

文章编号: 1000-7598-(2008) 06-1562-07

大型地下洞室考虑开挖卸荷效应的位移反分析

董志宏¹, 丁秀丽¹, 卢 波¹, 张 风², 张 练¹

(1. 长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室, 武汉 430010; 2. 长江勘测规划设计研究院, 武汉 430010)

摘 要: 基于现场监测资料的位移反分析是地下工程动态监控、信息化施工的重要组成部分。以乌江彭水水电站大型地下厂房(开挖跨度为 30 m, 高度为 78.5 m)为例, 从围岩实测位移出发, 建立了基于均匀设计-神经网络-遗传算法的围岩力学参数的系统反分析方法, 反演考虑开挖卸荷效应的围岩力学参数。根据数值分析结果形成训练样本, 利用 BP 神经网络映射围岩的变形与力学参数的关系, 同时针对传统人工神经网络存在初始权值难以确定的问题, 应用遗传算法优化神经网络的初始权值; 利用现场监测的增量变形反演了围岩的力学参数; 最后利用反演出的参数, 进行地下厂房开挖预测分析。结果表明, 预测位移与现场监测位移较为接近, 进行统计检验结果为优, 说明该参数反演方法是正确合理的。

关 键 词: 位移反分析; 大型地下洞室; 围岩扰动; 增量位移; 遗传-神经网络

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

Displacement back analysis of rock mechanical parameters of large-scale underground powerhouse with unloading surrounding rockmass

DONG Zhi-hong¹, DING Xiu-li¹, LU Bo¹, ZHANG-Feng², ZHANG Lian¹

(1. Yangtze River Scientific Research Institute; Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources, Wuhan, 430019, China; 2. Yangtze River Investigation, Planning, Design & Research Institute, Wuhan, 430019, China)

Abstract: Displacement back analysis based on the in-situ measured information is one of the important parts that compose the dynamics measurement-control and information-oriented construction of the underground project. On the basis of measured displacements of surrounding rockmass, a system analysis method for back analysis of rock mechanics mechanical is established, which is used to gain the unloading surrounding rock mechanical parameters of the large-scale underground powerhouse (excavating span 30 meters and height 78.5 meters) of Pengshui Project on Wujiang River. The analysis method includes uniform design (UD), BP artificial neural network (BP-ANN) and genetic algorithm (GA). Uniform design and numerical simulation are used to gain training samples of BP-ANN, and BP-ANN is used to simulate the relationship between rock mass displacements and rock mechanical parameters. In addition, the initial input weights of BP-ANN model are optimized by genetic algorithm (GA) because the initial input weights of BP artificial neural network model strongly affect the accuracy of neural network. And the rock mechanical parameters are gained through the trained BP-ANN and measured increment displacement of surrounding rock mass. Finally, the surrounding rock mass displacements induced by the excavation of underground powerhouse are forecasted. According the result, the forecasting displacements are approximate to the measured ones; so as to validate, the rightness and reliability of the above method.

Key words: displacement back analysis; large-scale underground powerhouse; unloading rockmass; increment of displacement; GA-ANN

1 引 言

岩体力学参数是进行岩土工程设计与稳定性评价的基础, 一般通过室内外的岩石力学试验或工程经验类比方法获得。由于岩体是在各种营力(如物

理、化学作用及地质构造运动等)作用下经过漫长地质变迁形成的天然材料, 其间存在着大量的地质缺陷, 如节理、裂隙、断层等, 其力学性质很复杂。室内的岩石力学试验由于受取样扰动、取样代表性和尺度效应等问题的影响, 试验结果往往取值偏高,

收稿日期: 2006-10-10

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(No. 50539110); 国家自然科学基金重点资助项目(No. 50639090)。

作者简介: 董志宏, 男, 1978 年生, 硕士, 工程师, 主要从事岩石工程稳定与监测反馈分析方面研究。E-mail: ckyjys2004@163.com

不能令人满意；现场岩石力学试验能够反映实际工程的真实条件，该方法获取的参数较为可信，但是这种原位试验技术条件要求较高、可重复性差，易受到现场其他因素的影响，且费用昂贵。

