

基于改进粒子群算法的岩土工程参数反演

陈秀铜¹ 李 璐²

(1. 二滩水电开发有限责任公司 四川 成都 610021 ; 2. 西南石油大学建筑工程学院 四川 成都 610500)

摘要 把粒子群算法引入岩土工程参数反演领域 , 并对基本粒子群算法进行改进 , 改进的算法 (CSV-PSO 算法) 在粒子飞速移动中动态地调整粒子运行的速度极限及惯性权重 , 压缩搜索空间 , 从而克服了基本粒子群算法搜索精度不高、易陷入局部最优的缺点。算例表明 , 与 POS 算法相比 , CSV-PSO 算法的结果精度提高约 1 倍 , 耗时缩短 40% , 说明 CSV-PSO 算法是一种新颖可行的参数反演方法。

关键词 粒子群优化算法 ; 全局优化算法 ; 参数反演 ; 岩土工程

中图分类号 : TU45 ; O241 文献标识码 : A 文章编号 : 1006-7647(2008) S1-0052-02

在岩土工程问题中 , 计算参数的不确定性一直是困扰岩土工程数值分析的问题之一 , 实验室测试和现场试验是解决这一问题的一种有效方法 , 但仍具有局限性。利用与待定参数有关的观测资料和反演理论 , 对参数进行反演 , 已越来越受到人们的重视^[1]。目前 , 在岩土工程中 , 参数反演的方法常采用直接法 , 该方法是把参数反演问题转化为一个目标函数的寻优问题。最优化方法是进行参数反演的有力工具 , 而由于岩土工程的复杂性及传统优化方法本身的不足 , 使得应用传统优化算法进行参数反演计算时难以得到满意的解答。一些学者将人工神经网络技术、遗传算法等智能优化算法应用于岩土工程中进行参数反演计算 , 取得了较好的结果^[2-3]。

粒子群优化算法 (particle swarm optimization , PSO) 是一种模拟群体智能行为的适合于复杂系统优化计算的自适应概率优化技术。PSO 作为一种高效并行优化方法 , 不依赖于所求问题的具体领域 , 而是直接以决策变量的编码作为运算对象 , 以适应度函数值为搜索目标 , 且同时可以使用多个搜索点的信息 , 适用于求解一些非线性、不可微、多目标的复杂优化问题 , 因其原理简单、易编程实现、需调整参数少 , 已应用于多个科学和工程领域^[4-5]。本文将粒子群算法引入岩土工程参数反演领域 , 并针对 PSO 搜索精度不高、易陷入局部最优的缺点 , 对 POS 算法进行了改进 , 改进的算法在粒子飞行中动态地调整粒子飞行的速度极限及惯性权重 , 压缩搜索空间 ,

故被称为压缩搜索空间与速度范围的粒子群优化方法 (CSV-PSO)。

1 粒子群算法的改进

1.1 基本粒子群算法

粒子群算法是受人工生命研究成果的启发而提出的 , 其基本概念源于对鸟群捕食行为的研究。在 PSO 中 , 鸟被抽象为没有质量和体积的微粒 (点) , 并将其延伸到 D 维空间 , 其 i 在 D 维空间里的位置表示为矢量 $X_i = (X_{i1} , X_{i2} , \dots , X_{iD})$, 飞行速度表示为矢量 $V_i = (V_{i1} , V_{i2} , \dots , V_{iD})$, 且假定鸟群只知道目前位置与食物 (目标) 的距离 (适应度) , 不知道目标的具体方位 , 鸟群在捕食的过程中根据自己的飞行历程和群体之间信息的传递不断地调整捕捉食物的方向和速度。因此 , PSO 的搜索过程主要是依靠粒子间的相互作用和相互影响完成的。粒子 i 位置与速度的更新公式如下 :

$$V_{id} = wV_{id} + c_1r_1(P_{id} - X_{id}) + c_2r_2(P_{gd} - X_{id})$$
(1)

$$X_{id} = X_{id} + V_{id}$$
(2)

式中 : w 为惯性权重 ; c_1 和 c_2 为非负常数的学习因子 ; r_1 和 r_2 为介于 $[0, 1]$ 之间的随机数 ; $d = 1, 2, \dots, D$ 。矢量 $P_i = (P_{i1} , P_{i2} , \dots , P_{iD})$ 和 $P_g = (P_{g1} , P_{g2} , \dots , P_{gD})$ 分别为第 i 个粒子迄今为止搜索到的最优位置和整个粒子群迄今为止搜索到的最优位置。每个粒子在 D 维空间的位置 X_i 就是其在问题空间中

的一个潜在解。将其代入目标函数就可计算出其适应值,根据粒子适应值的大小来衡量 X_i 的优劣。

以上为基本的 PSO 算法,其操作简单、使用方便,但搜索精度不高,易陷入局部最优解。

1.2 改进的粒子群算法

为了提高 PSO 算法的收敛速度与收敛精度,降低早熟收敛的比率,笔者对 PSO 算法进行了改进。改进的算法在粒子飞行中动态地调整粒子飞行的速度极限及惯性权重,压缩搜索空间,故称为压缩搜索空间与速度范围的粒子群优化方法(CSV-PSO),其主要计算公式如下。

