

Application of Genetic Algorithm to Foundation Pit of One Square

Qiang Zhang¹, Tingting Geng², Jinghong Li³

¹Traffic Investment Group of Baotou Industry Development Co., LTD., Baotou Inner Mongolia

²Construction Engineering Safety Supervision Station of Baotou, Baotou Inner Mongolia

³China Second Metallurgy Group Corporation Limited, Baotou Inner Mongolia

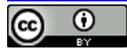
Email: 15949488501@139.com

Received: Oct. 25th, 2016; accepted: Nov. 11th, 2016; published: Nov. 16th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

This article takes the foundation pit supporting project of one square as an illustration. Optimal design of soil-nail bracing structures is analyzed by the empirical data. In condition of guaranteeing safety and stability, improved genetic algorithms to optimize the design of soil-nail bracing structures are used. Optimal designs of foundation pit support types are made by the genetic algorithm of MATLAB and the influence of parameters on the engineering cost of support types is analyzed by the statistics. Finally, the most economic and reasonable project of safety and stability is obtained.

Keywords

Genetic Algorithm, Design of Supporting Structure in Deep Excavations, Optimal Design

遗传算法在某广场基坑中的应用

张 强¹, 耿婷婷², 李敬红³

¹包头交通投资集团交通产业发展有限公司, 内蒙古 包头

²包头市建设工程安全监督站, 内蒙古 包头

³中国二冶集团有限公司, 内蒙古 包头

Email: 15949488501@139.com

收稿日期：2016年10月25日；录用日期：2016年11月11日；发布日期：2016年11月16日

摘要

本文以某广场基坑支护项目为实际工程案例，对土钉墙支护结构的优化设计方案进行实证分析，在保证安全稳定的前提下，采用改进遗传算法对土钉墙支护结构进行优化设计，使用MATLAB软件中的遗传算法对支护型式进行优化设计，通过实证分析支护型式的各种参数对工程造价的影响程度，最终确定最经济合理且安全稳定的设计方案。

关键词

遗传算法，基坑支护结构设计，优化设计

1. 引言

现行的基坑支护结构设计，通常是设计人员参照类似工程选出几个初步方案，再通过软件进行校核，设计人员根据校核结果进行方案修改，直到设计方案满足稳定性要求为止。这种设计方法存在的缺陷是工作效率比较低，设计方案只能满足安全稳定要求并不能保证设计方案是最优的。

基坑支护方案设计过程中涉及到很多的设计参数和约束条件，每一个设计参数和约束条件处理不当，都会影响基坑设计方案的最优性。基坑支护优化设计就是找到一组最好的设计参数，使得基坑支护方案能够满足安全要求、稳定要求、使用要求，并且造价最低。由于基坑支护方案的设计变量多、影响因素多，传统的数学设计法很难求解出最佳的设计方案。遗传算法可以很好的解决基坑设计中的多参数问题，实践表明，在优化设计方面，遗传算法具有很强的适用性。例如：周海青[1]以抗滑桩结构优化为研究对象，利用遗传算法，结合面向对象的设计思想，建立了相应的优化设计程序，并进行实际应用分析计算，得到了最优的抗滑桩结构设计方案。在保证基坑支护方案的可行性的前提下，使设计方案成本最低是本文的主要研究目的。

2. 分析方法

在自然条件下，适应环境的物种生存下来，不能适应环境的被淘汰，生存下来的物种通过生殖繁衍，将良好的基因不断向后代传递并优化组合，使得物种更好地适应环境，遗传算法就是基于上述原理而形成的优化方法。计算机在对自然界中的生物遗传进化系统模拟分析过程中，生物不断产生新个体适应新的环境，当环境变化时，生物一些特征也随之变化，从而得到最适应环境的个体。受到生物模拟技术的启发，Holland 教授和他的学生[2]提出了基于生物进化和遗传机制的遗传算法。遗传算法适合解决复杂的多参数的优化问题[3]。

2.1. 遗传算法的基本操作

1) 选择(Selection)

在优化过程中，选择操作是从种群中搜寻适应程度高的个体，挑选出的个体作为父代，通过交叉转换等遗传算子，得到适应程度更高的下一代。因为每个个体的适应程度不同，遗传算法根据适应程度的大小为种群中的个体排队，挑选出适应程度高的个体遗传到下一代群体之中。个体的适应程度越高，在约束条件下产生的后代存活下来的概率就越大。达尔文的适者生存原则在选择操作中得到了体现。算子

