

系统响应参数优化方法 及其在水文模型中的应用

赵丽平 邢西刚 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

系统响应参数优化方法 及其在水文模型中的应用

赵丽平 邢西刚 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书通过对目标函数结构以及对参数优选所提供的信息进行分析,阐明概念性流域水文模型局部优值存在的本质原因,提出了新的优化算法和策略,旨在能够快速有效地获得稳定的、物理意义合理的全局参数优值。全书共分为5章:第1章介绍了研究背景和意义、自动优选方法和目标函数的国内外研究进展以及研究内容和技术路线;第2章以误差平方和目标函数为例阐明了常用的幂次方目标函数对参数优化提供的信息存在众多不合理性,并对系统响应参数率定方法理论体系进行了介绍;第3章构建了三个水文模型(XAJ模型、NAM模型、HBV模型)的理想模型,对系统响应参数优化方法进行了验证,并与Simplex方法和SCE-UA方法进行了对比研究;第4章介绍了系统响应参数率定方法在多个模型、多个实际流域应用的检验效果;第5章对全书加以总结并提出未来的展望。

本书可供从事水文水资源、水利工程和水利信息化等相关专业的科学工作者和工程技术人员参考,也可作为上述专业的大学本科生和研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

系统响应参数优化方法及其在水文模型中的应用 / 赵丽平, 邢西刚著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2019.11

ISBN 978-7-5170-8103-6

I. ①系... II. ①赵... ②邢... III. ①水文模型—参数分析 IV. ①P334

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第247562号

书 名	系统响应参数优化方法及其在水文模型中的应用 XITONG XIANGYING CANSHU YOUHUA FANGFA JIQI ZAI SHUIWEN MOXING ZHONG DE YINGYONG
作 者	赵丽平 邢西刚 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	天津嘉恒印务有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 7.5印张 147千字
版 次	2019年11月第1版 2019年11月第1次印刷
定 价	42.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

模型结构和参数是水文模型的核心组成部分。研究及应用表明，流域水文模型中，在模型结构确定之后，模型参数的确定就变得较为重要。除物理模型和一些能用经验方法估计的参数外，参数估计都是利用优化方法从目标函数曲面上获取参数估计的信息。目前应用最多的目标函数是误差平方和目标函数，而本书通过对其结构以及对参数优选所提供的信息进行分析，发现误差平方和目标函数为参数优化提供的信息存在众多不合理性，并发现参数函数曲面比目标函数曲面更简单，可为参数优化提供更直接有效的信息，从而提出了一种直接在参数函数曲面上寻找优值的系统响应参数优化方法，并对其进行了多角度、多方面验证。该方法在多个模型、多个实际流域进行了实际应用检验，并取得了较好的应用效果。本书的主要创新点和特色成果如下：

(1) 提出了一种新的参数优化方法——系统响应参数率定方法 (System Response Parameter Calibration Method, SRPCM)。经研究发现，误差平方和目标函数为参数优化提供的信息存在众多不合理性，而参数函数曲面比目标函数曲面为参数优化提供的信息更直接有效。从而利用因变量增量与参数之间存在的系统响应关系将非线性函数线性化，提出了基于参数函数曲面的系统响应参数率定方法，并对方法的收敛性进行了证明。该成果改变了传统最优化方法在目标函数曲面上寻找参数的理念，找到了直接在参数函数曲面寻找参数的捷径，有效解决了传统优化的主要问题，使得寻优过程既快速又有效。

(2) 构建了三个概念性水文模型的理想模型 (XAJ 模型、NAM 模型和 HBV 模型)，首次将系统响应参数率定方法在这三个模型中进行多角度性能检验，并与 Simplex 方法和 SCE-UA 方法进行了对比分析研究。经验证，系统响应参数率定方法在三个模型中都可以

较快速并且稳定地收敛到参数真值，不受参数初值选择的影响，不同参数维数对其影响也皆较小。相比 Simplex 方法和 SCE-UA 方法，其稳定性、精度以及率定效率皆表现最优。

(3) 首次在多个模型、多个不同规模的实际流域进行了应用检验。通过不同尺度的实际流域的验证，可以看出系统响应参数优选方法简便易于实现，而且可行有效，在实际流域具有一定的应用价值，且对于不同尺度流域均适用，值得进一步推广应用。

