

SCE-UA 算法在 TOPMODEL 参数优化中的应用

马海波 董增川 张文明 梁忠民

(河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098)

摘要:以江西修水万家埠流域为例,用 SCE-UA 算法对 TOPMODEL 参数进行了优化,并对优化结果进行了检验.结果表明 SCE-UA 算法不仅可以用于概念性水文模型和分布式水文模型,还可以用于半分布式水文模型——TOPMODEL;TOPMODEL 参数上下边界需根据参数的物理意义和研究流域特性来确定.在 SCE-UA 算法中,目标函数的建立对于参数优化具有重要作用,在次洪模拟时,目标函数应突出高水过程和洪峰对模拟效果的影响. SCE-UA 算法的绝大部分参数取值都可以采用已有研究成果的默认值,只有复合型个数 p 需要根据具体问题确定.

关键词:水文模型;SCE-UA 算法;TOPMODEL;参数率定

中图分类号: P333 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2006)04-0361-05

参数率定是水文模型应用的重要组成部分.参数率定方法有人工率定和自动率定 2 种.人工率定主要通过试错法确定模型参数.这对于有经验的率定者来说,比较容易得到较好的参数率定值,但对于缺少经验的率定者来说,人工率定过程费时费力.随着优化技术的快速发展,各种水文模型参数自动率定方法迅速发展起来.通常,参数自动率定方法的主要步骤是建立目标函数、选择优化算法、确定中止准则和收集率定数据^[1].其中,优化算法是参数率定的关键.优化算法分为局部搜索法和全局搜索法.局部搜索法能够快速地对单峰函数进行寻优,但寻优过程很容易陷入局部最优.对于实际水文问题来讲,由于水文模型的响应面大都为多峰曲面,采用局部搜索法一般很难得到满意的结果.全局搜索法可以弥补局部搜索法的不足.全局搜索法分为确定性算法、随机算法和二者的混合算法.其中,混合算法应用较广.

1993 年, Duan 等^[2]在求解概念性降雨径流模型参数自动率定优化问题时,针对问题的非线性、多极值、没有具体的函数表达式、区间型约束等特点,提出了 SCE-UA 算法.该算法是一种解决非线性约束最优化问题的有效方法,可以找到全局最优解. SCE-UA 算法已在概念性水文模型、半分布式水文模型和分布式水文模型中得到广泛应用^[3-6].

TOPMODEL^[7]是一个以地形为基础的半分布式流域水文模型.该模型结构简单,优选参数少,并可以充分利用容易获取的地形资料,而且与所观测的物理水文过程有着密切联系.本文将 SCE-UA 算法应用于 TOPMODEL 参数率定,并以江西修水万家埠流域为例,对场次洪水进行了率定和检验.

1 SCE-UA 算法

SCE-UA 算法的基本思路是将基于确定性的复合型搜索技术和自然界中的生物竞争进化原理相结合.算法的关键部分为竞争的复合型进化算法(CCE).在 CCE 中,每个复合型的顶点都是潜在的父辈,都有可能参与产生下一代群体的计算.每个子复合型的作用如同一对父辈.随机方式在构建子复合型中的应用,使得在可行域中的搜索更加彻底.用 SCE-UA 算法求解最小化问题的具体步骤如下:

a. 初始化.假定待优化问题是 n 维问题,选取参与进化的复合型个数 p ($p \geq 1$) 和每个复合型所包含的顶点数目 m ($m \geq n + 1$),计算样本点数目 $s = p \times m$.

b. 产生样本点.在可行域内随机产生 s 个样本点 $x_1, \dots, x_s$, 分别计算每一点 x_i 的函数值 $f_i = f(x_i)$, $i = 1, \dots, s$.

