

文章编号:1006-1355(2009)05-0160-05

# 强电磁噪声环境下提取局部放电信号方法的研究

晏年平,于钦学,李文杰,汤超

(西安交通大学 电力设备电气绝缘国家重点实验室,西安 710049)

**摘要:**近年来,越来越多的实际应用显示,在强噪声环境下,只用小波变换去噪有可能带来波形畸变。相比之下,快速傅里叶变换可以用于去除窄带干扰,但它不能去除白噪声。因此,本文在综合二者优缺点的基础上,提出基于FFT自动阈值滤波法和小波变换的联合去噪技术。即先用FFT自动阈值滤波法去除部分窄带干扰,提高信噪比,继而使用小波变换将白噪声和残余窄带干扰一并滤除。仿真结果和实际应用表明,此法能有效地从较强噪声环境中提取出局部放电信号。

**关键词:**快速傅里叶变换;局部放电;小波变换;信噪比**中图分类号:** TM835.4      **文献标识码:** A

## Study on Extracting Partial Discharge Signals in Excessive Noisy Electromagnetic Environment

YAN Nian-ping, YU Qin-xue, LI Wen-jie, TANG Chao

(State Key Laboratory of Electrical Insulation for Power Equipment,  
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Recently, more and more practical applications show that in excessively noisy electromagnetic environment, using wavelet transform (WT) only may bring waveform distortion. The Fast Fourier Transform (FFT) can suppress sinusoidal interference without concerning the signal-to-noise ratio (SNR). Unfortunately, the FFT is almost helpless in suppressing white noise. Thus, combining the advantages of the two transforms, a new method to suppress both white noise and sinusoidal interference is presented. At first, the automatic threshold FFT is used to suppress sinusoidal interference partially and to raise the SNR. Then WT is used to suppress both the residual sinusoidal interference and white noise. Simulation results and practical applications demonstrate that this method can extract partial discharge (PD) signals effectively in excessively noisy electromagnetic environment.

**Key words:** fast Fourier transform; partial discharge; wavelet transform; signal-to-noise ratio

对电力设备进行局部放电检测是评估其绝缘性能的有效手段之一<sup>[1]</sup>。

现场实测局放信号中包含干扰,这些干扰按时域波形特征主要分为连续的周期性窄带干扰、脉冲性干扰以及白噪声。对于上述类别噪声,目前常用的抑制方法主要有极性鉴别法<sup>[2]</sup>、基于傅里叶变换的阈值滤波法<sup>[3-5]</sup>以及基于小波变换的阈值滤波

法<sup>[6-8]</sup>等,它们在噪声去除中都取得了良好的效果。但是,在实际应用中,由于干扰信号的频带及阈值难以确定,故只用傅里叶阈值滤波容易出现信号失真。而且,随着噪声强度加大,小波变换提取局放信号的能力也逐渐下降,信号畸变也越发严重。针对强噪声环境,本文提出基于FFT自动阈值滤波和小波变换的联合去噪方法,通过在频域内计算信号振幅谱均值及标准差之和自动确定阈值,初步滤除部分窄带干扰,提高信噪比。随后,利用小波变换,将窄带干扰和白噪声一并滤除。经仿真和现场实测证明,本法能从较强噪声环境中提取出局放信号。

收稿日期: 2009-01-13

作者简介: 晏年平(1985-),男,江西上高人,硕士研究生,研究方向为电力设备在线检测与故障诊断。

E-mail: ynp.falcon@stu.xjtu.edu.cn

# 1 FFT 自动阈值滤波与小波变换联合去噪法

## 1.1 FFT 自动阈值滤波<sup>[9]</sup>

根据正态分布性质<sup>[10]</sup>,样本位于区间( $\mu - \sigma$ ,  $\mu + \sigma$ )内的概率为 68. 27%,选定  $\mu + \sigma$  作为阈值,其中, $\mu$  为振幅谱均值, $\sigma$  为振幅谱标准差。然后根据软阈值规则,将大于  $\mu + \sigma$  的幅值替换为  $\mu + \sigma$ ,小于  $\mu + \sigma$  的保持不变。最后,将处理后的数据通过傅里叶逆变换(IFT)重构信号。

