

基于模拟退火的果蝇优化算法的边坡临界滑面搜索

余秀玲, 申翊*, 郑万栋

(武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 传统的边坡稳定性分析多采用极限平衡法,需要研究者依据经验试算一系列滑面,再确定最危险滑面。该文将果蝇优化算法(FOA)与模拟退火算法(SA)融合,提出基于模拟退火的果蝇优化算法(SA-FOA),避免了陷入局部极值的缺点,确保获得全局最优解,并结合极限平衡法用于边坡临界滑面的搜索。在 Matlab 中编程实现该算法,通过两个土坡算例的验证及与其他方法的对比分析,结果表明:基于模拟退火的果蝇优化算法能够高效、快捷地搜索出边坡的临界滑面,且具有更高的收敛精度和可靠性,为边坡临界滑面的搜索提供了一条高效的新途径。

关键词: 边坡稳定性分析; 极限平衡法; 果蝇优化算法; 模拟退火

边坡稳定性分析是岩土工程中的重要研究课题之一,其研究方法包括:工程地质类比法、极限平衡法、极限分析法、数值分析法等。其中极限平衡法的应用最为广泛,但是其必须依赖研究者的经验,试算一系列滑面寻找最小安全系数及其对应的临界滑面位置。

近年来,很多学者致力于临界滑面自动搜索技术的研究,提出了各种适用于圆弧滑面或非圆弧滑面的搜索方法,如蒙特卡罗法与有限元结合、临界化方法、遗传进化算法、模式搜索法、相遇蚁群算法、神经网络与多元回归等。与早期使用的穷举法、二分法相比,上述方法的精度和收敛性提高了很多,对边坡稳定研究和实际工程应用起到了积极的作用,但有时也会发生计算成果并非整体安全系数极值的情况。该文将果蝇优化算法和模拟退火算法相融合,在 Matlab 中编程实现基于模拟退火机制的果蝇优化算法,通过两个土坡算例验证,并与其他方法进行对比分析。以期对边坡

临界滑面搜索提供新途径。

1 边坡临界滑面搜索理论模型

简化 Bishop 法是目前常用的一种滑坡稳定性分析方法,被认为是圆弧滑面计算分析的最佳极限平衡法。其力学模型如图 1 所示。假定条间力的方向水平,切向剪力为零,根据滑面上土体的静力平衡和整体的力矩平衡可以得到滑面的安全系数:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\left(\cos\theta_i + \frac{\sin\theta_i \tan\varphi_i}{F_s} \right) (W_i \tan\varphi_i + c_i b_i) \right]}{\sum_{i=1}^n W_i \sin\theta_i} \quad (1)$$

式中: F_s 为对应滑面的安全系数; n 为条分数; c_i 、 φ_i 分别为滑动体第 i 条块土层的黏聚力和内摩擦角; W_i 为第 i 条块自重; b_i 为第 i 条块的宽度; θ_i 为第 i 条块

- *****
- [3] 陈永波,乔建平,王成华,等.张家界唐家坡滑坡形成机制及成因分析[J].山地学报,2002(S1).
 - [4] 陈侃福,周建锋,俞伯汀.某公路滑坡的变形机理与稳定性分析[J].地球与环境,2005(S1).
 - [5] 张亮,何宏民,张少挺,等.铜黄一级公路滑坡发育规律与成灾机理分析[J].公路交通科技,2005(6).
 - [6] 黄润秋.20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J].岩石力学与工程学报,2007(3).

- [7] 向强,陈彰贵.某滑坡的成因机制数值模拟分析[J].地质灾害与环境保护,2007(1).
- [8] 黄达,裴向军,张志刚,等.某公路滑坡成因机制及稳定性[J].山地学报,2008(7).
- [9] 杨为民,吴树仁,张春山,等.陕南岚皋县柳家坡滑坡形成机制研究[J].工程地质学报,2007(2).
- [10] 贺为民,杨杰.豫西高速公路滑坡成因分析[J].自然灾害学报,2013(3).

