

小生境与遗传模拟退火耦合算法在岩质边坡滑动面搜索中的应用

徐 佳,张 勤,吴继敏

(河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 将小生境思想与遗传模拟退火算法相结合,应用于岩质边坡滑动面的搜索中。在实现了边坡结构面模拟的基础上,小生境与遗传模拟退火耦合算法可以顺利搜索出边坡由结构面与岩桥组合形成的潜在最危险滑动面。与其他智能优化搜索算法相比,该耦合算法具有收敛速度快、可找到搜索函数所有全局最优解、参数依赖性小等优点。工程应用实例表明该耦合算法在岩质边坡滑动面搜索中能取得令人满意的结果。

关键词 遗传模拟退火算法 小生境思想 岩质边坡 边坡滑动面

中图分类号 P642.22

文献标识码 A

文章编号 1006-7647(2008)06-0028-04

Application of genetic simulated annealing algorithm coupled with niche to search rock slope's critical slip surface//XU Jia, ZHANG Qin, WU Ji-min(College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : Genetic simulated annealing algorithm coupled with niche is applied to search rock slope's critical slip surface in this study. Based on the slope structural plane simulation, the genetic simulated annealing algorithm coupled with niche can search the critical slip composed of the joints and rock-bridges. Compared with other intelligent algorithms, it has the merit of faster convergence rates and can find all extremes in a short time without strict requests for parameters.

Key words : genetic simulated annealing algorithm ; niche ; rock slope ; critical slip surface

确定边坡最危险滑动面的位置是边坡问题研究的主要内容之一,对边坡工程的实际处理具有重要的意义。智能优化搜索方法^[1-4]是近年来边坡滑动面搜索研究的主要方法之一,其优点在于容易获得最优解、工作量较小等。现阶段应用较多且相对较成熟的智能优化搜索算法主要有遗传算法^[5-6]、蚁群算法^[7-8]、模拟退火算法^[9]、神经网络算法^[10]等。由于优化原理各不相同,在具体使用过程中搜索方法及搜索效果也存在着较大差异,对岩质边坡潜在滑动面搜索的适用性也有所不同。单一智能优化搜索算法由于各自寻优理论的不同而存在一定的缺陷,例如遗传算法虽然搜索速度较快,但由于复制操作对当前种群外的解空间无探索能力,种群中各个体分佈‘畸形’时交叉操作的进化能力有限,小概率变异操作很难增加种群的多样性。所以,若算法收敛准则设计不好,遗传算法经常会出现进化缓慢或‘早熟’收敛的现象。模拟退火算法在岩质边坡结构面

的组合优化方面有得天独厚的优势,该方法通过指定初始的结构面组合,不断进行区域内结构面的替代优化,最终求得抗剪力最小的结构面组合,其缺点是寻优过程很慢,计算机编程实现时对内存的要求很高,而且每一次迭代仅有一个当前解,不像遗传算法可以产生群体搜索。此外模拟退火算法对目标函数的设置要求很高,设置不当会导致结构面组合的滑动面出现尖角或闭合环路等不良路径。

小生境^[11]与遗传模拟退火^[12]耦合算法(NGASA算法)很好地克服了单一智能优化搜索算法所存在的缺点,将各算法的优点交叉融合,使寻优收敛速度更快,解多峰值函数问题时找到的峰值数量更多,并可一次性找出全局最优解,而且算法参数的选择不必太严格。其中,遗传模拟退火算法是一种高效的混合算法,模拟退火过程通过赋予搜索过程一种时变且最终趋于零的概率突跳性,从而可有效避免遗传算法陷入局部最优解并‘早熟’收敛的现象。模拟

退火算法采用串行优化结构,遗传算法采用群体并行搜索,两者相结合能够使遗传模拟退火算法成为并行算法,大幅度提高其优化性能。引入来自生物学的小生境思想可以有效地保持种群的多样性,从而解决了遗传算法和模拟退火算法都不能解决的多峰值函数峰值搜索不全面而且最终解有可能是局部最优解而不是全局最优解的问题。岩体边坡潜在滑动面搜索就是寻找正应力作用下总体抗剪力最小的结构面组合,其根本就是解多峰值函数的全局最优解问题。因此 NGASA 算法完全符合寻优的要求,是一种高效、准确的滑动面搜索方法。

