



# 基于多功能航标监测数据的流态复原应用研究 \*

单敏尔<sup>1</sup>, 李有为<sup>1,2</sup>, 刘鑫<sup>2</sup>, 雷雪婷<sup>1</sup>

(1. 长江航道规划设计研究院, 湖北 武汉 430040;  
2. 长江航道勘察设计院(武汉)有限公司, 湖北 武汉 430040)

**摘要:** 应用多功能航标的实测数据建立平面二维水流数学模型, 准确复原所在河道流态, 分析了模型的可适用性及可调整性, 结果表明: 1) 模型适用性较强, 在初始条件、边界条件匹配和不匹配时, 模型均可应用多功能航标实测数据实现对河道的流态复原, 其中水位误差在 10 cm 以下, 流速误差约 0.2 m/s, 流场复原与实际情况相符。2) 模型具有较好的参数可调整性, 不同情况下依据多功能航标数据通过局部参数微调即可完成模型的率定。

**关键词:** 多功能航标; 流态复原; 数学模型; 可适用性; 可调整性

中图分类号: U 692

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)06-0179-06

## Application of flow recovery based on monitoring data of multifunctional navigation mark

SHAN Min'er<sup>1</sup>, LI Youwei<sup>1,2</sup>, LIU Xin<sup>2</sup>, LEI Xueting<sup>1</sup>

(1. Changjiang Waterway Institute of Planning and Design, Wuhan 430040, China;  
2. Changjiang Waterway Survey and Design Institute (Wuhan) Co., Ltd., Wuhan 430040, China)

**Abstract:** The plane two-dimensional flow mathematical model is established by using the measured data of the multifunctional navigation mark, and the flow state of the river where it is located is accurately restored. The applicability and adjustability of the model are analyzed. The results showed that: 1) The model has strong applicability. When the initial conditions and boundary conditions match or do not match, the model can use the measured data of multifunctional navigation mark to restore the flow state of the river. The water level error is below 10 cm, and the flow velocity error is about 0.2 m/s. The flow field restoration is also consistent with the actual situation. 2) The model has good parameter adjustability. Under different circumstances, the model can be calibrated by fine-tuning local parameters according to the multifunctional navigation mark data.

**Keywords:** multifunctional navigation mark; flow restoration; mathematical model; applicability; adjustability

应用多功能航标是近年来内河航道航标技术发展的新趋势, 同时也是数字和智能航道建设的具体要求<sup>[1-2]</sup>。多功能航标是指利用水文监测系统对所关注航道水域进行持续、不间断、长期的监测, 不仅具有传统航标指示船舶航行的作用, 还可通过集成于航标的测量设备获取水深、水位和

流速等航道水文要素数据<sup>[3]</sup>, 其测量的数据具有实时性、全面性和长期性的特点<sup>[4]</sup>。多功能航标早期多应用于外海水文和气象数据的监测<sup>[5]</sup>, 在内河航道上鲜有采用, 近年来长江航道局在戴家洲和马当南等水道投放了数个多功能航标, 进行航道水文要素监测<sup>[6]</sup>, 积累了一定数量的多功能

收稿日期: 2022-08-28

\*基金项目: 长江航道规划设计研究院自主立项项目 (2021-L-2-002)

作者简介: 单敏尔 (1997—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事航道规划、设计及研究工作。

通讯作者: 雷雪婷 (1980—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事航道规划、设计及研究工作。E-mail: 1002734344@qq.com

航标实测数据<sup>[7]</sup>，数据应用的主要目的是在低频次地形测量情况下，为航道维护、航道预测预报和航道演变分析等提供直观快捷的信息及数据支撑，另外，由于多功能航标所测为连续点状数据，如何利用点状数据复原航标所在河段的整体流态，也是实现上述目标的基础和不可缺少的步骤。

