

# 自适应神经网络模糊小波语音消噪算法

孙 燕

(青海民族大学计算机学院, 青海西宁 810007)

**摘要:** 针对有色噪声, 采用自适应神经网络模糊系统模糊(Auto Neural Fuzzy Inference System, ANFIS)逼近有色噪声, 利用自适应神经模糊推理系统 ANFIS 对噪声的非线性动态特性进行建模, 提出了语音自适应神经网络模糊小波消噪算法, 建立并训练了消噪系统。对被有色噪声污染的测量信号经模糊消噪后, 根据信号和噪声的小波系数在不同分解尺度上的传递性, 进行中值滤波和小波重构, 得到了干净的语音。对算法进行了仿真实验, 结果表明, 消噪效果明显。

**关键词:** 自适应神经网络模糊系统; 小波; 有色噪声; 消噪;

中图分类号: TN912.35

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2014)-03-232-05

DOI 编码: 10.3969/j.issn1000-3630.2014.03.010

## Algorithm for ANFIS and wavelet denoising of speech signal

SUN Yan

(Computer Department of Qinghai University for Nationalities, Xi'ning 810007, Qinghai, China)

**Abstract:** An ANFIS and wavelet denoising algorithm is proposed for additive colored noise. Modeling the nonlinear dynamic characteristic of noise by ANFIS and fuzzy approximating colored noise, the Auto Neural Fuzzy Inference System (ANFIS) and wavelet denoising system of speech signal is set up and trained. According to the different wavelet coefficients' transmission properties of edge signals and noises under the different scales of the wavelet transform, the median filter is designed. Colored noise can be successfully removed by using subtraction in the original speech signal. Experimental results show that the algorithm is effective.

**Key words:** Auto Neural Fuzzy Inference System(ANFIS); wavelet; colored noise; denoising

## 0 引言

信号淹没在噪声中, 是在实际环境中经常遇到的情况, 当这种噪声为加性高斯白噪声时, 可以采用线性滤波的方法, 它是最基本的减谱算法<sup>[1]</sup>, 适用于对加性噪声的消除。目前消除非加性噪声的方法有自适应滤波如卡尔曼滤波<sup>[2]</sup>、维纳滤波<sup>[3]</sup>、谱减法及其改进等, 卡尔曼滤波可以在一定程度上对有色噪声消除有效。维纳滤波法对背景噪声白化效果比较好。但对于噪声具有非线性传播性质时, 使用线性滤波效果很差。有色噪声可看作是白噪声经过非线性动态处理后产生的, 使用经典线性滤波的方法起不到抑制噪声的作用。

目前语音增强的方法很多: 如谱减法及改进, 它是应用最早最广泛的一种方法。它是从带噪语音频谱中减去噪声频谱分量, 剩余的就是干净语音的频谱。其缺点是存在音乐噪声。信号子空间法<sup>[4]</sup>是

把带噪语音分解成信号子空间和噪声子空间上的投影, 在残余噪声频谱小于规定门限的情况下, 使语音信号失真最小。缺点是主要针对加性宽带高斯白噪声。

本文利用自适应神经模糊推理系统 ANFIS<sup>[5]</sup>对非线性动态特性进行建模逼近有色噪声<sup>[6]</sup>, 再利用小波变换<sup>[7]</sup>把含噪信号分解到多尺度中, 然后在每一尺度下把属于噪声的小波系数去除, 保留并增强属于信号的小波系数, 最后重构出小波消噪后的信号得到有用信号。

针对实际环境的非线性有色噪声, 本文结合经典谱减法的优点及利用自适应 ANFIS 对高斯白噪声非线性动态建模逼近有色噪声和小波阈值分解的优点, 有效消除了有色噪声, 解决了经典算法对有色噪声无效的问题。

## 1 ANFIS 结构

1985 年 Takagi 和 Sugeno 提出了一种非线性 T-S 模糊模型, 即后来的 Sugeno 模糊模型<sup>[8]</sup>, 是一种对有精确输入、输出数据集产生模糊规则推理的系统化方法。它结合模糊逻辑与神经网络两者之优