对遗传算法很重要，确定合适的算子，遗传算法就容易得到较好的计算结果，反之，得到的结果就不理想。

2) 交叉(Crossover)

交叉通常又被称为重组。交叉是从种群中选择两个个体，按照一定的方式交换两者之间的部分基因，交叉运算产生的新个体是父代个体的优化组合，并继承了父代个体的基因。交叉运算的主要内容有两点，分别是两个个体基因交换方式和确定两个个体的交叉点位置。交叉运算在遗传算法中是为了从原有的两个个体中产生两个新的个体，父代个体之间的染色体通过一定规则或函数交换部分基因，产生两个子代个体。其它进化运算中没有交叉运算，交叉运算是遗传算法的重要特征，没有交叉运算，遗传算法很难高效的产生新个体，交叉运算在遗传算法中起到至关重要的作用。图 1 是多点交叉、单点交叉和均匀交叉运算的示意图。

3) 变异(Mutation)

在种群里随机的选择一个个体，改变该个体的部分基因，使其成为同位基因，就是变异。在自然界中变异发生的概率很低，在遗传算法优化过程中变异发生的概率同样也很低。基因变异可以产生新个体，丰富了群体的基因种类。变异就如同将二进制编码中“0”变为“1”或将“1”变成“0”，进而生成一个新的二进制编码。在遗传计算过程中，变异可以产生新的个体，但属于一种随机的方法，难以控制。变异会产生新的基因信息，而选择和交叉可能会造成某些信息的丢失。为了防止这些情况的发生，在遗传算法中要将变异、选择和交叉结合起来，形成新个体的主要方法是交叉运算，交叉运算直接决定了遗传算法在优化设计过程中的解空间中的搜索能力；变异运算决定了遗传算法的局部搜索能力，但只是作为产生新个体的辅助计算方法。为了更好的提高遗传算法在解空间中的搜索能力和得到最优解，将交叉和变异同时运用。

2.2. 改进遗传算法的实现过程

周瑞忠等[4]利用遗传算法的基本原理，提出深基坑支护结构设计的全局优化算法，该方法模拟了生物遗传的过程，克服了传统优化方法容易陷入局部最优解的缺点，降低了对目标函数性质的要求，通过实例证明该方法的有效性。遗传算法通过交叉、变异和选择的手段，模拟自然界中生物种群的遗传进化。在约束条件下，种群因为有交叉、变异和选择的操作，从而产生新的适应性更强的个体，使得种群总体向理想方向发展。这样每一代都在不断优化，当种群中的个体基因相似程度很高或者经过足够的进化次数，最终得到的结果就是最优解。其具体步骤等[5]如下：

1) 编码：遗传算法中，研究对象的表现形式是解空间中的数据 X ，研究对象从表现型转换成基因型的映射过程称为编码。编码的过程首先将需要解决的问题的设计参数转化成遗传空间的基因型字符串，不同的个体包含不同字符串；然后使用遗传算法对所有个体进行搜索。

2) 原始种群的生成：遗传算法首先需要人为生成 N 个初始字符串，由结构数据生成的每个字符串称为一个个体，原始种群就是初始产生的 N 个个体。原始种群用 $P(0)$ 表示。这 N 个字符串结构的数据作为原始数据，使用遗传算法进行迭代计算，将最大进化代数 T 设置为迭代终止条件，设置进化代数计数器为 $t \leftarrow 0$ 。

3) 适应度值评价检测：根据适应程度函数，在约束条件下，评价个体的优劣程度。根据优劣程度对个体进行选择或者淘汰，对于不同的研究问题要选择与之相适应的适应程度函数。根据不同的约束条件和评价指标，计算群体 $P(t)$ 中个体的适应程度，依照适应程度来选择遗传进化的对象。

