

水文模型参数识别算法研究及展望*

杨晓华¹ 杨志峰¹ 郦建强² 沈珍瑶¹ 陈强¹

1. 北京师范大学环境学院, 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875;

2. 水利部水利水电规划设计总局, 北京 100011

摘要 就国内外水文模型参数识别算法的最新进展做了较为详细的阐述, 特别对各种编码的遗传算法、单纯形混合加速遗传算法、模式搜索混合加速遗传算法、模拟退火混合加速遗传算法等现代优化算法在流域水文模型参数识别中的应用进行了研究, 并与传统方法进行了比较; 通过比较水文模型各参数优选方法的特点, 认为混合加速遗传算法 SHAGA, HJHAGA 是一种较好的方法, 具有较高的应用价值; 同时对水文模型参数识别算法的发展前景进行了展望。

关键词 水文模型 参数 识别 遗传算法 优化算法

水文模型是对水文过程进行模拟计算的数学模型。在水文过程模拟中, 包括对流域内的产流、坡面汇流及河道汇流过程的模拟。参数识别, 就是根据特定的目标函数, 确定一套固定的参数寻找法则, 根据这套法则, 可以估计出模型的参数值, 其中模型参数识别是一个十分复杂且困难的问题^[1,2]。

水文模型包含的参数一般可分为 3 类: (1) 是具有明确物理意义的参数, 可直接量测或用物理实验和物理关系推求; (2) 是纯经验参数, 可通过实测资料反求; (3) 是具有一定物理意义的经验参数, 可先按物理意义确定参数值的范围, 然后按实测资料确定其具体数值。对于以上第(2), (3)类参数的确定, 需要用参数识别算法来求解。

模型参数率定是模型全面发展过程中最重要的一步^[3]。从理论上讲, 模型参数可以从流域直接或间接获得, 但由于水文模型参数既有其物理意义, 又有其推理、概化的成分, 因此大部分模型参数只能是对实测资料进行分析的基础上, 通过参数优选得到。由于受天文、气候、气象、下垫面、人文等众多因素的综合影响, 水文模型的参数一般较多, 并不完全独立, 常常表现出不确定、高维、高度非

线性和庞杂的信息类型^[4], 传统优化方法难以处理上述优化问题。一般来说, 参数越多、非线性越强, 优化时间就越多, 同时也不能够保证优化算法收敛到全局最优。Newton 法、共轭梯度法、变尺度算法、单纯形法、步长加速法、方向加速法和 Rosenbrock 法等传统优化方法都是与初始点有关的局部优化方法, 常常是找出初始点附近的一个极值点来, 至于它是否为全局极值点, 在多数情况下不得而知。当给参数以不同的初值时, 传统优化方法优化的结果有时很不相同, 导致优化结果的不稳定性^[5], 这种参数优化的不稳定性和局部优化的结果, 将直接影响洪水预报的精度和可靠性, 进而影响到洪水调度与水资源管理的科学性和合理性。

由于传统优化方法用于水文模型参数识别的不稳定性, 自 20 世纪 90 年代以后, 国内外有关学者, 将遗传算法用于水文模型的参数识别中。虽然大多数情况下, 可以得到近似全局最优解, 但又遇到了新的问题, 其中最关键的问题是收敛速度慢和精度难以控制^[6,7]。这对于实时防洪决策等非常不利。另外, 由于实际问题的需要, 混沌算法^[8]、蚁群算法^[9]等现代优化算法不断涌现, 如何利用水文模型

2005-09-21 收稿, 2005-11-16 收修改稿

* 国家重点基础研究发展规划(批准号: 2003CB415204 和 2003CB716807)和国家科技攻关(批准号: 2004-BA611B-02-04-01)资助项目

E-mail: xiaohuayang@bnu.edu.cn

自身的结构与特点,研究和应用这些算法解决好水文模型参数识别问题,是国内外水文工作者和应用数学家所共同关注,并急需解决的问题.为此,本文就水文模型参数识别算法的国内外研究现状做了较为详细的阐述,特别对二进制加速遗传算法、改进二进制加速遗传算法、自适应加速遗传算法、实编码加速遗传算法、单纯形混合加速遗传算法、模式搜索混合加速遗传算法、模拟退火混合加速遗传算法等现代优化算法^[10-12]在流域水文模型参数识别中的应用进行了研究,并与传统方法进行了比较.同时对水文模型参数识别算法的发展前景进行了展望.

