

文章编号: 0451-0712(2005)06-0076-04

中图分类号: TU311.4

文献标识码: B

基于混合粒子群算法的土钉支护结构设计参数优化

尤晓晔¹, 刘大鹏^{1,2}

(1. 北京交通管理干部学院 北京市 101601; 2. 华中科技大学 武汉市 430074)

摘要: 在土层工程地质情况一定的条件下, 如何寻找一组最佳设计参数, 以达到既经济又安全的目的, 是土钉支护设计的一个重要问题。这是一个复杂的优化设计问题。就此, 提出基于混合粒子群优化(PSO)算法的基坑土钉支护优化设计方法, 以单位长度土钉墙的土钉材料造价作为优化的目标函数。该方法保持了 PSO 算法结构简单的特点, 改善了 PSO 算法的全局寻优能力, 提高了算法的收敛速度和计算精度, 不活动粒子的处理使算法避免了“早熟”现象的出现。工程实例计算表明, 该方法是进行土钉支护结构优化设计的有效方法。

关键词: 粒子群优化; 混沌; 土钉支护; 优化设计

粒子群优化(PSO)算法是一种现代启发式算法, 它是通过模拟简单的社会现象发展起来的, 和早期基于群体进化的算法比较, PSO 算法在计算速度和耗费内存上有较大的优势, 因为它只需要非常简单的数学运行和很少的几行计算机代码^[3]。与大多数进化算法不同的是, PSO 算法是通过个体间的“协作”而不是“适者生存”来搜寻最优解, PSO 算法中个体都有记忆, 这在其他的进化类算法中是没有的。PSO 算法已经得到了广泛的应用^[4~7]。

在土层工程地质情况一定的条件下, 土钉支护的设计参数有很多, 最主要的有土钉道数、土钉间距、土钉长度、土钉直径以及钢筋直径等参数。诸多的参数取值不仅关系到土钉支护的稳定性, 而且直接影响到工程的投资。显然, 土钉道数越多、间距越小、长度越长、直径越大, 则支护稳定性就越好, 但越不经济; 反之, 又不安全。因此, 如何寻找一组最佳设计参数, 以达到既经济又安全的目的, 是土钉支护设计的一个重要问题。这是一个复杂的优化设计问题。研究表明, 对复杂的优化问题, 传统的方法很容易陷入局部最优解。本文将改进 PSO 算法应用于深基坑土钉墙支护优化设计中, 以单位长度土钉墙的土钉材料造价作为优化的目标函数。工程实例计算表明, 该方法是进行土钉支护结构优化设计的有效方法。

1 优化模型

1.1 设计变量的选取

本文选取土钉道数、土钉钢筋直径、土钉孔径、土钉水平间距、土钉垂直间距和土钉长度作为设计变量, 由优化程序自动算出最优值。而将土钉入射角度、土钉钢筋等级、混凝土面层厚度、混凝土强度等级、钢筋网的钢筋直径、钢筋网的网格尺寸以及土层计算参数等变量均作为设计参量, 由设计者根据经验、规范要求或地质条件给定。

1.2 目标函数

本文取单位长度土钉墙的土钉材料造价作为目标函数, 取 1 m^3 的水泥砂浆价格为 1, 则:

$$F = C_1 \left[\sum_{i=1}^N \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) L_i / S_h \right] + C_2 \left(\sum_{i=1}^N \frac{\pi}{4} d^2 L_i / S_h \right) \quad (1)$$

式中: C_1 、 C_2 分别为 1 m^3 混凝土和 1 t 钢筋的价格; N 为土钉道数; d 为土钉钢筋直径; D 为土钉孔径; S_h 为土钉水平间距; L_i 为各道土钉的长度。

1.3 约束条件

土钉支护的约束条件可分为设计变量约束和设计准则约束。

1.3.1 设计变量约束

设计变量约束即设计变量的取值范围。根据《基

坑土钉支护技术规程》(CECS 96:97),上述各设计变量的约束条件为:土钉钢筋直径为 $18 \text{ mm} \leq d \leq 32 \text{ mm}$;土钉孔径为 $75 \text{ mm} \leq D \leq 150 \text{ mm}$;土钉道数为 $H/2 \leq N_{\text{nail}} \leq H$ (H 为基坑开挖深度, m);土钉水平间距为 $1 \text{ m} \leq S_h \leq 2 \text{ m}$;土钉垂直间距为 $1 \text{ m} \leq S_v \leq 2 \text{ m}$;土钉长度为 $0.6H \leq L \leq 1.2H$ 。