收稿日期:2018-11-06

作者简介:余秀玲,女,硕士研究生.E-mail:463401364@qq.com

* 通信作者:申翊,女,博士,副教授.E-mail:563615001@qq.com

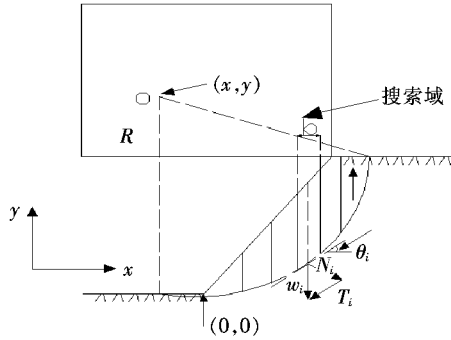


图 1 简化 Bishop 法力学模型

中心线与圆弧滑面交点处圆弧切线的水平角。

若忽略条间力的影响,即为瑞典条分法,安全系数的表达式简化为:

$$F_s = \frac{[c_i L + \tan \varphi_i \sum_{i=1}^n W_i \cos \theta_i]}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \theta_i} \quad (2)$$

式中: L 为圆弧滑面的弧长。其他参数同式(1)。

式(1)为隐式函数,求解安全系数时需要迭代,式(2)为显式函数,可以直接求解。

当边坡的几何参数和力学参数已知时,安全系数是滑弧圆心坐标和半径的函数,即:

$$F_s = f(x_0, y_0, R) \quad (3)$$

式中: x_0, y_0, R 分别为圆弧滑面的圆心坐标和半径; f 为安全系数 F_s 与可行搜索域参数的函数。

则式(3)转化为一个优化问题:

$$\begin{cases} \min f(x_0, y_0, R); \\ \text{s.t. } a(j) \leq x(j) \leq b(j), j=1, 2, 3. \end{cases} \quad (4)$$

式中: $x(j) = \{x(1) = x_0, x(2) = y_0, x(3) = R\}$ 为优化变量; $[a(j), b(j)]$ 为第 j 个变量的取值区间。

2 基于模拟退火的果蝇优化算法

2.1 基本果蝇优化算法(FOA)

基本果蝇优化算法(FOA)由台湾学者潘文超基于果蝇的觅食行为而开发,是一种新型的群体智能全局优化算法,近年来已被研究人员广泛运用到诸多领域解决优化问题。果蝇优化算法机理是基于果蝇种群觅食过程的模拟,利用果蝇良好的嗅觉和视觉,设计相应的感官搜索环节,通过不断迭代从而获得最优解。果蝇群体寻找食物的迭代过程如图 2 所示。

果蝇优化算法步骤如下:

(1) 果蝇种群相关参数的初始设定:位置 X_{axis} 、 Y_{axis} , 规模 $Sizepop$, 最大迭代次数 $Maxgen$ 。

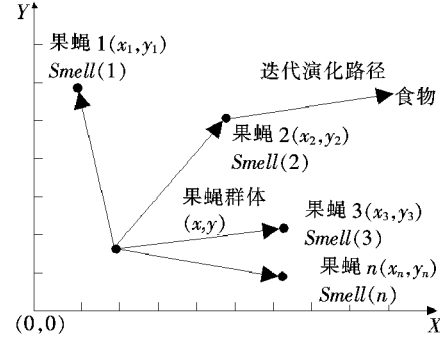


图 2 果蝇群体觅食迭代过程

(2) 更新果蝇个体觅食过程的随机距离($Random Value$)与方位。

$$\begin{cases} X_i = X_{\text{axis}} + RandomValue \\ Y_i = Y_{\text{axis}} + RandomValue \end{cases} \quad (5)$$

(3) 估量果蝇种群中个体与原点之间的距离。

$$\begin{cases} Dist_i = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2} \\ S_i = 1/Dist_i \end{cases} \quad (6)$$

