

# 基于自适应神经模糊滤波的低频振荡 Prony 分析

侯王宾, 刘天琪, 李兴源

(四川大学 电气信息学院, 四川省 成都市 610065)

## Prony Analysis of Low Frequency Oscillations Based on Adaptive Neural-Fuzzy Filtering

HOU Wang-bin, LIU Tian-qi, LI Xing-yuan

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan Province, China)

**ABSTRACT:** In view of the sensitivity of traditional Prony method to noise and its higher requirements to input signal while low-frequency oscillation is analyzed, a new low-frequency oscillation analysis method which integrates adaptive neural-fuzzy filtering with improved Prony method is proposed. Firstly, the fuzzy filtering of low-frequency signal is performed by adaptive neural-fuzzy inference system, then the filtered signal is analyzed by improved Prony method, and the effective orders of improved Prony method are determined by normalized singular values. Applying the proposed method to IEEE 4-machine 2-area system, simulation results show that the proposed method can accurately recognize the dominant mode of low-frequency oscillation under the affect of colored noise, and the effectiveness of the proposed method is proved.

**KEY WORDS:** low frequency oscillation; colored noise; adaptive neural-fuzzy filtering; improved Prony method; normalized singular value method

**摘要:** 传统 Prony 法在分析低频振荡时对输入信号要求较高, 存在着对噪声敏感的弱点。文中提出一种自适应神经模糊滤波和改进 Prony 法相结合的低频振荡分析方法。该方法先用自适应神经模糊滤波对低频振荡信号进行滤波, 再用改进 Prony 法对滤波后的信号进行分析。其中改进 Prony 法有效阶数用归一化奇异值法确定。将该方法用于分析 IEEE 4 机 2 区系统表明, 在有色噪声影响下, 该方法仍能相对准确地辨识出低频振荡主导模式, 验证了其有效性。

**关键词:** 低频振荡; 有色噪声; 自适应神经模糊滤波; 改进 Prony 法; 归一化奇异值法

## 0 引言

Prony 法是低频振荡分析中直接用系统受扰轨迹提取振荡特征参数的一种方法<sup>[1]</sup>。它用一组指数函数的线性组合来拟合等间隔采样数据, 从而估算

出给定信号的频率、衰减、幅值、相位等信息<sup>[2-4]</sup>。但传统 Prony 法对输入信号的要求很高, 对数据噪声非常敏感, 尤其在大噪声下甚至无法辨识出正确的结果, 这将直接影响对主导振荡模式的识别<sup>[5]</sup>。因此在使用 Prony 法分析含噪声信号之前有必要进行数据预处理。文献[6]提出了用离散卡尔曼滤波进行预处理, 但卡尔曼滤波需要建立一个系统模型, 而实际输入信号多为非平稳信号, 缺少对其真正特性的认识; 文献[7]提出用低通滤波器进行预处理, 但使用低通滤波器时, 除需时频变换之外, 还需预先确定相应滤波器的截止频率和信号带宽, 这对仅从实际信号确定滤波器参数和所需系统模型相对困难; 文献[8]用模糊滤波进行预处理, 但模糊系统缺乏自学习和自适应能力, 其隶属函数参数的调整、模糊推理规则的制定依赖于启发式知识和人类专家的经验, 而这类知识有时很难获得; 文献[9]用小波对信号进行预处理, 但小波变换在应用时存在着合理选择匹配小波基的困难。而且以上这些方法在处理噪声时多是认为信号噪声是高斯白噪声, 这与实际测量信号噪声多是有色噪声<sup>[10]</sup>有所出入。而对高斯白噪声有效的滤波方法往往在非线形滤波中效果不好<sup>[11]</sup>。文献[12]提出一种基于自适应神经模糊网络(adaptive neural-fuzzy inference system, ANFIS)的滤波方法。ANFIS 是用神经网络实现的 Sugeno 型模糊推理系统<sup>[13-14]</sup>, 它结合了模糊逻辑和神经网络的优点, 通过对大量已知数据的训练, 自适应地调整、改变隶属函数参数和模糊规则。有色噪声可以看成是白噪声通过非线性处理后产生的, 所以利用 ANFIS 对噪声的非线性特性进行建模, 从而使输出信号逼近有用信号。

根据以上研究成果, 并结合低频振荡信号的噪声往往是有色噪声的特点, 本文提出先用 ANFIS

基金项目: “十一五” 国家科技攻关计划项目(JS2008113506594)。

Key Project of the National Eleventh-Five Year Research Program of China (JS2008113506594).

