

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*

陈昌富^{1, 2} 龚晓南²(¹ 湖南大学岩土工程研究所 长沙 410082) (² 浙江大学岩土工程研究所 杭州 310027)

摘要 通过引入混沌扰动算子增加解的多样性和提高全局寻优能力, 另外通过构造蚂蚁的启发式搜索方式提高对局部最优解的搜索能力, 从而有效地克服了基本蚁群算法容易出现停滞和搜索效率低的缺陷。还利用 Spencer 法和 Janbu 法, 探讨了所提出的具有混沌扰动算子启发式蚁群算法在边坡稳定性分析中的应用。实例计算和对比分析结果表明, 该法有效而又可靠。

关键词 岩土工程, 混沌算子, 蚁群算法, 边坡, 启发式算法, Spencer 法

分类号 TU 473.2, TP 301.6

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2004)20-3450-04

HEURISTIC ANT COLONY ALGORITHM INVOLVING CHAOS OPERATOR AND ITS APPLICATION TO SEARCH FOR CRITICAL SLIP SURFACE OF SLOPE

Chen Changfu^{1, 2}, Gong Xiaonan²(¹ *Institute of Geotechnical Engineering, Hunan University, Changsha 410082 China*)(² *Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027 China*)

Abstract The chaos operator is introduced into the basic ant colony algorithm for enhancing the variety of solutions and the ability to find global optimization solution, and the heuristic search pattern is established to increase the computing efficiency of local optimization solution. Thus, the phenomena of stagnation existing in basic ant colony algorithm is avoided and the search performance is considerably improved. The application of heuristic ant colony algorithm involving chaos operator to the analysis of slope stability is discussed based on Spencer's slice method and Janbu's slice method. A case study is given to verify the proposed method. The results show that the proposed algorithm is practical and reliable.

Key words geotechnical engineering, chaos operator, ant colony algorithm, slope, heuristic algorithm, Spencer's method

1 引言

蚁群算法(ant colony algorithm, ACA)是近年来基于蚁群觅食过程而发展起来的一种新型演化算

法, 由意大利学者 M. Dorigo 等人提出, 他们称之为蚁群系统^[1](Ant Colony System, ACS)。蚁群算法目前多用于求解诸如旅行商(TSP)等组合优化问题^[1~5], 也有尝试解决连续变量优化问题^[6], 并取得了成功。研究结果表明^[7~8], 基本蚁群算法虽然具

2003 年 4 月 25 日收到初稿, 2003 年 6 月 30 日收到修改稿。

* 湖南省科技攻关项目(02GKY3024)和湖南大学引进人才基金(521101363)资助课题。

作者 陈昌富 简介: 男, 41 岁, 博士, 1985 年毕业于中南工业大学地质工程专业, 现任湖南大学教授、浙江大学岩土工程研究所站博士后, 主要从事边坡与基坑工程、地基处理等方面的教学和研究工作。E-mail: cfchen@163.com。

有开放性、鲁棒性、并行性、全局收敛性、对目标和约束函数无特殊要求以及易于同其他启发式算法结合等优点,但也存在搜索效率低和演化过程中容易出现停滞现象等缺陷。为此,本文通过在演化进程中适时引入混沌扰动算子来增加解的多样性,以便算法能有效地跳出停滞而提高算法全局寻优能力。另一方面,在蚂蚁进行局部最优解搜索时,根据问题的性质和特点,构造蚂蚁的模式搜索方式以提高对局部最优解的搜索能力。这样,既可有效地克服基本蚁群算法搜索效率低的缺陷,又可防止停滞现象的出现。

岩土工程中存在大量的复杂优化分析与设计问题,比如岩土工程可靠性指标优化计算、支挡结构优化设计、工程方案优化比选、施工顺序优化排序以及路堤、基坑和各种切方岩石边坡稳定性优化分析等。这类优化问题往往是具有复杂的,或者难以用显式表达的,或者无明确表达式的数学规划问题,采用传统的优化方法一般较难获得满意的结果。而利用如蚁群算法等模拟生物演化规律发展起来的仿生计算方法,则可以收到很好的效果。