- c. 样本点排序. 把 s 个样本点 (x_i, f_i) 按函数值升序排列, 排序后仍记为 $(x_i, f_i), i = 1, \dots, s$, 其中 $f_1 \leq f_2 \leq \dots \leq f_s$, 记 $D = \{(x_i, f_i) | i = 1, \dots, s\}$.
- d. 划分复合型群体. 将 D 划分为 p 个复合型 $A_1, \dots, A_p$, 每个复合型含有 m 点, 其中 $A^k = \{(x_j^k, f_j^k) | x_j^k = x_{k+m(k-1)}, f_j^k = f_{j+m(k-1)}, j = 1, \dots, m\}, k = 1, 2, \dots, p$.
- e. 复合型进化. 按 CCE 分别进化各个复合型.
- f. 复合型混合. 把进化后的每个复合型的的所有顶点组合成新的点集, 再次按函数值 f_i 升序排列, 排序后不妨仍记为 D , 对 D 按目标函数的升序进行排列.
- g. 收敛性判断. 如果满足收敛条件则停止, 否则返回 d.

2 TOPMODEL

TOPMODEL(TOPgraphy based hydrological MODEL)是 1979 年由 Beven 和 Kirkby 提出的一个以地形为基础的流域水文模型. 其主要特征是: 基于 DEM 计算地形指数 $\ln(\alpha/\tan\beta)$, 并假定地形指数相同的网格具有相同的水文响应^[8], 通过对地形指数的统计分析得到“地形指数-面积分布函数”, 用地形指数的这种空间统计分布来反映流域饱和和缺水量的空间分布.

2.1 模型参数

TOPMODEL 模型共有 7 个参数, 分别是: M ——土壤下渗率呈指数衰减的速率; $\ln(T_0)$ ——土壤刚达饱和时的传导度; T_d ——重力排水的时间滞时参数; $SR_{\max}$ ——根带最大蓄水能力; SR_0 ——根带土壤的初始缺水量; RV ——地表坡面汇流的有效速度; CHV ——主河道汇流的有效速度.

2.2 地形指数

利用 Lancaster 大学开发的 GRIDATB 模型, 首先对原始 DEM 进行填洼处理, 然后采用由 Quinn 等^[9]提出的方法计算流域内各点的水流流向, 再计算各点的地形指数, 最后通过统计分析得到流域的“地形指数-面积分布函数”, 并将此作为 TOPMODEL 的输入资料.

3 优化过程

将 TOPMODEL 与 SCE-UA 算法相结合进行参数优化. 参数优化过程是: (a) 确定寻优空间, 即待优化参数的上下限; (b) 确定 SCE-UA 算法参数值; (c) 建立目标函数; (d) 确定停止迭代准则.

3.1 确定寻优空间

寻优空间由参数的上下边界组成, 可以根据模型推荐的参数范围来确定, 也可以根据参数的物理意义和研究流域的特性由人工给定. 表 1 列出了本文选用的优化参数上下边界.

表 1 优化参数的上下边界

Table 1 Upper and lower boundaries for parameter optimization						
参数	M/m	$\ln(T_0)/$ ($m^2 \cdot h^{-1}$)	T_d/h	$SR_{\max}/m$	$RV/$ ($m \cdot h^{-1}$)	$CHV/$ ($m \cdot h^{-1}$)
下边界	0.02	1	0	0.001	100	100
上边界	0.10	10	30	0.100	10 000	10 000

3.2 确定 SCE-UA 参数

Duan 等^[2]对 CRS2, SCE-UA(包括 SCE1 和 SCE2)和 MSX 这几种不同的全局优化算法进行了试验比较, 发现 SCE-UA 算法中的 SCE2 参数取值最优. SCE-UA 算法的参数缺省取值为 $m = (2n + 1), q = n + 1, \alpha = 1, \beta = 2n + 1$. 其中: n 为待优化参数个数; m 为每个复合型的顶点数; q 为子复合型的顶点数; α 为每个子复合型进化后产生的连续后代的个数; β 为每个复合型的进化次数. 这样, 复合型的个数 p 是参数率定时唯一需要确定的参数. p 值越大, 越适宜于高阶非线性问题. 本文取 $p = 2$.

