

深基坑桩锚支护协同演化优化设计

Co-evolution optimization of anchored piles in row for deep foundation pit

吴恒, 周东, 李陶深, 欧孝夺, 王业田
(广西大学土木工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 将协同演化思想应用于基坑桩锚支护优化设计中, 成功开发了深基坑桩锚支护优化设计系统。协同演化方法提供了模拟问题空间不断变化的演化机制, 是一种高效的优化算法, 适合于深基坑支护这一复杂系统的优化。工程实践表明, 该方法具有明显的优化效果, 可作为深基坑支护优化设计的一种重要手段。给出了协同演化模型、优化目标函数、全部约束条件及其处理方法以及系统实现的几项关键技术。

关键词: 遗传算法; 协同演化; 优化; 桩锚支护; 深基坑

中图分类号: TU 473.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2002)04-0465-06

作者简介: 吴恒(1956-), 男, 湖北黄梅人, 中科院博士, 广西大学教授, 博士生导师, 主要从事深基坑开挖支护、岩土介质与结构相互作用及城市地质环境等研究。

WU Heng, ZHOU Dong, LI Tao-shen, OU Xiao-duo, WANG Ye-tian

(School of Civil Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: In this paper, the idea of co-evolution is applied to the optimization of retaining and protecting structure for deep excavation, and the system of optimization of anchored piles in row has been developed successfully. For the co-evolution algorithm provides an evolutionary mechanism to simulate everchanging problem space, it is an optimization algorithm that is highly effective, especially to be applied to the optimization of complicated system of retaining and protecting for deep foundation pit. It is shown by engineering practice that the co-evolution algorithm has obvious optimization effect, so it can be an important method of optimization of retaining and protecting for deep foundation pit. The authors discuss the co-evolution model, object function, all kinds of constraint conditions and their disposal methods, and several key techniques of system realization.

Key words: genetic algorithm; co-evolution; optimization; anchored piles in row; deep foundation pit

1 前言*

在各种深基坑围护技术中, 桩锚支护结构以其效果好、适应性强和施工简便等特点, 在我国得到了广泛应用。桩锚支护的一般设计步骤^[1]为: (1) 选择支护桩类型和锚杆层数, 即支护方案设计; (2) 初选支护结构各细部尺寸和材料参数, 即细部结构设计; (3) 进行计算分析, 包括桩的嵌固深度验算、锚杆承载力验算、桩身内力计算、配筋计算等, 通过计算对各细部初选参数做出修改和调整, 使之满足各种验算要求; (4) 对比多个方案, 找出造价最低的方案作为基坑支护的最终设计。

通常设计者需要对支护方案和细部结构进行多次调整、反复验算, 才能使得各计算步骤均满足设计要求。但这样得到的设计往往只是一个“可行”解, 而不一定是“最优”解。对于每一种支护方案, 其细部设计参数有很多, 它们都直接或间接地影响到工程投资。因此, 如何寻找一组最佳设计参数, 以达到既经济又安全, 是桩锚支护设计的一个重要问题。这是一个复杂的优化设计问题, 为此, 笔者在文献[2]中把遗传算法引入深基坑支护优化设计中来, 研究表明, 遗传算法的引入为深基坑支护优化设计问题闯出了一条新的途径^[2,3]。然而, 由于深基坑支护优化设计一般包括方

案优选与细部结构优化两个层次, 最初提出的算法比较适用于单层次优化问题, 为此, 笔者探索了另一种适用于深基坑支护优化设计问题的协同演化算法^[4]。

2 桩锚支护优化设计模型

2.1 桩锚支护体系及其优化设计目标

桩锚支护优化设计属于一项系统工程, 是深基坑支护设计体系中的一个子系统, 可以划分为方案优化设计和细部结构优化设计两个层次。支护方案由桩排与锚杆两个子方案构成, 是排桩类型(钻孔灌注桩、人工挖孔桩和预制桩等)与锚杆设置(无锚杆即悬臂式、一层锚杆、二层锚杆和三层锚杆)的不同组合形式(图1), 方案优化设计就是在给定的工程信息、场地水文工程地质条件、环境条件、施工条件等已知条件下, 寻找满足各种约束且造价最低的一种组合; 细部结构优化设计则是针对某一确定的支护方案所进行的桩、锚细部结构优化, 包括桩、锚的细部结构尺寸、配筋方式、材料参数及材料用量、顶部圈梁的设计等, 使得该结构满

