



非恒定流条件下明渠汇流口水动力特性 三维数值模拟研究*

李媛媛¹, 马倩^{1,2}, 李忠勇^{2,3}, 周彭雨¹

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400016; 2. 重庆交通大学, 西南水利水运科学研究院, 重庆 400016;
3. 德州市水利勘察设计院, 山东 德州 253000)

摘要: 河流交汇口水流具有复杂的三维特性, 受上游电站日调节的影响, 交汇口水流条件较一般河道更为复杂, 由此对河口船舶通航产生影响。针对电站日调节影响下河流交汇口通航水流条件问题, 采用数值模拟分析方法系统研究明渠交汇口在非恒定流条件下水动力特性的变化特征。研究基于通航水力指标, 探究非恒定流周期、流量变幅、干支流交汇角以及支流流量对交汇口区域纵向水面线、水位变幅、水面比降、流速大小以及流场分布的影响。研究发现: 交汇口上下游水位差会随非恒定流周期增大而减小, 随支流流量的增大而增大; 水位变幅随交汇角度增大而减小, 随流量变幅的增大而增大, 交汇口比降随流量变幅、交汇角度、支流流量的增大而增大, 同时月牙形高速水流区域面积在涨水阶段和退水阶段受各种影响因素的影响不同。研究揭示了非恒定流条件下河流交汇口的水动力学过程, 可为干支流交汇区非恒定流传播规律及其对通航水流条件影响的研究提供科学依据。

关键词: 非恒定流; 交汇口; 通航水流条件; 日调节; 数值模拟

中图分类号: U611; TV133.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)08-0127-11

Three-dimensional numerical simulation study of hydrodynamic characteristics at open channel confluences under unsteady flow conditions

LI Yuanyuan¹, MA Qian^{1,2}, LI Zhongyong^{2,3}, ZHOU Pengyu¹

(1. The College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China;

2. The Southwest Research Institute for Hydraulic and Water Transport Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China;

3. Dezhou Water Conservancy Survey and Design Institute, Dezhou 253000, China)

Abstract: The flow dynamics at river confluences exhibit complex three-dimensional characteristics, which are further influenced by the daily flow regulation of upstream hydropower stations. These factors result in flow conditions at confluences that are more intricate than those in typical river reaches, with notable impacts on navigation at river mouths. This study addresses navigation flow conditions at river confluences affected by daily hydropower regulation, utilizing numerical simulations to systematically analyze the hydrodynamic variations at open-channel confluences under unsteady flow conditions. Using navigation-related hydraulic indices, the study examines the effects of unsteady flow periods, flow fluctuation amplitudes, confluence angles between main and tributary streams, and tributary discharge on key hydrodynamic parameters, including longitudinal water surface profiles, water level fluctuations, water surface gradients, flow velocities, and flow field distributions at the confluence.

收稿日期: 2024-11-15

***基金项目:** 国家自然科学基金青年科学基金项目(52109150); 重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJQN202000716);
内河航道整治技术交通行业重点实验室开放基金项目(KLIWRE2023B01)

作者简介: 李媛媛(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水力学及河流动力学。

通信作者: 马倩(1988—), 女, 博士, 高级工程师, 从事水力学及河流动力学研究。E-mail: maggie@cqjtu.edu.cn

Findings indicate that the water level difference between upstream and downstream decreases as unsteady flow periods increase but rises with higher tributary discharge. Water level fluctuations decrease with increasing confluence angles and increase with larger flow fluctuation amplitudes, while the water surface gradient at the confluence increases with greater flow fluctuation amplitudes, larger confluence angles, and higher tributary discharge. Furthermore, the area of crescent-shaped high-velocity flow zones responds differently to various influencing factors during rising and falling water stages. This study clarifies the hydrodynamic processes at river confluences affected by unsteady flow conditions and daily hydropower regulation, providing a scientific foundation for understanding unsteady flow propagation in confluence zones and its implications for navigation.

Keywords: unsteady flow; river confluence; navigational hydraulic conditions; daily regulation; numerical simulation

在天然流域和水利工程中,水流交汇形成的河网系统普遍存在。支流在涌入干流后互相顶托,水位壅高,流速减小,河道水面纵向比降和横向比降均受到影响,局部交汇区域会呈现许多独特的水动力特性,从而对防洪、航运、河槽冲刷、水沙输运以及污染物扩散等产生显著的影响。随着越来越多渠化工程的修建和运行,上游电站的日调节过程导致下泄流量过程呈现陡增陡降的特性,引起下游河道水流出现非恒定流的特征,航道水流的连续性被破坏,给江河中航行的船舶带来诸多问题^[1-2]。干支流交汇区、分离区和二次流等的水流结构复杂,在上游非恒定来流的影响下,河流汇口呈现更为复杂的水动力特性,通航水流条件复杂。因此,掌握电站日调节影响下河流交汇口非恒定流的传播规律对于保障通航安全具有重要意义。

关于河流交汇口水流条件,学者们已开展了大量的研究。吴菲等^[3]根据不同交汇角混合多种汇流比工况计算结果,分析了交汇角和汇流比的变化对支流入汇区流速分布特性和环流结构的影响,得出不同交汇角支流入汇区发生回流汇流比的临界值。曹凌瑞^[4]探究在不同交汇角汇流比和干支流河道宽度比情况下船舶下行的舵角漂角以及偏移距离的变化规律。贾召文等^[5]研究了两个大型河流的非恒定流交汇、叠加及在长河段上的传播特性的问题,发现非恒定流传播过程中,受涨落影响的水位流量关系,涨水时附加比降增大,

流量随之增大,落水时附加比降减小,流量随之减小。李俊鹏^[6]针对典型工况对非恒定流特性进行分析和讨论,发现电站下泄流量越大,沿程各站间水位差值越大,受回水区影响越小。然而,现有关于非恒定流传播特征的研究多针对单一河槽或枢纽近坝区河段,鲜有关于干支流交汇区非恒定流传播规律的研究。而河流交汇口水流具有复杂的三维特性,受上游电站日调节的影响,交汇口水流条件较一般河道更为复杂。

