

文章编号: 1001-0920(2004)04-0407-04

非单点模糊逻辑系统在非线性信道均衡中的应用

祖家奎¹, 赵淳生¹, 戴冠中²

(1. 南京航空航天大学 超声电机研究中心, 江苏 南京 210016; 2. 西北工业大学 自动控制系, 陕西 西安 710072)

摘 要: 提出一种新的基于非单点模糊逻辑系统的自适应模糊滤波器的设计方法, 研究和对比了自适应非单点模糊滤波器在非线性数字通信信道均衡中的应用. 仿真结果表明, 基于非单点模糊逻辑系统的信道均衡器能够有效地遏制信道的时变性和随机噪声干扰, 可有效地解决数字信道的非线性畸变问题; 从提高数字通信信道的传输正确率和传输效率来说, 具有较强的适应能力.

关键词: 非单点模糊逻辑系统; 非线性; 通信信道; 均衡器

中图分类号: TP18 **文献标识码:** A

Nonlinear communications channel equalization based on non-singleton fuzzy logic system

ZU Jia-kui¹, ZHAO Chun-sheng¹, DAI Guan-zhong²

(1. Research Center of Ultrasonic Motors, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Department of Automatic Control, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China
Correspondent: ZU Jia-kui, Email: zjkchh@sina.com)

Abstract: Based on non-singleton fuzzy logic theories, a method is presented to design adaptive fuzzy filters. The designing process is described in detail and structure identification and parameter optimization are especially emphasized. An adaptive non-singleton fuzzy filter is investigated and analyzed for nonlinear communications channel equalization to solve its stability of digital transmission. Simulation results show that the proposed method can resist time-varied factors and stochastic noise, and solve nonlinear aberration effectively. It is strongly adaptive to improve correctness and efficiency of digital communication channel.

Key words: non-singleton fuzzy logic system; nonlinearity; communication channel; equalizer

1 引 言

模糊逻辑系统的“非单点”的概念^[1]是由 Zadeh 教授在 20 世纪 70 年代提出的. 常规的模糊逻辑系统^[2]采用“单点”模糊产生器对输入数据进行模糊化处理, 这种单点模糊化在某些工程应用中并不完全适宜, 特别当数据被测量噪声污染时, 系统的抗干扰能力受到很大的限制. 近年来, 随着大量复杂不确定问题的提出, 非单点模糊逻辑系统的研究日益受到重视, 取得了许多新的研究成果. 文献[3]对一类非

单点模糊逻辑系统所具有的前置滤波特性进行了系统的推导和相关对比分析.

在数字通信信道中, 非线性畸变^[4]是一个比较棘手的研究课题. 发送信号通过信道后会发幅值和相位随时间变化的非线性畸变, 严重影响了数据传输的稳定性以及传输率的提高. 目前, 解决信号处理^[4]中这种特殊的非线性均衡问题的方法是采用有限冲击响应(FIR)滤波器、无限冲击响应(IIR)滤波器和自适应数字滤波器等来处理, 这些方法在

收稿日期: 2003-03-17; 修回日期: 2003-05-29

作者简介: 祖家奎(1974—), 男, 江苏徐州人, 博士后, 从事模糊控制、神经网络等研究; 赵淳生(1938—), 男, 湖南衡山人, 教授, 博士生导师, 从事压电超声电机的研究

系统阶数、滤波效果、鲁棒性和自适应等方面存在许多不足和限制,因此需要研究和探讨解决非线性信道均衡问题的新理论和新方法

本文提出采用非单点模糊逻辑系统设计一种新的自适应模糊滤波器,以解决数字通信信道的非线性均衡问题.仿真结果表明该方法能够有效地解决信道的非线性畸变,具有较强的抗干扰能力,获得了令人满意的结果

2 非单点模糊逻辑系统

考虑多输入单输出系统,采用中心平均模糊消除器、乘积推理规则、高斯隶属函数以及非单点模糊化的非单点模糊逻辑系统具有如下数学描述^[3]:

$$f_{ns}(X) = \frac{\prod_{l=1}^M \prod_{k=1}^n \exp[-(x_k - m_{F_k^l})^2 / (2\sigma_x^2 + 2\sigma_{F_k^l}^2)]}{\prod_{l=1}^M \prod_{k=1}^n \exp[-(x_k - m_{F_k^l})^2 / (2\sigma_x^2 + 2\sigma_{F_k^l}^2)]} \quad (1)$$