滤除低频振荡信号含有的有色噪声，然后再进行 Prony 分析。为更好地提取主导振荡模式，采用基于能量级概念的归一化奇异值法<sup>[7]</sup>确定 Prony 拟合的有效阶数。

## 1 ANFIS 滤除有色噪声的原理

ANFIS 的去噪原理如图 1 所示。其中  $x(k)$  是有用信号， $n(k)$  是与  $x(k)$  相互独立的白噪声。 $n(k)$  通过未知的非线性动态系统产生有色噪声  $d(k)$ ， $d(k)$  叠加到  $x(k)$  得到含噪声测量信号  $y(k)$ 。消除噪声就是要从含噪声测量信号  $y(k)$  和参考输入信号  $n(k)$  中估计出原信号  $x(k)$ ，这只需估计出  $d(k)$  即可。而  $d(k)$  是  $n(k)$  的延迟及动态畸变，即

$$d(k) = f(n(k), n(k-1), \dots, n(0)) \quad (1)$$

其中函数  $f$  是噪声的非线性传输特性。

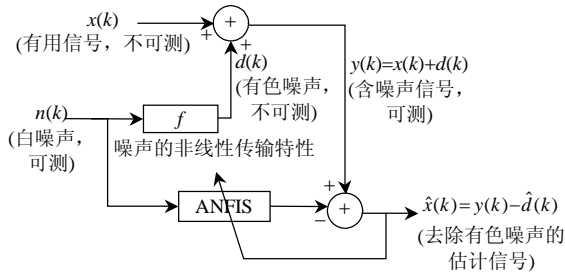


图 1 ANFIS 滤除有色噪声原理

Fig. 1 Schematic of ANFIS colored noise filtering

若  $x(k)$  的期望值为 0 (这对许多实际问题经过简单转化后都是成立的)，我们可以将可测信号  $y(k)$  作为 ANFIS 的理想输出，利用 ANFIS 网络逼近  $f$ ，从而确定 ANFIS 网络的参数。

$$\|e(k)\|^2 = \|y(k) - \hat{d}(k)\|^2 = \|x(k) + d(k) - \hat{d}(k)\|^2 = \|x(k) + d(k) - \hat{f}(n(k), n(k-1), \dots, n(0))\|^2 \quad (2)$$

以  $n(k)$  作为输入时，ANFIS 的输出即可作为  $d(k)$  的估计值  $\hat{d}(k)$ 。而 ANFIS 的训练应使式(2)的值最小。其中  $\hat{f}$  是训练 ANFIS 后得到的非线性函数  $f$  的近似函数。

将式(2)展开得

$$\|e(k)\|^2 = \|x(k)\|^2 + \|d(k) - \hat{d}(k)\|^2 + 2x(k)d(k) - 2x(k)\hat{d}(k) \quad (3)$$

对式(3)两边取期望值，并注意到  $x(k)$  的期望值为 0，并与  $n(k)$  互不相关，也与  $d(k)$ 、 $\hat{d}(k)$  互不相关，从而得到

