

【水文泥沙】

单位线自动优化率定的狼群算法研究

应碧茜,王建群,毕 婉

(河海大学 水文水资源学院,江苏 南京 210098)

摘 要:为了探讨单位线自动优化率定的新方法,对狼群算法在单位线优化率定中的应用进行了深入研究。分析了单位线优化率定的目标函数和约束条件,建立了单位线优化率定的数学模型,给出了单位线自动优化率定的狼群算法。在寻优迭代过程中采用同倍比修正法来处理水量平衡约束,保证了狼群算法优化求解的单位线严格满足水量平衡方程;采用具有动态罚因子的罚函数法处理单位线的不合理波动,保证了单位线的光滑性,实例应用表明提出的单位线自动优化率定的狼群算法是有效的。

关键词: 单位线; 汇流; 优化; 狼群算法

中图分类号: TV11 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1000-1379.2017.02.006

Wolf Pack Search Algorithm for Automatic Optimal Estimation of the Unit Hydrograph

YING Bixi, WANG Jianqun, BI Wan

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to explore a new method for automatic optimal estimation of the unit hydrograph, the wolf pack search algorithm of the unit hydrograph estimation was studied. The objective function and constraint conditions were analyzed to build the mathematical model of the unit hydrograph optimal estimation and the wolf pack search algorithm of automatic optimal estimation of the unit hydrograph was proposed. At the same times ratio correction method was used to deal with the constraint condition of water balance and the water balance equation was strictly satisfied in the algorithm. The penalty function with a dynamic penalty factor was used to avoid unreasonable fluctuations and guarantee the smoothness of the unit hydrograph. Case study shows that the wolf pack search algorithm of automatic optimal estimation of the unit hydrograph is effective.

Key words: unit hydrograph; runoff concentration; optimization; wolf pack search algorithm

自从 1932 年谢尔曼提出单位线的概念并建立谢尔曼单位线法以来,单位线已成为流域汇流计算的一种重要手段^[1]。人们习惯于利用分析法、最小二乘法^[2]、人工试错法等传统手段来推求单位线,但受到误差传播以及非线性等因素的影响,分析法及最小二乘法容易导致推求得到的时段单位线呈锯齿形^[3],有时甚至出现负值,而人工试错法则需要多次进行人工试错。因此,这些传统方法难以用于水文预报系统软件中。针对最小二乘法的缺陷,葛守西^[3]采用基于水量平衡、纵坐标非负及无振荡三约束条件的松弛无约束极小化法,基本解决了求解出的单位线不合理波动的问题,但采用滤波法确定松弛向量的方法较为复杂;陈科等^[4]提出了岭回归估计法;瞿思敏等^[5]提出了抗差岭估计的方法进行参数估计,在一定程度上克服了最小二乘法估计单位线时产生的锯齿波动现象,但观测值权重、岭回归估计参数或极值函数的选择具有一定的针对性和经验性;董晓华等^[6]考虑由单位线汇流得到的计算流量过程与实测流量过程拟合误差平方极小化、水量平衡方程左右端之差的平方极小化等优化

目标,采用多目标优化法来优化时段单位线,使得单位线的光滑程度有所改进,但求得的单位线不能严格满足水量平衡关系。

单位线自动优化率定问题一直是水文研究领域的一个难题,不论是在流域产汇流理论,还是在实时洪水预报系统应用等方面,都具有较大的研究价值。狼群算法^[7]是一种新的群体智能算法,与遗传算法、粒子群算法^[8]等相比,具有较强的全局搜索能力。本文主要对单位线自动优化率定的狼群算法进行深入研究。

1 单位线优化率定模型

设等时段净雨过程为 $R_i(i = 1, 2, \dots, m)$, 相应的等时段实测流量过程为 $Q_i(i = 1, 2, \dots, n)$, 则单位线时

收稿日期:2016-01-07
基金项目:国家自然科学基金资助项目(41371047)。
作者简介:应碧茜(1993—),女,江苏苏州人,硕士研究生,研究方向为为水文水资源。
通信作者:王建群(1960—),男,江苏句容人,教授,博士,研究方向为水资源系统分析。
E-mail:yingbixi@163.com

序节点数 $n_t = n - m + 1$ 。假定单位线为 $U_t(t = 1, 2, \dots, n_t)$, 则单位线优化的目标函数为

$$f = \min \frac{1}{n_t} \sum_{i=1}^n (Q_i - \hat{Q}_i)^2 \quad (1)$$

式中: \hat{Q}_i 为根据单位线 $U_t(t = 1, 2, \dots, n_t)$ 汇流计算得出的径流过程。

约束条件: ① 水量平衡约束, 表达式为

$$\left(\sum_{i=2}^{n_t} \frac{U_i + U_{i-1}}{2} dt \right) \frac{3.6}{F} = 10 \quad (2)$$

