

文章编号: 1000-7598-(2003)06-1038-04

# 降雨影响下滑坡变形预测的 GA-NN 模型研究

尹顺德, 冯夏庭, 周 辉, 赵洪波, 李邵军

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学重点实验室, 湖北 武汉 430071)

**摘 要:** 八尺门滑坡是福-宁高速公路施工现场的一个降雨型滑坡, 近年来该滑坡由于人为及降雨的因素而频频发生滑动, 对坡下的高速公路施工及滑坡区内人民生命财产安全造成了严重威胁。为了准确掌握降雨量与滑坡位移之间的关系, 在对八尺门滑坡现场降雨量及滑坡位移的长达一年的监测资料的基础上, 利用 GA-NN 模型, 对降雨条件下的滑坡位移演化发展做出了精确的预测。研究成果已作为重要的基础性数据被有关施工和研究部门采用, 对于指导现场施工和保证滑坡影响区内人民生命财产的安全发挥了重要作用。

**关 键 词:** 降雨; 滑坡; 预测; 遗传算法; 神经网络

中图分类号: TV 457

文献标识码: A

## Study on GA-NN model for forecasting the displacement of landslides affected by rainfall

YIN Shun-de, FENG Xia-ting, ZHOU Hui, ZHAO Hong-bo, LI Shao-jun

(Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** Bachimen landslide lies in a highway construction site, and hundreds of people are living nearby. In recent years, by human factor and the rainfall, the slide became moving frequently and threatened the residents and workers on it. Rainfall is the key factor leading to the landslide, so study on the relation between rainfall and displacement of landslide is essential to forecast the landslide. Combining genetic algorithm and neural network, a GA-NN model is proposed whose structure is optimized. The relation between the rainfall and the displacement of landslide is mapped by this GA-NN model. The research result has been adopted by the highway construction corporation and certain institutes, and it was very useful for directing the highway construction and ensuring the safety of the residents' lives and wealth.

**Key words:** Rainfall; landslides; forecast; genetic algorithm; neural network

## 1 引 言

八尺门互通区滑坡是福-宁高速公路福鼎分水关至福安湾坞段内的一个大型滑坡, 位于福建省福鼎市白岩村马坪及古井头一带, 形态呈轮椅状。滑坡所在的八尺门互通区地处丘陵、滨海滩涂地貌。地形起伏较大, 最大高差约 60 m, 占地面积约 6 000 m<sup>2</sup>。水文地质条件复杂, 地表水体不发育, 地下水丰富, 其补给来源于大气降水。八尺门互通区滑坡近期的滑移始于 1993 年; 在 2000 年 6 月份, 由于连续的暴雨, 使山体边坡出现滑移、开裂等现象, 最大裂隙达宽 1.6 m, 导致滑坡下部正在使用的沙

吕线路面下降约 1.5 m; 2001 年 4 月, 随着降雨又发生了较大的滑移, 在右侧古井头山坡方向也出现了裂隙; 2001 年 7 月, 随着福-宁高速公路建设进程的加快, 八尺门滑坡的危害性更为明显。当时滑坡体上仍有大量居民居住, 而滑坡前缘又有大量建筑工人施工, 此滑坡已严重威胁到数百居民的生命财产安全和交通要道的施工和行车安全。

通过分析该滑坡的形成机理, 发现其主要影响因素有两个, 一是人为因素的影响。在古滑坡舌下游有沙-吕线改线线路通过, 工程建设使古滑坡的天然边坡遭到破坏, 从而, 使斜坡失去天然应力平衡状态; 二是地下水影响。区内地下水是导致滑坡滑

收稿日期: 2002-07-29

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 50179034) 资助项目、中国科学院知识创新工程重要方向性项目 (编号: KJCX2-SW-L1-3)

