

基于 SCEUA 算法的水箱模型应用研究

于 雨¹, 薛 野²

¹中水北方勘测设计研究有限责任公司 天津

²太极计算机股份有限公司水利水务事业部 北京

【摘要】水箱模型作为水文模拟中重要的水文模型,但由于参数较多,采用人工试错法难以避免其中的不确定性与低效性。本文以 SCEUA 算法为基础,研究水箱模型参数的快速率定与应用。同时选取汉江上游安康到白河区间 1999 年至 2013 年间的 20 场洪水作为参数率定与验证样本,以确定性系数为优化目标,分析优化结果并对优化参数进行检验。经检验分析,模型率定期和验证期平均确定性系数均达到了 0.8 以上。研究结果表明,采用 SCEUA 算法能有效提升集总式水箱模型参数确定的效率,同时能有效保证模型参数的准确性。

【关键词】水箱模型; 参数率定; SCEUA; 汉江

【收稿日期】2025 年 7 月 16 日

【出刊日期】2025 年 8 月 15 日

【DOI】10.12208/j.jer.20250391

Application of the tank model based on the SCE-UA algorithm

Yu Yu¹, Ye Xue²

¹Bei Fang Investigation, Design & Research CO.LTD, Tianjin

²TaiJi Computer Corporation Limited, Water Resources and Water Affairs Division, Beijing

【Abstract】 The tank model is a significant hydrological model in hydrological simulation; however, due to its numerous parameters, the manual trial-and-error method struggles to avoid uncertainty and inefficiency. This paper investigates the rapid calibration and application of tank model parameters based on the SCE-UA algorithm. Additionally, 20 flood events from 1999 to 2013 in the upstream Han River region between Ankang and Baihe were selected as samples for parameter calibration and validation. Using the deterministic coefficient as the optimization objective, the optimization results were analyzed, and the optimized parameters were tested. The validation analysis shows that the average deterministic coefficient during both the calibration and validation periods exceeded 0.8. The research results indicate that the SCE-UA algorithm can effectively improve the efficiency of parameter determination for the lumped tank model while ensuring the accuracy of the model parameters.

【Keywords】 Tank model; Parameter calibration; SCE-UA; Han River

水箱模型又称坦克(Tank)模型,是一种概念性水文模型。水箱模型其核心思想是将降雨形成径流的复杂机制简化为流域蓄水能力与流域出口流量之间的数学关系。该模型采用多个自上而下串联的直列式水箱建立数学模型,以水箱中的蓄水深度为控制,模拟流域出流和下渗过程。其中每层水箱的侧边有出流孔,底部有下渗孔。顶层水箱的入流为流域的降雨,下层水箱的入流为上层水箱的下渗量。各层水箱的出流量可理解为流域各蓄水层形成的不同水源的径流量。由于水箱模型采用层级式的水箱结构,随着层数的增加,模型参数也逐渐增多,单一地使用人工试错法进行模型参数的率定,往往不能保证参数的准确性,严重影响模型搭

建的效率。SCEUA 算法是一种有效的解决非线性约束最优化问题的方法^[1],该方法综合了确定性搜索、随机搜索和生物竞争进化等方法的优点,可以快速地搜索到水文模型参数全局最优解,目前在流域水文模型参数优选中应用十分广泛^[2]。本文以汉江上游安康到白河作为验证案例,用 SCEUA 算法对水箱模型的参数优化展开研究。

1 水箱模型结构分析

水箱模型是以单个水箱作为基本单元,采用层级式结构作为整体结构。为保证水箱模型具有较好的通用性,一般通过设置土壤结构的方法,把第一层水箱的下渗孔开在水箱底上的某处,这一层为土壤水层,来模