本研究针对电站日调节影响下河流交汇口通航水流条件问题,基于通航水力指标,通过构建非对称性交汇口水力学计算模型,系统分析交汇水域中水位变动、流速分布及比降变化的动态特征,分析交汇区域的几何形态参数以及上游来流的水文边界条件对汇口水动力特征的影响,旨在为干支流交汇区非恒定流传播规律及其对通航水流条件影响的研究提供科学依据。

1 数学模型的构建与验证

本文采用 RNG (Re-normalization group, 重整化群) $k-\varepsilon$ 模型构建明渠交汇口三维水动力数值计算模型,利用非对称性明渠交汇口水槽实验数据对模型进行参数率定和验证。

1.1 控制方程体系

1.1.1 控制方程

质量守恒方程(连续性方程):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (i=1,2,3) \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho u_i' u_j' \right) + S_i \quad (2)$$

式中: ρ 为流体密度; P 为修正压力; u_i 为流体时均速度在 x 、 y 、 z 方向上的分量; $\rho u_i' u_j'$ 为雷诺应力; S_i 为广义源项; μ 为流体分子黏性系数。

1.1.2 湍流模型及湍流数值模拟方法

紊动能和紊动能耗散率方程如下:

$$\frac{\partial k_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial k_T}{\partial x} + v A_y \frac{\partial k_T}{\partial y} + w A_z \frac{\partial k_T}{\partial z} \right) = P_T + G_T + f_{k_T} - \varepsilon_T \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon_T}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(u A_x \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial x} + v A_y \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial y} + w A_z \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial z} \right) =$$

$$\frac{S_1 \varepsilon_T}{k_T} (P_T + S_3 G_T) + f_{\varepsilon} + S_2 \frac{\varepsilon_T^2}{k_T} \quad (4)$$

式中: k_T 为紊动能; V_F 为流体体积分; A_x 、 A_y 、 A_z 代表流体分数在 x 、 y 、 z 3 个方向上的分量; u 、 v 、 w 为流度在 x 、 y 、 z 3 个方向上的分量; ε_T 为湍动能耗散项; 无量纲参数 $S_1 = 1.42$ 、 $S_2 = 1.68$ 、 $S_3 = 0.2$; f_{ε} 为湍流扩散项; f_{k_T} 为紊流扩散项; P_T 为紊动能产生项; G_T 为浮力产生项。

1.2 模型建立与网格划分

本研究构建的水槽模型中, 主槽长 24 m、宽 1.0 m、高 0.4 m; 支槽长 6 m、宽 0.5 m、高 0.4 m, 并设定不同的主槽与支槽交汇角 α , 见图 1。

在数值模拟过程中, 为确保模拟精度与效率, 本试验严格遵循 $x:y:z=1:1:1$ 的空间比例原则进行网格划分, 选取 3 种不同的网格尺寸进行试算, 即 0.010、0.025、0.050 m。以 45° 交汇角计算模型为例, 基于 3 种网格尺寸下的计算模拟结果统计见表 1。综合权衡进出口边界条件下的流量损失控制需求与计算效率, 最终选定 0.025 m 作为最

优网格尺寸进行后续计算。该网格配置下, 总单元数量高达 106.240 万个, 确保了模拟结果的精确性与可靠性。

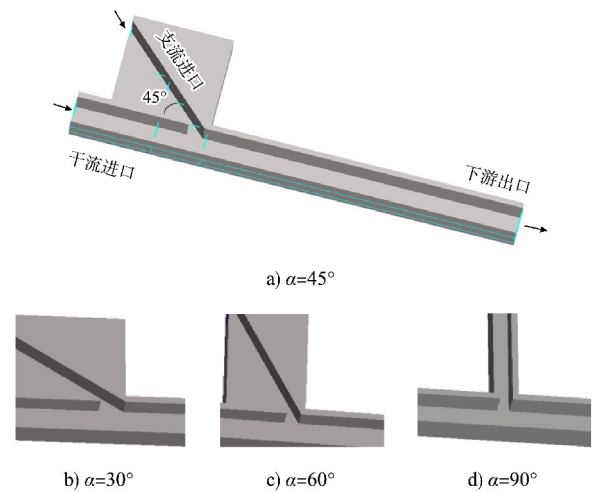


图 1 不同交汇角计算模型

Fig. 1 Calculation models for different intersection angles

表 1 网格计算数据汇总

Tab. 1 Summary of grid calculation data

网格尺寸/m	网格数目/万个	流量损耗/($L \cdot s^{-1}$)	计算时间/h	相对误差/%
0.050	16.782	1.668	1.5	5.56
0.025	106.240	0.375	12.0	1.25
0.010	1 269.000	0.075	56.0	0.25

鉴于非恒定流模拟中流量随时间周期性波动, 且周期设定为 100 s, 其动态特性要求采用较低的采样频率以捕捉完整变化, 这势必导致数据量激增, 直接全面分析显得不切实际。为高效探究非恒定流的演变规律, 研究中划分涨水与退水 2 个阶段, 并引入无量纲时间变量 $t_i = T/10 \times i$, 即将 1/10 周期作为一次采样间隔, 在精简数据量的同时保留关键信息, 见表 2。采样起始点设定在模拟开始后的 150 s。

表 2 采样时间和非恒定流时间对应情况

Tab. 2 Correspondence between sampling time and unsteady flow time

T/s	t_0	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9	t
50	150	155	160	165	170	175	180	185	190	195	200
100	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250
150	150	165	180	195	210	225	240	255	270	285	300
200	150	170	190	210	230	250	270	290	310	330	350

1.3 模型验证

为了确保数值模拟结果的准确性，研究采用与 45°交汇角模型等尺寸的水槽试验结果进行验证，水槽试验模型见图 2。工况为主槽非恒定流流量 15~22.4 L/s，支槽恒定流量 22.5 L/s，初始水位 100 mm，水槽糙率设置为 0.009，模型设置出口压力边界。验证工况见表 3。干流非恒定流随时间变化过程见图 3。



图 2 干支流水槽试验模型实景
Fig. 2 Photograph of the main and branch flow channel test model

表 3 模型验证工况
Tab. 3 Model validation conditions

支流流量 $Q_z/(L \cdot s^{-1})$	干流流量 $Q_g/(L \cdot s^{-1})$	周期 T/s	交汇角 $\alpha/(^{\circ})$	水深 h/mm
22.5	15~22.5	100	45	100