基于现场实测资料的位移反分析方法为人们获得岩体力学参数提供了新的途径。以“新奥法”施工理念为基础，利用工程现场监测信息通过反馈分析获得岩体力学参数方法引起了广大工程技术人员和科研工作者的关注，该方法能够反映更大尺度的地质信息且经济简便，是获取岩体力学参数的一种好方法，而且该方法可以成为信息化设计施工的关键步骤，即通过对监测资料及时分析并反演出岩体的力学参数预测后续工程的变形，指导设计和施工。根据数值方法实现反分析的过程不同，位移反分析方法主要分为逆解法、直接法（优化反分析方法）和图谱法，以及应用神经网络和遗传算法等人工智能方法等。目前，岩土工程反分析方面已经取得了大量的研究成果。但是，由于大型地下洞室群地质条件和开挖工况复杂，在地下厂房开挖工程中的应用不多。本文以彭水地下厂房施工开挖为背景，采用了人工神经网络建立岩体力学参数与岩体位移的高度非线性映射关系，通过均匀设计方法和考虑开挖卸荷效应的数值模型获得训练样本，以增量位移进行岩体力学参数的反分析；同时针对神经网络初始权值难以确定和易陷入局部最优的问题，采用改进的遗传算法优化神经网络的初始权值。最后，用反演得到的岩体力学参数进行地下厂房开挖稳定性分析，并与实测位移进行对比，用统计检验方法验证了该方法的正确性。

2 反分析的思路与原理

2.1 反分析的思路

基于人工神经网络和遗传算法的位移反分析方法，其基本思路为，先采用数值方法建立工程岩体的计算模型，通过大量的数值分析获得神经网络的训练样本；再利用神经网络的学习和记忆功能对样本进行逆辨识学习，即训练网络；利用遗传算法的全局优化性能对神经网络初始权值进行优化；由人工神经网络的非线性映射功能建立围岩位移与待反演参数（包括初始地应力、岩体力学参数）之间的特征关系；最后，将实测位移代入训练好的神经网络进行反分析。

围岩位移反分析过程主要分为正向计算和反演分析两部分。反演分析的主要步骤为：（1）通过地质分析和实际监测资料，分析对围岩变形影响显著

的因素。（2）根据室内外试验结果、现场监测资料、工程经验等确定待反演参数的取值范围。（3）应用均匀设计理论进行多参数多种水平的试验组合设计，得到多组正分析样本。（4）以这些样本为基础，应用遗传算法优化后的神经网络并进行网络训练，得到待反演参数与监测部位响应量（如位移等）的计算值的非线性映射关系。（5）将实际监测值输入训练好的网络，即得到要反演的力学参数和地应力等。（6）用所得到的力学参数进行正分析，预测监测部位的力学响应量，应用统计检验的方法对反分析结果进行检验和评价。

2.2 遗传算法优化 BP 人工神经网络

岩土工程是高度非线性系统，可以用非线性神经网络模拟，但非线性神经网络的误差面比线性网络的误差面复杂得多，多层网络中非线性传递函数有多个局部最优解。寻优的过程与初始点的选取关系很大，初始点如果更靠近局部最优点，而不是全局最优点，就不会得到正确结果，这也是多层网络无法得到最优解的一个原因。在实际训练过程中，往往重复选取多个初始点进行训练，这样做计算量大，且不一定能保证得到全局最优解。遗传算法具有强大深度搜索和广度搜索能力，对函数是否为非凸无要求，是进行全局优化的一种好方法。应用遗传算法优化网络的初始权值和阈值，能使网络训练的初始点更靠近全局最优，从而保证网络训练结果的正确性。

本文采用遗传算法优化 BP 网络的初始权值和阈值。首先产生实数型的初始种群，种群中的每一个个体表示网络的一组权值，而且每个权值可以看作是一个独立的变量。最初时个体是随机选择的，一旦个体选定后，就以训练样本运行网络，得到各样本的累积平方和误差，训练若干次用测试样本运行网络，得到测试样本的累计误差平方和，这就是一组权值即该个体的适应值。用于每个神经元的传递函数可以根据具体问题进行选择，由于遗传算法不需要计算梯度，故函数形式可以不受限制；其次，依据适应值来评价个体的优劣，进行选择、交叉和变异等操作，使所有测试样本的累计平方和误差达到最小的个体，即为我们需要的神经网络的初始权值。