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59868001); 广西区青年科学基金资助项目(桂科青 9912013)

收稿日期: 2001-07-26

足各种约束,同时造价最低。方案设计对细部结构设计具有指导作用,细部结构设计结果又可反馈回方案设计中以修改或调整方案设计。无论是方案优化还是细部结构优化,其优化目标是共同的,即桩锚支护体系的总造价最低。其数学模型为:

$$\begin{aligned} \min f(\mathbf{X}) = & \text{基坑桩锚支护总造价, } \mathbf{X} \in U \subset E^n \\ \text{s. t. } & h_v(\mathbf{X}) = 0, v = 1, 2, \dots, p \\ & g_u(\mathbf{X}) \leq 0, u = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $f(\mathbf{X})$ 为目标函数,即工程造价计算函数,套用《国家统一建筑工程基础定额》及《各省市建筑工程单位估价表》。

$\mathbf{X}$ 是由 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 组成的向量,是设计过程中要优选的量,即设计变量。在方案设计层次上,其设计变量仅两个,即排桩类型(Pt)与锚杆设置(Np);在细部结构设计层次上,则包括以下两方面的设计变量:①支护桩:桩径(Φ)、桩边距(S)、嵌固深度(h_d)、砼强度等级(Pct)、配筋方式(Ms)、钢筋类别(Pst)等;②锚杆:锚杆设置深度(h_a)、水平间距(PAr)、倾角(θ)、自由段长度(l_f)、锚固段长度(l_m)、锚固段直径(D)、锚筋类别(Ast)、水泥砂浆强度等级(Cg)等。

s. t. 表示需要满足的约束条件, $h_v(\mathbf{X})$ 为等式约束条件, p 为其数目, $g_u(\mathbf{X})$ 表示不等式约束条件, m 表示其数目。

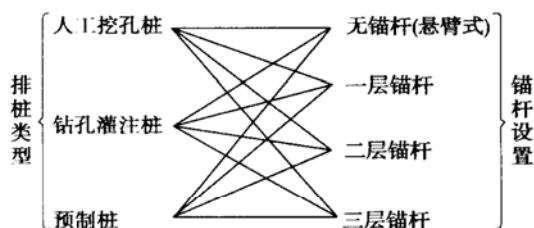


图1 排桩-锚杆支护体系

Fig. 1 Supporting system of anchored piles in row

上述桩锚支护优化设计数学模型在不同设计层次或演化空间中又有不同的表现形式。

2.2 方案优化数学模型

设支护方案种群空间(染色体空间)为 $\{\text{chrom}\}$, 求方案个体 $\text{chrom}' \in \{\text{chrom}\}$, 使得 chrom' 对应的方案总造价最小, 即

$$\min TotalCost = \left| \text{feasible} \left| \sum_{i=1}^2 Cost_{i, S_i} \right| \right| \quad (2)$$

式中 $Cost_{i, S_i}$ 表示方案空间中某一方案个体第 i 个子方案(取第 S_i 个可选值)的造价, 由于总的支护方案仅由排桩与锚杆两个子方案构成, 因此, i 的取值为 1 和 2; $\text{feasible}\{\}$ 表示在方案种群空间中求取满足约束条件的可行个体。

方案优化的目标是使方案总造价 $TotalCost$ 在满足约束条件的情况下取得最小值。

2.3 细部结构优化数学模型

桩锚支护体系的细部结构优化设计是在方案的各子方案选定的条件下进行的, 其数学模型是为细部结构优化而进行的数据结构设计的基础。

设与某确定方案对应的某细部结构种群空间为 $\{\text{xbchrom}\}$, 求细部结构个体 $\text{xbchrom}' \in \{\text{xbchrom}\}$, 使得 $\text{xbchrom}'$ 对应的设计总造价:

$$\begin{aligned} \min TotalCost = & \left| \text{feasible} \left| \sum_{i=1}^2 Cost_{i, S_i} \right| \right| \\ Cost_{i, S_i} = & f(\mathbf{X}_{i, S_i}) \\ = & f(X_{i, S_i, 1}, X_{i, S_i, 2}, \dots, X_{i, S_i, k}, \dots, X_{i, S_i, l}) \\ X_{i, S_i, k} \in & \text{XBP}ar_{i, S_i, k}, k = 1, 2, \dots, l \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $Cost_{i, S_i}$ 表示在与某一方案(第 i 个子方案取第 S_i 个可选值)相对应的细部结构空间中, 某一个体的第 i 个子方案(取第 S_i 个可选值)的造价, 它是向量 $\mathbf{X}_{i, S_i}$ 的函数; $\mathbf{X}_{i, S_i} = \{X_{i, S_i, 1}, X_{i, S_i, 2}, \dots, X_{i, S_i, k}, \dots, X_{i, S_i, l}\}$ 为某方案(第 i 个子方案取第 S_i 个可选值)中第 i 个子方案所需优化的设计变量向量, 是细部结构染色体的一部分, $X_{i, S_i, k}$ 为其中的第 k 个设计变量, l 为其设计变量的个数; i 取 1 和 2(子方案数为 2), 将这些 $\mathbf{X}_{i, S_i}$ 连接起来, 即 $\{\mathbf{X}_{1, S_1}, \mathbf{X}_{2, S_2}\}$, 就构成了某个细部结构种群的整条染色体。XBP $ar_{i, S_i, k}$ 为设计变量 $X_{i, S_i, k}$ 的值域(离散集), 它限定了 $X_{i, S_i, k}$ 的取值范围。

由公式(2), (3)可以看出, 方案种群和各细部结构种群演化的目标均为寻求最低造价, 由此在方案种群和各细部结构种群之间建立起一个纽带, 将方案种群的演化和各细部结构种群的演化有机地联系在一起。基于这一点, 方案种群个体和各细部结构种群个体的适应值都可通过对造价进行适当的数学变换而得到, 从而为评价个体的好坏提供了一个统一的标准。

3 协同演化模型及算法

3.1 协同演化模型

在桩锚支护优化设计中, 方案设计和细部结构设计是两个不同空间、不同层次的设计问题, 前者是问题空间, 也叫方案空间, 是全体支护方案的集合; 后者是解(设计)空间, 也叫细部结构空间, 是与各支护方案相对应的全体细部结构的集合。这两个空间既相互独立又相互联系、相互影响。桩锚支护优化设计就是对方案空间和细部结构空间进行交替搜索的过程, 对方案

空间的搜索,使支护方案发生改变,为细部结构空间的搜索提供新的焦点,由此开辟一个新的细部结构空间;对细部结构空间的搜索,将获得满足支护方案要求的细部结构解;细部结构解的产生又影响着对方案空间的搜索,使原支护方案发生新的改变,在新的支护方案下,进一步寻求新的细部结构解。……,如此不断地搜索下去,直至找到符合设计要求的支护方案和细部结构。上述基于搜索的设计思想,可用图2所示的协同演化模型来模拟。方案空间以 P 表示,细部结构空间以 S 表示。

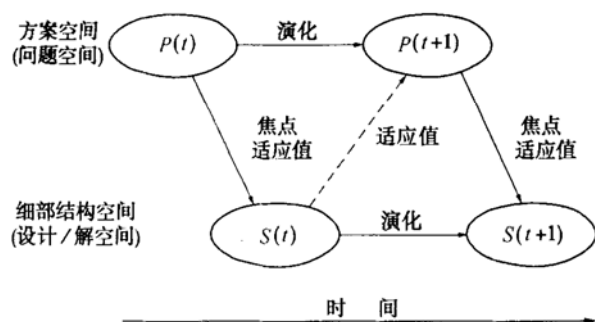


图2 协同演化模型

Fig. 2 The co-evolution model

(1) 整个搜索过程有两个不同的搜索空间,即方案空间与细部结构空间。

(2) 沿水平方向的移动是演化过程,包括方案空间的演化与细部结构空间的演化,两个空间的演化均以简单遗传算法(SGA)为基础^[5,6]。

方案空间演化:从 $P(t)$ 演化到 $P(t+1)$, $P(t+2)$, ..., 如此进行下去;细部结构空间演化:从 $S(t)$ 演化到 $S(t+1)$, $S(t+2)$, ..., 如此进行下去。这里, t , $t+1$, $t+2$, ..., 表示演化代数。

