

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.01.017

弯曲航道通航水流特性及船舶运动特性数值模拟

夏旭江¹, 庄宁¹, 徐兴年^{1,2}, 蔡飘洋¹

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院; 2. 苏交安(常州)水运安全技术咨询有限公司)

摘要:为揭示弯曲航道几何参数对通航水流条件及船舶运动特性的影响规律,以引江济淮工程典型弯曲航道段为研究对象,建立基于 MIKE21 的水流数学模型及 MMG 船舶操纵模型,系统分析了转弯角度($\theta=60^{\circ}, 90^{\circ}, 120^{\circ}$)、弯曲半径($R=540, 1\,000, 1\,500\text{ m}$)、航道宽度($B=60, 90\text{ m}$)对弯曲航道水流特性的影响,并量化了 1000t 级货船在弯曲航道中的运动规律。结果表明:转弯角度增大显著加剧了水流复杂性, $\theta=120^{\circ}$ 时弯顶壅水较 60° 时上升 0.012 m,水面最大横比降位置由下游 1/3 处上移至上游 1/3 处,主流向凸岸偏移;弯曲半径的增大改善了通航条件, $R=1\,500\text{ m}$ 时凹凸岸水位差较 540 m 时降低了 60%,最大流速从 0.55 m/s 降至 0.35 m/s;航道宽度减小显著恶化水流条件, $B=60\text{ m}$ 时最大流速、上下游水位差较 90 m 时均显著增大;船舶运动特性方面,下行船受水流主导,横移速度与舵角、漂角呈强负相关关系;上行船以自身动力为主,各参数相关性较弱。

关键词:弯曲航道;通航水流特性;船舶安全;数值模拟

Numerical simulation of water flow characteristics in curved channels and ship motion characteristics

Xia Xujiang¹, Zhuang Ning¹, Xu Xingnian^{1,2}, Cai Piaoyang¹

(1. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University;
2. SJA (Changzhou) Maritime Safety Technology Conslting Co., Ltd.)

Abstract: In order to reveal the influence of the geometric parameters of the curved channel on the navigable water flow conditions and ship motion characteristics, the typical curved channel section of the Yangtze-to-Huaihe River Water Diversion Project was taken as the research object. Moreover, the mathematical model of the water flow based on MIKE21 and the MMG ship manoeuvring model were established. The influence of the turning angle ($\theta=60^{\circ}, 90^{\circ}, 120^{\circ}$), the bending radius ($R=540, 1\,000, 1\,500\text{ m}$), and the channel width ($B=60, 90\text{ m}$) on the flow characteristics of the curved channel were analyzed in a systematic way, and the movement law of 1 000 t class cargo ship in the curved channel was quantified. The results show that the increase in the turning angle significantly aggravates the complexity of water flow; the backwater at the top of the bend at $\theta=120^{\circ}$ rises by 0.012 m compared with that at 60° , and the maximum transverse gradient of the water surface shifts from the downstream 1/3 to the upstream 1/3; the main stream shifts to the convex bank. The increase of the bending radius improves the navigable conditions, and the difference in water level between the concave and convex banks at $R=1\,500\text{ m}$ decreases by 60% compared with that at $R=540\text{ m}$; the maximum flow velocity decreases from 0.55 m/s to 0.35 m/s. The reduction of the channel width significantly worsens the water flow conditions, and the maximum flow velocity and the water level difference between upstream and downstream increase significantly at $B=60\text{ m}$ compared with $B=90\text{ m}$. As for the ship motion characteristics, the downstream ship is dominated by the water flow, and the traverse speed with the rudder angle and drift angle show a strong negative correlation; the upstream ship is dominated by its own power, and the correlation of each parameter is weak.

Key words: curved channel; navigable water flow characteristic; ship safety; numerical simulation

随着内河航运的快速发展,航道的安全性和通航效率愈发受到重视,尤其是在弯曲航道中,水流的复杂多变以及航道的几何尺度对船舶的安全通航构成了显著影响^[1-3]。弯曲航道因水流受地形约束形成非线性运动特征,易出现流速剧增、流向偏转及水面横比降不对称分布等复杂现象,进而影响船舶的操控性和航行稳定^[4]。因此,深入研究弯曲航道的水流特性,对于保障船舶安全通航、提升航运效率、推动内河航运稳步发展具有重要的理论和实践意义。

通过对大量航道内船舶事故的调查,归纳分析出事故发生的主要原因在船员操作能力、船舶性能优化及

作者简介: 夏旭江(1998—),男,博士研究生,主要从事水利工程研究。E-mail:18260635129@163.com
通信作者: 庄宁(1977—),男,教授,博士,主要从事水利工程研究。E-mail:zhuangning1977@163.com

航道管理机制等方面,并针对这些安全影响因素提出了相应的提高通航可靠性的对策^[5-8];Chai 等^[9]基于 300 起船舶碰撞事故,分析总结出 98 种事故原因,并构建了事故致因网络和事故致因链网络;陈相宇等^[10]结合具体案例分析了弯曲航道船舶安全事故发生的原因,认为需着重重视对船员能力和专业素养的培养、航道实时信息的获取和发布、船舶间沟通协调以及合理设计航路等。可以看出学者们在弯曲航道通航安全方面大多是从船舶操纵参数角度进行分析,很少从弯曲航道水流特性以及船舶运动特性等方面对弯曲航道通航安全进行分析研究。弯道水流特性的研究可追溯至 1876 年 Thomson^[11]的水槽试验,其发现弯道除纵向流速外还存在横向流速,奠定了研究基础。此后,学者们通过实测、物理模型及数值模拟,围绕水面形态、横纵向流速分布、环流结构等展开研究;Kalkwijk 等^[12]推导了环流垂向分布公式;徐艳军等^[13-14]揭示了横比降与环流对船舶漂移的影响。随着数值技术发展,陈相宇等^[15-16]采用数值模型模拟了曲率半径、转角等对流速与水位的影响,陈翠霞等^[17-18]对比分析了不同紊流模型的模拟精度。然而,现有研究大多针对天然河道或单一参数,对内河受限航道弯曲段的系统性研究不足,且国内通航标准也尚未明确相关水流条件规定。

