

文章编号:1001-4810(2000)01-0073-08

# BP 神经网络在岩溶水库渗漏评价中的应用<sup>\*</sup>

杨桂芳,姚长宏,王增银,万军伟  
(中国地质大学(武汉),武汉 430074)

**摘 要:**岩溶水库渗漏受众多因素影响,对其渗漏量预测一直是水利工作者的研究热点。本文根据非线性理论,综合考虑各种地质因素并由此建立了一个神经网络系统。研究结果表明,该神经网络模型具有较高的预测精度,是可行和实用的。在此基础上,利用此网络模型对水布垭水利枢纽渗漏进行了定量预测。

**关键词:**BP 神经网络;岩溶水库;渗漏;定量预测

**中图分类号:**T391;P642.25      **文献标识码:**A

## 0 前 言

岩溶水库渗漏一直是岩溶研究者和应用数学工作者十分关心的问题,但迄今为止,仍然没有较好的方法对其渗漏量进行定量预测。一方面,岩溶水库渗漏影响因素过于复杂,它涉及的水文地质条件大多是不完全定量的,甚至是随机的、模糊的,难以用确定性的模型加以描述;另一方面,岩溶系统的开放性,系统内各个因素之间是通过相互影响,相互制约的复杂交叉效应和动态效应达到系统内各个单元的自我排列、自我组织的,即影响其渗漏的各个因素之间存在着复杂的非线性关系,这个关系远非一个(组)简单的代数方程所能描述。鉴于此,我们对非线性理论特别是人工神经网络(Artificial Neural Network,简称 ANN)作为一种预测工具产生了兴趣。ANN 是由一些简单具有自适应功能的神经元经过多层组织形成的网络,其突出特点在于能通过对已知样本的学习(训练),掌握输入与输出间的复杂的非线性关系(尽管这种关系并不一定能用数学表达式写出),并能对这种关系进行存储记忆,直接为预测服务。

## 1 BP 神经网络模型

如前所述,人工神经网络是一种高度的非线性映射处理系统,具有强大的自组织、自学习、自适应和分类计算能力<sup>[1,2]</sup>。目前应用的神经网络有多种类型,其中 BP(Back Propagation)网是应用最广、最先进,也是较成熟的一种网络,它的结构简单,工作状态稳定,易于硬件的配置和编程的实现。BP 网是一种反向传递并修正误差的多层映射网,其对外界输入的响应是以并

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(498720096)、广西自然科学基金匹配项目共同资助  
第一作者简介:杨桂芳,女,1975 年生,中国地质大学研究生院在读硕士。  
收稿日期:1999 年 11 月

行的、非确定性的方式表现出来的。BP 神经网络主要由三层网络构成：输入层、隐含层和输出层（见图 1）。某一层的神经元输出通过连接权因子的加强和抑制传输到相邻层神经元。除了输入层神经元外，网络中每一层神经元的输入是前一层神经元输出的加权和。其输入信号，激励函数和节点偏置确定了该神经元的激励程度（节点偏置能够在实际数据与激励函数输入、输出之间建立对应关系，拓宽了激励函数的定义域和值域）。由于隐含层神经元可以按不同的方式处理输入数据，从而解决了各个因素之间的复杂交叉效应和动态效应，大大提高了神经网络的预测能力。



图 1 BP 神经网络结构简图  
Fig. 1 Simple structure of BP-ANN

2 输入信息的量化

影响岩溶水库渗漏的地质因素关系复杂<sup>[3]</sup>，概括起来主要有以下三个方面：

- (1)定量数据：岩体渗透性、地下水位、渗漏水头、岩溶发育程度等；
- (2)定性变量：岩性、构造、防渗处理程度等；
- (3)描述性信息：河谷结构、河床水文特征、渗漏通道形态等。