(3) 沿斜线方向的移动是目标驱动求解的过程,即“方案设计指导细部结构设计”(斜向下的箭头方向)和“细部结构设计调整方案设计”(斜向上的箭头方向)。

斜向下的箭头:由问题到设计求解的过程。在桩锚支护优化设计中,这是方案设计指导细部结构设计的过程,其指导作用有二:一是方案种群 $P(t)$ 中的各个个体都开辟一个新的细部结构子空间,并为该细部结构子空间的演化提供目标(焦点);二是方案种群 $P(t)$ 中的每一个个体都为相应的细部结构子空间的种群提供适应值度量的依据。

斜向上的箭头:由设计调整问题定义的过程。在桩锚支护的优化设计中,这是细部结构设计影响方案设计的过程,这种影响主要是通过将细部结构子空间的演化结果即细部结构解返回给方案空间的相应个体,并且为该方案个体提供适应值度量的依据而实现的。

可见,在整个搜索过程中,两个状态空间相互作用,每个空间的演化都是在另一个空间的最新一代的

指导下进行的。

3.2 协同演化算法

与上述协同演化模型相对应,深基坑桩锚支护协同演化算法可描述为:

```
{t:=0; 初始化生成方案种群 P(t); number:=count(P(t));
```

```
while (方案种群演化终止条件不满足)
```

```
{I:=0;
```

```
while (I≤number) do
```

```
{对于方案种群当前个体  $P_i(t)$  做如下操作: 随机生成包含 M 个个体的细部结构种群  $S_i(t)$ ; 对种群  $S_i(t)$  执行遗传算法, 演化 m 代;
```

```
if (细部结构演化获得可行解)
```

```
{将细部结构演化结果传递给  $P_i(t)$ ; 并据此计算  $P_i(t)$  的适应值;}
```

```
else
```

```
{给当前  $P_i(t)$  赋一个足够小的适应值;}
```

```
I:=I+1;
```

```
}
```

```
统计方案种群 P(t) 中个体的适应值; 在 P(t) 中选择并生成 t+1 代方案种群 P(t+1); t:=t+1; 对方案种群 P(t+1) 执行遗传算法操作;
```

```
}
```

```
将演化的最终结果输出;
```

```
}
```

4 系统实现的几项技术

4.1 系统数据结构

(1) 染色体结构定义

方案种群染色体:在方案空间,其设计变量仅两个,即排桩类型(P_t)与锚杆设置(N_p),因此,染色体结构可定义为 $Y=(P_t, N_p)$ 。

细部结构种群染色体:考虑到不同桩型和锚杆设置方式,其对应的细部结构设计变量不尽相同,因此,细部结构种群染色体主要定义以下四种结构:

无锚杆桩(悬臂桩): $Y_0=(\Phi, S, h_d, Pct, Ms, Pst)$; 一层锚杆桩: $Y_1=(\Phi, S, h_d, Pct, Ms, Pst, h_{a1}, PAR_1, \theta_1, l_{f1}, l_{m1}, D_1, Ast_1, Cg_1)$; 二层锚杆桩: $Y_2=(\Phi, S, h_d, Pct, Ms, Pst, h_{a1}, PAR_1, \theta_1, l_{f1}, l_{m1}, D_1, Ast_1, Cg_1, h_{a2}, PAR_2, \theta_2, l_{f2}, l_{m2}, D_2, Ast_2, Cg_2)$; 三层锚杆桩: $Y_3=(\Phi, S, h_d, Pct, Ms, Pst, h_{a1}, PAR_1, \theta_1, l_{f1}, l_{m1}, D_1, Ast_1, Cg_1, h_{a2}, PAR_2, \theta_2, l_{f2}, l_{m2}, D_2, Ast_2, Cg_2, h_{a3}, PAR_3, \theta_3, l_{f3}, l_{m3}, D_3, Ast_3, Cg_3)$ 。各符号含义同公式(1),脚标 1,

2, 3 分别代表各锚杆层号。

(2) 染色体编码

对染色体中变量进行编码的方式多种多样, 常用的有二进制编码、实数编码等。无论是方案种群还是细部结构种群, 我们均采用二进制编码。在桩锚支护问题中, 我们将设计变量都看做是离散的, 其值域存储在文本文件中, 系统运行时自动将其读入, 这样, 用户可通过编辑该文本, 随时改变系统演化的精度和计算工作量。变量编码分两步: 首先, 将离散变量进行整数编码; 其次, 对整数进行二进制编码。对设计变量编码后, 将代表各设计变量取值的二进制串首尾相接, 即得到染色体串。方案种群染色体串长度为 4, 编码空间为 $2^4 = 16$; 细部结构种群的染色体结构有 4 种, 其位串长度分别为 15, 39, 63, 87, 因而其编码空间分别为 2^{15} , 2^{39} , 2^{63} , 2^{87} 。

