

基于小波预处理技术的 低频振荡 Prony 分析

刘 森,赵书强,于赞梅,马燕峰

(华北电力大学 电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室,河北 保定 071003)

摘要:提出了一种利用改进的小波软阈值去噪技术,首先对电力系统低频振荡数据进行预处理,然后采用 Prony 算法提取低频振荡信号特征的分析方法。在分析 Prony 算法原理的基础上,分析了参数选择对算法的分析速度与精度有较大影响,提出了 Prony 算法主要参数的选择策略,即信号抽样频率应大于信号最高频率的 2 倍,以避免频谱混叠;信号时间长度应包含 2 个周期最低频率的振荡,以提高参数估计精度;模型初始阶数应远大于信号中实际包含的指数项个数,以使最优子集分量逼近观察到的数据。仿真和动模实验结果表明,基于小波预处理技术的 Prony 算法具有分辨率高、拟合效果好的优点,能满足电力系统低频振荡特征分析的需要。

关键词:电力系统; 低频振荡; Prony 算法; 小波软阈值; 去噪

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)04-0064-04

0 引言

随着电力系统的日益发展和复杂化,跨区域电网的互联,以及经济 and 环境的压力,现代电力系统越来越靠近系统的稳定极限运行。加之在长距离、重负荷线路上,对现代化大机组采用高放大倍数的快速励磁系统,导致低频振荡问题日益突出,危及电力系统的安全稳定运行^[1]。

电力系统低频振荡涉及非线性、控制系统协调、负荷等多方面。小扰动稳定分析方法^[2]主要有数值解法、特征值分析法和频域分析法等。随着非线性领域研究的深入,分歧^[3]、混沌理论^[4]开始引入低频振荡的研究。建立系统状态方程,得到对应输入时的响应,在实际电力系统中不易做到。由于响应信号中必然包含激励及系统固有特征,因此只从响应信号分析提取振荡特征,是一个重要课题,具有一定的现实意义。

通过 Prony 算法分析低频振荡数据,得到较为准确的振荡模式,在电力系统低频振荡领域的应用已开始进入系统实际事故的分析中^[5]。但通过对仿真数据和实际数据的处理,发现 Prony 算法对输入信号要求较高,目前即使最好的程序仍对被分析数据的噪声非常敏感,很难得到正确的分析结果。为此,这里提出采用改进的基于阈值处理的小波软阈值去噪技术对分析数据进行预处理,有效降低了高频杂散信号的影响,提高了 Prony 算法的抗噪能力。为 Prony 算法的在线应用提供了新思路。

1 Prony 分析方法

Prony 分析方法用指数函数的线性组合拟合特定的系统响应,从中分析出信号的频率、衰减因子、幅值和相位等对低频振荡分析至关重要的参数^[6-7]。其最大优点就是既可以对仿真结果进行分析,又可以对实时测量数据进行分析,和特征值模态法互为补充,已经成为低频振荡分析中的一种标准方法。

1.1 Prony 算法简介^[8-9]

Prony 算法是针对等间距采样点,假设模型是一系列具有任意振幅、相位、频率和衰减因子的指数函数的线性组合,即认为测量输入 $x(0)$ 、 $x(1)$ 、 $\dots$ 、 $x(n-1)$ 的估计值可以表示为

$$\hat{x}(n) = \sum_{m=1}^p b_m z_m^n = \sum_{m=1}^p A_m e^{j\theta_m} e^{(\alpha_m + j2\pi f_m)\Delta t} \quad (1)$$

式中 A_m 为幅值; f_m 为频率; θ_m 为初相; α_m 为衰减因子; Δt 为时间间隔。

下面介绍算法的主要步骤。

a. 定义样本函数:

$$r(x, y) = \sum_{n=p_e}^{N-1} x(n-j)x^*(n-i) \quad (2)$$

利用样本函数计算出样本矩阵

$$R = \begin{bmatrix} r(1, 0) & r(1, 1) & \cdots & r(1, p_e) \\ r(2, 0) & r(2, 1) & \cdots & r(2, p_e) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r(p_e, 0) & r(p_e, 1) & \cdots & r(p_e, p_e) \end{bmatrix}$$