目前对于多功能航标数据在流态复原方面的应用研究较为缺乏，本文建立了长江中游武汉—安庆段戴家洲水道平面二维水流数学模型，利用戴家洲水道 171056 号多功能航标测得的水位和流速等实时点状数据，作为糙率参数率定的依据，实现由模型与点状数据相结合复原所测时刻河道整体流态的目的，并对模型在初始条件和边界条件匹配和不匹配时，对其可适用性及参数可调整性进行了研究分析，结论可为多功能航标在流态复原方面的应用推广提供一定参考。

## 1 数学模型建立

### 1.1 控制方程

在 Boussinesq 假定和流体静压假定条件下，数值求解二维不可压缩雷诺时均 Navier-Stokes 方程<sup>[8-9]</sup>，包括水动力连续性方程和 X、Y 方向的动量方程。

水动力连续性方程：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial y} = hS \quad (1)$$

X 方向的动量方程：

$$\begin{aligned} \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}^2)}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}\bar{u})}{\partial y} &= f\bar{v}h - gh \frac{\partial\eta}{\partial x} - h \frac{\partial p_a}{\rho_0 \partial x} - \\ \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial\rho}{\partial x} - \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial x} \right) + \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + hu_s S$$

Y 方向的动量方程：

$$\begin{aligned} \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}^2)}{\partial y} &= f\bar{u}h - gh \frac{\partial\eta}{\partial y} - h \frac{\partial p_z}{\rho_0 \partial y} - \\ \frac{gh^2}{2\rho_0} \frac{\partial\rho}{\partial y} - \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial s_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial x} \right) + \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) + hv_s S$$

式中：t 为时间；x、y、z 为右手 Cartesian 坐标系； $\eta$  为水面相对于未扰动水面的高度，即水位；h 为静止水深；u、v、w 分别为流速在 x、y、z 方向上的分量； $p_a$  为当地大气压； $\rho$  为水密度， $\rho_0$  为参考水密度； $f=2\Omega\sin\varphi$  为 Coriolis 力参数，其中  $\Omega=0.729\times10^{-4}$  s<sup>-1</sup> 为地球自转角速率， $\varphi$  为地理纬度； $f\bar{v}$  和  $f\bar{u}$  为地球自转引起的加速度； $s_{xx}$ 、 $s_{xy}$ 、 $s_{yx}$ 、 $s_{yy}$  为辐射应力分量； $T_{xx}$ 、 $T_{xy}$ 、 $T_{yy}$  为水平黏滞应力项；S 为源汇项； $(u_s, v_s)$  为源汇项水流流速， $\tau$  为不同方位的剪应力。

### 1.2 模型范围和网格划分

戴家洲水道上起巴河口，下迄廻风矶，为微弯分汊河道，水道中戴家洲将河道分为左、右两汊，其中左汊习称圆水道，右汊习称直水道<sup>[10-11]</sup>。平面二维水流数学模型采用长江航道测量（武汉）中心实测的戴家洲水道地形数据（1:10 000 比尺，2000 国家大地坐标系，1985 国家高程基准）。计算范围上游选取鄂黄大桥断面（航道里程 944 km），下游选取鄂东大桥以下 700 m 处（航道里程 915 km），合计全长约 29 km。

模型采用 Delaunay 三角化法对计算区域进行网格划分，共布置 5 842 个网格节点和 11 187 个计算单元，网格间距最大为 200 m，最小为 50 m，并对多功能航标所在区域网格做局部加密处理。河道网格布置见图 1，多功能航标和断面分布见图 2。

