

蚁群算法在水科学中的应用研究进展

杨 娜¹, 付 强^{1,2}, 李荣东³

(1. 东北农业大学水利与建筑学院, 黑龙江 哈尔滨 150030 2. 黑龙江农垦总局, 黑龙江 哈尔滨 150040 3. 佳木斯市水利勘测设计研究院, 黑龙江 佳木斯 154003)

摘要 蚁群算法是优化领域中相对较新的一种随机启发式搜索算法, 通过模拟蚂蚁的觅食行为来解决复杂组合优化问题, 是迄今为止昆虫算法中较为成功的例子。主要介绍了蚁群算法的生物原理及其算法的基本模型, 对近些年来蚁群算法在水土资源新领域中的多种应用研究进行了分析与归纳, 并指出了存在的问题及其研究展望。

关键词 蚁群算法; 优化; 水土资源; 应用

中图分类号: TV213.4 文献标识码: A 文章编号: 1004-693X(2007)05-0067-04

Progress on application of ant colony algorithm in water science

YANG Na¹, FU Qiang^{1,2}, LI Rong-dong³

(1. College of Water Conservancy & Architecture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Heilongjiang Land Reclamation Bureau, Harbin 150040, China; 3. Jiamusi Water Investigation, Design and Research Institute, Jiamusi 154003, China)

Abstract: Ant colony algorithm (ACA) is a relatively new stochastic and meta-heuristic searching algorithm for optimization problems. By simulating ants' behavior of searching for food, the algorithm can solve complicated combinatorial optimization problems and is a successful paradigm of insects' algorithms at present. The biological theory and the basic model of ACA were presented. And the applications of ACA to water and soil resources field in recent years were analyzed and summarized. Finally existing problems and research directions of ACA in the future were proposed.

Key words: ant colony algorithm; optimization; water and soil resources; application

20 世纪 50 年代中期出现了仿生学学科, 人们很快从生物进化的机理和仿生学中得到启示, 提出了多种适合于对现实世界中复杂问题进行优化的模拟进化方法, 如: 模拟人的大脑神经网络建立的人工神经网络算法, 模拟人类进化过程建立的遗传算法, 模拟人工免疫系统建立的人工免疫算法, 模拟物理学中国体物质的退火过程建立的模拟退火算法以及模拟蚁群搜索食物的过程建立的蚁群算法(ACA)等。蚁群算法虽然是从研究求解著名的旅行商问题(TSP)等经典优化问题提出的, 但它却在求解复杂的组合优化问题中得到广泛的应用。

水土资源系统是一种多目标、多层次的, 不断发展的, 具有大量相互关系和作用单元及因素的开放性综合系统, 该系统规模庞大、结构复杂、影响因素众多。当前水土资源开发利用和人类活动结合日趋紧密, 从而在资源的时空分布、生产和生态需求上产生了众多矛盾, 对这些问题的解决到目前为止大多仍停留在简单的线性、连续的传统方法中, 因而难以找到很好的解决方案和得到最优解。文中介绍的蚁群算法不仅可以用于连续时间、空间系统的复杂优化, 而且还可以用于离散系统的复杂优化, 该算法已经成功地解决了若干水土资源领域的复杂问题,

基金项目: 国家“863”项目(2002AA2Z4251); 国家自然科学基金(30400275); 中国博士后科学基金(2004035167); 黑龙江省青年基金(QC04C28)

作者简介: 杨娜(1979—), 女, 黑龙江佳木斯人, 硕士, 从事系统工程建模、水土资源优化利用与系统分析研究。E-mail: yangna792005@126.com

显示出它是一种很有发展潜力的方法。本文对 ACA 及其在水科学中的应用研究加以综述,目的在于进一步推动蚁群算法在水土资源领域的理论与应用研究。

1 蚁群算法原理

蚁群算法是通过模拟蚂蚁群体寻找最优路径的过程形成该算法的基本思想:用蚂蚁的行走路径表示待求问题的可行解,每只蚂蚁根据问题依赖的准则,从被选的初始状态出发,在解空间中独立地搜索可行解或是解的一个组成部分。解的质量越好,在“行走路径”上留下的信息素也就越多(随着时间的推移,信息素会散发从而浓度逐渐减弱)随着算法的不断迭代,代表较好解的路径上的信息素逐渐增多,选择它的蚂蚁也相应增多,最终整个蚁群在正反馈启发式搜索的作用下集中到代表最优解的路径上,也就找到了当前条件下的最优解。