由此可见，数据的类型和性质特征复杂，定性和定量数据混杂，在进行神经网络输入时应首先对其进行量化处理。一般说来，描述性信息和定性变量进行等级划分（等级数主要根据精度确定，本文分三个不同的等级），为了简化计算和减少测量误差，定量数据也用等级表示（见表 1）。

3 BP 神经网络学习

BP 神经网络的基本核心是 BP 算法，由正向传播和反向传播组成。正向传播过程如下：  
选取任一样本输入网络，输入层的输出可直接等于其输出；也可经过归一化处理。然后转向隐含层，隐含层第  $j$  个神经元的输入为：

$$NET_{(j)} = \sum_i W_{ij}O_{(i)} \tag{1}$$

其输出为：

万方数据  $O_{(j)} = f(NET_{(j)}) \tag{2}$

表 1 岩溶水库渗漏影响因素量化表

Tab.1 Table showing quantization variables affecting the leakage in karst reservoirs

| 因素             | 等级       | 量值 | 因素              | 等级           | 量值 |
|----------------|----------|----|-----------------|--------------|----|
| 岩石性质<br>(X1)   | 碎屑岩夹碳酸盐岩 | 1  | 分水岭地下水位<br>(X6) | 高于水库蓄水位      | 1  |
|                | 不纯碳酸盐岩   | 2  |                 | 低于水库水位(<10m) | 2  |
|                | 纯碳酸盐岩    | 3  |                 | 低于水库水位(>10m) | 3  |
| 断裂发育程度<br>(X2) | 断层裂隙不发育  | 1  | 岩石渗透性<br>(X7)   | 弱渗透          | 1  |
|                | 断层裂隙一般发育 | 2  |                 | 中等渗透         | 2  |
|                | 断层裂隙很发育  | 3  |                 | 强渗透          | 3  |
| 河谷结构<br>(X3)   | 横向谷      | 1  | 渗漏通道形态(X8)      | 溶隙型          | 1  |
|                | 斜向谷      | 2  |                 | 溶隙管道型        | 2  |
|                | 纵向谷      | 3  |                 | 管道型          | 3  |
| 岩溶发育程度<br>(X4) | 岩溶一般发育   | 1  | 渗漏水头(X9)        | 小于 50m       | 1  |
|                | 岩溶较发育    | 2  |                 | 在 50~100m 之间 | 2  |
|                | 岩溶很发育    | 3  |                 | 大于 100m      | 3  |
| 河床水文特征<br>(X5) | 补给型      | 1  | 防渗处理程度(X10)     | 已进行严密处理      | 1  |
|                | 悬托型      | 2  |                 | 略做处理         | 2  |
|                | 排泄型      | 3  |                 | 未进行处理        | 3  |

其中  $NET_{(j)}$  为第  $j$  层的输入值,  $W_{(ji)}$  为第  $i,j$  层之间的连接权系数,  $O_{(i)}$  为第  $i$  层的输出值,  $f$  为激励函数, 一般为 Sigmoid 激励函数。

最后经过输出层处理, 其第  $k$  个神经元的输入为:

$$NET_{(k)} = \sum_j W_{(kj)} O_{(j)}$$

(3)

由此可在输出层得到学习样本的输出值

$$O_{(k)} = f(NET_{(k)})$$

(4)

此时, 输出值一般与期望值(实测数据)存在较大误差, 对于每个样本, 其平方误差为:

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_k (T_{(pk)} - O_{(pk)})^2$$

(5)

整个样品的系统误差为:

$$E = \frac{1}{2} \sum_p \sum_k (T_{(pk)} - O_{(pk)})^2$$

(6)

式中  $T_{(pk)}$ ,  $O_{(pk)}$  分别表示第  $p$  个样本第  $k$  个输出神经元的期望值和相应的输出值。

如果误差超过要求值, 就需对模型进行反向传递。在学习过程中, BP 网络按照误差  $E_p$  减小最快的方式改变连接权系数, 即沿着梯度变化的反方向改变权系数的值, 使网络逐步收敛, 直到获得正确的权系数。公式表达如下:

$$\Delta W_{(kj)} = -\eta \frac{\partial E_p}{\partial W_{(kj)}}$$

(7)

