

自适应随机搜索算法在 河网数学模型糙率反演中的应用

李 丽¹, 王加虎¹, 王建群¹, 李国新², 傅国胜³

(1. 河海大学水文水资源及水利工程国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 上海青浦区水文勘测队, 上海 201700; 3. 江苏省水文水资源勘测局泰州分局, 江苏 泰州 225300)

摘要 介绍自适应随机搜索(ARS)算法的基本原理,并以泰州市河网为例,测试了 ARS 算法在资料受限条件下河网模型糙率反演的表现。结果表明,ARS 算法能够自动优选出河网大多数河段的糙率值,得到较好的水位流量拟合效果。

关键词 ARS 算法; 河网模型; 糙率反演

中图分类号: TP391.9

文献标识码: B

文章编号: 1006-7647(2011)05-0064-04

Application of adaptive random search algorithm in roughness inversion of mathematical model for river networks/Li Li¹, WANG Jia-hu¹, WANG Jian-qun¹, LI Guo-xin², FU Guo-sheng³ 1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Qingpu Hydrological Survey Crew, Shanghai 201700, China; 3. Taizhou Branch of Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Taizhou 225300, China)

Abstract: The fundamental principles of the adaptive random search(ARS) algorithm were introduced. A case study of the ARS algorithm of roughness inversion of mathematical model for river networks in Taizhou City with restricted data was presented. The results show that the ARS algorithm can automatically optimize and select the values of roughness for most river networks, and satisfactory fitting between water level and discharge is achieved.

Key words: ARS algorithm; river network model; roughness inversion

自适应随机搜索(ARS)算法是 Masri 等^[1]在 1980 年建立的全局参数优选算法,具有原理简单、稳定性好、丢失最优值区间的可能性小等优点。但是相对于后来 Duan 等^[2]、Chen 等^[3]建立的优选算法来说,ARS 算法没有复杂的收敛加速方面的设计,其计算量大、计算效率低的缺点自诞生之日起即饱受诟病,过去主要应用于新优选算法的对照评估^[1]。随着计算机硬件的发展,数据处理速度迅速提高,个人微型计算机双核处理器已经基本普及,四核乃至多核处理器也将逐渐成为主流,配合并行计算技术的使用,这种效率较低的优选算法因其原理简单、稳定性好等优点,在沉寂多年后,近年来逐渐被应用于降雨产流模型的参数自动优选^[4]。

笔者在泰州市河网模拟的糙率确定中遇到 2 个难题:①河段数量众多。仅主城区河网就需要概化 157 个微段,即便根据规划的断面尺寸、结构、护坡

材料、河底坡度等要素,157 个微段最少需要 62 种聚类,相关糙率系数的确定比较困难。②资料奇缺。仅有的资料只有 2 个节点的水位和 1 个节点的流量,时间长度目前也仅有 22 时段的逐小时加密观测数据。在简单比较了 SCU、DREAM、ARS 等优化算法后发现,ARS 算法建模最为简单,容易被基层生产单位接受和掌握,且拟合效果较优、优选结果相对稳定。

1 ARS 算法简介

ARS 算法不考虑优选对象(模型和参数)的物理意义,只从统计学的角度分析参数值与优选指标的关系,积累了一定量的关系数据后,调整(主要是缩减)参数的可能取值范围,直到优选结束,基本原理见图 1。从图 1 可知,每个参数都有一个预先确定的参数范围,可以用最小值 $P_{\min}$ 到最大值 $P_{\max}$ 的区

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(40801012);中央高校基本科研业务费专项(2010B00814,2010B00914);水文水资源与水利工程科学国家重点实验室专项(1069-50985512)