拟干旱、半干旱地区或者湿润地区的干旱季节^[3]。在土壤水层, 重力和毛管力对水的运动不起显著作用, 也没有下渗, 水分只消耗于蒸发。

水箱模型中的输出汇入河道时, 其过程线受槽蓄作用的影响而变形, 为模拟槽蓄变形的影响, 在直列式

水箱旁边并联一个单一水箱^[4], 作为汇流水箱。本文所选用的水箱模型, 选用四层垂直直列式水箱进行产流计算, 在第一层水箱中考虑土壤水分结构设置土壤水层, 且并联一个汇流水箱进行汇流计算, 其模型结构图如图 1 所示^[5]。

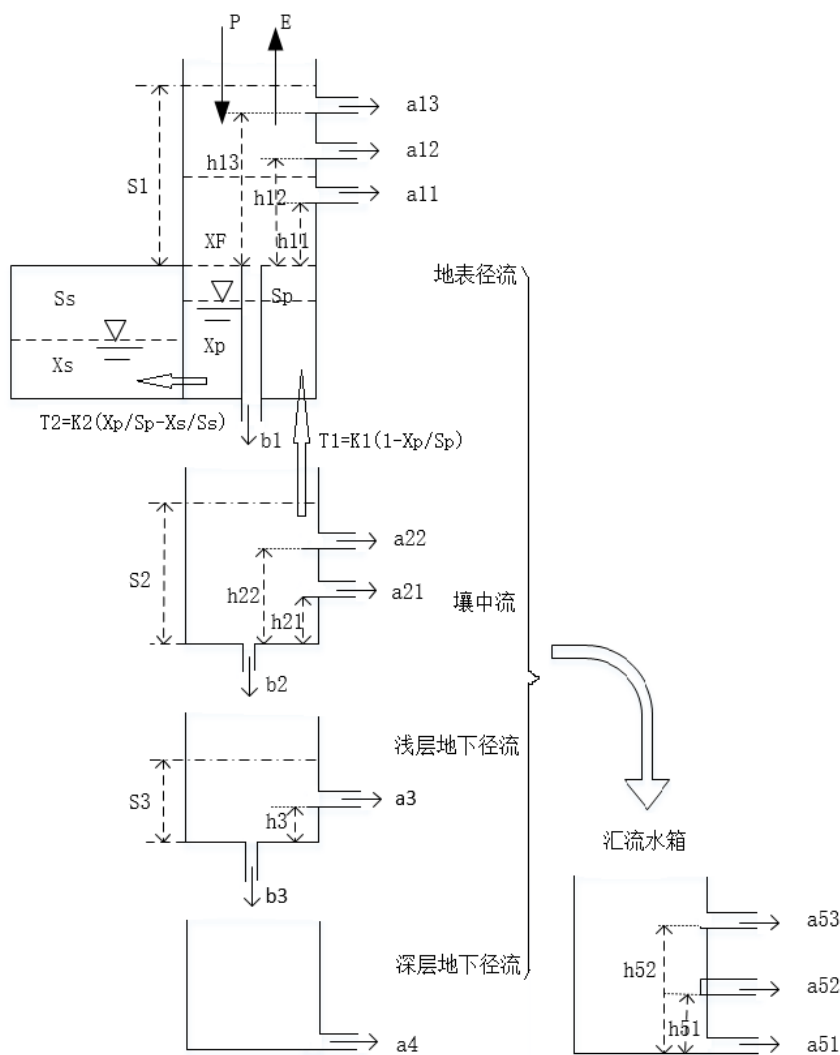


图 1 水箱模型结构图

本文所构建的水箱模型的计算原理按照水体运动过程分为单一水箱产流、串联水箱产流、汇流水箱汇流三部分。

(1) 单一水箱产流

水箱模型由一系列垂直串联的水箱组成, 每个水箱设有侧向开口和底部开口, 分别对应地表径流和地下渗流, 其中底部流出量即为下一层水箱的输入。每个水箱涉及三类参数: 侧孔高度 h 、侧孔出流系数 α 以及底孔出流系数 β 。简单的水箱模型如图 2 所示。