2 蚁群算法基本模型

人们发现蚁群寻找食物的过程与 TSP 十分相似,所以蚁群算法最早被应用于 TSP 的求解中。而 TSP 正是一个典型的易于描述却很难进行大规模处理的复杂问题,并常用来验证某一算法的有效性,便于与其他算法比较。下面就以求解平面上 n 个城市的对称性 TSP 问题为例来说明 ACA 基本模型。对于其他问题,基本原理是不变的,可以对模型稍作修改便可应用。

首先引入如下记号:

m 为蚁群中蚂蚁数量; $b_k(t)$ 为 t 时刻位于城市 i 的蚂蚁个数, $m = \sum_{i=1}^n b_k(t)$, n 为城市个数; d_{ij} 为两城市 i 和 j 之间的距离; η_{ij} 为边弧 (i, j) 的能见度,反映由城市 i 转移到城市 j 的启发程度,一般取 $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$; τ_{ij} 为边弧 (i, j) 上残留的信息素轨迹强度; $\Delta\tau_{ij}^k$ 为蚂蚁 k 在边弧 (i, j) 上留下的单位长度轨迹信息素量; P_{ij}^k 为蚂蚁 k 的转移概率, j 是将要访问的下一个城市; α 为残留信息的相对重要程度($\alpha \geq 0$); β 为能见度的相对重要程度($\beta \geq 0$)。

假定每只蚂蚁都具有如下特征:①根据路径上信息素的强度,概率地选择下一个将要访问的城市;②不再选取本次循环已走过的路径为下一步路径,用一个禁忌表(tabu list)来控制;③当完成一次循环后,根据整个路径长度来释放相应浓度的信息素,并更新走过的路径上信息素强度。

在蚂蚁开始搜索的初始时刻, m 只蚂蚁被放置在不同的城市上,赋予各条路径上的信息素强度相

等,设 $\tau_{ij}(0) = \alpha$ (C 为常数),每只蚂蚁的 tabu 中第一个元素赋值为它所在的城市。因此,在 t 时刻,在城市 i 的蚂蚁 k 选择城市 j 的转移概率为

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{s \in \text{allowed}_k} [\tau_{is}(t)]^\alpha [\eta_{is}(t)]^\beta} & j \in \text{allowed}_k \\ 0 & j \notin \text{allowed}_k \end{cases} \quad (1)$$

其中 allowed_k 表示蚂蚁 k 下一步允许走的城市的集合,它会随蚂蚁 k 的行进过程而减小。当一次循环结束后,可以用禁忌表来计算该蚂蚁此次所建立的解决方案(求解出蚂蚁所经过的路径总长)。

经过 n 个时刻,蚂蚁完成了一次周游,各路径上的信息素浓度根据下式更新

$$\tau_{ij}(t+n) = \rho \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t, t+n) \quad (2)$$

$$\Delta\tau_{ij}(t, t+n) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t, t+n) \quad (3)$$

$$\Delta\tau_{ij}^k(t, t+n) = \begin{cases} \frac{Q}{L_k} & \text{蚂蚁 } k \text{ 在本次循环中经过的路径为 } (i, j) \\ 0 & \text{蚂蚁 } k \text{ 在本次循环中的经过的路径不为 } (i, j) \end{cases} \quad (4)$$

其中, Q 为一个常数,表示蚂蚁完成一次完整的路径搜索后释放的信息素总量; L_k 表示路径总长度。它是目前最常用的 ant cycle system 模型,是在蚂蚁已经建立了完整的轨迹后再释放信息素,利用的是整体信息。