由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，恳请读者批评指正。

著者

2019 年 9 月于北京

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 国内外研究进展	3
1.2.1 自动率定方法研究	3
1.2.2 目标函数研究	9
1.3 研究内容与技术路线	10
1.3.1 研究的关键问题	10
1.3.2 研究内容	11
1.3.3 技术路线	12
第 2 章 系统响应参数优化方法	13
2.1 引言	13
2.2 误差平方和目标函数问题	14
2.2.1 单样本目标函数信息的不合理性	14
2.2.2 不同样本组合目标函数信息的不合理性	17
2.2.3 变参数样本组合目标函数信息的不合理性	18
2.2.4 误差平方和目标函数构建问题	19
2.3 系统响应参数优化方法	20
2.3.1 方法理论	21
2.3.2 方法步骤和流程	23
2.3.3 优化方法评价准则	24
2.3.4 方法的收敛性证明	25
2.4 本章小结	25
第 3 章 理想模型验证及方法对比研究	27
3.1 引言	27
3.2 邵武流域概况	28
3.3 LH-OAT 参数敏感性分析方法	29
3.4 XAJ 模型验证	30
3.4.1 XAJ 模型介绍及参数敏感性分析	30
3.4.2 不同参数维数检验	33

3.4.3	不同方法对比研究	37
3.5	NAM 模型验证	41
3.5.1	NAM 模型介绍及参数敏感性分析	41
3.5.2	不同参数维数检验	44
3.5.3	不同方法对比研究	48
3.6	HBV 模型验证	51
3.6.1	HBV 模型介绍及参数敏感性分析	51
3.6.2	不同参数维数检验	53
3.6.3	不同方法对比研究	57
3.7	本章小结	60
第 4 章	实际流域应用检验	61
4.1	引言	61
4.2	流域概况	61
4.3	新安江模型参数率定	63
4.3.1	XAJ 模型在七里街流域的参数率定	63
4.3.2	XAJ 模型在邵武流域的参数率定	69
4.3.3	XAJ 模型在东张水库流域的参数率定	71
4.4	NAM 模型参数率定	77
4.4.1	NAM 模型在七里街流域的参数率定	77
4.4.2	NAM 模型在邵武流域的参数率定	80
4.4.3	NAM 模型在东张水库流域的参数率定	84
4.5	HBV 模型参数率定	90
4.5.1	HBV 模型在七里街流域的参数率定	90
4.5.2	HBV 模型在邵武流域的参数率定	95
4.5.3	HBV 模型在东张水库流域的参数率定	99
4.6	本章小结	103
第 5 章	总结与展望	104
5.1	总结	104
5.1.1	系统响应参数率定方法的提出	104
5.1.2	理想模型验证及与其他方法对比研究	104
5.1.3	系统响应参数率定方法的实际应用检验	105
5.2	展望	105
	参考文献	107



绪 论

1.1 研究背景和意义

水文模型是模拟水文现象、研究水文规律的有效工具，现被广泛应用于水资源系统优化管理中，是实时洪水预报调度系统的核心部分，为水资源评价、开发利用和管理等提供理论基础。按照构建的基础模型可分为物理模型、概念性模型和黑箱子模型。其中概念性水文模型是目前应用最多的模型，比如 XAJ（新安江）模型、垂向混合产流模型、NAM 模型、HBV 模型等。模型结构和参数是概念性水文模型的核心，其中模型结构描述了流域降雨径流形成的客观水文规律，模型参数则反映了流域的水文特性。水文模型参数一般可分为三类：①具有明确物理意义的参数，可直接通过量测或用物理关系或物理实验推求；②纯经验参数，可通过实测资料反求；③具有一定物理意义的经验参数，可先按其物理意义确定参数范围，再按照实测资料确定具体参数值。

在模型结构确定之后，模型应用成功的关键在于模型参数的选择^[1]。因此，识别合理有效的模型参数尤为重要。因为水文模型参数不仅具有一定的物理意义，还有推理、概化的成分，所以目前还不能完全根据其所代表的物理意义推算模型参数值，在实际应用中一般依据观测的历史水文气象资料对参数进行率定。参数率定是根据特定的目标函数，确定一套固定的寻找参数法则，然后依据该法则，可以筛选出模型参数值。

最早的率定方法是人工率定，也叫人工试错法。人工率定的参数能够获得较好的模拟效果，但该过程过分依赖于调试人员，需要调试人员具有丰富的经验以及对模型结构的全面了解，不同的调试人员可能获得不同的参数值，主观性较强，而且没有客观的标准来判断优选过程什么时候达到最优，所得到的解是否为参数最优值也不可不知，这些缺点致使人工试错法传承性不高。

