

基于 ANFIS 的水质评价模型及其应用

马细霞¹ 郭慧芳² 陈 鑫¹

(1. 郑州大学环境与水利学院 河南 郑州 450001 ; 2. 河海大学水文水资源学院 江苏 南京 210098)

摘要 :在分析以往水质综合评价方法优缺点的基础上 ,采用自适应神经模糊推理系统(Adaptive Neural Fuzzy Inference System ,ANFIS)建立了水质综合评价模型。以 MATLAB 为工具 ,以某市 7 个水质观测点为实例进行研究 ,并将评价结果和人工神经网络法、灰色聚类法及地图重叠法的结果进行分析比较。结果表明 :该模型具有计算速度快 ,评价结果客观、合理、稳定等特点 ,能够有效的应用于水质综合评价。

关键词 :水质评价 ;模糊推理 ;人工神经网络 ;ANFIS

中图分类号 : 文献标识码 :A 文章编号 :1004-693X(2007)06-0012-03

Water quality evaluation model based on ANFIS and its application

MA Xi-xia¹ , GUO Hui-fang² , CHEN Xin¹

(1. College of Environment & Hydraulic Engineering , Zhengzhou University , Zhengzhou 450001 , China 2. College of Water Resources and Environment , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract :On the basis of analysis of advantages and disadvantages of former water quality assessment methods , a new water quality assessment model was established by using Adaptive Neural Fuzzy Inference System (ANFIS). As an example , it was used to evaluate water quality of seven observation stations in a city by MATLAB. By comparing with ANN , gray clustering method and map superposition method , it is shown that , with high calculation speed and objective , stable and reasonable evaluation results , the model can be applied effectively to water quality evaluation.

Key words :water quality evaluation ; fuzzy inference ; artificial neural network ; adaptive neural fuzzy inference system

水质综合评价是根据水的不同用途 ,按照水质评价标准 ,对水资源的质量状况进行定性或定量的评定和分级。近年来 ,国内外对水质综合评价方法的研究比较活跃 ,考虑到水体中污染物相互作用的复杂关系、水质分级标准难以统一以及水质综合评价存在模糊性等特点 ,引入了不确定性概念 ,提出了一些新的评价方法 ,如模糊数学方法^[1-2]、灰色聚类法^[3]、人工神经网络法^[4]等。模糊综合评判法需要给定各水质参数的权值 ,灰色聚类方法需要确定灰色聚类权 ,权值确定的主观性使得这些方法在模型的建立和使用上存在一定的困难 ;人工神经网络克服了上述评价方法不够客观的缺点 ,评价结果客观、合理 ,精度也较高 ,但是网络具有收敛速度慢、结构设计复杂等缺点。自适应神经模糊推理系统^[5-6]

(Adaptive Neural Fuzzy Inference System ,简记为 ANFIS)是在神经网络和模糊推理系统的基础上发展起来的 ,它充分考虑了神经网络和模糊系统之间的互补性 ,是一个集语言计算、逻辑推理、分布式处理和非线性动力学为一体的系统。本文尝试利用 ANFIS 建立水质评价模型 ,并将评价结果和灰色聚类法、人工神经网络法及地图重叠法进行分析比较 ,以验证运用 ANFIS 进行水质综合评价的有效性 ,评定评价结果的合理性。

1 ANFIS 及水质评价模型

1.1 自适应神经模糊推理系统

Roger 提出的 ANFIS 是 Sugeno 型模糊系统。对于 2 个输入(x, y) 1 个输出(z)的一阶 Sugeno 型模糊

系统,有以下 2 条规则:

if (x is A_1) and (y is B_1) then $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$

if (x is A_2) and (y is B_2) then $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$

与该一阶 Sugeno 型模糊系统等效的 ANFIS 结构如图 1 所示。

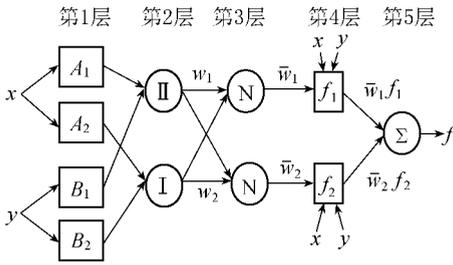


图 1 T-S 模糊系统等效的 ANFIS 结构

图 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,并输出对应模糊集的隶属度:

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x) \quad i = 1, 2$$

$$O_j^1 = \mu_{B_j}(y) \quad j = 1, 2$$

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,然而由于这两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形式。钟形隶属函数:

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

式中参数集 $\{a_i, b_i, c_i\}$ 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:

$$O_i^2 = w_i = \mu_{A_i}(x) \cdot \mu_{B_j}(y)$$

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:

$$O_i^3 = \bar{w}_i = w_i / (w_1 + w_2)$$

第 4 层:去模糊运算,计算每条规则的输出:

$$O_i^4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i)$$

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:

$$O_i^5 = f = \sum_i \bar{w}_i f_i = \sum_i w_i f_i / \sum_i w_i$$

前件参数和后件参数都是未知参数,通过混合学习算法训练 ANFIS,可以得到这些参数值,进而达到模糊建模的目的。

1.2 ANFIS 混合学习算法

混合学习算法是将最小二乘法 and 梯度下降法相结合的一种学习算法,它可以降低梯度法中搜索空间的维数,提高收敛速度。对于每一次样本训练,混合学习算法都存在前向传递和反向传递两个过程。首先,固定前件参数,将输入量前向传递到 ANFIS 的第 4 层,此时,系统总输出可表示为后件参数的线性组合,即

$$z = (\bar{w}_1 x) p_1 + (\bar{w}_1 y) q_1 + \bar{w}_1 r_1 + (\bar{w}_2 x) p_2 + (\bar{w}_2 y) q_2 + \bar{w}_2 r_2 = A \cdot X$$

式中: $\{p_1, q_1, r_1, p_2, q_2, r_2\}$ 构成向量 X ; A, X, z 为矩阵,其维数为 $P \times 6, 6 \times 1, P \times 1$; P 为训练数据的组数。应用最小二乘法求得后件参数

$$X^* = (A^T A)^{-1} A^T z$$

进行误差计算,将获得的误差信号反向传递,用梯度下降法更新前件参数,改变隶属度函数的形状。

1.3 基于 MATLAB 软件的 ANFIS

MATLAB 软件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。具体步骤:①产生训练数据和检验数据;②确定输入变量的隶属度函数类型和个数;③由 genfis1 函数使用训练数据产生初始的 FIS 结构;④设定 ANFIS 训练参数;⑤利用 anfis 函数训练 ANFIS,若满足精度要求,则认为该 ANFIS 系统是有效合理的基于模糊推理的系统模型。

1.4 基于 ANFIS 的水质评价模型

设有 n 个待识别的水体样本组成的样本集合,其中有 m 项评价指标,则有实测指标矩阵

$$X_{m \times n} = (x_{ij})_{m \times n}$$

$$i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$$

式中 x_{ij} 为样本 j 指标 i 的实测值。

若 m 项指标按照 c 类级别的标准进行评价,对于水质质量评价的数值区间型类别取其标准值,则有标准指标矩阵

$$Y_{m \times c} = (y_{ih})_{m \times c}$$

式中: h 为标准指标矩阵的类别号, $h = 1, 2, \dots, c$; c 为标准类别数; y_{ih} 为 h 级标准类别指标 i 的标准值。

以 m 项评价指标为输入,水质级别为输出,标准指标矩阵和水质类别矩阵为学习样本,采用 MATLAB 软件对模糊神经识别网络进行训练,将待识别的实测指标矩阵代入训练好的 ANFIS 评价模

型 根据系统输出值确定各水体样本的水质级别。
水质综合评价流程见图 2。

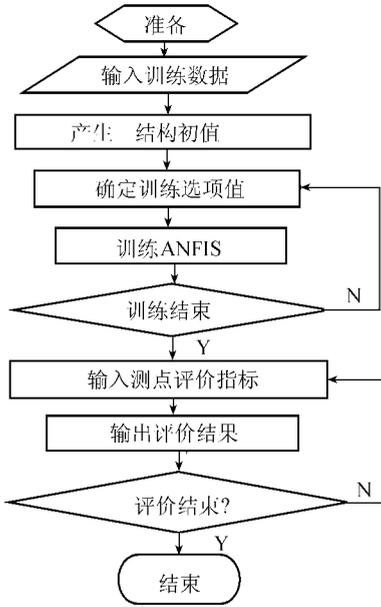


图 2 水质综合评价流程

2 应用实例

某市 1998 年在 7 个样本点对污染指标进行了

监测 表 1 中列出了其中 8 项指标的实测值 现采用 ANFIS 方法对 7 个样本点的水质进行综合评价。以 GB3838—2002《地表水环境质量标准》作为水质综合评价标准 如表 2 所示。