在船舶运动特性方面,研究手段已从实船试验的数据采集^[19]、船舶数值模拟研究^[20]发展到船舶操纵数学模型,其中日本的分离型船舶运动数学模型因能合理表达流体动力而被广泛应用^[21-23]。但针对弯曲航道特有的水流条件如横比降、环流与横移速度、舵角、漂角等船舶运动参数的关联性研究仍较缺乏,尤其对船舶在航道上行、下行时的特性差异研究不足。

综上,现有研究在弯曲航道通航安全方面仍存在明显不足,例如转弯角度、弯曲半径、航道宽度等航道几何参数与壅水高度、流速分布、水面比降等水流特性之间的关联揭示不足,尤其缺乏对弯曲航道的水流非线性特征的系统分析;船舶在弯曲航道中的运动特性如横移速度、舵角调整、漂角变化及其与水流条件的动态响应规律研究较为薄弱,难以支撑弯曲航道的安全通航需求。因此有必要对弯曲航道通航水流条件及船舶运动特性进行深入研究。本文依托引江济淮工程的典型弯曲航段,利用 MIKE21 软件建立水流数学模型,重点研究转弯角度、弯曲半径及航道宽度对弯道水流特性的影响规律,并结合 1 000 t 级货船双向航行试验,解析上行、下行船舶的运动特性差异,以期降低船舶在弯道段航行时可能面临的安全风险,并为工程弯曲航道设计优化与通航安全管控提供科学依据。

1 模型建立与验证

1.1 弯曲航道选取

引江济淮工程作为我国重大跨流域调水与航运工程,横跨长江、淮河两大流域,地跨安徽、河南两省,线路全长 723 km,通航等级为Ⅱ级,是沟通江淮地区的水运大动脉。工程沿线航道穿越平原、丘陵等多样地形,其中江淮沟通段的派河口枢纽至蜀山泵站枢纽段具有显著的连续反弯特征,不仅转弯角度大、弯曲半径差异明显,且弯道间直线段短,导致水流条件极为复杂,对船舶通航安全构成直接威胁。该航段作为工程通航的关键节点,对其弯曲航道的水流特性与船舶运动规律研究具有典型代表性与工程紧迫性。为系统开展相关研究,首先通过调研对工程沿线弯曲航道的核心特征参数转弯角度 θ 和弯曲半径 R 进行了全面采集与汇总,如表 1 所示。鉴于连续反弯段转向角度较大、弯道间直线段较短的特性对船舶通航安全影响显著,且各类通航标准均对此类参数提出了明确要求,在此基础上考虑到江淮沟通段蜀山枢纽上游总体布局上存在连续反弯段,有完整的弯道派生曲线,相对于整个航段具有代表性,因此选取地处安徽省合肥市肥西县派河口枢纽至蜀山泵站枢纽之间的蜀山枢纽段上游航道作为研究对象。

表 1 工程沿线弯道特征参数统计

Table 1 Characteristic parameters of bend along project route					
θ 范围	航段弯道数		R 范围	航段弯道数	
	引江济巢及巢湖湖区段	江淮沟通段		引江济巢及巢湖湖区段	江淮沟通段
>0°~10°	56	0	>0~500 m	41	0
>10°~20°	40	18	>500~1 000 m	94	65
>20°~30°	24	22	>1 000~1 500 m	11	10
>30°~40°	15	11	>1 500~2 000 m	9	1
>40°	27	28	>2 000 m	7	3
总计	162	79	总计	162	79

1.2 平面二维水流数学模型

采用 MIKE21 软件建立水流数学模型^[24-25],研究弯道特征参数对水流条件的影响,结合船舶操纵数学模型进一步探讨其对船舶通航可能产生的影响,据此为船舶实际安全航行提出可参考的通航安全保障措施。

1.2.1 控制方程

MIKE21 水动力模块的核心理论基础为纳维-斯托克斯(Navier-Stokes)方程,该方程基于流体三向不可压缩、雷诺数均匀分布基本假定,同时遵循布辛涅斯克(Boussinesq)假定和静水压力假定^[26-27]。模型的基本控制方程包括连续方程和动量方程:

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

(1)

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial s}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} - \frac{1}{\rho h} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{1}{h} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(Eh \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(Eh \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right]$$

(2)

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial s}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho h} - \frac{1}{\rho h} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{1}{h} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(Eh \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(Eh \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right]$$

(3)

式中: s 为水位; t 为时间; x 、 y 分别为直角坐标系坐标; u 、 v 分别为 x 、 y 方向的速度分量; g 为重力加速度; ρ 为水的密度; τ_{bx} 、 τ_{by} 分别为 x 、 y 方向的河床面应力张量分量; S_{xx} 、 S_{xy} 、 S_{yx} 、 S_{yy} 为辐射应力分量; h 为总水深, $h=h_0+\eta$; h_0 为静水深; η 为静止水平面上的水位; E 为涡动黏性系数。

1.2.2 模型建立与验证

以研究河段平面布置图和地形资料为基础,采用三角形非结构网格建立二维水流数学模型,局部加密。模型计算域共包括 122 613 个节点,238 972 个网格,如图 1(a)所示。模型进口边界由输水流量控制,出口边界由设计输水位控制,岸边界采用非滑移边界。模型采用实测资料率定方法确定床面综合阻力系数,取值为 0.025。

选择与模型模拟工况一致的水文条件时段,即输水流量稳定在 290 m³/s 进行数据采集。在研究区域沿航道中心线及两岸布设 10 个水位验证点,覆盖弯道进口、弯顶及出口关键区域,确保捕捉水流沿程变化特征。采用已计量校准的投入式水位传感器测量水位。测量时将传感器固定于航道两岸,确保探头完全浸没且避开船舶扰动区域,连续采集 3 d,取每日稳定时段的平均值作为该验证点的代表水位。同时在研究河段设置流速验证断面,采用流速剖面仪测量水深 0.5 m 处的流速,重复测量 3 次后取平均值,确保数据稳定性。水位验证点和流速验证断面如图 1(b)所示。