3 蚁群算法在水科学中的应用研究现状

蚁群算法虽然研究时间不长,但它已显示出在求解复杂优化问题上的优势,其应用前景非常广阔,相继渗透到许多新的领域。下面就对该算法在水科学中的应用研究做一简要概述。

3.1 在水资源优化调度中的应用

Jalali 等^[1]最先将蚁群算法及其 3 个子模型 Ant-Cycle, Ant-Quantity, Ant-Density 应用在水库优化调度中,并由单库优化扩展到两库,研究结果证明该算法比传统的优化算法更有优势。徐刚等^[2-4]引入变异特征的蚁群算法研究了单库水电站的优化调度问题,应用局部搜索机制优化路径,较好地解决了传统动态规划方法求解水库(群)优化调度存在的“维数灾”问题。在此基础上他又进一步解决了梯级水电站中长期优化调度问题,通过对水库调度线作不断调整、逐步逼近最优解实现梯级水库短期优化调度,并具体运用到梯级水电厂日竞价优化调度中。最近,练继建等^[5]通过引入遗传算法的交叉和变异思想以及自适应搜索半径方法改进蚁群算法,并将其应用于梯级水电站短期优化调度问题。在龙羊峡—李家峡梯级水电站实际调度中,可以表明蚁群算

法能求解具有复杂约束条件的非线性梯级优化调度问题。王德智等^[6]采用一种改进的连续蚁群算法来解决供水水库优化调度问题,在随机搜索过程中嵌入有限步动态解析法,与离散蚁群算法相比该算法具有并行化和较强的全局寻优能力,为解决水库优化调度问题又提供了一条行之有效的新途径。

3.2 在水资源供需平衡、合理分配及优化配置中的应用

蚁群算法在水资源合理优化配置领域中的发展相对较为缓慢,但也取得了一些成果,Nagesh等^[7]将Ant-Q算法与多目标问题相结合,提出了MOAQ算法。该算法在水资源分区灌溉设计中取得了很好的效果。Zecchin等^[8]采用了MMAS(Max-Min Ant System)对水资源配水系统适当转化后的优化调度问题求解,结果合理有效。

3.3 在地下水研究领域中的应用

蚁群算法在地下水应用与研究中具有很大的潜力。对观测井点进行优化布置是一个复杂的离散优化问题,然而其他传统优化算法在解决该类问题上是无法与蚁群算法相媲美的。Li等^[9]针对长期观测井网的最优布设问题,应用蚁群算法和遗传算法的耦合算法进行求解,获得了理想的效果。近来,李守巨等^[10]根据渗流场的水头和流量观测数据,建立了基于蚁群算法的地下含水层参数识别方法,而对于参数识别反问题蚁群算法能收敛到全局最优解。

除此之外,井灌区最优布井配泵、多目标的地下水规划与管理、地表水与地下水的联合优化调度等诸多问题都将成为此算法的应用领域,并且有待于人们进行深入研究及探讨。

3.4 在模型参数估计中的应用

最近,詹士昌等^[11-13]将连续性空间优化的蚁群算法应用在马斯京根洪水演算模型的改进及其参数估计中,同时又针对马斯京根洪水模型的近似性问题,用曲线积分法改进了原模型中时段流量的简单算术平均值法,使演算流量更加接近实际。应用表明,蚁群算法具有求解连续空间优化问题的突出特点,可以广泛应用于各种自然灾害模型的优化。此外,他对传统水位流量关系曲线拟合的参数优化问题,也应用了连续性空间优化的蚁群算法。结果证明,该算法具有直观、简便、快速、实用性强等优点,是较为优秀的一种全局优化方法。文献[14]介绍了水环境优化问题的一种新方法——求解连续变量非线性函数优化问题的蚁群加速遗传算法(ACAGA),它是一种既可以较大概率搜索全局最优解,又能进行局部细致搜索的较好的非线性优化方法,且对目标函数和约束条件没有限制,可广泛应用于各种水

环境优化问题中。文献[15]引入了带可变邻域搜索项的进化策略对蚂蚁算法进行了改进,然后将改进的蚂蚁算法应用到解决暴雨强度公式的参数优化这类连续问题中。可见,在水文水资源领域中存在大量的参数优化问题,改进的蚁群算法将在这一领域具有广泛的应用前景。

