

索风营水电站地下洞室岩体力学参数的位移反分析

许传华^{1,2}, 任青文¹, 郑治³, 肖德序³

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 中钢集团马鞍山矿山研究院, 安徽 马鞍山 243004; 3. 中国水电工程顾问集团贵阳勘测设计研究院, 贵州 贵阳 550002)

摘要: 利用支持向量机和模拟退火算法对索风营地下洞室岩体的力学参数进行位移反分析, 一方面支持向量机代替有限元计算提高了计算分析速度, 另一方面用模拟退火算法代替传统的优化算法, 避免优化过程中目标函数陷入局部极小值而无法继续寻优的状态, 提高了反演的效率精度。利用反演得到的岩体力学参数进行有限元正分析所得位移与现场实测结果更加接近。

关键词: 索风营水电站; 支持向量机; 模拟退火算法; 位移反分析

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)11-1981-05

作者简介: 许传华(1971-), 男, 博士, 1994年毕业于河北地质学院水文地质工程地质专业, 高级工程师, 主要从事岩土体非线性稳定性方面的研究工作。

Displacement back analysis of rock mechanic parameters of underground grotto of Suofengying Hydraulic Power Plant

XU Chuan-hua^{1,2}, REN Qing-wen¹, ZHENG Zhi³, XIAO De-xu³

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Maanshan Institute of Mining Research, Maanshan 243004, China; 3. Guiyang Institute of Investigation and Designing, Guiyang 550002, China)

Abstract: Parameters of rockmass of Suofengying Hydraulic Power Plant were derived from displacement back analysis based on the support vector machine and simulated annealing. Firstly the support vector machine was used to substitute the time-consuming finite element analysis, and secondly the simulated annealing was used for the optimization of objective function to avoid that the search fell in one of the minimums and could not go any further when the conventional mathematical optimization methods were employed. The displacement calculated by FEM with parameters obtained from back analysis was close to the measured value.

Key words: Suofengying Hydraulic Power Plant; support vector machine; simulated annealing algorithm; displacement back analysis

0 引言

索风营水电站位于贵州省修文县和黔西县交界的乌江中游六广河段上, 是乌江干流规划选定方案中的第二级。最大坝高 121.8 m, 电站装机容量 600 MW。

地下厂房洞室群位于坝轴线下游约 50 m 处的右岸山体内, 轴线方位 N68° E, 与岩层走向基本平行, 所处地层顶拱部位大约为 T_{1y}^{2-3} 厚层、中厚层块状灰岩, 其余为 T_{1y}^{2-2} 中厚层夹薄层灰岩; 围岩类别为 II ~ III1 类, 稳定性较好; 主变洞所处岩层大部分为 T_{1y}^{2-2-1} 薄层灰岩及 T_{1y}^{2-1-3} 薄层、极薄层灰岩, 其夹层发育, 围岩类别为 III2 类, 稳定性较差。尾水隧洞所处岩层大部分为 T_{1y}^{2-1-3} 薄层、极薄层灰岩, 其夹层发育, 围岩类别为 III2 类, 稳定性较差。较差的灰岩对主厂房下游边墙及尾水洞围岩的稳定性有很大的影响^[1]。

洞室开挖自 2002 年 10 月开始, 2003 年 12 月结束。开挖过程中在相关部位布设了多点变位计进行位移跟踪观测, 积累了相关的位移观测数据。

本文依据现有观测资料, 研究模拟实际的开挖和支护施工程序, 考虑岩体的弹塑性, 反馈分析岩体主要的力学参数。

1 基于支持向量机和模拟退火算法的位移反分析模型

1.1 确定岩体力学参数与岩体位移非线性映射关系的支持向量机模型

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50379005)

收稿日期: 2005-09-19

由于岩体结构的复杂性, 岩体力学参数与岩体位移之间的关系很难用显式数学表达式来描述, 而支持向量机则能被用来描述岩体力学参数与岩体位移之间的非线性映射关系。

支持向量机 (SVM) 是 Vapnik 等人根据统计学习理论提出的一种新的学习方法, 可以基于有限样本训练就能获得良好的泛化能力。并且是一个通用的学习机, 用它建模不必知道因变量和自变量之间的关系, 通过对样本的学习即可获得因变量和自变量之间非常复杂的映射关系^[2-5]。