在较强噪声环境下,窄带干扰由于强度远大于局放信号,处于被处理的 15. 86% 内,而局放信号则处于未处理的 84. 14% 的区域内。这样就在最大程度的保留局放波形特征的目的下,尽可能降低窄带干扰,提高信噪比,为进一步小波去噪提供了便利。

## 1.2 小波变换阈值滤波法

通过选定一个与局放波形最为相似的基本小波进行多层次小波分解。本文选定的基本小波为 db2,阈值大小根据式(1)的算法分别选取各层分量的阈值<sup>[11]</sup>

$$\lambda_j = \frac{m_j}{0.6725} \sqrt{2\lg(n_j)} \quad (1)$$

式中: $m_j$ 、 $n_j$  分别为尺度  $j$  上小波变换系数中值和系数总量。

## 1.3 FFT 自动阈值滤与小波变换联合去噪

上述过程的实施步骤如下:

1) 局放信号  $l(t)$  进行 FFT 变换,记 FFT 变换算子为  $F$ ,所得系数为  $F(l(t))$ ( $t \in 1, 2, \dots, N$ ,  $N$  为信号长度);

2) 计算  $F(l(t))$  的平均值  $\mu$  及方差  $\sigma$ ,取二者之和  $\mu + \sigma$  作为 FFT 自动阈值滤波法的阈值  $\lambda_j$ ;

3) 对  $F(l(t))$  进行软阈值处理。其中,软阈值函数为

$$k(t) = \begin{cases} \mu + \sigma & \text{当 } |F(l(t))| > \mu + \sigma \\ F(l(t)) & \text{当 } |F(l(t))| \leq \mu + \sigma \end{cases} \quad (2)$$

4) 对所得系数  $k(t)$  进行傅里叶逆变换,记为  $F^{-1}$ ,初步重构信号;

5) 将初步重构所得信号进行多层次小波分解,分解层数为  $j$ ,分解得到的小波系数为  $w(j, t)$ ,并由式(1)计算各层阈值;

6) 分别对各层小波系数进行硬阈值处理,阈值函数为

$$w'(j, t) = \begin{cases} 0 & \text{当 } w(j, t) < \lambda_j \\ d(j, t) & \text{当 } w(j, t) \geq \lambda_j \end{cases} \quad (3)$$

7) 对各层经过阈值处理后小波系数  $w'(j, t)$  进行小波重构,即可得到去噪后的信号。

## 2 仿真及分析

采用双指数衰减振荡型函数进行模拟<sup>[12]</sup>

$$f(t) = A(e^{-1.3(t-t_0)/\tau} - e^{-2.2(t-t_0)/\tau}) \cdot \sin(f_c \cdot 2\pi(t-t_0)) \quad (4)$$

式中:  $A$  为局放脉冲信号幅值; $t_0$  为局放脉冲起始时刻; $f_c$  为衰减振荡频率; $\tau$  为衰减振荡常数。

窄带周期干扰可以等效表示为

$$p(t) = A_i \times \sum_{i=1}^n \sin(2\pi f_i t) \quad (5)$$

式中: $A_i$ 、 $f_i$  分别表示各频率成分的幅值及频率。本文设定的窄带干扰频率  $f_i$  分别为: 150 kHz、270 kHz、480 kHz、830 kHz 及 1 100 kHz。加入的白噪声为  $q(t)$ ,所以含噪声的局放信号为

$$l(t) = f(t) + p(t) + q(t) \quad (6)$$

仿真的采样率为 10 MHz,数据长度为 1 000。为了衡量局放信号中的噪声强度,本文引入参数信噪比(SNR)

$$SNR(\text{dB}) = 10 \lg \frac{W_s}{W_n} \quad (7)$$

式中: $W_s$  为局放脉冲信号的能量; $W_n$  为噪声信号的能量。

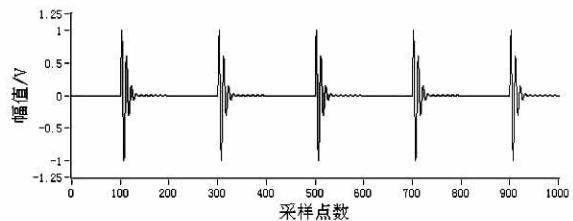
为了评估本文所提降噪方法的有效性,特选取参数均方差(MSE)进行评估

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f(i) - r(i))^2 \quad (8)$$

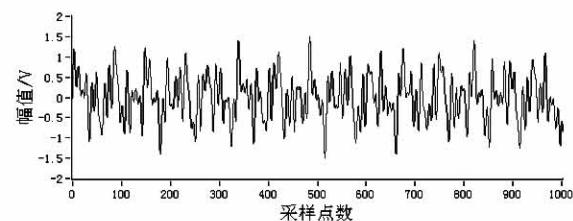
式中: $f(i)$  为去噪前局放脉冲信号; $r(i)$  为重构的局放脉冲信号; $n$  为局放脉冲信号的长度。