2 基本蚁群算法

象蚂蚁这类群居昆虫,虽然单个蚂蚁的行为极其简单,但由这样的单个简单的个体所组成的蚁群群体却表现出极其复杂的行为,并能够完成复杂的任务。因此,由大量蚂蚁组成的蚁群的集体行为便表现出一种信息正反馈现象,意即某一路径上走过的蚂蚁越多,后来者选择该路径的概率就越大。自然界蚂蚁个体之间就是通过这种信息的交流达到搜索食物的目的^[7]。

现以边坡临界滑动面搜索为例来阐述基本蚁群算法的原理。为便于计算,将边坡体离散成图1格式。蚂蚁从 START 点出发,按概率选择某个条分线的第1个结点,然后向前(图1为向右)逐级经过条分线上的结点,最后到达 END 点,完成一次循环并形成一条滑动面。图中虚线只用作引导蚂蚁搜索滑动面,不参与边坡安全系数计算。

如图1所示,设 (r, i) 表示第 r 条条分线上的第 i 个结点, $(r+1, j)$ 表示第 $r+1$ 条条分线上的第 j 个结点,而 $[(r, i), (r+1, j)]$ 则表示结点 (r, i) 到结点 $(r+1, j)$ 的连线,蚁群中蚂蚁的数量(即蚁群规模)为 m 。在运动过程中,蚂蚁 k ($k=1, 2, \dots, m$)是

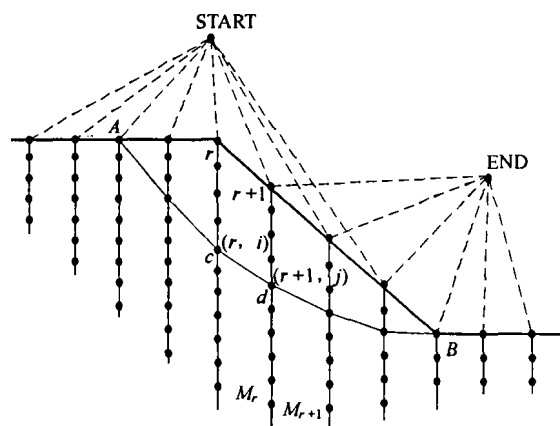


图1 边坡体离散及滑动面搜索

Figure 1 Discretization of slope and searching for slip surface

根据各条路径上的信息素量决定转移方向,则时刻 t 蚂蚁 k 由位置 (r, i) 转移到位置 $(r+1, j)$ 的概率为

$$P_{[(r, i), (r+1, j)]}^k(t) = \frac{[\tau_{[(r, i), (r+1, j)]}(t)]^\alpha [\eta_{[(r, i), (r+1, j)]}(t)]^\beta}{\sum_{j=1}^{M_{r+1}} [\tau_{[(r, i), (r+1, j)]}(t)]^\alpha [\eta_{[(r, i), (r+1, j)]}(t)]^\beta} \quad (1)$$

式中: $\tau_{[(r, i), (r+1, j)]}(t)$ 为时刻 t 在 $[(r, i), (r+1, j)]$ 连线上残留的信息素痕迹强度,初始时各条路径上信息素痕迹强度相等,即 $\tau_{[(r, i), (r+1, j)]}(0) = C$ (某个常数); $\eta_{[(r, i), (r+1, j)]}(t)$ 为时刻 t 路径 $[(r, i), (r+1, j)]$ 上的信息素痕迹能见度; α , β 分别表示信息素痕迹强度和能见度在蚂蚁选择路径时的相对重要程度指数($\alpha \geq 0$, $\beta \geq 0$)。