3.3 建立目标函数

研究时段以 d 或月为单位, 建立目标函数时主要考虑洪量误差. 本次研究以次洪为对象, 时段长为 6 h. 在建立目标函数时, 必须考虑洪峰对模型率定的贡献, 加入洪峰误差. 总目标函数 F 由 3 个子目标函数组成, 即

$$F = f_{obj_1} + f_{obj_2} + f_{obj_3}$$

$$f_{obj_1} = \left| \frac{\sum_{i=1}^n Q_{obs}(i) - \sum_{i=1}^n Q_{cal}(i)}{\sum_{i=1}^n Q_{obs}(i)} \right|$$

式中 : Q_{obs} ——观测值 ; Q_{cal} ——计算值.

$$f_{obj_2} = \frac{\sum_{i=1}^n |Q_{obs}(i) - Q_{cal}(i)|}{\sum_{i=1}^n Q_{obs}(i)}$$
$$f_{obj_3} = \left| \frac{Q_{obs\ max} - Q_{cal\ max}}{Q_{obs\ max}} \right|$$

式中 : $Q_{obs\ max}$ ——实测流量最大值 ; $Q_{cal\ max}$ ——计算流量最大值.

子目标函数 f_{obj_1} 计算的是整个研究期内的洪量误差 ,用以控制水量平衡 ;子目标函数 f_{obj_2} 用以控制观测值和计算值对应时段的流量值 ;子目标函数 f_{obj_3} 计算的是整个研究期内的洪峰误差 ,用以控制洪峰观测值和计算值.

3.4 确定迭代停止准则

- a. 目标函数在 5 次循环后仍无法提高 0.01% 的精度 ,则认为此时参数的取值对应的点到了可行域的平坦面 ,迭代停止.
- b. 连续 5 次迭代后仍无法显著改变参数值 ,并且模拟结果没有明显的提高 ,则认为目标函数达到最优 ,迭代停止.

4 应用实例

以修河水系的万家埠流域作为研究流域.修河是鄱阳湖水系 5 大河流之一 ,流域内有江西省的 11 个县 (市、区).万家埠流域是修河流域中游的万家埠水文站控制的流域 ,集水面积 3 548 km².输入 TOPMODEL 径流模拟计算需要的资料 ,即流域“地形指数-面积分布函数”资料 ,流域平均降雨、蒸发资料和流域出口断面的实测流量资料.

计算地形指数 $\ln(\alpha/\tan\beta)$ 所用的 DEM 分辨率为 500 m×500 m.利用 GRIDATB 模型计算出万家埠流域的“地形指数-面积分布函数”.其中 ,生成的地形指数最小值为 5.90 ,最大值为 15.93 ,平均值为 9.56.

降雨、蒸发资料从流域上 10 个雨量站获得 .用泰森多边形法确定各个雨量站的面积权重系数 ,计算流域平均降雨量、蒸发量.降雨、蒸发、流量资料时间步长为 6 h.

用 4 场洪水资料对模型参数进行率定 . SR_0 为根带土壤的初始缺水量 ,考虑到模拟的洪水大都在汛期 ,故都取为 0.率定结果如表 2 所示 ,模拟结果与实测结果如图 1 所示.

表 2 参数优化结果

Table 2 Results of TOPMODEL parameter optimization

洪号	M/m	$Lr(T_0)/(m^2 \cdot h^{-1})$	T_d/h	SR_{max}/m	$RV/(m \cdot h^{-1})$	$CHV/(m \cdot h^{-1})$	确定性系数	径流量误差/%	洪峰误差/%
19900604	0.0048	5.09	13.5	0.039	8 533	6 398	0.93	10.90	0
19910517	0.0048	9.27	13.9	0.044	7 302	4 967	0.90	16.60	0
19980621	0.0060	4.99	15.0	0.049	9 500	4 373	0.90	1.13	0
19990716	0.0038	6.01	18.8	0.049	7 528	4 392	0.90	14.80	0

表 2 中的模型参数 4 场洪水的参数变化大都控制在较小的范围内.从表 2 统计结果来看 ,确定性系数精度较高 ,洪峰模拟效果较好 ,主要是因为目标函数中加入了洪峰误差的子目标函数 f_{obj_3} .从图 1 可见 :单峰洪水模拟效果都比较好 (图 1(a)(b)(d));双峰洪水 (图 1(c)),最大洪峰重合 ,第 2 洪峰的模拟效果较差 ,因为所建立子目标函数 f_{obj_3} 只对最大洪峰进行了控制.

