

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0080

贾本有, 吴时强, 范子武, 等. 粒子群算法在河道水动力模型参数校正中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(3): 143-148. JIA B Y, WU S Q, FAN Z W, et al. Application of particle swarm optimization in parameter calibration of channel hydrodynamic model[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(3): 143-148. (in Chinese)

# 粒子群算法在河道水动力模型参数校正中的应用

贾本有, 吴时强, 范子武, 马振坤, 谢忱, 刘国庆

(南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210029)

**摘要:** 参数估计一直是河道水动力模型研究的难点之一, 在传统的模型参数人为经验率定方法的基础上, 提出了基于粒子群算法的模型参数优化校正方法, 构建了参数校正优化模型, 并将参数优化校正算法与河道水动力模型进行耦合, 针对淮河干流和史灌河支流组成的研究区域, 采用一维河道洪水演进模型, 比较了糙率系数校正方法和传统经验估算法, 校正方法得到的河段糙率系数值比人为经验估计值平均大 0.01, 淮河干流河段糙率略大于史灌河支流河段糙率, 采用校正河段糙率系数得到的河道水位过程与实测值拟合更优, 特别在主峰段洪水过程模拟精度显著改善, 验证了本文所提出的参数优化校正算法的有效性, 为复杂河道水动力模型参数的确定提供了一种有效方法。

**关键词:** 淮河流域; 洪水模拟; 水动力模型; 参数估计; 粒子群算法

**中图分类号:** TV 143    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2018)03-0143-06

## Application of particle swarm optimization in parameter calibration of channel hydrodynamic model

JIA Benyou, WU Shiqiang, FAN Ziwu, MA Zhenkun, XIE Chen, LIU Guoqing

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing

Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** Parameter estimation has always been one difficulty in channel hydrodynamic model. Based on the traditional method of calibrating model parameters by personal experience, we proposed a method to optimize and correct model parameters based on the Particle Swarm Optimization algorithm, and established an optimization model for parameter correction. Then we coupled the algorithm with the channel hydrodynamic model. We studied the area comprised of the main Huai River and Shiguan River tributary. Using 1D river flood routing model, we compared the roughness coefficient correction method and the traditional empirical estimation method. Results showed that the corrected roughness coefficient was 0.01 larger on average than the experiential roughness coefficient. The roughness in Huai River was slightly larger than the roughness in Shiguan River tributary. The water level hydrograph simulated by the corrected roughness coefficient fit the measured value better than that by the experiential roughness coefficient. Especially, for the main peak period of the flood hydrograph, the simulation accuracy was improved significantly. Thus, the validity of the proposed algorithm was verified. This algorithm provides an effective method for determining the parameters of complex channel hydrodynamic model.

**Key words:** Huai River basin; flood simulation; hydrodynamic model; parameter estimation; particle swarm optimization

水动力模型能够复演和预测河道、湖泊、水库以及蓄滞洪区的水流过程, 刻画水位、流量等重要水力要素的时空变化过程, 广泛应用于防洪减灾、水文预

报、水利工程设计等诸多领域。参数估计是水动力模型研究和应用的重要基础, 直接关系模型的应用效果。

水动力模型参数估计可大致分为人为经验和自

收稿日期: 2017-05-16    修回日期: 2017-10-20    网络出版时间: 2017-12-29

网络出版地址: <http://ns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20171229.0854.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51709178; 51379128); 水利部公益性行业科研专项(201501007); 中央级公益性科研院所青年基金项目(Y116019)

Funds: National Natural Science Foundation of China (51709178; 51379128); Special Research Fund for Public Welfare of the Ministry of Water Resources of China (201501007); Special Research Fund of Nanjing Hydraulic Research Institute (Y116019)