作者简介: 李丽(1978—),女,河南济源人,副教授,博士,从事水文水资源研究。E-mail: llwjh@163.com

间来表示,在某一次随机搜索时,每个参数都先按照平均分布在其取值范围内随机生成一个参数值 p_j^i (i 是参数序号, j 是某次随机搜索计算的编号);然后模型在随机生成的参数组 $(p_j^1, \dots, p_j^i, \dots, p_j^j)$ 控制下计算出模拟值,最后将模拟值与基准值(大多为实测数据)进行比较得到相应的优选指标 D_j ,完成一次随机搜索计算。实际使用时视模型结构及其适用性、参数数量等的不同,往往需要重复搜索上万次。

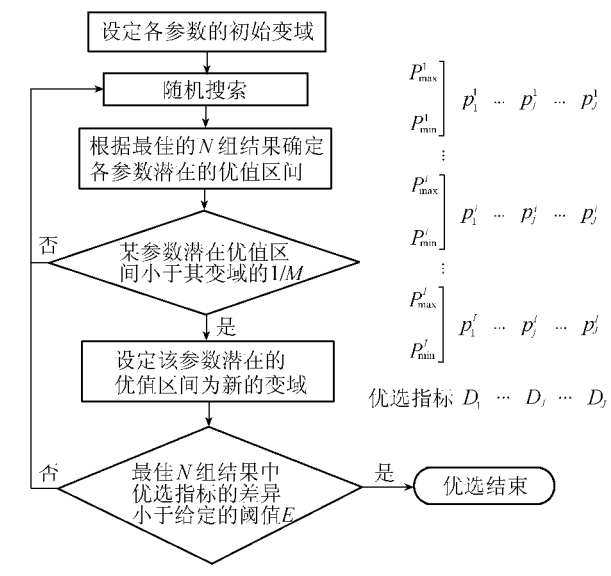


图1 随机搜索算法原理

ARS 算法是一个连续的自动过程,优选控制参数有3个:①参照的随机搜索结果数量 N 。优选算法将根据最优的 N 组结果确定潜在的优值区间, N 值越大,参数变域调整的速度越慢,但是漏掉最优区间的可能性就越小,建议取值大于或等于10。②给定比值 $1/M$ 。当某个参数潜在的优值区间小于其搜索变域的 $1/M$ 时,优选算法将设定其潜在的优值区间为新的搜索变域,重新开始随机搜索计算, M 值越大,变域缩减的速度越慢,漏掉最优区间的可能性就越小,建议取值大于或等于3。③结束控制阈值 E 。当最优 N 组结果的优选指标差异小于该阈值时计算结束。 E 值越小,最后优选出的参数变域范围越小。

2 应用实例

近年来,圣维南方程组中水力参数的确定由人工试错法逐步向参数自动反演发展。对于单一河段的糙率反演,Becker 等^[5-6]最早尝试了影响系数算法、改进的单纯形法、最小化误差平方和或最小化最大误差绝对值来反演河道糙率;Georges^[7]比较了 Gauss-Newton 法、Levenberg-Marquardt 法和 BFGS 法在糙率优化过程中的收敛特性;杨世孝等^[8]提出将手工调试糙率的方法程序化;La^[9]将奇异值分解运用

到河网糙率反演中,但他认为能够识别的变量个数等于观测点的个数;Khatibi 等^[10-13]探讨了准则函数在不同噪声水平中的特性和样本量对计算结果可靠性的影响;董文军等^[14-15]利用最小二乘逼近思想建立了关于一维圣维南方程中曼宁糙率的辨识模型,利用 Frechet 微分的概念构造协态方程确定了目标泛函的下降方向,并采用拟牛顿法优化河道的糙率。

在众多河网糙率自动反演的研究中,Fread 等^[16]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^[17]、韩龙喜等^[18]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^[19]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^[20]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^[21]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^[22]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^[23]用基本遗传算法作为参数优化估值方法,仅限于较小的河网试验模型;王玲玲等^[24]用奇异矩阵反演河道糙率;辛小康等^[25]尝试了基于改进遗传算法的河网糙率反演模型,但除了糙率以外,其他参数(如扩散系数、泥沙恢复饱和系数等)同步优选能力有待测试。