b. 利用总体最小二乘法确定线性预测方程的解

$a_1, a_2, \dots, a_{p_e}$ 。

$$R[1 \ a_1 \ \cdots \ a_{p_e}]^T = [\varepsilon_{p_e} \ 0 \ \cdots \ 0]^T \quad (4)$$

c. 求解下面由线性预测参数组成的多项式,得到 z_i 。

$$1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{p_e} z^{-p_e} = 0 \quad (5)$$

d. 利用式(6)递推出 $\hat{x}(n)$ 。

$$\hat{x}(n) = - \sum_{i=1}^{p_e} a_i \hat{x}(n-i) \quad (6)$$

e. 计算参数 b 。

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ z_1 & z_2 & \dots & z_p \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_1^{N-1} & a_2^{N-1} & \dots & a_{p_e}^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_{p_e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{x}(1) \\ \hat{x}(2) \\ \vdots \\ \hat{x}(p_e) \end{bmatrix} \quad (7)$$

f. 利用式(8)计算振幅、相位、频率和衰减。

$$\begin{aligned} A_i &= |b_i| \\ \theta_i &= \arctan[\operatorname{Im}(b_i) / \operatorname{Re}(b_i)] \\ \alpha_i &= \ln |z_i| / \Delta t \\ f_i &= \arctan[\operatorname{Im}(z_i) / \operatorname{Re}(z_i)] / (2\pi \Delta t) \end{aligned} \quad (8)$$

g. 对 p_e 个分量按照幅值大小排序,优先选择幅值大的分量,直到信噪比 SNR 接近 40 并且误差小于 1% 为止,作为最终的模型阶数 p 。

$$\text{SNR} = 20 \lg \frac{\text{rms}[x(k)]}{\text{rms}[\hat{x}(k) - x(k)]} \quad (9)$$

h. 对步骤 f 取前 p 个值,得到 Prony 分析的最终结果。则逼近函数 $\hat{x}(n)$ 变为

$$\hat{x}(n) = \sum_{i=1}^p A_i \exp(\alpha_i |n|) \exp(j2\pi f_i n + \theta_i) \quad (10)$$

1.2 Prony 算法主要参数选择策略

a. 抽样频率。要获得正确的估计,信号抽样应满足 Nyquist 抽样定理,即抽样频率应大于信号最高频率的 2 倍,以避免频谱发生混叠。但抽样频率也不能过大,否则,在数据长度 N 已确定的情况下,信号长度将很短,势必使参数估计精度下降。在实际应用中,抽样频率大于 2 倍最高频率一般不够,还留有一定裕度。在低频振荡分析中,振荡频率一般为 0.1~2.5 Hz,按 4 倍最高频率采样,采样周期为 0.1 s 即可。

b. 时间长度。在噪声水平和抽样频率确定的情况下,一般信号长度越大,参数估计精度越高,时间长度至少应该包括 2 个周期最低频率的振荡。在低频振荡分析中,一般取 10~20 s 的时间长度数据进行分析,而过长的时间长度可能无法辨识出衰减快的分量。同时,在时间间隔一定的情况下,时间长度过长将增加计算的复杂度,降低计算效率。

c. 模型阶数。由于电力系统动态过程中系统阶数很高,不可能建立系统的全阶模型,拟合模型都只是降阶的近似模型。通常情况下,模型的阶数是未知的。Prony 方法最常用的定阶描述为:选取初始阶数 p_e ,使其远大于信号中实际包含的指数项个数,然后从 p_e 个分量中选取 p 个分量的最优子集,使这 p 个分量在最小平方意义上逼近观察到的数据^[9]。

2 数据预处理

现场的抽样数据包含大量的噪声,而且电力系

统的低频振荡一般不是严格的平稳过程,特别是当发生故障而引发低频振荡时,采集的信号还会包括剧烈的突变过程。为了降低信号中高频杂散分量的影响,在对数据进行 Prony 分析前应首先对其进行降噪预处理。

