

新安江模型参数全局优化研究

李致家, 周 轶, 哈布·哈其

(河海大学水资源环境学院, 江苏 南京 210098)

摘要 采用单纯多边形进化算法对 3 个气候与流域条件各不相同的流域的新安江模型计算参数优化问题进行了研究. 结果表明: 对于没有误差的水文资料, 采用单纯多边形进化算法, 可以优化出新安江模型的全部参数并使参数收敛到真值; 对于实测的水文资料, 由于模型参数之间的共线性, 固定参数 B 与 EX , 可同时率定模型其他参数, 随着实测资料系列的增加, 率定参数值将趋于稳定.

关键词 新安江模型参数; 单纯多边形进化算法; 全局优化; 共线性

中图分类号 P338 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2004)04-0376-04

新安江模型是一个半分散性概念性水文模型. 该模型的参数率定方法有人工试错法和传统的数学优化方法. 人工试错法的缺点是主观性较强且缺乏客观标准, 而传统的数学优化方法, 如 Rosenbrock 方法和 Simplex 方法等, 大多为局部优化方法. 因此, 如何寻求概念性水文模型参数率定的全局最优解, 成为 20 世纪 90 年代以来水文模型研究的热点问题.

美国亚利桑那大学于 20 世纪 90 年代开始研究萨克拉门特模型参数优化问题, 后来提出了单纯多边形进化算法(SCE-UA)并得到了全局最优解^[1]. SCE-UA 结合了现有算法(包括基因算法等)中的一些优点, 可以解决高维参数的全局优化问题, 且不需要显式的目标函数或目标函数的偏导数. 因此, 本文采用单纯多边形进化算法对 3 个气候与流域条件各不相同的流域的新安江模型计算参数优化问题进行了研究.

1 新安江模型

应用新安江模型进行水文模拟时, 首先需按下垫面和地形等情况对流域进行分块(称为分单元或子流域), 然后将每个子流域的出口流量演算至整个流域的出口断面. 这样单元流域的新安江模型有 14 个参数. 如果假定各个单元流域的模型参数一致, 河道汇流采用马斯京干法, 每个子流域的汇流河段数可以通过河道汇流的长度来确定, 那么又增加了汇流方面的 2 个参数. 因此对一个流域来说, 需要率定的参数有 16 个.

2 SCE-UA

SCE-UA 本身有多个参数, 这些参数可分为不确定性参数和确定性参数 2 个部分, 只有选择好算法中的参数, 才能使算法达到全局最优. 实际上, 参数最优值取决于问题的类型, 但通常可用 $m = 2n + 1$, $q = n + 1$, $y = 1$, $z = 2n + 1$ 作为缺省值. 其中, m 为每个复合体(complex)多边形的顶点数, q 为每个子复合体的顶点数, y 为每一个子复合体连续繁殖后代的个数, z 为每个子复合体进化的步数, n 为水文模型中需要优化的参数个数. 理论上 m 可取比 1 大的任何值, 但如果 m 取得过大, 计算机计算时间就会过长, 有效性也不高. q 的取值范围为 $2 \leq q \leq m$. 所需复合体个数取决于问题类型, 如果为高度非线性问题, 那么就需要大量的复合体^[1~3].

3 优化中的几个问题

a. 目标函数. 计算中用到的目标函数有 3 个. 研究表明, 用最小绝对误差作为目标函数所获得的结果比

用最小二乘函数作为目标函数更稳定.因此,本文用年水量最小绝对值误差作为目标函数^[2,3].

- b. 精度指标. 以确定性系数和径流量(或径流)相对误差作为度量模型精度的指标.
- c. 循环结束的判别. 为防止死循环,符合下列条件之一时应停止计算. (a) 计算中,目标函数在 5 次循环后仍无法提高 0.01% 的精度 ;(b) 5 次循环后算法仍无法显著改变参数值并且无法改善目标函数 ;(c) 循环的最大次数已经达到.

4 应用实例

4.1 实验流域

选择中国密赛、斯里兰卡 Kalu 及中国万家埠 3 个不同流域作为实验流域.其水文气象特征如表 1 所示.