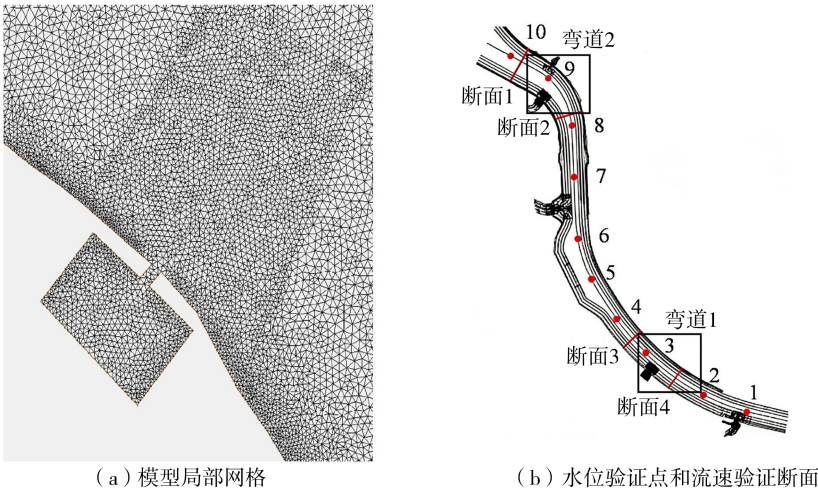


图1 弯曲航道模型局部网格及水位验证点、流速验证断面

Fig.1 Curved channel model local mesh, water level verification points, and flow velocity verification sections

由表 2 可知,实测水位在各验证点存在波动,范围大致在 8.851~9.015 m,模拟水位范围为 8.899~8.971 m。各验证点水位模拟值与实测值吻合良好,差值范围为-0.044~0.048 m,满足 JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》对平原河流规定的误差限值(± 0.05 m),表明模型能够反映天然河流的水位变化。

由图 2 可知,断面 1 实测流速峰值为 0.51 m/s,距起点 80~100 m,模拟流速峰值与所处位置与实测值较为接近,且除个别点,流速模拟值与实测值变化趋势一致,模拟效果相对较好;断面 2 的实测流速峰值为 0.54 m/s,距起点约 60~80 m,模拟流速峰值为 0.52 m/s,位置与实测值相近;断面 3 的实测流速峰值 0.53 m/s,距起点约 100 m,模拟流速峰值与实测峰值差为 0.48 m/s,但位置相近,整体趋势相似;断面 4 的实测流速峰值为 0.28 m/s,距起点 120~140 m 处,模拟流速峰值为 0.27 m/s,位置和数值二者均较为接近,整体趋势一致。整体看,4 个断面流速模拟值和实测值总体趋势较为一致,表明模型能在一定程度上反映实际流速变化情况。

表 2 不同验证点水位验证结果

Table 2 Results of water level validation at different verification points

水位验证点	水位实测值/m	水位模拟值/m
1	9.015	8.971
2	8.986	8.960
3	8.973	8.943
4	8.951	8.935
5	8.908	8.937
6	8.947	8.933
7	8.915	8.907
8	8.851	8.899
9	8.921	8.902
10	8.913	8.899

由图 3 可知,弯道 1 实测轨迹呈弯曲状,模拟水流流向与实测轨迹走向基本一致,意味着弯道处模拟水流流向能较好呈现实际水流的弯曲方向和大致路径;弯道 2 也呈现类似状况,实测轨迹与模拟水流流向高度契合,无论是弯曲趋势还是整体流向变化,均表现出一致性。因此,模型在反映弯道处水流流向时具备较高可靠性,能够较准确地模拟实际水流流向。

模型模拟的水位、流速、流向均满足 JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》的要求,可以切实反映实际航道中水流的运动状态,因此可基于该模型研究相关特征参数对弯道水流条件以及对船舶在弯曲航道航行的影响。

1.2.3 工况设置

为进一步研究不同弯曲航道特征对水流条件的影响,选择了转弯角度、弯曲半径、航道宽度作为特征要素,研究不同工况下的弯曲航道特征对水流条件的影响,因此设置 3 种工况:① θ 分别为 60°、90°、120°,固定 $R=540$ m、航道宽度 $B=90$ m;② R 分别为 540、1 000、1 500 m,固定 $\theta=44.05^\circ$ 、 $B=90$ m;③ B 分别为 60、90 m,固定 $\theta=44.05^\circ$ 、 $R=540$ m。

1.3 船舶操纵数学模型

1.3.1 控制方程

采用 MMG 作为船舶运动的仿真模型,对研究河段船舶双向通航安全进行研究。在静水中的操纵平面运动数学模型基础上,仅考虑纵荡、横荡和首摇 3 个自由度,在方程右端加入风、浪、流的干扰作用力,可建立船舶平面运动方程:

$$\begin{cases} (m+m_x)\dot{u}-(m+m_y)vr=X_H+X_P+X_R+X_{WD}+X_{WV}+X_C \\ (m+m_y)\dot{v}+(m+m_x)ur=Y_H+Y_P+Y_R+Y_{WD}+Y_{WV}+Y_C \\ (I_z+J_z)\dot{r}=N_H+N_P+N_R-Y_HX_C+N_{WD}+N_{WV}+N_C \end{cases} \tag{4}$$

式中: m 为船体的质量; m_x 、 m_y 分别为船体 x (纵荡)方向, y (横荡)方向的附连质量; r 为船舶绕 z 轴的艏摇角

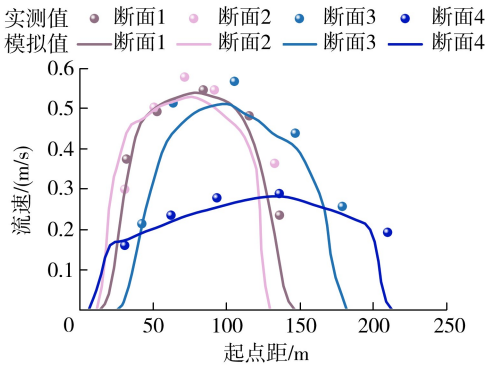


图 2 不同断面流速验证结果

Fig. 2 Flow velocity validation results for different sections

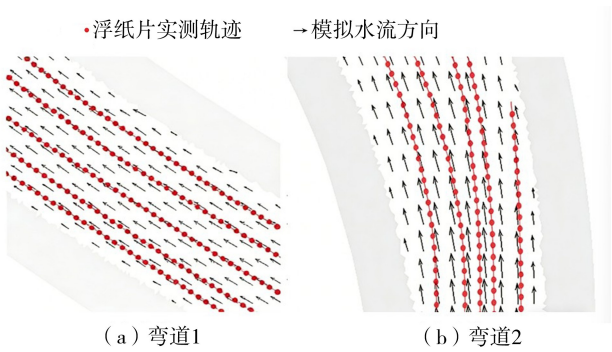


图 3 不同弯道处的流向验证结果

Fig. 3 Flow direction validation results at different bends

速度; I_z 、 J_z 分别为船舶绕艏摇轴的转动惯量及惯性矩; X_{WD} 、 Y_{WD} 、 N_{WD} 分别为水流干扰作用产生的纵荡力、横荡力、艏摇力矩; X_R 、 Y_R 、 N_R 分别为舵产生的纵荡力、横荡力、艏摇力矩; X_{WV} 、 Y_{WV} 、 N_{WV} 分别为波浪干扰作用产生的纵荡力、横荡力、艏摇力矩; X_C 、 Y_C 、 N_C 分别为风力干扰作用产生的纵荡力、横荡力、艏摇力矩; X_P 、 Y_P 、 N_P 分别为螺旋桨产生的纵荡力、横荡力、艏摇力矩; X_H 、 Y_H 、 N_H 为不包括惯性力在内的船体水动力。

