

# 模拟退火算法在水资源预测中的应用及发展研究

伍 立,曾光明,王玲玲,黄国和

(湖南大学环境科学与工程系,湖南 长沙 410082)

**摘要** 通过对模拟退火算法在国内外众多学科领域中的发展及应用实例的分析,总结概括模拟退火算法的发展演进历程,结合水资源优化配置中存在的确定性、复杂性特征,提出了粒子群模拟退火算法在水环境资源预测中的应用前景。

**关键词** 水资源;模拟退火算法;粒子群模拟退火算法;水资源预测

**中图分类号** :TV213.9 **文献标识码** :A **文章编号** :1004-693X(2007)S2-0014-03

水资源是与人类生存和国民经济发展密切相关的自然资源,随着人口的激增、经济的快速发展和污染的日趋严重,水资源危机正与日俱增,在一些地区甚至成为重要的政治问题,因此预测水资源的变化趋势并对其进行合理配置,对社会经济的可持续发展具有重要的现实意义。

影响水资源变化的因素有很多,包括自然因素和人为因素,存在很多不确定性,包括随机性、模糊性等,而且这些因素的影响可能是彼此相关的。这使得水资源预测问题变得异常复杂。

## 1 模拟退火算法

模拟退火算法(SA:Simulated Annealing)又称 Monte Carlo 退火<sup>[1-5]</sup>等,是基于蒙特卡罗(Monte Carlo)迭代求解法的一种启发式随机搜索算法。模拟退火算法的思想最早是由 N. Metropolis 等于 1953 年提出,1983 年 Kirkpatrick 等<sup>[6]</sup>和 Cerny<sup>[7]</sup>分别将其用于组合优化和 VLSI 设计。

SA 算法的工作原理可简单地叙述为:从任一初始状态  $i_0 \in S$  开始,SA 算法每一步从当前状态  $i$  的邻域  $N_i$  中随机地产生下一个状态  $j$ ,若  $C_j \leq C_i$ ,则接收  $j$  为新的当前状态,否则仅以一定的概率(通常是  $\exp\{-(C_j - C_i)/T\}$ ,其中  $T$  为一控制参数)接受  $j$  为新的当前状态,这个过程一直持续到找到一个状态  $i^* \in S, C_{i^*} \leq C_i \forall i \in S$  为止。在实际应用中,通常并不一定找到最优解,而只是求一个满意的近

似最优解。控制参数  $T$  的作用类似于物理退火中的温度参数。

SA 算法的一个主要特性就是能以一定的概率接收成本值高的状态,即算法不但往好的方向走,而且偶尔也往差的方向走。这使得算法即使落入局部最优值的陷阱中,经过足够长的时间后也可跳出来,收敛到全局最优解。SA 算法的收敛性从理论上给予了证明<sup>[8-11]</sup>。

## 2 SA 模型的发展

进入 20 世纪 90 年代后,SA 算法在各个研究领域的应用得到一系列突破性的进展。SA 算法因具有跳出局部最优陷阱的能力,最早广泛用于 VLSI 设计、图像识别和神经网络计算机的研究<sup>[12]</sup>,为此还问世了一些基于 SA 算法的实用系统<sup>[13]</sup>。另外,SA 算法还用于求解其他各种组合优化问题,如 TSP 问题、Knapsack 问题、机械设计和光学设计<sup>[14-16]</sup>等。在求解这些问题时能产生令人满意的近似最优解,而且缩短了优化时间。

1989 年,Ingber<sup>[17]</sup>就针对模拟退火算法提出了更有效的快速模拟退火算法模型,并于 1993 年构建出优化时间更快的模拟淬火算法<sup>[18]</sup>。郭宇春等<sup>[19]</sup>在 SA 基础上利用分层马尔可夫随机场模型表征纹理图像,根据最大后验概率分布准则提出一种确定型松弛分割算法。洪家荣等<sup>[20]</sup>创立的一个基于模拟退火的三角剖分算法(ST)克服了以往三角形算法

基金项目:国家“863”高技术项目(2004AA649370);国家重点基础研究“973”发展计划项目(2005CB724203);国家杰出青年科学基金(50225926,50425927)