其中: $l(l = 1, 2, \dots, M)$ 为模糊规则数; \bar{y}^T 为输出模糊集合的中心; $m_{F_k^l}$ 和 $\sigma_{F_k^l}^2$ 为输入模糊集合的高斯隶属函数的均值和方差; σ_x^2 为非单点模糊产生器的高斯隶属函数的方差,在特殊并重要的情况下,令各输入变量具有相同水平的不确定性,即各 σ_x^2 相同

由式(1)可以看出,当输入变量 x_k 没受到噪声污染时,即 $\sigma_x^2 = 0$,非单点模糊逻辑系统与单点模糊逻辑系统等价;当输入变量 x_k 受到噪声污染时,式(1)对噪声数据进行了预处理,在整个模糊逻辑系统中起到了对数据的前置滤波作用^[3],这种非单点模糊化处理有利于提高模糊逻辑系统的抗干扰能力和鲁棒性

3 自适应非单点模糊滤波器的设计

本文提出的基于非单点模糊逻辑系统的自适应模糊滤波器主要解决以下问题:

研究对象:考虑一个真值向量序列 $[X(i)]$ 和一个真值标量序列 $[d(i)]$,其中: $i(i = 0, 1, \dots)$ 为时间指数; $X(i) \in U = [C_1^-, C_1^+] \times [C_2^-, C_2^+] \times \dots \times [C_n^-, C_n^+] \subset R^n$ (U 和 R 分别称为滤波器的输入空间和输出空间).在每一个时刻 $i, X(i)$ 和 $d(i)$ 的值均是确定的

自适应非单点模糊滤波器所要研究的问题是:需要求出 $i = 0, 1, \dots$ 时,每一个时刻的自适应非单点模糊滤波器 $f_{ns}(X(i)) : U \subset R^n \rightarrow R$,从而使得

$$E_R(i) = \sum_{i=1}^N \Phi d(i) - \hat{f}_{ns}(X(i)) = \sum_{i=1}^N \Phi e(i) \quad (2)$$

为最小化,其中 $\Phi e(i)$ 为目标函数, N 为样本数

自适应非单点模糊滤波器的设计方案描述如下:

Step1 根据 $[X(i), d(i)] = [C_1^-, C_1^+] \times [C_2^-, C_2^+] \times \dots \times [C_n^-, C_n^+] \times [d^-, d^+]$,对样本数据进行归一化预处理;采用文献[5]中论述的减法聚类算法对样本数据进行聚类处理,得到 M 个聚类中心及其相应参数

Step2 构造非单点模糊逻辑系统 $\hat{f}_{ns}(X)$ 的模糊逻辑规则库:

$$R_f^l: \text{If } x_1 \text{ is } F_1^l \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } F_n^l, \text{ then } d \text{ is } G^l.$$

根据 Step1 获得的 M 个聚类中心 $[X_i^c, d_i^c]$,构造形如式(1)的非单点模糊逻辑系统初始结构和参数:选取聚类中心向量 X_i^c 中的各个分量元素 x_{ki}^c 作为式(1)中相应 $m_{F_k^l}$ 的初始值;并以 X_i^c 与最近邻的另一个聚类中心 X_j^c 欧氏距离的一半作为式(1)中 $\sigma_{F_k^l}^2$ 的初始值;取 d_k^c 作为式(1)中相应 \bar{y}^T 的初始值;而对于参数 σ_x ,其反映的是输入样本数据的噪声方差,在噪声方差未知的前提下,选取参数 σ_x 的初始值为 0

Step3 设计确定目标函数 Φe ,并根据系统的指标要求,参照文献[6],按如下误差反向传播算法对式(1)中的参数 $\bar{y}^T, m_{F_k^l}, \sigma_{F_k^l}^2, \sigma_x$ 进行调整,从而使得式(2)的误差最小

$$\bar{y}^T(t+1) = \bar{y}^T(t) + \alpha_y \sum_{i=1}^N \Psi(e^{(i)}(t)) P_i(X^{(i)}), \quad (3)$$

