

文章编号: 1000-7598-(2006) 09-1554-05

并行组合模拟退火算法在边坡稳定分析中的应用

吴余生¹, 陈胜宏²

(1.中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院, 昆明 650051; 2.武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

摘 要: 采用自适应有限元法分析边坡的应力场, 然后应用并行组合模拟退火算法建立基于应力场的边坡任意形状临界滑动面的全局搜索方法。该方法适用于任意几何形状, 不同岩土材料分层以及多种荷载作用的复杂边坡。并行组合模拟退火算法是将模拟退火算法和遗传算法相结合的优化算法, 它可以从多个初始点开始并行寻优, 能以较快的速度找到全局最优解。通过工程实例分析, 证明这种基于自适应有限元分析和并行组合模拟退火算法搜索边坡临界滑动面的方法可行、高效。

关 键 词: 边坡稳定分析; 临界滑动面; 自适应有限元; 并行组合模拟退火算法

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

Application of parallel recombination simulated annealing algorithm to slope stability analysis

WU Yu-sheng¹, CHEN Sheng-hong²

(1. Kunming Hydroelectric Investigation, Design and Research Institute, CHECC, Kunming 650051, China;

2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The adaptive finite element method is used to analyze the stress fields in slopes. Based on the stress fields, a global optimization method to search the critical slip surface in slopes is proposed by parallel recombination simulated annealing algorithm. The method can be applied to slopes with any configuration, different layering and external load distribution. The parallel recombination simulated annealing algorithm is an effective combination of simulated annealing algorithm and genetic algorithm. The algorithm displays inherent parallelism, iterates a population of solutions rather than a single solution, and consistently converges to global optimum. The feasibility and efficiency of the proposed method are finally demonstrated with the stability analysis of a real landslide case.

Key words: slope stability analysis; critical slip surface; adaptive finite element method; parallel recombination simulated annealing algorithm

1 引 言

随着有限单元法在边坡稳定分析中的广泛应用, 如何将有限单元法计算成果与传统的安全系数挂钩, 作为边坡设计的判别依据, 是近几年来边坡稳定分析领域中一个活跃的研究课题^[1-4]。有限元应力场快速而准确地确定边坡临界滑动面及相应的最小安全系数是其中的关键问题之一, 它可以抽象为非线性优化问题, 主要依赖于高效的优化搜索方法。近年来, 在这一领域已经提出了很多的优化搜索方法, 如变分法、固定模式搜索法、数学规划方法、随机搜索方法、人工智能方法等。文献[5]对应用于

边坡稳定分析领域的各种优化方法进行了综合评述, 每种方法都有自身的优缺点和适用条件, 而且在实际应用中搜索性的差异明显。把两种或多种优化算法结合起来, 取长补短, 开发出更有效的优化算法是今后解决优化问题的一个发展趋势。因此, 探讨各种优化方法相互联合与借鉴并应用于边坡稳定分析领域具有较大的实用意义。本文应用的并行组合模拟退火算法 PRSA^[6](Parallel Recombination Simulated Annealing)是将模拟退火算法和遗传算法相结合的优化方法。

自适应理论被引入有限元计算是从 20 世纪 70 年代开始的^[7], 其主导思想是减少前处理工作量和

收稿日期: 2004-12-06

基金项目: 水利部科技创新基金 (No.SCX2003-21)。

作者简介: 吴余生, 男, 1980 年生, 硕士研究生, 主要从事高坝复杂地基及高边坡稳定分析。

实现网格离散的客观控制^[8]。目前自适应有限元方法已成为有限元理论发展的一个新方向, 逐步被应用于水工结构和岩土工程领域^[9], 其研究成果已提高了有限元分析的自动化程度和分析效率及可靠性。

本文首先采用 h 型自适应有限元法分析边坡性状, 然后基于应力场定义边坡抗滑稳定安全系数, 进而应用并行模拟退火算法搜索任意形状的临界滑动面及相应的最小安全系数。

