应用技术

基于自适应神经模糊推理系统的地下水位预测

周维博，李 娜，刘 雷，董起广

（长安大学 环境科学与工程学院，陕西 西安 710054）

摘 要：针对地下水埋深变化影响因素的复杂性、多样性和不确定性，以及影响因子之间复杂的非线性关系，将自适应神经模糊推理系统（adaptive neuro-fuzzy interference system，ANFIS）应用于地下水埋深预测。利用 1993—2010 年陕西省泾惠渠灌区的灌溉资料对网络进行训练，构建了基于 ANFIS 的地下水埋深预测模型，并对其进行了检测。结果表明，利用 ANFIS 对地下水埋深进行短期预测是切实可行的。

关键词：地下水位预测；自适应神经模糊推理系统；泾惠渠灌区

文献标识码：B **文章编号**：1000-288X(2014)04-0138-03 **中图分类号**：P641.2

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.04.040

Groundwater Depth Prediction Based on Adaptive Neuro-Fuzzy Interference System

ZHOU Wei-bo, LI Na, LIU Lei, DONG Qi-guang

(*College of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi* 710054, *China*)

Abstract: According to the complexity, diversity and uncertainty of the influence factors on groundwater depth change, and the complicated nonlinear relation between these factors, the adaptive neuro-fuzzy interference system(ANFIS) was put forward for predicting the groundwater depth. By training the ANFIS according to the irrigation materials of Jinghuiqu irrigation district in Shaanxi Province during 1993—2010, the prediction model for groundwater depth was built based on ANFIS. The results showed that this model had high accuracy to forecast groundwater depth and was suitable for groundwater depth short-term prediction.

Keywords: groundwater depth prediction; adaptive neuro-fuzzy interference system(ANFIS); Jinghuiqu irrigation district

地下水动态预测是地下水开发利用和地下水资源评价方面的主要研究内容，也是灌区防治次生盐碱化和井渠结合地表水与地下水联合运用方面一项重要研究内容[1]。查明影响灌区地下水位变化的关键因子并采取措施，对于缓解土壤盐碱化对农业生产的影响，维持灌区可持续发展至关重要。灌区地下水动态变化受一系列自然和人为因素的影响，它是地下水系统受多种输入所激励而产生的综合效益。目前，对地下水动态预测研究的数学模型已超过了传统的解析法和数值解所论及的数学模型范围。

从早期采用的水均衡方法到应用广泛的三维有限差分、有限元数值预报方法，形成了一系列有效的实用方法及其模型。这些研究方法，大致分为两类，即确定性方法和随机性方法[2]。确定性方法主要通过地下水运动微分方程和定解条件建立模型来求解，主要包括解析法、数值法和物理模拟法。随机性方法是通过建立影响因素与预报因子之间的函数关系来实现的，具有很多的灵活性[3]，如线性回归分析法、频谱分析法、时间序列法和随机微分方程，还有近十几年兴起的模糊理论、灰色理论、神经网络、小波分析、遗传算法等不确定性理论方法[4]。

此外，地理信息系统、遥感、全球定位系统在地下水动态预报研究中也得到了重视和应用，取得了一定的进展。这些方法虽在地下水动态预测中得到了较好的应用，但是由于水文地质参数的不确定性以及水文地质数据的不完备性，使得一些精确分析方法在表达地下水资源系统各部分之间的非线性关系上具有很大的局限性。

采用随机理论建立的模型也因求解时维数高、计算量大，使得模型求解十分困难，地下水动态变化是一个受多种因素影响的复杂的非线性过程，往往单一的随机模型并不能真实地反映其动态变化过程。而

收稿日期：2013-08-04 修回日期：2013-09-02
资助项目：“十二五”国家科技支撑计划项目“旱区节水型生态灌区关键技术研究与应用”(2011BAD29B01)
作者简介：周维博(1956—)，男(汉族)，陕西省乾县人，教授，博士生导师，主要从事水资源与水环境及节水灌溉方面的教学与科研工作。E-mail:zwbzyz823@163.com。

自适应神经模糊推理系统(adaptive neuro-fuzzy interference system, ANFIS)将人工神经网络和模糊逻辑推理相结合,使专家的模糊推理过程蕴含于神经网络结构中,使神经网络的结点和权值具有明确的物理意义,避免了传统神经网络工作过程的"黑盒"性,同时该系统又具有神经网络的自适应性和学习能力,克服了传统模糊推理系统学习能力差的缺点[5]。因此,利用 ANFIS 方法对地下水位进行动态预测有着无可比拟的优势。