1 NGASA 算法

1.1 遗传模拟退火算法

遗传模拟退火算法是将遗传算法与模拟退火算法相结合而构成的一种优化算法。从理论上讲,遗传算法是基于‘优胜劣汰’思想通过群体演化操作实现寻优,该算法的关键是它独特的变异操作和并行搜索能力,但操作的本质特征也决定了该算法后期的收敛速度较慢,并且有可能会陷入局部最优解。而模拟退火算法通过赋予搜索过程一种时变且最终趋于零的概率突跳性,从而可以有效地减小陷入局部最优解的可能性(当然前提是选择适当的退火控制参数)。两者相结合克服了模拟退火算法实行串行搜索寻优过程较慢的缺点,能加快收敛速度,又能避免陷入局部最优解,即遗传模拟退火算法的稳健性及收敛速度优于单一算法。

遗传模拟退火算法的基本计算步骤如下:①将计算的对象用一定的字符串编码表示,可以是二进制编码、十进制编码、符号串编码等。②随机产生若干个个体(初始解)构成初始群体 P_0 ,以 P_0 作为当前群体,计算个体的目标函数值。③设置初始温度 T_0 。④设置进化代数计数器初值 $r = 1$ 。⑤对当前种群运用遗传算法进行选择、交叉、变异等操作,形成新的种群 P_1 。⑥以 P_1 为初始种群,对其中的各个个体进行模拟退火运算(具体操作运算可参考文献[8]),以生成新的种群 P_2 。⑦对 P_2 进行评价,若未满足终止条件,进行降低退火温度处理,更新进化代数计数器 $r = r + 1$,转入步骤⑤。

1.2 小生境思想

小生境是生物学中的一个概念,其主要思想是构建特定环境下的一种生存环境。生物在其进化过程中一般总是与自己相同的物种生活在一起,共同繁衍后代,它们也都是在某一特定的地理区域中生存。例如,热带鱼不能在较冷的地带生存,而北极熊也不能在热带生存。

在寻优过程中引入小生境思想主要是为了解决智能算法普遍存在的最优解搜索不全面,甚至最终结果只是局部最优解的问题。通过始终保持种群的多样性,小生境思想可以在寻优过程中顺利找到全局最优解,从而避免了通常寻优计算需要经过多次试算比较才能确定一个相对全局最优解问题的出现,大幅度减少了运算所需要的时间。

小生境思想通常是和遗传算法结合使用,基本计算步骤如下:①设置进化代数计数器初值 $r = 1$;随机生成 M 个初始个体组成初始群体 P_0 ,并求出各个个体的适应度 $F_i (i = 1, 2, \dots, M)$ 。②依据各个个体的适应度进行降序排序,记录前 N 个个体 ($N < M$)。③选择运算:对群体 P_0 进行比例选择运算,得到 P_1 。④交叉运算:对选择出的个体集合 P_1 做单点交叉运算,得到 P_2 。⑤变异运算:对 P_2 做均匀变异运算,得到 P_3 。⑥小生境淘汰运算:将第⑤步得到的 M 个个体和第②步所记录的 N 个个体合并在一起,得到一个含有 $M + N$ 个个体的新群体。计算这 $M + N$ 个个体中每 2 个个体 X_i 和 X_j 之间的海明距离,即 $\|X_i - X_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^T (x_{ik} - x_{jk})^2}$,式中 $i = 1, 2, \dots, M + N - 1; j = i + 1, \dots, M + N; T$ 为求解问题决策变量的个数。当 $\|x_i - x_j\| < L$ (L 是预先指定的小生境之间的距离参数)时,比较各个体的适应度大小,并对其中适应度较小的个体施加罚函数 $F_{\min}(x_i, x_j)$ 。⑦依据这 $M + N$ 个个体的新适应度对各个个体进行降序排序,记录前 N 个个体。⑧终止条件判断:若不满足终止条件,更新进化代数计数器 $r = r + 1$,并将第⑦步排序中的前 M 个个体作为新的下一代群体 P_0 ,然后转入第③步;若满足终止条件,则输出计算结果,算法结束。

