

文章编号:1671-6833(2007)03-0121-04

## 基于 ANFIS 模型的年径流预报方法

马细霞, 陈鑫, 胡铁成

(郑州大学 环境与水利学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 分析以往年径流预报方法的特点, 阐述自适应神经模糊推理系统 (adaptive network-based fuzzy inference system, ANFIS), 提出年径流预报的 ANFIS 模型, 并将其应用到西北地区某水文站年径流预报中. 以 MATLAB 为工具, 依据该地区历年水文资料, 对年径流量进行预报. 实例结果表明, 与改进的 ANN 模型 (最速下降—共轭梯度法、进化单纯形法) 相比, 本方法计算速度快、泛化能力强、预报精度高, 说明 ANFIS 在年径流预报方面具有良好的适用性.

**关键词:** 径流预报; ANFIS; 人工神经网络; 影响因素

**中图分类号:** TV 697.11

**文献标识码:** A

### 0 引言

径流预报是水资源管理中的基本内容, 其精度和预见期直接关系到水资源利用的规划、方案评价、决策和运行管理的效果与成败. 准确的径流预报可以最大限度地协调水资源综合利用中出现的各种用水矛盾, 为水权分配、调度及控制提供决策依据.

目前, 年径流预报模型主要有多元回归模型<sup>[1]</sup>、人工神经网络模型<sup>[2-4]</sup>、模糊模式识别模型<sup>[5]</sup>等. 多元回归模型常用显式函数来表示, 其具体的函数形式需根据研究地区的不同而作相应的改变, 求解这些函数较复杂. 人工神经网络具有并行计算、分布式信息存储、容错能力强和自适应学习功能等优点, 但它不能处理和描述模糊信息, 不能很好地利用已有的经验知识, 特别是神经网络的学习及问题求解具有“黑箱”特性. 模糊系统具备处理非线性及模糊语言信息的能力, 可模拟人类智慧进行判断和决策, 但它很难实现自适应学习的功能, 而且如何自动生成和调整隶属度函数和模糊规则, 也是一个棘手的问题.

自适应模糊神经网络 (ANFIS) 将人工神经网络与模糊理论有机地结合起来, 取长补短, 提高系统的学习能力与表达能力. 笔者尝试将 ANFIS 技术运用于年径流预报, 建立基于 ANFIS 的年径流预报模型, 并将其运用于西北地区某水文站的年

径流预报中. 通过与其他预报方法的对比分析, 验证该模型方法的可行性和有效性.

### 1 ANFIS 径流预报模型

#### 1.1 自适应神经模糊推理系统 (ANFIS)<sup>[6-9]</sup>

Roger 提出的 ANFIS 是 Sugeno 型模糊系统. 对于一个两输入  $x$  和  $y$ 、单输出  $z$  的一阶 Sugeno 型模糊系统有以下两条 if-then 规则:

$$\begin{cases} \text{if } (x \text{ is } A_1) \text{ and } (y \text{ is } B_1) \text{ then } f_1 = p_1 x + q_1 y + r_1 \\ \text{if } (x \text{ is } A_2) \text{ and } (y \text{ is } B_2) \text{ then } f_2 = p_2 x + q_2 y + r_2 \end{cases} \quad (1)$$

与该一阶 Sugeno 型模糊系统等效的 ANFIS 结构如图 1 所示.

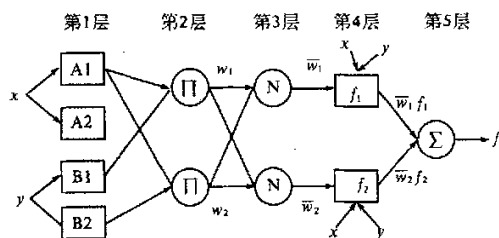


图1 T-S 模糊系统等效的 ANFIS 结构图

Fig.1 ANFIS frame chart equivalent to T-S

图 1 中, 节点间的连线仅表示信号的流向, 没有权值与之关联; 方形节点表示带有可调参数的节点, 圆形节点表示不带有可调参数的节点. ANFIS 的结构可分为 5 层:

第 1 层: 将输入变量模糊化, 并输出对应模糊

收稿日期: 2007-04-03; 修订日期: 2007-05-14

基金项目: 河南省自然科学基金资助项目 (0411050800); 河南省杰出青年科学基金资助项目 (512002500)

作者简介: 马细霞 (1963-), 女, 河南叶县人, 郑州大学副教授, 硕士, 主要从事水资源系统工程研究.