目前江淮沟通段航道按Ⅱ级航道标准设计,设计航道尺度为 4.0 m(航道水深)×60 m(航道底宽)×540 m(最小弯曲半径),设计代表船型为 1 000 t 货船、2 000 t 货船、100TEU 集装箱船、1 顶 2×1 000 t 分节驳顶推。考虑到实际通航船舶中,1 000 t 货船占比较大,本文建模的代表船型为 1 000 t 级货船,其船长为 58.0 m、船宽为 11.0 m、设计吃水为 2.8 m。

1.3.2 模型建立与验证

依据 JT/T 258—2021《长江运输船舶操纵性衡准》,结合类似研究和本文河段重要程度,本文主要通过航向稳定性、航向改变性和定常回转性对模型进行率定。经测定,1 000 t 级货船航向稳定性指标 ΔC_0 为 0° , 小于 3.5° ;航向改变性指标应舵转首指数 P' 为 1.12,大于 0.30;定常回转性试验中左、右旋的回转直径分别为 3.10L 和 3.20L(L 为船长),回转直径与船长之比均小于 4.0。综上,所建船舶操纵数学模型的操纵性指标符合内河船舶操纵性标准。

2 结果与分析

2.1 弯曲航道特征对水流条件的影响

由于弯道 1 断面更为规整,在其他条件不变的基础上分别调整原有模型弯道 1 的转弯角度、弯曲半径和航道宽度,工况均采用航道设计调水无支流工况,即上游按照设计输水流量 $290\text{ m}^3/\text{s}$,下游水位按照设计输水水位 8.9 m,其余支流按照干支流量关系和 5 年一遇标准给定流量。

2.1.1 转弯角度的影响

结合表 1 中弯曲河段的参数分布范围,转弯角度分别为 60° 、 90° 和 120° ,不同转弯角度弯道水位、流速分布如图 4、图 5 所示(两图中的线为等值线)。由图 4 可知,受入汇支流、支流口地形及弯道出口处航道宽度增大的综合影响,弯道水位仅呈现弯顶处凹岸水位高于凸岸的规律,未在弯顶处凹、凸岸出现水位极值,且仅在弯道出口凸岸观测到水位极小值,未发现极大值。等值线也未呈现层层包裹凸岸的形态,而是大致呈平行四边形分布,而凹、凸岸的水位极小值从侧面印证了相关研究中弯顶处凹、凸岸存在水位极值的结论。对比不同转弯角度下弯顶处水位可知,随转弯角度增大,弯道长度相应增加,弯道内整体壅水程度加剧; $\theta=60^\circ$ 时,弯顶处平均水位为 8.935 m; $\theta=90^\circ$ 时,同一位置水位升至 8.941 m,升高约 0.006 m; $\theta=120^\circ$ 时,水位进一步升至 8.947 m,较 $\theta=60^\circ$ 升高约 0.012 m。弯顶位置逐渐向上游偏移,水位亦逐步升高。对比弯道等值线间距可见,随转弯角度增大,最小等值线间距由下游逐步向上游迁移; $\theta=60^\circ$ 时,最大横比降出现于下游距弯道出口 1/3 处; $\theta=120^\circ$ 时,位置上移至上游距入口约 1/3 处,且横比降有所增大。因此,随转弯角度增大,弯道内水位最大横比降位置将由下游逐步向上游迁移。

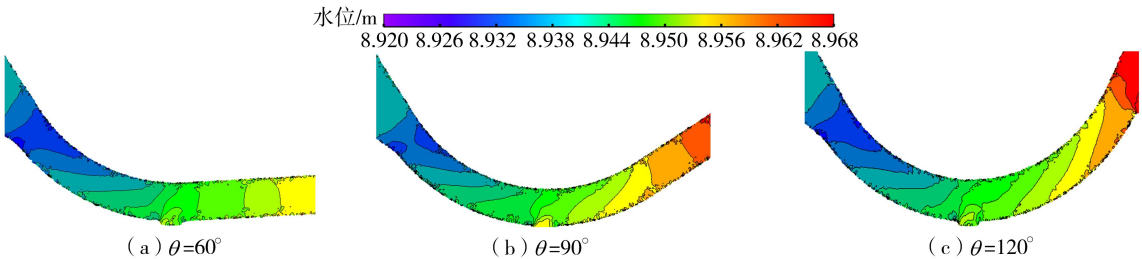


图 4 不同转弯角度下的水位分布

Fig. 4 Water level distribution at different turning angles

由图 5 可知,随着支流流量汇入,航道内流速等值线所包围区域的宽度明显增大,反映出断面流速随流量汇入有所增大。但随着水流在航道内前进,最大流速等值线包围区域的宽度和长度逐渐变小,第二大流速等值线包围区域宽度则有一定增大,且逐步向凸岸靠近,反映出弯道内主流会随弯道转角的增大,逐步贴向凸岸,使得凸岸逐步受到更大的冲刷力。反映到船舶通航条件上,可认为当船舶航行于小转角弯道时,需在