作者简介: 贾本有(1988), 男, 安徽芜湖人, 在读博士, 主要从事水库调度、防洪风险研究。E-mail: byjia@nhri.cn

通讯作者: 吴时强(1964), 男, 浙江诸暨人, 教授级高级工程师, 主要从事计算、环境水力学研究。E-mail: sqwu@nhri.cn

动优选两类方法<sup>[2]</sup>,前者根据人的经验来分析确定模型参数,其结果具有很强的主观性和差异性,后者是利用计算机技术、优化技术、数值技术等求解出模型参数值,其结果具有较强的不确定性。Lai 等<sup>[3]</sup>利用集合卡尔曼滤波器框架进行一维河道水动力模型的状态变量和参数的估计,建立在以概率方法描述系统误差的基础上;Butler 等<sup>[4]</sup>提出新颖的公式和数值方法求解曼宁场,同样适用于水动力模型的参数估计,但计算结果具有不确定性;程伟平等<sup>[5]</sup>利用广义逆方法和自然逆方法构建糙率系数的优化反演算法,也有指出河道糙率系数的影响因素众多,测算非常困难<sup>[6]</sup>;包为民等<sup>[7]</sup>提出了样本截痕的概念,用于参数估计,其难点是建立参数函数曲面。智能算法的兴起给求解高维非线性空间的最优化问题提供方便,刘志贤<sup>[8]</sup>提出利用遗传算法进行河道河网糙率反分析研究,郭俊等<sup>[9]</sup>提出利用改进的差分进化算法进行流域水文模型参数多目标的优化率定,为参数估计提供了新的途径,类似的参数率定方法研究有很多<sup>[10-12]</sup>。粒子群算法(PSO)是群体智能的典型代表,它通过种群个体之间的情报共享和交换,相互合作与竞争来实现最优位置的确定<sup>[13]</sup>,其最大的优点是位置更新方式原理清晰,计算量少,操作简单,并随着进化进程会不断自我调整。目前该方法已广泛应用于数值计算、工程设计和理论研究的各个领域<sup>[14-18]</sup>。

本文研究采用人为经验和自动优选相结合的方法,在人为经验预估参数值的基础上,基于 PSO 算法在目标函数指导下进行自动优选,针对淮河中游一维洪水演进模拟实例,比较糙率系数的优化校正方法和传统经验估算法,验证了算法的有效性,实现了模型参数的动态校正。

## 1 一维河道洪水演进数值模拟

### 1.1 基本方程

一维河道洪水波运动规律利用 Saint-Venant

方程组描述,如下:

$$B \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

$$\text{动力方程: } \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} +$$

$$gA \frac{Q|Q|}{K^2} - (V_x - \frac{Q}{A})q = 0 \quad (2)$$

式中: $B$  为河面总宽度(m); $Z$  为水位(m); $t$  为时间(s); $x$  为河长(m); $q$  为旁侧入流流量( $m^3/s$ ); $Q$  为流量( $m^3/s$ );流量模数  $K = AC\sqrt{R}$ ; 动量修正系数  $\alpha = \left[ \int_A v^2 dA \right] / (v^2 A)$ ;  $A$  为面积(m); $g$  为重力加速度( $m/s^2$ ); $v$  为流速( $m/s$ ); $R$  为水力半径(m); $C$  为谢才系数( $m^{1/2}/s$ ); $V_x$  为旁侧入流在水流方向上的流速分量( $m/s$ ); $v$  为断面平均流速( $m/s$ )。

### 1.2 计算方法

描述一维河道洪水波运动规律的 Saint-Venant 方程组在数学上属于一阶拟线性双曲型偏微分方程,其近似解法大体上分为两类<sup>[19]</sup>:第一类是水文学方法,通过求解基本方程组的转化形式水量平衡方程式和槽蓄方程式,获得河道各个断面的水力要素,典型方法包括有马斯京根法、汇流曲线法;第二类是水动力学方法,采用数值计算方法直接求解基本方程组的数值解,按照数值计算方法的类别分类,典型方法包括有限单元法、有限差分法、有限体积法等。本文借助 InfoWorks RS 软件,由 Preissmann 隐式差分法离散求解计算<sup>[20-21]</sup>。

### 1.3 模型参数

一维河道洪水演进数值模拟中,模型主要参数有河道糙率、空间步长和时间步长,其中,河道糙率为综合阻力系数指标,是一个非常敏感的模型控制参数,按照天然河道的实际特征,其一般取值范围标准<sup>[22]</sup>见表 1。