4) 选择：对种群使用选择算子来产生新的个体。

5) 交叉：对种群使用交叉算子来产生新的个体。

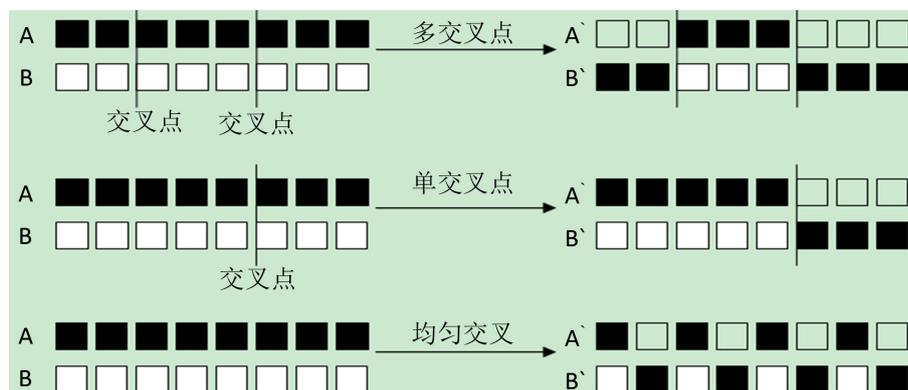


Figure 1. Diagram of crossover

图 1. 交叉运算示意图

6) 变异：对种群使用变异算子来产生新的个体。经过选择、交叉、变异运算后的父代种群 $P(t)$ 产生的子代种群用 $P(t+1)$ 来表示。

7) 终止条件判断：判断进化终止的方法有：设置最大进化次数，设置最大进化时间和根据父代和子代之间的相似程度判断是否终止。本文以最大进化次数为例介绍终止条件判断。当 $t \leq T$ 时，则 $t \leftarrow t+1$ ，通过变异交叉产生新种群；当 $t > T$ 时，此时所得到适应度最大的个体为研究问题的最优解。此时遗传算法对种群的优化结束。

下面所列代码是一个简单的遗传算法的伪代码描述，初始种群 $P(0)$ 是随机生成的，其中变量 $P(t)$ 表示遗传进化所得到的第 t 代种群。

```

Procedure GA
begin
t = 0(迭代开始)
initialize P(t);(定义种群)
evaluate P(t);(适应性评价)
while not finished do(循环)
begin
t = t + 1;(新一代群体)
select P(t) from P(t.1);(轮盘赌选择)
reproduce pairs in P(t);(再生)
evaluate P(t);(适应性评价)
end
end 结束

```

3. 算例分析

3.1. 工程概况

某广场的基坑工程采用土钉墙支护，基坑开挖深度约为 7.4~7.8 m，基坑平面尺寸约为 92 m × 150 m。土层分为五层：第一层为成分杂乱，土质较差，难以受力，较松散，应该清理的杂填土；第二层为高压缩性，软塑状态，工程性能较差的湿陷性黄土；第三层为浅黄色，中压缩性，可塑状态的粉质粘土。第四层为深黄色，密实状态的中砂。根据现场勘测地质报告，具体参数如表 1 所示。

Table 1. Physical and mechanical indexes of different soil layers
表 1. 各土层的物理力学指标

土层	土层厚度(m)	粘聚力 C (kPa)	天然重度 γ (kN/m ³)	内摩擦角 φ (°)
杂填土	5.0	0	18.0	18
湿陷性黄土	1.5	10	17.1	10
粉质粘土	5.0	20	19.0	18
中砂	5.0	28	19.6	18

3.2. 系统方案优化设计分析

某广场的基坑工程开挖深度小于 8 m，土钉墙支护结构的一般支护高度小于等于 12 m，在土钉墙支护范围之内，虽然土钉墙支护结构适用于周围环境保护要求不高的基坑工程，并且周围环境和设计参数对基坑支护工程稳定性和造价方面影响程度到底有多大，并没有明确的答案，但是土钉墙支护结构在降低工程造价方面有显著的优势。为此，结合工程实例，研究土钉墙支护型式的设计变量对基坑支护结构的整体安全性、稳定性和造价的影响程度是很有意义的。在对本方案设计变量初步选择的过程中，通过使用以下流程展开优化：

1) 可能方案集合——常用的基坑支护方案有 n 种，则可能方案集为这 n 类方案的集合，用 $P = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_n | n \in N\}$ 表示。

2) 可行性条件——依照基坑工程 A 的基坑面积、开挖深度、土层的地质条件等，在可能方案集 $P = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_n | n \in N\}$ 中选出 m 种可用于基坑工程 A 支护方案。

3) 可行方案集合——适合基坑工程 A 的 m 种支护方案形成的集合称为基坑工程 A 的可行方案集合，用 $P' = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_m | m \in N\}$ 表示。

4) 用户意向空间——用户感兴趣的方案数量用 k 表示。各项方案用 t_1, t_2, \dots, t_k 表示，根据用户的要求标准，从 1 开始逐次增高，将标准 1 做为评价好坏临界指标，好与坏的模糊评价分别表示为 a 和 a^{-k} ， a 大于 1。用户的意向空间为这些指标的乘积 $T = t_1 \cdot t_2 \cdot t_3 \cdot \dots \cdot t_k$ ， $k \in N$ 。