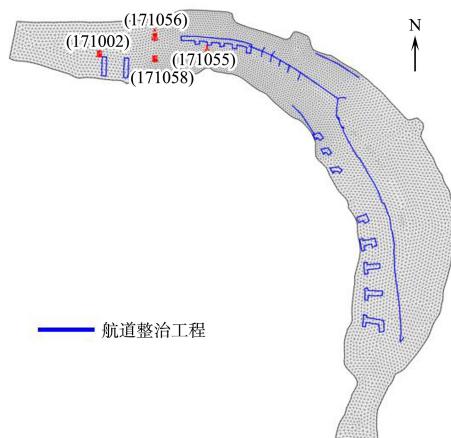


图 1 模型网格布置

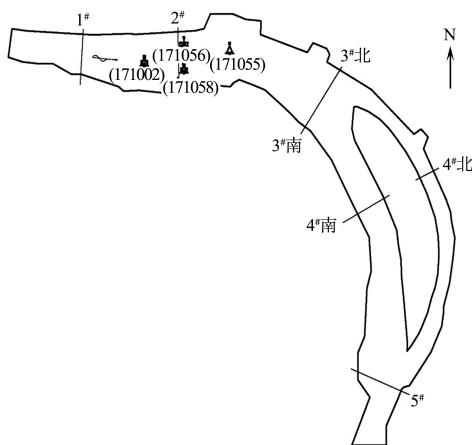


图2 多功能航标和断面分布

## 2 试验设置

### 2.1 模型参数率定

模型进口边界选取汉口站流量数据, 出口边界选取黄石站水位数据, 采用戴家洲水道 2022 年 1 月 13 日实测地形、水位、流速和流量数据进行参数率定, 根据模型模拟数据与戴家洲水道各断面实测数据的绝对差值, 判断并调整模型床面糙率, 使分流比、水位和流速模拟值与实际值相符, 断面分布见图 2。率定结果表明: 3# 和 4# 断面模型分流比误差均不超过 5%, 3# 断面实测分流比为 43.6%, 而模拟分流比为 44%, 4# 断面实测分流比为 43.7%, 模型模拟分流比为 44%; 在水位率定方面, 模拟结果见图 3, 水位的模拟值与实测值绝对误差均不超过 10 cm; 在流速率定方面, 采用 1#、3# 北、3# 南、4# 北、4# 南和 5# 共 6 处断面分别取点, 将流速值与实测值进行比对, 除个别点模拟值较实测值略偏小外, 其余点均达到率定误差要求, 见图 4。模型参数率定满足 JTS/T 231—2021《水运工程模拟试验技术规范》<sup>[12]</sup> 的精度要求, 率定的糙率值根据区域的不同在 0.011 4~0.031 3 之间。

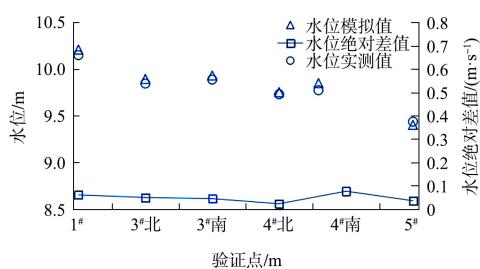
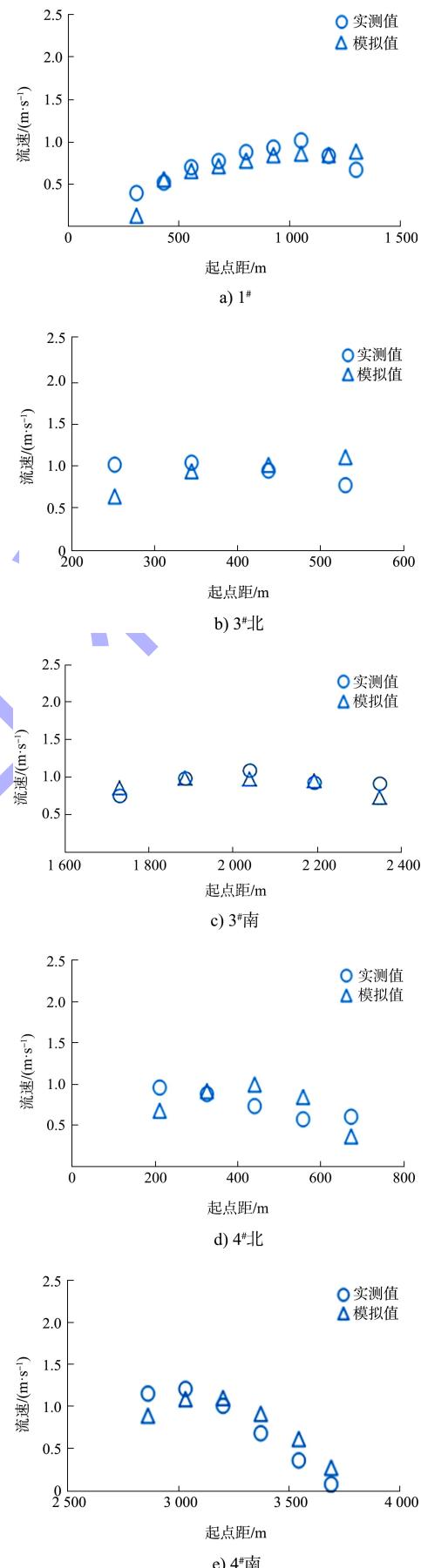