表 1 天然河道糙率取值范围简况

Tab. 1 Concise list of roughness range in natural channel

序号	河道主槽部分		河道漫滩部分		
	特征概述	糙率范围	特征概述	糙率范围	糙率均值
1	沙质河床,顺直,水流通畅	0.020~0.024	土沙质,淤泥,基本无植物	0.026~0.038	0.030
2	砂砾石河床,顺直,水流通畅	0.022~0.026	土沙质,稀疏杂草农作物	0.030~0.050	0.040
3	沙质河床但不平顺,水流不畅通	0.025~0.026	砂砾石滩,稀疏杂草高秆作物	0.040~0.060	0.050
4	砂砾石河床尚平整,水流较通畅	0.025~0.029	土沙质,种有农作物或稀疏树林	0.050~0.070	0.060
5	细沙稀疏水草河床,水流不畅通	0.030~0.034	土沙质,有杂草杂树或水稻田	0.060~0.090	0.075
6	砂砾石河床不平整,水流尚通畅	0.030~0.034	土沙质,中等密度杂草及农作物	0.080~0.120	0.100
7	河底卵石块石不平整,水流回流	0.035~0.040	土沙质,大面积茂密杂草灌木	0.100~0.160	0.130
8	卵石块石凹凸河床,急弯深坑湍流	0.040~0.070	土沙质,稠密植被芦柴等植物	0.160~0.200	0.180

## 2 参数校正模型

参数校正的目的是数值模拟的洪水过程在河道关键节点获得与实际情况相一致的结果, 现实中表现为控制断面模拟的水位、流量过程与相应实测过程拟合较好。鉴于洪水模拟一般重点关注高水位时段和流量峰值时段的特殊性, 本文提出利用带权重因子的方差构建参数校正模型的目标函数, 计算公式如下:

$$\text{minimize } F = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T w_t \cdot (P_t - Q_t)^2 \quad (3)$$

式中:  $F$  为目标函数值;  $P_t$  为控制断面数值模拟数据系列;  $Q_t$  为控制断面实测数据系列;  $T$  为数据系列长度;  $w_t$  为权重因子, 取值为  $(0, 1)$  区间;  $t$  为时间序号。数据系列可以是流量过程, 也可以是水位过程。

权重因子  $w_t$  与峰值段模拟精度的重要性有关, 峰值段精度要求越高, 权重因子的取值越大, 对应非峰值段的权重因子的取值越小。本文依据实测数据系列, 找到峰值点  $O_t^{\max}$ , 利用 0.85 倍以上峰值点分割出峰值时段, 当  $t$  位于实测峰值时段内时, 取  $w_t = 0.7$ , 在峰值时段以外时, 取  $w_t = 0.3$ 。参数校正模型考虑的主要约束条件为待优化参数的上、下限值, 以及水动力数值模拟模型本身。

## 3 粒子群算法及计算步骤

### 3.1 基本原理

粒子群算法(PSO)基本原理来源于对鸟类群觅食行为的模仿, 它将优化问题的某一具体解模拟为高维无限空间内的可以进行自由飞行的鸟类, 即一个基本粒子。设粒子群在一个  $n$  维空间中自由移动, 由  $N$  个粒子组成种群  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ , 其中每个粒子所处的位置  $X_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}\}$  表示问题一个完整的解。粒子通过不断变化自己所处的位置  $x_{id}$  来产生新的解。每个粒子都记录下自己曾经寻找到的最优的解, 记为  $P_{id}$ , 所有粒子寻优过程中得到的最优解记为  $P_{gd}$ , 粒子一直处于运动状态, 其速度记作  $V_i = \{v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in}\}$ 。当  $P_{id}$  和  $P_{gd}$  记录完毕后, 粒子的速度和位置更新如下式:

$$v_{id}(k+1) = w \cdot v_{id}(k) + c_1 \cdot \text{rand} \cdot [P_{id} - x_{id}(k)] + c_2 \cdot \text{rand} \cdot [P_{gd} - x_{id}(k)] \quad (4)$$

$$x_{id}(k+1) = x_{id}(k) + v_{id}(k+1) \quad (5)$$

式中:  $v_{id}(k+1)$  为第  $k+1$  次迭代中第  $i$  个粒子第  $d$  维上的速度分量;  $w$  为惯性权重参数;  $c_1$  和  $c_2$  为加速系数;  $\text{rand}$  为满足均匀分布的随机数。