随着时间的推移,在蚂蚁经过的路径上所留下的信息素痕迹的强度将会逐渐减弱,用参数 ρ ($0 \leq \rho \leq 1$)表示信息素痕迹的持久性, $(1-\rho)$ 可理解为信息素痕迹强度的衰减度(evaporation)。如果 m 个蚂蚁按式(1)在下一时间段均各自找到了可行解(完成了一次循环),则每条路径 $[(r, i), (r+1, j)]$ 上的信息素强度按下式调整:

$$\tau_{[(r, i), (r+1, j)]}(t+1) = \rho \tau_{[(r, i), (r+1, j)]}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{[(r, i), (r+1, j)]}^k \quad (2)$$

式中: $\Delta \tau_{[(r, i), (r+1, j)]}^k$ 为第 k 只蚂蚁在本次循环中留在路径 $[(r, i), (r+1, j)]$ 上的信息素量,由下式确定:

$$\Delta \tau_{[(r, i), (r+1, j)]}^k = \begin{cases} Q/F_s^k & \text{若路径} [(r, i), (r+1, j)] \text{处在蚂蚁} k \text{本次搜索到的滑动面上} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中: Q 为常数; F_s^k 为第 k 只蚂蚁本次搜索到的滑动面的安全系数值, 可采用各种边坡稳定性分析方法计算, 比如 Janbu 法、Spencer 法等。

3 带混沌扰动算子启发式蚁群算法

基本蚁群算法尽管具有前文所述的许多优点, 但同时也存在搜索效率低和演化过程中容易出现停滞现象的毛病。为此, 本文作如下两点改进: (1) 在蚂蚁寻找滑动面的过程中, 引入经验信息构成启发式算子, 从而降低生成无效滑动面的数量; (2) 适时引入混沌扰动算子, 增加解的多样性, 避免出现进化停滞现象。

蚂蚁 k 在寻找有效滑动面时, 总有指向 END 点的趋势。因此, 可认为蚂蚁 k 由条分线 r 转移到条分线 $r+1$ 时, 条分线 $r+1$ 上各点被选中的概率分布如图 2 所示。这样, 信息能见度可按式确定:

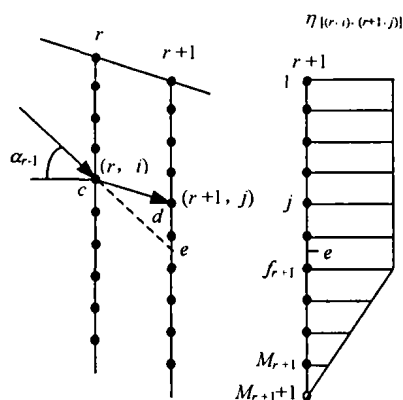


图 2 点 (r, i) 到点 $(r+1, j)$ 的转移概率

Fig.2 Transfer probability from point (r, i) to point $(r+1, j)$

$$\eta_{[(r, i), (r+1, j)]}(t) =$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{M_{r+1} + 1 - f_{r+1}}{(M_{r+1} + 1 - f_{r+1})f_{r+1} + \sum_{s=f_{r+1}+1}^{M_{r+1}+1} (M_{r+1} + 1 - s)} \quad 1 \leq j \leq f_{r+1} \\ \frac{M_{r+1} + 1 - j}{(M_{r+1} + 1 - f_{r+1})f_{r+1} + \sum_{s=f_{r+1}+1}^{M_{r+1}+1} (M_{r+1} + 1 - s)} \quad f_{r+1} < j \leq M_{r+1} \end{array} \right. \quad (4)$$