$$E(e^2) = E(x^2) + E[(d - \hat{d})^2] \quad (4)$$

因此  $E(e^2)$  最小等价于  $E[(d - \hat{d})^2]$  最小，即  $\hat{d}(k)$

尽可能地近似  $d(k)$ ，也就是 ANFIS 通过训练得到的噪声传递函数  $\hat{f}$  将以最小均方误差逼近实际的噪声传递函数  $f$ 。

## 2 基于 ANFIS 滤波的改进 Prony 法

### 2.1 ANFIS 滤波处理

基于 ANFIS 滤波的改进 Prony 法分析信号的流程如图 2 所示。

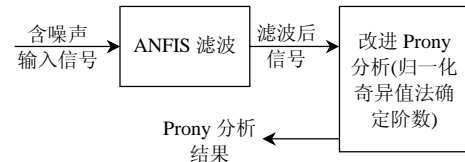


图 2 基于 ANFIS 滤波的改进 Prony 法分析流程

Fig. 2 Flow chart of improved Prony analysis based on ANFIS filtering

其中 ANFIS 滤除有色噪声的原理已在第 1 节中予以表述，归一化奇异值法定阶的改进 Prony 法将在 2.2 节中给出。

实际有色噪声虽然常是多阶的，但高阶次的噪声对系统影响很小，所以这里只考虑噪声 2 阶传输特性。用两输入单输出 ANFIS 网络逼近噪声传输特性，其结构如图 3 所示。

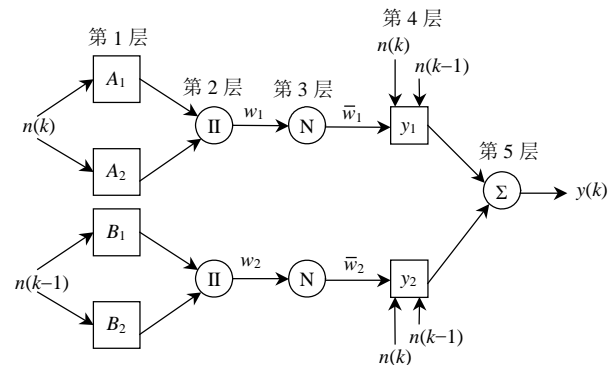


图 3 ANFIS 的网络结构

Fig. 3 Network structure of ANFIS

ANFIS 网络共有 5 层，各层的功能如下：

1) 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

$$\begin{cases} Q_{1,i} = f_i[n(k)], & i=1,2 \\ Q_{1,j} = f_{(j-2)}[n(k-1)], & j=3,4 \end{cases} \quad (5)$$

这里使用的隶属函数为钟型函数。

2) 第 2 层。将模糊化得到的隶属度两两相乘，该层的输出代表模糊规则的适用度。

$$O_{2,i} = w_i = f_i[n(k)]f_i[n(k-1)], \quad i=1,2 \quad (6)$$

3) 第3层。将各条规则的适用度归一化

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = w_i / (w_1 + w_2), \quad i=1,2 \quad (7)$$

4) 第4层。计算每条规则的结论

$$y_i = n(k)p_i + n(k-1)q_i + r_i, \quad i=1,2 \quad (8)$$

5) 第5层。计算所有规则的输出之和, 即系统输出为

$$y = \bar{w}_1 y_1 + \bar{w}_2 y_2 \quad (9)$$

在这一网络中, 包含了未知参数  $p_i$ 、 $q_i$ 、 $r_i$  等, 采用最小二乘估计和误差反向传播算法相结合的混合方法训练 ANFIS, 可以按指定的指标得到这些参数, 从而达到逼近噪声传递函数的目的。

### 2.2 改进 Prony 法

Prony 法<sup>[15-17]</sup>的实质是用一组复指数项的线性组合来拟合等间隔采样数据, 即认为测量输入  $x(0)$ ,  $x(1), \dots, x(N-1)$  的估计值可以表示为

$$\hat{x}(k) = \sum_{m=1}^P A_m e^{j\theta_m} e^{(a_m + j2\pi f_m)\Delta t}, \quad k=0, \dots, N-1 \quad (10)$$

其中:  $P$  为拟合阶数;  $A_m$  为幅值;  $f_m$  为频率;  $\alpha_m$  为衰减因子;  $\theta_m$  为初相;  $\Delta t$  为时间间隔;  $N$  为采样点数。

改进的 Prony 法主要有以下几步:

1) 构造样本函数矩阵

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r(1,0) & r(1,1) & \dots & r(1,P_e) \\ r(2,0) & r(2,1) & \dots & r(2,P_e) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r(P_e,0) & r(P_e,1) & \dots & r(P_e,P_e) \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中:  $r(i, j) = \sum_{k=P_e}^{N-1} x(k-j)x(k-i)^*$ , \*表示共轭;  $P_e$  为模型的初始阶数, 这里取为  $[N/2]$ <sup>[7]</sup>。