4.2 适应值函数构造

桩锚支护问题的适应值是目标函数即工程总造价的数学变换, 可参照“下界构造法”, 采用以下形式:

$$Fit(f(X)) = \frac{1}{f(X)} flag + (1 - flag) \frac{c}{f(X) + \theta \Phi(X)} \quad (4)$$

式中 $f(X)$ 为目标函数值, 在细部结构空间, 为各个个体的总造价(万元); 在方案空间, 为与方案个体相对应的细部结构空间演化得到的最优个体的造价(万元)。

$flag$ 为个体的可行性标志, $flag \in \{0, 1\}$ 。若细部结构空间设计准则约束得到满足, 则该个体是可行的, $flag = 1$, 否则为不可行, $flag = 0$ 。 c 为演化空间标志, $c \in \{0, 1\}$ 。方案空间, $c = 0$; 细部结构空间, $c = 1$ 。 $\theta \Phi(X)$ 为与细部结构设计准则约束相关的惩罚项, 各符号含义见式(5)。

4.3 约束条件及其处理

在方案种群和细部结构种群演化中, 其个体均需满足一定的约束。这些约束主要基于工程经验和各类基坑支护设计规范^[7, 8], 受制于场地的水文地质工程地质条件及周围环境因素(如邻近建筑、地下管线等)。不同的支护方案有不同的细部结构需要设计, 因此, 细部结构优化约束是随方案变化的, 在细部结构优化设计中要区别不同性质的约束。

(1) 方案种群的约束

a) 设计变量约束

排桩类型(Pt): 钻孔灌注桩、人工挖孔桩和预制桩; 锚杆设置(Np): 无锚杆(悬臂式)、一层锚杆、二层锚杆和三层锚杆。

b) 设计准则约束

在软土地带中, 基坑开挖深度 $h > 5$ m 时, 不宜采

用悬臂式支护结构; 预制桩不宜采用悬臂式。

(2) 细部结构种群的约束

a) 设计变量约束

桩径 Φ : 人工挖孔桩为 0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4 m; 钻孔灌注桩为 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 1.2, 1.4 m; 预制桩为 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50, 0.55, 0.60 m(边长)。

桩边距 S : 人工挖孔桩为 1.0 Φ , 1.3 Φ , 1.6 Φ , 1.9 Φ , 2.2 Φ , 2.5 Φ ; 钻孔灌注桩为 0.0 Φ , 0.4 Φ , 0.8 Φ , 1.2 Φ , 1.6 Φ , 2.0 Φ ; 预制桩为 1.5 Φ , 1.7 Φ , 1.9 Φ , 2.1 Φ , 2.3 Φ , 2.5 Φ 。

桩嵌固深度 h_d : 0.2h, 0.25h, 0.3h, 0.35h, 0.4h, 0.45h, 0.5h, 0.55h, 0.6h(悬臂桩及单支点桩: $h_d \geq 0.3h$, 多支点桩: $h_d \geq 0.2h$, h 为基坑开挖深度)。

桩身砼强度等级 Pct : C20, C25, C30, C35, C40, C45。

桩身配筋方式 Ms : 预制桩采用矩形截面对称配筋; 圆形截面悬臂桩采用受拉侧配置纵向受力钢筋, 其余按构造要求配置纵向构造钢筋或采用沿周边均匀配置纵向受力钢筋; 圆形截面支点桩采用沿截面受压区与受拉区周边对称配置局部均匀纵向受力钢筋, 其余按构造要求配置纵向构造钢筋或采用沿周边均匀配置纵向受力钢筋。

桩身配筋类别 Pst : 普通钢筋, I ~ II 级。

锚杆设置深度: 上下两层锚杆间距 ≥ 2 m, 因此, 第一层锚杆 h_{a1} : 0.1h, 0.2h, 0.3h, 0.4h, 0.5h; 第二层锚杆 h_{a2} : $h_{a1} + (1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0) \times 2$; 第三层锚杆 h_{a3} : $h_{a2} + (1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0) \times 2$ 。