1 国内外研究现状分析

水文模型广泛应用于洪水预报和水资源管理等众多领域,它可以帮助我们分析各种不同的信息,解决一些复杂的水资源和水环境问题.而模型参数的识别是模型研制与应用成功与否的关键.从水文模型参数识别的计算过程可以看到,有多种因素会影响计算的结果,它们包括:模型的建立、初始点的确定、优化方法的选择等等.对水文模型参数识别方法进行合理的改进,可以在很大程度上提高水文模型参数识别的成功率.近30年来,国内外许多学者对水文模型参数识别问题进行了研究.

早在1970年,Nash等^[13]就提出了用模型效率系数来评价模型模拟结果的精度;Ibbitt^[14]设计了概念性流域水文模型参数优选的拟合方法;Johnston^[15]对流域水文模型参数优选进行了探讨;Pickup^[16]对降雨-径流模型自动率定的算法及其搜索策略的有效性进行了测试;Gupta^[17]利用基于导数的优化方法对水文模型的参数进行了自动率定;Hendrickson^[18]比较了降雨-径流模型参数自动率定的Newton法和直接法;为了说明水文模型结构的复杂性,Duan^[1]等为设定了一些数据,检验了6个参数的识别问题,结果表明,即使用简单的6个参数的水文模型,参数优选也非常困难,从而说明水文模型结构非常复杂或参数优选算法需要改进等.以上学者主要对模型参数优选的传统优化方法进行了研究.传统优化方法都是基于单点迭代的局部优化方法,难以解决复杂水文模型参数优选问题.随着20世纪80年代模拟智能的全局优化算法——遗传

算法的兴起,水文工作者对遗传算法进行了研究.Wang^[19]最早将GAs应用于概念降雨-净雨模型的产流参数优选;Duan^[20]使用SCE-UA复合进化方法对流域水文模型参数的全局优化进行了自动率定,并观察到参数识别问题的难度主要取决于模型结构和参数估计方法;Franchi^[21]将GAs与局部搜索算法结合,并用于概念降雨-径流模型参数的自动率定;Marca^[22]在进行概念降雨-径流模型参数的自动率定时,比较了几种模式GAs的应用效果;与Duan采用的方法类似,Wang^[6]也从另一个角度对水文模型的参数率定进行了研究,先人为给定水文模型的参数,然后观察GAs是否可以找到这个最优的参数,并用实例来检测GAs的适用性和鲁棒性(该法我们称为“人为设定法”),结果表明GAs是一个有效的搜索方法,它可以近似找到全局最优解.但他并没有进一步给出GAs在水文模型参数识别过程中算法的参数设置及其收敛性问题;Madsen^[23]提出了水文模型参数多目标自动优选方法;Cheng^[24]应用模糊数学和GAs混合技术探讨了降雨-径流模型多目标优化的参数率定问题.

我国学者对水文模型参数识别问题也进行了一定的研究.如毛学文^[25]利用二进制编码的遗传算法,进行了新安江水文模型的参数优选.为了提高计算效率,金菊良等^[26]建立了加速遗传算法,并解决了最大流量频率曲线的参数估计.谭炳卿^[27]介绍了Rosenbrock法、改进的simplex法和遗传算法等3个水文模型参数优选的算法,以新安江模型为例,应用14个流域的资料,对这3种算法优选参数的效果进行了比较分析,指出以遗传算法的优选结果作为参数初值,再用其他两种方法进一步优化,是模型参数识别的一个有效途径.张建云等^[28]介绍了Rosenbrock法、simplex法和经验优选法在水文模型参数优选中的应用情况,以新安江模型为例,应用6个流域的资料,对这3种算法优选参数的效果,收敛速度等进行了比较分析,指出对于大多数流域可采用上述3种优化方法进行参数优选,但对于个别流域,采用上述3种优化方法,均得不到满意的精度.张洪刚等^[29]对水文模型多目标参数自动优选方法进行了研究,探讨了多目标函数的组合技术及其解法,指出多目标参数自动优选方法能够综合水文过程的各要素,优于传统的单目标参数自动优选