2) 用归一化奇异值法确定  $\mathbf{R}$  阵的有效秩  $P$ 。

对  $\mathbf{R}$  阵进行奇异值分解, 即  $\mathbf{R} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^H$ , 对于阶数为  $P_e$  的理想信号, 存在如下的奇异值分布:

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_p \geq \sigma_{p+1} = \dots = \sigma_{P_e} = 0$$

实际上由于噪声的存在, 奇异值矩阵  $\mathbf{S}$  的后  $P_e - P$  维零空间将被噪声子空间取代。

定义归一化奇异值为<sup>[2,7]</sup>

$$\bar{\sigma}_{kk} \stackrel{\text{def}}{=} \sigma_{kk} / \sigma_{11}, \quad 1 \leq k \leq P_e \quad (12)$$

奇异值从大至小排序, 以最大奇异值  $\sigma_{11}$  作为归一化的分母,  $k$  由 1 向样本矩阵维数  $P_e$  递增时,  $\bar{\sigma}_{kk}$  逐渐减小。此时选择一个接近于零的正数作为阈值, 并把  $\bar{\sigma}_{kk}$  大于此阈值的最大整数  $k$  取为  $\mathbf{R}$  阵有效秩  $P$ 。

与常用的归一化比值法相比, 用归一化奇异值

法确定阶数, 物理概念清晰, 而且简单、直观、阈值的自适应性强<sup>[7]</sup>。

3) 利用最小二乘法确定线性预测方程(13)的解  $a_1, a_2, \dots, a_p$ <sup>[2]</sup>。

$$\mathbf{R}[\mathbf{1} \ a_1 \ a_p]^T = [\varepsilon_p \ 0 \ 0]^T \quad (13)$$

其中  $\varepsilon_p = \sum_{j=0}^P a_j \sum_{k=P}^{N-1} x(k-j)x(k)$  为最小误差能量。

4) 求多项式(14)的根  $z$ 。

$$1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_p z^{-P} = 0 \quad (14)$$

$$\hat{x}(k) = -\sum_{i=1}^P a_i \hat{x}(k-i), \quad k=0, \dots, N-1 \quad (15)$$

其中  $a_i$  是式(13)求得的  $a_1, a_2, \dots, a_p$ 。

5) 计算参数  $\mathbf{b}$ 。

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ z_1 & z_2 & \dots & z_p \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \dots & z_p^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{x}(1) \\ \hat{x}(2) \\ \vdots \\ \hat{x}(N-1) \end{bmatrix} \quad (16)$$

6) 计算振幅、相位、频率和衰减。

$$\begin{cases} A_i = |b_i| \\ \theta_i = \arctan[\text{Im}(b_i) / \text{Re}(b_i)] \\ \alpha_i = \ln |z_i| / \Delta t \\ f_i = \arctan[\text{Im}(z_i) / \text{Re}(z_i)] / 2\pi\Delta t \end{cases} \quad (17)$$

### 3 4机2区域系统仿真

为了对低频振荡信号进行分析, 采用 IEEE 4机2区域系统进行仿真<sup>[18]</sup>。4机系统结构如图4所示。

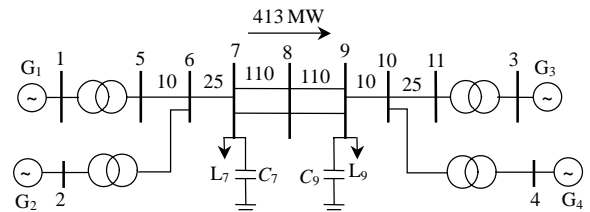


图4 IEEE 4机2区系统

Fig. 4 IEEE 4-machine two-area power system

系统参数设置为: 系统正常运行时受到小扰动, 1 s 时刻对发电机  $G_1$  的励磁参考电压加入一个持续时间 0.1 s、幅值 5% 的冲击扰动。采集 2.5~15 s 内区域 1 发电机  $G_1$  的输出有功功率  $P_{e1}$  和 3~14 s 内区域 2 发电机  $G_3$  的输出有功功率  $P_{e3}$  的振荡曲线作为分析信号。为尽可能地保留有用信息, 取采样间隔为 0.05 s, 进一步进行 Prony 分析时, 通过对 ANFIS 滤波后信号向下采样得到间隔为 0.1 s 的信号。