和

$$\Delta W_{(ji)} = -\eta \frac{\partial E_p}{\partial W_{(ji)}}$$

(8)

分析计算得到输出层的任意神经元连接权系数变化量, 有:

$$\Delta W_{(kj)} = \eta (T_{(k)} - O_{(k)}) f'(NET_{(k)}) O_{(j)} = \eta \delta_{(k)} O_{(j)}$$

(9)

同理,对于隐含层,其变化量为:

$$\Delta W_{(ji)} = \eta f'(NET_{(k)}) \sum_k W_{(kj)} \delta_{(k)} O_{(i)} = \eta \delta_{(j)} O_{(i)} \tag{10}$$

其中  $\eta$  为学习步长,  $T_{(k)}, O_{(k)}$  为第  $k$  个实测数据和计算数据。这个过程不断重复,完成对所有样本的学习,得到符合预测精度的人工神经网络模型。具体算法如下框图(见图 2)。



图 2 BP 神经网络学习算法框图  
Fig. 2 Algorithm figure of BP-ANN

4 应用实例

前人已经收集整理国内 59 个各类岩溶水库渗透实例。在此基础上,我们根据输入信息量化原则,分别对各水库的岩性(X1)、断裂发育程度(X2)、河谷结构(X3)、岩溶发育程度(X4)、河床水文特征(X5)、分水岭地下水位(X6)、岩体渗透性(X7)、渗漏通道形态(X8)、渗透水头(X9)及防渗处理程度(X10)进行量化赋值(见表 2)。在赋值过程中,有四组样本的输入信息完全一致,通过平均化处理,我们得到 54 个有效样本(见表 2)。为便于结果的验证,我们抽取其中 4 个样本作为检验样本。

由上可知,神经网络输入层应有 10 个神经元,分别对应 X1,X2,X3,...,X10;输出层只有 1 个,即岩溶水库渗漏量。另外根据文献<sup>[2]</sup>,如果神经网络具有一个隐含层,则可以完成超平面划分(输出结果以开凸区域或闭凸区域形式存在,即预测结果以线段形式分布);具有两个隐含层的网络能够输出超区域(输出结果以任意形状存在,预测结果以点形式分布)。针对岩溶水库渗漏影响因素的高度复杂性,本文 BP 神经网络采用两个隐含层(具体结构见表 3)。