式中: dt 为时段长, h ; F 为流域面积, km^2 。

② 不合理波动约束。正确的单位线应该只具有一个极大值点, 然而算法迭代过程中可能会产生多个极值点, 造成单位线不合理波动。

本文采用单位线同倍比修正法来处理水量平衡约束, 通过群体智能算法优化率定单位线, 群体中的每一个个体都是一组根据自变量的上下限由计算机随机产生的初值, 但并不是任意一组随机数就能构成一条单位线。单位线同倍比修正法即对每次优化迭代得到的解 $V_i(i = 1, 2, \dots, n_t)$ 进行同倍比修正:

$$r = \frac{1}{10} \sum_{i=2}^{n_t} \frac{V_i + V_{i-1}}{2} dt \frac{3.6}{F} \quad (3)$$

$$U_i = rV_i \quad (i = 1, 2, \dots, n_t) \quad (4)$$

式中 V_i 为优化迭代得到的当前解。

采用具有动态罚因子的罚函数法处理单位线的不合理波动。罚函数的形式为

$$P(U_i) = K \sum_{i=2}^{n_t-1} K_i (|U_i - U_{i-1}| + |U_{i+1} - U_i|) \quad (5)$$

式中: $K_i = \begin{cases} 1 & (a_i < 0) \\ 0 & (a_i \geq 0) \end{cases}$, 其中 $a_i = (U_i - U_{i-1})(U_{i+1} - U_i)$; $K = \sum_{i=2}^{n_t-1} K_i - 1$ 。

动态罚因子 C 为

$$C = C_0 \frac{I}{I_{\max}} \quad (6)$$

式中: $C_0 = 10^5$; I, I_{\max} 分别为当前迭代次数、最大迭代次数。

随着迭代次数 I 的增大, 动态罚因子 C 的值不断增大, 造成单位线不合理波动惩罚不断增大, 从而起到约束作用。

综上, 单位线自动优化的目标函数变为

$$F = \min \left[\frac{1}{n_t} \sum_{i=1}^n (Q_i - \hat{Q}_i)^2 + C \cdot P(U_i) \right] \quad (7)$$

2 狼群算法步骤

优化率定单位线的狼群算法^[7]流程如下:

(1) 初始化。以单位线 $U_t(t = 1, 2, \dots, n_t)$ 作为 $D = n_t$ 维决策空间中人工狼的位置 $X = (x_1, x_2, \dots, x_D)$, 随机初始化人工狼的位置可得到初始单位线并对其进行水量平衡约束同倍比修正。确定狼群规模 N 、竞选狼的个数 L 、游猎搜索点数 h 、最大搜索次数 h_{\max} 、游猎搜索步长 $step_a$ 、奔袭步长 $step_b$ 、最小围攻步长 $step_{c_{\min}}$ 、最大围攻步长 $step_{c_{\max}}$ 、最差狼淘汰个数 m 、最大迭代次数 I_{\max} 。令 $I = 0$ 。

(2) 竞选计算。根据式(7) 计算每匹狼的目标函数值, 目标函数值越小说明该狼所处位置越好, 因此选择目标函数值较小的 L 匹狼进行精细搜索并进行水量平衡约束修正, 按目标函数值极小化原则确定狼群首领。

(3) 奔袭计算。其他狼向具有当前最小目标函数值的首领所在的位置进行奔袭搜索, 同时进行水量平衡约束修正。

(4) 围攻计算。受到首领的召唤, 其他狼对猎物展开围攻。若围攻过程中人工狼搜索到的位置较当前位置更优越, 则改变该狼的位置, 同时进行水量平衡约束同倍比修正。

(5) 竞争更新。将目标函数值较大的 m 匹狼淘汰, 再随机生成 m 匹人工狼进行狼群的竞争更新。

(6) 收敛判断。若计算结果符合精度要求或循环迭代次数达到上限 I_{\max} , 则终止迭代, 输出最优解; 否则令 $I = I + 1$, 转步骤(2) 继续。

3 实例应用

浑江为鸭绿江的最大支流, 处在吉林省南部和辽宁省东部。浑江中游控制站为通化站, 集水面积为 $4\,731\text{ km}^2$ 。本文对浑江流域通化站已发生的代表性洪水过程(洪号为 66728), 采用以前期影响雨量为参数的降雨径流相关图法推求净雨过程。该次洪水过程的净雨量持续了 4 个时段, 计算时段的长度 Δt 取 6 h。采用狼群算法优化率定单位线, 各具体参数取值: $N, 100; I_{\max}, 100; L, 5; h, 4; h_{\max}, 15; m, 5; step_a, 1.5; step_b, 0.9; step_{c_{\max}}, 10^5; step_{c_{\min}}, 0.5$ 。计算结果见图 1、表 1。