降噪的基本目的是减小噪声部分的值,使降噪后信号尽可能逼近原始信号。小波分析用于降噪的过程^[10],可细分为 3 段。

a. 分解过程。选定一种小波,对信号进行 N 层小波(小波包)分解。

b. 作用阈值过程。对分解得到的各层系数选择一个阈值,并对细节系数作用软阈值处理。

c. 重建过程。降噪处理后的系数通过小波(小波包)重建恢复原始信号。

Donoho 的软阈值去噪方法^[11]考虑了小波空间中信号系数和噪声系数的不同传播特性,但没有体现信号在时域中不同时刻的特性。这里采用改进的小波软阈值去噪方法,结合信号的正则性分析其小波分解,关键步骤在“噪声强度估计”、“阈值设定”和“小波系数调整”3 个方面^[12]。

2.1 噪声强度估计

将小波系数按绝对值由小到大排列,得到向量 $D = [w_1^j, w_2^j, \dots, w_N^j]$,其中 $w_1^j \leq w_2^j \leq \dots \leq w_N^j$,依次删除该向量中最大的小波系数后按式(11)计算平均。其中 w_k^j 是第 j 层小波系数($1 \leq j \leq J$); N 是该层小波系数个数; J 是小波分解的最高次数。

$$D_i = \frac{1}{N-i} \sum_{k=1}^{N-i} w_k^j \quad i=0,1,2,\dots,N-1 \quad (11)$$

当 D_i 与 D_{i+1} 很接近时,再用以下的经验公式估计噪声强度:

$$\sigma = \frac{1}{0.6745} D_i \quad (12)$$

2.2 阈值选择策略

计算极小能量水平 $\varepsilon_N = \sigma^2 N^{1/2} (\ln N)^{3/2}$,对于某一层上的某个小波系数 w_k , $1 \leq k \leq N$,按下式选择阈值:

$$T_k = \begin{cases} T_1 & w_k^2 - \sigma^2 < \varepsilon_N \\ \min(T, T_a) & w_k^2 - \sigma^2 \geq \varepsilon_N \end{cases} \quad (13)$$

并以此作为调整该小波系数的阈值。其中,通用阈值可由下式计算:

$$T_1 = \sigma \sqrt{2 \ln N} \quad (14)$$

式中 σ 为噪声强度; N 为所处理的系数个数。

2.3 小波系数调整策略

在软阈值基础上引入一个反映噪声强度的系数 $k(\sigma)$,具体调整函数为

$$d(w_k) = \begin{cases} w_k - k(\sigma) T_k & w_k > T_k \\ w_k + k(\sigma) T_k & w_k < -T_k \\ 0 & |w_k| \leq T_k \end{cases} \quad (15)$$

一般选取

$$k(\sigma) = \sqrt{\sigma/A} \quad (16)$$

式中 A 为所处理信号的幅值。

3 仿真与动态物理模拟实验分析

3.1 加噪声的理想信号的计算机仿真

参照电力系统低频振荡波形情况,给出理想电压信号 u 的一种形式^[13]为

$$u(t)=10e^{-0.0027t}\cos\left(2\pi\times0.423\times t+\frac{11}{18}\pi\right)+$$
$$2e^{-0.2652t}\cos\left(2\pi\times0.42\times t+\frac{13}{180}\pi\right)+$$
$$10e^{-0.0311t}\cos\left(2\pi\times0.2473\times t+\frac{1}{9}\pi\right)+$$
$$e^{-0.2936t}\cos\left(2\pi\times1.0349\times t+\frac{1}{3}\pi\right)+$$
$$e^{-45.8788t}\cos\left(2\pi\times2.4\times t+\frac{1}{18}\pi\right) \quad (17)$$

该信号具有一定的代表性,包含 5 个振荡模式,阻尼比分别为 0.001、0.02、0.1、0.0451、0.95。频率范围 0.247 3~2.4 Hz。叠加均值为 0,方差为 0.25 的白噪声,其信噪比 SNR=24.725 5 dB。图 1 和图 2 分别为加噪声信号和去噪后信号。