由于仿真环境比较理想, 采样信号受到的噪声干扰很小。为模拟实际采样中存在的有色噪声, 验证 ANFIS 滤波的效果, 在每个采样点叠加由均值为

0, 方差为 1 的高斯白噪声  $n(k)$  进行非线性变换后得到有色噪声。由 2.1 节可知, 只考虑噪声的 2 阶传输特性, 所以设噪声非线性变换特性为

$$H(k) = f(n(k), n(k-1)) = \frac{0.18n(k-1)\sin(n(k))}{1+n^2(k)}$$

第 1 步, 先对  $P_{e1}$  信号进行分析, 并获得 ANFIS 的具体参数。叠加上有色噪声后得到含噪声测量信号  $y(k)$  如图 5 所示。

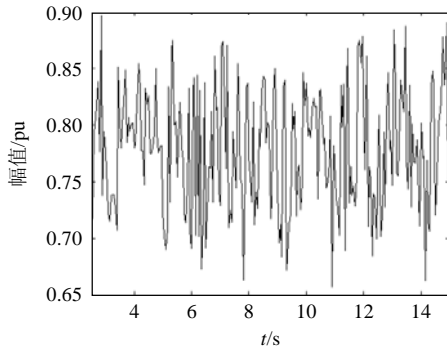


图 5  $P_{e1}$  含噪声测量信号  
Fig. 5 Measurement signal  $P_{e1}$  with noise

然后用 ANFIS 处理含噪声测量信号。训练数据取 125 对:  $[n(k), n(k-1); y(k)]$ ,  $k$  为第  $k$  个偶数点; 检验数据取 125 对:  $[n(k), n(k-1); y(k)]$ ,  $k$  为第  $k$  个奇数点。每个输入设定 2 个隶属函数集, 隶属函数形状取为钟型, 则共有 4 条规则。训练误差目标为 0, 训练批数为 10, 初始步长选为 0.2, 步长减量比 0.9, 步长增量比 1.1, 隶属函数训练时采用最小二乘估计和误差反向传播算法相结合的混合方法。训练后得到的输入隶属函数如图 6 所示。

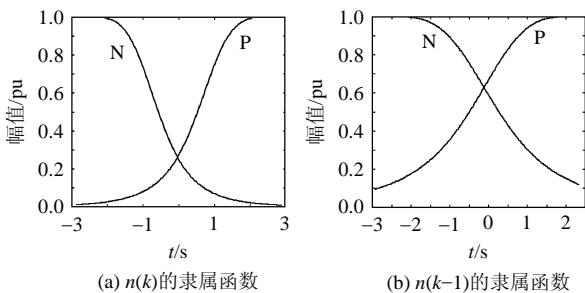


图 6 训练后得到的输入隶属函数  
Fig. 6 Input membership function after training

用训练后的 ANFIS 对含噪声测量信号滤波, 叠加噪声前的信号与 ANFIS 滤波后的信号对比如图 7 所示。进一步得到叠加噪声前的信号、ANFIS 滤波后改进 Prony 拟合信号及直接对含噪声测量信号用 Prony 拟合的信号, 如图 8 所示。从图中可见, 与直接用 Prony 法拟合相比, ANFIS 滤波后改进 Prony 拟合的信号与叠加噪声前的信号重合得更好。最终得到的辨识结果见表 1。

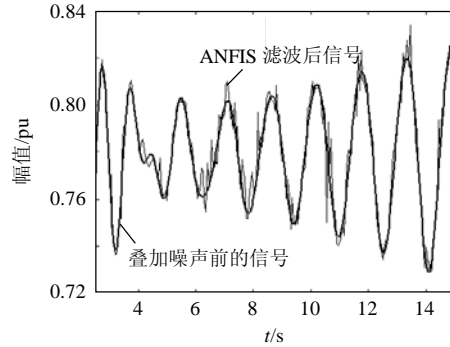


图 7  $P_{e1}$  的叠加噪声前的信号与 ANFIS 滤波后信号  
Fig. 7 Original signal and ANFIS filtered signal of  $P_{e1}$