集的隶属度:

$$\begin{cases} O_i^1 = \mu_{A_i}(x) & i=1,2 \\ O_j^1 = \mu_{B_j}(y) & j=1,2 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $x, y$  为节点输入;  $O_i^1, O_j^1$  为第 1 层对应节点的输出;  $A_i, B_j$  为与该层对应节点隶属度函数有关的语言表示(如“大”或“小”);  $\mu_{A_i}(x), \mu_{B_j}(y)$  分别为输入变量  $x$  和  $y$  的隶属度函数. 常用的隶属函数有三角形隶属函数、梯形隶属函数、高斯隶属函数和钟形隶属函数. 三角形和梯形隶属函数形式简单, 计算效率高, 然而, 由于这 2 种隶属函数都由直线段构成, 在由参数指定的拐角点处不够光滑; 高斯和钟形隶属函数具有平滑性和简洁的表示, 是定义模糊集合最流行的形式. 式(3)为钟形隶属函数:

$$\mu_{A_i}(x) = 1 / \left[ 1 + \left( \frac{x - c_i}{a_i} \right)^{2b_i} \right] \quad (3)$$

参数集  $\{a_i, b_i, c_i\}$  称为前件参数集.

第 2 层: 实现条件部分的模糊集运算, 输出每条规则的适用度:

$$O_i^2 = w_i = \mu_{A_i}(x) \cdot \mu_{B_j}(y), i=1,2 \quad (4)$$

第 3 层: 将各条规则的适用度归一化, 如第  $i$  条规则的归一化适用度为:

$$O_i^3 = \bar{w}_i = w_i / (w_1 + w_2), i=1,2 \quad (5)$$

第 4 层: 去模糊运算, 计算每条规则的输出:

$$O_i^4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i), i=1,2 \quad (6)$$

由所有  $\{p_i, q_i, r_i\}$  组成的参数集称为后件参数集.

第 5 层: 计算模糊系统的总输出, 即所有规则的输出之和:

$$O^5 = f = \sum_i \bar{w}_i f_i = \sum_i w_i f_i / \sum_i w_i \quad (7)$$

前件参数和后件参数都是未知参数, 通过某种算法训练 ANFIS, 可以按指定的指标得到这些参数值, 进而达到模糊建模的目的.

## 1.2 ANFIS 参数优化

由于 ANFIS 所用的参数一般都比较多, 因此采用一种高效的全局最优参数搜寻方法是非常重要的. 笔者采用混合学习算法 (hybrid learning algorithm) 来优选 ANFIS 中的参数, 使得系统的最终输出结果与目标的误差平方和最小. 该算法的核心思想如下: 在向前运算中, 保持所有前件参数的值不变, 采用“递归最小二乘算法 (recursive least squares)”来改进后件参数的值; 然后, 保持改进后的所有后件参数的值不变, 采用“误差逆向传播法 (error back-propagation)”来改进前件参数的值. 具体方法见文献[6].

万方数据

## 1.3 基于 MATLAB 的 ANFIS 径流预报

MATLAB 软件提供了 anfis 函数以及 ANFIS Editor 图形化编辑工具, 它将模糊推理技巧与神经网络的自适应建模结合起来, 提供了基于 Sugeno 模型的模糊神经网络的实现算法. 笔者结合 MATLAB 工具箱的 anfis 函数, 建立年径流预报模型, 并对模型进行检验. 具体步骤如下:

(1) 组成年径流训练样本和检验样本.

(2) 对训练样本进行学习, 以确定预报模型参数. 具体方法是: 确定输入变量的隶属度函数类型和个数; 由 genfis1 函数产生初始的 FIS 结构; 设定 ANFIS 训练参数; 利用 anfis 函数训练 ANFIS. 当达到训练次数或达到精度要求时, 训练结束.

(3) 用检验数据验证得到的 FIS 的性能, 若满足要求, 则认为该 ANFIS 系统是合理有效的基于模糊推理的系统模型.

年径流预报流程图见图 2.

