

文章编号: 1000-7598-(2006)08-1433-04

自适应混合遗传算法在基坑支护结构优化中的实现

王俊生¹, 夏元友¹, 舒怀珠²

(1. 武汉理工大学 土木工程与建筑学院, 武汉 430070; 2. 义乌工商学院 土木系, 浙江 义乌 322000)

摘 要: 采用遗传算法对基坑支护结构进行优化设计, 针对其早熟现象和局部搜索能力差的缺点改进遗传算法。使用自适应策略改进交叉算子与变异算子, 在进化后期采用与位爬山法结合的混合遗传算法增强 GA 的局部搜索能力。对基坑支护结构建立优化设计数学模型, 编制了基于遗传算法的基坑优化设计程序。通过实例分析, 验证了改进策略的正确性。

关 键 词: 深基坑; 自适应遗传算法; 位爬山法; 优化设计

中图分类号: TU 470

文献标识码: A

Realization of optimizing supporting structure in deep excavation based on adaptive hybrid genetic algorithm

WANG Jun-sheng¹, XIA Yuan-you¹, SHU Huai-zhu²

(1. Civil Engineering and Architecture of Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China

2. Civil Engineering Department of Yiwu Industrial and Commercial College, Yiwu 322000, China)

Abstract: Supporting structure of deep excavation is optimized using genetic algorithm(GA); and limitation of GA such as poor local search ability and premature is largely enhanced. Then crossover operator and mutation operator is improved while considering the adaptive method; also the combination of hill-climbing with GA enables better local search ability in post-evolution. Mathematic model of deep excavation supporting structure is discussed; according to which a GA software system is developed for deep excavation retaining system. An engineering example is studied; and the results show the validity of the amelioration.

Key words: deep excavation; adaptive GA; hill-climbing method; optimization design

1 引 言

基坑支护结构是一种临时性的构筑物, 在支护结构设计中, 支护方案的选择和设计过于保守, 会造成不必要的浪费, 因此, 优化设计十分重要。传统优化方法大都采用确定性的搜索方法, 有着明显的不足之处^[1]。遗传算法是一种具有广泛适用性的搜索方法, 解决局部或全局最优解有着更高的效率。

标准遗传算法通常采用固定的控制参数, 很难实现群体和开发之间的平衡, 对于复杂问题往往出现早熟现象或者陷于局部极值点。适应性遗传策略能够使 GA 具有更好的全局搜索能力和鲁棒性^[2]。

在 GA 进化的早期阶段, 群体中存在大量的有效低阶模式。在交叉算子的作用下, 低阶模式重组为较高阶模式的概率较大, 当前最优解的质量改善的速度也较快, 但是随着群体多样性的逐渐降低,

群体中包含的低阶模式数量不断减少, 高阶模式不断增加, 有效基因的重组成功概率显著降低, 从而群体中当前最优解改善的速度大大下降。因此, 从某种意义上说, GA 的宏观探索能力大于局部求精能力^[2]。根据实际问题的求解需要, 将局部搜索方法与 GA 结合起来, 可以促进进化后期的计算效率问题。

基于上述分析, 本文采用改进的遗传算法对基坑支护结构进行优化设计。在进化前期, 采用自适应策略的遗传算法; 在进化后期, 采用位爬山法与遗传算法结合的混合遗传算法。

2 优化设计的数学模型

2.1 设计变量的选取

设计变量取值的思想是选取对目标函数值影响较大、且不容易被设计者掌握的设计参数, 作为设

计变量,而一些根据经验或规范要求就能确定的参数作为已知参数固定下来^[3]。这样可以简化优化过程,提高遗传算法的运行速度。下面以桩锚支护为例进行分析。

选取桩径 D 、嵌固深度 h_d 、支撑道数 N_p 以及支撑位置 m 为设计变量;把混凝土强度等级 pct 、配筋方式 M_s 、钢筋类别 pst 及锚杆具体参数等作为设计变量预先确定下来。

2.2 目标函数的建立

桩锚支护造价一般包括支护桩造价、锚杆造价以及施工造价等。为了简化目标函数,本文预先设定锚杆的参数,优化时不考虑锚杆造价与施工造价,选取单位长度基坑桩材料造价为目标函数,则目标函数表示为

$$F(D, h_d, N_p, m) = \frac{\pi D^2 (h + h_d)}{4} \quad (1)$$

式中 h 为基坑开挖深度 (m)。

2.3 约束条件

2.3.1 设计变量约束

(1) 桩径 D : $D \in (0.6, 1.8)$ 。

(2) 嵌固深度 h_d : $h_d \in (0.2h, 1.5h)$ 。

(3) 支撑位置 m : $0 < m_1 < h$, $m_1 < m_2 < h$, 等等,依次类推。

(4) 支撑道数 N_p : $N_p = 0, 1, 2, 3$ 。

2.3.2 设计准则约束

桩的位移和弯矩约束条件:

$$\frac{U}{U_{\max}} - 1 \leq 0; \quad \frac{M}{M_{\max}} - 1 \leq 0 \quad (2)$$

式中 $U_{\max}$ 为桩顶允许最大位移; $M_{\max}$ 为桩身允许的最大弯矩。用通式 $g_i(x) \leq 0$ 表示上述约束条件。

桩的内力计算和变形采用《建筑基坑支护技术规程》^[4]中弹性支点法分析和计算。

3 遗传算法优化设计的实现

算法的实现就是在满足所有约束条件下, X 满足 $F(X) \rightarrow \min$, 其中 $X = [D, h_d, N_p, m]$, F 值越小,表明解的性能越好^[3,5]。算法实现的步骤如下。

3.1 初始种群的确定

采用二进制编码,随机、均匀的产生 N 个初始解 $x_i = [D, h_d, N_p, m]$ 作为初始种群,其中 x_i 称为染色体。染色体串长取决于需要的精度,以桩径为例分析,设定 D 的值域是 $[a_i, b_i]$,精度要求为小数点后两位,则桩径 D 需要的子串长 m_j 为

$$2^{m_j-1} < (b_i - a_i) \times 10^3 \leq 2^{m_j} - 1 \quad (3)$$

染色体的串长为各个子串长之和。

x_i 由二进制转化为十进制可以按照下面两步计算^[4]:

(1) 将一个二进制串 $(b_n b_{n-1} \cdots b_1)_2$ 转化为十进制数: $x' = (\sum_{i=1}^n b_i \cdot 2^{i-1})_{10}$ 。

(2) x' 对应的区间 $[a_i, b_i]$ 内的实数:

$$x = a_i + x' \frac{b_i - a_i}{2^n - 1} \quad (4)$$

二进制串 $<00000 \cdots 0>$ 与 $<11111 \cdots 1>$ 分别表示为区间的两个端点值 a_i 和 b_i 。

3.2 约束条件的处理和适应度函数的确定

用构造罚函数法处理约束条件,罚函数法的基本思想是^[5,6]:根据约束特征构造惩罚函数,并将其加到目标函数中去,那么问题就转化为一系列无约束极值子问题,然后按无约束优化方法来求解。这种“惩罚”策略,给予无约束极值问题求解过程中企图违反约束的那些迭代点以很大的目标函数值,而子问题的目的是目标函数极小化,这样迫使无约束问题的极小点趋向于满足约束条件。重复地产生和求解一系列这样的子问题,它们的解在极限情况下趋向原问题的约束极小值。

对于约束条件,若 $g_i(x) > 0$, 则 $c_i = g_i(x)$; 若 $g_i(x) \leq 0$, 则 $c_i = 0$, 令 $c = \sum_{i=1}^n c_i$, 则

$$\varphi(x) = F(x)(1 + Kc) \quad (5)$$

式中 $\varphi(x)$ 为惩罚后的目标函数; $F(x)$ 为原目标函数; K 为参数。

适应度函数 $fitness(x)$ 表示为: $fitness(x) = \frac{1}{\varphi(x)}$ 。

3.3 选择和复制

计算各染色体选择概率 p_i 和累积概率 q_k :

$$p_i = \frac{fitness_i}{\sum_{i=1}^n fitness_i}; \quad q_k = \sum_{i=1}^k p_i \quad (6)$$

在 $[0, 1]$ 内随机产生一个伪随机数 r , 若 $r \leq q_1$, 则选第一个染色体 v_1 ; 否则, 选择第 k 个染色体 v_k , 使得 $q_{k-1} < r \leq q_k$ 成立。选择后组成新的群体。

3.4 交叉和变异

交叉操作是以一定的交叉概率 p_c 两两配对, 具体规则如下:

(1) 在相互配对的两个染色体中随机设置一个交叉点;

(2) 交换两个染色体在交叉点的部分基因。

变异操作是以一定的变异概率 p_m 对个体的每一个基因位进行变异。

遗传算法的参数 p_c 和 p_m 的选择是影响遗传算法行为和性能的关键所在, 直接影响到算法的收敛性, p_c 越大, 新个体产生速度越快。但是, 当 p_c 过大时, 遗传算法模式被破坏的可能性也越大, 使具有高适应度的个体结构也会很快被破坏; p_c 过小, 会使搜索过程缓慢, 甚至停滞不前。本文采用自适应的 p_c 和 p_m , 使其随适应度的变化自动改变。当种群各个适应度趋于一致或局部最优解时, p_c 和 p_m 增加; 而当种群分散时, p_c 和 p_m 减小。同时, 对于适应度值高于群体平均适应度的个体, 对应于较低的 p_c 和 p_m , 使其得以保护并进入下一代; 适应度值低于群体平均适应度的个体, 对应于较高的 p_c 和 p_m , 使其被淘汰掉。因此, 自适应的 p_c 和 p_m 能提供相对某个解的最佳 p_c 和 p_m , 并且在保持群体多样性的同时, 保证遗传算法的收敛性^[7]。