图 1(a) 为模拟局部放电信号的波形,该信号为双指数衰减振荡波形;图 1(b) 为窄带干扰信号  $p(t)$ ;图 1(c) 为只添加了窄带干扰信号的局放波形,此时 SNR 为 -10 dB;图 1(d) 为只用小波变换去噪后的局放波形,图 1(e) 为用 FFT 自动阈值滤波和小波变换联合去噪后得到的波形,重构的局放波形不仅很好的保持了幅值,同时也很好的保证了相位,所得到的波形较只用小波变换得到的更为理想。

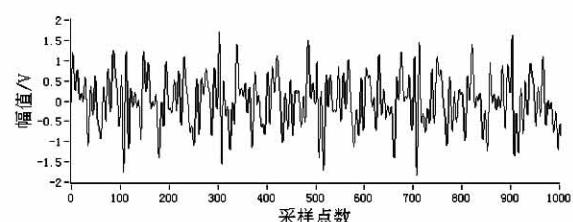
当窄带干扰加强至 20 dB 时,得到的仿真结果如图 2 所示。其中,图 2(a) 为添加了窄带干扰信号的局放波形;图 2(b) 为只用小波变换降噪得到的局放波形,图 2(c) 为 FFT 自动阈值滤波法和小波变换联合去噪后的结果,由图可知,即使噪声信号大为加强,该联合去噪法依然能较为理想的提取出局放信号来。