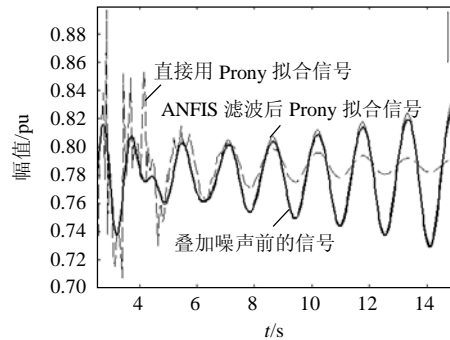


图 8  $P_{e1}$  的叠加噪声前的信号、ANFIS 滤波后 Prony 拟合信号及直接用 Prony 拟合的信号  
Fig. 8 Original signal/ANFIS filtered fitting Prony signal and direct Prony fitting signal of  $P_{e1}$

表 1 对  $P_{e1}$  进行辨识的结果对比

Tab. 1 Comparison of identification results of  $P_{e1}$

参数	特征值分析法		直接用 Prony		本文方法	
	计算结果	计算结果	法辨识结果	法辨识结果	辨识结果	辨识结果
频率/Hz	1.12	0.640	1.41	—	1.100	0.640
阻尼比	0.08	-0.026	0.19	—	0.092	-0.031

由表 1 可知, 在有色噪声环境下, 本文方法的辨识精度虽然受到一定影响, 但最终的结果还是与特征值分析法基本一致, 比较准确地辨识出了 2 个主导振荡频率(1.12 和 0.64 Hz)及其阻尼比。而在有色噪声影响下, 原始 Prony 法不仅参数辨识精度受到很大影响, 而且还没有辨识出其中关键的区间振荡模式(0.64 Hz)。这充分说明了该方法在有色噪声环境下的有效性。

第 2 步, 用训练好的 ANFIS 直接对叠加上有色噪声后的  $P_{e3}$  信号进行分析。含噪声的测量信号如图 9 所示。

用第 1 步训练得到的 ANFIS 直接对含噪声测量信号进行滤波, 得到叠加噪声前的信号与通过 ANFIS 滤波后的信号对比见图 10。进一步得到叠加噪声前的信号、ANFIS 滤波后改进 Prony 拟合信号及直接对含噪声测量信号用 Prony 拟合的信号, 见图 11。