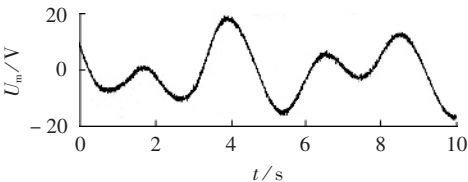


图 1 加噪声信号
Fig.1 The signal with noise

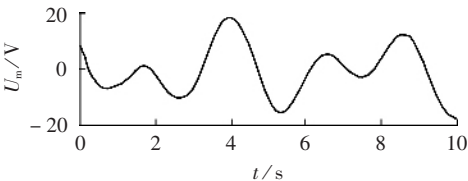


图 2 去噪后信号
Fig.2 The denoised signal

两者比较可见,采用软阈值小波去噪后波形变得平滑,信噪比提高到 SNR=41.756 8 dB,为说明去噪前、后数据的有效性,需用信号去噪前、后的赋范均方误差公式(18)验证。

$$E_r=\frac{\sum\|f(n)-\hat{f}(n)\|^2}{\sum\|f(n)\|^2} \quad (18)$$

式中 $f(n)$ 为未经加噪的原始采样信号; $\hat{f}(n)$ 为去噪后的信号; n 为采样点数。

本例中, $E_r=6.673\,0\times10^{-5}$,远小于 Mallat 信号重构法的重构误差,去噪效果较好。

对降噪后信号进行线性插值,取时间间隔为 0.1 s,采集 100 个数据点,设置初始阶为 80, Prony 分析结果如表 1 所示(表中 U_m 为幅值, α 为衰减因子, f 为频率, θ 为相角)。Prony 算法的信噪比提高到 SNR=57.148 9 dB,赋范均方误差 $E_r=1.928\,0\times10^{-6}$ 。

Prony 分析结果的拟合波形如图 3 实线所示,虚

表 1 去噪信号的 Prony 分析结果

Tab.1 Prony analysis result of denoising signal

$U_m/\text{p.u.}$	α/s^{-1}	f/Hz	θ/rad
5.1073	-0.0074	0.4247	-1.3330
4.9346	-0.0302	0.2468	-0.3657
1.0696	-3.2654	0.5286	-1.3457
0.9269	-0.8866	2.3877	-0.4094
0.5171	-0.3001	1.0331	-1.0923

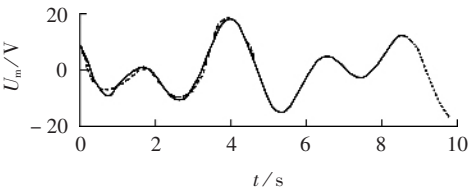


图 3 去噪信号与 Prony 分析拟合波形
Fig.3 Denoised signal and fitting curve by Prony analysis

线为去噪后信号波形。通过 E_r 可以认为两者的误差很小。

3.2 低频振荡仿真数据的 Prony 分析

为对仿真数据进行 Prony 分析,采用 IEEE 4 机系统^[14]建立仿真模型,4 机系统的电气接线图如图 4 所示(图中距离单位为 km)。

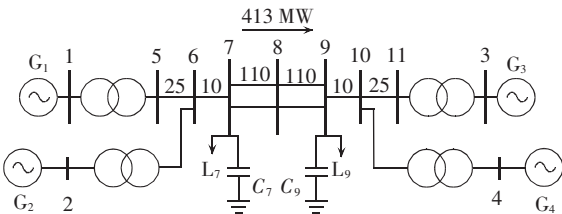


图 4 IEEE 4 机系统
Fig.4 IEEE 4-machine power system

在系统正常运行条件下,模拟系统受到小扰动,发电机 G_1 机端输入机械功率在 0.5 s 由 0.779 3 p.u. 跃变到 1.0 p.u.,仿真得到 G_1 输出的有功功率波形如图 5 中虚线所示。由于 Matlab 仿真得到的振荡数据,并不是 Prony 分析所要求的等间距采样数据,为节约分析时间,这里采用线性插值法得到 Prony 分析所需数据。分析时,选择采样间隔为 0.1 s,分析 1~10 s 间数据,91 个点。分析结果如表 2 所示(表中: ξ 为阻尼比,其他同表 1)。其中 1.121 8 Hz 符合就地机组振荡模式的振荡频率;0.575 5 Hz 符合区域间振荡模式的振荡频率。拟合后的信噪比提到 42.921 8 dB,赋范均方误差 $E_r=5.103\,0\times10^{-5}$,拟合效果较好。拟合曲线如图 5 实线所示。

