

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2009.06.006

基于遗传优化的河网数学模型糙率参数反演

辛小康¹, 刘刚², 张向东¹, 肖洋¹

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京信息工程大学大气科学学院, 江苏 南京 210044)

摘要 将遗传算法智能优化模型与一维河网模型相耦合, 提出一种河网糙率智能反演方法, 自动完成参数的优化选择。与其他河网糙率优化方法相比, 该方法具有理论简单、对实测数据依赖程度低和精度高的特点。将该方法获得的优化糙率值代入到数学模型中, 计算值与实测值吻合程度较高。
关键词 河网模拟; 遗传算法; 参数反演; 糙率

中图分类号: TV133 文献标识码: A 文章编号: 1006-7647(2009)06-0021-04

Investigation on parameter identification for river network model by using genetic algorithm/XIN Xiao-kang¹, LIU Gang², ZHANG Xiang-dong¹, XIAO Yang¹ (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract : The genetic algorithm intelligent model was coupled with a one-dimensional river network model. The intelligent inversion method for quantifying river network roughness, which can automatically accomplish optimal selection for parameters, is put forward. Compared with other optimization methods, this method is simple in theory, has little dependence on field data, and has high precision.

Key words : river network simulation; genetic algorithm; parameter inversion; roughness

一维河网水力模拟的研究日臻完善。一维河网圣维南方程组的差分格式有直接差分格式^[1]、特征差分格式^[2]等, 但应用较多的是 Preissmann 格式。针对 Preissmann 格式得到的代数方程组, 学者们提出了各种求解方法。自 1977 年李岳生等^[3]提出河网非恒定流隐式方程组的稀疏矩阵解法以来, 一维河网非恒定流代数方程组的求解方法经历了由直接解法到二级联解方法^[4]、三级联解方法^[5]、四级联解方法^[6]和汉点分组解法^[7]的里程碑式发展过程。

无论采用何种差分方法、何种求解程式, 都不能回避一个问题, 即圣维南方程组中水力参数的确定。如果只进行水流模拟, 参数就仅有糙率 n , 若涉及泥沙、污染物、温度等质、热传输过程, 就还需考虑扩散系数、泥沙恢复饱和系数等。目前的调参过程主要采用人工“试错法”, 即先假定一组糙率, 代入数学模型中计算, 将计算值和实测值进行比较, 然后逐步调整水力参数, 使计算值和实测值吻合, 这个过程叫做模型率定。人工调整参数具有一定的人为性, 且由于河网的非线性性质, 调参是一个费时费力的过程, 鉴于此, 学者们提出了一些糙率自动反演的模型。

Fread 等^[8]将河网划分成单个河道分别进行校正, 校正手段采用最小化误差方法, 但由于河道划分的人为性, 算不上是完全意义上的机器调参。金忠青等^[9]、韩龙喜等^[10]用复合形法优化河网糙率, 仅考虑了流量的验证, 对于大型河网而言, 精度不够理想。Atanov 等^[11]采用待定 Lagrangian 算子变分法反演糙率, 但此方法只能用于规则棱柱形河道。李光炽等^[12]引进了卡尔曼滤波方法来求解河道糙率反演问题, 可以得到随时间变化的动态糙率, 但该方法对实时数据的要求较高。Ding 等^[13]首次应用有限记忆准牛顿法反演糙率, 其前提是在浅水河道中进行的。程伟平等^[14]利用广义逆理论反演河网糙率, 其理论体系过于复杂。刘志贤^[15]用基本遗传算法作为参数优化估值方法, 仅限于较小的河网实验模型。笔者拟提出一种基于改进遗传算法的河网糙率反演模型, 其基本理论简单易懂, 对实测数据依赖程度低、精度高, 且能够实现实际工程中大型河网糙率参数的自动反演。

1 三级联解河网水力模型及求解程式

采用 Preissmann 格式离散圣维南方程组后得到

如下离散方程^[6]：

$$-Q_j + C_j Z_j + Q_{j+1} + C_j Z_{i+1} = D_j \quad (1)$$

$$E_j Q_j - F_j Z_j + G_j Q_{j+1} + F_j Z_{j+1} = O_j \quad (2)$$

将微段、河段和节点分级求解是河网三级联解方法的要义所在。针对河道微段的追赶求解,设河道首断面编号为 $L1$,末断面编号为 $L2$,对外河道和内河道则有不同的追赶模式。