表 2 神经网络学习和检验样本表

Tab. 2 Studying and testing samples of BP-ANN

| 因素   |       | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | X6 | X7 | X8 | X9 | X10 | 实测渗漏量( $T_{pk}$ )<br>m <sup>3</sup> /s | 计算渗漏量( $O_{pk}$ )<br>m <sup>3</sup> /s | 绝对误差( $\delta$ )<br>m <sup>3</sup> /s | 平方误差( $Ep$ )<br>m <sup>3</sup> /s |
|------|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|----------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| 学习样本 | 猫五    | 2  | 1  | 2  | 1  | 1  | 1  | 3  | 3  | 2  | 2   | 0.000                                  | 0.370                                  | 0.370                                 | 0.138                             |
|      | 乌江渡   | 3  | 1  | 1  | 2  | 1  | 1  | 3  | 1  | 3  | 1   | 0.000                                  | 0.270                                  | 0.270                                 | 0.074                             |
|      | 大江口   | 3  | 1  | 3  | 1  | 1  | 2  | 1  | 1  | 1  | 1   | 0.000                                  | 0.240                                  | 0.240                                 | 0.057                             |
|      | 大化    | 2  | 1  | 1  | 2  | 1  | 2  | 2  | 2  | 1  | 3   | 0.000                                  | 0.280                                  | 0.280                                 | 0.079                             |
|      | 六甲    | 2  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 3   | 0.000                                  | 0.160                                  | 0.160                                 | 0.027                             |
|      | 下桥    | 2  | 1  | 2  | 3  | 1  | 1  | 1  | 2  | 1  | 3   | 0.000                                  | 0.670                                  | 0.670                                 | 0.442                             |
|      | 后水河   | 2  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 3   | 0.005                                  | 0.160                                  | 0.155                                 | 0.025                             |
|      | 旧普韦布洛 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 2  | 3   | 0.010                                  | 0.190                                  | 0.180                                 | 0.030                             |
|      | 迎燕    | 1  | 1  | 2  | 1  | 1  | 2  | 1  | 1  | 1  | 1   | 0.030                                  | 0.170                                  | 0.140                                 | 0.020                             |
|      | 穿杆    | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 0.060                                  | 0.190                                  | 0.130                                 | 0.017                             |
|      | 龙须河   | 1  | 1  | 2  | 1  | 1  | 1  | 1  | 2  | 1  | 2   | 0.087                                  | 0.230                                  | 0.143                                 | 0.020                             |
|      | 登风    | 3  | 1  | 2  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 0.087                                  | 0.170                                  | 0.083                                 | 0.006                             |
|      | 伏曼    | 2  | 1  | 3  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 0.100                                  | 0.180                                  | 0.080                                 | 0.007                             |
|      | 仙人沱   | 3  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 0.105                                  | 0.150                                  | 0.045                                 | 0.002                             |
|      | 猫三    | 2  | 2  | 2  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 3   | 0.190                                  | 0.220                                  | 0.030                                 | 0.001                             |
|      | 木蓑衣   | 1  | 1  | 2  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 0.190                                  | 0.190                                  | 0.000                                 | 0.000                             |
|      | 猫一    | 2  | 2  | 1  | 1  | 1  | 2  | 1  | 1  | 1  | 3   | 0.200                                  | 0.200                                  | 0.000                                 | 0.000                             |
|      | 王家厂   | 1  | 1  | 2  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 0.200                                  | 0.190                                  | 0.010                                 | 0.000                             |
|      | 奥依玛纳  | 1  | 1  | 1  | 1  | 2  | 1  | 2  | 1  | 2  | 3   | 0.200                                  | 0.270                                  | 0.070                                 | 0.005                             |
|      | 若蓝    | 3  | 1  | 2  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 0.200                                  | 0.170                                  | 0.030                                 | 0.001                             |
|      | 东峰    | 2  | 2  | 3  | 1  | 1  | 2  | 1  | 1  | 1  | 3   | 0.210                                  | 0.260                                  | 0.050                                 | 0.002                             |
|      | 陈寺    | 3  | 1  | 2  | 1  | 1  | 1  | 1  | 2  | 1  | 1   | 0.250                                  | 0.200                                  | 0.050                                 | 0.002                             |
|      | 猛登    | 1  | 2  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 2  | 1  | 2   | 0.270                                  | 0.340                                  | 0.070                                 | 0.005                             |
|      | 猫六    | 2  | 1  | 2  | 1  | 1  | 3  | 1  | 2  | 1  | 1   | 0.300                                  | 0.240                                  | 0.060                                 | 0.004                             |
|      | 灌江    | 3  | 1  | 2  | 2  | 1  | 1  | 1  | 2  | 1  | 2   | 0.340                                  | 0.250                                  | 0.090                                 | 0.008                             |
|      | 巴蒙    | 2  | 2  | 1  | 2  | 3  | 2  | 1  | 1  | 1  | 2   | 0.490                                  | 0.640                                  | 0.150                                 | 0.021                             |