锚杆水平位置 PAr : 依赖于桩的布置, 主要有以下几种情况: 一桩一锚, 二桩一锚, 三桩一锚。并要求: 水平间距不小于 1.5 m, 不大于 4.0 m。

锚杆倾角 θ : 15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45°。

自由段长度 l_f ($l_f \geq 5$): $[1 + (0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5)] \times l_{f0}$, $l_{f0} = l_i \sin(45^\circ - \varphi_k/2) / \sin(45^\circ + \varphi_k/2 + \theta)$ 。其中: θ 为锚杆倾角; l_i 为锚杆锚头中点至基坑底面以下基坑外侧荷载标准值与基坑内侧抗力标准值相等处(O 点)的距离; φ_k 为 O 点以上各土层厚度加权内摩擦角标准值。

锚固段长度 l_m ($l_m \geq 4$): 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 m。

锚固段直径 D : 0.075, 0.091, 0.110, 0.130, 0.150 m。

锚筋类别 Ast : 普通钢筋、预应力钢筋及钢绞线。

锚固段水泥砂浆强度等级 Cg : M10, M15。

以上所列各设计变量值域为系统默认设置, 用户可随时通过修改“设计变量值域文本”文件来改变设计

变量约束。

b) 设计准则约束

对桩的嵌固深度要求:

对于悬臂式排桩: $h_p \sum E_{pj} - 1.2 \gamma_0 h_a \sum E_{ai} \geq 0$ 。其中: $\sum E_{pj}$ 为桩底以上基坑内侧各土层水平抗力标准值 e_{pj} 的合力之和; h_p 为合力 $\sum E_{pj}$ 作用点至桩底的距离; $\sum E_{ai}$ 为桩底以上基坑外侧各土层水平荷载标准值 e_{ai} 的合力之和; h_a 为合力 $\sum E_{ai}$ 作用点至桩底的距离; γ_0 为基坑侧壁重要性系数。

对于单层支点排桩: $h_p \sum E_{pj} + T_{cl}(h_{T1} + h_d) - 1.2 \gamma_0 h_a \sum E_{ai} \geq 0$ 。其中: h_{T1} 为支点至基坑底面的距离; T_{cl} 为支点力, 可由下式确定: $T_{cl} = (h_{a1} \sum E_{ac} - h_{p1} \sum E_{pc}) / (h_{T1} + h_{cl})$ 。在 T_{cl} 表达式中, $\sum E_{ac}$ 为设定弯矩零点位置以上基坑外侧各土层水平荷载标准值的合力之和; h_{a1} 为合力 $\sum E_{ac}$ 作用点至设定弯矩零点的距离; $\sum E_{pc}$ 为设定弯矩零点位置以上基坑内侧各土层水平抗力标准值的合力之和; h_{p1} 为合力 $\sum E_{pc}$ 作用点至设定弯矩零点的距离; h_{cl} 为基坑底面至设定弯矩零点位置的距离, 可由下式确定: $e_{alk} = e_{plk}$, e_{alk} 为水平荷载标准值, e_{plk} 为水平抗力标准值。

对于多层支点排桩: 采用圆弧滑动简单条分法验算桩与坑壁土体的整体稳定性。

对桩的水平位移要求: $\delta \leq \delta_{\max}$, 其中 δ 为桩顶水平位移(mm), $\delta_{\max}$ 为水平位移界限值(mm)。

对锚杆的要求: 锚杆的上覆土层厚度为 $h_a + |l_f + l_m/2| \sin \theta \geq 4$ 。锚杆自由段长度为 $l_f \geq 5.0$ 。锚杆承载力为 $T_d \leq N_u \cos \theta$, 其中: T_d 为锚杆水平拉力设计值, 由 $T_d = 1.25 \gamma_0 T_{cl}$ 计算; N_u 为锚杆轴向受拉承载力设计值, $N_u = (1/\gamma_s) \pi D \sum q_{sik} l_i$, γ_s 为锚杆轴向受拉抗力分项系数, 可取 1.3, l_i 为第 i 层土中锚固段长度; q_{sik} 为土体与锚固体的极限摩阻力标准值。

锚杆杆体截面积: 普通钢筋为 $A_{p0} \geq T_d / (f_y \cos \theta)$; 预应力钢筋为 $A_{p0} \geq T_d / (f_{py} \cos \theta)$ 。式中 f_y, f_{py} 分别为普通钢筋、预应力钢筋抗拉强度设计值; T_d 为锚杆水平拉力设计值。