支持向量机的回归学习算法是通过求解二次型的参数 a_i , a_i^* 得到解决, 即

$$\min \left[\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n (a_i - a_i^*)(a_j - a_j^*)(x_i x_j) - \sum_{i=1}^n y_i (a_i - a_i^*) + \varepsilon \sum_{i=1}^n (a_i + a_i^*) \right], \quad (1)$$

其约束条件为

$$\sum_{i=1}^n (a_i - a_i^*) = 0 \quad (0 \leq a_i; a_i^* \leq C; i = 1, 2, \dots, n). \quad (2)$$

求解出上述各相应参数后, 可得到支持向量机拟合函数为

$$f(x) = wx + b = \sum_{i=1}^k (a_i - a_i^*)(x \cdot x_i) + b, \quad (3)$$

其中, $(a_i - a_i^*)$ 不为 0 所对应的样本数据就是支持向量。

对于非线性支持向量回归, 可以通过非线性映射将原问题映射到高维特征空间中的线性问题进行求解。在高维特征空间中, 线性问题中的内积运算可用核函数来代替, 核函数可以用原空间中的函数来实现。常用的核函数有多项式核函数、径向基函数 (RBF) 和 Sigmoid 函数等。

为了建立岩体力学参数与岩体位移之间的非线性映射关系, 需要给出一组样本模式对支持向量机模型进行训练和检验, 用来训练和检验的样本可以通过数值计算方法 (一般为有限元方法) 获得。为了减少计算量和试验次数, 采用正交试验设计的思想来安排不同参数组合的有限元计算, 这样可以使得试验点安排得比较均匀且具有代表性, 从而能以较少的试验得出较好的结果。

1.2 模拟退火算法基本原理

模拟退火算法 (Simulated Annealing Algorithm) 就是基于金属退火的机理而建立起来的一种全局最优化方法, 它能够以随机搜索技术从概率的意义上找出目标函数的全局最小点, 避免使反演陷入目标函数的

局部极小。模拟退火算法属于直接反演, 它是一种非线性反演^[6-7]。

假设在状态 x_{old} 时, 系统受到某种扰动而可能会使其状态变为 x_{new} 。与此相应, 系统的能量也可能会从 $E(x_{old})$ 变成 $E(x_{new})$ 。系统由状态 x_{old} 变为状态 x_{new} 的接受概率可由 Metropolis 规则来确定:

$$P = \begin{cases} 1 & (E(x_{new}) < E(x_{old})), \\ \exp \left[-\frac{E(x_{new}) - E(x_{old})}{T} \right] & (E(x_{new}) \geq E(x_{old})). \end{cases} \quad (4)$$

式 (4) 的含义是: 当新状态使系统的能量函数值减少时, 系统一定接受这个新的状态; 而当新状态使系统的能量函数值增加时, 系统也以某一概率接受这个新的状态。一般可以这样来实现, 生成一个 $[0, 1]$ 区间均匀分布的随机数 η , 若

$$\eta < \exp \left[-\frac{E(x)}{T} \right], \quad (5)$$

则以新状态 x_{new} 取代 x_{old} 作为当前状态, 否则仍保留 x_{old} 作为当前状态。

1.3 基于支持向量机和模拟退火算法的位移反分析

位移反分析的实质就是寻找一组待反演的参数使与之相应的位移预测值向实测位移值逼近。目标函数可取为

$$F(X) = \sum_{i=1}^n (f_i(X) - u_i)^2. \quad (6)$$

式中 X 为待反演参数; $f_i(X)$ 为岩体上第 i 个量测点位移量的预测值; u_i 为相应的位移量的实测值; n 为位移监测点总数。

据此, 利用 Matlab 语言工具箱编写了该位移反分析的计算程序, 计算过程流程图如图 1 所示。

1.4 算例

设边坡岩体由单一岩性组成, 相应的物理力学参数为: 重度 $\gamma = 26 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$, 弹性模量 $E = 4 \text{ GPa}$, 泊松比 $\mu = 0.30$, 粘聚力 $c = 0.6 \text{ MPa}$, 摩擦角 $\varphi = 40^\circ$ 。初始应力场按自重应力场考虑, 在平面应变状态下分析。有限元网格如图 2 所示^[8]。