3 彭水地下厂房开挖围岩位移反分析

3.1 工程概况及地质条件

彭水水电站位于乌江干流下游，距重庆市彭水县城上游 11 km，是乌江流域规划的一个重要梯级

电站,以发电为主,其次是航运、防洪及其他综合利用,总装机容量为 1750 MW。

电站坝址河谷呈基本对称的“V”型谷,岸坡没有深切沟谷,山体较完整宽厚。根据地形地质条件,结合枢纽总体布置,采用右岸地下式厂房。地下主厂房位于地质条件较好的奥陶系下统南津关组($O_{1n}^1 \sim O_{1n}^5$),其中 O_{1n}^3 , O_{1n}^4 属 II 类围岩, O_{1n}^2 属 III 类围岩。厂房区断层、裂隙比较发育,且发育有下游 KW_{84} 和上游 KW_{51} 强岩溶系统。为了充分适应厂区的围岩地质特征,在高陡倾角的岩层中主厂房洞室平行于岩层走向布置(地层走向为 $NE22 \sim 25^\circ$, 陡倾角为 $60 \sim 70^\circ$)。地下主厂房洞室开挖跨度为 30 m、最大开挖高度为 78.5 m、全长为 252 m; 厂房上覆岩层最大约为 200 m, 最小约为 130 m。厂房区以水平构造应力为主。

3.2 计算模型与特征增量位移

3.2.1 计算模型

由于彭水地下厂房平行岩层走向布置,沿轴线各剖面地质条件差别不大,因此,采用二维有限元建立弹塑性数值模型。计算模型选取 3[#] 机组中心线

剖面(0 + 106.2 m 桩号),按设计参数样本(见第 3.4 节)计算。计算域内模拟了主厂房开挖揭露的全部岩层、岩层面以及 404[#], 406[#], 401[#] 软弱夹层、下游边墙页岩与下部灰岩间的软弱夹层等。其中,厂房上游 C4, C5 溶蚀层面与 KW_{51} 岩溶系统一并考虑为一种溶蚀介质,称为上游溶蚀带;下游破碎夹层 082[#], 084[#], 085[#] 与 KW_{84} 岩溶系统合并为一种材料,称为下游溶蚀带。计算采用的地质概化模型如图 1 所示,模型 x 轴与厂房轴线垂直,指向下游为正,主厂房中心轴线位置为 $x = 0$; y 轴为铅直方向,向上为正。沿 x 轴计算范围为 300 m, y 轴从高程 80 m 取至地表。

计算模型模拟了开挖爆破对围岩造成的卸荷扰动影响,根据施工过程中对洞室围岩松动圈的声波测试结果,围岩划分为强卸荷带、中等卸荷带及未扰动区,其中强卸荷带厚度为 3.5~4.0 m,中等卸荷带厚度为 3.0 m。计算模型中按上述卸荷带划分考虑了围岩力学参数的弱化,强卸荷带和中等卸荷带 E , C , R_t 分别按原岩参数的 50% 和 80% 进行弱化, f 分别按原岩参数的 80% 和 90% 进行弱化。

