

滑坡的综合集成智能分析与优化设计方法研究*

冯夏庭 李邵军 张友良 刘建 赵洪波 尹顺德

(中国科学院武汉岩土力学研究所 武汉 430071)

摘要 鉴于滑坡是多因素相互影响的高度非线性力学问题,智能、全局优化以及确定性力学分析方法的综合集成是很有吸引力的。总结了关于滑坡的监测、智能预测、分析与优化设计等方面的最新进展,包括综合集成智能分析与优化设计方法学、位移-时间序列建模的进化支持向量机、滑体参数反演的进化支持向量机-有限元方法、加固方案优化设计的演化神经网络-数值方法以及这些方法在高速公路滑坡(如福建八尺门滑坡、襄十滑坡)和三峡库区滑坡的应用研究成果。结果表明,所提出的综合集成智能分析与优化设计方法是科学合理的。最后还讨论了今后一段时间内的研究发展方向。

关键词 滑坡,综合集成智能分析方法,支持向量机,参数反演,进化神经网络,优化设计

分类号 P 642.22 **文献标识码** A **文章编号** 1000-6915(2003)10-1592-05

STUDY ON METHODOLOGY OF COMPREHENSIVE INTELLIGENT ANALYSIS AND OPTIMUM DESIGN FOR LANDSLIDE

Feng Xiating, Li Shaojun, Zhang Youliang, Liu Jian, Zhao Hongbo, Yin Shunde

(*Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071 China*)

Abstract Considering the highly nonlinear mechanical problem affected by many factors, the integration of intelligence, global optimum and determined mechanics is very attractive to analysis and control design of landslide. The state-of-the-art of the study results on monitoring, intelligent prediction, analysis and optimum design of landslide is presented, including integrated intelligent analysis and optimum design methodology, support vector machine of displacement time series, back analysis of mechanical parameters using evolutionary support vector machine-finite element method, optimum design of reinforcement of landslide using evolutionary neural network-numerical method, and their applications to stability analysis and optimum design of highway slopes and large Three Gorges reservoir slopes. The results indicate that the suggested methodology is scientific and applicable. At the end, the development future on this topic is also discussed.

Key words landslide, integrated intelligent method, support vector machine, back analysis of parameters, evolutionary neural network, optimum design

1 引言

随着西部大开发战略的实施,大型岩土工程不断涌现。开挖、降雨和库水位涨落诱发了滑坡,对

社会和经济造成了严重的影响,已引起了广大科技工作者的极大关注,提出了多种分析方法。由于复杂的地质条件、降雨、库水位涨落和人为活动(如开挖等)的影响,到目前为止,许多复杂条件下大型滑坡的诱发机制尚未很好地理解清楚,有效的预测、

2003 年 5 月 26 日收到初稿,2003 年 5 月 28 日收到修改稿。

* 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412708)和中国科学院知识创新工程重要方向性项目资助(KJCX2-SW-L1-3)。

作者 冯夏庭 简介:男,1964 年生,博士,1986 年毕业于东北工学院采矿系,现任教授、博士生导师,主要从事岩石力学智能分析方法及其应用方面的研究工作。

分析与控制方法还需要进一步的研究^[1~3]。智能分析方法可通过自学习的方法建立复杂的非线性关系，在全局空间中搜索可以找到最优解。本文总结了课题组关于滑坡的监测、智能预测、分析与优化设计等方面的最新进展，部分成果见文[4~10]。

2 综合集成智能分析方法学

采用工程地质学、力学、工程科学与人工智能等科学交叉综合研究，提出了综合集成分析方法，如图 1 所示。首先，通过地质调查、勘察、现场力学试验与室内试验，揭示滑坡体的地质结构、地下及地表水情况、诱发滑坡发生的机制和原因；分析滑体和滑动面的位置、力学性质、工程活动情况等影响滑坡的主要因素。其次，根据工程经验，利用数学、力学分析方法(如极限平衡法、数值分析法等)研究滑坡的诱发机制、加固方案、治水处理措施。再次，对现场实施监测，监测内容包括地下水、地表与深部岩土体变形、抗滑桩、锚杆锚索等加固构件的受力等；并利用监测结果寻找滑动面的位置、评价滑坡治理的效果、反演岩体和滑动面的力学参数、修正滑坡治理措施等。在上述基础上提出新型智能分析方法，如滑体力学参数反演的进化支持向量机-有限元方法、滑动面的力学参数反演的进化蚁群-极限平衡算法和滑体表面和深部位移非线性的支持向量机模拟方法，实施相关力学参数的识别和变形估计；研究反馈分析方法，如课题组提出了进化神经网络-极限平衡方法进行考虑安全与