一维河网数学模型已经日趋完善^[26-27],求解方法也比较成熟^[28-32],本文选择常用的河网三级联解方法^[30]来测试优选方法,基本步骤包括:①划分内外节点;②读入河道断面地形、微段长和河段糙率等常量和参数;③给定计算初始条件;④建立外河道的“追”模式和内河道的“追”模式;⑤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通过“赶”模式求解内河道各断面的水位和流量;⑧通过“赶”模式求解外河道各断面的水位和流量值。

在取值范围内随机给定1组糙率系数(图1,这里是62个值),利用河网模型计算出各节点对应的水位和流量。在有实测值的节点,通过与实测值的比较,评价该组糙率系数的优劣。重复这一过程,直到优选指标没有明显改善为止。

本文以较为常用的效率系数来比较计算值对实测值的模拟情况(即优选指标),公式为

$$\eta = \frac{\sum (X_{i,0} - \bar{X}_0)^2 - \sum (X_{i,0} - \bar{X})^2}{\sum (X_{i,0} - \bar{X}_0)^2} \quad (1)$$

式中： X_{i_0} 为第 i 个时段的实测值(流量或水位，下同)； $\bar{X}_0$ 为实测序列实测值的平均值； $\bar{X}$ 为模拟值的平均值。

优选指标可以是单目标(如本文的例子)，也可以是多个或多种目标函数的组合。本文按照简单的权重相等方法构造整个河网模型的优选指标，即

$$D_j = \frac{\eta_{\text{水位1}}^j + \eta_{\text{水位2}}^j + \eta_{\text{流量3}}^j}{3} \quad (2)$$

式中： $\eta_{\text{水位1}}$ 、 $\eta_{\text{水位2}}$ 、 $\eta_{\text{水位3}}$ 分别为节点 1、节点 2、节点 3 水位拟合的效率系数。

为了检验优选算法的稳定性，糙率 n 的初始取值范围是 0~0.1，这显然是一个超出实际意义的糙率值，如果优选算法能够给出一个合理的糙率结果，说明优选算法的稳定性较好。经过 316 万次计算后将绝大多数河段 n 的取值锁定在 0.026~0.031 范围内。优选出的最优 10 组结果构成的优选值区间与实测值的吻合情况较好(图 2)，自动优选的糙率值能够反映河道的实际状况。