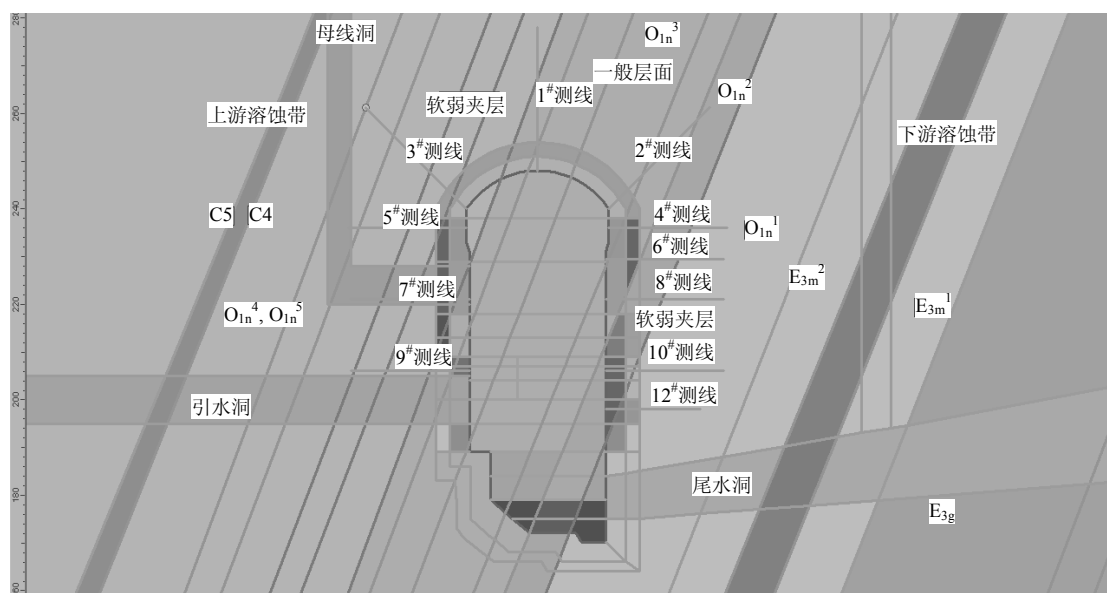


图 1 地质概化模型

Fig.1 Geological conceptual model

围岩的松动圈随洞室施工开挖形成,即在当前开挖步,主要模拟施工开挖应力释放;在下一开挖步,考虑上一步开挖形成的围岩卸荷带,降低其力学参数进行分析。洞室围岩、夹层综合体以及溶蚀带按实体单元模拟,其本构模型采用带拉伸截止限的 Mohr-Coulomb 弹塑性模型,即岩体可以产生拉破坏(单元体最小主应力达到岩体的抗拉强度)、拉

剪屈服或压剪屈服(屈服条件按 Mohr-Coulomb 准则判断)。夹层和层面采用弹塑性节理单元模拟,节理单元可沿层面产生滑移或张开,分别以节理单元的抗剪和抗拉强度判断。主厂房机窝、引水洞、母线洞、尾水洞部位围岩采用弱化等效的岩体模拟,即按洞间岩柱的宽度占主厂房长度的比例折减围岩参数作为该部位岩体力学参数的取值。具体岩体力学

参数取值见表 1，岩层层面、软弱表层相关系数待反演，其中 R_t 值与 c 值相同。计算步骤对施工步序作了适当的概化，共分为 14 步进行分层开挖模拟，第 1~10 步为洞室开挖，开挖至隔墩平台高程为 189 m，第 11~14 步采用弱化岩体力学参数方式模拟机窝开挖，见图 2。计算按实际施工过程中的固结灌浆时机改变卸荷松动带内岩体力学参数，以模拟了开挖至高程 218 m 和开挖至高程 189 m 时两次对下游边墙的固结灌浆。依据声波检测资料，分别对卸荷带内岩体的变形模量 E 提高 20%，强度参数 c 值提高 10%， f 提高 5% 进行计算。

表 1 岩体及夹层物理力学参数
Table 1 Physico-mechanical parameters of rock mass and interlayers

岩性	重度 kN·m ⁻³	变形模量 E/GPa	泊松 比 μ	抗剪强度		抗拉强度 R _t /MPa
				凝聚力 c/MPa	内摩量 系数 f	
O _{1r} ³	26.5	6.0	0.3	0.5	0.8	0.5
O _{1r} ²	26.5	10.0	0.25	1.0	1.1	1.0
O _{1n} ⁴ , O _{1n} ⁵	26.8	*	0.23	1.3	1.3	1.0
O _{1n} ³	26.6	*	0.22	1.2	1.2	1.0
O _{1n} ²	26.4	*	0.25	0.8	1.0	0.5
O _{1n} ¹	26.8	20.0	0.22	1.0	1.2	0.8
E _{3m} , E _{3g}	26.7	20.0	0.22	1.0	1.2	0.8
上游溶蚀带	24.0	10	0.25	0.7	0.8	0.5
下游溶蚀带	26.0	5	0.32	0.5	0.7	0

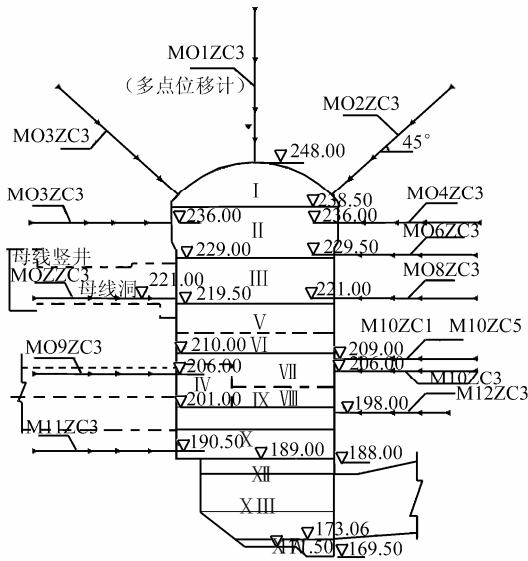


图 2 监测断面多点位移计布置及分步开挖图 (单位: m)
Fig.2 The distribution of extensometers and excavation sketch (单位: m)