经过改进的 p_c 和 p_m 表达式如下:

$$p_c = \begin{cases} p_{c1} - \frac{(p_{c1} - p_{c2})(f' - f_{\text{avg}})}{f_{\text{max}} - f_{\text{avg}}}, & f' \geq f_{\text{avg}} \\ p_{c1}, & f' < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (7)$$

$$p_m = \begin{cases} p_{m1} - \frac{(p_{m1} - p_{m2})(f_{\text{max}} - f)}{f_{\text{max}} - f_{\text{avg}}}, & f \geq f_{\text{avg}} \\ p_{m1}, & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (8)$$

式中 $p_{c1} = 0.9$; $p_{c2} = 0.5$; $p_{m1} = 0.1$; $p_{m2} = 0.001$; f_{max} 为群体中最大的适应度值; f_{avg} 为每代群体中的平均适应度值; f' 为要交叉的两个个体中较大的适应度值; f 为变异个体的适应度值。

由上式可以看出, 当适应度值低于平均适应度值时, 对它就采用较大的交叉率 p_{c1} 与变异率 p_{m1} ; 当适应度值高于平均适应度值时, 则随适应度值的变化, 而选择不同的交叉率与变异率。由于群体中的最大适应度值的个体不一定是优化的全局最优解, 采用上式使优良个体也会发生交叉与变异操作, 而不至于处于一种停滞不前的状态。

3.5 收敛判别

对于更新得到的新的种群, 计算其最优解 f_{max} , 判断是否满足下式:

$$\sum_{i=1}^n [f(x_i) - f_{\text{max}}]^2 < \varepsilon \quad (9)$$

式中 ε 为预先给定的充分小的正数。

至此, 完成了遗传算法进化前期的一次遗传迭代。如果在预定进化代数以前算法收敛, 则从收敛的代数起进行混合遗传算法运算。如在预定代数前没有收敛, 则从预定代数开始进行混合遗传算法运算。

3.6 与位爬山结合的混合遗传算法

当 GA 群体进化到预定代数, 选择当前群体最佳位串作为初始个体, 采用位爬山算法继续完成局部搜索过程^[2]。其步骤为

- (1) 初始化染色体个体: $b = (b_1, b_2, \dots, b_n)$ 。
- (2) 计算个体的适应值: $f = f(b)$ 。
- (3) 生成随机位序列 $\text{Bit_list} = [j_1, j_2, \dots, j_n]$ 。
- (4) 顺序取 $j_n \in \text{Bit_list}$ 。

(5) 变异该位基因生成新的染色体 b' : 若该基因位为 0, 则变异为 1; 反之若为 1, 则变异为 0。

(6) 计算新个体的适应值 $f(b')$, 并比较 $f(b')$ 与 f : if $f(b') > f$ then $f = f(b')$, $b = b'$ 。

(7) 循环: $n = n + 1$, 返回步骤 (4)。

(8) 满足终止条件, 则终止算法。

由上面可见, 随机初始化个体的位爬山法本身是一种局部搜索方法, 当基因位之间不存在严重的关联关系时, 它是一种有效的求解算法。

4 实例分析

某基坑深 9.2 m, 采用钻孔灌注桩加预应力锚杆支护, 支护桩桩身主筋: 12 ϕ 25 mm, 螺旋箍筋: ϕ 6.5@200 mm, 定位筋: ϕ 16@2000 mm。桩身混凝土强度等级为 C30。锚杆倾角 15°, 二次压裂注浆后计算直径为 ϕ 195 mm, 锚杆预应力值为 100 kN。基坑土性指标见表 1。

表 1 基坑地质条件参数

Table 1 Parameters of soils

层号	凝聚力 c/kPa	摩擦角 $\varphi /(^{\circ})$	厚度 /m	重度 /kN·m ⁻³
1	8.0	10	2.0	18.9
2	8.0	9	1.0	17.9
3	10	12	1.5	17.7
4	12	11	8.0	18.3
5	11	14	9.5	18.4

本文分别采用标准遗传算法(SGA)、自适应遗传算法(AGA)和自适应策略的混合遗传算法(HGA)进行优化计算, HGA 预定进化代数为 50。SGA 与 AGA 分别运算到 213 代和 53 代收敛, 3 种计算结果及原设计方案参数见表 2。