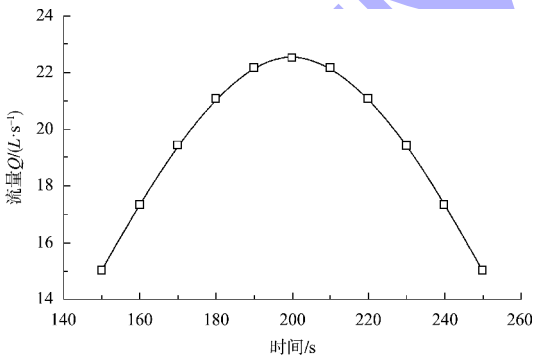
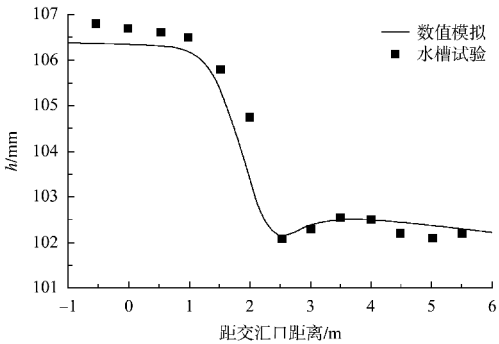
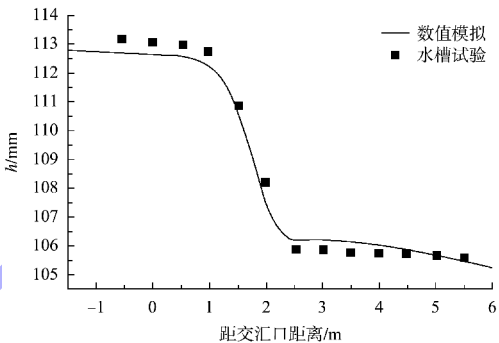


图 3 干流非恒定流流量历时曲线
Fig. 3 Temporal variation of flow rate in unsteady main stream flow

通过对比水槽试验数据与模型计算结果可知，两者在水位波动趋势及交汇区域流速分布特征上呈现出高度的一致性，见图 4、5，验证了所建数值模型的可靠性与精确性。

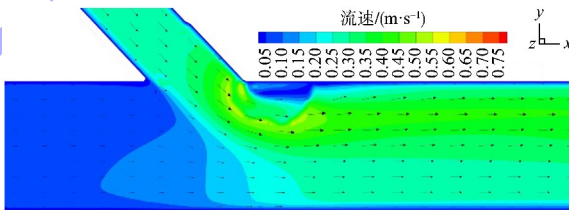


a) t_0 时刻

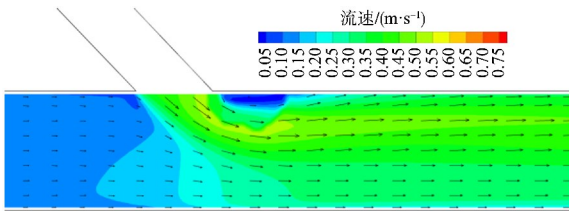


b) t_s 时刻

图 4 交汇口处水位对比
Fig. 4 Comparison of water levels at the confluence



a) 数值模拟流速分布



b) 水槽试验流速分布

图 5 非恒定流 t_0 时刻交汇口区域表面流速分布
Fig. 5 Surface flow velocity distribution at the confluence area at time t_0 of unsteady flow

2 工况设计

根据研究目标，工况设计从交汇角度、洪水周期、洪水流量变幅以及支流流量几个方面进行考虑，参数设置见表 5。

1) 交汇角度 α 。在自然河流环境中,交汇角度往往小于 90° 。为模拟实际条件,水槽试验设定了4种交汇角度,分别为 30° 、 45° 、 60° 及 90° ,以全面探讨其对通航水流条件的影响。

2) 非恒定流周期 T 。非恒定流周期即非恒定来流持续时间,它标志着来流从初始基流逐步攀升至峰值,随后又逐渐衰退回归至基流的全过程。特别是在水电站下游的河道中,受日调节作用显著,水流呈现出明显的长波振荡特性。为深入研究调峰周期对河流交汇区域水流特性的具体作用,本试验设置4种非恒定流周期,分别是50、100、150及200 s,以便进行系统性对比分析。

3) 非恒定流变幅 F 。非恒定流变幅是指最大流量与平均流量的比值。为保证研究成果对于工程实际的普适性,参考我国国内某水电站的典型日调节过程,计算得到最大与最小出库流量,见表4,进而得出一致的洪水流量增幅值为1.47。基于上述分析,本试验将洪水流量变幅统一设定为1.5,以保证试验条件的一致性与代表性。

表4 典型日变幅计算

Tab. 4 Calculation of typical daily amplitude variation

典型日	最大出库流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	最小出库流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	洪水 变幅
1	4 920.72	3 346.35	1.47
2	4 992.77	3 394.60	1.47
3	4 945.94	3 361.88	1.47

试验探讨了非恒定流变幅、支流流量大小、干支流交汇角度以及非恒定流周期4个关键因素对交汇区域水流动力特性的影响。为模拟非恒定流的动态过程,采用正弦波型曲线拟合公式,非恒定流流量的时程变化曲线见图6,其公式表述如下:

$$Q(t) = Q_0 + Q_b \sin\left(\frac{\pi t}{T}\right) \quad 0 < t < T \quad (5)$$

式中: Q_0 为基准流量; Q_b 为变幅流量; t 为某一瞬时时刻。

4) 干支流流量比。在以往恒定流交汇口试验

中,干支流流量比是影响交汇口水力学特性的重要影响因素,因此,本研究中主槽为非恒定流入过程,支槽为恒定入流。

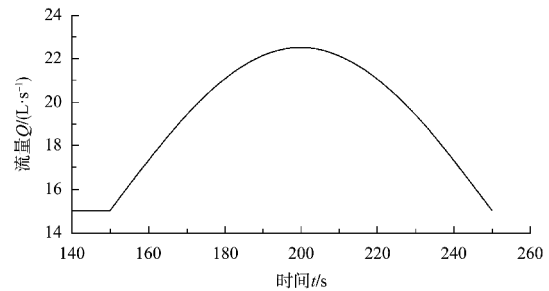


图6 干流非恒定流流量历时变化曲线

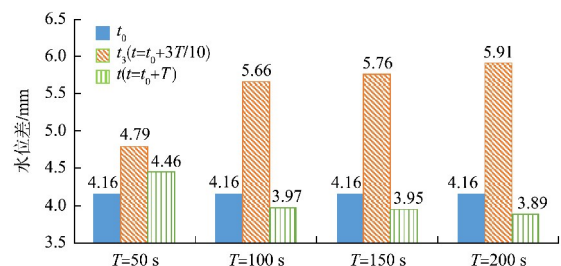
Fig. 6 Flow-rate duration curve of unsteady flow of the main stream

3 非恒定流下交汇口水动力特性分析

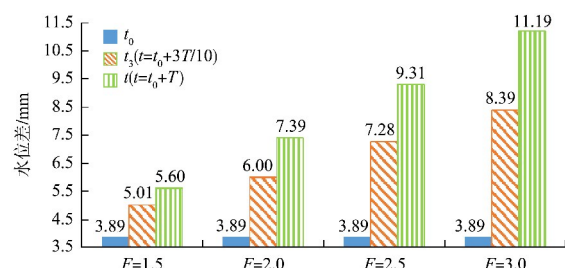
为分析电站日调节影响下,交汇口通航水流条件的变化规律,本研究主要基于通航水力指标,针对交汇口上下游水位差、水位波动范围及河道比降的变化规律进行分析。

3.1 交汇区域上下游水位差影响分析

根据模拟结果,对各工况下交汇口上下游水位差进行统计分析。由于水位极值位置的动态变化性,选定水槽中心线交汇口起点沿下游方向延伸2 m的区间,作为评估交汇口区域最大水位差的基准范围,结果见图7。



a) 非恒定流周期



b) 流量变幅

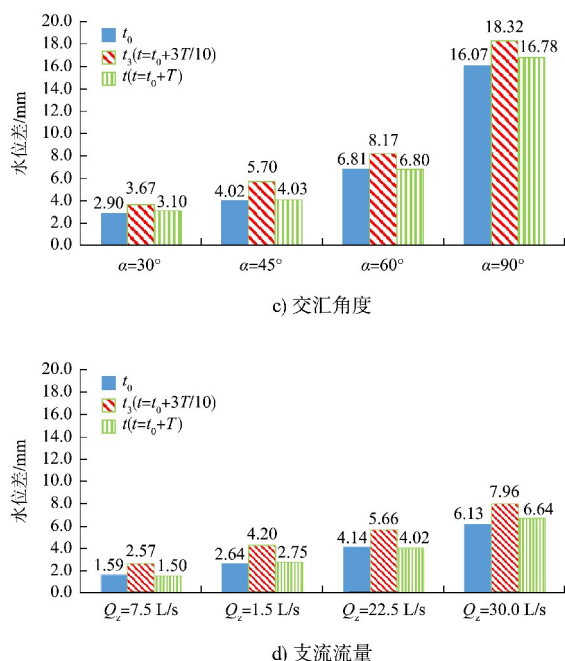


图 7 不同因素影响下交汇口上下游最大水位差

Fig. 7 Maximum water level difference at the upstream and downstream of the confluence under influence of different factors

各单因素对水槽上下游水位差最大值的影响为：1) 交汇口的初始水位差受到来流顶托作用的显著影响，其中交汇角度的调整与支流流量的变化是两大关键影响因子。2) 在涨水过程中，交汇口主槽中心线位置的上下游水位差普遍呈现出随各影响因素强度增强而递增的趋势。具体而言，流量变幅对水位差变动的贡献最为突出，交汇角度紧随其后，而非恒定流周期的影响则相对较为微弱。3) 进入退水阶段后，基于涨水期间已建立的水位差基础，该差值进一步累积并扩大，此时水位差增幅与流量变幅之间的正向关联性变得更为突出，即流量变幅的增大直接导致水位差显著增强。不同非恒定流周期的设置导致交汇口水位差总体上相较于涨水阶段有所缩减，且随着周期延长而逐渐递减。同时，交汇角度与支流流量对水位差的影响模式相似，均表现为退水阶段水位差整体低于涨水阶段，并随角度增大与流量增加而递增。

3.2 水位变幅影响分析

基于数值模拟的结果，对各工况下典型测点的水位变幅进行全面统计与分析。测点布设为：P1 点设定于交汇口上游主槽中心线处；P2 点相应

布置于支槽中心线上游位置，以捕捉不同路径的水流变化；P3 点布置于主槽与支槽交汇的几何中心交点，对关键交汇点进行直接观测；而 P4 点则下移至交汇口下游区域，以分析水流交汇后的传播效应。测点布局方案见图 8。

表 5 数值模拟计算工况

Tab. 5 Calculation conditions of numerical simulation

工况	变量	h/mm	T/s	$\alpha/(\text{°})$	$Q_e/(\text{L}\cdot\text{s}^{-1})$	$Q_g/(\text{L}\cdot\text{s}^{-1})$
A1	周期	100	50	45	22.5	15.0~22.5
A2	周期	100	100	45	22.5	15.0~22.5
A3	周期	100	150	45	22.5	15.0~22.5
A4	周期	100	200	45	22.5	15.0~22.5
B1	变幅	100	100	45	22.5	15.0~22.5
B2	变幅	100	100	45	22.5	15.0~30.0
B3	变幅	100	100	45	22.5	15.0~37.5
B4	变幅	100	100	45	22.5	15.0~45.0
C1	交汇角度	100	100	30	22.5	15.0~22.5
C2	交汇角度	100	100	45	22.5	15.0~22.5
C3	交汇角度	100	100	60	22.5	15.0~22.5
C4	交汇角度	100	100	90	22.5	15.0~22.5
D1	支流流量	100	100	45	7.5	15.0~22.5
D2	支流流量	100	100	45	15.0	15.0~22.5
D3	支流流量	100	100	45	22.5	15.0~22.5
D4	支流流量	100	100	45	30.0	15.0~22.5