喷层采用梁单元模拟，锚杆和预应力锚索采用

弹塑性杆单元模拟。其中，钢纤维混凝土喷层厚度为 15 cm；锚杆 $\Phi 32$ mm，长 6，8，9，10 和 12 m。高程 218 m 以上间距为 1.5 m，以下间距为 1.2 m，张拉锚杆预应力为 150 kN；预应力锚索长 25 m、设计预应力为 1 500 kN，间距为 3 m；支护措施的施作时机是在当前开挖步之后，下一开挖步之前。

3.2.2 特征增量位移

彭水地下厂房布置了大量变形、应力和渗流的监测仪器，由于采用位移为主的反分析方法，故只给出了所选计算剖面对应的多点位移计的布置图（图 2），在顶拱和上下游边墙部位共布置了 12 个多点位移计。

在已埋设的多点位移计中有一少部分是预埋的，其他大部分为主厂房开挖到相应高程后安装的。考虑到除预埋多点位移计外，其余的多点位移计只能测量到该多点位移计安装之后岩体发生的位移，在这之前的岩体位移损失掉了。所以，在将计算位移与监测位移进行对比时，对于预埋多点位移计，可直接将每一层开挖完的计算结果与相应的实测值进行比较；而对于后来埋设的多点位移计，可以求出该多点位移计所在层开挖完毕后的计算位移与后续各层开挖完成后的计算位移差值或者任意后续开挖步之间的计算位移差值，与相应的监测位移差值进行比较。例如，M01ZC3 在第 1 层开挖后安装，那么在第 2 层和第 3 层开挖完成后，用第 3 层开挖完成后的计算位移减去第 2 层开挖完成后的计算位移，与第 3 层开挖完成的监测位移减去第 2 层开挖完成的监测位移的差值进行对比。位移监测布置见图 2，从中选取了 12 个不同测点作为反演依据。

3.3 参数敏感性分析

神经网络输入变量的选择影响参数反演的精度，选取对位移灵敏度大的力学参数作为待反演的对象，可以减小模型误差与测量误差对反分析结果的影响。这对提高力学参数反分析的实用性与可信性有重要意义。因此，本文参考文献[1]中的方法，对地下厂房多种岩性参数进行了敏感性分析。由于厂房在施工开挖过程中洞室的边界条件在不断变化，新的岩层及层面不断出露，故厂房的不同部位对不同的岩性参数敏感程度差别较大，具体特点是：

- （1）围岩各部位的位移对地应力的水平侧压系数均较敏感；
- （2）下游页岩 O_{1n}² 的变形模量对下游边墙位移影响较大，但对上游边墙位移影响小；
- （3）岩层层面及软弱夹层的力学参数对围岩位移影响显著。考虑到彭水地下厂房地层为陡倾角岩层，结合实际监测资料和前期科研的数值分析结果，认为厂

房围岩变形主要受岩层层面,特别是软弱夹层的控制,故确定了9个敏感度大的参数:(1)一般岩层层面的剪切刚度 k_{s1} (取 $k_{n1}=2.5 k_{s1}$),凝聚力 c_1 ,内摩擦系数 f_1 ;(2)软弱层面的剪切刚度 k_{s2} (取 $k_{n2}=2.5 k_{s2}$),凝聚力 c_2 ,内摩擦系数 f_2 (软弱层面主要为401[#],404[#],406[#]夹层,以及下游侧页岩 O_{in}^2 岩层与灰岩 O_{in}^1 岩层间层面);(3)下游侧页岩 O_{in}^2 为III类围岩,其变形模量为 E_1 ;(4)由于岩体 $O_{in}^3 \sim O_{in}^5$ 的变形模量较高且同属II类围岩,故视为变形

模量相同,用 E_2 表示;(5)水平向的侧压系数 k_x (垂直于厂房洞轴线方向)。

3.4 训练样本的设计

根据地质资料和室内外岩石力学试验及地应力测试结果,确定9个参数的取值范围,见表2。根据均匀设计理论^[2],因素数为9,每个因素划分为6个水平,设计48组训练样本,表3列出了部分样本和10组测试样本的试验组合。将参数样本输入有限元模型进行计算,得到特征增量位移。