1.1 外河道追赶模式

a. 水位边界条件有如下追赶方程：

$$\left. \begin{aligned} Z_{L1} &= P_{L1} - V_{L1} Q_{L1} \quad (P_{L1} = Z_{L1}(t), V_{L1} = 0) \\ Q_j &= S_{j+1} - T_{j+1} Q_{j+1} \\ Z_{j+1} &= P_{j+1} - V_{j+1} Q_{j+1} \end{aligned} \right\} \quad (j = L1 \dots, L2 - 1) \quad (3)$$

b. 流量边界条件有如下追赶方程：

$$\left. \begin{aligned} Q_{L1} &= P_{L1} - V_{L1} Z_{L1} \quad (P_{L1} = Q_{L1}(t), V_{L1} = 0) \\ Z_j &= S_{j+1} - T_{j+1} Z_{j+1} \\ Q_{j+1} &= P_{j+1} - V_{j+1} Z_{j+1} \end{aligned} \right\} \quad (j = L1 \dots, L2 - 1) \quad (4)$$

c. 水位流量关系条件追赶方程。对于水位流量关系 $Q_{L1} = f(Z_{L1})$,可线性化处理成 $Q_{L1} = P_{L1} - V_{L1} Z_{L1}$,然后追赶方程同流量边界条件一样对待。

可见,无论是那种边界条件,外河段末断面的流量 Q_{L2} 都可以表达为末断面水位 Z_{L2} 的函数,即

$$Q_{L2} = f(Z_{L2}) \quad (5)$$

1.2 内河道追赶模式

$$Q_j = \alpha_j + \beta_j Z_j + \gamma_j Z_{L2} \quad (j = L2 - 1 \dots, L1) \quad (6)$$

$$Q_j = \xi_j + \zeta_j Z_j + \eta_j Z_{L1} \quad (i = L1 \dots, L2 - 1) \quad (7)$$

每一河段首末断面均与节点相连,利用式(6)和式(7)分别可得如下方程：

$$Q_{L1} = \alpha_{L1} + \beta_{L1} Z_{L1} + \gamma_{L1} Z_{L2} \quad (8)$$

$$Q_{L2} = \xi_{L2} + \zeta_{L2} Z_{L2} + \eta_{L2} Z_{L1} \quad (9)$$

方程(5)(8)(9)与河道微段无关,仅与河网中河道首末断面有关,因此称其为河段方程,河段方程在河网三级联解方法中的地位举足轻重。将式(6)(9)(10)代入汉点连接条件可得汉点连接方程组,用矩阵和向量表示为

$$AZ = R \quad (10)$$

求解汉点连接方程组得到内河段首末断面的水位和外河段末断面的水位,回代可求解各断面的水位和流量,其中内河道的回代关系由式(8)(9)得：

$$Z_j = \frac{\xi_j - \alpha_j + \eta_j Z_{L1} - \gamma_j Z_{L2}}{\beta_j - \zeta_j} \quad (11)$$

$$Q_j = \alpha_j + \beta_j Z_j + \gamma_j Z_{L2} \quad (12)$$

河网三级联解方法可列以下步骤：①读入河道断面地形、微段长和河段糙率等常量和参数；②给定计算初始条件,即给未知量赋初值；③根据式(3)或式(4)建立外河道的“追”模式；④根据式(6)(7)建立内河道的“追”模式；⑤根据式(10)建立汉点水位方程组,用超松弛迭代法求解；⑥根据汉点水位值 $Z_{\text{汉点}}$ 与河道首末断面的连接关系求得外河道末断面、内河道首末断面的水位值；⑦根据式(11)通过“赶”模式求解内河道各断面的水位和流量；⑧根据式(3)或式(4)通过“赶”模式求解外河道各断面的水位和流量值。

2 参数智能反演模型

曼宁糙率系数 n 对模型的影响举足轻重。人工试错法只能根据经验调整局部河段的糙率,使模型的计算值尽量和实测值相符,但人工调参具有随机性。如果将试错的过程交由电脑来完成,并为其指定一条准则,就能够使得河网糙率自动反演成为可能。遗传算法(GA)具有搜索性强、对目标函数性质要求较低的特点,文献[15]已作了本问题的初步尝试。河网是由很多单一河道组成的有机整体,如果把每一河段的糙率看成是定值的话,这些定值总有一个最优组合,使得数学模型能够比较真实地模拟河道水力要素。