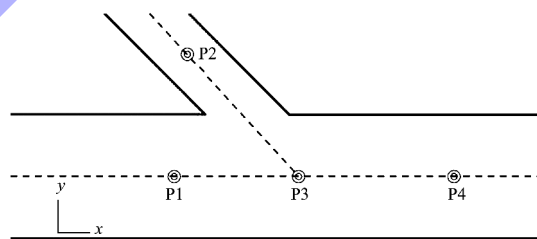
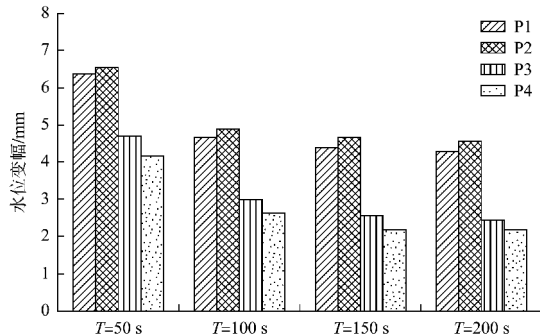


图 8 测点位置

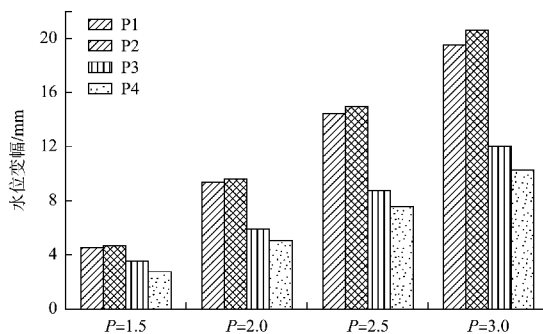
Fig. 8 Location of measurement points

上游测点的水位波动强度明显超出交汇口中心地带，相比之下，下游测点的水位变动幅度则呈现出最低水平，见图 9。对于各类影响因素的响应，不同测点间的水位变化幅度展现出了显著的差异性特征。交汇口区域的水位变幅与非恒定流中的流量波动幅度及支流流量间存在清晰的正相关关系，即随着流量波动幅度与支流流量的增加，交汇口区域的水位波动幅度也相应加剧。与流量波动的影响形成对比，非恒定流周期的延长则倾向于减小水位波动幅度，这一效应在周期较短的情形下尤为显著；然而，当周期长度超越 100 s

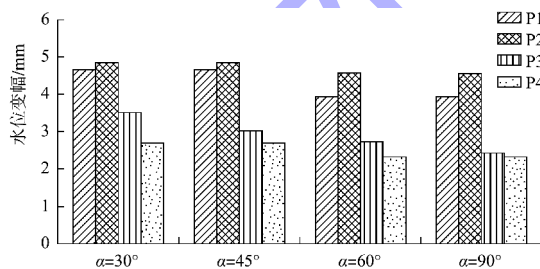
时,水位波动幅度的变化趋于稳定,不再显著受周期延长的影响。对于交汇角度,其对水位波动幅度的影响虽相对较小,但总体上仍呈现一定规律,即随着交汇角度的增大,水位波动趋于缓和,特别是在主槽与支槽中心线交汇的关键区域(交汇口中心),这一减缓趋势尤为突出。



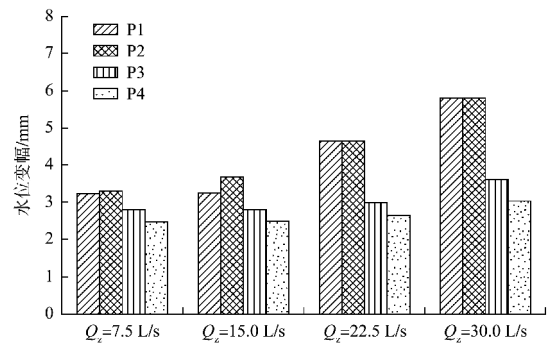
a) 波动周期



b) 流量变幅



c) 交汇角度



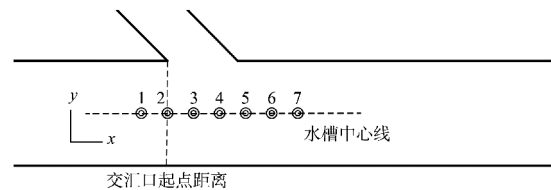
d) 支流流量

图9 不同因素影响下典型测点水位变幅变化规律

Fig.9 Variation of water level amplitude at typical measurement points under influence of different factors

3.3 比降变幅影响分析

基于交汇口区域水位数值分析结果,本文系统归纳了水槽轴线的纵坡比降,并提取了各工况条件下的最大水面纵坡比降值,量化数据见表6。进一步分析揭示,该区域内水面的纵坡比降与流量波动幅度、交汇角大小以及支流注入流量之间显示出强烈的线性相关性,此相关性表现为上述因素的提升直接导致水面纵坡比降的相应增加。然而,水面比降对非恒定流周期的变化不敏感。比降计算的测点位置见图10。



注:测点间距离均为0.25 m;比降研究长度为-0.25~1.00 m。

图10 比降计算测点布设

Fig.10 Layout of measurement points for slope calculation

表6 各影响因素下交汇口水槽中心线最大比降

Tab.6 Maximum slope along the centerline of confluence channel under various influencing factors

非恒定流 周期/s	非恒定流周期最大 比降/‰	流量 变幅	流量变幅最大 比降/‰	交汇角/ (°)	交汇角最大 比降/‰	支流流量/ (L·s ⁻¹)	支流流量最大 比降/‰
50	20.816	1.5	20.765	30	15.137	7.5	7.111
100	20.765	2.0	27.876	45	20.765	15.0	13.318
150	20.816	2.5	37.109	60	30.450	22.5	20.765
200	20.775	3.0	44.029	90	46.761	30.0	32.234