5) 最优方案集——根据客户的意向，从最优方案集中选取最高的 M 个方案称为最优方案集。

3.3. 迭代计算结果

依照上节描述的土钉墙的优化条件和表 1 中描述工程地质条件，经过 MATLAB 中遗传算法工具包迭代计算等[6]，迭代次数和目标函数解的关系等[7]如图 2、图 3 所示。

从图 2 和图 3 可以看出，遗传算法使得种群趋于一致，收敛效果很好，达到了预期效果。

4. 计算结果的分析

4.1. 遗传算法与传统经典算法对比

土钉墙支护结构的设计参量如表 2、表 3 所示。

经计算，可得基坑周围的平均荷载值为 21 kPa，钢筋的价格为 4550 元/t，水泥砂浆的价格为 410 元/m³。

原基坑工程设计方案是设计者根据经验理论和类似基坑支护工程设计出的方案，原设计方案结果如表 4 所示。

根据第 3 章叙述的优化设计方法，得到土钉墙的优化设计结果如表 4，表 5 所示。

对表 4 和表 5 分析可得，土钉根数减少一根，土钉长度明显降低，钻孔直径由 150 mm 降低到

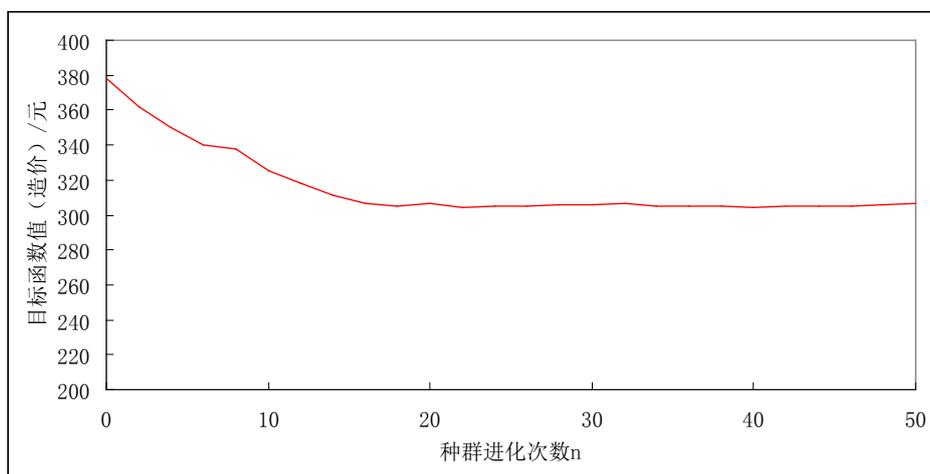


Figure 2. Convergence process of genetic algorithm on 50 times evolution
图 2. 遗传算法进化 50 次收敛过程

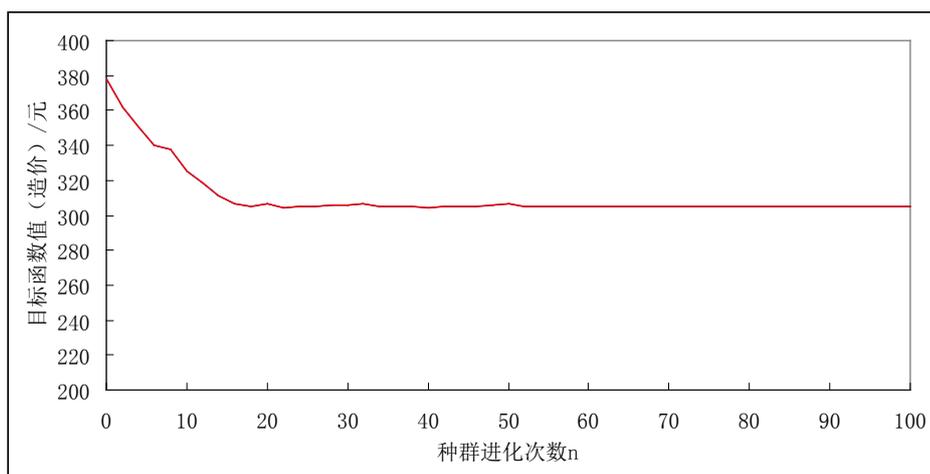


Figure 3. Convergence process of genetic algorithm on 100 times evolution
图 3. 遗传算法进化 100 次收敛过程