2 h 型自适应有限元方法

按逼近真实解的途径分类, 自适应有限元法可分为: ① h 型, 通过调整网格中单元尺寸, 即增减单元和节点数量来控制离散精度, 从而提高有限元的精度; ② p 型, 通过调整单元插值函数的阶数, 即增加基函数的阶次来控制离散精度, 从而提高有限元的精度; ③ h-p 型, 以上两者相结合的方法。其中, h 型自适应有限元法的理论较为流行, 其优点是有限元分析软件可基本不变以保持独立性, 方法的适应性强, 程序移植性好, 但缺点是依赖于一个强大的网格生成器。

h 型自适应有限元法主要包括 3 个分析模块: 区域网格自动离散 (GENCORE), 弹黏塑性有限元分析 (CORE) 和区域离散误差估计 (DENCORE) 等。上述分析模块的理论推导详见参考文献[8]和[9]。

边坡稳定 h 型自适应有限元分析的基本计算过程是: 首先读入定义结构几何造型的参数以及材料和边界条件参数, 接着生成 1 个背景网格, 这个背景网格同时也被作为当前网格进行有限元分析, 用有限元计算结果进行网格离散误差估计, 若精度满足要求则计算结束, 否则计算下一轮优化网格的尺度场, 然后返回, 依此尺度场形成新的网格, 原先的当前网格退后为背景网格, 而产生的新网格则作为当前网格供有限元分析使用。以上过程反复进行, 直到网格满足预定的精度为止。h 型自适应有限元的基本计算流程见图 1。

对于平面问题, 任意形状的滑动面可以由曲线 $y=y(x)$ 确定, 而边坡区域内的 1 点的应力状态可由 3 个独立的应力分量 σ_x , σ_y , τ_{xy} 确定。滑动面上某点的法向应力 σ_n 和切向应力 τ 可由下式确定:

$$\sigma_n = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\theta + \tau_{xy}\sin 2\theta \quad (1)$$

$$\tau = -\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)\sin 2\theta + \tau_{xy}\cos 2\theta \quad (2)$$

式中 θ 为此处滑动面法向与 x 轴的夹角。土体的抗剪强度 τ_f 采用摩尔-库仑准则, 即:

$$\tau_f = \sigma_n \tan \varphi + c \quad (3)$$

式中 φ 和 c 分别是土体的内摩擦角和凝聚力。

将抗剪强度 τ_f 和实际剪应力 τ 沿整个滑动面积分得边坡内沿任一滑动面的抗滑稳定安全系数为

$$F = \frac{\int_l \tau_f dl}{\int_l \tau dl} = \frac{\int_l (\sigma_n \tan \varphi + c) dl}{\int_l \tau dl} \quad (4)$$

这种方法把安全系数定义为沿滑动面上土体总的抗剪强度和总的实际剪应力之比, 和传统的极限平衡法的安全系数具有相同的物理意义。

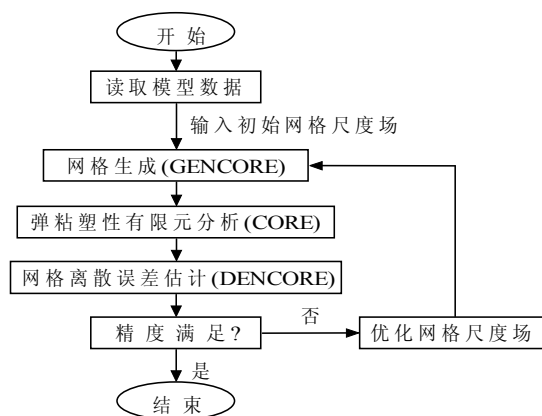


图 1 h 型自适应有限元计算流程图

Fig. 1 Flow chart for h-adaptive FEM

3 并行组合模拟退火算法

3.1 并行组合模拟退火算法的基本原理

1983 年, Kirkpatrick 等^[10, 11]成功地将固体退火思想引入组合优化领域, 提出一种全局最优化方法——模拟退火算法 SA (Simulated Annealing)。模拟退火算法用于优化问题的出发点是基于物理中固体物质的退火过程与一般优化问题的相似性, 它能够以随机搜索技术从概率的意义上寻找目标函数的全局最优点。理论上已经证明, 只要模拟足够充分, 这种算法能收敛于全局最优解。但是对固体退火过程模拟得足够充分需要很长的时间, 特别是对于自由度多且约束条件复杂的目标函数来说, 其退火收敛的过程很长, 寻优的效率不高。