作者简介:伍立(1982—),女,湖南邵阳人,硕士研究生,研究方向为流域水资源丰富度。E-mail: xqzazhi56@163.com

通讯作者:曾光明,教授, E-mail: zgming@hnu.cn

容易跳出局部极小的缺陷。众多学者的研究证明了模拟退火算法以概率 1 终止于全局最优解的特点。这些理论成果和实践研究突出了模拟退火算法能够模拟物质世界中问题复杂性较高且规模较大、其结构未知的或知之不多的函数关系的特征,为模拟退火算法在环境科学研究与工程领域得到广泛应用奠定了坚实的理论基础。

从一系列的研究中我们不难发现,单独使用 SA 算法来调整网络权值,会使得网络学习的速度很慢,而且随着研究的进展以及社会环境的变化,所要求进行预测的对象因素也日趋复杂,单一的预测方法不仅要求多个数据,而且要求的条件比较严格,往往难以得到满足。为了充分发挥各种预测模型的优点,提高预测质量,可以在各种单一预测模型的基础上建立组合预测模型。因此在研究 SA 算法的优化模型中,大多研究者还是着手在 SA 算法的组合模型研究及应用,应用广泛的组合模型包括:BP 神经网络模拟退火算法(BP-SA)<sup>[21-22]</sup>、遗传模拟退火算法(GA-SA)<sup>[23-26]</sup>、粒子群模拟退火算法(PSO-SA)<sup>[27]</sup>。BP-SA、GA-SA 组合模型的研究都应用已经进入了成熟阶段,20 世纪 90 年代末发展起来的粒子群算法(particle swarm optimizer,PSO)<sup>[28-29]</sup>是一种新兴的全局随机优化算法,PSO 与 GA 相似,系统初始化为一组随机解,通过迭代搜索最优值,但是并没有遗传算法用的交叉以及变异,而是粒子在解空间追随最优的粒子进行搜索,与 GA 比较,PSO 的优势在于简单,易于实现全局最优化,同时又有深刻的智能背景,比较适合工程应用<sup>[30]</sup>。高鹰等<sup>[31]</sup>首次提出了基于模拟退火算法的粒子群算法,该方法基本保持了 PSO 算法的简单容易实现的特点,并且改善了粒子群优化算法摆脱局部极值点的能力,提高了算法的收敛速度和精度,而且收敛速度和精度均优于粒子群优化算法。通过解决作业车间调度问题(Job Shop scheduling problem,JSSP)为例,潘全科等<sup>[32]</sup>发现 PSO-SA 的 4 种混合调度算法均具有较高的优化性能。

### 3 模拟退火算法在水环境预测中的应用现状

#### 3.1 国外对模拟退火算法的研究与应用

在水资源的预测管理中,影响因素有很多,而且这些影响大多是彼此相关的,这使得水资源的预测问题变得异常复杂。而 SA 模型在水资源预测中的应用研究起步较晚,1987 年加拿大的学者 Rassan<sup>[33]</sup>首次把 SA 算法应用于不确定条件下的渥太华河洪水管理,并取得较好的效果。

在日益变化的需水问题中,含水体系起到决定

性的作用,妥善设计及管理时不仅要确保水的数量、质量的满足,而且要有有一个最佳的优化方式。1999 年 Maria<sup>[34]</sup>针对含水层的管理问题,用 SA 算法随机的局部搜索性能进行优化,无论从理论上还是结果上都证实了 SA 算法的全局最有优化功能。

2002 年加拿大学者 Ramesh<sup>[35]</sup>利用 SA 算法的局部搜索能力成功优化了多重水库的复杂问题,在优化之前用线性程序检验了 SA 算法的全局最优性能,并通过实验证明对于同种问题 SA 算法的优化能力要高于混合的非线性规划算法。

SA 算法也用于其他的组合模型中进行水资源预测,结合强有力的统计学方法——频繁计算方法(The Most Frequent Value Method,MFV),Peter 等<sup>[36]</sup>将 SA 算法应用于地下水的预测,更好地解决地下水优化中的反演问题,这在传统的优化算法上实现了突破。

#### 3.2 国内对模拟退火算法的研究与应用

在水资源预测模型中,模拟退火算法是新兴的一种优化模型,国内的研究大都着重在组合模型的应用上,而且研究起步更晚。郑红星等<sup>[37]</sup>以 SA 算法为中心讨论了水质模型参数的非数值随机优化方法。实例分析表明,利用非数值随机优化方法(SA 和 GA)对水质模型参数进行估计,可以获得较为理想的结果,在解的精度和优化速度上 SA 算法都优于 GA 算法。