(4) 将味道浓度判定值 S_i 代入味道浓度判定函数,即适应度函数(Fitness function),得到果蝇个体的味道浓度 $Smell(i)$ 。

$$Smell(i) = \text{Function}(S_i) \quad (7)$$

(5) 在果蝇种群中找出味道浓度最佳的个体。

$$[bestSmell \ bestindex] = \min[Smell(i)] \quad (8)$$

(6) 记录并保存最佳味道浓度值 $bestSmell$ 及其位置 X 和 Y ,此时其他果蝇飞向该位置。

(7) 重复步骤(2)~(5),此次与前一次的最佳味道浓度做比较,若优于前一次的味道浓度,并且迭代次数未达到 $Maxgen$,则执行步骤(6),否则,结束算法。

基本果蝇优化算法能够快速高效地搜索出最优解。但是,由于在利用适应度函数的寻优过程中极易陷入局部最优解,导致果蝇种群停止迭代更新位置,因此得到的最优解具有局限性。

2.2 模拟退火算法(SA)

模拟退火算法是根据物理学中固体退火原理而建立的一种全局最优算法。固体加热升温时内部粒子排序紊乱,内能逐渐增大,降温时,粒子排列趋于有序,内能减小。假设在状态 A 时,系统内能为 $E(A)$,受到外界扰动后,变为状态 C ,内能变为 $E(C)$ 。基于 Metropolis 准则,粒子在温度 T 趋于平衡的概率为:

$$\begin{cases} P = 1, E(C) < E(A); \\ P = \exp\left[-\frac{E(C) - E(A)}{T}\right], E(C) \geq E(A) \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)可以看出:退火时,新状态使内能函数减

小,系统一定接受该状态;新状态使内能函数增加时,系统以一定概率接受该状态,即在优化进程中,可以获得最优解和一定概率的差解。将内能函数 $E(X)$ 演变为目标函数,退火温度 T 演变为控制参数,随着 T 值的变化,算法执行“新解—判断—舍弃或接受”的进化,直至求得问题的最优解。

模拟退火算法的步骤如下:

(1) 随机赋予初始状态,设置初始解 x_0 、初始温度 T_0 以及最大迭代次数 $Maxgen$,计算目标函数初始值 $E(x_0)$ 。

(2) 判断所赋初始值是否满足终止条件,若是,该解即为最优解,结束算法;否则,在 x_0 邻域内随机选取 x^* 重新赋值,计算内能增量 $\Delta E = E(x^*) - E(x_0)$ 。

(3) 若 $\Delta E < 0$,则 $x = x^*$;否则,以概率 $\exp(-\Delta E/T)$ 作为 x^* 的解。

(4) 进入迭代寻优过程,重复步骤(2)和(3),直至求得最优解或达到最大迭代次数。

2.3 基于模拟退火的果蝇优化算法(SA-FOA)

如前所述,基本果蝇优化算法(FOA)参数少,易调节,效率高,却易陷入局部最优,而模拟退火算法(SA)可以有效地跳出局部最优,因此该将两种算法融合,形成基于模拟退火的改进果蝇优化算法。其步骤为:

(1) 执行基本果蝇算法的步骤(1)~(6)。

(2) 模拟退火步骤,确定初始温度 T_0 。

$$T_0 = Smell_{best} / \log(5) \quad (10)$$

(3) 计算当下温度状态果蝇味道浓度判定值 S_i 的适应值:

$$TF(S_i) = \frac{\exp\{-[Function(S_i) - Smell_{best}]/T_0\}}{\sum_{i=1}^{sizepop} \exp\{-[Function(S_i) - Smell_{best}]/T_0\}} \quad (11)$$

(4) 计算随机概率:

$$p = \text{rand}() \quad (12)$$

(5) 采用轮盘赌法策略,从 S_i 中计算得到全局最佳的某个值(bestX, bestY)作为下一代果蝇的搜索中心位置。

$$\begin{cases} X^* = X_{axis} + \text{bestX} \\ Y^* = Y_{axis} + \text{bestY} \end{cases} \quad (13)$$