图3 2022年1月13日戴家洲水道实测水位与计算水位分布



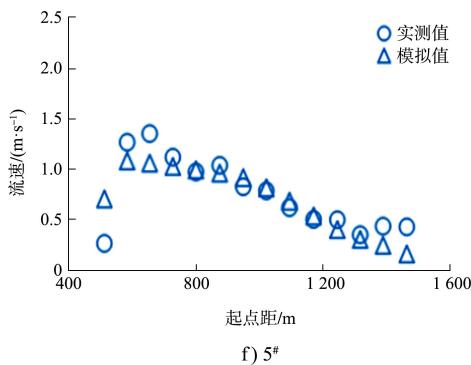


图 4 2022 年 1 月 13 日戴家洲水道实测断面流速与计算流速分布

## 2.2 数模试验设置

171056 航标是戴家洲水道多功能航标中采集数据量最大、数据连续性最好的一处航标，因此选择该航标采集的数据结果进行试验及比对。

数模试验用于分析模型在航标数据基础上的可适用性和参数可调整性，其中可适用性分析通过相同匹配时期的地形与水文资料、不同匹配时期的地形和水文资料进行结果对比，通过前述模型分析参数调整幅度分析模型的参数可调整性，具体过程为：首先，以进口流量作为上边界；然后采用下边界水位进行粗调；再通过调整糙率进行微调，微调完成的判定依据是多功能航标测得的流速、水位等实测值与模型模拟值相吻合，即实现了此时刻的以点复面的精准水流模型构建；之后输出模型调试完毕后的糙率、整体流态、多功能航标局部流态等结果；再以 2022 年 1 月为基础地形，输入 2022 年 5、6 月的水位流量值进行模型调试，主要过程和输出形式同上，之后对模型模拟和运行结果进行分析。

## 3 结果与分析

### 3.1 匹配条件下流态复原模型的可适用性

模型在初始地形和边界条件在时间上相匹配时，根据 2021 年 9 月实测地形和同期的水位、流量条件进行数值模拟试验的结果见图 5。结果表明：1) 模拟水位位于实测水位散点值中轴线附近，说明模型可较好地模拟该地形和边界条件下的水位值，模拟与实测水位的绝对差值除个别点较大外，基本不超过 10 cm，误差较小，模拟与实测值

的吻合度较高；2) 模拟流速在实测流速散点值附近波动，较为稳定，误差在 0.2 m/s 左右，模拟值与实测值实际情况较为符合，误差基本满足模拟精度要求；3) 模拟流场的流态较为平顺、稳定，流线紧贴岸边，流向分布符合实际情况，流速分布也符合中间大、两边小的规律，模型所恢复的流场较为合理。综上，在模型初始条件和边界条件相匹配的条件下，本文所构建的模型可较好地计算戴家洲水道某一时刻的水位和流速，并复原某一时刻的水道流态，流态复原模型在初始和边界条件匹配时是适用的。