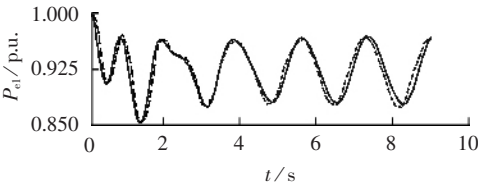


图 5 仿真曲线与 Prony 分析拟合波形
Fig.5 Simulation curve and fitting curve by Prony analysis

表 2 仿真数据的 Prony 分析结果
Tab.2 Prony analysis results

$U_m/\text{p.u.}$	f/Hz	α/s^{-1}	θ/rad	$\xi/\%$
0.039 2	1.121 8	-0.568 8	0.190 0	8.04
0.021 4	0.575 5	0.033 7	-1.440 6	-0.93

3.3 动模实验数据分析

为验证算法的实用性,在华北电力大学电力工程系的电力系统动态模拟实验室进行了算法应用的动态物理模拟实验。模拟发电机通过变压器和线路与无穷大系统连接。实验电气接线及相关参数如图 6 所示。

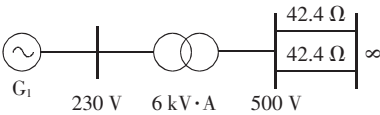


图 6 单机无穷大系统实验接线图
Fig.6 Experimental single-machine infinite-bus system

进行了如下 2 类实验,得到机端电压、电流振荡录波结果。在对数据进行预处理后,运用 Prony 算法进行分析。

实验 1 当发电机出力为 $P=1.0\text{ kW}$, $Q=0.05\text{ kvar}$, 单回线运行时,通过调整 AVR 的参数,使系统产生低频振荡,在 PID 控制模式下,引发振荡,振荡频率理论值约为 0.70 Hz。Prony 分析得到低频振荡频率为 0.711 24 Hz,与理论值很接近,拟合曲线如图 7 所示。

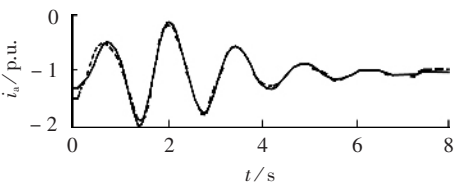


图 7 实验 1 引发振荡分析结果
Fig.7 Analysis result of experiment one

实验 2 当发电机出力为 $P=1.2\text{ kW}$, $Q=0.1\text{ kvar}$, 双回线运行时,其中一回线路高压侧发生 A 相接地故障,0.5 s 后切除故障,控制模式是 PID 控制,无法抑制振荡,呈现增幅振荡,振荡频率约为 0.65 Hz。对振荡数据的 Prony 分析结果为 0.675 22 Hz,与理论值分析结果一致,验证了方法的有效性。其拟合曲线如图 8 所示。

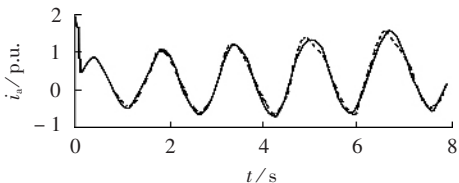


图 8 实验 2 引发振荡分析结果
Fig.8 Analysis result of experiment two

4 结论

提出了一种利用小波去噪技术对振荡数据进行

预处理,然后运用扩展 Prony 方法对数据进行分析的新方法,用于电力系统低频振荡信号特征的提取。提出了 Prony 方法主要参数的选择策略。计算机仿真和动模实验表明,该方法具有抗噪能力较强、分辨率较高、拟合效果较好等优点,满足低频振荡辨识和系统振荡分析的需要。小波预处理技术在提高精确度的同时,也降低了分析速度。如何提高数据预处理的计算速度,目前在进一步研究中。

参考文献:

[1] 倪以信,陈寿孙,张宝霖,等. 动态电力系统的理论与分析[M]. 北京:清华大学出版社,2002.

[2] 邵俊松,李庚银,周明. 电力系统低频振荡分析及振荡策略研究综述[J]. 电力情报,2000(2):1-5.

SHAO Jun-song,LI Geng-yin,ZHOU Ming. The survey on low frequency oscillation analysis of power system and strategy of oscillation splitting[J]. Information on Electric Power,2000(2): 1-5.

[3] 袁斌,孙启宏. 应用分支理论分析电力系统中的复杂振荡现象[J]. 电网技术,1994,18(4):1-4.