方法。

笔者在水文模型参数识别方面的研究亦取得了初步进展^[10-12]。笔者已对比比利时模型、新安江模型等国内外水文模型进行过比较研究；对二进制编码、实数编码、Gray 码编码等遗传算法和传统优化方法进行过研究，并用于新安江模型的参数识别，初步揭示，在精度和稳定性方面，改进的遗传算法优于传统优化方法。另外，笔者对暴雨强度公式、水位流量公式、Muskingum 模型、年径流预测模型等其他水文模型的参数识别也进行过研究，认为在应用遗传算法时，模型结构、算法和经验 3 方面的结合非常重要。根据研究者的经验、模型自身的结构与问题的需要不断地对算法进行设计与改进，是一条行之有效的途径。改进后的遗传算法具有较好的全局优化性和稳定性。各方法比较结果详见表 1。

到目前为止，国内外在水文模型参数识别方面，主要采用的优化方法有：Newton 法、Rosenbrock 法、simplex 法、经验优选法、模式搜索法、二进制加速遗传算法、实编码加速遗传算法、Gray 码编码遗传算法和 SCE-UA 复合进化方法等算法。国内外有关水文模型参数识别的研究可以概括为以下几个方面：(1) 寻求一种解决模型参数识别问题的最佳方法；(2) 选择多少数据以及选择什么样的数据来进行参数优选；(3) 如何有效统计分析模型结构与模型参数的不确定性，以及这种不确定性对模型输出的影响；(4) 参数优选算法比较研究^[1]；(5) 模型参数自动率定的收敛准则；(6) 多目标参数自动优选方法与单目标参数自动优选方法比较研究^[29]。

从国内外对水文模型参数识别方法研究的发展趋势来看，逐步从传统的优化方法过渡到现代优化方法；逐步从单一的优化方法过渡到混合优化方法；逐步从单目标优化方法过渡到多目标优化方法。

2 新安江模型参数识别算法比较分析

本文应用大坳流域资料，分别采用二进制加速遗传算法 (BAGA)、改进二进制加速遗传算法 (IBAGA)、自适应加速遗传算法 (AAGA)、实编码加速遗传算法 (RAGA)、单纯形混合加速遗传算法 (SHAGA)、模式搜索混合加速遗传算法 (HJHAGA)、模拟退火混合加速遗传算法 (SAHAGA) 等 7 种现代优化算法和单纯形法 (SA)、模式搜索法 (HJA)、Rosenbrock 法 (RA) 等 3 种传统优化方法来估计新安江水文模型的参数。目标函数、模型效率系数、水量平衡系数和参数设置详见文献^[12]。

为了客观地比较各方法的好坏，让每个算法调用目标函数的次数相同，取为 18 000 次。

表 1 分别给出了应用大坳流域资料，在相同的运算次数控制下，新安江模型率定期 (1989—1996)、检验期 (1997—1998) 的平均观测流量 Q_0 与平均计算流量 Q_c 的比值 Q_0/Q_c (即水量平衡系数) 及模型效率系数各算法计算结果的比较。

从表 1 可以看出，在相同的运算次数控制下，就目标函数值来看，各方法的排序为：

$$SHAGA > HJHAGA > HJA > SA > RA > SAHAGA > RAGA > IBAGA > AAGA > BAGA.$$

表 1 各算法在新安江模型参数识别中的结果比较 (应用大坳流域资料)

方法	目标函数值	效率系数			水量平衡系数 Q_0/Q_c		
		率定期	检验期	全期	率定期	检验期	全期
SHAGA	0.067 51	90.84	92.27	91.37	1.000	1.045	1.011
SA	0.068 01	90.77	92.08	91.26	1.000	1.051	1.013
RA	0.068 66	90.68	92.21	91.25	1.000	1.039	1.010
RAGA	0.093 70	86.77	92.50	88.92	1.001	1.039	1.011
HJHAGA	0.067 75	90.81	92.22	91.34	1.000	1.046	1.012
HJA	0.067 77	90.80	92.22	91.33	1.000	1.050	1.013
SAHAGA	0.070 08	90.49	91.98	91.05	1.000	1.047	1.012
BAGA	0.104 52	85.83	92.25	88.24	1.002	1.043	1.012
AAGA	0.104 21	85.87	91.70	88.06	1.001	1.044	1.012
IBAGA	0.096 22	86.93	91.84	88.77	1.000	1.035	1.009

就全期效率系数来看,各方法的排序为:

SHAGA>HJHAGA>HJA>SA>RA>SA-HAGA>RAGA>IBAGA>BAGA>AAGA.

就水量平衡来看,误差超过5%的只有SA,而HJA法刚好为5%,其他方法水量平衡均合格.

