

# 基于模拟退火和粒子群混合算法的地应力场分析

李永松<sup>1,2</sup>, 尹健民<sup>1</sup>, 陈建平<sup>2</sup>, 许静<sup>1</sup>, 汪洁<sup>1</sup>

(1. 长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010; 2. 中国地质大学(武汉) 工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**针对地应力场分析计算时边界荷载难以确定的问题,将模拟退火和粒子群优化算法引入到地应力场的分析研究中。由于粒子群算法容易陷入局部最优的缺陷,结合模拟退火思想与粒子群优化算法形成一种混合优化算法,以提高粒子群算法的收敛精度。运用该算法对新疆哈德布特水电站地应力场进行分析研究。计算结果表明:地应力场计算值和实测值吻合较好,说明该混合优化方法具有较高可靠性。

**关键词:**地应力; 模拟退火; 粒子群; 哈德布特水电站

**中图分类号:** TU431 **文献标志码:** A

地应力是赋存于岩体内部的地质荷载,是地质环境和地壳稳定性评价、岩土工程设计和施工的重要基础资料之一。对于重大岩体工程,进行必要的地应力测试和应力场分析工作,有助于正确认识工程所处的力学环境和围岩的破坏机理,使工程设计更加合理、经济,施工和运行更加安全、可靠。

地应力研究有两种途径:① 现场实测;② 根据现场测试资料进行模拟计算,以得到工程区内较大范围的地应力分布情况。对多数工程而言,根据实测结果,进行相应的数值模拟以推求较大工程区域地应力场是一种重要而又较为有效的途径。因此,常采用一定的优化方法进行分析。如:蒋中明和徐卫亚运用 RBF-ANN 的高度非线性特征计算模型的边界条件<sup>[2]</sup>,从而模拟出岩体的初始地应力场;戚蓝和熊开智采用灰色理论<sup>[3]</sup>,梁远文和林红梅用正交设计和 BP 神经网络<sup>[4]</sup>,石郭郭和傅永华采用遗传算法和 BP 神经网络的优化反演分析方法<sup>[5]</sup>,杨云浩等采用应力回归反演法进行岩体应力场分析研究<sup>[6]</sup>。粒子群优化算法(PSO)是一种基于群集智能的,具有全局寻优能力的优化工具,但其缺点是易陷入局部极值点、进化后期收

敛慢和优化精度较差。为此,学者们提出了很多的改进算法,很大程度上改善了基本粒子群的计算性能<sup>[7-10]</sup>。本文把模拟退火技术(SA)引入到粒子群优化算法 PSO 中进行地应力场分析研究,把实测地应力资料、工程地质资料和数理统计理论结合起来,综合考虑影响地应力的各种因素,以使计算结果接近真实情况。该方法保持了粒子群算法容易实现的优点,并利用 SA 的概率突跳性,保证了群体的多样性,提高了 PSO 算法的探索能力和收敛精度,克服了基本粒子群优化算法容易陷入局部最优的缺陷。

## 1 混合优化算法的基本原理及应用

### 1.1 算法基本原理

地应力的分布状况与地下工程的空间位置、岩体性质、岩体自重、地质构造、地形地貌等因素有关。实测地应力是这些因素综合作用的反映,反演地应力场就是对诸因素模拟再现的过程。测点应力值及所要反演的地应力场可以认为是下列变量的函数:

$$\sigma = F(x, y, z, E, \mu, \sigma_c, D1, D2, \dots) \quad (1)$$

式中,  $\sigma$  为初始地应力应力分量;  $x, y, z$  为空间位置坐

收稿日期:2011-01-06

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2008BAB29B01);水利部公益性行业科研专项项目(201001009);中央级公益性科研院所基金项目(CKSF2011020);国家重点基础研究发展计划“973”项目(2011CB710603)