(6) 计算果蝇个体与原点之间的距离 $Dist_i^*$ 、味道浓度判定值 S_i^* 。

(7) 计算果蝇个体的味道浓度 $Smell_i^*$,若

$Smell_i^* < Smell_{best}$,则:

$$Smell_{best} = Smell_i^*, X_{axis} = X_i^*, Y_{axis} = Y_i^* \quad (14)$$

(8) 进行退温操作:

$$T = 0.5T_0 \quad (15)$$

(9) 进入迭代寻优,重复执行(3)~(9),直至求得最优解或达到最大迭代次数。

将基于模拟退火机制的果蝇优化算法(SA-FOA)应用于边坡的临界滑面搜索,其流程如图3所示。

待优化的圆弧滑面圆心坐标和半径的取值区间通过地质勘查和工程类比相关资料确定。根据式(16)、(17)进行滑弧圆心坐标和半径的初始化:

$$\theta_i = 2\pi\eta_i^{(1)} \quad (16)$$

$$R_i = \sqrt{\eta_i^{(2)}(r_2^2 - r_1^2) + r_1^2} \quad (17)$$

式中: $\eta_i^{(1)}$ ($i=1,2,\dots$)和 $\eta_i^{(2)}$ ($i=1,2,\dots$)为(0,1)的均匀分布随机数; θ_i 为 $[0, 2\pi]$ 的均匀分布随机数; R_i 为 (r_1, r_2) 的均匀分布随机数。

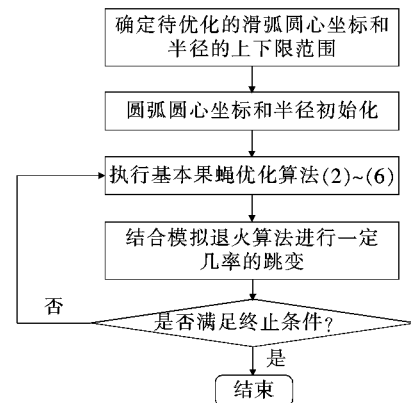


图3 基于SA-FOA的边坡临界滑面搜索流程图

3 算例分析

基于该文提出的SA-FOA算法,结合瑞典条分法/简化Bishop法,在Matlab中编写了相应的边坡临界滑面搜索程序,并对两个算例进行了验证分析。

3.1 算例1:双层土体边坡

算例1是文献[8]中的非均质土坡,安全系数计算采用瑞典条分法。该文分别采用FOA和SA-FOA算法搜索该土坡的临界滑面,并与文献[8]的SA算法进行比较,参见表1及图4。3种算法中,FOA算法安全系数较大,SA-FOA算法安全系数最小,即基于模拟退火的果蝇优化算法寻优能力最强。

表 1 不同算法的临界滑面搜索结果对比

算法	滑面圆心和半径/m			安全系数
	x	y	R	
SA	-1.82	15.59	15.7	0.890
FOA	-3.55	13.34	16.8	0.930
SA-FOA	-3.12	14.84	17.4	0.857

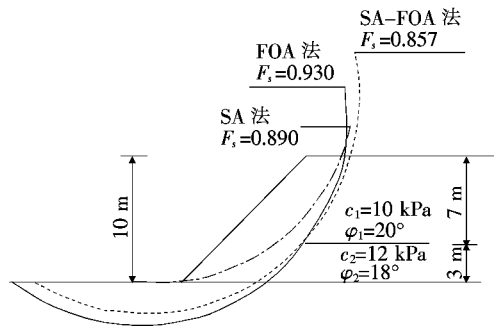
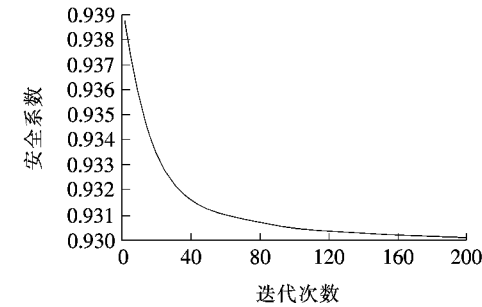
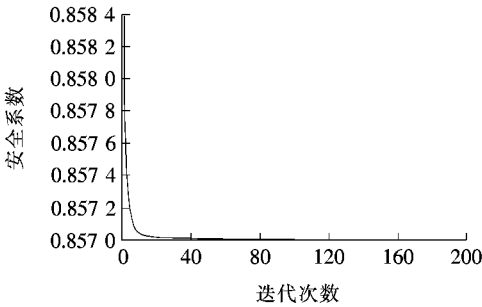