1.3.2 设计准则约束

设计准则约束,即设计的一系列要求。

1.3.2.1 土钉强度约束

$$F_{sd}N \leq 1.1 \frac{\pi d^2}{4} f_{yk} \quad (2)$$

式中: F_{sd} 为土钉的强度要求安全系数,取 1.2 ~ 1.4,基坑深度较大时取高值; d 为土钉钢筋直径; f_{yk} 为钢筋抗拉强度标准值,按《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002) 取用; N 为土钉设计内力,按式(3)计算。

$$N = \frac{PS_v S_h}{\cos\theta} \quad (3)$$

式中: θ 为土钉的倾角; P 为土钉长度中点所处深度位置上的侧压力,按文献[2] 计算。

1.3.2.2 土钉长度约束

$$L \geq L_1 + \frac{F_{sd} \cdot N}{\pi \cdot D \cdot \tau} \quad (4)$$

式中: L_1 为土钉轴线与图 1 所示倾角等于 $(45^\circ + \frac{\varphi}{2})$ 斜线的交点至土钉外端点的距离; D 为土钉孔径; τ 为土钉与土体之间的界面粘结强度; N 为土钉设计内力。

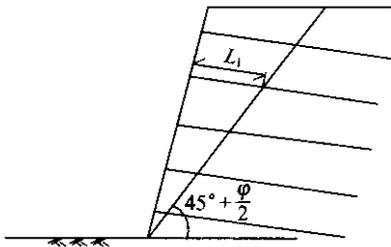


图 1 土钉长度的确定

1.3.2.3 土钉支护的外部整体稳定性约束

(1) 抗滑移稳定性约束。

$$K_q = \frac{\mu(G + qB)}{E_a} \geq 1.2 \quad (5)$$

式中: μ 为土钉墙底面与土体之间的摩擦系数; G 为土钉墙单位长度自重; q 为地面墙均布超载; B 为土钉墙等效宽度,取底部土钉的水平投影长度; E_a 为单位墙长土压力。

(2) 抗倾覆稳定性约束。

$$K_q = \frac{(G + qB) \cdot B/2}{E_a \cdot H/3} \geq 1.3 \quad (6)$$

(3) 土钉支护底面地基承载力约束。

$$\begin{cases} P \leq f \\ P_{\max} \leq 1.2f \end{cases} \quad (7)$$

式中: P 为土钉墙底面平均压力; P_{\max} 为土钉墙底面最大压力; f 为土钉墙底面地基承载力设计值。

(4) 深部整体圆弧破坏面失稳的约束。

假设整个支护连同外部土体沿深部产生圆弧滑动失稳,此时的可能破坏面在土钉的设置范围以外,按圆弧破坏面采用普通条分法,其抗滑稳定安全系数为:

$$F_s = \frac{\sum [(W_i + Q_i) \cdot \cos\alpha_i \cdot \tan\varphi_j + c_j (\Delta_i / \cos\alpha_i)]}{\sum [(W_i + Q_i) \cdot \sin\alpha_i]} \quad (8)$$

式中: W_i 、 Q_i 分别为作用于土条 i 的自重和地面、地下荷载; α_i 为土条 i 圆弧破坏面切线与水平面的夹角; Δ_i 为土条 i 的宽度; φ_j 为土条 i 圆弧破坏面所处第 j 层土的内摩擦角; c_j 为土条 i 圆弧破坏面所处第 j 层土的内聚力。

1.3.2.4 土钉支护的内部整体稳定性约束

土钉支护的内部整体稳定性约束是指边坡土体中可能出现的破坏面,发生在支护内部并穿过全部或部分土钉。假定破坏面上的土钉只承受拉力且达到最大抗力,按圆弧破坏面采用普通条分法对支护作整体稳定性分析,则:

$$F_s = \frac{\sum [(W_i + Q_i) \cos\alpha_i \tan\varphi_j + (R_k / S_{hk}) \cdot \sin\beta_k \tan\varphi_j + c_j (\Delta_i / \cos\alpha_i) + (R_k / S_{hk}) \cos\beta_k]}{\sum [(W_i + Q_i) \sin\alpha_i]} \quad (9)$$