随着计算机技术的发展,参数自动率定方法应运而生,这类方法依据一定的数学优化法则通过自动计算寻优,确定参数最优值。只需事先给定优化准则和参数初始值就可以自动完成整个寻优过程。这类方法寻优速率快,寻优结果客观,可大大节约人力、物力,降低模型应用成本,有利于模型的进一步推广及应用研究。Dawdy 和 O'Donnell 可以说是自动率定方法研究的捷足者,1965 年他们在《水力学》杂志上发表了第一篇关于概念性水文模型参数自动率定的文章^[2]。经过 50 多年的发展,模型参数自动率定的研究日益完善。但是 Bardossy 和 Singh 指出,到目前为止没有任何一种算法能够有效解决水文模型中参数优化的问题^[3]。模型参数率定一直是一个十分复杂且困难的问题^[4],其原因在于模型参数率定常表现出高维、多峰值、非线性、导数非连续、带噪声等特征,这些特征的综合效应极大地影响了目标函数响应曲面的形状。这些复杂特征主要体现在以下三个方面^[5]:

(1) 水文模型的不确定性。水文模型的不确定性是指:①水文过程本身就是一个不确定的过程,即一个随机过程;②水文模型只是一种复杂的随机过程的概化和简化,是对系列“平均”情况的一种近似模拟。

(2) 水文模型高维与高度非线性特征。传统参数率定方法对于处理线性、低维模型等问题较为成熟,但对于大多数高维、高度非线性水文模型应用效果较差。虽然一些非线性优化方法可供使用,但总体来说还不很成熟,在实际中应用较少。

(3) 水文模型庞杂的信息类型。水文系统通常既含有大量的确定性信息,又有众多不确定性信息,如模糊性信息、随机性信息、混沌性信息、灰色信息等,而且在水资源缺乏或受人类活动影响剧烈的地区以及在水资源工程的运行与管理中,常遇到很难用精确数值来表示的信息,通常是以经验型语言、规则或知识的形式体现。传统优选方法对于这类信息参数已不能妥善处理。

因此,众多水文学者对上述复杂特征做了大量深入研究,可概括为以下几个方面:①优化算法的研究以及优化算法之间的比较研究;②参数优化过程中有效信息挖掘的研究,包括怎样处理实测数据中的误差以及选择什么样的数据、选择多少数据进行参数率定;③不确定性研究,主要是模型结构和参数的不确定性对模型输出的影响研究;④优化算法收敛准则的研究;⑤目标函数的研究,包括单目标之间的比较研究以及多目标研究等。

尽管水文学者对于参数率定做了大量研究,但是模型参数率定的困难依然存在^[6-9]。关于模型参数率定需认清一个问题,究竟什么才是参数率定的目标?是获得一组稳定、符合物理意义可以很好地反映流域物理机制的参数值?还是获得一组能使模型模拟计算结果与实测系列拟合很好的参数值(这里指的是率定期)?显然,两者同样重要,如果一种方法可以同时注重这两方面固然可取。

但目前大多数的率定方法都更重视后者，这样做的风险是优选的参数值可能在率定期模拟效果较好，但用于预报可能表现很糟糕^[10]。对于概念性流域水文模型，要想获得一组稳定的、唯一的全局优值，虽然不能说是不可可能的，但也是非常困难的。这是由概念性流域水文模型本身的非线性结构特征所决定的，而且目前参数优选方法大都是依据目标函数所提供的参数率定信息，在目标函数曲面上寻找参数优值。常用的目标函数一般是幂次方函数，其中以误差平方和为最多^[9, 11-15]，然而这种寻优策略正是众多局部优值存在以及优选结果不稳定的根本原因。本书的目的是阐明概念性流域水文模型局部优值存在的本质原因，并借助于这一理解和新的发现提出新的优化算法和策略，旨在能够快速有效地获得稳定、物理意义合理的全局参数优值。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 自动率定方法研究

参数率定发展到现阶段，方法众多，可分为传统优化方法和现代优化方法，但基本思路一致：都是根据指定的目标准则，确定一套参数寻找法则，率定出模型参数值，使得率定参数值代入模型得到的计算结果在给定的目标准则下最优^[11]。因此无论哪种优化方法，其基本寻优步骤相似，见图 1.1。

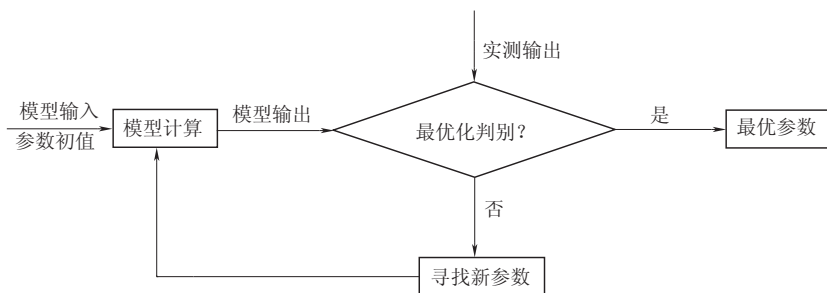


图 1.1 模型参数率定基本步骤

1.2.1.1 传统优化方法

传统优化方法可以有效处理单峰值的优化问题，对于多峰值优化问题通常找到的是局部优值。按照搜索策略和方法的不同，传统优化方法可分为四类：枚举法、直接法、梯度法和随机法。