经济两个目标的滑坡加固方案优化设计。通过连续的监测和反馈分析，以实现滑坡的动态控制。

3 非线性位移-时间序列支持向量机

支持向量机(support vector machine)是基于统计学习理论的一种新的通用学习方法，它是建立在一套较好的有限样本下机器学习的理论框架和通用方法之下，既有严格的理论基础，又能较好地解决小样本、非线性、高维数和局部极小点等实际问题。

对于通过监测获得的一个非线性位移-时间序列 $\{x_i\} = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ 进行支持向量机研究，就是要寻找在 $i + p$ 时刻的位移值 x_{i+p} 与前 p 个时刻的位移值 $x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+p-1}$ 的关系：

$$\left. \begin{aligned} x_{i+p} &= SVM(x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+p-1}) \\ f(x_{n+m}) &= \sum_{i=1}^{n-p} (\alpha_i - \alpha_i^*) K(X_{n+m}, X_i) + b \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： $f(x_{n+m})$ 为第 $n+m$ 时刻的位移值； p 为历史点数； X_{n+m} 为 $n+m$ 时刻前 p 个时刻的位移值，且 $X_{n+m} = (x_{n+m-p}, x_{n+m-p+1}, \dots, x_{n+m-1})$ ； X_i 为第 $p+i$ 时刻前 p 个时刻的位移值，有 $X_i = (x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+p-1})$ ； $K()$ 为核函数； α, α^* 和 b 为系数，通过解下列二次规划获得

$$\begin{aligned} \max W(\alpha, \alpha^*) &= \\ & - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^{n-p} (\alpha_i - \alpha_i^*)(\alpha_j - \alpha_j^*) K(X_i \cdot X_j) + \\ & \sum_{i=1}^k x_{i+p} (\alpha_i - \alpha_i^*) - \varepsilon \sum_{i=1}^{n-p} (\alpha_i + \alpha_i^*) \end{aligned} \quad (2)$$

s.t.:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^{n-p} (\alpha_i - \alpha_i^*) &= 0 \\ 0 \leq \alpha_i, \alpha_i^* &\leq C \quad (i=1, 2, \dots, n-p) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

鉴于支持向量机的核函数和参数 C 的选择对支持向量机的性质有重要的影响，将遗传算法和支持向量机进行结合，提出了非线性位移-时间序列分析的进化支持向量机方法，并将该方法应用于福宁高速公路八尺门滑坡深部变形与三峡工程永久船闸高边坡变形的估计，取得了令人满意的结果。

4 滑体力学参数的反演识别方法研究

提出了参数识别的进化支持向量机有限元法，其基本思想是：通过试验设计构造计算方案，有限元计算每一方案获得支持向量机的学习样本，通过

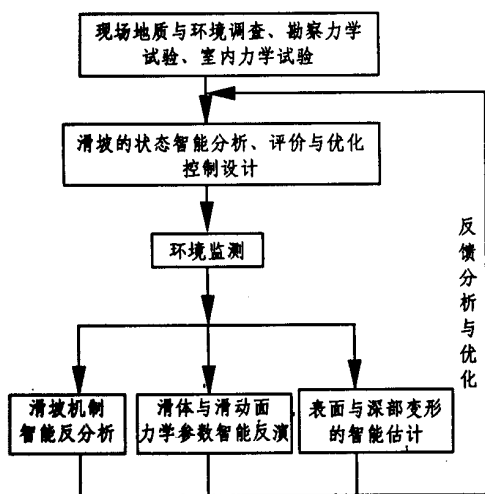


图 1 滑坡的综合集成智能分析与设计方法研究

Fig.1 Study on integrated intelligent analysis and design method for landslide

进化支持向量机学习建立位移与参数之间的复杂的非线性关系, 以此关系代替有限元计算, 通过遗传算法搜索获得岩土体的力学参数。这种方法既利用了保留数值方法的优点, 又提高了反分析的效率和精度。将该方法应用于福宁高速公路八尺门滑坡岩土体力学参数的识别, 取得了令人满意的结果。