以表 2 中的 4 场洪水率定参数的平均值作为模型的参数值 ,用该流域另 4 场洪水对率定参数进行了检验.检验结果表明 ,利用自动优化的参数值在一定程度上反映了优化参数值与参数真值之间的接近程度 ,能

取得比较好的效果.图 2 为其中 2 场洪水的检验结果.

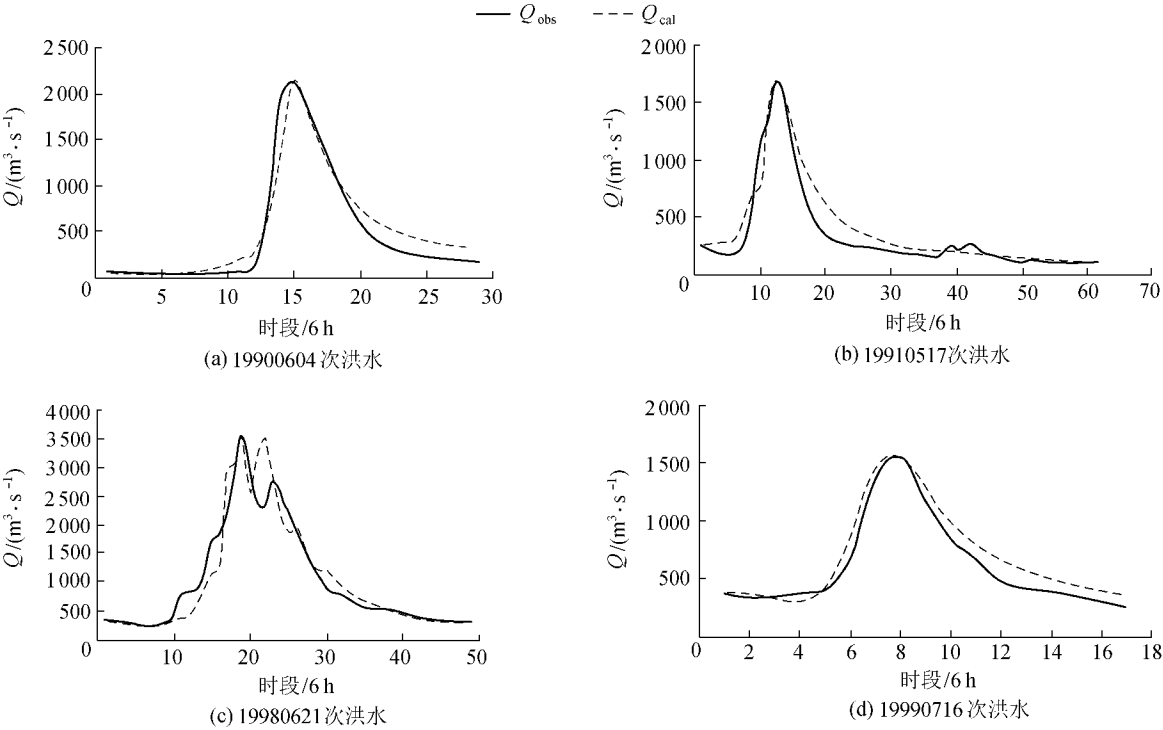


图 1 率定期流域出口模拟与实测流量过程对比

Fig.1 Comparison of observed and simulated discharges in calibration period

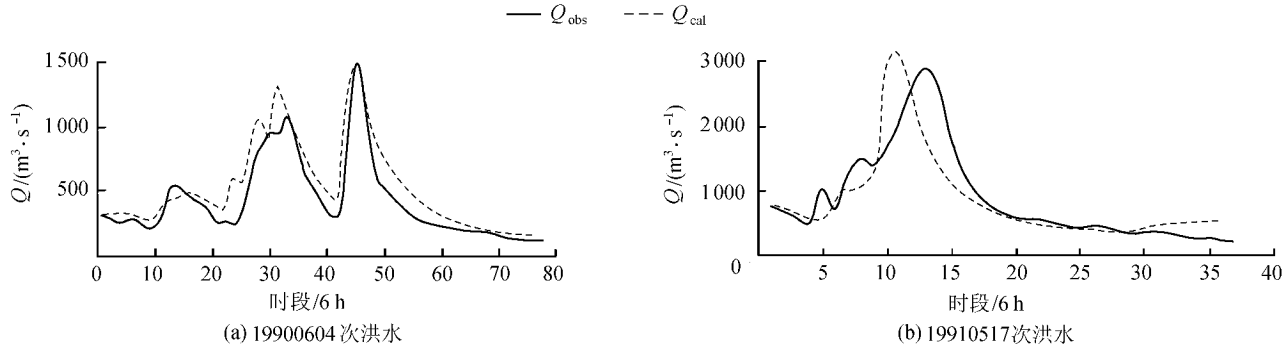


图 2 检验期流域出口模拟与实测流量过程对比

Fig.2 Comparison of observed and simulated discharges in test period

5 结 论

- a. SCE-UA 算法不仅可以用于概念性水文模型和分布式水文模型 ,还可以用于半分布式水文模型——TOPMODEL.
- b. TOPMODEL 参数上下边界需根据参数的物理意义和研究流域特性来确定.
- c. 在 SCE-UA 算法中 ,目标函数的建立对于参数优化具有重要作用 .在次洪模拟时 ,目标函数应突出高水过程和洪峰对模拟效果的影响.
- d. SCE-UA 算法的参数虽然较多 ,但绝大部分的取值都可以采用已有研究成果的默认值 ,只有复合型个数 p 需要根据具体问题确定.

参考文献 :

[1] VIJAY P S. Computer models of watershed hydrology[M]. Highlands Ranch :Water Resources Publication ,1995 23-68.

[2] DUAN Q ,GUPTA V K ,SOROOSHIAN S. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization[J]. Journal of Optimization Theory and Applications ,1993 ,76(3) :501-521.

[3] DUAN Q ,SOROOSHIAN S ,GUPTA V K. Optimal use of the SCE-UA optimization method for calibrating watershed models[J]. Journal of Hydrology ,1994 ,158 :265-284.

[4] ECKHARDT K ,AMOLD J G. Automatic calibration of a distributed catchment mode[J]. Journal of Hydrology ,2001 ,251 :203-209.

[5] NEWSHA K A ,GUPTA H ,WAGENER T , et al. Calibration of a semi-distributed hydrologic model for streamflow estimation along a river system[J]. Journal of Hydrology ,2004 ,298 :112-135.

[6] 李致家 ,周轶 哈布·哈其. 新安江模型参数全局优化研究[J]. 河海大学学报 :自然科学版 ,2004 ,32(4) :376-379.