|      | 独山    | 2  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 2  | 1  | 2   | 0.500                                  | 0.190                                  | 0.310                                 | 0.097                             |
|      | 轮廓    | 2  | 2  | 2  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1   | 0.500                                  | 0.270                                  | 0.230                                 | 0.056                             |
|      | 附蒙    | 2  | 1  | 1  | 2  | 1  | 1  | 2  | 3  | 1  | 2   | 0.600                                  | 0.530                                  | 0.070                                 | 0.005                             |
|      | 圭平    | 2  | 1  | 2  | 2  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 2   | 0.700                                  | 0.250                                  | 0.450                                 | 0.206                             |
|      | 火石坡   | 2  | 1  | 2  | 2  | 1  | 2  | 2  | 2  | 1  | 2   | 0.750                                  | 0.300                                  | 0.450                                 | 0.202                             |
|      | 拉浪    | 2  | 1  | 2  | 1  | 1  | 2  | 2  | 1  | 1  | 2   | 0.950                                  | 0.180                                  | 0.770                                 | 0.596                             |
|      | 猫二    | 3  | 2  | 1  | 1  | 1  | 2  | 1  | 2  | 1  | 1   | 1.000                                  | 0.890                                  | 0.110                                 | 0.013                             |
|      | 北关    | 3  | 2  | 2  | 2  | 1  | 1  | 2  | 2  | 1  | 1   | 1.000                                  | 0.710                                  | 0.290                                 | 0.085                             |
|      | 花溪    | 2  | 1  | 2  | 2  | 1  | 1  | 2  | 2  | 1  | 2   | 1.200                                  | 0.380                                  | 0.820                                 | 0.669                             |
|      | 马畔塘   | 2  | 2  | 2  | 3  | 1  | 3  | 2  | 3  | 1  | 2   | 1.310                                  | 1.340                                  | 0.030                                 | 0.000                             |
|      | 大潭    | 3  | 2  | 3  | 2  | 1  | 1  | 2  | 3  | 1  | 2   | 1.400                                  | 1.430                                  | 0.030                                 | 0.000                             |
|      | 肖家山   | 2  | 2  | 3  | 3  | 1  | 1  | 2  | 2  | 1  | 2   | 1.800                                  | 1.530                                  | 0.270                                 | 0.076                             |
|      | 水槽子   | 3  | 2  | 2  | 2  | 2  | 3  | 2  | 2  | 2  | 2   | 1.800                                  | 1.940                                  | 0.170                                 | 0.019                             |
|      | 克里马斯塔 | 2  | 3  | 1  | 2  | 1  | 2  | 3  | 2  | 3  | 2   | 2.000                                  | 2.020                                  | 0.020                                 | 0.000                             |
|      | 明溪    | 2  | 3  | 2  | 2  | 1  | 1  | 2  | 3  | 1  | 2   | 3.000                                  | 3.180                                  | 0.180                                 | 0.031                             |
|      | 蒙特雅克  | 1  | 2  | 3  | 3  | 3  | 3  | 2  | 3  | 3  | 3   | 4.000                                  | 3.880                                  | 0.120                                 | 0.017                             |
|      | 小排吾   | 2  | 3  | 3  | 3  | 1  | 2  | 2  | 3  | 1  | 2   | 4.300                                  | 4.200                                  | 0.100                                 | 0.013                             |
|      | 大龙潭   | 3  | 2  | 1  | 3  | 3  | 1  | 2  | 3  | 1  | 3   | 4.400                                  | 4.210                                  | 0.190                                 | 0.040                             |
|      | 格八    | 2  | 2  | 3  | 3  | 3  | 2  | 3  | 3  | 2  | 3   | 5.00                                   | 5.180                                  | 0.180                                 | 0.038                             |
|      | 杜坎    | 2  | 2  | 3  | 2  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3   | 7.000                                  | 6.950                                  | 0.050                                 | 0.002                             |
|      | 卡玛那   | 2  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3   | 12.00                                  | 12.03                                  | 0.030                                 | 0.002                             |
|      | 猫四    | 3  | 3  | 2  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 2  | 3   | 20.00                                  | 19.97                                  | 0.030                                 | 0.000                             |
|      | 凯班    | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3   | 26.00                                  | 25.96                                  | 0.040                                 | 0.001                             |
|      | 桃曲坡   | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 2  | 3   | 27.80                                  | 27.83                                  | 0.030                                 | 0.001                             |
| 检验样本 | 洛东    | 2  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 3   | 0.000                                  | 0.160                                  | 0.160                                 | 0.027                             |
|      | 里团    | 2  | 2  | 1  | 2  | 3  | 1  | 2  | 2  | 1  | 2   | 1.680                                  | 1.640                                  | 0.040                                 | 0.002                             |
|      | 金龙    | 3  | 2  | 2  | 3  | 3  | 2  | 2  | 3  | 1  | 2   | 3.000                                  | 3.210                                  | 0.210                                 | 0.046                             |
|      | 万方数据  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 2  | 3  | 3  | 1  | 2   | 23.00                                  | 22.98                                  | 0.020                                 | 0.000                             |