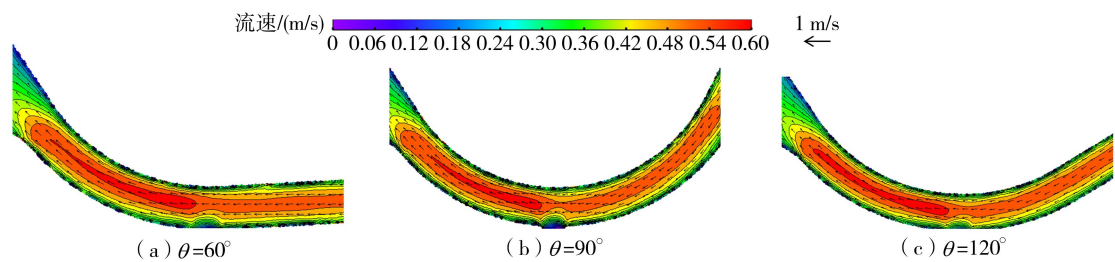


图 5 不同转弯角度下的流速分布

Fig. 5 Flow velocity distribution at different turning angles

弯道下游靠近出口段尤其注意控制船舶航向,而当船舶航行于大转角弯道时,需在弯道上游靠近入口段尤其注意控制船舶航向。同时由于航道主流的变化,通常情况下船舶需沿着航道中心线航行,尤其是航行于大转角弯道时,其弯曲段长度会更大,过往船舶需与岸侧保持必要的安全距离,并集中精力结合船舶情况操纵船舶,防止受水流主流的偏移发生搁浅或与其他船舶发生碰撞。

2.1.2 弯曲半径影响

由于研究河段为Ⅱ级航道,允许最小弯曲半径为 540 m,结合表 1 中弯曲半径分布范围,调整弯曲半径为 540、1 000、1 500 m。由图 6 可知,随着弯曲半径增大,弯道趋近顺直河段,两侧岸水位差减小,水面横比降降低; $R=540\text{ m}$ 时,弯道凹岸与凸岸水位差达 0.02 m ; $R=1\,000\text{ m}$ 时,水位差降至 0.012 m ,降幅 40%; $R=1\,500\text{ m}$ 时,水位差进一步缩小至 0.008 m ,仅为 540 m 工况的 40%。弯道长度增加,弯道内水流发展更充分,壅水现象逐渐减弱。由图 7 可知,航道内相同流速等值线包围区域宽度随弯曲半径增大而减小, $R=540\text{ m}$ 时,最大流速 0.55 m/s ; $R=1\,000\text{ m}$ 时,最大流速降至 0.45 m/s ; $R=1\,500\text{ m}$ 时,最大流速仅 0.35 m/s 。凸岸冲刷深度较 540 m 工况减少了 0.3 m ,表明主流逐渐扩散,流速变小,水流趋于平缓,对岸侧冲刷减弱,这是因为在弯曲航道中,离心力是关键影响因素。离心力使凹岸水流受挤压产生壅水,水位升高,而凸岸水流分散,水位较低。曲率半径越小,离心力作用越显著,凹凸岸高程差越大,且流速分布受离心力与摩擦力共同调控影响。凹岸因水流汇聚及离心力作用,流速较高;凸岸水流分散且离心力作用弱,流速较低。因此在曲率半径小的情况下,较强离心力使凹岸高速流区集中且流速峰值高;随着曲率半径增大,离心力缓和,高速流区范围与流速峰值减小,流速分布更均匀。从船舶通航角度看,航行于弯曲半径大的航段,通航水流条件更佳,船舶安全性更高。

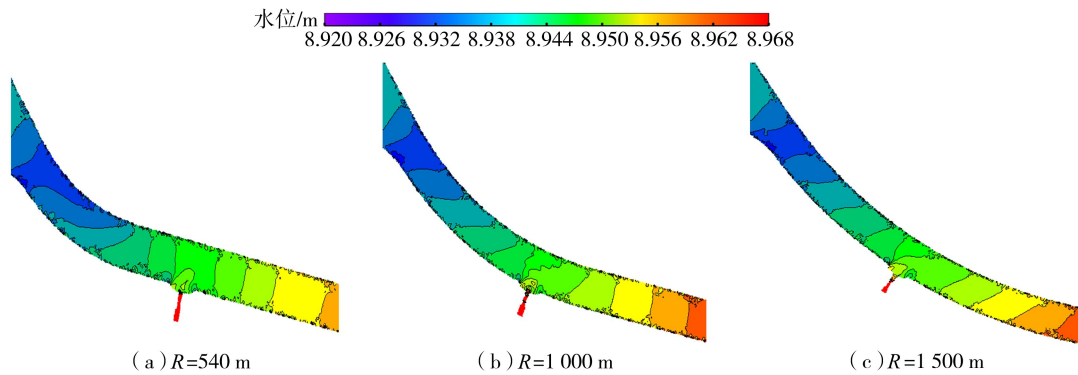


图 6 不同弯曲半径下的弯道水位分布

Fig. 6 Water level distribution in bends at different bending radii

2.1.3 航道宽度影响

航道宽度是弯曲航道的重要特征,常常被无量纲化以径宽比、宽深比等形式进行理论推导或拟合公式。由图 8、图 9 可知,从断面尺度分析,在水位较低的情况下,尤其是复式断面的航道,其过水断面面积会显著收缩;而在流量保持恒定的前提下,断面面积的减小会同步产生两个效应,一是水流流速相应增大,二是上游水流出现明显壅高,最终使得航道的上下游形成较大的水位差。随着航道宽度增大,断面面积也随之增大,数据显示 $B=60\text{ m}$ 时,航道上下游水位差为 0.25 m ,最大流速为 0.7 m/s ; $B=90\text{ m}$ 时,水位差降至 0.15 m ,降低幅度为 40%,最大流速降至 0.3 m/s ,表明弯道内壅水降低,同时航道内流速降低约 0.4 m/s ,超过原来较小