为了加速模拟退火算法收敛于全局最优解, 可以借鉴遗传算法的内在并行性, 从多个初始点开始并行模拟退火搜索。并行组合模拟退火算法 PRSA (Parallel Recombination Simulated Annealing)^[6]就是借鉴遗传算法的内在并行性, 在模拟退火算法中

融入遗传算法的思想,即在模拟退火算法的运行过程中融入遗传算法中的群体和交叉的概念,从而实现并行组合模拟退火搜索,形成更有效率的全局最优优化方法^[1]。

并行组合模拟退火算法的具体的计算过程可分为以下几个步骤:

(1) 将计算的对象用一定的字符串编码表示,如二进制编码、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 $P(0)$,以它作为当前群体,并计算个体的目标函数值。

(3) 设置初始温度: $T \leftarrow T_0$,

(4) 设置循环计数器初值: $r \leftarrow 1$;

(5) 对当前群体 $P(t)$ 中的各个个体进行随机配对,对其中的每一对个体组作如下处理:

① 进行交叉和变异运算,由两个父代个体 p_1 、 p_2 生成两个子代个体 c_1 和 c_2 。

② 对由父代个体和子代个体组成的两个个体组 p_1 和 c_1 、 p_2 和 c_2 ,以概率 ρ 接受父代个体为下一代群体中的个体,以概率 $1-\rho$ 接受子代个体为下一代群体中的个体,其中:

$$\rho = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{f_p - f_c}{T}\right)} \quad (5)$$

式中 f_p 和 f_c 分别为父代个体和子代个体所对应的目标函数值。

(6) 如果 $r <$ 终止步数 S ,则: $r \leftarrow r+1$,并转向(5)步;

(7) 如果未达到冷却状态,则进行退火降温: $T \leftarrow T(t)$,转向(4)步,如果已达到冷却状态,则输出最优解,计算结束。

上述第7步中的退火降温方式采用快速退火降温方式,假定时刻 t 的温度用 $T(t)$ 表示,则:

$$T(t) = \frac{T_0}{1+t} \quad (6)$$

3.2 目标函数

将滑裂面曲线用 k 个点离散,也就是将此 k 个点用直线或光滑的曲线连起来近似模拟此曲线,一旦连接的模式确定,在应力场已知的情况下,安全系数 F 即可表达成此 k 个控制点坐标的函数。对于平面问题,结合安全系数的定义,采用分段线性来模拟任意形状的滑动面,即用直线段连接 k 个离散点近似表示滑动面曲线。在应力场已经确定的条件下,优化目标函数(即抗滑稳定安全系数式(4))可以表示为

$$F = F(x_1, y_1, x_2, y_2 \cdots x_k, y_k) \quad (7)$$

在具体优化过程中,这 k 个控制点中有一些点可能只沿某一设定方向(如软弱夹层,断层破碎带)移动,或者不规定方向任其自由移动,也有一些点可能由于实际工程问题本身的要求可能固定。

3.3 滑动面的基因表示(编码)