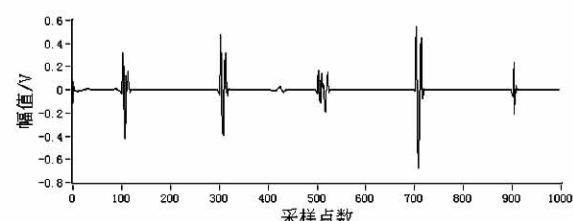
(a) 模拟局放波形



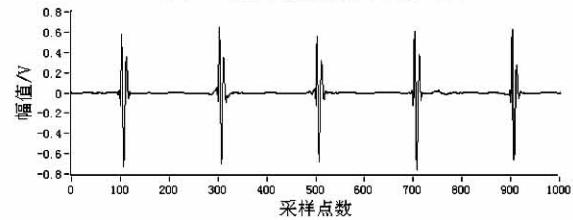
(b) 模拟10 dB强度窄带干扰波形



(c) 添加10 dB强度窄带干扰后的局放波形



(d) 只用小波变换的去噪结果

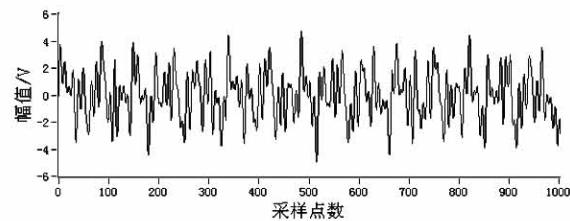


(e) FFT自动阈值滤波法和小波变换联合去噪结果

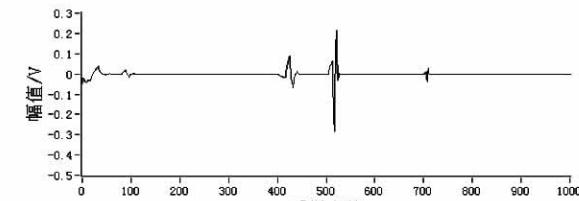
图1 10 dB强度窄带干扰下去噪性能比较

Fig. 1 Comparison of the performances  
when 10dB narrow band interference

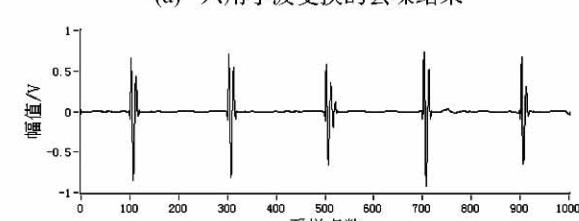
图3为两种去噪方法分别去噪所得波形均方差随噪声强度的变化图,由图可知,当噪声强度较小即SNR较大时,小波变换较本文联合去噪法理想,但随着噪声强度加强,其去噪性能下降明显,当SNR小于-7 dB时,联合去噪法去噪性能优势逐渐体现,所以本法适用于较强噪声环境。但是,随着噪声信号的不断加强,本法的去噪性能也存在一定的下降,即当小于-15 dB时,MSE开始逐渐增大。



(a) 加入20 dB强度窄带干扰后的局放波形



(b) 只用小波变换的去噪结果



(c) FFT自动阈值滤波法和小波变换联合去噪结果

图2 20 dB强度窄带干扰下去噪性能比较

Fig. 2 Comparison of the performances when  
20dB narrow band interference

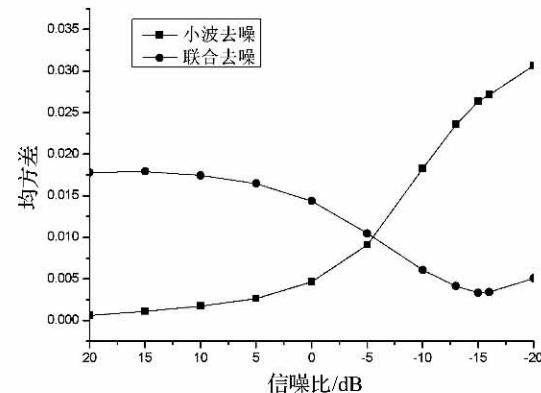


图3 均方差随噪声强度变化图

Fig. 3 The development of MSE with the change of SNR

在实际局部放电信号提取过程中,现场不仅存在周期型窄带干扰,也存在一定数量级的白噪声。在窄带干扰的基础上添加均值为0、标准差为0.1的高斯白噪声,在不同的噪声强度下予以检验本法的实用性。

图4(a)为在图1(d)的基础上添加白噪声后得到的波形,此时,窄带干扰强度没有发生变化,相对于局放信号依然是10dB;图4(b)为只用小波变换处理得到的局放波形,图4(c)为FFT自动阈值滤波法和小波变换联合处理得到的结果,可见该法不仅

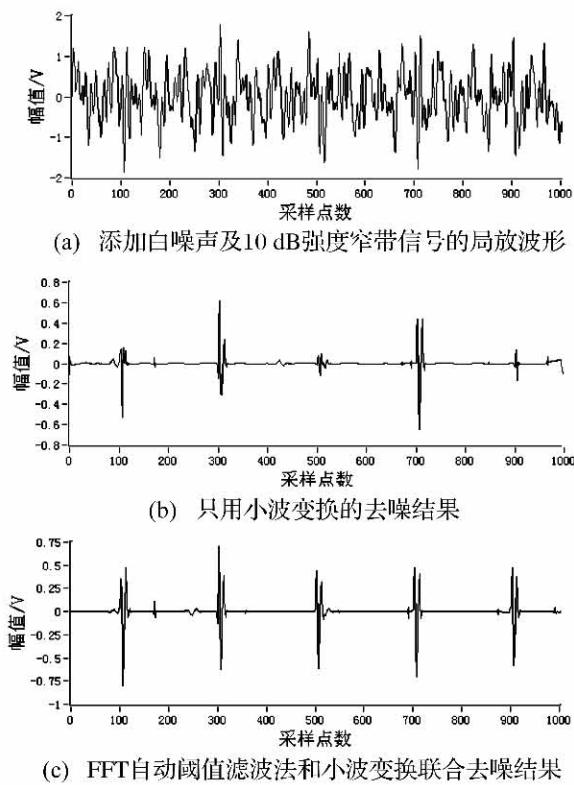


图4 白噪声及10dB强度窄带干扰下去噪性能比较  
Fig4. Comparison of the performances when white noise and 10dB narrow band interference