3.4 流场分布特征影响分析

某一工况下的三维流速见图 11, 表明在靠近主流左侧交汇区域出现回流现象。 $F=2.5$ 及 $T=100$ s 时, t_0 时刻下的近底流速分布见图 12、13, 在选取的 2 种工况下, 其流速整体小于表面流速, 同时在交汇口区域呈现椭圆形的高流速区, 各工况下分布较为相似。通航水流条件相关参数主要关注表面流速分布, 故选取其中 2 种工况代表分析。特定条件 ($T=100$ s、 $F=2.5$ 、 $\alpha=30^\circ$ 、 $Q_z=30$ L/s) 不同时间点的表面流速分布状况见图 14~17。在 4 组工况下, 交汇口边缘均显著呈现出一种形似“月牙”的高速水流区域, 但其分布范围和形状存在一定差异。受非恒定流周期的影响, 分离区外围出现月牙形高速水流区域, 随着非恒定流开始, 在涨水阶段, 月牙形高速水流区域面积逐渐减小, 至 t_5 时刻最小, 而后在退水阶段月牙形高速水流区域面积逐渐增大。对于流量变幅的影响, 高速水流区域面积变化规律与前者一致, 但高速水流区域形状不再为初始时刻的月牙形, 而是呈现类月牙形状。受交汇角度影响, 不同时刻下分离区外围产生月牙形高速水流区域, 在 t_0 时刻呈现未闭合圆环状, 在 t_5 时刻呈现闭合圆状, 在 t 时刻又恢复为未闭合圆状。受支流流量影响, 分离区外围出现流速大于周围水域的环形。

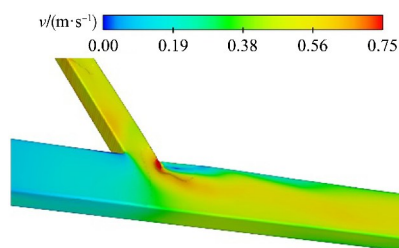


图 11 三维流速分布

Fig. 11 Three-dimensional flow velocity distribution

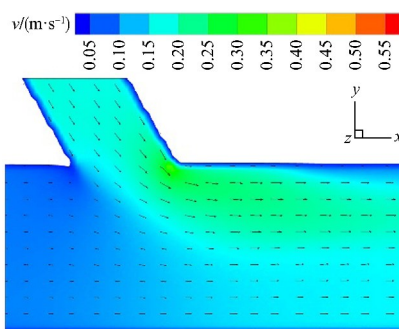


图 12 $F=2.5$ 近底流速分布

Fig. 12 Velocity distribution near the bottom when $F=2.5$

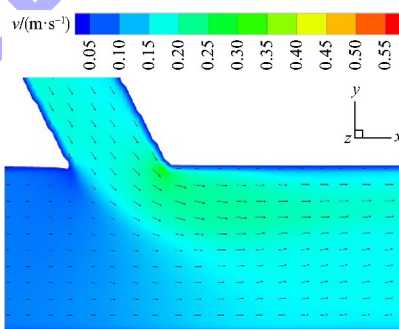


图 13 $T=100$ s 近底流速分布

Fig. 13 Velocity distribution near the bottom when $T=100$ s

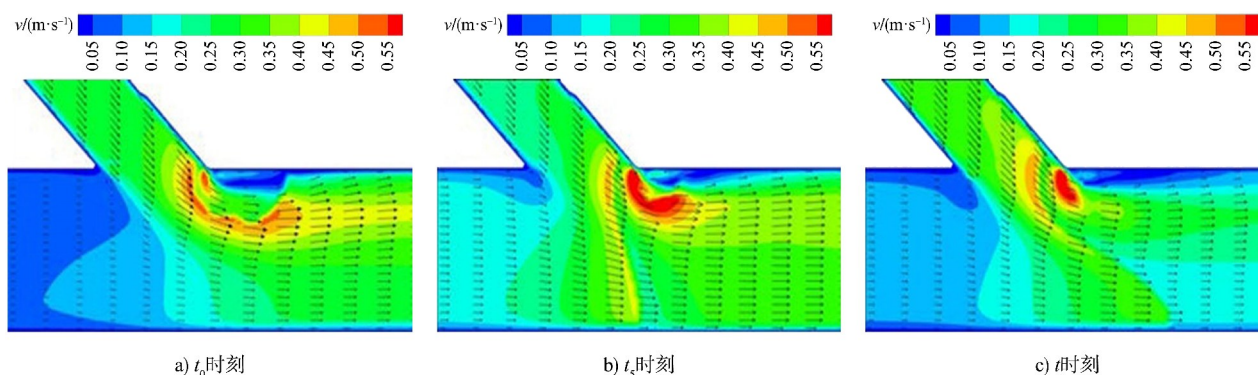
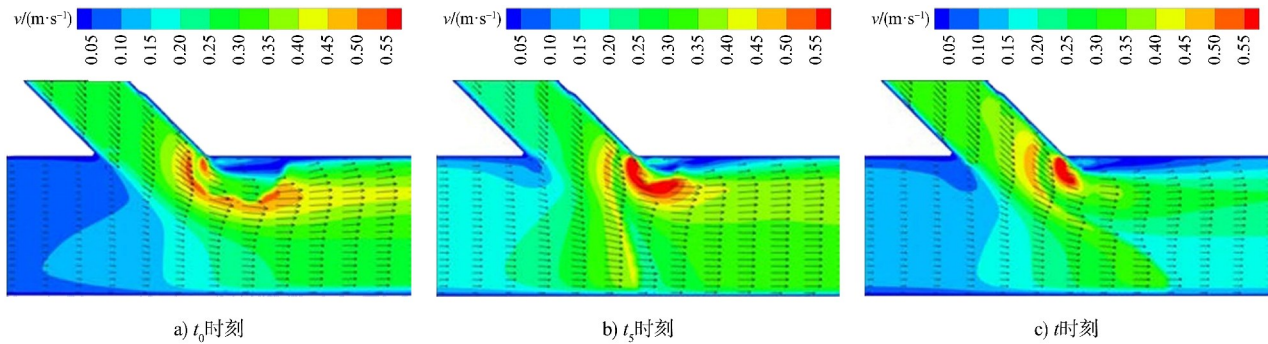
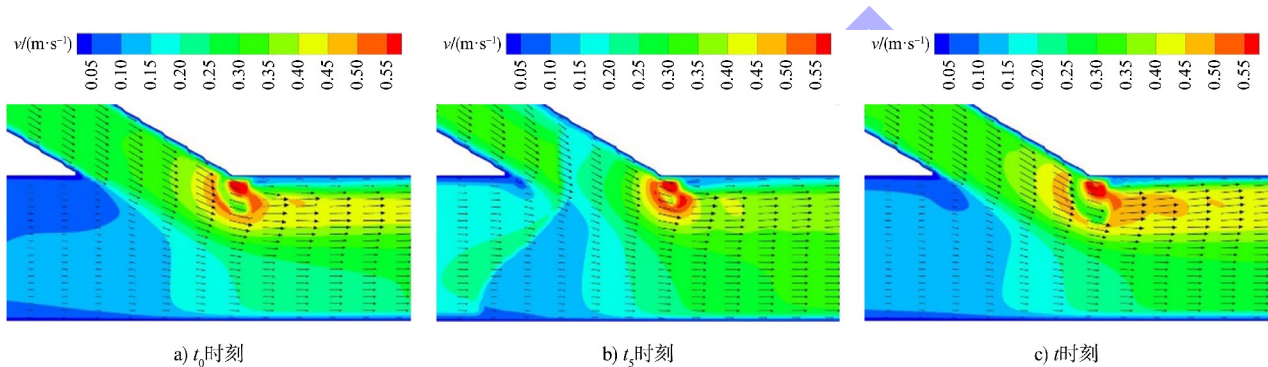
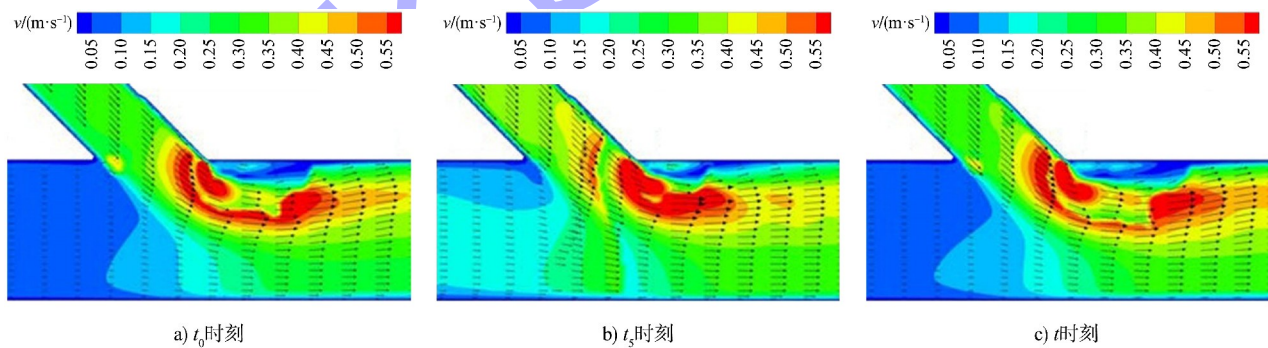