作者简介:李永松,男,博士研究生,主要从事岩石力学与工程应用方面的研究。E-mail:song90397@sohu.com

标,可由勘测资料获得; $E, \mu$  分别为弹性模量和泊松比; $G$  为自重因素; $D1, D2, \dots$  为各类地应力影响因素,这些待定因素可以根据地质模型及相应的边界条件通过计算求得。

为全面掌握哈德布特水电站坝址处地应力场分布规律,本文采用有限元及 SA - PSO 混合优化算法进行地应力场分析。

标准粒子群算法容易陷入局部最优,因此本文利用模拟退火算法在搜索过程中较强的概率突跳能力,能有效避免搜索过程陷入局部极小解。首先通过粒子群算法开始最优解的搜索并产生一组新的粒子,然后利用模拟退火算法对每个粒子进行模拟退火操作,并以其结果作为下一代种群的粒子,使后一代粒子群更加适应环境,避免粒子陷入局部最优。算法具体步骤如下:

(1) 随机初始化种群中各微粒的位置和速度,评价每个微粒的适应度,将其位置和适应值存储在  $p_i$  中,将所有  $p_{best}$  中的适应值最优个体的位置和适应值存储于  $p_g$  中,并确定初始温度冷却系数  $C$  和退火初始温度  $T$ 。

(2) 根据下式确定当前温度下各  $p_i$  的适配值。

$$TF(p_i) = e^{-[f(p_i) - f(p_g)]/t} / \sum_{i=1}^N e^{-[f(p_i) - f(p_g)]/t} \quad (2)$$

(3) 采用轮盘赌策略从所有  $p_i$  中确定全局最优的某个替代值  $p'_g$ ,更新各微粒的速度和位置。

(4) 计算各微粒新的目标值,更新各微粒的  $p_i$  值及种群的  $p_g$  值。

(5) 进行退火操作,若满足预设的停止条件,即达到全局收敛,搜索停止,输出结果,否则跳转返回(2)。

## 1.2 在地应力场分析中的应用

自重应力场和构造应力场是现今岩体应力场的主要组成部分。构造应力场是由水平方向构造运动  $U_x$ 、 $U_y$  和  $U_{xy}$  (分别对应南北方向构造应力、东西方向构造应力和水平面内剪切应力) 引起的,据此建立数学计算模型,将自重因素  $\sigma_c$ 、水平方向构造位移  $U_x$ 、 $U_y$  和  $U_{xy}$  视为待定因素<sup>[11]</sup>,常规的多元线性回归计算是通过施加水平方向构造位移进行有限元计算,把有限元计算求得的自重应力场和构造应力场作为实测点应力值的自变量建立回归方程,利用实测资料和 4 个三维有限元模拟地应力场结果,根据叠加原理,用最小二乘法进行多元回归分析求得:

$$\sigma = L_1 \times \sigma_c + L_2 \times \sigma_x + L_3 \times \sigma_y + L_4 \times \sigma_{xy} \quad (3)$$

式中,  $\sigma$  为初始应力场的拟合值;  $\sigma_c$  为自重应力;  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  和  $\sigma_{xy}$  为基本初始应力场;  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  和  $L_4$  为相应的回归系数,回归系数的数值等于自重应力  $G$  和构造位

移  $U_x$ 、 $U_y$  和  $U_{xy}$  的缩放比例,回归应力场等于基本应力场的线性叠加。进行多元回归分析时,常用的回归函数为待定因素的线性多项式,这样就忽略了它们之间的相互影响<sup>[12]</sup>。