枚举法的搜索策略是对参数域内的所有点都进行目标函数值的计算与比较，从而找出最优解。枚举法的寻优方式最简单、计算量也最大。其面临的主要问题是“维数灾”，寻优效率不高。而且只适用于参数域是有限集合的情形。

直接法的搜索策略是从一个初始点出发, 然后通过探测、模式移动或者通过反射、延伸、收缩、减小棱长等手段寻找参数优值, 通过比较目标函数的大小, 来确定下一步的寻优方向, 直至满足终止条件。可见, 在直接法中只需要目标函数值的信息, 目标函数的导数无须计算, 搜索策略相对简单, 而且计算量也不大。但若模型中有较多的参数或者目标函数性态较差, 搜索效率与精度通常不高。直接搜索法的代表有 Rosenbrock 法^[16]、模式搜索法^[17] 和单纯形 (Simplex) 法^[18]。

梯度法的搜索策略是从一个初始点出发, 然后依据目标函数减小的梯度方向来确定下一步寻优方向, 直至满足终止条件找到最优点。这里的梯度是目标函数的一次导数。因此梯度法除了要计算目标函数值还要计算其导数值。梯度法采用的策略是“最速下降”方式, 即沿着最陡的方向向最优点移动。但如果目标函数呈现多峰, 用梯度法找到全局最优点将非常困难, 率定结果也会不稳定; 而且对于不可导问题或变量较多的可导问题, 本方法将不再适用。常用的梯度方法有牛顿法^[19-21]、最速下降法和 Powell 法^[22]。

随机法^[23-25] 的搜索策略是在搜索方向上引入随机的变量, 通过随机变量的大量抽样, 得到目标函数的变化特性, 使得算法在搜索过程中以较大的概率跳出局部最优点, 但这种方法更适合于参数率定的早期阶段——获取参数初值阶段^[26]。

由于传统优化方法相对简单、易于实现, 在水文模型参数率定中得到了广泛的应用研究^[6-8, 27-33]。1970 年, Ibbitt 对 9 种不同的局部优化算法进行了全面的比较研究, 比较结果表明 Rosenbrock 法是最有效的。1976 年, Johnston 与 Pilgrim^[7] 使用了单纯形法^[18] 和变尺度方法^[34] 来率定 Boughton 模型^[35] 参数, 研究表明, 单纯形法要比变尺度方法更有效, 更不易陷入局部优值。Sorooshian 和 Dracup^[36] 以及 Sorooshian 和 Arfi^[37] 用单纯形法率定了 Diskin 和 Simon 模型^[15]。1983 年, Sorooshian 等^[30] 用模式搜索法对 SMA-NWSRFS 模型参数进行了优选。1985 年, Gupta 等^[33] 对牛顿法和单纯形法进行了比较研究, 结果表明, 两者的精度差不多, 牛顿法要比单纯形法效率高, 特别是参数维数较多的时候。这是因为基于导数的优化算法, 在连续的目标函数响应曲面上有确定的寻找方向, 即导数的梯度方向也是目标函数减小的方向, 可以确定地减少模拟结果与实测系列之间的误差, 而不是无方向的寻找, 因此其优化速率快, 节省计算时间。

但随着传统优化算法的应用, 一些困难与问题也凸显出来。许多学者指出, 传统优化算法无法解决很多问题^[6-8, 30, 32], 例如目标函数响应曲面非线性造成的局部优值问题, 参数间相关性导致的优化结果不稳定问题, 优化算法适应目标函数响应曲面的能力问题等。1992 年, Duan 等^[38] 指定参数“真值”, 人为生成了一些数据检验六参数水箱模型的参数识别问题, 发现目标函数曲面上存在众多局部优值, 并且传统优化算法无法寻找到参数“真值”, 初值不同

优化结果也不同。

上述传统优化算法被称为局部优化方法，优化结果与初始点选择有很大关系，常常是找出初始点附近的一些局部优值点，给定不同的参数初值，往往会得到不同的优选结果，致使参数率定结果很不稳定，因此采用上述传统优化方法优选出的参数值很难确定是否为全局最优^[39, 40]。这种参数优化的不稳定性 and 局部优选结果，将对水文过程的模拟精度和可靠性产生直接影响，从而影响到流域研究和水资源管理的合理性和科学性。