5 滑坡加固方案优化的进化神经网络极限平衡法

其基本原理为: 根据滑坡防治工程的实际情况初步选择加固措施种类, 如抗滑桩、锚索、锚杆、锚拉桩及其组合等。对其以不同的设计参数设计出若干组方案, 形成加固方案设计参数与稳定性、工程造价的对应关系的样本集, 利用搜索到的进化神经网络, 在最优学习误差下对此设计参数样本进行学习训练, 形成设计参数与稳定性及造价间的映射关系模型:

$$\left. \begin{aligned} GA-NN(n, h_1, \dots, h_p, m): R^n \rightarrow R^m \\ (Y) = GA-NN(n, h_1, \dots, h_p, m)(X) \\ (Y) = (M, F), (X) = (x_1, x_2, \dots, x_n) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: F 为滑坡加固后的安全系数; M 为滑坡防治工程总造价; x_j 为待优化的滑坡加固方案设计参数; $j=1, 2, \dots, n$; GA 为遗传算法; NN 为神经网络。

利用上述进化神经网络模型 $GA-NN$, 记其输出项中的安全系数为 $F(GA-NN)$, 其输出项中的防治工程造价为 $M(GA-NN)$, 则滑坡加固方案的优化是在满足防治工程安全系数要求的前提下, 以造价最低作为最优设计方案, 可以归纳为这样一个数学优化模型:

$$\min f = M(GA-NN) \quad (5)$$

s.t.:

$$\left. \begin{aligned} F(GA-NN) \geq F_s \\ (M, F) = GA-NN(n, h_1, \dots, h_p, m)(X) \\ (X) = (x_1, x_2, \dots, x_n) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: f 为滑坡加固工程的造价, F_s 为防治工程中安全等级要求的安全系数。

6 实例研究

6.1 高速公路滑坡研究

福宁高速公路八尺门滑坡是福建省内迄今所发现的最大型的滑坡之一。2000 年 5~8 月, 由于高

速公路开挖和大气强降雨的影响, 边坡发生大范围的滑塌, 并持续向山后方向牵引, 形成了一大型的滑坡群。根据滑坡成因及地形、地貌特征, 该滑坡群又划分为 1[#], 2[#], 3[#] 和 4[#] 滑坡。滑坡南北方向总长约 700 m, 宽为 100~400 m, 滑动面埋深 9~27 m, 滑体总体积约 $2.77 \times 10^6 \text{ m}^3$, 滑坡治理工程造价约 6 000 万元。

6.1.1 滑坡现场监测

自 2001 年 7 月至今, 现场主要开展了如下监测工作:

(1) 地表位移监测: 采用高精度全站仪观测, 共在滑坡区埋设 114 个地表位移监测点。

(2) 滑体深部位移监测: 采用数字式测斜仪观测, 在滑坡区共布设 45 个深部位移测斜孔。

(3) 裂缝监测: 采用 6 个裂缝计观测了滑坡区主生裂缝的发展变化。

(4) 锚索监测: 现场施工锚索为压力分散型, 类型分别为 4, 8 和 12 束钢绞线锚索, 采用数字式测力计分别对试验锚索的抗拔力和工程锚索在运营期间的预应力进行了测试。

