

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230045

基于 EnKF 法的无资料地区河道断面形状反演研究

韩仲凯¹, 刘现伟², 秦琳², 秦玉峰³, 路则峰⁴

(1. 山东省水利科学研究院, 山东 济南 250013; 2. 德州市水利局, 山东 德州 253000;

3. 禹城市水利局, 山东 禹城 251200; 4. 山东省调水工程运行维护中心平度管理站, 山东 平度 266700)

摘要: 针对无资料地区河道断面反演中使用优化算法和概率密度等数学方法在算法寻优过程中易陷入局部最优解的问题, 提出了基于集合卡尔曼滤波(EnKF)和粒子群优化(PSO)耦合的方法实现对无资料地区河道断面的反演计算, 即通过粒子群优化算法对缺失断面进行初始化, 形成一个梯形的初始断面, 再通过 EnKF 不断对初始断面进行修正, 并通过理想案例对所提方法进行验证。结果表明, 模型的 R^2 、 N_{NSE} 均高于 0.99, 相对均方差小于 0.04。考虑到工程实际中的观测误差, 选取 0.1%、1%、5%、10% 的观测误差对缺失断面、PSO 初始断面及 EnKF 法修正断面的水动力模拟误差进行评价, 发现误差随选取的误差不同整体呈现正态分布, 但 EnKF 法面对不同的观测误差均可保持一个很高的模拟精度, R^2 均高于 0.98, 相对均方差均小于 0.06 m, N_{NSE} 均高于 0.98。可见所提方法具有较高的可行性。

关键词: 无资料地区; 集合卡尔曼滤波; 参数反演; 粒子群优化算法

中图分类号: TV125

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)11-0022-04

1 引言

河道的水动力模拟是实现河道的水情感知能力的重要手段, 随着数字孪生的需求, 水动力仿真模型被广泛使用在河道的模拟中以用来获取更多的实时动态信息^[1-2]。河道的断面几何形状是输水河道水动力模拟的必要条件, 通常利用测量船只对河道横断面的几何形状进行采样勘测, 再使用插值的方法处理采样断面之间的区域, 描绘出整个河道的地形。然而部分河道恶劣的地貌和水文环境, 难以开展地形勘测工作, 给水动力数值模拟模型的搭建带来了很大的困难。准确分析断面几何形状对提高河道水动力模拟的计算精度意义重大^[3-4]。目前对断面反演多数使用优化算法和概率密度等数学方法, 但优化算法和概率密度方法在算法寻优过程中易陷入局部最优解。EnKF 法通过不断引入实测数据, 不断优化目标变量, 进而实现变量的最优解。采用 EnKF 法可有效避免参数反演过程中局部最优解的出现, 但 EnKF 法在优化求解过程中对滤波初始值较为敏感, 不当的初始值容易造成 EnKF 计算振荡并导致优

化的时间增长。而粒子群优化(PSO)算法具有代码实现难度低且无需过多调参的优势^[5-6]。为此, 本文提出采用 EnKF 与 PSO 相耦合方法实现无资料地区断面的反演计算, 并通过理想案例验证了所提方法的可行性。

2 研究方法

2.1 水力学模型

采用求解圣维南方程组计算非恒定, 圣维南方程组为:

$$\begin{cases} B \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\alpha Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中
$$S_f = \frac{n_c^2 |Q|}{A^2 R^{4/3}} \quad (2)$$

式中, B 为过水断面宽度; H 为水位; t 为时间坐标; Q 为流量; x 为断面的空间坐标; q 为旁侧入流; α 为动量校正系数; A 为过水面积; g 为重力加速度; S_f 为摩阻比降; n_c 为输水渠道曼宁糙率系数; R 为水力半径。

圣维南方程组属于一阶拟线性双曲型偏微分

收稿日期: 2023-01-10, 修回日期: 2023-02-21

作者简介: 韩仲凯(1979-), 男, 高级工程师, 研究方向为水利工程安全评价, E-mail: 420224931@qq.com

通讯作者: 路则峰(1988-), 男, 工程师, 研究方向为调水工程运行管理, E-mail: 157827851@qq.com

为了保证模型的准确性,通过粒子群优化算法对初始断面进行寻优概化,初始粒子 100 个,迭代次数 100 次,得到初始断面见图 2。

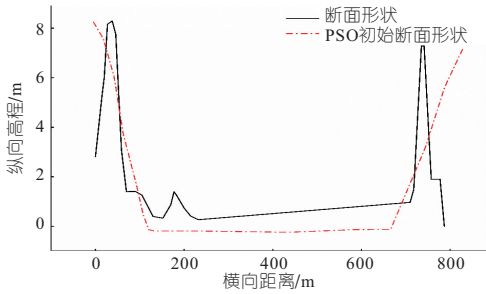


图 2 初始断面与原断面图

Fig. 2 Initial section and original section

根据初始断面及# 3 断面的实测水位,按照 EnKF 校正方法对断面形状进行校正,断面校正结果通过水动力模型对# 3 断面水位模拟结果进行表示。考虑到水位观测误差的存在,人为增加 5% 的观测误差。水位校正结果见图 3。