Table 2. Parameters of optimal design for soil nailed wall

表 2. 土钉墙优化设计参量

土钉墙基底地基承载力标准值(kPa)	土钉倾角	土钉墙基底的摩擦系数	土钉钢筋等级	土钉整体滑动安全系数
400	10°	0.3	II	1.3

Table 3. Design parameters for concrete surface

表 3. 混凝土面层设计参量

面层插入基坑底深度(m)	混凝土面层强度等级	钢筋网的网格尺寸(mm)	混凝土面层厚度(mm)	钢筋网的钢筋直径(mm)
0.2	C25	150	100	8

120 mm, 优化后的设计方案单位工程造价降低 18.8%。

从上述结果分析中可以看出, 使用遗传算法理论对土钉墙支护结构进行优化设计, 可以有效地降低支护结构的各项设计变量和工程造价。

4.2. 遗传算法下不同水平间距优化对比

从土钉墙优化设计中可知, 在施工过程中, 保证土钉墙支护结构每一处都能够满足最低安全系数的前提下, 土钉墙支护结构的构件达到极限强度, 这样得到的设计方案是最优方案。在计算土钉墙支护结构的土钉长度时, 应考虑土钉的孔径、钢筋的直径、土钉的倾角、水平间距、竖向间距。根据以往的工程案例, 发现钻孔直径对土钉墙支护结构的工程造价影响不大, 在此不再详细分析。土钉的密集程度对土钉墙的整体稳定性影响很大, 两者呈正比关系, 土钉布置的越密集, 基坑坑壁的整体稳定性越高, 但同时会加大土钉的使用量, 造成工程造价的提高。土钉的密集程度由土钉竖向间距、土钉的水平间距和土钉的道数三者决定, 由关系式 $n \leq H/S_v$ (n 为土钉的道数) 可知, 土钉的竖向间距直接影响土钉的道数。因此, 以下分析中, 对钻孔直径 D 取定值为 150 mm, 在合理范围内对土钉的水平间距取不同的定值, 研究其土钉的直径、竖向间距、长度和工程造价之间的关系。

水平间距 S_h 在 (1.2, 2.0) 区间内, 分别取 $S_h = 1.2, 1.4, 1.5, 1.6, 1.8$, 进行优化后, 得出的结果分别见表 6~表 10。

分析表 6~表 10 可知:

a、土钉的水平间距对土钉墙的工程造价影响不显著, 单位工程造价随着土钉水平间距的增大呈现先减小后增大的趋势, 当土钉水平间距为 1.4 m 时, 单位工程造价最低;

Table 4. Original project of soil nailing wall

表 4. 土钉墙的原工程设计方案

土钉根数	土钉长度 l_i (m)	水平间距 S_h (m)	竖向间距 S_v (m)	钢筋直径 D (mm)	钻孔直径 D (mm)	$f(x)$ (元/m ²)
1	7	1.5	1.3	18	150	
2	7	1.5	1.3	18	150	
3	6	1.5	1.2	18	150	374
4	6	1.5	1.2	22	150	
5	6	1.5	1.2	25	150	

Table 5. Results of optimal design for soil nailing wall

表 5. 土钉墙的优化设计结果

土钉根数	土钉长度 l_i (m)	水平间距 S_h (m)	竖向间距 S_v (m)	钢筋直径 D (mm)	钻孔直径 D (mm)	$f(x)$ (元/m ²)
1	6	1.5	1.5	18	120	
2	7	1.5	1.5	18	120	
3	7	1.5	1.5	18	130	305
4	4	1.5	1.5	18	130	

Table 6. Optimization results of $S_h = 1.2$

表 6. 当 $S_h = 1.2$ 时的优化结果

土钉根数	土钉长度 l_i (m)	水平间距 S_h (m)	竖向间距 S_v (m)	钢筋直径 D (mm)	钻孔直径 D (mm)	$f(x)$ (元/m ²)
1	6.77	1.2	1.4	18	150	
2	6.01	1.2	1.4	18	150	
3	6.83	1.2	1.4	20	150	345
4	5.21	1.2	1.6	18	150	

Table 7. Optimization results of $S_h = 1.4$ **表 7.** 当 $S_h = 1.4$ 时的优化结果

土钉根数	土钉长度 l_i (m)	水平间距 S_h (m)	竖向间距 S_v (m)	钢筋直径 D (mm)	钻孔直径 D (mm)	$f(x)$ (元/m ²)
1	5.79	1.4	1.4	20	150	307
2	6.82	1.4	1.6	18	150	
3	7.35	1.4	1.4	20	150	
4	4.63	1.4	1.6	18	150	