在边坡体中选取 5 个测点, 对于每一个测点利用有限元法计算该点的位移全量作为实测值进行位移反分析。本例只反分析岩体的抗剪强度参数 c 、 φ , 对每个参数取 5 个水平, 给出了 25 组不同的参数组合。其中的 20 组数据作为学习样本, 另 5 组数据作为测试样本检验支持向量机的预测效果。最后得到目标函数最小值为 127.6, 与该最小目标函数值对应的参数, 即为本次反演过程得到的最优参数值。反分析结果见表 1 所示。

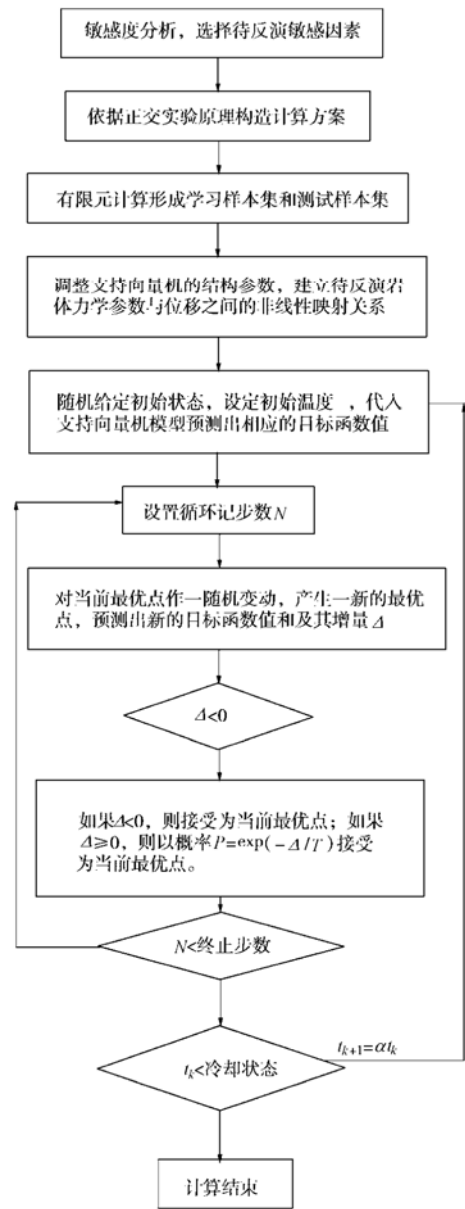


图 1 计算流程图

Fig. 1 Flow chart of calculation

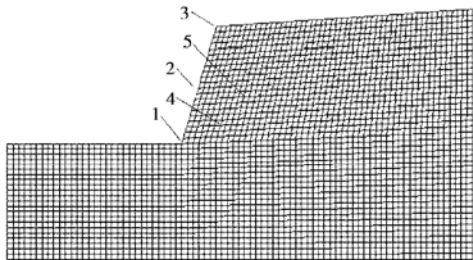


图 2 有限元计算网格图

Fig. 2 Mesh of FEM

2 索风营地下洞室围岩参数弹塑性反分析

2.1 索风营地下洞室围岩的材料分区与测点选择

表 1 位移反分析结果与理论值比较
Table 1 Comparison between theoretical and back analysis parameters

反演参数	反演值	理论值	绝对误差	相对误差 /%
c/MPa	0.572	0.6	0.028	4.67
$\phi/^\circ$	37.11	40	2.89	7.24