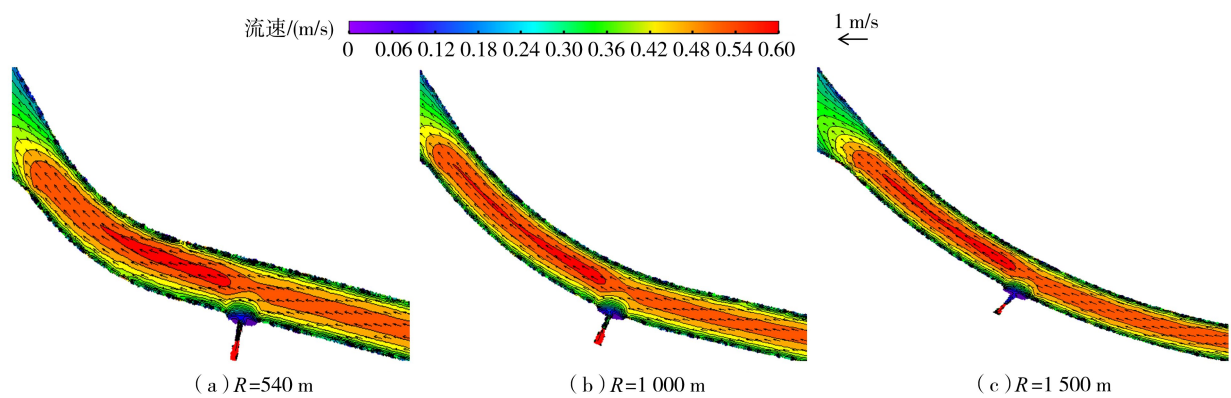


图 7 不同弯曲半径下的弯道流速分布

Fig. 7 Flow velocity distribution in bends at different bending radii

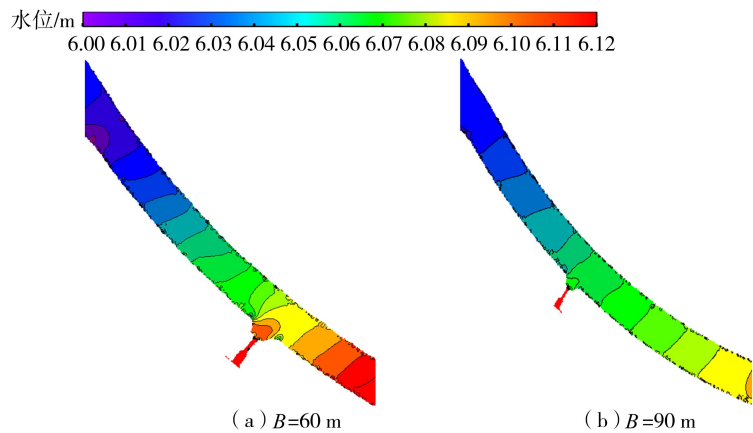


图 8 不同航道宽度下的弯道水位变化

Fig. 8 Variation diagram of water level in bends for different channel widths

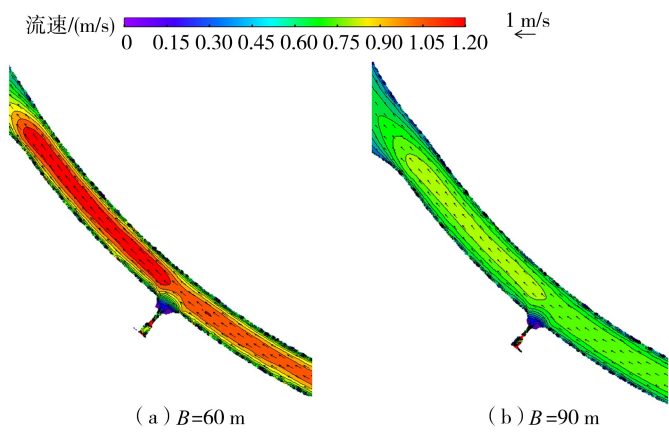


图 9 不同航道宽度下的弯道流速变化

Fig. 9 Variation diagram of water level in bends for different channel widths

航道宽度时最大流速的 1/3,水流流速变化幅度也随之减小。反映到船舶通航条件上,可以认为随着航道由丰水期向枯水期转变,航道宽度逐渐变小,通航水流条件会有一定恶化,船舶航行安全性降低。对于同一时期,船舶航行与航道宽度越大的航段,水流流速和水面纵比降会明显降低,通航水流条件会越好,船舶会相对更为安全。

2.2 弯曲航道船舶运动特性变化分析

选取 2 艘 1000t 级货船在弯道 1 繁华大桥处开展双向航行试验,研究弯曲航道船舶运动特性变化,结果如图 10 所示。货船的横移速度、舵角、漂角随航道里程变化如图 11 所示。由图 11 可知,下行船受到顺流推

力与弯道离心力叠加作用,横移速度波动剧烈,在弯道弯曲段呈现显著正负交替,体现横向往复摆动特征;上行船以自身动力克服水流阻力,横移速度波动平缓,受水流横向干扰较弱,运动稳定性显著优于下行船。舵角是船舶修正轨迹的主动操纵参数,下行船因横向受力复杂,舵角调整频繁且幅值较大,在急弯段出现多次大幅反向调整,因此需要通过舵力产生反向力矩以抵消横向偏移;而上行船受水流干扰较弱,舵角波动幅度小,仅需小幅调整即可维持轨迹。漂角为船舶首尾线与航迹线的夹角,反映了横向偏移程度。当横移速度增大时,船舶通过姿态调整使漂角反向减小,形成动态平衡以抑制偏移;而上行船因自身动力主导航向,水流横向作用对姿态影响微弱,漂角变化平缓。

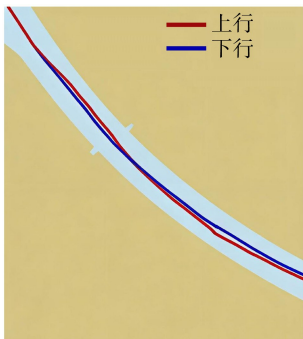


图 10 1000 t 级货船双向航行试验轨迹
Fig. 10 Trajectory of 1000 t class cargo ship in two-way sailing test

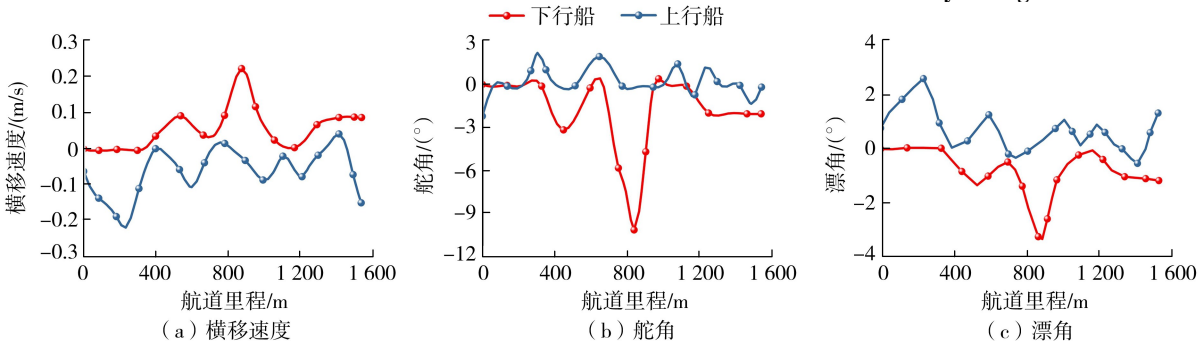


图 11 试验船运动特性随航道里程变化趋势
Fig. 11 Variation of test ship motion characteristics with channel mileage