表2 待反演参数取值范围及结果

Table 2 The range and result of parameters in back analysis

反演参数	$k_{s1}/\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1}$	$k_{s2}/\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1}$	c_1/MPa	$\varphi_1/(^{\circ})$	c_2/MPa	$\varphi_2/(^{\circ})$	E_1/GPa	E_2/GPa	k_x
取值范围	500~3000	200~1500	0.2~0.6	26.6~38.7	0.02~0.2	16.7~31	0.5~20	25~35	1.0~2.5
反演结果	1769.10	857.09	0.40	32.60	0.12	23.53	8.38	29.00	1.81

表3 训练参数样本

Table 3 The samples for training of BP model

方案	$k_{s1}/\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1}$	$k_{s2}/\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1}$	c_1/MPa	$\varphi_1/(^{\circ})$	c_2/MPa	$\varphi_2/(^{\circ})$	E_1/GPa	E_2/GPa	k_x
1	500	200	0.6	29.02	0.164	22.42	14	33	2.2
2	3000	200	0.44	38.7	0.128	19.56	17	33	1.6
3	2000	1500	0.44	36.28	0.164	16.7	8	35	2.2
4	2000	460	0.28	29.02	0.02	16.7	11	33	2.5
5	500	980	0.36	29.02	0.2	25.28	5	35	1.6
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
46	500	980	0.36	26.6	0.128	25.28	20	25	2.2
47	1000	980	0.2	38.7	0.092	28.14	11	33	2.2
48	2000	980	0.6	38.7	0.056	16.7	20	27	1.9

3.5 神经网络模型

待反演的围岩力学参数及地应力参数共9个,组成输出向量;取开挖实测相对位移增量共12个特征位移值组成输入向量。因此,神经网络输入层的神经元有12个,输出层的神经元有9个。网络结构设计选用2个隐含层,第1隐含层神经元24个,第2隐含层神经元18个。输入层与第1隐含层间的传递函数为logsig函数,第1隐含层和第2隐含层间的传递函数为tansig,第2隐含层和输出层间的传递函数为logsig函数。网络结构为:12-24-18-9。遗传算法计算中种群内个体数为40,进化代数数为600步,选择概率为0.08,交叉概率为0.6,变异概率为0.1,非均匀变异的形状因子取为3。图3所示为遗传算法适应度函数随进化代数的变化,从图中可以看出,随着不断的进行选择、交叉和变异操作,平均适应度逐渐趋于最优适应度。图4为神经网络误差曲线随训练时间步的变化。从图中可以看出,网络误差整体都随不断训练而减少,由于采用了弹性梯度下降函数^[3]来训练网络,使得权值的变化呈振荡趋势,但是权值的变化量不断减小,因而误差曲

线呈现整体波动下降的趋势。

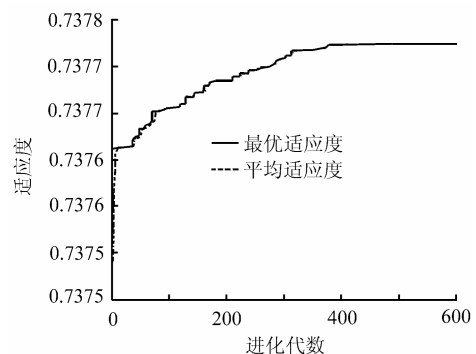


图3 遗传算法适应度变化图

Fig.3 The fitness sketch of GA

3.6 反演结果与检验

将训练参数样本和测试参数样本与相应特征位移组成样本对,对经过遗传算法优化过的神经网络进行训练,得到岩体力学参数与围岩特征点相对位移增量间的非线性映射关系。将实际监测得到的特征点的相对位移增量值输入训练好的神经网络,得到所要反演的岩体力学参数和地应力侧压系数,见表2。