1.3 NGASA 算法的基本计算步骤

NGASA 算法以遗传算法为桥梁,将模拟退火算法和小生境思想有机地结合在一起,遗传算法的并行结构克服了模拟退火算法效率低的缺点,而小生境思想又保证了解群的多样性,使算法最后不至于收敛于少数几个局部最优值点。另外,模拟退火算法较强的局部搜索能力有利于耦合算法快速收敛,提高了耦合算法的局部搜索能力,并且模拟退火算法中的 Metropolis 接受准则也有利于保持种群的多样性。这些优点结合在一起使得 NGASA 算法能够成功、高效地找到多峰值函数的所有局部最优解及全局最优解,并且也使 NGASA 算法对参数的选择不必太严格。

NGASA 算法基本计算步骤如下:①将计算对象用一定的字符串编码表示,可以是二进制编码、十进

制编码、符号串编码等。②随机生成规模为 M 的初始种群 P_0 。③评价群体 P_0 , 记录其中适应度较大的前 $N(N < M)$ 个个体, 构成较好群体 P_1 。④采用遗传算法对 P_0 进行选择、交叉、变异等操作, 生成群体 P_2 。⑤以 P_2 为初始种群, 对其中各个个体进行模拟退火运算, 得到新的规模为 M 的群体 P_3 。⑥将 P_1, P_2, P_3 合并构成一个规模最大为 $N + 2M$ 的新群体 P_4 , 采用小生境技术进行淘汰, 两两比较各个个体之间的小生境特征值, 若特征值在预先指定的数值之内, 则对适应度较小的个体施加一个罚函数, 极大地降低其适应度, 增加其被淘汰的概率。⑦对 P_4 进行评价, 若未满足终止条件, 取出其中较好的前 M 个个体构成 P_0 , 降低退火温度, 转入步骤③, 循环执行。

2 采用 NGASA 算法搜索边坡危险滑动面

2.1 结构面及岩桥的基本组合形式及其抗剪力计算

岩体边坡中搜索最危险滑动面的问题就是寻找由结构面及岩桥组合而成的抗剪力最小路径问题^[13-15]。分析结构面的抗剪强度通常用 Mohr-Coulomb 准则和 Barton 公式 2 种方法确定, 笔者采用了考虑了结构面粗糙度的 Barton 公式确定抗剪强度:

$$\tau_j = \sigma_n \tan \left(\varphi_b + n_{\text{JRC}} \lg \frac{\sigma_{\text{JCS}}}{\sigma_n} \right) \quad (1)$$

式中: σ_n 为法向有效应力; φ_b 为基本内摩擦角; n_{JRC} 为岩壁粗糙度系数; σ_{JCS} 为节理壁抗压强度。

在岩体结构面网络图中, 虽然结构面和岩桥的组合情况非常复杂, 但可以归纳为如图 1 所示的 3 种基本形式。这 3 种形式由结构面和岩桥组合而成的抗剪力 R 可以分别表示为

a. 相邻结构面重叠但不相交。如图 1(a) 所示, 此时有

$$R = \tau_{j1} l_1 + \sigma_1 h + \tau_{j2} l_2 \quad (2)$$

式中: τ_{j1}, τ_{j2} 分别为两结构面的抗剪强度; l_1, l_2 分别为两结构面的投影距离; h 为岩桥在与剪切方向相垂直的方向上的投影; σ_1 为完整岩石的抗拉强度。

b. 相邻结构面不相交且不重叠。如图 1(b) 所示, 此时又可分为 2 种情况: 当两结构面间的夹角 β 大于某一给定角度 θ (θ 一般取 45°) 时, 抗剪力 R 近似按式(2)计算; 当 $\beta < \theta$ 时有