在并行组合模拟退火算法中,基因表示就是如何用实用方便的染色体串表达欲求解问题的候选解,即如何编码问题的候选解。滑动面的基因表示就是对离散滑动面的 k 个控制点的坐标(即式(7)中优化目标函数的自变量)进行基因编码。将各控制点的基因编码连成一个整体顺序串,就构成了染色体。采用十进制编码,首先将每一个控制点的允许移动区间(即式(7)中自变量的允许取值区间)分为 M 等份,并按从小到大的次序用整数 $1, 2, \cdots, M, M+1$ 表示。染色体的每一个基因即用该整数 n ($n=1, 2, \cdots, M, M+1$) 表示,它代表式(7)中某一自变量的值 Z_i :

$$Z_i = Z_{i,\min} + (n-1) \frac{Z_{i,\max} - Z_{i,\min}}{M} \quad (9)$$

式中 $Z_{i,\min}$ 、 $Z_{i,\max}$ 分别为该自变量(即滑动面上的控制点)的允许取值区间的最小值和最大值。 M 的取值与所要求的十进制编码精度有关,欲使十进制编码精度为 δ ,则应把变量的取值区间划分为 M 等份:

$$M = \frac{Z_{i,\max} - Z_{i,\min}}{\delta} \quad (10)$$

例如,若离散滑动面的控制点为8个,那么每个染色体所含向量(基因)为16个, M 若取为50,染色体可以用十进制编码表示,如:染色体(1, 4, 7, 10, 13, 17, 22, 30, 38, 41, 48, 51, 37, 29, 11, 8)的意义为

$$\begin{aligned} Z_1 &= Z_{1,\min} \\ Z_2 &= Z_{2,\min} + (4-1) \frac{Z_{2,\max} - Z_{2,\min}}{50} \\ &\cdots \\ Z_{16} &= Z_{16,\min} + (8-1) \frac{Z_{16,\max} - Z_{16,\min}}{50} \end{aligned}$$

将上述 Z_i 值代入式(7)即可计算该滑动面的抗滑稳定安全系数。

3.4 交叉和变异运算

在并行组合模拟退火算法运行过程中,对个体进行交叉运算和变异运算,是为了丰富群体的多样性,使算法更有效地跳出局部极值的陷阱,收敛于

全局最优解。本文采用单点交叉算子和高斯变异算子，相关理论可参见文献[11]。交叉概率和变异概率的选取依不同的问题而异，通常是根据经验结合实际优化问题进行试算而定。

3.5 最优保存策略

由于交叉、变异运算的随机性，它们可能破坏当前群体中的优良个体，这对算法的运行效率和收敛性都不利。可以采用最优保存策略来进行优胜劣汰操作。最优保存策略的具体操作过程如下：

(1) 找出当前群体中的最优个体和最差个体。

(2) 若当前群体中的最优个体的目标函数值比总的迄今为止的最优个体的目标函数值还小，则以当前群体中的最优个体作为新的迄今为止的最优个体，并用该当前最优个体替换掉当前最差个体。否则，进行步骤(3)。

(3) 用迄今为止的最优个体替换掉当前群体中的最差个体。

4 工程实例分析

4.1 工程概况

应用本文前面介绍的 h 型自适应有限元法和 PRSA 算法分析某电站进水口崩塌堆积体边坡的稳定性，并搜索其临界滑动面及相应的最小抗滑稳定安全系数。该崩塌堆积体分布于电站进水口右侧 VI 号冲沟上游大支沟内，分布高程为 375.0~657.0 m，坡体厚度为 5.0~40.0 m，平均厚度 15.20 m。崩塌堆积体自然地形高陡，狭长而单薄，地表坡度 $32^{\circ} \sim 38^{\circ}$ ，物质构成较为复杂。崩塌堆积体与基岩之间的接触滑带为灰黄至黄色角砾夹黄色可塑至软塑状黏土，厚度约为 0.5 m。本文的计算工况为电站进水口未开挖前崩塌堆积体的天然状态，由于在自然条件下，地下水主要分布于滑带以下的基岩内，且基岩的渗透系数很小，故没有考虑地下水对崩塌体稳定性的影响作用。计算中各类材料参数见表 1。