Table 8. Optimization results of $S_h = 1.5$ **表 8.** 当 $S_h = 1.5$ 时的优化结果

土钉根数	土钉长度 l_i (m)	水平间距 S_h (m)	竖向间距 S_v (m)	钢筋直径 D (mm)	钻孔直径 D (mm)	$f(x)$ (元/m ²)
1	6.00	1.5	1.4	18	150	314
2	7.18	1.5	1.4	18	150	
3	7.72	1.5	1.4	20	150	
4	4.83	1.5	1.6	22	150	

Table 9. Optimization results of $S_h = 1.6$ **表 9.** 当 $S_h = 1.6$ 时的优化结果

土钉根数	土钉长度 l_i (m)	水平间距 S_h (m)	竖向间距 S_v (m)	钢筋直径 D (mm)	钻孔直径 D (mm)	$f(x)$ (元/m ²)
1	6.31	1.6	1.3	18	150	322
2	7.13	1.6	1.3	20	150	
3	8.06	1.6	1.6	20	150	
4	6.48	1.6	1.6	22	150	

Table 10. Optimization results of $S_h = 1.8$ **表 10.** 当 $S_h = 1.8$ 时的优化结果

土钉根数	土钉长度 l_i (m)	水平间距 S_h (m)	竖向间距 S_v (m)	钢筋直径 D (mm)	钻孔直径 D (mm)	$f(x)$ (元/m ²)
1	6.98	1.8	1.3	20	150	334
2	7.70	1.8	1.3	20	150	
3	8.91	1.8	1.6	22	150	
4	7.00	1.8	1.6	22	150	

b、在支护高度方向，土钉长度变化趋势为第一根和第四根土钉长度小于第二根和第三根土钉长度，得出中部的土钉受到的作用力相对较大；

c、在本工程案例中，土层①为杂填土和素填土，成分复杂，较松散，相对而言，在土层①中的土钉密集要大。在土钉水平间距增大的情况下，为保证土层①的受力，要增长第一排土钉的长度；

d、土钉总根数没有变化，可知土钉水平间距对土钉竖向间距的影响不大。

5. 结论

1) 采用遗传算法对基坑支护进行优化设计，详细介绍了遗传算法的具体步骤：编码→原始种群的生成→适应度值评价检测→选择、交叉、变异→终止条件判断，并使用 MATLAB 中的遗传算法对土钉墙

支护进行了优化设计,建立了土钉墙支护结构的优化步骤及优化流程图,降低了工程造价。

2) 土钉根数减少一根,土钉长度明显降低,钻孔直径由 150 mm 降低到 120 mm,优化后,单位工程造价降低了 18.8%;

3) 土钉的水平间距对土钉墙的工程造价影响不显著,单位工程造价随着土钉水平间距的增大呈现先减小后增大的趋势,当土钉水平间距为 1.4 m 时,单位工程造价最低;

4) 在支护高度方向,土钉长度变化趋势为第一根和第四根土钉长度小于第二根和第三根土钉长度,中部的土钉受到的作用力相对较大;

5) 土钉总根数没有变化,可知土钉水平间距对土钉竖向间距的影响不大。

参考文献 (References)

- [1] 周海清. 面向对象遗传算法及其在抗滑桩优化设计中的应用[J]. 岩土工程技术, 2003(6): 86-88.
- [2] Cho, H., Hajela, P. and Lee, E. (1995) Some Considerations about the Failure Mechanism of Nailed Walls during Construction. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 32,126A.
- [3] 徐洪泉, 罗海亮, 李春生, 叶以挺. 基于遗传算法的深基坑桩锚支护结构的设计优化与 MATLAB 实现[J]. 公路工程, 2012, 37(3): 158-161.
- [4] 周瑞忠, 潘是伟. 基于遗传算法的深基坑支护结构优化设计[J]. 土木工程学报, 2004, 37(6): 87-91.
- [5] 丁若冰. 基于聚类划分子种群的多种群遗传算法[J]. 四川理工学院学报(自然科学版), 2014, 27(3): 33-36.
- [6] 周宇, 黄俊南. 模糊数学在深基坑支护方案选择中的应用[J]. 建筑技术开发, 2003, 30(4): 16-18.
- [7] 陈磊, 霍永亮. 利用改进的遗传算法求解非线性方程组[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2015(1): 23-27.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org