式中: S_{hk} 为第 k 排土钉的水平间距; β_k 为第 k 排土钉轴线与该处破坏面切线之间的夹角; R_k 为破坏面上第 k 排土钉的最大抗力。

2 混合 PSO 算法

PSO 算法是一种模拟社会行为的随机全局优化算法^[3]。作为一种进化类算法,它有如下的特征^[1]:(1) 算法用随机种群初始化;(2) 通过种群进化搜索最优解;(3) 种群进化是基于历史种群信息。在 PSO 算法中,每个优化问题的潜在解都是搜索空间中的一个“粒子”,粒子们就追随当前的最优粒子在解空间中搜索。在每一次迭代中,粒子通过跟踪 2 个“极值”来更新自己。一个“极值”是粒子本身所找到的最优解,另一个“极值”是整个种群目前找到的

最优解。

令 D 表示搜索空间的维数, $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})^T$ 表示粒子 i 当前的位置, $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD})^T$ 表示粒子 i 曾经达到的最好位置, 种群中最优粒子的序号用 g 表示, $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})^T$ 表示粒子 i 的速度, 每个粒子根据式(10)来更新自己的速度和位置:

$$\begin{cases} v_{id}^{(k+1)} = \omega^{(k)} \cdot v_{id}^{(k)} + c_1 r_1 \cdot (p_{id}^{(k)} - x_{id}^{(k)}) + \\ \quad c_2 r_2 \cdot (p_{gd}^{(k)} - x_{id}^{(k)}) \\ x_{id}^{(k+1)} = x_{id}^{(k)} + a \cdot v_{id}^{(k)} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, n; d = 1, 2, \dots, D; k$ 表示第 k 次迭代; n 表示粒子群规模; D 表示搜索空间的维数; c_1, c_2 为学习因子; r_1, r_2 是 $[0, 1]$ 间的随机数; a 为控制速度权重的约束因子; ω 为惯性权重。

ω 是影响 PSO 算法收敛性的重要参数, 是用来控制粒子的历史速度对当前速度的影响程度, 一个较大的 ω 值能够促进粒子搜索新的区域。因此, 选取适当的 ω 值, 能够平衡 PSO 算法的全局和局部搜索能力, 从而得到更好的解。实验研究表明, 在进化初期, 可以设置 ω 为一个较大的值以提高算法的全局搜索能力, 然后在进化过程中逐步减小以便搜索到精确解^[5]。

PSO 算法中, Gbest(最优的粒子 g) 提供了粒子群的社会学习能力, 是影响算法收敛性能的重要因素。它把种群中所有粒子“拖”向它的位置并最终收敛到该位置。Gbest 以牺牲算法的鲁棒性来加快算法的收敛率, 所以, 基于 Gbest 的有效变异操作能大大改善算法的性能。

本文把混沌优化搜索技术^[8,9]引入到 PSO 算法中, 算法的主要思想是: 以基本 PSO 算法的计算流程为主体流程, 对种群中最优的粒子 g 进行给定步数的混沌优化搜索, 指导粒子群往最优解方向搜索, 以改进基本 PSO 算法进化后期收敛速度慢、易陷入局部极小范围的缺点。为了提高计算效率, 在进化初期, 由于 PSO 算法的收敛速度较快, 以小概率混沌搜索最优粒子的优化变量; 在进化后期, 以接近 1 的概率调用混沌优化搜索。调用混沌优化搜索的概率 P_k 以式(11)进行自适应变化。

$$P_k = 1 - \frac{1}{1 + \ln(k)} \quad (11)$$

用 PSO 算法求解工程优化问题时, 由于是随机算法, 它很难处理等式约束条件, 当可行域很小时, 很难找到最优解^[1]。在本文中, 采用了以下几个策略:

(1) 用保留可行解的方法处理等式约束条件, 即只要是不满足该约束条件的解, 不管其适应值如何都不接收;

(2) 用自适应罚函数法处理不等式约束条件^[2];