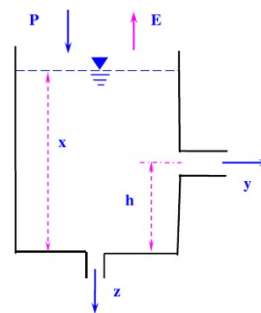


图 2 单个水箱模型图

用 P 代表时段雨量, E 代表时段蒸发量, x 代表水箱的蓄水深度, 用 y 代表径流量, z 代表下渗量, 则对时段 t 来说, 径流和下渗与水箱蓄量的关系如下:

$$y(t) = \alpha[x(t) - h] \quad (1.1)$$

$$z(t) = \beta \cdot x(t) \quad (1.2)$$

令 x'_{t-1} 为 $t-1$ 时段末的剩余蓄水量, 则用 x'_{t-1} 计算 t 时段的出流量和下渗的蓄水量 x_t 为:

$$x_t = x'_{t-1} + P_t - E_t \quad (1.3)$$

而 t 时段末的剩余蓄水量为:

$$x'_t = x_t - y_t - z_t \quad (1.4)$$

对于时段蒸发, 由蒸发能力 Em 计算实际蒸发时, 蒸发量从不同的水箱中扣除, 如第一层水箱不能满足时, 从第二层水箱扣除, 必要时继续从第三层水箱扣除。

在干旱、半干旱流域或湿润地区的干旱季节, 水箱模型中顶层水箱需要设置土壤水层, 来模拟土壤结构影响^[3]。在该层级中, 水分运动不受重力与毛管力的明显影响, 亦不发生下渗, 水分损失主要来自于蒸发。该

层上界可能位于出流孔高度或更低, 具体取决于流域下垫面条件。

(2) 串联水箱产流

在水文预报中, 通常由几个串联的直列式水箱模拟降雨径流过程关系。一般认为, 顶层水箱相应于地表结构, 产生地面径流; 第二层水箱相应于壤中流; 第三、四层水箱相应于地下径流。顶层水箱通常设有两到三个侧向出流孔, 其余各层一般仅设一个。最底层水箱的出流孔通常位于箱底高度。

串联水箱中每一层水箱的计算采用单一水箱的计算方法, 通过逐时段输入降雨和蒸发数据, 并采用迭代算法, 可连续模拟一次降雨事件中的出流与下渗过程。第二、三层水箱的输入来自上层渗流量, 计算方法与前述一致。

(3) 汇流水箱

为体现水箱模型的调蓄功能, 可在模型最右侧设置一个并联的独立水箱, 称为汇流水箱。该结构用于模拟径流汇入河道时因槽蓄效应引起的过程线变形, 常用形式如图 3 所示。