李守巨等<sup>[38]</sup>基于模拟退火算法根据水头和流量观测数据建立含水层参数非线性反演方法,通过对参数的全局随机搜索反演,解决了含水层参数反演解不唯一的问题,同时提高了参数反演结果的稳定性,提出了根据观测仪器精度建立算法收敛准则的方法。数值模拟结果表明,非线性反演方法具有较好的抗观测噪音的能力。

21 世纪以来在水资源研究领域洪水的预测逐渐受到人们的关注,康玲等<sup>[39]</sup>提出用遗传算法和模拟退火算法相结合的算法进行洪水频率计算的参数优化。通过对水库实测水文资料进行检测,证明了该组合模型是一种行之有效的优化算法,能更快和更有效的得到模型参数的最优结果。

近几年,对于模拟退火算法本身的研究又有新的突破,Tung 等<sup>[40]</sup>用三维模块模型来结合 SA 算法和最短距离法 SD 进行地下水的优化预测,该程序适用于同址假设地下水监测井,以减少分歧。这一优化结果显示,SA 算法不仅提高了优化效率,同时也增强了全局优化的概率。Hong 等<sup>[41]</sup>在讨论降雨预测的模型时,认为支持向量回归算法(support vector regression,SVR)的全面化性能要优于传统的人工神经网络,应用 SA 算法为 SVR 算法选择参数后,得

到的 SVRSA 算法将会成为一种高性能的组合预测模型预测台风季节的降雨量。

目前,我国在水资源的预测中对 SA 算法的应用和研究还比较少,特别是在需水预测和水资源变化趋势的研究和应用方面,与国外相比,存在一定的差距。

#### 4 结 语

水资源的预测和优化管理已成为 21 世纪一个重要的研究课题,而国内外对于预测模型的研究(灰色系统模型、神经网络模型、遗传算法等)着重于机械、TSP、电子激光等领域。SA 算法作为 20 世纪 80 年代初发展起来的一种随机性组合优化方法,在水资源预测中的应用也得到了初步的发展,但是影响水资源的因素很多,这些因素又具有随机性、模糊性等不确定性的特点,而且 SA 在水资源中的应用开始于 90 年代后,因而在研究和应用方面都还存在一定的问题。SA 模型具有强大的局部搜索能力和优化速度,相信随着科学技术的发展和研究的发现,必能突破理论和实践应用方面的缺陷,使其在水资源预测问题中应用进入一个崭新的发展阶段。另外,近几年发展起来的 PSO 所具有的简单、直观、鲁棒性强的特点以及它的全局搜索优化,可以和 SA 算法的局部搜索特性结合构成性能更好的预测优化模型,用于水资源预测的研究和应用。

#### 参考文献:

[ 1 ] JEPSEN D W ,GETATT J C D. Macro placement Monte Carlo annealing[ C ]//UEDA K. Conference Computer Design. Port Chester Proc IEEE ,1983 ,11 :495-498.

[ 2 ] STORER J A. NICKS A J. BECKETT J. Uniform circuit placement[ C ]//BERTOLAZZI P L F. VLSI :Algorithms and architectures ,Amsterdam :elsevier 's science publ ,1985 ,7 :255-273.

[ 3 ] ROMEO SANGIOVANM-VINCENTELLI A L. Probabilistic hill climbing algorithms ;Properties & applications[ R ]. In Proc 1985 Chapel Hill Conference on VLSI ,1985 ,5 :393-417.

[ 4 ] GEMAN S ,GEMAN D. Stochastic relaxation ,gibbs distributions ,& the bayesian restoration of images[ R ]. IEEE Proc. Pattern Analysis and Machine Intelligence ,PAMI-6 ,1984 :721-741.

[ 5 ] ROTHMAN D H. Nonlinear inversion ,statistical mechanics , and residual static 's estimation[ J ]. Geophysics ,1985 ,50 :2784-2796.

[ 6 ] KIRKPATRICK S ,GELATT J C D. VCCHT M P. Optimization by simulated annealing[ J ]. science , 1983 ,320( 5 ) :4598-4621.

[ 7 ] CERNY V. Thermo dynamical approach to the traveling Sales-

man problem :an efficient simulation algorithm[ J ]. J of Optimization Theory and Applications ,1985 ,45( 1 ) :41-51.

