. 水运工程, 2021 (8): 139-144.
- [8] 余凯, 马骏, 王志鹏. 赣江井冈山航电枢纽船闸下游口门区及连接段通航水流条件试验研究[J]. 水运工程, 2020(11): 122-126, 160.
- [9] 沈立群, 陈雷. 碾盘山水电枢纽通航条件优化模型试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2022(7): 61-66.
- [10] 李君涛, 普晓刚, 张明. 导流墩对狭窄连续弯道枢纽船闸引航道口门区水流条件改善规律研究[J]. 水运工程, 2011(6): 100-105.
- [11] 王建平, 刘超, 张世宝, 等. 风光枢纽扩建船闸上游口门区通航水流条件试验研究[J]. 水运工程, 2021(1): 156-161.
- [12] 刘超, 张世宝, 张金明, 等. 沥口枢纽上游口门区通航水流条件试验研究[J]. 水运工程, 2019(4): 141-146.
- [13] 李兴亮, 陈野鹰. 弯曲河段下游引航道口门区通航水流条件研究[J]. 水运工程, 2016(2): 127-130, 141.
- [14] 李文浩. 船闸引航道口门区回流对船舶航行影响研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.
- [15] ALOMARI N K, YUSUF B , MOHAMMAD T A, et al. Experimental investigation of scour at a channel junctions of different diversion angles and bed width ratios[J]. Catena, 2018, 166: 10-20.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第 84 页)

#### 参考文献:

- [1] 马铁玮, 刘翰卿, 朱苏辉, 等. 长江南京以下 12.5 m 深水航道二期工程初步效益分析[J]. 水运工程, 2019(7): 9-12, 27.
- [2] 中交第二航务工程勘察设计院有限公司. 无锡(江阴)港申夏港区港口集团五号码头改扩建工程可行性研究报告[R]. 武汉: 中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 2021.
- [3] 牟伟. 日照港某散货泊位专业化改造工艺设计简析[J]. 港工技术, 2021, 58(4): 33-37.
- [4] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 中交第四工程局有限公司. 码头结构设计规范: JTJ 167—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [5] 孙津潇, 陈守勇. 大型固体散货船装船码头工艺布置的探讨[J]. 港工技术, 2019, 56(3): 39-41.

(本文编辑 王璁)