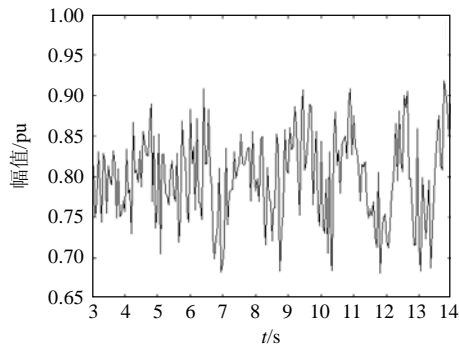


图 9  $P_{e3}$  的含噪声测量信号

Fig. 9 Measurement signal with noise of  $P_{e3}$

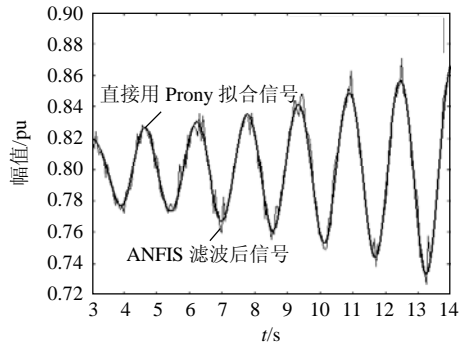


图 10  $P_{e3}$  的叠加噪声前的信号与 ANFIS 滤波后信号

Fig. 10 Original signal and ANFIS filtered signal of  $P_{e3}$

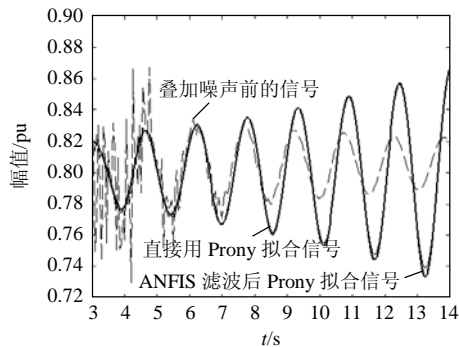


图 11  $P_{e3}$  的叠加噪声前的信号、ANFIS 滤波后 Prony 拟合信号及直接用 Prony 拟合的信号

Fig. 11 Original signal/ANFIS filtered fitting Prony signal and direct Prony fitting signal of  $P_{e3}$

从图中可以看出, ANFIS 滤波后信号能够与叠加噪声前的信号重合的比较一致。与直接用 Prony 法拟合相比, ANFIS 滤波后改进 Prony 拟合的信号与叠加噪声前的信号重合的更好。这充分说明了该方法在同一有色噪声环境下的自适应性, 并再次验证了该方法的有效性。最终所得到的辨识结果见表 2(仅列出主导振荡模式)。由表 2 可以得出与表 1 类似的结论: 在有色噪声环境下, 区间振荡模式比本地振荡模式更难以直接由 Prony 辨识得到。通过 ANFIS 滤除有色噪声, 可以提高 Prony 法分析低频振荡的有效性。

与直接使用 Prony 法相比, 前置 ANFIS 滤波在

表 2 对  $P_{e3}$  进行辨识的结果对比

Tab. 2 Comparison of identification results of  $P_{e3}$

参数	特征值分析法		直接用 Prony 法辨识结果		本文方法辨识结果	
	计算结果					
频率/Hz	1.16	0.640	1.23	—	1.190	0.640
阻尼比	0.08	-0.026	0.26	—	0.089	-0.023

提高了计算精度的同时也增加了计算时间, 但增加的计算时间主要体现在 ANFIS 对隶属函数参数和模糊规则的训练上。当噪声的非线性传输特性变化不明显时, 训练好的 ANFIS 可以直接用于对后续信号的处理, 此时的 ANFIS 滤波退化为模糊滤波, 与直接使用 Prony 法相比不会明显增加计算时间<sup>[8]</sup>, 可以用于低频振荡的在线辨识。

#### 4 结论

1) 该方法能够在有色噪声环境下得到较为准确的低频振荡参数, 有效提高了 Prony 方法分析低频振荡信号的抗噪能力。

2) 噪声传输特性变化不大时, ANFIS 经过一次训练后就能够实现后续的自适应滤波, 且后续滤波的计算时间不会明显增加。

#### 参考文献

- [1] 薛禹胜, 郝思鹏, 刘俊勇, 等. 关于低频振荡分析方法的评述[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(3): 1-8.  
Xue Yusheng, Hao Sipeng, Liu Junyong, et al. A review of analysis methods for low-frequency oscillations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(3): 1-8(in Chinese).
- [2] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 119-125.
- [3] 竺炜, 唐颖杰, 周有庆, 等. 基于改进 Prony 算法的电力系统低频振荡模式识别[J]. 电网技术, 2009, 33(5): 44-47.  
Zhu Wei, Tang Yingjie, Zhou Youqing, et al. Identification of power system low frequency oscillation mode based on improved Prony algorithm[J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 44-47(in Chinese).
- [4] 马燕峰, 赵书强, 刘森, 等. 基于改进多信号 Prony 算法的低频振荡在线辨识[J]. 电网技术, 2007, 31(15): 44-49.  
Ma Yanfeng, Zhao Shuqiang, Liu Sen, et al. Online identification of low-frequency oscillations based on improved multi-signal Prony algorithm[J]. Power System Technology, 2007, 31(15): 44-49(in Chinese).
- [5] Grund C E, Paserba J J, Hauner J F, et al. Comparison of Prony and eigen-analysis for power system control design[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(3): 964-971.
- [6] Johnson M A, Zarafonitis I P, Calligaris M. Prony analysis and power system stability-some recent theoretical and applications research[C]. Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2000, Seattle, WA, USA. Piscataway.
- [7] 熊俊杰, 邢卫荣, 万秋兰. Prony 算法的低频振荡主导模式识别[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2008, 38(1): 64-68.  
Xiong Junjie, Xing Weirong, Wan Qulan. Identification of control modes in low frequency oscillation analysis by Prony method[J].