[ 8 ] GEMAND S ,GEMAN D. Stochastic relaxation gibbs distributions and the bayesian restoration of images[ R ]. IEEE Trans Part Anal and Mach Intell ,PAMI-6 ,1984 ,6 :721-741.

[ 9 ] HAJEK B. Cooling schedules for optimal annealing[ J ]. Math Oper Res ,1988 ,13( 2 ) :311-329.

[ 10 ] MILRA D ,ROMEO F ,SANGIOVANNI-VINCENT E A. Convergence and finite-time behavior of simulated annealing[ J ]. Adv Appl Proh , 1986 ,18 :747-771.

[ 11 ] GIDAS B. Non stationary Markov chains and convergence of the annealing algorithm[ J ]. J Stat Phys ,1985 ,39 :73-131.

[ 12 ] 姚新 ,陈国良. 模拟退火算法及其应用[ J ]. 计算机研究与发展 ,1997( 7 ) :1-6.

[ 13 ] CATTHOOR F ,VANDEWALLE J. Sam urai a general and efficient simulated-annealing schedule with fully adaptive annealing parameters ,Integration[ J ]. The VLSI Journal ,1988 ,6 :147-178.

[ 14 ] 张德富 ,顾卫刚 ,沈平. 一种解旅行商问题的并行模拟退火算法[ J ]. 计算机研究与发展 ,1995 ,32( 2 ) :1-4.

[ 15 ] PROSENJIT D C ,URMILA M D. An automated approach for the optimal design of heat exchangers[ J ]. Sintee Applied Chemistry ,1997 ,36( 9 ) :3685-3693.

[ 16 ] 尹霄丽 ,余重秀. 用改进的模拟退火算法设计二元光学阵列器件[ J ]. 光电子·激光 ,2001 ,12( 2 ) :154-157.

[ 17 ] INGBER L. Very fast simulated re-annealing[ J ]. Mathematical Computer Modelling ,1989 ,12( 12 ) :967-973.

[ 18 ] INGBER L. Simulated annealing : practice versus theory[ J ]. Mathematical and Computer Modelling , 1993 ,12 :29-57.

[ 19 ] 郭宇春 ,匡锦瑜. 一种纹理图像分割的松弛算法[ J ]. 北京师范大学学报 ,1994 ,30( 1 ) :60-66.

[ 20 ] 洪家荣 ,丁明峰 ,李星原. 三角剖分的模拟退火算法[ J ]. 计算机学报 ,1994 ,17( 9 ) :682-689.

[ 21 ] 刘铁男 ,刘志德. 带混合模拟退火算法的神经网络及其应用[ J ]. 自动化技术与应用 ,2002 ,21( 5 ) :7-9.

[ 22 ] 曹军 ,苏建民 ,孙丽平 ,等. 遗传算法与模拟退火算法在神经网络优化中的性能分析[ J ]. 东北林业大学学报 ,2002 ,30( 6 ) :26-28.

[ 23 ] JOHN H H. The royal road for genetic algorithms :fitness landscapes and GA performance[ J ]. Francisco J Varela ,1992 :37-51.

[ 24 ] 翟宜峰 ,李鸿雁. 人工神经网络与遗传算法在多泥沙洪水预报中的应用[ J ]. 泥沙研究 ,2003 ,28( 2 ) :7-13.

[ 25 ] 巩琳琳. 基于遗传模拟退火算法的神经网络模型在陕西省需水预测中的应用[ J ]. 地下水 ,2006 ,28( 5 ) :10-14.

[ 26 ] 薛小杰 ,黄强. 基于径向基函数神经网络与改进遗传算法的黄河流域需水预测[ J ]. 水土保持学报 ,2002 ,16( 3 ) :83-97.

[ 27 ] 高尚 ,韩斌. 求解旅行商问题的混合粒子群优化算法[ J ]. 控制与决策 ,2004 ,19( 11 ) :1286-1289.