$$m_{F_k^l}(t+1) = m_{F_k^l}(t) + \alpha_m \sum_{i=1}^N \Psi(e^{(i)}(t)) \times [\bar{y}^T(t) - f_{ns}(X^{(i)})] \left[\frac{x_k^{(i)} - m_{F_k^l}(t)}{\sigma_x^2(t) + \sigma_{F_k^l}^2(t)} \right] P_i(X^{(i)}), \quad (4)$$

$$\sigma_{F_k^l}^2(t+1) = \sigma_{F_k^l}^2(t) + \alpha_\sigma \sum_{i=1}^N \Psi(e^{(i)}(t)) \times [\bar{y}^T(t) - f_{ns}(X^{(i)})] \left[\frac{x_k^{(i)} - m_{F_k^l}(t)}{\sigma_x^2(t) + \sigma_{F_k^l}^2(t)} \right]^2 P_i(X^{(i)}), \quad (5)$$

$$\sigma_x(t+1) = \sigma_x(t) + \alpha_\sigma \sum_{i=1}^N \Psi(e^{(i)}(t)) \times [\bar{y}^T(t) - f_{ns}(X^{(i)})] \left[\frac{x_k^{(i)} - m_{F_k^l}(t)}{\sigma_x^2(t) + \sigma_{F_k^l}^2(t)} \right]^2 P_i(X^{(i)}), \quad (6)$$

其中

$$\Psi(e^{(i)}(t)) = \partial \mathcal{R} e^{(i)}(t) / \partial e^{(i)}(t),$$

$$P_i(X^{(i)}) = \frac{\prod_{k=1}^n \exp[-(x_k^{(i)} - m_{F_k^i})^2 / (2\sigma_x^2 + 2\sigma_{F_k^i}^2)]}{\prod_{l=1}^M \prod_{k=1}^n \exp[-(x_k^{(l)} - m_{F_k^l})^2 / (2\sigma_x^2 + 2\sigma_{F_k^l}^2)]},$$

$\alpha_n, \alpha_m, \alpha_r, \alpha_e$ 为固定的训练步长

Step4 根据获得的非单点模糊逻辑系统 $f_{ns}(X)$, 构造未知系统的非单点模糊滤波器, 并对此自适应非单点模糊滤波器进行仿真实验

以上, 论述了自适应非单点模糊滤波器的实现过程. 由于 Step3 中的参数优化算法实际上是一种最速下降算法, 初始参数的选择是否合理对滤波器的收敛过程有很重要的影响. 而在设计中, 采用聚类算法选择初始参数, 能够有效地提高其收敛性和收敛速度^[6,7]. 同时也应看到, 模糊滤波器不是靠严格的数学模型构造的, 而是从样本数据或经验知识构造的, 系统的不确定性对滤波器的稳定性影响将会减小, 其稳定性问题的研究也正是模糊系统理论的一个有待进一步研究的课题^[2].

4 在非线性信道均衡中的应用

图 1 为数字通信系统的框图, 其中信道的含义包括了发送端滤波器、传输介质(媒体)、接收端滤波器以及其他元件. 设发送信号是以同等概率在 $\{-1, 1\}$ 上采样的一个独立序列 $s(k)$, 被附加噪声 $r(k)$

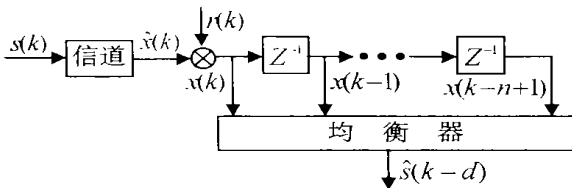


图 1 数字通信系统框图

污染后的信道输出为 $x(k), x(k-1), \dots, x(k-n+1)$, 且该输出序列为均衡器(自适应非单点模糊滤波器)的输入. 均衡器在采样时刻 k 所要完成的任务是: 利用 $x(k), x(k-1), \dots, x(k-n+1)$ 中所包含的信息给出发送信号 $s(k-d)$ 的一个估计 $\hat{s}(k-d)$, 这里的 n 和 k 分别为均衡器的阶数和延迟量