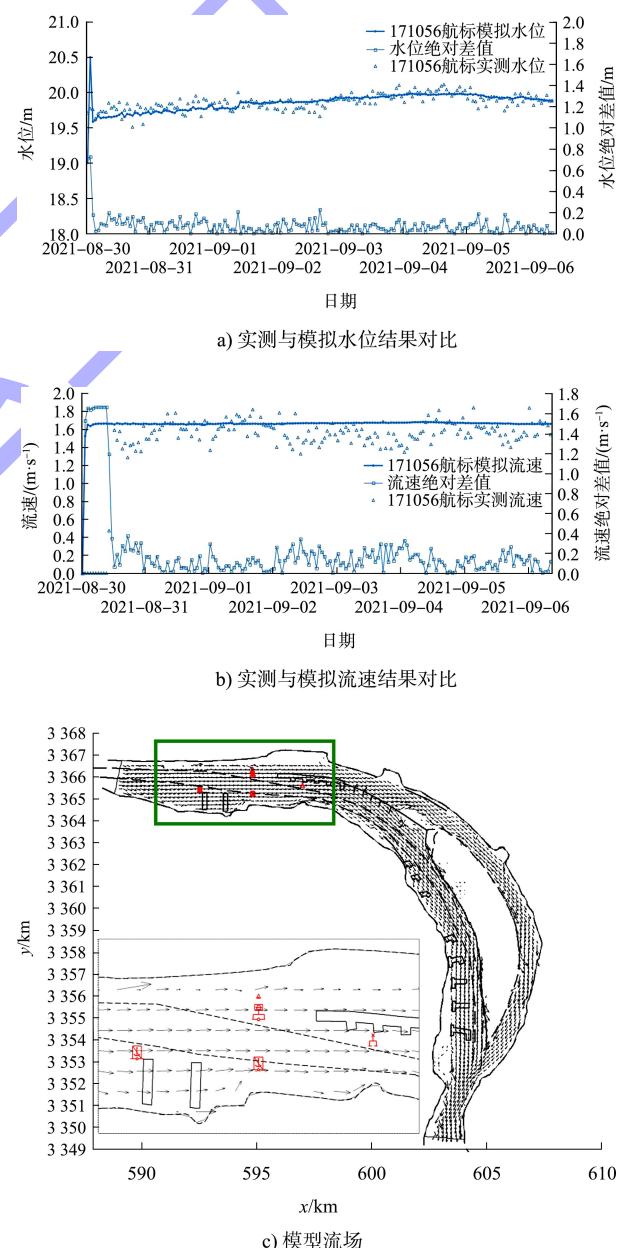


图 5 匹配条件下的数值模拟

### 3.2 不匹配条件下流态复原模型的可适用性

初始条件和边界条件在时间上并不严格匹配时, 为验证模型的适用性, 采用2022年1月实测地形和2022年5—6月水位、流量条件进行数值模拟试验, 水位、流速和流场模拟结果见图6。结果表明: 1) 多功能航标的水位模拟值与实测值的绝对差值约在3 cm之内, 最大不超过5 cm, 水位模拟精准度较高; 2) 流速模拟值较实测值偏小

0.2 m/s左右, 模型流速模拟稳定性较好, 符合流速误差要求; 3) 模拟流场较为平顺, 无明显漩涡, 流速分布正常, 岸边明显小于岸中间流速, 流态的波形较为稳定, 流场具有可适用性。综上, 在模型的初始条件和边界条件并不严格匹配时, 本文所构建的模型在水位、流速和流场等方面的模拟仍可达到误差精度要求, 在不匹配条件下, 模型仍可适用于水道某一时刻的水位、流速和流场模拟复原。