( 下转第 19 页 )

导农民科学施肥,推广测土平衡施肥技术,大力发展生态农业、有机农业,万宁水库上游以水果、蔬菜等农产品为主,积极创建无公害农产品基地。

### 3.4 工业污染控制

通过关停和整治污染企业相结合的方式,控制工业污染。对流域内现存的工业企业,实施关停搬迁或对其工业废水进行深度处理,将其污染影响减少到最小。

### 3.5 生态修复工程

小流域治理主要是对流域内的下截园、东和、加朗、边肚、牛枋园等支流小流域进行综合整治,采用植物廊道、植被缓冲带建设以及河道清理和污染控制等,防治水土流失。

在保护区内建设高标准的水源涵养生态林,以减少水土流失,实现涵养水源的生态防护目标。水源涵养生态林前期建设重点区域为万宁水库水面的四周、水库建设时原移民农田、宅基地、库周湿地、库区道路等,一级保护建设规模 75 hm<sup>2</sup>,二级保护区 30 hm<sup>2</sup>。

### 3.6 内源治理

对水库底泥进行疏浚,主要采用丰水期泄洪冲沙,将底泥携带出库。对水库内养殖的鱼类及其数量进行优化,利用鱼类清除水库中的藻类和浮游生物,净化水库水质;同时禁止在一、二级水源保护区内养鸭,对现有鸭场进行搬迁拆除。

## 4 结 语

万宁水库作为万宁市唯一饮用水源,必须确保水质安全。在目前当地政府已对水源保护和治理实行统一规划的基础上,建立以下各级政府目标责任制,把万宁水库水源保护与污染治理工作纳入各级领导干部政绩考核体系,同时依法保护生态环境,严格遵守和执行在饮用水源保护区对某些行为禁止和限制的规定。

通过对万宁水库水源保护区的综合治理,万宁水库的水质定能得到有效改善,从而真正实现万宁水库水资源的可持续利用,为万宁市民身体健康、社会和经济的可持续发展作出更大的贡献。

### 参考文献:

- [1] 刘阳生.海南省水资源与水环境现状分析及对策研究[J].水文,2006,26(1):89-91.
- [2] 刘志强.桂林市桃花江流域水污染现状分析及对策[J].环境工程,2006,24(3):81-83.
- [3] 刘阳生.海南省重要水源污染调查及保护策略研究[J].水利科技与经济,2006,12(11):748-750.
- [4] 张柳.水体富营养化及其治理措施[J].重庆环境科学,2002,24(3):52-54.
- [5] 袁龙义.湖泊富营养化的生态影响及治理措施[J].湖北农业科学,2004(5):13-15.

(收稿日期:2007-12-06 编辑:舒建)

(上接第 16 页)

- [28] EBERHART R C, KENNEDY J. A new optimizer using particles swarm theory[C]//Proc Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science, Nagoya, Japan, 1995.
- [29] KENNEDY J, EBERHART R C. Particle swarm optimization[C]//IEEE International Conference on Neural Network, Perth, Australia, 1995.
- [30] 钟一文,杨建刚.求解 TSP 问题的离散例子群优化算法[J].系统工程理论与实践,2006,26(6):88-94.
- [31] 高鹰,谢胜利.基于模拟退火的粒子群优化算法[J].计算机工程与应用,2004(1):46-49.
- [32] 潘全科,王文宏,朱剑英.基于粒子群优化和模拟退火的混合调度算法[J].中国机械工程,2006,17(10):1044-1047.
- [33] RASSAM J C. Flood management of the Ottawa River system under uncertainties[J]. Water Resources Management, 1987, 7: 985-1002.
- [34] MARIA D C C. On solving aquifer management problems with simulated annealing algorithms[J]. Water Resources Manage-

ment, 1999, 13: 153-169.

- [35] RAMESH S V, TEEGAVARAPU S P S. Optimal operation of reservoir systems using simulated annealing[J]. Water Resources Management, 2002, 16: 401-428.
- [36] PETER S, FARUK C. Applicability of the most frequent value method in groundwater modeling[J]. Hydrogeology Journal, 2006, 14: 31-43.
- [37] 郑红星,李丽娟.水质模型参数的非数值随机优化[J].地理研究,2001,20(1):97-102.
- [38] 李守巨,刘迎曦.基于模拟退火算法的含水层参数非线性反演[J].西安交通大学学报,2001,35(5):546-548.
- [39] 康玲,陈辉.基于遗传模拟退火算法的洪水频率计算研究[J].广西水利水电,2003(3):27-30.
- [40] TUNG Ching-pin, TANG Chung-che. Improving groundwater-flow modeling using optimal zoning method[J]. Environmental Geology, 2003, 44(8): 627-638.
- [41] HONG Wei-chiang, PAI Ping-feng. Potential assessment of the support vector regression technique in rainfall forecasting[J]. Water Resources Management, 2007, 21(4): 495-514.

(收稿日期:2007-03-08 编辑:高渭文)