4.2 参数率定

4.2.1 采用理想资料的参数率定

以密赛流域为例,先假定一组参数并将其作为模型参数的真值,然后采用新安江模型并利用流域实测降雨资料生成理想的流量资料,再假定 3 组不同的参数初值进行参数率定,结果如表 2 所示.从表 2 可以看出,由 3 组参数生成的理想资料,用 SCE-UA 进行参数率定,结果均收敛到真值.

表 1 3 个流域的水文气象特征
Table 1 Hydro-meteorologic condition of three catchments

流域	面积 /km ²	测试类型	资料年份	年雨量 /mm	流域类型
中国密赛	797	C V	1982 ~ 1986 1987 ~ 1988	1 777	湿润
斯里兰卡 Kalu	603	C V	1987 ~ 1993 1994 ~ 1995	3 506	湿润
中国万家埠	3 548	C	1988 ~ 1995	1 800	湿润

注 C 表示模型率定 ;V 表示模型检验.

表 2 对密赛流域利用理想资料的参数率定结果
Table 2 Parameters of Misai catchment calibrated with ideal data

组别	对比类别	<i>K</i>	<i>IM</i>	<i>B</i>	<i>WUM</i>	<i>WLM</i>	<i>WDM</i>	<i>C</i>	<i>SM</i>	<i>EX</i>	<i>CG</i>	<i>CI</i>	<i>CS</i>	<i>KG</i>	<i>KI</i>	<i>XE</i>
1	真 值	1.050	0.001	0.380	26.000	45.000	25.000	0.170	11.500	1.500	0.960	0.690	0.010	0.300	0.400	0.400
	SCE-UA 率定值	1.050	0.001	0.380	26.000	44.986	25.002	0.170	11.500	1.501	0.960	0.690	0.010	0.300	0.400	0.400
2	真 值	0.972	0.100	0.400	22.000	57.000	48.000	0.210	12.400	1.400	0.928	0.880	0.300	0.217	0.533	0.350
	SCE-UA 率定值	0.972	0.100	0.400	21.990	57.035	47.971	0.210	12.402	1.400	0.928	0.880	0.300	0.219	0.531	0.350
3	真 值	0.772	0.300	0.250	31.000	64.000	35.000	0.190	9.100	1.250	0.967	0.890	0.210	0.250	0.400	0.240
	SCE-UA 率定值	0.772	0.300	0.250	31.008	63.982	35.012	0.190	9.101	1.250	0.967	0.890	0.210	0.250	0.400	0.240

4.2.2 采用实测流量资料的参数率定

4.2.2.1 模型结构问题

当采用实测水文资料进行参数率定时,如果同时对所有参数进行率定,则随着资料系列长度的增加,有的参数仍不能趋于稳定.其原因是参数之间存在着一定的线性关系.

4.2.2.2 参数率定

新安江模型参数之间存在着多种相关性,如 *B* 与 *EX* 相关,*KG + KI* 与 *SM* 相关,*KG* 与 *KI* 相关等^[3].当采用传统的局部参数优化方法(如 Rosenbrock 方法和 Simplex 方法)进行模型参数优化时,由于参数间的共线性,即使采用较多的假定并固定较多参数,也无法得到全局最优解^[3,4].当采用基于基因的优化算法(如 SCE-UA)时,辅之以很少的固定参数就可优化得到全局最优解.对新安江模型来说,当固定 *B* 与 *EX* 时,在一定资料条件下,可优化得到全局最优解.因此,本文用 SCE-UA 对密赛、万家埠、Kalu 3 个流域的参数进行了优化.

a. 密赛流域的参数优化.采用 1982 ~ 1988 年共 7 年的实测资料(见表 3)进行参数优化研究,其中前 5 年资料用于参数率定,后 2 年资料用于参数检验.为了确定总共需要多少年资料才能得到优化解,本文研究了资料增加后对参数收敛性与稳定性的影响,结果如表 4、表 5 所示.一般情况下,变幅在 10% 以内则可认为参数值已基本不变.由表 5 可知,第 6 年时,仅参数 *C* 的变幅大于 10%,到第 7 年时,参数变幅全小于 10%.这说明,本文优化结果较为理想.

b. 万家埠流域的参数优化.采用 1988 ~ 1999 年共 12 年的实测资料进行了参数优化研究.计算结果表明,第 10 年时参数变化仍然较大,第 12 年时参数变化相对误差均小于 10%.