作者简介: 尹顺德, 男, 1977 年生, 硕士, 主要从事智能岩石力学、边坡稳定性分析与优化方面的研究。

动的主要原因, 降雨使地下水位升高, 致使滑动面上的土体孔隙水压力增大, 土体的强度降低, 抗滑阻力降低, 又因地下水位的抬升, 增强了土体内的管涌作用, 也使滑体的重度增大, 增加了下滑力, 而降雨是导致其加速下滑的关键因素, 降雨强度与滑坡位移速率存在着复杂的正相关关系。这与前人的大量研究结论<sup>[1-6]</sup>是一致的。

由于降雨是加速滑坡位移速率的一个非常关键的影响因素, 且往往也是导致发生灾难性后果的直接诱发因素。因此, 建立八尺门滑坡区的降雨与滑坡变形之间的关系, 对滑坡的演化发展作出准确的预测, 是进一步治理滑坡和保证人民生命财产及施工安全的一项亟待解决的重要课题。然而, 传统的相关研究大都以总结经验和定性的趋势性预测为主, 其研究结果尚不能很好地用于对滑坡演化做出定量的准确预测。且由于实际滑坡机理和规律极其复杂, 对于滑坡演化这种高度非线性问题, 经典的预测和方法因其本身的局限性亦难以胜任。

人工神经网络(Artificial Neural Network)方法为解决这一复杂非线性问题提供了一种有效方法<sup>[7-8]</sup>, 它具有较强的函数非线性映射能力, 经过训练, 可以找出输入、输出参数之间内在的隐式映射关系。但是, 目前人工神经网络方法中应用最广泛的前向反馈传播算法(BP算法)及一些改造后的神经网络仍存在着网络构造不当、“过训练”等问题<sup>[8]</sup>, 从而, 限制了人工神经网络方法的预测的精度和适应能力。为解决上述问题, 本文引入遗传算法(Genetic Algorithm)来搜索最佳的神经网络结构和学习参数, 用于改进神经网络的学习和预测功能, 针对实际滑坡的演化过程, 建立进化神经网络(GA-NN)。实际的预测结果表明, 此方法具有较高的精度。本文的预测成果已被有关施工和研究部门采用, 对指导现场的施工、保障滑坡影响区内人民群众的生命财产安全发挥了重要的作用, 取得了良好的经济效益和社会效益。

## 2 考虑降雨条件的滑坡变形预测模型

### 2.1 BP神经网络

人工神经网络(ANN)是在现代神经科学研究成果的基础上, 依据人脑基本功能特征, 模仿生物神经网络的功能和结构而发展起来的一种新型信息处理系统和体系。神经网络模型有数十种之多, 目前, 广泛使用的是BP神经网络(Back Propagation Neural Network, 即误差反向传播的前馈神经网络), 它是按层次结构构造的, 包括一个输入层、一个输

出层和一个或多个隐含层(如图1所示)。网络的学习过程由正向传播和反向传播两个过程组成。正向传播过程中, 输入信息从输入层经隐含层逐层处理, 然后, 传向输出层; 如果在输出层不能得到期望的输出, 则转向反向传播过程, 将误差信号沿原来的连接通路返回, 通过修改各层神经元的权值, 使得误差信号最小。

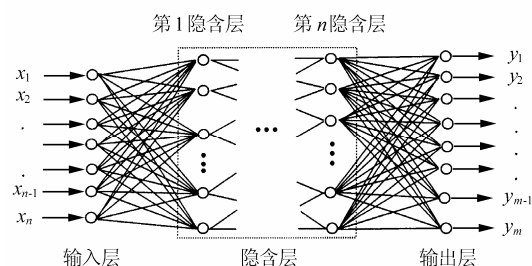


图1 BP网络结构图

Fig.1 The structure of BP network

虽然多层前馈网络已经被证实是一种有效的神经网络模型, 然而, 对于一些复杂的问题, 它往往并不能体现出ANN所应有的独特的优越性<sup>[9]</sup>, 因为至少有三个重要因素直接影响着网络的推广预测能力:

(1) 网络的结构。神经网络的预测效果有时十分依赖于网络结构, 在实际应用中, 多数情况下隐含层数及其节点数根据经验选取, 再通过验算确定。

(2) 允许学习误差的大小, 即网络学习何时结束的问题。通常人们认为, 网络应该学习到误差非常小或几乎不变时为止, 事实上这样做的结果是开始学习时网络的推广预测能力随着学习误差的下降而逐渐提高, 但是, 当学习误差减少到某一较小值时, 网络的预测能力反而下降, 这就是所谓的“过训练”。

(3) 用神经网络模型表达一个非线性动力学过程, 就是对一个随时间变化的序列 $\{X_i\} = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ , 要找出在 $i+p$ 时刻的值与其前 $p$ 个时刻的值的

$$X_{i+p} = F(X_i, X_{i+1}, \dots, X_{i+(p-1)}) \quad (1)$$

式中  $i = 1, 2, \dots, n, n = N - p - m$ 。其中 $n$ 为用来训练神经网络的数据点数;  $p$ 实际上是神经网络的全部或部分输入变量。容易引起人们忽略的是: 不同的 $p$ 值, 也会影响模型的预测能力, 一般来说, 人们都是凭经验选择, 这势必会降低神经网络的预测推广能力。

总之, 由于以上这些人为的盲目性因素, 造成网络的学习效果和预测能力难以达到最佳。而遗传算法恰以其独特全局优化搜索的优越性, 为上述问题的解决提供了新的思路和途径。

## 2.2 进化神经网络模型 (GA-NN)

遗传算法 (GA) 是基于进化论原理发展起来的一种模拟遗传和自然选择的高效搜索与优化方法。遗传算法仿效生物的进化与遗传, 从某一初始值群体出发, 根据生存竞争和优胜劣汰的原则, 借助复制、杂交、变异等操作, 不断迭代计算, 经过若干代的演化后, 群体中的最优值逐步逼近最优解, 直至最后达到全局最优<sup>[10]</sup>。

结合本文的实际问题, 提出基于遗传算法的进化神经网络模型及程序实现的步骤如下:

①设置参数个数、进化代数  $N_{\text{gen}}$ 、群体规模  $N_p$ 、每位参数中二进制数位数  $N_{\text{bit}}$ 、单点变异率  $P_{\text{jm}}$ 、蠕变变异率  $P_{\text{cm}}$ 、随机数种子、输入节点个数、隐含层数、隐含层节点数的搜索范围及神经网络的学习参数。

②随机产生一个初始群体作为父代, 其中每个个体代表一个网络结构, 用一条染色体表示。

③用前  $n$  组数据训练该网络, 用  $\delta$  规则修改连接权值和节点阈值, 用学得神经网络对后  $m$  组数据进行外推, 计算每条染色体的适应值  $F$ 。

$$F = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x_i - x'_i)^2 \quad (2)$$

④从父代中随机选取两个适应值低于平静值的个体  $i_1$  和  $i_2$ 。

⑤对  $i_1$ ,  $i_2$  进行一致杂交, 产生一条染色体, 对此染色体串的每一位分别依概率进行变异操作, 产生一个新个体。

⑥重复执行步骤④、⑤, 直到产生  $N_p$  个新个体, 形成一子代群体。

⑦将父代中最好的个体随机置换子代中一个个体。

⑧将子代转化为父代, 即为新一代。

⑨进化代数加 1。

⑩如果进化代数等于  $N_{\text{gen}}$ , 则计算过程结束, 最后一代中最好的, 即为要搜索的最佳网络结构, 否则, 转步骤④。

由此可见, 基于遗传算法的神经网络模型, 将神经网络的反映复杂非线性关系及预测能力同遗传算法的全局优化功能结合起来, 是建立在时间序列分析基础上的自适应模型, 能根据不断获得的信息不断提高模型自身的预测能力。