将河网各河段的糙率组合看作优化向量 $X = (n_1 \ n_2 \ \dots \ n_{NS})^T$,设定目标函数如下：

$$E(X) = \alpha \frac{1}{N_T} \sum_{i=1}^{N_T} \sum_{j=1}^{N_C} \left(\frac{Q_{j0} - Q_{j1}}{Q_{j0}} \right)^2 + (1 - \alpha) \cdot \frac{1}{N_T} \sum_{i=1}^{N_T} \sum_{j=1}^{N_C} \left(\frac{Z_{j0} - Z_{j1}}{Z_{j0}} \right)^2 \quad (13)$$

式中： α 为流量和水位的权重因子,可以根据需要调整大小,一般情况下取0.50； N_T 为模型验证时间系列的长度； N_C 为模型验证的验证断面数； Q_{j0} , Z_{j0} 为验证断面的实测流量值和水位值； Q_{j1} , Z_{j1} 为验证断面的计算流量值和水位值； $\bar{Q}_{j0}$, $\bar{Z}_{j0}$ 为验证断面实测流量、水位的均值。

糙率反演模型的寻优过程就是寻求使目标函数值最小的优化向量 X 的过程。

优化向量的每个分量在一定的范围内取值,糙率 n 是河道边壁对水流影响的综合系数,它与河道边壁的物理化学性质有关,同时也与水流流态有关。没有可以准确确定糙率系数的现存公式,仅有一些糙率表提供一些估值范围。本模型依照糙率表首先给定一个全局糙率取值范围。

基于GA的河网糙率反演模型可列如下具体

步骤：

a. 确定 GA 的参数。包括染色体基因个数 $\text{dim}x$ 交叉概率 p_c ,变异概率 p_m ,最大进化世代数 $T_{\max}$ 以及种群规模 M 。

b. 遗传算法编码。将优化向量进行染色体编码 ,考虑河网的河段较多 ,对糙率采用实数编码方法 ,使第 k 个个体的染色体为 : $X^k = (n_1^k, n_2^k, \dots, n_{NS}^k)$, $k = 1, 2, \dots, M$ 。其中每个基因的取值范围为根据糙率表拟定的全局糙率取值范围。

c. 产生初始种群。用随机的方法产生初始种群。 $n_i^k = n_{i, \min} + \text{rand}(n_{i, \max} - n_{i, \min})$, rand 是产生 $(0, 1)$ 区间内随机值的随机函数。

d. 确定适应度函数。GA 只能使个体朝着适应度增大的方向进化 ,而目标函数式(13)要求优化向量朝着使之减小的方向发展 ,因此将目标函数做如下改动后作为 GA 的适应度函数：

$$f(x) = \frac{1}{E(x)} \tag{14}$$

e. 遗传进化操作。对初始种群应用进化算子 ,包括选择算子、交叉算子和变异算子。直至收敛或达到最大进化代数为止 ,并输出最优适应度值对应的个体 ,其“表现型”即为河网水动力模型的最优糙率向量。

3 应用实例

笔者将基于 GA 的糙率反演模型应用于西江河网的水力模拟中 ,以检验模型的实用性。西江河网的概化及河网布置见图 1 ,是典型的环状河网。河网共划分河道 42 个 ,其中外河道 6 个 ,内河道 36 个 ,河道汉点 25 个。天河、石嘴水文站给定流量边界条件 ,官冲、西炮台、黄金和灯笼山水文站给定水位边界条件 ,三级联解河网水动力模型计算时间步长为 1 min ,模拟河网 1999 年 7 月 15 日 20 时至 16 日 20

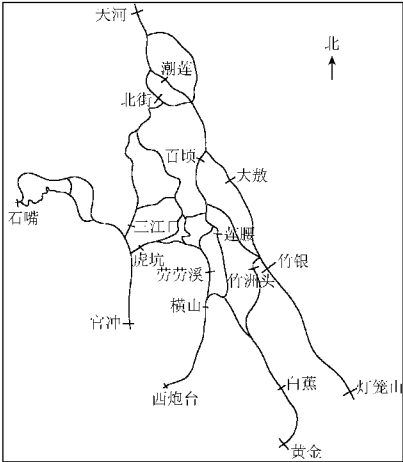


图 1 西江河网布置

时各断面的水位 ~ 流量过程 ,并将潮莲、北街、百顷、大敖、三江口、莲腰、虎坑、竹银、竹洲头、劳劳溪、横山、白蕉 12 个水文站的同步水文资料作为糙率反演的验证资料 ,即 $N_C = 12$ 。GA 的交叉概率 $p_c = 0.60$,变异概率 $p_m = 0.50$,种群规模取为 $M = 10$,最大遗传代数取为 $T_{\max} = 30$,河段糙率全局范围根据糙率表取为 $(0.0245 \sim 0.0305)$ 。