粒子飞行速度极限公式为

$$V_{\max d} = \alpha(U_{\max d} - D_{\min d}) \quad (3)$$

$$V_{\min d} = \alpha(D_{\min d} - U_{\max d}) \quad (4)$$

其中
$$\alpha = \alpha_0 \left[1 - \left(\frac{k-1}{k} \right)^m \right] \quad (5)$$

式中: $U_{\max d}$ 、 $D_{\min d}$ 、 $V_{\max d}$ 、 $V_{\min d}$ 分别为粒子在 d 维空间的位置上、下限和速度上、下限; α_0 为事先给定的正常数; k 为飞行次数; m 为以优化目标函数而定的正常数。

权重调整公式为

$$w = w_0 \left[1 - \left(\frac{k-1}{k} \right)^n \right] \quad (6)$$

式中: w_0 为事先给定的正常数; n 为以优化目标函数而定的正常数。

空间压缩公式为

$$U'_{\max d} = \beta_0(U'_{\max d} - G_{cd}) + G_{cd} \quad (7)$$

$$D'_{\min d} = \beta_0(D'_{\min d} - G_{cd}) + G_{cd} \quad (8)$$

其中
$$G_{cd} = \sum_{i=1}^{N_{\text{pop}}} x_{id} / N_{\text{pop}} \quad (9)$$

式中: $0 < \beta < 1$; $U'_{\max d}$ 、 $D'_{\min d}$ 和 G_{cd} 分别为粒子群在压缩空间中 d 维方向上的上、下限及几何重心; N_{pop} 为粒子群的群体规模。

2 岩土工程反分析的粒子群算法

用优化方法进行位移反分析的实质就是寻找一组待反演的参数使之与相应的位移预测值与实测位移值逼近的方法。对于实际工程的设计和施工来说,这种逼近追求的是总体上的最优效果,因此,目标函数可取为以下形式:

$$F(x) = \max \sum_{i=1}^n (f_i(X) - u_i)^2 \quad (10)$$

式中: $X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ 为一组待反演参数; $f_i(X)$ 为岩体第 i 个量测点对应的位移计算值; u_i 为相应的位移量实测值; n 为位移反分析的关键点个数。

具体的反分析过程如下:①初始化 CSV-PSO 模型参数,初始化粒子群。②根据当前位置和速度产生各个粒子的新位置。③计算每个粒子的新位置和适应值,对各个粒子,若粒子的适应值优于原来的个体极值,则设置当前适应值为个体极值。④根据粒子适应值更新个体极值与全局极值。⑤检验是否满足迭代终止条件,不满足则继续迭代,满足则输出计算结果。CSV-PSO 优化算法的流程如图 1 所示。

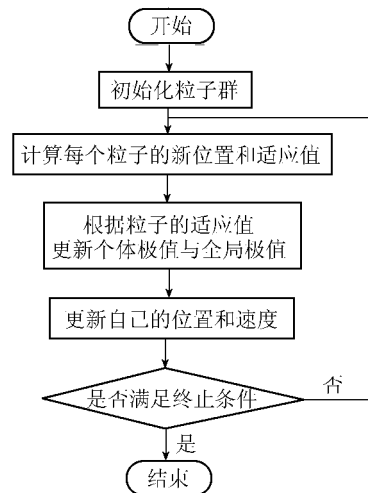


图 1 CSV-PSO 算法流程

3 工程实例分析

某混凝土重力坝挡水坝段高 66.5 m,坝顶宽 8.0 m,底部宽 52.0 m,取基础宽 300.0 m、高 150 m。坝基岩石密度为 2700 kg/m³,泊松比为 0.25,坝体混凝土密度为 2400 kg/m³,泊松比为 0.17。坝体和坝基材料分为 3 个区,如图 2 所示,用于水荷载作用下的坝体位移值识别各区弹性模量。

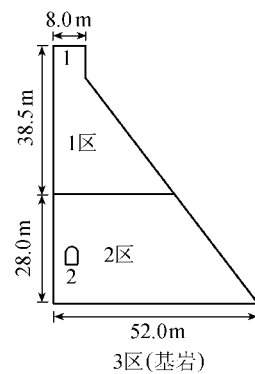


图 2 坝段断面示意图

选取一组弹性模量 $E = (E_1, E_2, E_3) = (22.0, 28.0, 19.0)$ GPa,把坝体和基础分为 1166 个单元、1070 个节点,进行有限元数值计算,求得在 258 m 水位时图 1 所示例点 1、2 处的水平及垂直位移值。把它们作为观测值,来反演坝体和基础的弹性模量。

(下转第 92 页)