### 3.2 算法计算步骤

粒子群优化算法作为群体智能的典型代表, 在

求解实际工程问题中得到了广泛的应用。洪水演进数值模拟的模型参数与模型输出结果之间是复杂的高维非线性映射关系, 利用粒子群算法的种群进行模型参数空间搜索, 同时利用目标函数进行模型输出的评价, 从而迭代优选出最优的模型参数, 关键是设计出合理的计算流程。本文将人为经验确定的模型参数, 作为一个参照值, 融合为 PSO 算法的某个个体, 参与到迭代中进行目标函数信息共享和协同进化, 从而实现了模型参数的动态校正。因此, 基于 PSO 的模型参数校正计算步骤见图 1。

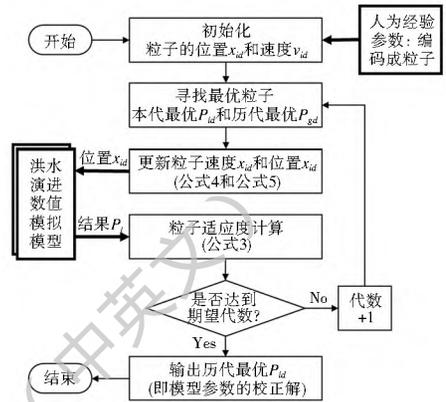


图 1 基于 PSO 的参数校正计算流程

Fig. 1 Calculation flow chart for PSO-based parameter calibration

(1) 种群初始化。给定粒子种群大小  $N$ , 将人为经验率定的模型参数编码为某一个体的初始位置, 并配合随机生成该个体的初始速度; 对于剩余的  $N-1$  个个体, 根据模型参数组合的个数设定计算维度  $d$ , 并随机生成个体的初始位置编码  $x_{id}$  和初始速度编码  $v_{id}$ 。各个体位置(既模型参数的具体解)分别带入洪水演进模型进行模拟计算, 对比得到初始的本代最优位置  $P_{id}$  与历代最优位置  $P_{gd}$ 。

(2) 速度和位置更新。根据 PSO 基本原理, 设定算法的控制参数  $w$ 、 $c_1$  和  $c_2$ , 标准算法<sup>[23-24]</sup>中推荐设置  $w = 0.4$  和  $c_1 = c_2 = 2$ , 并将  $P_{id}$  和  $P_{gd}$  代入公式(9)和公式(10)进行速度和位置更新, 获得新的粒子位置和速度。

(3) 粒子适应度计算。将新的个体位置, 输入到洪水演进模型进行模拟计算, 得到河道控制节点的水位或流量的模拟值, 如此反复独立操作模拟模型直至完成遍历所有的  $N$  个个体。依据模拟值与实测值, 利用参数校正模型的公式(8), 计算粒子适应度值(既目标函数值)。

(4) 寻找最优粒子。比较新的粒子适应度值之间的大小, 同时比较新的粒子与旧的粒子的适应度值大小, 评判标准为越小越优, 从而确定是否更新种群本代最优位置  $P_{id}$ ; 再比较种群的本代最优位置

$P_{it}$  与历代最优位置  $P_{gd}$ , 选择具有最优适应度值的个体作为  $P_{gd}$ 。

(5) 判断是否达到结束计算条件(既最大迭代次数)。如果否, 则转入步骤(2)继续迭代; 如果是, 输出群体历代最优个体  $P_{gd}$ , 既得到校正后的洪水演进数值模拟模型的最优参数值, 结束算法。

### 4 实例分析

淮河流域介于长江、黄河之间, 属暖温带半湿润季风气候区, 具有大陆性气候特征, 汛期暴雨频繁, 雨区分布与淮河干流河道走向基本一致, 常常发生大范围的流域性大洪水。本文选择淮河干流王家坝至润河集河段和史灌河支流蒋家集至淮河干流河段组成的研究区域, 为其建立河道一维洪水演进水动力数值模拟模型, 进行历史实测洪水模拟, 以及模型参数校正的有效性验证, 研究区域示意图见图 2。