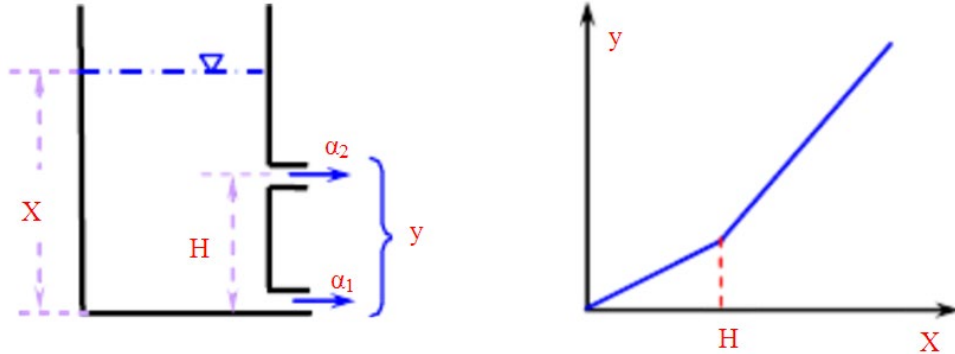


图 3 汇流水箱示意图

2 SCEUA 算法简介

SCE-UA^[6]算法基本思路是将基于确定性的复合形搜索技术和自然界中生物竞争进化原理相结合, 利用多边形法则进化寻优, 用来求解最小化问题, 融合了确定性方法、随机性方法、竞争进化、复合形混合等概念, 从而保证了 SCE-UA 算法搜索的灵活性、全局性、一致性、有效性等。该算法有多个参数, 主要包括: 每个复合形多边形的顶点数 $m=2n+1$ ($m \geq n+1$), 每个子复合形的顶点数 $q=n+1$ ($2 \leq q \leq m$), 参与进化的复合形个数 p ($p \geq 1$), 计算样本数目 s ($s=p \times m$), 每个子复合形进化的步数 z ($z=2n+1$), 每一个子复合形连续

繁殖后代的个数 y ($y=1$), 模型中待优化的参数个数 n ^[7]。该优化算法对于求解高维参数的全局寻优问题表现出较高的适用性和可靠性。SCE-UA 算法^[8]对于程序终止准则的控制主要有目标函数的收敛、参数的收敛和最大循环次数三个方面。

SCE-UA 优化算法的目标函数为:

$$F(\theta) = \frac{\sum_{i=1}^N [q_{obs,i} - q_{sim,i}(\theta)]^2}{\sum_{i=1}^N (q_{obs,i} - \bar{q}_{obs})^2} \quad (1.5)$$

式中, $q_{obs,i}$ 为 t 时刻的实测流量; $q_{sim,i}(\theta)$ 为模型计算流量; θ 为拟优化的模型参数向量; \bar{q}_{obs} 为实测流量过程的均值; N 为模型计算时段数。

3 案例分析

汉江作为长江中游最大的一级支流, 发源于陕西省汉中市宁强县的潘冢山, 自西向东穿越汉中与安康两市, 于白河县出陕进入湖北十堰, 并在丹江口与最大支流丹江交汇后注入丹江口水库。出库后继续东南流向, 经襄阳、荆门等地, 最终于武汉汇入长江, 干流全长 1577 公里, 流域面积达 15.9 万平方公里。汉江干流在湖北丹江口以上为上游, 丹江口至钟祥为中游, 钟祥以下至武汉为下游。该流域北抵秦岭, 与黄河流域接壤; 东北以伏牛山为界, 毗邻淮河流域; 南靠米仓山、大巴山, 与嘉陵江流域相邻; 东南侧为汉江平原, 无明显地形分界。本文选取汉江流域中的安康——白河区间作

为此次模型验证的目标流域。该区间总面积为 5531 平方公里, 包含安康、桂花园、向家坪、长沙坝、白河 5 个水文站, 其中, 桂花园水文站为支流坝河的控制站, 向家坪水文站为支流旬河的控制站, 长沙坝水文站为支流夹河的控制站, 白河水文站为该区间出口断面控制站。洪水预报计算模型中涉及 18 个雨量站, 分别为狮坪、秋坪、茨沟、花里墟、平利、六口、米粮、南宽坪、两河关、长枪铺、安康、县河口、桂花园、向家坪、蜀河、红军、长沙坝、白河雨量站, 区间雨量站位置分布如图 4 所示。

本文选取安康——白河区间 1992 年至 2010 年间的 20 场洪水作为全部样本, 其中 1992 年 7 月 11 日至 2000 年间的 12 场洪水作为参数率定样本, 上游控制断面洪水的演进选择分段马斯京根模型, 以确定性系数为优化目标^[9], 得出水箱模型相应参数, 率定结果如图 5 所示。