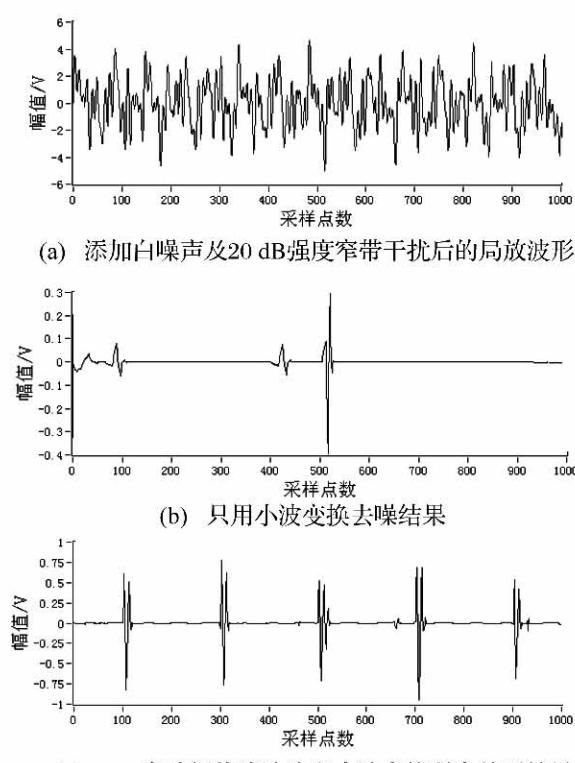


图5 白噪声及20 dB强度窄带干扰下去噪性能比较  
Fig5. Comparison of the performances when white noise and 20dB narrow band interference

能很好的滤除白噪声和窄带干扰,也能很好的保证局放波形各项参数。

保持白噪声强度不变,继续加强窄带干扰强度至20 dB时,如图5所示。其中,图5(a)为添加白噪声和窄带干扰时的局放波形;图5(b)为单小波降噪后的局放波形,图5(c)为FFT自动阈值滤波法及小波变换联合去噪后得到局放波形,此时,虽然噪声大为加强,但该联合去噪法依然能较好的提取出局放信号。

### 3 现场实测数据分析

图6(a)为从某220 kV变电站主变110侧高压套管末屏接地线上所测得的数据,此时,现场的各类干扰已经将局放信号完全淹没。图6(b)为只用小波变换去噪得到的结果,图6(c)为用后的结果。对比图6三个子图,根据同一时间放电幅值的差异(如图中箭头所示)等可以判定,只用小波变换去噪得到的结果已经大为失真,而使用FFT自动阈值滤波法和小波变换联合去噪却能清晰的显示出局放信号,如图6(c)所示,且与理论放电相位等参数吻合,说明本法在实际应用中较为可靠。

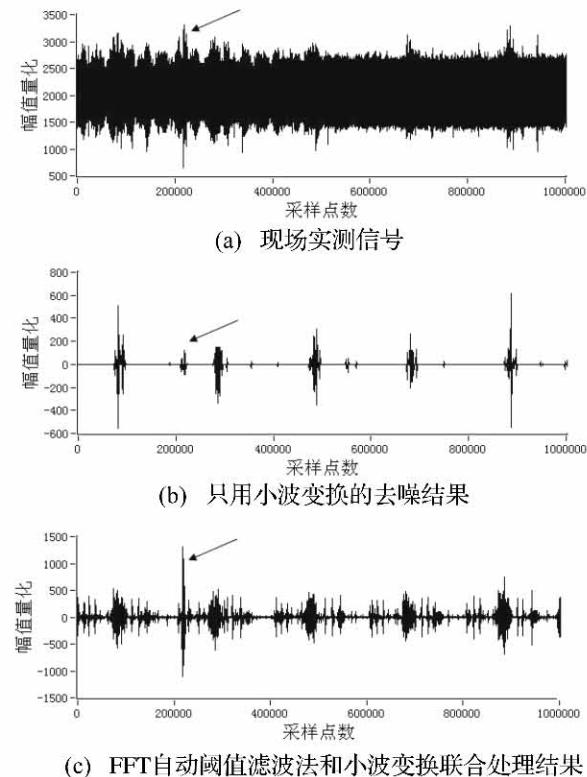


图6 实测局放信号去噪性能比较

Fig 6. Comparison of the practical use performances

## 4 结语

(1) FFT 自动阈值滤波和小波变换的联合去噪法能从较强噪声环境中提取出局部放电信号,并使局放波形尽量不失真;