收稿日期: 2013-02-01; 修回日期: 2013-05-12

作者简介: 孙燕(1973—), 女, 山东青岛人, 副教授, 硕士, 研究方向为语音处理和语音编码。

通讯作者: 孙燕, E-mail: 453856400@qq.com

势，改善了传统模糊控制设计中必须人为调整隶属度函数以减小误差的不足，采用混合学习算法调整前提参数和结论参数，自动产生模糊规则。后来，Tang Roger 提出与一阶 Sugeno 模糊模型功能等价的基于自适应神经网络的模糊推理系统(ANFIS)<sup>[8,9]</sup>用来实现 Sugeno 模糊模型的学习过程。该网络是一个多层前馈网络<sup>[10,11]</sup>，结构如图 1 所示。

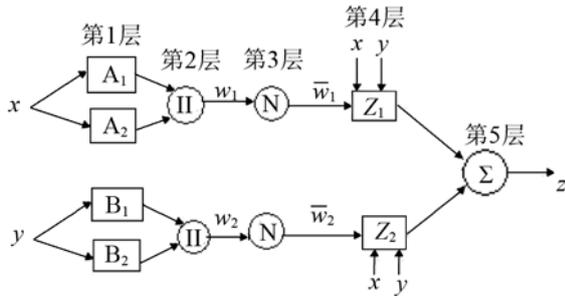


图 1 Sugeno 模糊系统等效的 ANFIS 网络  
Fig.1 Equivalent ANFIS network of Sugeno Fuzzy system

由图 1 可见，网络共有 5 层，各层功能如下：

第 1 层： $A_i$  和  $B_i$  为输入变量的模糊子集，该层节点的激活函数代表模糊变量的隶属函数，该层的输出代表模糊化结果，即隶属度，其中一个节点的传递函数可以表示为：

$$\begin{aligned} O_{1,i} &= f_{x_i}(x), & i=1,2 \\ O_{1,j} &= f_{y_j}(y), & i=3,4 \end{aligned} \quad (1)$$

其中： $O_{1,i}$ 、 $O_{1,j}$  是节点的传递函数，具体的函数关系由  $f(x)$  表示，通常采用钟形隶属度函数，也是这层的隶属度。

第 2 层：将模糊化得到的隶属度两两相乘，该层的输出代表着模糊规则的强度或适用度。

$$O_{2,i} = w_i = f_{x_i}(x) f_{y_i}(y), \quad i=1,2 \quad (2)$$

其中用  $w$  表示上一层的隶属度。

第 3 层：将各条规则的适用度归一化：

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, \quad i=1,2 \quad (3)$$

第 4 层：计算每条规则的结论：

$$z_i = p_i x + q_i y + r_i, \quad i=1,2 \quad (4)$$

其中参数  $p_i$ 、 $q_i$ 、 $r_i$  是经过系统的大量的输入输出数据，由递推最小二乘估计法确定。

第 5 层：计算所有规则的输出之和，即系统输出：

$$z = \bar{w}_1 z_1 + \bar{w}_2 z_2 \quad (5)$$

在这一网络中，第 4 层包含了参数  $p_i$ 、 $q_i$ 、 $r_i$  等，由递推最小二乘估计法确定。通过反向学习的最大梯度法，返回误差变化率以更新前提参数即中心和宽度。在改变这些参数的过程中，各种对应  $A_i$  和

$B_i$  的适当的钟型隶属函数也就出现了，由于前提参数与结论参数已经解耦，这里采用 RBF 网络算法，学习的速度快。

## 2 自适应神经网络模糊小波消噪原理

自适应神经网络<sup>[12]</sup>模糊小波消噪原理见图 2。

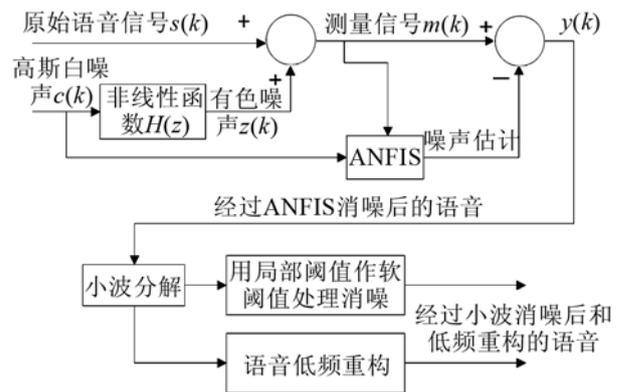


图 2 语音自适应神经网络模糊小波消噪原理  
Fig.2 Principle diagram of ANFIS and wavelet

图中原始语音信号为  $s(k)$ ，高斯白噪声为  $c(k)$ ， $c(k)$  经过非线性变换函数  $H(z)$  后为有色噪声  $z(k)$ ，它是高斯白噪声的延迟和变形，不可测量，即  $z(k) = f(c(k), c(k-1), c(k-2), \dots)$ ，其中，函数  $f$  是未知和非线性的，而且其频率范围往往与测量信号的频率范围重叠，所以线性频率滤波去除噪声是无法实现的；噪声估计是由 ANFIS 系统模糊逼近实现的；测量信号  $m(k)$  是原始语音信号与有色噪声的叠加。