表 2 各种计算结果与原设计方案参数比较

Table 2 Comparison between various computational results and original scheme

优化方法	桩径 /m	嵌固深度 /m	支撑道数	支撑位置 /m	桩顶最大位移 /mm	最大弯距 /kN·m
原设计	0.80	10.0	2	3.0 6.0	21.5	505.3
SGA	0.70	10.9	2	3.4 6.8	27.6	453.2
AGA	0.68	11.1	2	3.5 6.8	27.1	448.7
HGA	0.67	10.6	2	3.5 6.8	29.0	448.6

优化结果分析表明:

(1) 优化后的桩径减小, 但嵌固深度稍微增加, 优化结果满足各种约束条件。

(2) 随着支撑位置下移, 最大弯矩 $M_{\max}$ 变小, 支护桩水平变形变大, 嵌固深度基本不变。这与桩支撑支护结构优化设计理论^[5]是相符合的。

(3) 自适应策略的遗传算法的优化结果比普通遗传算法的优化结果好, 表现为桩径变小, 收敛代数减少。

(4) 比较混合遗传算法与自适应策略的遗传算法的优化结果, 可以看出桩径和嵌固深度减小。位爬山法局部寻优起到一定的效果。

(5) 改进的遗传算法比普通遗传算法的运算效率有了较大的提高, 优化结果也有较明显的改善。这证明遗传算法在基坑优化设计上是可行的, 也验证了本文采用的改进策略的正确性。

5 结 语

遗传算法作为一种新型的优化方法, 在深基坑工程领域很多人进行了各种有意义的尝试和研究。但遗传算法也有其不足之处, 早熟、求出的结果可能涉及局部最优解以及收敛速度慢等问题, 这一直是人们探索和研究的重点^[8]。本文结合位爬山法进行局部寻优, 获得了比较满意的结果。值得说明的是, 基坑优化设计涉及较多的参数, 这些参数受人为因素的影响很大, 如何合理的选择这些参数并运用遗传算法进行优化设计, 还需要进行不断的探索和研究。

参 考 文 献

- [1] 何则干, 陈胜宏. 遗传模拟退火算法在边坡稳定分析中的应用[J]. 岩土力学, 2004, 25(2): 316—319.
HE Ze-gan, CHEN Sheng-hong. Application of mixed genetic-simulated annealing algorithms to slope stability analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(2): 316—319.
- [2] 李敏强, 寇纪淞. 遗传算法的基本理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [3] 潘是伟, 周瑞忠. 遗传算法在深基坑支护结构优化设计中的应用[J]. 福州大学学报, 2002, 30(6): 850—855.
PAN Shi-wei, ZHOU Rui-zhong. Optimal design of supporting structure in deep excavations based on genetic algorithm[J]. **Journal of Fuzhou University**, 2002, 30(6): 850—855.
- [4] JGJ120—1999, 建筑基坑支护技术规程[S].
- [5] 徐杨青. 深基坑支护结构的优化设计和计算[J]. 岩土力学, 1997, 18(2): 57—61.
XU Yang-qing. Design optimization of bracing structure of deep foundation pit[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1997, 18(2): 57—61.
- [6] 薛毅. 最优化原理与方法[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2001.
- [7] 王小平, 曹立明. 遗传算法——理论实现、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
- [8] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防大学出版社, 1999.
- [7] 徐军, 邵军, 郑颖人. 遗传算法在岩土工程可靠度分析中的应用[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 586—589.
XU Jun, SHAO Jun, ZHENG Ying-ren. Application of genetic algorithm to reliability analysis of geotechnical engineering[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(5): 586—589.
- [8] 丰土根, 刘汉龙, 高玉峰, 等. 遗传算法在边坡抗震稳定性分析中的应用[J]. 岩土力学, 2002, 23(1): 63—66.
FENG Tu-gen, LIU Han-long, GAO Yu-feng, et al. Application of genetic algorithm to analysis of slope seismic stability[J]. **Rocks and Soil Mechanics**, 2002, 23(1): 63—66.
- [9] 冯仲仁, 王雄江, 姚爱民, 等. 基于遗传算法的深层搅拌桩优化设计[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 420—422.
FENG Zhong-ren, WANG Xiong-jiang, YAO Ai-min, et al. Optimal design of deep-mixing piles based on genetic algorithm[J]. **Rocks and Soil Mechanics**, 2003, 24(3): 420—422.
- [10] 钱家欢. 土力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 1995.
- [11] Rudiger Rackwitz, Bernd Fiessler. Structural reliability under combined random load sequence[J]. **Computers and Structures**, 1978, 9(5):489—494.

上接第 1432 页