YUAN Bin,SUN Qi-hong. Using bifurcation theory to analysis oscillation phenomenon in power system[J]. Power System Technology,1994,18(4):1-4.

[4] 宋永华,熊正美,曾庆禹. 电力系统在参数扰动下的混沌行为[J]. 中国电机工程学报,1990,10(1):29-34.

SONG Yong-hua,XIONG Zheng-mei,ZENG Qing-yu. Chaos in power systems affected by parameter variations[J]. Proceedings of the CSEE,1990,10(1):29-34.

[5] 王铁强,贺仁睦,徐东杰,等. 电力系统低频振荡机理的研究[J]. 中国电机工程学报,2002,22(2):21-25.

WANG Tie-qiang,HE Ren-mu,XU Dong-jie,et al. The mechanism study of low frequency oscillation in power system[J]. Proceedings of the CSEE,2002,22(2):21-25.

[6] TRUDNOWSKI D J,JOHNSON J M,HAUER J F. SIMO system identification from measured ringdowns [C] //Proceedings of the American Control Conference. Philadelphia: [s.n.],1998: 2968 - 2972.

[7] TRUDNOWSKI D J,JOHNSON J M,HAUER J F. Making Prony analysis more accurate using multiple signals[J]. IEEE Transaction on Power Systems,1999,14(1):226-231.

[8] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京:清华大学出版社,2002.

[9] HOCKING R R,LESLIE L L. Selection of the best subset in regression analysis[J]. Technometrics,1967,9(1):537-540.

[10] 董长虹. Matlab 小波分析工具箱原理与应用[M]. 北京:国防工业出版社,2004.

[11] DONOHO D L. De-noising by soft-thresholding[J]. IEEE Transaction on Information Theory,1995,41(3):613-627.

[12] 刘毅华,赵光宙. 故障分析中的小波软阈值改进除噪方法[J]. 继电器,2004,32(24):15-19.

LIU Yi-hua,ZHAO Guang-zhou. Denoising by wavelet soft-thresholding in fault analysis[J]. Relay,2004,32(24):15-19.

[13] 刘国平. 基于 Prony 法的电力系统低频振荡分析与控制[D]. 杭州:浙江大学,2004.

LIU Guo-ping. Analysis and control of low frequency electro-mechanical oscillations in power systems based on Prony's method[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2004.

(下转第 82 页 continued on page 82)

[14] KUNDUR P. 电力系统稳定与控制[M]. 周孝信,宋永华,李兴源,等,译. 北京:中国电力出版社,2001.

(责任编辑: 柏英武)

赵书强(1964-),男,河北景县人,教授,博士,研究方向为电力系统稳定分析和控制、电力系统谐波分析等;

于赞梅(1980-),女,河北衡水人,硕士研究生,研究方向为电力系统分析、运行与控制;

马燕峰(1978-),女,河北迁西人,硕士,研究方向为电力系统分析、运行与控制。

作者简介:

刘 森(1982-),男,江苏丰县人,硕士研究生,研究方向为电力系统分析、运行与控制(E-mail:liu_sen@126.com);

Prony analysis of low frequency oscillation based on wavelet pretreatment technology

LIU Sen,ZHAO Shu-qiang,YU Zan-mei,MA Yan-feng

(Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control of Ministry of Education,North China Electric Power University,Baoding 071003,China)

Abstract: An analysis method is presented,which uses improved wavelet soft - threshold denoising technology to preprocess the data of low frequency oscillations,and then Prony algorithm to extract the oscillation character. Based on the basic principle of Prony algorithm,the great influence of parameter selection on the velocity and accuracy is analyzed,and the selection strategies of main parameters are presented. To avoid the frequency spectrum alias,the sampling frequency should exceed two times of the highest frequency of signal. To improve the estimative accuracy,the analysis time should cover two cycles of the lowest frequency of signal. To approach the observed data through the optimal subsets, the initial rank of the model should outclass the number of the exponential parts of signal. Simulations and dynamic experiments show that,Prony algorithm based on wavelet pretreatment technology has high resolution and good fitting performance,meeting requests of character analysis for low frequency oscillations in power systems.

Key words: power system; low frequency oscillation; Prony algorithm; wavelet soft - threshold; denoising