1　ANFIS 基本原理及结构

ANFIS 属于 Sugeno 型模糊系统,由前件和后件构成,其典型的模糊规则形式为:如果 x 是 A,且 y 是 B,则 $z=f(x,y)$。其中,A 和 B 是前件中的模糊集合,而 $z=f(x,y)$是后件中的精确函数。通常 $f(x,y)$是输入变量 x 和 y 的多项式。如果 $f(x,y)$是一阶多项式时,所产生的模糊推理系统即为一阶 Sugeno 模糊模型。

一阶 Sugeno 模糊模型的 ANFIS 结构有 2 个输入 x 和 y,一个输出 z,因此具有 2 条模糊 if—then 规则:

规则 1:如果 x 是 A_1,y 是 B_1,那么 $f_1=p_1x+q_1y+r_1$。

规则 2:如果 x 是 A_2,y 是 B_2,那么 $f_2=p_2x+q_2y+r_2$。

ANFIS 结构共有 5 层,各自的功能为:

第 1 层:该层的每个结点 i 是一个有结点函数的自适应结点。

$$\begin{aligned} Q_{1i}&=u_{A_i}(x) \quad (i=1,2)\\ Q_{1i}&=u_{B_{i-2}}(y) \quad (i=3,4) \end{aligned} \tag{1}$$

式中:x,y——结点 i 的输入;A,B——是与该结点有关的语言标识(如"小"或"大");Q_{1i}——模糊集 A (A_1,A_2,B_1,B_2)的隶属度,并且它确定了给定输入 x 或 y 满足 A 的程度。这里 A 的隶属函数可以是任意何时的参数化隶属函数,如一般的钟形函数:

$$u_A(x)=\frac{1}{1+\left|\dfrac{x-c_i}{a_i}\right|^{2b_i}} \tag{2}$$

第 2 层:该层的每个结点是一个标以 Π 的固定结点,它的输出是所有输入信号的积。

$$Q_{2i}=u_{A_i}(x)u_{B_i}(y) \quad (i=1,2) \tag{3}$$

每个结点的输出表示一条规则的激励强度。

第 3 层:该层的每个结点是一个标以 N 的固定结点。第 i 个结点计算第 j 条规则的激励强度与所有规则的激励强度之和的比值。

$$Q_{3i}=\bar{\omega}_i=\frac{\omega_i}{\omega_1+\omega_2} \quad (i=1,2) \tag{4}$$

为方便起见,该层的输出成为归一化激励强度。

第 4 层:该层的每个结点 i 是一个有结点函数的自适应结点。

$$Q_{4i}=\bar{\omega}_i f_i=\bar{\omega}_i(p_ix+q_iy+r_i) \tag{5}$$

式中:$\bar{\omega}_i$——从第 3 层传来的归一化激励强度;$\{p_i,q_i,r_i\}$——该结点的参数集。这一层参数称为结论参数。

第 5 层:该的单结点是一个标以 Σ 的固定结点,它计算所有传来信号之和作为总输出:

$$Q_{5i}=\sum\bar{\omega}_i f_i=\frac{\sum\omega_i f_i}{\sum\omega_i} \tag{6}$$

这样就建立了一个功能上与 Sugeno 模糊模型等价的自适应网络。这个自适应结构不是唯一的,可以合并层 3 和层 4,从而得到一个只有 4 层的等价网络。

同样,可在网络的最后一层执行权值归一化,在极端情况下,甚至可以把整个网络缩减为一个具有相同参数集的单自适应结点。

ANFIS 的训练结构有 2 种生成方法,即人为制定方法和减法聚类方法。ANFIS 采用的学习法则有误差反传学习算法和混合学习算法。

2　基于 ANFIS 的泾惠渠灌区地下水位预测

2.1　研究区基本概况

泾惠渠灌区位于陕西省关中平原中部,东经 108°34′34″—109°21′35″,北纬 34°25′20″—34°41′40″。灌区东西长约 70 km,南北宽约 20 km,总面积为 1 180 km^2。现设施灌溉面积 1.98×10^7 hm^2,有效灌溉面积 2.18×10^7 hm^2,灌区土壤肥沃,水利条件较好,是陕西省重要的粮食、蔬菜、蛋奶的生产基地[6]。

2.2　样本数据

根据地下水动态资料分析,影响该灌区地下水位变化的因素很多,但主要受渠灌用水量($W_{渠}$)、降水量(P)、地下水开采量($W_{井}$)的影响,另外,工业、生活取用地下水也会对地下水位造成影响,但由于缺少相关数据,且该灌区用水以农业灌溉为主,故不考虑其作为主要因素。现以泾惠渠灌区 1993—2010 年各年地下水位动态资料作为样本进行训练,据此建立该灌区 ANFIS 模型。