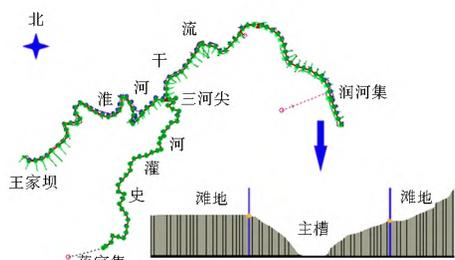


图 2 淮河中游研究区域示意图

Fig. 2 Schematic diagram of study area in middle reaches of Huai River Basin

2003 年, 淮河发生了一场典型的流域性大洪水, 降水量达到 1 331 mm, 比常年偏多 40% 左右, 降水高值区位于大别山区上游, 洪水经史灌河汇入淮河干流, 干流水位全线超过警戒水位, 王家坝至鲁台子河段水位超过保证水位, 部分河段水位甚至超过历史最高水位。图 3 展示了润河集站实测的水位和流量过程, 7 月份内出现三次洪峰过程, 洪峰流量分别达到 7 161 m<sup>3</sup>/s、6 892 m<sup>3</sup>/s 和 5 751 m<sup>3</sup>/s, 并且两次出现超保证水位情形, 分别高出 10 cm 和 40 cm, 场次洪量、最大 30 天洪量和最大 60 天洪量分别达到 139.1 亿 m<sup>3</sup>、116.2 亿 m<sup>3</sup> 和 144.2 亿 m<sup>3</sup>。

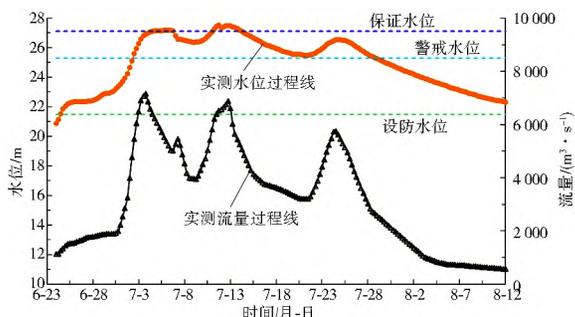


图 3 润河集站 2003 年实测洪水水位和流量过程线

Fig. 3 The measured hydrograph of Flood 2003 in Runheji station

利用一维河道水动力模型对 2003 年实测洪水进行模拟, 模型中需要校正的参数为河道糙率系数。考虑到研究区域包含淮河干流河段和史灌河支流河段, 以及河道大断面的区别特性, 将糙率系数分为主槽和左右漫滩分别考虑, 并在干、支流分开考虑, 因而, 模型需要设置的糙率系数有四个维度: 淮河主槽糙率、淮河漫滩糙率、史灌河主槽糙率、史灌河漫滩糙率。

结合淮河中游实际的河道特性, 参照糙率取值范围(表 1), 由人为经验设定四个糙率系数的初始值, 再采用本文拟定的基于 PSO 的参数动态校正算法, 依据润河集站水位过程的模拟精度, 对四个糙率系数进行优化校正, 并验证算法的有效性。设置 PSO 算法的初始种群规模为 10, 最大进化代数为 50, 惯性权重为 0.4, 加速系数为 2, 算法参数依据参考文献[13, 24, 25] 给定, 得到糙率参数校正结果见表 2。

表 2 河道糙率参数动态校正结果

Tab. 2 Results of dynamic correction of roughness

河段	位置	经验值	中间值 1	中间值 2	校正值
淮河干流 (王家坝-润河集)	主槽	0.025	0.031	0.035	0.035
	漫滩	0.035	0.039	0.040	0.046
史灌河 (蒋家集-三河尖)	主槽	0.025	0.033	0.030	0.034
	漫滩	0.035	0.045	0.045	0.045

由表 2 可知, 人为经验估计得到的糙率系数在合理的水力规范范围之内, 在目标函数的优化控制下, 通过 PSO 算法进行参数校正, 得到的糙率系数有增大趋势, 校正的糙率系数比人为经验估计的值大 0.01, 且淮河干流河道的糙率参数略微大于史灌河支流河道的糙率参数。

图 4 展示了基于 PSO 参数动态校正的最优目标函数值的进化过程, 表明随着算法进化代数的增加, 最优目标函数值一直保持下降, 直至维持在 23.25, 这说明算法的每一次进化均向着润河集站水位模拟过程与实测过程拟合更优的方向进行。