(3) 约束条件的处理

遗传算法是一种无约束优化方法, 求解桩锚支护的优化设计问题, 需将其转化为无约束问题, 为此, 在演化过程中, 我们采用以下几种方法解决:

对于设计变量约束, 在两个演化空间都必须得到严格满足, 为此, 我们主要采取三种方法: 一是对设计变量值域进行适当调整, 尽可能使数据代码充满整个编码空间, 从而减少设计变量的越界; 二是对演化过程

中个别设计变量的越界, 采用修正算子进行调整; 三是对其它一些设计变量越界, 由系统随机重新生成新的个体(执行遗传操作)。

对于设计准则约束, 在方案空间必须得到严格满足, 否则, 相应的细部结构演化将变得毫无意义, 由于方案空间中的设计准则约束较少, 因而很容易通过修正算法实现。在细部结构空间, 设计准则约束主要采用惩罚函数法来处理, 即通过惩罚不可行解将约束问题转化为无约束问题。广义目标函数构建如下:

$$F(X) = f(X) + \theta \varphi(X) \quad (5)$$

式中 $\varphi(X)$ 为惩罚函数。细部结构设计准则约束均可表示为 $g_i(X) \geq 0, i = 1, 2, K, m$, 因此, 我们将惩罚函数设计为 $\varphi(X) = \sum_{i=1}^m |\min\{0, g_i(X)\}|$, 当个体满足某个设计准则约束时, 其惩罚强度为零, 否则将产生惩罚强度为“不满足约束程度的绝对值乘以相应的系数”的惩罚。

θ 为惩罚因子($\theta > 0$)。通常, 我们让 θ 随着演化代数的推进动态地增大, 其优点是: 在演化初期, θ 值较小, 惩罚轻微, 非可行解的生存几率较大, 其优良基因通过遗传操作得以保存下来, 有助于扩大搜索空间, 寻找到全局最优解; 在演化后期, 随着优良品种不断产生, θ 值逐渐增大, 惩罚加重, 搜索空间逐渐向最优解靠拢, 使非可行解很快被淘汰, 可有效地防止适应值的振荡, 加快收敛速度。如人工挖孔桩、一层锚杆方案所对应的细部结构种群, 其惩罚因子从 50 试探到 1000。

4.4 最优设计的确定

系统在方案空间的演化获得收敛后终止运行, 即方案空间连续代数得到的最大适应值 $Fu_{\max}$ 都没有变化或达到最大演化代数, 则计算结束, 此时与 $Fu_{\max}$ 相对应的方案和细部结构的可行解 $X^* = [Pt^*, Np^*, \Phi^*, D^*, S^*, \dots]$ 即为最优设计变量。

5 工程应用实例

某深基坑工程, 开挖深度为 10.5 m, 各土层的物理力学性质指标如表 1。地下水为潜水, 埋深 0.9 m, 主要赋存于第四系残积层中, 水量不大, 对混凝土无腐蚀性。

方案种群规模取 4, 由于方案种群设计变量较少, 所以演化在 16~18 代时其适应值已基本收敛。表 2 给出了方案种群的十个演化状态采样数据, 从种群的第一代可以看到, 系统随机产生的各个个体各不相同, 满足初始种群个体相同率不超过 3% 的要求。随着演化代数的增加, 种群中各个个体的适应值呈上升趋势, 最终收敛于某一值, 实验结果与算法预期的情形是一致的。图 3 给出了方案种群中最佳个体适应值和平均

适应值随演化代数变化的曲线。

表 1 土层物理力学性质指标
Table 1 Physical and mechanical properties of soil

土层名称	厚度 /m	重度 /(kN·m ⁻³)	粘聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)
人工填土	3.4~9.5			
粉土	3.0~7.5	19.2	42~61	14~20
粉质粘土	2.5~9.8	19.6	34~75	13~29
粉土	5.2~15.6	19.9	27~62	10~27
粉质粘土	3.0~8.3	20.2	22~68	18~28

表 2 方案种群部分演化状态采样数据

	演化代及个体											
	1				3				5			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
排桩	1	2	2	0	0	0	0	2	0	2	0	2
锚杆	2	0	2	3	2	3	2	0	3	3	3	0
适应值	113	94	129	134	86	134	86	94	134	132	134	94
	7				9				11			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
排桩	0	2	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0
锚杆	3	3	3	3	3	3	1	3	1	3	3	3
适应值	134	133	137	137	139	137	156	137	156	129	137	137
	13				15				17			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
排桩	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
锚杆	1	3	1	3	1	1	1	3	1	1	1	3
适应值	170	139	170	129	170	170	170	139	170	170	170	139