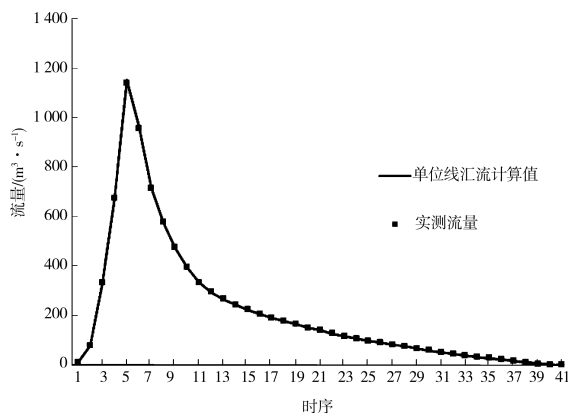


图 1 狼群算法率定值与实测值比较

表 1 狼群算法优化率定结果

时段 ($\Delta t=6\text{ h}$)	时段净雨 量/mm	单位线优化结 果/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	实测流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	汇流计算/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	相对误 差/%
1	6.0	14.9	8.8	8.9	0.91
2	7.6	110.0	77.8	77.3	0.61
3	21.9	362.8	331.4	333.8	0.74
4	4.7	256.2	674.5	677.2	0.40
5		186.2	1 140.2	1 152.5	1.08
6		150.6	956.3	963.4	0.74
7		125.3	715.1	717.7	0.37
8		103.1	576.6	574.4	0.39
9		84.9	474.7	474.5	0.04
10		74.8	394.5	394.0	0.13
11		67.8	334.0	331.9	0.64
12		61.8	294.8	292.3	0.86
13		56.8	267.3	264.7	0.97
14		51.7	242.8	241.4	0.59
15		48.8	223.5	222.0	0.66
16		44.8	205.9	204.0	0.91
17		41.8	190.7	190.3	0.22
18		38.8	176.5	176.0	0.29
19		35.6	163.9	163.5	0.24
20		31.8	150.8	150.9	0.04
21		29.8	138.9	138.7	0.14
22		26.7	126.8	125.3	1.21
23		24.8	116.5	115.6	0.74
24		22.8	106.7	105.4	1.22
25		20.9	97.9	96.9	0.98
26		19.9	90.2	89.5	0.79
27		16.9	82.5	81.7	0.97
28		14.8	75.0	75.1	0.11
29		12.9	66.2	65.4	1.23
30		11.9	58.1	57.5	1.08
31		9.8	50.6	50.3	0.51
32		7.9	44.2	44.5	0.66
33		6.9	37.6	37.5	0.24
34		6.0	31.7	30.9	2.63
35		5.0	26.9	26.4	1.41
36		3.0	21.1	21.9	3.66
37		2.0	15.5	17.1	10.09
38		0.0	9.2	10.4	13.44
39			4.6	5.7	25.16
40			0.7	0.9	27.66
41			0	0.0	

根据表 1 统计的实测径流过程与计算径流过程拟合的确定性系数为 1.00;由表 1 和图 1 可以看出,绝大

部分时段狼群算法优化率定单位线的结果很好,在最初和最后几个时段相对误差稍大的原因是流量太小,实际的绝对误差并不大。

4 结 论

通过研究单位线自动优化率定问题,提出了单位线自动优化率定的狼群算法。该算法的优点是在整个迭代过程中不断用同倍比修正法使单位线严格满足水量平衡方程;对目标函数进行罚函数修正可避免单位线产生不合理的波动。然而,随着单位线底宽的不断增大,决策变量的维数不断增大,狼群算法优化率定的单位线精度会有所下降,对此还需要进一步深入研究和改进。

参考文献:

[1] 芮孝芳,刘宁宁,凌哲,等.单位线的发展及启示[J].水利水电科技进展,2012,32(2):1-5.

[2] SNYDER W M. Hydrograph Analysis by the Method of Least Squares[J]. American Society of Civil Engineers, 1955,81(9):1-25.

[3] 葛守西.推求谢尔曼单位线的松弛无约束极小化方法[J].人民黄河,1988,10(1):21-25.

[4] 陈科,辛忠礼.岭回归法在单位线估计中的应用[J].四川水力发电,1995,14(1):84-87.

[5] 瞿思敏,包为民,嵇海祥,等.抗差岭估计在单位线推算方面的应用[J].浙江水利水电专科学校学报,2006,18(3):9-12.

[6] 董晓华,赵云发,袁杰,等.基于目标规划法的时段单位线多目标优化估计[J].人民长江,2007,38(8):12-13.

[7] 王建群,贾洋洋,肖庆元.狼群算法在水电站水库优化调度中的应用[J].水利水电科技进展,2015,35(3):1-4.

[8] 王建群,王尧,郝振纯.粒子群优化方法在小浪底水库补偿调度中的运用[J].人民黄河,2009,31(12):41-42.

【责任编辑 翟戌亮】