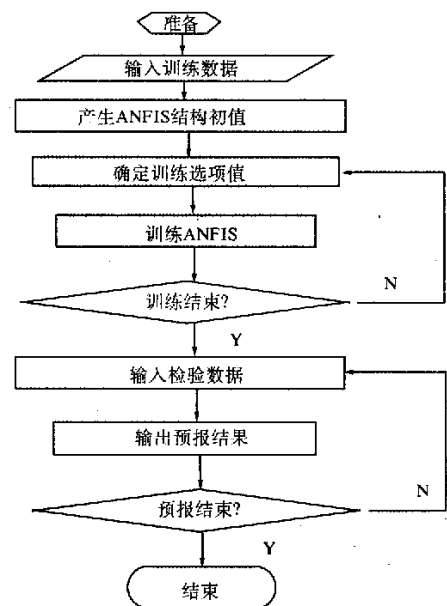


图 2 径流预报流程图

Fig. 2 Flow chart of runoff forecasting

## 2 应用实例

新疆维吾尔自治区伊犁河的雅马渡站有 23 年实测径流资料 and 与其相应的前期 4 个预报因子实测数据<sup>[3]</sup>见表 1. 预报因子分别为前一年 11 月至当年 3 月伊犁气象站的总降雨量  $x_1$ 、前一年 8 月欧亚地区月平均纬向环流指数  $x_2$ 、前一年 5 月欧亚地区月平均经向环流指数  $x_3$ 、前一年 6 月 2 800 MHz 太阳射电流量  $x_4$ .

表1 年平均流量与前期预报因子实测值

Tab.1 Survey values of the annual runoff and forecast factors

样本 序号	$x_1$ /mm	$x_2$	$x_3$ $/10^{-22} W \cdot (m^2 \cdot Hz)^{-1} / 10^8 m^3$	$x_4$	$\gamma$	样本 序号	$x_1$ /mm	$x_2$	$x_3$ $/10^{-22} W \cdot (m^2 \cdot Hz)^{-1} / 10^8 m^3$	$x_4$	$\gamma$
1	114.5	1.10	0.71	85	109	13	55.3	0.96	0.40	69	95
2	132.4	0.97	0.54	73	129	14	152.1	1.04	0.49	77	137
3	103.5	0.96	0.66	67	121	15	81.0	1.08	0.54	96	106
4	179.3	0.88	0.59	89	141	16	29.8	0.83	0.49	120	91
5	92.7	1.15	0.44	154	95	17	248.6	0.79	0.50	147	152
6	115.0	0.74	0.65	252	143	18	121.8	0.83	0.60	140	126
7	163.6	0.85	0.58	220	156	19	78.5	0.89	0.44	94	88
8	139.5	0.70	0.59	217	151	20	90.0	0.95	0.43	89	95
9	76.7	0.95	0.51	162	108	21	64.9	0.59	0.50	167	127
10	42.1	1.08	0.47	110	103	22	95.7	1.02	0.48	160	121
11	77.8	1.19	0.57	91	115	23	89.9	0.96	0.39	105	99
12	100.6	0.82	0.59	83	144						

2.1 训练样本和检验样本

将表1中1-20年资料作为模型训练样本,通过网络学习,确定模型参数;21-23年资料作为预测检验样本.模型的输入分别为 $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 和 $x_4$ ,模型输出为雅马渡水文站年径流量( $\gamma$ ).

2.2 ANFIS 训练与预报

按照1.3的流程,对表1中的训练样本进行学习,经过100次训练即可得出理想的样本模拟效果.将表1中检验样本数据代入训练好的ANFIS结构,得出相应的径流预报.改变训练次数,模型输出数据几乎无变化,预报结果稳定,各年预报值如表2所示.由表2可见,基于ANFIS的年径流预报模型预报误差<20%,预报精度较高,是合格的年径流预报.

文献[3]曾采用人工神经网络的2种改进算法进化单纯形法和最速下降-共轭梯度法对文中算例进行研究.3种方法的预报误差如表3所示.

表2 ANFIS 预报结果

Tab.2 Forecasting results based on ANFIS

样本 序号	实测值/ ( $10^8 m^3$ )	预报值/ ( $10^8 m^3$ )	相对误差/ %
21	127	130.73	-2.94
22	121	111.73	7.66
23	99	99.87	-0.88

表3 3种方法的预报误差对照表

Tab.3 Comparison of three method forecasting results

样本 序号	进化单纯 形法	最速下降-共轭 梯度法	ANFIS 模型
21	-20.28	7.33	-2.94
22	-10.99	0.40	7.66
23	-2.08	-5.62	-0.88

由表3可以发现,ANFIS预报误差变化范围小,收敛速度快,预报结果稳定且精度较高,预报效果最好.最速下降-共轭梯度法在模型训练中容易陷入局部极小点,表中的数据是在改变多个不同初始权重值后得到的结果;进化单纯形法训练结果较稳定,可以克服局部极小点问题,但预测精度较差<sup>[5]</sup>.