1.2.1.2 现代优化方法

由于传统优化方法用于水文模型参数识别的不稳定性以及局限性，国内外有关学者将数学上的现代优化方法用于水文模型的参数率定中。大多现代优化方法不是基于导数形式，而是基于生物学、物理学、人工智能、仿生或仿自然的优化算法，是一类以确定性信息与随机性信息相结合的寻优方法。现代优化算法包括基于物理学的模拟退火法（Simulated Annealing, SA）^[41]、基于模拟人工智能的禁忌搜索法^[42, 43]、仿生和仿自然的遗传算法（Genetic Algorithm, GA）^[44]、SCE-UA 方法^[38, 45]、粒子群优化方法（Particle Swarm Optimization, PSO）^[46-50]、蚁群算法（Ant Colony Optimization, ACO）、并行算法以及人工神经网络算法^[51] 等。其中 GA 与 SCE-UA 方法最为常用。

(1) 模拟退火法。模拟退火法的思想最早由 Metropolis 于 1953 年提出，在 1983 年被 Kirkpatrick 等学者成功引入优化领域，是一种求解大规模优化问题的高效搜索算法。模拟退火法的思想来源于对固体退火降温过程的模拟，即固体加热至充分高，再徐徐冷却的过程。固体加热后，固体中原子的热运动不断增强，内能增大，随着温度不断升高，固体内部粒子变为无序状；冷却时，粒子随温度降低逐渐趋于有序，在每个温度下都达到平衡状态，最后在常温下达到基态，同时内能也会减为最小。对于优化问题，也有类似的过程，优化问题中解空间的每一个点都代表一个解，不同的解有不同的能量值。优化就是在解空间中寻找使能量函数也就是目标函数达到最小值（或最大值）的解。模拟退火法采用 Metropolis 接受准则^[52, 53]，利用退火进度表来控制算法的进程，其包含三个重要函数：生成函数、接收函数和退火时间表函数。如果生成函数采用不同的概率分布，模拟退火法的性能与搜索特点也会有较大不同。虽然模拟退火法已经过大量验证，较为成熟，但在使用前需要确定一定的参数和选项，如果设置的这些参数和选项不符合问题的特征，可能致使算法收敛速度过慢，甚至不能保证解的质量。因此这些参数的选择需十分注意，特别是时间表和发生函数。

(2) 禁忌搜索法。禁忌搜索法属于局部邻域搜索算法的推广，并且是人工智能在组合优化方法中的一个成功应用。早在 1977 年，Glover 就提出了禁忌搜索概念，当时是将其应用到整数规划求解问题，直到 1989 年、1990 年

Glover 才将禁忌搜索法的结构与方法完整提出^[42, 43, 54]。禁忌技术是禁忌搜索法的核心。所谓禁忌就是禁止重复前面的工作。为了有效避免局部邻域搜索陷入局部极值点,利用禁忌表中的信息,在下次搜索中不重复或者有选择性地搜索这些点,以此来跳出局部最优点。因此,禁忌搜索法充分体现了集中与扩散两个策略:①集中策略体现在局部搜索,即从一点出发,在该点邻域内搜索更好的解,以达到局部最优解而结束;②扩散策略是为了跳出局部最优解,以禁忌表的功能来实现。禁忌表中记录了已经到达过点的某些信息,算法通过对禁忌表中点的禁忌而到达一些没有搜索过的点,从而实现更大区域的寻优。但禁忌搜索法占用计算机存储量较大,效率较低。

(3) 遗传算法。遗传算法又称基因算法,是不严格地建立在自然选择与进化论概念基础上的随机优化方法。该方法由美国密歇根大学的 John H. Holland 于 1975 年在其专著《*Adaptation in Natural and Artificial Systems*》中提出^[44],其搜索策略采用的是自然界的生物进化理论——适者生存,不适者淘汰。遗传算法求解问题的基本步骤是:从随机产生的一组初始解(称为群体)开始搜索;群体中的每个个体看作是问题的一个解,称为染色体;这些染色体在后续迭代过程中不断进化,称为遗传。遗传算法主要通过交叉、变异、选择运算来实现。交叉或变异运算生成下一代染色体,称为后代。染色体的好坏用适应度(即目标函数)来衡量。根据适应度数值的大小从上一代和后代中选择一定数量的个体,作为下一代群体,再继续进化,这样经过若干代进化后,算法收敛于最好的染色体,该染色体很有可能就是问题的最优解或次优解。遗传算法中包含一些初始设置变量,包括种群大小、遗传代数、交叉概率、变异概率,这些值的具体选择依具体问题而定^[55]。