以下将用自适应非单点模糊滤波器的设计方法来实现如下形式的非线性时变信道的均衡问题:

$$\hat{x}(k) = a_1(k)s(k) + a_2(k)s(k-1) - 0.9[a_1(k)s(k) + a_2(k)s(k-1)]^3, \quad (7)$$

$$x(k) = \hat{x}(k) + r(k), \quad (8)$$

式中 $a_1(k)$ 和 $a_2(k)$ 为通信信道中的时变系数

根据 Chen 等^[8] 已经证明的最优化均衡器的设计理论和方法, 得出如图 2 所示的理想条件下的最优化均衡器输出, 其中白线为决策边界. 从图中可以看出, 最优决策区域的边界呈现出严重的非线性, 给实际的均衡器的设计和实现带来了困难

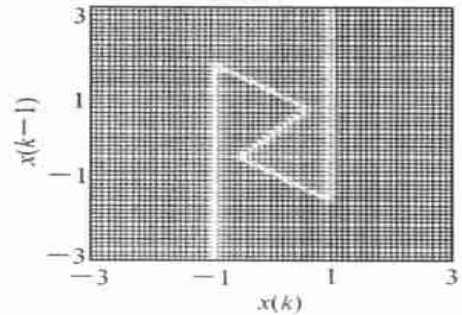


图 2 最优化均衡器的决策区域

本文将分两种情况进行分析, 并选择

$$\Phi e(k) = [f_{ns}(X(k)) - s(k)]^2 / 2 \quad (9)$$

作为误差目标函数来设计自适应非单点模糊滤波器, 从而实现非线性信道均衡问题

4.1 $a_1(k)$ 和 $a_2(k)$ 时不变且有噪声

设 $a_1(k) = 1, a_2(k) = 0.5$; 噪声 $r(k)$ 由两部分

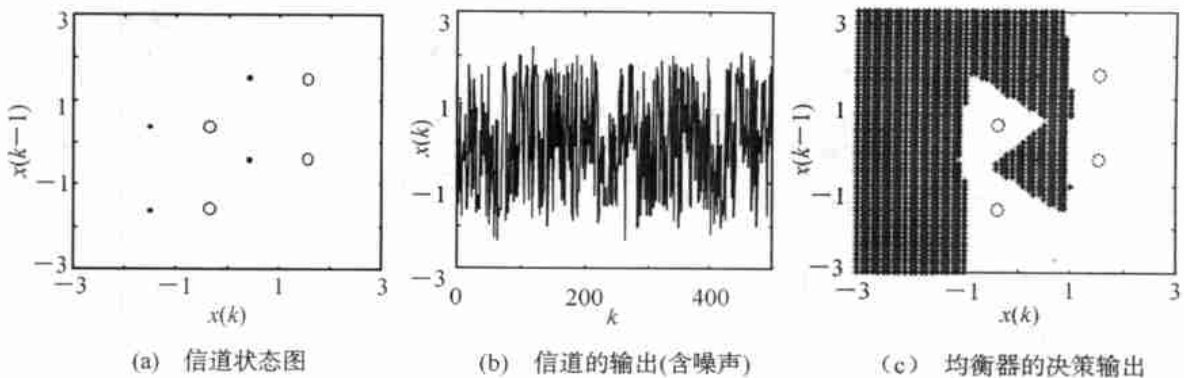


图 3 时不变且有噪声的特性图

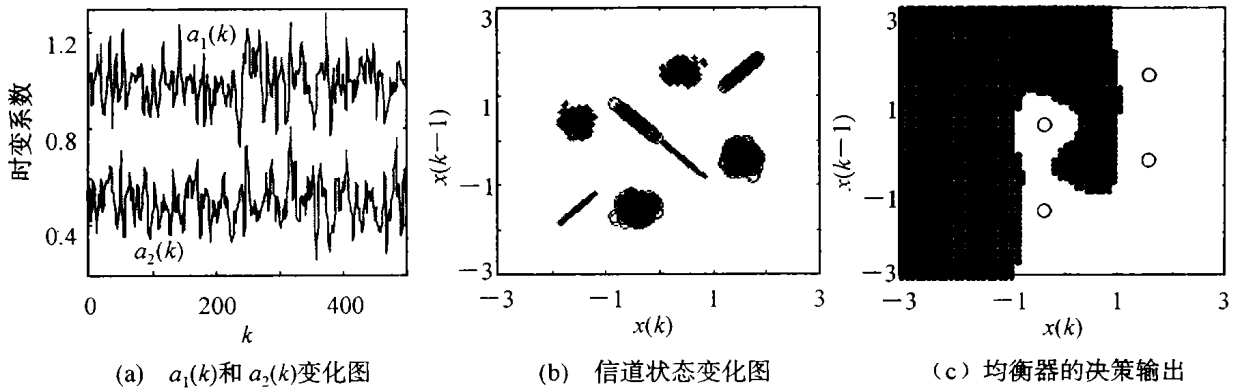


图4 时变且有噪声的特性图

组成: 一是均值为 0 且方差为 0.3 的随机噪声, 二是占数据总量 4% 的过失误差

通信信道在静态且无噪声时的状态变化如图 3(a) 所示. 随机产生 500 个二进制信号序列 $s(k)$ 作为信道的输入, 并获得受到噪声污染的时不变输出 $x(k)$, 组成 500 个样本输入数据点, 图 3(b) 描述了信道的输出 $x(k)$ 特性

采用上述自适应非单点模糊滤波器的设计方法, 构造出具有 8 条模糊逻辑规则的系统, 经过参数优化后, 得到基于非单点模糊系统的均衡器, 其决策输出特性如图 3(c) 所示. 从图中可知, 该均衡器的决策输出区域是趋向于收敛到最优决策区域的, 对信道的噪声干扰具有很强的鲁棒性, 反映出非单点模糊逻辑系统在解决时不变噪声信道的均衡问题上具有可行性和有效性

4.2 $a_1(k)$ 和 $a_2(k)$ 时变且有噪声

一般情况下, 通信信道总是时变的, 对于式 (7) 所描述的数字信道, 重点考虑由时变系数 $a_1(k)$ 和 $a_2(k)$ 造成的时变性. 在仿真验证中, $a_1(k)$ 和 $a_2(k)$ 如图 4(a) 所示, 是利用 Matlab 的信号处理工具箱 (式 (10)) 产生的有色高斯噪声

$$\begin{aligned}
 [B, A] &= \text{butter}(2, 0.2); \\