在采用 SA - PSO 混合优化算法进行地应力场分析时,首先用有限元计算出自重及单位水平方向构造位移  $U_x$ 、 $U_y$  和  $U_{xy}$  情况下实测点处的应力值,为了使计算结果更加精确,对计算值和实测值进行归一化处理。然后,采用计算出的应力值和实测应力值构造出待优化的目标函数,通过粒子群算法开始最优解的搜索并产生一组新的粒子。利用模拟退火算法对每个粒子进行模拟退火操作,并以其结果作为下一代种群的粒子。通过 SA - PSO 混合优化算法得到边界荷载和模型内部应力之间的映射关系,求得自重应力  $G$  和构造位移  $U_x$ 、 $U_y$  和  $U_{xy}$  的缩放比例  $L'_1$ 、 $L'_2$ 、 $L'_3$  和  $L'_4$ 。然后将得到的边界条件  $L'_1 \times G$ 、 $L'_2 \times U_x$ 、 $L'_3 \times U_y$  和  $L'_4 \times U_{xy}$  作用到模型边界上再进行有限元计算,得到整个工程区域的初始地应力场,即:

$$\sigma' = L'_1 \times \sigma_c + L'_2 \times \sigma_x + L'_3 \times \sigma_y + L'_4 \times \sigma_{xy}$$

## 2 工程实例

新疆哈德布特水电站工程区位于阿尔泰山脉的东段南麓,地形地貌受北西向构造的控制与影响,地势上自北向南形成阶梯状依次降低的景观。按地貌形态、成因类型可分为:侵蚀构造低中山区、侵蚀剥蚀低山丘陵区。电站安装 4 台单机容量为 50 MW 的立轴混流式水轮发电机组,总装机容量 200 MW。

为了研究工程区地应力分布,为地下厂房等工程建筑物的布置方案、开挖方式的选择以及各项建筑物的稳定性分析和支护设计提供依据,在地下厂房区进行了套芯解除法和水压致裂法的地应力测试,测试钻孔均位于地下厂房区,其中钻孔 ZKD01、ZKD02 和 ZKD03 位于 PD2 平洞内;钻孔 ZKD04、ZKD05 和 ZKD06 位于 PD3 平洞内。钻孔布置图见图 1。综合考虑地形地貌特点、岩层力学性能的差异性及结构组合特点、地质构造等影响因素,确定了计算范围:长  $\times$  宽为 4 000 m  $\times$  4 000 m,底部高程为 1 000 m,并使测点位于计算域的中部。

采用模拟退火和粒子群优化算法进行地应力场分析时,首先计算出自重及单位水平构造位移工况下测点的计算应力值,将各工况测点部位的计算应力值和实测应力值构成目标优化函数,即形成测点的应力值与自重系数和 3 个构造位移之间的映射关系。在本工程中,根据地下厂房区 6 个测孔的资料,采用模拟退火和粒子群优化算法得到的自重系数  $L_1$ 、构造位移  $U_x$ ,

$U_y$  和  $U_{xy}$  计算结果分别为  $L_1 = 1.15, U_x = 0.28, U_y = 0.24, U_{xy} = 0.09$ 。

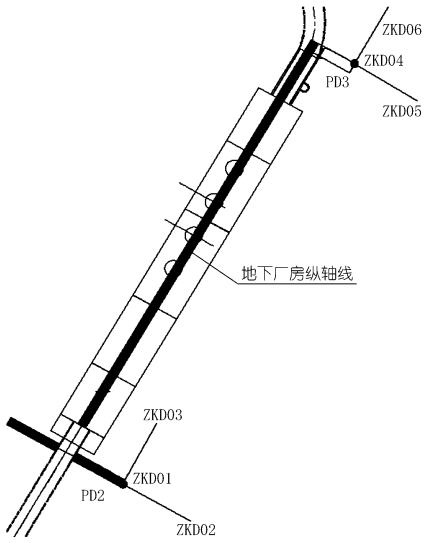


图 1 测孔布置示意

根据得到的自重系数和构造位移进行一次有限元正演计算,即可得到初始应力场。根据正演计算结果进行有限元插值可得测试部位岩体应力计算值。本文以 ZKD01 孔结果为代表,给出 ZKD01 钻孔模拟退火和粒子群 SA - PSO 混合优化算法计算结果和实测结果对比(表 1)。