式中: f_{r+1} 取图 2 中 e 点以下紧靠 e 点的节点编号(e 点为上一段滑动面延长线与条分线 $r+1$ 的交点)。

需注意, 当 e 点越过条分线 $r+1$ 最下面的节点, 以及蚂蚁 k 由 START 点出发选择 A 点的位置和从 A

点转移到下一阶段时(如图 1), 则以等概率选择条分线 $r+1$ 上各点。

在边坡临界滑动面搜索中, 引入算子式(4)可有效地提高搜索效率, 但仍然未能解决停滞问题。为此, 下面再引入混沌算子, 利用它的内在随机性和遍历性, 调整蚂蚁的选择策略, 加大随机选择概率, 以利于解空间的更完全搜索。混沌序列采用较常见的 Logistic 映射, 即

$$\lambda_{n+1} = \mu \lambda_n (1 - \lambda_n) \quad (5)$$

式中: λ_{n+1} 为混沌变量, $n=0, 1, 2, \dots, 0 < \lambda_0 < 1$; μ 为系统的状态控制参量, 已证明^[9], 当 $\mu=4$ 时, 式(5)表示的系统完全处于混沌状态, λ_{n+1} 在 $(0, 1)$ 范围内遍历。

在蚁群中以小概率 p_m 选择出 mp_m 个蚂蚁进行混沌搜索, 其中蚂蚁 k 从条分线 r 上第 i 个节点转移到条分线 $r+1$ 上第 j 个节点时, j 可按式确定:

$$j = \text{int}(1 + \lambda_{n+1} M_{r+1}) \quad (6)$$

式中: M_{r+1} 为条分线 $r+1$ 上的节点数。

于是, 混沌蚁群算法搜索边坡最危险滑动面的流程步骤如下:

步 1 $t := 0$, 置 $\tau_{[(r, i), (r+1, j)]}(0) := \varepsilon$ (较小正数) 与 $\Delta \tau_{[(r, i), (r+1, j)]} := 0$;

步 2 $m(1-p_m)$ 个蚂蚁从 START 点出发, 独立地按式(1)和(2)计算转移概率并追踪生成有效的滑动面; 而 mp_m 个蚂蚁则按式(5)和(6)确定路径并生成有效滑动面;

步 3 按选定的边坡稳定性分析方法计算各有效滑动面的安全系数值 F_s^k , 将其中最小者保存, 记为当前最优解;

步 4 对各蚂蚁及路径 $[(r, i), (r+1, j)]$, 按照式(2)~(4)计算 $\Delta \tau_{[(r, i), (r+1, j)]}^k$ 和 $\tau_{[(r, i), (r+1, j)]}(t)$;

步 5 $t := t+1$; 若 $t \geq t_{\max}$ (最大允许循环次数), 则输出最佳路径(即最危险滑动面)和最小安全系数值, 否则转入步 2。

4 算例

某高校建设新村家属宿舍区挡墙边坡, 开挖后形状如图 3 所示。边坡高 10.15 m, 边坡总体坡角为 79.125° , 无地下水, 其土层物理力学指标值如表 1。

采用不同的边坡稳定性分析方法(简化 Janbu 法和 Spencer 法), 按本文提出的混沌蚁群算法搜索临界滑动面并计算安全系数, 取计算参数 $m=120$, $\alpha=1.0$, $\beta=1.0$, $\rho=0.6$, $p_m=0.1$, $t_{\max}=200$, 得计算

结果如图 3 和表 2。由表 2 可知, 该边坡属不稳定边坡, 这与实际相符, 因为在施工过程中此边坡曾发生整体滑坡, 后采用锚杆挡墙方案支护。

表 1 土层物理力学参数值

Table 1 Physicomechanical parameters of soils

序号	土层	容重/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	粘聚力/ kPa	内摩擦角/ $^{\circ}$
①	素填土	18.00	10.0	15.0
②	粉质粘土	18.78	35.0	20.0
③	强风化岩	20.80	50.0	35.0