## 3 实例分析

根据八尺门滑坡防治工程的进度安排, 笔者所在项目组于 2001 年 6 月开始对八尺门滑坡进行了全面监测。为了监测滑坡深部变形状况, 在滑坡上 50 个控制点钻孔中埋设测管, 自 2001 年 7 月开始用 CX01-A 型测斜仪量测深部水平位移, 并对降雨量进行了重点监测。一年多以来, 在大量监测资料的基础上, 综合考虑降雨量和前期的滑坡深部位移, 应用本文提出的进化神经网络模型对滑坡后续的演化进行了预测。其中图 2 和图 3 为八尺门滑坡前缘一级平台上的 2#CX09 测斜孔的深部某点的累积位移和相应的降雨量全部数据 (截止到滑坡变形趋于平稳)。根据监测资料, 八尺门滑坡的变形主要产生在久雨、暴雨中或略滞后, 而滞后期一般不超过 10 d, 因此, 我们考虑以 10 d 为间隔构成降雨量和滑坡位移量的时间序列, 且时间序列中的降雨量为相应 10 d 内总降雨量的平均值。

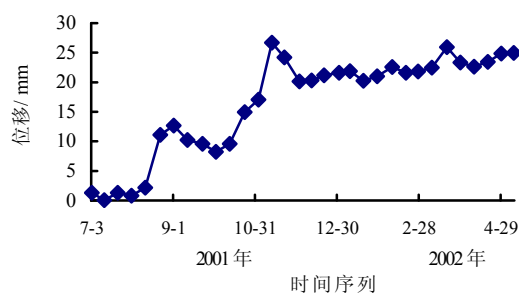


图 2 测斜孔 2#CX09 深部某点的累积位移监测资料  
Fig. 2 Accumulated displacements of a certain test point in 2#CX09 bore hole

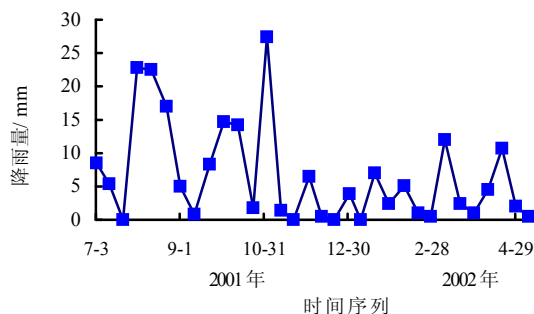


图 3 测斜孔 2#CX09 降雨量监测资料  
Fig. 3 Rainfall data of 2#CX09 bore hole

首先, 确定网络的总体结构和需要进行优化搜索的网络参数。其中, 输入层变量数为  $p+1$  个 (包括某时刻前最近的 1 个降雨量观测值和最近的  $p$  个滑坡位移量观测值), 输出层变量为该时刻相应的滑

坡位移。需要进行优化搜索的网络参数包括, 最优的  $p$  值、网络的隐含层数以及各隐含层相应的节点数。

然后, 利用遗传算法搜索最佳网络结构。设置群体规模为  $N_p=30$ , 进化代数  $N_{\text{gen}}=30$ , 二进制位数  $N_{\text{bit}}=10$ , 突变变异率  $P_{\text{jm}}=0.15$ , 蠕变变异率  $P_{\text{cm}}=0.25$ ,  $p$  为 1~12, 隐含层数  $h$  为 1~4, 隐含层节点数为 1~15。

对图 2, 3 中 2002 年 3 月 9 日前的 25 个数据进行遗传进化计算。搜索得到网络结构的  $p=4$ , 隐含层数为  $h=2$ , 隐含层节点数  $h_1=10$ ,  $h_2=8$ , 此网络在最优学习误差 0.000 98 下的推广预测误差最小。因此, 优化后的神经网络模型为 GA-NN (5, 10, 8, 1)。在最优学习误差下, 应用此网络模型计算得出 2002 年 3 月 9 日~5 月 8 日的外推预测结果见表 1, 预测值与实测值的比较见表 1 和图 4。