(5) 抗滑桩土压力监测: 对现场施工的 123 根抗滑桩中的 8 根进行了监测, 共埋设土压力计 45 个。

(6) 抗滑桩桩身位移监测: 在受监测各抗滑桩内埋设 2 根测斜管, 采用数字式测斜仪观测抗滑桩的桩身位移。

(7) 地下水位监测: 滑坡区的 45 个深部位移测斜孔兼做水位观测孔, 通过水位监测了解地下水的活动规律, 为滑坡区治水措施的综合评价提供依据。

6.1.2 滑坡监测成果对设计与施工的重要作用

(1) 通过对 3[#] 滑坡的监测获得了准确的滑动面位置、滑坡不同区域的滑动方向及滑坡周界, 从而为设计计算及加固方案的治理提供直接依据。

(2) 基于滑坡监测的稳定性评价结果, 对 2[#] 滑坡初步治理效果进行了综合分析, 优化了原 2[#] 滑坡的设计方案, 取消了大量的锚索加固措施, 直接节约工程成本 1 100 余万元。

(3) 根据地下水位监测结果, 设计方案加大了对滑坡区的治水力度, 增加了地表截水及平孔排水措施, 减少了部分边坡锚索措施。

(4) 实时监测获得了施工开挖及加固治理过程中滑坡动态变形信息, 对可能出现的异常危险情况进行了及时的预报, 有效地预防了施工过程中可能出现的由边坡滑塌而带来的经济损失。如 3[#] 滑坡

C 区在进行第 2,3 级边坡开挖时,边坡出现了异常变形情况,现场监测成功地进行了预报并建议停止 2 级边坡的开挖及实施反压的紧急措施,最终确保了该区滑坡的稳定和施工的安全。

6.1.3 支持向量机预测与参数反演识别

基于现场监测数据,利用前述支持向量机方法对八尺门滑坡的深部变形规律和岩土体力学参数识别进行了研究。图 2 是八尺门滑坡深部位移曲线的进化支持向量机预测值与监测值的对比,图 3 是利用进化支持向量机有限元方法识别参数的有限元正向计算值与监测值的对比。

6.2 大型库区滑坡研究

在三峡大坝建成蓄水以后,由于水位周期性涨落、库岸冲刷侵蚀以及降雨等多因素的耦合作用,库区滑坡灾害问题变得更为严重,治理威胁居民点、厂矿和耕地的滑坡灾害体成为三峡工程建设及库区移民迁建的焦点。三峡库区滑坡的形成与诱发机制复杂,滑坡种类繁多。因此,如何采用先进的分析

手段与设计方法,在合理分析滑坡潜在失稳机理及稳定性的基础上,提出安全经济的治理措施与方案,成为迫切需要研究的课题。本研究采用数值分析与

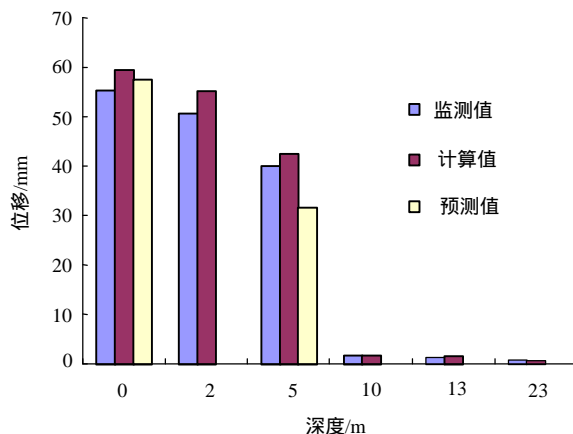


图 3 11-11 断面 BCX05 测孔监测、预测、识别参数计算位移的对比

Fig.3 Comparison of measured, predicted displacements and calculated one using recognized parameters at point BCX05 of section 11-11