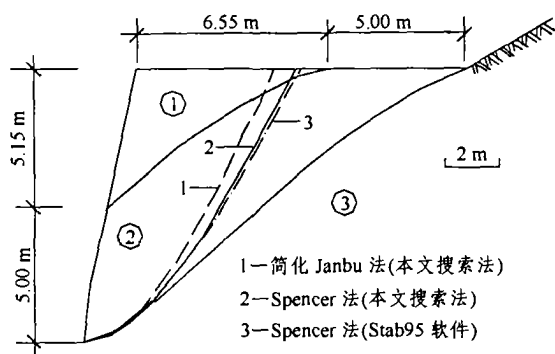


图 3 边坡剖面及计算结果图

Fig.3 Profile of slope and the computation results

表 2 边坡稳定性分析结果

Table 2 Analysis results of slope stability

稳定性分析法	临界滑动面搜索方法	安全系数值
简化 Janbu 法	本文混沌蚁群算法	0.963
Spencer 法	本文混沌蚁群算法	0.932
Spencer 法	Stab95 软件	0.936

为验算本文方法的准确性, 图 3 和表 2 中还给出了按陈祖煜教授开发的 Stab95 边坡分析软件得到的结果。从图 3 和表 2 中可以看出, 本文提出的方法的搜索结果与之非常接近, 这证明了本文方法的准确性和可靠性。

此外, 分别采用本文提出的混沌蚁群算法和文[8]的基本蚁群算法对该挡墙边坡稳定性进行验算, 取相同的计算参数, 数值验算结果表明: (1) 若要得到相同的计算结果, 本文方法比基本蚁群算法的搜索效率要高, 所用计算耗时要少 1/3~1/4。(2) 基本蚁群算法计算结果常与初值选取和计算范围有关, 比如本算例当计算范围过大时, 搜索到的最小

安全系数值(Janbu 法)会在 1.073 处早熟收敛; 若缩小搜索范围, 则最小安全系数值收敛于 0.975 处, 与本文结果接近。而采用本文方法一般不会出现这种情况。

5 结 语

(1) 蚁群算法虽具有鲁棒性、并行性、全局收敛性、对目标和约束函数无特殊要求等优点而受到广泛关注, 但在使用过程中也发现存在搜索效率低和容易出现演化停滞现象等缺陷。本文通过在演化进程中引入混沌扰动算子, 并同时依据经验信息构造启发式算子诱导蚂蚁转移, 以更快地搜寻到有效滑动面, 从而有效地克服了上述缺陷。

(2) 探讨了本文方法在边坡稳定性分析中的应用, 通过算例验证和与商用软件分析结果对比, 证明了本文方法的准确性和可靠性。

(3) 蚁群算法的应用尚处于刚刚起步阶段, 有许多问题有待进一步研究, 如算法的收敛性、计算参数对算法性能的影响等。但随着研究的深入, 相信该方法会有很好的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Dorigo M, Gambardella L M. Ant colony system: a cooperative learning approach to the travelling salesman problem[J]. IEEE Trans. on Evolutionary Computation, 1997, 1(1): 53~56
- 2 马 良, 蒋 馥. 多目标旅行售货员问题的蚂蚁算法求解[J]. 系统工程理论方法应用, 1999, 8(4): 23~27
- 3 林 锦, 朱文兴. 凸整数规划问题的混合蚁群算法[J]. 福州大学学报(自然科学版), 1999, 27(6): 5~9
- 4 马 良, 项培军. 蚂蚁算法在组合优化中的应用[J]. 管理科学学报, 2001, 4(2): 32~37
- 5 高 玮, 郑颖人. 蚁群算法及其在砌群施工优化中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 471~474
- 6 魏 平, 熊伟清. 用于一般函数优化的蚁群算法[J]. 宁波大学学报(理工版), 2001, 14(4): 52~55
- 7 张纪会. 自适应蚁群算法[J]. 控制理论与应用, 2000, 17(1): 1~8
- 8 陈昌富, 谢学斌. 露天采场边坡临界滑动面搜索蚁群算法研究[J]. 湘潭工学院学报, 2002, 17(1): 62~64
- 9 卢 侃, 孙建华, 欧阳容百等. 混沌动力学[M]. 上海: 上海翻译出版公司, 1990