自适应神经网络模糊小波消噪是将高斯白噪声与其延迟和测量信号作为系统训练集，通过 ANFIS 系统模糊逼近测量信号中的有色噪声，从被有色噪声污染的测量信号中减去逼近的噪声，再经过小波的低通滤波将高频噪声滤除得到干净的语音信号。

### 2.1 ANFIS 噪声估计

用 ANFIS 网络逼近有色噪声时，网络的输入为高斯白噪声  $c(k)$  和  $c(k-1)$ ，并且每个变量采用钟形隶属函数，输出样本本应该为有色噪声，但是实际上不能直接得到它，这里可以用测量信号： $m(k) = s(k) + f(c(k), c(k-1))$  来代替。

有色噪声为白噪声通过下列非线性函数后产生：

$$H(z) = f(c(k), c(k-1)) = \frac{4 \cos(c(k)) \cdot c(k-1)}{1 + c(k-1)^2} \quad (6)$$

仿真实验非线性函数特性曲线就是由这个函

数构造得出的, 如图 4 所示。

ANFIS 的输出即可作为  $z(k)$  的估计值  $\hat{z}(k)$ , 而 ANFIS 的训练应使下面的误差最小:

$$e^2(k) = \|d(k) - \hat{z}(k)\|^2 = \|s(k) + z(k) - \hat{z}(k)\|^2 = \|s(k) + z(k) - \hat{f}(c(k), c(k-1), c(k-2), \dots)\|^2 \quad (7)$$

其中  $\hat{f}$  就是由 ANFIS 产生的非线性函数的逼近。

将式(7)展开, 得到

$$e^2(k) = \|s(k)\|^2 + \|z(k) - \hat{z}(k)\|^2 + 2s(k)z(k) - 2s(k)\hat{z}(k) \quad (8)$$

对式(8)两边取期望, 并注意到  $s(k)$  的期望为 0、 $s(k)$  与  $c(k)$  不相关, 从而与  $z(k)$ 、 $\hat{z}(k)$  也不相关, 得

$$E(e^2) = E(s^2) + E[(z - \hat{z})^2] \quad (9)$$

因此, 使  $E(e^2)$  最小, 等价于使  $E[(z - \hat{z})^2]$  最小, 即将  $\hat{z}(k)$  尽可能接近  $z(k)$ 。换句话说, ANFIS 提供的函数  $\hat{f}$  将以期望最小均方误差逼近实际的噪声传输函数  $H(z)$ <sup>[8]</sup>, 从而得到噪声估计, 实际仿真实验中, 用公式(6)构造非线性噪声加到原始语音作为测量语音信号, ANFIS 系统将噪声和噪声的延迟及测量语音信号作为训练集, 从而完成噪声非线性特性的神经网络模糊建模, ANFIS 系统利用训练后的神经网络模糊系统对噪声信号在测量信号结果中产生的影响进行估计, 最终实际测量信号减去由 ANFIS 系统逼近的有色噪声, 得到消噪后的语音。

### 2.2 小波阈值

小波消噪原理是将含噪信号在各尺度上进行小波分解, 设定一个阈值, 幅值低于该阈值的小波系数置为 0, 高于该阈值的小波系数或者完全保留, 最后将处理后获得的小波系数用逆小波变换进行重构, 得到去噪后的信号。阈值去噪中, 阈值函数体现了对超过和低于阈值的小波系数不同处理策略, 是阈值去噪中关键的一步。

设  $v$  表示小波系数,  $T$  为给定阈值,  $\text{sgn}(\cdot)$  为符号函数, 常见的阈值函数有:

硬阈值函数:

$$v_{\text{new}} = \begin{cases} v, & |v| \geq T \\ 0, & |v| < T \end{cases} \quad (10)$$

软阈值函数:

$$v_{\text{new}} = \begin{cases} \text{sgn}(v)(|v| - T), & |v| \geq T \\ 0, & |v| < T \end{cases} \quad (11)$$