 a_1 &= 1 + \text{filter}(B, A, \text{beta} \cdot \text{randn}(1, 500)); \\
 a_2 &= 0.5 + \text{filter}(B, A, \text{beta} \cdot \text{randn}(1, 500));
 \end{aligned}
 \quad (10)$$

其中: $\text{butter}(\cdot)$ 产生一个截止频率为 0.2 的二阶低通 Butterworth 滤波器; $\text{filter}(\cdot)$ 产生一组有色高斯噪声; $\text{beta} = 0.2$

噪声 $r(k)$ 仍由均值为 0 且方差为 0.3 的随机噪声和占数据总量 4% 的过失误差两部分组成, 依照式 (7) 和式 (8) 构造 500 个样本数据点. 通信信道在时变且无噪声时的状态变化如图 4(b) 所示

根据上述设计方法, 得到具有 8 条模糊逻辑规则的均衡器, 其决策输出特性如图 4(c) 所示. 从图中可知, 由于通信信道时变性的增强, 信道的输出特性发生了剧烈的变化, 然而基于非单点模糊逻辑系统的均衡器仍能够有效地遏制信道的时变和噪声干扰, 从提高数字通信信道的传输正确率和传输效率来说, 表现出很强的适应能力. 与常规的自适应均衡器相比, 在系统设计的灵活性、结构的复杂程度以及实际应用效果等方面具有明显的优势

5 结 语

本文提出一种新的基于非单点模糊逻辑系统的自适应滤波器, 分析并论述了其实现方法, 验证了其在解决数字通信信道非线性均衡问题的可行性和有效性. 结果表明, 基于非单点模糊系统的相关理论能够在相关应用领域取得较好的效果, 丰富和完善了模糊理论, 为所研究的问题提供了一条新的途径和方法

参考文献 (References):

- [1] Zadeh L. A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes [J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics*, 1973, 3(1): 28-44
- [2] Wang L. X. *Adaptive Fuzzy Systems and Control: Design and Stability Analysis* [M]. New Jersey: PTR Prentice-Hall, 1994: 8-32
- [3] 祖家奎, 戴冠中, 张骏. 具有前置滤波特性的非单点模糊逻辑系统 [J]. *控制与决策*, 2002, 17(4): 476-479. (Zu Jia-kui, Dai Guan-zhong, Zhang Jun. Non-singleton fuzzy logic system and its performance of prefilter [J]. *Control and Decision*, 2002, 17(4): 476-479.)