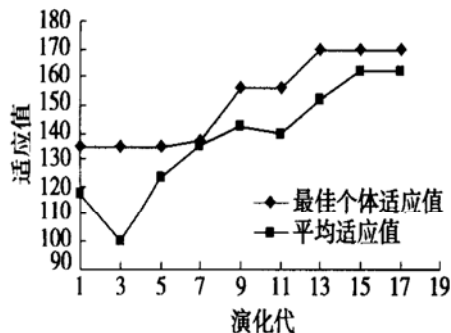


图 3 方案种群适应值随演化代变化曲线

Fig. 3 Curves of fitness vs. generation in scheme population

细部结构种群很多, 每个种群的结构复杂, 优化参数多, 染色体编码也很长, 不可能一一罗列, 这里仅给出“人工挖孔桩+ 一层锚杆”种群适应值的变化曲线(图 4)。

经系统优化分析, 采用刚度较大、造价较低的人工挖孔桩作为护坡桩, 桩长 16.8 m, 嵌固段长 6.3 m, 桩径 1200 mm, 密排并相互搭接。桩身配筋采用沿截面受压区与受拉区周边对称配置局部均匀纵向受力钢筋, 其余按构造要求配置纵向构造钢筋, 采用 18φ25。桩顶设

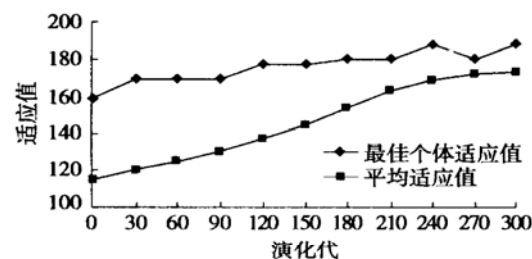


图 4 细部种群适应值随演化代变化曲线

Fig. 4 Curves of fitness vs. generation in detailing population

钢筋混凝土圈梁, 宽 1200 mm, 高 450 mm。设一层锚索, 锚固段长 17 m, 自由段长 6.5 m, 锚索采用 7φ5 (截面积 1.38 cm²), 取 5 股, 设置深度为 2 m, 倾角 35°, 一桩一锚。该优化设计结果较原设计降低造价 12.8%。

6 结 语

协同演化算法以 SGA 为基础, 对于问题空间不断变化的设计问题, 它提供了模拟问题空间不断变化的演化机制, 因而是一种高效的优化算法, 比较适用于深基坑支护这一系统工程优化, 本文对深基坑桩锚支护协同演化优化设计作了有意义的尝试。多项深基坑支护工程实践结果表明, 该方法具有明显的优化效果和重大的工程实际意义, 可作为深基坑支护优化设计的一种重要手段。在今后的工作中, 需要加强以下四方面问题的研究: (1) 研究深基坑支护自身的特点, 设计合理的协同演化算法; (2) 研究协同演化算法的适应函数的构造问题, 在实践中摸索合适的适应值度量方法; (3) 研究深基坑支护这一系统工程的体系结构, 做好方案与细部的层次划分工作; (4) 研究深基坑支护工程中各种类型的约束及其处理。

参考文献:

- [1] 杨 予. 深基坑支护优化设计[D]. 南宁: 广西大学, 1999.
- [2] 黄贵珍, 周 东. 基于遗传算法的基坑桩锚支护优化设计[J]. 桂林学院学报, 2000, 20(50): 86- 90.
- [3] 肖专文, 龚晓南, 谭昌明. 基坑土钉支护优化设计的遗传算法[J]. 土木工程学报, 1999, 32(3): 73- 80.
- [4] Maher M L, Poon J. Modeling design exploration as co evolution[J]. Microcomputers in Civil Engineering, 1996, 11(3): 195- 209.
- [5] Holland J H. Adaptation in Natural and Artificial System[M]. Ann Arbor: The University of Michigan Press, 1975.
- [6] Srinivas Mandavili, Patnaik L M. On an exact populationary model of genetic algorithm[J]. Information Sciences, 1997, 99: 37- 67.
- [7] JGJ120—99, 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [8] GBJ10—89, 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990.