表 3 密赛流域用于参数率定与检验的特征值

Table 3 Characteristic values for parameter calibration and verification of Misai catchment						
年份	总雨量/mm	总蒸发量/mm	实测径流深/mm	预报径流深/mm	径流深度相对误差/%	确定性系数
1982	1 649.23	634.91	1 042.18	987.85	5.213	0.965
1983	2 513.94	601.57	1 893.00	1 906.36	- 0.705	0.925
1984	1 727.68	623.16	1 076.57	1 094.23	- 1.641	0.913
1985	1 581.79	654.26	934.85	928.12	0.720	0.900
1986	1 447.20	687.79	798.43	815.76	- 2.171	0.951
1987	2 058.19	660.90	1 353.92	1 355.52	- 0.118	0.879
1988	1 528.57	551.88	1 106.98	1 033.41	6.646	0.905

表 4 密赛流域率定的参数值 ($B = 0.35, EX = 1.5$)

Table 4 Values of parameters of Misai catchment after calibration																
年份	目标函数值/ 10^2	K	IM	WUM	WLM	WDM	C	SM	CG	CI	CS	KG	KI	XE	$KG + KI$	WM
1982	21.849	1.078 0	0.001 0	25.514 8	30.000 3	25.002 6	0.188 6	30.718 0	0.647 9	0.981 8	0.001 0	0.407 6	0.310 8	0.480 0	0.718 4	80.517 7
1983	78.263	1.016 1	0.001 0	32.507 4	30.000 3	29.040 4	0.318 2	14.320 3	0.997 5	0.808 6	0.001 0	0.153 6	0.625 0	0.413 6	0.778 6	91.548 0
1984	114.040	1.023 7	0.001 0	45.070 6	30.000 2	15.614 5	0.221 1	16.386 9	0.996 4	0.796 6	0.001 0	0.119 9	0.546 3	0.394 6	0.666 2	90.685 3
1985	147.221	1.019 3	0.001 0	48.746 5	30.929 9	25.001 1	0.108 0	21.354 8	0.967 3	0.687 8	0.001 0	0.217 7	0.310 2	0.371 8	0.527 9	104.677 4
1986	174.307	0.999 8	0.001 0	47.764 2	30.001 5	26.043 6	0.133 6	14.934 2	0.997 7	0.798 1	0.001 0	0.131 0	0.649 8	0.397 7	0.780 8	103.809 3
1987	226.276	0.991 0	0.001 0	50.471 5	30.000 2	24.574 7	0.158 7	15.414 4	0.996 8	0.795 4	0.001 0	0.139 5	0.616 3	0.378 1	0.755 8	105.046 4
1988	270.625	0.993 2	0.001 0	49.044 7	30.006 7	25.000 5	0.158 1	16.632 5	0.997 3	0.796 2	0.001 0	0.139 4	0.649 3	0.382 0	0.788 7	104.051 8

表 5 参数率定中两年之间参数的变化

Table 5 Variation of parameters of Misai catchment for a period of two years during their calibration															%	
起止年份	K	IM	WUM	WLM	WDM	C	SM	CG	CI	CS	KG	KI	XE	$KG + KI$	WM	
1982 ~ 1983	5.740	0.000	27.406	0.000	16.150	68.665	53.381	53.945	17.643	0.200	62.303	101.091	14.583	8.385	13.699	
1983 ~ 1984	0.747	0.100	38.647	0.000	46.232	30.519	14.431	0.109	1.482	0.100	21.939	12.592	4.574	14.437	0.942	
1984 ~ 1985	0.432	0.000	8.156	3.099	60.114	51.128	30.316	2.916	13.652	0.000	81.485	43.208	5.784	20.759	15.429	
1985 ~ 1986	1.914	0.000	2.015	3.002	4.170	23.680	30.067	3.143	16.037	0.000	39.828	109.452	6.951	47.900	0.829	
1986 ~ 1987	0.885	0.100	5.668	0.004	5.640	18.777	3.215	0.094	0.340	0.100	6.498	5.157	4.912	3.202	1.192	
1987 ~ 1988	0.225	0.100	2.827	0.021	1.733	0.361	7.903	0.051	0.099	0.200	0.055	5.357	1.016	4.358	0.947	