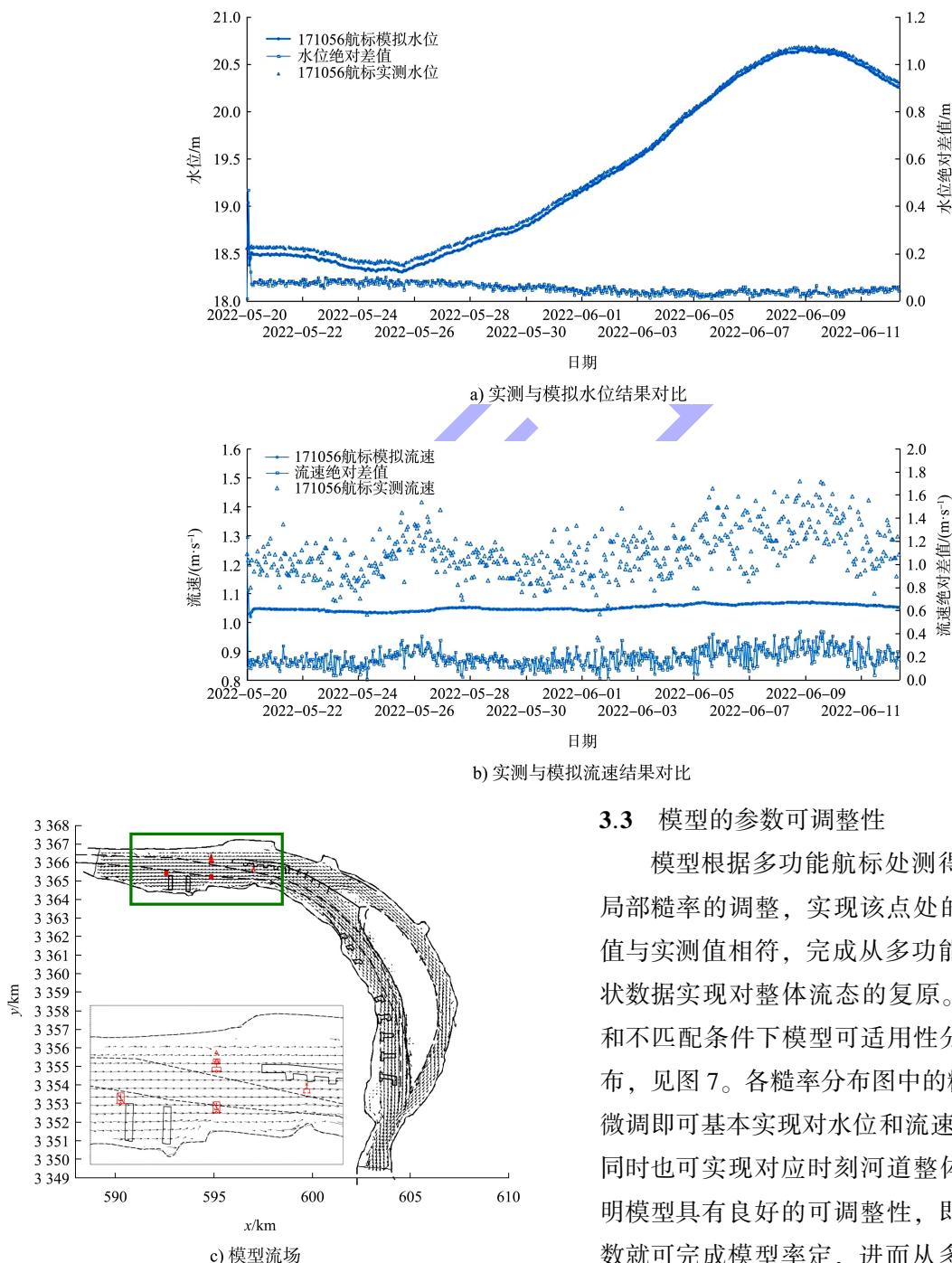


图6 不匹配条件下的数值模拟

### 3.3 模型的参数可调整性

模型根据多功能航标处测得的水位流速进行局部糙率的调整, 实现该点处的水位、流速模拟值与实测值相符, 完成从多功能航标所测得的点状数据实现对整体流态的复原。模型率定、匹配和不匹配条件下模型可适用性分析时的糙率 $n$ 分布, 见图7。各糙率分布图中的糙率仅进行局部的微调即可基本实现对水位和流速较为精确的模拟, 同时也可实现对应时刻河道整体流态的复原, 说明模型具有良好的可调整性, 即模型具备微调参数就可完成模型率定, 进而从多功能航标所测点状数据实现对河道二维平面流态的复原。