图 14 $T=100$ s 流速分布

Fig. 14 Flow velocity distribution when $T=100$ s

图 15 $F=2.5$ 流速分布Fig. 15 Flow velocity distribution when $F=2.5$ 图 16 $\alpha=30^\circ$ 流速分布Fig. 16 Flow velocity distribution when $\alpha=30^\circ$ 图 17 $Q_z=30 \text{ L/s}$ 流速分布Fig. 17 Flow velocity distribution when $Q_z=30 \text{ L/s}$

4 结论

1) 恒定的初始水位前提下, 在涨水阶段, 随着非恒定流周期逐步延长, 交汇口沿线的水位波动幅度呈现出显著的增强趋势; 相反, 在退水阶段, 则观察到水位波动逐渐趋于平缓, 呈下降趋势。交汇口上下游之间的水位差随着非恒定流周期的增长而有所缩减, 其对水位波动幅度的直接

影响相对有限。水位变幅与流量比呈近似线性关系, 且最大水位变幅出现在洪峰时段附近。随着非恒定流变幅的增加, 交汇口的比降也随之增大。

2) 在河流交汇口, 较小的交汇角度导致下游水位变化速率加快; 而较大的交汇角度则增大上下游水位差、河道比降及水位跌幅, 但会减小水位变幅; 同时, 支流流量的增加会进一步增大上

下游水位差、延迟最大水位出现时间,并减小交汇口水位变幅。

3) 交汇口水位波动的幅度受到主槽非恒定流流量及支流注入流量的双重影响,具体表现为这两者的增加会直接导致水位变幅的相应增大。然而,非恒定流周期的延长则会导致水位变幅的减小。交汇角度对水位变幅的影响相对较小,但总体来看,随着角度的增大,水位波动有所减弱。

4) 在多因素的综合影响下,分离区外围高速水流区域出现月牙形高速水流区域,在涨水阶段,高速水流区域面积逐渐减小,在 t_5 时刻最小,随后在退水阶段,高速水流区域面积开始逐渐增大,且不同影响因素下的分布区域及形状有所差异。

5) 本文中主槽为非恒定入流,支槽为恒定入流,且主、支槽尺寸固定,在后续的研究中将结合实际工程河段干、支流非恒定入流特征,进一步系统开展干、支流非恒定流周期差异、错峰等条件下交汇口通航水流条件变化规律的研究。

参考文献:

- [1] 郭英. 引汉济渭南干线明渠非恒定流的水力响应研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- GUO Y. Study on the hydraulic responses of unsteady flow in the open channel of Weinan trunk line[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.
- [2] 付俊, 张涛涛, 刘佳明, 等. 非恒定来流过程对复式河道水动力的影响试验研究[J]. 水电能源科学, 2023, 41(10): 41-45, 53.
- FU J, ZHANG T T, LIU J M, et al. Experimental study on influence of unsteady inflow process on hydrodynamics of compound open channel[J]. Water resources and power, 2023, 41(10): 41-45, 53.
- [3] 吴菲, 刘瑞芬, 白凤朋, 等. 交汇角和流量比对干支流交汇区水流结构影响模拟研究[J]. 中国农村水利水电, 2024(4): 15-23.
- WU F, LIU R F, BAI F P, et al. Study on the influence of intersection angles and confluence ratios on the flow structure in the intersection area of main and branch rivers[J]. China rural water and hydropower, 2024(4): 15-23.
- [4] 曹凌瑞. 支流入汇对干流航道通航影响研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2022.
- CAO L R. Study on the influence of branch inflow on navigation of main channel [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2022.
- [5] 贾召文, 刘勇, 郑晓刚, 等. 非恒定流在河流交汇区及长河段传播的二维数值模拟[J]. 江西建材, 2016(21): 141-144, 146.
- JIA Z W, LIU Y, ZHENG X G, et al. Two-dimensional numerical simulation of unsteady flow propagation in river intersection and long reach[J]. Jiangxi building materials, 2016(21): 141-144, 146.
- [6] 李俊鹏. 水电站下游非恒定流特性及其对航运影响[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2019.
- LI J P. Characteristics of unsteady flow downstream of hydropower station and its impact on shipping[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2019.
- [7] 王非. 非对称型汇流口数值模拟研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- WANG F. Numerical study of flow on asymmetric confluence zone [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.
- [8] 李忠勇. 电站日调节对河流汇口通航水流条件影响研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
- LI Z Y. Study on the influence of daily regulation of power stations on navigation conditions at river junctions [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023.
- [9] 曾诚, 尹雨然, 陈辰, 等. 明渠弯道交汇口水动力特性数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(2): 9-15, 38.
- ZENG C, YIN Y R, CHEN C, et al. Numerical simulation of hydrodynamics of open-channel confluences with bend flow [J]. Advances in science and technology of water resources, 2023, 43(2): 9-15, 38.
- [10] 马海涛, 王新, 张首元. 溪洛渡水电站坝下游河道非恒定流传播规律研究[J]. 水运工程, 2024(11): 146-152.
- MA H T, WANG X, ZHANG S Y. Propagation law of unsteady flow in downstream channel of Xiluodu hydropower station [J]. Port & waterway engineering, 2024(11): 146-152.
- [11] 张湛, 黄成林, 刘亚辉, 等. 向家坝水电站切机非恒定流对下游通航的影响[J]. 水运工程, 2024(9): 93-98, 104.

- ZHANG Z, HUANG C L, LIU Y H, et al. Influence of unsteady flow during unit cut-off at Xiangjiaba Hydropower Station on downstream navigation[J]. Port & waterway engineering, 2024(9): 93-98, 104.
- [12] 张帅帅,杨胜发.日调节非恒定流对筲箕背河段航道水流条件的影响[J].水运工程,2021(2): 109-114.
- ZHANG S S, YANG S F. Influence of unsteady flow on channel's flow conditions in Shaojibei reach[J]. Port & waterway engineering, 2021(2): 109-114.
- [13] LU G W, LIU J X, CAO Z X, et al. A computational study of 3D flow structure in two consecutive bends subject to the influence of tributary inflow in the middle Yangtze River [J]. Engineering applications of computational fluid mechanics, 2023, 17(1): 2183901.
- [14] SUN B, FENG L Q, LI Z W, et al. 3D numerical simulation of the separation zone at the channel-pipe junction[J]. Water science & technology, 2023, 88(6): 1358-1373.
- [15] JIN T, RAMOS P X, MIGNOT E, et al. On the delineation of the flow separation zone in open-channel confluences[J]. Advances in water resources, 2023, 180: 104525.
- [16] 薛博升,魏炳乾,王非,等.汇流比和入汇角对明渠交汇水流特性影响的对比研究[J].应用力学学报, 2019, 36(3): 658-665.
- XUE B S, WEI B Q, WANG F, et al. A comparative study of the influence of confluence ratio and tributary angle on flow state of an open channel [J]. Chinese journal of applied mechanics, 2019, 36(3): 658-665.
- [17] 何传凯.干支流洪水组合在航道通航条件影响评价中的应用[J].水电能源科学, 2020, 38(2): 84-86.
- HE C K. Application in waterway navigation evaluation based on flood combination of main and tributary rivers [J]. Water resources and power, 2020, 38(2): 84-86.
- [18] 许航维.明渠交汇口三维水流结构与物质输移数值模拟研究[D].天津:天津大学,2021.
- XU H W. Large eddy simulation of three-dimensional flow structure and material transport at the junction of open channels[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.
- [19] 王婷,王远见,马怀宝,等.水库支流异重流入汇区水沙演化特点试验研究[J].人民黄河, 2020, 42(5): 56-61.
- WANG T, WANG Y J, MA H B, et al. Experimental study on flow and sediment evolution characteristics in conjunction area after confluence of density current at reservoir tributary [J]. Yellow River, 2020, 42(5): 56-61.
- [20] 郭维东,周腾宇,李敬库,等.Y形交汇口冲淤特性的数值分析[J].中国农村水利水电, 2018(3): 22-28.
- GUO W D, ZHOU T Y, LI J K, et al. A numerical analysis of scouring and silting characteristics of Y-shaped junction [J]. China rural water and hydropower, 2018(3): 22-28.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第107页)

- [12] 长江三峡—葛洲坝水利枢纽两坝间航道汛期通航流量标准: JTS/T 180-5—2020[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.
- Navigable discharge standard of the waterway between the Three Gorges Dam and the Gezhouba Dam during flood season : JTS/T 180-5-2020 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2020.
- [13] 交通运输部天津水运工程科学研究院. 三峡—葛洲坝两坝间莲沱段航道整治工程物理模型试验研究报告[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究院, 2014.
- Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport. Physical model test research report of the waterway regulation project at Liantuo section between two dams of Three-Gorges and Gezhouba [R]. Tianjin: Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, 2014.
- [14] 长江航运科学研究所. 三峡—葛洲坝两坝间航道汛期通航流量实船适航试验研究报告[R]. 武汉: 长江航运科学研究所, 2013.
- Changjiang Shipping Science Research Institute. Research report on actual ship seaworthiness test of navigation flow during flood season between Three Gorges and Gezhouba Dams [R]. Wuhan: Changjiang Shipping Science Research Institute, 2013.

(本文编辑 王璁)