(2) 在实际测量过程中必须根据现场噪声环境适当调整 FFT 自动阈值滤波环节中阈值的大小及阈值规则,从而使其在保证局放波形尽量不失真的情况下,尽可能的提高信噪比,从而能发挥小波变换在高信噪比情况下的去噪性能的优越性;

(3) 由于多重计算误差及阈值调整,基于 FFT 自动阈值滤波和小波变换的联合去噪法在低强度噪声环境中性能不及小波变换去噪法,因此,在较低强度噪声环境下不宜采用;

(4) 在强噪声环境下,虽然基于 FFT 自动阈值滤波法和小波变换的联合去噪法性能较小波变换去噪优越,但随着噪声强度不断加大,当低于 -15 dB 时,去噪性能也存在一定下降。

## 参考文献:

- [1] Stone G C. The Use of Partial Discharge Measurement to Assess the Condition of Rotate Machine Insulation [J]. *IEEE Electr. Insul. Magazine*, 1996, 14(4):23-27.
- [2] 严 章. 电气绝缘在线检测技术 [M]. 北京:中国电力出版社,1995.
- [3] 谢良聘,朱德恒. FFT 频域分析算法抑制窄带干扰的研究

(上接第 76 页)

降低了轴承的油温,但也对油膜起了一定得破坏作用,使得半频振动有一定的下降,机组的径向最大下降了 1mm/s,但是机组基频的振动有一定的增加。

3) 机组在三个状态时,在额定转速下,轴的径向半频振动的幅值均比轴向的大较多,在汽轮机轴承座位置最为明显,在输出轴位置三个方向相差较小。

4) 机组的半频振动随着滑动轴承的油温及油压的变化而改变较为明显,进一步说明,半频振动为机组振动偏大的主要因素,滑动轴承的油膜振荡为机组振动偏大的主要原因。

由于本机组处于空载状态,滑动轴承油膜的工作状态和理想工作状态有较大的差别,轴承工作状态不理想,引发了轴承的油膜振荡。

究[J]. 高电压技术,2000,26(4):62-67.

- [4] Nagesh V, Gururaj B I. Evaluation of Digital Filters for Rejecting Discrete Spectral Interference in On-site PD Measurements [J]. *IEEE Trans on Electrical Insulation*, 1993, 28(1):73-85.
- [5] 程养春,李成榕,王伟. 用傅里叶级数法消除局部放电检测中窄带干扰的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(20):106-111.
- [6] X. Zhou, C. Zhou and I. J. Kemp, An Improved Methodology for Application of Wavelet Transform to Partial Discharge Measurement Denoising [J]. *IEEE Transaction on Electrical Insulation and Dielectrics*, 2005, 12(3):586-594.
- [7] Jian Li, S. Grzybowski. Extraction of Partial Discharge from Noises by use of Wavelet and Pulse-sequence Analysis [C]. 2006 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena: 656-659.
- [8] 许高峰,孙才新. 基于小波变换抑制 GIS 局部放电监测中白噪声干扰的新方法研究 [J]. 电工技术学报, 2003, 18(2):87-91.
- [9] 李文杰. 便携式电流互感器局部放电在线监测系统的研制 [D]. 西安:西安交通大学, 2008.
- [10] 刘舒强,宋益兰. 概率论与数理统计 [M]. 天津:天津大学出版社, 2003.
- [11] X. Ma, C. Zhou and I. J. Kemp. Automated Wavelet Selection and Thresholding for PD Detection [J]. *IEEE Electr. Insul. Mag.*, 2002, 18(2):37-45.
- [12] 邱昌容,王乃庆. 电工设备局部放电及其测试技术 [M]. 北京:机械工业出版社, 1994.

## 2 结语

对于系统复杂的动力系统,其单部件不在设计工况下的运行状态和实际的工况有较大的差别,在机组的设计和调试中,应考虑实际运转中的滑动轴承的状态,对机组单台设备的振动考核应区别于整机组的振动考核指标。

## 参考文献:

- [1] 陈长征,胡立新,周勃,等. 设备振动分析与故障诊断技术 [M]. 北京:科学技术出版社, 2007.5:264-265.
- [2] 沈庆根,郑水英. 设备故障诊断 [M]. 北京:化学工业出版社, 2006.5:107-108.
- [3] 顾家柳,等. 转子动力学 [M]. 北京:国防工业出版社, 1985, 102.