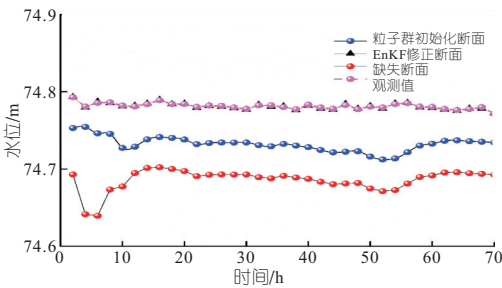


图 3 断面反演计算结果

Fig. 3 Results of cross-section inversion calculations

由图 3 可看出,将第一个断面剔除后, # 3 断面水动力仿真结果存在较大的偏差,通过粒子群优化算法对断面进行初始化,发现模拟的偏差较无断面的情况精度提升,但 PSO 算法仅对断面形状进行概化,从形状来说与实际的断面形状仍存在差异,所以模拟仍存在一定偏差。通过观测数据,采用 EnKF 校正后, # 3 断面的水位模拟结果较 PSO 初始断面的模拟结果有了显著的提升,主要由于 EnKF 通过观测值不断修正断面形状,使得断面不断贴近于实际断面,从而使得模拟误差最小。模拟结果误差评价见表 1。

表 1 模拟结果误差评价

Tab. 1 Error analysis of model results

项目	R^2	R_{RMSE}/δ	N_{NSE}
PSO 初始断面模拟	0.96 54	0.154 3	0.943 9
EnKF 修正断面模拟	0.996 3	0.033 7	0.995 7
缺失断面模拟	0.933 4	0.202 3	0.919 8

由于在实际工程中水位观测误差必然存在,观测误差对水动力的模拟结果存在影响,从而变相影响 EnKF 反演断面的结果。所以对模型观测误差进行分析,有助于 EnKF 反演断面的准确

性,按照比例 0.1%、1%、5%、10% 的观测误差,对水动力的模拟结果进行误差评价,从而确定水位观测误差对 EnKF 反演结果的影响。不同观测误差的水动力模型模拟误差评价分析结果见表 2。

表 2 不同观测误差下的水动力模型模拟误差评价分析结果
Tab. 2 Results of simulation error analysis for hydrodynamic simulation with different observation errors

不同观测误差/%	项目	R^2	R_{RMSE}/δ	N_{NSE}
0.1	PSO 初始断面模拟	0.942 8	0.174 6	0.934 6
	EnKF 修正断面模拟	0.987 6	0.050 3	0.980 5
	缺失断面模拟	0.893 4	0.246 9	0.902 7
1	PSO 初始断面模拟	0.953 6	0.169 8	0.937 6
	EnKF 修正断面模拟	0.994 0	0.052 9	0.989 4
	缺失断面模拟	0.912 7	0.229 3	0.914 8
5	PSO 初始断面模拟	0.965 4	0.154 3	0.943 9
	EnKF 修正断面模拟	0.996 3	0.033 7	0.995 7
	缺失断面模拟	0.933 4	0.202 3	0.919 8
10	PSO 初始断面模拟	0.932 7	0.186 1	0.924 0
	EnKF 修正断面模拟	0.985 8	0.054 9	0.984 3
	缺失断面模拟	0.903 7	0.243 8	0.903 4

由表 2 可知,观测误差对水动力模拟的结果存在影响,误差和预期均符合正态分布。随着观测误差的增大,整体模拟精度呈现先增加后减小的趋势。通过不同的误差分析,EnKF 法可根据实测数据对河道断面进行滚动修正,最大程度规避观测误差对反演参数的影响,从而使得水动力模拟在面向不同误差时可一直保持一个较高的模拟精度。在误差为 5% 时,水动力模型模拟的误差评价最好,所以选取 5% 观测误差合理。

4 结论

a. 本文提出一种基于集合卡尔曼滤波(EnKF)和粒子群优化(PSO)耦合的方法对无资料地区河道断面形状进行反演计算,即通过粒子群优化算法对缺失断面进行初始化,形成一个梯形的初始断面,再通过 EnKF 不断对初始断面进行修正,并将该方法运用到实际工程中。

b. 采用 EnKF 法修正的断面水动力模拟结果要远高于其他模拟结果,直接提高了水动力模型的计算精度,具有较高的实用意义。

参考文献:

[1] 杨甜甜,梁国华,何斌,等. 基于水文水动力学耦合的洪水预报模型研究及应用[J]. 南水北调与水利科技,2017,15(1):72-78.
[2] 曾志强,杨明祥,雷晓辉,等. 流域河流系统水文-水动力耦合模型研究综述[J]. 中国农村水利水电,

- 2017(9):72-76.
- [3] 李谷涵. 基于水动力仿真模拟的梯级泵站群明渠输水系统优化调度研究[D]. 镇江:江苏大学, 2022.
- [4] 王硕. 河道测量数据采集与处理技术研究及应用[D]. 青岛:山东科技大学, 2018.
- [5] ZILIANI M C, CHOSTINE R, AIT-EL-FOUIH B, et al. Enhanced flood forecasting through ensemble data assimilation and joint state-parameter estimation[J]. *Journal of hydrology*, 2019, 577: 15.
- [6] 李漫漫, 石朋, 尚艳丽, 等. 基于集合卡尔曼滤波的
新安江模型状态变量实时修正方法 [J]. *河海大学学报(自然科学版)* 2019, 47(3): 209-214
- [7] 张成, 傅旭东, 王光谦. 复杂内边界长距离输水明渠的一维非恒定流数学模拟[J]. *南水北调与水利科技*, 2007, 2007(6): 16-20.
- [8] MU J, ZHANG X. Real-time flood forecasting with 1-D unsteady flow model[J]. *Journal of hydrodynamics*, 2007, 19(2): 150-154.
- [9] 王船海, 李光炽, 向小华, 等. 实用河网水流计算[M]. 南京:河海大学出版社, 2012.

Inversion Study of the Shape of River Cross-sections in Ungauged Regions Based on EnKF Method

HAN Zhong-kai¹, LIU Xian-wei², QIN Lin², QIN Yu-feng³, LU Ze-feng⁴

(1. Water Resources Research Institute of Shandong Province, Jinan 250013, China; 2. Dezhou Water Resources Bureau, Dezhou 253000, China; 3. Yucheng Water Resources Bureau, Yucheng 251200, China; 4. Shandong Province Water Transfer Project Operation and Maintenance Center Pingdu Management Station, Pingdu 266700, China)

Abstract: Aiming at the falling into locally optimal solution shortcomings of optimization algorithm and probability density method for inversion of river cross-sections in ungauged regions, this paper proposed a combination of Ensemble Kalman Filter (EnKF) method and particle swarm optimization algorithm (PSO). The PSO was used to initialize the missing section to form a trapezoidal initial section. Then the EnKF was used to correct the initial section, and the proposed method was verified by the ideal case. The results show that the R^2 and N_{NSE} of the model are higher than 0.99, and the relative mean square error is less than 0.04. Considering the observation errors in the engineering practice, the observation errors of 0.1%, 1%, 5% and 10% were selected to evaluate the hydrodynamic simulation errors of the missing section, the PSO initial section and the corrected section by the EnKF method. It is found that the errors are normally distributed with the selected errors, but the overall distribution is normal with different errors. But the EnKF method can maintain a high simulation accuracy with different observation errors, the R^2 is higher than 0.98, the relative mean square deviation (RMSD) is less than 0.06 m, and the N_{NSE} is higher than 0.98. Thus, the proposed method has a high feasibility.

Key words: ungauged regions; Ensemble Kalman Filter; parameter inversion; particle swarm optimization algorithm

(上接第 168 页)

Failure Mechanism and Dynamic Evolution of Typhoon Rainstorm Induced Slopes

JIANG Jian-hong¹, BIAN Hong-guang², NING Xiao¹, LI Li-li¹, ZHANG Yu-yu³

(1. Shandong Provincial Communications Planning and Design Institute Group Co., Ltd., Jinan 250101, China;
2. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Manacement, Wuhan University, Wuhan
430072, China; 3. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250002, China)

Abstract: Aiming at analyzing the mechanism of slope failure and evolution propagation induced by typhoon and rainstorm, a numerical simulation of the safety state of a slope was carried out based on the measured rainfall data during various typhoons in Fujian Province of China. For the slope before instability, Monte Carlo method was used to calculate the real-time failure probability and reliability index and reveal the transient change characteristics of the seepage field and plastic zone of the slope. For the slope after instability, Herschel-Bulkley-Papanastasiou (HBP) model was used to describe the rheological characteristics of the slope using the SPH method. The propagation process of landslides was analyzed in terms of velocity and accumulation characteristics. The results show that the rainfall is the key factor to induce slope instability. When the slope failure occurs, the sliding speed of the leading edge can reach 15 m/s. This study provides a reference for the early warning and disaster prevention and mitigation of slope engineering under extreme conditions.

Key words: typhoon and rainstorm; slope failure; Monte-Carlo; dynamic catastrophe; HBP rheological model