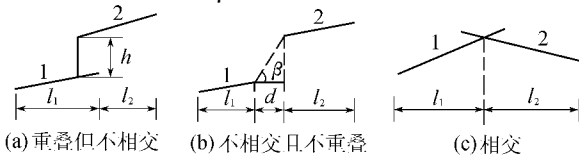


图 1 结构面与岩桥组合的 3 种基本形式

$$R = \tau_{j1} l_1 + [\sigma_1 (\sigma_1 + \sigma_n)]^{0.5} d + \tau_{j2} l_2 \quad (3)$$

式中 d 为两结构面的间距。

c. 相邻结构面相交。如图 1(c) 所示, 此时有

$$R = \tau_{j1} l_1 + \tau_{j2} l_2 \quad (4)$$

在智能搜索过程中可根据结构面的坐标判断属于哪种组合形式, 再计算抗剪力。

2.2 NGASA 算法在滑动面搜索中的应用

根据岩体滑动面的特点, NGASA 算法搜索步骤如下: ①将结构面按水平坐标的正方向排列, 用二进制串 x_i 中的每一位二进制数代表 1 个结构面。二进制数如果为“1”, 代表相应的结构面被选入破坏面, 在计算抗剪力时考虑该结构面; 如果为“0”则代表相应的结构面未被选进破坏面, 在计算抗剪力时不予考虑。②随机生成规模为 M 的初始种群 P_0 。③评价群体 P_0 , 计算各个体的抗剪强度值并取其倒数作为适应函数 $g(x_i)$, 记录其中适应度较大的前 $N(N < M)$ 个个体, 构成较好群体 P_1 。④采用遗传算法对 P_0 进行选择、交叉、变异等操作, 生成群体 P_2 。⑤以 P_2 为初始种群, 对其中各个个体进行模拟退火运算, 每次计算随机生成一个长度与结构面个数相同的二进制串 x_j , 计算 $\Delta g = g(x_j) - g(x_i)$ 并用 Metropolis 准则进行判断, 得到新的规模为 M 的群体 P_3 。⑥将 P_1, P_2, P_3 合并构成一个规模最大为 $N + 2M$ 的新群体 P_4 , 采用小生境技术进行淘汰, 两两比较各个个体之间的小生境特征值, 若特征值在预先指定的数值之内, 则对适应度较小的个体施加一个罚函数, 极大地降低其适应度, 增加其被淘汰的概率。⑦对 P_4 进行评价, 若未满足终止条件, 取其中较好的前 M 个个体构成 P_0 , 降低退火温度, 转入步骤③, 循环执行。若满足终止条件则输出结果, 在边坡结构面模拟图中显示最危险滑动面的路径。

3 工程实例

3.1 工程概况

锦屏一级水电站位于四川省凉山彝族自治州和木里县境内的雅砻江干流上。电站以发电为主, 兼有防洪、拦沙等作用。坝址控制流域面积约为 $102\,560\text{ km}^2$, 多年平均流量为 $1\,200\text{ m}^3/\text{s}$ 。水库正常蓄水位为 $1\,880\text{ m}$, 总库容为 77.6 亿 m^3 , 电站装机容量为 $3\,600\text{ MW}$ 。锦屏一级水电站所在工程区岩体在施工开挖过程中将形成一系列高陡边坡。由于大部分控制性结构面的走向接近平行于河道, 又属中、陡倾角, 因此边坡稳定问题十分突出。

进水口高边坡基岩裸露, 主要为厚层状大理岩, 岩体完整性较好, 岩层产状 $N40^\circ \sim 60^\circ E, NW \angle 30^\circ \sim 40^\circ$ 。主要节理裂隙有 3 组: ① $N50^\circ \sim 70^\circ E, SE \angle 65^\circ$

~85°,长度一般 2~3 m,面起伏粗糙;② N70°~80°W,SW∠75°~85°,面起伏粗糙,部分张开数厘米;③ N30°~50°W,NE∠35°~60°。图 2 为边坡结构面 Monte-Carlo 模拟示意图。