遗传算法具有良好的自适应优化能力,可以处理非解析式的目标函数和约束问题,因不受模型结构、参数数目、约束条件等限制,并具有灵活的算法配置和广度、深度搜索能力,得到越来越多的应用与研究。Wang^[40]最早将遗传算法应用于概念性降雨-径流模型参数优选中;Franchini^[56]将遗传算法与局部搜索算法相结合用于率定降雨-径流模型参数,经验证提高了遗传算法的效率;2009 年其又在进行概念性降雨-径流模型参数的自动率定时,比较了几种模式下遗传算法的应用效果^[57];金菊良等^[5]应用遗传算法进行水资源最优分配的设计;毛学文^[58]利用二进制编码的遗传算法进行了新安江模型的参数优选;1997 年, Wang^[59]又从另一个角度对水文模型的参数率定进行了研究,给定模型参数真值,利用人为生成的资料率定模型参数,然后观察遗传算法是否能够找到参数真值,并用实例检测其适用性和鲁棒性,结果表明,遗传算法可以近似地找到全局最优解,方法有效,但文中没有给出参数优化过程中算法参数设置及其收敛性问题。谭炳卿^[60]以新安江模型为例,应用 14 个流

域资料,对 Rosenbrock 法、改进的单纯形法和遗传算法优选模型参数的效果进行了比较分析。结果表明,遗传算法优化效果最佳,但收敛速度相对较慢。遗传算法虽是一种通用的有效求解参数优化问题的方法,但由于使用二进制编码,需要频繁的编码和解码,计算量较大;而且在很多情况下不是十分有效,容易出现过早收敛或者收敛较慢;其全局搜索能力强,但局部寻优能力较差,尤其对整个区域(包括边界)上的最优点搜索的遍历性较差,局部优化解质量不高^[61]。因此,众多学者对遗传算法进行了改进研究。杨晓华等^[62]在遗传算法中加入单纯形搜索算子和加速搜索算子提出了混合加速遗传算法,实例应用结果证明改进后的遗传算法区间好、速度更快、搜索解更准确。金菊良等^[63]建立了加速遗传算法,并解决了最大流量频率曲线的参数优化问题。Cheng 等^[64]结合遗传算法与模糊优化模型提出了新安江参数率定的新方法,有效解决了多目标参数优化问题并提高了率定效率。陆桂华等^[65]通过在遗传算法中加入单纯形搜索算子及加速搜索算子,逐步调整参数变化区间,建立了单纯形混合加速遗传算法并取得了较好的应用效果。

(4) SCE-UA 方法。SCE-UA 方法是美国亚利桑那大学水文与水资源系段青云博士 1991 年在其博士论文中提出的^[45]。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,引入种群概念,复合形点在可行域内随机生成和竞争演化。简单地说,SCE-UA 方法就是开始时在参数可行域中引入随机分布的点群,将这些点群分成 p 个复合形,每个复合形包含 $2n+1$ 个点,每一个复合形都独立地根据下降单纯形法进行“进化”,定时地将整个群体重新混合在一起,并产生新的复合形,进化和混合不断重复进行直到满足给定的收敛准则为止。

该方法由于可以搜索到水文模型参数全局最优解^[38, 66],解决高维参数的全局优化问题,被认为是连续型流域水文模型参数优选最有效的方法,在国内外流域水文模型参数优选中应用较为广泛。Sorooshian 等^[4]采用 SCE-UA 方法和 MSX (Multistart Simplex) 算法分别对 SAC-SMA 模型进行了参数率定,结果表明 SCE-UA 方法更有效,收敛效率更高。Kuczera^[67]利用 SCE-UA 方法、GA 和 MSX 算法分别进行了水文模型参数优选的研究,对比结果表明,SCE-UA 方法鲁棒性更强,收敛效果更佳,遗传算法虽在进化的初始阶段可以较快地收敛,但当靠近最优解区域时却无法有效地搜索到最优解。宋星原等^[68]将 SCE-UA 方法、遗传算法和改进的单纯形法应用于水文模型参数优选中,结果表明,SCE-UA 方法综合了遗传算法和单纯形法的优点,能全局一致、快速收敛到全局最优解。李致家等^[69, 70]利用 SCE-UA 方法优化新安江模型参数时发现算法的搜索精度受优化资料长度的影响,在通常资料质量情况下,算法要搜索到稳定的全局最优参数组通常需要 16 年以上的资料。