根据地下洞室计算范围内岩体材料的分区及层间错动带, 同时需要考虑岩体弹性变形模量的正交各向异性, 需要确定的参数有 25 个: ①极薄层层状灰岩 T_{1y}^{2-1-3} 水平和垂直向的岩体变形模量 E_1 、 E_2 及抗剪强度 f_1 、 c_1 ; ②薄层结构层状灰岩 T_{1y}^{2-2-1} 水平和垂直向的岩体变形模量 E_3 、 E_4 及抗剪强度 f_2 、 c_2 ; 中厚夹薄层状灰岩 T_{1y}^{2-2-2} 水平和垂直向的岩体变形模量 E_5 、 E_6 及抗剪强度 f_3 、 c_3 ; ③块状结构厚灰岩 T_{1y}^{2-3} 的岩体变形模量 E_7 及抗剪强度 f_4 、 c_4 ; ④5 条层间错动带的抗剪强度 f_5 、 c_5 、 f_6 、 c_6 、 f_7 、 c_7 、 f_8 、 c_8 、 f_9 、 c_9 。

反演计算范围为沿厂房轴线方向取 240 m, 下游取至尾水管出口处, 上游取至离厂房边墙 90 m 处, 下部取至高程 650 m。整体坐标系为: x 轴沿厂房轴线, 指向山体; y 轴指向下游; z 轴为高程方向, 铅直向上。依据初始地应力回归结果, x 向侧压力系数为 0.95, y 向侧压力系数为 0.66。有限元计算范围内共有节点 46144 个, 单元 44702 个, 计算网格见图 3、4。洞室群开挖分八步进行, 开挖次序依次为 A、B、C、D、E、F、G、H (如图 5)。

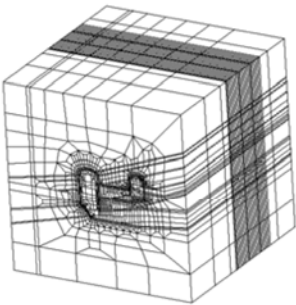


图 3 整体网格图

Fig. 3 Whole mesh of FEM

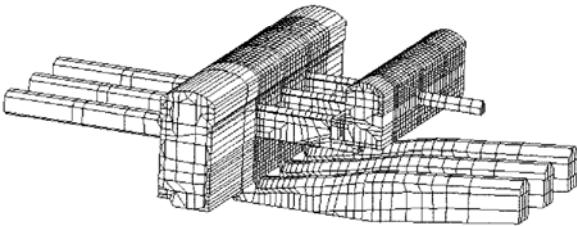


图 4 洞室群网格图

Fig. 4 Finite element mesh of cave

在按式 (5) 进行反分析时, 为了使位移的计算值和实测值符合得更好, 两者均采用相对值: ①实测值

采用多点变位计孔口和孔底的位移差;②计算值不仅考虑多点变位计位置孔口和孔底的位移差,而且要减去该多点变位计埋设之前发生的位移。

测点主要布置在主厂房、主变洞以及尾水洞等关键部位。将多次正分析的成果(相对值)与实测位移的相对值进行比较,删除个别不合理的测点,选用较为合理的 68 个测点作为反分析的拟合点。

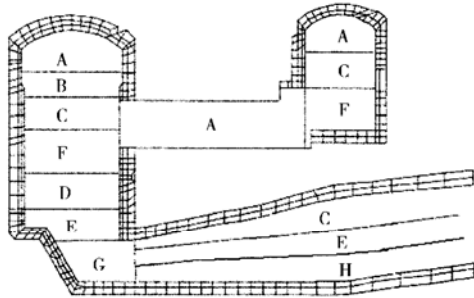


图 5 开挖次序示意图

Fig. 5 Illustration of excavation sequence

2.2 弹塑性反演参数的敏感性分析

在 $|\Delta x_k|/x_k$ 较小的情况下,敏感因子 $S_k(x_k)$ 可近似地表示为

$$S_k(x_k) = \left(\frac{\Delta F}{F} \right) / \left(\frac{|\Delta x_k|}{x_k} \right) = \left| \frac{\Delta F}{\Delta x_k} \right| \frac{x_k}{F} \quad (k=1,2,\cdots,n) \quad (7)$$