船舶在弯曲航道中维持轨迹稳定的核心在于外力干扰与主动操纵的动态平衡。船舶在弯道行驶时的受力是决定其姿态与轨迹的核心,下行船主要受顺流推力、弯道离心力影响,横向偏移风险高,需通过高频次、大幅值舵角调整产生反向舵力,抵消横向干扰以约束轨迹,维持轨迹;上行船则以自身动力克服水流阻力为主,弯道离心力影响因逆流行驶被削弱,仅需小幅舵力修正微小偏移,轨迹稳定性相对更优。通过对测试数据进行分析,进一步研究弯曲航道上行、下行船的横移速度、舵角、漂角之间的相关性,结果如图 12 所示。

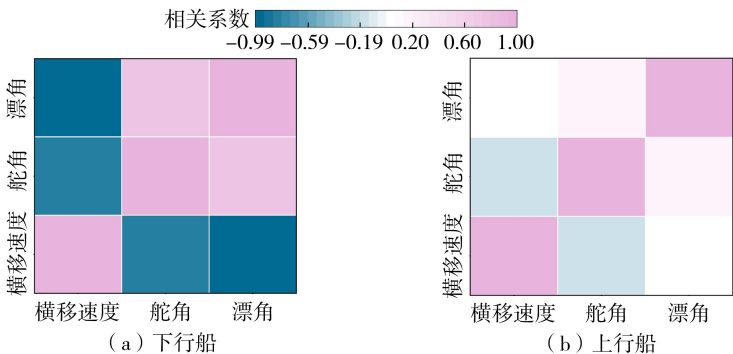


图 12 相关性分析
Fig. 12 Correlation analysis

下行船方面,横移速度与舵角呈较强负相关关系,从船舶航行力学角度看,下行时水流横向作用力改变横移速度,船员为抵消横向位移保持航线需反向调整舵角,故为负相关。横移速度与漂角区域亦为强负相关。漂角是船舶首尾线与实际航迹线夹角,下行横移速度增大使船舶横向偏移加剧,为保航向船舶调整姿态致漂角减小。舵角与漂角为较弱正相关,因舵角调整改变航向影响实际航迹,使漂角同向变化,但受水流等复杂因素干扰,相关性弱。

上行船方面,横移速度与舵角呈负相关关系,但相关性弱于下行船。因上行船逆水行驶,水流对横移速度影响小,自身动力对航向控制作用强,二者关联不明显。横移速度与漂角负相关程度弱,因上行靠自身动

力克服水流阻力,横移速度变化对漂角影响不显著,受船舶动力系统和航线保持机制综合作用,相关性不强。舵角与漂角为较弱正相关,舵角调整影响航迹致漂角变化,但因受力模式不同,整体相关性弱。

2.3 研究局限性与改进方向

本文系统分析了弯曲航道水流特性及船舶运动规律,但仍存在一定局限性:①水流模拟采用平面二维模型,难以完全刻画垂向流速分布及三维紊流结构,对弯道局部涡旋、凸岸回流等精细流态的表征精度有限,且模型参数基于经验率定,在复杂工况下可能产生偏差;②研究聚焦转弯角度、弯曲半径等几何参数,未充分纳入来流流量动态变化、风浪干扰等自然因素。针对上述局限,后续研究可从两方面进行改进:①构建三维水动力与船舶操纵动力学耦合模型,结合 CFD 技术捕捉船舶周围流场细节,并深化机理分析;②拓展多因素工况试验,涵盖不同流量、风浪及船型条件,建立船舶尺度与弯道参数的匹配关系,进一步增强结论工程适用性。

3 结 论

- a. 转弯角度增大时,弯道长度相应增加,弯顶壅水高度显著上升,主流向凸岸偏移导致冲刷风险加剧;弯曲半径增大则促使水流趋于平缓,凹凸岸水位差显著减小,通航条件得到明显改善;而航道宽度减小会加剧流速及壅水程度,尤其在枯水期,窄航道的通航条件恶化更为显著。
- b. 下行船受顺流推力与弯道离心力叠加影响,横移速度波动剧烈且其与舵角、漂角的相关性分析呈强负相关,在行进中需通过高频大幅舵角调整维持轨迹;上行船以自身动力主导,横移速度波动平缓,舵角调整幅度小,各船舶运动参数相关性较弱,操纵稳定性更优。
- c. 弯曲航道安全通航的关键在于优先选择大弯曲半径、宽航道的布置方案,可显著降低水流扰动对船舶的影响;下行船过弯时需重点关注弯道上游段的航向控制,上行船需保持足够动力以抵抗横向水流干扰。

参考文献:

[1] 吾斯曼·若孜. 南溪县综合交通规划研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2010.

[2] 甘浪雄,吴昌胜,邓巍,等. 内河弯曲河道船舶过弯自适应航迹控制仿真[J]. 系统仿真学报,2021,33(2):461-471. (Gan Langxiong, Wu Changsheng, Deng Wei, et al. Simulation of adaptive track control of ship bending in inland river curved channel [J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(2): 461-471. (in Chinese))

[3] 赵维阳,李靛亮,茆长胜,等. 弯曲航道通航宽度和水流条件确定方法探讨[J]. 长江科学院院报,2013,30(9):37-42. (Zhao Weiyang, Li Liangliang, Mao Changsheng, et al. Preliminary study on the calculation of navigation width and the determination of flow condition of curved waterway[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(9): 37-42. (in Chinese))

[4] 夏婧. 基于数据驱动的内河船舶动态航速优化[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2024.

[5] Ai Wanzheng, Gan Xuezheng. Analysis on navigation reliability of curved channel[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 275-277: 2816-2820.