在综合考虑各评价标准的情况下,混合遗传算法SHAGA, HJHAGA是一种较好的并行优化方法,但其他方法又在某一或某几个方面(如最小目标函数值、效率系数、水量平衡系数)更优;而二进制遗传算法虽然目标函数值次优,但效率系数,水量平衡指标却还可以.至于选哪一种算法,就要看具体情况、具体要求而定.

可见新安江模型的参数优选问题是一个参数优选结果满足水量平衡、效率系数高的要求下使得目标函数达到最小的复杂优化问题.在使用SA, HJA法进行优化时,特别要注意水量平衡.

值得说明的是,在新安江模型的参数优选过程中,遗传算法(不包括混合遗传算法)开始时,目标函数值就很大,随着演化次数的增加逐渐变小;混合遗传算法只需演化迭代数次,目标函数值就迅速变小;HJA, RA, SA开始时,目标函数值比遗传算法(不包括混合遗传算法)小,随后把每次的运行结果作为初值,随着计算次数的增加逐渐变小.在新安江模型中采用多种遗传算法结果表明,混合遗传算法SHAGA, HJHAGA可用来求解流域水文模型的参数优选问题.在实现过程中我们发现怎样按某种过程产生新的搜索区间是个值得探索的问题.产生新的搜索区间越好,则搜索的解越准确,搜索的速度越快.为保证在整个搜索空间较快地寻找最优解,本研究采用实编码遗传算法及单纯形法共同搜索的多个优秀个体所生成的区间作为新的搜索区间.应用实例表明,SHAGA, HJHAGA收敛性及收敛速度都令人满意.表1中RA, SA参数初始值均取初始区间的左端点.对于多参数的概念性流域水文模型的参数优选方法来说,本文从目标函数值、全期效率系数、水量平衡系数3个指标考察了水文模型各参数优选算法的特点,从中得出混合遗传算法SHAGA, HJHAGA是一种较好的方法,具有较高的应用价值;SA, HJA也可以使用,不过应用时要适当地调用若干次,注意水量平衡;其他算法应根据实际情况作相应处理后使用,特别是

二进制遗传算法,需要注意搜索空间的调整. SHAGA, HJHAGA作为新的并行现代优化方法,将在水文模型参数识别中具有广阔的应用前景.

3 结论与展望

本文就水文模型参数识别算法的国内外研究现状做了较为详细的阐述.并将7种现代优化算法和3种传统优化方法用于新安江模型的参数识别.结果表明,混合加速遗传算法SHAGA和HJHAGA比其他方法的效果好.

近几年来在算法方面的一些改进,尤其是混合遗传算法的提出,以及各种混合现代优化算法在水文模型参数识别中的应用给传统的方法注入了新的活力.但水文模型参数识别算法还存在一些缺陷和不足,还有很多方面需要完善和改进.从国内外研究的现状及进展来看,目前对水文模型参数识别算法的研究仍存在许多急需解决的问题:(1)标准遗传算法用于水文模型参数自动识别时,收敛速度较慢;(2)对水文模型参数自动识别方法的研究较零散,不够系统,尚未把蚁群算法、混沌算法、粒子群算法、量子遗传算法等现代优化方法用于水文模型的参数率定;(3)水文模型参数“概念化识别”方法研究较少.也就是说在参数自动识别过程中,利用模型本身的结构及参数本身的信息较少;(4)揭示水文模型参数识别方法搜索机理研究较少;(5)对不同时空尺度、不同目标的水文模型参数识别方法研究较少;(6)从多个角度出发,揭示各算法之间的内在关系,建立水文模型参数识别算法的多层次、多目标综合评价准则的理论研究较少.

鉴于上述原因,有必要把蚁群算法、粒子群算法、量子遗传算法、混沌算法等现代优化方法引进到水文模型的参数识别中,对多种优化方法进行系统研究,找出对水文模型适用的或改进后适用的方法,发展水文模型参数识别算法.有必要把国外水文模型参数识别中“人为设定法”引入国内,对多种优化方法进行人为模拟,同时注重研究复杂水文模型参数识别理论与方法,提高水文模型预测的精度和速度.在系统研究现代优化方法与传统优化方法的基础上,建立各种优化方法的融合技术和法则.通过对不同目标、不同时空尺度水文模型的参

数识别, 揭示水文模型参数识别的层次效应、尺度效应与耦合效应. 在新知识的获取上取得多点突破口, 发展水文模型参数识别方法. 我们相信, 随着水文学、水资源、水环境和应用数学等多门学科的不断发 展, 这些问题将会逐步得到解决.