c. Kalu 流域的参数优化. Kalu 流域的参数优化结果与以上结果类似,即在第 9 年时,参数已趋于稳定. 比较密赛流域和万家埠流域优化结果可以看出,万家埠流域模型参数率定收敛速度比密赛流域模型参数率定收敛速度慢. 本文研究与以往研究的不同之处是,以往研究固定 $KG + KI = 0.70$,而本文研究没有这个约束. 对于 $KG + KI$,本文率定结果为 密赛流域 $KG + KI = 0.7887$ 万家埠流域 $KG + KI = 0.528$ Kalu 流域 $KG + KI = 0.501$. 从物理机制来看, $KG + KI$ 越大,流域退水速度越快. 流域实测流量资料分析结果也说明,密赛流域退水速度要比万家埠流域和 Kalu 流域速度快.

5 结 论

对没有误差的水文资料来说,采用单纯多边形进化算法,可优化出新安江模型的全部参数并使其收敛至最佳. 对实测水文资料来说,由于模型参数之间的线性关系,如果固定参数 B 和 EX ,则可同时率定模型的其他参数,随着实测资料系列长度的增加,率定的参数值将趋于稳定.

参考文献：

[1] DUAN Q,SOROOSHIAN S,GUPTA V K. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models[J]. Water Resource Research,1992,28(4) :1015—1031.

[2] DUAN Q,SOROOSHIAN S,GUPTA V K. Optimal use of SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models[J]. Journal of Hydrology,1994,158(1) :265—284.

[3] ZHAO R J. The Xinanjiang Model applied in China[J]. Journal of Hydrology,1992,135(4) :371—381.

[4] ROSENBROCK H H. An automatic method of finding the greatest or least value of a function[J]. Computer Journal,1960,3 :175—184.

Application of global optimization to calibration of Xin ’anjiang model

LI Zhi-jia, ZHOU Yi, Hapuarachchi H. A. P.

(College of Water Resources and Environment, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract : A study was performed on the parameter optimization of the Xin ’anjiang model for three watersheds with different meteorological and hydrogeographical conditions by use of the Schuffle Complex Evolution (SCE-UA) Algorithm. The result shows that, for the ideal hydrological data generated by the hydrological model, the real values of all the parameters of the Xin ’anjiang model can be obtained by the SCE-UA optimization, and that for practical hydrological data, owing to the co-linearity between model parameters, the optimized parameters can be obtained by fixing of parameters B and EX, and with the increase of the hydrological data series, the optimized parameters converge to stable and real values.

Key words : parameter of Xin ’anjiang model ; Shuffle Complex Evolution (SCE-UA) Algorithm ; global optimization ; co-linearity

《河海大学学报(哲学社会科学版)》征订启事

(CN32 - 1521/C, ISSN1671 - 4970, 季刊, 自办发行)

本刊以马列主义、毛泽东思想和邓小平理论为指导,坚持实事求是的思想路线,贯彻“双百”方针,弘扬时代主旋律,理论联系实际,为社会主义物质文明与精神文明建设服务。

本刊为哲学与社会科学类学术期刊,主要刊登哲学、政治学、文学、史学、语言学、法学、社会学、心理学、经济学、管理学、高等教育学等社会科学方面的研究成果、学术论文、综述等学术性文章。本刊可供上述有关专业的研究人员、管理人员和大专院校师生阅读与参考。本刊为中国学术期刊(光盘版)入编期刊与中国学术期刊网入编期刊。

本刊由河海大学主办,每季末出版,国内外公开发行,每本定价 5 元,每本邮费 1 元,全年订费 24 元。欢迎广大读者直接向编辑部订阅。联系地址:南京市西康路 1 号《河海大学学报(哲学社会科学版)》编辑部,邮政编码 210098。联系电话:(025)83786376。