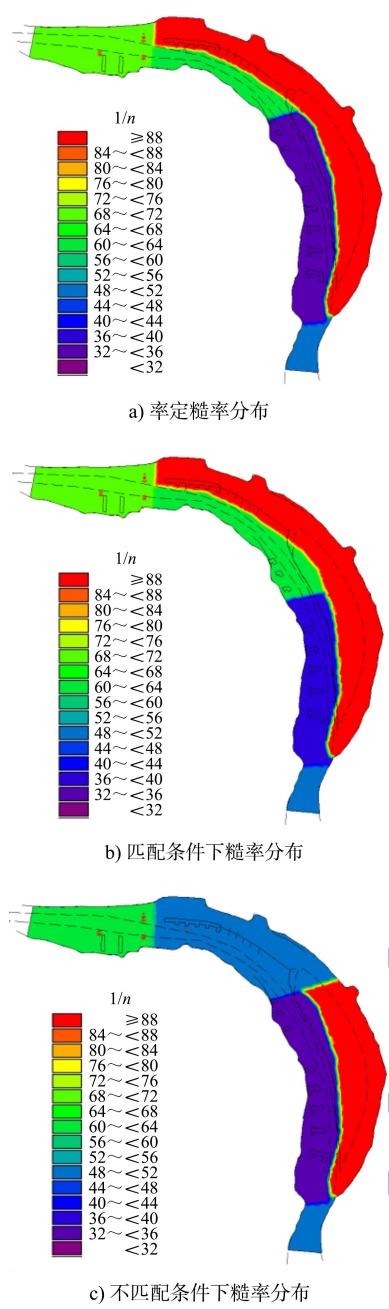


图 7 不同情况的模型糙率参数比较

#### 4 结论

1) 无论初始条件和边界条件是否匹配,本文所构建的模型均适用于应用多功能航标数据完成对戴家洲水道的水位、流速的计算和对二维流场的复原,模型模拟值与多功能航标实测值的水位绝对差值均在 10 cm 以下,流速绝对差值在 0.2 m/s 左右,流场的流速流向分布均较为接近实际情况。

2) 多功能航标所测水位和流速数据能较好地应用于模型参数调整率定过程,所建模型具有良好的可调整性,仅通过局部微调参数就可完成对不同情况初始条件和边界条件下的模型率定。

#### 参考文献:

- [1] 刘怀汉,李学祥,杨品福,等.长江智能航道关键技术体系研究[J].水运工程,2014(12): 6-9.
- [2] 郭涛.长江智能航道关键技术分析[J].水运工程,2016(1): 99-105.
- [3] 罗毅,江蓓,张红.三峡航道多功能航标系统设计及应用[J].中国水运(上半月),2014(6): 60-61.
- [4] 牛恩斌,陈柱.多功能智能测流航标的研制与应用[J].中国海事,2020(3): 50-54.
- [5] 张淑静,吕聪俐,马敏.国内外海上多功能浮标发展探讨[J].中国海事,2019(9): 47-51.
- [6] 长江航道规划设计研究院.长江航道水文要素自动监测技术研究[R].武汉:长江航道规划设计研究院,2021.
- [7] 长江航道规划设计研究院.多功能监测浮标水文数据应用研究[R].武汉:长江航道规划设计研究院,2021.
- [8] 班美娜,武永新.基于 MIKE21 FM 的南渡江河口段行洪能力分析[J].南水北调与水利科技,2018, 16(2): 151-157.
- [9] 穆聪,李家科,邓朝显,等.MIKE 模型在城市及流域水文:环境模拟中的应用进展[J].水资源与水工程学报,2019, 30(2): 71-80.
- [10] 王云波,王勇,李思伟,等.戴家洲水道近期演变及航道维护思路探讨[J].中国水运.航道科技,2017(2): 7-12.
- [11] 闫军,蔡大富,黄卫,等.戴家洲河段戴家洲右岸守护工程设计及稳定性研究[J].水运工程,2015(10): 112-117.
- [12] 交通运输部天津水运工程科学研究所.水运工程模拟试验技术规范: JTS/T 231—2021[S].北京:人民交通出版社有限公司,2021.

(本文编辑 赵娟)