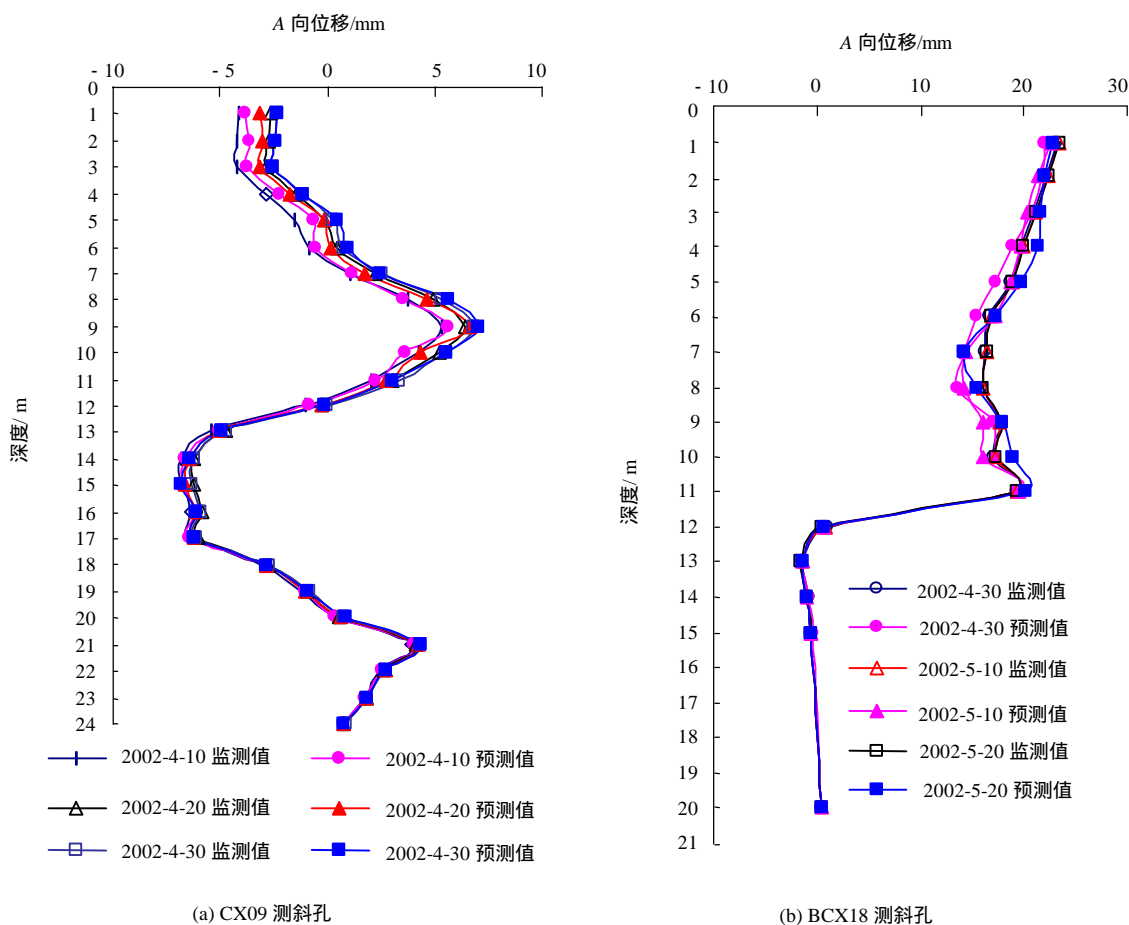


图 2 八尺门 2# 滑坡 BCX18, CX09 测斜孔深部监测位移曲线与预测位移曲线比较

Fig.2 Comparison between monitoring and predicting results of deep displacement in inclinometer boreholes of BCX18 and CX09 for landslide 2#

智能优化相结合的方法，针对三峡库区秭归县狮子包滑坡、金钗湾、云阳县松树林以及巫山县大昌镇库岸等滑坡，提出了相应的优化治理措施，优化方案通过了专家评审。

以狮子包滑坡为例，该滑坡位于三峡工程库区秭归县郭家坝新镇木籽树坪居民点的南西侧、狮子包北侧斜坡上。平面上呈一马蹄形，后缘高程 282 ~ 290 m，前缘高程 258 ~ 259 m，纵向长 55 ~ 70 m，横向宽 50 ~ 110 m，面积约 $0.49 \times 10^4 \text{ m}^2$ ，平均厚度约 10 m，体积约 $4.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ ，滑坡滑移方向为 NE 向。滑坡体前部地形坡度较陡，多为 $25^\circ \sim 30^\circ$ ，后部地形坡度多为 20° 左右。