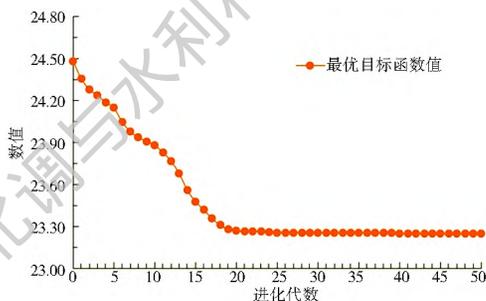


图 4 基于 PSO 参数校正的最优目标函数值变化过程

Fig. 4 Evolutionary process of optimal function value in PSO-based parameter calibration

图5展示了润河集站水位过程线的模拟结果,其中包含了实测水位过程线、人为经验率定糙率参数下的模拟水位过程线、基于 PSO 校正参数下的模拟水位过程线,以及主峰段水位过程线放大视图。

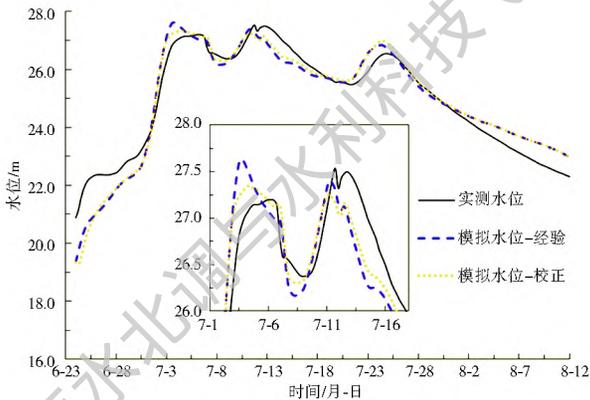


图5 润河集站 2003 年洪水水位模拟过程对比  
Fig. 5 Comparison between simulated water levels of Flood 2003 in Runheji station

由图5可知,一维河道水动力模型模拟的润河集站 2003 年洪水水位过程具有完整的 3 次峰值过程,两个不同糙率系数设置方案会影响模拟结果,但总体影响程度不大。人为经验率定糙率参数下的水位过程模拟结果在第 1 次最高水位处明显高出实测值;在优化方向控制下,通过 PSO 算法动态校正模型糙率参数,实现了第 1 次最高模拟水位的降低,同时模拟的水位过程线在整个主峰段与实测值拟合的更优。

实例中,依据水位过程构建的目标函数进行糙率参数校正(简称为水位标准),其对应的流量过程模拟结果,如图6所示。同时,参照水位标准的计算方式,经验糙率下流量过程模拟结果对应的目标函数值为 338 022.72,校正糙率下流量过程模拟结果对应的目标函数值为 294 742.60,根据越小越优原则,表明流量过程的模拟精度也得到了提升。因此推断,根据水位标准获得的河道糙率校正,只在趋

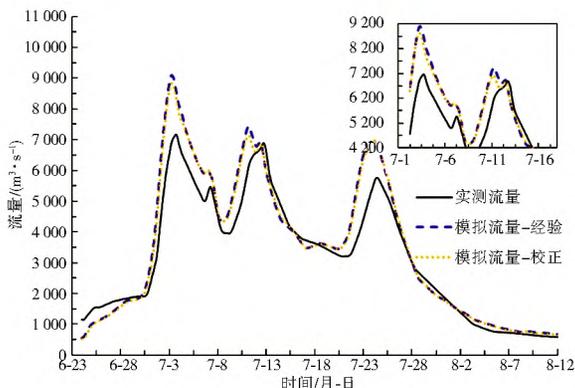


图6 润河集站 2003 年洪水流量模拟过程对比  
Fig. 6 Comparison between simulated water flow of Flood 2003 in Runheji station

势上适用于提高流量过程模拟精度,但是对于采用流量标准,不一定获得与水位标准相同的河道糙率校正。

总的来说,不同糙率系数方案会显著影响水位和流量的模拟结果,基于 PSO 的水动力模型参数校正方法有效,而且可以提高模拟精度。

## 5 结论

针对水动力模型中参数估计的难点问题,利用人为经验预估参数初始值,本文提出了基于粒子群算法的参数优化校正方法,给出了该算法与水动力模型耦合的具体计算步骤,结合淮河中游一维河道洪水演进模拟,进行了河道糙率系数校正,有效提高了河段水位、流量过程模拟精度,为水动力模型的参数优选提供了一种有效方法。但是,粒子群算法本质上是基于随机数的搜索算法,运用于参数优选结果的不稳定性处理技术有待深入研究,同时,在不同类型水动力模型中多种参数同时校正的应用效果和分析验证值得进一步研究。