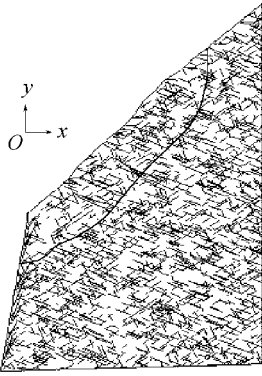


图 2 边坡结构面模拟示意图

3.2 搜索结果及搜索算法比较

根据 NGASA 算法理论,采用 Visual C++ 编写程序对边坡进行滑动面搜索,搜索到的滑动面位置见图 2。

为了便于比较,还采用了遗传算法和模拟退火算法对该边坡进行滑动面搜索,3 种算法一次性计算的结构面最小抗剪力收敛结果如图 3 所示。

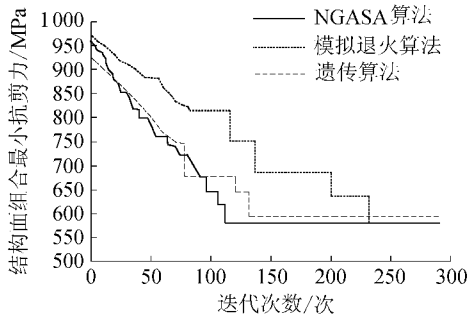


图 3 3 种算法计算结果比较

由图 3 可以清楚地看出,模拟退火算法虽然收敛于全局最优解但迭代时间较长,而遗传算法只收敛于局部最优解。NGASA 算法无论在收敛性还是在迭代效率上都优于单一算法。

4 结 语

随着智能优化算法理论的不完善和发展,各种优化算法和耦合算法都在岩土工程领域中得到了应用,其中 NGASA 算法是以小生境思想为桥梁把遗传算法和模拟退火算法有机地结合起来,取长补短,无论是在收敛性还是在计算效率上都优于单一智能优化搜索算法。工程实例也说明此耦合算法在岩质边坡滑动面搜索中可以取得令人满意的结果,有较高的应用价值。

参考文献:

- [1] 冯夏庭,王泳嘉.关于智能岩石力学发展的几个基本问题的讨论[J].岩石力学与工程学报,1998,17(6):705-710.
- [2] 冯夏庭.智能岩石力学(1):导论[J].岩石力学与工程学报,1999,18(2):222-226.
- [3] 冯夏庭,杨成祥.智能岩石力学(2):参数与模型的智能辨识[J].岩石力学与工程学报,1999,18(3):350-353.
- [4] 冯夏庭.智能岩石力学(3):智能岩石工程[J].岩石力学与工程学报,1999,18(4):475-478.
- [5] HOLLAND J H. Adaptation in natural and artificial system[J]. Michigan:University of Michigan Press,1975:145-160.
- [6] 刘勇,康立山,陈毓屏,等.非数值并行算法:遗传算法[M].北京:科学出版社,1995.
- [7] 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.
- [8] 马建,董增川,王春霞,等.蚁群算法研究进展[J].河海大学学报:自然科学版,2005,33(2):139-143.
- [9] 康立山,谢云,尤矢勇,等.非数值并行算法(第一册)模拟退火算法[M].北京:科学出版社,2003.
- [10] 陈昌彦,王思敬,沈小克.边坡岩体稳定性的人工神经网络预测模型[J].岩土工程学报,2001,23(2):157-161.
- [11] 周明,孙树栋.遗传算法原理及应用[M].北京:国防工业出版社,1999.
- [12] 冯毅,李丽,高艳明,等.一种基于小生境的混合遗传退火算法[J].机械科学与技术,2004,23(12):1494-1498.
- [13] 汪小刚,陈祖煜,孙文松.应用蒙特卡罗法确定节理岩体的连通率和综合抗剪强度指标[J].岩石力学与工程学报,1992,11(4):345-355.
- [14] 杜景灿,陈祖煜,汪小刚.寻优方法在岩体结构面连通特性和综合抗剪强度研究中的应用[J].岩石力学与工程学报,2003,22(9):1441-1447.
- [15] 张勤,陈志坚,罗增益.裂隙岩体结构面力学参数取值的工程地质研究[J].河海大学学报:自然科学版,1999,27(6):114-117.

(收稿日期 2008-05-16 编辑 骆超)