(3) 当粒子 i 的速度接近于 0 或者位置超过边界时, 重新初始化粒子 i 。

算法实现的步骤如下:

(1) 参数赋初值;

(2) 在满足各种约束条件下, 初始化粒子群的速度和位置;

(3) 计算每个粒子的适应值, 更新粒子的 p_i 和种群的最优粒子 g ;

(4) 按式(10)更新种群中粒子的速度和位置;

(5) 按式(11)计算概率 P_k , 对最优粒子 g 以概率 P_k 进行混沌优化搜索;

(6) 处理冲突约束条件的粒子;

(7) 重新初始化不活动粒子;

(8) 收敛判断;

(9) 转入步骤(3), 进行下一代进化计算。

根据拟定的步骤编制了基坑土钉优化设计程序, 并进行了实例计算。

3 计算实例

某基坑开挖深度为 7.8 m, 坑壁坡角为 75°。基坑开挖深度内各土层物理力学指标见表 1。根据场地工程地质条件和周围环境情况, 设计采用土钉墙方案。土钉及混凝土面层原设计参数见表 2 和表 3。土钉抗拔力取实测均值为 15 kN/m, 混凝土面层的厚度为 100 mm, 钢筋网尺寸为 200 mm × 200 mm, 钢筋网的钢筋直径为 6.5 mm。按第 2 章的计算步骤及优化程序对土钉墙设计参数进行优化设计, 优化结果与原设计的比较见表 4 和表 5。

表 1 基坑开挖深度内各土层物理力学指标

层号	厚度 /m	内聚力 /kPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	密度 /(kN/m ³)
1(填土)	1.8	10	15	18
2(淤泥)	0.5	5	5	17.3
3(粘土)	3.5	23	32	18.5
4(粉土)	2.0	13	30	18.3

根据优化计算, 原设计参数的目标函数 F 值为 0.507 8, 经优化计算后设计参数的目标函数 F 值为 0.421 9, 优化后可以降低 16.9% 的工程造价。

表2 土钉墙设计参数

土钉入射角度 / (°)	各道土钉超挖 /m	土钉钢筋等级	土钉墙基底摩擦系数	土钉局部稳定安全系数要求值	土钉墙基底地基承载力标准值 /kPa	土钉钢筋与水泥砂浆价格比
5	0.5	2	0.4	1.2	180	10

表3 混凝土面层设计参数

混凝土面层厚度 /mm	混凝土面层强度等级	钢筋网的钢筋直径 /mm	钢筋网的网格尺寸 / (mm × mm)	面层插入基坑底深度 /m
100	C20	6.5	200 × 200	0.2

表4 土钉墙原设计参数

N_{nail}	D/mm	d/mm	S_h/m	L/mm	S_v/mm
6	100	48	1.0	7	1.5
	100	25	1.1	8	1.2
	100	25	1.1	8	1.2
	100	25	1.1	8	1.2
	100	25	1.2	9	1.2
	100	25	1.2	9	1.2

表5 土钉墙优化设计参数

N_{nail}	D/mm	d/mm	S_h/m	L/mm	S_v/mm
5	100	20	1.2	8.5	1.4
	100	20	1.2	8.5	1.4
	100	20	1.2	7.6	1.4
	100	20	1.2	7.0	1.4
	100	20	1.2	6.5	1.4

4 结语

在土层工程地质情况一定的条件下,土钉支护的设计参数有很多,最主要的有土钉道数、土钉间距、土钉长度、土钉直径以及钢筋直径等参数。诸多的参数取值不仅关系到土钉支护的稳定性,而且直接影响到工程的投资。显然,土钉道数越多、间距越小、长度越长、直径越大,则支护的稳定性就越好,但越不经济;反之,又不安全。因此,如何寻找一组最佳设计参数,以达到既经济又安全目的,是土钉支护设计的一个重要问题。这是一个复杂的优化设计问题。本文应用基于混沌搜索的粒子群优化(PSO)算法,以单位长度土钉墙的土钉材料造价作为优化的目标函数,保持了 PSO 算法结构简单的特点,改善了 PSO 算法的全局寻优能力,提高了算法的收敛速度和计算精度,并通过实例证明了本文提出方法的有效性,对土钉支护优化设计做了一次有意义的尝试。