## 参考文献(References):

- [1] 梁承梅. 流域水文模型参数优化问题研究[D]. 南京: 河海大学, 2005. (LUAN C M. Study on parameter optimization of watershed hydrological model[D]. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese))
- [2] 卢士强, 徐祖信. 平原河网水动力模型及求解方法探讨[J]. 水资源保护, 2003(3): 5-9. (LU S Q, XU Z X. Hydrodynamic model for plain river networks and its solution[J]. Water Resources Protection, 2003(3): 5-9. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2003.03.002.
- [3] LAI R, FAND H, HE G, et al. Dual state parameter optimal estimation of one-dimensional open channel model using ensemble Kalman filter[J]. Journal of Hydrodynamics, 2013, 25(4): 564-571. DOI: 10.1016/S1001-6058(11)60397-2.
- [4] BUTLER T, GRAHAM L, ESTEP D, et al. Definition and solution of a stochastic inverse problem for the Manning's n parameter field in hydrodynamic models[J]. Advances in Water Resources, 2015, 78: 60-79. DOI: 10.1016/j.advwatres.2015.01.011.
- [5] 程伟平, 刘国华. 基于广义逆理论的河网糙率反演研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(10): 145-150. (CHEN W P, LIU G H. Inverse analysis of channel friction based on generalized inverse theory[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2005, 39(10): 145-150. (in Chinese)) DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2005.10.030.
- [6] 张小琴, 包为民, 梁文清, 等. 河道糙率问题研究进展[J]. 水力发电, 2008, 34(6): 98-100. (ZHANG X Q, BAO W M, LIANG W Q, et al. Recent Studies and Progresses of the River Roughness[J]. Water Power, 2008, 34(6): 98-100. (in Chinese))

DOI: 10.3969/j.issn.05599342.2008.06.030.