## 3 算法仿真实验

在实验室环境下录制语音文件。所录语音为 8 kHz 采样率、8 bit 量化、线性 PCM 编码的数字语

音; 实验仿真结果如图 3~10 所示。图 3 是原始语音及频谱。图 4 是非线性函数的特性曲线, 由式(6)构造得出。图 5 是测量语音信号与频谱, 从图 5 中根本无法看出任何的语音信息。图 6 是有色噪声的估计, 其频率范围与测量信号频率范围重叠。图 7 是经过非线性变换后的噪声信号和频谱。从图 8 可以看出被有色噪声污染的测量信号经过 ANFIS 系

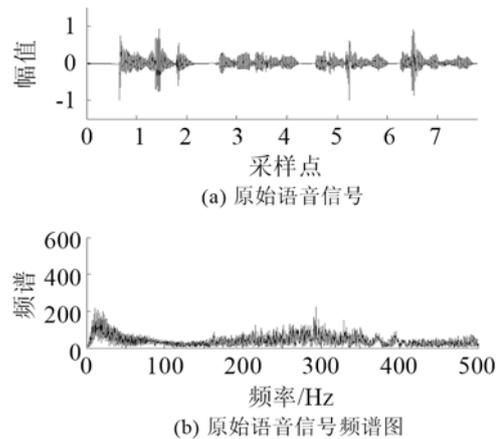


图 3 原始语音及频谱

Fig.3 The waveform and spectrum of original speech signal

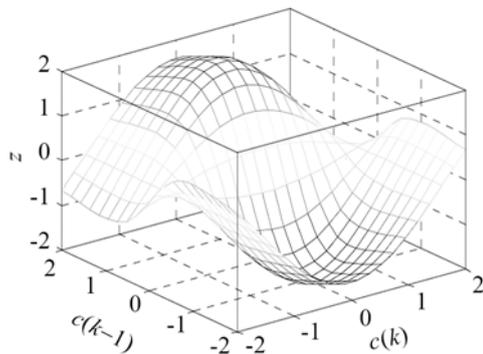


图 4 特性曲线

Fig.4 Characteristic curve

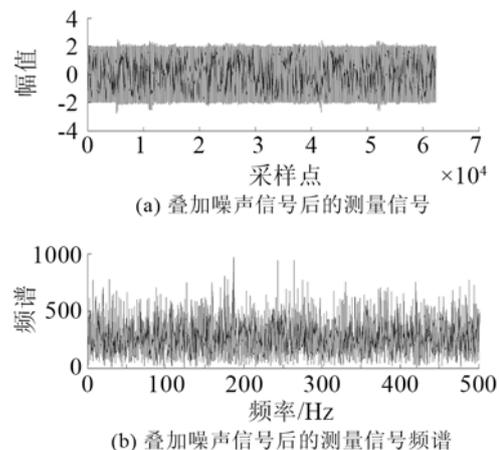


图 5 叠加有色噪声的测量语音信号与频谱

Fig.5 The waveform and spectrum of measured speech signal

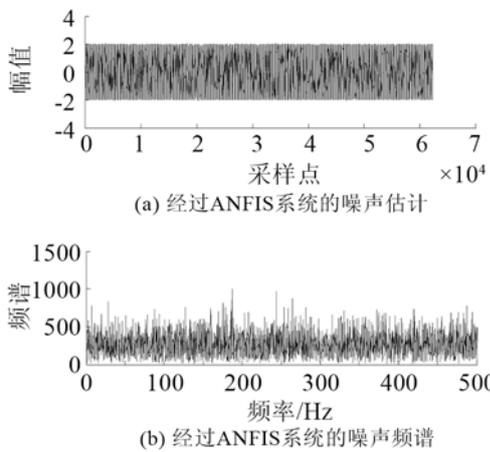


图6 经过 ANFIS 系统的噪声估计与频谱  
Fig.6 The waveforms and spectrums of noise estimated by ANFIS

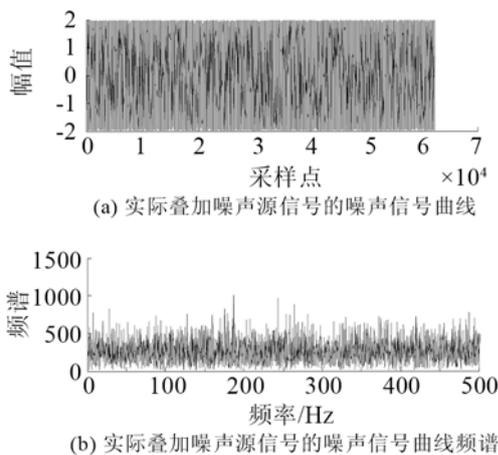


图7 经过非线性变换后的噪声与频谱  
Fig.7 The waveform and spectrum of after Nonlinear transformation of noise