表 1 崩塌体中不同材料的物理力学参数表

Table 1 Mechanics parameters of different materials in landslide

岩土材料名称	天然容重 $\gamma / \text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	弹性模量 E / MPa	泊松比 μ	凝聚力 c / kPa	内摩擦角 $\phi / (^{\circ})$
碎石土、坡积物 (高程 592.0 m 以上)	18.0	3.0	0.35	5.0	21.5
块石 (高程 592.0 m 以下)	19.0	10.0	0.35	0.0	31.5
崩塌体与基岩 的接触带	18.0	7.5	0.35	35.0	29.68
基岩	26.8	5 000.0	0.35	1 100.0	45.0

4.2 计算结果分析

对边坡进行应力应变自适应有限元分析，得到边坡的屈服区如图 2 所示（图中边坡内的细线是崩塌体与基岩的接触带），边坡顶部崩塌堆积体屈服区较大，并且基本贯通，存在局部失稳的可能。为了便于比较分析，对该边坡分别采用模拟退火算法（SA）和并行组合模拟退火算法（PRSA）搜索整体临界滑动面及相应的最小整体安全系数，并且搜索坡顶区域的局部临界滑动面及相应的局部最小安全系数。两种搜索方法的初始计算参数相同。

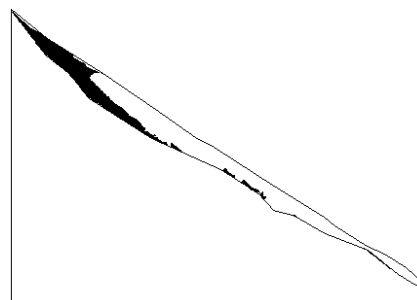


图 2 屈服区

Fig.2 The destroyed zone

两种方法搜索到的临界滑动面及相应的最小安全系数如图 3 和图 4，安全系数的收敛过程如图 5 和图 6 所示。

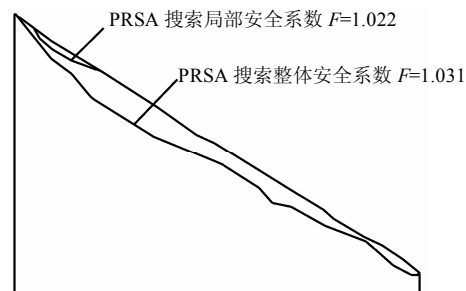


图 3 临界滑动面的位置 (PRSA 搜索)

Fig.3 Location of the critical slip surface (searched by PRSA)

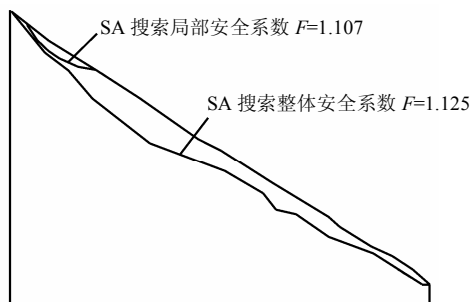


图 4 临界滑动面的位置 (SA 搜索)

Fig.4 Location of the critical slip surface (searched by SA)

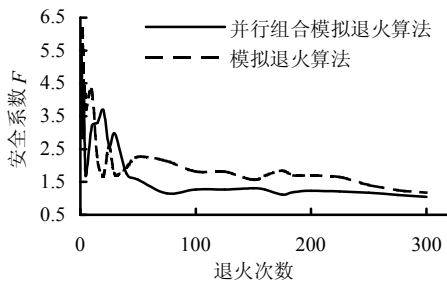


图 5 整体安全系数收敛示意图

Fig.5 The sketch map of convergence for whole safety

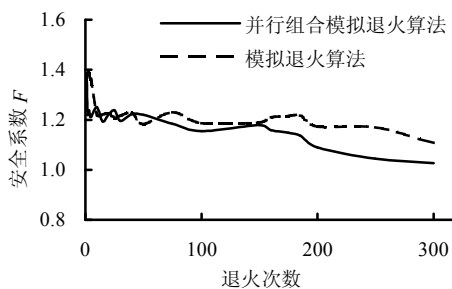


图 6 局部安全系数收敛示意图

Fig.6 The sketch map of convergence for local safety

从图 5 和图 6 可以看出, 并行组合模拟退火算法能快速地收敛, 并能较好地越过局部极值的障碍, 指导搜索向全局最优解方向前进, 而模拟退火算法收敛速度相对慢一些, 且不容易跳出局部极值。对于高边坡大范围搜索时, 并行组合模拟退火算法的优势更明显。由此可见, 在寻找任意形状临界滑动面时, 并行组合模拟退火算法是一个效率较高且收敛快的方法。