图 4 不同算法临界滑面形状和位置比较

在 Matlab 中,FOA、SA-FOA 搜索最小安全系数的收敛过程如图 5 所示,对比可见,SA-FOA 迭代曲线的斜率比 FOA 更大,即 SA-FOA 收敛速度更快;SA-FOA 迭代 200 次后的安全系数稳定在 0.857 处,而 FOA 迭代 200 次后的安全系数还未达到 0.93,因此 SA-FOA 的收敛稳定性更好,搜索能力较 FOA 显著提高。



(a) FOA 迭代路线



(b) SA-FOA 迭代路线

图 5 最小安全系数收敛进程

算例 1 证明将 SA-FOA 算法用于边坡临界滑面的搜索不仅是可行的,而且更高效、准确。

3.2 算例 2:复杂的 3 层土体边坡

算例 2 取自澳大利亚计算机应用协会(ACADS)发布的考题,土层剖面如图 6 所示,土层参数见表 2。

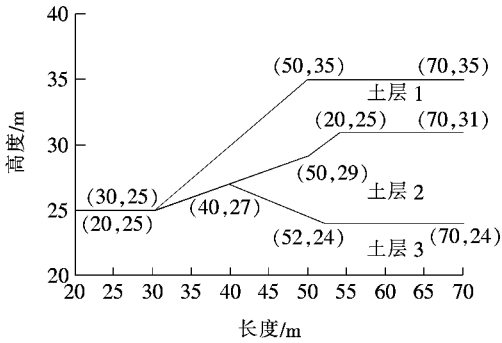


图 6 ACADS 考核题剖面图

该边坡土层厚度不均、材料参数相差较大,是一个复杂边坡,在最危险滑面搜索过程中会出现多个极值。SA-FOA 算法结合简化 Bishop 法,假设一个初始滑面,则局部危险滑面及最危险滑面的搜索结果列于表 3。SA-FOA 算法在初始滑面与最危险滑面(临界滑面)相差较大的情况下,能够跨越众多局部危险滑面,搜索到整体最危险滑面,证明了 SA-FOA 具有较强的全局搜索能力。

表 2 各土层材料参数

土层编号	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	重度/(kN·m ⁻³)
1	0	38	19.5
2	5.3	23	19.5
3	7.2	20	19.5

表 3 不同圆弧滑面的安全系数

滑面	滑面圆心和半径/m			安全系数
	x	y	R	
初始滑面	36.15	51.45	29.33	1.802 1
	34.92	49.01	25.52	1.440 9
	34.10	48.96	24.89	1.437 6
局部危险滑面	33.27	49.22	24.78	1.432 9
	33.07	48.55	24.15	1.425 3
	33.29	46.29	21.90	1.418 8
	33.60	46.36	21.91	1.407 5
最危险滑面	34.84	42.20	17.95	1.384 0

针对该考题各国学者以及裁判推荐答案同时列于

表 4,各个答案均基于简化 Bishop 法。由表 4 可见,该文 SA-FOA 计算结果与评判员答案吻合度很高,且临界滑面的安全系数较其他答案略低,进一步验证了该文 SA-FOA 算法用于边坡临界滑面搜索中是行之有效的。