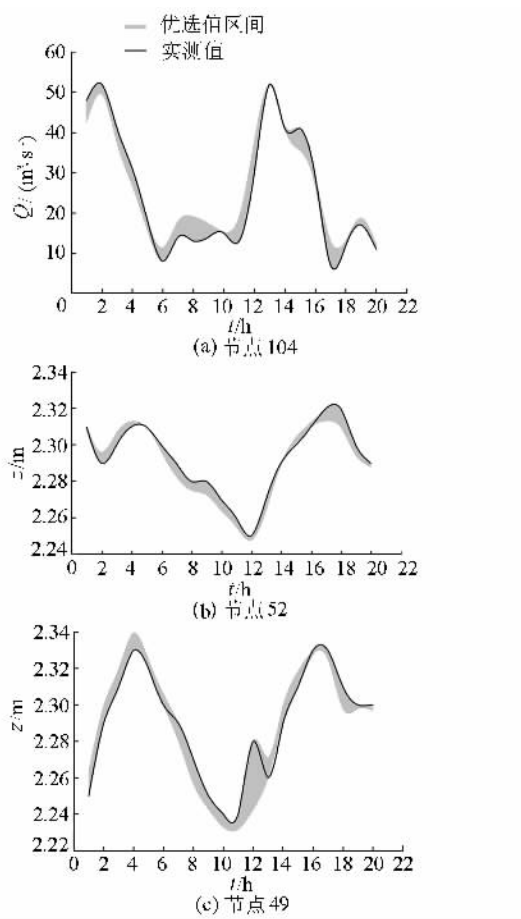


图 2 3 个控制节点的优选结果集(最优 10 组结果组成的优选值区间)与实测值比较

3 讨论与展望

316 万次计算在一般配置的计算机中(2 G 主频、单核、512 M 内存)需要连续运行约 154 h。随着

硬件设备的改善尤其是并行技术使用后，计算时间会大幅度缩短。如利用 iFort 编译器的[parallel]并行编译功能^[33]在主流配置的计算机上(3 G 主频、双核、2 G 内存)需要 61 h 完成优选计算；在一般配置的工作站上(2.5 G 主频、四核、双 CPU、10 G 内存)总运行时间仅需要 18 h；在多节点的小型机上需要的机时还可以进一步缩短。随着计算机硬件的快速发展，尤其是多核与并行处理技术的应用，这一原理简单、搜索性强、可同步优选参数种类和数量的方法应该会得到越来越广泛的应用。

本文利用 ARS 算法经过相当次数的迭代后，获得了河网模型中各河段糙率的最佳组合。这表明不考虑硬件负载的话，原理简单的优选算法也能代替人工调参和原理复杂的自动优选方法，既节省了人力、物力，又便于推广普及。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 ARS 算法调参模式能较准确地率定河网各河段的糙率。

笔者在初步研究中还发现有 10 条左右的微段，不管其糙率如何变化，优选指标都无响应。其原因可能是：①优选目标节点距离这些河段太远，无法反映这些河段的变化；②优选指标函数有待改进，以反映这些河段的细微变化；③这些河段水流缓慢，对整个河网的水流运动贡献较小；④实测数据的时间长度较短，初值的影响较大。这些问题计划在下一步研究中深入探讨。

参考文献：

- [1] MASRI S F, BEKEY F B. A global optimization algorithm using adaptive random search[J]. Applied Mathematics and Computation, 1980, 7(4): 353-375.
- [2] DUAN Q, SOROOSHIAN S, GUPTA V K. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed model[J]. Journal of Hydrology, 1994, 158(3/4): 265-284.
- [3] CHEN K C, MUROGA S. SYLON-DREAM: a multi-level network synthesizer [C]//Proceedings of International Conference on Computer-Aided Design. New York: IEEE Press, 1989: 552-555.
- [4] WANG J, HONG Y, LI L, et al. The coupled routing and excess storage (CREST) distributed hydrological model[J]. Hydrological Science Journal, 2011, 56(1): 84-98.
- [5] BECKER L, YEH W W G. Identification of parameters in unsteady open channel flows[J]. Water Resources Research, 1972, 8(4): 956-965.
- [6] BECKER L, YEH W W G. Identification of multiple reach channel parameters[J]. Water Resources Research, 1973, 9(2): 326-335.
- [7] GEORGES D. Nonlinear model identification and state-observer design for water distribution systems[C]//Control

International Conference 1994. New York :IEEE/IET, 1994 : 887-894.

[8] 杨世孝 ,肖子良 .反求糙率的一种数值方法[J]. 数值计算与计算机应用 ,1994 ,15(4) 247-260.

[9] LAL A M W. Calibration of riverbed roughness[J]. Journal of Hydraulic Engineering ,ASCE ,1995 ,121(9) 664-674.

[10] KHATIBI R H. Sample size determination in open-channel inverse problem[J]. Journal of Hydraulic Engineering ,ASCE , 2001 ,127(8) 678-688.

[11] KHATIBI R H ,WILLIAMS J J R ,WORMALEATON P R. Predict parameters for flows in nearly flat tidal channels[J]. Journal of Hydraulic Engineering ,ASCE ,2000 ,126(10) :741-749.

[12] KHATIBI R H ,WILLIAMS J J R ,WORMLEATON P R. Identification problem of open-channel friction parameters[J]. Journal of Hydraulic Engineering ,ASCE ,1997 ,123(12) : 1078.