3.5 在边坡稳定性分析中的应用

复杂边坡稳定性分析实际上是一个含多极值点的、且目标函数通常无法用显式表达的复杂非线性规划问题。陈昌富等^[16-18]对这一问题进行了大量的研究与应用,首先构造了一个适应复杂边坡临界滑动面搜索的启发式蚁群算法(HACA);并探讨了HACA在采矿边坡临界滑动面搜索和稳定性分析评价中的应用,以及在高填石路堤稳定性分析中的应用,随后,又构建了自适应蚁群算法(AACA),将它应用在边坡非圆弧临界滑动面搜索中。为了更加完善蚁群算法在边坡稳定中的应用与研究,进一步引入混沌扰动算子,利用Spencer法和Janbu法,深入探讨了改进后的算法在边坡稳定性分析中的应用。

文献[19]的实例表明,基于蚁群算法的复合形法容易找到全局最优,成为一种全局搜索能力很强的优化算法。文献[20]最先将蚁群算法与土坡稳定性有限元分析方法相结合,探讨了土坡应力场对应最小稳定安全系数的土坡任意形状临界滑动面搜索技术。之后,文献[21]将非圆弧滑动面的搜索简化为滑动面上若干关键点坐标的搜索问题,提出了一种新的连续型蚁群算法。

3.6 在水科学其他方面的应用

许刚等^[22]建立了较符合现状的给水管网校正优化微观模型,采用蚁群算法进行给水管网的改扩建优化设计,提高了优化效果。城市日用水量预测是城市供水管网系统动态模拟的基础和前提,李玉华等^[23]采用蚁群算法来训练神经网络的权值,避免了BP算法易陷于局部最优的缺陷。与此同时,王磊等^[24]还将蚁群算法应用于排水管道系统的优化设计。结果表明该算法性能优越,寻优速度极快,在给水管网设计中有较为广阔的应用前景。

高玮等^[25-26]把改进的蚁群算法应用于地下工程中的一类组合优化问题——硇群施工顺序优化。为了提高岩土工程优化反分析的计算效率,他们首次把连续蚁群算法引入岩土工程领域,并且相继引入免疫原理,结合有限元数值分析技术,提出免疫连续蚁群算法反分析。文献[27]又将改进的蚁群算法运用于土石坝土体参数反演问题的求解中,但它仅用一个简单算例进行验证,对于复杂的工程应用,仍需进一步研究。岩土工程中存在着大量难以解决的

复杂优化问题,这就需要科研人员更加深入研究蚁群算法来更好地解决现存问题。

4 ACA 存在的问题及展望

近年来,蚁群算法已在水土资源领域中得到了众多推广应用,但由于它正处于起步阶段,还存在许多有待解决的问题。

a. 文中文献表明,大多实例仅是对蚁群算法在该问题应用的一个简单仿真,没有更好地运用到生产实践中去。因此,今后应大力挖掘蚁群算法在实际应用中的潜力。

b. 算法的收敛性、参数的设定均来自于经验和大量的实验统计,这表明该算法在理论方面需要更深入地研究与探讨。

c. 对算法本身的改进与完善,目前的工作仅针对算法中不同部分做修改,对各种方法的综合应用及其相互作用的研究还很少,这是今后研究的重点之一。

d. 同遗传算法(GA)、人工神经网络(ANN)等算法相比,ACA没有系统的分析方法和坚实的数学基础,而具有完备的数学理论基础将会使蚁群算法得到更广泛的应用,同时也能为算法本身的改进与完善提供理论支持。综上所述,它将是研究的重中之重。

参考文献:

[1] JALALI M R, AFSHAR A, MARINO M A, et al. Reservoir operation by ant colony optimization algorithm[J]. Zran J Sci Technol 2006, 30(B1):107-117.

[2] 徐刚, 马光文, 梁武湖, 等. 蚁群算法在水库优化调度中的应用[J]. 水科学进展 2005, 16(3):397-400.

[3] 徐刚, 马光文. 基于蚁群算法的梯级水电站群优化调度[J]. 水力发电学报 2005, 24(5):7-10.

[4] 徐刚, 马光文, 涂扬举. 蚁群算法求解梯级水电厂日竞价优化调度问题[J]. 水利学报 2005, 36(8):978-981, 987.

[5] 练继建, 马超, 张卓. 基于改进蚂蚁算法的梯级水电站短期优化调度[J]. 天津大学学报 2006, 39(3):264-268.