参 考 文 献

- Duan Q, Sorooshian S, Gupta V K. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*, 1992, 28(4): 1015—1031
- Gupta H V, Sorooshian S, Duan Q. Calibration of rainfall-runoff models; Application of the global optimization to the sacramento soil moisture accounting model. *Water Resources Research*, 1998, 34(4): 1015—1030
- Ng A W M, Perera B J C. Selection of genetic algorithm operators for river water quality model calibration. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2003, 16(5): 529—541
- 金菊良, 丁 晶. 遗传算法及其在水科学中的应用. 成都: 四川大学出版社, 2000, 1—2
- Luther W W, Baxter V, David A, et al. Estimation of optimal parameters for a surface hydrology model. *Advances in Water Resources*, 2003, (26): 337—348
- Wang Q J. Using genetic algorithms to optimize model parameters. *Environmental Modeling & Software*, 1997, (12): 27—34
- 陆桂华, 郇建强, 杨晓华. 水文模型参数优选遗传算法的应用研究. *水利学报*, 2004, (2): 50—56
- Lu Z, Shieh L S, Chen G R, et al. Simplex sliding mode control for nonlinear uncertain systems via chaos optimization. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2005, 23: 747—755
- Dorigo M, Maniezzo V, Coloni A. Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Trans on SMC*, 1996, 26(1): 28—41
- 杨晓华, 陆桂华, 郇建强. 混合加速遗传算法在流域模型参数优化中的应用. *水科学进展*, 2002, 13(3): 340—344
- 杨晓华, 陆桂华, 郇建强. 自适应加速遗传算法及其在水位流量关系拟合中的应用. *水文*, 2002, 22(2): 14—18
- 杨晓华, 沈珍瑶. 智能算法及其在资源环境系统建模中的应用. 北京: 北京师范大学出版社, 2005, 178—183
- Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models. *J Hydrol*, 1970, (10): 282—290
- Ibbitt R P, O'Donnell T. Designing conceptual catchment models for automatic fitting methods. In: *Proceedings of International Symposium on Mathematical Models in Hydrology Science*. Warsaw: International Association of Hydrological Science, 1971, 59—69
- Johnston P R, Pilgrim D H. Parameter optimization for watershed models. *Water Resources Research*, 1976, 12(3): 477—486
- Pickup G. Testing the efficiencies of algorithms and strategies for automatic calibration of rainfall-runoff models. *Hydrological Science Bulletin*, 1977, 22: 257—274
- Gupta, V K, Sorooshian S. The relationship between data and the precision of estimate parameters. *Journal of Hydrology*, 1985, 81: 55—77
- Hendrickson J D, Sorooshian S, Brazil L E. Comparison of Newton-type and direct search algorithms for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*, 1988, 24(5): 691—700
- Wang Q J. The genetic algorithm and its application to calibrating conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*, 1991, 27(9): 2467—2471
- Duan Q, Sorooshian S, Gupta V K. Optimal use of SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology*, 1994, 158: 265—284
- Franchi M J. Using genetic algorithm combined with a local method for the automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models. *Hydrological Science Journal*, 1996, 41(1): 21—40
- Marco F, Giorgio G. Comparing several genetic algorithm schemes for the calibration of conceptual rainfall-runoff models. *Hydrological Science Journal*, 1997, 42(3): 357—378
- Madsen H. Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives. *Journal of Hydrology*, 2000, 235(3): 276—288
- Cheng C T, Ou C P, Chun K W. Combining a fuzzy optimal model with a genetic algorithm to solve multiobjective rainfall-runoff model calibration. *Journal of Hydrology*, 2002, 268: 72—86
- 毛学文. 基因算法及其在水文模型参数优选中的应用. *水文*, 1993, 13(5): 22—27
- 金菊良, 杨晓华, 储开凤, 等. 加速基因方法在最大流量频率曲线参数估计的应用. *四川联合大学学报(工程科学版)*, 1997, 1(4): 27—33
- 谭炳卿. 水文模型参数自动优选方法的比较分析. *水文*, 1996, 16(5): 58—65
- 张建云, 轩云卿, 李 健. 模型参数优化方法及其应用. *水文*, 1999 (增刊): 61—65
- 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. *水文*, 2002, 22(1): 12—16