取定各参数变化范围分别为设计值的 0.8、0.9、1.0、1.1、1.2 倍,求得相应参数的敏感度因子如表 2。

表 2 各参数的敏感度因子

Table 2 Sensitive indices of parameters

参数	敏感度	参数	敏感度	参数	敏感度
E_1	0.1225	f_2	0.0213	f_6	0.0015
E_2	0.3233	c_2	0.1092	c_6	0.0025
E_3	0.0661	f_3	0.0777	f_7	0.0011
E_4	0.2515	c_3	0.1956	c_7	0.0020
E_5	0.0895	f_4	0.0111	f_8	0.0000
E_6	0.0868	c_4	0.0087	c_8	0.0018
E_7	0.1938	f_5	0.0012	f_9	0.0000
f_1	0.1947	c_5	0.0040	c_9	0.0015
c_1	0.2523				

由表 2 可知,各参数灵敏度大小的次序为 E_2 、 c_1 、 E_4 、 c_3 、 f_1 、 E_7 、 E_1 、 c_2 ,其他参数接近于 0。这就表明,影响相对位移的主要因素是岩体的变形模量及部分岩体的抗剪强度,层间错动带及其它岩体的抗剪强度指标对位移目标函数影响较小。因此依据各参数的灵敏度及算法的可操作性,本次反演只选择岩体的 E_2 、 c_1 、 E_4 、 c_3 、 f_1 、 E_7 、 E_1 、 c_2 等 8 个参数作为反演

参数。

2.3 参数反演成果

计算表明,将灵敏度相差较大的参数放在一起同时反演不仅大大增加计算时间,更主要的是可能会得出不合理的结果,甚至可能使反演无法进行,为此根据以上灵敏度分析的结果,将这八个参数分成 4 组,第一组参数为 E_2 、 E_4 ,第二组为 f_1 、 c_1 ,第三组为 E_1 、 E_7 ,第四组为 c_2 、 c_3 。

依据正交实验设计原理,构造样本时,每个参数取 5 个水平,对每一组参数共有 25 组不同的组合。利用有限单元法计算出与每一组参数相对应的测点的相对位移值,从而得到 25 个样本值。用该正交设计构造的 25 个样本中的前 20 个样本训练网络,用后 5 个样本来测试模型,从而获得支持向量机的最佳参数,建立相应的支持向量机预测模型。

支持向量机参数的选择采用交叉验证法,并借鉴相关的研究经验,核函数采用径向基函数 RBF, $\varepsilon=0$, $C=\infty$, $\sigma=1$,利用测试样本进行检验可以看出,此时支持向量机拟合精度较高。对于模拟退火算法中相关参数则通过多次试算选取确定,初始温度 $T_0=10$,降温系数 $\beta=0.95$ 。

依据正交试验原理,同时考虑到计算灵敏度时目标函数值的变化规律,对第一组参数搜索出对应于第一组参数的目标函数最小值为 271.0468,对应的反演参数 $E_2=6.38$ GPa, $E_4=7.26$ GPa。把反演得到的 E_2 、 E_4 值代替初始值,再进一步反演第二组参数 f_1 、 c_1 ,重复进行可得到各反演参数值。为了得到较精确的参数值,第一次反演结束后,用 E_2 、 c_1 、 E_4 、 c_3 、 f_1 、 E_7 、 E_1 、 c_2 各参数的反演值代替初始设计值,重新计算 E_1 、 E_2 ,此时目标函数值无明显降低,至此反演结束。最终反演岩体力学参数如表 3。

表 3 各参数的反演值

Table 3 Values of parameters from back-analysis

参数	E_1 / GPa	E_2 / GPa	E_4 / GPa	E_7 / GPa	f_1	c_1 / MPa	c_2 / MPa	c_3 / MPa
初始值	5.00	3.00	4.00	15.00	0.70	0.50	0.60	1.00
反演值	8.09	6.38	7.26	18.53	0.96	0.77	0.82	1.25

利用该反演结果进行有限元正分析,目标函数值明显降低,对应值为 26.58,表明各测点的位移计算值和实测值之间的平均误差约为 0.63 mm,对于索风营这样的大型地下洞室来说,这一结果还是比较令人满意的。