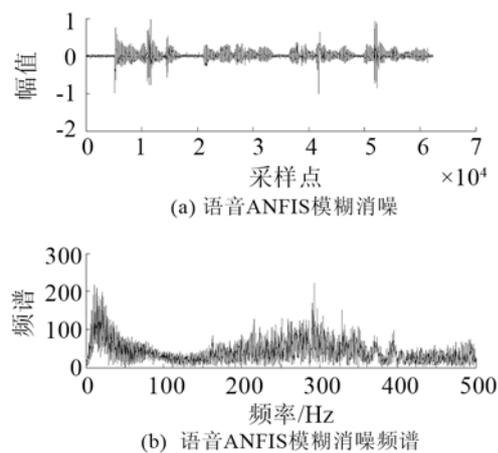


图8 经过 ANFIS 消噪后语音与频谱 SNR=50  
Fig.8 The ANFIS waveform and spectrum of after denoising, SNR=50

统消噪后, 可明显分辨出语音信号。图9是经过小波消噪后的语音, 消噪效果进一步优化。图10是被有色噪声污染后经过维纳滤波消噪后的语音, 可见消噪效果不好, 基本得不到语音信号, 语音信号

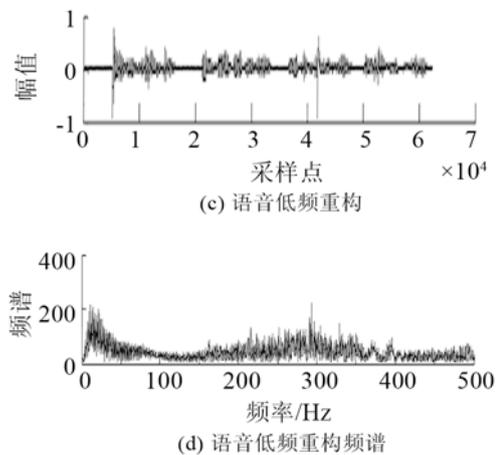
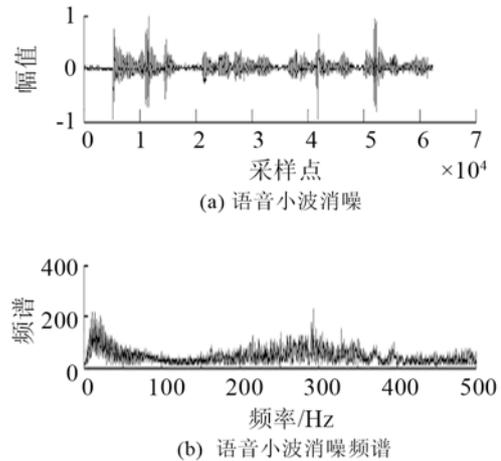


图9 语音小波消噪和低频重构及频谱 SNR=50  
Fig.9 The waveform and spectrum of after Wavelet denoising and Low-frequency reconstruction, SNR=50

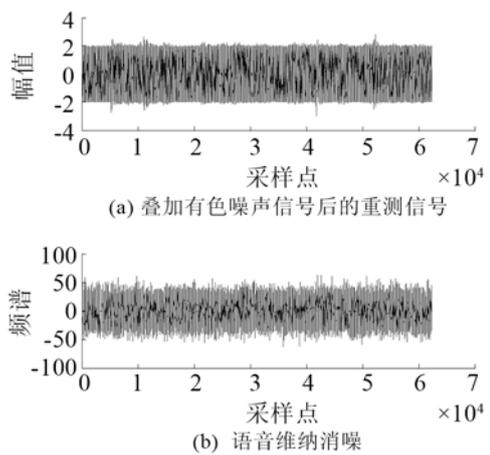


图10 语音维纳消噪  
Fig.10 Wiener denoising of speech signal

还是被淹没在噪声中。从图8、9与图10的对比可见, 其中信噪比为  $SNR=50$ , 采用自适应神经网络模糊信号和小波消噪算法对于去除有色噪声是有效的。图11是上述方法在  $SNR=3$  时的比较, 虽然从波形上还是有噪声, 但是播放时得到清晰可辨的语音, 可见该算法在低信噪比下也是有效的。