表 1 预测值和实测值的比较  
Table 1 The comparison of forecasted value and real value

| 时间序列  | 2月18日   | 2月27日   | 3月9日    | 3月20日   | 3月30日   | 4月9日    | 4月19日   | 4月29日   | 5月8日    |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 实际测量值 | 21.58   | 21.84   | 22.47   | 25.95   | 23.33   | 22.64   | 23.44   | 24.86   | 24.99   |
| 预测值   | 21.54   | 21.79   |         |         |         |         |         |         |         |
| 推广预测值 |         |         | 22.27   | 25.61   | 23.57   | 22.38   | 23.18   | 25.47   | 24.51   |
| 相对误差  | 0.001 9 | 0.002 3 | 0.008 9 | 0.013 1 | 0.010 3 | 0.011 5 | 0.011 1 | 0.024 5 | 0.019 2 |

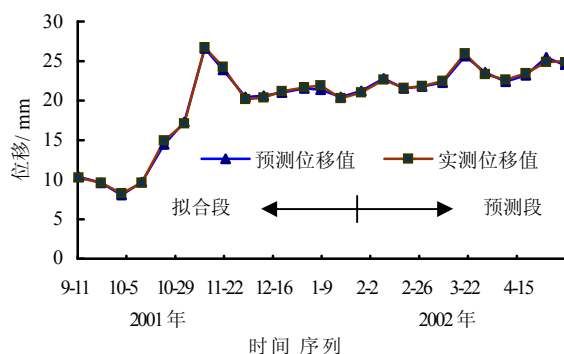


图 4 实测值和预测值对比图

Fig. 4 The relation between forecasted value and real value

表 1 和图 4 表明, 预测结果与实际测值比较接近, 对于其它测孔的预测也得到了相同的结论。这一方面表明, 基于遗传算法的神经网络模型具有较高的预测精度, 另一方面也表明, 在八尺门互通区滑坡变形预测中必须考虑降雨因素的影响。

至此, 依据八尺门互通区滑坡的监测资料, 经过进化神经网络模型的准确预测, 对八尺门滑坡, 降雨量与滑坡位移之间的关系得以准确地描述, 本文相关研究成果已用于指导八尺门滑坡下部的福宁高速公路的施工, 既确保了施工进度, 又保障了滑坡上居民的生命财产安全, 取得了巨大的经济效益和社会效益。

## 4 结 语

(1) 遗传算法可以确定最优的输入节点数和网络结构 (即网络的隐含层数及其节点数) 以及最佳允许学习误差, 减少人为决定网络结构的盲目性, 避免网络学习过程中的“过训练”现象, 增强网络

的学习效果和推广预测能力, 实例表明, 可以用来对滑坡的演化做出精确的预测。

(2) 在降雨型滑坡监测和预测预报工作中, 应充分考虑降雨量与滑坡位移量之间的复杂非线性关系, 本文在大量监测资料的基础上, 综合考虑近期降雨量和累积位移, 较好地解决了这一问题, 研究成果已被施工和研究部门采用, 取得了明显的经济效益和社会效益。

## 参 考 文 献

- [1] 李焯芬, 陈虹. 雨水渗透与香港滑坡灾害[J]. 水文地质工程地质, 1997, (4): 34—38.
- [2] 钟荫乾. 滑坡与降雨关系及其预报[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998, 8(4): 81—86.
- [3] 王发读. 浅层堆积物滑坡特征及其与降雨的关系初探[J]. 水文地质工程地质, 1995, (1): 20—23.
- [4] 林孝松, 郭跃. 滑坡与降雨的耦合关系研究[J]. 灾害学, 2001, 16(2): 87—92.
- [5] 谢守益, 徐卫亚. 降雨诱发滑坡机制研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1999, 32(1): 21—23.
- [6] 罗先启, 李海岭, 葛修润, 杨学堂. 降雨条件下滑坡灾害及滑坡排水效果研究[J]. 岩土力学, 2000, 21(3): 231—234.
- [7] Flood I, Kartam N. Neural networks in civil engineering. I: principles and understanding [J]. J. Comp. In Civ. Engrg., ASCE, 1994, 8(2): 131—148.
- [8] 冯夏庭. 智能岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [9] 冯夏庭, 张治强, 杨成祥. 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.
- [10] 陈国良. 遗传算法及其应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1994. 28—29.