GA 产生的最优糙率向量适应度值随进化代数的变化曲线如图 2 所示 ,曲线是单调递增的 ,且曲线的斜率逐步减小 ,表明糙率向量逐步逼近最优。

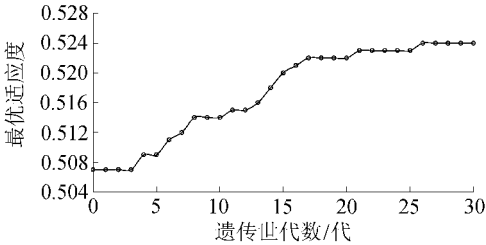


图 2 基于 GA 的糙率反演模型适应度变化曲线

将进化 30 代后产生的最优糙率向量直接代入到河网计算程序中 ,将部分验证断面的水位和流量计算值与实测值相比较 ,如图 3 和图 4 所示 ,2 条曲线十分吻合。这说明基于 GA 的河网糙率反演模型精度能够满足要求 ,且实用性较强。

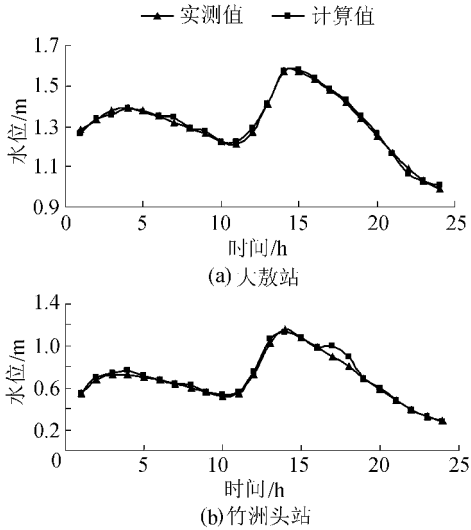


图 3 部分验证断面的水位计算值与实测值比较

4 结 语

一维河网水力模拟主要是求解含有糙率等参数的圣维南方程组 ,这些参数直接影响了模型的精度。笔者在河网非恒定流三级联解方法基本程式的基础上 ,提出一种基于遗传算法的河网数学模型糙率自动反演方法 ,将河网三级联解的计算程序稍加改动后作为遗传算法的适应度函数子程序 ,经过一定次数的迭代 ,便可获得河网糙率的最佳组合。这使得

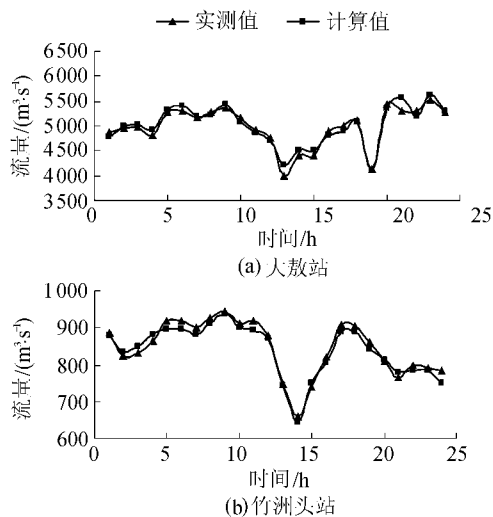


图4 部分验证断面的流量计算值与实测值比较

智能调参代替人工调参成为可能,既充分利用了实测的数据资源,也节省了人力物力。从计算结果看,计算值和实测值的吻合程度较好,说明本文的智能调参模型能较准确地率定河网各河段的糙率。

参考文献:

- [1] 顾元,王尚毅,郭传镇.具有岔道支流的明渠不恒定计算[J].天津大学学报,1985(1):55-64.
- [2] 杨世孝,肖子良.一维不恒定流方程组的一种隐式特征差分格式[J].中山大学学报:自然科学版,1992,31(4):26-32.
- [3] 李岳生,杨世孝,肖子良.河网不恒定流隐式方程组的稀疏矩阵解法[J].中山大学学报:自然科学版,1977(3):27-37.
- [4] DRONKERS J J. Tidal computations of rivers, coastal areas and sea[J]. Journal of Hydraulic Division, ASCE, 1969, 95(1):29-37.
- [5] 张二俊,张东生,李挺,等.河网非恒定流三级联合算法[J].华东水利学院学报,1985(1):1-13.
- [6] 吴寿红.河网非恒定流四级解算法[J].水利学报,1985(8):42-50.
- [7] 李义天.河网非恒定流隐式方程组的汉点分组解法[J].水利学报,1997(3):49-57.
- [8] FREAD D L, SMITH G F. Calibration techniques for 1-D unsteady flow models[J]. Journal of Hydraulic Division, ASCE, 1978, 104(7):1027-1043.
- [9] 金忠青,韩龙喜,张建.复杂河网的水力计算及参数反问题[J].水动力学研究与进展,1998,13(3):280-285.
- [10] 韩龙喜,金忠青.三角联解法水力水质模型的糙率反演及面污染源计算[J].水利学报,1998(7):30-34.
- [11] ATANOV G A, EVSEEVA E G, MESELHE E A. Estimation of roughness profile in trapezoidal open channel[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1999, 125(3):309-312.
- [12] 李光炽,周晶晏,张贵寿.用卡尔曼滤波求解河道糙率参数反问题[J].河海大学学报:自然科学版,2003,31(5):490-493.
- [13] DING Y, JIA Y, WANG S S Y. Identification of manning's roughness coefficient in shallow water flows[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2004, 130(6):501-510.

- [14] 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,2005,39(10):1063-1068.
- [15] 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.
- [16] 钟娜.复式河道一维数值模拟[D].南京:河海大学,2007. (收稿日期:2008-11-24 编辑:马敏峰)

(上接第20页)

- [2] 孙梅霞,汪耀富,张全民.烟草生理指标与土壤含水量的关系[J].中国烟草科学,2000,21(2):30-33.
- [3] 伍贤进.土壤水分对烤烟某些生理特性影响的研究[J].吉林农业大学学报,1998,20(2):22-25.
- [4] 汪耀富,阎栓年,于建军,等.土壤干旱对烤烟生长的影响及机理研究[J].河南农业大学学报,1994(3):250-256.
- [5] 刘国顺.烟草栽培学[M].北京:中国农业出版社,2003:212-224.
- [6] 史宏志,刘国顺,刘建利,等.烟田灌溉现代化创新模式的探索与实践[J].中国烟草学报,2008,14(2):44-49.
- [7] 阿吉艾克·拜尔,邵孝侯,钟华,等.调亏灌溉及其对烟草生长发育的影响研究[J].河海大学学报:自然科学版,2006,34(2):171-174.
- [8] 汪耀富,蔡寒玉,张晓海,等.我国烟草优化灌溉技术发展的策略与措施[J].中国烟草科学,2007,28(1):6-9.
- [9] 谷秋荣,杨占平,王秋杰,等.不同灌水量对土壤氮磷钾养分移动的影响[J].干旱地区农业研究,2002,20(4):13-17.
- [10] 袁有波,李继新,苏贤坤,等.节水灌溉条件下水氮耦合对烤烟生长发育及生理性状的影响[J].河海大学学报:自然科学版,2008,36(6):781-785.
- [11] 韩锦峰,汪耀富,钱晓刚,等.烟草栽培生理[M].北京:中国农业出版社,2003:1-22.
- [12] 李进平,陈振国,杨艳华,等.水分条件对烤烟生理指标的影响及适宜土壤水分指标研究[J].灌溉排水学报,2007,26(1):93-96.
- [13] 蔡寒玉,汪耀富,李进平,等.土壤水分对烤烟形态和耗水特征的影响[J].灌溉排水学报,2005,24(3):38-41.
- [14] 钟华,邵孝侯,阿吉艾克·拜尔,等.我国烟草节水优化灌溉和水肥耦合技术综述[J].水利水电科技进展,2005,25(3):68-70.
- [15] 陈海生,魏跃伟,刘国顺,等.基于GIS的平顶山烟区土壤肥力适宜性研究[J].河南农业大学学报,2008,42(5):546-549.
- [16] 谢贤群,于沪宁.作物与水分关系研究[M].北京:中国科学技术出版社,1992:21-35.
- [17] 汪耀富,李广安,张新堂.不同灌水条件下烤烟耗水特征和用水效率的研究[J].中国烟草,1995,1(1):4-8.
- [18] 彭世彰,边立明,朱成立.作物水分生产函数的研究与发展[J].水利水电科技进展,2000,20(1):17-20.
- [19] 苏贤坤,张晓海.水肥交互作用对烤烟生长发育和烟叶品质的影响[J].烟草农业科学,2005,1(1):42-46.
- [20] 张永丽,于振文.灌水量对不同小麦品种籽粒品质、产量及土壤硝态氮含量的影响[J].水土保持学报,2007,21(5):650-654.

(收稿日期:2009-02-17 编辑:高建群)