(5) 粒子群优化方法。粒子群优化方法是由 Kennedy 和 Eberhart 于 1995 年提出的一种基于对鸟群捕食行为模拟的智能群集优化算法^[46, 71]。其基本思想为：在一个优化问题的解空间中，每一个解可被看作一个粒子，每个粒子都有一个自己的位置和速度，用于决定优化方向和距离，还有一个适应值（目标函数值）用来衡量粒子的优劣。粒子群优化方法首先在可行解空间内随机初始化一群粒子，构成初始种群，然后计算出相应的适应值以判断是否达到寻优目标，每个粒子通过迭代循环来更新各自的位置和速度。在每一次迭代中，粒子依靠跟踪两个“极值”来更新自己：一个是粒子本身找到的最优解，称为个体极值点；另一个是种群目前找到的最优解，称为全局极值点。但在粒子群优化方法运行过程中，当某一粒子发现一个当前最优位置，其他粒子将迅速向其靠近；若该位置以局部最优，粒子群就很容易陷入局部最优，过早收敛。为克服过早收敛现象，就需不断扩大搜索范围、增加种群的多样性。江燕等^[72]将粒子群优化方法应用于新安江模型参数优选中，对人工生成的水文资料，粒子群优化方法可优选出模型参数真实值；对实测水文资料，通过与 SAGA 和 SCE-UA 方法比较，可看出粒子群优化方法的精度和计算效率更高。Kennedy 等^[46]对粒子群优化方法中的惯性系数 ω 进行了改进，惯性建立了 ω_{\min} 和 ω_{\max} 的函数关系，改进后的惯性系数使粒子群优化方法的计算精度大幅度提高。江燕等^[73]建立了并行种群混合进化的粒子群算法（PMSE-PSO）和序列主-从种群混合进化的粒子群算法（SMSE-PSO）。通过与 PSO 和 SCE-UA 方法的比较可看出，PMSE-PSO 和 SMSE-PSO 具有较高的计算效率、较强的自适应性和稳定性。朱良山等^[74]引进混沌优化方法，构建了一种混沌粒子群算法（CPSO），对局部最优解在搜索空间上进行混沌迭代优化，改善和提高了基本粒子群算法的全局寻优性能和收敛速度。张文明等^[75]在改进的粒子群优化方法基础上，引入存档群体和拥挤距离机制，构建了 PSO 的多目标优选方法，该方法综合考虑了水文过程的各要素，经验证比单目标优化结果模拟精度更高。

(6) 蚁群算法。蚁群算法是由意大利学者 Dorigo 等根据对自然界中真实蚁群集体行为的研究成果而提出来的^[76]。蚂蚁在觅食路径上会分泌一种化学物质——信息素。单个蚂蚁通过感知路径上的信息素强度按概率选择下一步的行进方向，而蚂蚁之间则通过感知和释放信息素完成简洁的信息传递。随着时间的增加，较短路径上的信息素含量越来越高，后续的蚂蚁则以较大概率选择短路径，同时算法引进了信息素挥发和更新机制，防止优化陷入局部最优。蚁群的这种自身催化过程形成的信息正反馈机制使其最终可以找到最短路径。蚁群算法在模型参数率定研究中也取得了很好的应用^[77-79]，但是在构造解的过程中使用了随机选择策略，因此收敛速度较慢，容易早熟。

(7) 并行算法。并行算法是提高算法效率的一个通用方法，上面介绍的

SCE-UA、GA 和 PSO 算法都隐含了并行处理的思想，比较容易实现。Liu 等^[80] 发展了一个以 PSO 算法为核心，以 SCE-UA 方法的主控流程为总体框架的并行优化算法（SCPSO），在该算法中，是以 PSO 方法取代了 SCE-UA 中的单纯形法，这样使整个算法的性能和效率得到了进一步的保证。武新宇等^[81] 在微机集群环境下，提出了并行遗传算法，并用于新安江模型参数优选中，经验证提高了参数优选的效率和求解质量，模型参数优选结果较为稳定。

综上，可以看出现代优化方法具有跳出局部最优达到全局最优的能力，在一定程度上解决了传统算法所不能解决的优化问题。但算法本身含有一些参数，而且算法属于在参数空间域内满天星的寻找，具有收敛缓慢或者过早收敛的现象。并且都是以确定性随机性寻找信息相结合来寻优，无法证明所获得的参数值是否为全局最优，参数优化方法本身的收敛性也常难以证明^[82-84]，只是概率意义上的收敛于全局最优。