表 4 该文计算结果与评判员答案比较

计算学者或方法	F_s 值
推荐答案(Donald)	1.39
SSA(Baker)	1.39
STAB(Chen)	1.385
GWEDGEM	1.39
EMU	1.39
Fredlund	1.406
SA-FOA(该文算法)	1.384

4 结 论

(1) 该文所提出的 SA-FOA 算法与瑞典条分法结合,在简单土坡中能够快速、高效地搜索出临界滑面,与单纯采用 SA 算法或 FOA 算法相比,收敛速度更快,寻优结果更准确。

(2) SA-FOA 算法与简化 Bishop 法结合,也适用于复杂边坡的临界滑面搜索,显示出较强的全局搜索能力,得到的最小安全系数和临界滑面更可靠。

(3) 将模拟退火算法与基本果蝇优化算法相结合,克服了单一算法的局限性,经验证具有较强的全局搜索能力和较快的收敛速度,为边坡临界滑面的搜索提供了一条高效的新途径。

参考文献:

- [1] 陈云敏,李育超,凌道盛.蒙特卡洛法与有限元结合搜索边坡临界滑动面[J].岩土力学,2004(S2).
- [2] 陈祖煜,邵长明.临界化方法在确定边坡最小安全系数方面的应用[J].岩土工程学报,1988(4).
- [3] 肖传文,张奇志.遗传进化算法在边坡稳定性分析中的应用[J].岩土工程学报,1998(1).
- [4] 唐超宏,莫海鸿,刘少跃.模式搜索法在边坡稳定性分析中的应用[J].华南理工大学学报:自然科学版,2000(2).
- [5] 高玮,张飞君.相遇蚁群算法在边坡非圆弧临界滑动面搜索中的应用研究[J].岩土力学,2014(1).
- [6] Yusuf Erzin, Tulin Cetin. The Prediction of the Critical Factor of Safety of Homogeneous Finite Slopes Using Neural Networks and Multiple Regressions [J]. Computers & Geosciences, 2013 (51): 305-313.
- [7] Aniruddh Sengupta, Anup Upadhyay. Locating the Critical Failure Surface in a Slope Stability Analysis by Genetic Algorithm [J]. Applied Soft Computing, 2009(9): 387-392.
- [8] 李守巨,刘迎曦,何翔,等.基于模拟退火算法的边坡最小安全系数全局搜索方法[J].岩石力学与工程,2003(2).
- [9] 贺子光,赵法锁,武斌,等.果蝇优化算法在边坡最小安全系数搜索中的应用[J].灾害学,2015(4).
- [10] Wen-Tsao Pan. A New Fruit Fly Optimization Algorithm: Taking the Financial Distress Model as an Example [J]. Knowledge-Based Systems, 2012, 26(1): 69-74.
- [11] 王凌,郑晓龙.果蝇优化算法研究进展[J].控制理论与运用,2017(5).
- [12] 王林,吕盛祥,曾宇容,等.果蝇优化算法研究综述[J].控制与决策,2017(2).
- [13] Mathieu Gerber, Luke Bornn. Improving Simulated Annealing through Derandomization [J]. Global Optimization, 2017, 68(1): 189-217.
- [14] 何庆,吴意乐,徐同伟.改进遗传模拟退火算法在 TSP 优化中的应用[J].控制与决策,2018(2).
- [15] 段艳明,肖辉辉,谭黔林.基于模拟退火机制的果蝇优化算法[J].控制工程,2017(5).
- [16] 张斌,张达敏,阿明翰.基于模拟退火的果蝇优化算法[J].计算机应用,2016(11).
- [17] 李旭东,赵雪娇.矩形和椭圆内均匀分布随机点定理及应用[J].成都理工大学学报,2012(5).
- [18] 陈祖煜.土质边坡稳定分析——原理、方法、程序[M].北京:中国水利电力出版社,2002.
- [19] 蒋鑫.全局优化在边坡最危险滑动面搜索中的应用[D].南京大学硕士学位论文,2012.