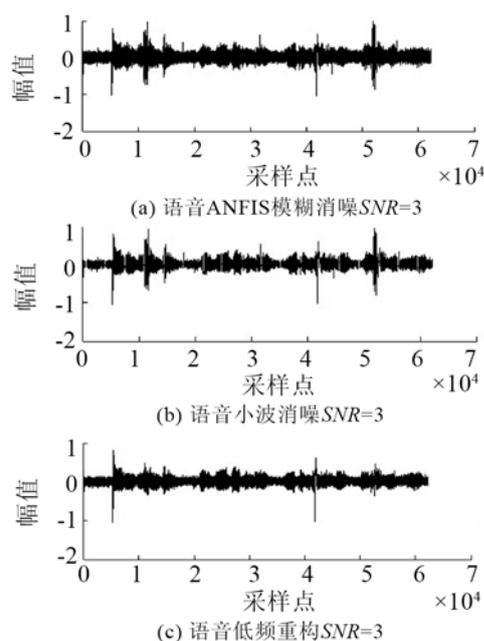


图 11 SNR=3 ANFIS 消噪后语音和小波消噪及低频重构语音波形  
 Fig.11 SNR=3 The waveform of ANFIS and Wavelet denoising and Low-frequency reconstruction

## 4 结 论

自适应神经网络模糊小波语音消噪算法,可在未知外界干扰源特征、传递途径不断变化以及背景噪声和被测对象相似的情况下,能够有效地消除外界有色声源的干扰,获得高信噪比的语音信号,这一算法为在测试环境不太理想的工作现场做测试分析和故障诊断时,提供可靠的方法和依据。

### 参 考 文 献

- [1] 赵晓群. 数字语音编码[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.  
ZHAO xiaoqun, Digital speech coding[M]. Beijing: Mechanical Industry Publishing Press, 2007.
- [2] PALIWAL K, BASU A. A speech enhancement method based on Kalman filtering[C]// Proc Acoustics Speech and Signal Processing, IEEE International Conference on IC A SSP' 87.[S.1.]: IEE E Press,1987, (12): 177-180.
- [3] Wiener, Norbert. Extrapolation, interpolation, and smoothing of stationary time Series[M]. New York: Wiley.
- [4] Ephraim Y. A signal subspace approach for speech enhancement[J]. IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, 1995, 3(4): 251-66.
- [5] Staib W E, Bliss N G, Staib R B. Recent developments in neural network applications -neural network conversion of the electric arc furnace into the intelligent arc furnace[C]// 1991 AISE Spring Conference, 1991.
- [6] 崔先强, 杨元喜, 高为广. 多种有色噪声自适应算法的比较[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2006, 31(8): 731-735.  
CUI Xianqiang YANG Yuanxi GAO Weiguang. A variety of colored noise adaptive algorithm is compared[J]. Journal of Wuhan University Information: Science Edition, 2006, 31(8): 731-735.
- [7] 郭桂容. 模糊模式识别[M]. 长沙: 国防科技大学出版社.  
GUO Guirong. Fuzzy pattern recognition[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press.
- [8] 张毅, 杨秀霞. 小波消噪在微弱信号检测中的应用[J]. 微计算机信息, 2006, 1(1): 113-114.  
ZHANG Yi, YANG Xiuxia. Wavelet denoising in the application of weak signal detection[J]. Journal of Micro Computer Information, 2006, 1(1): 113-114.
- [9] 张乃尧, 阎平凡. 神经网络与模糊控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.  
ZHANG Naiyao, Yan Pingfan. Neural network and fuzzy control [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998.
- [10] Widrow B, Glover J R, Mecool J, et al.Adaptive noise canceling: principles and application[J]. Proc IEEE, 1975, 63(12): 1692-1716.
- [11] 楼顺天, 胡昌华, 张伟. 基于 MATLAB 的系统分析与设计---模糊系统[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005.  
LOU Shuntian, HU Changhua, ZHANG wei. Based on the MATLAB system analysis and design - fuzzy system[M]. Xian Xi'an: University of Electronic Science and Technology Press, 2005.
- [12] Staib W E, Bliss N G, Staib R B. Neural network conversion of the electric arc furnace into the intelligent arc furnace[C]// 74th AIME Steelmaking Conference, 1991.