[13] KHATIBI R H ,WORMLEATON P R ,WILLIAMS J J R. Parameter quality conditions in open-channel inverse problems [J]. Journal of Hydraulic Research 2000 ,38(6) 447-458.

[14] 董文军 ,姜亨余 .一维水流方程中曼宁糙率的参数辨识 [J]. 天津大学学报 :自然科学与工程技术版 ,2001 ,34 (2) 201-204.

[15] 董文军 ,杨则 .一维圣维南方程的反问题研究与计算方法[J]. 水利学报 ,2002 ,33(9) 61-65.

[16] FREAD D L , SMITH G F. Calibration techniques for 1-D unsteady flow models[J]. Journal of Hydraulic Engineering , ASCE ,1978 ,104(7) :1027-1043.

[17] 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.

[18] 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 ,29(7) 30-34.

[19] ATANOV G A , EVSEEVA E G , MESELHE E A. Estimation of roughness profile in trapezoidal open channe[J]. Journal of Hydraulic Engineering ,ASCE ,1999 ,125(3) 309-312.

[20] 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.

[21] DING Y ,JIA Y ,WANG S S Y. Identification of Manning 's roughness coefficients in shallow water flows[J]. Journal of Hydraulic Engineering ,ASCE ,2004 ,130(6) 501-510.

[22] 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.

[23] 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.

[24] 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.

[25] 辛小康 ,刘刚 ,张向东 ,等 .基于遗传优化的河网数学模型糙率参数反演[J]. 水利水电科技进展 ,2009 ,29(6) :

21-24.

[26] 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.

[27] 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.

[28] 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 ,1997 ,36 (3) 27-37.

[29] DRONKERS J J. Tidal computations for rivers , coastal areas , and sea[J]. J Hydraul Div ,ASCE ,1969 ,95(1) 29-77.

[30] 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.

[31] 吴寿红 .河网非恒定流四级解算法[J]. 水利学报 ,1985 , 16(8) 42-50.

[32] 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 ,28(3) 49-57.

[33] DONGARRA J J. Performance of various computers using standard linear equations software[J]. ACM SIGARCH Computer Architecture News ,1992 ,20(3) 22-44.

(收稿日期 2010-10-14 编辑 方宇彤)

· 简讯 ·

首届中国湖泊论坛将在江苏淮安举办

由中国科协主办 ,江苏省科协、淮安市人民政府承办 ,中国水利学会、中国海洋湖沼学会、中国地理学会、中国可持续发展研究会等 12 家全国性学会 ,以及江苏省水利厅、江苏省环保厅、中国科学院南京地理与湖泊研究所、南京水利科学研究院、河海大学等协办的首届中国湖泊论坛将于 2011 年 11 月上旬在江苏省淮安市举办。论坛主题为 :湖泊健康与可持续发展。论坛拟设定 3 个专题分论坛 :①湖泊保护与资源利用 ;②湖泊流域发展与综合治理 ;③湖泊流域管理体制与措施。论坛主要议题为 :①湖泊流域生态环境演变 ;②水利工程与湖泊环境 ;③流域土地利用与湖泊环境 ;④气候变化与湖泊流域环境 ;⑤湖泊水资源可持续利用 ;⑥湖泊生态系统健康与湿地保护 ;⑦湖泊治理资金筹措机制 ;⑧国际经验、合作与湖泊流域保护 ;⑨人类活动对湖泊流域影响 ;⑩湖泊流域的综合治理与保护策略 ;⑪湖泊富营养化与蓝藻水华控制 ;⑫湖泊水旱灾害防治 ;⑬湖泊流域文化与文明 ;⑭现代生活方式与湖泊的健康 ;⑮洪泽湖保护与利用。会前将出版《首届湖泊论坛论文集》。

(本刊编辑部供稿)