图 4 区间雨量站分布图

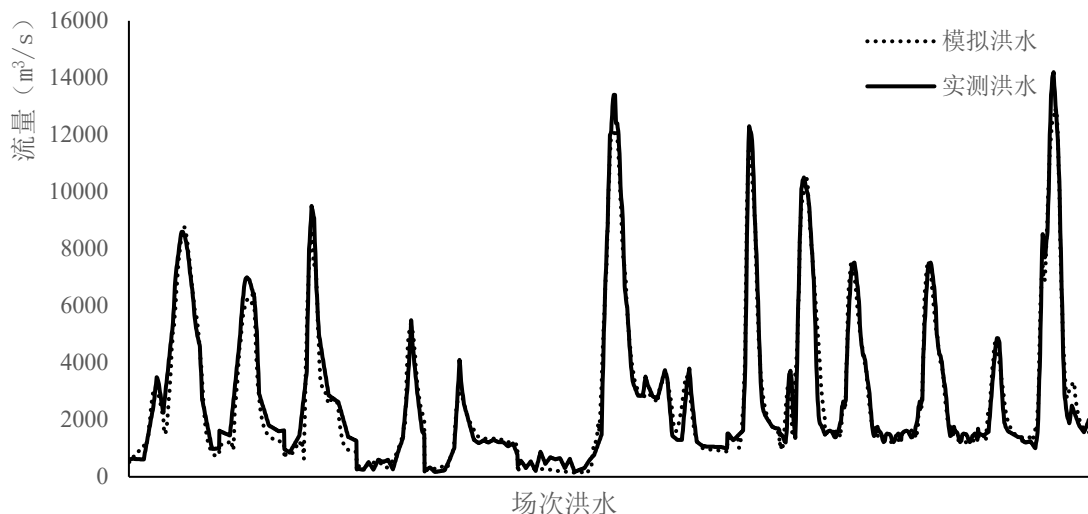


图 5 水箱模型 12 场洪水验证结果

本次水箱模型的搭建,所率定模型参数结果见表 1。与实测值基本重合,洪峰合格率达到 100%,平均确定性系数达到 0.93,峰现时间合格率达到 88% (以 3h 以内为合格),模拟精度较高,各场次洪水统计信息详情见图 6。从图 6 可以看出, TANK 模型在验证期的模拟值见表 2。

表 1 水箱模型参数率定结果

参数描述	参数	参数值
产流模型	S1	17.96
产流模型	SP	34.12
产流模型	SS	112.89
产流模型	XS_0	126.06
产流模型	K1	2.81
产流模型	K2	2.64
产流模型	DEPTH_01	0.42
产流模型	A11	0.05
产流模型	A12	0.13
产流模型	A13	0.15
产流模型	H11	11.66
产流模型	H12	11.14
产流模型	H13	22.59
产流模型	B1	0.17
产流模型	S2	11.29
产流模型	DEPTH_02	0.5
产流模型	A21	0.04
产流模型	A22	0.15
产流模型	H21	11.06
产流模型	H22	17.59
产流模型	B2	0.11
产流模型	S3	13.8
产流模型	DEPTH_03	0.32
产流模型	A3	0.07
产流模型	H3	18.2
产流模型	B3	0.05
产流模型	DEPTH_04	0.02
产流模型	A4	0
产流模型	DEPTH_05	0
产流模型	A51	0.1
产流模型	A52	0.14
产流模型	A53	0.16
产流模型	H51	14.86
产流模型	H52	29.04
产流模型	K	0.61
坡面汇流	CS	0.58

坡面汇流	1	5.06
桂花园-白河河道汇流	KX	1.04
桂花园-白河河道汇流	EX	0.55
桂花园-白河河道汇流	N	19
向家坪-白河河道汇流	KX	1.07
向家坪-白河河道汇流	EX	0.54
向家坪-白河河道汇流	N	9
长沙坝-白河河道汇流	KX	1.05
长沙坝-白河河道汇流	EX	0.55
长沙坝-白河河道汇流	N	3
安康-白河河道汇流	KX	1.06
安康-白河河道汇流	EX	0.53
安康-白河河道汇流	N	11