取水水质评价指标作为网络的输入 共 8 个输入节点 水质评价级别作为网络的输出 共 1 个输出节点。按隶属度不同 将 5 类水质划分为 [1, 0.2] 之间等分的区间作为输出区分。为增加网络训练的精度 采用插值法将地表水质标准数据增加 以增加后的地表水水质评价标准 (表 3) 作为网络训练样本的基础。为消除各输入项因数量级别差异较大等对训练和评价结果的影响 训练样本中输入数据进行规格化处理:

$$x'_{ij} = \frac{(x_{ij} + 0.1)^{0.2}}{10}$$

按照图 2 流程 对规格化后的训练样本进行学习 经过 20 次训练即可得出理想的样本识别效果。将表 1 中 7 个水质测样点数据经规格化后 代入训练好的 ANFIS 结构 得出相应的水质评价结果。改变训练次数 多次试验发现 尽管训练次数改变 模型输出数据几乎无变化 评价结果稳定。

表 1 地表水水质监测实测值

测点	$\rho(\text{DO})$	$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$	$\rho(\text{COD})$	$\rho(\text{BOD}_5)$	$\rho(\text{NH}_4\text{-N})$	$\rho(\text{FN})$	$\rho(\text{总磷})$	$\rho(\text{Cr}^{+6})$
1	5.195	9.175	49.6	7.13	21.21	0.005	0.041	0.0225
2	3.195	10.375	47.84	14.24	8.43	0.0065	0.188	0.0295
3	6.30	0.925	18.68	2.33	0.29	0.00	0.0055	0.0120
4	5.24	6.12	47.33	9.26	13.78	0.0035	0.0175	0.0175
5	3.95	17.91	99.40	17.58	7.51	0.016	0.057	0.0400
6	2.15	19.94	71.31	6.68	12.33	0.0145	0.0875	0.0335
7	6.05	0.81	1.645	0.51	0.324	0.001	0.0035	0.0170

表 2 地表水水质评价标准

水质类型	$\rho(\text{DO})$	$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$	$\rho(\text{COD})$	$\rho(\text{BOD}_5)$	$\rho(\text{NH}_4\text{-N})$	$\rho(\text{FN})$	$\rho(\text{总磷})$	$\rho(\text{Cr}^{+6})$
I	≥ 7.5	≤ 2	≤ 15	≤ 3	≤ 0.15	≤ 0.002	≤ 0.05	≤ 0.01
II	≥ 6	≤ 4	≤ 15	≤ 3	≤ 0.5	≤ 0.002	≤ 0.05	≤ 0.05
III	≥ 5	≤ 6	≤ 20	≤ 4	≤ 1.0	≤ 0.005	≤ 0.05	≤ 0.05
IV	≥ 3	≤ 10	≤ 30	≤ 6	≤ 1.5	≤ 0.010	≤ 0.1	≤ 0.05
V	≥ 2	≤ 15	≤ 40	≤ 10	≤ 2.0	≤ 0.100	≤ 0.1	≤ 0.1

表 3 模型训练样本

训练样本	输入项/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)								输出项
	$\rho(\text{DO})$	$\rho(\text{COD}_{\text{Mn}})$	$\rho(\text{COD})$	$\rho(\text{BOD}_5)$	$\rho(\text{NH}_4\text{-N})$	$\rho(\text{FN})$	$\rho(\text{总磷})$	$\rho(\text{Cr}^{+6})$	
1	9.0	1	15	3.0	0.10	0.002	0.05	0.005	1.0
2	7.5	2	15	3.0	0.15	0.002	0.05	0.010	0.9
3	7.0	3	15	3.0	0.32	0.002	0.05	0.030	0.8
4	6.0	4	15	3.0	0.50	0.002	0.05	0.050	0.7
5	5.5	5	18	3.5	0.75	0.004	0.05	0.050	0.6
6	5.0	6	20	4.0	1.00	0.005	0.05	0.050	0.5
7	4.0	8	25	5.0	1.25	0.007	0.07	0.050	0.4
8	3.0	10	30	6.0	1.50	0.010	0.10	0.050	0.3
9	2.0	15	40	10.0	2.00	0.100	0.10	0.100	0.2

(下转第 69 页)