- [7] 包为民, 张小琴, 赵丽平. 基于参数函数曲面的参数率定方法[J]. 中国科学: 技术科学, 2013, 43(9): 1050-1062. (BAO W M, ZHANG X Q, ZHAO L P. Parameter estimation method based on parameter function surface[J]. Sci. China Tech. Sci., 2013, 43(9): 1050-1062. (in Chinese)) DOI: 10.1007/s11431-013-5224-3.
- [8] 刘志贤. 基于遗传算法的河网糙率反分析研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008. (LIU Z X. Reverse analysis of roughness of river network based on genetic algorithm[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008. (in Chinese))
- [9] 郭俊, 周建中, 周超, 等. 概念性流域水文模型参数多目标优化率定[J]. 水科学进展, 2012, 23(4): 447-456. (GUO J, ZHOU J Z, ZHOU C, et al. Multiobjective optimization for conceptual hydrological models[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(4): 447-456. (in Chinese)) DOI: CNKI: 32.1309.P.20120614.2158.005.
- [10] 王玲玲, 钟娜, 成高峰. 基于奇异矩阵分解法的河道糙率反演计算方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(4): 359-363. (WANG L L, ZHONG N, CHENG G F. Inverse calculation of bed roughness based on singular value decomposition method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010, 38(4): 359-363. (in Chinese)) DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2010.04.001.
- [11] 陈强, 苟思, 秦大庸, 等. 一种高效的 SWAT 模型参数自动率定方法[J]. 水利学报, 2010, 41(1): 113-119. (CHEN Q, GOU S, QIN D Y, et al. A high efficiency auto calibration method for SWAT model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(1): 113-119. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2010.01.005.
- [12] 俞茜, 陈永灿, 朱德军, 等. 基于 DEM 数据的河道水动力过程数值模拟[J]. 水力发电学报, 2014, 33(3): 133-137. (YU Q, CHEN Y C, ZHU D J, et al. River cross section extraction from DEM for one dimensional hydrodynamic modeling[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(3): 133-137. (in Chinese))
- [13] EBERHART R C, KENNEDY J. A new optimizer using particle swarm theory[C]. Proceedings Sixth Symposium on Micro Machine and Human Science Piscataway, NJ, IEEE Service Center, 1995.
- [14] AFSHAR A, SHOJAEI N, SAGHARJOOGHIFARAHANI M. Multiobjective Calibration of reservoir water quality modeling using multi-objective particle swarm optimization (MOPSO)[J]. Water Resources Management, 2013, 27(7): 1931-1947. DOI: 10.1007/s11269-013-0263-x.
- [15] ZHOU J, ZHAO S, YU E L, et al. A particle swarm optimization algorithm and its application in hydrodynamic equations[J]. Advanced Materials Research, 2012, 510: 472-477. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.510.472.
- [16] 江燕, 刘昌明, 胡铁松, 等. 新安江模型参数优选的改进粒子群算法[J]. 水利学报, 2007, 38(10): 1200-1206. (JIANG Y, LIU C M, HU T S, et al. Improved particle swarm optimization for parameter calibration of Xin'anjiang model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(10): 1200-1206. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2007.10.008.
- [17] 张俊娜, 刘元会, 郭建青, 等. 基于改进粒子群优化算法的 BOD-DO 水质模型参数确定[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(3): 212-217. (ZHANG J N, LIU Y H, GUO J Q, et al. Application of improved particle swarm optimization algorithm to determine parameters of BOD-DO water quality model[J]. Journal of Northwest A&F University (Nat. Sci. Ed.), 2017, 45(3): 212-217. (in Chinese)) DOI: 10.13207/j.cnki.jnwf.2017.03.030.
- [18] 张梦泽, 刘远洪, 王苓如, 等. 基于量子行为粒子群优化算法的河道糙率反演[J]. 人民黄河, 2015, 37(2): 26-29. (ZHANG M Z, LIU Y H, WANG L R, et al. Inversion on Channel Roughness for Hydrodynamic Model by Using Quantum-Behaved Particle Swarm Optimization[J]. Yellow River, 2015, 37(2): 26-29. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2015.02.008.
- [19] 李致家, 孔凡哲, 王栋, 等. 现代水文模拟与预报技术[M]. 南京: 河海大学出版社, 2010. (LI Z J, KONG F Z, WANG D, et al. Modern Hydrological Simulation and Forecasting Technology[M]. Nanjing: Hohai University Press, 2010. (in Chinese))
- [20] 陈鸣, 吴永祥, 陆卫鲜, 等. InfoWorksRS、FloodWorks 软件及应用[J]. 水利水运工程学报, 2008(4): 19-24. (CHEN M, WU Y X, LU W X, et al. Characteristics and application of InfoWorks RS and Flood Works software[J]. Hydro Science and Engineering, 2008(4): 19-24. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1009-640X.2008.04.004.
- [21] 魏凯, 梁忠民, 陈永钢. InfoWorksRS 软件在河道洪水模拟中的应用[J]. 水电能源科学, 2013, 31(8): 56-58. (WEI K, LIANG Z M, CHEN Y G. Application of InfoWorks RS in channel flood routing[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(8): 56-58. (in Chinese))
- [22] 张秉文. 天然河道糙率计算及取值方法[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(1): 25-28. (ZHANG B W. Calculation and value selection method of the roughness of natural river channel[J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 2012, 10(1): 25-28. (in Chinese))
- [23] EBERHART R C, SHI Y. Guest Editorial Special Issue on Particle Swarm Optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 204-203. DOI: 10.1109/TEVC.2004.830335.
- [24] 倪庆剑, 邢汉承, 张志政, 等. 粒子群优化算法研究进展[J]. 模式识别与人工智能, 2007, 20(3): 349-357. (NI Q J, XING H C, ZHANG Z Z, et al. Survey of particle swarm optimization algorithm[J]. Pattern Recognition & Artificial Intelligence, 2007, 20(3): 349-357. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1003-6059.2007.03.010.
- [25] MENDES R, KENNEDY J, NEVES J. The Fully Informed Particle Swarm: Simpler, Maybe Better[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 204-210. DOI: 10.1109/TEVC.2004.826074.