[7] BEVEN K J ,KIRKBY M J. A physically based variable contributing area model of basin hydrology[J]. Hydrological Bulletin ,1979 ,24 :43-69.

[8] 夏军. 水文非线性系统理论与方法[M]. 武汉 :武汉大学出版社 ,2002 :320-341.

[9] QUINN P ,BEVEN K ,CHEVALLIER P , et al. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models[J]. Hydrological Processes ,1991 ,5 :59-79.

Application of SCE-UA algorithm to optimization of TOPMODEL parameters

MA Hai-bo , DONG Zeng-chuan , ZHANG Wen-ming , LIANG Zhong-min

State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China

Abstract: A case study was performed for Wanjiabu catchment of Jiangxi Province , and the result of parameter optimization by use of SCE-UA algorithm shows that the algorithm is applicable not only for the conceptual hydrological model and distributed hydrological model , but also for the semi-distributed hydrological model TOPMODEL. The upper and lower boundaries of TOPMODEL parameters should be determined according to their physical meanings and the characteristics of the catchment to be studied. In SCE-UA algorithm , the establishment of the objective function is important for parameter optimization , and the effects of high-water flood process and flood peak should be emphasized in the establishment of the objective function for flood simulation. Most parameters in SCE-UA algorithm can take default values from the former study , while the number of complexes should be determined based on specific issues.

Key words : hydrological model ; SCE-UA algorithm ; TOPMODEL ; parameter calibration