3 结语

(1)ANFIS将人工神经网络和模糊推理2者有机地结合,既能发挥优点,又可弥补各自的不足;基于MATLAB软件的ANFIS在编程和操作上极为方便,易于应用.

(2)基于ANFIS模型的年径流预报方法能够较好地模拟年径流量与其影响因子间的非线性映射关系,且泛化能力强,收敛速度快,值得在径流中长期预报中推广应用.

参考文献:

[1] 王 博,方法明,张连富,等. 非平稳序列的疏系数混合回归模型[J]. 水电能源科学,1999,17(4):13-15.

[2] 丁 晶,黄伟军,邓育仁. 水文水资源人工神经网络模型的研究[J]. 水资源研究,1996,17(1):22-24.

[3] 聂相田,邱 林,朱普生,等. 水资源可持续利用管理不确定性分析方法及应用[M]. 郑州:黄河水利出版社,1999.

[4] 王少波,柴艳丽,梁培. 神经网络学习样本点的选取方法比较[J]. 郑州大学学报(理学版),2003,24(1):63-65.

[5] 陈守煜. 模糊水文学与水资源系统模糊优化原理[M]. 大连:大连理工大学出版社,1990.

- [6] JANG JSR. ANFIS: Adaptive - network - based fuzzy inference system [J]. IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, 1993, 23(3): 665 - 685.
- [7] 杜太亮, 钟坚敏, 张永兴. 基于 ANFIS 模型的达坡变形预测方法[J]. 重庆建筑大学学报. 2005, 27(4): 27 - 31.
- [8] 许佳丽, 陈阳舟. 基于 MATLAB 的非线性系统模糊建模及仿真[J]. 计算机仿真, 2004, 21(5): 49 - 52.
- [9] 张智星, 孙春在, [日] 水谷英二, 等. 神经-模糊和软计算[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000.

## Annual Runoff Forecast Based on ANFIS

MA Xi-xia, CHEN Xin, HU Tie-cheng

(School of Environment and Water Conservancy Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The past forecast methods for annual runoff are analyzed and ANFIS is explained. This paper applies ANFIS forecast model which is used in the annual runoff forecast of a hydrologic station in northwest zone of China. Based on annual hydrologic data of this zone, the annual runoff is forecasted by MATLAB. The results show that this method accelerates the speed of calculation and improves the capability of accommodativeness and the precision of forecast by comparing this method with developed ANN model (two methods of Max - Speed Descending - Conjugate Grade and Evolution Simplex). The feasibility of ANFIS for annual runoff forecast is proved.

**Key words:** runoff forecast; ANFIS; ANN; influence factor

(上接第 120 页)

- [4] 易先忠. 碟形弹簧基本特性参考分析[J]. 石油机械, 1995, 23(3): 10 - 17.
- [5] 苏 军, 吴建国. 碟形弹簧特性曲线非线性有限元计算[J]. 力学与实践, 1997, 19(4): 49 - 50.
- [6] 张进国, 吕英民. 碟形弹簧非线性特性分析有限元法[J]. 机械研究与应用, 1998, 11(2): 15 - 16.
- [7] 吴鹤华, 张 行. 计及摩擦的有限变形碟形弹簧薄膜解[J]. 北京航空航天大学学报, 1996, 22(5): 585 - 590.
- [8] 罗晋华, 王海期, 何永标, 等. 碟形弹簧阻尼特性的试验和算法研究[J]. 中国机械工程, 1995, 6(2): 61 - 64.
- [9] GB/T 1972-2005, 碟形弹簧[S].
- [10] 尚晓江, 苏建宇. ANSYS/LS-DYNA 动力分析方法与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.

## Research on Stiffness of Combination Disk Spring

SUN Li-min, WANG Xiao-bo, SHI Li

(Department of Engineering Mechanics, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Based on the actual structure and specific working character of disk spring, experimentation was done on combination disk spring and the process of continuous load as well as load-unload of congruent disk spring was imitated with nonlinear explicit algorithm of the finite element software ANSYS/LS-DYNA. Therefore, we can obtain the result of the relative curve of load-displacement. The result was contrasted with experimented value and traditional algorithm Almen-Laszlo formula. The conclusion can be drawn that the result is approximately fitted with the experimental value and accurate than Almen-Laszlo formula. As a result, a brief and proper method of choosing the composite disk spring is provided in engineering.

**Key words:** combination disk spring; ANSYS/LS-DYNA; nonlinear; explicit algorithm