从狮子包滑坡推力计算结果分析，滑坡推力主要来自后部滑体，后部滑体滑动面较深，而且比较陡，因此，可以对后部滑体进行削坡减载，来增加滑体稳定性并减小滑坡推力。根据可行性报告审查的专家组意见，设计方案采用后部削方、抗滑桩整体加固，并结合地表排水。在此基础上，利用课题组自主开发的抗滑桩辅助设计计算系统^[9]，分别以不同的设计参数(抗滑桩长度、抗滑桩截面宽、抗滑桩截面长、桩间距及主断面主筋数)计算出 50 余种设计方案的造价及加固后滑体的稳定性。以这些设计方案作为样本，以设计参数抗滑桩长(L)、截面宽(a)、截面长(b)、桩间距(d)、主断面主筋数(n)为输入参数，安全系数和造价为输出参数，利用进化神经网络进行学习。由遗传算法搜索最佳网络结构： $(M, F) = GA - NN(5, 11, 9, 2)(L, a, b, d, n)$

$$(7)$$

用以上获得的网络模型进行滑坡的稳定性及工程造价计算，以防治工程的造价为评价指标，适应值按下式计算：

$$fitness = M \tag{8}$$

s.t. :

$$\left. \begin{aligned} &F \geq 1.23 \\ &(M, F) = GA - NN(5, 11, 9, 2)(L, a, b, d, n) \end{aligned} \right\} \tag{9}$$

经过遗传操作，进化 60 代，最后搜索出的方案为：抗滑桩长 14 m，截面宽 2.0 m，截面长 2.6 m，桩间距 7.3 m，主断面主筋数 31 根，安全系数为 1.233，工程总造价为 234.846 万元。优化后的设计参数满足抗滑桩设计计算检验，按照此优化方案设

计参数，实际计算的加固后滑坡体的稳定系数为 1.232，滑坡防治工程的造价为 234.713 万元。实际计算结果与进化神经网络估算值的相对误差分别为 0.081% 和 0.057%。

7 结 论

本文介绍了本课题组关于滑坡的综合集成分析与优化设计方法研究的最新进展，以及在高速公路边坡滑坡(如福建福宁高速公路八尺门滑坡和湖北襄十高速公路滑坡)和大型库区边坡(如三峡库区滑坡)的治理研究成果。实践表明，所研究的方法科学、先进、可行。今后，要进一步加强这些方法的推广应用，进行验证和完善，并且要加强大型滑坡的系统研究，充分研究清楚水、开挖等复杂因素对滑坡的影响机制。

参 考 文 献

- 1 Vapnik V N. The Nature of Statistical Learning Theory[M]. New York : Springer , 1995
- 2 Goldberg D E. Genetic Algorithms in Search , Optimization , and Machine Learning[M]. MA : Addison-Wesley Reading , 1989 , 106 ~ 122
- 3 Rumelhart D E , Hinton G E , William R J. Learning internal representations by error propagation[A]. In : Rumelhart D E , McClelland J L ed. Parallel Distributed Processing :Explorations in the Microstructures of Cognition[C]. Cambridge ,MA :MIT Press ,1986 , 1 : 10 ~ 15
- 4 赵洪波，冯夏庭，李邵军等. 福宁高速公路八尺门滑坡变形演化规律预测研究[J]. 岩土力学，2003，24(4)：1 618 ~ 1 622
- 5 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)：待刊
- 6 李邵军，王俊杰，刘 勇. 滑坡工程中单孔复合锚索现场试验研究[A]. 见：中国岩石力学与工程学会编. 中国岩石力学与工程学会第七次学术大会论文集[C]. 北京：中国科学技术出版社，2002，680 ~ 682
- 7 刘 建，冯夏庭，张 杰等. 三峡工程左岸厂房坝段深层抗滑稳定的物理模拟[J]. 岩石力学与工程学报，2002，21(7)：993 ~ 998
- 8 尹顺德，冯夏庭，张友良等. 滑坡加固方案优化的并行遗传神经网络方法研究[J]. 岩石力学与工程学报，2004，23(待刊)
- 9 张友良，冯夏庭，范建海等. 抗滑桩与滑坡体相互作用的研究[J]. 岩石力学与工程学报，2002，21(6)：839 ~ 842
- 10 冯夏庭. 智能岩石力学导论[M]. 北京：科学出版社，2000