泾惠渠降水量、渠灌用水量、井灌用水量随时间变化过程如图 1 所示。由图 1 可以看出,1993—1998 年之间井渠用水量比例接近 1∶1,而降水量比较均

衡，2000 年以后用水量普遍增加，且渠灌用水量较大。从整个过程来看，降水量大时，用水量减小，降水量小时，用水量增大。

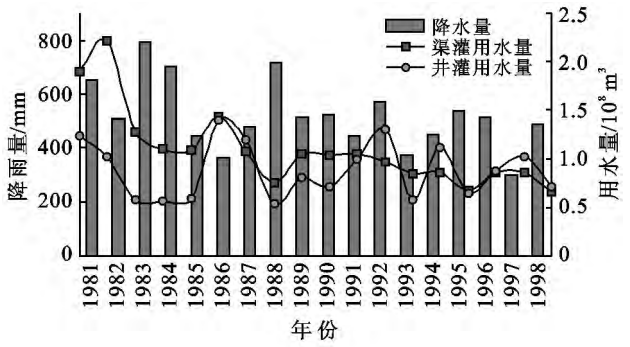


图 1 各影响因素随时间的变化过程

2.3 模型结构及其训练

以泾惠渠降水量、渠灌用水量、井灌用水量这 3 个影响因素作为输入变量，以地下水位平均埋深作为输出变量。隶属度函数数目的选取要适当，太少则不能反映系统的复杂性，太多则不能保证控制精度和实时性。经过试算，给每个输入变量赋予 5 个隶属度函数，类型均为“gaussmf”函数，输出函数类型为“linear”线性函数。

采用人为指定的方法来生成训练结构，其中训练次数为 20 次，训练期望误差为 0，训练步长为 0.01。学习法则采用“hybrid”混合学习算法。从各影响因素初始隶属度函数曲线可以看出，函数按照完整覆盖输入空间的原则构造了初始隶属度函数，并对其进行了均匀分割。

2.4 ANFIS 模型训练结果

模型训练结果详见表 1。由表 1 看出，原始训练数据和 ANFIS 系统输出数据的相对误差都在 5%以内，平均相对误差 1.06%。分析结果表明，ANFIS 系统输出数据与原始训练数据拟合程度好。说明 ANFIS 系统整体模拟精度较高，可用于泾惠渠灌区地下水位动态变化短期预测。

3 结 论

(1) 针对地下水位动态变化影响因子的复杂性、多样性和不确定性，以及这些影响因子之间复杂的非线性关系，利用自适应神经模糊推理系统(ANFIS)能够同时处理确定性和不确定信息以及动态非线性分析的能力，提出了基于 ANFIS 的地下水位动态变化预测方法。

(2) 以泾惠渠灌区 1993—2010 年的相关资料利用 ANFIS 对其进行训练，结果显示训练精度较高，可用于短期的地下水位动态预测。

表 1 模型训练结果

年份	地下水平均埋深/m	ANFIS 系统训练输出/m	误差	相对误差/%
1993	8.75	8.85	−0.10	1.18
1994	10.07	9.88	0.19	1.89
1995	11.89	12.20	−0.31	2.61
1996	10.99	10.91	0.08	0.77
1997	11.54	11.68	−0.14	1.23
1998	12.08	12.06	0.02	0.20
1999	12.66	12.12	0.54	4.27
2000	13.20	12.82	0.38	2.86
2001	12.94	12.98	−0.04	0.30
2002	13.71	13.65	0.06	0.42
2003	13.78	14.14	−0.36	2.64
2004	13.09	13.08	0.01	0.08
2005	13.99	13.98	0.01	0.04
2006	14.02	14.01	0.01	0.05
2007	14.21	14.14	0.07	0.49
2008	14.41	14.41	0.00	0.00
2009	14.67	14.67	0.01	0.05
2010	14.29	14.29	0.00	0.00

(3) 应用 ANFIS 进行灌区地下水动态预测，只要相关因子选择正确，其计算精度是较高的，预测结果一般能满足地下水资源评价要求。以多年的历史资料作为训练样本，当灌区样本资料越大，必然能够提高模型精度，使预测结果真实可靠。

[参 考 文 献]

[1] 周维博.人工神经网络理论在井渠结合灌区地下水动态预报中的应用[J].西北水资源与水工程，2003，14(2)：5.

[2] 陈葆仁，洪再吉.地下水动态及其预报[M].北京：科学出版社，1988.

[3] 王新民，崔巍.变权组合预测模型在地下水水位预测中的应用[J].吉林大学学报：地球科学版，2009，39(6)：1101-1105.

[4] 刘玉邦，梁川.地下水动态水位预测的非线性 PLSR 方法[J].武汉理工大学学报，2010，32(13)：127-128.

[5] 肖治宇，陈昌富，季永新.自适应神经—模糊推理系统在水库边坡稳定性评价中的应用[J].水土保持通报，2011，31(5)：186-190.

[6] 叶遇春，李林. 泾惠渠志[M]. 陕西 西安：三秦出版社，1991.