[6] 桓兆平. 关于船员培训考试发证建设的思考[J]. 中国水运, 2018(12): 23-24. (Huan Zhaoping. Reflections on the construction of the crew training examination and licensing system[J]. China Water Transport, 2018(12): 23-24. (in Chinese))

[7] 王群朋,谢松平,田圆圆,等. 大型船舶弯曲航道事故致因分析与对策研究[J]. 中国水运, 2024, 24(1): 10-12. (Wang Qunpeng, Xie Songping, Tian Yuanyuan, et al. Analysis of the causes of large ship bending channel accidents and countermeasures research[J]. China Water Transport, 2024, 24(1): 10-12. (in Chinese))

[8] 王伟,刘弘昱,胡海宇,等. 内河航道网络优化研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 74-80. (Wang Wei, Liu Hongyu, Hu Haiyu, et al. Study on optimization of inland waterway network[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(3): 74-80. (in Chinese))

[9] Chai Tian, Zhu Huaiwei, Peng Liyang, et al. Constructing and analyzing the causation chain network for ship collision accidents [J]. International Journal of Modern Physics C, 2022, 33(9): 2250118.

[10] 陈相宇,艾万政,冯娜. 内河弯曲航道船舶碰撞事故原因及对策[J]. 水运管理, 2019, 41(12): 18-20. (Chen Xiangyu, Ai Wanzheng, Feng Na. Ship collision accident reasons and countermeasures of channel bends in inland water [J]. Shipping Management, 2019, 41(12): 18-20. (in Chinese))

[11] Thomson J. On the origin of windings of rivers in alluvial plains, with remarks on the flow of water round bends in pipes[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1877, 25(171/172/173/174/175/176/177/178): 5-8.

- [12] Kalkwijk J P, Booij R. Adaptation of secondary flow in nearly-horizontal flow[J]. Journal of Hydraulic Research, 1986, 24(1): 19-37.
- [13] 徐艳军. 弯曲航道安全通航保障技术研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2017.
- [14] 孙东坡, 朱岐武, 张耀先, 等. 弯道环流流速与泥沙横向输移研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(1): 61-66. (Sun Dongpo, Zhu Qiwu, Zhang Yaoxian, et al. Study of circulating velocity profile and lateral sediment transport in curved channels[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(1): 61-66. (in Chinese))
- [15] 陈相宇. 内河弯道水流特性及安全通航对策研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2020.
- [16] 杨燕华, 白玉川. 连续弯道水流运动的三维数值模拟[J]. 泥沙研究, 2011(6): 46-49. (Yang Yanhua, Bai Yuchuan. Three-dimensional numerical simulation of flow in successive bends[J]. Journal of Sediment Research, 2011(6): 46-49. (in Chinese))
- [17] 陈翠霞, 张小峰, 冯向珍, 等. 弯曲型及顺直型河道水流三维数值模拟[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(6): 84-90. (Chen Cuixia, Zhang Xiaofeng, Feng Xiangzhen, et al. Three-dimensional flow numerical simulation in straight and meandering channels[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2018, 39(6): 84-90. (in Chinese))
- [18] Yan Xiaohui, Rennie C D, Mohammadian A. A three-dimensional numerical study of flow characteristics in strongly curved channel bends with different side slopes[J]. Environmental Fluid Mechanics, 2020, 20(6): 1491-1510.
- [19] Landsburg A C, Barr R A, Daggett L, et al. Critical needs for ship maneuverability: lessons from the houston ship channel full-scale maneuvering trials[J]. Marine Technology and SNAME News, 2005, 42(1): 11-20.
- [20] 胡旭跃, 王巧洋, 黄勇, 等. 内河连续弯曲航道航行漂角分析[J]. 湖南交通科技, 2010, 36(2): 179-180. (Hu Xuyue, Wang Qiaoyang, Huang Yong, et al. The analyze of the drift angle of the barge in inland waterway[J]. Hunan Communication Science and Technology, 2010, 36(2): 179-180. (in Chinese))
- [21] 王川隘, 童思陈, 蒋聘凤, 等. 风流效应下船舶操纵运动数值模拟[J]. 大连海事大学学报, 2020, 46(3): 50-59. (Wang Chuanai, Tong Sichen, Jiang Pinfeng, et al. Numerical simulation of ship maneuvering motion under wind and current effects[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2020, 46(3): 50-59. (in Chinese))
- [22] 田红伟, 官志鑫, 易振宇, 等. 湘江大花滩航道整治方案优化及效果数值研究[J]. 水运工程, 2021(11): 127-133. (Tian Hongwei, Guan Zhixin, Yi Zhenyu, et al. Numerical study of waterway regulation optimization and effect of Dahuatan shoal in the Xiangjiang River[J]. Port & Waterway Engineering, 2021(11): 127-133. (in Chinese))
- [23] 姜帆, 李云波, 龚家烨. 六自由度三体船操纵运动自航模拟[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021, 42(8): 1117-1124. (Jiang Fan, Li Yunbo, Gong Jiaye. Self-propulsion simulation of maneuvering motions of a trimaran with six degrees of freedom[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2021, 42(8): 1117-1124. (in Chinese))
- [24] 任杰, 董增川, 徐伟, 等. 基于 MIKE21 FM 模型的河道防浪林行洪影响分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(5): 420-424. (Ren Jie, Dong Zengchuan, Xu Wei, et al. Study on influence of river wavebreak forest on flood discharge ability based on MIKE21 FM Model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(5): 420-424. (in Chinese))
- [25] 施露, 董增川, 付晓花, 等. Mike Flood 在中小河流洪涝风险分析中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2017, 45(4): 350-357. (Shi Lu, Dong Zengchuan, Fu Xiaohua, et al. Application of Mike Flood to analysis of flood and waterlogging risks of medium and small rivers[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(4): 350-357. (in Chinese))
- [26] 周林飞, 周乃恒, 张静. 石佛寺水库历史洪水过程数值模拟与分析[J]. 水电能源科学, 2016, 34(9): 56-60. (Zhou Linfei, Zhou Naiheng, Zhang Jing. Analysis and numerical simulation of historic flood process of shifoshi reservoir[J]. Water Resources and Power, 2016, 34(9): 56-60. (in Chinese))
- [27] 刘宏伟, 储少志, 蔡钊, 等. 极端暴雨洪水条件下厂区不同排水方案的防洪能力模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(3): 30-39. (Liu Hongwei, Chu Shaozhi, Cai Zhao, et al. Simulation study on flood control capacity of different drainage schemes in factory area under extreme rainstorm flood conditions[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(3): 30-39. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-06-20 编辑: 刘晓艳)