注:仙人桥包含土桥样本;登风包含茅七和金江样本;格八包含清底江样本;杜坎包含卡那儿立斯样本。

表 3 神经网络结构表  
Tab.3 Material structure of BP-ANN

| 结构层      | 输入层 | 第一隐含层 | 第二隐含层 | 输出层 |
|----------|-----|-------|-------|-----|
| 神经元个数(个) | 10  | 7     | 4     | 1   |

网络通过学习和检验得计算结果(见表 2)。对比实测渗漏量与预测结果可以看出,神经网络对岩溶水库渗漏量可作出精确估计。为了分析其预测精度,这里选择了两个指标:绝对误差和平方误差(见表 2)。由其概率分布曲线(见图 3)可得两者在不同置信度下的置信区间(见表 4)。



图 3 渗漏预测绝对误差与平方误差概率密度曲线图

3 Probability density curves of absolute errors and square errors

表 4 渗漏预测绝对误差与平方误差置信区间分布表

Tab.4 Distribution of the confidence interval of absolute errors and square errors

| 指 标 \ 置信度                                  | 80 % | 85 % | 90 % | 95 % |
|--------------------------------------------|------|------|------|------|
| 绝对误差( $\text{m}^3/\text{s}$ )              | 0.23 | 0.26 | 0.36 | 0.42 |
| 平方误差( $\text{m}^3/\text{s}$ ) <sup>2</sup> | 0.05 | 0.08 | 0.12 | 0.22 |

建立本网络根本目的在于预测清江水布垭水利枢纽渗漏。清江水布垭水利枢纽位于清江中游长阳县和巴东县交界线附近。其设计水位 405m,工程坝高 230~250m,库容 47~50 亿  $\text{m}^3$ ,装机容量 150~200 万 kW,是正在拟建的世界级特大型水利枢纽工程<sup>①</sup>。坝址位于三友坪向斜近核部东翼,受构造影响,坝区断层、裂隙发育。向斜核部主要是二叠系龙潭组( $P_2l$ )、茅口组( $P_1m$ )和栖霞组( $P_1q$ ),其中充当含水层的碳酸盐岩渗透性好,并且发育有多条岩溶管道,为水库渗漏创造了条件。作者根据野外现场调查和前期大量的勘测资料,详细地分析了清江水布垭水利枢纽渗漏的各种影响因素,并在三种不同防渗处理强度下,量化输入信息,经上机预测结果如表 5。另外,根据上文误差分析,计算得不同置信度下的置信区间(见表 6)。由预测结果和分析数据可知,水布垭水利枢纽在未作防渗处理时,渗漏量超过水库渗漏要求量(清江年平

万方数据

① 长江水利委员会清江地质大队,湖北省清江水布垭(半峡)水利枢纽可行性研究选坝阶段工程地质勘察报告,1993 年

均流量 5%,约 7.5m<sup>3</sup>/s);但只要稍作防渗处理就能达到要求。就此建议建设单位对坝址区域渗流场进行模拟(现中国地质大学沈继方教授正在研究),确定所有渗漏通道具体位置和大小,采取封堵工程方案。