表 1 实测值与计算值比较 MPa

测点编号	对比项	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\tau_{xy}$
1	实测值	3.4	3.3	0.5
	计算值	3.2	3.2	0.4
	相对差	0.2	0.1	0.1
2	实测值	3.5	3.4	0.3
	计算值	3.2	3.2	0.4
	相对差	0.3	0.2	-0.2
3	实测值	3.6	3.5	0.3
	计算值	3.4	3.4	0.4
	相对差	-0.2	0.1	-0.1
4	实测值	3.5	3.5	0.3
	计算值	3.8	3.6	0.4
	相对差	-0.3	-0.1	-0.1
5	实测值	3.5	3.5	0.2
	计算值	3.8	3.6	0.6
	相对差	-0.3	-0.1	-0.4
6	实测值	3.6	3.6	0.3
	计算值	3.8	3.7	0.4
	相对差	-0.2	-0.1	-0.1

根据计算结果,自重系数为 1.15,大于 1。这主要是由于地表剥蚀作用:剥蚀前,岩体内存在一定数量的铅垂应力和水平应力;剥蚀后铅直应力随剥蚀程度有所释放,但一部分应力量值仍然保留赋存与岩体中,导

致了岩体内垂直应力比现有上覆地层所引起的自重应力要大。该表显示计算值和实测值基本一致,表明计算结果能反映实际的地应力场分部规律,模拟分析效果较好。

可以将 SA - PSO 混合优化算法应用于前馈型神经网络的优化设计中,对网络的权值和阈值进行优化,以保证较高的精度和训练收敛速度。

### 3 结语

本文应用模拟退火和粒子群优化算法对三维应力场进行了分析计算,计算结果表明:把模拟退火技术(SA)引入到粒子群优化算法 PSO 中,保持了粒子群算法容易实现的优点,并利用 SA 的概率突跳性,保证了群体的多样性,提高了 PSO 算法的探索能力和收敛精度,克服了基本粒子群算法容易陷入局部最优的缺陷。将这种混合优化算法应用到新疆哈德布特水电站地应力场分析研究中,计算结果能反映初始应力场的分布规律,拟合结果较好。

### 参考文献:

- [1] 刘允芳. 岩体地应力与工程建设[M]. 武汉:湖北科学技术出版社,2000.
- [2] 蒋中明,徐卫亚. 三维初始地应力场反分析的径向基函数法[J]. 岩土力学,2002,23(6):737-741.
- [3] 戚蓝,熊开智. 灰色理论在地应力场分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(10):1547-1550.
- [4] 梁远文,林红梅. 基于 BP 神经网络的三维应力场反分析[J]. 广西水利水电,2004,(4):5-8.
- [5] 石郭郭,傅永华. 神经网络结合遗传算法反演岩体初始地应力的研究[J]. 武汉大学学报,2005,38(2):73-76.
- [6] 杨云浩,徐卫亚,聂卫平,等. 糯扎渡水电站厂房区三维地应力场反演分析[J]. 人民长江,2010,41(7):52-57.
- [7] Eberhart R, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory [C]// Proc of the 16th International symposium on Micro Machine and Human Science. Nagoya, Japan: IEEE,1995:39-43.
- [8] Shi Y, Eberhart R. A modified panicle swarm optimizer [J]. IEEE World Congress on Computational Intelligence,1998:69-73.
- [9] Natsuki Higasshi, Hitoshi I. Particle swarm optimization with Gaussian mutation [C]// Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation,2003:72-79.
- [10] 王波,王灿林,董云龙. 基于 D-S 的粒子群算法[J]. 计算机仿真,2007,24(2):162-164.
- [11] 李永松,尹健民,艾凯. BP 神经网络在地应力场分析中的应用[J]. 人民黄河,2009,31(2):75-77.
- [12] 戴荣,李仲奎. 三维地应力场 BP 反分析的改进[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(1):83-88.

(编辑:郑毅)