(下转第 415 页)

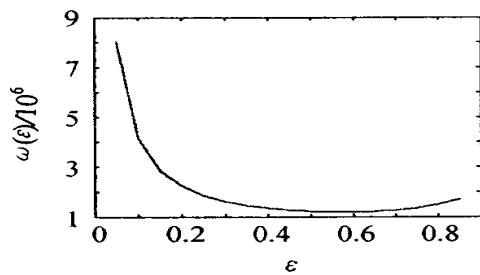


图2 成本柔性系数曲线

示 该图表明, 随着生产柔性水平的增大, 成本柔性系数取值呈先降后升的变化

4 结 语

本文研究了基于市场需求不确定条件下供应链的生产柔性决策问题, 通过成本分析建立了决策模型, 给出了供应链生产柔性决策有效边界的定义和经济意义, 并在此基础上引入成本柔性系数最小化的判断标准, 从而得出了最优方案的确定方法 本文建模过程简洁, 求解方便, 极具经济意义和应用价值

目前需求不确定性是供应链管理研究的热点和难点 本文仅研究了需求不确定条件下供应链中单生产商和销售商情景的柔性生产决策模型, 对于多销售商、多市场以及考虑供应商供应能力限制等条件下的柔性供应链设计问题, 是下一步将要研究的工作

参考文献(References):

- [1] 陈剑, 黄朔 供应链结构研究进展[J] 系统工程学报, 2002, 17(3): 246-251.
(Chen J, Huang S Prospects of studies on supply chain structure [J] *J of Systems Engineering*, 2002, 17(3): 246-251.)

- [2] Beamon B M. Measuring supply chain performance[J] *Int J of Operations & Production Management*, 1999, 19(3): 275-292
- [3] Jordan W C, Graves S C. Principles on the benefits of manufacturing process flexibility [J] *Management Science*, 1995, 41(4): 577-594
- [4] PR TM. Scor model[EB/OL] [Http://www. supply-chain.org/html/scor-overview_cfn](http://www.supply-chain.org/html/scor-overview_cfn), 2000-05-15
- [5] Gunasekaran A, Patel C, Tirriroglu E. Performance measures and metrics in a supply chain environment [J] *Int J of Operations & Production Management*, 2001, 21(1/2): 71-87.
- [6] Tsay A A. The quantity flexibility contract and supplier-customer incentives [J] *Management Science*, 1999, 45(10): 1339-1358
- [7] Tsay A A, Lovejoy W S. Quantity flexibility contract and supply chain performance [J] *Manufacturing & Service Operations Management*, 1999, 1(2): 88-111.
- [8] Voudouris V T. Mathematical programming techniques to debottleneck the supply chain of fine chemical industries [J] *Computers and Chemical Engineering*, 1996, 20(6): 1269-1274
- [9] Slack N. The flexibility of manufacturing systems [J] *Int J of Operations & Production Management*, 1987, 7(4): 35-45
- [10] Sabri E H, Beamon B M. A multi-objective approach to simultaneous strategic and operational planning in supply chain design [J] *The Int J of Management Science*, 2000, 28(5): 581-598
- [11] Stevens J. Integrating the supply chain [J] *Int J of Physical Distribution and Materials Management*, 1989, 19(8): 3-8

(上接第 410 页)

- [4] 俞卞章, 李志钧, 金明录 数字信号处理[M] 西安: 西北工业大学出版社, 1994 68-101
- [5] Ronald R Yager, Dimitar P Filev. Approximate clustering via the mountain method [J] *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1994, 24(8): 1274-1284
- [6] Jang J S R, Sun C T, Mizutani E. *Neuro-Fuzzy and Soft Computing* [M] New Jersey: Prentice-Hall, 1997. 56-90
- [7] 祖家奎, 戴冠中, 张骏 基于聚类算法的神经模糊推理系

统结构和参数的优化[J] 系统仿真学报, 2002, 14(4): 501-503

(Zu Jia-kui, Dai Guan-zhong, Zhang Jun The structure and parameters optimization of neural-fuzzy inference system via clustering algorithm [J] *J of System Simulation*, 2002, 14(4): 501-503

- [8] Chen S, Mulgrew B, McLaughlin S. A clustering technique for digital communications channel equalization using radial basis function network [J] *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1993, 4(2): 570-579