表 5 水布垭水利枢纽渗漏预测结果表  
Tab.5 Forecast results in Shuibuya reservoir

| 因素<br>处理方案 | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | X6 | X7 | X8 | X9 | X10 | 水库渗漏预测结果(m <sup>3</sup> /s) |
|------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----------------------------|
| 未作防渗处理     | 2  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3   | 12.03                       |
| 略作防渗处理     | 2  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 2  | 2  | 3  | 2   | 5.02                        |
| 已作严格处理     | 2  | 3  | 3  | 3  | 3  | 3  | 1  | 1  | 3  | 1   | 2.05                        |

表 6 水布垭水利枢纽渗漏预测置信区间表(单位:m<sup>3</sup>/s)  
Tab.6 Confidence interval of the leakage forecast in Shuibuya

| 置信度    | 绝对误差        |             | 平方误差        |             |
|--------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|        | 85%         | 95%         | 85%         | 95%         |
| 未作防渗处理 | 11.77~12.29 | 11.61~12.45 | 11.75~12.31 | 11.56~12.30 |
| 略作防渗处理 | 4.76~5.28   | 4.60~5.44   | 4.64~5.30   | 4.55~5.49   |
| 已作严格处理 | 1.79~2.31   | 1.63~2.47   | 1.77~2.33   | 1.58~2.52   |

5 结 语

本文采用 BP 神经网络对岩溶水库渗漏进行定量预测,一方面引用数量化理论对不确定因素进行量化处理;另一方面利用神经网络优点,充分考虑各影响因素与渗漏之间的非线性映射。实际应用表明,神经网络定量预测岩溶水库渗漏是理想的。其主要优点有:(1)避免了模糊或不确定因素的分析工作和具体数学模型的建立工作;(2)完成了输入和输出之间复杂的非线性映射关系;(3)采用自适应的信息处理方式,有效减少人为的主观臆断性。虽然如此,但仍存在以下缺点:(1)学习算法的收敛速度慢,通常需要上千次或更多;(2)从数学上看,BP 算法有可能存在局部极小问题。在本文,通过计算可以发现,渗漏量较小的水库计算误差(相对误差)较大,而渗漏量较大的则误差较小。因此,需要进一步改进算法,使预测模型得到补充和完善;建议在 BP 网络训练前先对样本进行分类,可以采用 ART 自适应模型或 SOM 自组织模型。

参考文献:

[1] 焦李成.神经网络系统理论[M].西安电子科技大学出版社,1990.  
[2] 殷勤业,杨宗凯等.模式识别与神经网络[M].机械工业出版社,1992.  
[3] 光耀华.岩溶水库渗漏预测的地质—数学模型——数量化理论在岩溶方面的应用[J].中国岩溶,1992,11(3).

**APPLICATION OF BACK-PROPAGATION ARTIFICIAL  
NEURAL NETWORK IN LEAKAGE EVALUATION  
FOR KARST RESERVOIRS**

YANG Gui-fang, YAO Chang-hong, WANG Zheng-yin, WAN Jun-wei  
*(China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)*

**Abstract:** Quantitative forecast of the leakage from karst reservoirs which is influenced by many factors has been a interesting research point. On the basis of nonlinear theory, an artificial neural network system is established in this paper. In the system, many geologic variables are considered comprehensively. The results show that back-propagation ANN system suggested in this paper is available for evaluating the leakage from karst reservoirs. For example, the quantitative forecast results in Shuibuya karst reservior are 12.03 m<sup>3</sup>/s without any treatment of the leakage, 5.02 m<sup>3</sup>/s with a little treatment, 2.05 m<sup>3</sup>/s with serious treatment to avoid the leakage, respectively.

**Key words:** Back-propagation artificial network; Karst reservoirs; Leakage; Quantitative forecast