水泥搅拌土成桩后与天然地基形成复合地基 , 共同承担建筑物的荷载。

3 水泥搅拌桩施工质量控制与检测

3.1 质量控制

所用水泥要过筛 ,水泥和外掺剂用量以及泵送浆液的时间等应有专人记录 ;在施工中严格控制浆液水灰比、单桩每米注浆量、总注浆量、桩身垂直度指标、施工定位允许误差及桩机移位距等影响桩质量的关键因素。

桩体压浆要求一气呵成 ,不得中断 ,每根桩宜装浆 1 次并喷搅完成 ,且要连续施工 ,相邻两桩施工间隔不得超过 12 h ,如超过则应在中间进行补桩。

水泥土搅拌桩的质量控制应贯穿在施工全过程中 ,做好全过程的施工监理 ,随时检查施工记录和计量记录。

3.2 质量检测

a. 浅部开挖外观检查。成桩 7 d 后 ,分别在 4 个部位进行顶部开挖检查 ,顶部开挖要求剔除桩头施工泛浆硬结层 ,露出清晰的水泥土桩 ,检查成桩直径、搅拌均匀程度等。

b. 力学指标检测。根据设计规定在施工 28 d 后随机在不同部位 ,用双管单动取样器钻取芯样作抗压强度检验 ,检验结果表明搅拌桩施工质量达到了设计要求(检验结果见表 3)。

由于试验设备等因素的限制 ,尽管取芯可达深层 ,但由于桩体的不均匀性 ,而水泥土强度很低 ,因

(上接第 53 页)

反演时 ,坝体和基础的弹性模量上、下限分别为 (36.0 ,1.0)GPa 和 (90.0 ,10.0)GPa。反演计算结果如表 1 所示。由反演结果可知 ,CSV-PSO 方法是一种性能良好的反分析方法。

表 1 反演计算结果

算法	E_1 /GPa	E_2 /GPa	E_3 /GPa	时间/s
PSO	21.695	27.821	18.872	5
CSV-PSO	21.872	27.961	18.912	3

4 结 语

粒子群优化是一种模拟鸟群捕食行为的集群智能方法 ,是解决复杂连续函数优化问题的理想方法。笔者从提高收敛速度、收敛精度和克服陷入局部最优等方面对基本粒子群算法进行了改进 ,提出了 CSV-PSO 算法 ,算例证明该算法是进行反演研究的

表 3 桩身强度检验结果

标段	水泥掺入比/%	水泥土浆体强度 R_{28} /MPa	
		设计值	实测值
A	12	≥ 1.0	1.327
B	13	≥ 1.0	1.349

此取样过程中很容易发生破碎无效现象 ,使得试验结果很难保证随机而真实 ,经常会出现强度不够、桩体样品破碎无效而不作为处理依据的情况 ,因此建议在水泥土强度和均匀性检测方面有更合理可靠的方法。

4 结 语

近年来 ,随着施工技术和施工条件的发展 ,深层搅拌水泥土桩的应用范围越来越广泛 ,在土类地基加固工程中有着广阔的前景 ,它除了作为一种复合地基使用之外 ,更多是作为一种经济型的基坑围护结构得到推广 ,在施工过程中一定要密切结合工程实际 ,正确选择固化剂的种类和固化剂在土体中的掺入比 ,并通过严格的生产性试验合理确定搅拌法的施工工艺及其技术参数 ,才能有效地保证工程施工质量。

参考文献 :

[1] JGJ 79—2002 ,建筑地基处理技术规范 [S] .
[2] 李彰明 . 软土地基加固的理论、设计与施工 [M] . 北京 : 中国电力出版社 , 2006 .
(收稿日期 2008-03-12 编辑 : 高建群)

一种好方法。

笔者提出的 CSV-PSO 算法仅是一种初步研究成果 ,也仅用一个简单算例对其进行了验证 ,更加复杂的工程应用将是本方法下一步应做的工作。

参考文献 :

[1] 杨林德 ,朱合华 ,冯紫良 ,等 . 岩土工程问题的反演理论与工程实践 [M] . 北京 : 科学出版社 , 1996 .
[2] 冯夏庭 ,张治强 ,杨成祥 ,等 . 位移反分析的进化神经网络方法研究 [J] . 岩石力学与工程学报 , 1999 , 18 (5) : 529-533 .
[3] 高玮 ,郑颖人 . 采用快速遗传算法进行岩土工程反分析 [J] . 岩土工程学报 , 2001 , 23 (1) : 120-122 .
[4] 杨维 ,李歧强 . 粒子群优化算法综述 [J] . 中国工程科学 , 2004 , 5 (5) : 87-90 .
[5] 黄岚 ,王康平 ,周春光 ,等 . 粒子群优化算法求解旅行商问题 [J] . 吉林大学学报 : 理学版 , 2003 , 13 (4) : 477-480 .
(收稿日期 2008-01-10 编辑 : 高建群)