1.2.2 目标函数研究

参数率定除物理模型和一些能用经验方法估计的参数外，都需要借助于优化方法从目标函数获取参数率定的信息，在目标函数曲面上寻找参数最优值。为优化算法选择恰当的目标函数是参数识别的重要环节。Sorooshian^[30] 在其 1983 年的报告中指出，合适的目标函数可以有助于找到稳定合理的参数值，而且还能使参数率定结果对于资料的敏感度大大降低。因此如何选择合适的目标函数，获取较理想的函数响应曲面以及尽可能多地筛选有效信息加以利用是成功率定水文模型的关键问题。假设 $Q_{\text{obs}} = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ 是观测样本系列， $Q_{\text{cal}}(\theta) = \{q(\theta)_1, q(\theta)_2, \dots, q(\theta)_n\}$ 是相应的模型计算输出系列，其中 θ 为参数。模型计算系列与实测系列之间的偏差可以表示为 $E(\theta) = F[Q_{\text{obs}} - Q_{\text{cal}}(\theta)]$ ，这里的函数 $F(\cdot)$ 可以对模型残差进行变形计算得到一个能够代表残差平均水平的标量，即为目标函数。模型参数率定的目标就是选择最优的参数 θ 使得目标函数最小（或者最大，取决于目标函数的定义）。

目前已提出的目标函数有很多，比如误差平方和（Simple Least Squares, SLS）、平均绝对误差（Mean Absolute Error），纳什系数（Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE），洪峰偏差（Peak Difference, PDIFF）等，其中最常用的就是误差平方和目标函数^[3, 11-14]。以往参数优化一般以单目标进行寻优。1977 年，Diskin 和 Simon^[85] 采用了 12 种目标函数，并建立了选择目标函数的过程；1986 年，Green 和 Stephenson^[86] 更是列举了 21 个目标函数，总结得出每个单目标函数率定参数时所具有的问题；1986 年，包为民^[87] 对新安江模型参数优选的研究中指出模型中存在参数相关、结构相关，单靠单纯的单目标优化方法无法得到较好的优化结果。2008 年，Fencia 等^[88] 分析了单目标优化问题的原因：①单目

标函数可能会增大其反映的特定过程的实测误差，只是关注了水文过程的某些特征而忽略了其他同样重要的部分；②单个变量的残差总和掩盖或者低估了实测资料所蕴含的信息，无法全面地捕捉和利用所有的资料信息成分。例如洪水预报中除了要求径流量模拟精确，还要求峰现时间、滞时和洪峰流量模拟精确。单一的目标函数优化通常只能使该函数达到最优，而其他结果并不理想。

因此在进行参数优化时，运用多目标方法优化模型参数的行为是必要的。Boyle 等^[89] 结合了多目标优化技术、专家知识及手动有效策略，最后采用计算机算法实现的方式，取得了比单一的加权聚合统计的方法更好的效果。Yu 等^[90] 为提高传统目标函数性能，提出了模糊多目标函数方法，使得该方法能够适合于产流分布不均匀的流域。2010 年，Li 等^[91] 首次将多目标优化方法用于多站点率定，结果表明，多目标函数在信息利用上要明显优于单目标函数，但是也有其弊端。早在 1996 年 Yapo^[13] 就指出多目标率定法最大的特征就是优化结果过多，不同的参数组合往往可以产生同样的效果，很难找到唯一的优化参数。如何在庞大的参数系列中找到最优的结果，是大家一直关心的问题。总结多目标函数法近 30 年的发展，其方法可以归纳为两大类：①不加取舍地将所有参数组合结果均作为样本；②根据需要加以取舍，挑选出能为所用的组合作为样本。第一种方法可以找到全局最优，但是在大量的单目标优化中往往无法收敛，而且当有较多目标函数时，计算成本和速率均不理想。第二种方法具有不完整的样本空间，可能无法找到全局优值，最终的优化结果可能某种程度上依赖于初始值的选择。

虽然目前的研究在优化策略、目标函数设计和选择上有很大进步，但是模型率定的困难依然存在。一个一直以来被忽略的问题是，在目标函数曲面上寻找参数优值，得到的率定结果不稳定的部分原因在于目标函数本身的数学特性，本书将在第 2 章将对目标函数进行详细分析。

1.3 研究内容与技术路线

1.3.1 研究的关键问题

(1) 参数优化结果不稳定、收敛速度缓慢。优化算法可分为传统优化方法和现代优化方法，利用传统优化算法寻找参数优值，常常是找出初始点附近的一些局部优值点，给定不同的参数初值，往往会得到不同的优选结果，参数率定结果很不稳定，优选出的参数值很难确定是否为全局最优。现代优化方法具有跳出局部最优达到全局最优的能力，在一定程度上解决了传统算法所不能解决的优化问题，但算法本身含有一些参数，而且算法属于在参数空间域内满天