在苏州水环境质量改善的特许经营管理模式中,必须明确其根本目的是改革传统体制下水务产业的发展模式,从国家包办向产业化、企业化发展,这要求政府转变职能、提高服务和管理水平,使公众从水务行业的特许经营和改革中切切实实地获得实惠^[8]。

4.2 加强培训学习和经验交流

2004年5月,《市政公用事业特许经营管理办法》正式实施,这部法规对规范特许经营招标、指导特许经营的工作具有积极的意义。公用事业的特许经营制度在我国尚处于起步阶段,由于其法律关系的复杂性、履约的长期性,我国政府及投资主体无论在观念意识、相关知识储备还是经验上都显得不够,因此,通过加强培训学习和经验交流,将有利于苏州水环境质量改善长效运行的特许经营模式逐步趋于成熟。

参考文献:

[1] 胡锦涛. 在省部级主要领导干部提高构建社会主义和谐

(上接第14页)

为验证方法的有效、合理性,表4中同时列出了ANFIS、人工神经网络、灰色聚类决策以及地图重叠法的评价结果。

表4 地表水水质评价结果

测点号	ANFIS输出结果	评价结果(水质类型)			
		ANFIS	人工神经网络	灰色聚类决策	地图重叠法
1	0.23	V	V	III	V
2	0.15	V	V	V	V
3	0.70	II	I	I	III
4	0.27	V	V	III	V
5	0.07	V	V	V	V
6	0.04	V	V	IV	V
7	0.90	I	I	I	II

从表4可以看出,ANFIS、人工神经网络、地图重叠法评价结果相近,灰色聚类决策结果相差较大。从7个测样点各水质指标与评价标准的比较发现,ANFIS评价结果更为合理。灰色聚类决策的灰色聚类权确定带有较大的主观性,地图重叠法是将观测值与水质评价标准相比较,只要单项指标超标,水质即属此类,非综合评价结果;人工神经网络模型比较全面地反映了各评价因素的影响,评价结果较为客观、合理,但网络训练速度慢,且网络结构因人而异,初始权重对评价结果也有一定的影响;基于ANFIS的水质评价方法克服了人工神经网络、灰色聚类方法的缺点,评价结果更为客观、合理。

社会能力专题研讨班上的讲话[N].人民日报,2005-02-19(1).
 [2] 张德浩,蒋岭.深圳特区城市水环境污染原因与对策[J].西南给排水,2005,27(2):25-27.
 [3] 梁才贵.水环境保护中建立行政区域补偿机制的思考[J].中国水利,2005(18):11-13.
 [4] 张鹏.公用事业市场化改革进展情况分析——以广西南宁市为例[J].价格理论与实践,2005(8):39-40.
 [5] 熊红星.论公用事业特许经营权有偿使用[J].经济问题探索,2004(6):111-114.
 [6] 徐宗威.法国城市公用事业特许经营制度及启示[J].城市发展研究,2001(4):1-5,16.
 [7] 郝莹.公用事业特许经营需防范四大问题[J].环境经济,2004(11):40-41.
 [8] 喻文光.德国水务私有化及其监管[J].行政法学研究,2005(3):19-28.

(收稿日期 2006-04-07 编辑 舒建)

3 结 语

a. ANFIS 将人工神经网络和模糊推理两者有机结合,既能发挥两者的优点,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。

b. 采用混合学习算法训练 ANFIS 后建立的水质评价模型具有评价结果客观、稳定、合理,计算速度快等特点,为水质评价提供了一条新途径。

参考文献:

[1] 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,1990:1-18.
 [2] 凌敏华,左其亭.水质评价的模糊数学方法及其应用研究[J].人民黄河,2006,28(1):34-36.
 [3] 贺北方,王效宇,贺晓菊,等.基于灰色聚类决策的水质评价方法[J].郑州大学学报:工学版,2002,23(3):10-13.
 [4] 马细霞,赵道全,贺晓菊,等.BP网络隐含层对水质评价结果的影响分析[J].水电能源科学,2002,20(3):16-18.
 [5] 刘怀国,孙建华,张冰,等.ANFIS及其在控制系统中的应用[J].华东船舶工业学院学报:自然科学版,2001,15(5):27-31.
 [6] 苏宇,何宁,武凯,等.基于ANFIS的铝合金铣削加工表面粗糙度预测模型研究[J].中国机械工程,2005,16(6):475-478.

(收稿日期 2006-07-20 编辑 舒建)