- Journal of Southeast University: Science & Technology Edition, 2008, 38(1): 64-68(in Chinese).
- [8] 李大虎, 曹一家. 基于模糊滤波和 Prony 算法的低频振荡模式在线辨识方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(1): 14-19.  
Li Dahu, Cao Yijia. An online identification method for power system low frequency oscillation mode based on fuzzy filtering and Prony algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(1): 14-19(in Chinese).
- [9] 刘森, 赵书强, 于赞梅, 等. 基于小波预处理技术的低频振荡 Prony 分析[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(4): 64-67.  
Liu Sen, Zhao Shuqiang, Yu Zanmei, et al. Prony analysis of low frequency oscillation based on wavelet pretreatment technology[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(4): 64-67(in Chinese).
- [10] 鞠平, 代飞. 电力系统广域测量技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 113-121.
- [11] 曾庆宁, 刘璟, 周德新. 基于 ANFIS 的非线性自适应噪声消除[J]. 通信学报, 2001, 22(12): 106-111.  
Zeng Qingning, Liu Jing, Zhou Dexin. Nonlinear adaptive noise cancellation based on ANFIS[J]. Journal of China Institute of Communications, 2001, 22(12): 106-111(in Chinese).
- [12] Li W N, Wang P F, L Y. A method of adaptive colored noise cancellation based on ANFIS[C]. Image Analysis and Signal Processing, IASP 2009 International Conference, 2009.
- [13] 李青茹, 王培峰. 基于 ANFIS 的有色噪声抵消技术[J]. 微机计算机信息, 2007, 23(4-1): 302-303.  
Li Qingru, Wang Peifeng. A technology of canceling colored noise based on ANFIS[J]. Control & Automation, 2007, 23(4-1): 302-303(in Chinese).
- [14] 吴晓莉. Matlab 辅助模糊系统设计[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002: 130-150.
- [15] 马燕峰, 赵书强, 顾雪平. 基于改进多信号 Prony 算法的低频振荡传递函数降阶辨识及 PSS 的设计[J]. 电网技术, 2007, 31(17): 16-20.  
Ma Yanfeng, Zhao Shuqiang, Gu Xueping. Reduced order identification of low-frequency oscillation transfer function and PSS design based on improved multi-signal Prony algorithm[J]. Power System Technology, 2007, 31(17): 16-20(in Chinese).
- [16] 郑超, 周孝信. 基于普罗尼辨识的 VSC-HVDC 附加阻尼控制器设计[J]. 电网技术, 2006, 30(17): 25-30.  
Zheng Chao, Zhou Xiaoxin. Design of additional damping controller for VSC based HVDC transmission system by use of Prony identification method[J]. Power System Technology, 2006, 30(17): 25-30(in Chinese).
- [17] 芦晶晶, 郭剑, 田芳, 等. 基于 Prony 方法的电力系统振荡模式分析及 PSS 参数设计[J]. 电网技术, 2004, 28(15): 31-34.  
Lu Jingjing, Guo Jian, Tian Fang, et al. Power system oscillation mode analysis and parameter determination of PSS based on Prony method[J]. Power System Technology, 2004, 28(15): 31-34(in Chinese).
- [18] Kundur P. 电力系统稳定与控制[M]. 周孝信, 李兴源, 周波, 等译. 北京: 中国电力出版社, 2002: 548-551.



侯王宾

收稿日期: 2009-10-19。

作者简介:

侯王宾(1987—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析计算及稳定控制, E-mail:

houwangbin@163.com;

刘天琪(1962—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统分析计算与稳定控制、调度自动化、高压直流输电等;

李兴源(1945—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统稳定与控制、高压直流输电。

(责任编辑 王晔)