参考文献:

- [1] H Xiaohui, R C Eberhart, S Yuhui. Engineering optimization with particle swarm [C]. Proceedings of the 2003 IEEE on Swarm Intelligence Symposium, 2003.
- [2] E Konstantinos, N Parsopoulos, N Michael. Particle swarm optimization method for constrained optimization problems [C]. Proceeding of the Euor — International Symposium on Computational Intelligence, 2002.
- [3] J Kennedy, R Eberhart. Particle swarm optimization [C]. IEEE International Conference on Neural Networks, 1995.
- [4] K Yasuda, A Ide, N Iwasaki. Adaptive particle swarm optimization [C]. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2003.
- [5] Y Shi, R C Eberhart. Empirical study of particle swarm optimization [C]. Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation, 1999.
- [6] X F Xie, W J Zhang, Z L Yang. Adaptive particle swarm optimization on individual level [C]. 2002 6th International Conference on Signal Processing, 2002.
- [7] D W Boeringer, D H Werner. A comparison of particle swarm optimization and genetic algorithms for a phased array synthesis problem [J]. Antennas and Propagation Society International Symposium, 2003, 1 (1).
- [8] S S Liu, Z J Hou. Weighted gradient direction based chaos optimization algorithm for nonlinear programming problem [C]. Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2002.
- [9] 李旻,等译. 加速混沌变尺度混合优化算法 [J]. 天津大学学报, 2002, 35(1).
- [10] 肖专文, 龚晓南, 谭昌明. 基于土钉支护优化设计的遗传算法 [J]. 土木工程学报, 1999, 32(3).

文章编号: 0451-0712(2005)06-0080-03

中图分类号: U414.75

文献标识码: B

级配和施工工艺对 SMA 混合料路用性能的影响

张 擎¹, 颜 彬², 陈二明³

(1. 长安大学公路学院 西安市 710064; 2. 北京建筑工程学院 北京市 100044;

3. 河北唐山市唐津高速公路管理处 唐山市 063000)

摘 要: 影响 SMA 路用性能的因素是多方面的, 本文结合对试验结果的分析, 讨论了 SMA 中最大粒径、细集料含量及拌和、摊铺与压实等施工工艺对于 SMA 路用性能的影响, 对于 SMA 的材料选择、配合比设计及施工管理有指导意义。

关键词: SMA; 级配; 施工工艺; 路用性能

SMA 是一种间断级配的沥青混合料, 它是由沥青玛蹄脂(即沥青+矿粉+少量细集料+纤维)填充碎石骨架组成的骨架嵌挤型密实结构混合料。该混合料具有骨架间嵌挤强、沥青膜厚、空隙率小和表面粗糙等特点, 因而具有良好的高温抗车辙能力、低

温抗裂能力、耐疲劳性、水稳性及抗滑性能。

影响 SMA 路用性能的因素有很多, 结合相关资料, 本文就矿料最大粒径、细集料含量以及施工工艺等方面对 SMA 混合料路用性能的影响进行了分析。

收稿日期: 2005-04-24

Hybrid Particle Swarm Optimization Algorithm Used for Design of Soil-Nail Bracing

YOU Xiao-wei¹, LIU Da-peng^{1,2}

(1. Beijing Communication Management Institute for Executives, Beijing 101601, China; 2. Huazhong

University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In the condition of soil layers engineering geology, how to find a set of optimal design parameters, in order to obtain both economic and safe purpose, is an important problem in soil-nail design. This is a complicated optimization problem. In this paper, the hybrid particle swarm optimization (PSO) algorithm is used in optimal design of soil nailing for deep excavations, the cost of soil nailing material in one unit length of wall is taken as the objective function. The chaos optimization algorithm is incorporated into the PSO algorithm, and a new particle swarm optimization algorithm based on chaos searching proposed. The proposed algorithm not only has simple for implement of original particle swarm optimization, also accelerate the convergence and enhance the computational precision of chaos optimization algorithm. The result of experimentation shows that the proposed approach, which is indeed capable of obtaining higher quality solutions efficiently, can optimize the design of the soil-nail bracing, and it is effective.

Key words: particle swarm optimization; chaos; soil-nail bracing; optimization design