[6] 王德智, 董增川, 丁胜祥. 基于连续蚁群算法的供水水库优化调度[J]. 水电能源科学 2006, 24(2):77-79.

[7] NAGESH D, KUMA R, REDDY M J. Ant colony optimization for multi-purpose reservoir operation[J]. Water Resources Management 2006, 20:879-898.

[8] ZECCHIN A C, MAIER H R, SIMPSON A R, et al. Max-min ant system applied to water distribution system optimisation [C]//ImModsim 2003-International Congress on Modelling and Simulation. Townsville: Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand Inc 2003:795-800.

[9] LI Y, HILTON A B C, TONG L. Development of ant colony

optimization for long-term groundwater monitoring[C]//In Proceedings of the ASCE EWRI 2004 World Water & Environmental Resources Congress. Salt Lake City: ASCE, CD-ROM 2004:1-10.

[10] 李守巨, 刘迎曦, 孙慧玲. 基于蚁群算法的含水层参数识别方法[J]. 岩土力学 2005, 26(7):1049-1052.

[11] 詹士昌, 徐婕. 蚁群算法在马斯京根模型参数估计中的应用[J]. 自然灾害学报 2005, 14(5):20-24.

[12] 詹士昌. 马斯京根洪水演算模型的改进-兼论其参数的蚁群算法率定[J]. 自然灾害学报 2006, 15(2):32-37.

[13] 詹士昌, 徐婕. 蚁群算法在水位流量关系拟合中的应用[J]. 杭州师范学院学报:自然科学版 2005, 4(2):109-113.

[14] 杨晓华, 杨志峰, 郦建强. 蚁群加速遗传算法在水环境优化问题中的应用[J]. 水电能源科学 2003, 21(4):42-45.

[15] 邹长武, 熊建秋, 李祚勇. 改进的蚂蚁算法及其在暴雨强度公式参数优化中的应用[J]. 四川大学学报:工程科学版 2005, 37(5):9-13.

[16] 陈昌富, 龚晓南. 启发式蚁群算法及其在高填石路堤稳定性分析中的应用[J]. 数学的实践与认识 2004, 34(6):89-92.

[17] 陈昌富, 龚晓南, 王贻荪. 自适应蚁群算法及其在边坡工程中的应用[J]. 浙江大学学报:工学版 2003, 37(5):566-569.

[18] 陈昌富, 龚晓南. 混沌扰动启发式蚁群算法及其在边坡非圆弧临界滑动面搜索中的应用[J]. 岩石力学与工程学报 2004, 23(20):3450-3453.

[19] 李亮, 迟世春, 林皋. 基于蚁群算法的复合形法及其在边坡稳定分析中的应用[J]. 岩土工程学报 2004, 26(5):691-696.

[20] 王成华, 夏绪勇, 李广信. 基于应力场的土坡临界滑动面的蚂蚁算法搜索技术[J]. 岩石力学与工程学报 2003, 22(5):813-819.

[21] 高玮. 搜索土坡潜在滑动面的蚁群算法[J]. 水利学报 2005, 36(9):1100-1104.

[22] 许刚, 朱汶迁, 吴金民. 基于蚁群算法的给水管网改扩建优化[J]. 中国农村水利水电 2006(3):67-69.

[23] 李玉华, 王征. 蚂蚁算法在日用水量预测中的应用研究[J]. 哈尔滨工业大学学报 2005, 37(1):60-62.

[24] 王磊, 吕谋. 基于蚁群算法的排水管道系统优化设计[J]. 中国给水排水 2005, 21(10):67-69.

[25] 高玮, 郑颖人. 蚁群算法及其在硇群施工优化中的应用[J]. 岩石力学与工程学报 2002, 21(4):471-474.

[26] 高玮, 冯夏庭. 基于免疫连续蚁群算法的岩土工程反分析研究[J]. 岩石力学与工程学报 2005, 24(23):4266-4271.

[27] 田明俊, 周晶. 基于蚁群算法的土石坝土体参数反演[J]. 岩石力学与工程学报 2005, 24(8):1411-1416.

(收稿日期 2006-09-08 编辑 徐娟)