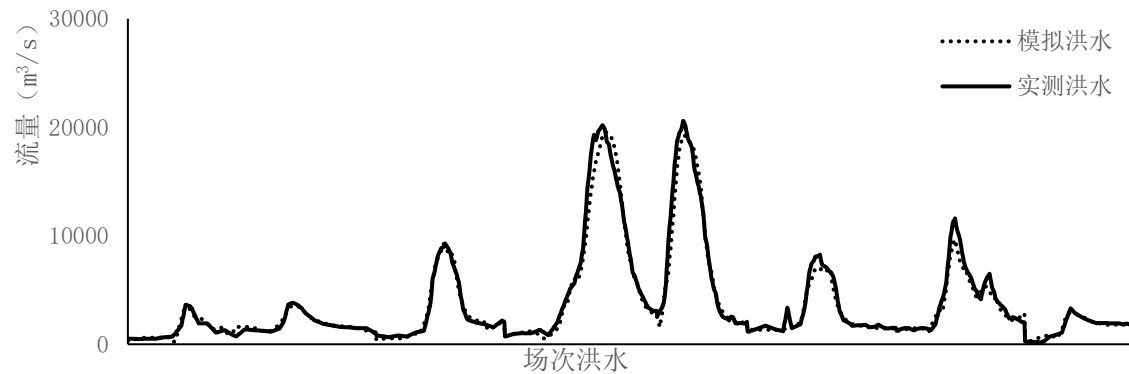


图 6 水箱模型验证结果

表 2 水箱模型验证统计表

洪水场次	洪峰流量相对误差 (%)	峰现时间误差 (h)	确定性系数
20000805	10.66	0	0.92
20000815	6.28	3	0.93
20030827	2.14	8	0.96
20030906	1.32	0	0.96
20030916	12.95	1	0.95
20030929	9.26	2	0.94
20060625	5.68	2	0.88
20110705	6.40	0	0.92

4 结论

水箱模型参数率定采用人工试错法,该方法在很大程度上依赖操作人员的主观判断与实际经验,因而可能引入一定的不确定性.通过引入 SCEUA 算法对水箱模型进行参数率定,能有效避免人工率参所导致的不确定性与低效性. SCEUA 算法具有计算结果稳定、速度较快,具有简单、方便、高效的特点.同时通过模型应用实例的计算分析,证明采基于 SCEUA 算法的水

箱模型法计算结果准确,能完成较为精确的产汇流计算,能为水文模拟计算提供了有力的分析计算工具和决策支持.

参考文献

[1] 张洪刚, 郭生练, 王才君,等. 概念性流域水文模型参数优选技术研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2004, 37(3): 18-22.

- [2] DUAN Q, SOROOSHIANS, GUPTA V K. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models[J]. Water Resource Research , 1992, 28(4):1015-1031.
- [3] 李纪生. 应用土壤水分结构的水箱模型的经验[J]. 水文, 1989(4):33-35.
- [4] 菅原正巳. 水箱模型参考手册[M]. 东京:日本国立防灾科学技术研究中心, 2000:120-147.
- [5] 林三益. 水文预报[M]. 北京:中国水利电力出版社, 2003: 148-153.
- [6] DUAN Q Y, GUPTA V K, SOROOSHIAN S. Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization[J]. Journal of Optimization Theory and Application , 1993, 76(3):501-521.
- [7] Nielsen S.A, Hansen E. Numerical simulation of the rainfall-runoff process on a daily basis[J]. Nordic Hydrology, 1973,4:171-190.
- [8] SOROOSHIAN S, DUAN Q Y, GUPTA V K. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models[J]. Journal of Hydrology , 1994, 158(3/4):265-268.
- [9] 张洪刚, 郭生练, 刘攀, 等. 概念性水文模型多目标参数自动优选方法研究[J]. 水文, 2002, 22(2):20-30.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