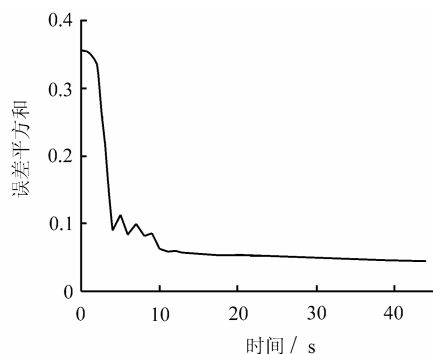


图4 人工神经网络误差变化图

Fig.4 The error sketch of ANN

针对反分析结果的正确性与可靠性,须按一定的方法对其进行检验。通常应将反分析得到的参数输入到正分析模型中进行数值计算,将实测点对应的计算位移值同量测位移相比较,根据两者的符合程度对反分析结果作出定性评价。本文采用后验差检验方法^[4]对参数反演结果进行检验,这里实测值与计算值之间误差的计算与一般的后验差方法有所不同。一般的后验差方法在检验某一测点的实测位移时间系列时比较适用;而本文情况则是某一时间段的多测点的位移反分析的检验,主要是检验所有测点的计算值对各自相应实测值的整体偏离,因此采用了“单位变形误差”的概念^[5],即所取计算值与观测值之间的误差是相对于单位观测值的偏差距离。这样的取值显然可以在一定程度上反映出由于空间位置不同而引起的不同测点的权重比例,因而具有更实际的意义。

设实测位移为 $u_m(i)$, 计算的预测位移为 $u_c(i)$, 其残差为

$$\varepsilon(i) = (u_m(i) - u_c(i)) / u_m(i) \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: n 为实测位移的总数。

令 s_1 为实测位移的均方差, s_2 为残差的均方差, 则有:

$$s_1^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ((u_m(i) - \bar{u}) / u_m(i))^2 \quad (2)$$

$$s_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\varepsilon(i) - \bar{\varepsilon})^2 \quad (3)$$

其中:

$$\bar{u} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_m(i), \quad \bar{\varepsilon} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_m(i) \quad (4)$$

后验差比值为

$$C = s_2 / s_1 \quad (5)$$

小误差概率为

$$P = P\{|\varepsilon(i) - \bar{\varepsilon}| < 0.6745s_1\} \quad (6)$$

根据上面得到的 C , P 值, 可按表 4 对反分析结果作出定性的评价。

表4 反分析结果评价指标

Table4 The evaluating indices of results of back analysis

指标	优	合格	基本合格	不合格
P	>0.95	>0.80	>0.70	≤ 0.70
C	<0.35	<0.50	<0.65	≥ 0.65

按照上述方法, 经二维有限元正分析计算, 得到地下厂房围岩特征点的相对位移值增量, 与实测相对位移增量的比较结果见表 5 和图 5。由上述方法可求得后验差的检验指标 C , P 值, 分别为 $C = 0.12$, $P = 1$, 反分析结果评价为优, 故本次参数反演结果是合理、有效的。

表5 实测位移与预测位移值比较

Table 5 Comparison between measured displacements and predicted ones

测点	对应的开挖步序	实测相对位移增量/mm	预测相对位移增量/mm
M01-4	II—III	1.34	0.78
M02-3	II—III	1.72	2.02
M02-4	II—III	2.23	2.52
M04-1	II—III	0.77	0.6
M04-4	II—III	5.07	3.55
M05-2	II—III	2.67	1.49
M05-3	II—III	2.93	2.8
M06-2	II—III	10.16	6.2
M06-3	II—III	11.57	7.92
M08-4	III—X	20.49	19.6
M10-3	III—X	19.54	21.3
M12-2	IX—X	3.79	5.72
M12-4	IX—X	6.44	6.7

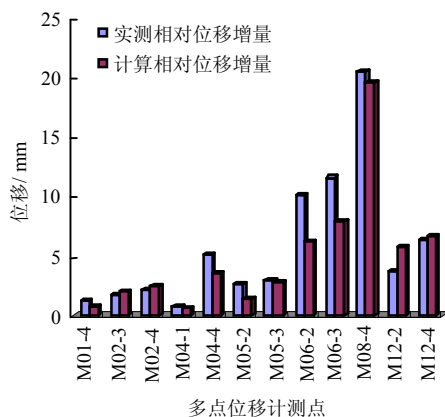


图5 各测点的计算相对位移增量与实测相对位移增量对比

Fig.5 The comparison between computed relative displacements and measured ones in rockmass