3 结 论

(1) 本文利用支持向量机和模拟退火算法对索风营水电站地下洞室的岩体力学参数进行位移反分析。

本反演模型既利用了支持向量机的非线性映射、推理和预测功能, 模拟有限元计算过程, 从而提高了反分析计算速度。同时由于模拟退火算法具有全局搜索能力, 解决了局部极小与全局极小问题, 为解决全局优化问题提供了一种新的搜索策略。

(2) 从参数的敏感性分析可以看出, 影响岩体相对位移的主要因素是岩体的变形模量及部分岩体的抗剪强度, 层间错动带及其它岩体的抗剪强度指标对目标函数影响较小。

(3) 利用反演值进行有限元正分析, 与原参数相比, 位移普遍变小, 与实测位移更加接近。

参考文献:

- [1] 河海大学土木工程学院, 国家电力公司贵阳勘测设计研究院. 乌江索风营水电站右岸地下厂房洞室群围岩稳定三维有限元分析研究报告[R]. 2003.(School of Civil Engineering of Hehai University, Guiyang Hydroelectric Investigation Design and Research Institute. 3-D FEM stability analysis of underground caves of right bank of Suofenyng Hydropower Station with [R].2003.)
- [2] 赵洪波, 冯夏庭. 位移反分析的进化支持向量机研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(10): 1618 - 1622.(ZHAO Hong-bo, FENG Xia-ting. Study on genetic-support vector machine in displacement back analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003,**22**(10):1618 - 1622.)
- [3] VAPNIK V N. The nature of statistical learning theory[M]. New York: Springer-Verlag, 1995:55 - 69.
- [4] YONAS B. DIBIKE, SLAVCO Velickov, et al. Model induction with support vector machines: introduction and application[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2001(7):208 - 216.
- [5] 刘开云, 乔春生, 腾文彦. 边坡位移非线性时间序列采用支持向量机算法的智能建模与预测研究[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(1): 57 - 61.(LIU Kai-yun, QIAO Chun-sheng, TENG Wen-yan. Research on non-linear time sequence intelligent model construction and prediction of slope displacement by using support vector machine algorithm[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004,**26**(1):57 - 61.)
- [6] KIRKPATRICK S, GELATT C D, VECCKI M P. Optimization by simulated annealing[J]. Science, 1983,**220**:671 - 680.
- [7] 徐果明. 反演理论及其应用[M]. 北京: 地震出版社, 2003:135 - 144.(XU Guo-ming. Theories of back analysis and its application[M]. Beijing: Earthquake Press, 2003:135 - 144.)
- [8] 许传华, 任青文, 周庆华. 基于支持向量机和模拟退火算法的位移反分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(22): 134 - 4138.(XU Chuan-hua, REN Qing-wen, ZHOU Qing-hua. Displacement back analysis based on support vector machine and simulated annealing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,**24**(22):4134 - 4138.)
- [9] 丁德馨, 张志军. 位移反分析的自适应神经模糊推理方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(18):3087 - 3092.(DING De-xin, ZHANG Zhi-jun. Adaptive neuro-fuzzy inference approach for back analysis of displacements[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,**23**(18):3087 - 3092.)
- [10] 杨林德. 岩土工程问题的反演理论与工程实践[M]. 北京: 科学出版社, 1996:8 - 20.(YANG Lin-de. Theories of back analysis and its application on geotechnique[M]. Beijing: Science Press, 1996:8 - 20.)

《岩土工程学报》2006 年增刊已出版

《岩土工程学报》2006 年增刊于 2006 年 11 月上旬出版, 该书刊登了第四届全国基坑工程研讨会的交流论文共计 139 篇, 内容涉及基坑工程理论分析及应用、基坑工程设计方法与实践、基坑工程施工技术及应用、基坑工程实录及事故分析以及基坑工程的风险评估与管理等方面, 适于从事基坑工程的研

究、教学、设计、施工、监测以及管理等工作的人员学习交流。全书共 600 页, 定价 100 元, 欢迎广大读者订购。购书请直接寄款至南京市虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部, 邮编 210024, 并注明购书人的姓名、邮政编码及详细地址和单位。

(《岩土工程学报》编辑部)