5 结 语

并行组合模拟退火算法是在模拟退火算法中融入了遗传算法的思想, 两者互相结合、借鉴、取长补短, 能够以较高的效率得到全局近似最优解。基于自适应有限元应力场, 采用并行组合模拟退火算法搜索边坡任意形状临界滑动的方法可行、高效且易于实现。通过工程实例分析也说明其在搜索任意形状临界滑动面的应用中, 可以得到令人满意的结果。同时应指出, 在今后的研究中, 还有一些问题需要提高和改进:

(1) 并行组合模拟退火算法中的一些参数(如退火的最高温度, 退火降温方式, 交叉和变异的概率等)的选取没有固定的公式可遵循, 主要靠试算和经验, 今后有必要进行深入的研究。

(2) 人工智能方法在寻优方面有其独特的优势, 但也存在一些缺点, 今后边坡临界滑动面的搜

索方法还应侧重于多种最优化方法的借鉴与结合。借鉴本文的经验, 可以将模拟退火算法或遗传算法与传统的最优化方法(如数学规划方法、随机搜索方法)相结合, 使其扬长避短。

(3) 边坡任意形状的临界滑动面搜索是一个复杂的最优化问题, 主要依赖于可靠的边坡稳定分析方法和高效的优化搜索方法, 本文仅运用 h 型自适应有限元法和并行组合模拟退火算法对其进行研究, 寻找更稳定可靠、更有效的计算方法仍需进一步探索研究。

参 考 文 献

- [1] Zou J Z, Williams D J, Xiong W L. Search for critical slip surfaces based on finite element method[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1995, 32(2): 233—246.
- [2] Griffith D V, Lane P A. Slope stability analysis by finite element[J]. **Geotechnique**, 1999, 49(3): 387—403.
- [3] 郑颖人, 赵尚毅, 张鲁渝. 用有限元强度折减法进行边坡稳定分析[J]. 中国工程科学, 2002, 4(10): 57—61.
ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, ZHANG Lu-yu. Slope stability analysis by strength reduction FEM[J]. **Engineering Science**, 2002, 4(10): 57—61.
- [4] 陈祖煜. 土质边坡稳定分析—原理·方法·程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003, 254—256.
- [5] 王成华, 夏绪勇. 边坡稳定分析中的临界滑动面搜索方法述评[J]. 四川建筑科学研究, 2002, 28(3): 34—39.
WANG Cheng-hua, XIA Xu-yong. State of the art: methods for searching critical slip surface in slope stability analysis[J]. **Building Science Research of Sichuan**, 2002, 28(3): 43—39.
- [6] Mahfoud S W, Goldgerg D E. Parallel simulated annealing: A genetic algorithm[J]. **Parallel Computing**, 1995, 21(1): 1—28.
- [7] Babuska I, Rheinboldt W C. A posteriori error estimates for the finite element method[J]. **International Journal For Numerical Methods In Engineering**, 1978, 12(10): 1 597—1 615.
- [8] 陈胜宏. 高坝复杂岩石地基及岩石高边坡稳定分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001, 33—41.
- [9] 陈胜宏, 王劲松, 张君禄. 水工结构的弹黏塑性自适应有限元分析[J]. 水利学报, 1996, (2): 68—75.
CHEN Sheng-hong, WANG Jin-song, CHEN Shang-fa. Adaptive elasto-viscoplastic FEM analysis for hydraulic structures[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 1996, (2): 68—75.
- [10] Kirkpatrick S, Gelatt C D, Vecchi M P. Optimization by Simulated Annealing[J]. **Science**, 1983, 220: 671—680.
- [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, 81—84.