4 结 论

(1) 本文以数值模拟技术和试验设计理论为基础,应用能够模拟复杂非线性问题的人工神经网络和具有全局搜索能力的遗传算法建立了大型地下厂房开挖过程中围岩位移与力学参数间的复杂映射关系,反演宏观岩体力学参数及初始地应力。预测计算结果表明,通过该方法得到的参数是合理的。该方法也可以为同类地下工程反分析问题提供有益的借鉴。

(2) 大型地下工程通常处于复杂的地质条件中,要穿越多种岩层及层面和夹层等,涉及的参数众多,必须在结合地质分析和已有试验资料基础上,进行敏感性分析,选择对于现场监测位移敏感性高的参数进行反演,这样既简化了反分析过程,又可以提高参数反演的精度。

(3) 由于施工现场的工作条件和工程进度等问题,多点位移计的埋设通常在工程开挖爆破之后进行,因此,开挖时刻释放的弹性应变能引起的岩体变形没有监测到。针对这个问题,本文采用不同开挖步序间增量位移进行反分析,有效地避免了瞬时位移损失问题。

(4) 由于彭水地下厂房平行于岩层走向布置,沿厂房轴向地质条件变化不大,因此,采用了二维弹塑性有限元进行正分析,要进行地质和施工详细的模拟,需进行三维数值分析。岩体力学参数反分

析的更大意义在于指导后续设计和施工。笔者利用反演得到的结果进行了二维和三维弹塑性分析和预测,详细分析了厂房后续开挖中应力、位移和锚固体系受力的变化,将另文给出。

参 考 文 献

- [1] 朱维申,何满潮. 复杂条件下围岩稳定性与岩体动态施工力学[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
 - [2] 方开泰,马长兴. 正交设计与均匀设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
 - [3] RIEDMILER M. BRAUN H. A direct adaptive method for faster back propagation learning: The RPROP algorithm// Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks[C]. San Francisco: [s.n.], 1993, 586—591.
 - [4] 邓聚龙. 灰色预测与决策[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1988.
 - [5] 李仲奎,王爱民,莫兴华,等. 大型地下洞群时空双系列反馈分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1998, 38(1): 50—54.
- LI Zhong-kui, WANG Ai-min, MO Xin-hua. Time/space double series back analysis of large scale underground power house [J]. *Journal of Tsinghua University (science and Technology)*, 1998, 38(1): 50—54.

第五届全国基坑工程学术讨论会(论文征集通知)

主办单位: 中国建筑学会建筑施工学术委员会基坑工程专业委员会; 天津市建筑学会地基基础学术委员会

承办单位: 天津大学; 天津城市基础设施建设投资集团有限公司; 天津城市建设学院; 天津市工程地质勘察院; 天津三建建筑工程集团有限公司; 河北工业大学

协办单位: 《岩土工程学报》编辑部; 中建三局第三建设工程有限责任公司; 天津市房屋鉴定勘测设计院; 天津市政二基础工程有限公司; 中国核工业中原建设公司

征文内容: (1) 深基坑设计理论与施工技术; (2) 承压水对城区深基坑及环境的影响技术措施; (3) 逆作法设计与施工技术; (4) 软土中深基坑设计与施工关键问题; (5) 其他特殊土条件下的基坑工程; (6) 典型工程实例及基坑事故。

本次会议论文将以我国岩土工程权威期刊《岩土工程学报》(增刊)形式出版,欢迎广大基坑工程工作者投稿。

重要日期: (1) 论文提交日期: 2008 年 5 月 15 日(以当地邮戳为准)。要求提供电子版一份,按照《岩土工程学报》格式要求排版。排版格式可在《岩土工程学报》网站 <http://www.cgejournal.com/> 下载。(2) 论文录用通知日期: 论文将组织专家审查,录用通知及修改意见将在 2008 年 6 月 15 日前通知作者。(3) 论文修改返回日期: 作者根据修改意见和排版要求定稿,于 2008 年 6 月 30 日前将修改稿和修改说明电子版发到会议组委会,同时要求通过邮局寄送打印件一份(信封注明“第五届全国基坑工程学术讨论会”)。

论文投稿地址及组委会联系地址(信封请注明第五届基坑工程会议)如下:

联系人: 刘 畅 徐激抒; 地址: 天津市南开区卫津路 92 号天津大学土木工程系; 邮编: 300072

联系电话: 022-27402341, 13821202109, 13920990790; 传真: 022-27402341; E-mail: jikengtj@yahoo.cn

(摘自 河海大学岩土网)